

DDGSの利用:総説(Utilization of Distiller's dried grains with solubles: A review)

訳:米持千里

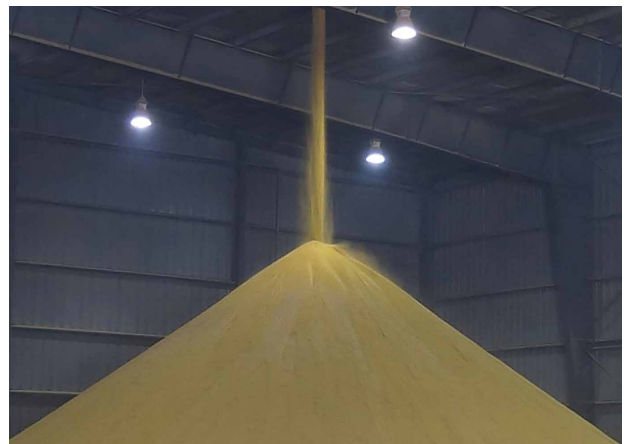
DDGSの利用についての、総説が出版されました (Utilization of Distiller's dried grains with solubles: A review, Ra ñia Marie, E. Buenavista, Kaliramesh Siliveru and Yi Zheng, Journal of Agriculture and Food Research, 5, 100195 (2021))。ここに仮訳を作りましたので、紹介いたします。詳細な内容、参考文献などについては、原著の総説 (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666154321000971>) をご参照ください。

(167号より続く)

4.3.輸送

成長を続けているエタノール産業のもう1つの懸念は輸送の問題である。DDGSの輸送に関しては、輸送用タンクローリーとホッパーにおける積み残しの問題が明らかになっている。これはDDGSとエタノール業界に課題となっているが比較的短期間に解決することができる。米国の地方都市では、DDGS等の需要を満たすために、より大きな輸送機材、車両およびインフラ整備が必要となっている。鉄道は、特に新しく設立されたエタノール工場近郊地域における車両通行量の増加を抑制できるため考慮されていない。年間1億ガロンのエタノールを生産するために、トウモロコシを満載したトラックが1日あたり100台使用されていると言われている。その結果、トラック70台分の出荷物(その半分はエタノールで、残りの半分はDDGS)を積み込むことになる。これらの地域での車両交通量の増加は、地方都市の高速道路の維持管理にも影響を与える可能性がある[56]。これらの問題は、エタノールとDDGSの需要が急速に増加しているために継続して発生している。建設が難しいまたは古い鉄道、橋、その他の経路でも問題が発生する可能性がある。したがって、エタノール業界のニーズを補うためのインフラ整備や輸送機材に追加予算を割り当てる必要がある。

DDGSの流動性も輸送と保管の際に問題を引き起こしている。DDGSの輸送中に発生するこのような問題には、鉄道車両、トラック、コンテナおよびホッパー内でのケーキングおよびブリッジの発生が含まれている。これらの流動性の問題から、コンテナからのDDGSの荷降ろしが困難となり、DDGSの損失が避けられなくなっている。大型のハンマーを用いてブリッジを崩すためには、より多くの作業員が必要となり、機器の損傷や、車両の修理・交換のために追加の費用も発生する[57]。ケーキングやブリッジングは、主に環境条件(相対湿度や温度など)、粒子サイズの分



布と表面特性、化学的性質、外部要因(圧縮や振動)、流動挙動および保管時間の組合せに起因する可能性がある[58]。輸送および保管中のDDGSの固結を減らすためのいくつかの方法が提案されている。その中には、DDGSの水分分布を均一に保つこと、乾燥後より速やかに冷却すること、乾燥方法の改善等がある[59]。

