

## 6章:低脂肪 DDGS の栄養組成と変動

### はじめに

動物栄養を精密に実行するための重要な事項の1つは、使用する飼料原料のエネルギー価や栄養成分の消化率を正確に把握することである。飼料原料の栄養価を正確に把握することで、給与飼料由来のエネルギー価や栄養成分が家畜の要求量に対して過少、あるいは、過大となるリスクを最小限にとどめることが出来、配合設計の際に行う各原料毎の栄養成分の「安全マージン」を最小化することで、経済的な損失を防ぐことが出来る。さらに、飼料設計の際に、その飼料原料の供給源毎にエネルギー価や可消化栄養価について信頼できるデータを入手できれば、DDGSなどの価格的に競争力がある飼料原料では、その利用率を高め、飼料コストのより大きな低減が望める。

栄養成分の変動は、すべての飼料原料で発生する。DDGSの利用者の間でよく聞かれる不満の1つは、栄養成分の変動が他の一般的な飼料原料と比べて大きいということである。エネルギー価と栄養成分の消化率は、

DDGSの供給源(工場)によって変動することが多くの文献で示されているが、現在の米国のエタノール工場では製造時に粗トウモロコシ油の一部を抽出しているため、栄養成分の変動は他の飼料原料と大きな違いはない。実際、Tahirら(2012)が最近報告した様々な飼料原料の分析結果(表1)によると、DDGSのCP(粗たん白質)のCV(変動係数)は5.4%であり、トウモロコシ(8.7%)や小麦(19.1%)のCVよりも小さかった。さらに、DDGSはトウモロコシ、大豆粕、小麦、ナタネ粕(カノラミール)と比べて、NDF(中性デタージェント繊維)およびリン含量の変動が少なかった。ただし、予想されたことではあるが、米国のエタノール工場の大部分でDDGSの製造時に粗トウモロコシ油を部分的に抽出しているため、DDGSの粗脂肪含量の変動は、分析した飼料原料中で最大だった。ただし、粗脂肪含量の変動の大きさは、DDGSの平均粗脂肪含量(11.6%)が、今回の比較した他の飼料原料の粗脂肪含量(0.8~3.2%)に比べて、はるかに大きいことにも影響している可能性がある。

表1. 家禽用飼料で一般的に使用される原料の成分含量と変動およびNRC家禽(1994)値との比較(乾物、Tahirら、2012から改編)

項目	トウモロコシ	大豆粕	DDGS	小麦	ナタネ粕
試料数	133	114	89	22	21
CP(%)	7.8	52.5	29.1	12.7	41.4
CV(変動係数、%)	8.7	3.0	5.4	19.1	2.9
NRCに対する比率(%)	82	97	99	98	101
粗脂肪(%)	2.9	0.8	11.6	1.2	3.2
CV(変動係数、%)	23.9	82.1	11.2	55.0	27.6
NRCに対する比率(%)	69	72	119	43	79
NDF(%)		16.8	42.4	13.4	35.8
CV(変動係数、%)	18.3	22.9	9.0	16.4	11.0
リン(%)	0.32	0.84	0.96	0.42	0.58
CV(変動係数、%)	28.7	7.2	6.5	15.0	43.0
NRCに対する比率(%)	103	121	124	121	80
フィチン態リン(%)	0.19	0.40	0.26	0.25	0.70
CV(変動係数、%)	13.4	5.6	27.2	13.9	4.7
NRCに対する比率(%)	83	162	72	-	74
粗灰分(%)	1.2	6.8	4.8	1.8	7.9
CV(変動係数、%)	10.9	4.6	13.9	14.9	9.0

Tahirら(2012)による比較の中でもう1つの重要点は、原料の栄養成分は経年的に変化しており、古いデータベースの値に依存すると、現在使用されている原料の栄養成分量を過大あるいは過小評価してしまう可能性があることである。エタノール工場が、エタノールの収率を改善し、より多くの粗トウモロコシ油を抽出し、たん白質とアミノ酸含量を高めるための新しい工程を採用するに伴って、DDGSの栄養成分は変化し続けており、これが重要な要因となっている。本章の目的は、DDGSに関する最新の栄養成分の概要を示すことにある。DDGSを配合した飼料の価値を評価し、配合設計する際には、これらのデータに基に行うことを勧める。

DDGSの供給源間のばらつきを管理するために、一部の飼料メーカーでは、栄養成分と品質の基準値を設定し、その基準値を満たす供給元を特定し、ID管理能力を持つ業者から直接購入している。また、一部の飼料メーカーは、第三者機関のマーケティング担当者が作成した、購入するDDGSのばらつきを最小限に抑えるための優先サプライヤーリストを利用している。おそらく、最良のアプローチは、DDGS供給源が示す成分組成に基づいて、最近開発および検証されたME(代謝エネルギー)および可消化アミノ酸量の推定式を用いて、供給源毎に真の栄養価を正確に把握することである。豚と家禽の推定式の詳細については19章および第20章を参照されたい。

## 米国におけるトウモロコシ DDGS の栄養成分含量とその変動

いくつかの研究では、様々な期間にわたるトウモロコシ DDGS の栄養成分組成に関するデータをまとめている(Olukosi & Adebisi, 2013年; Pedersenら, 2014; Steinら, 2016年; Zengら, 2017)。ただし、米国のエタノール産業における粗トウモロコシ油の抽出は2005年頃から開始され、今日では全米で広く採用されて、粗脂肪含量が5~9%の製品の割合が多くなっている。粗脂肪含量の低下により DDGS の粗脂肪含量の製品間でのばらつきは大きくなり、他の栄養成分の組成をも変化させるため、使用するデータベースを特定する際には注意が必要となる。

