

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, Rañia 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。

概要

様々な穀物を原料として生産されるエタノールは、世界的に需要が高まっている。それとともに、併産物であるDDGSの生産量が増加しており、2019年の米国における生産量は2,200万トン以上となっている。DDGSは栄養価が高いため、家畜用飼料、肥料、トウモロコシ油の供給源として利用されており、環境の持続可能性を高めるだけでなく、農業にも有益である。DDGSは比較的新しい原材料として、今後の生産と利用を持続するためには、利用技術とそれの経済的な側面を明らかにしておく必要がある。農業、医療、工業、食品、ペットフードなどへの利用を含む潜在的な用途は、DDGSの再生可能資源としての価値をより高める可能性がある。本稿では、DDGSの成分組成、生産、現在の利用および課題と将来の方向性について総説する。

1.はじめに

DDGSは、栄養価が高く、安価であるため、飼料産業で広く使用されている飼料原料である。ドライミリング工程での併産物の1つであり、バイオエタノールの発酵工程で生じる未利用の穀物成分で構成されている。米国における2019年の生産量は約2,260万トンに達している[1]。バイオエタノールの需要の増加にともない、DDGSの生産も増加すると予想されており[2]、米国国内市場および国際市場向けに提供されている。トウモロコシを原料としたエタノール発酵により、1ブッシュル(約25.4kg)あたり、エタノール約10.22L、二酸化炭素(CO₂)8.16kgおよびDDGS 8.16kgが生産される[3]。

DDGSはドライミリング工程により製造される[4]。その工程は、ハンマーミルにより全粒穀物を平均粒子径1mm程度に粉砕し、水と混合することでデンプンを液化する。この混合液を加温しながら酵素を加えてデンプンを糖化する。糖化液を冷却したのち、酵母を加えて発酵させ、糖成分をエタノールに変換し、エタノールと残りの不揮発性成分に分離する。不揮発性成分(ホールスティレージ)を遠心分離し、液体画分(シンティレージ)と固体画分(シンステレージ)に分離する。シンステレージは蒸発タンクでさらに濃縮し、ドラムドライヤーで乾燥中の固形画分に混合してDDGSが製造される[5]。すべての乾燥発酵製品に共通する煙臭が特徴である[6]。

DDGSは、主に畜産分野(乳牛や豚など)で利用されている。近年、DDGSを配合した飼料の需要は指数関数的に増加している。比較的新しい持続可能な飼料原料であるDDGSの価値を明らかにするために、多くの技術的側面を解明しておく必要がある[2]。栄養組成のばらつきは、原料穀物の種類(トウモロコシやソルガムなど)、発酵効率、製造工程の設計および様々な供給業者間でのエタノール生産に対する考え方に大きく影響される。このため、様々な供給業者から得られたDDGSを分析し、飼料原料としての価値を推定するための試みが行われている。

本稿では、農業、医療、食品、ペットフード業界におけるDDGSの現在および潜在的な用途、成分組成と、食品および飼料原料としてのDDGSの利点と制限要因、将来的な応用などについて総説する。

2.栄養成分

トウモロコシは、北米においてエタノール生産に用いられる最も一般的な原料であり、その他にもソルガム、小麦、大麦などが原料として使われている。一部ではこれらを組み合わせている例もある。成分組成のばらつきは原料穀物が同じ場合にも発生する。これは、原料穀物の品質や粉碎粒度、乾燥方法や乾燥効率等の処理技術や条件が原因となる可能性がある[7]。粒子密度やサイズなどがほぼ同じために発生する滞留は、通常、トラック、平積み倉庫およびビンで発生する[8]。表1にトウモロコシ、小麦、大麦、ソルガムを原料としたDDGSの成分組成を示した。小麦DDGSは、CP(粗たん白質)が最も高く、RUP(ルーメン非分解性たん白質)が最も低い。一方、トウモロコシDDGSはRUPと産乳のNE(正味エネルギー)が最も高い。大麦DDGSはCPが最も低く、NDF(中性デタージェント繊維)およびADF(酸性デタージェント繊維)が最も高い。一方、ソルガムDDGSはEE(エーテル抽出物)とRUPが最も高い。一般に、DDGSはNDF含量が高く、リグニン含量が低いことから、消化しやすい繊維の供給源になっている[9]。

