

飼料のかび毒汚染とその対策

1. はじめに

かび毒（マイコトキシン）とは、かびが作る化学物質のうち、人や家畜が摂取すると健康を害する物質のことをいいます。これまでに、数百種類のかび毒が分離・同定されていますが、その毒性やリスクが評価されて国際的に基準値が設けられているのは数種類に絞られます。本稿では、国内で飼料に対して基準値が設けられているかび毒を中心に、家畜への影響と汚染実態および対策を紹介します。

2. 飼料に含まれるかび毒の基準値

国内では、アフラトキシン B_1 、ゼアラレノン、デオキシニバレノールおよびフモニシン ($B_1+B_2+B_3$)、これら4種類のかび毒に対して指導基準、または管理基準が設定されています（表1）。基準値は、家畜の健康や畜産物を介した人の健康に悪影響を及ぼさないことを前提として、ALARAの原則（As Low As Reasonably Achievable：合理的に到達可能な範囲で出来る限り低く設定）に則り、通常の汚染レベルよりもやや高い値に設定されています。指導基準は著しい悪影響を及ぼす可能性があるものに対して設定され、基準値を超えた飼料は製造

禁止や廃棄命令の対象となります。一方、管理基準は事業者の工程管理による有害物質の低減対策の効果を確認するための指標として位置づけられたものであり、廃棄命令等の対象にはなりません。

3. かび毒の家畜への影響

(1) アフラトキシン B_1 (AFB $_1$)

AFB $_1$ は*Aspergillus flavus*や*A. parasiticus*等の*Aspergillus*属のかびによって産生されるかび毒であり、天然の最強の発がん性物質として知られています。アフラトキシン産生菌は熱帯、亜熱帯地域を中心に温帯域に広く分布し、落花生やトウモロコシ等の穀類を主に汚染します。家畜の中毒症状としては、黄胆、肝硬変などの肝障害を特徴とし、その他、食欲不振、増体率や泌乳量および産卵率の低下、出血性腸炎などが見られます。また、免疫毒性や生殖毒性も知られています。飼料中AFB $_1$ 濃度0.2mg/kgで鶏の免疫応答の低下が¹⁾、0.48mg/kgで豚の肝臓病変の発生が報告されています²⁾。また、乳牛では0.1mg/kg以上のAFB $_1$ を含む飼料の給与により、健康と乳生産への影響が示唆されています³⁾。

AFB $_1$ は牛の体内でアフラトキシンM $_1$ (AFM $_1$)に代謝されて乳汁に移行します。AFB $_1$ と同様に

表1 飼料に含まれるかび毒の指導基準および管理基準

種類	有害物質名	対象となる飼料	基準 (mg/kg現物)
指導基準	アフラトキシン B_1	搾乳の用に供する牛、めん羊および山羊に給与される配合飼料	0.01
管理基準	アフラトキシン B_1	反すう動物（ほ乳期のものを除く。牛、めん羊および山羊にあつては、搾乳の用に供するものを除く。）、豚（ほ乳期のものを除く。）、鶏（幼すう及びプロイラー前期のものを除く。）及びうずらに給与される配合飼料及びとうもろこし	0.02
		反すう動物（ほ乳期のものに限る。）、豚（ほ乳期のものに限る。）及び鶏（幼すう及びプロイラー前期のものに限る。）に給与される配合飼料	0.01
	ゼアラレノン	家畜及び家さんに給与される飼料（配合飼料を除く。）	1
		家畜及び家さんに給与される配合飼料	0.5
	デオキシニバレノール	反すう動物（ほ乳期のものを除く。）に給与される飼料（配合飼料を除く。）	4
		反すう動物（ほ乳期のものを除く。）に給与される配合飼料	3
家畜等（反すう動物（ほ乳期のものを除く。）を除く。）及び家さんに給与される飼料		1	
フモニシン ($B_1+B_2+B_3$)	家畜及び家さんに給与される配合飼料	4	

