

## 18 章:ブロイラーおよび産卵鶏における低脂肪 DDGS

### はじめに

トウモロコシ DDGS は、ブロイラーや産卵鶏用飼料における優れた飼料原料である。ブロイラーや産卵鶏用飼料を設計する場合の DDGS のエネルギーと栄養価に関するいくつかの総説が公表されている(Waldroup ら 2007; Choi ら、2008; Swiatkiewicz and Korelski, 2008; Bregendahl, 2008; Salim ら、2010; El-Hack ら、2015)が、これらは一般的に粗脂肪含量が 10%以上の高脂肪 DDGS に関する数値で、粗脂肪含量が 10%未満の低脂肪 DDGS には適用できない。幸いなことに、この 7 年間にかなりの量の研究が行われ、粗脂肪含量が異なる DDGS の AMEn(窒素補正した見かけの代謝エネルギー)価と可消化アミノ酸含量が明らかになっている。この章では、これらの最近の研究成果を要約した。エネルギー価と栄養成分組成のデータおよびそれらを推定するために使用される予測式は、最も新しい代表的な米国産トウモロコシ DDGS に対するものであり、DDGS を含むブロイラーおよび産卵鶏用の飼料を精密に設計するために必要不可欠である。

トウモロコシ DDGS は、家禽におけるトウモロコシのエネルギー価の約 85%を含み、可消化必須アミノ酸含量が適切で、利用可能なリン含量が高い。ブロイラーと産卵鶏用飼料では、最小限のエネルギーとアミノ酸補正を行うだけで、最大 10%量の DDGS を配合することが出来る。Swiatkiewicz and Korelski(2008)は、10 年前に公表した総説において、DDGS は家禽用飼料原料として利用出来、ブロイラー前期用飼料では 5~8%、後期用飼料では 12~15%の範囲で安全に使用できると結論付けている。ただし、これらは控えめな値であり、可消化アミノ酸含量ではなく、総アミノ酸含量を基に設計している。最近の研究(Shim ら、2011; Loar ら、2010; Masa'deh ら、2011)では、家禽用飼料では、DDGS をより多く(例えば、20%以上)配合可能であることを示している。正確なエネルギー価と可消化アミノ酸含量を把握することは、DDGS を配合する際に必須である。

### 低脂肪 DDGS の家禽におけるエネルギーと可消化成分

エネルギーは家禽用飼料において、飼料価格に占める割合が最も高く、次いで、アミノ酸とリンの価格が高い。したがって、家禽に供給する DDGS の正確な AMEn 価、可消化アミノ酸および有効または可消化リン含量を知ることは、発育・産卵成績や鶏肉と鶏卵の品質に影響を与えずに、配合量を最大化し、飼料価格を最小化するために最も重要な要因である。AMEn 価、可消化アミノ酸含量および有効リン含量が DDGS の供給源によって異なっていることが多くの文献により示されている。世界で最も成功している家禽のインテグレーターは、精密栄養のアプローチを用いて、AMEn 価または TME(真の代謝エネルギー)価、SID(標準化された回腸消化率)に基づく可消化アミノ酸含量および標準化された全消化管消化率または利用可能なリン含量に基づいて飼料設計を行っている。供給源間で DDGS の栄養成分組成にバラツキがあるため、過去の公開データではなく、AMEn 価および可消化アミノ酸とリンの含量の推定値を使用する必要がある。この章では、予測式を使用して AMEn 価、SID アミノ酸含量および有効リン含量を推定するための最先端のアプローチについて説明しているが、これらのアプローチは、様々な米国産トウモロコシ DDGS を評価する際に、配合に要する経費と栄養的な価値について経済的に判断する際に使用する必要がある。これらの予測式を使用することで、飼料配合時に重要なポイントとなるこの変数の正確な推定値が得られ、ブロイラーの発育成績と枝肉特性および産卵成績と鶏卵の品質を許容可能なレベルに保ちながら、DDGS を比較的多く配合することにより飼料価格を大幅に節減することが出来る。

飼料原料の栄養価を正確に知ることは、経済的価値を考える際に不可欠である。これには、DDGS を配合した飼料のコストを最小とするために許容可能な最大価格や、最大配合割合を含んでいる。Tahir and Pesti(2012b)は、正確な飼料原料の可消化アミノ酸含量に関するデー

データベースを使用することにより、年間約1億6,000万ドルの飼料費を節減することが出来るとしている。配合設計における線形計画モデルの使用は、栄養成分の要求量を充足させるための各飼料原料の制限値(最小および最大配合率)を設定することで、飼料価格を最小限にする配合設計が得られるため、広く利用されている。さらに、ほとんどの市販のソフトウェアは、感度分析(Sensitivity Analysis: 条件や数値の変化から、最適な答えの変動を分析する手法)または「シャドウプライシング」の機能を持っており、個々の飼料原料について使用可能な最高価格を決定できる。このアプローチを用いることで、原料価格とその原料の様々な配合割合に基づく使用曲線を作成出来る。

### AMEn 価の予測

NRC(家禽1994)では、DDGSのAMEn価は2,667 kcal/kgであり、TMEn(窒素補正した真の代謝エネルギー)価は3,330 kcal/kg(いずれも乾物)であるとしている。しかし、これらの数値は、20年以上前に製造されていた粗脂肪含量が10%以上の高脂肪DDGSのものである。現在の低脂肪DDGSの成分組成は、当時のものとは大幅に異なっており、DDGS中の粗脂肪含量とAMEn価を調査した3報が最近公表されている(表1)。

Rochellら(2011)による報告では、DDGSの平均AMEn価は2,678 kcal/kg(乾物)であり、NRC(1994)の値と差がなかったが、この報告には、粗脂肪含量が10%未満の低脂肪DDGSが1試料しか含まれておらず、この試料のAMEn価は著しく低い(表1)。従来の高脂肪性DDGSのAMEn価は、2,593~3,098 kcal/kg(乾物)であって、粗脂肪含量がほぼ同じDDGS間での差は505 kcal/kgだった。この研究では評価したDDGSは6試料のみであって、AMEn価はGE(総エネルギー)、粗脂肪、CP(粗たん白質)、でん粉、粗灰分およびADF(酸性デタージェント繊維)含量との間には相関は認められなかったが、TDF(総食物繊維)およびNDF(中性デタージェント繊維)とは負の相関が認められた( $r$ (相関係数)は、-0.77 および-0.83)。このことは、DDGSのAMEn価には、粗脂肪含量よりも繊維含量が密接に関連していることを示している。

その後の研究で、Melocheら(2013)は、粗脂肪含量が10%未満の低脂肪DDGSを6試料含む計15試料の

DDGSについての調査を行い、平均AMEn価は2,309 kcal/kg(乾物)であり、NRC(1994)の値よりも358 kcal/kg(乾物)低かった(表1)。さらに、AMEn価の範囲は1,869~2,824 kcal/kg(乾物)であって、供給源間の差Rochellら(2011)の報告より大きかった。AMEn価と、GE含量は正の相関を示し( $r=0.69$ )、TDF、NDFおよびADFとは、それぞれ負の相関を示した( $r=-0.56$ 、 $-0.52$ 、 $-0.52$ )。粗脂肪、CP、でん粉および灰分との相関は見られなかった。これらの結果は、Rochell(2011)らによる報告と一致しており、DDGSの繊維含量は粗脂肪含量よりもAMEn価と密接に関連していることを示している。さらに、これらのデータは、DCO(ジステラース・コーン油)抽出に伴うDDGSの粗脂肪含量の低下と、CPおよび繊維含量の増加による影響とは考えられないことを示している。したがって、この2報の結果は、DDGSのAMEn価を予測する際の因子として粗脂肪含量が適していないことを示している。

3つ目の報告はMelocheら(2014)によるもので、評価したDDGS15試料の平均AMEn価は2,764 kcal/kg(乾物)であり、NRC(1994)の値より97 kcal/kg(乾物)高い(表1)。これらの3報のデータから、粗脂肪含量が異なるDDGSのAMEn価の範囲は、1,869~3,634 kcal/kg(乾物)であった。このような供給源間における大きなバラツキは、実際の飼料設計にあたって、NRC(1994)などで公表されている値を用いることが出来ないことを示している。Melocheら(2013)は、DDGSの成分組成分析値を用いて最適なAMEn価の予測式を開発している:

$$\text{AMEn(kcal/kg)} = -12,282 + (2.60 \times \text{GE, kcal/kg}) - (40.67 \times \text{TDF, \%}) + (89.75 \times \text{CP, \%}) + (125.80 \times \text{でん粉, \%}) \quad (\text{いずれも乾物}) \quad R^2 = 0.86$$

この予測式は非常に正確( $R^2$ (決定係数)=0.86)であるが、GE、TDFおよびでん粉含量は、一般に民間の受託分析機関では測定できないことが多い。このため、彼らは、TDFの代わりにNDFを使用する代替予測式を開発した。

$$\text{AMEn(kcal/kg)} = -14,322 + (2.69 \times \text{GE, kcal/kg}) + (117.08 \times \text{CP, \%}) + (149.41 \times \text{でん粉, \%}) - (18.30 \times \text{NDF, \%}) \quad (\text{いずれも乾物}) \quad R^2 = 0.88$$

この予測式は、最初の予測式に比べて精度がわずかに向上しているが、依然として民間の受託分析機関で分

表 1. 粗脂肪含量が異なる DDGS の総エネルギー、AMEn および成分組成(乾物) (Rochell ら、2011; Meloche ら、2013; Meloche ら、2014 から改編)

<b>Rochell et al. (2011)</b>									
DDGS	GE kcal/kg	AMEn kcal/kg	粗脂肪%	CP %	TDF %	NDF %	ADF %	でん粉 %	灰分 %
4	5,547	3,098	11.7	29.5	35.9	33.4	8.6	4.9	5.4
1	5,434	2,685	10.2	31.9	35.7	40.1	14.4	6.2	4.5
5	5,375	2,593	10.9	29.7	38.1	40.1	10.6	3.5	4.4
3	5,314	2,628	11.5	29.6	30.3	34.6	11.3	7.9	4.2
6	5,174	2,903	11.5	26.5	32.7	27.7	9.8	3.3	4.5
2	5,076	2,146	3.2	34.7	37.2	51.0	15.8	3.0	5.2
<b>Meloche et al. (2013)</b>									
15	5,167	2,687	13.2	30.6	32.4	34.0	9.9	1.3	5.3
14	5,130	2,824	11.8	32.1	33.5	38.9	13.3	1.1	4.9
12	5,077	2,074	11.3	27.7	37.8	44.0	14.0	1.8	4.4
11	5,075	2,418	11.1	29.7	33.9	36.5	12.1	3.9	4.3
9	5,066	2,273	10.8	29.7	35.3	38.6	13.9	1.6	4.6
10	5,043	2,012	10.8	31.0	35.7	38.9	12.9	0.9	4.9
3	5,022	2,487	6.3	28.9	28.5	27.0	8.2	3.3	5.2
13	5,008	2,032	11.5	26.5	32.7	27.7	9.8	3.3	4.5
2	4,990	2,551	4.2	27.9	30.5	27.3	7.7	3.7	4.8
5	4,963	2,401	9.6	30.1	30.8	33.3	10.5	3.4	4.9
6	4,963	2,526	9.7	29.8	31.3	28.8	10.3	2.8	5.0
7	4,948	2,309	10.0	32.3	33.9	35.9	13.7	1.0	5.3
8	4,938	2,068	10.1	30.3	33.9	38.2	12.5	2.2	5.0
4	4,897	2,103	8.6	32.9	32.5	35.7	13.4	0.8	5.1
1	4,678	1,869	3.2	34.7	37.2	51.0	15.8	3.0	5.2
<b>Meloche et al. (2014)</b>									
1	5,254	3,634	13.3	29.7	31.5	38.3	11.5	2.5	4.8
10	5,254	3,120	14.3	33.0	26.5	32.8	12.1	4.0	4.6
6	5,194	2,535	11.4	29.8	32.1	27.8	8.6	4.7	5.5
15	5,154	3,137	11.6	30.7	33.6	33.0	8.2	6.7	5.0
8	5,148	2,640	8.2	34.1	30.5	37.1	13.2	4.0	5.1
2	5,139	2,553	10.4	32.0	31.6	38.5	12.1	2.3	4.7
11	5,098	3,111	12.0	28.4	28.1	38.1	10.7	10.0	4.6
3	5,061	2,869	9.1	31.6	31.1	39.6	11.6	3.8	5.4
14	5,052	2,644	8.8	28.5	36.6	37.1	9.7	5.9	5.4
4	5,009	2,781	8.0	30.6	32.4	31.0	8.9	4.9	5.6
5	4,978	2,523	7.0	32.2	32.8	31.1	8.6	4.4	5.5
9	4,951	2,461	10.7	32.7	29.2	43.8	14.8	8.1	4.7
13	4,934	1,975	6.1	30.3	31.4	32.9	9.2	4.9	5.4
12	4,884	2,581	5.9	32.3	31.7	34.6	9.4	6.0	5.6
7	4,841	2,903	5.0	34.2	29.3	31.4	8.8	5.6	5.6

