

# 第 3 章

## エタノール製造とその併産物

### フロントエンド分画技術とバックエンド油分抽出の技術

---

#### はじめに

乾式粉碎エタノール業界で製造されているトウモロコシ併産物の大半がジステラーズ・グレイン・ウィズ・ソリュブルであるが、量的にはわずかではあるものの、新たなトウモロコシ併産物も製造されつつあり、その中で最も注目されるのは高タンパク質DDGである。数年前から、米国エタノール業界ではフロントエンド分画技術への関心が急激に低下してきたが、高額な設備投資が必要であることやエタノール製造効率の改善が期待ほどではないことが原因と考えられる。数年前に米国エタノール業界で分画技術の検討が行われていたのにはいくつかの理由がある。こうした理由にはエタノール収量の増加、発酵時に使用する酵素量の低減、乾燥を必要とする併産物の産出低減、乾燥コストの削減、併産物中タンパク質の熱損傷の低減、消費エネルギーおよび用水の削減、油分除去のために必要とされる設備クリーニング頻度の低減、他の高価値用途でのトウモロコシ油の販売・使用する能力、分画によりトウモロコシ併産物の新しい市場の創出や付加価値創出の可能性がある併産物の種類が増えるなどの理由があった。残念ながら、このように見込んだ利点の多くが全く実現されなかった。

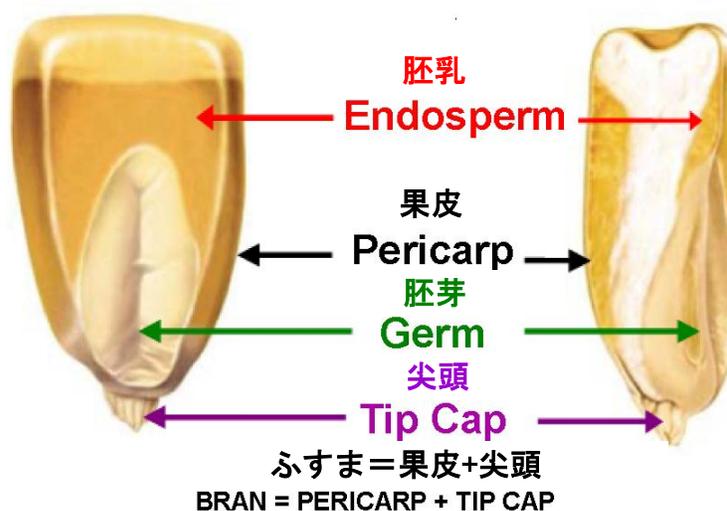
そのため、本章に記載するフロントエンド分画技術の大半が現在では使用されていない。こうした技術やプロセスによって生産される新たなトウモロコシ併産物が将来再度検討の対象となるか否かは定かではない。従って、本章の目的はこれまでに開発されてきた幅広いフロントエンドおよびバックエンドエタノールまたはジステラーズ併産物技術についての知識とともに、こうした技術で生み出される併産物の動物飼料原材料としての可能性を見極めるために開始した試験についての知識を提供することとする。

#### フロントエンド分画とバックエンド油分抽出の概要

分画過程ではトウモロコシ粒を 3 つの成分、すなわち胚乳、胚芽およびふすま（尖頭と果皮）に分離する。胚乳はトウモロコシ粒の約 83%を占め、その大部分がデンプンである。一方胚芽（トウモロコシ粒の約 12%）は脂肪、タンパク質、灰分および非発酵性炭水化物が豊富である。残るふすまはそのほぼすべてが繊維（非発酵性炭水化物）である。

フロントエンド分画では、発酵に先立ち胚乳、胚芽およびふすま部分を分離する。胚乳分画（デンプンが豊富）は発酵させてエタノールとトウモロコシ併産物を製造する。トウモロコシ油は胚芽分画から抽出し、様々な工業用途に使用、販売される。油分抽出後には飼料用併産物としてのコーンジャームीलが残ることになる。ふすま分画も分離され、主として反芻胃動物用の高繊維飼料として用いられる。

### トウモロコシ粒の構成要素



フロントエンド分画とは対照的に、米国エタノール業界ではバックエンド油分抽出は最も人気のある新技術となっており、エタノールプラントの50%以上がトウモロコシ油を抽出している。エタノール業界の大半で、遠心分離を用いてホールスティレージから取り出した後にトウモロコシ油をシンスティレージから抽出する「ステップ1」抽出プロセスが採用されている。(CEPA、2011)。結果として得られる部分的に濃縮されたシンスティレージを加熱し、2回目の遠心分離装置でトウモロコシ油を抽出する。シンスティレージの温度を上げて抽出を促進させるために熱交換器には蒸気を用いるが、トウモロコシ油抽出後のスティレージからの熱エネルギーは熱交換器で回収され、次のスティレージの加熱に用いられる。

シンスティレージにはトウモロコシ中の利用可能な油分の約30%が含まれており、個々のエタノールプラントの条件にもよるが、この「ステップ1」プロセスを用いることでその大半を回収することができる(CEPA、2011)。一般に、典型的なエタノールプラントではトウモロコシ油が約4%（重量比）含まれるトウモロコシが使用されており、トウモロコシ油の抽出を行わない場合にはこの油がDDGSに残ることになる。例えば、生産能力が年1億9000万リットルの乾式粉碎エタノールプラントでは年に570万リットルのトウモロコシ油を回収することができる。

「ステップ2」プロセスは未だほとんどの米国エタノールプラントでは実施されていないが、遠心分離を用いたウェットグレインとシンスティレージとの分離に先立ち、ホールスティレージ中のトウモロコシ油の30%をさらに獲得することを可能にする追加的な抽出プロセスである(CEPA、2011)。トウモロコシに含まれる全ての油分の40%以上がウェットケーキ中に存在するため、この油を遊離させるための「洗浄」を行い、「ステップ1」方式で油分抽出することを可能とする。「ステップ1」抽出プロセスに加えて更に追加的に得られるトウモロコシ油によって通常、トウモロコシ油の生産量が倍になる。従って、「ステップ1」と「ステップ2」を組み合わせることで、ジスチラーズ併産物中に存在するトウモロコシ油の60~70%を抽出することができることになる。結果として、こうした技術によって製造されるエタノール380リットルにつき23~27リットルのトウモロコシ油が抽出可能となる。

トウモロコシ油の抽出を行わない場合、製造されるエタノール3.8リットルにつき2.4kgのDDGSが得られる(CEPA、2011)。ところが、トウモロコシ油の抽出を行うと、DDGSの収量は製造され

るエタノール1リットルにつき約0.06 kg減少し、これはDDGS収率の9.4%減に相当する。トウモロコシ油の抽出はDDGSの栄養組成に影響を及ぼし、主に脂肪とエネルギーの減少、タンパク質含有率の増加につながる。油分低減DDGSを肉牛、乳牛、家禽および豚に給与することによるそれぞれの影響についての詳しい情報は第15、18、20および22の各章を参照されたい。

開発・評価されている分画および油分抽出技術の数は多いが、こうした技術がエタノールや併産物の製造に広く用いられてきたわけではない。以下に示す例は、エタノール収率を引き上げる目的で研究・開発中の技術で、異なる栄養成分を持つ様々な併産物が生み出され、やがては飼料用として利用可能になると考えられるものである。

