

## 21 章: 豚における低脂肪 DDGS

### はじめに

DDGS は、米国における各ステージの養豚用飼料の飼料原料として最も人気があり、経済的で、広く利用されている。トウモロコシ DDGS はトウモロコシとほぼ同量の ME(代謝エネルギー) 価を持ち、養豚用飼料では主にエネルギー源として使用されている。このため、DDGS は、主にトウモロコシの一部と置換されているが、一部の大豆粕と無機リンとも置換される。多くの研究により、DDGS は、ほ乳期用、育成期用、肥育期用および泌乳期用の各飼料に最大 30%、妊娠期用飼料で最大 50% 配合しても成績には悪影響を及ぼさないことが示されている。実際、DDGS の配合により飼料価格を節減できる可能性が高いため、米国のいくつかの大手の養豚家は、育成～肥育期の豚用飼料に低脂肪 DDGS を最大 60% 配合した飼料に対する評価まで行っている。ただし、配合割合をこのように高めた場合に許容可能な発育成績と枝肉形質を得るためには、使用している DDGS の正確なエネルギー価、可消化アミノ酸および可消化リン含量を正確に把握しておく必要がある。幸いにも、豚の精密栄養プログラムを実践するために使用できる低脂肪 DDGS 中のアミノ酸の SID(標準化された回腸消化率)と SIDC(標準化された回腸消化量)を推定するための予測式を開発するための多くの研究が行われている。

### 正確なエネルギーと可消化栄養成分の測定

#### 代謝エネルギー

米国のエタノール産業において、DCO(ジステラーズ・コーン油)の抽出が一般的になるにつれて、DDGS の製造量が減少し、ME 価と栄養成分含量の変動が大きくなっている。DDGS の供給源間による変動は、粗脂肪では 4~13%、NDF(中性デタージェント繊維)では 21~34%、CP(粗たん白質)では 24~35% である(Kerrら、2013)。ただし、DCO 抽出前の DDGS でも供給源間での栄養成分

含量の変動が大きいため(Stein and Shurson、2009)、DCO 抽出後の他の栄養成分含量には一貫した影響はない。

豚は、たん白質、でん粉、繊維、脂質を異なる効率で消化・吸収しているため、飼料原料の栄養成分組成はエネルギー価に大きな影響を与える(Patience、2009)。その結果、豚における低脂肪 DDGS の ME 価の推定値は 2,858 kcal/kg とは異なることが報告されている(表 1)。これらの ME 価の推定値にはかなり幅があるが、一般的にトウモロコシ DDGS の ME 価はトウモロコシの ME 価の 93% である。ただし、DDGS の粗脂肪含量は、豚における ME 価の単一の予測変数としては不十分である(表 2)。NRC(2012)は、粗脂肪含量が 10% 以上の高脂肪 DDGS の平均 ME 価は 3,845 kcal/kg、6~9% の中脂肪 DDGS では 3,801 kcal/kg、4% 未満の低脂肪 DDGS では 3,476 kcal/kg としている。ただし、中脂肪および低脂肪 DDGS の ME 価は、限られた公表論文によるデータのみに基づいたものであり、その精度には疑問があることを念頭に置いておく必要がある。

複数の要因が、DCO 抽出後の DDGS の ME 価の変動に影響を与えられられる。Kim ら(2013)は、豚における DDGS の粗脂肪の ATTD(見かけの全消化管消化率)は約 50% であると報告している。Kerr ら(2013)は、粗脂肪の ATTD は供給源の違いにより 53~81% の変動があるとしている。豚における DDGS の粗繊維の ATTD は 23~55% であり(Urriolaら、2010)、これも、ME 価の変動に影響する。供給源間における粗脂肪と粗繊維の消化性の違いは、様々な DDGS 供給源における繊維-でん粉-たん白質の画分の多様性によるもので、繊維の発酵性と炭水化物分解酵素の有効性に影響している(Jha ら、2015)。Liu ら(2012)は、DDGS をより細かく粉砕すると ME 価が高まると報告しているが、DDGS の粒子径は供給源間でも差がある。

表 1. DDGS の ME 価とトウモロコシに対する相対値(NRC、2012)

Item	n	ME of DDGS				DDGS relative to corn <sup>1</sup> (%)
		Average	Least value	Greatest value	SD	
Hastad et al., 2004 <sup>2</sup>	2	4,047	3,986	4,108	-	105.3
Hastad et al., 2004 <sup>3</sup>	2	3,679	3,476	3,882	-	95.7
Stein et al., 2006	4	3,378	-	-	-	87.9
Pedersen et al., 2007	10	3,897	3,674	4,336	221	101.4
Stein et al., 2009	4	3,750	3,575	3,976	168	97.6
Dahlen et al., 2011	2	2,962	2,959	2,964	-	77.0
Jacela et al., 2011 <sup>4,5</sup>	1	2,858	-	-	-	74.3
Liu et al., 2012	3	3,730	3,583	3,862	140	97.0
Anderson et al., 2012	6	3,790	3,414	4,141	252	98.6
Anderson et al., 2012 <sup>5</sup>	1	3,650	-	-	-	94.9
Kerr et al., 2013 <sup>5</sup>	15	3,435	3,266	3,696	140	89.3
NRC, 2012, >10 % oil	-	3,845	-	-	-	100.0
NRC, 2012, > 6 and < 9 % oil	-	3,801	-	-	-	98.9
NRC, 2012, < 4 % oil	-	3,476	-	-	-	90.4
Graham et al., 2014a <sup>4,5</sup>	1	3,365	-	-	-	87.5
Graham et al., 2014b <sup>5</sup>	4	3,744	3,481	3,905	183	97.4
Adeola et al., 2014	1	3,559	-	-	-	92.6

1 NRC (2012) におけるトウモロコシのMEに対するDDGSの平均MEの相対値)

2 代謝試験により測定したME(水分含量は未記載のため、乾物を89.3%(NRC、2012)とみなして試算)

3 増体量に基づいて計算したME(水分含量は未記載のため、乾物を89.3%(NRC、2012)とみなして試算)

4 Noblet and Perez(1993)によるDEおよび成分組成を変数とした予測式から推定したME

5 粗脂肪含量が10%未満の低脂肪DDGSを含む

表 2. 粗脂肪含量が異なる DDGS の ME 価と一般成分組成(乾物)(Kerrら、2013 から改編)

DDGS	ME kcal/kg	ME/GE %	粗脂肪 %	NDF %	CP %	でん粉 %	灰分 %
15	3,696	72.8	10.9	31.6	29.0	3.3	5.4
13	3,604	74.6	5.6	31.6	30.6	3.3	6.1
8	3,603	69.7	13.2	34.0	30.6	1.3	5.3
11	3,553	69.3	11.8	38.9	32.1	1.1	4.9
9	3,550	71.6	9.7	28.8	29.8	2.8	5.0
6	3,513	70.8	9.6	33.0	30.1	3.4	4.9
7	3,423	69.3	10.1	38.2	30.3	2.2	5.0
2	3,400	67.0	11.1	36.5	29.7	3.9	4.3
4	3,362	68.7	8.6	35.7	32.9	0.8	5.1
3	3,360	66.4	10.8	38.6	29.7	1.6	4.6
10	3,327	67.2	10.0	35.9	32.7	1.0	5.3
1	3,302	65.0	11.2	44.0	27.7	1.8	4.4
12	3,286	68.8	4.9	30.5	31.2	3.3	5.8
5	3,277	65.0	11.1	39.7	31.6	0.9	5.0
14	3,266	66.2	7.5	33.9	30.8	2.5	5.7

Kerrら(2013)によると、DDGSの乾物の ATTD は 66.8 ~ 77.3%と比較的高いが、ME 価との間には大きな相関はなかった(表 3)。粗脂肪の ATTD の変動も供給源間で

かなり大きく(52.7~81.2%)、ME 価とも大きな相関はない。これは、粗脂肪含量が ME 価を推定するための単一の変数としては利用できないことを示している。

表 3. 粗脂肪含量が異なる DDGS の ME 価とその他の成分(乾物) (Kerr ら、2013 から改編)

DDGS	ME kcal/kg	乾物ATTD %	粗脂肪ATTD %	NDF ATTD %	窒素ATTD %	炭素ATTD %
15	3,696	72.5	81.2	45.8	80.5	74.1
13	3,604	77.3	69.8	57.4	83.4	78.1
8	3,603	71.6	68.5	57.1	81.0	73.0
11	3,553	70.4	65.8	53.3	82.5	72.4
9	3,550	73.8	58.2	55.2	84.8	74.7
6	3,513	74.2	53.3	60.6	82.8	74.3
7	3,423	71.9	52.7	61.5	80.6	73.2
2	3,400	70.5	57.2	57.4	79.7	71.0
4	3,362	73.3	67.1	51.8	77.0	72.3
3	3,360	69.6	54.7	58.2	81.8	70.2
10	3,327	70.4	57.6	57.2	81.8	70.5
1	3,302	66.8	54.8	56.3	76.9	67.9
12	3,286	72.4	65.7	49.8	82.6	73.6
5	3,277	67.4	59.4	54.2	82.1	68.3
14	3,266	67.7	72.7	44.5	78.0	69.0

DDGS の NDF は、かなりの量がエネルギーとして利用され、ATTD は 45.8～61.5%である。これらの結果は、Urriola ら(2010)の報告とほぼ同様である。CP の ATTD は 76.9～84.8%で、供給源間での変動は比較的少ないが ME 価との相関性は低かった。過剰な窒素はエネルギーとして利用できるが、変換効率は低い。炭素の ATTD は 67.9～78.1%で比較的高いが、これも ME 価とは明確な相関はなかった。したがって、粗脂肪含量が異なる DDGS の ME 価は、可消化エネルギーに寄与する画分(NDF、粗脂肪、CP)の組み合わせによって決まり、粗脂肪含量とその ATTD のみからは推定できない。

DDGS の ME 価を正確に推定することは、正確な配合設計と、豚用飼料における DDGS の栄養学的および経済的な価値を正確に把握するために重要である。トウモロコシ DDGS の物理・化学的な組成に基づく DE(可消化エネルギー)価および ME 価の予測式を開発するためにいくつかの研究が行われている(Stein ら、2006; Pedersen ら、2007; Stein ら、2009; Anderson ら、2012; Kerr ら、2013)。これらの予測式は、豚についてクロスチェックが行われている(Urriola ら、2014)。最も正確な DE 価の予測式(予測誤差; 144 kcal/kg、バイアス; 19 kcal/

kg)は以下のとおりである。

$$\text{DE 価} = -2,161 + (1.39 \times \text{GE(総エネルギー)}) - (20.7 \times \text{NDF}) - (49.3 \times \text{粗脂肪})$$

また、最も正確な ME 価の予測式(予測誤差; 149 kcal/kg、バイアス; -82 kcal/kg)は、先の予測式から得られた DE 価を用いて、次式により推定出来る。

$$\text{ME} = -261 + (1.05 \times \text{DE}) - (7.89 \times \text{CP}) + (2.47 \times \text{NDF}) - (4.99 \times \text{粗脂肪})$$

Urriola ら(2014)によって最も正確であると評価された DE 価および ME 価の予測式をさらに評価するために、Wu ら(2016a)は、粗脂肪含量は異なる(低脂肪: 6%、中脂肪: 10%および高脂肪: 14%)が、推定 ME 価はほぼ同様(3,258、3,315 および 3,232 kcal/kg)の DDGS を 40% 配合した育成期～肥育期用飼料と、トウモロコシ・大豆粕主体の対照飼料との発育成績等を比較している(表 4)。各飼料のアミノ酸の SIDC とリン STDC(標準化された全消化管可消化量)は同一とした。この結果、DDGS を 40% 配合した各飼料では、飼料摂取量がわずかに低下する可能性が高いことが明らかとなった。これは、DDGS 配合飼料では対照飼料より繊維含量が高かったためと考えられる。しかし、粗脂肪含量が異なる DDGS を配合し

表 4. DDGS の粗脂肪含量の違いと、豚の発育成績、枝肉特性および脂肪の品質(Wu ら、2016a から改編)

	対照 <sup>1</sup>	DDGS 40%配合			SE <sup>2</sup>
		低脂肪DDGS <sup>1</sup>	中脂肪DDGS <sup>1</sup>	高脂肪DDGS <sup>1</sup>	
豚房数	12	12	12	12	
体重 kg					
開始時	39.24	39.52	38.95	39.58	0.90
終了時	122.7 <sup>a</sup>	118.7 <sup>b</sup>	118.6 <sup>b</sup>	119.4 <sup>b</sup>	0.90
全期間の飼料摂取日量 kg	2.72 <sup>a</sup>	2.65 <sup>ab</sup>	2.61 <sup>b</sup>	2.60 <sup>b</sup>	0.03
全期間の増体日量 kg	0.97 <sup>a</sup>	0.92 <sup>b</sup>	0.92 <sup>b</sup>	0.93 <sup>b</sup>	0.01
全期間の飼料効率	0.368 <sup>a</sup>	0.356 <sup>b</sup>	0.365 <sup>a</sup>	0.367 <sup>a</sup>	0.003
温屠体重 kg	90.97 <sup>a</sup>	86.69 <sup>b</sup>	86.80 <sup>b</sup>	87.24 <sup>b</sup>	0.88
枝肉歩留 %	74.2 <sup>a</sup>	73.0 <sup>b</sup>	72.9 <sup>b</sup>	73.0 <sup>b</sup>	0.20
背脂肪厚 <sup>3</sup> mm	20.6	19.9	19.2	19.8	0.5
ロース芯面積 <sup>3</sup> cm <sup>2</sup>	42.06 <sup>a</sup>	39.38 <sup>b</sup>	39.09 <sup>b</sup>	39.37 <sup>b</sup>	0.53
赤身肉の割合 <sup>3</sup> %	51.9	51.6	51.9	51.6	0.3
バラ脂肪のIV <sup>4</sup>	60.17 <sup>a</sup>	70.74 <sup>b</sup>	72.03 <sup>b</sup>	76.41 <sup>c</sup>	0.79

<sup>1</sup> 対照：トウモロコシ・大豆粕飼料、低脂肪DDGS、中脂肪DDGS、高脂肪DDGS：粗脂肪含量5.9%、9.9%、14.2%

<sup>2</sup> プールした標準誤差

<sup>3</sup> 終了時体重を共変数として解析

<sup>4</sup> ヨウ素価

a - b異符号間で有意差あり (p < 0.05)

た場合に、ADG(日増体量)と全体的な枝肉特性には影響がなかった。低脂肪および中脂肪 DDGS を給与した場合、PUFA(多価不飽和脂肪酸)の摂取量が減少し、バラ肉の脂肪の IV(ヨウ素価)が低下し、脂肪の品質が高まった。これらの結果は、粗脂肪含量が 6%以上の DDGS の ME 価は、Urriola ら(2014)の予測式を用いて正確に推定できることを示している。ただし、低脂肪 DDGS を配合した飼料では飼料効率がわずかに低下していることを考えると、粗脂肪含量が 6%未満の DDGS の ME 価を正確に推定するためには、予測式のさらなる改良が必要である。Urriola ら(2014)が述べているように、NRC(2012)が示しているエネルギー価の予測式は、低脂肪 DDGS の ME 価を過小評価することになるため使用しないほうが良い。

### 正味エネルギー

NE(正味エネルギー)価に基づく配合設計は、ME 価に基づく配合設計に比べて、高繊維飼料を給与する豚におけるエネルギー要求量を正確に表している(Noblet ら、1994)。このため、米国の栄養学者は NE 価に基づいて DDGS 配合飼料を設計し、30%以上の高い配合割合の飼料で、満足できる発育成績と枝肉形質を得ている。残念ながら、DDGS の NE 価(乾物値)を測定した報告は多

くない(表 5)。Gutierrez ら(2014)は、従来の DDGS(粗脂肪含量 13.0%)と、Uncooked と呼ばれるエタノール発酵前に粉碎トウモロコシへの酵素処理を行った DDGS(粗脂肪含量 2.6%)の NE 価を比較屠殺法により測定した。従来の DDGS の肥育豚における NE 価は、育成豚に比べて高かった(2,697 vs 2,173 kcal/kg)が、Uncooked DDGS では育成豚と肥育豚の差はなかった(2,120 vs 2,058 kcal/kg)。Uncooked DDGS の肥育期における NE 価が従来の DDGS に比べて低かった理由は明らかではないが、粗脂肪含量が高い従来の DDGS では、粗脂肪含量が低い Uncooked DDGS に比べて、枝肉への脂肪の蓄積が高まる可能性がある。肥育豚では、摂取したエネルギーを体たん白質の合成より脂肪蓄積により多く振り向ける(Gutierrez ら、2014)ことから、この傾向は肥育期で顕著となる可能性がある。さらに、これらの推定 NE 価は、NRC(2012)が示すトウモロコシの NE 価より低く、NRC(2012)による DDGS の NE 価(粗脂肪含量が 10%以上の DDGS では 2,669 kcal/kg、粗脂肪含量が 4%未満の DDGS では 2,251 kcal/kg)より低かった。NRC(2012)による NE 価は *in vivo* で直接測定したのではなく、完全配合飼料に基づく予測式から推定されたものであって、正確性を欠くことを再認識する必要がある。

表 5. トウモロコシ DDGS の NE 価(kcal / kg、乾物)(公表値)

	n	DDGSのNE価				トウモロコシ に対する相対 値 (%) <sup>1</sup>
		平均	最小値	最大値	標準 偏差	
Gutierrez et al., 2014 <sup>2</sup>	1	2,435	-	-	-	80.5
Gutierrez et al., 2014 <sup>3</sup>	1	2,089	-	-	-	69.1
Graham et al., 2014b	4	2,551	2,122	2,893	318.8	84.3
Kerr et al., 2015a	6	2,135	2,012	2,253	89.2	70.6
Wu et al., 2016c	4	2,660	2,182	2,915	-	87.9
NRC, 2012, > 10 % oil	-	2,384	-	-	-	78.8
NRC, 2012, > 6 and < 9 % oil	-	2,343	-	-	-	77.4
NRC, 2012, < 4 % oil	-	2,009	-	-	-	66.4

<sup>1</sup> NRC (2012) におけるトウモロコシのNEに対するDDGSの平均NEの相対値)

<sup>2</sup> 従来のDDGS

<sup>3</sup> Uncooked (発酵前に酵素処理を行った) DDGS

表 6. 粗脂肪含量が異なる DDGS の NE 価と一般成分組成等(乾物)(Kerr ら、2015 から改編)

