

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 3.9 g/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 を含む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ズ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; Drownoski 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 (%) (Drownoski 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、増体量に発育成績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 α -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。

引用文献

- Anjum, M.I., M.Z. Alam and I.H. Mirga. 2002. Effect of nonoxidized and oxidized soybean oil supplemented with two levels of antioxidant on broiler performance. *Asian-Aust. J. Anim. Sci.* 15:713-720.
- Atmaca, G. 2004. Antioxidant effects of sulfur-containing amino acids. *Yonsei Med. J.* 45: 776-788.
- Boyles, S. 2007. Distillers Grains with Solubles. OSU Extension Beef Team, BEEF Cattle Letter 551.
- Drewnoski, M., S. Hansen, D. Loy, and S. Hoyer. 2011. How much distillers grains can I include in my feedlot diet? Iowa Beef Center, Iowa State University Extension, IBC 46. 3 pp. Fernández-Dueñas, D.M. 2009. Impact of oxidized corn oil and synthetic antioxidant on swine performance, antioxidant status of tissues, pork quality and shelf life evaluation. Ph.D. dissertation thesis, Urbana, IL.
- Hanson, A.R., L. Wang, L.J. Johnston, S.K. Baidoo, J. L. Torrison, C. Chen, and G.C. Shurson. 2015. Effects of feeding peroxidized dried distillers grains with solubles to sows and progeny on growth performance and metabolic oxidative status of nursery pigs. *J. Anim. Sci.* 93:135-146.
- Harrell, R. J., J. Zhao, G. Reznik, D. Macaraeg, T. Wineman, and J. Richards. 2010. Application of a blend of dietary antioxidants in nursery pigs fed either fresh or oxidized corn oil or DDGS. *J. Anim. Sci.* 88 (Suppl. 3): 97 (Abstr).
- 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.
- Kerr, B.J., T.E. Weber, C.J. Ziemer, C. Spence, M.A. Cotta, and T.R. Whitehead. 2011. Effect of dietary inorganic sulfur level on growth performance, fecal composition, and measures of inflammation and sulfate-reducing bacteria in the intestine of growing pigs. *J. Anim. Sci.* 89:426-437.
- Kerr, B.J., C.J. Ziemer, T.E. Weber, S.L. Trabue, B.L. Bearson, G.C. Shurson, and M.H. Whitney. 2008. Comparative sulfur analysis using thermal combustion or inductively coupled plasma methodology and mineral composition of common livestock feedstuffs. *J. Anim. Sci.* 86:2377-2384.
- Kim, B.G., D.Y. Kil, D.C. Mahan, G.M. Hill, and H.H. Stein. 2014. Effects of dietary sulfur and distillers dried grains with solubles on carcass characteristics, loin quality, and tissue concentrations of sulfur, selenium and copper in growing-finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 92:4486-4493.
- Kim, B.G., Y. Zhang, and H.H. Stein. 2012. Sulfur concentration in diets containing corn, soybean meal and distillers dried grains with solubles does not affect feed preference or growth performance of weanling or growing-finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 90:272-281.
- Miller, J.K. and E. Brzezinska-Slebodzinska. 1993. Oxidative stress, antioxidants and animal function. *J. Dairy Sci.* 76:2812-2823.
- National Research Council. 1996. Nutrient requirements of beef cattle. 7th revised edition. National Academy Press, Washington, D.C.
- Pfalzgraf, A., M. Frigg, and H. Steinhart. 1995. α -Tocopherol contents and lipid oxidation in pork muscle and adipose tissue during frozen storage. *J. Agric. Food Chem.* 43:1339-1342.
- 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. Shurson, G.C. 2009. Nutrient profiles:

Current U.S. data www.ddgs.umn.edu

Song, R. and G.C. Shurson. 2013. Evaluation of lipid peroxidation level in corn dried distillers grains with solubles. *J. Anim. Sci.* 91:4383–4388.

Song, R., C. Chen, L. Wang, L.J. Johnston, B.J. Kerr, T.E. Weber, and G.C. Shurson. 2013. High-sulfur content in corn dried distillers grains with solubles protects against oxidized lipids by increasing sulfur-containing antioxidants in nursery pigs. *J. Anim. Sci.*

91:2715–2728.

Vanness, S.J., T.J. Klopfenstein, G.E. Erickson, and K.K. Karges. 2009. Sulfur in Distillers Grains. Nebraska Beef Report, University of Nebraska–Lincoln, p. 79–80.

Wang, S. Y., W. Bottje, P. Maynard, J. Dibner, and W. Shermer. 1997b. Effect of santonin and oxidized fat on liver and intestinal glutathione in broilers. *Poult. Sci.* 76:961–967.