1. トウモロコシの発酵およびエタノール製造の効率を改善するための取り組み
  - a) カルボヒドラーゼに加えてプロテアーゼの更なる添加 (Wang ら、2009)
  - b) 生デンプン加水分解酵素と従来の液化酵素および糖化酵素との比較 (Wang ら、2007)
  - c) 内在性液化酵素の使用 (Singh ら、2006)
  - d) 酵素を用いたプロセス (E-Mill) と粒状デンプン加水分解酵素を用いた従来の乾式粉碎トウモロコシ処理との比較 (Wang ら、2005)
2. エタノール収率を上げるための DDGS 原料の予備処理および発酵
  - a) 予備処理タンパク質分離 (Brehmer ら、2008)
  - b) 予備処理と酵素を用いた加水分解 (Perkis ら、2008)
  - c) DDGS 加水分解物の溶剤への発酵と溶剤生成クロストリジウムによる付加価値製品 (Ezeji と Blaschek、2008)
  - d) DDGS の繊維成分拡大を目的とした温水およびアンモニアの使用 (Dien ら、2008 ; Kim ら、2008a、b ; Lau ら、2008)
  - e) リン酸エステルを用いた DDGS の水溶化 (Oshel ら、2008)
  - f) DDGS とともに成長する固体発酵製品の使用 (Hoskins と Lyons、2009)
3. エタノール収率を向上させるための繊維分離
  - a) DDG と DDGS から (Srinivasan ら、2005、2007a,b、2008a,b、2009 ; Srinivasan と Singh、2006)
  - b) 剥皮 (Corredor ら、2006)
  - c) クイックジャーム法、クイックファイバー法および酵素使用ミリング法と従来型乾式粉碎トウモロコシ処理法との比較 (Singh ら、2005)
  - d) 胚乳分画の発酵および油分の除去に先立つトウモロコシの胚芽および果皮繊維の分離を目的とした乾式胚芽除去と繊維除去および脂肪除去法 (Murthy ら、2006)
4. 油分抽出効率
  - a) トウモロコシの処理方法 (Wang ら、2009)
  - b) 超臨界 CO<sub>2</sub> およびヘキサン抽出法を用いた DDGS からの脂質の抽出 (Wang ら、2008 ; 2007)



- c) DDGS から脂肪酸エステルを製造するための *in situ* エステル交換反応 (Haas ら、2007)
5. DDGS からのエタノールおよびバイオディーゼルの一貫生産 (Balan ら、2009)
6. DDGS からのゼイン抽出 (Xu ら、2007)

## 新規トウモロコシ併産物の栄養成分

燃料エタノール製造分野の分画は新しい技術であるため、分画から生まれる併産物の栄養成分データは十分に整えられていない。分画技術によって得られたものとして知られている主な併産物について、その乾物、粗タンパク質、粗脂肪、粗繊維および灰分の含有率を表 1.にまとめた。

表 1. 分画技術で得られた新規トウモロコシ・ジステラーズ併産物の栄養成分 (乾物ベース)

企業名および併産物名	乾物 %	粗タンパク			
		質 %	粗脂肪 %	粗繊維 %	灰分 %
一般的なトウモロコシ DDGS	89.3	30.9	10.7	7.2	6.0
Poet Dakota Gold HP	91.6	44.8	3.9	7.3	2.1
Poet Dakota ふすま	ND <sup>1</sup>	14.6	9.8	3.8	4.6
Poet 脱水コーンジャーム	93.2	16.9	18.9	5.5	5.8
Maize Processing Innovators クイックジャーム/クイックファイバー DDGS	ND	49.3	3.9	6.8	3.2
Maize Processing Innovators E-Mill DDGS	ND	58.5	4.5	2.0	3.2
Cereal Process Technologies 高タンパク質 DDGS	ND	35.0-37.0	4.0-6.0	4.0-6.0	ND
Renssen 強化 DDGS	ND	40.0-50.0	2.5-4.0	7.0-11.0	ND
Solaris NeutraGerm	97.0	17.5	45.0	6.0	1.9
Solaris Probran	90.0	9.5	2.0	16.6	1.0
Solaris Glutenol	90.0	45.0	3.3	3.8	4.0
Solaris Energia	90.0	30.0	2.5	8.2	2.5
FWS Technologies 強化 DDGS	ND	35.0-37.0	6.5	ND	3.8
脱油 DDGS	89.9	31.3	2.3	ND	6.2
J. Jireh Products 乾燥濃縮ソリュブル	93.4	21.6	4.7	3.1	8.3

<sup>1</sup> ND = 未確認

一般に、ほとんどの分画トウモロコシから生まれる併産物は DDGS よりも粗タンパク質および粗繊維が多く含まれ、粗脂肪は少ない。高タンパク質分画併産物の多くはアミノ酸含有率がわずかに増加しているが、単胃動物に必要とされる量を基準にすると、タンパク質の質 (アミノ酸バランス) は依然として十分ではない。こうした分画併産物は脂肪が少なく繊維質が多いため、豚および家禽にとってはエネルギー価値が低いと考えられる。従って、豚、家禽および水産養殖用としては、飼料価値および経済的価値が DDGS よりも低くなる可能性がある。しかしながら栄養成分から見ると、反芻動物用の飼料に求められるトウモロコシタンパク質のアミノ酸バランスは豚、家禽および養

殖用の飼料に要求される程には絶対的に不可欠ということではないため、こうした併産物は一般に反芻胃動物にとって飼料価値は高いと考えられる。加えて、易発酵性繊維が多く含まれるため反芻胃動物にとって良好なエネルギー源となる。また、脂肪が少ないため泌乳牛用の飼料に高い割合で配合することができ、乳脂肪の落ち込み懸念を低減してくれる。

## 主な新規トウモロコシ併産物の栄養成分消化率

表 2. は新規の分画トウモロコシ併産物を各種の家畜および家禽に給与した研究結果の発表文献をまとめたものである。こうした研究の大半は栄養成分の含有率および消化率を評価したもので、最大飼料配合率あるいは動物成績に及ぼす影響には触れていない。

表 2. 家畜および家禽に対する新規分画トウモロコシ併産物給与試験の発表文献一覧

対象種	HP-DDG	脱油 DDG	コーンジャー ム	トウモロコシ ふすま	その他
飼養場肉牛				Bremer ら (2006) Berger and Singh (2009)	部分的 DDGS 分画 (Depenbusch ら、2008)
泌乳期乳牛	Kelzer ら (2007) Mjoun ら (2009b)	Mjoun ら (2009a, b)	Kelzer ら (2007) Abdelqader ら、(2006)	Kelzer ら (2007) Janicek ら (2007)	
成長期—仕上期の豚	Widmer ら (2007) Widmer ら (2008) Gutierrez ら (2009a,b) Anderson ら (2009)	Anderson ら (2009)	Widmer ら (2007) Widmer ら (2008) Anderson ら (2009)	Anderson ら (2009)	酵母製品 - Stein ら (2005) 乾燥濃縮ソリュブルおよび脱水、脱胚芽トウモロコシ併産物 - Anderson ら (2009) Helembai ら (2006)
ブロイラ—	Batal (2007) Kim ら (2008)		Batal (2007) Kim ら (2008)	Batal (2007)	
産卵鶏	Batal (2007) Kim ら (2008)		Batal (2007) Kim ら (2008)	Batal (2007)	
七面鳥	Batal (2007) Kim ら (2008)		Batal (2007) Kim ら (2008)	Batal (2007)	高タンパク質加水分解トウモロコシ併産物 (Abe ら、2004)

