

第 1 章

家畜の精密栄養管理と世界への持続可能な食料提供における米国産 DDGS の役割

我々は克服すべき課題に溢れる世界に生きている。最大の課題のひとつは、恐らく、新しい方法と技術を開発・導入することにより、増加し続ける世界の人々に栄養価が高く、安全かつ購入可能な価格の食料を十分に提供すると同時に、天然資源を保全し、環境への悪影響を最小限にとどめることである。予測される食料の世界需要は 2050 年には 60 パーセント増大し、世界の中流階級消費者の増加により、肉、牛乳および卵に対する需要は増大する (Alexandratos と Bruinsma、2012 年)。幸いなことに、今後 10 年の間に、食用動物の生産量は増加し、世界の農産物生産高の 50 パーセントを占めるまでになると予測されている (FAO、2008 年)。しかしながら、こうした需要を満たすため、食料生産チェーンに関わるすべての関係者には、食料生産量の増大と効率化に結びつく新たな技術を開発・導入することが求められている。数多くの構造改革や家畜を対象とした栄養面および生産面でのイノベーションの開発が行われ、世界中の食用動物生産システムにおいて導入されている。「家畜の精密栄養管理」と呼ばれる新たなイノベーションは、加速度的な広がりを見せ、食糧安全保障、食料の安全性および環境サステナビリティという課題の解決策となっている。「家畜の精密栄養管理」のゴールは、飼料原料中のエネルギーや栄養成分を高品質な畜産食品へと変換させる際のカロリー効率や栄養効率を改善することである。

世界の飼料業界は全世界の人々に向けて持続可能に食料を提供するうえで重要な役割を担っている。世界の 130 を超える国々で毎年、ほぼ 10 億トンもの飼料が生産されている (IFIF、2016 年)。トウモロコシやソルガム、小麦、大麦といった様々な飼料穀物が動物用飼料の主要な原料となっているが、世界の飼料業界で使用されている飼料原料の圧倒的多数は多様な農業や食料業界に由来する副産物である。こうした副産物は人の食料には向かないが、動物用飼料に貴重なエネルギーや必須栄養素を提供している。従って、飼料業界は、こうした栄養供給源を用いて高品質な畜産食品を豊富に生産することで、栄養成分を「リサイクル」し、経済的価値を獲得し、食糧安全保障に貢献し、環境に及ぼす悪影響を最小限に抑える上で極めて重要な役割を担っている。

世界中の人々に持続可能に食料を提供する世界の農業力に関する論争のひとつが「食料対燃料論争」である。この論争では、生産される穀物や油糧種子の一部を動物飼料や人間用の食料として用いることのトレードオフではなく、バイオ燃料に用いることのトレードオフが問題となっている。しかしながら、世界の穀物総生産量のうちエタノール生産に用いられるのはわずか 6 パーセントであり (Popp ら、2016 年)、乾式粉砕エタノール業界がエタノール生産に使用しているトウモロコシの約 33 パーセントは、動物用飼料に用いられる併産物として回収されている。従



って、エタノール生産用のトウモロコシ需要は増加しているものの、デンプン以外のすべての成分は回収され、併産物に濃縮される (約 3 倍) ため、その成分濃度はトウモロコシ自体の濃度を上回っており、動物用飼料に用いられるトウモロコシ粕や大豆粕の相当量の置換用として使用されている。

世界のバイオ燃料業界は併産物を約 5,200 万トン生産しこれらは動物用飼料に用いられているが、こうした併産物の約 85 パーセントはエタノール業界によって生産されている (Popp ら、2016 年)。米国のエタノール業界はトウモロコシ併産物の最大の生産者であり、その年間生産量は約 3,800 万トンである。この生産量は米国で一年間に生産される大豆粕の量に匹敵するもので、トウモロコシ併産物は大量に国内で使用されるだけでなく、世界の 30 を超える国々で動物飼料用として消費されている。さらに、DDGS は過去 20 年にわたり、世界の飼料業界で用いられるあらゆる主要飼料原料の間でもっとも大規模に研究が行われている飼料原料でもある。こうした研究ではカロリーや栄養効率の改善だけでなく、あらゆる動物用飼料としての DDGS のメリットや最適使用のための限度値の決定にも力が注がれているが、DDGS の他とは異なる栄養補助的な特性や環境への影響を明確にすることに、より一層の焦点があてられるようになってきた。

DDGS はエネルギー、タンパク質およびリンが豊富であるため、以前から使用されてきた、より値が張るエネルギー (トウモロコシ)、タンパク質 (大豆粕)、リン (第一リン酸ま

たは第二リン酸カルシウム)供給源を部分的に代替する非常に魅力的な飼料成分である。適切に調製された動物用飼料に DDGS を配合すると、成長成績や健康、食品品質が非常に優れたものになる。その他の特性にこうした特性が加わって、DDGS は世界で最も人気のある動物用の飼料原料のひとつとなっている。

現在米国では DDGS が大量に供給されているため、輸出に割り当てることのできる量も増加し続けている。エンドユーザーが他の入手可能な競合原料よりも大きなコスト削減効果を獲得してきたことが主因となってこうした需要増という直接的な結果をもたらされた。しかしながら、米国産 DDGS は国内では動物用飼料として数十年使われてきたとはいえ、世界中の栄養専門家や飼料メーカー、家畜生産者の多くにとっては比較的馴染みのない飼料原料である。世界市場に新しい飼料原料が出てきたときにはそうであるように、最大の経済的価値を得ようとすると、動物用飼料における DDGS の栄養効果や限度、使用について数多くの技術的な疑問が生まれる。経験豊富なエンドユーザーであっても、従来型の高脂肪(粗脂肪 10 パーセント超)DDGS と比較した場合に、低脂肪(粗脂肪 7~9 パーセント)DDGS の生産については、様々な動物種に給与した場合のエネルギー価や飼料価値に関連して多くの疑問を抱く。



アメリカ穀物協会によるこの DDGS ユーザーハンドブック第 4 版「DDGS による精密栄養管理」は、栄養専門家や飼料原料購入者、飼料メーカー、家畜生産者に、DDGS を用いた精密栄養動物給与プログラムの開発に関連して入手可能な、最新の、科学に基づいた情報を提供するために作成されたものである。

アメリカ穀物協会(USGC)は DDGS の総合的な栄養情報について本書にまとめて提供し、動物用飼料として DDGS を用いる場合の栄養特性や推奨最大飼料配合率、メリットと限度について、現時点および今後のパイヤーが理解できるよう支援している。どのような飼料原料の場合であっても同じであるが、DDGS のエンドユーザーにおいては、飼料調製や給与推奨事項の展開にあたっては、資格を有する栄養専門家に相談し、支援やアドバイスを求められたい。USGC は給与目的で選択したいずれの原料についても、栄養成分含有量の管理を考慮していない。また、こうした推奨事項が特定の家畜、動物、それらの集団に適合することを保証するものではない。USGC はこうした推奨事項の使用により遭遇するいかなる問題についても、協会または協会の会員の責任を否認する。本書を閲覧するパイヤーは、こうした制限事項に同意し、本書情報に由来する責任について USGC にいかなる損害賠償も求めないことに同意する。

より詳細な情報が必要な場合は、アメリカ穀物協会 202-789-0789 に電話するか、メール grains@grains.org に問い合わせられたい。www.grains.org も参照されたい。

References

Alexandratos, N., and J. Bruinsma. 2012. World agriculture towards 2030/2050: The 2012 revision. ESA Working Paper No. 12-03, June, Agriculture Development Economic Division, Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy.

Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO). 2008. The Global Livestock Sector – A Growth Engine, Rome, Italy

<ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/ai554e/ai554c00.pdf>

International Feed Industry Federation. 2016. The Global Feed Industry. Wiehl, Germany <http://www.if-f.org/pages/t/The+global+feed+industry>

Popp, J., M. Harangi-Rakos, Z. Gabnai, P. Balogh, G. Antal, and A. Bai. 2016. Review: Biofuels and their co-products as livestock feed: Global economic and environmental implications. *Molecules* 21:285. Doi: 10.3390/molecules21030285

第 2 章

DDGS 価格と経済的価値との「ずれ」

DDGS の最大限の経済的価値を獲得し、DDGS を精密栄養給与プログラムで使用するためには、価値というものをどのように定めるかということについての新しい考え方が必要である。飼料原料から最も高い経済的価値を得る上で最大の課題のひとつとなるものは、世界のコモディティ市場で購入価格を決めるために用いられる栄養分析の種類と関係している。それらを動物用飼料の実際の経済的価値を定めるために用いられる実際の栄養測定値と比較する。エネルギー、アミノ酸およびリンは、動物用飼料の栄養成分の中で最も高価な 3 種である。現在の飼料原料コモディティ市場では、原材料の購入価格は粗タンパク質と粗脂肪の最低保証値に基づいている。DDGS のような原材料では、購入価格は「プロファット」含有率とよく呼ばれる、DDGS に含まれるタンパク質と粗脂肪を合わせた含有率に基づいている。粗繊維や水分、灰分、可溶性無窒素素物とともに、粗タンパク質、粗脂肪はいずれも、1865 年にドイツの Weende Experiment Station の Henneberg と Stohmann によって初めて確立されて以来、動物用飼料原材料の表示に広く用いられてきた近似分析の成分である。このシステムは動物用飼料の異なる化学特性を大まかに特徴付けするものだが、現在の動物用飼料の調製に用いることは甚だしく不適切である。なぜなら、このシステムでは異なる動物種に用いられるエネルギーの量や割合の正確な情報が得られないだけでなく、動物に必要とされるアミノ酸、リン、その他必須栄養素のような特定の栄養成分の量や可消化率も不明であるためである。事実、トウモロコシと DDGS の粗タンパク質含有率がリジン含有率とはほとんど相関していないことが研究から明らかになっている (Cromwell ら、1999 年)。加えて、Fiene らはアミノ酸の中には粗タンパク質や粗脂肪、粗繊維が含まれた予測式を用いて、中程度の精度で予測可能なものもある (イソロイシン、ロイシン、メチオニン、トレオニンおよびバリン) が、その他のアミノ酸 (アルギニン、シスチン、リジンおよびトリプトファン) の予測は難しいことを明らかにしている。従って、一般成分の分析が比較的シンプルで費用のかからないものであっても、飼料原料の使用可能エネルギーや可消化アミノ酸の含有量には極めて不正確な判断指標であるため、動物栄養の専門家は動物飼料の配合設計に粗タンパク質や粗脂肪を用いることはない。

過去数十年にわたり、動物に給与する飼料原料の実際の栄養価値を予測するための極めて正確な栄養測定方法が開発されてきたが、その内容は大きく改善されてきた。今日、動物飼料の調製は代謝エネルギー (ME) または正味エネルギー (NE) に基づいて、また、可消化タンパク質またはアミノ酸に基づいて行われている。



さらに、豚および家禽用の飼料調製は可消化リンまたは生体有効リンに基づいて行われている。最小限コストの動物用飼料、すなわちコスト面で最も優れた飼料の調製は、給与飼料の原料の正確な ME または NE、可消化アミノ酸および可消化リンまたは有効リンの値を用い、こうした高コストの必須栄養成分の最大または最小飼料濃度に制約を設けることで行われる。従って、DDGS の価格を決定するために用いられる分析方法は、動物用飼料を調製し、経済的価値を決定するために用いられる計測値とは「ずれ」がある。この「ずれ」はしばしば動物用飼料中の DDGS の真の経済的価値を過小評価することにつながる。その結果として、DDGS はこれを配合することで完全飼料が持つことになる実際の経済的価値よりも低い価格で販売されることが多い。

表 1 に示すように、「プロファット」含有量の一般的な方法を用いて DDGS の栄養価値および経済的価値を評価すると、粗タンパク質と粗脂肪を高配合した (37.1 パーセント) という理由から、大半の DDGS 購入者は最大の経済的価値があるものとして、5 種類の DDGS の中から A を選択することになる。さらに、栄養価値が低いとみて、大半の DDGS 購入者は DDGS の B (プロファット 31.4 パーセント) および C (プロファット 32.4 パーセント) に対しては値引きを要求する可能性が高い。ところが表 2 から分かるように、生育-仕上げ期の豚の飼料では、実際には DDGS の C の経済的価値が最も高く (\$279/トン)、これに A (\$266/トン) と B (\$252/トン) が続く。DDGS の D と E のプロファット含有率はそれぞれ 2 番目 (35.5 パーセント) と 3 番目 (34.4 パーセント) に高いが、これらの DDGS の実際の経済的価値は 5 種類中最も低い。こうした結果は、DDGS 購入時に価格決定する上で、**何故プロファット仕様を用いるべきでないか**を示す「現実世界」の例である。豚および家禽用飼料に用いる DDGS を対象とした、正確な

ME と SID アミノ酸予測式が開発されている(第 19 章および 20 章を参照のこと)現在ではなおのことである。

NE 価については DDGS の製品 C は 2 番目であるが、標準回腸消化(SID)メチオニン、トレオニンおよびトリプトファンの含有率は 5 種類の中で最も高く、こうした経済的重要性を持つ栄養成分の組み合わせによって DDGS の製品 C の経済的価値が最も高くなる。さらに、この例では、経済的価値が最も低い DDGS と最も高い DDGS との間には 1 トン当たり \$60 の開きがある。こうした価格の開きは、様々な DDGS の真の経済的価値を見極めるために「最新」のエネルギー・可消化アミノ酸予測式を採用することで、DDGS バイヤーが最大の価値を得ることができる大きなチャンスが存在を意味する。これは購入を検討している DDGS の分析を研究所に依頼し、栄養専門家と協力して予測式を用いて豚や家禽に給与する場合の実際の ME 価と SID 含有量を評価し、競合する原料の現在価格を使用して DDGS の「シャドウプライシング」を行うことで実現する。

この比較のもうひとつの重要な側面は、こうした「シャドウプライシング」比較の実施時の DDGS のスポット市場価格が \$182/トンであったということである。各 DDGS の実際の経済的価値と市場価格とを比較すると、これら DDGS のいずれについても、経済的価値はそれぞれを購入するために支払われたであろう価格を \$37~\$92/トン上回っていた。こうした結果は、DDGS が今日の世界の飼料原料市場で最も高い価値を持つ商品のひとつであることを示している。実際には、競合する原料の市場価格状況によって異なるものの、豚用飼料として使用する場合の米国産 DDGS の市場価格と経済的価値との「ずれ」によって、実際の経済的価値が実際の購入価格を \$100/トンも上回ることもある。加えて、豚用飼料の場合、米国産 DDGS の中で最も価値の低いものと最も価値の高いものと間に、1 トンにつき \$90 もの経済的価値の差が存在する可能性も



ある。同様の差は牛以外の反芻動物や家禽、養殖のための飼料に含まれる DDGS の実際の経済的価値にもみられるが、こうした経済的価値の差は乳牛および肉牛用飼料に用いられる DDGS の場合に最も大きくなる。結果として、異なる DDGS 商品の間で実際の経済的価値にこうまで大きな差が存在するという事は、DDGS を動物用飼料に用いる場合に、飼料コストを削減し、利益率を改善する非常に大きな機会が存在することを意味する。しかしながら、こうした価値の差を得るためには、動物種別の飼料調製に用いる特定の DDGS について、ダイナミックかつ正確な ME、NE、可消化タンパク質、可消化アミノ酸および可消化リンの値を用いる以外に方法はない。

表 1. 異なる 5 種類の市販米国産トウモロコシ DDGS の近似分析

	A	B	C	D	E
乾物 (%)	89.2	89.0	88.9	92.8	88.7
粗タンパク質 (%)	29.6	25.7	26.6	27.5	25.7
粗脂肪 (%)	7.5	5.7	5.8	8.0	8.7
プロファット (%)	37.1	31.4	32.4	35.5	34.4
粗繊維 (%)	6.9	6.7	6.7	7.2	7.1
灰分 (%)	4.5	5.2	4.3	4.9	4.8

出典: アイオワ州メーソンシティ所在 Nutriquest 社の Dr. Rob Musser

表 2. 生育 - 仕上げ期豚用飼料に配合する 5 種類の市販 DDGS のエネルギー、標準回腸消化 (SID) アミノ酸、有効リンの含有値¹

	A	B	C	D	E
ME (kcal/kg)	3,237	3,073	3,180	3,182	3,001
NE (kcal/kg)	2,302	2,190	2,278	2,256	2,141
SID リジン (%)	0.58	0.65	0.63	0.60	0.45
SID メチオニン (%)	0.48	0.49	0.58	0.46	0.42
SID トレオニン (%)	0.79	0.80	0.86	0.76	0.62
SID トリプトファン (%)	0.16	0.16	0.17	0.16	0.14
有効リン (%)	0.60	0.69	0.65	0.70	0.66
経済的価値 ² (\$/トン)	266	252	279	240	219

¹ ME、NE および SID アミノ酸含有値は、化学組成に基づき、DDGS 専用に開発された予測式を用いて求めた。

² 経済的価値は次の原材料価格 (DDGS = \$182/トン、トウモロコシ = \$138/トン、大豆粕 = \$343/トン) で、最小コスト調製ソフトウェアにおいて「シャドウプライシング」を用いて決定した。

出典: アイオワ州メーソンシティ所在 Nutriquest の Dr. Rob Musser

まとめ

世界のコモディティ飼料市場は、飼料原料の価格を決定するために粗タンパク質と粗脂肪の数値を使用し続けているが、この方法では動物用飼料に含まれる DDGS の実際の経済的価値を適切に把握することはできない。実際には、他のほとんどの飼料原料と比較して、DDGS には豊富なエネルギーやアミノ酸、リンが含まれており、DDGS の経済的価値を正確に決定することが難しい場合が多い。というのも、DDGS の価格は、トウモロコシ粕・大豆粕市場の価格競争によって決定されるため、動物種や生産段階、飼料配合率、市場状況によって異なるものの、メートルトン当たり通常 \$40 から \$100 過小に見積もられている。新たに開発されたエネルギーと可消化アミノ酸の式を用いることにより、栄養や飼料調製の専門家は様々な飼料調製において「シャドウプライス」を決定する時に正確な値を得ることができる。DDGS の価格と実際の経済的価値との間に存在する「ずれ」をなくすことで、最大限の経済的価値を得て、供給元の異なる DDGS のばらつきを管理し、エネルギーや栄養成分の過小または過大給与を回避しようとするなら、購入者は不正確な DDGS の粗タンパク質と粗脂肪含有量に頼るのではなく、この新たな方法を採用すべきである。

References

- Cromwell, G.L., C.C. Calvert, T.R. Cline, J.D. Crenshaw, T.D. Crenshaw, R.A. Easter, R.C. Ewan, C.R. Hamilton, G.M. Hill, A.J. Lewis, D.C. Mahan, E.R. Miller, J.L. Nelssen, J.E. Pettigrew, L.F. Tribble, T.L. Veum, and J.T. Yen. 1999. Variability among sources and laboratories in nutrient analyses of corn and soybean meal. *J. Anim. Sci.* 77:3262-3273.
- Fiene, S.P., T.W. York, and C. Shasteen. 2006. Correlation of DDGS IDEA™ digestibility assay for poultry with cockerel true amino acid digestibility. In: Proc. 4th Mid-Atlantic Nutrition Conference, University of Maryland, College Park, MD. pp. 82-89.

第 3 章

エタノール、ジスチラーズコーンオイルおよびトウモロコシ併産物の乾式粉碎製造

序説

米国は世界のバイオ燃料(エタノールとバイオディーゼル)生産のリーダーであり、これは化石燃料への依存を軽減し温室効果ガス排出量を低減するためにバイオ燃料を使用することを求める政府の指示とともに、高い農業生産性とインフラによる結果である。米国のエタノール生産量は過去 10 年にわたって増加し続けており、2017 年 55 億ブッシェルを上回るトウモロコシを使用して生産される量は 590 億リットルを超えると予測されている(図 1; 再生可能燃料協会、2017 年)。米国のエタノール生産量の約 90 パーセントは 29 州に所在する 214 の乾式粉碎エタノールプラントで生産されている(図 2; RFA、2017 年)。結果として、2017 年の生産量はジスチラーズ併産物が月約 3,650 万メートルトン(図 3; RFA、2017 年)、ジスチラーズコーンオイルが 15 億 kg(図 4; RFA、2017 年)と予測されている。今日、米国のエタノール生産量に占める湿式プラントの割合はわずかに約 10 パーセントにすぎず、トウモロコシ併産物の生産量の割合は比較的小さく、コーングルテンフィードはわずかに 360 万メートルトン、コーングルテンミールは約 705,000 メートルトンである(図 5; RFA、2017 年)。ジスチラーズ併産物の生産量 3,650 万メートルトンのうち、約 1,100 万メートルトンが輸出され(図 6; RFA、2017 年)、70 パーセントは米国内で肉牛、乳牛、豚および家禽用の飼料に用いられる(図 7; RFA、2017 年)。豚および家禽用飼料での DDGS 使用量は 2004 年以降増加傾向(図 8; RFA、2017 年)にあるが、肉牛は国内で生産される湿式および乾式のトウモロコシ併産物の約 45 パーセントを消費し、これに乳牛(31 パーセント)、豚(15 パーセント)、家禽(8 パーセント)が続く。

2005 年に米国のエタノールプラント数社が低脂肪 DDGS を生産する前に、シンスチレージからコーンオイルを部分的に抽出し始めた。コーンオイル抽出の第 1 のメリットは設備投資および稼働コストが比較的小さく済むという点であり、その結果として時間をかけずに投資を回収することが可能で、新たな併産物を生産、販売することでエタノールプラントの収入が増加する。現在、ジスチラーズコーンオイルの約 51%は動物用飼料に用いられ(すなわち、家禽と豚)、45%はバイオディーゼル生産に、残り 5%は他の商業目的で使用されている(図 9; RFA、2017)。2017 年現在、ジスチラーズコーンオイルの輸出はごくわずかであるが、輸出市場の飼料メーカーが高エネルギー飼料補給剤として使用することを真剣に検討すべき、経済的かつ優れたエネルギー源である。

世界のバイオディーゼル生産で最も使用されている飼料原料は菜種油、大豆油およびパーム油であるが(IEA、2015 年)、近年は動物性油や回収した食用油の使用量が増加傾向にある(Licht、2013 年)。米国のバイオディーゼル生産においては、大豆油が最も費用のかからない飼料原料であるが、低コストでのバイオディーゼルの生産というこれからの目標を達成するために、ジスチラーズコーンオイルのような低コストの代替品を使用できるというメリットがあり、その一方、食用油脂との競合を最小限に抑えることもできる。脂肪や油脂に含まれるトリアシルグリセロールは、脂肪酸をグリセロールエステルからアシルエステル(例えばメチル、エチル)に変換するために用いられる化学プロセスであるエステル交換反応処理を施すと、ディーゼルエンジンに用いられる石油を一部置換する原料として使用することができる。トリアシルグリセロールは粘度が高いため、ディーゼルエンジンのシリンダーでの噴霧化が適切に行われず、燃焼効率の悪化、燃料の堆積、エンジン摩耗や故障に結びつくことから、この変換が必要である(Ziejewski ら、1986 年 a,b; Goering ら、1987 年)。

本章の目的はエタノール生産、コーンオイル抽出および DDGS 生産の基本原則を記載して、米国燃料エタノール業界が生産するトウモロコシ併産物の栄養特性および飼料価値についての理解を深めてもらうことである。

図 1. 米国産エタノール生産量の推移

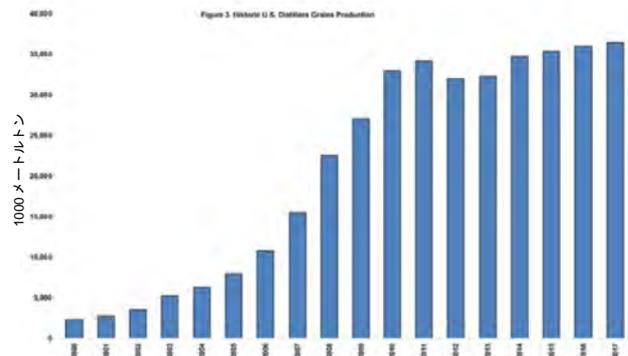


図2. 技術別のエタノール生産

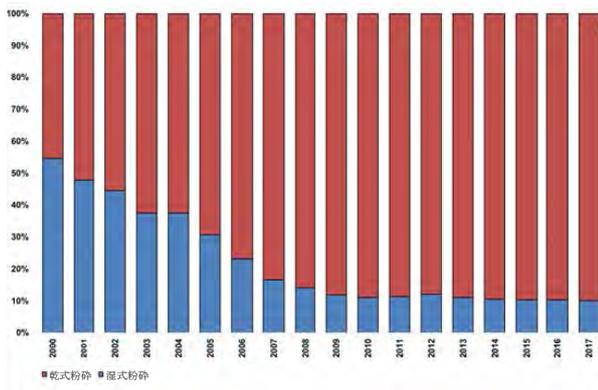


図5. 米国燃料エタノール併産物の生産量

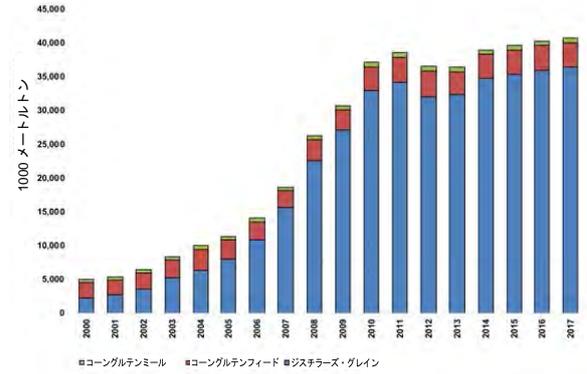


図3. 米国ジスチラーズ・グレイン生産量の推移

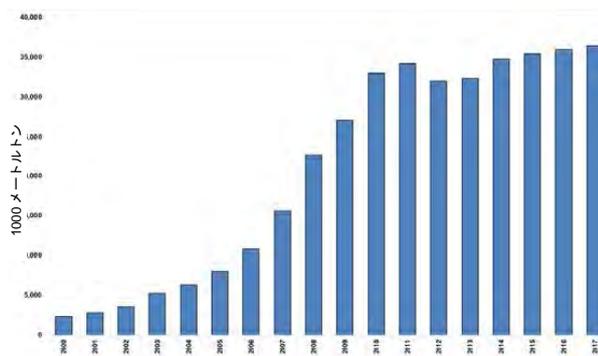


図6. 米国ジスチラーズ・グレイン輸出量の推移

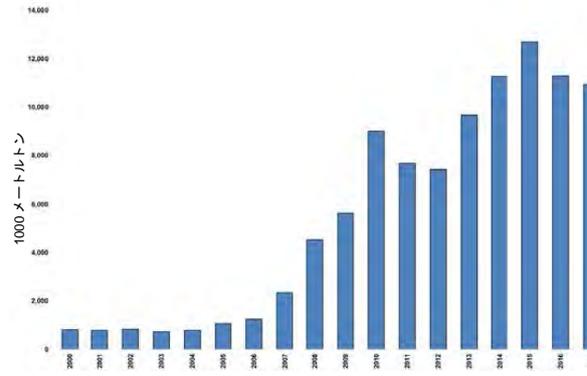


図4. 米国コーンジスチラーズオイル生産量の推移

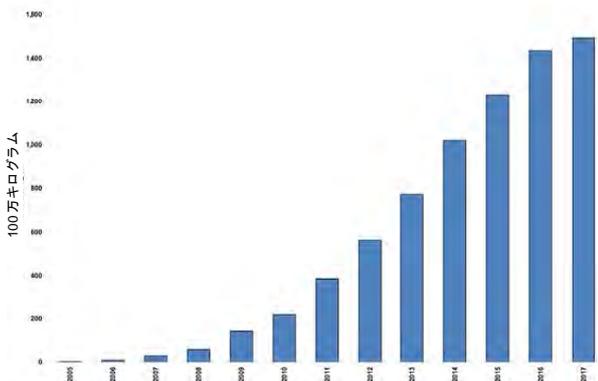


図7. 米国ジスチラーズ・グレインの輸出と国内消費

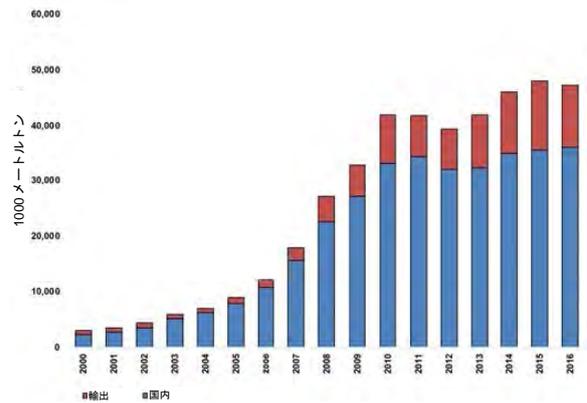


図 8. 米国産ジスチラーズ・グレインの動物種別消費量

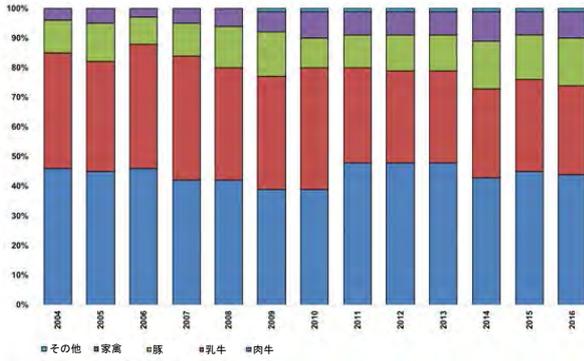
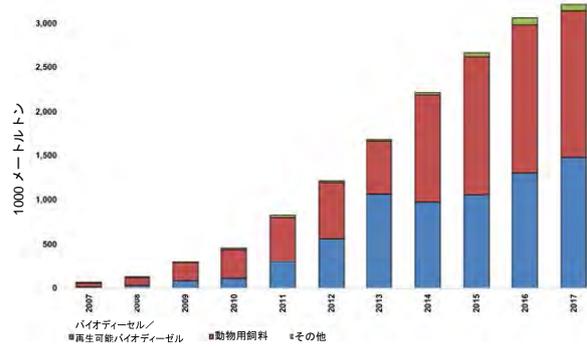


図 9. 米国のコーンジスチラーズオイルの消費量



デンプンからエタノールへの変換

米国のエタノール生産ではトウモロコシが主要なデンプン（グルコース）源である。サトウキビを除けば、トウモロコシによるエタノール収量が他の原料すべてを上回る（表 1）。しかしながら最近になって、トウモロコシ繊維とその他のセルロース原料をグルコースに変換してエタノール生産に使

用する技術が開発された。グルコースをエタノールに変換した場合のエネルギー効率は約 51.4 パーセントで、二酸化炭素の生成は残る 48.6 パーセントに起因する。無水デンプンを原料としてエタノールを生産する場合の効率は約 56.7 パーセントである。エタノール生産に用いられる原料の栄養成分によって、生産されるジスチラーズ併産物の栄養組成が決まることになる。

原料	水分 (%)	デンプン (%)	エタノール収量 (L/MT)
デンプン	-	100.0	720
サトウキビ	-	-	654
大麦	9.7	67.1	399
トウモロコシ	13.8	71.8	408
オーツ麦	10.9	44.7	262
小麦	10.9	63.8	375

乾式粉碎エタノール生産

穀粒の微粉化

図 10 に示すように、乾式粉碎技術を用いたエタノール生産の最初のステップは、ハンマーミルでトウモロコシを粉碎して粒径を小さくすることである。ハンマーミルは高速で回転するハンマーチップでトウモロコシを粉碎する。粉碎されたトウモロコシの粒度は主にローターの体積、ハンマーチップの速度、ハンマーの数およびスクリーンの目開きで決まる(Dupin ら、1997 年)。ハンマーミルで用いられるスクリーンは通常その直径が 3mm~5mm の範囲である。穀粒の粒径はエタノール収量に影響を及ぼすことがあるため(Kelsall と Lyons、1999 年)、エタノール製造業者は非常に細かくトウモロコシを粉碎してエタノールの収量を最大限まで高める傾向にある。表 2 から分かるように、5 mm のスクリーンを通過するように粉碎したトウモロコシ粒の収量は、8 mm のスクリーンを通過したものを 0.20 ガロン(0.85 リットル)上回る。

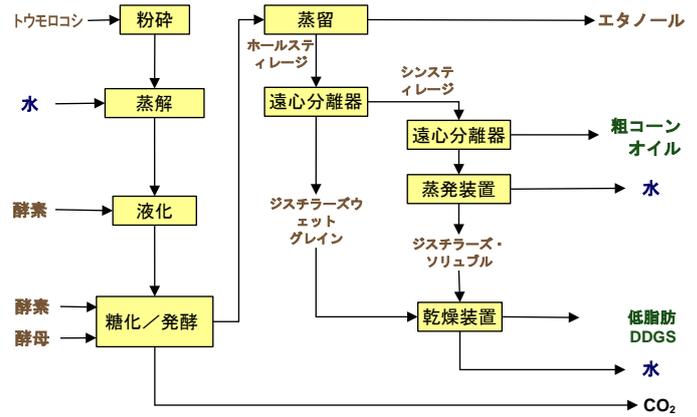


図 10. 乾式粉碎エタノールと併産物の生産プロセス

表 2. 粉碎トウモロコシ粒径別エタノール収量(出典: Kelsall と Lyons、1999 年)

粒径	エタノール収量(ガロン/ブッシェル)
微粉碎トウモロコシ、5mm スクリーン	2.65
粗粉碎トウモロコシ、8mm スクリーン	2.45

蒸解と糖化

可溶性タンパク質、糖、非デンプン結合脂質の滲出を開始させるための添加物として、水と回収ステイレージを粉碎したトウモロコシに加える(Chen ら、1999 年)。その後、デンプンをグルコースに加水分解し、酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)のためにデンプン分解酵素を加えてグルコースをエタノールに変換する蒸解のプロセスを実施する。この蒸解プロセスで用いられる一般的な温度は予備混合タンクでは 40~60°C、蒸解では 90~165°C、液化は 60°C である(Kelsall と Lyons、1999 年)。デンプンの糊化は 50°C~70°C の温度範囲で開始する。デンプンをグルコースに変換するプロセスで重要なステップは、デンプン糊化を完了させることである(Lin と Tanaka、2006 年)。糊化の進行中、デンプン顆粒に含まれるアミロースのほぼすべてが滲出するが(Han と Hamaker、2001 年)、可溶化アミロースから成る顆粒とゲルが膨らむため、粘度が高まる(Hermansson と Kidry matteran、1995 年)。

デンプン重合体を完全に加水分解するためには複数の酵素を組み合わせる必要がある。アミラーゼ類はデンプン業界で最も広く用いられている熱安定酵素である(Sarikaya ら、2000 年)。アミラーゼ類には α アミラーゼまたはグルコアミラーゼが含まれる(Poonam と Dalel、1995 年)。糊化後すぐのデンプンの加水分解に用いる酵素は熱安定性のあるものでなければならない。酵素の費用はエタノール生産コストの約 10~20 パーセントを占める(Gregg ら、1998 年)。

エタノールプラントの中にはバッチ蒸解システムを採用しているところがあるが、連続蒸解システムで生産を行っているプラントもある(Kelsall と Lyons、1999 年)。バッチ蒸解システムでは、既知量のトウモロコシ粕を既知量の水と回収ステイレージと混ぜ合わせる。連続蒸解プロセスでは、トウモロコシ粕、水および回収ステイレージを連続的に予備混合タンクに投入する。予備混合タンクでは糊化に必要な温度をわずかに下回る温度に保たれ、マッシュはジェットクッカーを経由して連続的にポンプで送り込まれる。クッカーの設定温度は 120°C である。マッシュはクッカーから垂直カラムの最上部に入り、約 20 分かけて降下し、その後フラッシュチャンバーへと進み、80~90°C で液化する。液化のために高温に耐えるアミラーゼを穀物に対し 0.05~0.08 パーセントの重量濃度で添加する。液化/フラッシュチャンバーでの保持時間は約 30 分である。システム内の pH は 6.0~6.5 の範囲内で管理される。バッチシステムでは使用する酵素の数は連続システムよりも少なく、エネルギー効率も上回る。バッチシステムの主たるデメリットは時間単位の生産性または原料利用率が低下することである。

発酵

発酵は酵母によって糖をアルコールに変換するプロセスである。最も一般的に使用されている酵母は *Saccharomyces cerevisiae* (Pretorius, 2000 年) であるが、これはこの酵母を使用すると発酵プロセスのエタノールを 18 パーセントという高濃度にするができるからである。*Saccharomyces* が人間にとって摂取しても安全 (GRAS) な食品添加物であると広く認められている酵母 (Lin と Tanaka, 2006 年) であるという理由もある。理想的な発酵では、約 95 パーセントの糖がエタノールと二酸化炭素に変換され、1 パーセントが酵母細胞の細胞内物質に変換され、4 パーセントがグリセロール等その他の生成物に変換される (Boulton et al., 1996 年)。酵母の費用はエタノール生産コストの約 10% を占める (Wingren et al., 2003 年)。

予備発酵は発酵に望ましい数の酵母細胞を得るために実施するもので、3~5 億の細胞/ml になるまで 10~12 時間攪拌する工程である。発酵は温度約 33°C (Thomas et al., 1996 年)、pH 約 4.0 (Neish と Blackwood, 1951 年) で起こり、48~72 時間続く (Ingledew, 1998 年)。エタノールに加え、二酸化炭素も生成されるが、回収されるか、あるいは大気中に放出される。

効率よくエタノールを生産する上で、通常の酵母増殖の管理が重要なファクターとなる。酵母の活性は発酵装置の温度に大きく依存している。Torija et al. (2003 年) の報告によれば、酵母の増殖と発酵に最適な温度はそれぞれ 28°C と 32°C である。*S. cerevisiae* の高温 (35°C 超) での発酵効率は低い (Banat et al., 1998 年)。そのため、発酵装置には冷却システムが必要とされる。

エタノールプラントで発酵槽を管理する上での課題のひとつは、他の微生物による汚染を避けることである。微生物汚染はエタノール収量およびエタノールプラントの生産性を低下させる原因となる (Barbour と Priest, 1988 年)。微生物汚染に関係する最も代表的な有機体は乳酸杆菌と野生酵母である。これらの微生物は *Saccharomyces cerevisiae* と栄養素 (微量ミネラル、ビタミン類、グルコースおよび遊離アミノ酸) を競い合い、酢酸または乳酸といった阻害最終生成物を産生する。野生酵母である *Dekkera/Brettanomyces* は燃料アルコールの生産で問題となる (Abbott と Ingledew, 2005 年)。現在、燃料エタノールプラントでは抗生物質を使用することで乳酸バクテリア汚染を低減している (Narendranath と Power, 2005 年)。

エタノールの蒸留

発酵後、蒸留塔でエタノールを回収する。発酵槽から回収したエタノールには水が混入しているので、分子篩装置を用いて水分を除去し、純粋なエタノールを生産する。

コーンオイルの抽出

米国のエタノールプラントの大半 (90 パーセント以上) が様々な油分抽出技術を用いて、DDGS の生産に先立ち様々な量の油を抜き取っているが、現在はコーンオイル抽出を行っていない残りのエタノールプラントもこの技術を採用する可能性があり、また、すでにコーンオイルの抽出を実施しているエタノールプラントでも、新しい技術が開発され、さらに多くの油が抽出されていることから、将来的にジスチラーズコーンオイルの抽出が増加することが考えられる。粗コーンオイルの生産はトウモロコシを使用するエタノールプラントで行われており、コーンオイルは DDGS 生産プロセスのシンスチレージ部分から抽出されている (CEPA, 2011 年)。シンスチレージからコーンオイルを抽出するのは、発酵と蒸留の後であり、DDGS 生産のために乾燥する前である。コーンオイル抽出システムを既存のエタノールプラントに追加することで、プラントのエネルギー効率が向上するとともに、処理トウモロコシのメートルトン当たりの総燃料生産量が増加する。既存エタノールプラントにコーンオイル抽出設備を設置することで、エタノール生産量に影響を及ぼすことなく、バイオディーゼルの原料生産が促進される。

エタノール業界では様々なコーンオイル抽出技術が商業的に利用可能となっている。エタノール蒸留後にシンスチレージからコーンオイルを抽出するために、複数の独自開発プロセスが用いられている。エタノール業界の大半は、遠心分離を用いてホールステイレージからシンスチレージを取り出し、このシンスチレージからコーンオイルを抽出するプロセスを使用している (CEPA, 2011 年)。シンスチレージにはトウモロコシに含まれる利用可能な油分の約 30 パーセントが含まれており、結果として得られる部分濃縮シンスチレージを加熱し、第 2 の遠心分離装置によってコーンオイルを抽出する。熱交換器では蒸気でシンスチレージの温度を上げて抽出を促進し、コーンオイルの抽出後に熱エネルギーはシンスチレージから熱交換器に回収され、新たに投入されるステイレージの加熱に用いられる。一般に、こうしたプロセスでは、様々な構成したデカンタ、遠心分離装置、および熱を用いて、併産物処理の工程から物理的に 30~70 パーセントの油分を分離する。こうしたプロセスから生産されるジスチラーズコーンオイルはすべて食用には適していない。しかし、コーンジャームからコーンオイルを抽出して食用に適した品質の高いコーンオイルをウェットリングで生産する場合には、通常溶媒 (ヘキサン) 抽出が用いられる (Moreau, 2005 年)。ヘキサン抽出は非常に効果的で、DDGS 中のコーンオイルの 90 パーセントを抽出することができるが、ヘキサン抽出施設を建設するための設備投資の高コストがエタノール業界でのこの技術を採用するうえでの足かせとなっている。現在、ヘキサンによる抽出を使用して DDGS からコーンオイルを除去している施設は 1 件だけ (Novita 社、サウスダコタ州ブルッキングズ所在) である。この施設では飼料グレードのコーンオイルと低脂肪 (粗脂肪 3.5 パーセント) DDGS を生産している。

コーンオイル抽出をしない場合には、生産されるエタノール 3.8 リットル当たりの DDGS 生産量は 2.4kg で (CEPA, 2011 年)、一方コーンオイル抽出を行った DDGS の収量は、生産されるエタノール 1 リットル当たり約 0.06kg 減少し、これは 9.4 パーセントの低下となる。コーンオイルの除去は DDGS の栄養組成に影響を及ぼし、主として粗脂肪含有率が低下するが、エネルギー価およびタンパク質の含有量への影響には幅がある。低脂肪 DDGS を各種の動物に給与する場合の影響についての詳細な情報は、第 13、15、17、18、20、21、24 および 25 の各章を参照されたい。

併産物の生産

エタノールの蒸留後に残る水分と固形物はホールスティレージと呼ばれる。ホールスティレージは主として水分や繊維、タンパク質、油分から構成される。混合物であるこのホールスティレージは遠心分離で粗固形物と液体とに分離させる。シンスチレージと呼ばれる液体は更に遠心分離器にかけて油分を抽出し、その後蒸発装置で処理して余分な水分を除去し、乾物が約 30 パーセントの濃縮ジスチラーズ・ソリュブル(シロップ)を生産する。濃縮ジスチラーズ・ソリュブル(CDS)は地元の家畜生産者に販売するか、粗固形物と混合して乾燥させ、ドライド・ジスチラーズ・グレイン・ウィズ・ソリュブル (DDGS) にすることができる。ウェットケーキとも呼ばれる粗固形物には乾物が約 35 パーセント含まれており、乾燥させることなく地元の家畜生産者に販売するか、乾燥させてドライド・ジスチラーズ・グレインを生産するか、あるいは濃縮ジスチラーズ・ソリュブルと混ぜ合わせて乾燥させ、DDGS(乾物 88 パーセント)にすることができる。乾式粉碎エタノールプラントで生産される各種併産物の割合を図 11 に示している。

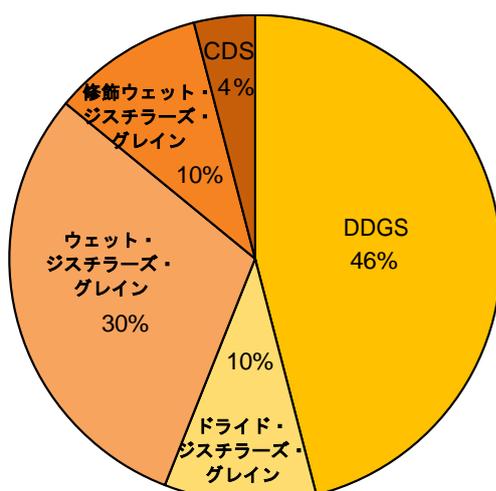


図 11. 乾式粉碎エタノールプラントで生産される各種併産物の割合(RFA, 2017 年)

References

- Abbott, D.A., and W.M. Ingledew. 2005. The importance of aeration strategy in fuel alcohol fermentations contaminated with *Dekkera/Brettanomyces* yeasts. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 69:16-21.
- Banat, I.M., P. Nigam, D. Singh, R. Merchant, and A.P. McHale. 1998. Ethanol production at elevated temperatures and alcohol concentrations: A review; Part-I Yeast In General. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 14:809-821.
- Barbour, E.A., and F.G. Priest. 1988. Some effects of *Lactobacillus* contamination in scotch whisky fermentations. *J. Inst. Brew.* 94:89-92.
- Boulton, B., V.L. Singleton, L.F. Bisson, and R.E. Kunkee. 1996. Yeast and biochemistry of ethanol fermentation. In: *Principles and Practices of Winemaking*, Boulton B, Singleton VL, Bisson LF, Kunkee RE (eds). Chapman and Hall. New York, pp. 139-172.
- California Environmental Protection Agency. 2012. California-Modified GREET Pathway for the Production of Biodiesel from Corn Oil at Dry Mill Ethanol Plants. Stationary Source Division, Release Date: November 3, 2011, Version 2.0. 40 pp.
- Chen, J.J., S. Lu, and C.Y. Lii. 1999. Effect of milling on physicochemical characteristics of waxy rice in Taiwan. *Cereal Chemistry* 76:796-799.
- Dupin, I.V.S., B.M. McKinnon, C. Ryan, M. Boulay, A.J. Markides, P.J. Graham, P. Fang, I. Boloni, E. Haque, and C.K. Spillman. 1997. Comparison of energy efficiency between roller mill and a hammer mill. *Appl. Engineering in Agric.* 13:631-635.
- Goering, C.E., M.D. Schrock, K.R. Kaufman, M.A. Hanna, F.D. Harris, and S.J. Marley. 1987. Evaluation of vegetable oil fuels in engines. *Proc. Int'l. Winter Meeting of ASAE*, Paper No. 87-1586. St. Joseph, MO.
- Gregg, D.J., A. Boussaid, and J.N. Saddler. 1998. Techno-economic evaluations of a generic wood-to-ethanol process: effect of increased cellulose yields and enzyme recycle. *Bioresour. Technol.* 63:7-12.
- Han, X.Z., and B.R. Hamaker. 2001. Amylopectin fine structure and rice starch paste breakdown. *J. Cereal Sci.* 34:279-284.

- Hermansson, A.M., and S. Kidry matteran. 1995. Starch – A phase-separated biopolymer system. In: S.E. Harding, S.E. Hill and J.R. Mitchell, Editors, *Biopolymer Mixtures*, Nottingham University Press, UK. pp. 225-245.
- International Energy Agency (IEA). 2015. *World Energy Outlook 2015*. Paris, 200 pp.
- Ingledeu, W.M. 1998. Alcohol production by *Saccharomyces cerevisiae*: A yeast primer. Chapter 5 In: *The alcohol textbook*. 3rd ed. K.A. Jacques, T.P. Lyons and D.R. Kelsall Ed. Nottingham University Press. Nottingham, UK.
- Kelsall, D.R., and T.P. Lyons. 1999. Grain dry milling and cooking for alcohol production: designing for 23 percent ethanol and maximum yield. Chapter 2. In: *The alcohol textbook*. 3rd ed. K.A. Jacques, T.P. Lyons and D.R. Kelsall Ed. Nottingham University Press. Nottingham, UK.
- Licht, F.O. 2013. *World Ethanol and Biofuels Report*, London, Agra Inf.
- Lin, Y., and S. Tanaka. 2006. Ethanol fermentation from biomass resources: current state and prospects. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 69: 627-642.
- Moreau, R.A. 2005. Corn oil in edible oil and fat products. In: *Baileys Industrial Oil and Fat Products, Vol. 2: Edible Oil and Fat Products: Edible Oils*, ed. F. Shahidi, pp. 149-172. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Narendranath, N.V., and R. Power. 2005. Relationship between pH and medium dissolved solids in terms of growth and metabolism of *Lactobacilli* and *Saccharomyces cerevisiae* during ethanol production. *Appl. Environ. Microbiol.* 71: 2239-2243.
- Neish, A.C., and A.C. Blackwood. 1951. Dissimilation of glucose by yeast at poised hydrogen ion concentrations. *Can. J. Technol.* 29:123-129.
- Poonam, N. and S. Dalel. 1995. Enzyme and microbial systems involved in starch processing. *Enzyme Microb. Technol.* 17:770-778.
- Pretorius, I.S. 2000. Tailoring wine yeast for the new millennium: Novel approaches to the ancient art of winemaking. *Yeast* 16:675-729.
- Renewable Fuels Association. 2017. *Annual Industry Outlook*. <http://www.ethanolrfa.org/pages/annual-industry-outlook>
- Sarikaya, E., T. Higassa, M. Adachi, and B. Mikami. 2000. Comparison of degradation abilities of α - and β -amylases on raw starch granules. *Proc. Biochem.* 35:711-715.
- Saskatchewan Agriculture and Food. 1993. *Establishing an Ethanol Business*.
- Thomas, K.C., S.H. Hynes, and W.M. Ingledeu. 1996. Practical and theoretical considerations in the production of high concentrations of alcohol by fermentation. *Proc. Biochem.* 31:321-331.
- Torija, M.J., N. Rozès, M. Poblet, J.M. Guillamón, and A. Mas. 2003. Effects of fermentation temperature on the strain population of *Saccharomyces cerevisiae*. *International J. Food Microbiol.* 80: 47-53.
- Wingren, A.M., Galbe, and G. Zacchiu. 2003. Techno-Economic Evaluation of Producing Ethanol from Softwood: Comparison of SSF and SHF and Identification of Bottlenecks. *Biotechnol. Prog.* 19:1109-1117.
- Ziejewski, M., H. Goettler, and G.L. Pratt. 1986a. Comparative analysis of the long-term performance of a diesel engine on vegetable oil-based alterantive fuels. *SAE Technical Paper Series*, No. 860301. Warrendale, PA.
- Ziejewski, M., H. Goettler, and G.L. Pratt. 1986b. Influence of vegetable oil based alternative fuels on residue deposits and components wear in a diesel engine. *SAE Technical Paper Series*, No. 860302. Warrendale, PA.

第 4 章

豚および家禽に給与する場合のジスチラーズコーンオイルの化学組成とエネルギー価

序説

ジスチラーズコーンオイル(DCO)は高品質エネルギー源として主として家禽および豚の飼料に用いられているが、これは代謝エネルギー(ME)価が高く、他の油脂類より比較的低価格であるためである。DCO の市場価格は米国の油脂市場のイエローグリースの価格と密接に関係しているが、DCO の ME 価はイエローグリースの値を大幅に上回り、大豆油の ME 価に匹敵する。米国の家禽・豚産業の市場セグメントの中には、マーケティング戦略の一環として、特定の消費者需要を満たすために「植物主体」(植物油を含む)飼料のみを給与して鶏や豚を生産することを選択しているところがある。さらに、2013 年に米国で Porcine Epidemic Diarrhea ウィルスが大発生したため、多くの獣医や栄養専門家が豚用飼料(例えば、精選ホワイトグリース、動物性副産物タンパク質ミール)への動物(豚)由来飼料原料の配合を避け、植物主体原材料(例えば、トウモロコシ、大豆粕、ジスチラーズ・ドライド・グレイン・ウィズ・ソリュブル(DDGS)、ジスチラーズコーンオイル)だけを使用するようになり、飼料原料に存在している可能性のあるこのウィルスやその他の病原体が飼育場に伝染するリスクを低減しようとした。ところが、ジスチラーズコーンオイルは豚肉脂肪のしまりを低下させるため、一般に、豚用飼料に高濃度のジスチラーズコーンオイルを使用するのは幼齢期から生育期初期までに制限されている。枝肉脂肪のしまりが低下すると、豚脇腹肉をベーコンに加工する時の歩留まりが減少し、日本輸出市場での豚肉品質に対するアクセプタビリティが低下する。ただし、米国では、DDGS または DCO を高配合して給与する場合の豚肉脂肪のしまりの低下を予防する効果的な方法として、GRAS(一般に安全と認められる)承認を受けた商用飼料添加物(アイオワ州メーソンシティ所在 Nutriquest 社の Lipinate™)を使用することができる。

DCO の生産量の増加、高い ME 価、競争力のある価格を踏まえ、DCO の動物飼料への使用について米国飼料検査官協会は正式な定義を定め承認した(2017 年)。

「33.10 ____ 飼料グレードのジスチラーズオイルは酵母発酵した穀物または穀物ミックスを蒸留し、エチルアルコールを除去した後、エタノール生産業界で採用されている方法を用いて機械的にまたは溶媒を用いて抽出して得られる。ジスチラーズオイルは主に脂肪酸のグリセドエステルから成り、添加された遊離脂肪酸等の脂肪由来物質を含まない。含有する総脂肪酸が 85 パーセント以上、不飽和物が 2.5 パーセント以下、不溶性不純物が 1 パーセント以下であることが保証されていなければならない。遊離脂肪酸および水分の最

大値が保証されていなければならない。抗酸化物質が使用されている場合には、一般名または通称名を、「保存料として使用」の文言とともに記載しなければならない。「トウモロコシ、ソルガム、大麦、ライ麦」といった使用材料の種類を表す製品名である場合には、その製品名の最初の単語が主原料と謳われている穀物に対応することが求められる」(2015 年提案、2016 年採用、改訂1)

2016 年に正式に採用されたこの定義では必要とされる保証分析が指定されており、またこの定義は米国産エタノールプラントの大半が採用している遠心分離プロセスとは異なるプロセスである溶媒抽出により加工されるコーンオイルにも適用される。脱油トウモロコシによる DDGS の現在の生産量はごくわずかであるが、懸案のこの新しい併産物についての AAFCO の定義は以下のように提案されている。

「T27.9 ____ 溶媒抽出による脱油トウモロコシによるジスチラーズ・ドライド・グレイン・ウィズ・ソリュブルは、トウモロコシのジスチラーズ・ドライド・グレイン・ウィズ・ソリュブル(DDGS)から溶媒抽出により油分を抜き出した製品で、粗脂肪が現物給与ベースで 3 パーセント未満のものである。この製品はタンパク質源とすることが意図されている。製品表示には粗タンパク質の保証最低値と硫黄の保証最大値が含まれていなければならない。製造飼料の成分として記載されている場合には「溶媒抽出」という表示は求めない」(2015 年提案)

ジスチラーズコーンオイルの化学組成

ジスチラーズコーンオイルを精製コーンオイルと比較した場合の顕著な差の一つは、DCO 源には含まれる遊離脂肪酸が多いということであり(表 1)、その幅は 2 パーセント未満から 18 パーセントにまで及ぶことがある。各種飼料の脂質を評価した過去の研究から、豚および家禽に給与した場合、含有する遊離脂肪酸が増加すると ME 価が減少することが分かっており、これが DE (豚) および AMEn (家禽) 予測式の開発につながった(Wiseman ら、1998 年)。コーンオイルは比較的ポリ不飽和酸(PUFA)の含有率が高く、特にオレイン酸(9c-18:1; 総脂質の 28~30 パーセント)およびリノール酸(18:2n-6; 総脂質の 53~55 パーセント)の含有率が高いという点で、その他の脂質源と異なる。植物油の PUFA 含有量は動物脂肪の値を上回るため、植物油の ME 価は高い(Kerr ら、2015 年)。その結果として DCO はすべての飼料油脂の中で最も ME 価が高いものの一つとなっているが、同時に過酸化の影響

をより受けやすいことになる(Kerrら、2015年; Shursonら、2015年; Hansonら、2015年)。過酸化脂質を豚およびブロイラーに給与すると、生育速度、飼料摂取量および増体効率が低下し(Hungら、2017年)、高過酸化コーンオイルを給与すると、幼豚のエネルギー利用効率および抗酸化状態が低下することが明らかになっている(Hansonら、2016年)。しかしながら、市販の抗酸化剤を

ジステラーズコーンオイルに添加すると、高温多湿条件下で保管されるDCOの過酸化を最小限に抑えることができる(Hansonら、2015年)。DCOの過酸化の程度(過酸化物価、アニシジン価およびヘキサナール)は精製コーンオイルを幾分上回るが、生育成績の低下が観察されたHansonら(2016年)による試験において幼豚に給与された過酸化コーンオイルの値を大幅に下回っている。

表 1. 精製コーンオイルと各種ジステラーズコーンオイル(DCO)の化学組成と過酸化測定(出典:Kerrら、2016年)

測定	精製コーンオイル	DCO (4.9% FFA ¹)	DCO (12.8% FFA)	DCO (13.9% FFA)
水分 (%)	0.02	1.40	2.19	1.19
不溶性物質 (%)	0.78	0.40	1.08	0.97
不飽和物 (%)	0.73	0.11	0.67	0.09
粗脂肪 (%)	99.68	99.62	98.96	99.63
遊離脂肪酸 (%)	0.04	4.9	12.8	13.9
総脂肪中の脂肪酸の割合 (%)				
パルミチン酸 (16:0)	11.39	13.20	11.87	13.20
パルミトレイン酸 (9c-16:1)	0.10	0.11	0.11	0.11
マルガリン酸 (17:0)	0.07	0.07	0.07	0.07
ステアリン酸 (18:0)	1.83	1.97	1.95	1.97
オレイン酸 (9c-18:1)	29.90	28.26	28.92	28.26
リノール酸 (18:2n-6)	54.57	53.11	54.91	53.11
リノレン酸 (18:3n-3)	0.97	1.32	1.23	1.32
ノナデカノン酸 (19:0)	ND ¹	0.65	0.65	0.65
アラキン酸 (20:0)	0.40	0.39	0.39	0.39
ゴンド酸 (20:1n-9)	0.25	0.24	0.24	0.24
ベヘン酸 (22:0)	0.13	0.13	0.12	0.13
リグノセリン酸 (24:0)	0.17	0.19	0.18	0.19
その他の脂肪酸	0.21	0.41	ND	0.41
過酸化測定				
過酸化物価 (MEq/kg)	1.9	2.9	3.3	2.0
アニシジン価 ³	17.6	80.9	70.3	73.3
ヘキサナール	2.3	4.4	3.9	4.9

¹ FFA = 遊離脂肪酸

² ND = 検出不能

³ アニシジン価の単位なし

表 2 は 2 種類の DCO と一般的な飼料脂質(すなわち、精選ホワイトグリース、パーム油および大豆油)の化学組成と過酸化指標を比較したものである。精選ホワイトグリース(精製された豚脂肪)は主としてオレイン酸 (9c-18:1)、パルミチン酸 (16:0)、ステアリン酸(18:0)から構成され、その結果として、DCO と比較した場合、この脂質源は飽和脂肪源と分類される。一般に動物の飽和脂肪(すなわち、精選ホワイトグリース)は不飽和脂肪の多い植物油(すなわち、ジスチラーズコーンオイル)よりも ME 価が低い。加えて、精選ホワイトグリースは飽和脂肪酸の割合が高いため、DCO よりも脂質過酸化の影響を受けにくい。精製中に用いられる温度と加熱時間によって DCO と同程度の過酸化量になることがある(表 2)。パーム油の脂肪酸の中で多いのはパルミチン酸 (16:0) とオレイン酸 (9c-18:1) で、リノール酸の含有率(9.85 パーセント)は DCO (56 パーセント)を大きく下回っている。その結果、油安定性指標(OSI)の値の高さから分かるように、DCO、精選ホワイトグリースや大豆油と比較して、パーム油は過酸化への耐性が高い(表 2)。対照的に、大豆油の脂肪酸組成は DCO と類似しており、リノール酸の含有率(53 パーセント)が高く、オレイン酸(23 パーセント)とパルミチン酸(11 パーセント)の含有率は中程度である。ところが大豆油は DCO とは異なり、リノレン酸 (18:3n-3) の含有率が

比較的高く、リノレン酸の化学構造中の二重結合がリノール酸よりも多いため、理論的に DCO よりも過酸化の影響を受け易いと考えられる。驚くことに、表 2 の大豆油は、アニジジン価や 2, 4-デカジエナルで計った場合に、アルデヒド(過酸化生成物)含有量が、DCO、精選ホワイトグリースおよびパーム油の値を下回る。DOC を精選ホワイトグリース、パーム油および大豆油と比較した場合の化学組成上の他の 2 つの特徴は、総トコフェロールの含有量(626~730mg/kg)とキサントフィルの含有量(92~175 mg/kg)が比較的高いことである(表 2)。大豆油だけが DCO の総トコフェロール含有量を上回るが、大豆油は基本的にキサントフィルを欠いている。トコフェロールとカロチノイド(キサントフィル)は強力な抗酸化物質で、併産物生産過程の熱に曝される間に発生するさらに強大な過酸化を防ぐのに効果的である。さらに言えば、DDGS に含まれるコーンオイルのこうした化合物の含有率が比較的高いことは、過酸化の進んだ DDGS を幼豚に給与する時の酸化ストレスを最小限に抑える上で役立つと考えられる(Song ら、2013 年)。DCO に含まれる豊富なキサントフィルは、「付加価値」的な要素であり、ブロイラーの皮膚の色や黄身を望ましい色にするための合成色素を一部代替するものとしてブロイラーや産卵鶏用飼料に配合することを促す誘因にもなる。

表 2. ジスチラーズコーンオイル(DCO)、精選ホワイトグース(CWG)、パーム油(PO)および大豆油(SO)の化学組成と過酸化測定 (Lindblom ら、2017 年に基づく)

測定	DCO (4.5 % FFA)	DCO (10 % FFA ¹)	CWG	PO	SO
水分 (%)	0.68	0.54	0.24	0.02	0.02
不溶性物質 (%)	0.18	0.04	0.22	0.02	0.02
不鹸化物 (%)	1.53	1.86	0.63	0.21	0.33
粗脂肪 (%)	98.7	98.2	98.3	98.6	98.5
遊離脂肪酸 (%)	4.5	10.0	13.4	0.07	0.04
総脂肪中の脂肪酸の割合 (%)					
カプリン酸 (10:0)	ND ²	ND	0.07	ND	ND
ラウリン酸 (12:0)	ND	ND	ND	0.22	ND
ミリスチン酸 (14:0)	ND	ND	1.28	0.99	ND
ペンタデカン酸 (15:0)	ND	ND	ND	0.04	ND
パルミチン酸 (16:0)	12.86	12.88	23.25	43.41	10.74
パルミトレイン酸 (9c-16:1)	0.10	0.10	2.44	0.15	0.08
マルガリン酸 (17:0)	ND	ND	0.33	0.10	0.09
ステアリン酸 (18:0)	1.76	1.73	12.54	4.38	4.20
オレイン酸 (9c-18:1)	26.95	26.56	41.38	39.90	23.08
リノール酸 (18:2n-6)	55.88	56.50	16.52	9.85	53.19

表 2. ジステラーズコーンオイル(DCO)、精選ホワイトグース(CWG)、パーム油(PO)および大豆油(SO)の化学組成と過酸化測定 (出典:Lindblom ら、2017)

総脂肪中の脂肪酸の割合 (%)	DCO (4.5 % FFA)	DCO (10 % FFA ¹)	CWG	PO	SO
リノレン酸 (18:3n-3)	1.26	1.26	0.55	0.22	7.28
ノナデカノン酸 (19:0)	0.10	ND	ND	ND	0.31
アラキシン酸 (20:0)	0.39	0.38	0.19	0.37	0.33
ガドレイン酸 (20:1)	0.28	0.25	0.80	0.14	0.20
エイコサジエン酸 (20:2)	ND	ND	0.74	ND	ND
ホモ γ リノール酸 (20:3)	ND	ND	0.11	ND	ND
アラキドン酸 (20:4)	ND	ND	0.30	ND	ND
ベヘン酸 (22:0)	0.12	0.14	ND	0.07	0.35
ドコサトリエン酸 (22:3)	ND	ND	0.14	ND	ND
ドコサテトラエン酸 (22:4)	0.12	ND	ND	ND	ND
ドコサペンタエン酸 (22:5)	0.18	0.19	ND	ND	ND
その他の脂肪酸	ND	ND	ND	0.15	0.16
遊離グリセリン (%)	0.85	0.53	0.58	0.74	0.31
総トコフェロール (mg/kg)	730	626	253	67	1,083
アルファ	51	62	50	67	77
ベータ	15	15	<10	<10	< 10
デルタ	29	15	< 10	< 10	< 10
ガンマ	635	534	203	< 10	817
キサントフィル (mg/kg)	92	175	< 1	< 1	< 1

過酸化測定

過酸化物価 (MEq/kg)	1.4	0.4	0.4	1.2	1.6
アニシジン価 ³	30.76	21.47	23.26	11.22	5.87
2, 4-デカジエナル (mg/kg)	26.4	ND	17.6	ND	6.2
ヘキサナル (μ g/g)	ND	ND	14.7	ND	ND
OSI ⁴ 、110°Cでの時間 (h)	5.15	10.75	4.15	30.05	6.35
酸化脂肪酸 (%)	1.6	0.9	2.2	1.2	1.4
極性化合物 (%)	9.38	9.55	20.53	7.40	3.46
TBA ^{3,5} 価	0.04	0.03	0.03	0.01	0.06

¹ FFA = 遊離脂肪酸

³ アニシジン価または TBA 価の単位なし

⁴ OSI = 油安定性指標

⁵ TBA = チオバルビツル酸

豚に給与する場合の各種ジステラズコーンオイルの可消化エネルギーおよび代謝エネルギーの実際値と予測値

豚に給与する場合の DCO に含まれる可消化エネルギー (DE) 価と ME 価を測定するための試験がこれまで 2 件行われている。最初の試験は精製コーンオイル (0.04 パーセント FFA)、FFA 含有率が 4.9~13.9 パーセントの 3 種類の市販 DCO、および人工的に生産された高 FFA コーンオイル (93.8 パーセント) の DE 価および ME 価を測定し、FFA 含有率が各 DCO の ME 価に及ぼす影響を見極めることを目的として、Kerr ら (2016 年) が実施した。表 3 に示すように、DCO サンプルの ME 価の範囲は 8,036 ~8,828 kcal/kg で、FFA 含有率が 4.9 パーセントの DCO サンプルは精製コーンオイルと同程度の ME 価である。精製コーンオイルの ME 価 (8,741 kcal/kg)、4.9 パーセント FFA DCO (8,691 kcal/kg) と 13.9 パーセントの FFA DCO (8,397 kcal/kg) は NRC (2012 年) で報告されているコーンオイルの値である 8,570 kcal/kg とほぼ同じである。驚くことに、すべてのコーンオイルの中で、93.8 パーセント FFA のコーンオイルの GE 価は最も低いが、DE 価および ME 価は最も高い。12.8 パーセントの FFA DCO はすべてのサンプルの中で ME 価が最も低いが、これを除くと FFA の含有率が DCO に含まれる DE および ME に及ぼす決定的な影響はみられない。

これに続く試験で、Lindblom ら (2017 年) は 2 種類の DCO (FFA が 4.5 パーセントと 10 パーセント) の DE 価および ME 価を測定し、これらの値を市販の精選ホワイトグリース、パーム油および大豆油と比較した (表 4)。いずれの DCO サンプルの ME 価も Kerr ら (2016 年) が評価した 3 種類の DCO (8,397~8,691 kcal/kg) のうちの 2 つの値を大幅に下回った (7,921 と 7,955 kcal/kg)。これら 2 件の試験の間で各種 DCO の ME 価に違いが出る理由は明らかではないが、これらの結果は、豚に給与する場合、DCO の FFA 含有率が ME 価に影響を及ぼすことは考えられないとする判断の更なる裏付けとなった。精選ホワイトグリースの ME 価 (8,535 kcal/kg) は両 DCO サンプルの ME 価を上回り、NRC (2012 年) の値である 8,124 kcal/kg も上回っていることも意外である。以前から不飽和脂質源の脂質含有率が飽和脂肪源の値を上回ること十分に立証されている (NRC、2012 年)。しかしながら、米国では生育-仕上げ期の豚に DDGS を高配合した飼料を給与することが広まっているが、これがこうした豚の枝肉から得られた精選ホワイトグリースに含まれる不飽和脂肪酸の増加傾向という結果に結びついている可能性がある。この精選ホワイトグリースのリノール酸含有率 (16 パーセント) が NRC (2012 年) の報告によるリノール酸含

有率 (11.6 パーセント) を上回っていることから裏付けられる。さらに、この精選ホワイトグリースでは、パルミチン酸 (23 パーセント) が NRC (2012 年) のパルミチン酸の報告値である 26 パーセントをわずかに下回っている。また、Lindblom ら (2017 年) が評価した大豆油の ME 価 (9,408 kcal/kg) は NRC (2012 年) の報告値である 8,574 kcal/kg を大きく上回っている。こうした結果は、参考データベースの統計値を用いる場合、飼料中の油脂の ME 価を過大評価あるいは過小評価する恐れがあることを示している。



Kerr ら (2016 年) は、Wisemann ら (1998 年) が開発した予測式の使用上の精度を評価し、各 DCO 源の DE 価を予測して、広く用いられている予測式が DCO 源に適用できるかどうかを見極め、DCO 製品間でばらつきのある FFA 組成に基づき、よりダイナミックで正確な DE 価の予測値を提供した (表 3)。Wiseman ら (1998 年) の数式では、DE 価を評価するために、FFA 含有率、不飽和/飽和脂肪酸比率および豚の年齢を用いている。残念ながら、こうした数式を用いて得られる結果は、精製コーンオイル、12.8 パーセントおよび 13.9 パーセントの FFA DCO では 4.9 パーセント FFA DCO の予測 DE 価と同程度になり、DE 価が過大に見積もられ、試験的に生産した高 FFA DCO では DE 価が大幅に過小評価 (1,146 kcal/kg) されることを示している。こうした結果は、Wiseman ら (1998 年) の数式が豚に給与する場合の DCO の DE 価を評価するために必要な精度に欠けるため、DCO 専用の新しい予測式の開発が必要であることを示唆している。

表3. 幼豚に給与する場合の DCO に含まれる DE および ME の実際値と予測値(出典: Kerr ら、2016 年)

測定	精製 コーンオイル	DCO (4.9 % FFA ¹)	DCO (12.8 % FFA)	DCO (13.9 % FFA)	DCO (93.8 % FFA)
GE (kcal/kg)	9,423	9,395	9,263	9,374	9,156
DE (kcal/kg)	8,814 ^a	8,828 ^a	8,036 ^b	8,465 ^{ab}	8,921 ^a
ME (kcal/kg)	8,741 ^a	8,691 ^a	7,976 ^b	8,397 ^{ab}	8,794 ^a
EE ² 可消化率 (%)	93.2	94.0	91.7	95.0	92.7
UFA: SFA ³	6.13	5.00	5.61	5.00	4.81
予測 DE ⁴ (kcal/kg)	8,972	8,848	8,794	8,741	7,775
DE の実際値と予測値の差 (kcal/kg)	-158	-20	-758	-276	+1,146

^{ab}は同一列の異なる上付き文字は差のあることを示す (Pは0.05未満)。

¹. FFA = 遊離脂肪酸

². EE = エーテル抽出物

³. UFA = 不飽和脂肪酸、SFA = 飽和脂肪酸

⁴. 予測式は Wisemann ら (1998 年) から得られた若齢豚 (DE) に基づく

表4. 幼豚に給与する場合のジステラーズコーンオイル(DCO)、精選ホワイトグリース(CWG)、パーム油(PO)および大豆油(SO)のエネルギー価と(EE)エーテル抽出物(EE)消化率 (出典: Lindblom ら、2017 年)

測定	DCO (4.5 % FFA)	DCO (10 % FFA ¹)	CWG	PO	SO
GE (kcal/kg)	9,392	9,395	9,365	9,419	9,419
DE (kcal/kg)	8,001 ^b	8,052 ^b	8,531 ^b	8,293 ^b	9,388 ^a
ME (kcal/kg)	7,921 ^b	7,955 ^b	8,535 ^b	8,350 ^b	9,408 ^a
EE ² 可消化率%	84.6 ^b	85.6 ^a	85.5 ^a	84.4 ^b	85.1 ^{ab}

^{ab}は同一列の異なる上付き文字は差のあることを示す (Pは0.05未満)。

¹. FFA = 遊離脂肪酸

². EE = エーテル抽出物

ブロイラーに給与する場合のジステラーズコーンオイルに含まれる代謝エネルギーの実際値と予測値

これまで家禽に給与する場合のジステラーズコーンオイルの AME_n 含有量を測定する試験は 1 件のみ実施されている。Kerr ら (2016 年) は、精製コーンオイル (0.04 パーセント FFA) および豚の試験で用いられたものと同じ市販の FFA 含有率が 4.9~13.9 パーセントの DCO3 種類と、人工的に作り出した高 FFA (93.8 パーセント) コーンオイルについて、含有する AME_n 値を測定した。表 5 に示すように、各 DCO の AME_n 含有量は 7,694~8,036 kcal/kg とほとんどばらつきがなく、精製コーンオイル (8,072 kcal/kg) の AME_n 含有量とも変わらない。ところが、こうした値は NRC (1994 年) に報告された精製コーンオイルの AME_n 値 (9,639~10,811 kcal/kg) を大幅に下回っている。豚の場合の反応とは異なり、他のコーンオイルに含まれる AME_n と比較して、93.8 パーセントの FFA DCO の給与は AME_n 値の大幅な低下 (6,276 kcal/kg) に結びつく結果となるのは興味深い。この試験的に作成した高 FFA コーンオイルを給与した場合に、ブロイラーの反応が豚の

反応と異なる理由は不明であるが、こうした結果は飼料の油脂に含まれる FFA の値が増加すると通常ブロイラーの AME_n 含有量が減少するとする過去の報告を裏付けている。

豚に給与した場合の比較と同様に、Kerr ら (2016 年) は、ブロイラーに給与する DCO の AME_n を評価するために Wisemann ら (1998 年) が開発した予測式の精度を評価し、ブロイラーに給与する DCO に含まれるばらつきのある FFA 組成に基づいて、これらの式が正確でよりダイナミックな AME_n 予測値を提供できるものであるか否かを見極めた (表 5)。Wiseman ら (1998 年) の予測式は、FFA 含有率、不飽和/飽和脂肪酸比率およびブロイラーの齢を代入して、ブロイラーに給与する場合の脂質の AME_n 含有量を予測する。残念ながら、こうした予測式を用いると、あらゆる種類のコーンオイルの AME_n が 379~659 kcal/kg の範囲で過大に評価されることになる。こうした結果は Wiseman ら (1998 年) の数式の使用がブロイラーに給与する場合の AME_n の値を過大に評価する結果となるため、ブロイラーのための DCO 専用の新しい予測式の開発が必要であることを示唆している。

表 5. ブロイラーに給与する場合の DCO に含まれる AME_n の実際値と予測値 (出典: Kerr ら、2016 年)

測定	精製 コーンオイル	DCO (4.9 % FFA ¹)	DCO (12.8 % FFA)	DCO (13.9 % FFA)	DCO (93.8 % FFA)
GE (kcal/kg)	9,423	9,395	9,263	9,374	9,156
AME _n ² (kcal/kg)	8,072 ^a	7,936 ^a	8,036 ^a	7,694 ^a	6,276 ^b
EE ³ 可消化率 (%)	91.6 ^a	89.8 ^a	89.0 ^a	88.4 ^a	83.0 ^b
UFA:SFA ⁴	6.13	5.00	5.61	5.00	4.81
予測 AME _n ⁵ (kcal/kg)	8,680	8,484	8,415	8,329	6,935
AME _n の実際値と予測値の差 (kcal/kg)	-608	-548	-379	-635	-659

1. FFA = 遊離脂肪酸

2. AME_n = 窒素補正済見かけの ME

3. EE = エーテル抽出物

4. UFA = 不飽和脂肪酸、SFA = 飽和脂肪酸

5. 予測式は Wisemann ら (1998 年) による若齢および老齢ブロイラーの平均値 (見かけの ME) に基づき、Lopez と Leeson (2007 年、2008 年) および King ら (2013 年) に基づいてブロイラーに給与した場合の AME_n に適合させた。

References

- AAFCO. 2017. Association of American Feed Control Officials – Official Publication. Champaign, IL.
- Hanson, A.R., P.E. Urriola, L. Wang, L.J. Johnston, C. Chen, and G.C. Shurson. 2016. Dietary peroxidized maize oil affects the growth performance and antioxidant status of nursery pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 216:251-261.
- Hanson, A.R., P.E. Urriola, L.J. Johnston, and G.C. Shurson. 2015. Impact of synthetic antioxidants on lipid peroxidation of distiller's dried grains with solubles and distiller's corn oil under high temperature and humidity conditions. *J. Anim. Sci.* 93:4070-4078.
- Hung, Y.T., A.R. Hanson, G.C. Shurson, and P.E. Urriola. 2017. Peroxidized lipids reduce growth performance of poultry and swine: A meta-analysis. *Anim. Feed Sci. Technol.* 231:47-58.
- Kerr, B.J., W.A. Dozier III, and G.C. Shurson. 2016. Lipid digestibility and energy content of distillers' corn oil in swine and poultry. *J. Anim. Sci.* 94:2900-2908.
- Kerr, B.J., and G.C. Shurson. 2016. Determination of ether extract digestibility and energy content of specialty lipids with different fatty acid and free fatty acid content, the effect of lecithin, for nursery pigs. *The Professional Anim. Scientist* 33:127-134.
- Kerr, B.J., T.A. Kellner, and G.C. Shurson. 2015. Characteristics of lipids and their feeding value in swine diets. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 6:30.
- King, E.J., F.H. de Witt, H.J. van der merwe, A. Hugo, and M.D. Fair. 2013. The effect of lipid saturation on nutrient digestibility of layer diets. *S. Afr. J. Anim. Sci.* 43:S131-S134.
- Lindblom, S.C., W.A. Dozier III, G.C. Shurson, and B.J. Kerr. 2017. Digestibility of energy and lipids and oxidative stress in nursery pigs fed commercially available lipids. *J. Anim. Sci.* 95:239-247.
- Lopez, G., and S. Leeson. 2007. Relevance of nitrogen correction for assessment of metabolizable energy with broilers to forty-nine days of age. *Poult. Sci.* 86:1696-1704.
- Lopez, G., and S. Leeson. 2008. Assessment of the nitrogen correction factor in evaluating metabolizable energy of corn and soybean meal in diets for broilers. *Poult. Sci.* 87:298-306.
- Shurson, G.C, B.J. Kerr, and A.R. Hanson. 2015. Evaluating the quality of feed fats and oils and their effects on pig growth performance. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 6:10.
- Song, R., C. Chen, L. Wang, L.J. Johnston, B.J. Kerr, T.E. Weber, and G.C. Shurson. 2013. High sulfur content in corn dried distillers grains with solubles protects against oxidized lipids by increasing sulfur-containing antioxidants in nursery pigs. *J. Anim. Sci.* 91:2715-2728.
- Wiseman, J., J. Powles, and F. Salvador. 1998. Comparison between pigs and poultry in the prediction of dietary energy value of fats. *Anim. Feed Sci. Technol.* 71:1-9.

5章: エタノール生産の新技术と生産された高たん白・トウモロコシ併産物の栄養組成

はじめに

米国のエタノール産業は進化し続けており、乾式粉碎方式のエタノール工場はバイオリファイナリー(バイオマスから燃料を製造する工場)となって、エタノール収率を高めるだけでなく、国内および国際市場向けの潜在的により高い価値を持つ、より多様化したトウモロコシ併産物を生産している。エタノールの収率を高め、新しい併産物を製造するためにフロントエンドの分画技術を採用するために、過去に、いくつかの試みが行われたが、それらのプロセスではエタノールと併産物の製造効率を最適化することが困難であり、現在は使用されていない。しかし、2005年初頭からの主な新技术は、バックエンドにおけるシンスチレージからオイル抽出であり、今日の乾式粉碎工場の大部分で使用されている。粗トウモロコシ油の製造工程、化学的な組成、エネルギー価については第4章に詳述した。

現在、一部の乾式粉碎工場で行われている新しいエンジニアリング技術の焦点の多くは、1)エタノール生産に用いるセルロースをトウモロコシ中の繊維から分離する、2)粗トウモロコシ油抽出法の改良、および、3)高たん白質(40%以上)のトウモロコシ併産物の製造である。

ICM社による新しいプロセステクノロジーの概要(www.icminc.com/products)

ICM社では、4つの新しい工程を開発した(図1)。これらの工程を既存の乾式粉碎エタノール工場の製造工程に組込むことで、エタノールと粗トウモロコシ油の収量を改善し、たん白質含量が高いDDGs(HP-DDG)を製造できる。

Selective Milling Technology™(SMT)

このプロセスでは、新しく設計された独自の粉碎機を用いることで、エタノールの収率が最大3%、粗トウモロコシ油の収率が最大25%向上し、エネルギー使用量を約40%削減でき、乾式粉碎工程の操作効率を高めるこ

とが出来る。

既存の乾式粉碎のエタノールと併産物の製造プロセスにSMTを追加することで、エタノールへの変換に利用されるデンプンの量が増加し、油の回収率が向上する。現在、世界中の26のエタノール工場でSMTプロセスが使用されている。

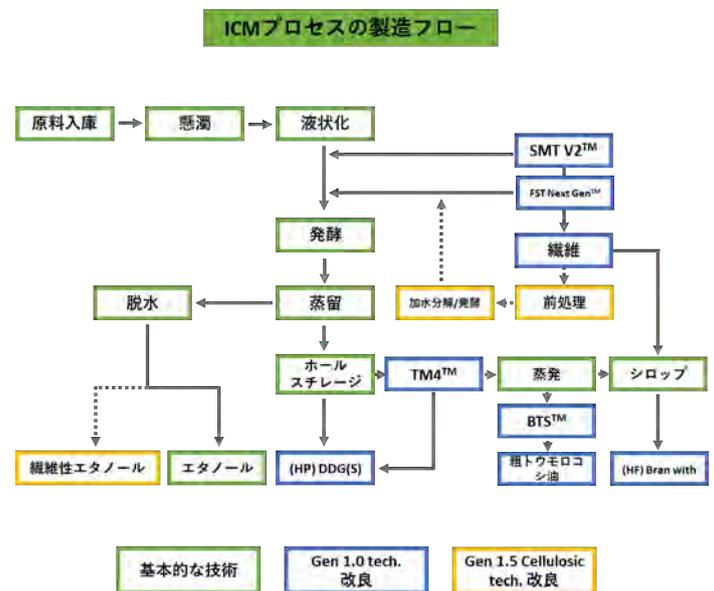


図1. エタノール工場でのエタノールおよび併産物製造工程におけるICM社のSMT、FST、TS4およびGen 1.5の概要

Fiber Separation Technology™(FST)

FSTはSMTと対応しており、トウモロコシ中のデンプンをエタノール発酵させる前に繊維を除去するように設計されている。発酵前に繊維を取り除くことで、エタノール工場では発酵槽内で発酵が可能なデンプンの量を増加させ、エタノールの生産能力と処理能力を高めることが出来る。その結果、FSTを導入したエタノール工場では、エタノール生産能力が最大15%、粗トウモロコシ油の抽出能力が最大30%高まり、製造で使用する天然ガス使用量が削減され、粗繊維含量が高い、あるいは粗タンパク質(CP)含量が高い(40%)併産物を製造すること

が出来る。

Thin Stillage Separation System™ (TS4)

ICM TS4にはいくつかの構成があり、発酵後のスチレージを CP、可溶性物質、粗トウモロコシ油などの付加価値が高い成分に分離することができる。このシステムは、乾燥機と蒸留器の能力を高め、遠心分離とトウモロコシ油分離を改善し、処理能力を高め、エタノール製造工程におけるエネルギーと水の使用量を削減することで、工場の運用効率を向上させる。

Generation 1.5 – Grain Fiber to Cellulosic Ethanol Technology™ (Gen 1.5)

前述した SMT および FST の使用に加えて、Gen 1.5 を設置することで、トウモロコシが含む繊維からさらに 7~10%のエタノールを生産し、粗トウモロコシ油の抽出量を最大 20%高めることが出来るこのシステムにより、エタノール工場では、現在の米国政府の繊維系エタノールインセンティブの下で生産されたエタノールの価値を1ガロンあたり最大 3 ドル高めることが出来る。さらに、トウモロコシの繊維はかさばる作物残渣よりもはるかに扱いやすいことから、繊維系エタノールを生産するための投資金額を大幅に削減できる。このプロセス技術を使用すると、高たん白質(40%)の DDGS が製造できる。

Fluid Quip、LLC による新しいプロセステクノロジーの概要(<http://fqptech.com/proven-technologies>)

3つの新しいプロセスが Fluid Quip LLC によって開発されている(図 2)。これは、既存の乾式粉碎エタノールの製造工程に組込むことで、エタノールおよび粗トウモロコシ油の収量の改善、CP 50%の DDGS、純粋な繊維、糖分を得ることが出来る。

Selective Grind Technology (SGT™)

SGT は、より多くのでん粉をエタノールに変換するための「さらし」、胚芽の剪断により多量のトウモロコシ油が回収を目的として、マッシュクック工程に挿入される。この工程では、エタノールと粗トウモロコシ油の収量を最

大化するように粒子サイズを最適化するよう設計されており、エタノール収量を最大 3.5%、粗トウモロコシ油収量を最大 30%高めることが出来る。

Stillage Co-Products™ (MSC)

MSC ホールシチレージから複数の製品群を分離できるように設計されている。MSC により、製造に用いた酵母とコーングルテンミールを独自にブレンドしたたん白質含量 50%の製品である Still Pro 50™を製造する。このシステムを使用すると、バックグラインドの固形物と不純物が除去されるため、乾式粉碎エタノールの製造工程の運用効率が向上し、粗トウモロコシ油の収量を最大 30%、エタノール製造能力を最大 10%向上することが出来る。MSC は、Still Pro 50™の生産量を調整できることから、残りを輸出市場向けの栄養価を持つ DDGS として仕向けることが出来る。

Clean Sugar Technology (CST™)

CST™は、トウモロコシの湿式粉碎工程と同等の糖質を生成できる。CST™は工業用糖製品群を製造するだけでなく、高価値の粗トウモロコシ油製品群を製造し、高純度のたん白質製品群を含む貴重な動物飼料原料を製造できる。

Rayeman Compression Dryer System の概要(www.rayemanelements.com)

Rayeman Compression Dryer System は、エタノール工場の大部分で使用されている従来の回転式ドラムドライヤーとは異なるユニークな乾燥システムである。生の DDGS が乾燥機に入ると、2つの特許を持つ electrically heated screws が互いにかみ合い、生の DDGS から水を絞り出す圧縮点を作り出す。これが発生すると、回転スクリューからの生の DDGS の剪断と圧縮により低温の熱が発生し、プロセス全体の各所で生の DDGS から水が蒸発する。このプロセスを使用することにより、併産物の乾燥工程で使用されるエネルギーが節約され、併産物の過加熱を防ぎ、二酸化炭素排出量が削減できる。

従来の乾燥機と比較して設置コストと稼働コストの低減が可能である。

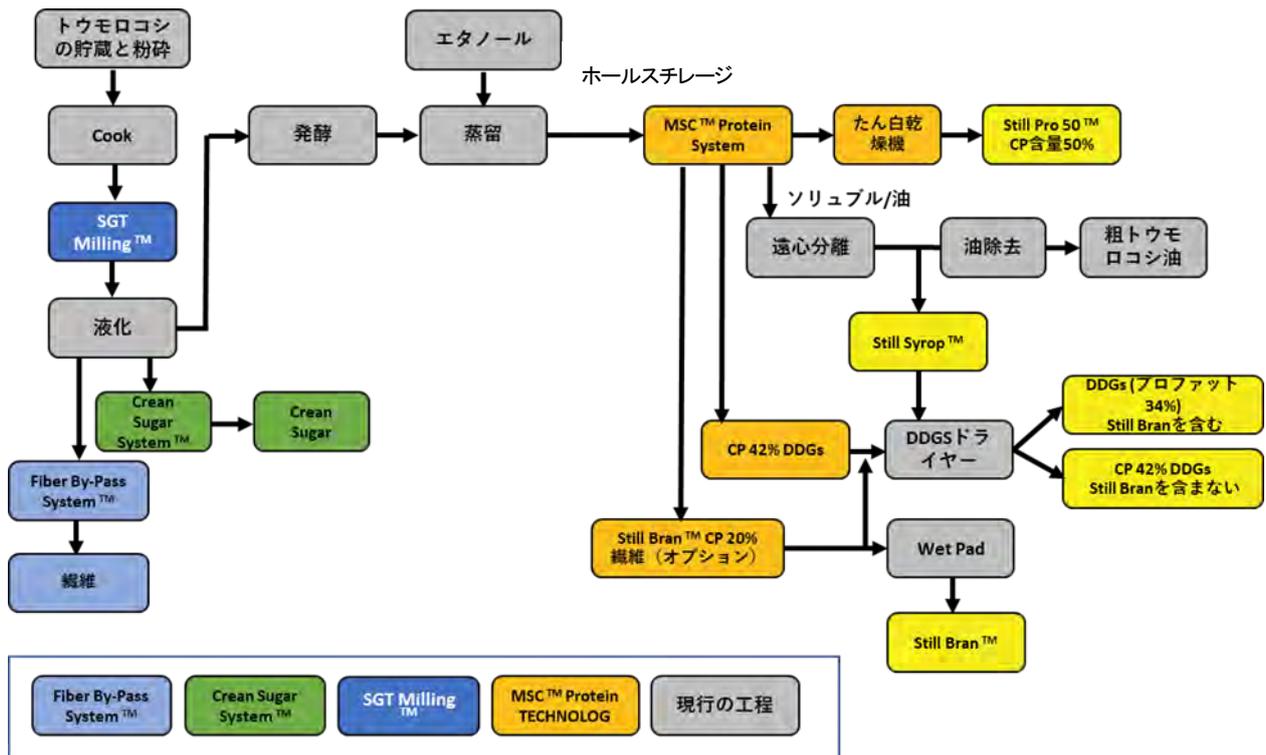


図2. Still Pro 50™の製造時の蛋白質をシンスチレージから分離するための工程の概要

新しい高たん白・トウモロコシ併産物の栄養成分

新しい高たん白・トウモロコシ併産物の購入と使用を検討する際に考慮しなければならない点は、栄養成分とエネルギー値が特異的であり、これまでの併産物とは異なっていることである。さらに、これらの新しい製品は、それぞれを他と区別するために異なる製品名でブランド化されている。したがって、様々な畜種におけるこれらの併産物の栄養価を比較する際には注意が必要である。

Still Pro 50™を除き、生産されている新しい高たん白・トウモロコシ併産物の栄養素組成に関するデータは限られている。これは、これらの様々な新しい技術を用いたエタノール工場でのプロセスの最適化が進められている最中であるためである。したがって、原料の買い手は、これらの併産物の製造業者およびマーケティング担当者から栄養価に関する最新情報を入手する必要がある。

表1に示すように、現在のICMテクノロジーを使用して製造された高たん白・DDGs (HP-DDG)には、以前に製造されていたHP-DDG (NRC, 2012)よりもCP含量が

低く、粗脂肪とリン含量が多く、アミノ酸組成が異なっている。成長期の豚およびブロイラーにおけるICMのHP-DDGの代謝エネルギー(ME)値に関する研究が進められているが、以前に生産されていた豚用HP-DDGのME値を考えると、新しいHP-DDGの豚およびブロイラーにおけるME値は粗脂肪含量が中程度のDDGs(粗脂肪含量7~9%)DDGsより高いことが期待できる。すべての畜種用飼料におけるHP-DDGの使用を評価した以前の研究結果を確認することは重要ではあるが、栄養特性が異なっているため、ICM HP-DDGには適用できない場合もありえる。

FSTファイバー + シロップの栄養組成については、ブラジルのトウモロコシエタノール工場での短期間しか生産されていないため、あまり知られていない。CP含有量が低い(25.8%)ため、高たん白併産物とは見なされないが、栄養組成は、CP、粗脂肪、可溶無窒素物(NDF)およびアミノ酸含量が従来のDDGsの一部と同等である。さらに、FSTファイバー + シロップのリン含量は、表1に示しており、すべての併産物中で最も高く(1.34%)、豚および家禽用飼料では、無機リン源の添加量を減らすことに

よる大幅なコスト削減が可能となる(含まれているリンが、DDGSと同様に消化率と生物学的利用率が高い場合)。この製品のME価、標準化された回腸末端アミノ酸消化率および標準化されたリンの全消化管総管消化率、有効リン含量を求めるための試験が進められている。

Purestream 40は、HP-DDGおよびStill Pro 50TMよりもCPが少ない(42%)が、HP-DDGよりもリジン、メチオニン、アルギニン、ロイシン、イソロイシン含量が高い。さらに、最近、報告されたPurestream 40の豚におけるME価は、Still Pro 50TM、粗脂肪含量が中程度のDDGSおよび大豆粕より高い。しかしPro 50TMは、すべての新し

いトウモロコシ併産物の中で最も広く研究されている。これは、すべての高たん白併産物の中でCP含量が最も高く、大豆粕と匹敵しているからである。その結果、Still Pro 50TMのアミノ酸含量は、他のすべての高たん白併産物より高くなっているが、大豆粕に比べてアルギニン、イソロイシン、リジン、フェニルアラニン、トリプトファン含量は低くなっている。Still Pro 50TMの豚におけるME価は、粗脂肪含量が中程度のDDGSよりやや低いものの、大豆粕より約100 kcal/kg多く、リン含量はPurestream 40に匹敵し、DDGS、大豆粕、HP-DDGよ

表 1. 新しい高たん白・トウモロコシ併産物の栄養成分(乾物値)

乾物換算値	HP-DDG (ICM) ¹	HP-DDG (NRC, 2012)	FST Fiber+Syrup (ICM) ²	Purestream 40 ³	Still Pro ^{TM4}	粗脂肪含量が中程度のDDGS (NRC 2012)	大豆粕 (NRC 2012)
水分、%	8.8	8.8	10.0	10.7	6.8	10.7	10.0
CP、%	44.2	49.7	25.8	42.1	53.4	30.6	53.0
粗脂肪、%	8.6	3.9	7.8	9.4	5.8	10.0	1.69
NDF、%	36.0	36.9	32.9	34.8	39.5	34.1	9.1
AFD、%	17.5	22.6	9.3	15.8	20.0	13.5	5.9
ME、kcal/kg	ND5	4,092	ND	4,275	3,766	3,801	3,660
アルギニン、%	1.80 (72-79)	1.78 (85)	1.29	2.10 (87)	2.41 (81)	1.38 (81)	3.83 (94)
シスチン、%	1.02 (69-74)	0.90 (78)	0.72	0.91 (75)	1.75 (73)	0.49 (73)	0.78 (84)
ヒスチジン、%	1.16 (66-72)	1.17 (79)	0.60	1.15 (82)	1.44 (80)	0.83 (78)	1.42 (90)
イソロイシン、%	1.52 (68-75)	2.01 (80)	0.57	1.62 (82)	2.12 (75)	1.19 (76)	2.38 (89)
イソロイシン：リジン	1.13	1.50	0.66	1.05	0.98	1.18	0.72
ロイシン、%	4.95 (81-84)	6.78 (86)	1.27	5.14 (89)	6.68(85)	3.64 (84)	4.02 (88)
ロイシン：リジン	3.69	5.06	1.46	3.36	3.08	3.60	1.22
リジン、%	1.34 (47-56)	1.34 (69)	0.87	1.53 (76)	2.17 (61)	1.01 (61)	3.29 (89)
メチオニン、%	0.80 (79-83)	1.02 (86)	0.53	0.88 (87)	0.95 (84)	0.64 (82)	0.73 (90)
フェニルアラニン、%	2.29 (77-80)	2.65 (84)	0.63	2.32 (86)	2.67 (81)	1.53 (81)	2.67 (88)
トレオニン、%	1.90 (60-67)	1.74 (75)	0.80	1.66 (75)	2.57 (70)	1.11 (71)	2.07 (85)
トリプトファン、%	0.38	0.26 (82)	0.30	0.31 (80)	0.40 (81)	0.22 (71)	0.73 (91)
バリン、%	2.19 (69-75)	2.32 (78)	0.93	2.15 (81)	2.73 (74)	1.56 (75)	2.48 (87)
バリン：リジン	1.63	1.73	1.07	1.40	1.26	1.54	0.75
粗灰分、%	3.0	2.6	7.3	2.8	3.9	4.5	7.0
カルシウム、%	0.01	0.02	0.08	0.03	0.03	0.09	0.37
リン、%	0.80	0.39	1.34	0.91	1.00	0.67	0.79
イオウ、%	0.86	0.82	0.66	0.48	0.51	0.54	0.44
ナトリウム、%	0.07	0.07	0.54	0.12	0.06	0.34	0.09

1 ミネソタ大学で実施した最近の豚の試験で使用されたHP-DDGからのデータ。()内はRhoら(2017)によって測定された標準化された回腸消化率(豚)
 2 FS Bioenergia (ブラジル)からのデータ
 3 ミネソタ大学で行われた最近の給餌試験で使用されたPurestream 40のデータ
 4 United Wisconsin Grain Processors, Flint Hills ResourcesおよびFluid Quip, LLCのStillPro 50TMのデータ

りも高くなっている。

これらの新しいトウモロコシの併産物は、すべて、カ

ルシウムとナトリウム含量が低いが、他の穀類や大豆粕に比べてリン含有量は比較的高くなっている。HP-DDG および Still Pro 50™ のイオウ含量は、従来の DDGS よりも高く、反芻動物用飼料でこれらの併産物を多量に配合(20%を超える)する場合の制限要因になる可能性がある。

新しいトウモロコシのすべての併産物は、すべての畜種のエネルギー、可消化アミノ酸、可消化リンの優れた供給源として使用できるが、DDGS および高たん白の併産物ではロイシン、イソロイシン、バリンの含量が比較的高く、大量の結晶リジン、スレオニン、トリプトファンを使用して大豆粕配合量を極端に減らすと、豚、家禽、魚用飼料では配合量が制限される可能性がある。リジンと比較して過剰なロイシンは、イソロイシンとバリンの利用を妨げ、豚の飼料摂取量と成長率を低下させる可能性がある。これらの影響が家禽や様々な魚種で発生するかどうかは不明だが、これら高たん白トウモロコシ併産物の配合量を高める(30%を超える)場合に、結晶イソロイシンとバリンを補充することが効果的か否かに関する研究が進められている。

フロントエンド分別により製造された HP-DDG における動物試験の要約

フロントエンドの分別工程により製造された HP-DDG の給与による栄養価と発育成績に関して、いくつかの報告がある(表 2)。これらの報告の多くは豚および乳牛についてのものだが、わずかに、養殖魚(ニジマス)、ブロイラーおよび産卵鶏について行われた文献もある。肉牛に対する HP-DDG 給与に関する報告はない。現在の ICM プロセスを使用して作成された HP-DDG に関連する唯一の研究は、Rho ら(2017)によるものがある。以前に製造されたフロントエンド分画 HP-DDG 併産物と ICM HP-DDG とはエネルギー価と栄養素組成が異なることか

ら、以前に公開された文献からの動物の反応を評価する際には注意が必要となる。

Still Pro 50™ の栄養価評価する研究の要約

Still Pro 50™ のユニークな特徴の 1 つは、HP-DDG、Purestream 40 および DDGS と比べて、製造工程で使用された酵母がかなりの量含まれていることである。暫定的な推定では、DDGS の酵母含量が 10%程度であるのに対して、Still Pro 50™ には 29%程度含まれていることが示されている。したがって、酵母は、この併産物にかなりの量の CP とアミノ酸をもたらし、様々な畜種で有益な健康効果が示されている酵母細胞壁(マンナン、β-グルカン、ヌクレオチド)に由来する有益な化合物を提供している(Shurson, 2017)。Still Pro 50™ のマンナン含有量は約 3%、β-グルカン含有量は約 8.4~8.8%である(Shurson, 2017)。したがって、高品質のエネルギー、可消化アミノ酸、可消化リンの供給源としてだけでなく、家畜の健康にも寄与する可能性がある。Still Pro 50™ のアミノ酸(豚および家禽)および CP(反すう動物)消化率に関する予備試験結果を表 3 および表 4 に示した。Still Pro 50™ の他の栄養素とアミノ酸含量については、表 1 を参照されたい。

結論

いくつかの新しい高たん白併産物が、国内および輸出市場で利用できるようになっている。予備試験結果では、これらの併産物の CP とアミノ酸含量は従来の DDGS と比較して大幅に高いが、アミノ酸消化率と ME 価は製品によって異なることを示している。豚、家禽、魚、反すう家畜にこれらの併産物を給与する場合の最大配合量と使用した場合の利点を確定するためには、今後の研究が必要となる。

表 2. フロントエンドの分画プロセスで製造された HP-DDG を配合した飼料を給与した場合の栄養価と飼育成績に関する公表論文

畜種	文献
養殖水産動物	Overland et al. (2013)
肉牛	なし
乳牛	Kelzer et al. (2007); Mjoun et al. (2009); Christen et al. (2010); Maxin et al. (2013a, b); Swanepoel et al. (2014)
ブロイラー	Batal (2007); Kim et al. (2008); Applegate et al. (2009); Rochelle et al. (2011);
産卵鶏	Batal (2007); Kim et al. (2008); Tangendjaja and Wina (2011)
豚	Widrymatteretal.(2007);Widrymatteretal.(2008);Gutierrezetal.(2009a,b);Andersonetal.(2012);Kimetal.(2009);Jacelaetal.(2010);Seaboltetal.(2010);aandRagland(2012);Petersenetal.(2014);Rojoetal.(2016);Rhoetal.(2017)

表 3 豚および家禽に対する Still Pro 50™ の ME およびアミノ酸消化率

栄養成分	豚	家禽
ME、kcal/kg (乾物値)	3,766	3,542 (TMEn)
アミノ酸の標準化された回腸消化率(豚)あるいは真の回腸消化率(家禽)、%		
アルギニン	81	94
ヒスチジン	80	90
イソロイシン	75	90
ロイシン	85	94
リジン	61	81
メチオニン+シスチン	79	88
フェニルアラニン	81	92
トレオニン	70	87
トリプトファン	81	90
バリン	74	88

表 4. Still Pro 50™ のたん白質のルーメンおよび腸における消化率

指標	% (原物)
水溶性たん白質	28.7
ルーメン内分解性たん白質	26.1
ルーメン内非分解性たん白質	73.9
腸内可消化たん白質	63.8
非分解性たん白質中の腸内非消化性たん白質	86.4
全消化管可消化たん白質	89.9
腸内非消化性たん白質	10.1

引用文献

- Adeola, O. and D. Ragland. 2012. Ileal digestibility of amino acids in coproducts of corn processing into ethanol for pigs. *J. Anim. Sci.* 90:86–88.
- Anderson, P.V., B. J. Kerr, T. E. Weber, C. Z. Ziemer, and G. C. Shurson. 2012. Determination and prediction of energy from chemical analysis of corn co-products fed to finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 90:1242–1254.
- Applegate, T.J., C. Troche, Z. Jiang, and T. Johnson. 2009. The nutritional value of high-protein corn distillers dried grains for broiler chickens and its effect

- ct on nutrient excretion. *Poult. Sci.* 88:354–359.
- Batal, A. 2007. Nutrient digestibility of high protein corn distillers dried grains with solubles, dehydrated corn germ and bran. 2007 ADSA/ASAS/AMPA/PASA Joint Ann. Mtg., San Antonio, TX. July 8–12. Abstract M206.
- Christen, K.A., D.J. Schingoethe, K.F. Kalscheur, A.R. Hippen, K.K. Karges, and M.L. Gibson. 2010. Response of lactating dairy cows to high protein distillers grains or three other protein supplements. *J. Dairy Sci.* 93:2095–2104.
- Gutierrez, N.A., D.Y. Kil, and H.H. Stein, 2009a. Net energy of distillers dried grains with solubles and high protein distillers dried grains fed to growing and finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 87(Suppl. 2):
- Gutierrez, N.A., D.Y. Kil, B.G. Kim, and H.H. Stein. 2009b. Effects of distillers dried grains with solubles and high protein distillers dried grains on growth performance and organ weights of growing and finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 87 (Suppl. 3):
- Jacela, J.Y., H.L. Frobose, J.M. DeRouche, M.D. Tokach, S.S. Dritz, R.D. Goodband, and J.L. Nelssen. 2010. Amino acid digestibility and energy concentration of high-protein corn dried distillers grains and high-protein sorghum dried distillers grains with solubles for swine. *J. Anim. Sci.* 88:3617–3623.
- Kelzer, J.M., P.J. Kononoff, K. Karges, and M.L. Gibson. 2007. Evaluation of protein fractionation and ruminal and intestinal digestibility of corn milling co-products. Dakota Gold Research Association. <http://www.dakotagold.org/research/dairy.asp> downloaded June 24, 2008.
- Kim, B.G., G.I. Petersen, R.B. Hinson, G.L. Allee, and H.H. Stein. 2009. Amino acid digestibility and energy concentration in a novel source of high-protein distillers dried grains and their effects on growth performance of pigs. *J. Anim. Sci.* 87:4013–4021.
- Kim, E.J., C. Martinez Amezcua, P.L. Utterback, and C.M. Parsons. 2008. Phosphorus bioavailability, true metabolizable energy and amino acid digestibilities of high protein corn distillers dried grains and dehydrated corn germ. *Poult. Sci.* 87:700–705.
- Maxin, G., D.R. Ouellet, and H. Lapierre. 2013. Ruminal degradability of dry matter, crude protein, amino acids in soybean meal, canola meal, corn and wheat dried distillers grains. *J. Dairy Sci.* 96:5151–5160.
- Maxin, G., D.R. Ouellet, and H. Lapierre. 2013. Effect of substitution of soybean meal by canola meal or distillers grains in dairy rations on amino acid and glucose availability. *J. Dairy Sci.* 96:7806–7817.
- Mjoun, K., K. F. Kalscheur, A. R. Hippen, and D. J. Schingoethe. 2009. In situ ruminal degradability and intestinal digestibility of protein in soybean and dried distillers grains with solubles products. *J. Anim. Sci.* 87(E-Suppl. 2): 84.
- Overland, M., A. Krogdahl, G. Shurson, A. Skrede, and V. Denstadli. 2013. Evaluation of distiller's dried grains with solubles (DDGS) and high protein distiller's dried grains (HPDDG) in diets for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquacult.* 416–417:201–208.
- Petersen, G.I., Y.Liu, and H.H. Stein. 2014. Coefficient of standardized ileal digestibility of amino acids in corn, soybean meal, corn gluten meal, high-protein distillers dried grains and field peas fed to weaning pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 188:145–149.
- Rochelle, S.J., B.J. Kerr, and W.A. Dozier III. 2011. Energy determination of corn co-products fed to broiler chicks from 15 to 24 days of age, and use of composition analysis to predict nitrogen-corrected apparent metabolizable energy. *Poult. Sci.* 90:1999–2007.
- Rho, Y., C. Zhu, E. Kiarie, and C.F.M. de Lange. 2017. Standardized ileal digestible amino acids and digestible energy contents in high-protein distiller's dried grains with solubles fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 2017.95 doi:10.2527/jas2017.1553
- Rojo, A., M. Ellis, E.B. Gaspar, A.M. Gaines, B.A. Peterson, F.K. McKeith, and J. Killefer. 2016. Effects of

- dietary inclusion level of distillers dried grains with solubles (DDGS) and high-protein distillers dried grains (HP-DDG) on the growth performance and carcass characteristics of wean-to-finish pigs. *J. Anim. Sci.* abstract doi: 10.2527/msasas2016-187 p. 88
- Seabolt, B.S., E. van Heugten, S.W. Kim, K.D. Ang-van Heugten, and E. Roura. 2010. Feed preferences and performance of nursery pigs fed diets containing various inclusion amounts and qualities of distillers coproducts and flavor. *J. Anim. Sci.* 88:3725-3738.
- Shurson, G.C. 2017. Review: Yeast and yeast derivatives in feed additives and ingredients: Sources, characteristics, animal responses and quantification methods. *Anim. Feed Sci. Technol.* (in press).
- Swanepoel, N., P.H. Robinson, and L.J. Erasmus. 2014. Determining the optimal ratio of canola meal and high protein dried distillers grain protein in diets of high producing Holstein dairy cows. *Anim. Feed Sci. Technol.* 189:41-53.
- Tangdjaja, B., and E. Wina. 2011. Feeding value of low and high protein dried distillers grains and corn gluten meal for layer. *Media Peternakan* p. 133-139. <http://medpet.jouranl.ipb.ac.id/> Doi: 10.5398/medpet.2011.34.2.133
- Widry matterer, M.R., L.M. McGinnis, and H.H. Stein. 2007. Energy, phosphorus and amino acid digestibility of highprotein distillers dried grains and corn germ fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 85:2994-3003.
- Widry matterer, L.M. McGinnis, D.M. Wulf, and H.H. Stein. 2008. Effects of feeding distillers dried grains with solubles, high protein distillers dried grains and corn germ to growing-finishing pigs on pig performance, carcass quality and the palatability of pork. *J. Anim. Sci.* 86:1819-1831.

6章:低脂肪 DDGS の栄養組成と変動

はじめに

動物栄養を精密に実行するための重要な事項の1つは、使用する飼料原料のエネルギー価や栄養成分の消化率を正確に把握することである。飼料原料の栄養価を正確に把握することで、給与飼料由来のエネルギー価や栄養成分が家畜の要求量に対して過少、あるいは、過大となるリスクを最小限にとどめることが出来、配合設計の際に行う各原料毎の栄養成分の「安全マージン」を最小化することで、経済的な損失を防ぐことが出来る。さらに、飼料設計の際に、その飼料原料の供給源毎にエネルギー価や可消化栄養価について信頼できるデータを入手できれば、DDGSなどの価格的に競争力がある飼料原料では、その利用率を高め、飼料コストのより大きな低減が望める。

栄養成分の変動は、すべての飼料原料で発生する。DDGSの利用者の間でよく聞かれる不満の1つは、栄養成分の変動が他の一般的な飼料原料と比べて大きいということである。エネルギー価と栄養成分の消化率は、

DDGSの供給源(工場)によって変動することが多くの文献で示されているが、現在の米国のエタノール工場では製造時に粗トウモロコシ油の一部を抽出しているため、栄養成分の変動は他の飼料原料と大きな違いはない。実際、Tahirら(2012)が最近報告した様々な飼料原料の分析結果(表1)によると、DDGSのCP(粗たん白質)のCV(変動係数)は5.4%であり、トウモロコシ(8.7%)や小麦(19.1%)のCVよりも小さかった。さらに、DDGSはトウモロコシ、大豆粕、小麦、ナタネ粕(カノラミール)と比べて、NDF(中性デタージェント繊維)およびリン含量の変動が少なかった。ただし、予想されたことではあるが、米国のエタノール工場の大部分でDDGSの製造時に粗トウモロコシ油を部分的に抽出しているため、DDGSの粗脂肪含量の変動は、分析した飼料原料中で最大だった。ただし、粗脂肪含量の変動の大きさは、DDGSの平均粗脂肪含量(11.6%)が、今回の比較した他の飼料原料の粗脂肪含量(0.8~3.2%)に比べて、はるかに大きいことにも影響している可能性がある。

表1. 家禽用飼料で一般的に使用される原料の成分含量と変動およびNRC家禽(1994)値との比較(乾物、Tahirら、2012から改編)

項目	トウモロコシ	大豆粕	DDGS	小麦	ナタネ粕
試料数	133	114	89	22	21
CP(%)	7.8	52.5	29.1	12.7	41.4
CV(変動係数、%)	8.7	3.0	5.4	19.1	2.9
NRCに対する比率(%)	82	97	99	98	101
粗脂肪(%)	2.9	0.8	11.6	1.2	3.2
CV(変動係数、%)	23.9	82.1	11.2	55.0	27.6
NRCに対する比率(%)	69	72	119	43	79
NDF(%)		16.8	42.4	13.4	35.8
CV(変動係数、%)	18.3	22.9	9.0	16.4	11.0
リン(%)	0.32	0.84	0.96	0.42	0.58
CV(変動係数、%)	28.7	7.2	6.5	15.0	43.0
NRCに対する比率(%)	103	121	124	121	80
フィチン態リン(%)	0.19	0.40	0.26	0.25	0.70
CV(変動係数、%)	13.4	5.6	27.2	13.9	4.7
NRCに対する比率(%)	83	162	72	-	74
粗灰分(%)	1.2	6.8	4.8	1.8	7.9
CV(変動係数、%)	10.9	4.6	13.9	14.9	9.0

Tahirら(2012)による比較の中でもう1つの重要点は、原料の栄養成分は経年的に変化しており、古いデータベースの値に依存すると、現在使用されている原料の栄養成分量を過大あるいは過小評価してしまう可能性があることである。エタノール工場が、エタノールの収率を改善し、より多くの粗トウモロコシ油を抽出し、たん白質とアミノ酸含量を高めるための新しい工程を採用するに伴って、DDGSの栄養成分は変化し続けており、これが重要な要因となっている。本章の目的は、DDGSに関する最新の栄養成分の概要を示すことにある。DDGSを配合した飼料の価値を評価し、配合設計する際には、これらのデータに基に行うことを勧める。

DDGSの供給源間のばらつきを管理するために、一部の飼料メーカーでは、栄養成分と品質の基準値を設定し、その基準値を満たす供給元を特定し、ID管理能力を持つ業者から直接購入している。また、一部の飼料メーカーは、第三者機関のマーケティング担当者が作成した、購入するDDGSのばらつきを最小限に抑えるための優先サプライヤーリストを利用している。おそらく、最良のアプローチは、DDGS供給源が示す成分組成に基づいて、最近開発および検証されたME(代謝エネルギー)および可消化アミノ酸量の推定式を用いて、供給源毎に真の栄養価を正確に把握することである。豚と家禽の推定式の詳細については19章および第20章を参照されたい。

米国におけるトウモロコシ DDGS の栄養成分含量とその変動

いくつかの研究では、様々な期間にわたるトウモロコシ DDGS の栄養成分組成に関するデータをまとめている(Olukosi & Adebisi, 2013年; Pedersenら, 2014; Steinら, 2016年; Zengら, 2017)。ただし、米国のエタノール産業における粗トウモロコシ油の抽出は2005年頃から開始され、今日では全米で広く採用されて、粗脂肪含量が5~9%の製品の割合が多くなっている。粗脂肪含量の低下により DDGS の粗脂肪含量の製品間でのばらつきは大きくなり、他の栄養成分の組成をも変化させるため、使用するデータベースを特定する際には注意が必要となる。

DDGSの購入者等は、DDGS中の粗脂肪含量の低下

に伴って CP とアミノ酸含量が高まると想定しているが、必ずしもそうではない。DDGS中の粗脂肪含量が低下すると、他のすべての化学成分が不均衡に増加することがよくある。NRC 豚(2012)以前の初期の低脂肪 DDGS のエネルギー価と栄養素に関する報告では、DDGSの粗脂肪含量が低下すると DE(可消化エネルギー)、ME、NR(正味エネルギー)価と他の栄養成分含量が高まるとされていた。その結果、NRC 豚(2012)は、粗脂肪含量に基づいて分類された DDGS のエネルギー価および栄養組成の推定値を記載しているが、残念ながら、粗脂肪含量が6~9%の DDGS と、4%未満の DDGS の ME 価と栄養成分組成に関するデータは限られていた(試料数は、前者13未満、後者は2未満)。このため、NRC 豚(2012)におけるこれらのデータは、現在、米国で入手可能な DDGS(粗脂肪含量:5~9%)の栄養成分含量と変動を正確に反映していない。その後のいくつかの報告(豚:Kerrら, 2013 および 2015、家禽:Melocheら, 2013)では、DDGSのDE、ME、NE価の推定する際に、粗脂肪含量は、単一の予測因子としては不十分であることを明確に示している(詳細は19章と20章を参照されたい)。

NRC 豚(2012)と同様に、Steinら(2016)による最近の総説では、粗脂肪含量が4%未満の DDGS(n=3 未満)、5~9%の DDGS(n=15 未満)および9%以上の DDGS(n=100 未満)の製品の栄養組成を示しているが、この総説では、粗脂肪含量が10%未満の DDGS の試料数が限られている。DDGSの粗脂肪含量と豚および家禽のME価との相関性があまりないため、推定式が開発され、検証が行われている(19章と22章を参照のこと)。これらのME推定式を用いて、粗脂肪含量が変化する DDGS の実際のエネルギー価を動的に推定する必要がある。

トウモロコシ DDGS のもう1つの栄養成分組成のデータセットは、Olukosi & Adebisi(2013、表2)によって公表されており、使用した試料のほとんどは米国で製造されたものであるが、ほとんどの試料は1997年から2010年の間に収集したものであるため、現在、生産されている低脂肪トウモロコシ DDGS の組成を適切に表してはいない。ただし、それらの分析は、DDGS間の栄養成分組成の変動を経年的に推定し、CP含量からの DDGS 中のアミノ酸含有量推定式の開発には役立っているが、残念ながら、実際の使用に用いるには、これらの推定式の精度は

十分ではない。Pedersen ら(2014)は、米国の 21 のエタノール工場から収集したトウモロコシ DDGS 72 試料を収集し、NIRS(近赤外線分光光度計)による分析を行っている。製品間の組成の中で、最も大きい CV(%)を示したのは、デンプン(45%)であり、以下、全糖(19%)、粗脂肪(17%)、酸分解エーテル抽出物(13%)であって、CP、NDF および ADF(酸性デタージェント繊維)含量の CV を超えていた(表 3)。また、彼らは、栄養成分の変動の信頼区間を確立するために必要な各栄養成分の DDGS 間の SD(標準偏差)も報告している。POET 社は、米国の主要なエタノールおよび DDGS 製造会社の 1 つであり、27 のエタノール工場を所有しており、他の DDGS と比べて市場で最も粗脂肪含量が低い(5.4%)DDGS を生産している。2014 年から 2016 年における POET 社の DDGS の栄養成分組成と変動に関する最近の調査(Herrick & Breitling, 2016)によると、DDGS の栄養成分組成(乾物値、%)は乾物 89.2±1.13、CP 30.7±1.57、粗脂肪 5.36±0.96、粗繊維 8.31±0.82、NDF 27.8±3.27、ADF 10.6±1.76、イオウ 0.92±0.13 であった。

原料トウモロコシに由来する DDGS の栄養素含有量とその変動

DDGS の栄養成分含量の変動には、粗トウモロコシ油の抽出以外にも多くの要因が関与している。

Olentine(1986)は、蒸留併産物の栄養成分組成の変動に関わる原料および加工工程における多くの要因をあげている(表 4)。トウモロコシ DDGS の栄養成分含量

の変動の多くは、品種間で通常起こり得る変動とそれが栽培される地域差によるものと考えられる。

表 5 に示した NRC 豚(2012)および NRC 家鶏(1994)で報告された値(スミスら、2015)によるトウモロコシの粗脂肪、CP、NDF、ADF、豚の DE 価および家鶏の TME と AME 価をみると、トウモロコシの品種、施肥率、成長期の気候条件、遺伝的改良にともない、トウモロコシの成分組成は時間とともに変化している。このため、トウモロコシのエネルギー価と栄養成分組成の変動は、トウモロコシ DDGS の栄養成分の変動に直接影響している。さらに、家禽や豚用飼料の設計を行う際に、NRC(1994 および 2012)によるトウモロコシのエネルギー価を使用すると、トウモロコシの実際のエネルギー価を過小評価することになる。

DDGS を製造時のジステラーズ・グレイン(固形部分、DG)へのジステラーズ・ソリュブル(液体部分、DS)の混合比も、工場によって異なっている。これら 2 つの画分の栄養成分組成には大きな違いがあるため、DG と DS の混合比が DDGS の最終的な栄養成分組成に大きな影響を与えることになる。Noll ら(2006)は、0、12、25、42 ガロンの DG に様々な水準(0、30、60 および 100%)の DS を添加して製造したトウモロコシ DDGS の栄養成分組成と消化率を評価している。DG への DS の添加率が低下すると、乾燥機の温度は低下した。粒子サイズは増加し、DG への DS の添加量の増加に伴い、DDGS の品質がより変化しやすくなった。DS の量が増加すると、DDGS の色調が濃くなり(L*が低下)、黄色味が低下した(b*が低下)。DS の増加は、粗脂肪、灰分、TME_n(家禽)、マグネ

表 2. 1997~2010 年におけるトウモロコシ DDGS の成分組成の変動(Olukosi & Adebisi, 2013 から改編)

項目	平均	最小値	最大値	SD	CV
CP %	27.9	23.3	34.7	2.4	8.5
粗繊維 %	7.4	6.2	11.3	1.1	15.1
NDF %	36.6	27.7	51.0	5.8	15.7
ADF %	13.6	8.6	18.5	3.3	24.2
粗脂肪 %	10.8	3.2	17.7	2.4	22.0
粗灰分 %	4.5	3.1	5.9	0.6	13.6
カルシウム %	0.04	0.02	0.08	0.02	53.5
リン %	0.80	0.69	0.98	0.07	8.8

表 3. NIR によるトウモロコシ DDGS の製造元による成分組成の変動(乾物、Pedersen ら、2014 から改編)

項目	平均	範囲	SD	CV
水分 %	8.7	6.5 - 12.4	0.8	10
CP %	31.4	27.1 - 36.4	2.1	7
粗繊維 %	7.7	6.4 - 9.5	0.6	7
NDF %	35.1	30.2 - 39.7	2.4	7
ADF %	10.1	8.9 - 11.9	0.6	6
でん粉 %	6.0	2.9 - 13.9	2.7	45
全糖 %	9.0	5.4 - 12.6	1.7	19
粗脂肪 %	9.1	6.5 - 11.8	1.5	17
酸分解エーテル抽出物 %	11.1	8.4 - 13.5	1.4	13
粗灰分 %	7.1	5.4 - 9.0	0.7	9

表 4. 併産物の栄養成分に影響を与える要因(Olentine、1986 年から抜粋)

原材料	要素
穀物の種類	粉碎手順
品種	粒度
品質	粉碎時間
土壌条件	浸漬処理
肥料	水量
天候	プレモルトの量
生産と収穫方法	温度と時間
処理	発酵方式 (連続あるいはバッチ単位)
	冷却時間
	糖化
	麦芽の種類、量、質
	真菌アミラーゼ
	時間と温度
	糖化した穀物の希釈
	穀物の容量
	品質と量
	発酵
	酵母の質と量
	温度
	時間
	冷却
	攪拌
	酸度などの生産管理
	蒸留
	タイプ：真空または大気圧、連続またはバッチ
	直接または間接加熱
	蒸留中の体積変化
	処理
	分離のタイプ：静止、回転または振動
	遠心分離機の使用
	圧搾の種類
	蒸発器
	温度
	数
	乾燥機
	時間
	温度
	タイプ
	穀物と混合したシロップの量

シウム、ナトリウム、リン、カリウム、塩化物および硫黄の増加をもたらしたが、CP およびアミノ酸含量と消化率への影響は最小限だった。

飼料成分の分析結果が研究室間で異なることも多く報告されていることにも注意が必要である(Cromwell ら、1999)。表 6 に示すように、同一の DDGS について、同一の分析手順を用い、4 か所の研究室で分析した分析結果は、乾物では 92.4~96.2%、粗脂肪では 9.4~13.0%、

NDF では 26.8~40.5%と試験場間で差があった。各成分の分析手順には、結果に差異をもたらす可能性がある固有の分析実施上の変動が関連付けられている、技術者のエラー、サンプリングエラー、古い試薬の使用、分析機器の不適切なキャリブレーションおよびメンテナンスなどのその他の要因が差異の原因となる場合もある。研究室間での DDGS の分析結果のばらつきを最小限に抑えるための推奨分析方法は 7 章を参照されたい。

表 5. NRC 豚(2012)および NRC 家禽(1994, Smith ら、2015 から更新)によるトウモロコシ穀粒由来の栄養成分とエネルギー価

	NRC豚 (2012)	Smithら (2015)				
		平均	範囲	差	SD	CV
乾物 %	88.3	86.6	83.7 – 88.9	5.2	1.2	1.4
CP %	9.3	9.5	7.9 – 12.3	4.4	0.98	10.3
粗脂肪 %	3.9	5.6	3.1 – 10.8	7.7	1.96	35.1
粗繊維 %	2.2	1.7	0.93 – 3.7	2.8	0.42	27.8
NDF %	10.3	10.7	6.7 – 15.4	8.7	2.14	20.0
ADF %	3.3	4.5	1.9 – 8.0	6.1	1.80	39.6
でん粉 %	70.8	68.5	58.3 – 74.2	15.9	3.4	4.9
可溶性炭水化物 %	-	72.8	63.6 – 79.9	16.3	3.7	5.1
粗灰分 %	1.5	1.4	0.87 – 2.4	1.5	0.28	20.5
GE kcal/kg	4,454	4,576	4,409 – 4,841	432	101	2.2
DE kcal/kg 豚)	3,907	4,105	3,904 – 4,344	440	100	2.4
AMEn kcal/kg	3,764	4,006	3,865 – 4,269	404	94	2.3
TMEn kcal/kg	3,898	4,086	3,955 – 4,272	317	80	2.0

表 6. 同一サンプルの DDGS に関する 4 か所の研究所間での栄養成分分析値の違い

	研究所1	研究所2	研究所3	研究所4
乾物 %	96.2	95.1	92.4	95.1
CP %	29.6	30.3	30.2	29.3
粗脂肪 %	9.4	13.0	11.1	11.9
NDF %	32.2	26.8	40.5	27.8
粗灰分 %	4.2	5.0	4.4	4.3

Kerr (2013) unpublished data.

DDGS の必須アミノ酸組成の変動

他のすべての栄養成分と同様に、DDGS のアミノ酸含量は、供給源によって大幅に異なる。Olukosi & Abeyiyi (2013) は、1997 年から 2010 年の間に公表されたいくつかの論文からのいくつかのアミノ酸のデータセットをまとめている(表 7)。

以前 Fiene ら(2006)によって報告されたように、これらのデータは、CP 含量とアルギニン(r (相関係数) = 0.44)、イソロイシン(r = 0.26)、リジン(r = 0.22)およびトリプトファン(r = 0.33)の間の相関が低く、統計的に有意ではなかった。これは、CP がトウモロコシ DDGS 中のこれらのアミノ酸含量に対して不十分な指標であり、推定式が開発されなかったことを意味している。

他の必須アミノ酸の含量は、CP 含量と有意な相関を示した(ヒスチジン、ロイシン、メチオニン、フェニルアラニン、トレオニン、バリンの各 $r = 0.68, 0.49, 0.73, 0.81, 0.59, 0.61$) が、それらの相関係数は一般的には低く、推定式の R^2 (決定係数) は低かった ($0.23 \sim 0.66$)。これらの結果は、CP 含量はトウモロコシ DDGS 中のアミノ酸含量の推定因子としては不十分であることを示しており、正

確な結果を得るためには、アミノ酸を実測する必要がある。最近では、Zeng ら (2017) が、2006 年から 2015 年の間に実施された研究結果 (査読済みの公表論文 22 報、修士論文 1 報) からのデータセットの要約を示している (表 8)。これらのデータは、Olukosi & Adebisi (2013) によるデータよりも、現在のトウモロコシ DDGS の化学組成と変動を反映している。

表 7. 1997~2010 年におけるトウモロコシ DDGS の必須アミノ酸組成の変動 (Olukosi & Adebisi, 2013 から改編)

	平均	最少値	最大値	SD	CV
アルギニン %	1.22	1.06	1.46	0.098	8.0
シスチン %	1.73	1.49	1.97	0.057	11.1
ヒスチジン %	0.74	0.65	0.91	0.070	9.4
イソロイシン %	1.07	0.96	1.25	0.072	6.7
ロイシン %	3.21	2.89	3.62	0.210	6.6
リジン %	0.90	0.62	1.11	0.118	13.1
メチオニン %	0.52	0.44	0.72	0.063	12.0
フェニルアラニン %	1.29	1.09	1.51	0.123	9.6
トレオニン %	1.03	0.93	1.16	0.067	6.5
トリプトファン %	0.22	0.16	0.26	0.022	10.3
バリン %	1.42	1.30	1.61	0.095	6.7

表 8. 2006~2015 年におけるトウモロコシ DDGS の一般成分アミノ酸含量の変動 (乾物 (88%)、Zeng ら、2017 から改編)

成分値	平均	CV
CP %	27.1	8.7
粗繊維 %	8.2	26.2
NDF %	34.1	13.4
ADF %	11.5	21.2
粗脂肪 %	8.8	36.3
粗灰分 %	4.1	24.9
必須アミノ酸		
アルギニン %	1.15	11.8
ヒスチジン %	0.74	14.2
イソロイシン %	0.99	11.8
ロイシン %	3.16	13.7
リジン %	0.80	17.9
メチオニン %	0.54	15.1
フェニルアラニン %	1.32	12.3
トレオニン %	1.01	15.5
トリプトファン %	0.20	16.3
バリン %	1.35	11.1

表 9. トウモロコシ DDGS 47 サンプルおよび小麦 DDGS 11 サンプルにおける栄養成分および非デンプン性多糖類 (NSP) 含量 (%) と変動 (乾物、Pedersen ら、2014 から改編)

	トウモロコシ DDGS				小麦 DDGS			
	平均	範囲	SD	CV	平均	範囲	SD	CV
水分	8.7	6.5 - 12.4	0.8	10	7.6	6.8 - 8.7	2.0	2
CP	31.4	27.1 - 36.4	2.1	7	33.4	30.3 - 37.9	2.8	9
粗脂肪	9.1	6.5 - 11.8	1.5	17	5.2	4.4 - 6.5	0.8	16
酸分解エーテル抽出物	11.1	8.4 - 13.5	1.4	13	7.3	6.5 - 8.8	0.8	11
NDF	35.1	30.2 - 39.7	2.4	7	30.6	27.3 - 34.2	2.6	8
ADF	10.1	8.9 - 11.9	0.6	6	10.5	9.5 - 12.2	0.8	7
粗繊維	7.7	6.4 - 9.5	0.6	7	6.7	5.5 - 8.8	0.9	14
でん粉	6.0	2.9 - 13.9	2.7	45	4.0	< 1.0 - 8.8	4.2	103
全糖	9.0	5.4 - 12.6	1.7	19	9.8	4.6 - 12.4	2.2	23
粗灰分	7.1	5.4 - 9.0	0.7	9	9.1	8.1 - 10.0	0.4	5
総NSP	28.3	25.0 - 33.7	2.0	9	26.2	24.2 - 29.1	0.9	4
水溶性NSP	3.1	1.6 - 6.5	0.8	47	6.7	5.3 - 8.0	0.1	2
セルロース	6.7	5.2 - 9.1	0.8	16	5.0	3.5 - 6.7	1.6	32
非繊維性多糖類								
総キシロース	7.7	6.7 - 10.0	0.7	10	8.6	7.0 - 9.3	0.7	8
水溶性キシロース	0.6	0.1 - 1.6	0.3	62	2.3	1.5 - 3.2	0.5	22
総アラビノース	6.2	5.6 - 7.2	0.4	7	5.7	5.1 - 6.2	0.0	0
水溶性アラビノース	0.7	0.2 - 1.5	0.3	45	1.7	1.2 - 2.2	0.3	15
総グルコース	2.8	2.1 - 4.4	0.4	13	3.3	2.7 - 3.7	0.1	5
水溶性グルコース	0.3	0.0 - 1.6	0.4	190	1.1	0.1 - 2.1	1.0	89
総マンノース	1.7	1.2 - 2.0	0.2	12	1.6	1.3 - 1.8	0.2	13
水溶性マンノース	0.6	0.4 - 0.9	0.1	19	0.7	0.4 - 0.8	0.1	18
総ガラクトース	1.5	1.3 - 2.1	0.2	11	1.1	1.0 - 1.2	0.1	11
水溶性ガラクトース	0.3	0.2 - 0.5	0.1	29	0.6	0.4 - 0.7	0.1	18
総ウロン酸	1.6	1.4 - 2.0	0.1	8	0.8	0.7 - 0.9	0.1	12
水溶性ウロン酸	0.5	0.3 - 0.6	0.1	11	0.3	0.2 - 0.4	0.0	15
クラソリグニン	2.5	1.5 - 4.7	0.7	26	6.6	4.4 - 9.3	2.1	32
アラビノース：キシロース	0.80	0.71 - 0.85	0.0	5	0.66	0.62 - 0.70	0.01	9
ウロン酸：キシロース	0.20	0.16 - 0.23	0.0	8	0.09	0.08 - 0.11	0.0	21

DDGS 繊維の非デンプン多糖類組成

DDGS の繊維画分の NSP (非デンプン性多糖類) の組成に関する知見は、豚、家禽および養殖水産動物用の原料として供給される DDGS のエネルギー価と栄養成分の消化率を改善する市販の酵素を選択する際に重要である。Pedersen ら (2014) は、47 試料のトウモロコシ DDGS および 11 試料の小麦 DDGS の NSP 組成を測定

し、NSP がトウモロコシ DDGS の約 25~34% を占め、そのほとんどは不溶性であることを示している (表 9)。これは、トウモロコシ DDGS の繊維画分は小腸での消化性が制限されており、豚、家禽、養殖魚の下部消化管での発酵性が制限されることを示している。セルロースはトウモロコシ DDGS 中の約 5~9% を占め、主な非繊維性多糖類はキシロース (7.7%) とアラビノキシロース (12.3~17.2%) であり、これらも主に不溶性である。トウモロコシ

DDGS のマンノース含有量(1.7%)は、トウモロコシ粒に比べて非常に多く、DDGS 中に存在する残留酵母細胞壁のマンナンに由来する可能性がある。トウモロコシ DDGS は、小麦 DDGS に比べて総アラビノースと総ウロン酸含量が高いため、アラビノース:キシロースおよびウロン酸:キシロース比が比較的高くなっている。これは、トウモロコシ DDGS の繊維(ヘテロキシラン)構造は、小麦 DDGS に比べてより複雑で変化しやすく、したがって、外因性酵素での分解がより困難であることを示している。ただし、小麦 DDGS では難消化性のクラソンリグニン含量がトウモロコシ DDGS より多かった。クラソンリグニンは化学成分として明確に定義されておらず、真のリグニンに加えて、たん白質(メイラード反応による生成物)、残留脂肪、ワックスおよびクチンが含まれている可能性がある。これらの結果は、DDGS の製造中にトウモロコシ粒に含まれていよ構造から置換されたキシランおよび水溶性 NSP の濃度に変化していることを示唆している。

DDGS におけるトウモロコシ油の脂肪酸組成と過酸化に対する指標

DDGS の脂肪酸組成には、ME および NE 価への寄与、乳牛における乳脂肪量への潜在的な影響、成長期～仕上げ期の豚の脂肪の硬さに及ぼす影響および生産、輸送中、貯蔵中の脂質の過酸化に対する感受性など、いくつか重要な点がある。表 10 に示すように、DDGS 中のトウモロコシ油に含まれる主な脂肪酸は、リノール酸(54%)、オレイン酸(26%)、パルミチン酸(14%)であり、リノール酸とオレイン酸は不飽和脂肪酸であることから、DDGS 中の脂質は過酸化されやすくなっている。さらに、脂肪酸組成は、粗脂肪含量が 10%以上の DDGS と、10%以下の DDGS とでは大きな違いはない。DDGS 中の脂質中では、エイコサペンタエン酸(EPA)は検出されないが、神経、網膜、免疫機能にとって生理学的に重要なオメガ 3 系の脂肪酸であるドコサヘキサエン酸(DHA)は少量含まれている。

粗脂肪含量が 10%以上の DDGS と、10%以下の DDGS における脂質過酸化(遊離脂肪酸含有量、チオバルビツル酸および過酸化物質)の平均には大きな差はないが、これらの測定値にはかなりのばらつきがある。DDGS の脂質過酸化についてのより包括的な分析のた

めに、Song & Shurson(2013)はトウモロコシ DDGS 31 試料から抽出したトウモロコシ油を分析し、これらのデータをトウモロコシ穀粒と比較している(表 11)。ミノルタの色差計による L*と b*と、過酸化物質間の相関は、それぞれ-0.63 と-0.57 で、TBARS(2-チオバルビツル酸反応性物質)の場合にはそれよりも大きかった($r = -0.73$ と-0.67)。茶色のオキシポリマーが脂質過酸化中の重合反応中に生成される(Buttkus, 1975; Khayat および Schwall, 1983)ことによる、DDGS の色調と過酸化の測定値の間の有意な負の相関は、色調が DDGS の脂質過酸化の程度の知るうえで有用な指標である可能性があることを示唆している。

ただし、Song ら(2013)は、この研究において、最も過酸化が進んだ DDGS(イオウ 0.95%を含む)を 30%配合した飼料を給与したが、離乳子豚の成長成績には悪影響を及ぼさなかった。成長成績に影響が出なかった原因として、DDGS の給与によるイオウ含有抗酸化化合物の増加に起因しており、発育成績への悪影響を防ぐためのビタミン E 添加は必要がなかった。

同様の結果は、Hanson ら(2015)による離乳子豚に過酸化が進んだ DDGS を給与した試験でも観察されている。これらの結果は、DDGS で脂質の過酸化が明らかに発生するものの、離乳子豚の発育成績や健康状態に悪影響を与えないことを示唆している。DDGS に含まれている比較的高い天然抗酸化物質は、DDGS の過酸化油をブタに与える潜在的な悪影響を克服するのに十分である可能性がある。

DDGS の天然抗酸化物質と植物化学組成

飼料の主な役割は、動物の養分要求量を充足するための十分な量のエネルギーと消化可能な栄養成分を供給することであるが、一部の飼料原料には、飼料として供給される栄養素を超える生理学的利点を有する化合物も含まれている。これらの化合物は、「機能的」または栄養補助食品の特性(すなわち、栄養および医薬品)を持っていると説明されることがある。

トウモロコシには、ビタミン E、フェルラ酸、カロテノイドなどの健康上有効な生理活性化合物がいくつか含まれている。これらの化合物は、他の化合物とともに、DDGS の抗酸化能力および潜在的な健康上の利点に貢献する可能性がある。

DDGS の植物化学物質含有量と抗酸化能に関するデータは限られているが、これらの植物化学成分を定量化することは、豚、家禽、養殖魚に対する DDGS 配合飼料の給与の際に観察される腸管健康と免疫系の応答に対する有益な効果を理解するために重要である。最初の証拠は、DDGS には、DDGS 由来の過酸化油を家畜に供給すると酸化ストレスが発生するものの、健康上の利点をもたらす可能性がある自然由来の様々な抗酸化化合物も大量に含まれている。DDGS の抗酸化物質等の分

析は、2011 年に Winkler-Moser & Breyer により実施されている。彼らは、POET 社から DDGS 試料を入手して、脂肪酸組成、トコフェロール、トコトリエノール、カロテノイド、酸化安定性指数(OSI)およびDDGSから抽出した脂質中のフィステロール等の広範囲の分析を行った(表 12)。

トコフェロールは油に含まれる主要な抗酸化物質であり(Kamal-Eldin, 2006)、酸化促進条件下での過酸化を最小限に抑える上で重要な物質である。トコトリエノールは

表 10. 様々な粗脂肪含有量の DDGS における脂肪酸組成と脂質過酸化の程度(Kerr ら、2013 から改編)

	平均値 (粗脂肪10%以上)	範囲	平均値 (粗脂肪10%以下)	範囲
サンプル数	8		7	
粗脂肪 %	11.2	10.1 -13.2	8.0	4.9 -10.0
全油中脂肪酸 %				
ミリスチン酸、14:0	0.07	0.06 - 0.08	0.04	ND - 0.08
パルミチン酸、16:0	14.2	13.6 - 15.4	14.2	14.0 - 14.6
パルミトレイン酸、16:1	0.14	0.12 - 0.16	0.12	ND - 0.15
ステアリン酸、18:0	2.2	2.0 - 2.6	2.2	2.1 - 2.3
オレイン酸、18:1	26.0	24.8 - 27.3	26.2	25.2 - 27.2
リノール酸、18:2	54.0	51.9 - 55.0	53.9	53.4 - 54.5
リノレン酸、18:3	1.6	1.4 - 1.8	1.6	1.6 - 1.8
アラキドン酸、20:4	ND	ND	ND	ND
EPA、20:5	ND	ND	ND	ND
ドコサペンタエン酸、22:5	ND	ND	ND	ND
DHA、20:6	0.18	0.15 - 0.27	0.21	0.16 - 0.26
脂質酸化反応				
遊離脂肪酸 %	1.7	1.1 - 2.4	1.1	0.6 - 1.7
TBA吸光度	7.8	5.7 - 11.8	10.6	5.3 - 17.1
過酸化物価 mEq/kg	5.4	0.2 - 19.0	7.7	0.6 - 17.5

表 11. トウモロコシ DDGS から抽出された脂質の脂質過酸化と色調(Song & Shurson, 2013 から改編)

	トウモロコシ	DDGS				
		平均	中央値	最小値	最大値	CV
過酸化物価、mEq/kg (脂質中)	3.1	13.9	11.7	4.2	84.1	97.5
TBARS価 ng MDA相当量/mg (脂質中)	0.2	1.9	1.7	1.0	5.2	43.6
色調						
L*	83.9	54.1	54.9	45.2	58.1	4.6
a*	2.6	10.9	10.8	9.3	12.4	7.2
b*	20.0	37.3	37.5	26.6	42.7	8.8

表 12. 粗トウモロコシ油の脂肪酸組成、天然抗酸化物質、酸化安定性およびフィトステロール(Winkler-Moser & Breyer、2011 から改編)

分析項目	濃度
遊離脂肪酸 (% オレイン酸中)	10.5 + 0.18
脂肪酸 (% 脂質中)	
16:0	12.9
16:1	0.1
18:0	1.8
18:1	28.1
18:2	55.5
20:0	0.3
18:3	1.2
20:1	0.0
ヨウ素価	123.1
総トコフェロール $\mu\text{g/g}$	1,104
α トコフェロール $\mu\text{g/g}$	296
γ トコフェロール $\mu\text{g/g}$	761
Δ トコフェロール $\mu\text{g/g}$	48
総トコトリエノール $\mu\text{g/g}$	1,762
α トコトリエノール $\mu\text{g/g}$	472
γ トコトリエノール $\mu\text{g/g}$	1,210
Δ トコトリエノール $\mu\text{g/g}$	80
総カロテノイド $\mu\text{g/g}$	75
ルテイン $\mu\text{g/g}$	47
ゼアキササンチン $\mu\text{g/g}$	24
β クリプトキササンチン $\mu\text{g/g}$	3.3
β カロチン $\mu\text{g/g}$	0.9
OSI 110°C時の時間	6.62
総フィトステロール mg/g	21.7
カンベステロール mg/g	2.97
カンベステノール mg/g	1.35
ステグマステロール mg/g	1.10
シトステロール mg/g	10.3
シトスタノール mg/g	3.72
アベナスステロール mg/g	0.93
シクロアルテノール mg/g	0.71
24-メチレンシクロアルタノール mg/g	0.30
シトロスタジエノール mg/g	0.31
Steryl ferulates mg/g	3.42

抗酸化剤としても機能し(Schroeder ら、2006)、血中コレステロールの低下、癌の予防、神経系の保護に貢献しているとされている(Sen ら、2000)。トウモロコシ油中の主要なカロテノイドは、ルテインとゼアキササンチンであり、これらはヒトの加齢性黄斑変性症と白内障から保護することが示されている(Zhao ら、2006)。 β カロチンと β クリプ

トキササンチンはビタミン A の前駆物質であり(Bendich & Olson、1989)、すべてのカロテノイドは、抗酸化作用や免疫反応の改善など、飼料由来のビタミン A 作用を補給する以外にも有益な健康効果があることが示されている。いくつかのタイプの癌に対する防御(Bendich & Olson、1989; Rao & Rao、2007)。フィトステロールは、血中コレス

テロールを低下させ、胃腸管からのコレステロールの再吸収をブロックする能力があり、機能性食品の貴重な成分となっている(Gylling & Miettinen, 2005)。フェルリル酸ステロールは、フィトステロールのコレステロール低下特性を助ける(Rong ら, 1997)だけでなく、また、抗酸化作用がある(Nyströmet ら, 2005)。ごく最近、シムラ(パーソナルコミュニケーション)は、供給源が異なる DDGS 16 試

料の抗酸化能力およびトコフェロール、トコトリエノール、アントフィル、フェルラ酸含量と変動を調査しており、これらの値をトウモロコシと比較している(表 13)が、DDGS 間で、これらの化合物の含量にはかなりのばらつきがあることを示しているが、いずれも、トウモロコシに比べて 2~3 倍多くなっている。

表 13. DDGS 16 サンプルの抗酸化能力、トコフェロール、トコトリエノール、キサントフィルおよびフェルラ酸含有量のトウモロコシとの比較(乾物、Shurson, 2017 年から抜粋)

	トウモロコシ	DDGS		
		平均	最小値	最大値
抗酸化能, mmolトコフェロール当量/kg	8.1	38.07 + 93.9	29.0	65.2
トコフェロールおよびトコトリエノール mg/kg				
α-トコフェロール	3.2	10.8 + 4.5	4.1	19.7
α-トコトリエノール	2.4	9.3 + 2.2	5.4	12.8
γ-トコフェロール	32.7	69.0 + 8.6	52.7	81.4
γ-トコトリエノール	8.6	14.0 + 2.9	7.6	17.5
δ-トコフェロール	10.1	18.2 + 3.6	10.0	24.3
総トコフェロール	57.0	121.3 + 16.9	90.8	141.2
キサントフィル μg/kg				
ルテイン	385	627 + 218	447	1,343
ゼアキサントチン	63	95 + 50	ND	243
総キサントフィル	448	697 + 257	447	1,586
フェルラ酸 mg/kg				
遊離フェルラ酸	0.01	0.042 + 0.016	0.018	0.087
総フェルラ酸	2.50	7.455 + 0.675	6.774	9.511

引用文献

- Bendich, A., and J.A. Olson. 1989. Biological actions of carotenoids. *FASEB J.* 3:1927-1932.
- Buttkus, H.A. 1975. Fluorescent lipid autoxidation products. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 23:823-825.
- Cromwell, G.L., C.C. Calvert, T.R. Cline, J.D. Crenshaw, R.A. Easter, R.C. Ewan, C.R. Hamilton, G.M. Hill, A.J. Lewis, D.C. Mahan, E.R. Miller, J.L. Nelssen, J.E. Pettigrew, L.F. Tribble, T.L. Veum, and J.T. Yen. 1999. Variability among sources and laboratories in nutrient analyses of corn and soybean meal. *77:3262-3273.*
- Fiene, S.P., T.W. York, and C. Shasteen. 2006. Correlation of DDGS IDEA™ digestibility assay for poultry with cockerel true amino acid digestibility. Pp. 82-89 In: *Proc. 4th Mid-Atlantic Nutrition Conference.* University of Maryland, College Park, MD.
- Gylling, H., and T.A. Miettinen. 2005. The effect of plant stanol- and sterol-enriched foods on lipid metabolism, serum lipids and coronary heart disease. *Ann. Clin. Biochem.* 42:254-263.
- Hanson, A.R., L. Wang, L.J. Johnston, S.K. Baidoo, J. L. Torrison, C. Chen, and G.C. Shurson. 2015. Effects of feeding peroxidized dried distillers grains with

- solubles to sows and progeny on growth performance and metabolic oxidative status of nursery pigs. *J. Anim. Sci.* 93:135–146.
- Herrick, K.J., and B.J. Breitling. 2016. Nutrient variability of distillers grains with solubles. *J. Anim. Sci.* abstract doi: 10.2527/msasas2016–342 p. 160–161.
- Kamal-Eldin, A. 2006. Effect of fatty acids and tocopherols on the oxidative stability of vegetable oils. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.* 58:1051–1061.
- Kerr, B.J., W.A. Dozier, III, and G.C. Shurson. 2013. Effects of reduced-oil corn distillers dried grains with solubles composition on digestible and metabolizable energy value and prediction in growing pigs. *J. Anim. Sci.* 91:3231–3243.
- Kerr, B.J., N.K. Gabler, and G.C. Shurson. 2015. Compositional effects of corn distillers dried grains with solubles with variable oil content on digestible, metabolizable, and net energy values in growing pigs. *Prof. Anim. Scientist* 31:485–496.
- Khayat, A., and D. Schwall. 1983. Lipid oxidation in seafood. *Food technol.* 37:130–140.
- Meloche, K.J., B.J. Kerr, G.C. Shurson, and W.A. Dozier III. 2013. Apparent metabolizable energy and prediction equations for reduced-oil corn distillers dried grains with solubles in broiler chicks from 10 to 18 days of age. *Poult. Sci.* 92:3176–3183.
- National Research Council. 2012. *Nutrient Requirements of Swine*. 11th Rev. Ed. National Academy Press, Washington, DC.
- National Research Council. 1994. *Nutrient Requirements of Poultry*. 9th Rev. Ed. National Academy Press, Washington, DC.
- Noll, S., C. Parsons, and B. Walters. 2006. What's new since September 2005 in feeding distillers co-products to poultry. *Proc. 67th Minnesota Nutrition Conference & University of Minnesota Research Update Session: Livestock Production in the New Millennium*. pp. 149–154.
- Nyström, L., Mäkinen, A.-M. Lampi, and V. Piironen. 2005. Antioxidant activity of steryl ferulate extracts from rye and wheat bran. *J. Agric. Food Chem.* 53:2503–2510.
- Olentine, C. 1986. Ingredient prole: Distillers feeds. *Proc. Distillers Feed Conf.* 41:13–24.
- Olukosi, O.A., and A.O. Adebisi. 2013. Chemical composition and prediction of amino acid content of maize- and wheat-Distillers' Dried Grains with Soluble. *Anim. Feed Sci. Technol.* 185:182–189.
- Pedersen, M.B., S. Dalsgaard, K.E. Bach Knudsen, S. Yu, and H.N. Lærke. 2014. Compositional prole and variation of distillers dried grains with solubles from various origins with focus on non-starch polysaccharides. *Anim. Feed Sci. Technol.* 197:130–141.
- Rao, A.V., and L.G. Rao. 2007. Carotenoids and human health. *Pharmacol. Res.* 55:207–216.
- Rong, N., L.M. Ausman, and R.J. Nicolosi. 1997. Oryzanol decreases cholesterol absorption and aortic fatty streaks in hamsters. *Lipids* 32:303–309.
- Schroeder, M.T., E.M. Becker, and L.H. Skibsted. 2006. Molecular mechanisms of antioxidant synergism of tocotrienols and carotenoids in palm oil. *J. Agric. Food Chem.* 54:3445–3453.
- Sen, C.K., S. Khann, and S. Roy. 2000. Tocotrienols in health and disease: The other half of the natural vitamin E family. *Mol. Aspects med.* 28:692–798.
- Shurson, G.C. 2017. The role of biofuels coproducts in feeding the world sustainably. *Annu. Rev. Anim. Biosci.* 5:229–254.
- Smith, B., A. Hassen, M. Hinds, D. Rice, D. Jones, T. Sauber, C. Iiams, D. Sevenich, R. Allen, F. Owens, J. McNaughton, and C. Parsons. 2015. Predicting the digestible energy of corn determined with growing swine from nutrient composition and cross-species measurements. *J. Anim. Sci.* 93:1025–1038.
- Song, R. and G.C. Shurson. 2013. Evaluation of lipid peroxidation level in corn dried distillers grains with solubles. *J. Anim. Sci.* 91:4383–4388.
- Song, R., C. Chen, L. Wang, L.J. Johnston, B.J. Kerr, T.E. Weber, and G.C. Shurson. 2013. High sulfur content in corn dried distillers grains with solubles (DDGS)

- protects against oxidized lipids in DDGS by increasing sulfur-containing antioxidants in nursery pigs. *J. Anim. Sci.* 91:2715–2728.
- Stein, H.H., L.V. Lagos, and G.A. Casas. 2016. Nutritional value of feed ingredients of plant origin fed to pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 218:33–69.
- Tahir, M., M.Y. Shim, N.E. Ward, C. Smith, E. Foster, A.C. Guney, and G.M. Pesti. 2012. Phytate and other nutrient components of feed ingredients for poultry. *Poult. Sci.* 91:928–935.
- Winkler-Moser, J.K., and L. Breyer. 2011. Composition and oxidative stability of crude oil extracts of corn germ and distillers grains. *Industrial Crops and Prod.* 33:572–578.
- Zeng, Z.K., G.C. Shurson, and P.E. Urriola. 2017. Prediction of the concentration of standardized ileal digestible amino acids and safety margins among sources of distillers dried grains with solubles for growing pigs: A meta-analysis approach. *Anim. Feed Sci. and Technol.* 231:150–159.
- Zhao, D.Y., P. Bhosal, and P.S. Bernstein. 2006. Carotenoids and ocular health. *Curr. Top. Nutr. Res.* 4:53–68.

7章: DDGS のための推奨される分析手順

はじめに

飼料成分の分析は、成分含量が保証値を満たしていることを確認し、飼料の配合に用いるための栄養成分組成と、潜在的な汚染物質の存在とその含量を知るために、飼料業界では一般的な手法となっている。したがって、DDGS を含む飼料原料中のさまざまな化学物質の測定の正確性は不可欠となる。分析手順は、特定の実験室のバリデーション・レベルに基づいて分類できる(Thiex、2012)。単一の実験室内でのバリデーションは、特定の

実験室、技術者および機器に適用されるが、複数の実験室間におけるバリデーションでは、分析結果が当該実験室と、他の実験室との間でどの程度再現性があるかの情報を得るために、2~7 か所の実験室でのバリデーションが行われる。完全に調和したプロトコルを用いた共同研究のバリデーションは、少なくとも 8 か所の実験室において、同一の手順を使用して許容できるデータが提供されることで得られる。DDGS に関する推奨分析手順についての優れた総説が Thiex(2012)によって公表されており、本章ではその重要点を紹介する。

DDGS の取引基準を満たすための推奨分析方法(AFIA、2007 年)

分析項目	方法	備考
水分	NFTA 2.2.2.5	Lab Dry Matter (105°C/3hr)
CP	AOAC 990.03	Protein (Crude) in Animal Feed
CP	AOAC 2001.11	Protein (Crude) in Animal Feed and Pet Food Copper Catalyst
粗脂肪	AOAC 945.16	Oil in Cereal Adjuncts (Petroleum Ether)
粗繊維	AOAC 978.10	Fiber (Crude) in Animal Feed and Pet Food (F.G. Crucible)

配合設計のための DDGS の栄養成分分析の推奨方法

分析項目	方法	備考
酸性デタージェント繊維 (ADF)	AOAC 973.18	Fiber, Acid Detergent and Lignin, H ₂ SO ₄ in Animal Feed and ISO, 2008 are equivalent
酸性デタージェントリグニン (ADL)	AOAC 973.18	Fiber, Acid Detergent and Lignin, H ₂ SO ₄ in Animal Feed and ISO 13906:2008 are equivalent
中性デタージェント繊維 (NDF)	AOAC 2002.04	AOAC 2002.04 Amylase Treated Neutral Detergent Fiber in Feeds and ISO 16472:2006 are equivalent
でん粉	No official method	AOAC 920.40 is no longer valid because of discontinued production of the enzyme needed for the assay, AOAC 996.11 is most commonly used but has deficiencies.
アミノ酸	AOAC 995.12 ISO 13903:2005	AOAC 994.12 for all amino acids except tyrosine and tryptophan
トリプトファン	AOAC 988.15	
灰分	AOAC 942.05 ISO 5984:2002	AOAC 942.05 and ISO 5984:2002 are equivalent. Note: If the ash contains unoxidized carbon, the sample should be re-ashed

分析項目	方法	備考
塩素	AOAC 969.10	AOAC 969.10 is the Potentiometric Method and AOAC 943.01 is the Volhard Method
	AOAC 943.01	
	ISO 6495:1999	
クロム	No official method	No methods have been validated
フッ素	Microdiffusion technique (Mineral Tolerances of Animals, 2005)	No methods have been validated
ヨウ素	ICP-MS technique (Mineral Tolerances of Animals, 2005)	No methods have been validated
リン	AOAC 965.17	AOAC 965.17 Phosphorus in Animal Feed, Photometric Method, ISO 6491:1998 Determination of Total Phosphorus Content – Spectrophotometric Method, and ISO 27085:2009 can be used
	ISO 6491:1998	
	ISO 27085:2009	
セレン	AOAC 996.16	AOAC 996.16 Selenium in Feeds and Premixes, Fluorometric Method and AOAC 996.17 Selenium in Feeds and Premixes, Continuous Hydride Generation Atomic Absorption Method are acceptable
	AOAC 996.17	
イオウ	AOAC 923.01	AOAC 923.01 Sulfur in Plants and ISO 27085:2009 are comparable
	ISO 27085:2009	
微量ミネラル	AOAC 968.08	Solubilization involves either dry ash followed by dissolving in acid, or wet ash using various acids depending on the elements being measured. Detection includes gravimetric techniques, visible spectrophotometry, flame and graphite furnace atomic absorption spectrophotometry (AOAC 968.08; ISO 6869:2000), or atomic mass spectroscopic detection (ICP-MS; ISO 27085:2009)
	ISO 6869:2000	
	ISO 27085:2009	

DDGS で考えられる汚染物質を測定するための推奨手順(Caupert ら、2012)

マイコトキシン(カビ毒)

1960年代以降、ヒトの健康に対する毒性の懸念から、食品や飼料中のマイコトキシン含量を分析するための多くの分析方法が開発されてきた(Trucksess、2000)。その中でも、TLC(薄層クロマトグラフィー)法、エライザ法および免疫センサーに基づく方法は、迅速なスクリーニングに広く使用されているが、FD(蛍光検出)を備えたHPLC(高速液体クロマトグラフィー)およびMS(質量分析検出)は、確認および参照方法として使用されている(Krska ら、2008)。

ただし、マイコトキシンの分析には、迅速、正確、低コストが求められるため、オンサイトメソッド・テストキットが、USDA(米国農業省)のGIPSA(穀物及び包装業者・飼育場検査管理部)によって開発および承認されて、DDGS

に関するマイコトキシン分析に用いられている(表 1; <http://www.gipsa.usda.gov/GIPSA/webapp?area=home&subject=lr&topic=hb>)。

これらの方法は、単一のマイコトキシンを検出するためのものであり、使用が比較的簡単で、定量感度が高く、高い試料処理能力(サンプルスループット)を可能にしている。DDGS中のマイコトキシンを分析するために6種類の製品がGIPSAにより承認されている(アフラトキシン;4種、フモニシン;1種、ゼアラレノン;1種)。DDGSに関して、マイコトキシン汚染の可能性を検討する場合、承認された分析手順を用いて正確な結果を得ることが不可欠となる。飼料中のマイコトキシンの存在と含量を測定するにはHPLCが推奨されている。HPLCと様々な検出器を使用することで、飼料中のほとんどのマイコトキシンを分離して検出することが出来る(Krska ら、2008)。米国の主要な研究所で使用されている方法は表2に示したとおりであり、これらの方法は、個々の実験室で検証されており、最近、査読済みの科学誌で公表されている。

表1. GIPSAが承認しているDDGS用マイコトキシン・テストキット(Zhangら、2009から改編)

商品名	製造者	分析範囲	分析方法	抽出方法	クリーンアップ法
アフラトキシン					
Veratox Aflatoxin	Neogen Corporation	5-50 ppb	Microtiter Well Plate Assay	Methanol/water (70 + 30)	ELISA
Ridascreen FAST SC	R-Biopharm	5-100 ppb	Microtiter Well Plate Assay	Methanol/water (70 + 30)	ELISA
Aflatest	Vicam	5-100 ppb	Immunoaffinity Column	Methanol/water (80 + 20)	Affinity column
FluroQuant® Afla IAC	Romer	5-100 ppb	Fluorometry	Methanol/water (80 + 20)	Affinity column
フモニシン					
AgraQuant Total Fumonisin 0.25/5.0	Romer	0.5-5 ppm	Direct Competitive ELISA	Methanol/water (70 + 30)	ELISA
ゼアラレノン					
ROSA® Zearalenone	Charm Sciences, Inc.	50-1000 ppb	Lateral Flow Strip	Methanol/water (70 + 30)	

表2. 飼料中のマイコトキシン分析の推奨方法(Zhangら、2009から改編)

項目	分析方法	検出範囲	引用文献
アフラトキシン			
トウモロコシ、アーモンド、ブラジルナッツ、ピーナッツ、ピスタチオナッツ	HPLC-FD	5-30 ppb	AOAC 994.08
デオキシニバレノール			
穀類、穀類副産物	HPLC-UV	ppm (detection limit)	MacDonald et al., 2005a
フモニシン			
トウモロコシ、圧ベントウモロコシ	HPLC-FD	0.5-2 ppm	AOAC 2001.04
トウモロコシ、トウモロコシ主体飼料	Thin layer chromatography (TLC)	ppm (detection limit)	Rottinghaus et al., 1992
T2トキシン			
食品、飼料	Thin layer chromatography (TLC)	ppm (detection limit)	Romer Labs, 1986
ゼアラレノン			
トウモロコシ、小麦、飼料	Microtiter Well Plate Assay	0.8 ppm (detection limit)	AOAC 994.01
大麦、トウモロコシ、小麦粉、ポレンタ、トウモロコシ主体のベビーフード	HPLC-FD	0.05 ppm (detection limit)	MacDonald et al., 2005b
アフラトキシン、デオキシニバレノール、フモニシン、T2トキシン、ゼアラレノン			
食品、飼料	LC/MS/MS	Aflatoxins (1-100 ppb); Deoxynivalenol, (1, 1000 ppb) Fumonisin (16-3,200 ppb) T-2, (2-1,000 ppb) Zearalenone (20-1,000 ppb)	Sulyok et al., 2007

抗生物質の残留

米国食品医薬品庁(FDA)の動物用医薬品センター(CVM)では、HPLCとイオントラップタンデム質量分析計を使用して、以下に示す13種類の抗生物質残留物についてDDGSでの検出を行っている(Heller, 2009)。

- ・アンピシリン
- ・バシトラシン A
- ・クロラムフェニコール
- ・クロルテトラサイクリン
- ・クラリスロマイシン
- ・エリスロマイシン
- ・モネンシン
- ・オキシテトラサイクリン
- ・ペニシリン G
- ・ストレプトマイシン
- ・タイロシン
- ・バージニアマイシン M₁

この手順の抽出効率の範囲は65~97%であり、定量限界は0.1~1.0 μg/gであった。精度の範囲は88~111%で、CV(変動係数)は4~30%である。バージニアマイシン残基を検出するためにFDAが承認した唯一の方法は、バイオアッセイ(QA@Phibro.com)であり、バージニアマイシン残基の存在を正確に測定するために推奨されている。このバイオアッセイは、バージニアマイシン分子の両方のサブユニットが存在する場合にのみ発生する可能性がある生物活性を検出する。Heller(2009)のLC-MS法は、1つのサブユニットのみを検出し、高い割合で偽陽性を引き起こす可能性がある。

引用文献

AFIA. 2007. Evaluation of Analytical Methods for Analysis of Distillers Grain with Solubles: AFIA Sub Working Group Final Report. American Feed Industry Association. Available online: www.aafi.org/Aa/Files/BAMN-percent20BSE-percent20DDGS-percent20Biosecurity-percent20Awareness/DDGS-percent20FINAL-percent20Report-percent20and-percent20Recommendations2-07.pdf. Ac

cessed May 30, 2012.

- AOAC. 2005. Official Methods of Analysis of AOAC International (OMA). AOAC International, Gaithersburg, MD.
- Caupert, J., Y. Zhang, P. Imerman, J.L. Richard, and G.C. Shurson. 2012. Mycotoxin Occurrence in DDGS. In: Distillers Grain Production, Properties, and Utilization, ed. K. Liu and K.A. Rosentratner, CRC Press, Boca Raton, FL, p. 219-234.
- Heller, D.N. 2009. Analysis of Antibiotics in Distillers Grains Using Liquid Chromatography and Ion Trap Tandem Mass Spectroscopy, ed. C.V.M Food and Drug Administration, Office of Research. Department of Health and Human Services. Rockville, MD.
- ISO. 1998. ISO 6491:1998, Animal Feeding Stuffs - Determination of Phosphorus Content - Spectrometric Method. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO. 1999. ISO 6495:1999, Animal Feeding Stuffs - Determination of Water-Soluble Chloride Content. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO. 2000. ISO 6491:1998, Animal Feeding Stuffs - Determination of the Contents of Calcium, Copper, Iron, Magnesium, Manganese, Potassium, Sodium, and Zinc - Method Using Atomic Absorption Spectrometry. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO. 2002. ISO 5984:2002, Animal Feeding Stuffs - Determination of Ash Content. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO. 2005. ISO 13903:2005, Animal Feeding Stuffs - Determination of Amino Acid Content. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO. 2006. ISO 16472:2006, Animal Feeding Stuffs - Determination of Amylase-Treated Detergent Fiber Content (aNDF). International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

- ISO. 2008. ISO 13906:2008, Animal Feeding Stuffs – Determination of Acid Detergent Fiber (ADF) and Acid Detergent Lignin (ADL) Content. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO. 2009. ISO 27085:2009, Animal Feeding Stuffs – Determination of Calcium, Sodium, Phosphorus, Magnesium, Potassium, Iron, Zinc, Copper, Manganese, Cobalt, Molybdenum, Arsenic, Lead, and Cadmium by ICP–AES. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- MacDonald, S.J., D. Chan, P. Brereton, A. Damant, and R. Wood. 2005a. Determination of deoxynivalenol in cereals and cereal products by immunofluorescence column cleanup with liquid chromatography: Interlaboratory study. *J. of AOAC International* 88:1197–1204.
- MacDonald, S.J., S. Anderson, P. Brereton, R. Wood, and A. Damant. 2005b. Determination of zearalenone in barley, maize and wheat flour, polenta, and maize-based baby food by immunofluorescence column cleanup with liquid chromatography: Interlaboratory study. *J. of AOAC International* 88:1733–1740.
- Mineral Tolerances of Animals. 2005. National Academy Press, Washington, DC.
- Romer Labs, Inc. 2010. T-2 Toxin. Romer Labs, Inc., Union, MO. Available online: www.romerlabs.com/downloads/Mycotoxins/T2-Toxin.pdf.
- Rottinghaus, G.E., C.E. Coatney, and C.H. Minor. 1992. A rapid, sensitive, thin layer chromatography procedure for the detection of fumonisin B1 and B2. *J. Vet Diag. Invest.* 4:326–329.
- Sulyok, M., R. Krska, and R. Schuhmacher. 2007. A liquid chromatography/tandem mass spectrometric multi-mycotoxin method for quantification of 87 analytes and its application to semi-quantitative screening of moldy food samples. *Analytical and Bioanalytical. Chem.* 389:1505–1523.
- Thiex, N. 2012. Analytical Methodology for Quality Standards and Other Attributes of DDGS In: *Distillers Grain Production, Properties, and Utilization*, ed. K. Liu and K.A. Rosentrater, CRC Press, Boca Raton, FL, p. 193–217.
- Trucksess, M.W. 2000. Natural Toxins. *Official Methods of Analysis of AOAC International*. 17th Edition. Chapter 49, 1 – 2.
- Zhang, Y., J. Caupert, J. Richard, P. Imerman and J. Shurson, 2009. The occurrence and concentration of mycotoxins in U.S. distillers dried grains with solubles. *J. Ag. Food Chemistry* 57:9828–9837.