昭和63年10月14日付け63畜B第2050号農林水産省畜産局通知（最終改正：令和元年8月6日付け元消第1605号）

AFM₁も発がん性を持つため、乳中に0.5μg/kgを超えて含まれてはならないことが食品衛生法で定められています。食の安全に係る重要なかび毒であり、飼料の基準値には廃棄命令の対象となる指導基準 (0.01mg/kg) が設定されています (表1)。

(2) デオキシニバレノール (DON)

DONは主に麦やトウモロコシの穂に感染し、赤かび病 (写真1 a) を起こす病原菌 (*Fusarium graminearum* 等) によって作られるかび毒で、世界中の穀類から高頻度で検出されます。DONは食欲不振や嘔吐を誘発する他、免疫機能に影響を及ぼします。豚はDONの影響を受けやすく、飼料中DON濃度1~3mg/kgで飼料摂取量や増体率の低下が、3~20mg/kgで嘔吐の発生が報告されています⁴⁾。鶏では10~13mg/kgのDONを含む飼料の給与により飼料摂取量や増体率の低下が確認されています⁴⁾。牛は第一胃内の微生物がDONを毒性の低い物質に代謝できるため感受性は低く、DON汚染飼料 (6~16mg/kg乾物) を乳牛に給与しても生産性への影響は見られないとする報告が多くあります。一方で、乳牛へのDON汚染飼料の給与により、代謝パラメーターや免疫機能への負の影響が見られたとする報告 (3.5mg/kg乾物のDON含有飼料を9週給与)⁵⁾ や、インスリン感受性が低下したとする報告 (5mg/kg乾物のDON含有飼料を27週給与)⁶⁾ もあり、生産性に及ぼす影響は十分に解明されていません。

飼料中のDONが畜産物へ移行する確率は低く、人の健康に及ぼす影響は小さいと考えられています⁴⁾。

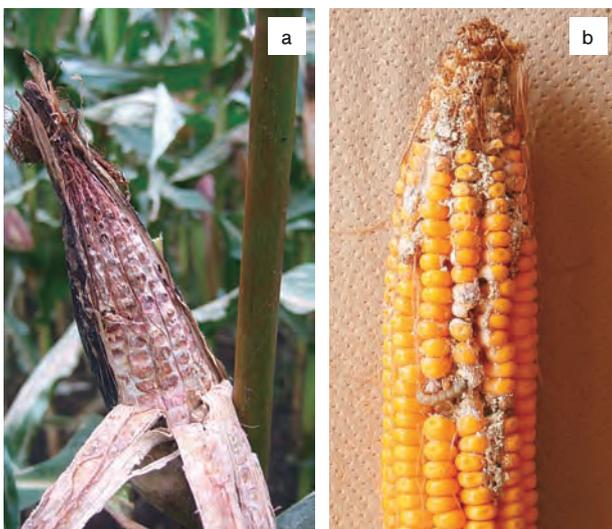


写真1 赤かび病に感染したトウモロコシ
aからはDON、bからはFUMが検出されている

(3) ゼアラレノン (ZEN)

ZENは主にDON産生菌と同じ*F. graminearum*によって作られます。このため、DONと共存することが多く穀類から高頻度で検出されますが、稲わらや牧草からも検出されます。ZENは内分泌攪乱物質 (環境ホルモン) の一つで、強いエストロゲン (女性ホルモン) 活性を有します。豚はZENに対する感受性が高く、外陰部の肥大や死流産等の繁殖障害等の中毒症状が現れます。子豚ではZENを0.42mg/kg含む自然汚染飼料の給与により、外陰部の発赤や子宮重量の増加が認められています⁷⁾。鶏と牛はZENに対する感受性は低く、影響は小さいと考えられています⁸⁾。しかし、牛でもZENを10mg/kg含む乾草の給与による人工授精後30~90日での流産⁹⁾や、ZENとDONの混合汚染飼料 (ZEN: 1.5mg/kg、DON: 1.0mg/kg) の給与による卵巣周期と無関係な発病兆候が報告されています¹⁰⁾。

飼料中のZENは畜産物へわずかに移行することが確認されていますが、人の健康に及ぼす影響は小さいと考えられています⁸⁾。

(4) フモニシン (FUM)

