

## 第 24 章

# 家禽と養豚用の DDGS 配合飼料への酵素の利用

## はじめに

植物性炭水化物は 3 種類に分類することができる。すなわち、1) 単糖とその複合体（グルコース、フルクトース等）、2) 貯蔵化合物（デンプン）、および 3) 構造的炭水化物（セルロース、ヘミセルロース等）である。単糖と貯蔵化合物は主に上部消化管で消化されるが、完全に消化されるわけではない。一方、構造的炭水化物は盲腸と大腸で細菌叢によってごく一部のみが消化される (Slominski, 1991)。デンプンの大半がエタノール製造中にトウモロコシから除去されるため、結果的に得られる併産物であるドライド・ジスチラーズ・グレイン・ウィズ・ソリュブル (DDGS) には高い濃度のタンパク質、ミネラルおよび繊維が含まれることになる (Spiehs ら、2002 ; Pedersen ら、2007 ; Anderson, 2009)。豚は幼齢期 (Whitney と Shurson, 2004 ; Weber ら、2008) および仕上期 (Whitney ら、2006) では高濃度は無理でも中濃度の繊維であれば利用する能力があるが、トウモロコシ由来併産物に含まれる構造的炭水化物に伴うエネルギーを利用する豚の能力については向上させる必要がある (Muley ら、2007)。米国ではエタノール製造に大量のトウモロコシが用いられているため、動物用飼料として利用可能で繊維豊富なトウモロコシ併産物の量は増加し続けている。飼料エネルギーおよびアミノ酸に関わる費用を最小化するためには、エネルギーやその他の栄養成分の消化率を引き上げるための技術を開発、評価することが不可欠である。外因性酵素の使用は、高繊維トウモロコシ併産物、とりわけ DDGS の栄養価値を高めることが期待されるこうした技術のひとつである。

## 豚の栄養成分としての繊維

### 定義

残念ながら、「繊維」はおそらく豚用飼料の成分の中で最も理解の遅れているものであり、一般に、複雑で非常に変動の大きい植物主体飼料の成分であると記載されている (図 1, NRC, 2007)。認識しておくべきことは、「繊維」の特性を明らかにするために用いられる分析方法では、しばしば明らかに繊維以外の炭水化物分画と重複していたり、あるいはそれを排除していたりするため、分析により得られた値を適切に繊維有効率に結び付けるのは容易ではないということである。繊維の中には他よりも消化率の高い種類のものがあり、こうした繊維は哺乳動物の酵素では分解されないが、後腸の細菌によって発酵する (Grieshop ら、2001)。このような繊維は「非デンプン性多糖類」(NSP) と呼ばれることが多く、植物の細胞壁の最大 90% が NSP であり、その中ではセルロース、ヘミセルロースおよびペクチンが最も豊富である (Selvendran と Robertson, 1990)。含有量が比較的少ない NSP にはフルクタン、グルコマンナン、ガラクトマンナン、植物粘液、 $\beta$  グルカンおよびゴムがある。植物中のセルロースは緻密な結合体として存在し、一方ヘミセルロースやペクチンは糖側鎖を持つため容易に分解する。リグニンはそれ自体は多糖類ではないが高分子重合体であり、豚には消化することができないため飼料機能成分とはみなされていない (Grieshop ら、2001)。

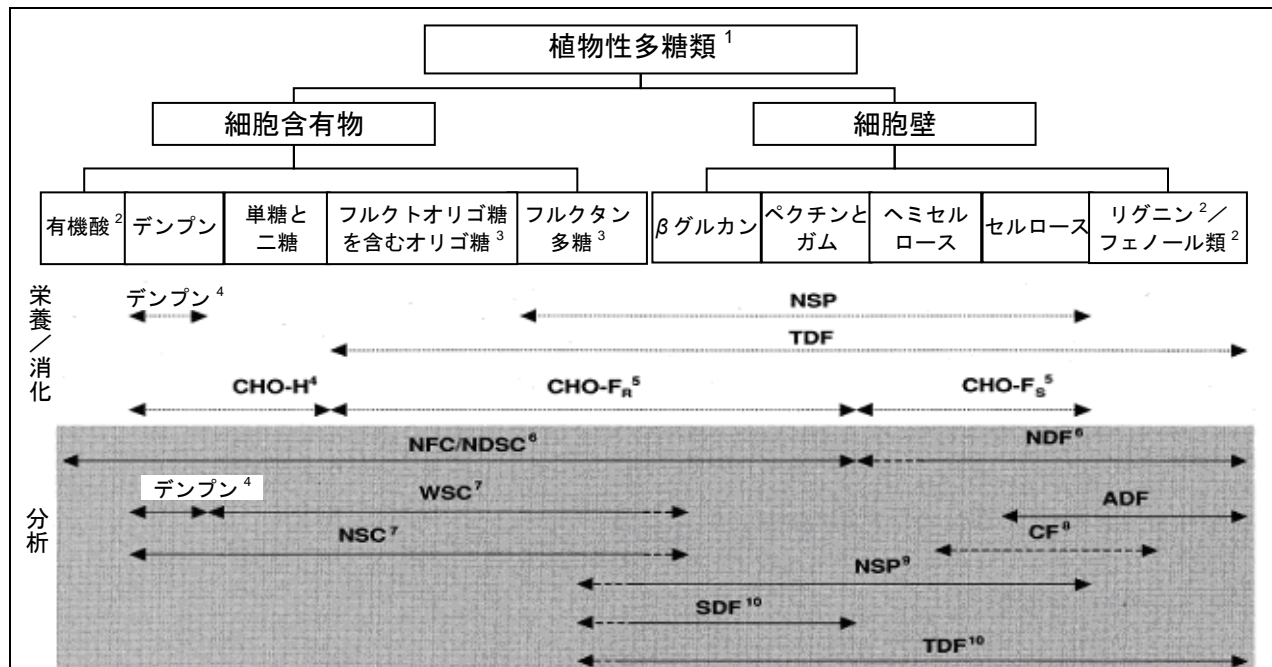


図 10-1 植物性炭水化物および関連化合物の分画

ウマ科動物の消化機能と関連付けた現在の分析手法（下側／網掛部；実線／破線）および栄養定義または生理学的定義（上側；点線）に基づく食物性炭水化物の区分化のための現行システムと提案システム。出典は Hall, 2003 と Hoffman, 2004。網掛部の破線は含有化合物の回収が不完全である可能性のあることを示している。

略語： ADF = 酸性デタージェント繊維、CF = 粗繊維、CHO-H = 加水分解性炭水化物、CHO-F<sub>S</sub> = 遅速発酵性炭水化物、CHO-F<sub>R</sub> = 急速発酵性炭水化物、NDF = 中性デタージェント繊維、NDSC = 中性デタージェント可溶性炭水化物、NFC = 非繊維炭水化物、NSC = 非構造性炭水化物、NSP = 非デンプン多糖類、SDF = 可溶性食物繊維、TDF = 総食物繊維、WSC = 水溶性炭水化物

- 1 炭水化物および関連する酵素反応物質の主要カテゴリーを示している。植物によって生成されるすべての炭水化物がこれらのカテゴリーに含まれているとは限らない。
- 2 特定の分析分画の成分の場合には、炭水化物ではない成分もここに含まれている場合がある。
- 3 特定のフルクタンは重合の程度に応じて、フルクトオリゴ糖かフルクタン多糖類のどちらかに分類されることがある。
- 4 総デンプンの変動分画は酸素加水分解に耐えることができ、そのため他の栄養分画中に現れるデンプンもある。
- 5 ゴムの発酵率は変動する可能性がある。
- 6 ヘミセルロースの中には中性デタージェントに溶解するものがあり、そのため NDF 分画ではなく NFC/NDSC 分画として回収されることがある。
- 7 分析 WSC 分画での化合物回収（その結果として、NSC がデンプン+WSC として見積もられる場合には NSC 分画となる）は使用する手法によって変化することがある。
- 8 CF 分析に含まれる細胞壁成分の量は飼料によって変化する。
- 9 栄養的観点から、NSP にはデンプンを除くすべての多糖類が含まれる。ただし、NSP のための分析手法では、不定量のフルクタン多糖類を回収することがある。
- 10 栄養的観点から、TDF には哺乳動物の消化に耐えるすべての炭水化物が含まれる。ただし、TDF (および SDF) のための分析手法ではオリゴ糖を回収せず、不定量のフルクタン多糖類を回収することがある。

図 1. 植物性炭水化物の特性を明確化するために用いられる栄養と分析の分類

図 1 に示すように、高繊維飼料成分および飼料に含まれる複雑な炭水化物の計測に用いられる一般的な分析手法には、粗繊維、酸性デタージェント繊維 (ADF)、中性デタージェント繊維 (NDF)、総食物繊維 (TDF) の可溶性および不溶性分画および NSP が含まれる。こうした繊維手法のいずれもが複雑な炭水化物の中の複数の分画を測定するものであるが、得られた値と豚用飼料のエネルギー値とは適切に関連付けられていない。

## 繊維のエネルギー値

豚にとっての「繊維」の消化率は、繊維入手源 (Bach Knudsen と Hansen、1991)、加工方法 (Fadel ら、1989)、および飼料中の繊維濃度 (Stanogias と Pearce、1985 ; Goodlad と Mathers、1991) によって 0~97% と大きな開きがある。しかしながら、多くの NSP が部分的に後腸で発酵し、酢酸塩、プロピオン酸塩および酪酸塩といった揮発性脂肪酸 (VFA) の生成に用いられる。こうした VFA はすぐに吸収され、豚の維持エネルギー要求量の 5~28% を供給することが報告されている (Farrell と Johnson、1970 ; Imoto と Namioka、1978 ; Kass ら、1980 ; Latymer と Low、1987 ; Rérat ら、1987 ; Yen ら、1991)。ただし、メタン、水素および発酵熱によるエネルギー損失は、後腸での繊維発酵から豚が得るエネルギー利用可能量を減少させる (Grieshop、2001) ため、エネルギー利用効率が低下する (Giusi-Perier ら、1989、Noblet ら、1994)。

## 消化管を改造する繊維

### 1. 重量

高繊維飼料を給与すると、一般に消化管の総自重が増加し (Kass ら、1980 ; Stanogias と Pearce、1985 ; Anugwa ら、1989)、消化管分泌物が増加した (Grieshop ら、2001)。Jørgensen ら (1996) によれば、低食物繊維飼料 (59 g/kg DM) を給与した成長期から仕上げ期の豚との比較で、高食物繊維 (NSP + リグニン) (268 g/乾物 kg、DM) を給与した豚では胃、盲腸、大腸の重量が大幅に増加し、大腸の長さも増加した。