8章: 中国産 DDGS と米国産 DDGS 栄養価と品質の違い

はじめに

最近、中国は米国 DDGS の最大の輸入業者になった。Fabiosa ら(2009)が報告した中国の飼料工場は、米国から輸入されたトウモロコシ DDGS を大豆粕とトウモロコシおよび他のより高価な飼料原料の部分的な代替品として使用することにより、飼料コストの 6%削減を実現している。中国で生産される DDGS の総量に関するデータはないが、5 か所のプラントからの DDGS の公式な総生産量は 2010 年に 169 万 MT であった(Jewison and Gale, 2012)。Jewison and Gale(2012)は、中国農業飼料産業界による 2011 年のデータを使用して畜種毎の飼料量を推定しているが、豚用としての利用が大部分(37%)で、次いで、産卵鶏(29%)、ブロイラー(19%)および水産養殖(9%)であるが、反すう家畜用とその他の使用は、それぞれ 4 および 2%にすぎなかった。

2014 年から 2015 年まで、中国は大豆、ナタネ、DDGS、ソルガム、大麦、魚粉の世界最大の輸入国だった(Gale, 2015)。さらに、中国は世界最大の食用動物生産国であり、飼料の製造業者でもある(Gale, 2015)。中国では人口が増え続け、動物由来食品の消費量も増え続けているため、DDGS などの多くの輸入原料の需要は増え続けると思われる。しかし、Jewison and Gale(2012)は、将来の中国における米国 DDGS の需要は、トウモロコシ、大豆および大豆粕の価格を含むいくつかの要因に依存することを示している。トウモロコシのサポート価格と公式の準備制度に対する最近の改革を含む中国政府の政策、他の代替飼料原料価格と入手の可能性、さらに、拡大する家畜および家禽産業界をサポートするための国内および輸入飼料原料に対する中国の需要は大幅に増加する。

米国の DDGS 総生産量の約 66%は、米国内の肉牛(45%)、乳牛(31%)、豚(15%)、家禽(8%)、その他(1%)によって消費されている。将来の米国における DDGS 消費量は、トウモロコシや大豆粕などの競合または代替原料の価格と入手可能性に依存している。これらの代替原料との価格差が DDGS に有利な場合、その多くが、飼料中のトウモロコシと大豆粕の両方あるいはそれぞれの代替えとして使用される。過去 12 か月間(2015

年 7 月~2016 年 6 月)の米国における DDGS のスポット価格は、トウモロコシの価格の 86~115%、大豆粕の価格の 37~50%であり、たん白質の単位あたりの価格は大豆粕と比べて DDGS の方が一貫して低い(たん白質の単位あたりの差は約 0.37 ドルから 2.54 ドルの範囲)。DDGS のこのたん白質価格の利点により、米国の飼料市場において、大豆粕と比べて、飼料のたん白質原料の一部としての競争力が高まっている。

エタノール生産を増やすために米国政府の政策が変更されない限り、ここ数年の米国におけるエタノールと DDGS 製造量の伸びは少ないと予想される。米国のエタノール業界で起こっている変化と、今後起こる可能性がある変化のほとんどは、より高価格で、多様な併産物を生産することである。米国のエタノール工場の過半数(85%以上)で粗トウモロコシ油を抽出するための、少額の設備投資が行われている。他の新しいエタノールと併産物の生産を行うために、いくつかのエタノール工場では、これらの他に小規模~中規模の設備投資を行っている。これらの技術により、脂肪含量が低い(6%未満) DDGS、粗トウモロコシ油、セルロース系エタノールを製造するためのトウモロコシ繊維、高たん白 DDG や高繊維 DDGS 等の特殊な併産物も生産されている。

DDGS 製造工程の違い

中国の飲料、燃料エタノールおよび DDGS の製造工程に関する公開情報は非常に限られている。ただし、DDGS のエネルギー価と栄養成分組成と消化率は、使用する穀物の種類と栄養成分組成、様々な飲料と燃料のエタノールおよび副産物の処理方法に依存している(Ingledeew ら, 2009)。

原料の違い

エタノールと DDGS の生産に使用される原料は、米国と中国のエタノール工場で異なるが、中国の DDGS の生産に使用される原料の総量、種類、比率に関するデータはない。Jewison and Gale(2012)は、中国のトウモロコシ、小麦、キャッサバを原料として 169 万 MT の DDGS

(米国産トウモロコシ DDGS の総生産量の 4.5%)を生産する 5 か所のエタノール工場が存在すると述べている。中国の飲料用アルコール産業は 2000 年代に急速に増加したが、中国でエタノールを生産するために使用される原料は地域によって異なるが、トウモロコシ、米、小麦、ソルガム、ジャガイモ、キャッサバが使用されている (Gale ら、2009)。

多くの場合、飲料アルコール生産では穀物のブレンドが使用されるが、米国での燃料用エタノール生産では、主にトウモロコシを唯一の原料として使用している。いくつかの米国のエタノール工場では、原料としてソルガムまたはトウモロコシとソルガムを混合して使用しているが、これらから生産された DDGS は国内で販売・消費されている。さらに、米国では、飲料用アルコール工場からの DDGS は、総生産量の約 1~2%であり、中国に比べてはるかに少ないと推定される。トウモロコシを原料とした燃料用エタノールと併産物の生産のほとんどは、トウモロコシの大部分が生産される中国北東地域で行われているものと推定される。中国の様々な種類の飲料および燃料エタノール工場から生産された併産物の量に関するデータはないが、トウモロコシからの併産物が最も多いものと思われる。

生産工程と栄養成分含量の違い

米国の燃料用エタノール工場では、中国で使用されているものよりも高度な生産技術を使用してエタノールと DDGS を生産している。米国のエタノール工場のほとんどは 2004 年以降に建設されており、これらの工場に設置されている機器の多くはステンレスでできている。発酵中の微生物汚染を防止するためには、エタノール工場での洗浄と高度な衛生管理が重要となる。これに対して、トウモロコシを原料として使用する中国のエタノール工場では、腐食しやすい炭素鋼が使用されており、発酵中に微生物汚染が頻繁に発生し、不完全な発酵、エタノール収量の低下、DDGS の品質の低下を引き起こす可能性がある。さらに、中国のエタノール工場では、炭素鋼の腐食により、米国の DDGS の鉄濃度(120~150 ppm)に比べて、鉄含有量が非常に高くなっている(500~1,700 ppm)。これは DDGS の給与量によっては、軽微な懸念材料となる可能性があり、中国産 DDGS の色調が濃くなる原因となる可能性もある。

米国のエタノール工場の過半数(90%以上)は、DDGS を製造時に部分的に油を抽出している。主要なエタノール会社の 1 つ(27 か所のエタノール工場を有する)は、4.5~5.0%の粗脂肪(原物値)を含む DDGS を生産するが、米国のエタノール産業の大半は、粗脂肪含量が最低 7%から 14%(原物値)の DDGS を生産している。これに対して、Li ら (2015)は、中国の飲料用および燃料用エタノール工場から収集した 25 試料のうち、約 44%で粗脂肪含量が 6%未満(原物値)であったと報告している。別の最近の研究(Jie ら、2013)では、中国の 11 省のいくつかのエタノール工場から収集した 28 試料のトウモロコシ DDGS、米国から中国に輸入されたトウモロコシ DDGS 2 試料における粗脂肪含量の範囲(原物値)は 1.43~15.1%であり、これらの試料の 32%は粗脂肪含量が 6%未満であったと報告している。この研究で分析された米国産 DDGS 2 試料の粗脂肪含量は 12.1 および 13.6%であった。Kerr ら(2013)は、米国で生産されたトウモロコシ DDGS 15 試料のエネルギー価と化学組成を評価している。粗脂肪含量は 4.3 から 11.2%(原物値)の範囲であったが、粗脂肪含量が 6%未満のものは 2 試料(全体の 13%)だけだった。要約すると、中国産 DDGS と米国産 DDGS の大きな違いの 1 つは、中国産 DDGS は米国産 DDGS に比べて粗脂肪含量が低い(6%未満)ものの割合が多いことある。

Li ら(2015)により発表された最近の研究では、17 の中国の飲料用(18 試料)および燃料用(7 試料)エタノール工場から収集された計 25 試料の DDGS のエネルギー価と化学組成を評価している。飲料用エタノール業界から収集された DDGS サンプルの割合が高いことは、中国産と米国産の DDGS の際立った違いの 1 つであり、中国産のトウモロコシ DDGS の大部分が飲料用エタノール工場で生産されていることを示している。Li ら(2015)は、粗脂肪含量(乾物値)と使用した処理に基づいて中国産の DDGS を以下の 5 つのカテゴリーに分類している。

1. 脂肪含量が高い DDGS(粗脂肪 9.6~13.9%、13 試料)
2. トウモロコシ皮を添加したもの(粗脂肪 8.7 および 9.9%、2 試料)
3. 部分的に油を減らした DDGS(粗脂肪 6.6%、1 試料)
4. 胚芽の一部が除去された低脂肪 DDGS(粗脂肪 5.1%、1 試料)

5. 一般的な低脂肪 DDGS(粗脂肪 2.82~4.9%、8 試料)

この分類は、中国のエタノール工場で使用される製造工程には、米国における燃料用エタノール工場で使用されるものよりもはるかに多くのバリエーションがあり、部分的な油抽出という共通の特徴があることを示唆している。ただし、Li ら(2015)が収集した試料をみると、油抽出を行っているエタノール工場の割合がかなり多いことを示している。中国産 DDGS の粗脂肪含量(粗脂肪 5%未満、乾物値)は、米国産 DDGS に比べてはるかに低いことがうかがわれる。

Xue et ら(2012)は、山東省、吉林省、河北省で生産されたトウモロコシ DDGS 3 試料および玄米から生産された DDGS 1 試料と、米国産トウモロコシ DDGS 2 試料(従来型および高たん白質)を比較し、玄米 DDGS は、すべての試料中で粗脂肪および総エネルギー含量が最も低く、粗繊維の含有量が最も高かったとしている。中国産トウモロコシ DDGS では、従来の米国産トウモロコシ DDGS に比べて ADF(酸性デタージェント繊維)含量が高く、リジン含量が低かった。また、中国産トウモロコシ DDGS のリジンと CP(粗たん白質)比は 1.93%であって、米国産トウモロコシ DDGS (2.87%)より低かった。このことは、中国産 DDGS のリジン消化率が米国産よりも低いことを示唆している。この研究で評価された中国産 DDGS では、米国産 DDGS に比べて繊維含量が高く、総エネルギーおよびリジン含量が低いことは、中国における豚および家禽における配合量が低い主な原因となる。ただし、Xue ら(2012)によって評価された試料数は限られているものの、米国産の従来品のトウモロコシ DDGS の ME(代謝エネルギー、3,525 kcal/kg)は、中国産のトウモロコシ DDGS 3 試料(3,306 kcal/kg)より 219 kcal/kg 高いものの、両者の間には有意差がなかったとしている。さらに、中国産トウモロコシ DDGS のリジンの平均 SID(標準化回腸消化率)は 52%であり、米国産 DDGS(従来品; 57%、高たん白質; 60%)より低かった。

[生産工程と DDGS の色調の違い]

DDGS の色調は、輸出市場の一部のバイヤーにとって品質を判断する非常に重要な要素になっており、DDGS 供給源毎に品質と価値を識別するために使用されている。DDGS の色調は、いくつかの栄養成分および物理的特性と相関している。場合によっては、色調が

明るい DDGS は、リジン消化率が高く、キサントフィル含有量および最小限の脂質酸化を推測する可能性がある。一方、色調が暗い DDGS は、明るい色調のものに比べて他の栄養素の濃度が高くなる可能性がある。たとえば、DDGS を製造する際に、ジチラーズ・グレインへのジステラーズ・ソリュブルの添加量を高めると、エネルギー、粗脂肪およびミネラル含量が高くなり、ジステラーズ・ソリュブルの量が少ない明るい色調のものに比べて、CP とアミノ酸の含量ならびに消化率への影響が最小限になる。さらに、濃い色調のものでは、家禽におけるリンの相対的な生物学的利用率が高いともいわれている。DDGS の粒子サイズ、水分含量、その他の物理的特性も色調と相関関係があるが、これらの関連は、飼料製造と栄養学的観点からの評価はより困難である。

数年前、一部の DDGS の売り手と買い手は、色調評価カード(図 1)を使用した主観的な評価システムを開発し、色調で DDGS を区別した。



図 1. DDGS 色調評価カードの例

この DDGS 色調評価カードは現在も市場で使用されているが、実際の DDGS の色調評価の解釈が異なること、主観的すぎて売り手と買い手との議論が頻繁に行われるため、多くのマーケティング担当者が使用を中止している。その結果、米国の供給者と海外(特にアジア諸国)の買い手の間で現在行われている多くの契約には、色の量的測定(L* 明度または暗さなど)の最小保証が含まれている。DDGS の色調の明暗を区別するために現在使用されている最小保証は、ハンター値 L* 50 以上である。ただし、米国産 DDGS は、色調に関わらず様々な国に輸出され続けているが、一部の市場では明るい色調の DDGS の保証が必要となっている(L* 50 以上)、販

売する DDGS の L*が 50 以上であることを保証できるマーケティング担当者には、かなりの価格プレミアムがある。

米国と中国のエタノール工場の間で使用している生産および乾燥工程が異なっていることも、色調の違いに影響している(図2)。米国産 DDGS は通常、明るい黄金色であり、中国の買い手は、色調がたん白質とアミノ酸の消化率と主観的な指標と考えていることから、この色調を好んでいる、実際、中国の買い手にとって色調は非常に重要であり、多くの場合、契約において L*の最少保障(50 以上)が要求されている。中国産 DDGS は色調が濃くなる傾向があるため、栄養価が低くなる。

図 2.米国産(左)と中国産(右)の色調比較



Jie ら(2013)は、中国国内 11 省のエタノール工場からトウモロコシ DDGS 28 試料を入手し、を取得し、米国産トウモロコシ DDGS 2 試料について、HunterLab 比色計を用いて色調の明度(L*)、赤色味(a*)および黄色味(b*)を測定している。L*(カラースコア:0~100)は低いほど暗色を示し、L*および b*は、a*より栄養価の一般的な指標として使用されているリジン含量およびアミノ酸消化率との相関が高い。中国産 DDGS 28 試料の L*は 30.9~59.5、a*は 14.6~27.7、b*は 35.3~59.8 の範囲であった。この調査で用いた米国産 DDGS は 2 試料のみであったが、L*は 54.6 および 57.3、a*は 18.4 および 19.7、b*は 53.3 および 55.3 であった。中国産 DDGS 28 試料のうち、L*が 50 を超えていたのは 5 試料のみであったのに対して、米国産 DDGS の L*はいずれも 50 以上であり、色調が明るかった。さらに、米国産 DDGS の b*値は 53.3 および 55.3 であり、b*値が 50 を超える中国産 DDGS は 5 試料のみであった。Uriolaet ら(2013)は、米国産トウモロコシ DDGS 34 試料の平均 L*は 52.7 であり、L*値が 62.5

に達するものもあることを報告している。このことは、中国産 DDGS の大部分と米国産 DDGS におけるもう 1 つの際立った差異は、米国産 DDGS は一般的に色調が明るく、たん白質を構成するアミノ酸が消化しやすいということである。

DDGS の栄養成分、品質の安定性、マイコトキシン、飼料価値

栄養成分組成と品質の安定性

一般的に、米国産 DDGS の総エネルギーおよび栄養素含量は中国産より安定している。これは、米国の農場において、その農場と契約して飼料の設計を行う栄養士は配合設計の際に控えめな数値を使用する傾向にあることから、より高価な原料と DDGS を大幅に置換して、全体的な飼料コストを削減し、エネルギーと栄養成分過給のリスク軽減を図っているためである。

栄養成分組成の違いを客観的に比較するために、最近発表された中国産の DDGS に関する 3 つの報告に記載されているデータを取りまとめて表 1 に示した。さらに、米国産トウモロコシ DDGS の栄養成分組成は、9 つの公開されたレポートおよび Kerr ら(2013)のデータを用いて表 1 に示した。なお、すべてのデータは乾物値で表示している。

粗脂肪、繊維およびたん白質の含量は、全体的な ME 価に寄与しており、CP 含量は、不正確ではあるがアミノ酸消化率の指標となる。エネルギー、アミノ酸およびリンは、飼料中で最も高価な栄養成分である。DDGS およびその他の飼料原料は、水分、CP、粗脂肪、粗繊維含量により価格設定がなされて取引され、豚および家禽用飼料は、ME、消化可能なアミノ酸(特にリジン)および可消化リンの推定値を用いて設計される。中国で用いられている DDGS の大部分は、豚および家禽用飼料に使用されている。したがって、ME、可消化アミノ酸(特にリジン)および可消化リン含量を製品間で比較し、実用的な価値がどのように違うかを判断する必要がある。中国産 DDGS の平均水分含量は、米国産 DDGS よりも低い傾向があり、原産地間での平均 CP、粗脂肪および灰分含量の差異はそれほど大きくない(表 1)。

ただし、中国産 DDGS ソースにおける粗脂肪含量の範囲(変動)は、米国産 DDGS より大きい。さらに、米国産

DDGS の NDF 含量は、中国産 DDGS より低く、変動が少ない。中国産 DDGS の繊維含有量は、米国産 DDGS に比べて変動が大きく、粗脂肪含量の変動が小さいことから、中国産 DDGS の豚および家禽に対する ME 価は、米国産 DDGS より低く、変動しやすいことが示唆されている。これは、米国産トウモロコシ DDGS の豚における ME 価 (Kerr ら、2013) と中国産 DDGS の豚における ME 価 (Xue ら、2012; Li ら、2015) を比較することで実証できる。Kerr ら (2013) は、米国産 DDGS 15 試料の範囲 (3,266 - 3,696 kcal/kg) は、Xue ら (2012) の報告 (3,047 - 3,549 kcal/kg) および Li ら (2015) の報告 (2,955-3,899 kcal/kg) より狭い。

中国産 DDGS のでん粉含量は、米国産 DDGS よりも大幅に高く (表 1)、エタノール発酵が不完全であることを示している。でん粉は、DDGS の乾燥工程中にリジンと化学結合を起こして、リジンの消化性が低下する。実際、中国産トウモロコシ DDGS のリジンの SID は 52% (Xue ら、2012) であり、米国産の従来型および高たん白質 DDGS (57 および 60%) より低い。この相違は、米国産トウモロコシ DDGS のリジンの平均 SID が 63% であることを示す 9 つの公表文献値の要約によっても確認できる。

中国産 DDGS のリン含量も、米国産 (Kerr ら、2013) に比べてはるかに低く、変動が大きい (Xue ら、2012; Li ら、2015)。これらの結果は、中国のエタノール工場の多くは、DDGS を製造する前に粗粒されたトウモロコシに添加する濃縮ジスチラーゼ・ソリュブル (リン含有量が高い) の量が少ないことを意味している。豚および家禽用飼料において、リン含量の違いは、米国産 DDGS が中国産 DDGS に比べて有意性があることを示している。

リジンは、豚および家禽用飼料における第 1 制限アミノ酸であり、すべてのアミノ酸の中で、トウモロコシ・大豆粕主体の飼料で欠乏する可能性が最も高い。したがって、リジン含量とその消化率は、様々な DDGS の栄養価の重要な指標となるが、中国産と米国産 DDGS の間でリジン含量と消化率は大きく変動している。中国産と米国産 DDGS の間におけるリジン消化率を比較するために利用できるデータは限られているが、米国産 DDGS のほうがリジン消化率が優れているものと思われる (Xue ら、2012)。

[マイコトキシン含有量の違い]

飼料原料中のマイコトキシンは、中国の飼料産業および

畜産業界において継続的な懸念事項であり、主要な問題である。中国の穀物農家は、穀物乾燥設備や適切な穀物貯蔵庫にアクセスできることが非常に少ないため、汚染された飼料原料が供与された場合に家畜の健康および生産性に重大な悪影響を及ぼす可能性があるマイコトキシン含量が高くなる可能性が高い。米国および世界の他の地域で生産されているトウモロコシやその他の穀物でも、成長期や収穫時の気候、保管条件によってはマイコトキシンが含まれている可能性はあるが、汚染の割合や含量は、中国で生産されている穀物や DDGS よりもはるかに低い。

DDGS の配合率の主な制限要因の 1 つは、マイコトキシン含量があげられる。マイコトキシンは発育成績の低下と健康への悪影響を引き起こすため、飼料設計の際には、マイコトキシンの総含量を最小限に抑えるよう努めている。米国産 DDGS におけるマイコトキシン汚染と含量は、中国産 DDGS よりもはるかに低い。Biomim (2014) は、世界 50 か国以上から 4,218 の飼料原料を収集し、マイコトキシン含量を分析している。北米、南米、中東、アフリカの試料に比べて、アジアから収集された飼料原料では、ほとんどのマイコトキシンが最も高い含量を示しており、全試料の 65% で複数のマイコトキシンが含まれていた。Li ら (2014) は、中国の北京地域で生産された飼料原料 55 試料 (DDGS 17 試料を含む) と豚用配合飼料 76 試料の評価を行っている。その結果、DDGS がすべての成分の中で最も深刻にマイコトキシンに汚染されており、サンプルの 6% がアフラトキシン B₁ (50 ppb)、88% がデオキシニバレノール (1,000 ppb)、41% がゼアラレノンの中国の規制値を超えていた。別の研究 (Guan ら、2011) では、中国のさまざまな地域から配合飼料および飼料原料 (中国産 DDGS 5 試料を含む) 83 試料が収集している。その結果、全試料のすべてでマイコトキシンが検出され、配合飼料 6 試料のマイコトキシンの濃度は、すべての原料の平均値より高かった。

近年、米国産 DDGS のマイコトキシン汚染に関する 2 つの広範な調査結果が発表されている (Zhang ら、2009; Khatibi ら、2014)。Zhang ら (2009) は、2006 年から 2008 年の間に米国のエタノール工場 20 か所および輸出コンテナ 23 か所から、計 235 試料の DDGS を収集しており、以下の結果を得ている

1. DDGSには、FDAガイドラインを超える濃度のアフラトキシンまたはデオキシニバレノールは含まれていなかった。
2. いずれの DDGS にも、乳牛、肉牛、豚、家禽および養殖魚用飼料に使用するための FDA ガイドラインを超える濃度のフモニシンは含まれておらず、馬およびウサギ(フモニシンに最も敏感な種)用飼料で使用するための最大レベルを超える濃度のフモニシンを含んでいたのは、全試料の10%だけだった。
3. 検出限界を超える T-2 トキシンを含む試料はなく、ゼアラレノン、ほとんどの試料で検出限界以下であった。
4. DDGS の輸出コンテナにおけるマイコトキシンの増加はなかった。

Khatibi らが実施した別の DDGS マイコトキシン調査(2014)では、米国の12州にあるエタノール工場78か所からトウモロコシ DDGS 141 試料を収集し、DON(デオキシニバレノール)、15-ADON(15-アセチルデオキシニバレノール)、3-ADON(3-アセチルデオキシニバレノール)、NIV(ニバレノール)および ZON(ゼアラレノン)濃度を調査している。

アメリカのトウモロコシでは、2011年に異常に高いフザリウム属のカビの発生があったが、トウモロコシの成長期に悪天候が続く年にまれに発生する可能性がある。DDGSについては、15-ADON、3-ADON および NIV を評価した報告はこれ以外にない。全試料の69%ではDONは検出限界以下であり、DON が検出された試料中含量は1~5 ppb であり、全試料の5%のみがFDAによる豚の勧告レベルを超えていた。15-ADONは全試料の85%で検出限界以下であり、3-ADON または NIV は全試料で検出限界以下であった。また、ZON が検出されたのは全試料中で19%のみであった。

これらの研究結果は、米国産 DDGS におけるマイコトキシンのリスクと含量は中国産 DDGS に比べてはるかに低いことを示している(Guan ら、2011; Li ら、2014)。この結果、米国産 DDGS は、中国産 DDGS よりも高い配合率での使用が可能であり、全飼料中のマイコトキシン含

量が推奨レベルを超えるリスクを最小限に抑えることが出来ることを示している。

飼料価値の違いと飼料における DDGS の使用

中国で使用されている DDGS の大部分は、豚および家禽用として消費されている。米国産 DDGS は、特に豚、家禽、乳牛に対して中国産 DDGS に比べていくつかの利点がある。中国産 DDGS はマイコトキシン汚染率と含量は米国産 DDGS よりも高いため、米国産 DDGS を用いることで、家畜・家禽の成績と健康および牛乳中のマイコトキシン汚染のリスクを大幅に低減することが出来る。さらに、米国産 DDGS は一般にエネルギーと栄養成分の変動が少なく(トウモロコシが使用される主な原料であり、生産工程は一般的に各エタノール工場間で類似している)、リジンの消化率とリンの含有量が高いため、飼料を配合する際に中国産 DDGS よりも価値がある。

Jewison and Gale (2012)は、様々な畜種用飼料における配合割合の推定値を取りまとめており(表2)、中国における畜種別の DDGS 総消費量は乳牛では10%、豚では20%、家禽では60%、水産養殖動物では10%と推定している。

中国産 DDGS の潜在的な飼料安全リスク

近年中国製品で発生した粉ミルクやその他の食品におけるメラミン汚染スキャンダルにより、中国製の飼料や食品安全に関して世界的な懸念と懐疑論が広がっている。Gale and Buzby (2009)は、中国政府による食品安全基準の施行が不十分なこと、農薬の大量使用および広範な環境汚染のために、中国の食品における安全リスク管理が難しいことを示している。その結果、DDGS と他の飼料原料の原産国を識別する技術が開発されている(Tena ら、2015)。NIR を利用すると、中国産 DDGS と欧州および米国産のプールされた DDGS とを区別できる優れた結果が得られている(Tena ら、2015)。これは、欧州と米国で生産された DDGS と中国産 DDGS との間には組成と品質に明確な違いがあることを示唆している。

表 1. 中国産および米国産トウモロコシ DDGS の栄養成分組成の比較(乾物値)

分析項目	Jieら(2013) 中国産トウモ ロコシDDGS	Xueら(2012) 中国産トウモロ コシDDGS	Lieら(2015) 中国産トウモ ロコシDDGS	米国産トウモロコシ DDGSの要約 ¹	Kerrら(2013) 米国産トウモ ロコシDDGS
水分 %	6.49 - 12.1 (8.5)	10.7 - 10.9 (10.9)	9.6 - 13.5 (11.4)	6.6 - 14.7 (11.2)	10.0 - 15.2 (12.4)
CP %	25.4 - 32.3 (29.6)	26.4 - 32.0 (28.8)	28.5 - 36.8 (32.2)	27.2 - 40.8 (30.8)	27.7 - 32.7 (30.5)
粗脂肪 %	1.5 - 16.2 (9.3)	9.2 - 12.6 (10.5)	2.8 - 13.6 (8.6)	4.6 - 14.1 (10.6)	4.9 - 13.2 (9.7)
NDF %	45.0 - 65.8 (54.3)	43.4 - 49.5 (46.4)	31.0 - 46.6 (37.1)	30.2 - 49.6 (38.6)	28.8 - 44.0 (35.4)
灰分 %	2.1 - 8.4 (5.5)	ND ²	2.9 - 9.1 (5.4)	1.78 - 6.6 (4.4)	4.3 - 6.1 (5.1)
でん粉 %	ND	ND	5.3 - 16.3 (11.6)	ND	0.84 - 3.89 (2.2)
リン %	ND	0.25 - 0.55 (0.39)	0.33 - 1.01 (0.75)	ND	0.71 - 0.91 (0.84)
リジン %	ND	0.46 - 0.67 (0.56)	0.74 - 1.08 (0.91)	0.55 - 1.36 (0.94)	ND
SID ³ リジン %	ND	0.19 - 0.29 (0.25)	ND	0.22 - 0.92 (0.59)	ND

¹ Fastinger and Mahan (2006); Steinら (2006); Pahnら (2008); Steinら (2009); Urriolaら (2009); Jacelaら (2010); Almeidaら (2011); Kimら (2012); Soaresら (2012) から得たデータ

² ND = データなし

³ SID = 標準化された回腸可消化物

表 2. 中国と米国における乳牛、肉牛、豚および家禽用飼料における DDGS 配合率 (Jewison and Gale, 2012)

畜種	中国	米国
乳牛	20 to 30 percent	10 to 20 percent
肉牛	No Data Available	10 to 40 percent
豚	10 to 12 percent	10 to 50 percent
家禽	5 to 10 percent	5 to 10 percent

米国産 DDGS の世界市場における需要

米国産 DDGS の輸出量は 2007 年以降増加している。エタノールおよび DDGS の生産量も増加しており、31 以上の国に DDGS が輸出されている。米国産 DDGS の主要な輸出先はメキシコ、アジア諸国、カナダ、トルコとなっている。この世界的な需要の伸びは、米国産 DDGS が 5 大陸の多くの国において、他の代替飼料原料に比べて品質と優れた栄養価が魅力的で价格的に競争力がある飼料原料であることを示している。

DDGS は高エネルギーで適度な蛋白質飼料原料であるため、大豆粕の価格よりもトウモロコシの価格に近い傾向にある。米国産 DDGS の価格は世界市場に基づいており、CP と粗脂肪含量の最低保証はない。歴史的に、米国産 DDGS の価格は、たん白質と脂肪含量の合計「プロ-ファット」の最低保証に基づいて設定されていた。しかし、DDGS 製造時に粗トウモロコシ油を部分的に抽出すると、たん白質含量は粗脂肪含量の減少量と同程度には増加しないため、「プロ-ファット」は成立

しにくくなる。したがって、多くの買い手と売り手は、CP と粗脂肪に関して、個別の最低保証値に基づいた価格設定を行っている。

中国の関税および税制は、他の飼料原料に比べて DDGS の輸入量に影響を与える重要な要素となっている (Jewison and Gale, 2012)。2012 年時点で、DDGS は輸入割当の対象ではないため、VAT (付加価値税) が免除されており、比較的低い関税 (5%) が課されていた。これに対して、トウモロコシの輸入は関税割当制度によって規制されており、1%の関税と 13%の VAT が課せられている。

中国の飼料原料の買い手は原料価格に非常に敏感である。近年、中国が購入した大量の米国産 DDGS は、中国のトウモロコシと比較して価格が安価であったことが原因である可能性があるが、中国産 DDGS と比べて米国産 DDGS の品質とその安定性、栄養価がより大きなウエイトを占めているように思われる。例えば、Jewison and Gale (2012) は、2011 年 6 月から 12 月における中国が輸入した米国産 DDGS の平均価格は、国内の中国産

トウモロコシより19%、大豆粕より35%低いことを示している。ただし、この期間中、中国国内における中国産 DDGS (中国北東部) の価格は、輸入された米国産 DDGS の価格より13%安かった。このことは、中国の DDGS の買い手は、中国産 DDGS と比べて品質とその安定性が高いため、輸入された米国産 DDGS に対してプレミアム価格を支払う用意があることを示している (Jewison and Gale, 2012)。中国の買い手は、中国産 DDGS より色調が明るく黄金色の米国産 DDGS を好んでいる。これは、飼料価値が高く、顧客の受入れに関する問題が少ないためと考えられる。

飼料製造に用いる原材料の需要が高いため、中国で生産された DDGS が輸出されたとしてもごくわずかである。トウモロコシの生産と供給は中国北東部で最も盛んであり、中国国内の DDGS の大部分がこの地域で生産されている (Jewison and Gale, 2012)。ただし、豚および家禽生産と飼料製造は、中国の南部地域で盛んであるため、これらの原料を消費する地域に輸送するために高いコストが発生している。その結果、中国南部 (広東省など) のトウモロコシ価格は、中国東北部のトウモロコシ価格より12~15%高くなっている (Jewison and Gale, 2012)。したがって、中国南部は、輸入された米国産 DDGS を使用する主要な地域となっている。輸入された米国産 DDGS は、中国内部への輸送コストが発生するため、港湾直近の地域で多く使用される傾向がある。このため、中国において生産される DDGS は、エタノール工場近隣の地域でより多く使用されている。

引用文献

- Almeida, F. N., G. I. Petersen, and H. H. Stein. 2011. Digestibility of amino acids in corn, corn coproducts, and bakery meal fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 89: 4109-4115.
- Biomim. 2014. Mycotoxins: Science and solutions. *Biomim magazine*, April, 2014.
- Fabiosa, J., J. Hansen, H. Matthey, S. Pan, and F. Tuan. 2009. Assessing China's potential import demand for distillers dried grain: Implications for grain trade. *CARD Staff Report 09-SR 104*, December, 2009.
- Fastinger, N. D., and D. C. Mahan. 2006. Determination of the ileal amino acid and energy digestibilities of corn distillers dried grains with solubles using grower-nisher pigs. *J. Anim. Sci.* 84: 1722-1728.
- Gale, F. 2015. Development of China's feed industry and demand for imported commodities. *USDA-ERS Outlook Report FDS-15K-01*, November 2015.
- Gale, F., and J.C. Buzby. 2009. Imports from China and food safety issues. *ERS Economic Information Bulletin* 52, July, 2009.
- Guan, S., M. Gong, Y. Yin, R. Huang, Z. Ruan, T. Zhou, and M. Xie. 2011. Occurrence of mycotoxins in feeds and feed ingredients in China. *J. Food Ag. Env.* 9:163-167.
- Ingledew, W.M., D.R. Kelsall, G.D. Austin, and C. Kluhspies. 2009. *The Alcohol Textbook*, 5th Ed., Nottingham University Press, Nottingham, U.K.
- Jacela, J. Y., H. L. Frobose, J. M. DeRouchey, M. D. Tokach, S. S. Dritz, R. D. Goodband, and J. L. Nelssen. 2010. Amino acid digestibility and energy concentration of high-protein corn dried distillers grains and high-protein sorghum dried distillers grains with solubles for swine. *J. Anim. Sci.* 88: 3617-3623.
- Jewison, M., and F. Gale. 2012. China's market for distillers dried grains and the key influences on its longer run potential. *USDA-ERS Outlook Report FDS-12g-01*, August 2012.
- Jie, Y.Z., J.Y. Zhang, L.H. Zhao, Q.G. Ma, and J. Cheng. 2013. The relationship between the metabolizable energy content, chemical composition and color score in different sources of corn DDGS.
- Kerr, B.J., W.A. Dozier, and G.C. Shurson. 2013. Effects of reduced-oil corn distillers dried grains with solubles composition on digestible and metabolizable energy value and prediction in growing pigs. *J. Anim. Sci.* 91:3231-3243.
- Khatibi, P.A., N.J. McMaster, R. Musser, and D.G. Schmale III. 2014. Survey of mycotoxins in corn distillers' dried grains with solubles from seventy-eight ethanol plants in twelve states in the U.S. in 2011. *Toxins* 6:1155-1168.
- Kim, B. G., D. Y. Kil, Y. Zhang, and H. H. Stein. 2012. Concentrations of analyzed or reactive lysine, but not

- crude protein, may predict the concentration of digestible lysine in distillers dried grains with solubles fed to pigs. *J. Anim. Sci.* 90: 3798–3808.
- Li, P., D.F. Li, H.Y. Zhang, Z.C. Li, P.F. Zhao, Z.K. Zeng, X. Xu, and X.S. Piao. 2015. Determination and prediction of energy values in corn distillers dried grains with solubles with varying oil content for growing pigs. *J. Anim. Sci.* 93:3458–3470.
- Li, X., L. Zhao, L., Y. Fan, Y. Jia, L. Sun, S. Ma, C. Ji, Q. Ma, and J. Zhang. 2014. Occurrence of mycotoxins in feed ingredients and complete feeds obtained from the Beijing region of China. *J. Anim. Sci. Biotech.* 5:37–45.
- Pahm, A. A., C. Pedersen, D. Hoehler, and H. H. Stein. 2008. Factors affecting the variability in ileal amino acid digestibility in corn distillers dried grains with solubles fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 86: 2180–2189.
- Soares, J. A., H. H. Stein, V. Singh, G. S. Shurson, and J. E. Pettigrew. 2012. Amino acid digestibility of corn distillers dried grains with solubles, liquid condensed solubles, pulse dried thin stillage, and syrup balls fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 90: 1255–1237.
- Stein, H. H., S. P. Connot, and C. Pedersen. 2009. Energy and nutrient digestibility in four sources of distillers dried grains with solubles produced from corn grown within a narrow geographical area and fed to growing pigs. *Asian–Australas. J. Anim. Sci.* 22: 1016–1025.
- Stein, H. H., M. L. Gibson, C. Pedersen, and M. G. Boersma. 2006. Amino acid and energy digestibility in ten samples of distillers dried grain with solubles fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 84: 853–860.
- Tena, N., A. Boix, and C. von Holst. 2015. Identification of botanical and geographical origin of distillers dried grains with solubles by near infrared microscopy. *Food Control* 54:103–110.
- Urriola, P. E., D. Hoehler, C. Pedersen, H. H. Stein, and G. C. Shurson. 2009. Amino acid digestibility of distillers dried grains with solubles, produced from sorghum, a sorghum–corn blend, and corn fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 87: 2574–2580.
- Urriola, P.E., L.J. Johnston, H.H. Stein, and G.C. Shurson. 2013. Prediction of the concentration of standardized ileal digestible amino acids in distillers dried grains with solubles. *J. Anim. Sci.* 91:4389–4396.
- Xue, P.C., B. Dong, J.J. Zang, Z.P. Zhu, and L.M. Gong. 2012. Energy and standardized ileal amino acid digestibilities of Chinese distillers dried grains, produced from different regions and grains fed to growing pigs. *Asian–Aust J. Anim. Sci.* 25:104–113.
- Zhang, Y. J. Caupert, P.M. Imerman, J.L. Richard, and G.C. Shurson. 2009. The occurrence and concentration of mycotoxins in U.S. distillers dried grains with solubles. *J. Agric. Food Chem.* 57:9828–9837.

9章: DDGS の取扱いと保管に関わる物理・化学的特性

はじめに

DDGS は保管および取扱いの際に、他の原料に比べて注意を要する特異的な物理・化学的特性がある。家畜、家禽、水産養殖動物用飼料にDDGSを利用する場合、原料の取扱い、輸送、保管および製造のいくつかの段階で、鉄道車両、コンテナ、バルク船の荷降ろしが困難になる/従来のフィーダースクリューとビンを用いた DDGS の移動と保管が困難になる/ペレットの品質と生産性の悪化(17章、22章、25章で詳述)/配合飼料の栄養価の根切れリスクを回避するための栄養成分のバラツキの管理(7章、21、24章で詳述)などの課題が生じる。

原料の適切な保管は、その栄養価を維持し、変敗を防ぐために不可欠である。入手時の原料の状態は、これを保管している間の品質維持に影響を与える最も重要な要素であり、水分含量、相対湿度および温度の影響を受ける(Mills, 1989)。原料中の水分は、時間経過とともに粒子内および粒子間で最終的には気相と平衡となり、条件によっては、カビや他の有害微生物の増加につながる可能性がある(Mills, 1989)。穀物の最大許容水分濃度が確立されており、穀物の種類によって保管期間は異なる(Mills, 1989)。

さらに、カビの生育を防ぐための相対湿度の上限は70%未満であり、微生物の生育を防ぐ上限は90%未満、昆虫発生を防ぐ上限は60%未満である(Mills, 1989)。ただし、相対湿度は、環境中の水分量と気温との相互作用を受ける。穀物と原料がビン内で曝気されている場合、高温条件下でも数か月保存することが出来る。温度と水分含量は、穀物または原料の酵素的、生物学的活性の程度を決定し、保存中の塊の表面と内部の温度差は、水分移動によるカビの生育のリスクを増加させる可能性がある(Mills, 1989)。残念なことに、DDGS の品質を維持し、長期間または様々な気候条件下で、変敗を防ぐための最適な保管条件に関する研究は行われていない。この結果、適度な保管温度と湿度のもとでは、DDGS の水分含量を12%未満まで乾燥させることが許容できる一般的な方法となる。

貯蔵ビンの割り当て

配合飼料工場で新しい原料を初めて使用する際には、その原料を保管する適切なスペースを特定または構築する必要がある。配合飼料工場が新しい原料を保管するための空スペースを持っていることは稀である。もっとも簡単な解決策は、既存の原料の使用を中止して新規原料用のビンを確認することであるが、一連で流れている飼料製造のプロセスを中断せずに行うことは非常に困難となる(Behnke, 2007)。ビンの容量、ホッパー構成およびフィーダースクリューの設計が新しい原料に適していない場合には、他のオプションを検討する必要性が生じる(Behnke, 2007年)。貯蔵ビンへの原料の割り当てを決定する際に最も重要な考慮事項の1つは、毎日または毎月の使用率と使用頻度を計算するために製造しているすべての配合飼料中の予想配合率を決定することである(Behnke, 2007)。次いで、重要なのは、原料のかさ密度や流動特性などの物理的特性に関連している。

DDGS のブリッジング、ケーキング、流動性

DDGS の取扱い上の最大の課題の1つは、鉄道車両、コンテナおよびバルク船から DDGS を積降ろす際に、ブリッジング、ケーキングおよび流動性が低下する傾向があることである。流動性は、「隣接する粒子間またはコンテナの壁面に沿った粒子の大部分の相対的な動き」と定義されている(Pelig, 1977)。残念ながら、一部の DDGS では流動性と処理が不十分である(Bhadra et al, 2008)。これにより、輸送用の鉄道車両の日常的な使用が妨げられ、バルク船およびコンテナ用に特別に設計された積降ろし装置の開発につながり、バルク保管コンテナのブリッジにより家畜・家禽用飼料への使用が制限されていた。

多くの要因がバルク原料の流動性に影響を及ぼすが(Pelig, 1977)、流動性を適切に説明する単一の測定はない(Bhadraら, 2008)。DDGS の水分含量と環境中の相対湿度は、ブリッジング、ケーキングおよび流動性の低

下の主な要因ではあるが、粒子サイズ、乾燥前にジスチラーズ・グレインに添加されたジスチラーズ・ソリュブルの割合、乾燥機の温度、乾燥機出口での水分含量などの他の要因も影響する(Ganesan ら、2008a、b、c)。長期保管中のカビの生育による変敗を防ぐために DDGS の水分含量は一般に 10～12%に設定されているが、DDGS は吸湿性があり、高湿度条件下で長期間保管すると水分含量が徐々に高まる可能性があり(Ganesan ら、2007)、吸湿性は、輸送、保管中のブリッジング、ケーキングおよび流動性の低下につながる可能性がある(Rosentrater、2007)。

エタノール工場では DDGS の貯蔵容量が限られているため、乾燥機から出てから数時間以内(水分が平衡化する前)に輸送船に積み込まれることがある。このようなことが起こると、DDGS は固化し、トラック、鉄道車両、コンテナ内で固い塊となって、荷降ろしが非常に困難となる。ただし、温かい DDGS を冷却して、荷重が加わる前に水分を平衡化すると、流動性が大幅に向上する。今日、ほとんどのエタノール工場では、ブリッジングとケーキングによる荷降ろし中の鉄道車両の損傷を防ぐために、出荷前に最低 24 時間の「キュアリング」または水分平衡を設けている。理想的には、5～7 日間 DDGS を置いておくと、完全に水分が平衡化し、冷却された固形物中に形成された液体の架橋が壊れ、取扱い上の困難を最小限に抑えることが出来る(Behnke、2007 年)。残念ながら、エタノール工場の大部分は、連続運転を行っていることから、貯蔵容量は 2～3 日分しかないため、水分平衡を適切にするために 5～7 日間貯蔵することは出来ない。

バルクの塊の水分含量と周囲環境の相対湿度との平衡関係は、吸着等温線の影響を受ける。収着等温線は、特定の湿度条件、特定の温度条件で対応する水分量を示している。したがって、保管環境の相対湿度が増加すると、吸湿量が増加し、粒子間に液体架橋が形成される(Mathlouthi and Roge、2003)。湿度が高い条件下での吸湿(材料の外側または内側の表面に水を保持する機能)および水分の蒸散(表面からの、または表面からの水の放出)は複雑であり、原料の炭水化物、糖、たん白質、繊維、ミネラル含量に影響を受ける(Chen、2000)。DDGS において、この関係を理解することは、輸送および保管中の水分含量および相対湿度レベルを決定する上で重

要である。

Kingsly and Ileleji(2009)は、相対湿度が 60%に達すると、DDGS 中で液体架橋形成が発生することを示している。相対湿度 80%では、DDGS の湿分飽和は最大となり、相対湿度 100%では吸湿によって形成された液体架橋が硬化し、湿度が低下するとブリッジングにつながった。この結果は、輸送および保管中の相対湿度の増加により DDGS の粒子間の不可逆的なブリッジングが引き起こされ、粒子の凝集、ケーキングおよび流動性の低下につながることを示している。

DDGS のペレット化は、かさ密度と流動性を改善するためにいくつかのエタノール工場が使用を考えた別のアプローチである。カンザス州立大学の研究者は、DDGS のペレット化の容易さ、物理的特性および流動特性について、様々なコンディショニング温度とダイ径に関して評価を行い、ペレット化条件でのほぼすべての組み合わせが DDGS の流動性を改善することを示している(Behnke、2007)ただし、このアプローチは、いくつかの理由により、米国のエタノール業界では採用されていない。すなわち、高価格のボイラーとペレットミルを購入、設置、運用する必要があるため、既存のエタノール工場への追加のコストが必要、操作作業者のトレーニングと人件費の追加、新たな保管スペースの追加が必要となる点である。さらに、ほとんどの DDGS 利用者は、ペレット化された DDGS の購入に消極的である。なぜなら、他の「増量材」を混入させていると感じる可能性があること、ペレット化工程中の熱処理によりアミノ酸などの栄養成分の消化率が低下する可能性があること、飼料工場において配合飼料を製造する際に再粉碎する追加コストが発生するためである。

油脂含量が DDGS の流動性に及ぼす影響

従来の高脂肪 DDGS(Rosentrater、2006)、中等度の DDGS(Ganesan ら 2009)および低脂肪 DDGS(Saunders and Rosentrater、2007)の物理的特性が評価されている。Ganesanら(2009)は、粗脂肪含量を低下させた DDGS は従来の高脂肪 DDGS と比べて流動特性が改善されている可能性があることを示しているが、いずれも「凝集」性を持つと分類されており、粗脂肪含量に関わらず長期間

保存時にブリッジングおよびケーキングの問題が発生しやすいことを示唆している。彼らは、化学組成と粒子表面の形態（粗さ、サイズ、形状）が粗脂肪含量よりも DDGS の流動性に大きな影響を与える可能性があることを示唆している。

前述のように、より完全な水分平衡化のための保管日数の延長とペレット化は、取扱いと流動性を防ぐため実行可能なオプションではない。いくつかの新しい荷降ろし機器の設計が開発され、鉄道車両とコンテナからの DDGS の荷降ろしを容易にするために使用されている。例えば、鉄道車両のピットの上に設置した鋼製の槍（spear）を用いて、荷降ろし前に固結部分を破壊している。この方法は荷降ろしに要する時間短縮とはなるが、人件費と設置コストが増加する。さらに、多くの飼料工場は、DDGS の流動性の問題を回避するために、DDGS を保管する際に、ビンまたはサイロによる保管を避けている。平積み保管の主な利点は、流動性の問題に適切に対処でき、ビン建設に比べて設備投資が少ないことである。ただし、平積み保管ははるかに労働集約的であり、原料を移動するための前工程への輸送装置の設置、保管施設内の他の原料からの汚染のリスクの増加、飛散によるロス等を増加させる。

DDGS への流動化剤添加の影響

DDGS の流動性を改善するために試みられた別のアプローチとして、様々な流動化剤の添加があるが、その有効性を評価するための研究は少ない。Ganesan ら(2008a)は、実験室条件でジスチラーズ・グレインとジスチラーズ・ソリュブルの混合比が異なる DDGS に対する炭酸カルシウムの添加効果を評価しているが、流動性の改善効果はなかった。Johnston ら(2009)は、dry matter X-7(2.5kg/MT, Delst, Inc. Temecula, CA)、炭酸カルシウム(2%, ILC Resources, Inc., Des Moines, IA)またはクリノプチロライトゼオライト(1.25%, St. Cloud Mining Co., New York, Winston)の水分含量 9%または 12%の DDGS(平均粒子サイズは、584~668 μm)への添加効果を評価した。この試験では、エタノール工場において、それぞれの流動化剤を添加した DDGS をトラックに積込んで 250 km 走行し、60 時間駐車し、さらに 250 km 走行したのちの流動性を測定した。それぞれの流動化剤に関する試験は、2 か月の間に実施し、各 4 日間の野外気温お

よび相対湿度は 12.9~27.8°C および 34~67% だった。その結果、荷降ろし時の流量は、dry matter X-7(441 kg/分)に比べてクリノプチロライトゼオライト(558 kg/分)では改善されたように思われたが、いずれも、無添加の対照 DDGS(509 kg/分)および炭酸カルシウムで処理された DDGS(512 kg/分)と差がなかった。さらに、クリノプチロライトゼオライトを添加すると追加した場合の流動性スコア(1 =ブリッジなし、10 =完全にブリッジ)は 4.0 であって、無添加対照(6.0)、dry matter X-7(6.5)および炭酸カルシウム(5.5)に比べて流動性スコアが改善された。処理時の水分含量は、DDGS の流量の最も重要な予測因子(変動の 70%を説明)であった。この場合、水分含量が 9%から 1%増加するごとに、流量が 100 kg/分減少した。DDGS の水分含有量が増加すると、流動性が高まるという同様の結果が Ganesan ら(2008b)により報告されている。また、Ganesan ら(2008b)は、DDGS でハンター b^* 値(色の黄色味を示す)が高まると、流量も増加するが、流量の変動の 4%程度であることも報告している。これらの結果は、DDGS の流量を改善するための最も効果的な方策は、水分含量を 9%程度に低く保つことであり、dry matter X-7、炭酸カルシウムおよびクリノプチロライトゼオライトの添加は明らかな効果がない。

DDGS の積載重量と粒子分離に対するかさ密度の影響

鉄道車両やコンテナに DDGS を積込む際に、安定したかさ密度を維持することは、輸送コストを最小限に抑えるために順次積み込まれる鉄道車両やコンテナにおける個別の積載重量を安定させるために、マーケティング担当者および購入者にとって課題となっていた(Ileleji and Rosentrater, 2008)。かさ密度は DDGS の供給元によって異なっており、391~496 kg/m^3 (Rosentrater, 2006)および 490~590 kg/m^3 (Bhadra ら, 2009)の範囲であると報告されている。

Clementson and Ileleji(2010)は、鉄道車両の積載中に観察されるかさ密度の違いは、粒子の偏在が原因である可能性があることを示している。DDGS がトウモロコシ粒の構成成分に見られる様々なサイズ、密度、形態学的特性の粒子を含んでいることに起因している可能性がある(Ileleji ら, 2007)。粒子の分離は、DDGS の取扱いおよび重力排出時に発生することが示されている(Ileleji ら,

2007; Clementson ら、2009)。Clementson and Ileleje (2010)は、エタノール工場での鉄道車両の積載を想定して、ホッパーに DDGS を充填する際および排出する際のかさ密度の変動を調査し、その両方で主に粒子分離によりかさ密度が変動することを示している。彼らは、充填後、より小さく、より高密度の粒子がホッパーの中心部分に集中し、より大きく、より粗く、より密度が低い粒子がホッパーの側面に集中することを示している。この現象は、DDGS のトランスローディング中にかさ密度が変動するだけではなく、栄養成分分析時のサンプリング時にも考慮する必要がある。サンプリング場所によっては、最終的な分析結果に影響を与える可能性がある(Clementson ら、2009)。

DDGS ダイエットの流動性に対するビンの設計と粒子サイズの影響

ビンの設計

DDGS の流動性は、積込み、輸送、保管および飼料製造中の課題であるだけでなく、DDGS を配合した飼料を給与する養豚場における課題となる可能性がある。飼料の流動性が適切ではない場合、フィーダーへの飼料の供給速度が低下し、フィーダー内でのブリッジが原因となって、飼料の給与不足が発生する可能性があり、ストレスの増加、腸管の健康への影響や生育成績の低下などの可能性がある(Hilbrands ら、2016)。この問題は、豚用飼料への DDGS の配合量を 30%以上にしたい場合、特に豚の飼料効率改善のためにより粒子サイズが小さい飼料を給与する場合に、より大きな懸念となる。米国のビンの設計は、DDGS を配合した飼料の輸送性に重大な原因または潜在的な解決策になる可能性がある。Hilbrands ら(2016)は、3 種類の市販のビン(① 60 度の円錐を持つ垂鉛メッキ鋼の滑らかな側面で継ぎ目がないビン(Steel 60)、② 67 度の円錐を持つ垂鉛メッキの波形鋼製ビン(Steel 67)、③ 60 度の円錐を持つ白色ポリエチレン製のビン(Poly 60))における飼料の流動性を評価している。供試したビンの形状は、排出円錐の側面の傾斜の違いや、ビンの壁に用いる様々な材料をカバーするために選択されている。この試験では、トウモロコシ 55%、大豆粕 35%、DDGS 40%とビタミン・ミネラル・プレミックス 2%を配合した飼料を用いており、平均粒子

サイズが 736~1,015 ミクロンの範囲となるように粉碎している。試験は、夏季と秋季に 2 回実施した。夏季試験期間中の気温は 16.6~30.9°C、相対湿度は 39.4~100%、秋季試験期間中の気温は 2.9~23.7°C、相対湿度は 23.3~92.7%であった。ビンからの供給流量は、Steel 60 に比べて Poly 60 の方が速く、Steel 67 ビンからの供給流量は両者の中間だった(表 1)。ただし、興味深いことに、流量が最も遅かった Steel 60 では、放出中に飼料を流し続けるために必要なタップ数は最少だった。表 2 に示すように、すべてのビンで、パンプアジテーターを装着すると、装着しない場合より供給流量が増加したが、Poly 60 にパンプアジテーターを装着した場合に鋼製のビンに装着した場合よりも供給流量が増加した。ただし、最初の試験結果では、6 つのビンの組み合わせ間で、飼料の流量に影響を与えるために必要なタップ数に違いはなかった。これらの結果は、ビンの設計が DDGS を 40%配合した飼料の流量に影響を与えることを示している。Poly 60 は、評価された鋼製ビンと比較して最高の供給流量と最高の排出率を示し、パンプアジテーターの設置は、すべてのデザインのビンで供給流量が増加する。

粒子サイズの影響

DDGS では供給元による粒子サイズの変動が大きい(平均:660 μm 、標準偏差:440 μm (Liu, 2008))。DDGS の粒子サイズは、流動特性に影響するだけではなく(Ganesan ら、2008a, b, c)、ME(代謝エネルギー)価と栄養成分の消化率にも影響する(Mendoza ら、2010)。育成期の豚における ME 価と栄養成分消化率に対する DDGS の粒子サイズの影響をさらに評価するために、Liu ら(2012)は、3 種類の粒子サイズ(818 μm =粗い、594 μm =中、308 μm =細かい)に粉碎した同一の DDGS の ME 価と栄養成分消化率を測定した。併せて、彼らは DDGS を 30%配合した飼料の給与可能性についても評価している。予想通り、DDGS の ME 価は、粒子サイズが小さくなるにつれて高まった。平均粒子サイズが 25 μm 減少する毎に(818 から 308 μm の間)、ME 価は 13.5 kcal/kg(乾物値)高まった。ただし、DDGS の粒径は、窒素およびリンの消化率には影響しなかった。DDGS 30%配合飼料の流動性は、対照としたトウモロコシ・大豆粕主体飼料に比べて低下し、微粉碎 DDGS を配合した飼料で最も低かった(排出された安息角を測定することにより

決定している)。これらの飼料の流動性について、測定基準として用いた安息角により比較した結果、対照飼料

と、各粒子サイズの DDGS を 30% 配合した飼料との間で差はなかった。

表 1. ビンの設計とヘッドスペース内の温度および湿度が飼料の流動性に及ぼす影響(Hilbrands ら、2016 から改編)¹

試験1			
測定項目	Steel60	Poly60	Steel67
平均温度 °C	23.6	22.9	22.6
平均湿度 %	55.3	54.7	53.9
飼料の流量 kg/分	603 ^a	737 ^a	663 ^{ab}
タップ必要数 ²	3.8 ^a	7.5 ^b	6.0 ^b
流動性スコア ³	3.7 ^a	4.9 ^b	4.2 ^{ab}

¹ ab異符号間に有意差あり (p<0.05)

² 排出中に必要なビン側面をタップする回数

³ 流動性スコア (1=ブリッジがない、10=完全にブリッジ)

表 2. ビンの設計およびパンプアジテーターとヘッドスペース内の温度および湿度が飼料の流動性に及ぼす影響(Hilbrands et al、2016 から改編)¹

試験2						
測定項目	Steel60		Poly60		Steel67	
	攪拌機あり	攪拌機なし	攪拌機あり	攪拌機なし	攪拌機あり	攪拌機なし
平均温度 °C	20.1	20.4	19.6	19.5	19.0	18.8
平均湿度 %	58.3	65.0	65.0	61.3	61.1	63.8
飼料の流量 kg/分	827a	827a	831a	970b	807a	880a
タップ必要数 ²	2.1	2.0	5.2	2.5	3.2	2.0
流動性スコア ³	2.3	2.6	4.2	2.9	3.7	2.3

¹ ab異符号間に有意差あり (p<0.05)

² 排出中に必要なビン側面をタップする回数

³ 流動性スコア (1=ブリッジがない、10=完全にブリッジ)

表 3. 25°Cから 27°Cで貯蔵した穀物におけるカビの生育をサポートする相対湿度と水分含量(Montross ら、1999 から改編)

カビの種類	相対湿度 %	水分含量 %
<i>Aspergillus halophilieus</i>	68	12 – 14
<i>Aspergillus restrictus</i>	70	13 – 15
<i>Aspergillus glaucus</i>	73	13 – 15
<i>Aspergillus candidus</i>	80	14 – 16
<i>Aspergillus ochraeus</i>	80	14 – 16
<i>Aspergillus flavus</i>	82	15 – 18
<i>Aspergillus parssiticus</i>	82	15 – 18
<i>Penicillium spp</i>	80 – 90	15 – 18

DDGS 保管中のカビの生育とマイコトキシンの産生リスク

カビ毒を産生する真菌類は、畑で成長している収穫前の穀類および収穫後の穀類貯蔵中に発生する可能性がある(Suleiman ら、2013)。このため、真菌類はしばしば、

野外性真菌と貯蔵性真菌に分類される(Barney ら、1995)。野外性真菌類はトウモロコシ粒に感染し、収穫前の水分含量(22~33%)、相対湿度(80%以上)および幅広い温度範囲(10~35°C)でマイコキシンを生成する可能性がある(Williams and MacDonald、1983; Montross ら、1999)。ほとんどの野外真菌は保管中には生存することが出来ないが、一部の種は適切な保管条件下でも生育し続けることができる(Sanchis ら、1982)。貯蔵性真菌も圃場に由来しており、収穫前のトウモロコシ粒に感染した野外性真菌と入れ替わることができる(Reed ら、2007)。表 3 に示すように、菌の生存には、トウモロコシ粒の水分含量が 12%以上、相対湿度が 70%以上であることが必要である(Montross ら、1999)。フザリウム属、リゾプス属、およびティレチア属などの新たな真菌類も収穫後に付着する(Williams and MacDonald、1983; Barney ら、1995)。DDGS はトウモロコシ粒から製造されるため、これらの真菌が DDGS に存在する可能性がある。ただし、DDGS の固有の物理的および化学的特性により、上記の相対湿度および水分含量の条件がトウモロコシ粒と同様に適用されるかどうかはわかっていない。収穫中および収穫後のトウモロコシ粒の機械的損傷が真菌胞子の侵入をもたらす可能性があるため(Dharmaputra ら、1994)、DDGS はトウモロコシ粒よりもカビの成長の影響を受けやすく、破損したトウモロコシ粒と異物が貯蔵中の真菌の生育を促進する(Sone、2001)。DDGS 中のマイコキシンに関する推奨分析方法の詳細については 7 章を参照のこと。

DDGS 中の脂質の過酸化

豚およびブロイラーへの過酸化脂質給与の影響

トウモロコシ DDGS には、世界中で飼料に用いられている一般的な飼料原料中で粗脂肪含量が最も高い。脂質の過酸化反応は、熱、酸素、水分、遷移金属(Cu(銅)や Fe(鉄)など)によって引き起こされる複雑な化学連鎖反応であり、フリーラジカルは有毒なアルデヒドやその他の化合物に変換される(Shurson ら、2015)。DDGS に

含まれているトウモロコシ油は、主に多価不飽和脂肪酸(特に、リノール酸(C18:2)58%)で構成されていることから、過酸化を受けやすい(Frankel ら、1984)。脂質が比較的高温で加熱されると、アルデヒド、カルボニル、ケトンなどの二次脂質過酸化生成物が大量に生成される(Esterbauer ら、1991)。DDGS 製造時の乾燥温度は 500°Cにもなる可能性があり、脂質過酸化の影響を受けやすくなる。すべての酸化促進条件(熱、酸素、水分、遷移ミネラル)は、DDGS を生産するエタノール工場に存在しており、DDGS は輸送、保管および飼料工場での配合飼料の製造中にこれらの要因にさらされる可能性がある。したがって、製造後、輸送中および長期保管中の DDGS の過酸化の程度については、いくつかの懸念がある。

豚やブロイラーに対して、過酸化脂質を給与すると成長成績が低下し、酸化ストレスが増加することが示されている。Hung ら(2017)は、29 報の公表文献のデータについてのメタ分析を行い、増体日量が 5%、飼料摂取日量が 3%、飼料効率が 2%、血漿ビタミン E 濃度が 52% 低下し、血清中 TBARS(チオバルビツル酸反応性物質)値が 120%高まった。最近公表された Karr ら(2015)および Shurson ら(2015)のレビューでは、豚および家禽に対する過酸化脂質給与による生物学的な影響と過酸化脂質の測定結果の解釈に関する課題について包括的に述べられている。本ハンドブックの 24 章では、最近行われた高度に過酸化された DDGS を豚に給与した試験の結果を記載している(Song ら、2013; 2014; Hanson ら、2015a)。

供給源が異なる DDGS の脂質過酸化指標調査

Song and Shurson(2013)は、米国の 9 つの州のエタノール工場から入手したトウモロコシ DDGS 31 試料の脂質過酸化と色調を測定し、これらの値をトウモロコシと比較している(表 4)。過酸化物価と TBARS 値は、飼料業界で長年使用されている脂質過酸化の一般的な指標となっている。ただし、これらの過酸化指標には他のすべての過酸化測定と同様にいくつかの制限があり、脂質の過酸化の真の程度を常に反映しているわけではない

表 4. トウモロコシ DDGS 31 試料から抽出した油の脂質過酸化指標の概要と DDGS の色調(Song and Shurson、2013)

DDGS						
指標	トウモロコシ	平均	中央値	最小値	最大値	CV %
過酸化価 meq/kg脂質	3.1	13.9	11.7	4.2	84.1	97.5
TBARS ¹ , ng MDA equiv/mg oil	0.2	1.9	1.7	1.0	5.2	43.6
Color						
L* ²	83.9	54.1	54.9	45.2	58.1	4.6
a* ³	2.6	10.9	10.8	9.3	12.4	7.2
b* ⁴	20.0	37.3	37.5	26.6	42.7	8.8

¹ TBARS =チオバルビツール酸反応性物質

² L* =値が大きいほど明るい色を示す

³ a* =正の値が大きいほど、赤色味がより強い

⁴ b* =正の値が大きいほど、黄色味がより強い

表 5. DDGS の粗脂肪、抗酸化剤およびサンプリング日が温度 38°C、相対湿度 90%で保存した DDGS の脂質過酸化に対する影響(HansonR、2015 から改編)

Item	High Oil DDGS			Low Oil DDGS		
	対照	Rendox	Santoquin	対照	Rendox	Santoquin
過酸化価 mEq/kg脂質						
14日目	7.1 ^a	3.1 ^{bc}	3.6 ^b	4.5 ^d	2.7 ^c	2.8 ^c
28日目	31.4 ^a	13.9 ^{bc}	15.4 ^b	20.5 ^d	11.7 ^{bc}	13.6 ^{bc}
TBARS 1 mg/MDA 2 Eq/kg脂質						
14日目	5.1 ^a	2.9 ^{cd}	2.4 ^d	3.8 ^{bc}	2.4 ^d	2.3 ^d
28日目	21.1 ^a	9.5 ^b	9.0 ^b	14.3 ^d	11.0 ^{bc}	10.1 ^{bc}
p-アニシジン価 ³						
14日目	3.9 ^a	1.0 ^b	1.0 ^b	3.8 ^a	0.7 ^b	1.0 ^b
28日目	9.1 ^a	3.4 ^{bc}	2.9 ^{bc}	9.5 ^a	5.0 ^b	4.3 ^b

a-c異符号間に有意差あり (P<0.05)

¹ TBARS =チオバルビツール酸反応物質

² MDA=マロンジアルデヒド

³ 単位なし

(Hungら、2017; Shursonら、2015)。現在、飼料原料の脂質過酸化を測定するための基準やガイドラインはない。しかし、Wangら(2016)は、4-ヒドロキシノネールと特定のアルデヒドの比率が、植物油の過酸化の実際の程度を推定するための指標となりうることを示唆している。しかし、残念ながら、一般的にはこれらの分析は委託分析機関では行われていない。

PV(過酸化価)は、過酸化のプロセスの開始段階における過酸化の程度を推定するために使用されている。DDGS の PV は変動が大きく(CV = 97.5%)、油脂中の最小値は 4.2 meq/kg、最大値は 84.1 meq/kg であった。TBARS 値は、過酸化の増加期(アルデヒドの大部分が生成される時期)における脂質過酸化の程度を推定するために使用されている。PV の値と比較して TBARS 値は

DDGS の試料間でのバラツキが少なく(CV = 43.6%)、脂質中含量は 1.0 から 5.2 ng MDA 相当量/mg の範囲だった。PVDD と TBARS の両者が、DDGS 製造時に行われる熱処理のためにトウモロコシより高値となった。L*と PV($r = -0.63$)、b*と PV($r = -0.57$)の間には中程度の負の相関が認められたが、L*と TBARS($r = -0.73$)と b*と TBARS($r = -0.67$)の間の負の相関はわずかに高かった。これらの結果は、色調が濃く、黄色味が少ない DDGS で過酸化が進んでいる可能性があることを示唆している。しかし、その後行われた、著しく酸化が進んだ DDGS を含む飼料を離乳豚(Songら、2014)および妊娠豚と産仔(Hansonら、2016)に給与しても、発育成績に悪影響はなかった。これらの研究において発育成績に悪影響が発生しなかった原因としては、DDGS 中に高濃度に含ま

れている抗酸化化合物(トコフェロール、フェルラ酸、ルテイン、ゼアキサンチン)の存在(Shurson、2017)や、硫黄化合物の内因性抗酸化物質への変換の結果の可能性がある。

DDGS の脂質過酸化防止のための市販抗酸化剤の効果

市販の合成抗酸化剤は飼料中の油脂の過酸化を最小限に抑えるために使用されている(Valenzuela ら、2002; Chen ら、2014)。最も一般的に使用されている合成抗酸化剤には、BHA (t-ブチル-4-ヒドロキシアニソール)、BHT(2,6-ジ-tert-ブチルヒドロキシルエン)、TBHQ(t-ブチルヒドロキノン)、エトキシキン、2,6-ジ-tert-ブチル-4-ヒドロキシメチルフェノールなどがある(Guo ら、2006)。

粗脂肪含量が高い(13%)あるいは低い(5%)DDGS に合成抗酸化剤を添加した場合の効果の評価した Hanson ら(2015b)による唯一の報告が公表されている。2 種類の DDGS には、TBHQ (Rendox; Kemin Industries、デモイン、IA) 1,000 mg/kg、またはエトキシキン (Santoquin; Novus International、St ルイ、ミズーリ)および TBHQ 1,500 mg/kg を添加し、温度(38°C)、相対湿度(90%)に調節したチャンパー内で 28 日間保管して、脂質過酸化の程度を測定した。その結果、28 日間の貯蔵期間中に脂質過酸化が発生して増加し、過酸化の程度は、粗脂肪含量が低い DDGS に比べて高い DDGS が高かった(表 5)。また、各 DDGS に Rendox または Santoquin を追加すると、過酸化の程度が約 50%減少し。これらの結果は、Rendox または Santoquin のいずれかの追加により、高温多湿条件下で最大 28 日間保管した場合に、脂質の過酸化を低減する効果があることを示している。さらに、DDGS の水分含量は、28 日間の保管期間中に 10.2 から 21.4%に増加し、すべてのサンプルでカビが著しく生育した。

引用文献

Barney, R.J., B.D. Price, J.D. Sedlacek, and M. Siddiqui. 1995. Fungal species composition and abundance on stored corn as influenced by several management practices and maize weevil (Coleoptera curculionidae). *Crop Protection* 14:159-164.

Behnke, K.C. 2007. Feed manufacturing considerations for using DDGS in poultry and livestock diets. Proc. 5th Mid-Atlantic Nutrition Conference, N.G. Zimmerman, ed., University of Maryland, College Park, MD. p. 77-81.

Bhadra, R., K. Muthukumarappan, and K.A. Rosentrater. 2009. Flowability properties of commercial distillers dried grains with solubles (DDGS). *Cereal Chem.* 86:170-180.

Bhadra, R., K.A. Rosentrater, and K. Muthukumarappan. 2008. Understanding and modeling flowability of DDGS. ASABE Paper No. 083808. St. Joseph, MI. ASABE.

Chen, X., Y. Zhang, Y. Zu, L. Yang, Q. Lu, and W. Wang. 2014. Antioxidant effects of rosemary extracts on sunflower oil compared with synthetic antioxidants. *Int. J. Food Sci. Technol.* 49:385-391.

Chen, C. 2000. Factors which affect equilibrium relative humidity of agricultural products. *Trans. ASABE* 43:673-683.

Clementson, C.L., and K.E. Ileleji. 2010. Variability of bulk density of distillers dried grains with solubles (DDGS) during gravity-drive discharge. *Bioresource technol.* 101:5459-5468.

Clementson, C.L., K.E. Ileleji, and R.L. Strohshine. 2009. Particle segregation within a pile of bulk density of distillers dried grains with solubles (DDGS) and variability in nutrient content. *Cereal Chem.* 86:267-273.

Dharmaputra, O.S., H.K. Purwadaria, H. Susilo, and S. Ambarwati. 1994. The effects of drying and shelling on fusarium spp. infection and fusarium toxins production in maize. Grain drying in Asia: Proc. Int'l Conf. at FAO Regional Office for Asia and the Pacific, Bangkok, Thailand, October 17-20, 1995. P. 275-281.

Esterbauer, H., R.J. Schaur, and H. Zollner. 1991. Chemistry and biochemistry of 4-hydroxynonenal, malonaldehyde and related aldehydes. *Free Radic. Biol. Med.* 11:81-128.

Frankel, E.N., L.M. Smith, C.L. Hamblin, R.K. Creveling,

- and A.J. Clifford. 1984. Occurrence of cyclic fatty acid isomers in frying fats used for fast foods. *J. Amer. Oil Chem. Soc.* 61:87–90.
- Ganesan, V., K.A. Rosentrater, and K. Muthukumarappan. 2009. Physical and flow properties of regular and reduced fat distillers dried grains with solubles (DDGS). *Food Bioprocess. Technol.* 2:156–166.
- Ganesan, V., K. Muthukumarappan, and K.A. Rosentrater. 2008a. Effect of flow agent addition on the physical properties of DDGS with varying moisture content and soluble levels. *Trans. ASABE* 51:591–601.
- Ganesan, V., K. Muthukumarappan, and K.A. Rosentrater. 2008b. Effect of soluble and moisture content on the physical and chemical properties of DDGS. *Cereal Chem.* 85:464–470.
- Ganesan, V., K. Muthukumarappan, and K.A. Rosentrater. 2008c. Flow properties of DDGS with varying soluble and moisture contents using Jenike shear testing. *Powder Tech.*, doi:10.1016/j.powtec.2008.02.003.
- Ganesan, V., K.A. Rosentrater, and K. Muthukumarappan. 2007. Dynamic water adsorption characteristics of distillers dried grains with solubles (DDGS). *Cereal Chem.* 84:548–555.
- Guo, L., M.-Y. Xie, A.-P. Yan, Y.-Q. Wan, and Y.M. Wu. 2006. Simultaneous determination of five synthetic antioxidants in edible vegetable oil by GC-MS. *Anal. Bioanal. Chem.* 386:1881–1881.
- Hanson, A.R., P.E. Urriola, L. Wang, L.J. Johnston, C. Chen, and G.C. Shurson. 2016. Dietary peroxidized maize oil affects the growth performance and antioxidant status of nursery pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 216:251–261.
- Hanson, A.R., L. Wang, L.J. Johnston, S.K. Baidoo, J. L. Torrison, C. Chen, and G.C. Shurson. 2015a. Effects of feeding peroxidized dried distillers grains with solubles to sows and progeny on growth performance and metabolic oxidative status of nursery pigs. *J. Anim. Sci.* 93:135–146.
- Hanson, A.R., P.E. Urriola, L.J. Johnston, and G.C. Shurson. 2015b. Impact of synthetic antioxidants on lipid peroxidation of distiller's dried grains with solubles and distiller's corn oil under high temperature and humidity conditions. *J. Anim. Sci.* 93:4070–4078.
- Hilbrands, A.M., K.A. Rosentrater, G.C. Shurson, and L.J. Johnston. 2016. Influence of storage bin design and feed characteristics on flowability of pig diets containing maize distillers dried grains with solubles. *Appl. Engineering in Agri.* 32:273–280.
- Hung, Y.T., A.R. Hanson, G.C. Shurson, and P.E. Urriola. 2017. Peroxidized lipids reduce growth performance of poultry and swine: A meta-analysis. *Anim. Feed Sci. Technol.* 231:47–58.
- Ileleji, K.E., and K.A. Rosentrater. 2008. On the physical properties of dried distillers grains with solubles (DDGS). ASAE Paper No. 084576. ASAE, St. Joseph, MI.
- Ileleji, K.E., K.S. Prakash, R.L. Strohshine, and C.L. Clementson. 2007. An investigation of particle segregation in corn processed dried distillers grains with solubles (DDGS) induced by three handling scenarios. *Bulk Solids Powder Sci. Technol.* 2:84–94.
- Johnston, L.J., J. Goihl, and G.C. Shurson. 2009. Selected additives did not improve flowability of DDGS in commercial systems. *Appl. Engineering in Agri.* 25:75–82.
- Kerr, B.J., T.A. Kellner, and G.C. Shurson. 2015. Characteristics of lipids and their feeding value in swine diets. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 6:30.
- Kingsly, A.R.P., and K.E. Ileleji. 2009. Influence of relative humidity on corn distillers dried grain with solubles (DDGS) flowability. ASABE Paper No. 095799. St. Joseph, MI. 11 pp.
- Liu, P., L.W.O. Souza, S.K. Baidoo, and G.C. Shurson. 2012. Impact of distillers dried grains with solubles particle size on nutrient digestibility, DE and ME content, and flowability in diets for growing pigs. *J. Anim. Sci.* 90:4925–4932.
- Liu, K. 2008. Particle size distribution of distillers dried grains with solubles (DDGS) and relationships to

- compositional and color properties. *Bioresource Technol.* 99:8421–8428.
- Mathlouthi, M., and B. Roge. 2003. Water vapour sorption isotherms and the caking of food powders. *Food Chem.* 82:61–71.
- Mendoza, O.F., M. Ellis, A.M. Gaines, M. Kocher, T. Sauber, and D. Jones. 2010. Effect of particle size of corn distillers dried grains with solubles (DDGS) on digestible and metabolizable energy content for growing pigs. *J. Anim. Sci.* 88(E-Suppl. 3):92 (Abstr.)
- Mills, J.T. 1989. Spoilage and heating of stored agricultural products: prevention, detection and control. Canadian Government Publishing Centre, Ottawa, Canada, Agriculture and Agri-Food Canada Publication 1823E, 98 pp.
- Montross, J.E., M.D. Montross, and F.W. Bakker-Arkema. 1999. Part 1.4 Grain storage. F.W. Bakker-Arkema, D.P. Amirante, M. Ruiz-Altisent, and C.J. Studry matteran, eds. In: *CIGR Handbook of Agricultural Engineering*. Vol. IV. *Agro-Processing Engineering*. St. Joseph, MI, p. 46–59.
- Peleg, G. 1977. Flowability of food powders and methods for its evaluation – A review. *J. Food Process Eng.* 1:303–328.
- Reed, D., S. Doyungan, B. Ioerger, and A. Getchel. 2007. Response of storage molds to different initial moisture contents of maize (corn) stored at 25° C, and effect on respiration rate and nutrient composition. *J. Stored Products Res.* 43:443–458.
- Rosentrater, K.A., 2007. Ethanol processing coproducts – A review of some current constraints and potential directions. *Int. Sugar J.* 109:1–12.
- Rosentrater, K.A. 2006. Some physical properties of distillers dried grains with solubles (DDGS). *Appl. Eng. Agri.* 22:589–595.
- Sanchis, V., I. vinas, M. Jimenez, M.A. Calvo, and E. Hernandez. 1982. Mycotoxin-producing fungi isolated from bin-stored corn. *Mycopathologia* 80:89–93.
- Saunders, J., and K.A. Rosentrater. 2007. Physical properties of low oil distillers dried grains with solubles (DDGS). ASABE Paper No. 076062. St. Joseph, MI. ASABE.
- Shurson, G.C, B.J. Kerr, and A.R. Hanson. 2015. Evaluating the quality of feed fats and oils and their effects on pig growth performance. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 6:10.
- Shurson, G.C. 2017. The role of biofuels co-products in feeding the world sustainably. *Ann. Rev. Anim. Biosciences* 5:229–254.
- Sone, J. 2001. Mold growth in maize storage as affected by compound factors: Difference levels of maize weevils, broken corn and foreign materials, and moisture contents. *J. Asia-Pacific Entomology* 4:17–21.
- Song, R., and G.C. Shurson. 2013. Evaluation of lipid peroxidation level in corn dried distillers grains with solubles. *J. Anim. Sci.* 91:4383–4388.
- Song, R., C. Chen, L.J. Johnston, B.J. Kerr, T.E. Weber, and G.C. Shurson. 2014. Effects of feeding diets containing highly peroxidized distillers dried grains with solubles and increasing vitamin E levels to wean-finish pigs on growth performance, carcass characteristics, and pork fat composition. *J. Anim. Sci.* 92:198–210.
- Song, R., C. Chen, L. Wang, L.J. Johnston, B.J. Kerr, T.E. Weber, and G.C. Shurson. 2013. High sulfur content in corn dried distillers grains with solubles protects against oxidized lipids by increasing sulfur-containing antioxidants in nursery pigs. *J. Anim. Sci.* 91:2715–2728.
- Suleiman, R.A., K.A. Rosentrater, and C.J. Bern. 2013. Effects of deterioration parameters on storage of maize. ASABE Paper No. 131593351. St. Joseph, MI, ASABE. 52 pp.
- Valenzuela, A., J. Sanhueza, and S. Nieto. 2002. Effect of synthetic antioxidants on cholesterol stability during the thermal-induced oxidation of a polyunsaturated vegetable oil. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 79:325–328.

- Wang, L., A.S. Csallany, B.J. Kerr, G.C. Shurson, and C. Chen. 2016. Kinetics of forming aldehydes in frying oils and their distribution french fries revealed by LC-MS-based chemometrics. *J. Agric. Food Chem.* 64:3881–3889.
- Williams, R.J., and D. MacDonald. 1983. Grains molds in the tropics: Problems and importance. *Ann. Rev. Phytopathology* 21:153–178.

10章: DDGS の色調は品質と栄養価の信頼できる指標ではない

なぜ DDGS の色が品質の問題として捉えられているのか

トウモロコシ(例えば米国の No. 2)やその他の米国産穀物商品のように、DDGS には格付けシステム、または定義および品質基準はない。その結果、世界中の米国 DDGS の売り手と買い手の間で誤解が生まれる可能性がある。品質基準がない状況では、価格設定、契約書の作成、期待への対応は困難となっている。過去 10 年間にわたって、業界、政府および各学界の専門家が DDGS の品質基準について協議し、品質基準の設定を試みてきたが、品質基準の定義設定の必要性に関する意見の相違およびおそらく透明性の向上と、品質を区分して DDGS 供給源間の差に関する評価能力が高まることへの警戒感から、試みは失敗に終わっている。米国の多くの DDGS 販売担当者は、水分および繊維の最大含量値保証と、脂肪とたん白質の最小含量保証値のみにスポットを当てることを好んでいる。しかし、米国産 DDGS の供給業者間で栄養成分含量と品質にはバラツキがあるため、世界の買い手は、自らが期待している水準に合わない併産物を入手するリスクを最小限に抑えるために、特定の品質項目に関する保証を要求することがある。

DDGS の色調は、輸出市場の一部のバイヤーにとって品質を保証する非常に重要な要因となっており、DDGS 供給源を評価する際の指標として使われている。数年前、一部の DDGS の売り手と買い手は 5 色のスコアカード(図 1)を使用した主観的な色調評価システムを開発し、DDGS 供給源の色調による区別を行った。このスコアカードは現在も使用されているが、あまりにも主観的すぎ、スコアの解釈の違いによる売り手と買い手との間で論争が頻繁に起こっているため、マーケティング担当者の多くはその使用を中止している。その結果、米国の供給業者と海外(特にアジア諸国)の買い手との間で交渉が進められている売買契約の中に、色調の量的測定値(L^* -色調の明暗)の最低保証が含まれるようになっていく。現在、一部の買い手の要求にこたえるために、DDGS の色調の明暗の最少保障値としてハンター $L^* > 50$ を採用している。米国産 DDGS は、色調に関わらず

様々な国に輸出され続けているが、一部の市場向けには、 $L^* > 50$ を保証している。

このため、買い手の色調に対する希望を満たすことが出来ない一部の供給業者は、DDGS の品質の指標として色調を用いることへの不満と疑念を抱くようになっていく。このような理由で、本章では、DDGS の品質と、市場で品質を表す指標として色調を用いる理由を明確化し、DDGS の品質を評価するためのその他の様々な品質特性と測定結果について説明することとする。



図 1. DDGS カラースコアカードの例

品質をどのように定義するのか?

品質には多くの定義があるが、その製品の卓越性、優位性または際立った特性等を表す本質的な特徴あるいは固有の特性と定義することが出来る(<http://www.merriam-webster.com/dictionary/quality>)。ビジネスの世界では、品質は卓越性、または、欠陥、不具合、著しいバラツキがない状態を示す一般的な尺度と定義されている(<http://www.businessdictionary.com/definition/quality.html>)。

ISO 8402-1986 規格では、品質を「指定または暗黙のニーズを満たす能力を備えた製品またはサービスの特性および機能の全体」と定義している。製造の世界では、品質は特定の顧客またはユーザーの要求を満たす均一な製品を実現するための、測定および検証が可能な基準を一貫して厳密に遵守すること定義している。品質は、

測定可能な基準を使用して客観的に確認することが可能で、主観的には、観察可能な特性として評価はできるが、測定することはできない特性であると言える。したがって、品質は有形物の望ましい特性を指す一般的な用語であって、人によって解釈が異なることを意味している。

飼料原料と飼料の品質はどのように定めるのか？

飼料製造業者および畜産生産者は飼料原料および飼料の品質を評価するために、物理・化学的および生物学的試験を含む、様々な定性的、定量的な方法を用いている。飼料の物理的評価は定性的なものであり、飼料原料と飼料の性質の変化を特定するために使用されている。一般的に評価される物理的特性には、色、粒子サイズ、かさ密度、均質性、臭い、味、触覚、音等がある。他の穀物、雑草の種、外皮、砂などの混入は、物理的評価によって確認できる最も一般的な異物である。

化学的な試験は定量的なものであり、栄養成分および潜在的な汚染物質の推定を可能にする。民間試験機関を利用して飼料原料の一般成分分析を行うことは品質を評価するための一般的な手法となっている。これらの測定項目には通常、水分、粗たん白質(CP)、粗繊維、粗脂肪、灰分がある。原料の特性(栄養成分組成)は、飼料製造における品質保証で不可欠であり、購買契約の作成、品質の評価およびある程度までは基礎的な配合設計用データとして使用される。これらの栄養成分値は、供給される原料が求めるレベルに達しているかを評価する指標となり、懸念される潜在的な汚染物質(マイコトキシン、ダイオキシンなど)の測定値が含まれる場合もある。

実体顕微鏡検査は、飼料または飼料原料に異物や汚染物質が混入しているか否かを判断する際に利用される。低倍率(8x~50x)および高倍率(100x~500x)の顕微鏡で飼料原料サンプルを鏡検し、形状、色、粒子サイズ、柔らかさ、硬度および質感を評価する。飼料原料の生物学的評価も行われるが、通常、大学や動物を用いた研究施設を持つ大規模な飼料会社に限定される。これには、動物の使用と、様々な動物種の消化および代謝試験を実施するための特別な訓練を受けた人材が必要となる。このような試験では、時間と費用がかかるため、

飼料製造品質管理プログラムの一部として使用される日常的な手順とはなり得ないが、他のすべての方法と比較して、飼料原料の品質と価値を最も正しく評価することが出来る。

品質とは有形物の望ましい特性を指す一般的な用語であり、人によって異なることを意味している。一部のユーザーにとって、DDGSの品質は、マイコトキシン汚染がないおよび家畜・家禽の健康と発育成績に有害と考えられる抗栄養因子を指す場合がある一方で、他のユーザーにとっては、安定した栄養成分含量と消化率を意味している可能性もある。これらの定義を考えると、色調はDDGSの品質を評価するための指標として、一部の市場で使用することが可能であり、実際に使用されている。

なぜ色調を測定するのか？

これまで何十年にもわたって色調は飼料原料の栄養価の主観的な評価指標として使用されてきた。遊離アミノ酸(特にリジン)は、還元糖と結合してメイラード反応を起こし、動物が消化しにくくなる。Louis Camille Maillardは、1912年に糖とアミノ酸の間の化学反応に関する化学反応を最初に発見した。メイラード反応は、糖とアミノ酸だけではなく、複合炭水化物とアミドを加熱するときに発生する一連の化学反応である。一般的に、これらの反応は製造および乾燥工程中にたん白質含量が中程度あるいは多量に含まれる飼料原料が過熱された際に発生し、色の黒ずみ(褐色化)、焦げた風味やにおいが特徴である。乾式粉碎エタノール工場で使用されているDDGSの乾燥温度は、127~621°Cの範囲であり、DDGSでのメイラード反応による影響は、反芻動物(Klopfenstein and Britton, 1987)だけでなく、豚や家禽(Cromwellら、1993)でも報告されており、DDGS中のたん白質の品質の低下の原因となっている(Cromwellら、1993; Fastinger and Mahan 2006; Steinら、2006)。メイラード反応は、乾燥ホエー、血粉、大豆粕などの他の一般的な原料でも発生する。これらの成分の色調が濃くなることも、過熱とたん白質の品質の低下を示している。したがって、飼料原料の買い手と飼料製造業者は、飼料原料の供給源間におけるたん白質の品質と消化率の違いを判断するための一般的な指標として色調を使用するように指導されている。

この他に、色調は穀物の成熟度、保管条件、有害物質

の存在、砂などの混入、殺虫剤/殺菌剤の使用の可能性を知るための目安ともなる。この場合、穀物の外観は、くすんでほこりっぽくなる。オレンジ色から赤色のソルガムは、タンニン含有量が高い可能性がある。穀物または穀物副産物の褐変または黒化は、不適切な保管による過剰な熱処理または腐敗を示し、栄養価を低下させる可能性がある。色調が黒い魚粉は含まれている魚油が酸敗している可能性がある。

色調の測定法

食品業界では、キャンディーバー、クッキー、パンなどの熱処理された製品の栄養的および物理的特性の指標として、ハンターラボ (Hunter Lab) とミノルタ (Minolta) の色差計が長年使用されてきた。これらの食品では、色調は消費者にとって製品の魅力を決定する重要な品質特性となっている。色調はオーストリア・ウィーンの国際委員会によって明確に定義された 3 種の色特性を読み取ることで測定される[明度または L^* (0 濃い、100 明るい)、 a^* (赤味-緑味)、 b^* (黄味-青味)、図 2]。



図 2. ハンターラボの色調測定スケール

たん白質含量が中度から高度の飼料原料、特に DDGS の色調測定は、熱損傷の程度を評価するために飼料業界で一般的に使用されている。ミノルタの色差計を用いたカラースコアは、ハンターラボの色差計を用いたものより低くなることを認識しておくことが重要である。Urrisola ら (2013) は、同一試料のハンターラボによる値と比べて、ミノルタによる一般に L^* は 2.9 ユニット低く、 b^* は 1.

7 ユニット低いことを示している。ただし、いずれの方法を用いても、カラースコアによる試料の順位付けは同様となる。したがって、DDGS を取引する際の基準として色差計による数値を用いる場合には、誤解がないように、使用する方法 (ハンターラボなのかミノルタなどか) を契約書内で明確にしておく必要がある。

なぜ一部の輸出市場で色調が重要視されているのか?

世界市場の中で活動する際には、世界中の様々な文化圏の中で物事をどのように認識されているか、その地域の人々がどのように考えるかという象徴的な特性と行動原理を理解することが不可欠となる。Web サイト (http://webdesign.about.com/od/colorcharts/l/bl_colorculture.htm) は、図 2 の様々な色の意味を説明しているが、ハンターラボによる色調測定結果は、様々な文化を推し量ることができる。例えば、中国では黄色は最も美しい色であると考えており、大地や物事のすべての中心を意味している (http://en.wikipedia.org/wiki/Color_in_Chinese_culture)。黄色は茶色より階級が上で、幸運をもたらす。黄色は中国帝国の色であり、古代中国の伝説的な 5 代皇帝の象徴的な色として、王宮、祭壇、寺院の装飾、皇帝の礼服や衣装に使用されていた。また、黄色は世俗的な苦勞からの解放を表し、仏教界でも重んじられている。さらに、多くのアジア諸国では、米国で見られるような典型的な淡い色の卵黄や鶏の皮膚よりも濃い黄色の卵黄や黄色の鶏の皮膚を好む傾向にある。これらのことは、アジアの多くの地域で、色調が黄色や黄金色の「Golden」DDGS が好まれている理由の 1 つであると思われる。

DDGS の色調と栄養価の間には関係があるのか?

供給源の違いによる色調の変化

米国産トウモロコシの DDGS は供給源間で、その色調に大きな違いがある (図 3)。供給源の違いによる色調の範囲 (L^* 、 a^* 、 b^*) と加熱の程度、栄養特性と物理的特性の違いとの関係性を評価するために 15 報の研究報告が公表されている。これらの報告の概要を表 1 に示したが、2 報 (Urrisola ら、2013; Song and Shurson、2013) を除く

すべての報告では、少数の試料(n=2~9)についての評価が行われている。ただし、これらのほとんどの報告で評価された試料数は限られてはいるものの、Rosentrater(2006)、Pahmら(2009)および Kingslyら(2010)の報告を除いて、L*には試料間で有意差があった。Cromwellら(1993)および Urriolaら(2013)の報告には、飲料用エタノール

工場で製造された DDGS が含まれており、このことが L*値が非常に低かった(色調が暗い)理由である可能性はあるが、Fastinger and Mahan(2006)および Bhadraら(2007)による報告による燃料用エタノール工場で製造された DDGS のみを評価した際に認められた低い L*値を説明できない。

表 1. 栄養学および物理的特性に関する DDGS の色(または加熱の程度)に関する研究結果の要約

引用文献	サンプル数	L*の範囲	a*の範囲	b*の範囲	重要な知見
Cromwell et al. (1993)	9	28.9-53.2	ND	12.4-24.1	DDGSのL*とリジン含量、L*およびb*のプロイラーゼの増体日量及び飼料効率との間の有意な相関関係(豚でも同様)。DDGS摂取量とプロイラーゼの増体日量と飼料効率の間に高い相関関係。
Whitney et al. (2001)	2	ND; Light and Dark	ND	ND	明るい色調のDDGSにおけるリジンのAIDは47.4%、暗い色調のDDGSのリジンのAIDは0%。
Ergul et al. (2003)	4	41.8-53.8	ND	32.9-42.8	L*およびb*と家禽における可消化リジンとの間に有意な相関。
Roberson et al.(2005)	2	ND; Light and Dark	ND	ND	キサントフィル含量：明るい色調のDDGSでは29.8 mg/kg、暗い色調のDDGSでは3.5 mg/kg。
Rosentrater (2006)	6	40.0-49.8	8.0-9.8	18.2-23.5	L*、a*およびb*は、いくつかの物理的特性と相関がある。
Batal and Dale (2006)	6	47.9-62.9	4.1-7.6	8.8-28.4	L*、b*と、Lys、Thr、Arg、His、Trpの各消化率との間には有意な相関関係が見られたが、a*では相関なし。
Fastinger and Mahan (2006)	5	28.0-55.1	6.7-9.0	15.8-41.9	L*およびb*がより高いDDGSの豚におけるSIDアミノ酸が、暗い色調のDDGS供給源より高い。
Urriola (2013)	34	36.5-62.5	8.0-12.0	21.3-47.0	ミノルタまたはハンターの色調スコアから、豚における可消化CPとアミノ酸の予測はできない(R ² は0.30未満)。L*とSIDリジンの間の相関(R ² =0.48)は、L*が50以上のDDGSより、L*が50以下のDDGSで高い(R ² =0.03)。
Bhadra et al. (2007)	3	36.6-50.2	5.2-10.8	12.5-23.4	a*およびb*は水分活性と高い相関があり、熱特性と中程度の相関があり、飼料の保管とその後の処理に重要な場合がある。
Martinez Amezcua and Parsons (2007)	ND	ND; heat process-sed light colored DDGS sample	ND	ND	DDGSの加熱により、家禽におけるリンの相対的生物学的利用率は大幅に増加するが、アミノ酸消化率(特にリジン)は大幅に低下する。
Ganesan et al. (2008)	ND	40.8-54.1	12.4-18.7	57.6-73.3	DDGS製造時のジスチラーズ・ソリュブルの添加はL*を低下させ、a*を高め、水分と相互作用してDDGSの色調に影響を与える。
Liu (2008)	6	44.9-59.6	8.3-11.4	31.0-46.4	ほとんどのDDGSサンプルでは、L*およびb*の減少と、粒子サイズの増加に伴うa*のわずかな増加を示した。
Pahm (2009)	7	49.3-56.4	10.4-14.5	36.7-43.9	L*と鶏ヒナにおけるSIDリジンの相関は低かったが、リジンの相対的生物学的利用率との相関は高かった。
Kingsly et al. (2010)	1	49.0-53.4	8.8-11.3	24.7-26.5	濃縮ジスチラーズ・ソリュブルの添加レベルの低下により、L*は高まり、a*は低下する。
Song et al. (2013)	31	45.2-58.1	9.3-12.4	26.6-42.4	L*およびb*と、脂肪酸化の評価値(TBARSおよびPV)との間には有意な相関あり。DDGS中のTBARSはトウモロコシの5~25倍。

ND = 測定値なし



図 3.米国産トウモロコシ DDGS の色調の違い

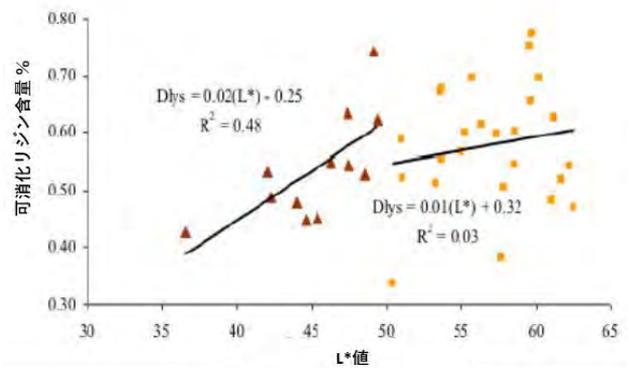
色調は DDGS のリジン消化率に関連するのか？

Evans and Butts(1948)は、他の研究者に先駆けて、飼料原料の過度な加熱がアミノ酸やたん白質を繊維などの他の化合物に結合させ、豚、鶏、魚などの単胃動物のアミノ酸(特にリジン)消化率を低下させる可能性があることを示している。このため、表 1 に示した 15 報中 7 報では、DDGS に対する過加熱によるアミノ酸消化率の低下の指標として色調を用いることを試験の目的としている。

DDGS の色調、リジン含量および発育成績の間関係を示す最初の報告が Cromwell ら(1993)によって公表されている。彼らは、最も明るい色調の DDGS でリジン含量が最も高く、中間の色調の DDGS で中間であり、最も暗い色の DDGS では最も低い傾向があることを示している。さらに、ブロイラー雛では、ハンターL*と体重増加および飼料効率の間に有意な相関があり、色調が類似した DDGS をブレンドして豚に給与した場合、発育成績は雛で観察されたものと同様だった。Ergul ら(2003)およびBatal and Dale(2006)による家禽を用いた報告では、幅広いL*およびb*を表す DDGS を評価しており、L*とb*がリジンや他のアミノ酸の消化率と有意に相関しているとした Cromwell ら(1993)の報告を裏付けている。しかし、色調が「Golden」に分類され、L*の範囲が狭い(49~56) DDGS 7 試料について評価を行った Pahm ら(2009)による最近の報告では、家禽におけるリジン消化率に対するL*の影響はなかったものの、これらの試料間ではリジンの相対的生物学的利用率には有意差が認められた。

同様に、豚を用いた報告(Whitney ら、2001; Fastinger and Mahan, 2006)では、L*が高い DDGS に比べて、L*が低い DDGS ではアミノ酸消化率が低いことを示している。一方で、L*が広範囲(37 から 63)の DDGS サンプル

(n=34)を用いた Urriola ら(2013)の報告では、ミノルタまたはハンターラボの色差計による値では可消化 CP およびアミノ酸量を正確に推定できない(R^2 :0.30 未満)ことを実証しており、図 4 に示すとおり、L*が 50 以上の DDGS における L*と可消化リジン含量では、L*が 50 未満の DDGS に比べて相関性が低いことを示している。なお、L*が 50 未満の DDGS の場合のサンプルでは、L*と豚における可消化リジン含量との L*と消化可能リジン含有量の相関は比較的低いものの($R^2=0.48$)、ある程度、一般的な指標になり得る可能性があることを示している。図 4. トウモロコシ DDGS の色調(L*)と可消化リジン含



量の相関(Urriola ら、2013)

DDGS の乾燥温度とリンの相対的生物学的利用率

乾燥中の過加熱(L*が低く、色が暗い)により、リジンや他のアミノ酸の消化率が低下するという見解は一致しているが、家禽ではリンの相対的生物学的利用率が向上する可能性があります。Martinez-Amezcuca and Parsons(2007)は、明るい色の DDGS で用いられている加熱温度を高めると、リンの相対的生物学的利用率が高まるが、アミノ酸消化率は大幅に低下したことを報告している。これは、DDGS の過加熱がリンの利用性を改善することで家禽における栄養価を高める可能性があることを示した最初の報告である。

DDGS の色調とキサントフィルの含量

DDGS のキサントフィル含量を測定した報告少ない。キサントフィルは、トウモロコシおよびトウモロコシ併産物に自然に含まれている黄色/オレンジ色の色素で、多く

の国々、特にアジア諸国における家禽用飼料において、卵黄とブロイラーの皮膚を望まれる黄金色にするための重要な要素である。工業的なキサントフィル色素(多くの場合、マリーゴールドの花弁由来)は非常に高価だが、主に色素の供給源としてアジア諸国の家禽飼料に添加されている。したがって、トウモロコシグルテンミールなどのトウモロコシ併産物や量的には少ないものの DDGS を家禽用飼料に配合すると、工業的に製造された色素の使用量を減らすことが出来、その結果、消費者が望んでいる卵黄と皮膚の色の品質基準を満たしながら、飼料コストを削減することが出来る。

DDGS のキサントフィル含量は 10.6~34.0 mg/kg であると報告されている(Sauvant and Tran, 2004)。Robersonら(2005)は、ミノルタまたはハンターラボの色差計は使用してはいないものの、暗い色の DDGS のキサントフィル含量は 3.5 mg/kg、明るい黄金色の DDGS では 29.8 mg/kg であったとしている。また、彼らは、過熱が DDGS 中のキサントフィルの酸化を引き起こし、含量の低下をもたらす可能性があることを示唆している。したがって、色調が明るい DDGS は、暗い DDGS よりもキサントフィルを多く含む傾向があると考えられる。

DDGS の色調と脂質の過酸化

トウモロコシ DDGS に含まれている脂質の過酸化の程度を評価した試験はわずかである。DDGS には 5~13% のトウモロコシ油が含まれており、トウモロコシ油には脂質過酸化の影響を受けやすい高濃度の多価不飽和脂肪酸(特にリノール酸)が含まれている。エタノール工場で使用される乾燥温度は大幅に変化する可能性があり(85~600°C)、乾燥プロセス中に使用される乾燥時間と温度により、脂質の過酸化が加速される。過酸化脂質を含む飼料は、豚およびブロイラーの健康や発育成績に悪影響を与えることが示されている(L' Estrange ら、1967; Dib

ner ら、1996; DeRouche ら、2004; Hung ら、2017)。

Harrell ら(2010)は、過酸化トウモロコシ油または DDGS を育成豚に給与すると、新鮮な(過酸化されていない)トウモロコシ油を給与した豚と比べて発育成績が低下することを示している。Song and Shurson(2013)は、トウモロコシ DDGS 31 試料中について、一般的に脂質の過酸化を示す指標として用いられている TBARS(チオバルビツル酸反応物質)と PV(過酸化価)を測定し、脂質当たりの TBARS 含量は 1.0 から 5.2 ng MDA 相当量/mg、PV は 4.2~84.1 meq/kg であると報告している。TBARS と PV の値が最も高かった DDGS では、トウモロコシ中の含量に比べて、それぞれ 25 倍および 27 倍高かった。また、DDGS 供給源間の L*および b*と、脂質過酸化のレベルとの間には有意な負の相関があったことを報告している。これらの結果は、黄色ではないより色調が濃い DDGS は、明るい色の DDGS に比べて過酸化化合物の含量が高い可能性があることを示している。

DDGS の色調と物理的特性の間には関係があるのか?

DDGS の色調とその保管およびその後の飼料処理に影響を与える可能性のある物理的特性との関係を理解するために、5 つの報告がある(表 1)。Rosentrater(2006)は、L*、a*および b*が DDGS のいくつかの物理的性質(水分、水分活性、導電率、抵抗率、かさ密度および流動性)と相関することを最初に報告している。Bhadra ら(2007)は、これらの知見を確認し、a*と b*が水分活性と高い相関関係にあり、DDGS の熱特性と中程度の相関関係にあることを示しており、色調が飼料の貯蔵とさらなる処理特性を評価するための色指標になる可能性があることを示している。DDGS を製造する際、ジスチラーゼ・ゲ

表 2. DDGS の色調特性に対するジスチラーゼ・ソリュブル添加量の影響

色調(CIEスコア)	0 ガロン/分	12 ガロン/分	25 ガロン/分	42 ガロン/分	ピアソンの相関係数	P値
L*	59.4	56.8	52.5	46.1	-0.98	0.0001
a*	8.0	8.4	9.3	8.8	0.62	0.03
b*	43.3	42.1	40.4	35.6	-0.92	0.0001

Nollら(2006)から改作。

レインへのジステラーズ・ソリュブルの添加割合のエタノール工場間での違いは DDGS の栄養成分組成に影響を与える。これは、これらの各画分の栄養成分含量が大幅に異なっているためである。ジステラーゼ・グレインは、ジステラーズ・ソリュブルに比べて、乾物(33.8 vs 19.5%)、CP(33.8 vs 19.5%)および粗繊維(9.1 vs 1.4%)含量が高く、粗脂肪(7.7 vs 17.4%)、粗灰分(3.0 vs 8.4%)およびリン(0.6 vs 1.3%)含量は低い。したがって、ジステラーゼ・グレインへのジステラーズ・ソリュブルの添加割合を増やすと、粗脂肪、粗灰分およびリン含量が増加するが、CP および粗繊維含量は減少する。

Noll ら(2006)は、ジステラーゼ・グレインへのジステラーズ・ソリュブルの添加水準を様々に変えて製造したトウモロコシ DDGS の栄養成分組成と消化率を測定している。供試した DDGS におけるジステラーゼ・グレインへのジステラーズ・ソリュブルの添加量は、最大可能添加量の約 0、30、60 および 100%であり、ジステラーゼ・グレインに毎分 0、12、25、42 ガロンのジステラーズ・ソリュブルを追加することに相当する。ジステラーズ・ソリュブルの添加率の低下に伴って、乾燥機の温度は低下した。一方、ジステラーズ・ソリュブル添加量の増加に伴い、粒子サイズが大きくなり、粒子径のバラツキも大きくなった。ジステラーズ・ソリュブルの添加量の増加に伴い、DDGS の色調が濃くなり(L*が減少)、黄色味が低くなった(b*が減少)(表 2)。ジステラーズ・ソリュブルの添加量に伴い、粗脂肪、灰分、家禽における真の代謝エネルギー(TME_n)値と、マグネシウム、ナトリウム、リン、カリウム、塩化物およびイオウ含量が増加したが、CP とアミノ酸含有量と消化率への影響は小さかった。Ganesan ら(2008)および Kingsly ら(2010)も、ジステラーズ・ソリュブルの量の増加に伴い、L*が低下し、a*が高まることを示している。これらのことから、DDGS の L*と a*は、DDGS の栄養成分組成の違いを示す一般的な指標となり得る。

ミネソタ大学で行われた研究では、DDGS の供給源間で粒子サイズにかなりのばらつき(256~1,217 μm)があり、DDGS の粒子サイズは豚における DE(可消化エネルギー)および ME(代謝エネルギー)値に影響を与える可能性があることを示した Liu ら(2012)および Liu(2008)の報告では、粒子サイズが大きくなるにしたがって、ほとんどの DDGS で L*と b*が減少し、a*がわずかに増加し

ている。

色調は DDGS の品質を表す最良の指標なのか

答えは、「No」である。これまでに説明したように、DDGS の色調に影響を与える要因は多く、これらの要因のいくつかは DDGS の栄養価に負の影響を与える一方で、他の要因は DDGS の栄養価に正の影響を及ぼす。色調はいくつかの栄養成分および物理的特性と関連している。多くの研究者は、濃い色の DDGS はリジンの消化率が低いことを示していると認識しているが、L*値が広範囲(36~64)の色調の DDGS では、リジンの消化率との関連性に関する予測因子としては不十分であることが示されている。さらに、L*が高い DDGS は、キサントフィル含量が高く、脂質過酸化が最小限であることを示している可能性もある。対照的に、暗い色の DDGS は、明るい色の DDGS に比べて、一部の栄養成分含量が高い場合がある。例えば、DDGS を製造する際にジステラーズ・ソリュブルの添加レベルを高めると、エネルギー、粗脂肪、ミネラル含量が増加し、CP およびアミノ酸含量と消化率への影響が最小限になる。

さらに、色調が濃い DDGS は、家禽に対するリンの相対的な生物学的利用率が高い。DDGS の粒子サイズ、含水率、その他の物理的特性も色調との間に相関関係があるが、これらの相関係数の値は、飼料製造と栄養学的観点から評価するのが困難である。したがって、DDGS 品質の指標として色調を用いることは推奨できない。

DDGS の品質はどのように決定すべきなのか

DDGS ユーザーのほとんどは、「品質が高い DDGS」とは、エネルギーおよび栄養成分含量と消化率が高く、マイコキシンなどの抗栄養因子が含まれていないことが条件である。エネルギー、CP(アミノ酸)とリンは、飼料中で価格が高い栄養成分である。したがって、様々な DDGS の供給源間で代謝エネルギー、可消化アミノ酸、可消化または利用可能なリンを把握するために正確な方法を使用する必要がある。このために、豚と家禽における正確な ME と消化可能なアミノ酸の推定式が開発、検証、

公開されている。これらの推定式の詳細については、本ハンドブックの 19 章と 22 章に詳述している。残念ながら、豚および家禽における DDGS 中の可消化または利用可能なリンを推定するための正確な推定式は開発されておらず、反芻家畜における DDGS の正味エネルギー、第一胃分解性および非分解性たん白質を推定するための推定式も開発されていない。DDGS のマイコキシン含量を測定するための推奨方法は、本ハンドブックの 8 章で詳述している。

引用文献

- Bhadra, R., K. Muthukumarappan, and K.A. Rosentrater. 2007. Characterization of chemical and physical properties of distillers dried grain with solubles (DDGS) for value-added uses. An ASABE Meeting Presentation, Paper Number: 077009, 2007 ASABE Annual International Meeting, Minneapolis, Minnesota, 17 - 20 June 2007.
- Batal, A.B. and N.M. Dale. 2006. True metabolizable energy and amino acid digestibility of distillers dried grains with solubles. *J. Appl. Poult. Res.* 15:89-93.
- Cromwell, G.L., K.L. Herkelman, and T.S. Stahly. 1993. Physical, chemical, and nutritional characteristics of distillers dried grains with solubles for chicks and pigs. *J. Anim. Sci.* 71:679-686.
- DeRouche, J.M., J.D. Hancock, R.H. Hines, C.A. Maloney, D.J. Lee, H. Cao, D.W. Dean, and J.S. Park. 2004. Effects of rancidity and free fatty acids in choice white grease on growth performance and nutrient digestibility in weanling pigs. *J. Anim. Sci.* 82:2937-2944.
- Dibner, J. J., C.A. Atwell, M.L. Kitchell, W.D. Shermer, and F.J. Ivey. 1996. Feeding of oxidized fats to broilers and swine: effects on enterocyte turnover, hepatocyte proliferation and the gut associated lymphoid tissue. *Animal Feed Science Technology* 62:1-13.
- Ergul, T., C. Martinez-Amezcuca, C. Parsons, B. Walters, J. Brannon and S.L. Noll. 2003. Amino acid digestibility in corn distillers dried grains with solubles. Presented at the 2003 Poultry Science Association Mtg., Madison, WI, July 2003. Available: www.ddgs.mn.edu/info-poultry.html. Accessed: January, 2011.
- Evans, R.J., and H.A. Butts. 1948. Studies on the heat inactivation of lysine in soy bean oil meal. *J. Biol. Chem.* 175:15-20.
- Fastinger, N.D. and D.C. Mahan. Determination of the ileal AA and energy digestibilities of corn distillers dried grains with solubles using grower-finisher pigs. *J. Anim. Sci.* 84:1722-1728.
- Ganesan, V., K. Muthukumarappan, and K.A. Rosentrater. 2008. Effect of moisture content and soluble level in physical, chemical, and flow properties of distillers dried grains with soluble (DDGS). *Cereal Chem.* 85:464-740.
- Harrell, R.J., J. Zhao, G. Rexnik, D. Macaraeg, T. Wineman, and J. Richards. 2010. Application of a blend of dietary antioxidants in nursery pigs fed either fresh or oxidized corn oil or DDGS. *J. Anim. Sci.* 88 (E-Suppl. 3): 97-98 (Abstr.). http://en.wikipedia.org/wiki/Color_in_Chinese_culture
<http://hubpages.com/hub/The-significance-of-the-colors-red-gold-in-Chinese-culture>
<http://v-ast.com/services.htm> http://webdesign.about.com/od/colorcharts/1/bl_colorculture.htm
<http://www.gipsa.usda.gov/GIPSA/webapp?area=home&subject=lr&topic=hb>
- Hung, Y.T., A.R. Hanson, G.C. Shurson, and P.E. Urriola. 2017. Peroxidized lipids reduce growth performance of poultry and swine: A meta-analysis. *Anim. Feed Sci. Technol.* 231:47-58.
- Kingsly, A.R.P., K.E. Ileleji, C.L. Clementson, A.Garcia, D. E. Maier, R.L. Strohshine, and Scott Radcliff. 2010. The effect of process variables during drying on the physical and chemical characteristics of corn dried distillers grains with solubles (DDGS) - Plant scale experiments. *Bioresource Technology* 101:193-

- 199.
- Klopfenstein, T. and R. Britton. 1987. Heat damage. Real or Artifact. In: Dist.Feed Conf. Proceedings. 42:84-86.
- L'Estrange J.L., K.J. Carpenter, C.H. Lea, and L.J. Parer. 1967. Nutritional effects of autoxidized fats in animal diets. 4. Performance of young pigs on diets containing meat meals of high peroxide value. *Br. J. Nutr.* 20:377-392.
- Liu, P., L.W.O. Souza, S.K. Baidoo, and G.C. Shurson. 2012. Impact of distillers dried grains with solubles particle size on nutrient digestibility, DE and ME content, and flowability in diets for growing pigs. *J. Anim. Sci.* 90:4925-4932.
- Liu, K. 2008. Particle size distribution of distillers dried grains with solubles (DDGS) and relationships to compositional and color properties. *Bioresource Technol.* 99:8421-8428.
- Martinez-Amezcuca, C. and C.M. Parsons. 2007. Effect of increased heat processing and particle size on phosphorus bioavailability in corn distillers dried grains with solubles. *Poultry Science* 86:331-337.
- Noll, S., C. Parsons, and B. Walters. 2006. What's new since September 2005 in feeding distillers co-products to poultry. Proceedings from the 67th Minnesota Nutrition Conference & University of Minnesota Research Update Session: Livestock Production in the New Millennium, St. Paul, MN. pp. 149-154.
- Pahm, A.A., C.S. Scherer, J.E. Pettigrew, D.H. Baker, C.M. Parsons, and H.H. Stein. 2009. Standardized amino acid digestibility in cecectomized roosters and lysine bioavailability in chicks fed distillers dried grains with solubles. *Poult. Sci.* 88:571-578.
- Roberson, K.D., J.L. Kalbfleisch, W. Pan and R.A. Charbeneau, 2005. Effect of corn distiller's dried grains with solubles at various levels on performance of laying hens and yolk color. *Intl J. Poultry Sci.* 4(2): 44-51.
- Rosentrater, K.A. 2006. Some physical properties of distillers dried grains with soluble (DDGS). *App. Eng. Agric.* 22:589-595.
- Sauvant, D. and G. Tran. 2004. Corn Distillers. Page 118 In: Tables of composition and nutritional value of feed materials. D. Sauvant, J.M. Perez, and G. Tran, ed. Wageningen Academic Publishers. The Netherlands.
- Song, R., and G.C. Shurson. 2013. Evaluation of lipid peroxidation level in corn dried distillers grains with solubles. *J. Anim. Sci.* 91:4383-4388.
- Stein H.H., M.L. Gibson, C. Pedersen, and M.G. Boersma. 2006. AA and energy digestibility in 10 samples of distillers dried grain with solubles fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 84: 853-860.
- Urriola, P.E., L.J. Johnston, H.H. Stein, and G.C. Shurson. 2013. Prediction of the concentration of standardized ileal digestible amino acids in distillers dried grains with solubles. *J. Anim. Sci.* 91:4389-4396.
- Whitney, M.H., M.J. Spiehs, G.C. Shurson, and S.K. Baidoo. 2001. Apparent ileal amino acid digestibility of corn distiller's dried grains with solubles. Available: [http://www.ddgs.umn.edu/articles-swine/2002-Spiehs-percent20Apparent percent20ileal percent20amino.pdf](http://www.ddgs.umn.edu/articles-swine/2002-Spiehs-percent20Apparent%20ileal%20amino.pdf) Accessed Jan. 7, 2011.

11 章: DDGS と飼料の安全性

はじめに

飼料の安全性は、家畜の健康と生産性に直接影響するだけでなく、人間が消費する畜産物の安全性にも直結しているため、食品安全システム全体に大きな影響を与えることになる。

飼料の汚染は、フード・チェーン全体に影響を与える可能性があり、何百万ドルもの損失とコストの増加をもたらす。さらに、消費者のパニックを引き起こし、食品の消費量が減少し、食品システム全体に対する消費者の信頼性を損なうことになる。また、疾病の発生や死、将来にわたる潜在的な健康リスクも起こり得る。すなわち、飼料の安全性は食品の安全性に直結する問題であり、「feed is food: 飼料は食品である」という概念につながっている。

私たちが暮らしているすべての国で飼料原料と食品の輸出入が行われている。しかし、飼料と食品の安全基準と規制は国によって大きく異なる。飼料および飼料原料は、有害な微生物学的、物理的および化学的な危害要因により汚染される可能性があり、サプライチェーンが世界的に広がっているため、たった一例の飼料汚染が広範囲に拡大する可能性がある。このため、飼料および食品のマーケティング、生産、流通が世界的に拡大すればするほど、飼料における有害物質の汚染の潜在的なリスクも増加することになる(Liu, 2011)。実際、一部の飼料原料の原産地についての透明性担保へのニーズに応じて、世界的な飼料市場における穀物と副産物の植物学および地理的な由来を識別するための分析方法の開発につながっている(Tres ら、2014; Tena ら、2015)。

飼料原料の供給者、買い手および飼料製造業者は、各国の規制当局による規制を遵守するだけでなく、飼料およびフード・チェーンのあらゆる側面において継続的な品質と安全性向上のためのプログラムの開発と実行が不可欠である。150 か国以上の先進的な飼料メーカーや畜産企業は ISO(国際標準化機構)規格を導入して、より効率的かつ安全な製品の生産を行い、最終的にはより標準化された製品を消費者に提供している。ISO 規

格を導入している企業では、規格を文書化し、内部監査を通じてコンプライアンスを確保すると同時に、外部監査機関による査察を受ける必要がある。さらに、先進的な飼料メーカーでは HACCP(ハザード分析および重要管理点)システムも導入している。これは、飼料および食品のサプライチェーンにおける製造、保管、流通のすべての段階で汚染を防止することを目指している。HACCP の開発と導入には、次の 7 つの原則がある。

1. 危害要因の分析
2. 重要な管理ポイントの特定
3. 潜在的な危害要因の制御のための製造プロセスの確立
4. 許容限界の設定
5. 監査手順と是正措置の確立
6. 記録の管理手順の確立
7. 検証手順の確立

食品安全管理システムは、ISO 9001 と HACCP の原則を組み合わせることで品質を管理し、飼料メーカー内で継続的な改善が行われるように設計する必要がある。これにより、食品への媒介性病原菌や新たな病原菌の汚染リスクを低減し、リスク管理によりブランド製品を保護することが出来る。

飼料および食品安全システムの導入とモニタリングは、多くの国で継続的な改良が行われている。米国では最近、消費者に対する食品由来の危険性をより少なくするために、さらに厳しい飼料の安全規制(DDGS の生産を含む)を採用している。2012 年 1 月、米国では Food Safety Modernization Act(FSMA、食品安全強化法)が制定され、FDA(米国食品医薬品局)における食品および飼料の安全規制に関する権限とその対象が大幅に拡大された(Brew and Toeniskoetter, 2012)。米国のエタノール工場を含む飼料生産施設は 2002 年以降 FDA への登録が義務付けられているが、FSMA により、食品または飼料の安全上の理由により施設の登録を取消す権限が FDA に与えられた。さらに、FSMA では、無登録のままでの州間における商取引による食品や飼料の輸送を禁止している。この結果、FDA は、食品または飼料の安全性

に関する重大な違反があった場合、販売を禁止してリコールを命じることが出来るようになった。FSMA では、エタノール工場に対して、生産する併産物のための HACCP の導入・実施を要求している。FSMA では、飼料製造業者は既知または潜在的な飼料安全上の危害要因を特定・評価して、予防管理手順を導入し、それらの手順を検証して、手順が機能していない場合は是正措置を講じ、システム全体が効果的に機能していることを定期的に検証する必要がある。これらの手順の文書化も必要であり、FDA では、これが順守されているかに関して各エタノール工場の査察を行っている。FSMA の制定により、米国産 DDGS が世界で最も厳しい飼料安全要件を満たしていることがより確実にされた。

FSMA による規制の遵守に加えて、一部の米国のエタノール工場では、多くの輸出相手国の市場で行われている併産物に対する厳しい安全基準に適合するように GMP+(Good Manufacturing Practices) 認証を導入している。GMP+ の認証スキームは、飼料原料の汚染を含む様々な問題に対応するために、オランダにおいて 1992 年に開発されたもので、現在は、GMP+ International が多くの国際的な機関と共同して管理する国際的なプログラムとなっている。2013 年、GMP+ はさらに発展し、飼料の安全性に関する保証と飼料に関する責任保証が含まれるようになっていく。

エタノール工場における GMP+ の導入は、飼料供給のすべての工程にわたる安全性に関する保証基準に準拠することにより、多くの国における先進的な配合飼料および畜産企業に DDGS を販売するためのライセンスとして必須となっている。さらに、食糧安全保障上で食品と競合する大豆や魚粉などの飼料原料の使用量低減と、環境への負荷を最小限に抑えることで、より責任ある方法で事業を展開している世界の飼料メーカーからの要求が高まっている。

幸いなことに、米国の DDGS における有害微生物、物理的および化学的な汚染物質のリスクは非常に低い。トウモロコシおよびトウモロコシ DDGS には、すべての穀物および穀物を原料とした副産物に様々な濃度で含まれているフィチン態リンを除き、抗栄養因子は含まれていない。しかしながら、単胃動物における植物性飼料原料主体飼料に対するフィターゼの商業的な利用により、フィ

チン態リンの利用性の改善は費用対効果が高いことが示されている。

本章では、様々な畜種に対して DDGS を給与する際に考慮する必要がある潜在的な安全性に関する微生物学的、化学的および物理的な危害要因について概説している。懸念される潜在的な汚染物質は病原微生物、カビ毒、抗生物質残留物およびイオウであり、13 章、14 章、15 章および 19 章も参照されたい。

潜在的な微生物学的な危害要因

[飼料および飼料原料におけるコロナウイルス感染]

コロナウイルス (TGEV (豚伝染性胃腸炎ウイルス)、PDCoV (豚デルタコロナウイルス)、PEDV (豚流行性下痢ウイルス)) は、世界の養豚業に壊滅的な影響を及ぼした。これらのウイルスは糞中に排泄され、汚染された機器、ヒトやその他の媒介によって感染が拡大する可能性があり、豚に深刻な下痢、高い斃死率、罹患後の発育成績の低下を引き起こし、収益性を低下させる。PEDV は、2013 年に米国で壊滅的な影響を及ぼしたが、感染には飼料および飼料原料が関与している可能性が浮上したため、飼料から豚への感染を最小限に抑えるための戦略を明確にするために、飼料および飼料原料中でのコロナウイルスの生存性に関する調査が行われた。Dee ら (2015) は、PEDV の生存日数は飼料原料によって異なり、大豆粕で最も長く生き残るが、ホルムアルデヒドを主成分とした薬剤処理により、すべての飼料原料でウイルスが不活化された。同様に、Trudeau ら (2017) は、粗脂肪含量が異なる DDGS を含む様々な飼料原料における PEDV、TGEV、PDCoV の生存性を評価した (図 1)。PED ウイルスは大豆粕中で最も長く生存し、TGEV と PDCoV も他の飼料原料に比べて高い生存率を示した。興味深いことに、中程度の粗脂肪含量の DDGS (TGEV: 1.7 日、PEDV: 7.3 日) に比べて粗脂肪含量が低いあるいは高い DDGS では、ウイルスの生存日数は非常に短かった (TGEV: 1.0 および 0.8 日、PEDV: 0.7 および 0.6 日)。対照的に、PDCoV は、中程度の粗脂肪含量の DDGS、血粉、配合飼料、肉粉、血漿たん白に比べて、粗脂肪含

量が低いあるいは高い DDGS ではより長く生存した。すべてのウイルスの DDGS 中での生存日数は、大豆粕に比べて著しく短く、DDGS での TGEV および PDCoV の生存日数はトウモロコシに比べてもはるかに短かった。これらの結果は、大豆粕が DDGS やその他の一般的な飼料原料よりも、飼料を介したコロナウイルス感染の大きなリスク要因ではないことを示唆している。残念ながら、鳥インフルエンザウイルスなどの他の病原体の飼料原料を介した伝染の可能性、または輸送および保管中の飼料原料中での生存の可能性については調査されていない。

[飼料および飼料原料中のサルモネラ感染]

DDGS におけるサルモネラ汚染に関するデータや当局による規制はないが、ヒトにおけるサルモネラ症の発生率低減を目的として、飼料にサルモネラ陰性の基準を設けることの実現可能性と有効性に関して、長期的な科学的議論が行われている(Davies ら、2004)。飼料中のサルモネラの抑制による、食品を媒介したヒトのサルモネラ症のリスクに及ぼす影響の評価は困難である。飼料

に対する規制導入を疑問視する要因としては、以下が考えられる。

- ・ 自家配農家が多数ある
- ・ 飼料の処理工程中での不完全な除染
- ・ 飼料工場における処理工程後の汚染
- ・ 飼料輸送中または農場での保管中の汚染
- ・ 飼料以外の多数な媒介の存在
- ・ 出荷後、屠殺までの間の感染
- ・ 畜産物となった後の汚染

[DDGS 給与時のサルモネラ、大腸菌 O157:H7 およびウェルシュ菌の排泄の潜在的なリスク]

家畜の消化管内には大腸菌(*E. coli*)O157:H7 とサルモネラが自然に存在する。これらは食品由来の病原体であり、家畜の糞便由来で食品が汚染され、ヒトに疾病を引き起こす可能性がある。肉用牛に対して DDGS を給与した場合、一般的に *E. coli* O157:H7 排泄率が低いことを示す一連の研究が Jacob ら(2008a, b, c)によって行われている。他の研究(Peterson ら、2007; Nagaraja ら、2008)でも、肉牛では *E. coli* が排泄されるが、DDGS の給

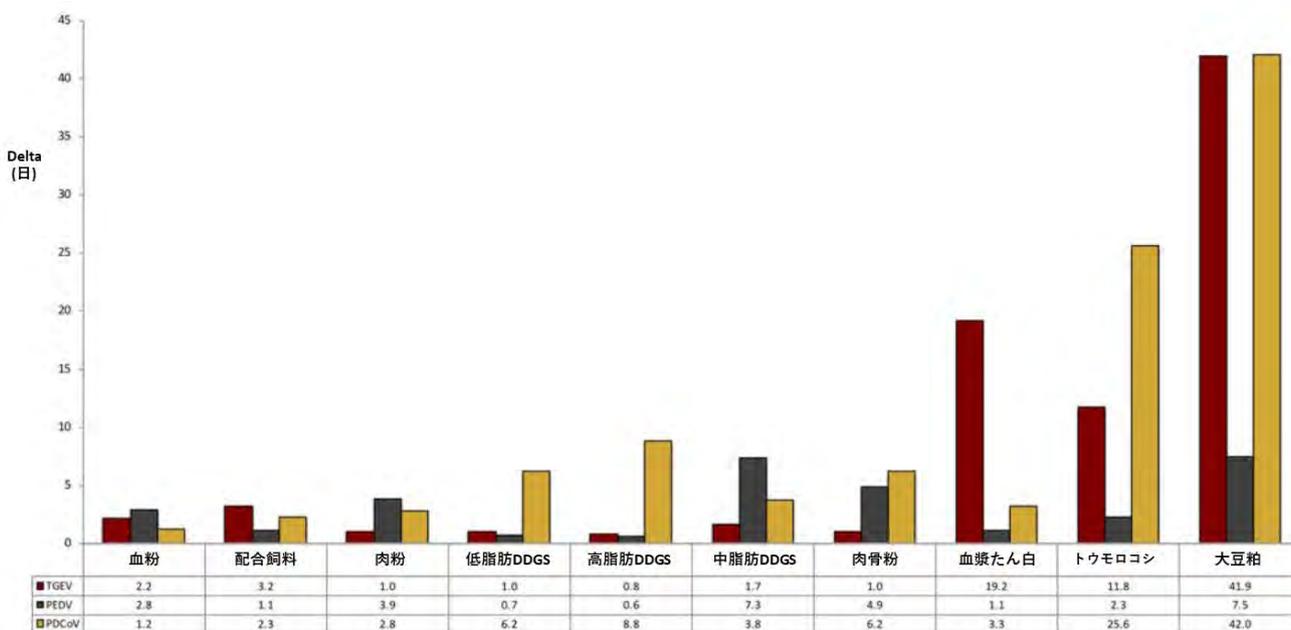


図 1. コロナウイルス(TGEV:豚伝染性胃腸炎ウイルス)、PDCoV:豚デルタコロナウイルス)、PEDV:豚流行性下痢ウイルス)の配合飼料および一般的な飼料原料中での生存日数(Trudeau ら 2017)

与量を高めても排泄状況への影響はなかった。さらに、DDGS とドライ・ロール・コーンとの間で *E. coli* O157:H7 ま

たはサルモネラの排泄率には差はなかった(Jacob ら、2009)。これらの結果は、DDGS の給与による *E. coli*

O157:H7 やサルモネラ排泄量の増加のリスクは非常に少ないことを示している。成長期の豚に DDGS を配合した飼料を給与しても、ネズミチフス菌の感受性やコロナー形成には影響がないことが示されており(Rostagno ら、2013)、ブロイラーに DDGS を配合した飼料を給与しても、盲腸内容物におけるウェルシュ菌および *E. coli* 数には影響がないことを示されている(Loarら、2010)。これらの結果は、肉牛、豚、ブロイラーへの DDGS の給与が食肉由来の病原菌の食肉製品への伝染リスクの増加と関連しているとしても、そのリスクは非常に少ないものと思われる。

[カビ毒]

DDGS 由来の飼料安全に関するリスクの中で、カビ毒汚染の可能性が最大の懸念事項であると思われる。カビ毒は、真菌の生育により保管中の特定の環境条件下で産生される。発がん性等、食品安全上の観点から、FDA によって規制値が設定されているのはアトキシンのみであるが、飼料原料中に高濃度の様々なカビ毒が含まれている場合、栄養素の利用性、免疫機能およびその他のいくつかの有害な生理機能に影響を及ぼし、家畜の健康と発育成績に悪影響を及ぼす可能性がある。一般に、豚や家禽は反芻動物に比べてもカビ毒への感受性が高く、幼動物は成長が進んだ動物より感受性が高い。カビ毒は特定の菌株によって産生されるが、飼料原料のカビ数を測定してもカビ毒の存在やその濃度を把握することは出来ない。

トウモロコシや他の穀物および DDGS におけるカビ毒の汚染率と濃度は、原産国によって異なっている(Biomin、2014)。米国産 DDGS のカビ毒の汚染率と濃度は、中国産の飼料原料に比べてはるかに低い(Biomin、2014; Guan ら、2011; Li、2014)。米国産 DDGS のカビ毒汚染に関する広範囲な調査が Zhang ら(2009)および Khatibi ら(2014)により行われており、DDGS における様々なカビ毒の濃度は、現在設けられているガイドラインによる規制値に比べて比較的低いことが示している。Zhang ら(2009)は、2006 年から 2008 年までに米国のエタノール工場 20 カ所から収集した DDGS 235 試料と、輸出用のコンテナから収集した DDGS 23 試料の分析を行った結果を、以下のとおり報告している。

1. すべての試料のアフラトキシンおよびデオキシニ

バレノール含有量は、飼料での使用に関する FDA によるガイドラインの値以下だった。

2. 全体の 10%において、フモニシンに最も敏感な種であるウマおよびウサギ用飼料での推奨最大濃度を超えるフモニシンが検出されたが、これらを含むすべての試料中のフモニシン濃度は乳製品、牛肉、豚、家禽および養殖水産動物用飼料における FDA のガイドライン値以下だった。
3. すべての試料で、T-2トキシンは検出限界以下であり、ゼアラレノンもほとんどの試料で検出限界以下だった。
4. 輸出用コンテナ内でのカビ毒濃度の増加はなかった。

最近、Khatibiら(2014)は、様々なトリコテセンの存在と濃度について、米国の 12 州にあるエタノール工場 78 カ所からトウモロコシ DDGS 141 試料を収集して分析し、2011 年にはトウモロコシの栽培期間中に悪天候に見舞われたため、フザリウム属のカビ毒の汚染率が非常に高かったことを報告している。このような極端なケースにおいても、収集した試料の 69%ではデオキシニバレノールは検出限界以下であり、FDA の豚における勧告値を超えていたものは 5%のみであった。また、ゼアラレノンも 19%で検出されたのみであった。これらの結果は、トウモロコシ DDGS にはカビ毒が存在する可能性があるものの、米国産 DDGS における汚染率と濃度は、中国産 DDGS よりもはるかに低い。したがって、その製造地域と栽培年におけるトウモロコシのカビ毒の発生率と濃度に応じて、配合割合を勘案することで、全給与飼料中でのカビ毒濃度が推奨レベルを超えるリスクを最小限に抑えることができる。

潜在的な化学的有害要因

[抗生物質の残留]

エタノール生産における発酵中の微生物汚染を制御するために、少量ではあるが、数種類の抗生物質が使用されることがある。FDA は、エタノール生産に際して使用する抗生物質の使用を規制しておらず、主に使用されているバージニアマイシンは GRAS (Generally Recognized As Safe: 一般に安全と認められる)物質と認定されている。米国および EU では、発育促進目的での

抗生物質の使用は認められておらず、これ以外の国でも畜産分野での使用量は減少している。抗生物質の使用による主なリスクは、肉、乳、卵への残留の潜在的な懸念と、家畜およびヒトにおける薬剤耐性菌の出現である。FDA は、多成分分析法(de Alwis and Heller, 2010; Kaklamanos ら、2013)を用いた DDGS 中の抗生物質の検出と濃度に関する調査を行っているが、その結果は公表されていない。一部の抗生物質(たとえば、バージニアマイシン)の残留は、バイオアッセイを使用してのみ正確に定量化できるため、分析手順の選択は非常に重要となる。

米国の 9 つの州にあるエタノール工場 43 カ所から四半期ごとに収集した DDGS 159 試料からの抗生物質の検出率、濃度および生物活性に関して報告されたのは 1 報のみである(Paulus-Compart ら、2013)。この報告では、全試料の 13%で低濃度の抗生物質(1.12 mg/kg未満)が含まれていたが、バイオアッセイを行った結果、*E. coli* の発育を阻害したものは 1 試料だけだった。このことは、DDGS から抗生物質の残留物が検出される可能性は非常に低く、たとえ検出された場合でも、生物学的な活性が残存しているリスクは非常に少ないものと思われる。この調査が行われて以降、エタノール生産における抗生物質の使用は大幅に減少している。これは、発酵工程での微生物汚染を制御するための衛生改善と、非抗生物質添加剤の利用の拡大によるもので、実際に、一部のエタノール工場では、現在、抗生物質を含まない DDGS を製造している。

[ダイオキシン]

DDGS の潜在的なダイオキシン汚染に関する調査は行われておらず、規制も設けられていない。ダイオキシンは、210 以上の異なる化合物のグループであり、環境のいたる所に存在している。これらの化合物のうち、毒性の懸念があるのは 17 種類であり、いずれも、意図的に生成されたものではないことから、それらを単純に禁止することはできない。ダイオキシンは化学的なプロセス中で副産物として発生する非水溶性で、脂溶性の物質であり、生分解性がないことから、フード・チェーン内で蓄積する可能性がある。柑橘類の残渣とカオリン質粘土ではダイオキシンの最大濃度基準が設けられており、ダイオキシン汚染がある最も一般的な飼料原料は魚油

と魚粉である。動物性油脂にもダイオキシンが含まれている可能性があるが、穀物や種子、乳製品副産物、肉骨粉におけるダイオキシン汚染例は少ない。

[遺伝子組換えトウモロコシ(GM)]

米国とは異なり、いくつかの国では遺伝子組換え(GM)作物の安全性に懸念を抱いており、その結果、すべてではないにしても、一部の GM 穀物と副産物の生産または輸入を禁止または制限している。世界の多くの国では、食料安全保障のために家畜への給与制限が設けられているが、これには引き続き議論がなされる余地がある。2015 年には、米国内のトウモロコシ耕作地の約 92%で GM 品種が作付けされている(USDA-NASS, 2015)。したがって、米国産のトウモロコシ DDGS の大部分は、原料として GM 品種が使用されていることになる。

米国では、トウモロコシと大豆を含む 19 の作物で 165 以上の遺伝子組換え品種が承認され(James, 2013)、すべてが FDA による包括的な安全リスク評価を受けており、過去 20 年間に FDA および日本の規制当局によって評価されたすべての遺伝子組換え品種は、従来の品種と同等の安全性を持つことが示されている(Herman and Price, 2013)。さらに、コーデックス委員会(www.codexalimentarius.org)による国際的なガイドラインが、遺伝子組換え生物のリスク評価に使用されている。

GM 作物が安全であるという科学的証拠は多く、バイオテクノロジー情報評議会は「FDA は、バイオテクノロジー食品および作物は非バイオテクノロジー食品と同様に安全であるとしている。アメリカ医師会、アメリカ栄養士協会および全米科学アカデミーも、バイオテクノロジー食品は人間および家畜にとって安全であるとしている。さらに、遺伝子組換え食品が 1996 年に米国市場に導入されて以来、この摂取が原因でヒトや家畜に疾病が発生した事例はない。バイオテクノロジー食品と作物が安全であると結論付けている国際的なグループには、上記のほか、FAO(国連食糧農業機関)、WHO(世界保健機関)、ISCU(国際科学会議)、フランス食品庁および英国医師会がある。EFSA(欧州食品安全機関)もまた、いくつかのバイオテクノロジー品種がヒトや家畜にとって安全であることを確認している。」としている。フード・チェーンにおける GM 作物の安全性の詳細な分析に関する関連リンクは、以下のとおりである。

- アメリカ栄養士協会: 農業および食品バイオテクノロジー (<http://downloadjournals.elsevierhealth.com/pdfs/journals / 0002-8223 / PIIS0002822305021097.pdf>)
- WHO: 現代の食品バイオテクノロジー、ヒトの健康と開発: 証拠に基づく研究 (http://www.who.int/foodsafety/publications/biotech/biotech_en.pdf)
- 国連: 人の健康と環境への影響 (<http://www.fao.org/newsroom/en/news/2004/41714/index.html>)
- 全米科学アカデミー: 遺伝子組換え食品の安全性 (http://books.nap.edu/catalog/10977.html?onpi_new_sdoc07272004)

家畜は、15 年以上にわたって遺伝子組換え作物とその副産物の 70~90%を摂取している(Flachowsky ら、2012)。最近の包括的なレビュー(van Eenennaam and Young、2014 年)では、遺伝子組換え作物とその副産物を給与した 1,000 億を超える家畜からのデータを分析し、家畜の健康と生産性への悪影響を示す証拠はないとしている。残念なことに、悪影響がないにもかかわらず、一部の国では、米国産トウモロコシと DDGS の飼料としての輸入と使用に対して貿易障壁と輸入制限を設けている。

潜在的な物理的的危害要因

DDGS の物理的な汚染物質のリスクは非常に低い。穀物と飼料原料に含まれる最も一般的な物理的汚染は、石、金属、ガラス、木材、プラスチックの破片等の異物の混入である。物理的な危害要因は、食品の「固いまたは尖った」または「窒息」の危険性として分類されている。農業生産および積込み施設には、飼料原料を意図せずに汚染する可能性がある砂利や石が存在している。コンベアや積載装置の金属同士の接触により、摩耗による金属の破片が生じる可能性があり、これらは輸送用コンテナやビンの中で発見されることがある。ガラスやプラスチック製の容器を使用して材料を保管する施設では、これらの破片が飼料原料に混入する可能性もある。これらの潜在的な危害要因のすべては一般的なものではないが、飼料原料の生産、積込み、輸送に使用される設備やその工程中で発生する可能性がある。

引用文献

- Biomin. 2014. Mycotoxins: Science and solutions. *Biomin magazine*, April, 2014.
- Brew, S. and S. Toeniskoetter. 2012. FDA Has No Jurisdiction Here – Or Does It? *Ethanol Producer Magazine*, April, 2012, p. 20.
- Davies, P.R., H.S. Hurd, J.A. Funk, P.J. Fedorka-Cray, and F.T. Jones. 2004. Review: The role of contaminated feed in the epidemiology and control of *Salmonella enteric* in pork production. *Foodborne Pathogens and Disease* 1:202-215.
- de Alwis, H., and D.N. Heller. 2010. Multiclass, multiresidue method for the detection of antibiotic residues in distillers grains by liquid chromatography and ion trap tandem mass spectrometry. *J. Chromatogr. A* 1217:3076-3084.
- Dee, S. C. Neill, T. Clement, A. Singrey, J. Christopher-Hennings, and E. Nelson. 2015. An evaluation of porcine epidemic diarrhea virus survival in individual feed ingredients in the presence or absence of a liquid antimicrobial. *Porcine Health Mgmt.* 1:9.
- Flachowsky, G., H. Schafft, and U. Meyer. 2012. Animal feeding studies for nutritional and safety assessments of feeds from genetically modified plants: A review. *J. Verbraucherschutz Lebensmittelsicherh.* 7:179-194.
- Guan, S., M. Gong, Y.L. Yin, R.L. Huang, Z. Ruan, T. Zhao, and M-Y. Xie. 2011. Occurrence of mycotoxins in feeds and feed ingredients in China. *J. Food Ag. Env.* 9:163-167.
- Herman, R.A., and W.D. Price. 2013. Unintended compositional changes in genetically modified (GM) crops: 20 years of research. *J. Agric. Food Chem.* 61: 11695-11701.
- Jacob, M.E., J.T. Fox, J.S. Drouillard, D.G. Renter, and T.G. Nagaraja. 2009. Evaluation of feeding dried distillers grains with solubles and dry-rolled corn and the fecal prevalence of *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella* spp. in cattle. *Foodborne Patho*

- gens and Disease 6:145–153.
- Jacob, M.E., J.T. Fox, J.S. Drouillard, D.G. Renter, and T.G. Nagaraja TG. 2008a. Effects of dried distillers' grain on fecal prevalence and growth of *Escherichia coli* O157 in batch culture fermentations from cattle. *Appl. Environ. Microbiol.* 74:38–43.
- Jacob, M.E., G.L. Parsons, M.K. Shelor, J.T. Fox, J.S. Drouillard, D.U. Thomson, D.G. Renter, and T.G. Nagaraja. 2008b. Feeding supplemental dried distillers grain increases fecal shedding of *Escherichia coli* O157 in experimentally inoculated calves. *Zoonoses Public Health* 55:125–132.
- Jacob, M.E., J.T. Fox, S.K. Narayanan, J.S. Drouillard, D.G. Renter, and T.G. Nagaraja. 2008c. Effects of feeding wet corn distillers grains with solubles with or without monensin and tylosin on the prevalence and antimicrobial susceptibilities of fecal food-borne pathogenic and commensal bacteria in feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 86:1182–1190.
- James, C. 2013. Global status of commercialized biotech/GM crops. The International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications (ISAAA) brief no. 46. ISAAA, Ithaca, NY.
- Kaklamanos, G., U. Vincent, and C. von Holst. 2013. Multi-residue method for the detection of veterinary drugs in distillers grains by liquid chromatography–Orbitrap high resolution mass spectrometry. *Chromatography A* <http://dx.doi.org/10.1016/j.chroma.2013.10.079>.
- Khatibi, P.A., N.J. McMaster, R. Musser, and D.G. Schmale III. 2014. Survey of mycotoxins in corn distillers' dried grains with solubles from seventy-eight ethanol plants in twelve states in the U.S. in 2011. *Toxins* 6:1155–1168.
- Li, X., L. Zhao, L.Y. Fan, Y. Jia, L. Sun, S. Ma, C. Ji, Q. Ma, and J. Zhang. 2014. Occurrence of mycotoxins in feed ingredients and complete feeds obtained from the Beijing region of China. *J. Anim. Sci. Biotech.* 5:37–45.
- Liu, K. 2011. Chemical composition of distillers grains, a review. *J. Agric. Food Chem.* 59:1508–1526.
- Loar, R.E., J.S. Moritz, J.R. Donaldson, and A. Corzo. 2010. Effects of feeding distillers dried grains with solubles to broilers from 0 to 28 days posthatch on broiler performance, feed manufacturing efficiency, and selected intestinal characteristics. *Poult. Sci.* 89:2242–2250.
- Nagaraja, T.G., J. Drouillard, D. Renter, and S. Narayanan. 2008. Distillers grains and food-borne pathogens in cattle: Interaction and intervention. *KLA News & Market Report* Vol. 33, No. 35.
- Paulus Compart, D.M., A.M. Carlson, G.I. Crawford, R.C. Fink, F. Diez-Gonzalez, A. Dicostanzo, and G.C. Shurson. 2013. Presence and biological activity of antibiotics used in fuel ethanol and corn co-product production. *J. Anim. Sci.* 91:2395–2404.
- Peterson, R.E., T.J. Klopfenstein, R.A. Moxley, G.E. Erickson, S. Hinckley, G. Bretschneider, E.M. Berberov, D. Rogan, and D.R. Smith. 2007. Effect of a vaccine product containing type III secreted proteins on the probability of *E. coli* O157:H7 fecal shedding and mucosal colonization in feedlot cattle. *J. Food Protection* 70:2568–2577.
- Rostagno M.H., B.T. Richert, L.V.C. Girao, G.M. Preis, L.J. Lara, A.F. Amaral, A.D.B. Melo, and A. Jones. 2013. Do dried distillers grains with solubles affect the occurrence of *Salmonella enterica* colonization in pigs? *J. Anim. Sci.* 91(E-Suppl. 2):699.
- Tena, N., A. Boix, and C. von Holst. 2015. Identification of botanical and geographical origin of distillers dried grains with solubles by near infrared microscopy. *Food Control* 54:103–110.
- Tres, A., S.P. Heenan, and S. van Ruth. 2014. Authentication of dried distilled grains with solubles (DDGS) by fatty acid and volatile profiling. *LWT – Food Sci. Tech.* 59:215–221.
- Trudeau, M.P., H. Verma, F. Sampedro, P.E. Urriola, G. C. Shurson, and S.M. Goyal. 2017. Environmental persistence of porcine coronaviruses in feed and feed ingredients. *PLoS ONE* 12:e0178094. <https://>

doi. org/10.1371/journal.pone.0178094.

USDA National Agricultural Statistics Service. 2015. Acreage. USDA. <http://usda.mannlib.cornell.edu/usda/current/Acre/Acre-06-30-2015.pdf> (Accessed November 3, 2017)

van Eenennaam, A.L., and A.E. Young. 2014. Prevalence and impacts of genetically engineered feedstuffs

on livestock populations. *J. Anim. Sci.* 92:4255–4278.

Zhang, Y., J. Caupert, P.M. Imerman, J.L. Richard, and G.C. Shurson. 2009. The occurrence and concentration of mycotoxins in U.S. distillers dried grains with solubles. *J. Agric. Food Chem.* 57:9828–9837.

12章:DDGS 中のイオウに関する懸念と利点

はじめに

イオウ(S)は動物にとって必須ミネラルであり、生体内で多くの重要な生理機能に関与している。DDGS 中の平均 S 含量は約 0.65~0.70%であるが、一部では 1%を超える場合があり(表 1)、反すう家畜に対する DDGS 使用量の制限因子となる。通常、でん粉をエタノールに効率的に変換するための最適な酵母増殖および発酵のために pH を望ましいレベルに保つため、乾式粉碎エタノール製造工程中で硫酸が添加される。硫酸は、他の酸と比べて低価格なことから洗浄にも使用されている。AAFCO Official Publication 2004(386 ページ)では、硫酸は一般的に安全な物質であるとされており、米国連邦規則(21 CFR 582)に従って承認された食品添加物(21 CFR 573)に記載されている。さらに、トウモロコシは通常約 0.12%の S を含んでおり、トウモロコシを用いたエタノール製造の際に、DDGS 中の S は他のすべての栄養素と同様に 3 倍に濃縮される。酵母には約 3.9 g/kg の S が含まれており、発酵中に硫酸塩を生成する。DDGS 製造時に用いられるこれらの S 発生源と S 濃度およびその変動に基づいて、ロットまたはバッチ間の S 含量のバラツキを注視することが重要であり、S 含量のバラツキを把握することで、DDGS を用いる際の安全マージンを適切に取ることが出来る。

反すう家畜用飼料中の S 含量が過剰であった場合、神経症状が発症する可能性がある。反すう家畜に対して、

高レベルの S を含む飼料(乾物値で 0.40%以上)を給与すると、PEM(灰白質脳軟化症)が発症する可能性がある。PEM は、牛、羊、山羊の脳皮質領域の壊死によって引き起こされる。反すう家畜が摂取した S はルーメン微生物によって硫化水素に還元される。硫化水素は有毒であり、ルーメン内での過剰な蓄積がこれらの毒性発現の原因であると考えられている。反すう家畜では、粗飼料主体飼料から穀物主体飼料に突然変更した場合に PEM の発症リスクが高まる。これは、チアミナーゼを産生するルーメン微生物叢に急激な変化を来し、チアミン欠乏症を誘発する。S は、この状態を引き起こす重要な役割とチアミナーゼ産生との相互作用を持っていると考えられているが、そのメカニズムは良く知られていない。さらに、飼料中の S が過剰な場合、銅(Cu)の吸収と代謝を妨げる可能性があり、高レベルの S を含む飼料が長期間給与される場合には飼料中の Cu レベルを高める必要がある(Boyles, 2007)。この状態は、非反芻動物(豚、家禽、魚)では発生しない。

反すう家畜とは対照的に、高レベルの S を含む DDGS を配合した飼料を給与することは、豚の代謝ストレスの回避に有効である可能性もある。ミネソタ大学で行われた最近の研究(Song ら、2013)では、高レベルの S を含むトウモロコシ DDGS が、哺乳中の子豚において S を含む抗酸化物質を増加させることにより、DDGS が含む過酸化脂質から保護することを示している。

表 1. DDGS のイオウ含量(乾物値)に関する報告の要約(Kim ら、2012 から改編)

引用文献	試料数	平均	標準偏差	最小値	最大値
Kim et al., 2012	35	0.65	0.19	0.33	1.04
Kerr et al., 2008	19	0.69	0.23	0.38	1.35
Shurson, 2009	49	0.69	0.26	0.31	1.93

DDGS を給与する際の反すう家畜用飼料中の S 含量の管理

NRC 肉牛(1996)では、フィードロット飼料中の S の最大許容レベルを 0.40% (乾物)としている。Vanness ら(2009)は、ネブラスカ大学におけるトウモロコシ併産物の給与試験の結果から PEM の発症率を考察し、粗飼料含量が 6~8%の飼料において、全飼料中の S 含量が 0.40%から 0.56%以上に増加すると、PEM 発症率が増加することを示している(表 2)。有効繊維含量が低く(4%未満)、易発酵性炭水化物含量が高く(30%以上)、S 含量が高い(0.50%以上)飼料では、PEM の発症リスクが最も高い(Drewnoski ら、2011)。Vanness ら(2009)は、粗飼料を給与せずに S 含量が 0.47%の DDGS を配合した飼料を給与した牛の PEM 発症率は 48%であったが、同様の飼料とともに粗飼料を 6~8%給与した牛では PEM 発生率は 1%以下であったと報告している。ネブラスカ大学とアイオワ州立大学で行われた研究では、飼料中の粗飼料の給与割合が 6~8%を超えると、S による毒性リスクが低下する可能性があることを示している(Drewnoski et al. 2011)。15%の粗飼料(乾物)が飼料に含まれている場合、PEM を発症することなく、飼料中の総 S を 0.5%まで高めることが出来る。これは、DDGS の配合量を 10~15%増やすことに相当する。粗飼料の給与割合を高めることで、ルーメン pH の低下は起きないことから、硫化水素の産生が促進されず、第一胃内での硫化水素濃度は増加しない。アシドーシスのリスクを最小限に抑える飼料の給与管理、例えば、採食量のバラツキを抑える、給与回数の増加、イオノフォアの使用も PEM のリスクを減らす可能性がある。

表 3 は、トウモロコシとトウモロコシサイレージからなる肉牛用飼料に、様々な S レベルの DDGS を配合した場合の最終的な S 含量への影響の例を示している。これ

らのデータは、S 含量が高い(0.80%以上)DDGS を多量に配合(乾物摂取量の 40%)すると、全飼料中の S 含量が PEM を発症するレベルと見なされている 0.40%を超えることを示している。DDGS 供給源による S 含量の変動が 10%であると仮定した場合の、DDGS の様々な配合割合と S 含量における全給与飼料中の S 含量の範囲を表 4 に示した。DDGS の配合割合と S 含有量および他の飼料原料と飲水由来の S を含めた全体の S 含量が 0.40%を超えないようにすることが重要である。

飼料由来の S に加えて、飲水は地理的特性によっては S 摂取量に重要な影響を及ぼす可能性がある。飲水中の S 含量が不明な場合は、硫酸塩含量を分析し、DDGS およびその他の飼料原料の配合割合を決定する際に考慮する必要がある。飲水量も地域によって異なる環境温度の影響を大きく受ける。飲水中の硫酸塩濃度と環境温度における飲水由来の S 摂取量は表 5 に示したとおりである。

フィードロット牛は、硫酸塩濃度が高い飲水または S 含量が高い飼料の場合、仕上げ初期用飼料給与開始当初の 30 日間に最も S の影響を受けやすい。硫酸塩濃度が高い飲水または S 含量が高い飼料の給与による S の毒性に対して感受性が高まるのは、硫酸還元細菌の増加とルーメン内 pH の低下に起因するルーメン内の硫化水素濃度の急激な増加によると考えられる。ルーメン内の硫酸塩還元菌は、S を硫化物に変換するために乳酸塩を利用するが、仕上げ初期では微生物代謝が活発で、乳酸塩の利用による硫化水素の産生量がより高まる場合がある。しかし、仕上げ後期では、乳酸塩を利用する微生物が定着し、硫酸塩還元菌と競合するようになるため硫化水素濃度は低下する。したがって、DDGS の配合割合が高い飼料給与の開始時期を、ルーメン微生物が高濃度の飼料に順応するまで(約 30 日)遅らせると、PEM の発症リスクを低下できる可能性がある。

表 2. ネブラスカ大学におけるトウモロコシ併産物の給与試験における PEM 発生率(Vanness ら、2009 から改編)

PEM発症率	飼料中のイオウ含量	PEM発生件数/総頭数
0.14%	0.40~0.46%	3 / 2147
0.35%	~ 0.56%	3 / 566
0.56%	0.56%以上	6 / 99

表 3. DDGS のイオウ含量と配合割合(乾物)が肉牛のトウモロコシ・トウモロコシサイレーズ主体飼料中の総イオウ含量に及ぼす影響(Boyles, 2007 から改編)

DDGS中推定イオウ含量 (%)	DDGS 30%配合時の飼料中s (%)	DDGS 40%配合時の飼料中s (%)	DDGS 50%配合時の飼料中s (%)	DDGS 60%配合時の飼料中s (%)
0.6	0.32-0.34	0.36-0.38	0.40-0.43	0.44-0.48
0.7	0.35-0.37	0.40-0.43	0.45-0.49	0.50-0.54
0.8	0.38-0.40	0.44-0.47	0.50-0.54	0.56-0.61
0.9	0.41-0.44	0.48-0.52	0.55-0.60	0.62-0.67
1.0	0.44-0.47	0.52-0.56	0.60-0.65	0.69-0.74

注) 飲水由来のイオウ摂取はなく、供給源によるDDGS中のイオウ含量のバラツキを10%として試算

表 4. DDGS 中のイオウ含量と配合割合の違いによるイオウ含量の変動(乾物; Drownoski ら, 2011 から改編)

DDGS配合率、% (乾物値)	s含量が0.6%のDDGS	s含量が0.8%のDDGS	s含量が1.0%のDDGS
20	0.21	0.25	0.29
30	0.27	0.33	0.37
40	0.33	0.41	0.49

表 5. 飲水中の硫酸塩濃度と環境温度の違いによるイオウ摂取量 (%) (Drownoski ら, 2011 から改編)

飲水中硫酸塩濃度 (%)	5° C	21° C	32° C
200	0.02	0.03	0.05
400	0.04	0.05	0.10
600	0.06	0.08	0.14
800	0.09	0.11	0.19
1000	0.11	0.13	0.24

S 含量が高い DDGS の豚への給与

前述のとおり、牛用飼料中におけるSの最大許容濃度は設定されているが、単胃動物におけるSの最大許容濃度は設定されていない。Sは動物体内での多くの生理機能に不可欠な成分であり、アミノ酸、たん白質、酵素、微量栄養素に含まれている(Atmaca, 2004)が、S含量が高い飼料やDDGSを配合した飼料給与による豚の健康と発育成績に及ぼす影響については最近までほとんど知られていなかった。Kerrら(2011)は、発育成績、腸管の炎症、糞便の組成および硫酸塩還元菌の存在に対する飼料中の無機S含量の影響に関する研究を行っている。その結果、豚に対して高S含量の飼料を給与すると、腸内の起炎性と腸内細菌叢が変化するが、発育成績に悪影響を及ぼすことなく比較的高濃度の飼料中Sに耐えることができることを示している。

Kimら(2012)は、離乳豚および育成豚における高濃度

のSを含むDDGSを配合した飼料への嗜好性および発育成績を調査し、トウモロコシ・大豆粕飼料に高濃度のSを含むDDGSを配合しても離乳豚および育成豚の嗜好性、飼料摂取量、増体量に悪影響を及ぼさないと結論している。その後の研究でも、Kimら(2012)は、最大0.38%のSを含むDDGSを20%配合した飼料を給与しても、離乳豚、育成～肥育豚の嗜好性、飼料摂取量、増体量に発育成績に悪影響を及ぼさないことを示しており、さらに、S含量が高いDDGSを30%配合しても、育成～肥育豚の発育成績に悪影響を及ぼさず、枝肉の特性や組織のS含量にも影響を及ぼさなかったことが報告されている(Kimら, 2014)。

実際、DDGS中のS含量の増加は、過酸化が高度に進んだDDGSの給与による潜在的な悪影響を打ち消すのに有益な効果があるようにみうけられる。飼料中の脂質の過酸化による損傷は、豚の健康と成長能力に悪影響を及ぼすことが示されている(Miller and Brzezinska-

Slebodzinska, 1993; Pfalzgraf ら, 1995; Hung ら, 2017)。脂質の過酸化はトウモロコシ DDGS の製造中に発生する。Song and Shurson(2013)は、トウモロコシ DDGS 31 試料から抽出したトウモロコシ油を分析し、DDGS に含まれている脂質の過酸化はトウモロコシ粒に含まれている脂質に比べて 20~25 倍大きいことを示している。トウモロコシ油には高濃度の PUFA(多価不飽和脂肪酸)、中でも、特に過酸化の影響を受けやすいリノール酸が含まれている(Shurson ら, 2015)。このため、過酸化された脂質を含む DDGS を豚に給与する際には、通常より高い量の抗酸化剤(ビタミン E など)の補給が必要となる可能性がある。例えば、抗酸化物質の補給は、DDGS または酸化されたトウモロコシ油を含む飼料を給与された豚の発育成績を改善している(Harrell ら, 2010)。一方、他の研究の結果では、抗酸化物質の補給が飼料の酸化ストレス発荷時の動物の発育成績に影響を及ぼさないとする文献もある(Wang ら, 1997b; Anjum ら, 2002; Fernández-Dueñas, 2009)。以前に Song and Shurson(2013)が行った試験で子豚に給与された過酸化 DDGS の発育成績への影響の有無を評価するために、Song ら(2013)は、トウモロコシ・大豆粕主体飼料と、過酸化が進んだ DDGS (PV(酸価):84.1 mEq/kg 脂質中、TBARS(チオバルビツル酸反応性物質):5.2 ng MDA/kg 脂質中、S:0.95%)を 30%配合した飼料にビタミン E を 3 水準(無添加、11 IU/kg、または、110 IU/kg)添加して豚に対する給与試験を行っている。血清 α -トコフェロール濃度は、DDGS の有無にかかわらず、ビタミン E 11 IU/kg 添加飼料では無添加飼料に比べて高かった。さらに、DDGS を配合した飼料では、トウモロコシ・大豆粕主体飼料に比べて血清中の含硫アミノ酸(メチオニンおよびタウリン)濃度、肝臓グルタチオン濃度およびグルタチオンペルオキシダーゼ濃度が高値を示した。これらの結果は、含硫抗酸化物質(メチオニン、タウリン、グルタチオン)の含量が高まると、過酸化が進んだ DDGS を豚に給与する際の酸化ストレスを軽減できる可能性があり、高濃度のビタミン E 添加が不必要となることを示唆している。

さらに、Hanson ら(2015)は、過酸化が進んだ DDGS を母豚とその子豚に給与した際の影響を評価するために、妊娠中~授乳中の母豚に対してトウモロコシ・大豆粕主体の対照飼料と DDGS 配合飼料(妊娠期:40%配合、授

乳期:20%配合)を給与した。また、離乳後の同腹子豚には、DDGS を含まない飼料および過酸化が進んだ DDGS (PV:84.1 mEq/kg 脂質中、TBARS:5.2 ng MDA/kg 脂質中、S:0.95%)を 30%配合し、ビタミン E を NRC 豚(2012)による要求量の 5 倍量を添加した飼料を給与した。

その結果、DDGS を配合した飼料を給与した母豚の離乳前および離乳後の血清中ビタミン E 濃度は、対照飼料を給与した母豚より低値を示した。離乳子豚の飼料摂取日量は DDGS を配合した飼料給与群が多かったが、日増体量には差がなかった。また、DDGS を配合した飼料を給与した子豚では、血清中ビタミン E 濃度が高かったが、血清中 TBARS およびグルタチオンペルオキシダーゼ濃度には影響がなかった。この研究における最も興味深い知見は、DDGS を給与した豚において血清中含硫アミノ酸濃度が、対照飼料を給与した豚に比べて約 40~50%高値を示したことである。これは、DDGS を配合した飼料を給与した豚では、含硫アミノ酸摂取量が多かったためと考えられる。したがって、含硫アミノ酸の抗酸化特性は、過酸化が進んだ DDGS の摂取による発育成績と酸化による潜在的な悪影響の緩和に十分寄与しており、そのためのビタミン E を節約できるため、ビタミン E の補給の必要はなかった。要約すると、豚に対して、最大 0.38%の S を含有する DDGS を配合した飼料を給与しても、成長成績、枝肉形質および組織中の S 濃度には悪影響を及ぼさず、さらに、高濃度の S(0.9%)が含まれている DDGS を離乳豚用飼料に 30%配合することで、含硫アミノ酸による抗酸化能力が高まるといえる。

結論

飼料摂取量の増加、飼料摂取量のバラツキの軽減、ルーメン pH の安定化という給与計画によって、反すう家畜に対して高レベルの S を含む飼料を給与した場合の毒性リスクを軽減することが出来る。仕上げ期の最初の 30 日間に高レベルの S を含む飼料を給与しても、粗飼料を 15%給与することで、毒性リスクなしに、最大 0.50%の S を含む飼料を給与することが出来る。入手した DDGS の S 含量のバラツキを見極めることで、反すう家畜用飼料への配合可能量を決定できる。フィードロット牛における総 S 摂取量を管理するためには飲水中の硫酸塩含量と飲水量をも考慮する必要がある。反芻家畜とは

対照的に、豚に対して高度に酸化された脂質とS(0.95%)を含むDDGSを30%配合した飼料を給与すると、若齢豚における含硫抗酸化物質が増加し、代謝酸化ストレスを軽減することが示されており、最大0.38%のSを含むDDGSを配合した飼料を給与しても、豚の発育成績、枝肉形質、組織のS濃度に悪影響はない。

引用文献

- Anjum, M.I., M.Z. Alam and I.H. Mirga. 2002. Effect of nonoxidized and oxidized soybean oil supplemented with two levels of antioxidant on broiler performance. *Asian-Aust. J. Anim. Sci.* 15:713-720.
- Atmaca, G. 2004. Antioxidant effects of sulfur-containing amino acids. *Yonsei Med. J.* 45: 776-788.
- Boyles, S. 2007. Distillers Grains with Solubles. OSU Extension Beef Team, BEEF Cattle Letter 551.
- Drewnoski, M., S. Hansen, D. Loy, and S. Hoyer. 2011. How much distillers grains can I include in my feedlot diet? Iowa Beef Center, Iowa State University Extension, IBC 46. 3 pp. Fernández-Dueñas, D.M. 2009. Impact of oxidized corn oil and synthetic antioxidant on swine performance, antioxidant status of tissues, pork quality and shelf life evaluation. Ph.D. dissertation thesis, Urbana, IL.
- Hanson, A.R., L. Wang, L.J. Johnston, S.K. Baidoo, J. L. Torrison, C. Chen, and G.C. Shurson. 2015. Effects of feeding peroxidized dried distillers grains with solubles to sows and progeny on growth performance and metabolic oxidative status of nursery pigs. *J. Anim. Sci.* 93:135-146.
- Harrell, R. J., J. Zhao, G. Reznik, D. Macaraeg, T. Wineman, and J. Richards. 2010. Application of a blend of dietary antioxidants in nursery pigs fed either fresh or oxidized corn oil of DDGS. *J. Anim. Sci.* 88 (Suppl. 3): 97 (Abstr).
- Hung, Y.T., A.R. Hanson, G.C. Shurson, and P.E. Urriola. 2017. Peroxidized lipids reduce growth performance of poultry and swine: A meta-analysis. *Anim. Feed Sci. Technol.* 231:47-58.
- Kerr, B.J., T.E. Weber, C.J. Ziemer, C. Spence, M.A. Cotta, and T.R. Whitehead. 2011. Effect of dietary inorganic sulfur level on growth performance, fecal composition, and measures of inflammation and sulfate-reducing bacteria in the intestine of growing pigs. *J. Anim. Sci.* 89:426-437.
- Kerr, B.J., C.J. Ziemer, T.E. Weber, S.L. Trabue, B.L. Bearson, G.C. Shurson, and M.H. Whitney. 2008. Comparative sulfur analysis using thermal combustion or inductively coupled plasma methodology and mineral composition of common livestock feedstuffs. *J. Anim. Sci.* 86:2377-2384.
- Kim, B.G., D.Y. Kil, D.C. Mahan, G.M. Hill, and H.H. Stein. 2014. Effects of dietary sulfur and distillers dried grains with solubles on carcass characteristics, loin quality, and tissue concentrations of sulfur, selenium and copper in growing-finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 92:4486-4493.
- Kim, B.G., Y. Zhang, and H.H. Stein. 2012. Sulfur concentration in diets containing corn, soybean meal and distillers dried grains with solubles does not affect feed preference or growth performance of weanling or growing-finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 90:272-281.
- Miller, J.K. and E. Brzezinska-Slebodzinska. 1993. Oxidative stress, antioxidants and animal function. *J. Dairy Sci.* 76:2812-2823.
- National Research Council. 1996. Nutrient requirements of beef cattle. 7th revised edition. National Academy Press, Washington, D.C.
- Pfalzgraf, A., M. Frigg, and H. Steinhart. 1995. α -Tocopherol contents and lipid oxidation in pork muscle and adipose tissue during frozen storage. *J. Agric. Food Chem.* 43:1339-1342.
- Shurson, G.C, B.J. Kerr, and A.R. Hanson. 2015. Evaluating the quality of feed fats and oils and their effects on pig growth performance. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 6:10. Shurson, G.C. 2009. Nutrient profiles: Current U.S. data www.ddgs.umn.edu
- Song, R. and G.C. Shurson. 2013. Evaluation of lipid peroxidation level in corn dried distillers grains with

- solubles. *J. Anim. Sci.* 91:4383–4388.
- Song, R., C. Chen, L. Wang, L.J. Johnston, B.J. Kerr, T.E. Weber, and G.C. Shurson. 2013. High-sulfur content in corn dried distillers grains with solubles protects against oxidized lipids by increasing sulfur-containing antioxidants in nursery pigs. *J. Anim. Sci.* 91:2715–2728.
- Vanness, S.J., T.J. Klopfenstein, G.E. Erickson, and K.K. Karges. 2009. Sulfur in Distillers Grains. Nebraska Beef Report, University of Nebraska–Lincoln, p. 79–80.
- Wang, S. Y., W. Bottje, P. Maynard, J. Dibner, and W. Shermer. 1997b. Effect of santonin and oxidized fat on liver and intestinal glutathione in broilers. *Poult. Sci.* 76:961–967.