表2には、これまでに公表されている様々な文献におけるトウモロコシDDGSの栄養成分を取りまとめた。これらの中で、GE(総エネルギー)は、2013年にはDCO(ジスチラーズコーンオイル)の抽出が始まったことから、2012年に対して乾物で約424kcal/kg減少したが、その後2018年まではほぼ同様レベルを維持している。

3.生産と利用

2019年における米国のエタノール生産量は157.8億ガロンであり[18]、使用された原料の約95%はトウモロコシである。2000年から2018年において、米国でエタノール生産に仕向けられたトウモロコシの割合は6.5%から37.6%に増加している[19]。米国の次にエタノール生産量が多いのはブラジルで、EUが続いている。他には、中国、カナダ、タイ、アルゼンチン、インドで穀物からエタノールを生産し

表1.穀物由来のDDGSの成分組成

成分	原料穀物 (% DM)			
	トウモロコシ	小麦	大麦	ソルガム
粗たん白質	30.1	36.2	15.4	32.0
粗たん白質中の第一胃非分解性たん白質(RUP%)	55.0	37.2	49.0	55.0
維持に要する正味エネルギー(Mcal/kg)	2.07	2.18	1.87	2.11
増体に要する正味エネルギー(Mcal/kg)	1.41	1.50	1.24	1.39
泌乳に要する正味エネルギー(Mcal/kg)	2.26	2.02	1.73	1.91
中性デタージェント繊維 (NDF)	41.5	41.4	74.3	46.0
酸性デタージェント繊維 (ADF)	16.1	17.3	31.1	28.4
粗脂肪	10.7	6.7	6.0	11.5
灰分	5.2	5.4	4.2	3.6
カルシウム	0.22	0.30	-	0.10
リン	0.83	1.05	-	0.84
マグネシウム	0.33	0.60	-	-
カリウム	1.1	1.7	-	-
ナトリウム	0.30	0.23	-	-
イオウ	0.44	0.57	-	-

出典: Schingoethe [9]からの抜粋。「-」は未報告を示す。

表2 複数年の公表データによる、トウモロコシDDGSの栄養組成 (他の表示がない場合、%DM)

成分	2006 [10,11]	2007 [11,12]	2009 [11,13]	2012 [11,14]	2013 [11,15]	2016 [11,16]	2018 [11,17]
総エネルギー(GE) ^a	5422	5434	5593	5420	4996	4805	5049
可消化エネルギー	3556	4140	4072	4029	3635	-	-
代謝エネルギー	-	3897	-	3790	3435	-	-
乾物 (DM)	88.90	87.60	89.30	89.10	87.00	90.84	-
粗たん白質	31.00	32.20	31.60	31.30	30.60	30.08	29.11
粗脂肪	-	11.70	13.20	11.40	10.60	9.00	11.12
デンプン	7.3	8.2	-	4.3	1.9	-	-
灰分	-	4.40	-	4.50	4.90	1.95	6.07
NDF	45.20	27.60	40.10	40.40	36.60	53.50	37.08
ADF	12.20	11.60	15.50	12.10	12.40	12.53	13.53
ヘミセルロース	32.00	16.00	24.50	26.80	24.20	-	23.55
粗繊維	-	-	-	7.80	-	9.25	8.84
総食物繊維	-	-	-	36.4	33.7	-	-

a=kcal/kg DM 「-」は未報告を示す。

ている[20]。ドライミルによるエタノールプラントは、DDGSの総生産量の約97.1%を占めており、残りの2.9%は飲料アルコール製造併産物である[21]。

DDGSは主に、畜産業、水産養殖産業で飼料原料として使用されおり、環境と動物の健康に有益なたん白質、カルシウム、リン、イオウの優れた供給源である。図1に示すように、2019年における各畜種における使用割合は、肉用牛46%、豚と乳牛46%、家禽7%、その他1%となっている[2]。DDGSは、飼料原料としての利用の他に、バイオディーゼル、繊維源、肥料などの他の用途でも使用されている(図2)。Iramら[2]は、DDGSには、いくつかの望ましくない成分が含まれており、可溶性炭水化物画分含量が低いことから、単独での供給はできないとしている。Stein & Shurson[22]は、DDGSは、

