

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世紀にウィ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、GFP 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 比は十分には解明されていない。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

CFP 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、CFP 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、CFP 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 β -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の国で禁止されており、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、 β -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 GFP 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 β -グルカンを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。

GFP 中の β -グルカン含量は、酵素的酵母 β -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)。 β -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 β -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 β -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、 β -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 と結論付けている。いくつかの文献で、数種類の魚類に酵母の β -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、GFP 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 β -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、 β -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い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、これらの違いを明確にし、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、その違い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™	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

	(FST™) を用いて生産されたノーブランド品					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 (syrup) (CDS)	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。
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™ ^(*) 、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ず、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

CD0 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。

CFP（トウモロコシ発酵たん白質）の栄養組成

CFP 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。

成分	ANDVantage 50Y ¹	Still Pro 50 ²	A+ Pro ³	NexPro ⁴	ProCap Gold ⁵
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 ⁶	24.1	26.52	NR	NR
酸性デタージェント繊維 (ADF)、%	22.22 ⁶	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 ⁶	0.05	0.04	NR	0.05
リン (P)、%	0.70 ⁶	1.1	0.89	NR	0.88

* NR = データなし

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

² 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

³ Yang ら (2021) の公表データ

⁴ Acosta ら (2021) の公表データ

⁵ Cristobal ら (2020) の公表データ

⁶ 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 ¹	Still Pro 50 ²	A+ Pro ³	NexPro ⁴	ProCap Gold ⁵
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

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

² 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

³ Yang ら (2021) の公表データ

⁴ Acosta ら (2021) の公表データ

⁵ 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ず地球温暖化	kg CO ₂ 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ず二酸化炭素 (CO ₂) 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	参照基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 NO _x 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 PM _{2.5} 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 NO _x 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 ₂ 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 ² 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 ³	1 kg の製品を生産するのに必要な水の量 (m ³) の指標

FAO (国連食糧農業機関) は、GHG および二酸化炭素 (CO₂) 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) の利用性を改善し、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、Cowleson 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、水資源の不足に関っている (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 CO₂ 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 GFP（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、CO₂ 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 GFP（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。

GFP 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 GFP 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 GFP

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、タイハ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 CO₂ 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。同様にタイハ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 CO₂ 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 ^b	30.4 ^a	28.7 ^b
GHG 排出量、kg CO ₂ 換算量/kg 増体	2.48	2.21	2.01
GHG 排出量、kg CO ₂ 換算量/kg 鶏肉	5.85	5.03	4.57

^{ab} 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 ₂ 換算量/kg 飼料	1.64	1.55	1.47	1.39	1.30
GHG 排出量、kg CO ₂ 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 GI 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、タイハ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-Hiablíe, 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>
- Cemin, 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
- Cemin, 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. Falcucci, 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
- 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](https://doi.org/10.2527/jas2015-9036)
- Kerkaert, H. R., H. S. Cemin, 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](https://doi.org/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. Opiyo, 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
- Vetvicka, V., and C. Oliveira. 2014. β (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 β –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](https://doi.org/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