

23 章: DDGS を配合した家禽および豚用飼料への酵素の利用

はじめに

飼料用酵素の開発とその利用は、過去 50 年間で最も重要な栄養学的進歩の 1 つである (Khattak ら、2006)。飼料用酵素の世界的な市場規模は 5 億 5,000 万ドルを超えており、飼料用酵素の利用による節約効果は年間で 30~50 億ドルと推定されている (Adeola and Cowieson, 2011)。飼料用酵素の市場は、一般的にフィターゼ (60%) とフィターゼ以外の酵素 (炭水化物分解酵素とタンパク質分解酵素; 40%) で構成されており、これらの豚や家禽用飼料への添加は、長年にわたって最も研究されている栄養学的なトピックの 1 つとなっている (Adeola and Cowieson, 2011)。フィターゼは、豚および家禽用飼料において、経済的かつ効果的な無機リン源代替方法として広く使用されており、イノシトール環の中で最初に加水分解が始まるリン酸塩の位置に基づいて、3-フィターゼまたは 6-フィターゼに分類される (Adeola and Cowieson, 2011)。世界の炭水化物分解酵素市場の約 80% はキシラナーゼとグルカナーゼであり、 α -アミラーゼ、 β -マンナーゼ、 α -ガラクトシダーゼ、ペクチナーゼの流通量は少ない (Adeola and Cowieson, 2011)。これらの炭水化物分解酵素のほとんどすべてが炭水化物ポリマーを加水分解して、分子量が少ない小糖類または多糖類を生成するが、遊離糖類は生成しない (Adeola and Cowieson, 2011)。

飼料用酵素を豚および家禽用飼料に添加することで、次のような多くの潜在的な効果がある: 腸管内容物の粘性を低下させることによる脂質およびタンパク質の消化性改善; 飼料の ME (代謝エネルギー) 価の増加; 飼料摂取量、増体率および飼料効率の改善; 消化管内における飼料サイズの低下と腸内細菌叢の変化; 家禽における飲水量と排泄物中の水分含量の減少; 排泄物の量と排泄物中のアンモニア、窒素、リン含量の減少 (Khattak ら、2006)。

ただし、これらの効果の適正に得るためには次の要因がある: 飼料中の標的基質に対して適した飼料用酵素

を用いる; 穀物主体飼料中の抗栄養因子の濃度; 使用する酵素のスペクトルと濃度; 動物種、年齢、ステージ; 腸内細菌叢の構成; 豚や鶏の生理状態 (Khattak ら、2006)。一般的に、飼料用酵素添加に対する家禽の反応性は豚に比べて高く、若齢動物は成畜に比べて反応性が高い傾向がある (Khattak ら、2006)。いくつかの研究では、家禽および豚において、通常添加されているレベル (500~1,000 FTU/kg) より添加量を増加させる (2,500 FTU/kg 以上) と、発育成績がさらに改善されることが示され、主要な研究トピックとなっている。これらのメカニズムには次の可能性がある: カルシウムの水準をより最適化するために、より多くのリンが必要となる; 抗栄養素として機能する飼料中のフィチン酸塩の減少; および/または、ビタミンのような特性と脂肪親和性効果を持つミオイノシトールの生成 (Adeola and Cowieson, 2011)。

さまざまな飼料用酵素の使用による家畜のさまざまな反応や作用機序に関する研究報告は多くあるが、栄養学者が、豚および家禽用飼料においてそれらの潜在的な利益を達成するために戦略的に使用する適切な酵素、酵素を使用するための最適な条件、および飼料設計を変更するための最適条件を決定することは非常に困難である。

豚 (Adeola and Cowieson, 2011; de Vries ら、2012; Kerr and Shurson、2013; Jha and Berrocoso、2015; Swiatkiewicz ら、2015) および家禽 (Khattak ら、2006; Adeola and Cowieson, 2011; Slominski, 2011; de Vries ら、2012; Ravindran, 2013; Swiatkiewicz ら、2015; Dida, 2016) に対して、さまざまな酵素の添加による利点と課題をまとめた優れたレビューが公表されている。ただし、これらのレビューのほとんどは、さまざまな原料を含む豚および家禽用飼料における酵素の反応に焦点を当てており、DDGS を配合した飼料に対する反応には特に焦点をあてていない。したがって、この章では、DDGS を配合した飼料におけるさまざまな飼料用酵素の反応を評価した多数の豚および家禽における研究成果を取りまとめた。

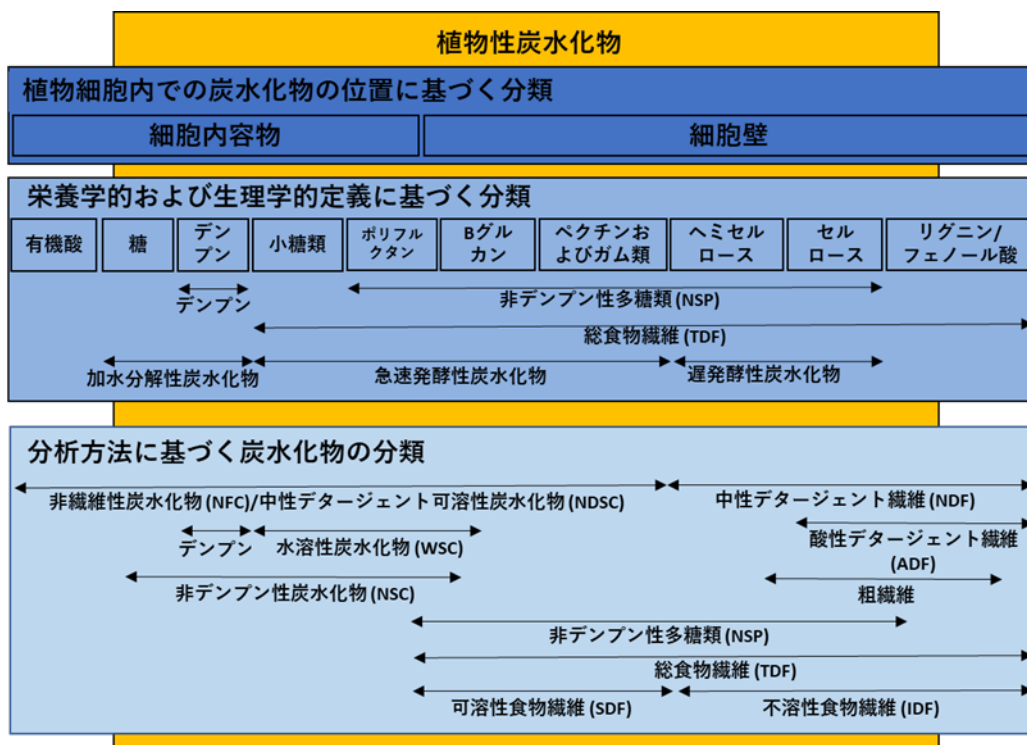


図 1. 植物性炭水化物の分画に使用される栄養学的および分析的分類 (2007 年 NRC から改編)

DDGS の繊維特性

食物繊維は、おそらく豚と家禽用飼料の構成成分の中で、最も理解が足りない部分であり、一般的に植物性原料主体の飼料において、複雑で非常に変化しやすい成分として説明される(図 1、NRC、2007)。飼料の繊維成分を特定するために用いられる分析方法では、飼料中の他の炭水化物画分の画分と重複または除外されていたりすることが多いことには注意が必要である。図 1 に示すように、繊維含量が高い飼料原料などに含まれている炭水化物画分を分析する一般的な方法には、粗繊維、ADF(酸性デタージェント繊維)、NDF(中性デタージェント繊維)、TDF(総食物繊維)の可溶性と不溶性画分および非デンプン性炭水化物(NSP)がある。これらを分析する際には、複雑な炭水化物のいくつかの画分を測定しているが、それらは豚用飼料のエネルギー値とは適切に関連していない。その結果、繊維の分析値をその生理学的機能と適切に関連付けるためには限界があった。いくつかのタイプの繊維は他のタイプの繊維も消化されやすく、

哺乳類の酵素では分解されないが、後腸内の細菌によって発酵される(Grieshop ら、2001)。発酵性繊維は、しばしば NSP と呼ばれる。植物の細胞壁の最大 90%が NSP で構成されており、この中には、セルロース、ヘミセルロース、ペクチンが最も多く(Selvendran and Robertson、1990)、この他に、フルクタン、グルコマンナン、ガラクトマンナン、種子が出す粘液、β-グルカンおよびガム類がある。