FUMは主にトウモロコシに赤かび病 (写真1 b) を生じさせる病原菌の一種である*Fusarium verticillioides* や*F. proliferatum*等によって作られ、世界中のトウモロコシから高頻度で検出されます。FUMは豚の肺水腫および馬の白質脳軟化症 (ELEM) の原因物質として近年発見されました。豚の中毒症状は肺、心機能不全、肝障害および肺水腫、増体量の低下として現れます。飼料中のFUM濃度5mg/kg以上で豚の肺や肝臓に病変が生じ¹¹⁾、10mg/kg以上で馬のELEMの発症リスクが増加¹²⁾、20mg/kg以上で鶏の肝臓での脂質代謝異常が認められています¹³⁾。牛はFUMに対する感受性が低く、高濃度FUM汚染飼料 (148mg/kg) を31日間摂取した子牛で肝臓の軽度な病変および免疫機能抑制が認められています¹⁴⁾。

飼料中のフモニシンは畜産物にわずかに移行したとする報告はありますが、残留レベルは低く、人の健康に及ぼす影響は小さいと考えられています¹⁵⁾。

(5) かび毒の複合汚染の影響

上記のかび毒は、AFB₁を除き主に赤かび病菌によって作られます。赤かび病菌の中にはその他にも、3-Ac DON、15-Ac DON、ニバレノール (NIV)

等のかび毒を作る種も存在します。それらのかび毒が、また別のかび毒を作るかびと同時に穀類を汚染することもあるため、一種類の飼料から数種類のかび毒が検出されることがあります。家畜が複数のかび毒を同時に摂取すると、それら毒素の相互作用により、毒性が強くなる場合があります。DONとFUMを同時に摂取した子豚¹⁶⁾や、AFB₁とオクラトキシンAを同時に摂取したブロイラー¹⁷⁾では、それぞれ単独で摂取した場合よりも強い影響が認められています。かび毒の組み合わせは多数あり、その影響はまだ十分に解明されていません。

(6) 家畜側の影響因子

鶏は品種や系統によりAFB₁に対する感受性が大きく異なります。また、環境条件や栄養状態等のストレス因子は、畜種によらずかび毒に対する感受性に影響を及ぼすと考えられます。牛は第一胃(ルーメン)に棲む微生物により、DON等のかび毒を毒性の低い物質に代謝することが出来ます。しかし、ルーメン内のpHや微生物活性が低下すると、かび毒の代謝能力が抑制されます¹⁸⁾。また、飼料摂取量が多くルーメン内での餌の滞留時間が短くなると、かび毒の代謝効率が低下する可能性が示唆されています¹⁹⁾。

4. 飼料のかび毒汚染の実態

(1) 配混合飼料

輸入トウモロコシや大豆粕などの飼料原料や、それらを混合した配混合飼料のかび毒汚染は、(独)農林水産省消費安全技術センターにより、モニタリングおよび立ち入り検査が行われています。平成21~30年度の配混合飼料のかび毒汚染状況をみると、AFB₁の検出率は8~64%で推移し、年次により大きな変動が見られています。数年に一度、AFB₁の基準値レベル(0.01~0.02mg/kg)で汚染されたものが検出されていますが、超過事例は認められていません。DON、ZENおよびFUMの検出率は80~100%であり、毎年高率で検出されていますが、基準値を超過する事例は認められていません。

(2) 粗飼料

乾草、稲わら、牧草およびトウモロコシサイレージ、稲発酵粗飼料などが生産・利用されています。それら自給飼料のかび毒汚染の調査報告は少なく、十分に解明されていませんが、トウモロコシサイレージ(CS)から赤かび病菌が産生するかび毒(DON、ニバレノール、ZEN、FUM等)がしばしば検出される