4.4.栄養素の変動性

エタノールの生産効率はDDGSの品質に大きく影響する。具体的には、エタノール生産のためのドライミリングでは、最初のステップで穀粒を粉碎し、水と酵素を加えるため、穀物の粒度分布はデンプンの加水分解と発酵に直接影響する。粉碎粒度は、粉碎機の種類、粉碎機の刃の鋭さ、ロット内の異物、スクリーン/メッシュサイズ、粉碎メカニズム、水分含量など、いくつかの要因に依存している[60]。このため、物理的特性に適した適切な粉碎方法を選択することにより最適化することができる。

原料の成分組成もDDGSの成分組成に影響する。トウモロコシ中の炭水化物はエタノール発酵に使用されるため、DDGSの炭水化物以外の成分含量は約2~3倍になり、原料が持つ変動が増幅される[61]。反芻動物では、イオウはたん白質の微生物合成を最大化するために機能している。エタノール製造におけるpHレベルの調整にはイオウの添加が必要であるため、DDGSには高濃度のイオウが含まれている。乳牛における飼料中のイオウの最大許容レベルは最大0.4%である。DDGSを約60%配合した飼料を給与した牛では異常な行動パターンと抑うつ兆候が観察されており、これは飼料中のイオウ含量が最大許容レベルを超えたことに起因している可能性がある[62]。したがって、DDGSを配合した牛用飼料においてDDGS中のイオウ含量を低減するた

めに、生産時のpH調整工程を改善する手法を検討する必要がある。

固形画分に添加されるシンティレーズの割合は、DDGSの成分組成に影響を与える。固形画分には、特定の比率（プラント間で大きく異なる）でシンティレーズが添加される。AAFCO（米国飼料検査官協会）の定義では、DDGSは、エチルアルコールを蒸留することによって抽出・分別された穀物の酵母発酵併産物とされており、一連の濃縮と乾燥工程を経ている〔61〕。固形画分には濃縮したシンティレーズをすべて混合する場合もあるが、混合量が少ない例も一部にある。Ganesanら〔58〕は、DDGSのEEおよびCP含量に対するシンティレーズの混合割合の影響を調査し、シンティレーズの混合割合の増加にともないEE含量が増加し、CP含量が減少するとしている。

前述のように、DDGSからのDCO抽出も栄養価に影響を与える。DCO抽出の程度はプラントによって異なる可能性があるため、低脂肪DDGSの成分組成にはばらつきが生じる。従来のDDGSと低脂肪DDGSは成分組成が大きく異なり、後者ではDEおよびMEが減少し、CPが増加している。一方、過度の乾燥は、異なるDDGS間でのアミノ酸の生物学的利用率にばらつきを発生させる可能性がある。乾燥方法が違えばDDGSの栄養組成も異なることになる。DDGSの品質に影響を与える乾燥工程の要因には、乾燥温度、乾燥機内の滞留時間、混合条件および乾燥機の種類がある〔63〕。DDGS中のリンの生物学的利用率は、124kPaおよび121℃で60～80分間オートクレーブ処理するか、121℃で60分間乾熱加熱すると高まることが観察されている〔64〕。しかし、これらの加熱条件ではアミノ酸消化率の低下が観察されている。

4.5.環境の持続可能性

飼料にDDGSを配合することは、栄養的および経済的な利点とは別に、環境の持続可能性を達成するための有益な手段でもある〔65〕。近年、農業を含むほとんどの分野では、環境に悪影響を及ぼさないシステムでの生産工程を採ることを目指している。その1つの手法として、製造前および製造後の各段階における無駄を減らすことがあげられ、したがって、多くの企業は、高い栄養価を提供するだけでなく、畜水産業界全般でのCO₂排出量の低減につながる飼料原料を求めつつある。

インドネシアでは、水産養殖で用いられる一般的な飼料原料について、酸性化、土地占有、地球温暖化および富栄養化等の環境影響に関する調査が行われており、DDGS利用による環境影響は中間レベルにあるとされている。ただし、DDGSは温室効果ガスの排出量を増加させる〔66〕。Masséら〔26〕は、乳牛にDDGSを30%配合した飼料を給与すると、揮発性固形物、ADF、NDF、ヘミセルロースおよび糞尿の乾物量がそれぞれ18%、15%、30%、53%および18%増加することを明らかにしている。DDGSを給与された家畜の糞尿は、適切に取扱わない場合には環境問題となり得るが、堆肥は貴重な肥料として利用できる。