可消化リンと、特に豚用飼料に適したエネルギー源を持つ飼料原料であるとしている。豚用飼料において、DDGSは、すべての成長段階で優れた飼料性能を期待でき、離乳期から仕上げ期用飼料に30%配合しても許容可能な発育成績を得ることが出来る。DDGSを給与すると豚が軟脂傾向になるが、これはDDGSにおけるリノール酸含量が高いことが原因であると考えられている。DDGSの配合割合が20%を超える豚用飼料では、仕上げ期の体脂肪のヨウ素価を高める可能性がある。ヨウ素価は、脂肪酸の不飽和度を示す指標であり、値が高いほど脂肪酸の不飽和度が高い。不飽和度が高いと体脂肪が柔らかく油っぽくなるため、枝肉品質の重要な指標となる。より良い脂肪品質を達成するために、通常屠殺する3~4週間前からDDGSを配合した豚用飼料の給与を休止する。さらに、体脂肪のヨウ素価とDDGSのEE含量には相関があり、低脂肪DDGSは、EEが10%を超える従来の高脂肪DDGSに比べて体脂肪のヨウ素価を下げると見なすことができる。さらに、DDGSを配合すると、豚の腸管健康に影響を与える可能性がある。Hicksら[23]は、反芻動物と単胃動物とでは、DDGS配合飼料に対する様々な消化管の反応が異なり、単胃動物では高含量の繊維を効率的に消化できないために、DDGSの配合量を過度に高めることには適さないと結論している。Jerez-Bogota [24]は、乾燥前にホールステイラージュを加熱(140~160℃、約20分間)することで食物繊維成分を破壊すると、豚における消化率が高まることを明らかにしているが、半面、加熱によりたん白質の品質は低下する。より大きな生産規模でのDDGS生産の際に前処理を行うことによるたん白質の品質とエネルギー価の間のトレードオフに対する影響を見極めるには、さらなる研究が必要である。

また、DDGSを乳牛用飼料中の大豆粕とトウモロコシの一部と置換することにより泌乳能力を高めることが出来る。この研究において、DDGSを10~20%配合すると乳量と乳脂肪や乳たん白質濃度が増加した[25]。さらに、乳牛用飼料にDDGSを配合すると、腸内のメタン排出量が減少し、嫌気性分解される糞尿のバイオエナジーポテンシャルが増加した。DDGSを30%含む飼料を給与した牛が排泄した糞尿では、嫌気性分解により、毎日のメタン生成量が約14%増加した[26]。一方、DDGSを20%配合した飼料を給与した牛では、大麦を20~40%配合した飼料に比べて、肉の口当たりがより良く柔らかく、風味強度がわずかに優れ、脂肪含量が高まることが報告されている[27]。

水産養殖産業では、魚や他の水産養殖動物におけるDDGSの消化率が調査されている。水産養殖動物用に使われている魚粉・トウモロコシ主体飼料のCP要件(56~76%)を満たすためには、DDGSを使用することができる[28]。Overlandら[29]は、典型的な植物性たん白質源混合物(ヒマワリ粕、ナタネ粕、大豆たん白濃縮物)とDDGSを置換して、ニジマス用飼料におけるCP、リンおよびエネルギー含量を適切に高めることができるとしている。この報告では、DDGS配合飼料を給与すると飼料摂取量、飼料要求率および

