

第7章

DDGS の取扱いおよび保管に関わる 物理特性と化学特性

はじめに

DDGS の物理特性および化学特性は供給源間で異なり、飼料価値、取扱い特性、保管特性に影響を及ぼすことがある。こうした特性には色、におい、粒径、かさ密度、pH、熱特性、流動性、保管期間中の安定性および吸湿性が含まれる。ジステラーズ・ドライド・グレイン・ウィズ・ソリュブルは様々な種類、サイズおよび形状の粒子から成る不均一顆粒状物質として特徴付けられる。粒子にはトウモロコシの破片（即ち、尖頭や種皮組織）、こうしたトウモロコシ破片の表面を覆う不均一に結晶化した可溶性タンパク質および脂肪の被覆物、ならびに乾燥プロセス中に形成される凝集体（即ち、「シロップボール」）が含まれる（Rosentrater, 2012）。こうした特徴は DDGS の取り扱い、流動性、および保管上の特性に影響を及ぼす。

DDGS の物理特性はエタノールプラントごとに異なり、またプラント内でもばらつきがあるが、そうした差異の多くは以下を含む様々な要素（Rosentrater, 2012）に起因する。

- 原材料（トウモロコシ）の特性
- ハンマーミルの設定
- 加工中に用いられる条件、添加剤および化学物質
- 乾燥前にウェット・ジステラーズ・グレインに添加する濃縮ジステラーズ・ソリュブルの割合
- 使用するドライヤーの種類
- 乾燥時間および温度
- 乾燥後の DDGS の冷却および調整
 - 平床貯蔵 vs. 垂直サイロ
 - 最終水分含有率
 - 出荷前の冷却時間
 - 高温状態での輸送車用およびコンテナへの積み込み
 - 周囲の温度および湿度

過去数年間に様々な DDGS の物理特性、とりわけ流動性に焦点を当てた測定試験が数多く実施されている（Rosentrater, 2006a ; Ganesan ら, 2008a,b）。2004 年に Rosentrater (2006a) はサウスダコタ州東部に所在する乾式粉碎エタノールプラント 6 件から DDGS のサンプルを入手し、水分含有率、水分活性、熱伝導率、熱抵抗、熱拡散率、かさ密度、安息角の測定および Hunter L*、a* および b* による測色を実施した。表 1 はその試験結果を示したものである。

表 1. 6 件の乾式粉碎エタノールプラントから入手した 144 の DDGS サンプルの物理特性の平均値および範囲¹

物理特性	最小値	最大値	平均値
水分含有率%	13.4	21.2	14.7
水分活性-	0.53	0.63	0.55
熱伝導率 W/m°C	0.06	0.08	0.07
熱伝導抵抗値 m°C/W	13.1	15.6	14.0
熱拡散率 mm ² /s	0.13	0.15	0.13
かさ密度 kg/m ³	389.3	501.5	483.3
安息角°	26.5	34.2	31.5
測色値 Hunter L*	40.0	49.8	43.1
測色値 Hunter a*	8.0	9.8	8.7
測色値 Hunter b*	18.2	23.5	19.4

¹Rosentrater, 2006.

全体として、かさ密度を除くと、測定対象サンプル間のばらつき（標準偏差）は小さかった。これらのサンプルの水分含有率の平均は 14.7%で、輸送費および微生物損傷を最小限に抑えるために推奨される飼料原材料の最大水分含有率である 12%を上回っていた（Rosentrater, 2006a）。水分活性は利用可能な「遊離」水分の量、ならびに微生物および化学物質による腐敗、劣化に対するサンプルの感受性を示すものである。熱伝導率、熱抵抗値、熱拡散率はそれぞれ、物質の熱伝導、熱抵抗、熱拡散の能力を測るものである。供給源が異なる DDGS の熱伝導率は 0.06 ~ 0.08 W/(m°C) の範囲で、熱拡散率は 0.13~0.15 mm²/s の範囲である(Rosentrater, 2012)。かさ密度は輸送車両、容器、コンテナ、大型袋、および袋に保管することのできる量を見極める上で重要な要素である。かさ密度は輸送費および保管費に影響を及ぼす。かさ密度の低い原材料ほど重量単位当たりの費用が高くなる。また、配合飼料を取り扱う場合に生じることのある原材料分離の程度にも影響を与える。かさ密度の高い粒子は輸送中に飼料の底に沈み、一方かさ密度の低い粒子は飼料の上部に浮き上がってくる。安息角は物質の流動性を測るもので、色値 L*は色の明るさまたは暗さを表し、a*は赤または緑の度合い、b*は黄または青の度合いを表す。

色

トウモロコシ DDGS の色には非常に明るいゴールドイエローから暗い茶色までのばらつきがある。DDGS の色と品質、栄養価との関係については第 8 章に詳細に記載している。DDGS の色は、熱加工された食品（Ferrer ら、2005）および飼料原材料（Cromwell ら、1993）の熱損傷（褐色化）の程度を測定するために食品業界および飼料業界で広く使用されている Hunter Lab または Minolta の比色計を用いて研究室で測定する。現在米国のエタノール業界では供給源間で異なる DDGS の色特性の評価にこうした比色計が一般的に用いられている。色の明るさまたは暗さは測色値 L*で決まる（0 = 暗、100 = 明）。測色値 a*は DDGS の色の赤みの程度を示し、測色値 b*は DDGS の色の黄色みの程度を示す。Bhadra ら（2007）は供給源間で異なる DDGS の L*値の範囲を 36.6~50.2、a*値を 5.2~10.8、b*値を 12.5~23.4 と報告している。

DDGS の色の違いは乾燥前に添加するソリュブルの量、使用するドライヤーの種類、乾燥温度および飼料原料として用いられる穀物本来の色等様々な要因から生じる。トウモロコシ粒の色は品種によって異なることがあり、最終的に製造される DDGS の色にも幾分かの影響を及ぼす。トウモロコシ-ソルガム混合 DDGS はトウモロコシ DDGS よりも多少色が濃い、これはソルガム品種の多くが褐色であることに起因する。

DDGS を製造する過程でマッシュ（穀物分画）に添加するソリュブルの割合が相対的に多い場合には、DDGS の色は暗くなる。Noll ら（2006）は、乾燥工程の前に添加可能最大量の約 0、30、60 および 100%の量のシロップをマッシュに加え、その製造バッチの DDGS の色を評価する試験を実施した。マッシュに添加したソリュブルの実際の割合は 1 分間に 0、12、25 および 42 ガロンであった。表 2 に示すように、マッシュに添加するソリュブルの割合が増加するに従って、L*値（明度）および b*値（黄色の程度）が減少し、a*値（赤色の程度）が増加した。Ganesan ら（2005）の試験でも同様の結果が報告されている。

