

第 4 章

DDGS の栄養成分と消化率: ばらつきと *In Vitro* 測定

はじめに

トウモロコシ DDGS を動物用飼料として使用する場合に注意すべき点のひとつは、給与しようとする飼料原材料の栄養成分および消化率を知ることである。複数の研究文献で様々な種類の動物に対する栄養成分および消化率のばらつきが取り上げられている (Spiehs ら、2002; Tjardes と Wright、2002; Waldroup ら、2007; Stein と Shurson、2009)。米国内の DDGS 供給源の間でもトウモロコシ DDGS の栄養成分にばらつきがあることは十分に裏付けられており (表 1)、同一プラントであっても長時間たつと変化が生じることも明らかになっている (Spiehs ら、2002)。

表 1. 米国 32 箇所の供給源から入手したトウモロコシ DDGS の栄養成分 (一部) の平均値と範囲 (100%乾物ベース)¹

栄養成分	平均 (CV)	範囲
粗タンパク質 %	30.9 (4.7)	28.7 - 32.9
粗脂肪 %	10.7 (16.4)	8.8 - 12.4
粗繊維 %	7.2 (18.0)	5.4 - 10.4
灰分 %	6.0 (26.6)	3.0 - 9.8
算出 ME (豚) kcal/kg	3810 (3.5)	3504 - 4048
リジン %	0.90 (11.4)	0.61 - 1.06
アルギニン%	1.31 (7.4)	1.01 - 1.48
トリプトファン%	0.24 (13.7)	0.18 - 0.28
メチオニン %	0.65 (8.4)	0.54 - 0.76
リン %	0.75 (19.4)	0.42 - 0.99

¹www.ddgs.umn.edu.

栄養担当者は自らが購入・使用する飼料原材料の栄養成分および消化率が一定で、予測可能であることを望んでいる。表 1 に記載されているように、DDGS 供給源間で最もばらつきの大きい栄養成分は脂肪、繊維、灰分、リジン、トリプトファンおよびリンである。フロントエンド分画技術とバックエンド油分抽出技術を採用しているエタノールプラントの中には、ジステラーズ併産物の栄養成分の変動幅が更に広がっているところがあり、混乱を来している。これは飼料原材料市場で入手可能になってきた、栄養成分の異なるトウモロコシ併産物を説明する場合に、「DDGS」という用語がしばしば誤用されることに原因がある (例えば、高タンパク質 DDGS)。結果として、トウモロコシや大豆粕といった他の飼料原材料と比較すると、DDGS は「コモディティ」とは言い難いも

のとなっている。DDGS 供給源間のばらつきに対処するため、市販飼料のメーカーの中には特定の DDGS 供給元に分別管理を求め、優先サプライヤーリストを作成する際に掲載する DDGS 供給元の数を制限しているメーカーもある。Value Added Science and Technologies 社 (<http://vast.com/services.htm>) の「Illuminate」といったような市販の栄養「ツール」を用いると、購入者やエンドユーザーは、最良の栄養価値および経済的価値を提供する DDGS 供給源の特定を大幅に簡便化することができ、特定の DDGS 供給源の正確な栄養負荷量がわかり、家畜および家禽用の飼料設計の改善に大いに役立つ。DDGS のエンドユーザーは有料でこうしたツールを使用することができる。米国ではこうしたツールとは別に、顧客のために DDGS 供給源別の相対的価値および栄養負荷量を算出するためのシステムを開発・使用している飼料メーカーもある。

Olentine (1986) によって、ジスチラーズ副産物の栄養成分のばらつきに影響を及ぼす原料および加工に含まれる可変要素を多数記載したリストが作成されている (表 2)。トウモロコシ DDGS の栄養成分のこうしたばらつきは、品種や栽培場所の地理的条件の一般的な差異が原因となっていることが多い。Reese と Lewis (1989) の報告では、1987 年にネブラスカ州で栽培されたトウモロコシの粗タンパク質は 7.8~10.0%、リジンは 0.22~0.32%、リンは 0.24~0.34%の開きがあった。

濃縮ジスチラーズ・ソリュブルと穀物の分画物との混合比率もまた DDGS を製造するプラントごとに異なっている。これら 2 種類の分画物の栄養成分には大きな開きがあるため、穀物とソリュブルの混合率の違いによって DDGS の最終的な栄養成分が相当な影響を受けるのは当然である。Noll ら (2006) は湿状穀物に加えるソリュブルの量を変えて様々な比率を用いたトウモロコシ DDGS を複数バッチ作製し、その栄養成分および消化率を評価した。作製されたトウモロコシ DDGS のサンプルに含まれるソリュブルの含有率は、穀物への混合が可能なソリュブル最大量の約 0、30、60、100%とした。これは 1 分間に 0、12、25、42 ガロンのシロップを穀物分画物に加えることに相当する。穀物に加えるソリュブルの割合が減少するに従ってドライヤーの温度を下げた。穀物分画に加えるソリュブルの割合が増加するに従って、粒子の大きさが増し、ばらつきが大きくなった。ソリュブルの添加量が増加すると、DDGS の色が濃くなり (L*値の減少)、黄味が薄くなった (b*値の減少)。ソリュブルの添加量が増加することによって、粗脂肪、灰分、TME_n (真の代謝エネルギー) (家禽)、マグネシウム、ナトリウム、リン、カリウム、塩素および硫黄が増加したが、粗タンパク質およびアミノ酸含有率と消化率に及ぼす影響はわずかであった。



表 2. ジスチラーズ併産物の栄養成分に影響を及ぼす要素¹

原材料	処理要素
<ul style="list-style-type: none"> 穀物の種類 穀物の品種 	<ul style="list-style-type: none"> 粉碎方法 <ul style="list-style-type: none"> 細かさ 継続時間 加熱

<ul style="list-style-type: none"> • 穀物の品質 <ul style="list-style-type: none"> • 土壌条件 • 肥料 • 気象条件 • 栽培および収穫方法 • 穀物の配合 	<ul style="list-style-type: none"> • 水量 • プレモルトの量 • 温度および時間 • 連続発酵またはバッチ発酵 • 冷却時間 • 変換 <ul style="list-style-type: none"> • モルトの種類、量および品質 • 菌類アミラーゼ • 時間および温度 • 変換した穀物の希釈 <ul style="list-style-type: none"> • 体積、ブッシュェルまたは穀物荷為替当たりのガロン • 穀物製品の品質および量 • 発酵 <ul style="list-style-type: none"> • 酵母の品質および量 • 温度 • 時間 • 冷却 • 攪拌 • 酸性度および製造管理 • 蒸留 <ul style="list-style-type: none"> • 種類：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 • 加工 <ul style="list-style-type: none"> • スクリーンの種類：固定、回転または振動 • 遠心力の使用 • プロセスの種類 • 蒸発器 <ul style="list-style-type: none"> • 温度 • 数量 • ドライヤー <ul style="list-style-type: none"> • 時間 • 温度 • 種類 • 穀物と混合するシロップの量
---	--

¹Olentine, 1986.