DDGS	NE Kcal/kg	ME Kcal/kg	NE/GE %	NE/ME %	粗脂肪 %	NDF %	CP %	でん粉 %	灰分 %
6	2,381	3,734	44.8	59.3	11.4	31.1	32.2	4.7	5.5
5	2,326	3,893	45.9	60.4	7.0	27.8	29.8	4.4	5.5
1	2,262	3,830	42.6	58.2	13.3	38.3	29.7	2.5	4.8
2	2,249	3,723	43.0	58.9	10.4	38.5	32.0	2.3	4.7
3	2,219	3,874	42.6	55.5	9.1	39.6	31.6	3.8	5.4
4	2,129	3,716	42.3	56.7	8.0	31.0	30.6	4.9	5.6

Kerr ら(2015a)は、DEXA(二重エネルギーX線吸収測定法)を用いて、6 試料のトウモロコシ DDGS の NE 価を測定した(表 6)。これらの DDGS の粗脂肪含量は 7.0~13.3%であったが、NE 価には大きな差はなかった(2,012~2,253 kcal/kg)。これら 6 試料の平均 NE 価は 2,135 kcal/kgであり、NRC(2012)によるトウモロコシのNE価および Gutierrez ら(2014)が測定した従来の DDGS の NE 価(育成期と肥育期の平均)よりも、それぞれ 29.4 および 12.3%低かった。この結果から、DDGS の粗脂肪含量が DDGS のエネルギー価を推定するための優れた変数ではないことが再確認された。残念ながら、Kerr ら(2015)が測定した DDGS の各成分組成には大きな差がなく、試料数も限られていたことから、NE 価の予測式を導くことは出来なかった。この他に、Graham ら(2014b)は、4 試料の DDGS を配合した飼料を給与した豚の NE 効率をトウモロコシ・大豆粕飼料を給与した豚と比較し、NRC

(2012)によるトウモロコシと大豆粕の NE 価に基づく NE 価を推定した。推定された NE 価は 2,122~2,893 kcal/kg で、粗脂肪含量と正の相関(NE 価、kcal/kg = 1,501.01 + 115.011 × 粗脂肪、%、R<sup>2</sup>:0.86)があった。Wu ら(2016)は、粗脂肪が 5.8~12.2%の DDGS 4 試料について、育成豚の発育応答と NRC(2012)による要求量モデルを使用して、NE 価を推定した。その結果、推定 NE 価は 2,182~2,915 kcal/kg(平均 2,660 kcal/kg、乾物)だった。これらの推定値は、NRC(2012)よりも大幅に高いが、Graham ら(2014b)の報告とは同程度であった。Kerr ら(2015a)および Wu ら(2016c)の結果を用いて、Wu ら(2016c)が導いた NE 価の予測式は以下のとおりである。

$$\text{NE 価 (kcal/kg、乾物)} = -1130.5 + (0.727 \times \text{GE}) + (23.86 \times \text{粗脂肪}) - (10.83 \times \text{NDF}); \quad (R^2:0.99, \text{リンは } 0.01 \text{ 未満})$$

ただし、この予測式の精度は飼育試験では検証され

ていない。利用可能なすべての公表文献の結果をまとめると、低脂肪 DDGS の NE 価の最も控えめな推定値は 2,012 kcal/kg であり、平均 NE 価の 2,374 kcal/kg (乾物) は、ほとんどの DDGS に適用できるものと思われる。

### 可消化アミノ酸

DDGS の配合割合に影響を与える最も重要な制約の一つは可消化アミノ酸含量の変動である。供給源が異なる様々な DDGS について、アミノ酸の SID を測定するための研究が行われている。ただし、DDGS の配合割合をより高めるためには、実際に使用する DDGS のアミノ酸の SIDC を逐次推定する必要がある。DDGS は、大豆粕に比べて、アミノ酸の消化性が悪く、アミノ酸組バランスも劣るために、配合割合を高めると発育成績が低下する可能性があることと、供給源間の変動が大きいため、DDGS の配合割合の上限は制限を受けている。Olukosi and Adebisi (2013) は、1997～2010 年に公表された文献におけるトウモロコシ DDGS のアミノ酸組成のデータをまとめている (表 7)。これらの DDGS の大部分は粗脂肪含量が 10% 以上のものであるが、DDGS のアミノ酸含量における供給源間の固有の変動性を理解するために利用出来る。さらに、彼らは、CP 含量とアルギニン、イソロイシン、リジンおよびトリプトファンとの相関性は低く ( $r$  (相関係数): 0.44、0.26、0.22 および 0.33)、有意ではないとしている。これは、CP がトウモロコシ DDGS のこれらのアミノ酸含量の変数としては不十分であり、CP を変数とした予測式は開発出来ないことを意味している。他の必須アミノ酸の含量は CP 含量と比較的相関するが (ヒスチジン、ロイシン、メチオニン、フェニルアラニン、スレオニンおよびバリンにおける相関係数は、0.68、0.49、0.73、0.81、0.59 および 0.61)、それらの相関係数は全般的に低く、予測式の精度も低かった ( $R^2$ : 0.23～0.66)。これらの結果は、CP 含量がトウモロコシ DDGS のアミノ酸含量を推定する際の変数としては不適切であり、正確な推定には化学的な分析値が必要であることを示している。

アミノ酸の SID と SIDC に対する DCO 抽出の影響を調査するために 4 つの研究が行われている。Ren ら (2011) は、低脂肪 DDGS (粗脂肪含量: 2.9～4.1%) のアミノ酸の

SID が従来の高脂肪 (粗脂肪含量: 10% 以上) と差がないことを示している。Li ら (2015) は、DDGS 製造時の CDS (濃縮ディスチラーズ・ソリュブル) の混合割合と粗脂肪含量が異なる DDGS についての調査を行い、低脂肪 DDGS は高脂肪 DDGS よりもアミノ酸の SID が低く、CDS の割合が高い高脂肪 DDGS ではアミノ酸の SID が減少する傾向があるが、この傾向は低脂肪 DDGS では見られなかったと報告している。Curry ら (2014) は、2 試料の CDO 抽出 DDGS (酸分解した粗脂肪含量: 8.4 および 7.9%、乾物) が、従来の DDGS (同 12.7%) に比べてほとんどのアミノ酸の SID が低く、飼料に油脂を添加しても改善されなかった (表 8)。また、Gutierrez ら (2016) は、トウモロコシ・大豆粕主体の豚用飼料に低脂肪 DDGS を配合するとリジンの SID が低下するが、大豆油を 6% 添加すると、リジンの SID が高まったとしている。CDO 抽出工程中で、繊維-でん粉-たん白質の画分に大きな変化が生じ、乾燥工程中での過熱による影響を受けやすくなることから、これら 2 つの研究で観察されたアミノ酸の SID の低下に影響している可能性がある。(Almeida ら、2013) は、熱変性を受けた DDGS のアミノ酸の SID を推定するために予測式を開発しているが、その精度については検証されていない。

最近、Zeng ら (2017) は、2006～2015 年に公表された 22 報の査読済み文献、出版物 1 編および修士論文データ 1 報を取りまとめた (表 9 および 10)。これらのデータは、Olukosi and Adebisi (2013) によって報告されたものに比べて、低脂肪トウモロコシ DDGS 成分組成と変動をより反映している。彼らはメタ分析を行っており、豚における低脂肪 DDGS の SID 予測式を開発した (表 11)。DDGS のアミノ酸含量と、NDF または ADF (酸性デタージェント繊維) 含量は、DDGS のアミノ酸の SIDC の優れた予測変数であり、これらの予測式の精度は、以前に発表されたものに比べて大幅に改善されている。その結果、これらの予測式を使用して、低脂肪 DDGS の豚におけるアミノ酸の SIDC を正確に推定できる。

DDGS の色調 ( $L^*$  および  $b^*$ ) が、DDGS の豚および家禽における可消化アミノ酸含量を推定する変数として使用できる可能性があることが初期の研究で報告されてい

表 7. 1997 年から 2010 年までの公表文献中のトウモロコシ DDGS の必須アミノ酸組成の変動(Olukosi and Adebisi, 2013 から改編)

	平均	最小値	最大値	標準偏差	変動係数 %
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. 粗脂肪含量が異なる DDGS の豚におけるアミノ酸含量とアミノ酸の SID(標準化された回腸消化率)および SIDC(標準化された回腸可消化含量)(原物値、Curry ら、2014 から改編)

	粗脂肪11.5%DDGS			粗脂肪 7.5%DDGS			粗脂肪 6.9%DDGS		
	含量 %	SID %	SIDC %	含量 %	SID %	SIDC %	含量 %	SID %	SIDC %
乾物 %	90.6	-	-	89.0	-	-	87.5	-	-
AH粗脂肪 %	11.5	-	-	7.5	-	-	6.9	-	-
CP %	25.7	79.8 <sup>a</sup>	20.5	28.0	72.8 <sup>b</sup>	20.4	27.9	73.6 <sup>b</sup>	20.5
アルギニン	1.22	87.7 <sup>a</sup>	1.07	1.22	81.0 <sup>c</sup>	0.99	1.24	82.5 <sup>bc</sup>	1.02
シスチン	0.62	76.0 <sup>a</sup>	0.47	0.62	67.8 <sup>c</sup>	0.42	0.63	68.8 <sup>bc</sup>	0.43
ヒスチジン	0.69	80.9 <sup>a</sup>	0.56	0.75	73.5 <sup>b</sup>	0.55	0.71	74.6 <sup>b</sup>	0.53
イソロイシン	1.03	79.8 <sup>a</sup>	0.82	1.12	72.9 <sup>b</sup>	0.82	1.06	73.1 <sup>bc</sup>	0.77
ロイシン	2.79	87.7 <sup>a</sup>	2.45	3.17	83.4 <sup>bc</sup>	2.64	3.07	82.2 <sup>c</sup>	2.52
リジン	0.91	67.9 <sup>a</sup>	0.62	0.91	56.4 <sup>c</sup>	0.51	0.88	61.7 <sup>b</sup>	0.54
メチオニン	0.52	88.1 <sup>a</sup>	0.46	0.59	84.8 <sup>bc</sup>	0.50	0.55	83.6 <sup>c</sup>	0.46
フェニルアラニン	1.25	84.9 <sup>a</sup>	1.06	1.36	80.3 <sup>bc</sup>	1.09	1.35	79.8 <sup>c</sup>	1.08
トレオニン	0.97	73.4 <sup>a</sup>	0.71	1.02	66.9 <sup>c</sup>	0.68	1.02	68.2 <sup>bc</sup>	0.70
トリプトファン	0.21	83.1 <sup>a</sup>	0.17	0.20	77.8 <sup>c</sup>	0.16	0.20	81.1 <sup>ab</sup>	0.16
バリン	1.30	80.5 <sup>a</sup>	1.05	1.43	74.2 <sup>bc</sup>	1.06	1.33	74.6 <sup>bc</sup>	0.99

a - c異符号間に有意差あり (p < 0.05)      <sup>1</sup> AH粗脂肪：酸分解性エーテル抽出物

表 9. 2006 年から 2015 年に豚に給与されたトウモロコシ DDGS の成分組成の変動(乾物 88%換算値、Zeng ら、2017 から改編)

	平均	変動係数 %
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

表 10. 2006～2015 年に豚に給与されたトウモロコシ DDGS の総アミノ酸含量と SID (標準化された回腸消化率) とそれらの変動(乾物 88%換算値、Zeng ら、2017 から改編)

必須アミノ酸	平均含量 %	変動係数 %	SID	変動係数 %
アルギニン	1.15	11.8	0.83	6.8
ヒスチジン	0.74	14.2	0.78	5.5
イソロイシン	0.99	11.8	0.76	9.2
ロイシン	3.16	13.7	0.85	4.0
リジン	0.80	17.9	0.62	13.5
メチオニン	0.54	15.1	0.82	7.0
フェニルアラニン	1.32	12.3	0.82	4.5
トレオニン	1.01	15.5	0.71	7.1
トリプトファン	0.20	16.3	0.72	12.7
バリン	1.35	11.1	0.77	5.9

表 11. DDGS の豚におけるアミノ酸の SIDC (標準化された回腸可消化量) 予測式(乾物 88%換算値; Zeng ら、2017)

アミノ酸 g/kg	予測式	R <sup>2</sup> (決定係数)
SIDアルギニン	$= -0.26 + (\text{Arg, g/kg} \times 0.97) - (\text{NDF, g/kg} \times 0.004)$	0.99
SIDヒスチジン	$= -0.08 + (\text{His, g/kg} \times 0.94) - (\text{NDF, g/kg} \times 0.003)$	0.99
SIDイソロイシン	$= 0.07 + (\text{Ile, g/kg} \times 0.90) - (\text{NDF, g/kg} \times 0.005)$	0.99
SIDロイシン	$= 0.30 + (\text{Leu, g/kg} \times 0.90) - (\text{ADF, g/kg} \times 0.018)$	0.97
SIDリジン	$= -1.03 + (\text{Lys, g/kg} \times 0.88) - (\text{NDF, g/kg} \times 0.003)$	0.98
SIDメチオニン	$= -0.22 + (\text{Met, g/kg} \times 1.00) - (\text{NDF, g/kg} \times 0.002)$	0.99
SIDメチオニン+シスチン	$= 0.05 + (\text{Met+Cys, g/kg} \times 0.92) - (\text{NDF, g/kg} \times 0.005)$	0.99
SIDフェニルアラニン	$= 0.15 + (\text{Phe, g/kg} \times 0.92) - (\text{NDF, g/kg} \times 0.004)$	0.99
SIDトレオニン	$= 1.30 + (\text{Thr, g/kg} \times 0.64) - (\text{ADF, g/kg} \times 0.028)$	0.99
SIDトリプトファン	$= -0.17 + (\text{Trp, g/kg} \times 0.89)$	0.99
SIDバリン	$= -0.49 + (\text{Val, g/kg} \times 0.87) - (\text{ADF, g/kg} \times 0.070)$	0.99

る。しかし、Urriola ら(2013)は DDGS の色調がアミノ酸の消化性を推定する際の正確な予測変数ではないことを示している。Urriola ら(2013)は、トウモロコシ DDGS 34 試料、ソルガム DDGS 1 試料および小麦 DDGS 2 試料について可消化アミノ酸量を測定している。これらの結果は、可消化アミノ酸量が DDGS 間で大きく異なる可能性があることを示している。図 1 に示すように、L\*が 50 未満の DDGS と、50 以上の DDGS では、それぞれ L\*と可消化リジン含量の相関性は高いように見受けられるが、いずれも精度は低い(R<sup>2</sup>:0.48 および 0.03)。したがって、トウモロコシ DDGS の可消化アミノ酸含量の予測変数として色調を使用することは妥当ではない。

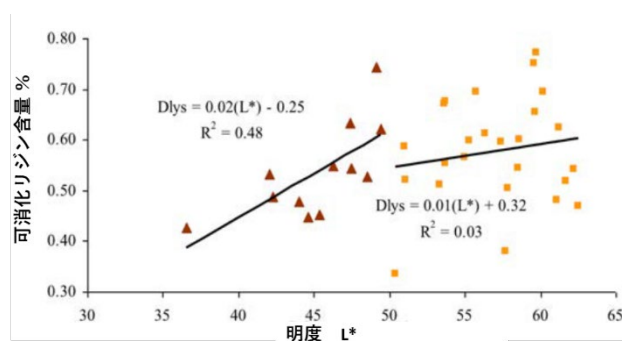


図 1. DDGS の明度(L\*)と可消化リジン含量の相関 (Urriola ら、2013)

ミネソタ大学の研究者は、34 試料の DDGS について、光学密度と蛍光度からアミノ酸の SID を推定する方法を



開発した(Urriola ら、2013)。DDGS における一部のアミノ酸の消化率の低下は、製造および乾燥工程中の熱処理に部分的に由来している。還元糖の存在下でたん白質を穏やかに加熱すると、初期のメイラード反応が起こり、さらに加熱すると、高度なメイラード反応が起こる。初期のメイラード反応による生成物の一部は環状構造を有しているため蛍光光度による検出が可能である。前面蛍光法(front-face fluorescence)は、DDGS の熱変性の進行度をカチオンの定量により可能にする迅速な方法であり、34 試料の DDGS 中のリジン、メチオニン、トレオニンおよびトリプトファンの SID を予測できるように設定した(Urriola ら、2013)。ただし、この方法を用いて DDGS のアミノ酸の SID を推定する精度は検証されていない。

この研究では、DDGS 中のアミノ酸は消化され難いだけでなく、生物学的利用性も低い可能性があることを示している(Fontaine ら、2007; Pahm ら、2008)。DDGS の乾燥工程における熱処理は、たん白質にいくつかの影響を与える可能性がある(Meade ら、2005)。過熱はリジンを直接分解するだけでなく、メイラード反応により栄養的に利用できない物質を生成することで、消化率や吸収率を低下させる、または、体内に吸収された後に利用されずに尿中に排泄されるリジンの割合を増加させる(Rutherford、2015)。ホモアルギニンを生成するリジンの側鎖アミノ基と O-メチルイソ尿素との反応であるグアニジン化反応は、未修飾のリジン(反応性リジン)の測定に使用されている。全体として、加熱により消化管から吸収されて体たん白質合成に利用される(生物学的に利用可能な)リジンが減少し、豚の発育成績と赤身肉の割合が低下する可能性がある(Almeida ら、2014)。

DDGS 中のアミノ酸の熱変性は、現在、DDGS 中の CP (約 27%)と糖またはでん粉(約 2~8%)の混合物が加熱処理中で強く結合する際に発生するメイラード反応に起因する(Fontaine ら、2007)。しかし、DDGS 中の粗脂肪含量(5~12%)と過酸化生成物も、画分中のアミノ酸と反応して、生物学的に利用できない分解生成物を生成する(Meade ら、2005)。熱ストレスは、リノール酸などの不飽和脂肪酸の過酸化を引き起こし、その結果、ヒドロペルオキシド、アルデヒド、ケトン、その他の過酸化生成物

が形成される。ヒドロペルオキシドはメチオニン、シスチンおよびトリプトファンを酸化し、アルデヒドとケトンはリジンおよびヒスチジンと反応する。以前の研究では、DDGS 中の脂質は、トウモロコシ粒中の脂質に比べて乾燥工程での熱変性を受けやすく、脂質中のヒドロペルオキシドおよびアルデヒド含量が 20~25 倍高まるとの知見もある(Song and Shurson、2013)。トウモロコシ DDGS の粗脂肪含量は大きく変動するため、加熱の影響がメイラード反応による生成物の生成量に影響を及ぼすだけでなく、リジンやその他のアミノ酸の消化性を低下させる可能性がある脂質過酸化物の生成をも引き起こす可能性がある。