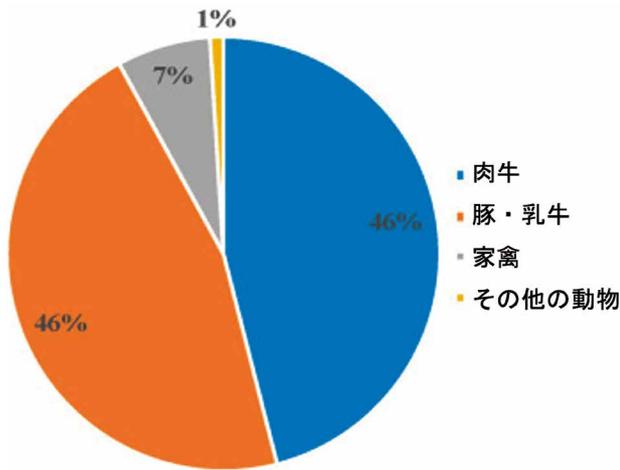


図1. DDGSの2019年における畜種別使用割合

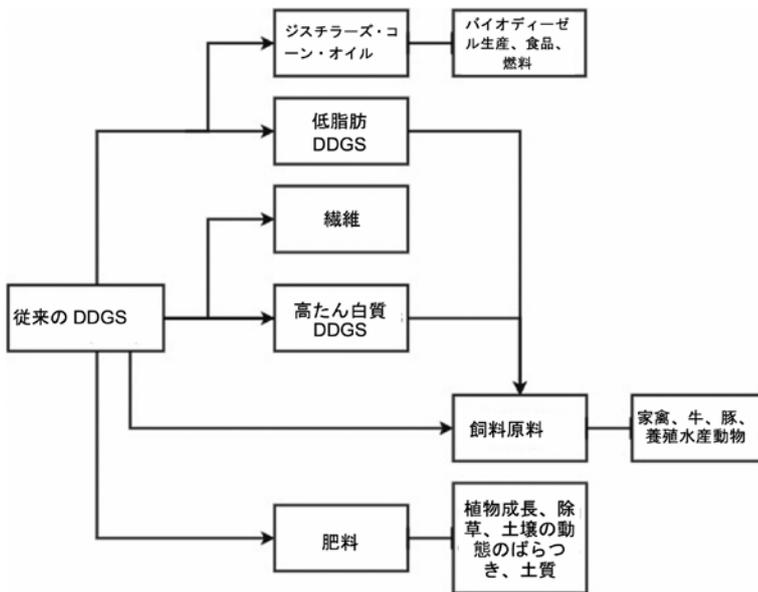


図2. DDGSの使用用途

増体量が改善されている。DDGSは、置換する原料、種、サイズ、年齢、成分の品質、制限栄養素の補給、養殖システム、給餌条件および同時に使用する他の原料由来のCPLレベル等に対応して、水産養殖動物用飼料に適切に配合することができる。DDGSは、マス用飼料では15%、ティラピアおよびアメリカナマズ用飼料では20～40%配合することが出来、この配合割合はリジンなどの制限アミノ酸を補給することでさらに高めることが出来る[30]。一方、イシビラメ (Turbot) の幼魚に対して、DDGSを魚粉と置換して10、17.5および25%配合すると、全体的な窒素およびエネルギー代謝障害と発育成績の低下をもたらしたとするDiógenesらの報告[31]もある。

高CP-DDGSは、DDGSを前処理することで、特定の飼料用途向けに栄養プロファイルを強化したDDGSの一種である。例えば、従来のDDGSから繊維を除去して、アミノ酸消化率を向上させた高CP-DDGS (CP34%以上) が生産されている。高CP-DDGSの製造は、CPが高い大豆粕などの代替製品を製造することで、結晶アミノ酸の使用量を減らすことを目的としている[32]。他の高CP-DDGSの製造方法は、発酵前の原料穀物を脱皮し、胚芽を除去することである。これにより、発酵出来ない穀物成分の量を減らすことができる[33]。Romeroら[34]は、トウモロコシ主体の豚用飼料で高CP-DDGSを使用した場合、従来のDDGSに比べて、DE (可消化エネルギー) およびME (代謝エネルギー) 値は高いが、リンの標

準化された全消化管消化率は低かったとしている。高CP-DDGS製品はすでに市場での入手が可能であり、結晶アミノ酸添加の必要性を減らしながら、大豆粕と代替できる可能性がある[32]。Shurson & Noll[35]は、高CP-DDGSではCPの増加にともない、リン含量が約42%減少するとしている。高CP-DDGSを使用する場合、無機リンの補給が必要になることがあり、配合コストが高まる可能性がある。最近、新しいDDGS製品 (製品名: ProCap DDGS (Marquis Energy, イリノイ州)) が上市された。これは、従来の低脂肪DDGSよりもCPおよびEE含量が高いが、繊維が少ないため、経済的価値は高まっている[36]。今後のさらなる研究により、様々な畜種用飼料へのProCap DDGSの適切な配合割合が確定できることが期待される。

DDGSは、飼料原料としての幅広い用途に加え、肥料としての利用も模索されており、穀物作物と雑草の成長、土壌の化学的およびミネラル特性、穀物の収量と品質に対する影響について研究が行われている[37]。DDGSの飼料原料としての安全性に関する問題の1つは潜在的なアフラトキシン汚染だが、アフラトキシンで汚染されたDDGSは、肥料の優れた供給源として有用である可能性がある。もう1つの用途はDCOの生産である。DDGSのEE含量は約12.55%であり、食品または燃料用として優れた油脂源となる[38]。2019年には、DDGSから約200万トンのDCOが抽出されている[2]。DDGSからDCOを抽出する最も一般的な方法は遠心分離であり、乾燥工程前に行われている。これは主としてバイオディーゼル生産に使用されており、バイオエタノール産業の収益性が高まり[39]、バージンオイルの使用を回避することによるバイオディーゼル価格の低下につながっている。