### 家禽

National Renewable Energy Laboratory から入手した高タンパク質加水分解トウモロコシ併産物について、栄養成分の含有率と消化率、および七面鳥鶏用飼料としての飼料価値を評価した (Abe ら、2004)。乾物、灰分、脂肪、繊維、タンパク質、デンプン、糖分の含有率はそれぞれ 95.9、1.43、10.7、3.9、57.8、1.6、2.0%であった。粗タンパク質に含まれるリジン、アルギニン、トリプトファン、スレオニン、シスチン、メチオニン割合 (%) はそれぞれ 1.99、2.63、0.34、3.14、2.1%で、消化率係数はそれぞれ 68.1、79.0、64.0、75.2、78.3、85.9%であった。窒素補正後の真の代謝エ

エネルギー（ $TME_n$ ）は 2,692 kcal/kg（原物ベース）。この併産物を 0、5、10、15、20%の割合で飼料に混合し、3 日齢～18 日齢まで給与した。11 日齢で ADG（1 日平均体重増加率）に線形減少がみられ、11 日齢～18 日齢の間に 3 次曲線効果がみられた。この試験の結果は、14 日齢まではこの併産物を 10%まで配合して効果的に使用でき、2 週齢以上の七面鳥にはこれを上回る配合率でも良好な生育成績が得られる可能性のあることを示唆している。

Batal (2007) は DDGS、トウモロコシの高タンパク質ジスチラーズ・ドライド・グレイン・ウィズ・ソリュブル（HP-DDGS）、脱水コーンジャームおよびトウモロコシふすまを家禽に給与した場合の栄養成分の消化率を明らかにした（表 3）。この試験の結果は、エタノール製造に用いられる新しい分画技術によって独自の栄養特性を有する併産物が生まれ、こうした併産物の栄養価値の知識を得ることは経済的価値および飼料価値を評価する上で重要であることを示唆している。

表 3. 家禽に給与した場合の DDGS、HP-DDGS、脱水コーンジャームおよびトウモロコシふすまの栄養成分および消化率<sup>1</sup>

栄養成分	DDGS	HP-DDGS	脱水コーンジャーム	ブランケーキ
粗タンパク質%	27.0	44.0	15.5	11.6
粗繊維%	7.0	7.0	4.5	4.5
粗脂肪%	10.0	3.0	17.0	7.8
$TME_n$ kcal/kg	2,829	2,700	2,965	2,912
リジン%	0.79	1.03	0.83	0.43
有効リジン%	81	72	80	68
CP 中リジン%	2.9	2.3	5.4	3.7
リン%	0.77	0.35	1.18	データなし
P バイオアベイラビリティ %	60	47	31	データなし

<sup>1</sup>Batal, 2007.

家禽を対象とした窒素補正後  $TME_n$ 、アミノ酸消化率およびリンのバイオアベイラビリティを明らかにするため、高タンパク質 DDGS（90%乾物ベースでタンパク質 33%、リン 0.33%）およびコーンジャームミール（粗タンパク質 14%、リン 1.22%）を雛鶏および正鶏に給与された飼料で飼育されている雄鶏に給与した（Kim ら、2008）。コーンジャームミールの  $TME_n$  およびアミノ酸消化率は HP-DDGS の値を大幅に上回り、一方、P バイオアベイラビリティは DDGS と HP-DDGS については同程度（それぞれ 60 vs. 58%）であったが、コーンジャームミールでは低かった（25%）。こうした結果は、コーンジャームミールが HP-DDGS を上回るアミノ酸消化率を有し、HP-DDGS よりも優れたエネルギー源ではあるものの、DDGS および HP-DDGS は家禽にとってはコーンジャームミールを上回る優れた生物利用可能リン源であることを示唆している。

Rochelle ら (2011) は段階的重回帰分析を用いて、栄養成分データに基づいた  $AME_n$  および幅広いトウモロコシ併産物に基づいた *in vivo*  $AME_n$  を推定するための予測式の開発を行った。 $AME_n$  は以下の式を用いて予測することができる ( $R^2 = 0.89$ ,  $SEM = 191$ ,  $P < 0.01$ )。

$$AME_n \text{ (kcal/kg 乾物ベース)} = 3,517 - (33.27 \times \% \text{ ヘミセルロース、乾物ベース}) + (46.02 \times \% \text{ 粗脂肪、乾物ベース}) - (82.47 \times \% \text{ 灰分、乾物ベース})$$

## 豚

Widmer ら (2007) はトウモロコシとの比較で、HP-DDG およびコーンジャームのエネルギー、リンおよびアミノ酸の消化率を明らかにするための3件の試験を実施した。DM ベースでのトウモロコシの可消化エネルギーおよび代謝エネルギー (それぞれ 4,056 および 3,972 kcal/kg) はコーンジャームの値 (それぞれ 3,979 と 3,866 kcal/kg) と同程度であるが、HP-DDG (それぞれ 4,763 と 4,476 kcal/kg) と比較すると驚くほど低かった。リンの真の総消化管消化率では、HP-DDG (69%) がコーンジャーム (34%) を上回り、Kim ら (2008) が家禽で明らかにした数値と同程度であった。粗タンパク質、およびアルギニン、リジン、グリシン、プロリンを除く他のすべてのアミノ酸の標準回腸消化率については、HP-DDG がコーンジャームを上回った。従って豚に給与する場合は、可消化エネルギー、リンおよび大半のアミノ酸で HP-DDG がコーンジャームを上回ると考えられる。

Stein ら (2005) はエタノール併産物ストリームから抽出された酵母製品のエネルギー、粗タンパク質およびアミノ酸の消化率を明らかにするための2件の試験を実施した。この酵母製品の可消化エネルギー (DE) および代謝エネルギー (ME) は 5,600 と 5,350 kcal/kg DM (乾燥ベース) で、それぞれがトウモロコシの値 (4,071 と 3,992 kcal/kg) の 138 ~ 134% に相当する。標準回腸消化率係数は粗タンパク質 (74.8%) リジン (82.2%)、メチオニン (88.6%)、スレオニン (71.1%)、トリプトファン (82.2%)、イソロイシン (79.5%)、ロイシン (84.0%) およびバリン (74.5%) でも高かった。こうした結果は、この酵母製品が豚用飼料にとって優れたエネルギー源および可消化アミノ酸源になりうることを示唆している。



Helembai ら (2006) はコーングルテンフィード、DDGS および酵母加水分解ベースの NuPro を成長期の豚に給与した場合の栄養成分のみかけの消化率および窒素保持率について評価した。配合率 20% の場合には、NuPro の粗タンパク質のみかけの消化率 (82.7%) および窒素保持率 (53.3%) が最も高かった。DDGS の粗タンパク質の消化率は 75.8% で、窒素保持率 (44.03%) は NuPro を下回った。コーングルテンフィードの粗タンパク質消化率は高かった (82.9%) が、窒素保持率は低かった (24.9%)。これら3種のトウモロコシ併産物の粗脂肪のみかけの消化率はいずれも同程度であった。(それぞれ 68.0、67.4、68.1%)。窒素保持率に違いがあるにも関わらず、これらの併産物の無窒素抽出物のみかけの消化率 (それぞれ 85.2、81.4、82.2%) および無機物のみかけの消化率 (それぞれ 86.4、80.6、82.6%) はいずれも高く、消化性に優れていることがわかる。