乳牛用としての DDGS の栄養価値と消化率

トウモロコシ DDGS は乳牛にとって非常に優れたタンパク質源である。一般的な値として、トウモロコシ DDGS に含まれるタンパク質は乾物ベースで 30% を上回る。トウモロコシ DDGS は畜牛にとって第一胃非分解性タンパク質 (RUP)、すなわちバイパスタンパク質のすぐれた供給源でもある (表 3)。トウモロコシに含まれる易分解性タンパク質の大半は発酵過程で分解するので、結果としてその割合に応じてトウモロコシよりもトウモロコシ DDGS の RUP が増加することになる。トウモロコシ DDGS のタンパク質の品質はかなり良いと言えるが、大半のトウモロコシ副産物ではアミノ酸のなかでもリジンが最も不足する。従って、乳牛に第一胃保護リジンおよびメチオニンを

添加した飼料を給与するか、リジンを含む他の高タンパク質原材料と DDGS とを混合して使用すると、乳産量を増加できる場合もある。しかし多くの場合、DDGS を含む飼料を給与すると、タンパク質源として大豆粕を添加した飼料を乳牛に給与した場合と同程度に乳産量は増加し、時にこれを上回ることもある。注意しなければならないのは色の濃いトウモロコシ DDGS で、この色の濃さはタンパク質が熱損傷を受けていることを示す場合が多いため、乳産量の減少につながる可能性がある。Powers らの試験（1995）では、色の濃い DDGS を給与した乳牛の乳産量は黄金色の DDGS を給与した乳牛の乳産量を下回った。従って、乳産量を最大限に引き上げるためには、品質の優れた供給源から入手した黄金色の DDGS を用いることが重要である。



Boucherら（2009）は、アミノ酸とRUPアミノ酸の標準消化率には緊密な相関関係があるため、適切な予測式が特定され検証されれば、飼料製品に含まれるアミノ酸の消化率に基づいてRUPアミノ酸消化率を予測することが可能であると結論付けた。加えて、ADICP（酸性デタージェント不溶粗タンパク質）濃度はタンパク質の品質を示す有用な指標となるが、DDGSサンプル間のアミノ酸消化率のばらつきが多くADICP濃度の差では説明できないことも明らかにした。Mjounら（2010）は大豆およびトウモロコシのジスチラーズ・グレイン製品に含まれるタンパク質およびアミノ酸の第一胃分解率と腸内消化率とを比較し、ジスチラーズ・グレイン併産物で利用可能なアミノ酸は大豆併産物と同程度であることを見出した。

トウモロコシ DDGS は乳牛にとって非常に良好なエネルギー源でもある。優れた品質の DDGS ではそのエネルギー価は以前の NRC（2001）の報告値を 10~15%上回る。トウモロコシ DDGS はトウモロコシよりもエネルギーが豊富である。しかも、トウモロコシに含まれるほぼすべてのデンプンが発酵工程でエタノールに変換されるため、DDGS の脂肪および繊維含有率はトウモロコシの 3 倍にまで増加する。トウモロコシ DDGS の NDF（中性デタージェント繊維）含有量が多いが、リグニン含有量は少ない。そのため、DDGS は畜牛にとって消化率の高い繊維の供給源となり、トウモロコシを給与した場合と比べ、消化不良の発生が低減される。トウモロコシ DDGS の繊維は非常に消化率が高いため、乳牛および肉牛用の粗飼料および濃厚飼料の一部を置換することも可能である。

Nuez-Ortin と Yu（2011）は小麦、トウモロコシ、小麦とトウモロコシを配合した DDGS 飼料のエネルギー価を予測するため、NRC2001 の化学物質要約表を用いた方法と *in situ* 試験法を比較し、予測したエネルギー値に違いはないものの、こうした併産物の可消化 NDF および粗タンパク質の予測精度を引き上げるためには NRC 2001 の数式にさらに手を加える必要のあることを示した。

表 3. 乳牛用としてのトウモロコシ DDGS の栄養成分¹

栄養成分	トウモロコシ DDGS (乾物比 (%))
粗タンパク質	30.1
粗タンパク質中の RUP ^a %	55.0

NE _{maintenance} 、Mcal/kg	2.07
NE _{gain} 、Mcal/kg	1.41
NE _{lactation} 、Mcal/kg	2.26
NDF	41.5
ADF	16.1
エーテル抽出物	10.7
灰分	5.2
カルシウム	0.22
リン	0.83
マグネシウム	0.33
カリウム	1.10
ナトリウム	0.30
硫黄	0.44

^a RUP = 第一胃非分解性タンパク質

¹ Schingoethe, 2004.

肉牛用としての DDGS の栄養価値と消化率

ドライド・ジステラーズ・グレイン (DDG) およびドライド・ジステラーズ・グレイン・ウィズ・ソリュブル (DDGS) の栄養価として一般に報告されているばらつきの範囲を表 4 に示した (Tjardes と Wright, 2002)。ソリュブルの添加の有無を問わず、ジステラーズ・グレインは肉牛にとって優れたエネルギー源である。米国では仕上期の肉牛用として、トウモロコシ粒との置換で飼料に最大 40% (乾物ベース) まで DDGS を配合して良好な結果が得られている。こうした割合で飼料に配合する場合は、トウモロコシ DDGS は主としてエネルギー源として用いられ、供給されるタンパク質やリンは仕上期の飼養場畜牛に求められる値を上回ることになる。ある試験では (Ham ら, 1994)、肉牛用として用いられるトウモロコシ DDGS の NE_{gain} (増体正味エネルギー) は乾燥渦巻き状のトウモロコシの値を 21% 上回っていた。控えめに言っても、ほとんどの栄養担当者の考えでは、トウモロコシ DDGS を飼料全体の 10~20% (乾物ベース) の範囲で配合して仕上期の畜牛に給与した場合、トウモロコシ DDGS のみかけのエネルギー価はトウモロコシの値と等しくなる。多くの試験で、飼料の 15~20% (乾物ベース) の範囲でトウモロコシ DDGS を配合して仕上期の肉牛に給与すると、トウモロコシを含む飼料を給与した場合よりも成長率および飼料要求率が改善されている。こうした改善は、亜急性アシドーシスが緩和されたり、畜牛の食欲減退の問題が起り難くなったりした結果である場合が多い。トウモロコシ粒に含まれるデンプンを仕上期の肉牛に高い割合で摂取させると、アシドーシス、蹄葉炎および脂肪肝の原因となることが多い。しかしながら、残余デンプンの含有率が低く (< 2%)、消化率の高い繊維が多く含まれているトウモロコシ DDGS を給与すると、こうした問題の発生を大幅に低減することができる。

表 4. トウモロコシ DDG および DDGS の栄養成分 (一部) の含有率の範囲 (100% 乾物ベース)

栄養成分	DDG ¹	DDGS ²
乾物、%	88-90	88-90
粗タンパク質、%	25-35	25-32
粗タンパク質中分解性摂取タンパク質、%	40-50	43-53
脂肪、%	8-10	8-10
NDF、%	40-44	39-45
TDN、%	77-88	85-90
NE _m , Mcal/kg	1.96-2.21	2.16-2.21
NE _g , Mcal/kg	1.48-1.54	1.50-1.54
カルシウム、%	0.11-0.20	0.17-0.26
リン、%	0.41-0.80	0.78-1.08