表 2. マッシュに添加するソリュブルの量が DDGS の色特性に及ぼす影響

色 (CIE スケール)	0 ガロン/分	12 ガロン/分	25 ガロン/分	42 ガロン/ 分	ピアソン 相関	P 値
L*	59.4	56.8	52.5	46.1	- 0.98	0.0001
a*	8.0	8.4	9.3	8.8	0.62	0.03
b*	43.3	42.1	40.4	35.6	- 0.92	0.0001

Noll ら（2006）に基づく。

乾式粉碎エタノールプラントで用いられているドライヤーの温度範囲は 127~621°C である。DDGS のドライヤー内滞留時間もまた色に影響を及ぼす。一般に、乾燥温度の上昇とドライヤーによる処理時間の増加にともなって、得られる DDGS の色が濃くなる。加熱の量と時間は DDGS の色およびリジンの消化率と密接な相関関係があり、ドライヤーの温度に大きなばらつきがあるために DDGS 供給源間でリジンの消化率にも大きな幅ができることになる。

飼料原材料に熱が加わると、褐色化、すなわちメイラード反応が起こり、メラノイジンとして知られる高分子化合物が生成される。褐色化の程度（420 nm での吸光度で測定）によって、食品中で発生しているメイラード反応の程度を評価する。メイラード反応の程度はリジンの消化率に影響を及ぼす。DDGS の色の明るさおよび黄色の程度は、家禽（図 1；Ergul ら、2003）および豚（Cromwell ら、1993；Pederson ら、2005）に給与する場合に、トウモロコシ DDGS 供給源間の可消化リジン含有率の差を示す指標として一般的に妥当であることが明らかにされている。しかしながら、Ergul ら（2003）は、トウモロコシ DDGS を家禽に給与する場合、DDGS 供給源間で、真のリジン消化率係数に 59~83%まで差があることを示し、Stein ら（2005）は豚に給与する場合のリジンの真の消化率係数（44~63%）も同様の範囲を示すことを明らかにした。Urriola（2007）はより堅固な試験を実施し、豚に給与する場合の供給源の異なる DDGS の L*値と可消化リジン含有率との関係性を評価した。その結果、L*値が 50 を上回る DDGS サンプルではこの相関性は低く、L*値が 50 未満の DDGS サンプルでも多少はこの相関関係が高まるものの、依然として低いことを見出した。Cromwell ら（1993）は様々な供給源から入手した DDGS の Hunter Lab カラースコアの相関関係、および酸性デタージェント不溶性窒素と豚の発育成績との関係性を評価した（表 3）。

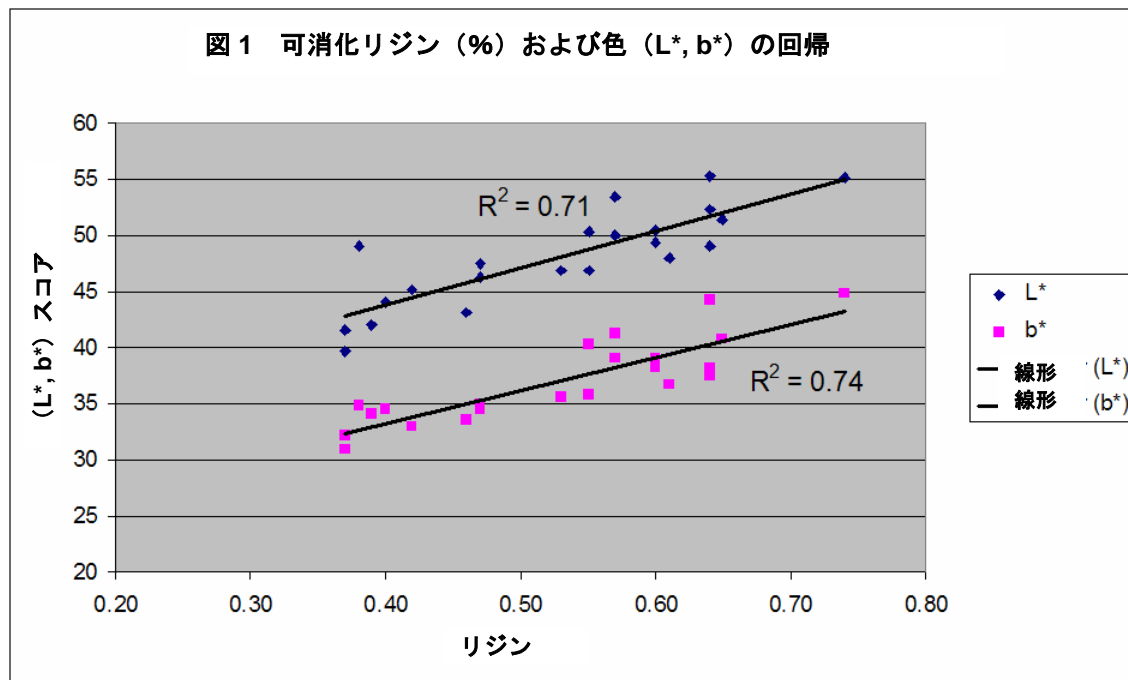


表 3.3 箇所から入手した配合 DDGS を給与した場合の、酸性デタージェント不溶性窒素 (ADIN) とカラースコアが豚の発育成績に及ぼす影響¹

DDGS 供給源	L ^{*b}	a ^{*b}	b ^{*b}	ADIN %	ADG g ^a	ADFI g ^a	F/G ^a
A	29.0	6.5	12.7	27.1	218	1,103	5.05
E	31.1	6.1	13.1	36.9			
G	38.8	6.8	16.5	16.0	291	1,312	4.52
I	41.8	6.5	18.8	26.4			
B	53.2	4.7	21.8	8.8	390	1,416	3.61
D	51.7	7.1	24.1	12.0			

¹Cromwell ら、1993.