セルロースは植物の強固な結合体として存在するが、ヘミセルロースとペクチンは糖側鎖を持ち、消化過程や下部消化管での発酵過程において分解しやすい。リグニンは、それ自体は多糖類ではないが、高分子量ポリマーであり、豚では消化することができないため、機能的な飼料成分とは見なされない(Grieshop ら、2001)。

DDGS を配合した飼料に酵素を添加する場合のエネルギー価と栄養素の消化性の改善効果を理解するためには、まず、DDGS の繊維画分中の NSP の組成を知る必要がある。Pedersen ら(2014)は、トウモロコシ DDGS 47 試料と小麦 DDGS 11 試料の NSP 組成を測定し(表

1)、トウモロコシ DDGS では NSP が全体の 25~34% を占めており、その大部分が不溶性であることを報告している。これは、豚、家禽および魚類において、トウモロコシ DDGS の繊維画分の小腸における消化性や、下部消

化管における発酵性が制限されていることを示唆している。トウモロコシ DDGS では、セルロースは約 5~9% を占め、主なセルロース以外の多糖類はキシロース(7.7%)とアラビノキシロース(12.3~17.2%)であるが、これらも

表 1. トウモロコシ DDGS 47 試料と小麦 DDGS 11 試料の栄養素および非デンプン多糖(NSP)組成の平均含有量と変動(乾物ベース、Pedersen ら、2014 から改編)

発育ステージ	DDGS %	酵素	添加による反応	引用文献
ほ乳期	20	フィターゼ	リン消化率の改善とリン排泄量の減少	Xu et al., 2006a
育成期~肥育期	20	フィターゼ	リン消化率の改善とリン排泄量の減少	Xu et al., 2006b
母豚、妊娠後期~泌乳後期	15	フィターゼ	フィチン態リン排泄量の減少 母豚と産仔への効果なし	Hill et al., 2008
育成期~肥育期	20	フィターゼ	乾物、総エネルギーおよび窒素消化率の改善	Lindemann et al., 2009
育成期~肥育期	15 to 60	キシラナーゼ、 βグルカナーゼ、 マンナナーゼ、 セルラーゼ、 プロテアーゼ	発育成績への影響なし	Jacela et al., 2010
ほ乳期	30	キシラナーゼ、 βグルカナーゼ、 マンナナーゼ	発育成績への影響なし	Jones et al., 2010
育成期~肥育期	10 or 15	マンナナーゼ	発育成績とたん白質消化率の改善	Yoon et al., 2010
育成期	50	フィターゼ	トウモロコシ粒に比べてリン消化率の改善効果が少ない	Almeida and Stein, 2012
肥育期	35 to 50	キシラナーゼ ゼ	DDGS35% 配合した飼料中の栄養素の消化率への影響はなく、DDGS 配合率が高い場合に栄養素の消化率が低下する	Asmus et al., 2012
育成期~肥育期	10 or 15	キシラナーゼ、 βグルカナーゼ、 フィターゼ、 プロテアーゼ、 セルラーゼ、 アミラーゼ	発育成績が改善される傾向	Li et al., 2012
育成期~肥育期	7.5 or 10	キシラナーゼ、 βグルカナーゼ	体重が55kg以上の雌豚では栄養素の消化率および発育成績が改善 去勢豚では効果なし	Kiarie et al., 2012
ほ乳期、育成期、 肥育期	30	キシラナーゼ、 βグルカナーゼ、 プロテアーゼ およびフィターゼを含む 複合酵素	いくつかの酵素では限定的な栄養素消化率の改善効果があるが、一貫性のない 哺乳期、育成期、肥育期における発育成績には影響なし	Kerr et al., 2013
育成期~肥育期	15 or 20	キシラナーゼ、 βグルカナーゼ	発育成績の改善、背脂肪厚の減少、 精肉重量の増加傾向	Swiatkiewicz et al., 2013a
育成期~肥育期	30	キシラナーゼ、 プロテアーゼ	キシラナーゼでは糞尿中の臭気成分の減少、 プロテアーゼはで総エネルギー消化率の改善	O'Shea et al., 2014
育成期	20	フィターゼ、 キシラナーゼ、 プロテアーゼ	フィチン態リン排泄量の減少と、 エネルギーおよび窒素消化率の改善	Passos and Kim, 2014

主に不溶性である。トウモロコシ DDGS のマンノース含有量(1.7%)は、原料のトウモロコシより著しく多いが、これは、DDGS 中に残存する酵母の細胞壁中に含まれているマンナンが原因である可能性がある。トウモロコシ DDGS のアラビノース含量(6.2%)およびウロン酸含量(1.6%)は、小麦 DDGS(5.7 および 0.8%)より高いため、アラビノースとキシロースの比率およびウロン酸とキシロースの比率は比較的高くなっている。このことは、トウモロコシ DDGS の繊維(ヘテロキシラン)の構造は、小麦 DDGS より複雑で変化しやすいため、酵素添加による分解がより難しいことを示している。ただし、小麦 DDGS 中の難消化性クラソリグニン含有量は、トウモロコシ DDGS より多かった。クラソリグニンは化学成分として明確には定義されていないが、真のリグニンに加えて、タンパク質(メイラード反応で生成された)、残留脂肪およびワックス、クチンが含まれている可能性がある。これらの分析結果は、置換キシランと水溶性 NSP の濃度が、原料であるトウモロコシに含まれていた元々の構造から、DDGS 製造中に変化することを示唆している。

DDGS を配合した豚用飼料への飼料用酵素の添加効果

DDGS のデンプン含有量は 3.8~11.4%だが、それが難消化性デンプンであるのか、または、消化可能であり、ME 価に寄与しているのかは不明である(表 2)。DDGS 中の食物繊維のほとんどは不溶性だが、TDF の見かけ

の全消化管消化率は 23~55%であり、その結果、DDGS 中の繊維の一部は消化されて発酵し、豚に給与した場合にはエネルギーとしてかなり寄与している。

このことは、NDF、TDF などの繊維の実測値が、豚の脱脂 DDGS の ME 価を推定するために開発された最近の回帰式において重要な予測因子となっている理由である(Urriola ら、2014)。

Swiatkiewicz ら(2015)の最近のレビューにおけるトウモロコシ DDGS を配合した豚用飼料にさまざまな飼料用酵素を添加した場合の反応を表 3 に示した。一般的に、多くの文献では、トウモロコシ DDGS を配合した豚用飼料に飼料用酵素を添加した場合、栄養素の消化率が改善されているが、これらの効果は、通常、発育成績の改善には結びついていない。さらに、このレビューで要約されているいくつかの文献では、フィターゼの応答のみを評価しており、フィターゼと炭水化物分解酵素およびプロテアーゼの組み合わせについては評価していない。Swiatkiewicz ら(2015)のレビュー中のいくつかの文献は、小麦 DDGS とトウモロコシ-小麦 DDGS との比較であり、繊維質と栄養素の特性が原因でトウモロコシ DDGS 飼料に酵素を追加した場合の反応を表していないため、表 3 からは除外した。

さらに、Swiatkiewicz ら(2015)によるレビュー以降にトウモロコシ DDGS を含む豚用飼料への飼料用酵素の添加効果を評価するいくつかの文献が公表されている。トウモロコシ DDGS を配合した豚用飼料への様

表 2. トウモロコシ DDGS 中の炭水化物含量と、食物繊維の豚における見かけの全消化管消化率(ATTD) (Urriola et al, 2010 から改編)

項目	平均値	最低値	最高値	標準偏差
総炭水化物、%	7.3	3.8	11.4	1.4
水溶性炭水化物、%	2.6	0.5	5.0	1.2
不溶性炭水化物、%	4.7	2.0	7.6	1.5
ADF、%	9.9	7.2	17.3	1.2
NDF、%	25.3	20.1	32.9	4.8
不溶性食物繊維、%	35.3	26.4	38.8	4.0
水溶性食物繊維化物、%	6.0	2.36	8.54	2.1
総食物繊維(TDF)、%	42.1	31.2	46.3	4.9
TDFの見かけの全消化管消化率、%	43.7	23.4	55.0	10.2

表 3. トウモロコシ DDGS を配合した豚用飼料における飼料酵素の添加効果 (Swiatkiewicz ら、2015 から抜粋)