¹ ドライド・ジステラーズ・グレイン

² ドライド・ジステラーズ・グレイン・ウィズ・ソリュブル
Tjardes と Wright (2002) から抜粋

ソリュブル添加の有無を問わず、ジステラーズ・グレインは肉牛用飼料の非常に優れたタンパク質源であり、RUPの含有率が高い。酸性デタージェント不溶性窒素（ADIN）を用いてDDGSのタンパク質損傷の程度を知ることができる。研究室でADIN値が割り出されると、この値に係数6.25を掛け合わせてDDGSの適切なタンパク質値を求めることができる。こうして算出されたタンパク質値はDDGS中の利用不能な粗タンパク質の量を表しており、実際の粗タンパク質値と比較することで、タンパク質損傷の程度を明らかにすることができる。DDGSのバイパスタタンパク質（RUP）の割合は約60～70%で、ちなみに大豆粕では30%である。ところがEricksonら（2005）によれば、DDGSのバイパスタタンパク質の値が高いのは乾燥や含まれている水分によるものではなくタンパク質本来の特性であり、DDGS中のADIN量が増加してもタンパク質効率（kggain/kg補給タンパク質）には変化がないか増加するので、このバイパスタタンパク質はADINの影響を受けないと考えられる。



ソリュブルの添加の有無を問わず、ジステラーズ・グレインはカルシウムが少なく、リンおよび硫黄を多く含む。配合割合にもよるが、ジステラーズ・グレインを飼料に配合した場合には、それまで摂取させていたミネラル混合補給原材料から他のリン補給原材料を完全に外すことができる。高い割合で乾燥または湿状DGSを配合すると、肉牛飼養場飼料には必要量を超えたリンが含まれることになる。その結果、過剰になったリンが糞尿に排泄されるため、排泄物管理計画策定時にはこの点に留意する必要がある。DDGSはカルシウム含有率が低いため、カルシウム補給源（例えば、

粉碎した石灰石またはアルファルファ）を飼料に加えることで動物成績の低下を避け、かつ尿結石を防ぐためにカルシウム対リンの割合を1.2:1～7:1の範囲内に維持しなければならない（Tjardes

と Wright, 2002)。ソリュブルの添加の有無を問わず、ジスチラーズ・グレインは時に硫黄の含有率が高いことがあり、飼料に相当量の硫黄が含まれる原因となることがある。飼料（乾物ベース）及び水から 0.4%を超える硫黄が摂取されている場合には、畜牛が灰白質脳軟化症を発症することがある。加えて、硫黄は銅の吸収および代謝を妨げるが、これはモリブデンが存在する場合に特に顕著になる。従って粗飼料および用水の硫黄レベルが高い地域では、飼料に加える DDGS の配合率を引き下げることが必要となる場合もある（Tjardes と Wright, 2002）。

豚用としての DDGS の栄養価値と消化率

DDGS の総エネルギー（GE）は平均 5,434 kcal/kg DM（表 5）で、トウモロコシの値を上回る（Stein と Shurson, 2009）。しかしながら、GE に占める割合で示すエネルギーの消化率はトウモロコシの値を下回る（Stein と Shurson, 2009）。DDGS の DE（可消化エネルギー）および ME（代謝エネルギー）はそれぞれ 4,140 kcal/kg と 3,897 kcal/kg DM である（Pedersen ら, 2007）。これらの値はトウモロコシの DE および ME 値とほぼ同程度である（表 5）。DDGS の正味エネルギー値は未だ確定されていないが、現在実施されている試験でこうした値の評価が進められている。

表 5. 成長期の豚に給与する場合のトウモロコシ及び10箇所の供給源から入手したトウモロコシ・ジスチラーズ・ドライド・グレイン・ウィズ・ソリュブル（DDGS）のエネルギー値¹（Stein と Shurson, 2009）

原材料	トウモロコシ		DDGS		
	平均	SD	最小値	最大値	
GE、kcal/kg DM	4,496	5,434	108	5,272	5,592
エネルギーの ATTD ² 、%	90.4	76.8	2.73	73.9	82.8
DE、kcal/kg DM	4,088	4,140	205	3,947	4,593
ME、kcal/kg DM	3,989	3,897	210	3,674	4,336

¹ Pedersen ら（2007）のデータによる。N = 11.

² ATTD = みかけの総消化管消化率

トウモロコシに含まれるデンプンはその大半がエタノールに変換されるため、DDGSには約35%の不溶性食物性繊維と約6%の可溶性食物繊維が含まれることになる（Stein と Shurson, 2009; 表 6）。24箇所の供給源から入手したトウモロコシDDGSの総食物繊維のみかけの回腸消化率、みかけの総消化管消化率（ATTD）および後腸発酵率の平均値はそれぞれ23.0%、47.3%および24.4%であった（Urriola と Stein, 2010）。ところが、DDGSを豚に給与した期間に応じて、盲腸内容物および排泄物中の揮発性脂肪酸濃度が増加することから、飼料中に含まれたDDGSは時間の経過とともにDE値が改善することが示唆される（Urriola と Stein, 2010）。比較的低い繊維消化率はDM消化率の低下につながり、これによりDEおよびME値に比較してDDGSの総エネルギー消化率が低いことを説明することができる。豚に給与した場合のDDGS、油分低減DDGSおよびその他の併産物のME値を推定するために、正確なME予測式の開発が行われており、これについては第22章で取り上げる。

表 6. トウモロコシ・ジスチラーズ・ドライド・グレイン・ウィズ・ソリュブルの炭水化物の含有率と食物繊維のみかけの総消化管消化率 (ATTD) ^{1,2}

項目	平均	最小値	最大値	SD (標準偏差)
総デンプン、%	7.3	3.8	11.4	1.4
可溶性デンプン、%	2.6	0.5	5.0	1.2
不溶性デンプン、%	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
不溶性総食物繊維、%	35.3	26.4	38.8	4.0
可溶性総食物繊維、%	6.0	2.36	8.54	2.1
総食物繊維、%	42.1	31.2	46.3	4.9
総食物繊維の ATTD、%	43.7	23.4	55.0	10.2

¹ イリノイ大学およびミネソタ大学の未発表データによる。デンプン、ADF および NDF のデータについては N = 46、不溶性、可溶性および総食物繊維のデータについては n = 8

² Stein と Shurson, 2009.

34 箇所の供給源から入手したトウモロコシDDGS、1箇所から入手したソルガムDDGSおよび2箇所から入手した小麦DDGSについて、アミノ酸の標準化回腸消化率を測定した(表7)。これにより、DDGSが同種の穀物から製造されている場合であっても、供給元によってアミノ酸消化率に大きなばらつきが発生する可能性のあることが分かった(Steinら、2005、2006; Urriolaら、2009; Pahmら、2008a)。



表 7. 成長期の豚に給与する場合のジスチラーズ・ドライド・グレイン・ウィズ・ソリュブル (DDGS) の粗タンパク質 (CP) およびアミノ酸 (AA) の含有率と標準回腸消化率 (SID) ¹(Stein と Shurson, 2009).

