



# トウモロコシ発酵たん白質（CFP）と その他の新しいトウモロコシ併産物の 飼料原料としての利用に関するユーザ ーズガイド

USE OF CORN FERMENTED PROTEIN AND OTHER NOVEL  
CORN CO-PRODUCTS IN ANIMAL FEEDS USERS GUIDE

2023年3月

アメリカ穀物協会

## 序文と謝辞

米国ではエタノール産業における技術の進捗により、従来のトウモロコシ・ジスチラーズグレインソリュブル（DDGS）とは異なる栄養組成、特性、飼料用途を持つ新たなトウモロコシ併産物の開発が進んでいる。これらの新しいトウモロコシ併産物の多くは既に大量生産が始まっており、米国国内で使用されている他、世界中の様々な国への輸出が始まっている。これらの新しいトウモロコシ併産物のうち、CP（粗たん白質）含量が50%以上で、発酵の際に使用された酵母を含むトウモロコシ発酵たん白質（CFP、Corn Fermented Protein）は、多くの水産養殖動物、家禽および豚の生産者の関心を集めている。しかし、様々な動物種に対するCFPの栄養特性と飼料価値に関する情報は少なく、従来のDDGSや他のタイプの高たん白DDG（HP-DDG、High Protein DDG）との違いに関する情報が混乱している現状にある。本書では、様々な畜種用の飼料におけるCFPおよびその他の新しいトウモロコシ併産物の使用に関する現在の研究に基づく情報をとりまとめている。アメリカ穀物協会では、現在および将来のユーザーに対してこれらの情報を提供することで、これらの併産物をすべての畜種用の飼料原料として使用する際の栄養的および経済的な最大の利益が得られる一助としたいと考えている。

この目標を達成するために、アメリカ穀物協会は、ミネソタ大学動物科学学部動物栄養学教授のGerald (Jerry) Shurson博士に、この“Use of Corn Fermented Protein and Other Novel Corn Co-Products in Animal Feeds Users Guide（CFPとその他の新しいトウモロコシ併産物の飼料原料としての利用に関するユーザーズガイド）”の執筆を依頼した。Shurson博士は、DDGSおよび新しいトウモロコシ併産物の栄養価と飼料原料としての利用に関する第一人者であり、1998年以來24年間にわたって、トウモロコシ併産物の研究プログラムを率いるとともに、他の多くの研究者と広く連携しており、世界中のすべての輸出市場におけるアメリカ穀物協会の技術栄養コンサルタントを務めている。

このユーザーズガイドの作成には、現在入手が可能なすべての査読を受けた公表文献を用いられている。それらに加えて、一部の業界技術プロバイダーおよびトウモロコシ併産物のマーケティング担当者等から提供された未公表の研究データおよび情報を用いており、これらは、ICM, Inc.のRyan Mass氏、Mallorie Wilken氏およびJackie Lissolo氏、The AndersonsのScott Tilton博士、Marquis EnergyのJennifer Aurandt博士およびTrevin Kennedy氏、POETのKevin Herrick博士、Melissa Jolly-Breitaupt氏およびDerek Balk氏から、未発表の研究データの提供および本ユーザーズガイドでの使用の許可を受けている。

# 第1章

## トウモロコシ発酵たん白質 (CFP, Corn Fermented Protein) の栄養特性と環境への影響

### 初めに

世界の人口増加に伴い、持続可能で、栄養価が高く、安全で、かつ、適正な価格の食料生産は、今日の社会が直面している大きな課題の1つとなっている (Shurson, 2017)。世界的に食料を持続して供給するためには、新たなイノベーションの開発と採用により、耕地の利用管理、水の利用率の向上と品質維持、生態系と生物多様性の維持、気候変動への影響の低減を考慮しつつ、食料生産時の栄養効率を高める必要がある (Shurson, 2017)。バイオ燃料、食品、産業動物の間で穀物や油糧種子を巡る競合が激化しており、長期的な持続可能性を考える上でこれらの資源をバイオ燃料の原料として使用することへの疑念が生まれている (Shurson, 2017)。一方で、バイオ燃料生産時に生産される併産物の食用動物生産への利用は、環境への持続可能性に貢献出来る可能性がある。これは、食用作物をバイオ燃料および併産物に変換しても、全体的なエネルギー効率はわずか1~2.5%しか失われないためである (Lywood & Pinkney, 2012)。トウモロコシのでん粉およびその他の発酵性炭水化物画分のみがエタノールに変換されるため、残りの粗たん白質 (CP)、粗脂肪、繊維および灰分は併産物に濃縮される。したがって、トウモロコシ併産物を飼料原料として使用して、これらの濃縮されたエネルギー源と栄養源を利用して肉、牛乳、卵を経済的、効率的に生産することは環境面でも持続可能な方法といえる。

米国での発酵エタノールと併産物の生産は劇的な増加を続けている。トウモロコシ併産物の生産は、19世紀にウイスキーなどのアルコール飲料の蒸留所において始まった (Shurson ら、2012)。1950年代までは、これらの併産物は主にたん白質原料と見なされ、他のたん白質原料を部分的に置き換えるために使われてきたが、1990年代後半までは豚や家禽用の原料としてはほとんど利用されていなかった (Shurson ら、2012)。1970年代~1980年代に大規模な湿式粉碎 (ウェットミリング) 方式の工場が建設され、ガソリンへの添加を検討するために十分な量のエタノールが生産され始めた (Shurson ら、2012)。湿式粉碎方式では、たん白質と繊維画分を残して、ヒトの食品やその他の産業用途のためにでん粉とコーン油を分離しており、この方式から得られるトウモロコシ併産物は、コーングルテンミール (CGM)、コーングルテンフィード (CGF) およびトウモロコシ胚芽粕である。トウモロコシ胚芽粕と CGM は、卵黄やブロイラーの皮膚を自然な色調に整えるために必要な色素 (キサントフィル) を多く含んでいることから、乾燥製品が高たん白原料として使用されてきたのに対して、CGF は繊維含量が多いことから、未乾燥のまま牛用の飼料原料として利用されてきた。

一方、1990年代から2000年代初頭にかけて、ガソリンに添加する酸化化合物

としてのエタノールの需要が増加し、これに対応するために農家が所有する多くの乾式粉碎（ドライミリング）方式のエタノール工場が建設された（Shursonら、2017）。現在では、200 か所以上の乾式粉碎方式のエタノール工場が稼働しており、年間約3,800万トンの併産物（生あるいは乾燥させた液状部分（ソリュブル）を含まない WDG（Wet Distiller's Grains）あるいは DDG（Dried Distiller's Grains）、ソリュブルを含む WDGS（Wet Distiller's Grains with Solubles）あるいは DDGS（Dried Distiller's Grains with Solubles）と、コーン・ディスティラーズ・オイル（Corn Distillers Oil、CDO）の合計量）が生産されている。乾式粉碎方式のエタノール工場における製造工程は主に2方式あるが、この他にもいくつかの製造工程が採用されていることから、製造工程の違いにより様々な栄養組成のトウモロコシ併産物が生産されている。また、米国国内市場と海外市場の両方で、DDGS の豚、家禽および養殖水産動物用飼料への使用を拡大させるために、多くの研究者が膨大な数の動物試験を行っており、これらの試験結果が認知されるようになったことで、米国国内における豚および家禽用飼料原料としての使用量は大幅に増加し、また、アメリカ穀物協会による海外市場の構築により世界 60 カ国以上に毎年約 1,100 万トンが輸出されている。

2005 年頃に始まったソリュブルからの CDO の分離により、DDGS の粗脂肪含量が減少し、栄養組成が大きく変化した。粗脂肪含量の減少により DDGS の代謝エネルギー（ME）価が低下し、豚および家禽用飼料原料としての継続利用が難しくなるのではとの懸念が出たために、豚および家禽の研究者は、様々な粗脂肪含量（4～13%）の DDGS についてエネルギー価および可消化アミノ酸含量を管理するために供給源を特定し、DDGS の必須アミノ酸含量から ME 価および可消化アミノ酸含量を正確に把握するための推定式の検討を開始した。現在、米国内のほぼすべてのエタノール工場では粗脂肪含量が少ない低脂肪 DDGS が生産されており、米国内および輸出市場では乳牛、肉牛、豚、家禽、養殖水産動物用の飼料原料として継続して利用されている。2018 年にアメリカ穀物協会が発行した「DDGS ユーザーズ・ハンドブック（第4版）」では、すべての動物種に対する低脂肪 DDGS の飼料価値について概説している。

でん粉からエタノールへの変換効率を高めるために、いくつかのエタノール工場では、湿式粉碎方式の工場や油糧種子の加工工場と同様に進化し続けている。これらの工場では、併産物を濃縮することで栄養価を高め、飼料原料としての利用性を高めており、発酵前あるいは発酵後の繊維の分離、たん白質と酵母の濃縮、CDO の分離割合の変更などにより、CFP と称される新しいタイプのトウモロコシ併産物を生産している。新たな技術を用いて CFP を生産している主要な3社は、ICM 社、Fluid Quip Technologies 社および Marquis Energy 社である。これらが生産している CFP は、CP 含量が従来の低脂肪 DDGS（CP 含量 27%程度）に比べてはるかに高く（50%以上）、発酵の際に使用されていた酵母の推定含量

は 20~29%である。CFP のエネルギー価および可消化成分組成も、現在上市されている高たん白 DDG (HP-DDG、CP : 36~48%) とは大きく異なる。トウモロコシたん白質濃縮物 (CPC、Corn Protein Concentrate) は、様々なトウモロコシ併産物の中で CP 含量が最も高く (67%以上)、粗脂肪含量が最も低い (0.5%) など、HP-DDG と同様に乾式粉碎方式のエタノール工場で採用されている工程とは明らかに異なる製造工程で生産されている。現在、米国国内および輸出市場で入手が可能な CP 含量が高いトウモロコシ併産物には多くの種類があり、ユーザーの間では、これらのトウモロコシ併産物に関する呼称や栄養特性についての混乱がしばしば生じている。このため、本章から第 5 章では、養殖水産動物、豚、家禽および乳牛用飼料における CFP の栄養価と飼料原料としての利用について、第 6 章では HP-DDG の栄養組成と飼料原料としての利用について、第 7 章では養殖水産動物および家禽用飼料における CPC の飼料原料としての利用について概説している。最後の第 8 章ではトウモロコシ・ブラン・アンド・ソリュブル (CBC、Corn Bran and Solubles)、粗脂肪を溶媒抽出した De-oiled DDGS および CDO などの他のトウモロコシ併産物の栄養組成と飼料原料としての利用について概説している。

#### トウモロコシ併産物中の CP とアミノ酸

CP 含量が高い飼料原料はすべての動物種において魅力的である。なぜなら、たん白質 (=アミノ酸) は飼料原料の中でエネルギー原料に次いで価格が高く、動物のアミノ酸要求量を充足させるために、少量の高 CP 原料が必要となる場面がしばしば発生する。CP、粗脂肪および粗繊維は飼料原料の価格設定および取引条件として世界中で広く使用され続けている。しかし、飼料原料が持っている本来の栄養的および経済的な価値はこれらの栄養成分からは説明できないことが多く、実際には ME 価あるいは正味エネルギー (NE) 価、可消化アミノ酸および可消化リン (P) 含量が飼料原料の栄養価と経済的な価値を決定する重要な要因となる。飼料原料の CP 含量は窒素 (N) の分析値に係数 (6.25) を乗じて計算される。6.25 はたん白質中の N 含量の加重平均 (16%) の逆数である (Shurson ら、2021)。N はたん白質を構成するアミノ酸に含まれる元素の 1 つであり、CP 含量を推定するための指標として使用されている。しかし、たん白質によってはアミノ酸組成が異なり、比較的高濃度の非たん白態 N (例えば、核酸やヌクレオチド、一部のビタミン、アミン、アミドおよび尿素等のたん白質ではない N 化合物) を含んでいるために、この普遍的な方法でたん白質の実際の含量を推定し、飼料中のアミノ酸を効率よく利用するための精度は不十分である。さらに、CP 含量のみからは飼料設計の際に必須となるアミノ酸の含量や組成、消化率や生物学的利用率などに関する情報を把握することは出来ない (Shurson ら、2021)。

大豆粕は CP 含量が高く (CP ; 44~48%)、飼料原料の世界的な標準、または「ゴールデン・スタンダード」として一般的に用いられており、穀物主体のエネ

ルギー原料と組み合わせることで、飼料中のアミノ酸組成を豚、家禽および養殖水産動物の要求量に合わせるために使われている。トウモロコシ中のたん白質は、大豆粕中のたん白質と比べて、単胃動物用飼料において第1制限アミノ酸（欠乏する可能性が最も高い）とされるリジン（Lys）の含量が比較的低いことから、トウモロコシ併産物における Lys:CP 比は 2.8~4.0 であり、大豆粕 (6.2) よりはるかに低い。その結果、豚、家禽、養殖水産動物用飼料で、DDGS、HP-DDG、CFP 等のトウモロコシ併産物を大豆粕と部分的に置き換える場合、これらの動物種における可消化アミノ酸要求量を充足させるためには、通常、塩酸 L-Lys やその他の結晶アミノ酸を添加する必要がある。さらに、トウモロコシ併産物中の豚、家禽および魚類における Lys 消化率（例えば DDGS では 65%）は、大豆粕中の Lys 消化率（90%）よりも著しく低い。豚および家禽用飼料では可消化アミノ酸含量に基づく配合設計が行われているため、可消化 Lys 含量が低い DDGS などの飼料原料を使用する場合には、可消化アミノ酸要求量を充足させるために、結晶アミノ酸（塩酸 L-Lys の消化率は約 98%）を多量に添加する必要がある。これは、トレオニン(Thr)、トリプトファン(Trp)、メチオニン(Met)、バリン(Val)、イソロイシン(Ile)などの必須アミノ酸でも同様である（トウモロコシ併産物（例えば DDGS）の単胃動物におけるこれらのアミノ酸の消化率は 73~82%であるのに対して、大豆粕では 85~91%である）。

トウモロコシ併産物中の繊維含量（中性デタージェント繊維（NDF）や総食物性繊維（TDF））は大豆粕に比べてはるかに高く、豚の腸管重量とムチン分泌量を増加させることが示されている。Thr は、腸上皮細胞とムチンを構成する主要なアミノ酸であり、豚に対して高繊維飼料を給与すると、Thr の内因性損失が増加する。ムチンたん白質は消化されにくく、アミノ酸は再吸収されないため、トウモロコシ併産物を 10%以上配合した豚用飼料を用いて最適な発育成績を得るためには、L-Thr を添加して Thr の損失分を補う必要がある（Mathai ら、2016; Wellington ら、2018）。この反応が家禽や魚類でも発生するか否かは不明であるが、トウモロコシ併産物の配合割合を中程度以上高めた飼料では発生する可能性は高いと思われる。

ロイシン（Leu）は、大豆粕（3.62%）とトウモロコシ併産物（例えば、DDGS では 5.30%）のいずれにおいても含量が最も多いアミノ酸であるが、トウモロコシたん白質中における Lys に対する Leu の割合は豚、家禽および魚類の要求量に対して著しく高い。過剰な Leu は、類似の分子構造と異化経路を持つ分岐鎖アミノ酸（BCAA）の Ile および Val の異化を促進させるため、トウモロコシ併産物の配合量の増加にともない Leu 過剰の影響が顕著に発現する。このため、豚用飼料において高 CP トウモロコシ併産物を大豆粕と部分的あるいは完全に置き換えて 20%以上配合する場合、過剰となる Leu に対応するために L-Val および L-Ile の添加が必要となる（Gemin ら、2019a, b; Kwon ら、2019; Kwon ら、2020; Siebert ら、2021; Zheng ら、2016）。しかし、現状では、豚、家禽あるいは

は魚類用の飼料における最適な可消化 Val : Lys 比および Ile : Lys 比は十分に解明されていない。家禽用飼料では BCAA バランスを管理する必要性について同様の証拠が存在する (Waldroup ら、2002; Peganova & Eder、2003; Erwan ら、2008; Ospina-Rojas ら、2017; Soares ら、2019) が、養殖水産動物用飼料では Leu の過剰と BCAA バランスの役割についての知見はほとんどない。

Leu とは対照的に、トウモロコシ併産物中の Trp 含量は、すべての必須アミノ酸の中で最も低い。Trp は、豚や家禽における要求量は比較的低いものの、脂肪を除く組織におけるたん白質合成、免疫応答の調節に関与しているほか、食欲とストレスを調節するセロトニンの前駆体となるなど、いくつかの重要な生理的役割を担っている。セロトニン産生を最適に保つためには、十分量の Trp が血液脳関門を通過して輸送される必要があるが、Trp は血液脳関門を通過する輸送に大きく関与している中性アミノ酸 (Ile、Leu、Phe、Tyr および Val) と競合している。大型中性アミノ酸である Leu の過剰はセロトニン濃度を低下させることから、豚用飼料への L-Trp の添加により、高 CP トウモロコシ併産物の配合割合の増加によって誘発される Leu 過剰による飼料摂取量の低下を改善できる可能性が示唆されている (Salyer ら、2013; Kwon ら、2019; Gemin ら、2020; Kerkaert ら、2021; Glizer、2021)。トウモロコシ併産物を配合した豚用飼料における理想的な可消化 Trp : Lys 比は明確にはなっていないものの、これまでの研究成果は、可消化 Trp : Lys 比は現在の NRC (2012) の推奨値よりも高いことを示唆している。最適な発育成績と枝肉特性を得るためには、大量の高 CP トウモロコシ併産物を配合した家禽および養殖水産動物用飼料への Trp 添加量を高めることについても、同様の考慮が必要であると思われる。

### トウモロコシ併産物の酵母含量

GFP と他のトウモロコシ併産物との際立った相違点の 1 つは、GFP が発酵時に使用された酵母 (*Saccharomyces cerevisiae*) を推定 20~29% 含有している点であり、これは従来の DDGS 中の酵母量 (推定 7~10%) に比べて著しく多い (Shurson、2018)。ただし、GFP 中の酵母は、直接給与生菌 (Direct Fed Microbial、DFM) としての機能や、活性乾燥酵母などの酵母製品のようにプロバイオティクスとしての機能は持たないことに注意する必要がある。しかし、いくつかの文献では、マンナンオリゴ糖、ヌクレオチドおよび  $\beta$ -グルカンなどの酵母細胞壁成分を家畜に給与すると健康面で有用であることが示されている (Shurson、2018)。発育促進目的での抗生物質の飼料添加が多く、禁じられており、産業動物の健康上有用であることが期待される化合物を含む「機能性」成分の究明に関心が集まっている (Shurson ら、2021)。DFM としての生菌の添加 (Vohra ら、2016) や、マンナンオリゴ糖、ヌクレオチド、 $\beta$ -グルカンを含む酵母細胞壁誘導体などの非抗生物質飼料添加物を添加 (Shurson、2018) することによる健康上の有用性や発育成績の改善効果、これらの効果の発現頻度を評価するために、近年膨大な

量の研究が行われている。これらの酵母細胞壁成分は、飼料原料として CFP を使用する際の潜在的な付加価値を持つ機能の 1 つではあるが、残念なことに、飼料にマンナンオリゴ糖、ヌクレオチドおよび  $\beta$ -グルカン濃縮して添加した場合の発育や健康面への有用性や発現の一貫性は期待するほどではない。

愛玩動物、馬、ウサギ、家禽、豚、子牛および様々な養殖水産動物にマンナンオリゴ糖を給与した場合の効果を評価した 733 報以上の公表文献のレビューでは、一般的に斃死率の低下とともに増体率および飼料効率の改善が示されているが、その応答には一貫性はみられない (Spring ら、2015)。Hooge (2004a, b) は、ブロイラーおよび七面鳥へのマンナンオリゴ糖給与の影響について 16 および 44 報を用いたレビューを行い、増体率と飼料効率の改善効果は比較的小さく、一貫性もみられなかったものの、斃死率は著しく低下したとしている。Miguel ら (2004) は、豚用飼料へのマンナンオリゴ糖添加による効果は、Hooge (2004a, b) による報告における家禽での反応よりも大きかったとしているが、その結果には一貫性はなかった。同様に、Torrecillas ら (2014) は、いくつかの試験でマンナンオリゴ糖の添加により魚の生存率、耐病性および発育成績が改善されたが、他の試験では影響はみられなかったと報告している。

CFP 中の  $\beta$ -グルカン含量は、酵素的酵母  $\beta$ -グルカン分析法 (Megazyme 社) により 8.2~8.4% と推定されている (Shurson、2018)。 $\beta$ -グルカンはプレバイオティクスに分類されているが、供給源により生理機能に影響する分子構造が異なっている。Vetvicka ら (2014) は、豚用飼料に  $\beta$ -グルカンを添加した研究をレビューし、発育および様々な種類の免疫応答の改善があることを報告している。しかし、Vetvicka & Oliveira (2014) は、豚用飼料への  $\beta$ -グルカン添加による発育と健康状態の改善効果の発現に一貫性がみられない原因は、 $\beta$ -グルカンの分子構造、分子量および純度の違いによる可能性がある結論付けている。いくつかの文献で、数種類の魚類に酵母の  $\beta$ -グルカンを給与すると、病原菌への抵抗性、発育成績および生存率が改善されることが示されている (Ringo ら、2012) が、CFP 配合量は比較的少なく、これらの効果を得るために必要十分量の  $\beta$ -グルカンが供給できるとは考えにくい。

酵母由来のヌクレオチドは、腸の形態と機能、免疫応答、腸内細菌叢の構成、肝機能および発育成績を改善することが示されている (Sauer ら、2011)。しかし、酵母には他の生理活性物質や細胞壁成分が含まれているため、発育や免疫応答の改善がヌクレオチドのみに由来すると断定するのは難しい (Sauer ら、2011)。応答に関する 15 文献のレビューでは、魚類にヌクレオチドを給与すると免疫反応、病原体耐性、発育成績および生存率が一貫して改善されることが示されている (Ringo ら、2012)。ただし、Sauer ら (2011) によってレビューされた 16 文献のほとんどでは、豚に対して様々な濃度の *Saccharomyces cerevisiae* 酵母培養物および市販のヌクレオチド製品を給与しても効果はなかった。

CFP 中の酵母の推定量には興味深いものがあり、これらの併産物の栄養価を超



えた潜在的な付加価値があるようにも見受けられるが、いくつかの理由から飼料原料として使用する主な目的とはなっていない。最初の理由は、含まれている酵母はプロバイオティクスとして機能することができないこと、2つ目は酵母の濃度はCFPの総重量の約25%に過ぎず、生理活性を持つ酵母細胞壁成分（マンナンオリゴ糖、 $\beta$ -グルカンおよびヌクレオチド）のCFP中の含量ははるかに少ないこと、3つ目は濃縮酵母製品とその誘導体の添加による発育成績と健康状態の改善効果や、効果の発現には期待されるほどの一貫性がないためである。これらを大局的に見るために、Schweerら（2017）は、オリゴ糖、プレバイオティクス、酵母製品などの様々な非抗生物質飼料添加物について豚における評価を行った2,000以上の飼育試験における発育成績への応答をレビューし、発育成績の改善が認められたのはこれらの試験の約30%のみであったと報告している。供試された非抗生物質飼料添加物の中で、DFM（全体の39.9%）、薬理学的レベルの亜鉛と銅（同39.2%）および有機酸（同31.2%）が、豚の発育改善において最も一貫性があった。酵母製品を用いた98試験の中で増体率が改善されたのは23.5%であり、同様に飼料摂取量の増加は12.2%、飼料効率の改善は11.2%、斃死率の低下はわずか1%であった。一般的に、発育促進を目的とした抗生物質の代替え製品の使用は、健康上の問題がある動物やストレスに暴露されている動物においてより効果がある可能性が高いと考えられている。ただし、このレビューで健康上問題があったと報告されているのは全体の8.6%のみであって、DFMの給与（35%）および薬理学的レベルの亜鉛と銅の添加（30%）は、他の製品よりも発育改善効果を示す可能性が高かった。これらの結果は、酵母製品が特定の条件下で離乳豚（および家禽と魚類）における発育成績や健康状態にある程度寄与出来る可能性がある一方で、一貫性がある反応を示す可能性は比較的低いことを示している。

### AAFCOによるトウモロコシ併産物の定義

飼料原料の売買の際の不要な議論を防ぐためには、当該飼料原料の栄養組成と飼料価値に関する正確かつ効果的なコミュニケーションが不可欠である。残念なことに、トウモロコシ併産物の市場（および公表文献中）における最大の課題の1つは、様々なトウモロコシ併産物に関する標準化されている米国飼料検査官協会（AAFCO）による定義への認識の欠如と、実際に定義が使用されていないことである。さらに、同じ製造工程を用いて生産された複数のCFPに異なるブランド名が使用されていることが、市場に混乱を生じさせる要因となっている。表1には、一般名、ブランド名、典型的な分析値および様々な種類のトウモロコシ併産物に関するAAFCOの定義を要約している。この表に記載されている一般名およびブランド名は、ユーザーが様々なトウモロコシ併産物の供給者と連絡を取る際に使用され、購入を検討中の併産物のタイプを明確に理解できるようにされている。トウモロコシ併産物のマーケティング担当者は、飼料業界の

顧客（原料購入者や栄養士）とコミュニケーションをとる際に、エタノール業界における専門用語を使用しないことも奨励される。たとえば、「シロップ (Syrup)」ではなく「コンデンスド・ディスティラーズ・ソリュブル (Condensed Distillers Solubles、CDS)」などの用語を用いて、ユーザーがトウモロコシ併産物のタイプと特性を AAFCO の公式な定義と用語に合わせて理解できるようにする必要がある。

よく見受けられるもう1つの用語の間違ひは、DDGS の粗脂肪含量の相対的な違ひに関する説明に関係している。「全脂肪 (Full-fat)」、「減油 (Reduced-oil)」、「脱油 (De-oiled)」などの用語は、多くの場合 DDGS の粗脂肪含量を相対的に示すことを意図しているが、残念なことに「減油 DDGS」を言及する際に「脱油」という用語が多くの場面で誤用されている。今日の市場で唯一の「脱油 DDGS」は、トウモロコシ油を溶媒抽出した粗脂肪含量が3% 未満の DDGS で、「NovaMeal」というブランド名で販売されている製品のみである。したがって、マーケティング担当者とユーザーの間でコミュニケーションを取り合う際には、DDGS の粗脂肪または粗脂肪の最小値を明確に規定しておくことが重要となる。

おそらく、エタノール併産物の中で最も紛らわしいのは、従来の DDGS の中で CP 含量が 25 から 30% を超える DDGS に使用されている「高 CP」という用語である。HP-DDG (CP 含量 : 36~48%) は従来の DDGS とは明らかに異なるトウモロコシ併産物のカテゴリーであるが、CP 含量が 48% を超える CFP としばしば混同されている。CFP の生産で用いられる製造工程は、HP-DDG の製造工程とは大幅に異なり、栄養組成も異なっている。また、CFP には添加剤を一切使用していない Fluid Quip Technologies 社および ICM 社による工程により生産された「機械的に分離された CFP (Corn Fermented Protein Mechanically Separated)」のカテゴリーに分類される製品と、凝集剤を使用した Marquis ProCap™ の製造工程やポリマーを使用した Harvesting Technologies 社の製造工程では、いずれも機械的な分離を行っていないことから単に「CFP」のカテゴリーに分類される製品がある。

同様に、CFP は全く異なる湿式粉碎処理を用いた工程から生産される特異的な栄養組成を持つ CPC と混同されている。残念なことに、トウモロコシ併産物の生産者、マーケティング担当者および研究者は、公表論文や出版物、ウェブサイト、プレゼンテーション、技術的なパンフレットや製品仕様書により様々なトウモロコシ併産物に関する情報を発信する際に、適切な用語の使用や慎重な説明を行っていない場合がある。このため、様々な公表データを用いて配合設計を行う場合、過去 15 年間に飼育試験による評価が行われている様々な「高 CP」トウモロコシ併産物の栄養組成が大きく異なっていることを認識しておく必要がある。本書の目的の1つは、これらの違ひを明確にし、トウモロコシ併産物のユーザーが増え続ける製品の特徴と、その違ひを理解できるようにすることである。

表1 トウモロコシ併産物の一般名、ブランド名、典型的な分析値と AAFCO の定義

一般名	製品名	典型的な分析値（原物）			AAFCO 収載 No.	一般的な定義
		CP	粗脂肪	粗繊維		
DDGS	なし	25-30	6-9	<14	27.6、27.8	穀類を酵母で発酵し、エタノールを蒸留した後に得られるもので、粗脂肪の一部を除去した後、全体量の少なくとも3/4量を乾燥して生産する。
DDGS	Dakota Gold	24-29	4.5	<14	27.6、27.8	穀類を酵母で発酵し、エタノールを蒸留した後に得られるもので、粗脂肪の一部を除去した後、全体量の少なくとも3/4量を乾燥して生産する。
De-oiled DDGS	NovaMeal	26-36	<3	<14	27.9	粗脂肪含有量が3%未満の溶媒抽出 DDGS。
Full Fat DDGS	なし	25-32	10-14	<14	27.6、27.8	穀類を酵母で発酵し、エタノールを蒸留した後に得られるもので、粗脂肪を除去せずに、全体量の少なくとも3/4量を乾燥して生産する。
DDGS with Bran	なし	23-36	3-16	<14	27.6、27.8、48.2	発酵前に分離した種皮などを混合した DDGS で、未乾燥製品と乾燥製品がある（ここでは乾燥製品の一般的な値を示している）。
DDGS Mechanically Separated	市販されていない	24-48	3-8	<14	27.6	蒸留後に繊維とたん白質を機械的に分離したもので、濃縮ジスチラーズ・ソリュブル（CDS）を含み、未乾燥製品と乾燥製品がある（ここでは乾燥製品の一般的な値を示している）。
DDG	なし	24-35	4-8	<14	27.5	CDS を含まないもので、穀物または穀物混合物を酵母で発酵し、エタノールを蒸留した後に得られる。粗脂肪の一部を除去している場合もある。
High Protein DDG	ANDVantage™ 40Y および ICM 社の Fiber Separation Technology™ (FST™) を用いて生産されたノーブランド品	36-48	4-6	<12	27.5	たん白質を濃縮するために繊維と粗脂肪の一部を取り除いた DDG で、CDS を含まない。
Condensed distillers solubles (syrup) (CDS)	なし	5-25	3-23	0-4	27.7	蒸留によりエタノールを除去した液体部分を半固体に濃縮して得られる。
Condensed distillers solubles	SOLMAX™	19-21	2-7	<1	27.7	蒸留によりエタノールを除去した液体部分を半固体（固形分約50~75%）に濃縮して

(syrup) (CDS)						得られる。
Distillers Dried Yeast	ALTO YEAST PROPLEX DY	40-55	0-8	0-6	96.5	蒸留前または蒸留後に取り除いて乾燥した非発酵性の不活性の <i>Saccharomyces cerevisiae</i> で、CP 含量が 40%以上のものである。
Hydrolyzed Yeast	ULTRAMAX™	40-45	6-10	3-5	96.12	濃縮、非抽出、一部が水溶性（酵素による加水分解による）の酵母消化物。
Bran with Syrup	Solbran™、NDVantage™、 Bran Plus および ICM 社の FST™を用いて生産された ノーブランド品	18-28	4-9	15-20	48.2、27.7	発酵前に穀物から分離した種皮などに、発酵後、CDS を加えたもので、未乾燥製品と乾燥製品がある（ここでは乾燥製品の一般的な値を示している）。
Fermented Fiber Mechanically Separated	市販されていない	<24	2-7	10-20	27.6	蒸留後に全廃液から繊維を機械的に分離して濃縮したもので、表示されていない限り CDS を含まない。
Corn Fermented Protein	なし	>48	3-8	<8	27.5	蒸留業界で一般的に使用されている方法で繊維と粗脂肪の一部を除去することで残留穀物と酵母たん白質を濃縮したもので、濃縮された酵母を含む。表示されていない限り CDS を含まない。
Corn Fermented Protein Mechanically Separated	A+ Pro、BP 50、 NexPro®、AltiPro™、 Still Pro 50™ (*1)、 ANDVantage™、50Y PROTOMAX™、ProCap Gold™	>48	1-5	<8	27.5	蒸留後の全液体成分から機械的にたん白質を分離したもので、酵母を含む。蒸留後に非機械的方法での分離は行われない。表示されていない限り CDS を含まない。

\*1 Still Pro 50™ はこのブランド名での販売はされなくなったが、Fluid Quip 社のシステムを用いて生産されたトウモロコシ発酵たん白質の説明としてこのブランド名を使用している公表論文があるため、一覧表に含めた

CDO はエネルギー源として使用できるもう 1 つの主要なトウモロコシ併産物であり、CP または粗繊維を含まないことから表 1 には記載されていない。CDO は、CDS からの遠心分離あるいは DDGS からの溶媒抽出によって生産される。CDO の総脂肪酸含量は 85%以上、不けん化物含量は 2.5%未満、不溶性不純物は 1%未満であり、その脂肪酸組成、ME 価、豚や家禽における使用方法については第 8 章で概説している。

### GFП (トウモロコシ発酵たん白質) の栄養組成

GFП の製造工程には少なくとも 3 種類のシステムが用いられている。ICM 社のシステム (Advanced Processing Package™ (APP™)) は「PROTOMAX™」という製品

名の CFP の生産に用いられており、「ANDVantage 50Y」という製品名で The Andersons 社からも販売されている。Fluid Quip Technologies 社のシステム (Maximized Stillage Co-Products Technology™ (MSC™)) は、「BP50」、「A+ Pro」、「NexPro®」および「Altipro」という製品名を持つ CFP の生産に使用されている。Marquis ProCap™ Technology™ というシステムは、「ProCap Gold™」という製品名の CFP の生産に使用されている。これらは、いずれもたん白質と酵母が最終製品に濃縮されているが、各製品の栄養組成は異なっている (表 2)。さらに、これら以外にも新たなシステムが開発されており、近い将来飼料原料市場に新しいトウモロコシ併産物が参入する予定である。

CFP の総エネルギー (GE) は、乾物 (DM) 値で 5,309~5,795 kcal/kg と様々だが、いずれも従来の DDGS の GE (4,940~5,140 kcal/kg) より著しく高い (Yangら、2021)。いくつかの文献では一部の CFP について ME 価が測定されており、第 6 章 (豚) およびブロイラー (第 5 章) において DDGS との比較が行われているが、CFP の ME 価は DDGS の 1.2~1.5 倍である。CFP の CP 含量も様々だが、一般的に DM 値で 53% 以上であり、CP 含量の変動は必須アミノ酸の濃度にも表れている (Lys : 1.91~2.26%、Met : 0.93~1.37%、Thr : 1.86~2.15%、Trp : 0.39~0.62%) (表 3)。

粗脂肪 (エーテル抽出物および酸分解エーテル抽出物) および繊維 (NDF、酸性デタージェント繊維 (ADF)、可溶性食物繊維、不溶性食物繊維および TDF 含量) についても、様々な CFP の間で違いがある (表 3)。CFP の粗灰分は 1.54~8.49% だが、カルシウム (Ca) および P 含量は製品間で比較的類似している。したがって、豚や家禽用飼料にこれらの CFP を配合して最適なエネルギー効率と栄養効率を得るためには、配合設計時に適切な ME 価、可消化アミノ酸含量および可消化リン含量を用いることが必須であり、現在入手可能な情報は第 5 章と第 6 章に概説した。

表 2 各種 CFP の栄養成分の比較 (DM 値)

成分	ANDVantage 50Y <sup>1</sup>	Still Pro 50 <sup>2</sup>	A+ Pro <sup>3</sup>	NexPro <sup>4</sup>	ProCap Gold <sup>5</sup>
乾物 (DM)、%	93.76	100.00	91.73	93.00	88.00
総エネルギー (GE)、kcal/kg	5,636	NR	5,351	5,309	5,795
粗たん白質 (CP)、%	55.24	53.0	54.73	53.87	55.78
リジン (Lys) : CP	3.46	4.19	3.96	3.95	3.93
粗脂肪、%	NR *	5.1	5.0	NR	NR
酸分解粗脂肪、%	10.56	NR	NR	6.02	10.78
中性デタージェント繊維 (NDF)、%	30.56 <sup>6</sup>	24.1	26.52	NR	NR
酸性デタージェント繊維 (ADF)、%	22.22 <sup>6</sup>	4.83	5.27	NR	NR
水溶性食物繊維、%	2.99	NR	NR	3.66	1.16
不溶性食物繊維、%	29.2	NR	NR	26.23	24.74
総食物繊維 (TDF)、%	31.14	NR	NR	29.89	25.90
粗灰分、%	1.54	5.49	5.98	8.49	8.39

カルシウム (Ca)、%	0.02 <sup>6</sup>	0.05	0.04	NR	0.05
リン (P)、%	0.70 <sup>6</sup>	1.1	0.89	NR	0.88

\* NR = データなし

<sup>1</sup> Lee and Stein (2021) の未公表データ (The Andersons, Inc. の許可を得て入手)

<sup>2</sup> Correy ら (2019) の公表データ : Still Pro 50™ はこの製品名で現在は販売されていないが、Fluid Quip 社のシステムを使用して生産された CFP を説明するためにこの文献で使用されていることから一覧表に含めた

<sup>3</sup> Yang ら (2021) の公表データ

<sup>4</sup> Acosta ら (2021) の公表データ

<sup>5</sup> Cristobal ら (2020) の公表データ

<sup>6</sup> The Andersons, Inc. の許可を得て取得した未公表データ

表3 各種 CFP のアミノ酸組成の比較 (DM 値)

成分	ANDVantage 50Y <sup>1</sup>	Still Pro 50 <sup>2</sup>	A+ Pro <sup>3</sup>	NexPro <sup>4</sup>	ProCap Gold <sup>5</sup>
DM、%	93.76	100.00	91.73	93.00	88.00
CP、%	55.24	53.0	54.73	53.87	55.78
必須アミノ酸、%					
Arg	2.53	2.49	2.57	2.48	2.81
His	1.22	1.41	1.57	1.43	1.59
Ile	2.14	2.24	2.46	2.35	2.31
Leu	6.87	5.80	6.87	6.11	6.33
Lys	1.91	2.22	2.17	2.13	2.15
Met	1.37	1.05	1.17	1.09	1.24
Pje	2.93	2.67	2.90	2.68	2.85
Thr	2.13	2.06	2.19	2.15	2.15
Trp	0.62	0.45	0.40	0.45	0.56
Val	2.71	3.08	3.21	3.04	3.23
非必須アミノ酸、%					
Ala	4.07	3.51	4.09	3.73	3.88
Asp	3.72	3.62	3.89	3.81	3.84
Cys	1.19	0.90	1.07	0.94	1.14
Glu	9.46	7.61	8.88	7.94	8.55
Gly	2.09	2.00	2.18	2.16	2.34
Pro	4.45	3.46	NR	3.76	4.00
Ser	2.55	2.25	2.47	2.33	2.50
Tyr	2.47	2.08	2.22	2.13	2.16

\* NR = 未報告

<sup>1</sup> Lee and Stein (2021) の未公表データ (The Andersons, Inc. の許可を得て入手)

<sup>2</sup> Correy ら (2019) の公表データ : Still Pro 50™ はこの製品名で現在は販売されていないが、Fluid Quip 社のシステムを使用して生産された CFP を説明するためにこの文献で使用されていることから一覧表に含めた

<sup>3</sup> Yang ら (2021) の公表データ

<sup>4</sup> Acosta ら (2021) の公表データ

<sup>5</sup> Cristobal ら (2020) の公表データ

## CFP の環境への影響

地球と人間社会の未来は、廃棄物、炭素と N のフットプリントおよび気候変

動を低減させる再生型の循環型社会をめざす人間の能力にかかっている。その一方で、資源の利用効率を高めて、地球規模で起きている人口増加にともなう消費の増加との折り合いをつけてゆく必要がある。食料安全保障と持続可能性に関連して最も広く議論されているトピックスの1つは、食用動物の生産が今後も世界の食料システムの一部として存在し続けることが出来るか否かである。

畜産は、世界の食料システム、経済、社会の中心であり、農業の国内総生産の40%を占めており、13億人を雇用し、10億人の貧困層の生計を助け、食事由来の摂取たん白質の33%を提供するなど、栄養不足を克服するための潜在的な要因となっている（Steinfeldら、2006）。一方で、畜産は、土地の劣化、気候変動、大気汚染、水不足と汚染、生物多様性の損失など、多くの環境問題の主な原因ともなっている（Steinfeldら、2006）。