13章:水産養殖動物における低脂肪 DDGS の利用

はじめに

水産養殖業は、世界で最も急速に成長している食用動物産業の 1 つである。2014 年の世界の魚摂取量は過去最高の 20 kg/人だったが、これは主に水産養殖の急速な成長によるものがある (FAO、2016)。実際、世界の水産養殖は、ヒトが消費する魚全体の約 50% を賄っており、2014 年の内陸水産養殖における総生産量は 7,380 万トン、ファースト・セール価格では 1,600 億ドル以上である (FAO、2016)。水産養殖の内訳は、魚類 4980 万トン、軟体動物 1610 万トン、甲殻類 690 万トン、両生類 730 万トンであり、主な生産国は中国 (4550 万トン) で、次いで、インド、ベトナム、バングラデシュ、エジプトとなっている (FAO、2016)。

魚粉は、たん白質を多く含み、その消化率も高く、アミノ酸バランスが優れ、必須脂肪酸含量、可消化エネルギー価が高く、ビタミンとミネラルの含量も多いことから、これまで、ほとんどの水産養殖動物用飼料の主原料として使用されてきた (Abdelghany、2003)。しかし、魚粉の供給量の減少に伴い価格が高騰していることから、水産養殖の持続可能性を確保するために、魚粉の一部あるいはすべてを、より安価で高品質の植物主体原料と置換することが模索されている。残念ながら、植物性原料で魚粉を置換すると、その他の栄養素、特にアミノ酸の要求量を満たさない限り、発育成績が低下する可能性がある (Mbahinzirek ら、2001; Sklan ら、2004; Gatlin ら、2007)。

ただし、2 種類以上の植物性たん白質源 (例えば、DDGS と大豆粕) を組み合わせることにより、飼料中の魚粉をすべての置換することが可能である。さらに、他の陸上畜種とは異なり、多くの水産養殖動物のエネルギーおよび可消化栄養成分の要求量は十分に解明されておらず、水産養殖動物用飼料で使用しているほとんどの飼料原料のエネルギーおよび栄養成分の消化率は分かっていないことが、現在、他の陸上食用動物で使用されているような正確な給与プログラムの開発を難しくしている。水産養殖動物用飼料におけるトウモロコシ DDGS を含む植物たん白質源の使用を制限している最大の要因の 1 つは、エネルギーとアミノ酸の組成および消化率が

明確ではないことである。乳牛、肉牛、豚、家禽と比較して、水産養殖動物へのトウモロコシ DDGS の給与試験の実施例ははるかに少ないが、本章では、水産養殖動物用飼料における DDGS の使用に関して現在公表されているすべての情報を取りまとめた。

水産養殖動物における DDGS の栄養価

トウモロコシ DDGS は、高濃度のエネルギー、中程度のたん白質、高濃度の可消化リンを含んでいる。ただし、栄養成分含量とその消化率は供給源によって大きく異なっている可能性がある (栄養成分含量とバラツキの詳細については 4 章を参照のこと)。トウモロコシ DDGS のエネルギー含量は、比較的高い脂質含量 (粗脂肪: 5~12%) に由来し、残りのでん粉、繊維、たん白質からの寄与は少ない。水産養殖動物における脂肪含量が高い伝統的な DDGS と低脂肪 DDGS のエネルギー消化率に関する研究は行われていないが、豚と家禽を用いたいくつかの報告では、粗脂肪含量は DDGS の可消化エネルギー価の予測因子としては不十分であるとされている。DDGS の粗脂肪含量は様々だが、DDGS 中のトウモロコシ油には、リノール酸が約 58%、リノレン酸が 8%、DHA が 0.14% 含まれている。その結果、DDGS の ω (オメガ) 6 系脂肪酸と ω 3 系脂肪酸の比率は高い。DDGS のでん粉含量は DDGS 製造プロセス中に酵母によるエタノール発酵の程度に応じて 1.1~7.9% (乾物) の範囲である (Anderson ら、2012)。DDGS 中のでん粉が消化可能であるか、または難消化性であるかは不明である。DDGS の平均粗繊維、ADF (酸性デタージェント繊維)、NDF (中性デタージェント繊維)、TDF (総食物繊維) 含量は、それぞれ 6.6、11.1、37.6 および 31.8% であり、TDF の大部分 (96.5%) は不溶性繊維である (Urriola ら、2010)。NDF 含量は DDGS 中で最もバラツキが大きい成分の 1 つであり、これが実験室間誤差に由来するのか、供給源に由来しているのかは明確ではない。DDGS の粗繊維消化率は魚では明らかにされていないが、他の陸上単胃動物では繊維の一部が消化、発酵することにより下部消化管内で揮発性脂肪酸を産生できることが示されているが、

その程度は畜種間で差がある。ティラピアやナマズなどの高繊維食を利用する魚種幼飼料では、腸内発酵がほとんどないサケやマス用飼料に比べて DDGS の配合割合が高い。

DDGS は CP(粗たん白質)含量が比較的高い(27%)にもかかわらず、リジン、メチオニン、スレオニンおよびトリプトファン含量は、魚のアミノ酸要求量に比べて比較的低い。さらに、リジン含量はすべてのアミノ酸の中で DDGS の供給源による変動が最も大きく、DDGS 製造工程中における加熱の程度により、その消化率も変動する。その結果、DDGS を多量に配合する場合には、結晶アミノ酸の添加が必須となる。ニジマスにおける DDGS の見かけのアミノ酸消化率は比較的高い(トレオニンを除くすべての必須アミノ酸で 90%を超える、Cheng and Hardy, 2004a)。Magalhães ら(2015)による最近の研究では、ヨーロッパスズキ(European Seabass)およびオオニベ(Meagre)におけるトウモロコシ DDGS の見かけのアミノ酸消化率を報告しており、Lech and Reigh(2012)は、コバンアジ(Pompano)におけるトウモロコシ DDGS の見かけのアミノ酸消化率を報告しているが、その他の魚種におけるアミノ酸消化率は明らかになっていない。DDGS のリン含量(0.85%)は、他の植物主体原料よりも多く、フィチン態リンの多くはエタノール発酵中に分解されるため、単胃動物での利用性は高まる。ただし、魚における DDGS のリン消化率および有効率は明らかになっていない。DDGS 中のカルシウム(Ca)、塩素(Cl)、カリウム(K)などの主要ミネラル含量は魚の要求量に比べて低いため、飼料中に添加する必要がある(Hertrampf and Piedad-Pascual, 2000)。また、DDGS 中の亜鉛(Zn)、鉄(Fe)、マンガン(Mn)、銅(Cu)などの微量ミネラル含量は、通常の魚粉より低いものの、これらの微量栄養素をプレミックスの形で添加することで要求量を満たすことが出来る。

リボフラビン、ナイアシン、パントテン酸、葉酸、コリンなどのビタミンは、トウモロコシに比べて DDGS では約 3 倍多い(Hertrampf and Piedad-Pascual, 2000)。DDGS のキサントフィル含量とその生物学的利用率、魚肉の色調への影響に関するデータは数少ないが、それらのデータから、トウモロコシ DDGS のキサントフィル含量のバラツキは大きい(20~50 mg/kg)、ナマズなどの一部の

魚種用飼料に配合するトウモロコシとトウモロコシ併産物の量によっては、フィレ肉への黄色の色素沈着を避けるために、キサントフィルの総含量の配合量が制限される。他の植物原料に対する DDGS の有意性の 1 つは、抗栄養因子(大豆粕におけるトリプシンインヒビター(Wilson and Poe, 1985; Shiao ら, 1987)、ナタネ粕におけるグルコシノレートとエルカ酸、綿実粕におけるゴシポール(Jauncey and Ross, 1982; Robinson, 1991))が含まれていないことであり、また、他の植物性原料よりフィチン酸塩含量が低いことである。したがって、DDGS は、抗栄養因子が含まず、エネルギー含量が比較的高いこと、可消化リン含量が高いこと等により、様々な水産養殖動物用飼料で使用の際に栄養的および経済的に魅力的な原料であると言える。

アワビ (*Haliotis discus hannai*)

アワビは、東アジア、特に中国、韓国、日本で最も商業的に重要な貝類の 1 つあり、養殖生産量は急速に増加している(Cho, 2010)が、アワビ用飼料におけるトウモロコシ DDGS の利用に関する報告はない。ただし、Choi ら(2014)は、アワビ稚貝の成長率について、飼料中の小麦と大豆粕をコメ DDGS で置換(0、15、30、45 および 60%)した場合の影響について、15 および 30%のコメ DDGS を給与した場合の増体量は、対照飼料と差がなかったが、45 または 60%のコメ DDGS を給与した場合には対照飼料に比べて増体量が低かった。育成率、殻の長さとおよび体成分組成には、コメ DDGS 給与による影響はなかった。この結果は、アワビ稚貝用飼料に最大 30%までのコメ DDGS を配合しても許容可能な発育成績と体成分組成が得られることを示しているが、トウモロコシ DDGS を用いた場合でも同様の結果が得られるか否かについては調査が必要である。

クロダイ (*Acanthopagrus schlegelii*)

クロダイは、発育速度が速いことが知られており、アジアにおいて商業的に重要な海洋魚種として種苗生産と養殖技術が確立されている。クロダイ用飼料へのトウモロコシ DDGS の利用に関する情報はないが、Rahman

ら(2013)の最近の報告では、クロダイ稚魚に対するコメ DDGS の利用性について検討し、コメ DDGS は、小麦粉とCGM(コーングルテンミール)の適切な代替原料であり、24%まで配合しても最適な発育成績が得られるとしているが、トウモロコシ DDGS を用いた場合でも同様の結果が得られるか否かについては調査が必要である。

アメリカナマズ(*Channel Catsh, Ictalurus punctatus*)

アメリカナマズ、アメリカナマズの雑種(アメリカナマズ×ブルーキャットフィッシュ(*Blue catsh, I. Furcatus*))およびナマズの1種のスワイ(*Swai, Pangasius hypophthalmus*,)に関する13の公表論文におけるDDGSの最適配合割合と実験条件の概要を表1に示した。

ナマズへのトウモロコシDDGS給与に関する最初の研究は、1990年代初頭にTidwellら(1990)により行われた。試験には、粗脂肪含量が10%以上の伝統的な高脂肪DDGSを用いており、DDGSをトウモロコシと大豆粕の一部と置換することで0(対照)、10、20および40%配合した飼料をアメリカナマズの稚魚に11週間給与した。その結果、魚体重、育成率、飼料要求率、PER(たん白効率)には飼料間で差がなかった。同様に、Websterら(1993)は、トウモロコシおよび大豆粕と部分的に置換することによりDDGSを0(対照)、10、20および30%配合した飼料をナマズ幼魚に給与して、魚体重、育成率、飼料要求率、体成分組成、頭、皮、内臓の割合、フィレ肉の官能特性を調査し、飼料間で差がなかったと報告している。これらの試験結果は、ナマズ用飼料に対してDDGSを最大30%まで配合することが可能であり、発育や魚体の成分組成、フィレ肉の風味などには悪影響を及ぼさないことを示している。したがって、DDGSは、ほぼ30年間にわたって、アメリカナマズ用飼料原料として受入れられてきた(Tidwellら、1990; Websterら、1991; Websterら、1993)。

その後も、Robinson and Li(2008)、Limら(2009)およびZhouら(2010)が、ナマズ用飼料原料としての高脂肪DDGSの利用に関して評価している。Robinson and Li(2008)は、大豆粕の代替えとして、綿実粕あるいはDDGSに結晶リジンを添加した場合の影響に関する2試験を実施し、DDGSを配合した飼料の増体量は対照飼料より優れていた(試験1)あるいは同等(試験2)であって、体脂肪は増加する傾向を示した。この結果は、アメリカナマズ用飼料に最大30%のDDGSを配合しても、結晶リジンを添加することで、満足出来る発育成績を得ることが出来ることを示している。Limら(2009)は、大豆粕、トウモロコシ粉およびDDGSをたん白質等量で0(対照)、10、20、30および40%配合し、リジンを添加した飼料を体重13gのナマズ幼魚に12週間給与した。その結果、発育成績および飼料要求率は飼料間で類似していたが、DDGSの給与により魚体の脂肪含量の増加と水分含量の減少が見られた。同様に、Zhouら(2010)は、大豆粕およびトウモロコシと置換することによりDDGSを30%配合した飼料をアメリカナマズの雑種に給与しても、発育、飼料要求率およびPERは良好であったと報告している。これらの研究の結果は、ナマズにおいては、発育成績や飼料要求率に悪影響を及ぼさずに、DDGSを比較的多量(30~40%)に配合できることを示している。なお、ほとんどの研究で、DDGSの配合量が多い場合に体脂肪含量の増加傾向が認められているが、フィレ肉の色調には影響がないようであった。

残念なことに、トウモロコシDDGSの水産養殖動物用飼料への利用性を評価した公表文献の大部分では、供試したDDGSの栄養成分組成に関する情報が不十分であるが、これらの研究の多くは、粗脂肪含量が10%以上の高脂肪DDGSを使用していたものと想定される。最近、Renukdasら(2014)は、低脂肪DDGSを20%配合した飼料を用いた試験を行っているが、アメリカナマズおよびアメリカナマズの雑種の発育成績や調理特性には影響を及ぼさないと報告している。

表 1. アメリカナマズ (*Ictalurus punctatus*)、アメリカナマズの雑種 (*I. punctatus* × *I. furcatus*) およびスワイ (*Pangasius hypophthalmus*) にトウモロコシ DDGS を給与した場合の発育成績と体組成に関する公表文献

魚体重 (開始-終了)g	DDGS %	置換 原料	試験期 間(日)	魚粉の 配合割 合%	リジン添 加量%	DDGS推 奨配合 割合%	体成分 組成	引用 文献
アメリカナマズ (<i>Ictalurus punctatus</i>)								
21 - 265	0 - 20	トウモロ コシ、大 豆粕	186	0	0.15 - 0.25	20	体幹の フィレ重 量が減少	Renukdas et al., 2014 ¹
Varied among experiments	0 - 40	大豆粕	330 (Exp. 1) 120 (Exp. 2) 165 (Exp. 3)	0 - 1	0 - 0.80	30 to 40	フィレの 脂肪含量 増加	Robinson and Li, 2012
9.1 - 80.4	0 - 30	トウモロコ シ、大豆粕、 ホイトミド リングス	56	5	0.30	30	フィレの たん白質 含量減少	Li et al., 2011
12.6 - 156.7	0 - 30	トウモロコ シ、大豆粕	63	0	0.30 - 0.39	30	フィレの 脂肪含量 増加、たん 白質含量 低下	Li et al., 2010
86 - 491	0 - 30	トウモロコ シ、大豆粕、 ホイトミド リングス	150	0	0.10 - 0.20	Up to 30	効果なし	Zhou et al., 2010a
13.3 - 67.1	0 - 40	トウモロコ シ、大豆粕	84	8	0.40	40	全魚体の脂 肪含量増加	Lim et al., 2009
48 - 1,227	0 - 40	大豆粕、ホ イトミド リングス	330	1	0.80 - 0.28	30 to 40	フィレの 脂肪含量 増加	Robinson and Li, 2008
33 - 226	0 - 30	トウモロコ シ、大豆粕	110	8	none	30	効果なし	Webster et al., 1993
12.4 - 54.5	0 - 35	トウモロコ シ、魚粉	84	0	0 - 0.4	35	-	Webster et al., 1992
10 - 79.3	0 - 70	トウモロコ シ、大豆粕	84	10	0 - 0.4	35/70	全魚体たん 白質含量 減少、脂 肪含量 増加	Webster et al., 1991
1.5 - 17.3	0 - 40	トウモロコ シ、大豆粕	77	8	none	40	-	Tidwell et al., 1990
アメリカナマズの雑種 (<i>I. punctatus</i> × <i>I. furcatus</i>)								
47 - 703	0 - 20	トウモロコ シ、大豆粕	186	0	0.15 - 0.25	20	効果なし	Renukdas et al., 2014 ¹
1.2 - 8.7	0 - 30	トウモロコ シ、大豆粕、 ホイトミド リングス	56	0	0.2	30	-	Zhou et al., 2010b
スワイ (<i>Pangasius hypophthalmus</i>)								
40 - 500	0 - 15	トウモロコ シ、フスマ	118	4.5 - 5.8	0	15	効果なし	U.S. Grains Council, 2015

1 低脂肪DDGSを使用

コイ (*Cyprinus carpio*)

コイは、アジアとヨーロッパの一部の国で養殖が行われている淡水魚である(Rahman, 2015)。様々な飼料や環境に対する適応力が高いことから、養殖生産業にとって魅力的な魚種であるが(Rahman, 2015)、コイ用飼料における DDGS の至適配合量に関する情報は少ない。U.S. Grains Council(アメリカ穀物協会)の後援によるコイ用飼料への DDGS の至適配合量の検討が、ベトナム・ホアビン省で行われており(U.S. Grains Council, 2007a)、魚体重 26~51g のコイに対して DDGS を 0(対照)、5、10 および 15% 配合した飼料を平均体重が約 200 g に達するまでの 3 か月以上給与した。その結果、増体率、飼料摂取量および育成率には各飼料間で有意差はなかったが、DDGS 10 および 15% 配合飼料では、対照および 5% 配合飼料に比べて発育速度が優れる傾向を示した。試験終了時の魚体の成分組成(水分、CP および粗脂肪)、肉の色調には、各飼料間で差がなかった。結論として、トウモロコシ DDGS は、コイの発育成績や肉質に悪影響を及ぼすことなく、最大 15% 程度配合することが出来る。

ヨーロッパスズキ (*Dicentrarchus labrax*)

ヨーロッパスズキは、地中海地域で多く養殖されている。Magalhães ら(2015)による最近の研究では、スぺ

イン産およびハンガリー産のトウモロコシ DDGS(粗脂肪含量(乾物):スペイン産 11.8%、ハンガリー産 12.8%)の見かけの消化率を測定している。2 種類の DDGS は成分組成が類似していたが、スペイン産 DDGS の乾物、エネルギーおよび CP の見かけの消化率は、ハンガリー産 DDGS より優れていた(表 2)。DDGS の供給源による栄養成分含量と消化率のバラツキは、水産養殖用飼料を精密に設計する際の可消化エネルギーと栄養成分含量、経済的な価値を把握する上で問題となる。特に肉食魚では複雑な炭水化物の消化能力が低いため、この試験で得られた乾物およびエネルギーの見かけの消化率が比較的低いのは、トウモロコシ DDGS の粗繊維含量が比較的高いためであると思われる。しかし、2 種類の DDGS の CP 消化率は、対照飼料中における唯一の CP 供給源である魚粉(89~92%)と同等か優れていた。2 種類のトウモロコシ DDGS のアミノ酸消化率には差がなかったが、主なアミノ酸の消化率は一般的な魚粉に比べて劣った。トウモロコシ DDGS は脂質の優れた供給源であるが、供試した 2 種類の DDGS の粗脂肪消化率は、魚油(98.5%)より劣っていた。

ヨーロッパスズキにおいて、飼育試験は行われていないが、この試験の結果は、トウモロコシ DDGS がヨーロッパスズキ用飼料に配合されている魚粉の一部を十分に置換できることを示している。

表 2. ヨーロッパスズキにおける 2 種類のトウモロコシ DDGS のエネルギーと栄養素の見かけの消化率(%) (Magalhães ら、2015 から改編)

	スペイン産 DDGS	ハンガリー産 DDGS
乾物	63.3 ^a	56.7 ^a
エネルギー	67.9 ^a	63.6 ^a
粗たん白質	96.3 ^a	92.1 ^a
粗脂肪	89.0	87.2
アルギニン	86.4	86.5
ヒスチジン	85.1	84.1
イソロイシン	83.7	83.0
ロイシン	89.1	89.0
リジン	94.8	99.0
メチオニン	78.3	83.9
フェニルアラニン	81.0	85.9
トレオニン	81.5	81.1
バリン	84.3	84.2

a-b 異符号間で有意差あり (p < 0.05)

淡水エビ (*Macrobrachium rosenbergii*)

高脂肪 DDGS を配合した淡水エビ用飼料に関する報告はいくつかある。最初の報告は Tidwell ら(1993a)のもので、DDGSを0(対照)、20および40%配合したCP29%の飼料を、体重 0.66g の淡水エビに給与した結果、平均収量(833 kg/ha)、育成率(75%)、終了時体重(57 g)および飼料要求率(3.1)には飼料間で差がなかったとしている。この結果から、DDGS を最大 40%配合した飼料を飼育密度 19,760/haで淡水エビに給与した場合、優れた発育成績と育成率が得られることを示している。その後の研究で、Tidwell ら(1993b)は、淡水エビの稚エビ(体重 0.51 g)用飼料の魚粉と大豆粉を DDGS で部分的に置換して発育成績などに及ぼす影響を調査した。供試飼料の CP はいずれも 32%で、対照飼料中の魚粉(15%)の半量および全量を大豆粕と DDGS 40%を組み合わせで置換した。その結果、平均収量、育成率、終了時体重および飼料要求率には飼料間で差がなかった。魚粉を大豆粕と DDGS で置換すると、飼料中のグルタミン、プロリン、アラニン、ロイシンおよびフェニルアラニン含量が増加し、アスパラギン酸、グリシン、アルギニンおよびリジン含量が減少した。また、飼料中の脂肪酸組成も 16:0、18:2n-6 および 20:1n-9 が増加し、14:0、16:1n-7、18:1n9、18:3n-3 および 20:5n-3 ならびに 22:5n-3 と 22:6n-3 の比率が減少した。この結果は、温帯域の養殖池で飼育される淡水エビの飼料に使用される魚粉の一部あるいはすべてを大豆粕と DDGS で置換できることを示唆している。Coyle ら(1996)は、DDGS は体重 2 g 以上の稚エビ用飼料原料としてだけでなく、池の肥料として利用できるとしている。

オオニベ (*Meagre, Argyrosomus regius*)

オオニベは、多様化する地中海地域の水産養殖にとって最も有望な魚種と考えられている。トウモロコシ DDGS の給与が発育成績、育成率および体成分組成に及ぼす影響に関する報告はないが、最近、Magalhães ら(2015)は、スペイン産およびハンガリー産のトウモロコシ DDGS (粗脂肪含量(乾物):スペイン産 11.8%、ハンガリー産 12.8%)について、体重 79g のオオニベ幼魚における見かけの消化率を測定している。供試した 2 種の

DDGS は成分組成が類似していたが、スペイン産 DDGS の乾物、エネルギーおよび CP の見かけの消化率は、ハンガリー産 DDGS に比べて優れていた。DDGS の栄養成分含量と消化率のバラツキは、経済的価値を決定する上で重要な問題であり、水産養殖動物用飼料を配合設計する際に用いる可消化エネルギーと可消化成分含量も同様に重要な問題となる。トウモロコシ DDGS の乾物およびエネルギーの見かけの消化率が比較的低いのは、トウモロコシ DDGS では粗繊維含量が比較的高いことに由来すると考えられる。しかし、供試した 2 種類の DDGS の CP 消化率は、対照飼料中に配合した唯一の CP 源である魚粉のそれ(89~92%)と同等かそれ以上であって、両 DDGS のアミノ酸消化率には違いがなかったが、ほとんどのアミノ酸の消化率は一般的な魚粉より低かった。トウモロコシ DDGS は脂質の優れた供給源であり、一部の製品では魚粉(粗脂肪 9.2%)より粗脂肪含量が高かったが、見かけの消化率は魚油(98.5%)より低かった。この結果は、トウモロコシ DDGS がオオニベ用飼料における魚粉の一部を置換できることを示唆している。

サバヒー (*Milkfish, Chanos chanos*)

サバヒーはアジア地域における主要な水産養殖魚種であり、安価なたん白質供給源として利用されている。サバヒーは、食物連鎖の下位に位置しており、大量のたん白質を必要としないため、水産養殖生産に適した魚種の 1 つとして FAO から推奨されている。U.S. Grains Council (2007b) は、サバヒー用飼料へのトウモロコシ DDGS の最大配合量を調査する実証試験を後援している。この試験では、DDGSを0(対照)、10、20、30および40%配合して窒素およびエネルギーを等量とした 5 種類の飼料をサバヒーに対して給与しているが、発育成績には飼料間で差が見られず、DDGS を最大 40%まで配合できることが示唆された。この結果は、Mamaug ら(2017)による最近の報告でも確認されている。この報告では、トウモロコシ DDGS を 0(対照)、15、25、30、35 および 45%配合した飼料(いずれも、CP 35%、粗脂肪 6%)を 90 日間給与した場合の発育成績、魚体成分組成および小腸の形態を調査しているが、増体量、育成率、飼料摂取量、飼料要求率および魚体成分には飼料間で差がな

かった。

表 3. オオニベ (*Argyrosomus regius*) における 2 種類のトウモロコシ DDGS のエネルギーと栄養素の見かけの消化率 (%) (Magalhães ら、2015 から改編)

	スペイン産DDGS	ハンガリー産DDGS
乾物	65.6 ^a	57.2 ^b
エネルギー	67.4 ^a	58.0 ^b
粗たん白質	97.9 ^a	91.8 ^b
粗脂肪	87.9	82.0
アルギニン	81.5	82.6
ヒスチジン	63.3	59.1
イソロイシン	75.0	76.4
ロイシン	93.0	88.9
リジン	85.0	85.6
メチオニン	66.3	67.0
フェニルアラニン	76.0	83.4
トレオニン	81.2	91.1
バリン	81.7	81.6

a-b異符号間で有意差あり (p < 0.05)

表 4. トウモロコシ DDGS の配合割合がサバヒー幼魚 (*Chanos chanos*) の発育成績、育成率および魚体成分組成に及ぼす影響 (Mamauag ら、2017 から改編)

	DDGS配合割合					
	0%	15%	25%	30%	35%	45%
開始時体重 g	3.08	3.01	3.08	3.10	3.11	3.08
終了時体重 g	21.0	18.5	20.1	22.1	18.1	19.2
増体率 %	582	513	553	614	483	519
生存率 %	82	81	85	82	85	83
飼料摂取量 1	24.2	25.1				.0
飼料効率 2	0.77	0.76	0.77	0.75	0.73	0.75
全魚体成分組成						
粗たん白質 g/kg 乾物	732	684	696	694	690	736
粗脂肪 g/kg 乾物	157	194	183	164	153	142
粗灰分 g/kg 乾物	93	99	92	90	103	91

1 飼料摂取量 = 乾物g/尾/90日間 2 飼料効率 = 生体重 (g)/乾物摂取量

トウモロコシ DDGS の CP、粗脂肪、炭水化物および乾物の見かけの消化率は、それぞれ 91、85、75 および 52% であり、腸の形態への影響もなかった (表 4)。これらの結果は、トウモロコシ DDGS は、サバヒーの発育成績、育成率、体成分組成および腸の形態に悪影響を与えることなく、45% まで配合できることを示している。

バナメイエビ (*Litopenaeus vannamei*)

世界のエビの生産量が急速に増加する中で、バナメ

イエビは主要な養殖種となっている。魚粉は、アミノ酸バランスが優れ、必須脂肪酸およびミネラル含量が比較的高いため、エビ用飼料の主要なたん白質源として通常約 20% 配合されているが、エビや他の水産養殖動物用飼料への魚粉の使用は、飼料費の増大を招き、長期的な持続可能性への懸念もあることから、エビ用飼料に使用される魚粉の一部あるいはすべてを DDGS 等の植物性飼料原料で置換する可能性が検討されている。バナメイエビへの DDGS 給与の影響を評価した 4 つの報告の概要を表 5 に示した。

Royら(2009)による初期の報告では、DDGSを10%配合した飼料を給与した場合の増体率は、魚粉と家禽副産物およびエンドウ豆たん白を置換した場合と同等であったが、死亡率は高まる傾向を示した。その後公表された Sookying and David(2011)による報告では、大豆粕を多量に含む DDGS 10%配合飼料と魚粉 10%配合飼料の最終体重(16.3 vs 16.9g)、育成率(92.2 vs 86.6%)および飼料要求率(1.32 vs 1.35)は差がなかった。Cumminsら(2013)は、魚粉、大豆粉および小麦粉の一部と置換することによりDDGSを最大30%配合し、リジンを追加した場合、バナメイエビの発育が低下した。一方、Rhodesら(2015)は、バナメイエビへの低脂肪 DDGS(粗脂肪: 4.8%)給与による影響評価のために、飼育試験および2回の消化試験を行った。飼育試験では、魚粉を6%配合した飼料中の大豆粕と置換することによりDDGSを0、10、20、30 および 40%配合した等たん白質飼料を用いた。なお、DDGS 30%配合飼料ではリジンを0.06%添加し、

40%配合飼料では、リジン無添加と0.13%添加の2種類を調製した。その結果、DDGSの配合量にかかわらず、最終的なバイオマス、平均体重、飼料要求率および育成率には影響が認められず、DDGS 10%配合飼料では最終的なバイオマスが改善された。また、40%配合飼料へのリジン添加の有無も発育成績に影響を及ぼさなかったことから、リジンは制限アミノ酸ではないことが示唆された。低脂肪 DDGSの乾物、エネルギーおよびCP消化率は、いずれの試験においても対照飼料より低く、低脂肪 DDGSの見かけのCP消化率(36.9~44.7%)はLemosら(2009)が報告している DDGSの消化率(78.5%)に比べて著しく低かった(表6)。この違いは、DDGSの供給源、CP含量または分析方法が原因である可能性がある。これらの結果は、低脂肪 DDGSの乾物、エネルギーおよびCPの見かけの消化率は対照飼料より低いものの、40%配合した場合でも許容可能な発育成績と育成率が得られることを示している。

表 5. トウモロコシ DDGS をバナメイエビ (*Litopenaeus vannamei*) に給与した場合の発育成績と体成分組成への影響を評価した公表文献の概要

体重 g (開始 - 終了)	DDGS %	置換原料	試験期間 (日)	魚粉配合割合 %	リジン添加量 %	DDGSの推奨配合割合 %	引用文献
0.49 - 7.2	0 - 40	大豆粕、コーンスターチ	56	6	0 - 0.13	40	Rhodes et al., 2015 ¹
0.99 - 6.1	0 - 30	魚粉、大豆粕、フスマ	56	0	0 - 0.4	魚粉を含まない飼料で大豆粉をDDGSで部分的に置換すると成長成績が低下	Cummins et al., 2013
0.04 - 16.3	10	ソルガム	126	0	none	10	Sookying and Davis, 2011
0.45 - 25	0 - 10	ソルガム、魚粉	63	0	none	Up to 10	Roy et al., 2009

1 低脂肪DDGS (粗脂肪4.8%)

表 6. バナメイエビ (*Litopenaeus vannamei*) における低脂肪 DDGS および対照飼料の乾物、エネルギーおよび CP の見かけの消化率係数 (Rhodes and Davis, 2015 から改編)

	対照飼料	低脂肪 DDGS
試験1		
乾物	68.2	53.8
エネルギー	74.5	55.7
粗たん白質 (CP)	85.7	36.9
試験2		
乾物	73.2	42.4
エネルギー	78.1	20.9
粗たん白質 (CP)	89.1	44.7

表 7. コバンアジ (*Trachinotus carolinus*) におけるナタネ粕、CGM および DDGS のエネルギーと CP の見かけの消化率と、必須アミノ酸の見かけの有効率 (Lech and Reigh, 2012 から改編)

	ナタネ粕	コーングルテンミール	DDGS
見かけの消化率 %			
エネルギー	21.3 ^a	57.1 ^a	30.7 ^a
粗たん白質 (CP)	38.6 ^{ab}	57.2 ^a	20.6 ^b
見かけの有効率 %			
アルギニン	53.8	68.5	35.0
シスチン	30.3	42.5	23.0
ヒスチジン	46.9	58.7	30.0
イソロイシン	50.4	62.5	40.9
ロイシン	46.8 ^b	70.8 ^a	55.6 ^b
リジン	48.4	47.9	50.4
メチオニン	91.9	84.9	91.5
フェニルアラニン	54.2	70.9	55.5
トレオニン	44.6	56.9	37.6
バリン	48.1	64.7	50.4

a - c 異符号間で有意差あり (p < 0.05).

コバンアジ (*Pompano*, *Trachinotus carolinus*)

コバンアジの養殖は、長年に渡って関心がもたれていたが、最近まで栄養要求量に関する報告はわずかしかなかった (Lazo ら、1998; Weirich ら、2006; Williams、2008 ; Riche、2009; Gonzalez-Felix ら、2010; Gothreaux ら、2010; Riche and Williams、2010; Lech and Reigh、2012)。

Lech and Reigh (2012) は、トウモロコシ DDGS の CP およびエネルギーの見かけの消化率ならびにアミノ酸の見かけの有効率を測定してナタネ粕および CGM と比較している (表 7)。CGM の見かけのエネルギー消化率は

ナタネ粕および DDGS よりも高く、DDGS のエネルギー消化率はナタネ粕よりも高かった。同様に、CGM の見かけの CP 消化率は DDGS よりも高かったが、ナタネ粕の CP 消化率は CGM と有意差はなかった。さらに、ナタネ粕、CGM および DDGS のアミノ酸の見かけの有効率は、ロイシンを除いて差がなかった。CGM におけるロイシンの見かけの有効率は、ナタネ粕および DDGS に比べて高かった。Lech and Reigh (2012) は、飼料の各栄養成分の消化率は、飼育条件、魚体のサイズ、実験方法が類似している場合でも、報告によって異なることから、様々な魚種において、飼料原料のエネルギーと栄養成分の消化率を推定するために推定式開発の必要があるとし

ている。これは、より正確な配合設計のために各飼料原料の栄養価を標準化するのに役立つものと思われる。また、実際の配合設計で使用するためのより現実的な消化率を求めるために、エネルギーと栄養成分の消化率および飼料原料の配合割合の様々な組合せに関する詳細な情報が不可欠であることも示唆している。公開されている飼料の可消化栄養成分値は、魚種毎により異なるばかりではなく、それが配合される飼料にも影響される。したがって、消化率測定の際には、対照として用いる飼料の成分組成をも考慮する必要がある。

ニジマス (*Oncorhynchus mykiss*)

ニジマスなどの肉食魚用の飼料には魚粉を大量に(30~50%)配合する必要があるが、魚粉価格の高騰に伴って、DDGSなどの代替たん白源の評価が行われ、魚粉の一部を置換するようになってきている。トウモロコシ DDGS はサケ科の魚では消化しにくい非貯蔵性多糖類が比較的少量に含まれており、可消化アミノ酸のバランスが悪いために給与飼料の栄養素の吸収が制限される可能性があると考えられていた。しかし、いくつかの報告は、トウモロコシ DDGS がニジマス用飼料における貴重な飼料原料であることを示している(表 8)。Cheng ら(2003)および Cheng and Hardy(2004a, b)らによる初期の研究では、DDGS を 15~22.5%配合してもリジンとメチオニンのいずれかを添加することで、体成分組成への影響を最小限に抑え、または、許容できる発育成績が得られることを示している。Cheng and Hardy(2004a)は、DDGS の CP とアミノ酸の見かけの消化率が高いことを示す未公表のデータがあるとしている(CP= 90.4%、スレオニンを除く必須アミノ酸= 90%以上、システイン以外の非必須アミノ酸= 86%以上)が、ニジマス用飼料に DDGS を配合する場合の制限因子の1つは、魚粉に比べてリジンとメチオニンの含量が比較的低いことにあると指摘している。したがって、ニジマスが十分に発育するためには、DDGS 配合飼料にリジンとメチオニンを添加する必要がある。これを実証するために、Cheng and Hardy(2004a)は、6週間の給与試験を行って、DDGS 配合量(0, 7.5, 15 および 22.5%)と、リジンとメチオニン添加の有無が体重 50 g のニジマスシステイン値に及ぼす影響を調査している。すべての供試魚の育成率は 100%であり、

DDGS を 15%配合した飼料、または CP およびエネルギー換算で魚粉の 50%を DDGS で置換した飼料は、魚粉を用いた飼料と同等の発育および飼料要求率を示した。

この結果は、リジンとメチオニンの添加を行わずに DDGS を 15%まで配合するか、魚粉の 50%量まで置換することで十分な発育成績が得られること、DDGS は 22.5%まで配合可能であり、リジンおよびメチオニンを添加すれば、魚粉の 75%量までを置換することができることを示している。さらに、Cheng ら(2003)は、大豆粕、DDGS および 1.65 g/kgの MHA(メチオニンヒドロキシルアナログ)を用いて、魚粉の 50%量を置換した飼料を体重 50g のニジマスに給与した場合、増体量、飼料要求率ならびにたん白質及びビリンの蓄積量が大幅に改善されたと報告している。

Cheng and Hardy(2004b)は、DDGS の栄養成分の見かけの消化率と、DDGS および様々なレベルの微量ミネラルプレミックスを含むニジマス用飼料にフィターゼを添加した場合の見かけの栄養成分蓄積率への影響を調査している。DDGS を 30%配合した飼料にフィターゼを 0, 300, 600, 900 および 1200 FTU/kg添加した場合の見かけの消化率は、乾物: 49~59%、粗脂肪: 79~89%、CP: 80~92%、総エネルギー: 51~67%、アミノ酸: 74~97%、ミネラル: 7~99%の範囲であった。DDGS を 15%配合し、リジン、メチオニンおよびフィターゼを添加した飼料に様々なレベルの微量ミネラルプレミックスを添加した場合、微量ミネラルプレミックス無添加飼料を除き、増体量、飼料要求率、育成率、体組成および栄養成分の見かけの蓄積率には差がなかった。この結果は、フィターゼが多くミネラルの放出に効果的であり、ニジマス用飼料にフィターゼを添加することで、微量ミネラル添加量を減らすことができることを示唆している。

その後、Stoneら(2005)は、ニジマス用飼料への CGM とトウモロコシ DDGS 配合の影響について検討し、飼料中の魚粉との置換率は、使用する CGM に対する DDGS の比率に依存することを明らかにしている。この報告では、CGM とトウモロコシ DDGS を組み合わせて 18% 配合することで、発育成績に影響を与えることなく魚粉の約 25%を置換出来ることを示唆している。あわせて、トウモロコシ DDGS と CGM を配合した飼料の加熱ペレット加工は、非加熱ペレット加工に比べて効果がないことも報告

している。

ニジマス用飼料におけるトウモロコシ DDGS の利用に関する最新の報告は、Overland ら(2013)によるヒマワリ粕、ナタネ粕、エンドウ豆たん白の代替えとして DDGS の 25 または 50% 配合した場合の影響調査である。DDGS を 50% 配合した試験飼料は、魚粉と植物性たん白質原料を配合した対照飼料と、対照飼料と試験飼料を 1:1 の割合で混合した飼料 (DDGS 配合率:25%) に比べて、増体量および飼料摂取量が増加し、飼料要求率が改善され、エネルギー消化率が高まる傾向を示したが、CP、ほとんどのアミノ酸およびリンの消化率は飼料間に差はなかった。また、実際、DDGS を 50% 配合した飼料の給与により、対照飼料に比べてエネルギーとリンの蓄積量が高まり、窒素の蓄積量は、対照飼料および DDGS25% 配合飼料に比べて窒素の蓄積量が高まった。さらに、DDGS を配合した飼料を給与しても、食餌を与えても、遠位腸管重量、腸内の酵素活性、血漿代謝産物には影響がなかった。これらの結果は、トウモロコシ DDGS を、こ

れまで使用されていた植物主体の飼料原料と代替して使用した場合に、ニジマスに適したエネルギー、CP およびリンの供給源であることを示している。

レッドクロウ (Red claw crayfish, *Cherax quadricarinatus*)

近年、オーストラリアでは淡水性ザリガニの 1 種であるレッドクロウの養殖への関心は高まっているが、現在、この種はオーストラリア以外にも、中国、メキシコ等の数か国で商業生産されている。レッドクロウは人工飼料で飼育することが出来、比較的短期間 (117 日) で急速に発育する (Thompson ら、2004)。この種は、体のサイズがエビより大きく、貯蔵品質に優れており、尾肉がロブスターのような味で風味が良いため、シーフードを好む消費者の人気を得ている。Thompson ら (2006) は、ソルガム、大豆粕、魚粉の代わりにトウモロコシ DDGS を 18.3 または 30% 配合した CP 18% または 28% の飼料を体重 5.75 g

表 8. トウモロコシ DDGS をニジマス (*Oncorhynchus mykiss*) に給与した場合の発育成績と体成分組成への影響を評価した公表文献の概要

魚体重 (開始 - 終了) g	DDGS %	置換原料	試験期間 (日)	魚粉の配合割合 %	リジン添加量 %	DDGS の推奨配合割合 %	体成分組成	引用文献
143-359	0-50	ひまわり粕、綿実粕、エンドウ豆	77	18.9	none	50	-	Overland et al., 2013
33.6-57	0-20	魚粉、小麦	36	30-40	0.50	none	20% 配合飼料給与により全魚体の粗脂肪が増加	Barnes et al., 2012
21-158.4	0-30	コーングルテンミールと組み合わせて魚粉とフスマと置換	84	0	none	30	全魚体の CP が減少し、粗脂肪が増加	Stone et al., 2005
49.8-96.2	0-22.5	コーングルテンミールと組み合わせて魚粉とフスマと置換	42	7.5-22.5	0-1.23	15/22.5	リジン無添加の 22.5% 配合飼料給与により全魚体の粗脂肪が減少、リジン添加時には影響なし	Cheng and Hardy, 2004a
20.0-78.5	15	-	70	15	0.82	15	効果なし	Cheng and Hardy, 2004b
49.5-114.6	18.5	魚粉 (ニシン)、小麦、トウモロコシグルテン	49	17.5	0-0.48	メチオニンを添加した飼料では 18.5	効果なし	Cheng et al., 2003

の稚エビに給与して発育成績等を検討している。その結

果、トウモロコシ DDGS と大豆粕を併用して魚粉と置換し

ても飼料要求率、育成率および体成分組成には影響を及ぼさずことはなく、DDGSはこの給与プログラムで効果的に使用されている。

サンシャインバス (Sunshine bass、*Morone chrysops* x *M. saxatilis*)

シマスズキ (Striped bass、*M. saxatilis*) とホワイトバス (*Morone*、*M. chrysops*) の雑種であるサンシャインバスは重要な食用魚であるだけでなく、米国におけるレクリエーション・フィッシングの対象魚としても最も人気があるが、ほとんどの魚種と同様に、シマスズキやその雑種へのトウモロコシ DDGS の給与に関する研究結果は少ない。

最初の研究は、Websterら(1999年)によって行われている。体重15gのサンシャインバス幼魚に対して、魚粉、トウモロコシおよび肉骨粉と置換することによりDDGSを10%配合したCP 40%飼料を8週間給与した。その結果は、DDGSを配合した飼料では、魚肉の成分組成に影響を及ぼすことなく、許容可能な発育成績が得られた。最近では、Thompsonら(2008)が、サンシャインバスの実用的な飼料原料として利用されている魚粉2試料、家禽副産物2試料、大豆粉およびDDGSの乾物、CP、脂質および有機物の消化率を測定している。DDGSのCPおよび有機物消化率(65および17%)は大型ニシン(メンヘーデン)から調整された魚粉(86および89%)と比べて劣った。この報告で使用されたDDGSの品質は明確ではないが、CPおよび有機物消化率が非常に低いことから、品質が劣っていた可能性がある。この結果は、他の様々な魚種用飼料にある程度の量のDDGSを配合すると満足する結果が得られたとするいくつかの研究結果とは対照的であり、優れた発育成績と栄養成分の消化性を確保するためには、高品質のDDGSのみを使用することが重要であることがわかる。

ティラピア (*Oreochromis niloticus*)

ティラピアは、世界中で最も一般的で、経済的にも重要な温水魚である。このため、水産養殖動物に対するトウモロコシ DDGS の給与に関する公表文献の多くはティラピアを対象としたものであり(n = 23)、表9にこれらの

概要を取りまとめた。

ティラピアに対するトウモロコシ DDGS の給与に関する報告は Wuら(1994、1996、1997)によるものである。Wuら(1994)の報告では、CGM 18%または DDGS 29%を配合した CP 32%あるいは 36%飼料を体重 30 g のティラピアに給与すると、魚粉を配合した CP 36%の市販飼料を給与したティラピアより増体量が優れた。その後の Wuら(1996)の報告では、DDGS を 49%まで、CGF (コーングルテンフィード) を 42%まで、CGM を 22%まで配合した CP 32、36 および 40%飼料と対照飼料(CP 36%)を体重 0.4 g のティラピア稚魚に 8 週間給与した。その結果、対照飼料および DDGS 35%配合飼料における増体量が最も優れた。飼料要求率は、対照飼料(1.05)と、DDGS を 35%配合した CP 40%飼料(1.13)および CGF を 30%配合した CP 40%飼料(1.12)が優れていた。PER は、対照飼料(3.79)と DDGS を 49%配合した CP 36%飼料(3.71)および CGF を 42%配合した CP 36%飼料(3.35)が優れていた。この結果から、CP 32、36 および 40%で、DDGS を 16~49%配合した飼料では、満足できる増体量、飼料要求率および PER が得られると結論している。

DDGS、CGF、CGM 等のトウモロコシ併産物を多く配合して CP が比較的低い水産養殖動物用飼料を調製する場合、アミノ酸欠乏を防ぐために結晶アミノ酸の追加が必要になることがある。特に、リジンは、発育成績への影響が大きい。Wuら(1997)は、54~92%のトウモロコシ併産物を CP 28 および 32%のリジン、トリプトファン添加使用を体重 0.5 g のティラピア稚魚に対して 8 週間給与し、リジンとトリプトファンを添加した DDGS 82%配合飼料の飼料要求率および PER は、グルテンフィード 67%と全脂大豆 26%を配合した飼料および CP 32%の対照飼料と差がなかったと報告している。この結果からすると、適切な量のアミノ酸を添加することにより、ティラピア幼魚用飼料中の魚粉を DDGS、CGF あるいは CGM で全量置換することが出来る。

Tidwellら(2000)によって行われたその後の研究では、淡水エビと複合養殖しているナイルティラピアの発育成績、育成率および体成分組成へのペレット加工の有無の影響を調査した。その結果、DDGS 配合飼料をペレット加工すると、未加工の DDGS 配合飼料に比べて増体率が

高まった。しかし、いずれも、市販飼料を給与した場合の体重、体長および飼料要求率は劣っていた。ペレット加工したあるいは未加工の DDGS 配合飼料における発育成績は、市販飼料を給与した場合に比べて劣っていたが、生産費は市販飼料(増体量 1 kgあたり 0.66 ドル)にたいして、大きく削減された(ペレット加工:0.37 ドル、未加工:の発育成績は 0.26ドル)。また、淡水エビの生産量は 1,449 kg/haとなり、総産量が 81%高まった。このことから、ティラピア養殖の際に DDGS を利用することで生産費の低減が図れ、かつ、淡水エビを同時に飼育することで、温帯域における養殖池の利用効率を高める可能性がある」と結論している。

Lim ら(2007)の別の研究では、DDGS を 0、10、20 および 40%配合した飼料と、DDGS 40%配合飼料にリジンを添加した飼料を体重 9.4 g のティラピア幼魚に連鎖球菌暴露下で 10 週間給与した。リジン無添加の DDGS 40% 配合飼料の増体量、PER および全魚体のたん白質量は最も低かったが、リジン添加により増体量および PER が改善された。なお、DDGS 配合飼料を給与しても、連鎖球菌暴露後の累積死亡率および血液背性状の指標には影響は見られなかったことから、発育成績、体成分組成、血液・免疫学的反応、連鎖球菌感染への抵抗性に影響を及ぼすことなく、大豆粕およびトウモロコシの代替えとして DDGS を最大 20%量まで使用できると結論している。

Abo-Stateら(2009)は、大豆粕の一部あるいはすべてをトウモロコシ DDGS で置換した飼料について、フィターゼ添加の有無が体重 2 g のナイルティラピアに 70 日間給与したが、DDGS を 0、25 および 50%配合したフィターゼ添加飼料の増体率および飼料要求率は最も優れていた。

Schaeffer ら(2009)は、ティラピア用飼料への DDGS の利用に関する 2 試験を実施した。最初の試験では、魚粉の一部と置換することにより DDGS を 0(対照)、17.5、20、22.5、25 および 27.5%配合した飼料を体重 35 g のティラピアに給与したが、見かけの栄養成分消化率には飼料間で差がなかった。増体率および PER は、DDGS を配合

していない対照飼料が最も優れたが、DDGS 17.5%配合飼料の飼料要求率および PER も満足できる成績であった。2 番目の試験では、DDGS を 20、25 および 30%配合した飼料への生菌剤添加の有無に関する検討を行ったが、増体量、飼料要求率および PER には飼料間で差がなかった。その後、Schaeffer ら(2010)は、DDGS を 17.5 から 27.5%配合した飼料を給与した場合の発育成績への応答によるティラピア幼魚におけるより精密な至適 DDGS 配合量の検討を行なっている。その結果、魚粉を 5%含む DDGS 配合飼料では、対象とした魚粉 15%飼料に比べて増体率が劣った。DDGS 配合飼料の中では、20%配合飼料が最も発育成績が優れていた。

これらの研究の結果は、DDGS がティラピア用飼料において非常に経済的な飼料原料であり、十分量のアミノ酸を補給できる場合には、比較的高い配合率での使用が可能であることを示している。

ティラピア用飼料への DDGS の利用に関する最も有益な情報は、最近、Herath ら(2016)によって報告されている。彼らは、魚粉をトウモロコシ DDGS(52.4%)、トウモロコシたん白濃縮物(19.4%)、CGM(23.5%)および高たん白 DDG (HP-DDG; 33.2%)で置換し、L-リジン(0.4~0.8%)およびDL-メチオニン(0.3~0.4%)を添加した飼料を、体重 4.5 g の稚魚に給与した。その結果、対照飼料と DDGS 52.4%配合飼料の増体率および育成率が最も優れ、ついで、HP-DDG 33.2%配合飼料の成績が優れていた(表 10)。

飼料要求率、PER および全魚体の総アミノ酸含量は、飼料間で差がなかった。全魚体およびフィレ肉の CP 含量は、HP-DDG 配合飼料が最も高く、全魚体およびフィレ肉の粗脂質含量は、DDGS 配合飼料が最も高かった。これらの結果は、トウモロコシ DDGS はナイルティラピア成魚用飼料中の魚粉全量と置換することが出来、発育成績、育成率、飼料の利用性および全魚体およびフィレ肉の成分組成には影響を及ぼさないことを示している。

表9. トウモロコシ DDGS をナイルティラピア (*Oreochromis niloticus*)、レッド・ティラピアおよびハイブリッドティラピア (*O. aureus* × *O. niloticus*) に給与した場合の発育成績と体成分組成への影響を評価した公表論文概要

魚体重 (開始 - 終了) g	DDGS %	置換 原料	試験 期間 (日)	魚粉配 合割合 %	リジン添 加量 %	DDGSの推奨 配合割合 %	体成分 組成	引用文 献
ナイルティラピア (<i>Oreochromis niloticus</i>)								
21 - 183	52.4	魚粉、大豆粕、家禽副産物、小麦粉、でん粉	168	0 - 10	0.4	50	フィレ肉の色調とアミノ酸組成に影響なし、ω6系脂肪酸が増加	Herath et al., 2016
6.4 - 32.0	17	大豆粕	56	0	0 - 10	結晶リジン無添加の際には、アミノ酸バランスを取るために高リジンのトウモロコシたん白濃縮物が使用できる		Nguyen and Davis, 2016
0.98 - 14.2	0 - 40	トウモロコシ、大豆粕	84	11	なし	酵素無添加では20%、酵素添加では30%	酵素添加した10および20%では魚体たん白が増加、40%で体脂肪増加	Soltan et al., 2015
6.0 - 28.3	0 - 20	トウモロコシ、魚粉	72	11 - 20	なし	15	効果なし	Gabr et al., 2013
6.0 - 28.3	0 - 20	トウモロコシ、大豆粕	72	20	なし	10	5%以上で魚体たん白が増加し、粗脂肪および灰分が減少	Khalil et al., 2013
27.1 - 286	0 - 15	魚粉	123	0 - 15	なし	15%で経済性が最も良く、11.25%で発育成績が最も良い	全魚体たん白と灰分が減少、脂質とエネルギーが増加	Abdelhamed et al., 2012
18.6 - 35.7	0 - 30	トウモロコシ、大豆粕	84	20	0 - 0.6	30		Ibrahim et al., 2012
34.9 - 67.7	0 - 27.5	トウモロコシ、大豆粕	55	5	なし	17.5		Schaeffer et al., 2010
6.7 - 11	0 - 40	トウモロコシ、大豆粕	42	5	なし	20		Schaeffer et al., 2009
3.8 - 35	28		82	10	なし	57~150mg/kgのフィターゼ添加でDDGS配合飼料の増体量および飼料要求率改善		Tahoun et al., 2009
2 - 23	0 - 55	トウモロコシ、大豆粕	70	10	0 - 0.4	28 to 55		Abo-Staté et al., 2009
6.7 - 68.6	0 - 60	トウモロコシ、大豆粕	84	8	0.9	60以上		Shelby et al., 2008
9.4 - 60.5	0 - 40	トウモロコシ、大豆粕	70	8	0 - 0.4	20 to 40	40%で全魚体たん白が減少	Lim et al., 2007

表9. トウモロコシ DDGS をナイルティラピア (*Oreochromis niloticus*)、レッド・ティラピアおよびハイブリッドティラピア (*O. aureus* × *O. niloticus*) に給与した場合の発育成績と体成分組成への影響を評価した公表論文概要 (続き)

魚体重 (開始 - 終了) g	DDGS %	置換 原料	試験 期間 (日)	魚粉配 合割合 %	リジン添 加量 %	DDGSの推 奨配合割 合 %	体成分 組成	引用文 献
2.7 - 68.5	0 - 30	魚粉、大 豆粕	70	0 - 8	なし	30	効果なし	Coyle et al., 2004
26 - 120	0 - 100	-	84	0	なし	-	効果なし	Tidwell et al., 2000
0.5 - 11.4	0 - 82	コーンゲ ルテン ミール、 大豆粕	56	0	0.25 - 0.75	なし	-	Wu et al., 1997
0.4 - 20.9	0 - 49	トウモロ コシ	56	0	なし	35	-	Wu et al., 1996a
30 - 387	0 - 29	トウモロ コシ	196	0 - 6	なし	19	フィレ肉 のたん白 と灰分は 対照飼料 と同等だ が脂肪含 量は減少 、香りには 差はない	Wu et al., 1996b
30 - 122.4	19 - 29	トウモロ コシ、大 豆粕	103	0 - 6	なし	29	-	Wu et al., 1994
レッドティラピア								
31.6 - 265.7	0 - 40	大豆粕、 米ぬか、 ホミニー フィード、 肉骨粉、 コーンゲ ルテン ミール	120	0	なし	40以上	-	Suprayudi et al., 2015
190 - 907	0 - 15	トウモロ コシ、米 ぬか	120	0	なし	15以上	効果なし	U.S. Grains Council, 2006
ハイブリッドティラピア (<i>O. aureus</i> × <i>O. niloticus</i>)								
6.0 - 81.4 2.1 - 63.2	0 - 50	大豆粕	56 (試験1) 84 (試験2)	5	0.0 - 0.27	30以上 (試験1) リジンと脂質添 加の場合50以上 (試験2)	-	Chatvijitkul et al., 2016
3.7 - 63.5	0 - 32	トウモロ コシ、大 豆粕	70	8	なし	30	-	Welker et al., 2014b
1.5 - 6.1	0 - 40	魚粉、小 麦	90	3	0.4	40以上	-	U.S. Grains Council, 2007a

表 10. 様々なトウモロコシの併産物を含む飼料を給与したナイルティラピアの発育成績、育成率、たん白質利用率、全魚体およびフィレ肉の組成 (Herath ら、2016 から改編)

測定項目	対照	DDGS	トウモロコシ たん白濃縮物	コーングル テンミール	高たん白 DDG
成長率 (SGR) %	3.56 ^a	3.53 ^a	2.63 ^d	2.75 ^c	3.30 ^b
飼料摂取量 g	84.1 ^a	81.2 ^a	38.8 ^b	40.2 ^b	71.1 ^a
飼料要求率	1.00	1.05	1.10	1.00	1.05
育成率 %	100.0 ^a	97.2 ^{ab}	75.0 ^c	66.6 ^c	80.6 ^{bc}
たん白効率 (PER)	3.20	3.06	2.84	3.10	2.99
たん白質蓄積率 %	49.6 ^a	46.7 ^{ab}	38.4 ^c	42.0 ^{bc}	46.2 ^{ab}
全魚体 %					
水分	69.4	69.7	71.6	70.9	68.9
たん白質	15.5 ^b	15.4 ^b	13.9 ^a	14.6 ^c	16.7 ^a
脂質	8.5 ^b	10.0 ^a	9.6 ^a	9.8 ^a	9.9 ^a
灰分	6.9 ^a	5.7 ^a	5.0 ^a	4.0 ^a	5.4 ^a
フィレ肉 %					
水分	78.2	77.2	78.5	77.9	76.2
たん白質	18.8 ^b	18.3 ^b	18.7 ^b	19.2 ^b	19.8 ^a
脂質	1.6 ^c	3.1 ^a	1.9 ^{bc}	2.2 ^b	2.4 ^b
灰分	1.4	1.3	1.4	1.3	1.2

a - e 異符号間に有意差あり (p < 0.05)

DDGS 給与による潜在的な健康上の利点

水産養殖動物用飼料への DDGS の利用は、優れた発育成績、育成率および体成分組成が得られるだけでなく、免疫やある種の疾病への耐性を高める可能性を示す証拠が増えている。Lim ら (2009) は、DDGS を 40% 配合した飼料を給与すると、アメリカナズにおけるエドワジェラ・イクタルリ感染症 (腸内細菌科に属するグラム陰性短桿菌の *Edwardsiella ictalur* が引き起こす) への耐性が改善されることを報告している。しかしながら、Lim ら (2007) が行ったナイルティラピアを用いた試験では、DDGS を 40% 配合した飼料は連鎖球菌に対する血液学および免疫学的反応を改善しなかった。同様に、Shelby ら (2008) は、DDGS の給与はナイルティラピアの免疫機能または耐病性に影響しなかったとしている。Aydin and Gumus (2016) は、ニジマス稚魚に対して DDGS を 30% まで配合した飼料を給与した際に、罹患魚は発生せず、血液学および生化学的な反応に影響をなかったとしている。これら、公表されているいくつかの肯定的な影響の要因となっているのは、DDGS には、全体の約 10% を占める酵母由来の生理活性化合物 (マンナン、β-グルカン、ヌ

クレオチド) による可能性が推察されている (Shurson、2018)。DDGS におけるこれらの化合物の含有量に関しては限られたデータしか公表されていないが、DDGS の β-グルカン含有量は約 21.2% と推定されている (Kim ら、2008)。Ringo ら (2012) は、酵母の β-グルカンの様々な魚種に対する給与に関する 14 の公表文献をレビューし、病原体耐性、成長性能および育成率の改善が見られることを報告している。

DDGS 配合飼料のエクストルーダー加工

繊維濃度が比較的高い DDGS の配合量が多い場合、ペレット加工を行う水産養殖動物用飼料ではペレット耐久指数を高く保つことが難しくなる。

DDGS 配合飼料のエクストルーダーとペレットの品質に影響を及ぼす最も重要な要因は、ダイの形状、温度、含水率、スクリー速度であると推察している。ペレットの耐久性や単位密度の向上には、各種結着剤の添加が効果的で、その結果、DDGS を 60% 配合した浮き餌を特定の条件下で生産すると、単位密度値が 0.24~0.61 g/cm³、ペレット耐久性が 96~98% の範囲の製品を製造

することが出来る(Chevanan ら、2007; 2009)。DDGS を含む水産養殖動物用飼料のペレット加工に関する包括的なレビューは 16 章で詳述する。

結論

水産養殖動物用飼料で使用されている魚粉の代替えとして植物主体原料を使用するには、世界の水産養殖産業からは大きな関心を寄せられており、その結果、水産養殖動物用飼料へのトウモロコシ DDGS の使用量が増加している。様々な水産養殖動物用飼料への DDGS の至適配合割合に関する研究は限られているが、最近の研究では、十分な発育成績、育成率および肉質を達成しつつ、飼料のコストを大幅に削減できることが示されている。DDGS の配合量は、一般に繊維の使用能力が高い種ほど高いが、置換する原料の種類や、他のたん白質原料(例えば魚粉)の量によって異なる。DDGS は、CP 含量が適度に高いにもかかわらず、可消化リジン含量が比較的低いことから、DDGS の配合割合が高い場合には、可消化アミノ酸の要求量を充足させるためにリジ

ン、メチオニンおよびその他のアミノ酸の添加が必要になる場合がある。高たん白質の水産養殖動物用飼料では、アミノ酸添加が適切に行われない場合には、DDGS の配合量が制限される可能性がある。DDGS の脂質含量が比較的高いと、一部の魚種では全魚体の粗脂肪含量が増加する可能性があるが、DDGS に含まれているトウモロコシ油は DHA が比較的低く、EPA を含んでいないため、魚油を添加することで、十分な必須脂肪酸を担保することができる。水産養殖動物用飼料において DDGS を使用する他の利点は、利用可能なリンの含量が比較的高いため、リンの排泄が減少することであり、抗栄養因子についての懸念はなく、免疫学的利益をもたらす可能性がある。加工条件を適切に保てば、高品質のペレットを製造することが出来る。公表されている文献のデータに基づいて、様々な水産養殖動物種における DDGS の最大配合量を表 11 に示した。これらの何報かでは、評価に用いた DDGS の品質と栄養組成の詳細が示されているが、特に配合割合が高い場合には、栄養成分の消化率を高く保つために色調が明るい、黄金色の DDGS は、使用する必要がある。

表 11. 様々な水産養殖魚種における DDGS の最大配合割合

魚種	DDGSの最大配合割合 (%)
チャンネルキャットフィッシュ	30~40 (+ 結晶アミノ酸)
コイ	15
淡水エビ	40
サバヒー	45
バナメイエビ	40 (+ 結晶アミノ酸)
ニジマス	50
レッドクロウ	30
サンシャインバス	10
ティラピア	50 (+ 結晶アミノ酸)

引用文献

- Abdelghany, A.E. 2003. Partial and complete replacement of fish meal with gambusia meal in diets for red tilapia, *Oreochromis niloticus* × *O. mossambicus*. Aquacult. Nutr. 9:145-154.
- Abdelhamid, A.M., A.A. El-Shebly, and A.S.I. Sultan. 2012. Effect of dietary graded levels of substitut

- ing distillers dried grains with solubles instead of fish meal in tilapia diet. https://www.academia.edu/15415389/EFFECT_OF_DIETARY_GRADED_LEVEL_OF_SUBSTITUTING_DISTILLERS_DRIED_GRAINS_WITH_SOLUBLES_INSTEAD_OF_FISH_MEAL_IN_TILAPIA_DIET
- Abo-State, H.A., A.M. Tahoun, and Y.A. Hammouda.

2009. Effect of replacement of soybean meal by DDGS combined with commercial phytase on Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fingerlings growth performance and feed utilization. *American-Eurasian J. Agric. Environ. Sci.* 5:473–479.
- Anderson, P.V., B. J. Kerr, T. E. Weber, C. Z. Ziemer, and G. C. Shurson. 2012. Determination and prediction of energy from chemical analysis of corn co-products fed to finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 90:1242–1254.
- Aydin, B. and E. Gumus. 2016. Effects of partial replacement of fish meal by DDGS on blood hematology and biochemical parameters of rainbow trout. *Proc. VII International Scientific Agriculture Symposium – Agrosym 2016*, October, 2016, Jahorina, Bosnia, and Herzegovina. Pp. 2472–2476.
- Barnes, M.E., M.L. Brown, and K.A. Rosentrater. 2012. Juvenile rainbow trout responses to diets containing distillers dried grain with solubles, phytase, and amino acid supplements. *Open J. of Animal Sciences* 2:69–77.
- Chatvijitkul, S., A.A. Davis, and C. Lim. 2016. Lipid extracted distillers dried grains with solubles (LE- DDGS) as a partial replacement for soybean meal in hybrid tilapia (*Oreochromis niloticus* × *Oreochromis aureus*) diets. *Aquacult.* 459:131–136.
- Cheng, Z.J. and R.W. Hardy. 2004a. Nutritional value of diets containing distiller's dried grain with solubles for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *J. Appl. Aquacult.* 15:101–113.
- Cheng, Z.J. and R.H. Hardy. 2004b. Effects of microbial phytase supplementation in corn distiller's dried grains with solubles on nutrient digestibility and growth performance of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *J. Appl. Aquacult.* 15:83–100.
- Cheng, Z.J., R.W. Hardy, and M. Blair. 2003. Effects of supplementing methionine hydroxyl analogue in soybean meal and distiller's dried grain-based diets on the performance and nutrient retention of rainbow trout [*Oncorhynchus mykiss* (Walbaum)]. *Aquaculture Research* 34:1303–1310.
- Chevanan, N., K. Muthukumarappan, and K.A. Rosentrater. 2009. Extrusion studies of aquaculture feed using dried distillers grains with solubles and whey. *Food and Bioprocess Technology* 2:177–185.
- Chevanan, N., K.A. Rosentrater, and K. Muthukumarappan. 2007. Twin screw extrusion processing of feed blends containing distillers dried grains with solubles. *Cereal Chemistry* 84:428–436.
- Cho, S.H. 2010. Effect of fish meal substitution with various animal and/or plant protein sources in the diet of the abalone *Haliotis discus hannai*. *Ino. Aquacult. Res.* 41:e587–e593.
- Choi, J., M.M. Rahman, and S-M. Lee. 2014. Inclusion of distillers dried grain as a partial replacement of wheat flour and soybean meal in the diet of juvenile abalone (*Haliotis discus hannai*). *Fish Aquat. Sci.* 17:249–253.
- Coyle, S. G.J. mengel, J.H. Tidwell, and C.D. Webster. 2004. Evaluation of growth, feed utilization and economics of hybrid tilapia, *Oreochromis niloticus* × *Oreochromis aureus*, fed diets containing different protein sources in combination with distillers dried grains with solubles. *Aquaculture Res.* 35:1–6.
- Coyle, S., T. Najeeullah, and J. Tidwell. 1996. A preliminary evaluation of naturally occurring organisms, distiller by-products, and prepared diets as food for juvenile freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii*). *J. Appl. Aquacult.* 6:57–66.
- Cummins, V.C., C.D. Webster, K.R. Thompson, and A. Velasquez. 2013. Replacement of fish meal with soybean meal, alone or in combination with distiller's dried grains with solubles in practical diets for Pacific white shrimp, (*Litopenaeus vannamei*), grown in a clear-water culture system. *J. World Aquacult. Soc.* 44:775–785.

- Davis, D.A., and D. Sookying. 2009. Strategies for reducing and/or replacing fish meal in production diets for the Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*. The Rising Tide, Proc. of the special session on shrimp farming, C.L. Browdy and D.E. Jory, eds. World Aquaculture 2009, World Aquaculture Society, Baton Rouge, LA. Pp. 91–96.
- FAO. 2016. The state of world fisheries and aquaculture 2016. Contributing to food security and nutrition for all. Rome, 200 pp.
- Gabr, A.A., F.F. Khalil, and S. E.M. El-Sharkawy. 2013. Utilization of distillers dried grains with solubles in fish nutrition to partial replacement of fish meal and yellow corn by graded levels of DDGS in Nile tilapia fingerlings diets (*Oreochromis niloticus*). J. Anim. Poult. Prod. Mansoura Univ., Egypt. 4:455–467.
- Gatlin, D.M., III, F.T. Barrows, P. Brown, K. Dabroski, T.G. Gaylord, R.W. Hardy. 2007. Expanding the utilization of sustainable plant products in aquaculture feeds: a review. Aquaculture Res. 38:551–579.
- Gonzalez-Felix, M.L., D.A. Davis, W. Rossi, and M. Perez-Velazquez. 2010. Evaluation of apparent digestibility coefficient of energy of various vegetable feed ingredients in Florida pompano, *Trachinotus carolinus*. Aquaculture 310:240–243.
- Gothreaux, C.T., R.C. Reigh, M.B. Williams, and E.J. Chesney. 2010. Amino acid availability of soybean meal for Florida pompano. North Amer. J. Aquac. 72:309–313.
- Herath, S.S., Y. Haga, and S. Satoh. 2016. Potential use of corn co-products in shrimp meal-free diets for juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). Fish Sci. 82:811–818.
- Hertrampf, J.W and F. Piedad-Pascual. 2000. Distillery by-products. In: Handbook on Ingredients for Aquaculture Feeds, pp. 115–124. Boston, MA. Kluwer Academic Publishers.
- Ibrahim, D., E.I. Hassanein, W. Eleraky, and M.F.A. Elgamal. 2012. The combined effect of distiller's dried corn grains with solubles and ginseng on growth performance, nutrient digestibility and some immunological parameters in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). The Global J. of Fisheries and Aqua. Res. Proc. of the 5th Global Fisheries and Aqua. Research Conf., Egypt, Vol. No. 5:299–314.
- Jauncey, K., and B. Ross. 1982. A guide to tilapia feeds and feeding. University of Stirling, Institute for Aquaculture, Stirling, UK.
- Khalil, F.F., A.A. Gabr, and S. E.M. El-Sharkawy. 2013. Utilization of distillers grains with solubles in shrimp nutrition: 1- replacement soybean meal and yellow corn by DDGS graded levels in diet for Nile tilapia fingerlings (*Oreochromis niloticus*). J. Anim. Poult. Prod. Mansoura Univ., Egypt. 4:149–159.
- Kim, Y. N.S. Mosier, R. Hendrickson, T. Ezeji, H. Blaschek, B. Dien, M. Cotta, B. Dale, and M.R. Lamsch. 2008. Composition of corn dry-grind ethanol by-products: DDGS, wet cake, and thin stillage. Bioresour. Technol. 99:5156–5176.
- Lazo, J.P., D.A. Davis, and C.R. Arnold. 1998. The effects of dietary protein level on growth, feed efficiency and survival of juvenile Florida pompano (*Trachinotus carolinus*). Aquaculture 169:225–232.
- Lech, G.P., and R.C. Reigh. 2012. Plant products affect growth and digestive efficiency of cultured Florida pompano (*Trachinotus carolinus*) fed compounded diets. PLoS ONE 7(4): e34981. Doi:10.1371/journal.pone.0034981.
- Lemos, D., A.L. Lawrence, and A.J. Siccardi III. 2009. Prediction of apparent protein digestibility of ingredients and diets by in vitro pH-stat degree of protein hydrolysis with species-specific enzymes for juvenile Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*. Aquaculture 295:89–98.
- Li, M.H., D.F. Oberle, and P.M. Lucas. 2011. Evaluation of corn distillers dried grains with solubles and brewers yeast in diets for channel catfish, *Ictalurus punctatus*. Aquacult. Res. 42:1424–1430.

- Li, M.H., E.H. Robinson, D.F. Oberle, and P.M. Lucas. 2010. Effects of various corn distillers by-products on growth, feed efficiency, and body composition of channel catfish, *Ictalurus punctatus*. *Aquacult. Nutr.* 16:188–193.
- Lim, C., M. Yildirim-Aksoy, and P.H. Klesius. 2009. Growth response and resistance to *Edwardsiella ictaluri* of channel catfish, *Ictalurus punctatus*, fed diets containing distiller's dried grains with solubles. *J. World Aquac. Soc.* 40:182–193.
- Lim, C.E., J.C. Garcia, M. Yildirim-Aksoy, P.H. Klesius, C.A. Shoemaker, and J.J. Evans. 2007. Growth response and resistance to *Streptococcus iniae* of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*, fed diets containing distiller's dried grains with solubles. *J. World Aquacult. Soc.* 38:231–237.
- Magalhães, R., F. Coutinho, P. Pousão-Ferreira, T. Aires, A. Oliva-Teles, and H. Peres. 2015. Corn distiller's dried grains with solubles: Apparent digestibility and digestive enzymes activities in European seabass (*Dicentrarchus labrax*) and meagre (*Argyrosomus regius*). *Aquacult.* 443:90–97.
- Mamauag, R.E.P., J.A. Ragaza, and T.J. Nacionales. 2017. Nutritional evaluation of distiller's dried grains with solubles as replacement to soybean meal in diets of milkfish (*Chanos chanos*) and its effect on fish performance and intestinal morphology. *Aquacult. Nutr.* 0:1–8. <https://doi.org/10.1111/anu.12470>.
- Mbahinzirek, G.B., K. Dabrowski, K.J. Lee, D. El-Saidy, and E.R. Wisner. 2001. Growth, feed utilization and body composition of tilapia fed cottonseed meal-based diets in a recirculating system. *Aquacult. Nutr.* 7:189–200.
- Nguyen, L., and D.A. Davis. 2016. Comparison of crystalline lysine and intact lysine used as a supplement in practical diets of channel catfish (*Ictalurus punctatus*) and Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture* 464:331–339.
- Overland, M., A. Krogdahl, G. Shurson, A. Skrede, and V. Denstadli. 2013. Evaluation of distiller's dried grains with solubles (DDGS) and high protein distiller's dried grains (HPDDG) in diets for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquacult.* 416–417:201–208.
- Rahman, M.M. 2015. Role of common carp (*Cyprinus carpio*) in aquaculture production systems. *Front. Life Sci.* 8:399–410.
- Rahman, M.M., J. Choi, and S-M. Lee. 2013. Use of distillers dried grains as partial replacement of wheat flour and corn gluten meal in the diet of juvenile black seabream (*Acanthopagrus schlegelii*). *Turkish J. Fisheries and Aquatic Sci.* 13:699–706.
- Renukdas, N. C. Engle, and R. Lochmann. 2014. Performance of alternative diets containing solvent-extracted distillers dried grains with solubles compared to traditional diets for pond-raised channel catfish, *Ictalurus punctatus*, and hybrid catfish, *Ictalurus punctatus* × *Ictalurus furcatus*. *J. World Aquac. Soc.* 45:290–300.
- Rhodes, M.A., D. Yu, Y. Zhou, and D.A. Davis. 2015. Use of lipid-extracted distillers dried grains with solubles (DDGS) in diets for Pacific white shrimp. *North Amer. J. Aquacult.* 77:539–546.
- Riche, M., and T.N. Williams. 2010. Apparent digestible protein, energy and amino acid availability of three plant proteins in Florida pompano, *Trachinotus carolinus* L., in seawater and low-salinity water. *Aqua. Nutr.* 16:223–230.
- Riche, M. 2009. Evaluation of digestible energy and protein from growth and nitrogen retention of juvenile Florida pompano, *Trachinotus carolinus*. *J. World Aquac. Soc.* 40:45–57.
- Ringo, E., R.E. Olson, J.L.G. Vecino, S. Wadsworth, and S.K. Song. 2012. Use of immunostimulants and nucleotides in aquaculture: a review. *J. Marine Sci. Res. Dev.* 1:104.
- Robinson, E.H., and M. H. Li. 2012. Summary of distillers grains studies for pond-raised catfish. *Mississippi State University Extension Service*.

- Mississippi Agricultural and Forestry Experiment Station, Mississippi State University Res. Rep. 24:11, 7 pp.
- Robinson, E.H. and M.H. Li. 2008. Replacement of soybean meal in channel catfish, *Ictalurus punctatus*, diets with cottonseed meal and distiller's dried grains with solubles. *J. World Aquacult. Soc.* 39:521–527.
- Robinson, E.H. 1991. Improvement of cottonseed meal protein with supplemental lysine in feeds for channel catfish. *J. Appl. Aquacult.* 1:1–14.
- Roy, L.A., A. Bordignon, D. Sookying, D.A. Davis, T. W. Brown, and G.N. Whittis. 2009. Demonstration of alternative feeds for the Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, reared in low salinity waters of west Alabama. *Aquacult. Res.* 40:496–503.
- Schaeffer, T.W., M.L. Brown, K.A. Rosentrater, and K. Muthukumarappan. 2010. Utilization of diets containing graded levels of ethanol production co-products by Nile tilapia. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 94:E348–E354.
- Schaeffer, T.W., M.L. Brown, and K.A. Rosentrater. 2009. Performance characteristics of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fed diets containing graded levels of fuel-based distillers dried grains with solubles. *J. Aqua. Feed Sci. Nutr.* 1:78–83.
- Shiau, S.Y., J.L. Chuang, and G.L. Sun. 1987. Inclusion of soybean meal in tilapia (*Oreochromis niloticus* x *O. aureus*) diets at two protein levels. *Aquaculture* 65:251–261.
- Shelby, R., C. Lim, M. Yildirim-Askoy, and P. Klesius. 2008. Effect of distillers dried grains with solubles-incorporated diets on growth, immune function and disease resistance in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquacult. Res.* 39:1351–1353.
- Shurson, G.C. 2018. Review – Yeast and yeast derivatives in feed additives and ingredients: sources, characteristics, animal responses and quantification methods. *Anim. Feed Sci. Technol.* 235:60–76.
- Sklan, D., T. Prag, and I. Lupatsch. 2004. Apparent digestibility coefficients of feed ingredients and their prediction in diets for tilapia *Oreochromis niloticus* x *Oreochromis aureus* (Teleostei, Chichliidae). *Aquaculture Res.* 35:358–364.
- Soltan, M.A., A.A. Radwan, A.H. Gomaa, and A.M. Farag. 2015. Using distillers dried grains as an alternative protein source in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) feeds. *Egypt J. Aquat. Biol. & Fish* 19:23–33.
- Sookying, D., and D.A. Davis. 2011. Pond production of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) fed high levels of soybean meal in various combinations. *Aquacult.* 319:141–149.
- Stone, D.A.J., R.W. Hardy, F.T. Barrows, and Z.J. Cheng. 2005. Effects of extrusion on nutritional value of diets containing corn gluten meal and corn distiller's dried grains for rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. *J. Appl. Aquacult.* 17:1–20.
- Suprayudi, M.A., D. Yaniharto, N. Priyoutomo, A. Kurniati, J. Ekasari, D. Jusadi, and Y. Haga. 2015. Evaluation of practical diets containing high levels of corn distillers dried grains with solubles on red tilapia floating net cage production performance. *Pakistan J. Nutr.* 14:708–711.
- Tahoun, A.M., H.A. Abo-State, and Y.A. Hammouda. 2009. Effect of adding commercial phytase to DGS-based diets on the performance and feed utilization of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fingerlings. *American-Eurasian J. Agric. Environ. Sci.* 5:473–479.
- Thompson, K.R., S.D. Rawles, L.S. Metts, R. Smith, A. Wimsatt, A.L. Gannam, R.G. Twibell, R.B. Johnson, Y.J. Brady, and C.D. Webster. 2008. Digestibility of dry matter, protein, lipid and organic matter of two fish meals, two poultry by-product meals, soybean meal and distiller's dried grains with solubles in practical diets for sunshine bass,

- Morone chrysops x M-Saxatilis. J. World Aquac. Soc. 39:352–363.
- Thompson, K.R., L.S. Metts, L.A. Muzinic, S. Dasgupta, and C.D. Webster. 2006. Effects of feeding practical diets containing various protein levels, with or without fish meal, on growth, survival, body composition and processing traits of male and female Australian red claw crayfish (*Cherax quadricarinatus*) grown in ponds. Aquacult. Nutr. 12:227:238.
- Thompson, K.R., L.A. Muzinic, L.S. Engler, S. Morton, and C.D. Webster. 2004. Effects of feeding practical diets containing various protein levels on growth, survival, body composition and processing traits of Australia red claw crayfish *Cherax quadricarinatus*, and on pond water quality. Aquacult. Res. 35:659–668.
- Tidwell, J.H., S.D. Coyle, A. Van Arnum, C. Weibel, and S. Harkins. 2000. Growth, survival and body composition of cage-cultured Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*, fed pelleted and unpelleted distillers grains with solubles in polyculture with fresh water prawn, *Macrobrachium rosenbergii*. J. World Aquacult. Soc. 31:627–631.
- Tidwell, J.H., C.D. Webster, J.A. Clark, and L.R. D'Abramo. 1993a. Evaluation of distillers dried grains with solubles as an ingredient in diets for pond culture of the freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii*. J. World Aquacult. Soc. 24:66–70.
- Tidwell, J.H., C.D. Webster, D.H. Yancey, and L.R. D'Abramo. 1993b. Partial and total replacement of fish meal with soybean meal and distiller's by-products in diets for pond culture of the freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii*). Aquaculture 118:119–130.
- Tidwell, J.H., C.D. Webster, and D.H. Yancey. 1990. Evaluation of distillers grains with solubles in prepared channel catfish diets. Transactions of the Kentucky Academy of Science 51:135–138.
- Urriola, P.E., G.C. Shurson, and H.H. Stein. 2010. Digestibility of dietary fiber in distillers coproducts fed to growing pigs. J. Anim. Sci. 88:2373–2381.
- U.S. Grains Council. 2006. Feeding trial of DDGS for Tilapia sh. Activity No. M05GX54318. U.S. Grains Council, Washington, DC.
- U.S. Grains Council. 2007a. Feeding trial of DDGS for common carp. Activity No. M06GX64322. U.S. Grains Council, Washington, DC.
- U.S. Grains Council. 2007b. The evaluation of dietary DDGS levels for milkfish (*Chanos chanos*) and hybrid tilapia (*O. aurus* × *O. nilotica*). U.S. Grains Council, Washington, DC.
- U.S. Grains Council. 2015. Effect of feeding diets containing corn distillers dried grains with solubles (DDGS) on growth performance and fillet color of swai (*Pangasius hypophthalmus*). Summary report. Washington, DC. p. 1–23.
- Webster, C.D., L.G. Tiu, A.M. Morgan, and A.L. Gannam. 1999. Effect of partial and total replacement of fish meal on growth and body composition of sunshine bass *Morone chrysops* × *M. saxatilis* fed practical diets. J. World Aquacult. Soc. 30:443–453.
- Webster, C.D., J.H. Tidwell, L.S. Goodgame, and P.B. Johnsen. 1993. Growth, body composition and organoleptic evaluation of channel catfish fed diets containing different percentages of distiller's grains with solubles. The Progressive Fish-Culturist 55:95–100.
- Webster, C.D., J.H. Tidwell, L.S. Goodgame, D.H. Yancey, and L. Mackey. 1992. Use of soybean meal and distillers grains with solubles as partial or total replacement of fish meal in diets for channel catfish, *Ictalurus punctatus*. Aquaculture 106:301–309.
- Webster, C.D., J.H. Tidwell, and D.H. Yancey. 1991. Evaluation of distillers grains with solubles as a protein source in diets for channel catfish. Aquaculture 96:179–190.
- Weirich, C.R., D.R. Groat, R.C. Reigh, E.J. Chesney,

- and R.F. Malone. 2006. Effect of feeding strategies on production characteristics and body composition of Florida pompano reared in marine recirculating systems. *North Amer. J. Aquaculture* 68:330–338.
- Welker, T.L., C. Lim, F.T. Barrows, and K. Liu. 2014a. Use of distiller's dried grains with solubles (DDGS) in rainbow trout feeds. *Anim. Feed Sci. Technol.* 195:47–57.
- Welker, T.L., C. Lim, P. Klesius, and K. Liu. 2014b. Evaluation of distiller's dried grains with solubles from different grain sources as dietary protein for hybrid tilapia, *Oreochromis niloticus* (♀) × *Oreochromis aureus* (♂). *J. World Aqua. Soc.* 45:625–637.
- Williams, T.N. 2008. An assessment of alternative feed ingredients in practical diets for Florida pompano (*Trachinotus carolinus*) held in low salinity recirculating systems. Master's thesis, University of Maine, Orono, Maine, USA.
- Wilson, R.P., and W.E. Poe. 1985. Effects of feeding soybean meal with varying trypsin inhibitor activities on growth of fingerling channel catfish. *Aquaculture* 46:19–25.
- Wu, Y.V., R.R. Rosati, and P.B. Brown. 1997. Use of corn-derived ethanol products and synthetic lysine and tryptophan for growth of tilapia (*Oreochromis niloticus*) fry. *J. Agric. Food Chem.* 45:2174–2177.
- Wu, Y.V., R.R. Rosati, and P.B. Brown. 1996a. Effect of diets containing various levels of protein and ethanol coproducts from corn on growth of tilapia fry. *J. Agric. Food Chem.* 44:1491–1493.
- Wu, Y.V., V.K. Warner, R. Rosati, D.J. Sessa, and P.B. Brown. 1996b. Sensory evaluation and composition of tilapia (*Oreochromis niloticus*) fed diets containing protein-rich ethanol byproducts from corn. *J. Aquatic Food Prod. Technol.* 5:7–16.
- Wu, Y.V., R.R. Rosati, D.J. Sessa, and P.B. Brown. 1994. Utilization of protein-rich ethanol coproducts from corn in tilapia feed. *J. Amer. Oil Chem. Soc.* 71:1041–1043.
- Zhou, P., D.A. Davis, C. Lim, M. Yildirim-Askoy, P. Paz, and L.A. Roy. 2010a. Pond demonstration of production diets using high levels of distiller's dried grains with solubles with or without lysine supplementation for channel catfish. *North Amer. J. Aquacult.* 72:361–367.
- Zhou, P., W. Zhang, D.A. David, and C. Lim. 2010b. Growth response and feed utilization of juvenile hybrid catfish fed diets containing distiller's dried grains with solubles to replace a combination of soybean meal and corn meal. *North Amer. J. Aquacult.* 72:298–303.

14章: DDGS を配合した水産養殖動物用飼料のエクストルーダ加工

はじめに

エクストルーダ加工は、水産養殖動物用飼料製造時に最も一般的に使用されている加工工程であり、飼料の効率とペレット密度を改善し、水中での安定性を高め、生産性と汎用性を向上させる (Khater ら、2014)。エクストルーダ加工は、でん粉の糊化、たん白変性、水和性、物性改善、部分的な脱水、微生物や有毒化合物の破壊も引き起こす (Khater ら、2014)。残念ながら、DDGS を配合した飼料は、でん粉含量が低く、繊維含量が高いため、エクストルーダ加工時の問題となる (Chin ら、1989)。飼料中のでん粉含量が減少すると、加工中に膨化しにくくなり、繊維含量を高めると、エクストルーダーの強度と耐久性が低下する (Chevanan ら、2007a)。

エクストルーダ加工

エクストルーダ加工は、ピストンまたはスクリューを使用して、所定の形状のオリフィスまたはダイを通して、飼料または食品材料を押し出す一連の工程である。エクストルーダ加工は水産養殖動物用飼料製造時に使用される最も一般的な加工工程であり (Khater ら、2014)、豚 (Rojas ら、2016) や家禽 (Lundblad ら、2011) 用飼料では、エネルギーおよび栄養成分の消化率が改善されるという利点もある。工程中では、流体の移動、熱と物質の移動、混合、剪断、粒子サイズの縮小、溶融、圧縮、カラメル化、可塑化、成形等が起こる (Camire、1998)。エクストルーダ加工には、従来のスチーム・ペレット加工と比べて、オンライン調整が可能で希望する物理的特性が得やすい、多くの種類の飼料製品に対応できる、排水がない、エネルギー効率が高い、乾燥あるいは粘性が高い原料から湿潤した原料まで、幅広い原料に対応できる等の利点がある (Maskan and Altan、2011)。エクストルーダーにはいくつかのタイプがあるが、一般的にはスクリューの数に基づいて一軸エクストルーダーと二軸エクストルーダーに分類される。一軸エクストルーダーは、二軸エク

ストルーダーに比べて、初期投資と運用コストが低いため、飼料業界で広く使用されている。一軸エクストルーダーは、ダイの圧力、バレル壁でのスリップおよびスクリューが充填される範囲により作動する。一方、二軸エクストルーダーは、2つのスクリューが回転する方向と2つのスクリュー間の噛み合いの範囲により作動する (Chevanan ら、2005)。一軸エクストルーダーは、金属バレル内に1本のスクリューが設置されており多くのパターンの構成がある。一軸エクストルーダーの主要な構成要素は、フィーダー、移動、圧縮、計量工程であり、飼料または原料がホッパーに入り、スクリューの回転によって移動部分に運ばれ、以後、スクリューの幅が徐々に狭くなることで材料が圧縮され、その物理的エネルギーにより材料温度が上昇して、でん粉の糊化と凝集が起こる。材料は計量部分から供給され続けるため、圧縮・加熱された材料はダイの開口部から押し出されて射出する。二軸エクストルーダーは、一軸エクストルーダーに比べて、前処理の必要がない、セルフクリーニングを必要としない、長さ対直径比の範囲が広い、材料を混合しやすい、滞留時間が短く熱伝達が良い、幅広い水分含量の材料に対応できる等の利点がある (Harper、1989)。

水産養殖動物用飼料のエクストルーダ加工に影響する要因

エクストルーダ加工された沈降性および非沈降性飼料、スチーム・ペレット加工飼料、様々なサイズのクランブル等、様々な形態の養殖水産動物用飼料が生産されているが、スチーム・ペレット加工とエクストルーダ加工は養殖水産動物用飼料製造の際の主要な方法となっている。

多くの魚種ではペレット状の非沈降性の浮き餌を必要とするか、少なくとも浮き餌を摂取できるように訓練することができるが、エビには沈降性のペレットが必須である (Craig、2009)。スチーム・ペレット加工は、水中で急速に沈む高密度のペレットを製造するために一般的に使用される。エクストルーダ加工は一般に浮き餌の製造に

使用されており、スチーム・ペレットと比べて、幅広い水分含量の飼料を処理できる、エネルギー効率が良い、乾燥したあるいは粘性のある原料を処理できる、テクスチャーおよび味覚特性を改善できる、処理中の熱変性を最小限に抑えることが出来る、製造した飼料の水中での安定性が良く水面に浮く、様々な飼料原料に対応できる等の利点がある(Chevanan ら、2005; Brown ら、2012)。

エクストルーダ加工した水産養殖動物用飼料の生産効率と品質特性に影響を与える要因には、栄養成分(CP(粗たん白質)、粗脂肪、粗繊維、粗灰分)含量と水分含量、粒度分布、使用機器の処理能力、スクリュウの構成と回転速度、温度などがある(Chevanan ら、2005)。エクストルーダ加工水産養殖動物用飼料の品質を測る重要な測定値は、見かけと真のかさ密度、多孔度、水分含量、PDI(ペレット耐久性指数)、壊れにくさ、水中での安定性指数、吸水指数、浮力等であるが、これらを評価する標準的方法はない(Chevanan ら、2005)。高品質のエクストルーダ加工水産養殖動物用飼料の製造には、栄養成分組成が重要だが、Kannadhasan ら(2011)は、CP 含量がエクストルーダ加工時の飼料の品質を左右する重要な要件であることを示している。エクストルーダ加工に大きく影響する飼料原料特性は、水分含量、粒子サイズおよび化学組成である。でん粉は膨化と糊化に必要であり、繊維は膨化、糊化、耐久性および水中安定性を低下させる(Brown ら、2012)。高 CP 原料や飼料をエクストルーダ加工すると、膨化が制限され、より多孔性でテクスチャーが高い製品が得られる。脂質含量が高い飼料は、潤滑剤として機能するため、でん粉の糊化と膨化が低下する(Brown ら、2012)。

DDGS を含むエクストルーダ加工水産養殖動物用飼料

エクストルーダ加工に最大の影響を与える飼料原料特性は、水分含量、粒子サイズおよび成分組成である。DDGS の成分組成は、米国のエタノール産業が生産性と収益性を高めるための技術革新を進めているために進化し続けている。DDGS の成分組成はペレットとエクストルーダ加工製品の品質に影響を与える重要な要素であるため、それらの供給源間におけるバラツキと部分的な油抽出の影響を理解しておく必要がある。伝統的な

DDGS(Spiehs ら、2002; Belyea ら、2004)は、現在生産されているトウモロコシ油の一部を抽出した低脂肪 DDGS(Kerr ら、2013)に比べて、粗脂肪含量、NDF(中性デタージェント繊維)およびでん粉含量が高く、CP 含量が低い(表1)。ただし、これらの成分組成の変化に関わらず、他の一般的な飼料原料と比べて、DDGS はでん粉含量が非常に低く、粗脂肪および NDF 含量が比較的高いことから、DDGS の配合割合が高い飼料では、これらの成分変化が PDI に悪影響を与えるため、エクストルーダ加工飼料でより高い PDI を得るためには、粘結剤を添加する必要がある。表 2 には、様々な粘結剤と一般的な添加量および水産養殖動物用飼料で使用するための特性の概要を示している。

DDGS を様々な割合で配合した水産養殖動物用飼料の品質特性を評価した研究成果を表 3 に取りまとめた。このうち、9 報では一軸エクストルーダを使用し、5 報では二軸エクストルーダを使用している。これらの報告では、成分組成、使用した粘結剤、DDGS の配合割合、単位密度および PDI とともに、飼料の多くの物理的および化学的特性が記されている。DDGS の配合割合が高い場合に様々な影響があるが、種々の粘結剤を添加すると単位密度と PDI が向上した。Chevanan ら(2009)および Rosentrater ら(2009b)による報告を除き、エクストルーダ加工された DDGS 配合飼料の単位密度は 1.0 g/cm^3 未満で、浮遊性を示した。さらに、DDGS を最大 60% 配合した飼料で PDI は 85% を超えており、DDGS の配合量の増加に伴う PDI の減少を報告しているのはわずかに 2 報(Chevanan ら、2008 および Kannadhasan ら、2011)のみであった。具体的には、Chevanan ら(2007b)は、ホエーを粘結剤として使用したトウモロコシ、きな粉、魚粉を含む飼料に DDGS を 60% まで配合しても高品質(高 PDI および低単位密度)のペレットを製造が可能であることを示している。Kannadhasan ら(2011)は、一軸エクストルーダの様々な物理的特性に対する DDGS の配合量と CP 含量、でん粉源の影響を評価し、DDGS 配合量と CP を高めると、単位密度とペレットの耐久性が向上することを明らかにしている。一般的に、水分含量を高めると PDI が高まるが、単位密度は減少する。ダイの温度が上昇すると PDI と単位密度が低下するが、ペレットの L:D を

高めると、ペレット品質評価値がわずかに向上する。したがって、DDGSの配合量が比較的高く、粘結剤(ホエーまたはでん粉)を配合した水産養殖動物用飼料では、工程中の水分含量、ダイの温度およびL:Dを適切に管理することで許容できる品質の製品を製造することが出来る。Hiltonetら(1981)は、エクストルーダ加工とスチーム・ペレット加工が、飼料の耐久性、吸水率、マスの生理学的反応に及ぼす影響を評価しているが、エクストルーダ加工飼料は、スチーム・ペレット加工飼料に比べて吸水性が高く、水安定性も優れていたと報告している。

要約すると、水産養殖動物用飼料にDDGSを多く配合することに、より大きな経済的利点があるが、PDIの低下

により飼料工場でのDDGSの使用が制限されることがよくある。いくつかの報告では、DDGSの配合割合と、様々な粘結剤の利用、エクストルーダーのタイプが加工製品の単位密度とPDIに及ぼす影響が評価されている。PDI低下の原因となるエクストルーダ加工変数間の相互作用には一貫性が見られない点も数多くあるが、DDGSを配合した飼料をエクストルーダ加工すると、適切な単位密度とPDIを達成できることがいくつかの研究で示されている。様々な水産養殖動物種に対してDDGSを含む水産養殖動物用飼料の化学組成を最適化するにはさらなる研究が必要である。

表1. 部分的な油抽出によるDDGSの栄養成分の平均と範囲(乾物)

栄養成分 %	トウモロコシDDGS(粗脂肪 > 10%)	トウモロコシDDGS(粗脂肪 < 10%)
水分	11.1 (9.8-12.8) ¹	12.5 (10.0-14.5)
粗たん白質 (CP)	30.8 (28.7-33.3) ^{1,2}	31.2 (29.8-32.9)
粗脂肪	11.5 (10.2-12.6) ^{1,2}	8.0 (4.9-9.9)
NDF	41.2 (36.7-49.1) ¹	32.8 (30.5-33.9)
でん粉	5.3 (4.7-5.9) ²	2.4 (0.8-3.4)
粗灰分	5.2 (4.3-6.7) ^{1,2}	5.4 (4.9-6.1)

1 Spiehsら(2002); 2 Belyeaら(2004); 3 Kerrら(2013)

表2. 水産養殖飼料のスチーム・ペレット加工時に一般的に使用されている粘結剤(Lovell, 1989 から改編)

粘結剤	添加量 %	備考
カルボキシメチルセルロース	0.5 to 2.0	粘結剤として優れているが、高価格
アルギン酸類	0.8 to 3.0	湿飼料に適しているが、効果を得るには2価または多価イオンと組み合わせる必要あり
Polymethylcarbamide	0.5 to 0.8	粘結剤として非常に優れているが、FDA未承認で、一部の魚種では嗜好性が悪い
グアガム	1.0 to 2.0	粘結剤として優れているが、高価格
ヘミセルロース	2.0 to 3.0	粘結剤としての効果は中程度だが、コストは中程度
リグニンスルホン酸	2.0 to 4.0	粘結剤として優れており、価格も中程度
ナトリウムおよびカルシウム・ベントナイト	2.0 to 3.0	有機質の粘結剤より効果が低い
糖蜜	2.0 to 3.0	粘結剤としての効果は中程度だが、栄養価がある
ホエイ	1.0 to 3.0	粘結剤としての効果は中程度だが、栄養価がある
トウモロコシ、ジャガイモ、モロコシ、米、キャッサバの糊化澱粉	10 to 20	栄養価を持つ優れたバインダーだが、多量に添加する必要がある
小麦グルテン	2.0 to 4.0	粘結剤として優れているが、高価格

表 3. エクストルーダーのタイプ、飼料組成、バインダー、押出養殖飼料の DDGS 濃度の要約

エクストルーダーのタイプ別の引用文献、魚種	飼料の組成	粘結剤	DDGS %	単位密度 g/cm ³	PDI %	
一軸エクストルーダー						
Chevannan et al. (2008)	きな粉、トウモロコシ、魚粉、ビタミンミネラル (VM)プレミックス	なし	20	0.96	89	
			30	0.93	65	
			40	0.93	56	
Chevanan et al. (2009)	きな粉、トウモロコシ、魚粉、VMプレミックス	ホエー	20	1.05	94	
			30	1.07	94	
			40	1.06	94	
Chevanan et al. (2007a)	きな粉、トウモロコシ、魚粉、VMプレミックス	ホエー	40	0.88 – 1.03	85 – 98	
Kannadhason et al. (2011) ティラピア アメリカナマズ	きな粉、魚粉、ホエイ、VMプレミックス	キャッサバでん粉	20	0.78	82	
			30	0.88	84	
			40	0.86	86	
		コーンスターチ	20	0.90	85	
			30	0.94	76	
			40	0.91	63	
		ジャガイモでん粉	20	0.79	82	
			30	0.88	85	
			40	0.90	87	
Rosentrater et al. (2009a) ティラピア	コーンスターチ、大豆粕、魚粉、ホエー、VMプレミックス	コーンスターチ	20	1.03	71	
			25	1.01	91	
			30	1.02	70	
Kannadhason et al. (2009) ティラピア	大豆粕、魚粉、ホエー、VMプレミックス	タビオカでん粉	20	0.94	90	
			25	0.93	96	
			30	0.99	84	
Rosentrater et al. (2009b) ティラピア	大豆粕、魚粉、ホエー、VMプレミックス	ジャガイモでん粉	20	0.85	89	
			25	0.97	96	
			30	0.93	82	
Ayadi et al. (2013) ナイルティラピア	トウモロコシ、魚粉、大豆粕 (30,40,50%)、VMプレミックス	ホエー	20	0.97	94	
			30	0.89	95	
			40	0.90	95	
Ayadi et al. (2016) ナイルティラピア幼魚	大豆粕、トウモロコシ、魚粉、ホエー、VMプレミックス	アミロース 70: アミロペクチン 30	20	0.97	93	
		100%アミロペクチン	20	0.99	94	
二軸エクストルーダー						
Chevanan et al. (2007b)	きな粉、トウモロコシ、魚粉、VMプレミックス	ホエー	20	0.24	98	
			40	0.34	98	
			60	0.61	97	
Kannadhason et al. (2010) ティラピア	大豆粕、トウモロコシ、魚粉、大豆油、VMプレミックス	ホエー	0	0.73	93	
			17.5	0.90	97	
			20	1.00	97	
			22.5	0.88	95	
			25	0.87	97	
			27.5	0.92	93	
Ayadi et al. (2011) ニジマス	魚粉、コーングルテンミール、小麦粉、イワシ油、セルロース、VMプレミックス	なし	0	0.93	83	
			10	0.89	91	
			20	0.89	89	
			30	0.94	88	
			40	0.97	92	
			50	0.99	95	
Fallahi et al. (2011) ナイルティラピア	大豆粕、トウモロコシ、魚粉、大豆油、VMプレミックス	ホエー	20	0.92 – 1.02	94 – 99	
Fallahi et al. (2012) イエローパーチ	高たん白DDG、魚粉、コーングルテンミール、小麦粉、油脂、結晶アミノ酸、VMプレミックス	CMC	31	0.66	99	
			上記+高たん白発酵大豆粕	31	0.60	99
			上記+大豆たん白	31	0.50	99

引用文献

- Ayadi, F.Y., K.A. Rosentrater, K. Muthukumarappan, and S. Kannadhasan. 2016. Effects of amylose-to-amylopectin ratios on binding capacity of DDGS/Soy-based aquafeed blends. *J. Food Res.* 5:43–56.
- Ayadi, F.Y., P. Fallahi, K.A. Rosentrater, and K. Muthukumarappan. 2013. Modeling single-screw extrusion processing parameters and resulting extrudate properties of DDGS-based Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) feeds. *J. Food Res.* 2:11–28.
- Ayadi, F.Y., K. Muthukumarappan, K.A. Rosentrater, and M.L. Brown. 2011. Twin-screw extrusion processing of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) feeds using various levels of corn-based distillers dried grains with solubles (DDGS). *Cereal Chem.* 88:363–374.
- Belyea, R.L., K.D. Rausch, and M.E. Tumbleson. 2004. Composition of corn and distillers dried grains with solubles from dry grind ethanol processing. *Bioresource Tech.* 94:293–298.
- Brown, M.L., T.W. Schaeffer, K.A. Rosentrater, M.E. Barnes, and K. Muthukumarappan. 2012. Feeding DDGS to nsh. In: *Distillers Grains – Production, Properties, and Utilization*, K. Liu and K.A. Rosentrater (eds.), CRC Press, Boca Raton, FL.
- Camire, M.E.. 1998. Chemical changes during extrusion cooking. *Recent advances. Adv. Exp. Med. Biol.* 434:109–21.
- Chevanan, N., K.A. Rosentrater, and K. Muthukumarappan. 2005. Utilization of distillers dried grains for fish feeds by extrusion technology – a review. *ASAE Annual International Meeting*, July 17–20, 2005, Tampa, FL, Paper no. 056025. 20 pp.
- Chevanan, N., K. Muthukumarappan, K.A. Rosentrater, and J. Julson. 2007a. Effect of die dimensions on extrusion processing parameters and properties of DDGS based exudates. *Cereal Chem.* 84:389–398.
- Chevanan, N., K.A. Rosentrater, and K. Muthukumarappan. 2007b. Twin screw extrusion processing of feed blends containing distillers dried grains with solubles. *Cereal Chem.* 84:428–436.
- Chevanan, N., K.A. Rosentrater, and K. Muthukumarappan. 2008. Effect of DDGS, moisture content and screw speed on the physical properties of exudates in single screw extrusion. *Cereal Chem.* 85:132–139.
- Chevanan, N., K.A. Rosentrater, and K. Muthukumarappan. 2010. Effects of processing conditions on single screw extrusion of feed ingredients containing DDGS. *Food Bioprocess Technol.* 3:111–120.
- Chevanan, N., K. Muthukumarappan, and K.A. Rosentrater. 2009. Extrusion studies of aquaculture feed using distillers dried grains with solubles and whey. *Food Bioprocess. Technol.* 2:177–185.
- Chin, H.K., A.M. Joseph, and T.M. Jeffrey. 1989. Properties of extruded dried distillers grains (DDG) and –our blends. *J. Food Proc. and Preserv.* 13:219–231.
- Craig, S., 2009. *Understanding fish nutrition, feeds and feeding.* VCE Publications, Virginia Tech. <https://www.pubs.ext.vt.edu/420/420-256/420-256.html> (accessed 6.24.17).
- Fallahi, P. K. Muthukumarappan, K.A. Rosentrater, and M.L. Brown. 2012. Twin-screw extrusion processing of vegetable-based protein feeds for yellow perch (*Perca avarescens*) containing distillers dried grains, soy protein concentrate and fermented high protein soybean meal. *J. Food Res.* 1:230–246.
- Fallahi, P. K.A. Rosentrater, K. Muthukumarappan, and M. Tulbek. 2011. Effects of conditioner steam, extruder water and screw speed on physical properties of DDGS-based extrudates in twin-screw extrusion. *ASABE Annual International Meeting*, August 7–10, 2011, Louisville, KY, paper no. 1110887, 40 pp.
- Harper, J.M. 1989. Food extruders and their applications. In: *Extrusion Cooking*, C. Mercer, P. Linko, and J.M. Harper (eds.). Amer. Assoc. Cereal chem., St. Paul, MN. Hilton, J.W., C.Y. Cho, and S.J. Slinger. 1981. Effect of extrusion processing and steam pelleting diets on pellet durability, pellet water absorption and the physiological response of rainbow trout. *Aquaculture* 25:185–194.
- Kannadhasan, S., K. Muthukumarappan, and K.A. Rosentrater. 2011. Effect of starch sources and protein

- content on extruded aquaculture feed containing DDGS. *Food Bioprocess. Technol.* 4:282–294.
- Kannadhasan, S., K.A. Rosentrater, and K. Muthukumarappan. 2010. Twin screw extrusion of DDGS-based aquaculture feeds. *J. World Aqua. Soc.* 41:1–15.
- Kannadhasan, S., K. Muthukumarappan, and K.A. Rosentrater. 2009. Effects of ingredients and extrusion parameters on aquafeeds containing DDGS and tapioca starch. *J. Aqua. Feed Sci. Nutr.* 1:6–21.
- Kerr, B.J., W.A. Dozier, III, and G.C. Shurson. 2013. Effects of reduced-oil corn distillers dried grains with solubles composition on digestible and metabolizable energy value and prediction in growing pigs. *J. Anim. Sci.* 91:3231–3243.
- Khater, E.S.G., A.H. Bahnasawy, and S.A. Ali. 2014. Physical and mechanical properties of fish feed pellets. *J. Food Process. Technol.* 5:1–6.
- Lovell, R.T. 1989. *Nutrition and feeding of Fish.* Van Nostrand Reinhold publisher. Lundblad, K.K., S. Issa, J.D. Hancock, K.C. Behnke, L.J. McKinney, S. Alavi, E. Prestløkken, J. Fledderus, and M. Sørensen. 2011. Effects of steam conditioning at low and high temperature, expander conditioning and extruder processing prior to pelleting on growth performance and nutrient digestibility in nursery pigs and broiler chickens. *Anim. Feed Sci. Technol.* 169:208–217.
- Maskan, M., and A. Altan. 2011. *Advances in Food Extrusion Technology.* CRC Press, Boca Raton, Fla. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- Rojas, O.J., E. Vinyeta, and H.H. Stein. 2016. Effects of pelleting, extrusion or extrusion and pelleting on energy and nutrient digestibility in diets containing different levels of fiber and fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 94:1951–1960.
- Rosentrater, K.A., K. Muthukumarappan, and S. Kannadhasan. 2009a. Effects of ingredients and extrusion parameters on aquafeeds containing DDGS and corn starch. *J. Aqua. Feed Sci. Nutr.* 1:44–60.
- Rosentrater, K.A., K. Muthukumarappan, and S. Kannadhasan. 2009b. Effects of ingredients and extrusion parameters on aquafeeds containing DDGS and potato starch. *J. Aqua. Feed Sci. Nutr.* 1:22–38.
- Spiehs, M.J., M.H. Whitney, and G.C. Shurson. 2002. Nutrient database for distillers dried grains with solubles produced from new plants in Minnesota and South Dakota. *J. Anim. Sci.* 80:2639–2645.

15章:肉用牛における低脂肪 DDGS

はじめに

米国の肉用牛飼育農家にとっては、湿式および乾式粉砕トウモロコシからの併産物は、過去何十年もの間、主要な飼料原料となっている。2017年における肉用牛飼育農家のエタノール発酵併産物消費量は、米国国内での総使用量の44%を占めている。その結果、エタノール発酵併産物の肉用牛への給与試験データは非常に多く、その多くは、最も多く使用されている仕上げ期のフィードロット牛における使用に焦点が当てられている。10年以上前にいくつかの優れた総説が発表されている(Ericksonら、2005; Tjardes and Wright、2002; Loyら、2005a; Loyら、2005b; Klopfensteinら、2008)が、2010年以降にも140を超える論文が公表されていることから、本章ではこれらの研究結果を要約する。

トウモロコシからのエタノール発酵併産物のエネルギー、栄養成分組成と消化率

トウモロコシ DDGS は、肉用牛の飼料に高いエネルギーと中程度のたん白質をもたらす飼料原料として使用されている。DDGS の栄養成分組成とバラツキに関しては4章で詳述している。米国では、トウモロコシの代替えとして、仕上げ期の肉用牛に DDGS を40%(乾物)程度給与しているが、主にエネルギー源として30%以上給与すると、フィードロット牛の要求量を超える CP(粗たん白質)とリンが給与されることになる。

エネルギー

DDGS の主要な炭水化物画分は NDF(中性デタージェント繊維)である。NDF の大部分は、NDF を約69%含むトウモロコシふすま由来で、そのほとんど(87%)が、急速に(6.2%/時間)消化される(DeHaanら、1983)。DDGS 中の繊維は、消化性と発酵性が高いため、仕上げ期のフィードロット牛用飼料のエネルギーおよびたん白質源として使用される。DDGS に含まれているトウモロコシ油も、エネルギー含量に大きく影響する。Vander Polら(2007)は、トウモロコシ油の消化率が70%であること

を示しているが、脂肪酸摂取量が増加すると、脂肪酸の消化率が低下し(Plascenciaら、2003)、DDGS を30%以上含む飼料を摂取した場合に摂取量の低下をもたらす可能性がある。Hamら(1994)による初期の研究では、トウモロコシ DDGS の肉用牛における NE_g(発育に要する正味エネルギー)は、トウモロコシの NE_g より21%高いことが報告されており、Tjardes and Wright(2002)によるその後の総説では、トウモロコシ DDGS の NE_m(維持に要する正味エネルギー)は2.16~2.21 Mcal/kg、ME_gは1.50~1.54 Mcal/kgであるとしている。実際、多くの反すう家畜関係の栄養士は、トウモロコシ DDGS は、圧ペントウモロコシと比較してフィードロット牛におけるルーメンアシドーシスのリスクが低いことから、トウモロコシ DDGS を好む傾向にある(Ahernら、2011)。

残念ながら、肉用牛における低脂肪 DDGS のエネルギー価に関するデータは少ない。Bremer(2014)は、成長期の子牛に DMI(乾物摂取量)の低脂肪(粗脂肪7.2%)および高脂肪(粗脂肪12.0%)DDGS を20または40%給与してエネルギー価を測定し、低脂肪 DDGS と高脂肪 DDGS のエネルギー価には差がなく、これらの2種類の DDGS のエネルギー価はトウモロコシの約124%であると推定している。ただし、低脂肪 DDGS を仕上げ期の肉用牛に給与した場合の価値は、高脂肪 DDGS の約89%であったが、低脂肪 DDGS の給与量の増加に伴い飼料効率が改善された。

DDGS はアシドーシスを減らす

DDGS を含む給与すると、高穀物飼料を給与しているフィードロット牛のアシドーシスが減少する。トウモロコシ穀粒には急速に発酵するでん粉が大量に含まれているため、仕上げ期の牛に多給した場合、亜急性アシドーシスが問題になることがある。これに対して、DDGS のでん粉含量は2~5%と低く、粗繊維、CP、粗脂肪含量が比較的多いため、DDGS が乾物で20%以上の粗飼料を給与すると、DMI を減少させることができる。さらに、低品質の粗飼料では、DDGS を20%以上用いると CP が高ま

る(Klopfensteinら、2008)。

たん白質

トウモロコシ DDGS は CP 含量が比較的多く(27~30%)、歴史的にフィードロット牛用飼料におけるたん白質サプリメントとしても使用されてきた(Klopfenstein ら、2008)。トウモロコシ DDGS のたん白質のほとんどはゼインであり、ルーメン・バイパス率が高く(Little ら、1968)、ゼインの約 40%がルーメンで分解される(McDonald、1954)。ルーメン・バイパスたん白質は DDGS の供給源で大きなバラツキがあることが示されているが(Aines ら、1987)、DDGS のたん白質は大豆粕のたん白質より 1.8 倍高いたん白質価を持っており、RUP(ルーメン非分解性たん白質)を豊富に含んでいる。

ADIN(酸性デタージェント不溶性窒素)は、DDGS のたん白質損傷を判断する尺度となり、ADIN 分析値に係数(6.25)を乗じた値を、実際の CP 含量を比較することで損傷の程度を判断できる。大豆粕中の RUP は 30%だが、DDGS 中の RUP は約 60~70%であり、Erickson ら(2005)は、DDGS 中のたん白質が持つ高いバイパス性は、乾燥や水分含量ではなく、たん白質が本来持っている特性に由来するものであって、PER(たん白効率)は同等であるために ADIN の増加が起こらないか、DDGS 中の ADIN の増加に伴い増加するとしている。肉用牛における DDGS 中の RUP 含量に関する報告は少ないが、Castillo-Lopez(2013)は、RUP は CP の約 63%であると推察している。DDGS の給与は、十二指腸への微生物たん白質の流入量を減少させる傾向があり、十二指腸中の原生動物由来たん白質には影響を与えず、少量の酵母由来のたん白質を供給する。

Li ら(2012)は、小麦、トウモロコシ、小麦 DDGS、高脂肪(粗脂肪 11.5%)と低脂肪(粗脂肪 4.5%)のトウモロコシ DDGS の CP とアミノ酸の *in situ* および *in vitro* 分解性について比較している。その結果、小麦、トウモロコシ、小麦 DDGS、高脂肪トウモロコシ DDGS および低脂肪トウモロコシ DDGS における CP の真の消化率はそれぞれ 98.5、96.5、94.3、93.5 および 88.9%であった。また、彼らは、DDGS 中の CP のルーメン内での分解は、原料である穀類より低く、高脂肪トウモロコシ DDGS よりも低脂

肪トウモロコシ DDGS の方が低かったが、小麦 DDGS とトウモロコシ DDGS との間には差がなかったと結論している。必須アミノ酸のルーメン分解は、小麦 DDGS で最大であり、次いで、高脂肪トウモロコシ DDGS と低脂肪トウモロコシ DDGS だった。たん白質の品質と RUP 中の必須アミノ酸は原料穀類よりもわずかに少なかったが、これらのすべては優れた RUP 源である。その後の Li ら(2013)の研究では、小麦 DDGS と低脂肪トウモロコシ DDGS(粗脂肪 4.5%)を補給すると、ナタネ粕と高脂肪トウモロコシ DDGS を給与した場合と比較して、小腸内での CP とアミノ酸量が増加することを示している

尿素

牛用飼料にトウモロコシなどの急速に発酵する炭水化物が大量に含まれ、かつ、飼料の CP の多くがトウモロコシに由来している場合、RDP(ルーメン分解性たん白質)の摂取量が不足する可能性がある。Ceconi ら(2015)は、RDP 摂取量の増加と尿素の添加がフィードロット牛の発育成績、枝肉形質、ルーメン発酵、全消化管消化率、プリン誘導体からクレアチニンへの変換の指標に及ぼす影響を評価するため 2 試験を実施した。その結果、DDGS を 20%含む圧ペントウモロコシと高水分トウモロコシの飼料では、RUO 供給量が限られるため、ルーメン発酵、飼料の消化率、発育成績を改善するために尿素補給が必要であることが示されている。

リン

トウモロコシ DDGS のカルシウム含量は少なく、リン含量は比較的高い。DDGS を給与すると、その給与量によっては、補給するミネラル・サプリメント中へのリン源の添加を行う必要がなくなる場合がある。DDGS の給与量が多いフィードロット牛では、飼料中には要求量より過剰なリンが含まれており、それが排泄物中に排泄されることを考慮する必要がある。DDGS ではカルシウム含量が低く、発育成績の低下と尿路結石の発生を予防するために、粉碎した石灰石やアルファルファ等のカルシウム源を補給して、カルシウム:リン比を 1.2:1 から 7:1 以下に維持する必要がある(Tjardes and Wright、2002)。

Geisert ら(2010)は、リン酸一ナトリウムを添加してリ

ン含量を 3 水準(0.12、0.27、0.42%)とした湿式粉碎トウモロコシ、圧ペントウモロコシおよび DDGS のリン消化率を測定した。その結果、DDGS を 30%配合した飼料では全リン含量と摂取量が比較的高くなり、その消化率は約 50%であった(表 1)。ただし、DDGS の可消化リン含量は、仕上げ期の肉用牛のリン要求量を超え、かなりの量のリン(摂取量の約 54%)が排泄された。仕上げ期の肉用牛のリン要求量は、典型的な米国のフィードロット牛用飼料のリン含量(0.30~0.50%)および NRC 肉牛(2001)よりも低い。最大の発育成績を期待する際のリンの要求量は、全飼料中で 0.17%(乾物)未満であるため、通常のトウモロコシ主体または DDGS 主体の飼料にリンを添加する必要はない。フィードロット牛用に用いるミネラル・サプリメントから過剰なリンを除くことで、排泄物中のリン含量が減少し、環境負荷のリスクを最小限に抑えることが出来る。

DDGS の配合量を高めると窒素(N)およびリン含量が減少する

DDGS をエネルギー源として 15~20%以上給与すると、過剰なたん白質とリンが供給される。過剰なたん白質は、アミノ酸の脱アミノ化によって発生し、尿素として排泄するためにエネルギーが必要となる。Vander Pol ら(2005)は、仕上げ期の肉用牛に DDGS を乾物で 10 表 1. リン給与量が去勢牛におけるリン摂取量と見かけの消化率と排泄量に及ぼす影響(Geisert ら、2010 から改編)

	低リン	中リン	高リン	圧ペントウモロコシ	DDGS
飼料中リン含量 %	0.12	0.27	0.42	0.30	0.36
乾物摂取量 kg/日	8.86	10.54	9.76	9.57	9.48
乾物消化率 %	71.9	69.6	72.5	75.7	68.5
リン摂取 g/日	11.0 ^a	28.0 ^b	41.3 ^d	28.9 ^b	34.0 ^c
見かけのリン消化率 %	11.3 ^a	48.9 ^b	39.0 ^b	58.6 ^b	51.5 ^b
糞由来のリン排泄量 g/日	9.3 ^a	14.2 ^a	26.0 ^b	12.1 ^a	15.9 ^a
尿由来のリン排泄量 g/日	0.4 ^a	2.2 ^b	1.9 ^b	2.0 ^b	2.3 ^b
全リン排泄量 g/日	9.7 ^a	16.3 ^{ab}	27.9 ^c	14.0 ^{ab}	18.2 ^b
全リン排泄量中の尿由来のリン排泄量 %	3.5	14.2	9.9	14.3	12.4

a-d異符号間に有意差あり (p < 0.10)

したがって、DDGS を多く含む飼料にアルカリ性のサプリメントを添加すると、pH の上昇と栄養成分の消化率改善効果がある。DDGS を含む高イオウ飼料におけるチアミン、銅、NaOH(水酸化ナトリウム)および CaO(酸化カル

シウム)の影響に関していくつかの研究報告がある。Neville ら(2012)は、DDGS の配合量(20、40、60%)とトウモロコシの加工方法(高水分トウモロコシと圧ペントウモロコシ)による発育成績、PEM 発生率およびフィード

イオウ

DDGS は比較的多くのイオウが含み、フィードロット牛にとって懸念となる可能性がある(Lonergan ら、2001)。14章では、反すう動物のイオウ摂取量の管理を詳述している。エタノール工場では、製造工程で硫酸を使用して pH 調整を行っているが、DDGS 中のイオウ含量 0.6~1.0%で、非常にバラツキが大きい。ルーメン微生物には十分なイオウが必要だが、飼料中のイオウ含量が過剰になると PEM(灰白脳軟化症)を誘引し、DMI、ADG(日増体量)、肝臓中の銅含量を低下させる可能性がある。Felix ら(2012a)は、DDGS を 30%以上含み、乾物の大部分を占めている場合には、肉用牛の DMI、ルーメン pH および食物繊維消化率が低下する可能性があることを示している。ルーメン pH が 6.35 に上がると、DMI が増加し、栄養成分のルーメン消化率が高まる(Leventini ら、1990)。

ロット去勢牛における硫化水素ガス濃度に及ぼす影響を調査している。飼料中のイオウ含量は 0.6~0.9%であり、チアミンを 150 mg/日補給した。最終体重で補正した枝肉重量は、DDGS 配合量の増加と用量相関的に直線的減少を示したが、飼料効率には影響はなかった。DDGS の給与量が高まると、温屠体重量、背脂肪、枝肉歩留が低下した。硫化水素ガスは、DDGS 給与量の増加に伴って増加したが、PEM の確定例はなかった。トウモロコシの加工方法は、発育成績、PEM 発生率または第一胃の硫化水素ガス濃度に影響を与えなかった。これらの結果と、Nevilleら(2010)および Schauerら(2008)の報告は、羊と去勢牛に対して、DDGS 由来のイオウを最大許容レベルを超えて給与できることを実証しており、NRC(2005)によるイオウの最大許容レベルは再評価されるべきである。

DDGS 主体の飼料への銅の補給は、イオウ含量が高い DDGS を多量に給与した場合に、第一胃の硫化水素産生量を減少させ、イオウによる毒性発生を防ぐために効果的である。第一胃では、銅とイオウが結合して硫化銅が形成され、動物体における銅とイオウの利用率が低下する(McDowell, 2003)。肉用牛用飼料中の銅の最大許容レベルは、100 mg/kg(乾物)であると報告されている(McDowell, 2003)。Felixら(2012a)は、育成期の去勢牛と若雌牛に対して、DDGS を 60%配合した飼料に銅を 0、100 または 200 mg/kg添加した場合の発育成績、枝肉形質およびルーメン内のイオウ代謝に及ぼす影響を調査した。その結果、銅の補給により飼料効率が改善された。ADG や枝肉形質に影響はなかったものの、ルーメン内のイオウ代謝に対する銅補給の影響は、推奨される最大許容限度の 2 倍まで高めても最小限であった。

ルーメン pH の低下は繊維の発酵を妨げる。DDGS の繊維含量は比較的多く、pH が比較的低いため、ルーメン pH と繊維の消化率を高めるためのアルカリ処理またはサプリメントの使用に関するいくつかの検討がなされている。Felixら(2012b)は、給与前に 2%の NaOH で処理した DDGS を 25~60%含む飼料を給与した牛では、無処理の DDGS を含む飼料を給与した牛と比べて NDF の *in situ* 消失量が増加した。また、DDGS に対する 2% NaOH 処理は、ルーメン pH の上昇、硫化水素濃度の低

下による PEM の発症リスクを低下させる可能性がある。NaOH 処理は、DDGS を中和するのに効果的だったが、反すう動物用飼料中の過剰なナトリウムは飼料摂取量を減少させる可能性があり(Croom ら、1982)、発育成績を改善するための DDGS 主体飼料におけるアルカリ処理が最適であるかの判断はされていない。Freetasら(2016)は、肥育去勢牛の発育成績、枝肉形質および飼料摂取パターンを改善するために、DDGS を 50%含む飼料における NaOH の至適添加量を検討したが、供試した DDGS の pH(5.5)が低かったため、最大 1.5%の NaOH を添加しても、発育成績や枝肉形質に影響はなかった。

DDGS 給与前にアルカリ剤で処理すると栄養成分の消化率が向上するため、DDGS への CaO の添加は、DDGS の配合量が 30%以上の飼料の飼料価値や発育成績に関して満足できる成績が得られる可能性がある(Felixら、2012b)。Schroederら(2014)は、発育成績、枝肉形質、飼料の消化率、飼料摂取量のパターンおよび飼料の分配に対する DDGS を 50%含む飼料への CaO の処理効果を検討した。その結果、CaO 処理の DDGS を給与した去勢牛では DMI が減少したが、ADG には影響がなかったため飼料効率が改善した。乾物や NDF 消化率には影響はなかった。Nuñezら(2014)は、60%DDGS 飼料への CaO を添加した場合の、フィードロット去勢牛のルーメン発酵、飼料消化率、発育成績および枝肉形質を調査した。その結果、最大 1.6%の CaO を添加することで、繊維の消化率、揮発性脂肪酸の生産量、アミノ酸利用率、精肉歩留が改善し、ルーメン pH の変動を最小限に抑えることができることが示された。

飼料と飲水からのイオウが乾物値で0.4%を超えると、牛で灰白脳軟化症が発生する可能性がある。さらに、イオウは銅の吸収と代謝を阻害し、モリブデンの存在下でさらに減少する。したがって、粗飼料や飲水中のイオウ含量が高い地域では、DDGS の給与量を抑える必要がある(Tjardes and Wright, 2002)。Drewnoskiら(2014)は、全イオウ摂取量が0.4%を超える場合、少なくとも7~8%の NDF を供給すると、イオウ含量が高い DDGS の配合割合が高い粗飼料を給与された牛におけるイオウの毒性の発生リスクを最小限にできることを示している。表 2

には、イオウの毒性の発生リスクと、PEM の発症リスクを回避するために、肥育牛にDDGSを使用する場合のイオウの最大含量を把握するための指標として使用できる。

仕上げ期の牛への DDGS の給与

肉用牛に対する WDGS(脱水していない未乾燥のジスチラーズ・グレイン・ソリュブル)とDDGSの給与に関する検討は、おそらくすべての動物種の中で最も多く行われている。その一例として、Bucknerら(2007)は、去勢牛の発育成績と枝肉形質に及ぼすDDGSの給与レベルの影響を検討している(表3)。その結果、DDGSの給与レベルの増加によるDMI、第12肋骨脂肪の厚さ、腰最長筋面積およびマーブリングスコアへの影響は見られないが、ADGと温屠体重量には二次曲線的な効果があり、飼料効率にも負の二次曲線的な効果があった。さらに、DDGSのフィーディングバリュー(飼料要求率の差をDDGS配合量で除したトウモロコシに対する相対値)は、配合割合の増加に伴って低下したが、いずれの配合割合の場合もトウモロコシより優れた(表3)。Klopfensteinら(2008)は、Bucknerら(2007)と他の試験のデータを用いてメタ分析を行っているが、DDGSの給与レベルの増加に伴い、ADGは二次曲線的な応答を示すが、飼料効率は三次曲線的な応答を示し、DDGSを20~30%含む飼料で仕上げ期における最大のADGを達成することが出来、飼料効率はDDGSを10~20%含む場合に最大の成績が達成出来ると推察している。

最近、Swansonら(2014)は、仕上げ期の肉用牛にDDGSを最大40%配合することでプラスの効果があることを示している。この研究では、DDGSを20または40%含む飼料に粗粒または細粒トウモロコシを配合して1年齢の去勢牛に給与し、発育成績と枝肉形質への影響を調査した。その結果、終了時体重とADGおよび枝肉形質はDDGSの配合割合あるいはトウモロコシの粒度による影響はなかったが、DDGSの配合量の増加に伴い、

DMIが減少し、飼料効率が改善された(表4)。この結果は、最大40%のDDGSを仕上げ期の飼料に配合しても、牛の枝肉品質に影響を与えずに、ADGを改善出来ることを示している。

Klopfensteinら(2008)によって行われたメタ分析以降、いくつかの研究が行われている。使用されたDDGSの粗脂肪含量が記されていない文献が多いが、記載されている場合には表中に示した。Frietasら(2017)、Engleら(2016)、Rodenhuisら(2016)、Nuñezら(2015)、Gigaxら(2011)およびLeuppら(2009)は、仕上げ期の肉牛における低脂肪WDGSまたはDDGSに関する研究を行っている。Gigaxら(2011)による研究では、低脂肪(粗脂肪6.7%)または高脂肪(12.9%)のWDGS(乾物35%)と、トウモロコシ(圧ペントウモロコシおよび高水分トウモロコシ)を含む飼料を仕上げ期の去勢牛に給与した。高脂肪WDGSの給与は、トウモロコシまたは低脂肪WDGSに比べて、ADG、終了時体重および温屠体重量が増加した。また、低脂肪WDGSの給与は、トウモロコシよりDMI、ADGおよび飼料効率が高かった。この結果は、仕上げ期の去勢牛に低脂肪WDGSを35%給与することで、圧ペントウモロコシあるいは高水分トウモロコシと少なくとも同等の発育成績と枝肉組成が得られることを示している。

これらの最近の研究の多くは、DDGSの配合割合が非常に高い(50~70%)場合の影響についての評価を行っており、その他の飼料組成と給与条件によっては、良好な発育成績と枝肉特性を示したとの報告がいくつもあることは非常に興味深いことである。さらに、いくつかの研究では、日常的に20~25%のDDGSを含む飼料を対照として使用していたが、このことは、25%までのDDGSを含む飼料をフィードロット牛に給与した場合、許容できる発育成績と枝肉特性が一貫して達成されるという高い信頼性があり、一般的に利用されていることを示している。したがって、米国以外の国でも、米国の現状と同様の利用形態をとることに何ら問題はない。

表 2. DDGS のイオウ含量と、変動を 10%と仮定した場合の肉用牛飼料のイオウ含量 1(Drewnoski ら、2014 から改編)

DDGS中のイオウ含量 %	DDGS配合割合 %				
	20	30	40	50	60
	飼料中イオウ含量 %				
0.3	0.16 - 0.17	0.18 - 0.18	0.20 - 0.21	0.22 - 0.23	0.23 - 0.25
0.4	0.18 - 0.19	0.21 - 0.22	0.24 - 0.25	0.27 - 0.29	0.29 - 0.32
0.5	0.20 - 0.21	0.24 - 0.27	0.28 - 0.30	0.32 - 0.34	0.35 - 0.38
0.6	0.22 - 0.24	0.26 - 0.30	0.32 - 0.34	0.37 - 0.40	0.41 - 0.45
0.7	0.24 - 0.26	0.28 - 0.33	0.36 - 0.39	0.42 - 0.45	0.47 - 0.51
0.8	0.26 - 0.28	0.33 - 0.35	0.40 - 0.43	0.52 - 0.56	0.53 - 0.58
0.9	0.28 - 0.30	0.36 - 0.38	0.44 - 0.47	0.52 - 0.56	0.59 - 0.65
1.0	0.30 - 0.32	0.39 - 0.41	0.48 - 0.52	0.57 - 0.62	0.65 - 0.71

1 飲料水からのイオウ摂取はなく、他の飼料成分にはイオウが0.13%含まれていると仮定

表 3. DDGS 配合量と肥育去勢牛の発育成績および枝肉形質(Buckner ら、2007 から改編)

評価項目	DDGS 0 %	DDGS 10 %	DDGS 20 %	DDGS 30 %	DDGS 40 %
乾物摂取量 kg/日	9.25	9.47	9.52	9.71	9.47
日増体量 kg	1.50	1.61	1.68	1.62	1.59
飼料効率	0.162	0.171	0.177	0.168	0.168
フィーディング・バリュー ¹	100	156	146	112	109
温屠体重 kg	351	362	370	364	359
12肋骨ロースの脂肪厚 cm	1.42	1.37	1.50	1.40	1.47
ロース芯面積cm ²	80.0	80.6	82.6	81.3	81.3
マーブリングスコア ²	533	537	559	527	525

1 飼料要求率の差をDDGS配合量で除したトウモロコシに対する相対値

2 マーブリングスコア: 400=わずが、500=小

表 4. 圧ペントウモロコシの粒度と DDGS 配合量が仕上げ期の肉用牛の発育成績と枝肉形質に及ぼす影響(Swanson ら、2014 から改編)

評価項目	圧ペントウモロコシの粉碎			
	粗粒 (2.88mm)		細粒 (1.46mm)	
	DDGS 20%	DDGS 40%	DDGS 20%	DDGS 40%
開始時体重 kg	345	345	343	345
終了時体重 kg	606	607	600	603
平均日増体量 kg/日	2.06	2.05	2.01	2.03
乾物摂取量 kg/日	12.1	11.0	11.6	11.0
乾物摂取量/体重kg % ¹	2.55	2.31	2.47	2.31
飼料効率	0.169	0.185	0.169	0.178
温屠体重 kg	361	369	360	360
12肋骨ロースの脂肪厚 cm	1.06	1.37	1.27	1.28
ロース芯面積cm ²	82.2	82.0	81.3	83.3
マーブリングスコア ²	543	538	533	530

1 DDGS配合量の影響 (p<0.001)

2 やや低い: 500、適度: 600

表 5. さまざまなタイプの DDGS 飼料を給与した仕上げ期肉用牛の発育成績と屠体特性を評価した 2009 年以降に公表された 28 報の概要

給与時期 開始体重	DDGS給与量と 粗脂肪含量	給与方法	発育成績等	屠体特性	引用文献
肥育牛					
去勢牛 211-261kg	50% 粗脂肪含量: 8.8%	NaOH含量が異なる(0, 0.5, 1.0, 1.5%)トウモロ コシサイレージ、圧ベン トウモロコシ各20%、 DDGS 50%飼料	NaOH添加による 終了時BW、ADG、 飼料効率に影響 なし	NaOH添加による HCW、LM面積、枝 肉歩留、背脂肪の硬 さ、マーブリングス コアに影響なし	Frietas et al., 2017
去勢牛 310kg	育成期・肥育 期 26% 粗脂肪含量: 9.6%	育成期用飼料：乾草 19%、 トウモロコシサイレージ 22%、トウモロコシまた は大麦 30% 肥育期用飼料：トウモロ コシサイレージ 20%、ト ウモロコシまたは大麦 51%	ADG、DMI、飼料 効率に影響なし	精肉歩留、HCW、枝 肉歩留、LM面積、 マーブリングスコア、 背脂肪に影響なし	Engle et al., 2016
去勢牛 287kg	0、0.5、1 %/BW 粗脂肪含量: 11.1%	中等度の乾草を自由 摂取、DDGS含量を変 えたサプリメントを 給与（試験期間84 日）	ADG、飼料効率に 二次回帰的傾向	DDGS添加量の増加 に伴いLM面積、脂 肪の硬さ、腰脂肪の 硬さが増加	Islas et al., 2014
去勢牛 359kg	DDGS 32%、濃 縮ジスチラー ズソリュブル 7%粗脂肪含 量:不明	DDGS由来のイオウを 0.46%含み、プロム グラス由来のNDFが 3.5~11.4%の6飼料 を給与	終了時BW、ADG、 飼料効率にNDF 含量による影響 ないが、DMIが 増加		Morine et al., 2014
去勢牛 355kg	60% 粗脂肪含量: 不明	CaOを0~2.5%含む DDGS 60%、トウモロ コシサイレージ 20%、 トウモロコシ 13~14% 飼料を給与	CaO添加量に対応 してADGと飼料効 率が直線的に改善、 DMIは直線的に低 下	CaO添加量が1.0%ま では枝肉歩留が直線的 に改善、その他の枝肉 特性には影響なし	Núñez et al., 2014
去勢牛 368kg	DDGSまたは WDGS 0、16.7、 33.3、50%(乾物) 粗脂肪含量: 不明	破碎アルファルファ ヘイレージ 10%を 含む飼料中のトウモ ロコシと置換して給与	DDGSまたはWDGSの 添加量の違いはBW、 ADGに影響しなかつ たが、DDGS給与量 に伴い肝臓癒スコア が直線的に低下	枝肉歩留、HCW、 マーブリングスコア、 赤身肉歩留と色調に 影響なし	Salm et al., 2014
去勢牛 336kg	DDGSまたはモ ディファイド DDGS 粗脂肪含量: 不明	CaOを無添加または 1.2%添加したアル ファルファ乾草およ びコーンハスクと置 換した試料を給与	DDGSをCaO処理 するとDMIが低下、 ADG、には影響な し。CaO無添加の 場合に飼料効率 が改善		Schroeder et al., 2014
去勢牛 345kg	20、40% 粗脂肪含量 :不明	DDGS 20または40%と、 粗挽および粉碎トウ モロコシを含む飼料 を給与	トウモロコシの加 工とDDGSはBW、 ADGに影響しない が、DDGS給与によ りDMIが低下し、 飼料効率が改善	DDGS給与による屠 体成績への影響なし	Swanson et al., 2014
去勢牛 268kg	1%/BW 粗脂肪含量 :不明	冬季のトールグラス放 牧地で1kgの綿実粕 1g/ 日と、ウモロコシ・大 豆粕飼料、大豆皮と大 豆粕またはDDGS 1% /BWを補給して121日間 飼育	トウモロコシ・ 大豆粕飼料給与 は、大豆粕と大 豆皮またはDDGS 給与ADGが高い	エネルギー源の補給 は腸間膜脂肪、YGを 高めたが、第12肋骨 脂肪の硬さ、マーブ リングスコアには影 響なし	Sharman et al., 2013

表 5. さまざまなタイプの DDGS 飼料を給与した仕上げ期肉用牛の発育成績と屠体特性を評価した 2009 年以降に公表された 28 報の概要(続)

給与時期 開始体重	DDGS給与量と 粗脂肪含量	給与方法	発育成績等	屠体特性	引用文献
去勢牛 335kg	モディファイ ドDDGS 0、25、 40、70% (乾 物) 粗脂肪含量 : 10.4%	トウモロコシサイ レージを15%含む飼 料中のトウモロコシ と大豆粕と置換して 給与	ADG、終了時BW には影響なし。 モディファイド DDGSを70%給与 すると、飼料効 率が劣る	モディファイドDDGS の70%給与は、ロー ス芯面積が小さい。 給与量の増加に伴い 格付けが低下	Veracini et al., 2013
冬小麦圃場 で放牧した 去勢牛 363~403kg	35% 粗脂肪含量 : 12.2%	DDGSを圧ペントウモ ロコシ、尿素、綿実 粕と置換して給与す る2年間の試験	DDGSの給与はBW に影響しない。圧 ペントウモロコシ 給与は対照飼料、 DDGS飼料より飼料 効率が優れる	DDGSの給与はLM面積、 YG、マープリングスコ アに影響なし、圧ペ ントウモロコシ給与で精 肉歩留、第12肋骨脂肪 の硬さが、高まる	Buttrey et al., 2012
去勢子牛 297kg	トウモロコシ または小麦 DDGS 22.5% 粗脂肪含量 : 不明	圧ペン大麦 71%、大 麦サイレージ 5%に混 合して給与	トウモロコシDDGS は小麦DDGSより ADG、飼料効率が 改善し、対照飼料 よりADG、DMIが 増加	トウモロコシDDGS 給与により、対照飼 料に比べてYG1の割 合が低下し、YG2と3 が増加	Halltewell et al., 2012
去勢子牛 336kg	20、40、60% 粗脂肪含量 : 不明	アルファルファ乾草 5%、トウモロコシサ イレージ 10%を含む 飼料に圧ペントウモ ロコシとともに配合 して給与	PEM(たんぱく質・ エネルギー欠乏)な かったが、DDGS給 与量増加により最 終終BW、ADGが二 次的に減少。飼料 効率に影響なし。 トウモロコシの加 工方法は発育成績 に影響なし。	DDGS給与により HCW、脂肪厚、YG が低下	Neville et al., 2012
去勢子牛 252kg	65% 粗脂肪含量 : 不明	DDGSあるいはトウモ ロコシを65%含む飼 料を0.9または1.4kg /BW給与	育成期のADG、 DMI、飼料効率は DDGS給与が優れ たが、肥育期で は差がない	育成期にDDGS給与 により、ADGおよび マープリングスコ アが改善	Felix et al., 2011
去勢牛 403kg	WDDGS 0、30% 粗脂肪含量: 6.7または 12.9%	圧ペントウモロコシ 85%、高水分トウモ ロコシ10%、ソルガ ムサイレージ 10%、 低脂肪あるいは高脂 肪WDDGS 35%	高脂肪WDDGS給 与ではADG、BW が増加したが、 DMI、飼料後逸に は差がない	高脂肪WDDGS給与 によりHCWが増加し たが、他の屠体成績 には差がない	Gigax et al., 2011
去勢牛 306kg	24.5% 粗脂肪含量: 不明	トウモロコシサイ レージ 75%と、DDGS、 コーングルテフィ ードまたは大豆粕 25% の飼料を給与		枝肉歩留、枝肉品質 には影響はないが、 DDGSあるいはコー ングルテンフィード 給与によりステーキ 肉が硬かった	Segers et al., 2011
1年齢の去勢 牛 406kg	30% 粗脂肪含量: 12.0%	イオウ含量が通常は 高レベルのDDGSを含 む湿式、乾式圧ペ ントウモロコシ飼料を 給与	高イオウ飼料で はDMI、ADGが低 下したが、飼料 効率には影響な し	高イオウ飼料では HCW、YGが低下し たが、精肉歩留、肝臓 痛、第12肋骨の脂肪 の硬さ、LM面積、格 付けには差がない	Urentze et al., 2011

表 5. さまざまなタイプの DDGS 飼料を給与した仕上げ期肉用牛の発育成績と屠体特性を評価した 2009 年以降に公表された 28 報の概要(続)

給与時期 開始体重	DDGS給与量と 粗脂肪含量	給与方法	発育成績等	屠体特性	引用文献
去勢牛 349kg	DDGSまたは WDDGS 20、 40% 粗脂肪含量： 不明	DDGSまたは WDDGSを大豆粕と トウモロコシたん白と 置換		WDGSまたはDDGS の給与により、脂肪 厚、YGが増加し、 YG 1および2の比率 が低下、牛肉のα-ト コフェロール含量が 減少。肉の共役リ ノール酸含量には影 響しないが、脂質酸 化を受けやすい PUFA含量は増加	Koger et al., 2010
若雌牛 353kg	0、25% 粗脂肪含量： 10.1%	DDGSを0、25%含み、 圧ペントウモロコシ とトウモロコシサイ レージ、または、ア ルファルファ乾草 6% を含む飼料を給与	DDGS給与による ADG、DMI、飼料 効率への影響な し。DDGS無給与 の場合に肝臓痛 が増加	HCW、歩留まり、脂 肪の硬さ、枝肉格付 けには飼料間で差が ない	Uwituze et al., 2010
去勢牛 257kg	育成期：0、 10.5、17.5% 肥育期：0、 11.4、18.3% 粗脂肪含量： 不明	育成期（84日間）、 肥育期（112日）に DDGSを圧ペントウモ ロコシと置換して給 与	開始時と終了時 BWに差がないが、 DDGS給与により 育成期のDMIが減 少し、ADGと飼料 効率が高まった。 DDGSの給与は、 肥育期のDMIを減 少させた、飼料 効率が高まる傾 向を示した	DDGS給与により マーブリングスコア、 YGを高めたが、LM 面積が低下。DDGS 給与量が多いと背脂 肪が柔化	Eun, J.-S. et al., 2009
去勢牛 443kg	25、50% 粗脂肪含量： 13.9%	DDGSを25または50% 含み、コーングルテ ンミールを12%含む トウモロコシ主体飼 料を給与	DDGS 25%飼料 ではたん白質と 脂肪含量が高い 50%飼料により ADGと飼料効率 が高まった	DDGS 25%飼料では HCW、マーブリング スコアおよび格付が 優れたが、歩留、12 番目肋骨の脂肪厚、 LM面積、YG、剪断力、 肉の過酸化に差はない	Gunn et al., 2009
若雌牛 296kg	30% 粗脂肪含量： 9.7%	0、30%含む育成用 および肥育用飼料を 給与	育成期、肥育期 のいずれもDMI、 ADG、飼料効率に はDDGS給与の影 響なし	DDGS給与によるLM 面積、12肋骨の脂肪 厚、YG、マーブリン グ、肉の柔らかさ には影響はないが、ス テーキはよりジュー シーで風味があった	Leupp et al., 2009

ADG：日増体量、BW：体重、DMI：乾物摂取量、HCW：温屠体重量、LM：腰最長筋、YG：枝肉

表 6. さまざまな種類の DDGS 飼料を給与した成長期または肥育期の肉用牛の発育成績と屠体特性を評価した 2009 年以降に公表された 5 報の概要

給与時期 開始体重	DDGS給与量と 粗脂肪含量	給与方法	発育成績等	屠体特性	引用文献
育成期～肥育期の肉牛					
1年目：去勢 牛 305kg 2年目：若雌 牛と去勢牛 301kg	25% 粗脂肪含量 ：10.9%	コーングルテン フィード、DDGS、ト ウモロコシ・大豆粕 25%とトウモロコシ サイレージ 75%を用 いた2年間の試験	DDGSとトウモロコシ・ 大豆粕を給与した去勢牛 は、高ADG、低DMI、高 飼料効率を示し、DDGS を給与した去勢牛の生産 コストは最も低い。	超音波装置 による枝肉 形質は差が ない	Segers et al., 2013
去勢牛 198 ～208kg	圧ベントウモロコ シまたはDDGSを体 重の0.2%補給 粗脂肪含量 ：11.6%	冬小麦牧草地で放牧した 去勢牛への圧ベントウモ ロコシまたはDDGSを給 与した2年間の試験	DDGS給与により、圧ベ ントウモロコシ給与およ びサプリメントなしに比 べてADGが8%増加		Buttrey et al., 2012
若雌牛と去 勢牛 238kg	60% 粗脂肪含量 ：不明	DDGS 60%、スチームグ ラスストロー 10%、大豆 皮 15%を含むサブリメン トに銅を0、100、200 mg/kg(乾物)添加	ADGには銅添加による影響は ないが、飼料効率は同含量と 対応して直線的に改善	HCW、LM面 積、YG、背脂 肪、マープリ ングスコアに は銅添加の影 響なし	Felix et al., 2012a
去勢牛 277kg	60% 粗脂肪含量 ：不明	ヘイレージ 0または10%、 モネンシン 0または 33mg/kg、DDGS 60%、 トウモロコシサイレージ 10%、トウモロコシ 5ま たは15%を給与	ヘイレージを10%給与する とADGが増加し、モネンシ ン添加でさらに増加しが、 DMIと飼料効率は低下		Felix and Loerch, 2011
ホルスタイン 種雄牛 246kg	0、0.8、1.6 kg/日 粗脂肪含量 ：不明	トウモロコシサイレージ を自由摂取させ、大豆粕 1.1 kg、ナタネ粕 1.5 kg、 DDGS 1.6 kg、またはナタ ネ粕 0.8 kg、DDGS 0.8 kg を補給	DDGSのみを給与すると、ナ タネ粕 + DDGS給与に比べて ADGが低下したが、他の飼料 との差はない。飼料効率には 影響なし	終了時BW、 枝肉歩留、内 臓脂肪には影 響なし	Meyer et al., 2010

ADG：日増体量、BW：体重、DMI：乾物摂取量、HCW：温屠体重量、LM：腰最長筋、YG：枝肉

育成期肉用牛への DDGS の給与

トウモロコシ DDGS を他のステージの肉用牛に給与した研究はあまり行われていない。しかし、DDGS は優れた飼料原料であり、牛に低品質の粗飼料を給与する場合に、飼料のエネルギーとたん白質を効果的に補うことができる。リン含量が少ない飼料原料を含む飼料では、DDGS を配合することで、DDGS 中のリンが非常に価値が高いものとなる。表 6 に示すように、DDGS の給与量が 60%までの粗飼料の給与に関する試験が 5 報公表されているが、一般に、DDGS を配合した飼料を給与した場合、発育成績と枝肉形質は同様に改善されている。

肉用牛子牛への DDGS の給与

子牛に対する給与試験が 3 報公表されており、DDGS を 60%まで含む飼料の給与についての評価が行われている(表 7)。一般に、DDGS の給与により、発育成績が改善され、さまざまな枝肉特性も改善された。

放牧肉用牛への DDGS の給与

放牧牛の発育とその後の枝肉形質に及ぼす DDGS の補給効果に関する試験が 3 報公表されている(表 8)。一般に、DDGS を補給すると、発育成績と枝肉形質が改善された。

表 7. さまざまな種類の DDGS 飼料を給与した子牛の発育成績と屠体特性を評価した 2009 年以降に公表された 3 報の概要

給与時期 開始体重	DDGS給与量と 粗脂肪含量	給与方法	発育成績等	屠体特性	引用文献
子牛					
若雌牛と 去勢牛 156kg	11~34 粗脂肪含量 : 不明	トウモロコシを 脂肪含量(高・ 低)×たん白質 (高・低)で置 換した4種類の 飼初期の126日 間では料を給与	高たん白質飼料は ADGを増加、トウモ ロコシ給与はDMIが 減少したが、DDGS 給与より飼料効率 が改善	高脂肪飼料は第12肋 骨脂肪とマープリ ングスコアを高め、高 たん白飼料はマー プリングスコアを低下、 HCW、LM面積、YGに 差はない。	Segers et al., 2014
ホルスタ イン種去勢牛 112kg	0、10、20、 30% 粗脂肪含量 : 不明	DDGSは、蒸気 圧ペントウモロ コシと置換して 305日間給与	初期の126日間では、 DDGSの増加に伴い ADGと飼料効率が 直線的に増加した が、以後および全 期間中の発育成績 には影響なし	DDGSを20%給与する とHCWは最大だった が、給与量との相関 はない。	Carrasco et al., 2013
早期離乳 去勢牛 200kg	0、30、60% 粗脂肪含量 : 9.8%	トウモロコシサ イレージ20%と DDGS 0、30、 60%を99日間給 与後、屠殺まで 一般的な飼料を 給与	DDGS給与による育 成期のADG、DMI、 飼料効率には影響 なし。その後の発 育成績にも影響は ない。	精肉歩留、HCW、 脂肪厚はDDGS給 与に伴い2次曲線 的に増加、マー プリングスコアへの影 響はないが、筋肉 内脂肪と皮下脂肪 の比率は、DDGS 30 ~60%で増加し、0 ~30%で減少。	Schoonmaker et al., 2013

ADG : 日増体量、BW : 体重、DMI : 乾物摂取量、HCW : 温屠体重量、LM : 腰最長筋、YG : 枝肉

肉質

一般的に多く使用されている量の DDGS(乾物摂取量の最大 30%)を含む飼料を給与しても、牛の枝肉肉質や歩留には影響はない。また、牛肉の官能的特性にも影響はない(Erickson ら、2005)。WDGS または DDGS を給与した牛の品質と官能特性を評価した研究は増えつつあり、DDGS の配合量が多い飼料を給与しても、牛肉の特性には悪影響を与えないことが一貫して示されている。

Roeber ら(2005)は、WDGS または DDGS を 50%まで配合した飼料をホルスタイン去勢牛に給与した 2 試験の結果から、ストリップロインの色調、柔らかさおよび官能特性を評価しているが、柔らかさ、風味、ジューシーさに差はなかった。同様に、Jenschke ら(2006)は、WDGS を

最大 50%(乾物)含む飼料を仕上げ期の肉用牛に給与し、ステーキ肉の柔らかさ、結合組織の量、ジューシーさ、異臭生成因子、異臭強度には影響がないことを示している。実際に、WDGS を 30%と 50%を給与した場合、WDGS 無給与、あるいは 10%含む飼料を給与した場合よりステーキ肉での異臭発生の可能性が明らかに低かった。Gordon ら(2002)は、仕上げ期の未経産牛に対して DDGS を 0、15、30、45、60、または 75%含む飼料を 153 日間給与し、DDGS の増加に伴い、ステーキ肉の柔らかさには線形モデル的な改善効果があったと報告している。Koger ら(2010)は、大豆粕すべてと粗挽きトウモロコシの一部と置換することにより WDGS あるいは DDGS を 20 または 40%配合してアンガス交雑種去勢牛に給与した。DDGS を給与した去勢牛の屠体は、圧ペントウモロコシ、

表 8. さまざまな種類の DDGS 飼料を給与した放牧牛の発育成績と屠体特性を評価した 2009 年以降に公表された 3

報の概要

給与時期 開始体重	DDGS給与量と 粗脂肪含量	給与方法	発育成績等	屠体特性	引用文献
放牧牛					
去勢牛 204kg	体重あたり0、 0.25、0.5% 粗脂肪含量 : 13.3%	メキシコ北部の砂漠地 帯で放牧し、週3回 DDGSを含むサプリメ ントを給与した2年間 の試験	DDGSの補給量増加 と対応して終了時 BW、ADG、サプリ メントの要求率が改 善	-	Murillo et al., 2016
去勢牛 1年目: 206kg 2年目: 230kg	体重あたり0、 0.2、0.4、0.6% 粗脂肪含量 : 12.1%	育成期の牧野で56~58 日間放牧し、DDGSを 含むサプリメントを BWの0、0.2、0.4、 0.6%給与した2年間の 試験	DDGS配合量増加と 対応してADGが直 線的に増加	-	Martinez- Pérez et al., 2013
1年去勢牛 321kg	放牧期間中は体 重あたり1% 肥育期間中は 40% 粗脂肪含量 : 不明	プロムグラス牧草地で 放牧し、低s (DDGSか ら0.34%) または高s (DDGSとNaSO ₄ から 0.47%) を補給。肥育 期用にはトウモロコシ 48%、DDGS 40%、乾 草8%を給与	放牧中のADGに飼料 中sの影響なし、肥 育期ではsが高まる とADGが低下したが DMI、飼料効率には 影響なし	肥育期の高s飼 料を給与によ りHCWは減少、 枝肉脂肪、LM 面積、YG格付、 マープリング スコアには影 響なし	Richter et al., 2012

ADG：日増体量、BW：体重、DMI：乾物摂取量、HCW：温屠体重量、LM：腰最長筋、YG：枝肉

大豆粕およびアルファルファ乾草を給与した場合に比べて、脂肪が厚く、歩留格付が改善された。DDGS 給与牛の腰最長筋は、WDGS 給与牛より pH が高く、対照飼料給与牛より α -トコフェロール含量が高かった。また、DDGS 40%給与牛の挽肉は、20%給与牛に比べて、販売店での陳列開始 2 日後における TBARS (チオバルビツル酸反応性物質: 脂質の指標となる) 含量が高かった。これらの結果から、DDGS を給与した去勢牛では体脂肪の過剰な蓄積を避けるために通常より早く出荷・と殺する必要があると結論しているが、挽肉や肉の柔らかさ、小売での陳列期間中の「ダークカッター」の発生などの影響はなかった。しかし、WDGS や DDGS の給与により、肉中の多価不飽和脂肪酸が増加しているため、酸化の影響を受けやすくなっている。

Leupp ら(2009)は、育成期および肥育期の去勢牛に DDGS を 0 または 30% 給与した場合、発育成績、マープリングスコアと肉の柔らかさに影響はないが、仕上げ期間中に DDGS を給与した去勢牛のステーキ肉はよりジュシーで風味が増したと報告している。これらのデータ

は、DDGS を育成期または仕上げ期にトウモロコシと部分的に置換して 30% 配合しても、発育成績、枝肉形質または官能特性に悪影響を及ぼさないことを示唆している。ただし、DDGS を 30% 給与すると、ステーキの色調に悪影響を及ぼす可能性がある。

同様に、Segers ら(2011)は、腰最長筋の組成と柔らかさは、たん白質補給源として大豆粕を離乳から屠殺まで使用する場合と比べて、DDGS またはコーングルテンフィードを 25% 含む飼料は影響を及ぼさないことを示しているが、Leupp ら(2009)によって観察されたステーキの色調には同様の影響があった。この試験では、パネラーが知覚できる色調の差についても評価しているが、全体的な色調は飼料間で類似していた。Koger ら(2010)による報告とは異なり、飼料間で牛肉の TBARS 濃度に差がなかったが、DDGS 給与牛のステーキ肉は、小売陳列 9 日後に変色し、多価不飽和脂肪酸の含量が高まった。この結果は、離乳から屠殺までの肉用牛用飼料の大豆粕とトウモロコシの一部を DDGS とトウモロコシグルテン

フィードで置換しても、肉の品質に影響を及ぼさないことを示している。

Aldaiら(2010a, b)は、小麦DDGSとトウモロコシDDGSの給与がフィードロット牛に肉の品質に及ぼす影響を比較し、小麦DDGSは肉の品質に影響を及ぼさないが、トウモロコシDDGSでは、大麦対照飼料を給与した牛と比べて、肉のやわらかさと味が改善されるなど、肉の品質にプラスの影響を示した。

DDGSの給与が大腸菌O157:H7排出に与える影響

2007年以降、米国で牛挽肉への*E. coli*(大腸菌)O157:H7汚染が増加している理由の究明に関する関心が高まっている。これは、この時期にエタノール製造に伴う併産物(DDGs)の生産量が指数関数的に増加したためであり、WGDSやDDGS等のDDGsの給与に疑念が向けられたのもこれが理由である。このため、DDGsの給与と、牛肉における*E. coli*O157:H7汚染発生率の増加との関連についての調査が開始された。その結果、いくつかの調査結果では、肉用牛へのDDGs給与は、*E. coli*O157:H7排出への一貫した影響はないことが示された。*E. coli*O157:H7の排出に対する反応は、DDGsの給与量や、トウモロコシの加工形態など、他の飼料原料の影響を受ける可能性がある。現在、行われているレベルのDDGsの給与が、牛挽肉の大腸菌O157:H7汚染の原因であることを示唆する科学的証拠はない。糞便における*E. coli*O157:H7の検出率とDDGS給与による潜在的な関連性に関する研究結果の包括的な詳細情報は18章を参照されたい。

肉用牛へのDDFSの給与

DDGSの他の用途として、クリープフィーディング用飼料、放牧時のサプリメント、低品質の粗飼料用サプリメントおよび成長期の子牛に給与される可能性がある牧草や作物残渣へのサプリメント等がある。ただし、育成期や仕上げ期の肉用牛とは異なり、DDGSの給与に関する研究はいずれも少ない。Loyら(2005a)は、肉用牛飼料へのDDGSに利用に関して最初に総説を公表し、DDGSの使用に最適なアプリケーションは、1)トウモロコシグル

テンフィードまたは大豆粕と置換するためにたん白質の補給が必要な場合(特に、低品質の粗飼料を給与する場合)、2)トウモロコシグルテンフィードまたは大豆皮と置換するために低でん粉、高繊維、高エネルギー源が必要な場合、3)脂質の補給が必要な場合であるとしている。

たん白質サプリメントとしてのDDGS

以前の研究では、コロラド州の放牧地帯で冬季に放牧されている牛に0.18kg/日のたん白質を補給するためにDDGSを利用した場合、アルファルファ乾草または間引かれたシロインゲンマメに比べて成績が優れていたことが報告されている(Smithら、1999)。Shikeら(2004)は、トウモロコシグルテンフィードまたはDDGSを、アルファルファ乾草のサプリメントとして泌乳中のシメンタール牛に給与した場合の産乳成績を比較し、DDGSの給与は、コーングルテンフィードの給与に比べて体重は増加するが、乳量は低下したと報告している。しかし、DDGSとコーングルテンフィードの間には、子牛の体重とその後の繁殖成績に差はなかった。その後のLoyら(2005a)の研究では、DDGSまたはコーングルテンフィードを配合した粉碎コーンストークス混合飼料を泌乳中のアンガス牛およびシメンタール牛に給与しても、乳量や子牛の増体量には差がなかったと報告している。

エネルギーサプリメントとしてのDDGS

トウモロコシDDGSは、低品質の粗飼料を給与する場合に効果的なエネルギーサプリメントとなる。

Summer and Trenkle(1998)は、コーンストーバー主体の飼料では、DDGSおよびトウモロコシグルテンフィードがトウモロコシより優れたサプリメントであることを示しているが、高品質のアルファルファ主体の飼料では有効ではなかった。

コーンストーバーは低タンパク質で、エネルギーおよびミネラル含量も低い、安価であり、米国における主要なトウモロコシ生産州では容易に入手できる。妊娠後期の3分の1の期間に1日あたり1.4~2.3kgのDDGSを給与すると、牛の要求量を充足するたん白質とエネルギーが供給できる(Loy and Miller, 2002)。泌乳初期の肉用牛にコーンストークスなどの低品質の粗飼料を給与す

る場合、DDGSを2.7~3.6kg補充すると、たん白質とエネルギーの要求量を充足させることが出来る(Loy and Miller, 2002)。Radunz ら(2010)は、分娩前後の肉用牛に対する妊娠後期のエネルギー源として乾草、トウモロコシまたは DDGS 給与の影響を評価した。これらのエネルギー源を1日の要求量以上給与すると、分娩前後の牛の成績に悪影響を及ぼさず、分娩前のエネルギー源として DDGS を給与すると、妊娠中の1日あたりの飼料費が低減できる。エネルギー源はエネルギーの分配に影響を及ぼし、血漿代謝産物に変化を引き起こし、結果として、妊娠後期に DDGS またはトウモロコシを給与した母牛が分娩した子牛の出生時体重は、乾草を給与したものと比べて増加した。

脂質サプリメントとしての DDGS

脂質の補給は、妊娠率が90%未満の経産牛群の繁殖成績を改善できる可能性がある。Loy and Miller(2002)は、DDGSに含まれているトウモロコシ油と類似した脂肪酸組成を持つサプリメントを給与すると、妊娠率が向上することを示している。彼らはまた、脂質の補給がたん白質および/またはエネルギー補給が必要な摂食状況で最も有益であることを示している。

Engle ら(2008)は、妊娠後期の未経産雌牛の飼料と飼料生産における DDGS 給餌の影響を大豆皮と比較しているが、DDGS を配合した分娩前の飼料が脂肪および RUP 供給源となって、受胎率を改善することを示している。

Shike ら(2009)は、制限給与条件下において、トウモロコシ併産物を使用した場合の発育成績、泌乳、栄養成分の排泄量およびその後の繁殖成績への影響を評価している。最初の試験では、DDGS を給与した牛は、体重が16kg減少し、乳量は0.9kg/日減少したため、コーングルテンフィードを給与した牛よりも ADG が低くなる傾向を示した。しかし、2回目の試験では、養分要求量を充足させるために粉碎コーンストーバー 2.3 kg/日と、等エネルギー量のコーングルテンフィード(7.7 kg/日)または DDGS(7.2 kg/日)を給与した結果、DDGS を給与すると、

コーングルテンフィードより体重が減少する傾向を示したが、乳量や子牛の ADG には差がなかった。さらに、いずれの試験でも、繁殖成績には差がなく、DDGS とコーングルテンミールは制限給与用飼料の75%まで配合できるが、DDGS を多く含んでいる粗脂肪は繁殖成績を改善しなかった。

DDGSを妊娠中の肉用牛に給与することを評価した13報の公表論文の概要を表9、妊娠中の牛肉用牛に給与した4報の公表論文の概要を表10に示した。一般的に、DDGS を補給すると、繁殖成績が同等か、あるいは、改善され、未経産牛の発育とその後の枝肉形質や生殖効果も同等か改善傾向にあった。

更新用未経産牛

更新用の未経産牛への DDGS の給与に関する研究はほとんど行われていない。しかし、仕上げ期の肉牛で行われている多くの報告に基づくと、DDGS は、更新用未経産牛のバイパスたん白質とエネルギーの優れた供給源となるものと思われる。MacDonald and Klopfenstein (2004)は、ブロムグラス牧草地で放牧している更新用未経産牛に0、0.45、0.90、1.36 または 1.81 kg/日の DDGS を補給した結果、DDGS 補充量 0.45 kgあたり、DMI が0.78 kg ADG が27 g/日増加したと報告している。

Loy ら(2003)は、育成中の雑種の未経産牛に粗飼料を多く給与する際の、DDGS 補給回数(週6回または週3回)の効果を評価している。未経産牛は乾草(CP 8.7%)を自由に摂取することが可能な条件で、DDGS または圧ペントウモロコシを補給した。サプリメントの給与量は2水準とした。週6回補給した未経産牛では、乾草摂取量が増加し、ADG も増加したが、飼料効率は、週3回補給した牛より低下した。ただし、DDGS の補給レベルに関わらず、圧ペントウモロコシを給与した未経産牛よりも ADG と飼料効率が改善された(表11)。これらの結果に基づいて、DDGS の推定正味エネルギー値はトウモロコシより27%高かった。

Loy ら(2004)によるその後の研究で、カニユーレを装

表 9. さまざまな種類の DDGS 飼料を給与した雌牛の繁殖成績とその後の発育、屠体成績または繁殖成績を評価した 2009 年以降に公表された 13 報の概要

給与時期	DDGS給与量と粗脂肪含量	給与方法	繁殖成績等	子牛の発育、枝肉成績、繁殖成績	引用文献
妊娠牛					
未経産牛		母牛には、妊娠後192日から分娩後118日までトウモロコシサイレージTMR、DDGSを給与。離乳までの産子にはDDGSを自由摂取させ、その後、AIまでの間、トウモロコシサイレージ、グラスサイレージ、コーンストーパー、大豆皮、大豆粕を給与	DDGSを給与した母牛から生まれた子牛は、離乳から繁殖までのBWおよび骨格スコアが優れたが、卵巣サイズと卵胞数と発情日数には差がなかった。発情時のBWと受胎率はDDGS給与により高まったが、異常分娩率には影響しなかった。	-	Gunn et al., 2015
初産牛 450 kg	0.83kg/日 粗脂肪含量：不明	妊娠142日間の3年間の試験で、乾草、あるいは、それと等窒素のDDGSまたはコーングルテンを含むサプリメントを給与	サプリメントの補給によりDMI及びBWが増加した。サプリメントの補給はADGを増加させたが、子牛の出生体重とその後の受胎率には差がなかった。	子牛のADGとHCWには、母牛へのサプリメント給与による影響はなかったが、枝肉脂肪が低く、肉が柔らかかった。	Summers et al., 2015a,b
2歳の雌牛 199 kg	粉碎大豆 1.2kg、 トウモロコシ 0.4kg、DDGS 1.65kg 粗脂肪含量：11.5%	離乳から繁殖まで、遅刈り乾草と、生大豆およびトウモロコシまたはDDGSを自由摂取	DDGSの補給により1年目のADGが増加したが、2年目では差はない。1年目と2年目の間で、卵胞のサイズ、卵胞ホルモン、妊娠率に差はない。子牛の生産性へ影響はない。	-	Martin et al., 2010
妊娠後期牛	2.8～3.1kg/日 粗脂肪含量：12.0%	乾草4 kg/日、DDGS 2.8～3.1 kg/日、大豆皮 3.2～3.5 kg/日を妊娠から分娩までの190日間給与	DDGS給与によりBWが増加したが、BCS、子牛の活力や出生体重、離乳時体重、ADGへの影響はない。DDGS給与牛では受胎率が高かったが、発情周期には影響なし。	-	Engle et al., 2008

ADG = 日増体量、AI = 人工授精、BCS = BCSスコア、BW = 体重、DMI = 乾物摂取日量、HCW = 温屠体重量、LM = 腰最長筋、YG = 枝肉評価

表 9. さまざまな種類の DDGS 飼料を給与した雌牛の繁殖成績とその後の発育、屠体成績または繁殖成績を評価した 2009 年以降に公表された 13 報の概要(続)

給与時期	DDGS給与量と粗脂肪含量	給与方法	発育成績等	子牛の発育、枝肉、繁殖成績	引用文献
春分娩 経産牛 688 kg	分娩後の飼料ではDDGS 7%、その後の一般的なフィードロット飼料にDDGS 45%またはモディファイドDDGSを配合	乾草とDDGSまたはトウモロコシフスマ、コーンストークスを配合したTDN要求量の100または125%を含む飼料を、分娩前83日から分娩まで給与し、分娩後は一般的な飼料を給与。産子には、DDGS 45%を含む一般的な飼料を給与	子牛の離乳時BW、フィードロット開始時および終了時のBW、DMI、ADG、飼料効率、罹患率には影響なし	No differences in call weaning weight, initial and final feedlot BW, DMI, ADG, Gain:Feed, or morbidity among dam diet treatments	Wilson et al., 2016b
秋分娩 雌牛 632 kg 子牛 186日齢	DDGS 70%と大豆皮 30%のサプリメント 離乳講師には粗脂肪含量 8.1%のモディファイドDDGSを25~45%給与	エンドファイトに感染したトールフェスク/レッドクローバー牧野でサプリメントなしまたは低 (2.2 kg/牛/日) または高 (8.6 kg/牛/日) 補給で飼育	サプリメントの給与量の増加により、分娩前、分娩後、繁殖後のBWが増加したが、子牛の生時BW、斃死率に影響なし。また、サプリメント給与は定時AI率の改善傾向を示したが、受精率には影響せず、早期離乳と栄養補給は、BW、BCS、繁殖成績を改善。	母牛に低サプリメント飼料を給与すると、離乳去勢牛の離乳時BWが改善されたが、サプリメント補給による子牛の成績の差は最小限。	Shoup et al., 2016
春分娩 雌牛 678 kg	脂肪含量 : 不明	分娩前~出産までは、乾草 (12 kg/日) またはコーンストークス 60%、DDGS 24%、トウモロコシフスマ 16%を含む飼料を10.4 kg/日給与。分娩後は、乾草 22%、コーンストークス 22%、DDGS 33%、トウモロコシフスマ 24%を給与。産子にはコーングルテンフィード、高水分トウモロコシ、コーンハスクを給与。	母牛のBWとBCS、子牛の出生時BWは分娩前のDDGS給与によりどうか、妊娠率および乳量には影響なし。	フィードロット期間中の子牛の終了時BW、ADG、DMI、飼料効率、斃死率、罹患率、HCW、LM面積、背脂肪、マープリングスコア、YGに影響なし	Wilson et al., 2015a
秋分娩 雌牛 603 kg	分娩までは2.1 kg/日; フィードロット中は43%量 粗脂肪含量 : 不明	分娩前69日間、トールフェスクの牧野に放牧、サプリメントなしで別の牧野に移動。雄去勢牛にはDDGSを43.5%含む飼料を給与	DDGS給与により、BWとBCSが高まったが、分娩日、乳量、AI適期、妊娠率、子牛の出生時または離乳時BW、ADGに影響なし。	去勢子牛の開始時および終了BW、飼育日数、ADG、DMI、飼料効率、マープリングスコア、YGに影響なし	Wilson et al., 2015b
雌牛 606 kg	4.1 kg/日 粗脂肪含量 : 不明	乾草のみ自由摂取、トウモロコシ 5.3kg/日、DDGS 4.1kg +2.1 kg+サプリメント 1 kg/日を補給して妊娠167日から分娩前1週間まで飼育	DDGS給与によりBWが高まったが、BCSには影響なし。また、より子牛の生時BWは増加したが、受胎率、乳量、乳成分には影響なし		Radtz et al., 2010

ADG : 1日増体量、AI : 人工授精、BW : 体重、DMI : =乾物摂取量、HCW =温屠体重量、LM : 腰最長筋、YG =枝肉

表 10. 様々な種類の DDGS 配合飼料を給与した妊娠牛の繁殖成績と発育成績、枝肉形質または繁殖反応を評価した 2009 年以降に公表された 4 報の概要

給与時期	DDGS給与量と粗脂肪含量	給与方法	発育成績等	子牛の発育、枝肉、繁殖成績	引用文献
妊娠牛					
秋分娩 経産牛 623 kg	DDGS 70% + 大豆皮30%を 0、2.2または 8.6 kg/日 粗脂肪含量 ：不明	供試牛をエンド ファイトに感染し たトールフェスク/ レッドクローバー の牧草地で放牧し、 分娩前103日から分 娩後2日まで補給		雌牛の離乳、繁殖、 妊娠、AI受胎率、 妊娠率、分娩率へ の影響はない。子 牛の生時体重、乳 量および73日齢の BWにも影響はな い。	Shoup et al., 2017
経産牛	DDGS 0、2.5ま たは4.7 kg/日 粗脂肪含量 ：不明	授乳初期に、等エ ネルギーのDDGS添 加または無添加の サイレージTMRを 給与	DDGS給与量を増 加すると、乳脂 肪と尿素含量が 増加し、2.5 kg 給 与により乳糖含 量が増加した。 終了時のBW、 ADG、発情日齢 および受胎率に は影響なし。		Taylor et al., 2017
初産および2 産牛 520 kg	0.3%体重を 週3回または6 回給与 粗脂肪含量 ：不明	DDGSを含むトウモ ロコシ併産物補給 による放牧	週6日および3日 の補充はADGを 増加させた。BCS は6日/週で高 まった。		Gross et al., 2016
経産牛 674 kg	0.3%体重を妊 娠後期3週およ び分娩後8週間 給与。 粗脂肪含量 ：不明	妊娠後期10週から コーンストーバー と、DDGSを含むサ イレージを給与	DDGS給与により 血糖値が高まり、 子牛の分娩時お よび離乳時体重 が高まった。 DDGSの給与は子 宮血を増加させ たが、エストラ ジオールとプロ ゲステロン濃度 が減少した。		Kennedy et al., 2016a,b,c
経産牛 653 kg	6.9kg/日 粗脂肪含量 ：不明	に母牛と子牛のベ アに分娩から分娩 後129日までライム ギ乾草とDDGSまた は大豆粕、コーン サイレージ、ライ 麦乾草を給与	DDGS給与により 産乳量には影響 はないが、乳中 尿素窒素と乳脂 肪が増加、乳た ん白が低下し、 定時AI率が低下。 受胎率には影響 なし。	DDGSを給与した 子牛ではADGと BWが増加	Shee et al., 2016
春分娩 経産牛 657 kg	19または39% (乾物)のモディ ファイドDDGS 粗脂肪含量 ：不明	エン麦サイレージ、ト ウモロコシサイレージ、 モディファイドDDGS をたん白質要求量ある いはその129%量を妊 娠後78日から分娩まで 給与	BW、BCS、産乳 量、繁殖成績、 英乳後の発育成 績には影響なし	子牛の発育とマー プリングスコアに は影響はないが、 高タンパク質サブ リメントの給与に より第12肋骨の脂 肪厚とYGが増加	Wilson et al., 2016a

表 11. 放牧中の成長期の未経産牛にトウモロコシ DDGS を低レベルまたは高レベルで補給した場合の発育成績(Loyら、2003 から改編)

		低 (0.21%/体重)	高 (0.81%/体重)
日増体量 kg/日	トウモロコシ	0.37	0.71
	DDGS	0.45	0.86
乾物摂取量/日増体量	トウモロコシ	15.9	9.8
	DDGS	12.8	8.0

着した未経産牛に、サプリメントなし、または、DDGS を毎日または 1 日おきに補給、圧ペントウモロコシを毎日または 1 日おきに補給した。その結果、予想通り、サプリメントを補給した未経産牛では、乾草摂取量が増加した。DDGS または圧ペントウモロコシを補給した未経産牛の飼料摂取量には差がなかったが、DDGS を補給した未経産牛では、ルーメンにおける繊維の消失率が高かった。

Loyら(2008)は、育成牛における DDGS のエネルギー価を推定するために、サプリメントの種類、濃度および給与頻度が DMI と発育成績に及ぼす影響を調査した。その結果、DDGS または圧ペントウモロコシを週に 3 回補給すると、毎日補給した場合に比べて DMI と ADG が減少したが、DDGS の補給は、圧ペントウモロコシの補給に比べて、ADG と飼料効率が改善されたと報告している。彼らは、未経産牛用の乾草飼料へのサプリメントとして使用した場合の DDGS の TDN(可消化養分総量)は、トウモロコシの 118~130%であったと推定している。

Stalker ら(2004)は、DDGS を粗飼料主体の飼料のエネルギー源として供給する際の、補足的な RDP の影響を評価するために 2 試験を行っている。供試飼料は RDP が不足するように設計された(100 g/日以上)が、代謝可能なたん白質は過剰に含まれていた。その結果、DDGS を粗飼料主体飼料のエネルギー源として使用する場合、RDP の要求量を充足させるための尿素添加は必要がないことを示している。

Morris ら(2005)は、個体毎に給餌している未経産牛に対して、高品質または低品質の粗飼料を給与し、0、0.68、1.36、2.04 または 2.72 kg/日の DDGS を補給すると、DMI が減少し、ADG が増加したことを示している。この結果

は、飼料の有効性が制限されている可能性があるときに、DDGS が発育促進に効果的なサプリメントである可能性があることを示唆している。

Islas and Soto-Navarro(2011)は、放牧未経産牛の DMI と消化性に対する DDGS 補給の影響を評価し、DDGS の補給量が最大 0.6%/体重であっても、粗脂肪摂取量および NDF 消化率、ルーメン発酵特性に悪影響を及ぼさないことを報告している。これらの結果に基づいて、DDGS をサプリメントとして使用すると、放牧牛の DMI や消化性に悪影響を及ぼすことなく、脂質摂取量を増加させることが出来る。

結論

トウモロコシ DDGS は、肉用牛生産のすべての段階において優れたエネルギーおよびたん白質源である。すなわち、エネルギー源として効果的に使用が可能で、優れた発育成績、枝肉成績と肉の品質を得るためには、DMI の最大 40%を給与することが可能である。ただし、DDGS の給与量が多い場合、要求量より過剰なたん白質とリンが供給されるため、排泄物中の窒素とリンが増加する。DDGS のイオウ含量に注意を払い、特にイオウ含量の多い粗飼料や飲水を摂取している場合には、必要に応じて DDGS の配合量を調整してイオウ摂取による毒性を回避する必要がある。DDGS を多量に含む飼料を仕上げ期の肉用牛に給与しても、牛肉の色調への影響は少なく、官能特性は向上するが、多価不飽和脂肪酸含量が増加するため、賞味期限が短くなる恐れがある。

肉用牛からの *E. coli* O157:H7 の排泄に対する DDGS 給与には一貫した影響は認められない。DDGS の給与

量とトウモロコシの加工(加熱あるいは蒸気圧パン、浸漬等)は、*E. coli* O157:H7 の排泄に影響を与える可能性がある。現在、行われているDDGSの給与レベルが牛挽肉の *E. coli* O157:H7 汚染の原因であることを示唆する科学的証拠はない。

肉用牛や未経産牛への DDGS の補給は、産子の発育、枝肉形質または繁殖成績への影響を最小に抑えながら、満足できる繁殖および泌乳成績を得ることが出来る。肉用牛飼料に DDGS を使用する場合の最適な用途は、1)トウモロコシグルテンフィードまたは大豆粕の代替として補足たん白質が必要な場合(特に低品質の粗飼料を給与する場合)、2)トウモロコシグルテンフィードまたは大豆皮とを置き換えるため低でん粉・高繊維エネルギー源が必要な場合、3)脂質の補給が必要な場合である。

育成中の未経産牛では、DDGS が粗飼料主体飼料のエネルギー源として使用されている場合、分解性たん白質の要求量を充足させるために尿素を追加する必要はない。DDGS は、飼料の入手が制限される可能性があるときに発育を促進するための効果的なサプリメントであり、育成用未経産牛において圧ペントウモロコシよりも18~30%高いTDNを有している。

引用文献

- Ahern, N.A., B.L. Nuttleman, C.D. Buckner, T.J. Klopfenstein, and G.E. Erickson. 2011. Use of dry-rolled corn, dry or wet distillers grains plus solubles as an energy source in high-forage diets for growing cattle. *Nebraska Beef Cattle Report*, p. 20-21.
- Aines, G., T. Klopfenstein, and R. Stock. 1987. Distillers Grains. MP51, Nebraska Agric. Res. Div., Lincoln.
- Aldai, N., M.E.R. Dugan, J.L. Aalhus, T.A. McAllister, L.J. Walter, and J.J. McKinnon. 2010a. Differences in the trans-18:1 prole of the backfat of feedlot steers fed wheat or corn based dried distillers' grains. *Anim. Feed Sci. Technol.* 157:168-172.
- Aldai, N., J.L. Aalhus, M.E.R. Dugan, W.M. Robertson, T.A. McAllister, L.J. Walter, J.J. McKinnon. 2010b. Comparison of wheat- versus corn-based dried distillers' grains with soluble on meat quality of feedlot cattle. *Meat Sci.* 84:569-577.
- Bremer, M.L. 2014. Energy value of de-oiled distillers grains plus solubles in beef cattle diets. Master's thesis, University of Nebraska-Lincoln. 117 pp.
- Buckner, C.D., T.L. Mader, G.E. Erickson, S.L. Colgan, K. Karges, and M.L. Gibson. 2007. Optimum levels of dry distillers grains with soluble for finishing beef steers. *Nebraska Beef Rep.* 35-38.
- Buttrey, E.K., F.T. McCollum, III, K.H. Jenkins, J.M. Patterson, B.E. Clark, M.K. Luebbe, T.E. Lawrence, and J.C. MacDonald. 2012. Use of dried distillers grains throughout a beef production system: Effects on stocker and finishing performance, carcass characteristics, and fatty acid composition of beef. *J. Anim. Sci.* 90:2381-2393.
- Carrasco, R., A.A. Arizon, A. Plascencia, N.G. Torrentera, and R.A. Zinn. 2013. Comparative feeding value of distillers dried grains plus solubles as a partial replacement for steam-flaked corn in diets for calf-fed Holstein steers: Characteristics of digestion, growth performance, and dietary energetics. *J. Anim. Sci.* 91:1801-1810.
- Castillo-Lopez, E., T.L. Klopfenstein, S.C. Fernando, and P.J. Kononoff. 2013. In vivo determination of rumen undegradable protein of dried distillers grains with solubles and evaluation of duodenal microbial crude protein flow. *J. Anim. Sci.* 91:924-934.
- Ceconi, I., M.J. Ruiz-Moreno, N. DiLorenzo, A. DiCostanzo, and G.I. Crawford. 2015. Effect of urea inclusion in diets containing corn dried distillers grains on feedlot cattle performance, carcass characteristics, ruminal fermentation, total tract digestibility, and purine derivatives-to-creatinine index. *J. Anim. Sci.* 93:357-369.
- Croom, W.J., Jr., R.W. Harvey, A.C. Linnerud, and M. Frotschel. 1982. High level of sodium hydroxide in in beef cattle diets. *Can J. Anim. Sci.* 62:217-227.