発育ステージ	DDGS %	酵素	添加による反応	引用文献
ほ乳期	20	フィターゼ	リン消化率の改善とリン排泄量の減少	Xu et al., 2006a
育成期～肥育期	20	フィターゼ	リン消化率の改善とリン排泄量の減少	Xu et al., 2006b
母豚、妊娠後期～泌乳後期	15	フィターゼ	フィチン態リン排泄量の減少 母豚と産仔への効果なし	Hill et al., 2008
育成期～肥育期	20	フィターゼ	乾物、総エネルギーおよび窒素消化率の改善	Lindemann et al., 2009
育成期～肥育期	15 to 60	キシラナーゼ、 βグルカナーゼ、 マンナーゼ、 セルラーゼ、 プロテアーゼ	発育成績への影響なし	Jacela et al., 2010
ほ乳期	30	キシラナーゼ、 βグルカナーゼ、 マンナーゼ	発育成績への影響なし	Jones et al., 2010
育成期～肥育期	10 or 15	マンナーゼ	発育成績とたん白質消化率の改善	Yoon et al., 2010
育成期	50	フィターゼ	トウモロコシ粒に比べてリン消化率の改善効果が少ない	Almeida and Stein, 2012
肥育期	35 to 50	キシラナーゼ	DDGS35% 配合した飼料中の栄養素の消化率への影響はなく、DDGS配合率が高い場合に栄養素の消化率が低下する	Asmus et al., 2012
育成期～肥育期	10 or 15	キシラナーゼ、 βグルカナーゼ、 フィターゼ、 プロテアーゼ、 セルラーゼ、 アミラーゼ	発育成績が改善される傾向	Li et al., 2012
育成期～肥育期	7.5 or 10	キシラナーゼ、 βグルカナーゼ	体重が55kg以上の雌豚では栄養素の消化率および発育成績が改善 去勢豚では効果なし	Kiarie et al., 2012
ほ乳期、育成期、 肥育期	30	キシラナーゼ、 βグルカナーゼ、 プロテアーゼ およびフィターゼを含む 複合酵素	いくつかの酵素では限定的な栄養素消化率の改善効果があるが、一貫性のない 哺乳期、育成期、肥育期における発育成績には影響なし	Kerr et al., 2013
育成期～肥育期	15 or 20	キシラナーゼ、 βグルカナーゼ	発育成績の改善、背脂肪厚の減少、 精肉重量の増加傾向	Swiatkiewicz et al., 2013a
育成期～肥育期	30	キシラナーゼ、 プロテアーゼ	キシラナーゼでは糞尿中の臭気成分の減少、 プロテアーゼはで総エネルギー消化率の改善	O'Shea et al., 2014
育成期	20	フィターゼ、 キシラナーゼ、 プロテアーゼ	フィチン態リン排泄量の減少と、 エネルギーおよび窒素消化率の改善	Passos and Kim, 2014

々な飼料用酵素の添加効果をより包括的かつ詳細に評価するために、フィターゼの有無にかかわらず、トウモロコシ-大豆粕主体飼料(表 4)における豚の発育成績を評価した文献における全体的な効果についてメタ分析により評価した。トウモロコシ-大豆粕主体飼料および DDGS

を配合した飼料に対する発育成績への添加効果の比較を表 5 に、さまざまな飼料用酵素を添加した DDGS を配合した飼料における栄養素の見かけの全消化管消化率を表 6 に、DDGS を配合した飼料における繊維成分の見かけの全消化管消化率を表 7 に示した。この分析では、

DDGS を配合した豚用トウモロコシ-大豆粕主体飼料にさまざまな炭水化物分解酵素、炭水化物分解酵素+プロテアーゼ、マンナーゼ、キシランナーゼ、フィターゼを添加した場合の影響を評価した多数の文献データを使用した(Agyekumら、2016; Agyekumら、2012; Asmusら、2012; Barnesら、2011; de Vriesら、2014; de Vriesら、2013; Grahamら、2012; Jacelaら、2010; Jakobsenら、2015; Jang

ら、2017; Jonesら、2010; Kerrら、2013; Kiarieら、2016; Kiarieら、2012; Kooら、2017; Liら、2012; Moranら、2016; Ndouら、2015; Passosら、2015; Pedersenら、2014; Sandbergら、2016; Shrestha、2012; Swiatkiewiczら、2013a; Tsaiら、2017; Widyaratneら、2009; Woyengoら、2015; Yanezら、2011; Yoonら、2010)。

表 4. 飼料用酵素を添加したトウモロコシ-大豆粕主体飼料における日増体量、飼料摂取日量および飼料要求率の変化

Dietary treatment	No. comparisons	ADG % change	ADFI % change	Gain:Feed % change
Without phytase	43	+0.74	+0.43	+0.22
+ carbohydrases	15	-1.10	+0.52	-1.21
+ carbohydrases and proteases	11	+2.03	+1.07	+1.00
+ mannanase	10	+2.35	-0.37	+2.74
+ xylanase	7	+0.33	+0.33	-1.56
With phytase	30	+1.83	+0.38	+1.82
+ carbohydrases	9	-0.14	+2.92	-1.70
+ carbohydrases and proteases	6	+2.22	+1.06	+0.81
+ mannanase	1	+0.47	+0.71	-0.61
+ xylanase	14	+3.03	-1.57	+4.70

表 5. トウモロコシ-大豆粕主体飼料と DDGS を配合した飼料における飼料用酵素を添加による日増体量、飼料摂取日量および飼料要求率の変化

処理	比較数	日増体量の変化、%	飼料摂取日量の変化、%	飼料要求率の変化、%
トウモロコシ-大豆粕主体飼料	43	+0.74	+0.43	+0.22
+ 炭水化物分解酵素	15	-1.10	+0.52	-1.21
+ 炭水化物分解酵素およびプロテアーゼ	11	+2.03	+1.07	+1.00
+ マンナーゼ	10	+2.35	-0.37	+2.74
+ キシランナーゼ	7	+0.33	+0.33	-1.56
DDGS配合飼料	30	+1.39	+1.10	+0.58
+ 炭水化物分解酵素	12	-0.74	+1.42	-1.40
+ 炭水化物分解酵素およびプロテアーゼ	7	+2.49	+1.92	+1.06
+ キシランナーゼ	11	+2.82	+0.24	+2.44

表 6. トウモロコシ DDGS を配合した飼料における飼料用酵素の添加による各栄養素の見かけの全消化管消化率の変化

栄養素	比較数	効果、%
乾物	15	+ 0.75
総エネルギー	34	+ 0.53
窒素	26	- 0.25
粗脂肪	20	- 0.88
リン	24	+2.15

表 7. トウモロコシ DDGS を配合した飼料における飼料用酵素を添加による繊維の見かけの全消化管消化率の変化

繊維成分	比較数	効果、%
ADF	19	- 0.77
NDF	24	+ 0.54
総アラビノキシロース	5	+1.84
総非デンプン多糖類	5	+4.66
可溶性非デンプン多糖類	5	+4.84

フィターゼの有無にかかわらず飼料用酵素の添加による日増体量、飼料摂取日量、飼料要求率の改善割合は限られていた。このことは、これらの市販の飼料用酵素をトウモロコシ-大豆粕主体飼料に添加するメリットは最小限であることを示している(表 4)。DDGS を配合した飼料(表 4)およびトウモロコシ-大豆粕主体飼料(表 5)では、市販の豚用配合飼料におけるコストを適正化します。実際、トウモロコシ-大豆粕主体飼料(15 の比較)と DDGS を含む飼料(12 の比較)に炭水化物分解酵素を添加した場合、全体的な増体日量と飼料効率の応答は負であった(表 5)。ただし、改善効果はわずかであったが、フィターゼと炭水化物分解酵素、炭水化物分解酵素+プロテアーゼ、およびキシラナーゼと組み合わせて添加した場合、トウモロコシ-大豆粕主体飼料でフィターゼを補給しなかった場合と比較して、増体日量と飼料効率がわずかに改善されている(表 4)。これらの応答は、フィターゼと炭水化物分解酵素の組み合わせが、一般的にどちらか一方よりも高い成長性能と消化率応答をもたらすことを示すいくつかの報告と一致している。ただし、エネルギー消化率に及ぼすフィターゼ添加の影響は一貫して

いない。他の報告(Brady ら、2002; Shelton ら、2003; Jendza ら、2005; Veum ら、2006)は、プラス効果があったとしている。Kerr ら(2010)の結果は、フィターゼ添加によるエネルギー消化率への影響は比較的小さく、変動が高いことを示唆している。飼料用酵素の添加によるこれらの期待外れの発育成績の改善またはその欠如は、乾物および総エネルギー消化率への最小限のプラス効果、および粗タンパク質および粗脂肪消化率への負の効果の結果である(表 6)。これらの反応は、DDGS を含む飼料中のさまざまな繊維画分の見かけの全消化管消化率の全体的な改善が比較的小さいことによってもたらされている(表 7)。