家畜生産による地球規模の温室効果ガス（GHG）排出量の推定値は8~51%とかなりの幅があることから学者や政策立案者の間での混乱を引き起こしている（Herreroら、2011）。この推定値については常に議論の的となっているが、現在の推定値は14.5%である（Gerberら、2013）。動物種、生産システム、地理的な条件にもよるが、単胃動物用飼料の生産は、気候変動の影響の50~85%、富栄養化の64~97%、エネルギー使用の70~96%、土地占有の約100%に影響する（Garcia-Launayら、2018）。したがって、使用される飼料原料は環境に対して大きく影響するため、食用動物生産による環境への影響を低減するための最も効果的な戦略の1つは、LCA（Life Cycle Assessment）によって決定された環境負荷が少ない飼料原料を配合する多目的な配合設計のアプローチを使用することである（Mackenzieら、2016b; Garcia-Launayら、2018; de Quelenら、2021; Médaら、2021; Soleimani & Gilbert、2021）。LCAは、製品生産で用いられるシステムのライフサイクル全体のインプット、アウトプットおよび環境への影響をまとめて評価している（van Middelaarら、2019）。様々なLCA環境影響指標を決定するために標準化された方法論とガイドラインが確立されているが（LEAP、2015）、LCA飼料原料データベースの含まれているものの多くはEUで使用されている飼料原料であるため、米国で使用されている飼料原料に直接適用することが出来ない。しかし、Global Feed LCA Institute（GFLI; <https://tools.blonkconsultants.nl/tool/16/>）では、飼料原料962種のLCA指標変数（n = 18; 表4）について、収載数が最大のデータベースであり、EU、米国およびカナダで最も広く普及しているグローバル・アプリケーションを開発した。

表4 GFLIにより飼料原料に適用された環境影響対策

環境影響対策	単位	説明
土地利用の変化の有無にかかわらない地球温暖化	kg CO <sub>2</sub> 換算量/製品	温室効果ガスの大気への排出による潜在的な地球温暖化の指標。土地利用の変化の有無にかかわらない二酸化炭素（CO <sub>2</sub> ）を基準
成層圏オゾン層の破壊	kg CFC11換算量/製品	CFC（クロロフルオロカーボン）11を参照基準とした成層圏オゾン層破壊の原因となる大気への排出量の指標。

電離放射線	kBq Co-60 換算量/製品	参照標準としての放射性同位体コバルト 60 の kBq によって測定される放射線への影響
オゾン生成とヒトの健康	kg NOx 換算量/製品	オゾンとヒトの健康に影響を与える亜酸化窒素ガスへの影響
微粒子状物質の形成	kg PM2.5 換算量/製品	直径 2.5 μm 未満の粒子を含む大気中の粒子状物質としての大気質への影響
オゾン生成と陸生生態系	kg NOx 換算量/製品	オゾンとヒトの健康に影響を与える亜酸化窒素ガスへの影響
地球の酸性化	kg SO <sub>2</sub> 換算量/製品	窒素酸化物および硫黄酸化物ガスの放出による土壌および水の潜在的な酸性化の指標
淡水の富栄養化	kg P 換算量/製品	淡水へのリン放出増加の可能性の指標
海水の富栄養化	kg N 換算量/製品	淡水への窒素排出増加の可能性の指標
陸生生態毒性	kg 1,4-DCB/製品	1,4-ジクロロベンゼンを基準とした、環境に放出される有害物質の陸上生物への影響
淡水生態毒性	kg 1,4-DCB/製品	1,4-ジクロロベンゼンを基準とした、環境に放出される有害物質の淡水生物への影響
海洋生態毒性	kg 1,4-DCB/製品	1,4-ジクロロベンゼンを基準とした環境に放出される有害物質の海水生物への影響
ヒト発がん性毒性	kg 1,4-DCB/製品	1,4-ジクロロベンゼンを基準とした発がん性有害物質の環境への影響
ヒト非発がん性毒性	kg 1,4-DCB/製品	1,4-ジクロロベンゼンを基準とした非発がん性有害物質の環境への影響
土地利用	m <sup>2</sup> a 穀類換算量/製品	非農地の農地転用の影響
鉱物資源の不足	kg Cu 換算量/製品	銅を基準とした天然無機鉱物資源の枯渇指標
化石資源の不足	kg oil 換算量/製品	天然化石燃料資源の枯渇指標
水消費量	m <sup>3</sup>	1 kg の製品を生産するのに必要な水の量 (m <sup>3</sup> ) の指標

FAO (国連食糧農業機関) は、GHG および二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) の排出量に加えて、N の利用率を改善することで、N 排泄量を 2030 年までに 50%削減させることに新たにフォーカスしている。世界の畜産業が排出する N (硝酸塩、アンモニア、亜酸化 N およびその他の N 酸化物) 量はヒトが排出する N 量の約 1/3 を占めているが、このうち、豚および家禽のサプライ・チェーンからの排出量が食用動物由来の排出量の 29%を占めており、そのうちの 68%は飼料生産によるものである (Uwizeye ら、2020)。亜酸化 N は強力な GHG であり、アンモニアと N 酸化物は大気汚染の原因となって酸性化と富栄養化を引き起こすことで、ヒトの健康にリスクをもたらす (Galloway ら、2008; Sutton ら、2013)。硝酸塩と有機態 N は水質汚染を引き起こして生物多様性を損う原因となる (Galloway ら、2003; Hamilton ら、2018; Ascott ら、2017; Erisman ら、2013)。世界的にみると、N の 80%は様々な形で環境中に放出されて失われており、有効に保持される量は 20%に過ぎない (Sutton ら、2019)。したがって、食用動物生産における飼料中のたん白質 (=アミノ酸=N) の利用率を改善し、豚、家禽および魚類のような食用動物種における要求量を充足させるために、CFP のようなアミノ酸供給源となる可能性を持つ飼料原料を利用する必要性が高まっている。

P は、飼料中でエネルギーおよびアミノ酸に次ぐ、3 番目に価格が高い栄養成分である。Oster ら (2018) は、農業における P 循環のバランスを取り、豚および家禽生産の持続可能性を改善するために対処しなければならないいくつかの



ギャップ（給餌戦略の改善（飼料へのフィターゼ添加）、再利用とリサイクル（糞尿および屠体廃棄物））を特定し、土壌農業生態系にフォーカスした農家の経営改善に効果的な政府の政策と規制（P 割当てや P 税）の開発を提案している。これらの戦略に欠けている重要な側面の 1 つは、CFP や DDGS などのトウモロコシ併産物の利用である。これらの併産物は可消化 P を比較的多く含んでおり、無機 P 源への依存や P 排泄量の低減が可能である。豚、家禽および養殖水産動物用飼料にトウモロコシ併産物を配合しない場合、比較的多量のフィチン態 P を含む植物由来原料を配合した飼料における P の利用性を高めるためには、フィターゼの使用が唯一の選択肢となる。フィターゼの使用により可消化 P の割合が増加することで、糞尿への P 排泄量が減少し、フィチン酸による他の栄養成分の消化率への悪影響を低減することが可能である（Shurson ら、2021）。実際、いくつかのエタノール工場では発酵工程中にフィターゼを添加して、難消化性のフィチン態 P から可消化 P への変換をより高めている（Reis ら、2018）。トウモロコシに含まれているフィチン態 P は、発酵工程中で酵母によりある程度の量が可消化 P に変換されるため、CFP および他のトウモロコシ併産物を利用する場合にはこの恩恵を受けることが出来る。したがって、Cowlieson ら（2016）が提案している単胃動物用飼料における栄養戦略の最終目標「フィチン酸を含まない」は、トウモロコシ併産物とフィターゼの戦略的な使用により可能となる。

トウモロコシの生産には大量の水、耕地、その他の資材が用いられており、GHG の排出、気候変動、化石燃料の枯渇、大気汚染、水資源の不足に関する（Smith ら、2017）。米国のエタノール産業と畜産農家はトウモロコシの主要な消費者であることから、環境の持続可能性の評価と改善に対してより注目するようになってきている。一部の研究（Kraatz ら、2013）によると、蒸留併産物全体を電力、熱および肥料に変換する場合、DDGS に加工するよりもエネルギー強度は 54% 低く、地球温暖化係数は 67% 低いことが示唆されている。Smith ら（2017）は、家畜生産およびエタノールのサプライ・チェーンにおける米国産トウモロコシの使用による国レベルの環境への影響を説明するモデルを開発し、これらの影響が場所、産業区分および環境評価に用いる指標によって異なることを示している。いくつかの研究では、DDGS を給与した場合の様々な環境への影響についての評価が行われている（肉用牛：Hunerberg ら（2014）、Leinonen ら（2018）、Asem-Hiablie ら（2019）、Werth ら（2021）、乳牛：Aguirre-Villegas ら（2015）、家禽：Kebreab ら（2016）、Benavides ら（2020）、豚：Stone ら（2012）、Meul ら（2012）、Kebreab ら（2016）、Mackenzie ら（2016a, b）、Benavides ら（2020）、養殖水産動物：Henriksson ら（2017）、Cortés ら（2021）。モデル化されたシステム境界、配分方法およびエタノールと DDGS に割り当てられた環境影響の割合に応じて、様々な動物種に対して DDGS を給与することにより環境に対する正と負の影響が生じるが、これは他の多くの飼料原料とかわらない。

バイオ燃料および併産物生産時における CO<sub>2</sub> 排出量削減の必要性は非常に高

いため、Marquis Energy 社は、2010 年に米国のエタノールおよび併産物生産施設として最初に ISCC（国際持続可能性カーボン認証、the International Sustainability and Carbon Certification）認証を取得している。ISCC 認証は、再生可能エネルギーを使用して GHG 排出量を削減するための EU の規制に対応する認証で、EU 域内でバイオ燃料を販売するためには炭素強度（CI）スコアが必要となる。日本でも ISCC Plus 認証はバイオ燃料の販売業者に必須となっている。ISCC はバイオ燃料に CI を割り当てるように設計されているが、DDGS や CFP(ProCap Gold™)などのトウモロコシ併産物にも CI スコアを割り当てている。多くの LCA 評価とは異なり、ISCC 認証のプログラムにおけるすべての CI スコアは、各物流経路から得られるエネルギー量に基づいてトウモロコシ併産物を含む各製品に分配される。これによりエタノール工場におけるエタノールと併産物の CI スコアは等しくなる。米国のエタノール産業における DDGS の現在の CI スコアは、CO<sub>2</sub>相当量で 1 kgあたり約 700 g とされているが、Marquis Energy 社が生産する DDGS および CFP (ProCap Gold™) の CI スコアは 175 g/kg であって (<https://www.iscc-system.org/certificates/valid-certificates/>)、これらの約 25%量である。このような CI スコアの著しい削減は、炭素を回収・隔離する技術の開発と採用への戦略的な投資を行うことで達成されている。ISCC 認証は、農場からエンドユーザーまでのエタノールと併産物のサプライ・チェーン全体の様々な段階での CI スコアを LCA により測定している。Marquis Energy 社では、原料トウモロコシのサプライヤーの農家と緊密に協力し、第三者による監査を通じて、低炭素に関する取組み（例えば、原生林や草原を農地に転換しない、浸食の制御、栄養管理、自然生態の維持）が行われ、遵守されていることを確認しており、ISCC プログラムに自主的に参加した農家が生産したトウモロコシのみが ISCC 認証エタノールおよびトウモロコシ併産物の生産に使用されている。

CFP は比較的新しい飼料原料であり、DDGS に比べて生産量や飼料への使用量はかなり少ない。このため、様々な動物種に対する CFP の給与に関する情報や、飼料原料としての使用が環境に及ぼす影響に関する情報は限られている。しかし、Barton ら（2021）は CFP の配合量を増加させた場合の経済的な配分を用いた GHG 排出量について、ブロイラーにおける増体および生産される鶏肉 1 kgあたりの量（表 5）、七面鳥における増体 1 kgあたりの量、タイヘイヨウサケにおける飼料と増体 1 kgあたりの量（表 6）を推定している（この文献で使用されている飼養試験の結果は、第 2 章（養殖水産動物）および第 3 章（家禽）で概説している）。彼らは、GFLI のデータベースによる GHG 排出量推定のための試験飼料中の飼料原料データを用いており、GFLI のデータベースに収載されていない CFP については Tallentire ら（2018）によるエタノール産業で生産されている他の高 CP トウモロコシ併産物に関する環境影響データを使用しているが、様々な CFP 製品を生産するために様々な原料とシステムが用いられているため、この仮定には疑問が残る。さらに、これらの飼養試験では CFP を大豆粕の一部と置き換

えているが、大豆粕の LCA 値は原産国により大きく異なっていることから、推定結果に大きな影響を与える可能性もあるものの、残念なことにこれらは文献中では詳しく説明されていない。このように推定結果には多少の疑念はあるものの、ブロイラーにおいて飼料中の CFP 配合量を増加させると、増体および生産される鶏肉 1 kgあたりの GHG 排出量が減少する（表 5）。さらに、ブロイラー用飼料に CFP を 10%配合した場合の N 蓄積率は、CFP を含まない対照飼料と同等であったものの、CFP 5%配合飼料では N 蓄積率が改善されている。N 蓄積率の改善は N 排泄量を減少させ得る可能性があり、これは別の有益な環境効果である可能性がある。同様に、七面鳥用飼料に CFP を 0%（対照）、4%および 8%配合した場合、GHG 排出量（増体量 1 kgあたりの CO<sub>2</sub> 換算量、kg）は、対照飼料の 3.96 kgから 3.77 および 3.40 kgに減少している。同様にタイヘイヨウサケにおいて、CFP を大豆粕の一部と置き換えて配合すると、飼料および増体 1 kgあたりの GHG 排出量が減少している（表 6）。したがって、サケ科の魚類用飼料で CFP を大豆粕と置換して使用すると、特に南米の森林伐採地域からの大豆粕の輸入を推奨していない EU におけるサケ科魚類養殖における CO<sub>2</sub> 排出量を削減する上で大きな利点があると考えられる。

表 5 CFP 配合量を増加させた場合のブロイラーの飼養試験期間（42 日間）における N 蓄積率と温室効果ガス推定排出量への影響（Burton ら、2021）

測定項目	CFP 配合量、%		
	0 %	5 %	10%
N 蓄積率、%	29.4 <sup>b</sup>	30.4 <sup>a</sup>	28.7 <sup>b</sup>
GHG 排出量、kg CO <sub>2</sub> 換算量/kg 増体	2.48	2.21	2.01
GHG 排出量、kg CO <sub>2</sub> 換算量/kg 鶏肉	5.85	5.03	4.57

<sup>ab</sup> 異符号間に有意差あり (p<0.05)

表 6 0、5、10、15、および 20% のトウモロコシ発酵タンパク質を含む飼料を大西洋サケ（初期体重：304 g）に大豆粕の部分的に置き換えた場合の飼養試験期間（12 週間）中の推定 GHG 排出量（Burton ら、2021）

測定項目	CFP 配合量、%				
	0 %	5 %	10%	15%	20%
GHG 排出量、kg CO <sub>2</sub> 換算量/kg 飼料	1.64	1.55	1.47	1.39	1.30
GHG 排出量、kg CO <sub>2</sub> 換算量/kg 増体	1.59	1.44	1.37	1.36	1.27

## 結論

CFP は、乾式粉碎方式のエタノール工場において新しいプロセスで生産されており、エネルギー、CP およびアミノ酸含量が多く、主に離乳子豚、ブロイラーおよび養殖水産動物用の飼料原料として用いられるが、すべての動物種で広く使用することが出来る。その栄養組成とアミノ酸消化率は製品によって異なるため、飼料の配合設計の際には供給者から ME 価とアミノ酸消化率の適切な情報を入手する必要がある。トウモロコシを含むたん白質のアミノ酸組成は、Lys と

Trp 含量が比較的少なく、Leu 含量が多いことから、Val と Ile とのアミノ酸の不均衡を引き起こし、CFP の配合割合を高めた単胃動物用飼料における発育成績や枝肉形質を最適なものとするためには合成アミノ酸の補給が必要となる。これらの併産物には推定で 20~29%量の酵母が含まれており、アミノ酸要求量に比べてアミノ酸組成がわずかに改善されていることから、飼料への配合割合や豚、家禽および魚類の健康状態によっては、健康上の利点が得られる可能性がある。

環境への影響が少ない飼料原料の使用は、持続可能な食用動物生産を行う上で必須条件である。飼料原料として DDGS を使用することに関するいくつかのライフサイクル評価では、温室効果ガス (GHG) 排出量の増加が示されているが、その他のいくつかの環境への影響は、DDGS を用いることで大幅に削減されている。米国内のいくつかのエタノール工場は、ISCC プログラムの認証を受けており、再生可能エネルギーを使用して GHG 排出量を削減し、エタノールとトウモロコシ併産物の CI スコアを低下させる EU の規制に適合している。CFP を配合した飼料をブロイラー、七面鳥、タイヘイヨウサケに給与した場合の GHG 排出量への影響を推定するための最初の研究が実施されており、GHG 排出量の大幅な削減が示されている。

## 引用文献

- AAFCO. 2020. Association of American Feed Control Officials - Official Publication. Champaign, IL.
- Acosta, J.P., C.D. Espinosa, N.W. Jaworski, and H.H. Stein. 2021. Corn protein has greater concentrations of digestible amino acids and energy than low-oil corn distillers dried grains with solubles when fed to pigs but does not affect the growth performance of weanling pigs. *J. Anim. Sci.* 99:1-12. Doi:10.1093/jas/skab175
- Aguirre-Villegas, H.A., T.H., Passos-Fonseca, D.J. Reinemann, L.E. Armentano, M.A. Wattiaux, V.E. Cabrera, J.M. Norman, and R. Larson. 2015. Green cheese: Partial life cycle assessment of greenhouse gas emissions and energy intensity of integrated dairy production and bioenergy systems. *J. Dairy Sci.* 98:1571-1592. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2014-8850>
- Ascott, M.J., D.C. Goody, L. Wang, M.E. Stuart, M.A. Lewis, R.S. Ward, and A.M. Binley. 2017. Global patterns of nitrate storage in the vadose zone. *Nat. Commun.* 8:1416.
- Asem-Hiablie, S., T. Battagliese, K.R. Stackhouse-Lawson, and C.A. Rotz. 2019. A life cycle assessment of the environmental impacts of a beef system in the USA. *The Intl. J. Life Cycle Assess.* 24:441-455.

- <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1464-6>
- Benavides, P.T., H. Cai, M. Wang, and N. Bajjalieh. 2020. Life-cycle analysis of soybean meal, distiller-dried grains with solubles, and synthetic amino acid-based animal feeds for swine and poultry production. *Anim. Feed Sci. Technol.* 268:114607. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114607>
- Burton, E., D. Scholey, A. Alkhtib, and P. Williams. 2021. Use of an ethanol bio-refinery product as a soybean alternative in diets for fast-growing meat production species: A circular economy approach. *Sustainability* 13:11019. <https://doi.org/10.3390/su131911019>
- Gemin, H.S., M.D. Tokach, S.S. Dritz, J.C. Woodworth, J.M. DeRouchey, and R.D. Goodband. 2019a. Meta-regression analysis to predict the influence of branched-chain and large neutral amino acids on growth performance of pigs. *J. Anim. Sci.* 2019.97:2505-2514. Doi:10.1093/jas/skz118
- Gemin, H.S., M.D. Tokach, J.C. Woodworth, S.S. Dritz, J.M. DeRouchey, and R.D. Goodband. 2019b. Branched-chain amino acid interactions in growing pig diets. *Trans. Anim. Sci.* 2019.3:1246-1253. doi:10.1093/tas/txz087
- Glizer, D.A. 2021. Evaluating impacts of tryptophan and branched chain amino acids in swine diets containing corn based dried distillers grains on the growth performance and carcass characteristics of grow-finish pigs. Ph.D. Thesis, South Dakota State University, Brookings. 191 pp.
- Corray, S., P. Utterback, D. Ramchandran, V. Singh, S.P. Moose, and C.M. Parsons. 2019. Nutritional evaluation of 3 types of novel ethanol coproducts. *Poult. Sci.* 98:2933-2939. <http://dx.doi.org/10.3382/ps/pez043>
- Cortés, A., R. Casillas-Hernández, C. Cambeses-Franco, R. Bórquez-López, F. Magallón-Barajas, W. Quadros-Seiffert, G. Feijoo, M.T. Moreira. 2021. Eco-efficiency assessment of shrimp aquaculture production in Mexico. *Aquaculture* 544:737145. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737145>
- Cowieson, A.J., J.P. Ruckebusch, I. Knap, P. Guggenbuhl, and F. Fru-Nji. 2016. Phytate-free nutrition: A new paradigm in monogastric animal production. *Anim. Feed Sci. Technol.* 222:180-189. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.10.016>
- Cristobal, M., J.P. Acosta, S.A. Lee, and H.H. Stein. 2020. A new source

- of high-protein distillers dried grains with solubles (DDGS) has greater digestibility of amino acids and energy, but less digestibility of phosphorus, than de-oiled DDGS when fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 98:1–9. doi:10.1093/jas/skaa200
- de Quelen, F., L. Brossard, A. Wilfart, J.-Y. Dourmad, and F. Garcia-Launay. 2021. Eco-friendly feed formulation and on-farm feed production as ways to reduce the environmental impacts of pig production without consequences on animal performance. *Front. Vet. Sci.* 8:689012. doi: 10.3389/fvets.2021.689012
- Erisman, J.W., J.N. Galloway, S. Seitzinger, A. Bleeker, N.B. Dise, A.M.R. Petrescu, A.M. Leach, and W. de vries. 2013. Consequences of human modification of the global nitrogen cycle. *Phil. Trans. R. Soc. B* 368:20130166.
- Erwan, E., A.R. Alimon, A.Q. Sazili, and H. Yaakub. 2008. Effect of varying levels of leucine and energy on performance and carcass characteristics of broiler chickens. *International J. Poult. Sci.* 7:696–699.
- Galloway, J.N., A.R. Townsend, J.W. Erisman, M. Bekunda, Z. Cai, J.R. Freney, L.A. Martinelli, S.P. Seitzinger, and M.A. Sutton. 2008. Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions and potential solutions. *Science* 320:889–892.
- Galloway, J.N., J.D. Aber, J.W. Erisman, S.P. Seitzinger, R.W. Howarth, E.B. Cowling, and B.J. Cosby. 2003. The nitrogen cascade. *BioScience* 53:341–356.
- Garcia-Launay, F., L. Dusart, S. Espagnol, S. Laisse-Redoux, D. Gaudré, B. Méda, and A. Wilfart. 2018. Multiobjective formulation is an effective method to reduce environmental impacts of livestock feeds. *Br. J. Nutr.* 120:1298–1309. doi:10.1017/S0007114518002672
- Gerber, P.J., H. Steinfeld, B. Henderson, A. Mottet, C. Opio, J. Dijkman, A. Faluccci, and G. Tempio. 2013. Tackling climate change through livestock - A global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, Italy. 139 pp. <https://www.fao.org/3/i3437e/i3437e.pdf>
- Hamilton, H.A., D. Ivanova, K. Stadler, S. Merciai, J. Schmidt, R. van Zelm, D. Moran, and R. Wood. 2018. Trade and the role of non-food commodities for global eutrophication. *Nat. Sustain.* 1:314–321.
- Henriksson, P.J.G., C.V. Mohan, and M.J. Phillips. 2017. Evaluation of

- different aquaculture feed ingredients in Indonesia using life cycle assessment. *IJoLCAS* 1:13–21.
- Herrero, M., and P.K. Thornton. 2013. Livestock and global change: Emerging issues for sustainable food systems. *PNAS* 110 (52) :20878–20881. [www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1321844111](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1321844111)
- Hooge, D.M. 2004a. Meta-analysis of broiler chicken pen trials evaluating dietary mannan oligosaccharide, 1993–2003. *Int. J. Poult. Sci.* 3:163–174.
- Hooge, D.M. 2004b. Turkey pen trials with dietary mannan oligosaccharide, 1993–2003. *Int. J. Poult. Sci.* 3:179–188.
- Hünerberg, M., S.M. Little, K.A. Beauchemin, S.M. McGinn, D. O’connor, E.K. Okine, O.M. Harstad, R. Kröbel, and T.A. McAllister. 2014. Feeding high concentrations of corn dried distillers’ grains decreases methane, but increases nitrous oxide emissions from beef cattle production. *Agric. Sys.* 127:19–27. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2014.01.005>
- Kebreab, E., A. Liedke, D. Caro, S. Deimling, M. Binder, and M. Finkbeiner. 2016. Environmental impact of using specialty feed ingredients in swine and poultry production: A life cycle assessment. *J. Anim. Sci.* 94:2664–2681. doi:10.2527/jas2015-9036
- Kerkaert, H.R., H.S. Gemin, J.C. Woodworth, J.M. DeRouchey, S.S. Dritz, M.D. Tokach, R.D. Goodband, K.D. Haydon, C.W. Hastad, and Z.B. Post. 2021. Improving performance of finishing pigs with added valine, isoleucine, and tryptophan: validating a meta-analysis model. *J. Anim. Sci.* 99:1–9. doi:10.1093/jas/skab006
- Kraatz, S., J.C. Sinistore, and D.J. Reinemann. 2013. Energy intensity and global warming potential of corn grain ethanol production in Wisconsin (USA) . *Food Ener. Secur.* 2:207–219. doi:10.1002/fes3.27
- Kwon, W.B., J.A. Soto, and H.H. Stein. 2020. Effects on nitrogen balance and metabolism of branch-chain amino acids by growing pigs of supplementing isoleucine and valine to diets with adequate or excess concentrations of dietary leucine. *J. Anim. Sci.* 98:1–10. doi:10.1093/jas/skaa346
- Kwon, W.B., K. J. Touchette, A. Simongiovanni, K. Syriopoulos, A. Wessels, and H.H. Stein. 2019. Excess dietary leucine in diets for growing pigs reduces growth performance, biological value of protein, protein retention, and serotonin synthesis. *J. Anim. Sci.* 2019:4282–4292. doi:10.1093/jas/skz259

- LEAP. 2015. Environmental performance of animal feed supply chains: Guidelines for assessment. *Livest. Environ. Assess. Perform. Partnership, Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.*
- Leinonen, I., M. MacLeod, and J. Bell. 2018. Effects of alternative uses of distillery by-products on the greenhouse gas emissions of Scottish malt whisky production: A system expansion approach. *Sustainability* 10:1473. doi:10.3390/su10051473
- Lywood, W., and J. Pinkney. 2012. An outlook on EU biofuel production and its implications for the animal feed industry. In: *Biofuel Co-Products as Livestock Feed: Opportunities and Challenges*, ed. H.P.S. Makkar, pp. 13–34. FAO, Rome, Italy.
- Mackenzie, S.G., I. Leinonen, N. Ferguson, and I Kyriazakis. 2016a. Can the environmental impact of pig systems be reduced by utilizing co-products as feed? *J. Clean. Prod.* 115:172–181. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.074>
- Mackenzie, S.G., I. Leinonen, N. Ferguson, and I Kyriazakis. 2016b. Towards a methodology to formulate sustainable diets for livestock: accounting for environmental impact of diet formulation. *Brit. J. Nutr.* 115:1860–1874. doi:10.1017/S0007114516000763
- Mathai, J.K., J.K. Htoo, J.E. Thomson, K.J. Touchette, and H.H. Stein. 2016. Effects of dietary fiber on the ideal standardized ileal digestible threonine:lysine ratio for twenty-five-to-fifty-kilogram growing gilts. *J. Anim. Sci.* 2016.94:4217–4230. doi:10.2527/jas2016-0680
- Méda, B., F. Garcia-Launay, L. Dusart, P. Ponchant, S. Espagnol, and A. Wilfart. 2021. Reducing environmental impacts of feed using multiobjective formulation: What benefits at the farm gate for pig and broiler production? *Animal* 15:100024. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2020.100024>
- Meul, M., C. Ginneberge, C.E. van Middelaar, I. J.M. de Boer, D. Fremaut, and G. Haesaert. 2012. Carbon footprint of five pig diets using three land use change accounting methods. *Livest. Sci.* 149:215–223. <http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2012.07.012>
- Miguel, J.C., S.L. Rodriguez-Zas, and J.E. Pettigrew. 2004. Efficacy of a mann oligosaccharide (Bio-Mos) for improving nursery pig performance. *J. Swine Health prod.* 12:296–307.
- NRC. 2012. *Nutrient Requirements of Swine*, 11th rev. Natl. Acad. Press, Washington, D.C.



- Ospina-Rojas, I.C., A.E. Murakami, C.R.A. Duarte, G.R. Nascimento, E.R.M. Garcia, M.I. Sakamoto, and R.V. Nunes. 2017. Leucine and valine supplementation of low-protein diets for broiler chickens from 21 to 42 days of age. *Poult. Sci.* 96:914–922. <http://dx.doi.org/10.3382/ps/pew319>
- Oster, M., H. Reyer, E. Ball, D. Fornara, J. McKillen, K. Ulrich Sørensen, H. Damgaard Poulsen, K. Andersson, D. Ddiba, A. Rosemarin, L. Arata, P. Sckokai, E. Magowan, and K. Wimmers. 2018. Bridging gaps in the agricultural phosphorus cycle from an animal husbandry perspective - The case of pigs and poultry. *Sustainability* 10:1825. doi: 10.3390/su10061825
- Peganova, S., and K. Eder. 2003. Interactions of various supplies of isoleucine, valine, leucine and tryptophan on the performance of laying hens. *Poult. Sci.* 82:100–105.
- Qui, X., H. Tian, and D.A. Davis. 2017. Evaluation of a high protein distiller's dried grains product as a protein source in practical diets for Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture* 480:1–10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.07.038>
- Reis, C.E.R., Q. He, P.E. Urriola, G.C. Shurson, and B. Hu. 2018. Effects of modified processes in dry-grind ethanol production on phosphorus distribution in coproducts. *Ind. Eng. Chem. Res.* 57:14861–14869. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b02700>
- Ringo, E., R.E. Olsen, J.L.G. Vecino, S. Wadsworth, and S.K. Song. 2012. Use of immunostimulants and nucleotides in aquaculture: A review. *J. Mar. Sci. Res. Dev.* 1:104.
- Salyer, J.A, M.D. Tokach, J.M. DeRouchey, S.S. Dritz, R.D. Goodband, and J.L. Nelssen. 2013. Effects of standardized ileal digestible tryptophan:lysine in diets containing 30% dried distillers grains with solubles on finishing pig performance and carcass traits. *J. Anim. Sci.* 2013.91:3244–3252. doi:10.2527/jas2012-5502
- Sauer, N., R. Mosenthin, and E. Bauer. 2011. The role of dietary nucleotides in single-stomached animals. *Nutr. Res. Rev.* 24:46–59.
- Schweer, W., A. Ramirez, and N. Gabler. 2017. Alternatives to In-Feed Antibiotics for Nursery Pigs. XVIII Biennial Congress AMENA 2017, October 17–21, 2017, Puerto Vallarta, Jalisco, Mexico.
- Shurson, G.C., Y.-T. Hung, J.C. Jang, and P.E. Urriola. 2021. Measures matter - Determining the true nutri-physiological value of feed ingredients for swine. *Animals* 11:1259.

<https://doi.org/10.3390/ani1051259>

- Shurson, G.C. 2018. Yeast and yeast derivatives in feed additives and ingredients: Sources, characteristics, animal responses, and quantification methods. *Anim. Feed Sci. Technol.* 235:60–76. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2017.11.010>
- Shurson, G.C. 2017. The role of biofuels co-products in feeding the world sustainably. *Annu. Rev. Anim. Biosci.* 5:229–254.
- Shurson, G.C, H.D. Tilstra, and B. J. Kerr. 2012. Impact of United States biofuels co-products on the feed Industry. In: *Opportunities and Challenges in Utilizing By-products of the Biofuel Industry as Livestock Feed*. Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations, Rome, Italy. pp. 35–60.
- Siebert, D., D.R. Khan, and D. Torrallardona. 2021. The optimal valine to lysine ratio for performance parameters in weaned piglets. *Animals* 11:1255. <https://doi.org/10.3390/ani11051255>
- Smith, T.M., A.L. Goodkind, T. Kim, R.E.O. Pelton, K. Suh, and J. Schmitt. 2017. Subnational mobility and consumption-based environmental accounting of US corn in animal protein and ethanol supply chains. *PNAS* 114:E7891–E7899. <https://doi.org/10.1073/pnas.1703793114>
- Soares, L., N.K. Sakomura, J.C de Paula Dorigam, F. Liebert, A. Sunder, M.Q. do Nascimento, and B.B. Leme. 2019. Optimal in-feed amino acid ratio for laying hens based on deletion method. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 103:170–181. doi:10.1111/jpn.13021
- Soleimani, T., and H. Gilbert. 2021. An approach to achieve overall farm feed efficiency in pig production: environmental evaluation through individual life cycle assessment. *The International J. LCA* <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01860-3>
- Spring, P., C. Wenk, A. Connolly, and A. Kiers. 2015. A review of 733 published trials on Bio-Mos®, a mannan oligosaccharide, and Actigen®, a second generation mannose rich fraction, on farm and companion animals. *J. Appl. Anim. Nutr.* 3:1–11.
- Steinfeld, H., P. Gerber, T. Wassenaar, V. Castel, M. Rosales, and C. de Haan. 2006. *Livestock's long shadow - environmental issues and options*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. 416 pp. <https://www.fao.org/3/A0701E/a0701e.pdf>
- Stone, J.J., C.R. Dollarhide, J.L. Benning, C.G. Carlson, and D.E. Clay. 2012. The life cycle impacts of feed for modern grow-finish Northern Great Plains US swine production. *Agric. Sys.* 106:1–10.

doi:10.1016/j.agsy.2011.11.002

- Sutton, M.A., C.M., Howard, T.K., Adhya, E. Baker, J. Baron, A. Basir, W. Brownlie, C. Cordovil, W. de Vries, V. Eory, R. Green, H. Harmens, K.W. Hicks, R. Jeffrey, D. Kanter, L. Lassaletta, A. Leip, C. Masso, T.H. Misselbrook, E. Nemitz, S.P. Nissanka, O. Oenema, S. Patra, M. Pradhan, J. Ometto, R. Purvaja, N. Raghuram, R. Ramesh, N. Read, D.S. Reay, E. Rowe, A. Sanz-Cobena, S. Sharma, K.R. Sharp, U. Skiba, J.U. Smith, I. van der Beck, M. Vieno, and H.J.M. van Grinsven. 2019. Nitrogen-Grasping the Challenge. A Manifesto for Science-in-Action through the International Nitrogen Management System. Summary Report. Center for Ecology and Hydrology, Edinburgh, UK.
- Sutton, M.A., S. Reis, S.N. Riddick, U. Dragosits, E. Nemitz, M.R. Theobald, Y.S. Tang, C.F. Braben, M. Vieno, A.J. Dore, R.F. Mitchell, S. Wanless, F. Daunt, D. Fowler, T.D. Blackall, C. Milford, C.R. Flechard, B. Loubet, R. Massad, P. Cellier, E. Personne, P.F. Coheur, L. Clarisse, M. van Damme, Y. Ngadi, C. Clerbaux, C.A. Skjøth, C. Geels, O. Hertel, R.J.W. Kruit, R.W. Pinder, J.O. Bash, J.T. Walker, D. Simpson, L. Horváth, T.H. Misselbrook, A. Bleeker, F. Dentener, and W. de Vries. 2013. Towards a climate-dependent paradigm of ammonia emission and deposition. *Phil. Trans. R. Soc. B* 368:20130166.
- Tallentire, C.W., S.G. Mackenzie, and I. Kyriazakis. 2018. Can novel ingredients replace soybeans and reduce the environmental burdens of European livestock systems in the future? *J. Cleaner Prod.* 187:338–347. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.212>
- Torrecillas, S., D. Montero, and M. Izquierdo. 2014. Improved health and growth of fish fed mannan oligosaccharides: potential mode of action. *Fish Shellfish Immunol.* 36:525–544.
- Uwizeye, A., I.J.M. de Boer, C.I. Opio, R.P.O. Schulte, A. Falcucci, G. Tempio, F. Teillard, F. Casu, M. Rulli, J.N. Galloway, A. Leip, J.W. Erisman, T.P. Robinson, H. Steinfeld, and P.J. Gerber. 2020. Nitrogen emissions along the global livestock supply chains. *Nature Food* 1:437–446.
- Van Middelaar, C.E., H.H.E. van Zanten, and I. J. M. de Boer. 2019. Future of animal nutrition: the role of life cycle assessment. In: *Poultry and Pig Nutrition - Challenges of the 21st century*, W.H. Hendriks, M.W.A. Verstegen, and L. Babinsky (eds.), Wageningen Academic Publishers, p.307–314. [https://doi.org/10.3920/978-90-8686-884-1\\_14](https://doi.org/10.3920/978-90-8686-884-1_14)
- Vetvicka, V., and C. Oliveira. 2014.  $\beta$  (1–3) (1–6) –D–glucans modulate

- immune status in pigs: potential importance for efficiency of commercial farming. *Ann. Transl. Med.* 2:16. <http://dx.doi.org/10.3928/j.issn.2305-5839.2014.01.04>.
- Vetvicka, V., L. Vannucci, and P. Sima. 2014. The effects of  $\beta$ -glucan on pig growth and immunity. *Open Biochem. J.* 8:89-93.
- Vohra, A., P. Syal, and A. Madan. 2016. Probiotic yeasts in livestock sector. *Anim. Feed Sci. Technol.* 219:31-47.
- Waldroup, P.W., J.H. Kersey, and C.A. Fritts. 2002. Influence of branched-chain amino acid balance in broiler diets. *International J. Poult. Sci.* 1:136-144.
- Wellington, M.O., J.K. Htoo, A.G. van Kessel, and D.A. Columbus. 2018. Impact of dietary fiber and immune system stimulation on threonine requirement for protein deposition in growing pigs. *J. Anim. Sci* 2018.96:5222-5232. doi:10.1093/jas/sky381
- Werth, S.J., A.S. Rocha, J.W. Oltjen, E. Kebreab, F.M. Mitloehner. 2021. A life cycle assessment of the environmental impacts of cattle feedlot finishing rations. *The Intl. J. Life Cycle Assess.* 26:1779-1793. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01957-3>
- Yang, Z., A. Palowski, J.-C. Jang, P.E. Urriola, and G.C. Shurson. 2021. Determination, comparison, and prediction of digestible energy, metabolizable energy, and standardized ileal digestibility of amino acids in novel maize co-products and conventional dried distillers grains with solubles for swine. *Anim. Feed Sci. Technol.* 282:115149. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.115149>
- Zheng, L., H. Wei, C. Cheng, Q. Xiang, J. Pang, and J. Peng. 2016. Supplementation of branched-chain amino acids to a reduced-protein diet improves growth performance in piglets: involvement of increased feed intake and direct muscle growth-promoting effect. *Brit. J. Nutr.* 115:2236-2245. doi:10.1017/S0007114516000842

## 第2章

### 養殖水産動物に対するトウモロコシ発酵たん白質（CFP）の給与

#### 初めに

CFPは養殖水産動物における飼料原料として広く利用されているが、驚くべきことに公表文献は多くない。CFPは養殖水産動物用飼料において優れたエネルギーおよび可消化アミノ酸源であり、ヨーロッパスズキ(*Dicentrarchus labrax*)、ニールティラピア(*Oreochromis niloticus*)、バナメイエビ(*Litopenaeus vannamei*)、タイヘイヨウサケ(*Salmo salar*)用の飼料における大豆粕および魚粉のすべて、あるいは部分的な置き換えに関する評価が行われている。

#### 養殖水産動物用飼料中の一般的なたん白質源とCFPの栄養組成の比較

豚や家禽用の飼料配合とは異なり、養殖水産動物用飼料において様々な「高たん白」飼料原料について、一般的に使用される魚粉や大豆粕と部分的に置き換えるの可能性に関する試験がしばしば行われている。様々な魚種におけるCFPのエネルギー価およびアミノ酸消化率のデータは大豆粕および魚粉に比べて限られているが、Quiら(2017)はバナメイエビ(*L. vannamei*)におけるCFP(NexPro)の乾物(DM)、エネルギー、粗たん白質(CP)およびアミノ酸の消化率を大豆粕および魚粉と比較している。表1に示すように、CFPのDM消化率は魚粉より高く、エネルギーおよびアミノ酸消化率は同等であり、CP消化率は魚粉より低かった。大豆粕のDM、CP、エネルギーおよびアミノ酸消化率は魚粉およびCFPより高かった。これらの結果は、CFPはバナメイエビ用飼料中における魚粉と置き換えることが出来るが、大豆粕との置き換えは難しいことを示唆している。