飼料原料中の生物学的に利用可能なリジンの比率を測定するために、フロシン法(Finot、2005)、グアニジン化法(Rutherford、2015)など、複数の方法が開発されている。ホモアルギニンを生成するリジンの側鎖アミノ基と O-メチルイソ尿素の反応であるグアニジン化反応は、未修飾の反応性リジンの測定には、前面蛍光法(Urriola ら、2013)や LC-MS 法(液体クロマトグラフィー質量分析、Wang ら、2016)で測定)が利用されている。フロシン法やグアニジン化法は費用が高く、分析に要する時間もかかり、かつ、DDGS のアミノ酸の生物学的利用率を推定するために開発されたものではない。前面蛍光法は、DDGS 中の生物学的に利用可能なリジンの測定が可能で迅速な分析法である。ただし、この方法は検証の結果、蛍光を発する環状構造が形成されている場合のみに適合することが明らかとなっている。より包括的な分析方法は、生成された多数の化合物を定量化できる LC-MS 法である。LC-MS 法と前面蛍光法は、加工乳の品質評価に使用されている(Ntakatsane ら、2011)。DDGS の豚および家禽におけるアミノ酸の生物学的利用率を推定するための実用的で、正確、かつ、安価な迅速定量の開発には、さらなる研究が必要である。

## 可消化リン

リンは、豚用飼料において三番目に高価な成分であるが、DDGS の可消化リン含量は他のすべての穀物や穀物副産物に比べて高い。したがって、可消化リン含量に

基づいて設計した豚用飼料に DDGS を配合すると、無機リンの使用量を低減し、飼料価格を大幅に節減出来る。さらに、多くのエタノール工場では、エタノールと DDGS の生産工程でフィターゼを用いているため、DDGS 中のリンの消化性がさらに高まっているが、供給源間のリン含量の変動を大きくする要因ともなっている。

豚用飼料中のリンの利用性を表現するには様々な言い方があり、混乱を招くことがある。全リンは、飼料原料に含まれる全てのリンを示しており、穀物および穀物副産物中のフィチン酸として知られているリンの難消化性部分を含んでいる。したがって、全リン含量に基づいて配合設計した試料では、豚が利用できるリンの量を考慮されていないために可消化リン含量が過大評価される可能性がある。生物学的に利用可能なリンは、消化・吸収され、生理機能として利用されたり、体内で貯蔵される。リンの生物学的利用率は通常、消化試験で傾斜比定量法を用いて測定され、体内でのリンの消化性および吸収後の利用率を理論的に推定している。リンの生物学的利用能は、しばしば「利用可能なリン:有効リン」として説明されている。傾斜比定量法で利用可能なリンを測定するアプローチには、供試飼料中の無機リン源由来のリン含量と、各水準で得られた増体量や骨灰分含量などの応答との間の直線の傾きと、供試成分の応答における直線の傾きを比較することにより供試成分の有効リン含量を推定している。しかし、この方法の欠点は、対照とした無機リン源の生物学的利用率は 100%であると仮定していることであり、指標として選択する応答によっては推定値が異なる。したがって、リンの生物学的利用率の推定値を使用する場合、これらの推定値は、対照物質として使用されている無機リン源の生物学的利用率に基づくものであり、真の生物学的利用率を示すものではないことを考慮する必要がある。これを考慮しない場合、有効リンに基づいて設計された飼料は、実際に利用されているリンの量を過大評価してしまうことになる。これらの課題を克服するために、最近の研究では、リンの ATTD または STTD(標準化された全消化管消化率)の推定が行われている。その結果、リンの真の消化率の推定精度が向上した。リンの ATTD を使用する場合、基礎的な内因

性損失量が考慮されていないため、リンの真の消化率が過小評価される可能性がある。Shen ら(2002)は、トウモロコシ中のリンの基礎的な内因性損失量は、豚におけるリンの一日必要量の約 26%を占めると推定している。したがって、内因性の損失量を補正した STTD は、飼料中のリンの真の消化率を最も正確に推定するものである(Gonçalves ら、2017)。

NRC(2012)は、粗脂肪含量が 6~9%の DDGS のリンの ATTD および STTD をそれぞれ 60 および 65%としているが、この値はかなり低いことが最近の研究により示されている。Almeida and Stein(2010)は、DDGS 中のリンの STTD は 72.9%であり、微生物フィターゼを 500 単位/kg添加しても STTD は 75.5%に改善されるだけで、フィターゼをトウモロコシ・大豆粕主体飼料に添加した場合のようなリンの大幅な改善効果は見られないと報告している。さらに、彼らはリン含量を STTD に基づいて設計した飼料では、豚の発育成績に悪影響を及ぼさず、トウモロコシ・大豆粕主体飼料に、フィターゼと DDGS を単独、あるいは、組み合わせて使用すると、育成豚におけるリン排泄量が減少することを示している。その後の研究で、Almeida and Stein(2012)は、微生物フィターゼを 130、430、770 または 1,100 単位/kg添加した場合のリンの STTD は、それぞれ 76.9、82.9、82.5、83.0%であったとし、この結果を基に、DDGS 中のリンの STTD 予測式の開発を試みたが、 $R^2$  は 0.20 にすぎなかった。

Hanson ら(2011)は、有効リン含量に基づいて DDGS を 0、10 または 20%配合すると、全リン含量に基づいて配合した場合と比べて、DDGS の配合割合の増加に伴い飼料中の全リン含量と糞中リン含量を低下させるが、リンの排泄量、蓄積量および消化率には影響しなかったと報告している。Baker ら(2013)は、育成豚に給与された DDGS 中のリンの STTD とリン酸二石灰を対照とした生物学的利用率を比較するために、2 回の試験を行っている。リン酸二石灰および DDGS 中のリンの STTD はそれぞれ 86.1 および 58.8%であり、DDGS 中のリンのリン酸二石灰に対する生物学的利用率は 87%だった。この結果、DDGS のリンの相対的生物学的利用率は真の利用率を過大評価しており、DDGS 中のリンの DTTD は、相

対的生物学的利用率からは正確に推定できないと結論している。最適なリン栄養値を得るには、豚に給与する飼料原料のリンの STTD を測定する必要がある。

Rojas ら(2013)は、微生物フィターゼを 870 単位/kg 添加した DDGS と無添加の DDGS のリンの STTD を 82.8 および 76.5%と報告しており、両者の間には大きな差はなかった。これは、恐らく、フィターゼ添加によるリンの STTD 改善効果があったとしても、DDGS 中のフィチン酸含量が比較的低いためだったと推察される。

She ら(2015)は、高脂肪(粗脂肪含量: 10.3%)、中脂肪(同 9.1%)および低脂肪(同 3.5%)の各 DDGS にフィターゼを 600 単位/kg 添加した場合のリンの STTD を測定した。その結果、高脂肪、中脂肪および低脂肪 DDGS のリンの STTD は、71.2、70.8 および 71.8%であり、DDGS 中の粗脂肪含量の違いはリンの STTD に影響を与えないことを示している。

要約すると、豚用の飼料原料として DDGS を使用する際に最適なリン栄養値を得る最も正確な方法は、STTD に基づいて飼料設計を行うことである。最近の研究の結果では、リンの STTD は 59~77%の範囲で変動する可能性があるが、いずれも、NRC(2012)が示す値(65%)よりも高い。残念ながら、DDGS 中のリンの STTD を推定する適切な予測式は開発されていない。したがって、NRC(2012)によるリンの STTD の推定値の使用は、実際の飼料設計における任意の DDGS にのみ使用するべきである。DDGS 配合飼料へのフィターゼの添加は、リンの利用性の改善にそれほど大きな影響を及ぼさない。これは、DDGS 中のフィチン酸含量が比較的低いためと考えられる。DDGS におけるリンの相対的な生物学的利用率はリン酸二カルシウムの 87%と推定されているが、この値は DDGS 中のリンの真の利用率を過大評価している。

## 発育成績

ほ乳期子豚、育成~肥育豚用の飼料に対して、高脂肪および低脂肪 DDGS を、ME 価または NE 価に基づいて、60%まで配合した場合の影響に関する多くの報告がある。2010~2017 年に公表された査読済み文献 26 報と

出版物 1 編(Benz ら、2011; Coble ら、2017; Cromwell ら、2011; Davis ら、2015; Duttlinger ら、2012; Graham ら、2014a, b, c; Hardry matteran, 2013; Jacela ら、2011; Jha ら、2013; Jones ら、2010; Kerr ら、2015a; Lammers ら、2015; Li ら、2013; Li ら、2012; McDonnell ら、2011; Nemechek ら、2015; Overholt ら、2016a; Pompeu ら、2013; Salyer ら、2013; Seabolt ら、2010; Tsai ら、2017; Wang ら、2012; Wu ら、2016a; Ying ら、2013)のデータを用いて、メタ分析を実施した。表 12 には、これらの 27 の文献における全体的な発育応答(DDGS 配合飼料の成績を対照飼料と比較した相対値)の概要を示した。DDGS 配合飼料を給与した場合に、DDGS を含まない対照飼料を給与した場合と比べて、ADG(-2.4%)と飼料効率(-1.2%)は数値的には少ないが有意に減少し( $p < 0.05$ )、ADFI(飼料摂取日量、-0.7%)もわずかに減少した( $p < 0.10$ )。これらの結果を適切に解釈することは非常に重要である。第一に、これらの結果は、DDGS の配合量が 20%以上の飼料が給与した試験結果に基づいたものであって、この要約に含まれているいくつかの報告には、最大 60%配合した試験データも含まれている。第二に、これらの全体的な反応は否定的なものであるが、ADG における-2.4%の変化は、育成~肥育期の豚の実際の ADG(0.90 vs 0.92 kg)と利益(0.45 vs 0.46)に相当し、これらのわずかな差を、一般の養豚現場で検出することは非常に難しい。さらに、豚用飼料に DDGS を配合することで、特に配合割合を 20%以上とした場合に得られる飼料費の節減効果は、発生する可能性のある ADG のわずかな低下による損失をはるかに上回っている。第三に、これらのわずかな減少は、特に応答が最も低いデータを示している試験では、DDGS 配合飼料を設計する際に、不正確な ME 価、NE 価、可消化アミノ酸含量を使用していたことに起因している。実際に、これらの報告における発育応答の 106 のデータのうち、ADG では全データの 72%で「対照飼料と変化がなく」、ADFI では同 63%で、飼料効率では同 67%で変化がなかった(表 13)。

表 14 に示したように、これらの研究における計 106 のデータのうち 72 のデータは、低脂肪 DDGS を給与された豚からのものである。低脂肪 DDGS を給与した豚では、

表 12. トウモロコシ DDGS の配合による豚の発育成績への影響(2010 年以降に公表された 27 報の要約)

	対照飼料に対する比善率 <sup>1</sup> %			開始時体重 kg	終了時体重 kg	飼育日数
	日増体量	飼料摂取日量	飼料効率			
データ数	106	106	106	106	106	106
試験数	27	27	27	27	27	27
平均	-2.4**	-0.7*	-1.2**	41.5	101.6	66.4
最小値	-12.3	-12.8	-17.7	6.7	17.5	20.0
最大値	4.1	18.0	6.5	105.7	134.9	120

\*\* 対照飼料との間で $p < 0.05$ で有意差あり \* 対照飼料との間で $p < 0.10$ で有意差あり

<sup>1</sup>各データのプールされた標準誤差の逆数を重みとして使用

表 13. トウモロコシ DDGS の配合による豚における発育応答(2010 年以降に公表された 27 報の要約)

データ数	N	トウモロコシ DDGS 給与による反応 <sup>1</sup>		
		増加	低下	変化なし
日増体量	106	0	30	76
飼料摂取日量	106	10	29	67
飼料効率	106	7	28	71

<sup>1</sup>有意差があった、あるいは、なかった結果数

ADG および飼料効率が、それぞれ 2.6 および 1.1%低下したが、これらの低下傾向は高脂肪 DDGS を給与した場合(1.7 および 1.3%低下)より大きかった。これらの違いは、試験用飼料を設計する際に、低脂肪 DDGS のエネルギー価と可消化アミノ酸含量について正しい値を使用しなかったことに起因している可能性がある。全体として、これらの 27 の文献からのデータでは、ADG に変化がなかったデータは、高脂肪 DDGS を用いた場合には 88%、低脂肪 DDGS を用いた場合では 64%であり、ADFI では同 56 および 67%、飼料効率では同 62 および 69%だった(表 15)。

27 試験中 22 試験では ME 価に基づいて配合設計を行っていたが、その際に、DDGS を配合することで、ADG が 2.3%、飼料効率が 1.5%低下した。NE 価に基づいて配合設計を行った場合は、ADG が 2.6%、飼料効率が 0.4%低下した(表 16)。これらのわずかな差は、一般の養豚現場では大きな影響を及ぼすものではなく、これらの文献で供試された DDGS について不適切な NE 価を使用された結果による可能性がある。繰り返しになるが、ADG で差がなかったデータは、ME 価に基づいた場合に全体の 71%、NE 価に基づいた場合に全体の 76%であり、ADFI では同 64 および 62%、飼料効率では同 59 および 100%である(表 17)。

よび 100%である(表 17)。

育成期～肥育期の豚のデータ(n = 87)と比較して哺乳期子豚のデータ(n = 19)は少ないが、DDGS 配合飼料を給与した場合の ADG と飼料効率の低下傾向は育成期～肥育期の豚より大きかったが(表 18)、ADG で変化がなかったデータは全体の 68%、ADFI では同 89%、飼料効率では同 74%であった(表 19)。DDGS を配合した飼料を給与したほ乳期子豚での発育成績が大きく劣ったのは、1 文献で否定的な応答を示していた結果であると思われる。したがって、DDGS についての正確な可消化栄養成分組成を使用してほ乳期用飼料を設計すれば、発育成績にはほとんど影響がないものとみなされる。

米国における育成期～肥育期の豚用飼料へのトウモロコシ DDGS の配合割合は通常 20～30%だが、DDGS を使用することで飼料費が大幅に節減できるため、いくつかの大規模な養豚場では DDGS の配合割合を高める動きが進んでいる。豚の発育成績がわずかに低下する場合でも、飼料費を 60%削減することが出来る。最近、米国内で承認された飼料添加物(Liponate™; Nutriquest, Mason City, Iowa)を使用して保存中の枝肉の軟化を防止するか、屠殺前の数週間、DDGS 配合飼料の給与を休止することで、DDGS を 30%以上配合した飼料を使用

している場合でも許容できる枝肉の脂肪の品質を確保できる。

対照的に、米国から DDGS を輸入している国々では、発育成績低下への懸念から、育成～肥育期の豚用飼料への DDGS の配合量を 20%以上に高めることには消極的姿勢を示しており、飼料への DDGS の配合割合を 20%以下に制限しているために、大幅な飼料費の削減は実現していない。しかし、ME 価とアミノ酸の SIDC の予

測式を使用して、使用する DDGS のエネルギー価とアミノ酸の SIDC を正確に把握することで、育成期～肥育期の豚の発育成績を招くことなく、最大 30%配合することが出来る。また、豚の養分要求量を充足させるためには、結晶アミノ酸と油脂を添加する必要がある。様々な配合割合での豚の発育応答の概要を表 20 に示したが、ADG、ADFI および飼料効率への影響を無視できる配合量は最

表 14. 高脂肪(粗脂肪>10%)と低脂肪(粗脂肪<10%)トウモロコシ DDGS を配合した飼料の給与が豚の発育成績に及ぼす影響(2010 年以降の 27 件の研究の要約) 1

	対照飼料に対する比善率 <sup>1</sup> %			開始時体重 kg	終了時体重 kg	飼育日数
	日増体量	飼料摂取日量	飼料効率			
<b>高脂肪DDGS</b>						
データ数	34	34	34	34	34	34
試験数	9	9	9	9	9	9
平均	-1.7**	-0.3	-1.3**	48.6	119.5	75
最小値	-9.0	-7.9	-7.6	30.3	81.7	43
最大値	3.2	8.2	3.7	49.7	134.9	96
<b>低脂肪DDGS</b>						
データ数	72	72	72	72	72	72
試験数	19	19	19	19	19	19
平均	-2.6**	-0.8*	-1.1**	9.4	20.2	25
最小値	-12.3	-12.8	-17.7	6.7	17.5	20
最大値	4.1	18.0	6.5	105.7	132.9	120

\*\* 対照飼料との間でp<0.05で有意差あり \* 対照飼料との間でp<0.10で有意差あり

<sup>1</sup>各データのプールされた標準誤差の逆数を重みとして使用

表 15. 高脂肪(粗脂肪>10%)と低脂肪(粗脂肪<10%)トウモロコシ DDGS を配合した飼料に対する豚の発育応答 (2010 年以降に公表された 27 報の要約)

	N	高脂肪トウモロコシDDGS給与による反応 <sup>1</sup>		
		増加	低下	変化なし
日増体量	34	0	4	30
飼料摂取日量	34	9	6	19
飼料効率	34	1	12	21
				低脂肪トウモロコシDDGS給与による反応 <sup>1</sup>
	N	増加	低下	変化なし
日増体量	72	0	26	46
飼料摂取日量	72	1	23	48
飼料効率	72	6	16	50

<sup>1</sup>有意差があった、あるいは、なかった結果数

大20%であることがわかる。実際、DDGSを25~30%配合しても、ADGでは全データの70%、ADFIでは同68%、飼料効率では同62%で変化は見られない。また、データ数は限られているものの、配合量が30%以上のデータ(n=9)の約半数ではADGとADFIに変化がなく、残りの半数ではそれぞれ2.4~2.8%の減少を示した。ただし、これらの否定的な応答の程度は小さい(例えば、DDGS

配合飼料と対照飼料のADGは0.90 vs 0.92 kg/日である)。豚に対してDDGSの配合割合が高い(30%以上)飼料を給与すると、発育成績がわずかに低下する理由はいくつか考えられる。第一の理由は、DDGSはトウモロコシや大豆粕と比べて繊維含量がはるかに高い(NDF:35~45%)。繊維は、豚用飼料のME価とNE価を低下させ、消化管の膨満により飼料摂取を制限する。その結果、ほ

表 16. トウモロコシ DDGS を ME(代謝エネルギー)あるいは NE(正味エネルギー)に基づいて配合した場合の豚の発育成績に及ぼす反応(2010 年以降に公表された 27 報の要約)<sup>1</sup>