最近の研究では、Anderson ら（2012）が仕上期の豚に給与した場合の DE および ME の値を明らかにするため、栄養成分含有率が大幅に異なる複数のトウモロコシ併産物（表 4）を評価した。評価対象となった飼料原材料には繊維の少ないもの（デンプン、油分、乾燥ソリュブルおよび脱外皮脱胚芽トウモロコシ）、DDGS（n = 7）、タンパク質が豊富なもの（HP-DDG ; n = 3 およびコーングルテンミール）および繊維の豊富なもの（ぶすま n = 2 ; コーンジャームミール n = 2; およびコーングルテンフィード）が含まれる。大半の原材料は複数の乾燥粉碎エタノールプラントから入手した。ただしグルテンミール、グルテンフィード、およびコーンジャームミールのうちの 1 種はトウモロコシのウェットミリングプラントから入手した。飼料のひとつである脱外皮脱胚芽トウモロコシは分画乾燥粉碎処理から得られた併産物である。

表 4. 仕上期の豚に給与した場合の DE および ME を明らかにするために用いられたトウモロコシ併産物の供給元<sup>1</sup>

飼料	入手先
コーングルテンフィード	Tate & Lyle, Ft. Dodge, IA
トウモロコシぶすま	ICM/Lifeline Foods, St. Joseph, MO
トウモロコシぶすま、ソリュブル含む	Poet Biorefining, Glenville, MN
DDGS	Ace Ethanol, Racine, WI
DDGS – ドラム乾燥	Cellencor, Heron Lake, MN
DDGS – マイクロ波乾燥	Cellencor, Heron Lake, MN
DDGS	Hawkeye Renewables, Iowa Falls, IA
DDGS- Dakota Gold BPX	Poet Biorefining, Groton, SD
DDGS	VeraSun Energy Corporation, Aurora, SD
DDGS – 脱油	VeraSun Energy Corporation, Aurora, SD
コーングルテンミール	Archer Daniels Midland, Cedar Rapids, IA
HP-DDG	ICM/Lifeline Foods, St. Joseph, MO
HP-DDG	MOR Technology, Cape Girardeau, MO
HP-DDG	Poet Biorefining, Coon Rapids, IA
コーンジャーム、脱水	Poet, Coon Rapids, IA
コーンジャームミール	Cargill, Eddyville, IA
トウモロコシ・ドライド・ジスチラーズ・ソリュブル	Pulse Combustion Systems, Payson, AZ
脱外皮脱胚芽トウモロコシ	Bunge North America, Atchison, KS
コーンスターチ	Archer Daniels Midland, Clinton, IA
トウモロコシ油	Mazola, ACH Food Co., Memphis, TN

<sup>1</sup> Anderson, 2009.

表 5. にトウモロコシ併産物の様々な栄養成分を示した。コーンスターチおよびトウモロコシ油は ME を見極めるための参照基準として試験に含めたが、化学分析には含めていない。値は全て乾物ベースである。栄養成分含有率の幅は粗タンパク質、デンプン、粗繊維、総食物繊維（TDF）、中性デタージェント繊維（NDF）、酸性デタージェント繊維（ADF）、セルロース、リグニン、粗脂肪がそれぞれ 8.3~66.3%、0.5~100%、0.08~11.5%、2.6~53.6%、2.3~61.1%、0.5~25.4%、0.8~22.6%、0.3~3.5%、0.5~14.1%であった。

予測したとおり、ME の値はトウモロコシ併産物によって大幅に異なっていた（表 6）。繊維の少ない併産物（デンプン、油分、乾燥ソリュブル、脱外皮脱胚芽トウモロコシ）では ME は 4,080 ~ 8,755kcal/kgDM の範囲であった。7 種の DDGS では ME は 3,414 ~4,141kcal/kgDM の範囲であった。高タンパク質併産物（コーングルテンミールおよび 3 箇所の供給源からの HP-DDG）では、HP-DDG（ICM）および HP-DDG（MOR）の ME はそれぞれ 3,676~4,606 kcal/kg DM の範囲であった。残る繊維豊富な併産物（2 箇所の供給源からのふすまおよびジャームミール、1 箇所の供給源からのコーングルテンフィード）の範囲は 2,334~3,692 kcal/kg DM となった。

飼料原材料の化学組成を用いた段階的回帰分析を採用して ME の予測式を作成した。この試験で評価されたトウモロコシ併産物の実際の ME を推定する上で、この計算式には有意性があり（ $P < 0.01$ ）、優れた推定値（ $r^2 = 0.95$ ）を得ることができた。総エネルギーは ME の推定にプラス効果があり、TDF および灰分は ME の推定にマイナス効果をもたらした。



表 5. トウモロコシ併産物の栄養成分<sup>1,2</sup>

DM 比	DDGS (WI)	DDGS (IA)	DDGS (Verasun)	RO-DDGS (Verasun)	DDGS (BPX)	DDGS (MNdm)	DDGS (MNmc)	乾燥ソリュブル	コーングルテンフィード
かさ密度 g/cm <sup>3</sup>	0.581	0.470	0.487	0.494	0.467	0.530	0.396	0.330	0.499
粒径 ミクロン	1054	784	579	480	330	568	866	WNP	571
水分	6.82	9.75	13.41	12.64	10.87	11.43	12.95	22.3	4.14

OM 消化率	74.22	62.25	64.7	57.14	65.43	63.85	62.97	93.48	60.99
総エネルギー	5314	5375	5434	5076	5547	5550	5502	54.76	4539
粗タンパク質	29.62	29.65	31.94	34.74	29.49	32.69	34.12	23.75	24.29
アラニン	2.07	2.09	2.38	2.48	2.09	2.38	2.47	1.47	1.52
アルギニン	1.33	1.46	1.49	1.44	1.37	1.47	1.55	1.20	1.13
アスパラギン酸	1.87	1.96	2.11	2.19	1.93	2.24	2.22	1.48	1.45
シスチン	0.53	0.57	0.60	0.61	0.59	0.64	0.61	0.39	0.52
グルタミン酸	4.41	4.50	5.20	5.43	4.70	5.11	5.33	2.79	3.70
グリシン	1.18	1.24	1.34	1.39	1.22	1.38	1.38	1.26	1.03
ヒスチジン	0.77	0.83	0.90	0.89	0.82	0.90	0.94	0.60	0.72
イソロイシン	1.06	1.14	1.19	1.25	1.11	1.23	1.29	0.68	0.70
ロイシン	3.47	3.45	3.90	4.12	3.37	3.88	4.08	1.58	2.03
リジン	1.03	1.21	1.19	1.00	1.10	1.20	1.29	1.09	0.67
メチオニン	0.56	0.58	0.65	0.64	0.54	0.64	0.65	0.32	0.30
フィニルアラニン	1.29	1.61	1.48	1.51	1.31	1.48	1.55	0.53	0.77
プロリン	2.08	2.23	2.52	2.54	2.29	2.44	2.57	1.29	1.87
セリン	1.37	1.32	1.52	1.58	1.30	1.47	1.53	0.90	0.88
スレオニン	1.11	1.10	1.22	1.26	1.09	1.25	1.26	0.81	0.78
トリプトファン	0.21	0.19	0.20	0.18	0.21	0.23	0.23	0.21	0.13
チロシン	1.04	1.17	1.19	1.22	1.05	1.16	1.22	0.62	0.65
バリン	1.49	1.57	1.69	1.76	1.53	1.73	1.80	1.08	1.11
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
総食物繊維	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
粗脂肪	11.45	10.89	10.16	3.15	11.71	12.10	11.98	11.81	2.70
灰分	4.16	4.43	4.46	5.16	5.41	4.55	4.04	14.08	6.81
カルシウム (mg/kg)	204	248	475	652	663	240	230	1699	683
銅 (mg/kg)	6	6	5	8	6	5	5	9	8
鉄 (mg/kg)	81	72	125	288	90	104	132	129	125
マグネシウム (mg/kg)	3485	3023	3456	3986	3710	3736	3125	11389	5192
マンガン (mg/kg)	21	13	16	23	15	20	18	40	34
リン (mg/kg)	7913	8582	7527	8373	9613	8377	7394	24356	11979
カリウム (mg/kg)	11465	10974	10069	11232	13140	11758	10172	38597	19862
セレン (mg/kg)	BDL								
ナトリウム (mg/kg)	172	1287	2414	3776	2659	1361	1324	4259	364
硫黄 (mg/kg)	8475	7940	7616	9772	11087	7288	6982	18069	4907
亜鉛 (mg/kg)	63	55	59	67	89	82	75	95	120