- DeHaan, K., T. Klopfenstein, R. Stock, S. Abrams, and R. Britton. 1983. Wet distiller's co-products for growing ruminants. *Nebraska Beef Rep.* MP 43:33-35.
- Drewnoski, M.E., D.J. Pogge, and S.L. Hansen. 2014. High-sulfur in beef cattle diets: A review. *J. Anim. Sci.* 92:3763-3780.
- Drewnoski, M.E., C.J. Brasche, and S.L. Hansen. 2014. Short communication: effects of dietary sulfur source on rumen pH and hydrogen sulfide gas concentration. *Livest. Sci.* 165:66-69.
- Engle, C.L., V.L. Anderson, and K.C. Swanson. 2016. Influence of two fat levels of dry distillers grains in diets with corn or barley on growing and finishing feedlot and carcass performance of steers. *J. Anim. Sci.* 94(Suppl. 2):173 (Abstr.).
- Erickson, G.E., T.J. Klopfenstein, D.C. Adams, and R.J. Rasby. 2005. Utilization of corn co-products in the beef industry. - A joint project of the Nebraska Corn Board and the University of Nebraska-Lincoln, Institute of Agriculture and Natural Resources, Agricultural Research Division, Cooperative Extension Division. www.nebraskacorn.org
- Eun, J.-S., D.R. ZoBell, and R.D. Wiedmreier. 2009. Influence of replacing barley grain with corn-based dried distillers grains with solubles on production and carcass characteristics of growing and finishing beef steers. *Anim. Feed Sci. Technol.* 152:72-80.
- Felix, T.L., W.P. Weiss, F.L. Fluharty, and S.C. Loerch. 2012a. Effects of copper supplementation on feedlot performance, carcass characteristics and rumen sulfur metabolism of growing cattle fed diets containing 60 percent dried distillers grains. *J. Anim. Sci.* 90:2710-2716.
- Felix, T.L., T.A. Murphy, and S.C. Loerch. 2012b. Effects of dietary inclusion and NaOH treatment of dried distillers grains with solubles on ruminal metabolism of feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 90:4951-4961.
- Felix, T.L., and S.C. Loerch. 2011. Effects of haylage and monensin supplementation on performance, carcass characteristics and ruminal metabolism of feedlot cattle fed diets containing 60 percent dried distillers grains. *J. Anim. Sci.* 89:2614-2623.
- Geisert, B.G., G.E. Erickson, T.J. Klopfenstein, C.N. Macken, M.K. Luebbe, and J.C. MacDonald. 2010. Phosphorus requirement and excretion of finishing beef cattle fed different concentrations of phosphorus. *J. Anim. Sci.* 88:2393-2402.
- Gigax, J.A., B.L. Nuttleman, W.A. Grifn, G.E. Erickson, and T.J. Klopfenstein. 2011. Performance and carcass characteristics of finishing steers fed low-fat and normalfat wet distillers grains. *Nebraska beef Cattle Report* p. 44-45.
- Gordon, C.M., J.S. Drouillard, R.K. Phebus, K.A. Hachmeister, M.E. Dikeman, J.J. Higgins, and A.L. Reicks. 2002. The effect of Dakota Gold Brand dried distiller's grains with solubles of varying levels on sensory and color characteristics of ribeye steaks. *Cattleman's Day 2002, Report of Progress 890, Kansas State University.* pp. 72-74.
- Gross, S.M., B.W. Neville, F.A. Brummer, and M. Undi. 2016. Frequency of feeding distillers dry grain with solubles as a supplement to beef cows grazing corn residue. *J. Anim. Sci.* 94(E-Suppl. 5):290 (Abstr.)
- Gunn, P.J., J.P. Schoonmaker, R.P. Lemenager, and G.A. Bridges. 2015. Feeding distiller's grains as an energy source to gestating and lactating beef heifers: Impact on female progeny growth, puberty attainment and reproductive processes. *J. Anim. Sci.* 93:746-757.
- Gunn, P.J., A.D. Weaver, R.P. Lemenager, D.E. Gerrard, M.C. Claeys, and S.L. Lake. 2009. Effects of dietary fat and crude protein on feedlot performance, carcass characteristics and meat quality in finishing steers fed differing levels of dried distillers grains with solubles. *J. Anim. Sci.* 87:2882-2890.
- Hallewell, J., T.A. McAllister, J. Thomas, C.W. Booker, S. Hannon, G.K. Jim, L.O. Burciaga-Robles, M.L. May, R.E.

- Peterson, C. Flaig, E.M. Hussey, and K. Stanford. 2012. Effects of wheat or corn distillers dried grains with solubles on feedlot performance, fecal shedding and persistence of *Escherichia coli* O157:H7. *J. Anim. Sci.* 90:2802–2810.
- Ham, G.A., R.A. Stock, T.J. Klopfenstein, E.M. Larson, D.H. Shain, and R.P. Huffman. 1994. Wet corn distillers co-products compared with dried distillers grains with soluble as a source of protein and energy for ruminants. *J. Anim. Sci.* 72:3246.
- He, M.L., L. Xu, W.Z. Yang, D. Gibb, and T.A. McAllister. 2014. Effect of low-oil corn dried distillers grains with solubles on growth performance, carcass traits and beef fatty acid profile of feedlot cattle. *Can. J. Anim. Sci.* 94:343–347.
- Islas, A., T.C. Gilbery, R.S. Goulart, C.R. Dahlen, M.L. Bauer, and K.C. Swanson. 2014. Influence of supplementation with corn dried distillers grains plus solubles to growing calves fed medium-quality hay on growth performance and feeding behavior. *J. Anim. Sci.* 92:705–711.
- Islas, A., and S.A. Soto-Navarro. 2011. Effect of supplementation of dried distillers grains with solubles on forage intake and characteristics of digestion of beef heifers grazing small-grain pasture. *J. Anim. Sci.* 89:1229–1237.
- Jenschke, B.E., J.M. James, K.J. Vander Pol, C.R. Calkins, and T.J. Klopfenstein. 2006. Wet distiller's grains plus solubles do not increase liver-like off-flavors in cooked beef. *Nebraska Beef Report*, University of Nebraska-Lincoln, pp. 115–117.
- Kennedy, V.C., M.L. Bauer, K.C. Swanson, and K.A. Vonnahme. 2016. Supplementation of corn dried distillers grains plus solubles to gestating beef cows fed low-quality forage: I. Altered intake behavior, body condition and reproduction. *J. Anim. Sci.* 94:240–247.
- Kennedy, V.C., B.R. Mordhorst, J.J. Gaspers, M.L. Bauer, K.C. Swanson, C.O. Lemley, and K.A. Vonnahme. 2016. Supplementation of corn dried distillers' grains plus solubles to gestating beef cows fed low-quality forage: II. Impacts on uterine blood flow, circulating estradiol-17 α and progesterone and hepatic steroid metabolizing enzyme activity. *J. Anim. Sci.* 94:4619–4628.
- Kennedy, V.C., J.J. Gaspers, B. Mordhorst, G.L. Stokka, M.L. Bauer, K.C. Swanson, and K.A. Vonnahme. 2016. Supplementation of corn-dried distiller's grains plus solubles to gestating beef cows fed low quality forage: neonatal calf performance. *J. Anim. Sci.* 94(E-Suppl. 5):558 (Abstr.)
- Klopfenstein, T.J., G.E. Erickson, and V.R. Bremer. 2008. Board-invited review: Use of distillers by-products in the beef cattle feeding industry. *J. Anim. Sci.* 86:1223–1231.
- Koger, T.J., D.M. Wulf, A.D. Weaver, C.L. Wright, K.E. Tjardes, K.S. Mateo, T.E. Engle, R.J. Maddock, and A.J. Smart. 2010. Influence of feeding various quantities of wet and dry distillers grains to finishing steers on carcass characteristics, meat quality, retail-case life of ground beef and fatty acid profile of longissimus muscle. *J. Anim. Sci.* 88:3399–3408.
- Leupp, J.L., G.P. Lardy, M.L. Bauer, K.K. Karges, M.L. Gibson, J.S. Caton, and R.J. Maddock. 2009. Effects of distillers dried grains with soluble on growing and finishing steer intake, performance, carcass characteristics and steak color and sensory attributes. *J. Anim. Sci.* 87:4118–4124.
- Leventini, M.W., C.W. Hunt, R.E. Ruffer, and D.G. Casebolt. 1990. Effect of dietary level of barley-based supplements and ruminal buffer on digestion and growth of beef cattle. *J. Anim. Sci.* 68:4334–4340.
- Li, C., K.A. Beauchemin, and W.Z. Yang. 2013. Effects of supplemental canola meal and various types of distillers grains on ruminal degradability, duodenal flow and intestinal digestibility of protein and amino acids in background rounded heifers. *J. Anim. Sci.* 91:5399–5409.
- Li, C., J.Q. Li, W.Z. Yang, and K.A. Beauchemin. 2012.

- Ruminal and intestinal amino acid digestion of distiller's grain vary with grain source and milling process. *Anim. Feed Sci. Technol.* 175:121–130.
- Little, C.O., G.E. Mitchell Jr., and G.D. Potter. 1968. Nitrogen in the abomasums of wethers fed different protein sources. *J. Anim. Sci.* 27:1722–1726.
- Lonergan, G.H., J.J. Wagner, D.H. Gould, F.B. Garry, and M.A. Toren. 2001. Effects of water sulfate concentration on performance, water intake and carcass characteristics of feedlot steers. *J. Anim. Sci.* 79:2941–2948.
- Loy, T.W., T.J. Klopfenstein, G.E. Erickson, C.N. Macken, and J.C. MacDonald. 2008. Effect of supplemental energy source and frequency on growing calf performance. *J. Anim. Sci.* 86:3504–3510.
- Loy D.D., D.R. Strohbehn, and R.E. Martin. 2005a. Ethanol co-products for cattle: Distillers grains for beef cows. IBC 26. Iowa Beef Center, Iowa State University.
- Loy, D.D., D.R. Strohbehn, and R.E. Martin. 2005b. Ethanol co-products for cattle: Factors affecting the economics of corn co-products in cattle feeds. IBC 28. Iowa Beef Center, Iowa State University.
- Loy, T.W., J.C. MacDonald, T.J. Klopfenstein, and G.E. Erickson. 2004. Effect of distiller's grains or corn supplementation frequency on forage intake and Digestibility. *Nebraska Beef Cattle Report MP 80-A:22–24*.
- Loy, T.W., T.J. Klopfenstein, G.E. Erickson, and C.N. Macken. 2003. Value of dry distiller's grains in high fiber diets and effect on supplementation frequency. *Nebraska Beef Cattle Report MP 80-A:8*.
- Loy, D. and W. Miller. 2002. Ethanol co-products for cattle – The process and products. Iowa Beef Center. Iowa State University IBC–18.
- MacDonald, J.C. and T.J. Klopfenstein. 2004. Dried distiller's grains as a grazed forage supplement. *Nebraska Beef Cattle Report MP 80-A:22–24*.
- Martin, J.L., D.M. Larson, H.L. Stroh, A.S. Cupp, and R.N. Funston. 2010. Effects of dietary crude protein sources on hormone and follicle characteristics in beef heifers. *J. Anim. Sci.* 88:937–942.
- Martínez-Pérez, M.F., D. Calderón-Mendoza, A. Islas, A.M. Encinias, F. Loya-Olguín, and S.A. Soto-Navarro. 2013. Effect of corn dry distillers grains plus solubles supplementation level on performance and digestion characteristics of steers grazing native range during forage growing season. *J. Anim. Sci.* 91:1350–1361.
- McDonald, I.W. 1954. The extent of conversion of feed protein to microbial protein in the rumen of sheep. *Biochem. J.* 56:120–125.
- McDowell, L.R. 2003. *Minerals in Animal and Human Nutrition*, 2nd edition, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Meyer, U., A. Schwabe, S. Dänicke, and G. Flachowsky. 2010. Effects of by-products from biofuel production on the performance of growing fattening bulls. *Anim. Feed Sci. Technol.* 161:132–139.
- Morine, S.J., M.E. Drewnoski, and S.L. Hansen. 2014. Increasing dietary neutral detergent fiber concentration decreases ruminal hydrogen sulfide concentrations in steers fed high-sulfur diets based on ethanol coproducts. *J. Anim. Sci.* 92:3035–3041.
- Morris, S.E., T.J. Klopfenstein, D.C. Adams, G.E. Erickson, and K.J. Vander Pol. 2005. The effects of dried distiller's grains on heifers consuming low- or high-quality forages. *Nebraska Beef Report MP 83-A:18–20*.
- Murillo, M., E. Herrera, O. Ruiz, O. Reyes, F.O. Carrete, and H. Gutierrez. 2016. Effect of supplemental corn dried distillers grains with solubles fed to beef steers grazing native rangeland during the forage dormant season. *Asian Australas. J. Anim. Sci.* 29:666–673.
- Neville, B.W., G.P. Lardy, K.K. Karges, S.R. Eckermann, P.T. Berg, and C.S. Schauer. 2012. Interaction of corn processing and distillers dried grains with soluble on health and performance of steers. *J. Anim. Sci.* 90:560–567.
- Neville, B.W., C.S. Schauer, K. Karges, M.L. Gibson, M.M.

- Thompson, L.A. Kirschten, N.W. Dyer, P.T. Berg, and G.P. Lardy. 2010. Effect of thiamine supplementation on animal health, feedlot performance, carcass characteristics, and ruminal hydrogen sulfide concentrations in lambs fed diets based on 60 percent DDGS. *J. Anim. Sci.* 88:2444–2455.
- Nuñez, A.J.C., T.L. Felix, S.C. Loerch, and J.P. Schoonmaker. 2015. Short communication: Effect of dried distillers grains with solubles or corn in growing cattle diets, followed by a corn-based finishing diet, on performance of feedlot cattle. *Anim. Feed Sci. Technol.* 207:267–273.
- Nuñez, A.J.C., T.L. Felix, R.P. Lemenager, and J.P. Schoonmaker. 2014. Effect of calcium oxide inclusion in beef feedlot diets containing 60 percent dried distillers grains with solubles on ruminal fermentation, diet digestibility, performance and carcass characteristics. *J. Anim. Sci.* 92:3954–3965.
- NRC. 2001. *Nutrient Requirements of Beef Cattle*, 7th ed. National Academy Press, Washington, DC.
- NRC. 2005. *Mineral tolerances of animals*, 2nd ed. Natl. Acad. Press, Washington, D.C.
- Plascencia, A., G. D. Mendoza, C. Vásquez, and R. A. Zinn. 2003. Relationship between body weight and level of fat supplementation on fatty acid digestion in feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 81:2653–2659.
- Pogge, D.J., M.E. Drewnoski, D. Snider, W.K. Rumbelha, and S.L. Hansen. 2016. Effect of ferric ammonium citrate in feedlot diets with varying dried distillers grains inclusion on ruminal hydrogen sulfide concentrations and steer growth. *J. Anim. Sci.* 94:3894–3901.
- Radunz, A.E., F.L. Fluharty, M.L. Day, H.N. Zerby, and S.C. Loerch. 2010. Parturient dietary energy source fed to beef cows: I. Effects on pre- and postpartum cow performance. *J. Anim. Sci.* 88:2717–2728.
- Richter, E.L., M.E. Drewnoski, and S.L. Hansen. 2012. Effects of increased dietary sulfur on beef steer mineral status, performance, and meat fatty acid composition. *J. Anim. Sci.* 90:3945–3953.
- Rodenhuis, M.A., F.E. Keomanivong, J.J. Gaspers, T.C. Gilbery, S.R. Underdahl, M.L. Bauer, V.L. Anderson, C.L. Engle, and K.C. Swanson. 2016. The influence of grain source and dried corn distiller's grains plus solubles oil concentration on finishing cattle performance and feeding behavior. *J. Anim. Sci.* 94(Suppl. 2):170 (Abstr.)
- Roeber, D.L., R.K. Hill, and A. DiCostanzo. 2005. Meat quality responses to feeding distiller's grains to finishing Holstein steers. *J. Anim. Sci.* 83:2455–2460.
- Salim, H., K.M. Wood, P.L. McEwen, G. Vandervoort, S.P. Miller, I.B. Mandell, J.P. Cant, K.C. Swanson. 2014. Influence of feeding increasing level of dry or modified wet corn distillers grains plus solubles in whole corn grain-based finishing diets on growth performance, carcass traits and feeding behavior in finishing cattle. *Livest. Sci.* 161:53–59.
- Schauer, C.S., M.M. Stramm, T.D. Maddock, and P.B. Berg. 2008. Feeding 60 percent lamb finishing rations as dried distillers grains with solubles results in acceptable performance and carcass quality. *Sheep and Goat Res. J.* 23:15–19.
- Schoonmaker, J.P., M.C. Claeys, and R.P. Lemenager. 2013. Effect of increasing distillers grains inclusion on performance and carcass characteristics of early-weaned steers. *J. Anim. Sci.* 91:1784–1790.
- Schroeder, A.R., M. Iakiviak, and T.L. Felix. 2014. Effects of feeding dry or modified wet distillers grains with solubles with or without supplemental calcium oxide on ruminal metabolism and microbial enzymatic activity of beef cattle. *J. Anim. Sci.* 92:3997–4004.
- Schroeder, A.R., M.J. Duckworth, D.W. Shike, J.P. Schoonmaker, and T.L. Felix. 2014. Effects of calcium oxide treatment of dry and modified wet corn distillers grains plus solubles on growth performance, carcass characteristics and apparent digestibility of feedlot steers. *J. Anim. Sci.* 92:4661–4668.
- Segers, J.R., D.B. Faulkner, K.M. Retallick, and D.W. Shike.

2014. Effects of protein and fat concentration in coproduct-based growing calf diets on performance and carcass composition. *J. Anim. Sci.* 92:5603–5611.
- Segers, J.R., A.M. Stelzleni, T.D. Pringle, M.A. Froetschel, C.L. Ross, and R.L. Stewart, Jr. 2013. Use of corn gluten feed and dried distillers grains plus solubles as a replacement for soybean meal and corn for supplementation in a corn silage-based stocker system. *J. Anim. Sci.* 91:950–956.
- Segers, J.R., R.L. Stewart, Jr., C.A. Lents, T.D. Pringle, M.A. Froetschel, B.K. Lowe, R.O. McKeith, and A.M. Stelzleni. 2011. Effect of long-term corn by-product feeding on beef quality, strip loin fatty acid profiles, and shelf life. *J. Anim. Sci.* 89:3792–3802.
- Sharman, E.D., P.A. Lancaster, C.R. Krehbiel, G.G. Hilton, D.R. Stein, U. DeSilva, and G.W. Horn. 2013. Effects of starch- vs. fiber-based energy supplements during winter grazing on partitioning of fat among depots and adipose tissue gene expression in growing cattle and final carcass characteristics. *J. Anim. Sci.* 91:2264–2277.
- Shee, C.N., R.P. Lemenager, and J.P. Schoonmaker. 2016. Feeding dried distillers grains with solubles to lactating beef cows: impact of excess protein and fat on cow performance, milk production and pre-weaning progeny growth. *Animal* 10:1, pp. 55–63.
- Shike, D.W., D.B. Faulkner, and J.M. Dahlquist. 2004. Influence of limit-fed dry corn gluten feed and distiller's dried grains with solubles on performance, lactation and reproduction of beef cows. *J. Anim. Sci.* 82 (Suppl. 2):96.
- Shike, D.W., D.B. Faulkner, D.F. Parrett, and W.J. Sexten. 2009. Influences of corn co-products in limit-fed rations on cow performance, lactation, nutrient output and subsequent reproduction. *Professional Animal Scientist.* 25:132–138.
- Shoup, L.M., F.A. Ireland, and D.W. Shike. 2017. Effects of dam prepartum supplemental level on performance and reproduction of heifer progeny. *Italian J. Anim. Sci.* 16:75–81.
- Shoup, L.M., A.C. Kloth, T.B. Wilson, D. González-Peña, F.A. Ireland, S. Rodríguez-Zas, T.L. Felix, and D.W. Shike. 2015. Prepartum supplement level and age at weaning: I. Effects on pre- and postpartum beef cow performance and calf performance through weaning. *J. Anim. Sci.* 93:4926–4935.
- Smith, C.D., J.C. Whitlier, D.N. Schutz, and D. Conch. 1999. Comparison of alfalfa hay and distiller's dried grains with solubles alone and in combination with cull beans as protein sources for beef cows grazing native winter range. *Beef Program Report. Colorado State Clin.*
- Stalker, L.A., T.J. Klopfenstein, D.C. Adams, and G.E. Erickson. 2004. Urea inclusion in forage-based diets containing dried distiller's grains. *Nebraska Beef Cattle Report MP 80-A:20–21.*
- Stelzleni, A.M., J.R. Segers, and R.L. Stewart Jr. 2016. Long-term use of corn coproducts as a sources of protein in beef finishing diets and the effects on carcass characteristics and round muscle quality. *J. Anim. Sci.* 94:1227–1237.
- Summer, P., and A. Trenkle. 1998. Effects of supplementing high- or low-quality forages with corn or corn processing co-products upon digestibility of dry matter and energy by steers. *Iowa State University Beef Research Report ASL-R1540.*
- Summers, A.F., T.L. Meyer, and R.N. Funston. 2015a. Impact of supplemental protein source offered to primiparous heifers during gestation on I. Average daily gain, feed intake, calf birth body weight and rebreeding in pregnant beef heifers. *J. Anim. Sci.* 93:1865–1870.
- Summers, A.F., A.D. Blair, and R.N. Funston. 2015b. Impact of supplemental protein source offered to primiparous heifers during gestation on II greater than Progeny performance and carcass characteristics. *J. Anim. Sci.* 93:1871–1880.
- Swanson, K.C., A. Islas, Z.E. Carlson, R.S. Goulart, T.C. Gilbery, and M.L. Bauer. 2014. Influence of dry-rolled

- corn processing and increasing dried corn distillers grains plus solubles inclusion for finishing cattle on growth performance and feeding behavior. *J. Anim. Sci.* 92:2531–2537.
- Taylor, E.G., R.P. Lemenager, and K.R. Stewart. 2017. Effects of using distiller's dried grains with solubles in postpartum diets of beef cows on heifer offspring reproductive performance. *J. Anim. Sci.* 95(Suppl. 2): 165 (Abstr.)
- Tjardes, J. and C. Wright. 2002. Feeding corn distiller's co-products to beef cattle. SDSU Extension Extra. ExEx 2036, Dept. of Animal and Range Sciences. pp.1–5.
- Uwituze, S., G.L. Parsons, C.J. Schneider, K.K. Karges, M.L. Gibson, L.C. Hollis, J.J. Higgins, and J.S. Drouillard. 2011. Evaluation of sulfur content of dried distillers grains with solubles in finishing diets based on steam-flaked corn or dry-rolled corn. *J. Anim. Sci.* 89:2582–2591.
- Uwituze, A., G.L. Parsons, M.K. Shelor, B.E. Deppenbusch, K.K. Karges, M.L. Gibson, C.D. Reinhardt, J.J. Higgins, and J.S. Drouillard. 2010. Evaluation of dried distillers grains and roughage source in steam-flaked corn finishing diets. *J. Anim. Sci.* 88:258–274.
- Vander Pol, K.J., M.K. Luebbe, G.I. Crawford, G.E. Erickson, and T.J. Klopfenstein. 2007. Digestibility, rumen metabolism and site of digestion for finishing diets containing wet distillers grains or corn oil. *Nebraska Beef Cattle Report.* MP88–A:51–53.
- Vander Pol, K.J., G.E. Erickson, and T.J. Klopfenstein. 2005. Degradable intake protein in finishing diets containing dried distiller's grains. *J. Anim. Sci.* 83(Suppl. 2):62.
- Veracini, J.L., P.M. Walker, M.J. Faulkner, R.E. Hall, R.L. Atkinson, and B.R. Wiegand. 2013. Effects of high-fat, modied-wet, corn distiller's grains plus solubles on beef steer performance and carcass characteristics. *Livest. Sci.* 157:151–161.
- Wilson, T.B., N.M. Long, D.B. Faulkner, and D.W. Shike. 2016a. Influence of excessive dietary protein intake during late gestation on drylot beef cow performance and progeny growth, carcass characteristics and plasma glucose and insulin concentrations. *J. Anim. Sci.* 94:2035–2046.
- Wilson, T.B., D.B. Faulkner, and D.W. Shike. 2016b. Influence of prepartum dietary energy on beef cow performance and calf growth and carcass traits. *Livest. Sci.* 184:21–27.
- Wilson, T.B., D.B. Faulkner, and D.W. Shike. 2015a. Influence of late gestation drylot rations differing in protein degradability and fat content on beef cow and subsequent calf performance. *J. Anim. Sci.* 93:5819–5828.
- Wilson, T.B., A.R. Schroeder, F.A. Ireland, D.B. Faulkner, and D.W. Shike. 2015b. Effects of late gestation distillers grains supplementation on fall-calving beef cow performance and steer calf growth and carcass characteristics. *J. Anim. Sci.* 93:4843–4851.

16章:肉用牛および乳用牛からの *E. coli* O157:H7 と

Listeria monocytogenes の排泄

はじめに

米国の CDC(疾病管理予防センター)は、*Escherichia coli* (*E. coli*) O157:H7 と *Listeria monocytogenes* を主要な食品が媒介する病原細菌としている(CDC、2014)。牛挽肉は、ヒトにおける *E. coli* O157:H7 による食中毒と最も密接に関連しており、牛由来食品は発生の約 75% と関連がみられる(USDA-APHIS、1997; Vugia ら、2007)。牛の直腸粘膜上皮(Naylor ら、2003; Gyles、2007; Hussein、2007) および糞便(Callaway ら、2003; Berg ら、2004; Jacob ら、2008a、b)には *E. coli* O157:H7 が存在する。実際の研究報告によると、牛の 30% 以上が *E. coli* O157:H7 を保菌していることが明らかにされている(Callaway ら、2006; Reinstein ら、2007; Stanford ら、2005)。

反すう家畜からの病原細菌の排泄には、飼料、飲水、家畜の年齢、季節など多くの要因が影響している(Caro ら、1990; Bach ら、2002; Renter and Sargeant、2002; Ho ら、2007)。牛舎内の *E. coli* O157:H7 を含む堆肥は、飲水や灌漑用水を汚染し、他の牛に感染を拡げる可能性がある(Hill ら、2006; LeJeune ら、2001; Sargeant ら、2003; Thurston-Enriquez ら、2005)。飼料はこれらの病原細菌の糞便への排泄に関連している可能性がある重要な因子であると考えられているが、穀類、穀類副産物および粗飼料の相対的な影響は明確ではない。Diez-Gonzalez ら(1998)による初期の研究では、穀物から乾草主体の飼料に急激に変更すると、一般的に、*E. coli* 菌数が著しく減少することを報告している。しかし、その後の研究では、さまざまな結果が報告されている(Hancock ら、2000; Hovde ら、1999; Keen ら、1999)。

Listeria monocytogenes (*L. monocytogenes*) は牛の糞便中にも存在している(Pell、1997; Pauly ら、1999)。いくつかの *Listeria* 属の細菌(*L. innocua*、*L. monocytogenes* および *L. welshimeri*) は、健康な肉用牛の糞便の 9~35% に存在することが確認されている(Siragusa ら、1993)。Skovgaard and Morgen(1988)は、酪農場 7 か所から採取した糞便およびサイレージから *Listeria* spp. が検出され、Ryster ら(1997)は、採取したサイレージ 129

試料および乾草サイレージ 35 試料の 2% から *L. monocytogenes* を分離している。これらの結果は、サイレージが牛への *L. monocytogenes* 感染における潜在的な危険因子となっている可能性を示している。ただし、今のところ、肉用牛と乳用牛における飼料組成の違いと病原細菌の排泄との直接的な関係を示す明らかな証拠はない。

E. coli O157:H7 と *L. monocytogenes* による牛肉と牛乳汚染の可能性への懸念と、飼料の組成が汚染リスクに潜在的な役割を担う可能性への懸念のために、DDGS を肉用牛および乳用牛に給与した際に、それがリスク要因となっているのか否かを判断するためには、給与試験結果の解析が重要である。

DDGS は *E. coli* O157:H7 の排泄を増加させるのか?

様々な種類の細菌が環境の至る所に存在しており、トウモロコシ併産物にもそれらは存在している。しかし、穀類と粗飼料の割合および牛用飼料中の CP(粗たん白質)含量は、より大きな要因となっている可能性がある(Biswas ら、2016)。

最初の報告では、スコットランドにおける子牛飼育現場において、DDGS の給与により *E. coli* O157:H7 の排泄量が増加したことが報告されている(Synge ら、2003)。この報告に続いて公表された Dewell ら(2005)の報告では、牛に対して発酵併産物(distiller's grains)を給与すると、*E. coli* O157 排泄の可能性が 6 倍以上高まることを明らかにしている。2007 年、米国内での牛挽肉における *E. coli* O157:H7 汚染の増加理由の究明に対する関心が急激に高まった。ちょうどこの時期に、エタノール発酵における発酵併産物の製造量と牛用飼料原料としての使用量が指数関数的に増加していたため、発酵併産物の給与が一因ではないかとの疑念が浮上した。これを契機として、牛に対する DDGS の給与と、牛肉における *E. coli* O157:H7 汚染率の増加との間の関連性についての検討が始まった。カンザス州立大学の研究者らによる報告(Jacob

ら、2008a, b, c)では、フィードロット牛に対して DDGS を含む飼料を給与し、*E. coli* O157:H7 の感染率は低く、その排泄状況にも一貫性がなかったとの結果が得られていたにも関わらず、DDGS を給与したフィードロット牛では、糞便中の *E. coli* O157:H7 が増加すると結論付けていたため、一連の論争の的となった。

しかし、ネブラスカ大学の研究者らによる報告 (Peterson ら、2007)では、発酵併産物を乾物で 50%含む飼料を給与すると *E. coli* O157:H7 の排泄が見られたが、排泄量は DDGS を含まない飼料を給与した場合と差がなく、Jacob ら(2008a, b, c)の報告とは一致していない。

さらに、Nagaraja ら(2008)は、DDGS 無添加の対照飼料と DDGS を含む飼料を 150 日間給与した合計 700 頭の牛から採取した排泄物からの *E. coli* O157:H7 の分離割合は 5.1%と全体的に低く、DDGS の給与が *E. coli* O157:H7 排泄に影響しないことを示している。さらに、Jacob ら(2009)は、以前の研究とは対照的に、乾燥圧ペントウモロコシまたは DDGS を給与した牛では *E. coli* O157:H7 と *Salmonella* spp.の排泄には差がなかったと報告している。

Callaway ら(2010)は、DDGS を穀物サプリメントと 25 または 50%置換した飼料をフィードロット牛に給与し、ルーメンと糞便中の細菌叢の変化を調査し、DDGS の給与により細菌叢に変化が生じることと、ルーメン pH が低下することを報告した。Biswas ら(2016)は、乳用牛に対して粗飼料の割合が高い、高 CP 飼料を給与すると、*E. coli* O157:H7 の排泄量は最大となり、粗飼料の割合が低い高 CP 飼料を給与すると排泄量が最も少なくなることを報告した。これらの結果は、飼料の組成と CP 含量が乳牛における *E. coli* O157:H7 の排泄に影響を与える可能性があることを示しているが、飼料に DDGS を配合しても影響はなかった。

現在、行われている DDGS の給与レベルが牛挽肉の *E. coli* O157:H7 汚染の要因となっていることを示す科学的な証拠はない。さらに、発酵併産物の給与と *E. coli* 排泄との間に関連がある可能性があるとしても、そのメカニズムは解明されていない。ルーメン液と糞便を混合して培養した *In vivo* 試験においても、*E. coli* O157:H7 のコロニーに対する発酵併産物の影響は見られなかった

(Callaway ら、2008)。食肉供給の様々な場所で食肉への *E. coli* O157:H7 を含む細菌の汚染が発生する可能性があり、その原因は飼料や飼料原料のみに限定されていないことを認識することが重要である。

DDGS は *L. monocytogenes* の排泄を増加させるのか?

L. monocytogenes の牛の糞便への排泄に対する飼料組成または DDGS 給与による影響についての研究は行われていない。Fenlon ら(1996)は、サイレージを給与し始めた後に、1 牛群の約 30%の牛が *L. monocytogenes* を排泄したと報告している。Ho ら(2007)は、調査したサイレージ試料の 38%で *L. monocytogenes* が検出され、そのサイレージを給与した牛の 94%が調査期間中に少なくとも一度、糞便中に *L. monocytogenes* を排泄したと報告している。Biswas ら(2016)は、乳牛に *Listeria* で汚染されたアルファルファ乾草を多く含む飼料を給与すると、乳牛から *Listeria* が排泄されたことを明らかにしている。これらの研究者らは、粗飼料の割合が高い飼料または低 CP 飼料を給与すると、粗飼料の割合が低いまたは高 CP 飼料を給与した場合と比べて、*Listeria* が多く排泄されることを示している。しかし、この研究で使用された DDGS には、検出可能なレベルの *E. coli* または *Listeria* 属菌は含まれていなかった。

結論

食品に対する安全規制が取られているにも関わらず、食品を媒介する病原細菌は、世界の多くの国でヒトの健康に対する重大な脅威であり続けている。屠畜後の衛生管理により、肉および乳製品における *E. coli* O157:H7 と *Listeria* の汚染は減少したが、屠畜前の介入戦略を採用することで、肉および乳製品が食物連鎖に入る前に、食中毒の発生リスクをさらに減らすことが出来る。飼料の組成やいくつかの飼料原料は、*E. coli* O157:H7 の排泄レベルを変えるように見られるが、これらの影響は一貫しているわけではない。断食あるいは低品質の粗飼料の給与は、牛からの *E. coli* O157:H7 の排泄量が増加すること、牛を高穀物飼料から高品質の乾草主体の飼料に切替えると、*E. coli* O157:H7 が減少することが示されて

いる。給与飼料が反すう家畜の腸内細菌叢に影響を及ぼすメカニズム(競争的排除、物理的排除、飼料の品質、タンニン、リグニン、その他のフェノール類などの含量など)を特定し、実用的な飼料給与戦略をとるためには、*E. coli*と*E. coli* O157:H7の生態学な問題を含めてさらなる研究が必要である。また、乳牛および肉用牛における*Listeria*の排泄に対する飼料組成の影響および様々な飼料原料の使用についてはほとんど知られていない。

引用文献

- Bach, S.J., T.A. McAllister, D.M. Veira, V.P.J. Gannon, and R.A. Holley. 2002. Transmission and control of *Escherichia coli* O157:H7: a review. *Can J. Anim. Sci.* 82:475-490.
- Berg, J., T. McAllister, S. Bach, R. Stilborn, D. Hancock, and J. LeJeune. 2004. *Escherichia coli* O157:H7 excretion by commercial feedlot cattle fed either barley- or corn-based finishing diets. *J. Food Protection* 67:666-671.
- Biswas, S., M. Niu, J.A.D.R.N. Appuhamy, A.B. Leytem, R.S. Dungan, E. Kebreab, and P. Pandey. 2016. Impacts of dietary forage and crude protein levels on the shedding of *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria* in dairy cattle feces. *Livest. Sci.* 194:17-22.
- Callaway, T.R., S.E. Dowd, T.S. Erdington, R.C. Anderson, N. Krueger, N. Bauer, P.J. Kononoff, and D.J. Nisbet. 2010. Evaluation of bacterial diversity in the rumen and feces of cattle fed different levels of dried distillers grains plus solubles using bacterial tag-encoded FLX amplicon pyrosequencing. *J. Anim. Sci.* 88:3977-3983.
- Callaway, T.R., M.A. Carr, T.S. Edrington, R.C. Anderson, and D.J. Nisbet. 2008. Diet, *Escherichia coli* O157:H7, and cattle: A review after 10 years. *Curr. Issues Mol. Biol.* 11:67-80.
- Callaway, T.R., T.S. Edrington, A.D. Brabban, J.E. Keen, R.C. Anderson, M.L. Rossman, M.J. Engler, K.J. Genovese, B.L. Gwartney, J.O. Reagan, T.L. Poole, R.B. Harvey, E.M. Kutter, and D.J. Nisbet. 2006. Fecal prevalence of *Escherichia coli* O157, *Salmonella*, *Listeria*, and bacteriophage infecting *E. coli* O157:H7 in feedlot cattle in the southern plains region of the United States. *Foodborne Pathog. Dis.* 3:234-244.
- Callaway, T.R., R.O. Elder, J.E. Keen, R.C. Anderson, and D.J. Nisbet. 2003. Forage feeding to reduce preharvest *Escherichia coli* populations in cattle, a review. *J. Dairy Sci.* 86:852-860.
- Caro, M.R., E. Zamora, L. Leon, F. Cuello, J. Salinas, D. Megias, M.J. Cubero, and A. Contreras. 1990. Isolation and identification of *Listeria monocytogenes* in vegetable byproduct silages containing preservative additives and destined for animal feeding. *Anim. Feed Sci. Technol.* 31:285-291.
- CDC. 2014. Surveillance of Foodborne Disease Outbreaks, United States, 2012 (Annual Report). U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, Atlanta, GA.
- Dewell, G.A., J.R. Ransom, R.D. Dewell, K. McCurdy, I.A. Gardner, A.E. Hill, J.N. Sofos, K.E. Belk, G.C. Smith and M.D. Salman. 2005. Prevalence of and risk factors for *Escherichia coli* O157 in market-ready beef cattle from 12 U.S. feedlots. *Foodborne Path. Dis.* 2:70-76.
- Diez-Gonzalez, F., T.R. Callaway, M.G. Kizoulis and J.B. Russell. 1998. Grain feeding and the dissemination of acid-resistant *Escherichia coli* from cattle. *Science* 281:1666-1668.
- Fenlon, D.R., J. Wilson, and W. Donachie. 1996. The incidence and level of *Listeria monocytogenes* contamination of food sources at primary production and initial processing. *J. Appl. Bacteriol.* 81:641-650.
- Gyles, C.L. 2007. Shiga toxin-producing *Escherichia coli*: an overview. *J. Anim. Sci.* 85(E-Suppl.):E45-E62.
- Hancock, D.D., T.E. Besser, C. Gill and C.H. Bohach. 2000. Cattle, hay, and *E. coli*. *Science* 284:49-50.
- Hill, D.D., W.E. Owens, and P.B. Tchounwou. 2006. Prevalence of *Escherichia coli* O157:H7 bacterial infections associated with the use of animal wastes in Louisiana for the period 1996-2004. *Int. J. Environ. Res. Pub. Health* 3:107-113.
- Ho, A.J., R. Ivanek, Y.T. Grohn, K.K. Nightingale, and M. Wiedry matterann. 2007. *Listeria monocytogenes* fecal shedding in dairy cattle shows high levels of day-to-day

- variation and includes outbreaks and sporadic cases of shedding of specific *L. monocytogenes* subtypes. *Prev. Vet. Med.* 80:287–305.
- Hovde, C.J., P.R. Austin, K.A. Cloud, C.J. Williams and C.W. Hunt. 1999. Effect of cattle diet on *Escherichia coli* O157:H7 acid resistance. *Appl. Environ. Microbiol.* 65:3233–3235.
- Hussein, H.S. 2007. Prevalence and pathogenicity of Shiga toxin-producing *Escherichia coli* in beef cattle and their products. *J. Anim. Sci.* 85(E. Suppl.):E63–E72.
- Jacob ME, J.T. Fox, J.S. Drouillard, D.G. Renter, and T.G. Nagaraja. 2009. Evaluation of feeding dried distiller's grains with solubles and dry-rolled corn on the fecal prevalence of *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella* spp. in cattle. *Foodborne Pathog. Dis.* 6(2):145–53.
- Jacob, M.E., J.T. Fox, J.S. Drouillard, D.G. Renter, & T.G. Nagaraja. 2008a. Effects of feeding dried distillers' grains on fecal prevalence and growth of *Escherichia coli* O157 in batch culture fermentations from cattle. *Appl. Environ. Microbiol.* 74:38–43.
- Jacob, M.E., J.T. Fox, S.K. Narayanan, J.S. Drouillard, D.G. Renter, and T.G. Nagaraja. 2008b. Effects of feeding wet corn distiller's grains with soluble with or without monensin and tylosin on the prevalence and antimicrobial susceptibilities of fecal food-borne pathogenic and commercial bacteria in feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 86:1182–1190.
- Jacob, M.E., G.L. Parsons, M.K. Shelor, J.T. Fox, J.S. Drouillard, D.U. Thomson, D.G. Renter, and T.G. Nagaraja. 2008c. Feeding supplemental dried distiller's grains increases fecal shedding *Escherichia coli* O157 in experimentally inoculated calves. *Zoonoses Publ. Hlth.* 55:125–132.
- Keen, J. E., G. A. Uhlich, and R. O. Elder. 1999. Effects of hay- and grain-based diets on fecal shedding in naturally acquired enterohemorrhagic *E. coli* (EHEC) O157 in beef feedlot cattle. In 80th Conf. Res. Workers in Anim. Dis., Chicago, IL. (Abstr.) CHAPTER 16 | *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* Shedding in Beef and Dairy Cattle 144
- Keen, J.E., L.M. Durso and T.P. Meehan. 2007. Isolation of *Salmonella enterica* and shiga-toxigenic *Escherichia coli* O157 from feces of animals in public contact areas of United States zoological parks. *Appl. Environ. Microbiol.* 73:362–365.
- LeJeune, J.T., T.E. Besser, and D.D. Hancock. 2001. Reduction of fecal shedding of enterohemorrhagic *Escherichia coli* O157. *Appl. Environ. Microbiol.* 67:3053–3057.
- Nagaraja, T.G., J. Drouillard, D. Renter, & S. Narayanan. 2008. Distiller's grains and food-borne pathogens in cattle: Interaction and intervention. *KLA News and Market Report Vol. 33, No. 35.*
- Naylor, S.W., J.C. Low, T.E. Besser, A. Mahajan, G.J. Gunn, M.C. Pearce, I.J. McKendrick, D.G.E. Smith, and D.L. Gally. 2003. Lymphoid follicle dense mucosa at the terminal rectum is the principal site of colonization of enterohemorrhagic *Escherichia coli* O157:H7 in the bovine host. *Infect. Immun.* 71:1505:1512.
- Pauly, T.M., I.B. Hansson, and W.A. Tham. 1999. The effect of mechanical forage treatments on the growth of *Clostridium tyrobutyricum* and *Listeria monocytogenes* in grass silage. *Anim. Feed Sci. Technol.* 78:127–139.
- Pell, A.N. 1997. Manure and microbes: public and animal health problem? *J. Dairy Sci.* 80:2673–2681.
- Peterson, R.E., T.J. Klopfenstein, R.A. Moxley, G.E. Erickson, S. Hinkley, G. Bretschneider, E.M. Berberov, D. Rogan, and D.R. Smith. 2007. Effect of a vaccine product containing type III secreted proteins on the probability of *E. coli* O157:H7 fecal shedding and mucosal colonization in feedlot cattle. *J. Food Protection* 70:2568–2577.
- Reinstein, S., J.T. Fox, X. Shi, and T.G. Nagaraja. 2007. Prevalence of *Escherichia coli* O157:H7 in gallbladders of beef cattle. *Appl. Env. Microbiol.* 73:1002–1004.
- Renter, D.G., and J.M. Sargeant. 2002. Enterohemorrhagic *Escherichia coli* O157: epidemiology and ecology in bovine production environments. *Anim. Health res. Rev.* 3:83–94.
- Ryster, E.T., S.M. Arimi, and C.W. Donnelly. 1997. Effects of

- pH on distribution of *Listeria Ribotypes* in corn, hay, and grass silage. *Appl. Environ. Microbiol.* 63:3695–3697.
- Sargeant, J.M., M.W. Sanderson, R.A. Smith, and D.D. Grifn. 2003. *Escherichia coli* O157 in feedlot cattle feces and water in four major feeder–cattle states in the USA. *Prev. Vet. Med.* 61:127–135.
- Siragusa, G.R., J.S. Dickson, and E.K. Daniels. 1993. Isolation of *Listeria* spp. from feces of feedlot cattle. *J. Food Protection* 56:102–105.
- Skovgaard, N., and C.Morgen. 1988. Detection of *Listeria* spp. in faeces from farm animals, in feeds, and in raw foods of animal origin. *Int. J. Food Microbiol.* 6:229–242.
- Stanford, K., D. Croy, S.J. Bach, G.L. Wallins, H. Zahiroddini, and T.A. McAllister. 2005. Ecology of *Escherichia coli* O157:H7 in commercial dairies in southern Alberta. *J. Dairy Sci.* 88:4441.
- Synge, B.A., M.E. Chase–Topping, G.F. Hopkins, I.J. McKendrick, F. Thomson–Carter, D. Gray, S.M. Rusbridge, F.I. Munro, G. Foster and G.J. Gunn. 2003. Factors influencing the shedding of verocytotoxin–producing *Escherichia coli* O157 by beef suckler cows. *Epidemiol. Infect.* 130:301–312.
- Thurston–Enriquez, J.A., J.E. Gilley, and B. Eghball. 2005. Microbial quality of runoff following land application of cattle manure and swine slurry. *J. Water Health* 3:157–171.
- USDA–APHIS. 1997. An update: *Escherichia coli* O157:H7 in humans and cattle.
- Vugia, D., A. Cronquist, J. Hadler, M. Tobin–D’ Angelo, D. Blythe, K. Smith, S. Lathrop, D. Morse, P. Cieslak, T. Jones, K.G. Holt, J.J. Guzewich, O.L. Henao, E. Scallan, F.J. Angulo, P.M. Grifn and R.V. Tauxe. 2007. Preliminary FoodNet data on the incidence of infection with pathogens transmitted commonly through food – 10 states, 2006. *Morbidity and Mortality Weekly Report* 56:336–339.

17 章: 乳牛における低脂肪 DDGS

はじめに

トウモロコシ DDGS は、泌乳中の乳牛用飼料において優れた飼料原料であり、米国で生産される DDGS (3,800 万トン) の約 30% が乳牛用飼料原料として使用されている。DG(ジスチラーズグレイン)は、乳牛、乾乳牛および後継育成牛にとって、優れたエネルギー、容易に発酵可能な繊維、たん白質、ミネラル源となっている。乳牛へのトウモロコシ DDGS の利点、制限および給与方法に関する優れた総説がいくつか公表されている(Schingoethe ら、2009; Kalscheur ら、2012a, b; Kalscheur、2013)。多くの研究成果から、TMR に DDGS を 20% 配合すると、産乳量を最大にし、最適な乳成分組成を得ることが可能であり(Schingoethe ら、2009)、糞尿中への過剰なリンの排泄量を最小限に抑えることが出来る(Schmit ら、2009)。TMR に 20% 以上の DDGS を配合した場合の懸念としては、DDGS 中の脂質には PFA(多価不飽和脂肪酸)が多く含まれていることにより、乳脂率の低下を引き起こす可能性があることである。ルーメンへの不飽和脂肪酸の負荷は、DDGS が乳脂率の低下を引き起こす最も大きな要因となるとの考え方が主流だが、唯一の原因ではない(Kalscheur、2013)。乳脂率の低下を引き起こす要因は、飼料の組成、有効繊維供給量の不足および易発酵性炭水化物供給量の増加である。実際、Kalscheur(2005)は、DDGS を含む飼料を給与した場合に乳脂率の低下が起こるのは、粗飼料の給与割合が 50% 未満または NDF(中性デタージェント繊維)が 22% 未満の場合にのみであることを明らかにしている。したがって、DDGS の含量が多い(20% 以上)飼料を給与する場合は、飼料全体の NDF の少なくとも 22% を粗飼料から供給することが望ましい。さらに、現在生産されている DDGS の大部分は、これまで利用されてきた高脂肪 DDGS(粗脂肪含量 10% 以上)と比べて粗脂肪含量が低い(5~9%)ため、DDGS 中の脂質がルーメン微生物を変化させる恐れは少なく、ルーメン微生物の環境と乳脂率の低下リスクは低くなっている。したがって、DDGS を給与する際に適切な配合設計を行えば、乳脂率の低下を招くことはない。

乳牛における DDGS の栄養成分

乳牛に対する DDGS の栄養上の利点

トウモロコシ DDGS には、乳牛用に利用されている他のたん白原料と比べて、栄養上の利点がいくつかある(Yildiz and Todorov, 2014)。

1. CP(粗たん白質)含量が比較的高い(26~38%)
2. エネルギー含量が高い(NE_L(産乳に要する正味エネルギー): 2.03 Mcal/kg)
3. バイパスたん白質が多い(CP の 55%)
4. でん粉含量が少ないため、高エネルギー飼料におけるルーメンアシドーシス発症の可能性が低下する
5. 含まれている細胞壁物質はビタミンを豊富に含み、嗜好性、繊維の消化性、ルーメン微生物によるたん白質合成能を高める
6. エネルギー含量を増やし、ルーメン微生物を刺激する NDF 含量が高い
7. メチオニン含量が高く、メチオニン含量が低い飼料原料の選択幅が広がる
8. リン含量が比較的高く(0.7~0.9%)で、入手が容易で安価なリン源として利用できる
9. 抗栄養素を含まない
10. リジン含量が比較的低いにもかかわらず、大豆粕およびナタネ粕に匹敵する産乳成績が得られるため、乳たん白量に影響を与えることなく、リジン:メチオニン比を推奨の 3:1 に近づけることが出来る

トウモロコシ DDGS を泌乳中の乳牛用の飼料原料として使用することで、これらの栄養学的な利点のすべてを備えていることから、米国の酪農家では好んで使用されるエネルギーおよびたん白源となっている。

エネルギー

低脂肪 DDGS の反すう家畜におけるエネルギー価と栄養成分消化率に関する報告は比較的少ない。しかし、Schingoethe ら(2009)は、現在公表されているデータからトウモロコシ DDGS のエネルギー価をまとめ、平均 NE_L は 2.25 Mcal/乾物kgであると報告している。これはトウモロコシより約 10% 高く、NRC(2001)による値(1.97 Mcal/乾物kg)よりも高い。これは、トウモロコシ DDGS の粗脂肪含量が比較的高く(5~12%)、消化率が高い NDF 含

量が高い(38%)ためである。DDGS 中の繊維にはリグニンが少ないため、消化率が高い(62~71%; Birkelo ら、2004; vander Pol ら、2009)。

Nuez-Ortín and Yu (2011)は、NRCによる公表データと生物学的アプローチにより、DDGSの乳牛におけるエネルギー価を推定している(表1)。それによると、トウモロコシ DDGSの真の可消化 CP および NFC(非繊維性炭水化物)含量は小麦 DDGS よりも低く、可消化脂肪酸と NDF 含量ははるかに多い。その結果、3 倍のメンテナンスで推定した NE_L は Schingoethe ら(2009)による報告(2.3 Mcal/乾物kg)と差がなかった。

最近、Foth ら(2015)は、泌乳中の乳牛における低脂肪 DDGS(粗脂肪含量 6.2%)のエネルギー価は、1 倍のメンテナンスで DE(可消化エネルギー)が 3.82 Mcal/乾物kg、ME(代謝エネルギー)が 3.41 Mcal/乾物kg、NE_L は 3 倍のメンテナンスで 2.03 Mcal/乾物kgであると推定しており、これらは Schingoethe ら(2009)によって報告された高脂肪 DDGS(粗脂肪含量 10%以上)のエネルギー価より低いが、NRC(2001)による NE_L 価とが差がない。要約すると、高脂肪 DDGS の NE_L 価は 2.25~2.30 Mcal/乾物kgであり、低脂肪 DDGS では約 2.0 Mcal/kgである。

DDGS の脂肪含量と脂肪酸組成

泌乳中の乳牛用飼料にトウモロコシ DDGSを使用することに関する懸念材料は、粗脂肪と不飽和脂肪酸含量が比較的高く、乳脂率の低下につながる可能性があるこ

とである。Owens(2009a)および NASS(米国農務省農業統計局、2007)の調査では、DDGS を使っていない米国内の酪農家における、使用しない主な理由は、DDGS の粗脂肪含量が高いことである。

しかし、Kalscheur(2005)は、公表されている24報のデータを用いてメタ分析を行い、DDGSを含む飼料を給与した場合に乳脂率が低下するのは、給与飼料中の粗飼料の割合が50%未満またはNDF含量が22%未満の場合のみであることを明らかにしている。さらに、現在生産されている DDGS の大部分は、過去に使われていた高脂肪 DDGS(粗脂肪含量 10%以上)より粗脂肪含量が低い(5~9%)ため、DDGS 中の脂質がルーメン微生物を変化させる恐れは少ない。Diaz-Royón ら(2012)は、いくつかの研究からのトウモロコシ DDGS の脂肪酸組成のデータをまとめている(表2)が、DDGS から抽出されたトウモロコシ油に最も多く含まれているのはリノール酸(C18:2)とオレイン酸(C18:1)で、DDGS の総脂肪酸の約74%に相当する。ただし、表2で示した脂肪酸組成は DDGS の供給源、分析施設、分析手順などによりかなり変動する可能性がある。

DDGS 中のルーメン分解性および非分解性たん白質

Yildiz and Todorov(2014)は、これまでに公表されているトウモロコシ DDGS の小腸における RDP(ルーメン分

表1. *in situ*による小麦およびトウモロコシの DDGS の真の可消化栄養成分含量とエネルギー価の比較(乾物、Nuez-Ortín and Yu、2011 から改編)

項目	小麦DDGS	トウモロコシDDGS
真の可消化粗たん白質 %	33.5	22.7
真の可消化非繊維性炭水化物 %	23.6	6.4
真の可消化脂肪酸 %	3.7	15.1
真の可消化NDF %	17.3	33.9
推定エネルギー価		
DE _{3x} kcal/kg 乾物(乳用牛)	3,470	3,791
ME _{3x} kcal/kg 乾物(乳用牛)	3,069	3,439
NE _{L3x} kcal/kg 乾物(乳用牛)	1,979	2,299
NE _m kcal/kg 乾物(肉用牛)	2,110	2,340
NE _g kcal/kg 乾物(肉用牛)	1,439	1,630

解性たん白質)と RUP(ルーメン非分解性たん白質)の消化率(dRUP)をまとめている(表3)。トウモロコシ DDGS

のルーメンにおけるたん白質の分解率と小腸における消化率に大きな変動があるのは、DDGS 製造時の乾燥温度の違いによるものと考えられる。豚および家禽においても、DDGS のアミノ酸消化率、特にリジンの消化率にも、同様に供給源の違いによるバラツキが認められる。しかし、一般的に、トウモロコシ DDGS のルーメン分解性は比較的低いことから、反すう家畜用の飼料原料としては有利である。トウモロコシ DDGS は、dRUP の優れた供給源であり、その含量は CP の 47~64%である。さらに、ほとんどのアミノ酸の小腸消化率は 93%を超えており、リジンの消化率が大豆粕(97%)より著しく低い(8%)ことを除けば、大豆粕よりわずかに低い程度である。

Schingoethe ら(2009)と Mjoun ら(2010c)は、アミノ酸、特にリジンの含量と小腸消化率に関して、リジン含量は CP 中 3.15%であり、小腸消化率は NRC(2001)に示された値より高いことを示している。

アミノ酸消化率

高泌乳牛では、乳生産と乳たん白質合成を高いレベルで保つために、毎日大量の CP を摂取し、十二指腸に流入するアミノ酸の供給とバランスをとる必要がある。一般に、泌乳中の乳牛に高 CP 飼料を給与すると、乳たん白質の濃度がわずかに増加する。単一の飼料原料には、適切な量の RUP が含まれておらず、乳中のアミノ酸組成

表 2. トウモロコシ DDGS の脂肪酸組成 (全脂肪酸中の%) に関する研究の要約(Diaz-Royón ら、2012 から改編)

脂肪酸	Tang et al. (2011)	Ranathunga et al. (2010)	Nyoka (2010)	Owens (2009b)	Martinez-Amezcuca et al. (2004)	Anderson et al. (2006)	平均
C12:0	0.02	ND	ND	0.01	0.04	0.78	0.21
C14:0	0.07	0.42	3.95	0.38	0.09	2.45	1.23
C16:0	16.7	14.7	16.9	12.5	12.8	15.5	14.9
C16:1	0.16	0.13	2.46	0.11	0.18	ND	0.61
C18:0	2.62	1.99	2.82	1.68	2.03	2.38	2.25
C18:1	23.1	26.9	21.4	38.2	23.2	17.0	25.0
C18:2	53.7	50.7	40.2	40.3	56.3	52.5	49.0
C18:3	0.45	1.60	1.44	1.05	1.48	4.79	1.80
C20:0	1.99	0.39	0.55	0.26	0.39	1.45	0.84
C20:1	0.29	0.22	3.46	0.14	0.27	ND	0.88
C20:2	ND	0.03	0.13	0.03	0.05	ND	0.06

表 3. 乳牛小腸における DDGS のルーメン分解性たん白質(RUP) 含量と非分解性たん白質(RUP)の消化率(Yildiz and Todorov, 2014 から改編)

ルーメン分解性たん白質 (RDP) %	ルーメン非分解性たん白質(RUP)消化率 (dRUP) %	引用文献
46.0	-	Firkins et al., 1984
63.3	50.5	Carvalho et al., 2005
48.7	88.8	MacDonald et al., 2007
57.0	86.2	Kononoff et al., 2007
22.0 – 36.5	-	Kleinschmit et al., 2007a
47.0 – 64.0	-	Schingoethe et al., 2009
38.0	64.0	Cao et al., 2009
-	92.4	Mjoun et al., 2010c
43.7 – 66.9	91.9 – 92.1	Kelzer et al., 2010
45.0	-	Schingoethe et al., 2009
69.3	-	Oba et al., 2010

と乳生産のための要求量と一致する必須アミノ酸の理想的なバランスは保たれていない。その結果、一般的に入

手可能な飼料原料を使用して、乳生産のためのすべての必須アミノ酸の要求量を充足する泌乳牛用飼料を設計することは困難である。

DDGS や他のトウモロコシ併産物のアミノ酸組成は、乳中のアミノ酸組成とは異なっており、特にリジン含量が低いため、近年、DDGS を含む泌乳中の乳牛用飼料へのバイパスリジンの補給に大きな関心が向けられている。現在の代謝モデルを使用する場合、飼料原料の変動性、牛間乳量の遺伝的な差異、環境条件およびそれらの相互作用のために、代謝性たん白質の飼料中でのバランスをとることは困難である。ただし、DDGS を配合した乳牛用飼料へのバイパスアミノ酸補給の効果に関していくつかの研究が行われ、乳量と組成における潜在的な利益が得られることが示唆されている。

Boucher ら(2009)は、5 試料の DDGS について、RUP 画分の小腸アミノ酸消化率を測定し、ルーメンで分解され、小腸では消化されない一定のたん白質画分の有無について検討している。その結果、DDGS には、ルーメンでは分解できず、小腸では消化できない一定のたん白質画分が含まれていなかった。したがって、この研究で得られた難消化性の値に基づいて、DDGS には、小腸では消化できないが、ルーメンで部分的に分解されたのちに小腸で消化できる、またはその両方のたん白質画分が含まれている可能性がある。

Swanepoel ら(2010a)は、バイパスリジン製品について、高泌乳牛における DMI(乾物摂取量)、消化率、乳生産および乳成分への影響を調査した。バイパスリジンを補給した飼料を給与しても、DMI、乳量、乳中たん白率および乳糖率には影響はなかったが、乳脂率と乳脂肪量は低下した。リジンを除くほとんどのアミノ酸の血漿中濃度は、バイパスリジンを給与すると低下した。これは、リジンがこれらの飼料における第一制限アミノ酸であったことを示唆しており、バイパスリジンを補給すると、他のアミノ酸の吸収と利用が改善された。ただし、バイパスリジンの補給は、乳たん白質合成に影響を及ぼさず、血漿 3-メチルヒスチジン濃度を低下させた。これは、筋肉たん白質合成量が増加したか、その分解が減少したことを示唆している。リジンは筋肉たん白質とエネルギー代謝に影響を及ぼし、アミノ酸の摂取、代謝、吸収さらには乳生産に差をもたらした可能性があり、腸で吸収されるリジンの

必要量の予測性が低下する可能性を考えると、バイパスリジンの補給は推奨できないとしている。

Swanepoel ら(2010b)による、さらなる研究では、3 種類の代謝予測モデルを比較して、乳牛用飼料で小腸に流入したたん白質のアミノ酸組成を推定し、一般的な反芻家畜におけるバイパスアミノ酸プレミックスの開発と、その補給が十分な栄養学的効果があるか否かについて検討している。その結果、乳牛においてバイパスアミノ酸プレミックスの使用効果には一貫性があるものの、どのモデル予測が正しいかを判断することは不可能であるとしている。

Robinson 等(2011)は、リジン欠乏飼料給与時のバイパスリジンの小腸への流入量および高泌乳牛の DMI、乳生産および血漿アミノ酸組成に対する影響を調査した。バイパスリジンを補給すると、泌乳中期の牛の血漿リジン濃度が上昇したが、リジン要求量を超えていることから、バイパスリジンの補給は必要がないことが示唆された。彼らは、以前実施した試験の結果に基づき、体たん白質の代謝回転がアミノ酸利用の最初の優先事項であり、乳成分の合成は、それに続いて起こると推考している。

Li ら(2012)は、小麦と小麦 DDGS ならびにトウモロコシとトウモロコシ DDGS について、*in situ*での CP のルーメン分解性、RUP のアミノ酸組成およびアミノ酸の *in vitro* 消化率を調査した。CP のルーメン分解率は、原料穀物よりも DDGS の方が低かったが、小麦 DDGS とトウモロコシ DDGS の間には差がなかった。必須アミノ酸のルーメン分解率は、トウモロコシ DDGS と比べて小麦 DDGS が高く、RUP のアミノ酸組成は、穀物と、それを原料とした DDGS の間で異なっていた。総アミノ酸および必須アミノ酸の小腸消化率は、個々のアミノ酸および飼料原料間で大きく変動したが、小麦 DDGS とトウモロコシ DDGS の間では差はなかった。これらの結果は、アミノ酸の利用性が穀物と DDGS によって大きく異なっていることを示唆している。

Paz ら(2013)は、バイパスリジン添加(60g/日)あるいは無添加の DDGS を含む飼料(0、10 または 20%)を給与し、乳量、乳組成およびアミノ酸の血漿中濃度に対する影響を調査している。DDGS を 10%または 20%含む飼料を給与すると、対照飼料に比べて DMI と産乳量には

差がなかった。DDGS を 20%含む飼料では、乳たん白率と乳たん白量が高まったが、他の乳成分は、対照あるいは DDGS を 10%含む飼料と類似していた。DDGS を含む飼料へのバイパスリジンの補給は、産乳量や乳成分組成には影響しなかった。血漿中アルギニン、ヒスチジン、バリン濃度は低く、ロイシンとメチオニン濃度は、DDGS を 10 および 20%含む飼料では対照飼料より高かった。DDGS の量の増加に伴い、血漿中リジン濃度が低下したが、バイパスリジンの補充は、他の必須アミノ酸の血漿濃度に影響を及ぼさなかった。

その後の研究で、Paz and Kononoff(2014)は、低脂肪 DDGS を 15 または 30%含む等窒素・等カロリー飼料へのバイパスリジン補給の有無が産乳成績とアミノ酸の利用性に及ぼす影響を調査した。低脂肪 DDGS の量は、DMI、乳量、乳脂肪および乳糖率に影響を与えなかったが、低脂肪 DDGS を 30%含む飼料を給与すると、乳たん白率が低下した。ただし、低脂肪 DDGS を 30%含む飼料では、15%含む飼料に比べて、アミノ酸の排泄率が高く、バイパスリジンを給与すると乳たん白率が高まる傾向を示した。この結果は DDGS を 30%含む飼料では飼料中のリジンが不足していたことを示しているが、乳たん白量には飼料間で差はなかった。また、これらの試験結果は、供試したバイパスリジン製品の代謝性リジン量は予想より低く、これらの飼料でリジン、アルギニン、フェニルアラニンが制限アミノ酸であったことを示しており、乳牛用飼料にバイパスアミノ酸を補給することは不足しているアミノ酸の供給に役立つ可能性があるものの、これらのアミノ酸の生物学的な利用能に関する正確な情報が必要であるとしている。

Mjoun ら (2010a)は、溶剤抽出大豆粕、圧搾大豆粕、エクストруд大豆、高脂肪 DDGS、低脂肪 DDGS、高たん白 DDG およびモディファイド DDGS について、*in situ* および *in vitro* の CP およびアミノ酸のルーメン内分解率と小腸消化率を調査した。トウモロコシ DDGS の大部分のアミノ酸の小腸消化率は、リジンでは 84.6%であったが、それ以外のアミノ酸では 92%であって、大豆製品(97.3%)に比べてわずかに低かった。このことは、トウモロコシ DDGS と大豆製品との間で乳牛におけるアミノ酸の利用性はほぼ同等であることを示している。

Mjoun ら(2010b)は、泌乳初期の乳牛に高脂肪 DDGS

を 22%、または低脂肪 DDGS を 20%含む飼料を給与し、産乳成績とアミノ酸の利用性を評価した。なお、DDGS を含まない対照飼料を含め、各飼料の CP、粗脂肪、NDF および NE 含量は同一とした。その結果、体重、体重変化および BCS スコアは飼料間で類似していたが、対照飼料では、DDGS を含む飼料に比べて、BCS が高まる傾向を示した(表 4)。DMI、たん白質摂取量、正味エネルギーには差がなかった。すべての牛は、泌乳開始後 35~120 日で正のエネルギー出納を示したが、対照飼料では、エネルギー出納が高まり、DDGS を含む飼料に比べてエネルギー蓄積量が高まり、エネルギー効率が低下する傾向を示した。この結果は、対照飼料を給与した牛では、ME をエネルギー蓄積に向けて優先的に分配し、乳生産や乳成分合成に使用してはならないことを示している。飼料間で産乳量、乳脂肪と乳糖量に差がなかったが、DDGS を含む飼料を給与した牛は、乳たん白量と産乳量が多く、さらに、飼料効率および窒素効率が高くなる傾向を示した。アミノ酸の利用率は乳生産のピーク時(泌乳開始後 9 週間)に測定したが、乳腺におけるリジンの取り込み率は、対照飼料(65%)と比べて DDGS を含む飼料で高かった(76%)。しかし、リジンの乳腺への取り込み量には各飼料で類似していた(乳中 2.56 g/kg)。さらに、メチオニンの乳腺への取り込み量は、DDGS を含む飼料で増加する傾向があった。明らかなリジン欠乏状態にも関わらず、DDGS を含む飼料では乳たん白率が高まった。これらの結果は、高脂肪および低脂肪 DDGS を 20%程度含んでいる場合、エネルギーと代謝性アミノ酸の優れた供給源となることを示しており、リジン含量と生物学的利用率は、泌乳量 40 kg の乳牛における乳生産または乳たん白質合成を制限しないことを示している。

Mjoun ら(2010c)は、泌乳中期の乳牛に大豆粕と置換して低脂肪 DDGS(粗脂肪含量 3.5%)を 0、10、20 または 30%含む飼料を給与した場合の産乳量と乳成分に及ぼす影響を調査した。その結果、DDGS の量を高めても、DFI と産乳量には影響はなく、乳脂肪率が直線的に増加し、乳脂肪量も増加する傾向を示した。乳たん白量への DDGS の配合による影響はなかったが、乳たん白率は二次直線的に高まった。また、DDGS の配合により、乳生産効率は向上したが、窒素効率には影響がなかった。乳腺からのリジンの取り込み量は DDGS の配合量と対

応して直線的に増加し、メチオニンの取り込み量は直線的に低下した。これらの結果から、低脂肪 DDGS を最大 30% 含む飼料を給与すると、大豆たん白質主体の対照飼料と同様の産乳成績と栄養成分の利用効率を得られることが明らかとなった。

Pereira ら(2015)は、泌乳後期の乳牛(乳量; 21~27 kg/日)に対して、大豆粕と DDGS を置換し、バイパスリ

ジンとメチオニンを添加した飼料を給与して、泌乳成績への影響を調査した。その結果、DDGS とバイパスリジンおよびメチオニンの組合せにより、低CPTウモロコシサイレージとライグラスサイレージ主体飼料中の大豆粕と置換しても、産乳量と乳成分組成の維持に効果的であることを示している。

表 4. 高脂肪または低脂肪 DDGS を泌乳初期の乳牛に給与した場合の産乳成績、エネルギーおよびアミノ酸の利用率と乳成分に及ぼす影響(Mjoun ら、2010a から改編)

	対照	高脂肪DDGS 22%	低脂肪DDGS 20%
(体重および状態)			
開始時体重 kg	693	682	660
終了時体重 kg	734	722	704
体重の変動 kg	0.47	0.47	0.53
BCS ¹	3.43	3.32	3.34
BCSの変化/日	0.14	0.02	0.00
(乾物、たん白質、エネルギー摂取量)			
乾物摂取量 kg/日	24.8	24.7	24.6
たん白質摂取量 kg/日	4.3	4.3	4.3
NE _I Mcal/日 ²	41.3	40.1	40.3
NE _M Mcal/日 ³	11.0	11.0	11.0
NE _L Mcal/日 ⁴	26.4	26.5	27.4
エネルギー出納 Mcal/日 ⁵	4.39	1.98	1.98
総エネルギー蓄積量 ⁶	20.7	20.0	20.1
エネルギー効率 ⁷	63.1	66.9	68.1
(産乳および効率)			
産乳量 kg/日	39.2	38.9	39.8
エネルギー補正乳量 ⁸	38.0	37.8	39.5
乳脂肪補正乳量 ⁹	35.7	35.3	37.1
飼料効率 ¹⁰	1.50	1.57	1.61
窒素効率 ¹¹	24.5	26.9	26.5
乳腺における必須アミノ酸取り込み量 g/産乳量 kg¹²			
ヒスチジン	0.80	0.91	0.98
イソロイシン	2.07	2.40	2.45
ロイシン	3.09	4.03	4.38
リジン	2.52	2.49	2.68
メチオニン	0.58	0.83	0.81
フェニルアラニン	1.14	1.39	1.58
トレオニン	1.18	1.19	1.30
トリプトファン	0.14	0.64	0.50
バリン	2.35	2.87	2.87

表 4. 高脂肪または低脂肪 DDGS を泌乳初期の乳牛に給与した場合の産乳成績、エネルギーおよびアミノ酸の利用率と乳成分に及ぼす影響(Mjoun ら、2010a から改編) (続)

	対照	高脂肪DDGS 22%	低脂肪DDGS 20%
(乳成分組成)			
乳脂肪%	3.63	3.24	3.57
乳脂肪 kg/日	1.33	1.34	1.40
乳たん白質 %	2.82	2.88	2.89
乳たん白質 kg/日	1.07	1.15	1.14
乳糖 %	4.90	4.99	4.96
乳糖 kg/日	1.94	1.94	1.96
乳固形分 %	12.3	12.0	12.4
乳固形分 kg/日	4.73	4.70	4.90
乳中尿素窒素 mg/dL	11.8	10.9	10.1
体細胞数スコア % ¹³	3.38	3.91	3.83

- 1 BCS (Body condition score) : 1 = 削瘦 ~ 5 = 肥満
- 2 NE_i : 正味エネルギー摂取量 = NE (正味エネルギー) Mcal/kg × 乾物摂取量 kg/日
- 3 NE_M : 維持に要するNE = 体重^{0.75} × 0.08 ; NRC (2001)
- 4 NE_L : 泌乳に要するNE = [産乳量 kg × (0.029 × 乳脂肪率%) + (0.0563 × 乳たん白質率%) + (0.0395 × 乳糖%) ; NRC (2001)]
- 5 エネルギー出納 : $NE_i - (NE_M + NE_L)$
- 6 総エネルギー蓄積量 : (絶食時体脂肪率 × 9.4) + (絶食時体たん白率 × 5.55); NRC (2001)
- 7 エネルギー効率 : $NE_i / NE_L × 100$
- 8 エネルギー補正乳量 : (0.327 × 産乳量 kg) + (12.95 × 乳脂肪量 kg) + (7.2 × 乳たん白量 kg)
- 9 乳脂肪4%補正乳量 : (0.4 × 産乳量 kg) + (15 × 乳脂肪量 kg)
- 10 飼料効率 : (エネルギー補正乳量 / 乾物摂取量) × 100
- 11 窒素効率 : (乳中窒素量 kg/日) / (窒素摂取量 kg/日) × 100
- 12 乳腺における必須アミノ酸取り込み量 : 動静脈差 × 乳房血漿流量
- 13 体細胞数スコア : 体細胞数の対数値

リン

リンは家畜の栄養上最も重要で、価格も高いミネラルの1つだが、過剰に給与すると排泄物中に高濃度のリンが排泄されるため、集約的な畜産における環境負荷の大きな要因と見なされている(Humer and Zebeli, 2015年)。Schmit ら(2009)は、泌乳中の乳牛用飼料中のリン濃度を適切に保てば、リン排泄量は大幅に増加しないが、乾乳牛と未経産牛用の飼料にDDGSを配合すると、排泄物を施肥した時に植物が利用できるリンの量が増加し、作物におけるリンの養分要求量を超えるとしている。DDGS中のリン含量は高く(0.65~0.95%)、反すう家畜での利用率は高い(Mjoun ら、2008)。また、高泌乳牛は、飼料中へのリンの添加が必須であるため、DDGSは、価格が高い無機リン源の一部を置換するために使用することが出来る。

過剰なリンの排泄量を最小限に抑えるために、乳牛用飼料中のリンは、牛の1日要求量に合わせるように配合する必要がある(NRC, 2001)。

高脂肪 DDGS の給与と泌乳成績および乳成分組成を評価した初期の研究成果

Schingoethe ら(2009)は、乳牛に対する高脂肪 DDGS の給与に関する多数のデータを取りまとめている。トウモロコシ DDGS は、CP が豊富(30 乾物%以上)で、RUP も豊富(CP の約55%)な優れたたん白質原料である。かつ、中程度の粗脂肪含量(5~12 乾物%)と易消化性繊維(NDF 含量約39%)がもたらす優れたエネルギー源でもある(NE_L は約2.25 Mcal/乾物kg)。

DDGS または WDGS(未乾燥の DGS)を給与した場合の泌乳成績には大きな差がないが、一部の報告では、WDGS を給与した場合にわずかに利点があることが示されている。

トウモロコシ DDGS は、濃厚飼料と粗飼料のいずれの場合にも部分的な代替原料として使用することが出来るが、一般的には濃厚飼料の代替原料として使用されることが多い。これは、DDGS を泌乳期の乳牛用飼料中の粗飼料と置き換える場合、乳脂肪率の低下を防ぐために必要

な有効繊維を十分量確保できない可能性があるためである。泌乳期の乳牛用飼料は、飼料の栄養バランスが確保できる場合、乾物ベースで20~30%のDDGSを含むことができる。実際、いくつかの研究では、DDGSを最大30%含む飼料を給与すると、一般的な飼料原料を含む飼料を給与した場合と比べて、産乳量は同等または増加することが示されている。DDGSは30%(乾物)以上含むことが出来るが、ルーメンの容積がDMIと乳生産を抑制する可能性がある。DDGS中の繊維は通常、トウモロコシなどのでん粉含量が高い飼料原料の代替物と見なされ、その結果、アシドーシスのリスクを最小限に抑えることが出来るが、必ずしも排除するわけではない。

Kalscheur(2005)は、過去に行われた乳牛へのWDGSまたはDDGSを給与した23のデータについてメタ分析を行っている。これらの試験は1982年から2005年の間に公表された高脂肪DDGSを用いている。低脂肪DDGSの給与を含む最近の報告の概要は、後述する。WDGSおよびDDGSの飼料への利用量が産乳成績に及ぼす影響を評価するために、配合量は5つのカテゴリー(0%、4~10%、10~20%、20~30%、30%以上、乾物)に区分し、形態(WDGSおよびDDGS)の違いも対象とした。

DMIは、配合量および形態の両方に影響を受けた(表5)。DDGSを給与した場合、DDGSの配合量が増加するとDMIが増加し、配合量が20~30%の飼料を給与で最大で、DDGSを配合していない対照飼料に比べて0.7kg/日多かった。DDGS配合量が30%以上の場合のDMIは、対照飼料とほぼ同様であった。DDGSを20~30%

含む飼料では、DMIが増加したが、WDGを含む飼料では、配合量が低い場合(4~10%および10~20%)に最大値を示した。WDGの配合量が20%以上の場合はDMIは減少し、30%以上の場合は対照飼料より2.3kg/日少なく、4~10%配合飼料より5.1kg/日少なかった。これらの結果は、DDGSを乳牛用飼料の最大20%配合すると嗜好性が高まってDMIが増加することを示している。配合量がより高い場合のDMIの減少は、粗脂肪含量が高まること、WDGSでは水分含量が高まることである可能性がある。

産乳量は、形態の違いによる影響は受けなかったが、WDGSまたはDDGSの配合量の増加に伴い曲線的な増加傾向を示した(表5)。4~30%のDGを含む飼料の産乳量は対照飼料を給与した牛より約0.4kg/日多かったが大きな差ではなかった。WDGSあるいはDDGSを30%以上配合した飼料を乳牛に給与すると、産乳量が減少する傾向があり、対照飼料に比べて産乳量が約0.8kg/日少なかった。ただし、WDGSを20%以上配合した飼料では産乳量が減少しており、DMIの減少に関連している可能性が最も高い。

乳脂率は、WDGSあるいはDDGSを配合した飼料で変化したが、配合量や水分含量の影響はなかった(表6)。この広範なデータの要約で観察された乳脂率における反応は、WDGSあるいはDDGSを多く含む飼料を給与することによる乳脂率の低下という懸念を払しょくするものである。乳脂率の低下には多くの要因が影響を与える可能性があり、ルーメンの機能を十分に維持するために飼料から十分な繊維を供給することで避けることが出来る。

表5. WDGSとDDGSの配合量が乳牛の乾物摂取量と乳量に及ぼす影響(Kalscheur, 2005)

配合割合 (乾物)	乾物摂取量 kg/日			産乳量 kg/日		
	乾燥	生	すべて	乾燥	生	すべて
0%	23.5 ^c	20.9 ^b	22.2 ^b	33.2	31.4	33.0
4-10%	23.6 ^{bc}	23.7 ^a	23.7 ^a	33.5	34.0	33.4
10-20%	23.9 ^{ab}	22.9 ^{ab}	23.4 ^{ab}	33.3	34.1	33.2
20-30%	24.2 ^a	21.3 ^{ab}	22.8 ^{ab}	33.6	31.6	33.5
>30%	23.3 ^{bc}	18.6 ^c	20.9 ^c	32.2	31.6	32.2
SEM	0.8	1.3	0.8	1.5	2.6	1.4

a-b異符号間に有意差あり(p < 0.05)

表6. WDGSとDDGSの配合量が乳牛の乳脂率およびたん白率に及ぼす影響(Kalscheur, 2005)

配合割合	乳脂率 %	乳たん白率 %
0%	3.39	2.95 ^a
4 – 10%	3.43	2.96 ^a
10.1 – 2%	3.41	2.94 ^a
20.1 – 30%	3.33	2.97 ^a
> 30%	3.47	2.82 ^b
SEM	0.08	0.07

a – b異符号間に有意差あり (p < 0.05)

WGDS あるいは DDGS の NDF 含量は 28~44%であるが、NDF は細かく切断されており、ルーメン内で急速に分解される。その結果、DDGS 中の繊維は、反すう家畜に効果的な繊維ではなく、食物繊維と同等と見なすべきではない。さらに、WGDS や DDGS が含む高含量の脂質は、ルーメンの機能に影響を与えて乳脂率の低下をきたす可能性があるが、一般的には、乳脂率の大幅な低下につながるのは、単に WGDS や DDGS だけの問題ではなく、いくつかの要因が絡んでいる。

乳たん白率は WGDS あるいは DDGS を 0~30%含む飼料では差はなく、形態も乳たん白率に影響しなかった(表 6)。ただし、対照飼料と比べて、30%以上の WGDS あるいは DDGS を含む場合、乳たん白率は 0.13%低下した。WGDS や DDGS を多く含む飼料では、WGDS や DDGS を飼料中の他のすべてのたん白源と置き換えられている可能性が高い。WGDS や DDGS の量が多い場合、たん白質の小腸消化率が低下し、リジン含量の低下およびアミノ酸バランスの不均衡が、乳たん白率の低下に影響した可能性がある。ただし、DDGS の栄養成分組成と消化率が、1980 年代と 1990 年代に実施された試験では、乳たん白率が現在の値より低いことには注意する必要がある。最近の研究では、あまり触れられていないが、リジンは熱に非常に敏感であり、一部のエタノール工場での製造および乾燥中における過加熱によって DDGS に悪影響を与えていた可能性がある。しかし現在のエタノール工場では、これらの研究が行われて以来、製造と乾燥の技術が劇的に改善されており、DDGS のリジンとアミノ酸の消化率が向上している。

高脂肪 DDGS、低脂肪 DDGS の給与と泌

乳成績、乳成分組成、ルーメン発酵、栄養成分消化率に及ぼす影響に関する最近の研究成果

最近公表されているいくつかの報告では、最大 30%の高脂肪および低脂肪 DDGS を含む飼料を泌乳中の乳牛に給与すると、産乳量と乳成分組成ならびにメタン排出量と、基礎的なルーメン発酵および栄養成分の消化反応が低下するという数多くの利点を示されている。メタン排出量、栄養成分の排泄量および乳脂率を低下させる潜在的なリスクを含むいくつかの理由から、トウモロコシ DDGS を泌乳中の乳牛に給与することによるルーメン発酵および栄養成分の消化率への影響を理解することは重要である。

Benchaar ら(2013)は、泌乳中の乳牛飼料中のトウモロコシと大豆粕を高脂肪 DDGS で、0、10、20、30%置換することで腸内メタン排出量、ルーメン発酵特性、見かけの全消化管消化率、窒素出納および産乳成績に及ぼす影響を調査した。DDGS の量が増加すると、DMI と産乳量が増加したが、乾物と総エネルギーの見かけ全消化管消化率は低下した(表 7)。ルーメンにおける酢酸:プロピオン酸比(A:P 比)は、酢酸濃度の低下に伴って直線的に低下し、メタン生成は DDGS の給与量に伴って直線的に減少した。メタン生成の減少は、DDGS によって供給される脂質量の増加と、ルーメン内での繊維の分解、A:P 比およびプロトゾア数に対する影響に起因している。DDGS の給与量を高めることで窒素効率も改善されたが、窒素排泄量は増加した。この結果は、DDGS を泌乳中の乳牛に給与すると、メタン排出を削減すると同時に、DMI と乳量の改善に効果があることを示している。

表 7. 泌乳能力の向上、第一胃の pH、第一胃の揮発性脂肪酸とアンモニアの生産、栄養成分の見かけの全消化管消化率および糞便排出量に対する、高レベルの低脂肪 DDGS を授乳中の乳牛に給与した場合の影響 (Benchaar ら、2013 から改編)

	0% DDGS	10% DDGS	20% DDGS	30% DDGS
開始時体重 kg	700	701	697	698
終了時体重 kg	710	714	724	730
日増体量 kg/日	0.29	0.35	0.76	0.95
乾物摂取量 kg/日	24.2	24.6	24.4	25.3
(産乳量、飼料効率、乳成分)				
産乳量 kg/日	32.6	35.1	35.8	36.6
エネルギー補正乳量 kg/日	35.3	37.8	37.3	37.1
乳脂肪4%補正乳量 kg/日	32.1	34.5	34.1	33.7
産乳量/乾物摂取量	1.40	1.44	1.44	1.45
エネルギー補正乳量/乾物摂取量	1.51	1.55	1.50	1.46
脂肪補正乳量/乾物摂取量	1.37	1.42	1.37	1.33
乳脂率 %	3.93	3.91	3.69	3.47
乳脂量 kg/日	1.27	1.36	1.32	1.27
乳たん白率 %	3.49	3.41	3.31	3.31
乳たん白量 kg/日	1.13	1.19	1.18	1.20
乳糖率 %	4.60	4.63	4.59	4.58
乳糖量 kg/日	1.50	1.62	1.65	1.68
乳中尿素窒素 mg/dL	11.1	10.0	9.9	10.6
体細胞数 × 10 ⁵ /mL	75	82	133	89
(ルーメン pH)				
最低値	5.92	5.92	5.98	5.97
最高値	6.56	6.59	6.64	6.55
平均	6.21	6.21	6.27	6.22
プロトゾア数 × 10 ⁵ /mL	5.12	5.28	5.42	4.48
(揮発性脂肪酸)				
総揮発性脂肪酸 mM	99.3	96.1	93.6	91.1
酢酸 mol/100 mol	63.4	62.7	61.8	60.1
プロピオン酸 mol/100 mol	21.8	22.1	22.3	23.1
イソ酪酸 mol/100 mol	0.8	0.8	0.7	0.7
酪酸 mol/100 mol	11.5	12.0	12.8	13.7
イソ吉草酸 mol/100 mol	1.4	1.2	1.2	1.1
吉草酸 mol/100 mol	1.2	1.2	1.2	1.3
酢酸/プロピオン酸比(A/P 比)%	63.4	62.7	61.8	60.1
アンモニア mg/dL	8.4	7.5	6.7	6.1
尿中窒素排泄量 g/日	204	209	213	223
尿中窒素排泄量/窒素摂取量 %	33.7	32.7	32.7	32.6
総窒素排泄量 g/日	402	413	419	434

表 7. 泌乳能力の向上、第一胃の pH、第一胃の揮発性脂肪酸とアンモニアの生産、栄養成分の見かけの全消化管消化率および糞便排出量に対する、高レベルの低脂肪 DDGS を授乳中の乳牛に給与した場合の影響 (Benchaar ら、2013 から改作) (続)

	0% DDGS	10% DDGS	20% DDGS	30% DDGS
全窒素排泄量/窒素摂取量 %	66.4	64.4	64.3	63.5
乳窒素量 g/日	177	187	185	189
乳窒素/窒素摂取量 %	29.4	29.1	28.2	27.7
窒素蓄積量 g/日	33	42	51	60
窒素蓄積量/窒素摂取量 %	5.3	6.5	7.6	8.9
窒素生産量 g/日	204	229	236	248
窒素生産量/窒素摂取量 %	34.6	35.6	35.7	36.5

- 1 エネルギー補正乳量 (ECM) : $(0.327 \times \text{乳量 kg}) + (12.95 \times \text{乳脂肪 kg}) + (7.2 \times \text{乳たん白質 kg})$
- 2 乳脂肪4%補正乳量 = $0.4 \times \text{産乳量 kg/日} + 15 \times \text{乳脂肪量 kg/日}$

Castillo-Lopez (2014) は、低脂肪 DDGS を 0~30% 含む飼料を給与した場合の産乳成績、ルーメン発酵、微生物体窒素の腸内流入および全消化管消化率を調査している。低脂肪 DDGS 給与量の増加は、産乳量および乳脂肪量に影響を与えなかったが、乳たん白質を増加させる傾向を示した(表 8)。低脂肪 DDGS の給与により、ルーメン pH が低下したが、これは、TMR の粒子サイズが小さくなったことが一部影響している可能性があり、咀嚼するための唾液を産生に費やす時間が短くなり、その結果、ルーメン pH に対する緩衝効果が低下したものと推察している。ルーメン内の揮発性脂肪酸とアンモニア濃度および微生物体窒素の小腸への流入は DDGS の量には影響を受けなかった。乾物、有機物、NDF、NFC の消化率は、低脂肪 DDGS の量が高まると改善される傾向を示した。この結果は、最大 30% の低脂肪 DDGS を給与すると、ルーメン内の揮発性脂肪酸濃度と微生物体窒素の供給量には影響を及ぼさずに優れた産乳成績と乳成分組成を得ることが出来、栄養成分の見かけの全消化管消化率を高める傾向があることを示している。

Ramirez-Ramirez 他(2016)は、高脂肪 DDGS S(粗脂肪含量 12.0%)と低脂肪 DDGS(粗脂肪含量 6.6%)を 30% 含む、バイパス油脂の添加の有無(1.9%)が、ルーメン発酵、産乳成績および乳脂肪組成に及ぼす影響を調査した(表 9)。DMI と産乳量は、高脂肪あるいは低脂肪 DDGS の給与により増加した。DMI の増加は、DDGS を含む飼料において粒度が 1.18 mm 未満の割合が 1.8 倍多かったことに起因しているものと推察された。その

結果、DDGS の給与によりルーメン液中の揮発性脂肪酸組成に変化が生じ、酪酸濃度が低下した。高脂肪性 DDGS を給与すると乳脂率と乳脂肪量が減少したが、低脂肪 DDGS を給与した場合には対照飼料牛と差がなかった。ルーメン微生物の多くは *Bacteroidetes*(54%)と *Firmicutes*(43%)であって、飼料の違いによる相対的な変化は少なかった。DDGS を含む飼料を給与すると、対照飼料に比べて PFA 摂取量が増加し、ルーメン pH が低下したが、ルーメン内で DDGS が発酵することにより、咀嚼回数と唾液産生量が減少したことによる影響の可能性もある。これらの発酵の変化により、微生物による水素添加と CLA(共役リノール酸)の組成が変化した。乳脂肪合成を阻害することが知られているトランス 10-CLA、シス 12-CLA は高脂肪 DDGS を給与した数頭の牛の乳汁から検出されたが、他の飼料を給与した牛からは検出されなかった。さらに、DDGS を含む飼料を給与した牛の乳中トランス-10 18:1 濃度と総量は、対照飼料を給与した牛と比べて約 10 倍増加した。したがって、低脂肪 DDGS を含む飼料では、乳脂率の減少に関連するトランス 10 18:1 のルーメンへの供給と生成量が減少しているようであり、低脂肪 DDGS を含む飼料では、高脂肪 DDGS を含む飼料とルーメン pH には差がなかったものの、乳脂率や乳脂肪量の低下は見られなかった。この結果は、高脂肪 DDGS と低脂肪の DDGS を含む飼料を給与すると DMI が増加し、粗飼料由来の NDF が不足していても優れた乳生産と乳成分組成を保つことが出来ることを示している。トランス 10-CLA およびシス 12-CLA は

表 8.泌乳能力、第一胃の pH、第一胃の揮発性脂肪酸とアンモニアの生産、栄養成分の見かけの全消化管消化率および糞便排泄に対する還元油 DDGS のレベルの増加が泌乳乳牛に与える影響(Castillo-Lopez、2014 から改作)

	DDGS 0%	低脂肪DDGS 10%	低脂肪DDGS 20%	低脂肪DDGS 30%
体重 kg	687	688	693	697
BCS	3.06	3.10	3.14	3.18
	DDGS 0%	高脂肪DDGS 30%	低脂肪DDGS 30%	低脂肪DDGS 30%+バイパス 油脂
体重 kg	607 ^b	619 ^a	616 ^a	619 ^a
BCS	3.1	3.2	3.1	3.2
乾物摂取量 kg/日	21.6 ^b	25.8 ^a	26.1 ^a	26.1 ^a
(乳量および乳成分)				
産乳量 kg/日	32.2 ^b	33.8 ^a	33.8 ^a	34.0 ^a
乳脂肪3.5%補正乳量 ¹	33.2 ^b	32.8 ^b	34.3 ^{ab}	35.0 ^a
乳脂率 %	3.69 ^a	3.27 ^b	3.65 ^a	3.70 ^a
乳脂量 kg/日	1.18 ^a	1.11 ^b	1.22 ^a	1.25 ^a
総脂肪酸量 g/日	1,103 ^a	1,036 ^b	1,137 ^a	1,166 ^a
総不飽和脂肪酸 g/日	314 ^c	400 ^a	365 ^b	398 ^a
総多価不飽和脂肪酸 g/日	49	79	77	78
総飽和脂肪酸 g/日	787 ^a	636 ^b	765 ^a	766 ^a
18:1 trans-10	5.6 ^b	18.9 ^a	6.4 ^b	7.6 ^b
18:2 cis-9, trans-11	4.8 ^d	13.7 ^a	9.1 ^c	11.0 ^b
18:2 trans-10, cis-12	-	0.05	-	-
乳たん白率 %/日	3.07 ^c	3.22 ^a	3.21 ^a	3.12 ^b
乳たん白量 kg/日	1.00 ^b	1.10 ^a	1.07 ^a	1.06 ^a
乳中尿素窒素 mg/dL	15.3 ^b	15.2 ^b	16.4 ^a	15.9 ^a
(ルーメン発酵)				
pH	6.17 ^a	5.80 ^b	5.78 ^b	6.02 ^{ab}
総揮発性脂肪酸 mM	116	121	127	119
酢酸 mol/100 mol	67.3 ^a	60.9 ^c	61.4 ^{bc}	63.2 ^b
プロピオン酸 mol/100 mol	18.2 ^c	23.6 ^a	23.1 ^a	20.7 ^b
イソ酪酸 mol/100 mol	0.85	0.66	0.69	0.76
酪酸 mol/100 mol	11.6	12.5	12.3	12.8
イソ吉草酸 mol/100 mol	0.56	0.56	0.51	0.62
吉草酸 mol/100 mol	1.62 ^b	1.84 ^{ab}	2.00 ^a	1.91 ^a
酢酸/プロピオン酸比(A/P 比) %	3.74 ^a	2.64 ^c	2.68 ^{bc}	3.05 ^b
アンモニア mg/dL	25.6	28.5	27.4	26.5
(見かけの全消化管消化率)				
乾物消化率 %	50.6 ^c	58.0 ^b	67.1 ^a	59.1 ^b
有機物消化率 %	52.6 ^c	59.9 ^b	69.3 ^a	60.9 ^b
NDF消化率 %	32.5 ^c	43.8 ^{ab}	53.0 ^a	43.2 ^b
窒素消化率 %	53.2 ^c	63.8 ^b	72.6 ^a	64.4 ^b
¹ 乳脂肪3.5%補正乳量 = (乳脂量 kg × 16.216) + (産乳量 kg × 0.4324)				
リン摂取量 g/日	75	86	96	109
リン消化率 %	28.1	35.0	50.2	50.5
糞中リン g/日	46	54	53	53

表 9. 第一胃不活性脂肪を含むまたは含まない 30%低脂肪 DDGS(6.6%粗脂肪)、または 30%従来の高脂肪 DDGS

(12%粗脂肪)を含む総混合飼料を給与した乳牛への影響 泌乳能力、牛乳組成、ルーメン発酵、栄養成分の見かけの総消化管消化率(Ramirez-Ramirez ら、2016 から改編)

乳脂肪生産の低下に関連するが、低脂肪 DDGS を含む飼料を給与した場合には検出されず、低脂肪 DDGS を 30%含む飼料では乳脂率低下のリスクが低くなる。

Whelen ら(2017)は、多年生ライグラス草地で放牧している泌乳中期の乳牛用飼料の大麦および大豆粕 の 11.6あるいは 31%を、大豆皮、DDGS およびパーム核粕の混合物で置換した場合の影響を調査している。その結果、産乳成績、消化および代謝特性に影響を及ぼさずに、飼料中の大麦および大豆粕を大豆皮、DDGS、パーム核粕で置換できることを報告している。

牛乳の消費者の満足度と健康上の利点

いくつかの研究では、泌乳中の乳牛に DDGS を給与すると、乳中の不飽和脂肪酸の濃度が増加し、過酸化と異臭の発生につながる可能性があることが報告されている。Testroet ら(2015)は、DDGS を 0、10 または 25%含む飼料を給与した乳牛における乳汁の化学組成および風味特性に及ぼす影響を調査した。その結果、乳中の過酸化物質および遊離脂肪酸の含量はほとんど検出限界以下であって、DDGS を含む飼料を給与すると乳成分組成は変化するものの、異臭の発生には関連しないことを示している。近年、ヒトの健康上有益な効果をもたらす物質の乳中濃度を高めることにより、ヒトの健康上の利点を改善することに大きな関心が寄せられている。これらの物質の 1 つは、シス 9、トランス 11-CLA であり、発癌性とアテローム性動脈硬化のリスクを軽減し、免疫力を高めることが報告されている。飼料の配合組成を変更することで、乳中 CLA 含量を増加させる手法がいくつか試みられている。アンダーソンら(2006)および Sasikala-Appukuttan ら(2008)は、DDGS を 10~20%を含む飼料を給与すると、DMI、産乳量、乳脂率に影響を及ぼすことなく、乳中の CLA 濃度を増加させることを示している。最近では、Kurokawa ら(2013)が、DDGS を 0、10 または 20%含む高 NDF(46%)飼料を泌乳中の乳牛に給与すると、産乳量が増加し、CLA 含量が著しく増加することを明らかにしている。したがって、泌乳中の乳牛に DDGS を

含む飼料を給与することで、ヒトの健康上有効な牛乳を生産できることも利点の 1 つであると思われる。

春機発動前の若雌牛へ DDGS の給与

乳牛への DDGS の給与に関する研究のほとんどは泌乳中の乳牛を用いたものであり、乳牛の発育成績とその後の長期的な繁殖成績および産乳成績への影響に焦点をあてた研究は限られている。これまでの研究では、未経産牛に DDGS を給与すると繁殖成績が向上することが示されている(Martin ら、2007; Engle ら、2008)。Anderson ら(2015a、b)は、低脂肪 DDGS を 22%含む飼料を給与した未経産牛と、高脂肪 DDGS を 34%給与した未経産牛では、ADG(日増体量)が高く(0.96 kg/日)、栄養成分の全消化管消化率が高いことを示している。さらに、Anderson ら(2015b)は、高脂肪 DDGS を含む飼料の給与は、低脂肪 DDGS を含む飼料に比べて、レプチン(脂肪組織で作られる、食欲の抑制とエネルギー代謝の調節に関わるホルモン)、IGF-1(インスリン様成長因子)、インスリンの血漿濃度に基づくエネルギー状態は同等に維持されるが、血漿コレステロールと脂肪酸濃度が増加したと報告している。これらの血漿中脂質の増加は、繁殖成績を改善する可能性があることが示されている(Talavera ら、1985; Thomas ら、1997; Funston、2004)。これらの反応をさらに評価するために、Anderson ら(2015c)は、トウモロコシ・大豆製品主体の対照飼料、低脂肪 DDGS を 22%含む飼料および高脂肪 DDGS を 34%含む飼料を春機発動前の若雌牛 33 頭に対して、分娩前 24 週間から分娩後 4 ヶ月まで給与した。その結果、初回発情日齢、人工授精回数、受胎日齢または分娩日齢には差が見られなかった(表 10)。高脂肪性 DDGS を含む飼料では、対照飼料および低脂肪 DDGS を含む飼料と比べて、体高と体長が短かった。低脂肪 DDGS を含む飼料では、他の飼料に比べて産乳量が多かったが、乳たん白率と乳脂率および乳たん白量と乳脂量は類似していた。これらの結果は、春機発動前の若雌牛に対して、高脂肪あるいは低脂肪 DDGS をトウモロコシと大豆製品と置換して給与することで、繁殖能力や産乳成績に悪影響を及

ばさないか、あるいは改善できることを示している。さらに、DDGS 由来の脂質は、トウモロコシを与える場合に供給されるでん粉と効果的に置き換えることができ、その後の成績に悪影響を及ぼさないことが明らかとなっている。

その後の研究では、高脂肪および低脂肪 DDGS の給

表 10. 生殖能力、身体測定、 出産前 24 週間とその後 4 か月の泌乳期間に 22%低脂肪 DDGS と 34%高脂肪 DDGS を含む飼料を給与した乳用未経産牛の泌乳成績と牛乳組成 (Anderson ら、2015c から改作)

	DDGS 0%	低脂肪DDGS 22%	高脂肪DDGS 34%
初回発情日齢	394	400	398
人工授精回数	2.11	2.89	1.78
受胎日齢	455	483	444
初産日齢	733	764	728
(分娩前3週)			
体重 kg	681	678	638
体高 cm	144 ^a	144 ^a	140 ^b
十字部高 cm	147	147	144
胸囲 cm	206	206	203
体長 cm	145 ^a	144 ^a	140 ^b
BCS	3.4	3.4	3.4
(分娩時)			
体重 kg	634	621	590
BCS	3.3	3.1	3.2
産子体重 kg	40.8	41.6	41.6
異常産子数	1	2	2
移行期が順調に推移した頭数	9	9	9
分娩日齢	732	764	728
産乳量 kg/日	33.0 ^b	36.4 ^a	34.7 ^{ab}
エネルギー補正乳量 kg/日 1	34.4	37.9	35.1
乳たん白率 %	2.94	3.01	3.03
乳たん白量 kg/日 1	0.98	1.08	1.03
乳脂率 %	3.98	3.94	3.86
乳脂量 kg/日 1	1.28	1.41	1.28
体細胞数 × 10 ³ /mL	53.4	124.4	299.6

a,b異符号間に有意差あり (p<0.05)

1エネルギー補正乳量 (ECM) : (0.327 × 乳量 kg) + (12.95 × 乳脂肪 kg) + (7.2 × 乳たん白質 kg)

消化率は、DDGS を 14%含む飼料において最も優れたが、DDGS 給与量の増加に伴い、窒素保持量が減少した。粗飼料の給与割合が高い飼料では、DDGS 給与量の増加に伴ってルーメン液中の酢酸濃度が減少し、プロピオン酸濃度が増加する傾向を示した。さらに、DDGS 給与量が増加すると、ルーメンプロトゾア数が減少した。これ

による安定した利点も示されている。Suarez-Mena (2015)は、粗飼料と濃厚飼料の給与割合 (50:50 または 75:25)と DDGS の量 (0、7、14 または 21%)が、春機発動前の若雌牛における消化率とルーメン発酵に及ぼす影響を調査した。乾物、有機物、ADF、NDF の見かけの

らの結果は、DDGS を 14%含む飼料を給与すると、粗飼料と濃厚飼料の比率が異なる飼料を給与した未経産牛における栄養成分の利用性とルーメンにおける発酵性が改善されたことを示している。

Manthey and Anderson (2016)は、乾草を自由摂取させ、DDGS あるいはトウモロコシ・大豆粕を体重の 0.8%量給

与した未経産牛のDMI、体重、ADGおよび飼料効率は類似しており、体型の各測定項目やBCSにも差がなかった。Mantheyら(2016)は、DDGSの含有量を最大50%とした飼料を制限給与すると、飼料効率、乾物およびOPの見かけの全消化管消化率が改善されることを報告し表11. 乳牛に対するDDGSの推奨最大配合量(Kalscheurら、2012bから改編)

ステージ	DDGS %	配合設計上で考慮すべき重要な栄養成分
離乳前の子牛	25	リジン、繊維、粗脂肪
育成期	30	粗脂肪/エネルギー、イオウ
乾乳期	15	粗脂肪/エネルギー、イオウ、カルシウム/リン
泌乳期	20	全脂質/多価不飽和脂肪酸、有効繊維、イオウ、カルシウム/リン、RUP、リジン

は、ホルスタイン種未経産牛にDDGSを30%(体重の2.65%)、40%(同2.50%)、または50%(同2.35%)給与し、残りは乾草と微量プレミックスを給与した。試験2では、トウモロコシ・大豆粕またはDDGSを体重の0.8%量給与し、乾草を自由摂取させた。その結果、制限給与の場合、DDGSを乾草の最大50%置換出来ること、また、乾草を自由摂取できる場合には、トウモロコシと大豆粕を置換しても、十分な栄養成分消化率と発育成績が得られることを示している。

Mantheyら(2017)は、制限給与する粗飼料と置換してDDGを30、40または50%を給与した場合の代謝能と初回発情への影響も調査している。各飼料給与時の血漿グルコース、インスリン、IGF-1、レプチンおよびトリグリセリドは類似していたが、総脂肪酸およびPFAは、DDGSの飼料量の増加に伴って高まった。初回発情日齢と、その時点の体重も、各飼料間で差がなかった。この結果は、DDGSを最大50%まで含む飼料を制限給与しても、脂肪組織の過剰蓄積をもたらさずに、エネルギー状態を維持し、初回発情日齢や体重に悪影響を及ぼさないことを示している。

最後に、Rodriguez-Hernandez(2017)は、ナタネ粕中のグルコシノレートの種類と含量が、乳牛のDDGSまたは他の油糧種子粕と比べて、嗜好性と摂取量に影響があるか否かを調査している。その結果、未経産牛ではDDGSを含む飼料の嗜好性が最も優れ、次いで、アマニ粕、ナタネ粕、ナタネ粕、カノラミールの嗜好性が優れ、ナタネ粕が最も劣った。

ており、BCSを高めることなく、体全体の発育を維持できることを示唆している。

MantheyとAnderson(2017)は、粗飼料とDDGSを置換した飼料を制限給与(実験1)、および乾草を自由摂取させDDGSを給与(実験2)の2試験を実施した。試験1で

結論

トウモロコシDDGSは、泌乳牛のエネルギー、たん白質、リンの優れた供給源である。多くの研究により、トウモロコシDDGSは、泌乳中の乳牛のDMI、産乳量、乳脂量および乳たん白量を低下させることなく、飼料中に20%までの配合することが出来る。実際に、DDGSを20~30%含んだ飼料の給与は、DDGSを含まない飼料と同等か、それ以上の乳生産が可能であり、飼料の設計を適切に行えば、乳脂率は低下しない。さらに、DDGSを30~50%含んだ育成牛用飼料を給与すると、優れた発育成績、繁殖成績およびその後の産乳能力を得ることが出来る。Kalscheurら(2012b)は、乳牛および子牛の生産の様々な段階におけるDDGSの推奨飼料含有率と、DDGSを含む飼料を設計する際に考慮すべき主要な成分を示している(表11)。

引用文献

- Anderson, J.L., K.F. Kalscheur, A.D. Garcia, and D.J. Schingoethe. 2015a. Feeding fat from distillers dried grains with solubles to dairy heifers: I. Effects on growth performance and total-tract digestibility of nutrient. *J. Dairy Sci.* 98:5699-5708.
- Anderson, J.L., K.F. Kalscheur, A.D. Garcia, and D.J. Schingoethe. 2015b. Feeding fat from distillers dried grains with solubles to dairy heifers: II. Effects on metabolic prole. *J. Dairy Sci.* 98:5709-5919.

- Anderson, J.L., K.F. Kalscheur, A.D. Garcia, and D.J. Schingoethe. 2015c. Short communication: Feeding fat from distillers dried grains with solubles to dairy heifers: III. Effects on posttrial reproductive and lactation performance. *J. Dairy Sci.* 98:5720–5725.
- Anderson, J.L., D.J. Schingoethe, K.F. Kalscheur, and A.R. Hippen. 2006. Evaluation of dried and wet distiller's grain included at two concentration in the diets of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 89:3133–3142.
- Benchaar, C., F. Hassanat, R. Gervais, P.Y. Chouinard, C. Julien, H.V. Petit, and D.I. Masse. 2013. Effects of increasing amounts of corn dried distillers grains with solubles in dairy cow diets on methane production, ruminal fermentation, digestion, N balance and milk production. *J. Dairy Sci.* 96:2413–2427.
- Birkelo, C.P., M.J. Brouk, and D.J. Schingoethe. 2004. The energy content of wet corn distillers grains for lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 87:1815–1819.
- Boucher, S.E., S. Calsamiglia, C.M. Parsons, H.H. Stein, M.D. Stern, P.S. Erickson, P.L. Utterback, and C.G. Schwab. 2009. Intestinal digestibility of amino acids in rumen-undegraded protein estimated using a precision-fed cecectomized rooster bioassay: II Distillers dried grains with solubles and fish meal. *J. Dairy Sci.* 92:6056–6067.
- Cao, Z.J., J.L. Anderson, and K.F. Kalscheur. 2009. Ruminal degradation and intestinal digestibility of dried or wet distillers grains with increasing concentrations of condensed distillers solubles. *J. Anim. Sci.* 87:3013–3019.
- Carvalho, L.P.F., D.S.P. Meloa, C.R.M. Pereira, M.A.M. Rodrigues, A.R.J. Cabrita, and A.J.M. Finseca. 2005. Chemical composition, *in vivo* digestibility, N degradability and enzymatic intestinal digestibility of five protein supplements. *Anim. Feed Sci. Technol.* 119:171–178.
- Castillo-Lopez, E., H.A. Ramirez-Ramirez, T.J. Klopfenstein, D. Hostetler, K. Karges, S.C. Fernando, and P.J. Kononoff. 2014. Ration formulations containing reduced-fat dried distillers grains with solubles and their effect on lactation performance, rumen fermentation and intestinal flow of microbial nitrogen in Holstein cows. *J. Dairy Sci.* 97:1578–1593.
- Diaz-Royón, F., A. Garcia, and K.A. Rosentrater. 2012. Composition of fat in distillers grains. *Agricultural and Biosystems Engineering Publications*, 391. http://lib.dr.iastate.edu/abe_eng_pubs/391.
- Engel, C.L., H.H. Patterson, and G.A. Perry. 2008. Effect of dried corn distillers grains plus soluble compared with soybean hulls, in late gestation heifer diets, on animal and reproductive performance. *J. Anim. Sci.* 86:1697–1708.
- Firkins, J.L., L.L. Berger, G.C. Fahey, Jr., and N.R. Merchen. 1984. Ruminal nitrogen degradability and escape of wet and dry distillers grains and wet and dry corn gluten feeds. *J. Dairy Sci.* 67:1936–1944.
- Foth, A.J., T. Brown-Brandt, K.J. Hanford, P.S. Miller, G. Garcia Gomex, and P.J. Kononoff. 2015. Energy content of reduced-fat dried distillers grains with solubles for lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 98:7142–7152.
- Funston, R.N. 2004. Fat supplementation and reproduction in beef females. *J. Anim. Sci.* 82(E Suppl.):E154–E161.
- Humer, E., and Q. Zebeli. 2015. Phytate in feed ingredients and potentials for improving the utilization of phosphorus in ruminant nutrition. *Anim. Feed Sci. Technol.* 209:1–15.
- Kalscheur, K.F. 2013. Use of low-fat DDGS in diets for lactating dairy cattle. *Proceedings 34th Western Nutrition Conference – Processing, Performance & Prot*, September 24–26, 2013, Saskatoon, SK., p. 139–145.
- Kalscheur, K.F., A.D. Garcia, D.J. Schingoethe, F. Diaz-Royón, and A.R. Hippen. 2012a. Feeding biofuels co-products to dairy cattle. In: *Biofuel Co-products as Livestock Feed – Opportunities and Challenges*. H.P.S. Makkar, ed. FAO, Rome, Italy. <http://www.fao.org/docrep/016/i3009e/i3009e00.htm> pp 115–153.
- Kalscheur, K.F., A.R. Hippen, and A.D. Garcia. 2012b. Feeding distillers grains products to dairy cattle. In: *Distillers Grains: Production, Properties and Utilization*,

- K. Liu and K.A. Rosentrater, eds. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 265–295.
- Kalscheur, K.F. 2005. Impact of feeding distillers grains on milk fat, protein and yield. Proc. Distillers Grains Technology Council, 9th Annual Symposium, Louisville, KY.
- Kelzer, J.M., P.J. Kononoff, L.O. Tedeschi, T.C. Jenkins, K. Karges, and M.L. Gibson. 2010. Evaluation of protein fractionation and ruminal and intestinal digestibility of corn milling co-products. *J. Dairy Sci.* 93:2803–2815.
- Kleinschmit, D.H., J.L. Anderson, D.J. Schingoethe, K.F. Kalscheur and A.R. Hippen. 2007a. Ruminal and intestinal degradability of distillers grains plus solubles varies by source. *J. Dairy Sci.* 90:2909–2918.
- Kononoff, P.J., S.K. Ivan and T.J. Klopfenstein. 2007. Estimation of the proportion of feed protein digested in the small intestine of cattle consuming wet corn gluten. *J. Dairy Sci.* 90:2377–2385.
- Kurokawa, Y., H. Shibata, S. Tateno, S. Kanada, K. Takaura, S. Ishida and H. Itabashi. 2013. Rumen fermentation, milk production and conjugated linoleic acid in the milk of cows fed high fiber diets added with dried distillers grains with solubles. *Anim. Sci. J.* 84:106–112.
- Li, C., J.Q. Li, W.Z. Yang and K.A. Beauchemin. 2012. Ruminal and intestinal amino acid digestion of distiller's grain vary with grain source and milling process. *Anim. Feed Sc. Technol.* 175:121–130.
- MacDonald, J.C. T.J. Klopfenstein, G.E. Erickson and W.A. Grifn. 2007. Effect of dried distillers grains and equivalent undegradable intake protein or ether extract on performance and forage intake of heifers grazing smooth bromegrass pastures. *J. Anim. Sci.* 85:2614–2624.
- Manthey, A.K., and J.L. Anderson. 2017. Feeding peripubertal dairy heifers diets high in distiller's grains with varying forage-to-concentrate ratios. *J. Dairy Sci.* 100(Suppl. 1):183 (Abstr.)
- Manthey, A.K., J.L. Anderson, G.A. Perry and D.H. Keisler. 2017. Feeding distillers dried grains in replacement of forage in limit-fed dairy heifer rations: Effects on metabolic prole and onset of puberty. *J. Dairy Sci.* 100:2591–2602.
- Manthey, A.K., J.L. Anderson and G.A. Perry. 2016. Feeding distillers dried grains in replacement of forage in limit-fed dairy heifer rations: Effects on growth performance, rumen fermentation and total-tract digestibility of nutrients. *J. Dairy Sci.* 99:7206–7215.
- Manthey, A.K., and J.L. Anderson. 2016. Growth performance of dairy heifers limit-fed distillers dried grains with ad libitum forage. *J. Dairy Sci.* 99(E-Suppl. 1):680–681 (Abstr.)
- Martin, J.L., A.S. Cupp, R.J. Rasby, Z.C. Hall and R.N. Funston. 2007. Utilization of dried distillers grains for developing beef heifers. *J. Anim. Sci.* 85:2298–2303.
- Martinez-Amezcuca, V., C.M. Parson and S.L. Noll. 2004. Content and relative bioavailability of phosphorus in distillers dried grains with solubles in chicks. *Poult. Sci.* 83:971–976.
- Mjoun, K., K.F. Kalscheur, A.R. Hippen and D.J. Schingoethe. 2010a. Rumen degradability and intestinal digestibility of protein and amino acids in soybean and corn distillers grains products. *J. Dairy Sci.* 93:4144–4154.
- Mjoun, K., K.F. Kalscheur, A.R. Hippen and D.J. Schingoethe. 2010b. Performance and amino acid utilization of early lactation dairy cows fed regular or reduced-fat dried distillers grains with solubles. *J. Dairy Sci.* 93:3176–3191.
- Mjoun, K., K.F. Kalscheur, A.R. Hippen, D.J. Schingoethe, and D.E. Little. 2010c. Lactation performance and amino acid utilization of cows fed increasing amounts of reduced-fat dried distillers gains with solubles. *J. Dairy Sci.* 93:288–303.
- Mjoun, K., K.F. Kalscheur, A.R. Hippen and D.J. Schingoethe. 2008. Ruminal phosphorus disappearance from corn and soybean feedstuffs. *J. Dairy Sci.* 91:3938–3946.
- NASS (National Agricultural Statistics Service). 2007. Ethanol Co-Products Used for Livestock Feed. U.S. Agricultural Statistics Board, U.S. Department of Agriculture.
- NRC. 2001. Nutrient Requirements of Dairy Cattle. 7th Rev. Ed. National Academy of Science, Washington, DC.

- Nuez-Ortín, W.G., and P. Yu. 2011. Using the NRC chemical summary and biological approaches to predict energy values of new co-product from bioethanol production for dairy cows. *Anim. Feed Sci. Technol.* 170:165–170.
- Nyoka, R. 2010. Fat and rumen undegradable protein for grazing cows: Effect on composition of milk and quality of cheese. Master's thesis, South Dakota State University, Brookings.
- Oba, M.G.B., T.D. Penner, T.D. Whyte and T.D. Wierenga. 2010. Effects of feeding triticale dried distillers grains plus solubles as a nitrogen source on productivity of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 93:2044–2052.
- Owens, F. 2009a. Nutrition & Health: Dairy. Cattle nutritionists. *Feedstuffs*, p.22–25.
- Owens, T.M. 2009b. Risk of milk fat depression for dairy cows fed high moisture corn and distillers grains in diets containing monensin. Ph.D. Thesis, South Dakota state University, Brookings.
- Paz, H.A., and P.J. Kononoff. 2014. Lactation responses and amino acid utilization of dairy cows fed low-fat distillers dried grains with solubles with or without rumen-protected lysine supplementation. *J. Dairy Sci.* 97:6519–6530.
- Paz, H.A., M.J. de Veth, R.S. Ordway and P.J. Kononoff. 2013. Evaluation of rumen-protected lysine supplementation to lactating dairy cows consuming increasing amounts of distillers dried grains with solubles. *J. Dairy Sci.* 96:7210–7222.
- Pereira, A.B.D., L.K. Zeringue, C. Leonardi, B.F. Jenny, C.C. Williams, M.E. McCormick and V.R. Moreira. 2015. Short communication: Substituting dry distillers grains with solubles and rumen-protected amino acids for soybean meal in late-lactation cows' diets based on corn silage or ryegrass silage. *J. Dairy Sci.* 98:8121–8127.
- Ramirez-Ramirez, H.A., K.J. Harvatine and P.J. Kononoff. 2016a. Short communication: Forage particle size and fat intake affect rumen passage, the fatty acid profile of milk and milk fat production in dairy cows consuming dried distillers grains with solubles. *J. Dairy Sci.* 99:392–398.
- Ramirez-Ramirez, H.A., E. Castillo Lopez, C.J.R. Jenkins, N.D. Aluthge, C. Anderson, S.C. Fernando, K.J. Harvatine and P.J. Kononoff. 2016b. Reduced-fat dried distillers grains with solubles reduces the risk for milk fat depression and supports milk production and ruminal fermentation in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 99:1912–1928.
- Ranathunga, S.D. K.F. Kalscheur, A.R. Hippen and D.J. Schingoethe. 2010. Replacement of starch from corn with nonforage fiber from distillers grains and soyhulls in diets of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 93:1086–1097.
- Robinson, P.H., N. Swanepoel, I. Shinzato and S.O. Juchem. 2011. Productive responses of lactating dairy cattle to supplementing high levels of ruminally protected lysine using a rumen protection technology. *Anim. Feed Sci. Technol.* 168:30–41.
- Rodriguez-Hernandez, K., J.L. Anderson and M.A. Berhow. 2017. Preference of carinata meal compared with other oilseed meals and distiller's dried grains by dairy heifers. *J. Dairy Sci.* 100(Suppl. 1):178 (Abstr.).
- Sasikala-Appukuttan, A.K., A.R. Hippen, K.F. Kalscheur, K. Karges, M.L. Gibson. 2008. The Feeding Value of Corn Distillers Solubles for Lactating Dairy Cows. *J. Dairy Sci.* 91:279–287.
- Schingoethe, D.J., K.F. Kalscheur, A.R. Hippen and A.R. Garcia. 2009. The use of distillers products in dairy cattle diets. *J. Dairy Sci.* 92:5802–5813.
- Schmit, T.M., R.N. Boisvert, D. Enahoro and L.E. Chase. 2009. Optimal dairy farm adjustments to increase utilization of corn distillers dried grains with solubles. *J. Dairy Sci.* 92:6105–6115.
- Suarez-Mena, F.X., G.J. Lascano, D.E. Rico and A.J. Heinrichs. 2015. Effect of forage level and replacing canola meal with dry distillers grains with solubles in precision-fed heifer diets: Digestibility and rumen fermentation. *J. Dairy Sci.* 98:8054–8065.
- Swanepoel, N., P.H. Robinson and L.J. Erasmus. 2010a. Amino acid needs of lactating dairy cows: Impact of feeding lysine in a ruminally protected form on productivity of lactating dairy cows. *Anim. Feed Sci.*

- Technol. 157:79–94.
- Swanepoel, N., P.H. Robinson and L.J. Erasmus. 2010b. Amino acid needs of lactating dairy cows: Predicting limiting amino acids in contemporary rations fed to high producing dairy cattle in California using metabolic models. *Anim. Feed Sci. Technol.* 161:103–120.
- Talavera, F., C.S. Park and G.L. Williams. 1985. Relationships among dietary lipid intake, serum cholesterol and ovarian function in Holstein heifers. *J. Anim. Sci.* 60:1045–1051.
- Tang, S.C., I. Zulki-i, M. Ebrahimi, A.R. Alimon, A.F. Soleimani and K. Filer. 2011. Effects of feeding different levels of corn dried distillers grains with solubles on growth performance, carcass yield and meat fatty acid composition in broiler chickens. *Intl. J. Anim. Vet. Adv.* 3:205–211.
- Testroet, E.D., G. Li, D.C. Beitz and S. Clark. 2015. Feeding dried distillers grains with solubles affects composition but not oxidative stability of milk. *J. Dairy Sci.* 98:2908–2919.
- Thomas, M.G., B. Bao and G.L. Williams. 1997. Dietary fats varying in their fatty acid composition differentially influence follicular growth in cows fed isoenergetic diets. *J. Anim. Sci.* 75:2512–2519.
- Vander Pol, K.J., M.K. Luebke, G.I. Crawford, G.E. Erickson and T.J. Klopfenstein. 2009. Performance and digestibility characteristics of finishing diets containing distillers grains, composites of corn processing coproducts or supplemental corn oil. *J. Anim. Sci.* 87:639–652.
- Whelan, S.J., W. Carey, T.M. Boland, M.B., Lynch, A.K. Kelly, G. Rajauria and K.M. Pierce. 2017. The effect of by-product inclusion level on milk production, nutrient digestibility and excretion and rumen fermentation parameters in lactating dairy cows offered a pasture-based diet. *J. Dairy Sci.* 100:1055–1062.
- Yildiz, E., and N. Todorov. 2014. The comparison of the main protein sources for dairy cows. A review. *Bulgarian J. Agricult. Sci.* 20:428–446.

18 章: ブロイラーおよび産卵鶏における低脂肪 DDGS

はじめに

トウモロコシ DDGS は、ブロイラーや産卵鶏用飼料における優れた飼料原料である。ブロイラーや産卵鶏用飼料を設計する場合の DDGS のエネルギーと栄養価に関するいくつかの総説が公表されている (Waldroup ら 2007; Choi ら、2008; Swiatkiewicz and Korelski、2008; Bregendahl、2008; Salim ら、2010; El-Hack ら、2015) が、これらは一般的に粗脂肪含量が 10% 以上の高脂肪 DDGS に関する数値で、粗脂肪含量が 10% 未満の低脂肪 DDGS には適用できない。幸いなことに、この 7 年間にかなりの量の研究が行われ、粗脂肪含量が異なる DDGS の AMEn (窒素補正した見かけの代謝エネルギー) 価と可消化アミノ酸含量が明らかになっている。この章では、これらの最近の研究成果を要約した。エネルギー価と栄養成分組成のデータおよびそれらを推定するために使用される予測式は、最も新しい代表的な米国産トウモロコシ DDGS に対するものであり、DDGS を含むブロイラーおよび産卵鶏用の飼料を精密に設計するために必要不可欠である。

トウモロコシ DDGS は、家禽におけるトウモロコシのエネルギー価の約 85% を含み、可消化必須アミノ酸含量が適切で、利用可能なリン含量が高い。ブロイラーと産卵鶏用飼料では、最小限のエネルギーとアミノ酸補正を行うだけで、最大 10% 量の DDGS を配合することが出来る。Swiatkiewicz and Korelski (2008) は、10 年前に公表した総説において、DDGS は家禽用飼料原料として利用出来、ブロイラー前期用飼料では 5~8%、後期用飼料では 12~15% の範囲で安全に使用できると結論付けている。ただし、これらは控えめな値であり、可消化アミノ酸含量ではなく、総アミノ酸含量を基に設計している。最近の研究 (Shim ら、2011; Loar ら、2010; Masa'deh ら、2011) では、家禽用飼料では、DDGS をより多く (例えば、20% 以上) 配合可能であることを示している。正確なエネルギー価と可消化アミノ酸含量を把握することは、DDGS を配合する際に必須である。

低脂肪 DDGS の家禽におけるエネルギーと可消化成分

エネルギーは家禽用飼料において、飼料価格に占める割合が最も高く、次いで、アミノ酸とリンの価格が高い。したがって、家禽に供給する DDGS の正確な AMEn 価、可消化アミノ酸および有効または可消化リン含量を知ることが、発育・産卵成績や鶏肉と鶏卵の品質に影響を与えずに、配合量を最大化し、飼料価格を最小化するために最も重要な要因である。AMEn 価、可消化アミノ酸含量および有効リン含量が DDGS の供給源によって異なっていることが多くの文献により示されている。世界で最も成功している家禽のインテグレーターは、精密栄養のアプローチを用いて、AMEn 価または TME (真の代謝エネルギー) 価、SID (標準化された回腸消化率) に基づく可消化アミノ酸含量および標準化された全消化管消化率または利用可能なリン含量に基づいて飼料設計を行っている。供給源間で DDGS の栄養成分組成にバラツキがあるため、過去の公開データにはなく、AMEn 価および可消化アミノ酸とリンの含量の推定値を使用する必要がある。この章では、予測式を使用して AMEn 価、SID アミノ酸含量および有効リン含量を推定するための最先端のアプローチについて説明しているが、これらのアプローチは、様々な米国産トウモロコシ DDGS を評価する際に、配合に要する経費と栄養的な価値について経済的に判断する際に使用する必要がある。これらの予測式を使用することで、飼料配合時に重要なポイントとなるこの変数の正確な推定値が得られ、ブロイラーの発育成績と枝肉特性および産卵成績と鶏卵の品質を許容可能なレベルに保ちながら、DDGS を比較的多く配合することにより飼料価格を大幅に節減することが出来る。

飼料原料の栄養価を正確に知ることは、経済的価値を考える際に不可欠である。これには、DDGS を配合した飼料のコストを最小とするために許容可能な最大価格や、最大配合割合を含んでいる。Tahir and Pesti (2012b) は、正確な飼料原料の可消化アミノ酸含量に関するデータベースを使用することにより、年間約 1 億 6,000 万ドル

の飼料費を節減することが出来るとしている。配合設計における線形計画モデルの使用は、栄養成分の要求量を充足させるための各飼料原料の制限値(最小および最大配合率)を設定することで、飼料価格を最小限にする配合設計が得られるため、広く利用されている。さらに、ほとんどの市販のソフトウェアは、感度分析(Sensitivity Analysis: 条件や数値の変化から、最適な答えの変動を分析する手法)または「シャドウプライシング」の機能を持っており、個々の飼料原料について使用可能な最高価格を決定できる。このアプローチを用いることで、原料価格とその原料の様々な配合割合に基づく使用曲線を作成出来る。

AMEn 価の予測

NRC(家禽1994)では、DDGSのAMEn価は2,667 kcal/kgであり、TMEn(窒素補正した真の代謝エネルギー)価は3,330 kcal/kg(いずれも乾物)であるとしている。しかし、これらの数値は、20年以上前に製造されていた粗脂肪含量が10%以上の高脂肪DDGSのものである。現在の低脂肪DDGSの成分組成は、当時のものとは大幅に異なっており、DDGS中の粗脂肪含量とAMEn価を調査した3報が最近公表されている(表1)。

Rochellら(2011)による報告では、DDGSの平均AMEn価は2,678 kcal/kg(乾物)であり、NRC(1994)の値と差がなかったが、この報告には、粗脂肪含量が10%未満の低脂肪DDGSが1試料しか含まれておらず、この試料のAMEn価は著しく低い(表1)。従来の高脂肪性DDGSのAMEn価は、2,593~3,098 kcal/kg(乾物)であって、粗脂肪含量がほぼ同じDDGS間での差は505 kcal/kgだった。この研究では評価したDDGSは6試料のみであって、AMEn価はGE(総エネルギー)、粗脂肪、CP(粗たん白質)、でん粉、粗灰分およびADF(酸性デタージェント繊維)含量との間には相関は認められなかったが、TDF(総食物繊維)およびNDF(中性デタージェント繊維)とは負の相関が認められた(r (相関係数)は、-0.77 および-0.83)。このことは、DDGSのAMEn価には、粗脂肪含量よりも繊維含量が密接に関連していることを示している。

その後の研究で、Melocheら(2013)は、粗脂肪含量が10%未満の低脂肪DDGSを6試料含む計15試料のDDGSについての調査を行い、平均AMEn価は2,309

kcal/kg(乾物)であり、NRC(1994)の値よりも358 kcal/kg(乾物)低かった(表1)。さらに、AMEn価の範囲は1,869~2,824 kcal/kg(乾物)であって、供給源間の差Rochellら(2011)の報告より大きかった。AMEn価と、GE含量は正の相関を示し($r=0.69$)、TDF、NDFおよびADFとは、それぞれ負の相関を示した($r=-0.56$ 、 -0.52 、 -0.52)。粗脂肪、CP、でん粉および灰分との相関は見られなかった。これらの結果は、Rochell(2011)らによる報告と一致しており、DDGSの繊維含量は粗脂肪含量よりもAMEn価と密接に関連していることを示している。さらに、これらのデータは、DCO(ジステラース・コーン油)抽出に伴うDDGSの粗脂肪含量の低下と、CPおよび繊維含量の増加による影響とは考えられないことを示している。したがって、この2報の結果は、DDGSのAMEn価を予測する際の因子として粗脂肪含量が適していないことを示している。

3つ目の報告はMelocheら(2014)によるもので、評価したDDGS15試料の平均AMEn価は2,764 kcal/kg(乾物)であり、NRC(1994)の値より97 kcal/kg(乾物)高い(表1)。これらの3報のデータから、粗脂肪含量が異なるDDGSのAMEn価の範囲は、1,869~3,634 kcal/kg(乾物)であった。このような供給源間における大きなバラツキは、実際の飼料設計にあたって、NRC(1994)などで公表されている値を用いることが出来ないことを示している。Melocheら(2013)は、DDGSの成分組成分析値を用いて最適なAMEn価の予測式を開発している:

$$\text{AMEn(kcal/kg)} = -12,282 + (2.60 \times \text{GE, kcal/kg}) - (40.67 \times \text{TDF, \%}) + (89.75 \times \text{CP, \%}) + (125.80 \times \text{でん粉, \%}) \quad (\text{いずれも乾物}) \quad R^2 = 0.86$$

この予測式は非常に正確(R^2 (決定係数)=0.86)であるが、GE、TDFおよびでん粉含量は、一般に民間の受託分析機関では測定できないことが多い。このため、彼らは、TDFの代わりにNDFを使用する代替予測式を開発した。

$$\text{AMEn(kcal/kg)} = -14,322 + (2.69 \times \text{GE, kcal/kg}) + (117.08 \times \text{CP, \%}) + (149.41 \times \text{でん粉, \%}) - (18.30 \times \text{NDF, \%}) \quad (\text{いずれも乾物}) \quad R^2 = 0.88$$

この予測式は、最初の予測式に比べて精度がわずかに向上しているが、依然として民間の受託分析機関で分

表 1. 粗脂肪含量が異なる DDGS の総エネルギー、AMEn および成分組成(乾物) (Rochell ら、2011; Meloche ら、2013; Meloche ら、2014 から改編)

Rochell et al. (2011)									
DDGS	GE kcal/kg	AMEn kcal/kg	粗脂肪%	CP %	TDF %	NDF %	ADF %	でん粉%	灰分%
4	5,547	3,098	11.7	29.5	35.9	33.4	8.6	4.9	5.4
1	5,434	2,685	10.2	31.9	35.7	40.1	14.4	6.2	4.5
5	5,375	2,593	10.9	29.7	38.1	40.1	10.6	3.5	4.4
3	5,314	2,628	11.5	29.6	30.3	34.6	11.3	7.9	4.2
6	5,174	2,903	11.5	26.5	32.7	27.7	9.8	3.3	4.5
2	5,076	2,146	3.2	34.7	37.2	51.0	15.8	3.0	5.2
Meloche et al. (2013)									
15	5,167	2,687	13.2	30.6	32.4	34.0	9.9	1.3	5.3
14	5,130	2,824	11.8	32.1	33.5	38.9	13.3	1.1	4.9
12	5,077	2,074	11.3	27.7	37.8	44.0	14.0	1.8	4.4
11	5,075	2,418	11.1	29.7	33.9	36.5	12.1	3.9	4.3
9	5,066	2,273	10.8	29.7	35.3	38.6	13.9	1.6	4.6
10	5,043	2,012	10.8	31.0	35.7	38.9	12.9	0.9	4.9
3	5,022	2,487	6.3	28.9	28.5	27.0	8.2	3.3	5.2
13	5,008	2,032	11.5	26.5	32.7	27.7	9.8	3.3	4.5
2	4,990	2,551	4.2	27.9	30.5	27.3	7.7	3.7	4.8
5	4,963	2,401	9.6	30.1	30.8	33.3	10.5	3.4	4.9
6	4,963	2,526	9.7	29.8	31.3	28.8	10.3	2.8	5.0
7	4,948	2,309	10.0	32.3	33.9	35.9	13.7	1.0	5.3
8	4,938	2,068	10.1	30.3	33.9	38.2	12.5	2.2	5.0
4	4,897	2,103	8.6	32.9	32.5	35.7	13.4	0.8	5.1
1	4,678	1,869	3.2	34.7	37.2	51.0	15.8	3.0	5.2
Meloche et al. (2014)									
1	5,254	3,634	13.3	29.7	31.5	38.3	11.5	2.5	4.8
10	5,254	3,120	14.3	33.0	26.5	32.8	12.1	4.0	4.6
6	5,194	2,535	11.4	29.8	32.1	27.8	8.6	4.7	5.5
15	5,154	3,137	11.6	30.7	33.6	33.0	8.2	6.7	5.0
8	5,148	2,640	8.2	34.1	30.5	37.1	13.2	4.0	5.1
2	5,139	2,553	10.4	32.0	31.6	38.5	12.1	2.3	4.7
11	5,098	3,111	12.0	28.4	28.1	38.1	10.7	10.0	4.6
3	5,061	2,869	9.1	31.6	31.1	39.6	11.6	3.8	5.4
14	5,052	2,644	8.8	28.5	36.6	37.1	9.7	5.9	5.4
4	5,009	2,781	8.0	30.6	32.4	31.0	8.9	4.9	5.6
5	4,978	2,523	7.0	32.2	32.8	31.1	8.6	4.4	5.5
9	4,951	2,461	10.7	32.7	29.2	43.8	14.8	8.1	4.7
13	4,934	1,975	6.1	30.3	31.4	32.9	9.2	4.9	5.4
12	4,884	2,581	5.9	32.3	31.7	34.6	9.4	6.0	5.6
7	4,841	2,903	5.0	34.2	29.3	31.4	8.8	5.6	5.6

析が比較的困難な GE とでん粉含量を必要としている。このため、Meloche ら(2014)は、粗脂肪含量が 5.0~14.2%(乾物)の DDGS 15 試料の AMEn 価を測定して、

Rochell ら(2011)および Meloche ら(2013)による AMEn 予測式の検証を行った。この予測式における変数には、前述と同様に、民間の受託分析機関でのデータ取得が

困難な GE および TDF 値を用いているが、非常に精度が高い ($R^2 = 0.92$)。

$$\text{AMEn (kcal/kg)} = 2,655 - (18.29 \times \text{NDF, \%}) + (44.14 \times \text{粗脂肪, \%}) + (0.21 \times \text{GE, kcal/kg}) - (10.91 \times \text{TDF, \%}) - (91.08 \times \text{粗灰分, \%}) \quad R^2 = 0.92 \quad \text{正確度: 321 kcal/kg (いずれも乾物)}$$

一般的に測定可能な成分分析値しか利用できない場合には、以下の予測式を使用できるが、精度が低く ($R^2 = 0.70$)、前の式よりも正確度 (457 kcal/kg) が低下する。

$$\text{AMEn (kcal/kg)} = 3,673 - (121.35 \times \text{粗繊維, \%}) + (55.29 \times \text{粗脂肪, \%}) - (121.08 \times \text{粗灰分, \%}) \quad \text{(いずれも乾物)}$$

このような予測式を使用した DDGS の AMEn 価を逐次推定するアプローチとは別に、鶏の消化機構をコンピュータでシミュレーションすることでエネルギー価を推定する手法が中国の飼料業界で使用されている Zhao ら (2014)。この手法を用いると、トウモロコシ DDGS を含む 26 種類の飼料原料のうち 17 種類で正確な AME および TME 価を推定できる。

アミノ酸含量および可消化アミノ酸の推定

各飼料原料中の正確な総アミノ酸含量および可消化アミノ酸含量に関するデータベースを選ぶことも、家禽において最適な成績を得るための飼料原料の経済的な価値を把握するために不可欠である。NRC (1994) の値は長年広く使用されているが、特に DDGS の場合、過去 23 年間でエネルギーと栄養成分の含量と消化率が劇的に変化していることから、古いデータを用いることで問題が生じる。

各飼料原料の可消化アミノ酸含量に基づく配合設計は、総アミノ酸含量に基づく配合設計に比べて、ブロイラーの増体量、飼料摂取量および枝肉特性を改善できる (Rostagno ら、1995; Fernandez ら、1995)。多くの家禽の栄養学者は、雄鶏を用いた試験から得られたアミノ酸消化率の値が様々な種類の家禽 (ブロイラー、産卵鶏、アヒル、七面鳥) 間で類似していると考えているが、Tahir and Pesti (2012a) は、この考えは正しくないと主張しており、雄鶏の試験により得られたアミノ酸消化率は、ブロイラー雛を用いて測定した 20 種類の飼料原料の可消化ア

ミノ酸含量より 6~14% 高いと報告している。

味の素ハートランド (Ajinomoto Heartland、イリノイ州シカゴ) とエボニックデグサ (Evonik Degussa、ドイツ) は、家禽で用いられている多くの飼料原料中の可消化アミノ酸含量に関する包括的なデータベースを開発している。両データベースの際立った違いは、味の素の値は雄鶏を用いた試験から得られたものであり、エボニックの値はブロイラー雛を用いた試験から得られたものであることである。その結果、DDGS の可消化リジン (0.60 vs 0.56%)、メチオニン (0.47 vs 0.44%)、TSAA (全含硫アミノ酸、1.07 vs 1.00%)、およびトレオニン (0.72 vs 0.71%) は、いずれも味の素の値がエボニックの値より高くなっている。家禽のアミノ酸消化率を求める際に、雄鶏およびブロイラー雛を用いる手法の両方が広く使用されているにも関わらず、様々な年齢の家禽およびその系統における発育成績に対する、両手法から得た消化率の値を使用した際の正確性についてはまだ明らかになっていない (Tahir and Pesti, 2012b)。ブロイラー、七面鳥および産卵鶏における DDGS の経済的価値をより理解するために、Tahir and Pesti (2012b) は、一般的な市販配合飼料における味の素およびエボニックのデータベースからの可消化アミノ酸含量を使用した場合の比較を行っている (表 2)。この比較から、いくつかの重要なポイントがあることがわかる。

1. 2009 年における飼料原料の平均価格を使用すると、ブロイラー、七面鳥および産卵鶏用のすべての配合飼料に DDGS を配合した場合のシャドウコストは、DDGS の購入価格を 65.9~139.5 ドル/トン上回っている。これは、DDGS の家禽用飼料原料としての実際の価値は市場価格よりはるかに高いことを示している。
2. エボニックの可消化アミノ酸含量データベースを使用した場合、七面鳥後期用飼料および産卵前の産卵鶏用飼料を除き、DDGS のシャドウコストは味の素のデータベースを使用した場合より 0.2~6.4 ドル/トン高くなった。この差は、エボニックのデータベースにおける DDGS の可消化アミノ酸含量が低いためであり、シャドウプライシングに基づいて DDGS の購入を決定する際に、正確な

表 2. ブロイラー、七面鳥および産卵鶏用飼料における DDGS の市場価格とシャドウコスト(Tahir and Peski, 2012b から改編)

飼料原料	\$/MT	ブロイラー前期 (Ross)		ブロイラー後期 (Cobb)		七面鳥前期 (Nicholas)		七面鳥後期 (British United Tukey Males)		レグホン種産卵前 (ISA North America)		レグホン種産卵ピーク期 (Hy-Line)	
		Alin.	Evo.	Alin.	Evo.	Alin.	Evo.	Alin.	Evo.	Alin.	Evo.	Alin.	Evo.
トウモロコシ	170	58.41	56.17	71.96	71.20	39.48	36.42	81.22	81.17	59.40	59.16	56.08	54.40
大豆粕	396	36.37	38.23	21.92	22.54	49.85	52.39	14.80	14.80	20.69	21.25	27.98	29.41
ホートミドリ ングス	265	-	-	-	-	-	-	-	-	13.88	13.55	-	-
家禽油脂	487	2.00	2.33	2.70	2.78	5.57	6.03	1.00	1.00	-	-	4.04	4.29
L-リジン	1,666	0.17	0.19	0.18	0.19	0.33	0.35	0.18	0.19	-	-	-	-
DL-メチオニン	3,721	0.30	0.32	0.19	0.22	0.37	0.40	0.18	0.20	0.15	0.15	0.18	0.21
L-トレオニン	2,485	0.06	0.08	-	-	0.07	0.09	-	-	-	-	-	-
炭酸カルシウム	45	0.65	0.65	0.68	0.68	0.73	0.73	0.61	0.61	3.90	3.90	9.08	9.08
リン酸二石灰	646	1.70	1.68	2.09	2.08	3.34	3.32	1.41	1.41	1.67	1.66	2.26	2.25
食塩・ビタミン・ ミネラル・ プレミックス	-	0.36	0.36	0.33	0.33	0.27	0.27	0.67	0.67	0.32	0.32	0.37	0.37
飼料価格 \$/トン		283.5	290.3	249.7	252.6	338.1	347.4	224.6	225.7	241.7	242.8	255.2	260.2
DDGSの市場価格 \$/トン	154												
DDGSのシャドウ コスト\$/トン		221.4	226.7	240.6	240.8	219.9	225.2	236.3	227.6	293.5	291.5	233.8	240.2
DDGSの市場価格 とシャドウ コストとの差 \$/トン		67.4	72.7	86.6	86.8	65.9	71.2	82.3	73.6	139.5	137.5	79.8	86.2

Alin.= Ajinomoto, Evo.= Evonik

可消化アミノ酸含量を使用する際の重要性を示している。

3. DDGS のシャドウコストは、高価格の飼料(七面鳥前期用飼料)の方が低価格の飼料(七面鳥後期用飼料)に比べて必ずしも高いとは限らない。
4. DDGS のシャドウコストは、家禽の種類やステージによって異なるが、産卵前の産卵鶏用飼料で最も高く、七面鳥用前期用飼料で最も安い。ブロイラーと七面鳥における DDGS の経済的価値は、前期用飼料よりも後期用飼料で高くなる。
5. エボニックのデータベースを使用する場合、DDGS の市場価格が 221.40~226.70 ドル/トンであれば、ブロイラー前期用飼料に 7~17%配合す

ることが出来るが、味の素のデータベースを使用した場合、DDGS の市場価格が 221.40ドル/トン未満の場合でいか使用できない。このことは、DDGS の価値を評価して家禽用飼料を設計する際、DDGS の可消化アミノ酸含量の正確な値を使用することの重要性がよりわかる。

6. ブロイラー前期用飼料において DDGS の配合割合をさらに高める場合(20~24%)には、DDGS の市場が 211.10~191.20 ドル/トンの場合、経済的に使用することが出来る。これは、DDGS の価格が他の競合する飼料原料の価格と比較して安価となった場合に、DDGS をより多く配合できることを示している。

表 3. 粗脂肪含量が異なる DDGS のアミノ酸含量、AID(見かけの回腸消化率)と AIDAA(見かけの回腸可消化アミノ酸)含量(Dozier ら、2015 から改編)

栄養成分 %	粗脂肪10.5% DDGS			粗脂肪7.9% DDGS			粗脂肪5.4% DDGS		
	含量	AID	AID AA	含量	AID	AID AA	含量	AID	AID AA
水分	9.3	-	-	10.6	-	-	10.3	-	-
CP	27.9	-	-	27.6	-	-	29.2	-	-
アルギニン	1.25	79.9	1.00	1.35	77.6	1.05	1.32	76.2	1.00
シスチン	0.55	68.4	0.37	0.57	62.9	0.36	0.52	62.0	0.32
ヒスチジン	0.76	75.0	0.57	0.78	71.2	0.56	0.81	72.1	0.58
イソロイシン	1.05	73.3	0.77	1.05	69.8	0.73	1.13	70.2	0.79
ロイシン	3.40	83.5	2.84	3.27	80.1	2.62	3.54	80.3	2.84
リジン	0.81	55.2	0.45	0.87	51.0	0.44	0.89	50.4	0.45
メチオニン	0.55	79.1	0.43	0.64	77.8	0.50	0.54	72.2	0.39
フェニルアラニン	1.43	79.9	1.15	1.41	76.7	1.09	1.53	76.8	1.18
トレオニン	1.08	61.2	0.66	1.11	56.6	0.63	1.16	56.3	0.65
トリプトファン	0.29	76.7	0.15	0.22	73.3	0.16	0.20	70.8	0.14
バリン	1.43	73.3	1.05	1.45	69.9	1.01	1.52	70.1	1.07

7. プロイラー後期では、前期よりも、可消化アミノ酸の飼料中要求量が低くなっている。その結果、データベース間での可消化アミノ酸含量の差は、可消化アミノ酸含量が比較的低い飼料では、可消化アミノ酸含量が高い飼料に比べて、それほど重要ではなく、最終的には DDGS のシャドウコストと配合割合の違いに影響している。

多くの家禽の栄養学者は、DDGS の粗脂肪含量が低下すると、CP とアミノ酸含量が増加すると考えているが、DDGS の粗脂肪による組成の変化には一貫性は見られず(表 3)、正しい考えとは言えない。例えば、粗脂肪含量の低下に伴い、リジンとトレオニンは増加傾向を示すが、トリプトファンは減少し、粗脂肪含量が 5.4% の DDGS のメチオニン含量は粗脂肪含量が 10.5% の DDGS と差がなかった(表 3)。低脂肪 DDGS におけるリジン、メチオニン、トレオニンおよびトリプトファンの AID(見かけの回腸消化率)は、粗脂肪含量が 10.5% の DDGS に比べて低かった。この結果は、DDGS の粗脂肪含量が家禽における一部のアミノ酸の消化率に影響を及ぼす可能性を示唆している(Dozier ら、2015)。ただし、アミノ酸含量と消化率の複合的な変化を考慮すると、可消化リジンおよびトレオニン含量には影響がなく、可消化メチオニンおよびトリプトファン含量の差にも一貫性がある影響はな

かった。これらの結果は、いくつかのアミノ酸の消化率が低下したとしても、低脂肪 DDGS の可消化アミノ酸含量は高脂肪 DDGS と大きく異なることを示している。ただし、アミノ酸含量の変化と粗脂肪含量を用いて DDGS 中の可消化アミノ酸含量を逐次把握しておく必要がある。

Adedokun ら(2015)は、DDGS 5 試料について、プロイラー(21 日齢、Ross 708)および産卵鶏(30 週齢、Hy-Line W36)におけるアミノ酸の SID(標準化された回腸消化率)を測定した。供試した DDGS の粗脂肪含量は 8.25~9.79% であり、乾物と CP の AID およびアミノ酸の SID の範囲は表 4 に示したとおりである。産卵鶏における DDGS の乾物、CP および必須アミノ酸の AID の差の平均は 9.9% で、有意な変動とはみなされなかった。予想されたように、リジンの SID の変動が最も大きく(41.3~56.5%)、次いで、シスチン(56.8~69.0%)、メチオニン(67.9~78.6%)、バリン(55.8~66.5%)の変動が大きかった。DDGS における各アミノ酸の SID の変動は、プロイラーの方が小さく、差の平均は 7.1% だったが、プロイラーにおいても SID の変動が最も大きいのはリジン(49.9~63.3%)であり、以下、イソロイシン(67.8~76.8%)、バリン(68.5~75.9%)、トレオニン(61.7~69.0%)、メチオニン(77.7~85.0%)であった。プロイラーにおけるリジンお

表 4. 5 試料のトウモロコシ DDGS における乾物と CP の AID(見かけの回腸消化率)とアミノ酸の SID(標準化された回腸消化率)の範囲(Adedokun ら、2015 から改編)

栄養成分 %	産卵鶏	ブロイラー
乾物	40.8 – 50.5	42.2 – 51.1
CP	59.6 – 68.3	72.2 – 78.2
アルギニン	66.0 – 74.7	76.0 – 82.6
シスチン	56.8 – 69.0	71.6 – 76.5
ヒスチジン	63.7 – 70.5	70.4 – 75.8
イソロイシン	59.6 – 68.5	67.8 – 76.8
ロイシン	72.1 – 80.3	81.8 – 86.0
リジン	41.3 – 56.5	49.9 – 63.3
メチオニン	67.9 – 78.6	77.7 – 85.0
フェニルアラニン	71.4 – 78.0	77.2 – 82.5
トレオニン	52.8 – 63.8	61.7 – 69.0
バリン	55.8 – 66.5	68.5 – 75.9

よびメチオニンの SID は、産卵鶏より 8.2 および 7.4%高かった。これらの結果は、産卵鶏用飼料に DDGS を配合する場合は、ブロイラーとは異なる SID を使用する必要があること、家禽における DDGS の SID アミノ酸含量を推定するためには正確な方法が必要であることを示唆している。さらに、これらの推定値は、産卵鶏に対して最初に DDGS を給与した際の推定値を用いており、産卵鶏用飼料を精密に設計する際に用いるべきである。

DDGS では、供給源間で可消化アミノ酸含量の変動が大きく、可消化アミノ酸含量を逐次推定する必要があるため、Zhu ら(2017)は、トウモロコシ DDGS と小麦 DDGS の家禽における SID アミノ酸含量の予測式を導くために、19 報の公表文献からの 86 のデータについてメタ分析を行った。これらの公表文献におけるトウモロコシ DDGS の成分組成の平均と変動係数は表 5 に示したとおりである。リジン含量は、DDGS 間での変動が最も大きかった。SID は、ロイシン(85.0%)とトリプトファン(84.5%)が高く、リジン(62.7%)が最も低かった(表 6)。トウモロコシ DDGS における SID アミノ酸含量の平均、範囲および標準偏差(%)は表 7 に示したとおりである。

アミノ酸含量は予測に最も充当な変数であり、試料間の変動の大部分を占めているため、SID アミノ酸含量の予測式(表 8)で使用できる唯一の因子となった。成立した予測式は、RMSE(Root Mean Square、二乗平均平方根誤差)が低く(0.01~0.36)、 R^2 が高く、変動の 84~99%

を説明していた。予測モデルの評価は、線形バイアスと平均バイアスを表す勾配と切片が、すべてのアミノ酸で 0 と 1 と有意に異なっていないことを示し、この予測式が家禽における DDGS の SID アミノ酸推定において非常に信頼できることを示している(表 9)。家禽用飼料原料のアミノ酸消化率を測定するために最も一般的に使用されているのは、3 週齢のブロイラーを用いた試験と、盲腸を切除した雄鶏を用いた試験の 2 種類である。なお、両者から得られるアミノ酸消化率の推定値は異なり、一部の栄養学者は、両者のいずれかから得られたデータのみを好んで使用する傾向がある。このため、表 10 に示した予測式は、ニワトリ雛と雄鶏を用いた試験結果に分けて作成した。

最後に、多くの配合飼料工場では NIRS(近赤外分光分析機)を使用し、様々な飼料原料の栄養成分値を迅速に測定し、配合設計に用いるソフトウェアの栄養成分組成データベースの更新を行っている。DDGS のアミノ酸含量および可消化アミノ酸含量のキャリブレーションが様々な NIRS 用に開発されている。Soto ら(2013)による最近の研究では、ブロイラー用飼料原料のアミノ酸と ME 価を把握する際の様々な手法についての評価を行っている。この報告では、飼料設計を行う際に用いる公表されている成分表によるアミノ酸含量、これに NIRS による分析値を含めたアミノ酸含量、NIRS による可消化アミノ酸含量、NIR による可消化アミノ酸含量と ME 価推定値に

に関して、ブロイラーの発育成績と枝肉特性への影響を比較している。その結果、Foss 社の NIRS を用いて、トウモロコシ、大豆粕および DDGS の可消化アミノ酸含量と ME

価の推定した値に基づいて配合設計した場合の増体量と飼料効率は、成分表におけるデータを用いて配合設計した場合より優れていた。

表 5. 標準化された回腸の可消化アミノ酸含量の予測に使用された DDGS の成分組成(%) (乾物値 88%)、Zhu ら、2017)

変数	n	平均	変動係数 %
CP	59	27.16	11.1
灰分	8	4.66	9.3
粗脂肪	24	10.24	27.8
粗繊維	7	8.10	41.0
NDF	38	35.66	12.1
ADF	20	9.92	19.4
必須アミノ酸			
アルギニン	75	1.18	16.5
シスチン	72	0.50	12.4
ヒスチジン	67	0.70	12.1
イソロイシン	75	1.00	15.9
ロイシン	75	3.13	11.5
リジン	75	0.79	19.9
メチオニン	75	0.50	15.8
フェニルアラニン	67	1.28	12.5
トレオニン	75	1.00	11.2
トリプトファン	51	0.20	19.4
バリン	75	1.33	12.4

表 6. トウモロコシ DDGS の SID (標準化回腸消化率、%) (Zhu ら、2017 から改編)

変数	n	平均	最小値	最大値	標準偏差
アルギニン	75	81.5	53.0	92.6	9.7
シスチン	67	74.3	49.0	91.9	14.3
ヒスチジン	67	76.3	47.0	89.4	11.4
イソロイシン	75	77.0	52.0	89.4	11.1
ロイシン	75	85.0	64.3	93.7	7.3
リジン	75	62.7	31.3	84.8	19.0
メチオニン	75	82.9	53.2	98.4	10.0
フェニルアラニン	67	81.6	58.3	91.0	8.3
トレオニン	75	70.9	39.2	89.7	12.8
トリプトファン	22	84.5	60.2	92.2	10.7
バリン	75	75.9	48.8	90.6	11.5

表 7. トウモロコシ DDGS 中の標準化された回腸の可消化アミノ酸含量 (Zhu ら、2017 から改編)

変数	n	平均	最小値	最大値	標準偏差(%)
アルギニン	75	0.96	0.47	1.48	21.1
シスチン	67	0.37	0.22	0.69	22.0
ヒスチジン	67	0.54	0.29	0.83	19.2
イソロイシン	75	0.77	0.49	1.38	23.1
ロイシン	75	2.67	1.90	4.24	15.4
リジン	75	0.51	0.16	0.84	31.6
メチオニン	75	0.42	0.22	0.71	21.7
フェニルアラニン	67	1.05	0.70	1.63	17.9
トレオニン	75	0.71	0.36	1.10	20.1
トリプトファン	22	0.18	0.08	0.26	26.8
バリン	75	1.02	0.60	1.64	20.6

表 8. DDGS 中の標準化された回腸の可消化アミノ酸含量の家禽における予測式 (Zhu ら、2017 から改編)

アミノ酸%	予測式 ¹	R ²	RMSE	Prediction Error	Prediction Bias
アルギニン	$y = -0.20 + 0.96x$	0.95	0.13	0.19	0.31
シスチン	$y = -0.07 + 0.88x$	0.87	0.09	0.09	0.29
ヒスチジン	$y = -0.17 + 1.00x$	0.91	0.08	0.10	0.46
イソロイシン	$y = -0.01 + 0.77x$	0.94	0.12	0.20	0.55
ロイシン	$y = -0.60 + 1.04x$	0.93	0.36	1.48	2.57
リジン	$y = -0.22 + 0.91x$	0.87	0.16	0.25	0.25
メチオニン	$y = -0.12 + 1.05x$	0.90	0.08	0.06	0.08
フェニルアラニン	$y = -0.15 + 0.93x$	0.99	0.06	0.22	> 0.001
トレオニン	$y = -0.17 + 0.88x$	0.84	0.24	0.23	0.73
トリプトファン	$y = -0.03 + 1.00x$	0.99	0.01	> 0.001	0.01
バリン	$y = -0.19 + 0.90x$	0.93	0.15	0.40	0.82

1 y: SIDアミノ酸含量、x: DDGS中のアミノ酸含量

表 9. DDGS の家禽における標準化された回腸の可消化アミノ酸含量、実測値と予測値の比較 (Zhu ら、2017 から改編)

アミノ酸%	観測された平均値	予測された平均値	切片	標準誤差 (SE)	P値
アルギニン	0.97	0.97	0.01	0.02	0.75
シスチン	0.38	0.37	0.00	0.02	0.98
ヒスチジン	0.54	0.53	0.01	0.02	0.59
イソロイシン	0.79	0.79	0.02	0.02	0.50
ロイシン	2.58	2.55	0.06	0.08	0.46
リジン	0.50	0.50	0.01	0.02	0.69
メチオニン	0.42	0.42	0.01	0.01	0.54
フェニルアラニン	1.09	1.08	0.03	0.03	0.35
トレオニン	0.71	0.71	0.01	0.03	0.84
トリプトファン	0.18	0.18	0.00	0.00	0.30
バリン	1.03	1.02	0.03	0.04	0.45

表 10. ブロイラー雛および盲腸を切除した雄鶏による分析に基づく標準化された回腸の可消化アミノ酸含量の予測式 (Zhu ら、2017 から改編)

アミノ酸	雛による分析			雄鶏による分析		
	予測式 ¹	R ²	RMSE	予測式 ¹	R ²	RMSE
アルギニン	$y = -0.16 + 0.89x$	0.90	0.15	$y = -0.09 + 0.95x$	0.99	0.03
シスチン	$y = -0.05 + 0.82x$	0.79	0.10	$y = -0.08 + 0.98x$	0.97	0.02
ヒスチジン	$y = -0.24 + 1.06x$	0.88	0.08	$y = -0.08 + 0.95x$	0.99	0.04
イソロイシン	$y = -0.03 + 0.71x$	0.90	0.13	$y = -0.11 + 0.95x$	0.99	0.04
ロイシン	$y = -0.79 + 1.08x$	0.87	0.37	$y = -0.12 + 0.94x$	0.98	0.09
リジン	$y = -0.24 + 0.90x$	0.73	0.21	$y = -0.20 + 0.97x$	0.99	0.05
メチオニン	$y = -0.16 + 1.12x$	0.81	0.10	$y = -0.05 + 0.97x$	0.99	0.01
フェニルアラニン	$y = -0.19 + 0.95x$	0.76	0.27	$y = -0.13 + 0.98x$	0.98	0.03
トレオニン	$y = -0.14 + 0.82x$	0.82	0.13	$y = -0.15 + 0.94x$	0.99	0.04
トリプトファン	$y = -0.08 + 1.13x$	0.99	0.01	$y = -0.01 + 0.92x$	0.98	0.01
バリン	$y = -0.17 + 0.86x$	0.86	0.16	$y = -0.13 + 0.92x$	0.98	0.06

1 y : SIDアミノ酸含量、x : DDGS中のアミノ酸含量

有効リンと可消化リン

DDGSは、穀物やその他の穀物副産物と比べて、家禽が利用できるリンを多く含んでいる。Tahir ら(2012)は、トウモロコシ、大豆粕、パンくず、小麦、ホイトミドリングス、ナタネ粕、ホイトショーツおよびトウモロコシ DDGS の複数試料の分析を行い、トウモロコシ DDGS は他の飼料原料に比べてフィチン態リンが低く、非フィチン態リンは高いと報告している。89 試料のトウモロコシ DDGS の全リンとフィチン態リン含量は平均で0.96%および0.26% (いずれも乾物)で、NRC(1994)の値の 124 および 72% だった。これは、NRC(1994)による値を用いると、全リン含量が過小評価され、フィチン態リンと有効リン含量が過大評価されることを示している。この報告では、DDGS 中のフィチン態リン含量はカルシウム含量と正の相関を示し、NDF、ADF および粗脂肪含量とは負の相関を示すが、フィチン態リン含量を推定する予測式の精度は低かった(R² = 0.37)。このため、現在のところ、家禽用 DDGS の正確なリン消化率または有効率の予測式は開発されていない。

Mutucumarana ら(2014)による最近の研究では、トウモロコシ DDGS の真の可消化リン含量は 0.59%であり、これは全リンの約 73%に相当すると報告している(表 11)。ただし、Mutucumarana (2014)らによる評価で用い

た飼料ではカルシウムとリンが不足しており、飼料中のカルシウム含量が要求量を下回る場合、フィチン態リンの利用率が高まり(Mohammed ら、1991; Tamin and Angel、2003)、リンが不足すると、リンが充足している場合に比べて腸内におけるフィターゼ活性が大幅に増加する(Davies ら、1970)ため、リンの消化率が過大評価されている可能性がある。表 11 に示した結果は、すべての原料の可消化リン含量が非フィチン態リン含量より高く、各飼料原料の可消化リン含量を推定するために非フィチン態リン含量を因子とすることは適当ではないこと、家禽が非フィチン態リンの一部を使用できることを示している。

家禽におけるフィチン態リンの利用能には、カルシウム、リン、ビタミン D₃ および粗繊維含量だけでなく、飼料へのフィターゼ添加、溶解度、飼料の加工形態、家禽のステージによって異なる(Ravidran ら、1995; Angel ら、2002)。Martinez-Amezcuca ら(2006)は、DDGS のリン利用率を改善するためのブロイラー飼料への OptiPhos[®]フィターゼとクエン酸添加の効果を評価するために、3 回の試験を行った。最初の試験では雛の発育成績と脛骨灰分含量を指標として傾斜比定量法により実施し、DDGS 中のリンの生物学的利用率は 67%であることを明らかにした。別の実験では、フィターゼとクエン酸の添加により DDGS からのリンの放出量が 0.04 から 0.07%

表 11. 小麦、ソルガム、大豆粕およびトウモロコシ DDGS のリン組成と消化率(Mutucumarana ら、2014 から改編)

項目 %	小麦	ソルガム	大豆粕	トウモロコシDDGS
全リン ¹	0.32 (0.37)	0.24 (0.30)	0.65 (0.62)	0.82 (0.72)
フィチン態リン	0.21	0.18	0.43	0.38
非フィチン態リン ¹	0.11 (0.13)	0.06	0.22 (0.22)	0.44 (0.39)
真の可消化リン	0.15	0.08	0.52	0.59
全リンに対する割合				
フィチン態リン	66	77	67	47
非フィチン態リン	35	23	33	53
真の可消化リン	46	33	80	73

¹ NRC (1994)

に高まることを示している。フィターゼとクエン酸の添加は、DDGS 中のリンの生物学的利用率を 62 から 72% に高めた。Wamsley ら(2013)は、彼らが評価した DDGS におけるリンの生物学的利用率は 66~68%であったとしており、Martinez-Amezcu ら(2006)の報告と一致している。したがって、家禽におけるリンの消化率と生物学的利用率を推定する正確な予測式が開発されるまでは、家禽においては、DDGS 中の全リンの約 66%が利用可能であると考えるのが妥当である。

ブロイラーへの低脂肪 DDGS の給与

発育成績と屠体特性

2010 年以降、ブロイラーに対して DDGS を様々な割合で配合した飼料を給与した場合の発育成績部関する報告が 17 報公表されている(表 12)。

Loar ら(2010)は、DDGS を、前期用飼料(0~14 日)では 0 または 8%、中期用飼料(14~28 日)では 0、7.5、15、22.5 または 30%配合した場合の影響を評価している。飼料効率と斃死率には DDGS 配合による影響はなかったが、DDGS の配合量が 15%以上の場合は増体量が低下した。しかし、Shim ら(2011)は、家禽油脂を補足のエネルギー源として DDGS を 0、8、16 または 24%配合し、結晶アミノ酸により可消化アミノ酸量をそろえた飼料を給与した場合に、前期終了時(18 日齢)における増体量は対照飼料に比べて改善され、全期間(42 日間)の増体量および飼料効率は DDGS の配合量の違いに関わらず類似していた。また、DDGS を 24%配合した飼料における腹腔内脂肪、胸肉量および枝肉の品質にも影響はなかった。これらの結果は、DDGS を配合したブロイラー用飼料

が、可消化アミノ酸に基づいて設計されている場合には、発育成績や屠体特性、鶏肉の品質に影響を及ぼすことなく、最大 24%まで配合が可能であることを示している。

Guney ら(2013)は、様々な粗脂肪含量の DDGS を 0、10 または 20%配合した飼料を 18 日齢まで給与しても、増体量、飼料摂取量および飼料効率には悪影響が見られなかったと報告している(表 13)。この試験では、粗脂肪含量が最も低い DDGS を 10%配合した飼料では、飼料効率が改善されている。

Kim ら(2016)は、粗脂肪含量が 7.4%の低脂肪 DDGS を最大 30%まで配合した飼料が後期のブロイラーの発育成績と屠体特性に及ぼす影響について、2 期のフェーズ(後期 1; 28~42 日齢、表 14 および後期 2; 43~56 日齢、表 15)で調査した。後期 1 では、配合量が 30%では発育成績が低下したが、それ以下の配合量の場合には DDGS 配合量の違いによる増体量、飼料摂取量および飼料効率への影響はなかった。しかし、いずれの配合割合の場合でも、屠体重量、屠体の脂肪量、ささみ、浅胸筋、全胸肉重量には差がなかった。後期 2 の成績も同様であった。Kim ら(2016)は、低脂肪 DDGS を最大 24%まで配合した飼料を給与しても、発育成績と屠体特性には影響がなかったと報告している。これら、複数の公表文献の結果は、増体量や枝肉の形質に影響を及ぼすことなく、ブロイラーの前期および中期では 20%、後期では 24%まで低脂肪 DDGS を配合することが可能であること示唆している。ただし、許容できる発育成績や枝肉特性を得るためには、低脂肪 DDGS の AMEn 価と可消化アミノ酸含量を正確に把握して、配合設計を行うことが肝要である。

表 12. 様々な DDGS 配合割合が、ブロイラーの発育成績に及ぼす反応の要約

DDGS配合割合	飼育期間	DDGSの粗脂肪	飼育効果	引用文献
後期1：0、8、18、24、30% 後期2：0、18、16、24%	後期1：28～42日齢 後期2：43～56日齢	7.4%	DDGSを24%配合した飼料を後期に給与しても、増体量、飼料摂取量、飼料効率に影響なし	Kim et al., 2016
前期：0、2.7、5.4、8.1% 後期：0、2、4、6%	前期：0～28日齢 後期：29～42日齢	不明	大豆粕と置換して4～5.4%のDDGSを配合すると増体量が高まり、飼料費が低減	Gacche et al., 2016
0、6、12%	前期：0～10日齢 中期：11～21日齢 後期：22～42日齢	6.5%、5.4%	全期間の増体量、飼料摂取量、飼料要求率には、DDGSの粗脂肪含量および配合量の違いによる影響なし	Cortes-Cuevas et al., 2015
0、5、10%	0～35日齢	10.5%	DDGSを10%配合した飼料を35日間給与しても、増体量、飼料摂取量、飼料要求率に影響なし	Hassan and Al Aqil, 2015
0、15%	前期：0～21日齢 中期：22～42日齢	不明	DDGSを15%配合しても、21日齢、42日齢の増体量、飼料摂取量、飼料効率に影響なし	Min et al., 2015
0、5、10、15%	前期：0～21日齢	8.2%	DDGS 15%配合飼料では、0および5%配合飼料に比べて7および14日齢増体量が低下し、0および10%配合飼料に比べて21日齢の増体量が低下した、FCRは、他の封入率と比較して15%配合飼料の飼料要求率は14日齢で劣ったが、21日齢では差がなかった	Campasino et al., 2015
5、7、9%または8、10、12%	前期：0～13日齢 中期：14～26日齢 後期：27～33日齢	10.5、7.8、5.4%	DDGSの粗脂肪含量の違いによる発育成績への影響はない。配合量が5、7、9%の場合、8、10、12%配合に比べて増体量、飼料摂取量が増加し、飼料要求率が改善	Dozier and Hess, 2015
前期：0、12% 後期：0、18%	前期：0～21日齢 後期：21～42日齢	11.0%	増体量、飼料摂取量、飼料効率は、前期で12%、後期で18%配合した場合と等エネルギー、等CP飼料と比べて差がない	Swiatkiewicz et al., 2014
前期：10% 中期：20% 後期：20%	前期：0～17日齢 中期：17～35日齢 後期：35～49日齢	11% 4%	全期間の飼料摂取量は低脂肪DDGSを配合した飼料で増加傾向を示したが、増体量、飼料効率には影響なし	Kubas and Firman, 2014
7%	前期：1～21日齢 後期：22～48日齢	不明	アミノ酸含量をNRC (1994) の値に基づいて計算するのに比べて、NIRSを用いて計算することで増体量が改善された。また、NIRDにより可消化アミノ酸含量を計算すると前期の飼料効率が改善された	Soto et al., 2013
0、10、20%	前期：0～18日齢	12.5、7.5、6.7%	DDGSの粗脂肪含量に関わらず、DDGSを20%配合しても体重、飼料摂取量、飼料効率には影響なし	Guney et al., 2013
1、10、20%	前期：7～21日齢	不明	DDGSの配合量の増加に伴い増体量が7～14日齢では直線的に、15～21日齢では二次曲線的に減少したが、いずれの時期においても飼料摂取量と飼料効率には影響なし	Perez et al., 2011
0、10、20%	前期：0～21日齢 後期：22～42日齢	不明	DDGS配合飼料を給与すると、前期では飼料摂取量は増加し、増体量と飼料効率が低下、後期では増体量、飼料摂取量、飼料効率が低下。前期ではDDGSの配合量による発育成績への影響はなかったが、後期では10%配合した飼料の増体量、飼料効率が増加	Liu et al., 2011

表 12. 様々な DDGS 配合割合が、ブロイラーの発育成績に及ぼす反応の要約(続)

DDGS配合割合	飼育期間	DDGSの粗脂肪	飼育効果	引用文献
前期：0、8% 中期：0、7.5、15、 22.5、30%	前期：0～14日齢 中期：14～28日齢	不明	DDGSを前期用飼料に8%、中期用飼料に7.5～15%配合した場合に満足できる発育成績が得られる	Loar et al., 2010
0、5、10%	0～42日齢	12.6%	増体量、飼料摂取量、飼料効率に影響なし。エクストルード処理はアミノ酸消化率を改善	Oryschak et al., 2010
0、10、20、30、 40、50%	前期：0～14日齢 中期：14～35日齢 後期：35～49日齢	不明	飼料が可消化アミノ酸ベースで設計されている場合には49日齢までの飼料のDDGSを最大20%配合が可能、DDGSを30%以上配合すると発育成績が低下	Wang et al., 2008
0、15、30%	前期：0～14日齢 中期：15～35日齢 後期：36～42日齢	9.4%	飼料が可消化アミノ酸ベースで設計されている場合にはDDGAを15%配合した飼料を継続して給与しても増体量、飼料摂取量、飼料効率には影響なし、DDGSを30%以上配合すると発育成績が低下	Wang et al., 2007

表 13. 0～18日齢のブロイラーの発育成績に対する0、10、または20%の粗脂肪含量が異なる DDGS 給与の影響 (Guney ら、2013 から改編)

	対照	粗脂肪12.5%DDGS	粗脂肪7.5%DDGS	粗脂肪6.7%DDGS			
飼料割合	0%	10%	20%	10%	20%	10%	20%
18日齢体重 g	596	666	615	607	615	650	598
0～18日齢の飼料摂取量 g/日	53.6	56.0	56.8	54.2	55.9	53.3	56.7
飼料要求率	1.61	1.51	1.66	1.61	1.63	1.47	1.70

a - c 異符号間に有意差あり (p < 0.05).

ブロイラーに対して、DDGS を配合した飼料を給与した場合の全体的な影響をより詳細に知るために、19 報の公表文献 (Martinez-Amezcuca ら、2006; Wang ら、2007; Wang ら、2008; Loar ら、2010; Olukosi ら、2010; Oryschak ら、2010; Liu ら、2011; Min ら、2011; Barekatin ら、2013a、b、c; Guney ら、2013; Wamsley ら、2013; Swiatkiewicz ら、2014; Campasino ら、2015; Cortes-Cuevas ら、2015; Hassan and Al Aqil, 2015; Min ら、2015; Kim ら、2016) からのデータについてメタ分析を行った (表 16～18)。

DDGS を配合した飼料を給与した 70 のデータでは、増体量には影響はなく、飼料摂取量が 3% 高まり、飼料効率が 1.5% 高まった (表 16)。全データの 73% で、体重の増加または変化は見られず、85% で飼料摂取量の増加

率には変化がないか高まった。91% で飼料効率に変化がないか改善された (表 17)。前期に DDGS を配合した飼料を給与すると、後期あるいは全期間に DDGS を配合した飼料を給与した場合に比べて、増体量と飼料効率が改善され (表 18)。DDGS の配合割合を高めると、飼料効率が直線的に改善され、20% 以上の DDGS を配合した飼料では、飼料効率が 5.5% 改善されたが、配合割合が 20% 未満の飼料での影響は最小限だった。これらの結果は、DDGS がブロイラーの前期用、中期用、後期用の各飼料に、最大 20% まで配合することが可能で、増体量、飼料摂取量および飼料効率への影響を最小限に抑えることが出来ることを示唆している。

表 14. 28～42 日齢のブロイラーに粗脂肪含量が 7.4%の DDGS を配合した場合の発育成績と枝肉特性(Kim ら、2016 から改編)

	DDGS配合量					
	0%	6%	12%	18%	24%	30%
増体量 kg	1.60 ^a	1.64 ^a	1.57 ^a	1.56 ^a	1.56 ^a	1.42 ^b
飼料摂取量 kg	3.01	3.06	3.05	2.97	2.98	3.00
飼料要求率	1.84 ^b	1.87 ^b	1.90 ^b	1.89 ^b	1.90 ^b	2.03 ^a
43日齢の体重 kg	2.63	2.70	2.62	2.72	2.58	2.60
屠体重量 kg	1.92	1.97	1.91	1.98	1.87	1.87
歩留 %	73.5 ^a	73.2 ^{ab}	73.5 ^a	72.9 ^{abc}	72.8 ^{bc}	72.3 ^c
脂肪 g	27	28	28	28	25	29
胸肉 g	461	481	471	483	458	461
ささみ g	98	100	98	98	96	94
全胸肉 g	559	581	569	581	553	554

a - c異符号間に有意差あり (p < 0.05).