項目	CP と AA の含有率 (%)			CP と AA の SID (%)		
	トウモロコシ DDGS	ソルガム DDGS	小麦 DDGS	トウモロコシ DDGS	ソルガム DDGS	小麦 DDGS
粗タンパク質	27.27	31.50	40.67	72.8	71.4	72.2
必須 AA						
アルギニン	1.16	1.06	1.53	81.2	78.2	85.5
ヒスチジン	0.72	0.68	0.92	77.5	70.6	77.4
イソロイシン	1.00	1.31	1.35	75.2	72.7	79.6
ロイシン	3.12	4.02	2.66	83.7	76.3	82.9
リジン	0.78	0.66	0.65	62.0	62.0	56.6
メチオニン	0.55	0.51	0.53	82.0	75.4	81.1
フェニルアラニン	1.32	1.62	1.92	81.0	75.8	86.3
スレオニン	1.06	1.03	1.21	70.8	68.6	74.9
トリプトファン	0.21	0.34	0.40	70.2	70.4	85.7
バリン	1.34	1.59	1.70	74.5	72.3	81.9
非必須 AA						
アラニン	1.90	2.79	1.48	78.0	73.4	68.0
アスパラギン	1.82	2.09	1.92	68.6	68.0	56.7
シスチン	0.53	0.47	0.73	73.3	65.6	75.2
グルタミン	4.28	6.08	9.81	80.4	75.5	86.3
グリシン	1.02	0.99	1.62	63.4	66.9	67.8
プロリン	2.06	2.41	4.11	74.3	83.1	81.0
セリン	1.16	1.35	1.88	75.6	72.5	77.0
チロシン	1.01	-	-	80.9	-	-

¹ トウモロコシ DDGS データ (供給源: 34) Stein ら (2005、2006)、Urriola ら (2007c)、Pahm ら (2008)。ソルガム DDGS データ (供給源: 1) Urriola ら (2007c)。小麦 DDGS データ (供給源: 2) Widyaratne と Zijlstra (2007)、Lan ら (2008)

すべての必須アミノ酸の中で、リジンの消化率が最もばらつきが大きい (Fastinger と Mahan、2006; Stein ら、2006; Pahm ら、2008a)。他のアミノ酸のばらつきに比較してリジン消化率のばらつきが大きい理由は、リジンが最も熱損傷を受けやすく、また、供給源の異なる DDGS 間での熱損傷の程度が異なるためである (Cromwell ら、1993; Stein ら、2006)。DDGS に含まれるアミノ酸の大半でその消化率がトウモロコシに比べて約 10 パーセントユニット下回るが、これは、DDGS の食物繊維含有率がトウモロコシよりも高い結果によるものと考えられる。ただしリジンを除き、アミノ酸消化率の供給源間のばらつきはその他の飼料原材料で観察されるばらつきの通常範囲内である。リジン消化率の低い DDGS ではしばしばリジン含有率も低い。結果として粗タンパク質に占めるリジンの割合によって、DDGS 供給源間で異なる相対的なリジン消化率を予測することができる (Stein、2007)。ソルガム DDGS および小麦 DDGS に含まれるアミノ酸の消化率はトウモロコシ DDGS で測定された値と同程度である (Urriola ら、2009; Widyaratne と Zijlstra、2007; Lan ら、2008)。

DDGS に含まれるリジンの色測定にはミノルタまたはハンターのラボ用分光光度計による測色が用いられてきた。DDGS サンプルの色のばらつきが大きい極端な状況下では、供給源間で異なる

DDGS のリジン消化率を予測する上で、ミノルタまたはハンターのラボ用分光光度計による測色が有効な場合がある (Cromwell ら、1993 ; Fastinger と Mahan、2006)。一般に、色の濃い DDGS (L*値 50 未満) ではアミノ酸の消化率が低く、色の明るい DDGS と比較すると、色の濃い DDGS を豚に給与した場合に生育成績が低下する結果となる可能性がある (Cromwell ら、1993 ; Fastinger と Mahan、2006)。しかしながら、エタノールプラントの乾燥条件が改善されてきたため、図 1 に示すように、測色によるリジンおよびアミノ酸の消化率予測については精度が高いとは言えない場合もある。アミノ酸消化率指標としての DDGS の色の使用に関するより詳細な情報は第 8 章を参照されたい。

DDGS のリジンおよびその他のアミノ酸の消化率を予測する場合には、ハンターやミノルタのスコアを用いた測色よりも、光学濃度や前面蛍光分光法を用いる方がより正確な結果が得られると考えられる (Urriola ら、2007a, b) が、これらの手法については妥当性が確認されておらず、市販もされていない。DDGS の色および相対的なアミノ酸消化率は ADIN を測定することによっても予測されている (Cromwell ら、1993)。IDEA™やペプシン/パンクレアチンといったような酵素試験法 (Pedersen ら、2005; Schasteen ら、2005) は DDGS に含まれる可消化粗タンパク質やアミノ酸の含有率を予測するための有望な *in vitro* 技術として評価されているが、こうした方法の精度は十分ではない。

豚に給与する場合の DDGS の可消化リジンの予測式が開発されている。Pahm ら、(2008b) は反応性リジンの計測値を用いて、以下のように、DDGS に含まれる標準回腸可消化リジンのための正確な予測式を開発した。

$$\text{標準回腸可消化リジン (\%)} = 0.023 + 0.637 \times \text{反応性リジン (\%)}$$

反応性リジンの値は酸加水分解後の DDGS サンプル中に含まれるフロシン含有率から求めることができる (Pahm ら、2008b)。フロシンは HPLC を用いて測定し、反応性リジンの含有率は次のように求めることができる。

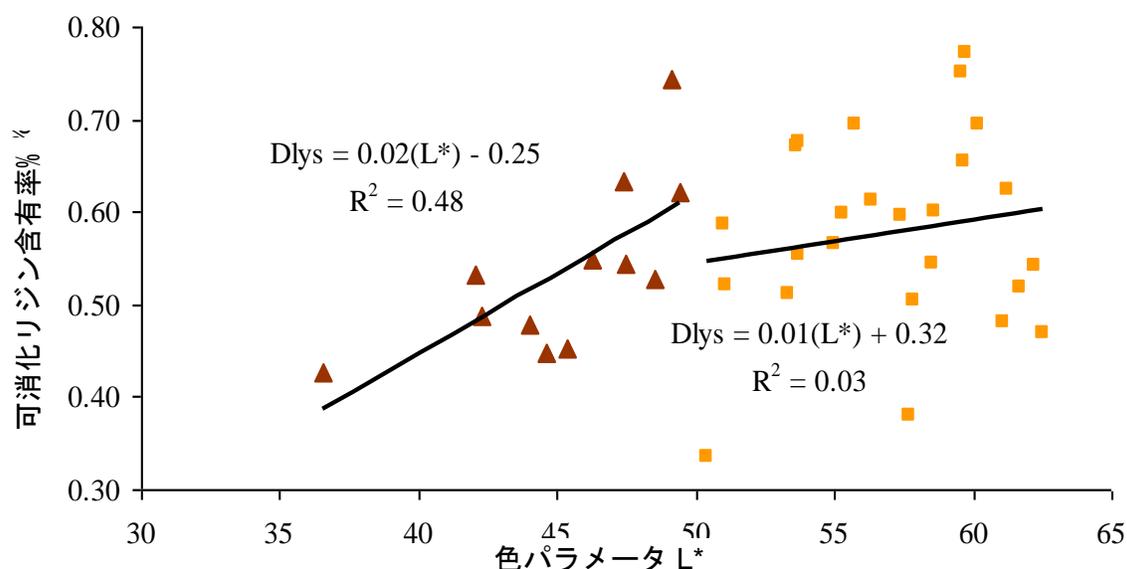
$$\text{反応性リジン (\%)} = \text{分析済リジン (\%)} - \text{フロシン (\%)} / 0.32 \times 0.40$$

この予測式の精度は Kim ら (2010) が実施した試験の中で確認された。しかしながら、商業ラボでは通常フロシンの測定を行っていない。そのため、Stein (2011) は DDGS サンプルに含まれるフロシンを計測することなく可消化リジンの概算値を知ることのできる次のような予測式を開発した。

$$\text{標準回腸可消化リジン (\%)} = -0.636 + [0.858 \times \text{リジン (\%)}] \times [0.12 \times (100 \times \text{リジン (\%)} / \text{粗タンパク質 (\%)})]$$

この式を用いて、豚用飼料に配合される DDGS に含まれる可消化リジンを正確に予測することができる。

図 1. トウモロコシ DDGS の明度 (L*) と可消化リジンの含有率との関係 (Urriola 2007a, b) .



