

飼料用トウモロコシの赤かび病の病原菌 および産生かび毒について

畜産草地研究所 ^{おか}岡 ^べ部 ^{いく}郁 ^こ子

はじめに

トウモロコシ赤かび病は *Fusarium* 属菌の一部のグループ（有性世代が *Gibberella* 属とされるものを含む）によって雌穂などが侵され、淡紅色ないし鮭肉色のかびを生じる病害である。本病原菌の中には人畜に有害な二次代謝物（かび毒、マイコトキシン）を産生する系統があり、日本国内で栽培した飼料用トウモロコシから作ったサイレージにおいて、低濃度ではあるが、本病害のかび毒汚染が報告されている（平岡，2007）。飼料の国内自給率を向上させ、より安全で良質な飼料の生産を可能にするため、赤かび病菌によるかび毒の低減策が急務である。

現在、赤かび病とのかび毒に関する研究が国内外の多くの研究グループによって進められている（須賀，2006）。その中で、飼料用トウモロコシの赤かび病を扱う際には、ムギ類など他作物の赤かび病と異なる部分もある。ここでは、飼料用トウモロコシの赤かび病への対策を考えるうえで重要な、いくつかの事項について述べる。

I 対象とする病原菌は何か：*Fusarium graminearum* 種複合体と *Gibberella fujikuroi* 種複合体

トウモロコシ赤かび病の病原菌としては *Fusarium graminearum* 種複合体（以下、F. g. 種複合体と略す。この中には有性世代が *G. zeae* (Schweinitz) Petch とされる種を含む）および *Gibberella fujikuroi* 種複合体（以下、G. f. 種複合体）の二つが知られている。この二つの種複合体に含まれるすべての種がトウモロコシ赤かび病に関与しているのではなく、それぞれの種複合体の一部の種あるいはグループが赤かび病の病原菌と考えられる。G. f. 種複合体の中で赤かび病を引き起こす代表種は *F. verticillioides* (Saccardo) Nirenberg（有性世代 *G. moniliformis* Wineland）であるが（岡部ら，2008），

ほかにもいくつかの種が国内に発生していると考えられる。*Fusarium* 属菌の分類体系は、現在、見直し中であるため、トウモロコシ赤かび病菌の種名をすべて明らかにすることは、将来の課題である。

日本では F. g. 種複合体による病害も G. f. 種複合体による病害もまとめて「赤かび病」としているが、米国および EU では前者を *Gibberella ear rot*，後者を *Fusarium ear rot* と呼び、それぞれ別個の病害としている（PAYNE, 1999）。実際、両病害は、発生に好適な気象条件や産生されるかび毒等の点で異なる（表-1）。ムギ類赤かび病においても問題となっているデオキシニバレノール（DON）やニバレノール（NIV）等のトリコテセン系毒素およびゼアラレノン（ZEA）を産生するのは F. g. 種複合体であり、一方、G. f. 種複合体ではフモニシンの産生が主な問題となっている。トウモロコシへの侵入経路についても、G. f. 種複合体ではアワノメイガ類の食痕が重要であり、アワノメイガ類の発生が病害の程度に影響を与える（MAIORANO et al., 2009）のに対し、F. g. 種複合体では虫による食害が見られなくても感染が起きているとされる（出口，2008）。また、病害抵抗性についても、*Gibberella ear rot* に対する抵抗性と *Fusarium ear rot* に対する抵抗性は異なる（SCHAAFSMA et al., 2006）。したがって、赤かび病防除についても両者を分けて考える必要がある。国内での両病害の発生を見ると、北海道で

表-1 *Gibberella ear rot* と *Fusarium ear rot* の比較

	<i>Gibberella ear rot</i>	<i>Fusarium ear rot</i>
病原菌	<i>F. graminearum</i> 種複合体	<i>G. fujikuroi</i> 種複合体
発生に適した気象条件	冷涼・多雨	高温
産生するかび毒	トリコテセン系毒素（デオキシニバレノール、ニバレノール等）およびゼアラレノン等	フモニシン等
発生地域	北海道を中心に、全国的に発生	本州以南に発生。ただし、夏季の気温が高い年には北海道にも発生する可能性がある