表1. CFP(NexPro)、大豆粕および魚粉のNIR分析値、アミノ酸組成、見かけの消化率の比較(*L. vannamei*; Quiら(2017)から改変)

分析値(原物)、%	CFP	大豆粕	魚粉
乾物(DM)	94.77	89.03	92.01
見かけの消化率	69.72	78.51	49.15, 49.45
粗たん白質(CP)	49.20	44.89	62.78
見かけの消化率	60.58	97.03	67.07, 71.3
粗脂肪	4.31	3.78	10.56
粗繊維	4.29	3.20	0.00
見かけのエネルギー消化率	68.09	82.56	69.77, 67.78
粗灰分	4.87	6.67	18.75
アラニン(Ala)	3.26(70)	2.04(94)	3.94(69)
アルギニン(Arg)	3.26(77)	3.35(97)	3.68(75)
アスパラギン酸(Asp)	4.05(73)	5.10(95)	5.34(69)
システチン(Cys)	0.82(73)	0.62(91)	0.47(54)
グルタミン酸(Glu)	7.49(68)	8.24(96)	7.47(71)
グリシン(Gly)	1.54(73)	2.04(95)	4.88(67)
ヒスチジン(His)	1.42(76)	1.20(94)	1.63(74)
イソロイシン(Ile)	2.18(71)	2.17(93)	2.42(69)
ロイシン(Leu)	5.64(68)	3.57(92)	4.21(71)

リジン (Lys)	2.14 (72)	3.06 (95)	4.67 (77)
メチオニン (Met)	0.83 (74)	0.66 (95)	1.61 (71)
フェニルアラニン (Phe)	2.89 (69)	2.35 (93)	2.39 (65)
プロリン (Pro)	3.58 (68)	2.39 (95)	3.08 (67)
セリン (Ser)	2.53 (75)	1.90 (93)	2.11 (58)
トレオニン (Thr)	2.02 (73)	1.75 (92)	2.41 (66)
トリプトファン (Trp)	0.54 (80)	0.62 (95)	0.62 (80)
チロシン (Tyr)	2.34 (74)	1.64 (95)	1.67 (74)
バリン (Val)	2.73 (72)	2.34 (91)	2.99 (67)

### ヨーロップスズキ (*Dicentrarchus labrax*)

ヨーロップスズキへの CFP 給与に関する 2 文献が公表されている (Goda ら、2019; 2020)。最初の文献 (Goda ら、2019) では、体重 7.5 g のヨーロップスズキ (*D. labrax*) 稚魚に対する CFP を 30、40 および 50% 含む飼料に関する 8 週間の飼養試験が行われている。なお、著者らは、供試した CFP を「高たん白 DDG」と記載しているが、結論部分では 製品名である「NexPro」と正しく記載している。各供試飼料は等 CP (45%) および等粗脂肪 (13%) とした。表 2 に示すとおり、CFP を 30、40 および 50% 配合した飼料を給与すると、対照飼料に対して増体量、比成長率および飼料摂取量が改善された。斃死率には各飼料間で差がなく、CFP を 50% 配合した場合には、他の飼料より飼料要求率が改善された。CFP を配合すると、対照飼料に比べて血液・生化学的検査値、総抗酸化能および腸の形態学的測定値が改善され、これらの反応が CFP に含まれる酵母成分が関与している可能性が示唆された。この結果は、ヨーロップスズキ稚魚用飼料中の大豆粕と部分的に置き換えることにより、CFP を最大 50% 配合すると発育成績が改善され、健康状態に正の影響を与える可能性があることを示している。

表 2. ヨーロップスズキ (*Dicentrarchus labrax*) に対して CFP の配合量を高めた飼料を給与した場合の発育成績に及ぼす影響 (Goda ら、2019)

測定項目	CFP 配合量、%			
	0%	30%	40%	50%
開始時体重、g/尾	7.47	7.50	7.50	7.53
終了時体重、g/尾	14.47 <sup>b</sup>	17.20 <sup>a</sup>	17.37 <sup>a</sup>	18.03 <sup>a</sup>
増体量、g/尾	7.00 <sup>b</sup>	9.70 <sup>a</sup>	9.87 <sup>a</sup>	10.50 <sup>a</sup>
比成長率 <sup>1</sup> 、%/日	0.87 <sup>b</sup>	1.39 <sup>a</sup>	1.41 <sup>a</sup>	1.70 <sup>a</sup>
飼料摂取量、g/尾	11.97 <sup>b</sup>	14.17 <sup>a</sup>	13.30 <sup>a</sup>	13.20 <sup>a</sup>
飼料要求率 <sup>2</sup>	1.71 <sup>a</sup>	1.45 <sup>ab</sup>	1.46 <sup>ab</sup>	1.26 <sup>b</sup>
生存率、%	100	100	100	100

<sup>1</sup> 比成長率 =  $100 \times (\text{終了時体重} - \text{g} - \text{開始時体重} - \text{g}) / \text{飼育期間} - \text{日}$

<sup>2</sup> 飼料要求率 =  $\text{増体量} - \text{g} / \text{飼料料摂取量} - \text{g}$

ab 異符号間に有意差あり ( $p < 0.05$ )

Goda ら (2020) によるその後の研究では、CFP を大豆粕と部分的に置き換えて 30、40 および 50% 配合した飼料に市販のプロテアーゼを添加して、ヨーロップスズキ稚魚の発育成績、生理学および腸の組織学的反応を評価した。CFP を 50% 配合した場合、対照飼料、CFP 30 および 40% 配合した飼料に対して終了時

体重、増体量、比成長率および飼料要求率が改善された（表3）。これらの効果は、CFPを50%配合した場合のたん白効率、たん白生産価、脂質およびエネルギー蓄積率が、対照飼料より改善された結果であり、CFPを30%および40%配合した場合でもこれらの指標が改善された（表3）。前報（Godaら、2019）と同様に、70日間の飼育試験期間中にはいずれの飼料においても死亡魚は発生しなかった。プロテアーゼを添加したCFP飼料を給与すると、血液学、血清生化学、体液性免疫応答および腸の形態の測定値が改善された。これらの結果は、最適な発育成績と健康を得るために、稚魚用の飼料に最大50%量のCFPを大豆粕と部分的に置き換えて配合できることを示している。

表3. ヨーロッパスズキ (*Dicentrarchus labrax*) 用飼料へのプロテアーゼ添加を伴うCFP (NexPro) 配合量の増加が発育成績と利用効率に及ぼす影響 (Godaら、2020)

測定項目	CFP 配合量、%			
	0%	30%	40%	50%
開始時体重、g/尾	7.47	7.53	7.43	7.43
終了時体重、g/尾	15.57 <sup>a</sup>	16.80 <sup>ab</sup>	17.07 <sup>ab</sup>	19.28 <sup>b</sup>
増体量、g/尾	8.10 <sup>a</sup>	9.27 <sup>ab</sup>	9.63 <sup>ab</sup>	11.85 <sup>b</sup>
比成長率 <sup>1</sup> 、%/日	1.31 <sup>a</sup>	1.43 <sup>ab</sup>	1.48 <sup>ab</sup>	1.70 <sup>b</sup>
飼料摂取量、g/尾	16.93 <sup>a</sup>	15.57 <sup>b</sup>	14.47 <sup>b</sup>	13.07 <sup>b</sup>
飼料要求率 <sup>2</sup>	2.09 <sup>a</sup>	1.68 <sup>ab</sup>	1.47 <sup>ab</sup>	1.10 <sup>b</sup>
生存率、%	100	100	100	100
たん白効率	1.07 <sup>c</sup>	1.33 <sup>b</sup>	1.48 <sup>b</sup>	1.94 <sup>a</sup>
たん白生産価、%	11.08 <sup>c</sup>	17.33 <sup>b</sup>	19.78 <sup>b</sup>	26.15 <sup>a</sup>
脂質蓄積率、%	22.42 <sup>c</sup>	26.94 <sup>b</sup>	35.69 <sup>a</sup>	27.82 <sup>b</sup>
エネルギー蓄積率、%	6.72 <sup>d</sup>	7.80 <sup>cd</sup>	10.20 <sup>a</sup>	8.28 <sup>b</sup>

<sup>1</sup> 比成長率 =  $100 \times (\text{終了時体重、g} - \text{開始時体重、g}) / \text{飼育期間、日}$

<sup>2</sup> 飼料要求率 =  $\text{増体量、g} / \text{飼料料摂取量、g}$

abcd 異符号間に有意差あり ( $p < 0.05$ )

### ナイルティラピア (*Oreochromis niloticus*)

CFPに含まれる各栄養成分の様々な養殖水産動物における消化率に関するデータは限られているが、ナイルティラピア (*O. niloticus*) におけるCFP (ProCap Gold) の有機物 (OM)、総エネルギー (GE)、CP、エーテル抽出物およびアミノ酸消化率が測定されており (未公表)、表4に示す結果が得られている。

表4. ナイルティラピア (*O. niloticus*) 成魚におけるCFP 2製品のOM、GE、CP、エーテル抽出物およびアミノ酸の見かけの消化率 (%) (Marquis ProCap の許可を得て改編した未発表データ)

測定値、%	CFP
有機物 (OM)	60.6
総エネルギー (GE)	83.1
粗たん白質 (CP)	83.1
粗脂肪	52.9
必須アミノ酸	
アルギニン (Arg)	93
ヒスチジン (His)	94

イソロイシン (Ile)	93
ロイシン (Leu)	94
リジン (Lys)	89
メチオニン (Met)	89
フェニルアラニン (Phe)	93
トレオニン (Thr)	85
バリン (Val)	92
非必須アミノ酸	
アラニン (Ala)	94
アスパラギン酸 (Asp)	93
グルタミン酸 (Glu)	96
グリシン (Gly)	93
プロリン (Pro)	95
セリン (Ser)	92
チロシン (Tyr)	92

Suehs & Gatlin (2022) は、CFP (ProCap Gold) の栄養価がニルティラピア (*O. niloticus*) 稚魚の発育、体組成成分および免疫応答に及ぼす影響を調査している。最初の試験では、大豆粕、大豆たん白濃縮物、メンハーデン魚粉を配合した CP 36%飼料 (対照) と、対照飼料中の大豆粕と魚粉と置換して CFP を 7.5、15、22.5、30 および 37.5%置き換えて、すべての飼料中の粗脂肪含量が6%となるように大豆油の添加量を変化させた飼料を用いた。各飼料にティラピア幼魚 (開始時体重 10.6 g) を 15 尾×3水槽ずつ配して8週間飼育した。8週終了時に各水槽から3尾を抽出し、肝臓の相対重量、腹腔内脂肪率、フィレ肉収量およびフィレ肉の組成を調査した。また、血液中の好中球酸化ラジカル産生、細胞内および細胞外スーパーオキシドアニオン産生、リゾチーム、総たん白質、総免疫グロブリンおよび抗プロテアーゼ活性を含むいくつかの非特異的免疫応答を測定した。その結果、増体率、飼料効率、生存率、フィレ肉収量 (表5) および体組成 (表6) には飼料間に差はなかった。この結果は、CFP を大豆粕および魚粉と部分的に置き換えてはいるものの、各飼料の CP およびエネルギー含量を同一としたことから予想されたものであった。さらに、最大 37.5%の CFP を配合しても、評価した各非特異的免疫測定値には影響はなかった (データは示していない)。

表5. 0、7.5、15、22.5、30 および 37.5%の CFP (ProCap Gold) を配合した飼料を給与したニルティラピア稚魚 (*O. niloticus*、開始時体重 0.25 g) の発育成績、フィレ肉収量、肝臓の相対重量、腹腔内脂肪率および試験期間中の生存率 (Suehs & Gatlin, 2022; Marquis ProCap の許可を得て改編)

測定値	CFP 配合量、%					
	0%	7.5%	15%	22.5%	30%	37.5%
増体率 <sup>1</sup> 、g	383	321	353	376	354	364
飼料効率 <sup>2</sup>	0.85	0.79	0.82	0.87	0.81	0.83
フィレ肉収量 <sup>3</sup> 、%	27.2	27.3	28.5	26.1	26.7	26.7
肝臓の相対重量 <sup>4</sup>	3.09	2.73	3.26	2.92	3.30	3.32
腹腔内脂肪率 <sup>5</sup> 、%	1.10	1.33	0.99	1.13	0.94	1.40
生存率、%	100	97.8	91.1	100	88.9	95.6



<sup>1</sup> 増体率 = (終了時体重、g - 開始時体重、g) / 開始時体重、g × 100

<sup>2</sup> 飼料効率 = 増体量、g / 飼料料給餌量、g

<sup>3</sup> フィレ肉収量 = フィレ肉重量、g / 体重 100 g

<sup>4</sup> 肝臓相対重量 = 肝臓重量、g / 体重、g × 100

<sup>5</sup> 腹腔内脂肪率 = 腹腔内脂肪重量、g / 体重 g × 100

表 6. 0、7.5、15、22.5、30 および 37.5%の CFP (ProCap Gold) を配合した飼料を給与したニルティラピア稚魚 (*O. niloticus*) の体成分組成 (Suehs & Gatlin, 2022; Marquis ProCap の許可を得て改編)

測定値	CFP 配合量、%					
	0%	7.5%	15%	22.5%	30%	37.5%
水分、%	70.9	72.9	70.9	70.8	71.4	69.9
たん白質、%	17.5	16.8	17.4	17.2	17.2	17.4
脂質、%	7.4	6.5	7.4	7.8	7.0	8.3
灰分、%	3.8	3.7	3.7	3.9	3.9	3.9
たん白効率、%	44.2	40.0	42.4	43.4	40.1	42.5

オーバーン大学で実施された未公表データによると、ニルティラピア稚魚 (体重 7.5 g) を用い、CFP (NexPro) をトウモロコシ濃縮たん白 (CPC) と部分的に置き換えて 0、3.15、6.30、9.45 および 12.60% 配合して 9 週間飼育した場合、増体率、飼料効率および生存率に有意差はなく、CFP の配合量を最大 12.6% まで高めても発育成績を損なうことなく、CPC との置き換えが可能であることを示している (表 7)。

表 7. CFP (NexPro) を 0、3.15、6.30、9.45 および 12.60% 含む飼料をニルティラピア (*O. niloticus*) 幼魚に 9 週間給与した場合の発育成績に及ぼす影響 (オーバーン大学の未公表データ、POET の許可を得て掲載)

測定項目	CFP 配合量、%				
	0%	3.15%	6.30%	9.45%	12.60%
終了時体重、g	80.4	73.1	79.8	79.5	79.5
最終バイオマス、g	1,446	1,405	1,436	1,447	1,447
増体率 <sup>1</sup> 、%	965	880	953	954	936
飼料要求率 <sup>2</sup>	1.23	1.30	1.24	1.23	1.24
生存率、%	90.0	96.3	90.0	91.3	92.5

<sup>1</sup> 増体率 = (終了時体重、g - 開始時体重、g) / 開始時体重、g × 100

<sup>2</sup> 飼料効率 = 飼料料給餌量、g / (終了時体重 - 開始時体重)

### バナメイエビ (*Litopenaeus vannamei*)

Qui ら (2017) は、バナメイエビ (*Litopenaeus vannamei*) の稚エビ用飼料において、CFP (NexPro) を大豆粕あるいは魚粉と大豆粕と置き換えた場合の発育成績に関して 3 試験を行っている。試験 1 では、バナメイエビ (体重 0.18 g、10 尾/1 水槽) に対して CFP を大豆粕と置き換えて 0、10、20 および 30% 配合して 6 週間飼育した。その結果、増体率および飼料効率には各飼料間で有意差はなかった (表 8)。しかし、試験 2 において CFP を大豆粕と魚粉の一部と置き換えて 10、20 および 30% 配合した場合、20 および 30% 配合飼料の終了時体重、増体率および飼料効率は、対照飼料 (0%) および CFP 10% 配合飼料より低下

した（表9）。このため、発育成績（表10）と体組成成分（表11）へのCFPの最適配合量を決定するために試験3を行った。その結果、CFPを24%配合した場合には増体率および飼料効率が低下したことから、稚エビ用飼料へのCFP配合量の上限は18%であるとみなされた。CFPの配合割合が高い飼料で発現した発育成績の低下は、CFPのエネルギーおよびCPの消化率（68及び61%）が、大豆粕の消化率（83%および97%）より低く、また、魚粉のCP消化率（67~71%）より低かったことが影響している可能性が高い。実際に、CFP中の数種類のアミノ酸の見かけの消化率は大豆粕より低かった（詳細は第1章を参照のこと）。稚エビの水分、たん白質、脂質、灰分、マクロおよび微量ミネラルの体組成は飼料間で差がなかったが、CFPを18および24%配合した飼料では鉄および銅含量は対照飼料より高まった（表11）。これらの結果は、CFPが含む鉄と銅の生物学的利用率は対照飼料中の他の飼料原料より高いことを示唆している。

これら3試験の結果をまとめると、CFPは優れた植物性たん白質源であり、稚エビ（*Litopenaeus vannamei*）用飼料において大豆粕と置き換えて30%まで、または、大豆粕および魚粉と置き換えて18%まで配合しても、発育成績に影響を及ぼさなかった。しかし、これらの試験で用いたCFPのエネルギーおよびアミノ酸の消化率は、大豆粕よりも低かった。

表8. 試験1においてCFP (NexPro) を0、10、20 および 30%配合した飼料を稚エビ (*L. vannamei*、体重 0.18 g) に6週間給与した場合の発育成績への影響 (Quiら、2017より引用)

測定項目	CFP 配合量、%			
	0%	10%	20%	30%
終了時体重、g	3.4	3.5	3.1	3.1
最終バイオマス、g	28.0	31.7	29.0	29.4
増体率 <sup>1</sup> 、%	1,724.4	1,894.9	1,679.8	1,827.8
飼料要求率 <sup>2</sup>	2.44	2.35	2.62	2.58
生存率、%	84.0	92.0	94.0	94.0

<sup>1</sup> 増体率 = (終了時体重、g - 開始時体重、g) / 開始時体重、g × 100

<sup>2</sup> 飼料効率は飼料料給餌量、g / (終了時体重 - 開始時体重)

表9. 試験2においてCFP (NexPro) を0、10、20 および 30%配合した飼料を稚エビ (*L. vannamei*、体重 1.24 g) に7週間給与した場合の発育成績への影響 (Quiら、2017より引用)

測定項目	CFP 配合量、%			
	0%	10%	20%	30%
終了時体重、g	9.9 <sup>a</sup>	9.2 <sup>a</sup>	8.0 <sup>b</sup>	7.7 <sup>b</sup>
最終バイオマス、g	225.8	204.6	191.4	199.0
増体率 <sup>1</sup> 、%	684.8 <sup>a</sup>	644.7 <sup>ab</sup>	554.9 <sup>bc</sup>	519.4 <sup>c</sup>
飼料要求率 <sup>2</sup>	1.61 <sup>a</sup>	1.72 <sup>a</sup>	2.05 <sup>b</sup>	2.12 <sup>b</sup>
生存率、%	76.7	73.3	80.0	85.8

<sup>1</sup> 増体率 = (終了時体重、g - 開始時体重、g) / 開始時体重、g × 100

<sup>2</sup> 飼料効率は飼料料給餌量、g / (終了時体重 - 開始時体重)

abc 異符号間に有意差あり (p < 0.05)

表 10. 試験 3 において CFP (NexPro) を 0、6、12、18 および 24% 配合した飼料を稚エビ (*L. vannamei*、体重 0.25 g) に 6 週間給与した場合の発育成績への影響 (Qui ら、2017 より引用)

測定項目	CFP 配合量、%				
	0%	6%	12%	18%	24%
試験終了時体重、g	5.1 <sup>ab</sup>	5.4 <sup>a</sup>	5.1 <sup>a</sup>	4.6 <sup>ab</sup>	4.3 <sup>b</sup>
最終バイオマス、g	41.9	46.8	46.2	41.5	37.6
増体率 <sup>1</sup> 、%	1,837.7 <sup>ab</sup>	2,065.7 <sup>a</sup>	1,854.2 <sup>ab</sup>	1,776.2 <sup>ab</sup>	1,593.5 <sup>b</sup>
飼料要求率 <sup>2</sup>	1.81 <sup>b</sup>	1.67 <sup>b</sup>	1.74 <sup>b</sup>	1.94 <sup>ab</sup>	2.14 <sup>a</sup>
生存率、%	82.5	87.5	90.0	90.0	87.5

<sup>1</sup> 増体率 = (終了時体重、g - 開始時体重、g) / 開始時体重、g × 100

<sup>2</sup> 飼料効率 = 飼料料給餌量、g / (終了時体重 - 開始時体重)

ab 異符号間に有意差あり (p < 0.05)

表 10. 試験 3 において CFP (NexPro) を 0、6、12、18 および 24% 配合した飼料を稚エビ (*L. vannamei*、体重 0.25 g) に 6 週間給与した場合の体組成成分への影響 (Qui ら、2017 より引用)

測定項目	CFP 配合量、%				
	0%	6%	12%	18%	24%
水分、%	77.98	77.45	77.40	76.64	75.90
たん白質、%	75.18	73.00	72.60	73.90	73.90
脂質、%	5.62	5.88	6.81	6.29	6.92
灰分、%	11.43	11.70	11.58	11.70	11.55
カルシウム、%	2.97	3.33	3.09	3.41	3.40
リン、%	1.08	1.06	1.01	1.03	1.02
ナトリウム、%	1.06	1.15	1.10	1.10	1.09
カリウム、%	1.38	1.45	1.41	1.39	1.38
塩素、%	0.87	0.90	0.88	0.88	0.88
マグネシウム、%	0.26	0.29	0.27	0.29	0.28
鉄、mg/kg	13.53 <sup>b</sup>	16.40 <sup>ab</sup>	16.05 <sup>ab</sup>	15.70 <sup>ab</sup>	18.68 <sup>a</sup>
銅、mg/kg	66.53 <sup>b</sup>	69.68 <sup>bc</sup>	73.93 <sup>abc</sup>	84.85 <sup>a</sup>	80.58 <sup>ab</sup>
亜鉛、mg/kg	73.28	76.13	74.18	75.13	75.48
マンガン、mg/kg	2.23	3.55	2.75	3.20	3.90

abc 異符号間に有意差あり (p < 0.05)

Guo ら (2019) も、バナメイエビの稚エビ (体重 0.36 g) 用飼料で、CFP (NexPro) を魚粉あるいは CPC と置き換えた場合の発育成績への影響に関する 8 週間の飼育試験を行っている。表 12 に示したように、平均体重、体重増加、飼料要求率および生存率には各飼料間で差はなかった。しかし、CFP を魚粉と 20% 置き換えた場合、0 および 10% 置き換えた場合より最終バイオマスが減少し、飼料要求率も低下した。これらの結果は、CFP がバナメイエビにおいて優れたたん白質源であり CPC の最大 20%、または、魚粉の最大 15% と置き換えても発育成績を損なうことがないことを示している。

表 12. CFP を CPC または魚粉と部分的に置き換えて配合割合を高めた飼料を 56 日間給与した場合のバナメイエビ稚エビにおける発育および生存率 (Guo ら、2019 より引用)

測定項目	飼料の種類							
	CPC	CPC	CPC	CPC	魚粉	魚粉	魚粉	魚粉

	0% CFP	10% CFP	15% CFP	20% CFP	0% CFP	10% CFP	15% CFP	20% CFP
バイオマス、g	225	227	230	221	240 <sup>b</sup>	235 <sup>b</sup>	230 <sup>ab</sup>	216 <sup>a</sup>
平均体重、g	7.49	7.64	7.88	7.50	8.05	7.90	7.88	7.38
増体量、g	7.13	7.28	7.52	7.14	7.68	7.54	7.52	7.02
増体率、%	1,997	2,032	2,106	1,996	2,104	2,093	2,106	1,920
飼料要求率	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4 <sup>a</sup>	1.4 <sup>a</sup>	1.5 <sup>ab</sup>	1.6 <sup>b</sup>
生存率、%	100	99.2	97.5	98.3	99.2	99.2	97.5	97.5

ab 異符号間に有意差あり (p<0.05)

### タイヘイヨウサケ (*Salmo salar*)

Burtonら (2021) は、CFP を大豆粕と置き換えて0、5、10、15 および 20% 配合した飼料をタイヘイヨウサケ (体重 304 g、5尾/水槽) に 12 週間給与した場合の発育成績、飼料中のたん白質の利用性および温室効果ガス (GHG) 排出量に関する影響を調査している。CFP (NexPro) を 5、10、15 および 20% 配合した飼料における大豆粕との置換割合は、それぞれ 12.9、25.8、37.9 および 50.8% であった。CFP を 10% 配合した場合の最終体重および飼料摂取量は CFP を 20% 配合した場合より増加した (表 13)。しかし、飼料要求率およびたん白効率には飼料間に差がなかった。

表 13. CFP (NexPro) を大豆粕の一部と置換して0、5、10、15 および 20% 配合した飼料を 12 週間給与したタイヘイヨウサケ (体重 304 g) の発育成績に及ぼす影響 (Burtonら、2021 から引用)

測定項目	CFP 配合量、%				
	0%	5%	10%	15%	20%
開始時体重、g	295.0	301.9	305.7	304.7	305.0
終了時体重、g	720.0 <sup>ab</sup>	701.1 <sup>ab</sup>	752.1 <sup>a</sup>	690.8 <sup>ab</sup>	663.7 <sup>b</sup>
増体量、g	425.0	399.2	446.4	386.1	358.7
飼料摂取量、g/尾	411.9 <sup>a</sup>	370.5 <sup>ab</sup>	414.4 <sup>a</sup>	377.8 <sup>ab</sup>	348.3 <sup>b</sup>
飼料効率	0.98	0.93	0.93	0.97	0.97
たん白効率、%	19.8	23.1	23.0	22.1	26.0

ab 異符号間に有意差あり (p<0.05)

CFP の配合量を高めても、魚体の DM、たん白質、アミノ酸 (データは示していない)、脂質および灰分量には影響はなく、たん白質の蓄積速度および効率にも影響はなかった (表 14)。また、CFP の配合量は前部フィレ肉の明度 (L\*)、黄色味 (a\*) および赤色味 (b\*) には影響を及ぼさなかったが、後部フィレ肉の色度にはわずかながら相違がみられた (表 14)。CFP の消化率が高いことに起因する可能性がある血漿中の P および Mg 濃度の上昇以外には、ほとんどの血液生化学的検査値に差はなかった。CFP の配合割合の増加に対応して総細胞数および血中血球容積が増加した (データは示していない)。組織の炎症の指標であるクレアチンキナーゼ濃度は各飼料間で近似していた。病理組織学的検索においても、腸炎および他の腸障害を示す所見は認められず、ほとんどの遠位腸管でも固有層および粘膜下組織の炎症所見は見られなかった (データは示していない)。これらの結果は、CFP は銀化が始まった後のタイヘイヨウサケ (*Salmo salar*) に

おけるたん白質およびエネルギー源として優れており、体組成、たん白質および脂質の利用性、フィレ肉への色素沈着および腸の組織像には影響を及ぼさないことを示唆している。ただし、CFP の配合割合を 15%以上に高めた場合には発育成績が低下する可能性がある。

表 CFP (NexPro) を大豆粕の一部と置換して0、5、10、15 および 20%配合した飼料を 12 週間給与したタイヘイヨウサケ (体重 304 g) の発育成績に及ぼす影響 (The Center for Aquaculture Technologies、2019 による未公表データを POET の許可を得て掲載)

測定項目	CFP 配合量、%				
	0%	5%	10%	15%	20%
DM、%	37.1	37.2	38.0	37.8	37.0
たん白質、%	18.8	18.4	18.5	18.7	19.0
たん白蓄積速度、mg/°C、日	45.4	41.4	47.6	41.1	41.1
たん白効率、%	19.8	23.1	23.0	22.1	26.0
脂質、%	17.1	17.5	18.4	18.0	16.8
脂質蓄積速度、mg/°C、日	50.7	50.7	62.6	51.9	43.3
脂質効率、%	59.0	50.4	58.7	54.5	50.5
灰分	1.7	1.7	1.8	1.8	1.8
色調					
前部フィレ肉					
L*	60.0	56.5	56.9	56.3	56.0
a*	7.9	8.0	7.7	7.9	7.9
b*	17.2	17.5	17.2	17.2	17.0
後部フィレ肉					
L*	54.9 <sup>ab</sup>	54.7 <sup>b</sup>	55.5 <sup>ab</sup>	55.7 <sup>a</sup>	54.6 <sup>b</sup>
a*	9.1	9.6	9.1	9.2	9.5
b*	18.8	19.1	18.8	18.6	18.5

ab 異符号間に有意差あり (p<0.05)

アイダホ大学水産養殖研究所のハーマン養魚実験場で別の試験が行われ、タイヘイヨウサケの稚魚の発育成績に及ぼす (ProCap Gold) の栄養価を測定している。各飼料の CP 含量は 43%、粗脂肪含量は 20%とし、CFP を対照飼料の大豆粕の一部と置き換えた 5 飼料 (飼料 1 (対照) : 大豆粕 22%および CFP 0%、飼料 2 : 同 16.5%および 5.5%、飼料 3 : 同 11.0%および 10.9%、飼料 4 : 同 5.5%および 16.4%、飼料 5 : 同 0%および 21.9%) を用い、体重 21 g のタイヘイヨウサケに 12 週間飽食給餌した。その結果、すべての飼料で生存率は 100% であり、CFP の配合割合の増加に伴う発育成績への有意な影響はなかった (表 15)。

表 15. CFP (ProCap Gold) の配合割合を高めた場合のタイヘイヨウサケ (*Salmo salar*) の発育成績に及ぼす影響 (アイダホ大学の未公表データ、2022 から引用)

測定項目	CFP 配合量、%				
	0%	5.5%	10.9%	16.4%	21.9%
開始時体重、g/尾	21.4	21.5	21.5	21.6	21.4
終了時体重、g/尾	169.4	165.3	161.6	168.6	165.2

増体率、%	691.1	668.9	653.6	682.3	673.0
比成長率、%/日	2.47	2.42	2.40	2.45	2.43
飼料摂取量、g/尾	147.1	143.3	142.6	150.8	146.3
飼料要求率	1.00	0.99	1.02	1.03	1.02
生存率、%	100	100	100	100	100

CFP 配合割合の増加に伴い脂質の消化率が大幅に改善されたが、DM、CP およびエネルギー消化率には影響はなかった(表 16)。この結果は、CFP(ProCap Gold)のタイヘイヨウサケにおける脂質消化率が高く(97.2%)、DM、CP およびエネルギー消化率は、それぞれ 67.5%、88.7%および 76.8%であったことに起因しており、CFP は消化率が優れた飼料原料であり、タイヘイヨウサケ稚魚用飼料に 22%配合しても発育成績および生存率に影響を与えることはないことを示している。

表 16. CFP (ProCap Gold) の配合割合を高めた場合のタイヘイヨウサケ (*Salmo salar*) における DM、CP、脂質およびエネルギーの見かけの消化率 (%) (アイダホ大学の未公表データ、2022 から引用)

測定項目	CFP 配合量、%				
	0%	5.5%	10.9%	16.4%	21.9%
DM	69.9	68.3	69.1	69.7	69.8
CP	88.3	87.5	87.3	87.6	87.4
脂質	95.7 <sup>a</sup>	95.9 <sup>ab</sup>	96.7 <sup>bc</sup>	97.5 <sup>c</sup>	97.3 <sup>c</sup>
エネルギー	78.6	78.2	78.1	78.4	78.5

abc 異符号間に有意差あり (p<0.05)

## 結論

ヨーロッパスズキ (*Dicentrarchus labrax*) 稚魚用飼料で CFP を大豆粕と部分的に置き換えて最大 50%配合すると発育成績が改善され、健康状態にも正の影響を及ぼす可能性がある。ナイルティラピア (*Oreochromis niloticus*) では、CFP を最大 37.5%配合した場合に最適な発育成績とフィレ肉の組成を得ることが出来る。CFP は稚エビ (*Litopenaeus vannamei*) 用飼料中の大豆粕と部分的に置き換えて最大 30%まで、あるいは、大豆粕および魚粉と部分的に置き換えて最大 18%まで配合しても発育成績に悪影響を及ぼす恐れがない優れた植物性飼料原料であるが、CFP のエネルギーおよびアミノ酸消化率は変動する可能性があり、大豆粕より低い場合がある。タイヘイヨウサケを用いた 2 つの飼育試験結果からはタイヘイヨウサケにおける最適な最大配合割合が異なることが示唆されるが、1 試験の結果では CFP の配合割合を最大 22%としても発育成績や飼料摂取量に低下させることなく利用可能であることが示されている。

## 引用文献

Auburn University. Evaluation of corn fermented protein as a partial

- replacement for corn protein concentrate in diets for juvenile Nile tilapia (7.5 g initial body weight) on growth performance during a 9-week feeding period. (Unpublished data provided with permission from POET) .
- Burton, E., D. Scholey, A. Alkhtib, and P. Williams. 2021. Use of an ethanol bio-refinery product as a soy bean alternative in diets for fast-growing meat production species: A circular economy approach. *Sustainability* 13:11019. <https://doi.org/10.3390/su131911019>
- Goda, A. A. S., T.M. Srour, E. Omar, A.T. Mansour, M.Z. Baromh, S.A. Mohamed, E. El-Haroun, and S.J. Davies. 2019. Appraisal of a high protein distillers dried grain (DDG) in diets for European sea bass, *Dicentrarchus labrax* fingerlings on growth performance, hematological status and related gut histology. *Aquaculture Nutrition* 25:808–816. <https://doi.org/10.1111/anu.12898>
- Goda, A. M. A. –S., S.R. Ahmed, H.M. Nazmi, M.Z. Baromh, K. Fitzsimmons, W. Rossi, Jr., S. Davies, E. El-Haroun. 2020. Partial replacement of dietary soybean meal by high-protein distiller' s dried grains (HPDDG) supplemented with protease enzyme for European seabass, *Dicentrarchus labrax* fingerlings. *Aquaculture Nutrition* 26:842–852.
- Guo, J., J. Reis, G. Salze, M. Rhodes, S. Tilton, and D.A Davis. 2019. Using high protein distiller' s dried grain product to replace corn protein concentrate and fish meal in practical diets for the Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *J. World Aquac. Soc.* 50:983–992. <https://doi.org/10.1111/jwas.12606>
- The Center for Aquaculture Technologies. 2019. Effect of NexPro on weight gain, nutrient utilization, fillet color, blood plasma biochemistry and gut physiology of post-smolt Atlantic salmon. Unpublished report provided with permission from POET.
- Qui, X., H. Tian, and D.A. Davis. 2017. Evaluation of a high protein distiller' s dried grains product as a protein source in practical diets for Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture* 480:1–10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.07.038>
- Chapter 2. Feeding Applications of Corn Fermented Protein Co-Products in Aquaculture Diets 12
- Suehs, B.A. and D.M Gatlin III. 2022. Evaluation of a commercial high-protein distillers dried grain with solubles (DDGS) product in the diet of juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) . *Aquaculture Nutrition*, In press.