### 2. 腸細胞の増殖

腸上皮細胞の増殖率は高 NSP 飼料の刺激を受け (Jin ら、1994 ; Howard ら、1995)、細胞の再生率が増加する。小麦のわらを 10% 含む飼料を成長期の豚に給与すると、空腸および大腸の細胞増殖率が 33% 上昇し、細胞死する細胞が 65% 増加した (Jin ら、1994)。

### 3. 内因性消化液分泌

高繊維飼料を豚に給与すると、内因性の消化液の分泌も増加する (Wenk、2001)。50kg の豚に給与する飼料の食物繊維を 50 から 180g/kg に引き上げると、唾液、胃液および膵液の分泌が倍増した (Zebrowska ら、1983)。

### 4. 維持エネルギー要求量

高繊維飼料を給与することによって消化管の特性の多くが変化し、内臓の発達および維持に栄養が必要であるために代謝要求が増加し、結果的に豚の維持エネルギー要求量が増加する可能性がある (Grieshop ら、2001 ; Wenk、2001)。そのため、繊維の消化を改善する方法があれば、繊維が動物の代謝に及ぼすこうした悪影響を抑えることができる。

### 5. 胃内容排出と飽満感

特定形態の NSP を添加すると胃内容排出率が減少する可能性がある。グアーガムおよびペクチンは消化管内容物の粘度 (Grieshop ら、2001) および水分保持 (Johansen ら、1996) を高める。高エネルギー (デンプン、カゼイン、大豆油および獣脂) 飼料に 40~60g/kg のグアーガムを添加したものを給与した生育期の豚は、給与後の胃内容排出率が 33~52% の範囲に減少し、消化管

内容物の DM 濃度が 27%減少した (Rainbird, 1986 ; Rainbird と Low, 1986)。胃壁の膨張によって胃のシグナルを受けるため、高繊維飼料では飽満感が早く訪れる。食物繊維の量を増やした飼料を給与すると、胃内容物の量が増加し、通過時間が減少し、飽満感が増す可能性がある。このことは妊娠中の豚には重要で、物理的かつ栄養的に満足した豚はストレスが軽減され、身体的活動が減少すると考えられる (Rijhen ら、1999)。

#### 6. 消化管内容物の通過率と栄養利用

消化管内容物の通過率も高繊維飼料給与の影響を受ける。ある試験によれば、飼料に含まれる NDF の含有率を引き上げた場合に、回腸終端部での日々の DM 流量が増加した (Schulze ら、1995)。また、他の試験では、飼料にブランまたはオートミールの副産物を 75g~300g 加えた結果として、通過率がそれぞれ最大で 14%と 23%増加した (Potkins ら、1991)。入手した繊維のいずれでも胃内容物排出や小腸通過率に有意な影響を及ぼさないことから、こうした結果は総消化管通過率の差が大腸通過率の差によるものであることを示唆している (Potkins ら、1991)。更に、繊維の粒径も通過率に影響を及ぼす可能性がある。Bardon と Fioramonti (1983)は、粒子の大きな小麦ブランでは粒子の小さなブランよりも経過時間が短くなることを示した。

消化管内容物が大腸を通過する時間は発酵能力にも影響を及ぼす。盲腸および大腸での繊維発酵は VFA の生成、主に酢酸、プロピオン酸、酪酸の生成につながるが、これらは実用的なエネルギー源となる。ところが、通常 NSP が添加されると飼料のエネルギー値と消化率は減少する (Grieshop ら、2001)。更に、NSP は脂肪分解と腸内脂肪吸収を一部阻害するため、脂肪吸収が低下する (Borel ら、1989)。非デンプン多糖類も内因性窒素 (N) の分泌を増加させるため、食物性窒素の保持量が減少し、細菌による窒素排泄の増加に結び付く (Grieshop ら、2001)。ミネラルは飼料のエネルギーには直接貢献しないが、NSP がミネラルの利用率に及ぼす影響も考慮すべきである (例えば、過剰や欠乏は最終的にエネルギー吸収に影響を及ぼす可能性のある生理学的状態に影響を与える)。しかしながら、NSP 源がミネラルの利用率に及ぼす影響はごくわずかと考えられる (Kornegay と Moore、1986 ; Grieshop ら、2001)。

## 繊維利用率に影響を及ぼす機械処理

トウモロコシおよびトウモロコシ併産物の処理法 (機械または化学処理) が非反芻胃動物の繊維利用率に及ぼす影響に関するデータはわずかしかなくまたデータの一貫性もない。Teitge ら(1991)の報告によれば、ペレット処理および微粉化することによってライムギを含む飼料を給与したブロイラーの食物性ペントサナーゼに対する反応が大きく改善したが、スチームフレーク処理では改善しなかった。一方、Brenes ら (1993a) の報告によれば、オートクレーブ処理したルピナスは雛の成績に影響を及ぼさなかった。レグホンの雛では、タンニンの少ない豆と比較して、オートクレーブ処理したタンニンの多い豆を給与すると見かけの代謝エネルギーおよび見かけのタンパク質消化率が改善した (Brenes ら、1993b)。大麦主体飼料を給与した 80kg の豚では、ペレット処理は DM、エネルギー、粗タンパク質 (CP)、脂肪、繊維 (NSP+リグニン) の見かけの回腸消化率および見かけの排泄物消化率に影響を及ぼさなかったが、回腸前のデンプンの見かけの消化率は増加した (Graham ら、1989)。Teitge ら (1991) とは対照的に、Graham ら (1989) の報告では食物性  $\beta$  グルカナーゼを飼料に加えた場合に、ペレット処理による消化反応の改善は認められなかった。



Poel ら(1992)の報告によれば、ソラマメの子葉の蒸気処理では CP の回腸消化率の改善は認められなかったが、これはソラマメに含まれるトリプシン阻害物質の活性が不活発であるか、トリプシン阻害物質が本試験で用いられた 100° C 以上の熱に敏感であったためと考えられる。同様に、Thacker と Campbell (1999) および Nyachoti ら (2006) は、微粉化処理が栄養成分消化率係数に及ぼす影響がごくわずかであることを示した。トウモロコシ繊維を多く含む飼料（コーングルテンフィード）をペレット化すると窒素バランスが改善したが、これは明らかにトリプトファンの有効性が増加したためである (Yen ら、1971)。押し出し成型処理は飼料業界で一般的に用いられている飼料原材料の熱処理方法である。しかしながら、押し出し成型処理したトウモロコシおよびトウモロコシ併産物が栄養価値に及ぼす影響についてはほとんど知られていない (Muley ら 2007)。従って、押し出し成型処理やその他実際に用いられている高繊維トウモロコシ併産物の飼料向け処理方法が豚の栄養成分消化率に及ぼす影響を評価するための試験が必要である。

## 外因性酵素が繊維利用率に及ぼす影響

### 家禽用飼料 vs. 豚用飼料

栄養成分の消化を改善するために外因性酵素を動物用飼料に添加することは、新しいコンセプトではなく、その反応については詳細な検討が加えられている (Chesson、1987 ; Bedford、2000)。市場を流通している酵素製品の大半が家禽を対象としており (Annison と Choct、1991 ; Cowan、1993)、通常は大麦、オーツ麦、豆、ライ麦または小麦を含む飼料に添加されているが (Aimonen と Nasi、1991 ; Thacker ら、1992 ; Viveros ら、1994 ; Huberner ら、2002)、トウモロコシ - 大豆粕飼料に添加される酵素についての評価は限られている (Saleh ら、2005)。

### 豚用非トウモロコシ主体飼料に用いられる酵素

家禽と同様に、酵素を豚用飼料に加える試験の大半はその対象が非トウモロコシ主体飼料である。大麦および小麦を含む飼料に複合酵素剤を添加すると、10kg の豚の可溶性 NSP の消化率が改善されたが、生育成績への影響は認められなかった (Inborr ら、1993)。同じく、豚用飼料に酵素を添加した場合の様々な反応についての報告が Nonn ら (1999) によって発表されているが、ここでも酵素添加は豚の生育成績に影響を及ぼしていない。ただし、粗繊維およびセルロースの消化率の増加が確認された。Thacker と Campbell (1999) も同様に、酵素の添加によって栄養成分消化率係数は増加したものの、豚の生育成績はわずかな影響しか受けなかったと報告している。こうした報告とは対照的に、Omogbenigun ら (2004) は酵素カクテル (セルロース、ガラクタナーゼ、マンナーゼ、ペクチナーゼの組み合わせ) を小麦主体飼料に添加して 6kg の豚に給与し、38 日後の生育成績 (生育速度および飼料効率) が改善されたと報告している。栄養成分消化率の改善は Yin ら (2000) によっても報告されている。その試験では小麦副産物を含む飼料にキシラナーゼを添加して 15kg の豚に給与した場合、特に不溶性 NSP を高い割合で配合した飼料については、DM、CP およびエネルギーの回腸や全消化管での見かけの消化率が改善された。別の試験では、酵素カクテル (発酵抽出物および *A. niger* と *T. longibranchautum* のソリュブルとの組み合わせ) を大豆皮 20% 配合の飼料に添加して 33~51kg の豚に給与し、DM 消化率およびエネルギー消化率の改善がみられたが、窒素の消化率には変化がなかった (Moeser と van Kempen、2002)。他の NSP と比較するとセルロースの割