<sup>1</sup> 供給源は表 1. に記載される個々の飼料に基づく。BDL = 検出限度未満 WNP = 不合格 粒径およびかさ密度を除き、すべて乾物比。粒径およびかさ密度は現物ベース。他の記載無き場合には値はすべてパーセント値。

<sup>2</sup> Anderson, 2009.

表 5 (続き) トウモロコシ併産物の栄養成分<sup>1,2</sup>

DM 比	DH-DG トウモロコシ	脱水コーンジャーム	コーンジャー ムミール	トウモロコシふすま (ICM)	トウモロコシふすま (Poet)	コーングルテンミール	HP-DDG (MOR)	HP-DDG (Poet)	HP-DDG (ICM)
かさ密度 g/cm <sup>3</sup>	0.687	0.435	0.465	0.158	0.346	0.677	0.636	0.576	0.604
粒径, ミクロン	477	1175	483	1841	2166	577	471	587	783
水分	12.78	9.44	10.87	12.62	9.18	8.51	8.3	5.95	12.31
OM 消化率	93.15	75.54	56.98	32.32	73.32	79.95	61.46	71.54	54.36
総エネルギー	4397	5224	4767	4847	4982	5467	58.11	53.21	5464
粗タンパク質	8.28	17.54	23.64	10.94	15.17	66.30	57.45	43.83	39.98
アラニン	0.66	1.05	1.41	0.78	1.04	5.54	4.65	3.49	2.92
アルギニン	0.28	1.31	1.67	0.65	0.77	2.38	2.26	1.63	1.68
アスパラギン酸	0.48	1.35	1.68	0.81	1.02	4.23	3.75	2.82	2.44
シスチン	0.17	0.34	0.37	0.22	0.30	1.08	1.13	0.81	0.74
グルタミン酸	1.74	2.47	3.22	1.67	1.95	13.51	10.88	7.88	6.84
グリシン	0.25	0.91	1.31	0.55	0.77	1.93	1.93	1.51	1.46
ヒスチジン	0.22	0.51	0.72	0.31	0.44	1.41	1.36	1.17	1.07
イソロイシン	0.31	0.53	0.84	0.38	0.50	2.83	2.33	1.86	1.53
ロイシン	1.25	1.27	1.91	1.10	1.30	10.67	8.57	6.37	5.12
リジン	0.17	0.97	1.17	0.58	0.62	1.39	1.58	1.33	1.20
メチオニン	0.16	0.28	0.42	0.18	0.23	1.41	1.44	0.94	0.81
フェニルアラニン	0.45	0.66	1.02	0.50	0.55	4.14	3.13	2.37	1.96
プロリン	0.77	1.07	1.20	0.82	1.08	5.59	4.77	3.79	3.06
セリン	0.39	0.68	1.00	0.53	0.65	2.91	2.86	2.02	1.68
スレオニン	0.26	0.57	0.88	0.50	0.61	2.12	2.14	1.61	1.33
トリプトファン	0.06	0.17	0.20	0.06	0.09	0.24	0.29	0.14	0.19
チロシン	0.25	0.53	0.71	0.37	0.41	3.16	2.61	1.77	1.46
バリン	0.38	0.86	1.37	0.56	0.76	3.18	2.88	2.32	2.02
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
総食物繊維	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
粗脂肪	0.17	18.45	2.38	5.14	9.68	1.34	4.12	2.86	6.97
灰分	0.49	6.46	2.70	2.33	5.31	3.99	1.10	2.05	2.09
カルシウム (mg/kg)	13	159	359	164	314	6408	173	114	78
銅 (mg/kg)	1	7	36	5	5	18	6	4	4
鉄 (mg/kg)	15	90	122	54	98	242	102	53	61
マグネシウム (mg/kg)	268	5626	1905	1675	3277	1039	456	1110	936
マンガン (mg/kg)	1	22	11	15	17	25	17	6	5
リン (mg/kg)	879	15187	6496	4379	7578	6318	2486	4185	5029
カリウム (mg/kg)	1449	16593	4093	6464	13682	4596	1700	4389	3028
セレン (mg/kg)	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
ナトリウム (mg/kg)	115	83	839	63	4270	1029	231	1260	563
硫黄 (mg/kg)	1048	2141	3274	1460	9506	9051	7178	9034	7002
亜鉛 (mg/kg)	5	85	77	39	195	42	71	28	37

<sup>1</sup> 供給源は表 1. に記載される個々の飼料に基づく。BDL = 検出限度未満 粒径およびかさ密度を除き、すべて乾物比。粒径およびかさ密度は現物ベース。他の記載無き場合には値はすべてパーセント値。

<sup>2</sup> Anderson, 2009.

表 6. 仕上期の豚に給与した場合のトウモロコシ併産物の可消化エネルギーおよび代謝エネルギー<sup>1</sup>

トウモロコシ併産物	エネルギー kcal/kg	
	DE <sup>3</sup>	ME <sup>3</sup>
グルテン飼料	2517	2334
ふすま (ICM)	3004	2957
ふすま (Poet)	3282	3031
DDGS (ACE)	4332	4141
DDGS (MNdrum)	4116	3876
DDGS (MNmicro)	4016	3713
DDGS (Hawk)	3841	3659
DDGS (Poet)	3705	3414
DDGS (VS)	4164	3937
RO-DDGS (VS)	3868	3650
グルテンミール	5047	4598
HP-DDG (ICM)	3994	3676
HP-DDG (MOR)	4955	4606
HP-DDG (Poet)	4210	3823
DCG (Poet)	3889	3692
ジャームミール	3521	3417
ソリュブル(20%)	4762	4525
DH-DG corn	4401	4316
デンプン	4082	4080
油(10%)	8988	8755
平均	4250	4028
SD	362.5	413.0

飼料原材料の化学組成を用いた段階的回帰分析を採用して ME の予測式を作成した (表 7)、この計算式には有意性があり (P < 0.01)、この試験においてトウモロコシ併産物の実質 ME を推定する上で優れた値 (r<sup>2</sup> = 0.95) を得ることができた。総エネルギー (GE) は ME の推定にプラス効果があり、TDF および灰分は ME の推定にマイナス効果をもたらした。

表 7. 仕上期の豚に給与した場合のトウモロコシ併産物の化学分析による ME 予測式

式 <sup>1</sup>	R <sup>2</sup>	SE	P-value
ME = 0.949 × GE - 32.238 × TDF - 40.175 × 灰分	0.95	306	< 0.01

<sup>1</sup> ME = kcal/kg DM; GE = kcal/kg DM; TDF = %; 灰分 = %.