酵素の有効性を改善するため、および DDGS でのエネルギー利用を改善するために繊維構造を分解する方法には、繊維の物理構造をよりよく理解することが必要である。穀物の主な細胞壁構造は、ヘミセルロースと少量のペクチン、糖タンパク質、ヒドロキシ桂皮酸のマトリックスに埋め込まれたセルロース微小ブリルの骨格で構成されており、その後、二次細胞壁が発達し続けると、p-クマリル、コニフェリル、シナピルアルコールが共

重合して混合リグニンが形成される(Santiago ら、2013)。これらの混合リグニンを細胞壁構造に追加すると、繊維に大きな強度と劣化に対する耐性が追加される。トウモロコシでは、最も豊富なヘミセルロースはアラビノキシランであり、アラビノース、グルクロン酸および酢酸の置換基を持つ β (1 \rightarrow 4)-d-キシラン骨格で構成されている。

ヘミセルロースは、水素結合によってセルロースのマイクロフィブリルと絡み合っている(図 1)。これらの水素結合により、細胞壁は分解しにくくなる(Somerville ら、2004)が、キシラナーゼの添加による繊維の表面領域からのアラビノキシランの除去により、セルロースのマイクロフィブリル(結晶構造)が露出する可能性があることも意味しており、酸や酵素による加水分解に強い耐性がある(Hall ら、2010)。実際、小麦 DDGS を給餌された豚におけるセルロースの見かけの回腸消化率(11.9 パーセント)は、他の繊維成分(37 パーセント)より低く、セルロースの見かけの全消化管消化率(29.0 パーセント)も他の繊維成分(43.8 パーセント)より低い(Pedersen ら、2015)。したがって、より安定したセルロースのマイクロフィブリルがアラビノキシランを包埋またはトラップし、繊維の見かけの全消化管消化率を低下させ、キシラナーゼがその基質にアクセスするのを妨げる可能性がある。

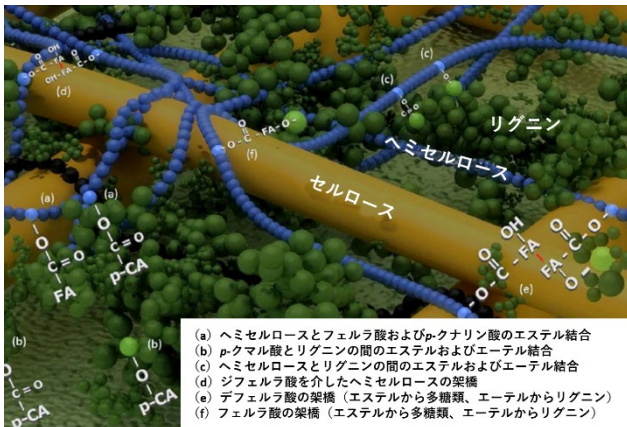


図 1. トウモロコシの二次細胞壁構造 (Santiago ら、2013 から改編)

さらに、分解プロセスの前後における繊維の形態の変化を理解することは、DDGS の豚における繊維の利用性を改善するためのアプローチを特定するのに役立つ可能性がある。いくつかの研究結果から、結晶セルロース

は、結晶化度が低いものと比較して、酵素による加水分解に対してはるかに耐性があることが示されている(Fan ら、1980; Zhang and Lynd、2004; Hall ら、2010)。さらに、天然繊維源の結晶化度と結晶サイズは、熱処理中に増加することが示されている(Poletto ら、2014)。DDGS の製造には、乾燥機を出るときに品温が 100°C を超える場合があることはよく知られている(Rosentrater ら、2012)。これは、DDGS 製造中に、最も容易に分解可能な繊維がすでに部分的に分解されている可能性があり、したがって DDGS 含有量が高い飼料における飼料用酵素または他の加工技術の効果を制限することを示している。実際、Urriola ら(2010)は、繊維消化率の変動が DDGS の供給源間で異なることを示している。これは、エタノールプラントがさまざまな処理条件を使用していることに由来する可能性を示唆している。

植物細胞壁構造の処理方法を変更して、NSP 分解性を向上させることもできるが、粉碎やペレット化などの一般的な処理方法の使用は、NSP 構造の分解には不十分である(de Vries ら、2012)。酸触媒を使用した熱水前処理は、リグノセルロースの分解に効果的であることが示されているが(Sun and Cheng、2002)、タンパク質損傷を引き起こし、酸またはミネラル含有量を増加させる可能性がある(van den Borne ら、2012)。対照的に、マレイン酸を用いた穏やかな酸による水熱処理は、DDGS における NSP の可溶化を高めることが示されている(de Vries ら、2013)。しかし、酸による処理は NSP のより迅速な分解を助け、消化管のより近位の場所に発酵をシフトするが、DDGS 中の NSP の 35% 以上は分解できなかった(de Vries ら、2014)。結果として、これらの報告では、繊維構造のエステル結合アセチル、フェロイル、またはクマロールグループを対象とする場合、酵素および/またはプロセステクノロジーがより効果的である可能性があることを示唆している。穀物、フェルラ酸、p-クマル酸、シナピン酸は、アラビノキシラン、細胞壁に閉じ込められたタンパク質、リグニン様ポリマーの結合に関与している(Ralph ら、1995; Bunzel ら、2004; Piber and Koehler、2005)。フェルラ酸と誘導体は、穀物細胞壁の最も重要な架橋であり、アラビノキシランとペクチンに結合している(Bunzel、2010)。フェルラ酸の二量体、三量体およびオリゴマーは、

2 つ以上の多糖鎖と架橋して細胞壁を強化するが、酵素分解を損ない(Grabber ら、1998a、b)、DDGS での繊維消化率の低下につながる。実際、Pedersen ら(2015)は、トウモロコシ DDGS のフェルラ酸ダイマーとトリマーの濃度は、小麦または穀物をブレンドした DDGS よりも 5 から 6 倍高かったと報告しており、DDGS の発酵および生産中には、トウモロコシの細胞壁のフェルラ酸の架橋は変化していないように見える。

アンモニア処理(AFEX)は、セルロースの結晶構造を破壊し、繊維が豊富なバイオマスからの酵素消化性を大幅に向上させるアルカリ前処理技術の 1 つである(Mosier ら、2005; Gao ら、2010)。反すう家畜では、AFEX 処理された飼料は、ルーメン内容物を用いて *in vitro* で評価した場合、NDF 消化率が改善されたと報告されている(Bals ら、2010)。彼らは、また、トウモロコシ DDGS の AFEX 前処理の最適化条件について検討し、DDGS 中のほとんどすべてのセルロースが 72 時間の酵素加水分解後に分解され、190 g のグルコース乾燥バイオマスを放出したことを報告している(Bals ら、2006)。

トウモロコシ DDGS にはセルロースが 5.8%含まれており、NSP 全体の約 23.3%を占めている(Jaworski ら、2015)。DDGS 中のセルロースが豚の下部消化管に入る前に加水分解された場合、DDGS のエネルギー価に約 242 kcal / kg DE (Noblet and van Milgen、2004) 寄与する可能性がある。さらに重要なことは、セルロースに抱合されたアラビノキシランの割合は、外因性の酵素、細菌、有機酸およびそれらの組み合わせからの分解に暴露され、アクセスしやすくなる可能性がある。

DDGS を配合した家禽用飼料への酵素添加効果

家禽用飼料への飼料用酵素の添加は、消化管内容物の粘性低下、栄養素の消化と吸収の向上、AME 価の改善、飼料摂取量、増体量、飼料効率の増加、嘴の詰まりの減少、消化管および腸内細菌数の変化、水分摂取量とそれにとまなう排泄物中の水分量の減少、排泄物中の窒素とリンの排泄量の減少、アンモニア排出量の減少をもたらす(Khattak ら、2006)。一般に、トウモロコシ DDGS

を配合した家禽用飼料と豚用飼料を比較すると、炭水化物分解酵素の添加は、家禽用飼料において、より効果的だった。

Swiatkiewicz ら(2015)による最近のレビューでは、トウモロコシ DDGS を配合した家禽用飼料に飼料用酵素を添加した場合の様々な反応に関する文献をとりまとめており、その結果を表 8 に示した。これらの文献の大部分は、DDGS を配合したブロイラーおよび産卵鶏用飼料に飼料用酵素を添加した場合のいくつかの利点を示しているが、測定に用いた反応や結果には一貫性がない。