	対照飼料に対する比率 <sup>1</sup> %			開始時体重 kg	終了時体重 kg	飼育日数
	日増体量	飼料摂取日量	飼料効率			
<b>ME</b>						
データ数	85	85	85	85	85	85
試験数	22	22	22	22	22	22
平均	-2.3**	-0.5	-1.5**	48.6	119.5	75
最小値	-12.3	-12.8	-17.7	6.7	17.5	134.9
最大値	4.1	18.0	6.5	100.6	134.9	96
<b>NE</b>						
データ数	21	21	21	21	21	21
試験数	5	5	5	5	5	5
平均	-2.6**	-1.8**	-0.4	9.4	20.2	25
最小値	-9.0	-7.9	-4.9	29.1	106.2	20
最大値	3.2	6.9	3.5	105.7	130.0	93.0

\*\* 対照飼料との間でp<0.05で有意差あり

<sup>1</sup>各データのプールされた標準誤差の逆数を重みとして使用

表 17. トウモロコシ DDGS の ME(代謝エネルギー)あるいは NE(正味エネルギー)に基づいて配合した場合に対する豚の発育応答(2010 年以降に公表された 27 報の要約)<sup>1</sup>

	ME価を基に配合設計した場合の反応 <sup>1</sup>			
	N	増加	低下	変化なし
日増体量	34	0	4	30
飼料摂取日量	34	9	6	19
飼料効率	34	1	12	21
	NE価を基に配合設計した場合の反応 <sup>1</sup>			
	N	増加	低下	変化なし
日増体量	72	0	26	46
飼料摂取日量	72	1	23	48
飼料効率	72	6	16	50

<sup>1</sup>有意差があった、あるいは、なかった結果数

乳期と育成期の初期では、エネルギー要求量を充足させるために必要な量の飼料を物理的に摂取できない場合がある。飼料用酵素の添加により、DDGS を配合した飼料中の繊維の利用性と ME 価および NE 価を高める研究は、近年最も多く行われている(25 章を参照)。残念ながら、DDGS 配合飼料への市販の炭水化物分解酵素とプロテアーゼの使用は、豚の繊維消化率とエネルギー価の改善に一貫した実質的な効果は見られていない。第二に、配合設計時に DDGS の正確な ME 価または NE 価を使用することが不可欠なことである。多くの場合、トウモロコシ DDGS のエネルギー価を推定するための予測式(Urriola ら、2014)を利用していない。これらの予測式により推定された ME 価を使用すると、不適切な配合設計により配合された飼料に由来する発育への悪影響を最小限に抑えることが出来る。さらに、アミノ酸の SID

は、DDGS の繊維含量に影響を受けるが(Urriola and Stein、2010)、公表文献のデータのメタ分析により、総アミノ酸含量と NDF 含量に基づく DDGS 中のアミノ酸の SIDC を逐次推定出来る予測式が開発されている(Zeng ら、2017)。実際、一部の企業(Nutriquest、Cargill、Evonik 等)では、DDGS のアミノ酸の SID を推定するサービスを提供している。したがって、この章で説明する予測式とこれらの市販のサービスを利用することで、トウモロコシ DDGS の ME 価、NE 価およびアミノ酸の SIDC を入手することが出来る。

DDGS の成分組成による他の側面として、DDGS の配合割合が高い(30%以上)飼料を給与すると、豚の発育成績に影響を及ぼす可能性がある。トウモロコシ DDGS の繊維含量は多く、食物繊維が多い場合、豚のトレオニン要求量が高まる(Zhu ら、2005)。Mathai ら(2016)は、

表 18. トウモロコシ DDGS を配合した飼料の給与ステージが発育成績に及ぼす影響(2010 年以降に公表された 28 報の要約)<sup>1</sup>

	ステージ		標準誤差
	対照飼料に対する比率 %		
	ほ乳期	育成期～肥育期	
データ数	19	87	-
試験数	4	24	-
日増体量	-6.3**	-2.2**	1.05
飼料摂取日量	-1.8	-3.7**	1.52
飼料効率	-3.7**	1.4	1.28

\*\* 対照飼料との間で  $p < 0.05$  で有意差あり

<sup>1</sup> 各データのプールされた標準誤差の逆数を重みとして使用

表 19. トウモロコシ DDGS を配合した飼料の給与ステージと発育応答(2010 年以降に公表された 27 報の要約)<sup>1</sup>

	N	ほ乳期子豚における反応 <sup>1</sup>		
		増加	低下	変化なし
日増体量	19	0	6	13
飼料摂取日量	19	0	2	17
飼料効率	19	0	5	14
	N	育成期～肥育期の豚における反応 <sup>1</sup>		
		増加	低下	変化なし
日増体量	87	0	24	63
飼料摂取日量	87	10	27	50
飼料効率	87	7	23	57

<sup>1</sup> 有意差があった、あるいは、なかった結果数

表 20. 配合割合が異なるトウモロコシ DDGS 飼料を給与した場合の豚の発育応答(2010 年以降に公表された 25 報の要約) 1

DDGS配合割合	DDGS – 対照		DDGS配合飼料による反応		
	平均 %	N	増加	低下	変化なし
<b>&lt; 12.5%</b>					
日増体量	-0.95	13	0	2	11
飼料摂取日量	0.15	13	0	2	11
飼料効率	-0.60	13	1	1	11
<b>15 to 20%</b>					
日増体量	-0.91*	27	0	3	24
飼料摂取日量	-0.65	27	6	6	15
飼料効率	-0.66	27	3	7	17
<b>25 to 30%</b>					
日増体量	-3.20**	47	0	14	33
飼料摂取日量	-0.24	47	4	11	32
飼料効率	-2.14**	47	1	17	29
<b>&gt; 30%</b>					
日増体量	-2.44**	9	0	5	4
飼料摂取日量	-2.28**	9	0	4	5
飼料効率	-0.18	9	0	3	6

\*\* 対照飼料との間で $p < 0.05$ で有意差あり \* 対照飼料との間で $p < 0.10$ で有意差あり

<sup>1</sup>Jhaら(2015)の報告ではDDGS配合飼料に大麦(16%)、エクストールドアマニ種実およびエンドウ豆(20%)を配合されていたため除外。また、Benzらの(2011)報告では過酸化油が添加されていたため除外した(これにより、DDGSを配合した飼料のヨウ素価は対照飼料の約20倍だった)

大豆皮とエンドウ豆繊維を給与した豚におけるリジンに対する比率として表されるトレオニンの要求量が、低繊維飼料を給与している豚と比較して高まるとしている。DDGS を多く配合した飼料を豚に給与すると、繊維の組成の変化により、トレオニンの内因性の損失およびその後のトレオニンの要求量が増加する可能性がある(Blank ら、2012)。Huang ら(2017)、Saqui-Salces ら(2017a)およびNRC(2012)のモデルでは、DDGSの配合割合が高い飼料を給与した場合におけるトレオニンの内因性損失量(要求量に対する相対値)は、トウモロコシ・大豆粕主体飼料の3.2%に対して7.7%に高まっている。その結果、DDGS飼料のリジンのSIDCに対するトレオニンのSIDCの比率の最適値は、トウモロコシ・大豆粕主体飼料の59%と比べて、61%に高まる可能性がある。

トレオニンの内因性損失に対する DDGS 中の繊維の

影響に加えて、DDGS は大豆粕よりロイシン含量が 3.3 倍多く、イソロイシン(1.12 倍)およびバリン(1.47 倍)に比べてロイシンの比率が高くなる可能性がある。豚に対して、大豆粕の配合量を減らして DDGS の配合割合を高めた(30%以上)飼料を給与した場合、イソロイシンおよびバリンが不足する可能性がある。これらの分岐鎖アミノ酸は、BCKDC( $\alpha$ -ケト酸デヒドロゲナーゼ複合体)を介して分解経路を共有している。この酵素はキナーゼによって不活性化され、その活性はロイシンの異化作用の産物によって緩和される(Harris ら、2004)。その結果、ロイシンの過剰摂取はイソロイシンとバリンの異化作用を増加させる(Witafsky ら、2010; Gloaguen ら、2012)。

Htoo(2017)は、SID ロイシンとリジンの比率が 160 を超える量の過剰なロイシンを給与した豚におけるイソロイシンとバリンの要求量を測定し、DDGS を配合した飼料



では、ロイシン、イソロイシンおよびバリンの比率が異なるが、これらの分岐鎖アミノ酸の比率を加味した DDGS 配合飼料設計は大規模な商業用養豚方式では評価されていない。過剰なロイシンの影響は、主に飼料摂取量を減少させる。DDGS 中の過剰なロイシン含量およびイソロイシンとバリンのその後の異化は、大豆粕からの GP を供給することで、アミノ酸要求量を充足させることを可能にし、大量の結晶リジンおよびその他のアミノ酸 (0.15%未満のリジン添加) の添加を回避することで軽減できる (Stein and Shurson, 2009)。しかし、現状では、結晶アミノ酸と DDGS の価格が比較的安いために、大豆粕の使用量を減らし、DDGS を 30%以上配合した豚用飼料への結晶アミノ酸の添加量を高めることで対応している。さらに、イソロイシンとバリンの異化作用に対する過剰なロイシンの影響も、アミノ酸のバランスを適切に保つために結晶イソロイシンを添加することによって軽減出来る。ほ乳期子豚と、育成～肥育豚に対して、DDGS を 30%以上配合した飼料を給与した場合のアミノ酸バランスを評価するための研究が進められている。

## 給餌器の形状と給餌管理

養豚場では、様々な形状の給餌器が使用されている。Bergstromら(2012)は、育成～肥育期の豚の発育成績と枝肉形質に及ぼす給餌器の形状(ウェット・ドライ・フィーダーと従来型の粉餌用フィーダー)と、フィーダーの間口に関する評価を行い、ウェット・ドライ・フィーダーを用いた場合の ADG、ADFI、温屠体重量および背脂肪厚は従来型の粉餌用フィーダーを用いた場合より大きいことを明らかにしているが、ウェット・ドライ・フィーダーは従来型の粉餌用フィーダーに比べて調整が難しいとしている。この研究に基づき、Bergstromら(2014)は、粗脂肪含量が10%以上のDDGSを20または60%配合した飼料を、ウェット・ドライ・フィーダーと従来型の粉餌用フィーダーを用いて給与した場合の育成～肥育期の豚の発育成績と枝肉形質への影響を調査した(表21)。この試験は、一般の養豚農家で行われ、ウェット・ドライ・フィーダーと従来型の粉餌用フィーダーのいずれかを設置した40豚房に計1,080頭の豚を収容して実施した。供試DDGSのME価は3,420 kcal/kgであり、SIDCはSteinら(2006)の値を、その他の飼料原料のME可およびアミノ酸のSIDCはNRC(1998)の値を用いて設計した。その結果、ADG、ADFIおよび最終体重は、ウェット・ドライ・フィーダーを用

表 21. DDGS の配合割合と給餌器のタイプが豚の発育成績と枝肉形質に及ぼす影響(Bergstromら、2014 から改編)

	給餌器の形状			
	ウェット・ドライ・フィーダー		従来型粉餌用フィーダー	
	DDGS 20%	DDGS 60%	DDGS 20%	DDGS 60%
発育成績 0～99日齢				
日増体量 <sup>1,2</sup> kg	0.95	0.92	0.88	0.86
飼料摂取日量 <sup>1,2</sup> kg	2.59	2.59	2.28	2.31
飼料効率 <sup>1,2</sup>	0.367	0.355	0.384	0.382
体重 <sup>1</sup> kg	129.2	126.9	122.6	121.3
枝肉形質				
温屠体重量 <sup>1,2</sup> kg	96.6	93.5	90.9	89.8
枝肉歩留 %	74.9	75.1	74.9	75.2
背脂肪厚 <sup>1,2</sup> mm	19.0	18.1	16.7	16.2
ロースの深さ cm	5.96	5.89	6.10	5.99
除脂肪赤身指数 <sup>1,2</sup> %	49.5	50.0	50.6	50.8
顎肉脂肪のヨウ素価 <sup>1,2</sup>	72.1	80.4	73.5	81.9

<sup>1</sup> 給餌器の形状による有意な影響 (p < 0.05)    <sup>2</sup> DDGS配合量による有意な影響 (p < 0.05)

いた場合が大きかったが、飼料効率は従来型の粉餌用フィーダーを用いた場合に高まった。また、ウェット・ドライ・フィーダーを用いた場合には、温屠体重量および背脂肪厚が増加し、脂肪を除いた赤身肉の割合とほほ肉脂肪の IV が低下した。DDGS を 60%配合すると、20%配合した場合より ADG および飼料効率がわずかに減少し、終了時体重が低下する傾向を示した。また、60%配合飼料では、温屠体重量と背脂肪厚が低下し、脂肪を除いた赤身肉の割合とほほ肉脂肪の IV が高まる傾向を示したが、枝肉歩留には差がなかった。これらの結果は、給餌器の形状によって、DDGS を配合した飼料を給与した豚の発育成績と枝肉形質に大きな影響が出る可能性があること、DDGS の配合割合が非常に高い飼料では、ADG と温屠体重量が低下するものの、飼料効率は改善されることを示している。

Weber ら(2015)は、給餌器の間口を変化させた場合の DDGS 配合飼料給与が豚の発育成績を調査した(表

22)。ほ乳期から肥育期までの 7 フェーズのうち、DDGS はフェーズ 3 から 7 において給与し、低配合飼料における配合割合は、それぞれ、27.5、30.0、32.5、32.5 および 26.3%、高配合飼料では 30.0、59.9、59.9、59.9 および 30.0%とし、それぞれ、動物性油脂(ホワイトグリース)の添加により等エネルギーとなるように調整した。DDGS の ME 価は Noblet and Perez(1993)の予測式を用いて推定した。その結果、給餌器の間口と、DDGS の配合割合の間には交互作用はなく、給餌器の間口は育成～肥育期の豚の発育成績と枝肉形質に影響を与えなかった。さらに、DDGS の配合量の違いによる終了時体重、ADG、ADFI および飼料効率への影響はなかった。しかし、DDGS の配合割合が低い飼料では、温屠体重量がわずかに重く、枝肉歩留とロースの深さが増加した。この結果は、育成期～肥育期の豚における給餌器の間口の違いは、DDGS を 30%あるいは 60%配合した飼料を給与した豚の発育成績や枝肉形質には影響を及ぼさないこ

表 22 フェーズ 4、5、および 6 における DDGS の配合割合と、給餌器の間口が豚の発育成績と枝肉形質に及ぼす影響(Weber ら、2015 から改編)

	給餌器の間口 cm/頭			DDGSの配合割合 <sup>1</sup>	
	4.1	4.9	5.7	30%	60%
No. pigs/pen	31	31	31	31	31
<b>体重 kg</b>					
試験開始時	29.9	29.8	29.8	30.3 <sup>a</sup>	29.3 <sup>b</sup>
出荷時	121.5	122.2	122.9	122.4	121.9
<b>変動係数 %</b>					
試験開始後61日	18.3	17.9	17.2	18.0	17.6
試験開始後152日	11.1	11.0	9.8	10.9	10.5
日増体量 kg	0.91	0.91	0.92	0.91	0.92
温屠体増加日量 kg	0.69	0.70	0.71	0.71	0.69
飼料摂取日量 kg	2.06	2.04	2.04	2.07	2.03
飼料効率 <sup>2</sup>	0.44	0.45	0.45	0.44	0.45
飼料効率 <sup>3</sup>	0.34	0.34	0.35	0.34	0.34
出荷までに要した日数	155.0	156.2	155.8	156.1	155.3
<b>枝肉形質</b>					
豚房数	10	10	10	15	15
温屠体重量 kg	92.7	93.4	93.8	93.9 <sup>a</sup>	92.7 <sup>b</sup>
歩留 %	75.2	75.7	76.1	76.1 <sup>a</sup>	75.2 <sup>b</sup>
背脂肪厚 mm	12.8	12.7	12.8	12.6	12.9
ロースの深さ mm	63.6	64.4	63.7	64.9 <sup>a</sup>	62.9 <sup>b</sup>

a - b 異符号間に有意差あり (p < 0.05)

<sup>1</sup> フェーズ4、5および6におけるDDGS配合

<sup>2</sup> 生体重を用いた飼料効率

<sup>3</sup> 温屠体重量を用いた飼料効率

とを示している。Myers ら(2013)は、1,290 頭の育成期～肥育期の豚を用いて、DDGS を 25～45%配合した飼料と、パンくずを 15 および 30%配合した粉餌あるいはペレット飼料を、ウェット・ドライ・フィーダーと従来型の粉餌用フィーダーを用いて給与した場合の影響を調査した。

その結果は表 23 に示したとおりであり、ADG にはペレット加工と給餌器の形状による交互作用なかったが、ペレット飼料の ADG は粉餌より増加し、ウェット・ドライ・フィーダーを用いると、従来型の粉餌用フィーダーを用いた場合より ADG が増加した。従来型の粉餌用フィーダーを用いて給与した場合、粉餌の ADFI はペレット飼料より増加したが、ウェット・ドライ・フィーダーを用いた場合には差がなかった。ウェット・ドライ・フィーダーを用いて給与した場合の飼料効率は、粉餌とペレット飼料の間で飼料効率に差はなかったが、従来型の粉餌用フィーダーを用いた場合には粉餌の飼料効率が低下した。枝肉形質に及ぼすペレット加工の主効果と、交互作用には有意差はなかったが、ウェット・ドライ・フィーダーを用いて給与した場合には従来型の粉餌用フィーダーを用いて給与した場合に比べて、背脂肪が厚く、脂肪を除いた赤身の割合が低かった。

DDGS の価格の増減と、入手の容易性に応じて、経済性を確保するために、育成期～肥育期における DDGS の利用を断続的に行うことがある。さらに、飼料工場では、栄養成分含量や消化率が異なる複数の DDGS を使用する場合があり、これは、エネルギー価とアミノ酸の SIDC を動的に変更して配合設計を行わないと発育成績と枝肉形質に悪影響を及ぼす可能性がある。Hilbrands ら(2013)は、育成期～肥育期に DDGS を配合した飼料と配合しない飼料を交互に給与した場合の発育成績と枝肉形質への影響を調査するために 2 試験を行っている。最初の試験では、①トウモロコシ・大豆粕主体の対照飼料と DDGS を 20%配合した飼料を継続給与、②、③対照飼料と DDGS 20%配合飼料、あるいは、40%配合飼料を 2 週間間隔で交互に給与の 3 処理を設定した。その結果、表 24 に示すように、DDGS を 20%配合した飼料を継続して給与、あるいは、DDGS 配合飼料と対照飼料を交互に給与すると、発育成績と枝肉形質には差がなかったが、DDGS を 40%配合した飼料と対照飼料を交互に給与すると温屠体重量が低下した。2 回目の試験では、①～③トウモロコシ・大豆粕主体の対照飼料、アミノ酸の SIDC が低い DDGS、あるいは、高い DDGS を 40%配合した飼