ことが報告されています^{20)~23)}。特に、DONの検出率は60~80%と高く、DONは国産飼料を汚染する主要なかび毒であることがわかっています。CSのかび毒汚染は、DONは全国で生産されたCSから検出されていますが、北海道産で特に濃度が高い傾向が見られています。一方、FUMは北海道産では検出率が低く、関東産で検出率と濃度が高い傾向が見られています²²⁾。いずれも汚染レベルは低くほとんどが基準値未満ですが、平岡らの調査²⁰⁾では、18点中14点で2種類以上のかび毒が検出されています。反すう動物用飼料の基準値(DON: 4 mg/kg)を超過した事例としては、異常気象に見舞われた2016年産のCSからDONが4.8mg/kg現物検出された報告²¹⁾や、同年・同地域での調査によりCS 233点中10点(4.3%)でDON濃度が4 mg/kg現物(最大9.9mg/kg)以上であったとする報告があります²⁴⁾。AFB₁は、国産農作物からの検出例はほとんどありませんが、Uegakiらの調査²²⁾では、日本全国から収集した124点のトウモロコシの内、中国・四国地方で生産された1点から管理基準値レベルの値(0.022mg/kg現物)が検出されています。国内のアフラトキシン産生菌の分布は、1970年代の調査では、九州、沖縄、南西諸島の限られた地域でしたが、1990年代の調査では神奈川や静岡、2000年代の調査では茨城、千葉の土壌からも分離されています。温暖化に伴い生息域が広がる可能性もあるため、注視が必要です。

牧草(乾草、サイレージ)のかび毒汚染実態については、16種類の主要なかび毒が全く検出されなかったとする報告²⁰⁾や、CSに比べ汚染レベルは低かったとする報告²²⁾があり、一般的にかび毒汚染リスクは低いと考えられています。しかし、イタリアアンライグラスサイレージ5点中4点から1~4種類のかび毒が検出された報告²³⁾や、牧草から管理基準値レベルのZEN(1.2mg/kg現物)が検出された報告²²⁾もあり、牧草でも何らかの条件により、汚染頻度やレベルが高くなると考えられるため、注視が必要です。

5. かび毒汚染の低減対策

自給飼料の中で、かび毒汚染リスクが高いトウモロコシサイレージを対象にその低減対策を紹介します。

(1) 収穫前(プレハーベスト)

国産飼料から検出されるかび毒は、赤かび病菌が産生するものが主であり、その汚染は畑で作物が生

育する過程で生じます。このため、かび毒汚染リスクを低減するには、赤かび病に感染しにくい品種（抵抗性品種）を利用することが有効です。農研機構が育成した東北地域向けのトウモロコシ品種「きみまる」は赤かび病抵抗性が強く、FUM蓄積性が低いことを特徴としています。一方、感染しやすい品種（感受性品種）も存在するため、品種の育成や選定過程での選抜が重要となります。

トウモロコシの生育過程では、かび毒汚染レベルは黄熟中期以降に顕著に高まるため、刈り遅れないように収穫することが重要です。また、赤かび病菌は自然界に広く分布しており、野生動物や昆虫の食害の跡から侵入してかび毒を産生します。このため、獣害や虫害の防止はかび毒蓄積の低減に有効に働きます。

（2）収穫後（ポストハーベスト）

赤かび病菌は好気性の微生物（生育に酸素を必要とする）であり、空気のない嫌氣的なサイレージ発酵中では生育できず、かび毒が作られることはありません。しかし、サイレージの表面にはしばしばかびの発生が認められます。このような箇所では赤かび病菌はかび毒を産生しているのでしょうか？。かびが発生したスポットに含まれるかび毒濃度を、サイレージ表面および中心部のものと比較した調査²⁵⁾では、かびスポットのかび毒濃度は、DONとZENは他の部位と変わらない一方、ペニシリウム属のかびが産生するRoquefortine CとMycophenolic acidはかびスポットが他の部位よりも顕著に高くなりました（表2）。ペニシリウム属のかびは、低pHおよび低酸素濃度でも生育できるため、サイレージ中で優占して増殖したと考えられます。なお、国内のサイレージにおける、それら毒素の汚染実態はわかりません。一方で、サイロの最上層や壁際の変敗した箇所ではZEN濃度が高かったとする報告もあります²⁶⁾。材料や詰込条件、被覆状況などによってサイロ詰め込み後のかび毒の発生状況は異なると考えられますが、サイレージ調製・貯蔵中では極力かびを増やさないような管理が重要です。