NEと可消化栄養成分含量の情報を用いた精密な飼料設計を行ってDDGSを飼料原料として最大限に活用することで環境的に持続可能となり、窒素とリンの排泄量を減少できる。豚、家禽および養殖水産動物用飼料ではリジン要求量が高いが、入手が簡単で費用対効果も高い合成アミノ酸により補うことが出来る。この解決法は、リジン以外のアミノ酸が低レベルである場合にも応用できる。Almeida & Stein〔67〕は、DDGSが可消化リンの優れた供給源であるとしている。リンの消化率が低い他の飼料原料とDDGSを置換することで、リンの排泄量を低減することが出来る。Spiehsら〔68〕は、育成～肥育期の豚用トウモロコシ・大豆粕主体飼料にDDGSを20%配合しても、堆肥の総還元イオウおよびアンモニア濃度と臭気には統計学的な差はないとしている。

飼料にDDGSを配合することで発生する別の環境問題は、糞尿が泡立つ可能性である。この現象は、米国の養豚産業における大きな問題であり、糞尿ピットの必要容量を増加させ、バイオガスの発生量が増加する。糞尿の泡立ちは、粒子サイズが大きい飼料画分と食物繊維含量の多さに起因しており、事実上、乾物排泄量と栄養成分の消化率に悪影響を及ぼす〔47, 69〕。Jakobsonら〔70〕は、DDGSの配合により豚の糞尿中の脂肪酸が増加することで、糞尿ピットが泡立ち易くなった可能性があると推察している。糞尿の泡立ちは、ガス、泡安定剤、界面活性剤などの3つの要因によるため、通常でも少なからず発生する。DDGS中の食物繊維は泡の安定剤として機能し、脂肪酸は表面張力の低下に関与する界面活性剤として機能する。糞尿の泡は溶存ガス、特に畜舎面積の最大5～15%を占める可能性があるメタンを発生する可能性がある。メタンの爆発限界の最低値と最高値はそれぞれ5%と15%であり（空気中のv/v）、糞尿の攪拌により爆発などを引き起こす可能性がある。糞尿ピットの発泡の短期的な対処方法として、糞尿10万ガロンあたり5ポンドのモノネンシンを糞尿ピットに添加することが提案されているが、この問題の長期的な解決策の開発には、さらに研究が必要である。

5.潜在的な用途と今後の方向性

5.1.発酵原料

DDGSは炭素、窒素、その他の栄養成分含量が高く、需要が急激に高まるため、バイオエタノールより価値が高い製品を生産するための有望な発酵原料と見られてきた〔2, 71〕。トウモロコシと前処理を施したDDGSの混合物（混合比1:1）の利用により、エタノール生産時の原料コストの削減が可能である。トウモロコシのみを原料とした場合の負荷速度（30%）と比較して、希酸処理したトウモロコシとDDGSの混合物では、エタノール生産量が12.6%増加し、セルロース生産量が86.5%増加した。一方、液体熱水で処理したトウモロコシとDDGSの混合物は、エタノール生産を12.6%、セルロース生産量を69.3%増加させた〔72〕。DDGS主体の付加価値製品の製造では、前処理工程によるDDGS中の繊維の発酵性糖への変換が必要となる。これにより、グルコース、キシロース、マンノース、アラビノース、その他の炭水化物モノ