豚を対象とした場合のDDGSに含まれるリンのみかけの総消化管消化率 (ATTD) は約59%で (表 8)、トウモロコシの値を大幅に上回っている (Pedersenら、2007)。第二リン酸カルシウムのリンのバイオアベイラビリティと比較して、DDGSのリンのATTDは70~90%の範囲のバイオアベイラビリティに相当する。(Burnellら、1989; WhitneyとShurson、2001)。そのため、豚に給与する飼料にDDGSが含まれている場合には、DDGSのリン利用率が上昇し、無機リン酸を添加する必要性が軽減されることになる。微生物フィターゼを飼料に添加した結果としてトウモロコシおよびコーンジャームに含まれるリンの標準総消化管消化率(STTD)は回帰方程式によって予測することが可能であるが、微生物フィターゼがDDGSおよびHP-DDGに含まれるリンのSTTDに及ぼす影響は極めて少なく、添加するフィターゼの配合率を引き上げることに對する反応については回帰方程式では正確に予測することができない (AlmeidaとStein、2012)。

表 8. 成長期の豚に給与する場合の 10 箇所の供給源から入手したトウモロコシ・ジステラーズ・ドライド・グレイン・ウィズ・ソリュブルに含まれるリン (P) の含有率と消化率¹
(Stein と Shurson、2009)

項目	平均	低	高	標準偏差
総 P、%	0.61	0.51	0.74	0.09
総 P、% DM	0.70	0.57	0.85	0.10
みかけの総消化管消化率、%	59.1	50.1	68.3	5.18
可消化 P、%	0.36	0.28	0.47	0.06

¹Pedersen ら (2007) のデータによる。N = 11

家禽用としての DDGS の栄養価値と消化率



Waldroup ら (2007) は公表されたデータについて優れたレビューを発表し、家禽のためのトウモロコシ DDGS の標準栄養総覧を作成した。彼らは最初に、公表された 5 件の試験結果 (Spiels ら、2002; Fiene ら、2006; Parsons ら、2006; Fastinger ら、2006; および Batal と Dale、2006) に基づいて、近似分析の加重平均およびアミノ酸の値を割り出した (表 9)。

表 9. 複数の供給源から入手した DDGS の栄養成分 (一部) の平均値 (%原物給与ベース) ¹

栄養成分	加重平均
乾物	89.36
粗タンパク質	26.45
脂肪	10.08
繊維	6.99
灰分	4.67
アルギニン	1.09
ヒスチジン	0.68
イソロイシン	0.96
ロイシン	3.00
リジン	0.73
メチオニン	0.50
シスチン	0.54
フェニルアラニン	1.31
スレオニン	0.96
トリプトファン	0.21
バリン	1.30
セリン	1.07

¹Waldroup ら、2007.

これまでに DDGS の真の代謝エネルギー (TME_n) の推定値が割り出されているが、こうした推定値は供給源間で異なる (表 10)。Waldroup ら (2007) はこの推定値に基づいて DDGS の加重平均 TME_n を求め、2,851 kcal/kg とした。DDGS のみかけの代謝エネルギー (AME_n) については他の複数の研究者たちが推定値を求め、その平均は約 2,728 kcal/kg となっている (表 11)。Adeola と Ileleji (2009) の試験では、基礎飼料として半精製された無窒素飼料を用いた場合ではトウモロコシ DDGS サンプルの ME および ME_n (窒素補正した代謝エネルギー) の値 (kcal/kg) はそれぞれ 3,013 と 2,963、基礎飼料として実際的なトウモロコシ・大豆粕飼料を用いた場合ではそれぞれ 2,904 と 2,787 という値となった。このように異なる結果が得られたため、栄養担当者は DDGS を含む飼料を

用いて試料設計する場合には、トウモロコシDDGSのME価のデータ元にしかるべき注意を払う必要があることが示唆される。BatalとDale (2006)は粗タンパク質、脂肪および繊維からDDGSの推定TME_nを求めるための予測式を開発したが(表12)、このR²値は低く、家禽飼料設計時にDDGSのエネルギー価を推定する目的で用いるに足る信頼性はない。しかしながら、Rochelleら(2011)は比較的高いR²値となる、DDGSのAME_nを推定するための以下のような予測式を開発した。

$$\text{AME}_n, \text{ kcal/kg DM} = 3,517 - (33.27 \times \% \text{ヘミセルロース, DM ベース}) + (46.02 \times \% \text{粗脂肪, DM ベース}) - (82.47 \times \% \text{灰分, DM ベース}) \quad R^2 = 0.89$$

ヘミセルロースの値はNDF含有率からADFを除いて求める。あるいは、以下の式を用いることも可能である。

$$\text{AME}_n, \text{ kcal/kg DM} = (-30.19 \times \% \text{NDF, DM ベース}) + (0.81 \times \text{総エネルギー, kcal/kg DM ベース}) - (12.26 \times \% \text{粗タンパク質, DM ベース}) \quad R^2 = 0.87$$

以上2種類の予測式を用いてDDGSだけでなく油分低減DDGSやその他の家禽用併産物のAME_nも正確に推定することができるが、詳しくは第20章に記載する。AdeolaとZhai (2012)はDDGSの回腸可消化エネルギー、MEおよびME_nの値がDDG(ソリュブル画分を含まないジスチラーズ・ドライド・グレイン)の値をそれぞれ20、23、24%上回ることを示した。

表 10. 複数の供給源から入手した DDGS の真の代謝エネルギー (TME_n kcal/kg) の推定値¹

参考文献	N	高	低	平均	種
NRC (1994)	1	-	-	2,864	すべて
Roberson ら (2003)	1	-	-	2,800	七面鳥
Lumpkins ら (2004)	1	-	-	2,906	ブロイラー
Batal と Dale (2004)		2,380	3,079	2,831	産卵鶏
Noll (2005)	1	-	-	2,980	七面鳥
Roberson ら (2005)	1	-	-	2,884	産卵鶏
Parsons ら (2006)	20	2,606	3,054	2,864	産卵鶏
Batal と Dale (2006)	17	2,496	3,197	2,827	産卵鶏
Fastinger ら (2006)	5	2,485	3,047	2,871	産卵鶏
Waldroup ら (2007)	1	-	-	2,851	ブロイラー
Hong ら (2008)		2,863	2,976	2,904	ブロイラー

¹Waldroup ら (2007)および Salim ら (2010)のデータを採用

表 11. 複数の供給源から入手した DDGS のみかけの代謝エネルギー (AMEn kcal/kg) の推定値¹

参照文献	N	平均	種
NRC (1994)	1	2,840	すべて
Roberson ら (2003)	1	2,756	七面鳥
Noll (2005)	1	2,760	七面鳥
Roberson ら (2005)	1	2,770	産卵鶏