### 第3章

#### 家禽用飼料に対するトウモロコシ発酵たん白質（CFP）の給与

##### 初めに

家禽用飼料における CFP の利用についての報告は豚や養殖水産動物用飼料への利用に関する報告ほど多くはない。ただし、CFP は代謝エネルギー（ME）価や可消化アミノ酸含量が高く、急速な発育に必要なエネルギーおよび栄養密度が高い飼料を必要とするブロイラーや七面鳥における最適な飼料原料である。以降に様々な CFP の ME 価、アミノ酸組成および消化率と、CFP を使用した場合のブロイラーおよび七面鳥の発育成績と環境への影響に関する研究成果を概説する。なお、残念なことに産卵鶏に対する CFP の使用の評価に関する報告はない。

##### 家禽用飼料原料としての CFP の栄養特性

###### 栄養組成

3つの異なるプロセスを用いて生産された CFP 3製品の粗たん白質（CP）、粗脂肪、粗繊維および粗灰分含量を表1に示す。3製品のCP含量は近似しており、リジン：CP比は3.82～4.19と従来のDDGSに比べてはるかに高いが、粗脂肪、粗繊維および粗灰分含量は製品間で大きく異なる。従来のDDGSと同様に、CFPはカルシウム（Ca）含量が低く、リン（P）含量は0.68～1.1%である。これらの結果は、CFPは製品間でCP以外の栄養成分が異なるために、家禽における最適な栄養効率と発育成績を得るために、使用するCFPの供給源を把握しておくことが重要となる。

表1. トウモロコシ発酵たん白質（CFP）のCP、粗脂肪、粗繊維および粗灰分

分析値	ANDVantage 50Y <sup>1</sup>	NexPro <sup>2</sup>
乾物（DM）、%	90.0	100.00
粗たん白質（CP）、%	51.1	53.0
リジン（Lys）：CP	3.82	4.19
粗脂肪、%	9.6	5.1
酸分解エーテル抽出物、%	9.90	-
粗繊維、%	8.5	-
中性デタージェント繊維（NDF）、%	27.5	24.1
酸性デタージェント繊維（ADF）、%	20.0	4.83
可溶性食物繊維、%	2.8	-
不溶性食物繊維、%	29.2	-
総食物繊維（TDF）、%	32.0	-
粗灰分、%	2.17	5.49
カルシウム（Ca）、%	0.01	0.05
リン（P）、%	0.68	1.1
イオウ（S）、%	0.64	-
マグネシウム（Mg）、%	0.07	-
カリウム（K）、%	0.29	-
ナトリウム（Na）、%	0.04	0.05

<sup>1</sup> The Andersons, Inc. からの許可を得て提供された製品仕様書（供給時）



<sup>2</sup> Correy ら、から入手した公表データ(乾物値)、2019

### 代謝エネルギー (ME)

CFP の家禽における ME 価は豚の ME 価を基に推定されている。主要な 3 製品すべてについて評価が行われており (表 2)、ANDVantage 50Y と NexPro では窒素補正された真の ME (TME<sub>n</sub>) 価が、ProCap Gold では窒素補正された見かけの ME (AME<sub>n</sub>) 価が推定されている (3,546 kcal/kg; オーバーン大学の Bill Dozier 博士による未公表データで、Marquis Energy 社の許可を得て掲載)。これら 3 製品の相対的な ME 価を比較することは難しいが、CFP の ME 価は従来の DDGS の 130 ~150% であって、ブロイラーおよび七面鳥用の優れた飼料原料であることは明らかである。

分析値	ANDVantage 50Y <sup>1</sup>	NexPro <sup>2</sup>
乾物 (DM)、%	93.76	93.52
総エネルギー (GE)、kcal/kg	5,636	5,366
代謝エネルギー (ME)、kcal/kg	3,378	3,713
ME/GE	0.60	0.69

<sup>1</sup> TME<sub>n</sub> = 窒素補正した真の ME; The Andersons 社の許可を得て提供された未公表データ

<sup>2</sup> TME<sub>n</sub> 価 (6 試料の平均値); POET 社の許可を得て提供された未公表データ

### 可消化アミノ酸

ANDVantage 50Y と NexPro の必須および非必須アミノ酸含量と消化率を表 3 に示した。アミノ酸含量と消化率は製品によって異なるが、一般的に見て CFP は家禽用飼料に使用され得る消化率が高いアミノ酸原料であるものの、家禽において最適な栄養効率と発育成績を得るためには使用する CFP の供給源を把握することが重要である。

分析値 <sup>1</sup>	ANDVantage 50Y <sup>2</sup>	NexPro <sup>3</sup>
乾物 (DM)、%	90.0	93.0
粗たん白質 (CP)、%	51.1	50.2
リジン (Lys) : CP	3.82	4.19
アルギニン (Arg)	2.62 (91)	2.37 (96)
ヒスチジン (His)	1.81 (89)	1.46 (91)
イソロイシン (Ile)	2.16 (87)	2.22 (93)
ロイシン (Leu)	6.53 (93)	6.65 (94)
リジン (Lys)	1.95 (83)	2.11 (85)
メチオニン (Met)	1.08 (91)	1.26 (94)
フェニルアラニン (Phe)	2.75 (90)	2.82 (95)
トレオニン (Thr)	1.98 (85)	2.17 (87)
トリプトファン (Trp)	0.42 (89)	0.51 (89)
バリン (Val)	2.58 (87)	2.96 (90)
アラニン (Ala)	3.82	3.51 (91)
アスパラギン酸 (Asp)	3.49	3.62 (87)
シスチン (Cys)	1.12 (92)	0.90 (87)

グルタミン酸 (Glu)	8.87	7.61 (93)
グリシン (Gly)	1.96	2.00
プロリン (Pro)	4.17	3.46 (93)
セリン (Ser)	2.39	2.25 (89)
チロシン (Tyr)	2.32	2.08 (87)

<sup>1</sup> 括弧内の値は、家禽におけるアミノ酸回腸消化率 (%)

<sup>2</sup> アミノ酸データの未発表の消化率は The Andersons, Inc. の許可を得て掲載

<sup>3</sup> アミノ酸含量 (乾物) と消化率は POET の許可を得て掲載

## 可消化リン

CFP の家禽における P 消化率と相対的な利用可能性に関する報告はないが、Mutucumarana ら (2014) は、飼料原料中の可消化 P 含量について非フィチン態 P の値を用いるのは正確ではないとしている。これは、しばしば飼料原料中の可消化 P 含量が非フィチン態 P 含量よりも高いためである。ただし、DDGS を評価している報告から得られた家禽の P 消化率と利用率の推定値を使用することは妥当である。Mutucumarana ら (2014) は、トウモロコシ DDGS の真の可消化 P 含量は 0.59% であって、全 P の約 73% を占めるとしている。Wamsley ら (2013) は、彼らが評価した DDGS の P 利用率は 66~68% であると推定しており、この値は Martinez-Amezcuca ら (2006) による報告と一致している。したがって、CFP 中の P の家禽における消化率と利用率の測定が行われるまでの間は、家禽では CFP 中の全 P の約 60% が利用可能であると仮定するのが妥当である。ただし、いくつかのエタノール工場では発酵工程中にフィターゼを添加することで、難消化性のフィチン態 P から可消化 P リンへの変換割合をさらに高めていることに注意する必要がある (Reis ら、2018)。フィターゼが P 消化率を高めるため、使用しているトウモロコシ併産物の生産工程中でのフィターゼ使用の有無を確認しておく必要がある。

## ブロイラーに対する CFP 給与試験の概略

Burton ら (2021) は、飼料中の大豆粕を CFP (NexPro) で置き換えた場合の効果を評価するためのブロイラーを用いた飼育試験を実施している。ブロイラー (Ross) 雄初生雛の体重を測定したのち 1 ペンに 9 羽ずつ収容し、CFP を 0、5 および 10% 配合した飼料を 6 週間給与した。0~21 日には前期用飼料を、21~42 日は後期用飼料を給与した。CFP を 10% 配合した場合、CFP を含まない対照飼料と比較して飼料摂取量が多く、飼料効率が低下した (表 4)。CFP を 10% 配合した場合の窒素 (N) 蓄積率は対照飼料と同等であり、CFP を 5% 配合した場合には両飼料に対して改善された (表 4)。N 蓄積率の改善は、これらの飼料で CFP を大豆粕と部分的に置き換える際に、結晶リジン (Lys)、メチオニン (Met)、アルギニン (Arg)、トレオニン (Thr) およびバリン (Val) を補給して、アミノ酸バランスを補正した結果であるといえる。

表 4. CFP (NexPro) の配合割合を増加させた飼料を 42 日間給与した場合のブロイラーの

発育成績、窒素保持および屠体の収量に及ぼす影響 (Burton ら、2021 から引用)			
測定値	CFP 配合割合、%		
	0 %	5 %	10%
開始時体重、g	45	45	44
終了時体重、g	3,360	3,439	3,339
増体量、g	3,315	3,394	3,295
飼料摂取量、g/羽	4,848 <sup>b</sup>	5,042 <sup>ab</sup>	5,151 <sup>a</sup>
飼料要求率	1.47 <sup>a</sup>	1.49 <sup>a</sup>	1.57 <sup>b</sup>
窒素 (N) 保持率、%	29.4 <sup>a</sup>	30.4 <sup>a</sup>	28.7 <sup>b</sup>
屠体歩留まり、kg	1.41	1.49	1.45

<sup>ab</sup> 異付号間に有意差あり (p<0.05)

### 七面鳥に対する CFP 給与試験の概略

Burton ら (2021) は、ブロイラーを用いた試験と同様に七面鳥用飼料中の大豆粕を CFP (NexPro) で置き換えた場合の発育試験を実施している。雄の七面鳥 (BUT6) 初生雛の体重を測定したのち 1 ペンあたり 5 羽を収容し、CFP を 0、4 および 8 % 配合した飼料を 6 週間給与した。0~21 日には前期用飼料を、21~42 日は後期用飼料を給与した。CFP を 8 % 配合した場合、CFP を含まない対照飼料より飼料要求率が改善され、窒素蓄積率が高まった (表 5)。窒素蓄積率の改善は、CFP を大豆粕と部分的に置き換える際に、結晶 Lys、Met、Arg、Thr および Val を補給して、アミノ酸バランスを補正した結果であるといえる。

表 5. CFP (NexPro) の配合割合を増加させた飼料を 42 日間給与した場合の七面鳥の発育成績、窒素保持および屠体の収量に及ぼす影響 (Burton ら、2021 から引用)			
測定値	CFP 配合割合、%		
	0 %	4 %	8 %
開始時体重、g	66	66	66
終了時体重、g	2,328	2,423	2,518
増体量、g	2,262	2,357	2,452
飼料摂取量、g/羽	3,741	3,850	3,743
飼料要求率	1.66	1.64	1.61
窒素保持率、%	18.3 <sup>b</sup>	21.0 <sup>ab</sup>	21.8 <sup>a</sup>

<sup>ab</sup> 異付号間に有意差あり (p<0.05)

### 結論

CFP をブロイラーや七面鳥に給与した場合の飼料価値と発育成績への反応に関する入手可能なデータからは、CFP が従来の DDGS と比べてエネルギー価が高く、消化しやすいアミノ酸飼料原料であることを示しており、ブロイラー用飼料では最大 10% まで、七面鳥用飼料では最大 8 % まで配合しても許容できる発育成績や窒素保持率が得られるものと思われる。

### 引用文献

Burton, E., D. Scholey, A. Alkhtib, and P. Williams. 2021. Use of an ethanol bio-refinery product as a soy bean alternative in diets for

- fast-growing meat production species: A circular economy approach. Sustainability 13:11019. <https://doi.org/10.3390/su131911019>
- Correy, S., P. Utterback, D. Ramchandran, V. Singh, S.P. Moose, and C.M. Parsons. 2019. Nutritional evaluation of 3 types of novel ethanol coproducts. Poultry Science 98:2933–2939. <http://dx.doi.org/10.3382/ps/pez043>
- Martinez-Amezcuca, C., C.M. Parsons, and D.H. Baker. 2006. Effect of microbial phytase and citric acid on phosphorus bioavailability, apparent metabolizable energy, and amino acid digestibility in distillers dried grains with solubles in chicks. Poultry Science 85:470–475.
- Mutucumarana, R.K., V. Ravindran, G. Ravindran, and A.J. Cowieson. 2014. Measurement of true ileal digestibility of phosphorus in some feed ingredients for broiler chickens. J. Anim. Sci 92:5520–5529.
- Reis, C.E.R., Q. He, P.E. Urriola, G.C. Shurson, and B. Hu. 2018. Effects of modified processes in dry-grind ethanol production on phosphorus distribution in coproducts. Ind. Eng. Chem. Res. 57:14861–14869. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b02700>
- Wamsley, kg.S., R.E. Loar II, K. Karges, and J.S. Moritz. 2013. The use of practical diets and regression analyses to determine the utilization of lysine and phosphorus in corn distillers dried grains and solubles using Cobb 500 male broilers. J. Appl. Poult. Res. 22:279–297.

## 第4章

### 豚用飼料に対するトウモロコシ発酵たん白質（CFP）の給与

#### 初めに

CFP は、代謝エネルギー（ME）価と可消化アミノ酸およびリン（P）含量が多いことから、離乳豚用の飼料原料として魅力がある。エネルギーおよび栄養成分の密度が高いことは、配合割合が限られている飼料により低い配合割合で大量のエネルギーと栄養成分を供給することが可能となる。さらに、離乳豚用飼料では、エネルギーとアミノ酸含量を著しく濃く設計する必要がある。これは、ME 価と可消化アミノ酸含量が高い飼料原料を使用することによってのみ達成できる。また、CFP は発酵時に使用された酵母を含み、酵母細胞壁に存在するマンナンオリゴ糖、 $\beta$ -グルカンおよびヌクレオチドを比較的多く添加した場合に健康上の利点が得られる可能性がある (Shurson, 2018) ことから、飼料摂取量が少なく比較的変動しやすい離乳豚において、ストレスが暴露されやすい時期に発育成績を許容範囲内に保つことが出来る可能性が高くなる。したがって、本章では、可消化エネルギー（DE）価、ME 価、アミノ酸の標準化された回腸消化率（SID）および P の標準化された総消化管消化率（STTD）、CFP 生産時に使用されるプロセスの種類および離乳豚を用いた飼育試験成績における発育成績等について概説する。

#### 豚における CFP の栄養特性

CFP の生産には、3 種類のプロセス（ICM 社の Advanced Processing Package™（APP™）、FluidQuip 社の Maximized Stillage Co-Products Technology™（MSC™）および Marquis ProCap Technology™）が使われている。これらはいずれも、最終的にたん白質と酵母を併産物に濃縮しているが、それぞれの栄養特性は異なっている。このため、これらの併産物を豚用の飼料原料として用いる場合、製品に合致した ME 価、アミノ酸の SID 値および P の STTD 値を用いた飼料設計が必須となるが、幸いなことにこれらの CFP 製品では、それぞれについて豚における DE および ME 価ならびにアミノ酸の SID 値が測定されている。

#### 栄養組成

各 CFP の粗たん白質（CP）、粗脂肪、粗繊維および粗灰分含量を表 1 に示した。各製品の CP 含量は近似しているが、粗脂肪（エーテル抽出物）および酸分解エーテル抽出物、中性デタージェント繊維（NDF）、総食物繊維（TDF）および粗灰分含量は製品間で大きく異なっている。DDGS と同様に、CFP のカルシウム（Ca）含量は低く、P 含量は 0.68~1.04% である。これらのことは、CFP は製品間で栄養特性が異なり、適切な栄養効率や発育成績を得るためには、エンドユーザーは飼料設計時に CFP の供給源を特定しておくことが不可欠であることを示してい

る。

分析値	ANDVantage 50Y <sup>1</sup>	A+Pro <sup>2</sup>	NexPro <sup>3</sup>	ProCap Gold <sup>4</sup>
乾物 (DM)、%	93.76	91.73	93.00	88.00
粗たん白質 (CP)、%	51.79	50.20	50.1	49.09
リジン (Lys) : CP	3.46	3.96	3.95	3.93
粗脂肪、%	9.60 *	4.62	-	-
AEE <sup>5</sup> 、%	9.90	-	5.6	9.49
中性デタージェント繊維 (NDF)、%	27.50 *	24.33	-	-
酸性デタージェント繊維 (ADF)、%	20.00 *	4.83	-	-
可溶性食物繊維、%	2.8	-	3.4	1.02
不溶性食物繊維、%	29.2	-	24.4	21.77
総食物繊維 (TDF)、%	32.0	-	27.8	22.79
粗灰分、%	1.44	5.49	7.9	7.38
カルシウム (Ca)、%	0.01 *	0.04	-	0.04
リン (P)、%	0.68 *	0.82	-	0.77

<sup>1</sup> Lee and Stein (2021) の未公表データ (The Andersons 社の許可を得て掲載)

<sup>2</sup> Yang ら (2021) の公表データ

<sup>3</sup> Acosta ら (2021) の公表データ

<sup>4</sup> Cristobal ら (2020) の公表データ

<sup>5</sup> AEE = 酸分解エーテル抽出物

\* 供給業者による成分表示表の値 (The Andersons 社の許可を得て掲載)

### 代謝エネルギー (ME) 価

CFP 各製品間で脂質、繊維および灰分の含量幅が大きく、DE および ME 価は、A+Pro では 3,837 および 3,643 kcal/kg、ProCap Gold では 4,560 および 4,306 kcal/kg である (表 2)。ただし、これらの ME 価は従来の DDGS の ME 価の 117~150% である。ME : 総エネルギー (GE) は、ProCap Gold を除き、各製品間で類似している。ProCap Gold における ME:GE は 0.84 であり、他の CFP 製品に比べて豚における GE 利用率が著しく高い。

分析値	ANDVantage 50Y <sup>1</sup>	A+Pro <sup>2</sup>	NexPro <sup>3</sup>	ProCap Gold <sup>4</sup>
乾物 (DM)、%	93.76	91.73	93.00	88.00
総エネルギー (GE)、kcal/kg	5,284	4,908	4,937	5,100
可消化エネルギー (DE)、kcal/kg	4,421	3,837	4,070	4,560
代謝エネルギー (ME)、kcal/kg	4,085	3,643	3,705	4,306
ME : DE	0.92	0.95	0.91	0.94
DE : GE	0.84	0.78	0.82	0.89
ME : GE	0.77	0.74	0.75	0.84

<sup>1</sup> Lee and Stein (2021) の未公表データ (The Andersons, Inc. の許可を得て掲載)

<sup>2</sup> Yang ら (2021) の公表データ

<sup>3</sup> Acosta ら (2021) の公表データ

<sup>4</sup> Cristobal ら (2020) の公表データ

### 可消化アミノ酸

CFP 各製品のアミノ酸組成は様々だが、当然、CP 含量が高い製品ほどアミノ

酸含量は高い（表3）。Lys 含量に対する各アミノ酸の割合は、従来の DDGS に比べて改善されている（データは示していない）。これは、含まれている酵母の含量が多いため、酵母由来のアミノ酸の影響が大きいためである（Shurson, 2018）。一般に、CFP の各アミノ酸の SID は従来の DDGS より高いが、製品間に差があることに注意する必要がある。例えば、Lys の SID には、61%（A+ Pro および NexPro）から 85%（ProCap Gold）の幅がある。繰り返しになるが、適切な栄養効率や発育成績を得るためには、飼料設計時に CFP の供給源を特定しておくことが不可欠である。

表3. CFP の CP およびアミノ酸含量と、豚におけるアミノ酸の SID 値（原物）

分析値	ANDVantage 50Y <sup>1</sup>	A+Pro <sup>2</sup>	NexPro <sup>3</sup>	ProCap Gold <sup>4</sup>
乾物 (DM)、%	93.76	91.73	93.00	88.00
粗たん白質 (CP)、%	51.79 (80)	50.20 (70)	50.1 (75)	48.09 (84)
リジン (Lys) : CP	3.46	3.96	3.95	3.93
アルギニン (Arg)	2.37 (90)	2.36 (81)	2.31 (81)	2.47 (92)
ヒスチジン (His)	1.41 (84)	1.44 (77)	1.33 (80)	1.40 (88)
イソロイシン (Ile)	2.01 (81)	2.26 (74)	2.19 (75)	2.03 (87)
ロイシン (Leu)	6.44 (89)	6.30 (84)	5.68 (85)	5.57 (90)
リジン (Lys)	1.79 (72)	1.99 (61)	1.98 (61)	1.89 (85)
メチオニン (Met)	1.28 (89)	1.07 (81)	1.01 (84)	1.09 (89)
フェニルアラニン (Phe)	2.75 (86)	2.66 (81)	2.49 (81)	2.51 (89)
トレオニン (Thr)	2.00 (80)	2.01 (67)	2.00 (70)	1.89 (83)
トリプトファン (Trp)	0.58 (83)	0.37 (75)	0.42 (81)	0.49 (90)
バリン (Val)	2.54 (82)	2.94 (74)	2.83 (74)	2.84 (85)
アラニン (Ala)	3.82 (86)	3.75 (78)	3.47 (79)	3.41 (86)
アスパラギン酸 (Asp)	3.49 (78)	3.57 (67)	3.55 (69)	3.38 (82)
シスチン (Cys)	1.12 (81)	0.98 (70)	0.87 (73)	1.00 (84)
グルタミン酸 (Glu)	8.87 (87)	8.15 (82)	7.39 (83)	7.52 (89)
グリシン (Gly)	1.96 (81)	2.00 (56)	2.01 (65)	2.06 (76)
プロリン (Pro)	4.17 (100)	-	3.50	3.52 (73)
セリン (Ser)	2.39 (86)	2.27 (77)	2.17 (77)	2.20 (86)
チロシン (Tyr)	2.32 (90)	2.04 (83)	1.98 (82)	1.90 (90)

<sup>1</sup> ( ) 内は各アミノ酸の豚における SID 値

<sup>2</sup> Lee and Stein (2021) の未公表データ (The Andersons, Inc. の許可を得て掲載)

<sup>3</sup> Yang ら (2021) の公表データ

<sup>4</sup> Acosta ら (2021) の公表データ

<sup>5</sup> Cristobal ら (2020) の公表データ

## 可消化 P

CFP は豚用飼料にかなりの量の可消化 P を提供することが可能であり、P の STTD 値に基づいた豚用飼料の設計を行うことが出来る。トウモロコシ併産物の全 P 含量は比較的高く、消化率も高いため、豚の P 要求量を充足させるために必要なリン酸-カルシウムなどの無機 P の使用量を減らすことができ、同時に糞尿中への P 排泄量と飼料費の削減が可能である。ただし、CFP 中の P の STTD 値のデータが報告されているのは 1 文献のみである。Cristobal ら (2020) は、低脂肪 DDGS および CFP (ProCap Gold) 中の P の STTD 値と Ca の見かけの全消化管消化率 (ATTD) の比較を行っている。CFP 中の P の STTD 値は、従来の DDGS に

比べて低かったが、トウモロコシよりも大幅に高かった（表 4）。この結果は、発酵および加工後にも、多少のフィチン態 P が残っており、フィターゼの添加は豚が利用可能な P の加水分解に有効であることを示している。同様に、CFP 中の Ca の ATTD 値は従来の DDGS よりも低かったが、低脂肪 DDGS および CFP の全 Ca 含量は非常に少ないことからそれほど重要ではない。他の CFP 製品の P 消化率は測定されていないが、P の STTD 値は ProCap Gold で得られたデータとほぼ同程度であると推定される。ただし、いくつかのエタノール工場では発酵工程中でフィターゼが添加されており、難消化性のフィチン態 P を可消化 P に変換が進んでいることに注意する必要がある（Reis ら、2018）。したがって、飼料設計時には使用する CFP の供給源を知り、P 消化率に影響を与える生産工程におけるフィターゼ使用に有無を把握しておくことが重要である。

表 4. 豚における Ca の ATTD と P の STTD (現物値) (Cristobal ら、2020 より引用)		
測定値	低脂肪 DDGS	CFP
カルシウム (Ca)、%	0.04	0.04
リン (P)、%	1.01	0.77
Ca のみかけの全消化管消化率 (ATTD)、%	83	66
P の標準化された全消化管消化率 (STTD)、%	81	56

#### 離乳豚子豚に対する CFP 給与試験の概要

CFP の配合に最も適している飼料は、離乳豚におけるフェーズ 1 およびフェーズ 2 用の飼料である。これは、トウモロコシと比べて ME 価 および可消化アミノ酸含量が高いためであり、これらの飼料では、一般的に噴霧乾燥血漿 (SDAP) などの消化率が高い動物由来たん白源や、酵素処理大豆粕などの植物性たん白源が利用されているが、これらは高価格であるためである。大豆粕は抗原物質を含んでいるためフェーズ 1 用飼料を設計する際には配合量を出来るだけ抑えたいと考えられている。したがって、離乳直後の子豚用飼料で、大豆粕、酵素処理大豆粕および SDAP を置き換えるための安価で消化率が高いエネルギーおよびたん白質源に大きな関心が寄せられている。

最初の報告は Martindale ら (2018) によるものである。フェーズ 1 (離乳後 0~14 日) およびフェーズ 2 (離乳後 14~28 日) 用飼料では CFP (NexPro) を 0、8、16 および 24% 配合し、フェーズ 3 (離乳後 28~35 日) では一般的なトウモロコシ・大豆粕飼料を用いて、21 日齢で離乳した子豚の発育成績を調査した。フェーズ 1 では、平均日増体量 (ADG)、平均飼料摂取日量 (ADFI) および飼料効率には差がみられなかったが、フェーズ 2 において CFP を 24% 配合すると、CFP を含まない対照飼料に対して ADG および ADFI が低下した。フェーズ 3 および全試験期間 (35 日間) の発育成績には各飼料に差はなかった。この試験における反復 (ペン) 数は 4 で、ペン毎の収容頭数は 5 頭であって、商業生産レベルではないことから、CFP の配合による有意な影響を判断する統計的な検出力にはやや疑問が残るが、フェーズ 1 および 2 の離乳子豚用飼料に CFP を最大 16%



まで配合しても、発育成績には悪影響を及ぼさないと結論付けられている。

Acosta ら (2021) は、離乳後のフェーズ 1 および 2 において CFP を様々な水準で SDAP および酵素処理大豆粕 (ES) と部分的に置き換えた場合の発育成績と糞便スコアを評価している (表 5)。離乳後 7 日間、ES を 5% と SDAP を 2.5% 含む対照飼料を給与した場合に、CFP を 5% と ES を 4.5% 配合した場合および CFP を 10% 配合した場合より ADG および飼料効率が優れたが、ADFI には飼料間で有意差はなかった。離乳後 8 日目から 21 日までのフェーズ 2 では CFP の配合割合による ADG、ADFI および飼料効率への影響はなかった。すべてに一般的なトウモロコシ・大豆粕飼料を給与したフェーズ 3 (離乳後 22~35 日) では発育成績には差がみられなかった。これらの結果は、離乳子豚のフェーズ 1 用飼料に CFP を 5% 配合した場合、SDAP が 2.5% 配合されていれば許容範囲内の発育成績は得られるが、ES を 4.5% 配合されていても許容範囲の発育成績は得られないことを示している。SDAP あるいは ES を配合せずに最適な発育成績を得るための CFP 配合量は 10% ではやや過剰であると思われる。しかし、フェーズ 2 においては CFP を 10% 配合しても、ES を 7.5% 含む飼料と同等の許容可能な発育成績が得られた。

これらの結果は、CFP (NexPro) が、離乳子豚用飼料で使用される他の飼料原料に応じて、フェーズ 1 およびフェーズ 2 用飼料に最大 16% までで配合可能なことを示している。CFP ではロイシン (Leu) 含量が高く、バリン (Val) およびイソロイシン (Ile) の利用と代謝能に悪影響を及ぼすことが、多くの研究者の間で栄養上の課題として認識されている (Harris ら、2004 ; Gemin ら、2019; Kwon ら、2019; Yang ら、2019)。さらに、過剰な Leu は血液を介して脳へのトリプトファン (Trp) 輸送と競合してセロトニン合成量を低下させ、その結果として ADFI が減少する (Kwon ら、2019; Yang ら、2019)。また、CFP に含まれている食物繊維含量が高いと、小腸でのムチン産生とスレオニン (Thr) 損失が高まる可能性が高く、豚の Thr 要求量を高める可能性がある (Mathai ら、2016) ため、CFP を給与した離乳子豚において最適な発育成績を得るためには合成 Thr、Trp、Val および Ile の添加が必要である。

表 5. 離乳後のフェーズ 1 および 2 において様々な量の動物血漿たん白質 (PP)、酵素処理大豆粕 (ES)、および CFP (NexPro) を含む飼料を給与した場合の離乳子豚の発育成績 (Acosta ら、2021 から引用)

測定値	対照-No CFP	低 CFP	中 CFP+ES	高 CFP
開始時体重、kg	5.86	6.03	6.02	6.02
終了時体重、kg	18.53	18.58	18.51	18.20
フェーズ 1 (0~7 日)	5% ES + 2.5% PP	2.5% PP + 5% CFP	4.5% ES + 5% CFP	10% CFP
ADG、kg	0.134 <sup>a</sup>	0.106 <sup>ab</sup>	0.088 <sup>bc</sup>	0.074 <sup>c</sup>
ADFI、kg	0.162	0.146	0.147	0.136
飼料効率	0.836 <sup>a</sup>	0.731 <sup>ab</sup>	0.604 <sup>bc</sup>	0.538 <sup>c</sup>
フェーズ 2 (8~21 日)	7.5% ES	5 ES + 2.5% CFP	1% ES + 7.5% CFP	10% CFP
ADG、kg	0.285	0.292	0.227	0.267
ADFI、kg	0.433	0.430	0.418	0.404

飼料効率	0.662	0.681	0.663	0.661
フェーズ3 (22~35日)	一般的なトウモロコシ・大豆粕飼料			
ADG, kg	0.554	0.552	0.572	0.566
ADFI, kg	0.837	0.848	0.851	0.859
飼料効率	0.663	0.653	0.672	0.662
全期間 (0~35日)				
ADG, kg	0.362	0.359	0.357	0.348
ADFI, kg	0.541	0.540	0.537	0.533
飼料効率	0.673	0.666	0.666	0.656

<sup>abc</sup> 異付合間に有意差あり (p<0.05)

## 育成～肥育豚に対する CFP 給与試験の概要

サウスダコタ州立大学の Clizer らによる未公表データ (POET 社の許可を得て掲載) によると、低濃度 (10~15%) の CFP (NexPro) を配合した飼料について育成豚 (59.5 kg) における Ile:Lys および Val:Lys 比の影響を評価している。このデータでは、CFP 配合で引き起こされる過剰な Leu による悪影響を防ぐために、大豆粕または結晶性アミノ酸を使用した SID Val および Ile 量の補正が必要であることが示されている。CFP を 10~15% 配合した飼料を給与した豚の発育成績は、対照としたトウモロコシ・大豆粕飼料と同等であったが、より多量の Val および Ile を補給するために CFP 配合飼料に大豆粕を配合することで全般的に対照飼料と同様の発育成績が得られた。したがって、育成豚用飼料に CFP を 10% あるいは 15% 配合しても、結晶アミノ酸の代わりに大豆粕を使用して SID Val および Ile 含量を高めるで、Leu 過剰による発育成績と枝肉組成への悪影響を最小限に抑えることが出来る。

## 結論

CFP は、高エネルギーで消化可能なアミノ酸と P を多く含んでおり、離乳子豚のフェーズ 1 および 2 において最適な飼料原料である。供給源により栄養特性が異なるために、最適な栄養効率および発育成績を得るためには、配合設計時に供給源を知ることが不可欠である。育成飼料に CFP を配合する場合、Lys 含量に対する Thr、Trp、Val および Ile 含量比を計算し、結晶性アミノ酸を補給して発育成績を最適化する必要がある。

## 引用文献

- Acosta, J.P., C.D. Espinosa, N.W. Jaworski, and H.H. Stein. 2021. Corn protein has greater concentrations of digestible amino acids and energy than low-oil corn distillers dried grains with solubles when fed to pigs but does not affect the growth performance of weanling pigs. *J. Anim. Sci.* 99:1-12. doi:10.1093/jas/skab175
- Chapter 1. Nutritional Characteristics of Corn Fermented Protein Co-Products 7

- Cemin, H.S., M.D. Tokach, J.C. Woodworth, S.S. Dritz, J.M. DeRouchey, and R.D. Goodband. 2019. Branched-chain amino acid interactions in growing pig diets. *Transl. Anim. Sci.* 3:1246–1253. doi:10.1093/tas/txz087
- Cristobal, M., J.P. Acosta, S.A. Lee, and H.H. Stein. 2020. A new source of high-protein distillers dried grains with solubles (DDGS) has greater digestibility of amino acids and energy, but less digestibility of phosphorus, than de-oiled DDGS when fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 98:1–9. doi:10.1093/jas/skaa200
- Harris, R.A., M. Joshi, and N.H. Jeung. 2004. Mechanisms responsible for regulation of branched-chain amino acid catabolism. *Biochem. Res. Commun.* 313:391–396. doi:10.1016/j.bbrc.2003.11.007
- Kwon, W.B., K. Touchette, A. Simongiovanni, K. Syriopoulos, A. Wessels, and H.H. Stein. 2019. Excess dietary leucine in diets for growing pigs reduces growth performance, biological value of protein, protein retention, and serotonin synthesis. *J. Anim. Sci.* 97:4282–4292. doi:10.1093/jas/skz259
- Martindale, A., M. Trenhaile-Grannemann, S. Barnett, P. Miller, and T. Burkey. 2018. Growth performance of weaned pigs fed a high-protein corn co-product. *J. Anim. Sci.* 96 (Suppl. S3) :295.
- Mathai, J.K., J.K. Htoo, J.E. Thomson, K.J. Touchette, and H.H. Stein. 2016. Effects of dietary fiber on the ideal standardized ileal digestible threonine:lysine ratio for twenty-five to fifty kilogram growing pigs. *J. Anim. Sci.* 94:4217–4230. doi:10.2527/jas.2016-0680
- NRC. 2012. *Nutrient Requirements of Swine*, 11th rev. Natl. Acad. Press, Washington, D.C.
- Reis, C.E.R., Q. He, P.E. Urriola, G.C. Shurson, and B. Hu. 2018. Effects of modified processes in dry-grind ethanol production on phosphorus distribution in coproducts. *Ind. Eng. Chem. Res.* 57:14861–14869. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b02700>
- Shurson, G.C. 2018. Yeast and yeast derivatives in feed additives and ingredients: Sources, characteristics, animal responses, and quantification methods. *Anim. Feed Sci. Technol.* 235:60–76. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2017.11.010>
- Yang, Z., A. Palowski, J.-C. Jang, P.E. Urriola, and G.C. Shurson. 2021. Determination, comparison, and prediction of digestible energy, metabolizable energy, and standardized ileal digestibility of amino acids in novel maize co-products and conventional dried distillers

grains with solubles for swine. *Anim. Feed Sci. Technol.* 282:115149.  
<https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.115149>

Yang, Z., P.E. Urriola, A.M. Hilbrands, L.J. Johnston, and G.C. Shurson.  
2019. Growth performance of nursery pigs fed diets containing  
increasing levels of a novel high-protein corn distillers dried  
grains with solubles. *Transl. Anim. Sci.* 3:350–358.  
Doi:10.5713/ajas.2010.90513

## 第5章

### 乳牛および肉牛用飼料に対するトウモロコシ発酵たん白質（CFP）の給与

#### 初めに

肉牛および乳牛用飼料への CFP の利用についての広範囲な評価は行われていないが、エネルギーおよびたん白質の消化率は測定されており、育成牛および泌乳中の乳牛に CFP を給与しても問題ないとの結果が報告されている。本章では、一部の CFP の代謝エネルギー（ME）価、正味エネルギー（NE）価、アミノ酸および脂肪酸組成とともに、乾物（DM）、粗たん白質（CP）および中性デタージェント繊維（NDF）の分解性について概説する。

#### 肉牛および乳牛用の飼料原料としての栄養特性

##### 栄養組成

CFP の 1 製品（A+ Pro）、加水分解酵母（Ultramax）、HP-DDG および従来の DDGS 2 製品の DM、NDF および CP の分解率を比較するための *in vitro* 消化試験が行われている（Palowski ら、2021）。加水分解酵母製品の DM 分解率は従来の DDGS と同等であって、CFP および HP-DDG よりも高かった（表 1）。加水分解酵母および CFP の NDF 分解率は HP-DDG および従来の DDGS より低く、加水分解酵母は微粒子であったことから培養中にフィルターバッグから流出したため負の値を示した。ルーメン分解性たん白質（RDP）およびルーメン非分解性たん白質（RUP）は各トウモロコシ併産物間で差がなかった。小腸内分解性たん白質と全消化管可消化たん白質は、加水分解酵母では最も低かったが、それ以外のすべてのトウモロコシ併産物間では差がなかった。さらに、表 2 に示すように、CFP（NexPro）の炭水化物、無機物、脂肪酸およびアミノ酸含量と製品間の変動が調査されている。

表 1. CFP のルーメン内 NDF 分解性と、乾物、たん白質のルーメンおよび小腸内 *in vitro* 分解性（Palowski ら、2021 から引用）

分析値、%	CFP A+Pro	加水分解酵母 Ultramax *	HP-GGDS	GGGS Gakota Gold	DDGS Adsolute Energy
NDF のルーメン分解率 <sup>1</sup>	24	-8	53	62	79
ルーメン分解性 NDF	4	-1	24	16	30
ルーメン非分解性 NDF	14	7	21	10	8
DM の <i>in vitro</i> 総分解率 <sup>2</sup>	86	93	79	90	92
ルーメン非分解性たん白質	57	52	59	55	56
推定小腸分解性たん白質	74	52	80	68	77
ルーメン分解性たん白質 <sup>3</sup>	43	48	41	45	44
小腸で吸収される飼料由来のたん白質 <sup>4</sup>	43	27	47	38	43
総可消化たん白質 <sup>5</sup>	85	75	88	82	87

<sup>1</sup> NDF 分解率は 48 時間のインキュベーション後に測定した

<sup>2</sup> 48 時間のインキュベーション後に測定した *in vitro* 乾物分解率

<sup>3</sup> ルーメン分解性たん白質 = 100 - ルーメン非分解性たん白質

- <sup>4</sup> 小腸から吸収される飼料由来の総たん白質 = ルーメン非分解性たん白質 × 推定小腸内分解性たん白質  
<sup>5</sup> 消化可能な飼料由来総たん白質 = ルーメン分解性たん白質 + 飼料由来の小腸分解性たん白質  
<sup>\*</sup> 負の値は、この製品が微粒子だったためにインキュベーション中にフィルターバッグから流出した可能性が高い

表 1. 同じ工場から入手した CFP (NexPro) の成分組成と変動 (ネブラスカ州フェアモント、POET 社の許可を得て提供されたネブラスカ大学の未公表データから改編)

分析値、DM%	平均値±標準偏差
DM	92.1±2.57
粗たん白質 (CP)	53.6±1.13
水溶性たん白質	4.52±0.82
中性デタージェント不溶性 CP	5.00±2.22
酸性デタージェント不溶性 CP	3.73±1.46
aNDF (α-アミラーゼと亜硫酸ナトリウムを用いて測定)	31.2±3.53
酸性デタージェント繊維 (ADF)	19.2±2.43
リグニン	1.96±0.76
糖	1.25±0.39
でん粉	1.47±0.28
粗脂肪	5.81±0.46
<b>無機物</b>	
粗灰分、%	3.47±0.37
カルシウム (Ca)、%	0.03±0.01
リン (P)、%	0.72±0.16
マグネシウム (Mg)、%	0.22±0.08
カリウム (K)、%	0.52±0.26
イオウ (S)、%	0.71±0.10
ナトリウム (Na)、%	0.12±0.03
塩素 (Cl)、%	0.08±0.01
鉄 (Fe)、mg/kg	120±12.9
マンガン (Mn)、mg/kg	16.7±7.51
亜鉛 (Zn)、mg/kg	116±67.8
銅 (Cu)、mg/kg	3.80±0.98
<b>脂肪酸、DM%</b>	
総脂肪酸	7.17±0.50
C14:0	0.01±0.005
C16:0	1.24±0.09
C16:1	0.01±0.003
C17:0	0.01±0.003
C18:0	0.17±0.01
C18:1ω9	1.63±0.16
C18:2ω6	3.87±0.30
C18:3ω3	0.15±0.01
C20:0	0.02±0.005
C20:1ω9	0.02±0.005
C22:0	0.01±<0.001
C24:0	0.02±0.005
C24:1	0.01±0.007
<b>アミノ酸、DM%</b>	
アルギニン (Arg)	2.29±0.13
ヒスチジン (His)	1.39±0.08
イソロイシン (Ile)	1.83±0.17
ロイシン (Leu)	6.53±0.34
リジン (Lys)	1.99±0.13
メチオニン (Met)	1.34±0.09

フェニルアラニン (Phe)	2.81±.13
トレオニン (Thr)	2.26±0.10
トリプトファン (Trp)	0.62±0.03
バリン (Val)	3.51±0.24
総必須アミノ酸	12.7±0.56
アラニン (Ala)	3.86±0.16
アスパラギン酸 (Asp)	3.96±0.15
シスチン (Cys)	1.23±0.07
グルタミン酸 (Glu)	9.37±0.43
グリシン (Gly)	2.11±0.09
プロリン (Pro)	4.89±0.29
セリン (Ser)	3.00±0.13
チロシン (Tyr)	2.33±0.10
総非必須アミノ酸	30.8±1.26
総アミノ酸	55.3±0.10

### 泌乳中の乳牛に対する CFP 給与試験の概略

泌乳中の乳牛（ジャージー）に、トウモロコシ・サイレージ（40%）、アルファアルファ乾草（18.1%）、粉碎トウモロコシ（14.3%）、大豆粕（加熱褐変処理、2.66%）、大豆皮（8.61%）、油脂（3%）、尿素（0.64%）、ビタミンおよびミネラルプレミックスを配合した飼料中の大豆粕と置き換えて CFP（NexPro）を 0、2.64、5.36 および 8% 配合した。CFP の配合により CP 含量が 16.14% から 16.06% へとわずかに低下し、CFP の粗脂肪含量は大豆粕に比べて高いため飼料中の総脂肪酸含量が増加した。CFP の配合量を増加させても、酸素消費量と二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）およびメタン生成量には影響がなかった（表 3）。しかし、CFP 配合量の増加に伴い、呼吸時の CO<sub>2</sub> 排泄量と酸素摂取量の比で示す呼吸商が二次曲線的に変動した。また、乾物摂取量（DMI）にも二次曲線的な影響がみられ、CFP 配合量の増加に伴い産乳量が直線的に増加した（表 4）。さらに、CFP 配合量の増加に伴い、エネルギー補正乳量（ECM）、DMI あたりの ECM、乳脂率と乳脂量および乳糖率と乳糖量が直線的に有意に高まった（表 4）。乳たん白率と尿素窒素には差はみられなかったが、より多量の CFP を配合すると乳たん白量が直線的に増加する傾向を示した。これらの結果は、CFP を最大 8% まで配合した飼料を乳牛に給与すると、産乳量、乳成分およびエネルギー効率が改善されることを示している。

表 3. CFP（NexPro）の配合量を増加させた場合の泌乳中のジャージー牛における酸素消費量、CO<sub>2</sub> とメタンの生成、呼吸商およびエネルギーの利用（POET 社の許可を得て提供されたネブラスカ大学の未公表データを改編）

測定値	CFP 0%	CFP 2.46%	CFP 5.36%	CFP 8%
ガス、L/日				
酸素摂取量	4,892	4,674	4,779	4,770
CO <sub>2</sub> 産生量	4,995	4,861	4,984	4,869
メタン生産量	436	403	413	402
呼吸商 <sup>b</sup>	1.02	1.04	1.04	1.02
エネルギー、Mcal/kg				
総エネルギー（GE） <sup>a</sup>	4.25	4.26	4.28	4.31

可消化エネルギー (DE)	2.81	2.84	2.83	2.83
代謝エネルギー (ME)	2.48	2.54	2.54	2.53
参入に要する正味エネルギー (NE <sub>L</sub> )	1.60	1.72	1.76	1.72
エネルギー効率				
ME: DE	0.88	0.90	0.90	0.89
NE <sub>L</sub> : ME <sup>a</sup>	0.65	0.68	0.69	0.68

<sup>a</sup> CFP 配合水準間に有意な一次回帰あり (p<0.05)

<sup>b</sup> CFP 配合水準間に有意な二次回帰あり (p<0.05)

表 4. CFP (NexPro) の配合量を増加させた場合の泌乳中のジャージー牛における DM 摂取量、乳量と組成、水分摂取量およびボディ・コンディション・スコア (POET 社の許可を得て提供されたネブラスカ大学の未公表データを改編)

測定値	CFP 0%	CFP 2.46%	CFP 5.36%	CFP 8%
DM 摂取量 <sup>d</sup> , kg/日	19.2	19.9	20.7	19.9
産乳量 <sup>b</sup> , kg/日	27.8	28.6	29.8	29.0
ECM <sup>1,a</sup> , kg/日	34.3	35.7	37.3	37.4
ECM/DM 摂取量 <sup>a</sup>	1.80	1.81	1.81	1.89
乳たん白質, %	3.35	3.43	3.40	3.40
乳たん白質生産量 <sup>b</sup> , kg/日	0.93	0.98	1.01	0.99
乳脂肪 <sup>a</sup> , %	5.05	5.18	5.15	5.47
乳脂肪生産量 <sup>a</sup> , kg/日	1.40	1.46	1.53	1.58
乳糖 <sup>a</sup> , %	4.86	4.89	4.90	4.93
乳糖生産量 <sup>a</sup> , kg/日	1.35	1.40	1.46	1.43
尿素窒素, mg/dL	12.9	13.0	12.8	13.5
水分摂取量 <sup>b,d</sup> , L/日	79.0	90.6	84.7	80.9
体重, kg	436	440	440	439
ボディ・コンディション・スコア	3.05	3.04	3.16	3.04

<sup>1</sup> エネルギー補正乳 (ECM) = 0.327 × 乳量 (kg) + 12.95 × 脂肪 (kg) + 7.20 × 真のタンパク質 (kg)

<sup>a</sup> CFP 配合水準間に有意な一次回帰あり (p<0.05)

<sup>b</sup> CFP 配合水準間に有意な一次回帰あり (p<0.01)

<sup>c</sup> CFP 配合水準間に有意な二次回帰あり (p<0.05)

<sup>d</sup> CFP 配合水準間に有意な二次回帰あり (p<0.01)

## 肉用育成牛に対する CFP 給与試験の概略

Wiseman ら (2020) は、体重 250 kg の交雑種去勢牛を用いてトウモロコシ・サイレージ主体飼料のたん白質補給源として CFP (NexPro)、加熱褐変処理大豆粕 (SoyPass) および大豆粕を 0、4.5、9.0、13.5 および 18% 給与した。その結果、加熱褐変処理大豆粕、CFP および大豆粕を 18% 給与した場合の日増体量は、対照飼料に比べてそれぞれ 56、42 および 32% 高まり、飼料効率はそれぞれ 33、26 および 23% 改善された。これは、CFP、加熱褐変処理大豆粕および大豆粕を肉用育成用のトウモロコシ・サイレージ主体飼料に補給すると発育成績が改善されることを示している、また、CFP および加熱褐変処理大豆を補給した場合には大豆粕に比べて改善効果がより大きかった。これは、CFP および加熱褐変処理大豆の RDP が大豆粕よりも多いことによる。

## 結論

CFP は、泌乳中の乳牛にとって優れた RDP およびエネルギー源であり、最大



8%まで配合することで、産乳量、乳組成およびエネルギー効率を改善することが出来る。肉用育成牛では、CFP、加熱褐変処理大豆あるいは大豆粕をトウモロコシ・サイレージ主体の飼料に補給することで発育成績を高めることが出来、CFP および加熱褐変処理大豆における RDP は大豆粕よりも多くなる。

#### 引用文献

- Kononoff, P. J. Feed characterization and studying the effects of a novel corn milling co-product (NexPro) on milk production, composition and nitrogen and energy utilization in lactating dairy cows. Unpublished study with permission for use granted by POET.
- Palowski, A., Z. Yang, J. Jang, T. Dado, P.E. Urriola, and G.C. Shurson. 2021. Determination of in vitro dry matter, protein, and fiber digestibility and fermentability of novel corn coproducts for swine and ruminants. *Transl. Anim. Sci.* 5:1-14. doi:10.1093/tas/txab055
- Wiseman, A. R., Z.E. Carlson, L. J. McPhillips, A.K. Watson, G.E. Erickson, and S.L. Tilton. 2020. Evaluation of RUP content of Nexpro dried distillers grains plus solubles and their effect on growing calf performance in corn silage based diets. The Board of Regents of the University of Nebraska, Nebraska Beef Cattle Report, p. 38-40.