表 23. DDGS 配合のペレット加工と給餌器の形状が豚の発育成績と枝肉形質に及ぼす影響(Myers ら、2013 から改編)

	従来型粉餌用		ウェット・ドライ	
	粉餌	ペレット	粉餌	ペレット
試験開始後0～91日の発育成績				
日増体量 <sup>1,2</sup> kg	0.84	0.85	0.89	0.91
飼料摂取日量 <sup>1,2</sup> kg	2.29 <sup>a</sup>	2.45 <sup>b</sup>	2.50 <sup>b</sup>	2.51 <sup>b</sup>
飼料効率 <sup>1</sup>	0.369 <sup>a</sup>	0.349 <sup>c</sup>	0.357 <sup>bc</sup>	0.361 <sup>ab</sup>
体重 <sup>2</sup> kg	123.1	124.0	127.2	128.5
ペレット品質				
PDI	-	74.0	-	74.0
正常なペレットの割合 %	-	36.6	-	36.6
枝肉形質				
温屠体重量 kg	91.7	92.7	94.1	93.8
枝肉歩留 %	75.6	75.3	75.6	76.0
背脂肪厚 <sup>2</sup> mm	17.3	17.2	18.8	18.3
ロースの深さ cm	6.19	6.05	5.97	5.93
除脂肪赤身指数 <sup>2</sup> %	50.4	50.4	49.7	49.9

a-b異符号間に有意差あり (p < 0.05)    <sup>1</sup>ペレット加工による影響 (p < 0.07)    <sup>2</sup>給餌器のデザインによる影響 (P < 0.01)

表 24. DDGS 配合割合と除去が豚の発育成績と枝肉形質に及ぼす影響 (Hilbrands ら、2013 から改編)

	対照飼料を 継続給与	DDGS 20%配合飼 料を継続給与	DDGS 20%配合飼料 と対照飼料を交互 に給与	DDGS 40%配合飼料 と対照飼料を交互 に給与
開始時体重 kg	51.3	51.3	51.3	51.4
終了時体重 kg	112.3 <sup>xy</sup>	112.2 <sup>xy</sup>	113.0 <sup>x</sup>	110.6 <sup>y</sup>
日増体量 kg	0.87	0.87	0.88	0.85
飼料摂取日量 kg	2.70 <sup>xy</sup>	2.75 <sup>x</sup>	2.71 <sup>xy</sup>	2.63 <sup>y</sup>
飼料効率	0.323 <sup>ab</sup>	0.317 <sup>a</sup>	0.325 <sup>b</sup>	0.322 <sup>ab</sup>
温屠体重量 kg	83.8 <sup>a</sup>	83.6 <sup>a</sup>	84.3 <sup>a</sup>	81.1 <sup>b</sup>
歩留 %	74.8	74.6	74.6	73.8
第10肋骨の背脂肪厚 mm	19.3	20.1	20.4	19.8
ロース芯面積 cm <sup>2</sup>	48.8	48.3	48.2	47.6
赤肉割合 %	54.4	54.0	53.8	54.2

a - b 異符号間に有意差あり (p < 0.05)      x - y 異符号間に有意差あり (p < 0.10)

表 25. SIDC(標準化された回腸消化量)が高いあるいは低い DDGS を 40% 配合した飼料と対照飼料を継続給与あるいは 2 週間ごとに交互に給与した場合の豚の発育成績と枝肉形質に及ぼす影響 (Hilbrands ら、2013 から転載)

	対照	低SIDC - 対照	高SIDC - 対照	低SIDC	高SIDC	高 - 低SIDC
開始時体重 kg	33.2	33.2	33.2	33.2	33.2	33.2
終了時体重 kg	121.5 <sup>ab</sup>	121.6 <sup>ab</sup>	123.0 <sup>a</sup>	115.9 <sup>c</sup>	118.3 <sup>bc</sup>	117.8 <sup>c</sup>
日増体量 kg	0.92 <sup>ab</sup>	0.92 <sup>ab</sup>	0.93 <sup>a</sup>	0.86 <sup>c</sup>	0.89 <sup>bc</sup>	0.88 <sup>c</sup>
飼料摂取日量 kg	2.70 <sup>ab</sup>	2.72 <sup>a</sup>	2.78 <sup>a</sup>	2.57 <sup>b</sup>	2.73 <sup>ab</sup>	2.68 <sup>ab</sup>
飼料効率	0.34	0.34	0.34	0.34	0.33	0.33
赤肉生産量 kg/日	0.395 <sup>ab</sup>	0.396 <sup>ab</sup>	0.405 <sup>a</sup>	0.362 <sup>d</sup>	0.383 <sup>bc</sup>	0.367 <sup>cd</sup>
赤肉の生産効率	0.15	0.15	0.15	0.14	0.14	0.14
温屠体重量 kg	93.3 <sup>a</sup>	92.3 <sup>ab</sup>	94.4 <sup>a</sup>	87.2 <sup>c</sup>	89.4 <sup>bc</sup>	88.5 <sup>c</sup>
歩留 %	76.2 <sup>a</sup>	75.8 <sup>ab</sup>	76.0 <sup>ab</sup>	74.7 <sup>c</sup>	75.1 <sup>bc</sup>	74.6 <sup>c</sup>
第10肋骨の背脂肪厚 mm	21.3 <sup>a</sup>	19.9 <sup>ab</sup>	20.4 <sup>ab</sup>	18.9 <sup>ab</sup>	18.1 <sup>b</sup>	19.8 <sup>ab</sup>
ロース芯面積 cm <sup>2</sup>	44.7 <sup>a</sup>	44.7 <sup>a</sup>	45.3 <sup>a</sup>	40.4 <sup>b</sup>	42.7 <sup>ab</sup>	40.6 <sup>b</sup>
赤肉割合 %	51.8	52.1	52.1	51.3	52.3	50.8

a - d 異符号間に有意差あり (p < 0.05)

料を継続給与、④～⑥両 DDGS を配合した飼料と対照飼料あるいは SIDC が高い DDGS と低い DDGS を配合した飼料をフェーズによって切替える 6 処理を設定した。両 DDGS の ME 価は Pedersen ら (2007) の予測式から推定、アミノ酸の SIDC は IDEA アッセイ (Novus International、ミズーリ州セントルイス) で測定し、トウモロコシおよび大豆粕の ME 価およびアミノ酸の SIDC は NRC (1998) を、その他の原料の SIDC は NRC (1994) を用いた。その結

果は表 25 に示したとおりであり、SIDC が低い DDGS を配合した飼料と、SIDC が高い DDGS と低い DDGS を配合した飼料をフェーズによって切替えると ADG が減少し、対照飼料より終了時体重が低かった。SIDC が低い DDGS を配合した飼料を継続した場合の ADFI は、SIDC が低い、あるいは、高い DDGS を配合した飼料と対照飼料をフェーズによって切替えた場合より低かったが、飼料効率には影響はなかった。これらの結果は、IDEA アッ

セイにより DDGS 中のアミノ酸の SIDC が過大評価されていた可能性が高いことを示している。SIDC が低い DDGS を配合した飼料を継続した場合と、SIDC が低い DDGS と高い DDGS を配合した飼料をフェーズによって切替えた場合より温屠体重量、枝肉歩留およびロース芯面積が低下した。しかし、両 DDGS を 40% 配合した飼料を継続給与あるいは定期的に切り替えても、全体的な発育成績には悪影響はなかった。さらに、赤身肉の割合にも差は見られなかった。したがって、これら 2 試験の結果は、トウモロコシ・大豆粕主体飼料と DDGS 配合飼料を 2 週間ごとに交互に給与しても、発育成績や枝肉形質に悪影響を及ぼす懸念はないことを示している。

### 枝肉形質

育成～肥育の豚の枝肉組成に及ぼすトウモロコシ DDGS の影響を調査した数々の報告 (n = 20) が 2010 年

以降に公表されており (Asmus ら、2014; Coble ら、2017; Cromwell ら、2011; Davis ら、2015; Duttlinger ら、2012; Graham ら、2014a, b, c; Hardryatteran、2013; Jacela ら、2011; Jha ら、2013; Lee ら、2013; McDonnell ら、2011; Nemechek ら、2015; Overholt ら、2016; Pompeu ら、2013; Salyer ら、2013; Wang ら、2012; Wu ら、2016c; Ying ら、2013)、これらの報告から得られた枝肉歩留と脂肪を除いた赤身肉の割合への応答は表 26 および 27 に示した。

DDGS を配合した飼料を給与した際に最も一貫性がある影響の 1 つは、枝肉歩留のわずかな減少である。DDGS の繊維含量が比較的高いため、消化管の総重量が増加し、枝肉重量が減少する。このメタ分析から、育成期～肥育期の豚用飼料への DDGS の配合量の増加に伴い、枝肉歩留は相対比率で 0.022% 減少する。この影響は、粗脂肪含量が 10% 以上の高脂肪 DDGS の使用に関連しているようであり、低脂肪 DDGS を配合した飼

表 26. トウモロコシ DDGS を配合した飼料の給与が歩留と脂肪を除いた赤肉の割合に及ぼす影響 (2010 年以降に公表された 20 報の要約 1)

	DDGS - 対照 (絶対値 %)		開始時体重 kg	終了時体重 kg	飼育日数
	歩留	脂肪を除いた赤肉割合			
データ数	75	55	75	75	75
試験数	20	16	20	20	20
平均	-0.87**	0.05	46.7	120.3	76.5
最小値	-2.1	-1.6	23.4	86.9	20
最大値	0.7	1.6	105.7	1.4.9	120

\*\* 対照飼料に対して有意差あり (p < 0.05)    1 各データのプールされた標準誤差の逆数を重みとして使用

表 27. ME あるいは NE 価を用いて設計、低脂肪あるいは高脂肪 DDGS の利用が豚の歩留および脂肪を除いた赤肉の割合に及ぼす影響 (2010 年以降に公表された 20 報の要約 1)

	粗脂肪含量		標準 誤差	エネルギー価		標準 誤差	P値	
	> 10%	< 10%		ME	NE		粗脂肪 含量	エネルギー 価
データ数	30	45		60	15			
試験数	8	13		16	4			
歩留	-0.79**	-0.42	0.17	-0.49**	-0.72**	0.16	0.034	0.139
脂肪を除いた赤肉割合	0.20	-0.16	0.23	0.24	-0.18	0.14	0.220	<0.01

\*\* 対照との間に p < 0.05 で有意差あり    \* 対照との間に p < 0.10 で有意差あり  
1 最小二乗法による平均値。各データのプールされた標準誤差の逆数を重みとして使用  
2 育成期の飼料における DDGS 配合割合が増加すると、歩留まりが相対割合で 0.022% 減少

料では枝肉歩留に大きな変化はなかった(表27)。DDGSを配合する際にNE価またはME価のいずれかを使用すると、枝肉歩留が同様に減少した。ただし、脂肪を除く赤身肉の割合は、DDGSの配合量や粗脂肪含量には影響を受けない。

## 脂肪の品質

トウモロコシ・大豆粕主体飼料へのDDGSの配合量を高めると育成期～肥育期の豚の脂肪の品質が低下することが報告されている(Stein and Shurson, 2009; Xuら、2010a、b; Benzら、2010; Grahamら、2014a、b; Davisら、2015)。豚肉の脂肪(ほほ肉、背脂肪およびバラ肉脂肪)の品質は、一般的に、不飽和脂肪酸含量と飽和脂肪酸含量の比率を用いたIVにより評価されている。DDGS給与による脂肪の品質へ悪影響を抑制するために、いくつかの戦略が開発されている。これらの戦略には、出荷前の飼料中のDDGS配合量を段階的に低下させる(Harrisら、2018)、出荷前3週間以上DDGS配合飼料の給与を休止する(Jacelaら、2009; Xuら、2010b; Hilbrandsら、2013)、低脂肪DDGSの利用(Dahlenら、2011; Wuら、2016a)、体脂肪のIV予測式を使用した飼料設計(Wuら、2016b)などがある。

ほほ肉、背脂肪およびバラ肉脂肪のIVを予測するために、飼料に含まれるIVP(ヨウ素価産物)を変数とした予測式(Madsenら、1992; Boydら、1997; Bergstromら、2010; Estrada Restrepo、2013)、リノール酸(C18:2)摂取

量を変数とした予測式(Averette Gatlinら、2002; Benzら、2011; Kellner、2014)および飼料へのDDGSの配合割合を変数とした予測式(Cromwellら、2011; Estrada Restrepo、2011)が開発されている。最近では、Paulkら(2015)が、飼料中の必須脂肪酸含量、給与日数、飼料のNE価および背脂肪厚を変数としたIV予測式を示している。

Wuら(2016)は、これらの予測式を用いて推定された背脂肪のIVの精度を比較し、Paulkら(2015)の予測式を用いると、誤差とバイアスが最少で最も精度が高く推定出来ることを明らかにしている(表28)。全体として、これらの結果は、DDGSの粗脂肪含量の減少が、枝肉の脂肪のIVを低下させ、DDGSの給与による豚肉の脂肪の品質に及ぼす悪影響を低減することを示している。ただし、この改善効果は、飼料からの脂質摂取量とは比例しておらず、DDGS中の脂質の消化性の違いによって影響を受ける可能性がある。脂肪酸組成は脂肪の部位によって異なることも頭に入れておく必要がある。ほほ肉の脂肪は、背脂肪およびバラ肉の脂肪よりもIVが高いが、背脂肪は、ほほ肉の脂肪およびバラ肉の脂肪に比べて飼料の油脂含量の変化に最も鋭敏に反応するようである。公表されている各部位の脂肪のIV予測式を使用した結果、部位によるIVの推定精度に違いがあった。Paulkら(2015)が示しているように、飼料のエネルギー価、発育成績、枝肉組成等の測定値を変数として加える必要があり、これらを用いた予測式は、飼料中の油脂の特性と量のみに基づいた推定値より精度が高まる。飼料

表 28. 背脂肪、ほほ肉脂肪およびバラ肉脂肪のヨウ素価(IV)を推定するための予測式(Wuら、2016 から改編)

	予測式	R <sup>2</sup>	予測バイアス <sup>1</sup>	バイアス <sup>2</sup>	引用文献
<b>背脂肪</b>					
	47.1 + 0.14 × IVP <sup>3</sup> intake/day	0.86	6.43	-4.95	Madsen et al., 1992
	52.4 + 0.315 × diet IVP	-	4.60	-2.15	Boyd et al., 1997
	51.946 + 0.2715 × diet IVP	0.16	6.45	-5.05	Benz et al., 2011
	35.458 + 14.324 × diet C18:2 %	0.73	8.36	-1.08	Benz et al., 2011
	64.5 + 0.432 × DDGS in diet %	0.92	8.26	7.10	Cromwell et al., 2011
	60.13 + 0.27 × diets IVP	0.81	5.04	3.05	Estrada Restrepo, 2013
	70.06 + 0.29 × DDGS in diet %	0.81	9.19	8.00	Estrada Restrepo, 2013
	84.83 + (6.87 × IEFA) - (3.90 × FEFA) - (0.12 × Id) - (1.30 × Fd) - (0.11 × IEFA × Fd) + (0.048 × FEFA × Id) + (0.12 × FEFA × Fd) - (0.006 × FNE) + (0.0005 × FNE × Fd) - (0.26 × BF)	0.95	4.01	-0.84	Paulk et al., 2015 <sup>4</sup>
<b>ほほ肉脂肪</b>					
	56.479 + 0.247 × diet IVP	0.32	4.92	-3.69	Benz et al., 2011
	47.469 + 10.111 × diet C18:2 %	0.90	5.57	-1.37	Benz et al., 2011
	64.54 + 0.27 × diet IVP	0.81	6.55	5.66	Estrada Restrepo, 2013
	72.99 + 0.24 × DDGS in diet %	0.81	8.33	7.38	Estrada Restrepo, 2013
	85.50 + (1.08 × IEFA) + (0.87 × FEFA) - (0.014 × Id) - (0.05 × Fd) + (0.038 × IEFA × Id) + (0.054 × FEFA × Fd) - (0.00066 × INE) + (0.071 × IBW) - (2.19 × ADFI) - (0.29 × BF)	0.93	4.73	-3.37	Paulk et al., 2015 <sup>4</sup>
<b>バラ肉脂肪</b>					
	58.32 + 0.25 × diet IVP	0.74	3.43	1.41	Estrada Restrepo, 2013
	67.35 + 0.26 × DDGS in diet %	0.75	6.66	5.53	Estrada Restrepo, 2013
	106.16 + (6.21 × IEFA) - (1.50 × Fd) - (0.11 × IEFA × Fd) - (0.012 × INE) + (0.00069 × INE × Fd) - (0.18 × HCW) - (0.25 × BF)	0.94	3.27	1.73	Paulk et al., 2015 <sup>4</sup>
<b>3か所の平均</b>					
	58.103 + 0.2149 × diet IVP	0.93	3.93	-2.23	Kellner, 2014
	58.566 + 0.1393 × C18:2 intake/day, g	0.94	6.17	-4.90	Kellner, 2014

<sup>1</sup> 予測誤差：値が小さいほど予測式の精度が高い

<sup>2</sup> 予測バイアス：絶対値が小さいほど予測式の精度が高い（値が負の場合は過小評価していることを示し、正の場合は過大評価していることを示す）

<sup>3</sup> ヨウ素価積：飼料のヨウ素価 (IV) × 飼料の粗脂肪含量 (%) × 0.10 (Madsenら、1992)

<sup>4</sup> 予測式の略語：I=初期の飼料、F=最終的な飼料、d=給与日数、EFA=必須脂肪酸 (C18:2およびC18:3%)、NE=正味エネルギー (kcal/kg)、BW=体重 (kg)、ADFI=平均飼料摂取日量 (kg/日)、HCW=温層体重量 (kg)、BF=背脂肪厚 (mm)

中の DDGS の配合割合を枝肉の脂肪の IV の予測変数とすると推定精度が最も低くなる。育成期～肥育期の豚に DDGS を配合した飼料を給与する際に、より予測が可能な脂肪の IV の応答を得るためには、予測誤差の大きさとこれらの予測式のバイアスを減らす必要がある。

## ロースの品質

DDGS 配合飼料を給与した豚のロースの品質を評価するためにいくつかの研究が行われている。Leick ら (2010)は、肉質を評価するために、DDGS を 0、15、30、45 または 60%配合した育成期～肥育期の豚用飼料にラ