Waldroup ら (2007)	1	2,770	ブロイラー
Applegate ら (2009)	1	2,526	ブロイラー
Rochelle ら (2011)	6	2,148 - 3,098	ブロイラー

¹Salim ら (2010)のデータを採用

表 12. 粗タンパク質 (CP)、脂肪、繊維および灰分から DDGS の真の代謝エネルギー (kcal/kg) を推定するための予測式¹

式	R ²
$TME_n = 2439.4 + 43.2 \times \text{脂肪}$	0.29
$TME_n = 2957.1 + 43.8 \times \text{脂肪} - 79.1 \times \text{繊維}$	0.43
$TME_n = 2582.3 + 36.7 \times \text{脂肪} - 72.4 \times \text{繊維} + 14.6 \times \text{CP}$	0.44
$TME_n = 2732.7 + 36.4 \times \text{脂肪} - 76.3 \times \text{繊維} + 14.5 \times \text{CP} - 26.2 \times \text{灰分}$	0.45

¹Bata と Dale、2006.

Fiene ら (2006) は 150 の DDGS サンプルの段階的重回帰分析を行って、粗タンパク質、脂肪および繊維からアミノ酸含有率を推定するための予測式を開発した (表 13)。しかしながら、そのうちのいくつかの予測式の R² 値が低く (アルギニン、シスチン、リジンおよびトリプトファン)、こうした予測式を用いても主要な一般組成からアミノ酸含有率を正確に推定することが不可能であることを示している。

表 13. 粗タンパク質 (CP)、脂肪、および繊維から DDGS のアミノ酸含有率を推定するための予測式¹

アミノ酸	式	R ²
アルギニン	$Y = 0.07926 + 0.0398 \times \text{CP}$	0.48
イソロイシン	$Y = -0.23961 + 0.04084 \times \text{CP} + 0.01227 \times \text{脂肪}$	0.86
ロイシン	$Y = -1.15573 + 0.13082 \times \text{CP} + 0.06983 \times \text{脂肪}$	0.86
リジン	$Y = -0.41534 + 0.04177 \times \text{CP} + 0.00913 \times \text{繊維}$	0.45
メチオニン	$Y = -0.17997 + 0.02167 \times \text{CP} + 0.01299 \times \text{脂肪}$	0.78
シスチン	$Y = 0.11159 + 0.01610 \times \text{CP} + 9.00244 \times \text{脂肪}$	0.52
TSAA	$Y = -0.12987 + 0.03499 \times \text{CP} + 0.05344 \times \text{脂肪} - 0.00229 \times \text{脂肪}^2$	0.76
スレオニン	$Y = -0.05630 + 0.03343 \times \text{CP} + 0.02989 \times \text{脂肪} - 0.00141 \times \text{脂肪}^2$	0.87
トリプトファン	$Y = 0.01676 + 0.0073 \times \text{CP}$	0.31
バリン	$Y = 0.01237 + 0.04731 \times \text{CP} + 0.00054185 \times \text{脂肪}^2$	0.81

¹Fiene ら、2006.

家禽飼料に DDGS を用いて最善の価値を引き出すためには、DDGS に含まれる可消化アミノ酸の値を正確に推定し、使用することが重要である。Waldroup は DDGS のアミノ酸消化率について、Fiene ら (2006)、Parsons ら (2006)、Fastinger ら (2006) および Batal と Dale (2006) が実施した試験の結果をまとめた。アミノ酸消化率係数の平均を表 14 に示した。家禽用として DDGS のアミノ酸消化率を推定するために用いられている *in vitro* 法のひとつは、NOVUS International 社 (ミズーリ州セントルイス) の IDEA™ 検査法である。Schasteen ら (2005) および Fiene ら (2006) の試験結果によって、IDEA™ は家禽に給与する場合の DDGS に含まれるリジンの消化率

を推定する上では合理的な方法であるが、他のアミノ酸については、*in vivo* 確定消化率と *in vitro* 推定消化率の間の相関関係が十分でないことが明らかになった。

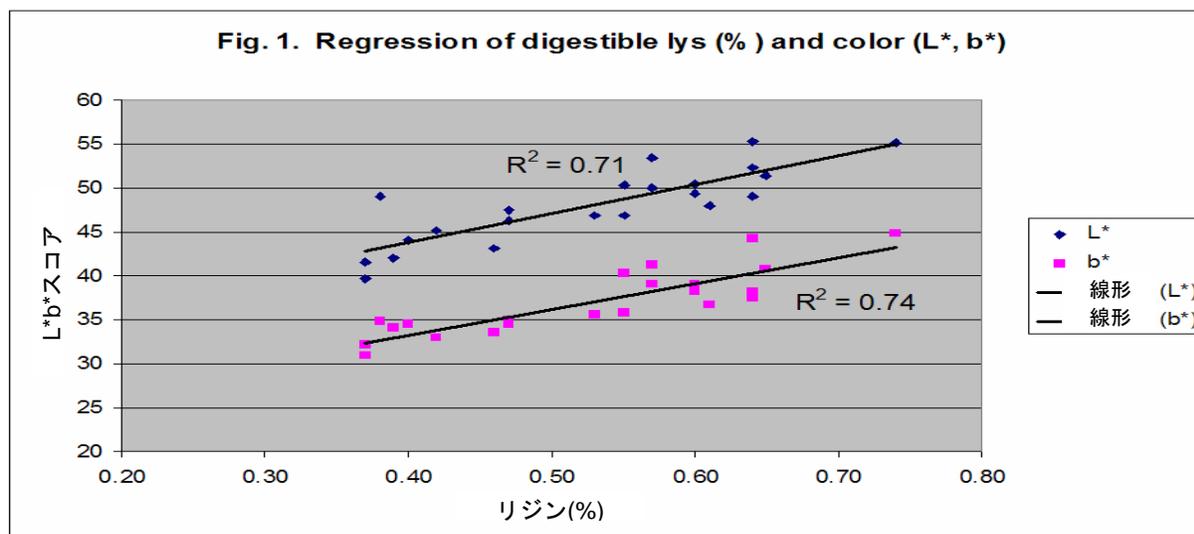
表 14. 家禽用としての DDGS のアミノ酸消化率係数 (%) ¹

栄養成分	加重平均
アルギニン	85.3
ヒスチジン	84.5
イソロイシン	82.2
ロイシン	89.3
リジン	68.5
メチオニン	86.8
シスチン	77.3
フェニルアラニン	87.7
スレオニン	75.1
トリプトファン	84.1
バリン	81.4
セリン	82.8

¹Waldroup ら、2007.