トウモロコシ DDGS を配合したブロイラーおよび産卵鶏用飼料におけるさまざまな飼料用酵素の添加効果をより包括的かつ詳細に評価するために、メタ分析を行った。

炭水化物分解酵素、炭水化物分解酵素とプロテアーゼ、プロテアーゼとキシラナーゼをトウモロコシ-大豆粕主体と、DDGS を配合した飼料に添加した場合のブロイラーにおける発育成績への応答を表 9 に示した。豚における反応と同様に、トウモロコシ-大豆粕主体飼料と、DDGS を配合した飼料に炭水化物分解酵素を添加すると、発育成績がわずかに低下したが、プロテアーゼあるいはキシラナーゼを添加すると、DDGS を配合した飼料では、発育成績への効果がより優れていた。これらの反応は、飼料用酵素のコストと飼料価格に応じて、ブロイラー用飼料にキシラナーゼを添加することにより、添加コストを上回る発育成績が得られる可能性があることを示唆している。プロテアーゼ添加による効果も比較的高いようだが、データは限られており、ブロイラー用飼料へのプロテアーゼの添加効果を検討するためには注意が必要である。

DDGS を配合したブロイラー用飼料へのキシラナーゼの添加による AME 価と乾物消化率の改善は、炭水化物分解酵素またはプロテアーゼのみの添加に比べて優れているが、データは限られている(表 10)。2 つの文献では、DDGS を配合したブロイラー用飼料にプロテアーゼを添加すると、タンパク質消化率が平均で 4.5%高まり、炭水化物分解酵素とプロテアーゼを組み合わせると、AME 価と乾物消化率が高まった(表 10)。

産卵鶏用飼料に炭水化物分解酵素とプロテアーゼ、

表 8. トウモロコシ DDGS を配合した家禽用飼料における飼料用酵素の添加効果 (Swiatkiewicz et ち、2015 から改編)

ステージ	DDGS %	酵素	添加による反応	引用文献
産卵鶏 26-68週齢	20	キシラナーゼ βグルカナーゼ	DDGS給与による産卵ピーク後の産卵成績の悪化を軽減	SwiatkiewiczandKorelski, 2006
産卵鶏 30-40週齢	5, 10, 15 or 20	キシラナーゼ、β グルカナーゼ、ア ミラーゼ、プロテ アーゼを含む複合 酵素	DDGSを15および20%配合した飼料 における産卵成績と脂質消化率を改 善	Shalash et al., 2010
産卵鶏 40-56週齢	7, 15 or 23	キシラナーゼ、β グルカナーゼ、ア ミラーゼ、プロテ アーゼを含む複合 酵素	DDGSを7及び5%配合した飼料にお ける産卵成績の改善 卵質、栄養素消化率、血液性状には 影響なし	Ghazalah et al., 2011
産卵鶏 40-52週齢	15	フィターゼ	産卵成績や卵質には影響なし	Koksal et al., 2012
産卵鶏 28-36週齢	5, 10, 15 or 20	プロテアーゼ、キシ ラナーゼ (ペントサ ナーゼ)、ペクチナ ーゼ、セルラーゼ、 βグルカナーゼ、ア ミラーゼ、フィター ゼを含む複合酵素	窒素およびリン排泄量を低減 産卵成績や卵質には影響なし	Deniz et al., 2013a
産卵鶏 64-72週齢	10	フィターゼ	飼料摂取量および飼料要求率の増加 と、排泄物中のリン含量を低下 産卵成績や卵質には影響なし	Deniz et al., 2013b
産卵鶏 20-44週齢	20	キシラナーゼ フィターゼ	両酵素の組合せにより産卵成績を改 善	Swiatkiewiczetal.,2013b
産卵鶏 20-44週齢	10 or 15	キシラナーゼ	産卵率および産卵量を改善	Bobek et al., 2014
産卵鶏 26-55週齢	20	キシラナーゼ フィターゼ	大腿骨および脛骨の性状に影響なし	Swiatkiewiczetal.,2014a

またはキシラナーゼを組み合わせると、通常、体重増加、飼料摂取量および飼料要求率が改善されるが、その程度は、ブロイラーに比べて低い(表 11)。また、飼料用酵素の添加により、産卵量、卵重、卵黄色調がわずかに改善されるように見えるが、ハウユニットに悪影響を与える可能性がある(表 12)。このメタ分析の結果に基づいて、経済的に重要な生産性の改善効果の大きさにより、炭水化物分解酵素とプロテアーゼの組み合わせ、またはキシラナーゼを産卵鶏用飼料に添加するコストの正当性を判断できる。

要約すると、コマーシャルベースでブロイラーと産卵鶏の反応を発揮させる可能性を判断するためには、炭水化物分解酵素、プロテアーゼ、またはキシラナーゼのタイプを考慮する必要がある。DDGS を配合したブロイラ

ーと産卵鶏用飼料への飼料用酵素添加の可否を判断する前に、これらの表で引用されている公開文献を入手し、供試飼料の配合組成と実験条件について詳しく知っておく必要がある。

結論

植物質原料主体の豚および家禽用飼料への様々な飼料用酵素の添加は、長年にわたって研究されてきた。豚とブロイラーの発育成績および産卵鶏の産卵成績への効果は、目的基質(NSP、タンパク質およびフィチン酸塩)に対して適切な酵素を選択したか否かにより、結果に一貫性がなくなる。

一般的に、豚および家禽に用いるトウモロコシ-大豆

粕主体飼料にフィターゼを添加すると、リンと栄養素の消化率が一貫して改善されるが、炭水化物分解酵素、プロテアーゼ、キシラナーゼの添加では一貫性が見られない。トウモロコシ DDGS は、飼料用酵素による著しい分解を防ぐ独自の化学的特性を持つが、飼料用酵素添加によるエネルギー、タンパク質および繊維の消化率の改善効果は、一般的に、ブロイラーの方が豚や産卵鶏よりも大きくなる。ただし、飼料用酵素の添加によるエネルギーと栄養素の消化率の改善は、必ずしも発育成績や産卵成績と直結しているわけではない。このメタ分析の結果に基づいた反応の要約を用いることで、経済的に重要

な反応の改善の大きさにより、豚、ブロイラーまたは産卵鶏用飼料に対する様々な飼料用酵素の添加コストが正当であるかを判断することが出来る。炭水化物分解酵素、プロテアーゼまたはキシラナーゼのタイプは、コマーシャルベースでこれらの反応を達成する可能性を決めるためには、この評価を考慮する必要がある。本章で引用されている公開文献を入手し、これらの反応を達成するために使用される飼料の配合組成と実験条件についてさらに確認し、DDGS を配合した豚、ブロイラーおよび産卵用飼料への酵素添加の可否を判断する必要がある。

表 9. ブロイラー用トウモロコシ-大豆粕主体飼料およびトウモロコシ DDGS 配合飼料に飼料用酵素を添加した場合の日増体量、飼料摂取日量および飼料要求率の変化

処理	比較数	日増体量の変化、%	飼料摂取日量の変化、%	飼料要求率の変化、%
トウモロコシ-大豆粕主体飼料	16	-1.07	-0.77	0.66
+炭水化物分解酵素	4	-6.13	-4.82	1.41
+炭水化物分解酵素およびプロテアーゼ	3	0.75	-0.64	-1.31
+プロテアーゼ	1	4.34	8.14	3.64
+キシラナーゼ	8	0.11	0.10	0.65
DDGS配合飼料	33	2.73	1.18	-1.97
+炭水化物分解酵素	7	-0.70	-1.12	-0.33
+炭水化物分解酵素およびプロテアーゼ	7	1.02	-1.23	-2.16
+プロテアーゼ	2	5.95	1.79	-3.89
+キシラナーゼ	17	4.47	3.04	-2.33

引用文献：Olukosi et al., 2010; Liu et al., 2011; Min et al., 2011; Barekatin et al., 2013a,b,c; Waititu et al., 2014; Campasino et al., 2015

表 10. トウモロコシ DDGS を配合したブロイラー用飼料に飼料用酵素を添加した場合の見かけの代謝エネルギーと栄養素の見かけの全総消化管消化率の変化

酵素	AME ¹		乾物		粗たん白質		リン	
	n	%	n	%	n	%	n	%
炭水化物分解酵素	8	+0.07	0	ND	3	-0.29	0	ND
炭水化物分解酵素、プロテアーゼ	7	+4.21	4	+2.75	5	+1.20	5	-1.82
プロテアーゼ	0	ND	2	+1.00	2	+4.50	0	ND
キシラナーゼ	6	+5.83	8	+3.63	8	+2.50	0	ND
全体	21	+3.09	14	+3.00	18	+1.90	5	-1.82

