

第 5 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、臭い、粒径、かさ密度、pH、流動性、保管期間中の安定性および吸湿性が含まれる。過去数年間に DDGS の様々な物理特性、特に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) はサウスダコタ州の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、含水率、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
含水率 %	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含水率の平均は 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含水率である 12%を上回っていた (Rosentrater、2006a)。水分活性は利用可能な「自由」水分の量、ならびに微生物および化学物質による損傷、劣化に対するサンプルの感受性を測るものである。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。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非常に重要な要素である。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、配合済みの完全な飼料を取り扱う場合に生じることが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。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 の色は、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 (茶色への変色) の程度を測定するために食品業界および動物用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。DDGS の供給源間の色の違いは乾燥前に添加するソリュブルの量、乾燥装置の種類、乾燥温度および原材料として使用される穀物本来の色から生じる。

トウモロコシ粒の色は品種によって違いがでることがあり、最終的に DDGS の色に多少の影響を及ぼす。ソルガムの品種の多くは褐色であることから、トウモロコシ DDGS に比べるとトウモロコシとソルガムを混合した DDGS の色は幾分濃くなる。

DDGS を製造する過程でマッシュ (微細穀物) に添加するソリュブルの量が相対的に多い場合には、DDGS の色は暗くなる。Noll ら (2006) は、乾燥工程の前にシロップの添加可能最大量の約 0、30、60 および 100% 量のソリュブルをマッシュに加え、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量は 0、12、25 および 42 ガロン/分であった。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乾燥装置の温度範囲は 127~621°C である。DDGS の乾燥装置内滞在時間もまた色に影響を及ぼす。一般に、乾燥温度の上昇と乾燥時間の増加にともなって結果的に 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関係があり、乾燥装置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ことができる。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、黄金色トウモロコシ 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妥当であると考えられる。しかしながら、Ergul ら (2003) は黄金色トウモロコシであっても、様々な供給源間で家禽に給与する場合の真のリジン消化率係数には 59~83% までの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%) も同様であることを示した。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)。