^a飼料間の有意差 (P < .01)

^bL^{*}=明度 (0=黒、100=白) で、a^{*}値が上昇すると赤の量が増加し、b^{*}値が上昇すると黄色の量が増加する。

乾式粉碎エタノールプラントの中には、製造工程に修正を加えてエタノールおよび DDGS を製造しているところがある。例えば、発酵を目的とした加熱にクッカーを用いて、結果的に酵素の使用量を減らしているプラントや、発酵を促進するためにクッカーを用いることに重きを置かず、酵素の使用量を増やすプラントもある。理論的には、加熱が減ると DDGS のアミノ酸消化率が改善されるが、こうした工程が最終的な栄養成分や消化率に及ぼす影響を見極めるための試験はこれまで行われていない。

におい

黄金色の高品質 DDGS は甘い発酵臭がある。過度に加熱された色の濃い DDGS は焦げくさくなったり、煙くさくなったりする。

粒径と pH

家畜や家禽の飼料担当者が供給源を選択し完全飼料や補給用飼料を製造するためにさらに加工が必要かどうかを見極めるにあたり、飼料原材料の粒径や粒径の均一性は重要な検討要素となる。粒径は、栄養成分の消化率、混合効率、輸送や取扱い時の飼料原料分離量、ペレットの品質、かさ密度、嗜好性、ミール飼料またはマッシュ飼料の分別および豚の胃潰瘍発生に影響を及ぼす。

かさ密度は、輸送用の車両、容器、コンテナ、大型袋、および袋に保管することのできる量を見極める上で重要な要素であり、輸送費および保管費に影響を及ぼす。かさ密度の低い原材料は重量単位当たりの費用が高くつく。また、完全配合飼料を取り扱う場合に生じる可能性のある原材料の分離の程度にも影響を与える。かさ密度の高い粒子は輸送中に飼料の底に沈み、一方かさ密度の低い粒子は飼料の上部に浮き上がってくる。

ミネソタ大学で実施された未発表の研究によれば、DDGSの粒径は供給源によって大きなばらつきがある。2001年の試験では、16箇所のエタノールプラントから入手したDDGSの平均粒径は1282ミクロン (SD = 305, CV= 24%) で、612ミクロン~2125ミクロンまでの幅があった。2004年 (11州に所在するエタノールプラントから入手した34のサンプル) と2005年 (35のサンプル) には、ミネソタ大学で2件のDDGS栄養分析と物理特性試験が研究者らによって追加的に実施された。表4および5から分かるように、平均粒径は665~737 μm であるが、粒径のばらつき範囲は73~1217 μm にまで及び、極めて大きい。DDGSのpHの平均は4.1で、ばらつき範囲は3.6~5.0である。

表4. 2004年に分析された34箇所から入手したDDGSの粒径、かさ密度およびpH

	平均	範囲	SD	CV %
粒径 μm	665	256 - 1087	257.48	38.7
かさ密度 lbs/ft^3	31.2	24.9 - 35.0	2.43	7.78
pH	4.14	3.7 - 4.6	0.28	6.81

表5. 2005年に分析された35箇所から入手したDDGSの粒径、かさ密度およびpH

	平均	範囲	SD	CV %
粒径 μm	737	73 - 1217	283	38.0
かさ密度 lbs/ft^3	25.2	22.8 - 31.5	8.6	34.2
pH	4.13	3.6 - 5.0	0.33	7.91

最近実施された試験では、DDGSの粒径のばらつきおよび特性が評価されている。Liu (2009) は粉砕トウモロコシの粒径分布の影響およびその分布がDDGSの粒径分布に及ぼす影響を評価する試験を実施した。この目的でLiuは8番、12番、18番、35番、60番、100番という6種類の米国標準篩と1種類の容器を用いて、6種類の粉砕トウモロコシのサンプルおよびこの6種類のトウモロコシに対応するDDGSの粒径分布について分析を行った。トウモロコシおよびDDGSのサンプルはそれぞれ異なる幾何平均径を有し、DDGS粒子の平均径はトウモロコシの値を上回った (0.696 vs. 0.479 mm)。これはトウモロコシからDDGSへと変換される過程で、特定の粒子が大きくなることを示唆している。個々の粒径カテゴリーの直径と質量頻度との関係にはばらつきがみられたが、サンプル全体の粒径分布はそれぞれの間で相関関係がみられた ($r = 0.81$)。トウモロコ

シと DDGS の栄養成分を比較すると、DDGS の粗タンパク質、脂肪、灰分、総非デンプン性炭水化物の含有量はそれぞれトウモロコシの 3.59 倍、3.40 倍、3.32 倍、2.89 倍であった。トウモロコシと DDGS との間でタンパク質含有率、非デンプン性炭水化物含有率、L*値に正の相関関係がみられたが、栄養成分および色特性のばらつきは DDGS がトウモロコシを上回った。トウモロコシでも DDGS でも、このばらつきは原材料の全体をそのまま用いたものより分離させた分画を用いたものの方が大きかった。Liu (2009) は、供給源が異なる DDGS 間に粒径の大きなばらつきが生まれる様々な原因の中で、原材料（トウモロコシ）の物理特性および化学特性、加工方法ならびに酵母の添加がとりわけ重要な要素であると結論付けた。

Liu (2008) は米国中西部の複数のエタノールプラントから 11 種類のトウモロコシ DDGS サンプルを入手し、8 番、12 番、18 番、35 番、50 番、100 番という 6 種類の米国標準篩と 1 種類の容器を用いてサンプルそれぞれの粒径分布を明らかにした。DDGS サンプル間で粒径に大きな開きがあり、粒子の幾何平均径の平均値は 0.660 mm で、質量基準による粒径の幾何平均標準偏差の平均値は 0.440 mm となった。ほとんどが単峰型の粒径分布となり、粒径階の最頻値は 0.5 mm と 1.0 mm の範囲内であった。粒径分布および色と DDGS の栄養成分との相関関係は希薄であるが、栄養成分および測色値の分布は粒径分布と高い相関を示した。DDGS から分離させた様々な分画で、タンパク質含有率と L*値および a*値に負の相関関係がみられ、脂肪および総 CHO 含有率と粒径には正の相関関係がみられた。こうした結果は、粒径に基づいて DDGS を分画することで、特定の栄養成分の含有率を引き上げることが可能であり、粒径分布を DDGS 分画の潜在性の指標として用いることも可能であることを示唆している。