¹AME=見かけの代謝エネルギー

²ND= 不検出

引用文献：Min et al., 2009; Olukosi et al., 2010; Liu et al., 2011; Min et al., 2011; Barekatin et al., 2013a; Romero et al., 2013; Waititu et al., 2014

表 11. トウモロコシ-大豆主体飼料およびトウモロコシ DDGS を配合した飼料における飼料酵素添加による体重、飼料摂取日量および飼料要求率の変化の比較

処理	比較数	体重変化、%	飼料摂取日量の変化、%	飼料要求率の変化、%
トウモロコシ-大豆粕主体飼料	4	+0.07	+0.48	+0.51
+炭水化物分解酵素、プロテアーゼ	4	+0.07	+0.48	+0.51
DDGS配合飼料	16	+3.52	+0.13	-1.86
+炭水化物分解酵素	2	+1.70	-0.87	-2.64
+炭水化物分解酵素、プロテアーゼ	11	+4.34	+0.30	-1.61
+キシラナーゼ	3	+1.66	+0.19	-2.26

引用文献：Swiatkewicz et al., 2006; Shalash et al., 2010; Ghazalah et al., 2011; Bobeck et al., 2014

表 12. トウモロコシ DDGS を配合した飼料に飼料用酵素を添加した場合の産卵成績および卵質の変化

項目	比較数	変化、%
産卵数	26	+1.26
卵重	26	+0.33
卵黄色調	19	+4.94
ハウユニット	12	-0.12

引用文献：Swiatkewicz et al., 2006; Shalash et al., 2010; Ghazalah et al., 2011; Koksall et al., 2012; Deniz et al., 2013a,b; Swiatkewicz et al., 2013; Bobeck et al., 2014

引用文献

- Adeola, O., and A.J. Cowieson. 2011. BOARD-INVITED REVIEW: Opportunities and challenges in using exogenous enzymes to improve nonruminant animal production. *J. Anim. Sci.* 89:3189–3218.
- Adeola, O., O.A. Olukosi, J.A. Jendza, R.N. Dilger, and M.R. Bedford. 2006. Response of growing pigs to *Peniophora lycii*- and *Escherichia coli*-derived phytases or varying ratios of calcium to total phosphorus. *J. Anim. Sci.* 82:637–644.
- Adeola, O., J.S. Sands, P.H. Simmins, and H. Schulze. 2004. The efficacy of an *Escherichia coli*-derived phytase preparation. *J. Anim. Sci.* 82:2657–2666.
- Agyekum, A.K., A. Regassa, E. Kiarie, and C.M. Nyachoti. 2016. Nutrient digestibility, digesta volatile fatty acids, and intestinal bacterial profile in growing pigs fed a distillers dried grains with solubles containing diet supplemented with a multi-enzyme cocktail. *Anim. Feed Sci. Technol.* 212:70–80.
- Agyekum, A.K., B.A. Slominski, and C. M. Nyachoti. 2012.

Organ weight, intestinal morphology, and fasting whole-body oxygen consumption in growing pigs fed diets containing distillers dried grains with solubles alone or in combination with a multienzyme supplement. *J. Anim. Sci.* 90:3032–3040.

- 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 co-products fed to pigs. *J. Anim. Sci.* 90:1262–1269.
- Asmus, M., J.M. DeRouchey, M.D. Tokach, R.D. Goodband, J.L. Nelssen, and S.S. Dritz. 2012. Effects of xylanase in high-co-product diets on nutrient digestibility in finishing pigs. *Kansas Agricultural Experiment Station Research Reports.* pp. 335–342. <https://doi.org/10.4148/2378-5977.7089>.
- Bals, B., H. Murnen, M. Allen, and B. Dale. 2010. Ammonia fiber expansion (afex) treatment of eleven different forages: Improvements to fiber digestibility in vitro. *Anim. Feed Sci. Technol.* 155:147–155.
- Bals, B., B. Dale, and V. Balan. 2006. Enzymatic hydrolysis of distiller's dry grain and solubles (ddgs) using

- ammonia ber expansion pretreatment. *Energy & Fuels* 20:2732–2736.
- 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.
- Barnes, J., J.M. DeRouchey, M.D. Tokach, R.D. Goodband, J.L. Nelssen, and S.S. Dritz. 2011. Effects of xylanase in growing–finishing diets varying in dietary energy and fiber on growth performance, carcass characteristics, and nutrient digestibility. *Kansas Agricultural Experiment Station Research Reports*. <https://doi.org/10.4148/2378-5977.7124>
- Beaulieu, A.D., M.R. Bedford, and J.F. Patience. 2007. Supplementing corn or corn–barley diets with an *E. coli* derived phytase decreases total and soluble phosphorus output by weanling and growing pigs. *Can. J. Anim. Sci.* 87:353–364.
- Bobek, E.A., N.A. Nachtrieb, A. Batal, and M.E. Persia. 2014. Effects of xylanase supplementation of corn–soybean meal–dried distiller's grain diets on performance, metabolizable energy, and body composition when fed to first–cycle laying hens. *J. Appl. Poult. Res.* 23:174–180.
- Brady, S. M., J.J. Callan, D. Cowan, M. McGrane, and J.V. O'Doherty. 2002. Effect of phytase inclusion and calcium/phosphorus ratio on the performance and nutrient retention of grower–finisher pigs fed barley/wheat/soya bean meal–based diets. *J. Sci. Food Agric.* 82:1780–1790.
- Bunzel, M. 2010. Chemistry and occurrence of hydrocinnamate oligomers. *Phytochem. Rev.* 9:47–64.
- Bunzel, M., J. Ralph, F. Lu, R.D. Hateld, and H. Steinhart. 2004. Lignins and ferulate–coniferyl alcohol cross–coupling products in cereal grains. *J. Agric. Food Chem.* 52:6496–6502.
- 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.
- 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.
- de Vries, S., A.M. Pustjens, C. van Rooijen, M.A. Kabel, W.H. Hendriks, and W.J.J. Gerrits. 2014. Effects of acid extrusion on the degradability of maize distillers dried grain with solubles in pigs. *J. Anim. Sci.* 92:5496–5506.
- de Vries, S., A.M. Pustjens, M.A. Kabel, S. Salazar–Villanea, W.H. Hendriks, and W.J.J. Gerrits. 2013. Processing technologies and cell wall degrading enzymes to improve nutritional value of dried distillers grain with solubles for animal feed: an in vitro digestion study. *J. Agric. Food Chem.* 61:8821–8828.
- de Vries, S., A.M. Pustjens, H.A. Schols, W.H. Hendriks, and W.J.J. Gerrits. 2012. Improving digestive utilization of fiber–rich feedstuffs in pigs and poultry by processing