合が大きい大豆の皮では、ヘミセルロースや可溶性の高い他の繊維だけでなく、セルロースの消化にも影響を及ぼす可能性のあることをこうしたデータはある程度裏付けている。

## 豚用トウモロコシ主体飼料に用いられる酵素

トウモロコシ主体飼料を豚に給与した場合に、外因性酵素が栄養成分消化率または豚の生育成績に及ぼす影響を見極めるための試験についてはわずかしか報告されていない。β グルカナーゼをトウモロコシ - 大豆粕主体飼料に添加して 6kg の豚に給与した場合、DM やエネルギーの消化率にも CP の消化率にも影響を及ぼさなかった (Li ら、1996)。同様に、β マンナーゼ (β マンナーゼはヘミセルロースの一部) をトウモロコシ - 大豆粕主体飼料に添加して 93kg の去勢豚に給与した場合、DM、エネルギー、窒素の消化率への影響はいずれも認められなかった (Petty ら、2002)。ただし、6kg (給与期間は 42 日) と 14kg の豚 (給与期間は 21 日) では、β マンナーゼによって飼料効率が改善され、23~110kg の豚では増体量および飼料効率が改善されたが、枝肉組成は影響を受けなかった (Petty ら、2002)。Kim ら (2003) はトウモロコシ - 大豆粕主体飼料にカルボヒドラーゼ複合酵素剤 (α-1,6-ガラクトシダーゼと β-1,4 マンナーゼを混合したもの) を添加して幼齢期の豚に給与した結果として、2 件の試験 (試験期間 35 日で BW は 6.3 から 19.1 kg と試験期間 21 日で BW は 8.0 から 15.2 kg) で飼料効率および回腸エネルギー消化率が改善されたと報告している。カルボヒドラーゼ複合酵素剤を添加すると、近位小腸と遠位小腸のスタキオースおよび遠位小腸のラフィノースの濃度も低下した。これはこのカルボヒドラーゼ複合酵素剤が大豆粕に含まれる炭水化物の消化率を改善したことを示唆している。同様に、複数の複合酵素剤をトウモロコシ - 大豆粕主体飼料 (少量の小麦、小麦スクリーニング、大麦、小麦ミルラン、菜種粕および豆) に添加して 7kg の豚に 28 日間給与すると、生育成績や回腸と全消化管の各種栄養成分消化率指数が改善した (表 1 ; Omogbenigun ら、2004)。

表 1. 酵素添加が 7kg の豚の生育成績および栄養成分の見かけの回腸消化率 (AID) と全消化管消化率 (TTD) に及ぼす影響<sup>1</sup>

成績	飼料 <sup>2</sup>				統計	
	対照	C + 酵素 A	C + 酵素 B	C + 酵素 C	SEM	P 値
ADG, g	224 <sup>b</sup>	252 <sup>a</sup>	263 <sup>a</sup>	249 <sup>a</sup>	7.9	0.02
ADFI, g	432	435	456	414	17.8	0.42
G:F	0.52 <sup>b</sup>	0.58 <sup>a</sup>	0.58 <sup>a</sup>	0.61 <sup>a</sup>	0.02	0.01
<b>AID, %</b>						
DM	60.1 <sup>b</sup>	65.8	66.1 <sup>a</sup>	66.7 <sup>a</sup>	1.5	0.01
デンプン	86.7 <sup>b</sup>	92.6 <sup>a</sup>	94.6 <sup>a</sup>	95.3 <sup>a</sup>	1.1	0.02
GE	62.8 <sup>b</sup>	70.0 <sup>a</sup>	69.7 <sup>a</sup>	71.4 <sup>a</sup>	0.9	0.01
CP	62.1 <sup>b</sup>	71.5 <sup>a</sup>	71.4 <sup>a</sup>	73.2 <sup>a</sup>	1.5	0.01
フィチン酸塩	59.2 <sup>b</sup>	71.7 <sup>a</sup>	69.1 <sup>a</sup>	69.7 <sup>a</sup>	2.3	0.04
NSP	10.1 <sup>b</sup>	14.9 <sup>a</sup>	16.4 <sup>a</sup>	21.4 <sup>a</sup>	1.4	0.01
<b>TTD, %</b>						
DM	75.6 <sup>b</sup>	78.1	77.2 <sup>a</sup>	80.0 <sup>a</sup>	0.5	0.01
デンプン	94.4 <sup>b</sup>	98.6 <sup>a</sup>	97.6 <sup>a</sup>	98.6 <sup>a</sup>	0.7	0.01
GE	77.8 <sup>b</sup>	79.8 <sup>a</sup>	79.8 <sup>a</sup>	81.1 <sup>a</sup>	0.7	0.01
CP	67.1 <sup>b</sup>	71.2 <sup>a</sup>	71.6 <sup>a</sup>	74.2 <sup>a</sup>	1.0	0.01
フィチン酸塩	69.4 <sup>b</sup>	96.8 <sup>a</sup>	96.3 <sup>a</sup>	96.0 <sup>a</sup>	3.2	0.01
NSP	48.9 <sup>b</sup>	61.2 <sup>a</sup>	59.6 <sup>a</sup>	66.8 <sup>a</sup>	1.2	0.01

<sup>1</sup> 平均開始体重 7.0 kg、試験期間 28 日、各飼料当たり 6 頭、DM ベースの ADFI (Omogbenigun ら、2004)

<sup>2</sup> 酵素剤：飼料 1 キロに対してキシラナーゼ 250 ユニット、グルカナーゼ 150 ユニット、アミラーゼ 0.001%、プロテアーゼ 0.0003%、インペルターゼ 0.002% およびフィターゼ 400 ユニットで、植物細胞壁の分解活性の種類が異なる。酵素 A にはセルラーゼ、ガラクターナーゼおよびマンナーゼ、酵素 B にはセルロースとペクチナーゼ、酵素 C にはセルロース、ガラクターナーゼ、マンナーゼおよびペクチナーゼが含まれる。

<sup>abc</sup> 同一列の異なる上付文字は有意差 (P<表示値) のあることを示す。

最近になって Ji ら (2008) は  $\beta$  グルカナーゼ - プロテアーゼ酵素ブレンドをトウモロコシ - 大豆粕飼料に添加し、38kg の豚に給与した (表 2)。酵素ブレンドが含まれた飼料を摂取した豚では、DM、エネルギー、CP、TDF およびリン (P) の全消化管消化率が増加し、NDF は回腸消化率のみが増加したが、CP は回腸消化率が減少したと思われる。Ji らは、NDF の回腸消化率 (とヘミセルロース) の増加が、酵素添加により排泄物消化率に変化がなかったこともあわせ考えると、こうした栄養成分の消化の一部の場を後腸から小腸に移動させ、これによってエネルギーの発酵損失が避けられ、繊維消化のエネルギー効率が改善したのではないかとみている。

表 2. 酵素添加が 38kg の豚の栄養成分の見かけの回腸消化率 (AID) および全消化管消化率 (TTD) に及ぼす影響<sup>1</sup>

AID, %	飼料 <sup>2</sup>			統計	
	Basal	B + 0.05%	B + 0.10%	B vs Enz	0.05 vs 0.10
DM	70.86	69.13	70.50	0.33	0.25
エネルギー	70.93	69.48	70.71	0.44	0.31
CP	78.29	75.51	76.54	0.04	0.37
デンプン	97.95	98.01	98.12	0.51	0.59
NDF	1.21	9.52	10.05	0.02	0.88
ADF	4.33	4.36	5.22	0.91	0.84
TDF	該当なし	該当なし	該当なし	該当なし	該当なし
粗脂肪	61.40	62.94	62.18	0.49	0.68
P	49.62	49.54	49.00	0.86	0.80
TTD, %					
DM	87.42	88.61	88.50	0.01	0.62
エネルギー	86.51	87.42	87.26	0.01	0.51
CP	86.47	88.08	87.39	0.01	0.10
デンプン	99.24	99.26	99.31	0.53	0.44
NDF	54.62	55.62	56.05	0.36	0.77
ADF	64.84	61.40	65.92	0.40	0.01
TDF	60.61	65.36	65.61	0.01	0.86
粗脂肪	80.14	80.51	78.24	0.51	0.09
P	53.80	61.73	57.83	0.01	0.01

<sup>1</sup> 平均開始体重 38.2 kg、試験期間 14 日の 4×4 ラテン方格 (順応 4 日、糞便採取 5 日、移行 3 日、回腸回収 2 日) (Ji ら、2008)

<sup>2</sup> 酵素には 1 g につき β グルカナーゼ 660 ユニット、ヘモグロビン 22 ユニットが含まれる。

先頃、DDGS を 30% 配合した飼料に酵素剤を添加して幼齢期の豚に給与すると、生育成績が向上するという報告があった (Spencer ら、2007)。トウモロコシ繊維の含有率を引き上げた飼料に飼料用酵素を添加して仕上期の豚に給与した場合、生育成績が向上するかどうかについては依然として不明のままである。残念なことに、豚の生育成績は酵素添加の影響を受けないとする試験結果は科学文献としてほとんど発表されておらず、豚肉生産者、養豚栄養担当者および豚肉業界の専門家が利用することのできる査読済みデータはごくわずかという結果となっている。

## フィターゼ単独使用と他の酵素との併用

飼料用フィターゼの添加によるエネルギー消化率への影響には一貫性がない。大半の試験ではフィターゼのエネルギー消化率への影響は確認されていないが (Adeola ら、2004、2006 ; Liao ら、2005 ; Jendza ら、2006 ; Beaulieu ら、2007)、好ましい影響を報告しているものもある (Brady ら、2002 ; Shelton ら、2003 ; Jendza ら、2005 ; Veum ら、2006)。Kerr ら(2010)が実施した最近の試験でも結果は決定的なものではなく、フィターゼがエネルギー消化率に影響を及ぼすとしても、その程度は比較的小さく、変動が非常に大きいことを示唆している。



フィターゼが栄養（およびエネルギー）消化率に及ぼす影響については、フィターゼ単体であれ、他の酵素と組み合わせた場合であれ、十分な報告が存在しない。Olukosi ら (2007)は、トウモロコシ、小麦ふすま、大豆粕、菜種粕から成る飼料にフィターゼか酵素カクテル（キシラナーゼ、アミラーゼおよびプロテアーゼ）を単独で添加するか、併用して添加し、10~23kg の豚に給与した (表 3)。こうしたデータは、フィターゼは豚の増体量および飼料効率を改善するが、酵素カクテルを単独で添加するか、フィターゼとの併用で添加しても、豚の成績には影響を与えないことを示唆している。単独使用か併用かを問わず、フィターゼの添加も酵素カクテルの添加も DM、エネルギーまたは窒素の消化率に一貫した影響を及ぼさないが、いずれでもリンの消化率は改善された。ただし、これらは相加的効果ではない。飼料中のトウモロコシを小麦で代替した飼料を用いた追加試験 (BW は 23~52kg、試験期間 42 日) では、フィターゼもキシラナーゼ (それぞれ 500 U と 4,000 U/kg) も豚の成績、エネルギーおよび窒素の消化率に影響を及ぼさなかった (Olukosi ら、2007)。フィターゼはリンの消化率を改善したが、キシラナーゼでは改善しなかった。

表 3. フィターゼまたは酵素カクテル（キシラナーゼ、アミラーゼおよびプロテアーゼ）を添加した場合の 10~23kg の豚の生育成績および見かけの全消化管消化率<sup>1</sup>