Clementson ら (2009) は、積み上げた DDGS 内で重力排出により発生する粒子の分離、ひいてはその貯蔵空間全体で発生する栄養成分のばらつきについて調べた。粒子分離試験は、「旧」世代燃料エタノールプラント 1 箇所と「新」世代燃料エタノールプラント 1 箇所から入手した DDGS サンプルを用いて、研究所内に山を築いて実施された。プラントでの試験も、同じ 2 箇所の燃料エタノールプラントから入手した DDGS を用い、山を築いて実施された。いずれの試験でも DDGS の山は重力排出により築き、サンプルは山の中心部から周辺部に至るまで様々な箇所から採取した。試験結果から、粒子が分離することによって山の異なる箇所から採取したサンプル間に有意な粒径差が発生し、中心から周辺部に移動するに従って粒径（幾何平均径）が大きくなることが分かった。栄養成分の中で粗タンパク質および水分に限っては粒径との相関関係がみられたが、粗タンパク質と粒径との相関関係については一貫性がなく、一方水分と粒径の間には非常に高い正の相関関係がみられた。彼らは、DDGS を積み上げた山の異なる箇所ではばらつきのある粗タンパク質と水分の含有量に基づいて、異なる供給源の DDGS に含まれる栄養成分について正確に見極めるための標準サンプリング・プロトコルを策定すべきであると結論付けた。



流動性

残念ながら DDGS は流動性が乏しく、特定の条件下ではこれに関係して望ましくない取り扱い特性が現れることがある。DDGS は流動性が低いか、低くなる可能性があるため、鉄道輸送会社は DDGS の輸送に車両の使用を認めていない (NCERC, 2005)。そのため、DDGS を取り扱う業者は DDGS の輸送に自分たちが所有している車両を使用しなければならない。DDGS は流動性が低く、

また、バルク保管コンテナや輸送車両内で発生する DDGS の粉体架橋により、顧客が受け入れ難くなる DDGS もある。これは飼料工場が自社の飼料ミリング・システムで流動しない飼料原料を取り扱う不都合や費用を避けたいと考えているためである。

流動性は、粒状固形物や粉体が輸送コンテナや保管コンテナから排出されるときに流れる能力と定義される。流動性は原材料固有の自然な特性ではなく、物質の流れに同時に影響を及ぼす複数の相互作用的な特性の結果として生まれるものである (Rosentrater, 2006b)。製品の水分、粒径分布、保管温度、相対湿度、時間、製品集合体内での圧縮圧力分布、輸送中の振動、または全保管プロセス中のこうした要素の影響力のばらつきなど、互いに相乗効果を及ぼす数多くの要素から流動性の問題が発生すると考えられる (Rosentrater, 2006b)。これに加え、化学構成、タンパク質、脂肪、デンプンおよび炭水化物の含有率や流動化剤の添加の有無もまた流動性に影響を及ぼすと考えられる要素である。

飼料原材料の流動挙動は多面的であるため、1 種類の試験で原材料の流動性についての完全な評価を行うことは不可能である (Rosentrater, 2006b)。バルク材料の強度および流動特性の測定において主として用いられるのは剪断試験装置である。この装置で材料の圧縮量や体積強度も測ることが



ができる (Rosentrater, 2006)。顆粒状物質の流動性を測る他の方法のひとつとして、4 大物理特性である安息角、圧縮率、スパチュラ角および均等係数 (例えば、凝集力) を測定するという方法がある (Rosentrater, 2006b)。

DDGS の流動性の問題を引き起こす原因や流動性を改善する可能性のある解決策に関して、最新試験が複数発表されている。バルク固体および粉体の流動性と取り扱い特性に関する研究データのレビューの中で、Ganesan ら (2008a) は DDGS の流動性が保管時の水分、温度、相対湿度、粒径、時間、温度変化等の要素の影響を受ける可能性のあることを示唆した。Bhadra ら (2008) は DDGS の粒子に断面染色を行って表面特性および流動性を評価し、DDGS の表面層のタンパク質の厚みが炭水化物の厚みを上回っている場合は流動機能指数が低く、凝集力が強くなり、流動に関する問題が発生する可能性のあることを示した。この他に、サンプルの表面の脂肪が多いと流動上の問題が悪化することも見いだした。

Ganesan ら (2007a) は探索的データ分析技術を用いた以前の試験から得たデータを使用して、DDGS の流動性を予測する総合モデルを開発した。開発されたモデル ($R^2 = 0.93$, $SE = 0.12$) はシンプルでロバストであるが、1 箇所のエタノールプラントから入手した DDGS にのみ基づいたものであった。DDGS の流動特性は供給源によって異なるため、彼らはこのモデルを使用して、他のプラントで製造される DDGS の流動性を予測することのできる同様のモデルを開発することを提案した。この研究の追跡試験の中で、Bhadra ら (2009) は Carr 法テストおよび Jenike 法テストを用いて、米国の北中部の 5 箇所のエタノールプラントから入手した DDGS サンプルの流動特性を評価し、得られたデータと以前に開発した経験的モデルとの数学的比較を実施した。この全体的な流動

性を評価することによって、いずれのサンプルでも完全な架橋は観察されなかったものの、DDGSのサンプルには流動上の問題が生じる可能性のあることが示唆された。

その後、Ganesan ら (2008b) は水分含有率およびソリュブルの含有率が DDGS の物理特性、化学特性および流動特性に及ぼす影響を見極めるため試験を実施し、4 種類の含有率 (10、15、20、25%) でソリュブルを含む DDGS の物理特性および化学特性に及ぼす 5 種類の水分含有率 (10、15、20、25、30%) の影響を見極めた。この試験の結果によって、ソリュブルおよび水分の含有率は物理特性および流動特性 (例えば、空気混入時のかさ密度、圧縮時のかさ密度および圧縮率) に著しい影響を及ぼすことが明らかになった。大半の評価対象ソリュブル含有率について水分含有率が増加すると通常流動性が減少することを示すために分散性、流動性指数および噴流性指数が用いられた。ソリュブル含有率が増加するに従って、DDGS の色およびタンパク質含有率も影響を受けた。

その後の研究で、Ganesan ら (2008c) は Jenike 剪断テストを用い、様々な割合でソリュブルおよび水分を含む DDGS の流動特性を評価した。この試験結果は、DDGS に含まれるソリュブルの割合や一定の割合を超えた水分含有率に依存して水分が実際に潤滑剤として作用し始め、DDGS の流れをよくすることを示していた。この他に、Ganesan らはソリュブルおよび水分の割合が増加すると、DDGS の圧縮率が上昇することも見だし、DDGS は凝集力を有する原材料であり、凝集による架橋化の問題を発生させる可能性が高いと結論付けた。