析が比較的困難な GE とでん粉含量を必要としている。このため、Meloche ら(2014)は、粗脂肪含量が 5.0~

14.2%(乾物)の DDGS 15 試料の AMEn 価を測定して、Rochell ら(2011)および Meloche ら(2013)による AMEn

予測式の検証を行った。この予測式における変数には、前述と同様に、民間の受託分析機関でのデータ取得が困難な GE および TDF 値を用いているが、非常に精度が高い ( $R^2 = 0.92$ )。

$$\text{AMEn(kcal/kg)} = 2,655 - (18.29 \times \text{NDF, \%}) + (44.14 \times \text{粗脂肪, \%}) + (0.21 \times \text{GE, kcal/kg}) - (10.91 \times \text{TDF, \%}) - (91.08 \times \text{粗灰分, \%}) \quad R^2 = 0.92 \quad \text{正確度: 321 kcal/kg (いずれも乾物)}$$

一般的に測定可能な成分分析値しか利用できない場合には、以下の予測式を使用できるが、精度が低く ( $R^2 = 0.70$ )、前の式よりも正確度 (457 kcal/kg) が低下する。

$$\text{AMEn(kcal/kg)} = 3,673 - (121.35 \times \text{粗繊維, \%}) + (55.29 \times \text{粗脂肪, \%}) - (121.08 \times \text{粗灰分, \%}) \quad \text{(いずれも乾物)}$$

このような予測式を使用した DDGS の AMEn 価を逐次推定するアプローチとは別に、鶏の消化機構をコンピュータでシミュレーションすることでエネルギー価を推定する手法が中国の飼料業界で使用されている Zhao ら (2014)。この手法を用いると、トウモロコシ DDGS を含む 26 種類の飼料原料のうち 17 種類で正確な AME および TME 価を推定できる。

### アミノ酸含量および可消化アミノ酸の推定

各飼料原料中の正確な総アミノ酸含量および可消化アミノ酸含量に関するデータベースを選ぶことも、家禽において最適な成績を得るための飼料原料の経済的な価値を把握するために不可欠である。NRC (1994) の値は長年広く使用されているが、特に DDGS の場合、過去 23 年間でエネルギーと栄養成分の含量と消化率が劇的に変化していることから、古いデータを用いることで問題が生じる。

各飼料原料の可消化アミノ酸含量に基づく配合設計は、総アミノ酸含量に基づく配合設計に比べて、ブロイラーの増体量、飼料摂取量および枝肉特性を改善できる (Rostagno ら、1995; Fernandez ら、1995)。多くの家禽の栄養学者は、雄鶏を用いた試験から得られたアミノ酸消化率の値が様々な種類の家禽 (ブロイラー、産卵鶏、アヒル、七面鳥) 間で類似していると考えているが、Tahir and Pesti (2012a) は、この考えは正しくないと主張しており、雄鶏の試験により得られたアミノ酸消化率は、ブロイ

ラー雛を用いて測定した 20 種類の飼料原料の可消化アミノ酸含量より 6~14% 高いと報告している。

味の素ハートランド (Ajinomoto Heartland、イリノイ州シカゴ) とエボニックデグサ (Evonik Degussa、ドイツ) は、家禽で用いられている多くの飼料原料中の可消化アミノ酸含量に関する包括的なデータベースを開発している。両データベースの際立った違いは、味の素の値は雄鶏を用いた試験から得られたものであり、エボニックの値はブロイラー雛を用いた試験から得られたものであることである。その結果、DDGS の可消化リジン (0.60 vs 0.56%)、メチオニン (0.47 vs 0.44%)、TSAA (全含硫アミノ酸、1.07 vs 1.00%)、およびトレオニン (0.72 vs 0.71%) は、いずれも味の素の値がエボニックの値より高くなっている。家禽のアミノ酸消化率を求める際に、雄鶏およびブロイラー雛を用いる手法の両方が広く使用されているにも関わらず、様々な年齢の家禽およびその系統における発育成績に対する、両手法から得た消化率の値を使用した際の正確性についてはまだ明らかになっていない (Tahir and Pesti, 2012b)。ブロイラー、七面鳥および産卵鶏における DDGS の経済的価値をより理解するために、Tahir and Pesti (2012b) は、一般的な市販配合飼料における味の素およびエボニックのデータベースからの可消化アミノ酸含量を使用した場合の比較を行っている (表 2)。この比較から、いくつかの重要なポイントがあることがわかる。

1. 2009 年における飼料原料の平均価格を使用すると、ブロイラー、七面鳥および産卵鶏用のすべての配合飼料に DDGS を配合した場合のシャドウコストは、DDGS の購入価格を 65.9~139.5 ドル/トン上回っている。これは、DDGS の家禽用飼料原料としての実際の価値は市場価格よりはるかに高いことを示している。
2. エボニックの可消化アミノ酸含量データベースを使用した場合、七面鳥後期用飼料および産卵前の産卵鶏用飼料を除き、DDGS のシャドウコストは味の素のデータベースを使用した場合より 0.2~6.4 ドル/トン高くなった。この差は、エボニックのデータベースにおける DDGS の可消化アミノ酸含量が低いためであり、シャドウプライシングに基づいて DDGS の購入を決定する際に、正確な

表 2. ブロイラー、七面鳥および産卵鶏用飼料における DDGS の市場価格とシャドウコスト(Tahir and Peski, 2012b から改編)

飼料原料	\$/MT	ブロイラー前期 (Ross)		ブロイラー後期 (Cobb)		七面鳥前期 (Nicholas)		七面鳥後期 (British United Tukey Males)		レグホン種産卵前 (ISA North America)		レグホン種産卵ピーク期 (Hy-Line)	
		Alin.	Evo.	Alin.	Evo.	Alin.	Evo.	Alin.	Evo.	Alin.	Evo.	Alin.	Evo.
トウモロコシ	170	58.41	56.17	71.96	71.20	39.48	36.42	81.22	81.17	59.40	59.16	56.08	54.40
大豆粕	396	36.37	38.23	21.92	22.54	49.85	52.39	14.80	14.80	20.69	21.25	27.98	29.41
ホートミドリ ングス	265	-	-	-	-	-	-	-	-	13.88	13.55	-	-
家禽油脂	487	2.00	2.33	2.70	2.78	5.57	6.03	1.00	1.00	-	-	4.04	4.29
L-リジン	1,666	0.17	0.19	0.18	0.19	0.33	0.35	0.18	0.19	-	-	-	-
DL-メチオニン	3,721	0.30	0.32	0.19	0.22	0.37	0.40	0.18	0.20	0.15	0.15	0.18	0.21
L-トレオニン	2,485	0.06	0.08	-	-	0.07	0.09	-	-	-	-	-	-
炭酸カルシウム	45	0.65	0.65	0.68	0.68	0.73	0.73	0.61	0.61	3.90	3.90	9.08	9.08
リン酸二石灰	646	1.70	1.68	2.09	2.08	3.34	3.32	1.41	1.41	1.67	1.66	2.26	2.25
食塩・ビタミン・ ミネラル・ プレミックス	-	0.36	0.36	0.33	0.33	0.27	0.27	0.67	0.67	0.32	0.32	0.37	0.37
飼料価格 \$/トン		283.5	290.3	249.7	252.6	338.1	347.4	224.6	225.7	241.7	242.8	255.2	260.2
DDGSの市場価格 \$/トン	154												
DDGSのシャドウ コスト \$/トン		221.4	226.7	240.6	240.8	219.9	225.2	236.3	227.6	293.5	291.5	233.8	240.2
DDGSの市場価格 とシャドウ コストとの差 \$/トン		67.4	72.7	86.6	86.8	65.9	71.2	82.3	73.6	139.5	137.5	79.8	86.2

Alin.= Ajinomoto, Evo.= Evonik

可消化アミノ酸含量を使用する際の重要性を示している。

3. DDGS のシャドウコストは、高価格の飼料(七面鳥前期用飼料)の方が低価格の飼料(七面鳥後期用飼料)に比べて必ずしも高いとは限らない。
4. DDGS のシャドウコストは、家禽の種類やステージによって異なるが、産卵前の産卵鶏用飼料で最も高く、七面鳥用前期用飼料で最も安い。ブロイラーと七面鳥における DDGS の経済的価値は、前期用飼料よりも後期用飼料で高くなる。
5. エボニックのデータベースを使用する場合、DDGS の市場価格が 221.40~226.70 ドル/トンであれば、ブロイラー前期用飼料に 7~17%配合す

ることが出来るが、味の素のデータベースを使用した場合、DDGS の市場価格が 221.40ドル/トン未満の場合でいか使用できない。このことは、DDGS の価値を評価して家禽用飼料を設計する際、DDGS の可消化アミノ酸含量の正確な値を使用することの重要性がよりわかる。

6. ブロイラー前期用飼料において DDGS の配合割合をさらに高める場合(20~24%)には、DDGS の市場が 211.10~191.20 ドル/トンの場合、経済的に使用することが出来る。これは、DDGS の価格が他の競合する飼料原料の価格と比較して安価となった場合に、DDGS をより多く配合できることを示している。

表 3. 粗脂肪含量が異なる DDGS のアミノ酸含量、AID(見かけの回腸消化率)と AIDAA(見かけの回腸可消化アミノ酸)含量(Dozier ら、2015 から改編)

栄養成分 %	粗脂肪10.5% DDGS			粗脂肪7.9% DDGS			粗脂肪5.4% DDGS		
	含量	AID	AID AA	含量	AID	AID AA	含量	AID	AID AA
水分	9.3	-	-	10.6	-	-	10.3	-	-
CP	27.9	-	-	27.6	-	-	29.2	-	-
アルギニン	1.25	79.9	1.00	1.35	77.6	1.05	1.32	76.2	1.00
シスチン	0.55	68.4	0.37	0.57	62.9	0.36	0.52	62.0	0.32
ヒスチジン	0.76	75.0	0.57	0.78	71.2	0.56	0.81	72.1	0.58
イソロイシン	1.05	73.3	0.77	1.05	69.8	0.73	1.13	70.2	0.79
ロイシン	3.40	83.5	2.84	3.27	80.1	2.62	3.54	80.3	2.84
リジン	0.81	55.2	0.45	0.87	51.0	0.44	0.89	50.4	0.45
メチオニン	0.55	79.1	0.43	0.64	77.8	0.50	0.54	72.2	0.39
フェニルアラニン	1.43	79.9	1.15	1.41	76.7	1.09	1.53	76.8	1.18
トレオニン	1.08	61.2	0.66	1.11	56.6	0.63	1.16	56.3	0.65
トリプトファン	0.29	76.7	0.15	0.22	73.3	0.16	0.20	70.8	0.14
バリン	1.43	73.3	1.05	1.45	69.9	1.01	1.52	70.1	1.07

7. プロイラー後期では、前期よりも、可消化アミノ酸の飼料中要求量が低くなっている。その結果、データベース間での可消化アミノ酸含量の差は、可消化アミノ酸含量が比較的低い飼料では、可消化アミノ酸含量が高い飼料に比べて、それほど重要ではなく、最終的には DDGS のシャドウコストと配合割合の違いに影響している。

多くの家禽の栄養学者は、DDGS の粗脂肪含量が低下すると、CP とアミノ酸含量が増加すると考えているが、DDGS の粗脂肪による組成の変化には一貫性は見られず(表 3)、正しい考えとは言えない。例えば、粗脂肪含量の低下に伴い、リジンとトレオニンは増加傾向を示すが、トリプトファンは減少し、粗脂肪含量が 5.4% の DDGS のメチオニン含量は粗脂肪含量が 10.5% の DDGS と差がなかった(表 3)。低脂肪 DDGS におけるリジン、メチオニン、トレオニンおよびトリプトファンの AID(見かけの回腸消化率)は、粗脂肪含量が 10.5% の DDGS に比べて低かった。この結果は、DDGS の粗脂肪含量が家禽における一部のアミノ酸の消化率に影響を及ぼす可能性を示唆している(Dozier ら、2015)。ただし、アミノ酸含量と消化率の複合的な変化を考慮すると、可消化リジンおよびトレオニン含量には影響がなく、可消化メチオニンおよびトリプトファン含量の差にも一貫性がある影響はな

かった。これらの結果は、いくつかのアミノ酸の消化率が低下したとしても、低脂肪 DDGS の可消化アミノ酸含量は高脂肪 DDGS と大きく異なることを示している。ただし、アミノ酸含量の変化と粗脂肪含量を用いて DDGS 中の可消化アミノ酸含量を逐次把握しておく必要がある。

Adedokun ら(2015)は、DDGS 5 試料について、プロイラー(21 日齢、Ross 708)および産卵鶏(30 週齢、Hy-Line W36)におけるアミノ酸の SID(標準化された回腸消化率)を測定した。供試した DDGS の粗脂肪含量は 8.25~9.79% であり、乾物と CP の AID およびアミノ酸の SID の範囲は表 4 に示したとおりである。産卵鶏における DDGS の乾物、CP および必須アミノ酸の AID の差の平均は 9.9% で、有意な変動とはみなされなかった。予想されたように、リジンの SID の変動が最も大きく(41.3~56.5%)、次いで、シスチン(56.8~69.0%)、メチオニン(67.9~78.6%)、バリン(55.8~66.5%)の変動が大きかった。DDGS における各アミノ酸の SID の変動は、プロイラーの方が小さく、差の平均は 7.1% だったが、プロイラーにおいても SID の変動が最も大きいのはリジン(49.9~63.3%)であり、以下、イソロイシン(67.8~76.8%)、バリン(68.5~75.9%)、トレオニン(61.7~69.0%)、メチオニン(77.7~85.0%)であった。プロイラーにおけるリジンお