飼料	豚の生育成績			見かけの全消化管消化率 %			
	ADG, g	ADFI, g	G:F, g:kg	DM	GE	N	P
陰性対照飼料	398	1140	363	80.2	79.8	80.1	38.3
NC + フィターゼ <sup>2</sup>	483	1070	457	80.1	78.1	80.2	49.9
NC + 酵素 <sup>3</sup>	393	1050	380	82.3	80.1	81.2	48.3
NC + Ph + En	479	1210	415	80.0	79.0	80.0	51.1
SEM	10.4	30	13.7	0.20	0.43	0.43	0.87

<sup>1</sup> 試験期間 28 日、去勢豚と未経産雌豚それぞれにつき 4 反復ペン (1 頭/ペン)  
<sup>2</sup> フィターゼは飼料 1kg につき 500 ユニットの割合で添加  
<sup>3</sup> カクテルは飼料 1kg につきキシラナーゼ 400 U、アミラーゼ 4,000 U、プロテアーゼ 2,500 U

酵素添加の有無を問わず、DDGS を配合した飼料にフィターゼを添加した場合の栄養（およびエネルギー）消化率への影響を評価する試験の結果も不十分で、一貫性を欠いている。幼齢期および仕上期の豚に DDGS を 20%配合した飼料にフィターゼを 500 ユニット添加して給与すると、リンの消化率が改善したが、DM 消化率は改善しなかった (Xu ら、2006a,b)。これとは対照的に、Lindemann ら (2009) の報告によれば、64~123kg の豚に DDGS を 20%配合した飼料にフィターゼを 1kg に付き 250 または 500 ユニット添加して給与すると、DM、エネルギーおよび窒素の消化率がフィターゼ添加のない飼料を給与した場合の値を上回ったが、キシラナーゼを追加しても DM、エネルギーおよび窒素の排泄物消化率はそれ以上改善されなかった。

## トウモロコシ併産物のエネルギーと繊維

DDGS の総エネルギー (GE) は平均 5,434 kcal/kg DM で、トウモロコシに含まれる GE 値を上回る (表 4; Stein と Shurson、2009)。ただし、GE の割合 (%) として測定されるエネルギーの消化率は DDGS の値がトウモロコシの値を下回る (Stein と Shurson、2009)。DDGS の DE と ME の値はそれぞれ 4,140 と 3,897 kcal/kg DM である (Pedersen ら、2007)。これらの値はトウモロコシの DE および ME の値と似通っている (表 4)。DDGS の正味エネルギーは確定されていないが、こうした値を測定するための試験が現在実施されている。

表 4. トウモロコシと 10 カ所から入手したトウモロコシのジステラーズ・ドライド・グレイン・ウィズ・ソリュブルを生育期の豚に給与した場合のエネルギー値<sup>1</sup>

項目	DDGS				
	トウモロコシ	平均	SD	最小値	最大値
GE, kcal/kg DM	4,496	5,434	108	5,272	5,592
エネルギーの ATTD <sup>2</sup> %	90.4	76.8	2.73	73.9	82.8
DE, kcal/kg DM	4,088	4,140	205	3,947	4,593
ME, kcal/kg DM	3,989	3,897	210	3,674	4,336

<sup>1</sup> Pedersen ら(2007) のデータ(Stein と Shurson, 2009 から適用).  
<sup>2</sup> ATTD = 見かけの全消化管消化率<sup>2</sup>

トウモロコシに含まれるデンプンの大半がエタノールに変換されるので、DDGS に含まれる不溶性食物繊維は約 35%で、可溶性食物繊維は 6%である (Stein と Shurson, 2009 ; 表 5)。食物繊維の ATTD の平均値は 43.7%であるが、範囲は 23~55%に及ぶ。この繊維消化率のばらつきが DDGS のエネルギー消化率に影響を及ぼすと考えられている。DDGS に含まれる食物繊維の見かけの回腸消化率および全消化管消化率はトウモロコシの値を上回るが、これはエタノールプラントで用いられている加工処理および発酵処理の結果であると推測することができる (Urriola ら、2010)。ただし、全消化管を通じて発酵するのは食物繊維全体の 50%に満たないため、50%以上が発酵せずに豚の体内を通過すると考えられる (Urriola ら、2010)。そのため、適切な外因性酵素が開発され、DDGS 飼料に含まれるこうした酵素の影響を受ける成分の利用率が向上すれば、DDGS に相当量含まれている非発酵性炭水化物がより一層利用できる可能性がある。

表 5. トウモロコシのジステラーズ・ドライド・グレイン・ウィズ・ソリュブルに含まれる炭水化物の含有率と食物繊維の見かけの全消化管消化率(ATTD)<sup>1,2</sup>

項目	平均	低値	高値	SD
全デンプン%	7.3	3.8	11.4	1.4
可溶性デンプン %	2.6	0.5	5.0	1.2
不溶性デンプン %	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 TDF, %	35.3	26.4	38.8	4.0
可溶性 TDF, %	6.0	2.36	8.54	2.1
TDF, %	42.1	31.2	46.3	4.9
TDF 中 ATTD の割合, %	43.7	23.4	55.0	10.2

<sup>1</sup> デンプン、ADF および NDF のデータでは n = 46、可溶性、不溶性および総食物繊維のデータでは n = 8  
<sup>2</sup> Stein と Shurson, 2009.

最近実施された米国農務省農業研究局とミネソタ大学との共同研究プロジェクトでは、各種のトウモロコシ・ミリング併産物の ME 値の評価が行われた (Anderson, 2009)。最も適切な数式のひとつは TDF が含まれた予測式 [ME, kcal/kg DM = -1358 + (1.26 × GE) - (30.91 × TDF) - (33.14 × 粗脂肪)] ( $R^2 = 0.85$ , SE = 273)] であるが、この TDF を NDF に置き換えてもほとんど全体式 [ME, kcal/kg DM = -2161 + (1.39 × GE) - (20.70 × NDF) - (49.30 × 粗脂肪)] ( $R^2 = 0.77$ , SE = 337)] に影

響を及ぼさず、(図 1 の TDF と NDF の差から分かるように) 「トウモロコシ繊維」ではペクチン、ガム、β グルカンまたはフルクタン多糖類の含有率が低いことが示唆される。このことは、こうした併産物では比較的似通った値を示す TDF と NDF の含有率を照らし合わせることによっても分かる(表 6)。更に、NDF と ADF の差から明らかなように、トウモロコシの「繊維」にはヘミセルロース成分が多く含まれる。

表 6. トウモロコシ併産物の分析成分 (DM ベース)<sup>1</sup>

項目	DDGS (WI)	DDGS (IA)	DDGS (SD)	RO- DDGS (SD)	DDGS (BPX)	ドラ ム- DDGS (MN)	マイク ロ 波-DDGS (MN)	ドライ ド・ソ リュブ ル	グルテ ンフィ ード
粗タンパク質	29.62	29.65	31.94	34.74	29.49	32.69	34.12	23.75	24.29
デンプン	7.85	3.47	6.24	3.04	4.94	2.12	1.05	6.34	12.57
粗繊維	7.05	7.76	7.56	8.69	7.95	7.93	8.35	0.08	8.56
TDF	30.34	38.14	35.69	37.20	35.90	35.38	43.18	16.07	40.07
NDF	34.61	40.13	40.12	50.96	33.41	44.87	49.12	2.33	42.66
ADF	11.25	10.55	14.42	15.82	8.62	13.16	14.66	0.49	9.90
セルロース	10.64	10.12	11.72	12.72	8.21	11.95	13.37	0.79	9.17
リグニン	1.21	1.06	3.16	3.49	1.00	1.72	1.92	0.31	1.05
項目	DHDG トウ モロ コシ	乾燥 トウ モロ コシ ーム	コーン ジャー ムミ ール	ブラン	ブラン + ソリ ュブル	グル テン ミ ール	HP-DDG (MOR)	HP- DDG (Poet)	HP- DDG (ICM)
デンプン	87.96	25.00	15.29	23.25	25.73	11.08	0.51	7.30	5.10
粗繊維	0.60	4.87	10.69	11.54	4.80	1.44	8.14	9.42	7.87
TDF	2.61	24.78	47.76	53.60	26.65	9.24	28.80	31.28	36.75
NDF	4.27	27.37	61.05	56.86	25.21	12.25	43.52	32.00	51.09
ADF	0.49	6.13	12.49	13.14	5.35	7.57	25.42	12.61	15.11
セルロース	0.77	5.21	11.71	12.78	5.38	5.95	22.55	12.05	14.25
リグニン	0.33	1.28	1.22	0.89	0.55	2.24	3.40	0.95	1.44

<sup>1</sup> 略語: TDF=総食物繊維、NDF=中性デタージェント繊維、ADF=酸性デタージェント繊維、DDGS=ジステラーズ・ドライド・グレイン・ウィズ・ソリュブル、RO-DDGS=低脂肪 DDGS、ドラム乾燥 DDGS またはマイクロ波乾燥 DDGS、DHDG=剥皮除胚芽、HP-DDG=高タンパク質ドライド・ジステラーズ・グレイン (括弧内の略語は製品入手先の州または会社を示す)

こうした報告は、異なる地域を対象とした 6 件の試験から得られたトウモロコシ繊維組成では、トウモロコシ繊維の中で最も多い成分はヘミセルロースで、次がキシロースであるとする Leathers (1998) の報告とほぼ矛盾がない (表 7)。

表 7. トウモロコシ繊維の主要成分

成分	地域					
	A	B	C	D	E	F
デンプン	22	11	18	22	20	23
ヘミセルロース	40	53	32	47	29	39
キシロース	24	25	20	28	18	19
アラビノース	16	18	10	19	11	11
セルロース	12	18	24	ND	14	ND
タンパク質	12	11	ND	ND	11	12

従って、外因性酵素の効果を評価する場合には、エネルギーおよび栄養成分の消化率を改善するため、「繊維」の組成についても検討する必要がある。これは  $\beta$  グルカナーゼを様々な割合で広範な飼料に添加し、 $\beta$  グルカンの含有率を変えた場合の影響を評価した Li ら (1996) によってはっきりと実証されている。彼らのデータから、 $\beta$  グルカナーゼを添加しても大豆粕に小麦、トウモロコシまたはライ麦を加えた飼料では、エネルギー消化率に影響はないが、大豆粕と大麦を組み合わせた飼料ではエネルギー消化率が改善されたことが分かる。これは飼料中の  $\beta$  グルカンの含有率の差を反映している (表 8)

