

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。硝酸塩は土壤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、リンは土壤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、土壤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 温室効果ガス排出量/トン

³ 窒素と窒素の流出ポテンシャル/トン

⁴ 二酸化硫黄と窒素酸化物の排出/トン

⁵ 生産物1トンあたりに要する土地資源

⁶ Fresh生産物1トンあたりに淡水量 m³

* 飼料原料間による影響が著しい

** 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、新鮮な水が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高い脂質含量が高い、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も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量が 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が示されている (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/m ³		
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 ^b	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 ^b	484 ^a
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)

一々は、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, I.I. 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. Helmerts, 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 physic-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.