## 第6章

### 高たん白 DDG (HP-DDG) の飼料原料としての栄養特性と飼料価値

#### 初めに

従来の DDGS の他にも、ソリュブルを含まない、粗たん白質 (CP) 含量が高い HP-DDG を飼料原料として用いた場合の発育成績に関する数多くの試験が行われている。HP-DDG は様々な技術を使用した製品が生産され続けており、製品によって栄養特性が大幅に異なるため、現在米国のエタノール業界で流通している様々なトウモロコシ併産物の中で最も誤解を受けやすい製品群でもある。HP-DDG という名称は、2006～2007 年頃に CP 含量が 27～30% である従来の DDGS と、CP 含量が 36～48% の新しいトウモロコシ併産物を区別するために最初に用いられた。これらの新しいトウモロコシ併産物は、トウモロコシから繊維と粗脂肪の一部を除去することによりたん白質画分を濃縮する様々なプロセスを用いて生産されている。HP-DDG は従来の DDGS とは明らかに異なるトウモロコシ併産物であり、CP 含量がさらに高い (50% 以上) トウモロコシ発酵たん白質 (CFP) としばしば混同されている。CFP の中には CP 含量が一部の HP-DDG と同等の製品もあるが、CFP に含まれている使用済みの酵母の量は 20～27% であるのに対して、HP-DDG では 0～18% である。残念ながら、トウモロコシ併産物の生産者、マーケティング担当者および研究者は、公表文献、ウェブサイト、プレゼンテーション、製品パンフレットおよび製品仕様書等で、これらの併産物に関する情報を発信する際に、適切な用語の注意深い説明や使用を行っていない。このため、飼料の配合設計時に様々な文献からのデータを使用する際には、現在の HP-DDG の栄養特性は過去 15 年間の飼養試験で評価された様々な HP-DDG とは大きく異なることを把握しておくことが求められており、供給者から当該製品に関する正確な情報を入手する必要がある。

HP-DDG の生産に使用されるプロセスに関する技術は 2005 年以降劇的に進化しているが、表 1 に示すように、現在ではほとんど使用されていない古いフロントエンド分別工程を用いて生産された HP-DDG を評価した公表文献が多く存在する。現在、米国内のエタノール工場のいくつかで生産されている HP-DDG はすべて ICM 社の Fiber Separation Technology™ (FST™) というプロセスが用いられており、表 1 に示す文献は様々な動物種に対する HP-DDG の相対的な飼料価値について一般的な指標とはなるものの、現在生産されている HP-DDG の栄養組成、消化率および飼料用途を正確に表すものではない。これを強調するために、表 2 に最近公表された文献中の豚における HP-DDG の栄養特性と消化率を示したが、NRC (2012) に収載されている古いフロントエンド分別工程による HP-DDG は、現在の HP-DDG に比べて CP 含量が高く、粗脂肪 (エーテル抽出物) およびリン (P) 含量が低いことに注意が必要である。

例えば、表 2 に示した NRC (2012) による豚における HP-DDG の栄養特性は、

表 1 に示した多くの文献で評価された HP-DDG のデータを用いたものであり、新たなプロセスを用いて生産されている HP-DDG を評価した最近のデータに比べて CP 含量が比較的高く (45%)、粗脂肪含量は比較的低い (3.5%)。ただし、栄養成分含量、エネルギー価およびアミノ酸と P 消化率には大きなばらつきがあるため、製品の供給源を把握し、使用する製品固有の栄養特性を用いた精密な配合設計を行うことが必須である。

表 1. 現在は使用されていない古い工程により生産された HP-DDG 製品を評価した公表文献

動物種	文献
豚	Widmer ら (2007、2008)
	Gutierrez ら (2009a、b)
	Kim ら (2009)
	Jacela ら (2010)
	Seabolt ら (2010)
	Anderson ら (2012)
	Adeola and Ragland (2012)
	Adeola and Ragland (2016)
	Peterson ら (2014)
	Rajo ら (2016)
家禽	Kim ら (2008、2010)
	Applegate ら (2009)
	Jung and Batal (2009、2010)
	Rochell ら (2011)
	Tangenjaja and Wina (2011)
養殖水産動物	Kim ら (2008、2010)
	Barnes ら (2012a、b)
	Øverland ら (2013)
	Prachom ら (2013)
	Herath ら (2016a、b)
乳牛	Mjoun ら (2009)
	Christen ら (2010)
	Maxin ら (2013a、b)
	Swanepoel ら (2014)

## 現在の HP-DDG の栄養成分と消化率

### 豚

HP-DDG のエネルギーとアミノ酸の消化率の測定のほとんどは豚を用いて行われている (表 2)。HP-DDG の生産には様々なプロセスが用いられているため、CP 含量は 34~43%、リジン (Lys) 含量は 1.0~1.4%、Lys の標準化された回腸消化率 (SID) は 47~76%、総エネルギー (GE) 含量は 4,813~5,296 kcal/kg、可消化エネルギー (DE) 価は 3,352~4,424 kcal/kg と製品間で大きく異なる場合がある。驚くべきことに、DE 価およびアミノ酸含量に比べ、P 含量 (0.40~0.50%) には製品間で大きな差はないが、P の標準化された全消化管消化率 (STTD) の推定値には 48~68% の幅がある (表 2)。アミノ酸の SID 値も製品間で大きく異なり、一般的に 60~89% の範囲にある。ただし、Lys の SID 値は例外的に 47~66%

の幅である。これらの結果は、HP-DDG 各製品の製造業者が、様々な動物種におけるエネルギー効率、可消化アミノ酸および可消化 P 含量を測定し、この情報をユーザーに提供することで、実際の配合設計時における経済的および栄養的価値を最適にする必要があることを示している。

表 2. 最近の公表文献から得られた豚用の HP-DDG 製品の成分組成 (原物値)、エネルギー、アミノ酸および P 消化率の比較

分析値	NRC (2012) <sup>1</sup>	Rho ら (2017) <sup>2</sup>	Rho ら (2017) <sup>2</sup>	Paula ら (2021) <sup>3</sup>	Paula ら (2021) <sup>4</sup>	Espinosa and Stein (2018) <sup>5</sup>	Lee and Stein (2021) <sup>6</sup>
乾物 (DM)、%	91.20	91.9	91.3	89.62	92.30	86.50	87.45
粗たん白質 (CP)、%	45.35	38.9 (61) <sup>7</sup>	39.4 (73)	34.83 (62)	42.93 (67)	37.11 (77)	39.05 (76)
粗脂肪、%	3.54	9.27	8.63	7.80	10.30	*	8.50**
酸分解エーテル抽出物、%	*	*	*	*	*	7.59	8.46
中性デタージェント繊維 (NDF)、%	33.63	29.4	28.4	47.48	37.40	31.87	*
酸性デタージェント繊維 (ADF)、%	20.63	14.6	14.8	19.81	17.53	14.68	*
総食物繊維 (TDF)、%	*	*	*	*	*	34.20	37.6
水溶性食物繊維、%	*	*	*	*	*	2.40	2.2
不溶性食物繊維、%	*	*	*	*	*	31.80	35.4
総エネルギー (GE)、kcal/kg	5,173	4,986	4,935	4,915	5,296	4,825	4,813
可消化エネルギー (DE)、 kcal/kg	4,040	4,130	4,157	3,352	4,060	4,424	3,688
代謝エネルギー (ME)、kcal/ kg	3,732	*	*	3,116	3,757	4,275	3,496
粗灰分、%	2.39	2.40	2.34	3.39	2.81	2.41	1.80
カルシウム (Ca)、%	0.02	0.05	0.06	0.02	0.02	*	<0.10**
リン (P)、%	0.36	0.50	0.47	0.46	0.48	*	0.40**
PのSTTD値、%	73	*	*	68	48	*	*
マグネシウム (Mg)、%	0.09	*	*	0.18	0.01	*	*
ナトリウム (Na)、%	0.06	*	*	0.47	0.09	*	*
カリウム (K)、%	0.37	*	*	0.63	0.41	*	*
銅 (Cu)、mg/kg	2.03	*	*	7.9	7.10	*	*
鉄 (Fe)、mg/kg	65.30	*	*	52.1	112.5	*	*
マンガン (Mn)、mg/kg	7.00	*	*	9.00	9.97	*	*
亜鉛 (Zn)、mg/kg	27.30	*	*	56.40	75.55	*	*
必須アミノ酸、%							
アルギニン (Arg)	1.62 (85)	1.64 (72)	1.66 (79)	1.50 (76)	2.06 (83)	1.63 (87)	1.59 (84)
ヒスチジン (His)	1.07 (79)	1.01 (66)	1.04 (72)	0.89 (66)	1.26 (76)	0.97 (82)	1.00 (75)
イソロイシン (Ile)	1.83 (80)	1.48 (68)	1.50 (75)	1.46 (68)	1.79 (76)	1.59 (82)	1.53 (75)
ロイシン (Leu)	6.18 (86)	4.78 (81)	5.01 (84)	4.38 (72)	5.30 (81)	4.39 (89)	4.92 (86)
リジン (Lys)	1.22 (69)	1.19 (47)	1.20 (56)	1.00 (53)	1.37 (66)	1.43 (76)	1.34 (62)
メチオニン (Met)	0.93 (86)	0.79 (79)	0.82 (83)	0.54 (75)	0.95 (82)	0.70 (87)	0.84 (83)
フェニルアラニン (Phe)	2.42 (84)	2.01 (77)	2.07 (80)	1.86 (72)	2.16 (78)	2.03 (86)	2.00 (80)
トレオニン (Thr)	1.59 (75)	1.45 (60)	1.46 (67)	1.32 (67)	1.66 (76)	1.39 (75)	1.52 (72)
トリプトファン (Trp)	0.24 (82)	-	-	0.22 (71)	0.23 (73)	0.30 (80)	0.42 (81)
バリン (Val)	2.12 (78)	1.92 (69)	1.95 (75)	1.82 (69)	2.37 (76)	2.07 (81)	1.89 (73)
非必須アミノ酸、%							
アラニン (Ala)	3.32 (82)	2.78	2.87	2.65 (72)	3.28 (82)	2.58 (85)	2.83 (80)
アスパラギン酸 (Asp)	2.75 (74)	2.62	2.60	2.72 (64)	3.29 (73)	2.44 (73)	2.64 (73)
シスチン (Cys)	0.82 (78)	0.73	0.78	0.80 (72)	1.09 (82)	0.69 (75)	0.80 (70)
グルタミン酸 (Glu)	7.52 (83)	6.69	6.92	6.21 (70)	7.98 (81)	5.61 (88)	6.83 (82)

グリシン (Gly)	1.39 (70)	1.44	1.43	1.40 (73)	1.77 (93)	1.45 (71)	1.38 (65)
プロリン (Pro)	3.65 (79)	3.29	3.40	3.08 (43)	3.99 (55)	-	3.26 (92)
セリン (Ser)	1.96 (82)	1.89	1.93	1.74 (64)	2.18 (79)	1.46 (82)	1.94 (82)
チロシン (Tyr)	1.92 (85)	-	-	1.45 (70)	1.91 (79)	1.46 (87)	1.59 (86)
総アミノ酸	-	-	-	34.76 (65)	44.39 (68)	35.11 (83)	38.45 (80)
Lys: CP	2.69	3.06	3.05	2.87	3.19	3.85	3.43

1 NRC・豚 (2012) のデータ。

2 ICM 社 (Colwich, KS) によって開発された Fiber Separation Technology™ (FST™) により生産された HP-DDG 2 試料についての Rho ら (2017) のデータ

3 ICM 社 (Colwich KS) によって開発された FST™ により Corn Plus Co-op (ウィネベゴ、ミネソタ州、米国) が生産した HP-DDG についての Paula ら (2021) のデータ

4 ICM 社 (Colwich KS) によって開発された FST™ により FS Bioenergia 社 (Lucas do Rio Verde, MT, ブラジル) が生産した HP-DDG についての Paula ら (2021) のデータ

5 発酵前の溶解度に基づく繊維の機械的分離、発酵後の油脂分離および低温圧縮乾燥を使用して Lincolnway Energy 社 (アイオワ州ネバダ州) が生産した HP-DDG についての Espinosa and Stein (2018) のデータ

6 ICM 社 (Colwich, KS) によって開発された FST™ により生産された HP-DDG (ANDVantage™ 40Y) についての Lee and Stein (2021) の未公表データ、The Andersons 社 (モーミー、オハイオ州) の許可を得て掲載

7 ( ) 内の値は、対応するアミノ酸の SID 値

\* データなし

\*\* 供給業者の成分表示値

表 3 に示すように、HP-DDG のでん粉含量は比較的 low (2.3%)、NDF (41.3%) 含量と TFD (39.7%) 含量は従来の DDGS と同様に高い。DDGS や HP-DDG の繊維含量は比較的高いため、炭水化物分解酵素やプロテアーゼの添加が検討されている (Jang ら、2021) が、HP-DDG でもこれらと同様の膨潤性や水結合能力などの生化学的な反応が得られる可能性がある (表 3)。Boucher ら (2021) は、DDGS および HP-DDG を配合した豚用飼料に複合炭水化物分解酵素製剤 (キシラナーゼ、グルカナーゼ、セルラーゼ、アミラーゼ、インベルターゼおよびプロテアーゼ) を添加した場合の DE 値および ME 値の改善効果について報告している。供試した HP-DDG は、機械的な分離技術 (ICM 社、コルウィッチ、カンザス州、米国) を用いたもので、発酵前に非発酵性繊維の大きな粒子を除去し、単位時間当たりの処理量とエタノール生産量を高めている。ただし、この文献中の HP-DDG の栄養組成は ICM 社の FST™ を用いて生産された典型的な HP-DDG のデータを反映していないことから、名称の誤用や、供試したトウモロコシ併産物の生産プロセスに関する誤解があった可能性がある。それにもかかわらず、この文献による結果は、供試した HP-DDG は DDGS と比べてでん粉含量が約 50% 低く、CP 含量が 20% 高く、水結合能力が 14% 大きく、DE 値が高くなっている (それぞれ 3,896 および 4,405 kcal/kg, DM)。豚における ME 値はそれぞれ 3,494 および 3,872 kcal/kg (DM) であったが、複合炭水化物分解酵素製剤の添加による DE 値および ME 値の改善効果は DDGS および HP-DDG を配合した飼料のいずれでも認められなかった。

表 3. トウモロコシおよび併産物の化学的および物理化学的特性 (Boucher ら、2021 より引用)

特性	トウモロコシ	DDGS	HP-DDG	Dried Corn Bran + Solubles
<b>化学的組成</b>				
乾物 (DM)、%	86.1	89.3	88.9	94.9
総エネルギー (GE)、kcal/kg	3,769	4,600	4,950	4,629
粗たん白質 (CP)、%	6.5	27.1	32.5	19.4
粗脂肪、%	2.7	7.6	9.6	6.8
デンプン、%	67.1	4.5	2.3	7.4
総食物繊維 (TDF)、%	11.2	36.7	39.7	37.0
中性デタージェント繊維 (NDF)、%	12.3	30.5	41.3	33.5
酸性デタージェント繊維 (ADF)、%	3.2	7.1	15.1	7.6
<b>理化学的性状</b>				
嵩比重、g/L	522	507	478	386
膨潤度、L/kg	2.4	3.5	3.6	4.4
水結合能力、g/g	2.1	2.9	3.3	2.9

## 家禽

Fries-Craft & Bobeck (2019) は、HP-DDG のブロイラーにおけるアミノ酸の SID と窒素補正した見かけの代謝エネルギー (AMEn) 価を測定している (表 4)。HP-DDG の CP 含量 (34.1%)、AMEn 価 (2,725 kcal/kg) およびアミノ酸含量は従来の DDGS より高く、アミノ酸の SID 値も Lys、Thr および Cys の 81% から Arg および Leu の 90% と高かった。ANDVantage™ 40Y に関する未公表データ (The Andersons 社の許可を得て掲載) は、Fries-Craft らの報告に比べて CP およびアミノ酸含量が高いが、アミノ酸の消化率は同等であった (表 4)。ANDVantage™ 40Y の窒素補正した真の代謝エネルギー (TMEn) 価も、従来の DDGS よりも大幅に高い。

表 4. HP-DDG の栄養成分とブロイラーにおける AMEn および TMEn 価ならびにアミノ酸の SID 値 (原物値) (Fries-Craft and Bobeck、2019 から引用)

分析値	DDGS <sup>1</sup>	HP-DDG <sup>1</sup>	ANDVantage™40Y <sup>2</sup>
乾物 (DM)、%	89.80	83.10	90.0
粗たん白質 (CP)、%	27.10	34.10	40.4
粗脂肪、%	9.63	7.91	8.50
粗繊維、%	7.85	8.35	8.80
窒素補正した見かけの代謝エネルギー (AMEn)、kcal/kg	2,629	2,725	NR <sup>4</sup>
窒素補正した真の代謝エネルギー (TMEn)、kcal/kg	2,509	NR	3,286
アルギニン (Arg)	1.10	1.49 (90) <sup>3</sup>	1.69 (93) <sup>3</sup>
ヒスチジン (His)	0.62	0.88 (86)	1.15 (88)
イソロイシン (Ile)	1.15	1.26 (84)	1.65 (87)
ロイシン (Leu)	2.40	4.32 (90)	4.93 (94)
リジン (Lys)	0.70	1.16 (81)	1.35 (81)
メチオニン (Met)	0.50	0.74 (89)	0.80 (91)
フェニルアラニン (Phe)	1.35	1.57 (88)	2.11 (91)
トレオニン (Thr)	0.93	1.31 (81)	1.56 (85)
トリプトファン (Trp)	0.20	0.30 (82)	0.30 (88)
バリン (Val)	1.40	1.60 (86)	1.97 (87)
アラニン (Ala)	NR	NR (86)	NR
アスパラギン酸 (Asp)	NR	NR (82)	NR
シスチン (Cys)	0.45	0.58 (81)	NR
グルタミン酸 (Glu)	NR	NR (90)	NR

グリシン (Gly)	0.60	1.25 (NR)	NR
プロリン (Pro)	NR	NR (82)	NR
セリン (Ser)	1.30	1.60 (87)	NR
チロシン (Tyr)	0.80	1.34 (84)	NR
Lys: CP	2.58	3.40	3.34

1 Fries-Craft and Bobeck (2019) による公表データ

2 The Andersons, Maumee (アハイオ) の許可を得て掲載した未公表データ

3 ( ) 内の数値は各アミノ酸の SID 値

4 NR = データなし

## 養殖水産動物

最近、HP-DDG (ANDVantage™ 40Y)、大豆粕および家禽処理副産物における栄養上の違いと、アメリカナマズ用飼料中の大豆粕または家禽処理副産物を HP-DDG で部分的に置き換えた場合の効果に関するデータが公表されている (Nazeer ら、2022)。これら 3 種類の飼料原料の栄養特性を比較して表 5 に示した。家禽処理副産物は、HP-DDG より CP 含量が高く、Leu を除く必須アミノ酸含量も高い。同様に、大豆粕は Leu および Met を除くアミノ酸含量が HP-DDG より高い。このため、養殖水産動物用飼料において HP-DDG を大豆粕および家禽処理副産物と部分的に置き換える場合、最適な発育成績およびフィレ肉の組成を得るためには、合成 Lys、Met、Thr および Trp の補給が必要になる可能性がある。

表 5. 家禽処理副産物、大豆粕および HP-DDG の成分組成 (原物値) (HP-DDG の値は Nazeer ら (2022) より引用)

分析値、%	家禽処理副産物	大豆粕	ANDVantage™40Y <sup>2</sup>
乾物 (DM)	91.05	88.52	90.86
粗たん白質 (CP)	64.59	46.66	42.25
粗脂肪	12.29	0.48	8.48
粗繊維	-	3.59	7.05
粗灰分	9.88	6.47	2.13
<b>必須アミノ酸</b>			
アルギニン (Arg)	4.32	3.49	1.84
ヒスチジン (His)	1.41	1.24	1.18
イソロイシン (Ile)	2.64	2.27	1.88
ロイシン (Leu)	4.55	3.64	5.48
リジン (Lys)	4.11	3.02	1.30
メチオニン (Met)	1.22	0.61	0.86
フェニルアラニン (Phe)	2.57	2.38	2.34
トレオニン (Thr)	2.55	1.83	1.58
トリプトファン (Trp)	0.60	0.64	0.34
バリン (Val)	3.21	2.31	2.30
<b>非必須アミノ酸</b>			
アラニン (Ala)	4.05	2.04	3.19
アスパラギン酸 (Asp)	5.29	5.31	2.86
シスチン (Cys)	0.77	0.69	0.83
グルタミン酸 (Glu)	8.58	9.00	7.17
グリシン (Gly)	5.54	2.00	1.56
ヒドロキシリシン	0.23	0.02	0.00
ヒドロキシオウロリン	1.55	0.11	0.07
プロリン (Pro)	3.59	2.21	3.44

セリン (Ser)	2.53	2.26	1.82
タウリン	0.47	0.12	0.10
チロシン (Tyr)	2.15	1.73	1.79

### 豚に対する HP-DDG 給与試験の概要

Yang ら (2019) は、Lincolnway Energy 社 (ネバダ、アイオワ州) が生産した HP-DDG (37.6%) について、離乳子豚において試験的に推定した ME 価およびアミノ酸の SID 値の使用の可否に関する評価している。離乳後の 1 週間は共通のフェーズ 1 用飼料を給与した後、フェーズ 2 (離乳後 7~21 日) およびフェーズ 3 (離乳後 21~42 日) では、HP-DDG を 0、10、20 および 30% 配合した飼料を給与した。各飼料は、ME 価、可消化 Lys、Met、Thr および Trp 含量ならびに可消化 P 含量が等量となるように調製した。HP-DDG の配合量の増加に伴い、SID-Leu : SID-Lys 比は、フェーズ 2 用飼料では 119% から 173% に、フェーズ 3 用飼料では 120% から 160% に高まった。SID-Ile : SID-Lys 比はフェーズ 2 用飼料では 60~69%、フェーズ 3 用飼料では 54~59%、SID-Val : DID-Lys 比はフェーズ 2 用飼料では 63~79%、フェーズ 3 用飼料では 64~68% であった。HP-DDG の配合量の増加に伴い、フェーズ 2 および 3 における平均日増体量 (ADG)、平均摂取日量 (ADFI) および飼料効率は直線的に低下した。この試験では子豚に対して連鎖球菌と大腸菌を暴露したが、罹患率は各飼料間で差がないものの、HP-DDG を配合した場合の斃死率は HP-DDG を配合していない対照飼料に対して低下する傾向を示した。これらの結果から、HP-DDG の配合割合の増加に伴う発育成績の直線的な低下は、おそらく SID アミノ酸含量の過大評価と、可消化 Val および Ile に対する可消化 Leu の過剰による拮抗作用によるもので、食物繊維摂取量の増加による Thr 必要量が増加した可能性も考えられる。

同様に、Gemin ら (2019b) は、ICM 社のプロセスを用いて生産された HP-DDG の配合量を増加させた場合の (0、10、20、30 または 40%) エネルギー生産量を推定している。HP-DDG の正味エネルギー (NE) 価は、3 つの異なる DE 予測式を用いて推定した。エネルギー効率は、ADFI に飼料 1 kg あたりの推定 NE 価 (kcal) を乗じ、ADG で除して算出した。21 日間の試験期間において HP-DDG の配合量を増加させると、ADG、ADFI および最終体重が直線的に低下した。飼料効率は二次回帰的な傾向を示し、HP-DDG を 40% 配合した飼料で最も優れていた。この結果、HP-DDG のエネルギー効率は、配合量の増加とともに直線的に減少し、DE 価予測式を適用させると HP-DDG の NE 価を過小評価し、エネルギー効率の計算に基づいて推定した HP-DDG の NE 価は、NRC (2012) によるトウモロコシの NE 価の約 97% であると推定している。

4 段階のフェーズにより、HP-DDG を 30% 配合した場合の発育成績、枝肉成績および体脂肪の品質に及ぼす影響について 2 つの試験が行われている (Yang ら、2020)。試験 1 では、比較的低濃度のデオキシニバレノール (DON、1.7 mg/kg)、フモニシン (FUM、0.60 mg/kg) およびゼアラレノン (ZEA、0.2 mg/kg) を含む



IGPC Ethanol 社 (Alymer, Ontario, カナダ) が生産した HP-DDG を供試し、試験 2 では比較的 low 濃度の DON (1.0 mg/kg)、FUM (3.80 mg/kg) および ZEA (0.06 mg/kg) を含む ICM 社 (St. Joseph, ミズーリ州) が生産した HP-DDG を供試した。アメリカ食品医薬品局 (FDA) による「安全な」最大濃度に関するガイドラインでは DON 濃度を 1 mg/kg 以下、FUM 濃度を 5 mg/kg および ZEA 濃度を 1 mg/kg 以下としているが、これらの HP-DDG を 30% 配合しても発育成績に悪影響を及ぼさないと予想された。試験 1 の結果、低濃度の DON、FUM および ZEA を含む HP-DDG を 30% 配合した飼料を 16 週間給与した場合、最初の 8 週間で、トウモロコシ・大豆粕主体の対照飼料に比べて ADG および ADFI が減少した。増体と飼料摂取量の減少が HP-DDG を配合した飼料中の過剰な Leu に由来するか、あるいは、低濃度のカビ毒に由来するかを判断するために、後半の 8 週間では、半数の供試豚に対して、市販のカビ毒低減製品を対照飼料および HP-DDG 30% 配合飼料の両者に添加し、無添加飼料とともに給与試験を続行した。その結果、カビ毒低減製品を添加することで、HP-DDG 30% 配合飼料における発育成績は対照飼料と同等まで回復した。これらのことは、試験期間の前半 8 週間における発育成績の低下は、低濃度の DON、FUM および ZEA による相加的な悪影響であって、Leu 過剰による影響でないことを示している。

試験 2 では、カビ毒低減製品を試験開始時から添加して実施した。その結果、HP-DDG を 30% 配合した飼料では、全期間 (16 週間) の ADG、最終体重、ADFI および飼料効率が低下した (表 6)。さらに、HP-DDG を 30% 配合した飼料では、対照飼料に比べて温屠体重量、枝肉歩留、ロース芯面積、赤味肉除脂肪体重も減少したが、背脂肪厚には影響はなかった (表 6)。また、HP-DDG 配合飼料を給与した場合の体脂肪の多価不飽和脂肪酸含量とヨウ素価は対照飼料を給与した場合より高く、HP-DDG を給与した場合には軟脂となることが示された。これらの結果は、1) カビ毒で汚染された HP-DDG を含む飼料中の低濃度のカビ毒は発育成績を低下させる可能性があるが、カビ毒低減製品の使用によりこれらの悪影響を軽減できること、2) HP-DDG を 30% 配合すると、飼料中の Leu 過剰により Ile および Val の利用を妨げ、飼料摂取量、発育、飼料効率、枝肉特性に悪影響を及ぼし、かつ、3) HP-DDG に含まれるトウモロコシ油の高濃度の不飽和脂肪酸により、30% 配合した場合に軟脂をもたらすことを示している。

表 6. カビ毒低減製品を添加した HP-DDG 30% 配合飼料を給与した場合の肥育豚の発育成績および枝肉形質 (Yang ら、2020 より引用)

測定値	対照		30% HP-DDG + マイコトキシン軽減製品	
開始時体重、kg	22.75		22.74	
終了時体重、kg	133.37 a		126.58 b	
ADG、kg	1.01 a		0.95 b	
ADFI、kg	2.63 a		2.57 b	
飼料効率	0.41 a		0.39 b	
枝肉形質	雌	去勢	雌	去勢
温屠体重量、kg	98.34	98.16	96.07	95.86

枝肉歩留、%	75.55	75.33	74.04	73.78
背脂肪厚、mm	19.75	23.45	20.72	23.22
コース芯面積 <sup>1, 2, 3</sup> 、cm	49.26	44.91	42.58	43.71
除脂肪赤肉 <sup>1, 2, 3</sup> 、%	52.40	49.38	50.10	49.04

<sup>ab</sup> 異付号間に有意差あり (p<0.05)

<sup>1</sup> 飼料間に有意差あり (p<0.01)

<sup>2</sup> 性間に有意差あり (p<0.05)

<sup>3</sup> 飼料×性の交互作用に有意差あり (p<0.01)

HP-DDG の配合量が高い飼料を用いた場合の影響に関する最新の報告が Rao ら (2021) により行われている。この報告では、育成～肥育期の豚に対して、従来の DDGS または HP-DDG (ICM 社) の配合水準 (0、15 および 30%) が異なる飼料を給与した場合の発育成績および枝肉形質を評価している。各飼料の可消化 Lys 含量および NE 価を同等とし、分岐鎖アミノ酸比は、DDGS および HP-DDG 配合飼料中の Leu 過剰に関する Cemin ら (2019) の推定式に基づいて調整した。エネルギー効率 は推定 NE 摂取量を体重増加で除して算出した (Cemin ら、2020)。

その結果、従来の DDGS の配合量を増加させると最終体重が直線的に大幅に減少したが、HP-DDG の配合率を増加させた場合でも最終体重が減少する傾向を示した (表 7)。DDGS または HP-DDG を増加させた場合の最終体重の減少は、育成期において ADG が直線的に減少したことに起因していた。HP-DDG を配合した飼料では、DDGS を配合した飼料より ADFI と飼料効率が高まった。DDGS または HP-DDG の配合割合の増加に伴い、温屠体重および枝肉歩留が直線的に減少した。体脂肪の不飽和脂肪酸と飽和脂肪酸の比率として示されるヨウ素価は、DDGS および HP-DDG の配合割合の増加と対応して直線的に高まった。これらの結果は、HP-DDG を DDGS と同水準で配合した場合の ADG は類似しているが、HP-DDG を用いた場合のほうが飼料効率は高いことを示している。HP-DDG を配合した飼料で体脂肪のヨウ素価が高まった原因は、従来の DDGS の粗脂肪含量 (8.03%) と比べて、HP-DDG の粗脂肪含量 (10.27%) が高かったためと考えられる。

表 7. 従来の DDGS と HP-DDG の配合割合を高めた飼料を給与した場合の育成-肥育豚の発育成績、エネルギー効率および枝肉形質 (Rao ら、2021 より引用)

測定値	対照 (0%)	DDGS		HP-DDG	
		15%	30%	15%	30%
開始時体重、kg	27.1	27.1	27.1	27.1	27.1
終了時体重、kg	130.0	127.3	127.8	129.0	128.0
育成期					
ADG、g	893	879	862	875	852
ADFI、g	1,870	1,840	1,828	1,825	1,721
飼料効率、g/kg	479	479	472	480	497
エネルギー効率、kcal/kg	5,395	5,317	5,322	5,420	5,300
肥育期					
ADG、g	855	833	864	860	870
ADFI、g	2,609	2,604	2,644	2,555	2,510
飼料効率、g/kg	328	321	327	336	347
エネルギー効率、kcal/kg	8,040	8,136	7,890	7,937	7,743
全期間					

ADG、g	876	857	865	870	863
ADFI、g	2,262	2,243	2,259	2,212	2,139
飼料効率、g/kg	388	382	384	394	404
エネルギー効率、kcal/kg	6,747	6,758	6,655	6,699	6,586
枝肉形質					
温屠体重量、kg	94.9	92.5	92.1	94.0	92.0
枝肉歩留、%	73.1	72.6	72.1	72.9	71.9
背脂肪厚、mm	15.9	15.5	15.9	15.8	15.6
ロース芯、mm	67.0	67.0	66.9	67.3	66.7
赤肉、%	57.2	57.5	57.2	57.3	57.4
ヨウ素価、g/100 g	64.8	69.0	73.7	72.9	80.0

### ブロイラーに対する HP-DDG 給与試験の概要

Fries-Craft and Bobeck (2019) は、供給源が不明の HP-DDG (CP : 34%) を配合した飼料のブロイラーにおける AMEn 価、アミノ酸の SID 値および発育成績 (42 日間) を調査している。AMEn 価は 2,725 kcal/kg であり、必須アミノ酸の SID は 81% (Arg および Leu) から 90% (Lys) の範囲にあった。HP-DDGS を 15% および 20% 配合すると増体量と飼料要求率が低下したが、飼料摂取量は HP-DDGS を 10% 配合した飼料と差がなかった (表 8)。この結果は、この HP-DDGS をブロイラー用飼料に最大 10% まで配合できる可能であり、Lys および Arg を補給しなくても発育成績には悪影響がないことを示している。

表 8. 従来の DDGS を 5% 配合した飼料と HP-DDG の配合量を高めた飼料を 42 日間給与した場合のブロイラー (Cobb 500) の発育成績 (Fries-Craft and Bobeck、2019 より引用)

測定値	5% DDGS	10% HP-DDGS	15% HP-DDGS	20% HP-DDGS
開始時体重、g	37.93	37.74	37.40	37.48
前期 (0~14 日)				
14 日齢体重、kg	0.39 <sup>a</sup>	0.39 <sup>a</sup>	0.35 <sup>b</sup>	0.37 <sup>a</sup>
増体量、kg	0.34 <sup>a</sup>	0.35 <sup>a</sup>	0.31 <sup>b</sup>	0.34 <sup>a</sup>
飼料摂取量、kg	0.51 <sup>ab</sup>	0.53 <sup>a</sup>	0.51 <sup>b</sup>	0.53 <sup>a</sup>
飼料要求率	1.49 <sup>c</sup>	1.51 <sup>c</sup>	1.63 <sup>a</sup>	1.58 <sup>b</sup>
中期 (15~35 日)				
35 日齢体重、kg	1.99 <sup>ab</sup>	2.02 <sup>a</sup>	1.91 <sup>c</sup>	1.93 <sup>bc</sup>
増体量、kg	1.61 <sup>ab</sup>	1.64 <sup>a</sup>	1.56 <sup>b</sup>	1.55 <sup>b</sup>
飼料摂取量、kg	2.66 <sup>ab</sup>	2.74 <sup>a</sup>	2.63 <sup>b</sup>	2.70 <sup>ab</sup>
飼料要求率	1.66 <sup>c</sup>	1.67 <sup>bc</sup>	1.69 <sup>b</sup>	1.76 <sup>a</sup>
後期 (35~42 日)				
42 日齢体重、kg	2.70 <sup>a</sup>	2.72 <sup>a</sup>	2.56 <sup>b</sup>	2.58 <sup>b</sup>
増体量、kg	0.70 <sup>a</sup>	0.70 <sup>ab</sup>	0.65 <sup>b</sup>	0.65 <sup>b</sup>
飼料摂取量、kg	1.30 <sup>a</sup>	1.29 <sup>ab</sup>	1.24 <sup>b</sup>	1.26 <sup>ab</sup>
飼料要求率	1.86	1.86	1.91	1.94
全期間 (0~42 日)				
増体量、kg	2.65 <sup>a</sup>	2.68 <sup>a</sup>	2.52 <sup>b</sup>	2.54 <sup>b</sup>
飼料摂取量、kg	4.47 <sup>ab</sup>	4.55 <sup>a</sup>	4.38 <sup>b</sup>	4.49 <sup>ab</sup>
飼料要求率	1.69 <sup>c</sup>	1.70 <sup>c</sup>	1.74 <sup>b</sup>	1.77 <sup>a</sup>

<sup>abc</sup> 異付号間に有意差あり (p<0.05)

Hussain ら (2019) は、HP-DDG (米国産であるが詳細は不明、CP: 43%) を 6.4%

配合し、プロテアーゼ、マンナーゼおよびキシラーゼを組合わせて添加、あるいは3種類すべてを添加した飼料を用いて、ブロイラーの発育成績、栄養素の消化率および腸管の形態に及ぼす影響を調査している。その結果、増体量、飼料摂取量、飼料効率、屠体形質、臓器重量および腸管の形態ならびにエネルギーおよびアミノ酸の消化率には酵素添加の影響はなかった。これらの結果は、この研究で評価された炭水化物分解酵素とプロテアーゼには、ブロイラーの発育成績、栄養素消化率および腸管の形態への改善効果はないことを示している。

### 産卵鶏に対する HP-DDG 給与試験の概要

Foley ら (2022) は、ICM 社の FST™を用いて生産された2種類の新しい HP-DDG (FST 1: CP 40.3%、FST 2: CP 39.1%) を配合した場合の21~45週齢の白色レグホン種産卵鶏における飼料摂取量、産卵成績および AME 価に及ぼす影響を調査している。処理区は、HP-DDG を含まないトウモロコシ・大豆粕主体の対照飼料と、FST1 または FST2 を5、10 または 15%配合した試験飼料で構成した。その結果、産卵成績、卵黄の色調および卵殻強度に給与開始後日数×処理の交互作用が認められた。両 HP-DDG を 15%配合した飼料では、試験後半の数週間で産卵率が改善された。卵黄色調は HP-DDG 配合割合の増加に対応して高まったが、HP-DDG の違いに係わらず日数経過とともに低下した。卵殻強度は、対照飼料および FST 2 を 15%配合した飼料で高値を示したが、HP-DDG の種類および配合量は飼料摂取量、卵重および供試鶏の体重に影響を及ぼさなかった。要約すると、ICM 社の FST™を用いて生産された HP-DDG は産卵鶏用飼料に最大 15%まで配合することが可能であり、飼料摂取量や産卵成績に悪影響を与えることはなく、産卵後期の卵黄色調と産卵成績をわずかに改善できる。