DDGS の流動性を改善しようとする試みの一環として、DDGS に添加した特定の流動化剤が流動性に及ぼす効果を見極めるために 2 件の試験が実施されている (Ganesan ら、2008d ; Johnston ら、2009)。Ganesan ら (2008) は様々な割合でソリュブルおよび水分を含む DDGS に 0、1 および 2% の炭酸カルシウムを添加してその効果を調べた。ソリュブルおよび水分の含有率が増加するに従って DDGS の流動性が低下した。流動化剤 (炭酸カルシウム) の添加は DDGS の流動特性の改善につながらなかったが、これは DDGS 粒子と流動化剤粒子の表面親和性の欠如によるものか、あるいは流動化剤の添加量が少なすぎたという原因によるものと考えられる。同じく Johnston ら (2009) も 2.5 kg/メートルトン (DMX-7) の水分移動制御剤、2% の炭酸カルシウム、または 1.25% の斜プチロ沸石を添加した場合の効果を評価する試験を実施した。この試験は 2 種類の水分含有率 (9 vs. 12%) を有する DDGS を用いて、民間乾式粉碎エタノールプラントで行われた。投下時の流動率は水分含有率 9% の DDGS が 12% の DDGS を上回った (620 vs. 390 kg/min)。投下時の DDGS の流動率は 509 kg/分 (対照)、441 kg/分 (DMX-7)、512 kg/分 (炭酸カルシウム) および 558 kg/分 (沸石) であった。いずれの ACA でも対照と有意に異なる流動率は観察されなかった。こうした試験の結果、水分含有率が 9% から 11.6% に増加すると DDGS の流動率は減少し、本試験において使用された流動化剤は、採用された様々な添加率では DDGS の流動性の改善に結びつかないとの結論に至った。

保管安定性

水分

腐敗を防止し、保管寿命を延ばすために、(水分 50% までの) ウェット・ジスチラーズ・グレインには通常防腐剤やかび防止剤が用いられている。ところが DDGS では、水分は通常 10~12% の間であり、運搬容器や保管施設内への漏水がない限り輸送中および保管中の腐敗リスクはわずかし

ない。穀物取扱い業界および飼料業界では、輸送中および保管中の加熱や腐敗（すなわち、かびおよびマイコトキシン）を防ぐために穀物および穀物副産物の水分含有率が 15%未満に抑えることが広く受け入れられている。従って DDGS の水分含有率が 15%を超えない限り、何か月もの間保管することができるものと思われる。DDGS の腐敗を防ぎ、保管寿命を延ばすために防腐剤およびかび防止剤が必要であるか否かを実証する試験はこれまで実施されていない。

荷積みの前に適切な冷却や「回復」が行われなかった場合には、DDGS をトラック、貨物列車またはコンテナに積み込んだ結果「擬集」または「固まり」が発生することがある。これにより流動上の問題が発生したり、DDGS の荷降ろしが困難になったりすることが頻繁に起こる。流動化剤を添加しても DDGS の流動性は改善されなかったが、水分含有率 12%の DDGS と比較すると、水分含有率の低い（9%）DDGS では流動性が改善された（Johnston ら、2009）。

脂肪の酸化

過去においては、様々な供給源のトウモロコシ DDGS の脂肪含有率（トウモロコシ油）は乾物ベースで 11~12%であったが、トウモロコシ油の抽出技術が広く利用されるようになり、現在の粗脂肪率は 5~12%の範囲となっている。粗脂肪の含有率に関わらず、表 7 および表 8 に示すように、トウモロコシ油の脂肪酸の組成および特性は感知できるほどには変化していない。

トウモロコシ油をはじめとする植物油には不飽和脂肪酸が豊富に含まれている。よって、植物油の飽和脂肪酸に対する不飽和脂肪酸の割合（U:S）は動物油の値を上回る。この U:S 比率は脂肪の融点およびエネルギー価、ならびに豚および家禽の肝臓、脂肪、肉および乳中の脂肪酸組成に影響を及ぼす。ひとつの方法として、ヨウ素価から U:S 比率を予測することが可能である。脂肪酸の二重結合のそれぞれがヨウ素の原子 2 個を取り上げる能力を有する。脂肪酸とヨウ素とを反応させることにより、脂肪または油の不飽和度を測ることができる。ヨウ素価は 100 グラムの脂肪によって吸収されるヨウ素をグラム単位で表したものである。不飽和脂肪は飽和脂肪より多くの二重結合を持つため、飽和脂肪よりもヨウ素価が高い。ヨウ素価を用いて様々な脂肪源の脂肪酸構造を予測することが可能である。

脂肪は酸化による分解の影響を受けやすく、不安定な化合物である過酸化物が生成され、悪臭を放つようになる。過酸化物価は提出されたままのサンプルで評価された値であるため、初期過酸化物価と呼ばれることもある。1 kg 当たりの過酸化物を示す過酸化物価が 5.0 mEq かそれ以下である場合には、悪臭がないか、あっても僅かである。遊離脂肪酸が多く含まれる場合には酸化すなわち脂肪の分解が示唆され、悪臭の可能性もある。遊離脂肪酸はエステル結合によりグリセロールとは結合せずに、遊離状態で存在している脂肪酸のことである。脂肪の酸化によって副産物として遊離脂肪酸が生成される。脂肪および脂肪の多い原材料に含まれる水分は悪臭を助長する可能性がある。しかしながら、DDGS では水分含有率は通常わずか 10~11%に過ぎないため、この問題は相対的にはごく小さな懸念事項である。

表 7. トウモロコシ油に含まれる主な脂肪酸（総脂肪酸に占める割合（%））¹

	<C16:0	C16:0	C16:1	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3	>C:20
トウモロコシ油	0.0	10.9	0.0	1.8	24.2	59.0	0.7	---

¹ 豚 NRC, 1998.

表 8. トウモロコシ油の化学特性とエネルギー価¹

	総飽和 %	総不飽和 %	U:S 比 率	ヨウ 素価	総 Σ N-6	総 Σ N-3	DE kcal/k g	ME kcal/k g
トウモ ロコシ 油	13.3	86.7	6.53	125	58.0	0.7	8755	8405

¹ 豚 NRC, 1998.