DDGSの購入者等は、DDGS中の粗脂肪含量の低下に伴ってCPとアミノ酸含量が高まると想定しているが、必ずしもそうではない。DDGS中の粗脂肪含量が低下すると、他のすべての化学成分が不均衡に増加することがよくある。NRC豚(2012)以前の初期の低脂肪 DDGS のエネルギー価と栄養素に関する報告では、DDGSの粗脂肪含量が低下するとDE(可消化エネルギー)、ME、NR(正味エネルギー)価と他の栄養成分含量が高まるとされていた。その結果、NRC豚(2012)は、粗脂肪含量に基づいて分類されたDDGSのエネルギー価および栄養組成の推定値を記載しているが、残念ながら、粗脂肪含量が6~9%のDDGSと、4%未満のDDGSのME価と栄養成分組成に関するデータは限られていた(試料数は、前者13未満、後者は2未満)。このため、NRC豚(2012)におけるこれらのデータは、現在、米国で入手可能なDDGS(粗脂肪含量:5~9%)の栄養成分含量と変動を正確に反映していない。その後のいくつかの報告(豚:Kerrら, 2013および2015、家禽:Melocheら, 2013)では、DDGSのDE、ME、NE価の推定する際に、粗脂肪含量は、単一の予測因子としては不十分であることを明確に示している(詳細は19章と20章を参照されたい)。

NRC豚(2012)と同様に、Steinら(2016)による最近の総説では、粗脂肪含量が4%未満のDDGS(n=3未満)、5~9%のDDGS(n=15未満)および9%以上のDDGS(n=100未満)の製品の栄養組成を示しているが、この総説では、粗脂肪含量が10%未満のDDGSの試料数が限られている。DDGSの粗脂肪含量と豚および家禽のME価との相関性があまりないため、推定式が開発され、検証が行われている(19章と22章を参照のこと)。これらのME推定式を用いて、粗脂肪含量が変化するDDGSの実際のエネルギー価を動的に推定する必要がある。

トウモロコシ DDGS のもう1つの栄養成分組成のデータセットは、Olukosi & Adebisi(2013、表2)によって公表されており、使用した試料のほとんどは米国で製造されたものであるが、ほとんどの試料は1997年から2010年の間に収集したものであるため、現在、生産されている低脂肪トウモロコシ DDGS の組成を適切に表してはいない。ただし、それらの分析は、DDGS間の栄養成分組成の変動を経年的に推定し、CP含量からのDDGS中のアミノ酸含有量推定式の開発には役立っているが、残念ながら

ら、実際の使用に用いるには、これらの推定式の精度は十分ではない。Pedersen ら(2014)は、米国の 21 のエタノール工場から収集したトウモロコシ DDGS 72 試料を収集し、NIRS(近赤外線分光光度計)による分析を行っている。製品間の組成の中で、最も大きい CV(%)を示したのは、デンプン(45%)であり、以下、全糖(19%)、粗脂肪(17%)、酸分解エーテル抽出物(13%)であって、CP、NDF および ADF(酸性デタージェント繊維)含量の CV を超えていた(表 3)。また、彼らは、栄養成分の変動の信頼区間を確立するために必要な各栄養成分の DDGS 間の SD(標準偏差)も報告している。POET 社は、米国の主要なエタノールおよび DDGS 製造会社の 1 つであり、27 のエタノール工場を所有しており、他の DDGS と比べて市場で最も粗脂肪含量が低い(5.4%)DDGS を生産している。2014 年から 2016 年における POET 社の DDGS の栄養成分組成と変動に関する最近の調査(Herrick & Breitling, 2016)によると、DDGS の栄養成分組成(乾物値、%)は乾物 89.2±1.13、CP 30.7±1.57、粗脂肪 5.36±0.96、粗繊維 8.31±0.82、NDF 27.8±3.27、ADF 10.6±1.76、イオウ 0.92±0.13 であった。

## 原料トウモロコシに由来する DDGS の栄養素含有量とその変動

DDGS の栄養成分含量の変動には、粗トウモロコシ油の抽出以外にも多くの要因が関与している。

Olentine(1986)は、蒸留併産物の栄養成分組成の変動に関わる原料および加工工程における多くの要因をあげている(表 4)。トウモロコシ DDGS の栄養成分含量

の変動の多くは、品種間で通常起こり得る変動とそれが栽培される地域差によるものと考えられる。

表 5 に示した NRC 豚(2012)および NRC 家鶏(1994)で報告された値(スミスら、2015)によるトウモロコシの粗脂肪、CP、NDF、ADF、豚の DE 価および家鶏の TME と AME 価をみると、トウモロコシの品種、施肥率、成長期の気候条件、遺伝的改良にともない、トウモロコシの成分組成は時間とともに変化している。このため、トウモロコシのエネルギー価と栄養成分組成の変動は、トウモロコシ DDGS の栄養成分の変動に直接影響している。さらに、家禽や豚用飼料の設計を行う際に、NRC(1994 および 2012)によるトウモロコシのエネルギー価を使用すると、トウモロコシの実際のエネルギー価を過小評価することになる。

DDGS を製造時のジステラーズ・グレイン(固形部分、DG)へのジステラーズ・ソリュブル(液体部分、DS)の混合比も、工場によって異なっている。これら 2 つの画分の栄養成分組成には大きな違いがあるため、DG と DS の混合比が DDGS の最終的な栄養成分組成に大きな影響を与えることになる。Noll ら(2006)は、0、12、25、42 ガロンの DG に様々な水準(0、30、60 および 100%)の DS を添加して製造したトウモロコシ DDGS の栄養成分組成と消化率を評価している。DG への DS の添加率が低下すると、乾燥機の温度は低下した。粒子サイズは増加し、DG への DS の添加量の増加に伴い、DDGS の品質がより変化しやすくなった。DS の量が増加すると、DDGS の色調が濃くなり(L\*が低下)、黄色味が低下した(b\*が低下)。DS の増加は、粗脂肪、灰分、TME<sub>n</sub>(家禽)、マグネ