DDGS のサンプルの色を見極めることも、家禽用としての供給源間で異なる DDGS のアミノ酸、特にリジンの消化率を推定するもうひとつの方法として用いられてきた (Cromwell ら、1993; Ergul ら、2003; Batal と Dale、2006; Fastinger ら、2006)。DDGS の色の明度や黄味は、供給源間で異なる家禽用トウモロコシ DDGS の可消化リジン含有率を予測するための判断材料として妥当であると考えられる (図 2; Ergul ら、2003)。供給源により異なる DDGS に含まれるリジンの真の消化率は、家禽を対象とする場合では 59~83% の範囲である (Ergul ら、2003)。Batal と Dale (2006) は、明度 ($L^* = 60.3$) および黄味 ($b^* = 25.9$) の値が高い場合には、供給源間で異なる DDGS に含まれるリジンの消化率が平均 0.66% で、色が濃く ($L^* = 50.4$)、黄味が薄い ($b^* = 7.41$) 場合にはリジン消化率が低い (0.18%) ことを示した。こうした結果は、供給源間で異なる DDGS のリジン消化率が平均値を上回るのか下回るのかを区別するために測色を使用することができるということを示している。ただし、正確な飼料設計を行う場合には、このリジン消化率推定方法では精度が不十分である可能性がある。DDGS の色をアミノ酸消化率の指標として用いることに関するさらに詳しい情報は第 8 章を参照されたい。

図 2. 可消化リジン (%) および色 (L*, b*) の回帰



出典：Ergul ら (2003).

DDGS には相当量の総リンおよび有効リンが含まれているが、その値は供給源間で異なる (Singsen ら、1972; Martinez-Amezcuca ら、2004; Lumpkins と Batal、2005)。Singsen ら (1972) は、アルコール飲料製造から得られた DDGS に含まれるリンのバイオアベイラビリティが第二リン酸カルシウムの値と同じであることを見出した。Martinez-Amezcuca ら (2004) は、 KH_2PO_4 と比較してリンのバイオアベイラビリティは 69~102%の範囲であり、DDGS 製造中の温度上昇によってリンのバイオアベイラビリティは上昇するが、リジンの消化率は低下することを示した。Lumpkins と Bata (2005) の報告によれば、異なる 2 件の試験で得られた相対的なリン有効率の推定値は 68%と 54%であった。こうした結果に基づき、Waldroup (2007)は DDGS に含まれるリンの相対的なバイオアベイラビリティの平均値を家禽用については 62%としている。Tahir ら (2012) は DDGS に含まれるフィチン態リンを推定するために次のような予測式を開発した。

$$\text{DDGS 中のフィチン態リン (\%)} = 0.4447 + (0.9696 \times \% \text{ Ca}) - (0.0149 \times \% \text{ ADF}) + (0.0064 \times \% \text{ NDF}) - (0.025 \times \% \text{ 粗脂肪})$$

トウモロコシ DDGS のナトリウム含有率は 0.01~0.48%の範囲でばらつきがあり、平均値は 0.11% である。したがって、ナトリウムが多く含まれる供給源のトウモロコシ DDGS を用いる場合には、湿った汚物や卵の汚れという潜在的問題を回避するために、飼料中のナトリウム含有量に調整が必要な場合もある。

トウモロコシ DDGS には 40 ppm という高濃度のキサントフィルが含まれることがある。商業分野や大学での研究試験 (それぞれ Shurson ら、2003 と Roberson ら、2005) によって、トウモロコシ DDGS が産卵鶏に給与された場合に、これに含まれるキサントフィルによって卵黄の色が著しく濃くなり、飼料への DDGS の配合率が 10%の場合ではブロイラーの皮膚の色も濃くなることが明らかになっている。

まとめ

供給源間で異なる DDGS の栄養成分の含有率および消化率は、家畜および家禽を対象とした場合の経済的価値および飼料価値を見極める際に問題となることがある。しかしながら、新しい栄養「ツール」が開発されており、特定の供給源の DDGS について総栄養成分および可消化栄養成分の含有率を、素早く正確かつ安価に推測する手段として商業的に利用することができるものも多い。この概要報告書に記載されている栄養成分および消化率は、家畜および家禽用の飼料設計を行う場合に、使用する DDGS を供給源別に評価し、合理的な栄養負荷量を割り出す上で役立つと思われる。

References

- Adeola, O., and K.E. Ileleji. 2009. Comparison of two diet types in the determination of metabolizable energy content of corn distillers dried grains with soluble for broiler chickens by the regression method. *Poult. Sci.* 88:579-585.
- Adeola, O., and H. Zhai. 2012. Metabolizable energy value of dried corn distillers grains and corn distillers grains with soluble for 6-week-old broiler chickens. *Poult. Sci.* 91:712-718.
- 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.
- 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 effects on nutrient excretion. *Poult. Sci.* 88:354-359.
- Batal, A.B., and N.M. Dale. 2004. True metabolizable energy and amino acid digestibility of distillers dried grains with solubles. Poster #118, Joint Annual Meeting abstracts pp. 317-318.
- Batal, A. and N. Dale. 2006. True metabolizable energy and amino acid digestibility of distillers dried grains with soluble. *J. Appl. Poult. Res.* 15:89-93.
- 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 soluble and fish meal. *J. Dairy Sci.* 92:6056-6067.
- Burnell, T.W., G.L. Cromwell, and T.S. Stahly. 1989. Bioavailability of phosphorus in dried whey, blood meal, and distillers grains for pigs. *J. Anim. Sci.* 67(Suppl. 1):262.
- 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.
- Ergul, T., C. Martinez Amezcus, C. M. Parsons, B. Walters, J. Brannon and S. L. Noll, 2003. Amino acid digestibility in corn distillers dried grains with solubles. *Poultry Sci.* 82 (Suppl. 1): 70.
- Erickson, G.E., T.J. Klopfenstein, D.C. Adams, and R.J. Rasby. 2005. Utilization of Corn Co-Products in the Beef Industry. Nebraska Corn Board and the University of Nebraska. www.nebraskacorn.org. 17 pp.
- 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-finisher pigs. *J. Anim. Sci.* 84:1722-1728.
- Fastinger, N.D., J.D. Latshaw, and D.C. Mahan. 2006. Amino acid availability and true metabolizable energy content of corn distillers dried grains with soluble in adult cecectomized roosters. *Poult. Sci.* 85:1212-1216.
- 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.
- 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.
- Hong, E.C., W.T. Chung, G.H. Kang, H.D. Park, O.S. Suh, J.C. Na, W. Kim, W.G. Nho, and J. Hwangbo. 2008. Evaluation of true metabolizable energy and the effect of corn distillers dried rains with soluble in the diets on broiler performance and nutrient availability. *Korean J. Poul.*