### 養殖水産動物に対する HP-DDG 給与試験の概要

#### ナイルティラピア (*Oreochromis niloticus*)

Hereth ら (2016a) は、トウモロコシたん白濃縮物 (CPC、配合割合: 19.4%)、HP-DDG (同 33.2%)、コーングルテンミール (CGM、同 23.5%) または DDGS (同 52.4%) で、魚粉 (同 21.8%、対照) を完全に置き換えた等窒素飼料をナイルティラピア (*Oreochromis niloticus*) 稚魚 (体重 4.5 g) に 12 週間給与した場合の発育成績および体成分組成への影響を調査している。対照飼料および DDGS を配合した飼料は、すべての飼料中で最も優れた比成長率、飼料摂取量、たん白質蓄積率および生存率を示した (表 9)。これに対して、CGM および CPC を配合した飼料では比成長率、体積膨張率、飼料摂取量、たん白質保持率および生存率が最も低かった。HP-DDG を配合した飼料の比成長率および体積膨張率は低かったが、飼料摂取量とたん白質蓄積率は対照飼料および DDGS を配合した飼料と同程度であった。さらに、HP-DDG を配合した飼料では、対照飼料および DDGS を配合した飼料に比べて全魚体およびフィレ肉の CP 含量が高く、脂質含量も対照飼

料より高かった（表9）。しかし、体指数を表す各指標には各飼料間で差はなかった。この結果は、ナイルティラピア稚魚用飼料において魚粉を様々なトウモロコシ併産物で完全に置き換えると、発育成績や全魚体およびフィレ肉の組成に様々な影響を及ぼすことを示している。供試したトウモロコシ併産物中で、DDGSは発育成績や体組成が最も優れていたが、HP-DDGもCGMおよびCPCに比べて発育成績と全魚体およびフィレ肉のたん白質量が優れていた。

表9. トウモロコシ併産物飼料を12週間給与したナイルティラピア (*Oreochromis niloticus*) の発育成績、魚体インデックスおよびフィレ肉の色調 (Herathら、2016aから引用)

測定値	Control	HP-DDG <sup>1</sup>	DDGS <sup>2</sup>	CGM <sup>3</sup>	CPC <sup>4</sup>
<b>発育成績</b>					
比成長率、%	3.56 <sup>a</sup>	3.30 <sup>b</sup>	3.53 <sup>a</sup>	2.75 <sup>c</sup>	2.63 <sup>d</sup>
体積膨張率	1.21 <sup>a</sup>	1.06 <sup>c</sup>	1.16 <sup>b</sup>	0.81 <sup>d</sup>	0.76 <sup>e</sup>
飼料摂取量、DM g	84.05 <sup>a</sup>	71.05 <sup>a</sup>	81.20 <sup>a</sup>	40.2 <sup>b</sup>	38.80 <sup>b</sup>
飼料要求率	1.00	1.05	1.05	1.00	1.10
たん白効率	3.20	2.99	3.06	3.10	2.84
たん白質蓄率、%	49.62 <sup>a</sup>	46.17 <sup>ab</sup>	46.70 <sup>ab</sup>	42.02 <sup>bc</sup>	38.42 <sup>c</sup>
生存率、%	100.0 <sup>a</sup>	80.6 <sup>bc</sup>	97.2 <sup>ab</sup>	66.6 <sup>c</sup>	75.0 <sup>c</sup>
<b>全魚体組成、% (原物値)</b>					
水分	69.4	68.9	69.7	70.9	71.6
たん白質	15.5 <sup>b</sup>	16.7 <sup>a</sup>	15.4 <sup>b</sup>	14.6 <sup>c</sup>	13.9 <sup>d</sup>
脂質	8.5 <sup>b</sup>	9.9 <sup>a</sup>	10.0 <sup>a</sup>	9.8 <sup>a</sup>	9.6 <sup>a</sup>
灰分	6.9 <sup>a</sup>	5.4 <sup>c</sup>	5.7 <sup>b</sup>	4.0 <sup>e</sup>	5.0 <sup>d</sup>
<b>フィレ肉の組成、% (原物値)</b>					
水分	78.2	76.2	77.2	77.9	78.5
たん白質	18.8 <sup>b</sup>	19.8 <sup>a</sup>	18.3 <sup>b</sup>	19.2 <sup>b</sup>	18.7 <sup>b</sup>
脂質	1.6 <sup>c</sup>	2.4 <sup>b</sup>	3.1 <sup>a</sup>	2.2 <sup>b</sup>	1.9 <sup>bc</sup>
灰分	1.4	1.2	1.3	1.3	1.4
<b>体指数</b>					
内臓指数 <sup>5</sup>	10.8	11.6	12.9	12.1	12.8
肝臓指数 <sup>6</sup>	3.0	2.1	2.7	2.2	2.0
フィレ肉収量 <sup>7</sup> 、%	30.4	30.8	32.4	31.9	28.3
状態係数 <sup>8</sup>	2.0	2.0	2.0	1.8	1.9

abcde 異付号間に有意差あり (p<0.05)

<sup>1</sup> HP-DDG = 高たん白 DDG

<sup>2</sup> DDGS = ディスチラーズ・グレイン・ウィズ・ソリュブル

<sup>3</sup> CGM = コーングルテンミール

<sup>4</sup> CPC = トウモロコシたん白濃縮物

<sup>5</sup> 内臓係数 = 100 × 内臓重量 (g)/体重 (g)

<sup>6</sup> 肝臓係数 = 100 × 肝臓重量 (g)/体重 (g)

<sup>7</sup> フィレ肉収量 = 100 × フィレ肉重量 (g)/体重 (g)

<sup>8</sup> 状態係数 = 100 × 体重 (g)/魚体積 (cm<sup>3</sup>)

Herathら (2016b) は、その後に行われた長期飼育試験において、ナイルティラピア (*Oreochromis niloticus*、体重 21g) を用いた 24 週間の飼養試験中の発育成績、フィレ肉の色調および組成に対するトウモロコシ併産物主体飼料の影響について検討している。この試験で用いた飼料は、魚粉を 10% 配合した対照飼料と、魚粉を含まずに HP-DDG (33.2%)、DDGS (52.4%)、CGM (23.5%) あ

るいは CPC (19.4%) を配合して飼料中のたん白質の 50%量を置き換えた試験飼料 4 種類である。対照飼料、HP-DDG および DDGS を配合した飼料では、CGM および CPC を配合した飼料に比べて増体率、比成長率、平均飼料摂取量、たん白効率が優れ、飼料効率および生存率が高まった (表 10)。しかし、フィレ肉の明度、赤色度、黄色度、粗たん白質および総アミノ酸含量への各トウモロコシ併産物配合の影響はなかった。CGM を配合した飼料ではフィレ肉の脂質および灰分含量が最も高かったが、フィレ肉の脂肪酸組成は飼料間で差が見られた。これらの結果は、魚粉を含まない飼料に HP-DDG または DDGS を飼料中たん白質の最大 50%量まで配合しても、発育成績やフィレ肉の色調への悪影響は見られないが、CGM および CPC を用いた場合に生存率などに悪影響があることを示している。

表 10. HP-DDG、DDGS、CGM および CPC を含む飼料を 24 週間給与した場合のニルティラピア (*Oreochromis niloticus*) の発育成績、体指数、フィレ肉の成分および色調に及ぼす影響 (Herath ら、2016b から引用)

測定値	Control	HP-DDG <sup>1</sup>	DDGS <sup>2</sup>	CGM <sup>3</sup>	CPC <sup>4</sup>
発育成績					
平均増体量、g	162 <sup>a</sup>	161 <sup>a</sup>	161 <sup>a</sup>	88 <sup>b</sup>	75 <sup>b</sup>
比成長率、%	1.27 <sup>a</sup>	1.26 <sup>a</sup>	1.27 <sup>a</sup>	0.96 <sup>b</sup>	0.90 <sup>b</sup>
平均飼料摂取量、g/尾	216 <sup>a</sup>	222 <sup>a</sup>	226 <sup>a</sup>	149 <sup>b</sup>	124 <sup>b</sup>
飼料要求率	1.33 <sup>b</sup>	1.38 <sup>b</sup>	1.40 <sup>b</sup>	1.72 <sup>a</sup>	1.66 <sup>a</sup>
たん白効率	2.31 <sup>a</sup>	2.12 <sup>a</sup>	2.30 <sup>a</sup>	1.69 <sup>b</sup>	1.68 <sup>b</sup>
生存率、%	97.2 <sup>a</sup>	97.2 <sup>a</sup>	97.2 <sup>a</sup>	91.7 <sup>a</sup>	52.7 <sup>b</sup>
体指数					
腹腔内脂肪率	1.88	2.22	1.50	2.02	1.34
肝臓指数	2.70 <sup>b</sup>	2.70 <sup>b</sup>	1.93 <sup>c</sup>	3.45 <sup>a</sup>	2.30 <sup>bc</sup>
内臓指数	9.33	10.92	9.44	11.62	11.50
フィレ肉収量	28.16	27.52	27.34	27.14	26.37
状態指数	2.01 <sup>a</sup>	1.83 <sup>c</sup>	1.89 <sup>bc</sup>	1.94 <sup>b</sup>	1.87 <sup>bc</sup>
フィレ肉の組成					
水分、%	77.85	77.60	77.35	77.30	77.70
粗たん白質、%	19.60	19.60	19.65	19.40	19.35
粗脂肪、%	1.80 <sup>b</sup>	2.05 <sup>ab</sup>	2.20 <sup>ab</sup>	2.35 <sup>a</sup>	2.05 <sup>ab</sup>
粗灰分、%	1.30 <sup>b</sup>	1.30 <sup>b</sup>	1.26 <sup>b</sup>	1.60 <sup>a</sup>	1.50 <sup>ab</sup>
フィレ肉の色調					
L*	47.8	48.0	47.8	41.5	41.8
a*	1.3	0.7	1.2	1.8	2.3
b*	3.2	2.3	2.3	1.3	2.2
彩度 <sup>1</sup>	3.5	2.4	2.7	1.9	3.3
色相角 <sup>2</sup> 、°	67.5	74.0	54.5	53.6	43.3
ΔE <sup>3</sup>	0	1.11	0.97	6.61	6.22

abc 異付号間に有意差あり (p < 0.05)

<sup>1</sup> 彩度 = 色の濃さ

<sup>2</sup> 色相角 = 0° は赤色、90° は黄色

<sup>3</sup> ΔE = 対照飼料と比較した全体的な色の違い

### カイヤン (*Pangasianodon hypophthalmus*)

HP-DDG (CP : 40%、粗脂肪 : 3.1%、粗繊維 : 28.1%、粗灰分 : 2.4%) の HP-DDG を対照飼料中の魚粉と部分的に置き換えて 5.8, 11.6 および 17.4% 配合し

た等窒素、等脂肪および等カロリー飼料を給与した場合のカイヤン (*Pangasianodon hypophthalmus*) の発育成績と経済性を評価した (Allamら、2020)。対照飼料中に含まれる魚粉の 25%量を HP-DDG で置き換えた場合 (配合割合 5.8%) には許容範囲内の成長率および飼料効率が得られたが、HP-DDG 配合量をそれ以上に高めた場合には成長率と飼料効率が直線的に低下した。さらに、HP-DDG 配合量が最も高い場合 (17.4%) には全魚体のたん白質含量が低下し、脂質含量が増加した。HP-DDG を 11.6 および 17.4%配合した場合の発育成績および体組成への悪影響は、Lys、Met およびその他の必須アミノ酸が不十分であったためである可能性が高く、十分な量の結晶アミノ酸を補給することで改善できるものと思われる。

### アメリカナマズ (*Ictalurus punctatus*)

Tidwell ら (2017) は、HP-DDG の配合量 (0、20、40 および 40% + 結晶 Lys) がペレットの特性と発育成績に及ぼす影響について調査している。HP-DDG を 20%配合した飼料における平均収量 (86.8 g) は、HP-DDG を 40%配合した飼料 (57.0 g) および HP-DDG 40% + Lys 添加飼料 (73.7 g) より優れたが、飼料効率および生存率には飼料間に差がなかった。HP-DDG を 40%配合した飼料では Lys 添加の有無にかかわらず全魚体のたん白質含量が対照飼料より低かったが、水分、脂質および灰分含量は差がなかった。HP-DDG の配合割合が高まると、ペレット膨張率が低下し、単位密度とペレット耐久性指数が高まる傾向を示した。これらの結果は、HP-DDG を 20%以上配合する場合に、最適な発育成績およびフィレ肉の組成を得るためには Lys の補給が必要であり、他の必須アミノ酸の補給も必要である可能性を示唆している。しかし、HP-DDG を高水準で配合することによりペレットの耐久性を高めることが出来る。

最近の研究では、アメリカナマズ稚魚用飼料において、HP-DDG (ANDVantage™ 40Y) を家禽処理副産物あるいは大豆粕と置換した場合の影響が調査されている (Nazeer ら、2022)。供試飼料は HP-DDG (0、3.1、6.2 および 9.3%) を家禽処理副産物 (6、4、2 および 0%) と置き換えおよび HP-DDG (5、10、15、20、30 および 40%) を大豆粕 (51.0、46.5、41.9、37.4、28.2 および 19.2%) と置き換えて等窒素 (CP : 32%) および等脂質 (粗脂肪 : 6.5%) とした。試験 1 ではすべての飼料をペレット加工し、アメリカナマズ (*Ictalurus punctatus*、体重 1.8 g) に給与した。試験 2 では、9.3%の HP-DDG を家禽処理副産物と置き換えた飼料を給与した場合の飼料摂取量の低下に及ぼす給餌率の影響を調査した。HP-DDG の配合量と、置き換えたたん白質源 (家禽処理副産物または大豆粕) との間に有意な交互作用が認められた。HP-DDG を家禽処理副産物と置き換えて配合量を高めた場合、特に 9.3%配合した飼料では発育、飼料摂取量、飼料効率および正味たん白質蓄積率が低下したが (表 11)、生存率、全魚体の粗たん白質、粗脂質および灰分含量には飼料間には見られなかった (表 11)。一方、HP-DDG を

大豆粕と部分的に置き換えた場合、HP-DDG の配合割合が 30 および 40%とした飼料を除き、飼料間には発育成績の差はなかった（表 12）。この場合にも、生存率と全魚体の水分、粗たん白質、粗脂質および灰分含量は、HP-DDG の配合量の増加による影響はなかった（表 12）。これらの試験結果は、HP-DDG はナマズ用飼料において優れたたん白質源となるが、大豆粕と部分的に置き換えた場合の発育成績の低下を避けるためには、配合量が 20%を超えないようにする必要がであることを示している。しかし、HP-DDG を家禽処理副産物と完全に置き換えて 9.3%配合した場合には栄養不足による可能性が高い発育成績の低下が生じる。

表 11. HP-DDG (ANDVantage™ 40Y) を家禽処理副産物と部分的に置き換えた飼料を 10 週間給与した場合のアメリカナマズの発育成績および全魚体成分 (Nazeer ら、2022 より引用)

測定値	対照	3.1% HP-DDG	6.2% HP-DDG	9.3% HP-DDG
発育成績				
最終バイオマス、g	479 <sup>a</sup>	445 <sup>ab</sup>	411 <sup>b</sup>	351 <sup>c</sup>
終了時体重、g/尾	24.26 <sup>a</sup>	22.25 <sup>ab</sup>	21.40 <sup>b</sup>	18.02 <sup>c</sup>
増体量、g/尾	22.41 <sup>a</sup>	20.50 <sup>ab</sup>	19.62 <sup>b</sup>	16.18 <sup>c</sup>
増体率、%	1,215 <sup>a</sup>	1,169 <sup>a</sup>	1,103 <sup>a</sup>	882 <sup>b</sup>
乾物摂取量、g/尾	24.35 <sup>a</sup>	23.27 <sup>a</sup>	23.52 <sup>a</sup>	20.50 <sup>b</sup>
飼料要求率	1.09 <sup>c</sup>	1.14 <sup>bc</sup>	1.20 <sup>ab</sup>	1.27 <sup>a</sup>
生存率、%	98.75	100.0	96.25	97.50
正味たん白質蓄積率、%	42.85 <sup>a</sup>	40.43 <sup>ab</sup>	38.47 <sup>ab</sup>	33.90 <sup>b</sup>
全魚体の組成、%				
水分	72.15	72.15	73.12	75.13
CP	14.65	14.40	14.40	13.80
粗脂肪	8.98	9.16	8.42	7.78
粗灰分	2.64	3.17	2.89	2.49

<sup>abc</sup> 異付号間に有意差あり (p<0.05)

表 12. HP-DDG (ANDVantage™ 40Y) を大豆粕と部分的に置き換えた飼料を 10 週間給与した場合のアメリカナマズの発育成績および全魚体成分 (Nazeer ら、2022 より引用)

測定値	HP-DDG 配合割合、%						
	0	5	10	15	20	30	40
発育成績							
最終バイオマス、g	479 <sup>a</sup>	493 <sup>a</sup>	504 <sup>a</sup>	512 <sup>a</sup>	507 <sup>a</sup>	403 <sup>b</sup>	253 <sup>c</sup>
終了時体重、g/尾	24.26 <sup>a</sup>	24.64 <sup>a</sup>	25.18 <sup>a</sup>	25.92 <sup>a</sup>	26.00 <sup>a</sup>	20.15 <sup>b</sup>	12.65 <sup>c</sup>
増体量、g/尾	22.41 <sup>a</sup>	22.85 <sup>a</sup>	23.33 <sup>a</sup>	24.13 <sup>a</sup>	24.19 <sup>a</sup>	18.35 <sup>b</sup>	10.88 <sup>c</sup>
増体率、%	1,215 <sup>a</sup>	1,277 <sup>a</sup>	1,263 <sup>a</sup>	1,349 <sup>a</sup>	1,340 <sup>a</sup>	1,020 <sup>b</sup>	613 <sup>c</sup>
乾物摂取量、g/尾	24.35 <sup>a</sup>	24.24 <sup>bc</sup>	24.83 <sup>ab</sup>	25.30 <sup>ab</sup>	25.65 <sup>a</sup>	23.32 <sup>c</sup>	18.30 <sup>d</sup>
飼料要求率	1.09 <sup>c</sup>	1.06 <sup>c</sup>	1.07 <sup>c</sup>	1.05 <sup>c</sup>	1.06 <sup>c</sup>	1.27 <sup>b</sup>	1.68 <sup>a</sup>
生存率、%	98.75	100.0	100.0	98.75	100.0	100.0	100.0
正味たん白質蓄積率、%	42.85 <sup>a</sup>	42.11 <sup>ab</sup>	44.82 <sup>a</sup>	43.78 <sup>a</sup>	43.65 <sup>a</sup>	35.26 <sup>b</sup>	24.39 <sup>c</sup>
全魚体の組成、%							
水分	72.15	72.47	70.72	71.65	71.55	73.37	73.40
CP	14.65	13.57	15.02	14.05	13.92	13.90	13.15
粗脂肪	8.98	9.31	9.50	9.52	9.86	8.78	8.23
粗灰分	2.64	3.15	3.19	3.31	2.82	2.96	3.21

<sup>abc</sup> 異付号間に有意差あり (p<0.05)



## イエローパーチ (*Perca flavescens*)

Von Eschen ら (2021) は、HP-DDG (CP : 40%) をニシン魚粉 (CP : 72%) と部分的あるいは完全に置き換えて 105 日間飼育している。HP-DDG の置換量は魚粉の 25、50、75 および 100% 量とした。増体、飼料要求率、見かけの CP 消化率および状態指数は、HP-DDG の配合割合と負の相関を示した。魚粉の配合量が減少すると発育成績も低下したが、生存率はすべての飼料で 100% だった。この結果は、HP-DDG をイエローパーチ用飼料に配合する場合、魚粉との置換率を 50% 以下とすべきであり、Lys を補給することで発育成績を改善出来る可能性があることを示している。

## 泌乳中の乳牛に対する HP-DDG 給与試験の概要

Zynda ら (2021) による未公表データによると、乾物摂取量の 20% 量の HP-DDG (ICM 社) を給与した場合の産乳性、栄養素消化率および排泄物からのガス排出量について、酵母給与の有無、または、飼料中のイオンバランス (DCAD) 操作の有無の影響を調査している。大豆粕主体の対照飼料と比べて、HP-DDG を給与した場合には、有機物 (OM) と NDF の消化率が低下し、多価不飽和脂肪酸の含量摂取量の増加と DCAD の低下により産乳量が減少した。陽イオンの補給により HP-DDG 配合飼料の DCAD を高めると乳脂肪の低下が緩和されたが、酵母給与による影響はいずれの測定項目においても見られなかった。さらに、HP-DDG は P とイオウ (S) 含量が比較的高いため、HP-DDG を給与した場合に糞尿中への P および S 排泄量が増加し、硫化水素の排出量も増加した。これらの結果は、泌乳中の乳牛に HP-DDG を多量に給与する場合の乳脂肪の低下を防止するためには DCAD を調整が必要であることを示唆しているが、酵母含量の多い HP-DDG を用いても産乳成績、乳成分、栄養素の消化率および糞尿からのガス排出量は改善できなかった。

## 結論

現在、市場で入手することが出来る HP-DDG は、10~15 年前に生産されて評価された HP-DDG とは栄養特性が大幅に異なっている。このため、精密な配合設計を行って最適な飼育成績を得るためには、供給元から使用する HP-DDG の実際のエネルギー価、可消化アミノ酸および可消化 P 含量などの実際のデータを入手することが不可欠である。理論的には、適切な炭水化物分解酵素とプロテアーゼを豚、家禽および水産養殖動物用飼料に添加すると、HP-DDG を配合した飼料での食物繊維の利用と ME 価が改善される可能性があるが、豚および家禽についての現時点での報告では、効果的な戦略ではないことが示されている。HP-DDG は従来の DDGS に比べて CP および可消化アミノ酸含量が高いものの、Ile と Val に比べて Leu を過剰に含むため HP-DDG の配合量を高めると、離乳子豚および育成

～肥育豚の増体量と飼料摂取量が低下する。したがって、HP-DDG の配合量によっては、増体量および飼料摂取量の減少を克服するために、いくつかの結晶アミノ酸 (Lys、Thr、Trp、Ile、Val など) の補給が必要となる場合がある。ブロイラーと産卵鶏について報告されている限られたデータによると、ブロイラー用飼料では 10%、産卵鶏用飼料では 15%まで配合しても十分な成績が維持できることが示されている。一般に、HP-DDG はナイルティラピアおよびイエローパーチ用の魚粉を含まない飼料の CP の最大 50% 量を置き換えることが出来るように見えるが、発育成績を最適化するためには場合により Lys の補給が必要となる場合がある。カイヤンおよびアメリカナマズでは、HP-DDG を大豆粕と部分的に置き換える場合には配合割合を 20% 以下とすることが推奨され、発育成績を最適化するためには場合により Lys やその他の必須アミノ酸の補給が必要になる。泌乳中の乳牛用飼料に HP-DDG を配合しても産乳成績と乳成分を十分に維持できるが、最適な使用を行うためには、DCAD の調整を考慮する必要がある。

## 引用文献

- AAFCO. 2020. Association of American Feed Control Officials - Official Publication. Champaign, IL.
- Adeola, O., and D. Ragland. 2016. Comparative ileal amino acid digestibility of distillers' grains for growing pigs. *Anim. Nutr.* 2:262– 266. doi: 10.1016/j.aninu.2016.07.008
- Adeola, O., and D. Ragland. 2012. Ileal digestibility of amino acids in coproducts of corn processing into ethanol for pigs. *J. Anim. Sci.* 90:86–88.
- Allam, B. W., H. S. Khalil, A. T. Mansour, T. M. Srour, E. A. Omar, and A. A. M. Nour. 2020. Impact of substitution of FM by high protein distillers grains on growth performance, plasma protein and economic benefit of striped catfish (*Pangasianodon hypophthalmus*). *Aquaculture* 517:734792. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734792>
- Anderson, P. V., B. J. Kerr, T. E. Weber, C. J. Ziemer, and G. C. Shurson. Determination and prediction of digestible and metabolizable energy from chemical analysis of corn coproducts fed to finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 90:1242–1254.
- Applegate, T. J., C. Troche, Z. Jiang, and T. Johnson. 2009. The nutritional value of high-protein corn distillers grains for broiler chickens and its effect on nutrient excretion. *Poult. Sci.* 88:354–359. doi:3382/ps.2008–00346
- Barnes, M. E., M. L. Brown, and K. A. Rosentrater. 2012a. Initial observations on the inclusion of high protein distiller' s dried

- grain into rainbow trout diets. *Open Fish Sci. J.* 5:21–29.
- Barnes, M.E., M.L. Brown, K.A. Rosentrater, and B. Fletcher. 2012b. Replacement of FM with high protein distiller's dried grain in juvenile rainbow trout diets. *J. Aquac. Feed Sci. Nutr.* 4:39–47.
- Batal, A. 2007. Nutrient digestibility of high protein corn distillers dried grains with solubles, dehydrated corn germ and bran. *Poult. Sci.* 86 (Suppl. 1) :206.
- Boucher, M., C. Zhu, S. Holt, and L.-A. Huber. 2021. Physiochemical characterization and energy contents of novel corn ethanol co-product streams, with and without inclusion of a multi-carbohydrase enzyme blend, for growing pigs. *Can. J. Anim. Sci.* 101:353–361. [dx.doi.org/10.1139/cjas-2020-0144](https://doi.org/10.1139/cjas-2020-0144)
- Buenavista, R.M.E., K. Siliveru, and Y. Zheng. Utilization of distiller's dried grains with solubles: A review. *J. Agric. Food Res.* 5:100195. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100195>
- Gemin, H.S., H.E. Williams, M.D. Tokach, S.S. Dritz, J.C. Woodworth, J.M. DeRouchey, R.D. Goodband, K.F. Coble, B.A. Carrender, and M.J. Gerhart. 2020. Estimate of the energy value of SBM relative to corn based on growth performance of nursery pigs. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 11:70. doi:10.1186/s40104-020-00474-x
- Gemin, H.S., M.D. Tokach, S.S. Dritz, J.C. Woodworth, J.M. DeRouchey, and R.D. Goodband. 2019a. Meta-regression analysis to predict the influence of branched-chain and large neutral amino acids on growth performance of pigs. *J. Anim. Sci.* 97:2505–2514. doi:10.1093/jas/skz118
- Gemin, H.S., M.D. Tokach, and S.S. Dritz. 2019b. Evaluating the productive energy content of high-protein distillers dried grains in swine diets. *Kansas Agric. Exp. Sta. Rep.* 5 (8) :1–9. <https://doi.org/10.4148>
- Christen, K.A., D.J. Schingoethe, K.F. Kalscheur, A.R. Hippen, K.K. Karges, and M.L. Gibson. 2010. Response of lactating dairy cows to high protein distillers grains or 3 other protein supplements. *J. Dairy Sci.* 93:2095–2104.
- Cristobal, M., J.P. Acosta, S.A. Lee, and H.H. Stein. 2020. A new source of high-protein distillers dried grains with solubles (DDGS) has greater digestibility of amino acids and energy, but less digestibility of phosphorus, than de-oiled DDGS when fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 98:1–9. doi:10.1093/jas/skaa200

- Espinosa, C.D., and H.H. Stein. 2018. High-protein distillers dried grains with solubles produced using novel front-end-back-end fractionation technology has greater nutritional value than conventional distillers dried grains with solubles when fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 96:1869–1876. doi:10.1093/jas/sky052
- Foley, J., S. Purdum, and M.F. Wilken. 2022. New generation high protein dried distillers grain in White Leghorn laying hens diets. Unpublished abstract provided with permission from ICM, Inc.
- Fries-Craft, K., and E.A. Bobeck. 2019. Evaluation of a high-protein DDGS product in broiler chickens: performance, nitrogen-corrected apparent metabolizable energy, and standardized ileal amino acid digestibility. *Brit. Poultry Sci.* 60: <https://doi.org/10.1080/00071668.2019.1652884>
- Garland, S.A., M.L. Jolly-Breithaupt, H.C. Hamilton, G.E. Erickson, J.C. MacDonald, and R.A. Mass. 2019a. Evaluation of the energy value and nutrient digestibility of distillers grains that have undergone a fiber separation process in finishing diets. *Nebraska Beef Cattle Reports*, 1019, p. 94–96. <https://digitalcommons.unl.edu/animalscinbcr/1019>
- Garland, S.A., B.M. Boyd, F.H. Hilscher, G.E. Erickson, J.C. MacDonald, and R.A. Mass. 2019b. Evaluation of corn bran plus solubles on performance and carcass characteristics in finishing diets. *Nebraska Beef Cattle Reports*, 1020, p. 91–93. <https://digitalcommons.unl.edu/animalscinbcr/1020>
- Garland, S.A., B.M. Boyd, F.H. Hilscher, G.E. Erickson, J.C. MacDonald, and R.A. Mass. 2019c. Evaluation of fractionated distillers grains (high protein and bran plus solubles) on performance and carcass characteristics in finishing diets. *Nebraska Beef Cattle Reports*, 1021, p. 88–90. <https://digitalcommons.unl.edu/animalscinbcr/1021>
- 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) :332
- 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) :136.
- Hanson, A.R., P.E. Urriola, L. Wang, L.J. Johnston, C. Chen, and G.C.

- Shurson. 2016. Dietary peroxidized maize oil affects the growth performance and antioxidant status of nursery pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 216:251–261.
- Hanson, A.R., P.E. Urriola, L.J. Johnston, and G.C. Shurson. 2015. Impact of synthetic antioxidants on lipid peroxidation of distiller's dried grains with solubles and distiller's corn oil under high temperature and humidity conditions. *J. Anim. Sci.* 93:4070–4078.
- Herath, S.S., Y. Haga, and S. Satoh. 2016a. Potential use of corn co-products in fishmeal-free diets for juvenile Nile tilapia *Oreochromis niloticus*. *Fish Sci.* 82:811–818. <https://doi.org/10.1007/s12562-016-1008-6>
- Herath, S.S., Y. Haga, and S. Satoh. 2016b. Effects of long-term feeding of corn co-product-based diets on growth, fillet color, and fatty acid and amino acid composition of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Aquaculture* 464:205–212. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.06.032>
- Hung, Y.T., A.R. Hanson, G.C. Shurson, and P.E. Urriola. 2017. Peroxidized lipids reduce growth performance of poultry and swine: A meta-analysis. *Anim. Feed Sci. Technol.* 231:47–58.
- Hussain, M., M.A. Mirza, H. Nawaz, M. Asghar, and G. Ahmed. 2019. Effect of exogenous protease, mannanase, and xylanase supplementation in corn and high protein corn DDGS based diets on growth performance, intestinal morphology and nutrient digestibility in broiler chickens. *Braz. J. Poult. Sci.* 21:1–10. <https://dx.doi.org/10.1590/1806-9061-2019-1088>
- Jacela, J.Y., J.M. DeRouchey, S.S. Dritz, M.D. Tokach, R.D. Goodband, J.L. Nelssen, R.C. Sulabo, R.C. Thaler, L. Brandts, D.E. Little, and K.J. Prusa. 2011. Amino acid digestibility and energy content of deoiled (solvent extracted) corn distillers dried grains with solubles for swine and effects on growth performance and carcass characteristics. *J. Anim. Sci.* 89:1817–1829. Doi:10.2527/jas.2010-3097
- Jacela, J.Y., H.L. Frobose, J.M. DeRouchey, M.D. Tokach, S.S. Dritz, R.D. Goodband, and J.L. Nelssen. 2010. Amino acid digestibility and energy concentration of high-protein corn dried distillers grains and high-protein sorghum dried distillers grains with solubles for swine. *J. Anim. Sci.* 88:3617–3623.
- Jang, J.-C., Z. Zeng, P.E. Urriola, and G.C. Shurson. 2021. Effects of

- feeding corn distillers dried grains with solubles diets without or with supplemental enzymes on growth performance of pigs: a meta-analysis. *Transl. Anim. Sci.* 5:1–15. doi:10.1093/tas/txab029
- Jung, B., and A.B. Batal. 2010. Evaluation of high protein distillers' dried grains as a feed ingredient for broiler chickens. *Can. J. Anim. Sci.* 90:505–512. Doi:10.4141/cjas10030
- Jung, B., and A. Batal. 2009. The nutrient digestibility of high-protein corn distillers dried grains and the effect of feeding various levels on the performance of laying hens. *J. Appl. Poult. Res.* 18:741–751.
- Kerr, B.J., W.A. Dozier III, and G.C. Shurson. 2016. Lipid digestibility and energy content of distillers' corn oil in swine and poultry. *J. Anim. Sci.* 94:2900–2908.
- Kerr, B.J., T.A. Kellner, and G.C. Shurson. 2015. Characteristics of lipids and their feeding value in swine diets. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 6:30.
- Kim, E.J., C.M. Parsons, R. Srinivasan, and V. Singh. 2010. Nutritional composition, nitrogen-corrected true metabolizable energy, and amino acid digestibilities of new corn distillers dried grains with solubles produced by new fractionation processes. *Poult. Sci.* 89:44–51.
- Kim, B.G., G.I. Petersen, R.B. Hinson, G.L. Allee, and H.H. Stein. 2009. Amino acid digestibility and energy concentration in a novel source of high-protein distillers dried grains and their effects on growth performance of pigs. *J. Anim. Sci.* 87:4013–4021.
- Kim, E.J., C. Martinez-Amezcu, 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. doi:10.3382/ps.2007-003302.
- Maxin, G., D.R. Ouellet, and H. Lapierre. 2013. Ruminal degradability of dry matter, crude protein, and amino acids in SBM, canola meal, corn, and wheat dried distillers grains. *J. Dairy Sci.* 96:5151–5160.
- Maxin, G., D.R. Ouellet, and H. Lapierre. 2013. Effect of substitution of SBM by canola meal or distillers grains in dairy rations on amino acid and glucose availability. *J. Dairy Sci.* 96:7806–7817.
- Mjoun, K., K.F. Kalscheur, A.R. Hippen, D.J. Schingoethe, and D.E. Little. 2010a. Lactation performance and amino acid utilization of cows fed increasing amounts of reduced-fat dried distillers grains with

- solubles. *J. Dairy Sci.* 93:288–303. doi:10.3168/jds.2009–2377
- Mjoun, K., K.F. Kalscheur, A.R. Hippen, and D.J. Schingoethe. 2010b. Performance and amino acid utilization of early lactation dairy cows fed regular or reduced-fat dried distillers grains with solubles. *J. Dairy Sci.* 93:3176–3191. doi:10.3168/jds.2009–2974
- Mjoun, K., K.F. Kalscheur, A.R. Hippen, and D.J. Schingoethe. 2010c. Ruminal degradability and intestinal digestibility of protein and amino acids in soybean and corn distillers grains products. *J. Dairy Sci.* 93:4144–4154. doi:10.3168/jds.2009–2883
- Mjoun, K., K. F. Kalscheur, A. R. Hippen, and D.J. Schingoethe. 2009. 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.
- Nazeer, S., D.C. Fornari, H.S.C. Galkanda–Arachchige, S. Tilton, and D.A. Davis. 2022. Use of high protein distiller’ s dried grain with yeast in practical diets for the channel catfish, *Ictalurus punctatus*. *Aquaculture* 546:737387. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737387>
- Noblet, J., H. Fortune, X.S. Shi, and S. Dubois. 1994. Prediction of net energy value of feeds for growing pigs. *J. Anim. Sci.* 86:2180–2189.
- Noblet, J., and J.M. Perez. 1993. Prediction of digestibility of nutrients and energy values of pig diets from chemical analysis. *J. Anim. Sci.* 71:3389–3398.
- Øverland, M., Å. Krogdahl, G. Shurson, A. Skrede, and V. Denstadli. 2013. Evaluation of distiller’ s dried grains with solubles (DDGS) and high protein distiller’ s dried grains (HPDDG) in diets for rainbow trout ( *Oncorhynchus mykiss* ) . *Aquaculture* 416–417:201–208. <https://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.09.016>
- Petersen, G. I., Y.Liu, and H.H. Stein. 2014. Coefficient of standardized ileal digestibility of amino acids in corn, SBM, corn gluten meal, high-protein distillers dried grains, and field peas fed to weanling pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 188:145–149.
- Prachom, N., Y. Haga, and S. Satoh. 2013. Impact of dietary high protein distillers dried grains on amino acid utilization, growth response, nutritional health status and waste output in juvenile rainbow trout ( *Oncorhynchus mykiss* ) . *Aquac. Nutr.* 19:62–71. <https://doi.org/10.1111/anu.12049>
- Rao, Z.-X., R. D. Goodband, M. D. Tokach, S. S. Dritz, J. C. Woodworth, J. M.

- DeRouchey, H. I., Calderone, and M. F. Wilken. 2021. Evaluation of high-protein distillers dried grains on growth performance and carcass characteristics of growing-finishing pigs. *Transl. Anim. Sci.* 5:1-9. doi:10.1093/tas/txab038
- Rho, Y., C. Zhu, E. Kiarie, and C.F.M. de Lange. 2017. Standardized ileal digestible amino acids and digestible energy contents in high-protein distiller's dried grains with solubles fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 85:3591-3597. <https://doi.org/10.2527/jas.2017.1553>
- Rochell, S.J., B.J. Kerr, and W.A. Dozier, III. 2011. Energy determination of corn co-products fed to broiler chicks from 15 to 24 days of age, and use of composition analysis to predict nitrogen-corrected apparent metabolizable energy. *Poult. Sci.* 90:1999-2007. doi:10.3382/ps.2011-01468
- Rajo, A., M. Ellis, E.B. Gaspar, A.M. Gaines, B.A. Peterson, F.K. McKeith, and J. Killefer. 2016. Effects of dietary inclusion level of distillers dried grains with solubles (DDGS) and high-protein distillers dried grains (HP-DDG) on the growth performance and carcass characteristics of wean-to-finish pigs. *J. Anim. Sci* abstract doi: 10.2527/msasas2016-187 p. 88
- Seabolt, B.S., E. van Heugten, S.W. Kim, K.D. Ang-van Heugten, and E. Roura. 2010. Feed preferences and performance of nursery pigs fed diets containing various inclusion amounts and qualities of distillers coproducts and flavor. *J. Anim. Sci.* 88:3725-3738.
- Shurson, G.C, B.J. Kerr, and A.R. Hanson. 2015. Evaluating the quality of feed fats and oils and their effects on pig growth performance. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 6:10.
- Soares, J.A., H.H. Stein, V. Singh, G.C. Shurson, and J.E. Pettigrew. 2012. Amino acid digestibility of corn distillers dried grains with solubles, liquid condensed solubles, pulse dried thin stillage, and syrup balls fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 90:1255-1261.
- Swanepoel, N., P.H. Robinson, and L.J. Erasmus. 2014. Determining the optimal ratio of canola meal and high protein dried distillers grain protein in diets of high producing Holstein dairy cows. *Anim. Feed Sci. Technol.* 189:41-53.
- Tangendjaja, B., and E. Wina. 2011. Feeding value of low and high protein dried distillers grains and corn gluten meal for layer. *Media Peternakan* 34:133-139. <https://doi.org/10.5398/medpet.2011.34.2.133>
- Tidwell, J., S. Coyle, L. Bright, L. Pires, and K. Rosentrater. 2017.