マーが抽出され、微生物発酵のエネルギー源として使用される。この工程により、微生物培養時にDDGSを用いてメタン、水素、アセトンおよび有機酸を生成する[2]。この前処理工程の課題は、エネルギーコストが高く、不要な成分が放出されることである。したがって、特定の微生物発酵に適した固有の様々な前処理工程の検討が必要となる。技術的な不確実性は別として、経済的な懸念もこの潜在的な用途に関連している。真菌汚染を回避し、輸送コストを削減するために、ウェットDGSを乾燥させる必要があるためにより多くの費用が必要となるが、DDGSを生産現場でそのまま利用することが出来れば、乾燥コストを削減できる。例えば、DDGSの製造プラント内で、加水分解酵素やバイオ燃料などの付加価値製品の生産が可能となる。ただし、この解決策は、プラント内に利用可能なスペースがあり、環境規制をクリアできることが条件となる。発酵原料としてのDDGSは実験室レベルでの実現は可能であるが、これをスケールアップした大規模生産時の不確実性(技術的成熟度、コスト、市場など)を克服するには、さらなる研究が必要となる。

5.2. 食品としての用途

食品グレードのDDGS(FDDG)はまだ上市されていないが、様々な調査研究により、FDDGは様々な食品において有望なことが示されている。食品としての潜在的な用途は、栄養的および経済的利益につながる可能性がある。DDDGはCPと繊維含量が高いことから、FDDGを配合した食品の摂取により、冠動脈性心臓病、肥満、糖尿病および結腸癌の発症を予防出来る可能性が示されている[73]。FDDGを食品に配合するとデンプン含量が低下するため、血糖コントロールが容易となり食後の血糖値が低くなるため、糖尿病患者用の代替食品としての選択肢となり得る[74]。FDDGを食品業界に導入することが出来れば、DDGSの価値自体が他の食品原料より高まる可能性がある。

Krishana[75]は、DDGまたはDDGSを、色調および臭いが食品に適し、かつ、CPと繊維の含量が高いFDDGに変換する手法を開発した。この方法には、食品グレードの溶剤による洗浄、粉碎、滅菌および真空処理が含まれている。色調の改善には、エタノール洗浄または超臨界二酸化炭素(SCO₂)抽出が利用できる。SCO₂抽出は処理時間がより短く、エタノール洗浄と比べてFDDGの色調をより改善することが出来た。この方法で、CP25%以上、EE15%未満、食物繊維 30%以上のFDDG製品を製造出来る。

食品用途、特にパン、パスタ、クッキーおよびエクストルード食品におけるDDGSの潜在的な用途について、いくつかの調査が行われている。Pourafsharら[76]は、イランの伝統的なパンであるバルバリパンの製造時にDDGSを配合すると、CPと繊維の含量が大幅に増加し、DDGSはシリアルを主体とした製品の栄養成分を強化するための原料になる可能性があると報告している。ただし、DDGSを加えると、パンがざらざらして固くなるため、ステアロイル乳酸ナトリウム(SSL)を使用してパンを柔らかくする必要があった。さらに、DDGSの配合量の増加とともに、パンの色調が暗

くなることを明らかにしている。DDGSを食品用途に利用する際に直面する課題の1つは、食品の官能的品質がDDGSの配合量とともに大幅に変化することである。DDGSは、置換した原材料と機能が異なることが多い。そのため、焼き菓子の生産量と膨張性、テクスチャーおよび吸湿性に変化が生じる。また、元の製品の香りが変化し、嗜好性面での市場受容性が低下する。DDGSを配合した食品の香りを改善するために、オフフレーバーとオフカラーに寄与する脂肪酸と色素を用いた配合前の漂白や脱臭などの方法が研究されている[77]。小麦粉を配合した平らなパンや他の酵母発酵製品などの一部の生地にはFDDGを配合することが出来る。FDDGは、蒸しパンの食感や味に大きな影響を及ぼすことなく、生地に最大15%配合することが出来る。配合量が15%以上となると、グルテンレベルを低下させ、グルテンネットワークの形成に大きな影響を与え、吸水率の上昇、伸展性の低下、空気細胞の減少および発酵時間の短縮がみられた[78]。蒸しパンの配合時に砂糖と生地の改良剤を添加すると、DDGSを配合した場合の食感、風味および口当たりがより改善されることが示唆されている。