DCOを抽出したDDGSは、低脂肪DDGSとして知られている。脂肪のエネルギー価は炭水化物の約2.25倍であることから、DDGSからのDCOの抽出はDEおよびMEを低下させることになり、DDGSの配合量と経済的価値に大きく影響する[40]。飼料への油脂の添加はアミノ酸消化率を高める可能性があるため、低脂肪DDGSにおいてEE含量が低下するとアミノ酸の消化性が低下する可能性がある[41]。Saunders & Rosentrater[42]は、従来のDDGSと比べて低脂肪DDGSの水分活性レベル (0.225～0.244) および脂肪含量 (2.7%DM) は低く、CP (34%DM) および繊維含量 (8.4%DM) が高いことを報告している。いくつかの研究では、産卵鶏およびブロイラー[43]、産卵鶏[44] および肥育牛[45]用飼料への低脂肪DDGSの配合に関する検討が行われている。Cortes-Cuevas [43]は、低脂肪DDGSを6および12%配合したソルガム・大豆粕主体飼料を給与しても産卵鶏とブロイラーの発育成績、枝肉収量、腹部脂肪含量には有意差はなかったと報告している。しかし、この研究では、低脂肪DDGS由来のキサントフィル含量の影響を反映して、枝肉、腹部脂肪および皮膚の黄色度が高まった。Guneyらの研究[38]では、トウモロコシ・大豆粕飼料に低脂肪DDGSを10%配合するとブロイラーの発育成績が高まり、最大20%まで配合可能であって、発育成績と腹部脂肪重量には悪影響を及ぼさない可能性があるとしている。一方、Purdumら[44]は、低脂肪DDGSではME価が低いことから産卵鶏用飼料に利用できると考察している。Heら[45]は、仕上げ期の肥育牛において、低脂肪DDGS 200gを大麦粒1kgと置換しても、枝肉品質と発

育成績には悪影響を及ぼさないと報告している。

4. DDGSの生産と利用における現在の課題

4.1 価格の変動性と経済的価値

2006年から2015年におけるDDGSとトウモロコシの1トンあたりの平均価格はそれぞれ164ドルおよび165ドルであった。両者の差はわずかであるが、年度によってはDDGSとトウモロコシの価格が大きく乖離している。一般的にたん白質源として使用されている大豆粕の価格は、DDGSに比べて、2011年には約35%、2014年には最大338%高かったが、2015年には111%に低下している[46]。DDGSが比較的low価格である場合、豚、家禽および牛の生産者にとって魅力的である。Shurson[47]によると、DDGSが直面している課題の1つは、経済的価値と栄養価に基づく世界市場での購入価格を適切に決めることである。DDGSの成分中、最も高価な成分は、リン、エネルギーおよびアミノ酸であるが、DDGSの価格はCPとEE含量で評価されているため、現在の市場価値は過小評価され、実際の経済的価値よりも安価で販売されている。他の一般的な飼料原料と比較して、DDGSはより多くのアミノ酸、リンおよびエネルギーを含有している。2020年には、大豆粕とトウモロコシとの価格競争が続いているため、DDGSの価格は1トンあたり142~205ドルと過小評価されたままである[48]。重力分離を用いることで、DDGSを高価値の高CP画分と高繊維画分などに分離することで、DDGSの経済的価値と利用性が効果的に改善出来ることが判明している[49]。この研究は、市場でより高い経済的価値を持つDDGSの製品群を製造するための参考として役立つ可能性がある。