表 2. 1997~2010 年におけるトウモロコシ DDGS の成分組成の変動(Olukosi & Adebisi, 2013 から改編)

項目	平均	最小値	最大値	SD	CV
CP %	27.9	23.3	34.7	2.4	8.5
粗繊維 %	7.4	6.2	11.3	1.1	15.1
NDF %	36.6	27.7	51.0	5.8	15.7
ADF %	13.6	8.6	18.5	3.3	24.2
粗脂肪 %	10.8	3.2	17.7	2.4	22.0
粗灰分 %	4.5	3.1	5.9	0.6	13.6
カルシウム %	0.04	0.02	0.08	0.02	53.5
リン %	0.80	0.69	0.98	0.07	8.8

表 3. NIR によるトウモロコシ DDGS の製造元による成分組成の変動(乾物、Pedersen ら、2014 から改編)

項目	平均	範囲	SD	CV
水分 %	8.7	6.5 - 12.4	0.8	10
CP %	31.4	27.1 - 36.4	2.1	7
粗繊維 %	7.7	6.4 - 9.5	0.6	7
NDF %	35.1	30.2 - 39.7	2.4	7
ADF %	10.1	8.9 - 11.9	0.6	6
でん粉 %	6.0	2.9 - 13.9	2.7	45
全糖 %	9.0	5.4 - 12.6	1.7	19
粗脂肪 %	9.1	6.5 - 11.8	1.5	17
酸分解エーテル抽出物 %	11.1	8.4 - 13.5	1.4	13
粗灰分 %	7.1	5.4 - 9.0	0.7	9

表 4. 併産物の栄養成分に影響を与える要因(Olentine、1986 年から抜粋)

原材料	要素
穀物の種類	粉碎手順
品種	粒度
品質	粉碎時間
土壌条件	浸漬処理
肥料	水量
天候	プレモルトの量
生産と収穫方法	温度と時間
処理	発酵方式 (連続あるいはバッチ単位)
	冷却時間
	糖化
	麦芽の種類、量、質
	真菌アミラーゼ
	時間と温度
	糖化した穀物の希釈
	穀物の容量
	品質と量
	発酵
	酵母の質と量
	温度
	時間
	冷却
	攪拌
	酸度などの生産管理
	蒸留
	タイプ：真空または大気圧、連続またはバッチ
	直接または間接加熱
	蒸留中の体積変化
	処理
	分離のタイプ：静止、回転または振動
	遠心分離機の使用
	圧搾の種類
	蒸発器
	温度
	数
	乾燥機
	時間
	温度
	タイプ
	穀物と混合したシロップの量

シウム、ナトリウム、リン、カリウム、塩化物および硫黄の増加をもたらしたが、CP およびアミノ酸含量と消化率への影響は最小限だった。

飼料成分の分析結果が研究室間で異なることも多く報告されていることにも注意が必要である(Cromwell ら、1999)。表 6 に示すように、同一の DDGS について、同一の分析手順を用い、4 か所の研究室で分析した分析結果は、乾物では 92.4~96.2%、粗脂肪では 9.4~13.0%、

NDF では 26.8~40.5%と試験場間で差があった。各成分の分析手順には、結果に差異をもたらす可能性がある固有の分析実施上の変動が関連付けられている、技術者のエラー、サンプリングエラー、古い試薬の使用、分析機器の不適切なキャリブレーションおよびメンテナンスなどのその他の要因が差異の原因となる場合もある。研究室間での DDGS の分析結果のばらつきを最小限に抑えるための推奨分析方法は 7 章を参照されたい。

表 5. NRC 豚(2012)および NRC 家禽(1994, Smith ら、2015 から更新)によるトウモロコシ穀粒由来の栄養成分とエネルギー価

	NRC 豚 (2012)	Smith ら (2015)				
		平均	範囲	差	SD	CV
乾物 %	88.3	86.6	83.7 – 88.9	5.2	1.2	1.4
CP %	9.3	9.5	7.9 – 12.3	4.4	0.98	10.3
粗脂肪 %	3.9	5.6	3.1 – 10.8	7.7	1.96	35.1
粗繊維 %	2.2	1.7	0.93 – 3.7	2.8	0.42	27.8
NDF %	10.3	10.7	6.7 – 15.4	8.7	2.14	20.0
ADF %	3.3	4.5	1.9 – 8.0	6.1	1.80	39.6
でん粉 %	70.8	68.5	58.3 – 74.2	15.9	3.4	4.9
可溶性炭水化物 %	-	72.8	63.6 – 79.9	16.3	3.7	5.1
粗灰分 %	1.5	1.4	0.87 – 2.4	1.5	0.28	20.5
GE kcal/kg	4,454	4,576	4,409 – 4,841	432	101	2.2
DE kcal/kg 豚)	3,907	4,105	3,904 – 4,344	440	100	2.4
AMEn kcal/kg	3,764	4,006	3,865 – 4,269	404	94	2.3
TMEn kcal/kg	3,898	4,086	3,955 – 4,272	317	80	2.0

表 6. 同一サンプルの DDGS に関する 4 か所の研究所間での栄養成分分析値の違い

	研究所1	研究所2	研究所3	研究所4
乾物 %	96.2	95.1	92.4	95.1
CP %	29.6	30.3	30.2	29.3
粗脂肪 %	9.4	13.0	11.1	11.9
NDF %	32.2	26.8	40.5	27.8
粗灰分 %	4.2	5.0	4.4	4.3

Kerr (2013) unpublished data.