食べやすく美味しく、しかも、ヘルシーなおやつ需要が高まっている。より健康的なスナック代替品を検討するために、Singhら[79]は、ヒヨコマメ粉、コーングリッツおよびDDGS(FDDGに処理済み)を様々な混合比で組合せて、高CP、高繊維のエクストルード・スナックを製造した。FDDGを20%含む原料に水を19%加え、140°C、167rpmのスクリー速度でエクストルード加工することで、望ましいスナックの製造が可能であった。健康食品に対する食品業界の関心を基に、食物繊維、たん白質および繊維性物質の豊富さと、低脂肪含量を考えると、DDGSを機能性食品原料として利用できる可能性は大きい。しかし、FDDGを含む食品を商品化する際には、FDAの承認を取得する必要がある。

5.3. ペットフードと糞尿処理剤としての用途

ペットフード市場は、長期にわたり大きく拡大している。ペットフードには、すぐに食べられる缶詰やエクストルード加工されたスナックもあり、消費者は、ペットの様々なライフステージにおけるニーズを満たすために、費用対効果が高い方法を選択することが出来る。ペットフードの研究は、品質を低下させることなく配合コストを最小限に抑えるための代替成分の発見に注力されてきた。Risoliaら[80]の研究では、キシラナーゼとプロテアーゼを添加したDDGSを含むドッグフードでは、短鎖脂肪酸の組成が変化し、糞便のpHが低下する等の潜在的なプレバイオティクス効果が見込まれるとしており、腸内の有用微生物の増殖を促進するDDGSの作用についてさらなる研究が望まれている。これらの研究には、乾物、総エネルギー、有機物および酸加水分解粗脂肪消化率の低下が見られてはいるが、全般的に許容範囲内の消化率であって、DDGSを低コストのドッグフードに配合できる可能性が示唆されている。キシラナーゼの添加は、栄養価の変動を最小限に抑え、家畜用飼料、特に豚や家禽用飼料の消化率

を改善する。Silvaら[16]は、最大18%のDDGSを配合したドッグフードでは、栄養成分の消化率とエネルギー含量が減少するが、キシラナーゼの添加により、乾物、CPおよび有機物消化率が高まった。嗜好性の面からも、同様の配合割合が適用できる。ペットフードには、5~40%の脂肪が含まれている[81]。さらに、Huら[82]は、DDGSに由来するたん白質加水分解物は、脂質の酸化を阻害する可能性がある抗酸化特性を有していると結論している。

ペットフードの安全性は、消化器系や全体的な健康状態との関係を考える重要な懸念事項となる。マイコトキシンは、特定の種類の真菌によって生成される複雑な天然毒素であり、真菌は劣悪な環境条件下で増殖する。マイコトキシンはペットの健康とパフォーマンスに影響を及ぼすが、その程度はペットの一般的な健康状態、年齢、品種、マイコトキシンの種類によって異なる。Fockerら[83]は、飼料中のマイコトキシンに関するEUのガイダンス値を満たすために、バイオエタノールとDDGSの生産にFUMzymeとZENzymeなどの2つのマイコトキシン分解酵素を使用した。その結果、これら2つの酵素がDDGSサンプルの90%以上でゼアラレノンとフモニシンB1を定量限界(30 μ g/kg)未満まで特異的に分解でき、これらの酵素の利用により、バイオエタノール産業はより多くの収入を得ることが出来、DDGSを使用するペットフード製造業者はマイコトキシンを含まない製品の利用により良い健康状態とパフォーマンスを期待することができる。ペットフード産業におけるDDGSの別の潜在的な用途として、生分解性で臭気を低減するネコ用トイレへの配合がある。米国では、ネコは屋内飼育されているペットの中で最も人気のある1つである。ネコ用のトイレには吸収性の材料が詰められており、猫の糞便を簡単に清掃し、臭いの広がりを防ぐことが出来る。Vaughnら[84]の研究では、ヘキサソール溶液中でDDGSから植物化学物質を抽出している。これを配合したネコ用トイレ(凝集剤、臭気抑制剤、および防塵剤としてそれぞれ機能するグアーガム、硫酸銅およびグリセロールからなる)は高い水和能力を有していた。