かびの発生を抑制するには、以下の点に留意する必要があります。①サイロ詰め込み後は、十分に踏圧をかけて空気を追い出し、速やかに密封する。②貯蔵中は防鳥ネットなどでシートの破損を防ぐ。③サイロ開封後はサイロ内部まで空気を侵入させないような管理（取出し面の被覆、ほじくり返さないように少量ずつ切り崩す等）を心がける。

（3）かび毒吸着剤の効果

かび毒から家畜を保護することを目的とした飼料添加物「かび毒吸着剤」が多数市販されています。その主成分は粘土鉱物（HSCAS、モンモリナイト、ベントナイト等）や酵母および酵母細胞壁由来成分であり、それらにかび毒分解酵素を組み合わせた複合製剤もあります。粘土鉱物や酵母細胞壁系の資剤はかび毒を吸着させて体外への排出を促し体内への吸収を抑制することを、酵素はかび毒を無毒または毒性の低い物質に分解することを狙っています。

粘土鉱物系の吸着剤はアフラトキシンの吸着効果が非常に高く、AFB₁汚染飼料の給与場面において乳中のAFM₁濃度を低下させる効果が報告されています²⁷⁾。酵母細胞壁系の吸着剤はAFB₁やZENに対して吸着効果があり、鶏や豚において汚染飼料の給与で生じる悪影響を改善する効果が認められています²⁷⁾。国産飼料を広く汚染するDONは鉱物系の資剤にはほとんど吸着しないため、かび毒分解酵素を含む複合製剤に効果が期待されますが、その有効性は十分に検証されていません。また、反すう動物でのかび毒吸着剤の効果に関する報告はAFB₁の知見を除くと少なく、十分にわかっていません。最近、Debevereら²⁸⁾によって、反すう胃内での吸着剤の効果の評価できるin vitroルーメンモデルが確立されました。このモデルの活用により各種資剤の有効性評価が進むことが期待されます。

6. かび毒汚染レベルの簡易検査

かび毒の中毒症状は飼料摂取量や生産性の低下など特異的なものではないため、かび中毒が疑われる

表2 トウモロコシサイレージの採取部位別のかび毒検出率と汚染レベル

サイロ採取部位	調査点数 (n)	DON		ZEN		Roquefortine C		Mycophenolic acid	
		検出率 (%)	平均濃度 (mg/kg)	検出率 (%)	平均濃度 (mg/kg)	検出率 (%)	平均濃度 (mg/kg)	検出率 (%)	平均濃度 (mg/kg)
かびスポット	7	100	0.96	29	0.073	100	26	71	9.3
表面	16	94	0.98	44	0.137	50	1.6	50	0.66
中心	16	100	0.93	50	0.146	25	0.1	0	<0.025

Driehuis et al. 2008 (NIZO Food Research, オランダ)

場合は、飼料に含まれるかび毒の汚染レベルを確認する必要があります。しかし、かび毒の検出には高度な機器が必要であり、専門的分析機関に依頼すると、結果が得られるまでに1～2週間の時間と数万円/検体の費用を要します。道総研畜産試験場では、穀類のDON検出用に市販されている簡易キットを用いて、トウモロコシサイレージのDON汚染レベルを簡易・迅速にスクリーニングする手法を構築しました。R-Biopharm社のイムノクロマトキット（RIDA QUICK DON）を利用したもので、基準値を超過するDONが含まれる場合は、2本の赤いラインが出現します（写真2）。目視判定のため、高価な機器を必要とせず、1検体あたり約15分で結果が得られます。詳細は畜産試験場のホームページ（<http://www.hro.or.jp/list/agricultural/research/sintoku/SiryuG/SiryuG-top.html>）を参照下さい。なお、このような簡易キットをサイレージに適用する場合、かび毒の種類やキットによっては正しく評価できないものもあるため注意が必要です。