4.2. 飼料の安全性

世界的な食品安全システムの中で飼料の安全性を考えることは、家畜の健康状態や生産性、ヒトが消費する畜産物生産に不可欠である。飼料汚染はフード・チェーンに相互に関連する影響を及ぼし、大幅な収益損失と生産性および諸経費の増加につながる可能性がある。飼料の汚染は、主にいくつかの微生物学的な因子によって引き起こされる[47]。飼料では、特にDDGSでのコロナウイルス感染が調査されている。Trudeauらの研究[50]では、PEDV(豚流行性下痢ウイルス)、PDCoV(豚デルタコロナウイルス)、TGEV(豚伝染性胃腸炎ウイルス)などのコロナウイルスについて、EE含量が異なるDDGS中での生存率が56日間の培養により調査されている。この調査において、ウイルスの対数的な減少は、様々なEE含量のDDGSで認められている:低脂肪DDGS(TGEV-6.11、PDCoV-5.78、PEDV-3.01)、中脂肪DDGS(TGEV-5.67、PDCoV-5.01、PEDV-2.01)、および高脂肪DDGS(TGEV-6.56、PDCoV-5.45、PEDV-3.44)。大豆粕と比較して、3種類のコロナウイルスの生存率は、DDGS主体飼料でより低かった。国を越えた輸送モデルを使用して、畜産業界に世界的に大きな影響を与える11のウイルスの生存率が、DDGSを含む様々な飼料原料で調査されている。ウイルス分離アッセイと豚バイオアッセイを実施した後もDDGS中で生存し続けたウイルスは、SVA(A型セネカウイルス)とPRRSV(豚繁殖・呼吸障害症候群ウイルス)であり、生存可能な形態では回収されなかったウイルスはASFV(アフリカ豚熱ウイルス)、PSV(豚サペロウイルス)、FCV(ネコカリシウイルス)、PCV2(豚サーコウイルス2型)、BHV-1(牛ヘルペスウイルス1型)、BVDV(牛ウイルス性下痢ウイルス)、VSV(小胞性口内炎ウイルス)、CDV

(イヌジステンパーウイルス)およびIAV-S(豚インフルエンザAウイルス)であった[51]。この研究は、一部のウイルスに対する耐性飼料原料としてのDDGSの大きな可能性を示しているが、他のウイルスや病原体の伝播が給餌、保管、輸送中に発生する可能性について検討するためには、さらなる研究が必要である。汚染リスクが高い国から飼料原料を輸入する際の検疫の実施はその飼料原料を飼料に配合する前にウイルスを減衰させる物理的な緩和方法として提案されている。例えば、DDGSの輸入は、SVAの99.99%の減衰を達成するために、4℃で39~494日間、15℃で13~182日間または30℃で13~26日間隔離されることが提案されている[52]。飼料中のウイルスに対する実行可能なアプローチとして抗菌活性を有する飼料添加物を使用する化学的緩和の手法はNiederwerderら[52]により概説されている。

マイコトキシン(カビ毒)の汚染率はKhatibiら[53]により調査されている。菌類は圃場での穀実の成長期と、収穫後の貯蔵庫で環境条件によりマイコトキシンを生成する。FDA(米国食品医薬品局)は、発がん性を有するアフラトキシンのみを規制しているが、飼料原料に他のマイコトキシンが高濃度に存在していると家畜の免疫系に悪影響をもたらす可能性がある[47]。Khatibiら[53]は、様々な穀物から製造したDDGSが比較的low濃度の様々なマイコトキシンを含有していると報告しており、Zangら[54]によるDDGS 235試料の調査でも、FDAの基準値以下ではあるが低レベルのアフラトキシンとデオキシニバレノールが含まれていた。さらに、輸出用のDDGS収容コンテナは、マイコトキシンの生成を増加させないことが明らかとなっている。DDGSのマイコトキシンレベルは、これまでの調査では低値ではあるものの、汚染の可能性は依然としてあり、生産地域および異なる畜種間の耐性レベル等の飼料安全性の観点から高い懸念が残っている。トウモロコシをDDGSに加工すると、マイコトキシンは3倍に濃縮される。したがって、毎年生産されるトウモロコシとDDGSのマイコトキシンレベルを定期的に監視することが重要である[55]。

DDGSにおけるサルモネラとダイオキシンの存在や汚染の可能性に関する研究データはまだ少ないが、これらについても、DDGSの生産と利用が飼料の安全性のレベルを満たしているか否かを判断するための研究が必要である[47]。いくつかの生産および利用段階で、飼料の除染を行わないあるいは不適切な除染、飼料工場での後処理中の汚染、非飼料接触源からのサルモネラの伝播、農場での飼料混合汚染など、飼料の安全性の低下につながる可能性がある。

(次号に続く)

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/>