表 4. 5 試料のトウモロコシ DDGS における乾物と CP の AID(見かけの回腸消化率)とアミノ酸の SID(標準化された回腸消化率)の範囲(Adedokun ら、2015 から改編)

栄養成分 %	産卵鶏	ブロイラー
乾物	40.8 – 50.5	42.2 – 51.1
CP	59.6 – 68.3	72.2 – 78.2
アルギニン	66.0 – 74.7	76.0 – 82.6
シスチン	56.8 – 69.0	71.6 – 76.5
ヒスチジン	63.7 – 70.5	70.4 – 75.8
イソロイシン	59.6 – 68.5	67.8 – 76.8
ロイシン	72.1 – 80.3	81.8 – 86.0
リジン	41.3 – 56.5	49.9 – 63.3
メチオニン	67.9 – 78.6	77.7 – 85.0
フェニルアラニン	71.4 – 78.0	77.2 – 82.5
トレオニン	52.8 – 63.8	61.7 – 69.0
バリン	55.8 – 66.5	68.5 – 75.9

よびメチオニンの SID は、産卵鶏より 8.2 および 7.4%高かった。これらの結果は、産卵鶏用飼料に DDGS を配合する場合は、ブロイラーとは異なる SID を使用する必要があること、家禽における DDGS の SID アミノ酸含量を推定するためには正確な方法が必要であることを示唆している。さらに、これらの推定値は、産卵鶏に対して最初に DDGS を給与した際の推定値を用いており、産卵鶏用飼料を精密に設計する際に用いるべきである。

DDGS では、供給源間で可消化アミノ酸含量の変動が大きく、可消化アミノ酸含量を逐次推定する必要があるため、Zhu ら(2017)は、トウモロコシ DDGS と小麦 DDGS の家禽における SID アミノ酸含量の予測式を導くために、19 報の公表文献からの 86 のデータについてメタ分析を行った。これらの公表文献におけるトウモロコシ DDGS の成分組成の平均と変動係数は表 5 に示したとおりである。リジン含量は、DDGS 間での変動が最も大きかった。SID は、ロイシン(85.0%)とトリプトファン(84.5%)が高く、リジン(62.7%)が最も低かった(表 6)。トウモロコシ DDGS における SID アミノ酸含量の平均、範囲および標準偏差(%)は表 7 に示したとおりである。

アミノ酸含量は予測に最も充ちな変数であり、試料間の変動の大部分を占めているため、SID アミノ酸含量の予測式(表 8)で使用できる唯一の因子となった。成立した予測式は、RMSE(Root Mean Square、二乗平均平方

根誤差)が低く(0.01~0.36)、 $R^2$ が高く、変動の 84~99%を説明していた。予測モデルの評価は、線形バイアスと平均バイアスを表す勾配と切片が、すべてのアミノ酸で 0 と 1 と有意に異なっていないことを示し、この予測式が家禽における DDGS の SID アミノ酸推定において非常に信頼できることを示している(表 9)。家禽用飼料原料のアミノ酸消化率を測定するために最も一般的に使用されているのは、3 週齢のブロイラーを用いた試験と、盲腸を切除した雄鶏を用いた試験の 2 種類である。なお、両者から得られるアミノ酸消化率の推定値は異なり、一部の栄養学者は、両者のいずれかから得られたデータのみを好んで使用する傾向がある。このため、表 10 に示した予測式は、ニワトリ雛と雄鶏を用いた試験結果に分けて作成した。

最後に、多くの配合飼料工場では NIRS(近赤外分光分析機)を使用して、様々な飼料原料の栄養成分値を迅速に測定し、配合設計に用いるソフトウェアの栄養成分組成データベースの更新を行っている。DDGS のアミノ酸含量および可消化アミノ酸含量のキャリブレーションが様々な NIRS 用が開発されている。Soto ら(2013)による最近の研究では、ブロイラー用飼料原料のアミノ酸と ME 価を把握する際の様々な手法についての評価を行っている。この報告では、飼料設計を行う際に用いる公表されている成分表によるアミノ酸含量、これに NIRS による

分析値を含めたアミノ酸含量、NIRS による可消化アミノ酸含量、NIRによる可消化アミノ酸含量とME 価推定値に関して、ブロイラーの発育成績と枝肉特性への影響を比較している。その結果、Foss 社の NIRS を用いて、トウモ

ロコシ、大豆粕および DDGS の可消化アミノ酸含量と ME 価の推定した値に基づいて配合設計した場合の増体量と飼料効率、成分表におけるデータを用いて配合設計した場合より優れていた。

表 5. 標準化された回腸の可消化アミノ酸含量の予測に使用された DDGS の成分組成(%) (乾物値 88%)、Zhu ら、2017 )

変数	n	平均	変動係数 %
CP	59	27.16	11.1
灰分	8	4.66	9.3
粗脂肪	24	10.24	27.8
粗繊維	7	8.10	41.0
NDF	38	35.66	12.1
ADF	20	9.92	19.4
必須アミノ酸			
アルギニン	75	1.18	16.5
シスチン	72	0.50	12.4
ヒスチジン	67	0.70	12.1
イソロイシン	75	1.00	15.9
ロイシン	75	3.13	11.5
リジン	75	0.79	19.9
メチオニン	75	0.50	15.8
フェニルアラニン	67	1.28	12.5
トレオニン	75	1.00	11.2
トリプトファン	51	0.20	19.4
バリン	75	1.33	12.4

表 6. トウモロコシ DDGS の SID(標準化回腸消化率、%) (Zhu ら、2017 から改編)

変数	n	平均	最小値	最大値	標準偏差
アルギニン	75	81.5	53.0	92.6	9.7
シスチン	67	74.3	49.0	91.9	14.3
ヒスチジン	67	76.3	47.0	89.4	11.4
イソロイシン	75	77.0	52.0	89.4	11.1
ロイシン	75	85.0	64.3	93.7	7.3
リジン	75	62.7	31.3	84.8	19.0
メチオニン	75	82.9	53.2	98.4	10.0
フェニルアラニン	67	81.6	58.3	91.0	8.3
トレオニン	75	70.9	39.2	89.7	12.8
トリプトファン	22	84.5	60.2	92.2	10.7
バリン	75	75.9	48.8	90.6	11.5

表 7. トウモロコシ DDGS 中の標準化された回腸の可消化アミノ酸含量 (Zhu ら、2017 から改編)

変数	n	平均	最小値	最大値	標準偏差(%)
アルギニン	75	0.96	0.47	1.48	21.1
シスチン	67	0.37	0.22	0.69	22.0
ヒスチジン	67	0.54	0.29	0.83	19.2
イソロイシン	75	0.77	0.49	1.38	23.1
ロイシン	75	2.67	1.90	4.24	15.4
リジン	75	0.51	0.16	0.84	31.6
メチオニン	75	0.42	0.22	0.71	21.7
フェニルアラニン	67	1.05	0.70	1.63	17.9
トレオニン	75	0.71	0.36	1.10	20.1
トリプトファン	22	0.18	0.08	0.26	26.8
バリン	75	1.02	0.60	1.64	20.6

表 8. DDGS 中の標準化された回腸の可消化アミノ酸含量の家禽における予測式 (Zhu ら、2017 から改編)

アミノ酸%	予測式 <sup>1</sup>	R <sup>2</sup>	RMSE	Prediction Error	Prediction Bias
アルギニン	$y = -0.20 + 0.96x$	0.95	0.13	0.19	0.31
シスチン	$y = -0.07 + 0.88x$	0.87	0.09	0.09	0.29
ヒスチジン	$y = -0.17 + 1.00x$	0.91	0.08	0.10	0.46
イソロイシン	$y = -0.01 + 0.77x$	0.94	0.12	0.20	0.55
ロイシン	$y = -0.60 + 1.04x$	0.93	0.36	1.48	2.57
リジン	$y = -0.22 + 0.91x$	0.87	0.16	0.25	0.25
メチオニン	$y = -0.12 + 1.05x$	0.90	0.08	0.06	0.08
フェニルアラニン	$y = -0.15 + 0.93x$	0.99	0.06	0.22	> 0.001
トレオニン	$y = -0.17 + 0.88x$	0.84	0.24	0.23	0.73
トリプトファン	$y = -0.03 + 1.00x$	0.99	0.01	> 0.001	0.01
バリン	$y = -0.19 + 0.90x$	0.93	0.15	0.40	0.82

1 y: SIDアミノ酸含量、x: DDGS中のアミノ酸含量

表 9. DDGS の家禽における標準化された回腸の可消化アミノ酸含量、実測値と予測値の比較 (Zhu ら、2017 から改編)

アミノ酸%	観測された平均値	予測された平均値	切片	標準誤差 (SE)	P値
アルギニン	0.97	0.97	0.01	0.02	0.75
シスチン	0.38	0.37	0.00	0.02	0.98
ヒスチジン	0.54	0.53	0.01	0.02	0.59
イソロイシン	0.79	0.79	0.02	0.02	0.50
ロイシン	2.58	2.55	0.06	0.08	0.46
リジン	0.50	0.50	0.01	0.02	0.69
メチオニン	0.42	0.42	0.01	0.01	0.54
フェニルアラニン	1.09	1.08	0.03	0.03	0.35
トレオニン	0.71	0.71	0.01	0.03	0.84
トリプトファン	0.18	0.18	0.00	0.00	0.30
バリン	1.03	1.02	0.03	0.04	0.45

表 10. ブロイラー雛および盲腸を切除した雄鶏による分析に基づく標準化された回腸の可消化アミノ酸含量の予測式 (Zhu ら、2017 から改編)

アミノ酸	雛による分析			雄鶏による分析		
	予測式 <sup>1</sup>	R <sup>2</sup>	RMSE	予測式 <sup>1</sup>	R <sup>2</sup>	RMSE
アルギニン	$y = -0.16 + 0.89x$	0.90	0.15	$y = -0.09 + 0.95x$	0.99	0.03
シスチン	$y = -0.05 + 0.82x$	0.79	0.10	$y = -0.08 + 0.98x$	0.97	0.02
ヒスチジン	$y = -0.24 + 1.06x$	0.88	0.08	$y = -0.08 + 0.95x$	0.99	0.04
イソロイシン	$y = -0.03 + 0.71x$	0.90	0.13	$y = -0.11 + 0.95x$	0.99	0.04
ロイシン	$y = -0.79 + 1.08x$	0.87	0.37	$y = -0.12 + 0.94x$	0.98	0.09
リジン	$y = -0.24 + 0.90x$	0.73	0.21	$y = -0.20 + 0.97x$	0.99	0.05
メチオニン	$y = -0.16 + 1.12x$	0.81	0.10	$y = -0.05 + 0.97x$	0.99	0.01
フェニルアラニン	$y = -0.19 + 0.95x$	0.76	0.27	$y = -0.13 + 0.98x$	0.98	0.03
トレオニン	$y = -0.14 + 0.82x$	0.82	0.13	$y = -0.15 + 0.94x$	0.99	0.04
トリプトファン	$y = -0.08 + 1.13x$	0.99	0.01	$y = -0.01 + 0.92x$	0.98	0.01
バリン	$y = -0.17 + 0.86x$	0.86	0.16	$y = -0.13 + 0.92x$	0.98	0.06

1 y : SIDアミノ酸含量、x : DDGS中のアミノ酸含量

### 有効リンと可消化リン

DDGSは、穀物やその他の穀物副産物と比べて、家禽が利用できるリンを多く含んでいる。Tahir ら(2012)は、トウモロコシ、大豆粕、パンくず、小麦、ホイトミドリングス、ナタネ粕、ホイトショーツおよびトウモロコシ DDGS の複数試料の分析を行い、トウモロコシ DDGS は他の飼料原料に比べてフィチン態リンが低く、非フィチン態リンは高いと報告している。89 試料のトウモロコシ DDGS の全リンとフィチン態リン含量は平均で0.96%および0.26% (いずれも乾物)で、NRC(1994)の値の 124 および 72% だった。これは、NRC(1994)による値を用いると、全リン含量が過小評価され、フィチン態リンと有効リン含量が過大評価されることを示している。この報告では、DDGS 中のフィチン態リン含量はカルシウム含量と正の相関を示し、NDF、ADF および粗脂肪含量とは負の相関を示すが、フィチン態リン含量を推定する予測式の精度は低かった(R<sup>2</sup> = 0.37)。このため、現在のところ、家禽用 DDGS の正確なリン消化率または有効率の予測式は開発されていない。

Mutucumarana ら(2014)による最近の研究では、トウモロコシ DDGS の真の可消化リン含量は 0.59%であり、これは全リンの約 73%に相当すると報告している(表 11)。ただし、Mutucumarana (2014)らによる評価で用い

た飼料ではカルシウムとリンが不足しており、飼料中のカルシウム含量が要求量を下回る場合、フィチン態リンの利用率が高まり(Mohammed ら、1991; Tamin and Angel、2003)、リンが不足すると、リンが充足している場合に比べて腸内におけるフィターゼ活性が大幅に増加する(Davies ら、1970)ため、リンの消化率が過大評価されている可能性がある。表 11 に示した結果は、すべての原料の可消化リン含量が非フィチン態リン含量より高く、各飼料原料の可消化リン含量を推定するために非フィチン態リン含量を因子とすることは適当ではないこと、家禽が非フィチン態リンの一部を使用できることを示している。

