# 特集:高品質・安定多収および環境調和をめざした飼料作物病害虫の研究動向

# トウモロコシ赤かび病の最近の発生状況と サイレージのかび毒汚染

北海道立畜産試験場 湊 啓 子

# はじめに

トウモロコシの赤かび病は、Fusarium 属の糸状菌に より雌穂および雄穂が侵され、白~ピンク色の菌糸に覆 われる病気である (図-1)。国内では Fusarium graminearum 種複合体 (広義の F. graminearum, 以下, 単に F. graminearum と記す) および Gibberella fujikuroi 種複合 体中のいくつかの種「F. verticillioides (旧名 F. moniliforme) など]が病原菌として報告されているが、本病 の発生に関する詳細な報告は少なく, トウモロコシの収 量が顕著に減収するような重要病害としては位置づけら れていない。しかし、赤かび病菌は人や家畜に対して毒 性を有する化学物質(=かび毒)を産生するため、かび 毒に汚染された農作物の安全性という観点からその実態 解明が求められている。F. graminearum は消化器系障 害や免疫抑制機能をもつ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, T-2トキシン等) およ びゼアラレノンを、F. moniliforme は馬の白質脳症や豚 の肺水腫との関連が疑われるフモニシンを産生する。

飼料のかび毒汚染は, 家畜に健康被害を生じさせるた め、農林水産省は主要なかび毒の飼料中許容基準を設定 し,流通飼料については独立行政法人農林水産消費安全 技術センターが汚染状況をモニタリングしている。しか し、酪農家が自ら生産して家畜に給与する自給飼料のか び毒汚染状況については調査事例が少なく、その汚染実 態はほとんどわかっていない。出口ら(2005)は、北海 道十勝管内で生産・調整されたトウモロコシサイレージ のかび毒汚染状況を調査し (n = 40), 70%のトウモロ コシサイレージからデオキシニバレノール (以下、 DON) が検出され (平均 1.8 ppm, 最大 19.4 ppm), 全 体の 7.5% が飼料安全法の許容基準値である 4 ppm を超 えていたことを報告している。F. graminearum は道内 に広く分布することから、飼料用トウモロコシが同菌に よる感染を受けて赤かび病が発生している可能性が考え られる。本稿では、筆者らが北海道で実施している、飼

Field Survey of Gibberella Ear Rot of Corn and Mycotoxin Contamination in Corn Silage. By Keiko Minato

(キーワード:トウモロコシ, 赤かび病, かび毒, サイレージ)

料用トウモロコシにおける DON 汚染の実態とその発生機序の解明に関する取り組みを中心に紹介する。

# I 赤かび病の発生状況と病原菌の種類

北海道十勝地域の飼料用トウモロコシ栽培圃場におい て, 子実にカビが生えたトウモロコシから糸状菌を分離 同定した結果, F. graminearum, F. moniliforme, F. avenaceum が高頻度で分離された。このうち、F. graminearum 10 菌株を米培地で培養して毒素産生能を 調べた結果,いずれも DON およびゼアラレノン産生能 を保有していた。また、収穫時に1cm程度に裁断した 子実と茎葉の混合物 (サイレージ原料草) からは、F. graminearum が  $2 \times 10^2 \sim 4 \times 10^4$  CFU/g 検出された。 同試料からは DON が  $0.15 \sim 4.6$  ppm 検出され、F. graminearum 菌数が多い試料ほど DON 含量が高い傾向 があった (図-2)。2003~05年にかけて道内の他地域 (石狩,後志,日高,根釧,網走)で生産されたトウモ ロコシサイレージからも平均  $0.8 \sim 2.5$  ppm の DON が 検出されていることからも, 道内の飼料用トウモロコシ 栽培圃場においては赤かび病の発生による DON 汚染が 広く生じている可能性が示唆された。

本州での調査結果では、長野県で飼料用トウモロコシにおける赤かび病発生の品種間差を調べた結果、発病程度に大きな差があるものの、すべての供試品種において赤かび病の発生が認められ、赤かび粒からフモニシンが検出されている(三木ら、2008)。また、赤かび粒から分離された Fusarium 属菌の約 40%の菌株がフモニシン



図-1 トウモロコシ赤かび病の病徴

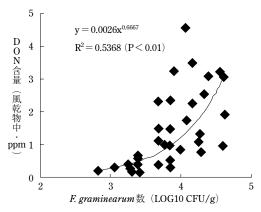


図-2 トウモロコシサイレージ原料草中の F. graminearum 菌数と DON 含量 (湊ら, 2006)

