

## DDGSハンドブック第4版

DDGSの栄養分析と新たな発見をまとめたDDGSハンドブック第4版がアメリカ穀物協会から発行されました。こちらでその一部を和訳したものを数回にわたってご紹介いたします。

(No.200からの続き)

## 第12章

## DDGS中のイオウに関する懸念と利点

## はじめに

イオウ(S)は動物にとって必須ミネラルであり、生体内で多くの重要な生理機能に関与している。DDGS中の平均S含量は約0.65~0.70%であるが、一部では1%を超える場合があり(表1)、反すう家畜に対するDDGS使用量の制限因子となる。通常、でん粉をエタノールに効率的に変換するための最適な酵母増殖および発酵のためにpHを望ましいレベルに保つため、乾式粉碎エタノール製造工程中で硫酸が添加される。硫酸は、他の酸と比べて低価格なことから洗浄にも使用されている。AAFCO Official Publication 2004(386ページ)では、硫酸は一般的に安全な物質であるとされており、米国連邦規則(21 CFR 582)に従って承認された食品添加物(21 CFR 573)に記載されている。さらに、トウモロコシは通常約0.12%のSを含んでおり、トウモロコシを用いたエタノール製造の際に、DDGS中のSは他のすべての栄養素と同様に3倍に濃縮される。酵母には約3.9g/kgのSが含まれており、発酵中に硫酸塩を生成する。DDGS製造時に用いられるこれらのS発生源とS濃度およびその変動に基づいて、ロットまたはバッチ間のS含量のバラツキを注視することが重要であり、S含量のバラツキを把握することで、DDGSを用いる際の安全マージンを適切に取ることが出来る。

反すう家畜用飼料中のS含量が過剰であった場合、神経症状が発症する可能性がある。反すう家畜に対して、高レベルのSを含む飼料(乾物値で0.40%以上)を給与すると、PEM(灰白質脳軟化症)が発症する可能性がある。PEMは、牛、羊、山羊の脳皮質領域の壊死によって引き起こされる。反すう家畜が摂取したSはルーメン微生物によって硫化水素に還元される。硫化水素は有毒であり、ルーメン内での過剰な蓄積がこれらの毒性発現の原因であると考えられている。反すう家畜では、粗飼料主体飼料から穀物主体飼料に突然変更した場合にPEMの発症リスクが高まる。これは、チアミナーゼを産生するルーメン微生物叢に急激な変化を来たし、チアミン欠乏症を誘発する。Sは、この状態を引き起こす重要な役割とチアミナーゼ産生との相互作用を持っていると考えられているが、そのメカニズムは良く知られていない。さらに、飼料中のSが過剰な場合、銅(Cu)の吸収と代謝を妨げる可能性があり、高レベルのSを含む飼料が長期間給与される場合には飼料中のCuレベルを高める必要がある(Boyles, 2007)。この状態は、非反芻動物(豚、家禽、魚)では発生しない。

反すう家畜とは対照的に、高レベルのSを含むDDGSを配合した飼料を給与することは、豚の代謝ストレスの回避に有効である可能性もある。ミネソタ大学で行われた最近の研究(Songら, 2013)では、高レベルのSを含むトウモロコシDDGSが、哺乳中の子豚においてSを含有する抗酸化物質を増加させることにより、DDGSが含む過酸化脂質から保護することを示している。

表1. DDGSのイオウ含量(乾物値)に関する報告の要(Kimら, 2012から改編)

引用文献	試料数	平均	標準偏差	最小値	最大値
Kim et al., 2012	35	0.65	0.19	0.33	1.04
Kerr et al., 2008	19	0.69	0.23	0.38	1.35
Shurson, 2009	49	0.69	0.26	0.31	1.93