家禽におけるフィチン態リンの利用能には、カルシウム、リン、ビタミン D<sub>3</sub> および粗繊維含量だけでなく、飼料へのフィターゼ添加、溶解度、飼料の加工形態、家禽のステージによって異なる(Ravidran ら、1995; Angel ら、2002)。Martinez-Amezcuca ら(2006)は、DDGS のリン利用率を改善するためのブロイラー飼料への OptiPhos<sup>®</sup>フィターゼとクエン酸添加の効果を評価するために、3 回の試験を行った。最初の試験では雛の発育成績と脛骨灰分含量を指標として傾斜比定量法により実施し、DDGS 中のリンの生物学的利用率は 67%であることを明らかにした。別の実験では、フィターゼとクエン酸の添加により DDGS からのリンの放出量が 0.04 から 0.07%

表 11. 小麦、ソルガム、大豆粕およびトウモロコシ DDGS のリン組成と消化率(Mutucumarana ら、2014 から改編)

項目 %	小麦	ソルガム	大豆粕	トウモロコシDDGS
全リン <sup>1</sup>	0.32 (0.37)	0.24 (0.30)	0.65 (0.62)	0.82 (0.72)
フィチン態リン	0.21	0.18	0.43	0.38
非フィチン態リン <sup>1</sup>	0.11 (0.13)	0.06	0.22 (0.22)	0.44 (0.39)
真の可消化リン	0.15	0.08	0.52	0.59
全リンに対する割合				
フィチン態リン	66	77	67	47
非フィチン態リン	35	23	33	53
真の可消化リン	46	33	80	73

<sup>1</sup> NRC (1994)

に高まることを示している。フィターゼとクエン酸の添加は、DDGS 中のリンの生物学的利用率を 62 から 72% に高めた。Wamsley ら(2013)は、彼らが評価した DDGS におけるリンの生物学的利用率は 66~68%であったとしており、Martinez-Amezcu ら(2006)の報告と一致している。したがって、家禽におけるリンの消化率と生物学的利用率を推定する正確な予測式が開発されるまでは、家禽においては、DDGS 中の全リンの約 66%が利用可能であると考えるのが妥当である。

## ブロイラーへの低脂肪 DDGS の給与

### 発育成績と屠体特性

2010 年以降、ブロイラーに対して DDGS を様々な割合で配合した飼料を給与した場合の発育成績部関する報告が 17 報公表されている(表 12)。

Loar ら(2010)は、DDGS を、前期用飼料(0~14 日)では 0 または 8%、中期用飼料(14~28 日)では 0、7.5、15、22.5 または 30%配合した場合の影響を評価している。飼料効率と斃死率には DDGS 配合による影響はなかったが、DDGS の配合量が 15%以上の場合は増体量が低下した。しかし、Shim ら(2011)は、家禽油脂を補足のエネルギー源として DDGS を 0、8、16 または 24%配合し、結晶アミノ酸により可消化アミノ酸量をそろえた飼料を給与した場合に、前期終了時(18 日齢)における増体量は対照飼料に比べて改善され、全期間(42 日間)の増体量および飼料効率は DDGS の配合量の違いに関わらず類似していた。また、DDGS を 24%配合した飼料における腹腔内脂肪、胸肉量および枝肉の品質にも影響はなかった。これらの結果は、DDGS を配合したブロイラー用飼料

が、可消化アミノ酸に基づいて設計されている場合には、発育成績や屠体特性、鶏肉の品質に影響を及ぼすことなく、最大 24%まで配合が可能であることを示している。

Guney ら(2013)は、様々な粗脂肪含量の DDGS を 0、10 または 20%配合した飼料を 18 日齢まで給与しても、増体量、飼料摂取量および飼料効率には悪影響が見られなかったと報告している(表 13)。この試験では、粗脂肪含量が最も低い DDGS を 10%配合した飼料では、飼料効率が改善されている。

Kim ら(2016)は、粗脂肪含量が 7.4%の低脂肪 DDGS を最大 30%まで配合した飼料が後期のブロイラーの発育成績と屠体特性に及ぼす影響について、2 期のフェーズ(後期 1; 28~42 日齢、表 14 および後期 2; 43~56 日齢、表 15)で調査した。後期 1 では、配合量が 30%では発育成績が低下したが、それ以下の配合量の場合には DDGS 配合量の違いによる増体量、飼料摂取量および飼料効率への影響はなかった。しかし、いずれの配合割合の場合でも、屠体重量、屠体の脂肪量、ささみ、浅胸筋、全胸肉重量には差がなかった。後期 2 の成績も同様であった。Kim ら(2016)は、低脂肪 DDGS を最大 24%まで配合した飼料を給与しても、発育成績と屠体特性には影響がなかったと報告している。これら、複数の公表文献の結果は、増体量や枝肉の形質に影響を及ぼすことなく、ブロイラーの前期および中期では 20%、後期では 24%まで低脂肪 DDGS を配合することが可能であること示唆している。ただし、許容できる発育成績や枝肉特性を得るためには、低脂肪 DDGS の AMEn 価と可消化アミノ酸含量を正確に把握して、配合設計を行うことが肝要である。

表 12. 様々な DDGS 配合割合が、ブロイラーの発育成績に及ぼす反応の要約

DDGS配合割合	飼育期間	DDGSの粗脂肪	飼育効果	引用文献
後期1：0、8、18、24、30% 後期2：0、18、16、24%	後期1：28～42日齢 後期2：43～56日齢	7.4%	DDGSを24%配合した飼料を後期に給与しても、増体量、飼料摂取量、飼料効率に影響なし	Kim et al., 2016
前期：0、2.7、5.4、8.1% 後期：0、2、4、6%	前期：0～28日齢 後期：29～42日齢	不明	大豆粕と置換して4～5.4%のDDGSを配合すると増体量が高まり、飼料費が低減	Gacche et al., 2016
0、6、12%	前期：0～10日齢 中期：11～21日齢 後期：22～42日齢	6.5%、5.4%	全期間の増体量、飼料摂取量、飼料要求率には、DDGSの粗脂肪含量および配合量の違いによる影響なし	Cortes-Cuevas et al., 2015
0、5、10%	0～35日齢	10.5%	DDGSを10%配合した飼料を35日間給与しても、増体量、飼料摂取量、飼料要求率に影響なし	Hassan and Al Aqil, 2015
0、15%	前期：0～21日齢 中期：22～42日齢	不明	DDGSを15%配合しても、21日齢、42日齢の増体量、飼料摂取量、飼料効率に影響なし	Min et al., 2015
0、5、10、15%	前期：0～21日齢	8.2%	DDGS 15%配合飼料では、0および5%配合飼料に比べて7および14日齢増体量が低下し、0および10%配合飼料に比べて21日齢の増体量が低下した、FCRは、他の封入率と比較して15%配合飼料の飼料要求率は14日齢で劣ったが、21日齢では差がなかった	Campasino et al., 2015
5、7、9%または8、10、12%	前期：0～13日齢 中期：14～26日齢 後期：27～33日齢	10.5、7.8、5.4%	DDGSの粗脂肪含量の違いによる発育成績への影響はない。配合量が5、7、9%の場合、8、10、12%配合に比べて増体量、飼料摂取量が増加し、飼料要求率が改善	Dozier and Hess, 2015
前期：0、12% 後期：0、18%	前期：0～21日齢 後期：21～42日齢	11.0%	増体量、飼料摂取量、飼料効率は、前期で12%、後期で18%配合した場合と等エネルギー、等CP飼料と比べて差がない	Swiatkiewicz et al., 2014
前期：10% 中期：20% 後期：20%	前期：0～17日齢 中期：17～35日齢 後期：35～49日齢	11% 4%	全期間の飼料摂取量は低脂肪DDGSを配合した飼料で増加傾向を示したが、増体量、飼料効率には影響なし	Kubas and Firman, 2014
7%	前期：1～21日齢 後期：22～48日齢	不明	アミノ酸含量をNRC (1994) の値に基づいて計算するのに比べて、NIRSを用いて計算することで増体量が改善された。また、NIRDにより可消化アミノ酸含量を計算すると前期の飼料効率が改善された	Soto et al., 2013
0、10、20%	前期：0～18日齢	12.5、7.5、6.7%	DDGSの粗脂肪含量に関わらず、DDGSを20%配合しても体重、飼料摂取量、飼料効率には影響なし	Guney et al., 2013
1、10、20%	前期：7～21日齢	不明	DDGSの配合量の増加に伴い増体量が7～14日齢では直線的に、15～21日齢では二次曲線的に減少したが、いずれの時期においても飼料摂取量と飼料効率には影響なし	Perez et al., 2011
0、10、20%	前期：0～21日齢 後期：22～42日齢	不明	DDGS配合飼料を給与すると、前期では飼料摂取量は増加し、増体量と飼料効率が低下、後期では増体量、飼料摂取量、飼料効率が低下。前期ではDDGSの配合量による発育成績への影響はなかったが、後期では10%配合した飼料の増体量、飼料効率が増加	Liu et al., 2011

表 12. 様々な DDGS 配合割合が、ブロイラーの発育成績に及ぼす反応の要約(続)

DDGS配合割合	飼育期間	DDGSの粗脂肪	飼育効果	引用文献
前期：0、8% 中期：0、7.5、15、 22.5、30%	前期：0～14日齢 中期：14～28日齢	不明	DDGSを前期用飼料に8%、中期用飼料に7.5～15%配合した場合に満足できる発育成績が得られる	Loar et al., 2010
0、5、10%	0～42日齢	12.6%	増体量、飼料摂取量、飼料効率に影響なし。エクストルード処理はアミノ酸消化率を改善	Oryschak et al., 2010
0、10、20、30、 40、50%	前期：0～14日齢 中期：14～35日齢 後期：35～49日齢	不明	飼料が可消化アミノ酸ベースで設計されている場合には49日齢までの飼料のDDGSを最大20%配合が可能、DDGSを30%以上配合すると発育成績が低下	Wang et al., 2008
0、15、30%	前期：0～14日齢 中期：15～35日齢 後期：36～42日齢	9.4%	飼料が可消化アミノ酸ベースで設計されている場合にはDDGAを15%配合した飼料を継続して給与しても増体量、飼料摂取量、飼料効率には影響なし、DDGSを30%以上配合すると発育成績が低下	Wang et al., 2007

表 13. 0～18日齢のブロイラーの発育成績に対する0、10、または20%の粗脂肪含量が異なる DDGS 給与の影響 (Guney ら、2013 から改編)

	対照	粗脂肪12.5%DDGS	粗脂肪7.5%DDGS	粗脂肪6.7%DDGS			
飼料割合	0%	10%	20%	10%	20%	10%	20%
18日齢体重 g	596	666	615	607	615	650	598
0～18日齢の飼料摂取量 g/日	53.6	56.0	56.8	54.2	55.9	53.3	56.7
飼料要求率	1.61	1.51	1.66	1.61	1.63	1.47	1.70

a - c 異符号間に有意差あり (p < 0.05).

ブロイラーに対して、DDGS を配合した飼料を給与した場合の全体的な影響をより詳細に知るために、19 報の公表文献 (Martinez-Amezcuca ら、2006; Wang ら、2007; Wang ら、2008; Loar ら、2010; Olukosi ら、2010; Oryschak ら、2010; Liu ら、2011; Min ら、2011; Barekatin ら、2013a、b、c; Guney ら、2013; Wamsley ら、2013; Swiatkiewicz ら、2014; Campasino ら、2015; Cortes-Cuevas ら、2015; Hassan and Al Aqil, 2015; Min ら、2015; Kim ら、2016) からのデータについてメタ分析を行った (表 16～18)。

DDGS を配合した飼料を給与した 70 のデータでは、増体量には影響はなく、飼料摂取量が 3% 高まり、飼料効率が 1.5% 高まった (表 16)。全データの 73% で、体重の増加または変化は見られず、85% で飼料摂取量の増加

率には変化がないか高まった。91% で飼料効率に変化がないか改善された (表 17)。前期に DDGS を配合した飼料を給与すると、後期あるいは全期間に DDGS を配合した飼料を給与した場合に比べて、増体量と飼料効率が改善され (表 18)。DDGS の配合割合を高めると、飼料効率が直線的に改善され、20% 以上の DDGS を配合した飼料では、飼料効率が 5.5% 改善されたが、配合割合が 20% 未満の飼料での影響は最小限だった。これらの結果は、DDGS がブロイラーの前期用、中期用、後期用の各飼料に、最大 20% まで配合することが可能で、増体量、飼料摂取量および飼料効率への影響を最小限に抑えることが出来ることを示唆している。

表 14. 28～42 日齢のブロイラーに粗脂肪含量が 7.4%の DDGS を配合した場合の発育成績と枝肉特性(Kim ら、2016 から改編)

	DDGS配合量					
	0%	6%	12%	18%	24%	30%
増体量 kg	1.60 <sup>a</sup>	1.64 <sup>a</sup>	1.57 <sup>a</sup>	1.56 <sup>a</sup>	1.56 <sup>a</sup>	1.42 <sup>b</sup>
飼料摂取量 kg	3.01	3.06	3.05	2.97	2.98	3.00
飼料要求率	1.84 <sup>b</sup>	1.87 <sup>b</sup>	1.90 <sup>b</sup>	1.89 <sup>b</sup>	1.90 <sup>b</sup>	2.03 <sup>a</sup>
43日齢の体重 kg	2.63	2.70	2.62	2.72	2.58	2.60
屠体重量 kg	1.92	1.97	1.91	1.98	1.87	1.87
歩留 %	73.5 <sup>a</sup>	73.2 <sup>ab</sup>	73.5 <sup>a</sup>	72.9 <sup>abc</sup>	72.8 <sup>bc</sup>	72.3 <sup>c</sup>
脂肪 g	27	28	28	28	25	29
胸肉 g	461	481	471	483	458	461
ささみ g	98	100	98	98	96	94
全胸肉 g	559	581	569	581	553	554

a - c 異符号間に有意差あり (p < 0.05).