クトパミン(5 mg/kg)を添加した場合の影響を調査している。DDGS の配合量を高めても、ロースの pH、主観的および客観的な色調、マーブリングまたは脂肪含量には影響がなかったが、主観的なマーブリングスコアおよび硬さが低下し、ドリップロスが増加した。さらに、バラ肉の重量、長さ、厚さ、風味およびL\*が低下し、バラ肉の調理ロスが増加した。バラ肉の脂肪とほほ肉の脂肪の IV は、一価不飽和脂肪酸:多価不飽和脂肪酸比の低下により高まった。保存後のTBARS(チオバルビツール酸反応物質)は保存期間が0、7または14の間では影響を受けなかったが、21日間保存すると、DDGSを配合しない、あるいは15%配合した飼料に比べて、DDGSを30、45または60%配合した飼料ではTBARAが高まった。これらの結果は、育成期～肥育期の豚用飼料に最大60%のDDGSを配合すると、ロースの品質にはほとんど影響しないが、バラ肉の品質、ベーコンの加工特性および脂肪の安定性が低下することを示唆している。

McClellandら(2012)は、DDGSを0、15、30または45%配合した育成期～肥育期の豚用飼料を比較し、DDGSの配合割合を高めると、枝肉脂肪中のPUFA含量が増加してIVが高まり、バラ肉を柔らかくするが、冷蔵後のバラ肉のスライス収率、品質またはベーコン、ソーセージ、ロース肉の食味には影響しなかったとしている。

Wangら(2012)は、DDGSを0、15または30%配合した飼料に、ビタミンEを10または210 IU/kg添加した場合の影響を調査し、DDGSを配合した飼料では、筋肉および脂肪組織中の飽和脂肪酸の割合が低下し、不飽和およびPUFA比が高まり、真空パックしたロース肉中の揮発性塩基窒素濃度が低下したと報告している。また、ビタミンE添加量を高めると、筋肉および脂肪組織中の $\alpha$ -トコフェロール濃度が高まった。DDGSを配合した結果、13日間保存後のロース肉のTBARSが増加したが、ビタミンEを210 IU/kg添加すると、保存後4、7、10および13日におけるロース肉のTGARSが明らかに低下した。これらの結果は、DDGS配合飼料を給与すると、新鮮な豚ロース肉の保存特性に多少の悪影響があるが、ビタミンEを210 IU/kg添加することで、これらの悪影響をある程度緩和出来ることを示している。

Yingら(2013)は、DDGSの配合量を、フェーズ1、2および3では30%、フェーズ4では20%、フェーズ5では50%とし、L-カルニチンを添加(0、50または100 mg/kg)した場合の育成期～肥育期の豚の発育成績、枝肉形質、ロースと脂肪の品質への影響を、DDGSを含まない対照飼料と比較した。枝肉形質には、DDGSの配合とL-カルニチンの添加との交互作用はなかったが、L-カルニチンの添加量が高い場合には、温屠体重量、枝肉歩留および背脂肪厚が増加した。また、L-カルニチンの添加はロース肉の貯蔵ロスを高め、DDGSの配合はロース肉のマーブリングスコアを低下させる傾向を示した。DDGSを配合した飼料にL-カルニチンを50 mg/kg添加すると、L-カルニチン無添加あるいは100 mg/kg添加飼料に比べてロース肉の剪断力価が低下した。DDGSを配合した飼料にL-カルニチンを添加すると、ロース肉の色調が高まった。また、L-カルニチン添加量の増加に伴ってリノール酸とアラキジン酸含量が減少したが、DDGSを含まない飼料では減少傾向は見られなかった。これらの結果は、L-カルニチンを50 mg/kg添加したDDGS配合飼料を給与すると、温屠体重量が高まり、ほほ肉の脂肪のリノール酸含量が減少することを示している。

Overholtら(2016b)は、DDGSを0または30%配合したペレット飼料がバラ肉の特性、脂肪の品質およびベーコンスライス収率に及ぼす影響を調査している。DDGSを30%配合した飼料では、DDGSを配合していない対照飼料に比べてIVが7.1ユニット高く、バラ肉厚、締めりおよび重量が低下したが、バラ肉の収率には影響がなかった。これらの結果は、DDGSを30%配合すると、バラ肉が薄く、柔らかくなるが、収率には影響がないことを示している。

### 免疫学的去勢豚へのDDGSの給与

雄豚のPC(Physical castration、外科的去勢)は、世界の多くの国で、雄豚の攻撃的および性的行動の抑制や不快な獣臭の発生を防ぐために一般的に行われている。しかし、PCは豚肉の獣臭の除去には有効だが、飼料効率の低下、赤身肉の減少、離乳前の死亡率の増加を招く。さらに、イギリス、アイルランド、オーストラリアなどの



国々では、アニマルウェルフェアの徹底により、雄豚の PC を認めていない。その結果、Zoetis 社(ニュージーランド州フローラムパーク)は、筋肉注射による IC(immunological castrates、免疫学的去勢)製品を開発し、Improvast(米国およびカナダ)、Improvac(オーストラリアおよびニュージーランド)、Innosure または Vivax という商品名で販売している。この製品は、FDA(米国食品医薬品局)により承認されており、世界の 63 か国で登録され、過去 10 年間にわたって 5,000 万頭以上の雄豚に使用されている(Bradford and Mellencamp, 2013)。Improvast で処理した雄豚が生産する豚肉は、ヒトの健康に影響を与える可能性がある残留物はなく、安全に摂取することが出来る。さらに、この製品を用いて IC 豚が生産した豚肉の輸出制限はない(Bradford and Mellencamp, 2013)。この製品は、豚に 2 回注射する。1 回目の投与は雄豚の免疫系に機能し、2 回目(出荷前 3~10 週間)の投与により精巢機能の抑制を引き起す。雄豚の IC は、ADG と飼料効率の改善、赤身肉の増加、背脂肪の減少など、PC に比べて多くの利点があることから、使用頭数が劇的に増加し、米国における雄豚の 10%以上で使用されている。

IC 豚への DDGS の給与が、発育成績、枝肉形質、肉と脂肪の品質に及ぼす影響に関する調査が Asmus ら(2014b)により行われている。IC あるいは PC 豚には、①、② DDGS を含まない対照飼料または DDGS を 30% 配合した飼料を出荷まで継続給与、③ 出荷前約 50 日目までは DDGS 30%配合飼料を給与した。以後は対照飼料に切り替えるの、3 群を設定し。その結果、IC 豚は、PC 豚に比べて枝肉歩留と飼料摂取量が低下したが、飼料効率は改善された。IC 豚では脂肪の IV が高まったが、2 回目の投与後出荷までの期間を長期化した場合の IV は PC 豚と差がなかった。去勢の方法に関わらず、出荷前に DDGS 配合飼料の給与を休止すると、枝肉歩留への悪影響が軽減され、脂肪の品質が改善された。

Little ら(2014)は、DDGS を 0 または 30%配合した飼料を IC 豚および PC 豚に給与し、出荷 5 週間前に DDGS を配合した飼料の給与を休止した場合のバラ肉の締まりに及ぼす影響を調査した結果、DDGS 配合飼料の給与の有無に関わらず、2 回目の Improvast 投与時期を出荷

前 5 週または 7 週とした場合のバラ肉の香り、異臭、風味、塩味には差がなかった。この結果は、Improvast の 2 回目の投与時期を出荷前 5 週または 7 週間とすると、DDGS 30%配合飼料の継続給与、あるいは、出荷前 5 週間の休止に関わらず、PC 豚と同様の獣臭抑制効果があることを示している。

同様に、Tavárez ら(2014)は、DDGS を 0 または 20% 配合した飼料の継続給与と、2 回目の Improvast 投与後出荷までの間 DDGS 配合飼料を休止した場合の、IC 豚および PC 豚の精肉歩留、バラ肉収量を調査した。出荷前に DDGS 配合飼料を休止することで、枝肉形質、精肉歩留およびバラ肉の特性への悪影響を最小限に抑制できた。PC 豚では、出荷前の DDGS 配合飼料休止による骨抜き枝肉収量への影響はなかったが、IC 豚に対照飼料を給与すると骨抜き枝肉収量が減少した。DDGS 配合飼料ではバラ肉の脂肪の IV が対照飼料に比べて高まった。PC 豚では、対照飼料および DDGS 配合飼料を継続給与した場合にバラ肉の収量が低下したが、出荷前に DDGS 配合飼料の給与を休止すると、バラ肉の収量が増加した。

最近では、Harris ら(2017a、b、2018)が、トウモロコシ DDGS 配合飼料の給与方法と、2 回目の Improvast 投与時期(出荷前 5、7 および 9 週)が発育成績、枝肉の成分組成、プライマルカット量、赤身肉の品質およびバラ肉脂肪の品質に及ぼす影響を調査している。DDGS の給与方法は、① トウモロコシ・大豆粕主体の対照飼料を継続給与、② DDGS の配合量をフェーズ 1 から 4 で漸減(40、30、20 および 10%)、③ フェーズ 1~3 では DDGS を 40%配合した飼料を給与し、フェーズ 4 では対照飼料を給与、④ フェーズ 1~4 において DDGS 40%配合飼料を継続給与の 4 処理とした。DDGS 40%配合飼料を給与した IC 豚の飼料摂取量は、飼料中の繊維含量の増加と、Improvast の投与時期により抑制されたが、フェーズ 4 で対照飼料に切り替えると急速に増加した。全体的に、給与飼料への DDGS の配合割合をフェーズにより漸減させると、対照飼料を継続給与した場合と同様の ADG と ADFI が得られ、フェーズ 4 で DDGS 配合飼料を休止するより効果的だった。給与飼料への DDGS の配合割合を

フェーズにより漸減させる、あるいは、フェーズ 4 で DDGS 配合飼料の給与を休止すると精肉歩留が高まるとともに、各部位の脂肪の IV が低下し、対照飼料あるいは DDGS 40%飼料を継続給与した場合に比べてプライマルカット量と、ロス肉の品質が改善された。出荷前7週間に Improvest を投与することで、各部位の脂肪の IV が低下し、バラ肉厚が増加した。

## DDGS 給与による豚の健康効果

DDGS を給与すると、PPE(豚増殖性腸炎)の起因菌である *Lawsonia intracellularis* に感染した豚の腸管健康の改善に有効であるという報告が複数公表されている (Whitney ら、2006a, b) が、DDGS の給与が豚の腸内細菌叢にどのように影響するのか、また、病原菌の感染やコロニー形成に対する感受性に影響を与える可能性があるのかといった情報は限られているため、作用機序は明らかにはなっていない。

Tran ら(2012)は、離乳豚に最大 30%の DDGS を配合した飼料を給与すると、腸内細菌叢の単一の微生物の割合が増加して腸内微生物の多様性が低下することで、細菌叢の不安定化に影響している可能性があることを示しているが、DDGS 配合飼料を給与しても血清免疫グロブリン濃度には影響がなかった。Rostagno ら(2013)は、DDGS を 20、30 または 40%配合した飼料がサルモネラへの感受性、腸内における菌数および排出量への影響に関して 2 つの試験を行っている。これらの試験の 1 つでは、DDGS を含まない対照飼料を給与した育成期～肥育期のサルモネラ感染豚は、DDGS 30%配合飼料に比べてサルモネラの排出頻度が高かったが、全体的な応答は、DDGS 配合飼料を給与してもサルモネラのコロニー形成に対する感受性に変化を及ぼさなかった。Saqui-Salces ら(2017b)は、DDGS 配合飼料を育成期～肥育期の豚に給与すると、杯細胞の分化の促進により腸管上皮細胞を変化させて、栄養受容体と輸送体の発現量を変化させること示している。

PEDV(豚流行性下痢ウイルス)は、2013 年に米国の養豚産業に壊滅的な影響を及ぼし、ウイルスの生存率に関する広範的な調査と、他のコロナウイルス(TGEV;

伝染性胃腸炎ウイルス、PDCoV; 豚デルタコロナウイルス-PDCoV)の飼料原料および様々な飼料添加物中での生存性に関する調査が行われた。Dee ら(2015)は、飼料中の PEDV の生存性は飼料原料によって異なり、大豆粕中で最も長く生存するように思われるが、ホルマリン主体の液体処理を行うと、調査したすべての飼料原料でウイルスが不活化されたと報告している。同様に、Trudeau ら(2017)は、様々な飼料原料における PEDV、TGEV および PDCoV の生存性を調査し、大豆粕中での PEDV ウイルスの生存日数は最も長く、TGS および PDCoV の生存性も、DDGS を含むいくつかの飼料原料に比べて高かった。これらの結果は、大豆粕が DDGS やその他の一般的な飼料原料よりも、飼料を介したコロナウイルス感染における大きな危険因子であることを示唆している。

## 妊娠期および泌乳期用飼料への DDGS の利用

最近公表されたいくつかの報告では、妊娠期および泌乳期の母豚の繁殖成績と、産仔の発育成績への DDGS 給与に関する調査が行われている。Song ら(2010)は、DDGS を 0、10、20 または 30%配合した飼料を、産次が異なる複数の泌乳期母豚に給与し、母豚および産仔の成績、エネルギーおよび窒素の消化率ならびに血漿尿素窒素濃度、乳脂肪および乳たん白量への影響を調査した。その結果、DDGS の配合割合を高めても、飼料の DE 価、ME 価、窒素蓄積量および窒素消化率には影響を及ぼさなかった。DDGS の配合量が 20 および 30%の飼料を給与した母豚では、対照飼料を給与した母豚より離乳時の血漿尿素窒素濃度が低かった。母豚の ADFI と背脂肪の変化には、DDGS 配合量による影響はなかったが、DDGS を 30%配合した飼料を給与すると、対照飼料を給与した母豚より体重の減少が大きかった。産仔の離乳前死亡率および増体量には、DDGS 配合量による影響はなかった。この結果から、DDGS を最大 30%配合した飼料を母豚に給与しても、母豚および産仔の成績や、DE 価と ME 価、窒素消化率、乳成分組成は、トウモロコシ・大豆粕主体の対照飼料と差がないことを示しており、泌乳期の母豚に DDGS を最大 30%配合した飼料を給与

すると、満足できる母豚と産仔の成績が得られる。

Wang ら(2013)は、2 産および 3 産の母豚に対して、DDGS を 0、20 または 40%配合した飼料を分娩前 20 日間給与した。その結果、母豚の平均妊娠期間、離乳から次回発情までの間隔、ADFI および泌乳時の背脂肪厚には DDGS 配合量による影響はなかった。さらに、分娩頭数、生存頭数、出生時体重、離乳豚雛、泌乳中の子豚の ADG にも、DDGS 配合量による影響はなかった。DDGS 配合飼料を給与した母豚の乳の乳固形分、乳たん白質、乳脂肪および乳糖率は、トウモロコシ・大豆粕主体の対照飼料と差がなかった。これらの結果は、妊娠後期および泌乳期の母豚用飼料に対して DDGS を 40%まで配合することが出来ることを示している。また、この際、リジン含量が 0.87%の飼料にリジンを 5.2 g/kgを添加すると、母豚と産仔の成績や初乳と乳の成分組成に影響を及ぼすことなく、飼料中に配合している大豆粕のすべてを置換することが出来た。

Li ら(2014)は、DDGS の配合割合を妊娠期では 40%、泌乳既では 20%とした飼料について、3 回の繁殖サイクルにわたる母豚と産仔の成績と、母豚の寿命に及ぼす影響をトウモロコシ・大豆粕主体の対照飼料と比較した。DDGS 配合飼料を 3 回の繁殖サイクルに渡って給与しても、母豚の寿命には影響しなかったが、対照飼料と比べて、産仔数と母豚の生産性が低下した。しかし、妊娠中に群飼した場合の母豚への悪影響は、DDGS 配合飼料に比べて対照飼料でより顕著だった。

Greiner 等(2015)は、DDGS の配合量を妊娠期では 10%(試験 1)、あるいは、40%(試験 2)、泌乳期では 10、20 または 30%(試験 1)、20、30、40 または 50%(試験 2 および 3)とした場合の、母豚と産仔の成績に及ぼす影響を調査した。その結果、泌乳期の母豚用飼料に DDGS を 40~50%配合すると、飼料摂取量と敷料の性状が低下する可能性が示唆された。

トウモロコシ DDGS には比較的高濃度の不飽和脂肪酸が含まれており、DDGS を給与した子豚と母豚のビタミン E の状態に影響を与える可能性がある。このため、Shelton ら(2014)は、妊娠後 69 日目の母豚に対して、DDGS を 40%配合した飼料を給与し、酢酸 DL- $\alpha$ -トコフ

エロール(44 または 66 mg/kg)あるいは酢酸 D- $\alpha$ -トコフェロール(11、22、33 または 44 mg/kg)の添加が、血漿、乳および体組織の  $\alpha$ -トコフェロール含量に及ぼす影響を調査した。その結果、酢酸 D- $\alpha$ -トコフェロールの酢酸 DL- $\alpha$ -トコフェロールに対する生物学的利用率は、指標によって異なっているが、推奨されている効力値(1.36)よりも大きいことを明らかにしている。

Song and Shurson(2013)は、DDGS 中のトウモロコシ油が過酸化される可能性があり、DDGS を肥育豚および母豚用飼料に高い割合で配合すると、酸化ストレスを引き起こす可能性があることを示唆している。L-カルニチンは、細胞代謝において重要であり、ミトコンドリアによる長鎖遊離脂肪酸の輸送を調節して、 $\beta$  酸化により ATP(アデノシン三リン酸)を生成する。L-カルニチンは製品として入手可能であり、母豚用飼料に添加すると、繁殖成績と乳生産を改善するだけでなく、消化管の抗酸化能、抗炎症能およびその他の保護機能を高めることが示されている(Ramanau ら、2004; Ramanau ら、2005; Musser ら、2005)。Wei ら(2016)は、DDGS を妊娠期では 25%、泌乳期では 40%配合した飼料への L-カルニチンの添加の有無(妊娠期では 100 mg/kg、泌乳期では 200 mg/kg)の効果について調査した。その結果、妊娠期および泌乳期の母豚に対して、DDGS 配合飼料を給与しても、産仔の腸管バリア機能には影響しなかったが、L-カルニチンを添加すると、新生子豚と離乳子豚の腸管バリア機能が改善された。離乳豚の消化管内の Eubacteria(真正細菌)数は、トウモロコシ・大豆粕主体の対照飼料への L-カルニチン添加により増加したが、DDGS 配合飼料への添加効果はなかった

Li ら(2013)は妊娠豚を群飼した場合の DDGS 40%配合飼料の給与の影響を調査している。妊娠期間中にフィードステーションを設置した豚房で群飼した母豚に DDGS 配合飼料を給与すると、対照飼料に比べて、群内の他の個体に対する攻撃性が高まり、ストレス増加の指標とされている唾液コルチゾール濃度が高まった。ストールで個体管理している母豚に DDGS 配合飼料を給与すると、対照飼料に比べて休息時間と反復行動に費やす時間が長く、唾液コルチゾール濃度が低かった。これ

らの結果は、母豚に対する DDGS 40%配合飼料の給与は、群飼時の母豚の福祉状態を悪化させる可能性があるが、ストールで個体管理する場合には、福祉状態を改善することを示唆している。

## 結論

過去数年間に渡って行われた膨大な量の研究の結果、許容可能な発育・繁殖成績や枝肉形質や肉質を維持しながら飼料費を節減するために、比較的高い配合割合でトウモロコシ DDGS を効果的に使用する技術が劇的に改善された。粗脂肪含量が異なる DDGS の ME 価とアミノ酸の SIDC を正確に推定するための予測式も開発されている。すべてのステージの豚用飼料に DDGS を配合する場合、正確な ME 価、NE 価、可消化アミノ酸およびリンの含量のデータを使用することで、全てのステージで配合量を高める(最大 30%)ことが出来る。実際、現在米国における養豚農家のトレンドは、従来のトウモロコシ・大豆粕主体飼料と同等の発育成績と枝肉組成を達成するために、可消化トレオニンと分岐鎖アミノ酸の飼料中でのバランスをとることで、ほ乳期と育成～肥育期の豚用飼料への DDGS の配合割合を 30%以上に高めている。豚脂肪の硬度の低下は、低脂肪 DDGS を利用する、出荷の 3~4 週間前に DDGS 配合飼料の給与を休止する、または、最も正確な豚脂肪の品質予測式を使用して DDGS 配合量を制限することで最小限に抑えることが出来る。また、分娩前の母豚では、DDGS の配合量を最大 50%まで高めることが出来、DDGS にマイコトキシン含有の懸念がない場合には、母豚と産仔の成績に悪影響を及ぼさないことが示されている。

## 引用文献

Adeola, O., and C. Kong. 2014. Energy value of distillers dried grains with solubles and oilseed meals for pigs. *J. Anim. Sci.* 92:164–170.