- Effects of varying levels of high-protein distillers grains on growth performance of channel catfish, *Ictalurus punctatus*, and post-extrusion feed pellet characteristics. *J. World Aquac. Soc.* 48:426–434. <https://doi.org/10.1111/jwas.12374>
- Von Eschen, A.J., M.L. Brown, and K. Rosentrater. 2021. Effect of increasing dietary high protein distillers dried grains on yellow perch *Perca flavescens* performance. *J. Appl. Aquac.* <https://doi.org/10.1080/10454438.2021.1885558>
- Widmer, M.R., 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.
- 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.
- Wiseman, J., J. Powles, and F. Salvador. 1998. Comparison between pigs and poultry in the prediction of dietary energy value of fats. *Anim. Feed Sci. Technol.* 71:1–9.
- Yang, Z., P.E. Urriola, A. Hilbrands, L.J. Johnston, and G.C. Shurson. 2020. Effects of feeding high-protein corn distillers dried grains and a mycotoxin mitigation additive on growth performance, carcass characteristics, and pork fat quality of growing-finishing pigs. *Transl. Anim. Sci.* 4:1–16. [doi:10.1093/tas/txaa051](https://doi.org/10.1093/tas/txaa051)
- Yang, Z., P.E. Urriola, A.M. Hilbrands, L.J. Johnston, and G.C. Shurson. 2019. Growth performance of nursery pigs fed diets containing increasing levels of a novel high-protein corn distillers dried grains with solubles. *Transl. Anim. Sci.* 3:350–358. [doi:10.1093/tas/txy101](https://doi.org/10.1093/tas/txy101)
- Zynda, H.M., J.E. Copelin, L.R. Rebelo, W.P. Weiss, M. Wilken, and C. Lee. 2021. Effects of high-protein corn distillers' grains with and without yeast or manipulation of dietary cation and anion difference on production, nutrient digestibility, and gas emissions from manure in lactating dairy cows. Unpublished but included with permission from ICM, Inc.

## 第7章

### 養殖水産動物用飼料および産卵鶏用飼料における トウモロコシたん白濃縮物（CPC）の栄養特性および飼料価値

#### 初めに

歴史的に、魚粉は養殖水産動物用飼料に使用される「ゴールド・スタンダード」で、粗たん白質（CP）含量が高い飼料原料であるが、今後も継続的に使用して行くことが難しい状況にある（Naylor ら、2009）。このため、魚粉に代わる適切な飼料原料の探索が不可欠であり、一般的に、穀物、油糧種子および豆類からのたん白濃縮物が有力な代替品であると考えられている。残念なことに、魚粉配合量が少なく、CPC や DDGS などの植物由来の代替たん白質原料の配合量が高く、アミノ酸を含むすべての既知の必須栄養素の要求量が充足されているようにみなされる飼料を給与した場合、特に肉食魚の場合には最適な発育成績やたん白効率が得られない可能性がある（Gomes ら、1995; Davies ら、1997; Refstie ら、2000; Martin ら、2003; Gómez-Requeni ら、2004）。植物性たん白質源を比較的多量に給与した魚類における発育成績の低下には、飼料摂取量の減少；抗栄養因子、アナボリック・ステロイドおよび植物性エストロゲンの供給；未確認の栄養素の不足；必須アミノ酸の不均衡を含むいくつかの潜在的な要因がある（Gatlin ら、2007; Glencross ら、2007; Krogdahl ら、2010）。適切な発育成績が得られない最も可能性が高い要因は、植物主体のたん白質源によってもたらされる可消化アミノ酸の不足である。可消化アミノ酸の不足を是正するためには、CPC などのトウモロコシ併産物を含む植物主体のたん白質源を配合したすべての飼料に結晶アミノ酸を補給する必要がある。さらに、Brezas and Hardy (2020) は、植物主体のたん白原料の原動力は、最終的に発育に影響を及ぼす可能性があるアミノ酸の消化と吸収の同期性と均一性により影響を受ける可能性があることを示唆している。したがって、養殖水産動物用飼料に CPC などの CP 含量が高いトウモロコシ併産物を配合して最適な発育およびフィレ肉の組成を得るためには、魚粉の利用に頼るだけでなく、栄養上の課題は残っているものの、適切な量の合成アミノ酸を補給することで克服出来る可能性がある。

#### AAFCO による CPC の定義

CPC の CP 含量は 80% であり、この点で他のすべてのトウモロコシ併産物と異なっている。乾式粉碎方式のエタノール工場生産されるトウモロコシ発酵たん白質（CFP）や高たん白 DDG（HP-DDG）で用いられる製造工程とは異なり、CPC の製造には独自の湿式粉碎方式が用いられている。CPC は、米国の Cargill Corn Milling 社で生産され Empyreal® 75 という製品名で販売されている。さらに改良されたプロセスを用いて生産されたリジン（Lys）含量が高くアミノ酸組成が改善された Lysto™ という製品も存在する（Yu ら、2013）。CPC は CP 含量が非常

に高く、全ての魚種における養分要求量を充足させるために必要な高い飼料中 CP とアミノ酸含量を維持しながら、養殖水産動物飼料中の魚粉（CP：64%）を部分的あるいは完全に置き換えることが可能な飼料原料として大きな関心を集めている。米国飼料検査官協会（AFFCO）では、CPC を次のように定義している。

#### 48.89 Corn Protein Concentrate

「CPC は、湿式粉碎方式の工程から得られるたん白質画分を酵素により可溶化して非たん白質成分の大部分を除去したもので、主に胚乳に由来するトウモロコシの乾燥たん白質画分である。トウモロコシのたん白質画分のたん白質含量は乾物換算で 80%以上、でん粉含量は 1%以下でなければならない。製品には「原物換算」で表示されたラベルを付ける必要がある。この画分には、発酵したトウモロコシの抽出物、トウモロコシ胚芽粉およびその他の非たん白質成分を含んではならない。粉塵を減らすために、植物油または AAFCO の公式刊行物(Official Publication)のセクション 87 で定義しているその他の適切な成分を 3%以下の濃度で添加することができる。防カビ剤を使用する場合は追加成分としてその名称を表示する必要がある。」

このように、CPC には主にトウモロコシの胚乳由来のたん白質が含まれているため、他のトウモロコシ併産物と比べて粗繊維と粗灰分の含量が著しく低い。さらに、CPC には CFP が含んでいるような酵母は含まれていない。

### CPC の栄養特性

CPC の栄養特性に関する公表データは少ないが、Empyreal® 75 に関するいくつかの仕様書と情報がオンラインで入手できる ([https://agripermata.com/brochure/commodity/corn\\_protein\\_concentrate/brochure2.pdf](https://agripermata.com/brochure/commodity/corn_protein_concentrate/brochure2.pdf))。Yu ら (2013) は、2 製品の CPC の成分組成をメンハーデン魚粉、脱皮大豆粕およびコーングルテンミール (CGM) と比較している (表 1)。CPC の CP 含量は、魚粉 (64%)、CGM (65%) および脱皮大豆粕 (50%) よりもはるかに高く、大豆粕および魚粉に比べて Lys およびトリプトファン (Trp) 含量が低い。さらに、CPC および CGM には、イソロイシン (Ile)、バリン (Val) および Trp の利用を妨げるロイシン (Leu) 含量が著しく高い。本ハンドブックの第 1 章において、単胃動物用飼料中におけるすべてのトウモロコシ併産物由来のトウモロコシたん白質のアミノ酸組成の不均衡を管理する手法を概説している。

表 1. 2 製品の CPC の成分組成 (原物値) と、メンハーデン魚粉、脱皮大豆粕およびコーングルテンミール (CGM) の比較 (Yu ら、2013 より引用)

分析値、%	魚粉	脱皮大豆粕	CGM	CPC (Empyreal®) <sup>1</sup>	CPC (Lysto™) <sup>1</sup>
乾物 (DM)	90.61	88.36	91.59	90.16	88.39
CP	64.3	49.9	64.8	79.7	79.8
粗脂肪	10.7	1.19	0.46	2.36	2.58

酸性デタージェント繊維 (ADF)	-	2.83	2.82	9.8	7.5
粗灰分	15.1	5.34	6.63	0.91	0.91
<b>必須アミノ酸</b>					
アルギニン (Arg)	4.99	3.26	2.03	2.11	2.16
ヒスチジン (His)	2.21	1.16	1.30	2.05	1.40
イソロイシン (Ile)	3.10	1.86	2.51	2.36	2.99
ロイシン (Leu)	5.50	3.36	10.04	10.40	11.95
リジン (Lys)	6.04	2.81	1.03	1.37	5.66
メチオニン (Met)	1.47	0.82	1.45	1.77	1.67
フェニルアラニン (Phe)	2.97	2.16	3.88	5.00	4.57
トレオニン (Thr)	3.46	1.56	2.02	2.42	2.19
トリプトファン (Trp)	1.10	NR <sup>2</sup>	0.34	0.55	0.37
バリン (Val)	4.09	1.78	3.03	2.85	3.29
<b>非必須アミノ酸</b>					
アラニン (Ala)	6.45	1.72	5.32	8.26	6.17
アスパラギン酸 (Asp)	6.84	6.55	3.72	3.89	4.10
シスチン (Cys)	0.43	0.88	1.10	1.28	1.27
グルタミン酸 (Glu)	9.70	9.64	12.89	14.20	14.06
グリシン (Gly)	6.05	1.89	1.79	1.84	1.83
プロリン (Pro)	4.48	2.36	5.82	7.42	6.78
セリン (Ser)	3.37	1.95	2.97	3.53	2.78
チロシン (Tyr)	2.50	1.49	3.08	3.74	3.75

<sup>1</sup> Cargill Corn Milling (Cargill, Inc., Blair, NE)

<sup>2</sup> データなし

### ナイルティラピア (*Oreochromis niloticus*) に対する給与試験の概要

養殖水産動物用飼料への CPG の利用に関する公表文献における対象魚のほとんどはナイルティラピア (*Oreochromis niloticus*) である。最初の研究は Herath ら (2016a) によって行われており、CPG (配合割合: 19.4%)、HP-DDG (同 33.2%)、CGM (同 23.5%) あるいは DDGS (同 52.4%) を魚粉 (同 21.8%) と完全置換した等窒素飼料をナイルティラピア (*Oreochromis niloticus*) 稚魚 (体重 4.5 g) に 12 週間給与した場合の発育成績と体成分組成に及ぼす影響を調査している。魚粉を 21.8% 配合した対照飼料および DDGS を 52.4% 配合した飼料では、全ての飼料中で比成長率、飼料摂取量、たん白質蓄積率および生存率が最も優れた (表 2)。これに対して、CGM および CPG を配合した飼料では、比成長率、熱成長率、飼料摂取量、たん白質蓄積率および生存率が最も低かった。CGM および CPG 飼料を給与されたティラピアのたん白質蓄積率の低下は、全魚体の CP 含量の低下を反映していたが、フィレ肉の CP 含量には反映されなかった (表 2)。トウモロコシ併産物を配合した飼料では、対照飼料に比べて全魚体の粗脂肪含量が高く、粗灰分含量が低かったが、測定された各体指標への影響はみられなかった。この結果は、ナイルティラピアの稚魚用飼料中の魚粉を様々なトウモロコシ併産物で完全置換すると、発育成績、全魚体およびフィレ肉の組成に様々な影響を及ぼすことを示している。供試したトウモロコシ併産物中で、DDGS は発育成績および体成分組成が最も優れたが、CPG は発育成績が最も劣った。

表 2. トウモロコシ併産物を配合した飼料を 12 週間給与したナイルティラピア

(Oreochromis niloticus) の発育成績、魚体成分およびフィレ肉の色調 (Herath ら、2016a から引用)					
測定値	対照	HP-DDG <sup>1</sup>	DDGS <sup>2</sup>	CGM <sup>3</sup>	CPC <sup>4</sup>
発育成績					
比成長率、%	3.56 <sup>a</sup>	3.30 <sup>b</sup>	3.53 <sup>a</sup>	2.75 <sup>c</sup>	2.63 <sup>d</sup>
体積膨張率	1.21 <sup>a</sup>	1.06 <sup>c</sup>	1.16 <sup>b</sup>	0.81 <sup>d</sup>	0.76 <sup>e</sup>
飼料摂取量、DM g	84.05 <sup>a</sup>	71.05 <sup>a</sup>	81.20 <sup>a</sup>	40.2 <sup>b</sup>	38.80 <sup>b</sup>
飼料要求率	1.00	1.05	1.05	1.00	1.10
たん白効率	3.20	2.99	3.06	3.10	2.84
たん白質蓄率、%	49.62 <sup>a</sup>	46.17 <sup>ab</sup>	46.70 <sup>ab</sup>	42.02 <sup>bc</sup>	38.42 <sup>c</sup>
生存率、%	100.0 <sup>a</sup>	80.6 <sup>bc</sup>	97.2 <sup>ab</sup>	66.6 <sup>c</sup>	75.0 <sup>c</sup>
全魚体組成、% (原物値)					
水分	69.4	68.9	69.7	70.9	71.6
たん白質	15.5 <sup>b</sup>	16.7 <sup>a</sup>	15.4 <sup>b</sup>	14.6 <sup>c</sup>	13.9 <sup>d</sup>
脂質	8.5 <sup>b</sup>	9.9 <sup>a</sup>	10.0 <sup>a</sup>	9.8 <sup>a</sup>	9.6 <sup>a</sup>
灰分	6.9 <sup>a</sup>	5.4 <sup>c</sup>	5.7 <sup>b</sup>	4.0 <sup>e</sup>	5.0 <sup>d</sup>
フィレ肉の組成、% (原物値)					
水分	78.2	76.2	77.2	77.9	78.5
たん白質	18.8 <sup>b</sup>	19.8 <sup>a</sup>	18.3 <sup>b</sup>	19.2 <sup>b</sup>	18.7 <sup>b</sup>
脂質	1.6 <sup>c</sup>	2.4 <sup>b</sup>	3.1 <sup>a</sup>	2.2 <sup>b</sup>	1.9 <sup>bc</sup>
灰分	1.4	1.2	1.3	1.3	1.4
体指数					
内臓指数 <sup>5</sup>	10.8	11.6	12.9	12.1	12.8
肝臓指数 <sup>6</sup>	3.0	2.1	2.7	2.2	2.0
フィレ肉収量 <sup>7</sup> 、%	30.4	30.8	32.4	31.9	28.3
状態係数 <sup>8</sup>	2.0	2.0	2.0	1.8	1.9

abcde 異付号間に有意差あり (p<0.05)

<sup>1</sup> HP-DDG = 高たん白 DDG

<sup>2</sup> DDGS = ディスチラーズ・グレイン・ウィズ・ソリュブル

<sup>3</sup> CGM = コーングルテンミール

<sup>4</sup> CPC = トウモロコシたん白濃縮物

<sup>5</sup> 内臓係数 = 100 × 内臓重量 (g)/体重 (g)

<sup>6</sup> 肝臓係数 = 100 × 肝臓重量 (g)/体重 (g)

<sup>7</sup> フィレ肉収量 = 100 × フィレ肉重量 (g)/体重 (g)

<sup>8</sup> 状態係数 = 100 × 体重 (g)/魚体積 (cm<sup>3</sup>)

Herath ら (2016b) は、その後に行われた長期飼育試験において、ナイルティラピア (*Oreochromis niloticus*、体重 21g) を用いた 24 週間の飼養試験中の発育成績、フィレ肉の色調および組成に対するトウモロコシ併産物主体飼料の影響について検討している。この試験で用いた飼料は、魚粉を 10% 配合した対照飼料と、魚粉を含まずに HP-DDG (33.2%)、DDGS (52.4%)、CGM (23.5%) あるいは CPC (19.4%) を配合して飼料中のたん白質の 50% 量を置き換えた試験飼料 4 種類である。魚粉を含む対照飼料、HP-DDG および DDGS を配合した飼料では、CGM および CPC を配合した飼料に比べて平均増体量、比成長率、平均飼料摂取量、たん白効率が優れ、飼料効率および生存率が高まった (表 3)。しかし、フィレ肉の明るさ (L\*)、赤色度 (a\*)、黄色度 (b\*)、CP および総アミノ酸含量には各トウモロコシ併産物の影響はなかった。CGM を配合した飼料におけるフィレ肉の粗脂肪および粗灰分含量は最も高かったが、フィレ肉の脂肪酸組成は飼料により異っていた。この結果は、HP-DDG または DDGS を、魚粉を含まない飼料

に飼料中 CP の 50% 量まで配合しても、発育成績やフィレ肉の色調への悪影響はないが、CGM および CPC を配合した飼料では発育成績に悪影響を及ぼすことを示している。

表 3. トウモロコシ併産物を配合した飼料を 24 週間給与した場合のニルティラピア (*Oreochromis niloticus*) の発育成績、体指数およびフィレ肉の色調 (Herath ら、2016b より引用)

測定値	対照	HP-DDG	DDGS	CGM	CPC
<b>発育成績</b>					
平均増体量、g	162.2 <sup>a</sup>	160.7 <sup>a</sup>	161.4 <sup>a</sup>	88.3 <sup>b</sup>	74.9 <sup>b</sup>
比成長率、%	1.27 <sup>a</sup>	1.26 <sup>a</sup>	1.27 <sup>a</sup>	0.96 <sup>b</sup>	0.90 <sup>b</sup>
平均飼料摂取量、g/尾	216.2 <sup>a</sup>	222.2 <sup>a</sup>	225.5 <sup>a</sup>	148.8 <sup>b</sup>	124.1 <sup>b</sup>
飼料要求率	1.33 <sup>b</sup>	1.38 <sup>b</sup>	1.40 <sup>b</sup>	1.72 <sup>a</sup>	1.66 <sup>a</sup>
たん白効率	2.31 <sup>a</sup>	2.12 <sup>a</sup>	2.30 <sup>a</sup>	1.69 <sup>b</sup>	1.68 <sup>b</sup>
生存率、%	97.2 <sup>a</sup>	97.2 <sup>a</sup>	97.2 <sup>a</sup>	91.7 <sup>a</sup>	52.7 <sup>b</sup>
<b>体指数</b>					
腹腔内脂肪率	1.99	2.22	1.50	2.02	1.34
肝臓指数	2.70 <sup>b</sup>	2.70 <sup>b</sup>	1.93 <sup>c</sup>	3.45 <sup>a</sup>	2.30 <sup>bc</sup>
内臓指数	9.33	10.92	9.44	11.62	11.50
フィレ肉収量	28.16	27.52	27.34	27.14	26.37
状態指数	2.01 <sup>a</sup>	1.83 <sup>c</sup>	1.89 <sup>bc</sup>	1.94 <sup>b</sup>	1.87 <sup>bc</sup>
<b>フィレ肉の色調</b>					
L*	47.8	48.0	47.8	41.5	41.8
a*	1.3	0.7	1.2	1.8	2.3
b*	3.2	2.3	2.3	1.3	2.2
彩度 <sup>1</sup>	3.5	2.4	2.7	1.9	3.3
色相角 <sup>2</sup> 、°	67.5	74.0	54.5	53.6	43.3
ΔE <sup>3</sup>	0	1.11	0.97	6.61	6.22

abc 異付号間に有意差あり (p < 0.05)

<sup>1</sup> 彩度 = 色の濃さ

<sup>2</sup> 色相角 = 0° は赤色、90° は黄色

<sup>3</sup> ΔE = 対照飼料と比較した全体的な色の違い

Herath ら (2016a, b) による CPC を魚粉と置き換えて 19.4% 配合した飼料を給与した場合の報告とは対照的に、Khalfia ら (2017) はニルティラピア (*Oreochromis niloticus*) の稚魚に対して配合割合がより低い等カロリー・等窒素飼料 (配合量: 0、5、10 および 19%) を給与した試験を行っている。CPC を 5 および 10% 配合した飼料の発育成績には差がみられず、いずれも CPC を 19% 配合した飼料より優れていた。さらに、フィレ肉の収量と体組成には、使用感で差がなかった。興味深いことに、対照飼料では胃の大きさがわずかに小さく、電子顕微鏡による検索の結果、CPC を配合した飼料を給与した場合より胃壁が薄かった。さらに、CPC を 10 および 19% 配合した飼料では、対照および CPC を 5% 配合した飼料に比べて総好気性細菌数と大腸菌群数が減少した。この結果は、ティラピア稚魚用飼料に対して CPC を最大 10% まで配合することで、魚粉の 53% までを置き換えることが可能であり、発育成績と体組成には悪影響を与えないことを示している。

Ngら (2019) は、レッドハイブリッドティラピア (*Oreochromis sp.*) の発育成績、栄養素の利用性、腸の形態および皮膚の色に対する魚粉と CPC の置き換えによる効果について、ごく最近報告を行っている。魚粉の 0、25、50、75 および 100% 量を CPC で置換した 5 種類の等 CP (35%)、等脂質 (粗脂肪: 1%) 飼料を、3 反復群のティラピア (体重 10.33 g) に対して 63 日間給与した。その結果、レッドハイブリッドティラピア用飼料の魚粉の 50% 量を CPC で置き換えても、発育、飼料効率、ヘマトクリット値、状態指標および腸の形態には悪影響はみられなかったが、魚粉の 75 または 100% 量を CPC で置き換えた場合には負の効果が発現した。さらに、CPC を魚粉と完全置換した場合に CPC 中に存在するカロテノイドにより皮膚の黄色度が高まった。回帰分析を行った結果、CPC の魚粉との最適置換量は、体重増加率を指標とした場合に 25%、飼料効率を指標とした場合に 33%、たん白効率を指標とした場合に 29% だった。この結果は、CPC を単一の植物性たん白質源として使用して、レッドハイブリッドティラピア用飼料に魚粉の 50% 量まで置き換えることが出来ることを示唆している。

#### バナメイエビ (*Litopenaeus vannamei*) に対する給与試験の概要

様々なステージのバナメイエビ (*Litopenaeus vannamei*) の発育成績に及ぼす CPC の配合量を検討するために、3 水槽を用いた給与試験および養殖池を用いた試験が行われている (Yu ら、2013)。最初の水槽を用いた試験では、稚エビ (体重 0.52 g) に対して、CGM を 8% 配合した飼料と、CPC を 6.5 または 13.0% 配合した飼料を 6 週間給与した。2 回目の水槽を用いた試験では、稚エビ (体重 0.36 g) に対して、CPC を 0、4、8 および 16% 配合し、CPC を等窒素換算で大豆粕と置き換えるために L-Lys を補給した飼料と、CPC を 9.7% 配合し L-Lys の補給量をより高めた飼料を 10 週間給与した。3 回目の水槽を用いた試験では、CPC を 0、4、8 および 16% 配合した飼料を稚エビ (体重 0.128 g) に 44 日間給与した。最初の 2 試験では、終了時体重、体重増加、飼料要求率および生存率に有意差はなかった。試験 2 の終了時におけるエビの DM および CP 含量には差はなく、CPC の配合水準間でたん白蓄積率に差はなかった。しかし、試験 3 では、CPC を 8 および 12% 配合した飼料における最終的なバイオマス量、終了時体重および飼料効率は、CPC を 0 および 4% 配合した飼料に比べて低下した。

養殖池を用いた試験 (Yu ら、2013) では、稚エビ (体重 0.023 g) を 16 の養殖池に収容し、CPC を 0、4、8 または 12% 配合した飼料を出荷前までの 16 週間給与した。表 3 に示したとおり、最終体重、収量、飼料要求率、生存率および生産量に差がなかった。しかし、飼料への CPC 配合量の増加に伴い、飼料費が大幅に削減された結果、CPC を 8 および 12% 配合した場合のエビの体重 1 kg あたりの飼料費は、CPC を 0 および 4% 配合した場合に比べて低かった。この結果は、稚エビ用飼料に対して CPC を最大 12% まで配合することで発育成績に影響を及ぼすことなく、生産されるエビ 1 kg あたりの飼料費を大幅に削減できることを

示している。

測定値	0% CPC	4% CPC	8% CPC	12% CPC
終了時体重、g	20.51	17.48	17.17	18.71
収量、kg/ha	5,008	5,190	5,421	5,440
飼料要求率	1.38	1.34	1.27	1.29
生存率、%	64.9	77.6	83.6	75.9
飼料費、\$	791 <sup>a</sup>	716 <sup>b</sup>	651 <sup>c</sup>	598 <sup>d</sup>
飼料費/エビ収量kg	1.60 <sup>a</sup>	1.39 <sup>ab</sup>	1.20 <sup>b</sup>	1.11 <sup>b</sup>
生産価、\$	2,107	1,808	1,844	2,018

<sup>abcd</sup> 異付号間に有意差あり (p < 0.05)

### 産卵鶏に対する給与試験の概要

産卵鶏用飼料に CPC を配合した場合の産卵成績および卵の品質への影響を評価するための試験結果が 1 報公表されている (Herrera ら、2019)。産卵鶏 (64 週齢、体重 2.05 kg) に対して、CPC を 0、0.5、1.0、1.5、2.0 および 2.5% 配合した等エネルギー (2,850 kcal/kg)・等 CP (15%) 飼料を 10 週間給与した。CPC の配合量の増加に伴い、増体量、飼料摂取量、飼料効率、産卵数、卵量および卵重に二次曲線的な応答が認められた。CPC の配合量を増加させると、飼料摂取量、飼料効率、卵殻厚と破断強度および卵黄色調は直線的に高まった。しかし、卵白高とハウユニットには CPC の配合割合の増加による影響は見られなかった。この結果は、産卵鶏用飼料に CPC を最大 2.5% まで配合すると産卵成績が改善されることを示している。

### 結論

CPC は、養殖水産動物および家禽用飼料において魅力的な代替原料である。ナイルティラピア (*Oreochromis niloticus*) とバナメイエビ (*Litopenaeus vannamei*) 用飼料への CPC の使用を評価するため研究が実施されており、CPC を最大 10% 配合、ティラピア用飼料中の魚粉を最大 50% まで置換、あるいは、バナメイエビ用飼料に最大 12% 配合した場合に、十分な発育成績と魚体あるいはフィレ肉の組成を得ることが出来る。また、産卵鶏用飼料に対して CPC を最大 2.5% 配合すると産卵成績と鶏卵の品質が改善されることが示されている。

### 引用文献

AAFCO. 2020. Association of American Feed Control Officials - Official Publication. Champaign, IL. Brezas, A., and R.W. Hardy. 2020. Improved performance of a rainbow trout selected strain is associated with protein digestion rates and synchronization of amino acid absorption. Sci. Rep. 10:4678. <https://doi.org/10.1038/s41598-020->



- Davies, S.J. and P.C. Morris. 1997. Influence of multiple amino acid supplementation on the performance of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum) , fed soya based diets. *Aquaculture res.* 28:65–74.
- Gatlin, D.M., III, F.T. Barrows, P. Brown, K. Dabrowski, T.G. Gaylord, R.W. Hardy, E. Herman, G. Hu, Å. Krogdahl, R. Nelson, K. Overturf, M. Rust, W. sealey, D. Skonberg, E.J. Souza, D. Stone, R. Wilson, and E. Wurtele. 2007. Expanding the utilization of sustainable plant products in aquafeeds: a review. *Aquaculture Res.* 38:551–579. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2007.01704x>
- Glencross, B.D., M. Booth, and G.L. Allan. 2007. A feed is only as good as its ingredients - A review of ingredient evaluation strategies for aquaculture feeds. *Aquaculture Nutr.* 13:17–34.
- Gomes, E.F., P. Rema, and S.J. Kaushik. 1995. Replacement of FM by plant protein in the diet of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) : Digestibility and growth performance. *Aquaculture* 130:177–186.
- Gómez-Requeni, P., M. Mingarro, J.A. Calduch-Giner, F. Médale, S.A.M. Martin, D.F. Houlihan, S. Kaushik, and J. Pérez-Sánchez. 2004. Protein growth performance, amino acid utilization and somatotropic axis responsiveness to FM replacement by plant protein sources in gilthead sea bream (*Sparus aurata*) . *Aquaculture* 232:493–510. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(03\)00532-5](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(03)00532-5)
- Herath, S.S., Y. Haga, and S. Satoh. 2016a. Potential use of corn co-products in fishmeal-free diets for juvenile Nile tilapia *Oreochromis niloticus*. *Fish Sci.* 82:811–818. <https://doi.org/10.1007/s12562-016-1008-6>
- Herath, S.S., Y. Haga, and S. Satoh. 2016b. Effects of long-term feeding of corn co-product-based diets on growth, fillet color, and fatty acid and amino acid composition of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Aquaculture* 464:205–212. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.06.032>
- Herrera, A., M. Ortiz, H. Torrealba, and C.H. Ponce. 2019. Effects of corn protein concentrate levels on egg production and egg quality parameters of commercial layers. *J. Anim. Sci.* 97 (Suppl. 3) :345. <https://doi.org/10.1093/jas/skz258.688>
- Khalifa, N.S.A., I.E.H. Belal, K.A. El-Tarabily, S. Tariq, and A.A. Kassab. 2017. Evaluation of replacing FM with corn protein concentrate in Nile tilapia *Oreochromis niloticus* fingerlings

- commercial diet. *Aquac. Nutr.* 24:143–152.  
<https://doi.org/10.1111/anu.12542> Krogdahl, Å., M. Penn, J. Thorsen, S. Refstie, and A. Bakke. 2010. Important antinutrients in plant feedstuffs for aquaculture: An update on recent findings regarding responses in salmonids. *Aquaculture Res.* 41:333–344.
- Martin, S. A. M., O. Vilhelmsson, F. Médale, P. Watt, S. Kaushik, and D.F. Houlihan. 2003. Proteomic sensitivity to dietary manipulations in rainbow trout. *Biochim. Biophys. Acta.* 1651:17–29. doi:10.1016/s1570–9639 (03) 00231–0
- Naylor, R.L., R.W. Hardy, D.P. Bureau, A. Chiu, M. Elliott, A.P. Farrell, I. Forster, D.M. Gatlin, R.J. Goldburg, K. Hua, and P.D. Nichols. 2009. Feeding aquaculture in an era of finite resources. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 106:15103–15110. Doi:10.1073/pnas.0905235106
- Ng, W.-K., T.-C. Leow, and R. Yossa. 2019. Effect of substituting fishmeal with corn protein concentrate on growth performance, nutrient utilization and skin coloration in red hybrid tilapia, *Oreochromis sp.* *Aquaculture Nutr.* 25:1006–1016. <https://doi.org/10.1111/anu.12918>
- Refstie, S., Ø. Korsøen, T. Storebakken, G. Baeverfjord, I. Lein, and A. Roem. 2000. Differing nutritional responses to dietary soybean meal in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture* 190:49–63. doi:10.1016/S0044–8486 (00) 00382–3
- Yu, D., X. Fang, Y. Zhou, M. Rhodes, and D.A. Davis. 2013. Use of corn protein products in practical diets for the Pacific White shrimp. *Avances En Nutrición Acuicola.* <https://nutricionacuicola.uani.mx/index.php/acu/article/view/62>

## 第8章

### ドライド・コーン・ブラン・アンド・ソリュブル (BS、Dried Corn Bran and Soluble)、脱油 DDGS (De-Oiled (溶媒抽出) DDGS) およびコーン・ディステイラーズ・オイル (CDO) 飼料原料としての栄養特性および飼料価値

#### 初めに

トウモロコシ発酵たん白質 (CFP; 第1章、第2章、第3章、第4章および第5章)、高たん白 DDG (HP-DDG; 第6章) およびトウモロコシたん白濃縮物 (CPC; 第7章) 以外にも、いくつかのエタノール工場において新しい工程を使用した栄養特性や用途が異なる新しいトウモロコシ併産物 (コーン・ファイバー/ブラン・アンド・ソリュブル (CBS、Corn Fiber/Bran and Solubles、未乾燥製品および乾燥製品)、脱油 DDGS、CDO) が生産されている。本章では、これらについての栄養特性や様々な動物種において飼料原料として用いる場合の利点と注意点に関する最新の情報とこれまでに実施された給与試験の結果を概説する。

#### CBS

##### 反芻動物における CBS の栄養組成

ICM 社の Fiber Separation Technology™ (FST™) を導入しているいくつかのエタノール工場では、未乾燥の高水分 (乾物 (DM) 40%) CBS を生産している。水分含量が高く輸送コストが高くなるために輸出は行われていないが、肉牛の肥育現場では評価されており、本章内の「反芻動物に対する CBS の給与試験の概要」において給与試験の結果を概説した。

##### 豚における乾燥 CBS の栄養組成

ブラジルのトウモロコシを原料とした新しいエタノール工場では、ICM 社の FST™ を用いて、豚、家禽および牛用飼料原料として CBS の乾燥製品を生産している。Paula ら (2021) は、CBS 乾燥製品の可消化エネルギー (DE) 価、代謝エネルギー (ME) 価、アミノ酸の標準化された回腸消化率 (SID) およびリン (P) の標準化された全消化管消化率 (STTD) を測定し、従来の DDG、米国で生産された HP-DDG およびブラジルにおいて ICM 社の FST™ を用いて生産した HP-DDG と比較した。

予想したとおり、CBS の粗たん白質 (CP) 含量は比較的低く (13.87%)、粗脂肪 (9.00%) および中性デタージェント繊維 (NDF、39.07%) 含量は、他のトウモロコシ併産物に比べて比較的高かった (表1)。CBS の ME 価は、米国産の DDGS の約 91%、米国産 HP-DDG およびブラジル産 HP-DDG の 80% および 71% であった。CBS の P 含量は 0.71% であり、他のトウモロコシ併産物よりも高かったが、P の STTD 値は 46.4% であって、比較したトウモロコシ併産物で最も低かった (表1)。CBS 中のリジン (Lys)、メチオニン (Met)、トレオニン (Thr) および

トリプトファン (Trp) の SID 値は、他のトウモロコシ併産物よりも低かった。これらの結果は、CBS 乾燥品の ME 価と可消化アミノ酸含量は従来の DDGS や HP-DDG よりも大幅に低いが、エネルギー摂取量やボディ・コンディションの抑制が必要で、可消化アミノ酸要求量が比較的低い妊娠豚用飼料原料としては適している。

表 1. CBS の栄養組成と、米国产の DDGS と HP-DDG、ブラジル産の HP-DDG の栄養組成の比較 (原物値) (Paula ら、2021 より引用)

分析値	米国产 DDGS	米国产 HP-DDG	ブラジル産 HP-DDG	ブラジル産 CBS
乾物 (DM)、%	86.08	89.62	92.30	87.59
粗たん白質 (CP)、%	26.37 (72)	34.83 (62)	42.93 (67)	13.87 (59)
粗脂肪、%	6.40	7.80	10.30	9.00
中性デタージェント繊維 (NDF)、%	36.59	47.48	37.40	39.07
酸性デタージェント繊維 (ADF)、%	14.31	19.81	17.53	13.31
総エネルギー (GE)、kcal/kg	4,532	4,915	5,296	4,513
可消化エネルギー (DE)、豚 kcal/kg	3,134	3,352	4,060	2,843
代謝エネルギー (ME)、豚 kcal/kg	2,941	3,116	3,757	2,680
粗灰分、%	4.89	3.39	2.81	4.80
カルシウム (Ca)、%	0.04	0.02	0.02	0.02
リン (P)、%	0.68	0.46	0.48	0.71
STTD P、%	62.7	67.6	48.3	46.4
マグネシウム (Mg)、%	0.28	0.18	0.01	0.33
ナトリウム (Na)、%	0.44	0.47	0.09	0.24
カリウム (K)、%	1.09	0.63	0.41	1.50
銅 (Cu)、mg/kg	14.26	7.9	7.10	7.14
鉄 (Fe)、mg/kg	59.56	52.1	112.5	87.32
マンガン (Mn)、mg/kg	12.72	9.00	9.97	16.81
亜鉛 (Zn)、mg/kg	63.39	56.40	75.55	61.26
<b>必須アミノ酸、%</b>				
アルギニン (Arg)	1.10 (84)	1.50 (76)	2.06 (83)	0.69 (74)
ヒスチジン (His)	0.64 (72)	0.89 (66)	1.26 (76)	0.36 (69)
イソロイシン (Ile)	0.98 (67)	1.46 (68)	1.79 (76)	0.46 (65)
ロイシン (Leu)	2.90 (74)	4.38 (72)	5.30 (81)	1.20 (72)
リジン (Lys)	0.73 (55)	1.00 (53)	1.37 (66)	0.40 (46)
メチオニン (Met)	0.43 (75)	0.54 (75)	0.95 (82)	0.25 (73)
フェニルアラニン (Phe)	1.21 (72)	1.86 (72)	2.16 (78)	0.54 (64)
トレオニン (Thr)	0.95 (68)	1.32 (67)	1.66 (76)	0.51 (54)
トリプトファン (Trp)	0.15 (74)	0.22 (71)	0.23 (73)	0.11 (66)
バリン (Val)	1.30 (66)	1.82 (69)	2.37 (76)	0.64 (65)
<b>非必須アミノ酸、%</b>				
アラニン (Ala)	1.86 (78)	2.65 (72)	3.28 (82)	0.90 (79)
アスパラギン酸 (Asp)	2.02 (65)	2.72 (64)	3.29 (73)	1.02 (53)
シスチン (Cys)	0.59 (70)	0.80 (72)	1.09 (82)	0.34 (59)
グルタミン酸 (Glu)	4.34 (75)	6.21 (70)	7.98 (81)	2.03 (69)
グリシン (Gly)	1.08 (94)	1.40 (73)	1.77 (93)	0.66 (80)
プロリン (Pro)	2.14 (59)	3.08 (43)	3.99 (55)	1.08 (52)
セリン (Ser)	1.20 (66)	1.74 (64)	2.18 (79)	0.61 (63)
チロシン (Tyr)	1.09 (69)	1.45 (70)	1.91 (79)	0.49 (62)
総アミノ酸	24.44 (62)	34.76 (65)	44.39 (68)	12.16 (65)
Lys: CP	2.77	2.87	3.19	2.88

以前に公表された Anderson ら (2012) および Rochell (2011) の報告では CBS の栄養特性、豚における DE および ME 価、家禽における AMEn 価の測定が行われている (表 2)。CBS の家禽における AMEn 価を推定した最近の報告はないが、Anderson ら (2012) により測定された CBS の豚における DE 価 (3,282 kcal/kg、DM) および ME 価 (3,031 kcal/kg、DM) は、Paula ら (2021) が測定した DE 価 (3246 kcal/kg、DM)、DM) および ME 価 (3,060 kcal/kg、DM) とほぼ同一だった。CBS のアミノ酸含量は Anderson ら (2012) のデータと Paula ら (2021) のデータの間で異なっていたが、P 含量には差がなかった。

表 2. CBS の豚および家禽における栄養成分の公表値 (DM) (Anderson ら、2012 および Rochell ら、2011 より引用)

分析値 (DM)、%	CBS
乾物 (DM)、%	90.82
総エネルギー (GE)、kcal/kg	4,982
可消化エネルギー (DE)、豚 kcal/kg	3,282
代謝エネルギー (ME)、豚 kcal/kg	3,031
窒素補正した代謝エネルギー (AMEn) 家禽 kcal/kg	3,030
粗たん白質 (CP)	34.74
粗脂肪	9.68
総食物性繊維 (TDF)	26.65
中性デタージェント繊維 (NDF)	25.21
酸性デタージェント繊維 (ADF)	5.35
粗灰分	5.31
カルシウム (Ca)	0.03
リン (P)	0.76
<b>必須アミノ酸</b>	
アルギニン (Arg)	0.77
ヒスチジン (His)	0.44
イソロイシン (Ile)	0.50
ロイシン (Leu)	1.30
リジン (Lys)	0.62
メチオニン (Met)	0.23
フェニルアラニン (Phe)	0.55
トレオニン (Thr)	0.61
トリプトファン (Trp)	0.09
バリン (Val)	0.76
<b>非必須アミノ酸</b>	
アラニン (Ala)	1.04
アスパラギン酸 (Asp)	1.02
シスチン (Cys)	0.30
グルタミン酸 (Glu)	1.95
グリシン (Gly)	0.77
プロリン (Pro)	1.08
セリン (Ser)	0.65
チロシン (Tyr)	0.41

#### 反芻動物に対する CBS の給与試験の概要

Garland ら (2019a) は、トウモロコシ (対照)、HP-DDG を 20 および 40%、CBS を 40%、従来のウェット DGS (WDGS) を 40%、従来の DDGS を 40%含む飼料の

エネルギーおよび栄養素消化率と乾物摂取量（DMI）を比較している。その結果、CBS を含む飼料の DM と有機物（OM）消化率はトウモロコシを含む対照飼料より低く、NDF 消化率は同等で、ADF およびエネルギー消化率はトウモロコシを含む対照飼料より高かった。CBS の DM および OM 消化率と DE 価は従来の WDGS および DDGS と同様だった。さらに、CBS を 40%含む飼料の DM、OM、NDF および ADF 消化率ならびに DE 価は HP-DDG を同量含む飼料と差がなかった。これらの結果は、HP-DDG および CBS を与えると DM および OM の消化率が低下するが、これらを含む飼料ではエネルギー摂取量が増加することを示している。さらに、CBS は WDGS や DDGS と同等の飼料価値を有している。