産生能をもち、それらの菌株は F. verticillioides またはその近縁種であった(岡部ら、2008)。これらの調査結果から、北海道と本州では赤かび病の主たる病原菌の種類が異なるものと考えられる。F. graminearum および F. verticillioides は感染の至適環境が異なり、F. graminearum は網糸抽出期~子実成長期に温暖・湿潤な気象条件で多発するのに対し、F. verticillioides は高温・乾燥年に多発するという(REID et al., 1999)。しかしながら、両菌は日本国内に広く分布するものと考えられ、気象条件によって優先度が変化する場合も想定されるため、複合汚染を視野に入れて調査を進める必要がある。

# II かび毒の汚染部位と発生時期

赤かび病菌 (F. graminearum, F. verticillioides) は トウモロコシの子実を侵すだけでなく、海外では茎の 病害(stalk rot)の病原菌としても報告されている (GILBERTSON et al., 1985)。このため、子実だけでなく茎 部でのかび毒蓄積も懸念される。そこで、植物体におけ るかび毒の蓄積部位とその発生時期を明らかにするた め、トウモロコシの生育ステージごとに、植物体の部位 別に F. graminearum 分離切片率と DON 含量を調査し た(出口ら,2007)。植物体は葉,茎および子実に分け、 葉と茎は飼料用カッターで細切後に無作為に各50片, 子実は直接 50 粒を採取し、それぞれ表面殺菌後に F. graminearum の選択分離培地(FG 培地,外側,1994) で培養し、F. graminearum が分離される切片率を調べ た。残りの試料を乾燥・粉砕し、エライザキット (Veratox DON5/5, NEOGEN) により DON 含量を測定 した。その結果, F. graminearum 分離切片率は, 抽雄 期(7月下旬)の植物体では、葉、茎および子実でそれ

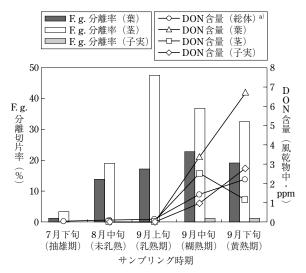


図-3 飼料用トウモロコシの生育時期別 F. graminearum (F. g.) 分離切片率および DON 含量の変化 (2005年,北海道十勝管内の5 圃場平均;出口ら,2007) a) 各部位の DON 含量を構成比で加重平均して算出.

ぞれ 1.2, 3.6 および 0.0%, 未乳熟 (8月中旬)~黄熟 期(9月下旬)では、それぞれ14~23、19~47およ び < 0.2 ~ 0.4%であった。未乳熟期以降の葉と茎から の分離率が高く, 子実からの分離率は常に低かった (図-3)。一方, DON 含量は, 抽雄期 (7月下旬) ~乳 熟期(9月上旬)においては各部位ともに定量限界 (0.5 ppm) 以下であったが、糊熟 (9 月中旬) ~ 黄熟期 では、葉、茎および子実からそれぞれ 3.4 ~ 6.8, 1.2 ~ 2.5 および  $1.0 \sim 2.8$  ppm 検出された(図-3)。これらの 結果は5 圃場の平均値であるが、糊熟~黄熟期の葉と茎 からは5圃場ともに定量限界以上のDONが検出された のに対し、子実から定量限界以上の DON が検出された のは糊熟および黄熟期ともに1圃場のみで、それぞれ 5.0 および 11.3 ppm と高かった。子実からの F. graminearum 分離切片率および DON 検出率は低かったが、子 実は汚染された場合高濃度になる可能性が示唆された。 また、総体の DON 含量(各部位の DON 含量を構成比 で加重平均して算出)が飼料安全法の許容基準値 4 ppm を超えたのは1圃場のみで, 8.2 ppm であった。

以上のことから、F. graminearum の感染は抽雄期前後(8月上旬)から茎葉部を中心に始まり、DON の蓄積は糊熟期以降(9月中旬)に明瞭になって現れるものと考えられた。なお、本調査では葉鞘部を茎に、包葉部を葉に含めたため、より詳細な汚染部位がわからなかった。このため、翌年、植物体を葉、葉鞘、茎、包葉およ