表 15. 43～56 日齢のブロイラーに粗脂肪含量が 7.4%の DDGS を配合した場合の発育成績と枝肉特性(Kim ら、2016 から改編)

	DDGS配合量			
	0%	8%	16%	24%
増体量 kg	1.45	1.47	1.42	1.44
飼料摂取量 kg	3.00	3.14	3.02	3.06
飼料要求率	2.08	2.09	2.07	2.08
57日齢の体重 kg	4.61	4.67	4.60	4.66
屠体重量 kg	3.51	3.47	3.49	3.52
歩留 %	75.6	75.2	75.7	76.1
脂肪 g	79	77	78	80
胸肉 g	976	964	972	988
ささみ g	179	178	180	182
全胸肉 g	1,155	1,142	1,152	1,170

表 16. ブロイラーの発育成績に対する DDGS 給与の影響(2010 年以降に公表された 19 報の要約)

項目	DDGS飼料と対照飼料の差 %					
	増体量	飼料摂取量	飼料要求率	開始時体重 g	終了時体重 g	飼育期間
データ数	70	70	70	67	67	70
試験雛	16	16	16	15	15	16
平均	2.7	3.0**	1.5**	345	1,812	26
最小値	-23.4	-6.5	-21.2	25	302	5
最大値	76.5	50.8	25.1	3,200	4,660	49

\*\* DDGSを配合していない飼料に対して有意差あり (p < 0.05).

表 17. 対照飼料と比較した、DDGS 配合飼料の給与によるブロイラーの発育成績の要約(2010 年以降に公表された 19 報の要約)

項目	N	DDGS配合による反応		
		改善	低下	変化なし
増体量	70	15	19	36
飼料摂取量	67	22	10	35
飼料効率	70	17	6	47

表 18. ブロイラーの発育成績に対するトウモロコシ DDGS の給与期間と配合割合の影響(2010 年以降に公表された 19 報の要約)<sup>1</sup>

項目	フェーズ			SE	DDGS配合割合 %			SE
	前期	後期	全期間		< 10	10 to 20	> 20	
データ数	26	14	30	-	21	34	15	-
試験数	8	3	7	-	9	14	7	-
増体量 <sup>2</sup>	0.56	-5.42	-5.57	2.70	-0.89	-2.57	-6.97	2.85
飼料摂取量	0.14	-3.31	-0.25	1.73	1.10	-1.64	-2.87	1.95
飼料効率 <sup>2</sup>	-0.05	1.59	4.17	1.40	-0.38	0.54	5.54	1.55

<sup>1</sup> 最小二乗法による平均値。前期は0~21日齢、後期は21~42または49日齢。0~42日齢または0~49日齢給与した場合には全期間の期間発育成績を用いた。

<sup>2</sup> すべてのDDGS配合割合のデータでは、増体量が0.34%低下し、飼料要求率が0.32%高まった。

## 屠体と鶏肉の品質

多くの報告は、DDGS をブロイラー飼料に配合しても、屠体特性や鶏肉の品質に否定的な結果を示すことがないことで一致している。Corzoら(2009)は、DDGSを0または8%配合した飼料をブロイラーに給与し、鶏肉の色調、pH、調理ロス、剪断強度には影響はないと報告している。さらに、鶏肉の硬さにも差がなかったが、対照飼料を給与した鶏肉に比べて、香りと全体的な受容性がわずかに低下した。しかし、鶏肉の消費者は、いずれの飼料を給与したブロイラーの胸肉についても「適度に好ましい」としており、「適度に好ましい」または「非常に好ましい」と回答した割合には差がなかった。DDGSを0または8%配合した飼料による胸肉の官能特性に差はなかったが、DDGSを配合した飼料を給与したブロイラーの鶏肉は、リノール酸とPUFA(多価不飽和脂肪酸)含量が増加したため、鶏肉を長期間保管すると酸化を受けやすくなる可能性があった。全体として、DDGSを8%配合した飼料を給与しても、胸肉と大腿肉の品質には影響がないことが示されている。Schillingら(2010)は、ブロイラーに対して、DDGSを0、6、12、18または24%配合した飼料を

42日間給与し、DDGSの配合割合に関わらず、高品質の胸肉が生産されることを報告している。腿肉の品質は、DDGSを0~12%配合した飼料では類似していたが、配合量を高めると、酸化の影響を受けやすい腿肉が生産された。

## 酸化ストレスと免疫機能

複数の畜種で、DDGSの給与が酸化ストレスを緩和し、免疫機能と健康状態を改善するという証拠が増えている。トウモロコシ DDGSには、強力な抗酸化剤として知られているトコフェロール、トコリエノール、キサントフィルが比較的多く含まれている(詳細は6章を参照されたい)。さらに、トウモロコシ DDGSに約10%含まれている残留酵母と酵母の細胞壁成分(マンナン、 $\alpha$ -グルカン、ヌクレオチド)は、家畜の健康状態に好影響を与えることが示されている(Shurson, 2017年)。

Minら(2015)は、免疫抑制チャレンジ(デキサメタゾン)の下でブロイラーに対してDDGSを0または15%配合した飼料を6週間給与した場合の影響を調査した。免疫チャレンジを受けたブロイラーは増体量と飼料効率が低下したが、発育成績には影響がなかった。興味深いことに、

DDGS を配合した飼料を給与すると、血清の総抗酸化活性と血清および肝臓の総スーパーオキシドジスムターゼ活性が低下し、21 日齢のブロイラーの血清 IgA、IgG、およびマロンジアルデヒドが増加した。DDGS を給与した雛は、対照飼料を給与した雛に比べて IL-4 および IL-6 をコードする mRNA の相対量が多く、免疫チャレンジは、グルタチオンペルオキシダーゼ、IL-6、および IL-10 の発現を減少させた。これらの結果は、免疫チャレンジを受けたブロイラーに DDGS を給与すると、免疫機能を改善できることを示唆している。

## 産卵鶏への低脂肪 DDGS の給与

2010 年以降、産卵鶏に DDGS を給与した場合の産卵成績と鶏卵品質に及ぼす影響に関する報告が 11 報公表されている(表 19)。これら 11 報のうち、5 報が低脂肪 DDGS を用いた給与試験である。

産卵鶏用飼料におけるトウモロコシ DDGS の利用に関しては、最近、El-Hack ら(2015)が総説を公表している。彼らは、以前には、産卵鶏用飼料への DDGS の最大配合量は 10~15%が推奨されていたが、いくつかの研究では、エネルギー価と、可消化リジンおよびメチオニン含量を適切に設計した場合、配合量をさらに高めても許容できる産卵成績と鶏卵品質が得られることを示している。さらに、Masa' deh(2011)は、産卵鶏用飼料に DDGS を 30%配合すると、DDGS を配合しない飼料と比べて、飼料費がフェーズ I およびフェーズ II で 31.15 および 28.58 ドル/トン節約できることを示した。

トウモロコシ DDGS は、産卵鶏にとって、エネルギー、可消化アミノ酸、利用可能なリンとキサントフィルの優れた供給源となる。Swiatkiewicz ら(2014a)は、DDGS を最大 20%配合した飼料を産卵鶏に給与しても、骨の性状には影響を与えないことを明らかにしている。さらに、多くの報告が、DDGS の配合量を高めると、トウモロコシ DDGS が含むキサントフィル(30~56 mg/kg; Trupia ら、2016)により卵黄の色調が高まることを示している。

産卵鶏用飼料に DDGS を配合した場合の全体的な影

響を知るために、2010 年以降に公表された 17 報 (Świątkiewicz and Koreleski, 2006; Shalash ら、2010; Wu-Haan ら、2010; Ghazalah ら、2011; Masa' deh ら、2011; Tangendjaja and Wina, 2011; Koksall ら、2012; Sun ら、2012; Cho ら、2013; Deniz ら、2013a; Deniz ら、2013b; Jiang ら、2013; Świątkiewicz ら、2013; Purdum ら、2014; Cortes-Cuevas ら、2015; Hassan and Al Aquil, 2015; Trupia ら、2016)におけるデータを用いたメタ分析を実施した。

表 20 に示したように、DDGS 配合飼料を給与した産卵鶏は、対照飼料に比べて、体重が平均で約 16%減少したが、飼料摂取量、飼料効率、産卵率、卵重およびハウユニットへの影響は少なかった(対照飼料と比べて-0.2~2.7%の変化)。しかし、卵殻厚と卵黄の色調は、DDGS 配合飼料の給与による影響を受けた(4.1 および 18.1%改善)。これらの 17 報において、DDGS の給与により、体重変化に影響がなかった、あるいは、影響を受けた割合は 78%であり、同様に、飼料摂取量では 78%、飼料効率では 65%、産卵率では 70%、卵重では 75%、卵殻厚では 100%、卵黄の色調では 98%、ハウユニットでは 89%であった(表 21)。

DDGS を配合した飼料を 16 週間以上給与した産卵鶏の体重変化と飼料摂取量は、給与期間が 16 週間以下の場合と同様であったが、給与期間が 16 週間以下であった場合には飼料効率が有意に優れた( $p < 0.01$ ) (表 22)。DDGS 配合飼料の給与期間は、産卵率、卵殻厚、卵黄の色調に影響を与えなかったが、給与期間が 16 週以下である場合には、DDGS を給与した産卵鶏の体重はやや大きく( $p < 0.01$ )、卵重が比較的少なく(4%)、ハウユニットがやや優れた( $p < 0.03$ )。DDGS の配合割合を増加させると、体重変化を増加させる傾向があり( $p < 0.11$ )、飼料摂取量が増加し( $p < 0.01$ )、飼料効率が高まった( $p < 0.01$ )。さらに、DDGS 配合量の増加は、産卵率と卵重を減少させたが( $p < 0.01$ )、ハウユニットは改善された( $p < 0.01$ )。また、DDGS 配合割合の増加は卵黄の色調を高め、卵殻厚が減少する傾向を示した( $p < 0.11$ )。

表 19. DDGS の給与が産卵成績と鶏卵品質に及ぼす影響

DDGS配合割合	試験期間	DDGSの粗脂肪	成績	引用文献
0、10、20%	21～26週齢	不明	産卵量、飼料摂取量、卵重、体重変化にはDDGSによる影響なし。DDGS20%配合飼料では毎日のアンモニア排泄量が24%、硫化水素排泄量が58%削減	Wu-Haan et al., 2010
0、5、10、15、20、25%	24～46週齢 (フェーズ1) 47～76週齢 (フェーズ2)	10.3%	飼料摂取量、産卵率、ハウユニット、卵比重、体重変化にはDDGS配合による影響なし。DDGSの配合量が高めるとフェーズ1では卵量が低下したが、フェーズ2では差がなかった。DDGSの配合量の増加に伴い卵黄色調が高まり、窒素とリンの排泄量が減少	Masa'deh et al., 2011
0、4、8、12、16%	40～50週齢	9.7%	DDGS配合飼料では、飼料摂取日量がわずかに低下したが、産卵率、飼料要求率、卵量、産卵量には影響なし	Tangendjaja and Wina, 2011
0、17、35、50%	54週齢の鶏に24週間給与	10.7%	DDGS配合飼料に適切な可消化アミノ酸が含まれている限り、最大50%まで配合しても、産卵率、飼料摂取量、飼料要求率、卵量、産卵量への影響なし。DDGS配合飼料の給与で、貯蔵中の鶏卵品質が改善され、卵黄色調が高まった。DDGSを50%配合した飼料ではハウユニットが最も高かったが、卵黄と卵白の比率には差がなかった。	Sun et al., 2012
10%		12.2%	産卵率、飼料摂取量、飼料要求率、開始時および最終時体重、卵量、産卵量、卵殻厚、卵殻強度、ハウユニット、破卵率、正常卵数への影響なし	Deniz et al., 2013a
0、5、10、20%	28～38週齢	11.2%	DDGS配合量が15%までの飼料では、産卵率、飼料摂取量、飼料要求率、卵重さ、産卵量、破卵率、正常卵数への影響はなかったが、20%配合飼料では産卵成績と卵重が低下。DDGSの配合量の増加に伴う卵殻厚と卵殻強度、ハウユニットには影響はなかったが、卵黄色調が高まった	Deniz et al., 2013b
0、10、20%	40～63週齢	8.3%	産卵率、飼料摂取量、卵量、産卵量、卵黄の色調、卵殻厚、飼料効率にはDDGS配合割合の増加による影響なし	Jiang et al., 2013
20%	20～33週齢	10.3、7.3、5.2%	DDGSの粗脂肪含量は、産卵率、飼料摂取量、飼料要求率、卵量、産卵量、体重変化に影響なし	Purdum et al., 2014
20%	26～39週齢 (フェーズ1) 40～55週齢 (フェーズ2)	11%	産卵率、飼料摂取量、飼料要求率、卵量、産卵量、卵質、卵殻質には飼料およびフェーズの影響なし。DDGS配合飼料では卵黄の高まる	Swiatkiewicz et al., 2014b
0、6、12%	66～77週齢	6.5、5.4%	産卵率、飼料摂取量、飼料要求率、卵重、産卵量に影響なし。DDGS配合飼料では卵黄の色調が高まる	Cortes-Cuevas et al., 2015
0、5、10、20%	30～42週齢	9%	産卵率、卵重、産卵量、飼料摂取量、飼料要求率、単比重、ハウユニット、卵黄色調には影響なし。DDGS20%配合飼料では他の飼料より体重が減少	Hassan and Al Aqil, 2015

