

第 12 章

DDGS 中の硫黄に関する懸念と利点

はじめに

硫黄 (S) は動物にとって必須ミネラルであり、動物体内の重要な生物学的機能の多くに関与している。しかしながら、反芻胃動物用の飼料中に硫黄が過剰に含まれていると、神経障害が発生することがある。硫黄含有率の高い飼料 (飼料 DM の 0.40% 超) および飲用水を反芻胃動物に給与すると、灰白質脳軟化症 (PEM) と呼ばれる状態が起こる可能性がある。灰白質脳軟化症は畜牛、羊および山羊の脳の大脳皮質領域の壊死によって引き起こされる。硫黄が反芻胃動物によって摂取されると、第一胃のバクテリアによって硫化水素に還元される。硫化水素は有毒で、第一胃に蓄積されると毒作用を引き起こすと考えられている。粗飼料主体の飼料から穀物主体の飼料へと突然切り替えた場合、反芻胃動物は PEM を発症しやすくなる。これは、チアミナーゼを生成する第一胃中の微生物個体群に劇的な変化が発生するためで、その結果としてチアミン欠乏が起こる。硫黄もまたチアミナーゼ生成に重要な役割を果たし、相互作用によってこうした状態を引き起こすと考えられるが、この機序は十分には明らかにされていない。加えて、食餌性硫黄が過剰になると、銅の吸収および代謝を妨げる可能性もある。そのため、硫黄含有率が高い飼料を長期間給与する場合には、食餌性銅のレベルも引き上げるべきである (Boyles, 2007)。こうした状態は非反芻胃動物 (豚、家禽、魚) では発生しない。

DDGS 給与による PEM リスクの低減

Beef Cattle NRC (1996) では肥育飼料中の許容可能な硫黄レベルは 0.40% (DM ベース) であるとしている。Vanness ら (2009) はネブラスカ大学でのトウモロコシ併産物給与試験で PEM 発生についてまとめ、粗飼料比率が 6 から 8% の場合に、総食餌性硫黄含有率が 0.40% から 0.56% を超えて増加するに従って、PEM 発症率が増加することを示した (表 1)。有効繊維含有率が低く (< 4%)、易発酵性デンプンの含有率が高く (> 30%)、かつ硫黄含有率の高い (> 0.50%) 飼料が最も PEM を引き起こしやすい (Drewnoski ら、2011)。例えば、Vanness ら (2009) の報告によれば、粗飼料を給与せず、硫黄含有率が 0.47% のジスチラーズ・グレイン飼料を給与した牛の PEM 発症率は 48% であるが、6 から 8% の粗飼料を給与した上で同様の硫黄含有率の飼料を給与すると、PEM 発症率は 1% を下回った。ネブラスカ大学およびアイオワ州立大学で実施された試験では、飼料中の粗飼料の割合が 6 から 8% を上回ると、硫黄毒のリスクが低減される可能性のあることが示された (Drewnoski ら、2011)。飼料に 15% (乾物ベース) の粗飼料が含まれていると、PEM を発症させることなく、総食餌性硫黄含有率を 0.5% に増加させることができるが、この割合は飼料に含まれるジスチラーズ・グレインの 10 から 15% 増に相当する。飼料全体の粗飼料の割合を引き上げることによって、第一胃の pH は低下せず、従って硫化水素発生に不利な条件となり、第一胃での硫化水素濃度は増加しない。飼料摂取量のばらつきを避け、給与回数を増やし、イオノフォアを使用する等、アシドーシスのリスクを最小限に抑えるための給与管理計画も PEM リスクの低減に役立つと考えられる。

表 1. ネブラスカ大学トウモロコシ併産物給与試験での PEM 発症率

食餌性 S	PEM 件数/総頭数	PEM 発症率
0.40 to 0.46%	3/2147	0.14%
0.47 to 0.56%	3/566	0.35%

>0.56%

6/99

0.56%

Vannessa ら (2009)

表 2 は飲用水の硫黄含有率が低いと仮定して、トウモロコシおよび粉砕トウモロコシから構成される肉牛用飼料に異なる硫黄含有率の DDGS を異なる配合率で加えた飼料を給与した場合の、最終的な食餌性硫黄含有率に及ぼす影響を例示したものである。このデータによれば、DDGS の配合率が高く (DM 摂取量の 40%)、DDGS に含まれる硫黄含有率が 0.80% を上回る場合には、総食餌性硫黄含有率は PEM 発生の最大限度値と考えられる 0.40% を上回る。DDGS を畜牛に給与する場合には、総食餌性硫黄含有率が 0.40% を超えることがないように、DDGS の配合率および他の飼料原材料や飲用水を考慮して硫黄含有率を見極める必要がある。

表 2. DDGS の硫黄含有率および DDGS の配合率 (DM ベース) がトウモロコシ-粉砕トウモロコシ主体肉牛用飼料の総食餌性硫黄含有率に及ぼす影響¹

DDGS 配合率、% DM	DDGS 中の S が		
	DDGS 中の S が 0.60%	DDGS 中の S が 0.80%	1.0%
20	0.21	0.25	0.29
30	0.27	0.33	0.37
40	0.33	0.41	0.49

¹Boyles, 2007.