5.4. バイオコンポジット(生分解性ポリマーとの複合化により完全生分解の可能な複合材料)としての用途

高分子複合材の製造における補強剤または充填剤としてのDDGSの潜在的な用途は、DDGSに付加価値を与える有望な分野の1つである。石油を原料としたポリマーの代替材料発見のために、DDGSなどの農業併産物が、様々な産業で持続可能な方法で使用できるバイオベースのポリマーおよび複合材料の製造用に検討されてきた。バイオベースの高分子複合材料は、樹脂、繊維、発泡体の形で、様々な産業用途で広く使用できる。また、生分解性と生体適合性により、ドラッグデリバリーや組織再生、架橋などの医療分野でも利用できる[85,86]。Zarrinbakhshら[87]の研究において、溶融押出成形および射出成形を行ってDDGとコポリプロピレンのバイオコンポジットを製造し、次に、マレイン化ポリプロピレン相溶化剤と混合して、バイオコンポジットの引張強度と曲げ強度を改善した。適切な添加剤を特定することによ

り、靱性、メルトフロー挙動および柔軟性の観点からバイオコンポジットの特性をさらに強化するためには、さらなる作業が必要となる。一方、DDGSをポリヒドロキシアルカノエート(PHA)に添加すると、持続可能なプラスチックの利用に適用できる生分解性と機械的特性を備えたバイオコンポジットが形成された。このバイオコンポジットは、最終的に土壌中の有機物として分解するように設計されている。DDGSで複合材料を強化する利点としては、生分解速度の向上、PHAの機械的特性の向上および材料費の削減がある。さらに、DDGSとPHAのバイオコンポジットは、土壌中で生分解後24週間まで接触しても植物に対して無毒であると宣言されており、植物栽培用途に適している。

6. 結論

DDGSは、他の様々な有望な産業用途がある一方で、従来から、飼料原料として長い間使用されてきた。肥料、発酵原料、コーン油生産の原料など、その多くの潜在的な用途により、製造工程の最適化の研究は、収量、収益性の向上および環境への悪影響の低減につながっている。飼料にDDGSを適切な量を配合すると、家畜などの飼育成績を改善することが出来る。様々なDDGSで見られる栄養成分の変動により、最終用途は、CP、粗脂肪およびその他の重要な栄養成分組成に応じて決定することが出来る。さらに、飼料の安全性は、その用途の様々な段階で評価する必要があり、定期的に監視する必要がある主要な懸念事項の1つである。飼料原料としてのDDGSの利用は、代替となる他の飼料原料と比べてCO₂排出量、酸性化、地球温暖化、富栄養化への影響が最小限であるため、環境の持続可能性を高めることに寄与する。農業およびエタノール産業における経済的および技術的影響を評価および分析するためには、さらなる研究が必要となる。DDGSの経済的価値は、バイオエタノールおよびメタン、アセトン、有機酸などの付加価値製品製造における潜在的な用途によって増加すると予測される。食品、ペットフード、バイオコンポジットおよび発酵産業におけるDDGS基原の付加価値製品の開発は、将来的にDDGSの市場を拡大し、バイオ燃料産業を継続させるが、このためには、より多くの資金と研究が必要となる。さらに、このようなDDGSを基原とする製品を工業規模で製造する際には、特に食品およびペットフードに関する基

ネットワークに関するご意見、
ご感想をお寄せ下さい。



U.S. GRAINS アメリカ穀物協会
COUNCIL

〒105-0001 東京都港区虎ノ門1丁目2番20号
第3虎の門電気ビル11階

Tel: 03-6206-1041 Fax: 03-6205-4960

E-mail: Japan@grains.org

本部ホームページ (英語) :<https://www.grains.org>
日本事務所ホームページ (日本語) :<https://grainsjp.org/>