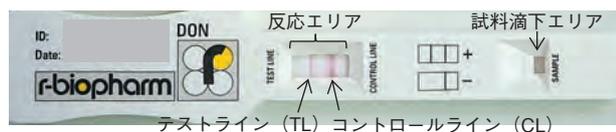


写真2 簡易キットを活用したトウモロコシサイレージ中DON検査における陽性例
サイレージ抽出液を試料滴下エリアに100 μ L滴下し、5分後に反応エリアを目視で観察します。基準値以上のDONが含まれる場合はCLとTLの2本の赤いラインが出現します。

7. おわりに

現状明らかになっている国産飼料の汚染実態からは、基準値を超過する事例は少なく、家畜への影響が生じる危険性は低いと考えられます。しかし、複数のかび毒が共存した場合の影響や、家畜側のストレス因子との関係など明らかになっていません。今後の解明が待たれるところですが、かび毒の有無によらず、かびが生えた飼料には、有害なアミンや感染症の原因となる微生物が含まれる危険性があります。かびを増やささないような飼料の調製・管理方法を改めて見直し、徹底する必要があるでしょう。

また、近年、飼料用米やトウモロコシ子実等の国産濃厚飼料の生産が始まっています。トウモロコシを子実利用する場合、サイレージ利用時よりも収穫時期が遅くなるため、かび毒汚染リスクはより高まります。生産・流通・保管の各段階でのかび毒に対する注意が必要です。

8. 引用文献

- 1) Grabal, M. A. et al.: Avian Pathol, 27, 290-295 (1998)
- 2) Southern, L. L. et al.: J Anim Sci, 49, 1006-1011 (1979)
- 3) Patterson, D. S. P., et al.: Vet Res, 110, 60-61. (1982)
- 4) EFSA Journal: 15 (9), 4718 (2017)
- 5) Korosteleva, S. N. et al.: J Dairy Sci, 92 (4) 1585-1593 (2009)
- 6) Kinoshita, A. et al.: Toxins, 10, 188 (2018)
- 7) Döll, S. et al.: Arch Tierernähr, 57, 311-334 (2003)
- 8) EFSA Journal: 15 (7), 4851 (2017)
- 9) Kallela, K. et al.: Nord Vet Med, 36, 305-309 (1984)
- 10) Coppock, R. W. et al.: Case Reports Vet Hum Toxicol, 32 (3), 246-248 (1990)
- 11) Zomborszky-Kovacs M. et al.: J of Vet Med, 49, 197-201 (2002)
- 12) Ross, P. F. et al.: Vet Diagn Invest, 3, 238-241 (1991)
- 13) Henry, M. H. et al.: Poult Sci, 79, 1378-1384 (2000)
- 14) Osweiler, G. D. et al.: J Anim Sci, 71 (2), 459-466. (1993)
- 15) EFSA Journal: 16 (5), 5242 (2018)
- 16) Harvey, R. B. et al.: Am J Vet Res, 57, 1790-1794 (1996)
- 17) Verma, J. et al.: Brit Poult Sci, 45 (4), 512-518 (2004)
- 18) Debevere, S. et al.: Toxins, 12, 101, (2020)
- 19) Seeling, K. et al.: Food Additives and Contaminants, 22 (9), 847-855 (2005)
- 20) 平岡久明: 臨床獣医, 25 (6), 10-17 (2007)
- 21) 川島千帆ら: 北畜草会報, 6, 29-33 (2018)
- 22) Uegaki, R. et al.: Food Safety, 6 (2), 96-100 (2018)
- 23) 住吉俊亮ら: 日獣会誌, 71, 245-249 (2018)
- 24) 出口健三郎: 研究紹介 2017 農食事業, 75-76 (2017)
- 25) Driehuis, F. et al.: J Dairy Sci, 91, 4261-4271 (2008)
- 26) Borreani, G. et al.: Ital J Anim Sci, 4, 162-165 (2005)
- 27) EFSA: <https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2009.EN-22>
- 28) Debevere, S. et al.: Toxins, 12, 405. (2020)