Gibberella Ear Rot of Forage Maize ; the Pathogens and Mycotoxins. By Ikuko OKABE

（キーワード：飼料用トウモロコシ，赤かび病，かび毒，マイコトキシン）

表-2 トウモロコシより分離された赤かび病菌の種類と毒素産生能

	畜草研圃場	長野中信 農試圃場
分離菌株数	38	23
<i>Fusarium verticillioides</i> およびその近縁種	31 (81.6%)	23 (100.0%)
上記のうち、フモニシン産生能をもつ株	17 (44.7%)	10 (43.5%)
<i>Fusarium graminearum</i> およびその近縁種	7 (18.4%)	0
上記のうち、DON 産生能をもつ株	2 (5.3%)	0

問題となっているのは *F. g.* 種複合体である (湊, 2009) のに対し、関東以西では後述のように、圃場に分布する赤かび病菌の中で *G. f.* 種複合体が大きな部分を占めると考えられる。

状況を複雑にしているのは、しばしば、*G. f.* 種複合体と *F. g.* 種複合体の両者が同一圃場に発生することである。表-2 は 2007 年に畜産草地研究所 (栃木県那須塩原市) および長野県中信農業試験場 (長野県塩尻市) で栽培した飼料用トウモロコシの赤かび病被害粒 (赤かび粒) から分離した *Fusarium* 属菌の内訳である。畜産草地研究所の圃場では *G. f.* 種複合体が 8 割近くを占めるものの、*F. g.* 種複合体も同時に存在することがわかる。しかも、同一植物体から *G. f.* 種複合体と *F. g.* 種複合体の両者が分離される例もあった。このような圃場では、病徴の類似した二つの病害が同時発生していると考えer ほうがよい。

II コントロールしたいものは何か：感染・赤かび粒発生・かび毒蓄積

赤かび病の防除の目指すものは何だろうか。感染率の低下、可視的病徴である赤かび粒発生の抑制、あるいは、かび毒蓄積の低減が想定されるが、サイレージに加工される飼料用トウモロコシに関して最も重要なのは「かび毒低減」である。

G. f. 種複合体も *F. g.* 種複合体も、感染してすぐに病徴が現れるわけではない。むしろ、外見上は全く健全なトウモロコシから赤かび病菌が分離されることも多い。したがって、赤かび病菌の感染率を調査するためには、個々の植物体から菌の分離培養または菌の遺伝子増幅 (PCR) による検出を試みなければならない。しかも、同一植物体 (時には、同一のかび粒) から両者が分離されることもあるため、分離した菌株が *F. g.* 種複合体あ

るいは *G. f.* 種複合体であることを確認するためには、単胞子分離が必要である。したがって、大規模な圃場試験で感染率を厳密に決定するためには多大な労力を要することになる。

1 本の穂当たりの赤かび粒の数、あるいは赤かび粒率はこれまでも赤かび病の発病度を表す指標として用いられてきた。実際、子実が穀物として利用される品種のトウモロコシにおいては、赤かび粒発生は重大な問題である。しかし、日本で栽培される飼料用トウモロコシの大部分は子実用ではなく、サイレージ用であり、赤かび粒率はサイレージ生産工程の中では問題にされない。サイレージ用トウモロコシの収穫においては、地上部全体を機械によって刈り取られると同時に 1 センチ程度に細断される。それがサイロに詰め込まれて発酵し、サイレージとなる。子実の外見によって選別を行う作業はない。

サイレージ用トウモロコシで赤かび病が問題になる理由は、トリコテセン系毒素、ゼアラレノンおよびフモニシン等のかび毒を摂取することにより、家畜の健康被害が生じる可能性があるからである (動物衛生研究所安全性研究チーム, 2008)。農林水産省通知では市販の飼料中の DON を生後 3 か月以上のウシに対しては 4 ppm 以下、それ以外の家畜については 1 ppm 以下 (14 生畜第 2267 号)、また、飼料中のゼアラレノン濃度を 1 ppm 以下 (13 生畜第 72695 号) と定めている*。しかし、サイレージについては、従来、畜産農家が自分の飼料畑で飼料作物を栽培して自分のウシに給与している場合が多いため、市場に流通する飼料のような品質管理体制は整備されていない。しかし、近年は、飼料作物栽培と家畜飼養の分業が進みつつあり、TMR (total mixed rations: 完全混合飼料) の原料として使用されるサイレージの生産においては流通飼料としての品質管理が求められているため、サイレージ用トウモロコシ栽培におけるかび毒リスク管理方法の確立が急務となっている。