Almeida, F. N., J. K. Htoo, J. Thomson, and H. H. Stein. 2014. Effects of balancing crystalline amino acids in diets containing heat-damaged soybean meal or distillers dried grains with solubles fed to weanling pigs. *Animal*

8:1594–1602.

Almeida, F.N., J.K. Htoo, J. Thomson, and H.H. Stein. 2013. Amino acid digestibility of heat damaged distillers dried grains with solubles fed to pigs. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 4:44.

Almeida, F.N., and H.H. Stein. 2012. Effects of graded levels of microbial phytase on the standardized total tract digestibility of phosphorus in corn and corn coproducts fed to pigs. *J. Anim. Sci.* 90:1262–1269.

Almeida, F.N., and H.H. Stein. 2010. Performance and phosphorus balance of pigs fed diets formulated on the basis of values for standardized total tract digestibility of phosphorus. *J. Anim. Sci.* 88:2968–2977.

Anderson, P.V., B.J. Kerr, T.E. Weber, C.J. Ziemer, and G.C. Shurson. 2012. Determination and prediction of digestible and metabolizable energy from chemical analysis of corn coproducts fed to finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 90:1242–1254.

Asmus, M.D., J.M. DeRouchey, M.D. Tokach, S.S. Dritz, T.A. Houser, J.L. Nelssen, and R.D. Goodband. 2014a. Effects of lowering dietary fiber before marketing on finishing pig growth performance, carcass characteristics, carcass fat quality, and intestinal weights. *J. Anim. Sci.* 92:119–128.

Asmus, M.D., T.A. Tavarez, M.D. Tokach, S.S. Dritz, A.L. Schroeder, J.L. Nelssen, R.D. Goodband, and J.M. DeRouchey. 2014b. The effects of immunological castration and corn dried distillers grains with solubles withdrawal on growth performance, carcass characteristics, fatty acid analysis, and iodine value of pork fat depots. *J. Anim. Sci.* 92:2116–2132.

Averette Gatlin, L., M. T. See, J. A. Hansen, D. Sutton, and J. Odle. 2002. The effects of dietary fat sources, levels, and feeding intervals on pork fatty acid composition. *J. Anim. Sci.* 80:1606–1615.

Baker, S.R., B.G. Kim, and H.H. Stein. 2013. Comparison of values for standardized total tract digestibility and relative bioavailability of phosphorus in dicalcium

- phosphate and distillers dried grains with solubles fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 91:203–210.
- Benz, J. M., M. D. Tokach, S. S. Dritz, J. L. Nelssen, J. M. DeRouche, R. C. Sulabo, and R. D. Goodband. 2011. Effects of dietary iodine value product on growth performance and carcass fat quality of finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 89:1419–1428.
- Benz, J. M., S. K. Linneen, M. D. Tokach, S. S. Dritz, J. L. Nelssen, J. M. DeRouche, R. D. Goodband, R. C. Sulabo, and K. J. Prusa. 2010. Effects of dried distillers grains with solubles on carcass fat quality of finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 88:3666–3682.
- Bergstrom, J.R., J.L. Nelssen, M.D. Tokach, S.S. Dritz, R.D. Goodband, and J.M. DeRouche. 2012. Effects of two feeder designs and adjustment strategies on the growth performance and carcass characteristics of growing–finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 90:4555–4566.
- Bergstrom, J.R., J.L. Nelssen, M.D. Tokach, S.S. Dritz, R.D. Goodband, and J.M. DeRouche. 2014. The effects of feeder design and dietary dried distillers’ grains with solubles on the performance and carcass characteristics of finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 92:3591–3597.
- Bergstrom, J. R., M. D. Tokach, J. L. Nelssen, S. S. Dritz, R. D. Goodband, J. M. DeRouche, and T. A. Houser. 2010. Meta-analyses describing the variables that influence the backfat, belly fat, and jowl fat iodine value of pork carcasses. Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service. Kansas State University, Manhattan, KS.
- Blank, B., E. Schlecht, and A. Susenbeth. 2012. Effect of dietary bre on nitrogen retention and bre associated threonine losses in growing pigs. *Arch. Anim. Nutr.* 66:86–101.
- Boyd, R. D., M. E. Johnston, K. Scheller, A. A. Sosnicki, and E. R. Wilson. 1997. Relationship between dietary fatty acid prole and body fat composition in growing pigs. Pig Improvement Company, Franklin, KY.
- Bradford, J.R., and M.A. Mellencamp. 2013. Immunological control of boar taint and aggressive behavior in male swine. *Anim. Frontiers* 3:12–19.
- Coble, K.F., J.M. DeRouche, M.D. Tokach, S.S. Dritz, R.D. Goodband, and J.C. Woodworth. 2017. Effects of distillers dried grains with solubles and added fat fed immediately before slaughter on growth performance and carcass characteristics of finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 95:270–278.
- Cromwell, G. L., M. J. Azain, O. Adeola, S. K. Baidoo, S. D. Carter, T. D. Crenshaw, S. W. Kim, D. C. Mahan, P. S. Miller, and M. C. Shannon. 2011. Corn distillers dried grains with solubles in diets for growing–finishing pigs: A cooperative study. *J. Anim. Sci.* 89:2801–2811.
- Curry, S.M., D.M.D.L. Navarro, F.N. Almeida, J.A.S. Almeida, and H.H. Stein. 2014. Amino acid digestibility in low–fat distillers dried grains with solubles fed to growing pigs. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 5:27.
- Dahlen, R. B. A., S. K. Baidoo, G. C. Shurson, J. E. Anderson, C. R. Dahlen, and L. J. Johnston. 2011. Assessment of energy content of low–solubles corn distillers dried grains and effects on growth performance, carcass characteristics, and pork fat quality in growing–finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 89:3140–3152.
- Davis, J. M., P. E. Urriola, G. C. Shurson, S. K. Baidoo, and L. J. Johnston. 2015. Effects of adding supplemental tallow to diets containing 30 percent distillers dried grains with solubles on growth performance, carcass characteristics, and pork fat quality in growing–finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 93:266–277.
- Dee, S. C. Neill, T. Clement, A. Singrey, J. Christopher–Hennings, and E. Nelson. 2015. An evaluation of porcine epidemic diarrhea virus survival in individual feed ingredients in the presence or absence of a liquid antimicrobial. *Porcine Health Mgmt.* 1:9.
- Duttlinger, A.J., J.M. DeRouche, M.D. Tokach, S.S. Dritz, R.D. Goodband, J.L. Nelssen, T.A. Houser, and R.C. Sulabo. 2012. Effects of increasing crude glycerol and

- dried distillers grains with solubles on growth performance, carcass characteristics, and carcass fat quality of finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 90:840–852.
- Estrada Restrepo, J. E. 2013. Factors associated with variation in the fatty acid composition and iodine value of carcass fat in pigs fed increasing levels of dried distillers grains with solubles. Master's thesis. Univ. of Illinois at Urbana-Champaign.
- Finot, P. A. 2005. The absorption and metabolism of modified amino acids in processed foods. *J. AOAC Int.* 88:894–903.
- Fontaine, J., U. Zimmer, P. J. Moughan, and S. M. Rutherford. 2007. Effect of heat damage in an autoclave on the reactive lysine contents of soy products and corn distillers dried grains with solubles. Use of the results to check on lysine damage in common qualities of these ingredients. *J. Agric. Food Chem.* 55:10737–10743.
- Gloaguen, M., N. Le Floch, E. Corrent, Y. Primot, and J. van Milgen. 2012. Providing a diet deficient in valine but with excess leucine results in a rapid decrease in feed intake and modifies the postprandial plasma amino acid and alpha-keto acid concentrations in pigs. *J. Anim. Sci.* 90:3135–3142.
- Gonçalves, M.A.D., S.S. Dritz, M.D. Tokach, J.M. DeRouche, J.C. Woodworth, and R.D. Goodband. 2017. Fact sheet – Ingredient database management for swine: phosphorus. *J. Swine Health Prod.* 25:76–78.
- Graham, A.B., R.D. Goodband, M.D. Tokach, S.S. Dritz, J.M. DeRouche, and S. Nitikanchana. 2014a. The effects of medium-oil dried distillers grains with solubles on growth performance, carcass traits, and nutrient digestibility in growing-finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 92:604–611.
- Graham, A. B., R. D. Goodband, M. D. Tokach, S. S. Dritz, J. M. DeRouche, S. Nitikanchana., and J. J. Updike. 2014b. The effects of low-, medium-, and high-oil distillers dried grains with solubles on growth performance, nutrient digestibility, and fat quality in finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 92:3610–3623.
- Graham, A.B., R.D. Goodband, M.D. Tokach, S.S. Dritz, J.M. DeRouche, and S. Nitikanchana. 2014c. The interactive effects of high-fat, high-fiber diets and ractopamine HCl on finishing pig growth performance, carcass characteristics, and carcass fat quality. *J. Anim. Sci.* 92:4585–4597.
- Greiner, L., C. Neill, G.L. Allee, X. Wang, J. Connor, K. Touchette, and J.L. Usry. 2015. The feeding of dried distillers' grains with solubles to lactating sows. *J. Anim. Sci.* 93:5718–5724.
- Gutierrez, N.A., N.V.L. Serão, and J.F. Patience. 2016. Effects of distillers' dried grains with solubles and soybean oil on dietary lipid, fiber, and amino acid digestibility in corn-based diets fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 94:1508–1519.
- Gutierrez, N.A., D.Y. Kil, Y. Liu, J.E. Pettigrew, and H.H. Stein. 2014. Effects of co-products from the corn-ethanol industry on body composition, retention of protein, lipids and energy, and on the net energy of diets fed to growing or finishing pigs. *J. Sci. Food Agric.* doi: 10.1002/jfsa.6648, 8 pp.
- Hanson, A.R., G. Xu, M. Li, M.H. Whitney, and G.C. Shurson. 2011. Impact of dried distillers grains with solubles (DDGS) and diet formulation method on dry matter, calcium, and phosphorus retention and excretion in nursery pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 172:187–193.
- Hardy matteran, S.J. 2013. Effect of dietary distillers dried grains with solubles (DDGS) and pig removal strategy at harvest on the growth performance, carcass characteristics, and fat quality of growing-finishing pigs. Master's thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Harris, E.K., M.A. Mellencamp, L.J. Johnston, R.B. Cox, and G.C. Shurson. 2018. Effectiveness of different corn dried distillers grains with solubles feeding strategies and increasing the time intervals between the second Improvev dose and slaughter of immunologically

- castrated pigs on belly and pork fat quality. *Meat Sci.* 135:62–73.
- Harris, E.K., M.A. Mellencamp, L.J. Johnston, and G.C. Shurson. 2017a. Growth performance of immunologically castrated pigs slaughtered at 5, 7, or 9 weeks after the second Improvevst dose and fed diets containing corn dried distillers grains with solubles. *J. Anim. Sci.* 95:806–819.
- Harris, E.K., M.A. Mellencamp, L.J. Johnston, R.B. Cox, and G.C. Shurson. 2017b. Effect of time interval between the second Improvevst dose and slaughter and corn dried distillers grains with solubles feeding strategies on carcass composition, primal cutout, and pork quality of immunologically castrated pigs. *Meat Sci.* 127:13–20.
- Harris, R. A., M. Joshi, and N. H. Jeoung. 2004. Mechanisms responsible for regulation of branched-chain amino acid catabolism. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 313:391–396.
- Hastad, C. W., M. D. Tokach, J. L. Nelssen, R. D. Goodband, S. S. Dritz, J. M. DeRouchey, C. N. Groesbeck, K. R. Lawrence, N. A. Lenehan, and T. P. Keegan. 2004. Energy value of dried distillers grains with solubles in swine diets. *J. Anim. Sci.* 82(Suppl. 2):50. (Abstr.)
- Hilbrands, A. M., L. J. Johnston, K. M. McClelland, R. B. Cox, S. K. Baidoo, L. W. O. Souza, and G. C. Shurson. 2013. Effects of abrupt introduction and removal of high and low digestibility corn distillers dried grains with solubles from the diet on growth performance and carcass characteristics of growing–finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 91:248–258.
- Htoo, J. K., K. Manner, and J. Zentek. 2017. Excess dietary leucine level increases the optimal dietary isoleucine–to–lysine ratio in 8- to 21-kilogram pigs. *J. Anim. Sci.* 95:195.
- Huang, Z., P.E. Urriola, and G.C. Shurson. 2017. Use of in vitro dry matter digestibility and gas production to predict apparent total tract digestibility of total dietary fiber for growing pigs. *J. Anim. Sci.* 95:5474–5484.
- Jacela, J.Y., J.M. DeRouchey, S.S. Dritz, M.D. Tokach, R.D. Goodband, J.L. Nelssen, R.C. Sulabo, R.C. Thaler, L. Brandts, D.E. Little, and K.J. Prusa. 2011. Amino acid digestibility and energy content of deoiled (solventextracted) corn distillers dried grains with solubles for swine and effects on growth performance and carcass characteristics. *J. Anim. Sci.* 89:1817–1829.
- Jacela, J. Y., J. M. Benz, S. S. Dritz, M. D. Tokach, J. M. DeRouchey, R. D. Goodband, J. L. Nelssen, and K. J. Prusa. 2009. Effect of dried distillers grains with solubles withdrawal regimens on finishing pig performance and carcass characteristics. *Swine Day, phosphorus 181–191.* Manhattan, KS.
- Jha, R., T.A. Woyengo, J. Li, M.R. Bedford, T. Vasanthan, and R.T. Zijlstra. 2015. Enzymes enhance degradation of the fiber–starch–protein matrix of distillers dried grains with solubles as revealed by a porcine in vitro fermentation model and microscopy. *J. Anim. Sci.* 93:1039–1051.
- Jha, R., J.K. Htoo, M.G. Young, E. Beltranena, and R.T. Zijlstra. 2013. Effects of increasing co-product inclusion and reducing dietary protein on growth performance, carcass characteristics, and jowl fatty acid profile of growing–finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 91:2178–2191.
- Jones, C.K., J.R. Bergstrom, M.D. Tokach, J.M. DeRouchey, R.D. Goodband, J.L. Nelssen, and S.S. Dritz. 2010. Efficacy of commercial enzymes in diets containing various concentrations and sources of dried distillers grains with solubles for nursery pigs. *J. Anim. Sci.* 88:2084–2091.
- Kellner, T. A. 2014. Impact of dietary fat intake on carcass iodine value and pork fat quality. Master’s thesis. Iowa State University, Ames, IA.
- Kerr, B.J., N.K. Gabler, and G.C. Shurson. 2015a. Formulating diets containing corn distillers dried grains with solubles on a net energy basis: Effects on pig performance and energy and nutrient digestibility. *Prof. Anim. Scientist* 31:497–503.