## DDGSを給与する際の反すう家畜用飼料中のS含量の管理

NRC肉牛(1996)では、フィードロット飼料中のSの最大許容レベルを0.40% (乾物)としている。Vannessら(2009)は、ネブラスカ大学におけるトウモロコシ併産物の給与試験の結果からPEMの発症率を考察し、粗飼料含量が6~8%の飼料において、全飼料中のS含量が0.40%から0.56%以上に増加すると、PEM発症率が増加することを示している(表2)。有効繊維含量が低く(4%未満)、易発酵性炭水化物含量が高く(30%以上)、S含量が高い(0.50%以上)飼料では、PEMの発症リスクが最も高い(Drewnoskiら、2011)。Vannessら(2009)は、粗飼料を給与せずにS含量が0.47%のDDGSを配合した飼料を給与した牛のPEM発症率は48%であったが、同様の飼料とともに粗飼料を6~8%給与した牛ではPEM発生率は1%以下であったと報告している。ネブラスカ大学とアイオワ州立大学で行われた研究では、飼料中の粗飼料の給与割合が6~8%を超えると、Sによる毒性リスクが低下する可能性があることを示している(Drewnoski et al. 2011)。15%の粗飼料(乾物)が飼料に含まれている場合、PEMを発症することなく、飼料中の総Sを0.5%まで高めることが出来る。これは、DDGSの配合量を10~15%増やすことに相当する。粗飼料の給与割合を高めることで、ルーメンpHの低下は起きないことから、硫化水素の産生が促進されず、第一胃内での硫化水素濃度は増加しない。アシドーシスのリスクを最小限に抑える飼料の給与と管理、例えば、採食量のバラツキを抑える、給与回数の増加、イオノフォアの使用もPEMのリスクを減らす可能性がある。

表3は、トウモロコシとトウモロコシサイレージからなる肉牛用飼料に、様々なSレベルのDDGSを配合した場合の最終的なS含量への影響の例を示している。これらのデータは、S含量が高い(0.80%以上)DDGSを多量に配合(乾物摂取量の40%)

すると、全飼料中のS含量がPEMを発症するレベルと見なされている0.40%を超えることを示している。DDGS供給源によるS含量の変動が10%であると仮定した場合の、DDGSの様々な配合割合とS含量における全給与飼料中のS含量の範囲を表4に示した。DDGSの配合割合とS含有量および他の飼料原料と飲水由来のSを含めた全体のS含量が0.40%を超えないようにすることが重要である。

飼料由来のSに加えて、飲水は地理的特性によってはS摂取量に重要な影響を及ぼす可能性がある。飲水中のS含量が不明な場合は、硫酸塩含量を分析し、DDGSおよびその他の飼料原料の配合割合を決定する際に考慮する必要がある。飲水量も地域によって異なる環境温度の影響を大きく受ける。飲水中の硫酸塩濃度と環境温度における飲水由来のS摂取量は表5に示したとおりである。

フィードロット牛は、硫酸塩濃度が高い飲水またはS含量が高い飼料の場合、仕上げ初期用飼料給与開始当初の30日間に最もSの影響を受けやすい。硫酸塩濃度が高い飲水またはS含量が高い飼料の給与によるSの毒性に対して感受性が高まるのは、硫酸還元細菌の増加とルーメン内pHの低下に起因するルーメン内の硫化水素濃度の急激な増加によると考えられる。ルーメン内の硫酸塩還元菌は、Sを硫化物に変換するために乳酸塩を利用するが、仕上げ初期では微生物代謝が活発で、乳酸塩の利用による硫化水素の産生量がより高まる場合がある。しかし、仕上げ後期では、乳酸塩を利用する微生物が定着し、硫酸塩還元菌と競合するようになるため硫化水素濃度は低下する。したがって、DDGSの配合割合が高い飼料給与の開始時期を、ルーメン微生物が高濃度の飼料に順応するまで(約30日)遅らせると、PEMの発症リスクを低下できる可能性がある。

表2. ネブラスカ大学におけるトウモロコシ併産物の給与試験におけるPEM発生率(Vannessら、2009から改編)

PEM発症率	飼料中のイオウ含量	PEM発生件数/総頭数
0.14%	0.40~0.46%	3 / 2147
0.35%	~0.56%	3 / 566
0.56%	0.56%以上	6 / 99

表3. DDGSのイオウ含量と配合割合(乾物)が肉牛のトウモロコシ・トウモロコシサイレージ主体飼料中の総イオウ含量に及ぼす影響 (Boyles, 2007から改編)

DDGS中推定イオウ含量 (%)	DDGS 30%配合時の飼料中s (%)	DDGS 40%配合時の飼料中s (%)	DDGS 50%配合時の飼料中s (%)	DDGS 60%配合時の飼料中s (%)
0.6	0.32-0.34	0.36-0.38	0.40-0.43	0.44-0.48
0.7	0.35-0.37	0.40-0.43	0.45-0.49	0.50-0.54
0.8	0.38-0.40	0.44-0.47	0.50-0.54	0.56-0.61
0.9	0.41-0.44	0.48-0.52	0.55-0.60	0.62-0.67
1.0	0.44-0.47	0.52-0.56	0.60-0.65	0.69-0.74