表 20. 産卵鶏へのトウモロコシ DDGS の給与が産卵成績に及ぼす影響(2010 年以降公表された 19 報の要約)

項目	報告者数	試験数	DDGS飼料と対照飼料の差 %		
			平均	最少	最大
体重変化	36	8	-16.0**	-100.0	183.9
飼料摂取日量	65	16	-0.2*	-11.7	6.9
飼料効率	51	13	2.7**	-4.0	26.1
産卵率	57	15	-1.7**	-28.7	2.6
卵重	69	17	-0.5**	-5.5	3.7
卵殻厚	32	9	4.1**	-2.8	8.3
卵黄色調	41	11	18.1**	-2.3	58.2
ハウユニット	35	9	-0.1**	-2.4	6.0

\*\* DDGSを含まない飼料との間で有意差あり (p < 0.05)

\* DDGSを含まない飼料との間で有意差あり (p < 0.10)

表 21. 産卵鶏へのトウモロコシ DDGS 飼料の給与が産卵成績に及ぼす影響(2010 年以降公表された 19 報の要約)

項目	N	DDGS配合による反応		
		改善	低下	変化なし
体重変化	36	1	8	27
飼料摂取日量	65	2	14	49
飼料効率	51	18	2	31
産卵率	57	5	17	35
卵重	69	4	17	48
卵殻厚	32	6	0	26
卵黄色調	41	33	1	7
ハウユニット	35	0	4	31

表 22. 産卵鶏へのトウモロコシ DDGS の給与期間と配合割合が産卵成績および鶏卵品質に及ぼす影響(2010 年以降公表された 19 報の要約)

	試験期間		標準偏差	DDGS配合割合 %			標準偏差
	16週以下	16週以上		< 10	10 to 20	> 20	
データ数	25	44		16	30	23	
試験数	6	11		9	13	12	
体重変化	-28.8	-25.6	17.7	-17.2	-17.5	-46.9	4.9
飼料摂取日量	0.03	1.0	0.7	-0.4	0.6	1.4	0.3
飼料効率	3.6	13.1	2.9	2.2	7.6	15.1	1.0
産卵率	-4.3	-6.6	1.9	-2.2	-5.6	-8.4	0.8
卵重	-2.3	-4.3	0.8	-1.3	-3.5	-5.0	0.3
卵殻厚	2.0	-0.8	2.0	1.1	1.0	-0.2	0.6
卵黄色調	22.3	23.1	5.2	12.5	16.3	39.3	1.9
ハウユニット	1.5	0.1	0.6	-0.1	1.3	1.2	0.2

表 23. 24 週間の給与期間中における産卵鶏への DDGS 配合割合が産卵成績に及ぼす影響(Sun ら。2012 から改編)

	0% DDGS	17% DDGS	35% DDGS	50%DDGS
産卵率 %	87 <sup>a</sup>	83 <sup>b</sup>	84 <sup>a,b</sup>	62 <sup>c</sup>
飼料摂取量 g/日	104.4 <sup>a</sup>	104.2 <sup>a</sup>	106.0 <sup>a</sup>	92.2 <sup>b</sup>
飼料効率	531.6 <sup>a</sup>	487.6 <sup>b</sup>	501.9 <sup>b</sup>	431.8 <sup>c</sup>
卵重 g	64.7 <sup>a</sup>	63.3 <sup>bc</sup>	64.0 <sup>ab</sup>	62.6 <sup>c</sup>
産卵日量 g/日	56.0 <sup>a</sup>	51.8 <sup>b</sup>	53.6 <sup>ab</sup>	39.1 <sup>c</sup>
体重変化 kg	0.02	0.00	0.00	0.05

a - c 異符号間に有意差あり (p < 0.05).

表 24. DDG 配合割合が異なる飼料を給与した場合の鶏卵の品質と組成に及ぼす影響(Sun ら。2012 から改編)

測定値	0% DDGS	17% DDGS	35% DDGS	50%DDGS
卵黄色調 <sup>1</sup>	5.5 <sup>d</sup>	7.0 <sup>c</sup>	7.9 <sup>b</sup>	8.7 <sup>a</sup>
卵黄の割合 %	26.5	26.8	26.8	26.5
卵白の割合 %	63.7	63.4	63.4	63.3
卵殻の割合 %	9.8 <sup>b</sup>	9.8 <sup>a</sup>	9.9 <sup>b</sup>	10.1 <sup>a</sup>
保存後のハウユニット <sup>2</sup>				
0週	80.5 <sup>b</sup>	81.8 <sup>b</sup>	82.3 <sup>b</sup>	85.3 <sup>a</sup>
1週	76.4 <sup>b</sup>	78.0 <sup>b</sup>	78.3 <sup>b</sup>	82.3 <sup>a</sup>
2週	73.7 <sup>b</sup>	75.6 <sup>b</sup>	76.0 <sup>b</sup>	79.9 <sup>a</sup>
3週	72.4 <sup>b</sup>	73.7 <sup>b</sup>	74.3 <sup>b</sup>	78.2 <sup>a</sup>
卵殻強度 g	3,924 <sup>b</sup>	3,995 <sup>b</sup>	3,877 <sup>b</sup>	4,299 <sup>a</sup>

各乾物値の a - c 異符号間に有意差あり (p < 0.05).

1 ヨークカラー・スコア：1 (明るい) ~ 10 (暗い).

2 ハウユニット：100 × log [卵白高 - 0.01 × 5.6745 × (30 × 卵重 0.37 - 100) + 1.9]

## 鶏卵の品質

表 19 で要約したように、産卵鶏用飼料における DDGS の配合割合と粗脂肪含量を評価した最近の研究の多くは、DDGS の配合割合が比較的高くても(20%以上)、鶏卵の品質への影響は最小限であることを示している。Sunら(2012)は、粗脂肪含量が10.7%のDDGSを0、17、35 または 50%配合した等エネルギー飼料を 54 週齢の産卵鶏に 24 週間給与し、産卵成績と鶏卵の品質への影響を評価した。初期の 12 週間に DDGS を 50%配合した飼料を給与した場合には、産卵率、飼料摂取量、飼料効率、卵量および産卵量が減少した(表 23)。しかし、飼料にリジンとメチオニンを添加すると、DDGS 50%配合飼料における成績の低下が大幅に改善された。

結果的に、終了前 6 週間の産卵率、卵重および飼料摂取量には飼料間の差がなかった。DDGS の配合量を

高めると、卵黄の色調とハウユニットが高まり、DDGS を 50%配合した飼料の鶏卵ではハウユニットが最も高く、DDGS 配合量が 35%以下の鶏卵より貯蔵性が長くなった(表 24)。さらに、DDGS を 50%配合した飼料では、卵殻重量(割合)と破壊強度が最も高かった。これらの結果から、DDGS を配合した飼料に十分な量の可消化アミノ酸が含まれている場合には、産卵率、飼料摂取量、飼料効率、卵重、産卵量に影響を与えることなく、最大 50%まで配合できるものと結論付けている。

Sun ら(2013)は、同じ研究から得られた鶏卵について、卵黄の成分組成に及ぼす影響を調査している。DDGS を 50%配合した飼料を給与した場合には卵黄中の粗脂肪含量がわずかに増加し、CP 含量がわずかに低下したが、配合割合がそれ以下の場合には、卵黄中の粗脂肪および CP 含量には差がなかった。鶏卵の水分含量には

DDGS の配合割合による影響はなかった。ただし、DDGS の配合割合を高めると卵黄の総 PUFA 含量が増加した。DDGS を 50%配合した飼料ではコリンおよびコレステロール含量が高まったが、試験の最終4週間では差がなかった。予想した通り、DDGS の配合量の増加に伴い、卵黄中のルテイン含量が増加した。しかし、この研究における興味深い知見は、DDGS を 50%配合した飼料を給与すると、ヒトの健康上重要な効果がある $\omega$  (オメガ)3 系脂肪酸(リノレン酸とエイコサペンタエン酸)の卵黄中含量が増加したことである。

Trupia ら(2016)は、粗脂肪含量が 13.3%の高脂肪 DDGS および粗脂肪含量が 7.4%の低脂肪 DDGS を 0、10 または 20%配合した飼料を給与した場合の産卵成績と鶏卵の品質への影響を調査し、体重変化、産卵率、飼料摂取量、飼料効率、産卵量および卵重には、飼料間で差がなかった。高脂肪 DDGS を 10%配合した飼料および低脂肪 DDGS を 20%配合した飼料では卵比重がやや低かった。DDGS を配合した飼料を給与した場合、対照飼料を給与した鶏卵に比べて、卵黄中のトコフェロール、トコリエノールおよびキサントフィル含量が高まり、卵黄の黄色味と赤色味が高まった(表 25)。

この報告で供試された高脂肪および低脂肪 DDGS の脂質組成は表 26 に示したとおりであり、飼料中に配合した DDGS 由来のトコフェロール、トコリエノールおよびキサントフィル含量が、卵黄のこれらの成分組成に影響することを示している。実際、低脂肪 DDGS を配合した飼料では卵黄中トコフェロール含量が高かったが、キサントフィル含量は高脂肪 DDGS を配合した飼料より低かった。DDGS の給与により、卵黄の脂肪酸組成はわずかに変化した。飽和脂肪酸と不飽和脂肪酸の比率は類似しており、レシチンおよびコレステロール含量には差がなかった。これらの結果は、産卵鶏用飼料に高脂肪および低脂肪 DDGS を配合すると、卵黄中でいくつかの有益な脂溶性の栄養成分が増加するが、卵黄の品質には悪影響を及ぼさないことを示している。

### バージニアマイシンの残留リスク

エタノール発酵工程中に少量の抗生物質(1~2 mg/kg)を添加することで、エタノールの収量を減らし、DDGS の品質と栄養価を低下させる微生物汚染を防いでいる。

米国のエタノール産業で使用される最も一般的な抗生物質はバージニアマイシンとペニシリンである。Paulus-Compart(2013)は、DDGS 中にバージニアマイシンとペニシリンが残留するリスクは非常に低く、仮に残留していたとしても、残留濃度は非常に低いことから、肉、乳、卵では検出できないとしている。Sun ら(2012)は、プレート法およびバイオオートグラフィー法により、DDGS を 0、17、35 および 50%配合した飼料中のバージニアマイシン残留物を測定し、すべての飼料でバージニアマイシン残留物が規制値の 0.1 mg/kgを下回っていたことを明らかにしている。これらの分析方法の検出限界は 0.05~0.1 mg/kgであった。飼料原料と鶏卵中のバージニアマイシンを検出するために FDA が承認している唯一の方法はバイオアッセイであり、この報告の妥当性には疑問がある。いずれにしても、これらの結果は、産卵鶏用飼料に DDGS を 50%配合しても、バージニアマイシンが卵黄に移行する可能性は無視できることを示唆している。

### 誘導換羽への効果

Hong ら(2007)は、換羽を誘導するための DDGS を配合し、食塩無添加の飼料について、産卵成績、鶏卵の品質、臓器重量への影響を、絶食させた場合と比較している。この報告では、産卵数が 80%を超え、平均体重が 1.08 kg の 62 週齢の白色レグホン鶏 108 羽を用いている。試験区は、対照(通常飼料)、誘導換羽飼料(DDGS + 食塩無添加)給与および絶食群を設定した。絶食群では試験開始後 18 日に産卵率が 0%となり、誘導換羽飼料給与群では 17 日後に産卵率が 0%となった。絶食群では 6 日間産卵が停止した。産卵は、誘導換羽飼料給与群では 12 日後に、絶食群では 16 日後に再開した。卵黄の品質を除いて、すべての誘導換羽処理で鶏卵の品質が改善された。肝臓、心臓および卵管の重量は、すべての誘導換羽処理で低下した。この結果は、誘導換羽飼料(DDGS+食塩無添加)の給与が、絶食処理に代わって、換羽中のアニマル・ウェルフェアへの懸念を軽減できることを示している。

Mejia ら(2010)は、絶食による誘導換羽処理中に、DDGS を 36、45 または 54g/日給与すると、同量のトウモロコシを給与した場合に比べて、換羽後(5~43 週間)の