アメリカ穀物協会による現場試験のひとつとして、台湾で亜熱帯の高温、多湿条件下で酪農場の倉庫に貯蔵した米国産 DDGS の脂肪安定性を評価した。この試験は台湾中部にある民間酪農場で行われた。DDGS はサウスダコタ州のエタノールプラントで製造されたものを用い、40 フィートコンテナで台湾まで輸送した。台湾に到着した DDGS はプラスチックで裏打ちした 50kg 飼料袋に詰め替えられた。この袋は試験の期間中 10 週間にわたり、遮蔽した鉄柱構造の倉庫に保管した。この試験は高温多湿条件下で、2003 年 9 月から 11 月にかけて実施した。保管中の DDGS から毎週サンプルを無作為抽出で採取し、過酸化物価および遊離脂肪酸の分析を実施するまで冷凍庫で保存した。表 9 は分析結果を示したものである。当初の DDGS の過酸化物価と第 10 週の値に変化はなく、悪臭の閾値である最大 5.0 mEq (過酸化物価/kg) を大きく下回った。第 10 週の DDGS から抽出した油分中の遊離脂肪酸の割合は第 1 週の値をわずかに上回ったが、DDGS 中の脂質酸化 (悪臭) の徴候は認められなかった。この試験により、平均温度が 25.4°C (17.1°C~32.4°C の範囲)、平均相対湿度が 79.9% (41.2%~99.5%の範囲) という高温多湿気候下で、DDGS 中の脂肪が最低 10 週間は安定していることが明らかになった。

表 9. 保管第 1 週と第 10 週の DDGS の過酸化物価および DDGS から抽出された油分に含まれる遊離脂肪酸の割合

分析	第 1 週のサンプル	第 10 週のサンプル
過酸化物価 mEq/kg	0.70	0.60
遊離脂肪酸 オレイン酸としての割合 (%)	11.2	16.2

2003 年にミネソタ州とうもろこし生産者協会の後援で別の現場試験が実施され (www.ddgs.umn.edu)、メキシコのハリスコ州民間飼料工場に保管された DDGS サンプル (毎週採取) の水分 (乾物) マイコトキシン (アフラトキシン、オクラトキシン、T-2 トキシン、フモニシンおよびゼアラレノン) に関する評価および脂肪酸化測定 (悪臭) が行われた。16 週間の保管期間中の平均環境温度は 17.0°C で、その範囲は平均最低温度の 9.3°C から平均最高温度の 24.7°C であった。この 16 週間の保管中に酸化による悪臭またマイコトキシンについての変化は観察されなかった。

トウモロコシ DDGS の明らかな安定性は自然の抗酸化成分の含有率が高いことに起因すると考えられる。トウモロコシには自然の抗酸化活性を有する化合物が高い割合で含まれている。Adom と Liu (2002) はトウモロコシの総抗酸化活性値は小麦、オーツ麦および米と比較すると最も高く、結合した抗酸化物の含有率も最も高いことを見いだした。数週間保管しても、たとえ高温多湿下での保

管であっても DDGS の安定性が優れているのは、恐らくはトウモロコシに本来的に相当量の抗酸化物質が含まれているためと考えられる。

DDGS の水分吸着特性

DDGS の水分吸着特性（吸湿性、すなわち水分を引き寄せる能力）に関する情報はわずかしが存在しないが、アメリカ穀物協会は台湾でのブロイラー飼育現場試験を主催した。その中で 2004 年 3 月 16 日～6 月 10 日までの間、民間の飼料工場で保管された DDGS の水分含有率の監視が行われた。毎週この工場に保管された DDGS から無作為抽出したサンプルを入手し、13 週間の保管期間中の水分変化を分析した。DDGS の水分含有率は保管当初の 9.05%から 13 週間最終時には 12.26%に増加した（表 6）。予期したように、DDGS に含まれる粗タンパク質の含有率に変化はなく、保管開始時にも終了時にもアフラトキシンは存在しなかった。これにより、湿度の高い気象条件での長期保管では DDGS は水分含有率が増加すると考えられる。

表 6. 台湾の民間飼料工場保管時の DDGS の水分、粗タンパク質、アフラトキシンのラボ分析結果

サンプル採取日	サンプル番号	水分%	粗タンパク質 %	アフラトキシン ppb
04 年 3 月 16 日		9.05	27.60	0.00
04 年 3 月 17 日		10.17	27.61	0.00
04 年 3 月 24 日	1	10.65	27.59	0.00
04 年 3 月 31 日	2	10.70	27.63	0.00
04 年 4 月 7 日	3	10.71	27.62	0.00
04 年 4 月 14 日	4	10.76	27.73	0.00
04 年 4 月 21 日	5	10.93	27.71	0.00
04 年 4 月 28 日	6	11.02	27.62	0.00
04 年 5 月 5 日	7	11.28	27.54	0.00
04 年 5 月 12 日	8	11.16	27.61	0.00
04 年 5 月 19 日	9	11.70	27.63	0.00
04 年 5 月 27 日	10	11.88	27.61	0.00
04 年 6 月 3 日	11	12.13	27.50	0.00
04 年 6 月 10 日	12	12.26	27.53	0.00

保管および輸送中の DDGS の流動性に影響を及ぼす主な要素は水分であると考えられる。保管時の水分、温度、相対湿度、粒径および時間のばらつきが互いに作用することにより流動特性が決まる。Ganesan ら（2008e）は施設の設計者や運営者に保管・輸送関連情報を提供するために、様々な含有率でソリュブルを添加して DDGS の吸着等温線の試験・開発を行った。10°C、20°C、30°C および 40°C で 60、70、80 および 90%という 4 種類の平衡相対湿度を用いて静的重量法を実施し、4 種類の異なる含有率（乾物ベース、10、15、20、25%）でソリュブルを添加した DDGS の平衡含水率を特定した。温度の上昇およびソリュブル含有率の増加に従って DDGS の吸着能力が高まり、通常糖分の多い食品にみられる等温式分類のタイプ III となった。10、15、20 および 25%のソリュブ

ルが含まれる DDGS の平衡含水率の範囲はそれぞれ 8.61~47.07% (乾物ベース)、11.58~83.49% (乾物ベース)、13.72~90.70% (乾物ベース)、15.03~132.01% (乾物ベース) であった。等温線データに適合させるために 9 種のモデルに当てはめてみたが、様々な含有率でソリュブルを添加した DDGS の吸着等温線を正確に予測することのできる共通モデルは存在しないことがわかった。そのため、今度は温度や水分含有率といった影響要素のひとつとして DDGS に含まれるソリュブルの含有率を採り入れた新しい平衡含水率モデル (Ganesan-Muthu-Rosentrater モデル) を開発した。修正された 2 種類の新指数モデルとともに、この新しい平衡モデルは様々な含有率でソリュブルを添加した DDGS に良好に適合し、各種の保管条件下で DDGS の平衡水分吸着特性を予測するために使用することができる (Ganesan ら、2007b)。