表 8.  $\beta$  グルカナーゼの添加がエネルギー消化率に及ぼす影響

飼料	飼料組成 %			$\beta$ グルカナーゼ添加 %			
	NDF	ADF	$\beta$ グルカン	0	0.05	0.10	0.20
大麦-SBM	8.4	2.3	3.2	85.2 <sup>b</sup>	87.8 <sup>ab</sup>	86.4 <sup>ab</sup>	88.5 <sup>a</sup>
小麦-SBM	7.9	2.5	0.8	86.8	88.1	88.4	88.4
トウモロコシ-SBM	8.1	1.9	0.3	85.8	84.4	83.8	85.7
ライ麦-SBM	7.4	2.1	0.7	87.2	88.0	88.1	87.1

## 幼齢期および仕上期の豚用飼料に含まれる市販酵素／添加物製品が栄養成分消化率および生育成績に及ぼす影響の比較

### 試験手順

飼料添加物 (表 9) は、エネルギー消化率と繊維消化率に及ぼす影響力、または消化管内の細菌生態を調整する能力に基づいて選択した。基本飼料 (表 10) は 5 週間にわたってすべての栄養成分がそれぞれの豚の体重に該当するカテゴリ別に NRC(1998)が推奨している内容に照らし合わせて適切



な値となるよう調製し、各生育段階を通じてドライド・ジスチラーズ・グレイン・ウィズ・ソリュブル (DDGS) が 30% 配合されるようにした。間接的な方法、すなわち  $[1 - ((T_{i_{feed}} \times Nutrient_{feces}) / (T_{i_{feces}} \times Nutrient_{feed})) \times 100]$  を用いて見かけの「栄養」消化率を見極めるため、不消化マーカーとして二酸化チタンを 0.5% の割合で添加した。いずれの飼料にも、製造業者が推奨する割合で添加物を加えた。本試験で評価したすべての添加物には、製品ラベルに記載される活性成分および活性レベルがあるものとみなした (表 9)。

幼齢期試験では、計 192 頭を 64 頭ずつ 3 グループに分けて用いた (平均開始 BW は 11.9 kg)。各グループを無作為に 2 室に割り当て (1 室 32 ペン)、その後 1 頭ずつ 0.46 m × 1.22 m のステンレス製の飼育ペンに入れた。5 週間の給与期間中、それぞれの豚に個別の試験飼料を給与した。仕上期試験では、計 96 頭を 48 頭ずつ 2 グループに分けて用いた (平均開始 BW は 98.4 kg)。各グループを無作為に 2 室に割り当て (1 室 24 ペン)、その後 1 頭ずつ 0.57 × 2.21 m の亜鉛メッキ製の飼育ペンに入れた。5 週間の給与期間中、それぞれの豚に個別の試験飼料を給与した。いずれの試験でも、水および飼料は不断給与とし、各部屋は 24 時間照明し、機械的な換気を施し、プルプラグ式の肥料貯蔵システムを採用した。各種飼料は無作為に飼育ペンに割り当てたが、雌雄および BW はグループ内およびグループ間でできる限り同じになるように調整した。試験飼料はミール状のものを給与した。糞便サンプルは第 1 週、第 3 週および第 5 週の最後に、新しい排泄物を個々にビニール袋に入れて採取し、すぐに 0°C で保管し試験終了まで保存した。

試験終了時、飼料および糞便は 70°C の強制エアオーブンで乾燥させ、重量を計測し、1-mm 目のスクリーンを通して細かくし、栄養分析用のサブサンプルを準備した。飼料および糞便サンプルは 2 重に分析した。炭素、窒素および硫黄は熱燃焼装置 (VarioMax, Elementar Analysensysteme GmbH, Hanau, Germany) を用いて分析した。酸性デタージェント繊維および中性デタージェント繊維はフィルターバッグ技術 (Ankom2000, Ankom Technology, Macedon, NY) を用いてそれぞれ第 8 番と第 9 番の方法で分析した。エーテル抽出物は Luthria ら (2004) が記述した石油エーテルを用いて ASE 350 (Dionex Corporation, Sunnyvale, CA) で分析した。総エネルギーは標準的に用いられている安息香酸とともに、イソペリボル熱量計 (Model 1281, Parr Instrument Co., Moline, IL) を用いて確定した。リンは 1N HCl で (II)A (AMC, 1960) 法に従って濃縮硝酸とともに消化させ、その後 ICP 分光分析 (Optima 5300DV, PerkinElmer, Shelton, CT) を行った。

データはモデルに含まれるグループ、部屋、雌雄、週および飼料を用いて ANOVA (Proc GLM, SAS Inst. Inc., Cary, NC) を実施した。週と飼料との相互関係はなく、従って、飼料と週の主要効果のみを用い、平均値は LSMEANS として報告された。更に、添加物が含まれる飼料を給与した豚と含まれていない飼料を給与した豚との事前計画比較のみを用いた。豚を各試験の試験単体とみなした。

表 9. 外因性飼料添加物の特性

商品名	製造業者	ロット番号 日付	活性同定	表示活性
Allzyme SSF	Alltech, Lexington, KY	215612/460369 2/2/2008	提供なし (NP)	NP
Bactocell	Lallemand Animal Nutrition, Milwaukee, WI	8022202 3/3/2008	ペディオコッカス菌	$10 \times 10^9$ CFU/g
BioPlus 2B	Chr. Hansen, Milwaukee, WI	2821721 1/31/2008	リケニホルミス菌と枯草菌	$2.2 \times 10^9$ CFU/g

Econase XT25	AB Enzymes, Darmstadt, Germany	7855 12/19/2007	エンド-1,4-β-キシラナーゼ	160,000 U/g
Hemicel	ChemGen Corp., Gaithersburg, MD	NP NP	ヘミセルラーゼ	1.4 × 10 <sup>6</sup> U/g
Porzyme 9302	Danisco Animal Nutrition, Marlborough, UK	4320849505 8/11/2008	キシラナーゼ	8,000 U/g
Releaz-a-zyme 4M	Prince Agri Products Inc., Quincy, IL	31-2047 5/6/2008	β-グルカナーゼ プロテアーゼ	440 U/g 11 U/g
Rovabio AP10%	Adisseo, Antony, France	NP NP	エンド-1,4-β-キシラナーゼ エンド-1,3(4)-β-グルカナーゼ	2,200 U/g 200 U/g
Roxazyme G2 G	DSM Nutritional Products Inc., Parsippany, NJ	NP NP	エンド-1,4-β-グルカナーゼ エンド-1,3(4)-β-グルカナーゼ エンド-1,4-β-キシラナーゼ	8,000 U/g 18,000 U/g 26,000 U/g
XPC yeast	Diamond V Mills Inc., Cedar Rapids, IA	300308 NP	出芽酵母培養物	NP

表 10. 試験飼料組成 (現物給与ベース)

材料	幼齢期	仕上期
トウモロコシ	41.69	61.98
大豆粕	16.94	4.85
ドライド・ジスチラーズ・グレイン・ウィズ・ソリュブル	30.00	30.00
乾燥ホエイ	5.00	-
魚粉	2.50	-
大豆油	0.52	-
第二リン酸カルシウム (P 21%)	0.34	-
石灰	0.96	1.11
塩化ナトリウム	0.35	0.35
ビタミンミックス <sup>1</sup>	0.30	0.25
微量ミネラルミックス <sup>2</sup>	0.11	0.10
L-リジン・HCl	0.27	0.33
L-トリプトファン	0.02	0.03
剥皮除胚芽トウモロコシ	0.45	0.475
抗生物質 <sup>3</sup>	0.05	0.025
二酸化チタン	0.50	0.50
合計	100.00	100.00

<sup>1</sup> 幼齢期飼料および仕上期飼料それぞれ 1 キログラム当たり : ビタミン A, 6,614/5,512 IU; ビタミン D<sub>3</sub>, 1,653/1,378 IU; ビタミン E, 33/28 IU; ビタミン B<sub>12</sub>, 0.033/0.028 mg; リボフラビン, 10/8 mg; ナイアシン, 50/41 mg; パントテン酸, 26/22 mg.

<sup>2</sup> 幼齢期飼料および仕上期飼料それぞれ 1 キログラム当たり : Cu (酸化物), 11/9 mg; Fe (硫酸塩), 105/88 mg; I (Cal), 1.2/1.0 mg; Mn (酸化物) 36/30 mg; Zn (酸化物), 90/75 mg; Se (Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>), 0.3 mg.

<sup>3</sup> チロシン・プレミックス

## 結果と考察

### 幼齢期豚

幼齢期試験では、ほとんどの栄養成分消化率係数は酵素、酵母、微生物培養物を添加してもその影響を受けなかった(表 11)。本稿執筆時にはリンの消化率の確定作業は完了していない。窒素および硫黄の消化率は Roxazyme の添加により改善されたが、その他の栄養成分は影響を受けなかった。同様に、Rovabio および BactoCel のいずれもが硫黄の消化率を改善したが、その他の栄養成分はすべて添加の影響を受けなかった。硫黄の消化率に改善があったといっても、こうした飼料中のどのような価値を持つものが貢献したかは明らかではない。対照的に、Porzyme および Hemicel は NDF の消化率を減少させたが、その他の栄養成分消化率係数は影響を受けなかった。こうした添加物のラベル表示にはトウモロコシ繊維の消化率の改善に効果的な酵素が含まれていると記載されているため、このような結果は予測されていなかった。Econase、Allzyme および Releezyme の添加により様々な栄養成分の消化率が減少した。ただし、酵素、酵母または微生物培養物が様々な栄養成分の消化率にプラスの影響を及ぼすかマイナスの影響を及ぼすかに関わらず、豚の生育成績への影響は見られなかった (表 13)。GE、N、C、S、ADF、NDF およびエーテル抽出物の消化率は第 1 週から第 5 週まで増加した ( $P < 0.01$ )。こうした結果は、12 kg の豚の消化管が DDGS に含まれる食物繊維に適応し、継続的にこれを給与していると、やがて栄養成分消化率が改善することを示唆している。こうした所見は生育期の豚が年齢とともに栄養成分 (に繊維) 消化するために消化器系の能力を向上させていくことと矛盾しない。

### 仕上期の豚

仕上期試験では、大半の栄養成分消化率係数が酵素、酵母または微生物培養物の影響をほとんど受けなかった (表 12)。Roxazyme (エーテル抽出物)、Allzyme (ADF と NDF)、および BioPlus2B (ADF) の添加により消化率は改善したが、他の栄養成分の消化率はすべて影響を受けなかった。ただし、Allzyme と BioPlus2B の添加による繊維消化率の改善は総エネルギー消化率の改善には結びつかなかった。Porzyme、Hemicel、Releezyme、XPC 酵母および BactoCel の添加は各種栄養成分の消化率にマイナスの影響を及ぼした。幼齢期の豚の場合に観察された栄養成分消化率反応とは異なり、栄養成分消化率は第 1 週から第 5 週まで改善されなかった。本稿執筆時には、リンの消化率の確定作業は完了していない。幼齢期試験の結果と同様に、酵素、酵母または微生物培養物による豚の成績への影響は認められなかった (表 14)。