表 25. 高脂肪および低脂肪 DDGS を 10 または 20% 配合した飼料を給与した産卵鶏の卵黄の色調調および脂質組成

測定値	対照	高脂肪DDGS 10%	高脂肪DDGS 20%	低脂肪DDGS 10%	低脂肪DDGS 20%
卵黄 L*	58.5 <sup>a</sup>	57.8 <sup>b</sup>	56.7 <sup>c</sup>	57.3 <sup>b</sup>	56.6 <sup>c</sup>
卵黄 a*	-4.3 <sup>d</sup>	-3.5 <sup>c</sup>	-2.2 <sup>a</sup>	-3.5 <sup>c</sup>	-2.7 <sup>b</sup>
脂肪酸組成 %					
C16:0	25.5	25.4	25.1	25.5	25.5
C16:1	2.71 <sup>a</sup>	2.46 <sup>b</sup>	2.08 <sup>c</sup>	2.54 <sup>ab</sup>	2.49 <sup>ab</sup>
C18:0	9.50	9.42	9.56	9.28	9.19
C18:1	45.7 <sup>a</sup>	43.5 <sup>bc</sup>	42.1 <sup>d</sup>	44.4 <sup>b</sup>	42.3 <sup>cd</sup>
C18:2	13.6 <sup>c</sup>	16.4 <sup>b</sup>	18.3 <sup>a</sup>	15.5 <sup>b</sup>	17.6 <sup>a</sup>
C18:3	0.44 <sup>c</sup>	0.45 <sup>d</sup>	0.47 <sup>c</sup>	0.45 <sup>b</sup>	0.58 <sup>a</sup>
C22:0	2.10	2.10	2.20	2.10	2.10
トコフェロールおよびトコトリエノール 脂質中 μg/g					
α-トコフェロール	173.8 <sup>b</sup>	183.5 <sup>ab</sup>	183.3 <sup>ab</sup>	209.9 <sup>ab</sup>	218.2 <sup>a</sup>
β-トコフェロール	0.58 <sup>c</sup>	0.95 <sup>b</sup>	0.96 <sup>b</sup>	0.98 <sup>b</sup>	1.34 <sup>a</sup>
γ-トコフェロール	46.0 <sup>d</sup>	57.2 <sup>cd</sup>	72.2 <sup>ab</sup>	67.0 <sup>bc</sup>	85.1 <sup>a</sup>
δ-トコフェロール	1.1 <sup>ab</sup>	1.0 <sup>ab</sup>	0.82 <sup>b</sup>	1.0 <sup>ab</sup>	1.2 <sup>a</sup>
α-トコトリエノール	2.5 <sup>c</sup>	4.0 <sup>bc</sup>	5.8 <sup>a</sup>	5.1 <sup>ab</sup>	6.3 <sup>a</sup>
γ-トコトリエノール	0.13 <sup>b</sup>	0.23 <sup>ab</sup>	0.34 <sup>a</sup>	0.26 <sup>a</sup>	0.32 <sup>a</sup>
総トコトリエノール	224.2 <sup>c</sup>	246.9 <sup>bc</sup>	263.4 <sup>bc</sup>	284.2 <sup>ab</sup>	312.4 <sup>a</sup>
キサントフィル 脂質中 μg/g					
ルテイン	80.0 <sup>b</sup>	110.1 <sup>a</sup>	123.1 <sup>a</sup>	87.4 <sup>b</sup>	91.1 <sup>b</sup>
ゼアキサントチン	22.4 <sup>c</sup>	31.7 <sup>ab</sup>	36.8 <sup>a</sup>	29.1 <sup>b</sup>	34.9 <sup>a</sup>
β-クリプトキサントチン	Not detected	1.1 <sup>b</sup>	2.0 <sup>a</sup>	1.0 <sup>b</sup>	1.7 <sup>a</sup>
不明	8.6 <sup>d</sup>	13.6 <sup>bc</sup>	17.3 <sup>a</sup>	12.1 <sup>c</sup>	14.8 <sup>ab</sup>
総キサントフィル	111.1 <sup>d</sup>	156.4 <sup>ab</sup>	179.1 <sup>a</sup>	129.7 <sup>cd</sup>	142.6 <sup>bc</sup>

各乾物値の a - c 異符号間に有意差あり (p < 0.05).

(Trupia ら, 2016 から改編)

産卵成績が優れたと報告している。換羽後の産卵量、卵比重、飼料効率および飼料摂取量には、トウモロコシと DDGS の差や給与量による一貫した影響はなかった。この結果から、絶食処理中にトウモロコシまたは DDGS を制限給与することにより、トウモロコシ・大豆皮主体飼料を自由摂取させる処理に匹敵する換羽後の成績が得られると結論付けている。

### 敷料の性状

ブロイラーおよび産卵鶏飼育現場における施設管理上の重要な関心事項は、湿った敷料の発生をいかに最小限に抑えるかである。湿った敷料の発生は、鶏の水分

出納が損なわれるためである (Collett, 2012)。非でん粉性多糖類、動物性たん白質、飽和遊離脂肪酸、抗栄養因子または毒性物質の存在などの多くの飼料要因が湿った敷料の発生に影響している可能性がある (Collett, 2012)。

飲水および飼料中のナトリウム、マグネシウムまたは硫酸塩濃度は、湿った敷料発生に関連している。家禽用飲水中の許容最大濃度は、ナトリウムが 0.05 g/kg (Muirhead, 1995) ~ 0.25 g/kg (Coetzee, 2005)、マグネシウムが 0.125 g/kg (Schwartz, 1994) ~ 0.25 g/kg (Coetzee, 2005)、硫酸塩が 0.06 g/kg (Keshavarz, 1987) ~ 0.50 g/kg (Coetzee, 2005) である。塩類は世界の飲水

表 26. 高脂肪 DDGS(粗脂肪 13.3%)と低脂肪 DDGS(粗脂肪 7.4%)の脂肪酸組成等(Trupia ら、2016 から抜粋)

成分	高脂肪DDGS	低脂肪DDGS
脂肪酸組成 脂質中%		
C16:0	11.3	11.9
C16:1	0.14	0.13
C18:0	1.73	1.93
C18:1	27.0	27.4
C18:2	57.7	56.3
C18:3	1.50	1.60
その他の脂質 mg/kg		
α-トコフェロール	20.9	20.1
β-トコフェロール	0.45	0.37
γ-トコフェロール	76.0	38.3
δ-トコフェロール	1.4	0.9
α-トコトリエノール	10.9	8.8
γ-トコトリエノール	17.4	9.0
δ-トコトリエノール	1.40	0.3
総トコフェロールおよびトコトリエノール	128.6	77.8
ルテイン	15.7	39.3
ゼアキサンチン	9.4	9.7
β-クリプトキサンチン	3.3	3.4
不明	1.6	3.7
総キサントフィル	29.9	56.1

における一般的な汚染物質であり、必要に応じて飼料中に添加する塩分の量を調整する必要がある。トウモロコシ DDGS は、ナトリウムとイオウが高い場合があり(0.5%および0.6%以上)、DDGSの配合割合が多い飼料では、アニオン・カチオン・バランスと、塩分の添加量が調整されていないと、湿った敷料の発生につながる可能性がある。

## 結論

トウモロコシ DDGS は、ブロイラーおよび産卵鶏飼料で使用するための優れた飼料原料で、飼料コストを削減し、最適な発育成績、産卵成績および鶏肉と鶏卵の品質をもたらす。家禽用飼料にDDGSを配合する際の最大の課題は、エネルギーと可消化栄養成分含量が供給元によって異なるため、実際に使用しているDDGSの正確なAMEn値、可消化アミノ酸含量および利用可能なリン含量を把握することである。DDGSの粗脂肪含量は、

AMEn値および可消化アミノ酸含量を予測する因子としては不十分である。このため、成分分析値に基づいて実際のAMEn値とSIDアミノ酸含量を正確に推定する予測式が開発されている。公表されている多くの研究において、ブロイラーの発育成績と枝肉の組成は変動しているが、報告されている反応の大部分は、一般的な発育成績と枝肉の組成には変化がないか、または改善されることを示している。実際、最近の報告では、低脂肪DDGSを20%配合したブロイラー前期用飼料を給与し、低脂肪DDGSを24%配合したブロイラー後期用飼料は、許容可能な発育成績と枝肉品質を得ることが出来ることを示している。同様に、産卵鶏の産卵成績と鶏卵の品質への反応は論文によって変動するが、そのほとんどは、変化がないか、一般的な産卵成績と鶏卵の品質が改善されている。正確なAMEn値と可消化アミノ酸含量を用いて低脂肪DDGSを配合した産卵鶏用飼料を精密に設計した場合には、50%配合しても、許容できる産卵成績と鶏

卵の品質を得ることが出来る。

## 引用文献

- Adedokun, S. A., P. Jaynes, R. L. Payne, and T. J. Applegate. 2015. Standardized ileal amino acid digestibility of corn, corn distillers' dried grains with solubles, wheat middlings and bakery by-products in broilers and laying hens. *Poult. Sci.* 94:2480–2487.
- Angel, R., N.M. Tamim, T.J. Applegate, A.S. Dhandu, and L.E. Ellestad. 2002. Phytic acid chemistry: Influence on phytin phosphorus availability and phytase efficacy. *J. Appl. Poult. Res.* 11:471–480.
- Barekatin, M.R., C. Antipatis, M. Choct, and P.A. Iji. 2013a. Interaction between protease and xylanase in broiler chicken diets containing sorghum distillers' dried grains with solubles. *Anim. Feed Sci. Technol.* 182:71–81.
- Barekatin, M.R., C. Antipatis, N. Rodgers, S.W. Walkden-Brown, P.A. Iji, and M. Choct. 2013b. Evaluation of high dietary inclusion of distillers dried grains with solubles and supplementation of protease and xylanase in the diets of broiler chickens under necrotic enteritis challenge. *Poult. Sci.* 92:1579–1594.
- Barekatin, M.R., M. Choct, and P.A. Iji. 2013c. Xylanase supplementation improves the nutritive value of diets containing high levels of sorghum distillers' dried grains with solubles for broiler chickens. *J. Sci. Food. Agric.* 93:1552–1559.
- Bregendahl, K. 2008. Use of Distillers Co-products in Diets Fed to Poultry. In: *Using Distillers Grains in the U.S. and International Livestock and Poultry Industries*, B.A. Babcock, D.J. Hayes, and J.D. Lawrence eds., Midwest Agribusiness Trade Research and Information Center, Center for Agricultural and Rural Development, Iowa State University, Ames. Pp. 99–134.
- Campasino, A., M. Williams, R. Latham, C.A. Bailey, B. Brown, and J.T. Lee. 2015. Effects of increasing dried distillers' grains with solubles and non-starch polysaccharide degrading enzyme inclusion on growth performance and energy digestibility in broilers. *J. Appl. Poult. Res.* 00:1–10 <http://dx.doi.org/10.3382/japr/pfv018>
- Cho, J.H., Z.F. Zhang, and I.H. Kim. 2012. Effects of canthaxanthin on egg production, egg quality and egg yolk color in laying hens. *J. Agri. Sci.* 5:269–274.
- Choi, H.S., H.L. Lee, M.H. Shin, C. Jo, S.K. Lee, and B.D. Lee. 2008. Nutritive and economic values of corn distiller's dried grains with solubles in broiler diets. *Asian-Australasian J. Anim. Sci.* 21(3):414–419.
- Coetzee, C.B. 2005. The development of water quality guidelines for poultry in southern Africa. Ph.D. thesis. Animal and Wildlife Sciences, University of Pretoria, South Africa.
- Collett, S.R. 2012. Nutrition and wet litter problems in poultry. *Anim. Feed Sci. Technol.* 173:65–75.
- Cortes-Cuevas, A.C., S.R. Estrada, J.A. Menocal, E.A. Gonzalez, and C.L. Coello. 2015. Effect of feeding low-oil DDGS to laying hens and broiler chickens on performance and egg yolk and skin pigmentation. *Brazilian J. Poult. Sci.* 17:247–254.
- Corzo, A., M.W. Schilling, R.E. II. Loar, V. Jackson, S. Kin, and V. Radhakrishnan. 2009. The effects of feeding distillers dried grains with solubles on broiler meat quality. *Poult. Sci.* 88:432–439.
- Davies, M.I., G.M. Ritcey, and I. Motzok. 1970. Intestinal phytase and alkaline phosphatase of chicks: Influence of dietary calcium, inorganic and phytate phosphorus and vitamin D3. *Poult. Sci.* 49:1280–1286.
- Deniz, G., H. Gencoglu, S.S. Gezen, II. Turkmen, A. Orman, and C. Kara. 2013a. Effects of feeding corn distiller's dried grains with solubles with and without enzyme cocktail supplementation to laying hens on performance, egg quality, selected manure parameters and feed cost. *Livest. Sci.* 15:174–181.
- Deniz, G., S.S. Gezen, C. Kara, H. Gencoglu, Y. Meral, and E. Baser. 2013b. Evaluation of nutrient equivalency of microbial phytase in hens in late lay given maize-soybean or distiller's dried grains with solubles (DDGS) diets. *Br. Poult. Sci.* 54:494–502.
- Dozier III, W.A., and J.B. Hess. 2015. Growth and meat yield responses of Hubbard × Cobb 500 male broilers fed