表 15. 43～56 日齢のブロイラーに粗脂肪含量が 7.4%の DDGS を配合した場合の発育成績と枝肉特性(Kim ら、2016 から改編)

	DDGS配合量			
	0%	8%	16%	24%
増体量 kg	1.45	1.47	1.42	1.44
飼料摂取量 kg	3.00	3.14	3.02	3.06
飼料要求率	2.08	2.09	2.07	2.08
57日齢の体重 kg	4.61	4.67	4.60	4.66
屠体重量 kg	3.51	3.47	3.49	3.52
歩留 %	75.6	75.2	75.7	76.1
脂肪 g	79	77	78	80
胸肉 g	976	964	972	988
ささみ g	179	178	180	182
全胸肉 g	1,155	1,142	1,152	1,170

表 16. ブロイラーの発育成績に対する DDGS 給与の影響(2010 年以降に公表された 19 報の要約)

項目	DDGS飼料と対照飼料の差 %					
	増体量	飼料摂取量	飼料要求率	開始時体重 g	終了時体重 g	飼育期間
データ数	70	70	70	67	67	70
試験雛	16	16	16	15	15	16
平均	2.7	3.0**	1.5**	345	1,812	26
最小値	-23.4	-6.5	-21.2	25	302	5
最大値	76.5	50.8	25.1	3,200	4,660	49

** DDGSを配合していない飼料に対して有意差あり (p < 0.05).

表 17. 対照飼料と比較した、DDGS 配合飼料の給与によるブロイラーの発育成績の要約(2010 年以降に公表された 19 報の要約)

項目	N	DDGS配合による反応		
		改善	低下	変化なし
増体量	70	15	19	36
飼料摂取量	67	22	10	35
飼料効率	70	17	6	47

表 18. ブロイラーの発育成績に対するトウモロコシ DDGS の給与期間と配合割合の影響(2010 年以降に公表された 19 報の要約)¹

項目	フェーズ			SE	DDGS配合割合 %			SE
	前期	後期	全期間		< 10	10 to 20	> 20	
データ数	26	14	30	-	21	34	15	-
試験数	8	3	7	-	9	14	7	-
増体量 ²	0.56	-5.42	-5.57	2.70	-0.89	-2.57	-6.97	2.85
飼料摂取量	0.14	-3.31	-0.25	1.73	1.10	-1.64	-2.87	1.95
飼料効率 ²	-0.05	1.59	4.17	1.40	-0.38	0.54	5.54	1.55

1 最小二乗法による平均値。前期は0~21日齢、後期は21~42または49日齢。0~42日齢または0~49日齢給与した場合には全期間の期間発育成績を用いた。

2 すべてのDDGS配合割合のデータでは、増体量が0.34%低下し、飼料要求率が0.32%高まった。

屠体と鶏肉の品質

多くの報告は、DDGS をブロイラー飼料に配合しても、屠体特性や鶏肉の品質に否定的な結果を示すことがないことで一致している。Corzoら(2009)は、DDGSを0または8%配合した飼料をブロイラーに給与し、鶏肉の色調、pH、調理ロス、剪断強度には影響はないと報告している。さらに、鶏肉の硬さにも差がなかったが、対照飼料を給与した鶏肉に比べて、香りと全体的な受容性がわずかに低下した。しかし、鶏肉の消費者は、いずれの飼料を給与したブロイラーの胸肉についても「適度に好ましい」としており、「適度に好ましい」または「非常に好ましい」と回答した割合には差がなかった。DDGSを0または8%配合した飼料による胸肉の官能特性に差はなかったが、DDGSを配合した飼料を給与したブロイラーの鶏肉は、リノール酸とPUFA(多価不飽和脂肪酸)含量が増加したため、鶏肉を長期間保管すると酸化を受けやすくなる可能性があった。全体として、DDGSを8%配合した飼料を給与しても、胸肉と大腿肉の品質には影響がないことが示されている。Schillingら(2010)は、ブロイラーに対して、DDGSを0、6、12、18または24%配合した飼料を42日間給与し、DDGSの配合割合に関わらず、高品質の

胸肉が生産されることを報告している。腿肉の品質は、DDGSを0~12%配合した飼料では類似していたが、配合量を高めると、酸化の影響を受けやすい腿肉が生産された。

酸化ストレスと免疫機能

複数の畜種で、DDGSの給与が酸化ストレスを緩和し、免疫機能と健康状態を改善するという証拠が増えている。トウモロコシ DDGSには、強力な抗酸化剤として知られているトコフェロール、トコリエノール、キサントフィルが比較的多く含まれている(詳細は6章を参照されたい)。さらに、トウモロコシ DDGSに約10%含まれている残留酵母と酵母の細胞壁成分(マンナン、 α -グルカン、ヌクレオチド)は、家畜の健康状態に好影響を与えることが示されている(Shurson, 2017年)。

Minら(2015)は、免疫抑制チャレンジ(デキサメタゾン)の下でブロイラーに対してDDGSを0または15%配合した飼料を6週間給与した場合の影響を調査した。免疫チャレンジを受けたブロイラーは増体量と飼料効率が低下したが、発育成績には影響がなかった。興味深いことに、DDGSを配合した飼料を給与すると、血清の総抗酸化活

性と血清および肝臓の総スーパーオキシジスムターゼ活性が低下し、21日齢のブロイラーの血清 IgA、IgG、およびマロンジアルデヒドが増加した。DDGS を給与した雛は、対照飼料を給与した雛に比べて IL-4 および IL-6 をコードする mRNA の相対量が多く、免疫チャレンジは、グルタチオンペルオキシダーゼ、IL-6、および IL-10 の発現を減少させた。これらの結果は、免疫チャレンジを受けたブロイラーに DDGS を給与すると、免疫機能を改善できることを示唆している。

産卵鶏への低脂肪 DDGS の給与

2010 年以降、産卵鶏に DDGS を給与した場合の産卵成績と鶏卵品質に及ぼす影響に関する報告が 11 報公表されている(表 19)。これら 11 報のうち、5 報が低脂肪 DDGS を用いた給与試験である。

産卵鶏用飼料におけるトウモロコシ DDGS の利用に関しては、最近、El-Hack ら(2015)が総説を公表している。彼らは、以前には、産卵鶏用飼料への DDGS の最大配合量は 10~15%が推奨されていたが、いくつかの研究では、エネルギー価と、可消化リジンおよびメチオニン含量を適切に設計した場合、配合量をさらに高めても許容できる産卵成績と鶏卵品質が得られることを示している。さらに、Masa' deh(2011)は、産卵鶏用飼料に DDGS を 30%配合すると、DDGS を配合しない飼料と比べて、飼料費がフェーズ I およびフェーズ II で 31.15 および 28.58 ドル/トン節約できることを示した。

トウモロコシ DDGS は、産卵鶏にとって、エネルギー、可消化アミノ酸、利用可能なリンとキサントフィルの優れた供給源となる。Swiatkiewicz ら(2014a)は、DDGS を最大 20%配合した飼料を産卵鶏に給与しても、骨の性状には影響を与えないことを明らかにしている。さらに、多くの報告が、DDGS の配合量を高めると、トウモロコシ DDGS が含むキサントフィル(30~56 mg/kg; Trupia ら、2016)により卵黄の色調が高まることを示している。

産卵鶏用飼料に DDGS を配合した場合の全体的な影

響を知るために、2010 年以降に公表された 17 報 (Świątkiewicz and Koreleski, 2006; Shalash ら、2010; Wu-Haan ら、2010; Ghazalah ら、2011; Masa' deh ら、2011; Tangendjaja and Wina, 2011; Koksall ら、2012; Sun ら、2012; Cho ら、2013; Deniz ら、2013a; Deniz ら、2013b; Jiang ら、2013; Świątkiewicz ら、2013; Purdum ら、2014; Cortes-Cuevas ら、2015; Hassan and Al Aquil, 2015; Trupia ら、2016)におけるデータを用いたメタ分析を実施した。

表 20 に示したように、DDGS 配合飼料を給与した産卵鶏は、対照飼料に比べて、体重が平均で約 16%減少したが、飼料摂取量、飼料効率、産卵率、卵重およびハウユニットへの影響は少なかった(対照飼料と比べて-0.2~2.7%の変化)。しかし、卵殻厚と卵黄の色調は、DDGS 配合飼料の給与による影響を受けた(4.1 および 18.1%改善)。これらの 17 報において、DDGS の給与により、体重変化に影響がなかった、あるいは、影響を受けた割合は 78%であり、同様に、飼料摂取量では 78%、飼料効率では 65%、産卵率では 70%、卵重では 75%、卵殻厚では 100%、卵黄の色調では 98%、ハウユニットでは 89%であった(表 21)。

DDGS を配合した飼料を 16 週間以上給与した産卵鶏の体重変化と飼料摂取量は、給与期間が 16 週間以下の場合と同様であったが、給与期間が 16 週間以下であった場合には飼料効率が有意に優れた($p < 0.01$) (表 22)。DDGS 配合飼料の給与期間は、産卵率、卵殻厚、卵黄の色調に影響を与えなかったが、給与期間が 16 週以下である場合には、DDGS を給与した産卵鶏の体重はやや大きく($p < 0.01$)、卵重が比較的少なく(4%)、ハウユニットがやや優れた($p < 0.03$)。DDGS の配合割合を増加させると、体重変化を増加させる傾向があり($p < 0.11$)、飼料摂取量が増加し($p < 0.01$)、飼料効率が高まった($p < 0.01$)。さらに、DDGS 配合量の増加は、産卵率と卵重を減少させたが($p < 0.01$)、ハウユニットは改善された($p < 0.01$)。また、DDGS 配合割合の増加は卵黄の色調を高め、卵殻厚が減少する傾向を示した($p < 0.11$)。

表 19. DDGS の給与が産卵成績と鶏卵品質に及ぼす影響

DDGS配合割合	試験期間	DDGSの粗脂肪	成績	引用文献
0、10、20%	21～26週齢	不明	産卵量、飼料摂取量、卵重、体重変化にはDDGSによる影響なし。DDGS20%配合飼料では毎日のアンモニア排泄量が24%、硫化水素排泄量が58%削減	Wu-Haan et al., 2010
0、5、10、15、20、25%	24～46週齢 (フェーズ1) 47～76週齢 (フェーズ2)	10.3%	飼料摂取量、産卵率、ハウユニット、卵比重、体重変化にはDDGS配合による影響なし。DDGSの配合量を高めるとフェーズ1では卵量が低下したが、フェーズ2では差がなかった。DDGSの配合量の増加に伴い卵黄色調が高まり、窒素とリンの排泄量が減少	Masa'deh et al., 2011
0、4、8、12、16%	40～50週齢	9.7%	DDGS配合飼料では、飼料摂取日量がわずかに低下したが、産卵率、飼料要求率、卵量、産卵量には影響なし	Tangendjaja and Winat., 2011
0、17、35、50%	54週齢の鶏に24週間給与	10.7%	DDGS配合飼料に適切な可消化アミノ酸が含まれている限り、最大50%まで配合しても、産卵率、飼料摂取量、飼料要求率、卵量、産卵量への影響なし。DDGS配合飼料の給与で、貯蔵中の鶏卵品質が改善され、卵黄色調が高まった。DDGSを50%配合した飼料ではハウユニットが最も高かったが、卵黄と卵白の比率には差がなかった。	Sun et al., 2012
10%		12.2%	産卵率、飼料摂取量、飼料要求率、開始時および最終時体重、卵量、産卵量、卵殻厚、卵殻強度、ハウユニット、破卵率、正常卵数への影響なし	Deniz et al., 2013a
0、5、10、20%	28～38週齢	11.2%	DDGS配合量が15%までの飼料では、産卵率、飼料摂取量、飼料要求率、卵重さ、産卵量、破卵率、正常卵数への影響はなかったが、20%配合飼料では産卵成績と卵重が低下。DDGSの配合量の増加に伴う卵殻厚と卵殻強度、ハウユニットには影響はなかったが、卵黄色調が高まった	Deniz et al., 2013b
0、10、20%	40～63週齢	8.3%	産卵率、飼料摂取量、卵量、産卵量、卵黄の色調、卵殻厚、飼料効率にはDDGS配合割合の増加による影響なし	Jiang et al., 2013
20%	20～33週齢	10.3、7.3、5.2%	DDGSの粗脂肪含量は、産卵率、飼料摂取量、飼料要求率、卵量、産卵量、体重変化に影響なし	Purdum et al., 2014
20%	26～39週齢 (フェーズ1) 40～55週齢 (フェーズ2)	11%	産卵率、飼料摂取量、飼料要求率、卵量、産卵量、卵質、卵殻質には飼料およびフェーズの影響なし。DDGS配合飼料では卵黄の高まる	Swiatkiewicz et al., 2014b
0、6、12%	66～77週齢	6.5、5.4%	産卵率、飼料摂取量、飼料要求率、卵重、産卵量に影響なし。DDGS配合飼料では卵黄の色調が高まる	Cortez-Cuevas et al., 2015
0、5、10、20%	30～42週齢	9%	産卵率、卵重、産卵量、飼料摂取量、飼料要求率、単比重、ハウユニット、卵黄色調には影響なし。DDGS20%配合飼料では他の飼料より体重が減少	Hassan and Al Aqili, 2015

表 20. 産卵鶏へのトウモロコシ DDGS の給与が産卵成績に及ぼす影響(2010 年以降公表された 19 報の要約)

項目	報告者数	試験数	DDGS飼料と対照飼料の差 %		
			平均	最少	最大
体重変化	36	8	-16.0**	-100.0	183.9
飼料摂取日量	65	16	-0.2*	-11.7	6.9
飼料効率	51	13	2.7**	-4.0	26.1
産卵率	57	15	-1.7**	-28.7	2.6
卵重	69	17	-0.5**	-5.5	3.7
卵殻厚	32	9	4.1**	-2.8	8.3
卵黄色調	41	11	18.1**	-2.3	58.2
ハウユニット	35	9	-0.1**	-2.4	6.0

** DDGSを含まない飼料との間で有意差あり (p < 0.05)

* DDGSを含まない飼料との間で有意差あり (p < 0.10)

表 21. 産卵鶏へのトウモロコシ DDGS 飼料の給与が産卵成績に及ぼす影響(2010 年以降公表された 19 報の要約)

項目	N	DDGS配合による反応		
		改善	低下	変化なし
体重変化	36	1	8	27
飼料摂取日量	65	2	14	49
飼料効率	51	18	2	31
産卵率	57	5	17	35
卵重	69	4	17	48
卵殻厚	32	6	0	26
卵黄色調	41	33	1	7
ハウユニット	35	0	4	31

表 22. 産卵鶏へのトウモロコシ DDGS の給与期間と配合割合が産卵成績および鶏卵品質に及ぼす影響(2010 年以降公表された 19 報の要約)

	試験期間		標準偏差	DDGS配合割合 %			標準偏差
	16週以下	16週以上		< 10	10 to 20	> 20	
データ数	25	44		16	30	23	
試験数	6	11		9	13	12	
体重変化	-28.8	-25.6	17.7	-17.2	-17.5	-46.9	4.9
飼料摂取日量	0.03	1.0	0.7	-0.4	0.6	1.4	0.3
飼料効率	3.6	13.1	2.9	2.2	7.6	15.1	1.0
産卵率	-4.3	-6.6	1.9	-2.2	-5.6	-8.4	0.8
卵重	-2.3	-4.3	0.8	-1.3	-3.5	-5.0	0.3
卵殻厚	2.0	-0.8	2.0	1.1	1.0	-0.2	0.6
卵黄色調	22.3	23.1	5.2	12.5	16.3	39.3	1.9
ハウユニット	1.5	0.1	0.6	-0.1	1.3	1.2	0.2

表 23. 24 週間の給与期間中における産卵鶏への DDGS 配合割合が産卵成績に及ぼす影響(Sun ら。2012 から改編)

	0% DDGS	17% DDGS	35% DDGS	50%DDGS
産卵率 %	87 ^a	83 ^b	84 ^{a,b}	62 ^c
飼料摂取量 g/日	104.4 ^a	104.2 ^a	106.0 ^a	92.2 ^b
飼料効率	531.6 ^a	487.6 ^b	501.9 ^b	431.8 ^c
卵重 g	64.7 ^a	63.3 ^{bc}	64.0 ^{ab}	62.6 ^c
産卵日量 g/日	56.0 ^a	51.8 ^b	53.6 ^{ab}	39.1 ^c
体重変化 kg	0.02	0.00	0.00	0.05

a - c 異符号間に有意差あり (p < 0.05).

表 24. DDG 配合割合が異なる飼料を給与した場合の鶏卵の品質と組成に及ぼす影響(Sun ら。2012 から改編)

測定値	0% DDGS	17% DDGS	35% DDGS	50%DDGS
卵黄色調 ¹	5.5 ^d	7.0 ^c	7.9 ^b	8.7 ^a
卵黄の割合 %	26.5	26.8	26.8	26.5
卵白の割合 %	63.7	63.4	63.4	63.3
卵殻の割合 %	9.8 ^b	9.8 ^b	9.9 ^b	10.1 ^a
保存後のハウユニット ²				
0週	80.5 ^b	81.8 ^b	82.3 ^b	85.3 ^a
1週	76.4 ^b	78.0 ^b	78.3 ^b	82.3 ^a
2週	73.7 ^b	75.6 ^b	76.0 ^b	79.9 ^a
3週	72.4 ^b	73.7 ^b	74.3 ^b	78.2 ^a
卵殻強度 g	3,924 ^b	3,995 ^a	3,877 ^a	4,299 ^a

各乾物値の a - c 異符号間に有意差あり (p < 0.05).

1 ヨークカラー・スコア：1 (明るい) ~ 10 (暗い).

2 ハウユニット：100 × log [卵白高 - 0.01 × 5.6745 × (30 × 卵重 0.37 - 100) + 1.9]

鶏卵の品質

表 19 で要約したように、産卵鶏用飼料における DDGS の配合割合と粗脂肪含量を評価した最近の研究の多くは、DDGS の配合割合が比較的高くても(20%以上)、鶏卵の品質への影響は最小限であることを示している。Sunら(2012)は、粗脂肪含量が10.7%のDDGSを0、17、35 または 50%配合した等エネルギー飼料を 54 週齢の産卵鶏に 24 週間給与し、産卵成績と鶏卵の品質への影響を評価した。初期の 12 週間に DDGS を 50%配合した飼料を給与した場合には、産卵率、飼料摂取量、飼料効率、卵量および産卵量が減少した(表 23)。しかし、飼料にリジンとメチオニンを添加すると、DDGS 50%配合飼料における成績の低下が大幅に改善された。

結果的に、終了前 6 週間の産卵率、卵重および飼料摂取量には飼料間の差がなかった。DDGS の配合量を高めると、卵黄の色調とハウユニットが高まり、DDGS を

50%配合した飼料の鶏卵ではハウユニットが最も高く、DDGS 配合量が 35%以下の鶏卵より貯蔵性が長くなった(表 24)。さらに、DDGS を 50%配合した飼料では、卵殻重量(割合)と破壊強度が最も高かった。これらの結果から、DDGS を配合した飼料に十分な量の可消化アミノ酸が含まれている場合には、産卵率、飼料摂取量、飼料効率、卵重、産卵量に影響を与えることなく、最大 50%まで配合できるものと結論付けている。

Sun ら(2013)は、同じ研究から得られた鶏卵について、卵黄の成分組成に及ぼす影響を調査している。DDGS を 50%配合した飼料を給与した場合には卵黄中の粗脂肪含量がわずかに増加し、CP 含量がわずかに低下したが、配合割合がそれ以下の場合には、卵黄中の粗脂肪および CP 含量には差がなかった。鶏卵の水分含量には DDGS の配合割合による影響はなかった。ただし、DDGS の配合割合を高めると卵黄の総 PUFA 含量が増

加した。DDGS を 50%配合した飼料ではコリンおよびコレステロール含量が高まったが、試験の最終4週間では差がなかった。予想した通り、DDGS の配合量の増加に伴い、卵黄中のルテイン含量が増加した。しかし、この研究における興味深い知見は、DDGS を 50%配合した飼料を給与すると、ヒトの健康上重要な効果がある ω (オメガ)3 系脂肪酸(リノレン酸とエイコサペンタエン酸)の卵黄中含量が増加したことである。

Trupia ら(2016)は、粗脂肪含量が 13.3%の高脂肪 DDGS および粗脂肪含量が 7.4%の低脂肪 DDGS を 0、10 または 20%配合した飼料を給与した場合の産卵成績と鶏卵の品質への影響を調査し、体重変化、産卵率、飼料摂取量、飼料効率、産卵量および卵重には、飼料間で差がなかった。高脂肪 DDGS を 10%配合した飼料および低脂肪 DDGS を 20%配合した飼料では卵比重がやや低かった。DDGS を配合した飼料を給与した場合、対照飼料を給与した鶏卵に比べて、卵黄中のトコフェロール、トコリエノールおよびキサントフィル含量が高まり、卵黄の黄色味と赤色味が高まった(表 25)。

この報告で供試された高脂肪および低脂肪 DDGS の脂質組成は表 26 に示したとおりであり、飼料中に配合した DDGS 由来のトコフェロール、トコリエノールおよびキサントフィル含量が、卵黄のこれらの成分組成に影響することを示している。実際、低脂肪 DDGS を配合した飼料では卵黄中トコフェロール含量が高かったが、キサントフィル含量は高脂肪 DDGS を配合した飼料より低かった。DDGS の給与により、卵黄の脂肪酸組成はわずかに変化したが、飽和脂肪酸と不飽和脂肪酸の比率は類似しており、レシチンおよびコレステロール含量には差がなかった。これらの結果は、産卵鶏用飼料に高脂肪および低脂肪 DDGS を配合すると、卵黄中でいくつかの有益な脂溶性の栄養成分が増加するが、卵黄の品質には悪影響を及ぼさないことを示している。

バージニアマイシンの残留リスク

エタノール発酵工程中に少量の抗生物質(1~2 mg/kg)を添加することで、エタノールの収量を減らし、DDGS の品質と栄養価を低下させる微生物汚染を防いでいる。米国のエタノール産業で使用される最も一般的な抗生物

表 25. 高脂肪および低脂肪 DDGS を 10 または 20%配合した飼料を給与した産卵鶏の卵黄の色調および脂質組成

質はバージニアマイシンとペニシリンである。Paulus-Compart(2013)は、DDGS 中にバージニアマイシンとペニシリンが残留するリスクは非常に低く、仮に残留していたとしても、残留濃度は非常に低いことから、肉、乳、卵では検出できないとしている。Sun ら(2012)は、プレート法およびバイオオートグラフィー法により、DDGS を 0、17、35 および 50%配合した飼料中のバージニアマイシン残留物を測定し、すべての飼料でバージニアマイシン残留物が規制値の 0.1 mg/kgを下回っていたことを明らかにしている。これらの分析方法の検出限界は 0.05~0.1 mg/kgであった。飼料原料と鶏卵中のバージニアマイシンを検出するために FDA が承認している唯一の方法はバイオアッセイであり、この報告の妥当性には疑問がある。いずれにしても、これらの結果は、産卵鶏用飼料に DDGS を 50%配合しても、バージニアマイシンが卵黄に移行する可能性は無視できることを示唆している。

誘導換羽への効果

Hong ら(2007)は、換羽を誘導するための DDGS を配合し、食塩無添加の飼料について、産卵成績、鶏卵の品質、臓器重量への影響を、絶食させた場合と比較している。この報告では、産卵数が 80%を超え、平均体重が 1.08 kgの 62 週齢の白色レグホン鶏 108 羽を用いている。試験区は、対照(通常飼料)、誘導換羽飼料(DDGS + 食塩無添加)給与および絶食群を設定した。絶食群では試験開始後 18 日に産卵率が 0%となり、誘導換羽飼料給与群では 17 日後に産卵率が 0%となった。絶食群では 6 日間産卵が停止した。産卵は、誘導換羽飼料給与群では 12 日後に、絶食群では 16 日後に再開した。卵黄の品質を除いて、すべての誘導換羽処理で鶏卵の品質が改善された。肝臓、心臓および卵管の重量は、すべての誘導換羽処理で低下した。この結果は、誘導換羽飼料(DDGS + 食塩無添加)の給与が、絶食処理に代わって、換羽中のアニマルウェルフェアへの懸念を軽減できることを示している。

Mejia ら(2010)は、絶食による誘導換羽処理中に、DDGS を 36、45 または 54g/日給与すると、同量のトウモロコシを給与した場合に比べて、換羽後(5~43 週間)の

(Trupia ら。2016 から改編)

測定値	対照	高脂肪DDGS 10%	高脂肪DDGS 20%	低脂肪DDGS 10%	低脂肪DDGS 20%
卵黄 L*	58.5 ^a	57.8 ^b	56.7 ^c	57.3 ^b	56.6 ^c
卵黄 a*	-4.3 ^d	-3.5 ^c	-2.2 ^a	-3.5 ^c	-2.7 ^b
脂肪酸組成 %					
C16:0	25.5	25.4	25.1	25.5	25.5
C16:1	2.71 ^a	2.46 ^b	2.08 ^c	2.54 ^{ab}	2.49 ^{ab}
C18:0	9.50	9.42	9.56	9.28	9.19
C18:1	45.7 ^a	43.5 ^{bc}	42.1 ^d	44.4 ^b	42.3 ^{cd}
C18:2	13.6 ^c	16.4 ^b	18.3 ^a	15.5 ^b	17.6 ^b
C18:3	0.44 ^c	0.45 ^d	0.47 ^c	0.45 ^b	0.58 ^a
C22:0	2.10	2.10	2.20	2.10	2.10
トコフェロールおよびトコトリエノール 脂質中 μg/g					
α-トコフェロール	173.8 ^b	183.5 ^{ab}	183.3 ^{ab}	209.9 ^{ab}	218.2 ^a
β-トコフェロール	0.58 ^c	0.95 ^b	0.96 ^b	0.98 ^b	1.34 ^a
γ-トコフェロール	46.0 ^d	57.2 ^{cd}	72.2 ^{ab}	67.0 ^{bc}	85.1 ^a
δ-トコフェロール	1.1 ^{ab}	1.0 ^{ab}	0.82 ^b	1.0 ^{ab}	1.2 ^a
α-トコトリエノール	2.5 ^c	4.0 ^{bc}	5.8 ^a	5.1 ^{ab}	6.3 ^a
γ-トコトリエノール	0.13 ^a	0.23 ^{ab}	0.34 ^a	0.26 ^a	0.32 ^a
総トコトリエノール	224.2 ^c	246.9 ^{bc}	263.4 ^{abc}	284.2 ^{ab}	312.4 ^a
キサントフィル 脂質中 μg/g					
ルテイン	80.0 ^b	110.1 ^a	123.1 ^a	87.4 ^b	91.1 ^b
ゼアキサントシン	22.4 ^c	31.7 ^{ab}	36.8 ^a	29.1 ^b	34.9 ^a
β-クリプトキサントシン	Not detected	1.1 ^b	2.0 ^a	1.0 ^b	1.7 ^a
不明	8.6 ^d	13.6 ^{bc}	17.3 ^a	12.1 ^c	14.8 ^{ab}
総キサントフィル	111.1 ^d	156.4 ^{ab}	179.1 ^a	129.7 ^{cd}	142.6 ^{bc}

各乾物値のa-c 異符号間に有意差あり (p < 0.05).

産卵成績が優れたと報告している。換羽後の産卵量、卵比重、飼料効率および飼料摂取量には、トウモロコシと DDGS の差や給与量による一貫した影響はなかった。この結果から、絶食処理中にトウモロコシまたは DDGS を制限給与することにより、トウモロコシ・大豆皮主体飼料を自由摂取させる処理に匹敵する換羽後の成績が得られると結論付けている。

敷料の性状

ブロイラーおよび産卵鶏飼育現場における施設管理上の重要な関心事項は、湿った敷料の発生をいかに最小限に抑えるかである。湿った敷料の発生は、鶏の水分

出納が損なわれるためである (Collett, 2012)。非でん粉性多糖類、動物性たん白質、飽和遊離脂肪酸、抗栄養因子または毒性物質の存在などの多くの飼料要因が湿った敷料の発生に影響している可能性がある (Collett, 2012)。

飲水および飼料中のナトリウム、マグネシウムまたは硫酸塩濃度は、湿った敷料発生に関連している。家禽用飲水中の許容最大濃度は、ナトリウムが 0.05 g/kg (Muirhead, 1995) ~ 0.25 g/kg (Coetzee, 2005)、マグネシウムが 0.125 g/kg (Schwartz, 1994) ~ 0.25 g/kg (Coetzee, 2005)、硫酸塩が 0.06 g/kg (Keshavarz, 1987) ~ 0.50 g/kg (Coetzee, 2005) である。塩類は世界の飲水

表 26. 高脂肪 DDGS(粗脂肪 13.3%)と低脂肪 DDGS(粗脂肪 7.4%)の脂肪酸組成等(Trupia ら、2016 から抜粋)

成分	高脂肪DDGS	低脂肪DDGS
脂肪酸組成 脂質中%		
C16:0	11.3	11.9
C16:1	0.14	0.13
C18:0	1.73	1.93
C18:1	27.0	27.4
C18:2	57.7	56.3
C18:3	1.50	1.60
その他の脂質 mg/kg		
α-トコフェロール	20.9	20.1
β-トコフェロール	0.45	0.37
γ-トコフェロール	76.0	38.3
δ-トコフェロール	1.4	0.9
α-トコトリエノール	10.9	8.8
γ-トコトリエノール	17.4	9.0
δ-トコトリエノール	1.40	0.3
総トコフェロールおよびトコトリエノール	128.6	77.8
ルテイン	15.7	39.3
ゼアキサンチン	9.4	9.7
β-クリプトキサンチン	3.3	3.4
不明	1.6	3.7
総キサントフィル	29.9	56.1

における一般的な汚染物質であり、必要に応じて飼料中に添加する塩分の量を調整する必要がある。トウモロコシ DDGS は、ナトリウムとイオウが高い場合があり(0.5%および0.6%以上)、DDGSの配合割合が多い飼料では、アニオン・カチオン・バランスと、塩分の添加量が調整されていないと、湿った敷料の発生につながる可能性がある。

結論

トウモロコシ DDGS は、ブロイラーおよび産卵鶏飼料で使用するための優れた飼料原料で、飼料コストを削減し、最適な発育成績、産卵成績および鶏肉と鶏卵の品質をもたらす。家禽用飼料にDDGSを配合する際の最大の課題は、エネルギーと可消化栄養成分含量が供給元によって異なるため、実際に使用しているDDGSの正確なAMEn値、可消化アミノ酸含量および利用可能なリン含量を把握することである。DDGSの粗脂肪含量は、

AMEn値および可消化アミノ酸含量を予測する因子としては不十分である。このため、成分分析値に基づいて実際のAMEn値とSIDアミノ酸含量を正確に推定する予測式が開発されている。公表されている多くの研究において、ブロイラーの発育成績と枝肉の組成は変動しているが、報告されている反応の大部分は、一般的な発育成績と枝肉の組成には変化がないか、または改善されることを示している。実際、最近の報告では、低脂肪DDGSを20%配合したブロイラー前期用飼料を給与し、低脂肪DDGSを24%配合したブロイラー後期用飼料は、許容可能な発育成績と枝肉品質を得ることが出来ることを示している。同様に、産卵鶏の産卵成績と鶏卵の品質への反応は論文によって変動するが、そのほとんどは、変化がないか、一般的な産卵成績と鶏卵の品質が改善されている。正確なAMEn値と可消化アミノ酸含量を用いて低脂肪DDGSを配合した産卵鶏用飼料を精密に設計した場合には、50%配合しても、許容できる産卵成績と鶏卵の品質を得ることが出来る。

引用文献

- Adedokun, S. A., P. Jaynes, R. L. Payne, and T. J. Applegate. 2015. Standardized ileal amino acid digestibility of corn, corn distillers' dried grains with solubles, wheat middlings and bakery by-products in broilers and laying hens. *Poult. Sci.* 94:2480–2487.
- Angel, R., N.M. Tamim, T.J. Applegate, A.S. Dhandu, and L.E. Ellestad. 2002. Phytic acid chemistry: Influence on phytin phosphorus availability and phytase efficacy. *J. Appl. Poult. Res.* 11:471–480.
- Barekatin, M.R., C. Antipatis, M. Choct, and P.A. Iji. 2013a. Interaction between protease and xylanase in broiler chicken diets containing sorghum distillers' dried grains with solubles. *Anim. Feed Sci. Technol.* 182:71–81.
- Barekatin, M.R., C. Antipatis, N. Rodgers, S.W. Walkden-Brown, P.A. Iji, and M. Choct. 2013b. Evaluation of high dietary inclusion of distillers dried grains with solubles and supplementation of protease and xylanase in the diets of broiler chickens under necrotic enteritis challenge. *Poult. Sci.* 92:1579–1594.
- Barekatin, M.R., M. Choct, and P.A. Iji. 2013c. Xylanase supplementation improves the nutritive value of diets containing high levels of sorghum distillers' dried grains with solubles for broiler chickens. *J. Sci. Food. Agric.* 93:1552–1559.
- Bregendahl, K. 2008. Use of Distillers Co-products in Diets Fed to Poultry. In: *Using Distillers Grains in the U.S. and International Livestock and Poultry Industries*, B.A. Babcock, D.J. Hayes, and J.D. Lawrence eds., Midwest Agribusiness Trade Research and Information Center, Center for Agricultural and Rural Development, Iowa State University, Ames. Pp. 99–134.
- Campasino, A., M. Williams, R. Latham, C.A. Bailey, B. Brown, and J.T. Lee. 2015. Effects of increasing dried distillers' grains with solubles and non-starch polysaccharide degrading enzyme inclusion on growth performance and energy digestibility in broilers. *J. Appl. Poult. Res.* 00:1–10 <http://dx.doi.org/10.3382/japr/pfv018>
- Cho, J.H., Z.F. Zhang, and I.H. Kim. 2012. Effects of canthaxanthin on egg production, egg quality and egg yolk color in laying hens. *J. Agri. Sci.* 5:269–274.
- Choi, H.S., H.L. Lee, M.H. Shin, C. Jo, S.K. Lee, and B.D. Lee. 2008. Nutritive and economic values of corn distiller's dried grains with solubles in broiler diets. *Asian-Australasian J. Anim. Sci.* 21(3):414–419.
- Coetzee, C.B. 2005. The development of water quality guidelines for poultry in southern Africa. Ph.D. thesis. Animal and Wildlife Sciences, University of Pretoria, South Africa.
- Collett, S.R. 2012. Nutrition and wet litter problems in poultry. *Anim. Feed Sci. Technol.* 173:65–75.
- Cortes-Cuevas, A.C., S.R. Estrada, J.A. Menocal, E.A. Gonzalez, and C.L. Coello. 2015. Effect of feeding low-oil DDGS to laying hens and broiler chickens on performance and egg yolk and skin pigmentation. *Brazilian J. Poult. Sci.* 17:247–254.
- Corzo, A., M.W. Schilling, R.E. II. Loar, V. Jackson, S. Kin, and V. Radhakrishnan. 2009. The effects of feeding distillers dried grains with solubles on broiler meat quality. *Poult. Sci.* 88:432–439.
- Davies, M.I., G.M. Ritcey, and I. Motzok. 1970. Intestinal phytase and alkaline phosphatase of chicks: Influence of dietary calcium, inorganic and phytate phosphorus and vitamin D3. *Poult. Sci.* 49:1280–1286.
- Deniz, G., H. Gencoglu, S.S. Gezen, I.I. Turkmen, A. Orman, and C. Kara. 2013a. Effects of feeding corn distiller's dried grains with solubles with and without enzyme cocktail supplementation to laying hens on performance, egg quality, selected manure parameters and feed cost. *Livest. Sci.* 15:174–181.
- Deniz, G., S.S. Gezen, C. Kara, H. Gencoglu, Y. Meral, and E. Baser. 2013b. Evaluation of nutrient equivalency of microbial phytase in hens in late lay given maize-soybean or distiller's dried grains with solubles (DDGS) diets. *Br. Poult. Sci.* 54:494–502.
- Dozier III, W.A., and J.B. Hess. 2015. Growth and meat yield responses of Hubbard × Cobb 500 male broilers fed diets formulated with distillers dried grains with solubles varying in ether extract content and inclusion rate from 1 to 33 days of age. *J. Appl. Poult. Res.* 24:436–450.

- Dozier III, W.A., K.R. Perryman, and J.B. Hess. 2015. Apparent ileal amino acid digestibility of reduced-oil distillers dried grains with solubles fed to broilers from 23 to 31 days of age. *Poult. Sci.* 94:379–383.
- El-Hack, M.E.A., M. Alagawany, M.R. Farag, and K. Dhama. 2015. Use of maize distiller's dried grains with solubles (DDGS) in laying hen diets: Trends and advances. *Asian J. Anim. Vet. Advances* 10:690–707.
- Fernandez, S.R., Y. Zhang, and C.M. Parsons. 1995. Dietary formulation with cottonseed meal on a total amino acid versus a digestible amino acid basis. *Poult. Sci.* 74:1168–1179.
- Gacche, S.M., A.B. Kanduri, P.V. Patil, and N.Z. Gaikwad. 2016. Extent of replacement of soybean meal with distillers dried grains with solubles (DDGS) on carcass yield, dressing percentage and feed cost in broiler chickens. *Anim. Sci. Reporter* 10:109–114.
- Guney, A.C., M.Y. Shim, A.B. Batal, N.M. Dale, and G.M. Pesti. 2013. Effect of feeding low-oil distillers dried grains with solubles on the performance of broilers. *Poult. Sci.* 92:2070–2076.
- Hassan, S.M., and A.A. Al Aqil. 2015. Effect of adding different dietary levels of distillers dried grains with solubles (DDGS) on productive performance of broiler chicks. *Intl. J. Poult. Sci.* 14:13–18.
- Hong, E.C., J.C. Na, D.C. You, H.K. Kim, W.T. Chung, H.J. Lee, I.H. Kim, and J. Hwangbo. 2007. Effects of feeding non-salt diet on the induced molting in laying hens. *Korean J. Poult. Sci.* 34:4, 279–286.
- Jiang, W., L. Zhang, and A. Shan. 2013. The effect of vitamin E on laying performance and egg quality in laying hens fed corn dried distillers grains with solubles. *Poult. Sci.* 92:2956–2964.
- Keshavarz, K. 1987. Proper water management for poultry. *Poult. Dig.* (January), pp. 12–22.
- Kim, E.J., J.L. Purswell, and S.L. Branton. 2016. Effects of increasing inclusion rates of a low-fat distillers dried grains with solubles (LF-DDGS) in finishing broiler diets. *Intl. J. Poult. Sci.* 15:182–187.
- Kubas, T.A., and J.D. Firman. 2014. Effects of yellow grease addition to broiler rations containing DDGS with different fat contents. *Intl. J. Poult. Sci.* 13:437–441.
- Liu, N., Y.J. Ru, D.F. Tang, T.S. Xu, and G.G. Partridge. 2011. Effects of corn distillers dried grains with solubles and xylanase on growth performance and digestibility of diet components in broilers. *Anim. Feed Sci. Technol.* 163:260–266.
- Loar, R.E. II, J. S. Moritz, J.R. Donaldson, and A. Corzo. 2010. Effects of feeding distillers dried grains with soluble to broilers from 0 to 28 days posthatch on broiler performance, feed manufacturing efficiency and selected intestinal characteristics. *Poult. Sci.* 89:2242–2250.
- Martinez-Amezcuca, C., C.M. Parsons, and D.H. Baker. 2006. Effect of microbial phytase and citric acid on phosphorus bioavailability, apparent metabolizable energy and amino acid digestibility in distillers dried grains with solubles in chicks. *Poult. Sci.* 85:470–475.
- Masa' deh, M.K. 2011. Dried distillers grain with solubles in laying hen and pullet rations. Ph.D. Thesis, Department of Animal Science, University of Nebraska-Lincoln.
- Masa' deh, M.K., S.E. Purdum, and K.J. Hanford. 2011. Dried distillers grains with soluble in laying hen diets. *Poult. Sci.* 90:1960–1966.
- Mejia, L., E.T. Meyer, P.L. Utterback, C.W. Utterback, C.M. Parsons, and K.W. Koelkebeck. 2010. Evaluation of limit feeding corn and distillers dried grains with soluble in non-feed-withdrawal molt programs for laying hens. *Poult. Sci.* 89:386392.
- Meloche, K.J., B.J. Kerr, N. Billor, G.C. Shurson, and W.A. Dozier III. 2014. Validation of prediction equations for apparent metabolizable energy of corn distillers dried grains with solubles in broiler chicks. *Poult. Sci.* 93:1428–1439.
- Meloche, K.J., B.J. Kerr, G.C. Shurson, and W.A. Dozier III. 2013. Apparent metabolizable energy and prediction equations for reduced-oil corn distillers dried grains with solubles in broiler chicks from 10 to 18 days of age. *Poult. Sci.* 92:3176–3183.
- Min, Y.N. L.L. Li, S.K. Liu, J. Zhang, Y.P. Gao, and F.Z. Liu. 2015. Effects of dietary distillers dried grains with

- solubles (DDGS) on growth performance, oxidative stress and immune function in broiler chickens. *J. Appl. Poult. Res.* 24:23–29.
- Min, Y.N., F.Z. Liu, A. Karimi, C. Coto, C. Lu, F. Yan, and P.W. Waldroup. 2011. Effect of Rovabio® Max AP on performance, energy and nitrogen digestibility of diets high in distillers dried grains with solubles (DDGS) in broilers. *Int. J. Poult. Sci.* 10:796–803.
- Mohammed, A., M.J. Gibney, and T.G. Taylor. 1991. The effects of dietary levels of inorganic phosphorus, calcium and cholecalciferol on the digestibility of phytate phosphorus by the chick. *Br. J. Nutr.* 66:251–259.
- Muirhead, S. 1995. Good, clean water is critical component of poultry production. *Feedstuffs*.
- Mutucumarana, R.K., V. Ravindran, G. Ravindran, and A.J. Cowieson. 2014. Measurement of true ileal digestibility of phosphorus in some feed ingredients for broiler chickens. *J. Anim. Sci.* 92:5520–5529.
- NRC. 1994. Nutrient requirements for poultry. 9th rev. ed. Natl. Acad. Press, Washington, DC.
- Olukosi, O.A., A.J. Cowieson, and O. Adeola. 2010. Broiler responses to supplementation of phytase and aDMixture of carbohydrases and protease in maize–soyabean meal diets with or without maize distiller’s dried grain with solubles. *Brit. Poult. Sci.* 51: 434–443.
- Oryschak, M., D. Korver, M. Zuidhof, X. Meng, and E. Beltranena. 2010. Comparative feeding value of extruded and nonextruded wheat and corn distillers dried grains with solubles for broilers. *Poult. Sci.* 89:2183–2196.
- Paulus–Compart, D.M., A.M. Carlson, G.I. Crawford, R.C. Fink, F. Diez–Gonzalez, A. DiCostanzo, and G.C. Shurson. 2013. Presence and biological activity of antibiotics used in fuel ethanol and corn co–product production. *J. Anim. Sci.* 91:2395–2404.
- Perez, V.G., C.M. Jacobs, J. Barnes, M.C. Jenkins, M.S. Kuhlenschmidt, G.C. Fahey Jr., C.M. Parsons, and J.E. Pettigrew. 2011. Effect of corn distillers dried grains with solubles and *Eimeria acervulina* infection on growth performance and the intestinal microbiota of young chicks. *Poult. Sci.* 90:958–964.
- Purdum, S., K. Hanford, and B. Kreifels. 2014. Short–term effects of lower oil dried distillers grains with solubles in laying hen rations. 93:2592–2595.
- Ravindran, V., W.L. Bryden, and E.T. Kornegay. 1995. Phytates: Occurrence, bioavailability and implications in poultry nutrition. *Poult. Avian Biol. Rev.* 6:125–143.
- Rochelle, S.J., B.J. Kerr, and W.A. Dozier III. 2011. Energy determination of corn co–products fed to broiler chicks from 15 to 24 days of age, and use of composition analysis to predict nitrogen–corrected apparent metabolizable energy. *Poult. Sci.* 90:1999–2007.
- Rostagno, H.S., J.M.R. Pupa, and M. Pack. 1995. Diet formulation for broilers based on total versus digestible amino acids. *J. Appl. Poult. Res.* 4:293–299.
- Salim, H.M., Z.A. Kruk, and B.D. Lee. 2010. Nutritive value of corn distillers dried grains with soluble as an ingredient of poultry diets: A review. *World’ s Poult. Sci. J.* 66:411–432.
- Schilling, M.W. V. Battula, R.E. Loar II, V. Jackson, S. Kin, and A. Corzo. 2010. Dietary inclusion level effects of distillers dried grains with solubles on broiler meat quality. *Poult. Sci.* 89:752–760.
- Schwartz, D.L. 1994. Water quality. In: 131st American Veterinary medical Association Annual Convention, San Francisco, CA.
- Shalash, S.M.M., S. Abou El–Wafa, R.A. Hassan, Nehad A. Ramadan, Manal S. Mohamed, and Hoda E. El–Gabry. 2010. Evaluation of distillers dried grains with solubles as feed ingredient in laying hen diets. *Int. J. Poult. Sci.* 9:537–545.
- Shim, M.Y., G.M. Pesti, R.I. Bakalli, P.B. Tillman, and R.L. Payne. 2011. Evaluation of DDGS as an alternative ingredient for broiler chickens. *Poult. Sci.* 90:369–376.
- Shurson, G.C. 2017. Review article: Yeast and yeast derivatives in feed additives and ingredients: Sources, characteristics, animal responses and quantification methods. *Anim. Feed Sci. Technol.* 235:60–76.
- Soto, C., E. Avila, J. Arce, F. Rosas, and D. McIntyre. 2013.

- Evaluation of different strategies for broiler feed formulation using near infrared reflectance spectroscopy as a source of information for determination of amino acids and metabolizable energy. *J. Appl. Poult. Res.* 22:730–737.
- Sun, H., E.J. Lee, H. Samaraweera, M. Persia, and D.U. Ahn. 2013. Effects of increasing concentration of corn distillers dried grains with solubles on chemical composition and nutrient content of egg. *Poult. Sci.* 92:233–242.
- Sun, H., E.J. Lee, H. Samaraweera, M. Persia, H.S. Ragheb, and D.U. Ahn. 2012. Effects of increasing concentrations of corn distillers dried grains with solubles on the egg production and internal quality of eggs. *Poult. Sci.* 91:3236–3246.
- Świątkiewicz, S., A. Arczewska-Włosek, and D. Jozeak. 2014a. Bones quality indices in laying hens fed diets with a high level of DDGS and supplemented with selected feed additives. *Czech J. Anim. Sci.* 59:61–68.
- Świątkiewicz, S., A. Arczewska-Włosek, and D. Jozeak. 2014b. Feed enzymes, probiotic or chitosan can improve the nutritional efficiency of broiler chicken diets containing a high level of distillers dried grains with solubles. *Livest. Sci.* 163:110–119.
- Świątkiewicz, S., A. Arczewska-Włosek, J. Krawczyk, M. Puchała, and D. Józeak. 2013. Effects of selected feed additives on the performance of laying hens given a diet rich in maize dried distiller's grains with solubles (DDGS). *Brit. Poult. Sci.* 54:478–485.
- Świątkiewicz, S., and J. Koreleski. 2008. The use of distillers dried grains with solubles (DDGS) in poultry nutrition. *World's Poult. Sci. J.* 64:257–266.
- Świątkiewicz, S., and J. Koreleski. 2006. Effect of maize distillers dried grains with solubles and dietary enzyme supplementation on the performance of laying hens. *J. Anim. Feed Sci.* 15:253–260.
- Tahir, M. and G.M. Pesti. 2012a. A comparison of digestible amino acid databases: Relationship between amino acid concentration and digestibility. *J. Appl. Poult. Res.* 21:1–12.
- Tahir, M., and G.M. Pesti. 2012b. Comparison of ingredient usage and formula costs in poultry feeds using different amino acid digestibility databases. *J. Appl. Poult. Res.* 21:693–705.
- Tahir, M., M.Y. Shim, N.E. Ward, C. Smith, E. Foster, A.C. Guney, and G.M. Pesti. 2012. Phytate and other nutrient components of feed ingredients for poultry. *Poult. Sci.* 91:928–935.
- Tamin, N.M., and R. Angel. 2003. Phytate phosphorus hydrolysis as influenced by dietary calcium and micro-mineral source in broiler diets. *J. Agric. Food Chem.* 51:4687–4693.
- Tangendjaja, B., and E. Wina. 2011. Feeding value of low and high protein dried distillers grains and corn gluten meal for layer. *Media Peternakan* p. 133–139. <http://medpetjournal.ipb.ac.id/> doi: 10.5398/medpet.2011.34.2.133
- Trupia, S., J.K. Winkler-Moser, A.C. Guney, R. Beckstead, and C-Y. O Chen. 2016. Nutritional quality of eggs from hens fed distillers dried grains with solubles. *Poult. Sci.* 2592–2601.
- Waldroup, P.W., Z. Wang, C. Coto, S. Serrate, and F. Yan. 2007. Development of a standardized nutrient matrix for corn distillers dried grains with solubles. *Intl. J. Poult. Sci.* 6:478–483.
- Wamsley, K.G.S., R.E. Loar II, K. Karges, and J.S. Moritz. 2013. The use of practical diets and regression analyses to determine the utilization of lysine and phosphorus in corn distillers dried grains and solubles using Cobb 500 male broilers. *J. Appl. Poult. Res.* 22:279–297.
- Wang, Z., S. Cerrate, C. Coto, F. Yan, and P.W. Waldroup. 2008. Evaluation of high levels of distillers dried grains with solubles (DDGS) in broiler diets. *Intl. J. Poult. Sci.* 7:990–996.
- Wang, Z., S. Cerrate, C. Coto, F. Yan, and P.W. Waldroup. 2007. Effect of rapid and multiple changes in level of distillers dried grains with solubles (DDGS) in broiler diets on performance and carcass characteristics. *Intl. J. Poult. Sci.* 6:725–731.
- Wu-Haan, W., W. Powers, R. Angel, and T.L. Applegate. 2010.

The use of distillers dried grains plus soluble as a feed ingredient on air emissions and performance from laying hens. *Poult. Sci.* 89:1355–1359.

Zhao, F., L.Q. Ren, B.M. Mi, H.Z. Tan, J.T. Zhao, H. Li, H.F. Zhang, and Z.Y. Zhang. 2014. Developing a computer-controlled simulated digestion system to predict the concentration of metabolizable energy of feedstuffs for

rooster. *J. Anim. Sci.* 92:1537–1547.

Zhu, J.L., Z.K. Zeng, G.C. Shurson, and P.E. Urriola. 2017. A meta-analysis to predict the concentration of standardized ileal digestible amino acids in distillers dried grains with solubles for poultry. *Poult. Sci.* (in review)

19章: DDGS を配合した家禽用飼料のペレット加工

はじめに

DDGS は家禽用飼料における経済的なエネルギーおよび可消化栄養素源であるが、ペレット加工において望ましい品質と生産効率を得るためには、多くの場合、配合割合は 10%未満に制限される。その結果、配合飼料工場では、ペレット品質と生産効率を保つために、DDGS を多量に配合した場合のコストメリットを犠牲にせざるを得ない。

ペレット加工は家禽用飼料製造時に、最も一般的に使用される加熱処理であり (Abdollah ら、2013)、飼料の無駄を減らし、でん粉の一部を糊化することによるエネルギーと栄養成分の消化率を改善することにより、飼料効率を高める (Richert and DeRouchey, 2010; NRC, 2012)。これに加えて、飼料のペレット加工により、粉塵の減少、輸送中の飼料成分の分離、有害微生物の抑制、粉餌飼料における粒子径が大きい原料の選り食いの抑制、かさ密度の増加による取扱い特性の向上が期待できることである (Abdollahi ら、2012; NRC, 2012)

ペレット加工工程

ペレット加工は、湿度、熱、圧力を使用して小さな粒子を大きな粒子に凝集させる機械的なプロセスである (Falk, 1985)。市販のペレットは、畜種と給与用途に応じて、直径 (0.16~0.75 mm)、形状 (三角形、正方形、楕円形または円筒形) および長さを調節している (California Pellet Mill Co., 2016)。

ペレット加工工程の最初のステップは、粉砕機を用いて飼料原料 (主に穀物) の粒子径を小さくすることである。一般に、ペレット加工する飼料は、ペレットの耐久性を高めるために、粉餌 (マッシュ) 飼料に比べ粒子径が小さい (Wondra ら、1995)。次のステップは、飼料原料を個別に計量し、配合設計に基づく割合でミキサーに投入し、適切な時間混合する。次いで、スチームコンディショナー内で蒸気を使用して熱と水分含量を適切なバランスに整える (Smallman, 1996)。スチームコンディショニングにはエネルギーが必要であり、加工コストの上昇を招くが、ドラ

イコンディショニングと比べて、ペレットの生産性と PDI (ペレット耐久指数) が向上する (Skoch ら、1981)。スチームコンディショナー内で飼料に蒸気を吹き込んだ後、湿った高温の飼料がチャンバーに流れ込み、ダイを通過してペレットが形成される。ダイから排出されたペレットはクーラーに入り、品温が環境温度より 8°C 程度低くなるまで冷却される (Zimonja ら、2007)、この間に、周囲の空気の流れにより水分含量が 15~17% から 10~12% に低下する (Robinson, 1976)。クーラーから集められた微粉は、ペレットチャンバーに戻されてペレットに再加工される。一部の家禽用飼料では、冷却されたペレットをクランブラーで荒砕きしたクランブル飼料も利用されている。

ペレットの耐久性、エネルギー消費量および生産効率に影響を与える要因

高品質の家禽用ペレット飼料を製造する際の主要な目標は、加工工程におけるエネルギーコストを最小限に抑えながら、ペレットの耐久性を高め、生産効率を高めることである (All About Feed, 2012)。一般に、高いペレット耐久性が達成できると、ペレットが製造時から家禽が摂取するまでの間に損傷を受けずに無傷のままである可能性が高くなる。ただし、ペレットの耐久性を高めるために行われている措置の多くはペレットミルの生産効率を低下させ、エネルギーコストの増加を招く (Behnke, 2006)。高品質のペレット製造は、飼料の種類、油脂量、蒸気量、粒子径、水分含量、ダイの材質、ローラーの材質、ローラーとダイのギャップなどの要因に影響される (California Pellet Mill Co., 2016)。ペレット加工工程で使用されるエネルギーの主な用途は、蒸気の発生と、フィーダー、コンディショナー、ペレットミルおよびペレット冷却システムの運転に必要な電力 (kWh/トンで測定) であるが、使用される電力のほとんど (最大 72%) は蒸気の発生に費やされており (Skoch ら、1983)、Payne (2004) は、ブロイラー用飼料におけるペレット加工での目標電力消費量は 10 kWh/トンであるとしている。ペレットの耐

久性はわずかに低下するものの、ペレットの品質、生産効率、製造コストを、効果的に最適化する意思決定支援システム(Effective Decision Support Systems)が開発されている(Thomasら、1997)。

ダイの特性(材質、孔の形状、孔のパターンおよび数)は、ペレットの耐久性、生産効率、エネルギー消費量に影響する(Stark、2009)。飼料がダイを通過する際の摩擦とその後の温度上昇には、ダイ内部の材質が大きく影響する(Behnke、2014年)。孔の設計はストレートボアまたはレリーフ状だが、ダイにおける最も重要な要素は、孔の直径(D)に対するダイの厚さ(L)であり、一般にL:Dで示されている。L:Dが増える(ダイが厚くなる)と、摩擦係数とダイでの保持時間が長くなるため、ペレットの耐久性は向上するが、生産効率が低下し、エネルギー消費量が増加する(Traylor、1997)。

ペレットの物理的な品質とは、微粉の割合を最小限に抑えながら、畜産農家の給餌器に届くまでの間の袋詰め、保管、輸送中にペレットが無傷で残る能力を指している(Cramerら、2003; Amerahら、2007)。ペレットの品質は通常、PDI(ペレット耐久性指数、ASAE 1997)で示される。高いPDIを達成するためには、固体ブリッジの形成、固体粒子間の引力、機械的相互結合、接着力と凝集力および界面力と毛管圧という重要なメカニズムがある。(Thomas and van der Poel、1996; Kaliyan and Morey、2006)。

ペレットの品質と同様に、ペレットミルのエネルギー消費量は、ダイの直径、押出し速度、L:D、飼料原料の水分含量と成分組成などの変数に依存している(Tumuluruら、2016)。ペレットミルの電気使用量は、生産効率または時間あたりのエネルギー単位として定量化され、一般にkWh/トンで示されており(Fahrenholz、2012)、飼料の配合設計によるPDIへの効果と、加工によるPDIへの効果をモデル化することで検証できる。生産効率を最大化した時のペレット飼料1トンあたりのエネルギー消費量の最小化は、飼料の特性とダイの特性により影響を受け(Fahrenholz、2012)、PDIに対する配合および加工係数の影響をモデル化して調査することで実現できる。

ペレットミルの生産効率は、PDIとエネルギー消費量

に影響を与えるもう1つの重要な要素である。Stark(2009)は、ペレットミルの生産効率を545kg/時から1646kg/時に高めると、ペレットミルの効率が73.3から112.4kg/馬力時間に増加し、PDIが55.4から30.2まで直線的に低下することを明らかにしている。コンディショニング温度を高めると、機械的な摩擦が減少するため、高いPDIを実現する上で重要な要素となり(Skochら、1981)、PDIが増加して、エネルギー消費量が減少する(Pfost、1964)。でん粉の糊化は、コンディショニング温度が上昇すると減少する(Abdollahiら、2011)。コンディショナーパドルのピッチを変更すると(Briggsら、1999)、保持時間(熱)が増加し、PDIが高まる(Gilpinら、2002)。ただし、PDIの改善に対する蒸気圧の影響には一貫した影響は示されていない。Cutlipら(2008)による報告では、蒸気圧の増加は、PDIをわずかに改善したとしているのに対し、Thomasら(1997)は、蒸気圧とPDIの間には明確な関係はないと報告している。このような関係性は、PDIや生産効率に蒸気圧の影響がなかったとする初期の研究でも観察されている(Stevens、1987)。その結果、Briggsら(1999)は、高いPDIを達成するための蒸気圧は207-345kPaで十分であると結論している。

多くの配合飼料工場では、飼料の粒子径がペレットのPDIに大きな影響を与えたとの認識を持っているが、これを裏付ける明確な科学的な証拠はない。理論的には、飼料の粒子径が大きくなるとペレットが崩れやすくなる(California Pellet Mill Co.、2016)。ただし、Stevens(1987)は、粉碎トウモロコシの粒子径が生産効率またはPDIには影響を及ぼさないことを示している。同様に、Starkら(1994)は、飼料の粒子径を543 μ mから233 μ mに減少させると、PDIがわずかに増加したと報告しているが、Reeceら(1985)の報告では、粒子径を670 μ mから1289 μ mに増加させても、PDIがわずかに低下しただけだった。飼料の粒子径は、望ましいペレット品質と製造効率を達成するための主要な要素ではないが、飼料の組成はダイの潤滑と摩耗および飼料のかさ密度に影響するため重要な要素となり(Behnke、2006)、ペレット加工係数に基づく様々な飼料原料の特徴付けが行われている(Payneら、2001)。これらの相対的な飼料原料のペレット

加工係数を配合設計時の制約変数として用いることは理論的には可能であるが、配合設計の主な目的は、安価で家禽の栄養要求量を満たすことであるため、実現性はない。

家禽用飼料のでん粉含量は PDI に大きく影響する。でん粉を 65% 含む飼料では最大の PDI を達成できるが、たん白質含量が高い低でん粉飼料は PDI を低下させる (Cavalcanti and Behnke, 2005a)。飼料中のでん粉とたん白質含量は、コンディショニング温度よりも PDI に大きな影響を与えることが示されている (Wood, 1987)。飼料の油脂含量を高めると PDI が減少し (Cavalcanti and Behnke (2005a)、油脂を 1.5 または 3% 添加すると PDI が 2 および 5% 減少することが示されている (Stark ら、1994)。ペレット加工前の飼料は、飼料の成分組成間に多くの相互作用があるため、ペレット加工工程中のエネルギー消費量を必ずしも削減できない可能性がある (Briggs ら、1999)。Cavalcanti and Behnke (2005b) は、トウモロコシ、大豆粕および大豆油を配合した飼料の CP (粗たん白質) 含量の増加は PDI を増加させるとしている。

加工前の粉餌の水分含量は、PDI と加工時のエネルギー消費量に影響を及ぼすもう 1 つの主要な要因である。Gilpin (2002) は、水分含量の増加が PDI を高め、エネルギー消費量を減少させることを示している。さらに、ペレット加工する前に水分を 5% 加えると、高油脂飼料をペレット加工する際の PDI が高まることが示されている (Moritz ら、2002)。

ペレット品質の測定

ペレットの耐久性は、機械式タンブリングや空気式タンブリングなどの様々なタンブリング試験で測定でき、Stoke's[®] Tablet Hardness Tester、タンブリングボックステスト、Holman Pellet Tester 等がある (Behnke, 2001; Winowski ら、1962)。飼料業界で行われている標準的なペレット耐久性試験は ASAE S269.4 (ASAE Standards, 2003) であり、これにより PDI を測定する。これは、篩にかげられたサンプルをタンブルボックス内で転倒させた

後に残るペレット全体の割合と定義されている。この他に使用される手法には、TekPro (英国、ノーフォーク) で製造している Homen pellet tester があるが使用頻度は少ない。Holmen pellet tester は、ピラミッド型の孔のあいたチャンバー内でペレットを攪拌し 20~120 秒においてチャンバーから出た微粉により定量化している。ASAE S269.4 と Holmen pellet tester を比較した報告は 2 報のみである。Winowski (1998) は両方法の結果は相関していたと報告し、Fahrenholz (2012) も両方法の結果は相関しているが、ASAE S269.4 を使用して測定した PDI 値にはより一貫性があるとしている。Fahrenholz (2012) も、PDI のペレットの硬度、密度、保持時間、初期/最終水分間と有意な相関があったが、これらの相関性は低く、PDI の予測変数因子としては使用できないとしている。

DDGS の成分組成

DDGS の化学組成は、米国のエタノール産業が収益性を高めるための新しい工程を採用するのに伴い変化し続けている。DDGS の成分組成はペレットの品質に影響を与える重要な因子であるため、供給源間のバラツキと DCO (ジスチラーズ・コーン油) の抽出による影響を理解しておくことは重要である。表 1 に示すように、現在生産されている低脂肪 DDGS (Kerr ら、2013) は、これまでの伝統的な DDGS (Spiels ら、2002; Belyea ら、2004) に比べて、粗脂肪、NDF およびでん粉含量が比較的低く、CP 含量が高い。しかし、これらの成分組成の変化に関わらず、DDGS の配合割合が高い家禽用飼料では、高品質のペレットを製造することは難しい。なぜなら、これらの化学成分は、望ましい PDI の達成に悪影響を与えるからである。

California Pellet Mill Company (2016) は、「ペレット性」の特性に基づいていくつかの一般的な成分を分類している。DG (ジスチラーズグレイン) は、ペレット加工性が低く、ダイに対して中程度の研磨性があると分類されている。表 2 に示すように、DDGS のペレット加工性が低いと分類される理由はいくつかある。まず、DDGS は、水分

表 1. 粗脂肪含量が異なる DDGS の成分組成

栄養成分	トウモロコシDDGS (粗脂肪10%以上)	トウモロコシDDGS (粗脂肪10%以下) ³
水分 %	11.1 (9.8-12.8) ¹	12.5 (10.0-14.5)
粗たん白質 %	30.8 (28.7-33.3) ^{1,2}	31.2 (29.8-32.9)
粗脂肪 %	11.5 (10.2-12.6) ^{1,2}	8.0 (4.9-9.9)
NDF %	41.2 (36.7-49.1) ¹	32.8 (30.5-33.9)
でん粉 %	5.3 (4.7-5.9) ²	2.4 (0.8-3.4)
灰分 %	5.2 (4.3 - 6.7) ^{1,2}	5.4 (4.9-6.1)

¹ Spiehs et al. (2002) ² Belyea et al. (2004) ³ Kerr et al. (2013)

表 2. 飼料成分がペレット品質と生産能力に及ぼす影響 (California Pellet Mill Co., 2016 から転載)

飼料原料の特性	ペレット品質への影響	ペレットミルの生産能力への効果
水分	水分含量の増加により品質が向上	N/A
たん白質	たん白質が高いと品質が向上	N/A
脂肪	脂肪含量が2%以上の場合品質が低下	脂質含有量が多い高いと生産速度が高まる
繊維	繊維含量が高いと品質が向上	繊維含量が多いと生産能力が高まる
でん粉	デンプン含量が多いと、加工時の高温多湿で糊化しない限り、品質が低下	N/A
嵩比重	N/A	嵩比重が高いと生産能力が高まる
粒度	細粒あるいは州程度の粒子により品質が向上	細粒あるいは州程度の粒子が生産能力を高める

含量が比較的 low、高品質のペレットを製造するためには、コンディショナーで供給される蒸気に加えて、水分を加える必要がある。DDGS の CP 含量が比較的高いと、ペレット加工中にたん白質が可塑化することでペレットの品質が高まるが、DDGS では脂肪含量が比較的多く、飼料への配合量と他の原料由来の油脂量によって、ペレットの品質が低下する。DDGS は比較的多量の繊維を含んでいるが、繊維をペレットミルで圧縮することは難しいため、ペレットの生産効率が低下する。DDGS のでん粉含量は低いため、ペレットの品質向上にはつながらない。加えて、DDGS は適度なかさ密度を持っているため、飼料中の他の飼料原料のかさ密度や配合量によっては生産効率を低下させる可能性がある。DDGS の粒子径は、供給源によって 294 μm から 1,078 μm で変動する (Kerr ら、2013)。微粉および中程度の粒子径は、重量当たりの表面積が大きく、蒸気由来の水分をより多く吸収するため、ペレットの品質を向上させ、粒子径が大きい成分から微

粉が生成されるための破壊点として機能するのを防ぐ可能性がある。さらに、粒子径が低いまたは中程度の原料と飼料は、ダイの潤滑性を改善し、生産効率を高める可能性がある。

家禽用飼料のペレット加工

家禽用飼料のペレット加工の利点と制限

一般に、ペレット加工したブロイラー用飼料は、粉餌に比べて発育成績が優れる。Jafarnejad ら (2010) は、クランブル飼料と粉餌を給与したブロイラーの発育成績を比較し、クランブル飼料は増体量と飼料効率を改善したと報告している。以前の研究でも、高品質のペレット飼料をブロイラーに給与した際に同様の結果が示されている (Jensen ら、1962; Nir ら、1994)。ペレット加工による増体量と飼料効率の改善は、飼料摂取量増加の結果である (Engberg ら、2002; Svihus ら、2004; Abdollahi ら、2011)。ペレットの品質は最適な飼料摂取量を達成するために

重要で、崩れていないペレットの割合が増加すると、崩れた微粉の摂取割合が低下し、増体量が高まる(Lilyら、2011)。さらに、まったく崩れていないペレットでは、AMEn(窒素補正した見かけの代謝エネルギー)価が 197 kcal/kg高まると推定されている。ペレットが崩れて微粉の割合が高まると AMEn 価は低下するが、微粉の割合が 80%(正常なペレットが 20%)である場合でも AMEn 価は 76 kcal/kg高まった(McKinney and Teeter, 2004)。同様に、Skinner-Nobleら(2005)は、ペレット加工により、粉餌に比べて AMEn 価が 151 kcal/kg高まったと報告している。このようなエネルギー価の改善は、粉餌を給与する場合と比べて、飼料摂取時の熱生産が少なく、その分を発育のためのエネルギーに振り向けることが出来ることが要因となっている可能性がある(Latshaw and Moritz, 2009)。

ブロイラー用飼料をペレット加工することで、飼料の無駄が減り(Jensen, 2000)、バランスが取れていない飼料を摂取した場合に発生しやすい発育成績への悪影響を最小限に抑えることが出来る(Falk, 1985)。さらに、ペレット飼料を給与した家禽は、摂取時間が粉餌飼料に比べて短くなり、飼料摂取で消費されるエネルギー量が少なくなる(Jensenら、1962; Jonesら、1995; Vilarinoら、1996)。Nirら(1994)は、28~40日齢のブロイラーは活動的ではなく、ペレット飼料を給与したブロイラーの飼料摂取時間は、粉餌飼料の 1/3 だったと報告している。

ブロイラーの発育成績を最大にするための最適なペレット径と長さに関する研究は少ない。Abdollahi and Ravindran(2013)は、長さが 3、5 または 7 mmのペレットを比較し、ペレットが長くなると PDI とペレットの硬度が高まったが、3 mmのペレットでは、同様の増体量を示した長さが 3 mm以上のペレットに比べて飼料摂取量が増加した。

ペレット加工により、原料の分離が最小化され(Greenwood and Beyer, 2003)、かさ密度が増加することで、輸送と保管が効率的となり、配合飼料工場と飼育農家における粉塵の発生が減少する(Abdollahiら、2013)。

コンディショニング温度は一般的には 80~90°Cであるが、サルモネラやカンピロバクターなどの有害微生物の減少と同時に、ペレット品質をより高めるために、コンデ

ィショニング温度を高めることがある(Abdollahiら、2013)。しかし、エネルギーと栄養成分の消化率(Abdollahiら、2011)だけでなく、飼料に添加した酵素とビタミンの活性を低下させる可能性がある(Abdollahiら、2013)。

飼料中の有害微生物抑制に関する最適なコンディショニング温度は 80°C(Veldryatteranら、1995)であり、サルモネラを含まない飼料を生産するコンディショニング温度は 85°Cが最適である(Jones and Richardson, 2004)。McCapesら(1989)は、サルモネラと大腸菌の完全な不活化には、水分含量 14.5%、コンディショニング温度 85.7°C、加熱時間 4.1 分が必要であるとしている。飼料のペレット加工は、剪断、熱、滞留時間および水分含量の組み合わせにより、飼料中のたん白質の部分的な変性を引き起こし(Thomasら、1998)、溶解度を低下させ、消化率を改善する(Voragenら、1995)。残念ながら、高温で低水分飼料を処理すると、メイラード反応(褐色化)が起こり、たん白質やアミノ酸(特にリジン)、炭水化物の消化率が低下する可能性がある(Pickford, 1992; Hendriksら、1994; Thomasら、1998)。しかし、Hussar and Robblee(1962)は、ペレット加工の際に使用される一般的なコンディショニング温度がリジンの消化率に及ぼす影響は非常に少ないことを示唆している。

飼料に添加されている酵素は熱処理の影響を受けやすく、ペレット加工により酵素活性が低下する事例がよく見られる。Inbarr and Bedford(1994)は、ブロイラー用飼料をコンディショニング温度 75、85 または 95°Cで、30 秒または 15 分間処理した場合の、飼料に添加した β -グルカナーゼの活性、でん粉、 β -グルカン、非でん粉性多糖類への影響と発育成績を調査した。その結果、コンディショニング温度が高まると飼料効率と増体量は二次曲線的に低下し、飼料中の β -グルカナーゼ活性が高まると、飼料効率と増体量は直線的に改善された。具体的には、コンディショニング温度 75°Cで 30 秒間処理したペレット飼料中の β -グルカナーゼ活性は 66%低下した。この結果は、ペレット加工が一部の酵素の活性を低下させることを示しているが、ブロイラーの発育成績は、コンディショニング温度が 85°C以上の場合にのみ影響を受けた(Inbarr and Bedford, 1994)。

DDGS を配合した家禽用飼料のペレット加工

DDGS を 5~7%配合した場合、飼料中の粗脂肪含量が増加するが、でん粉が低下するため、ペレット加工工程中で粒子の結合に必要なでん粉が最小限となり、ペレット加工が困難となる場合がある (Behnke, 2007)。Shimら (2011) は、DDGS をブロイラー中期用飼料に 8%、後期用飼料に 16%配合するとペレットの耐久性が低下することを報告している。ただし、この報告では、DDGS の配合量の増加と対応して、油脂も添加されていたことから、これがペレットの耐久性の低下に影響した可能性もある。対照的に、いくつかの研究では、ブロイラーの発育成績には影響を及ぼさず、DDGS の配合割合をより高めたペレット飼料を製造することが出来ることが報告されている。Wangら (2007a, b, c) は、DDGS を最大 30% 配合したペレット飼料を用いた飼育試験を行っている。これらの研究ではペレットの耐久性は測定されていないが、いずれの飼料でも粘結剤を使用しており、DDGS を 15% 配合した飼料のペレット品質は対照飼料と同等であり、30% 配合した飼料より崩れたペレットの割合が少なかった (Wangら, 2007a, b)。

Minら (2008) は、粗脂肪含量が 8.9% の DDGS の配合割合 (0, 15 または 30%)、グリセリンの添加 (無添加または 5% 添加) が、家禽油脂を添加した等エネルギーのトウモロコシ・大豆粕主体飼料を、0~42 日齢のブロイラーに給与した。前期用飼料のペレット径は 2.38 mm、中期および後期用飼料のペレット径は 4.76 mm とした。その結果、2 mm 篩を通過する崩れたペレットの割合は、DDGS の配合割合が高まるとともに増加した (表 3)。しかし、崩れたペレットの割合が多いにも関わらず、DDGS を 15 および 30% 配合した飼料を給与したブロイラーの体重は 14 日齢で高まり、28 日齢および 42 日齢では差がなかった。DDGS を配合していない対照飼料の飼料要求率は 1.65 であったのに対して、DDGS を 15% 配合した飼料では 1.64 と差がなく、30% 配合した場合には飼料摂取量が増加したため、飼料要求率が劣った (1.71)。これはおそらく崩れたペレットの割合が増加したためだと考えられる。DDGS を 30% 配合した飼料では、枝肉歩留が低下した

が、胸肉量には影響がなかった。

その後公表された Minら (2009) の報告では、DDGS の配合割合を 25% まで高めると、崩れたペレットの割合が 1.49 から 10.81% に高まったが、粘結剤として、リグノスルホン酸を添加することで、ペレットの品質が改善され、崩れたペレットの割合が減少した。

家禽用の DDGS 配合飼料をペレット加工する際の生産効率を評価する最初の包括的な研究は、Loarら (2010) によって行われた。DDGS を 0, 15 または 30%、DDGS 30% と砂 (粒子径 450 μm) を 2% 配合した飼料に、家禽油脂を 1.90~3.88% 添加し、直径 30.48 cm、0.476 \times 4.496 cm のダイを使用して、コンディショニング温度 82°C、蒸気圧 262 kPa で加工した。その結果、DDGS の配合割合の増加に伴い、崩れたペレットの割合が増加し、PDI が減少した。DDGS を 30% 配合した飼料に砂を 2% 添加してもペレットの品質は改善されなかった。これらの変化は、各飼料の脂肪含量は家禽油脂添加により増加していること、かつ、DDGS の配合割合の増加に伴って配デンプン量が減少したことによるものと思われる (表 4)。

Salmon (1985) は、ブロイラー用飼料中の脂肪含量を高めるとペレットの品質が低下することを示している。かさ密度も、DDGS の配合量の増加に伴い減少する。これは、これらの飼料で部分的に置き換えたトウモロコシに比べて DDGS のかさ密度が低いことによる。しかし、ペレットミルの生産効率は、DDGS の配合割合が 0, 15 または 30% の飼料間で同様だった。彼らは、DDGS を 30% 配合した場合の生産効率の数値的な低下は、ペレットダイ内の研磨効果を有する無機リン添加量の減少に起因する可能性があることを示唆している。DDGS には利用可能なリンがかなりの量含まれているため、家禽用飼料に DDGS を配合すると、リンの要求量を充足させるために必要な無機リンの添加量を減らすことが出来る。コンディショナーの電気使用量は、DDGS 30% 配合飼料で最大だったが、ペレットミルの電気エネルギー使用量は、DDGS の配合量の増加に伴って減少した。ペレットミルの処理量は、油脂の添加量に伴って増加することが示さ

表 3. ブロイラー用のペレット品質への DDGS 配合割合の影響 (Min ら、2008 から改編)

飼料の種類	DDGS配合割合 %	2 mm篩を通過するペレットの割合 %		
		平均	標準偏差	変動係数
前期用 ¹	0	1.05	0.67	63.32
	15	4.29	0.30	7.02
	30	12.04	2.40	19.90
中期用 ¹	0	10.53	3.02	28.66
	15	18.96	7.94	41.88
	30	26.89	3.38	12.58
後期用 ²	0	12.83	6.34	49.40
	15	26.60	11.55	43.43
	30	42.64	16.68	39.11

¹ 2.38 mm径のダイを使用してペレット加工、² 4.76 mmのダイを使用してペレット加工

表 4. DDGS の配合割合と、ペレット品質、生産効率および電気エネルギー使用量 (Loar ら、2010 から改編)

DDGS配合割合 %	Fines ² %	PDI ³ %	かさ密度 kg/m ³	総生産率 トン/時	コンディショナーの相対電気エネルギー使用量、kwh/トン	ペレットミルの相対電気エネルギー使用量、kwh/トン
0	30.8 ^c	74.4 ^a	631.8 ^a	1.211	0.659 ^{bc}	6.531 ^a
15	41.7 ^b	66.8 ^b	622.8 ^b	1.266	0.646 ^c	5.127 ^b
30	54.2 ^a	62.1 ^c	618.3 ^b	1.143	0.749 ^a	4.775 ^c
30+砂 ⁴	54.5 ^a	62.3 ^c	616.9 ^b	1.149	0.723 ^{ab}	5.019 ^{bc}

a-b異符号間で有意差あり (p<0.05)

¹ 各4バッチの平均

² クーラーにおけるペレット飼料に含まれる粉化の比率

³ ペレットの耐久性指数: ASAE標準S269.4 (ASAE、1997)

⁴ 全飼料の2%量を添加

れている (Thomas ら、1998) ため、エネルギー使用量におけるこれらの差は、油脂の添加量が原因である可能性がある。一般的に、砂をくわえると、様々なペレットの品質と製造効率が改善されると考えられているが、この報告では影響はなかった。興味深いことに、DDGS を 0 または 8% 配合した前期用クランブル飼料 (0~14 日齢)、0、7.5、15、22.5 または 30% 配合した中期用ペレット飼料 (14~28 日齢) を給与した場合、中期用飼料への DDGS 配合量が 15% 以上の場合には増体量と飼料摂取量が低下した。

最近の研究では、Wamsley ら (2013) は、DDGS の配合割合の増加は、生産効率が高い後期用飼料においてはペレットの品質には影響を及ぼさない傾向があることを示している (表 5)。興味深いことに、DDGS の配合割合を

高めると、ペレットミルによるエネルギー消費量が減少する傾向を示すが、ペレットの品質、生産効率、電気エネルギー使用量の差が DDGS の配合によるものか、油脂の添加量によるものなのかはわからない。

最近のいくつかの研究では、ブロイラー用飼料における低脂肪 DDGS のペレット加工に関する評価が行われている。Dozier ら (2015) は、粗脂肪含量が 5.4% (低脂肪)、7.8% (中脂肪)、および 10.5% (高脂肪) の DDGS を 5、7 または 9%、あるいは、8、10 または 12% 配合した前期、中期、後期用飼料を給与した場合のブロイラーの発育成績と枝肉組成を調査した。低脂肪および中脂肪 DDGS 飼料では家禽油脂の添加量を増加させた。後期用飼料について New Holmen pellet tester を用いて PDI を測定した結果、粗脂肪含量が異なる 3 種類の DDGS を配合し

表 5. DDGS の配合割合と、ペレット品質、生産効率および電気エネルギー使用量(Wamsley ら、2013 から改編)

飼料	DDGS 配合割合 %	脂質添加量 ¹ %	Fines ² %	PDI ³ %	総生産率 トン/時	コンディショナーの相対電気エネルギー使用量、kwh/トン	ペレットミルの相対電気エネルギー使用量、kwh/トン
前期用	0	1.25	12.2	86.7	0.712	0.170	6.36
	4	1.38	15.1	85.2	0.824	0.042	5.35
中期用	0	1.45	11.4	78.4	0.819	0.059	5.56
	5	1.63	6.8	78.8	0.816	0.067	5.58
	10	1.81	14.6	81.2	0.789	0.043	4.93
後期用	0	1.59	6.7	71.1	1.22	0.116	4.94
	10	1.96	11.2	64.3	1.20	0.144	4.87
	20	2.43	10.0	65.8	1.18	0.117	4.12

¹ ペレット加工前に添加する脂質

² クーラーにおけるペレット飼料に含まれる粉化の比率

³ ペレットの耐久性指数

た飼料では PDI が変化し、DDGS を 9% 配合した場合の PDI は、低脂肪、中脂肪および高脂肪 DDGS 飼料で、それぞれ 75.6、70.8 および 88.3% だった。これらの研究者らは、低脂肪および中脂肪 DDGS を配合した飼料への家禽油脂の添加量が多いほど、PDI が数値的に低下することを示唆している。しかし、Shim ら(2011)によって報告された結果と同様に、DDGS の配合割合の増加による PDI の減少は、発育成績には悪影響を及ぼさなかった。

Kim ら(2016)は、28~42 日齢(後期 I)と 43~56 日齢(後期 II)の 2 種類の後期用飼料への粗脂肪含量が 7.4% の低脂肪 DDGS の最大配合量を調査する試験を実施している。DDGS の配合量は、後期 I では 0、8、16、18、24 または 30%、後期 II では 0、8、16 または 24% であった。すべての飼料は、コンディショナー温度 85°C で 0.476 × 3.81 cm のダイを用いてペレット加工した。この報告では、ペレットの品質は測定されていないが、後期 I および後期 II において、DDGS を最大 24% 配合しても、発育成績と枝肉特性には差がなかった。この結果は、最適なペレット品質は得られない可能性はあるものの、比較的高い配合割合(24%)で DDGS を使用しても、許容可能な発育成績と枝肉組成を得られることを示している。

最後に、家禽に対する DDGS 飼料へのエクストルーダ加工の影響を評価した報告を紹介する。Oryschak ら(2010)は、小麦 DDGS およびトウモロコシ DDGS を 0、15 または 30% 配合した飼料を、二軸のエクストルーダーで処理すると、トウモロコシ DDGS のアミノ酸の AID(見か

けの回腸消化率)が 10%、小麦 DDGS では 34% 改善されたと報告している。リジン、トレオニン、バリンおよびアルギニンの AID は、トウモロコシ DDGS または小麦 DDGS を 15% 配合した飼料へのエクストルーダ加工により、それぞれ 31、26、23 および 21% 増加した。さらに、総エネルギーと CP の AID は、小麦 DDGS ではエクストルーダ加工による影響は少なかったが、トウモロコシ DDGS ではわずかに改善された。これらの結果は、エクストルーダ加工によりトウモロコシ DDGS と小麦 DDGS を配合した飼料のアミノ酸消化率を改善出来ることを示唆している。さらに、エクストルーダ加工は、有害微生物汚染の抑制に有効であることが示されている(Said, 1996)。

家禽用 DDGS 飼料のペレット品質を改善するための予測式

豚および家禽に関する公表論文の中でペレットの耐久性、生産効率、エネルギー使用量について報告された結果には一貫性はなく、これらの重要な対策に影響を与える様々な要因の間には多くの相互作用があることが示されている。Fahrenheit(2012)は、これらの複雑な相互作用に対応して、豚や家禽用飼料に DDGS を配合する場合の影響を推定するために、DDGS 配合飼料の PDI とエネルギー消費量推定のための予測式を導いている。

$$PDI = 53.90 - (0.04 \times \text{トウモロコシの粒子径, } \mu\text{m}) - (6.98 \times \text{油脂添加量, \%}) - (1.12 \times \text{DDGS 配合割合, \%}) - (1.82 \times \text{生産効率, kg/時}) + (0.27 \times \text{コンディショニング}$$

温度、°C)+(0.04×保持時間、秒)+(1.78×ダイの L:D)
 +(0.006×粒子径×ダイの L:D)-(0.23×油脂添加量
 ×DDGS 配合割合)+(0.06×油脂添加量×コンディシ
 ヨニング温度)+(0.15×DDGS 配合割合×ダイの L:D)

この予測式の R²(決定係数)は0.92で、推定されたPDI
 と実測値の差は 1.1(約 1%の変動)であった。ダイの L:
 D は、PDI に最大の影響を与える。ダイの厚さを業界で
 は一般的な 8:1 から 5.6:1 に低下させると、PDI は 10.9
 ユニット減少する。コンディショニング温度を 65°Cから
 85°Cに高めると、PDI が 7.0 ユニット高まり、飼料への大
 豆油の添加量を 3%から 1%に低下させると、PDI が 5.4
 ユニット高まった。粉碎トウモロコシの粒子径を 462 μmか
 ら 298 μmに減少させることは、PDI をわずかに(0.5 ユニ
 ット)高めた。同様に、飼料生産効率を 1,814 から 1,360 kg
 /時に下げると、PDI は 0.6 ユニット高まり、PDI への影響
 は最小限だった。

エネルギー消費量、kWh/トン = 55.93 -(0.01×トウモロ
 コシの粒子径、μm)+(1.88×油脂添加量、%) -
 (0.05×DDGS 配合割合、%)-(30.90×生産効率、kg/
 時)-(0.41×コンディショニング温度、°C)+(0.17×保
 持時間、秒)-(1.20×ダイの L:D)+(0.02×トウモロコ
 シの粒子径×生産効率)-(0.0001×トウモロコシの粒
 子径×コンディショニング温度)-(1.41×油脂添加量
 ×生産効率)-(0.01×油脂添加量×DDGS 配合割合)
 -(0.21×DDGS 配合割合×生産効率)+(0.004×DDGS 配
 合割合×コンディショニング温度)+(0.22×生産効率×
 コンディショニング温度)-(0.11×生産効率×保持時間、
 秒)+(1.21×生産効率×ダイの L:D)

この予測式の R² は 0.95 で、予測エネルギー消費量と
 実測値の差は 0.3(約 3%の変動)だった。コンディショ
 ニング温度を 65°Cから 85°Cに高めると、エネルギー消費
 量が 2.7 kWh /トン削減され、L:D を 5.6:1 にすると、エネ
 ルギー消費量が 1.3 kWh /トン削減された。その他の要
 因(トウモロコシの粒子径、大豆油の添加量、生産速度
 および保持時間)によるエネルギー消費量への影響は
 1.0 kWh /トン以下であった。この予測式が示しているよう
 に、各変数間には複数の相互作用がある。したがって、

現在のペレット加工条件で、目標とする PDI やエネルギ
 ー消費量が得られない場合は、他の要因を検討すること
 で、より良い結果が達成できる。

引用文献

- Abdollahi, M.R., and V. Ravindran. 2013. Influence of pellet length on pellet quality and performance of broiler diets. *J. Appl. Poult. Res.* 22:516–522.
- Abdollahi, M.R., V. Ravindran, and B. Svihus. 2013. Pelleting of broiler diets: An overview with emphasis on pellet quality and nutritional value. *Anim. Feed Sci. Technol.* 179:1–23.
- Abdollahi, M.R., V. Ravindran, T.J. Webster, G. Ravindran, and D.V. Thomas. 2012. The effect of manipulation of pellet size (diameter and length) on pellet quality and performance, apparent metabolisable energy and ileal nutrient digestibility in broilers fed maize-based diets. *Anim. Prod. Sci.*, 53:114–120.
- Abdollahi, M.R., V. Ravindran, T.J. Webster, G. Ravindran, and D.V. Thomas. 2011. Influence of feed form and conditioning temperature on performance, apparent metabolisable energy and ileal digestibility of starch and nitrogen in broiler starters fed wheat-based diet. *Anim. Feed Sci. Technol.* 168:88–99.
- All About Feed. 2012. AllAboutFeed – The better the pellet, the better the performance <http://www.allaboutfeed.net/Nutrition/Research/2012/2/The-better-the-pellet-the-better-the-performance-AAF012746W/> (accessed 9–21–17).
- Amerah, A.M., V. Ravindran, R.G. Lentle, and D.G. Thomas. 2007. Feed particle size: Implications on the digestion and performance of poultry. *World's Poult. Sci. J.* 63:439–455.
- ASAE. 1997. S269.4. Cubes, pellet and crumbles definitions and methods for determining density durability and moisture content. St Joseph, MI. ASAE Standards. 2003. S269.4. Cubes, pellet, and crumbles definitions and methods for determining density durability and moisture

- content. St. Joseph, MI.
- Behnke, K.C. 2014. Pelleting with Today's Ingredient Challenges. Kansas State University, Manhattan, Kansas.
- Behnke, K.C. 2007. Feed manufacturing considerations for using DDGS in poultry and livestock diets. In: Proceedings of the 5th Mid-Atlantic Nutrition Conference, N.G. Zimmerman (Ed.), Maryland Feed Industry Council and Dept. of Animal and Avian Sciences, University of Maryland, College Park. pp. 77–81.
- Behnke, K.C. 2006. The art (science) of pelleting. Tech. Rep. Series: Feed Tech. American Soya Association, Singapore.
- Behnke, K.C. 2001. Factors influencing pellet quality. *Feed Tech.* 5:19–22.
- Belyea, R.L., K.D. Rausch, and M.E. Tumbleson. 2004. Composition of corn and distillers dried grains with solubles from dry grind ethanol processing. *Bioresource Tech.* 94:293–298.
- Briggs, J.L., D.E. Maier, B.A. Watkins, and K.C. Behnke. 1999. Effect of ingredients and processing parameters on pellet quality. *Poult. Sci.* 78:1464–1471.
- California Pellet Mill Co., 2016. The Pelleting Process. [https://www.cpm.net/downloads/Animal Feed Pelleting.pdf](https://www.cpm.net/downloads/Animal_Feed_Pelleting.pdf) (accessed 11–11–17).
- Cavalcanti, W.B., and K.C. Behnke. 2005a. Effect of composition of feed model systems on pellet quality: A mixture experimental approach. I. *Cereal Chem.* 82:462–467.
- Cavalcanti, W.B., and K.C. Behnke. 2005b. Effect of composition of feed model systems on pellet quality: A mixture experimental approach. II. *Cereal Chem.* 82:462–467.
- Cramer, K.R., K.J. Wilson, J.S. Moritz, and R.S. Beyer. 2003. Effect of sorghum-based diets subjected to various manufacturing procedures on broiler performance. *J. Appl. Poult. Res.* 12:404–410.
- Cutlip, S.E., J.M. Hott, N.P. Buchanan, A.L. Rack, J.D. Latshaw, and J.S. Moritz. 2008. The effect of steam-conditioning practices on pellet quality and growing broiler nutritional value. *J. Appl. Poult. Res.* 17:249–261.
- Dozier III, W.A., and J.B. Hess. 2015. Growth and meat yield responses of Hubbard × Cobb 500 male broilers fed diets formulated with distillers dried grains with solubles varying in ether extract content and inclusion rate from 1 to 33 days of age. *J. Appl. Poult. Res.* 24:436–450.
- Engberg, R.M., M.S. Hedemann, and B.B. Jensen. 2002. The influence of grinding and pelleting of feed on the microbial composition and activity of the digestive tract of broiler chickens. *Br. Poult. Sci.* 43:569–579.
- Fahrenholz, A. 2012. Evaluating factors affecting pellet durability and energy consumption in a pilot feed mill and comparing methods for evaluating pellet durability. Ph.D. Thesis, Kansas State University, Manhattan, Kansas, 92 pages.
- Falk, D. 1985. Pelleting cost centre. In: *Feed manufacturing Technology III*, R.R. McElhiney (Ed.). American Feed manufacturers Association, Arlington, VA, pp. 167–190.
- Gilpin, A.S., T.J. Herrman, K.C. Behnke, and F.J. Fairchild. 2002. Feed moisture, retention time, and steam as quality and energy utilization determinants in the pelleting process. *Appl. Engineering Agricult.* 18:331–340.
- Greenwood, M.W., and R.S. Beyer. 2003. Effect of feed manufacturing practices on nutrient availability and feed quality. In: *Proc. 30th Annual Carolina Poultry Nutrition Conference*, Raleigh, NC, pp. 7–16.
- Hendriks, W.H., P.J. Moughan, H. Boer, and A.F.B. van der Poel. 1994. Effects of extrusion on the dye-binding, filorodinitrobenzene-reactive and total lysine content of soybean meal and peas. *Anim. Feed Sci. Technol.* 48:99–109.
- Hussar, N., and A.R. Robblee. 1962. Effect of pelleting on the utilization of feed by the growing chicken. *Poult. Sci.* 41:1489–1493.

- Inbarr, J., and M.R. Bedford. 1994. Stability of feed enzymes to steam pelleting during feed processing. *Anim. Feed Sci. Technol.* 46:179–196.
- Jafarnejad, S., M. Farkhoy, M. Sadegh, and A.R. Bahonar. 2010. Effects of crumble–pellet and mash diets with different levels of dietary protein and energy on the performance of broilers at the end of the third week. *Vet. Med. Intl.* Vol 2010, Article ID 328123, 5 pages, doi:10.4061/2010/328123.
- Jensen, L.S. 2000. Influence of pelleting on the nutritional needs of poultry. *Asian–Aust. J. Anim. Sci.* 13:35–46.
- Jensen, L.S., L.H. Merrill, C.V. Reddy, and J. McGinnis. 1962. Observations on eating patterns and rate of food passage of birds fed pelleted and unpelleted diets. *Poult. Sci.* 41:1414–1419.
- Jones, F.T., K.E. Anderson, and P.R. Ferket. 1995. Effect of extrusion on feed characteristics and broiler chicken performance. *J. Appl. Poult. Res.* 4:300–309.
- Kaliyan, N., and R.V. Morey. 2006. Factors affecting strength and durability of densified products. In: 2006 ASAE Annual Meeting (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Kerr, B.J., W.A. Dozier III, and G.C. Shurson. 2013. Effects of reduced–oil corn distillers dried grains with solubles composition on digestible and metabolizable energy value and prediction in growing pigs. *J. Anim. Sci.* 91:3231–3243.
- Kim, E.J., J.L. Purswell, and S.L. Branton. 2016. Effects of increasing inclusion rates of a low–fat distillers dried grains with solubles (LF–DDGS) in finishing broiler diets. *Int. J. Poult. Sci.* 15:182–187.
- Latshaw, J.D., and J.S. Moritz. 2009. The partitioning of metabolizable energy by broiler chickens. *Poult. Sci.* 88:98–105.
- Lily, K.G. S., C.K. Gehring, K.R. Beaman, P.J. Turk, M. Sperow, and J.S. Moritz. 2011. Examining relationships between pellet quality, broiler performance and bird sex. *J. Appl. Poult. Res.* 20:231–239.
- Loar II, R.E., J.S. Moritz, J.R. Donaldson, and A. Corzo. 2010. Effects of feeding distillers dried grains with solubles to broilers from 0 to 28 days posthatch on broiler performance, feed manufacturing efficiency and selected intestinal characteristics. *Poult. Sci.* 89:2242–2250.
- McCapes, R.H., H.E. Ekperigin, W.J. Cameron, W.L. Ritchie, J. Slagter, V. Stangeland, and K.V. Nagaraja. 1989. Effect of a new pelleting process on the level of contamination of poultry mash by *Escherichia coli* and *Salmonella*. *Avian Diseases* 33:103–111.
- McKinney, L.J., and R.G. Teeter. 2004. Predicting effective caloric value of non–nutritive factors: I. Pellet quality and II. Prediction of consequential formulation dead zones. *Poult. Sci.* 83:1165–1174.
- Min, Y.N., A. Hancock, F. Yan, C. Lu, C. Coto, A. Karimi, J.H. Park, F.Z. Liu, and P.W. Waldroup. 2009. Use of combinations of canola meal and distillers dried grains with solubles in broiler starter diets. *J. Appl. Poult. Res.* 18:725–733.
- Min, Y.N., F.Z. Liu, Z. Wang, C. Coto, S. Serrate, F.P. Costa, F. Yan, and P.W. Waldroup. 2008. Evaluation of distillers dried grains with solubles in combination with glycerin in broiler diets. *Int. J. Poult. Sci.* 7:646–654.
- Moritz, J. S., K.J. Wilson, K.R. Cramer, R.S. Beyer, L.J. McKinney, W.B. Cavalcanti, and X. Mo. 2002. Effect of formulation density, moisture and surfactant on feed manufacturing, pellet quality and broiler performance. *J. Appl. Poult. Res.* 11:155–163.
- Nir, I., I. Twina, E. Grossman, and Z. Nitsan. 1994. Quantitative effects of pelleting on performance, gastrointestinal tract and behavior of meat–type chickens. *Br. Poult. Sci.* 35:589–602.
- NRC. 2012. Nutrient requirements of swine. 11th ed. Natl. Acad. Press, Washington, DC.
- Oryschak, M., D. Korver, M. Zuidhof, X. Meng, and E. Beltranena. 2010. Comparative feeding value of extruded and nonextruded wheat and corn distillers

- dried grains with solubles for broilers. *Poult. Sci.* 89:2183–2196.
- Payne, J.D., 2004. Predicting pellet quality and production efficiency. *World Grain* 3, 68–70.
- Payne, R.L., T.D. Bidner, L.L. Southern, and K.W. McMillin. 2001. Dietary effects of soy iso-avones on growth and carcass traits of commercial broilers. *Poult. Sci.* 80:1201–1207.
- Pfost, H.B. 1964. The effect of lignin binders, die thickness and temperature on the pelleting process. *Feedstuffs* 36:20–54.
- Pickford, J.R. 1992. Effects of processing on the stability of heat labile nutrient in animal feeds. In: *Recent Advances in Animal Nutrition*, P.C. Garnsworthy, W. Haresign, and D.J. A. Cole (Eds.), Butterworth Heinemann, Oxford, UK. Pp. 177–192.
- Reece, F.N., B.D. Lott, and J.W. Deaton. 1985. The effects of feed form, grinding method, energy level and gender on broiler performance in a moderate (21 C) environment. *Poult. Sci.* 64:1834–1839.
- Richert, B.T., and J.M. DeRouchey. 2010. Swine feed processing and manufacturing. In: D. J. Meisinger, editor, *National swine nutrition guide*. Pork Center of Excellence, Ames, IA. p. 245–250.
- Robinson, R. 1976. Pelleting—introduction and general definitions. *Feed manufacturing technology*. Feed Production Council, American Feed Manufacturing Association, Inc., Chicago, Ill, 96–103.
- Said, N.W. 1996. Extrusion of alternative ingredients: An environmental and nutrition solution. *J. Appl. Poult. Res.* 5:395–407.
- Salmon, R.E. 1985. Effects of pelleting, added sodium bentonite and fat in a wheat-based diet on performance and carcass characteristics of small white turkey. *Anim. Feed Sci. Technol.* 12:223–232.
- Shim, M.Y., G.M. Pesti, R.I. Bakalli, P.B. Tillman, and R.L. Payne. 2011. Evaluation of corn distillers grains with solubles as an alternative ingredient for broilers. *Poult. Sci.* 90:369–376.
- Skinner-Noble, D.O., L.J. McKinney, and R.G. Teeter. 2005. Predicting effective caloric value of non-nutritive factors: III. Feed form affects broiler performance by modifying behavior patterns. *Poult. Sci.* 84:403–411.
- Skoch, E.R., S.F. Binder, C.W. Deyoe, G.L. Allee, and K.C. Behnke. 1983. Effects of steam pelleting condition and extrusion cooking on a swine diet containing wheat middlings. *J. Anim. Sci.* 57:929–935.
- Skoch, E.R., K.C. Behnke, C.W. Deyoe, and S.F. Binder. 1981. The effect of steam-conditioning rate on the pelleting process. *Anim. Feed Sci. Technol.* 6:83–90.
- Smallman C. 1996. Maximizing conditioning potential. *Feed Milling International* 190:16–19.
- Spiehs, M.J., M.H. Whitney, and G.C. Shurson. 2002. Nutrient database for distillers dried grains with solubles produced from new plants in Minnesota and South Dakota. *J. Anim. Sci.* 80:2639–2645.
- Stark, C.R. 2009. Effect of die thickness and pellet mill throughput on pellet quality. Abstract T89. Southern *Poult. Sci. Soc. Meeting*.
- Stark, C.R., K.C. Behnke, J.D. Hancock, S.L. Traylor, and R.H. Hines. 1994. Effect of diet form and fines in pelleted diets on growth performance of nursery pigs. *J. Anim. Sci.* 72(Suppl 1):214.
- Stevens, C.A. 1987. Starch gelatinization and the influence of particle size, steam pressure and die speed on the pelleting process. Ph.D. Thesis, Kansas State Univ., Manhattan.
- Svihus, B., K.H. Kløvstad, V. Perez, O. Zimonjia, S. Sahlstrom, R.B. Schuller, W.K. Jeksrud, and E. Prestlækken. 2004. Physical and nutritional effects of pelleting broiler chicken diets made from wheat ground to different coarsenesses by the use of roller mill and hammer mill. *Anim. Feed sci. Technol.* 117:281–293.
- Thomas, M., and A.F.B van der Poel. 1996. Physical quality of pelleted animal feed 1. Criteria for pellet quality. *Anim. Feed Sci. Technol.* 61:89–112.

- Thomas, M., T. van Vliet, and A.F.B. van der Poel. 1998. Physical quality of pelleted animal feed: 3. Contribution of feedstuff components. *Anim. Feed sci. Technol.* 70:59–78.
- Thomas, M., D.J. van Zuilichem, and A.F.B. van der Poel. 1997. Physical quality of pelleted animal feed. 2. contribution of processes and its conditions. *Anim. Feed Sci. Technol.* 64:173–192.
- Traylor, S.L. 1997. Effects of feed processing on diet characteristics and animal performance. Master's thesis. Kansas State Univ., Manhattan.
- Tumuluru, J.S., C.C. Conner, and A.N. Hoover. 2016. Method to produce durable pellets at lower energy consumption using high moisture corn stover and a corn starch binder in a –at die pellet mill. *J. Vis. Exp.* 112:1–13.
- Veldry matteran, A., H.A. Vahl, G.J. Borggreve, and D.C. Fuller, D.C. 1995. A survey of the incidence of *Salmonella* species and *Enterobacteriaceae* in poultry feeds and feed components. *Vet. Rec.* 136:169–172.
- Vilarino, M., M.J. Picard, J.P. Melcion, and J.M. Faure. 1996. Behavioural adaptation of laying hens to dilution of diets under mash and pellet form. *Br. J. Poult. Sci.* 37:895–907.
- Voragen, A.G.J., H. Gruppen, G.J.P. Marsman, and A.J. Mul. 1995. Effect of some manufacturing technologies on chemical, physical and nutritional properties of feed. In: *Recent Advances in Animal Nutrition*, P.C. Garnsworthy and D.J.A. Cole (Eds.), Feed Manufacturers Conference 1995, University of Nottingham, Nottingham University Press, pp. 93–126.
- Wamsley, K.G.S., R.E. Loar II, K.Karges, and J.S. Moritz. 2013. The use of practical diets and regression analyses to determine the utilization of lysine and phosphorus in corn distillers dried grains and solubles using Cobb 500 male broilers. *J. Appl. Poult. Res.* 22:279–297.
- Wang, Z., S. Cerrate, C. Coto, F. Yan, and P.W. Waldroup. 2007a. Effect of rapid and multiple changes in level of distillers dried grain with solubles (DDGS) in broiler diets on performance and carcass characteristics. *Int. J. Poult. Sci.* 6:725–731.
- Wang, Z., S. Cerrate, C. Coto, F. Yan, and P.W. Waldroup. 2007b. Use of constant or increasing levels of distillers dried grains with solubles (DDGS) in broiler diets. *Int. J. Poult. Sci.* 6:501–507.
- Wang, Z., S. Cerrate, C. Coto, F. Yan, and P.W. Waldroup. 2007c. Utilization of distillers dried grains with solubles (DDGS) in broiler diets using a standardized nutrient matrix. *Int. J. Poult. Sci.* 6:470–477.
- Winowiski, T. 1998. Examining a new concept in measuring pellet quality: Which test is best? *Feed Mgmt.* 49:23–26.
- Winowiski, B.Y.T., E. By, C. Stark, A. Fahrenholz, and C. Jones. 1962. Measuring the physical quality of pellets. American Soybean Association. LingoTech USA, Inc.
- Wood, J.F. 1987. The functional properties of feed raw materials and their effect on the production and quality of feed pellets. *Anim. Feed Sci. Technol.* 18:1–17.
- Wondra, K.J., J.D. Hancock, K.C. Behnke, R.H. Hines, and C.R. Stark. 1995. Effects of particle size and pelleting on weanling pig performance and nutrient digestibility. *J. Anim. Sci.* 73:757–763.
- Zimonja, O., A. Stevnebø, and B. Svihus. 2007. Nutritional value of diets for broiler chickens as affected by fat source, amylose level and diet processing. *Can. J. Anim. Sci.* 87:553–562.

20章:アヒルおよびガチョウ用飼料における DDGS

はじめに

世界のアヒルとガチョウの飼育数は、特にアジアの国々で増加し続けている(The Poultry Site a, b)。2013年の世界の肉用アヒル生産量は、440万トンで、全体の83.8%がアジアで生産されている(The Poultry Site, 2015a)。肉用アヒルの生産量が最も多いのは中国(290万トン)で、以下、マレーシア(129,600トン)、ミャンマー(107,000トン)、ベトナム(102,500トン)、タイ(89,900トン)、韓国(69,400トン)、台湾(64,000トン)の順である。肉用アヒルの主な品種は、ペキン種、ムスコビー種(フランス)およびラバ種(フォアグラを生産するための交雑種)である。卵用アヒルの主な品種は、ジンディン種およびシャオシン種(中国)、ツァイヤ種(台湾)、カーキキャンベル種、インディアンランナー種およびデン種(ベトナム、カンボジア、インドネシア)である(Pingel, 2004)。タイでは、卵生産量の約37%がアヒルの卵であり、次いで、カンボジア(21%)、インドネシア(19%)、バングラデシュ(16%)、中国(15%)、フィリピン(12%)である(Pingel, 2004)。

2013年の全世界のガチョウ肉の生産量は270万トンで(The Poultry Site, 2015b)、アジアでの生産が全体の96%(260万トン)を占めている。肉用アヒルと同様に、中国はガチョウ肉(255万トン)の主要な生産国でもあり、台湾(19,550トン)とミャンマー(6,840トン)がそれに続く。

残念なことに、肉用および卵用のアヒルおよびガチョウ用の飼料におけるDDGSの利用に関する報告は少ない。この章では、アヒルやガチョウに対するDDGSの給与に関する公開情報の要約を提供する。

アヒル

肉用アヒル

様々な国で多くの種類のアヒルが使用されているが、アヒルの養分要求量は十分に確立されていない(Creswell, 2012)。養分要求量に関する正確な情報がな

ければ、最適な飼育成績を達成するための飼料を配合設計することは出来ず、一般的に使用されているDDGSを含む飼料原料のAME(見かけの代謝エネルギー)と可消化アミノ酸含有量の知識だけで、アヒル用飼料を精密に設計することはさらに難しい。Baéza(2015)は、肉用アヒルの養分要求量と飼養管理について優れた総説を示している(表1)。Baézaは、ラバ種アヒルの前期、中期および後期におけるCP(粗たん白質)の最適レベルは、それぞれ23.5、15.4および13.8%であることを示している。また、Baéza(2015)は、2~6週齢のアヒルにおいて、最適な増体量と飼料効率を得るためのAME要求量は約3,000 kcal/kgだが、AME価が2,700 kcal/kgを超える飼料では腹腔内脂肪量が増加することを示している。

Wenら(2017)は、初生~21日齢のアヒルのエネルギーとリジンの要求量を測定し、AME価が2,750および3,050 kcal/kgの飼料における、増体量に基づくリジン要求量は0.94および0.98%であったと報告している。Kong and Adeola(2010)は、白色ペキン種アヒルにおけるDDGSおよび他の飼料原料のAID(見かけの回腸消化率)を測定した(表2)。予想通り、大豆粕はDDGS、トウモロコシ、小麦と比較して窒素含量が最も多く、アミノ酸のAIDが高かった。また、DDGS中のリジンのAIDは他の飼料原料より低く、乾燥工程における過加熱が原因であるとみなされた。

Creswell(2012)は、トウモロコシDDGSをアヒル用飼料に最大10~15%使用できるとしているが、Kowalczykら(2012)は、22~56日齢のペキン種アヒルに最大25%のDDGSを含む飼料を給与しても、発育成績、枝肉の形質や組成、pHおよび胸肉の色調には悪影響を及ぼさないことを示している。同様に、Peilodら(2010)は、ラバ種アヒルに対してDDGSを24%配合した飼料を給与しても、発育成績には悪影響はなかったとしている。

Adamskiら(2011)は、22、49日齢の雄及び雌のペキ

表 1. 肉用アヒルにおけるエネルギーおよび栄養成分要求量(Baéza, 2015 から改編)

	前期 (1~14日齢)	中期 (15~35日齢)	後期 (35~49日齢)
AME kcal/kg	2,800-2,900	2,900-3,000	2,950-3,050
標準化された回腸可消化アミノ酸 %			
リジン	1.00	0.75	0.65
メチオニン	0.37	0.29	0.26
メチオニン+シスチン	0.70	0.55	0.49
トリプトファン	0.16	0.13	0.12
トレオニン	0.62	0.48	0.44
アルギニン	1.05	0.81	0.72
イソロイシン	0.65	0.50	0.45
バリン	0.77	0.59	0.51
ミネラルおよびコリン			
カルシウム %	0.70	0.65	0.60
有効リン %	0.35	0.32	0.30
塩素 %	0.20	0.16	0.14
コリン mg/kg	1,800	1,500	1,250

表 2. 白色ペキン種アヒルにおける DDGS、トウモロコシ、大豆粕、小麦の見かけの乾物、窒素、アミノ酸消化率(Kong and Adeola, 2010 から抜粋)

	DDGS	トウモロコシ	大豆粕	小麦
乾物	63 ^c	79 ^a	80 ^a	72 ^b
窒素	77 ^a	75 ^{bc}	88 ^a	79 ^b
アルギニン	84 ^{bc}	79 ^{cd}	94 ^a	78 ^d
シスチン	73 ^a	54 ^b	81 ^a	72 ^a
ヒスチジン	81 ^b	84 ^{bc}	92 ^a	83 ^b
イソロイシン	79 ^a	75 ^b	90 ^a	81 ^b
ロイシン	88 ^a	85 ^{ab}	89 ^a	82 ^{bc}
リジン	69 ^c	78 ^b	90 ^a	77 ^b
メチオニン	85 ^a	86 ^a	92 ^a	85 ^b
フェニルアラニン	84 ^b	81 ^{bc}	90 ^a	84 ^b
トレオニン	70 ^b	62 ^c	84 ^a	66 ^{bc}
トリプトファン	79 ^d	80 ^{cd}	93 ^a	91 ^{ab}
バリン	79 ^b	68 ^c	87 ^a	73 ^{bc}

a - c 異符号間で有意差あり (p < 0.01)

ン種アヒル用飼料に DDGS を 0、15、25 または 30% 配合した場合の発育成績と枝肉の特性に及ぼす影響を評価した(表 3)。屠殺時に、各飼料給与区から雄、雌各 5 羽を採材して枝肉の特性を評価した。DDGS の配合量が

30% までの各飼料では、生体重、屠体重、枝肉重量、胸と脚の筋肉重量および皮下脂肪と腹腔内脂肪量には差がなかった。さらに、胸部筋肉の pH、色調、コレステロール含量にも差がなかったが、DDGS を 30% 配合した飼料

表 3. DDGS 配合割合と性がペキン種アヒルの 22～49 日齢の発育成績および枝肉組成に及ぼす影響(Adamski ら、2011 から抜粋)

	前期 (1～14日齢)	中期 (15～35日齢)	後期 (35～49日齢)
AME kcal/kg	2,800-2,900	2,900-3,000	2,950-3,050
標準化された回腸可消化アミノ酸 %			
リジン	1.00	0.75	0.65
メチオニン	0.37	0.29	0.26
メチオニン+シスチン	0.70	0.55	0.49
トリプトファン	0.16	0.13	0.12
トレオニン	0.62	0.48	0.44
アルギニン	1.05	0.81	0.72
イソロイシン	0.65	0.50	0.45
バリン	0.77	0.59	0.51
ミネラルおよびコリン			
カルシウム %	0.70	0.65	0.60
有効リン %	0.35	0.32	0.30
塩素 %	0.20	0.16	0.14
コリン mg/kg	1,800	1,500	1,250

の給与により、雄の胸部筋肉の脂肪含量と、雌の胸部筋肉のたん白質含量が増加した。ただし、DDGS を 30% 配合した飼料を給与した雌の最終体重は雄より小さかった。これらの結果は、肉用アヒル用飼料に対して、DDGS を最大 30% まで配合出来ることを示している。

卵用アヒル

肉用のアヒルと同様に、産卵期のアヒルが必要な様々な養分は、国によっては十分に定義されていない。しかし、Baéza(2015)は、自身の経験と限られた報告に基づいて、産卵期のアヒルにおけるエネルギーと養分要求量を提案している(表 4)。

USGC(アメリカ穀物協議会)は、台湾・宜蘭県の畜産研究所で実施した試験を支援している。この試験では、トウモロコシ DDGS を配合した飼料を 14～50 週齢の褐色ツァイヤ種アヒルに給与し、産卵成績と卵の品質を評価した(Huang ら、2006)。DDGS の配合量は 0、6、12 または 18% とし、各飼料は等エネルギー(2,750 kcal/kg)、等 CP(19%)とした。その結果、DDGS を 18% まで配合しても、飼料摂取量、飼料効率および卵殻の品質には影

響はなかった。DDGS の配合量が 18% の場合には寒冷期における産卵率が増加し、12 または 18% 配合した場合には卵重が重くなる傾向を示した。卵黄の色調は、DDGS の配合量の増加に伴って直線的に改善された。これは、DDGS が含んでいる天然のキサントフィルが、産卵期のアヒルによって十分に利用出来ることを示している。さらに、DDGS を産卵期のアヒル用飼料に配合すると、卵黄の粗脂肪含量とリノール酸含量が増加した。これらの結果は、DDGS を産卵期のアヒル用飼料に 18% まで配合しても、産卵成績と卵の品質を損なうことなく、卵黄の特性を改善できることを示している。

ガチョウ

残念ながら、肉用および卵用のガチョウに対して、DDGS を給与した影響に関する報告は公表されていない。したがって、DDGS をガチョウ用飼料に配合することによる経済的および栄養的価値を知るための研究が必要である。

表 4. 産卵用アヒルにおけるエネルギーおよび栄養成分要求率(Baéza から、2015 から改編)

AME kcal/kg	2,650
標準化された回腸可消化アミノ酸 %	
リジン	0.80
メチオニン	0.36
メチオニン+シスチン	0.64
トリプトファン	0.16
トレオニン	0.58
アルギニン	0.96
イソロイシン	0.62
バリン	0.72
ミネラルとコリン	
カルシウム %	3.50
有効リン %	0.35
塩素 %	0.20
コリン mg/kg	1,250

要約

公表されている情報は少ないものの、DDGS は、肉用のアヒル用飼料で最大 30%、産卵期のアヒル用飼料で最大 18%まで配合しても、許容できる発育成績や産卵成績や卵の品質が得られることが明らかになっている。しかし、アヒルの種類毎のエネルギーおよび養分要求量と、DDGS とその他の飼料原料の正確な AME と可消化アミノ酸含量を入手することが出来れば、DDGS の配合量をさらに高めることが出来る可能性がある。DDGS のガチョウにおけるエネルギー価や可消化アミノ酸含量および飼育成績に及ぼす DDGS の配合量に関する報告は公表されていない。飼料に飼料用酵素(特に、炭水化物分解酵素とフィターゼ)を添加する場合、アヒルとガチョウではブロイラーや産卵鶏に比べて高繊維成分をより効果的に利用することが出来る。これは、アヒルとガチョウにおいて、DDGS をより多く使用できる可能性を示唆している。アヒルやガチョウ用飼料における DDGS の使用をより効果的に利用するためには、さらなる研究が必要である。

引用文献

Adamski, M.P., A.M. Kowalczyk, E.T. Lukaszewicz, and M. Korzeniowska. 2011. Effect of sex and inclusion of dried

distillers grains with solubles on slaughter yield and meat characteristics of Pekin ducks. *British Poultry Science*. 52:742–749.

Baéza, E. 2015. Nutritional requirements and feeding management of meat type ducks. 20th European Symposium on Poultry Nutrition, August 24–27, 2015, Prague, Czech Republic.

Creswell, D. 2012. Feeding meat and laying ducks for maximum performance. In: *Proc. Poultry Feed Conference*, July 9–10, 2012, Bangkok, Thailand. Huang, J.F., M.Y. Chen, H.F. Lee, S.H. Wang, Y.H. Hu, and Y.K. Chen. 2006. Effects of Corn Distiller's Dried Grains with Soluble on the Productive Performance and Egg Quality of Brown Tsaiya Duck Layers. Personal communication with Y.K Chen agape118@so-net.net.tw.

Kong, C., and O. Adeola. 2010. Apparent ileal digestibility of amino acids in feedstuffs for White Pekin ducks. *Poultry Science*. 89:545–550.

Kowalczyk, A., E. Lukaszewicz, M. Adamski, and J. Kuzniacka. 2012. Carcass composition and meat characteristics of Pekin ducks in relation to age at slaughter and level of maize distiller's dried grains with solubles. *J. Anim. Feed Sci.* 21:157–167.

- Peillod, C., V. Mancini, J.P. Metayer, F. Skiba, M. Laborde. 2010. Détermination du taux optimal d'incorporation de drêches de maïs dans la ration alimentaire des canards mulards mâles en phase de croissance et nition. In, 9èmes Journées de la Recherche sur les Palmipèdes à Foie Gras, 7-8/10/10, Bordeaux (France), 49-53.
- Pingel, H. 2004. Duck and geese production. *World Poul.* 20:26-28.
- The Poultry Site. 2015a. Global Poultry Trends – Asia Dominates Duck Production. September, 3, 2015 <http://www.thepoultrysite.com/articles/3506/global-poultry-trends-asia-dominates-duck-production/>
- The Poultry Site. 2015b. Global Poultry Trends – Goose Meat Trade ‘Flat’. September 8, 2015. <http://www.thepoultrysite.com/articles/3507/global-poultry-trends-geese-meat-trade-at/>
- Wen, Z.G., T.J. Rasolofomanana, J. Tang, Y. Jiang, M. Xie, P.L. Yang, and S.S. Hou. 2017. Effects of dietary energy and lysine levels on growth performance and carcass yields of Pekin ducks from hatch to 21 days of age. *Poult. Sci.* 0:1-6. <http://dx.doi.org/10.3382/ps/pex122>

21 章: 豚における低脂肪 DDGS

はじめに

DDGS は、米国における各ステージの養豚用飼料の飼料原料として最も人気があり、経済的で、広く利用されている。トウモロコシ DDGS はトウモロコシとほぼ同量の ME(代謝エネルギー) 価を持ち、養豚用飼料では主にエネルギー源として使用されている。このため、DDGS は、主にトウモロコシの一部と置換されているが、一部の大豆粕と無機リンとも置換される。多くの研究により、DDGS は、ほ乳期用、育成期用、肥育期用および泌乳期用の各飼料に最大 30%、妊娠期用飼料で最大 50% 配合しても成績には悪影響を及ぼさないことが示されている。実際、DDGS の配合により飼料価格を節減できる可能性が高いため、米国のいくつかの大手の養豚家は、育成～肥育期の豚用飼料に低脂肪 DDGS を最大 60% 配合した飼料に対する評価まで行っている。ただし、配合割合をこのように高めた場合に許容可能な発育成績と枝肉形質を得るためには、使用している DDGS の正確なエネルギー価、可消化アミノ酸および可消化リン含量を正確に把握しておく必要がある。幸いにも、豚の精密栄養プログラムを実践するために使用できる低脂肪 DDGS 中のアミノ酸の SID(標準化された回腸消化率)と SIDC(標準化された回腸消化量)を推定するための予測式を開発するための多くの研究が行われている。

正確なエネルギーと可消化栄養成分の測定

代謝エネルギー

米国のエタノール産業において、DCO(ジステラーズ・コーン油)の抽出が一般的になるにつれて、DDGS の製造量が減少し、ME 価と栄養成分含量の変動が大きくなっている。DDGS の供給源間による変動は、粗脂肪では 4~13%、NDF(中性デタージェント繊維)では 21~34%、CP(粗たん白質)では 24~35% である(Kerrら、2013)。ただし、DCO 抽出前の DDGS でも供給源間での栄養成分

含量の変動が大きい(Stein and Shurson、2009)、DCO 抽出後の他の栄養成分含量には一貫した影響はない。

豚は、たん白質、でん粉、繊維、脂質を異なる効率で消化・吸収しているため、飼料原料の栄養成分組成はエネルギー価に大きな影響を与える(Patience、2009)。その結果、豚における低脂肪 DDGS の ME 価の推定値は 2,858 kcal/kg とは異なることが報告されている(表 1)。これらの ME 価の推定値にはかなり幅があるが、一般的にトウモロコシ DDGS の ME 価はトウモロコシの ME 価の 93% である。ただし、DDGS の粗脂肪含量は、豚における ME 価の単一の予測変数としては不十分である(表 2)。NRC(2012)は、粗脂肪含量が 10% 以上の高脂肪 DDGS の平均 ME 価は 3,845 kcal/kg、6~9% の中脂肪 DDGS では 3,801 kcal/kg、4% 未満の低脂肪 DDGS では 3,476 kcal/kg としている。ただし、中脂肪および低脂肪 DDGS の ME 価は、限られた公表論文によるデータのみに基づいたものであり、その精度には疑問があることを念頭に置いておく必要がある。

複数の要因が、DCO 抽出後の DDGS の ME 価の変動に影響を与えられられる。Kim ら(2013)は、豚における DDGS の粗脂肪の ATTD(見かけの全消化管消化率)は約 50% であると報告している。Kerr ら(2013)は、粗脂肪の ATTD は供給源の違いにより 53~81% の変動があるとしている。豚における DDGS の粗繊維の ATTD は 23~55% であり(Urriolaら、2010)、これも、ME 価の変動に影響する。供給源間における粗脂肪と粗繊維の消化性の違いは、様々な DDGS 供給源における繊維-でん粉-たん白質の画分の多様性によるもので、繊維の発酵性と炭水化物分解酵素の有効性に影響している(Jha ら、2015)。Liu ら(2012)は、DDGS をより細かく粉砕すると ME 価が高まると報告しているが、DDGS の粒子径は供給源間でも差がある。

表 1. DDGS の ME 価とトウモロコシに対する相対値(NRC、2012)

Item	n	ME of DDGS				SD	DDGS relative to corn ¹ (%)
		Average	Least value	Greatest value			
Hastad et al., 2004 ²	2	4,047	3,986	4,108	-	105.3	
Hastad et al., 2004 ³	2	3,679	3,476	3,882	-	95.7	
Stein et al., 2006	4	3,378	-	-	-	87.9	
Pedersen et al., 2007	10	3,897	3,674	4,336	221	101.4	
Stein et al., 2009	4	3,750	3,575	3,976	168	97.6	
Dahlen et al., 2011	2	2,962	2,959	2,964	-	77.0	
Jacela et al., 2011 ^{4,5}	1	2,858	-	-	-	74.3	
Liu et al., 2012	3	3,730	3,583	3,862	140	97.0	
Anderson et al., 2012	6	3,790	3,414	4,141	252	98.6	
Anderson et al., 2012 ⁵	1	3,650	-	-	-	94.9	
Kerr et al., 2013 ⁵	15	3,435	3,266	3,696	140	89.3	
NRC, 2012, >10 % oil	-	3,845	-	-	-	100.0	
NRC, 2012, > 6 and < 9 % oil	-	3,801	-	-	-	98.9	
NRC, 2012, < 4 % oil	-	3,476	-	-	-	90.4	
Graham et al., 2014a ^{4,5}	1	3,365	-	-	-	87.5	
Graham et al., 2014b ⁵	4	3,744	3,481	3,905	183	97.4	
Adeola et al., 2014	1	3,559	-	-	-	92.6	

1 NRC (2012) におけるトウモロコシのMEに対するDDGSの平均MEの相対値)

2 代謝試験により測定したME(水分含量は未記載のため、乾物を89.3%(NRC、2012)とみなして試算)

3 増体量に基づいて計算したME(水分含量は未記載のため、乾物を89.3%(NRC、2012)とみなして試算)

4 Noblet and Perez(1993)によるDEおよび成分組成を変数とした予測式から推定したME

5 粗脂肪含量が10%未満の低脂肪DDGSを含む

表 2. 粗脂肪含量が異なる DDGS の ME 価と一般成分組成(乾物)(Kerrら、2013 から改編)

DDGS	ME kcal/kg	ME/GE %	粗脂肪 %	NDF %	CP %	でん粉 %	灰分 %
15	3,696	72.8	10.9	31.6	29.0	3.3	5.4
13	3,604	74.6	5.6	31.6	30.6	3.3	6.1
8	3,603	69.7	13.2	34.0	30.6	1.3	5.3
11	3,553	69.3	11.8	38.9	32.1	1.1	4.9
9	3,550	71.6	9.7	28.8	29.8	2.8	5.0
6	3,513	70.8	9.6	33.0	30.1	3.4	4.9
7	3,423	69.3	10.1	38.2	30.3	2.2	5.0
2	3,400	67.0	11.1	36.5	29.7	3.9	4.3
4	3,362	68.7	8.6	35.7	32.9	0.8	5.1
3	3,360	66.4	10.8	38.6	29.7	1.6	4.6
10	3,327	67.2	10.0	35.9	32.7	1.0	5.3
1	3,302	65.0	11.2	44.0	27.7	1.8	4.4
12	3,286	68.8	4.9	30.5	31.2	3.3	5.8
5	3,277	65.0	11.1	39.7	31.6	0.9	5.0
14	3,266	66.2	7.5	33.9	30.8	2.5	5.7

Kerrら(2013)によると、DDGSの乾物の ATTD は 66.8 ~ 77.3%と比較的高いが、ME 価との間には大きな相関はなかった(表 3)。粗脂肪の ATTD の変動も供給源間で

かなり大きく(52.7~81.2%)、ME 価とも大きな相関はない。これは、粗脂肪含量が ME 価を推定するための単一の変数としては利用できないことを示している。

表 3. 粗脂肪含量が異なる DDGS の ME 価とその他の成分(乾物) (Kerr ら、2013 から改編)

DDGS	ME kcal/kg	乾物ATTD %	粗脂肪ATTD %	NDF ATTD %	窒素ATTD %	炭素ATTD %
15	3,696	72.5	81.2	45.8	80.5	74.1
13	3,604	77.3	69.8	57.4	83.4	78.1
8	3,603	71.6	68.5	57.1	81.0	73.0
11	3,553	70.4	65.8	53.3	82.5	72.4
9	3,550	73.8	58.2	55.2	84.8	74.7
6	3,513	74.2	53.3	60.6	82.8	74.3
7	3,423	71.9	52.7	61.5	80.6	73.2
2	3,400	70.5	57.2	57.4	79.7	71.0
4	3,362	73.3	67.1	51.8	77.0	72.3
3	3,360	69.6	54.7	58.2	81.8	70.2
10	3,327	70.4	57.6	57.2	81.8	70.5
1	3,302	66.8	54.8	56.3	76.9	67.9
12	3,286	72.4	65.7	49.8	82.6	73.6
5	3,277	67.4	59.4	54.2	82.1	68.3
14	3,266	67.7	72.7	44.5	78.0	69.0

DDGS の NDF は、かなりの量がエネルギーとして利用され、ATTD は 45.8～61.5%である。これらの結果は、Urriola ら(2010)の報告とほぼ同様である。CP の ATTD は 76.9～84.8%で、供給源間での変動は比較的少ないが ME 価との相関性は低かった。過剰な窒素はエネルギーとして利用できるが、変換効率は低い。炭素の ATTD は 67.9～78.1%で比較的高いが、これも ME 価とは明確な相関はなかった。したがって、粗脂肪含量が異なる DDGS の ME 価は、可消化エネルギーに寄与する画分(NDF、粗脂肪、CP)の組み合わせによって決まり、粗脂肪含量とその ATTD のみからは推定できない。

DDGS の ME 価を正確に推定することは、正確な配合設計と、豚用飼料における DDGS の栄養学的および経済的な価値を正確に把握するために重要である。トウモロコシ DDGS の物理・化学的な組成に基づく DE(可消化エネルギー)価および ME 価の予測式を開発するためにいくつかの研究が行われている(Stein ら、2006; Pedersen ら、2007; Stein ら、2009; Anderson ら、2012; Kerr ら、2013)。これらの予測式は、豚についてクロスチェックが行われている(Urriola ら、2014)。最も正確な DE 価の予測式(予測誤差; 144 kcal/kg、バイアス; 19 kcal/

kg)は以下のとおりである。

$$\text{DE 価} = -2,161 + (1.39 \times \text{GE(総エネルギー)}) - (20.7 \times \text{NDF}) - (49.3 \times \text{粗脂肪})$$

また、最も正確な ME 価の予測式(予測誤差; 149 kcal/kg、バイアス; -82 kcal/kg)は、先の予測式から得られた DE 価を用いて、次式により推定出来る。

$$\text{ME} = -261 + (1.05 \times \text{DE}) - (7.89 \times \text{CP}) + (2.47 \times \text{NDF}) - (4.99 \times \text{粗脂肪})$$

Urriola ら(2014)によって最も正確であると評価された DE 価および ME 価の予測式をさらに評価するために、Wu ら(2016a)は、粗脂肪含量は異なる(低脂肪: 6%、中脂肪: 10%および高脂肪: 14%)が、推定 ME 価はほぼ同様(3,258、3,315 および 3,232 kcal/kg)の DDGS を 40% 配合した育成期～肥育期用飼料と、トウモロコシ・大豆粕主体の対照飼料との発育成績等を比較している(表 4)。各飼料のアミノ酸の SIDC とリン STDC(標準化された全消化管可消化量)は同一とした。この結果、DDGS を 40% 配合した各飼料では、飼料摂取量がわずかに低下する可能性が高いことが明らかとなった。これは、DDGS 配合飼料では対照飼料より繊維含量が高かったためと考えられる。しかし、粗脂肪含量が異なる DDGS を配合し

表 4. DDGS の粗脂肪含量の違いと、豚の発育成績、枝肉特性および脂肪の品質(Wuら、2016a から改編)

	DDGS 40%配合				SE ²
	対照 ¹	低脂肪DDGS ¹	中脂肪DDGS ¹	高脂肪DDGS ¹	
豚房数	12	12	12	12	
体重 kg					
開始時	39.24	39.52	38.95	39.58	0.90
終了時	122.7 ^a	118.7 ^b	118.6 ^b	119.4 ^b	0.90
全期間の飼料摂取日量 kg	2.72 ^a	2.65 ^{ab}	2.61 ^b	2.60 ^b	0.03
全期間の増体日量 kg	0.97 ^a	0.92 ^b	0.92 ^b	0.93 ^b	0.01
全期間の飼料効率	0.368 ^a	0.356 ^b	0.365 ^a	0.367 ^a	0.003
温屠体重量 kg	90.97 ^a	86.69 ^b	86.80 ^b	87.24 ^b	0.88
枝肉歩留 %	74.2 ^a	73.0 ^b	72.9 ^b	73.0 ^b	0.20
背脂肪厚 ³ mm	20.6	19.9	19.2	19.8	0.5
ロース芯面積 ³ cm ²	42.06 ^a	39.38 ^b	39.09 ^b	39.37 ^b	0.53
赤身肉の割合 ³ %	51.9	51.6	51.9	51.6	0.3
バラ脂肪のIV ⁴	60.17 ^a	70.74 ^b	72.03 ^b	76.41 ^c	0.79

¹ 対照：トウモロコシ・大豆粕飼料、低脂肪DDGS、中脂肪DDGS、高脂肪DDGS：粗脂肪含量5.9%、9.9%、14.2%

² プールした標準誤差

³ 終了時体重を共変数として解析

⁴ ヨウ素価

a - b異符号間で有意差あり (p < 0.05)

た場合に、ADG(日増体量)と全体的な枝肉特性には影響がなかった。低脂肪および中脂肪 DDGS を給与した場合、PUFA(多価不飽和脂肪酸)の摂取量が減少し、バラ肉の脂肪の IV(ヨウ素価)が低下し、脂肪の品質が高まった。これらの結果は、粗脂肪含量が 6%以上の DDGS の ME 価は、Urriolaら(2014)の予測式を用いて正確に推定できることを示している。ただし、低脂肪 DDGS を配合した飼料では飼料効率がわずかに低下していることを考えると、粗脂肪含量が 6%未満の DDGS の ME 価を正確に推定するためには、予測式のさらなる改良が必要である。Urriolaら(2014)が述べているように、NRC(2012)が示しているエネルギー価の予測式は、低脂肪 DDGS の ME 価を過小評価することになるため使用しないほうが良い。

正味エネルギー

NE(正味エネルギー)価に基づく配合設計は、ME 価に基づく配合設計に比べて、高繊維飼料を給与する豚におけるエネルギー要求量を正確に表している(Nobletら、1994)。このため、米国の栄養学者は NE 価に基づいて DDGS 配合飼料を設計し、30%以上の高い配合割合の飼料で、満足できる発育成績と枝肉形質を得ている。残念ながら、DDGS の NE 価(乾物値)を測定した報告は多

くない(表 5)。Gutierrezら(2014)は、従来の DDGS(粗脂肪含量 13.0%)と、Uncooked と呼ばれるエタノール発酵前に粉碎トウモロコシへの酵素処理を行った DDGS(粗脂肪含量 2.6%)の NE 価を比較屠殺法により測定した。従来の DDGS の肥育豚における NE 価は、育成豚に比べて高かった(2,697 vs 2,173 kcal/kg)が、Uncooked DDGS では育成豚と肥育豚の差はなかった(2,120 vs 2,058 kcal/kg)。Uncooked DDGS の肥育期における NE 価が従来の DDGS に比べて低かった理由は明らかではないが、粗脂肪含量が高い従来の DDGS では、粗脂肪含量が低い Uncooked DDGS に比べて、枝肉への脂肪の蓄積が高まる可能性がある。肥育豚では、摂取したエネルギーを体たん白質の合成より脂肪蓄積により多く振り向ける(Gutierrezら、2014)ことから、この傾向は肥育期で顕著となる可能性がある。さらに、これらの推定 NE 価は、NRC(2012)が示すトウモロコシの NE 価より低く、NRC(2012)による DDGS の NE 価(粗脂肪含量が 10%以上の DDGS では 2,669 kcal/kg、粗脂肪含量が 4%未満の DDGS では 2,251 kcal/kg)より低かった。NRC(2012)による NE 価は *in vivo* で直接測定したのではなく、完全配合飼料に基づく予測式から推定されたものであって、正確性を欠くことを再認識する必要がある。

表 5. トウモロコシ DDGS の NE 価(kcal / kg、乾物)(公表値)

	n	DDGSのNE価				トウモロコシ に対する相対 値 (%) ¹
		平均	最小値	最大値	標準 偏差	
Gutierrez et al., 2014 ²	1	2,435	-	-	-	80.5
Gutierrez et al., 2014 ³	1	2,089	-	-	-	69.1
Graham et al., 2014b	4	2,551	2,122	2,893	318.8	84.3
Kerr et al., 2015a	6	2,135	2,012	2,253	89.2	70.6
Wu et al., 2016c	4	2,660	2,182	2,915	-	87.9
NRC, 2012, > 10 % oil	-	2,384	-	-	-	78.8
NRC, 2012, > 6 and < 9 % oil	-	2,343	-	-	-	77.4
NRC, 2012, < 4 % oil	-	2,009	-	-	-	66.4

¹ NRC (2012) におけるトウモロコシのNEに対するDDGSの平均NEの相対値)

² 従来のDDGS

³ Uncooked (発酵前に酵素処理を行った) DDGS

表 6. 粗脂肪含量が異なる DDGS の NE 価と一般成分組成等(乾物)(Kerr ら、2015 から改編)

DDGS	NE Kcal/kg	ME Kcal/kg	NE/GE %	NE/ME %	粗脂肪 %	NDF %	CP %	でん粉 %	灰分 %
6	2,381	3,734	44.8	59.3	11.4	31.1	32.2	4.7	5.5
5	2,326	3,893	45.9	60.4	7.0	27.8	29.8	4.4	5.5
1	2,262	3,830	42.6	58.2	13.3	38.3	29.7	2.5	4.8
2	2,249	3,723	43.0	58.9	10.4	38.5	32.0	2.3	4.7
3	2,219	3,874	42.6	55.5	9.1	39.6	31.6	3.8	5.4
4	2,129	3,716	42.3	56.7	8.0	31.0	30.6	4.9	5.6

Kerr ら(2015a)は、DEXA(二重エネルギーX線吸収測定法)を用いて、6 試料のトウモロコシ DDGS の NE 価を測定した(表 6)。これらの DDGS の粗脂肪含量は 7.0~13.3%であったが、NE 価には大きな差はなかった(2,012~2,253 kcal/kg)。これら 6 試料の平均 NE 価は 2,135 kcal/kgであり、NRC(2012)によるトウモロコシのNE価および Gutierrez ら(2014)が測定した従来の DDGS の NE 価(育成期と肥育期の平均)よりも、それぞれ 29.4 および 12.3%低かった。この結果から、DDGS の粗脂肪含量が DDGS のエネルギー価を推定するための優れた変数ではないことが再確認された。残念ながら、Kerr ら(2015)が測定した DDGS の各成分組成には大きな差がなく、試料数も限られていたことから、NE 価の予測式を導くことは出来なかった。この他に、Graham ら(2014b)は、4 試料の DDGS を配合した飼料を給与した豚の NE 効率をトウモロコシ・大豆粕飼料を給与した豚と比較し、NRC

(2012)によるトウモロコシと大豆粕の NE 価に基づく NE 価を推定した。推定された NE 価は 2,122~2,893 kcal/kg で、粗脂肪含量と正の相関(NE 価、kcal/kg = 1,501.01 + 115.011 × 粗脂肪、%、R²:0.86)があった。Wu ら(2016)は、粗脂肪が 5.8~12.2%の DDGS 4 試料について、育成豚の発育応答と NRC(2012)による要求量モデルを使用して、NE 価を推定した。その結果、推定 NE 価は 2,182~2,915 kcal/kg(平均 2,660 kcal/kg、乾物)だった。これらの推定値は、NRC(2012)よりも大幅に高いが、Graham ら(2014b)の報告とは同程度であった。Kerr ら(2015a)および Wu ら(2016c)の結果を用いて、Wu ら(2016c)が導いた NE 価の予測式は以下のとおりである。

$$\text{NE 価 (kcal/kg、乾物)} = -1130.5 + (0.727 \times \text{GE}) + (23.86 \times \text{粗脂肪}) - (10.83 \times \text{NDF}); \quad (\text{R}^2:0.99, \text{リンは } 0.01 \text{ 未満})$$

ただし、この予測式の精度は飼育試験では検証され

ていない。利用可能なすべての公表文献の結果をまとめると、低脂肪 DDGS の NE 価の最も控えめな推定値は 2,012 kcal/kg であり、平均 NE 価の 2,374 kcal/kg (乾物) は、ほとんどの DDGS に適用できるものと思われる。

可消化アミノ酸

DDGS の配合割合に影響を与える最も重要な制約の一つは可消化アミノ酸含量の変動である。供給源が異なる様々な DDGS について、アミノ酸の SID を測定するための研究が行われている。ただし、DDGS の配合割合をより高めるためには、実際に使用する DDGS のアミノ酸の SIDC を逐次推定する必要がある。DDGS は、大豆粕に比べて、アミノ酸の消化性が悪く、アミノ酸組バランスも劣るために、配合割合を高めると発育成績が低下する可能性があることと、供給源間の変動が大きいため、DDGS の配合割合の上限は制限を受けている。Olukosi and Adebisi (2013) は、1997～2010 年に公表された文献におけるトウモロコシ DDGS のアミノ酸組成のデータをまとめている (表 7)。これらの DDGS の大部分は粗脂肪含量が 10% 以上のものであるが、DDGS のアミノ酸含量における供給源間の固有の変動性を理解するために利用出来る。さらに、彼らは、CP 含量とアルギニン、イソロイシン、リジンおよびトリプトファンとの相関性は低く (r (相関係数): 0.44, 0.26, 0.22 および 0.33)、有意ではないとしている。これは、CP がトウモロコシ DDGS のこれらのアミノ酸含量の変数としては不十分であり、CP を変数とした予測式は開発出来ないことを意味している。他の必須アミノ酸の含量は CP 含量と比較的相関するが (ヒスチジン、ロイシン、メチオニン、フェニルアラニン、スレオニンおよびバリンにおける相関係数は、0.68, 0.49, 0.73, 0.81, 0.59 および 0.61)、それらの相関係数は全般的に低く、予測式の精度も低かった (R^2 : 0.23～0.66)。これらの結果は、CP 含量がトウモロコシ DDGS のアミノ酸含量を推定する際の変数としては不適切であり、正確な推定には化学的な分析値が必要であることを示している。

アミノ酸の SID と SIDC に対する DCO 抽出の影響を調査するために 4 つの研究が行われている。Ren ら (2011) は、低脂肪 DDGS (粗脂肪含量: 2.9～4.1%) のアミノ酸の

SID が従来の高脂肪 (粗脂肪含量: 10% 以上) と差がないことを示している。Li ら (2015) は、DDGS 製造時の CDS (濃縮ジスチラーズ・ソリュブル) の混合割合と粗脂肪含量が異なる DDGS についての調査を行い、低脂肪 DDGS は高脂肪 DDGS よりもアミノ酸の SID が低く、CDS の割合が高い高脂肪 DDGS ではアミノ酸の SID が減少する傾向があるが、この傾向は低脂肪 DDGS では見られなかったと報告している。Curry ら (2014) は、2 試料の CDO 抽出 DDGS (酸分解した粗脂肪含量: 8.4 および 7.9%、乾物) が、従来の DDGS (同 12.7%) に比べてほとんどのアミノ酸の SID が低く、飼料に油脂を添加しても改善されなかった (表 8)。また、Gutierrez ら (2016) は、トウモロコシ・大豆粕主体の豚用飼料に低脂肪 DDGS を配合するとリジンの SID が低下するが、大豆油を 6% 添加すると、リジンの SID が高まったとしている。CDO 抽出工程中で、繊維-でん粉-たん白質の画分に大きな変化が生じ、乾燥工程中での過熱による影響を受けやすくなることから、これら 2 つの研究で観察されたアミノ酸の SID の低下に影響している可能性がある。(Almeida ら、2013) は、熱変性を受けた DDGS のアミノ酸の SID を推定するために予測式を開発しているが、その精度については検証されていない。

最近、Zeng ら (2017) は、2006～2015 年に公表された 22 報の査読済み文献、出版物 1 編および修士論文データ 1 報を取りまとめた (表 9 および 10)。これらのデータは、Olukosi and Adebisi (2013) によって報告されたものに比べて、低脂肪トウモロコシ DDGS 成分組成と変動をより反映している。彼らはメタ分析を行っており、豚における低脂肪 DDGS の SID 予測式を開発した (表 11)。DDGS のアミノ酸含量と、NDF または ADF (酸性デタージェント繊維) 含量は、DDGS のアミノ酸の SIDC の優れた予測変数であり、これらの予測式の精度は、以前に発表されたものに比べて大幅に改善されている。その結果、これらの予測式を使用して、低脂肪 DDGS の豚におけるアミノ酸の SIDC を正確に推定できる。

DDGS の色調 (L^* および b^*) が、DDGS の豚および家禽における可消化アミノ酸含量を推定する変数として使用できる可能性があることが初期の研究で報告されてい

表 7. 1997 年から 2010 年までの公表文献中のトウモロコシ DDGS の必須アミノ酸組成の変動(Olukosi and Adebisi, 2013 から改編)

	平均	最小値	最大値	標準偏差	変動係数 %
アルギニン %	1.22	1.06	1.46	0.098	8.0
シスチン %	1.73	1.49	1.97	0.057	11.1
ヒスチジン %	0.74	0.65	0.91	0.070	9.4
イソロイシン %	1.07	0.96	1.25	0.072	6.7
ロイシン %	3.21	2.89	3.62	0.210	6.6
リジン %	0.90	0.62	1.11	0.118	13.1
メチオニン %	0.52	0.44	0.72	0.063	12.0
フェニルアラニン %	1.29	1.09	1.51	0.123	9.6
トレオニン %	1.03	0.93	1.16	0.067	6.5
トリプトファン %	0.22	0.16	0.26	0.022	10.3
バリン %	1.42	1.30	1.61	0.095	6.7

表 8. 粗脂肪含量が異なる DDGS の豚におけるアミノ酸含量とアミノ酸の SID(標準化された回腸消化率)および SIDC(標準化された回腸可消化含量)(原物値、Curry ら、2014 から改編)

	粗脂肪11.5%DDGS			粗脂肪 7.5%DDGS			粗脂肪 6.9%DDGS		
	含量 %	SID %	SIDC %	含量 %	SID %	SIDC %	含量 %	SID %	SIDC %
乾物 %	90.6	-	-	89.0	-	-	87.5	-	-
AH粗脂肪 %	11.5	-	-	7.5	-	-	6.9	-	-
CP %	25.7	79.8 ^a	20.5	28.0	72.8 ^b	20.4	27.9	73.6 ^b	20.5
アルギニン	1.22	87.7 ^a	1.07	1.22	81.0 ^c	0.99	1.24	82.5 ^{bc}	1.02
シスチン	0.62	76.0 ^a	0.47	0.62	67.8 ^c	0.42	0.63	68.8 ^{bc}	0.43
ヒスチジン	0.69	80.9 ^a	0.56	0.75	73.5 ^b	0.55	0.71	74.6 ^b	0.53
イソロイシン	1.03	79.8 ^a	0.82	1.12	72.9 ^b	0.82	1.06	73.1 ^{bc}	0.77
ロイシン	2.79	87.7 ^a	2.45	3.17	83.4 ^{bc}	2.64	3.07	82.2 ^c	2.52
リジン	0.91	67.9 ^a	0.62	0.91	56.4 ^c	0.51	0.88	61.7 ^b	0.54
メチオニン	0.52	88.1 ^a	0.46	0.59	84.8 ^{bc}	0.50	0.55	83.6 ^c	0.46
フェニルアラニン	1.25	84.9 ^a	1.06	1.36	80.3 ^{bc}	1.09	1.35	79.8 ^c	1.08
トレオニン	0.97	73.4 ^a	0.71	1.02	66.9 ^c	0.68	1.02	68.2 ^{bc}	0.70
トリプトファン	0.21	83.1 ^a	0.17	0.20	77.8 ^c	0.16	0.20	81.1 ^{ab}	0.16
バリン	1.30	80.5 ^a	1.05	1.43	74.2 ^{bc}	1.06	1.33	74.6 ^{bc}	0.99

a - c異符号間に有意差あり (p < 0.05) ¹ AH粗脂肪：酸分解性エーテル抽出物

表 9. 2006 年から 2015 年に豚に給与されたトウモロコシ DDGS の成分組成の変動(乾物 88%換算値、Zeng ら、2017 から改編)

	平均	変動係数 %
CP %	27.1	8.7
粗繊維 %	8.2	26.2
NDF %	34.1	13.4
ADF %	11.5	21.2
粗脂肪 %	8.8	36.3
粗灰分 %	4.1	24.9

表 10. 2006～2015 年に豚に給与されたトウモロコシ DDGS の総アミノ酸含量と SID (標準化された回腸消化率) とそれらの変動(乾物 88%換算値、Zeng ら、2017 から改編)

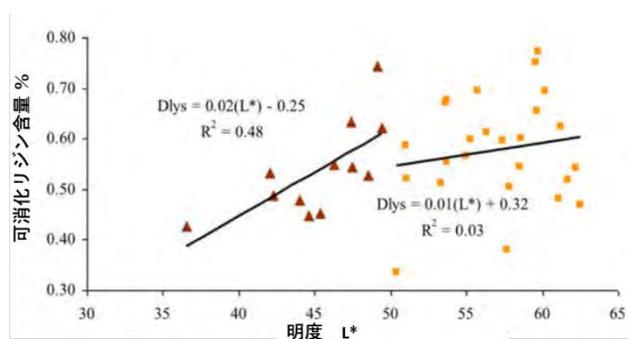
必須アミノ酸	平均含量 %	変動係数 %	SID	変動係数 %
アルギニン	1.15	11.8	0.83	6.8
ヒスチジン	0.74	14.2	0.78	5.5
イソロイシン	0.99	11.8	0.76	9.2
ロイシン	3.16	13.7	0.85	4.0
リジン	0.80	17.9	0.62	13.5
メチオニン	0.54	15.1	0.82	7.0
フェニルアラニン	1.32	12.3	0.82	4.5
トレオニン	1.01	15.5	0.71	7.1
トリプトファン	0.20	16.3	0.72	12.7
バリン	1.35	11.1	0.77	5.9

表 11. DDGS の豚におけるアミノ酸の SIDC (標準化された回腸可消化量) 予測式(乾物 88%換算値; Zeng ら、2017)

アミノ酸 g/kg	予測式	R ² (決定係数)
SIDアルギニン	$= -0.26 + (\text{Arg, g/kg} \times 0.97) - (\text{NDF, g/kg} \times 0.004)$	0.99
SIDヒスチジン	$= -0.08 + (\text{His, g/kg} \times 0.94) - (\text{NDF, g/kg} \times 0.003)$	0.99
SIDイソロイシン	$= 0.07 + (\text{Ile, g/kg} \times 0.90) - (\text{NDF, g/kg} \times 0.005)$	0.99
SIDロイシン	$= 0.30 + (\text{Leu, g/kg} \times 0.90) - (\text{ADF, g/kg} \times 0.018)$	0.97
SIDリジン	$= -1.03 + (\text{Lys, g/kg} \times 0.88) - (\text{NDF, g/kg} \times 0.003)$	0.98
SIDメチオニン	$= -0.22 + (\text{Met, g/kg} \times 1.00) - (\text{NDF, g/kg} \times 0.002)$	0.99
SIDメチオニン+シスチン	$= 0.05 + (\text{Met+Cys, g/kg} \times 0.92) - (\text{NDF, g/kg} \times 0.005)$	0.99
SIDフェニルアラニン	$= 0.15 + (\text{Phe, g/kg} \times 0.92) - (\text{NDF, g/kg} \times 0.004)$	0.99
SIDトレオニン	$= 1.30 + (\text{Thr, g/kg} \times 0.64) - (\text{ADF, g/kg} \times 0.028)$	0.99
SIDトリプトファン	$= -0.17 + (\text{Trp, g/kg} \times 0.89)$	0.99
SIDバリン	$= -0.49 + (\text{Val, g/kg} \times 0.87) - (\text{ADF, g/kg} \times 0.070)$	0.99

る。しかし、Urriola ら (2013) は DDGS の色調がアミノ酸の消化性を推定する際の正確な予測変数ではないことを示している。Urriola ら (2013) は、トウモロコシ DDGS 34 試料、ソルガム DDGS 1 試料および小麦 DDGS 2 試料について可消化アミノ酸量を測定している。これらの結果は、可消化アミノ酸量が DDGS 間で大きく異なる可能性があることを示している。図 1 に示すように、L* が 50 未満の DDGS と、50 以上の DDGS では、それぞれ L* と可消化リジン含量の相関性は高いように見受けられるが、いずれも精度は低い (R²: 0.48 および 0.03)。したがって、トウモロコシ DDGS の可消化アミノ酸含量の予測変数として色調を使用することは妥当ではない。

図 1. DDGS の明度 (L*) と可消化リジン含量の相関



(Urriola ら、2013)

ミネソタ大学の研究者は、34 試料の DDGS について、光学密度と蛍光度からアミノ酸の SID を推定する方法を開発した (Urriola ら、2013)。DDGS における一部のアミノ酸の消化率の低下は、製造および乾燥工程中の熱処理

に部分的に由来している。還元糖の存在下でたん白質を穏やかに加熱すると、初期のメイラード反応が起こり、さらに加熱すると、高度なメイラード反応が起こる。初期のメイラード反応による生成物の一部は環状構造を有しているため蛍光光度による検出が可能である。前面蛍光法(front-face fluorescence)は、DDGS の熱変性の進行度をカチオンの定量により可能にする迅速な方法であり、34 試料の DDGS 中のリジン、メチオニン、トレオニンおよびトリプトファン の SID を予測できるように設定した(Urriolaら、2013)。ただし、この方法を用いて DDGS のアミノ酸の SID を推定する精度は検証されていない。

この研究では、DDGS 中のアミノ酸は消化され難いだけでなく、生物学的利用性も低い可能性があることを示している(Fontaineら、2007; Pahmら、2008)。DDGS の乾燥工程における熱処理は、たん白質にいくつかの影響を与える可能性がある(Meadeら、2005)。過熱はリジンを直接分解するだけでなく、メイラード反応により栄養的に利用できない物質を生成することで、消化率や吸収率を低下させる、または、体内に吸収された後に利用されずに尿中に排泄されるリジンの割合を増加させる(Rutherford、2015)。ホモアルギニンを生成するリジンの側鎖アミノ基と O-メチルイソ尿素との反応であるグアニジン化反応は、未修飾のリジン(反応性リジン)の測定に使用されている。全体として、加熱により消化管から吸収されて体たん白質合成に利用される(生物学的に利用可能な)リジンが減少し、豚の発育成績と赤身肉の割合が低下する可能性がある(Almeidaら、2014)。

DDGS 中のアミノ酸の熱変性は、現在、DDGS 中の CP (約 27%)と糖またはでん粉(約 2~8%)の混合物が加熱処理中で強く結合する際に発生するメイラード反応に起因する(Fontaineら、2007)。しかし、DDGS 中の粗脂肪含量(5~12%)と過酸化生成物も、画分中のアミノ酸と反応して、生物学的に利用できない分解生成物を生成する(Meadeら、2005)。熱ストレスは、リノール酸などの不飽和脂肪酸の過酸化を引き起こし、その結果、ヒドロペルオキシド、アルデヒド、ケトン、その他の過酸化生成物が形成される。ヒドロペルオキシドはメチオニン、シスチンおよびトリプトファンを酸化し、アルデヒドとケトンはリ

ジンおよびヒスチジンと反応する。以前の研究では、DDGS 中の脂質は、トウモロコシ粒中の脂質に比べて乾燥工程での熱変性を受けやすく、脂質中のヒドロペルオキシドおよびアルデヒド含量が 20~25 倍高まるとの知見もある(Song and Shurson、2013)。トウモロコシ DDGS の粗脂肪含量は大きく変動するため、加熱の影響がメイラード反応による生成物の生成量に影響を及ぼすだけではなく、リジンやその他のアミノ酸の消化性を低下させる可能性がある脂質過酸化生成物の生成をも引き起こす可能性がある。

飼料原料中の生物学的に利用可能なリジンの比率を測定するために、フロシン法(Finot、2005)、グアニジン化法(Rutherford、2015)など、複数の方法が開発されている。ホモアルギニンを生成するリジンの側鎖アミノ基と O-メチルイソ尿素の反応であるグアニジン化反応は、未修飾の反応性リジンの測定には、前面蛍光法(Urriolaら、2013)や LC-MS 法(液体クロマトグラフィー質量分析、Wangら、2016)で測定)が利用されている。フロシン法やグアニジン化法は費用が高く、分析に要する時間もかかり、かつ、DDGS のアミノ酸の生物学的利用率を推定するために開発されたものではない。前面蛍光法は、DDGS 中の生物学的に利用可能なリジンの測定が可能で迅速な分析法である。ただし、この方法は検証の結果、蛍光を発する環状構造が形成されている場合のみに適合することが明らかとなっている。より包括的な分析方法は、生成された多数の化合物を定量化できる LC-MS 法である。LC-MS 法と前面蛍光法は、加工乳の品質評価に使用されている(Ntakatsaneら、2011)。DDGS の豚および家禽におけるアミノ酸の生物学的利用率を推定するための実用的で、正確、かつ、安価な迅速定量の開発には、さらなる研究が必要である。

可消化リン

リンは、豚用飼料において三番目に高価な成分であるが、DDGS の可消化リン含量は他のすべての穀物や穀物副産物に比べて高い。したがって、可消化リン含量に基づいて設計した豚用飼料に DDGS を配合すると、無機リンの使用量を低減し、飼料価格を大幅に節減出来る。さらに、多くのエタノール工場では、エタノールと DDGS

の生産工程でフィターゼを用いているため、DDGS 中のリンの消化性がさらに高まっているが、供給源間のリン含量の変動を大きくする要因ともなっている。

豚用飼料中のリンの利用性を表現するには様々な言い方があり、混乱を招くことがある。全リンは、飼料原料に含まれる全てのリンを示しており、穀物および穀物副産物中のフィチン酸として知られているリンの難消化性部分を含んでいる。したがって、全リン含量に基づいて配合設計した試料では、豚が利用できるリンの量を考慮されていないために可消化リン含量が過大評価される可能性がある。生物学的に利用可能なリンは、消化・吸収され、生理機能として利用されたり、体内で貯蔵される。リンの生物学的利用率は通常、消化試験で傾斜比定量法を用いて測定され、体内でのリンの消化性および吸収後の利用率を理論的に推定している。リンの生物学的利用能は、しばしば「利用可能なリン:有効リン」として説明されている。傾斜比定量法で利用可能なリンを測定するアプローチには、供試飼料中の無機リン源由来のリン含量と、各水準で得られた増体量や骨灰分含量などの応答との間の直線の傾きと、供試成分の応答における直線の傾きを比較することにより供試成分の有効リン含量を推定している。しかし、この方法の欠点は、対照とした無機リン源の生物学的利用率は 100%であると仮定していることであり、指標として選択する応答によっては推定値が異なる。したがって、リンの生物学的利用率の推定値を使用する場合、これらの推定値は、対照物質として使用されている無機リン源の生物学的利用率に基づくものであり、真の生物学的利用率を示すものではないことを考慮する必要がある。これを考慮しない場合、有効リンに基づいて設計された飼料は、実際に利用されているリンの量を過大評価してしまうことになる。これらの課題を克服するために、最近の研究では、リンの ATTD または STTD(標準化された全消化管消化率)の推定が行われている。その結果、リンの真の消化率の推定精度が向上した。リンの ATTD を使用する場合、基礎的な内因性損失量が考慮されていないため、リンの真の消化率が過小評価される可能性がある。Shen ら(2002)は、トウモロコシ中のリンの基礎的な内因性損失量は、豚におけ

るリンの一日必要量の約 26%を占めると推定している。したがって、内因性の損失量を補正した STTD は、飼料中のリンの真の消化率を最も正確に推定するものである(Gonçalves ら、2017)。

NRC(2012)は、粗脂肪含量が 6~9%の DDGS のリンの ATTD および STTD をそれぞれ 60 および 65%としているが、この値はかなり低いことが最近の研究により示されている。Almeida and Stein(2010)は、DDGS 中のリンの STTD は 72.9%であり、微生物フィターゼを 500 単位/kg添加しても STTD は 75.5%に改善されるだけで、フィターゼをトウモロコシ・大豆粕主体飼料に添加した場合のようなリンの大幅な改善効果は見られないと報告している。さらに、彼らはリン含量を STTD に基づいて設計した飼料では、豚の発育成績に悪影響を及ぼさず、トウモロコシ・大豆粕主体飼料に、フィターゼと DDGS を単独、あるいは、組み合わせて使用すると、育成豚におけるリン排泄量が減少することを示している。その後の研究で、Almeida and Stein(2012)は、微生物フィターゼを 130、430、770 または 1,100 単位/kg添加した場合のリンの STTD は、それぞれ 76.9、82.9、82.5、83.0%であったとし、この結果を基に、DDGS 中のリンの STTD 予測式の開発を試みたが、 R^2 は 0.20 にすぎなかった。

Hanson ら(2011)は、有効リン含量に基づいて DDGS を 0、10 または 20%配合すると、全リン含量に基づいて配合した場合と比べて、DDGS の配合割合の増加に伴い飼料中の全リン含量と糞中リン含量を低下させるが、リンの排泄量、蓄積量および消化率には影響しなかったと報告している。Baker ら(2013)は、育成豚に給与された DDGS 中のリンの STTD とリン酸二石灰を対照とした生物学的利用率を比較するために、2 回の試験を行っている。リン酸二石灰および DDGS 中のリンの STTD はそれぞれ 86.1 および 58.8%であり、DDGS 中のリンのリン酸二石灰に対する生物学的利用率は 87%だった。この結果、DDGS のリンの相対的生物学的利用率は真の利用率を過大評価しており、DDGS 中のリンの DTTD は、相対的生物学的利用率からは正確に推定できないと結論している。最適なリン栄養値を得るには、豚に給与する飼料原料のリンの STTD を測定する必要がある。

Rojas ら(2013)は、微生物フィターゼを 870 単位/kg添加した DDGS と無添加の DDGS のリンの STTD を 82.8 および 76.5%と報告しており、両者の間には大きな差はなかった。これは、恐らく、フィターゼ添加によるリンの STTD 改善効果があったとしても、DDGS 中のフィチン酸含量が比較的低いためだったと推察される。

She ら(2015)は、高脂肪(粗脂肪含量:10.3%)、中脂肪(同9.1%)および低脂肪(同3.5%)の各 DDGS にフィターゼを 600 単位/kg添加した場合のリンの STTD を測定した。その結果、高脂肪、中脂肪および低脂肪 DDGS のリンの STTD は、71.2、70.8 および 71.8%であり、DDGS 中の粗脂肪含量の違いはリンの STTD に影響を与えないことを示している。

要約すると、豚用の飼料原料として DDGS を使用する際に最適なリン栄養値を得る最も正確な方法は、STTD に基づいて飼料設計を行うことである。最近の研究の結果では、リンの STTD は 59~77%の範囲で変動する可能性があるが、いずれも、NRC(2012)が示す値(65%)よりも高い。残念ながら、DDGS 中のリンの STTD を推定する適切な予測式は開発されていない。したがって、NRC(2012)によるリンの STTD の推定値の使用は、実際の飼料設計における任意の DDGS にのみ使用するべきである。DDGS 配合飼料へのフィターゼの添加は、リンの利用性の改善にそれほど大きな影響を及ぼさない。これは、DDGS 中のフィチン酸含量が比較的低いためと考えられる。DDGS におけるリンの相対的な生物学的利用率はリン酸二カルシウムの 87%と推定されているが、この値は DDGS 中のリンの真の利用率を過大評価している。

発育成績

ほ乳期子豚、育成~肥育豚用の飼料に対して、高脂肪および低脂肪 DDGS を、ME 価または NE 価に基づいて、60%まで配合した場合の影響に関する多くの報告がある。2010~2017 年に公表された査読済み文献 26 報と出版物 1 編(Benz ら、2011; Coble ら、2017; Cromwell ら、2011; Davis ら、2015; Duttlinger ら、2012; Graham ら、

2014a, b, c; Hardry matteran, 2013; Jacela ら、2011; Jha ら、2013; Jones ら、2010; Kerr ら、2015a; Lammers ら、2015; Li ら、2013; Li ら、2012; McDonnell ら、2011; Nemechek ら、2015; Overholt ら、2016a; Pompeu ら、2013; Salyer ら、2013; Seabolt ら、2010; Tsai ら、2017; Wang ら、2012; Wu ら、2016a; Ying ら、2013)のデータを用いて、メタ分析を実施した。表 12 には、これらの 27 の文献における全体的な発育応答(DDGS 配合飼料の成績を対照飼料と比較した相対値)の概要を示した。DDGS 配合飼料を給与した場合に、DDGS を含まない対照飼料を給与した場合と比べて、ADG(-2.4%)と飼料効率(-1.2%)は数値的には少ないが有意に減少し($p < 0.05$)、ADFI(飼料摂取日量、-0.7%)もわずかに減少した($p < 0.10$)。これらの結果を適切に解釈することは非常に重要である。第一に、これらの結果は、DDGS の配合量が 20%以上の飼料が給与した試験結果に基づいたものであって、この要約に含まれているいくつかの報告には、最大 60%配合した試験データも含まれている。第二に、これらの全体的な反応は否定的なものであるが、ADG における-2.4%の変化は、育成~肥育期の豚の実際の ADG(0.90 vs 0.92 kg)と利益(0.45 vs 0.46)に相当し、これらのわずかな差を、一般の養豚現場で検出することは非常に難しい。さらに、豚用飼料に DDGS を配合することで、特に配合割合を 20%以上とした場合に得られる飼料費の節減効果は、発生する可能性のある ADG のわずかな低下による損失をはるかに上回っている。第三に、これらのわずかな減少は、特に応答が最も低いデータを示している試験では、DDGS 配合飼料を設計する際に、不正確な ME 価、NE 価、可消化アミノ酸含量を使用していたことに起因している。実際に、これらの報告における発育応答の 106 のデータのうち、ADG では全データの 72%で「対照飼料と変化がなく」、ADFI では同 63%で、飼料効率では同 67%で変化がなかった(表 13)。

表 14 に示したように、これらの研究における計 106 のデータのうち 72 のデータは、低脂肪 DDGS を給与された豚からのものである。低脂肪 DDGS を給与した豚では、

表 12. トウモロコシ DDGS の配合による豚の発育成績への影響(2010 年以降に公表された 27 報の要約)

	対照飼料に対する比善率 ¹ %			開始時体重 kg	終了時体重 kg	飼育日数
	日増体量	飼料摂取日量	飼料効率			
データ数	106	106	106	106	106	106
試験数	27	27	27	27	27	27
平均	-2.4**	-0.7*	-1.2**	41.5	101.6	66.4
最小値	-12.3	-12.8	-17.7	6.7	17.5	20.0
最大値	4.1	18.0	6.5	105.7	134.9	120

** 対照飼料との間で $p < 0.05$ で有意差あり * 対照飼料との間で $p < 0.10$ で有意差あり

¹各データのプールされた標準誤差の逆数を重みとして使用

表 13. トウモロコシ DDGS の配合による豚における発育応答(2010 年以降に公表された 27 報の要約)

データ数	N	トウモロコシ DDGS 給与による反応 ¹		
		増加	低下	変化なし
日増体量	106	0	30	76
飼料摂取日量	106	10	29	67
飼料効率	106	7	28	71

¹有意差があった、あるいは、なかった結果数

ADG および飼料効率が、それぞれ 2.6 および 1.1%低下したが、これらの低下傾向は高脂肪 DDGS を給与した場合(1.7 および 1.3%低下)より大きかった。これらの違いは、試験用飼料を設計する際に、低脂肪 DDGS のエネルギー価と可消化アミノ酸含量について正しい値を使用しなかったことに起因している可能性がある。全体として、これらの 27 の文献からのデータでは、ADG に変化がなかったデータは、高脂肪 DDGS を用いた場合には 88%、低脂肪 DDGS を用いた場合では 64%であり、ADFI では同 56 および 67%、飼料効率では同 62 および 69%だった(表 15)。

27 試験中 22 試験では ME 価に基づいて配合設計を行っていたが、その際に、DDGS を配合することで、ADG が 2.3%、飼料効率が 1.5%低下した。NE 価に基づいて配合設計を行った場合は、ADG が 2.6%、飼料効率が 0.4%低下した(表 16)。これらのわずかな差は、一般の養豚現場では大きな影響を及ぼすものではなく、これらの文献で供試された DDGS について不適切な NE 価を使用された結果による可能性がある。繰り返しになるが、ADG で差がなかったデータは、ME 価に基づいた場合に全体の 71%、NE 価に基づいた場合に全体の 76%であり、ADFI では同 64 および 62%、飼料効率では同 59 および 100%である(表 17)。

育成期～肥育期の豚のデータ(n = 87)と比較して哺乳期子豚のデータ(n = 19)は少ないが、DDGS 配合飼料を給与した場合の ADG と飼料効率の低下傾向は育成期～肥育期の豚より大きかったが(表 18)、ADG で変化がなかったデータは全体の 68%、ADFI では同 89%、飼料効率では同 74%であった(表 19)。DDGS を配合した飼料を給与したほ乳期子豚での発育成績が大きく劣ったのは、1 文献で否定的な応答を示していた結果であると思われる。したがって、DDGS についての正確な可消化栄養成分組成を使用してほ乳期用飼料を設計すれば、発育成績にはほとんど影響がないものとみなされる。

米国における育成期～肥育期の豚用飼料へのトウモロコシ DDGS の配合割合は通常 20～30%だが、DDGS を使用することで飼料費が大幅に節減できるため、いくつかの大規模な養豚場では DDGS の配合割合を高める動きが進んでいる。豚の発育成績がわずかに低下する場合でも、飼料費を 60%削減することが出来る。最近、米国内で承認された飼料添加物(Liponate™; Nutriquest, Mason City, Iowa)を使用して保存中の枝肉の軟化を防止するか、屠殺前の数週間、DDGS 配合飼料の給与を休止することで、DDGS を 30%以上配合した飼料を使用している場合でも許容できる枝肉の脂肪の品質を確保できる。

対照的に、米国から DDGS を輸入している国々では、
 発育成績低下への懸念から、育成～肥育期の豚用飼料
 への DDGS の配合量を 20%以上に高めることには消極
 的姿勢を示しており、飼料への DDGS の配合割合を
 20%以下に制限しているために、大幅な飼料費の削減
 は実現していない。しかし、ME 価とアミノ酸の SIDC の予
 測式を使用して、使用する DDGS のエネルギー価とアミ

ノ酸の SIDC を正確に把握することで、育成期～肥育期
 の豚の発育成績を招くことなく、最大 30%配合するこ
 とができる。また、豚の養分要求量を充足させるためには、
 結晶アミノ酸と油脂を添加する必要がある。様々な配合
 割合での豚の発育応答の概要を表 20 に示したが、ADG、
 ADFI および飼料効率への影響を無視できる配合量は最

表 14. 高脂肪(粗脂肪>10%)と低脂肪(粗脂肪<10%)トウモロコシ DDGS を配合した飼料の給与が豚の発育成績に
 及ぼす影響(2010 年以降の 27 件の研究の要約) 1

	対照飼料に対する比善率 ¹ %			開始時体重 kg	終了時体重 kg	飼育日数
	日増体量	飼料摂取日量	飼料効率			
高脂肪DDGS						
データ数	34	34	34	34	34	34
試験数	9	9	9	9	9	9
平均	-1.7**	-0.3	-1.3**	48.6	119.5	75
最小値	-9.0	-7.9	-7.6	30.3	81.7	43
最大値	3.2	8.2	3.7	49.7	134.9	96
低脂肪DDGS						
データ数	72	72	72	72	72	72
試験数	19	19	19	19	19	19
平均	-2.6**	-0.8*	-1.1**	9.4	20.2	25
最小値	-12.3	-12.8	-17.7	6.7	17.5	20
最大値	4.1	18.0	6.5	105.7	132.9	120

** 対照飼料との間でp<0.05で有意差あり * 対照飼料との間でp<0.10で有意差あり
¹各データのプールされた標準誤差の逆数を重みとして使用

表 15. 高脂肪(粗脂肪>10%)と低脂肪(粗脂肪<10%)トウモロコシ DDGS を配合した飼料に対する豚の発育応答
 (2010 年以降に公表された 27 報の要約)

高脂肪トウモロコシDDGS給与による反応 ¹				
	N	増加	低下	変化なし
日増体量	34	0	4	30
飼料摂取日量	34	9	6	19
飼料効率	34	1	12	21
低脂肪トウモロコシDDGS給与による反応 ¹				
	N	増加	低下	変化なし
日増体量	72	0	26	46
飼料摂取日量	72	1	23	48
飼料効率	72	6	16	50

¹有意差があった、あるいは、なかった結果数

大20%であることがわかる。実際、DDGSを25~30%配合しても、ADGでは全データの70%、ADFIでは同68%、飼料効率では同62%で変化は見られない。また、データ数は限られているものの、配合量が30%以上のデータ(n=9)の約半数ではADGとADFIに変化がなく、残りの半数ではそれぞれ2.4~2.8%の減少を示した。ただし、これらの否定的な応答の程度は小さい(例えば、DDGS