硫黄含有率は DDGS 供給源間で大幅なばらつきが出る可能性があり、その範囲は DM ベースで 0.31 から 1.93% (平均 0.69%) に至ることもある (www.ddgs.umn.edu)。デンプンをエタノールに変換するためには pH を望ましいレベルに維持して酵母の増殖および発酵を最適化しなければならず、一般的に硫酸はこの目的のためドライグランド製法のエタノール製造プロセスで添加されている。また、他の酸と比較して安価であることからクリーニングにも用いられている。AAFCO Official Publication 2004, p 386 によれば、硫酸は米国連邦規則集 (21 CFR 582) に照らして一般に安全な物質であると認識されており、承認食品添加物リストにも記載されている (21 CFR 573)。加えて、トウモロコシは本来的に硫黄を約 0.12% 含み、トウモロコシからエタノールや DDGS が製造される場合のその他の栄養成分と同じく濃縮されて係数 3 を掛けた含有率となる。酵母にも 3.9 g/kg の硫黄が含まれており、発酵中に自然に亜硫酸塩が作られる。同じ供給源の DDGS 間でも、また異なる供給源の DDGS 間でも硫黄含有率には大きなばらつきがあることを踏まえ、供給対象の DDGS の硫黄含有率を見極め、負荷変化を監視する必要がある。そうすることにより、栄養担当者および飼料設計担当者は飼料設計を行う際の適切な安全限界を見極めこのばらつきに対処することができる。プラント間のばらつきを 10% と仮定した場合の、各種 DDGS 配合率および DDGS 中硫黄含有率別の食餌性硫黄含有率の潜在的範囲を表 3 に示した。

飼料中の硫黄含有率に加え、地域によっては飲用水も相当な総食餌性硫黄摂取源となっている場合がある。畜牛に給与する飲用水の硫黄含有率が不明である場合、硫酸塩含有率を明らかにするための試験を実施し、DDGS およびその他飼料原材料の配合率を決定する際もそれを考慮しなければならない。畜牛の飲用水消費量もまた地域によってばらつきがあり、周囲温度に大きく左右される。周囲温度別および水中硫酸塩濃度別に飲用水からの食餌性硫黄追加摂取量を表 4 に示した。

表 3. 一般的な同一プラント DDGS 中の S 含有率のばらつきに基づいた食餌性 S¹ の範囲 (DM ベース)

DDGS 中の推定 S 含有率 %	DDGS30% の場合の食餌性 S %	DDGS40% の場合の食餌性 S %	DDGS50% の場合の食餌性 S %	DDGS60% の場合の食餌性 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

¹ 飲用水からの硫黄摂取はなく、DDGSの硫黄含有率のばらつきを最大10%と仮定している。
Drewnoski ら (2011) のデータから抜粋

表 4. 周囲温度および水中硫酸塩濃度¹別の飲用水から食餌性S追加摂取量 (%)

水中硫酸塩 ppm	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

¹ 総食餌性硫黄含有率を見極めるために、飼料に追加した硫黄 (%)
Drewnoski ら (2011) のデータからの抜粋

飲用水または飼料中の硫黄含有率が高い場合、飼養牛は仕上期の飼料給与開始当初 30 日間で最も硫黄有毒性の影響を受けやすいと考えられる。硫黄含有率の高い飼料によって硫黄毒性の影響を受けやすくなるのは、硫酸塩の増加によるバクテリアの減少、および第一胃の pH 低下の結果として第一胃の硫化水素濃度が劇的に増加することが原因である可能性がある。硫酸塩還元バクテリアは硫黄を硫化物に変換するために乳酸塩を利用するが、仕上期初期には乳酸塩の有効性を高めるので代謝が活発になり、より多くの硫化水素が生成されると考えられる。しかしながら、乳酸塩を使用するバクテリアが定着し、硫酸塩還元バクテリアと競うようになるため、仕上期後期では硫化水素濃度は低下する。従って、DDGS の配合率が高い飼料の給与を、第一胃の微生物が高濃度の飼料に慣れるまでの間 (約 30 日間) 遅らせることも、PEM のリスク低減に役立つ可能性がある。

硫黄含有率の高い DDGS の豚への給餌

食餌性硫黄の牛飼料中の最大含入限度量は DM の 0.40% であることが示唆されている (NRC, 1996) が、豚への飼料中の硫黄限界量は決定されていない。そのため、Kim ら (2012) は高含量の S を含む DDGS を利用した飼料が離乳期と生育-仕上期の豚の飼料嗜好性と成長に負の影響を及ぼすか決定するために 4 つの実験を行った。これらの 4 つの実験から、トウモロコシ、大豆粕、DDGS を与えた離乳期または生育-仕上期の豚の飼料嗜好性、飼料摂取、生育成績に対して、食餌性 S の含量が負の影響を与えないと結論付けた。