## 乳牛

Kelzer ら（2007）はコーンジャーム、トウモロコシふすま、HP-DDGS、2箇所の供給源からの DDG、湿状コーングルテンフィード、およびウェット・ジスチラーズ・グレインのタンパク質分画を明らかにし、第一胃非分解性タンパク質（RUP）、RUP 消化率（dRUP）およびアミノ酸含有率の差異を評価する試験を実施した。表 8.にこれらの併産物の栄養含有率の比較をまとめた。RUP、dRUP、リジンおよびメチオニンの含有率はトウモロコシ粉砕併産物供給源間で差がある。

表 8. トウモロコシ併産物 7 種のタンパク質分画含有率の比較（粗タンパク質中の割合（%））<sup>1</sup>

タンパク質分画 % CP	コーンジャーム	トウモロコシふすま	高タンパク質 DDGS	DDGS 1	DDGS 2	湿状コーングルテンフィード	ウェット・ジスチラーズ・グレイン
粗タンパク質 % DM	16.3	13.5	47.2	30.1	28.9	26.7	29.9
非タンパク質態窒素	30.0	33.5	7.4	17.0	17.9	36.6	18.6
急速分解性の真のタンパク質	15.0	4.0	0.6	7.0	2.1	15.9	2.4
中速分解性の真のタンパク質	38.1	54.3	82.4	67.0	41.0	33.2	53.1
遅速分解性の真のタンパク質	13.5	6.0	8.8	4.8	11.1	10.1	11.0
非分解性の真のタンパク質	3.4	2.2	0.8	4.2	27.9	4.1	14.9
第一胃非分解性タンパク質	16.5	20.7	55.2	33.2	56.3	11.5	44.7
RUP 消化率	66.8	65.8	97.7	92.0	91.9	51.0	93.1
リジン	2.9	3.2	2.0	1.9	1.9	3.5	1.9
メチオニン	1.9	1.4	3.2	2.0	2.4	1.6	2.3

<sup>1</sup>Kelzer, 2007

## 肉牛

Bremer ら（2006）は低タンパク質のトウモロコシ併産物（Dakota のブランケーキー DBRAN）が仕上げ牛の飼養場成績および枝肉特性に及ぼす影響を評価した。この研究の結果は、DBRAN を最大 45%まで配合した飼料によって生育成績が改善され、枝肉特性には影響を及ぼさず、トウモロコシの約 100~108%のエネルギー価を有することを示唆している。

## 家畜および家禽を対象とした場合のトウモロコシの新規分画併産物の飼料価値

新しい分画技術の大半が完全な形では用いられておらず、また評価中の段階であることから、製造される分画トウモロコシ併産物の量が限られ、商業利用も限られている。このため、こうした分画トウモロコシ併産物を家畜および家禽用の飼料として使用した場合の効率や品質に関して公表されたデータも限定的である。こうしたデータが利用可能になるまで、相対的な飼料価値、飼料配合率および相対的な栄養価値や経済的価値を見極めることは困難である。

表 9 は動物生育または産乳反応を明らかにする目的で実施されたわずか数件の動物給与試験に基づいて、複数の分画トウモロコシ併産物の最大飼料配合率をまとめたものである。

表 9. 動物成績試験に基づき種別にまとめたトウモロコシ併産物（一部）の飼料最大配合率

	乳牛	肉牛	豚	家禽
HP-DDG	NA	NA	20%-30%	NA
脱油 DDG	NA	NA	NA	NA
トウモロコシふすま	25%	45%	NA	NA
コーンジャーム	14%	NA	10%	NA

NA = データなし

## 家禽

トウモロコシふすま、コーンジャーム、HP-DDGS および脱油 DDGS の給与がブロイラーおよび七面鳥の生育成績および産卵鶏の産卵数に与える影響を評価した成績試験は存在しない。こうした情報が存在しないため、家禽の成績には何ら変化がないものと想定して飼料の一部をこうした併産物に置換するための計算を行った。

## 豚

ある研究 (Widmer ら、2008) では、成長期一仕上期の豚に DDGS (飼料の 10%または 20%)、HP DDG (大豆粕の 50 または 100%を置換) およびコーンジャーム (飼料の 5 または 10%) を給与した場合の、生育成績、枝肉品質および豚肉の嗜好性への影響を評価している。この研究の結果は、DDGS を 20%含む飼料または HP-DDG を高配合した飼料を給餌しても生育成績、枝肉組成、筋肉品質ならびにベーコンおよびポークチョップの採食特性には何ら悪影響を与えないが、豚肉脂肪品質が低下する可能性のあることを示している。同様に、最大 10%までコーンジャームを配合した飼料も生育成績、枝肉組成、枝肉品質ならびにベーコンおよび豚ロース肉の採食特性に悪影響を与えることなく、仕上時の体重を増加させ、ベーコン脂肪の品質を改善 (ヨウ素価の減少) することが明らかになった。複数の分画トウモロコシ併産物を乳牛および肉牛に給与した予備段階の結果と同様に、HP-DDGS およびコーンジャームを含む飼料を成長期一仕上期の豚に給与した場合も悪影響はなく、好ましい影響が現れる可能性があり、こうした併産物に含まれる脂肪が少ないことが豚肉の品質向上に役立つ可能性もある。

## 乳牛

現時点で、これまでに成績試験において評価対象となった分画併産物はコーンジャームとトウモロコシふすまのみである。泌乳期乳牛用として 55:45 の比率で用いる粗飼料と濃厚飼料のうち、濃厚飼料に 14%の割合でコーンジャームを配合すると乳産量および乳脂肪量が増加するが、これを 21%にすると乳脂肪含有率が減少することになる (Abdelqader ら、2006)。Janicek ら (2007) によれば、飼料に配合するトウモロコシふすまを 10%から 25%に引き上げると、乾物摂取量および乳脂肪量に変化はないものの、乳産量、乳タンパク質量および飼料要求率が増加した。トウモロコシふすまの配合量を上げると乳脂肪含有率が減少するとともに、総乳産量が増加するため、結果として 3.5%脂肪調整乳には配合率の違いによる変化は発生しないことになる。この 2 件の研究から得られた予備段階の結果は成績が改善されたことを示しているが、我々としてはこの 2 件の研究結果に基づいて、いずれの併産物 (コーンジャームおよびトウモロコシふすまを含む) を給与する場合でも、乳産量および飼料効率には影響がないという控えめな前提に立って置換率を計算する。