注) 飲水由来のイオウ摂取はなく、供給源によるDDGS中のイオウ含量のバラツキを10%として試算

表4. DDGS中のイオウ含量と配合割合の違いによるイオウ含量の変動(乾物; Drenowskiら、2011から改編)

DDGS配合率、% (乾物値)	S含量が0.6%のDDGS	S含量が0.8%のDDGS	S含量が1.0%のDDGS
20	0.21	0.25	0.29
30	0.27	0.33	0.37
40	0.33	0.41	0.49

表5. 飲水中の硫酸塩濃度と環境温度の違いによるイオウ摂取量(%) (Drenowskiら、2011から改編)

飲水中硫酸塩濃度 (%)	5° C	21° C	32° C
200	0.02	0.03	0.05
400	0.04	0.05	0.10
600	0.06	0.08	0.14
800	0.09	0.11	0.19
1000	0.11	0.13	0.24

### S含量が高いDDGSの豚への給与

前述のとおり、牛用飼料中におけるSの最大許容濃度は設定されているが、単胃動物におけるSの最大許容濃度は設定されていない。Sは動物体内での多くの生理機能に不可欠な成分であり、アミノ酸、たん白質、酵素、微量栄養素に含まれている (Atmaca, 2004) が、S含量が高い飼料やDDGSを配合した飼料給与による豚の健康と発育成績に及ぼす影響については最近までほとんど知られていなかった。Kerrら (2011) は、発育成績、腸管の炎症、糞便の組成および硫酸塩還元菌の存在に対する飼料中の無機S含量の影響に関する研究を行っている。その結果、豚に対して高S含量の飼料を給与すると、腸内の起炎性と腸内細菌叢が変化するが、発育成績に悪影響を及ぼすことなく比較的高濃度の飼料中Sに耐えることができることを示している。

Kimら(2012)は、離乳豚および育成豚における高濃度のSを含むDDGSを配合した飼料への嗜好性および発育成績を調査し、トウモロコシ・大豆粕飼料に高濃度のSを含むDDGSを配合しても離乳豚および育成豚の嗜好性、飼料摂取量、増体量に悪影響を及ぼさないと結論している。その後の研究でも、Kimら(2012)は、最大0.38%のSを含むDDGSを20%配合した飼料を給与しても、離乳豚、育成～肥育豚の嗜好性、飼料摂取量、増

体量に悪影響を及ぼさないことを示しており、さらに、S含量が高いDDGSを30%配合しても、育成～肥育豚の発育成績に悪影響を及ぼさず、枝肉の特性や組織のS含量にも影響を及ぼさなかったことが報告されている (Kimら、2014)。

実際、DDGS中のS含量の増加は、過酸化が高度に進んだDDGSの給与による潜在的な悪影響を打ち消すのに有益な効果があるようにみうけられる。飼料中の脂質の過酸化による損傷は、豚の健康と成長能力に悪影響を及ぼすことが示されている (Miller and Brzezinska-Slebodzinska, 1993; Pfalzgrafら、1995; Hungら、2017)。脂質の過酸化はトウモロコシDDGSの製造中に発生する。Song and Shurson (2013) は、トウモロコシDDGS 31試料から抽出したトウモロコシ油を分析し、DDGSに含まれている脂質の過酸化はトウモロコシ粒に含まれている脂質に比べて20～25倍大きいことを示している。トウモロコシ油には高濃度のPUFA(多価不飽和脂肪酸)、中でも、特に過酸化の影響を受けやすいリノール酸が含まれている (Shursonら、2015)。このため、過酸化された脂質を含むDDGSを豚に給与する際には、通常より高い量の抗酸化剤(ビタミンEなど)の補給が必要となる可能性がある。例えば、抗酸化物質の補給は、DDGSまたは酸化されたトウモロコシ油を含む飼料を給与された豚の発育成績を改善してい