飼料中の脂質の酸化による損傷は、豚の健康と生育成績に負の影響を与える (Miller and Brzezinska-Slebodzińska, 1993; Pfalzgraf ら, 1995)。脂質の過酸化はトウモロコシ DDGS の製造工程で起こる。トウモロコシ油は DDGS 中に通常約 10% 存在し、脂肪の過酸化が起こりやすい多価不飽和脂肪酸 (PUFA)、特にリノレン酸を高レベルに含む (NRC, 1998)。いくつかのエタノールプラントで行われている乾燥の時間や温度の上昇によって、脂肪の過酸化は加速する。さらに、エタノール生産過程での硫酸添加によって、トウモロコシ DDGS 中の総硫黄含量が 1% を超えてしまう可能性があり、DDGS 中の硫黄含量は非常にばらつきが大きい (0.3 から 0.9%、給餌ベース; Kim ら, 2012)。硫黄は動物の生理機能の多くにとって必須な物質であり、アミノ酸、タンパ

ク質、酵素、微量栄養素に取り込まれる (Atmaca, 2004) が、硫黄を多く含む DDGS の給餌による、豚の健康と成績への影響はほとんど知られていない。

酸化された脂質を含む DDGS の豚への給餌は、現在の給餌量より高レベルの抗酸化物質 (たとえばビタミン E) の補給を必要とする可能性がある。たとえば、追加の抗酸化物質の補給によって、DDGS や酸化トウモロコシ油を含む飼料を給餌することによって、豚の生育成績が改善された (Harrell ら、2010)。しかしながら、他の研究からは、飼料中の酸化ストレスにさらされている動物の生育成績に対して、抗酸化物質を補給しても効果が得られないという結果が示されている (Wang ら、1997b ; Anjum ら、2002 ; Fernández-Dueñas、2009)。

最近、Song ら (2012) は酸化脂質含量の高い DDGS を給餌した際の豚の生育成績と代謝酸化状態を評価し、負の効果が見られた際にそれらがビタミン E の給餌レベルを上げることによって回復するかを見極める研究を行った。総硫黄含量は DDGS 飼料のほうが大豆粕の対照飼料と比較して高かった (0.39 対 0.19%)。飼料中に 30%DDGS を含む場合には、トウモロコシ-大豆粕飼料と比較して見かけの硫黄の総腸管消化性 (86.8 対 84.6%) と硫黄の保持がより改善した。この研究では豚に高度に酸化された DDGS が与えられたが、血清 TBARS は DDGS 群と対照群との間で似ており、DDGS と血清 TBARS 中の食餌由来ビタミン E 濃度の間に相関関係はなかった。血清 α -トコフェロール濃度は、DDGS 飼料を給餌した豚のほうが、酢酸 α -トコフェロール (ビタミン E) を供給しないか NRC レベル供給した対照飼料給餌の場合と比較して高かった (それぞれ 1.61 対 0.69 $\mu\text{g}/\text{mL}$)。DDGS 飼料を給餌した豚は血清中含硫アミノ酸、特にメチオニンとタウリンの濃度が、対照飼料を給餌した豚より高かった。肝臓グルタチオン濃度は DDGS 飼料を給餌した豚で大豆粕飼料の場合より高かった (それぞれ 56.3 対 41.8 nmol/g)。DDGS とビタミン E の飼料への配合によって、血清中のグルタチオン過酸化酵素活性が上昇した。含硫抗酸化物質 (メチオニン、タウリン、グルタチオン) が生体内で高濃度存在することによって、高度に酸化された DDGS の給餌による酸化ストレスに対して、豚を保護しているのかもしれない。したがって、高レベルの硫黄と高レベルの酸化された DDGS を給餌した際の代謝性酸化ストレスから豚を保護するために、飼料中の高レベルのビタミン E が必ずしも必要ではないのかもしれない。

まとめ

粗飼料摂取量の引き上げ、飼料摂取量のばらつきの改善、第一胃 pH の安定化といった給与計画によって硫黄毒性リスクを低減させることができるようになる。高濃度の飼料を 30 日間給与した後で仕上期飼料に 15%の粗飼料を組み合わせると、硫黄毒性リスクなしに硫黄含有率 0.50%までの飼料を給与することができる。負荷別に DDGS の硫黄含有率のばらつきを見極めることで、飼料設計上許容できる安全限界を定めることができる。飼養牛の総硫黄摂取量を管理する場合には、水中の硫酸塩含有率および摂取量も考慮しなければならない。高度に酸化された脂質と高濃度の硫黄 (0.95%) を含む、30%DDGS 飼料を給餌すると、含硫抗酸化物質が増加することによって、幼齢豚の代謝性酸化ストレスを予防することができる。

References

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.
- 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 of DDGS. *J. Anim. Sci.* 88 (Suppl. 3): 97 (Abstr).
- 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.
- National Research Council. 1998. Nutrient Requirements of Swine (9th Ed.). National Academy Press, Washington, DC.
- 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.
- Song, R., C. Chen, L. J. Johnston, B. J. Kerr, T. E. Weber, and G. C. Shurson. 2012. High sulfur content in dried distillers grains with solubles (DDGS) protects against oxidized lipids in DDGS by increasing sulfur-containing antioxidants in nursery pigs. *J. Anim. Sci* 90 (Suppl. 2):11 (Abstr.).
- 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.