本試験で評価した酵素／添加物製品の多くは、DDGS を 30%配合した飼料を給与した場合にエネルギー／繊維の消化率を改善する効果を持つとされる成分が含まれている。こうした添加物の特定の酵素／活性成分の活性については確認をしていないので、評価対象の栄養成分の多くにとって、消化率を大幅に改善するに足るだけの十分な活性がなかったという可能性もある。生育成績の改善が見られず明確な栄養成分消化率反応がなかった他の理由として、飼料に配合した DDGS に原因があるとも考えられる。Urriola ら (2010) によれば、食物繊維の見かけの全消化管消化率は供給源の異なる DDGS 間で 23~55%までの開きがありうる。恐らく、本試験で用いられた DDGS は可消化繊維が少なく、そのため栄養成分消化率を改善すると評価された製品の能力が発揮されなかったと考えられる。最後に、本試験で用いた飼料は評価対象の各生育段階の豚に必要な栄養を満たすよう

に飼料設計されたものであるため、実際の栄養成分消化率の増加または減少は非常に小さく、豚の全体的な成績には影響を及ぼさなかった。

表 11. 外因性飼料添加物を給与した幼齢期豚の見かけの栄養成分消化率 (%) <sup>1</sup>

飼料 <sup>2</sup>	GE	N	C	S	P	ADF	NDF	EE
対照飼料	79.2	79.9	79.9	78.5	該当なし	40.1	36.6	64.2
Roxazyme	79.6	81.1	80.3	79.9	該当なし	38.8	39.1	63.3
<i>P</i> 値 <sup>3</sup>	0.40	0.10	0.42	0.06	該当なし	0.58	0.16	0.61
Porzyme	79.0	79.4	79.7	78.8	該当なし	36.3	33.2	64.9
<i>P</i> 値 <sup>3</sup>	0.67	0.47	0.61	0.66	該当なし	0.13	0.07	0.67
Econase	78.3	78.7	79.1	77.0	該当なし	35.6	32.5	62.8
<i>P</i> 値 <sup>3</sup>	0.07	0.07	0.10	0.04	該当なし	0.06	0.03	0.45
Rovabio	80.0	80.7	80.7	79.9	該当なし	38.1	36.5	64.4
<i>P</i> 値 <sup>3</sup>	0.12	0.25	0.14	0.06	該当なし	0.39	0.97	0.88
Hemicel	78.9	79.0	79.6	79.0	該当なし	36.3	33.4	65.5
<i>P</i> 値 <sup>3</sup>	0.53	0.17	0.48	0.49	該当なし	0.12	0.09	0.45
Allzyme	76.5	77.6	77.4	77.5	該当なし	30.6	27.3	61.5
<i>P</i> 値 <sup>3</sup>	0.01	0.01	0.01	0.17	該当なし	0.01	0.01	0.14
Releezyme	76.9	77.4	77.7	77.3	該当なし	30.0	29.9	61.1
<i>P</i> 値 <sup>3</sup>	0.01	0.01	0.01	0.09	該当なし	0.01	0.01	0.08
XVC 酵母	79.6	80.1	80.3	79.4	該当なし	39.0	36.4	65.9
<i>P</i> 値 <sup>3</sup>	0.40	0.81	0.46	0.26	該当なし	0.63	0.95	0.33
BactoCel	80.0	80.4	80.3	80.1	該当なし	39.4	39.3	64.9
<i>P</i> 値 <sup>3</sup>	0.14	0.55	0.42	0.03	該当なし	0.76	0.15	0.66
BioPlus2B	79.5	80.3	80.0	79.6	該当なし	37.7	35.0	65.0
<i>P</i> 値 <sup>3</sup>	0.59	0.64	0.85	0.17	該当なし	0.31	0.39	0.64
<i>P</i> 値 <sup>4</sup>	0.01	0.01	0.01	0.01	該当なし	0.01	0.01	0.08
SE <sup>4</sup>	0.35	0.48	0.34	0.52	該当なし	1.714	1.318	1.221
第 1 週 <sup>5</sup>	76.9	76.0	77.6	75.4	該当なし	31.4	28.5	70.6
第 3 週	79.2	80.1	79.8	79.3	該当なし	36.2	35.8	61.9
第 5 週	80.5	82.4	81.2	81.8	該当なし	42.0	39.1	59.4
<i>P</i> 値 <sup>6</sup>	0.01	0.01	0.01	0.01	該当なし	0.01	0.01	0.01
SE <sup>6</sup>	0.18	0.25	0.18	0.27	該当なし	0.93	0.69	0.64

<sup>1</sup> 見かけの消化率は間接マーカー法により算出した。各飼料には 16~18 頭の個別給与豚を割り当てた。

<sup>2</sup> Roxazyme G2, 200 g/T (DSM Nutritional Products Inc., Parsippany, NJ); Porzyme 9302, 227 g/T (Danisco Animal Nutrition, Marlborough, UK); Econase XT25, 136 g/T (AB Enzymes, Darmstadt, Germany); Rovabio AP10, 454 g/T (Adisseo, Antony, France); Hemicel, 454 g/T (ChemGen Corp., Gaithersburg, MD); Allzyme SSF, 454 g/T (Alltech, Lexington, KY); Release, 454 g/T (Prince Agri Products Inc., Quincy, IL); XPC Yeast, 1,816 g/T (Diamond V Mills Inc., Cedar Rapids, IA); BactoCel, 100 g/T (Lallemand Animal Nutrition, Milwaukee, WI); BioPlus 2B, 454 g/T (Chr. Hansen, Milwaukee, WI).

<sup>3</sup> 「*P* 値」は飼料添加物と対照飼料との比較を表す。

<sup>4</sup> 全体的な飼料効果を示すためのモデル *P* および SE 値

<sup>5</sup> 開始、第 1 週、第 3 週、第 5 週の BW はそれぞれ 11.88、13.96、23.23、33.26 kg

<sup>6</sup> 週のモデル *P* および SE 値



表 12. 外因性飼料添加物を給与した仕上期豚の見かけの栄養成分消化率 (%) <sup>1</sup>

飼料 <sup>2</sup>	GE	N	C	S	P	ADF	NDF	EE
対照飼料	81.4	83.8	82.3	82.7	該当なし	52.9	42.1	46.5
Roxazyme	80.9	81.9	81.7	81.9	該当なし	49.8	38.1	49.9
<i>P</i> 値 <sup>3</sup>	0.45	0.12	0.35	0.27	該当なし	0.15	0.14	0.08
Porzyme	79.4	80.9	80.4	80.1	該当なし	43.8	34.0	44.4
<i>P</i> 値 <sup>3</sup>	0.01	0.01	0.01	0.01	該当なし	0.01	0.01	0.28
Econase	80.8	82.7	81.8	83.1	該当なし	50.8	42.0	46.7
<i>P</i> 値 <sup>3</sup>	0.40	0.15	0.45	0.55	該当なし	0.33	0.95	0.82
Rovabio	81.3	83.7	82.3	82.8	該当なし	52.7	43.5	45.5
<i>P</i> 値 <sup>3</sup>	0.98	0.92	0.96	0.88	該当なし	0.93	0.62	0.62
Hemicel	80.7	82.8	81.6	82.4	該当なし	48.3	37.4	44.3
<i>P</i> 値 <sup>3</sup>	0.30	0.20	0.27	0.74	該当なし	0.03	0.08	0.25
Allzyme	82.1	84.2	83.00	83.3	該当なし	56.6	46.9	48.1
<i>P</i> 値 <sup>3</sup>	0.27	0.61	0.29	0.38	該当なし	0.08	0.08	0.41
Releezyme	79.5	80.7	80.4	79.9	該当なし	50.0	35.4	38.1
<i>P</i> 値 <sup>3</sup>	0.01	0.01	0.01	0.01	該当なし	0.18	0.02	0.01
XVC yeast	80.1	82.5	81.1	82.1	該当なし	50.1	38.4	43.1
<i>P</i> 値 <sup>3</sup>	0.05	0.10	0.05	0.36	該当なし	0.19	0.18	0.08
BactoCel	80.8	82.3	82.0	82.4	該当なし	50.1	39.5	49.6
<i>P</i> 値 <sup>3</sup>	0.40	0.05	0.57	0.73	該当なし	0.19	0.34	0.11
BioPlus2B	81.7	83.2	82.7	82.6	該当なし	56.3	45.4	38.6
<i>P</i> 値 <sup>3</sup>	0.58	0.46	0.49	0.91	該当なし	0.10	0.23	0.01
<i>P</i> 値 <sup>4</sup>	0.01	0.01	0.01	0.01	該当なし	0.01	0.01	0.01
SE <sup>4</sup>	0.45	0.55	0.45	0.47	該当なし	1.50	1.95	1.38
Wk-1 <sup>5</sup>	80.6	82.3	81.5	81.7	該当なし	50.7	40.1	45.3
Wk-3	80.8	82.5	81.8	82.3	該当なし	51.7	40.5	44.9
Wk-5	81.0	83.0	82.0	82.3	該当なし	50.8	40.2	44.8
<i>P</i> 値 <sup>6</sup>	0.43	0.17	0.39	0.17	該当なし	0.62	0.96	0.89
SE <sup>6</sup>	0.24	0.30	0.24	0.25	該当なし	0.80	1.04	0.73

<sup>1</sup> 見かけの消化率は間接マーカー法により算出した。各飼料には 8 頭の個別給与豚を割り当てた。

<sup>2</sup> Roxazyme G2, 200 g/T (DSM Nutritional Products Inc., Parsippany, NJ); Porzyme 9302, 227 g/T (Danisco Animal Nutrition, Marlborough, UK); Econase XT25, 136 g/T (AB Enzymes, Darmstadt, Germany); Rovabio AP10, 454 g/T (Adisseo, Antony, France); Hemicel, 454 g/T (ChemGen Corp., Gaithersburg, MD); Allzyme SSF, 454 g/T (Alltech, Lexington, KY); Release, 454 g/T (Prince Agri Products Inc., Quincy, IL); XPC Yeast, 908 g/T (Diamond V Mills Inc., Cedar Rapids, IA); BactoCel, 100 g/T (Lallemand Animal Nutrition, Milwaukee, WI); BioPlus 2B, 454 g/T (Chr. Hansen, Milwaukee, WI).