る(Harrellら, 2010)。一方、他の研究の結果では、抗酸化物質の補給が飼料の酸化ストレス負荷時の動物の発育成績に影響を及ぼさないとする文献もある(Wangら, 1997b; Anjumら, 2002; Fernández-Dueñas, 2009)。以前にSong and Shurson(2013)が行った試験で子豚に給与された過酸化DDGSの発育成績への影響の有無を評価するために、Songら(2013)は、トウモロコシ・大豆粕主体飼料と、過酸化が進んだDDGS(PV(酸価):84.1 mEq/kg脂質中、TBARS(チオバルビツル酸反応性物質):5.2 ng MDA/kg脂質中、S:0.95%)を30%配合した飼料にビタミンEを3水準(無添加、11 IU/kg、または、110 IU/kg)添加して豚に対する給与試験を行っている。血清 $\alpha$ -トコフェロール濃度は、DDGSの有無にかかわらず、ビタミンE 11 IU/kg添加飼料では無添加飼料に比べて高かった。さらに、DDGSを配合した飼料では、トウモロコシ・大豆粕主体飼料に比べて血清中の含硫アミノ酸(メチオニンおよびタウリン)濃度、肝臓グルタチオン濃度およびグルタチオンペルオキシダーゼ濃度が高値を示した。これらの結果は、含硫抗酸化物質(メチオニン、タウリン、グルタチオン)の含量が高まると、過酸化が進んだDDGSを豚に給与する際の酸化ストレスを軽減できる可能性があり、高濃度のビタミンE添加が不必要となることを示唆している。

さらに、Hansonら(2015)は、過酸化が進んだDDGSを母豚とその子豚に給与した際の影響を評価するために、妊娠中～授乳中の母豚に対してトウモロコシ・大豆粕主体の対照飼料とDDGS配合飼料(妊娠期:40%配合、授乳期:20%配合)を給与した。また、離乳後の同腹子豚には、DDGSを含まない飼料および過酸化が進んだDDGS(PV:84.1 mEq/kg脂質中、TBARS:5.2 ng MDA/kg脂質中、S: 0.95%)を30%配合し、ビタミンEをNRC豚(2012)による要求量の5倍量を添加した飼料を給与した。

その結果、DDGSを配合した飼料を給与した母豚の離乳前および離乳後の血清中ビタミンE濃度は、対照飼料を給与した母豚より低値を示した。離乳子豚の飼料摂取日量はDDGSを配合した飼料給与群が多かったが、日増体量には差がなかった。また、DDGSを配合した飼料を給与した子豚では、血清中ビタミンE濃度が高かったが、血清中TBARSおよびグルタチオンペルオキシダーゼ濃度には影響がなかった。この研究における最も興味深い知見は、DDGSを給与した豚において血清中含硫アミノ酸濃度が、対照飼料を給与した豚に比べて約40～50%高値を示したことである。これは、DDGSを配合し

た飼料を給与した豚では、含硫アミノ酸摂取量が多かったためと考えられる。したがって、含硫アミノ酸の抗酸化特性は、過酸化が進んだDDGSの摂取による発育成績と酸化による潜在的な悪影響の緩和に十分寄与しており、そのためのビタミンEを節約できるため、ビタミンEの補給は必要なかった。要約すると、豚に対して、最大0.38%のSを含有するDDGSを配合した飼料を給与しても、成長成績、枝肉形質および組織中のS濃度には悪影響を及ぼさず、さらに、高濃度のS(0.9%)が含まれているDDGSを離乳豚用飼料に30%配合することで、含硫アミノ酸による抗酸化能力が高まるといえる。

## 結論

飼料摂取量の増加、飼料摂取量のバラツキの軽減、ルーメンpHの安定化という給与計画によって、反すう家畜に対して高レベルのSを含む飼料を給与した場合の毒性リスクを軽減することが出来る。仕上げ期の最初の30日間に高レベルのSを含む飼料を給与しても、粗飼料を15%給与することで、毒性リスクなしに、最大0.50%のSを含む飼料を給与することが出来る。入手したDDGSのS含量のバラツキを見極めることで、反すう家畜用飼料への配合可能量を決定できる。フィードロット牛における総S摂取量を管理するためには飲水中の硫酸塩含量と飲水量をも考慮する必要がある。反芻家畜とは対照的に、豚に対して高度に酸化された脂質とS(0.95%)を含むDDGSを30%配合した飼料を給与すると、若齢豚における含硫抗酸化物質が増加し、代謝酸化ストレスを軽減することが示されており、最大0.38%のSを含むDDGSを配合した飼料を給与しても、豚の発育成績、枝肉形質、組織のS濃度に悪影響はない。

第12章の引用文献リストにつきましてはこちらをご覧ください。  
<https://grains.org/buying-selling/ddgs/user-handbook/>

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/>