配合飼料と対照飼料のADGは0.90 vs 0.92 kg/日である)。豚に対してDDGSの配合割合が高い(30%以上)飼料を給与すると、発育成績がわずかに低下する理由はいくつか考えられる。第一の理由は、DDGSはトウモロコシや大豆粕と比べて繊維含量がはるかに高い(NDF:35~45%)。繊維は、豚用飼料のME価とNE価を低下させ、消化管の膨満により飼料摂取を制限する。その結果、ほ

表 16. トウモロコシ DDGS を ME(代謝エネルギー)あるいは NE(正味エネルギー)に基づいて配合した場合の豚の発育成績に及ぼす反応(2010 年以降に公表された 27 報の要約)¹

	対照飼料に対する比率 ¹ %			開始時体重 kg	終了時体重 kg	飼育日数
	日増体量	飼料摂取日量	飼料効率			
ME						
データ数	85	85	85	85	85	85
試験数	22	22	22	22	22	22
平均	-2.3**	-0.5	-1.5**	48.6	119.5	75
最小値	-12.3	-12.8	-17.7	6.7	17.5	134.9
最大値	4.1	18.0	6.5	100.6	134.9	96
NE						
データ数	21	21	21	21	21	21
試験数	5	5	5	5	5	5
平均	-2.6**	-1.8**	-0.4	9.4	20.2	25
最小値	-9.0	-7.9	-4.9	29.1	106.2	20
最大値	3.2	6.9	3.5	105.7	130.0	93.0

** 対照飼料との間でp<0.05で有意差あり

¹各データのプールされた標準誤差の逆数を重みとして使用

表 17. トウモロコシ DDGS の ME(代謝エネルギー)あるいは NE(正味エネルギー)に基づいて配合した場合に対する豚の発育応答(2010 年以降に公表された 27 報の要約)¹

	N	ME価を基に配合設計した場合の反応 ¹		
		増加	低下	変化なし
日増体量	34	0	4	30
飼料摂取日量	34	9	6	19
飼料効率	34	1	12	21
				NE価を基に配合設計した場合の反応 ¹
	N	増加	低下	変化なし
日増体量	72	0	26	46
飼料摂取日量	72	1	23	48
飼料効率	72	6	16	50

¹有意差があった、あるいは、なかった結果数

乳期と育成期の初期では、エネルギー要求量を充足させるために必要な量の飼料を物理的に摂取できない場合がある。飼料用酵素の添加により、DDGS を配合した飼料中の繊維の利用性と ME 価および NE 価を高める研究は、近年最も多く行われている(25 章を参照)。残念ながら、DDGS 配合飼料への市販の炭水化物分解酵素とプロテアーゼの使用は、豚の繊維消化率とエネルギー価の改善に一貫した実質的な効果は見られていない。第二に、配合設計時に DDGS の正確な ME 価または NE 価を使用することが不可欠なことである。多くの場合、トウモロコシ DDGS のエネルギー価を推定するための予測式(Urriola ら、2014)を利用していない。これらの予測式により推定された ME 価を使用すると、不適切な配合設計により配合された飼料に由来する発育への悪影響を最小限に抑えることが出来る。さらに、アミノ酸の SID

は、DDGS の繊維含量に影響を受けるが(Urriola and Stein、2010)、公表文献のデータのメタ分析により、総アミノ酸含量と NDF 含量に基づく DDGS 中のアミノ酸の SIDC を逐次推定出来る予測式が開発されている(Zeng ら、2017)。実際、一部の企業(Nutriquest、Cargill、Evonik 等)では、DDGS のアミノ酸の SID を推定するサービスを提供している。したがって、この章で説明する予測式とこれらの市販のサービスを利用することで、トウモロコシ DDGS の ME 価、NE 価およびアミノ酸の SIDC を入手することが出来る。

DDGS の成分組成による他の側面として、DDGS の配合割合が高い(30%以上)飼料を給与すると、豚の発育成績に影響を及ぼす可能性がある。トウモロコシ DDGS の繊維含量は多く、食物繊維が多い場合、豚のトレオニン要求量が高まる(Zhu ら、2005)。Mathai ら(2016)は、

表 18. トウモロコシ DDGS を配合した飼料の給与ステージが発育成績に及ぼす影響(2010 年以降に公表された 28 報の要約)¹

	ステージ		標準誤差
	対照飼料に対する比率 %		
	ほ乳期	育成期～肥育期	
データ数	19	87	-
試験数	4	24	-
日増体量	-6.3**	-2.2**	1.05
飼料摂取日量	-1.8	-3.7**	1.52
飼料効率	-3.7**	1.4	1.28

** 対照飼料との間で $p < 0.05$ で有意差あり

¹ 各データのプールされた標準誤差の逆数を重みとして使用

表 19. トウモロコシ DDGS を配合した飼料の給与ステージと発育応答(2010 年以降に公表された 27 報の要約)¹

	N	ほ乳期子豚における反応 ¹		
		増加	低下	変化なし
日増体量	19	0	6	13
飼料摂取日量	19	0	2	17
飼料効率	19	0	5	14
	N	育成期～肥育期の豚における反応 ¹		
		増加	低下	変化なし
日増体量	87	0	24	63
飼料摂取日量	87	10	27	50
飼料効率	87	7	23	57

¹ 有意差があった、あるいは、なかった結果数

表 20. 配合割合が異なるトウモロコシ DDGS 飼料を給与した場合の豚の発育応答(2010 年以降に公表された 25 報の要約) 1

DDGS配合割合	DDGS – 対照		DDGS配合飼料による反応		
	平均 %	N	増加	低下	変化なし
< 12.5%					
日増体量	-0.95	13	0	2	11
飼料摂取日量	0.15	13	0	2	11
飼料効率	-0.60	13	1	1	11
15 to 20%					
日増体量	-0.91*	27	0	3	24
飼料摂取日量	-0.65	27	6	6	15
飼料効率	-0.66	27	3	7	17
25 to 30%					
日増体量	-3.20**	47	0	14	33
飼料摂取日量	-0.24	47	4	11	32
飼料効率	-2.14**	47	1	17	29
> 30%					
日増体量	-2.44**	9	0	5	4
飼料摂取日量	-2.28**	9	0	4	5
飼料効率	-0.18	9	0	3	6

** 対照飼料との間で $p < 0.05$ で有意差あり * 対照飼料との間で $p < 0.10$ で有意差あり

¹Jhaら(2015)の報告ではDDGS配合飼料に大麦(16%)、エクストールドアマニ種実およびエンドウ豆(20%)を配合されていたため除外。また、Benzらの(2011)能報告では過酸化油が添加されていたため除外した(これにより、DDGSを配合した飼料のヨウ素価は対照飼料の約20倍だった)

大豆皮とエンドウ豆繊維を給与した豚におけるリジンに対する比率として表されるトレオニンの要求量が、低繊維飼料を給与している豚と比較して高まるとしている。DDGS を多く配合した飼料を豚に給与すると、繊維の組成の変化により、トレオニンの内因性の損失およびその後のトレオニンの要求量が増加する可能性がある(Blank ら、2012)。Huang ら(2017)、Saqui-Salces ら(2017a)およびNRC(2012)のモデルでは、DDGSの配合割合が高い飼料を給与した場合におけるトレオニンの内因性損失量(要求量に対する相対値)は、トウモロコシ・大豆粕主体飼料の3.2%に対して7.7%に高まっている。その結果、DDGS飼料のリジンのSIDCに対するトレオニンのSIDCの比率の最適値は、トウモロコシ・大豆粕主体飼料の59%と比べて、61%に高まる可能性がある。

トレオニンの内因性損失に対するDDGS中の繊維の影響に加えて、DDGSは大豆粕よりロイシン含量が3.3倍多く、イソロイシン(1.12倍)およびバリン(1.47倍)に比べてロイシンの比率が高くなる可能性がある。豚に対し

て、大豆粕の配合量を減らしてDDGSの配合割合を高めた(30%以上)飼料を給与した場合、イソロイシンおよびバリンが不足する可能性がある。これらの分岐鎖アミノ酸は、BCKDC(α -ケト酸デヒドロゲナーゼ複合体)を介して分解経路を共有している。この酵素はキナーゼによって不活性化され、その活性はロイシンの異化作用の産物によって緩和される(Harris ら、2004)。その結果、ロイシンの過剰摂取はイソロイシンとバリンの異化作用を増加させる(Wiltafsky ら、2010; Gloaguen ら、2012)。

Htoo(2017)は、SID ロイシンとリジンの比率が160を超える量の過剰なロイシンを給与した豚におけるイソロイシンとバリンの要求量を測定し、DDGSを配合した飼料では、ロイシン、イソロイシンおよびバリンの比率が異なるが、これらの分岐鎖アミノ酸の比率を加味したDDGS配合飼料設計は大規模な商業用養豚方式では評価されていない。過剰なロイシンの影響は、主に飼料摂取量を減少させる。DDGS中の過剰なロイシン含量およびイソロイシンとバリンのその後の異化は、大豆粕からのCP

を供給することで、アミノ酸要求量を充足させることを可能にし、大量の結晶リジンおよびその他のアミノ酸(0.15%未満のリジン添加)の添加を回避することで軽減できる(Stein and Shurson, 2009)。しかし、現状では、結晶アミノ酸と DDGS の価格が比較的安いために、大豆粕の使用量を減らし、DDGS を 30%以上配合した豚用飼料への結晶アミノ酸の添加量を高めることで対応している。さらに、イソロイシンとバリンの異化作用に対する過剰なロイシンの影響も、アミノ酸のバランスを適切に保つために結晶イソロイシンを添加することによって軽減出来る。ほ乳期子豚と、育成～肥育豚に対して、DDGS を 30%以上配合した飼料を給与した場合のアミノ酸バランスを評価するための研究が進められている。

給餌器の形状と給餌管理

養豚場では、様々な形状の給餌器が使用されている。Bergstromら(2012)は、育成～肥育期の豚の発育成績と枝肉形質に及ぼす給餌器の形状(ウェット・ドライ・フィー

ダーと従来型の粉餌用フィーダー)と、フィーダーの間口に関する評価を行い、ウェット・ドライ・フィーダーを用いた場合の ADG、ADFI、温屠体重量および背脂肪厚は従来型の粉餌用フィーダーを用いた場合より大きいことを明らかにしているが、ウェット・ドライ・フィーダーは従来型の粉餌用フィーダーに比べて調整が難しいとしている。この研究に基づき、Bergstromら(2014)は、粗脂肪含量が 10%以上の DDGS を 20 または 60%配合した飼料を、ウェット・ドライ・フィーダーと従来型の粉餌用フィーダーを用いて給与した場合の育成～肥育期の豚の発育成績と枝肉形質への影響を調査した(表 21)。この試験は、一般の養豚農家で行われ、ウェット・ドライ・フィーダーと従来型の粉餌用フィーダーのいずれかを設置した 40 豚房に計 1,080 頭の豚を収容して実施した。供試 DDGS の ME 価は 3,420 kcal/kg であり、SIDC は Steinら(2006)の値を、その他の飼料原料の ME 可およびアミノ酸の SIDC は NRC(1998)の値を用いて設計した。その結果、ADG、ADFI および最終体重は、ウェット・ドライ・フィーダーを用

表 21. DDGS の配合割合と給餌器のタイプが豚の発育成績と枝肉形質に及ぼす影響(Bergstromら、2014 から改編)

	給餌器の形状			
	ウェット・ドライ・フィーダー		従来型粉餌用フィーダー	
	DDGS 20%	DDGS 60%	DDGS 20%	DDGS 60%
発育成績 0～99日齢				
日増体量 ^{1,2} kg	0.95	0.92	0.88	0.86
飼料摂取日量 ^{1,2} kg	2.59	2.59	2.28	2.31
飼料効率 ^{1,2}	0.367	0.355	0.384	0.382
体重 ¹ kg	129.2	126.9	122.6	121.3
枝肉形質				
温屠体重量 ^{1,2} kg	96.6	93.5	90.9	89.8
枝肉歩留 %	74.9	75.1	74.9	75.2
背脂肪厚 ^{1,2} mm	19.0	18.1	16.7	16.2
ロースの深さ cm	5.96	5.89	6.10	5.99
除脂肪赤身指数 ^{1,2} %	49.5	50.0	50.6	50.8
顎肉脂肪のヨウ素価 ^{1,2}	72.1	80.4	73.5	81.9

¹ 給餌器の形状による有意な影響 (p < 0.05) ² DDGS配合量による有意な影響 (p < 0.05)

いた場合が大きかったが、飼料効率は従来型の粉餌用フィーダーを用いた場合に高まった。また、ウェット・ドライ・フィーダーを用いた場合には、温屠体重量および背脂肪厚が増加し、脂肪を除いた赤身肉の割合とほほ肉

脂肪の IV が低下した。DDGS を 60%配合すると、20%配合した場合より ADG および飼料効率がわずかに減少し、終了時体重が低下する傾向を示した。また、60%配合飼料では、温屠体重量と背脂肪厚が低下し、脂肪を除

いた赤身肉の割合とほぼ肉脂肪の IV が高まる傾向を示したが、枝肉歩留には差がなかった。これらの結果は、給餌器の形状によって、DDGS を配合した飼料を給与した豚の発育成績と枝肉形質に大きな影響が出る可能性があること、DDGS の配合割合が非常に高い飼料では、ADG と温屠体重量が低下するものの、飼料効率は改善されることを示している。

Weber ら(2015)は、給餌器の間口を変化させた場合の DDGS 配合飼料給与が豚の発育成績を調査した(表 22)。ほ乳期から肥育期までの 7 フェーズのうち、DDGS はフェーズ 3 から 7 において給与し、低配合飼料における配合割合は、それぞれ、27.5、30.0、32.5、32.5 および 26.3%、高配合飼料では 30.0、59.9、59.9、59.9 および

30.0%とし、それぞれ、動物性油脂(ホワイトグリース)の添加により等エネルギーとなるように調整した。DDGS の ME 価は Noblet and Perez(1993)の予測式を用いて推定した。その結果、給餌器の間口と、DDGS の配合割合の間には交互作用はなく、給餌器の間口は育成～肥育期の豚の発育成績と枝肉形質に影響を与えなかった。さらに、DDGS の配合量の違いによる終了時体重、ADG、ADFI および飼料効率への影響はなかった。しかし、DDGS の配合割合が低い飼料では、温屠体重量がわずかに重く、枝肉歩留とロースの深さが増加した。この結果は、育成期～肥育期の豚における給餌器の間口の違いは、DDGS を 30%あるいは 60%配合した飼料を給与した豚の発育成績や枝肉形質には影響を及ぼさないこ

表 22. フェーズ 4、5、および 6 における DDGS の配合割合と、給餌器の間口が豚の発育成績と枝肉形質に及ぼす影響(Weber ら、2015 から改編)

	給餌器の間口 cm/頭			DDGSの配合割合 ¹	
	4.1	4.9	5.7	30%	60%
No. pigs/pen	31	31	31	31	31
体重 kg					
試験開始時	29.9	29.8	29.8	30.3 ^a	29.3 ^b
出荷時	121.5	122.2	122.9	122.4	121.9
変動係数 %					
試験開始後61日	18.3	17.9	17.2	18.0	17.6
試験開始後152日	11.1	11.0	9.8	10.9	10.5
日増体量 kg	0.91	0.91	0.92	0.91	0.92
温屠体増加日量 kg	0.69	0.70	0.71	0.71	0.69
飼料摂取日量 kg	2.06	2.04	2.04	2.07	2.03
飼料効率 ²	0.44	0.45	0.45	0.44	0.45
飼料効率 ³	0.34	0.34	0.35	0.34	0.34
出荷までに要した日数	155.0	156.2	155.8	156.1	155.3
枝肉形質					
豚房数	10	10	10	15	15
温屠体重量 kg	92.7	93.4	93.8	93.9 ^a	92.7 ^b
歩留 %	75.2	75.7	76.1	76.1 ^a	75.2 ^b
背脂肪厚 mm	12.8	12.7	12.8	12.6	12.9
ロースの深さ mm	63.6	64.4	63.7	64.9 ^a	62.9 ^b

a-b 異符号間に有意差あり (p < 0.05)

¹ フェーズ4、5および6におけるDDGS配合

² 生体重を用いた飼料効率

³ 温屠体重量を用いた飼料効率

とを示している。Myers ら(2013)は、1,290 頭の育成期～肥育期の豚を用いて、DDGS を 25～45%配合した飼料と、パンくずを 15 および 30%配合した粉餌あるいはペレット飼料を、ウェット・ドライ・フィーダーと従来型の粉餌用

フィーダーを用いて給与した場合の影響を調査した。

その結果は表 23 に示したとおりであり、ADG にはペレット加工と給餌器の形状による交互作用なかったが、ペレット飼料の ADG は粉餌より増加し、ウェット・ドライ・

フィーダーを用いると、従来型の粉餌用フィーダーを用いた場合より ADG が増加した。従来型の粉餌用フィーダーを用いて給与した場合、粉餌の ADFI はペレット飼料より増加したが、ウェット・ドライ・フィーダーを用いた場合には差がなかった。ウェット・ドライ・フィーダーを用いて給与した場合の飼料効率は、粉餌とペレット飼料の間で飼料効率に差はなかったが、従来型の粉餌用フィーダーを用いた場合には粉餌の飼料効率が低下した。枝肉形質に及ぼすペレット加工の主効果と、交互作用には有意差はなかったが、ウェット・ドライ・フィーダーを用いて給与した場合には従来型の粉餌用フィーダーを用いて給与した場合に比べて、背脂肪が厚く、脂肪を除いた赤身の割合が低かった。

DDGS の価格の増減と、入手の容易性に依じて、経済性を確保するために、育成期～肥育期における DDGS の利用を断続的に行うことがある。さらに、飼料工場では、栄養成分含量や消化率が異なる複数の DDGS を使

用する場合があります、これは、エネルギー価とアミノ酸の SIDC を動的に変更して配合設計を行わないと発育成績と枝肉形質に悪影響を及ぼす可能性がある。Hilbrands ら(2013)は、育成期～肥育期に DDGS を配合した飼料と配合しない飼料を交互に給与した場合の発育成績と枝肉形質への影響を調査するために 2 試験を行っている。最初の試験では、①トウモロコシ・大豆粕主体の対照飼料と DDGS を 20% 配合した飼料を継続給与、②、③対照飼料と DDGS 20% 配合飼料、あるいは、40% 配合飼料を 2 週間間隔で交互に給与の 3 処理を設定した。その結果、表 24 に示すように、DDGS を 20% 配合した飼料を継続して給与、あるいは、DDGS 配合飼料と対照飼料を交互に給与すると、発育成績と枝肉形質には差がなかったが、DDGS を 40% 配合した飼料と対照飼料を交互に給与すると温屠体重量が低下した。2 回目の試験では、①～③トウモロコシ・大豆粕主体の対照飼料、アミノ酸の SIDC が低い DDGS、あるいは、高い DDGS を 40% 配合した飼

表 23. DDGS 配合のペレット加工と給餌器の形状が豚の発育成績と枝肉形質に及ぼす影響 (Myers ら、2013 から改編)

	従来型粉餌用		ウェット・ドライ	
	粉餌	ペレット	粉餌	ペレット
試験開始後0～91日の発育成績				
日増体量 ^{1,2} kg	0.84	0.85	0.89	0.91
飼料摂取日量 ^{1,2} kg	2.29 ^a	2.45 ^b	2.50 ^b	2.51 ^b
飼料効率 ¹	0.369 ^a	0.349 ^c	0.357 ^{bc}	0.361 ^{ab}
体重 ² kg	123.1	124.0	127.2	128.5
ペレット品質				
PDI	-	74.0	-	74.0
正常なペレットの割合 %	-	36.6	-	36.6
枝肉形質				
温屠体重量 kg	91.7	92.7	94.1	93.8
枝肉歩留 %	75.6	75.3	75.6	76.0
背脂肪厚 ² mm	17.3	17.2	18.8	18.3
ロースの深さ cm	6.19	6.05	5.97	5.93
除脂肪赤身指数 ² %	50.4	50.4	49.7	49.9

a-b 異符号間に有意差あり (p < 0.05) ¹ ペレット加工による影響 (p < 0.07) ² 給餌器のデザインによる影響 (P < 0.01)

表 24. DDGS 配合割合と除去が豚の発育成績と枝肉形質に及ぼす影響 (Hilbrands ら、2013 から改編)

	対照飼料を 継続給与	DDGS 20%配合飼 料を継続給与	DDGS 20%配合飼料 と対照飼料を交互 に給与	DDGS 40%配合飼料 と対照飼料を交互 に給与
開始時体重 kg	51.3	51.3	51.3	51.4
終了時体重 kg	112.3 ^y	112.2 ^y	113.0 ^x	110.6 ^y
日増体量 kg	0.87	0.87	0.88	0.85
飼料摂取日量 kg	2.70 ^y	2.75 ^x	2.71 ^y	2.63 ^y
飼料効率	0.323 ^{ab}	0.317 ^a	0.325 ^b	0.322 ^{ab}
温屠体重量 kg	83.8 ^a	83.6 ^a	84.3 ^a	81.1 ^b
歩留 %	74.8	74.6	74.6	73.8
第10肋骨の背脂肪厚 mm	19.3	20.1	20.4	19.8
コース芯面積 cm ²	48.8	48.3	48.2	47.6
赤肉割合 %	54.4	54.0	53.8	54.2

a - b 異符号間に有意差あり (p < 0.05) x - y 異符号間に有意差あり (p < 0.10)

表 25. SIDC(標準化された回腸消化量)が高いあるいは低い DDGS を 40% 配合した飼料と対照飼料を継続給与あるいは 2 週間ごとに交互に給与した場合の豚の発育成績と枝肉形質に及ぼす影響 (Hilbrands ら、2013 から転載)

	対照	低SIDC - 対照	高SIDC - 対照	低SIDC	高SIDC	高 - 低SIDC
開始時体重 kg	33.2	33.2	33.2	33.2	33.2	33.2
終了時体重 kg	121.5 ^{ab}	121.6 ^{ab}	123.0 ^a	115.9 ^c	118.3 ^{bc}	117.8 ^c
日増体量 kg	0.92 ^{ab}	0.92 ^{ab}	0.93 ^a	0.86 ^c	0.89 ^{bc}	0.88 ^c
飼料摂取日量 kg	2.70 ^{ab}	2.72 ^a	2.78 ^a	2.57 ^b	2.73 ^{ab}	2.68 ^{ab}
飼料効率	0.34	0.34	0.34	0.34	0.33	0.33
赤肉生産量 kg/日	0.395 ^{ab}	0.396 ^{ab}	0.405 ^a	0.362 ^d	0.383 ^{bc}	0.367 ^{cd}
赤肉の生産効率	0.15	0.15	0.15	0.14	0.14	0.14
温屠体重量 kg	93.3 ^a	92.3 ^{ab}	94.4 ^a	87.2 ^c	89.4 ^{bc}	88.5 ^c
歩留 %	76.2 ^a	75.8 ^{ab}	76.0 ^{ab}	74.7 ^c	75.1 ^{bc}	74.6 ^c
第10肋骨の背脂肪厚 mm	21.3 ^a	19.9 ^{ab}	20.4 ^{ab}	18.9 ^{ab}	18.1 ^b	19.8 ^{ab}
コース芯面積 cm ²	44.7 ^a	44.7 ^a	45.3 ^a	40.4 ^b	42.7 ^{ab}	40.6 ^b
赤肉割合 %	51.8	52.1	52.1	51.3	52.3	50.8

a - d 異符号間に有意差あり (p < 0.05)

料を継続給与、④～⑥両 DDGS を配合した飼料と対照飼料あるいは SIDC が高い DDGS と低い DDGS を配合した飼料をフェーズによって切替える 6 処理を設定した。両 DDGS の ME 価は Pedersen ら (2007) の予測式から推定、アミノ酸の SIDC は IDEA アッセイ (Novus International、ミズーリ州セントルイス) で測定し、トウモロコシおよび大豆粕の ME 価およびアミノ酸の SIDC は NRC (1998) を、その他の原料の SIDC は NRC (1994) を用いた。その結果は表 25 に示したとおりであり、SIDC が低い DDGS を

配合した飼料と、SIDC が高い DDGS と低い DDGS を配合した飼料をフェーズによって切替えると ADG が減少し、対照飼料より終了時体重が低かった。SIDC が低い DDGS を配合した飼料を継続した場合の ADFI は、SIDC が低い、あるいは、高い DDGS を配合した飼料と対照飼料をフェーズによって切替えた場合より低かったが、飼料効率には影響はなかった。これらの結果は、IDEA アッセイにより DDGS 中のアミノ酸の SIDC が過大評価されていた可能性が高いことを示している。SIDC が低い

DDGS を配合した飼料を継続した場合と、SIDC が低い DDGS と高い DDGS を配合した飼料をフェーズによって切替えた場合より温層体重量、枝肉歩留およびロース芯面積が低下した。しかし、両 DDGS を 40% 配合した飼料を継続給与あるいは定期的に切り替えても、全体的な発育成績には悪影響はなかった。さらに、赤身肉の割合にも差は見られなかった。したがって、これら 2 試験の結果は、トウモロコシ・大豆粕主体飼料と DDGS 配合飼料を 2 週間ごとに交互に給与しても、発育成績や枝肉形質に悪影響を及ぼす懸念はないことを示している。

枝肉形質

育成～肥育の豚の枝肉組成に及ぼすトウモロコシ DDGS の影響を調査した数々の報告 (n = 20) が 2010 年以降に公表されており (Asmus ら、2014; Coble ら、2017;

Cromwell ら、2011; Davis ら、2015; Duttlinger ら、2012; Graham ら、2014a, b, c; Hardryatteran、2013; Jacela ら、2011; Jha ら、2013; Lee ら、2013; McDonnell ら、2011; Nemecek ら、2015; Overholt ら、2016; Pompeu ら、2013; Salyer ら、2013; Wang ら、2012; Wu ら、2016c; Ying ら、2013)、これらの報告から得られた枝肉歩留と脂肪を除いた赤身肉の割合への応答は表 26 および 27 に示した。

DDGS を配合した飼料を給与した際に最も一貫性がある影響の 1 つは、枝肉歩留のわずかな減少である。DDGS の繊維含量が比較的高いため、消化管の総重量が増加し、枝肉重量が減少する。このメタ分析から、育成期～肥育期の豚用飼料への DDGS の配合量の増加に伴い、枝肉歩留は相対比率で 0.022% 減少する。この影響は、粗脂肪含量が 10% 以上の高脂肪 DDGS の使用に関連しているようであり、低脂肪 DDGS を配合した飼

表 26. トウモロコシ DDGS を配合した飼料の給与が歩留と脂肪を除いた赤肉の割合に及ぼす影響 (2010 年以降に公表された 20 報の要約 1)

	DDGS - 対照 (絶対値 %)		開始時体重 kg	終了時体重 kg	飼育日数
	歩留	脂肪を除いた赤肉割合			
データ数	75	55	75	75	75
試験数	20	16	20	20	20
平均	-0.87**	0.05	46.7	120.3	76.5
最小値	-2.1	-1.6	23.4	86.9	20
最大値	0.7	1.6	105.7	1.4.9	120

** 対照飼料に対して有意差あり (p < 0.05) 1 各データのプールされた標準誤差の逆数を重みとして使用

表 27. ME あるいは NE 価を用いて設計、低脂肪あるいは高脂肪 DDGS の利用が豚の歩留および脂肪を除いた赤肉の割合に及ぼす影響 (2010 年以降に公表された 20 報の要約 1)

	粗脂肪含量		標準誤差	エネルギー価		標準誤差	P値	
	> 10%	< 10%		ME	NE		粗脂肪含量	エネルギー価
データ数	30	45		60	15			
試験数	8	13		16	4			
歩留	-0.79**	-0.42	0.17	-0.49**	-0.72**	0.16	0.034	0.139
脂肪を除いた赤肉割合	0.20	-0.16	0.23	0.24	-0.18	0.14	0.220	<0.01

** 対照との間に p < 0.05 で有意差あり * 対照との間に p < 0.10 で有意差あり
1 最小二乗法による平均値。各データのプールされた標準誤差の逆数を重みとして使用
2 育成期の飼料における DDGS 配合割合が増加すると、歩留まりが相対割合で 0.022% 減少

料では枝肉歩留に大きな変化はなかった(表27)。DDGSを配合する際にNE 価またはME 価のいずれかを使用すると、枝肉歩留が同様に減少した。ただし、脂肪を除く赤身肉の割合は、DDGS の配合量や粗脂肪含量には影響を受けない。

脂肪の品質

トウモロコシ・大豆粕主体飼料へのDDGSの配合量を高めると育成期～肥育期の豚の脂肪の品質が低下することが報告されている(Stein and Shurson, 2009; Xu ら、2010a, b; Benz ら、2010; Graham ら、2014a, b; Davis ら、2015)。豚肉の脂肪(ほほ肉、背脂肪およびバラ肉脂肪)の品質は、一般的に、不飽和脂肪酸含量と飽和脂肪酸含量の比率を用いたIVにより評価されている。DDGS 給与による脂肪の品質へ悪影響を抑制するために、いくつかの戦略が開発されている。これらの戦略には、出荷前の飼料中のDDGS 配合量を段階的に低下させる(Harris ら、2018)、出荷前3週間以上DDGS 配合飼料の給与を休止する(Jacela ら、2009; Xu ら、2010b; Hilbrands ら、2013)、低脂肪DDGS の利用(Dahlen ら、2011; Wu ら、2016a)、体脂肪のIV予測式を使用した飼料設計(Wu ら、2016b)などがある。

ほほ肉、背脂肪およびバラ肉脂肪のIVを予測するために、飼料に含まれるIVP(ヨウ素価産物)を変数とした予測式(Madsen ら、1992; Boyd ら、1997; Bergstrom ら、2010; Estrada Restrepo, 2013)、リノール酸(C18:2)摂取

量を変数とした予測式(Averette Gatlin ら、2002; Benz ら、2011; Kellner, 2014)および飼料へのDDGSの配合割合を変数とした予測式(Cromwell ら、2011; Estrada Restrepo, 2011)が開発されている。最近では、Paulk ら(2015)が、飼料中の必須脂肪酸含量、給与日数、飼料のNE 価および背脂肪厚を変数としたIV予測式を示している。

Wu ら(2016)は、これらの予測式を用いて推定された背脂肪のIVの精度を比較し、Paulk ら(2015)の予測式を用いると、誤差とバイアスが最少で最も精度が高く推定出来ることを明らかにしている(表28)。全体として、これらの結果は、DDGSの粗脂肪含量の減少が、枝肉の脂肪のIVを低下させ、DDGSの給与による豚肉の脂肪の品質に及ぼす悪影響を低減することを示している。ただし、この改善効果は、飼料からの脂質摂取量とは比例しておらず、DDGS中の脂質の消化性の違いによって影響を受ける可能性がある。脂肪酸組成は脂肪の部位によって異なることも頭に入れておく必要がある。ほほ肉の脂肪は、背脂肪およびバラ肉の脂肪よりもIVが高いが、背脂肪は、ほほ肉の脂肪およびバラ肉の脂肪に比べて飼料の油脂含量の変化に最も鋭敏に反応するようである。公表されている各部位の脂肪のIV予測式を使用した結果、部位によるIVの推定精度に違いがあった。Paulk ら(2015)が示しているように、飼料のエネルギー価、発育成績、枝肉組成等の測定値を変数として加える必要があり、これらを用いた予測式は、飼料中の油脂の特性と量のみに基づいた推定値より精度が高まる。飼料

表 28. 背脂肪、ほほ肉脂肪およびバラ肉脂肪のヨウ素価(IV)を推定するための予測式(Wuら、2016 から改編)

	予測式	R ²	予測バイアス ¹	バイアス ²	引用文献
背脂肪					
	$47.1 + 0.14 \times \text{IVP}^3 \text{ intake/day}$	0.86	6.43	-4.95	Madsen et al., 1992
	$52.4 + 0.315 \times \text{diet IVP}$	-	4.60	-2.15	Boyd et al., 1997
	$51.946 + 0.2715 \times \text{diet IVP}$	0.16	6.45	-5.05	Benz et al., 2011
	$35.458 + 14.324 \times \text{diet C18:2 \%}$	0.73	8.36	-1.08	Benz et al., 2011
	$64.5 + 0.432 \times \text{DDGS in diet \%}$	0.92	8.26	7.10	Cromwell et al., 2011
	$60.13 + 0.27 \times \text{diets IVP}$	0.81	5.04	3.05	Estrada Restrepo, 2013
	$70.06 + 0.29 \times \text{DDGS in diet \%}$	0.81	9.19	8.00	Estrada Restrepo, 2013
	$84.83 + (6.87 \times \text{IEFA}) - (3.90 \times \text{FEFA}) - (0.12 \times \text{Id}) - (1.30 \times \text{Fd}) - (0.11 \times \text{IEFA} \times \text{Fd}) + (0.048 \times \text{FEFA} \times \text{Id}) + (0.12 \times \text{FEFA} \times \text{Fd}) - (0.006 \times \text{FNE}) + (0.0005 \times \text{FNE} \times \text{Fd}) - (0.26 \times \text{BF})$	0.95	4.01	-0.84	Paulk et al., 2015 ⁴
ほほ肉脂肪					
	$56.479 + 0.247 \times \text{diet IVP}$	0.32	4.92	-3.69	Benz et al., 2011
	$47.469 + 10.111 \times \text{diet C18:2 \%}$	0.90	5.57	-1.37	Benz et al., 2011
	$64.54 + 0.27 \times \text{diet IVP}$	0.81	6.55	5.66	Estrada Restrepo, 2013
	$72.99 + 0.24 \times \text{DDGS in diet \%}$	0.81	8.33	7.38	Estrada Restrepo, 2013
	$85.50 + (1.08 \times \text{IEFA}) + (0.87 \times \text{FEFA}) - (0.014 \times \text{Id}) - (0.05 \times \text{Fd}) + (0.038 \times \text{IEFA} \times \text{Id}) + (0.054 \times \text{FEFA} \times \text{Fd}) - (0.00066 \times \text{INE}) + (0.071 \times \text{IBW}) - (2.19 \times \text{ADFI}) - (0.29 \times \text{BF})$	0.93	4.73	-3.37	Paulk et al., 2015 ⁴
バラ肉脂肪					
	$58.32 + 0.25 \times \text{diet IVP}$	0.74	3.43	1.41	Estrada Restrepo, 2013
	$67.35 + 0.26 \times \text{DDGS in diet \%}$	0.75	6.66	5.53	Estrada Restrepo, 2013
	$106.16 + (6.21 \times \text{IEFA}) - (1.50 \times \text{Fd}) - (0.11 \times \text{IEFA} \times \text{Fd}) - (0.012 \times \text{INE}) + (0.00069 \times \text{INE} \times \text{Fd}) - (0.18 \times \text{HCW}) - (0.25 \times \text{BF})$	0.94	3.27	1.73	Paulk et al., 2015 ⁴
3か所の平均					
	$58.103 + 0.2149 \times \text{diet IVP}$	0.93	3.93	-2.23	Kellner, 2014
	$58.566 + 0.1393 \times \text{C18:2 intake/day, g}$	0.94	6.17	-4.90	Kellner, 2014

¹ 予測誤差：値が小さいほど予測式の精度が高い

² 予測バイアス：絶対値が小さいほど予測式の精度が高い（値が負の場合は過小評価していることを示し、正の場合は過大評価していることを示す）

³ ヨウ素価積：飼料のヨウ素価 (IV) × 飼料の粗脂肪含量 (%) × 0.10 (Madsenら、1992)

⁴ 予測式の略語：I=初期の飼料、F=最終的な飼料、d=給与日数、EFA=必須脂肪酸 (C18:2およびC18:3%)、NE=正味エネルギー (kcal/kg)、BW=体重 (kg)、ADFI=平均飼料摂取日量 (kg/日)、HCW=温層体重量 (kg)、BF=背脂肪厚 (mm)

中の DDGS の配合割合を枝肉の脂肪の IV の予測変数とすると推定精度が最も低くなる。育成期～肥育期の豚に DDGS を配合した飼料を給与する際に、より予測が可能な脂肪の IV の応答を得るためには、予測誤差の大きさとこれらの予測式のバイアスを減らす必要がある。

ロースの品質

DDGS 配合飼料を給与した豚のロースの品質を評価するためにいくつかの研究が行われている。Leick ら (2010)は、肉質を評価するために、DDGS を 0、15、30、45 または 60%配合した育成期～肥育期の豚用飼料にラ

クトパミン(5 mg/kg)を添加した場合の影響を調査している。DDGS の配合量を高めても、ロースの pH、主観的および客観的な色調、マーブリングまたは脂肪含量には影響がなかったが、主観的なマーブリングスコアおよび硬さが低下し、ドリップロスが増加した。さらに、バラ肉の重量、長さ、厚さ、風味およびL*が低下し、バラ肉の調理ロスが増加した。バラ肉の脂肪とほほ肉の脂肪の IV は、一価不飽和脂肪酸:多価不飽和脂肪酸比の低下により高まった。保存後の TBARS(チオバルビツル酸反応物質)は保存期間が0、7または14日の間では影響を受けなかったが、21日間保存すると、DDGSを配合しない、あるいは15%配合した飼料に比べて、DDGSを30、45または60%配合した飼料ではTBARAが高まった。これらの結果は、育成期～肥育期の豚用飼料に最大60%のDDGSを配合すると、ロースの品質にはほとんど影響しないが、バラ肉の品質、ベーコンの加工特性および脂肪の安定性が低下することを示唆している。

McClellandら(2012)は、DDGSを0、15、30または45%配合した育成期～肥育期の豚用飼料を比較し、DDGSの配合割合を高めると、枝肉脂肪中のPUFA含量が増加してIVが高まり、バラ肉を柔らかくするが、冷蔵後のバラ肉のスライス収率、品質またはベーコン、ソーセージ、ロース肉の食味には影響しなかったとしている。

Wangら(2012)は、DDGSを0、15または30%配合した飼料に、ビタミンEを10または210 IU/kg添加した場合の影響を調査し、DDGSを配合した飼料では、筋肉および脂肪組織中の飽和脂肪酸の割合が低下し、不飽和およびPUFA比が高まり、真空パックしたロース肉中の揮発性塩基窒素濃度が低下したと報告している。また、ビタミンE添加量を高めると、筋肉および脂肪組織中の α -トコフェロール濃度が高まった。DDGSを配合した結果、13日間保存後のロース肉のTBARSが増加したが、ビタミンEを210 IU/kg添加すると、保存後4、7、10および13日におけるロース肉のTGARSが明らかに低下した。これらの結果は、DDGS配合飼料を給与すると、新鮮な豚ロース肉の保存特性に多少の悪影響があるが、ビタミンEを210 IU/kg添加することで、これらの悪影響をある程度緩和出来ることを示している。

Yingら(2013)は、DDGSの配合量を、フェーズ1、2および3では30%、フェーズ4では20%、フェーズ5では50%とし、L-カルニチンを添加(0、50または100 mg/kg)した場合の育成期～肥育期の豚の発育成績、枝肉形質、ロースと脂肪の品質への影響を、DDGSを含まない対照飼料と比較した。枝肉形質には、DDGSの配合とL-カルニチンの添加との交互作用はなかったが、L-カルニチンの添加量が高い場合には、温屠体重量、枝肉歩留および背脂肪厚が増加した。また、L-カルニチンの添加はロース肉の貯蔵ロスを高め、DDGSの配合はロース肉のマーブリングスコアを低下させる傾向を示した。DDGSを配合した飼料にL-カルニチンを50 mg/kg添加すると、L-カルニチン無添加あるいは100 mg/kg添加飼料に比べてロース肉の剪断力価が低下した。DDGSを配合した飼料にL-カルニチンを添加すると、ロース肉の色調が高まった。また、L-カルニチン添加量の増加に伴ってリノール酸とアラキジン酸含量が減少したが、DDGSを含まない飼料では減少傾向は見られなかった。これらの結果は、L-カルニチンを50 mg/kg添加したDDGS配合飼料を給与すると、温屠体重量が高まり、ほほ肉の脂肪のリノール酸含量が減少することを示している。

Overholtら(2016b)は、DDGSを0または30%配合したペレット飼料がバラ肉の特性、脂肪の品質およびベーコンスライス収率に及ぼす影響を調査している。DDGSを30%配合した飼料では、DDGSを配合していない対照飼料に比べてIVが7.1ユニット高く、バラ肉厚、締まりおよび重量が低下したが、バラ肉の収率には影響がなかった。これらの結果は、DDGSを30%配合すると、バラ肉が薄く、柔らかくなるが、収率には影響がないことを示している。

免疫学的去勢豚へのDDGSの給与

雄豚のPC(Physical castration、外科的去勢)は、世界の多くの国で、雄豚の攻撃的および性的行動の抑制や不快な獣臭の発生を防ぐために一般的に行われている。しかし、PCは豚肉の獣臭の除去には有効だが、飼料効率の低下、赤身肉の減少、離乳前の死亡率の増加を招く。さらに、イギリス、アイルランド、オーストラリアなどの国々では、アニマルウェルフェアの徹底により、雄豚の

PC を認めていない。その結果、Zoetis 社(ニュージーランド州フローラムパーク)は、筋肉注射による IC(immunological castrates、免疫学的去勢)製品を開発し、Improvast(米国およびカナダ)、Improvac(オーストラリアおよびニュージーランド)、Innosure または Vivax という商品名で販売している。この製品は、FDA(米国食品医薬品局)により承認されており、世界の 63 か国で登録され、過去 10 年間にわたって 5,000 万頭以上の雄豚に使用されている(Bradford and Mellencamp, 2013)。Improvast で処理した雄豚が生産する豚肉は、ヒトの健康に影響を与える可能性がある残留物はなく、安全に摂取することが出来る。さらに、この製品を用いて IC 豚が生産した豚肉の輸出制限はない(Bradford and Mellencamp, 2013)。この製品は、豚に 2 回注射する。1 回目の投与は雄豚の免疫系に機能し、2 回目(出荷前 3~10 週間)の投与により精巢機能の抑制を引き起す。雄豚の IC は、ADG と飼料効率の改善、赤身肉の増加、背脂肪の減少など、PC に比べて多くの利点があることから、使用頭数が劇的に増加し、米国における雄豚の 10%以上で使用されている。

IC 豚への DDGS の給与が、発育成績、枝肉形質、肉と脂肪の品質に及ぼす影響に関する調査が Asmus ら(2014b)により行われている。IC あるいは PC 豚には、①、② DDGS を含まない対照飼料または DDGS を 30% 配合した飼料を出荷まで継続給与、③ 出荷前約 50 日目までは DDGS 30%配合飼料を給与した。以後は対照飼料に切り替えるの、3 群を設定し。その結果、IC 豚は、PC 豚に比べて枝肉歩留と飼料摂取量が低下したが、飼料効率は改善された。IC 豚では脂肪の IV が高まったが、2 回目の投与後出荷までの期間を長期化した場合の IV は PC 豚と差がなかった。去勢の方法に関わらず、出荷前に DDGS 配合飼料の給与を休止すると、枝肉歩留への悪影響が軽減され、脂肪の品質が改善された。

Little ら(2014)は、DDGS を 0 または 30%配合した飼料を IC 豚および PC 豚に給与し、出荷 5 週間前に DDGS を配合した飼料の給与を休止した場合のバラ肉の締まりに及ぼす影響を調査した結果、DDGS 配合飼料の給与の有無に関わらず、2 回目の Improvast 投与時期を出荷前 5 週または 7 週とした場合のバラ肉の香り、異臭、風

味、塩味には差がなかった。この結果は、Improvast の 2 回目の投与時期を出荷前 5 週または 7 週間とすると、DDGS 30%配合飼料の継続給与、あるいは、出荷前 5 週間の休止に関わらず、PC 豚と同様の獣臭抑制効果があることを示している。

同様に、Tavárez ら(2014)は、DDGS を 0 または 20% 配合した飼料の継続給与と、2 回目の Improvast 投与後出荷までの間 DDGS 配合飼料を休止した場合の、IC 豚および PC 豚の精肉歩留、バラ肉収量を調査した。出荷前に DDGS 配合飼料を休止することで、枝肉形質、精肉歩留およびバラ肉の特性への悪影響を最小限に抑制できた。PC 豚では、出荷前の DDGS 配合飼料休止による骨抜き枝肉収量への影響はなかったが、IC 豚に対照飼料を給与すると骨抜き枝肉収量が減少した。DDGS 配合飼料ではバラ肉の脂肪の IV が対照飼料に比べて高まった。PC 豚では、対照飼料および DDGS 配合飼料を継続給与した場合にバラ肉の収量が低下したが、出荷前に DDGS 配合飼料の給与を休止すると、バラ肉の収量が増加した。

最近では、Harris ら(2017a, b, 2018)が、トウモロコシ DDGS 配合飼料の給与方法と、2 回目の Improvast 投与時期(出荷前 5, 7 および 9 週)が発育成績、枝肉の成分組成、プライマルカット量、赤身肉の品質およびバラ肉脂肪の品質に及ぼす影響を調査している。DDGS の給与方法は、① トウモロコシ・大豆粕主体の対照飼料を継続給与、② DDGS の配合量をフェーズ 1 から 4 で漸減(40、30、20 および 10%)、③ フェーズ 1~3 では DDGS を 40%配合した飼料を給与し、フェーズ 4 では対照飼料を給与、④ フェーズ 1~4 において DDGS 40%配合飼料を継続給与の 4 処理とした。DDGS 40%配合飼料を給与した IC 豚の飼料摂取量は、飼料中の繊維含量の増加と、Improvast の投与時期により抑制されたが、フェーズ 4 で対照飼料に切り替えると急速に増加した。全体的に、給与飼料への DDGS の配合割合をフェーズにより漸減させると、対照飼料を継続給与した場合と同様の ADG と ADFI が得られ、フェーズ 4 で DDGS 配合飼料を休止するより効果的だった。給与飼料への DDGS の配合割合をフェーズにより漸減させる、あるいは、フェーズ 4 で

DDGS 配合飼料の給与を休止すると精肉歩留が高まるとともに、各部位の脂肪の IV が低下し、対照飼料あるいは DDGS 40% 飼料を継続給与した場合に比べてプライマルカット量と、ロス肉の品質が改善された。出荷前 7 週間に Improvest を投与することで、各部位の脂肪の IV が低下し、バラ肉厚が増加した。

DDGS 給与による豚の健康効果

DDGS を給与すると、PPE(豚増殖性腸炎)の起原菌である *Lawsonia intracellularis* に感染した豚の腸管健康の改善に有効であるという報告が複数公表されている (Whitney ら、2006a, b) が、DDGS の給与が豚の腸内細菌叢にどのように影響するのか、また、病原菌の感染やコロニー形成に対する感受性に影響を与える可能性があるのかといった情報は限られているため、作用機序は明らかにはなっていない。

Tran ら (2012) は、離乳豚に最大 30% の DDGS を配合した飼料を給与すると、腸内細菌叢の単一の微生物の割合が増加して腸内微生物の多様性が低下することで、細菌叢の不安定化に影響している可能性があることを示しているが、DDGS 配合飼料を給与しても血清免疫グロブリン濃度には影響がなかった。Rostagno ら (2013) は、DDGS を 20、30 または 40% 配合した飼料がサルモネラへの感受性、腸内における菌数および排出量への影響に関して 2 つの試験を行っている。これらの試験の 1 つでは、DDGS を含まない対照飼料を給与した育成期～肥育期のサルモネラ感染豚は、DDGS 30% 配合飼料に比べてサルモネラの排出頻度が高かったが、全体的な応答は、DDGS 配合飼料を給与してもサルモネラのコロニー形成に対する感受性に変化を及ぼさなかった。Saqi-Salces ら (2017b) は、DDGS 配合飼料を育成期～肥育期の豚に給与すると、杯細胞の分化の促進により腸管上皮細胞を変化させて、栄養受容体と輸送体の発現量を変化させること示している。

PEDV(豚流行性下痢ウイルス)は、2013 年に米国の養豚産業に壊滅的な影響を及ぼし、ウイルスの生存率に関する広範的な調査と、他のコロナウイルス (TGEV; 伝染性胃腸炎ウイルス、PDCoV; 豚デルタコロナウイル

ス-PDCoV) の飼料原料および様々な飼料添加物中での生存性に関する調査が行われた。Dee ら (2015) は、飼料中の PEDV の生存性は飼料原料によって異なり、大豆粕中で最も長く生存するように思われるが、ホルマリン主体の液体処理を行うと、調査したすべての飼料原料でウイルスが不活化されたと報告している。同様に、Trudeau ら (2017) は、様々な飼料原料における PEDV、TGEV および PDCoV の生存性を調査し、大豆粕中での PEDV ウイルスの生存日数は最も長く、TGGs および PDCoV の生存性も、DDGS を含むいくつかの飼料原料に比べて高かった。これらの結果は、大豆粕が DDGS やその他の一般的な飼料原料よりも、飼料を介したコロナウイルス感染における大きな危険因子であることを示唆している。

妊娠期および泌乳期用飼料への DDGS の利用

最近公表されたいくつかの報告では、妊娠期および泌乳期の母豚の繁殖成績と、産仔の発育成績への DDGS 給与に関する調査が行われている。Song ら (2010) は、DDGS を 0、10、20 または 30% 配合した飼料を、産次が異なる複数の泌乳期母豚に給与し、母豚および産仔の成績、エネルギーおよび窒素の消化率ならびに血漿尿素窒素濃度、乳脂肪および乳たん白量への影響を調査した。その結果、DDGS の配合割合を高めても、飼料の DE 価、ME 価、窒素蓄積量および窒素消化率には影響を及ぼさなかった。DDGS の配合量が 20 および 30% の飼料を給与した母豚では、対照飼料を給与した母豚より離乳時の血漿尿素窒素濃度が低かった。母豚の ADFI と背脂肪の変化には、DDGS 配合量による影響はなかったが、DDGS を 30% 配合した飼料を給与すると、対照飼料を給与した母豚より体重の減少が大きかった。産仔の離乳前死亡率および増体量には、DDGS 配合量による影響はなかった。この結果から、DDGS を最大 30% 配合した飼料を母豚に給与しても、母豚および産仔の成績や、DE 価と ME 価、窒素消化率、乳成分組成は、トウモロコシ・大豆粕主体の対照飼料と差がないことを示しており、泌乳期の母豚に DDGS を最大 30% 配合した飼料を給与すると、満足できる母豚と産仔の成績が得られる。

Wang ら(2013)は、2 産および 3 産の母豚に対して、DDGS を 0、20 または 40%配合した飼料を分娩前 20 日間給与した。その結果、母豚の平均妊娠期間、離乳から次回発情までの間隔、ADFI および泌乳時の背脂肪厚には DDGS 配合量による影響はなかった。さらに、分娩頭数、生存頭数、出生時体重、離乳豚雛、泌乳中の子豚の ADG にも、DDGS 配合量による影響はなかった。DDGS 配合飼料を給与した母豚の乳の乳固形分、乳たん白質、乳脂肪および乳糖率は、トウモロコシ・大豆粕主体の対照飼料と差がなかった。これらの結果は、妊娠後期および泌乳期の母豚用飼料に対して DDGS を 40%まで配合することが出来ることを示している。また、この際、リジン含量が 0.87%の飼料にリジンを 5.2 g/kgを添加すると、母豚と産仔の成績や初乳と乳の成分組成に影響を及ぼすことなく、飼料中に配合している大豆粕のすべてを置換することが出来た。

Li ら(2014)は、DDGS の配合割合を妊娠期では 40%、泌乳既では 20%とした飼料について、3 回の繁殖サイクルにわたる母豚と産仔の成績と、母豚の寿命に及ぼす影響をトウモロコシ・大豆粕主体の対照飼料と比較した。DDGS 配合飼料を 3 回の繁殖サイクルに渡って給与しても、母豚の寿命には影響しなかったが、対照飼料と比べて、産仔数と母豚の生産性が低下した。しかし、妊娠中に群飼した場合の母豚への悪影響は、DDGS 配合飼料に比べて対照飼料でより顕著だった。

Greiner 等(2015)は、DDGS の配合量を妊娠期では 10%(試験 1)、あるいは、40%(試験 2)、泌乳期では 10、20 または 30%(試験 1)、20、30、40 または 50%(試験 2 および 3)とした場合の、母豚と産仔の成績に及ぼす影響を調査した。その結果、泌乳期の母豚用飼料に DDGS を 40~50%配合すると、飼料摂取量と敷料の性状が低下する可能性が示唆された。

トウモロコシ DDGS には比較的高濃度の不飽和脂肪酸が含まれており、DDGS を給与した子豚と母豚のビタミン E の状態に影響を与える可能性がある。このため、Shelton ら(2014)は、妊娠後 69 日目の母豚に対して、DDGS を 40%配合した飼料を給与し、酢酸 DL- α -トコフェロール(44 または 66 mg/kg)あるいは酢酸 D- α -トコ

フェロール(11、22、33 または 44 mg/kg)の添加が、血漿、乳および体組織の α -トコフェロール含量に及ぼす影響を調査した。その結果、酢酸 D- α -トコフェロールの酢酸 DL- α -トコフェロールに対する生物学的利用率は、指標によって異なっているが、推奨されている効力値(1.36)よりも大きいことを明らかにしている。

Song and Shurson(2013)は、DDGS 中のトウモロコシ油が過酸化される可能性があり、DDGS を肥育豚および母豚用飼料に高い割合で配合すると、酸化ストレスを引き起こす可能性があることを示唆している。L-カルニチンは、細胞代謝において重要であり、ミトコンドリアによる長鎖遊離脂肪酸の輸送を調節して、 β 酸化により ATP(アデノシン三リン酸)を生成する。L-カルニチンは製品として入手可能であり、母豚用飼料に添加すると、繁殖成績と乳生産を改善するだけでなく、消化管の酸化化能、抗炎症能およびその他の保護機能を高めることが示されている(Ramanau ら、2004; Ramanau ら、2005; Musser ら、2005)。Wei ら(2016)は、DDGS を妊娠期では 25%、泌乳期では 40%配合した飼料への L-カルニチンの添加の有無(妊娠期では 100 mg/kg、泌乳期では 200 mg/kg)の効果について調査した。その結果、妊娠期および泌乳既の母豚に対して、DDGS 配合飼料を給与しても、産仔の腸管バリア機能には影響しなかったが、L-カルニチンを添加すると、新生子豚と離乳子豚の腸管バリア機能が改善された。離乳豚の消化管内の Eubacteria(真正細菌)数は、トウモロコシ・大豆粕主体の対照飼料への L-カルニチン添加により増加したが、DDGS 配合飼料への添加効果はなかった

Li ら(2013)は妊娠豚を群飼した場合の DDGS 40%配合飼料の給与の影響を調査している。妊娠期間中にフィードステーションを設置した豚房で群飼した母豚に DDGS 配合飼料を給与すると、対照飼料に比べて、群内の他の個体に対する攻撃性が高まり、ストレス増加の指標とされている唾液コルチゾール濃度が高まった。ストールで個体管理している母豚に DDGS 配合飼料を給与すると、対照飼料に比べて休息時間と反復行動に費やす時間が長く、唾液コルチゾール濃度が低かった。これらの結果は、母豚に対する DDGS 40%配合飼料の給与

は、群飼時の母豚の福祉状態を悪化させる可能性があるが、ストールで個体管理する場合には、福祉状態を改善することを示唆している。

結論

過去数年間に渡って行われた膨大な量の研究の結果、許容可能な発育・繁殖成績や枝肉形質や肉質を維持しながら飼料費を節減するために、比較的高い配合割合でトウモロコシ DDGS を効果的に使用する技術が劇的に改善された。粗脂肪含量が異なる DDGS の ME 価とアミノ酸の SIDC を正確に推定するための予測式も開発されている。すべてのステージの豚用飼料に DDGS を配合する場合、正確な ME 価、NE 価、可消化アミノ酸およびリンの含量のデータを使用することで、全てのステージで配合量を高める(最大 30%)ことが出来る。実際、現在米国における養豚農家のトレンドは、従来のトウモロコシ・大豆粕主体飼料と同等の発育成績と枝肉組成を達成するために、可消化トレオニンと分岐鎖アミノ酸の飼料中でのバランスをとることで、ほ乳期と育成～肥育期の豚用飼料への DDGS の配合割合を 30%以上に高めている。豚脂肪の硬度の低下は、低脂肪 DDGS を利用する、出荷の 3~4 週間前に DDGS 配合飼料の給与を休止する、または、最も正確な豚脂肪の品質予測式を使用して DDGS 配合量を制限することで最小限に抑えることが出来る。また、分娩前の母豚では、DDGS の配合量を最大 50%まで高めることが出来、DDGS にマイコトキシン含有の懸念がない場合には、母豚と産仔の成績に悪影響を及ぼさないことが示されている。

引用文献

- Adeola, O., and C. Kong. 2014. Energy value of distillers dried grains with solubles and oilseed meals for pigs. *J. Anim. Sci.* 92:164–170.
- Almeida, F. N., J. K. Htoo, J. Thomson, and H. H. Stein. 2014. Effects of balancing crystalline amino acids in diets containing heat-damaged soybean meal or distillers dried grains with solubles fed to weanling pigs. *Animal* 8:1594–1602.
- Almeida, F.N., J.K. Htoo, J. Thomson, and H.H. Stein. 2013. Amino acid digestibility of heat damaged distillers dried grains with solubles fed to pigs. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 4:44.
- Almeida, F.N., and H.H. Stein. 2012. Effects of graded levels of microbial phytase on the standardized total tract digestibility of phosphorus in corn and corn coproducts fed to pigs. *J. Anim. Sci.* 90:1262–1269.
- Almeida, F.N., and H.H. Stein. 2010. Performance and phosphorus balance of pigs fed diets formulated on the basis of values for standardized total tract digestibility of phosphorus. *J. Anim. Sci.* 88:2968–2977.
- Anderson, P.V., B.J. Kerr, T.E. Weber, C.J. Ziemer, and G.C. Shurson. 2012. Determination and prediction of digestible and metabolizable energy from chemical analysis of corn coproducts fed to finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 90:1242–1254.
- Asmus, M.D., J.M. DeRouchey, M.D. Tokach, S.S. Dritz, T.A. Houser, J.L. Nelssen, and R.D. Goodband. 2014a. Effects of lowering dietary fiber before marketing on finishing pig growth performance, carcass characteristics, carcass fat quality, and intestinal weights. *J. Anim. Sci.* 92:119–128.
- Asmus, M.D., T.A. Tavarez, M.D. Tokach, S.S. Dritz, A.L. Schroeder, J.L. Nelssen, R.D. Goodband, and J.M. DeRouchey. 2014b. The effects of immunological castration and corn dried distillers grains with solubles withdrawal on growth performance, carcass characteristics, fatty acid analysis, and iodine value of pork fat depots. *J. Anim. Sci.* 92:2116–2132.
- Averette Gatlin, L., M. T. See, J. A. Hansen, D. Sutton, and J. Odle. 2002. The effects of dietary fat sources, levels, and feeding intervals on pork fatty acid composition. *J. Anim. Sci.* 80:1606–1615.
- Baker, S.R., B.G. Kim, and H.H. Stein. 2013. Comparison of values for standardized total tract digestibility and relative bioavailability of phosphorus in dicalcium phosphate and distillers dried grains with solubles fed

- to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 91:203–210.
- Benz, J. M., M. D. Tokach, S. S. Dritz, J. L. Nelssen, J. M. DeRouche, R. C. Sulabo, and R. D. Goodband. 2011. Effects of dietary iodine value product on growth performance and carcass fat quality of finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 89:1419–1428.
- Benz, J. M., S. K. Linneen, M. D. Tokach, S. S. Dritz, J. L. Nelssen, J. M. DeRouche, R. D. Goodband, R. C. Sulabo, and K. J. Prusa. 2010. Effects of dried distillers grains with solubles on carcass fat quality of finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 88:3666–3682.
- Bergstrom, J.R., J.L. Nelssen, M.D. Tokach, S.S. Dritz, R.D. Goodband, and J.M. DeRouche. 2012. Effects of two feeder designs and adjustment strategies on the growth performance and carcass characteristics of growing–finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 90:4555–4566.
- Bergstrom, J.R., J.L. Nelssen, M.D. Tokach, S.S. Dritz, R.D. Goodband, and J.M. DeRouche. 2014. The effects of feeder design and dietary dried distillers’ grains with solubles on the performance and carcass characteristics of finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 92:3591–3597.
- Bergstrom, J. R., M. D. Tokach, J. L. Nelssen, S. S. Dritz, R. D. Goodband, J. M. DeRouche, and T. A. Houser. 2010. Meta-analyses describing the variables that influence the backfat, belly fat, and jowl fat iodine value of pork carcasses. Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service. Kansas State University, Manhattan, KS.
- Blank, B., E. Schlecht, and A. Susenbeth. 2012. Effect of dietary bre on nitrogen retention and bre associated threonine losses in growing pigs. *Arch. Anim. Nutr.* 66:86–101.
- Boyd, R. D., M. E. Johnston, K. Scheller, A. A. Sosnicki, and E. R. Wilson. 1997. Relationship between dietary fatty acid prole and body fat composition in growing pigs. Pig Improvement Company, Franklin, KY.
- Bradford, J.R., and M.A. Mellencamp. 2013. Immunological control of boar taint and aggressive behavior in male swine. *Anim. Frontiers* 3:12–19.
- Coble, K.F., J.M. DeRouche, M.D. Tokach, S.S. Dritz, R.D. Goodband, and J.C. Woodworth. 2017. Effects of distillers dried grains with solubles and added fat fed immediately before slaughter on growth performance and carcass characteristics of finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 95:270–278.
- Cromwell, G. L., M. J. Azain, O. Adeola, S. K. Baidoo, S. D. Carter, T. D. Crenshaw, S. W. Kim, D. C. Mahan, P. S. Miller, and M. C. Shannon. 2011. Corn distillers dried grains with solubles in diets for growing–finishing pigs: A cooperative study. *J. Anim. Sci.* 89:2801–2811.
- Curry, S.M., D.M.D.L. Navarro, F.N. Almeida, J.A.S. Almeida, and H.H. Stein. 2014. Amino acid digestibility in low–fat distillers dried grains with solubles fed to growing pigs. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 5:27.
- Dahlen, R. B. A., S. K. Baidoo, G. C. Shurson, J. E. Anderson, C. R. Dahlen, and L. J. Johnston. 2011. Assessment of energy content of low–solubles corn distillers dried grains and effects on growth performance, carcass characteristics, and pork fat quality in growing–finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 89:3140–3152.
- Davis, J. M., P. E. Urriola, G. C. Shurson, S. K. Baidoo, and L. J. Johnston. 2015. Effects of adding supplemental tallow to diets containing 30 percent distillers dried grains with solubles on growth performance, carcass characteristics, and pork fat quality in growing–finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 93:266–277.
- Dee, S. C. Neill, T. Clement, A. Singrey, J. Christopher–Hennings, and E. Nelson. 2015. An evaluation of porcine epidemic diarrhea virus survival in individual feed ingredients in the presence or absence of a liquid antimicrobial. *Porcine Health Mgmt.* 1:9.
- Duttlinger, A.J., J.M. DeRouche, M.D. Tokach, S.S. Dritz, R.D. Goodband, J.L. Nelssen, T.A. Houser, and R.C. Sulabo. 2012. Effects of increasing crude glycerol and dried distillers grains with solubles on growth

- performance, carcass characteristics, and carcass fat quality of finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 90:840–852.
- Estrada Restrepo, J. E. 2013. Factors associated with variation in the fatty acid composition and iodine value of carcass fat in pigs fed increasing levels of dried distillers grains with solubles. Master's thesis. Univ. of Illinois at Urbana–Champaign.
- Finot, P. A. 2005. The absorption and metabolism of modified amino acids in processed foods. *J. AOAC Int.* 88:894–903.
- Fontaine, J., U. Zimmer, P. J. Moughan, and S. M. Rutherford. 2007. Effect of heat damage in an autoclave on the reactive lysine contents of soy products and corn distillers dried grains with solubles. Use of the results to check on lysine damage in common qualities of these ingredients. *J. Agric. Food Chem.* 55:10737–10743.
- Gloaguen, M., N. Le Floch, E. Corrent, Y. Primot, and J. van Milgen. 2012. Providing a diet deficient in valine but with excess leucine results in a rapid decrease in feed intake and modifies the postprandial plasma amino acid and alpha-keto acid concentrations in pigs. *J. Anim. Sci.* 90:3135–3142.
- Gonçalves, M.A.D., S.S. Dritz, M.D. Tokach, J.M. DeRouchey, J.C. Woodworth, and R.D. Goodband. 2017. Fact sheet – Ingredient database management for swine: phosphorus. *J. Swine Health Prod.* 25:76–78.
- Graham, A.B., R.D. Goodband, M.D. Tokach, S.S. Dritz, J.M. DeRouchey, and S. Nitikanchana. 2014a. The effects of medium-oil dried distillers grains with solubles on growth performance, carcass traits, and nutrient digestibility in growing–finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 92:604–611.
- Graham, A. B., R. D. Goodband, M. D. Tokach, S. S. Dritz, J. M. DeRouchey, S. Nitikanchana., and J. J. Updike. 2014b. The effects of low-, medium-, and high-oil distillers dried grains with solubles on growth performance, nutrient digestibility, and fat quality in finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 92:3610–3623.
- Graham, A.B., R.D. Goodband, M.D. Tokach, S.S. Dritz, J.M. DeRouchey, and S. Nitikanchana. 2014c. The interactive effects of high-fat, high-fiber diets and ractopamine HCl on finishing pig growth performance, carcass characteristics, and carcass fat quality. *J. Anim. Sci.* 92:4585–4597.
- Greiner, L., C. Neill, G.L. Allee, X. Wang, J. Connor, K. Touchette, and J.L. Usry. 2015. The feeding of dried distillers' grains with solubles to lactating sows. *J. Anim. Sci.* 93:5718–5724.
- Gutierrez, N.A., N.V.L. Serão, and J.F. Patience. 2016. Effects of distillers' dried grains with solubles and soybean oil on dietary lipid, fiber, and amino acid digestibility in corn-based diets fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 94:1508–1519.
- Gutierrez, N.A., D.Y. Kil, Y. Liu, J.E. Pettigrew, and H.H. Stein. 2014. Effects of co-products from the corn-ethanol industry on body composition, retention of protein, lipids and energy, and on the net energy of diets fed to growing or finishing pigs. *J. Sci. Food Agric.* doi: 10.1002/jfsa.6648, 8 pp.
- Hanson, A.R., G. Xu, M. Li, M.H. Whitney, and G.C. Shurson. 2011. Impact of dried distillers grains with solubles (DDGS) and diet formulation method on dry matter, calcium, and phosphorus retention and excretion in nursery pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 172:187–193.
- Hardy matteran, S.J. 2013. Effect of dietary distillers dried grains with solubles (DDGS) and pig removal strategy at harvest on the growth performance, carcass characteristics, and fat quality of growing–finishing pigs. Master's thesis, University of Illinois at Urbana–Champaign.
- Harris, E.K., M.A. Mellencamp, L.J. Johnston, R.B. Cox, and G.C. Shurson. 2018. Effectiveness of different corn dried distillers grains with solubles feeding strategies and increasing the time intervals between the second Improvev dose and slaughter of immunologically castrated pigs on belly and pork fat quality. *Meat Sci.*

- 135:62–73.
- Harris, E.K., M.A. Mellencamp, L.J. Johnston, and G.C. Shurson. 2017a. Growth performance of immunologically castrated pigs slaughtered at 5, 7, or 9 weeks after the second Improvest dose and fed diets containing corn dried distillers grains with solubles. *J. Anim. Sci.* 95:806–819.
- Harris, E.K., M.A. Mellencamp, L.J. Johnston, R.B. Cox, and G.C. Shurson. 2017b. Effect of time interval between the second Improvest dose and slaughter and corn dried distillers grains with solubles feeding strategies on carcass composition, primal cutout, and pork quality of immunologically castrated pigs. *Meat Sci.* 127:13–20.
- Harris, R. A., M. Joshi, and N. H. Jeoung. 2004. Mechanisms responsible for regulation of branched-chain amino acid catabolism. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 313:391–396.
- Hastad, C. W., M. D. Tokach, J. L. Nelssen, R. D. Goodband, S. S. Dritz, J. M. DeRouchey, C. N. Groesbeck, K. R. Lawrence, N. A. Lenehan, and T. P. Keegan. 2004. Energy value of dried distillers grains with solubles in swine diets. *J. Anim. Sci.* 82(Suppl. 2):50. (Abstr.)
- Hilbrands, A. M., L. J. Johnston, K. M. McClelland, R. B. Cox, S. K. Baidoo, L. W. O. Souza, and G. C. Shurson. 2013. Effects of abrupt introduction and removal of high and low digestibility corn distillers dried grains with solubles from the diet on growth performance and carcass characteristics of growing-finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 91:248–258.
- Htoo, J. K., K. Manner, and J. Zentek. 2017. Excess dietary leucine level increases the optimal dietary isoleucine-to-l ysine ratio in 8- to 21-kilogram pigs. *J. Anim. Sci.* 95:195.
- Huang, Z., P.E. Urriola, and G.C. Shurson. 2017. Use of in vitro dry matter digestibility and gas production to predict apparent total tract digestibility of total dietary fiber for growing pigs. *J. Anim. Sci.* 95:5474–5484.
- Jacela, J.Y., J.M. DeRouchey, S.S. Dritz, M.D. Tokach, R.D. Goodband, J.L. Nelssen, R.C. Sulabo, R.C. Thaler, L. Brandts, D.E. Little, and K.J. Prusa. 2011. Amino acid digestibility and energy content of deoiled (solventextracted) corn distillers dried grains with solubles for swine and effects on growth performance and carcass characteristics. *J. Anim. Sci.* 89:1817–1829.
- Jacela, J. Y., J. M. Benz, S. S. Dritz, M. D. Tokach, J. M. DeRouchey, R. D. Goodband, J. L. Nelssen, and K. J. Prusa. 2009. Effect of dried distillers grains with solubles withdrawal regimens on finishing pig performance and carcass characteristics. *Swine Day, phosphorus 181–191.* Manhattan, KS.
- Jha, R., T.A. Woyengo, J. Li, M.R. Bedford, T. Vasanthan, and R.T. Zijlstra. 2015. Enzymes enhance degradation of the fiber–starch–protein matrix of distillers dried grains with solubles as revealed by a porcine in vitro fermentation model and microscopy. *J. Anim. Sci.* 93:1039–1051.
- Jha, R., J.K. Htoo, M.G. Young, E. Beltranena, and R.T. Zijlstra. 2013. Effects of increasing co-product inclusion and reducing dietary protein on growth performance, carcass characteristics, and jowl fatty acid profile of growing-finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 91:2178–2191.
- Jones, C.K., J.R. Bergstrom, M.D. Tokach, J.M. DeRouchey, R.D. Goodband, J.L. Nelssen, and S.S. Dritz. 2010. Efficacy of commercial enzymes in diets containing various concentrations and sources of dried distillers grains with solubles for nursery pigs. *J. Anim. Sci.* 88:2084–2091.
- Kellner, T. A. 2014. Impact of dietary fat intake on carcass iodine value and pork fat quality. Master's thesis. Iowa State University, Ames, IA.
- Kerr, B.J., N.K. Gabler, and G.C. Shurson. 2015a. Formulating diets containing corn distillers dried grains with solubles on a net energy basis: Effects on pig performance and energy and nutrient digestibility. *Prof. Anim. Scientist* 31:497–503.
- Kerr, B.J., W.A. Dozier, III, and G.C. Shurson. 2013. Effects

- of reduced-oil corn distillers dried grains with solubles composition on digestible and metabolizable energy value and prediction in growing pigs. *J. Anim. Sci.* 91:3231–3243.
- Kim, B.G., D.Y. Kil, D.C. Mahan, G.M. Hill, and H.H. Stein. 2014. Effects of dietary sulfur and distillers dried grains with solubles on carcass characteristics, loin quality, and tissue concentrations of sulfur, selenium, and copper in growing–finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 92:4486–4493.
- Kim, B.G., D.Y. Kil, and H.H. Stein. 2013. In growing pigs, the true ileal and total tract digestibility of acid hydrolyzed ether extract in extracted corn oil is greater than in intact sources of corn oil or soybean oil. *J. Anim. Sci.* 91:755–763.
- Lammers, P.J., B.J. Kerr, and M.S. Honeyman. 2015. Biofuel co-products as swine feed ingredients: Combining corn distillers dried grains with solubles (DDGS) and crude glycerin. *Anim. Feed Sci. Technol.* 201:110–114.
- Lee, J.W., D.Y. Kil, B.D. Keever, J. Killefer, F.K. McKeith, R.C. Sulabo, and H.H. Stein. 2013. Carcass fat quality of pigs is not improved by adding corn germ, beef tallow, palm kernel oil, or glycerol to finishing diets containing distillers dried grains with solubles. *J. Anim. Sci.* 91:2426–2437.
- Leick, C.M., C.L. Puls, M. Ellis, J. Killefer, T.R. Carr, S.M. Scramlin, M.B. England, A.M. Gaines, B.F. Wolter, S.N. Carr, and F.K. McKeith. 2010. Effect of distillers dried grains with solubles and ractompamine (Paylean) on quality and shelf life of fresh pork and bacon. *J. Anim. Sci.* 88:2751–2766.
- Li, G., Z. Wang, M. Lin, Z. Lu, and W. Yao. 2012. Effects of corn DDGS in combination with compound enzymes on growth performance, carcass fat quality, plasma and tissue redox homeostasis of growing–finishing pigs. *Livest. Sci.* 149:46–52.
- Li, P., X. Xu, Q. Zhang, J.D. Liu, Q.Y. Li, S. Zhang, X.K. Ma, and X.S. Piao. 2015. Effect of different inclusion level of condensed distillers solubles ratios and oil content on amino acid digestibility of corn distillers dried grains with solubles in growing pigs. *Asian Austral. J. Anim. Sci.* 28:102–110.
- Li, X., S.K. Baidoo, Y.Z. Li, G.C. Shurson, and L.J. Johnston. 2014. Interactive effects of distillers dried grains with solubles and housing system on reproductive performance and longevity of sows over three reproductive cycles. *J. Anim. Sci.* 92:1562–1573.
- Li, Y.Z., C.E. Phillips, L.H. Wang, X.L. Xie, S.K. Baidoo, G.C. Shurson, and L.J. Johnston. 2013. Effects of distiller’ dried grains with solubles on behavior of sows kept in a group-housed system with electronic sow feeders or individual stalls. *Can. J. Anim. Sci.* 93:57–66.
- Little, K.L., J.M. Kyle, B.M. Bohrer, A.L. Schroeder, C.A. Fedler, K.J. Prusa, and D.D. Boler. 2014. A comparison of slice characteristics and sensory characteristics of bacon from immunologically castrated barrows with bacon from physically castrated barrows, boars, and gilts. *J. Anim. Sci.* 92:5769–5777.
- Liu, P., L. W. O. Souza, S. K. Baidoo, and G. C. Shurson. 2012. Impact of distillers dried grains with solubles particle size on nutrient digestibility, DE and ME content, and –owability in diets for growing pigs. *J. Anim. Sci.* 90:4925–4932.
- Madsen, A., K. Jakobsen, and H. P. Mortensen. 1992. In- uence of dietary fat on carcass fat quality in pigs. A review. *Acta Agric. Scand., Sect. A, Animal Sci.* 42:220–225.
- Mathai, J. K., J. K. Htoo, J. E. Thomson, K. J. Touchette, and H. H. Stein. 2016. Effects of dietary fiber on the ideal standardized ileal digestible threonine: Lysine ratio for twenty–five to fifty kilogram growing gilts. *J. Anim. Sci.* 94:4217–4230.
- McClelland, K.M., G. Rentfrow, G.L. Cromwell, M.D. Lindemann, and M.J. Azain. 2012. Effects of corn distillers dried grains with solubles on quality traits of pork. *J. Anim. Sci.* 90:4148–4156.

- McDonnell, P., C.J. O’ Shea, J.J. Callan, and J.V. O’ Doherty. 2011. The response of growth performance, nitrogen, and phosphorus excretion of growing–finishing pigs to diets containing incremental levels of maize dried distiller’s grains with solubles. *An. Feed Sci. Tech.* 169:104–112.
- Meade, S. J., E. A. Reid, and J. A. Gerrard. 2005. The impact of processing on the nutritional quality of food proteins. *AOAC Int.* 88:904–922.
- Musser, R.E., R.D. Goodband, M.D. Tokach, K.Q. Owen, J.L. Nelssen, S.A. Blum, S.S. Dritz, and C.A. Civis. 1999. Effects of L–carnitine fed during gestation and lactation on sow and litter performance. *J. Anim. Sci.* 77:3289–3295.
- Myers, A.J., R.D. Goodband, M.D. Tokach, S.S. Dritz, J.M. DeRouche, and J.L. Nelssen. 2013. The effects of diet form and feeder design on the growth performance of finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 91:3420–3428.
- Nemecek, J.E., M.D. Tokach, S.S. Dritz, R.D. Goodband, J.M. DeRouche, and J.C. Woodworth. 2015. Effects of diet form and type on growth performance, carcass yield, and iodine value of finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 93:4486–4499.
- Noblet, J., H. Fortune, X. S. Shi, and S. Dubois. 1994. Prediction of net energy value of feeds for growing pigs. *J. Anim. Sci.* 72:344–354.
- Noblet, J., and J. M. Pérez. 1993. Prediction of digestibility of nutrients and energy value of pig diets from chemical analysis. *J. Anim. Sci.* 71:3389–3398.
- NRC. 2012. Nutrient requirements of swine. 11th rev. ed. Natl. Acad. Press, Washington, DC.
- NRC. 1998. Nutrient Requirements of Swine. 10th ed. National Academy Press, Washington, DC.
- NRC. 1994. Nutrient requirements for poultry. 9th rev. ed. Natl. Acad. Press, Washington, DC.
- Ntakatsane, M. P., X. Q. Yang, M. Lin, X. M. Liu, and P. Zhou. 2011. Short communication: Suitability of –fluorescence spectroscopy for characterization of commercial milk of different composition and origin. *J. Dairy Sci.* 94:5375–80.
- Olukosi, O.A., and A.O. Adebisi. 2013. Chemical composition and prediction of amino acid content of maize– and wheat–distiller’s dried grains with solubles. *Anim. Feed Sci. Technol.* 185:182–189.
- Overholt, M.F., J.E. Lowell, E.K. Arkfeld, I.M. Grossman, H.H. Stein, A.C. Dilger, and D.D. Boler. 2016a. Effects of pelleting diets without or with distillers’ dried grains with solubles on growth performance, carcass characteristics, and gastrointestinal weights of growing–finishing barrows and gilts. *J. Anim. Sci.* 94:2172–2183.
- Overholt, M.F., J.E. Lowell, K.B. Wilson, R.J. Matulis, H.H. Stein, A.C. Dilger, and D.D. Boler. 2016b. Effects of feeding pelleted diets without or with distillers dried grains with solubles on fresh belly characteristics, fat quality, and commercial bacon slicing yields of finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 94:2198–2206.
- Pahm, A. A., C. Pedersen, D. Hoehler, and H. H. Stein. 2008. Factors affecting the variability in ileal amino acid digestibility in corn distillers dried grains with solubles fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 86:2180–2189.
- Paulk, C. B., J. R. Bergstrom, M. D. Tokach, S. S. Dritz, D. D. Burnett, E. W. Stephenson, M. A. Vaughn, J. M. DeRouche, R. D. Goodband, J. L. Nelssen, and J. M. Gonzalez. 2015. Equations generated to predict iodine value of pork carcass back, belly, and jowl fat. *J. Anim. Sci.* 93:1666–1678.
- Patience, J. F. 2009. Energy in swine nutrition. *Animal Industry Report*. http://lib.dr.iastate.edu/ans_air/vol655/iss1/80. (accessed December 3, 2017).
- Pedersen, C., M. G. Boersma, and H. H. Stein. 2007. Digestibility of energy and phosphorus in ten samples of distillers dried grains with solubles fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 85:1168–1176.
- Pompeu, D. B.R. Wiegand, H.L. Evans, J.W. Rickard, G.D.

- Gerlemann, R.B. Hinson, S.N. Carr, M.J. Ritter, R.D. Boyd, and G.L. Allee. 2013. Effect of corn dried distillers grains with solubles, conjugated linoleic acid, and ractopamine (Paylean) on growth performance and fat characteristics of late finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 91:793–803.
- Ramanau, A., H. Kluge, and K. Eder. 2005. Effects of L-carnitine supplementation on milk production, litter gains and backfat thickness in sows on a low energy and protein intake during lactation. *Br. J. Nutr.* 717–721.
- Ramanau, A., H. Kluge, J. Spilke, and K. Eder. 2004. Supplementation of sows with L-carnitine during pregnancy and lactation improves growth of piglets during the suckling period through increased milk production. *J. Nutr.* 134:86–92.
- Ren, P., Z. Zhu, B. Dong, J. Zang, and L. Gong. 2011. Determination of energy and amino acid digestibility in growing pigs fed corn distillers' dried grains with solubles containing different lipid levels. *Arch. Anim. Nutr.* 65:303–319.
- Rojas, O.J., Y. Liu, and H.H. Stein. 2013. Phosphorus digestibility and concentration of digestible and metabolizable energy in corn, corn coproducts, and bakery meal fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 91:5326–5335.
- Rostagno, M.H., B.T. Richert, L.V.C. Girao, G.M. Preis, L.J. Lara, A.F. Amaral, A.D.B. Melo, and A. Jones. 2013. Do distillers grains with solubles affect the occurrence of *Salmonella enterica* colonization in pigs? *J. Anim. Sci.* 91(E-Suppl. 2): 699 (Abstr.).
- Rutherford, S. M. 2015. Use of the guanidination reaction for determining reactive lysine, bioavailable lysine and gut endogenous lysine. *Amino Acids* 47:1805–1815.
- Salyer, J.A., M.D. Tokach, J.M. DeRouchey, S.S. Dritz, R.D. Goodband, and J.L. Nelssen. 2013. Effects of standardized ileal digestible tryptophan:lysine in diets containing 30 percent dried distillers grains with solubles on finishing pig performance and carcass traits. *J. Anim. Sci.* 91:3244–3252.
- Saqui-Salces, M., Z. Luo, P.E. Urriola, G.C. Shurson, and B.J. Kerr. 2017a. Effect of dietary fiber and diet particle size on nutrient digestibility and gastrointestinal secretory function in growing pigs. *J. Anim. Sci.* 95:2640–2648.
- Saqui-Salces, M, Z. Huang, M. Ferrandis Vila, J. Li, J.A. Mielke, P.E. Urriola, and G.C. Shurson. 2017b. Modulation of intestinal cell differentiation in growing pigs is dependent on the fiber source in the diet. *J. Anim. Sci.* 95:1179–1190.
- Seabolt, B.S., E. van Heugten, S.W. Kim, K.D. Ange-van Heugten, and E. Roura. 2010. Feed preference and performance of nursery pigs fed diets containing various inclusion amounts and qualities of distillers coproducts and -flavor. *J. Anim. Sci.* 88:3725–3738.
- She, U., Y. Su, L. Liu, C. Huang, J. Li, P. Li, D. Li, and X. Piao. 2015. Effects of microbial phytase on coefficient of standardized total tract digestibility of phosphorus in growing pigs fed corn and corn co-products, wheat and wheat co-products and oilseed meals. *Anim. Feed Sci. Technol.* 208:132–144.
- Shelton, N.W., S.S. Dritz, J.L. Nelssen, M.D. Tokach, R.D. Goodband, J.M. DeRouchey, H. Yang, D.A. Hill, D. Holzgraefe, D.H. Hall, and D.C. Mahan. 2014. Effects of dietary vitamin E concentration and source on sow, milk, and pig concentrations of α -tocopherol. *J. Anim. Sci.* 92:4547–4556.
- Shen, Y., M.Z. Fan, A. Ajakiye, and T. Archibold. 2002. Use of the regression analysis technique to determine the true digestible phosphorus digestibility and the endogenous phosphorus output associated with corn in growing pigs. *J. Nutr.* 132:1199–1206.
- Song, M. S.K. Baidoo, G.C. Shurson, M.H. Whitney, L.J. Johnston, and D.D. Gallaher. 2010. Dietary effects of distillers dried grains with solubles on performance and milk composition of lactating sows. *J. Anim. Sci.* 88:3313–3319.
- Song, R., and G. C. Shurson. 2013. Evaluation of lipid

- peroxidation level in corn dried distillers' grains with solubles. *J. Anim. Sci.* 91:4383–4388.
- Stein, H. H., and G. C. Shurson. 2009. The use and application of distillers dried grains with solubles in swine diets. *J. Anim. Sci.* 87:1292–1303.
- Stein, H. H., S. P. Connot, and C. Pedersen. 2009. Energy and nutrient digestibility in four sources of distillers dried grains with solubles produced from corn grown within a narrow geographical area and fed to growing pigs. *Asian–Aust. J. Anim. Sci.* 22:1016–1025.
- Stein, H. H., M. L. Gibson, C. Pedersen, and M. G. Boersma. 2006. Amino acid and energy digestibility in ten samples of distillers dried grain with solubles by growing pigs. *J. Anim. Sci.* 84:853–860.
- Tavárez, M.A., B.M. Bohrer, M.D. Asmus, A.L. Schroeder, R.J. Matulis, D.D. Boler, and A.C. Dilger. 2014. Effects of immunological castration and distiller's dried grains with solubles on carcass cutability and commercial bacon slicing yields of barrows slaughtered at two time points. *J. Anim. Sci.* 92:3149–3160.
- Tran, H., R. Moreno, E.E. Hinkle, J.W. Bundy, J. Walter, T.E. Burkey, and P.S. Miller. 2012. Effect of corn distillers dried grains with solubles on growth performance and health status indicators in weanling pigs. *J. Anim. Sci.* 90:790–801.
- Trudeau, M.P., H. Verma, F. Sampedro, P.E. Urriola, G. C. Shurson, and S.M. Goyal. 2017. Environmental persistence of porcine coronaviruses in feed and feed ingredients. *PLoS ONE* 12:e0178094. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0178094>.
- Tsai, T., C.R. Dove, P.M. Cline, A. Owusu–Asiedu, M.C. Walsh, and M. Azain. 2017. The effect of adding xylanase or β -glucanase to diets with corn distillers dried grains with solubles (CDDGS) on growth performance and nutrient digestibility in nursery pigs. *Livest. Sci.* 197:46–52. Urriola, P. E., M. Li, B. J. Kerr, and G. C. Shurson. 2014. Evaluation of prediction equations to estimate gross, digestible, and metabolizable energy content of maize dried distillers grains with solubles (DDGS) for swine based on variable chemical composition. *Anim. Feed Sci. Technol.* 198:196–202.
- Urriola, P. E., L. J. Johnston, H. H. Stein, and G. C. Shurson. 2013. Prediction of the concentration of standardized ileal digestible amino acids in distillers dried grains with solubles. *J. Anim. Sci.* 91:4389–4396.
- Urriola, P. E., and H. H. Stein. 2010. Effects of distillers dried grains with solubles on amino acid, energy, and fiber digestibility and on hindgut fermentation of dietary fiber in a corn–soybean meal diet fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 88:1454–1462.
- Urriola, P. E., G. C. Shurson, and H. H. Stein. 2010. Digestibility of dietary fiber in distillers coproducts fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 88:2373–2381.
- Wang, L., P.E. Urriola, Z. Luo, Z.J. Rambo, M.E. Wilson, J.L. Torrison, G.C. Shurson, and C. Chen. 2016. Metabolomics revealed heat stress and zinc supplementation–induced changes in amino acid, lipid, and microbial metabolism. *Phys. Rep.* 4:e12676, doi:10.14814/phy2.12676.
- Wang, H., L.S. Wang, B.M. Shi, and A.S. Shan. 2012. Effects of dietary corn dried distillers grains with solubles and vitamin E on growth performance, meat quality, fatty acid profiles, and pork shelf life of finishing pigs. *Livest. Sci.* 149:155–166.
- Wang, L.S., B.C. Su, Z. Shi, B.M. Shi, and A.S. Shan. 2013. Dietary supplementation with maize distillers dried grains with solubles during late gestation and lactation: Effects on sow and litter performance, and on colostrum and milk composition. *Anim. Feed Sci. Technol.* 179:149–153.
- Weber, E.K., K.J. Stalder, and J.F. Patience. 2015. Wean-to-finish feeder space availability effects on nursery and finishing pig performance and total tract digestibility in a commercial setting when feeding dried distillers grains with solubles. *J. Anim. Sci.* 93:1905–1915.

- Wei, B., S. Nie, Q. Meng, Z. Qu, A. Shan, and Z. Chen. 2016. Effects of L-carnitine and/or maize distillers dried grains with solubles in diets of gestating and lactating sows on the intestinal barrier functions of their offspring. *Br. J. Nutr.* 116:459–469.
- Whitney, M.H., G.C. Shurson, and R.C. Guedes. 2006a. Effect of dietary inclusion of distillers dried grains with solubles on the ability of growing pigs to resist a *Lawsonia intracellularis* challenge. *J. Anim. Sci.* 2006. 84:1860–1869.
- Whitney, M.H., G.C. Shurson, and R.C. Guedes. 2006b. Effect of including distillers dried grains with solubles in the diet, with or without antimicrobial regimen, on the ability of growing pigs to resist a *Lawsonia intracellularis* challenge. *J. Anim. Sci.* 2006. 84:1870–1879.
- Witafsky, M. K., M. W. Pfaffi, and F. X. Roth. 2010. The effects of branched-chain amino acid interactions on growth performance, blood metabolites, enzyme kinetics and transcriptomics in weaned pigs. *Br. J. Nutr.* 103:964–76.
- Wu, F., L.J. Johnston, P.E. Urriola, A.M. Hilbrands, and G.C. Shurson. 2016a. Evaluation of ME predictions and the impact of feeding maize distillers dried grains with solubles with variable oil content on growth performance, carcass composition, and pork fat quality of growing-finishing pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 213:128–141.
- Wu, F., L.J. Johnston, P.E. Urriola, and G.C. Shurson. 2016b. Pork fat quality of pigs fed distillers dried grains with solubles with variable oil content and evaluation of iodine value prediction equations. *J. Anim. Sci.* 94:1041–1052.
- Wu, F., L.J. Johnston, P.E. Urriola, A.M. Hilbrands, and G.C. Shurson. 2016c. Evaluation of NE predictions and the impact of feeding maize distillers dried grains with solubles (DDGS) with variable NE content on growth performance and carcass characteristics of growing-finishing pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 215:105–116.
- Xu, G., S. K. Baidoo, L. J. Johnston, D. Bibus, J. E. Cannon, and G. C. Shurson. 2010a. Effects of feeding diets containing increasing content of corn distillers dried grains with solubles to grower-finisher pigs on growth performance, carcass composition, and pork fat quality. *J. Anim. Sci.* 88:1398–1410.
- Xu, G., S. K. Baidoo, L. J. Johnston, D. Bibus, J. E. Cannon, and G. C. Shurson. 2010b. The effects of feeding diets containing corn distillers dried grains with solubles, and withdrawal period of distillers dried grains with solubles, on growth performance and pork quality in grower-finisher pigs. *J. Anim. Sci.* 88:1388–1397.
- Ying, W., M.D. Tokach, J.M. DeRouchey, T.E. Houser, S.S. Dritz, R.D. Goodband, and J.L. Nelssen. 2013. Effects of dietary L-carnitine and dried distillers grains with solubles on growth, carcass characteristics, and loin and fat quality of growing-finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 91:3211–3219.

22 章: DDGS を配合した飼料のペレット加工

はじめに

米国では、養豚用飼料原料として DDGS を多く使用することで、長年にわたり飼料費の大幅な節減を図ってきた。米国中西部では、豚用の DDGS 配合飼料のほとんどは粉餌(マッシュ)を用いている。DDGS を含む飼料をペレット加工する必要がある場合、ペレット品質と生産速度の低下の懸念から、多くの場合、配合量を 10% に制限している。配合飼料工場でペレットの品質と生産効率を確保するために設けられているこのような DDGS の配合割合の制限は、飼料製造業者と養豚業者が大きな経済的恩恵を受ける機会の減少につながっている。

ペレット加工は、養豚用飼料の製造において最も一般的に使用されている熱処理方法であり(Miller, 2012)、飼料の無駄を減らし、でん粉の部分的な糊化によるエネルギーと栄養成分の消化率の改善により、飼料効率を高める(Richert and DeRouchey, 2010, NRC, 2012)。その他に、飼料のペレット化による利点として、嗜好性の改善、かさ密度の増加による取り扱い特性の改善、粉塵の減少、輸送中の原料分離の抑制、有害微生物の抑制および給餌器内における大きな粒子の選り食いの防止等がある(Abdollahi ら、2012; NRC, 2012)。

ペレット加工工程

ペレット加工は、湿度、熱、圧力を使用して小さな粒子を大きな粒子に凝集させる機械的なプロセスである(Falk, 1985)。市販のペレットは、畜種と給与用途に応じて、直径(0.16~0.75 mm)、形状(三角形、正方形、楕円形または円筒形)および長さを調節している(California Pellet Mill Co., 2016)。

ペレット加工工程の最初のステップは、粉砕機を用いて飼料原料(主に穀物)の粒子径を小さくすることである。一般に、ペレット加工する飼料は、ペレットの耐久性を高めるために、粉餌に比べ粒子径が小さい(Wondra ら、1995)。次のステップは、飼料原料を個別に計量し、設計に基づく割合でミキサーに投入し、適切な時間混合する。次いで、スチームコンディショニング内で蒸気を使用し

て熱と水分含量を適切なバランスに整える(Smallman, 1996)。スチームコンディショニングにはエネルギーが必要であり、加工コストの上昇を招くが、ドライコンディショニングと比べて、ペレットの生産性と PDI(ペレット耐久指数)が向上する(Skoch ら、1981)。スチームコンディショナー内で飼料に蒸気を吹き込んだ後、湿った高温の飼料がチャンバーに流れ込み、ダイを通過してペレットが形成される。ダイから排出されたペレットはクーラーに入り、品温が環境温度より 8°C 程度低くなるまで冷却される(Zimorja ら、2007)、この間に、周囲の空気の流れにより水分含量が 15~17% から 10~12% に低下する(Robinson, 1976)。クーラーから集められた微粉は、ペレットチャンバーに戻されてペレットに再加工される。一部の養豚用飼料では、冷却されたペレットをクランブラーで荒砕きしたクランブル飼料も利用されている。

ペレットの耐久性、エネルギー消費および生産率に影響を与える要因

高品質の家畜用ペレット飼料を製造する際の主要な目標は、加工工程におけるエネルギーコストを最小限に抑えながら、ペレットの耐久性を高め、生産効率を高めることである(All About Feed, 2012)。一般に、耐久性が高いペレットが製造できると、ペレットが製造時から豚が摂取するまでの間に損傷を受けずに無傷のままである可能性が高くなる。ただし、ペレットの耐久性を高めるために行われている措置の多くはペレットミルの生産効率を低下させ、エネルギーコストの増加を招く(Behnke, 2006)。高品質のペレット製造は、飼料の種類、油脂量、蒸気量、粒子径、水分含量、ダイの材質、ローラーの材質、ローラーとダイのギャップなどの要因に影響される(California Pellet Mill Co., 2016)。ペレット加工工程で使用されるエネルギーの主な用途は、蒸気の発生と、フィーダー、コンディショナー、ペレットミルおよびペレット冷却システムの運転に必要な電力(kwh/トンで測定)であるが、使用される電力のほとんど(最大 72%)は蒸気の

発生に費やされており(Skoch ら、1983)、Payne(2004)は、豚用飼料におけるペレット加工での目標電力消費量は 10 kWh/トンであるとしている。ペレットの耐久性はわずかに低下するものの、ペレットの品質、生産効率、製造コストを、効果的に最適化する意思決定支援システム(Effective Decision Support Systems)が開発されている(Thomas ら、1997)。

ダイの特性(材質、孔の形状、孔のパターンおよび数)は、ペレットの耐久性、生産効率、エネルギー消費量に影響する(Stark、2009)。飼料がダイを通過する際の摩擦とその後の温度上昇には、ダイ内部の材質が大きく影響する(Behnke、2014 年)。孔の設計はストレートボアまたはレリーフ状だが、ダイにおける最も重要な要素は、孔の直径(D)に対するダイの厚さ(L)であり、一般にL:Dで示されている。L:Dが増える(ダイが厚くなる)と、摩擦係数とダイでの保持時間が長くなるため、ペレットの耐久性は向上するが、生産効率が低下し、エネルギー消費量が増加する(Traylor、1997)。

ペレットの物理的な品質とは、微粉の割合を最小限に抑えながら、畜産農家の給餌器に届くまでの間の袋詰め、保管、輸送中にペレットが無傷で残る能力を指している(Cramer ら、2003; Amerah ら、2007)。ペレットの品質は通常、PDI(ペレット耐久性指数、ASAE 1997)で示される。高い PDI を達成するためには、固体ブリッジの形成、固体粒子間の引力、機械的相互結合、接着力と凝集力および界面力と毛管圧という重要なメカニズムがある。(Thomas and van der Poel、1996; Kaliyan and Morey、2006)。

ペレットの品質と同様に、ペレットミルのエネルギー消費量は、ダイの直径、押出し速度、L:D、飼料原料の水分含量と成分組成などの変数に依存している(Tumuluru ら、2016)。ペレットミルの電気使用量は、生産効率または時間あたりのエネルギー単位として定量化され、一般に kWh/トンで示されており(Fahrenholz、2012)、飼料の配合設計による PDI への効果と、加工による PDI への効果をモデル化することで検証できる。生産効率を最大化した時のペレット飼料 1 トンあたりのエネルギー消費量の最小化は、飼料の特性とダイの特性による影響を受

け(Fahrenholz、2012)、PDI に対する配合および加工係数の影響をモデル化して調査することで実現できる。

ペレットミルの生産効率は、PDI とエネルギー消費量に影響を与えるもう 1 つの重要な要素である。Stark(2009)は、ペレットミルの生産効率を 545 kg/時から 1646 kg/時に高めると、ペレットミルの効率が 73.3 から 112.4 kg/馬力時間に増加し、PDI が 55.4 から 30.2 まで直線的に低下することを明らかにしている。コンディショニング温度を高めると、機械的な摩擦が減少するため、高い PDI を実現する上で重要な要素となり(Skoch ら、1981)、PDI が増加して、エネルギー消費量が減少する(Pfost、1964)。でん粉の糊化は、コンディショニング温度が上昇すると減少する(Abdollahi ら、2011)。コンディショナーパドルのピッチを変更すると(Briggs ら、1999)、保持時間(熱)が増加し、PDI が高まる(Gilpin ら、2002)。ただし、PDI の改善に対する蒸気圧の影響には一貫した影響は示されていない。Cutlip ら(2008)による報告では、蒸気圧の増加は、PDI をわずかに改善したとしているのに対し、Thomas ら(1997)は、蒸気圧と PDI の間には明確な関係はないと報告している。このような関係性は、PDI や生産効率に蒸気圧の影響がなかったとする初期の研究でも観察されている(Stevens、1987)。その結果、Briggs ら(1999)は、高い PDI を達成するための蒸気圧は 207–345 kPa で十分であると結論している。

多くの配合飼料工場では、飼料の粒子径がペレットの PDI に大きな影響を与えるとの認識を持っているが、これを裏付ける明確な科学的な証拠はない。理論的には、飼料の粒子径が大きくなるとペレットが崩れやすくなる(California Pellet Mill Co.、2016)。ただし、Stevens(1987)は、粉碎トウモロコシの粒子径が生産効率または PDI には影響を及ぼさないことを示している。同様に、Stark ら(1994)は、飼料の粒子径を 543 μm から 233 μm に減少させると、PDI がわずかに増加したと報告しているが、Reece ら(1985)の報告では、粒子径を 670 μm から 1289 μm に増加させても、PDI がわずかに低下しただけだった。飼料の粒子径は、望ましいペレット品質と製造効率を達成するための主要な要素ではないが、飼料の組成はダイの潤滑と摩耗および飼料のかさ密度に影響するため

重要な要素となり(Behnke、2006)、ペレット加工係数に基づく様々な飼料原料の特徴付けが行われている(Payneら、2001)。これらの相対的な飼料原料のペレット加工係数を配合設計時の制約変数として用いることは理論的には可能であるが、配合設計の主な目的は、安価で家禽の栄養要求量を満たすことであるため、実現性はない。

家禽用飼料のでん粉含量はPDIに大きく影響する。でん粉を65%含む飼料では最大のPDIを達成できるが、たん白質含量が高い低でん粉飼料はPDIを低下させる(Cavalcanti and Behnke、2005a)。飼料中のでん粉とたん白質含量は、コンディショニング温度よりもPDIに大きな影響を与えることが示されている(Wood、1987)。飼料の油脂含量を高めるとPDIが減少し(Cavalcanti and Behnke(2005a)、油脂を1.5または3%添加するとPDIが2および5%減少することが示されている(Starkら、1994)。ペレット加工前の飼料は、飼料の成分組成間に多くの相互作用があるため、ペレット加工工程中のエネルギー消費量を必ずしも削減できない可能性がある(Briggsら、1999)。Cavalcanti and Behnke(2005b)は、トウモロコシ、大豆粕および大豆油を配合した飼料のCP(粗たん白質)含量の増加はPDIを増加させるとしている。

加工前の粉餌の水分含量は、PDIと加工時のエネルギー消費量に影響を及ぼすもう1つの主要な要因である。Gilpin(2002)は、水分含量の増加がPDIを高め、エネルギー消費量を減少させることを示している。さらに、ペレット加工する前に水分を5%加えると、高油脂飼料をペレット加工する際のPDIが高まることが示されている(Moritzら、2002)。

ペレット品質の測定

ペレットの耐久性は、機械式タンブリングや空気式タンブリングなどの様々なタンブリング試験で測定でき、Stoke's® Tablet Hardness Tester、タンブリングボックステスト、Holman Pellet Tester 等がある(Behnke、2001; Winowiskiら、1962)。飼料業界で行われている標準的な

ペレット耐久性試験は ASAE S269.4(ASAE Standards、2003)であり、これにより PDI を測定する。これは、篩にかけられたサンプルをタンブルボックス内で回転させた後に残るペレット全体の割合と定義されている。この他に使用される手法には、TekPro(英国、ノーフォーク)で製造している Homen pellet tester があるが使用頻度は少ない。Holmen pellet tester は、ピラミッド型の孔のあいたチャンバー内でペレットを攪拌し 20~120 秒においてチャンバーから出た微粉により定量化している。ASAE S269.4 と Holmen pellet tester を比較した報告は 2 報のみである。Winowski(1998)は両方法の結果は相関していたと報告し、Fahrenholz(2012)も両方法の結果は相関しているが、ASAE S269.4 を使用して測定した PDI 値にはより一貫性があるとしている。Fahrenholz(2012)も、PDI のペレットの硬度、密度、保持時間、初期/最終水分間と有意な相関があったが、これらの相関性は低く、PDI の予測変数因子としては使用できないとしている。

DDGS の成分組成

DDGS の化学組成は、米国のエタノール産業が収益性を高めるための新しい工程を採用するのに伴い変化し続けている。DDGS の成分組成はペレットの品質に影響を与える重要な因子であるため、供給源間のバラツキと DCO(ジステラース・コーン油)の抽出による影響を理解しておくことは重要である。表 1 に示すように、現在生産されている低脂肪 DDGS(Kerrら、2013)は、これまでの伝統的な DDGS(Spiehsら、2002; Belyeaら、2004)に比べて、粗脂肪、NDF およびでん粉含量が比較的 low、CP 含量が高い。しかし、これらの成分組成の変化に関わらず、DDGS の配合割合が高い家禽用飼料では、高品質のペレットを製造することは難しい。なぜなら、これらの化学成分は、望ましい PDI の達成に悪影響を与えるからである。

California Pellet Mill Company(2016)は、「ペレット性」の特性に基づいていくつかの一般的な成分を分類している。DG(ジステラースグレイン)は、ペレット加工性が

表 1. DCD(ジステラーズ・コーン油)を抽出した DDGS の栄養成分組成(乾物)

栄養成分	トウモロコシDDGS (粗脂肪10%以上)	トウモロコシDDGS (粗脂肪10%以下) ³
水分 %	11.1 (9.8-12.8) ¹	12.5 (10.0-14.5)
粗たん白質 %	30.8 (28.7-33.3) ^{1,2}	31.2 (29.8-32.9)
粗脂肪 %	11.5 (10.2-12.6) ^{1,2}	8.0 (4.9-9.9)
NDF %	41.2 (36.7-49.1) ¹	32.8 (30.5-33.9)
でん粉 %	5.3 (4.7-5.9) ²	2.4 (0.8-3.4)
灰分 %	5.2 (4.3-6.7) ^{1,2}	5.4 (4.9-6.1)

¹ Spiehs et al. (2002) ² Belyea et al. (2004) ³ Kerr et al. (2013)

表 2. 飼料成分の特性がペレット品質と生産能力に及ぼす影響(California Pellet Mill Co., 2016 から転載)

飼料原料の特性	ペレット品質への影響	ペレットミルの生産能力への効果
水分	水分含量の増加により品質が向上	N/A
たん白質	たん白質が高いと品質が向上	N/A
脂肪	脂肪含量が2%以上の場合品質が低下	脂質含有量が多い高いと生産速度が高まる
繊維	繊維含量が高いと品質が向上	繊維含量が多いと生産能力が高まる
でん粉	デンプン含量が多いと、加工時の高温多湿で糊化しない限り、品質が低下	N/A
高比重	N/A	高比重が高いと生産能力が高まる
粒度	細粒あるいは州程度の粒子により品質が向上	細粒あるいは州程度の粒子が生産能力を高める

低く、ダイに対して中程度の研磨性があると分類されている。表 2 に示すように、DDGS のペレット加工性が低いと分類される理由はいくつかある。まず、DDGS は、水分含量が比較的 low、高品質のペレットを製造するためには、コンディショナーで供給される蒸気に加えて、水分を加える必要がある。DDGS の CP 含量が比較的高いと、ペレット加工中にたん白質が可塑化することでペレットの品質が高まるが、DDGS では脂肪含量が比較的多く、飼料への配合量と他の原料由来の油脂量によって、ペレットの品質が低下する。DDGS は比較的多量の繊維を含んでいるが、繊維をペレットミルで圧縮することは難しいため、ペレットの生産効率が低下する。DDGS のでん粉含量は低いため、ペレットの品質向上にはつながらない。加えて、DDGS は適度なかさ密度を持っているため、飼料中の他の飼料原料のかさ密度や配合量によっては生産効率を低下させる可能性がある。DDGS の粒子径は、供給源によって 294 μm から 1,078 μm で変動する(Kerrら、2013)。微粉および中程度の粒子径は、重量当たりの表

面積が大きく、蒸気由来の水分をより多く吸収するため、ペレットの品質を向上させ、粒子径が大きい成分から微粉が生成されるための破断点として機能するのを防ぐ可能性がある。さらに、粒子径が低いまたは中程度の原料と飼料は、ダイの潤滑性を改善し、生産効率を高める可能性がある。

DDGS を含む豚用飼料のペレット加工

DDGS を配合した養豚用ペレット飼料の耐久性を評価した報告はそれほど多くなく、また、それらの結果には一貫性がない。Fahrenholz(2008)は、DDGS の配合割合の増加に伴い、PDI が低下した(配合量 0%:PDI 90.3、10%:88.3、20%:86.8)が、この PDI のわずかな減少は、実用上の影響はかなり少ない。Stender and Honeyman(2008)は、DDGS を 20%配合したペレット飼料と DDGS を含まないペレット飼料を比較すると、PDI は 78.9 から 66.8 に著しく低下した。一方で、Feoli(2008)は、トウモロコシ・大豆粕主体の養豚用飼料に DDGS を 30%配合す

ると、PDI が 88.5 から 93.0 に高まったと報告している。Farhenholz ら(2008)は、3.97 mm×31.75 mmのペレットダイで、コンディショニング温度を 85°Cとした場合に、DDGS の配合割合の増加に伴い、PDI とかさ密度が低下したとしている。De Jong ら(2013)は、ほ乳期子豚用のトウモロコシ・大豆粕主体飼料と DDGS 30%配合飼料を、3.18 mm×3.81 mmのダイを用いてペレット加工した場合の PDI(93.3 vs 96.9)、崩れたペレットの割合(1.2 vs 8.0%) および生産率(1,098 vs 1,287 kg/時間)には差がなかったと報告している。これらの一貫性がない結果は、各報告で DDGS を配合した飼料の PDI に影響する多くの要因には相互作用がある可能性が高いことを示唆している。

これらの要因の一つは、DDGS の粗脂肪含量にある可能性がある。前述のように、飼料と飼料原料の粗脂肪含量は、ペレットの品質と生産速度に影響を与える。米国のエタノール工場の大部分で DCO(ジスチラーズ・コーン・オイル)の部分的な抽出が行われているため、DDGS の粗脂肪含量には変動が大きい(5~13%)。Yoder(2016)は、トウモロコシ・大豆粕主体の肥育豚用飼料に低脂肪および高脂肪 DDGS を 15 または 30%配合してペレット加工した場合の影響を調査した。コンディショニング温度は 65.6°Cまたは 82.2°Cの 2 水準で、4.0 mm×32 mmのダイを使用し、680 kg/時で加工した。ペレットの品質は、4 つのペレット耐久性テスト(標準 PDI 法(ASABE S269.4, 2007)、3 つの 19 mm六角ナットを使用した修正 PDI 法、Holmen NHP 100 法(処理時間 60 秒)、Holmen NHP 200 法(処理時間 240 秒))を用いて評価した。DDGS の配合量(15 または 30%)とコンディショニング温度(65.6 または 82.2°C)は PDI に影響を与えなかったが、高脂肪 DDGS を配合した場合の PDI は、低脂肪 DDGS を配合した場合より低かった(82.8 vs 88.0)。また、使用したペレット耐久テストにより、得られた結果に大きな違いが認められた。すなわち、標準 PDI 法での値が最も高く(95)、以下、修正 PDI(91)、Holmen NHP 100 法(89%)、Holmen NHP 200 法(67%)であった。この結果は、DDGS を 30%まで配合したトウモロコシ・大豆粕主体の豚肥育期用飼料では、PDI が比較的較高いペレット

飼料を製造出来ることを示しており、低脂肪 DDGS を使用すると、高脂肪 DDGS を使用する場合より、PDI が約 5%高まる。しかし、テスト方法によって、PDI の解釈に相違が生ずる可能性があるため、各文献間での PDI を比較する場合は注意が必要となる。

DDGS を含む飼料のペレット化がエネルギーと栄養成分の消化性に及ぼす効果

養豚用飼料のペレット化により、でん粉(Freire ら、1991; Rojas ら、2016)、粗脂肪(Noblet and van Milgen、2004; Xing ら、2004)、乾物、窒素および総エネルギー(Wondra ら、1995a)の消化率が高まることが示されている。DDGS を 30%含むほ乳期子豚用ペレット飼料は、粉餌に比べて、乾物、有機物、GE(総エネルギー)、CP(粗たん白質)の見かけの全消化管消化率を改善した(Zhu ら、2010)。最近では、Rojasら(2016)は、トウモロコシ・大豆粕主体飼料および DDGS を 25%配合したトウモロコシ・大豆粕主体飼料をペレット加工、エクストルード加工、エクストルードペレット加工した場合のエネルギーおよび栄養成分の消化率への影響を評価している。表 3 に示すように、ペレット加工、エクストルード加工あるいはエクストルード加工により、GE、でん粉、CP、乾物、灰分、酸分解粗脂肪およびアミノ酸の回腸消化率が高まった。多くの栄養成分において、消化率の改善効果が最も大きかったのはエクストルード加工で、エクストルードペレット加工には、エクストルード加工以上の改善効果はなかった。他のいくつかの報告では、アミノ酸の見かけの回腸消化率がペレット加工あるいはエクストルード加工によって改善されることが示されている(Muley ら、2007; Stein and Bohlke、2007; Lundblad ら、2012)が、常に改善効果があるわけではない(Herkleman ら、1990)。DDGS を含む飼料では、ペレット加工により ME 価が乾物換算値で 97 kcal/kg増加し、エクストルード加工により 108 kcal/kg乾物増加したが、エクストルードペレット加工では ME 科の改善はなかった(Rojasら、2016; 表 4)。同様に、トウモロコシ・大豆粕主体飼料をペレット加工すると、ME 価が 81 kcal/kg増加し、エクストルードとペレット加工に

表3. トウモロコシ DDGS あるいは大豆皮の配合の有無がトウモロコシ・大豆粕主体飼料の GE(総エネルギー)、乾物、有機物、酸分解粗脂肪、アミノ酸の AID(見かけの回腸消化率、%) (Rojas ら、2016 から転載)

	加工の種類			
	粉餌	ペレット	エクストルード	エクストルードペレット
総エネルギー	66.2 ^d	68.4 ^c	72.7 ^a	71.0 ^b
でん粉	96.4 ^b	97.7 ^a	98.0 ^a	98.4 ^a
CP	72.5 ^b	73.6 ^b	77.9 ^a	76.6 ^a
乾物	63.5 ^d	65.3 ^c	69.6 ^c	67.9 ^b
灰分	21.7 ^c	24.4 ^{b,c}	32.4 ^a	27.4 ^b
有機物	66.2 ^c	67.9 ^b	71.9 ^a	70.4 ^a
アミノ酸 %				
アルギニン	88.3 ^b	88.6 ^b	91.6 ^a	91.1 ^a
ヒスチジン	83.1 ^b	84.9 ^a	85.8 ^a	85.6 ^a
イソロイシン	78.8 ^c	81.3 ^b	84.3 ^a	83.7 ^a
ロイシン	82.2 ^c	84.9 ^b	87.1 ^a	86.4 ^a
リジン	78.0 ^c	79.6 ^b	81.8 ^a	80.9 ^{ab}
メチオニン	83.3 ^c	86.5 ^b	87.7 ^a	86.7 ^{ab}
シスチン	66.7	68.6	67.9 ^a	67.6
フェニルアラニン	81.2 ^c	83.9 ^b	87.3 ^a	86.5 ^a
トレオニン	70.9 ^c	73.3 ^b	75.7 ^a	74.7 ^{ab}
トリプトファン	78.1 ^c	80.5 ^b	83.2 ^a	83.4 ^a
バリン	75.6 ^c	78.4 ^b	80.5 ^a	79.9 ^a

a - d 異符号間に有意差あり (p < 0.05)

表 4. トウモロコシ・大豆粕主体飼料および DDGS を 25%配合したトウモロコシ・大豆粕主体飼料の大豆ミールの代謝エネルギー量-25%DDGS ダイエット(ミールの形態またはペレット加工(85°C)、エクストルード加工(115°C)およびエクストルードペレット加工後の育成豚における ME(代謝エネルギー)価(Rojas ら、2016 から改編)

	トウモロコシ・大豆粕主体飼料				トウモロコシ・大豆粕主体飼料+25%DDGS			
	粉餌	ペレット	エクストルード	EP	粉餌	ペレット	エクストルード	EP
ME kcal/kg	3,868 ^d	3,949 ^{bc}	3,893 ^{cd}	3,957 ^{bc}	3,947 ^{cd}	4,044 ^{ab}	4,055 ^a	3,926 ^{cd}

a - d 異符号間に有意差あり (p < 0.05)

より 89 kcal/kg増加したが、エクストルード加工のみでは ME 価は増加しなかった。

DDGS を含む飼料のペレット化が発育成績に及ぼす効果

養豚用飼料をペレット加工すると、飼料効率(Wondra ら、1995a; Nemecek ら、2015)と増体量(Wondra ら、1995a; Myers ら、2013; Nemecek ら、2015)が改善されることが示されている。養豚用のペレット飼料では、粉餌に比べて飼料摂取量が減少する事例がしばしば観察され

ているが、これは浪費される飼料の減少(Skoch ら、1983; Hancock and Behnke、2001)とエネルギー消化率の改善(NRC、2012)に起因している。DDGS を 15%配合したペレット飼料を給与すると、日増体量への影響はないものの、飼料摂取日量が低下し、飼料変換率が改善される。DDGS を 30%配合したペレット飼料を育成期~肥育期の豚に給与すると、全体的な増体量が高まる傾向を示し、飼料摂取量には影響はなかったため、飼料要求率が改善された(Fry ら、2012 ; Overholt ら、2016)。

DDGS を含む飼料のペレット化が枝肉形質と収量に及ぼす効果

Wondra ら(1995a)、Myers ら(2013)、Nemecek ら(2015)の報告では、ペレットまたは粉餌の給与が枝肉形質に及ぼす影響を調査していないが、Fry ら(2012)の報告では枝肉歩留の改善、Matthews ら(2014)の報告では背脂肪およびバラ肉の脂肪の増加が報告されている。最近の De Jong ら(2016)の報告では、DDGS を 15% 配合した飼料をペレット加工しても、粉餌と比べて、温屠体重量、枝肉収量、背脂肪厚および脂肪を除いた枝肉歩留に差はなかった。これに対して、Overholt ら(2016)は、育成期～肥育期の豚にペレット飼料を給与すると、粉餌に比べて温屠体重量および第 10 肋骨の背脂肪厚が増加し、赤身肉割合が低下したが、DDGS を 30% 配合しても影響はなく、肉質にも影響はなかった。ペレット飼料を給与すると、消化管重量が減少し、枝肉歩留が高まるが、DDGS を配合した飼料を給与すると、消化管の重量と内容物重量が増加し、結果として枝肉歩留収量が低下した。

DDGS を含む飼料のペレット化が取扱いと貯蔵性に及ぼす効果

DDGS 配合飼料のペレット加工は、飼料原料の分離を減らし、貯蔵ビンと給餌器における流動性を改善し、豚による粒子径が異なる飼料原料の選り食いを防止するために有効である(Clementson ら、2009; Ileleji ら、2007)。

DDGS を含む飼料のペレット化がカビ毒汚染に及ぼす効果

Frobose ら(2015)は、DON(デオキシニバレノール)を 20.6 mg/kg 含む DDGS への二亜硫酸ナトリウム(メタ重亜硫酸ナトリウム)の添加と、この DDGS を配合した飼料をペレット加工する際のコンディショニング温度化(66 および 82°C)および保持時間(30 および 60 秒)の影響を調査している。ペレットの加工条件は DON 濃度に影響を与えなかったが、DDGS への二亜硫酸ナトリウムの添加量を高めると、DON 濃度が低下した。二亜硫酸ナトリウムを添加した DDGS 配合飼料をペレット加工すると、ほ乳期子豚の増体量と飼料摂取量が増加した。この結果は、ほ乳期子豚をペレット加工する前に、DON で汚染された

DDGS に二亜硫酸ナトリウムを添加することが、DON による発育成績への悪影響を軽減するのに有効であることを示している。

DDGS を含む飼料のペレット化が PED ウイルスの生存性に及ぼす効果

PEDV(豚流行性下痢ウイルス)は、2013 年に米国の養豚産業において、若齢豚の死亡率を劇的に高めることで、壊滅的な影響を引き起こした。しかし、PEDV ウイルスは熱に敏感で、ペレット加工プロセス中の加温と曝露時間は、配合飼料による PEDV の感染性を低下させる可能性がある(Pospischil ら、2002; Nitikanjana、2014; Thomas ら、2015)。Cochrane ら(2017)は、ペレット加工工程中で、コンディショニング温度が 54.4°C を超えると、養豚用飼料中の PEDV の量と感染力を低下させるのに有効であると思われるとしている。実際、Cochrane ら(2017)の結果は、飼料のペレット化することで、Trudeau ら(2016)が示している条件(145°C、10 分間)よりも短い保持時間(30 秒)と、はるかに低い温度で PEDV が不活性化したことを示している。養豚用飼料をペレット加工することで他の病原体の量と感染力が低下するかどうかは明らかになっていないが、ペレット加工は PEDV が配合飼料工場から養豚農家に伝染するリスクを部分的に減らす有効な手段であるものと思われる。

DDGS を含む飼料のペレット化が飼料価格に及ぼす影響

ペレット加工によりコストが増加する(Wondra ら、1995b)が、増体量の改善と死亡率の低下による経済的利益がこのペレット加工による追加のコストを超える場合、ペレット加工によるコストの増加は許容範囲となる。DDGS そのもののペレット加工は、ペレット加工のコストに加えて、DDGS を飼料に配合する前に粉砕する必要があり、場合によっては、配合後に再度ペレット加工する必要が出てくるため、コストが高くなる。

PDI が低く、微粉が多いと発育成績を低下させる

PDI が低く、したがって微粉の量が多いペレットは、豚の発育成績に悪影響を与える可能性がある。Stark ら(1993)は、ほ乳期と育成～肥育期の両方で豚の発育成

績に及ぼすペレット品質の影響を評価した。ほ乳期において、25%の微粉を含むペレット飼料を給与すると、微粉を取り除いたペレット飼料と比べて、飼料効率が7%低下した。育成～肥育期においては、微粉の量が増加すると飼料効率が低下し、ペレット飼料を使用する有意性も低下した(Stark ら、1993)。一方で、Knauer(2014)は、粒子径が異なる DDGS(640 vs 450 μm)と、微粉の量が異なるペレット飼料の給与による影響を調査し、肥育豚の発育成績には影響がなかったとしている

ペレット化のための微粉碎は胃潰瘍の発生率を高める

胃の病変と潰瘍は、養豚経営において一般的な問題であり(Grosse Liesner ら、2009; Cappai ら、2013)、大きな経済的損失をもたらしている(Friendship、2006)。ペレット飼料を給与した豚では、粉餌を給与した場合に比べて、過角化症、粘膜びらん、出血性潰瘍がより一般的に観察されている(Mikkelsen ら、2004、Canibe ら、2005; Cappai ら、2013; Möbeler ら、2014; Liermann ら、2015)。この理由は明確ではないが、何人かの研究者は、飼料の粒子径の影響を示唆している(Vukmirovic ら、2017)。Vukmirovic ら(2017)は、ペレット加工工程中で、粒子径がさらに減少することを示しているが、利用可能なすべての公開文献の結果をまとめると、400 μm 未満の粒子の量が29%未満の飼料では、豚における胃潰瘍発生のリスクが低いと結論付けている。De Jong ら(2016)は、豚に DDGS を0 または15%配合したペレット飼料を少なくとも58日間給与した場合、粉餌を給与した豚と比べて、胃潰瘍と角質化の割合が高かったと報告している。なお、彼らは同時に、仕上げ段階でペレット飼料と粉餌を交互に給与することで、胃潰瘍の発生率を下げながら、飼料効率を改善し続けることができるとも報告している(De Jong ら、2016)。同様に、Overholt ら(2016)は、育成期の豚に DDGS を0 または30%含む飼料をペレット加工し、ペレット飼料を給与した豚では食道領域の病変スコアが高いが、DDGS を30%配合しても病変の発生率には影響を与えなかったと報告している。

ペレット化は脂質過酸化を増加させ、添加したビ

タミンおよび酵素の活性を低下させる可能性がある

ペレット加工工程には熱と水分が加えられるため、脂質過酸化の増加(Shurson ら、2015)とビタミン活性の低下(Pickford、1992)をもたらす可能性がある。Jongbloed and Kemme(1990)は、フィターゼ活性がある養豚用飼料をコンディショニング温度80°Cでペレット加工すると、フィターゼの活性が低下し、リンの消化率が低下することを明らかにしている。ペレット加工工程には飼料に影響を与え得る多くの要素があるが、コンディショニング温度が高まるとフィターゼの活性が低下する(Simons ら、1990)。

豚の DDGS 飼料のペレット品質を改善するための予測式

豚および家禽に関する公表論文の中でペレットの耐久性、生産効率、エネルギー使用量について報告された結果には一貫性はなく、これらの重要な対策に影響を与える様々な要因の間には多くの相互作用があることが示されている。Fahrenholz(2012)は、これらの複雑な相互作用に対応して、豚や家禽用飼料に DDGS を配合する場合の影響を推定するための予測式を開発した。

$$\begin{aligned} \text{PDI} = & 53.90 - (0.04 \times \text{トウモロコシの粒子径, } \mu\text{m}) - \\ & (6.98 \times \text{油脂添加量, } \%) - (1.12 \times \text{DDGS 配合割合, } \%) - (1.82 \times \text{生産効率, kg/時}) + (0.27 \times \text{コンディショニング温度, } ^\circ\text{C}) + (0.04 \times \text{保持時間, 秒}) + \\ & (1.78 \times \text{ダイの L:D}) + (0.006 \times \text{粒子径} \times \text{ダイの L:D}) \\ & - (0.23 \times \text{油脂添加量} \times \text{DDGS 配合割合}) + (0.06 \times \text{油脂添加量} \times \text{コンディショニング温度}) + (0.15 \times \text{DDGS 配合割合} \times \text{ダイの L:D}) \end{aligned}$$

この予測式の R^2 (決定係数)は0.92で、推定されたPDIと実測値の差は1.1(約1%の変動)であった。ダイのL:Dは、PDIに最大の影響を与える。ダイの厚さを業界では一般的な8:1から5.6:1に低下させると、PDIは10.9ユニット減少する。コンディショニング温度を65°Cから85°Cに高めると、PDIが7.0ユニット高まり、飼料への大豆油の添加量を3%から1%に低下させると、PDIが5.4ユニット高まった。粉碎トウモロコシの粒子径を462 μm から298 μm に減少させることは、PDIをわずかに(0.5ユニ

ット)高めた。同様に、飼料生産効率を 1,814 から 1,360 kg /時に下げると、PDI は 0.6 ユニット高まり、PDI への影響は最小限だった。

エネルギー消費量、kWh/トン = $55.93 - (0.01 \times \text{トウモロコシの粒子径、}\mu\text{m}) + (1.88 \times \text{油脂添加量、}\%) - (0.05 \times \text{DDGS 配合割合、}\%) - (30.90 \times \text{生産効率、kg/時}) - (0.41 \times \text{コンディショニング温度、}^\circ\text{C}) + (0.17 \times \text{保持時間、秒}) - (1.20 \times \text{ダイの L:D}) + (0.02 \times \text{トウモロコシの粒子径} \times \text{生産効率}) - (0.0001 \times \text{トウモロコシの粒子径} \times \text{コンディショニング温度}) - (1.41 \times \text{油脂添加量} \times \text{生産効率}) - (0.01 \times \text{油脂添加量} \times \text{DDGS 配合割合}) - (0.21 \times \text{DDGS 配合割合} \times \text{生産効率}) + (0.004 \times \text{DDGS 配合割合} \times \text{コンディショニング温度}) + (0.22 \times \text{生産効率} \times \text{コンディショニング温度}) - (0.11 \times \text{生産効率} \times \text{保持時間、秒}) + (1.21 \times \text{生産効率} \times \text{ダイの L:D})$

この予測式の R² は 0.95 で、予測エネルギー消費量と実測値の差は 0.3 (約 3%の変動) だった。コンディショニング温度を 65°C から 85°C に高めると、エネルギー消費量が 2.7 kWh /トン削減され、L:D を 5.6:1 にすると、エネルギー消費量が 1.3 kWh /トン削減された。その他の要因(トウモロコシの粒子径、大豆油の添加量、生産速度および保持時間)によるエネルギー消費量への影響は 1.0 kWh /トン以下であった。この予測式が示しているように、各変数間には複数の相互作用がある。したがって、現在のペレット加工条件で、目標とする PDI やエネルギー消費量が得られない場合は、他の要因を検討することで、より良い結果が達成できる。

引用文献

Abdollahi, M.R., V. Ravindran, T.J. Wester, G. Ravindran, and D.V. Thomas. 2012. The effect of manipulation of pellet size (diameter and length) on pellet quality and performance, apparent metabolisable energy and ileal nutrient digestibility in broilers fed maize-based diets. *Anim. Prod. Sci.*, 53:114-120.

Abdollahi, M.R., V. Ravindran, T.J. Webster, G. Ravindran, and D.V. Thomas. 2011. Influence of feed form and

conditioning temperature on performance, apparent metabolisable energy and ileal digestibility of starch and nitrogen in broiler starters fed wheat-based diet. *Anim. Feed Sci. Technol.* 168:88-99.

All About Feed. 2012. All About Feed - The better the pellet, the better the performance <http://www.allaboutfeed.net/Nutrition/Research/2012/2/The-better-the-pellet-the-better-the-performance-AAF012746W/> (accessed 9-21-17).

Amerah, A.M., V. Ravindran, R.G. Lentle, and D.G. Thomas. 2007. Feed particle size: Implications on the digestion and performance of poultry. *World's Poult. Sci. J.* 63:439-455.

ASAE. 1997. S269.4. Cubes, pellet, and crumbles definitions and methods for determining density durability and moisture content. St Joseph, MI. ASAE Standards. 2003. S269.4. Cubes, pellet, and crumbles definitions and methods for determining density durability and moisture content. St. Joseph, MI.

Behnke, K.C. 2014. Pelleting with Today's Ingredient Challenges. Kansas State University, Manhattan, KS.

Behnke, K.C. 2006. The art (science) of pelleting. Tech. Rep. Series: Feed Tech. American Soya Association, Singapore.

Behnke, K.C. 2001. Factors influencing pellet quality. *Feed Tech.* 5:19-22.

Belyea, R.L., K.D. Rausch, and M.E. Tumbleson. 2004. Composition of corn and distillers dried grains with solubles from dry grind ethanol processing. *Bioresource Tech.* 94:293-298.

Briggs, J.L., D.E. Maier, B.A. Watkins, and K.C. Behnke. 1999. Effect of ingredients and processing parameters on pellet quality. *Poult. Sci.* 78:1464-1471.

California Pellet Mill Co., 2016. The Pelleting Process. https://www.cpm.net/downloads/Animal_Feed_Pelleting.pdf (accessed 11-11-17).

Canibe, N., O. Hojberg, S. Hojsgaard, and B.B. Jensen. 2005. Feed physical form and formic acid addition to the feed

- affect the gastrointestinal ecology and growth performance of growing pigs. *J. Anim. Sci.* 83:1287–1302.
- Cappai, M.G., M. Picciau, and W. Pinna. 2013. Ulcerogenic risk assessment of diets for pigs in relation to gastric lesion prevalence. *BMC Vet. Res.* 9:36–44.
- Cavalcanti, W.B., and K.C. Behnke. 2005a. Effect of composition of feed model systems on pellet quality: a mixture experimental approach. I. *Cereal Chem.* 82:462–467.
- Cavalcanti, W.B., and K.C. Behnke. 2005b. Effect of composition of feed model systems on pellet quality: a mixture experimental approach. II. *Cereal Chem.* 82:462–467.
- Clementson, C.L., K.E. Ileleji, and R.L. Strohshine. 2009. Particle segregation within a pile of bulk density of distillers dried grains with solubles (DDGS) and variability in nutrient content. *Cereal Chem.* 86:267–273.
- Cochrane, R.A., L.L. Schumacher, S.S. Dritz, J.C. Woodworth, A.R. Huss, C.R. Stark, J.M. DeRouchey, M.D. Tokach, R.D. Goodband, J. Bia, Q. Chen, J. Zhang, P.C. Gauger, R.J. Derscheid, D.R. Magstadt, R.G. Main, and C.K. Jones. 2017. Effect of pelleting on survival of porcine epidemic diarrhea virus-contaminated feed. *J. Anim. Sci.* 95:1170–1178.
- Cramer, K.R., K.J. Wilson, J.S. Moritz, and R.S. Beyer. 2003. Effect of sorghum-based diets subjected to various manufacturing procedures on broiler performance. *J. Appl. Poult. Res.* 12:404–410.
- Cutlip, S.E., J.M. Hott, N.P. Buchanan, A.L. Rack, J.D. Latshaw, and J.S. Moritz. 2008. The effect of steam-conditioning practices on pellet quality and growing broiler nutritional value. *J. Appl. Poult. Res.* 17:249–261.
- Dee, S., T. Clement, A. Schelkopf, J. Nerem, D. Knudsen, J. Christopher-Hennings, and E. Nelson. 2014. An evaluation of contaminated complete feed as a vehicle for porcine epidemic diarrhea virus infection of naïve pigs following consumption via natural feeding behavior: Proof of concept. *BMC Vet. Res.* 10:176.
- De Jong, J.A., J.M. DeRouchey, M.D. Tokach, S.S. Dritz, R.D. Goodband, J.C. Woodworth, and M.W. Allerson. 2016. Evaluating pellet and meal feeding regimens on nishing pig performance, stomach morphology, and carcass characteristics. *J. Anim. Sci.* 94:4781–4788.
- De Jong, J.A., J.M. DeRouchey, M.D. Tokach, and R.D. Goodband. 2013. Effects of ne-grinding corn or dried distillers grains with solubles and diet form on growth performance and caloric efficiency of 25- to 50-lb nursery pigs. *Swine Day 2013*, Kansas State University, Manhattan, KS, p. 102–109.
- Fahrenholz, A. 2012. Evaluating factors affecting pellet durability and energy consumption in a pilot feed mill and comparing methods for evaluating pellet durability. Ph.D. Thesis, Kansas State University, Manhattan, KS, 92 pages.
- Fahrenholz, A.C. 2008. The effects of DDGS inclusion on pellet quality and pelleting performance. Master's thesis, Kansas State University, Manhattan, KS, 56 pages.
- Falk, D. 1985. Pelleting cost centre. In: *Feed manufacturing Technology III*, R.R. McElhiney (Ed.). American Feed manufacturers Association, Arlington, VA, pp. 167–190.
- Feoli, C. 2008. Use of corn- and sorghum-based distillers dried grains with solubles in diets for nursery and finishing pigs. Ph.D. Thesis, Kansas State University, Manhattan, KS, 152 pages.
- Freire, J.B., A. Aumaitre, and J. Peiniau. 1991. Effects of feeding raw and extruded peas on ileal digestibility, pancreatic enzymes and plasma glucose and insulin in early weaned pigs. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 65:154–164.
- Friendship, R.M., 2006. Gastric ulcers. In: *Diseases of Swine*, B.E. Straw, J.J. Zimmerman, S. D'Allaire, D.J. Taylor, and I.A. Ames (eds.). Blackwell Professional Publishing, UK, pp. 891–900.
- Frobese, H.L., E.D. Fruge, M.D. Tokach, E.L. Hansen, J.M. DeRouchey, S.S. Dritz, R.D. Goodband, and J.L. Nelssen.

2015. The influence of pelleting and supplementing sodium metabisulfite (Na₂S₂O₅) on nursery pigs fed diets contaminated with deoxynivalenol. *Anim. Feed Sci. Technol.* 210:152–164.
- Fry, R.S., W. Hu, S.B. Williams, N.D. Paton, and D.R. Cook. 2012. Diet form and by-product level affect growth performance and carcass characteristics of grow–finish pigs. *J. Anim. Sci.* 90(Suppl. 3):380 (Abstr.)
- Gilpin, A.S., T.J. Herrman, K.C. Behnke, and F.J. Fairchild. 2002. Feed moisture, retention time, and steam as quality and energy utilization determinants in the pelleting process. *Appl. Engineering Agriculture*. 18:331–340.
- Grosse Liesner, G.V., V. Taube, S. Leonhard–Marek, A. Beineke, and J. Kamphues. 2009. Integrity of gastric mucosa in reared piglets and effects of physical form of diets (meal/pellets), pre-processing grinding (coarse/–ne) and addition of lignocellulose (0/2.5 percent). *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 93:373–380.
- Hancock, J.D., and K.C. Behnke. 2001. Use of ingredient and diet processing technologies (grinding, mixing, pelleting, and extruding) to produce quality feeds for pigs. In: *Swine Nutrition*, 2nd ed., A.J. Lewis and L.L. Southern, editors. CRC Press, Boca Raton, FL. pp. 480–486.
- Herkelman, K.L., S.L. Rodhouse, T.L. Veum, and M.R. Ellersieck. 1990. Effect of extrusion in the ileal and fecal digestibilities of lysine in yellow corn in diets for young pigs. *J. Anim. Sci.* 68:2414–2424.
- Ileleji, K.E., K.S. Prakash, R.L. Strohshine, and C.L. Clementson. 2007. An investigation of particle segregation in corn processed dried distillers grains with solubles (DDGS) induced by three handling scenarios. *Bulk Solids Powder Sci. Technol.* 2:84–94.
- Jongbloed, A.W., and P.A. Kemme. 1990. Effect of pelleting mixed feeds on phytase activity and the apparent absorbability of phosphorus and calcium in pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 28:233–242.
- Kaliyan, N., and R.V. Morey. 2006. Factors affecting strength and durability of densified products. In: 2006 ASAE Annual Meeting (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Kerr, B.J., W.A. Dozier III, and G.C. Shurson. 2013. Effects of reduced-oil corn distillers dried grains with solubles composition on digestible and metabolizable energy value and prediction in growing pigs. *J. Anim. Sci.* 91:3231–3243.
- Knauer, M. 2014. The effect of regrinding major feed ingredients to improve pellet quality, pig performance and producer profitability. *Res. Rep. Anim. Sci.*, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, p. 1–14.
- Liermann, W., A. Berk, V. Böschenb, and S. Dänicke. 2015. Effects of particle size and hydro-thermal treatment of feed on performance and stomach health in fattening pigs. *Arch. Anim. Nutr.* 69:455–472.
- Lundblad, K.K., J.D. Hancock, K.C. Behnke, L.J. McKinney, S. Alavi, E. Prestløkken, and M. Sørensen. 2012. Ileal digestibility of crude protein, amino acids, dry matter and phosphorous in pigs fed diets steam conditioned at low and high temperature, expander conditioned or extruder processed. *Anim. Feed Sci. Technol.* 172:237–241.
- Matthews, N., L. Greiner, C.R. Neill, S. Jungst, B. Fields, R.C. Johnson, and A. Sosmicki. 2014. Effect of feed form (mash vs. pellets) and ractopamine on pork fat quality. *J. Anim. Sci.* 92(Suppl. 2):148 (Abstr.).
- Mikkelsen, L.L., J.N. Patrick, S.H. Mette, and B.B. Jensen. 2004. Effects of physical properties of feed on microbial ecology and survival of *Salmonella enterica* serovar typhimurium in the pig gastrointestinal tract. *Appl. Environ. Microbiol.* 70:3485–3492.
- Miller, T.G. 2012. Swine feed efficiency: Influence of pelleting. Iowa Pork Industry Center Fact Sheet 12. http://lib.dr.iastate.edu/ipic_factsheets/12.
- MöBELER, A., M.F. Wintermann, M.J. Beyerbach, and J. Kamphues. 2014. Effects of grinding intensity and

- pelleting of the diet and fed either dry or liquid and on intragastric milieu, gastric lesions and performance of swine. *Anim. Feed Sci. Technol.* 194:113–120.
- Moritz, J. S., K.J. Wilson, K.R. Cramer, R.S. Beyer, L.J. McKinney, W.B. Cavalcanti, and X. Mo. 2002. Effect of formulation density, moisture, and surfactant on feed manufacturing, pellet quality, and broiler performance. *J. Appl. Poult. Res.* 11:155–163.
- Muley, N.S., E. van Heugten, A.J. Moeser, K.D. Rausch, and T.A.T.G. van Kempen. 2007. Nutritional value for swine of extruded corn and corn fractions obtained after dry milling. *J. Anim. Sci.* 85:1695–1701.
- Myers, A.J., R.D. Goodband, M.D. Tokach, S.S. Dritz, J.M. DeRouche, and J.L. Nelssen. 2013. The effects of diet form and feeder design on the growth performance of finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 91:3420–3428.
- Nemecek, J.E., M.D. Tokach, S.S. Dritz, R.D. Goodband, J.M. DeRouche, and J.C. Woodworth. 2015. Effects of diet form and type on growth performance, carcass yield, and iodine value of finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 93:4486–4499.
- Nitikanchana, S. 2014. Potential alternatives to reduce porcine epidemic diarrhea virus (PEDV) contamination in feed ingredients. [http://www.asi.k-state.edu/species/swine/research-and-extension/PEDV percent20contamination percent20in percent20feed percent20ingredients_Feb percent202016.pdf](http://www.asi.k-state.edu/species/swine/research-and-extension/PEDV%20contamination%20in%20feed%20ingredients_Feb%202016.pdf).
- Noblet, J., and J. van Milgen. 2004. Energy value of pig feeds: Effect of pig body weight and energy evaluation system. *J. Anim. Sci.* 82(E-Suppl.):E229–E238.
- NRC. 2012. Nutrient requirements of swine. 11th ed. Natl. Acad. Press, Washington, DC.
- Overholt, M.F., J.E. Lowell, E.K. Arkfeld, I.M. Grossman, H.H. Stein, A.C. Dilger, and D.D. Boler. 2016. Effects of pelleting diets without or with distillers' dried grains with solubles on growth performance, carcass characteristics, and gastrointestinal weights of growing-finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 94:2172–2183.
- Payne, J.D., 2004. Predicting pellet quality and production efficiency. *World Grain* 3, 68–70.
- Payne, R.L., T.D. Bidner, L.L. Southern, and K.W. McMillin. 2001. Dietary effects of soy iso-avones on growth and carcass traits of commercial broilers. *Poult. Sci.* 80:1201–1207.
- Pfost, H.B. 1964. The effect of lignin binders, die thickness and temperature on the pelleting process. *Feedstuffs* 36:20–54.
- Pickford, J.R. 1992. Effects of processing on the stability of heat labile nutrients in animal feeds. In: *Recent Advances in Animal Nutrition*, P.C. Garnsworthy, W. Haresign, and D.J. A. Cole (Eds.), Butterworth Heinemann, Oxford, UK. Pp. 177–192.
- Pospischil, A., A. Stuedli, and M. Kiupel. 2002. Update on porcine epidemic diarrhea. *J. Swine Health Prod.* 10:81–85.
- Reece, F.N., B.D. Lott, and J.W. Deaton. 1985. The effects of feed form, grinding method, energy level, and gender on broiler performance in a moderate (21 C) environment. *Poult. Sci.* 64:1834–1839.
- Richert, B.T., and J.M. DeRouche. 2010. Swine feed processing and manufacturing. In: D. J. Meisinger, editor, *National swine nutrition guide*. Pork Center of Excellence, Ames, IA. p. 245–250.
- Robinson, R. 1976. Pelleting—introduction and general definitions. *Feed manufacturing technology*. Feed Production Council, American Feed Manufacturing Association, Inc., Chicago, IL, 96–103.
- Rojas, O.J., E. Vinyeta, and H.H. Stein. 2016. Effects of pelleting , extrusion , or extrusion and pelleting on energy and nutrient digestibility in diets containing different levels of fiber and fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 94:1951–1960.
- Schumacher L.L., J.C. Woodworth, C.R. Stark, C.K. Jones, R.A. Hesse, R.G. Main, J. Zhang, P.C. Gauger, S.S. Dritz, and M.D. Tokach. 2015. Determining the minimum

- infectious dose of porcine epidemic diarrhea virus (PEDV) in a feed matrix. *Kansas Agric. Exp. Station Res. Rep.* Vol. 1, Issue 7. Manhattan, KS. p. 1–8.
- Shurson, G.C., B.J. Kerr, and A.R. Hanson. 2015. Evaluating the quality of feed fats and oils and their effects on pig growth performance. *J. Anim. Sci. and Biotechnol.* 6:10 pp.
- Simons, P.C.M., H.A.J. Versteegh, A.W. Jongbloed, P.A. Kemme, P. Slump, K.D. Bos, M.G.E. Wolters, R.F. Beudeker, and G.J. Verschoor. 1990. Improvement of phosphorus availability by microbial phytase in broilers and pigs. *Br. J. Nutr.* 64:525–540.
- Skoch, E.R., S.F. Binder, C.W. Deyoe, G.L. Allee, and K.C. Behnke. 1983. Effects of steam pelleting condition and extrusion cooking on a swine diet containing wheat middlings. *J. Anim. Sci.* 57:929–935.
- Skoch, E.R., K.C. Behnke, C.W. Deyoe, and S.F. Binder. 1981. The effect of steam-conditioning rate on the pelleting process. *Anim. Feed Sci. Technol.* 6:83–90.
- Smallman C. 1996. Maximizing conditioning potential. *Feed Milling International* 190:16–19.
- Spiehs, M.J., M.H. Whitney, and G.C. Shurson. 2002. Nutrient database for distillers dried grains with solubles produced from new plants in Minnesota and South Dakota. *J. Anim. Sci.* 80:2639–2645.
- Stark, C.R. 2009. Effect of die thickness and pellet mill throughput on pellet quality. Abstract T89. Southern Poul. Sci. Soc. Meeting.
- Stark, C.R., K.C. Behnke, J.D. Hancock, S.L. Traylor, and R.H. Hines. 1994. Effect of diet form and fines in pelleted diets on growth performance of nursery pigs. *J. Anim. Sci.* 72(Suppl 1):214.
- Stark, C.R., R.H. Hines, K.C. Behnke, and J.D. Hancock. 1993. Pellet quality affects growth performance of nursery and finishing pigs. In: *Swine Day Conf. Proc.*, Manhattan, KS. pages 71–74.
- Stein, H.H., and R.A. Bohlke. 2007. The effects of thermal treatment of field peas (*Pisum sativum* L.) on nutritional and energy digestibility by growing pigs. *J. Anim. Sci.* 85:1424–1431.
- Stender, D., and M.S. Honeyman. 2008. Feeding pelleted DDGS-based diets to finishing pigs in deep-bedded hoop barns. *J. Anim. Sci.* 86 (Supp. 3):84.
- Stevens, C.A. 1987. Starch gelatinization and the influence of particle size, steam pressure and die speed on the pelleting process. Ph.D. Thesis, Kansas State University, Manhattan, KS.
- Thomas, M., and A.F.B van der Poel. 1996. Physical quality of pelleted animal feed 1. Criteria for pellet quality. *Anim. Feed Sci. Technol.* 61:89–112.
- Thomas, M., T. van Vliet, and A.F.B van der Poel. 1998. Physical quality of pelleted animal feed: 3. Contribution of feedstuff components. *Anim. Feed sci. Technol.* 70:59–78.
- Thomas, M., D.J. van Zuilichem, and A.F.B. van der Poel. 1997. Physical quality of pelleted animal feed. 2. Contribution of processes and its conditions. *Anim. Feed Sci. Technol.* 64:173–192.
- Thomas, P.R., L.A. Karriker, A. Ramirez, J. Zhang, J.S. Ellingson, K.K. Crawford, J.L. Bates, K.J. Hammen, and D.J. Holtkamp. 2015. Evaluation of time and temperature sufficient to inactivate porcine epidemic diarrhea virus in swine feces on metal surfaces. *J. Swine Health Prod.* 23:84–90.
- Traylor, S.L. 1997. Effects of feed processing on diet characteristics and animal performance. Master's thesis. Kansas State University, Manhattan, KS.
- Trudeau, M.P., H. Verma, F. Sampedro, P.E. Urriola, G.C. Shurson, J. McKelvey, S.D. Pillai, and S.M. Goyal. 2016. Comparison of thermal and non-thermal processing of swine feed and the use of selected feed additives on inactivation of porcine epidemic diarrhea virus (PEDV). *PLoS One* 11(6):e0158128. doi:10.1371/journal.pone.0158128.
- Tumuluru, J.S., C.C. Conner, and A.N. Hoover. 2016. Method to produce durable pellets at lower energy consumption

- using high moisture corn stover and a corn starch binder in a –at die pellet mill. *J. Vis. Exp.* 112:1–13.
- Vukmirović, D., R. Čolovic, S. Rakita, T. Brlek, O. Đuragić, and D. Sola–Oriol. 2017. Importance of feed structure (particle size) and feed form (mash vs. pellets) in pig nutrition. *Anim. Feed Sci. Technol.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2017.06.016>
- Winowiski, T. 1998. Examining a new concept in measuring pellet quality: which test is best? *Feed Mgmt.* 49:23–26.
- Winowiski, B.Y.T., E. By, C. Stark, A. Fahrenholz, and C. Jones. 1962. Measuring the physical quality of pellets. American Soybean Association. LingoTech USA, Inc.
- Wood, J.F. 1987. The functional properties of feed raw materials and their effect on the production and quality of feed pellets. *Anim. Feed Sci. Technol.* 18:1–17.
- Wondra, K.J., J.D. Hancock, K.C. Behnke, R.H. Hines, and C.R. Stark. 1995a. Effects of particle size and pelleting on weanling pig performance and nutrient digestibility. *J. Anim. Sci.* 73:757–763.
- Wondra, K.J., J.D. Hancock, K.C. Behnke, and C.R. Stark. 1995b. Effects of mill type and particle size uniformity on growth performance, nutrient digestibility, and stomach morphology in finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 73:2564–2573.
- Xing, J.J., E. van Heugten, D.F. Li, K.J. Touchette, J.A. Coalson, R.L. Odgaard, and J. Odle. 2004. Effects of emulsification, fat encapsulation, and pelleting on weanling pig performance and nutrient digestibility. *J. Anim. Sci.* 82:2601–2609.
- Yoder, A.D., J.W. Wilson, and C.R. Stark. 2007. Effects of Dakota Gold and high fat commodity DDGS in a complete swine diet on pellet quality. *J. Anim. Sci.* 94(E–Suppl. 5):472 (Abstr.).
- Yoder, A.D., Wilson, J.W., Stark, C.R., 2007. Effects of Dakota Gold and high fat commodity DDGS in a complete swine diet on pellet quality. *J. Anim. Sci.* 94(E–Suppl. 5): 472 (Abstr.).
- Zhu, Z., R.B. Hinson, L. Ma, D. Li, and G.L. Allee. 2010. Growth performance of nursery pigs fed 30 percent distillers dried grains with solubles (DDGS) and the effects of pelleting on performance and nutrient digestibility. *Asian–Aust. J. Anim. Sci.* 23:792–798.
- Zimonja, O., A. Stevnebo, and B. Svihus. 2007. Nutritional value of diets for broiler chickens as affected by fat source, amylose level and diet processing. *Can. J. Anim. Sci.* 87:553–562.

23 章: DDGS を配合した家禽および豚用飼料への酵素の利用

はじめに

飼料用酵素の開発とその利用は、過去 50 年間で最も重要な栄養学的進歩の 1 つである (Khattak ら、2006)。飼料用酵素の世界的な市場規模は 5 億 5,000 万ドルを超えており、飼料用酵素の利用による節約効果は年間で 30~50 億ドルと推定されている (Adeola and Cowieson, 2011)。飼料用酵素の市場は、一般的にフィターゼ (60%) とフィターゼ以外の酵素 (炭水化物分解酵素とタンパク質分解酵素; 40%) で構成されており、これらの豚や家禽用飼料への添加は、長年にわたって最も研究されている栄養学的なトピックの 1 つとなっている (Adeola and Cowieson, 2011)。フィターゼは、豚および家禽用飼料において、経済的かつ効果的な無機リン源代替方法として広く使用されており、イノシトール環の中で最初に加水分解が始まるリン酸塩の位置に基づいて、3-フィターゼまたは 6-フィターゼに分類される (Adeola and Cowieson, 2011)。世界の炭水化物分解酵素市場の約 80% はキシラナーゼとグルカナーゼであり、 α -アミラーゼ、 β -マンナーゼ、 α -ガラクトシダーゼ、ペクチナーゼの流通量は少ない (Adeola and Cowieson, 2011)。これらの炭水化物分解酵素のほとんどすべてが炭水化物ポリマーを加水分解して、分子量が少ない小糖類または多糖類を生成するが、遊離糖類は生成しない (Adeola and Cowieson, 2011)。

飼料用酵素を豚および家禽用飼料に添加することで、次のような多くの潜在的な効果がある: 腸管内容物の粘性を低下させることによる脂質およびタンパク質の消化性改善; 飼料の ME (代謝エネルギー) 価の増加; 飼料摂取量、増体率および飼料効率の改善; 消化管内における飼料サイズの低下と腸内細菌叢の変化; 家禽における飲水量と排泄物中の水分含量の減少; 排泄物の量と排泄物中のアンモニア、窒素、リン含量の減少 (Khattak ら、2006)。

ただし、これらの効果の適正に得るためには次の要因がある: 飼料中の標的基質に対して適した飼料用酵素

を用いる; 穀物主体飼料中の抗栄養因子の濃度; 使用する酵素のスペクトルと濃度; 動物種、年齢、ステージ; 腸内細菌叢の構成; 豚や鶏の生理状態 (Khattak ら、2006)。一般的に、飼料用酵素添加に対する家禽の反応性は豚に比べて高く、若齢動物は成畜に比べて反応性が高い傾向がある (Khattak ら、2006)。いくつかの研究では、家禽および豚において、通常添加されているレベル (500~1,000 FTU/kg) より添加量を増加させる (2,500 FTU/kg 以上) と、発育成績がさらに改善されることが示され、主要な研究トピックとなっている。これらのメカニズムには次の可能性がある: カルシウムの水準をより最適化するために、より多くのリンが必要となる; 抗栄養素として機能する飼料中のフィチン酸塩の減少; および/または、ビタミンのような特性と脂肪親和性効果を持つミオイノシトールの生成 (Adeola and Cowieson, 2011)。

さまざまな飼料用酵素の使用による家畜のさまざまな反応や作用機序に関する研究報告は多くあるが、栄養学者が、豚および家禽用飼料においてそれらの潜在的な利益を達成するために戦略的に使用する適切な酵素、酵素を使用するための最適な条件、および飼料設計を変更するための最適条件を決定することは非常に困難である。

豚 (Adeola and Cowieson, 2011; de Vries ら、2012; Kerr and Shurson、2013; Jha and Berrocoso、2015; Swiatkiewicz ら、2015) および家禽 (Khattak ら、2006; Adeola and Cowieson, 2011; Slominski, 2011; de Vries ら、2012; Ravindran, 2013; Swiatkiewicz ら、2015; Dida, 2016) に対して、さまざまな酵素の添加による利点と課題をまとめた優れたレビューが公表されている。ただし、これらのレビューのほとんどは、さまざまな原料を含む豚および家禽用飼料における酵素の反応に焦点を当てており、DDGS を配合した飼料に対する反応には特に焦点を当てていない。したがって、この章では、DDGS を配合した飼料におけるさまざまな飼料用酵素の反応を評価した多数の豚および家禽における研究成果を取りまとめた。

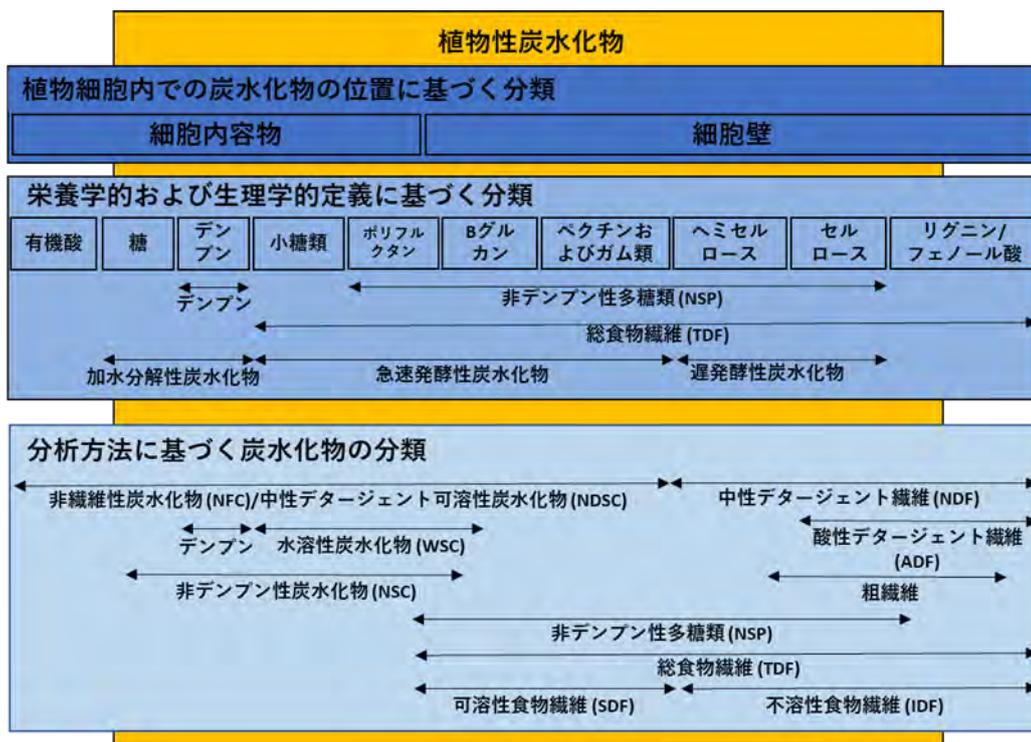


図 1. 植物性炭水化物の分画に使用される栄養学的および分析的分類 (2007 年 NRC から改編)

DDGS の繊維特性

食物繊維は、おそらく豚と家禽用飼料の構成成分の中で、最も理解が足りない部分であり、一般的に植物性原料主体の飼料において、複雑で非常に変化しやすい成分として説明される(図 1、NRC、2007)。飼料の繊維成分を特定するために用いられる分析方法では、飼料中の他の炭水化物画分の画分と重複または除外されていたりすることが多いことには注意が必要である。図 1 に示すように、繊維含量が高い飼料原料などに含まれている炭水化物画分を分析する一般的な方法には、粗繊維、ADF(酸性デタージェント繊維)、NDF(中性デタージェント繊維)、TDF(総食物繊維)の可溶性と不溶性画分および非デンプン性炭水化物(NSP)がある。これらを分析する際には、複雑な炭水化物のいくつかの画分を測定しているが、それらは豚用飼料のエネルギー値とは適切に関連していない。その結果、繊維の分析値をその生理学的機能と適切に関連付けるためには限界があった。いくつかのタイプの繊維は他のタイプの繊維も消化されやすく、哺乳類の酵素では分解されないが、後腸内の細菌によ

って発酵される(Grieshop ら、2001)。発酵性繊維は、しばしば NSP と呼ばれる。植物の細胞壁の最大 90%が NSP で構成されており、この中には、セルロース、ヘミセルロース、ペクチンが最も多く(Selvendran and Robertson、1990)、この他に、フルクタン、グルコマンナン、ガラクトマンナン、種子が出す粘液、 β -グルカンおよびガム類がある。

セルロースは植物の強固な結合体として存在するが、ヘミセルロースとペクチンは糖側鎖を持ち、消化過程や下部消化管での発酵過程において分解しやすい。リグニンは、それ自体は多糖類ではないが、高分子量ポリマーであり、豚では消化することができないため、機能的な飼料成分とは見なされない(Grieshop ら、2001)。

DDGS を配合した飼料に酵素を添加する場合のエネルギー価と栄養素の消化性の改善効果を理解するためには、まず、DDGS の繊維画分中の NSP の組成を知る必要がある。Pedersen ら(2014)は、トウモロコシ DDGS 47 試料と小麦 DDGS 11 試料の NSP 組成を測定し(表 1)、トウモロコシ DDGS では NSP が全体の 25~34%を

占めており、その大部分が不溶性であることを報告している。これは、豚、家禽および魚類において、トウモロコシ DDGS の繊維画分の小腸における消化性や、下部消化管における発酵性が制限されていることを示唆してい

る。トウモロコシ DDGS では、セルロースは約 5~9%を占め、主なセルロース以外の多糖類はキシロース(7.7%)とアラビノキシロース(12.3~17.2%)であるが、これらも

表 1. トウモロコシ DDGS 47 試料と小麦 DDGS 11 試料の栄養素および非デンプン多糖(NSP)組成の平均含有量と変動(乾物ベース、Pedersen ら、2014 から改編)

発育ステージ	DDGS %	酵素	添加による反応	引用文献
ほ乳期	20	フィターゼ	リン消化率の改善とリン排泄量の減少	Xu et al., 2006a
育成期~肥育期	20	フィターゼ	リン消化率の改善とリン排泄量の減少	Xu et al., 2006b
母豚、妊娠後期~泌乳後期	15	フィターゼ	フィチン態リン排泄量の減少 母豚と産仔への効果なし	Hill et al., 2008
育成期~肥育期	20	フィターゼ	乾物、総エネルギーおよび窒素消化率の改善	Lindemann et al., 2009
育成期~肥育期	15 to 60	キシラナーゼ、 βグルカナーゼ、 マンナーゼ、 セルラーゼ、 プロテアーゼ	発育成績への影響なし	Jacela et al., 2010
ほ乳期	30	キシラナーゼ、 βグルカナーゼ、 マンナーゼ	発育成績への影響なし	Jones et al., 2010
育成期~肥育期	10 or 15	マンナーゼ	発育成績とたん白質消化率の改善	Yoon et al., 2010
育成期	50	フィターゼ	トウモロコシ粒に比べてリン消化率の改善効果が少ない	Almeida and Stein, 2012
肥育期	35 to 50	キシラナーゼ ゼ	DDGS35% 配合した飼料中の栄養素の消化率への影響はなく、DDGS配合率が高い場合に栄養素の消化率が低下する	Asmus et al., 2012
育成期~肥育期	10 or 15	キシラナーゼ、 βグルカナーゼ、 フィターゼ、 プロテアーゼ、 セルラーゼ、 アミラーゼ	発育成績が改善される傾向	Li et al., 2012
育成期~肥育期	7.5 or 10	キシラナーゼ、 βグルカナーゼ	体重が55kg以上の雌豚では栄養素の消化率および発育成績が改善 去勢豚では効果なし	Klarie et al., 2012
ほ乳期、育成期、 肥育期	30	キシラナーゼ、 βグルカナーゼ、 プロテアーゼ およびフィターゼを含む 複合酵素	いくつかの酵素では限定的な栄養素消化率の改善効果があるが、一貫性のない 哺乳期、育成期、肥育期における発育成績には影響なし	Kerr et al., 2013
育成期~肥育期	15 or 20	キシラナーゼ、 βグルカナーゼ	発育成績の改善、背脂肪厚の減少、 精肉重量の増加傾向	Swiatkiewicz et al., 2013a
育成期~肥育期	30	キシラナーゼ、 プロテアーゼ	キシラナーゼでは糞尿中の臭気成分の減少、プロテアーゼはで総エネルギー消化率の改善	O'Shea et al., 2014
育成期	20	フィターゼ、 キシラナーゼ、 プロテアーゼ	フィチン態リン排泄量の減少と、 エネルギーおよび窒素消化率の改善	Passos and Kim, 2014

主に不溶性である。トウモロコシ DDGS のマンノース含有量(1.7%)は、原料のトウモロコシより著しく多いが、これは、DDGS 中に残存する酵母の細胞壁中に含まれているマンナンが原因である可能性がある。トウモロコシ DDGS のアラビノース含量(6.2%)およびウロン酸含量(1.6%)は、小麦 DDGS(5.7 および 0.8%)より高いため、アラビノースとキシロースの比率およびウロン酸とキシロースの比率は比較的高くなっている。このことは、トウモロコシ DDGS の繊維(ヘテロキシラン)の構造は、小麦 DDGS より複雑で変化しやすいため、酵素添加による分解がより難しいことを示している。ただし、小麦 DDGS 中の難消化性クラソリグニン含有量は、トウモロコシ DDGS より多かった。クラソリグニンは化学成分として明確には定義されていないが、真のリグニンに加えて、タンパク質(メイラード反応で生成された)、残留脂肪およびワックス、クチンが含まれている可能性がある。これらの分析結果は、置換キシランと水溶性 NSP の濃度が、原料であるトウモロコシに含まれていた元々の構造から、DDGS 製造中に変化することを示唆している。

DDGS を配合した豚用飼料への飼料用酵素の添加効果

DDGS のデンプン含有量は 3.8~11.4%だが、それが難消化性デンプンであるのか、または、消化可能であり、ME 価に寄与しているのかは不明である(表 2)。DDGS 中の食物繊維のほとんどは不溶性だが、TDF の見かけ

の全消化管消化率は 23~55%であり、その結果、DDGS 中の繊維の一部は消化されて発酵し、豚に給与した場合にはエネルギーとしてかなり寄与している。

このことは、NDF、TDF などの繊維の実測値が、豚の脱脂 DDGS の ME 価を推定するために開発された最近の回帰式において重要な予測因子となっている理由である(Urriola ら、2014)。

Swiatkiewicz ら(2015)の最近のレビューにおけるトウモロコシ DDGS を配合した豚用飼料にさまざまな飼料用酵素を添加した場合の反応を表 3 に示した。一般的に、多くの文献では、トウモロコシ DDGS を配合した豚用飼料に飼料用酵素を添加した場合、栄養素の消化率が改善されているが、これらの効果は、通常、発育成績の改善には結びついていない。さらに、このレビューで要約されているいくつかの文献では、フィターゼの応答のみを評価しており、フィターゼと炭水化物分解酵素およびプロテアーゼの組み合わせについては評価していない。Swiatkiewicz ら(2015)のレビュー中のいくつかの文献は、小麦 DDGS とトウモロコシ-小麦 DDGS との比較であり、繊維質と栄養素の特性が原因でトウモロコシ DDGS 飼料に酵素を追加した場合の反応を表していないため、表 3 からは除外した。

さらに、Swiatkiewicz ら(2015)によるレビュー以降にトウモロコシ DDGS を含む豚用飼料への飼料用酵素の添加効果を評価するいくつかの文献が公表されている。トウモロコシ DDGS を配合した豚用飼料への様

表 2. トウモロコシ DDGS 中の炭水化物含量と、食物繊維の豚における見かけの全消化管消化率(ATTD) (Urriola et al, 2010 から改編)

項目	平均値	最低値	最高値	標準偏差
総炭水化物、%	7.3	3.8	11.4	1.4
水溶性炭水化物、%	2.6	0.5	5.0	1.2
不溶性炭水化物、%	4.7	2.0	7.6	1.5
ADF、%	9.9	7.2	17.3	1.2
NDF、%	25.3	20.1	32.9	4.8
不溶性食物繊維、%	35.3	26.4	38.8	4.0
水溶性食物繊維化物、%	6.0	2.36	8.54	2.1
総食物繊維(TDF)、%	42.1	31.2	46.3	4.9
TDFの見かけの全消化管消化率、%	43.7	23.4	55.0	10.2

表 3. トウモロコシ DDGS を配合した豚用飼料における飼料酵素の添加効果 (Swiatkiewicz ら、2015 から抜粋)

発育ステージ	DDGS %	酵素	添加による反応	引用文献
ほ乳期	20	フィターゼ	リン消化率の改善とリン排泄量の減少	Xu et al., 2006a
育成期～肥育期	20	フィターゼ	リン消化率の改善とリン排泄量の減少	Xu et al., 2006b
母豚、妊娠後期～泌乳後期	15	フィターゼ	フィチン態リン排泄量の減少 母豚と産仔への効果なし	Hill et al., 2008
育成期～肥育期	20	フィターゼ	乾物、総エネルギーおよび窒素消化率の改善	Lindemann et al., 2009
育成期～肥育期	15 to 60	キシラナーゼ、 βグルカナーゼ、 マンナーゼ、 セルラーゼ、 プロテアーゼ	発育成績への影響なし	Jacela et al., 2010
ほ乳期	30	キシラナーゼ、 βグルカナーゼ、 マンナーゼ	発育成績への影響なし	Jones et al., 2010
育成期～肥育期	10 or 15	マンナーゼ	発育成績とたん白質消化率の改善	Yoon et al., 2010
育成期	50	フィターゼ	トウモロコシ粒に比べてリン消化率の改善効果が少ない	Almeida and Stein, 2012
肥育期	35 to 50	キシラナーゼ	DDGS35% 配合した飼料中の栄養素の消化率への影響はなく、DDGS配合率が高い場合に栄養素の消化率が低下する	Asmus et al., 2012
育成期～肥育期	10 or 15	キシラナーゼ、 βグルカナーゼ、 フィターゼ、 プロテアーゼ、 セルラーゼ、 アミラーゼ	発育成績が改善される傾向	Li et al., 2012
育成期～肥育期	7.5 or 10	キシラナーゼ、 βグルカナーゼ	体重が55kg以上の雌豚では栄養素の消化率および発育成績が改善 去勢豚では効果なし	Kiarie et al., 2012
ほ乳期、育成期、肥育期	30	キシラナーゼ、 βグルカナーゼ、 プロテアーゼ およびフィターゼを含む複合酵素	いくつかの酵素では限定的な栄養素消化率の改善効果があるが、一貫性のない 哺乳期、育成期、肥育期における発育成績には影響なし	Kerr et al., 2013
育成期～肥育期	15 or 20	キシラナーゼ、 βグルカナーゼ	発育成績の改善、背脂肪厚の減少、 精肉重量の増加傾向	Swiatkiewicz et al., 2013a
育成期～肥育期	30	キシラナーゼ、 プロテアーゼ	キシラナーゼでは糞尿中の臭気成分の減少、 プロテアーゼはで総エネルギー消化率の改善	O'Shea et al., 2014
育成期	20	フィターゼ、 キシラナーゼ、 プロテアーゼ	フィチン態リン排泄量の減少と、 エネルギーおよび窒素消化率の改善	Passos and Kim, 2014

々な飼料用酵素の添加効果をより包括的かつ詳細に評価するために、フィターゼの有無にかかわらず、トウモロコシ-大豆粕主体飼料(表 4)における豚の発育成績を評価した文献における全体的な効果についてメタ分析により評価した。トウモロコシ-大豆粕主体飼料および DDGS

を配合した飼料に対する発育成績への添加効果の比較を表 5 に、さまざまな飼料用酵素を添加した DDGS を配合した飼料における栄養素の見かけの全消化管消化率を表 6 に、DDGS を配合した飼料における繊維成分の見かけの全消化管消化率を表 7 に示した。この分析では、

DDGS を配合した豚用トウモロコシ-大豆粕主体飼料にさまざまな炭水化物分解酵素、炭水化物分解酵素+プロテアーゼ、マンナーゼ、キシランナーゼ、フィターゼを添加した場合の影響を評価した多数の文献データを使用した(Agyekumら、2016; Agyekumら、2012; Asmusら、2012; Barnesら、2011; de Vriesら、2014; de Vriesら、2013; Grahamら、2012; Jacelaら、2010; Jakobsenら、2015; Jang

ら、2017; Jonesら、2010; Kerrら、2013; Kiarieら、2016; Kiarieら、2012; Kooら、2017; Liら、2012; Moranら、2016; Ndouら、2015; Passosら、2015; Pedersenら、2014; Sandbergら、2016; Shrestha、2012; Swiatkiewiczら、2013a; Tsaiら、2017; Widyaratneら、2009; Woyengoら、2015; Yanezら、2011; Yoonら、2010)。

表 4. 飼料用酵素を添加したトウモロコシ-大豆粕主体飼料における日増体量、飼料摂取日量および飼料要求率の変化

Dietary treatment	No. comparisons	ADG % change	ADFI % change	Gain:Feed % change
Without phytase	43	+0.74	+0.43	+0.22
+ carbohydrases	15	-1.10	+0.52	-1.21
+ carbohydrases and proteases	11	+2.03	+1.07	+1.00
+ mannanase	10	+2.35	-0.37	+2.74
+ xylanase	7	+0.33	+0.33	-1.56
With phytase	30	+1.83	+0.38	+1.82
+ carbohydrases	9	-0.14	+2.92	-1.70
+ carbohydrases and proteases	6	+2.22	+1.06	+0.81
+ mannanase	1	+0.47	+0.71	-0.61
+ xylanase	14	+3.03	-1.57	+4.70

表 5. トウモロコシ-大豆粕主体飼料と DDGS を配合した飼料における飼料用酵素を添加による日増体量、飼料摂取日量および飼料要求率の変化

処理	比較数	日増体量の変化、%	飼料摂取日量の変化、%	飼料要求率の変化、%
トウモロコシ-大豆粕主体飼料	43	+0.74	+0.43	+0.22
+炭水化物分解酵素	15	-1.10	+0.52	-1.21
+炭水化物分解酵素およびプロテアーゼ	11	+2.03	+1.07	+1.00
+マンナーゼ	10	+2.35	-0.37	+2.74
+キシランナーゼ	7	+0.33	+0.33	-1.56
DDGS配合飼料	30	+1.39	+1.10	+0.58
+炭水化物分解酵素	12	-0.74	+1.42	-1.40
+炭水化物分解酵素およびプロテアーゼ	7	+2.49	+1.92	+1.06
+キシランナーゼ	11	+2.82	+0.24	+2.44

表 6. トウモロコシ DDGS を配合した飼料における飼料用酵素の添加による各栄養素の見かけの全消化管消化率の変化

栄養素	比較数	効果、%
乾物	15	+0.75
総エネルギー	34	+0.53
窒素	26	-0.25
粗脂肪	20	-0.88
リン	24	+2.15

表 7. トウモロコシ DDGS を配合した飼料における飼料用酵素を添加による繊維の見かけの全消化管消化率の変化

繊維成分	比較数	効果、%
ADF	19	-0.77
NDF	24	+0.54
総アラビノキシロース	5	+1.84
総非デンプン多糖類	5	+4.66
可溶性非デンプン多糖類	5	+4.84

フィターゼの有無にかかわらず飼料用酵素の添加による日増体量、飼料摂取日量、飼料要求率の改善割合は限られていた。このことは、これらの市販の飼料用酵素をトウモロコシ-大豆粕主体飼料に添加するメリットは最小限であることを示している(表 4)。DDGS を配合した飼料(表 4)およびトウモロコシ-大豆粕主体飼料(表 5)では、市販の豚用配合飼料におけるコストを適正化します。実際、トウモロコシ-大豆粕主体飼料(15 の比較)と DDGS を含む飼料(12 の比較)に炭水化物分解酵素を添加した場合、全体的な増体日量と飼料効率の応答は負であった(表 5)。ただし、改善効果はわずかであったが、フィターゼと炭水化物分解酵素、炭水化物分解酵素+プロテアーゼ、およびキシラナーゼと組み合わせて添加した場合、トウモロコシ-大豆粕主体飼料でフィターゼを補給しなかった場合と比較して、増体日量と飼料効率がわずかに改善されている(表 4)。これらの応答は、フィターゼと炭水化物分解酵素の組み合わせが、一般的にどちらか一方よりも高い成長性能と消化率応答をもたらすことを示すいくつかの報告と一致している。ただし、エネルギー消化率に及ぼすフィターゼ添加の影響は一貫して

いない。他の報告(Brady ら、2002; Shelton ら、2003; Jendza ら、2005; Veum ら、2006)は、プラス効果があったとしている。Kerr ら(2010)の結果は、フィターゼ添加によるエネルギー消化率への影響は比較的小さく、変動が高いことを示唆している。飼料用酵素の添加によるこれらの期待外れの発育成績の改善またはその欠如は、乾物および総エネルギー消化率への最小限のプラス効果、および粗タンパク質および粗脂肪消化率への負の効果の結果である(表 6)。これらの反応は、DDGS を含む飼料中のさまざまな繊維画分の見かけの全消化管消化率の全体的な改善が比較的小さいことによってもたらされている(表 7)。

酵素の有効性を改善するため、および DDGS でのエネルギー利用を改善するために繊維構造を分解する方法には、繊維の物理構造をよりよく理解することが必要である。穀物の主な細胞壁構造は、ヘミセルロースと少量のペクチン、糖タンパク質、ヒドロキシ桂皮酸のマトリックスに埋め込まれたセルロース微小ブリルの骨格で構成されており、その後、二次細胞壁が発達し続けると、p-クマリル、コニフェリル、シナピルアルコールが共

重合して混合リグニンが形成される(Santiagoら、2013)。これらの混合リグニンを細胞壁構造に追加すると、繊維に大きな強度と劣化に対する耐性が追加される。トウモロコシでは、最も豊富なヘミセルロースはアラビノキシランであり、アラビノース、グルクロン酸および酢酸の置換基を持つ β (1 \rightarrow 4)- α -キシラン骨格で構成されている。

ヘミセルロースは、水素結合によってセルロースのマイクロフィブリルと絡み合っている(図 1)。これらの水素結合により、細胞壁は分解しにくくなる(Somerville ら、2004)が、キシラナーゼの添加による繊維の表面領域からのアラビノキシランの除去により、セルロースのマイクロフィブリル(結晶構造)が露出する可能性があることも意味しており、酸や酵素による加水分解に強い耐性がある(Hall ら、2010)。実際、小麦 DDGS を給餌された豚におけるセルロースの見かけの回腸消化率(11.9 パーセント)は、他の繊維成分(37 パーセント)より低く、セルロースの見かけの全消化管消化率(29.0 パーセント)も他の繊維成分(43.8 パーセント)より低い(Pedersen ら、2015)。したがって、より安定したセルロースのマイクロフィブリルがアラビノキシランを包埋またはトラップし、繊維の見かけの全消化管消化率を低下させ、キシラナーゼがその基質にアクセスするのを妨げる可能性がある。

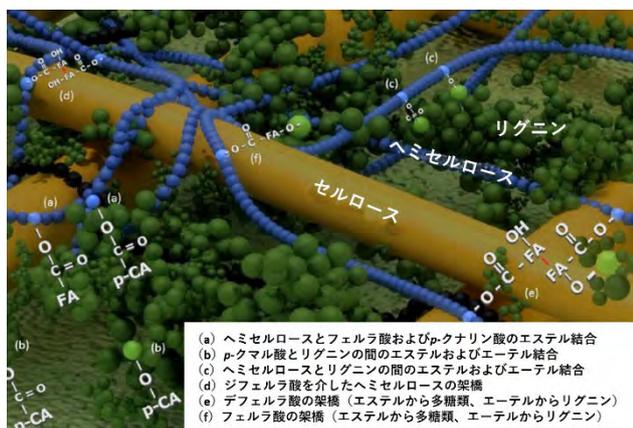


図 1. トウモロコシの二次細胞壁構造 (Santiago ら、2013 から改編)

さらに、分解プロセスの前後における繊維の形態の変化を理解することは、DDGS の豚における繊維の利用性を改善するためのアプローチを特定するのに役立つ可能性がある。いくつかの研究結果から、結晶セルロース

は、結晶化度が低いものと比較して、酵素による加水分解に対してはるかに耐性があることが示されている(Fan ら、1980; Zhang and Lynd、2004; Hall ら、2010)。さらに、天然繊維源の結晶化度と結晶サイズは、熱処理中に増加することが示されている(Poletto ら、2014)。DDGS の製造には、乾燥機を出るときに品温が 100°C を超える場合があることはよく知られている(Rosentrater ら、2012)。これは、DDGS 製造中に、最も容易に分解可能な繊維がすでに部分的に分解されている可能性があり、したがって DDGS 含有量が高い飼料における飼料用酵素または他の加工技術の効果を制限することを示している。実際、Urriola ら(2010)は、繊維消化率の変動が DDGS の供給源間で異なることを示している。これは、エタノールプラントがさまざまな処理条件を使用していることに由来する可能性を示唆している。

植物細胞壁構造の処理方法を変更して、NSP 分解性を向上させることもできるが、粉碎やペレット化などの一般的な処理方法の使用は、NSP 構造の分解には不十分である(de Vries ら、2012)。酸触媒を使用した熱水前処理は、リグノセルロースの分解に効果的であることが示されているが(Sun and Cheng、2002)、タンパク質損傷を引き起こし、酸またはミネラル含有量を増加させる可能性がある(van den Borne ら、2012)。対照的に、マレイン酸を用いた穏やかな酸による水熱処理は、DDGS における NSP の可溶化を高めることが示されている(de Vries ら、2013)。しかし、酸による処理は NSP のより迅速な分解を助け、消化管のより近位の場所に発酵をシフトするが、DDGS 中の NSP の 35% 以上は分解できなかった(de Vries ら、2014)。結果として、これらの報告では、繊維構造のエステル結合アセチル、フェロイル、またはクマロールグループを対象とする場合、酵素および/またはプロセステクノロジーがより効果的である可能性があることを示唆している。穀物、フェルラ酸、*p*-クマル酸、シナピン酸は、アラビノキシラン、細胞壁に閉じ込められたタンパク質、リグニン様ポリマーの結合に関与している(Ralph ら、1995; Bunzel ら、2004; Piber and Koehler、2005)。フェルラ酸と誘導体は、穀物細胞壁の最も重要な架橋であり、アラビノキシランとペクチンに結合している(Bunzel、2010)。フェルラ酸の二量体、三量体およびオリゴマーは、2 つ以上の多糖鎖と架橋して細胞壁を強化するが、酵素

分解を損ない(Grabberら、1998a、b)、DDGSでの繊維消化率の低下につながる。実際、Pedersenら(2015)は、トウモロコシDDGSのフェルラ酸ダイマーとトリマーの濃度は、小麦または穀物をブレンドしたDDGSよりも5から6倍高かったと報告しており、DDGSの発酵および生産中には、トウモロコシの細胞壁のフェルラ酸の架橋は変化していないように見える。

アンモニア処理(AFEX)は、セルロースの結晶構造を破壊し、繊維が豊富なバイオマスからの酵素消化性を大幅に向上させるアルカリ前処理技術の1つである(Mosierら、2005; Gaoら、2010)。反すう家畜では、AFEX処理された飼料は、ルーメン内容物を用いて*in vitro*で評価した場合、NDF消化率が改善されたと報告されている(Balsら、2010)。彼らは、また、トウモロコシDDGSのAFEX前処理の最適化条件について検討し、DDGS中のほとんどすべてのセルロースが72時間の酵素加水分解後に分解され、190gのグルコース乾燥バイオマスを放出したことを報告している(Balsら、2006)。

トウモロコシDDGSにはセルロースが5.8%含まれており、NSP全体の約23.3%を占めている(Jaworskiら、2015)。DDGS中のセルロースが豚の下部消化管に入る前に加水分解された場合、DDGSのエネルギー価に約242 kcal/kg DE(Noblet and van Milgen、2004)寄与する可能性がある。さらに重要なことは、セルロースに抱合されたアラビノキシランの割合は、外因性の酵素、細菌、有機酸およびそれらの組み合わせからの分解に暴露され、アクセスしやすくなる可能性がある。

DDGSを配合した家禽用飼料への酵素添加効果

家禽用飼料への飼料用酵素の添加は、消化管内容物の粘性低下、栄養素の消化と吸収の向上、AME価の改善、飼料摂取量、増体量、飼料効率の増加、嘴の詰まりの減少、消化管および腸内細菌数の変化、水分摂取量とそれとともなう排泄物中の水分量の減少、排泄物中の窒素とリンの排泄量の減少、アンモニア排出量の減少をもたらす(Khattakら、2006)。一般に、トウモロコシDDGSを配合した家禽用飼料と豚用飼料を比較すると、炭水化

物分解酵素の添加は、家禽用飼料において、より効果的だった。

Swiatkiewiczら(2015)による最近のレビューでは、トウモロコシDDGSを配合した家禽用飼料に飼料用酵素を添加した場合の様々な反応に関する文献をとりまとめており、その結果を表8に示した。これらの文献の大部分は、DDGSを配合したブロイラーおよび産卵鶏用飼料に飼料用酵素を添加した場合のいくつかの利点を示しているが、測定に用いた反応や結果には一貫性がない。

トウモロコシDDGSを配合したブロイラーおよび産卵鶏用飼料におけるさまざまな飼料用酵素の添加効果をより包括的かつ詳細に評価するために、メタ分析を行った。

炭水化物分解酵素、炭水化物分解酵素とプロテアーゼ、プロテアーゼとキシラナーゼをトウモロコシ大豆粕主体と、DDGSを配合した飼料に添加した場合のブロイラーにおける発育成績への応答を表9に示した。豚における反応と同様に、トウモロコシ大豆粕主体飼料と、DDGSを配合した飼料に炭水化物分解酵素を添加すると、発育成績がわずかに低下したが、プロテアーゼあるいはキシラナーゼを添加すると、DDGSを配合した飼料では、発育成績への効果がより優れていた。これらの反応は、飼料用酵素のコストと飼料価格に応じて、ブロイラー用飼料にキシラナーゼを添加することにより、添加コストを上回る発育成績が得られる可能性があることを示唆している。プロテアーゼ添加による効果も比較的高いようだが、データは限られており、ブロイラー用飼料へのプロテアーゼの添加効果を検討するためには注意が必要である。

DDGSを配合したブロイラー用飼料へのキシラナーゼの添加によるAME価と乾物消化率の改善は、炭水化物分解酵素またはプロテアーゼのみの添加に比べて優れているが、データは限られている(表10)。2つの文献では、DDGSを配合したブロイラー用飼料にプロテアーゼを添加すると、タンパク質消化率が平均で4.5%高まり、炭水化物分解酵素とプロテアーゼを組み合わせると、AME価と乾物消化率が高まった(表10)。

産卵鶏用飼料に炭水化物分解酵素とプロテアーゼ、

表 8. トウモロコシ DDGS を配合した家禽用飼料における飼料用酵素の添加効果 (Swiatkiewicz et ち、2015 から改編)

ステージ	DDGS %	酵素	添加による反応	引用文献
産卵鶏 26-68週齢	20	キシラナーゼ βグルカナーゼ	DDGS給与による産卵ピーク後の産卵成績の悪化を軽減	SwiatkiewiczandKorelski, 2006
産卵鶏 30-40週齢	5, 10, 15 or 20	キシラナーゼ、β グルカナーゼ、ア ミラーゼ、プロテ アーゼを含む複合 酵素	DDGSを15および20%配合した飼料における産卵成績と脂質消化率を改善	Shalash et al., 2010
産卵鶏 40-56週齢	7, 15 or 23	キシラナーゼ、β グルカナーゼ、ア ミラーゼ、プロテ アーゼを含む複合 酵素	DDGSを7及び5%配合した飼料における産卵成績の改善 卵質、栄養素消化率、血液性状には影響なし	Ghazalah et al., 2011
産卵鶏 40-52週齢	15	フィターゼ	産卵成績や卵質には影響なし	Koksal et al., 2012
産卵鶏 28-36週齢	5, 10, 15 or 20	プロテアーゼ、キシ ラナーゼ (ペントサ ナーゼ)、ペクチナ ーゼ、セルラーゼ、 βグルカナーゼ、ア ミラーゼ、フィター ゼを含む複合酵素	窒素およびリン排泄量を低減 産卵成績や卵質には影響なし	Deniz et al., 2013a
産卵鶏 64-72週齢	10	フィターゼ	飼料摂取量および飼料要求率の増加と、排泄物中のリン含量を低下 産卵成績や卵質には影響なし	Deniz et al., 2013b
産卵鶏 20-44週齢	20	キシラナーゼ フィターゼ	両酵素の組合せにより産卵成績を改善	Swiatkiewiczetal.,2013b
産卵鶏 20-44週齢	10 or 15	キシラナーゼ	産卵率および産卵量を改善	Bobeck et al., 2014
産卵鶏 26-55週齢	20	キシラナーゼ フィターゼ	大腿骨および脛骨の性状に影響なし	Swiatkiewiczetal.,2014a

またはキシラナーゼを組み合わせて添加すると、通常、体重増加、飼料摂取量および飼料要求率が改善されるが、その程度は、ブロイラーに比べて低い(表 11)。また、飼料用酵素の添加により、産卵量、卵重、卵黄色調がわずかに改善されるように見えるが、ハウユニットに悪影響を与える可能性がある(表 12)。このメタ分析の結果に基づいて、経済的に重要な生産性の改善効果の大きさにより、炭水化物分解酵素とプロテアーゼの組み合わせ、またはキシラナーゼを産卵鶏用飼料に添加するコストの正当性を判断できる。

要約すると、コマーシャルベースでブロイラーと産卵鶏の反応を発揮させる可能性を判断するためには、炭水化物分解酵素、プロテアーゼ、またはキシラナーゼのタイプを考慮する必要がある。DDGS を配合したブロイラ

ーと産卵鶏用飼料への飼料用酵素添加の可否を判断する前に、これらの表で引用されている公開文献を入手し、供試飼料の配合組成と実験条件について詳しく知っておく必要がある。

結論

植物質原料主体の豚および家禽用飼料への様々な飼料用酵素の添加は、長年にわたって研究されてきた。豚とブロイラーの発育成績および産卵鶏の産卵成績への効果は、目的基質(NSP、タンパク質およびフィチン酸塩)に対して適切な酵素を選択したか否かにより、結果に一貫性がなくなる。

一般的に、豚および家禽に用いるトウモロコシ-大豆粕主体飼料にフィターゼを添加すると、リンと栄養素の

消化率が一貫して改善されるが、炭水化物分解酵素、プロテアーゼ、キシラナーゼの添加では一貫性が見られない。トウモロコシ DDGS は、飼料用酵素による著しい分解を防ぐ独自の化学的特性を持つが、飼料用酵素添加によるエネルギー、タンパク質および繊維の消化率の改善効果は、一般的に、ブロイラーの方が豚や産卵鶏よりも大きくなる。ただし、飼料用酵素の添加によるエネルギーと栄養素の消化率の改善は、必ずしも発育成績や産卵成績と直結しているわけではない。このメタ分析の結果に基づいた反応の要約を用いることで、経済的に重要な反応の改善の大きさにより、豚、ブロイラーまたは産

卵鶏用飼料に対する様々な飼料用酵素の添加コストが正当であるかを判断することが出来る。炭水化物分解酵素、プロテアーゼまたはキシラナーゼのタイプは、コマーシャルベースでこれらの反応を達成する可能性を決めるためには、この評価を考慮する必要がある。本章で引用されている公開文献を入手し、これらの反応を達成するために使用される飼料の配合組成と実験条件についてさらに確認し、DDGS を配合した豚、ブロイラーおよび産卵用飼料への酵素添加の可否を判断する必要がある。

表 9. ブロイラー用トウモロコシ-大豆粕主体飼料およびトウモロコシ DDGS 配合飼料に飼料用酵素を添加した場合の日増体量、飼料摂取日量および飼料要求率の変化

処理	比較数	日増体量の変化、%	飼料摂取日量の変化、%	飼料要求率の変化、%
トウモロコシ-大豆粕主体飼料	16	-1.07	-0.77	0.66
+炭水化物分解酵素	4	-6.13	-4.82	1.41
+炭水化物分解酵素およびプロテアーゼ	3	0.75	-0.64	-1.31
+プロテアーゼ	1	4.34	8.14	3.64
+キシラナーゼ	8	0.11	0.10	0.65
DDGS配合飼料	33	2.73	1.18	-1.97
+炭水化物分解酵素	7	-0.70	-1.12	-0.33
+炭水化物分解酵素およびプロテアーゼ	7	1.02	-1.23	-2.16
+プロテアーゼ	2	5.95	1.79	-3.89
+キシラナーゼ	17	4.47	3.04	-2.33

引用文献：Olukosi et al., 2010; Liu et al., 2011; Min et al., 2011; Barekatin et al., 2013a,b,c; Waititu et al., 2014; Campasino et al., 2015

表 10. トウモロコシ DDGS を配合したブロイラー用飼料に飼料用酵素を添加した場合の見かけの代謝エネルギーと栄養素の見かけの全総消化管消化率の変化

酵素	AME ¹		乾物		粗たん白質		リン	
	n	%	n	%	n	%	n	%
炭水化物分解酵素	8	+0.07	0	ND	3	-0.29	0	ND
炭水化物分解酵素、プロテアーゼ	7	+4.21	4	+2.75	5	+1.20	5	-1.82
プロテアーゼ	0	ND	2	+1.00	2	+4.50	0	ND
キシラナーゼ	6	+5.83	8	+3.63	8	+2.50	0	ND
全体	21	+3.09	14	+3.00	18	+1.90	5	-1.82

¹AME=見かけの代謝エネルギー

²ND=不検出

引用文献：Min et al., 2009; Olukosi et al., 2010; Liu et al., 2011; Min et al., 2011; Barekatin et al., 2013a; Romero et al., 2013; Waititu et al., 2014

表 11. トウモロコシ-大豆主体飼料およびトウモロコシ DDGS を配合した飼料における飼料酵素添加による体重、飼料摂取日量および飼料要求率の変化の比較

処理	比較数	体重変化、%	飼料摂取日量の変化、%	飼料要求率の変化、%
トウモロコシ-大豆粕主体飼料	4	+0.07	+0.48	+0.51
+炭水化物分解酵素、プロテアーゼ	4	+0.07	+0.48	+0.51
DDGS配合飼料	16	+3.52	+0.13	-1.86
+炭水化物分解酵素	2	+1.70	-0.87	-2.64
+炭水化物分解酵素、プロテアーゼ	11	+4.34	+0.30	-1.61
+キシラナーゼ	3	+1.66	+0.19	-2.26

引用文献：Swiatkewicz et al., 2006; Shalash et al., 2010; Ghazalah et al., 2011; Bobeck et al., 2014

表 12. トウモロコシ DDGS を配合した飼料に飼料用酵素を添加した場合の産卵成績および卵質の変化

項目	比較数	変化、%
産卵数	26	+1.26
卵重	26	+0.33
卵黄色調	19	+4.94
ハウユニット	12	-0.12

引用文献：Swiatkewicz et al., 2006; Shalash et al., 2010; Ghazalah et al., 2011; Koksall et al., 2012; Deniz et al., 2013a,b; Swiatkewicz et al., 2013; Bobeck et al., 2014

引用文献

Adeola, O., and A.J. Cowieson. 2011. BOARD-INVITED REVIEW: Opportunities and challenges in using exogenous enzymes to improve nonruminant animal production. *J. Anim. Sci.* 89:3189–3218.