## DDGS の必須アミノ酸組成の変動

他のすべての栄養成分と同様に、DDGS のアミノ酸含量は、供給源によって大幅に異なる。Olukosi & Abeyiyi (2013) は、1997 年から 2010 年の間に公表されたいくつかの論文からのいくつかのアミノ酸のデータセットをまとめている(表 7)。

以前 Fiene ら(2006)によって報告されたように、これらのデータは、CP 含量とアルギニン( $r$ (相関係数) = 0.44)、イソロイシン( $r$  = 0.26)、リジン( $r$  = 0.22)およびトリプトファン( $r$  = 0.33)の間の相関が低く、統計的に有意ではなかった。これは、CP がトウモロコシ DDGS 中のこれらのアミノ酸含量に対して不十分な指標であり、推定式が開発されなかったことを意味している。

他の必須アミノ酸の含量は、CP 含量と有意な相関を示した(ヒスチジン、ロイシン、メチオニン、フェニルアラニン、トレオニン、バリンの各  $r = 0.68, 0.49, 0.73, 0.81, 0.59, 0.61$ ) が、それらの相関係数は一般的には低く、推定式の  $R^2$  (決定係数) は低かった ( $0.23 \sim 0.66$ )。これらの結果は、CP 含量はトウモロコシ DDGS 中のアミノ酸含量の推定因子としては不十分であることを示しており、正

確な結果を得るためには、アミノ酸を実測する必要がある。最近では、Zeng ら (2017) が、2006 年から 2015 年の間に実施された研究結果 (査読済みの公表論文 22 報、修士論文 1 報) からのデータセットの要約を示している (表 8)。これらのデータは、Olukosi & Adebiji (2013) によるデータよりも、現在のトウモロコシ DDGS の化学組成と変動を反映している。

表 7. 1997~2010 年におけるトウモロコシ DDGS の必須アミノ酸組成の変動 (Olukosi & Adebiji, 2013 から改編)

	平均	最少値	最大値	SD	CV
アルギニン %	1.22	1.06	1.46	0.098	8.0
シスチン %	1.73	1.49	1.97	0.057	11.1
ヒスチジン %	0.74	0.65	0.91	0.070	9.4
イソロイシン %	1.07	0.96	1.25	0.072	6.7
ロイシン %	3.21	2.89	3.62	0.210	6.6
リジン %	0.90	0.62	1.11	0.118	13.1
メチオニン %	0.52	0.44	0.72	0.063	12.0
フェニルアラニン %	1.29	1.09	1.51	0.123	9.6
トレオニン %	1.03	0.93	1.16	0.067	6.5
トリプトファン %	0.22	0.16	0.26	0.022	10.3
バリン %	1.42	1.30	1.61	0.095	6.7

表 8. 2006~2015 年におけるトウモロコシ DDGS の一般成分アミノ酸含量の変動 (乾物 (88%)、Zeng ら、2017 から改編)

成分値	平均	CV
CP %	27.1	8.7
粗繊維 %	8.2	26.2
NDF %	34.1	13.4
ADF %	11.5	21.2
粗脂肪 %	8.8	36.3
粗灰分 %	4.1	24.9
<b>必須アミノ酸</b>		
アルギニン %	1.15	11.8
ヒスチジン %	0.74	14.2
イソロイシン %	0.99	11.8
ロイシン %	3.16	13.7
リジン %	0.80	17.9
メチオニン %	0.54	15.1
フェニルアラニン %	1.32	12.3
トレオニン %	1.01	15.5
トリプトファン %	0.20	16.3
バリン %	1.35	11.1

表 9. トウモロコシ DDGS 47 サンプルおよび小麦 DDGS 11 サンプルにおける栄養成分および非デンプン性多糖類 (NSP) 含量 (%) と変動 (乾物、Pedersen ら、2014 から改編)

	トウモロコシ DDGS				小麦 DDGS			
	平均	範囲	SD	CV	平均	範囲	SD	CV
水分	8.7	6.5 - 12.4	0.8	10	7.6	6.8 - 8.7	2.0	2
CP	31.4	27.1 - 36.4	2.1	7	33.4	30.3 - 37.9	2.8	9
粗脂肪	9.1	6.5 - 11.8	1.5	17	5.2	4.4 - 6.5	0.8	16
酸分解エーテル抽出物	11.1	8.4 - 13.5	1.4	13	7.3	6.5 - 8.8	0.8	11
NDF	35.1	30.2 - 39.7	2.4	7	30.6	27.3 - 34.2	2.6	8
ADF	10.1	8.9 - 11.9	0.6	6	10.5	9.5 - 12.2	0.8	7
粗繊維	7.7	6.4 - 9.5	0.6	7	6.7	5.5 - 8.8	0.9	14
でん粉	6.0	2.9 - 13.9	2.7	45	4.0	< 1.0 - 8.8	4.2	103
全糖	9.0	5.4 - 12.6	1.7	19	9.8	4.6 - 12.4	2.2	23
粗灰分	7.1	5.4 - 9.0	0.7	9	9.1	8.1 - 10.0	0.4	5
総NSP	28.3	25.0 - 33.7	2.0	9	26.2	24.2 - 29.1	0.9	4
水溶性NSP	3.1	1.6 - 6.5	0.8	47	6.7	5.3 - 8.0	0.1	2
セルロース	6.7	5.2 - 9.1	0.8	16	5.0	3.5 - 6.7	1.6	32
非繊維性多糖類								
総キシロース	7.7	6.7 - 10.0	0.7	10	8.6	7.0 - 9.3	0.7	8
水溶性キシロース	0.6	0.1 - 1.6	0.3	62	2.3	1.5 - 3.2	0.5	22
総アラビノース	6.2	5.6 - 7.2	0.4	7	5.7	5.1 - 6.2	0.0	0
水溶性アラビノース	0.7	0.2 - 1.5	0.3	45	1.7	1.2 - 2.2	0.3	15
総グルコース	2.8	2.1 - 4.4	0.4	13	3.3	2.7 - 3.7	0.1	5
水溶性グルコース	0.3	0.0 - 1.6	0.4	190	1.1	0.1 - 2.1	1.0	89
総マンノース	1.7	1.2 - 2.0	0.2	12	1.6	1.3 - 1.8	0.2	13
水溶性マンノース	0.6	0.4 - 0.9	0.1	19	0.7	0.4 - 0.8	0.1	18
総ガラクトース	1.5	1.3 - 2.1	0.2	11	1.1	1.0 - 1.2	0.1	11
水溶性ガラクトース	0.3	0.2 - 0.5	0.1	29	0.6	0.4 - 0.7	0.1	18
総ウロン酸	1.6	1.4 - 2.0	0.1	8	0.8	0.7 - 0.9	0.1	12
水溶性ウロン酸	0.5	0.3 - 0.6	0.1	11	0.3	0.2 - 0.4	0.0	15
クラソンリグニン	2.5	1.5 - 4.7	0.7	26	6.6	4.4 - 9.3	2.1	32
アラビノース：キシロース	0.80	0.71 - 0.85	0.0	5	0.66	0.62 - 0.70	0.01	9
ウロン酸：キシロース	0.20	0.16 - 0.23	0.0	8	0.09	0.08 - 0.11	0.0	21