- 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.
- Kim, B.G., D.Y. Kil, D.C. Mahan, G.M. Hill, and H.H. Stein. 2014. Effects of dietary sulfur and distillers dried grains with solubles on carcass characteristics, loin quality, and tissue concentrations of sulfur, selenium, and copper in growing-finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 92:4486–4493.
- Kim, B.G., D.Y. Kil, and H.H. Stein. 2013. In growing pigs, the true ileal and total tract digestibility of acid hydrolyzed ether extract in extracted corn oil is greater than in intact sources of corn oil or soybean oil. *J. Anim. Sci.* 91:755–763.
- Lammers, P.J., B.J. Kerr, and M.S. Honeyman. 2015. Biofuel co-products as swine feed ingredients: Combining corn distillers dried grains with solubles (DDGS) and crude glycerin. *Anim. Feed Sci. Technol.* 201:110–114.
- Lee, J.W., D.Y. Kil, B.D. Keever, J. Killefer, F.K. McKeith, R.C. Sulabo, and H.H. Stein. 2013. Carcass fat quality of pigs is not improved by adding corn germ, beef tallow, palm kernel oil, or glycerol to finishing diets containing distillers dried grains with solubles. *J. Anim. Sci.* 91:2426–2437.
- Leick, C.M., C.L. Puls, M. Ellis, J. Killefer, T.R. Carr, S.M. Scramlin, M.B. England, A.M. Gaines, B.F. Wolter, S.N. Carr, and F.K. McKeith. 2010. Effect of distillers dried grains with solubles and ractompamine (Paylean) on quality and shelf life of fresh pork and bacon. *J. Anim. Sci.* 88:2751–2766.
- Li, G., Z. Wang, M. Lin, Z. Lu, and W. Yao. 2012. Effects of corn DDGS in combination with compound enzymes on growth performance, carcass fat quality, plasma and tissue redox homeostasis of growing-finishing pigs. *Livest. Sci.* 149:46–52.
- Li, P., X. Xu, Q. Zhang, J.D. Liu, Q.Y. Li, S. Zhang, X.K. Ma, and X.S. Piao. 2015. Effect of different inclusion level of condensed distillers solubles ratios and oil content on amino acid digestibility of corn distillers dried grains with solubles in growing pigs. *Asian Austral. J. Anim. Sci.* 28:102–110.
- Li, X., S.K. Baidoo, Y.Z. Li, G.C. Shurson, and L.J. Johnston. 2014. Interactive effects of distillers dried grains with solubles and housing system on reproductive performance and longevity of sows over three reproductive cycles. *J. Anim. Sci.* 92:1562–1573.
- Li, Y.Z., C.E. Phillips, L.H. Wang, X.L. Xie, S.K. Baidoo, G.C. Shurson, and L.J. Johnston. 2013. Effects of distiller' dried grains with solubles on behavior of sows kept in a group-housed system with electronic sow feeders or individual stalls. *Can. J. Anim. Sci.* 93:57–66.
- Little, K.L., J.M. Kyle, B.M. Bohrer, A.L. Schroeder, C.A. Fedler, K.J. Prusa, and D.D. Boler. 2014. A comparison of slice characteristics and sensory characteristics of bacon from immunologically castrated barrows with bacon from physically castrated barrows, boars, and gilts. *J. Anim. Sci.* 92:5769–5777.
- Liu, P., L. W. O. Souza, S. K. Baidoo, and G. C. Shurson. 2012. Impact of distillers dried grains with solubles particle size on nutrient digestibility, DE and ME content, and -owability in diets for growing pigs. *J. Anim. Sci.* 90:4925–4932.
- Madsen, A., K. Jakobsen, and H. P. Mortensen. 1992. In-uence of dietary fat on carcass fat quality in pigs. A review. *Acta Agric. Scand., Sect. A, Animal Sci.* 42:220–225.
- Mathai, J. K., J. K. Htoo, J. E. Thomson, K. J. Touchette, and H. H. Stein. 2016. Effects of dietary fiber on the ideal standardized ileal digestible threonine: Lysine ratio for twenty-five to fifty kilogram growing gilts. *J. Anim. Sci.* 94:4217–4230.
- McClelland, K.M., G. Rentfrow, G.L. Cromwell, M.D. Lindemann, and M.J. Azain. 2012. Effects of corn distillers dried grains with solubles on quality traits of



- pork. *J. Anim. Sci.* 90:4148–4156.
- McDonnell, P., C.J. O’Shea, J.J. Callan, and J.V. O’Doherty. 2011. The response of growth performance, nitrogen, and phosphorus excretion of growing–finishing pigs to diets containing incremental levels of maize dried distiller’s grains with solubles. *An. Feed Sci. Tech.* 169:104–112.
- Meade, S. J., E. A. Reid, and J. A. Gerrard. 2005. The impact of processing on the nutritional quality of food proteins. *AOAC Int.* 88:904–922.
- Musser, R.E., R.D. Goodband, M.D. Tokach, K.Q. Owen, J.L. Nelssen, S.A. Blum, S.S. Dritz, and C.A. Civis. 1999. Effects of L-carnitine fed during gestation and lactation on sow and litter performance. *J. Anim. Sci.* 77:3289–3295.
- Myers, A.J., R.D. Goodband, M.D. Tokach, S.S. Dritz, J.M. DeRouchey, and J.L. Nelssen. 2013. The effects of diet form and feeder design on the growth performance of finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 91:3420–3428.
- Nemechek, J.E., M.D. Tokach, S.S. Dritz, R.D. Goodband, J.M. DeRouchey, and J.C. Woodworth. 2015. Effects of diet form and type on growth performance, carcass yield, and iodine value of finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 93:4486–4499.
- Noblet, J., H. Fortune, X. S. Shi, and S. Dubois. 1994. Prediction of net energy value of feeds for growing pigs. *J. Anim. Sci.* 72:344–354.
- Noblet, J., and J. M. Pérez. 1993. Prediction of digestibility of nutrients and energy value of pig diets from chemical analysis. *J. Anim. Sci.* 71:3389–3398.
- NRC. 2012. Nutrient requirements of swine. 11th rev. ed. Natl. Acad. Press, Washington, DC.
- NRC. 1998. Nutrient Requirements of Swine. 10th ed. National Academy Press, Washington, DC.
- NRC. 1994. Nutrient requirements for poultry. 9th rev. ed. Natl. Acad. Press, Washington, DC.
- Ntakatsane, M. P., X. Q. Yang, M. Lin, X. M. Liu, and P. Zhou. 2011. Short communication: Suitability of –fluorescence spectroscopy for characterization of commercial milk of different composition and origin. *J. Dairy Sci.* 94:5375–80.
- Olukosi, O.A., and A.O. Adebisi. 2013. Chemical composition and prediction of amino acid content of maize– and wheat–distiller’s dried grains with solubles. *Anim. Feed Sci. Technol.* 185:182–189.
- Overholt, M.F., J.E. Lowell, E.K. Arkfeld, I.M. Grossman, H.H. Stein, A.C. Dilger, and D.D. Boler. 2016a. Effects of pelleting diets without or with distillers’ dried grains with solubles on growth performance, carcass characteristics, and gastrointestinal weights of growing–finishing barrows and gilts. *J. Anim. Sci.* 94:2172–2183.
- Overholt, M.F., J.E. Lowell, K.B. Wilson, R.J. Matulis, H.H. Stein, A.C. Dilger, and D.D. Boler. 2016b. Effects of feeding pelleted diets without or with distillers dried grains with solubles on fresh belly characteristics, fat quality, and commercial bacon slicing yields of finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 94:2198–2206.
- Pahm, A. A., C. Pedersen, D. Hoehler, and H. H. Stein. 2008. Factors affecting the variability in ileal amino acid digestibility in corn distillers dried grains with solubles fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 86:2180–2189.
- Paulk, C. B., J. R. Bergstrom, M. D. Tokach, S. S. Dritz, D. D. Burnett, E. W. Stephenson, M. A. Vaughn, J. M. DeRouchey, R. D. Goodband, J. L. Nelssen, and J. M. Gonzalez. 2015. Equations generated to predict iodine value of pork carcass back, belly, and jowl fat. *J. Anim. Sci.* 93:1666–1678.
- Patience, J. F. 2009. Energy in swine nutrition. *Animal Industry Report*. [http://lib.dr.iastate.edu/ans\\_air/vol655/iss1/80](http://lib.dr.iastate.edu/ans_air/vol655/iss1/80). (accessed December 3, 2017).
- Pedersen, C., M. G. Boersma, and H. H. Stein. 2007. Digestibility of energy and phosphorus in ten samples of distillers dried grains with solubles fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 85:1168–1176.

- Pompeu, D. B.R. Wiegand, H.L. Evans, J.W. Rickard, G.D. Gerlemann, R.B. Hinson, S.N. Carr, M.J. Ritter, R.D. Boyd, and G.L. Allee. 2013. Effect of corn dried distillers grains with solubles, conjugated linoleic acid, and ractopamine (Paylean) on growth performance and fat characteristics of late finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 91:793–803.
- Ramanau, A., H. Kluge, and K. Eder. 2005. Effects of L-carnitine supplementation on milk production, litter gains and backfat thickness in sows on a low energy and protein intake during lactation. *Br. J. Nutr.* 717–721.
- Ramanau, A., H. Kluge, J. Spilke, and K. Eder. 2004. Supplementation of sows with L-carnitine during pregnancy and lactation improves growth of piglets during the suckling period through increased milk production. *J. Nutr.* 134:86–92.
- Ren, P., Z. Zhu, B. Dong, J. Zang, and L. Gong. 2011. Determination of energy and amino acid digestibility in growing pigs fed corn distillers' dried grains with solubles containing different lipid levels. *Arch. Anim. Nutr.* 65:303–319.
- Rojas, O.J., Y. Liu, and H.H. Stein. 2013. Phosphorus digestibility and concentration of digestible and metabolizable energy in corn, corn coproducts, and bakery meal fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 91:5326–5335.
- Rostagno, M.H., B.T. Richert, L.V.C. Girao, G.M. Preis, L.J. Lara, A.F. Amaral, A.D.B. Melo, and A. Jones. 2013. Do distillers grains with solubles affect the occurrence of *Salmonella enterica* colonization in pigs? *J. Anim. Sci.* 91(E-Suppl. 2): 699 (Abstr.).
- Rutherford, S. M. 2015. Use of the guanidination reaction for determining reactive lysine, bioavailable lysine and gut endogenous lysine. *Amino Acids* 47:1805–1815.
- Salyer, J.A., M.D. Tokach, J.M. DeRouchey, S.S. Dritz, R.D. Goodband, and J.L. Nelssen. 2013. Effects of standardized ileal digestible tryptophan:lysine in diets containing 30 percent dried distillers grains with solubles on finishing pig performance and carcass traits. *J. Anim. Sci.* 91:3244–3252.
- Saqui-Salces, M., Z. Luo, P.E. Urriola, G.C. Shurson, and B.J. Kerr. 2017a. Effect of dietary fiber and diet particle size on nutrient digestibility and gastrointestinal secretory function in growing pigs. *J. Anim. Sci.* 95:2640–2648.
- Saqui-Salces, M., Z. Huang, M. Ferrandis Vila, J. Li, J.A. Mielke, P.E. Urriola, and G.C. Shurson. 2017b. Modulation of intestinal cell differentiation in growing pigs is dependent on the fiber source in the diet. *J. Anim. Sci.* 95:1179–1190.
- Seabolt, B.S., E. van Heugten, S.W. Kim, K.D. Ange-van Heugten, and E. Roura. 2010. Feed preference and performance of nursery pigs fed diets containing various inclusion amounts and qualities of distillers coproducts and -flavor. *J. Anim. Sci.* 88:3725–3738.
- She, U., Y. Su, L. Liu, C. Huang, J. Li, P. Li, D. Li, and X. Piao. 2015. Effects of microbial phytase on coefficient of standardized total tract digestibility of phosphorus in growing pigs fed corn and corn co-products, wheat and wheat co-products and oilseed meals. *Anim. Feed Sci. Technol.* 208:132–144.
- Shelton, N.W., S.S. Dritz, J.L. Nelssen, M.D. Tokach, R.D. Goodband, J.M. DeRouchey, H. Yang, D.A. Hill, D. Holzgraefe, D.H. Hall, and D.C. Mahan. 2014. Effects of dietary vitamin E concentration and source on sow, milk, and pig concentrations of  $\alpha$ -tocopherol. *J. Anim. Sci.* 92:4547–4556.
- Shen, Y., M.Z. Fan, A. Ajakiye, and T. Archibold. 2002. Use of the regression analysis technique to determine the true digestible phosphorus digestibility and the endogenous phosphorus output associated with corn in growing pigs. *J. Nutr.* 132:1199–1206.
- Song, M. S.K. Baidoo, G.C. Shurson, M.H. Whitney, L.J. Johnston, and D.D. Gallaher. 2010. Dietary effects of distillers dried grains with solubles on performance and milk composition of lactating sows. *J. Anim. Sci.* 88:3313–3319.

- 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.
- Stein, H. H., and G. C. Shurson. 2009. The use and application of distillers dried grains with solubles in swine diets. *J. Anim. Sci.* 87:1292–1303.
- Stein, H. H., S. P. Connot, and C. Pedersen. 2009. Energy and nutrient digestibility in four sources of distillers dried grains with solubles produced from corn grown within a narrow geographical area and fed to growing pigs. *Asian–Aust. J. Anim. Sci.* 22:1016–1025.
- Stein, H. H., M. L. Gibson, C. Pedersen, and M. G. Boersma. 2006. Amino acid and energy digestibility in ten samples of distillers dried grain with solubles by growing pigs. *J. Anim. Sci.* 84:853–860.
- Tavárez, M.A., B.M. Bohrer, M.D. Asmus, A.L. Schroeder, R.J. Matulis, D.D. Boler, and A.C. Dilger. 2014. Effects of immunological castration and distiller's dried grains with solubles on carcass cutability and commercial bacon slicing yields of barrows slaughtered at two time points. *J. Anim. Sci.* 92:3149–3160.
- Tran, H., R. Moreno, E.E. Hinkle, J.W. Bundy, J. Walter, T.E. Burkey, and P.S. Miller. 2012. Effect of corn distillers dried grains with solubles on growth performance and health status indicators in weanling pigs. *J. Anim. Sci.* 90:790–801.
- Trudeau, M.P., H. Verma, F. Sampedro, P.E. Urriola, G. C. Shurson, and S.M. Goyal. 2017. Environmental persistence of porcine coronaviruses in feed and feed ingredients. *PLoS ONE* 12:e0178094. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0178094>.
- Tsai, T., C.R. Dove, P.M. Cline, A. Owusu-Asiedu, M.C. Walsh, and M. Azain. 2017. The effect of adding xylanase or  $\beta$ -glucanase to diets with corn distillers dried grains with solubles (CDDGS) on growth performance and nutrient digestibility in nursery pigs. *Livest. Sci.* 197:46–52. Urriola, P. E., M. Li, B. J. Kerr, and G. C. Shurson. 2014. Evaluation of prediction equations to estimate gross, digestible, and metabolizable energy content of maize dried distillers grains with solubles (DDGS) for swine based on variable chemical composition. *Anim. Feed Sci. Technol.* 198:196–202.
- Urriola, P. E., L. J. Johnston, H. H. Stein, and G. C. Shurson. 2013. Prediction of the concentration of standardized ileal digestible amino acids in distillers dried grains with solubles. *J. Anim. Sci.* 91:4389–4396.
- Urriola, P. E., and H. H. Stein. 2010. Effects of distillers dried grains with solubles on amino acid, energy, and fiber digestibility and on hindgut fermentation of dietary fiber in a corn–soybean meal diet fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 88:1454–1462.
- Urriola, P. E., G. C. Shurson, and H. H. Stein. 2010. Digestibility of dietary fiber in distillers coproducts fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 88:2373–2381.
- Wang, L., P.E. Urriola, Z. Luo, Z.J. Rambo, M.E. Wilson, J.L. Torrison, G.C. Shurson, and C. Chen. 2016. Metabolomics revealed heat stress and zinc supplementation-induced changes in amino acid, lipid, and microbial metabolism. *Phys. Rep.* 4:e12676, doi:10.14814/phy2.12676.
- Wang, H., L.S. Wang, B.M. Shi, and A.S. Shan. 2012. Effects of dietary corn dried distillers grains with solubles and vitamin E on growth performance, meat quality, fatty acid profiles, and pork shelf life of finishing pigs. *Livest. Sci.* 149:155–166.
- Wang, L.S., B.C. Su, Z. Shi, B.M. Shi, and A.S. Shan. 2013. Dietary supplementation with maize distillers dried grains with solubles during late gestation and lactation: Effects on sow and litter performance, and on colostrum and milk composition. *Anim. Feed Sci. Technol.* 179:149–153.
- Weber, E.K., K.J. Stalder, and J.F. Patience. 2015. Wean-to-finish feeder space availability effects on nursery and finishing pig performance and total tract digestibility in a commercial setting when feeding dried distillers

- grains with solubles. *J. Anim. Sci.* 93:1905–1915.
- Wei, B., S. Nie, Q. Meng, Z. Qu, A. Shan, and Z. Chen. 2016. Effects of L-carnitine and/or maize distillers dried grains with solubles in diets of gestating and lactating sows on the intestinal barrier functions of their offspring. *Br. J. Nutr.* 116:459–469.
- Whitney, M.H., G.C. Shurson, and R.C. Guedes. 2006a. Effect of dietary inclusion of distillers dried grains with solubles on the ability of growing pigs to resist a *Lawsonia intracellularis* challenge. *J. Anim. Sci.* 2006. 84:1860–1869.
- Whitney, M.H., G.C. Shurson, and R.C. Guedes. 2006b. Effect of including distillers dried grains with solubles in the diet, with or without antimicrobial regimen, on the ability of growing pigs to resist a *Lawsonia intracellularis* challenge. *J. Anim. Sci.* 2006. 84:1870–1879.
- Wiltafsky, M. K., M. W. Pfaffi, and F. X. Roth. 2010. The effects of branched-chain amino acid interactions on growth performance, blood metabolites, enzyme kinetics and transcriptomics in weaned pigs. *Br. J. Nutr.* 103:964–76.
- Wu, F., L.J. Johnston, P.E. Urriola, A.M. Hilbrands, and G.C. Shurson. 2016a. Evaluation of ME predictions and the impact of feeding maize distillers dried grains with solubles with variable oil content on growth performance, carcass composition, and pork fat quality of growing-finishing pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 213:128–141.
- Wu, F., L.J. Johnston, P.E. Urriola, and G.C. Shurson. 2016b. Pork fat quality of pigs fed distillers dried grains with solubles with variable oil content and evaluation of iodine value prediction equations. *J. Anim. Sci.* 94:1041–1052.
- Wu, F., L.J. Johnston, P.E. Urriola, A.M. Hilbrands, and G.C. Shurson. 2016c. Evaluation of NE predictions and the impact of feeding maize distillers dried grains with solubles (DDGS) with variable NE content on growth performance and carcass characteristics of growing-finishing pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 215:105–116.
- Xu, G., S. K. Baidoo, L. J. Johnston, D. Bibus, J. E. Cannon, and G. C. Shurson. 2010a. Effects of feeding diets containing increasing content of corn distillers dried grains with solubles to grower-finisher pigs on growth performance, carcass composition, and pork fat quality. *J. Anim. Sci.* 88:1398–1410.
- Xu, G., S. K. Baidoo, L. J. Johnston, D. Bibus, J. E. Cannon, and G. C. Shurson. 2010b. The effects of feeding diets containing corn distillers dried grains with solubles, and withdrawal period of distillers dried grains with solubles, on growth performance and pork quality in grower-finisher pigs. *J. Anim. Sci.* 88:1388–1397.
- Ying, W., M.D. Tokach, J.M. DeRouchey, T.E. Houser, S.S. Dritz, R.D. Goodband, and J.L. Nelssen. 2013. Effects of dietary L-carnitine and dried distillers grains with solubles on growth, carcass characteristics, and loin and fat quality of growing-finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 91:3211–3219.