ペレット化

DDGS および完全飼料のペレット化は、流動性の改善、かさ密度の増加ならびに廃棄物、粉塵および粒子分離の減少といった点で顆粒状の DDGS よりも利点が多くあるだけでなく、家畜に給与した場合に嗜好性およびエネルギー消化率の改善に役立つ可能性がある。

Rosentrater (2007) は DDGS のペレット化の実現可能性を見極めるため、ラボスケールと量産スケールを用いて 2 件の試験を実施した。ラボスケールの試験で得られた良好な結果を量産スケールの試験で再現した。量産スケールの試験では、1 箇所の供給源から入手した DDGS および異なる 2 社の装置製造業者 (製造業者 A と製造業者 B) の加工ラインを使用した。表 7 にその加工条件を示す。この 2 種類の加工ライン間の主な差異は、ペレット金型の長さ、金型の長さとの比率、調整マッシュ温度、ペレットミルの出口温度、調製マッシュの水分含有率、ペレットミルの出口水分含有率、冷却装置の出口水分含有率であった。

表 8 および 9 から分かるように、栄養成分およびアミノ酸組成の大半はペレット化の前後で差がみられず、タンパク質の熱損傷はごく僅かであった。Rosentrater らは加工プロセス間でいくつかの項目にわずかな成績の差があることを見いだした。

表 7. DDGS のペレット化に用いた加工条件¹

パラメータ	製造業者 A	製造業者 B
ペレット金型の径 in.	11/64	11/64
ペレット金型の長さ in.	1 3/4	2 5/8
長さとの比率	10.2	15.3
周囲温度°F	49	49
調製マッシュ温度 °F	175	155
ペレットミル出口温度 °F	190	160
冷却装置出口温度°F	56	55
DDGS の水分含有率%	11.34	11.34
調製マッシュの水分含有率 %	17.73	16.08
ペレットミル出口水分含有率 %	17.57	16.62
冷却装置出口水分含有率%	13.49	12.80

¹ Rosentrater, 2007.

表 8. ペレット化前後の DDGS の栄養成分 (乾物ベース)¹

栄養成分	DDGS	製造業者 A	製造業者 B
水分%	10.8	12.1	12.1
乾物%	89.3	87.9	88.0
粗タンパク質%	28.8	28.1	28.6
熱損傷タンパク質%	2.9	2.8	2.8
有効タンパク質 %	26.0	25.3	25.8
ADF %	14.3	13.0	15.4
NDF %	31.4	30.3	28.9
粗繊維%	7.1	5.9	6.6
粗脂肪%	11.0	11.1	11.5
灰分%	3.84	3.98	4.00
総デンプン%	11.7	13.9	12.5

¹ Rosentrater, 2007

表 9. ペレット化前後の DDGS のアミノ酸組成 (乾物ベース) ¹

アミノ酸	DDGS	製造業者 A	製造業者 B
アラニン%	2.50	2.15	2.24
アルギニン%	1.08	1.08	1.29
アスパラギン酸%	1.66	1.68	1.71
シスチン%	0.80	0.83	0.82
グルタミン酸%	4.61	4.63	4.69
グリシン%	1.05	1.01	1.01
ヒスチジン%	0.76	0.74	0.74
イソロイシン %	1.00	0.83	0.84
ロイシン%	3.18	3.00	3.10
リジン%	0.80	0.81	0.81
メチオニン %	0.59	0.58	0.54
フェニルアラニン %	1.34	1.33	1.37
プロリン%	2.12	2.13	2.15
セリン %	1.24	1.36	1.30
スレオニン%	0.92	1.01	0.99
チロシン%	1.07	1.11	1.07
トリプトファン%	0.28	0.24	0.28
バリン%	1.41	1.08	1.18

¹ Rosentrater, 2007

DDGS のペレット化により物理特性が変化した (表 10)。DDGS をペレットにすると、用いる装置に関わりなく色が濃くなったが、かさ密度は増加し (9~20%)、安息角 (流動性を示す) は 18%~19%に減少した。これはペレット化された DDGS の流動性が大幅に改善されたことを示している。用いる製造装置に関わりなくペレットの耐久性は高かった (89~94%)。こうした結果は、ペレット結合剤を用いることなく高品質の DDGS ペレットを製造できることを示唆している。ただし、使用する DDGS によっては、ペレット化の条件の修正が必要な場合がある (例えば、ペレット金型の長さとの比率)。

表 10. ペレット化前後の DDGS の物理特性 ¹

特性	DDGS	製造業者 A	製造業者 B
----	------	--------	--------

水分活性-	0.474	0.538	0.534
L* 測色値	40.66	33.26	34.19
a* 測色値	9.48	5.15	6.01
b* 測色値	20.00	13.64	15.17
粒径-GMD mm	0.93	-	-
粒径-GSD mm	1.61	-	-
熱伝導率 W/m°C	0.07	-	-
熱拡散率 mm ² /s	0.15	-	-
かさ密度 kg/m ³	476.14	571.93	519.50
安息角°	20.06	16.36	16.21
単位密度 kg/m ³	-	1035.25	938.44
耐久率%	-	93.93	88.87
機械的強度 MPa	-	0.51	0.30
弾性係数 MPa	-	5.24	2.41

¹ Rosentrater, 2007

Xu ら (2008) は Instron 社の万能試験機により垂直ピストンから軸方向応力を受けるクローズドエンド型金型を用いて、トウモロコシ DDGS のペレット化 (長さ 3.5 cm、直径 1.5 cm) に関する試験を実施した。ペレット化の条件には DDGS 水分含有率 25~35%、加工温度 100~120°C、圧力 12.5~37.5MPa、滞留時間 5~15 秒が含まれる。Xu らはペレットの濃度、耐久性および安定度を測定し、水分含有率、温度および圧力が DDGS ペレットの特性に大きな影響を及ぼし、一方滞留時間の影響はごく僅かであることを見いだした。加えて、温度上昇により当初は単位密度が増加するが、その後は減少すること、および水分含有率や圧力が増加すると単位密度やペレットの耐久性が改善することも見いだした。水分含有率および圧力が増加するに従って密度比も増加した。この試験結果は、評価対象とした可変要素が変動範囲内のいずれの値であっても DDGS を効果的にペレット化することができるとした Rosentrater (2007) の研究結果を裏付けている。この試験での最適ペレット化条件は水分含有率が 34.6% (DDGS の含水量を大幅に上回る)、プレス温度が 107°C、圧力が 36.8 MPa で、この条件で加工されたペレットの耐久性および密度は最も優れ、寸法安定性は許容レベルとなった。