なお、感染率や赤かび粒発生率とかび毒蓄積量との関係は単純ではない。赤かび病菌の中にもかび毒を産生しないグループ・系統がある。このような菌に感染した場合、赤かび粒は発生してもかび毒は蓄積しないことになる。逆に、病徴の見られない植物体でも、かび毒産生菌に感染し、かび毒を蓄積している場合もある (出口, 2008)。また、かび毒産生能をもつ菌も、常に一定の率

* NIV およびフモニシンについての規制値は、日本ではまだ定められていない。なお、米国では、乳牛に関してはトウモロコシ由来の飼料中のフモニシン濃度が 30 ppm 以下であること、しかも、当該飼料が乳牛の摂取する餌の乾物量の中で 50% 以下であることが定められている。

でかび毒を生産しているわけではなく、黄熟期以前のトウモロコシではかび毒生産量は比較的少ない (WARFIELD and GILCHRIST, 1999)。かび毒産生には菌の性質および植物の生育段階等種々の要因が関与しているので、かび毒濃度を推定するには、これらの要因も考慮する必要があるだろう。

III 被害回避の代償：飼料の栄養価とかび毒

かび毒蓄積を回避しようとする場合、飼料の栄養価がその代償となる可能性がある。畜産草地研究所 (栃木県那須塩原市) で栽培した飼料用トウモロコシ 2 品種 (32K61 および SH3815) の地上部全体に含まれるフモニシン含量を経時的に調べた結果 (図-1), 収穫調査日が遅くなるにつれてフモニシン含量も上昇した (岡部ら, 2009)。したがって、フモニシン含量の上昇が始ま

る以前の時期に収穫すれば、フモニシンによるリスクを回避できる。しかし、サイレージ用トウモロコシの収穫適期は植物体の乾物率が 28% 以上となる黄熟中後期であり、それより早い時期に刈り取った場合には排汁流出による養分損失が生じる (大下, 2006)。このため、かび毒のリスクを回避しようとするれば、飼料の栄養価を損

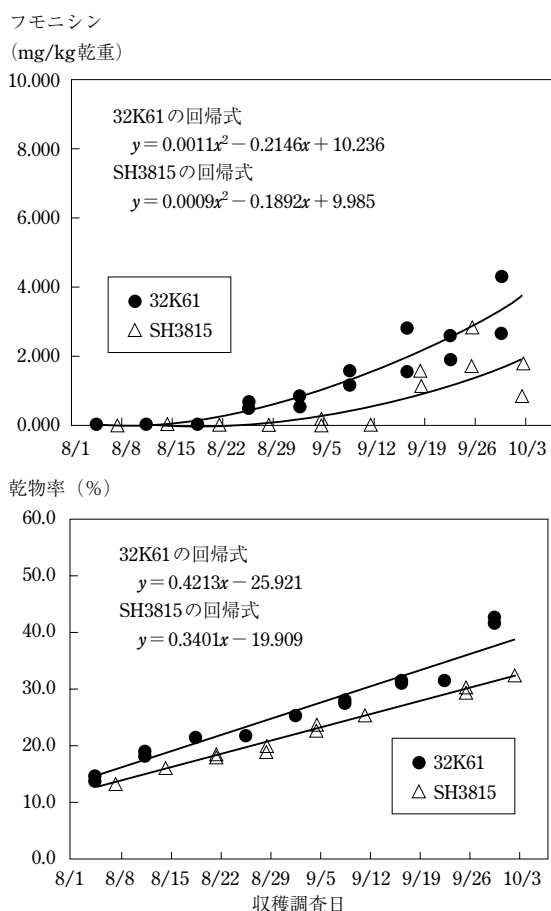


図-1 トウモロコシ地上部のフモニシン含量 (上) および乾物率 (下)