## DDGS 繊維の非デンプン多糖類組成

DDGS の繊維画分の NSP (非デンプン性多糖類) の組成に関する知見は、豚、家禽および養殖水産動物用の原料として供給される DDGS のエネルギー価と栄養成分の消化率を改善する市販の酵素を選択する際に重要である。Pedersen ら (2014) は、47 試料のトウモロコシ DDGS および 11 試料の小麦 DDGS の NSP 組成を測定

し、NSP がトウモロコシ DDGS の約 25~34% を占め、そのほとんどは不溶性であることを示している (表 9)。これは、トウモロコシ DDGS の繊維画分は小腸での消化性が制限されており、豚、家禽、養殖魚の下部消化管での発酵性が制限されることを示している。セルロースはトウモロコシ DDGS 中の約 5~9% を占め、主な非繊維性多糖類はキシロース (7.7%) とアラビノキシロース (12.3~17.2%) であり、これらも主に不溶性である。トウモロコシ

DDGS のマンノース含有量(1.7%)は、トウモロコシ粒に比べて非常に多く、DDGS 中に存在する残留酵母細胞壁のマンナンに由来する可能性がある。トウモロコシ DDGS は、小麦 DDGS に比べて総アラビノースと総ウロン酸含量が高いため、アラビノース:キシロースおよびウロン酸:キシロース比が比較的高くなっている。これは、トウモロコシ DDGS の繊維(ヘテロキシラン)構造は、小麦 DDGS に比べてより複雑で変化しやすく、したがって、外因性酵素での分解がより困難であることを示している。ただし、小麦 DDGS では難消化性のクラソンリグニン含量がトウモロコシ DDGS より多かった。クラソンリグニンは化学成分として明確に定義されておらず、真のリグニンに加えて、たん白質(メイラード反応による生成物)、残留脂肪、ワックスおよびクチンが含まれている可能性がある。これらの結果は、DDGS の製造中にトウモロコシ粒に含まれていよ構造から置換されたキシランおよび水溶性 NSP の濃度に変化していることを示唆している。

## DDGS におけるトウモロコシ油の脂肪酸組成と過酸化に対する指標

DDGS の脂肪酸組成には、ME および NE 価への寄与、乳牛における乳脂肪量への潜在的な影響、成長期～仕上げ期の豚の脂肪の硬さに及ぼす影響および生産、輸送中、貯蔵中の脂質の過酸化に対する感受性など、いくつか重要な点がある。表 10 に示すように、DDGS 中のトウモロコシ油に含まれる主な脂肪酸は、リノール酸(54%)、オレイン酸(26%)、パルミチン酸(14%)であり、リノール酸とオレイン酸は不飽和脂肪酸であることから、DDGS 中の脂質は過酸化されやすくなっている。さらに、脂肪酸組成は、粗脂肪含量が 10%以上の DDGS と、10%以下の DDGS とでは大きな違いはない。DDGS 中の脂質中では、エイコサペンタエン酸(EPA)は検出されないが、神経、網膜、免疫機能にとって生理学的に重要なオメガ 3 系の脂肪酸であるドコサヘキサエン酸(DHA)は少量含まれている。

粗脂肪含量が 10%以上の DDGS と、10%以下の DDGS における脂質過酸化(遊離脂肪酸含有量、チオバルビツール酸および過酸化物価)の平均には大きな差はないが、これらの測定値にはかなりのばらつきがある。

DDGS の脂質過酸化についてのより包括的な分析のために、Song & Shurson(2013)はトウモロコシ DDGS 31 試料から抽出したトウモロコシ油を分析し、これらのデータをトウモロコシ穀粒と比較している(表 11)。ミノルタの色差計による L\*と b\*と、過酸化物価の間の相関は、それぞれ-0.63 と-0.57 で、TBARS(2-チオバルビツール酸反応性物質)の場合にはそれよりも大きかった( $r=-0.73$  と  $-0.67$ )。茶色のオキシポリマーが脂質過酸化中の重合反応中に生成される(Buttkus, 1975; Khayat および Schwall, 1983)ことによる、DDGS の色調と過酸化の測定値の間の有意な負の相関は、色調が DDGS の脂質過酸化の程度の知るうえで有用な指標である可能性があることを示唆している。