- and enzyme technologies: A review. *Anim. Feed Sci. Technol.* 178:123–138.
- Dida, M.F. 2016. Review paper on enzyme supplementation in poultry ration. *Int. J. Bioorganic Chem.* 1:1–7 doi:10.11648/j.jjbc.20160101.11
- Fan, L.T., Y.H. Lee, and D.H. Beardry matterore. 1980. Mechanism of the enzymatic-hydrolysis of cellulose – effects of major structural features of cellulose on enzymatic-hydrolysis. *Biotechnol. and Bioengineer.* 22:177–199.
- Gao, D., S.P. Chundawat, C. Krishnan, V. Balan, and B.E. Dale. 2010. Mixture optimization of six core glycosyl hydrolases for maximizing saccharification of ammonia fiber expansion (afex) pretreated corn stover. *Bioresour Technol* 101: 2770–2781.
- Ghazalah, A.A., M.O. Abd-Elsamee, and E.S. Moustafa. 2011. Use of distillers dried grains with solubles (DDGS) as replacement for soybean meal in laying hen diets. *Intl. J. Poult. Sci.* 10:505–513.
- Grabber, J.H., R.D. Hatfield, and J. Ralph. 1998a. Fiferulate cross-links impede the enzymatic degradation of non-lignified maize walls. *J. Sci. Food Agric.* 77:193–200.
- Grabber, J.H., J. Ralph, and R.D. Hatfield. 1998b. Ferulate cross-links limit enzymatic degradation of synthetically lignified primary walls of maize. *J. Agric. Food Chem.* 46:2609–2614.
- Grieshop, C.M., D.E. Reece, G. C. Fahey. 2001. Nonstarch polysaccharides and oligosaccharides in swine nutrition. Pages 107–130 in: *Swine Nutrition*. 2nd eds. A.J. Lewis and L.L. Southern, eds. CRC Press, Boca Raton, FL
- Graham, A., S. Nitikanachana, J. De Jong, J.M. DeRouchey, M.D. Tokach, R.D. Goodband, J.L. Nelssen, and S.S. Dritz. 2012. The interactive effects of Enzyme and phytase in diets containing high-fiber co-products on growth performance of nursery pigs. *Swine Day–Kansas State University*, p. 66–73.
- Hall, M., P. Bansal, J.H. Lee, M.J. Real, and A.S. Bommarius. 2010. Cellulose crystallinity—a key predictor of the enzymatic hydrolysis rate. *FEBS J.* 277:1571–1582.
- Hill, G.M., J.E. Link, M.J. Rincker, D.L. Kirkpatrick, M.L. Gibson, and K. Karges. 2008. Utilization of distillers dried grains with solubles and phytase in sow lactation diets to meet the phosphorus requirement of the sow and reduce fecal phosphorus concentration. *J. Anim. Sci.* 86:112–118.
- Jacela, J., S. Dritz, J. DeRouchey, M. Tokach, R. Goodband, and J. Nelssen. 2010. Effects of supplemental enzymes in diets containing distillers dried grains with solubles on finishing pig growth performance. *The Professional Animal Scientist* 26:412–424.
- Jakobsen, G.V., B.B. Jensen, K.E. Bach Knudsen, and N. Canibe. 2015. Impact of fermentation and addition of non-starch polysaccharide-degrading enzymes on microbial population and on digestibility of dried distillers grains with solubles in pigs. *Livest. Sci.* 178:216–227.
- Jang, Y.D., P. Wilcock, R.D. Boyd, and M.D. Lindemann. 2017. Effect of combined xylanase and phytase on growth performance, apparent, total tract digestibility, and carcass characteristics in growing pigs fed corn-based diets containing high-fiber coproducts. *J. Anim. Sci.* 95:4005–4017.
- Jaworski, N., H.N. Lærke, K. Bach Knudsen, and H.-H. Stein. 2015. Carbohydrate composition and *in vitro* digestibility of dry matter and nonstarch polysaccharides in corn, sorghum, and wheat and coproducts from these grains. *J. Anim. Sci.* 93: 1103–1113.
- Jendza, J.A., R.N. Dilger, J.S. Sands, and O. Adeola. 2006. E cacy and equivalency of an *Escherichia coli*-derived phytase for replacing inorganic phosphorus in the diets of broiler chickens and young pigs. *J. Anim. Sci.* 84:3364–3374.
- Jendza, J. A., R. N. Dilger, S. A. Adedokun, J. S. Sands, and O. Adeola. 2005. *Escherchia coli* phytase improves growth performance of starter, grower, and finisher pigs fed phosphorus-deficient diets. *J. Anim. Sci.*

83:1882–1889.

- Jha, R., and J.D. Berrocoso. 2015. Review: Dietary fiber utilization and its effects on physiological functions and gut health of swine. *Animal* 9:1441–1452.
- 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
- Kerr, B.J., and G.C. Shurson. 2013. Strategies to improve fiber utilization in swine. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 4:11.
- Kerr, B.J., T.E. Weber, and G.C. Shurson. 2013. Evaluation of commercially available enzymes, probiotics, or yeast on apparent total-tract nutrient digestion and growth in nursery and finishing pigs fed diets containing corn dried distillers grains with solubles. *Prof. Anim. Scientist* 29:508–517.
- Kerr, B. J., T.E. Weber, P.S. Miller, and L.L. Southern. 2010. Effect of phytase on apparent total tract digestibility of phosphorus in corn-soybean meal diets fed to finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 88:238–247.
- Khattak, F.M., T.N. Pasha, Z. Hayat, and A. Mahmud. 2006. Enzymes in poultry nutrition. *J. Anim. Pl. Sci.* 16:1–7.
- Kiarie, E., M.C. Walsh, L.F. Romero, and S.K. Baidoo. 2016. Digestibility responses of growing pigs fed corn plus corn distiller grains or wheat plus wheat co-product-based diets without or with supplemental xylanase. *J. Anim. Sci.* 94:211–214.
- Kiarie, E., A. Owusu-Asiedu, A. Péron, P.H. Simmins, and C.M. Nyachoti. 2012. Efficacy of xylanase and β -glucanase blend in mixed grains and grain co-products-based diets for fattening pigs. *Livest. Sci.* 148:129–133.
- Koksal, B.H., P. Sacakli, and A. Ergun. 2012. Effects of phytase and vitamin D3 addition to diets containing distillers dried grains with solubles on performance and some egg traits in laying hens. *Intl. J. Poult. Sci.* 11:259–263.
- Koo, B., J.W. Kim, C.F.M. de Lange, M.M. Hossain, and C.M. Nyachoti. 2017. Effects of diet complexity and muticarbhydrase supplementation on growth performance, nutrient digestibility, blood profile, intestinal morphology, and fecal score in newly weaned pigs. *J. Anim. Sci.* 95:4060–4071.
- 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.
- Liao, S. F., A.K. Kies, W.C. Sauer, Y.C. Zhang, M. Cervantes, and J.M. He. 2005. Effect of phytase supplementation to a low- and a high-phytate diet for growing pigs on the digestibilities of crude protein, amino acids, and energy. *J. Anim. Sci.* 83:2130–2136.
- Lindemann, M.D., G.A. Apgar, G.L. Cromwell, P.H. Simmins, and A. Owusu-Asiedu. 2009. Supplementation with phytase and xylanase can increase energy availability in swine diets containing corn distillers dried grains with solubles (DDGS). *J. Anim. Sci.* 87(E-Suppl. 2):69 (Abstr.).
- 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.
- Martínez-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.
- 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. *Intl. J. Poult. Sci.* 10:796–803.
- Min, Y.N., F. Yan, F.Z. Liu, C. Coto, and P.W. Waldroup. 2009. Effect of various dietary enzymes on energy

- digestibility of diets high in distillers dried grains with solubles for broilers. *J. Appl. Poult. Res.* 18:734–740.
- Moran, K., C.F.M. de Lange, P. Ferket, V. Fellner, P. Wilcock, and E. van Heugten. 2016. Enzyme supplementation to improve the nutritional value of fibrous feed ingredients in swine diets fed in dry or liquid form. *J. Anim. Sci.* 95:1031–1040.
- Mosier, N., C. Wyman, B. Dale, R. Elander, Y.Y. Lee, M. Holtzapple, and M. Ladisch. 2005. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresour Technol* 96: 673–686. doi:10.1016/j.biortech.2004.06.025
- NRC. 2007. Page 206 in *Nutrient Requirements of Horses*. 6th rev. ed. Natl. Acad. Press. Washington, DC.
- Noblet, J., and J. van Milgen. 2004. Energy value of pig feeds: Effect of pig body weight and energy evaluation system. *J. Anim. Sci.* 82 E–Suppl:E229–238.
- Ndou, S.P., E. Kiarie, A.K. Agyekum, J.M. Heo, L.F. Romero, S. Arent, R. Lorentsen, and C.M. Nyachoti. 2015. Comparative efficacy of xylanases on growth performance and digestibility in growing pigs fed wheat and wheat bran- or corn and corn DDGS-based diets supplemented with phytase. *Anim. Feed Sci. Technol.* 209:230–239.
- Olukosi, C.M., A.J. Cowieson, and A. Adeola. 2010. Broiler responses to supplementation of phytase and a mixture of carbohydrases and phytase in maize soybean meal diets with or without maize distillers' dried grain with solubles. *Br. Poult. Sci.* 51:434–443.
- O'Shea, C.J., P.O. McAlpine, P. Solon, T. Curran, P.F. Varley, A.M. Walsh, and J.V.O. Doherty. 2014. The effect of protease and xylanase enzymes on growth performance, nutrient digestibility, and manure odour in grower-finisher pigs. *Anim. Feed sci. technol.* 189:88–97.
- Passos, A.A., I. Park, P. Ferket, P., E. von Heimendahl, and S.W. Kim. 2015. Effect of dietary supplementation of xylanase on apparent ileal digestibility of nutrients, viscosity of digesta, and intestinal morphology of growing pigs fed corn and soybean meal based diet. *Anim. Nutr.* 1:36–40.
- Passos, A.A., and S.W. Kim. 2014. Effects of different feed enzyme combinations on apparent total tract digestibility of dry matter, N, phytate, DE, and ME in corn-soybean meal-DDGS based diets fed to pigs. *ADSA-ASAS Midwest Meeting abstract*, p. 147 <https://asas.confex.com/asas/mw14/webprogram/Paper2705.html>.
- Pedersen, M.B., S. Yu, S. Arent, S. Dalsgaard, K.E. Bach Knudsen and H.N. Laerke. 2015. Xylanase increased the ileal digestibility of nonstarch polysaccharides and concentration of low molecular weight nondigestible carbohydrates in pigs fed high levels of wheat distillers dried grains with solubles. *J. Anim. Sci.* 93:2885–2893.
- Pedersen, M.B., S. Dalsgaard, K.E. Bach Knudsen, S. Yu and H.N. Laerke. 2014. Compositional profile and variation of distillers dried grains with solubles from various origins with focus on non-starch polysaccharides. *Anim. Feed Sci. Technol.* 197:130–141.
- Piber, M., and P. Kohler. 2005. Identification of dehydroferulic acid tyrosine in rye and wheat: evidence for a covalent cross-link between arabinoxylans and proteins. *J. Agric. Food Chem.* 53:5276–5284.
- Poletto, M., H. Júnior, and A. Zattera. 2014. Native cellulose: Structure, characterization and thermal properties. *Materials* 7:6105–6119.
- Ralph, J., J.H. Grabber, and R.D. Hatfield. 1995. Lignin-ferulate cross-links in grasses: active incorporation of ferulate polysaccharide esters into ryegrass lignins. *Carbohydr. Res.* 275:167–178.
- Ravindran, V. 2013. Feed enzymes: The science, practice, and metabolic realities. *J. Appl. Poult. Res.* 22:628–636.
- Romero, L.F., C.M. Parsons, P.L. Utterback, P.W. Plumstead and V. Ravindran. 2013. Comparative effects of dietary carbohydrases without or with protease on the ileal digestibility of energy and amino acids and AMEn in young broilers. *Anim. Feed sci. Technol.* 181:35–44.
- Rosentrater, K.A., K. Ileleji, and D.B. Johnson. 2012.