- Sci. 35:381-389.
- Kim, B.G., Y. Zhang, and H.H. Stein. 2010. Concentrations of analyzed or reactive lysine, but not crude protein, may predict the concentration of digestible lysine in distillers dried grains with soluble fed to pigs. *J. Anim. Sci.* 88(E-Suppl. 3):104 (Abstr.)
- Lan, Y., F.O. Opapeju, and C.M. Nyachoti. 2008. True ileal protein and amino acid digestibilities in wheat dried distillers' grains with solubles fed to finishing pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 140:155-163.
- Lumpkins, B.S., A.B. Batal, and N.M. Dale. 2004. Evaluation of distillers dried grains with soluble as a feed ingredient for broilers. *Poul. Sci.* 83:1891-1896.
- Lumpkins, B.S. and A. Batal. 2005. The bioavailability of lysine and phosphorus in distiller's dried grains with solubles. *Poultry Sci.* 84:581-586
- Martinez-Amezcuca, C., C.M. Parsons, and D.H. Baker. 2006. Effect of microbial phytase and citric acid on phosphorus availability, apparent metabolizable energy and amino acid digestibility in distillers dried grains with soluble in chicks. *Poult. Sci.* 85:470-475.
- Martinez-Amezcuca, C., C.M. Parsons, and S.L. Noll. 2004. Content and relative bioavailability of phosphorus in distillers dried grains with soluble in chicks. *Poultry Sci.* 83:971-976.
- Mjoun, K., K.F. Kalscheur, A.R. Hippen, and D.J. Schingoethe. 2010. Ruminal degradability and intestinal digestibility of protein and amino acids in soybean and corn distillers grains products. *J. Dairy Sci.* 93:4144-4154.
- Noll, S.L., J. Brannon, J.L. Kalbfleisch, and K.D. Roberson. 2005. Metabolizable energy value for corn distillers dried grains with soluble in turkey diets. *Poul. Sci.* 84(Suppl. 1) (Abstr.).
- 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.
- National Research Council. 1994. *Nutrient Requirements of Poultry.* 9th Rev. Ed. National Academy Press, Washington, DC.
- National Research Council. 2001. *Nutrient Requirements of Dairy Cattle.* 7th Rev. Ed. National Academy Press, Washington, DC.
- Nuez-Ortin, W.G., and P. Yu. 2011. Using the NRC chemical summary and biological approaches to predict energy values of new co-products from bio-ethanol production for dairy cows. *An. Feed Sci. Tech.* 170:165-170.
- Olentine, C. 1986. Ingredient profile: Distillers feeds. *Proc. Distillers Feed Conf.* 41:13-24.
- Pahm, A.A., C. Pedersen, D. Hoehler, and H.H. Stein. 2008a. 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.
- Pahm, A.A., C. Pedersen, and H.H. Stein. 2008b. Application of the reactive lysine procedure to estimate lysine digestibility in distillers dried grains with soluble fed to growing pigs. *J. Agric. Food Chem.* 56:9441-9446.
- 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. *Poul. Sci.* 88:571-578.
- Parsons, C.M., C. Martinez, V. Singh, S. Radhadrishman, and S. Noll. 2006. Nutritional value of conventional and modified DDGS for poultry. *Proc. Multi-State Poul. Nutr. Feeding Conf., Indianapolis, IN.*
- Pederson, C., A. Pahm, and H.H. Stein. 2005. Effectiveness of *in vitro* procedures to estimate CP and amino acid digestibility coefficients in dried distillers grain with solubles by growing pigs. *J. Anim. Sci. (Suppl. 2)* 83:39.
- Pedersen, C., M.G. Boersma, and H.H. Stein. 2007. Digestibility of energy and phosphorus in 10 samples of distillers dried grains with solubles fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 85:1168-1176.
- 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.
- Reese, D.E. and A.J. Lewis. 1989. Nutrient content of Nebraska corn. *Nebraska Cooperative Extension Service EC 89-219*, pp. 5-7.

- Roberson, K.D. 2003. Use of distillers grains with soluble in growing-finishing diets of turkey hens. *Int'l. J. Poul. Sci.* 2:389-393.
- 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.
- Rochell, 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. *Poul. Sci.* 90:1999-2007.
- 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 Poul. Sci. J.* 66:411-432.
- Schasteen, C., J. Wu, and C. Parsons. 2005. Enzyme-based protein digestibility (IDEA™) assay accurately predicts poultry *in vivo* lysine digestibility for distiller's dried grain and solubles (DDGS). *J. Anim. Sci. (Suppl. 2)* 83:39.
- Schingoethe, D.J. 2004. Corn Co-products for Cattle. Proceedings from 40th Eastern Nutrition Conference, May 11-12, Ottawa, ON, Canada. pp 30-47.
- Shurson, G.C., C. Santos, J. Aguirre, and S. Hernández. 2003. Effects of Feeding Babcock B300 Laying Hens Conventional Sanfandila Layer Diets Compared to Diets Containing 10% Norgold DDGS on Performance and Egg Quality. A commercial field trial sponsored by the Minnesota Corn Research and Promotion Council and the Minnesota Department of Agriculture.
- Singsen, E.P., L.D. Matterson, and J.J. Tlustohowicz. 1972. The biological availability of phosphorus in distillers dried grains with soluble for poultry. *Proc. Distillers Res. Council* 27:46-49, Cincinnati, OH.
- Spiehs, M.J., M.H. Whitney, and G.C. Shurson. 2002. Nutrient database for distiller's dried grains with solubles produced from new ethanol plants in Minnesota and South Dakota. *J. Anim. Sci.* 80:2639.
- Stein, H.H., C. Pedersen, and M.G. Boersma. 2005. Energy and nutrient digestibility in dried distillers grain with solubles. *J. Anim. Sci.* 83(Suppl. 2):79. (Abstr.)
- 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.
- Stein, H.H. 2007. Distillers dried grains with solubles (DDGS) in diets fed to swine. *Swine Focus #001*. University of Illinois Urbana-Champaign IL.
- Stein, H.H. and G.C. Shurson. 2009. Board invited review: The use and application of distillers dried grains with solubles (DDGS) in swine diets. *J. Anim. Sci.* 87:1292-1303.
- Stein, H.H. 2011. Use of corn co-products in diets fed to swine. *Proc. 72nd Minnesota Nutrition Conference*, September 21-22, Owatonna, MN, p. 47-61.
- 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. *Poul. Sci.* 91:928-935.
- 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.
- Urriola, P.E., D. Hoehler, C. Pedersen, L.J. Johnston, and G.C. Shurson. 2007a. Prediction of *in vivo* amino acid digestibility of dried distillers grains with solubles (DDGS) from selected physical and chemical characteristics. *J. Anim. Sci.* 85(Suppl.2):72.
- Urriola, P.E., D. Hoehler, C. Pedersen, H.H. Stein, L.J. Johnston, and G.C. Shurson. 2007b. Prediction of *in vivo* amino acid digestibility in dried distillers grains with solubles (DDGS) from crude protein, optical density, and fluorescence. *J. Anim. Sci.* 85(Suppl.2):31.
- Urriola, P. E., D. Hoehler, C. Pedersen, H. H. Stein, L. J. Johnston, and G. C. Shurson. 2007c. Amino acid digestibility by growing pigs of distillers dried grain with solubles produced from corn, sorghum, or a corn-sorghum blend. *J. Anim. Sci.* 85(Suppl.2):71. (Abstr.)
- Urriola, P.E., D. Hoehler, C. Pedersen, H.H. Stein, and G.C. Shurson. 2009. Amino acid digestibility of distillers dried grains with soluble, produced from sorghum, a sorghum-corn blend, and corn fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 87:2574-2580.
- 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.

- Urriola, P.E., and H.H. Stein. 2010. Effect of distillers dried grains with soluble 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.
- Waldroup, P.W., Z. Wang, C. Coto, S. Cerrate, and F. Yan. 2007. Development of a standardized nutrient matrix for corn distillers dried grains with soluble. *Int. J. Poult. Sci.* 6:478-483.
- Whitney, M.H., and G.C. Shurson. 2001. Availability of phosphorus in distillers dried grains with solubles for growing swine. *J. Anim. Sci.* 79(Suppl. 1):108.
- Widyaratne, G.P., and R.T. Zijlstra. 2007. Nutritional value of wheat and corn distillers dried grain with solubles: Digestibility and digestible contents of energy, amino acids and phosphorus, nutrient excretion and growth performance of grower-finisher pigs. *Can. J. Anim. Sci.* 87:103-114.