Adeola, O., O.A. Olukosi, J.A. Jendza, R.N. Dilger, and M.R. Bedford. 2006. Response of growing pigs to *Peniophora lycii*- and *Escherichia coli*-derived phytases or varying ratios of calcium to total phosphorus. *J. Anim. Sci.* 82:637–644.

Adeola, O., J.S. Sands, P.H. Simmins, and H. Schulze. 2004. The efficacy of an *Escherichia coli*-derived phytase preparation. *J. Anim. Sci.* 82:2657–2666.

Agyekum, A.K., A. Regassa, E. Kiarie, and C.M. Nyachoti. 2016. Nutrient digestibility, digesta volatile fatty acids, and intestinal bacterial profile in growing pigs fed a distillers dried grains with solubles containing diet supplemented with a multi-enzyme cocktail. *Anim. Feed Sci. Technol.* 212:70–80.

Agyekum, A.K., B.A. Slominski, and C. M. Nyachoti. 2012. Organ weight, intestinal morphology, and fasting

whole-body oxygen consumption in growing pigs fed diets containing distillers dried grains with solubles alone or in combination with a multienzyme supplement. *J. Anim. Sci.* 90:3032–3040.

Almeida, F.N., and H.H. Stein. 2012. Effects of graded levels of microbial phytase on the standardized total tract digestibility of phosphorus in corn and corn co-products fed to pigs. *J. Anim. Sci.* 90:1262–1269.

Asmus, M., J.M. DeRouchey, M.D. Tokach, R.D. Goodband, J.L. Nelssen, and S.S. Dritz. 2012. Effects of xylanase in high-co-product diets on nutrient digestibility in finishing pigs. *Kansas Agricultural Experiment Station Research Reports.* pp. 335–342. <https://doi.org/10.4148/2378-5977.7089>.

Bals, B., H. Murnen, M. Allen, and B. Dale. 2010. Ammonia fiber expansion (afex) treatment of eleven different forages: Improvements to fiber digestibility in vitro. *Anim. Feed Sci. Technol.* 155:147–155.

Bals, B., B. Dale, and V. Balan. 2006. Enzymatic hydrolysis of distiller's dry grain and solubles (ddgs) using ammonia fiber expansion pretreatment. *Energy & Fuels*

20:2732–2736.

- Barekatin, M.R., C. Antipatis, M. Choct, and P.A. Iji. 2013a. Interaction between protease and xylanase in broiler chicken diets containing sorghum distillers' dried grains with solubles. *Anim. Feed Sci. Technol.* 182:71–81.
- Barekatin, M.R., C. Antipatis, N. Rodgers, S.W. Walkden–Brown, P.A. Iji, and M. Choct. 2013b. Evaluation of high dietary inclusion of distillers dried grains with solubles and supplementation of protease and xylanase in the diets of broiler chickens under necrotic enteritis challenge. *Poult. Sci.* 92:1579–1594.
- Barekatin, M.R., M. Choct, and P.A. Iji. 2013c. Xylanase supplementation improves the nutritive value of diets containing high levels of sorghum distillers' dried grains with solubles for broiler chickens. *J. Sci. Food. Agric.* 93:1552–1559.
- Barnes, J., J.M. DeRouchey, M.D. Tokach, R.D. Goodband, J.L. Nelssen, and S.S. Dritz. 2011. Effects of xylanase in growing–finishing diets varying in dietary energy and fiber on growth performance, carcass characteristics, and nutrient digestibility. *Kansas Agricultural Experiment Station Research Reports*. <https://doi.org/10.4148/2378-5977.7124>
- Beaulieu, A.D., M.R. Bedford, and J.F. Patience. 2007. Supplementing corn or corn–barley diets with an *E. coli* derived phytase decreases total and soluble phosphorus output by weanling and growing pigs. *Can. J. Anim. Sci.* 87:353–364.
- Bobek, E.A., N.A. Nachtrieb, A. Batal, and M.E. Persia. 2014. Effects of xylanase supplementation of corn–soybean meal–dried distiller's grain diets on performance, metabolizable energy, and body composition when fed to first–cycle laying hens. *J. Appl. Poult. Res.* 23:174–180.
- Brady, S. M., J.J. Callan, D. Cowan, M. McGrane, and J.V. O'Doherty. 2002. Effect of phytase inclusion and calcium/phosphorus ratio on the performance and nutrient retention of grower–finisher pigs fed barley/wheat/soya bean meal–based diets. *J. Sci. Food Agric.* 82:1780–1790.
- Bunzel, M. 2010. Chemistry and occurrence of hydrocinnamate oligomers. *Phytochem. Rev.* 9:47–64.
- Bunzel, M., J. Ralph, F. Lu, R.D. Hateld, and H. Steinhart. 2004. Lignins and ferulate–coniferyl alcohol cross–coupling products in cereal grains. *J. Agric. Food Chem.* 52:6496–6502.
- Campasino A., M. Williams, R. Latham, C.A. Bailey, B. Brown, and J.T. Lee. 2015. Effects of increasing dried distillers' grains with solubles and non–starch polysaccharide degrading enzyme inclusion on growth performance and energy digestibility in broilers. *J. Appl. Poult. Res.* 00:1–10.
- Deniz, G., H. Gencoglu, S.S. Gezen, I.I. Turkmen, A. Orman, and C. Kara. 2013a. Effects of feeding corn distiller's dried grains with solubles with and without enzyme cocktail supplementation to laying hens on performance, egg quality, selected manure parameters, and feed cost. *Livest. Sci.* 15:174–181.
- Deniz, G., S.S. Gezen, C. Kara, H. Gencoglu, Y. Meral, and E. Baser. 2013b. Evaluation of nutrient equivalency of microbial phytase in hens in late lay given maize–soybean or distiller's dried grains with solubles (DDGS) diets. *Br. Poult. Sci.* 54:494–502.
- de Vries, S., A.M. Pustjens, C. van Rooijen, M.A. Kabel, W.H. Hendriks, and W.J.J. Gerrits. 2014. Effects of acid extrusion on the degradability of maize distillers dried grain with solubles in pigs. *J. Anim. Sci.* 92:5496–5506.
- de Vries, S., A.M. Pustjens, M.A. Kabel, S. Salazar–Villanea, W.H. Hendriks, and W.J.J. Gerrits. 2013. Processing technologies and cell wall degrading enzymes to improve nutritional value of dried distillers grain with solubles for animal feed: an in vitro digestion study. *J. Agric. Food Chem.* 61:8821–8828.
- de Vries, S., A.M. Pustjens, H.A. Schols, W.H. Hendriks, and W.J.J. Gerrits. 2012. Improving digestive utilization of fiber–rich feedstuffs in pigs and poultry by processing and enzyme technologies: A review. *Anim. Feed Sci. Technol.* 178:123–138.
- Dida, M.F. 2016. Review paper on enzyme supplementation

- in poultry ration. *Int. J. Bioorganic Chem.* 1:1–7
doi:10.11648/j.ijbc.20160101.11
- Fan, L.T., Y.H. Lee, and D.H. Beardry matterore. 1980. Mechanism of the enzymatic–hydrolysis of cellulose – effects of major structural features of cellulose on enzymatic–hydrolysis. *Biotechnol. and Bioengineer.* 22:177–199.
- Gao, D., S.P. Chundawat, C. Krishnan, V. Balan, and B.E. Dale. 2010. Mixture optimization of six core glycosyl hydrolases for maximizing saccharification of ammonia fiber expansion (afex) pretreated corn stover. *Bioresour Technol* 101: 2770–2781.
- Ghazalah, A.A., M.O. Abd–Elsamee, and E.S. Moustafa. 2011. Use of distillers dried grains with solubles (DDGS) as replacement for soybean meal in laying hen diets. *Intl. J. Poult. Sci.* 10:505–513.
- Grabber, J.H., R.D. Hatfield, and J. Ralph. 1998a. Fiferulate cross–links impede the enzymatic degradation of non–lignified maize walls. *J. Sci. Food Agric.* 77:193–200.
- Grabber, J.H., J. Ralph, and R.D. Hatfield. 1998b. Ferulate cross–links limit enzymatic degradation of synthetically lignified primary walls of maize. *J. Agric. Food Chem.* 46:2609–2614.
- Grieshop, C.M., D.E. Reece, G. C. Fahey. 2001. Nonstarch polysaccharides and oligosaccharides in swine nutrition. Pages 107–130 in: *Swine Nutrition*. 2nd eds. A.J. Lewis and L.L. Southern, eds. CRC Press, Boca Raton, FL
- Graham, A., S. Nitikanchana, J. De Jong, J.M. DeRouche, M.D. Tokach, R.D. Goodband, J.L. Nelssen, and S.S. Dritz. 2012. The interactive effects of Enzyme and phytase in diets containing high–fiber co–products on growth performance of nursery pigs. *Swine Day–Kansas State University*, p. 66–73.
- Hall, M., P. Bansal, J.H. Lee, M.J. Real, and A.S. Bommarius. 2010. Cellulose crystallinity—a key predictor of the enzymatic hydrolysis rate. *FEBS J.* 277:1571–1582.
- Hill, G.M., J.E. Link, M.J. Rincker, D.L. Kirkpatrick, M.L. Gibson, and K. Karges. 2008. Utilization of distillers dried grains with solubles and phytase in sow lactation diets to meet the phosphorus requirement of the sow and reduce fecal phosphorus concentration. *J. Anim. Sci.* 86:112–118.
- Jacela, J., S. Dritz, J. DeRouche, M. Tokach, R. Goodband, and J. Nelssen. 2010. Effects of supplemental enzymes in diets containing distillers dried grains with solubles on finishing pig growth performance. *The Professional Animal Scientist* 26:412–424.
- Jakobsen, G.V., B.B. Jensen, K.E. Bach Knudsen, and N. Canibe. 2015. Impact of fermentation and addition of non– starch polysaccharide–degrading enzymes on microbial population and on digestibility of dried distillers grains with solubles in pigs. *Livest. Sci.* 178:216–227.
- Jang, Y.D., P. Wilcock, R.D. Boyd, and M.D. Lindemann. 2017. Effect of combined xylanase and phytase on growth performance, apparent, total tract digestibility, and carcass characteristics in growing pigs fed corn–based diets containing high–fiber coproducts. *J. Anim. Sci.* 95:4005–4017.
- Jaworski, N., H.N. Lærke, K. Bach Knudsen, and H.–H. Stein. 2015. Carbohydrate composition and *in vitro* digestibility of dry matter and nonstarch polysaccharides in corn, sorghum, and wheat and coproducts from these grains. *J. Anim. Sci.* 93: 1103–1113.
- Jendza, J.A., R.N. Dilger, J.S. Sands, and O. Adeola. 2006. E cacy and equivalency of an *Escherichia coli*–derived phytase for replacing inorganic phosphorus in the diets of broiler chickens and young pigs. *J. Anim. Sci.* 84:3364–3374.
- Jendza, J. A., R. N. Dilger, S. A. Adedokun, J. S. Sands, and O. Adeola. 2005. *Escherichia coli* phytase improves growth performance of starter, grower, and finisher pigs fed phosphorus–deficient diets. *J. Anim. Sci.* 83:1882–1889.
- Jha, R., and J.D. Berrocoso. 2015. Review: Dietary fiber utilization and its effects on physiological functions and gut health of swine. *Animal* 9:1441–1452.
- Jones, C.K., J.R. Bergstrom, M.D. Tokach, J.M. DeRouche,

- R.D. Goodband, J.L. Nelssen, and S.S. Dritz. 2010. Efficacy of commercial enzymes in diets containing various concentrations and sources of dried distillers grains with solubles for nursery pigs. *J. Anim. Sci.* 88:2084–2091
- Kerr, B.J., and G.C. Shurson. 2013. Strategies to improve fiber utilization in swine. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 4:11.
- Kerr, B.J., T.E. Weber, and G.C. Shurson. 2013. Evaluation of commercially available enzymes, probiotics, or yeast on apparent total-tract nutrient digestion and growth in nursery and finishing pigs fed diets containing corn dried distillers grains with solubles. *Prof. Anim. Scientist* 29:508–517.
- Kerr, B. J., T.E. Weber, P.S. Miller, and L.L. Southern. 2010. Effect of phytase on apparent total tract digestibility of phosphorus in corn-soybean meal diets fed to finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 88:238–247.
- Khattak, F.M., T.N. Pasha, Z. Hayat, and A. Mahmud. 2006. Enzymes in poultry nutrition. *J. Anim. Pl. Sci.* 16:1–7.
- Kiarie, E., M.C. Walsh, L.F. Romero, and S.K. Baidoo. 2016. Digestibility responses of growing pigs fed corn plus corn distiller grains or wheat plus wheat co-product-based diets without or with supplemental xylanase. *J. Anim. Sci.* 94:211–214.
- Kiarie, E., A. Owusu-Asiedu, A. Péron, P.H. Simmins, and C.M. Nyachoti. 2012. Efficacy of xylanase and β -glucanase blend in mixed grains and grain co-products-based diets for fattening pigs. *Livest. Sci.* 148:129–133.
- Koksal, B.H., P. Sacakli, and A. Ergun. 2012. Effects of phytase and vitamin D3 addition to diets containing distillers dried grains with solubles on performance and some egg traits in laying hens. *Intl. J. Poult. Sci.* 11:259–263.
- Koo, B., J.W. Kim, C.F.M. de Lange, M.M. Hossain, and C.M. Nyachoti. 2017. Effects of diet complexity and muticarbhydrase supplementation on growth performance, nutrient digestibility, blood profile, intestinal morphology, and fecal score in newly weaned pigs. *J. Anim. Sci.* 95:4060–4071.
- Li, G., Z. Wang, M. Lin, Z. Lu, and W. Yao. 2012. Effects of corn DDGS in combination with compound enzymes on growth performance, carcass fat quality, plasma and tissue redox homeostasis of growing-finishing pigs. *Livest. Sci.* 149:46–52.
- Liao, S. F., A.K. Kies, W.C. Sauer, Y.C. Zhang, M. Cervantes, and J.M. He. 2005. Effect of phytase supplementation to a low- and a high-phytate diet for growing pigs on the digestibilities of crude protein, amino acids, and energy. *J. Anim. Sci.* 83:2130–2136.
- Lindemann, M.D., G.A. Apgar, G.L. Cromwell, P.H. Simmins, and A. Owusu-Asiedu. 2009. Supplementation with phytase and xylanase can increase energy availability in swine diets containing corn distillers dried grains with solubles (DDGS). *J. Anim. Sci.* 87(E-Suppl. 2):69 (Abstr.).
- Liu, N., Y.J. Ru, D.F. Tang, T.S. Xu, and G.G. Partridge. 2011. Effects of corn distillers dried grains with solubles and xylanase on growth performance and digestibility of diet components in broilers. *Anim. Feed Sci. Technol.* 163:260–266.
- Martinez-Amezcuca, C., C.M. Parsons, and D.H. Baker. 2006. Effect of microbial phytase and citric acid on phosphorus bioavailability, apparent metabolizable energy, and amino acid digestibility in distillers dried grains with solubles in chicks. *Poult. Sci.* 85:470–475.
- Min, Y.N., F.Z. Liu, A. Karimi, C. Coto, C. Lu, F. Yan, and P.W. Waldroup. 2011. Effect of Rovabio® Max APon performance, energy and nitrogen digestibility of diets high in distillers dried grains with solubles (DDGS) in broilers. *Intl. J. Poult. Sci.* 10:796–803.
- Min, Y.N., F. Yan, F.Z. Liu, C. Coto, and P.W. Waldroup. 2009. Effect of various dietary enzymes on energy digestibility of diets high in distillers dried grains with solubles for broilers. *J. Appl. Poult. Res.* 18:734–740.
- Moran, K., C.F.M. de Lange, P. Ferket, V. Fellner, P. Wilcock, and E. van Heugten. 2016. Enzyme supplementation to improve the nutritional value of fibrous feed ingredients in swine diets fed in dry or liquid form. *J. Anim. Sci.* 95:1031–1040.

- Mosier, N., C. Wyman, B. Dale, R. Elander, Y.Y. Lee, M. Holtzapple, and M. Ladisch. 2005. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresour Technol* 96: 673–686. doi:10.1016/j.biortech.2004.06.025
- NRC. 2007. Page 206 in *Nutrient Requirements of Horses*. 6th rev. ed. Natl. Acad. Press. Washington, DC.
- Noblet, J., and J. van Milgen. 2004. Energy value of pig feeds: Effect of pig body weight and energy evaluation system. *J. Anim. Sci.* 82 E-Suppl:E229–238.
- Ndou, S.P., E. Kiarie, A.K. Agyekum, J.M. Heo, L.F. Romero, S. Arent, R. Lorentsen, and C.M. Nyachoti. 2015. Comparative efficacy of xylanases on growth performance and digestibility in growing pigs fed wheat and wheat bran- or corn and corn DDGS-based diets supplemented with phytase. *Anim. Feed Sci. Technol.* 209:230–239.
- Olukosi, C.M., A.J. Cowieson, and A. Adeola. 2010. Broiler responses to supplementation of phytase and a mixture of carbohydrases and phytase in maize soybean meal diets with or without maize distillers' dried grain with solubles. *Br. Poult. Sci.* 51:434–443.
- O'Shea, C.J., P.O. McAlpine, P. Solon, T. Curran, P.F. Varley, A.M. Walsh, and J.V.O. Doherty. 2014. The effect of protease and xylanase enzymes on growth performance, nutrient digestibility, and manure odour in grower-finisher pigs. *Anim. Feed sci. technol.* 189:88–97.
- Passos, A.A., I. Park, P. Ferket, P., E. von Heimendahl, and S.W. Kim. 2015. Effect of dietary supplementation of xylanase on apparent ileal digestibility of nutrients, viscosity of digesta, and intestinal morphology of growing pigs fed corn and soybean meal based diet. *Anim. Nutr.* 1:36–40.
- Passos, A.A., and S.W. Kim. 2014. Effects of different feed enzyme combinations on apparent total tract digestibility of dry matter, N, phytate, DE, and ME in corn-soybean meal-DDGS based diets fed to pigs. *ADSA-ASAS Midwest Meeting abstract*, p. 147 <https://asas.confex.com/asas/mw14/webprogram/Paper2705.html>.
- Pedersen, M.B., S. Yu, S. Arent, S. Dalsgaard, K.E. Bach Knudsen and H.N. Laerke. 2015. Xylanase increased the ileal digestibility of nonstarch polysaccharides and concentration of low molecular weight nondigestible carbohydrates in pigs fed high levels of wheat distillers dried grains with solubles. *J. Anim. Sci.* 93:2885–2893.
- Pedersen, M.B., S. Dalsgaard, K.E. Bach Knudsen, S. Yu and H.N. Laerke. 2014. Compositional profile and variation of distillers dried grains with solubles from various origins with focus on non-starch polysaccharides. *Anim. Feed Sci. Technol.* 197:130–141.
- Piber, M., and P. Kohler. 2005. Identification of dehydroferulic acid tyrosine in rye and wheat: evidence for a covalent cross-link between arabinoxylans and proteins. *J. Agric. Food Chem.* 53:5276–5284.
- Poletto, M., H. Júnior, and A. Zattera. 2014. Native cellulose: Structure, characterization and thermal properties. *Materials* 7:6105–6119.
- Ralph, J., J.H. Grabber, and R.D. Hatfield. 1995. Lignin-ferulate cross-links in grasses: active incorporation of ferulate polysaccharide esters into ryegrass lignins. *Carbohydr. Res.* 275:167–178.
- Ravindran, V. 2013. Feed enzymes: The science, practice, and metabolic realities. *J. Appl. Poult. Res.* 22:628–636.
- Romero, L.F., C.M. Parsons, P.L. Utterback, P.W. Plumstead and V. Ravindran. 2013. Comparative effects of dietary carbohydrases without or with protease on the ileal digestibility of energy and amino acids and AMEn in young broilers. *Anim. Feed sci. Technol.* 181:35–44.
- Rosentrater, K.A., K. Ileleji, and D.B. Johnson. 2012. Manufacturing of fuel ethanol and distillers grains – current and evolving processes. In: Liu K, Rosentrater K. A and B. Raton (eds.) *Distillers grains production, properties, and utilization*. phosphorus 73–102.
- Sandberg, F.B., S.J. England, and M.R. Bible. 2016. Responses of growing-finisher pigs to two levels of a multi-enzyme blend (Natuzyne) as compared to pigs fed a lower energy-higher fiber, or a higher energy-lower fiber diet. *J. Anim. Sci.* doi:

- Santiago, R., J. Barros-Rios, and R.A. Malvar. 2013. Impact of cell wall composition on maize resistance to pests and diseases. *Int. J. Mol. Sci.* 14:6960-6980.
- Selvendran, R.R. and J.A. Robertson. 1990. The chemistry of dietary fiber: a holistic view of the cell wall matrix. Pages 27-43 in *Dietary Fibre: Chemical and Biological Aspects*. D.A.T. Southgate, K. Waldron, I.T. Johnson, and G.R. Fenwick, eds. Royal Society of Chemistry Special Publication No 83. Royal Society of Chemistry, Cambridge.
- Shalash, S.M.M., S.A. El-Wafa, R.A. Hassan, N.A. Ramadan, M.S. Mohamed, and H.E. El-Gabry. 2010. Evaluation of distillers dried grains with solubles as feed ingredient in laying hen diets. *Intl. J. Poult. Sci.* 9:537-545.
- Shelton, J. L., L. L. Southern, T. D. Bidner, M. A. Persica, J. Braun, B. Cousins and F. McKnight. 2003. Effect of microbial phytase on energy availability and lipid and protein deposition in growing swine. *J. Anim. Sci.* 81:2503-2062.
- Shrestha, D.R. 2012. Effects of supplemented NSP-degrading enzymes on nutrient digestibility of diets containing co-products fed to grower pigs. University of Alberta, Edmonton, Alberta. Slominski, B.A. 2011. Review - Recent advance in research on enzymes in poultry diets. *Poult. Sci.* 90:2013-2023.
- Somerville, C., S. Bauer, G. Brininstool, M. Facette, T. Hamann, J. Milne, E. Osborne, A. Paredez, S. Persson, T. Raab, S. Vorwerk, and H. Youngs. 2004. Toward a systems approach to understanding plant cell walls. *Science* 306:2206-2211.
- Sun, Y., and J. Cheng. 2002. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: A review. *Bioresource Technol.* 83:1-11.
- Świątkiewicz, M., A. Świątkiewicz, A. Arczewska-Wlosek, and D. Jozefiak. 2015. Efficacy of feed enzymes in pig and poultry diets containing distillers dried grains with solubles: a review. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 100:15-26.
- Świątkiewicz, S., A. Arczewska-Wlosek, and D. Jozefiak. 2014a. Bones quality indices in laying hens fed diets with a high level of DDGS and supplemented with selected feed additives. *Czech J. Anim. Sci.* 59:61-68.
- Świątkiewicz, S., A. Arczewska-Wlosek, and D. Jozefiak. 2014b. Feed enzymes, probiotic, or chitosan can improve the nutritional efficiency of broiler chicken diets containing a high level of distillers dried grains with solubles. *Livest. Sci.* 163:110-119.
- Świątkiewicz, M., E. Hanczakowska, and A. Olszewska. 2013a. Effect of corn distillers dried grains with solubles (DDGS) in diets with NSP-hydrolyzing enzymes on growth performance, carcass traits and meat quality of pigs. *Annals of Anim. Sci.* 13:313-326.
- Świątkiewicz, S., A. Arczewska-Wlosek, J. Krawczyk, M. Puchala, and D. Jozefiak. 2013b. Effects of selected feed additives on the performance of laying hens given a diet rich in maize dried distiller's grains with solubles (DDGS). *Br. Poult. Sci.* 54:478-485.
- Świątkiewicz, S., and J. Korelski. 2006. Effect of maize distillers dried grains with solubles and dietary enzyme supplementation on the performance of laying hens. *J. Anim. Feed Sci.* 15:253-260.
- Tsai, T., C.R. Dove, P.M. Cline, A. Owusu-Asiedu, M.C. Walsh and M. Azain. 2017. The effect of adding xylanase or β -glucanase to diets with corn distillers dried grains with solubles (CDDGS) on growth performance and nutrient digestibility in nursery pigs. *Livest. Sci.* 197:46-52.
- Urriola, P.E., M. Li, B.J. Kerr, and G.C. Shurson. 2014. Evaluation of prediction equations to estimate gross, digestible, and metabolizable energy content of maize dried distillers grains with solubles (DDGS) for swine based on chemical composition. *Anim. Feed Sci. Technol.* 198:196-202.
- Urriola, P.E., G.C. Shurson, and H.H. Stein. 2010. Digestibility of dietary fiber in distillers coproducts fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 88:2373-2381.
- van den Borne, J.J., M.A. Kabel, M. Briens, A.F. van der Poel, and W.H. Hendriks. 2012. Effects of pretreatment of wheat bran on the quality of protein-rich residue for

- animal feeding on monosaccharide release for ethanol production. *Bioresource Technol.* 124:446–454.
- Veum, T. L., D.W. Dollinger, C.E. Bu, and M.R. Bedford. 2006. A genetically engineered *Escherichia coli* phytase improved nutrient utilization, growth performance, and bone strength of young swine fed diets deficient in available phosphorus. *J. Anim. Sci.* 84:1147–1158.
- Waititu, S.M., A. Rogiewicz, B.A. Slominski, G.J. Maina, J.O. Ochanda, and C.M. Nyachoti. 2014. Effect of multi-enzyme mixtures on performance and nutrient utilization in broilers fed diets containing different types of cereals and industrial by-products. *J. Poult. Sci.* 51:402–410.
- Widyaratne, G., J. Patience, and R. Zijlstra. 2009. Effect of xylanase supplementation of diets containing wheat distiller's dried grains with solubles on energy, amino acid and phosphorus digestibility and growth performance of grower–finisher pigs. *Can. J. Anim. Sci.* 89:91–95.
- Woyengo, T.A., D.V. Ige, O.O. Akinremi, and C.M. Nyachoti. 2015. Performance and nutrient digestibility in growing pigs fed wheat dried distillers' grain with solubles-containing diets supplemented with phytase and multi-carbohydrase. *J. Anim. Sci.* 87:570–577.
- Xu, G., G.He, S. Baidoo, and G.C. Shurson. 2006a. Effect of feeding diets containing corn distillers dried grains with solubles (DDGS), with or without phytase, on nutrient digestibility and excretion in nursery pigs. *J. Anim. Sci.* 84(Suppl. 2):122 (Abstr.).
- Xu, G. M.H. Whitney, and G.C. Shurson. 2006b. Effects of feeding diets containing corn distillers dried grains with solubles (DDGS), with or without phytase, on nutrient digestibility and excretion in grow–finish pigs. *J. Anim. Sci.* 85(Suppl. 2):123 (Abstr.).
- Yanez, J.L., E. Beltranena, M. Cervantes, and R.T. Zijlstra. 2011. Effect of phytase and xylanase supplementation or particle size on nutrient digestibility of diets containing distillers dried grains with solubles cofermented from wheat and corn in ileal-cannulated grower pigs. *J. Anim. Sci.* 89:113–123.
- Yoon, S.Y., Y.X. Ynag, P.L. Shinde, J.Y. Choi, J.S. Kim, Y.W. Kim, K. Yun, J.K. Jo, J.H. Lee, S.J. Ohh, I.K. Kwon, and B.J. Chae. 2010. Effects of mannanase and distillers dried grains with solubles on growth performance, nutrient digestibility, and carcass characteristics of grower–finisher pigs. *J. Anim. Sci.* 88:181–191.
- Zhang, Y.H., and L.R. Lynd. 2004. Toward an aggregated understanding of enzymatic hydrolysis of cellulose: Noncomplexed cellulase systems. *Biotechnol Bioeng* 88:797–824.

24 章:めん羊およびヤギ用飼料における DDGS

はじめに

めん羊およびヤギへの DDGS の給与による影響を評価した研究は他の畜種に比べて少ないが、DDGS はめん羊およびヤギ用飼料において、経済的で、優れた飼料原料として利用されている。DDGS は繊維含量が高く、でん粉含量が低いいため、飼料設計の柔軟性を高め、粗飼料や穀類主体飼料の一部と置換することで、ルーメンアシドーシスのリスクを低減することが出来る (Held、2006a、b)。

妊娠期および泌乳期の雌めん羊

Ely ら (1991) は、粗濃比 2:1 で NRC 要求量の 75 あるいは 85% 量を給与している分娩後 14~56 日の交雑種雌めん羊 20 頭に対して、大豆粕または DDGS を補給した。DDGS を補給すると泌乳中の体重減少が少なかったが、産乳量が低下した。大豆粕または DDGS の補給を行わずに要求量の 75% 量の飼料を給与した場合、泌乳期における体重減少がより大きかったが、産乳量は 85% 量のみを給与した場合と差がなかった。大豆粕を補給、あるいは要求量の 85% 量のみを給与した雌めん羊が生産した子めん羊では ADG (日増体量) が増加した。大豆粕あるいは DDGS の補給は、乳の乾物量、CP (粗たん白質)、灰分および乳糖率に影響を及ぼさなかったが、DDGS を補給すると、乳脂肪量が 15% 増加した。大豆粕を補給、あるいは要求量の 85% 量のみを給与した雌めん羊が生産した子めん羊では、DDGS を補給、あるいは要求量の 75% 量のみを給与した雌めん羊が生産した子めん羊に比べて、乳の栄養成分利用率が高かった。大豆粕を補給した雌めん羊の乾物および CP 消化率は、DDGS を補給した雌めん羊よりも優れた。

最近公表された報告 (Held、2006a) では、泌乳期のめん羊に対して給与するたん白質補給源として大豆粕の替りに DDGS を使用すると、母めん羊の BCS (ボディ・コンディション・スコア) と子めん羊の発育への影響は観察されていない。DDGS をトウモロコシの 2/3 (全飼料中の

25%) 置換して母めん羊に給与すると、三つ子の子めん羊の増体量は 12% 改善されたが、双子あるいは単子の発育への影響はなかった (Held、2006)。Ely ら (1991) および Held (2006a) が示した大豆粕と DDGS 補給による影響の差は、給与飼料の栄養価の差と、供試した DDGS の品質の差による可能性がある。

Radunz ら (2011) は、交雑種の妊娠期雌めん羊を冬季に飼育する際の給与形態 (粗飼料のみ、粗飼料+トウモロコシ制限給与 vs 粗飼料+DDGS 制限給与) の影響を検討した。分娩時の雌めん羊の体重は、DDGS を制限給与した場合に最も重く、粗飼料のみを給与した場合に最も軽かった。トウモロコシと DDGS を制限給与した雌めん羊の BCS は粗飼料のみを給与した雌めん羊よりも高く、DDGS を制限給与した雌めん羊の離乳時の BSC は、トウモロコシの制限給与および粗飼料のみ給与より高かった。出生時の子めん羊の体重は、雌めん羊にトウモロコシあるいは DDGS を制限給与した場合に比べ、粗飼料のみを給与した場合に重い傾向を示したが、離乳体重への影響はなかった。出生子めん羊の体組成、乳生産量、離乳までの子めん羊の増体率と育成率には、給与形態の影響はなかった。DDGS の制限給与により飼料費が削減されたが、分娩前の雌めん羊におけるケトーシスの発生率が高まった。次いで、彼らは、これらの給与形態で飼育した雌めん羊から生まれた離乳子めん羊をフィードロットで飼育した場合の発育成績、耐糖能および枝肉組成を評価した (Radunz ら、2011b)。その結果、妊娠中期から後期の雌めん羊に対する飼料の形態は、母体の血漿インスリン濃度に影響を与えた。DDGS を給与した雌めん羊が生産した子めん羊は、トウモロコシまたは粗飼料を給与した雌めん羊からの子めん羊に比べてインスリン反応が大きい傾向があった。このインスリン抵抗性の違いは、主に内部脂肪に影響を与える脂肪蓄積の変化

と関連していた。枝肉組成におけるこれらの変化は、実用上それほど重要ではないが、冬季の給与形態による母体の代謝の変化が産子の発育と体成分組成に長期的な影響を与える可能性があることを示している。

未去勢雄めん羊

発育期の未去勢雄めん羊に対して DDGS を給与する事例は増えているが、未去勢雄めん羊の繁殖性への影響を評価した成績が 1 報公表されている (Van Emon ら、2013)。DDGS をトウモロコシの一部と置換して 0、15 または 30% 配合した飼料を、サフォーク種 × ウェスタンホワイトフェイス種の未去勢雄めん羊 (体重 40 kg) に対して 116 日間給与した。その結果、DMI (乾物摂取量) と ADG は DDGS の配合割合の増加に伴って直線的に増加した。最終体重、陰囊周囲の変化、枝肉形質、血清テストステロン濃度、精子運動性スコアには影響がなかったが、精子の濃度は、DDGS の配合割合の増加に伴って直線的に低下した。この報告は、未去勢雄めん羊の繁殖成績への影響を評価した唯一の公表文献であるため、この結果を肯定または否定するためには、さらなる調査が必要である。

育成期～肥育期のめん羊

DDGS のたん白質とアミノ酸の利用性について育成期～肥育期のめん羊の発育成績を指標とした 2 つの調査の結果から、DDGS は優れたたん白質源であることが示されている。Waller ら (1980) は、代謝試験を行って、ルーメン内での分解性が遅いたん白質と、尿素を組合せて給与した場合の影響を調査している。尿素と DDGS を組合せて給与した場合、飼料の乾物または CP 消化率には大きな影響はなかった。Archibeque ら (2008) は、DDGS を給与すると、中程度の品質の粗飼料を摂取している育成期～肥育期のめん羊におけるアミノ酸栄養が改善されることを示している。Gutierrez ら (2009) は、育成期～肥育期のサフォーク種めん羊に対して、DDGS の配合割合が異なる (0、15 または 30%、乾物) 飼料を給与した。飼料摂取量は各飼料で類似していたが、DDGS を 30% 配合した飼料の ADG (221 g/日) は、0 および 15% 配合飼



料 (それぞれ 284 および 285 g/日) より劣っていた。この結果は、DDGS の推奨配合量が、Schauer ら (2008) が示している量よりはるかに低いことを示している。

McKeown ら (2010) は、トウモロコシ DDGS、小麦 DDGS またはライ麦 DDGS を、大麦およびナタネ粕と 20% 置換しても、育成期～肥育期のめん羊の DMI、増体率および育成率に影響を及ぼさないが、小麦 DDGS の給与は飼料効率を低下させ、ライ麦 DDGS の給与は体脂肪の脂肪酸組成を変化させたとしている。Felix ら (2012) は、DDGS を 0、20、40 または 60% 配合した飼料を育成期～肥育期のめん羊に給与し、DDGS は乾物摂取量に影響を及ぼさず、飼料の最大 60% (乾物) までの給与が可能だが、配合割合があまりにも高いと ADG を低下させる可能性があるとしている。彼らはまた、DDGS の配合量が高い場合にマーブリングスコアに影響を与え、温屠体重量を減少させる可能性があることも観察しており、DDGS の配合割合は乾物で 20% が最適であるとしている。これに対して、Van Emon ら (2011) は、育成期～肥育期のめん羊の発育成績、枝肉の品質や代謝産物の濃度に悪影響を及ぼさず、DDGS を乾物摂取量の最大 50% まで給与出来ることを示す結果を示している。同様に、O'Hara ら (2011) は、育成期～肥育期

のカナディアン・アルコット種めん羊に、低脂肪 DDGS および高脂肪 DDGS を大麦とナタネ粕の一部と置換して 20% 配合することで、ルーメン機能を健康に保ち、発育成績と枝肉形質を維持出来ると報告している。

Whitney and Braden(2010)は、DDGS を綿実粕と 0、33、66 または 100% 置換した飼料をランブイエ種の去勢めん羊に 84 日間自由摂取させ、DDGS の置換量は枝肉形質に影響は及ぼさなかったが、DDGS の増加に伴ってロース肉中の脂肪量が増加した。綿実粕のすべてを DDGS で置換すると、DDGS を配合しない場合より、調理ロスが少なく、ジューシーさが優れた。これらの結果は、肥育期のめん羊用飼料中の綿実粕の一部あるいはすべてを DDGS で置換することで、問題がない枝肉形質を保ち、肉の官能特性が高まる可能性があることを示している。

その後の研究で、Whitney ら(2014)は、91 日間の給与試験中に、DDGS を 40% 配合した飼料と乾草を増加させた飼料を育成期～肥育期のランブイエ種めん羊に 91 日間給与し、DDGS 主体の飼料は、ソルガムと綿実粕主体飼料に比べて飼育経費を削減できると報告している。

Huls ら(2006)は、大豆粕とトウモロコシの一部を DDGS で置換した肥育期用飼料を給与した場合の、発育成績、枝肉形質、アシドーシス、鼓張症、尿路結石の発症状況について、大豆皮を唯一の繊維源とした高穀類飼料と比較した。両飼料の CP 含量(14.6%)、ME 値(3.4 Mcal/kg)およびカルシウム:リン比(2:1)が同一とし、ペレット加工して給与した。その結果、ADG、DMI、飼料効率および枝肉形質には飼料間で差がなく、アシドーシス、鼓張症、尿路結石も発症しなかった。この結果は、DDGS は、大豆皮を唯一の繊維源とした肥育期のめん羊において、大豆粕およびトウモロコシの一部との置換することが可能であることを示している。

Sewell ら(2009)は、非加熱あるいは加熱処理された様々な作物残渣(麦ワラ、コーンストバー、スイッチグラス(イネ科キビ属の多年草)、トウモロコシ繊維、小麦殻)と DDGS の組合せについて評価を行い、これらの作物残渣の栄養成分消化率は加熱処理により改善され、加熱処理されたこれらの作物残渣と DDGS を組合せることにより、反すう家畜用飼料のトウモロコシの一部と置換

できることを示している。

McEachern ら(2009)により報告された結果は、肥育期のめん羊用飼料に配合されている綿実粕のすべてを DDGS で置換することが出来、増体率、飼料効率、羊毛の特性に悪影響を及ぼさずに、飼料費を節減できることを示している。Whitney and Lupton(2010)は、綿実殻が DDGS を 40% 含む肥育期のめん羊用飼料において優れた粗飼料源であることを示している。

Bárcena-Gama ら(2016)は、DDGS の配合の有無(0、15、30 または 45%)がクリオ口種めん羊(体重 29 kg)における DMI、乾物、NDF(中性デタージェント繊維)および ADF(酸性デタージェント繊維)の消化率、発育成績、枝肉組成に及ぼす影響を調査した。DDGS を 15% 配合した飼料の ADG は DDGS を含まない対照飼料より高かったが、DDGS を 45% 配合した飼料では乾物消化率が低下した。さらに、DDGS を配合した各飼料では、背脂肪厚に差はなく、枝肉重量と歩留が増加した。

同様に、育成期～肥育期の Wrzosówka 種めん羊(体重 16 kg)に、メドウ・ストローおよび乾草と、DDGS を 45% 配合した濃厚飼料、あるいは、大麦、小麦、大豆粕を配合した濃厚飼料を 60 日間給与した場合の枝肉の品質に関する調査が行われている(Kawęcka ら、2017)。濃厚飼料の違いは、枝肉の品質、赤肉割合、肉の化学的組成およびコレステロール含量に影響を及ぼさなかった。DDGS を配合した濃厚飼料を給与すると、筋肉内脂肪に含まれるリノール酸と CLA(共役リノール酸)の比率が高まった。この結果は、DDGS の給与がめん羊肉の官能特性、特に、味に有益な影響を与えることを示した他の報告と一致している。

15 章で詳述したように、DDGS には様々な濃度のイオウが含まれており、反すう家畜用において DMI の減少、ルーメン pH の低下、PEM(灰白脳軟化症)を発症させる可能性がある。イオウが誘引する PEM は、ルーメン微生物による硫酸塩から硫化物への還元と、 S^2 から硫化水素ガスへのプロトン化を伴う。ルーメン内で硫化水素濃度が高まると、イオウが誘引する PEM の発症リスクが増加する。Felix ら(2014)は、DDGS に由来するイオウが Na_2SO_4 (硫酸ナトリウム)または H_2SO_4 (硫酸)由来のイオ

ウよりも容易に還元されることを示している。最近のいくつかの研究では、DDGS を多く含む飼料のイオウがルーメンの特性、発育成績、潜在的な緩和戦略に及ぼす影響を評価している。

Schauer ら(2008)は、ランブイエ種の去勢および雌めん羊(31.7 kg BW)240 頭に、アルファルファ乾草、大豆粕、大麦および微量ミネラルサプリメントからなる飼料と、この飼料中の大麦と大豆粕の一部を置換することにより DDGS を 20、40 および 60%配合した飼料を 111 日間自由摂取させた。給与飼料中のイオウ含量は、DDGS 飼料 0、20、40 および 60%飼料で、それぞれ 0.22、0.32、0.47 および 0.55%であり、PEM 予防のために、すべての飼料群に対してチアミンを 142 mg/日(乾物)の割合で補給した。その結果、終了時体重、ADG、飼料効率、育成率、温屠体重量、肢蹄スコア、枝肉形質スコア、体脂肪厚、肉厚、ロース芯面積、肉の品質、枝肉歩留には、DDGS の配合量の増加に伴う影響はなかった。飼料摂取量は DDGS の配合量の増加に伴って直線的に増加した。これらの結果は、DDGS を多く配合した飼料を給与すると、枝肉の特性に悪影響を及ぼさずに許容可能なめん羊の発育成績をもたらすことを示唆している。

Morrow ら(2013)は、飼料の酸度を調整するために NaOH を添加(2%)あるいは無添加の DDGS 60%飼料(総イオウ含量:0.60%)およびイオウ含量が同一となるまで数水準の Na_2SO_4 を添加した飼料を育成期~肥育期のめん羊に給与した。NaOH を 2%添加した DDGS 60%配合飼料を給与すると、DFI、ADG および終了時体重が改善され、NDF 消化率が低下したが、飼料効率は NaOH 無添加の DDGS 60%配合飼料と差がなかった。飼料には影響がありませんでした。NaOH を添加した Na_2SO_4 添加飼料では、DFI が増加する傾向を示したが、ADG、飼料効率および終了時体重には影響がなかった。ルーメン内の硫化水素濃度には、飼料のイオウまたは NaOH 添加の影響はなかった。

Crane ら(2017)は、サフォーク種×ランブイエ種のめん羊(体重 32 kg)に、ラサロシド無添加あるいは 22g/トン添加した DDGS 0、15 または 30%配合飼料を給与し、発育成績とルーメン内の硫化水素生産への影響を調査

した。その結果、DDGS の配合量の増加に伴ってルーメン内の硫化水素濃度が増加し、DFI とルーメン内の揮発性脂肪酸濃度が直線的に減少したが、飼料効率は直線的に高まった。DDGS を配合した飼料にラサロシドを添加することで、めん羊の罹患率や死亡率に影響を与えることなく発育成績が改善された。

Neville ら(2010)は、DDGS を 60%配合したイオウ含量が 2 水準(0.73 および 0.87%、乾物)の肥育期用飼料へのチアミンの補給が PEM の発症に及ぼす影響を調査するために、2 回の試験を行った。飼料へのチアミンの補給量は無添加、50、100 および 150 mg/日とした。その結果は表 1 に示したとおりであり、PEM はほとんど発生せず、多くの枝肉形質にもチアミン補給による影響はなかった。DDGS を 60%配合した飼料を給与しても、ほとんどの枝肉特性には影響はなく、2 回目の試験では発育成績への影響もなかったが、1 回目の試験では、チアミンの補給量の増加に伴い DMI が二次曲線的に増加した。この研究では、イオウ含量が高い DDGS の配合量が多い飼料を給与している場合でも、PEM を防止するためのチアミンの補給は必要なかった。

肉用種ヤギ

肉用種ヤギにおける DDGS の使用を評価した公表文献はほとんどないが、めん羊および肉用牛に対する高い量の DDGS 配合割合の給与に関する報告で得られている多くの肯定的な結果は、DDGS を肉用種ヤギにおける反応にも適用できると思われる。Gurung ら(2009)は、発育成績と枝肉形質への影響を評価するために、DDGS を 0、10.3、20.6 および 31%(乾物)含む濃厚飼料 51.6%と、乾草 48.4%をキコ種×スパニッシュ種のヤギ(体重 29 kg)に 57 日間給与した。その結果、開始時及び終了時体重、DFI、ADG および飼料効率には濃厚飼料への DDGS の配合割合の増加に伴う傾向はなかった。さらに、血漿尿素窒素、枝肉歩留、ロース芯面積および体脂肪厚にも DDGS 配合量の影響はなかったが、DDGS 配合量の増加と対応して血清コレステロール濃度が直線的に増加した。これらの結果は、DFI、ADG、飼料効率およ

表 1. DDGS 60%DDGS 配合飼料を給与した子ヒツジの発育成績および枝肉形質に及ぼすチアミン添加の影響 (Neville ら、2010 から改編)

	対照	低チアミン	中チアミン	高チアミン
開始時体重 kg	32.6	32.6	32.5	32.6
終了時体重 kg	62.3	62.8	62.5	60.5
日増体量 g	0.268	0.274	0.272	0.253
乾物摂取量 g/日	1.77	1.78	1.98	1.74
飼料効率	0.15	0.15	0.14	0.15
育成率 %	1.67	0	0	0
温屠体重量 kg	31.4	32.1	31.7	30.9
蹄冠スコア ¹	11.3	11.5	11.6	11.1
飛節スコア ¹	11.5	11.4	11.6	11.2
体脂肪厚 cm	0.79	0.86	0.76	0.84
肉厚 cm	2.72	2.99	2.54	2.67
ロース芯面積 cm ²	15.6	15.5	15.7	15.7
バラ肉脂肪の筋 ²	337	340	353	336
肉質等級 ¹	11.3	11.3	11.5	11.2
歩留等級	3.5	3.8	3.4	3.7
枝肉歩留 %	44.7	44.3	45.0	46.8

¹ 1：最低～15：高品質

² 100 to 199：ほとんどない、200 to 299 = 痕跡、300 to 399：わずかにある、400 to 499：少ない、500 to 599：中程度

表 2. DDGS の配合量の増加がキコ種×スパニッシュ種雄ヤギの発育成績と枝肉形質に及ぼす影響 (Gurung ら、2009 から改編)

	DDGS 0%	DDGS 10.3%	DDGS 20.6%	DDGS 31.0%
開始時体重 kg	28	30	28	30
終了時体重 kg	39	40	36	38
日増体量 g	141	134	115	117
乾物摂取量 g/日	1,017	1,138	1,106	1,003
濃厚飼料摂取量 g/日	519	591	575	520
乾草摂取量 g/日	499	547	531	483
飼料効率	0.12	0.12	0.11	0.12
枝肉歩留 %	44.6	45.1	44.7	42.2
ロース芯面積 cm ²	9.75	10.25	9.50	9.00
体脂肪厚 cm	0.94	1.09	0.91	0.97

び枝肉の品質に影響を及ぼすことなく、最大 31%の DDGS を肉用種ヤギ用の飼料に配合出来ることを示唆している。

ごく最近の研究では、Camareno ら (2016) は、キコ種の去勢ヤギに対して、バミューダグラス乾草と、低脂肪 DDGS を 0、10、20 または 30% 配合した濃厚飼料を 1:1

の割合で 84 日間給与した場合の皮下脂肪組織への影響を調査した。その結果、低脂肪 DDGS を給与しても脂肪組織の総脂肪酸含量には影響を及ぼさなかったが、DDGS を 30% 配合した場合には、皮下脂肪の不飽和脂肪酸含量が増加した。

乳用種ヤギ

肉用種ヤギにおける DDGS の研究報告と同様に、乳用種ヤギへの DDGS の多量給与の影響を評価した報告は 1 報しか公表されていない。Williams ら(2017)は、泌乳後期の乳用種ヤギに対して、トウモロコシと大豆粕と置換することにより DDGS を 59%配合した濃厚飼料と、イースタンガマグラス乾草 (*Tripsacum dactyloides*) を 14 日間乳用種ヤギに給与した。その結果、DDGS を配合した濃厚飼料を給与しても、DMI、血漿グルコース、遊離脂肪酸および乳成分組成には影響がなかったが、血漿尿素窒素濃度が高まった。この結果から、かれらは、濃厚飼料中のトウモロコシと大豆粕と置換することにより DDGS を 59%配合しても、泌乳後期のヤギの DFI と乳成分組成に悪影響を及ぼさないと結論付けている。

結論

DDGS は、妊娠期および泌乳期の雌めん羊、未去勢雄めん羊および育成期～肥育期の去勢、雌めん羊において、飼料のトウモロコシと大豆粕の一部を置換出来る優れたたん白質およびエネルギー源である。DDGS は、トウモロコシと大豆粕に比べて繊維含量が高いため、高穀類飼料を給与した際の育成期～肥育期めん羊におけるアシドーシスを防ぐためにも有効である。イオウ含量が中程度から高濃度の DDGS を用いる場合、PEM の発症を回避するために、イオウ含量を監視して飼育管理する必要がある。しかし、いくつかの報告は、飼料中のイオウ含量が比較的高い場合でも、PEM を引き起こさずに飼育出来ることを示唆しており、チアミンの補給は必要ない可能性がある。いくつかの報告の結果は、発育成績への応答の違いが、供試した DDGS の栄養価に関して不正確な情報を用いている可能性があることを示唆している。控えめに言って、DDGS を育成期～肥育期のめん羊用飼料に 20%、泌乳期の雌めん羊用飼料に 25%配合することで、良好な成績を得ることが出来るが、いくつかの報告では、配合量が最大 60%であっても、許容可能な発育成績が得られることが示されている。DDGS を肉用種ヤギに給与した数少ない報告では、DMI、ADG、飼料効率および枝肉の品質には影響を及ぼすことなく、最

大 31%の DDGS を給与することが出来、乳用種ヤギに対しては、トウモロコシおよび大豆粕と置換して 59%給与しても DFI や乳成分組成には悪影響を及ぼさない。

引用文献

- Archibeque, S.L., H.C. Freetly, and C.L. Ferrell. 2008. Feeding distillers grains supplements to improve amino acid nutriture of lambs consuming moderate-quality forages. *J. Anim. Sci.* 86:691–701.
- Bárcena-Gama, J.R., K.R. Curzaynz-Leyva, C. Sánchez del Real, J.C. Escobar-España, M.I. Rivas-Martínez, E.A. Santillán-Gómez, and S.S. Gonzalez-Muñoz. 2016. Effect of dried distillers grains on diet digestibility, body weight gain, and carcass composition of lambs. *J. Anim. Sci.* 94(E-Suppl. 5):828 (abstr.).
- Camareno, K.C., A.T. Sukumaran, J. Scott, N. Gurung, T.T.N. Dinh, and D.D. Burnett. 2016. Effects of feeding varying levels of deoiled distillers dried grains with solubles on fatty acid composition of subcutaneous adipose tissue in meat goats. *J. Anim. Sci.* 94(E-Suppl. 5):825 (abstr.).
- Crane, A.R., R.R. Redden, K.C. Swanson, B.M. Howard, T.J. Frick, K.R. Maddock-Carlin, and C.S. Schauer. 2017. Effects of dried distiller's grains and lasalocid inclusion on feedlot lamb growth, carcass traits, nutrient digestibility, ruminal fluid volatile fatty acid concentrations, and ruminal hydrogen sulfide concentration. *J. Anim. Sci.* 95:3198–3205.
- Ely, D.G., K.K. Ragland, K.N. McCann, D.K. Aaron, and W.P. Deweese. 1991. Comparison of lactating ewe diets supplemented with soybean meal or distillers dried grains with solubles. *Sheep Research J.* 7:33–38.
- Felix, T.L., C.J. Long, S.A. Metzger, and K.M. Daniels. 2014. Adaptation to various sources of dietary sulfur by ruminants. *J. Anim. Sci.* 92:2503–2510.
- Felix, T.L., H.N. Zerby, S.J. Moeller, and S.C. Loerch. 2012. Effects of increasing dried distillers grains with soluble on performance, carcass characteristics, and digestibility of feedlot lambs. *J. Anim. Sci.* 90:1356–1363.

- Gurung, N.K., S.G. Solaiman, D.L. Rankins, and W.H. McElhenney. 2009. Effects of distillers dried grains with solubles on feed intake, growth performance, gain efficiency and carcass quality of growing Kiko × Spanish male goats. *J. Anim. Vet. Adv.* 8:2087–2093.
- Gutierrez Z.A., J.R. Orozco Hernandez, I.J. Ruiz Garci, and J.J Olmos Colmenero. 2009. Effect of level of spent corn from the ethanol industry and lamb sex on performance. *J. Anim. Vet. Adv. Medwell Online, Faisalabad, Pakistan*: 8:595–597.
- Held, J. 2006a. Feeding soy hulls and dried distillers grain with soluble to sheep. *Extension Extra, ExEx 2052*. South Dakota State University, p. 1–2.
- Held, J. 2006b. Using DDGS in mixed lamb diets. *Extension Extra, ExEx 2053*. South Dakota State University, p. 1–2.
- Huls, T.J., A.J. Bartosh, J.A. Daniel, R.D. Zelinsky, J. Held, and A.E. Wertz–Lutz. 2006. Efcacy of dried distiller’s grains with solubles as a replacement for soybean meal and a portion of the corn in a finishing lamb diet. *Sheep and Goat Research J.* 21:30–34.
- Kaw cka, A., E. Sosin–Bzducha, M. Puchała, and J. Sikora. 2017. Effect of maize DDGS addition on carcass and meat quality of lambs of native sheep breed. *J. Appl. Anim. Res.* doi: 10.1080/09712119.2017.1299014.
- McEachern, J.K., T.R. Whitney, C.B. Scott, C.J. Lupton, and M.W. Salisbury. 2009. Substituting distillers dried grains for cottonseed meal in lamb–finishing diets: growth, wool characteristics, and serum NEFA, urea N, and IGF–1 concentrations. *Sheep and Goat Res. J.* 24:32–40.
- McKeown, L.E., A.V. Chaves, M. Oba, M.E.R. Dugan, E. Okine, and T.A. McAllister. 2010. Effects of corn-, wheat- or triticale dry distiller’s grains with soluble on in vitro fermentation, growth performance and carcass traits of lambs. *Can. J. Anim. Sci.* 90:99–108.
- Morrow, L.A., T.L. Felix, F.L. Fluharty, K.M. Daniels, and S.C. Loerch. 2013. Effects of sulfur and acidity on performance and digestibility in feedlot lambs fed dried distillers grains with solubles. *J. Anim. Sci.* 91:2211–2218.
- Nevile, B.W., C.S. Schauer, K. Karges, M.L. Gibson, M.M. Thompson, L.A. Kirschten, N.W. Dyer, P.T. Berg, and G.P. Lardy. 2010. Effect of thiamine concentration on animal health, feedlot performance, carcass characteristics, and ruminal hydrogen sulfide concentrations in lambs fed diets based on 60 percent distillers dried grains with solubles. *J. Anim. Sci.* 88:2444–2455.
- O’ Hara, A.S., A. Tanner, T.A. McAllister, D.J. Gibb, F. van Herk, and A.V. Chaves. 2011. Effect of low and high oil corn distillers’ grain on rumen fermentation, growth performance and carcass characteristics of lambs. *Anim. Prod. Sci.* 51:708–716.
- Radunz, A.E., F.L. Fluharty, H.N. Zerby, and S.C. Loerch. 2011a. Winter–feeding systems for gestating sheep I. Effects on pre- and postpartum wew performance and lamb progeny preweaning performance. *J. Anim. Sci.* 89:467–477.
- Radunz, A.E., F.L. Fluharty, I. Susin, T.L. Felix, H.N. Zerby, and S.C. Loerch. 2011b. Winter–feeding systems for gestating sheep II. Effects on feedlot performance, glucose tolerance, and carcass composition of lamb progeny. *J. Anim. Sci.* 89:478–488.
- Schauer, C.S., M.M. Stamm, T.D. Maddock, and P.B. Berg. 2008. Feeding of DDGS in lamb rations – feeding dried distillers grains with solubles as 60 percent of lamb – nishing rations results in acceptable performance and carcass quality. *Sheep and Goat Res. J.* 23:15–19.
- Sewell, J.R., L.L. Berger, T.G. Nash, M.J. Cecava, P.H. Doane, J.L. Dunn, M.K. Dyer, and N.A. Pyatt. 2009. Nutrient digestion and performance by lambs and steers fed thermochemically treated crop residues. *J. Anim. Sci.* 87:1024–1033.
- Van Emon, M.L., K.A. Vonnahme, P.T. Berg, R.R. Redden, M.M. Thompson, J.D. Kirsch, and C.S. Schauer. 2013. In–uence of level of dried distillers grains with solubles

- on feedlot performance, carcass characteristics, serum testosterone concentrations, and spermatozoa motility and concentration in growing rams. *J. Anim. Sci.* 91:5821–5828.
- Van Emon, M.L., P.J. Gunn, M.K. Neary, R.P. Lemenager, A.F. Schultz, and S.L. Lake. 2011. Effects of added protein and dietary fat on lamb performance and carcass characteristics when fed differing levels of dried distiller's grains with solubles. *Small Ruminant Res.* doi:10.1016/j.smallrumres.2011.09.002.
- Waller J, T. Klopfenstein, and M. Poos. 1980. Distillers feeds as protein sources for growing ruminants. *J. Anim. Sci.* 51:1154–1167.
- Whitney, T.R., C.J. Lupton, J.P. Muir, R.P. Adams, and W.C. Stewart. 2014. Effects of using ground redberry juniper and dried distillers grains with solubles in lamb feedlot diets: Growth, blood serum, fecal, and wool characteristics. *J. Anim. Sci.* 92:1119–1132.
- Whitney, T.R., and K.W. Braden. 2010. Substituting corn dried distillers grains for cottonseed meal in lamb – finishing diets: carcass characteristics, meat fatty acid profiles, and sensory panel traits. *Sheep and Goat Research J.* 25:49–56.
- Whitney, T.R., and C.J. Lupton. 2010. Evaluating percentage of roughage in lamb finishing diets containing 40 percent dried distillers grains: Growth, serum urea nitrogen, nonesterified fatty acids, and insulin growth factor–1 concentrations and wool, carcass, and fatty acid characteristics. *J. Anim. Sci.* 88:3030–3040.
- Williams, T.L., B. Kouakou, and J.H. Lee. 2017. Effects of replacing corn and soybean meal with dried distillers grains with solubles on blood metabolites, milk composition and fatty acid profile of dairy goats consuming eastern gamagrass hay during late lactation. *J. Anim. Sci.* doi: 10.2527/ssasas2017.098 (abstr).

25 章:ウマ、ウサギおよびイヌ用飼料における DDGS

はじめに

ウマ、ウサギおよびイヌ用飼料原料として DDGS を評価した報告は非常に少ない。しかし、米国産 DDGS は供給量が多く、高品質で、比較的安価で、多くの場合にはマイコトキシンのリスクが低いことから、ウマ、ウサギおよびイヌ用飼料で多量に利用される可能性が高まっている。残念ながら、これらの動物種に対して低脂肪 DDGS を給与した最近の報告はない。

ウマ

ドイツの研究者は、醸造副産物の DE(可消化エネルギー)価は 11.5~14.2 MJ/kg (2,747~3,392 kcal/kg) (乾物)であると推定している(DLG, 1995)。DDGS は粗脂肪含量が比較的高いため、乗馬用のウマにおいて重要なエネルギー源になり得る(DLG, 1995; Orme ら, 1997)。ウマにおける DDGS の GE(総エネルギー)、乾物および栄養成分の消化率を測定した 4 報が公表されており、その結果を表 1 にとりまとめた。

Leonard ら(1975)は、成馬における DDGS の GE、乾物および CP(粗たん白質)の消化率を測定するために 2 試験を実施し、DDGS の配合量を 18%まで高めてもこれらの消化率には影響がないことを示している。しかし、2 試験間で、CP 消化率への反応は異なっており、去勢馬を用いた試験では DDGS の配合量の増加に伴って CP 消化率が低下したが、成馬を用いた試験では DDGS の配合量の増加に伴って CP 消化率が高まった。しかし、Pagan and Jackson(1991)の報告では、0、5、10 または 20%の DDGS を配合したペレット飼料を給与した場合の乾物および CP 消化率は、Leonard(1975)らの報告よりはるかに高く、DDGS 配合量の違いによる影響もなかった。Bonoma ら(2008 年)は、アルファルファと、トウモロコシおよび大豆粕を含む濃厚飼料、または濃厚飼料中の



トウモロコシおよび大豆粕と置換することにより DDGS を 30%配合した濃厚飼料(いずれもペレット飼料)を 1:1 の割合で離乳馬に給与した。その結果、DDGS を含む濃厚飼料を給与した場合に、乾物と CP 消化率が大幅に低下した。Frape(1998)は、DDGS は CP 含量が高く、その消化率も比較的高いことから、DDGS がウマ用飼料中の大豆粕または脱脂粉乳の部分的な代替品として有効であることを示している。一般的に、DDGS を離乳馬に給与する場合を除き、最大 20%の DDGS は、乾物と CP 消化率に悪影響を及ぼすことなく、成馬用飼料で有効に使用できる。これらの結果は、DDGS がウマにおいて消化性が高いエネルギー源であることを示唆している。

ウマは DDGS の栄養成分を有効に利用出来るが、嗜好性は DDGS の利用を制限する潜在的な因子の一つとなる可能性がある。ウマは、新しい飼料原料が含まれている飼料に対して非常に敏感である。このため、Pagan and Jackson(1991)は、DDGS を 0、5、10 または 20%配合したペレット飼料に対する 6 日間の嗜好性試験を 2 回実施した。その結果、DDGS を 10%まで配合した飼料では嗜好性に差がなかったが、20%配合した飼料では嗜好性が高まった。この結果は、DDGS がウマの嗜好性に影響を及ぼすことなく、最大 20%含むペレット飼料を有効に使用できることを示唆している。

表 1. DDGS を含むウマ用飼料の GE(総エネルギー)、乾物および CP(粗たん白)消化率

年齢	DDGS %	GE消化率 %	乾物消化率 %	CP消化率 %	引用文献
成馬 (去勢、400kg)	0	43.8	44.1	60.0	Leonard et al. (1975)
	5	40.7	40.1	56.8	
	10	41.8	41.4	54.7	
成馬 (460kg)	0	44.7	43.0	35.6	Leonard et al. (1975)
	9.1	43.2	42.1	44.7	
	18.2	38.9	41.5	49.9	
離乳馬 (276kg)	0	-	67.2	64.1	Bonoma et al. (2008)
	15	-	51.1	51.5	
様々な年齢の馬	0	-	58.9	69.8	Pagen and Jackson (1991)
	5	-	57.7	68.3	
	10	-	57.7	67.6	
	20	-	58.7	67.0	

Hill (2002) は、小麦 DDGS と濃厚飼料を、1:0、0.75:0.25、0.50:0.50 および 0:1 (乾物比) で給与した場合のウマの摂食行動と飼料摂取状況を調査した。小麦 DDGS と濃厚飼料が 0.75:0.25 として、飼料の浸漬処理を行わない場合、飼料摂取率と乾物 1 kgあたりの咀嚼回数大幅に減少した。飼料を浸漬処理した場合、小麦 DDGS を 0.75:0.25 の割合で給与すると、摂取回数が増加した。しかし、小麦 DDGS と濃厚飼料の割合が 0.50:0.50 までの場合は飼料消費量への影響はなかった。これらの結果から、Hill (2002) は、小麦 DDGS は、飼料の給与方法により影響を受けるものの、他のエネルギーおよびたん白質原料の代替として使用できると結論付けている。濃厚飼料を浸漬処理すると、濃厚飼料に配合できる DDGS の量が低下する。

DDGS を含む飼料が離乳馬の発育成績に及ぼす影響を調査した報告が 1 報公表されている (Bonoma ら、2008)。この報告によると、アルファルファと、トウモロコシと大豆粕、あるいは DDGS を 30% 配合した濃厚飼料を 1:1 で給与した場合、増体率と飼料効率には差がなかった。しかし、DDGS を配合した濃厚飼料を給与すると、乾物、CP、ADF (酸性デタージェント繊維)、NDF (中性デタージェント繊維) の消化率が低下した。したがって、離乳馬において、アルファルファを粗飼料源とし、その給与量が全飼料の 50% を占める場合、濃縮飼料への DDGS の

配合量は 30% 未満 (全給与飼料の 15% 未満) とする必要がある。アルファルファよりも低品質の粗飼料を用いる場合は、濃厚飼料中の DDGS の配合割合をより少なくすることが望まれる

ウサギ

ウサギに対する DDGS の飼料価値に関する研究はほとんど行われていないが、Villamide ら (1989) により、ニュージーランド・ホワイト×カリフォルニア種の交雑種における小麦ふすま、CGF (コーングルテンフィード) および DDGS の栄養成分消化率の測定が行われている。GE 含量が低く (2200 kcal/kg、乾物)、DCP (可消化粗たん白質) 含量あたりの DE 価が高い (25 kcal DE/g) 飼料を基礎飼料として用いた。飼料の繊維含量は同一とした。GE と ADF の消化率は、小麦ふすまを含む飼料 (59.4 および 9.6%) と比べて、DDGS を含む飼料では 74.0 および 58.3%、CGF では 65.0 および 27.7% だった。さらに、DDGS を含む飼料の CP 消化率は 70.1% であり、小麦フスマあるいは CGM を含む飼料 (66.6 および 61.4%) より高かった。これらの結果は、DDGS がウサギに適した飼料原料であり、小麦ふすまや CGM よりエネルギー、ADF および CP を消化しやすいことを示している。



Villamide and Fraga (1998) は、粗飼料(26 試料)、DDGS を含む穀類および穀類副産物(29 試料)、たん白濃縮物(18 試料)、動物副生物(22 試料)の成分組成からウサギにおける DCP を推定する予測式を開発している。CP 含量と ADF 含量は、穀類および穀類副産物の DCP の最良の予測変数であり、予測式は以下のとおりであった。

$$\text{DCP \%} = -10.856 + 0.628 \times \text{CP \%} + 0.224 \times \text{ADF \%}$$

最近、Alagón ら(2016)は、スペインのバイオエタノール工場で生産された大麦、トウモロコシおよび小麦由来の DDGS とブラジル産トウモロコシ DDGS について、成長期のウサギにおける栄養価を測定した(表 2)。大麦 DDGS は、トウモロコシ DDGS および小麦 DDGS よりも乾物および粗脂肪の消化率が低く、GE 消化率がスペイン産トウモロコシ DDGS および小麦 DDGS より低かった。そのため、トウモロコシ DDGS と小麦 DDGS の DE 価は類似していたが、大麦 DDGS の DE 価は前二者より低かった。さらに、大麦 DDGS の DCP は、ブラジル産トウモロコシ DDGS および小麦 DDGS より低かった。米国産トウモロコシ DDGS がこの研究で評価された試料とどのように比較できるのかは不明であるが、これらの結果は、トウモロコシ DDGS を成長期のウサギの飼料原料として使用した場合、かなりの DE 価と DCP を提供できることを示している。

イヌ

エクストルード加工されたイヌ用のドライフードへの DDGS の利用に関する報告はそれほど多くない。イリノイ大学において、初期に行われた研究(Allen ら、1981)では、ポインターの成犬および成長期の子犬における DDGS を含む飼料の栄養成分消化率が測定されている。成犬の場合、DDGS 配合量が少ない(4~8%)飼料では乾物およびでん粉の見かけの消化率には影響がなかった。DDGS 配合量が中程度(16.1%)の飼料では、乾物消化率が低下したが、でん粉とエネルギー消化率には影響がなかった。DDGS 配合量が高い(26.1%)飼料では乾物およびエネルギー消化率が低下したが、CP 消化率への影響はなかった。子犬の場合、DDGS 配合量が中程度(14.1%)の飼料では乾物およびエネルギー消化率が低下したが、DDGS を含まない飼料に比べて ADF 消化率が高かった。飼料に DDGS を配合すると、窒素摂取量と糞中窒素が減少したが、尿中窒素には影響がなく、窒素の吸収量、蓄積量、全排泄量にも影響はなかった。

Corbin(1984)が行ったその後の研究では、成長期の子イヌに対して DDGS を 10%配合した飼料を 10 週間給与しても、飼料摂取量、増体量、飼料効率、試験終了時

表 2. 様々な DDGS の成長期のウサギにおける乾物、CP(粗たん白質)、粗脂肪および GE(総エネルギー)の見かけの消化率と、DE(可消化エネルギー)価および DCP(可消化粗たん白質)(Alagón ら、2016)

項目	大麦DDGS	トウモロコシDDGS (スペイン)	トウモロコシDDGS (ブラジル)	小麦DDGS
乾物 %	64.7 ^b	72.2 ^{ab}	68.4 ^{ab}	75.4 ^a
CP %	63.5	65.6	70.4	74.8
粗脂肪 %	76.7 ^a	92.1 ^b	94.5 ^b	91.5 ^b
GE %	58.2 ^c	71.8 ^{ab}	65.3 ^{ab}	75.0 ^a
DE価 MJ/kg (乾物)	11.87 ^a	15.89 ^b	14.72 ^b	15.69 ^b
DCP g/kg (乾物)	168 ^a	195 ^{ab}	221 ^b	263 ^c

a-b異符号間で有意差あり (p < 0.05)

表 3. DDGS を 0、6、12 または 18 パーセント含む飼料のイヌにおける乾物、CP(粗タンパク質)、AHEE(酸分解粗脂肪)、有機物および GE(総エネルギー)の全消化管消化率、推定 ME(代謝エネルギー)価と糞中乾物量へのキシラナーゼ添加の影響(Silva ら、2016 から改編)

項目	DDGS 0%		DDGS 6%		DDGS 12%		DDGS 18%	
	無添加	添加	無添加	添加	無添加	添加	無添加	添加
乾物 %	85.1	85.8	84.1	85.2	81.5	82.6	80.6	83.2
CP %	87.6	88.3	87.3	88.3	85.6	87.8	85.1	87.3
AHEE %	93.0	93.2	92.7	92.8	89.6	90.7	90.0	91.3
有機物 %	88.5 ^a	88.5 ^a	88.5 ^a	88.0 ^b	85.0 ^b	87.0 ^b	83.1 ^b	85.6 ^b
GE %	89.6	89.6	89.2	88.3	85.7	87.3	83.6	85.5
ME価 MJ/kg	19.55	19.78	19.14	19.41	18.98	18.54	18.89	18.67
糞中乾物量 g/kg	395	392	363	362	352	352	347	353

a-b異符号間で有意差あり (p < 0.05)

表 4. ウマ、ウサギおよびイヌ用飼料における DDGS の推奨最大配合割合

動物種	DDGSの最大配合量
成馬	最大20%
離乳馬	粗飼料の品質に応じて最大15%
ウサギ	最大20%
成長期の子犬	最大10%
成犬	年齢と活動量に応じて最大25%

の体重には影響がないことが示されている。DDGS は繊維含有量が高いため、高齢の成犬用飼料に配合すると体重増加を抑制するのに有効である。Weigel ら(1997)は、成犬用飼料において、腸管の健康状態を健全に保つために、年齢と活動量に応じて、DDGS を最大 25%まで配合出来るとしている。

最近では、de Godoy ら(2009)は、DDGS と他の新しいトウモロコシ併産物の犬用飼料原料としての利用性を評価し、それらがイヌにおいて一般的に使用されているたん白源および繊維源に匹敵する栄養特性を持っていると報告している。Silva ら(2016)は、DDGS の配合量を段階的に高めた飼料へのキシラナーゼの添加が、乾物、CP、AHEE(酸加水粗脂肪)、有機物および GE 消化率に及ぼす影響を調査した(表 3)。DDGS の配合量を最大 18%まで高めると、エネルギーおよび各栄養成分の消化率と DE 価がわずかに減少したが、キシラナーゼの添加により乾物、CP および有機物の消化率が改善された。また、DDGS を 18%配合した飼料では嗜好性が向上した。

結論

現在入手が出来る公表文献によると、DDGS はウマ、ウサギおよびイヌ用の飼料原料として非常に適しているようである。現在の推奨配合量は表 4 に示したとおりである。

引用文献

- Alagón, G., O.N. Arce, E. Martínez-Paredes, L. Ródenas, V.J. Moya, E. Blas, C. Cervera, and J.J. Pascual. 2016. Nutritive value of distillers dried grains with solubles from barley, corn and wheat for growing rabbits. *Anim. Feed Sci. Technol.* 222:217-226.
- Allen, S.E., G.C. Fahey, Jr., J.E. Corbin, J.L. Pugh, and R.A. Franklin. 1981. Evaluation of byproduct feedstuffs as dietary ingredients for dogs. *J. Anim. Sci.* 53:1538-1544.
- Bonoma, T.A., A.C. Brogren, K.H. Kline, and K.M. Doyle. 2008. Effects of feeding distiller's dried grains with solubles on growth and feed efficiency of weanling horses. *J. Equine Vet Sci.* 28:12, 725-727.

- Corbin, J. 1984. Distiller's dried grains with solubles for growing puppies. *Distillers Feed Conference*. 39:28–33.
- de Godoy, M.R.C., L.L. Bauer, C.M. Parsons, and G.C. Fahey Jr. 2009. Select corn coproducts from the ethanol industry and their potential as ingredients in pet foods. *J. Anim. Sci.* 87:189–199.
- Deutsche Landwirtschafts Gesellschaft, DLG. 1995. *Futtewettabellen – Ppferde*. 3. Ausgabe DLG, Frankfurt am Main, Germany.
- Frape, D. 1998. *Equine Nutrition and Feeding*. Blackwell Science, London.
- Hill, J. 2002. Effect of level of inclusion and method of presentation of a single distillery by-product on the processes of ingestion of concentrate feeds by horses. *Livest Prod Sci.* 75:209–218.
- Leonard, T.M., J.P. Baker, and J. Willard. 1975. Influence of distiller's feeds on digestion in the equine. *J. Anim. Sci.* 40:1086–1092.
- Orme, C.E., R.C. Harris, D. Marlin, and J. Hurley. 1997. Metabolic adaptation to a fat supplemented diet by the thoroughbred horse. *Brit. J. Nutr.* 78:443–455.
- Pagan, J.D., and S.G. Jackson. 1991. Distiller's dried grains as an ingredient for horse rations: A palatability and digestibility study. *Distillers Feed Conference*. 46:83–86.
- Silva, J.R., T.T. Sabchuk, D.C. Lima, A.P. Félix, A. Maiorka, and S.G. Oliveira. 2016. Use of distillers dried grains with solubles (DDGS), with and without xylanase, in dog food. *Anim. Feed Sci. Technol.* 220:136–142.
- Villamide, M.J., and M.J. Fraga. 1998. Prediction of the digestible crude protein and protein digestibility of feed ingredients for rabbits from chemical analysis. *Anim. Feed Sci. Technol.* 70:211–224.
- Villamide, M.J., J.C. de Blas, and R. Carabano. 1989. Nutritive value of cereal by-products for rabbits. 2. Wheat bran, corn gluten feed and dried distiller's grains and solubles. *J. Appl. Rabbit Res.* 12:152–155.
- Weigel, J.C., D. Loy, and L. Kilmer. 1997. *Feeding co-products of the dry corn milling process*. Renewable Fuels Association and National Corn Growers Association. Washington, D.C. and St. Louis, MO p. 8.

26 章: DDGS の評価に対する配合設計の影響

はじめに

本ハンドブックの多くの章で説明しているように、飼料への配合量を最も多くし、飼料費を最小化し、最適な家畜の飼育成績を得るための栄養的および経済的価値が最も大きい DDGS を特定するための最も重要な要因の一つは、入手した DDGS の正確なエネルギー価と可消化栄養成分含量を把握することである。DDGS またはその他の飼料原料のエネルギー価と可消化栄養成分含量を過大に見積もった場合には飼育成績が低下する可能性があり、DDGS の配合量を高めた場合には、発生する可能性がより高くなるため、精密な家畜栄養プログラムには不可欠である。対照的に、DDGS の栄養成分含量を過少評価した場合には、要求量以上の過剰な栄養成分を給与することになり、経済的な価値が過少評価され、栄養成分の排泄量が増加する可能性がある。

DDGS を用いて、精密栄養給餌を行う際に重要なもう一つの要因は、利用可能な最も精度が高い指標を用いて配合設計することである。この章では、これまで使用されてきた様々な飼料設計の方法を要約し、すべての畜種において DDGS を含む飼料の最適な栄養価と経済的価値を得るための推奨方法を示している。

飼料の設計方法

エネルギー、たん白質(アミノ酸)およびリンは、飼料中で最も高価な栄養成分である。様々な畜種用飼料を配合設計する際の精密栄養アプローチが開発されているにも関わらず、一部では時代遅れのアプローチによる設計が行われている。例えば、配合設計の手法は長年にわたって改善されており、CP(粗たん白質)に基づいて豚や家禽用飼料を設計する代わりに、アミノ酸のSID(標準化された回腸消化率)に基づく設計が行われるようになった。さらに、豚用飼料では、ME(代謝エネルギー)価の代わりに NE(正味エネルギー)価を用いると、DDGS などの繊維含量が多い飼料原料について、真の利用可能なエネルギー価を説明するためのより正確なアプローチとなる。同様に、リンでは STD(標準化された

全消化管消化率)の値を使用する方が、豚や家禽において有効リンまたは全リン含量を用いるより正確である。これらの高度なアプローチにより、家畜の真の栄養要求量を充足させる技術が大幅に向上している。

配合設計の手法は、家畜の飼育成績と DDGS の配合可能性に影響を及ぼす。配合設計の目標は、飼料中に含まれる過剰なエネルギー価と栄養成分含量を最小限に抑え、栄養成分の排泄量を最小限に抑えながら、家畜の養分要求量を充足させ、家畜の健康と最適な飼育成績を得ることである。

DE(可消化エネルギー)は、GE(総エネルギー)より飼料中での利用可能なエネルギーを把握するために、より正確であるために使用される頻度が高い。同様に、MEは DE よりも正確な指標であり、NE はさらに優れた指標である。しかし、飼料原料の DE、ME または NE 価の精度と利用性、これらのエネルギーシステムのいずれかを使用したエネルギー要求量に関する配合設計者の知識と理解のレベルによって、飼料設計方法は大きく異なっている。残念ながら、DDGS の NE 価は ME 価ほど定義されておらず、ME 価自体も供給源間で大きく変動する(20 章および第 23 章を参照のこと)。

CP は、飼料または飼料原料の窒素含量の指標であり、飼料原料中のアミノ酸含量、消化率または品質を適切に反映しているわけではない。CP は反芻家畜用飼料を設計する際には使用することが出来るが、豚、家禽および水産養殖動物においては使用は適切ではない。一般的に、ルーメン内で、ルーメン微生物が飼料中の窒素を適切なアミノ酸量とバランスの微生物たん白質に変換するため、CP は反芻家畜用飼料を設計する際には役立つ指標となる。ただし、ルーメン分解性および非分解性たん白質含量は、CP よりも反芻家畜の飼料中のたん白質の真の栄養価の正確な指標となる。単胃動物の消化器官にはこのような機能がないため、飼料を通じた必要量の可消化アミノ酸の供給が必要となる。豚、家禽および水産養殖動物では、アミノ酸含量に基づく配合設計は、

CP に基づくものより正確性があるが、可消化アミノ酸量に基づいて設計すると、精度がはるかに高くなる。さらに、豚、家禽および水産養殖動物用飼料に DDGS を配合する場合、飼料中のアミノ酸バランスを適切に保つために、リジンに対するメチオニン、スレオニンおよびトリプトファンの比率と量を調整することが重要となる。アミノ酸含量に対するエネルギー量の比率を適切に保つことも重要である。DDGS を配合する際に、可消化アミノ酸の概念を使用することで、たん白質とアミノ酸の過剰摂取のリスクを最小限に抑えながら、飼料費と窒素排泄量を最小限に抑えることが出来る。

同様に、DDGS を含む単胃動物用飼料は、総リンではなく、可消化または利用可能なリンに基づいて設計する必要がある。DDGS に含まれている利用可能なリンの量は比較的高いことを考慮すると、無機リン源の添加量、飼料費およびリンの排泄量を大幅に削減することが出来る。消化可能または利用可能なリンに基づいて DDGS 配合飼料を設計すると、DDGS に含まれる消化可能で利用可能なリンの有効利用につながる。

肉用牛(17章)、乳用牛(19章)、家禽(20章)および豚(23章)における DDGS の正確なエネルギー価と可消化栄養成分含量の概要は、本ハンドブックの他の章で詳述した。さらに、DDGS の豚および家禽における ME 価および可消化アミノ酸量を推定するための予測式も、各章に記載している。それぞれの章では、家畜種の健康と最適な生産性を得るための DDGS を含む飼料を評価するために行われた多数の公表文献における配合例も記載している。DDGS を使用する場合の設計方法の影響を考える上で、多くの例を見ることが出来る。様々な設計基準を用いた場合の比較と、豚の正確な栄養摂取目標を達成する上でこれらの影響を示すために、以下に、豚の飼料設計のいくつかの例を示した。これらの相対的な比較は、他の家畜や家禽にも関連してはいるが、各家畜・家禽の様々な発育ステージにおけるすべての組み合わせを比較はこの章では省略する。

エネルギー価と可消化アミノ酸含量が豚用飼料における配合設計と DDGS の使用量に及ぼす影響

DDGS の ME 価

ME 価が極端に異なる DDGS のデータは、公表文献 (Pedersen ら、2007 および Anderson ら、2009) から選択した。前者における DDGS の ME 価(乾物)は 4,334 kcal/kg であり、後者は 3,414 kcal/kg だった。両飼料の ME 価は同一とし、アミノ酸の SIDC (SID に基づく可消化量) に基づいて設計した(表 1)。アミノ酸の SIDC は、DDGS の各アミノ酸の SID を測定した *in vivo* 試験のデータ(リジン: 63%、メチオニン: 82%、スレオニン: 71%、トリプトファン: 69%) に基づいた。飼料の栄養レベルは、脂肪を除いた目標赤肉生産量を 325 g/日とした場合の体重 45 kg の豚における NRC (NRC 2012) 要求量とした。低 ME 価の DDGS 配合飼料では、エネルギー要求量を充足させるために動物性油脂を添加した。この比較で用いた 2 つの DDGS の ME 価には大きな差があるため、高 ME 価の DDGS 配合飼料と ME 価を同一とするために、低 ME 価の DDGS 配合飼料には動物性油脂を約 3.8% 配合した。低 ME 価の DDGS 配合飼料に動物性油脂を配合しない場合には、飼料摂取量を増加させない限り、豚のエネルギー要求量を充足させることは恐らく出来ないが、飼料摂取量が増加すれば、飼料効率が低下し、要求量以上のアミノ酸とリンを摂取することになる。このように、エネルギー価が不足する場合には、動物性油脂以外の脂質源を使用することが出来るが、脂肪源に関わらず、低 ME 飼料に脂質を配合すると飼料費が上昇する可能性がある。これらの結果は、使用している DDGS の供給源を知り、ME 価および出来れば DDGS と他の飼料原料の NE 価を正確に推定して、飼料設計におけるエネルギー価を最大にして、飼料費を最小限に抑えることが重要であることを示している。

表 1. ME 価(乾物)が高い(4,334 kcal/kg)と低い(3,414 kcal/kg)DDGS を用いた豚用飼料の配合例

原料 kg	高ME価のDDGS	低ME価のDDGS
トウモロコシ	607.0	569.1
大豆粕	172.5	172.5
高ME DDGS 4,336 kcal/kg	200.0	
Low ME DDGS, 3,414 kcal/kg		200.0
動物性油脂		37.9
炭酸カルシウム	10.0	10.0
リン酸二石灰	4.0	4.0
食塩	3.0	3.0
ビタミンミネラルプレミックス	2.0	2.0
塩酸L-リジン	1.5	1.5
計	1000.0	1000.0
栄養成分組成	高ME価のDDGS	低ME価のDDGS
乾物 %	87.39	84.03
CP (粗たん白質) %	19.54	19.22
ME価 kcal/kg	3526	3526
リジン %	0.83	0.83
メチオニン %	0.30	0.30
トレオニン %	0.59	0.58
トリプトファン %	0.16	0.16
カルシウム %	0.57	0.57
全リン %	0.52	0.51
有効リン %	0.25	0.25
カルシウム：リン	1.10	1.12

DDGS 間のリジン含量と可消化量の変動

前述のように、DDGS の総アミノ酸および可消化アミノ酸含量は供給源によって異なる。使用している DDGS の供給源に対して、正確な可消化アミノ量を使用して配合設計することの重要性を示すために、DDGS を 10% 配合した 3 種類の成長期の豚用飼料を設計した(表 2)。DDGS は、Uriola(2005)による報告から得られたリジンの SIDC に基づいた。リジン含量は 0.76~1.02% の範囲で、リジンの SIDC は 0.47~0.67% の範囲だった。飼料は、これら 3 種類の DDGS を、それぞれ 10% (非常に保守的な飼料配合割合) 配合し、各飼料の SIDC リジン量が 0.66% となるように設計した(表 3)。DDGS の配合割合を高めると、飼料への DDGS 由来の可消化アミノ酸の割合が高まるため、アミノ酸の SIDC の精度の重要性はより高くなる。これらの結果は、DDGS を一定の配合割合

(10%) としたままで、リジンの SIDC が低い DDGS の代わりにリジンの SIDC が高い DDGS を用いると、トウモロコシと大豆粕の配合量を減らすことが出来ることを示している。したがって、トウモロコシ、大豆粕および DDGS の相対的な価格差に応じて、リジンの SIDC が高い DDGS を豚用飼料に配合すると、通常、飼料費が削減できる。

飼料の設計方法が豚用飼料の組成と DDGS の使用量に及ぼす影響

CP 含量に基づく設計

数十年前には、米国の豚用飼料は CP に基づいて設計されていた。これは、各発育ステージにおける総アミノ酸および可消化アミノ酸の要求量が十分に確立されて

表 2. DDGS 3 試料のリジン、メチオニン、スレオニンおよびトリプトファン含量および SID (標準化された回腸消化率)

栄養成分	低SIDリジン	平均的SIDリジン	高SIDリジン
ME価 kcal/kg	3,834	3,893	3,838
CP (粗たん白質) %	28.00	29.10	31.90
リジン %	0.76	0.85	1.02
メチオニン %	0.50	0.52	0.58
トレオニン %	1.05	1.05	1.15
トリプトファン %	0.23	0.23	0.28
SIDリジン %	0.47	0.60	0.67
SIDメチオニン %	0.43	0.50	0.53
SIDトレオニン %	0.79	0.80	0.87
SIDトリプトファン %	0.17	0.20	0.20

表 3. SID リジン含量が異なる DDGS を用いた豚用飼料の配合例

原料 kg	低SIDリジン	平均的SIDリジン	高SIDリジン
トウモロコシ	708.1	713.2	715.9
大豆粕 CP47%	172.7	167.5	164.8
DDGS	100.0	100.0	100.0
リン酸二石灰	3.0	3.1	3.2
炭酸カルシウム	9.7	9.7	9.7
食塩	3.0	3.0	3.0
ビタミンミネラルプレミックス	2.0	2.0	2.0
塩酸L-リジン	1.5	1.5	1.5
計	1,000	1,000	1,000
栄養成分組成			
CP (粗たん白質) %	17.03	16.94	17.11
ME価 kcal/kg	3,416	3,422	3,416
カルシウム %	0.50	0.50	0.50
リン %	0.45	0.45	0.45
カルシウム：リン	1.11	1.11	1.11
食塩 %	0.36	0.36	0.36
粗脂肪 %	4.34	4.26	4.24
リジン %	0.90	0.90	0.91
SIDリジン %	0.66	0.66	0.66
メチオニン %	0.29	0.29	0.29
SIDメチオニン %	0.26	0.26	0.26
トレオニン %	0.63	0.62	0.63
SIDトレオニン %	0.53	0.52	0.52
トリプトファン %	0.18	0.17	0.18
SIDトリプトファン %	0.15	0.15	0.15

表 4. DDGS を 0、10 および 20% 配合した CP(粗たん白質)16% の育成豚用飼料の配合例

原料 kg	DDGS 0%	DDGS 10%	DDGS 20%
トウモロコシ	783.5	733.8	684.2
大豆粕 CP47%	196.7	147.1	97.4
DDGS	0.0	100.0	200.0
リン酸二石灰	5.1	3.6	2.0
炭酸カルシウム	8.2	9.0	9.9
食塩	3.0	3.0	3.0
塩酸L-リジン	1.5	1.5	1.5
ビタミンミネラルプレミックス	2.0	2.0	2.0
計	1000.0	1000.0	1000.0
栄養成分組成			
CP (粗たん白質) %	16.0	16.0	16.0
ME価 kcal/kg	3,372	3,316	3,261
リジン %	0.92	0.82	0.72
メチオニン %	0.26	0.27	0.28
トレオニン %	0.59	0.58	0.57
トリプトファン %	0.18	0.16	0.15
カルシウム %	0.50	0.50	0.50
リン %	0.45	0.45	0.45
カルシウム：リン	1.11	1.11	1.11
食塩 %	0.37	0.41	0.44
粗脂肪 %	3.65	4.14	4.64

おらず、飼料原料の総アミノ酸および可消化アミノ酸含量が測定されていなかったためである。しかし、特定のアミノ酸の要求量が決められたことで、総アミノ酸含量に基づいた飼料設計が始まり、豚の要求量を充足させる精度が向上した。その後の研究により、可消化アミノ酸含量は、原料間および同一原料内で異なることが明らかになった。以後、豚の可消化アミノ酸の要求量と原料中の可消化アミノ酸含量を測定するための数多くの研究が行われ、豚の精密栄養がさらに改善された。今日、最も正確な飼料の設計方法は、アミノ酸の SIDC に基づくものである。アミノ酸の SIDC の使用は、アミノ酸の AID(見かけの回腸消化率)を使用するよりも正確である。これは、SIDC は、アミノ酸の内因性の損失を考慮しているためである。DDGS を配合する際に、アミノ酸の SIDC を利用して配合設計すると、豚用飼料の栄養的および経済的な価値を最適化するだけでなく、最適な飼育成績を得る

ことが出来る。

CP に基づいて DDGS を配合した豚用飼料を設計する際に起こる可能性がある問題を示すために、体重 50 kg の豚の CP 要求量(16%)を充足させた DDGS 配合飼料(DDGS の配合割合:0、10 および 20%)を設計した(表 4)。DDGS の配合割合を 10%とすると、アミノ酸を含む栄養要求量のすべてを充足させることが出来る。しかし、配合量を 20%に高めると、塩酸 L-リジンを 0.15%添加しても、総リジン要求量(0.75%)を充足させることは出来ない。豚に対して、この飼料を給与すると、DDGS を含まない、あるいは、10%配合した飼料に比べて増体量と飼料効率が低下する。

アミノ酸含量に基づく設計

豚用飼料をアミノ酸含量に基づいて設計した場合に起こり得る問題を示すために、体重 50 kg の豚の養分要求量を充足させた 4 種類の飼料(DDGS を含まない飼料、

表 5. リジン含量に基づいて設計した DDGS を 0、10 および 20% 配合した豚用飼料の配合例

原料 kg	DDGS 0%	DDGS 10%	DDGS 20%	調製した DDGS 20%
トウモロコシ	796.5	757.5	635.4	610.9
大豆粕 CP47%	183.4	123.0	147.1	170.3
DDGS	0.0	100.0	200.0	200.0
リン酸二石灰	5.4	4.1	0.9	0.9
炭酸カルシウム	8.1	9.0	10.0	9.9
食塩	3.0	3.0	3.0	3.0
ビタミンミネラルプレミックス	2.0	2.0	2.0	2.0
塩酸L-リジン	1.5	1.5	1.5	1.5
L-トリプトファン	0.0	0.0	0.0	1.5
計	1,000	1,000	1,000	1,000
栄養成分組成				
CP (粗たん白質) %	15.5	15.1	18.0	19.0
ME価 kcal/kg	3,372	3,316	3,262	3,281
リジン %	0.88	0.75	0.85	0.92
メチオニン %	0.26	0.26	0.31	0.32
トレオニン %	0.57	0.54	0.64	0.83
トリプトファン %	0.17	0.15	0.18	0.20
カルシウム %	0.50	0.50	0.50	0.50
リン %	0.45	0.45	0.45	0.46
カルシウム：リン	1.11	1.11	1.11	1.09
食塩 %	0.37	0.41	0.44	0.44
粗脂肪 %	3.66	4.16	4.60	4.57
SIDリジン %	0.66	0.52	0.60	0.66
SIDメチオニン %	0.23	0.23	0.26	0.27
SIDトレオニン %	0.49	0.44	0.51	0.54
SIDトリプトファン %	0.15	0.11	0.12	0.13

DDGS を 10 および 20% 配合した飼料、DDGS を 20% 配合し、結晶アミノ酸を添加した飼料) をアミノ酸含量に基づいて設計した(表 5)。DDGS の配合量を 20% に高めると、CP 含量も増加することには注意が必要である。各飼料は、NRC による総リジン、メチオニン、トレオニンおよびトリプトファン要求量を充足あるいは超過していたが、アミノ酸の消化率は考慮されていなため、DDGS 10 および 20% 配合飼料ではリジンとトリプトファンの SIDC 要求量を充足していなかった(表 5)。しかし、DDGS を 20% 配合した飼料に L-トリプトファンを添加し、さらに大豆粕の配合量を高めると、リジンおよびトリプトファンの SIDC 要求量を充足させることが出来た

アミノ酸の SID に基づく設計

現在、米国の豚用飼料はアミノ酸の SID に基づいて設計されている。この設計方法により、豚の栄養要求量に対して高い精度で対応することが出来、使用している原料のアミノ酸の SID がわかっていれば、豚の飼育成績を損なうことなく、DDGS の高い配合割合(最大 40%)で使用することが出来る。表 6 に示すように、アミノ酸の SIDC に基づいて設計された DDGS を最大 30% 配合した各飼料は、体重 50 kg の豚におけるリジンの SIDC (0.66%) を充足し、メチオニン、トレオニン、トリプトファンの SIDC を

表 6. SID リジンに基づいて設計した DDGS を 0、10、20 および 30% 配合した豚用飼料の配合例

原料 kg	DDGS 0%	DDGS 10%	DDGS 20%	DDGS 30%
トウモロコシ	795.9	746.3	672.1	586.4
大豆粕 CP47%	184.0	134.4	109.8	96.6
DDGS	0.0	100.0	200.0	300.0
リン酸二石灰	5.4	3.9	1.7	0.0
炭酸カルシウム	8.2	9.0	9.9	10.5
食塩	3.0	3.0	3.0	3.0
ビタミンミネラルプレミックス	2.0	2.0	2.0	2.0
塩酸L-リジン	1.5	1.5	1.5	1.5
計	1,000	1,000	1,000	1,000
栄養成分組成				
CP (粗たん白質) %	15.48	17.17	18.86	20.55
ME価 kcal/kg	3,371	3,317	3,262	3,205
カルシウム %	0.50	0.50	0.50	0.50
リン %	0.45	0.45	0.45	0.49
カルシウム：リン	1.11	1.11	1.11	1.02
食塩 %	0.37	0.41	0.44	0.48
粗脂肪 %	3.66	4.54	4.58	5.04
リジン %	0.88	0.90	0.92	0.94
SIDリジン %	0.66	0.66	0.66	0.66
メチオニン %	0.26	0.29	0.32	0.35
SIDメチオニン %	0.23	0.25	0.27	0.29
トレオニン %	0.57	0.63	0.68	0.74
SIDトレオニン %	0.48	0.51	0.54	0.57
トリプトファン %	0.17	0.18	0.2	0.21
SIDトリプトファン %	0.15	0.14	0.13	0.12

含む他のすべての栄養要求量を充足している。これらの飼料では、塩酸 L-リジンを 0.15% 添加している以外に、結晶アミノ酸は添加していないが、結晶トレオニンとトリプトファンを追加添加すれば、DDGS をより多く配合できる。これらの結果は、DDGS を 30% まで配合した豚用飼料を用いて、優れた発育成績と枝肉の成分組成を得るためには、可消化アミノ酸要求量を満たすようにアミノ酸の SIDC に基づいて飼料設計する必要がある。

結晶アミノ酸の利用と大豆粕配合量の低減

現在米国で使用されている多くの育成期～肥育期の豚用飼料に DDGS を配合する場合、飼料の NE 価を高めるためにかなりの量の大豆粕と置換しており、比較的多

量の結晶アミノ酸を添加している。トウモロコシ DDGS は、大豆粕よりも NE 価が高く、これまで、主なエネルギー源とアミノ酸源として使用されてきたトウモロコシと大豆粕よりも安価である事例が多くみられる。しかし、アミノ酸の SIDC に基づいた配合設計が必須である。結晶アミノ酸の添加にはいくつかの利点がある。一つ目の利点は、可消化アミノ酸の要求量を満たし、発育成績を最適にしつつ、飼料中の大豆粕やその他の高たん白質原料の配合量を減らすことで、過剰な窒素(たん白質)を減らす。二つ目の利点は、結晶アミノ酸を使用すると、DDGS を配合した飼料を給与した際の窒素排泄量と排泄物からのアンモニア排出が最小限に抑えることが出来、特に大豆粕の価格が高い時には、飼料費を大幅に節減できる

表 7. 結晶アミノ酸の添加量を高め、大豆粕配合量を減じた DDGS 30%配合飼料の配合例

原料 kg	対照	結晶アミノ酸添加量を高め、大豆粕を減じたDDGS 30%配合飼料
トウモロコシ	738.5	653.1
大豆粕	238.8	20.0
DDGS	0.0	300.0
炭酸カルシウム	8.2	12.0
リン酸二石灰	8.0	2.6
食塩	3.0	3.0
プレミックス	2.0	2.0
L-リジン	1.5	5.9
L-トレオニン	0.0	0.7
DL-メチオニン	0.0	0.0
L-トリプトファン	0.0	0.7
計	1,000	1,000
栄養成分組成		
CP (粗たん白質) %	17.6	16.3
ME価 kcal/kg	3,333	3,459
SIDリジン %	0.92	0.84
SIDメチオニン %	0.26	0.26
SIDトレオニン %	0.56	0.52
SIDトリプトファン %	0.18	0.17
SIDイソロイシン %	0.61	0.46
カルシウム %	0.60	0.58
全リン %	0.52	0.48
有効リン %	0.21	0.26
カルシウム：リン	1.15	1.20

ことが出来る。したがって、結晶リジン、メチオニン、トレオニンおよびトリプトファンの価格がリーズナブルであるために利用しやすくなっていることもあり、大豆粕の配合量を低くすることが出来る。

DDGS 30%配合飼料における大豆粕の配合量を減らすため設計例を表 7 に示した。この設計では、大豆粕の配合量は、第 5 制限アミノ酸であるイソロイシン含量に基づいて決定した。飼料は、体重 45 kg の豚のすべての NRC 要求量を充足あるいは超過するように、アミノ酸の SIDC] に基づいて設計した。DDGS の配合割合が高い (20% を超える) 飼料を給与する際の課題の一つは、DDGS は CP とリジンの比率が比較的高いため、CP (窒素) の供給量が過剰となる点である。豚用飼料において、CP 含量が高すぎる場合、脱アミノ化と過剰な窒素排泄に要するエネルギーの必要量が高まるため、発育成績が低下する可能性がある。DDGS を配合した飼料に

結晶アミノ酸を追加することで、たん白質の過剰な供給が削減される。実際、大豆粕の配合量を 2% 減らし、豚の要求量を満たすのに十分な結晶アミノ酸を添加することで、飼料の CP 含量は、典型的なトウモロコシ・大豆粕主体飼料より低かった (表 7)。

結論

DDGS を使用することにより、最高の経済的および栄養的効果を得るためには、DDGS の供給源、栄養成分含量および消化率を把握する必要がある。使用する DDGS の栄養成分組成および選択した設計方法により、DDGS の相対的な経済的および栄養的価値は大幅に異なる。DDGS の正確なエネルギー価と、アミノ酸およびリンの消化率を用いて飼料設計を行うと、栄養成分の過剰な給与を減らし、栄養成分の不足を回避し、最適な家畜の飼育成績を保ちながら飼料費を節減できる。

引用文献

Anderson, P.V., B.J. Kerr, T.E. Weber, C.Z. Ziemer, and G.C.

Shurson, 2009. Determination and prediction of energy from chemical analysis of corn co-products fed to – finishing pigs. *J. Anim. Sci.* (submitted).

NRC. 2012. *Nutrient Requirements of Swine*. 10th Revised Edition, Natl. Acad. Press, Washington, DC.

Pedersen, C., M.G. Boersma, and H.H. Stein. 2007.

Digestibility of energy and phosphorus in ten samples of distillers dried grains with solubles fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 85(5):1168–1176.

Urriola, P.E. 2005. *Distillers Dried Grains with Solubles digestibility, in vivo estimation and in vitro prediction*. Master's thesis, University of Minnesota.

27章:環境の持続可能性への DDGS の役割

はじめに

飼料に DDGS を使用することで得られる栄養的および経済的利益に関する報告は多くあるが、ほとんどの栄養学者や畜産業者は、DDGS を給与することで得られるいくつかの環境への効果を認識していない (Shurson, 2017)。近年、環境の持続可能性は世界の農業において新しい大きなトレンドとなっており、いくつかの多国籍企業では、コストと栄養価だけでなく、環境への影響をも加味した飼料原料の使用による業界における全体的な CO₂(二酸化炭素) 排出量を削減する生産システムを取り入れ始めている。Kauffman(2015)は、栄養成分、排出量、排泄物管理のアプローチを組合せた中国の養豚場における排出量低減方法を紹介している。中国では年間 40 億トンを超える家畜排泄物が発生しており、水系への廃棄による汚染、地域の富栄養化、デッドゾーンでの栄養分の過剰な負荷を引き起している。より多くの土地がトウモロコシと大豆栽培用の耕地として開拓されるにつれて、生物多様性の低下、農薬、除草剤、肥料による水系の汚染、土地利用形態の変化による直接および間接的な自然の炭素吸収源の破壊等、飼料生産から輸送までのすべての段階で温室効果ガスが排出される。Kaufmann (2015)は、中国の持続可能な家畜生産を推進するために次の施策を実施することを推奨しているが、これらは、他のどこの国でも適用できる。

1. 肥料および農薬の流出と汚染を含む、水、土壌、大気のバイオレメディエーション(微生物や植物等の生物が持つ化学物質の分解能力、蓄積能力などを利用して、土壌や地下水等の浄化を図る技術)に要するコスト、生計の損失、温室効果ガスの排出に関連するコスト、栄養成分と有機物の供給源となる糞尿による損失コスト、施肥する化学的肥料のコストを正確に把握する
2. アミノ酸の SIDC(標準的な回腸可消化量)、NE(正味エネルギー)価、可消化または利用可能なリン含量に基づいて豚および家禽用飼料を設計する、高泌

乳用牛へのルーメンバイパスアミノ酸の利用等による飼料のたん白質含量を削減出来る方法を最大限に活用する

3. 大規模な商業農場にバイオガス生産のためのメタン発酵槽を設置し、排泄物を主原料としたバイオガスの生産

温室効果ガス(CO₂、メタン、亜酸化窒素)の総排出量の約 18%は畜産物生産に由来しており(Steinfeld ら、2006)、これは主に、飼料の消化管内での発酵と排泄物の貯蔵によるものである。飼料、動物生産および食品関連のいくつかの多国籍企業では、畜産物生産の過程における CO₂ 排出量を最小限に抑えることが出来る飼料原料を用いた CO₂ 排出量を削減するサプライチェーン戦略を開始している。さらに、数人の研究者が、飼料に様々な飼料原料を使用することによる環境影響に関してライフサイクルアセスメントを開始した。ただし、これらのアセスメントでの仮定や範囲等が研究者によって異なっていることから、結果とその解釈に影響している(Zilberman, 2017)。実際、公表された論文の多くでは環境評価に関する経済的な影響を含まず、動的モデルの代わりに静的モデルを使用していること、給与飼料から実際に影響する効果を考慮していないため、誤解を招く結果となっている。

温室効果ガス排出量の削減と、畜産業からの CO₂ 排出量に対する世界的な関心の高まりに加えて、飼料および生産コストだけでなく、飼料のエネルギーおよび栄養成分の栄養率を改善し、過剰な栄養成分の排泄と畜舎からの臭気とガスの発生を減らすためには、精密な動物飼料プログラムの使用が不可欠である。Lu ら(2017)はこれらの主要な環境問題を総説している。施肥により濃度が高まった農地の窒素、リンおよび微量のミネラルが、その農地で栽培される農作物における吸収量を超えてしまう場合がある。硝酸塩は土壌から浸出して地下水を汚染する可能性があり、畜産業における汚染の主要な因子となる懸念がある。排泄物から発生するメタンと亜

酸化窒素は温室効果ガスの排出に寄与し、アンモニアの揮発は酸性雨を引き起こし、植生や樹木に有害な影響を与える。さらに、リンは土壌浸食を通じて地表水に入り、藻類や他の水生植物の成長を促進し、魚を死亡させる可能性がある地表水中の溶存酸素濃度を減少させる。また、土壌に銅や亜鉛などの過剰な微量ミネラルが蓄積すると、植物や微生物への毒性リスクが高まる。

Luら(2017)は、排泄物中の窒素、リンおよび微量ミネラルを最小限に抑えるための効果的な栄養戦略をいくつか提案している。第一に、家畜・家禽のたん白質またはアミノ酸、リン、微量ミネラルの要求量を正確に満たす飼料を設計する。栄養成分のCP(粗たん白質)含量は、単胃家畜用飼料への結晶アミノ酸の添加または反芻動物においてルーメン非分解性たん白質含量が多い飼料原料を使用することで減らすことが出来る。豚や家禽用飼料を利用可能なまたは消化可能なリンに基づいて設計し、フィターゼを添加することにより、リンの過剰な排泄を最小限に抑えることが出来る。家畜・家禽の育成ステージが進むにつれて養分要求量は変化するため、複数の栄養補給プログラムを使用してより短い間隔で飼料を設計することで、栄養成分の過剰な排泄を実質的に最小限に抑えることが出来る。第二の点は、生物学的利用率が高いリンと微量ミネラルを使用し、飼料設計時にこれらの栄養成分の過剰配合を避ける。第三の点は、酵素、プロバイオティクス、プレバイオティクスなど、飼料の栄養成分の利用性を改善する効果的な飼料添加物を使用することである。これらの試みをすべて実践することで、飼料および生産コストを節減するだけでなく、潜在的な環境への悪影響を最小限に抑えることが出来る。

豚やブロイラー用飼料に結晶アミノ酸とフィターゼを添加すると、栄養成分の利用性の改善、飼料コストの削減、排泄物中への窒素とリン排出量の削減およびアンモニア等のガス排出の抑制に有効である。Kebreabら(2016)は、ヨーロッパ、北米、南米で、これらの添加物を使用していない豚や家禽用飼料に結晶アミノ酸とフィターゼを添加した場合の影響を比較している。その結果、豚とブ

ロイラー用飼料に、これらの添加物を用いると、温室効果ガスの排出量がヨーロッパではそれぞれ 56 および 54%、北米では 17 および 15%、南アメリカでは 33 および 19%減少するとしている。これらの削減効果は非常に大きい。この比較で使用されたヨーロッパと南アメリカの飼料には DDGS が含まれていないが、北米の豚とブロイラー用飼料では DDGS がそれぞれ 14.6 および 6.4%含まれている。飼料への DDGS の使用は、食用動物生産における環境への影響を最小限に抑えるための解決策の一部となる。この章では、様々な動物種に対する DDGS の給与が環境への有益な効果に関するいくつかの報告を取りまとめた。

養殖水産動物

世界の水産養殖業は、特にアジア諸国で急速な成長を続けている。例えば、インドネシアの水産養殖業は過去5年間、年25%の割合で増加している(Henrikssonら、2017a)。そのため、環境への影響を減らし、水産養殖業の持続的な発展を図る方法への注目が大きくなっている。水産養殖業における環境への影響を決定する主な要因の一つは、飼料原料の選択と使用方法である。水産養殖業で使用されるすべての飼料原料の中で、魚粉の使用は、環境への負の影響と、水産養殖動物用飼料での広範囲の使用を維持するための配合量の制限のため、最も問題視されてきた。インドネシアの水産養殖用飼料で一般的に使用されている飼料原料の環境への影響を比較するために、Henrikssonら(2017a)は、ライフサイクルアセスメントの手法を用いて、地球温暖化、酸性化、富栄養化、土地占有、淡水使用量に基づいて分類を行った(表1)。エビミールは、すべての評価項目で環境影響が最も大きかったが、キャッサバは、土地の占有率を除いて、環境影響が最も少なかった。トウモロコシと DDGS における環境影響は、一般的な飼料原料の中間的な値であった。この評価に、経済的な配分をくわえると、キャッサバ、トウモロコシ、魚油、小麦粉、CGM(コーングルテンミール)の環境影響の配点にわずかな変更があった

表 1. インドネシアの水産養殖産業で使用されている飼料原料の相対的な環境影響の比較 1 (Henriksson ら、2017a から改編)

原料	地球温暖化 ²	富栄養化 ³	酸性化 ⁴	土地占有率 ⁵	淡水の使用量 ⁶
魚粉	H	M	M	L	L
エビミール	H*	H*	H*	H*	H*
家禽副生物	H	H	H	H	M
大豆粕	M	L	L	M	M
コーングルテンミール	H	M	H	M	M
コーングルテンフィード	H	M	H	M	M
DDGS	M	M	M	M	M
キャッサバ	L**	L**	L**	M	L**
トウモロコシ皮	L	M	M	M	M
小麦粉	M	M	M	M	M
フスマ	M	M	M	M	M
米ぬか	L	H	L	M	H
魚油	L	M	L	L*	L
大豆油	L	L	L	M	M

¹ H：高い、M：中程度、L：低い

² 二酸化硫黄と窒素酸化物の排出/トン

³ Fresh生産物1トンあたりに淡水量 m³

⁴ 温室効果ガス排出量/トン

⁵ 生産物1トンあたりに要する土地資源

⁶ * 飼料原料間による影響が著しい

⁷ Nと窒素の流出ポテンシャル/トン

** 飼料原料間による影響が少ない

が、魚粉、米ぬか、家禽副生物、DDGS、CGF（コーングルテンフィード）とエビミールへの影響はほとんどなかった。

ティラピアの養殖は過去 20 年間にエジプトで 20 倍以上増加し、同国の動物生産業としては 3 番目に大きく、魚供給量の 77%を占めている(El-Sayed ら、2015; FAO、2016)。しかし、エジプトの養殖場では、新鮮な水に限られていることから、生産性の向上を目指している。その結果、Worldfish は「エジプトの水産養殖業の発展による雇用と収入の改善」プロジェクトを実施した。このプロジェクトでは、最高の管理方法に関するトレーニングを提供し、500 カ所以上の水産養殖場にナイルティラピアの改良種を提供した。その結果、Henriksson ら(2017b)は、ライフサイクルアセスメントを使用したエジプトの水産養殖業における最良の管理手法と遺伝的改善の使用の環境影響に関してベンチマーク調査を実施した。エジプトは輸入飼料原料に大きく依存しているため、彼らは、輸入魚粉、魚油、大豆粕、大豆油、グアーミール、家禽副生物、ナタネ粕、CGM、CGF、トウモロコシフスマ、米ぬか、

フスマ、DDGS を対象とした。その結果、地球温暖化に最も影響が大きかったのは、大豆粕、ふすま、米ぬかおよび CGF であったが、飼料原料 1 kgあたりの温室効果ガス排出量に最も影響を与える成分は、家禽副生物、魚粉、魚油、トウモロコシ、DDGS、CGF および CGM だった。トウモロコシとトウモロコシ併産物による影響が大きいのは、エジプトの農地には過剰な窒素肥料が施肥されていることから気象に影響を及ぼす亜酸化窒素の排泄用が多いためである。

肉用牛および乳用牛

DDGS はトウモロコシに比べて CP とリンの含量が約 3 倍あるため、乳用牛や肉用牛に DDGS を多く給与すると、窒素とリンの排泄量が増加する可能性がある。

窒素とリンの使用効率は、窒素とリンの保持量を増加させるか、窒素とリンの過剰な給与を減少させるか、またはその両方によって改善できる。放牧している際に、DDGS を補給すると、DDGS の CP(窒素)含量が比較的高いため、過剰に摂取された窒素が尿素として排泄され

る可能性がある。しかし、排泄物の管理が適切に行われ、農耕地に適切に施肥されることで、非常に貴重な肥料として機能する。さらに、放牧牛の場合、尿中の窒素含量が高いと、牧草の生産量を高めることが示されている (Ball and Ryden, 1984)。

窒素とリンの利用効率

Greenquist ら(2011)は、スムースブロムグラス牧野で若齢去勢牛を放牧した際の、牧野への窒素施肥と、供試牛への DDGS の給与効果を調査した。放牧牛に DDGS を 2.3 kg/日/頭補給した場合の牧野 1 haあたりの窒素貯留量は、窒素を 90 kg/ha施肥した場合と、DDGS の補給を行わなかった場合に比べて、それぞれ 30 および 98% 高まった。放牧牛の窒素排泄率は、DDGS を補給した場合に高く、DDGS の補給を行わずに、窒素を施肥した牧野あるいは施肥していない牧野で放牧した場合より窒素排泄量が多かった。各放牧牛の窒素利用率には差がなかったが、窒素を施肥していない牧野で放牧牛に DDGS を補給した場合には、窒素施肥を行った牧野に比べて全体的な窒素利用率が 144%高まった。

Bernier 等(2014)は、熱的中性圏および寒冷下で長期間飼育した場合の、低品質の粗飼料を給与している牛へのトウモロコシ・小麦 DDGS(原料としてトウモロコシと小麦を 1:1 の割合で使用)を補給した場合の窒素とリンの利用性を調査した。DDGS を給与すると、排泄物の窒素およびリン含量が増加し、堆肥を施肥した場合に流出量が増加する可能性がある形態の窒素およびリンが増加した。しかし、寒冷下で飼育した牛のたん白質とリンの要求量は、熱的中性圏で飼育している牛とは異なっていた。

Hao ら(2011)は、トウモロコシ DDGS を含む牛用飼料に濃縮タンニンを添加した場合の、堆肥の窒素含量と温室効果ガスの排出量に及ぼす影響を調査した。濃縮タンニンを 2.5%添加した DDGS を 40%含む飼料を給与した牛の熟成堆肥中の総炭素、窒素およびアンモニア含量は、DDGS のみまたは対照飼料のみを与えられた牛の堆肥より高かった。濃縮タンニンを加えても、堆肥化中の

CO₂、メタン、亜酸化窒素の排出量には影響はなかった。これらの結果は、牛に対して、DDGS を 40%含み、さらに濃縮タンニンを添加した飼料を給与すると、温室効果ガスの排出量を増やすことなく、堆肥の肥料価値を高めることを示している。

メタン排泄量

食料、繊維、バイオ燃料の生産に使用される耕作地や牧野は、世界全体で約 13.5%の温室効果ガスを排出し、農業活動から排出される亜酸化窒素は全体の約 85%、メタン排出量の 50%を占めている(IPCC, 2007)。CO₂、メタン、亜酸化窒素の大気への排出は、過去数十年で増加しており、気候変動の主要な原因であると考えられてきた。CO₂ 排出量の増加は、主に化石燃料の燃焼によるものだが、農業活動からもかなりの量のメタンと亜酸化窒素が排出される(Smith ら, 2007)。亜酸化窒素の排出の大部分は土壌(肥料と堆肥の施肥の結果としての)に由来しているが、メタンの大部分は家畜の消化管内での発酵に由来している。したがって、家畜生産システムにおけるメタンの排出を軽減するための飼料給与、畜舎設計、飼育管理方法に大きな関心が寄せられている(Beauchemin ら, 2011)。

反すう家畜はメタン排出の主な原因となっている。Hristov ら(2014)は、畜産業における腸内メタン放出を軽減するための様々な戦略について総説している。トウモロコシ DDGS の給与によるメタン排出量への影響は畜種間で一貫してはいないが、飼料中の脂質含量がメタン排出量に影響を与える可能性がある(Hunerberg ら, 2013)。Hristov ら(2014)は、飼料の消化率と消化可能な栄養成分を増加させることが、反芻家畜からのメタン排出量を削減するための主な戦略の一つであることを示唆している。また、反すう家畜用飼料に比較的脂質含量が高い、DDGS のような飼料原料を配合することで、メタンの排出量を大幅に削減できることを示唆している。実際に、いくつかの研究では、DDGS を含む飼料を給与すると、肉用牛および乳用牛からのメタン排出量が減少することが示されている。

表 2 泌乳期の乳牛に対する高レベルの DDGS 給与が乾物摂取量、乳量、ルーメン pH、ルーメン微生物およびメタン生成に及ぼす影響(Benchaar ら, 2013 から改編)

測定値	DDGS 0%	DDGS 10%	DDGS 20%	DDGS 30%
乾物摂取量 kg/日	24.2	24.6	24.4	25.3
産乳量 kg/日	32.6	35.1	35.8	36.6
エネルギー補正乳量 kg/日 ¹	35.3	37.8	37.3	37.1
乳脂肪4%補正乳量 kg/日 ²	32.1	34.5	34.1	33.7
乳量/乾物摂取量	1.40	1.44	1.44	1.45
エネルギー補正乳量/乾物摂取量	1.51	1.55	1.50	1.46
ルーメンpH				
最小値	5.92	5.92	5.98	5.97
最大値	6.56	6.59	6.64	6.55
平均	6.21	6.21	6.27	6.22
プロトゾア数 × 10 ⁵ /mL	5.12	5.28	5.42	4.48
メタン産生				
g/日	495	490	477	475
g/乾物摂取量 kg	0.6	20.1	19.7	18.9
総エネルギー摂取量に対する割合 %	6.09	5.80	5.61	5.23
代謝エネルギー摂取量に対する割合 %	8.75	8.39	8.17	7.74
g/産乳量 kg	15.6	14.2	13.6	13.2
g/乳脂肪補正乳量 kg	15.7	14.3	14.3	14.4
g/エネルギー補正乳量 kg	14.3	13.1	13.0	13.0
g/乳脂肪量 kg	396	363	372	390
g/乳たん白量 kg	446	415	411	400

¹ $0.327 \times \text{乳量 (kg/日)} + 12.95 \times \text{乳脂肪量 (kg/日)} + 7.2 \times \text{乳たん白量 (kg/日)}$

² $0.4 \times \text{乳量 (kg/日)} + 15 \times \text{乳脂肪量 (kg/日)}$

Drehmelら(2016)は、DDGS中のNDF(中性デタージェント繊維)残留物にトウモロコシ油を添加するとメタン生成量が減少するのに対し、DDGSにセルロースをくわえるとメタン生成量が増加することから、飼料原料を操作することにより、反芻家畜からのメタン排泄量を削減できることを示唆している。さらに、McGinnら(2009)は、3% (乾物)の脂質を添加すると、DDGSを大麦と置換して35%用いた際に、メタン排出量が16から24%減少したと報告している。トウモロコシDDGSをフィードロット牛に給与すると、小麦DDGS配合飼料あるいは対照飼料を給与した場合と比べて比較して、メタン排出量が減少した(Hunerbergら、2013)。しかし、DDGSをエネルギー源として多量に含む飼料をフィードロット肉用牛に給与すると、牛は過剰なたん白質(窒素)を摂取し、窒素排泄量が著しく高まる(Hunerbergら、2013)。

DDGSを乳用牛に給与すると、腸内におけるメタン量

が減少すると同時に、排泄物の嫌気性発酵によるバイオエネルギー(メタン生成)が増加する可能性も示されている(Masseら、2014)。Benchaarら(2013)は、DDGSが泌乳中の乳用牛の腸内のメタン排出量とルーメンの発酵特性に及ぼす影響について調査するために、高脂肪DDGSを飼料中のトウモロコシと大豆粕と置換して0、10、20および30%給与した。飼料中のDDGS含量の増加に伴って乾物摂取量と乳量が増加し、メタン生成量は直線的に減少した(表2)。メタン生成の減少は、DDGS給与量の増加に伴う脂質量の増加と、ルーメン内での繊維の分解、酢酸:プロピオン酸比およびプロトゾア数に対する影響によるものであった。この結果は、低脂肪DDGSを泌乳期の乳用牛に給与すると、メタン排出量を削減するとともに、乾物摂取量と乳量を高めることに効果的であることを示している。

Judyら(2016)は、泌乳期の乳用牛における低脂肪

DDGS を 20%含む飼料へのトウモロコシ油の添加(0 および 1.4%)と、硫酸カルシウムの添加(0.93%)がメタン排泄量への影響を調査した。低脂肪 DDGS を 20%含む飼料では、DDGS を含まない対照飼料に比べて乾物摂取量と乳量が増加したが、メタン排出量には影響はなかった。しかし、DDGS を 20%含む飼料に硫酸カルシウムを添加すると、対照飼料に比べて、総メタン生成量が減少し、トウモロコシ油を添加すると、メタン生成量が減少する傾向を示した。同様に、硫酸カルシウムまたはトウモロコシ油を添加した DDGS を 20%含む飼料では、対照飼料に比べて、脂肪補正乳量または乾物摂取量あたりのメタン生成量が減少した。これらの結果は、低脂肪 DDGS を含む飼料に硫酸カルシウムまたはトウモロコシ油を添加すると、乳生産に影響を及ぼすことなく、メタン排出量も削減に有効であることを示している。

硫化水素排泄量

イオウを多く含む(0.40%以上)飼料は反すう家畜に潜在的に有毒である可能性がある。DDGS のイオウ含量にはバラツキはあるが、一部の DDGS には比較的高濃度のイオウが含まれている。さらに、飼料中のイオウは、ルーメンおよび排泄物からの硫化水素の排出に影響している可能性があり、高濃度で農場に存在する場合には、動物やヒトの突然死を発生させる可能性がある。Drewnoski ら(2014)は、DDGS を 42%および 21%含む飼料(飼料中のイオウ含量を 0.40 および 0.19%増加)と CDS(濃縮ジスチラーズソリュブル)を 7%含む飼料(同 0.19%増加)からの硫化水素排出量を比較した。DDGS を 21%含む飼料および CDS を 7%含む飼料には、硫酸、硫酸ナトリウム、または硫酸カルシウムのいずれかを添加してイオウ含量を 0.17%高めた。その結果、イオウ摂取量とルーメン内硫化水素濃度には、飼料間で差がなく、ルーメンの毒性または硫化水素濃度に差がないことを示している。その後の研究では、Morine ら(2014)は、NDF 含量を高めるためにブロムグラス乾草の給与量を高めた飼料と、DDGS あるいは CDS を全飼料中のイオウ含量が 0.46%となるように配合した飼料を去勢牛に給与した。その結果、飼料中の NDF 含量を増加させると、ルーメン pH を高く維持し、硫化水素濃度が低下すること

を明らかにした。このような飼料給与戦略は、高イオウ飼料を給与する際に、イオウによる毒性リスクを低減するだけでなく、硫化水素排出量の減少にも有効である。

エネルギー利用のためのバイオガス生産

Aguirre-Villegas ら(2015)は、栄養バランスがとれた泌乳期の乳用牛用飼料に様々な量の DDGS、大豆粕および粗飼料を給与し、乳生産とバイオエネルギー生産装置(嫌気性発酵槽)を組み合わせることによる土地の利用性、エネルギー消費量、温室効果ガス排出量への影響を調査した。このようなシステムで、DDGS の多く含む飼料を給与すると、温室効果ガス排出量と NE 消費量が大幅に削減されたが、土地利用率が増加した。これらの結果は、酪農現場で嫌気性発酵槽を使用すると、エネルギー消費量が 65%削減され、温室効果ガス排出量が 77%削減されることを示している。したがって、DDGS を含む飼料の給与は、嫌気性発酵槽を設置した酪農場におけるエネルギー使用量と温室効果ガス排出量の削減に大きな効果を与える。

家禽

家禽の糞尿にはかなり多くの窒素が含まれており、管理を適切に行わないと、飲水の硝酸塩または亜硝酸塩汚染、湖水の富栄養化、アンモニアの揮発および亜酸化窒素の排出量を増加させる可能性がある。飼料に要求量を超える過剰なたん白質が含まれている場合、糞尿中に尿酸として排泄され、糞尿微生物によってアンモニアに変換される(Pineda ら、2008)。

窒素とリンの利用効率

ブロイラーに対して、DDGS を最大 20%目で配合した飼料を給与しても、乾物と窒素の排泄量には影響がないが、可消化アミノ酸および利用可能なリンに基づいて配合設計した飼料ではリンの排泄量が減少した(Deniz ら、2013)。同様に、Abd El-Hack and Mahgoub(2015)は、DDGS を 5 または 10%配合した産卵鶏用飼料では、対照飼料に比べて糞尿混合物中の窒素排泄量が、それぞれ 8.6 および 4.3%減少し、DDGS を 5、10 および 15%配合した産卵鶏用飼料では、対照飼料に比べてリン排泄

が 3.3、7.2 および 10.6%減少したと報告している。

Martinez-Amezcuca ら(2006)は、DDGS 中のリンのプロイラーにおける利用率を改善するために、OptiPhos®フィターゼとクエン酸の添加の影響を調査する実施した。最初に、雛の脛骨灰分含量を指標とした傾斜比定量法による試験を行い、DDGS 中のリンの生物学的利用率は 67%であることを明らかにした。次いで、フィターゼとクエン酸の添加により DDGS からのリン放出量が 0.04 から 0.07%高まり、OptiPhos®フィターゼとクエン酸の添加により、DDGS の家禽におけるリンの利用性を高めることが出来ることを示した。したがって、フィターゼとクエン酸の同時添加で、プロイラーにおける DDGS のリンの生物学的利用率が 62%から 72%に高まり、糞尿混合物中のリンが減少する。さらに、Masa' deh(2011)は、飼料への DDGS 配合量の増加に伴って、リン排泄量が直線的に減少すると報告している。

アンモニアと硫化水素の排出

産卵鶏に DDGS を 20%配合した飼料を給与すると、トウモロコシ・大豆粕主体飼料を給与した場合に比べて、アンモニアおよび硫化水素の排泄量がそれぞれ 24 および 58%削減された。この報告で示されたアンモニア排泄量の減少は、Roberts ら(2007)および Li ら(2012)の報告された結果と一致していた。これは、Li ら(2014)が実施したその後の研究でも確認されており、産卵鶏に DDGS 配合飼料を与えるとアンモニアの排泄量が減少するが、他のガスに影響を与えずにメタン排出量が増加することを示している(Li ら、2014)。Wu-Hann ら(2010)による硫化水素発生量の削減に関する報告によると、糞尿中の硫化水素排泄物濃度が高いにも関わらず、糞尿表面に自然に発生する皮(Crust)の発生は報告されていない。DDGS 中の未消化繊維は家禽の下部消化管で発酵し、その結果、短鎖脂肪酸が生成され、糞尿混合物の pH を低下させる。低 pH の糞尿混合物は、窒素の非揮発性形態であるアンモニアの生成を低減し、大気中への悪影

響が低減する(Babcock ら、2008; Bregendahl ら、2008)。したがって、DDGS の給与により、アンモニア排出量が削減されるだけでなく、家禽の堆肥に含まれる窒素量が増加し、施肥した時の肥料価値が高まる。DDGS 16%飼料を給与した産卵鶏 800,000 羽からの堆肥の肥料価値は DDGS を配合しない場合に比べて、窒素を基準にした場合年間 5,000ドル、リンを基準とした場合に 47,000ドル高まった(Regassa ら、2008)。これらの研究から、DDGS 配合飼料を産卵鶏やプロイラーに給与することは、糞尿混合物中の窒素とリン量の削減、およびアンモニアと硫化水素の排出量の削減に大きな効果を与える可能性があることが示している。

豚

DDGS を配合した豚用飼料は、従来のトウモロコシ・大豆粕主体飼料(Kerr ら、2008; Zhang、2010)に比べて、繊維、CP およびイオウ含量が高く、栄養成分の消化性と排泄量に影響を及ぼす(Kerr ら、2003; Degen ら、2007; Kil ら、2010; Anderson ら、2012)。DDGS では繊維含量が比較的高いため、DDGS 配合飼料を給与すると、トウモロコシ・大豆粕主体飼料に比べて乾物排泄量が増加する(Almeida and Stein、2012)。このため、排泄物量が増加し、貯蔵施設の容量増加や、豚房から排泄物の除去頻度を高める必要がある。

窒素とリンの利用効率

McDonnell ら(2011)は、NE 価、アミノ酸の SIDC および可消化リンに基づいて、小麦および大麦と置換することにより、トウモロコシ DDGS を 0、10、20 または 30%配合した場合の育成期～肥育期の豚への効果を検討した。予想通り、窒素の摂取量と、窒素の尿中排泄量および総窒素排泄量は、DDGS の配合割合の増加に伴って直線的に増加した(表 3)。これは、DDGS の配合により、豚の要求量を超えた過剰な窒素が供給されたことによるもの

表 3. 小麦および大麦主体飼料へのトウモロコシ DDGS の配合が育成期～肥育期の豚の窒素とリンの出納に及ぼす影響(McDonnell ら、2011)

測定値	DDGS 0%	DDGS 10%	DDGS 20%	DDGS 30%
リン g/日				
摂取量 ¹	52.7	57.2	57.9	62.8
糞中排泄量	7.3	6.2	7.4	8.0
尿中排泄量	15.0	18.0	17.2	20.8
全排泄量	22.3	24.2	24.6	28.7
蓄積量	30.5	33.0	33.3	34.1
蓄積量/摂取量 ²	0.58	0.58	0.58	0.54
リン g/日				
摂取量	9.7	9.6	9.1	8.9
糞中排泄量	3.7	3.7	3.3	3.3
尿中排泄量	0.69	0.56	0.62	0.94
全排泄量	4.4	4.3	3.1	4.2
蓄積量	5.3	5.3	5.0	4.7

¹ 飼料中のDDGS含量に対応して直線的に増加 (p < 0.01)

² 飼料中のDDGS含量に対応して二次曲線的に増加 (p < 0.05)

であり、過剰なアミノ酸の脱アミノ化量が増加して、尿中排泄が増加した。窒素の保持量は、DDGS の配合量が10%と20%では影響がなかったが、30%配合すると窒素摂取量に比べて保持量が減少した。豚に DDGS 配合飼料を給与した場合に一般的に観察される窒素排泄量の増加は、結晶アミノ酸を使用して飼料中の過剰なたん白質(窒素)量を減らすことで最小限に抑えることができる。対照的に、リンの摂取量は、DDGS 配合量の増加に伴って直線的に増加したが、リンの排泄量または保持量には影響がなかった。これらの結果は、DDGS を30%まで配合した飼料を給与すると、窒素排泄量が増加するが、消化可能なアミノ酸とリンに基づいて飼料を設計すれば、育成期～肥育期の豚からのリン排泄量には影響がないことを示している。

Baker ら(2013)は、育成期～肥育期の豚のリン酸二石灰と DDGS 中のリンの消化率と出納を比較し、DDGS 中のリンの STD(標準化された全消化管消化率)(63.1%)は、リン酸二石灰(93.1%)よりも低く、リン酸二石灰よりもリンの糞中排泄量が多かった(表 4)。しかし、リン酸二石灰は非常に高価な飼料原料であり、無機リン源の供給量

は急速に減少しているため、DDGS は豚用飼料における優れたより持続可能なリン供給源となっている。

豚用飼料に微生物フィターゼを添加すると、リンの消化率を改善し、排泄物中のリンを減らし、飼料への無機リン源の配合量を減らすことにより、飼料コストを削減するための一般的な方法になっている。Almeida and Stein (2012)は、トウモロコシまたは DDGS 50%配合飼料に微生物フィターゼを 0、500、1,000 または 1,599 単位/kg添加し、トウモロコシ中のリンの STD は、40.9、67.5、64.5 および 74.9%に高まり、DDGS のリンの STD は、76.9、82.9、82.5 および 83.0%に高まった。ただし、フィターゼ添加によるリンの STD に対する効果は、トウモロコシに比べて DDGS 配合飼料でははるかに小さく、豚用飼料に対するフィターゼの添加量の増加に伴うコスト増を補えない場合がある。

Rojas ら(2013)は、フィターゼを 600 単位/kg添加した場合のトウモロコシ、DDGS および CGM 中のリンの育成期～肥育期の豚における消化率と出納に及ぼす影響を調査した。リンの総排泄量は、フィターゼ無添加のトウモロコシ飼料で最も多かったが、フィターゼ添加により

表 4.リン酸二石灰と DDGS 中のリンの摂取量、排泄量、消化率の比較(Baker ら、2013 から改編)

項目	リン酸二石灰	DDGS
飼料摂取量 g/日	1,023	925
リン摂取量 g/日	2.5	3.8
糞へのリン排泄量 g/日	0.3	1.6
リンの見かけの全消化管消化率 %	86.1	58.5
リンの標準化された全消化管消化率 %	93.1	63.1

表 5. トウモロコシ、DDGS およびコーングルテンミールへの微生物フィターゼの添加(600 単位/kg)が糞中リン含量、排泄量および消化率に及ぼす影響(Rojas ら、2013 から改編)

項目	トウモロコシ		DDGS		コーングルテンミール	
	無添加	添加	無添加	添加	無添加	添加
飼料摂取量 g/日	481	456	463	471	475	482
リン摂取量 g/日	1.6 ^b	1.1 ^c	2.2 ^a	2.2 ^a	1.0 ^c	1.0 ^c
糞中リン含量 %	2.0 ^b	1.1 ^d	0.9 ^{ab}	0.7 ^a	2.4 ^a	1.4 ^c
糞へのリン排泄量 g/日	1.0 ^a	0.5 ^c	0.6 ^{bc}	0.5 ^c	0.4 ^c	0.2 ^d
リンの見かけの全消化管消化率 %	36.4 ^d	56.1 ^c	72.2 ^{ab}	78.5 ^a	70.6 ^{ab}	77.6 ^a
リンの標準化された全消化管消化率 %	42.5 ^d	64.1 ^c	76.5 ^b	82.8 ^{ab}	75.2 ^b	87.4 ^a

a - e 異符号間に有意差あり (p < 0.05)

50%減少した(表 5)。しかし、フィターゼ無添加の DDGS 飼料では、フィターゼ無添加のトウモロコシ飼料よりリンの排泄量が 40%減少し、フィターゼ無添加の CGM 飼料では同様に 60%減少した。DDGS 飼料へのフィターゼの添加効果はほとんどなく、CGM 飼料ではある程度の改善効果があった。その結果、トウモロコシまたは CGM を配合した飼料にフィターゼを添加すると、リンの STD が高まるが、DDGS ではその効果はない。DDGS 飼料においてフィターゼの添加効果がない原因は、乾式粉碎のエタノール工場での発酵プロセス工程でフィチン酸が分解され、リン消化率が既に高まっていることによる。したがって、消化可能なリンに基づいて DDGS を含む豚用飼料を設計すると、トウモロコシ主体の飼料に比べて、排泄物中のリンを劇的に減らすことができる。

反すう家畜および単胃家畜に高エネルギー飼料を給与すると、メタンの生成が高まること示されている (Jarret ら、2011; Klevenhusen ら、2011)。さらに、DDGS

を含む飼料を給与すると、イオウ含量が増加し、硫化水素やその他の還元イオウ化合物が増加し、豚の糞尿の臭気が増加する可能性がある (Blanes-Vidal ら、2009; Feilberg ら、2010; Trabue ら、2011)。また、DDGS は CP 含量に比べてリジン含量が比較的低いため、飼料中のたん白質と窒素の含量が増加し、窒素の排泄とアンモニアの生成が増加する可能性がある。アンモニアと硫化水素は、貯蔵中に豚の糞から生成される主要なガスである。

アンモニア、硫化水素、メタン、悪臭の排出

豚への DDGS の給与が、糞尿からのガスと臭気の発生に及ぼす影響を調査するためにいくつかの研究が行われている。Powers ら (2009) は、DDGS を 0 または 20% 配合した飼料への無機または有機微量無機物を添加した場合のアンモニア、硫化水素、メタンおよび非メタン炭化水素の放出量を調査した。DDGS 配合飼料を給与すると、アンモニア、メタンおよび非メタン炭化水素排出量が

表6. トウモロコシ・大豆粕主体飼料および DDGS 35%配合飼料を給与した豚の糞尿特性と臭気成分濃度(Trabueら、2016 から改編)

測定値	トウモロコシ・大豆粕主体飼料	DDGS 35%配合飼料
糞尿特性		
温度 °C	14.1 ^b	14.5 ^a
乾物 %	3.4 ^b	6.2 ^a
外殻 %	16.7 ^b	87.5 ^a
pH	8.42 ^a	7.61 ^b
全アンモニア態窒素 μmol/g	480 ^b	628 ^a
全硫化物イオウ μmol/g	0.41 ^b	0.79 ^a
臭気成分濃度 μg/m³		
アンモニア	12,627 ^a	8,651 ^b
硫化水素	189 ^a	129 ^b
酢酸	0.2 ^b	21.3 ^a
プロピオン酸	0.50 ^b	20.0 ^a
イソ酪酸	0.49 ^b	17.9 ^a
酪酸	0.67 ^b	32.1 ^a
3-メチルブタン酸	0.36 ^b	17.7 ^a
短鎖脂肪酸(C ₅ -C ₇)	0.23	8.1
フェノール	33.3 ^b	54.6 ^a
4-メチルフェノール	12.4 ^b	24.1 ^a
4-エチルフェノール	7.7 ^a	2.6 ^a
インドール	0.48	0.78
3-メチルインドール	1.06	0.57

a - b 異符号間に有意差あり (p < 0.05)

増加したが、有機微量無機物を添加すると、DDGS 配合飼料に比べて硫化水素発生量が減少した。この報告は、豚への DDGS 給与によるアンモニアと硫化水素の排出量の増加を示した唯一のものである。Spiehs ら(2012)の報告では、DDGS を 20%配合した飼料を 10 週間給与した場合の、イオウ、アンモニア、または臭気の総濃度は、トウモロコシ・大豆粕主体飼料と差がなかった。

Trabue ら(2016)は、育成期～肥育期の豚に対して DDGS を 35%配合した飼料を 42 日間給与し、糞尿の pH の低下、糞尿表面の外殻、乾物含量および糞尿中の炭素、窒素、イオウ濃度の増加をトウモロコシ・大豆粕主体飼料と比較した(表 6)。表面温度が高い堆肥や発泡している堆肥では温度が高く、pH が低い(Kerr ら、2006)事例がしばしばあり(van Weelden ら、2015)、これは、高繊維

の飼料の給与と関連している(Misselbrook ら、2005; Lynch ら、2007; Wood ら、2012)。そのため、堆肥の外殻(Wood ら、2012)、温度(Blunden and Aneja、2008; Blunden ら、2008; Rumsey and Aneja、2014)の上昇および DDGS の給与に関連する pH の低下により、ガス排出量が削減できる。実際、DDGS を給与した豚の糞尿からのアンモニアと硫化水素の排出量は、トウモロコシ・大豆粕主体飼料に比べて少なかったが、揮発性脂肪酸とフェノール化合物の濃度は多かった(表 6)。DDGS 配合飼料を給与した豚の堆肥の外殻が増加することにより、バリアとなって大気中へのガス排出を妨げ、硫化水素の発生量を減少させたと思われる。

Trabue ら(2016)の報告から、糞尿からの様々な臭気成分の排泄量を取りまとめて表 7 に示した。これらのデ

表 7. トウモロコシ・大豆粕主体飼料および DDGS 35%配合飼料を給与した豚の貯蔵糞からの臭気化合物の排出量 (Trabuera ら、2016 から改編)

ガス排出係数	トウモロコシ・大豆粕主体飼料	DDGS 35%配合飼料
アンモニア kg/日/動物係数 ¹	185.9 ^a	112.4 ^b
アンモニア 窒素g/消費窒素kg	528.7 ^a	289.3 ^b
硫化物イオウ kg/動物係数	1.80 ^a	0.87 ^b
硫化物イオウ g/消費量kg	90.6 ^a	22.7 ^b
短鎖脂肪酸総量 mg/日/動物係数	14.0 ^b	1,752 ^a
フェノール総量 mg/日/動物係数	554 ^b	960 ^a
インドール総量 mg/日/動物係数	21.9	19.1
全揮発性有機化合物総量 炭素gC/消費炭素kg	0.31 ^b	0.74 ^a
ヒトによる官能 ²	772	700
硫化水素 ³	576 ^a	287 ^b
アンモニア ³	40.1 ^a	27.6 ^b
短鎖脂肪酸総量 ³	4.7 ^a	484 ^b
フェノール類総量 ³	212 ^b	485 ^a
インドール類総量 ³	114	58
OAV(Total activity Value)総量 ³	862	948

¹ 体重500kg

² 濃度/閾値

³ 人間のパネルによる測定値および体重500kgの生きている動物に対して正規化された化学分析値

a - b 異符号間に有意差あり (p < 0.05)

一たは、豚の体重(動物の単位)と消費した栄養成分に基づいて正規化した。DDGS を 30%配合した飼料のアンモニア排出量は 30%(消費窒素に対する窒素量)でトウモロコシ・大豆粕主体飼料(53%)より低く、硫化水素排出量(消費イオウに対するイオウ量)も 2%でトウモロコシ・大豆粕主体飼料(9%)より低かった。これらの結果は、DDGS 配合飼料を豚に給与した結果(Li ら、2011)および家禽に給与した結果(Roberts ら、2007; Wu-Haan ら、2010; Li ら、2012)と一致している。これらはおそらく糞尿の pH が低下した(Roberts ら、2007)ことと、糞尿中に存在する微生物の活動が多く炭素により増加した(Kerr ら、2006; Ziemer ら、2009)ことによるものと考えられる。DDGS 35%配合飼料の糞尿では、揮発性脂肪酸とフェノール化合物の排出量が多かったが、インドールの排出量には差がなかった(表 7)。揮発性有機化合物の総排出量は、両飼料における消費総炭素の 1%未満であったため、アンモニアや硫化水素の排出量に比べて

比較的影響が小さかった。パネルによる官能テストで、両飼料を給与された糞尿の臭いの差を検知できなかったが、化学分析値では、DDGS 配合飼料のほうが硫化水素とアンモニアが低く、揮発性脂肪酸とフェノールの総量が高かった。豚の糞中の臭気化合物の大部分(60%)は、アンモニアと硫化水素に由来している。これらのデータは、DDGS 配合飼料のイオウ含量がトウモロコシ・大豆粕主体飼料のほぼ2倍であったため、DDGS 配合飼料を給与した時に窒素とイオウの排泄量を制御してもアンモニアと硫化水素の放出量を変化させないことを示している(Trabue and Kerr, 2016)が、DDGS 配合飼料を給与した豚の堆肥からの硫化水素排出量は、トウモロコシ・大豆粕主体飼料に比べて約 30%少なかった。

CO₂、メタンおよび亜酸化窒素は、家畜生産で懸念される主要な温室効果ガスである。Trabue ら(2016)の試験データから、主要な炭素、窒素およびイオウガスの排

表 8.トウモロコシ・大豆粕主体飼料および DDGS 35%配合飼料を給与した豚の貯蔵糞からの炭素、窒素および硫黄ガスの排出量(Trabue and Kerr, 2016 から改編)

ガス排出係数	トウモロコシ・大豆粕主体飼料	DDGS 35%配合飼料
二酸化炭素 kg/日/動物係数 ¹	3.89	3.71
二酸化炭素 炭素g/消費炭素kg	285.6	252.5
メタン kg/日/動物係数	18.5	21.9
メタン 炭素g/消費炭素kg	5.2	5.6
アンモニア kg/日/動物係数 ¹	185.9 ^a	112.4 ^b
アンモニア 窒素g/消費窒素kg	528.7 ^a	289.3 ^b
亜酸化窒素 kg/日/動物係数	7.9	7.5
亜酸化窒素 窒素g/消費窒素kg	20.7	19.0
硫化水素 kg/日/動物係数	1.80 ^a	0.87 ^b
硫化水素 イオウg/消費イオウkg	90.6 ^a	22.7 ^b

¹ 体重500kg

a - b 異符号間に有意差あり (p < 0.05)

出量も測定されている(Trabue and Kerr, 2016)が、その結果から、CO₂、メタンおよび亜酸化窒素の排出量は、動物単位と消費された元素の量で示した場合、両飼料間で差がなかった(表 8)。ただし、前述のように、DDGS 配合飼料を給与することで、アンモニアと硫化水素の排出が減少する。これらの結果は、DDGS 配合飼料を給与すると、トウモロコシ・大豆粕主体飼料を給与した豚より、貯蔵中の堆肥からの温室効果ガスの排出量が少ないことを示している。

糞尿の起泡

2009 年、米国の豚肉業界では糞尿からの発泡が広く問題となり、嫌気性発酵槽の貯蔵容量が減少して、バイオガスの生産量が増加し、ヒトと動物の安全性へ懸念が生じた。DDGS 配合飼料の給与がこの現象の潜在的な要因とし指摘されたが、複数の研究結果(Luo ら、2015; van Weelden ら、2016)は、DDGS 配合飼料を給与すると糞尿が発泡するという直接的な証拠を示していない。これらの研究結果は、糞尿の起泡性が飼料の粒子サイズが大きく、食物繊維の含量が多いほど増加し、栄養成分の消化率が低下し、乾物排泄量が増加することを示している。さらに、Van Weelden ら(2016)は、トウモロコシと大豆粕を含む粗挽き飼料を給与した豚の糞尿ではメタン発生量が最も低く、トウモロコシ、大豆粕および大豆皮を配

合した飼料を給与した豚の糞尿ではメタン生産量が最も大きく、DDGS を 35%配合した飼料を給与した豚の糞尿のメタン生成率は、全二者の間中であるとしている。しかし、生化学的なメタン生産の可能性は、トウモロコシ、大豆粕飼料またはトウモロコシ、大豆粕、大豆皮飼料と比べて、DDGS 35%飼料を給与したときに最大だった。これは、糞尿からエネルギーを回収するためのバイオガス生産システムを設置している養豚場にとって、DDGS 配合飼料を給与すると、大量のメタンを生成するために糞尿に大量の炭素が供給されることを示唆している。

ライフサイクルアセスメント

養豚業界で様々な飼料原料を使用することによる環境影響のライフサイクルアセスメントに関心が高まっている。Lammers ら(2010)は、アイオワ州において DDGS 配合飼料で用いられている飼料原料の生産と加工、非太陽光エネルギーの使用と地球温暖化の可能性に焦点を当てた部分的なライフサイクルアセスメントを実施した。残念ながら、この研究では飼料設計による経済的な分析は考慮されていなかったことから、誤解を招く結果となった。Thoma ら(2011)による別の研究では、豚用飼料に DDGS を用いると、豚肉の生産から消費までの全体的なカーボンフットプリントが約 6%増加した。これは、トウモロコシや大豆粕と比較した場合、製造プロセスにおいて

表 9. カナダの育成～肥育期用飼料に使用されている併産物・副産物が最大量配合されている飼料 1 kgあたりの平均環境影響のトウモロコシ・大豆粕主体飼料(対照)との比較(Mackenzie ら、2016 から改編)

環境要因	対照	肉粉 ¹	パンくず ²	DDGS ³	ホイトショーツ ⁴
再生不可能な資源の使用 等量 g	1.90	1.81	1.82	3.25	1.57
酸性化の可能性 二酸化硫黄等量 g	5.71	5.30	5.32	4.46	5.03
富栄養化の可能性 リン酸塩等量 g	1.22	1.14	1.16	0.98	1.08
地球温暖化の可能性 二酸化炭素等量 g	0.40	0.38	0.38	0.52	0.33
再生不可能なエネルギー使用量 MJ	4.49	4.27	4.27	7.32	3.70

¹ 育成期、肥育期、仕上げ期用飼料に5.0、7.5および7.5%配合

² 育成期、肥育期、仕上げ期用飼料に7.5、10.0および10.0%配合

³ 育成期、肥育期、仕上げ期用飼料に30.0、30.0および20.0%配合

⁴ 育成期、肥育期、仕上げ期用飼料に30.0、40.0および20.0%配合

エタノールと併産物の製造で消費される追加のエネルギーに起因している。

カナダの豚肉生産システムにおいて、豚用飼料にヒトの食物とバイオ燃料のサプライチェーンからの併産物を使用することの環境への影響が、Mackenzie ら(2016)によるライフサイクルアセスメントで調査された。表 9 に示すように、トウモロコシ DDGS を最大の割合で配合した飼料を給与すると、対照のトウモロコシ・大豆粕主体飼料と比べて、飼料 1 kgあたりの非再生可能資源の使用が 71%、非再生可能エネルギーの使用が 68%、地球温暖化係数が 30%増加した。しかし、トウモロコシ DDGS 配合飼料では、トウモロコシ・大豆粕主体飼料と他の副産物を配合した飼料と比べて、酸性化の可能性が 20%、富栄養化の可能性が 22%減少した。環境への影響が死屠体重量 1 kgあたりで表された場合、影響はそれほど劇的ではないが、飼料 1 kgあたりで表された場合と同じ傾向を示した。

結論

すべての食料生産動物用飼料に DDGS を使用する際に、NE と消化可能な栄養成分含量に基づいて配合設計を行うことは、家畜・家禽からの排泄物への窒素とリンの過剰な排泄を抑え、環境の持続可能性を高めるために必須である。DDGS は、豚、家禽および水産養殖動物の要求量に比べて CP が比較的高く、リジンやその他のアミノ酸含量が少ないが、結晶アミノ酸利用の費用対効果

により、飼料の CP 含量を減らし、必須アミノ酸の要求量を充足させることで、窒素排泄を減らすことが出来る。放牧中の反すう家畜では、DDGS を補給することで発育と産乳成績が改善されるだけでなく、排泄された尿と糞が牧草の成長に必要な窒素を供給し、牧草の収量を高める費用対効果が高い方法として有効であることも明らかになっている。他の穀物および穀物由来する飼料原料と比較したトウモロコシ DDGS のユニークな利点の一つは、総可消化リン含量が比較的高いことである。消化可能なリンに基づいて豚および家禽用飼料を設計し、さらにフィターゼを添加すると、リンの排泄量を大幅に減らすことが出来る。さらに、いくつかの報告では、DDGS を含む飼料を給与すると反芻家畜におけるメタン排出量が減少し、豚および家禽のアンモニアと硫化水素の排泄が減少する。DDGS を他の併産物または副産物原料と比較した最初の研究では、動物の飼料の環境への影響を最小限に抑えるための DDGS のいくつかの追加の利点が見られている。

引用文献

Abd El-Hack, M.E., and S. Mahgoub. 2015. Mitigating harmful emissions from laying hens manure and enhancing productive performance through feeding DDGS with or without *Bacillus* spp. Proceedings of the International Conference on Industrial Waste and Wastewater Treatment and Valorization, May 21–23,

- 2015, President Hotel, Athens, Greece.
- Aguirre-Villegas, H.A., T.H. Passos-Fonseca, D.J. Reinemann, L.E. Armentano, M.A. Wattiaux, V.E. Cabrera, J.M. Norman, and R. Larson. 2015. Green cheese: Partial life cycle assessment of greenhouse gas emissions and energy intensity of integrated dairy production and bioenergy systems. *J. Dairy Sci.* 98:1571–1592.
- Almeida, F.N., and H.H. Stein. 2012. Effects of graded levels of microbial phytase on the standardized total tract digestibility of phosphorus in corn and corn coproducts fed to pigs. *J. Anim. Sci.* 90:1262–1269.
- Anderson, P.V., B.J. Kerr, T.E. Weber, C.J. Ziemer, and G.C. Shurson. 2012. Determination and prediction of energy from chemical analysis of corn co-products fed to finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 90:1242–1254.
- Babcock, B.A., D.J. Hayes, and J.D. Lawrence. 2008. Using Distillers Grains in the U.S. and International Livestock and Poultry Industries. Midwest Agribusiness Trade Research and Information Center, Ames, IA. http://www.card.iastate.edu/books/distillers_grains/.
- Baker, S.R., B.G. Kim, and H.H. Stein. 2013. Comparison of values for standardized total tract digestibility and relative bioavailability of phosphorus in dicalcium phosphate and distillers dried grains with solubles fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 91:203–210.
- Ball, P.R., and J.C. Ryden. 1984. Nitrogen relationships in intensively managed temperate grasslands. *Plant Soil* 76:23–33.
- Beauchemin, K.A., H.H. Janzen, S.M. Little, T.A. McAllister, and S.M. McGinn. 2011. Mitigation of greenhouse gas emissions from beef production in western Canada – Evaluation using farm-based life cycle assessment. *Anim. Feed Sci. Technol.* 166–167:663–677.
- Benchaar, C., F. Hassanat, R. Gervais, P.Y. Chouinard, C. Julien, H.V. Petit, and D.I. Masse. 2013. Effects of increasing amounts of corn dried distillers grains with solubles in dairy cow diets on methane production, ruminal fermentation, digestion, N balance, and milk production. *J. Dairy Sci.* 96:2413–2427.
- Bernier, J.N., M. Undi, K.H. Ominski, G. Donohoe, M. Tenuta, D. Flaten, J.C. Plaizier, and K.M. Wittenberg. 2014. Nitrogen and phosphorus utilization and excretion by beef cows fed a low quality forage diet supplemented with dried distillers grains with solubles under thermal neutral and prolonged cold conditions. *Anim. Feed Sci. Technol.* 193:9–20.
- Blanes-Vidal, V., M. Hasen, A. Adamsen, A. Feilberg, S. Petersen, and B. Jensen. 2009. Characterization of odor released during handling of swine slurry: Part I. Relationship between odorants and perceived odor concentration. *Atmos. Environ.* 43:2997–3005.
- Blunden, J., and V. Aneja. 2008. Characterizing ammonia and hydrogen sulfide emissions from a swine waste treatment lagoon in North Carolina. *Atmos. Environ.* 42:3277–3290.
- Blunden, J., V. Aneja, and P. Westerman. 2008. Measurement and analysis of ammonia and hydrogen sulfide emissions from a mechanically ventilated swine confinement building in North Carolina. *Atmos. Environ.* 42:3315–3331.
- Bregendahl, K. S.A. Roberts, B. Kerr, and D. Hoehler. 2008. Ideal ratios of isoleucine, methionine, methionine plus cysteine, threonine, tryptophan and valine relative to lysine for white leghorn-type laying hens of twenty-eight to thirty-four weeks of age. *Poult. Sci.* 87:744–758.
- Degen, L., V. Halas, and I. Babinsky. 2007. Effect of dietary bre on protein and fat digestibility and its consequences on diet formulation for growing and fattening pigs: A review. *Acta Agric. Scand. Sect. A* 57:1–9.
- Deniz, G., H. Gencoglu, S.S. Gezen, II. Turkmen, A. Orman, and C. Kara. 2013. Effects of feeding corn distiller's dried grains with solubles with and without enzyme cocktail supplementation to laying hens on performance, egg quality, selected manure parameters, and feed cost. *Livest. Sci.* 152:174–181.