播種日: 2008 年 5 月 1 日。絹糸抽出日: 2008 年 7 月 20 日 (品種 32K61) および 7 月 24 日 (品種 SH3815)。

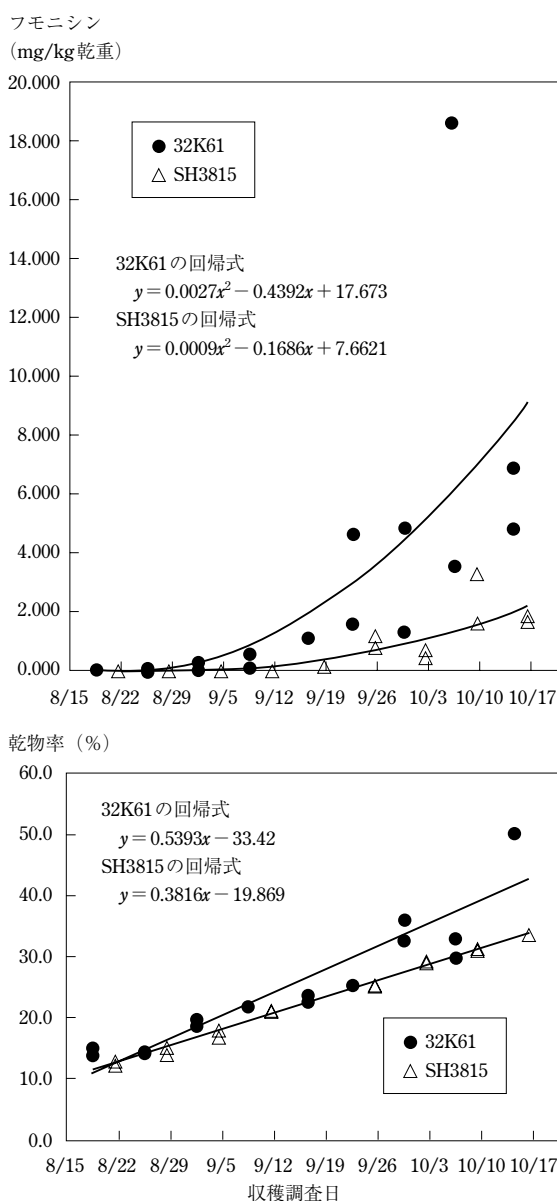


図-2 トウモロコシ地上部のフモニシン含量 (上) および乾物率 (下)

播種日: 2008 年 5 月 28 日。絹糸抽出日: 2008 年 8 月 5 日 (品種 32K61) および 8 月 7 日 (品種 SH3815)。

なうことになる。

フモニシン含量はトウモロコシの登熟とともに急激に増大し、飼料の栄養価とトレードオフ関係にあるため、リスク評価においては、収穫適期のフモニシン含量を問題にする必要がある。収穫期である9月上・中旬のフモニシン含量を比較すれば、SH3815は32K61よりも低い(図-1)。しかし、SH3815は乾物率の上昇も32K61より遅いため、乾物率28%となる時点、すなわち帰直線から求められる32K61の9月6日およびSH3815の9月19日のフモニシン含量を比較すると、32K61は約0.79 mg/kg 乾重、SH3815は約1.2 mg/kg 乾重と推定され、32K61のほうがやや低い。

一方、同じ圃場の隣接した区画に約4週間遅れて播種したトウモロコシ(図-2)では、乾物率28%となる時点(32K61では9月19日、SH3815では9月30日)のフモニシン含量を比較すると、32K61は約2.7 mg/kg 乾重、SH3815は約0.67 mg/kg 乾重と推定され、SH3815のほうが低い。一般にトウモロコシの播種時期が遅くなるとフモニシン濃度が高くなることが報告されており(BLANDINO et al., 2009)、32K61はそのとおりにフモニシン含量の上昇が急激になったのに対し、SH3815は5月1日播種(図-1)と同程度であった。