ただし、Song ら(2013)は、この研究において、最も過酸化が進んだ DDGS(イオウ 0.95%を含む)を 30%配合した飼料を給与したが、離乳子豚の成長成績には悪影響を及ぼさなかった。成長成績に影響が出なかった原因として、DDGS の給与によるイオウ含有抗酸化化合物の増加に起因しており、発育成績への悪影響を防ぐためのビタミン E 添加は必要がなかった。

同様の結果は、Hanson ら(2015)による離乳子豚に過酸化が進んだ DDGS を給与した試験でも観察されている。これらの結果は、DDGS で脂質の過酸化が明らかに発生するものの、離乳子豚の発育成績や健康状態に悪影響を与えないことを示唆している。DDGS に含まれている比較的高い天然抗酸化物質は、DDGS の過酸化油をブタに与える潜在的な悪影響を克服するのに十分である可能性がある。

## DDGS の天然抗酸化物質と植物化学組成

飼料の主な役割は、動物の養分要求量を充足するための十分な量のエネルギーと消化可能な栄養成分を供給することであるが、一部の飼料原料には、飼料として供給される栄養素を超える生理学的利点を有する化合物も含まれている。これらの化合物は、「機能的」または栄養補助食品の特性(すなわち、栄養および医薬品)を持っていると説明されることがある。

トウモロコシには、ビタミン E、フェルラ酸、カロテノイドなどの健康上有効な生理活性化合物がいくつか含まれている。これらの化合物は、他の化合物とともに、DDGS の抗酸化能力および潜在的な健康上の利点に貢献する

可能性がある。

DDGS の植物化学物質含有量と抗酸化能に関するデータは限られているが、これらの植物化学成分を定量化することは、豚、家禽、養殖魚に対する DDGS 配合飼料の給与の際に観察される腸管健康と免疫系の応答に対する有益な効果を理解するために重要である。最初の証拠は、DDGS には、DDGS 由来の過酸化油を家畜に供給すると酸化ストレスが発生するものの、健康上の利点をもたらす可能性がある自然由来の様々な抗酸化化合物

物も大量に含まれている。DDGS の抗酸化物質等の分析は、2011 年に Winkler-Moser & Breyer により実施されている。彼らは、POET 社から DDGS 試料を入手して、脂肪酸組成、トコフェロール、トコトリエノール、カロテノイド、酸化安定性指数(OSI)およびDDGSから抽出した脂質中のフィトステロール等の広範囲の分析を行った(表 12)。

トコフェロールは油に含まれる主要な抗酸化物質であり(Kamal-Eldin, 2006)、酸化促進条件下での過酸化を最小限に抑える上で重要な物質である。トコトリエノールは

表 10. 様々な粗脂肪含有量の DDGS における脂肪酸組成と脂質過酸化の程度(Kerr ら、2013 から改編)

	平均値 (粗脂肪10%以上)	範囲	平均値 (粗脂肪10%以下)	範囲
サンプル数	8		7	
粗脂肪 %	11.2	10.1 -13.2	8.0	4.9 -10.0
全油中脂肪酸 %				
ミリスチン酸、14:0	0.07	0.06 - 0.08	0.04	ND - 0.08
パルミチン酸、16:0	14.2	13.6 - 15.4	14.2	14.0 - 14.6
パルミトレイン酸、16:1	0.14	0.12 - 0.16	0.12	ND - 0.15
ステアリン酸、18:0	2.2	2.0 - 2.6	2.2	2.1 - 2.3
オレイン酸、18:1	26.0	24.8 - 27.3	26.2	25.2 - 27.2
リノール酸、18:2	54.0	51.9 - 55.0	53.9	53.4 - 54.5
リノレン酸、18:3	1.6	1.4 - 1.8	1.6	1.6 - 1.8
アラキドン酸、20:4	ND	ND	ND	ND
EPA、20:5	ND	ND	ND	ND
ドコサペンタエン酸、22:5	ND	ND	ND	ND
DHA、20:6	0.18	0.15 - 0.27	0.21	0.16 - 0.26
脂質酸化反応				
遊離脂肪酸 %	1.7	1.1 - 2.4	1.1	0.6 - 1.7
TBA吸光度	7.8	5.7 - 11.8	10.6	5.3 - 17.1
過酸化物価 mEq/kg	5.4	0.2 - 19.0	7.7	0.6 - 17.5

表 11. トウモロコシ DDGS から抽出された脂質の脂質過酸化と色調(Song & Shurson, 2013 から改編)

	トウモロコシ	DDGS				
		平均	中央値	最小値	最大値	CV
過酸化物価、mEq/kg (脂質中)	3.1	13.9	11.7	4.2	84.1	97.5
TBARS価 ng MDA相当量/mg (脂質中)	0.2	1.9	1.7	1.0	5.2	43.6
色調						
L*	83.9	54.1	54.9	45.2	58.1	4.6
a*	2.6	10.9	10.8	9.3	12.4	7.2
b*	20.0	37.3	37.5	26.6	42.7	8.8

表 12. 粗トウモロコシ油の脂肪酸組成、天然抗酸化物質、酸化安定性およびフィトステロール(Winkler-Moser & Breyer、2011 から改編)