- Drehmel, O.R., S.C. Fernando, J.L. Gramkow, J.V. Judy, J.C. MacDonald, H.A. Paz Manzano, and P.J. Kononoff. 2016. Factors affecting methane production from ruminal fermentation of ber isolated from dried distillers' grains and solubles. *J. Anim. Sci.* 94(E-Suppl. 5):697.
- Drewnoski, M.E., C.J. Brasche, and S.L. Hansen. 2014. Effects of dietary sulfur source on rumen pH and hydrogen sulfide gas concentration. *Livest. Sci.* 165:66–69.
- El-Sayed, A.-F.M., M.W. Dickson, and G.O. El-Naggar. 2015. Value chain analysis of the aquaculture feed sector in Egypt. *Aquaculture* 437:92–101.
- FAO. 2016. *FishStatJ*. Rome, Italy: FAO – Department of Fisheries and Aquaculture.
- Feilberg, A., D. Liu, A. Adamsen, M. Hensen, and K. Jonassen. 2010. Odorant emissions from intensive pig production measured by online proton-transfer-reaction mass spectrometry. *Environ. Sci. Technol.* 44:5894–5900.
- Greenquist, M.A., A.K. Schwarz, T.J. Klopfenstein, W.H. Schacht, G.E. Erickson, K.J. Vander Pol, M.K. Luebke, K.R. Brink, and L.B. Baleseng. 2011. Effects of nitrogen fertilization and dried distillers grains supplementation: Nitrogen use efficiency. *J. Anim. Sci.* 89:1146–1152.
- Hao, X., M.B. Benke, C. Li, F.J. Larney, K.A. Beauchemin, and T.A. McAllister. 2011. Nitrogen transformation and greenhouse gas emissions during composting of manure from cattle fed diets containing corn dried distillers grains with solubles and condensed tannins. *Anim. Feed Sci. Technol.* 166–167:539–549.
- Henriksson, P.J. G., C.V. Mohan, and M.J. Phillips. 2017a. Evaluation of different aquaculture feed ingredients in Indonesia using life cycle assessment. *IJoLCAS* 1:13–21.
- Henriksson, P.J.G., M. Dickson, A.N. Allah, D. Al-Kenawy, and M. Phillips. 2017b. Benchmarking the environmental performance of best management practice and genetic improvements in Egyptian aquaculture using life cycle assessment. *Aquaculture* 468:53–59.
- Hristov, A.N., J. Oh, J.L. Firkins, J. Dijkstra, E. Kebreab, G. Waghorn, H.P.S. Makkar, A.T. Adesogan, W. Yang, C. Lee, P.J. Gerber, B. Henderson, and J.M. Tricarico. 2014. SPECIAL TOPICS – Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: I. A review of enteric methane mitigation options. *J. Anim. Sci.* 91:5045–5069.
- Hunerberg, M., S.M. McGinn, K.A. Beauchemin, E.K. Okine, O.M. Harstad, and T.A. McAllister. 2013. Effect of dried distillers' grains with solubles on enteric methane emissions and nitrogen excretion from finishing beef cattle. *Can. J. Anim. Sci.* 93:373–385.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. *Climate Change 2007: Synthesis Report*. http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_synthesis_report.htm.
- Jarret, G., J. Martinez, and J.Y. Dourmad. 2011. Pig feeding strategy coupled with effluent management—fresh or stored slurry, solid phase separation—on methane potential and methane conversion factors during storage. *Atmos. Environ.* 45:6204–6209.
- Judy, J.V., T.M. Brown-Brandl, S.C. Fernando, and P.J. Kononoff. 2016. Manipulation of lactating dairy cows diets using reduced-fat distillers' grain, corn oil, and calcium sulfate to reduce methane production measured by indirect calorimetry. *J. Dairy Sci.* 99 (E-Suppl. 1): 706 (Abstr.)
- Kaufmann, T. 2015. Sustainable livestock production: Low emission farm – The innovative combination of nutrient, emission and waste management with special emphasis on Chinese pig production. *Anim. Nutr.* 1:104–112.
- Kebreab, E., A. Liedke, D. Caro, S. Deimling, M. Binder, and M. Finkbeiner. 2016. Environmental impact of using specialty feed ingredients in swine and poultry production: A life cycle assessment. *J. Anim. Sci.* 94:2664–2681.
- Kerr, B.J., C.J. Ziemer, T.E. Weber, S.L. Trabue, B.L.

- Bearson, G.C. Shurson, and M.H. Whitney. 2008. Total sulfur composition of common livestock feedstuffs using thermal combustion or inductively coupled plasma methodology. *J. Anim. Sci.* 86:2377–2384.
- Kerr, B.J., C.J. Ziemer, S.L. Trabue, J.D. Crouse, and T.B. Parkin. 2006. Manure composition as affected by dietary protein and cellulose concentration. *J. Anim. Sci.* 84:1584–1592.
- Kerr, B.J. 2003. Dietary manipulation to reduce environmental impact. In: R.O. Ball, ed., 9th International Symposium on Digestive Physiology in Pigs. Banff, AB, Canada. P. 139–158.
- Kil, D.Y., T.E. Sauber, D.B. Jones, and H.H. Stein. 2010. Effect of the form of dietary fat on the concentration of dietary neutral detergent fiber on ileal and total tract digestibility of fat by growing pigs. *J. Anim. Sci.* 88:2959–2967.
- Klevenhusen, F., M. Kreuzer, and C. Soliva. 2011. Enteric and manure derived methane and nitrogen emissions as well as metabolic energy losses in cows fed balanced diets based on maize, barley, or grass hay. *Animal* 5:450–460.
- Lammers, P.J., M.D. Kenealy, J.B. Kliebenstein, J.D. Harmon, M.J. Helmers, and M.S. Honeyman. 2010. Nonsolar energy use and one-hundred-year global warming potential of Iowa swine feedstuffs and feeding strategies. *J. Anim. Sci.* 88:1204–1212.
- Li, W., Q.F. Li, W. Powers, D. Karcher, R. Angel, and T.J. Applegate. 2014. Effects of distillers dried grains with solubles and mineral sources on gaseous emissions. *J. Appl. Poult. Res.* 23:41–50.
- Li, H., H. Xin, R. Burns, S. Roberts, S. Li, J. Kliebenstein, and K. Bregendahl. 2012. Reducing ammonia emissions from laying-hen houses through dietary manipulation. *J. Air Waste Manage. Assoc.* 62:160–169.
- Li, W., W. Powers, and G. Hill. 2011. Feeding distillers dried grains with solubles and organic trace mineral sources to swine and resulting effect on gaseous emissions. *J. Anim. Sci.* 89:3286–3299.
- Lu, L., X. D. Liao, and X.D. Luo. 2017. Nutritional strategies for reducing nitrogen, phosphorus and trace mineral excretions for livestock and poultry. *J. Integrative Agric.* 16:60345–7.
- Luo, Z., P.E. Urriola, B. Hu, B.J. Kerr, and G.C. Shurson. 2015. Effect of diet composition and particle size on nutrient excretion off finishing pigs and the propensity to cause manure pit foaming. *J. Anim. Sci.* 93(Suppl. 2):165.
- Lynch, M.B., T. Sweeney, J.J. Callan, and J.V. O’Doherty. 2007. Effects on increasing the intake of dietary beta-glucans by exchanging wheat for barley on nutrient digestibility, nitrogen excretion, intestinal micro-flora, volatile fatty acid concentration and manure ammonia emissions in finishing pigs. *Animal* 1:812–819.
- Mackenzie, S.G., I. Leinonen, N. Ferguson, and I. Kyriazakis. 2016. Can the environmental impact of pig systems be reduced by utilizing co-products as feed? *J. Cleaner Prod.* 115:172–181.
- Martinez-Amezcuca, C., C.M. Parsons, and D.H. Baker. 2006. Effect of microbial phytase and citric acid on phosphorus bioavailability, apparent metabolizable energy, and amino acid digestibility in distillers dried grains with solubles in chicks. *Poult. Sci.* 85:470–475.
- Masa’deh, M.K. 2011. Dried distillers grain with solubles in laying hen and pullet rations. Ph.D. thesis, Animal Science Department, University of Nebraska–Lincoln.
- Massé, D.I., G. Jarret, C. Benchaar, and N.M. Cata Saady. 2014. Effect of corn dried distillers grains with solubles (DDGS) in dairy cow diets on manure bioenergy production potential. *Animals* 4:82–92.
- McDonnell, P., C.J. O’Shea, J.J. Callan, and J.V. O’Doherty. 2011. The response of growth performance, nitrogen, and phosphorus excretion of growing-finishing pigs to diets containing incremental levels of maize dried distiller’s grains with solubles. *Anim. Feed sci. technol.* 169:104–112.
- McGinn, S.M., Y.-H. Chung, K.A. Beauchemin, A.D. Iwaasa,

- and C. Grainger. 2009. Use of corn distillers dried grains to reduce enteric methane loss from beef cattle. *Can. J. Anim. Sci.* 89:409–413.
- Misselbrook, T., S. Brookman, K. Smith, T. Cumby, A. Williams, and D. McCrory. 2005. Crusting of stored dairy slurry to abate ammonia emissions: Pilot-scale studies. *J. Environ. Qual.* 34:411–419.
- Morine, S.J., M.E. Drewnoski, and S.L. Hansen. 2014. Increasing dietary neutral detergent fiber concentration decreases ruminal hydrogen sulfide concentrations in steers fed high-sulfur diets based on ethanol coproducts. *J. Anim. Sci.* 92:3035–3041.
- Pineda, L., S. Roberts, B. Kerr, R. Kwakkel, M. Verstegen, and K. Bregendahl. 2008. Maximum dietary content of corn dried distiller's grains with solubles in diets for laying hens: Effects on nitrogen balance, manure excretion, egg production, and egg quality. Iowa State University Animal Industry report 2008, A.S. Lea-et R2334. <http://www.ans.iastate.edu/report/air/>.
- Regassa, T., R. Koelsch, S. Scheideler, and M. Masa' deh. 2008. Impact of feeding distillers grains on comprehensive nutrient management planning for poultry layer production systems. University of Nebraska – Lincoln Extension RP194, 6 pp.
- Roberts, S., H. Xin, B. Kerr, J. Russell, and K. Bregendaahl. 2007. Effects of dietary fiber and reduced crude protein on ammonia emissions from laying hen manure. *Poult. Sci.* 86:1625–1632.
- Rojas, O.J., Y. Liu, and H.H. Stein. 2013. Phosphorus digestibility and concentration of digestible and metabolizable energy in corn, corn coproducts, and bakery meal fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 91:5326–5335.
- Rumsey, I., and V. Aneja. 2014. Measurement and modeling of hydrogen sulfide lagoon emissions from a swine concentrated animal feeding operation. *Environ. Sci. Technol.* 48:1609–1617.
- Shurson, G.C. 2017. The role of biofuels coproducts in feeding the world sustainably. *Annu. Rev. Anim. Biosci.* 5:229–254.
- Smith, P., D. Martino, Z. Cai, D. Gwary, H. Janzen, P. Kumar, B. McCarl, S. Ogle, F. O' Mara, C. Rice, B. Scholes, and O. Sirotenko. 2007. Agriculture. In: *Climate Change 2007: Mitigation*. B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, and L.A. Meyer eds. Contribution III to the fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY.
- Spiehs, M.J., M. H. Whitney, G.C. Shurson, R.E. Nicolai, J.A. Renteria-Flores, and D.B. Parker. 2012. Odor and gas emissions and nutrient excretion from pigs fed diets containing dried distillers grains with solubles. *Appl. Eng. Agric.* 28:431–437.
- Steinfeld, H., P. Gerber, T. Wassenaar, V. Castle, M. Rosales, and C. de Haan. 2006. *Livestock's Long Shadow: Environmental Issues and Options*. Rome: Food Agric. Organ.
- Thoma, G., D. Nutter, R. Ulrich, C. Maxwell, J. Frank, and C. East. 2011. National life cycle carbon footprint study for production of U.S. swine. Final project report. National Pork Board, Des Moines, IA. <https://porkcdn.s3.amazonaws.com/sites/all/files/documents/NPBpercent20Scan percent20Final percent20- percent20Maypercent202011.pdf>
- Trabue, S., B.J. Kerr, and K. Scoggin. 2016. Odor and odorous compound emissions from manure of swine fed standard and dried distillers grains with solubles supplemented diets. *J. Environ. Qual.* 45:915–923.
- Trabue, S., and B. Kerr. 2016. Emissions of greenhouse gases, ammonia, and hydrogen sulfide from pigs fed standard diets and diets supplemented with dried distillers grains with solubles. *J. Environ. Qual.* 43:1176–1186.
- Trabue, S.L., B. Kerr, C. Ziemer, and B. Bearson. 2011. Swine odor analyzed by both human panels and chemical techniques. *J. Environ. Qual.* 40:1510–1520.

- van Weelden, M.B., D.S. Anderson, B.J. Kerr, S.L. Trabue, and L.M. Pepple. 2016. Impact of fiber source and feed particle size on swine manure properties related to spontaneous foam formation during anaerobic decomposition. *Bioresource Technol.* 202:84–92.
- van Weelden, M., D.S. Anderson, S.L. Trabue, B.J. Kerr, K.A. Rosentrater, and L.M. Pepple. 2015. An evaluation of the physico-chemical and biological characteristics of foaming manure. *Trans. ASABE* 58:1299–1307.
- Wood, J., R. Gordon, C. Wagner–Riddle, K. Duneld, and A. Madani. 2012. Relationships between dairy slurry total solids, gas emissions and surface crust. *J. Environ. Qual.* 41:694–704.
- Wu–Haan, W., W. Powers, R. Angel, and T.J. Applegate. 2010. The use of distillers dried grains plus solubles as a feed ingredient on air emissions and performance from laying hens. *Poult. Sci.* 89:1355–1359.
- Zhang, Y. 2010. Sulfur concentration in distiller’s dried grains with solubles (DDGS) and its impact on palatability and pig performance. National Pork Board. Report no. NPB–08–093, <http://old.pork.org/lelibrary/researchdocuments/08–093–zhang.siu.pdf>.
- Zilberman, D. 2017. Indirect land use change: much ado about (almost) nothing. *GCB Bioenergy* 9:485–488.
- Ziemer, C., B. Kerr, S. Trabue, H. Stein, D. Stahl, and S. Davidson. 2009. Dietary protein and cellulose effects on chemical and microbial characteristics of swine feces and stored manure. *J. Environ. Qual.* 38:2138–2146.

28章: DDGS の価格決定と輸送に影響を及ぼす要因

はじめに

DDGS が国際市場で経済的な飼料原料であるか否かを決定する大きな要因の1つは、DDGS を輸入する際の価格と輸送費である。この章では、米国 DDGS の輸入先で負担される費用を決めるための要因、課題、価格決定メカニズムについて説明する。これまで、DDGS の主な利用者は米国内の乳用牛および肉用牛飼育業者であった(図1)。しかし、2003~2004年頃から、豚および家禽用飼料原料として使用の利点に関する新しい情報が入手できるようになったことから、養豚業界での DDGS の使用量が劇的に増加しはじめた。家禽産業ではそれほど増加はないが、現在、米国における養豚および養鶏

業界では、国内市場に供給される DDGS の約 25% を消費しており、特にトウモロコシや大豆粕などの競合する飼料原料の価格が高く、供給量に年変動があるために、この増加傾向は今後も続くと思われる。

米国のエタノールと DDGS の生産量は 2001 年から 2010 年にかけて劇的に増加したが、2010 年以降は比較的安定している。図2に示すように、米国ではエタノール産業の発展により、DDGS 生産量が増加し、輸出割合にも変化が生じている。米国の家畜および家禽業界での DDGS 使用量が飽和状態になると輸出割合が高まる。ただし、DDGS の輸出量の増加は、国際市場で競合する他の飼料原料の価格や輸送費に大きく依存する。

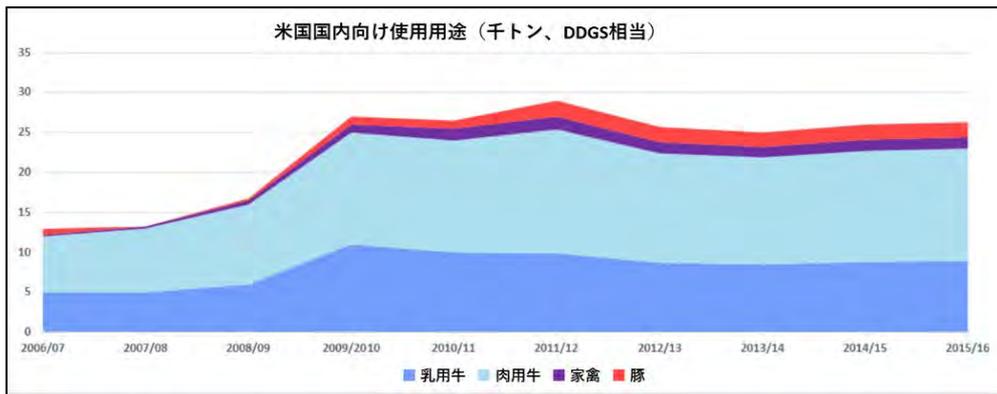


図1. 2006~2016年の作物年度(10月~9月)におけるDDGSの家畜別使用量(出典: Steve Markham, CHS Inc.)

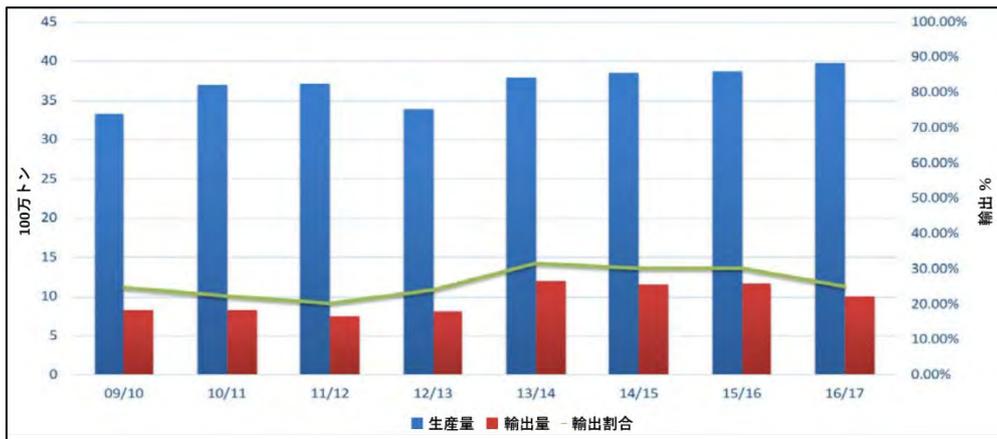


図2. 2009~2017年の米国におけるDDGSの生産と輸出量(出典: Sean Broderick, CHS Inc.)

価格に影響を及ぼす要因

DDGS の価格に影響を及ぼす要因はいくつかある。まず、DDGS の需要が最も高いのは米国内であり、現在生産されている蒸留併産物の約 75%が家畜・家禽用途で消費されていることを頭に入れておく必要がある。この結果、2017 年には生産量の約 25%が輸出されているが、輸出量は毎年増加しており、エタノールおよび併産物の生産者と市場関係者は、輸出市場が DDGS の全体的な需要において非常に重要であることを認識している。

DDGS は非常に特徴的な飼料原料で、たん白質が中程度で、エネルギー含量が高く、飼料中のトウモロコシ、大豆粕およびリン源の一部と置換することにより使用される。したがって、DDGS の価格は、トウモロコシと大豆粕の市場価格、輸出供給量、米国内での消費の季節性、輸送費の変動および輸入関税等、いくつかの要因に影響を受ける。飼料原料の取引業者の多くは DDGS を「たん白質源」と見なしており、その結果、DDGS を大豆粕と比較しているが、栄養的および経済的価値は実際にはトウモロコシと近似しており、DDGS の価格は大豆粕市場よりもトウモロコシ市場に密接に関連している。図 3 に、メキシコ湾におけるトウモロコシと DDGS の過去の FOB (本船渡し) 価格の推移を示した。トウモロコシと大豆粕の市場の全体的な傾向は DDGS の価格に影響している

が、CBOT(シカゴ商品取引所)のトウモロコシまたは大豆粕市場の毎日のボラティリティ(価格変動の割合)は、DDGS 市場の毎日のボラティリティに必ずしも反映されていない。トウモロコシおよび大豆粕の価格が一般に DDGS 価格に比べて高い場合、DDGS は飼料中のトウモロコシおよび大豆粕をより多い量で置換することになる(すなわち、配合割合が高まる)。

DDGS の価格は季節的な影響を受ける。米国内で DDGS のほとんどが養牛用飼料原料として使用されているため、放牧のために牛が牧草地に移動する夏季(5~10月)には、飼料給与対象牛数が減少し、DDGS の需要が著しく減少する(図 4)。その結果、輸出向け供給量が増加し、夏季には DDGS の価格が安くなる。夏季にはエレベータの使用料とバージ使用料が安くなるため、DDGS の競争力が高まる。

市場での DDGS 価格が季節的な影響により高い間は、トウモロコシと大豆粕の競争力が DDGS を上回ることから、コスト重視で飼料の設計を行う際に DDGS の配合割合が低下する。年初の数か月間は需要が高まり、供給量が低下する時期でもあるため、一般的に、1~5 月には DDGS の価格が上昇する。これは、以前からの傾向ではあるが、今後もこの傾向が続くか否かは不明である。米国のエタノール産業の発展により、DDGS の市場への

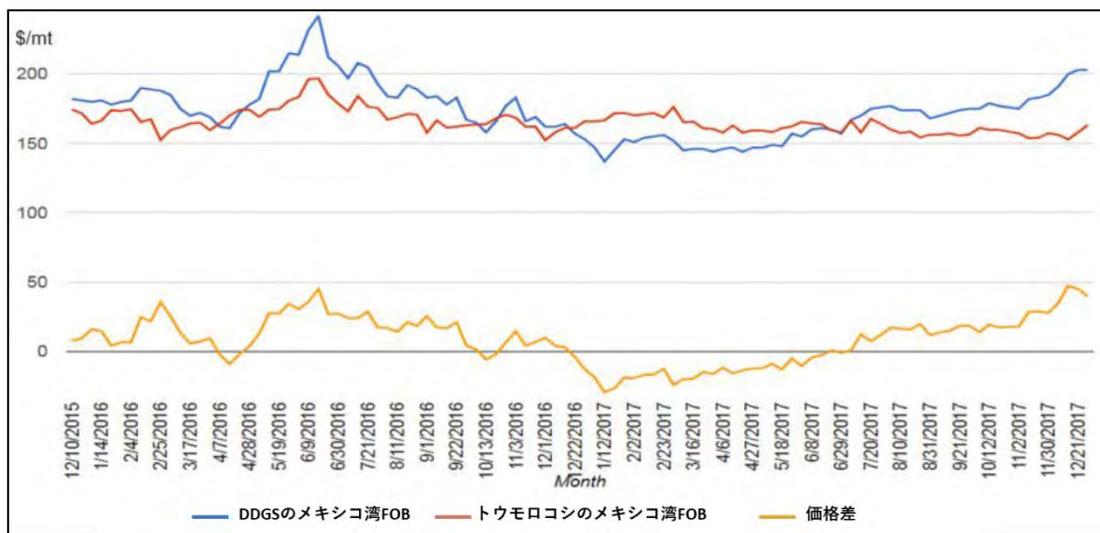


図 3. 2015 年 12 月～2018 年 1 月における米国湾岸のトウモロコシに対する DDGS の価格(出典: Steve Markham, CHS Inc.)

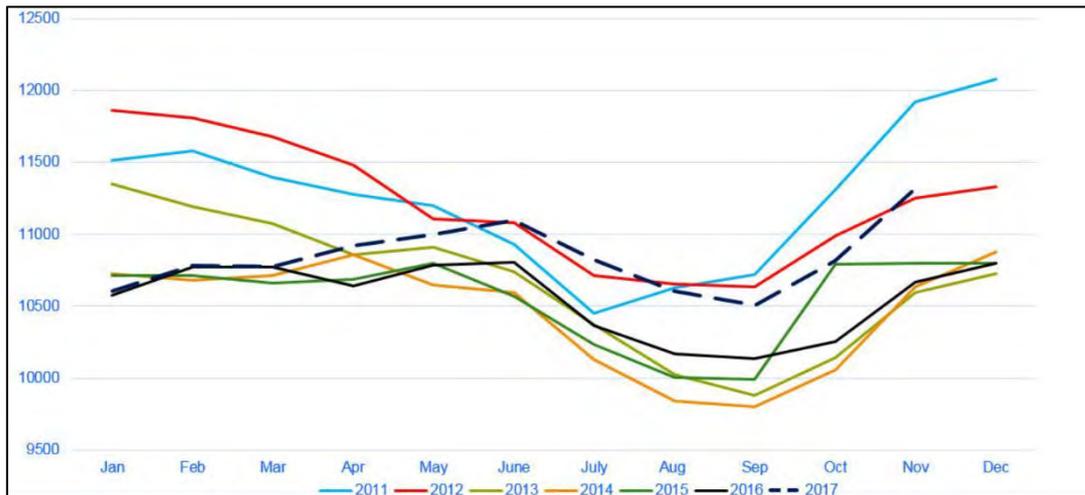


図4. 高穀類配合飼料を給与するフィードロット牛数の季節変動(出典: Sam Erwin, CHS Inc.)

供給量が増加しているため、買い手側も売り手側も、晩冬から春にかけてみられる供給不足が今後も発生するとは考えないほうが良い。

米国における養豚および家禽業界では DDGS の総生産量に占める使用割合が増加し続けており、牛のように放牧シーズンによる季節的な影響がないため、DDGS 価格への季節的な影響は今後少なくなるものと思われる。DDGS の輸出市場は、米国市場における高値と安値のボラティリティを狭める意味でも大きな役割を果たしており、国内価格が低くなりすぎると、多くの場合、輸出量は増加する。

DDGS の輸送

バージと外航船

図5に示すように、バルチック海運指数に基づく海上運賃は過去10年間で劇的に変化している。例えば、2007年9月のチャーター外航船の価格は1日あたり94,000ドルを超え、2008年12月には3,350ドルまで低下したが、1年後には少し高くなっている。チャーター船価格の高いボラティリティは、輸入国の顧客がDDGSを入手する際の価格に大きな影響を及ぼす。現在の運賃は2016年1月の最低価格に比べて大幅に高まっているが、2010年の冬における最高価格に比べれば比較的合理的な水準である。

米国で利用できる最もコストパフォーマンスが高い輸



図5. 2009年以降のバルチック海運指数



Photo Courtesy of Steve Markham, CHS Inc.

送方法の一つは、バージを用いてDDGSを河川輸送し、その後、外航船に積替える手法である。バージの料金は、料金表の料率により算定されているが、長距離輸送(例えば、ミネソタ州ミネアポリスからルイジアナ州ニューオーリンズまで)では、より南部の出発地から短い距離を輸送する場合と比べて、高い料金表が適用され、料

率も高くなる。米国内には、バージやタグボートの航行が可能な水路が 5,000 マイルあり、河川ごとに料金表と料率が異なっている。

ニューオーリンズまでの輸送に使用されるバージには、通常、CIF NOLA(経費、保険料およびニューオーリンズまでの運賃)が適用されている。CIF 価格には、船への積載経費は含まれていない。一般的に、DDGS はバージに積込まれて、ニューオーリンズあるいはその周辺地域の港まで輸送され、そこで外航船に積換えられる。

積換えは、通常ミッドストリームローダーを使用して行われる。バージと外航船は、このローダーに横付けされ、ローダーを介して積換えが行われる。外航船のサイズは様々で、最も一般的なものは、ハンディサイズ船、ハンディマックス船およびパナマックス船である。ハンディサイズ船の積載能力は 20,000~30,000 トン、ハンディマックス船では 35,000~49,000 トン、パナマックス船は 50,000~75,000 トンである。パナマックス船 1 隻には、バージ 37 隻分あるいは貨車 555 両分の DDGS を積載することが出来る。外航船の運賃は、先物商品価格と同様に日々変動する。

海上運賃は、以下に示す多くの要因の影響を受ける。

- 市場の状況
- 必要とする船舶の種類
- 使用する港の許容喫水
- 入港税
- 荷揚げ条件
- 必用時間

外航船の需給

- 造船費用と運用経費
- 船舶の造船と廃船の比率
- 季節的な需要変動(例えば、北米や南米における収穫時期)
- 中国におけるすべての原材料への需要
- 航海距離
- ターンアラウンドタイム(船舶が目的港に到着してから出航港に到着するまでの期間)
- 市場心理と期待感

外航船チャーターのオプションは以下のとおりである。

る。

- 航海の概要:ポイント A からポイント B への輸送
→コスト計算上のリスクが少ない
- 定期用船:航海単位ではなく、特定期間チャーターする→潜在的リスクが高く、潜在的報酬も高額である。船舶が目的港に到着すると、クライムバケットを用いて荷降ろしするか、空気圧送で荷降ろしする。

コンテナ

米国は現在、世界最大のコンテナ輸入国で、そのため、非常に特殊な状況にある。電子機器、衣料品、自動車部品等で積載したコンテナは、主にアジアから米国に到着するが、同じ種類の消費財を再度積込むためには、このコンテナを出発地に戻す必要がある。汽船会社は、コンテナを空のままアジアに送り返すのではなく、帰路にも収入を生み出すことを考えている。このために、DDGS や他の農産物をコンテナに積載して送り戻している。米国内における最も余剰な空コンテナがあるのはイリノイ州シカゴとミズーリ州カンザスシティであり、次いで、テネシー州メンフィスである。一般的なコンテナ輸出の手順は以下のとおりである。

1. DDGS が、エタノール工場からコンテナ積み専用施設に出荷される。このような施設は通常、空のコンテナが保管されている大きなコンテナ集積ヤード周辺にある。
2. 場合によっては、エタノール工場の敷地内で DDGS をコンテナに積込むことで、第三者に支払う経費を削減している。
3. DDGS が積込まれたコンテナは、トラックでコンテナ集積ヤードに輸送され、その後、貨車に載せられる。
4. コンテナは米国内の港まで鉄道輸送され、コンテナ船に積込まれる。カリフォルニア州ロングビーチは、米国内の港の中で最も多くのコンテナを取扱っている。シカゴからロングビーチまでの輸送には通常 7~10 日、ロングビーチからアジアの港までの通常の輸送期間は 16~18 日である。



Photo Courtesy of Steve Markham, CHS Inc.

コンテナを用いた輸送は、限定した供給元またはエタノール工場から DDGS を購入することを望む買い手にとっては優れたオプションである。

鉄道

DDGS をメキシコとカナダに輸出するためには、ホッパー貨車を使用される。DDGS のメキシコへの鉄道輸送量は毎年指数関数的に増加しており、カナダへの鉄道輸送件数も年々増加している。鉄道輸送は、輸送時の作業工程数と輸送時間を考慮すると最も容易な方法である。

DDGS は、エタノール工場で貨車に積込まれ、鉄道で最終目的地まで輸送される。貨車は、国境到着時に検疫および清掃が行われ、その後、国境を越えて最終目的地に向かう。米国内の主要な鉄道は、Union Pacific (UP) と Burlington Northern Santa Fe (BNSF) であり、メキシコの主要鉄道は、Ferromex (FXE) と Kansas City Southern de Mexico (KCSM、以前は TFM) である。カナダの主要鉄道は、Canadian National Railway (CN) と Canadian Pacific Railway (CPR) である。

DDGS の輸出の課題: DDGS 輸出業者から見た要望

積載コストと効率

DDGS を外航船に積込むためには、トウモロコシと比べて時間が約 2 倍必要である。DDGS の輸送費に大きく影響する港湾のエレベータ業者の経費も高額である。エレベータの管理権を持たない輸出業者では、船が予定どおりに到着しない場合には、船積みが出来なくなる可能性がある。この状況を回避するために、DDGS の輸出



Photo Courtesy of Steve Markham, CHS Inc.

業者は、バージ、鉄道車両または内航船を適切な時期に確保しておく必要がある。これらの経費を最小限に抑えるためには、エレベータが重要となる。

コンテナ

数年前とは異なり、現在では、コンテナを空のままに戻すことはほとんどない。その結果、世界的に利用可能性が課題となっており、納期厳守の問題が発生している。原則として、バラ積み船の利用はより安価で信頼性が高く、DDGS の品質を容易に監視・制御出来る。

現在、コンテナ輸送の多くは、エタノール工場で直接積みが行われている。高品質の DDGS を生産するエタノール工場であっても、時には望ましくない品質の DDGS を製造されてしまう可能性があり、その情報が取引業者に知らされないままにコンテナに積込まれる可能性がある。

コンテナが期限通りに積載船まで輸送されないことも時に問題となる可能性がある。コンテナへ積込まれた後に、貨物料金に変更される可能性がある。コンテナ市場の季節的な変動により、予約のキャンセルや主要な輸出市場でのコンテナの在庫量の制限などにより、サプライチェーンに混乱が生じることがある。

DDGS の輸入を成功させるための提言

DDGS の輸入業者は、取引する供給業者と関係を深めることが不可欠である。具体的には、輸入業者は、輸出企業の物流および輸送能力を理解する必要がある。DDGS の輸出業者が港湾エレベータを所有していない場合、これらのエレベータへのアクセスが問題になる可能性がある。現在、米国内の DDGS 輸エレベータ用出来るエレベータは少なくエレベータ物副産物の流通量が記録的に増加しているため、貨物とエレベータの能力には限

度がある。

複数の輸送手段(五大湖、主要な河川、メキシコ湾、太平洋岸北西部)に設備と機能を有する輸出業者は、世界各国への輸出対応能力が優れている。最も安価な輸送費で DDGS を購入するためには、複数の輸送および積載方法に柔軟性を持つ業者と取引することが肝要である。

特定のエタノール工場の DDGS を取扱う業者は、供給する DDGS の品質をより容易に管理出来る。エタノール工場と直接販売契約を結んでいないブローカーやその他の取扱業者を通じて購入した製品を取扱う業者は、取り扱う DDGS の品質を簡単に管理することが出来ない。DDGS の供給元を管理できる取扱業者は、DDGS 製造時にサンプルを信頼できる受託試験機関に直接送付して

検査を行い、船舶または船倉への積込前に、そのデータを顧客に知らせることも出来る。目的地に到着した時に発生する潜在的な問題を回避するためには、サンプル分析のための信頼できる第三者試験機関を特定して顧客との間で同意しておくことが重要である。

カビ毒濃度に関する検査は、トウモロコシの原産地で入手したサンプルに対して実施することで、DDGS を生産するエタノール工場で使用されるトウモロコシの受け入れ制限を行うことも出来る。ハンターまたはミノルタの色調測定値を使用して、顧客の要望に合う色調を決めることも出来る。取引を行う前に、たん白質と脂肪の保証値についての合意を得ておくことも重要である。

DDGS の積み込み Photos Courtesy of Steve Markham, CHS Inc





29 章:アメリカ穀物協会が行った 世界各国で行われた低脂肪 DDGS の飼育試験

はじめに

2010 年以降、アメリカ穀物協会が日本、メキシコ、ベトナムで DDGS を評価するために行ったいくつかの実証試験の概要を説明する。以前にアメリカ穀物協会が支援した飼育試験に関する情報は、2012 年に発行された DDGS ハンドブックの第 3 版にまとめられている。

日本で最近行われた実証試験

豚

肥育前期における低脂肪 DDGS の給与が豚の肥育成績に及ぼす影響

要約

日本大学生物資源科学部で、豚の肥育前期に低脂肪 DDGS を給与し、その後の肥育成績に及ぼす影響を検討した。対照区は肥育前期(1 期)、後期(2 期)ともに DDGS は給与せず、試験区は 1 期用飼料に DDGS を 20% 配合し、2 期には対照区と同一の飼料を給与した。供試豚は、ランドレース種(L)、大ヨークシャー種(W)、交雑種(L×W)の計 67 頭を対照区と試験区に分けて群飼した。試験開始時体重は 50 kg とし、体重 75 kg までを 1 期、それ以降体重 115 kg 到達時までを 2 期として、各飼料を給与した。全供試豚について、体重、肥育日数、枝肉重量、背脂肪厚および格付を調査した。枝肉の分析にはランドレースの去勢雄 18 頭を用いた。その結果、全飼育期間の肥育日数、増体日量は区間に差がなかった。枝肉成績、枝肉ロース部の分析値(加熱損失率、テクスチャー、色調(L*, a*, b*)、背脂肪の融点、脂肪酸組成)には区間差はなかった。これらの結果から、肥育前期飼料に対して DDGS を 20% 配合しても、肥育成績に対する悪影響はなく、一般的な飼料を給与した場合と同様の生産性があることが明らかになった。

材料および方法

肥育前期における低脂肪 DDGS の給与が、豚の肥育成績に及ぼす影響を検討することを目的とした。試験は、2015 年 9 月から 2016 年 1 月まで、神奈川県豚肉生産者組合(神奈川県海老名市)の農場で実施した(写真 1)。

供試豚の飼育

供試豚は、ランドレース種(L)、大ヨークシャー種(W)、交雑種(L×W)の計 67 頭を用い、第 1 グループ(9 月 10 日開始、25 頭)と、第 2 グループ(10 月 4 日開始、42 頭)に分けて実施した。各グループ内で、品種、性別(雌、去勢雄)、開始時体重ができるかぎり均等になるように対照区と試験区に割り付け、さらにそれらを 3 豚房ずつに分けて飼育した。個体識別は耳標を装着して行った。試験開始時体重は 50 kg として 75 kg までを肥育前期(1 期)、それ以降 115 kg までを肥育後期(2 期)とした。給与飼料の切り替えは豚房毎の平均体重に基づいて 75 kg を目標に行った。体重 115 kg に到達した個体は個別豚房に移して飼育し順次出荷した。と畜は出荷の翌日または当日であり、その枝肉の格付を全頭記録した。

試験飼料

給与飼料の組成は表 1 に示した(写真 2)。対照区は 1 期、2 期ともに DDGS は給与せず、試験区は 2 期用飼料には低脂肪 DDGS を 20% 配合し、2 期は対照区と同一の飼料を給与した。1 期の試験飼料は、対照区中のトウモロコシおよび大豆粕の一部と代替し、両飼料の TDN(可消化養分総量)および CP(粗たん白質)を同水準に設計した。

発育成績の測定

体重は 1 週間毎に測定し、出荷目標体重(115 kg)に近づいた個体は適宜測定した。飼料給与量は群毎に測定し、それ以外の日齢、日増体量は個体別に測定した。なお、豚房内のすべての供試豚が同時に出荷できな

表 1. 供試飼料の配合割合(%、原物)

	1期用飼料		2期用飼料
	対照飼料	試験飼料	
低脂肪DDGS	-	20.00	-
トウモロコシ	56.28	47.73	56.22
マイロ	20.00	20.00	20.00
大豆粕	16.00	4.35	14.40
フスマ	3.00	3.00	7.00
魚粉 (CP 65%)	2.00	2.00	-
炭酸カルシウム	0.88	1.10	0.98
リン酸二石灰	0.41	0.15	0.48
動物性油脂	0.50	0.50	-
食塩	0.30	0.30	0.30
塩酸L-リジン	0.03	0.27	0.02
ビタミンB群プレミックス	0.20	0.20	0.20
ビタミンADE	0.20	0.20	0.20
微量ミネラルプレミックス	0.20	0.20	0.20
計		100.00	100.00

日本飼養標準による要求量に対する充足率 (%)

TDN (可消化養分総量) : 104.0、CP (粗たん白質) : 103.0、カルシウム : 107.7、リジン : 107.7

ったため、それぞれの個別の飼料摂取量は総給与量を測定日時点での供試豚数を基に豚房ごとに算出した。

屠体形質の測定

全供試豚の枝肉重量、背脂肪厚、格付を記録した。枝肉の分析にはランドレースの去勢雄、対照区 9 頭、試験区 9 頭を用いた。分析部位は左側ロース部とし、肩、背、腰に 3 分割した背部分を用い、ロース芯の加熱損失、テクスチャー、色調(L*, a*, b*)、ならびに背脂肪の内層の色調(L*, a*, b*)、脂肪融点、脂肪酸組成とした。加熱損失率は、(加熱前肉塊重量－加熱後肉塊重量)÷加熱前肉塊重量×100 によって求めた。テクスチャーはテンシプレッサーを、色調は色差計を用いて測定し、脂肪の融点は衛生試験法注解(1990 年版)の方法で測定した。脂肪酸組成はガスクロマトグラフィーによって測定した。

統計処理

t 検定により対照区と実験区の平均値の差を検定した。

結果および考察

試験飼料の一般成分を表 2 に、供試豚の品種、性別毎の結果を表 3 に示した。屠畜日齢は雌よりも去勢雄が

早く、日増体量は去勢雄が多く、背脂肪厚は去勢雄が厚いという一般的な肥育豚と同様の傾向を示し、品種間に平均値の差は認められなかった。そのため、以降の結果は供試個体全頭の平均値で示した。

発育成績

増体成績は表 4 に示した。体重 50 kg から試験を開始して 75 kg を超えてから 2 期用飼料に切り替え、115 kg に達したことを確認して出荷した。開始時と切り替え時は、群の平均値で管理し、出荷は個体管理したため、出荷時体重の標準偏差は小さくなった。期間全体の肥育日数は 80 日と 81 日で両区間に差はなく、増体日量も 0.84 kg と同じだった。最終的な屠畜日齢にも差はなかった。しかし、1 期と 2 期を比べると、1 期の飼育期間は試験区よりも対照区が数日長く、2 期は試験区が若干長い傾向を示した。飼料要求率は、DDGS を給与した試験区の 1 期(3.11)は、対照区(3.37)より優れる傾向を示したが、2 期では両区間に差がなかった。

屠体形質

枝肉成績には、枝肉重量、枝肉歩留、背脂肪厚、いずれにも違いは認められず、一般的な値を示した。格付に

表 2. 供試飼料の一般成分(%、原物)

	1期用飼料			2期用飼料
	DDGS	対照飼料	試験飼料	
水分	15.3	13.3	13.3	13.3
CP (粗たん白質)	26.9	14.9	14.2	13.2
粗脂肪	9.7	4.3	5.7	4.2
粗繊維	5.3	1.8	2.1	2.0
NFE (可溶性無窒素物)	38.4	61.9	60.9	63.6
粗灰分	4.4	3.8	3.8	3.7

表 3. 品種別の飼育成績

	性	動物数	と殺までの日数 (日)	増体日量 (kg)	背脂肪厚 (cm)
対照区					
ランドレース (L)	雌	8	203	0.76	2.0
	去勢雄	9	185	0.89	2.6
ヨークシャー (W)	雌	8	189	0.86	2.3
	去勢雄	5	187	0.86	2.3
交雑種 (L×W)	雌	1	185	1.04	2.3
	去勢雄	2	193	0.88	3.1
試験区					
ランドレース (L)	雌	8	200	0.80	2.2
	去勢雄	9	188	0.87	2.6
ヨークシャー (W)	雌	7	192	0.82	1.9
	去勢雄	4	190	0.88	2.3
交雑種 (L×W)	雌	5	194	0.85	2.4
	去勢雄	1	185	0.93	3.0

については、上物率は両区とも高くはなかったが、中物の頭数は対照区よりも試験区が多く、対照区は並の頭数が多くなる傾向があった。等外の理由はいずれも厚脂であった。全体の上物率が低かった理由は、試験農場側の事情で交雑種ではなく、純粋種を多く供試したためと考えられる。対照区に比べて試験区の中物率が高く、成績が良かった理由は不明だが、DDGSを給与した1期の発育が良好で、2期には対照区に比べて穏やかに発育したことが影響していた可能性がある。

ロース部の肉質分析にはランドレース種去勢雄の9頭ずつを供試し、表5に最長筋(ロース芯)の分析結果を示した。いずれの項目にも差は認められなかった(写真3)。表6にはロース背脂肪内層の結果を示した。これについて

でも各分析項目に差は認められなかった。脂肪の融点は約37℃と、いわゆる「脂肪がゆるい」と云われる30℃に近いような低い融点ではなく、良好な融点であった。脂肪酸組成の結果(表6)からも、リノール酸、リノレン酸のような多価不飽和脂肪酸は少なく、一価不飽和脂肪酸のオレイン酸、飽和脂肪酸のパルミチン酸とステアリン酸を多く含む標準的な脂肪酸組成であったと評価された。

結論

肥育前期飼料に対して低脂肪DDGSを20%配合して給与しても、肥育成績に対する悪影響はなく、一般的な飼料と同水準の生産性を得られることが明らかになった。

表 4. 発育成績および枝肉形質

	対照区 (n = 33)	試験区 (n = 34)
1期開始時体重 (kg)	50.1 ± 5.8	49.6 ± 6.6
2期開始時体重 (kg)	78.2 ± 6.1	79.2 ± 7.0
出荷体重 (kg)	117.2 ± 3.0	116.9 ± 2.7
肥育日数 (日)	82 ± 14	82 ± 12
1期	31 ± 5	32 ± 6
2期	51 ± 12	50 ± 11
飼料摂取量 (kg)	245.2 ± 47.5	235.8 ± 34.1
1期	92.1 ± 20.3	89.9 ± 15.0
2期	153.1 ± 43.8	145.9 ± 32.3
増体日量 (kg)	0.84 ± 0.11	0.83 ± 0.09
1期	0.93 ± 0.27	0.96 ± 0.21
2期	0.79 ± 0.14	0.76 ± 0.13
飼料要求率	3.61 ± 0.60	3.49 ± 0.38
1期	3.37 ± 0.93	3.11 ± 0.69
2期	3.94 ± 0.93	3.95 ± 0.90
と殺日数 (日)	192 ± 19	193 ± 16
屠体重 (kg)	77.5 ± 3.0	77.8 ± 2.4
枝肉歩留 (%)	66.1 ± 1.7	66.5 ± 1.4
背脂肪厚 (cm)	2.4 ± 0.6	2.3 ± 0.5
格付 (頭数)		
上	6	5
中	14	19
並	10	7
等外	3	3

平均値 ± 標準偏差 すべての項目で有意差なし

表 5. ロース芯の加熱損失、特性および色調

	対照区	試験区
加熱損失 (ドリップ率、%)	7.2 ± 1.4	8.4 ± 1.2
テクスチャー		
硬さ (kg/cm ²)	7.95 ± 0.76	8.37 ± 1.20
凝集性	0.50 ± 0.03	0.51 ± 0.03
弾力性 (%)	81.2 ± 1.6	80.8 ± 1.6
付着性 (cm ² /cm ²)	0.00 ± 0.01	0.00 ± 0.00
色調		
L*	51.8 ± 2.7	51.9 ± 2.6
a*	10.5 ± 1.1	10.4 ± 0.8
b*	10.8 ± 1.2	10.6 ± 1.0

平均値 ± 標準偏差 すべての項目で有意差なし

表 6. 背脂肪内層の色調、融点、脂肪酸組成

	対照区	試験区
色調		
L*	80.3 ± 1.5	79.5 ± 0.9
a*	6.7 ± 1.4	6.8 ± 1.0
b*	9.9 ± 1.9	10.4 ± 1.8
融点 (°C)	37.7 ± 1.3	37.0 ± 1.9
脂肪酸組成 (%)		
10 : 0 (デカン酸)	0.1 ± 0.0	0.1 ± 0.0
12 : 0 (ラウリン酸)	0.1 ± 0.0	0.1 ± 0.0
14 : 0 (ミリスチン酸)	1.3 ± 0.1	1.4 ± 0.1
16 : 0 (パルミチン酸)	27.0 ± 0.7	26.9 ± 0.8
16 : 1 (パルミトレイン酸)	1.5 ± 0.2	1.6 ± 0.2
17 : 0 (ヘプタデカン酸)	0.3 ± 0.1	0.3 ± 0.1
18 : 0 (ステアリン酸)	16.8 ± 1.0	15.9 ± 0.9
18 : 1 (n9) (オレイン酸)	39.4 ± 0.8	39.4 ± 1.2
18 : 2 (n6) (リノレン酸)	7.7 ± 0.6	6.7 ± 0.7
18 : 3 (n3) (αリノレン酸)	0.4 ± 0.0	0.4 ± 0.1
20 : 0 (アラキドン酸)	0.3 ± 0.0	0.3 ± 0.0
20 : 1 (イコセン酸)	1.1 ± 0.1	1.0 ± 0.1
20 : 2 (n2) (イコサジエン酸)	0.4 ± 0.1	0.4 ± 0.1
20 : 4 (n6) (アラキドン酸)	0.1 ± 0.0	0.1 ± 0.0

平均値 ± 標準偏差 すべての項目で有意差なし

写真 1. 試験場所



豚房

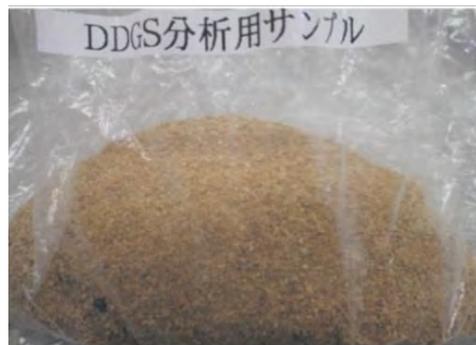


豚房



体重測定

写真 2. 供試飼料およびDDGS



DDGS



試験飼料および対照飼料



飼料

写真 3. 屠体



カット肉

メキシコで最近行われた実証試験

肉用牛

試験 1

様々な気象条件下での雄牛の発育成績と代償性発育について、1 kg/日の DDGS または、肉骨粉と DDGS を含む濃厚飼料を補給した場合の影響を調査するために 2014 年に試験を行った。肉骨粉は消化率が非常に低いことが文献でも示されている。BSE 感染の懸念があるため、多くの企業では反すう家畜に対する反すう家畜由来の肉骨粉の給与を認めていない。

この実証試験の結果を図 1 に示した。DDGS を給与した雄牛は、開始時体重は対照区に比べて約 38 kg 低かった、試験終了時体重は対照区より約 24 kg 増加した。DDGS 給与による日増体量の改善に関して、いくつかの重要な理由が考えられる。まず、対照区と DDGS 補給区ともに、供試雄牛は養分摂取量が非常に不足したままで農場に到着している。新しいパドックに適応した雄牛に対して濃厚飼料を補給すると、29 日目における日増体量が著しく高まった。これは代償性発育と考えられる(図 2)。次の体重測定日(55 日目)までの間の飼育環境は高温で乾燥していたため、飼料摂取量が低下し、その結果、日増体量が大きく低下した。しかし、DDGS を補給した場合の日増体量は、対照区に比べて 500g/日優れた。その

結果、DDGS を補給した場合の 1 日 1 頭当たりの純利益は約 15 ドル増加した(表 1 および図 3)。DDGS の補給による経済的な利点に加えて、試験の最終期間で対照区では体重は 24.5 kg 減少し、日増体量も 0.48 kg/日にとどまった。したがって、対照区では、DDGS を補給した雄牛と同じ最終体重に到達するまでにさらに 51 日間を要した。フィードロットで多頭数の牛が必要になる時期には、需給関係から牛の価格が急上昇するため、DDGS を補給することで、農場は、体重がより重い雄牛を販売出来る絶好の機会を得たことになる。これは、フィードロットでの飼育に適応するための日数を 5 日間短縮できる可能性があり、これは、1 日 1 頭あたり約 15 ドルの利益に相当する。

2016 年には、アルバグラン飼料工場近くの飼育場で別の実証試験を行った。多くの生産農場から総計 51 頭の交雑種雄牛を導入し、獣医師による検診と、ビタミンとワクチンの投与を行った後、体重に応じて 2 つの牛房に収容し、TMR を 1 日 2~3 回給与して 53 日間飼育した。濃厚飼料および TMR の組成を表 2 に示した。供試牛の平均 TMR 摂取量は 7.1 kg/日であり、平均日増体量は 1.17 kg/日だった。終了時体重は、最も軽い牛で 194 kg、最も重い牛で 234 kg だった。経済評価では、濃厚飼料に DDGS を配合すると、1 頭あたりの総収入が 61.03 ドル

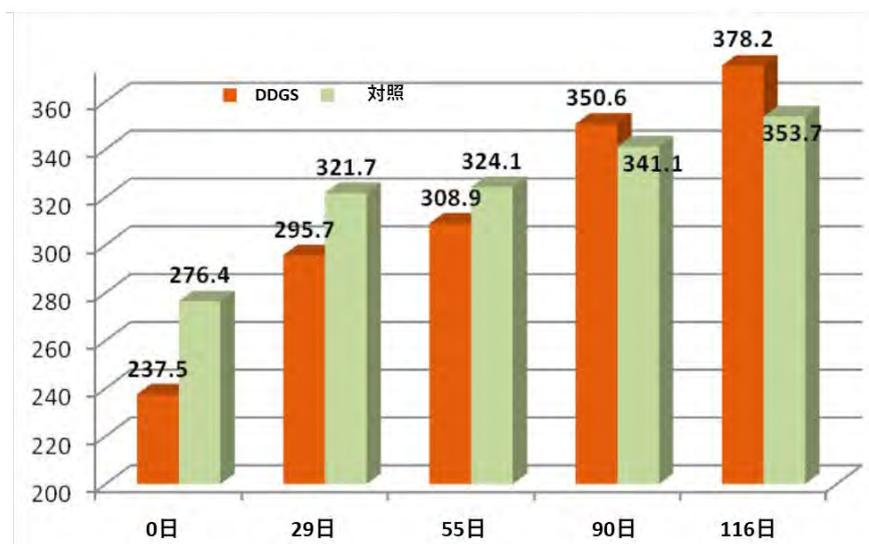


図 1. 2014 年 2 月 28 日~6 月 24 日に DDGS を補給した雄牛の体重(kg)

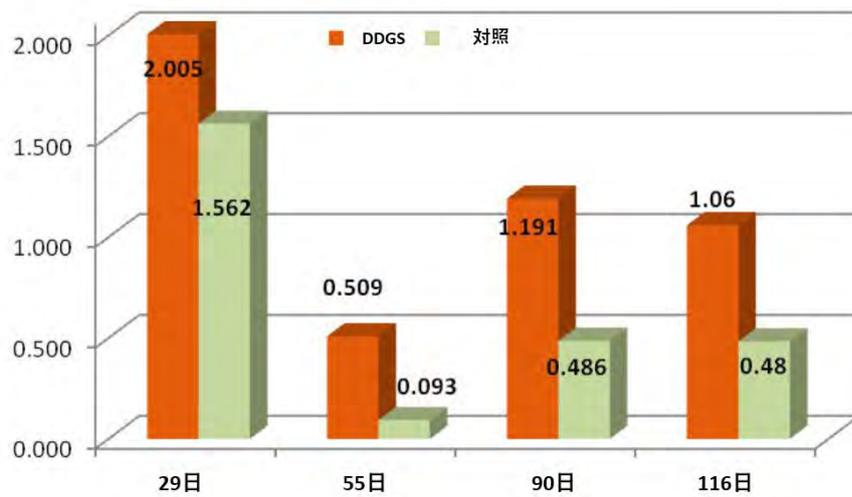


図2. 2014年2月28日～6月24日にDDGSを補給した雄牛の日増体量

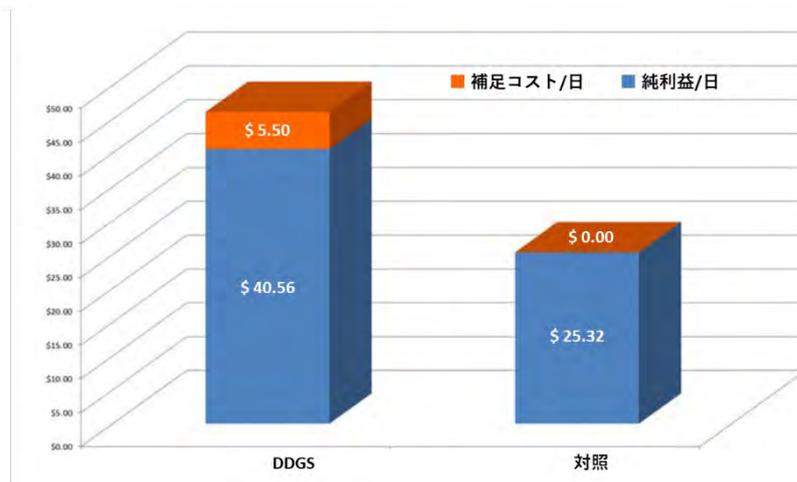


図3. 1頭あたりの平均純収入/日(ドル)

表1.DDGSを補給した牛の発育成績と経済性

	DDGS	対照
開始時体重 kg	237.5	276.4
終了時体重 kg	378.2	353.7
増体量 kg	140.6	77.3
飼育日数	116	116
日増体量 kg	1.212	0.666
\$/生体重 kg	\$38.00	\$38.00
総収入/日	\$46.06	\$25.32
補足に要する経費/日	\$5.50	
純利益/日	\$40.56	25.32

表 2. 濃厚飼料と TMR の組成

原料	kg/トン
濃厚飼料の組成	
DDGS	350
蒸気圧ペントウモロコシ	328
フスマ	110
糖蜜	100
大豆粕	85
ミネラル・プレミックス	27
計	1,000
TMRの組成	
細切乾草	165
濃厚飼料	835
計	1,000

となり、飼料コスト(40.49 ドル)を差引いた結果、純収入は 20.54ドルとなった(表 3)。

表 3.成長期の雄牛に対する DDGS 給与プログラムの経済評価

仕入れ価格/kg	\$52.00
販売価格/kg	\$52.00
開始時体重 kg	150.6
終了時体重 kg	212.8
補給量/日 kg	7.1
平均日増体量 kg	1.174
金利	\$2.610
補給に要する費用/日/頭	\$32.802
雑費	\$5.074
総収入	\$40.486
総利益	\$61.026
純利益	\$20.540
飼育日数	53.0
投資金額/期間	
\$/金利	\$138
\$/DDGS補給期間	\$1,739
\$/その他の期間	\$269
小計	\$2,146
仕入金額/頭	\$7,831
合計金額/期間	\$9,977
総収入	\$11,066
差	\$1,089
回転資金/年	6.887
純利益/年	\$7,497
費用/増体kg	\$34.50

試験 2

2017 年には、メキシコ湾に面するベラクルス州のティエラコロラダで未経産牛を用いた実証試験を実施した。ベラクルス州では、ほとんどの牧場が乳生産と更新用雌牛育成を行っており、1 日 1 回 3 分房から搾乳し、残りの 1 分房は更新用の子牛にほ乳させている。このような農場では、更新用雌子牛をどの時期(225~400 kg)まで飼育して販売するかを、その時点での酪農家のニーズと、子牛価格により決定している。更新用交雌牛の需要は毎年ほぼ一定している。更新用交雌牛を飼育するための一般的なガイドラインが存在し、多くの生産者はそれを知っているが、一部の生産者はあまり注意を払っていない。理想的には、更新用雌牛は 15 か月齢までに成熟体重の 60%に達し、最初の種付け時の最低体高は 145 cm でなければならない。ティエラコロラダにおける成熟牛の体重は平均 555 kgであり、この 60%体重は 330 kgとなる。15 か月齢で体重を 350 kgに到達させることが、未経産雌牛を種付けするための一般的な指標として使用されている。

2016 年 12 月、100 頭の更新用雌牛を用いて DDGS の給与実証試験を行った。供試牛の月齢と体重は表 4 に示したとおりである。ティエラコロラダ牧場での未経産雌牛の実際の体重と理想体重の比較は図 4 に示したとおりである。

試験は、幅広い月齢と体重の未経産牛 100 頭を用いて実施し、DDGS の補給により日増体量を高め、目標体

重到達までの日数の短縮の可能性を調査した。月齢毎の群分けは不可能なため、供試牛は、体重が軽い群(50頭、平均体重214 kg、平均年齢13.3か月)と、重い群(50頭、平均体重 275 kg、平均年齢 16.6 ヶ月)に分けて試験を行った。

表 4. ティエラコロラダ牧場での実証試験の供試牛

平均月齢	経産牛数	平均体重 kg
8 to 10	12	206
11 to 12	22	238
13 to 14	11	228
15 to 16	25	256
17 to 18	24	282
19 to 20	5	300
21 to 22	1	240
計	100	254

両群とも、試験開始後の1か月は慣行にしたがって放牧した。この間の平均日増体量は、軽量群では 4.4 kg/日、重量群では 10.6 kg/日であった。この増体傾向がそのまま維持されたと仮定した場合、軽量群では体重が 350 kgに到達するまでに 951 日間、重量群では 198 日間を要すると推定され、放牧した場合には、日増体量の最低目標(0.65 kg)を達成できないことが明らかとなった。

放牧地において、実際の乾物摂取量を測定することは非常に難しいため、供試牛の毎月の平均日増体量に基づいて TMR を設計した(表 5)。TMR の価格は 3.878

ペソ/kgで、1 頭あたりの給与量は 3.5 kg/日であったため、1 日 1 頭あたりの飼料費は 13.573 ペソとなる。

表 5. 更新用未経産牛用飼料の組成

ペソ/トン	原料	kg/トン
650	トウモロコシサイレージ	100
4,035	トウモロコシ	350
4,673	DDGS	405
2,725	糖蜜	125
10,156	ミネラル・プレミックス	20
	計	1,000

軽量群の開始時体重は 219 kg、終了時体重は 313 kg であり、重量群では同 285 および 393 kgだった。したがって、試験期間中に、軽量群の増体量は 94 kg(日増体量 0.79 kg/日)、重量群では 108 kg(同 0.90 kg/日)であった。4 月には、重量群の体重が 350 kgに達し、種付けを開始した。2017 年 1 月 20 日までの日増体量の実績から、重量群では体重 350 kg到達までに要する日数を 198 日間と予測していたが、今回の試験では、わずか 94 日間に短縮され、種付けが 104 日早まった。一方、軽量群では体重 350 kg到達までの日数は 153 日間であった。

図 5 および 6 に、ティエラコロラダ牧場において DDGS を給与した未経産雌牛の試験期間中の体重変化と、体重が 350 kg体重に到達するまでの日数を示した。試験期間中に、ほぼすべての供試牛は、日齢に応じた希望体重に到達した。図 7 中の青い線は、理想的な体重の推

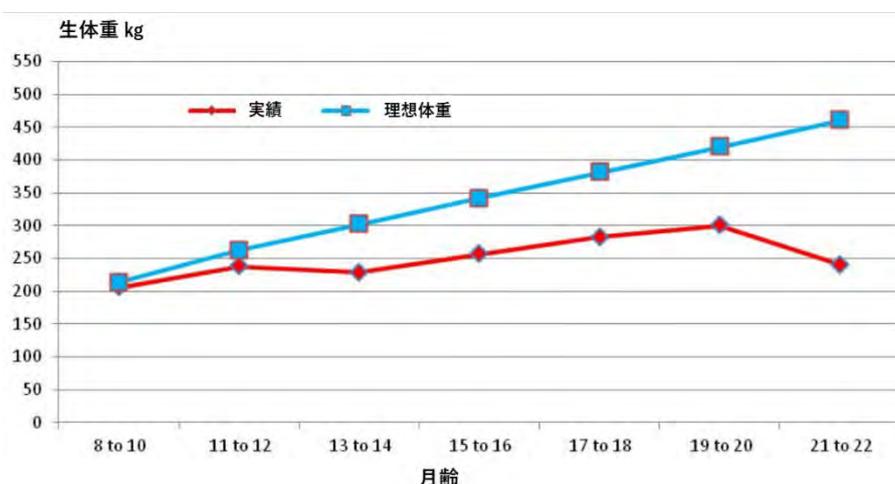


図 4. ティエラコロラダ牧場における未経産雌牛の実際の体重と理想体重の比較

移を示し、赤い線は実証試験における軽量群の体重推移を示しており、緑の線は初回種付後の体重推移を示している。表 6 および表 7 に、DDGS 補給による収支バラ

ンスを示したが、軽量群、重量群のいずれにおいても、DDGS を補給すると純利益が著しく増加し、軽量群では以前の収支はマイナスであったものが、プラスに転じた。

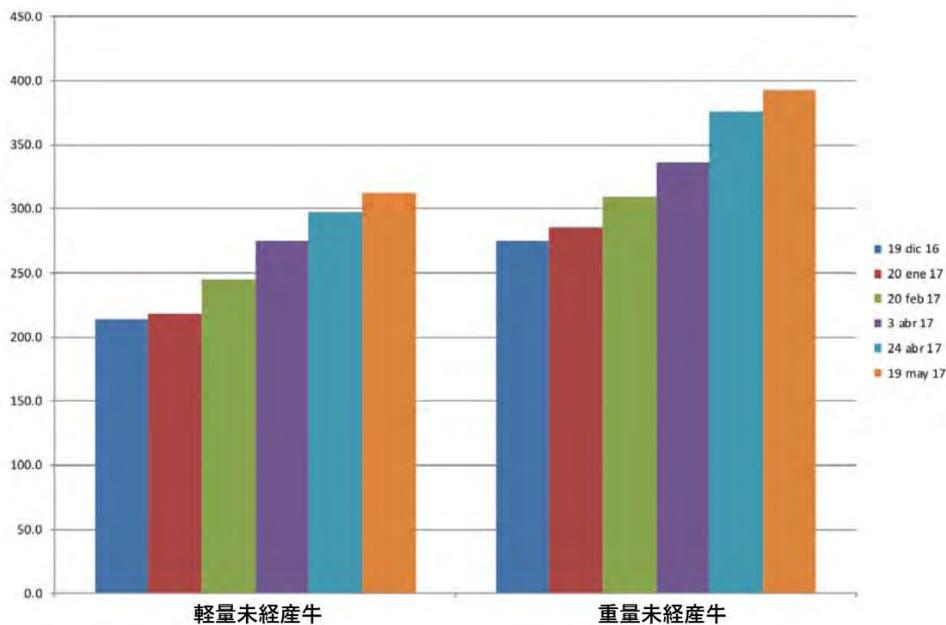


図 5. ティエラコロラダ牧場における実証試験中の軽量および重量群の体重変化

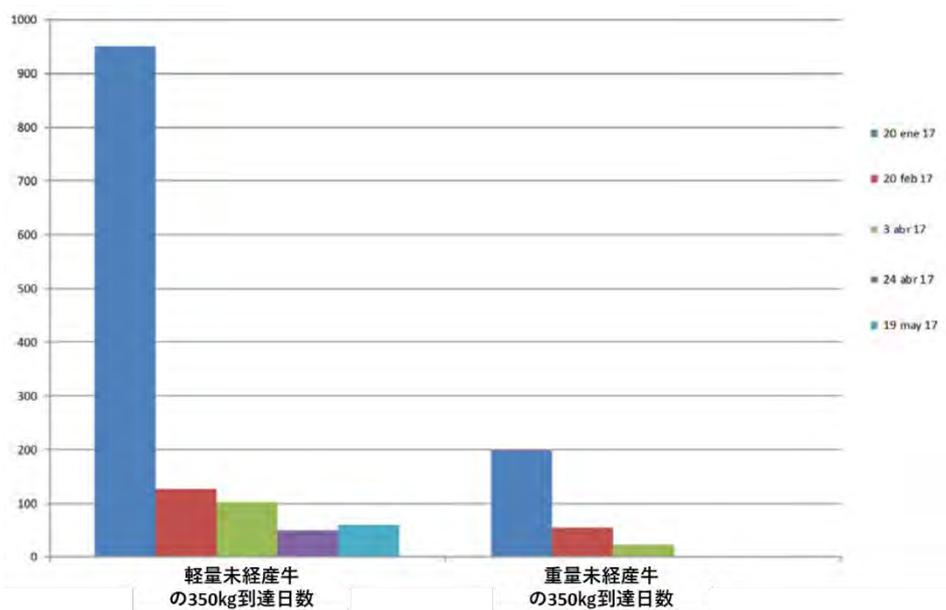


図 6. 軽量および重量群が体重 350 kg到達までに要した日数

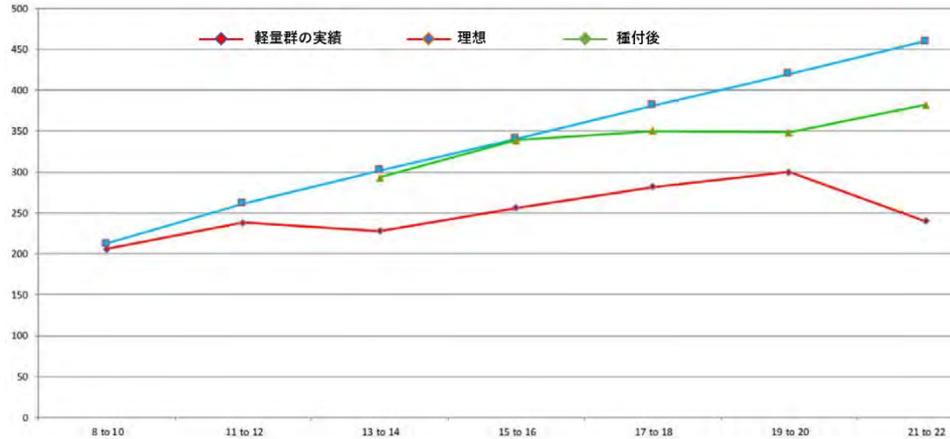


図 7. ティエラコロラダ牧場 DDGS 実証試験中に交換用未経産牛の理想的な体重(350 kg)に到達するための体重増加のシナリオ

表 6. 軽量未経産牛群における経済性の検討

1日あたりの経費		
1日あたり補給量/頭	0	3.5
日増体量 kg	0.138	0.791
金利 年10%	\$2,186	\$2,186
畜房レンタル料/牧草地	\$4,250	\$4,250
補給費用 3.5kg/頭	\$0.000	\$13,573
雑費	\$1,500	\$1,500
計	\$7,936	\$21,509
総収入	\$4,968	\$28,476
収支	-\$2,968	\$6,967

目標体重到達日数	952.2	166.1
開始時体重	218.6	218.6
終了時体重	350.0	350.0

総経費/期間		
金利 \$	\$2,081	\$363
畜房レンタル料 \$	\$4,047	\$706
DDGS 費用 \$	\$0	\$2,255
諸経費 \$	\$1,428	\$249
計	\$7,556	\$3,573
仕入れ価格/頭	\$7,870	\$7,870
調査費/期間	\$15,426	\$11,443
総収入 350kg × \$35/kg	\$12,600	\$12,600
差額	-\$2,826	\$1,157
回転資金/年	0.383	2.197
純収益/年	-\$1,083.3	\$2,543.0
費用/増体kg	\$57.51	\$27.19

表 7. 重量未経産牛群における経済性の検討

1日あたりの経費		
1日あたり補給量/頭	0	3.5
日増体量 kg	0.326	0.902
金利 年10%	\$2,750	\$2,750
畜房レンタル料/牧草地	\$4,250	\$4,250
補給費用 3.5kg/頭	\$0.000	\$13,573
雑費	\$1,500	\$1,500
計	\$8,500	\$22,073
総収入	\$11,736	\$32,472
収支	\$3,236	\$10,399

目標体重到達日数	230.1	83.1
開始時体重	275.0	275.0
終了時体重	350.0	350.0

総経費/期間		
金利 \$	\$633	\$229
畜房レンタル料 \$	\$978	\$353
DDGS 費用 \$	\$0	\$1,129
諸経費 \$	\$345	\$125
計	\$1,956	\$1,835
仕入れ価格/頭	\$9,900	\$9,900
調査費/期間	\$11,856	\$11,735
総収入 350kg × \$35/kg	\$12,600	\$12,600
差額	\$744	\$865
回転資金/年	1.587	4.390
純収益/年	\$1,181.1	\$3,795.6
費用/増体kg	\$26.07	\$24.47

試験 3

2017年2月23日から6月26日までのオズルアマベラクルスにおけるアメリカ穀物協会による実証試験

ベラクルス州は、メキシコ湾を取り巻く長さ約 850 km (528 マイル) の州で、州の西側にはシエラマドレオリエンタル山脈があり、東側はメキシコ湾に面している。この地理的特性より、ベラクルス州は年間を通じて降雨量が非常に多い。州は、北部、中央部、南部の3つに分けられ、

それぞれの地域で気象条件が異なる。

北部地域は他の2地域と比べて乾燥して冷涼なため、肉用牛および乳用牛農家は、コブウシとヨーロッパの品種(例えば、シャロレー、アンガス、モンベリアード、ジンメンタール、ブラウンビエ、ヨーロッパスイス)との交雑種を飼育している。これらの牛は放牧に適している。ヨーロッパタイプの肉牛にとって好ましい気象条件は、逆に粗飼料生産には適しておらず、放牧地では少量の低消化

性の牧草しか生育出来ない。この結果、遺伝的に低栄養条件下でも飼育出来る品種にはメリットがあるが、低発育、低乳量、低繁殖性等、様々な望ましくない状態となっている。

ベラクルス州北部地域の肉用牛および乳用牛農家において DDGS の使用を促進するための最初の試験は、DDGS は濃厚飼料中に配合するのではなく、消化性が高い牧草との組合せることで行った。牛が乾物摂取量を最

大に出来ない場合には、ほとんどすべての濃厚飼料はこれらの牛の遺伝的可能性を十分に発揮することは出来ない。1 月から 5 月の乾季で寒冷期にあたり、十分な量の牧草が得られないため、230 kg未満の子牛飼育に必要な飼料費は、体重がより重い牛に比べて高くなる。このため、アメリカ穀物協会は、オズルアマベラクルスの生産者に対して DDGS の実証試験の実施を依頼した。

表 1 に示したとおり、合計 32 頭の供試牛(平均体重

表 1. 2つの実験群の性別と体重の分布

オズルアマベラクルス、ELパイサジョ農場 2017年2月23日							
群	性	ID No.	kg	群	性	ID No.	kg
1	雌	3740	70	2	雌	3715	75
1	雌	3729	83	2	雌	3724	80
1	雌	3747	95	2	雌	3741	94
1	雌	8301	97	2	雌	3728	98
1	雌	3726	98	2	雌	8299	100
1	雌	3745	107	2	雌	3730	107
1	雌	3717	109	2	雌	8303	108
1	雌	3718	110	2	雌	8353	112
1	雌	3723	147	2	雌	3720	124
1	雄	5347	50	2	雄	8319	64
1	雄	3739	88	2	雄	3738	71
1	雄	3742	90	2	雄	3744	90
1	雄	3791	93	2	雄	3746	100
1	雄	3725	104	2	雄	8307	114
1	雄	8356	116	2	雄	3716	123
1	雄	8311	139	2	雄	3727	136
		合計 kg	1,596			合計 kg	1,596
16		平均 kg	99.75	16		平均 kg	99.75

表 2. DDGS 配合カーフスターターおよび TMR の飼料配合

原料	Kg/トン
カーフスターター (CP (粗たん白質) 18%)	
DDGS	480
粉碎トウモロコシ	300
糖蜜	100
トウモロコシ皮	90
ビタミン・ミネラル・プレミックス	30
計	1,000
給与飼料	
カーフスターター	680
細切牧草	230
糖蜜	90
計	1,000

表 3. 飼料の給与量

開始	2017年2月17日	2017年3月17日	2017年4月17日	2017年5月17日
終了	2017年3月17日	2017年4月17日	2017年5月17日	2017年6月17日
飼料給与量 kg/日/頭	3.5	4.5	5.5	6.5
濃厚飼料	2.39	3.07	3.75	4.43
細切牧草	0.80	1.02	1.25	1.48
糖蜜	0.32	0.41	0.50	0.59

表 4. 第 2 回体側までの発育状況

ELパイサジョ農場		33日目		増体量 kg	増体日量 kg	230kg到達日数	雄	雌
体重測定日	2017年2月23日	2017年3月17日						
	平均	kg	kg					
対照区	平均	105.0	124.7	19.7	0.597	176.5	4	9
DDGS区	平均	105.7	135.7	30.0	0.909	103.7	5	8

99.8 kg)を 2 群(各群、雌 9 頭および雄 7 頭)に分け、うち、一方は慣行法で飼育した(対照区)。他方には DDGS を配合したカーフスターターを含む TMR(表 2)を表 3 に示す量で給与した(DDGS 区)。DDGS 区の供試牛では畜房飼育への馴化に 10 日間要したが、最初の 33 日間の日増体量は対照区より優れていた。日増加量に基づいて体重 230 kg到達までの日数を計算した(表 4)。

ほぼ 1 か月間隔で、供試牛の個体別体重を測定した。第 4 回体重測定(5 月 24 日)時点で、DDGS 区の何頭かは 230 kgに非常に近づいたことから、230 kg到達前に販売した。これらの牛を販売した後、新たな若い供試牛を追加した。

平均体重、増体量および増体日量の推移を図 1~3 に示した通りであり、DDGS 区では対照区に比べて、発育が改善され、生産コストも節減された。

DDGS 区では、DDGS 補給のための追加費用が発生

するものの、1 日あたりの純収益(11.21 メキシコペソ/頭)は対照区より多かった。すべての農場主は、より短期間で牛乳を生産する、あるいは、子牛を得ることを目標としている。慣行の飼育方法で飼育した対照区の供試牛が目標体重(230 kg)に到達するまでに約 206 日間を要するのに対して、DDGS 区では 100 日間であった。子牛を販売する毎に、DDGS 区では対照区に比べて 2,700 メキシコペソの増収が実現する。ほとんどの生産者は、サプリメントを使用しない方が経済的であると考えているが、この試験結果は、DDGS を給与すると収益がプラスとなる機会は年間 3.77 回であるのに対して、対照区では 1.77 回である。DDGS 区での年間収入は 8,860.8 メキシコペソであるのに対して、対照区では 4,769.1 メキシコペソに過ぎない。日増体量だけではなく、目標体重に到達するまでに要する日数も非常に重要となる。

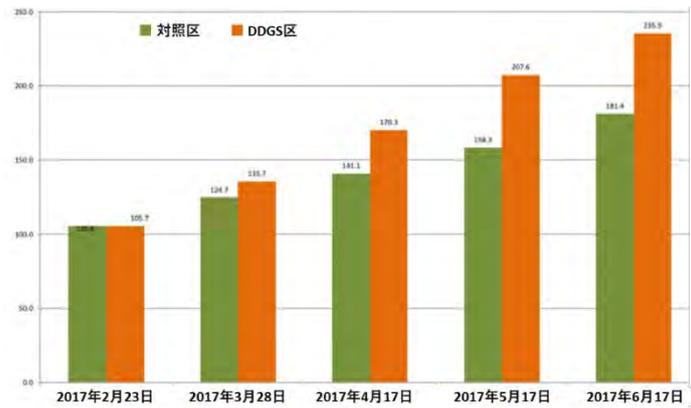


図 1. DDGS の給与が牛の体重に及ぼす影響



図 2. DDGS の給与が牛の増体量に及ぼす影響



図 3. DDGS の給与が牛の増体日量に及ぼす影響

試験 4

2017年2月24日～6月27日にオズルアマベラクルスのロスシエラ牧場で行った実証試験

ロスシエラ牧場では、1日に1回、約60頭から搾乳し、牛乳を地元のチーズ工場に販売している。また、雄牛は年間放牧している。1歳の雄牛の市場価格で雄牛を販売

するかどうかは、350 kgまたは400 kgに達した時点で決定している。この実証試験では、平均体重が100、150、200、250、300、350 kgの雄牛のグループを用いて実施した。そのため、現在用いている市販の濃厚飼料(Dulce 20)と、DDGSを含む濃厚飼料との比較を行った。この牧場では、体重の1%量の市販濃厚飼料を給与している。

平均体重 100 kgの子牛への濃厚飼料給与量は 1 kg/日であり、平均体重 350 kgへの牛への給与量は 3.5 kg/日になる。粗飼料は乾草を用いた。この濃厚飼料は通常「taco」と呼ばれている。合計 32 頭の供試牛を 2 群(各 16 頭、平均体重 112 kg)に分け、1 群には DDGS を含む濃厚飼料を、他の 1 群には Dulce 20 を給与した。表 1 に供試牛の詳細を示した。

給与試験は 2017 年 2 月 24 日に開始した。牧草地には自動給与器を設置し、水は自由飲水させた。毎朝、濃厚飼料 2 kgと乾草 1 kgを給与した。毎月末に全供試牛の体重を測定した。両区の開始時体重は 113 kgだった。試験開始後 1 か月目の体重には区間差はなかった(DDGS 区: 136 kg、対照区: 135 kg)が、2 か月目では、DDGS 区の体重(152 kg)は、対照区(147 kg)に比べて大きく、日増体量(DDGS 区: 0.57 kg/日、対照区: 0.38 kg/日)から予測した体重 230 kg到達日数は、それぞれ、138 日および 218 日となった。しかし、実証試験実施の際には放牧地の牧草の生育状況が悪かったため、日増体量は両区ともにそれほど優れたものではなかった。3 か月目(5 月)の日増体量(DDGS 区: 0.58 kg/日、対照区: 0.31 kg/日)も前月と大きく変わらなかったことから、牧場主と協議して、TMR(DDGS を含む濃厚飼料 680 kg、細切乾草 230

kg、糖蜜 90 kg)を要求量の 100%量を給与するように変更した。供試牛放牧地でそのまま飼育し、TMR を 1 日 4 kg/頭給与することとしたが、この変更が従業員に徹底されていなかったため、給与量は以前のプログラムのままとなった。しかし、試験終了時の結果では、DDGS を含む濃厚飼料の補給により、増体量あたりの利益が高まり、体重 230 kg到達日数が 10 日短縮された。供試牛の体重、増体量および日増体量の推移を図 1～3 に示した。

この実証試験では、2 種類の濃厚飼料を同じ給与方法で比較した。濃厚飼料の一方は DDGS を多く配合したもので、もう一方は Dulce 20 として知られている市販の濃厚飼料である。Dulce20 の価格は 8.00 ペソ/kgで、DDGS を含む濃厚飼料の価格は 6.75 ペソ/kgである(表 2)。濃厚飼料 2 kgと粗飼料 1 kgを給与した場合、Dulce 20 を給与する対照区の飼料価格は 1 頭あたり 16.50 ペソであり、DDGS を含む濃厚飼料を給与した DDGS 区では 14.00 ペソとなる。

123 日間の給与期間後、DDGS 区の平均日増体量が高まり、試験期間中の増体量が増加した。さらに、DDGS 区の 1 日当たりの収支バランスはプラス 10.129 ペソであり、対照区(プラス 4.010 ペソ)に比べて収益性が高まった(表 3)。この試験における供試牛の日増体量(0.80 kg/

表 1. 供試牛の詳細

オズルアマベラクルスのロスシエラ牧場				2017年2月24日			
群	ID	日齢	体重 kg	群	ID	日齢	体重 kg
1	209	92	82	2	219		84
1	206	79	86	2	217		86
1	230		99	2	174	103	92
1	225	84	99	2	196	88	100
1	189	98	101	2	194	65	101
1	213	102	103	2	183	87	102
1	200	81	107	2	181	90	105
1	211	85	110	2	185	67	110
1	223	69	111	2	204	58	111
1	186	55	118	2	229	97	112
1	171	101	120	2	167		120
1	154	73	121	2	203	74	121
1	184	96	132	2	161	56	122
1	172	94	132	2	164	59	132
1	177	68	138	2	87	72	137
1	158	71	143	2	153	66	167
16		合計 kg	1,802	16		合計 kg	1,802
		平均 kg	112.6			平均 kg	112.6

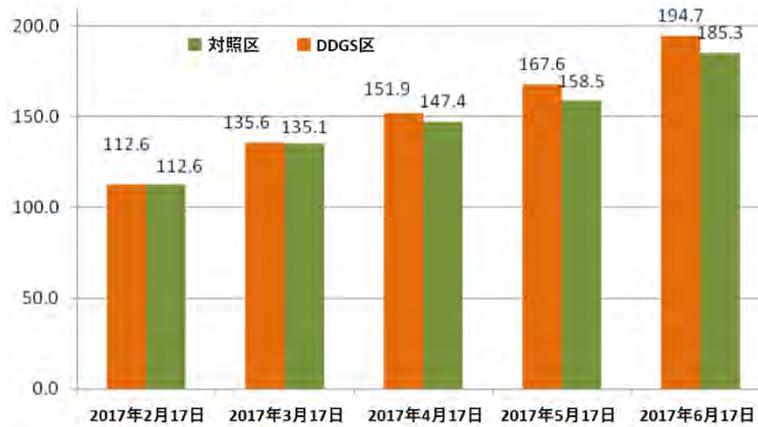


図 1. DDGS の給与が牛の体重に及ぼす影響

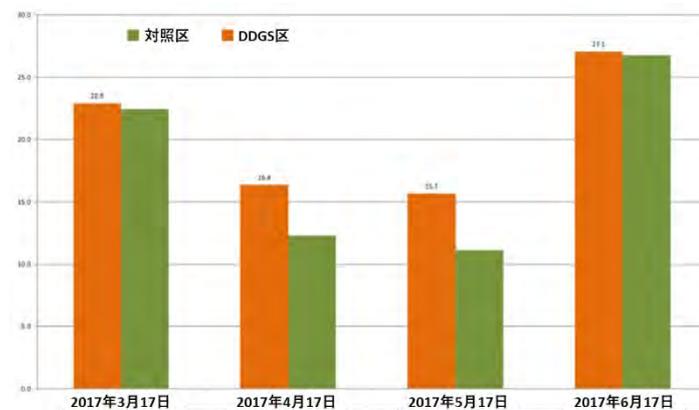


図 2. DDGS の給与が牛の増体量に及ぼす影響



図 3. DDGS の給与が牛の日増体量に及ぼす影響

日)は、同じ体重の牛を供試したメキシコでの他の実証試験の成績(1.3 kg/日)より低かったが、DDGS 区の試験期間中の 1 頭あたりの経済的利益は、対照区に比べて約 1,000 ペソ高まった。DDGS 区における増体量 1 kg あたりの費用は、対照区に比べて約 8.2 ペソ節減された。

結論として、この牧場の雄牛の遺伝的背景は、農家が飼料摂取量の制限を行わずに、養分要求量を充足させた給与を行った場合には、より大きな利益をもたらす。

表 2. 市販濃厚飼料または DDGS 配合濃厚飼料の価格

Dulce 20使用	kg/頭/日	\$/kg	価格
濃厚飼料	2	\$8.00	\$16.00
細切乾草	1	\$0.50	\$0.50
計	3		\$16.50

kg = \$5.50

DDGS使用	kg/頭/日	\$/kg	価格
濃厚飼料	2	\$6.75	\$13.50
細切乾草	1	\$0.50	\$0.50
計	3		\$14.00

kg = \$4.67

表 3. オズルアマベラクルスのロスシエラ牧場における対照区と DDGS 区の収支バランスのコスト比較

1日あたりの経費	DDGS区	対照区
1日あたり補給量/頭	3	3
日増体量 kg	0.667	0.590
金利 年10%	\$1,470	\$1,470
畜房レンタル料/牧草地	\$4,250	\$4,250
補給費用 3.5kg/頭	\$14,000	\$16,500
雑費	\$1,500	\$1,500
計	\$21,220	\$23,720
総収入	\$31,349	\$27,730
収支	\$10,129	\$4,010

目標体重到達日数	176.0	199.0
開始時体重	112.6	112.6
終了時体重	230.0	230.0

総経費/期間	DDGS区	対照区
金利 \$	\$259	\$293
畜房レンタル料 \$	\$748	\$846
DDGS 費用 \$	\$2,464	\$3,283
諸経費 \$	\$264	\$298
計	\$3,735	\$4,720
仕入れ価格/頭	\$5,292	\$5,292
調査費/期間	\$9,027	\$10,012
総収入 350kg × \$35/kg	\$10,810	\$10,810
差額	\$1,783	\$798
回転資金/年	2,074	1,834
純収益/年	\$3,697.1	\$1,463.6
費用/増体kg	\$31.81	\$40.20

試験 5

肉牛を用いた実証試験は、ユカタン州ティジミン近郊のサンフランシスコ牧場で 2016 年に行った。ユカタン州における放牧地は、主にユカタン半島の東部に位置する

ティジミン、ブクツオッツ、パナバおよびスチラにあり、州内における牛の生産システムは多岐にわたるが、自然牧野または誘導牧野で放牧されている。一般的に、補足資料は乾季にのみ使用されており、牛の維持要求量をほとんど充足していない。家禽敷料は、牛用飼料の主原料となっている。多くの牧場主は、補足飼料を投資ではティジミンンと考えており、伝統的なユカタン州の農場では、牛の平均日増体量は 400~600g/日である。従来の繁殖牛群の繁殖成績も、この地域における期待値を下回っている。一般的に、ユカタン州の牧場主は保守的で、結果が悪いにもかかわらず、飼育方法を変更することはめったにない。しかし、農家はお互いを見て何をするかを決める傾向がある。他の牧場において新しい製品が購入された場合、特に、その牧場主が地域の牛生産者のリーダー格であった場合には、その傾向が強い。ペドロ・クー氏は、ユカタン州の牛生産者の間では有名な牧場主であり、純血種のブラウンスイス種と F1 牛の飼育を行っている。このため、氏が所有するサンフランシスコ牧場で実証試験を行うことになった。この結果は、この地域の他の牛生産者にプラスの影響を与えるものと思われる。

牧場の説明:

サンフランシスコ牧場は、ユカタン州ティジミンにある。この地域は熱帯低湿機構で、月平均気温は 26°C、年間降水量は 1100 mm である。牧場では、純血種のブラウンスイス牛と F1 交雑種を生産している。この牧場では、半集中的な飼育方法を使用しており、飼育牛は、日中は気温が上昇するため、フリーストールの畜舎で飼育されており、夜間には放牧地で暖地型イネ科牧草のルジグラス (*Brachiaria ruziziensis*)、ブリザンサ (*Brachiaria brizantha*)、タンザニア (*Panicum maximum*) を摂取している。飼育設備はよく整備されており清潔である。牧場には、牛の体重を測定するデジタルスケールを設置して生産記録を保管している。また、この地域に特化した予防獣医保健プログラムに従って衛生管理を行っている。

材料と方法

ブラウンスイス純血種および F1 牛を対照区および DDGS 区に 12 頭ずつ(各区:雄牛、未経産牛各 6 頭)に

割り当て、日増体量に及ぼす DDGS 補給の効果の評価した。試験開始時体重は、DDGS 区では 305 kg、対照区では 297 kg だった。終了時体重は、DDGS 区では 366 kg、対照区では 348 kg だった。供試牛には耳標を装着し、15 日間隔で体重測定を行って、日増体量を算出した。試験期間は、2016 年 7 月から 10 月までの 75 日間であった。

対照区では、1 日 1 頭あたり、市販飼料(CP(粗たん白質) 16%) 3 kg と、家禽敷料とトウモロコシを含む「Productor Plus(表 1)」3 kg を給与した。DDGS 区で、DDGS を含む補足飼料(表 2) 3 kg と、Productor Plus 3 kg を給与した。75 日間の試験期間中の 1 頭あたりの総飼料費は、DDGS 区では 1946.45 メキシコペソ、対照区では 1991.25 メキシコペソだった(表 3 および 4)。

表 1. 家禽敷料混合物(Productor Plus)の組成

原料	割合 %
家禽敷料	70
トウモロコシ	30
計	100

表 2. DDGS 補給飼料の組成

原料	割合 %
DDGS	85.47
糖蜜	12.82
ミネラル・プレミックス	1.71
計	100

結果

全試験期間を、体重測定を行った 15 日間隔で 5 期に分割して、試験成績を検討した。日増体量は、これらの期間毎に、試験全体の累積と性別で求めた。DDGS 区の全体的な日増体量は 1 kg を超え、対照区(0.84 kg)より優れた。DDGS 区は、4 期では増体率が低かったが、その他の期間では両区はほぼ同様の傾向を示した(図 1)。両区のグループの日増体量の比較は図 2 に示したとおりである。

DDGS 区の雄牛の累積日増体量は 1.42 kg/日であり、対照区では 1.07 kg/日だったが、各期の傾向は一定ではなかった(図 3 および 4)。

DDGS 区の未経産牛の累積日増体量は 1.08 kg /日、対照区では 1.02 kg/日であり、未経産牛においても各期の傾向は一定ではなかった。(図 5)

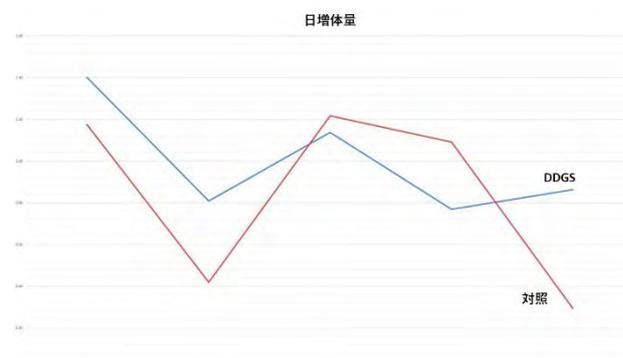


図 1. 対照区および DDGS 区の日増体量の変動(全体)

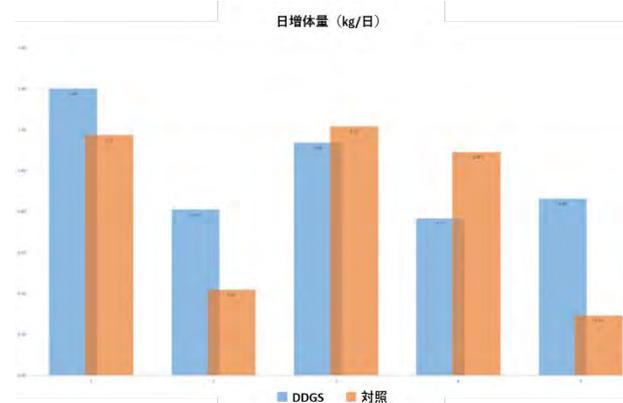


図 2. 期別日増体量(全体)

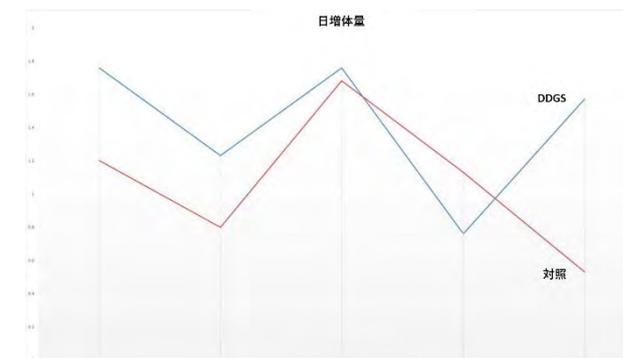


図 3. 対照区および DDGS 区の雄牛の日増体量の変動

雄牛の繁殖能力検査

雄牛は繁殖用として販売されるため、販売前に行う繁殖能力検査は、牧場主が雄牛の繁殖力を顧客に保証するために重要であり、内性器および外性器の検査と採取した精液の評価を行った。両区の供試牛の性器はいずれも正常であり、精液も質量的に正常だった。

表 1. 対照区に給与した飼料のコスト

	費用 メキシコペソ/kg	kg/頭/日	費用 メキシコペソ/日
市販飼料 16%	\$6.10	3.0	\$18.30
Producer Plus	\$2.75	3.0	\$ 8.25

表 2. DDGS 区に給与した飼料のコスト

	費用 メキシコペソ/kg	kg/頭/日	費用 メキシコペソ/日
DDGS補給	\$5.90	3.0	\$17.70
Producer Plus	\$2.75	3.0	\$ 8.25

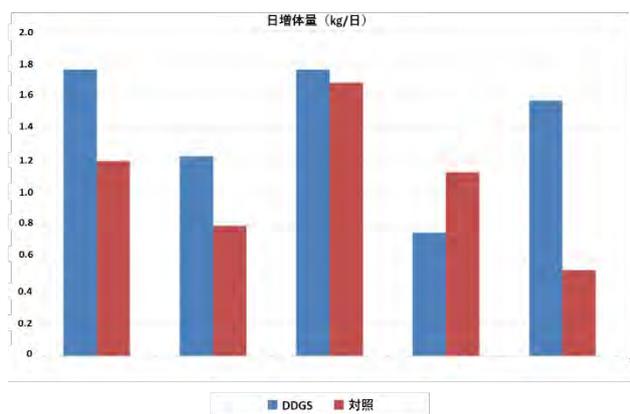


図 4. 期別日増体量(雄牛)

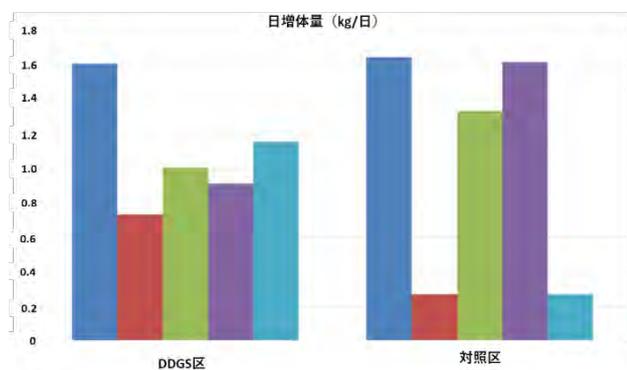


図 5. 期別日増体量(未経産雌牛)

動物の被毛と一般的な外観

DDGS 区の被毛状態と全体的な外観は、対照区より優れていた。

経済分析

試験全体の総コストと両区の日増体量を基に算出した増体量 1 kgあたりの費用は、DDGS 区では 31.91 メキシコペソ/kgであり、対照区(39.04 メキシコペソ/kg)に比べて 18%少なかった(表 5)。

結論

1. DDGS を含む補給飼料を給与した牛の日増体量は、一般的な市販の補給飼料を給与した対照区に肉食べて比べて優れていた。
2. DDGS は、ユカタン州の気候条件の下で、大規模および中規模飼育施設で飼育する牛用飼料原料として有効に使用できる。
3. DDGS は、ユカタン州で使用されている典型的な牛用飼料において費用対効果の高い原料である。
4. DDGS の給与は、若い雄牛の生殖能力に影響を与えない。
5. DDGS を給与すると、牛の被毛が改善される。

表 5. 費用/ 増体量 kg

	DDGS	対照
開始時体重 kg	305	297
終了時体重 kg	366	348
変動 kg	61	51
総飼料費/試験	\$1,946.45	\$1,991.25
費用/増体量 kg	\$ 31.91	\$ 39.04

乳用牛

メキシコのフイマンギロタバスコのフランシスコゲイタで泌乳中の乳用牛への DDGS 給与試験を実施した。合計 34 頭の乳用牛(分娩後 105 日未満)を二分し、一方には市販の濃厚飼料を 2 kg/頭/日給与し(対照区)、他方には DDGS を含む飼料(表 1)を給与した(DDGS 区)。市販の濃厚飼料の価格は 5.00 ペソ/kg であり、DDGS を含む飼料は 5.76 ペソ/kg とのことである。生産した牛乳は地元のチーズ工場に販売(5.20 ペソ/L)されている。

表 1. DDGS を含む飼料の組成

原料	kg/トン
乾草	100.0
DDGS	559.2
糖蜜	111.4
粉碎トウモロコシ	155.9
尿素	17.8
ミネラル・プレミックス	55.7
計	1,000.0

試験結果を図 1 および 2 に示した。乳期が分娩後 50 日未満の乳用牛の産乳量は、DDGS 区が対照区より 2.88L/日多かった。この結果は、泌乳ピークに達した乳用牛に DDGS を含む飼料を給与することで、産乳量の大幅な改善が出来ることを示唆している。図 1 に示すように、DDGS 区では対照区より 2.77L/日産乳量が多く、この傾向は給与期間終了までにさらに大きくなった。

メキシコの多くの酪農家は、より安価な濃厚飼料をのぞむため、DDGS を含む濃厚飼料の価格が受け入れられない場合があるが、この試験において市販の濃厚飼

料を用いても高い乳生産性を期待出来ないことは明らかであった。表 2 に示すように、DDGS 区は対照区に比べて 1 日あたり 1.52 ペソ高かったが、表 3 に示すように、DDGS 区では対照区に比べて産乳量が多く、その結果、総収入と純利益が増加した。これらの結果は、DDGS を含む飼料の価格が高いにも係わらず、乳生産量が増加することを明らかにし、この牧場主は DDGS を含む飼料の製造と販売を始めることになった。

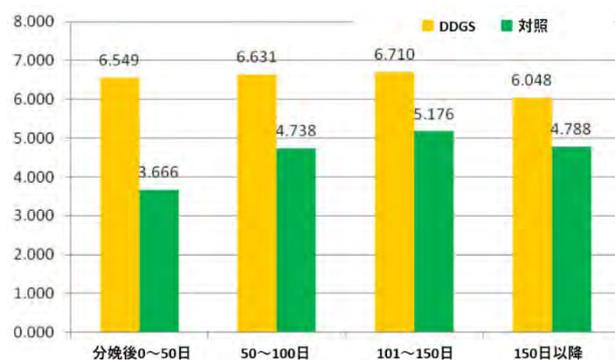


図 1. 牛乳の日別の平均乳量



図 2. 各期の平均乳量

表 2. 市販濃厚飼料および DDGS を含む飼料のコストの比較

補足飼料	濃厚飼料 kg/頭/日	メキシコペソ/濃厚飼料 kg	メキシコペソ/頭/日
DDGS	2	\$5.76	\$11.52
市販	2	\$5.00	\$10.00
差	-	\$0.76	\$1.52

表 3. 市販濃厚飼料および DDGS を含む飼料給与による総収入と純収入

補足飼料	産乳量 L/頭/日	メキシコペソ/L	総収入 メキシコペソ
DDGS	7.494	\$5.20	\$38.97
市販	4.726	\$5.20	\$24.58
差	-	-	\$14.39

ベトナムで最近行われた実証試験

乳用牛

ベトナムの高温気候条件下での乳生産に対するトウモロコシ DDGS 給与の影響

要約

ベトナムにおける乳用牛に対するトウモロコシ DDGS の給与試験は、2010 年の暑熱時期に一般の酪農場で行われた。泌乳後期の乳用牛 156 頭を、対照区、DDGS 7.5%区および DDGS 15%区に対して、乳量の分布がほぼ均等となるように 52 頭ずつ割り付けた。各給与飼料 (TMR) は、トウモロコシ、エレファントグラス、アルファルファ乾草、乾草ビール粕、豆乳廃液、トウモロコシ、大豆粕、糖蜜および乳用牛用サプリメントで構成し、各区の栄養成分含量を均等に設計した。飼料は 1 日 2 回給与し、試験開始 5 日前から試験開始後、45 日までの産乳量、飼料摂取量および乳質を測定した。

その結果、DDGS の給与は飼料摂取量に影響を及ぼすことなく、より高い産乳性を得られることが示された。DDGS を 7.5 および 15% 給与すると、対照飼料に比べて、乳量が 2 および 4 kg/日増加した。飼料摂取量には区間で差がなく、約 35 kg/日だった。総固形分と乳脂肪量は、対照区と DDGS 7.5%区は類似していたが、DDGS 15%区では総固形分と乳脂肪量がわずかに増加する傾向を示した。飼料費は、対照区で 2537 ドン/kg、DDGS 7.5%区で 2460 ドン/kg、DDGS 15%区で 2399 ドン/kgであり、DDGS を給与することで飼料費が節減された。

緒言

DDGS は、トウモロコシを用いたエタノール発酵における併産物であり、家畜用飼料原料として利用されている。過去 10 年間、米国におけるエタノール生産量の増加に伴って DDGS の製造量が増加している。2009 年の DDGS 製造量は 3,000 万トンであり、450 万トンが世界の様々な国に輸出されたと推定されている。

乳用牛への DDGS の給与に関する研究は、過去 20 年にわたり多くの大学で行われてきた。Kalscheur (2005) は、DDGS を含む乳用牛用飼料に関する 23 報に基づく、96 のデータについてメタ分析を行い、DDGS を 20% まで含んだ飼料は、一般的に嗜好性が高まり、飼料摂取量増

加の刺激となると報告している。産乳量は、給与する DDGS の形態には影響されなかったが、DDGS 給与量の増加に対応して二次曲線的に増加し、DDGS を 4~30% 含む飼料を給与すると、産乳量が約 0.4 kg/日増加した。乳用牛に DDGS の 30% 以上給与すると産乳量が減少する傾向を示した。

米国では、初期には、エタノール工場近郊で飼育されている牛に対して未乾燥のまま給与されていたが、エタノール工場の増加に伴い、乾燥された DDGS が製造されるようになった。古い技術で製造された DDGS は色調が暗く、Power ら (1995) は、暗い色調の DDGS を給与すると、明るい色調の DDGS を給与した場合より産乳量が低いと報告している。

DDGS は、乳用牛にとって非常に優れたたん白質源である。Schingoethe (2004) によれば、高品質の DDGS のたん白質含量は通常 30% 以上 (乾物) であり、粗脂肪含量は 10% である。DDGS は、RUP (ルーメン非分解性たん白質) またはバイパスたん白質の優れた供給源であり、その含量は 55% である。また、DDGS は乳用牛にとって非常に優れたエネルギー源であり、TDN (可消化養分総量) は 77%、NE_G (増体に要する真のエネルギー) 価は 1.41 Mcal/kg、NE_L (泌乳に要する真のエネルギー) は 2.26 Mcal/kg である。これらのエネルギー価は、NRC (2001) による値よりも 10~15% 高いと報告されている。乳用牛を含む DDGS 研究のほとんどは、温暖な気候条件下で行われてきた。Chen and Shurson (2004) は、台湾で夏季に実施された DDGS の乳用牛への給与試験から、DDGS を 10% 含む TMR は、飼料摂取量に影響を及ぼさずに産乳量を 0.9 kg/日増加させると報告している。DDGS は成長期の未経産牛にも給与出来、報告は少ないが、Kalscheur and Garcia (2004) は、未経産牛に対して DDGS を 40% 量まで給与できると報告している。

ベトナムの酪農業は主に南部熱帯地域で行われており、近年は中部と北部地域にも拡大している。北部地域では夏季に飼料消費量が大きく減少するため、DDGS が貴重な飼料原料となる可能性がある。ベトナムでは過去 4 年間、米国から DDGS を輸入してきたが、その用途は、主に豚や家禽の飼料、そして最近では魚の飼料用であ

る。現在、ベトナムでは乳用牛が25万頭飼育されているにも関わらず、乳用牛にはDDGSは使用されていない。過去5年間で乳製品の生産量は大幅に増加し、今後も毎年10%以上増加すると予測されている。乳用牛に対するDDGS給与の可能性は非常に大きく、毎日1kgのDDGSを乳用牛に与えた場合、ベトナムでは年間25万トンのDDGSを必要とする可能性があると推定される。

乳用牛用飼料は、通常、粗飼料とともに、大豆粕、ふすま、米ぬか、キャッサバ副産物、キャッサバ、糖蜜、ビタミン・ミネラル・プレミックス等を含む濃厚飼料を補給している。ベトナムでは、乳用牛へのDDGSの使用に関する情報がないため、今回の給与試験は有用な情報となると思われる。

材料および方法

試験は、ベトナムのトゥエンクアンにあるフォーラム農場で行われた。試験は、以下の3処理を設定した。

1. DDGSを使用しないTMRを給与
2. DDGSを7.5%含むTMRを給与
3. DDGSを15%含むTMRを給与

試験は、産乳量が同様の乳用牛3群を用いて乱塊法実験計画により実施した。分娩後200日以上泌乳後期の乳用牛を計156頭用い、各区に52頭ずつ配して45日間各TMRを給与した。各TMRは、栄養成分組成がほぼ同一となるように設計し(表1)、農場内の飼料製造場で製造した。

試験開始前5日から試験開始後45日の産乳量および飼料摂取量を測定した。

給与方法

給与方法は、フォーラム農場の慣行により行った。TMRは、粗飼料(ネピアグラスおよびトウモロコシ茎葉)と、その他の原料(キャッサバ、豆乳廃液、乾燥ビール粕、粉碎トウモロコシ、大豆粕、乳用牛用濃厚飼料(CP40%)、糖蜜、粉末油脂、ビタミン・ミネラル・プレミックス)で構成し、NRC(2001)による乳用牛の養分要求量を充足し、飼料費が最少となるように設計した。飼料は1日2回給与し、乳量は毎日測定した。TMRの給与量は、牛の体重と産乳量に基づいて計算した。

測定

毎日の産乳量、飼料摂取量、乳たん白質、脂肪および総固形分率と乳比重を測定した。品質については、試験の中間と終了時に、各区から5試料採取して分析した(3区×5試料×2回)。

統計解析

収集されたデータはProcを用いて、SASの分散分析プログラムにより解析し、Duncanの多重検定(SAS ver. 6.12)により各区間の差を検定した。

結果および考察

環境条件

試験を実施した2010年5月から6月までの平均気温と相対湿度を表2に示した。5月~6月は、ハノイ北部において最も暑い時期としてよく知られており、最高気温は摂氏37度または華氏99度に達し、湿度は88%に達している。畜舎は開放型で、ファンを稼働させた。

乳生産と飼料消費

DDGS給与開始前後の平均飼料摂取量と産乳量を表3に示した。試験には泌乳後期の乳用牛を用いているため、DDGS給与開始前の産乳量はDDGS給与後より多く、試験の経過に伴って産乳量が減少した。DDGS給与開始前と、給与開始後の産乳量の差は、産乳性に対する給与飼料の影響を示している。表3によると、DDGSを給与しない対照区における産乳量の差は6.1kg/日であり、DDGS7.5%区では4.0kg/、DDGS15%区では2.1kg/日であって、DDGSの給与により、対照区に比べて産乳量が大幅に増加した。

各区の様々な産乳量の推移は図1に示したとおりであり、各区の産乳量は試験の経過とともに減少しているが、対照区における減少傾向はより顕著であり、DDGS15%区での減少傾向が穏やかであったことが明らかであった。

この結果は、DDGSを給与することでベトナムの暑熱時でも高い産乳性を維持できることを明確に示している。TMRにDDGSを15%配合すると、対照飼料に比べて牛と比較して、産乳量が4kg多くなった。これは、DDGSを

表 1. 供試 TMR の組成

原料	対照	DDGS 7.5%	DDGS 15%
トウモロコシサイレージ	29.40	29.40	29.40
エレファントグラス	28.01	29.40	29.40
アルファルファ乾草	9.80	5.91	5.00
乾燥ビール	7.35	7.35	7.35
豆乳廃液	7.35	7.35	4.51
粉碎トウモロコシ	6.00	1.80	
糖蜜	4.90	4.10	4.90
乳用牛用濃厚飼料 (40%、guyomarch)	3.40	3.40	3.40
大豆粕	2.75	2.75	
植物油	0.39	0.39	0.39
リン酸二石灰	0.30	0.30	0.30
重炭酸ナトリウム	0.30	0.30	0.30
ビタミン・ミネラル・プレミックス	0.05	0.05	0.05
DDGS %		7.50	15.00
栄養成分 (計算値、原物)			
水分 %	51.7	52.8	53.0
TDN (可消化養分総量) %	70.6	72.0	72.7
NE _L (泌乳に要する真のエネルギー) Mcal/kg	1.72	1.76	1.78
CP (粗たん白質) %	15.1	17.1	17.0
NDF (中性デタージェント繊維) %	29.8	33.3	38.6
ADF (酸性デタージェント繊維) %	18.3	19.1	20.6
カルシウム %	1.02	0.91	0.87
リン %	0.45	0.51	0.54
塩素 %	0.27	0.29	0.32
マグネシウム %	0.21	0.20	0.20
イオウ %	0.18	0.19	0.21
UDP (ルーメン非分解性たん白質) %	8.6	9.7	9.3
RUP (ルーメン分解性たん白質) %	6.8	7.4	7.8
費用 (CND/kg)	2537	2460	2399

表 2. 試験期間中の気温と相対湿度

	温度 (°C)	相対湿度 (%)
最低	28	74
最大	37	88
平均	33	82

表 3. 試験開始前 5 日間と、試験開始後 45 日間の平均産乳量と飼料摂取量

処理	産乳量 (kg /日)		差 (kg/日)	飼料摂取量 (kg /日)	
	DDGS 給与後	DDGS 給与前		DDGS 給与後	DDGS 給与前
対照	20.5	14.4 ^a	6.1	36.8	35.6
DDGS 7.5%	19.2	15.2 ^{ab}	4.0	38.3	35.3
DDGS 15%	18.2	16.1 ^b	2.1	36.8	35.6

*同じ列の異なる上付き文字は有意差 (p < 0.05) を示し、SEM (標準誤差平均) は 0.4 kg /日

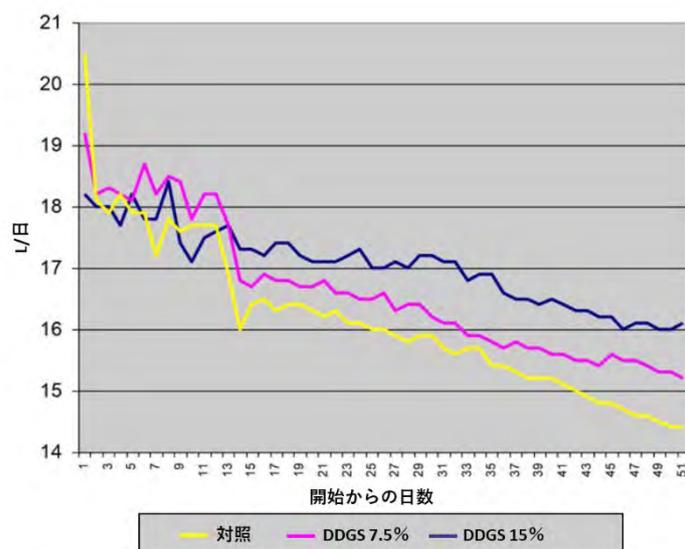


図1. 産乳量の推移

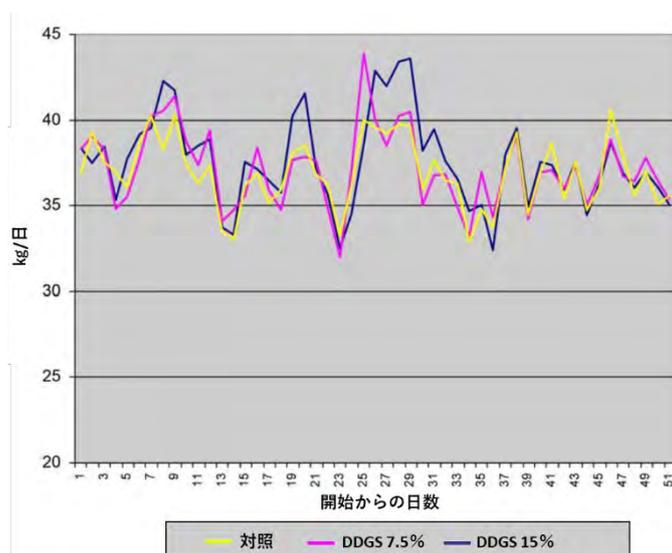


図2. 飼料摂取量の推移

表4. DDGS 給与開始前後の総固形分および乳脂率

処理	固形分 (%)		差 (%)	乳脂率 (%)		差 (%)
	DDGS給与後	DDGS給与前		DDGS給与後	DDGS給与前	
対照	12.5	12.1	-0.4	3.8	3.7	-0.1
DDGS 7.5%	12.4	12.1	-0.3	3.8	3.7	-0.1
DDGS 15%	12.0	12.4	0.4	3.6	4.0	0.4

10%給与すると産乳量が1 kg/日増加したとする夏季の台湾で行われた試験結果(Chen and Shurson, 2004)と一致しており、今回のベトナムでの試験結果は、台湾で行われた試験に比べて、効果がより優れていた。

また、表3は、飼料消費量は、対照区では35.6 kg/日

であり、DDGS 7.5%区および15%区では、35.3 および35.6 kg/日であって、DDGS 給与による影響を受けないことを示している。試験開始前後の飼料消費量にも差はなかった。供試牛は、DDGSを配合したTMRに数日以内に適応し、問題なく摂取した。さらに、対照飼料、DDGS

7.5%飼料および DDGS 15%飼料の価格は 2537、2460 および 2399 ドン/kgであり(表 1)、DDGS の配合により飼料費の削減が出来た。

給与試験中に飼料摂取量の推移を図 2 に示したが、各区間で差がなかった。飼料摂取量の変動は、日中の畜舎内温度と湿度に相関しており、気温と湿度が上昇すると飼料摂取量が減少し、温度が下がると増加した。

乳質

DDGS 給与開始前後の乳質の測定結果を表 4 に示した。DDGS 7.5%区の総固形分率と乳脂率は対照区と差がなかったが、DDGS 15%区ではわずかに高まる傾向を示した。この結果は、DDGS を 15%配合した TMR を給与すると乳質が改善されることを示している。

結論

1. 乳用牛は、DDGS を配合した TMR をすぐに摂取する。
2. DDGS の給与により、暑熱時の乳用牛の産乳量を改善する。
3. DDGS を 15%配合した TMR は、乳生産性を維持することができ、DDGS を配合していない TMR に比べて産乳量が 4 kg/日増加し、DDGS を 7.5%配合した TMR に比べて 2 kg/日増加した。
4. DDGS を 15%配合した TMR の給与により、DDGS を配合していない TMR および DDGS を 7.5%配合した TMR に比べて優れる傾向を示した。

謝辞

Vinamilk Dairy Farm Co.のマネージャー Huy 氏およびアメリカ穀物協会インターナショナルコンサルタントの Tran Trong Chein 氏の給与試験への協力に感謝する。

引用文献

- Chen, Yuan-Kuo and J. Shurson. 2004. Evaluation of distiller's dried grains with solubles for lactating cows in Taiwan. [http://www.ddgs.umn.edu/international-translations/Taiwanese \(Yuan-Kuo Chen 2004\).pdf](http://www.ddgs.umn.edu/international-translations/Taiwanese%20(Yuan-Kuo%20Chen%202004).pdf)
- Cyriac, J., M. M. Abdelqader, K. F. Kalscheur, A. R. Hippen, and D. J. Schingoethe. 2005. Effect of replacing forage fiber with non-forage fiber in lactating dairy cow diets. *J.*

Animal Sci. 88(Suppl. 1):252

Kalscheur, K. F. Impact of feeding distillers grains on milk fat, protein, and yield. Distillers Grains Technology Council. 9th Annual Symposium. Louisville, KY. May 18, 2005.

Kalscheur, K.F. and A.D. Garcia. 2004. Use of by-products in growing dairy heifer diets. Extension Extra, South Dakota State University. ExEx 4030, 3 pp.

National Research Council. 1981. Nutrient Requirements of Dairy Cattle. 5th Rev. Ed. National Academy of Sci., Washington, DC.

National Research Council. 2001. Nutrient Requirements of Dairy Cattle. 7th Rev. Ed. National Academy of Sci., Washington, DC.

Powers, W.J., H.H. Van Horn, B. Harris, Jr., and C.J. Wilcox. 1995. Effects of variable sources of distillers grains plus solubles on milk yield and composition. *J. Dairy Sci.* 78:388-396.

Schingoethe, D.J. 2004. Corn Co products for Cattle. Proceedings from 40th Eastern Nutrition Conference, May 11-12, Ottawa, ON, Canada. pp 30-47.

USGC, 2007. Handbook of DDGS. U.S. Grains Council, Washington DC.

水産養殖動物

DDGS の給与が *Pangasius* の発育成績と肉の色調に及ぼす影響

要約

ナマズ (*Pangasius*) に対するトウモロコシ DDGS の給与試験は、2015 年にベトナムの民間農場で実施された。DDGS は米国から入手し、一般成分とアミノ酸組成を分析した。0.5 の池に深さ 3m ナイロン製ネットで作成した 16 基の浮き生け簀に、体重 40 g の *Pangasius* 幼魚 6 千尾を無作為に割り当てた。各区に 4 基の生け簀を割り付けた (4 反復群)。DDGS の配合量は、0、5、10 および 15% とし、それぞれ、大豆粕、米ぬか、キャッサバ、魚粉、小麦、ふすまを配合して、栄養成分含量が同一となるように設計した。供試飼料 (浮き餌) の CP は前期用では 28%、育成用では 26% とした。

試験は 118 日間実施し、試験開始後 42 および試験終了時に供試魚のサンプリングを行った。*Pangasius* は DDGS 配合飼料をすぐに摂取し、DDGS の配合割合は発育成績に影響を及ぼさなかった。DDGS 0、5、10 および 15% 区の体重は、それぞれ 471、472、470 および 490 g であり、飼料効率はそれぞれ 1.59、1.62、1.56 および 1.53 だった。斃死率には区間差はなかった。フィレ肉の収量は、DDGS 配合量の増加に伴い 526 g/kg から 531 g/kg までわずかに改善された。色差計によるフィレ肉の色調 (L、a および b 値) には区間差はなく、黄色味が強まる傾向はなかった。結論として、トウモロコシ DDGS は *Pangasius* に対して問題なく給与することができ、飼料に 15% 量を配合してもフィレ肉の色調には影響を及ぼさなかった。

緒言

DDGS はエタノール産業の併産物であり、家畜用の飼料原料として使用されている。過去 15 年間における米国でのエタノール生産量の増加に伴い、飼料原料として利用できる DDGS の量が増加している。2014 年には 4,000 万トンを超える DDGS が生産され、1,000 万トン以上が様々な国に輸出されていると推定されている (USGC、2014)。特に乳用牛、豚、家禽用の飼料原料として経済

的に実現可能であることが示されている。

ナマズはベトナムにおける主要な魚種の一つであり、地元では食用魚として人気がある。ベトナムのナマズは、ヨーロッパ、アメリカ、アジア太平洋地域の多くの国に輸出されている。メコンデルタの河川地域の池または生け簀において、出荷体重 (500~1000 g) までの養殖されている。ナマズ用飼料は、通常、大豆粕、小麦副産物、魚粉、米副産物、キャッサバ等のいくつかの原料で構成されている。DDGS はナマズ養殖用飼料原料として利用されているが、*Pangasius* 用飼料原料としての DDGS の価値に関するデータは限られている。Tidwell ら (1990) は、DDGS を、トウモロコシと大豆粕の一部を置換して 0、10、20 および 40% 配合した飼料をアメリカナマズ幼魚に 11 週間給与している。1993 年に、Webster らはナマズ稚魚への給与試験を実施し、ナマズ飼料に DDGS を最大 30% 配合することが出来、発育成績、枝肉の組成またはフィレ肉の風味や品質に悪影響を及ぼさないことを示している。したがって、DDGS はナマズ用飼料の原料として使用できると考えられている (Tidwell ら、1990; Webster ら、1991)。

ただし、初期の DDGS に関する給与試験は古い工程で製造された DDGS を使用されているが、エタノール生産技術は、酵素と酵母の選択および最新の製造工程、発酵前の酵素処理等を用いることにより進化している。現在、米国では、20 年間で 200 以上のエタノール工場が出来ており、DDGS の品質は高く、黄色みも強くなっている。以前のデータは、ティラピア (Coyle ら、2004; Shelby ら、2008) およびアメリカナマズ (Robinson and Li、2008、Li ら、2010、2011、Zhou ら、2010) において植物性たん白を新しい DDGS で正常に置換できることを示している。Cheng and Hardy (2004) は、ニジマス用飼料に DDGS を最大 15% 配合することで魚粉と置換することができ、Overland ら (2013) による最近の研究では、DDGS をひまわり粕、ナタネ粕、エンドウ等の代替えとして最大 10% まで配合できるといえる。

養殖生産動物、特に淡水魚の養殖は、主にはアジアで行われており、ベトナムは自国での消費と輸出用のナマズを生産する主要国である。ベトナムのナマズは米国

のアメリカナマズとは少し異なっている。ベトナムのナマズはメコン川に生息しており、*Pangasius hypohthalmus* と呼ばれている。ベトナムのナマズの生産量は過去数年間増加し続けており、*Pangasius* のフィレ肉は多くの国に輸出されている。

消費者の要望に応じて、白色のフィレ肉を要求する多くの輸出業者がいる。トウモロコシ DDGS を給与すると、DDGS からの色素成分がフィレ肉に移行する可能性があるため、フィレ肉の色調が変化する可能性がある懸念がある。この考えは、DDGS の給与がフィレ肉の香気品質に影響を及ぼさなかったと Webster ら(1993)が報告している以外に、証明する報告はない。したがって、試験の目的は、DDGS の摂食価値と *Pangasius* のフィレ肉の色調に対する影響を評価することとした。

材料および方法

試験は、ベトナムのメコンデルタにあるサデック州の Hung Vuong Co.農場で行い、供試飼料は Hung Vuong 飼料工場で製造した。飼育には、深さ 3 m、容量 5000 m³の池に設置した 4×6×3mの浮き生け簀 16 器を用いた。池内の淡水はメコン川から得た。生け簀は、水の移動と交換が問題なく行えるように配置した。水質測定は毎日実施し、pH は 8 で安定しており、溶存酸素は 4、水温は 28~32°Cだった。

飼料

供試飼料は、1)DDGS を含まない対照飼料(対照区)、2)DDGS を 5%配合した飼料(DDGS 5%区)、3)DDGS を 10%配合した飼料(DDGS 10%区)および 4)DDGS を 15%配合した飼料(DDGS 15%区)とし、ベトナムの養水産養殖業の一般的な慣行に従って、前期用と育成用飼料を調製した。前期用飼料の CP は 28%、育成用飼料では 26%であり、各飼料の栄養成分含量は同一となるように設計した(表 1)。前期用飼料のペレット径は 3~4 mm、育成用飼料は 5~6 mmとした。各食事療法は、40 g のサイズのパンガシウス魚に与えられた。供試魚は、ナイロン製の網(メッシュ 1)で製造された浮き生け簀(4×6×3 m、水の有効容積 72 m³)に 1 器あたり 300 尾を収容して飼育した。試験は 118 日間行い、いずれも出荷体重(約 500 g)に到達した。試験終了後、50 尾をより小さな生け

簀に移し、フィレ肉の色調を調査するために 6 月間継続飼育した。

飼育方法

体重 40 g の *Pangasius* 幼魚約 6,000 尾を導入し、生け簀に馴化させた。導入時には、生け簀収容量の 5%量の飼料を給与し、午前 7 時 30 分、午前 10 時 30 分、午後 1 時 30 分、午後 3 時 00 分の 1 日 4 回給与した。給与量は飽食量の 95%量とし、最初は、給与後 10 分以内に全量を摂取できる量の 90%量の飼料を 5 日間給与し、その後 5 日間は飽食量が与えられたため、平均は飽食量の 95%量とした。給与量は 10 日毎に計算して調整した。

飼料の採取および発育成績測定

前期用飼料給与期間(42 日間)および育成用飼料給与期間(78 日間)の各終了時に各生け簀から魚を採取して体重測定を行い、全期間終了時に総重量を測定した。毎日の斃死率と飼料消費量を記録した。試験終了に、各生け簀内の総重量を測定し、飼料の残量を計量した。飼料効率を算出し、斃死重量での補正を行った。供試した DDGS、フンヴォン研究所で NIR を用いて分析した。水分、CP、粗繊維、粗脂肪および粗灰分は、それぞれ測定方法(EC 152/2009、TCVN 4328-1:2007、AOCS Ba-6a-05、ISO 6492:1999 および EC 152/2009)に従って分析した。

各供試飼料のアミノ酸含量は、シンガポールのエボニック SEA 研究所において分析した。アミノ酸分析用の飼料は、窒素ガスで 24 時間冷却(-110°C)し、塩酸(6N)で加水分解した。過ギ酸酸化は、メチオニンおよびシステイン分析のための加水分解前に行った(AOAC International, 2000; 982.30 E [a, b, c])。加水分解物後のアミノ酸は、ポストカラム誘導体化後に高速液体クロマトグラフィーによって分析したアミノ酸濃度は、加水分解に起因する不完全な回復による補正を行わなかった。

フィレ肉の色調調査

試験終了時の各生け簀から 5 尾(各区 20 尾:5 尾×4 反復群)を選抜し、フィレ肉重量を測定し、フィレ肉収量(フィレ肉重量/魚体重、%)を算出した。色調の測定は、携帯用色差計(日本電工業、NR-3000)を用いて、ハンターラボシステムとして L、a および b 値を測定した。L 値は明度を、a 値は赤色味を、b 値は黄色味を示す。さらに、

試験終了後、魚体重が0.9～1.0kg程度になるまでDDGS配合飼料を継続給与し、184日後に同様の方法でフィレ肉の色調を測定した。

統計解析

各データについて、コンピュータープログラム(SASバージョン 6.12)を使用して乱塊法により分散分析し、各区間の差はダンカン多重検定により解析した。

表 1. 供試飼料の成分組成

原料	前期用飼料 (CP28%)				育成用飼料 (CP26%)			
	DDGS 0%	DDGS 5%	DDGS 10%	DDGS 15%	DDGS 0%	DDGS 5%	DDGS 10%	DDGS 15%
大豆粕 ¹	487.0	468.2	456.2	428.2	447.0	428.0	424.0	412.0
全脂米ぬか	224.5	145.1	154.6	133.6	233.0	202.0	166.0	125.0
フスマ	0.0	0.0	0.0	0.0	50.0	50.0	50.0	15.0
脱脂米ぬか	50.0	100.1	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
キャッサバ	120.0	120.1	120.1	165.1	120.0	120.0	120.0	120.0
小麦	50.0	50.0	50.0	50.0	80.0	80.0	80.0	117.5
魚粉 CP62%	40.0	40.0	40.0	47.5	30.0	30.0	30.0	30.0
魚粉 CP55%	12.0	12.0	14.5	11.0	26.0	26.0	16.0	15.0
DDGS	0.0	50.0	100.0	150.0	0.0	50.0	100.0	150.0
プレミックス ²	10.5	10.5	10.5	10.5	8.0	8.0	8.0	8.0
食塩	6.0	4.0	4.0	4.0	6.0	6.0	6.0	6.0
リン酸一石灰	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5
計	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

¹ アルゼンチン産

² kg/飼料: 鉄 50 mg、銅 30 mg、マンガン 20 mg、亜鉛 30 mg、コバルト 0.1 mg、セレン 0.1 mg、ビタミンA 7,000 IU、ビタミンD₃ 1,000 IU、ビタミンE 50 IU、ビタミンK 3 mg、チアミン 6 mg、リボフラビン 7 mg、パントテン酸 15 mg、ナイアシン 40 mg、ビリドキシン 6 mg、葉酸 2 mg、ビオチン 0.1 mg

結果

DDGS および飼料の成分組成

供試したトウモロコシ DDGS の組成を表 2 に示した。CP 含量は 27.73%、粗脂肪含量は 9.88% であり、米国産 DDGS の一般的にみられる DDGS より粗脂肪含量が高かった。NIR による CP 含量は 27.65% であり、湿式化学分析値とほぼ同値であった。アミノ酸含量は、米国産トウモロコシ DDGS の一般的な値(リジン:0.8%、メチオニン:0.8%)であった。

DDGS を 0、5、10 および 15% 配合した前期用飼料および育成期用飼料は、それぞれ栄養成分含量が同一となるように設計した。供試飼料の成分組成は表 3 に示したとおり、各飼料の成分組成はほぼ設計通りの値を示したが、前期用飼料の CP 含量は 28.8～29.6%、育成期用

飼料は 27.4～28.4% であり、設計値よりわずかに高かった。供試飼料は、浮き餌を製造するためにでん粉含量を高めているが、各供試飼料のでん粉含量は約 30% と同一であった。

アミノ酸組成は表 4 に示したとおりであり、飼料によってアミノ酸含量に多少の違いが見られた。リジン含量は約 1.6 %、メチオニン含量は 0.59% に維持されていた。

発育成績

供試魚の体重を図 1 に示した。供試魚は順調に発育し、前期用飼料給与期間、育成期用飼料給与期間および全期間終了時の体重は、それぞれ、150、300 および 470 であった。試験終了時の体重には統計的な差はなかったが、前期用飼料給与期間終了時には、DDGS の配合により体重がわずかに重かった。

表 2. 供試した DDGS の組成と必須アミノ酸含量

分析値	量 g/kg
水分	114.1
CP (粗たん白質)	277.3
粗繊維	76.9
粗脂肪	98.8
粗灰分	45.0
必須アミノ酸	
たん白質 (NIRS値)	276.5
トレオニン %	10.02
シスチン %	5.02
バリン %	13.03
メチオニン %	5.08
イソロイシン %	9.58
ロイシン %	29.90
フェニルアラニン %	12.74
リジン %	7.91
ヒスチジン %	7.28
アルギニン %	11.79
トリプトファン %	2.21

表 3. 供試飼料の成分組成

飼料	水分	たん白質	脂肪	繊維	灰分	カルシウム	リン	でん粉
育成用飼料 CP28%								
DDGS 0%	103.6	290.2	56.2	35.2	88.0	14.0	13.1	301.2
DDGS 5%	88.6	287.7	52.6	40.3	88.9	13.8	10.5	311.4
DDGS 10%	88.7	296.3	51.3	39.1	85.4	13.4	11.5	310.5
DDGS 15%	84.5	292.8	52.6	40.0	83.8	14.0	11.3	317.6
育成用飼料 CP26%								
DDGS 0%	99.7	273.6	63.6	38.7	91.5	13.5	10.8	308.6
DDGS 5%	95.1	277.1	59.4	38.8	86.3	13.2	11.3	303.9
DDGS 10%	97.0	277.6	55.2	39.0	86.5	14.1	11.6	308.7
DDGS 15%	98.5	284.2	49.0	37.5	84.0	13.6	11.8	320.3

発育成績は表 5 に示したとおりであって、いずれの項目にも統計的な差はなかった。DDGS 15%区の終了時体重は 490 g であり、対照飼料(471 g)よりやや重い傾向を示したが、飼料消費量にも統計的な差はなく、DDGS を 15%まで配合しても *Pangasius* の嗜好性に影響を及ぼさなかったことを示している。飼料効率にも各区間に統計学的な差はなかったが、DDGS 15%区は最も優れた。斃死率は 3.7~4.9%であり、区間差はなかった。

フィレ肉の色調

飼育試験終了時およびその後の 184 日間継続給与後のフィレ肉の色調測定結果を表 6 および 7 に、フィレ肉の写真を図 2 に示した。飼育試験終了時のフィレ肉の前部、中央部および後部の色調には統計学的な有意差はなかった。その後 184 日間継続給与した場合に、フィレ肉の前部の a 値に有意差が認められたが、a 値は赤色味の指標である。DDGS の黄色い色は、原料であるトウモロ

表 4. 供試飼料のアミノ酸組成(g/100 g)

アミノ酸	DDGS 0%	DDGS 5%	DDGS 10%	DDGS 15%
メチオニン	0.59	0.57	0.59	0.60
シスチン	0.42	0.42	0.44	0.43
メチオニン+シスチン	1.01	0.99	1.03	1.03
リジン	1.67	1.62	1.63	1.58
トレオニン	1.13	1.11	1.14	1.13
トリプトファン	0.37	0.37	0.37	0.36
アルギニン	2.07	2.03	2.05	2.00
イソロイシン	1.25	1.24	1.27	1.26
ロイシン	2.12	2.15	2.29	2.32
バリン	1.39	1.38	1.42	1.41
ヒスチジン	0.71	0.71	0.74	0.73
フェニルアラニン	1.37	1.37	1.42	1.41
グリシン	1.43	1.43	1.46	1.46
セリン	1.41	1.40	1.45	1.43
プロリン	1.54	1.60	1.70	1.72
アラニン	1.37	1.40	1.48	1.50
アスパラギン酸	3.02	2.96	3.00	2.93
グルタミン酸	4.74	4.72	4.89	4.84
計 (アンモニアを除く)	26.60	26.47	27.31	27.09
アンモニア	0.59	0.59	0.61	0.63
計	27.18	27.06	27.93	27.72

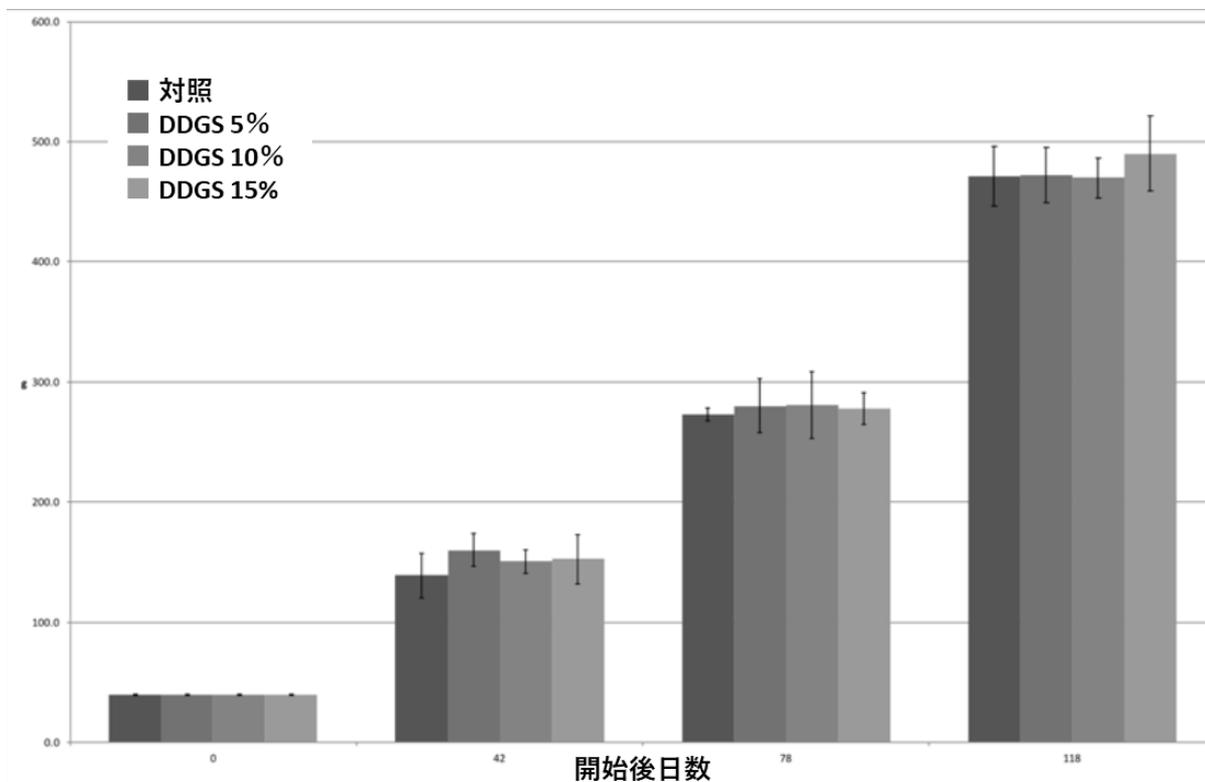


図 1. 体重の比較

表 5. 発育成績

測定項目	DDGS 0%	DDGS 5%	DDGS 10%	DDGS 15%	SEM**
尾数/ケージ	300	300	300	300	
開始時体重 g	39.8	39.8	39.8	39.9	0.17
終了時体重 g	471.3	472.0	470.0	490.2	24.6
増体量 g	431.5	432.2	430.1	450.3	24.6
飼料摂取量 g	698.2	708.7	674.4	691.5	48.0
斃死率 %	3.7	4.9	4.0	3.7	2.0
飼料効率	1.62	1.65	1.57	1.54	0.064
飼料効率 coor*	1.59	1.62	1.56	1.53	0.055

*飼料効率corr: 斃死率を加味した飼料効率、** SEM : 標準誤差

表 6. 飼育試験終了時のフィレ肉の収量と色調

区	収量 (g/kg)	L 前部	a 前部	b 前部	L 中央部	a 中央部	b 中央部	L 後部	a 後部	b 後部
DDGS 0%	525.6 ^a	46.48	-4.95	7.52	48.59	-5.52	6.04	47.97	-3.37	7.27
DDGS 5%	539.1 ^b	47.23	-4.04	7.93	47.23	-5.14	7.74	48.58	-3.19	7.82
DDGS 10%	535.6 ^b	46.81	-4.54	8.03	47.96	-3.50	7.53	47.83	-4.00	7.74
DDGS 15%	530.9 ^{ab}	46.67	-4.76	7.83	48.59	-4.56	7.67	48.90	-3.93	8.56
危険率	0.030	0.595	0.755	0.851	0.463	0.332	0.268	0.449	0.685	0.268

a - b異符号間有意差あり (p < 0.05)

表 7. 継続給与後のフィレ肉の色調

区	L 前部	a 前部	b 前部	L 中央部	a 中央部	b 中央部	L 後部	a 後部	b 後部
DDGS 0%	46.50	-4.44b	-0.84	46.28	-2.23	-1.59	46.94	-1.24a	-1.21
DDGS 5%	46.61	-3.20ab	-0.45	45.73	-1.82	-0.27	47.08	-2.19ab	-0.30
DDGS 10%	46.61	-2.23a	-0.20	47.45	-3.10	-1.23	47.03	-3.53b	-0.21
DDGS 15%	47.52	-4.86b	-0.41	46.40	-2.74	-0.58	46.58	-1.18a	-0.08
危険率	0.288	0.040	0.804	0.089	0.439	0.145	0.950	0.024	0.392

a - b異符号間有意差あり (p < 0.05)

コシのキサントフィルに由来し、エタノール生産中に DDGS へ濃縮されることから、DDGS を 15%まで配合するとフィレ肉が黄色みを帯びる可能性が示唆されるが、6 か月まで給与を継続してもフィレ肉の色調への変化はなかったと言える。

フィレ肉の収量(表 6)は、DDGS の配合によりわずかに改善された。

考察

エタノール生産時の併産物である DDGS の水産養殖

用飼料原料としての利用可能性が高まっている。DDGS の CP 含量は 27.7%、粗脂肪含量は 9.9%であって、淡水魚種用飼料の飼料原料として使用できる。本試験では、DDGS を米ぬかおよび大豆粕の一部と置換した。以前に行われたアメリカナマズに対する給与試験では、DDGS はトウモロコシと大豆粕と置換することが可能であり (Tidwell ら、1990、Zhou ら、2010)、リジンを追加していれば綿実粕と組み合わせることで大豆粕と置換できることが示されている (Robinson and Li、2008)。本試験では、*Pangasius* 用飼料に DDGS を 15%まで配合すると、リジ

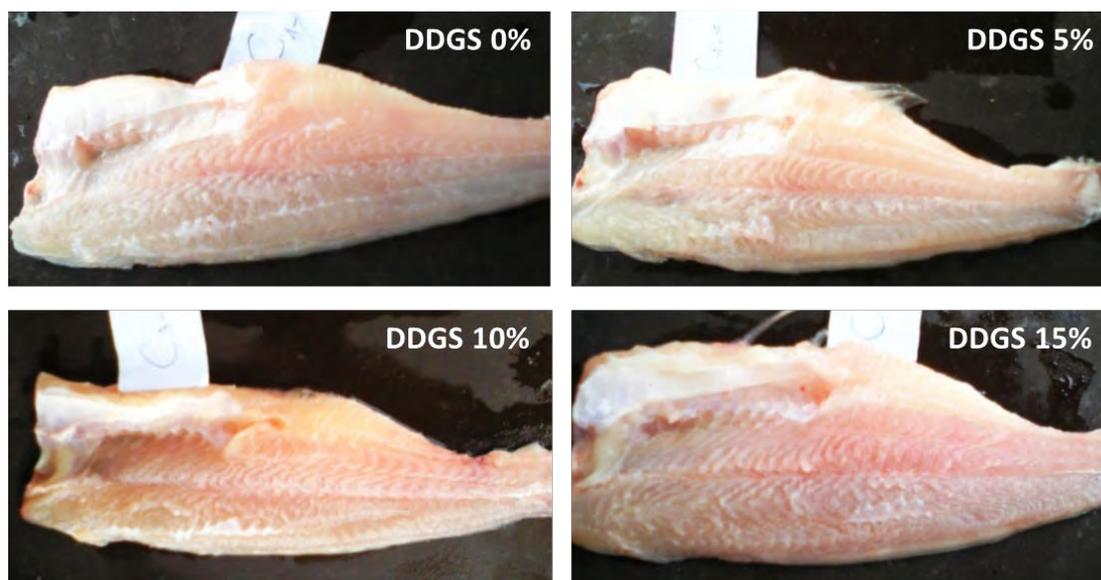


図2. 飼育試験終了時における *Pangasius* のフィレ肉

ンではなく、DL-メチオニンを添加(0.14%) 添加する必要があった。最近の試験では、飼料への大豆粕の配合量が非常に高い(40%以上)場合、メチオニンが不足する。

トウモロコシ DDGS のリジン含量(0.79%)は、大豆粕に比べてはるかに低く、DDGS 中のリジンは単胃動物では消化されにくい可能性がある(Waldroup ら、2007; Stein and Shurson、2009)。したがって、アミノ酸組成と消化率を考慮するために、水産養殖動物用飼料を精密設計することが重要である。残念ながら、魚における DDGS のアミノ酸消化率は不明であるが、家禽における消化率を流用することが出来る。本試験では、各供試飼料はアミノ酸含量の分析結果によってアミノ酸組成が同様となるように設計した。

しかし、DDGS の粗繊維含量(7.69%)は、脱皮大豆粕(3.5%)に比べてわずかに多い。高繊維は魚による利用を制限する可能性があるが、含有量と魚種によって影響は異なる。最近の報告では、ニジマス用飼料への DDGS の配合量は 10~20%に制限する必要がある(Welker ら、2014)が、結晶リジンとトリプトファンを添加すれば、ティラピア用の低たん白質飼料では 82%まで配合出来る(USGC、2012)。

Pangasius は、DDGS を 15%まで配合した飼料は問題なく摂取しており、DDGS の配合による嗜好性への影響がないことを示している。各供試飼料は、でん粉含量が同一となるように設計されており(30%)、いずれも浮遊

性で、製造工程での問題も散見されなかった。トウモロコシ中のでん粉の大部分は、発酵工程中にエタノールと二酸化炭素に変換されるため、DDGS にはでん粉はほとんど含まれていない。したがって、でん粉含量を考慮しても、DDGS を 15%まで配合しても、問題なく浮き餌が製造できるものと考えられる。

DDGS を 15%まで配合した飼料を給与しても、*Pangasius* は問題なく成長した。前期中飼料給与期間(42日間)では、DDGS 配合飼料の増体率が高かったが、育成用飼料給与期間には、その傾向は見られなかった。DDGS を配合すると、ティラピアにプラスの効果をもたらされる可能性がある。Wu ら(1994)は、トウモロコシグルテンミール(18%)または DDGS(29%)を配合した CP 含量が 32 および 36%飼料の増体率は、魚粉を含む CP 含量が 36%の飼料に比べて優れたと報告している。その後の研究で、Wu ら(1996)は、ティラピア稚魚(体重 0.4g)を用いて 8 週間給与試験を行い、DDGS を 32、36 および 40%配合した飼料と高たん白 DDG を 16~49%配合した飼料を給与しても、良好な増体量、飼料効率およびたん白効率を得られたと報告している。

ベトナムでのティラピアへの DDGS 給与に関する以前の研究では、DDGS を 15%まで配合した場合に生存率の改善が示されている(Tangendjaja and Chien、2007)。

今回の試験では、*Pangasius* の発育成績は区間で差がなく、5、10 および 15%配合しても、増体率、飼料消費

量および飼料効率には影響がなく、斃死率も DDGS 給与による影響を受けなかった。ティラピアを用いた試験で見られた斃死率の改善は、今回の *Pangasius* を用いた試験では観察されず、DDGS の給与による斃死率への影響に種差があるか否かは明らかではない。Lim ら (2009) は、飼料に DDGS が配合されている場合の *Edwardsiella ictaluri* 暴露への耐性の可能性を報告しているが、Overland ら (2013) による最近の報告では、DDGS の給与はマスの血液性状には影響しないとしている。DDGS には、発酵時に使用した残留酵母 (*Sacharomyces cerevisiae*) が含まれており (Ingledew, 1999)、酵母の細胞、特に細胞壁は、マンナンオリゴ糖および β -グルカンの供給源であり、魚用飼料に免疫刺激剤として使用され、最終的に魚の健康状態を改善すると報告されている (Li and Gatlin III, 2006 および Refstie ら, 2010)。

DDGS がトウモロコシに由来する場合、キサントフィルが適量含まれている。キサントフィル含量は最大 59 mg/kg に達する可能性があり、DDGS のキサントフィルは卵黄に移行して卵黄の色調を改善出来ることが示されている (Tangendjaja and Wina, 2011)。黄身の黄色は消費者に好まれるが、黄色味を帯びたフィレ肉は消費者に好まれないと思われる。ベトナムの多くの *Pangasius* 養殖業界では、フィレ肉の色調は白色にする必要があり、黄色味のフィレ肉は望ましくない。本研究では、DDGS を 15% まで飼料に配合して 118 日間給与しても *Pangasius* のフィレ肉の色調は影響を受けず、さらに 6 か月まで継続給与して、魚体重が約 900 g に達しても、フィレ肉の色調には影響がなかった。ベトナムの養殖業界では、通常、魚体重が 1 kg に達した時点で輸出用のフィレ肉を製造する。以前の研究 (Tangendjaja ら, 2012, 未公表) では、キサントフィル含量が 30 ppm の DDGS を 15% 配合した飼料を給与したナマズのフィレ肉のキサントフィル含量は 1.1 ppm で、対照飼料を給与したナマズのフィレ肉 (2.0 ppm) と差がなかった。これは、DDGS を 15% 配合した飼料を給与してもナマズのフィレ肉のキサントフィル含量が増加しないことを示しており、表 6 および 7 に示したフィレ肉の色調調査結果を裏付けている。キサントフィルを含むカロテノイドは脂溶性の化合物で、鶏卵の脂肪は卵白ではな

く卵黄に存在している。対照的に、*Pangasius* のフィレ肉は大部分がたん白であるため、キサントフィルが移行しない可能性があり、飼料に DDGS を 15% 配合しても、*Pangasius* のフィレ肉は黄色味を帯びることはなかった。

結論

この試験の結果は、トウモロコシ DDGS を *Pangasius* のたん白質源およびエネルギー源として米ぬかと大豆粕の一部と置換できることを示している。*Pangasius* 用飼料に DDGS を 15% まで配合しても、発育成績 (増体率、飼料消費量および飼料効率) と斃死率には影響はなかった。DDGS を配合した飼料を 6 か月間給与しても、色差計で測定したフィレ肉の色調には影響を及ぼさなかった。

謝辞

飼育施設を提供いただいた Hung Vuong Co. Ltd., Sadec Vietnam およびアミノ酸分析を実施して頂いた Evonik SEA Pte. Ltd., Singapore に謝辞を表します。

引用文献

- Association of Official Analytical Chemists (AOAC). 2000. Official methods of Analysis. 17th ed. AOAC, Arlington, VA.
- Cheng, Z.J., Hardy, R.W., 2004. Nutritional value of diets containing distiller's dried grain with solubles for rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. J. Appl. Aquac. 15 (3/4), 101–113.
- Coyle, S.D., Mengel, G.J., Tidwell, J.H., Webster, C.D., 2004. Evaluation of growth, feed utilization, and economics of hybrid tilapia, *Oreochromis niloticus* × *Oreochromis aureus*, fed diets containing different protein sources in combination with distiller's dried grains with solubles. Aquac. Res. 35, 365–370.
- Ingledew, W.M., 1999. Yeast — Could you base a business on this bug? In: Lyons, T.P., Jacques, K.A. (Eds.), Under the Microscope — Focal Points for the New Millennium — Biotechnology in the Feed Industry. Proceedings of Alltech's 15th Annual Symposium, pp. 27–47.
- Li, M.H., Oberle, D.F., Lucas, P.M., 2011. Evaluation of corn

- distiller's dried grains with solubles and brewer's yeast in diets for channel catfish *Ictalurus punctatus* (Rafinesque). *Aquac. Res.* 42 1424–1430.
- Li, P., Gatlin III, D.M., 2006. Nucleotide nutrition in fish: current knowledge and future applications. *Aquaculture* 251, 141–152.
- Li, M.H., Robinson, E.H., Oberle, D.F., Lucas, P.M., 2010. Effects of various corn distillers byproducts on growth, feed efficiency, and body composition of channel catfish, *Ictalurus punctatus*. *Aquac. Nutr.* 16, 188–193.
- Lim, C., Yildirim-aksoy, M., Klesius, P.H., 2009. Growth response and resistance to edwardsiella ictaluri of channel catfish, ictalurus punctatus, fed diets containing distiller's dried grains with solubles. *J. World Aquaculture Society.* 40(2), 182–193
- Overland, M., Krogdahl, A., Shurson, G., Skrede, A., Denstadli, V., 2013. Evaluation of distiller's dried grains with solubles (DDGS) and high protein distiller's dried grains (HPDDG) in diets for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture* 416–417, 201–208.
- Refstie, S., Baevefjord, G., Seim, R.R., Elvebø, O., 2010. Effects of dietary yeast cell wall β -glucans and MOS on performance, gut health, and salmon lice resistance in Atlantic salmon (*Salmo salar*) fed sun-flower and soybean meal. *Aquaculture* 305, 109–116.
- Robinson, E.H., Li, M.H., 2008. Replacement of soybean meal in channel catfish, ictalurus punctatus, diets with cottonseed meal and distiller's dried grains with solubles. *J. World Aquaculture Society.* 39(4), 521–527.
- SAS Institute, 2002. SAS/Stats User's Guide. Version 9.1. SAS Inst. Inc., Cary, NC, USA.
- Shelby, R.A., Lim, C., Yildirim-Aksoy, M., Klesius, P.H., 2008. Effects of distiller's grains with solubles-incorporated diets on growth, immune function and disease resistance in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.). *Aquac. Res.* 39, 1351–1353.
- Stein, H., Shurson, G.C., 2009. The use and application of distiller's dried grains with solubles in swine diets. *J. Anim. Sci.* 87, 1292–1303
- Tangendjaja, B., Chien, T.T., 2007. Use of dried distiller grain and solubles (DDGS) for feeding tilapia. *Proc. IndoAqua Bali*, July 30–August 1, 2007.
- Tangendjaja, B., Wina, E., 2011. Feeding value of low and high protein dried distilled grains and soluble, and corn gluten meal for layer. *Media Peternakan* 34(1) 133–139
- Tidwell, J.H., Webster, C.D., Yancey, D.H., 1990. Evaluation of distillers grains with solubles in prepared channel catfish diets. *Transactions of the Kentucky Academy of Science* 51:135–138.
- USGC. 2012. A guide to Distiller's Dried Grains with Solubles. Third edition. Washington, D.C.
- Waldroup, P.W., Wang, Z., Coto, C., Cerrate, S., Yan, F., 2007. Development of a standardized nutrient matrix for corn distiller's dried grains with solubles. *Int. J. Poult. Sci.* 6, 478–483
- Webster, C.D., Tidwell, J.H., Goodgame, L.S., Johnsen, P.B., 1993. Growth, body composition, and organoleptic evaluation of channel catfish fed diets containing different percentages of distiller's grains with solubles. *The Progressive Fish-Culturist* 55:95–100.
- Webster, C.D., Tidwell, J.H., Yancey, D.H., 1991. Evaluation of distillers grains with solubles as a protein source in diets for channel catfish. *Aquaculture* 96:179–190.
- Wu, Y.V., Rosati, R.R., Brown, P.B., 1996. Effect of diets containing various levels of protein and ethanol co products from corn on growth of tilapia fry. *Journal of Agricultural Food Chemistry* 44:1491–1493.
- Wu, Y.V., Rosati, R.R., Brown, P.B., 1997. Use of corn-derived ethanol co products and synthetic lysine and tryptophan for growth of tilapia (*Oreochromis niloticus*) fry. *Journal of Agricultural Food Chemistry* 45:2174–2177.
- Wu, Y.V., Rosati, R.R., Sessa, D.J., Brown, P.B., 1994. Utilization of protein-rich ethanol co-products from corn in tilapia feed. *Journal of American Oil Chemists*

Society 71:1041–1043.

Zhou, P., Zhang, W., Davis, D.A., Lim, C., 2010. Growth Response and Feed Utilization of Juvenile Hybrid Catfish Fed Diets Containing Distiller's Dried Grains with

Solubles to Replace a Combination of Soybean Meal and Corn Meal. North American Journal of Aquaculture 72:298–303

30章: DDGS に関するよくある質問

米国のエタノール工場で DDGS を製造する際に部分的に油を抽出しているのはなぜですか？

現在の DCO(ジステラース・コーン油)の市場価格と需要は、米国のエタノール工場の収益源として経済的に非常に有益である。米国では、バイオディーゼル産業の成長にともない、原料油脂の需要が高まっているため、DCO は経済的にも魅力的な脂質源となっている。DCO 抽出装置を既存のエタノール工場に設置する費用は比較的安価であり、その投資額は 1 年未満で簡単に完全に回収することができる(3 章参照)。

DCO は動物飼料用として輸出出来ますか？

はい。DCO は、AAFCO(全米飼料検査官協会)が品質を定義しており、米国の養鶏および養豚業においてかなりの量が使用されている。DCO は、バイオディーゼル生産用原料および飼料原料への使用は承認されているが、食品用途としては承認されていない。最近の研究により、家禽における AMEn(窒素補正した代謝エネルギー)価と豚における ME(代謝エネルギー)価が測定されており(4 章参照)、エネルギー価が高い経済的な脂質源であることが明らかになっている。一部の米国のマーケティング担当者は、海外への DCO の輸出経験があり、大量に入手することが可能であるが、販売数量は限られている。

低脂肪 DDGS は、従来の高脂肪 DDGS よりもエネルギー価は低いのですか？

いくつかの研究では、DDGS の粗脂肪含量は、豚の ME 価および家禽の AMEn 価を推定するための予測変数としては不十分であることを示している(6 章参照)。いくつかの化学分析値を予測変数として使用した ME と AMEn を正確に推定するため予測式が開発され、検証されている。これらの予測式では、繊維含量は粗脂肪含量よりも予測変数として適している。乳用牛および肉用牛における低脂肪 DDGS の NE(正味エネルギー)価を測定するためにいくつかの研究が行われているが、低脂

肪 DDGS の NE 価は高脂肪 DDGS よりわずかに少ない。その詳細については、17 章および 19 章を参照されたい。

DDGS における DCO の抽出は、DDGS の飼料価値にどのように影響しますか？

部分的な DCO の抽出は、豚や家禽における ME 価と AMEn 価を必ずしも減少させるとは限らない。いくつかの研究では、低脂肪 DDGS の一部は従来の高脂肪 DDGS と同等以上の ME 価と AMEn 価を持つことが示されている。ただし、反すう家畜ではデータが少ないため、低脂肪 DDGS のエネルギー価は従来の高脂肪 DDGS よりも低い可能性があるが、いずれのエネルギー価もトウモロコシと同等あるいはそれ以上である。最近の豚と家禽における研究では、粗脂肪含量が低い DDGS は、粗脂肪含量が高い DDGS に比べてアミノ酸の消化率がわずかに低いが、個々のアミノ酸の反応は様々である。さらに、低脂肪 DDGS では一般にアミノ酸消化率が低いが、総アミノ酸含量が増加しているため、低脂肪 DDGS 源と高脂肪 DDGS 源の間で可消化アミノ酸含量の変化は非常に小さい(6 章を参照)。家禽および豚の低脂肪 DDGS と高脂肪 DDGS のリン消化率を比較した研究はない。

低脂肪 DDGS の平均 CP(粗たん白質)含量はどれくらいですか？

最近行われた包括的なメタ分析(Zengら、2017)によると、トウモロコシ DDGS の平均 CP 含量は 27%(乾物 88% 換算値)で、変動係数は 8.7%である(6 章参照)。多くの売り手や買い手は、部分的に DCO を抽出した低脂肪 DDGS では、CP 含量がわずかに高まると予想していたが、一貫した応答ではなかった。

高たん白 DDG(ドライド・ジステラース・グレイン)は輸出市場で入手できますか？

はい。一部の米国のエタノール工場では、CP 含量が 40~50%の高たん白トウモロコシ DDG を製造するため

に、いくつかの新しい技術を導入している(5章参照)。これらの新しい高たん白トウモロコシ DDG を様々な畜種に給与する場合の最大配合割合と発育成績を調査した報告は少ない。エネルギー価と栄養成分含量、特に、これらの新しい高たん白 DDG のアミノ酸組成は、数年前にフロントエンド分別工程で製造されていた高たん白 DDG のエネルギー価と栄養成分含量は大幅に異なっていることを認識しておくことが重要である。いくつかの公表文献では、フロントエンド分画工程から製造された高たん白 DDG を家畜に給与した場合に優れた成績が得られることが示されているが、これらの結果は現在製造されている新しい高たん白 DDG には直接適用できない。

DDGS の色調は DDGS の品質と栄養価の信頼できる指標ですか？

非常に暗い色調の DDGS は、たん白質とアミノ酸の消化率が低いことが示されているが、最近の研究では、DDGS の色調とアミノ酸の消化率の間の相関は非常に低いことが示されている(10章参照)。乾燥温度の他にも、多くの要因が色調に影響を与えるため、色調は栄養価を表す指標としては信頼性が低い。したがって、濃い色調の DDGS は淡色の DDGS ソースよりも栄養価が低いと考えるべきではない。

DDGS は飼料中の大豆粕と置き換えることができますか？

個々の飼料原料が持っている栄養成分の量と、その比率は様々である。家畜・家禽用飼料に含まれる最も高価な3つの栄養素は、エネルギー、アミノ酸およびリンである。相対的な原料価格に応じて、DDGS はエネルギー、アミノ酸およびリン源として用いられている飼料原料の一部と置換して使用されている。典型的なトウモロコシ・大豆粕主体飼料では、DDGS はトウモロコシおよび大豆粕と部分的に置き換えられている。しかし、より多様なエネルギー源原料やたん白質源原料が利用できる場合、DDGS は、飼料中の大豆粕を減らすことなく、他の原料と置き換えることができる。豚と家禽用飼料における大豆粕と DDGS の違いは以下のとおりである。

- DDGS のエネルギー価は、家畜・家禽用飼料中の脱皮大豆粕よりも高い。
- DDGS の CP 含量は通常約 27%だが、大豆粕の CP 含量は 44~48%である。
- トウモロコシ・大豆粕主体の豚および家禽用飼料での制限アミノ酸は、リジン、メチオニン、トレオニンおよびトリプトファンである。大豆粕はこれらの必須アミノ酸含量が実質的に多く、DDGS よりも消化性が良い。
- 大豆粕には DDGS とほぼ同じ量のリンが含まれているが、DDGS 中のリンの大部分は、大豆に含まれる難消化性のリン(フィチン酸)と比べて、豚や家禽が容易に消化・利用できる形態になっている。この栄養上の利点により、DDGS を使用すると、飼料に添加が必要な無機リン源の量、飼料価格および糞尿中のリン含量を大幅に削減できると同時に、豚と家禽の成績を最適に保つことが出来る。また、いくつかの研究では、DDGS が反すう家畜用飼料において、大豆粕の優れた代替品であることが示されている。

DDGS にはカビ毒が含まれていますか？

DDGS の製造に用いられているトウモロコシのほとんどは、米国の上中西部で栽培されている。栽培時において、トウモロコシにストレスを与える異常な気象条件(干ばつ、過度の降雨、極端な高温および高湿等)により様々なカビ毒が産生される可能性がある。これらの条件下では、主要なトウモロコシ生産地域の一部の地域で特異的に発生することがある。エタノールおよび併産物の製造に用いられるトウモロコシにカビ毒が存在している場合、工程中では分解されずに DDGS 中で約 3 倍濃縮される。したがって、ほとんどの米国のエタノール工場では、主要なカビ毒(アトキシン、デオキシニバレノール、フモニシン、ゼアラレノン等)の最大基準を設定し、その基準に基づいてトウモロコシの受入を行っている。これらのエタノール工場は、トウモロコシ受入れ時に検査を行い、基準を超えるトウモロコシを受入れないことにより、カビ毒が最大基準より低い DDGS を製造している。最近の調査では、特定の年に生産された米国のトウモロコシにおける様々なカビ毒の発現率は、アジア、中南米で生

産されたトウモロコシよりも低いことが示されている。

DDGS にはエタノールが含まれていますか？

いいえ。エタノール工場で使用されている蒸留工程は完璧で、アルコールは非常に揮発性が高いため、DDGS の製造での乾燥工程中で、残っているアルコールは消失する。

DDGS に抗生物質の残留はありますか？

エタノールとトウモロコシ併産物を製造する際に、発酵中のトウモロコシへの細菌感染を制御するために少量の抗生物質が使用される。最も一般的に使用されているのは、バージニアマイシンとペニシリンである。これまでの研究によると、これらの抗生物質を製造時に推奨用量を添加すると、製造工程中の低 pH および高温条件下で、抗生物質は完全に分解される。ミネソタ大学が行った最近の調査によると、米国のエタノール工場から収集した DDGS の約 12% が、検出可能な非常に少量の 1 つ以上の抗生物質残留物を含んでいた。しかし、エタノール工場でのエタノールおよび DDGS 製造工程中での処理条件により、これらの抗生物質の残留物には生物活性がなかった。したがって、エタノール製造工程で抗生物質が使用されていても、DDGS は現在の FDA (米国食品医薬品局) の規制に基づいて動物に安全に給与できる。

一部の DDGS でイオウ含量が高いのはなぜですか？

エタノールの生産性を最適に保ち、高品質の DDGS を製造するために、発酵中の pH を最適化する必要がある。このために少量の硫酸を使用している。その結果、DDGS のイオウ含量が高まることになる。イオウ含量は 0.6~1.0% である。最近の研究では、イオウ含量が高い飼料を豚に給与しても、発育成績に悪影響はなく、豚の抗酸化状態を改善する可能性があることが示されている (14 章参照)。ただし、反すう家畜に対して高イオウ DDGS を多量に給与すると、硫化水素の生成が増加し、イオウの毒性リスクが高まり、PEM (灰白脳軟化症) を発症させる可能性がある。さらに、反すう家畜では、乾物摂

取量、消化率および発育成績が低下する可能性がある (14 章、17 章および 19 章参照)。したがって、DDGS のイオウ含量を監視することは重要で、乳用牛、肉用牛、めん羊、ヤギ用飼料中の総イオウ含量が推奨値 (0.4%) を超えないようにすることが重要である。

DDGS を飼料工場で長期間安全に保管できますか？

様々な保管時間、温度、相対湿度下で DDGS を長期保管した場合の影響に関する報告は限られている。トウモロコシ DDGS には、吸湿性や吸油性等、他の飼料原料には見られないいくつかの特異的な化学的・物理的特性がある。DDGS の吸湿性は取扱い特性に影響を与え、水分含量が 15% を超えるとカビの発生やカビ毒産生量を増加させる可能性がある。DDGS に含まれる DCO には、保管中に過酸化されやすい高濃度の PUFA (多価不飽和脂肪酸) が含まれている。しかし、最近の研究では、市販の抗酸化剤を用いると、高温多湿状態で保存した場合に DDGS と DCO の脂質過酸化を効果的に防止出来ることが示されている (9 章参照)。

コンテナ内の DDGS のブリッジとケーキングを防止できますか？

トウモロコシ DDGS は、他の飼料原料と比べていくつかの特異的な化学的・物理的特性を持っており、流動性を低下させるブリッジまたはケーキングを引き起こす。コンテナを用いて DDGS を輸送する際の流動性への問題を防ぐために一部では滑沢剤が使用されているが、一般的には効果がないことが示されている (9 章参照)。水分含量を最小限に抑えると流動性が高まること示されており、低脂肪 DDGS では従来の高脂肪 DDGS に比べて流動性が高い傾向がある。DDGS は、固化や荷降ろし時の硬化を防止するために、製造後少なくとも 24 時間はエタノール工場内で冷却することが不可欠である。

家禽、豚、水産養殖動物用飼料に DDGS を配合すると、ペレット加工やエクストруд加工時にどのような影響がありますか？

DDGS の高繊維と低デンプン含量は、ペレットの PDI (耐久性インデックス)とペレットミルの生産速度を低下させることが示されている。ただし、ペレット化条件の調整と、増粘剤の使用により、ペレット品質や生産速度が高まり、製造時のエネルギー使用量を削減できる(16 章、21 章および 24 章参照)。

価格に関連して DDGS の経済的価値をどのように決定すればよいですか？

DDGS の市場価格と、最小コストで飼料に配合出来る経済的な価格との間には差がある(2 章参照)。これには多くの理由がある。飼料原料は CP と粗脂肪含量の最低保証に基づいて取引されるが、飼料は ME 価または NE 価と、消化可能なアミノ酸に基づいて設計される。CP と粗脂肪含量はエネルギー価と可消化アミノ酸含量に関連しているものの、CP と粗脂肪含量に基づいて市場価格を決定すると、すべての畜種用飼料における DDGS の真の経済的節減効果が過小評価されてしまう。さらに、DDGS のエネルギー価とたん白質の価値は、反すう家畜用飼料では豚や家禽用飼料に比べて大きく、経済的に優れている。実際、豚用飼料では、DDGS の経済的な価格は市場価格よりも最大 60 ドル/トン高いことが報告されている。したがって、DDGS の様々な畜種用原料としての価値は、栄養成分組成と消化率を、他の競合する飼料原料と比較して算定するべきである。

DDGS の分析証明書には何を含めるべきですか？

通常、DDGS は、CP と粗脂肪含量の最低保証値に基

づいて取引されているが、多くのトレーダーは、栄養成分の保証のために、プロファット(CP と粗脂肪の合計値)を使い続けている。低脂肪 DDGS における粗脂肪含量の減少は、DDGS の価格設定においてプロファットを使用した場合に、業者間での大きな混乱を招くことになる。したがって、プロファットのかわりに CP と粗脂肪の最低保証値を使用することを推奨する。ただし、多くの DDGS の買い手は、給与用途に応じて、水分、CP、粗脂肪、粗繊維のほかに、カビ毒の最小濃度や色調スコアなどの追加の保証値を求めている。これらの追加項目については買い手と売り手の間で交渉する必要がある。さらに、それらの検査方法が検証されているかが大きく影響する可能性があるため、保証または検査される栄養素分析で用いる分析方法と、実施する分析施設についても、売り手と買い手の間で事前に合意しておく必要がある。

私のニーズを満たすことができる DDGS サプライヤーを特定するにはどうすればよいですか？

エタノールと DDGS を製造するエタノール工場では製造工程にバラツキがあるため、栄養成分含量と消化率には大きなバラツキが生じる可能性がある。栄養成分含量と消化率のバラツキは、飼料設計時の誤差を生じることになる。したがって、DDGS 購入者は、DDGS のマーケティング担当者と連絡を取り、栄養成分と消化性に関する情報と特定のエタノール工場からの供試品を入手することで、品質基準を満たすエタノール工場の優先リストを作成し、それらの工場由来の DDGS のみを購入して使用するべきである。