## 肉牛

現在のところ、肉牛飼養場成績および枝肉試験で評価対象となっているのはトウモロコシふすまのみである。Bremer ら (2006) は仕上期の肉牛に Dakota のブランケーキ (DBRAN) を給与して飼養場成績および枝肉特性の評価を行い、最大 45%まで DBRAN を配合することで生育成績を向上させることができ、枝肉特性には影響がないことを明らかにした。この試験では畜牛の育成成績が改善されたが、他に実施された試験がないため、分画トウモロコシ併産物を飼養場肉牛に給与する場合には、我々としては生育成績に変化はないという控えめな前提で置換率の計算を行う。

## まとめ

トウモロコシ分画技術は特殊工業品および食品グレードの製品を製造する目的で長年用いられてきた。胚芽およびふすまといった非発酵分画から胚乳 (デンプン豊富な分画) を分離する方法として「フロントエンド」分画技術を採用するエタノールプラントはごくわずかである。対照的に、エタノール業界の半数以上が併産物ストリームからトウモロコシ油の一部を抜き取る「バックエンド」油分抽出技術を用いている。この技術を採用すると、結果的に得られる併産物のタンパク質や繊維の含有率は高まるが、油分含有率は低下する。家畜や家禽にこうした原油分削減分画トウモロコシ併産物を給与して評価した試験の発表文献の数は少ないが、利用可能な文献に記載された結果をここにまとめている。こうした併産物の飼料価値を評価するためにさらに多くの試験が実施されるまでは、併産物の相対的な飼料価値、飼料配合率ならびに相対的な栄養価値および経済的価値を見極めることは困難である。とは言え、新しい分画併産物のすべてはそれなりの栄養価値を持ち、動物用飼料に配合することは可能である。

## References

- Abdelqader, M, A.R. Hippen, D.J. Schingoethe, K.F. Kalscheur, K. Karges, and M.L. Gibson. 2006. Corn germ from ethanol production as an energy supplement for lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 89(Suppl. 1):156.
- Abe, C., N.J. Nagle, C. Parsons, J. Brannon, and S.L. Noll. 2004. High protein corn distiller grains as a feed ingredient. *J. Anim. Sci.* 82(Suppl. 1):264.

- Anderson, P.V., B. J. Kerr, T. E. Weber, C. Z. Ziemer, and G. C. Shurson. 2012. Determination and prediction of energy from chemical analysis of corn co-products fed to finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 90:1242-1254.
- 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.
- Balan, V, C.A. Rogers, S.P.S. Chundawat, L. da C. Sousa, P.J. Slininger, R. Gupta, and B.E. Dale. 2009. Conversion of Extracted Oil Cake Fibers into Bioethanol Including DDGS, Canola, Sunflower, Sesame, Soy, and Peanut for Integrated Biodiesel Processing. *J. American Oil Chemists' Society.* 86(2):157-165.
- Batal, A. 2007. Nutrient digestibility of high protein corn distillers dried grains with solubles, dehydrated corn germ and bran. 2007 ADSA/ASAS/AMPA/PSA Joint Ann. Mtg., San Antonio, TX. July 8-12. Abstract M206.
- Berger, L. and V. Singh. 2009. Changes and evolution of corn based co-products for beef cattle. *J. Anim. Sci.* 87(E-Suppl. 2): 116.
- Brehmer, B., B. Bals, J. Sanders, and B. Dale. 2008. Improving the corn-ethanol industry: Studying protein separation techniques to obtain higher value-added product options for distiller' grains. *BiotechnolBioeng.* 101(1):49-61.
- Bremer, V.R., G.E. Erickson, T.J. Klopfenstein, M.L. Gibson, K.J. Vander Pol, and M.A. Greenquist. 2006. Evaluation of a low protein distiller's by-product for finishing cattle. *Nebraska Beef Report.* Pp. 57-58.
- California Environmental Protection Agency. 2012. California-Modified GREET Pathway for the Production of Biodiesel from Corn Oil at Dry Mill Ethanol Plants. Stationary Source Division, Release Date: November 3, 2011, Version 2.0. 40 pp.
- Corredor, D.Y., S.R. Bean, T. Schober, and D. Wang. 2006. Effect of decorticating sorghum on ethanol production and composition of DDGS. *Cereal Chem* 83(1):17-21
- Depenbusch, B.E., E.R. Loe, M.J. Quinn, M.E. Corrigan, M.L. Gibson, K.K. Karges, and J.S. Drouillard. 2008. Corn distiller's grain with solubles derived from a traditional or partial fractionation process: growth performance and carcass characteristics of finishing feedlot heifer. *J. Anim. Sci.* 1910. doi: 10.2527/jas.2007-0501.
- Dien, B.S., E.A. Ximenes, P.J. O'Bryan, M. Moniruzzaman, X-L.Li, V. Balan, B. Dale, and M.A. Cotta. 2008. Enzyme characterization for hydrolysis of AFEX and liquid hot-water pretreated distillers' grains and their conversion to ethanol. *Bioresource Technol.* 99(12):5216-5225.
- Ezeji, T., and H.P. Blaschek. 2008. Fermentation of dried distillers' grains and solubles (DDGS) hydrolysates to solvents and value-added products by solventogenic clostridia. *Bioresource Technol.* 99(12):5232-5242.
- Gutierrez, N.A., D.Y. Kil, and H.H. Stein, 2009a. Net energy of distillers dried grains with solubles and high protein distillers dried grains fed to growing and finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 87(Suppl. 2): in press.
- Gutierrez, N.A., D.Y. Kil, B.G. Kim, and H.H. Stein. 2009b. Effects of distillers dried grains with solubles and high protein distillers dried grains on growth performance and organ weights of growing and finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 87 (Suppl. 3): In press
- Haas, M.J., K.M. Scott, T.A. Foglia, and W.N. Marmer. 2007. The general applicability of in situ transesterification for the production of fatty acid esters from a variety of feedstocks. *J. American Oil Chemists' Society.* 84(10):963-970.
- Helembai J., J. Hausenblas, and M. Mezes. 2006. Ethanol industry by-products in pig nutrition. *Takarmanyozas-Hungary.* v. 9(2):24-26.
- Hoskins, B., and M. Lyons. 2009. Improving bioethanol yield: the use of solid-state fermentation products grown on DDGS. *J. Institute of Brewing.* 115:1, 64-70.
- Janicek, B.N., P.J. Kononoff, A.M. Gehman, K. Karges, and M.L. Gibson. 2007. Effect of increasing levels of corn bran on milk yield and composition. *J. Dairy Sci.* 90:4313-4316.
- Kelzer, J.M., P.J. Kononoff, K. Karges, and M.L. Gibson. 2007. Evaluation of protein fractionation and ruminal and intestinal digestibility of corn milling co-products. *Dakota Gold Research Association.* <http://www.dakotagold.org/research/dairy.asp> downloaded June 24, 2008.