分析項目	濃度
遊離脂肪酸 (%オレイン酸中)	10.5 + 0.18
脂肪酸 (%脂質中)	
16:0	12.9
16:1	0.1
18:0	1.8
18:1	28.1
18:2	55.5
20:0	0.3
18:3	1.2
20:1	0.0
ヨウ素価	123.1
総トコフェロール $\mu\text{g/g}$	1,104
$\alpha$ トコフェロール $\mu\text{g/g}$	296
$\gamma$ トコフェロール $\mu\text{g/g}$	761
$\Delta$ トコフェロール $\mu\text{g/g}$	48
総トコトリエノール $\mu\text{g/g}$	1,762
$\alpha$ トコトリエノール $\mu\text{g/g}$	472
$\gamma$ トコトリエノール $\mu\text{g/g}$	1,210
$\Delta$ トコトリエノール $\mu\text{g/g}$	80
総カロテノイド $\mu\text{g/g}$	75
ルテイン $\mu\text{g/g}$	47
ゼアキササンチン $\mu\text{g/g}$	24
$\beta$ クリプトキササンチン $\mu\text{g/g}$	3.3
$\beta$ カロチン $\mu\text{g/g}$	0.9
OSI 110°C時の時間	6.62
総フィトステロール $\text{mg/g}$	21.7
カンベステロール $\text{mg/g}$	2.97
カンベステノール $\text{mg/g}$	1.35
ステグマステロール $\text{mg/g}$	1.10
シトステロール $\text{mg/g}$	10.3
シトスタノール $\text{mg/g}$	3.72
アベナステロール $\text{mg/g}$	0.93
シクロアルテノール $\text{mg/g}$	0.71
24-メチレンシクロアルタノール $\text{mg/g}$	0.30
シトロスタジエノール $\text{mg/g}$	0.31
Steryl ferulates $\text{mg/g}$	3.42

抗酸化剤としても機能し(Schroeder ら、2006)、血中コレステロールの低下、癌の予防、神経系の保護に貢献しているとされている(Sen ら、2000)。トウモロコシ油中の主要なカロテノイドは、ルテインとゼアキササンチンであり、これらはヒトの加齢性黄斑変性症と白内障から保護することが示されている(Zhao ら、2006)。 $\beta$ カロチンと $\beta$ クリプ

トキササンチンはビタミン A の前駆物質であり(Bendich & Olson、1989)、すべてのカロテノイドは、抗酸化作用や免疫反応の改善など、飼料由来のビタミン A 作用を補給する以外にも有益な健康効果があることが示されている。いくつかのタイプの癌に対する防御(Bendich & Olson、1989; Rao & Rao、2007)。フィトステロールは、血中コレス

テロールを低下させ、胃腸管からのコレステロールの再吸収をブロックする能力があり、機能性食品の貴重な成分となっている(Gylling & Miettinen, 2005)。フェルリル酸ステロールは、フィトステロールのコレステロール低下特性を助ける(Rong ら, 1997)だけでなく、また、抗酸化作用がある(Nyströmet ら, 2005)。ごく最近、シムら(パーソナルコミュニケーション)は、供給源が異なる DDGS 16 試

料の抗酸化能力およびトコフェロール、トコトリエノール、アントフィル、フェルラ酸含量と変動を調査しており、これらの値をトウモロコシと比較している(表 13)が、DDGS 間で、これらの化合物の含量にはかなりのばらつきがあることを示しているが、いずれも、トウモロコシに比べて 2~3 倍多くなっている。

表 13. DDGS 16 サンプルの抗酸化能力、トコフェロール、トコトリエノール、キサントフィルおよびフェルラ酸含有量のトウモロコシとの比較(乾物、Shurson, 2017 年から抜粋)

	トウモロコシ	DDGS		
		平均	最小値	最大値
抗酸化能, mmolトコフェロール当量/kg	8.1	38.07 + 93.9	29.0	65.2
トコフェロールおよびトコトリエノール mg/kg				
α-トコフェロール	3.2	10.8 + 4.5	4.1	19.7
α-トコトリエノール	2.4	9.3 + 2.2	5.4	12.8
γ-トコフェロール	32.7	69.0 + 8.6	52.7	81.4
γ-トコトリエノール	8.6	14.0 + 2.9	7.6	17.5
δ-トコフェロール	10.1	18.2 + 3.6	10.0	24.3
総トコフェロール	57.0	121.3 + 16.9	90.8	141.2
キサントフィル μg/kg				
ルテイン	385	627 + 218	447	1,343
ゼアキサントチン	63	95 + 50	ND	243
総キサントフィル	448	697 + 257	447	1,586
フェルラ酸 mg/kg				
遊離フェルラ酸	0.01	0.042 + 0.016	0.018	0.087
総フェルラ酸	2.50	7.455 + 0.675	6.774	9.511