まとめ

DDGS の物理特性は大豆粕やコーングルテンミールといったその他の顆粒状乾燥飼料原材料の特性と似通っているが、温度特性、かさ密度および流動性は水分含有率、粒径および粘度の影響を受ける。乾燥工程での粒径および加熱温度と加熱時間はエタノールプラントごとに異なり、DDGS の栄養成分消化率に影響を及ぼす。従来型のペレット金型およびプロセスを使用している民間飼料工場では、DDGS を含む飼料を製造する場合にはペレットの耐久性やペレット加工能力が低下する可能性がある。しかしながら、本章に概要を記載したガイドラインに従ってペレット化条件に修正を加えると、DDGS が動物飼料に含まれている場合でも、好ましいペレット品質を得ることができる。

References

Adom, K.K., and R.H. Liu. 2002. Antioxidant activity of grains. *J. Agric. Food Chem.* 50:6182-6187.

- Bhadra, R., K. Muthukumarappan, and K.A. Rosentrater. 2009. Flowability Properties of Commercial Distillers Dried Grains with Solubles (DDGS). *Cereal Chem.* 86(2):170-180.
- Bhadra, R., K.A. Rosentrater and K. Muthukumarappan. 2008. Surface Characteristics and Flowability of Distillers Dried Grains with Solubles. Paper No. 083811.
- Bhadra, R., K. Muthukumarappan, and K.A. Rosentrater. 2007. Characterization of chemical and physical properties of distillers dried grains with soluble (DDGS) for value added uses. Paper No. 077009. 2007 ASABE Annual International Meeting, Minneapolis, MN.
- Clementson, C., K.E. Ileleji and R.L. Strohshine. 2009. Particle Segregation Within a Pile of Bulk Distillers Dried Grains with Solubles (DDGS) and Variability of Nutrient Content. *Cereal Chem.* 86(3): 267-273.
- Cromwell, G.L., K.L. Herkleman, 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.
- Ferrer, E., A. Algria, Farre', G. Clemente, and C. Calvo. 2005. Fluorescence, browning index, and color in infant formulas during storage. *J. Agric. Food Chem.* 53:4911-4917.
- Ganesan, V., K.A. Rosentrater, and K. Muthukumarappan. 2008a. Flowability and handling characteristics of bulk solids and powders - a review with implications for DDGS. *Biosystems Engineering.* 101:4, 425-435.
- Ganesan, V., K. Muthukumarappan, and K.A. Rosentrater. 2008b. Effect of moisture content and soluble level on the physical, chemical, and flow properties of distillers dried grains with solubles (DDGS). *Cereal Chem.* 85(4). 466-472.
- Ganesan, V., K. Muthukumarappan, and K.A. Rosentrater. 2008c. Flow properties of DDGS with varying soluble and moisture contents using jenike shear testing. *Powder technology.* 187(2) p. 130-137.
- Ganesan, V., K. Muthukumarappan, and K.A. Rosentrater. 2008d. Effect of flow agent addition on the physical properties of DDGS with varying moisture content and soluble levels. *Transactions of the ASABE.* 51:2, 591-601.
- Ganesan, V., K. Muthukumarappan, and K.A. Rosentrater. 2008e. Sorption isotherm characteristics of distillers dried grains with solubles (DDGS). *Transactions of the ASABE.* 51: 1, 169-176.
- Ganesan, V., K.A. Rosentrater, and K. Muthukumarappan. 2007a. Modeling the flow properties of DDGS. *Cereal Chem.* 84(6):556-562.
- Ganesan, V., K.A. Rosentrater, and K. Muthukumarappan. 2007b. Dynamic water adsorption characteristics of distillers dried grains with solubles (DDGS). *Cereal Chem.* 84(6):548-555.
- Ganesan, V. K.A. Rosentrater, and K. Muthukumarappan. 2005. Effect of moisture content and soluble levels on the physical and chemical properties of DDGS. ASAE paper No. 056110. St. Joseph, MI.
- Johnston, L.J., J. Goihl, and G.C. Shurson. 2009. Selected additives did not improve flowability of DDGS in commercial systems. *Appl. Eng. Agric.* 25:1, 75-82.
- Liu, K. 2009. Effects of particle size distribution, compositional and color properties of ground corn on quality of distillers dried grains with solubles (DDGS). *Bioresource Technol.* 100(19):4433-40.
- Liu, K. 2008. Particle size distribution of distillers dried grains with solubles (DDGS) and relationships to compositional and color properties. *Bioresource Technol.* 99(17):8421-8428.
- National Corn to Ethanol Research Center (NCERC). 2005. Website at: www.ethanolresearch.com/. Accessed June 13, 2006.
- Noll, S., C. Parsons, and B. Walters. 2006. What's new since September 2005 in feeding distillers co-products to poultry. In: *Proceedings 67th Minnesota Nutrition Conference*, St. Paul, MN. pp. 149-154.
- NRC. 1998. Nutrient requirements of swine. 10th ed. Nat'l Acad. Press, Washington, D.C..
- 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.

- Rosentrater, K.A. 2012. Physical properties of DDGS. In: Distillers Grain Production, Properties, and Utilization, ed. K. Liu and K.A. Rosentrater, CRC Press, Boca Raton, FL, p. 121-142.
- Rosentrater, K.A. 2007. Can you really pellet DDGS? Distillers Grains Quarterly, Third Quarter, pp. 26-31.
- Rosentrater, K.A. 2006a. Some physical properties of distillers dried grains with solubles (DDGS). Appl. Eng. Agric. 22:4, 589-595.
- Rosentrater, K.A. 2006b Understanding Distiller's grain Storage, Handling, and Flowability Challenges. Distiller's Grains Quarterly. First Quarter 2006. pp. 18-21.
- Stein, H.H. C. Pedersen, A.R. Wirt and R.A. Bohlke. 2005 Additivity of values for apparent and standardized ileal digestibility of amino acids in mixed diets fed to growing pigs. J. Anim. Sci. 83(10):2387-95.
- Urriola, P.A. 2007. Digestibility of Dried Distillers Grains with Solubles, In vivo Estimation and In vivo Prediction. M.S. Thesis. University of Minnesota.
- Xu, Y., M.A. Hanna, and R. Weber. 2008. Compaction of corn distillers dried grains. Cereal Chem. 85(2):158-164.