

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、その両者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、積み込み、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、パッシブ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 にパッシブ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、パッシブ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 ^b	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ッシブ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	827 ^a	827 ^a	831 ^a	970 ^b	807 ^a	880 ^a
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 halophilus</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)でマイコト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 中のマイコト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-ヒドロキシノネナ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タン)、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%)に調節したチャンバー内で 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.