その後の研究で、Garland ら（2019b）は、未乾燥の CBS を DMI の 20 あるいは 40% 給与した場合と、生のディスティラーズ・グレイン（WDG）を DMI の 20 あるいは 40% 給与した場合の去勢牛における発育成績を比較している。いずれのトウモロコシ併産物を用いた場合も、DMI と飼料効率は給与量の増加とともに増加し、CBS または WDGS を給与した場合の日増体量（ADG）は、高水分トウモロコシと乾燥圧ペントウモロコシを用いた対照飼料と比べて高かった。この結果は、WDG と同じ量の生の CBS を給与すると、同様の発育成績および枝肉形質が得られることを示している。

また、Garland ら（2019c）は、HP-DDG、従来の DDGS、WDGS あるいは未乾燥の CBS を DM 摂取量の 40%含む飼料を交雑種去勢牛に給与した場合の発育成績と枝肉形質を比較している。その結果、DMI には差がなかったが、HP-DDG と未乾燥の CBS を給与した場合には、WDGS と DDGS を給与した場合に比べて、ADG と枝肉重量が増加した。この試験において、肥育後期に測定した飼料効率を基に推定した HP-DDG および未乾燥の CBS の飼料価値は、トウモロコシの飼料価値の 121 および 125%であった。

## 脱油 DDGS

脱油 DDGS は、溶媒抽出により DDGS から粗脂肪を除去したトウモロコシ併産物（ブランド名：NovaMeal）だが、米国における現在の生産量は限られており、大部分は泌乳中の乳牛用飼料原料として使用されている。このため、栄養組成と飼料価値に関する研究のほとんどは、泌乳中の乳牛における飼料価値に焦点が当てられている。

## AAFCO の定義

AAFCO は、脱油 DDGS を次のように定義している。

27.9 De-oiled Corn Distillers Dried Grains with Solubles, Solvent Extracted は、DDGS から粗脂肪を溶媒抽出し、粗脂肪含量を原物値で 3% 未満とした製品であり、たん白源としての使用を目的としている。表示票には、CP の最小値とイオウ（S）の最大値の保証値を記載する必要がある。飼料原料として表示する場合、「溶媒抽出」という記載は必要ない。

## 反芻動物における脱油 DDGS の栄養組成

Mjoun ら (2010c) は、泌乳中のホルスタインにおける従来の大豆粕、高脂肪 DDGS、脱油 DDGS および HP-DDG の栄養成分組成、ルーメン分解性および非分解性たん白質ならびにアミノ酸の小腸消化率を測定している (表 3)。遅分解性たん白質の分解速度は、大豆粕で最大 (11.8%/時) であり、De-oiled DDGS では 2.7%/時だった。ルーメン非分解性たん白質 (RUP) は、32% (大豆粕) から 60% (脱油 DDGS) の範囲にあった。可消化 CP の総量は大豆粕の併産物の方が多かったが、いずれも 95%以上であった。同様に、併産物中の大部分のアミノ酸の小腸内消化率は 92%以上であったが、大豆粕 (94%以上) よりわずかに低かった。脱油 DDGS における小腸内吸収性たん白質は 55%であって、DDGS (48%)、HP-DDG (51%)、大豆粕 (31%) より多かった。これらの結果は、泌乳中の乳牛に給与した脱油 DDGS およびその他のトウモロコシ併産物の CP およびアミノ酸の消化率は大豆粕に匹敵することを示している。

表 3. 泌乳中の乳牛における成分組成、ルーメン分解性および非分解性たん白質とアミノ酸の小腸内消化率の比較 (Mjoun ら、2010c より引用)

分析値、DM%	大豆粕	DDGS	脱油 DDGS	HP-DDG
乾物 (DM)	90.2	88.5	87.7	93.2
粗たん白質 (CP)	49.6	30.8	34.0	41.5
可溶性たん白質、%/CP	15.0	14.0	10.9	6.4
ルーメン分解性たん白質 (RDP) %/CP	68	48	40	46
ルーメン非分解性たん白質 (RUP) %/CP	32	52	60	54
たん白質の小腸内推定消化率、%/RUP	97	92	91	94
小腸内吸収性たん白質、%/CP	31	48	55	51
総可消化たん白質、%/CP	99	96	95	97
中性デタージェント不溶性蛋白質 (NDICP)、%/CP	3.4	9.1	19.7	10.1
酸性デタージェント不溶性蛋白質 (ADICP)、%/CP	3.2	8.8	13.2	9.9
中性デタージェント繊維 (NDF)	12.0	31.5	42.5	30.4
酸性デタージェント繊維 (ADF)	6.2	9.4	12.4	10.5
粗脂肪	1.1	10.6	3.5	3.2
でん粉	2.0	8.9	5.1	8.3
非繊維炭水化物 (NFC)	29.9	22.7	14.7	22.5
粗灰分	7.4	4.4	5.3	2.4
カルシウム (Ca)	0.70	0.06	0.07	0.06
リン (P)	0.73	0.75	0.77	0.51
マグネシウム (Mg)	0.33	0.32	0.34	0.16
カリウム (K)	2.34	0.92	0.93	0.53
イオウ (S)	0.42	0.62	0.74	0.79
必須アミノ酸、g/kg CP <sup>1</sup>				
アルギニン (Arg)	71.0 [85] (99)	47.4 [66] (93)	46.9 [59] (93)	37.1 [57] (93)
ヒスチジン (His)	27.9 [87] (96)	30.0 [71] (93)	30.5 [65] (93)	27.7 [68] (93)
イソロイシン (Ile)	48.0 [84] (98)	40.4 [65] (93)	43.1 [59] (93)	41.8 [56] (93)

ロイシン (Leu)	79.7 [84] (98)	117.4 [59] (96)	125.3 [50] (96)	135.3 [51] (96)
リジン (Lys)	64.7 [86] (96)	34.8 [77] (84)	32.2 [69] (86)	29.5 [70] (87)
メチオニン (Met)	14.3 [82] (94)	20.4 [55] (95)	19.9 [37] (95)	20.4 [48] (94)
フェニルアラニン (Phe)	50.2 [84] (98)	45.2 [53] (95)	47.3 [45] (95)	50.9 [49] (95)
トレオニン (Thr)	38.2 [83] (98)	37.8 [63] (88)	38.0 [51] (90)	36.5 [56] (91)
バリン (Val)	50.0 [83] (97)	53.0 [67] (92)	53.4 [60] (92)	51.4 [59] (92)
非必須アミノ酸、g/kg CP				
アラニン (Ala)	43.3	69.3	71.2	73.1
アスパラギン酸 (Asp)	114.3	63.7	68.5	65.0
シスチン (Cys)	14.7	19.3	18.1	18.3
グルタミン酸 (Glu)	149.9	130.4	143.8	160.8
グリシン (Gly)	42.9	41.1	41.1	32.6
プロリン (Pro)	47.8	86.3	74.3	88.0
セリン (Ser)	43.3	40.7	43.1	43.6
総アミノ酸	918.1 [84]	877.0	896.9	912.0

<sup>1</sup> [ ]内は必須アミノ酸のルーメン内分解率(%)、( )内はRUP中の必須アミノ酸の小腸内消化率(%)

### 豚における脱油 DDGS の栄養組成

脱油 DDGS の豚における DE 価および ME 価を測定した 2 文献が公表されており (Jacela ら、2011; Anderson ら、2012)、これらのうち 1 報ではアミノ酸の標準化された回腸消化率 (SID) も推定されている (Jacela ら、2011)。これらの文献において、脱油 DDGS の総エネルギー (GE) は同等だったが、Anderson ら (2012) が直接測定した DE 価と ME 価は、*in vivo*により測定された Jacela ら (2011) の ME 価よりはるかに高かった。Jacela ら (2011) は、Noblet and Perez (1993) および Noblet ら (1994) による ME 価および正味エネルギー (NE) 価の推定式を利用しているが、これらの推定式は個々の飼料原料ではなく配合飼料に適用することを意図して作成されたものであるため、このアプローチの正確性には疑問が残るが、この DE 価と ME 価は最近のデータに匹敵している (Paula ら、2021; Yang ら、2021)。また、Jacela ら (2011) の報告によるアミノ酸の SID 値は最近のデータ (Paula ら、2021; Yang ら、2021) と同一であるが、脱油 DDGS 中の P の STTD 値の推定値のデータはない。

表 4. 脱油 DDGS の豚におけるの栄養成分の公表値表

分析値、DM%	Jacela ら (2011)	Anderson ら (2012)
乾物 (DM)	87.69	87.36
総エネルギー (GE)、kcal/kg	5,098	5,076
可消化エネルギー (DE)、kcal/kg	3,100	3,868
代謝エネルギー (ME)、kcal/kg	2,858 <sup>1</sup>	3,650
正味エネルギー (NE)、kcal/kg	2,045 <sup>2</sup>	-
粗たん白質 (CP)	35.58	34.74
粗脂肪	4.56	3.15
総食物性繊維 (TDF)	-	37.20
中性デタージェント繊維 (NDF)	39.46	50.96
酸性デタージェント繊維 (ADF)	18.36	15.82
粗灰分	5.29	5.16
カルシウム (Ca)	0.06	0.08
リン (P)	0.87	0.84



必須アミノ酸		
アルギニン (Arg)	1.50 (83) <sup>3</sup>	1.44
ヒスチジン (His)	0.93 (75)	0.89
イソロイシン (Ile)	1.38 (75)	1.25
ロイシン (Leu)	4.15 (84)	4.12
リジン (Lys)	0.99 (50)	1.00
メチオニン (Met)	0.67 (80)	0.64
フェニルアラニン (Phe)	1.92 (81)	1.51
トレオニン (Thr)	1.26 (69)	1.26
トリプトファン (Trp)	0.22 (78)	0.18
バリン (Val)	1.75 (74)	1.76
非必須アミノ酸		
アラニン (Ala)	2.43 (79)	2.48
アスパラギン酸 (Asp)	2.10 (65)	2.19
シスチン (Cys)	0.62 (67)	0.61
グルタミン酸 (Glu)	4.85 (79)	5.43
グリシン (Gly)	1.35 (65)	1.39
プロリン (Pro)	2.41 (88)	2.54
セリン (Ser)	1.48 (77)	1.58
チロシン (Tyr)	1.29 (82)	1.22

<sup>1</sup> 計算値 : ME = 1 × DE - 0.68 × CP (Noblet and Perez, 1993)

<sup>2</sup> 計算値 : NE = (0.87 × ME) - 442 (Noblet ら、1994).

<sup>3</sup> ( ) 内は SID 平均値

## 家禽における脱油 DDGS の栄養組成

豚において Anderson ら (2012) が評価した脱油 DDGS と同一製品について Rochell ら (2011) がブロイラーにおける窒素補正した見かけの代謝エネルギー (AMEn) 価を測定している。このため、表 4 に示す栄養組成は家禽における AMEn (2,146 kcal/kg) 以外は同様である (Rochell ら、2011)。

## 乳牛に対する脱油 DDGS 給与試験の概要

Mjoun ら (2010a) は、8 週間の飼育試験を行って、泌乳中期のホルスタイン牛用飼料における脱油 DDGS の最適含量を調査している。飼料には、脱油 DDGS の大豆主体原料と置き換えて 0、10、20 および 30% (DM) 配合した。この結果、脱油 DDGS の飼料への配合割合は DMI および産乳量に差がないことは示された (表 5)。乳脂率と乳脂量は、脱油 DDGS 配合量の増加と対応して増加したが、乳たん白質率および乳たん白質量には二次曲線的な影響がみうけられた。産乳効率は直線的に増加する傾向を示したが、乳生産のための窒素の利用効率には脱油 DDGS の配合量増加の影響はなかった。これらの結果は、脱油 DDGS を最大 30% まで含む飼料を泌乳中の乳牛に給与した場合、たん白質およびエネルギー源として大豆主体の副産物を配合した対照飼料と同等の成績が得られることを示している。

表 5. 脱油 DDGS を大豆主体の副産物と置き換えて 0、10、20 および 30% 給与した場合の泌乳中期の乳牛の乾物摂取量、乳量および乳成分 (Mjoun ら、2010a)

測定値	飼料中脱油 DDGS 量 (DM%)
-----	--------------------

	0%	10%	20%	30%
体重、kg	705	713	721	710
体重の変動、g/日	-167	15	230	-36
ボディ・コンディション・スコア (BCM) <sup>1</sup>	3.56	3.37	3.36	3.53
正味エネルギー (NE) 摂取量 <sup>2</sup> 、Mcal/日	34.7	37.0	38.3	35.2
維持に要する NE <sup>3</sup> 、Mcal/日	10.9	11.2	11.0	11.0
泌乳に要する NE <sup>4</sup> 、Mcal/日	22.6	24.0	24.7	25.0
エネルギー収支 <sup>5</sup> 、Mcal/日	3.18	1.60	2.80	-0.81
エネルギー効率 <sup>6</sup>	64.6	66.8	64.2	71.2
乾物摂取量 (DMI)、kg/日	22.7	23.0	23.7	22.2
粗たん白質 (CP) 摂取量、kg/日	4.0	4.1	4.2	4.0
産乳量、kg/日	34.5	34.8	35.5	35.2
エネルギー補正乳量 (ECM) <sup>7</sup> 、kg/日	32.6	34.6	35.6	36.0
脂肪補正乳量 (FCM) <sup>8</sup> 、kg/日	30.0	31.7	32.1	33.1
飼料効率 <sup>9</sup>	1.47	1.53	1.49	1.61
窒素効率 <sup>10</sup>	25.5	27.0	25.8	26.0
<b>乳成分</b>				
乳脂率、%	3.18	3.40	3.46	3.72
乳脂量、kg/日	1.08	1.19	1.23	1.32
乳たん白率、%	2.99	3.06	3.13	2.99
乳たん白質量、kg/日	1.03	1.07	1.10	1.06
乳糖率、%	4.95	4.96	4.94	5.06
乳糖量、kg/日	1.71	1.74	1.75	1.76
総固形分率、%	12.10	12.39	12.40	12.67
総固形分量、kg/日	4.15	4.35	4.43	4.45

<sup>1</sup> BCM: 1 = 削瘦、5 = 肥満

<sup>2</sup> 泌乳に要する NE (Mcal/kg) × DMI (kg/日)

<sup>3</sup> 維持に要する NE = 体重<sup>0.75</sup> × 0.08

<sup>4</sup> 産乳に要する NE = 乳量 (kg) × [(0.0929 × 脂肪、%) + (0.0563 × たん白質、%) + (0.0395 × 乳糖率、%) ]

<sup>5</sup> エネルギー収支 = NE 摂取量 - (維持に要する NE + 産乳に要する NE)

<sup>6</sup> エネルギー効率 = 産乳に要する NE / NE 摂取量

<sup>7</sup> ECM = [0.327 × 乳量 (kg) ] + [12.95 × 乳脂量 (kg) ] + [7.2 × 乳たん白質量 (kg) ]

<sup>8</sup> FCM = [0.4 × 乳量 (kg) ] + [15 × 乳脂量 (kg) ]

<sup>9</sup> 飼料効率 = ECM / DMI

<sup>10</sup> 窒素効率 = 乳窒素量 (kg/日) / 窒素摂取量 (kg/日)

また、Mjoun ら (2010b) は、トウモロコシ併産物を含まない飼料 (大豆粕、圧搾大豆粕および大豆皮を含む、対照)、従来の DDGS を 22%含む飼料および脱油 DDGS を 20%含む飼料を 14 週間給与した場合の泌乳初期の乳牛における産乳性への影響を調査している。各飼料中の CP、粗脂肪、NDF および泌乳に要する NE が同一となるように設計した。その結果、体重、体重変化、BCM、DMI、乳量、乳脂率および乳糖率には、飼料間で差がなかった (表 6)。乳たん白率および乳たん白質量は、DDGS 飼料を給与した場合と脱油 DDGS 飼料を給与した場合とで類似していたが、対照飼料を給与した場合より高かった。DDGS 飼料および脱油 DDGS 飼料を給与した場合には、対照飼料と比べて飼料効率が高まる傾向があり、窒素効率も高まった。これらの結果は、脱油 DDGS を 20%含む飼料を泌乳初期の乳牛に給与すると、大豆主体の飼料を給与した場合に比べて産乳成績と乳組成が同等あるいは改善されることを示している。

表 6. 大豆主体製品（対照）と、DDGS を 22%、脱油 DDGS を 20%含む飼料を泌乳初期の乳牛に給与した場合の乳量、組成および栄養効率（Mjounら、2010b）

測定値	Control	22% DDGS	20% 脱油 DDGS
開始時体重、kg	693	682	660
終了時体重、kg	734	722	704
体重の変動、g/日	0.47	0.47	0.53
ボディ・コンディション・スコア (BCM) <sup>1</sup>	3.43	3.32	3.34
正味エネルギー (NE) 摂取量 <sup>2</sup> 、Mcal/日	41.3	40.1	40.3
維持に要する NE <sup>3</sup> 、Mcal/日	11.0	11.0	11.0
泌乳に要する NE <sup>4</sup> 、Mcal/日	26.4	26.5	27.4
エネルギー収支 <sup>5</sup> 、Mcal/日	4.39	1.98	1.98
エネルギー効率 <sup>6</sup>	63.1	66.9	68.1
乾物摂取量 (DMI)、kg/日	24.8	24.7	24.6
粗たん白質 (CP) 摂取量、kg/日	4.3	4.3	4.3
産乳量、kg/日	39.2	38.9	39.8
エネルギー補正乳量 (ECM) <sup>7</sup> 、kg/日	38.0	37.8	39.5
脂肪補正乳量 (FCM) <sup>8</sup> 、kg/日	35.7	35.3	37.1
飼料効率 <sup>9</sup>	1.50	1.57	1.61
窒素効率 <sup>10</sup>	24.5 <sup>b</sup>	26.9 <sup>a</sup>	26.5 <sup>a</sup>
<b>乳成分</b>			
乳脂率、%	3.63	3.24	3.57
乳脂量、kg/日	1.33	1.34	1.40
乳たん白率、%	2.82 <sup>b</sup>	2.88 <sup>a</sup>	2.89 <sup>a</sup>
乳たん白質量、kg/日	1.07 <sup>b</sup>	1.15 <sup>a</sup>	1.14 <sup>a</sup>
乳糖率、%	4.90	4.99	4.96
乳糖量、kg/日	1.94	1.94	1.96
総固形分率、%	12.3	12.0	12.4
総固形分量、kg/日	4.73	4.70	4.90

<sup>1</sup> BCM: 1 = 削瘦、5 = 肥満

<sup>2</sup> 泌乳に要する NE (Mcal/kg) × DMI (kg/日)

<sup>3</sup> 維持に要する NE = 体重<sup>0.75</sup> × 0.08

<sup>4</sup> 産乳に要する NE = 乳量 (kg) × [(0.0929 × 脂肪、%) + (0.0563 × たん白質、%) + (0.0395 × 乳糖率、%) ]

<sup>5</sup> エネルギー収支 = NE 摂取量 - (維持に要する NE + 産乳に要する NE)

<sup>6</sup> エネルギー効率 = 産乳に要する NE / NE 摂取量

<sup>7</sup> ECM = [0.327 × 乳量 (kg) ] + [12.95 × 乳脂量 (kg) ] + [7.2 × 乳たん白質量 (kg) ]

<sup>8</sup> FCM = [0.4 × 乳量 (kg) ] + [15 × 乳脂量 (kg) ]

<sup>9</sup> 飼料効率 = ECM / DMI

<sup>10</sup> 窒素効率 = 乳窒素量 (kg/日) / 窒素摂取量 (kg/日)

ab 異付号間に有意差あり (p<0.05)

### ほ乳期および育成-肥育期の豚に対する脱油 DDGS 給与試験の概要

Jacelaら (2011) は、飼料中の脱油 DDGS の配合量増加 (0、5、10、20 および 30%) が哺乳期子豚 (体重 9.9 kg) の発育成績に及ぼす影響について 28 日間の飼育試験 (表 7) および育成-肥育豚 (体重 30 kg) の発育および枝肉形質に及ぼす影響について 99 日間に飼育試験 (表 8) を行っている。飼料は、脱油 DDGS の配合量の増加に応じて大豆油の配合量を増加させ、以前の試験で得られた測定値に基づいて SID リジン含量を等量で、ME 価も等しくなるように設計した。育成-肥育期の試験では 4 つのフェースを設定した。表 7 に示したとおり、

ほ乳期子豚を用いた成績では飼料間に差はみられず、脱油 DDGS を最大 30%まで配合しても、維持のために大豆油を用いてエネルギーを補給してエネルギー密度を高めることで、許容できる発育成績が得られたことが示された。

一方、育成-肥育豚では、脱油 DDGS の配合割合を増加させると、日増体量 (ADG)、日飼料摂取日量 (ADFI)、枝肉重量および枝肉歩留が直線的に減少した (表 8)。しかし、飼料効率、枝肉の背脂肪、赤肉割合、無脂赤身割合に影響を及ぼすことなく改善される傾向を示した (表 8)。ADG や ADFI の減少などの悪影響がほ乳期子豚では発生せず、育成-肥育豚で発生したのかの原因は不明である。

表 7. ほ乳期子豚に対して脱油 DDGS の配合割合を高めた飼料を 28 日間給与した場合の発育成績に及ぼす影響 (Jacela ら、2011 より引用)

測定値	脱油 DDGS 配合割合、%				
	0	5	10	20	30
開始時体重、kg	10.0	10.0	9.6	9.9	9.9
終了時体重、kg	22.7	22.8	22.2	22.4	22.3
日増体量 (ADG)、kg	0.455	0.459	0.452	0.445	0.442
飼料摂取日量 (DFI)、kg	0.749	0.771	0.760	0.751	0.761
飼料効率	0.609	0.595	0.594	0.593	0.582

表 8. 育成-肥育豚に対して脱油 DDGS の配合割合を高めた飼料を 99 日間給与した場合の発育成績と枝肉形質に及ぼす影響 (Jacela ら、2011 より引用)

測定値	脱油 DDGS 配合割合、%				
	0	5	10	20	30
開始時体重、kg	29.6	29.6	29.6	29.6	29.6
終了時体重 <sup>1</sup> 、kg	121.4	119.3	118.8	118.2	116.2
日増体量 (ADG) <sup>1</sup> 、kg	0.909	0.893	0.887	0.887	0.873
飼料摂取日量 (DFI) <sup>1</sup> 、kg	2.16	2.17	2.11	2.11	2.04
飼料効率 <sup>2</sup>	0.420	0.413	0.422	0.421	0.431
枝肉重量、kg	91.1	89.0	89.1	87.7	86.3
枝肉歩留 <sup>1</sup> 、%	75.5	75.0	75.0	74.7	74.3
背脂肪厚、mm	16.46	16.53	16.53	16.38	16.96
コース芯 <sup>3</sup> 、mm	63.5	62.2	62.5	63.0	60.7
赤肉割合、%	56.48	55.91	56.30	56.43	55.78
無脂肪赤肉指数	50.4	50.4	50.4	50.5	50.2

<sup>1</sup> 飼料中の De-oiled DDGS 配合割合増加に伴う直線的な減少 ( $p < 0.01$ )

<sup>2</sup> 飼料中の De-oiled DDGS 配合割合増加に伴う二次曲線的な改善傾向 ( $p < 0.10$ )

<sup>3</sup> 飼料中の De-oiled DDGS 配合割合増加に伴う二次曲線的な減少傾向 ( $p < 0.10$ )

## CDO

### AAFCO の定義

AAFCO では CDO を以下のように定義している。

「33.10 \_\_\_\_ Distillers Oil (飼料品質) は、穀物または穀物混合物の酵母発酵からの蒸留によりエチルアルコールを除去し、エタノール生産産業で採用されている方法により油分を機械的または溶媒抽出した後得られる。主に、脂肪酸のグリセリンエステルで構成され、遊離脂肪酸や脂肪由来の他の物質は含まれていない。総脂肪酸が 85%以上、不飽和脂肪酸が 15%以下である。」

ん化物が 2.5%以下、不溶性不純物が 1%以下であることを保証する必要がある。また、遊離脂肪酸と水分の最大値を保証する必要がある。酸化防止剤を使用している場合には、一般名または慣用名を表示し、その後「防腐剤として使用」という文言を加えなければならない。製品名にその起源となった穀類の種類が表示されている場合、すなわち「トウモロコシ」、「ソルガム」、「大麦」、「ライ麦」等が付いている場合、製品名の最初の単語として宣言された主要な穀物が起源と対応している必要がある。提案：2015、改正版採用：2016。1)

CDO は、米国のエタノール産業によって大量に生産され、再生可能ディーゼルの生産に使用されるほか、豚や家禽用飼料のエネルギー源としても使用されている。CDO の ME 価は、高濃度の多価不飽和脂肪酸 (PUFA)、特にリノール酸に由来しており、未精製の脱ガム大豆油に匹敵する。CDO では PUFA 含量が高いため、加工時の加熱や酸素および遷移金属 (Cu および Fe) に暴露されると、酸化が非常に進む。酸化された脂質を飼料原料として用いると、豚やブロイラーの健康状態や発育に悪影響を及ぼす可能性があるため、輸送および保管中の酸化を防ぐために酸化防止剤の添加が必要になる場合がある (Hung ら、2017)。さらに、トウモロコシ・大豆粕主体の育成-肥育豚用飼料に CD0 を配合すると、豚肉の脂肪中 PUFA 含量が増加し、脂肪の硬さと保存性・安定性が低下する。

### CD0 の化学組成

精製されたトウモロコシ油と比較した場合の CD0 の特筆すべき特徴の 1 つは、CD0 では遊離脂肪酸 (FFA) 含量が高く (表 9)、FFA に 2%未満から最大 18%と幅があることである。様々な油脂原料を評価した以前の報告では、FFA 含量が増加すると豚や家禽における ME 価が低下されることが示されており、豚における DE 価と家禽における AMEn 価の予測式が開発されている (Wiseman ら、1998)。トウモロコシ油は、PUFA 含量が比較的高く、特に、オレイン酸 (9c-18:1; 総脂質の 28~30%) とリノール酸 (18:2n-6; 同 53~55%) が多いため、他の脂質源と区別される。植物油は動物性脂質に比べて PUFA 含量が高く、その結果として植物油の ME 価が高くなる (Kerr ら、2015)。そのため、CD0 はすべての油脂原料中で ME 価が高い原料の 1 つではあるが、過酸化の影響を受けやすくなっている (Kerr ら、2015; Shurson ら、2015; Hanson ら、2015)。過酸化脂質を豚やブロイラーに給与すると、発育速度、飼料摂取量および飼料効率が低下することが示されており (Hung ら、2017)、酸化が高度に進んだトウモロコシ油はほ乳期子豚におけるエネルギー利用率と抗酸化能を低下させる (Hanson ら、2016)。ただし、市販の抗酸化剤の添加は効果があり、CD0 への抗酸化剤の添加により、高温多湿条件下で保存した場合の過酸化を最小限に抑制できる (Hanson ら、2015)。CD0 の過酸化の程度 (過酸化価、アニシジン価およびヘキサナール) は、精製

トウモロコシ油より多少大きいものの、Hanson ら (2016) による発育成績が低下した豚の試験で用いられているトウモロコシ油の過酸化に比べてはるかに低い。

表9. 精製トウモロコシ油と CDO の化学組成と過酸化度 (Kerr ら、2016 より引用)				
測定項目	精製 トウモロコシ油	CDO (FFA <sup>1</sup> 4.9%)	CDO (FFA 12.8%)	CDO (FFA 13.9%)
水分、%	0.02	1.40	2.19	1.19
不溶性不純物、%	0.78	0.40	1.08	0.97
不けん化物、%	0.73	0.11	0.67	0.09
粗脂肪、%	99.68	99.62	98.96	99.63
遊離脂肪酸、%	0.04	4.9	12.8	13.9
脂肪酸、全脂質中の%				
オレイン酸 (9c-18:1)	29.90	28.26	28.92	28.26
リノール酸 (18:2n-6)	54.57	53.11	54.91	53.11
リノレン酸 (18:3n-3)	0.97	1.32	1.23	1.32
ノナデカノン酸 (19:0)	ND <sup>2</sup>	0.65	0.65	0.65
アラキドン酸 (20:0)	0.40	0.39	0.39	0.39
ゴンドウ酸 (20:1n-9)	0.25	0.24	0.24	0.24
ベヘン酸 (22:0)	0.13	0.13	0.12	0.13
リグノセリン酸 (24:0)	0.17	0.19	0.18	0.19
その他の脂肪酸	0.21	0.41	ND	0.41
酸化を示す指標				
過酸化価、MEq/kg	1.9	2.9	3.3	2.0
アニシジン価 <sup>3</sup>	17.6	80.9	70.3	73.3
ヘキサナール、 $\mu\text{g/g}$	2.3	4.4	3.9	4.9

<sup>1</sup> FFA = 遊離脂肪酸

<sup>2</sup> ND = 未検出

<sup>3</sup> 単位なし

## 豚および家禽における CDO の ME 価

Kerr ら (2016) は、精製トウモロコシ油 (FFA : 0.04%A) および市販されている CDO 3 製品 (FFA : 4.9~13.9%) の豚における DE および ME 価とブロイラーにおける AMEn 価を測定している。表 10 に示すとおり、CDO の豚における ME 価は 8,036 から 8,828 kcal/kg の範囲にあり、FFA を 4.9%含む CDO の ME 価は精製トウモロコシ油と同等であった。精製トウモロコシ油 (8,741 kcal/kg)、FFA を 4.9%含む CDO (8,691 kcal/kg) および FFA を 13.9%含む CDO (8,397 kcal/kg) の ME 価は、NRC (2012) におけるトウモロコシ油の ME 価 (8,570 kcal/kg) と同等であった。全供試品中で ME 価が最も低かった FFA を 12.8%含む CDO を除き、CDO の FFA 含量は豚に DE 価および ME 価に影響を及ぼさなかった。ブロイラーにおける CDO の AMEn 価は、7,694 から 8,036 kcal/kg の範囲にあり (表 10)、精製トウモロコシ油の AMEn 価 (8,072 kcal/kg) と差がなかったが、これらの値は NRC (1994) による精製トウモロコシ油の AMEn 価 (9,639~10,811 kcal/kg) に比べて大幅に低かった。FFA 含量が様々な CDO を給与された子豚またはブロイラーにおける粗脂肪消化率には差がなかった。また、Kerr ら (2016) は、Wiseman (1998) の推定式を用いた場合に、精製トウモロコシ油と FFA を 12.8%

および 13.9%含む CDO では豚における DE 価は過大評価されたが、FFA 含量が 4.9%の CDO では推定値とほぼ同様の値を示したとしており、新たな DE および AMEn 価の予測式の開発が必要であることが示唆される。これは、豚とブロイラーの両者において固有の結果であるが、FFA を最大 14%含む CDO が、豚およびブロイラー用飼料のエネルギー源として機能することを示している。

表 10. 遊離脂肪酸 (FFA) 含量が異なる精製トウモロコシ油および CDO の豚およびブロイラーを用いた *in vivo* 試験から得られた DE および ME 価 (Kerr ら、2016 より引用)

測定項目	精製 トウモロコシ油	CDO (FFA <sup>1</sup> 4.9%)	CDO (FFA 12.8%)	CDO (FFA 13.9%)
総エネルギー (GE)、kcal/kg	9,423	9,395	9,263	9,374
可消化エネルギー (DE)、豚 kcal/kg	8,814 <sup>a</sup>	8,828 <sup>a</sup>	8,036 <sup>b</sup>	8,465 <sup>ab</sup>
代謝エネルギー (ME)、豚 kcal/kg	8,741 <sup>a</sup>	8,691 <sup>a</sup>	7,976 <sup>b</sup>	8,397 <sup>ab</sup>
粗脂肪消化率、豚 %	93.2	94.0	91.7	95.0
窒素補正した見かけの代謝エネルギー (AMEn)、家禽 kcal/kg	8,072	7,936	8,036	7,694
粗脂肪消化率、家禽 %	91.6	89.8	89.0	88.4
不飽和脂肪酸：飽和脂肪酸	6.13	5.00	5.61	5.00

<sup>ab</sup> 異付号間で有意差あり (p<0.05)

<sup>1</sup> FFA = 遊離脂肪酸。

## 結論

現在、CBS は限られたエタノール工場において未乾燥の製品が生産されており、歴史的にはトウモロコシ併産物、高水分トウモロコシおよび乾式圧ペントウモロコシに代わるエネルギー源として肉牛肥育用飼料としてのみ使用されてきたが、輸送コストをより低減した製品の利用が可能となった場合には、乳牛を含むより多様な反芻家畜用の飼料原料として使用する機会が増える可能性がある。一方で、CBS の乾燥製品では、ME 価および可消化アミノ酸含量は比較的低いため、大量に生産されて利用が可能となった場合でも、豚や家禽用の飼料原料としての用途は限定的である。脱油 DDGS は NovaMeal の製品名で小量が販売されている。脱油 DDGS は、泌乳中の乳牛に対して大豆主体の飼料を給与する場合に比べて、DMI の最大 20%まで給与できる。文献によると脱油 DDGS をほ乳期子豚用飼料に配合して許容できる範囲の発育成績を得られることが示されているが、育成-肥育期の豚用飼料に使用して発育成績を最適化するためにはエネルギーと可消化アミノ酸の補給が必要となる。CDO は、豚や家禽用飼料における優れたエネルギー源である。CDO の FFA 含量は 14%と高いものの、そのことは豚の ME 価には影響しないようにみられるが、ブロイラーの場合には著しく高い FFA 含量は AMEn 価を低下させるようにみられる。しかし、米国では再生可能なディーゼルオイルの生産用としての油脂への需要が非常に大きいため、将来的には、輸出市場での CDO の入手が制限される可能性がある。

## 引用文献

- AAFCO. 2020. Association of American Feed Control Officials - Official Publication. Champaign, IL.
- Anderson, P.V., B.J. Kerr, T.E. Weber, C.J. Ziemer, and G.C. Shurson. 2012. Determination and prediction of digestible and metabolizable energy from chemical analysis of corn coproducts fed to finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 90:1242–1254.
- Garland, S.A., M.L. Jolly-Breithaupt, H.C. Hamilton, G.E. Erickson, J.C. MacDonald, and R.A. Mass. 2019a. Evaluation of the energy value and nutrient digestibility of distillers grains that have undergone a fiber separation process in finishing diets. *Nebraska Beef Cattle Reports*, 1019, p. 94–96. <https://digitalcommons.unl.edu/animalscinbcr/1019>
- Garland, S.A., B.M. Boyd, F.H. Hilscher, G.E. Erickson, J.C. MacDonald, and R.A. Mass. 2019b. Evaluation of corn bran plus solubles on performance and carcass characteristics in finishing diets. *Nebraska Beef Cattle Reports*, 1020, p. 91–93. <https://digitalcommons.unl.edu/animalscinbcr/1020>
- Garland, S.A., B.M. Boyd, F.H. Hilscher, G.E. Erickson, J.C. MacDonald, and R.A. Mass. 2019c. Evaluation of fractionated distillers grains (high protein and bran plus solubles) on performance and carcass characteristics in finishing diets. *Nebraska Beef Cattle Reports*, 1021, p. 88–90. <https://digitalcommons.unl.edu/animalscinbcr/1021>
- Hanson, A.R., P.E. Urriola, L. Wang, L.J. Johnston, C. Chen, and G.C. Shurson. 2016. Dietary peroxidized maize oil affects the growth performance and antioxidant status of nursery pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 216:251–261.
- Hanson, A.R., P.E. Urriola, L.J. Johnston, and G.C. Shurson. 2015. Impact of synthetic antioxidants on lipid peroxidation of distiller's dried grains with solubles and distiller's corn oil under high temperature and humidity conditions. *J. Anim. Sci.* 93:4070–4078.
- Hung, Y.T., A.R. Hanson, G.C. Shurson, and P.E. Urriola. 2017. Peroxidized lipids reduce growth performance of poultry and swine: A meta-analysis. *Anim. Feed Sci. Technol.* 231:47–58.
- Jacela, J.Y., J.M. DeRouchey, S.S. Dritz, M.D. Tokach, R.D. Goodband, J.L. Nelssen, R.C. Sulabo, R.C. Thaler, L. Brandts, D.E. Little, and K.J. Prusa. 2011. Amino acid digestibility and energy content of deoiled (solvent extracted) corn distillers dried grains with solubles for swine and effects on growth performance and carcass



- characteristics. *J. Anim. Sci.* 89:1817–1829. doi:10.2527/jas.2010-3097
- Jacela, J.Y., H.L. Frobose, J.M. DeRouchey, M.D. Tokach, S.S. Dritz, R.D. Goodband, and J.L. Nelssen. 2010. Amino acid digestibility and energy concentration of high-protein corn dried distillers grains and high-protein sorghum dried distillers grains with solubles for swine. *J. Anim. Sci.* 88:3617–3623.
- Kerr, B.J., W.A. Dozier III, and G.C. Shurson. 2016. Lipid digestibility and energy content of distillers' corn oil in swine and poultry. *J. Anim. Sci.* 94:2900–2908.
- Kerr, B.J., T.A. Kellner, and G.C. Shurson. 2015. Characteristics of lipids and their feeding value in swine diets. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 6:30.
- Mjoun, K., K.F. Kalscheur, A.R. Hippen, D.J. Schingoethe, and D.E. Little. 2010a. Lactation performance and amino acid utilization of cows fed increasing amounts of reduced-fat dried distillers grains with solubles. *J. Dairy Sci.* 93:288–303. doi:10.3168/jds.2009-2377
- Mjoun, K., K.F. Kalscheur, A.R. Hippen, and D.J. Schingoethe. 2010b. Performance and amino acid utilization of early lactation dairy cows fed regular or reduced-fat dried distillers grains with solubles. *J. Dairy Sci.* 93:3176–3191. doi:10.3168/jds.2009-2974
- Mjoun, K., K.F. Kalscheur, A.R. Hippen, and D.J. Schingoethe. 2010c. Ruminal degradability and intestinal digestibility of protein and amino acids in soybean and corn distillers grains products. *J. Dairy Sci.* 93:4144–4154. doi:10.3168/jds.2009-2883
- Mjoun, K., K.F. Kalscheur, A.R. Hippen, and D.J. Schingoethe. 2009. 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.
- Noblet, J., H. Fortune, X.S. Shi, and S. Dubois. 1994. Prediction of net energy value of feeds for growing pigs. *J. Anim. Sci.* 86:2180–2189.
- Noblet, J., and J.M. Perez. 1993. Prediction of digestibility of nutrients and energy values of pig diets from chemical analysis. *J. Anim. Sci.* 71:3389–3398.
- NRC. 2012. *Nutrient Requirements of Swine*, 11th rev. Natl. Acad. Press, Washington, D.C.
- Paula, V.R.C., N.C. Milani, C.P.F. Azevedo, A.A., Sedano, L.J. Souza, B.P. Mike, G.C. Shurson, and U.S. Ruiz. 2021. Comparison of

- digestible and metabolizable energy and digestible phosphorus and amino acid content of corn ethanol coproducts from Brazil and the United States produced using fiber separation technology for swine. *J. Anim. Sci.* 99:1–13. doi:10.1093/jas/skab126
- Rochell, S.J., B.J. Kerr, and W.A. Dozier, III. 2011. Energy determination of corn co-products fed to broiler chicks from 15 to 24 days of age, and use of composition analysis to predict nitrogen-corrected apparent metabolizable energy. *Poult. Sci.* 90:1999–2007. doi:10.3382/ps.2011-01468
- Shurson, G.C, B.J. Kerr, and A.R. Hanson. 2015. Evaluating the quality of feed fats and oils and their effects on pig growth performance. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 6:10.
- Wiseman, J., J. Powles, and F. Salvador. 1998. Comparison between pigs and poultry in the prediction of dietary energy value of fats. *Anim. Feed Sci. Technol.* 71:1–9.
- Yang, Z., A. Palowski, J.-C. Jang, P.E. Urriola, and G.C. Shurson. 2021. Determination, comparison, and prediction of digestible energy, metabolizable energy, and standardized ileal digestibility of amino acids in novel maize co-products and conventional dried distillers grains with solubles for swine. *Anim. Feed Sci. Technol.* 282:115149. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.115149>