<sup>3</sup> 「*P* 値」は飼料添加物と対照飼料との比較を表す。

<sup>4</sup> 全体的な飼料効果を示すためのモデル *P* および SE 値

<sup>5</sup> 開始、第 1 週、第 3 週、第 5 週の BW はそれぞれ 98.40、104.90、119.52、132.20 kg

<sup>6</sup> 週のモデル *P* および SE 値

表 13. 外因性飼料添加物を給与した豚の成績<sup>1</sup>

飼料 <sup>2</sup>	幼齢期、12 – 33 kg BW			仕上期 98 – 132 kg BW		
	ADG, kg	ADFI, kg	G:F	ADG, kg	ADFI, kg	G:F
対照飼料	0.640	1.126	0.572	0.999	3.032	0.333
Roxazyme	0.638	1.100	0.583	0.975	3.084	0.321
Porzyme	0.642	1.131	0.570	0.979	3.077	0.318
Econase	0.653	1.133	0.578	1.051	3.240	0.325
Rovabio	0.648	1.148	0.565	0.906	2.985	0.302
Hemicel	0.629	1.149	0.551	0.933	3.239	0.292
Allzyme	0.651	1.140	0.574	0.961	3.118	0.311
Releenzyme	0.639	1.109	0.579	0.983	3.115	0.311
XVC yeast	0.653	1.157	0.568	0.862	2.930	0.294
BactoCel	0.615	1.083	0.568	1.007	3.084	0.328
BioPlus2B	0.645	1.162	0.559	0.988	3.179	0.315
<i>P</i> 値	0.87	0.70	0.72	0.60	0.90	0.56
SE	0.016	0.030	0.011	0.057	0.141	0.014

<sup>1</sup> 5 週間の成績。各飼料に幼齢期ではそれぞれ 16~18 頭、仕上期では 8 頭の個別給与豚を割り当てた。

<sup>2</sup> Roxazyme G2, 200 g/T (DSM Nutritional Products Inc., Parsippany, NJ); Porzyme 9302, 227 g/T (Danisco Animal Nutrition, Marlborough, UK); Econase XT25, 136 g/T (AB Enzymes, Darmstadt, Germany); Rovabio AP10, 454 g/T (Adisseo, Antony, France); Hemicel, 454 g/T (ChemGen Corp., Gaithersburg, MD); Allzyme SSF, 454 g/T (Alltech, Lexington, KY); Release, 454 g/T (Prince Agri Products Inc., Quincy, IL); XVC Yeast, 1,816 g/T starter or 908 g/T finisher (Diamond V Mills Inc., Cedar Rapids, IA); BactoCel, 100 g/T (Lallemand Animal Nutrition, Milwaukee, WI); BioPlus 2B, 454 g/t (Chr. Hansen, Milwaukee, WI).

## まとめ

豚および家禽用の植物主体飼料原材料の栄養成分消化率を改善するため、数十年にわたって酵素の添加に関する試験が行われてきた。しかしながら、植物主体飼料原材料間で化学特性が著しく異なっていたり似通っていたりするため、外因性酵素を生育期の豚用飼料に添加することによって栄養成分消化率および豚の生育成績を改善できるか否かは、こうした特性と酵素活性との関係性についての理解にかかっている。基本的に、酵素はその作用を受ける側の物質に適合したものでなければならず、複雑な繊維性炭水化物構造のマトリクスを効果的に分解するために酵素の「カクテル」を用いなければならない場合もあり、作用を受ける側の物質が栄養成分消化率または自発的な飼料摂取に対してある程度負の役割を果たしていなければならない。いくつかの飼料原材料については繊維含有率とエネルギー消化率との間に反比例関係のあることが多くの文献に記載されていることから、論理上は、繊維を分解する酵素を開発してエネルギー消化率または自発的飼料摂取量を改善すれば、代謝の面からまた経済的にもメリットを得る可能性がもたらされることになる。筆者らの試験結果においては、評価対象の酵素/添加物製品にはばらつきはあるものの、栄養成分消化率にわずかながらも影響を及ぼすものもあるが、いずれの酵素/添加物製品も、DDGS を 30% 配合し、栄養面で適切に飼料設計されたトウモロコシ大豆飼料を給与した場合には、幼齢期および仕上期の豚の生育成績の改善には効果がないことを示唆している。

## References

- 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.
- 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. *Anim. Sci.* 82:637-644.
- Aimonen, E.M.J., and M. Nasi. 1991. Replacement of barley by oats and enzyme supplementation in diets for laying hens. 1. Performance and balance trial results. *Acta Agric. Scand.* 41: 179-192.
- Anderson, P. V. 2009. Energy determination of corn co-products in finishing pigs and the use of an *in vitro* organic matter digestibility assay to predict *in vivo* energy. Iowa State University.
- Annison, G., and M. Choct. 1991. Anti-nutritive activities of cereal non-starch polysaccharides in broiler diets and strategies minimizing their effects. *World' s Poul. Sci. J.* 47: 232-242.
- Anugwa, F.O.I., V. H. Varel, J. S. Dickson, W. G. Pond, and L. P. Krook. 1989. Effects of dietary fiber and protein concentration on growth, feed efficiency, visceral organ weights and large intestine microbial populations of swine. *J. Nutr.* 119:879-886.
- Bach Knudsen, K.E. and I. Hansen. 1991. Gastrointestinal implications in pigs of wheat and oat fractions. 1. Digestibility and bulking properties of polysaccharides and other major constituents. *Br. J. Nutr.* 65:217-232.
- Bardon, T. and J. Fioramonti. 1983. Nature of the effects of bran on digestive transit time in pigs. *Br. J. Nutr.* 50:685-690.
- 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 P output by weanling and growing pigs. *Can. J. Anim. Sci.* 87:353-364.
- Bedford, M. R. 2000. Exogenous enzymes in monogastric nutrition-their current value and future benefits. *Anim. Feed Sci. Tech.* 86: 1-13.
- Borel, P., D. Lairon, M. Senft, M. Chautan, and H. Lafont. 1989. Wheat bran and wheat germ: effect on digestion and intestinal absorption of dietary lipids in the rat. *Am. J. Clin. Nutr.* 49:1192-1202.
- 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.
- Brenes, A., R. R. Marquardt, W. Guenter, and B. A. Rotter. 1993a. Effect of enzyme supplementation on the nutritional value of raw, autoclaved, and dehulled lupins (*Lupinus albus*) in chicken diets. *Poult. Sci.* 72: 2281.
- Brenes, A, B. A. Rotter, R. R. Marquardt, and W. Guenter. 1993b. The nutritional value of raw, autoclaved and dehulled peas (*Pisum sativum* L.) in chicken diets as affected by enzyme supplementation. *Can. J. Anim. Sci.* 73: 605-614.
- Chesson, A. 1987. Supplementary enzymes to improve the utilization of pig and poultry diets. In: *Recent Advances in Animal Nutrition* (Eds W. Haresign and D.J.A. Cole), Butterworths, London, pp. 71-89.
- Cowan, W. D. 1993. Understanding the manufacturing, distribution, application, and overall quality of enzymes in poultry feeds. *J. Appl. Poul. Res.* 2: 93-99.
- Fadel, J. G., R. K. Newman, C. W. Newman, and H. Graham. 1989. Effects of baking hullless barley on the digestibility of dietary components as measured at the ileum and in the feces in pigs. *J. Nutr.* 119:722-726.
- Farrell, D. J. and K. A. Johnson. 1970. Utilization of cellulose by pigs and its effects on caecal function. *Anim. Prod.* 14:209-217.
- Giusi-Perier, A., M. Fiszlewicz, and A. Rérat. 1989. Influence of diet composition on intestinal volatile fatty acid and nutrient absorption in unanesthetized pigs. *J. Anim. Sci.* 67:386-402.
- Goodlad, J. S. and J. C. Mathers. 1991. Digestion by pigs of non-starch polysaccharides in wheat and raw peas (*Pisum sativum*) fed in mixed diets. *Br. J. Nutr.* 65:259-270.