以上のように、フモニシン濃度は播種時期や品種による影響を受けるが、それらの影響を評価するためには収穫適期のフモニシン濃度を比較する必要がある。

IV ポストハーベストのかび毒汚染

赤かび病によるかび毒汚染は圃場で植物が生育しているときに生じる(出口, 2008)。しかし、収穫後(ポストハーベスト)にサイロ内で嫌気状態に置かれると、赤かび病菌は不活化され、検出されなくなる(MANSFIELD and KULDAU, 2007)。

これに対して、サイロへの原料詰め込みの際に空気が残存するなど、十分な嫌気状態が保たれない場合、赤かび病菌の活動によるかび毒蓄積が発酵・貯蔵中にも進行する可能性がある。飼料イネサイレージではフモニシン産生菌が分離された例が報告されており(月星ら, 2009)、フモニシンが低濃度ながら検出されている(上垣ら, 2009)。飼料イネでは茎部が中空で空気が残存しやすい(出口, 2008)が、トウモロコシサイレージにおいても詰め込みが不十分でサイロ内が好氣的になれば、同様のことが起こる可能性がある。ポストハーベストに

おける発酵・貯蔵過程でのかび毒汚染対策も今後の課題である。

おわりに

赤かび病は飼料用トウモロコシ圃場で常発している病害である。近年、農作物の安全性が重視されるようになり、赤かび病によるかび毒汚染の防止策が求められている。

赤かび病の中ではムギ類赤かび病についての研究が先行し、既に、麦類のかび毒汚染低減のための生産工程管理マニュアル(九州沖縄農業研究センター赤かび病研究チーム, 2008)が公表されている。飼料用トウモロコシの赤かび病についても、生産者に受け入れられるような対応方法を目指しているが、本病では、実質的に二つの病害を対象にしていること、植物の地上部全体におけるかび毒濃度の低減を目指すべきであること、飼料の栄養価とかび毒リスクがトレードオフ関係にあること等、ムギ類とは異なった状況にある。これらを解決するためには植物病理学だけではなく、飼料分析、育種、栽培等の多くの分野の専門家が協力していくことが不可欠である。

最後になったが、本稿の作成に当たっては月星隆雄博士(畜産草地研究所)、三木一嘉氏(長野県野菜花き試験場)、平岡久明氏(農林水産消費安全技術センター)にご協力いただいた。ここに厚くお礼申し上げる。

引用文献

- 1) BLANDINO, M. et al. (2009): J. Phytopathology **157**: 7 ~ 14.
- 2) 出口健三郎 (2008): 飼料自給・最前線, 酪農学園大学, 江別市, p. 154 ~ 164.
- 3) 動物衛生研究所安全性研究チーム (2008): <http://niah.naro.affrc.go.jp/disease/poisoning/manual/contents-myco.html>
- 4) 平岡久明 (2007): 臨床獣医 **25**(6): 10 ~ 17.
- 5) 九州農研センター赤かび病研究チーム (2008): <http://konarc.naro.affrc.go.jp/team/Fusarium/manual.pdf>
- 6) MAIORANO, A. et al. (2009): Crop Protection **28**: 243 ~ 256.
- 7) MANSFIELD, M. A. and G. A. KULDAU (2007): Mycologia **99**: 269 ~ 278.
- 8) 湊 啓子 (2009): 植物防疫 **63**: 557 ~ 560.
- 9) 大下友子 (2006): 牧草と園芸 **54**(6): 7 ~ 10.
- 10) 岡部郁子ら (2008): 日植防報 **74**: 35.
- 11) ————ら (2009): 日草誌 **55**(別): 181.
- 12) PAYNE, G. A. (1999): Compendium of Corn Diseases, APS Press, St. Paul, p. 44 ~ 47.
- 13) SCHAAFSMA, A. W. et al. (2006): Can. J. Plant Pathol. **28**: 548 ~ 557.
- 14) 須賀晴久 (2006): 日植病報 **72**: 121 ~ 134.
- 15) 月星隆雄ら (2009): 日草誌 **55**(別): 180.
- 16) 上垣隆一ら (2009): 同上 **55**(別): 125.
- 17) WARFIELD, C. Y. and D. G. GILCHRIST (1999): Appl. Environ. Microbiol. **65**: 2853 ~ 2856.