## 引用文献

- Bendich, A., and J.A. Olson. 1989. Biological actions of carotenoids. *FASEB J.* 3:1927-1932.
- Buttkus, H.A. 1975. Fluorescent lipid autoxidation products. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 23:823-825.
- Cromwell, G.L., C.C. Calvert, T.R. Cline, J.D. Crenshaw, R.A. Easter, R.C. Ewan, C.R. Hamilton, G.M. Hill, A.J. Lewis, D.C. Mahan, E.R. Miller, J.L. Nelssen, J.E. Pettigrew, L.F. Tribble, T.L. Veum, and J.T. Yen. 1999. Variability among sources and laboratories in nutrient analyses of corn and soybean meal. *77:3262-3273.*
- Fiene, S.P., T.W. York, and C. Shasteen. 2006. Correlation of DDGS IDEA™ digestibility assay for poultry with cockerel true amino acid digestibility. Pp. 82-89 In: *Proc. 4th Mid-Atlantic Nutrition Conference.* University of Maryland, College Park, MD.
- Gylling, H., and T.A. Miettinen. 2005. The effect of plant stanol- and sterol-enriched foods on lipid metabolism, serum lipids and coronary heart disease. *Ann. Clin. Biochem.* 42:254-263.
- Hanson, A.R., L. Wang, L.J. Johnston, S.K. Baidoo, J. L. Torrison, C. Chen, and G.C. Shurson. 2015. 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.
- Herrick, K.J., and B.J. Breitling. 2016. Nutrient variability of distillers grains with solubles. *J. Anim. Sci.* abstract doi: 10.2527/msasas2016–342 p. 160–161.
- Kamal-Eldin, A. 2006. Effect of fatty acids and tocopherols on the oxidative stability of vegetable oils. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.* 58:1051–1061.
- Kerr, B.J., W.A. Dozier, III, and G.C. Shurson. 2013. Effects of reduced-oil corn distillers dried grains with solubles composition on digestible and metabolizable energy value and prediction in growing pigs. *J. Anim. Sci.* 91:3231–3243.
- Kerr, B.J., N.K. Gabler, and G.C. Shurson. 2015. Compositional effects of corn distillers dried grains with solubles with variable oil content on digestible, metabolizable, and net energy values in growing pigs. *Prof. Anim. Scientist* 31:485–496.
- Khayat, A., and D. Schwall. 1983. Lipid oxidation in seafood. *Food technol.* 37:130–140.
- Meloche, K.J., B.J. Kerr, G.C. Shurson, and W.A. Dozier III. 2013. Apparent metabolizable energy and prediction equations for reduced-oil corn distillers dried grains with solubles in broiler chicks from 10 to 18 days of age. *Poult. Sci.* 92:3176–3183.
- National Research Council. 2012. *Nutrient Requirements of Swine*. 11th Rev. Ed. National Academy Press, Washington, DC.
- National Research Council. 1994. *Nutrient Requirements of Poultry*. 9th Rev. Ed. National Academy Press, Washington, DC.
- Noll, S., C. Parsons, and B. Walters. 2006. What's new since September 2005 in feeding distillers co-products to poultry. *Proc. 67th Minnesota Nutrition Conference & University of Minnesota Research Update Session: Livestock Production in the New Millennium*. pp. 149–154.
- Nyström, L., Mäkinen, A.-M. Lampi, and V. Piironen. 2005. Antioxidant activity of steryl ferulate extracts from rye and wheat bran. *J. Agric. Food Chem.* 53:2503–2510.
- Olentine, C. 1986. Ingredient prole: Distillers feeds. *Proc. Distillers Feed Conf.* 41:13–24.
- Olukosi, O.A., and A.O. Adebisi. 2013. Chemical composition and prediction of amino acid content of maize- and wheat-Distillers' Dried Grains with Soluble. *Anim. Feed Sci. Technol.* 185:182–189.
- Pedersen, M.B., S. Dalsgaard, K.E. Bach Knudsen, S. Yu, and H.N. Lærke. 2014. Compositional prole and variation of distillers dried grains with solubles from various origins with focus on non-starch polysaccharides. *Anim. Feed Sci. Technol.* 197:130–141.
- Rao, A.V., and L.G. Rao. 2007. Carotenoids and human health. *Pharmacol. Res.* 55:207–216.
- Rong, N., L.M. Ausman, and R.J. Nicolosi. 1997. Oryzanol decreases cholesterol absorption and aortic fatty streaks in hamsters. *Lipids* 32:303–309.
- Schroeder, M.T., E.M. Becker, and L.H. Skibsted. 2006. Molecular mechanisms of antioxidant synergism of tocotrienols and carotenoids in palm oil. *J. Agric. Food Chem.* 54:3445–3453.
- Sen, C.K., S. Khann, an S. Roy. 2000. Tocotrienols in health and disease: The other half of the natural vitamin E family. *Mol. Aspects med.* 28:692–798.
- Shurson, G.C. 2017. The role of biofuels coproducts in feeding the world sustainably. *Annu. Rev. Anim. Biosci.* 5:229–254.
- Smith, B., A. Hassen, M. Hinds, D. Rice, D. Jones, T. Sauber, C. Iiams, D. Sevenich, R. Allen, F. Owens, J. McNaughton, and C. Parsons. 2015. Predicting the digestible energy of corn determined with growing swine from nutrient composition and cross-species measurements. *J. Anim. Sci.* 93:1025–1038.
- 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. Wang, L.J. Johnston, B.J. Kerr, T.E. Weber, and G.C. Shurson. 2013. High sulfure content in corn dried distillers grains with solubles (DDGS)

- protects against oxidized lipids in DDGS by increasing sulfur-containing antioxidants in nursery pigs. *J. Anim. Sci.* 91:2715–2728.
- Stein, H.H., L.V. Lagos, and G.A. Casas. 2016. Nutritional value of feed ingredients of plant origin fed to pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 218:33–69.
- Tahir, M., M.Y. Shim, N.E. Ward, C. Smith, E. Foster, A.C. Guney, and G.M. Pesti. 2012. Phytate and other nutrient components of feed ingredients for poultry. *Poult. Sci.* 91:928–935.
- Winkler-Moser, J.K., and L. Breyer. 2011. Composition and oxidative stability of crude oil extracts of corn germ and distillers grains. *Industrial Crops and Prod.* 33:572–578.
- Zeng, Z.K., G.C. Shurson, and P.E. Urriola. 2017. Prediction of the concentration of standardized ileal digestible amino acids and safety margins among sources of distillers dried grains with solubles for growing pigs: A meta-analysis approach. *Anim. Feed Sci. and Technol.* 231:150–159.
- Zhao, D.Y., P. Bhosal, and P.S. Bernstein. 2006. Carotenoids and ocular health. *Curr. Top. Nutr. Res.* 4:53–68.