- Graham, H., J. G. Fadel, C. W. Newman, and R. K. Newman. 1989. Effect of pelleting and  $\beta$ -glucanase supplementation on the ileal and fecal digestibility of a barley-based diet in the pig. *J. Anim. Sci.* 67: 1293-1298.
- 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.
- Howard, M. D., D. T. Gordon, L. W. Pace, K. A. Garleb, and M. S. Kerley. 1995. Effect of dietary supplementation of fructooligosaccharides on colonic microbiota populations and epithelial cell proliferation in neonatal pigs. *J. Pediatr. Gastroenterol. Nutr.* 21:297-303.
- Hubener, K., W. Vahjen, and O. Simon. 2002. Bacterial responses to different dietary cereal types and xylanase supplementation in the intestine of broiler chicken. *Arch. Anim. Nutr.* 56: 167-187.
- Imoto, S. and S. Namioka. 1978. VFA production in the pig large intestine. *J. Anim. Sci.* 47:467-478.
- Inbarr, J., M. Schmitz, and F. Ahrens. 1993. Effect of adding fibre and starch degrading enzymes to a barley/wheat based diet on performance and nutrient digestibility in different segments of the small intestine of early weaned pigs. *Anim. Feed Sci. Tech.* 44: 113-127.
- Jendza, J. A., R. N. Dilger, S. A. Adedokun, J. S. Sands, and O. Adeola. 2005. *Escherichia coli* phytase improves growth performance of starter, grower, and finisher pigs fed phosphorus-deficient diets. *J. Anim. Sci.* 83:1882-1889.
- Jendza, J. A., R. N. Dilger, J. S. Sands, and O. Adeola. 2006. Efficacy 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.
- Ji, F., D.P. Casper, P. K. Brown, D. A. Spangler, K. D. Haydon, and J. E. Pettigres. 2008. Effects of dietary supplementation of an enzyme blend on the ileal and fecal digestibility of nutrients in growing pigs. *J. Anim. Sci.* 86:1533-1543.
- Jin, L., L. P. Reynolds, D. A. Redmer, J. S. Caton, and J. D. Crenshaw. 1994. Effects of dietary fiber on intestinal growth, cell proliferation, and morphology in growing pigs. *J. Anim. Sci.* 72:2270-2278.
- Johansen, H. N., K. E. Bach Knudsen, B. Sandström, and F. Skjøth. 1996. Effects of varying content of soluble dietary fiber from wheat flour and oat milling fractions on gastric emptying in pigs. *Br. J. Nutr.* 75:339-351.
- Jørgensen, H., X. Q. Zhao, and B. O. Eggum. 1996. The influence of dietary fiber and environmental temperature on the development of the gastrointestinal tract digestibility, degree of fermentation in the hind-gut and energy metabolism in pigs. *Br. J. Nutr.* 75:365-378.
- Kass, M. L. P. J. Van Soest, W. G. Pond, B. Lewis, and R. E. McDowell. 1980. Utilization of dietary fiber from alfalfa by growing swine. I. Apparent digestibility of diet components in specific segments of the gastrointestinal tract. *J. Anim. Sci.* 50:175-191.
- 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.
- Kim, S. W., D. A. Knabe, K. J. Hong, and R. A. Easter. 2003. Use of carbohydrases in corn-soybean meal-based nursery diets. *J. Anim. Sci.* 81:2496-2504.
- Kornegay, E. T. and R. J. Moore. 1986. Dietary fiber sources may affect mineral use in swine. *Feedstuffs.* 58:36-49.
- Latymer, E. A. and A. G. Low. 1987. Tissue incorporation and excretion of  $^{14}\text{C}$  in pigs after injection of  $[1-^{14}\text{C}]$  or  $[2-^{14}\text{C}]$  propionic acid into the caecum. *Proc. Nutr. Soc.* 43:12A.
- Leathers, T.O. 1998. Upgrading fuel ethanol coproducts. *Soc. Ind. Microbial News* 48:210-217.
- Li, S., W. C. Sauer, R. Mosenthin, and B. Kerr. 1996. Effect of  $\beta$ -glucanase supplementation of cereal-based diets for starter pigs on the apparent digestibilities of dry matter, crude protein and energy. *Anim. Feed Sci. Tech.* 59:223-231.
- 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.)
- Moeser, A. J., and T.A.T.G. van Kempen. 2002. Dietary fibre level and enzyme inclusion affects nutrient digestibility and excreta characteristics in grower pigs. *J. Sci. Food Agric.* 82: 1606-1613.
- Muley, N. S., E. van Heugten, A. J. Moeser, K. D. Rausch, and T.A.T.G. van Kempen. 2007. Nutritional value for swine of extruded corn and corn fractions obtained after dry milling. *J. Anim. Sci.* 85: 1695-1701.
- 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.
- Nonn, H., H. Kluge, H. Jeroch, and J. Broz. 1999. Effects of carbohydrate-hydrolysing enzymes in weaned piglets fed diets based on peas and wheat. *Agribiol.Res.* 52: 137-144.
- NRC. 2007. Page 206 in *Nutrient Requirements of Horses*. 6th rev. ed. Natl. Acad. Press. Washington, D.C.
- NRC. 1998. Pages 3-15 in *Nutrient Requirements of Swine*. 9th rev. ed. Natl. Acad. Press, Washington, D.C.
- Nyachoti, C. M., S. D. Arntfield, W. Guenter, S. Cenkowski, and F. O. Opapeju. 2006. Effect of micronized pea and enzyme supplementation on nutrient utilization and manure output in growing pigs. *J. Anim. Sci.* 84: 2150-2156.
- Olukosi, O. A., J. S. Sands, and O. Adeola. 2007. Supplementation of carbohydrases or phytase individually or in combination to diets for weanling and growing-finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 85:1702-1711.
- Omogbenigun, F. O., C. M. Nyachoti, and B. A. Slominski. 2004. Dietary supplementation with multienzyme preparations improved nutrient utilization and growth performance in weaned pigs. *J. Anim. Sci.* 82: 1053-1061.
- 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.
- Petty, L. A., S. D. Carter, B. W. Senne, and J. A. Shriver. Effects of beta-mannanase addition to corn-soybean meal diets on growth performance, carcass traits, and nutrient digestibility of weanling and growing-finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 80:1012-1019.
- Poel, A.F.B.van der, S. Gravendeel, D. J. van Kleef, A.J.M. Jansman, and B. Kemp. 1992. Tannin-containing fava beans (*Vicia faba* L.): effects of methods of processing on ileal digestibility of protein and starch for growing pigs. *Anim. Feed Sci. Tech.* 36: 205-214.
- Potkins, Z. V., T.L.J. Lawrence, and J. R. Thomlinson. 1991. Effects of structural and non-structural polysaccharides in the diet of the growing pig on gastric emptying rate and rate of passage of digesta to the terminal ileum and through the total gastrointestinal tract. *Br. J. Nutr.* 65:391-413.
- Rainbird, A.L. 1986. Effect of guar gum on gastric emptying of test meals of varying energy content in growing pigs. *Br. J. Nutr.* 55:99-109.
- Rainbird, A. L. and A. G. Low. 1986. Effect of various types of dietary fiber on gastric emptying in growing pigs. *Br. J. Nutr.* 55:111-121.
- Rérat, A., M. Fiszlewicz, A. Giusi, and P. Vaugelade. 1987. Influence of meal frequency on postprandial variations in the production and absorption of volatile fatty acids in the digestive tract of conscious pigs. *J. Anim. Sci.* 64:448-456.
- Rijnen, M. M., J. W. Heetkamp, M. W. Verstegen, and J. W. Schrama. 1999. Effects of dietary fermentable carbohydrates on physical activity and energy metabolism in group-housed sows. *J. Anim. Sci.* 77(Suppl. 1):182. (Abstr.)
- Saleh, F., M. Tahir, A. Ohtsuka, and K. Hayashi. 2005. A mixture of pure cellulose, hemicellulase and pectinase improved broiler performance. *Br. Poult. Sci.* 46: 602-606.
- Schulze, H., P. van Leeuwen, M.W.A. Verstegen, and J.W.O. van den Berg. 1995. Dietary level and source of neutral detergent fiber and ileal endogenous nitrogen flow in pigs. *J. Anim. Sci.* 73:441-448.

- Selvendran, R.R. and J.A. Robertson. 1990. The chemistry of dietary fibre: 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.
- 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.
- Slominski, B. A. 1991. Carbohydrates in feedstuffs in relation to dietary enzyme use. Proc. 12<sup>th</sup> Western Nutr. Conf., Sept 11, Winnipeg, pp. 140-162.
- Spiehs, M. J., M. H. Whitney, and G. C. Shurson. 2002. Nutrient database for distiller' s dried grains with solubles produced from new ethanol plants in Minnesota and South Dakota. *J. Anim. Sci.* 80: 2639-2645.
- Spencer, J. D., G. I. Petersen, A. M. Gaines, and N. R. Augspurger. 2007. Evaluation of different strategies for supplementing distiller' s dried grains with solubles (DDGS) to nursery pig diets. *J. Anim. Sci.* 85 (Suppl. 2): 169.
- Stanogias G. and G.R. Pearce. 1985. The digestion of fibre by pigs. 3. Effects of the amount and type of fibre on physical characteristics of segments of the gastrointestinal tract. *Br. J. Nutr.* 53:537-548.
- 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.
- Teitge, D. A., G. L. Campbell, H. L. Classen, and P. A. Thacker. 1991. Heat pretreatment as a means of improving the response to dietary pentosanase in chicks fed rye. *Can. J. Anim. Sci.* 71: 507-513.
- Thacker, P. A., and G. L. Campbell. 1999. Performance of growing/finishing pigs fed untreated or micronized hullless barley-based diets with or without  $\beta$ -glucanase. *J. Anim. Feed Sci.* 8: 157-170.
- Thacker, P. A., G. L. Campbell, and J.W.D. GrootWassink. 1992. Effect of salinomycin and enzyme supplementation on nutrient digestibility and the performance of pigs fed barley- or rye-based diets. *Can. J. Anim. Sci.* 72: 117-125.
- Urriola, P.E., G.C. Shurson, and H.H. Stein. Digestibility of dietary fiber in distillers coproducts fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 88:2373-2381.
- Veum, T. L., D. W. Dollinger, C. E. Buff, 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.
- Viveros, A., A. Brenes, M. Pizarro, and M. Castano. 1994. Effect of enzyme supplementation of a diet based on barley, and autoclave treatment, on apparent digestibility, growth performance and gut morphology of broilers. *Anim. Feed Sci. Tech.* 48: 237-251.
- Weber, T. E., C. J. Ziemer, and B. J. Kerr. 2008. Effects of adding fibrous feedstuffs to the diet of young pigs on growth performance, intestinal cytokines, and circulating acute-phase proteins. *J. Anim. Sci.* 86:871-881.
- Wenk, C. 2001. The role of dietary fibre in the digestive physiology of the pig. *Anim. Feed Sci. Tech.* 90:21-33.
- Whitney, M. H., and G. C. Shurson. 2004. Growth performance of nursery pigs fed diets containing increasing levels of corn distiller' s dried grains with solubles originating from a modern Midwestern ethanol plant. *J. Anim. Sci.* 82: 122-128.
- Whitney, M. H., G. C. Shurson, L. J. Johnston, D. M. Wulf, and B. C. Shanks. 2006. Growth performance and carcass characteristics of grower-finisher pigs fed high-quality corn distillers dried grain with solubles originating from a modern Midwestern ethanol plant. *J. Anim. Sci.* 84: 3356-3363.
- Xu, G., G. He, K. 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. Shruson. 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.* 84(Suppl. 2): 123. (Abstr.)
- Yen, J. T., D. H. Baker, B. G. Harmon, and A. H. Jensen. 1971. Corn gluten feed in swine diets and effect of pelleting on tryptophan availability to pigs and rats. *J. Anim. Sci.* 33: 987-991.
- Yen, J. T. 1997. Oxygen consumption and energy flux of porcine splanchnic tissues. Pages 260-269 in *Digestive Physiology in Pigs*, Proc. of the VII International Symposium on Digestive Physiology in Pigs. EAAP Publ. 88.
- Yin, Y. L., J.D.G. McEvoy, H. Schulze, U. Henning, W. B. Souffrant, and K. J. McCracken. 2000. Apparent digestibility (ileal and overall) of nutrients and endogenous nitrogen losses in growing pigs fed wheat (var. Soissons) or its by-products without or with xylanase supplementation. *Livest. Prod. Sci.* 62: 119-132.
- Zebrowska, T. 1982. Nitrogen digestion in the large intestine. Pages 225-236 in *Digestive Physiology in the Pig*. J.P. Laplace, T. Corring, and A. Rerat, eds. Institut National de la Recherche Agronomique. Paris, France, p. 225-236.