図 1. リジン消化率 (%) および色 (L*, b*) の回帰

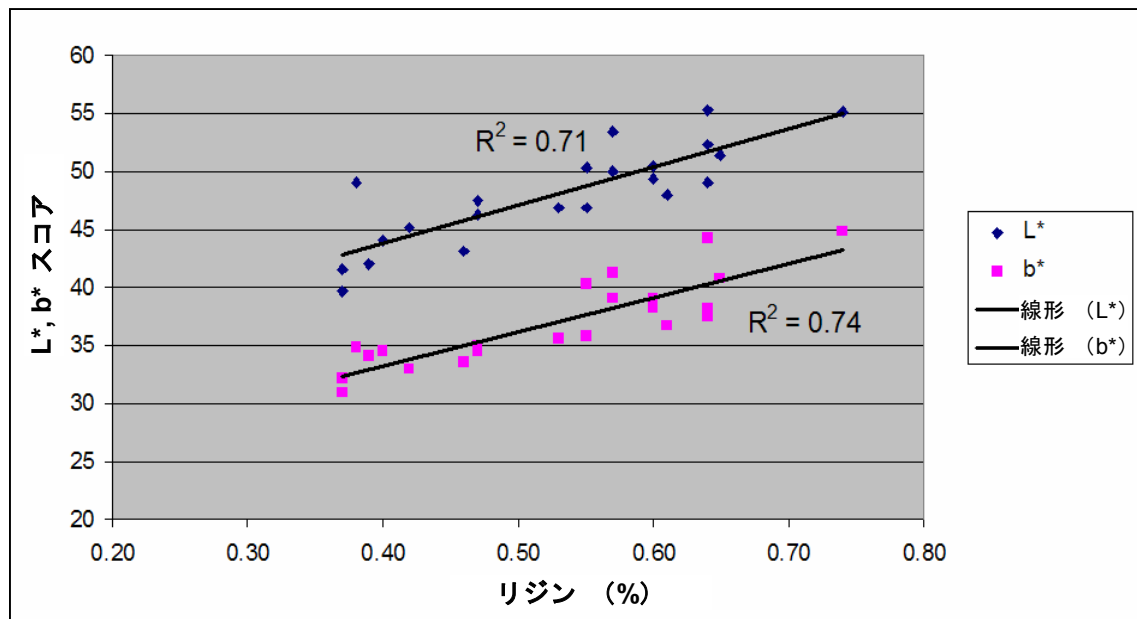


表 3. 3 箇所から入手した配合 DDGS を給与した場合の、酸性デタージェント不溶性窒素 (ADIN) とカラースコアが豚の発育成績に及ぼす影響¹

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) .

^b L* = 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、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、こうした修正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。

臭い

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

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場合、飼料原材料の粒径や粒径の均一性は家畜や家禽の飼料担当者にとって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、輸送や取扱い時の原材料分離量、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非常に重要な要素であり、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要単

第5章 DDGSの取扱いおよび保管に関わる物理特性と化学特性

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おお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ミクロンから2125ミクロンまでの幅があった。2004年と2005年には、ミネソタ大学では2件のDDGS栄養分析と物理特性試験が追加的に実施された（2004年の試験では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、2005年の試験では35のサンプル）。表4および5から分かるように、平均粒径は665~737 μm であったが、粒径のばらつき範囲は73から1217 μm にまで及び、極めて大きかった。DDGSのpHの平均は4.1であったが、ばらつき範囲は3.6~5.0であった。

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

	平均値	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

	平均値	ばらつき	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

最近では、DDGSの粒径のばらつきおよび特性を評価する試験が実施されている。Liu（2009）は粉碎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種類の粉碎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の粒径分布を分析した。トウモロコシおよびDDGSのサンプルはそれぞれに異なる幾何学的平均粒径を有し、DDGS粒子の平均径はトウモロコシを上回った（0.696 vs. 0.479 mm）。これはトウモロコシからDDGSへと変換する過程で、特定の粒子が大きくなることを示唆している。粒子の直径と個々の粒径カテゴリーの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。トウモロコシおよびDDGS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最も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サンプルの間で粒径には大きな開きがあり、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。大半は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

第5章 DDGSの取扱いおよび保管に関わる物理特性と化学特性

含有率と L^* 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、重力排出によって山のように積み上げられた DDGS では粒子の分離が発生し、その結果として空間的に栄養成分のばらつきが起こることを明らかにした。粒子分離試験は、「新」世代燃料エタノールプラント 1 箇所と「旧」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で採取した。試験結果によって、粒子の分離によるサンプル採取箇所の粒径間には有意差があり、中心から周辺部に移動するに従って粒径（幾何平均径）が増加することが示された。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は一貫しておらず、一方水分と粒径と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および水分に基づいて、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 取引業者は 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 の流動性の低さ、およびバルク保管コンテナや輸送車両内での DDGS の粉体架橋を理由として、一部の供給源に対し DDGS の受け入れを制限する業者も存在する。これは業者が所有する飼料ミリング・システムでは流動しない飼料原材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、粒状固体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および流動性を改善する可能性を持つ解決策に関する最新

第5章 DDGSの取扱いおよび保管に関わる物理特性と化学特性

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、温度変化その他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。シンプルなロバストモデル ($R^2 = 0.93$, $SE = 0.12$) ではあったが、このモデルは1箇所のエタノールプラントから入手した DDGS にのみ基づいて開発されていた。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。この流動性全体評価によって、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) は含水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た。彼らは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%) の影響を見極めるため試験を実施した。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、充填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。大半のソリュブル含有率について含水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、および一定の割合を超えた含水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の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 (CaCO_3) 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、1.25% の斜プチロル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種類の含水率 (9 vs. 12%) を有する DDGS を用いて、商用乾式粉碎エタノールプラントで行われた。投下時の流動率は含水率 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、含水率が 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