- Kim, E.J., C. Martinez Amezcua, P.L. Utterback, and C.M. Parsons. 2008. Phosphorus bioavailability, true metabolizable energy, and amino acid digestibilities of high protein corn distillers dried grains and dehydrated corn germ. *Poult. Sci.* 87:700-705.
- Kim, Y., R. Hendrickson, N.S. Mosier, M.R. Ladisch, B. Bals, V. Balan, B.E. Dale. 2008a. Enzyme hydrolysis and ethanol fermentation of liquid hot water and AFEX pretreated distillers' grains at high-solids loadings. *Bioresource Technol.* 99(12): 5206-5215.
- Kim, Y., N. Mosier, and M.R. Ladisch. 2008b. Process simulation of modified dry grind ethanol plant with recycle of pretreated and enzymatically hydrolyzed distillers' grains. *Bioresource Technol.* 99(12):5177-5192.
- Lau, M.W., B.E. Dale, V. Balan. 2008. Ethanol fermentation of hydrolysates from ammonia fiber expansion (AFEX) treated corn stover and distillers grain without detoxification and external nutrient supplementation. *BiotechnolBioeng.* 99(3):529-539.
- Mjoun, K., K. F. Kalscheur, A. R. Hippen, and D. J. Schingoethe. 2009a. Lactation performance and amino acid utilization of early lactating cows fed regular or de-oiled dried distillers grains with solubles. *J. Anim. Sci.* 87(E-Suppl. 2): 559.
- Mjoun, K., K. F. Kalscheur, A. R. Hippen, and D. J. Schingoethe. 2009b. In situ ruminal degradability and intestinal digestibility of protein in soybean and dried distillers grains with solubles products. *J. Anim. Sci.* 87(E-Suppl. 2): 84.
- Murthy, G.S., V. Singh, D.B. Johnston, K.D. Rausch, and M.E. Tumbleson. 2006. Improvement in fermentation characteristics of degermed ground corn by lipid supplementation. *J. IndMicrobiolBiot.* 33(8):655-660.
- Oshel, R.E., M.V. Nandakumar, S. Uргаonkar, D.G. Hendricker, and J.G. Verkade. 2008. Water solubilization of DDGS via derivatization with phosphite esters. *Bioresource Technol.* 99(12):5193-5205.
- Perkis, D., W. Tyner, and R. Dale. 2008. Economic analysis of a modified dry grind ethanol process with recycle of pretreated and enzymatically hydrolyzed distillers' grains. *Bioresource Technol.* 99(12):5243-5249.
- Rochelle, S.J., B.J. Kerr, and W.A. Dozier. 2011. Energy determination of corn co-products fed to broiler chicks from 15 to 24 days of age, and use of composition analysis to predict nitrogen-corrected apparent metabolizable energy. *Poul. Sci.* 90:1999-2007.
- Singh, V., C.J. Batie, G.W. Aux, K.D. Rausch, and C. Miller. 2006. Dry-grind processing of corn with endogenous liquefaction enzymes. *Cereal Chem.* 83(4):317-320.
- Singh, V., D.B. Johnston, K. Naidu, K.D. Rausch, R.L. Belyea, and M.E. Tumbleson. 2005. Comparison of modified dry-grind corn processes for fermentation characteristics and DDGS composition. *Cereal Chem.* 82(2):187-190.
- Srinivasan, R., F. To, and E. Columbus. 2009. Pilot scale fiber separation from distillers dried grains with solubles (DDGS) using sieving and air classification. *Bioresource Technol.* 100(14):3548-55.
- Srinivasan, R., M.P. Yadav, R.L. Belyea, K.D. Rausch, L.E. Pruiett, D.B. Johnston, M.E. Tumbleson, and V. Singh. 2008a. Fiber separation from distillers dried grains with solubles using a larger elutriation apparatus and use of fiber as a feedstock for corn fiber gum production. *Biol. Eng.* 1:1, 39-49.
- Srinivasan, R., R.A. Moreau, C. Parsons, J.D. Lane, and V. Singh. 2008b. Separation of fiber from distillers dried grains (DDG) using sieving and elutriation. *Biomass Bioenerg.* 32(5):468-472.
- Srinivasan, R., and V. Singh. Removal of fiber from grain products including distillers dried grains with solubles. United States Patent Application Publication. US 0040024 A1; 2006.
- Srinivasan, R., R.A. Moreau, K.D. Rausch, M.E. Tumbleson, and V. Singh. 2007a. Phytosterol distribution in fractions obtained from processing of distillers dried grains with solubles using sieving and elutriation. *Cereal Chem.* 84(6):626-630.
- Srinivasan, R., B.S. Dien, K.D. Rausch, M.E. Tumbleson, and V. Singh. 2007b. Fiber separated from distillers dried grains with solubles as a feedstock for ethanol production. *Cereal Chem.* 84(6):563-566.

- Srinivasan, R., R.A. Moreau, K.D. Rausch, R.L. Belyea, M.E. Tumbleson, and V. Singh. 2005. Separation of fiber from distillers dried grains with solubles (DDGS) using sieving and elutriation. *Cereal Chem.* 82(5):528-533.
- Stein, H.H., M.L. Gibson, M.G. Boersma, and C. Pedersen. 2005. Digestibility of CP, AA, and energy in a novel yeast product by pigs. *J. Anim. Sci.* 83(Suppl. 1):35.
- Wang, H., T. Wang, L.A. Johnson, and A.L. III. Pometto. 2008. Effect of the corn breaking method on oil distribution between stillage phases of dry-grind corn ethanol production. *J. Agr. Food Chem.* 56(21):9975-9980.
- Wang, L., C.L. Weller, V.L. Schlegel, T.P. Carr, and S.L. Cuppett. 2008b. Supercritical CO<sub>2</sub> extraction of lipids from grain sorghum dried distillers grains with solubles. *Bioresource Technol.* 99(5):1373-1382.
- Wang, L., C.L. Weller, V.L. Schlegel, T.P. Carr, and S.L. Cuppett. 2007. Comparison of supercritical CO<sub>2</sub> and hexane extraction of lipids from sorghum distillers grains. *Eur. J. Lipid Sci. Tech.* 109(6):567-574.
- Wang, P., D.B. Johnston, K.D. Rausch, S.J. Schmidt, M.E. Tumbleson, and V. Singh. 2009. Effects of Protease and Urea on a Granular Starch Hydrolyzing Process for Corn Ethanol Production. *Cereal Chem.* 86(3): 319-322.
- Wang, P., V. Singh, H. Xue, D.B. Johnston, K.D. Rausch, and M.E. Tumbleson. 2007. Comparison of raw starch hydrolyzing enzyme with conventional liquefaction and saccharification enzymes in dry-grind corn processing. *Cereal Chem.* 84(1):10-14.
- Wang, P., V. Singh, L. Xu, D.B. Johnston, K.D. Rausch, and M.E. Tumbleson. 2005. Comparison of enzymatic (E-Mill) and conventional dry-grind corn processes using a granular starch hydrolyzing enzyme. *Cereal Chem.* 82(6):734-738.
- Widmer, M.R., L.M. McGinnis, and H.H. Stein. 2007. Energy, phosphorus, and amino acid digestibility of high-protein distillers dried grains and corn germ fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 85:2994-3003.
- Widmer, L.M. McGinnis, D.M. Wulf, and H.H. Stein. 2008. Effects of feeding distillers dried grains with solubles, high protein distillers dried grains, and corn germ to growing-finishing pigs on pig performance, carcass quality, and the palatability of pork. *J. Anim. Sci.* 86:1819-1831.
- Xu, W., N. Reddy, and Y. Yang. 2007. An acidic method of zein extraction from DDGS. *J. Agr. Food Chem.* 55(15):6279-6284.