- Manufacturing of fuel ethanol and distillers grains – current and evolving processes. In: Liu K, Rosentrater K. A and B. Raton (eds.) Distillers grains production, properties, and utilization. phosphorus 73–102.
- Sandberg, F.B., S.J. England, and M.R. Bible. 2016. Responses of growing–finishing pigs to two levels of a multi–enzyme blend (Natuzyne) as compared to pigs fed a lower energy–higher fiber, or a higher energy–lower fiber diet. *J. Anim. Sci.* doi: 10.2527/msasas2016–292
- Santiago, R., J. Barros–Rios, and R.A. Malvar. 2013. Impact of cell wall composition on maize resistance to pests and diseases. *Int. J. Mol. Sci.* 14:6960–6980.
- Selvendran, R.R. and J.A. Robertson. 1990. The chemistry of dietary fiber: a holistic view of the cell wall matrix. Pages 27–43 in *Dietary Fibre: Chemical and Biological Aspects*. D.A.T. Southgate, K. Waldron, I.T. Johnson, and G.R. Fenwick, eds. Royal Society of Chemistry Special Publication No 83. Royal Society of Chemistry, Cambridge.
- Shalash, S.M.M., S.A. El–Wafa, R.A. Hassan, N.A. Ramadan, M.S. Mohamed, and H.E. El–Gabry. 2010. Evaluation of distillers dried grains with solubles as feed ingredient in laying hen diets. *Intl. J. Poult. Sci.* 9:537–545.
- Shelton, J. L., L. L. Southern, T. D. Bidner, M. A. Persica, J. Braun, B. Cousins and F. McKnight. 2003. Effect of microbial phytase on energy availability and lipid and protein deposition in growing swine. *J. Anim. Sci.* 81:2503–2062.
- Shrestha, D.R. 2012. Effects of supplemented NSP–degrading enzymes on nutrient digestibility of diets containing co–products fed to grower pigs. University of Alberta, Edy matteronton, Alberta. .Slominski, B.A. 2011. Review – Recent advance in research on enzymes in poultry diets. *Poult. Sci.* 90:2013–2023.
- Somerville, C., S. Bauer, G. Brininstool, M. Facette, T. Hamann, J. Milne, E. Osborne, A. Paredez, S. Persson, T. Raab, S. Vorwerk, and H. Youngs. 2004. Toward a systems approach to understanding plant cell walls. *Science* 306:2206–2211.
- Sun, Y., and J. Cheng. 2002. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: A review. *Bioresource Technol.* 83:1–11.
- Świątkiewicz, M., A. Swiatkiewicz, A. Arczewska–Wlosek, and D. Jozefiak. 2015. E cacy of feed enzymes in pig and poultry diets containing distillers dried grains with solubles: a review. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 100:15–26.
- Świątkiewicz, S., A. Arczewska–Wlosek, and D. Jozefiak. 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–Wlosek, and D. Jozefiak. 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, M., E. Hanczakowska, and A. Olszewska. 2013a. E ect of corn distillers dried grains with solubles (DDGS) in diets with NSP–hydrolyzing enzymes on growth performance, carcass traits and meat quality of pigs. *Annals of Anim. Sci.* 13:313–326.
- Świątkiewicz, S., A. Arczewska–Wlosek, J. Krawczyk, M. Puchala, and D. Jozefiak. 2013b. E ects of selected feed additives on the performance of laying hens given a diet rich in maize dried distiller’ s grains with solubles (DDGS). *Br. Poult. Sci.* 54:478–485.
- Świątkiewicz, S., and J. Korelski. 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.
- Tsai, T., C.R. Dove, P.M. Cline, A. Owusu–Asiedu, M.C. Walsh and M. Azain. 2017. The e ect of adding xylanase or β –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 chemical composition. *Anim. Feed Sci. Technol.* 198:196–202.
- 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.
- van den Borne, J.J., M.A. Kabel, M. Briens, A.F. van der Poel, and W.H. Hendriks. 2012. Effects of pretreatment of wheat bran on the quality of protein-rich residue for animal feeding on monosaccharide release for ethanol production. *Bioresource Technol.* 124:446–454.
- Veum, T. L., D.W. Dollinger, C.E. Bu , and M.R. Bedford. 2006. A genetically engineered *Escherichia coli* phytase improved nutrient utilization, growth performance, and bone strength of young swine fed diets deficient in available phosphorus. *J. Anim. Sci.* 84:1147–1158.
- Waititu, S.M., A. Rogiewicz, B.A. Slominski, G.J. Maina, J.O. Ochanda, and C.M. Nyachoti. 2014. Effect of multi-enzyme mixtures on performance and nutrient utilization in broilers fed diets containing different types of cereals and industrial by-products. *J. Poult. Sci.* 51:402–410.
- Widyaratne, G., J. Patience, and R. Zijlstra. 2009. Effect of xylanase supplementation of diets containing wheat distiller's dried grains with solubles on energy, amino acid and phosphorus digestibility and growth performance of grower–finisher pigs. *Can. J. Anim. Sci.* 89:91–95.
- Woyengo, T.A., D.V. Ige, O.O. Akinremi, and C.M. Nyachoti. 2015. Performance and nutrient digestibility in growing pigs fed wheat dried distillers' grain with solubles-containing diets supplemented with phytase and multi-carbohydrase. *J. Anim. Sci.* 87:570–577.
- Xu, G., G.He, S. Baidoo, and G.C. Shurson. 2006a. Effect of feeding diets containing corn distillers dried grains with solubles (DDGS), with or without phytase, on nutrient digestibility and excretion in nursery pigs. *J. Anim. Sci.* 84(Suppl. 2):122 (Abstr.).
- Xu, G. M.H. Whitney, and G.C. Shurson. 2006b. Effects of feeding diets containing corn distillers dried grains with solubles (DDGS), with or without phytase, on nutrient digestibility and excretion in grow–finish pigs. *J. Anim. Sci.* 85(Suppl. 2):123 (Abstr.).
- Yanez, J.L., E. Beltranena, M. Cervantes, and R.T. Zijlstra. 2011. Effect of phytase and xylanase supplementation or particle size on nutrient digestibility of diets containing distillers dried grains with solubles cofermented from wheat and corn in ileal-cannulated grower pigs. *J. Anim. Sci.* 89:113–123.
- Yoon, S.Y., Y.X. Ynag, P.L. Shinde, J.Y. Choi, J.S. Kim, Y.W. Kim, K. Yun, J.K. Jo, J.H. Lee, S.J. Ohh, I.K. Kwon, and B.J. Chae. 2010. Effects of mannanase and distillers dried grains with solubles on growth performance, nutrient digestibility, and carcass characteristics of grower–finisher pigs. *J. Anim. Sci.* 88:181–191.
- Zhang, Y.H., and L.R. Lynd. 2004. Toward an aggregated understanding of enzymatic hydrolysis of cellulose: Noncomplexed cellulase systems. *Biotechnol Bioeng* 88:797–824.