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

第5章 DDGS の取扱いおよび保管に関わる物理特性と化学特性

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かない。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。

荷積みに先立ち適切な冷却や「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、流動上の問題が頻繁に引き起こされ、DDGS の荷降ろしが困難になる。流動上の問題を引き起こす原因となる要素を特定し、こうした問題を低減する上で役立つ可能性のある対策を見極める試験が現在実施されている。

DDGS の含水率が 12~13%を超えない限り、DDGS は数ヶ月間保管可能であると考えられる。アメリカ穀物協会が実施した現場試験では、DDGS を 40 ft コンテナでサウスダコタのエタノールプラントから台湾に船積みした。台湾に到着した DDGS を 50 kg 袋に詰め、北回帰線から南に 20 km 離れた場所にある商用酪農場で実施された乳牛給与試験の期間中 10 週間にわたり、遮蔽鉄柱構造の倉庫に保管した。この保管期間中、環境温度の平均は 32°C を超え、湿度は 90%を超えた。酪農場到着時に DDGS のサンプルを採取し、さらに 10 週間経過後にもサンプルを採取した。本試験期間中に過酸化物質価（脂肪の酸敗の測定による）に変化はみられなかった。恐らく、トウモロコシには自然の抗酸化物質がかなり含まれており、加熱過程でこれが更に増加したためと考えられる。

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、商用飼料工場で保管された DDGS の含水量の監視が行われた。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 の含水率は保管当初の 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、湿潤気候下の長期保管では DDGS は水分含有率が増加すると考えられる。

表 6. 台湾の商用飼料工場保管時の 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

第 5 章 DDGS の取扱いおよび保管に関わる物理特性と化学特性

保管および輸送中の DDGS の流動性に影響を及ぼす主要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して流動特性が作りあげられる。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た DDGS の吸着等温線を開発した。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測定を実施し、4 種類の異なる含有率 (乾物比 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、今度は温度や含水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した。この 2 種類の加工ライン間の主要な差異は、ペレット金型の長さ、金型の長さとの比率、調製マッシュ温度、ペレットミルの出口温度、調製マッシュの含水率、ペレットミルの出口含水率、冷却装置の出口含水率であった。

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 の含水率 %	11.34	11.34
調製マッシュの含水率 %	17.73	16.08
ペレットミル出口含水率 %	17.57	16.62
冷却装置出口含水率, %	13.49	12.80

¹Rosentrater, 2007

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 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。

第 5 章 DDGS の取扱いおよび保管に関わる物理特性と化学特性

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	DDGS ペレット 製造業者 A	DDGS ペレット 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
利用可能なタンパク質 %	26.0	25.3	25.8
ADF（酸性デタージェント繊維） %	14.3	13.0	15.4
NDF（中性デタージェント繊維） %	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

¹Rosentrater、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	DDGS ペレット 製造業者 A	DDGS ペレット 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

¹Rosentrater、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%から 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質の高い 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、ペレット化の条件を修正する必要がある場合がある（例えば、ペレット金型の長さとの比率）。

第5章 DDGS の取扱いおよび保管に関わる物理特性と化学特性

表 10. ペレット化前後の DDGS の物理特性¹

特性	DDGS	DDGS ペレット 製造業者 A	DDGS ペレット 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* 測直値	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
耐久性 %	-	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 含水率 25~35%、加工温度 100~120°C、圧力 12.5~37.5 MPa、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、含水率、温度および圧力が DDGS ペレットの特性に相当な影響を及ぼし、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や、含水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。含水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こととした 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含水率が 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であった。

References

- 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.
- 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. Algría, 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

第 5 章 DDGS の取扱いおよび保管に関わる物理特性と化学特性

- (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.
- 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. 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
- Xu, Y., M.A. Hanna, and R. Weber. 2008. Compaction of corn distillers dried grains. Cereal Chem. 85 (2) :158-164.