- diets formulated with distillers dried grains with solubles varying in ether extract content and inclusion rate from 1 to 33 days of age. *J. Appl. Poult. Res.* 24:436–450.
- Dozier III, W.A., K.R. Perryman, and J.B. Hess. 2015. Apparent ileal amino acid digestibility of reduced-oil distillers dried grains with solubles fed to broilers from 23 to 31 days of age. *Poult. Sci.* 94:379–383.
- El-Hack, M.E.A., M. Alagawany, M.R. Farag, and K. Dhama. 2015. Use of maize distiller's dried grains with solubles (DDGS) in laying hen diets: Trends and advances. *Asian J. Anim. Vet. Advances* 10:690–707.
- Fernandez, S.R., Y. Zhang, and C.M. Parsons. 1995. Dietary formulation with cottonseed meal on a total amino acid versus a digestible amino acid basis. *Poult. Sci.* 74:1168–1179.
- Gacche, S.M., A.B. Kanduri, P.V. Patil, and N.Z. Gaikwad. 2016. Extent of replacement of soybean meal with distillers dried grains with solubles (DDGS) on carcass yield, dressing percentage and feed cost in broiler chickens. *Anim. Sci. Reporter* 10:109–114.
- Guney, A.C., M.Y. Shim, A.B. Batal, N.M. Dale, and G.M. Pesti. 2013. Effect of feeding low-oil distillers dried grains with solubles on the performance of broilers. *Poult. Sci.* 92:2070–2076.
- Hassan, S.M., and A.A. Al Aqil. 2015. Effect of adding different dietary levels of distillers dried grains with solubles (DDGS) on productive performance of broiler chicks. *Intl. J. Poult. Sci.* 14:13–18.
- Hong, E.C., J.C. Na, D.C. You, H.K. Kim, W.T. Chung, H.J. Lee, I.H. Kim, and J. Hwangbo. 2007. Effects of feeding non-salt diet on the induced molting in laying hens. *Korean J. Poult. Sci.* 34:4, 279–286.
- Jiang, W., L. Zhang, and A. Shan. 2013. The effect of vitamin E on laying performance and egg quality in laying hens fed corn dried distillers grains with solubles. *Poult. Sci.* 92:2956–2964.
- Keshavarz, K. 1987. Proper water management for poultry. *Poult. Dig.* (January), pp. 12–22.
- Kim, E.J., J.L. Purswell, and S.L. Branton. 2016. Effects of increasing inclusion rates of a low-fat distillers dried grains with solubles (LF-DDGS) in nishing broiler diets. *Intl. J. Poult. Sci.* 15:182–187.
- Kubas, T.A., and J.D. Firman. 2014. Effects of yellow grease addition to broiler rations containing DDGS with different fat contents. *Intl. J. Poultr. Sci.* 13:437–441.
- Liu, N., Y.J. Ru, D.F. Tang, T.S. Xu, and G.G. Partridge. 2011. Effects of corn distillers dried grains with solubles and xylanase on growth performance and digestibility of diet components in broilers. *Anim. Feed Sci. Technol.* 163:260–266.
- Loar, R.E. II, J. S. Moritz, J.R. Donaldson, and A. Corzo. 2010. Effects of feeding distillers dried grains with soluble to broilers from 0 to 28 days posthatch on broiler performance, feed manufacturing efficiency and selected intestinal characteristics. *Poult. Sci.* 89:2242–2250.
- Martinez-Amezcuca, C., C.M. Parsons, and D.H. Baker. 2006. Effect of microbial phytase and citric acid on phosphorus bioavailability, apparent metabolizable energy and amino acid digestibility in distillers dried grains with solubles in chicks. *Poult. Sci.* 85:470–475.
- Masa' deh, M.K. 2011. Dried distillers grain with solubles in laying hen and pullet rations. Ph.D. Thesis, Department of Animal Science, University of Nebraska–Lincoln.
- Masa' deh, M.K., S.E. Purdum, and K.J. Hanford. 2011. Dried distillers grains with soluble in laying hen diets. *Poult. Sci.* 90:1960–1966.
- Mejia, L., E.T. Meyer, P.L. Utterback, C.W. Utterback, C.M. Parsons, and K.W. Koelkebeck. 2010. Evaluation of limit feeding corn and distillers dried grains with soluble in non-feed-withdrawal molt programs for laying hens. *Poult. Sci.* 89:386392.
- Meloche, K.J., B.J. Kerr, N. Billor, G.C. Shurson, and W.A. Dozier III. 2014. Validation of prediction equations for apparent metabolizable energy of corn distillers dried grains with solubles in broiler chicks. *Poult. Sci.* 93:1428–1439.
- 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.
- Min, Y.N., L.L. Li, S.K. Liu, J. Zhang, Y.P. Gao, and F.Z. Liu. 2015. Effects of dietary distillers dried grains with solubles (DDGS) on growth performance, oxidative stress and immune function in broiler chickens. *J. Appl. Poult. Res.* 24:23–29.
- Min, Y.N., F.Z. Liu, A. Karimi, C. Coto, C. Lu, F. Yan, and P.W. Waldroup. 2011. Effect of Rovabio® Max AP on performance, energy and nitrogen digestibility of diets high in distillers dried grains with solubles (DDGS) in broilers. *Int. J. Poult. Sci.* 10:796–803.
- Mohammed, A., M.J. Gibney, and T.G. Taylor. 1991. The effects of dietary levels of inorganic phosphorus, calcium and cholecalciferol on the digestibility of phytate phosphorus by the chick. *Br. J. Nutr.* 66:251–259.
- Muirhead, S. 1995. Good, clean water is critical component of poultry production. *Feedstuffs*.
- Mutucumarana, R.K., V. Ravindran, G. Ravindran, and A.J. Cowieson. 2014. Measurement of true ileal digestibility of phosphorus in some feed ingredients for broiler chickens. *J. Anim. Sci.* 92:5520–5529.
- NRC. 1994. Nutrient requirements for poultry. 9th rev. ed. Natl. Acad. Press, Washington, DC.
- Olukosi, O.A., A.J. Cowieson, and O. Adeola. 2010. Broiler responses to supplementation of phytase and aDMixture of carbohydrases and protease in maize–soyabean meal diets with or without maize distiller’s dried grain with solubles. *Brit. Poult. Sci.* 51: 434–443.
- Oryschak, M., D. Korver, M. Zuidhof, X. Meng, and E. Beltranena. 2010. Comparative feeding value of extruded and nonextruded wheat and corn distillers dried grains with solubles for broilers. *Poult. Sci.* 89:2183–2196.
- Paulus–Compart, D.M., A.M. Carlson, G.I. Crawford, R.C. Fink, F. Diez–Gonzalez, A. DiCostanzo, and G.C. Shurson. 2013. Presence and biological activity of antibiotics used in fuel ethanol and corn co–product production. *J. Anim. Sci.* 91:2395–2404.
- Perez, V.G., C.M. Jacobs, J. Barnes, M.C. Jenkins, M.S. Kuhlenschmidt, G.C. Fahey Jr., C.M. Parsons, and J.E. Pettigrew. 2011. Effect of corn distillers dried grains with solubles and *Eimeria acervulina* infection on growth performance and the intestinal microbiota of young chicks. *Poult. Sci.* 90:958–964.
- Purdum, S., K. Hanford, and B. Kreifels. 2014. Short–term effects of lower oil dried distillers grains with solubles in laying hen rations. 93:2592–2595.
- Ravindran, V., W.L. Bryden, and E.T. Kornegay. 1995. Phytates: Occurrence, bioavailability and implications in poultry nutrition. *Poult. Avian Biol. Rev.* 6:125–143.
- Rochelle, S.J., B.J. Kerr, and W.A. Dozier III. 2011. Energy determination of corn co–products fed to broiler chicks from 15 to 24 days of age, and use of composition analysis to predict nitrogen–corrected apparent metabolizable energy. *Poult. Sci.* 90:1999–2007.
- Rostagno, H.S., J.M.R. Pupa, and M. Pack. 1995. Diet formulation for broilers based on total versus digestible amino acids. *J. Appl. Poult. Res.* 4:293–299.
- Salim, H.M., Z.A. Kruk, and B.D. Lee. 2010. Nutritive value of corn distillers dried grains with soluble as an ingredient of poultry diets: A review. *World’s Poult. Sci. J.* 66:411–432.
- Schilling, M.W. V. Battula, R.E. Loar II, V. Jackson, S. Kin, and A. Corzo. 2010. Dietary inclusion level effects of distillers dried grains with solubles on broiler meat quality. *Poult. Sci.* 89:752–760.
- Schwartz, D.L. 1994. Water quality. In: 131st American Veterinary medical Association Annual Convention, San Francisco, CA.
- Shalash, S.M.M., S. Abou El–Wafa, R.A. Hassan, Nehad A. Ramadan, Manal S. Mohamed, and Hoda E. El–Gabry. 2010. Evaluation of distillers dried grains with solubles as feed ingredient in laying hen diets. *Int. J. Poult. Sci.* 9:537–545.
- Shim, M.Y., G.M. Pesti, R.I. Bakalli, P.B. Tillman, and R.L. Payne. 2011. Evaluation of DDGS as an alternative ingredient for broiler chickens. *Poult. Sci.* 90:369–376.
- Shurson, G.C. 2017. Review article: Yeast and yeast derivatives in feed additives and ingredients: Sources,

- characteristics, animal responses and quantification methods. *Anim. Feed Sci. Technol.* 235:60–76.
- Soto, C., E. Avila, J. Arce, F. Rosas, and D. McIntyre. 2013. Evaluation of different strategies for broiler feed formulation using near infrared reflectance spectroscopy as a source of information for determination of amino acids and metabolizable energy. *J. Appl. Poult. Res.* 22:730–737.
- Sun, H., E.J. Lee, H. Samaraweera, M. Persia, and D.U. Ahn. 2013. Effects of increasing concentration of corn distillers dried grains with solubles on chemical composition and nutrient content of egg. *Poult. Sci.* 92:233–242.
- Sun, H., E.J. Lee, H. Samaraweera, M. Persia, H.S. Ragheb, and D.U. Ahn. 2012. Effects of increasing concentrations of corn distillers dried grains with solubles on the egg production and internal quality of eggs. *Poult. Sci.* 91:3236–3246.
- Świątkiewicz, S., A. Arczewska-Włosek, and D. Jozeak. 2014a. Bones quality indices in laying hens fed diets with a high level of DDGS and supplemented with selected feed additives. *Czech J. Anim. Sci.* 59:61–68.
- Świątkiewicz, S., A. Arczewska-Włosek, and D. Jozeak. 2014b. Feed enzymes, probiotic or chitosan can improve the nutritional efficiency of broiler chicken diets containing a high level of distillers dried grains with solubles. *Livest. Sci.* 163:110–119.
- Świątkiewicz, S., A. Arczewska-Włosek, J. Krawczyk, M. Puchała, and D. Józeak. 2013. Effects of selected feed additives on the performance of laying hens given a diet rich in maize dried distiller's grains with solubles (DDGS). *Brit. Poult. Sci.* 54:478–485.
- Świątkiewicz, S., and J. Koreleski. 2008. The use of distillers dried grains with solubles (DDGS) in poultry nutrition. *World's Poult. Sci. J.* 64:257–266.
- Świątkiewicz, S., and J. Koreleski. 2006. Effect of maize distillers dried grains with solubles and dietary enzyme supplementation on the performance of laying hens. *J. Anim. Feed Sci.* 15:253–260.
- Tahir, M. and G.M. Pesti. 2012a. A comparison of digestible amino acid databases: Relationship between amino acid concentration and digestibility. *J. Appl. Poult. Res.* 21:1–12.
- Tahir, M., and G.M. Pesti. 2012b. Comparison of ingredient usage and formula costs in poultry feeds using different amino acid digestibility databases. *J. Appl. Poult. Res.* 21:693–705.
- 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.
- Tamin, N.M., and R. Angel. 2003. Phytate phosphorus hydrolysis as influenced by dietary calcium and micro-mineral source in broiler diets. *J. Agric. Food Chem.* 51:4687–4693.
- Tangendjaja, B., and E. Wina. 2011. Feeding value of low and high protein dried distillers grains and corn gluten meal for layer. *Media Peternakan* p. 133–139. <http://medpet.jouranl.ipb.ac.id/> doi: 10.5398/medpet.2011.34.2.133
- Trupia, S., J.K. Winkler-Moser, A.C. Guney, R. Beckstead, and C-Y. O Chen. 2016. Nutritional quality of eggs from hens fed distillers dried grains with solubles. *Poult. Sci.* 2592–2601.
- Waldroup, P.W., Z. Wang, C. Coto, S. Serrate, and F. Yan. 2007. Development of a standardized nutrient matrix for corn distillers dried grains with solubles. *Intl. J. Poult. Sci.* 6:478–483.
- Wamsley, K.G.S., R.E. Loar II, K. Karges, and J.S. Moritz. 2013. The use of practical diets and regression analyses to determine the utilization of lysine and phosphorus in corn distillers dried grains and solubles using Cobb 500 male broilers. *J. Appl. Poult. Res.* 22:279–297.
- Wang, Z., S. Cerrate, C. Coto, F. Yan, and P.W. Waldroup. 2008. Evaluation of high levels of distillers dried grains with solubles (DDGS) in broiler diets. *Intl. J. Poult. Sci.* 7:990–996.
- Wang, Z., S. Cerrate, C. Coto, F. Yan, and P.W. Waldroup. 2007. Effect of rapid and multiple changes in level of distillers dried grains with solubles (DDGS) in broiler

- diets on performance and carcass characteristics. *Intl. J. Poultry Sci.* 6:725–731.
- Wu-Haan, W., W. Powers, R. Angel, and T.L. Applegate. 2010. The use of distillers dried grains plus soluble as a feed ingredient on air emissions and performance from laying hens. *Poult. Sci.* 89:1355–1359.
- Zhao, F., L.Q. Ren, B.M. Mi, H.Z. Tan, J.T. Zhao, H. Li, H.F. Zhang, and Z.Y. Zhang. 2014. Developing a computer-controlled simulated digestion system to predict the concentration of metabolizable energy of feedstuffs for rooster. *J. Anim. Sci.* 92:1537–1547.
- Zhu, J.L., Z.K. Zeng, G.C. Shurson, and P.E. Urriola. 2017. A meta-analysis to predict the concentration of standardized ileal digestible amino acids in distillers dried grains with solubles for poultry. *Poult. Sci.* (in review)