び子実の5部位に分けてDON含量を調査した結果,葉, 葉鞘および包葉を中心に植物体地上部全体からDONが 検出された(飯田ら,2007a)。

# III 赤かび病菌の胞子飛散と気象条件

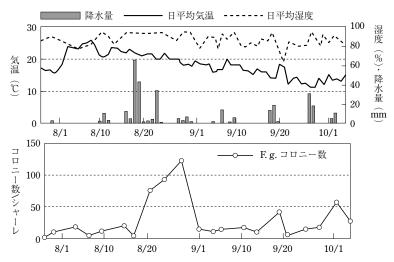
赤かび病の主な一次伝染源は、罹病残渣や枯死植物上 で形成される子のう胞子であり、風によって飛散した子 のう胞子が植物体に付着して感染すると考えられてい る。そこで、北海道新得町のトウモロコシ栽培圃場にお いて F. graminearum の胞子飛散状況を調査した(図-4)。F. graminearum は調査期間を通してトウモロコシ 圃場の空中から常に捕捉され、胞子飛散数は連続した降 雨が続いた後の8月下旬に顕著に増加した(湊ら, 2007)。これは赤かび病菌の子のう胞子が降雨時および 降雨後など湿度が高い環境下で空中に放出されるという 既報(小泉ら, 1993) と一致した。また, 胞子飛散を調 査した圃場において、トウモロコシの生育ステージごと に植物体部位別に F. graminearum 切片率と DON 含量 を前章までに述べたものと同じ方法で調査した結果, 8月初旬(抽雄期)の調査時ではトウモロコシの葉、葉 鞘および茎のいずれの部位からも F. graminearum は分 離されなかったが、8月中旬(未乳熟期)以降は子実を除 く植物体の各部位より安定して分離された (データ略)。 以上から、飼料用トウモロコシの DON 汚染機序とし ては,8月の高温・多湿条件下で多量に飛散した胞子が, 葉や絹糸に付着して、そのままの部位、あるいは降雨や 夜露により洗い流されて葉から葉鞘部に、絹糸から子実 へと移動して感染し、収穫までの間に DON を産生する

と推察された。なお、植物体への感染時期と考えられる 8月上旬は、トウモロコシの花粉飛散時期と重なり、葉および葉の付け根部分に多量の花粉の付着が観察され、 常に湿気を帯びた状態であった。

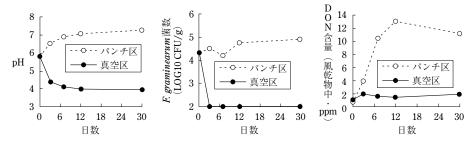
# IV サイレージ発酵過程におけるかび毒 含量の変化と除毒化

飼料用のトウモロコシは,多くの場合,茎葉・子実と もに収穫時に1cm程度に裁断され、サイロ内の嫌気的 な環境下でサイレージ化された後に家畜に給与される。 これまで、サイレージ発酵過程におけるかび毒含量の変 化を調査した報告は少ない。そこで、トウモロコシサイ レージの発酵過程において pH, F. graminearum 菌数お よび DON 含量の変化を調査した(飯田ら, 2007 b; 図-5)。原料草をパウチ袋に詰込み後、袋内の空気を吸 引除去後に密封した真空区では、速やかに pH が低下し て, その後の発酵中は pH 4.0 前後で推移し, 良好な発 酵状態を示した。真空区では F. graminearum は処理 3日後に検出されなくなり、発酵期間中に DON 含量が 大きく変化することはなく、2 ppm 前後で推移した。一 方,パウチ袋に穴をあけたため、嫌気的な条件が保てず に pH が上昇したパンチ区では, F. graminearum は減 少せずに, DON 含量は原料草の 0.5 ppm から 13 ppm まで増加した(飯田ら、2007b)。このためサイレージ 発酵過程でのかび毒の増加を防止するには、十分に気密 性を高めて空気を遮断し、糸状菌の増殖を抑制すること が重要であると考えられた。

圃場段階でトウモロコシ植物体に蓄積された DON



**図-4** 飼料用トウモロコシ栽培圃場における *F. graminearum* (F. g.) 胞子飛散数 (地上高 80 cm) と気象 (湊ら, 2007)



**図-5** トウモロコシサイレージの発酵過程における pH, *F. graminearum* 菌数および DON 含量の変化 (飯田ら, 2007 b)

パウチ袋に原料草を詰めこみ、袋内空気を吸引・除去後に密封した. 真空区は通常のパウチ袋, パンチ区は事務用穴あけパンチにより中央2箇所に直径5mmの穴をあけたパウチ袋を使用した. 各3袋ずつ開封し分析に供試した. データは3袋の平均値を示した.

は、良好なサイレージ発酵過程においてはその濃度は大きく変わらず、安定して存在していた。かび毒は熱に安定な物質であり、発酵熱による汚染物からのかび毒の除去は困難であることが知られている。このため、圃場での栽培段階での汚染を防止する必要がある。麦類栽培では圃場段階での汚染防止のために薬剤防除が行われるが、飼料用トウモロコシの場合、地上部すべてを家畜に給与するために、家畜への薬剤の影響が懸念される点や、技術的にも、長大作物に対する防除自体が困難であることなどいくつかの問題があり、現時点で使用が認可されている殺菌剤はない。このため、トウモロコシのフモニシン汚染で提案されているような黄熟期後の適期刈りあるいは抵抗性品種の利用などの薬剤によらない対策を確立することが必要である(岡部ら、2009)

汚染飼料の除毒化としては、飼料に添加した多孔質吸着材によって、家畜の消化管内でかび毒を吸着・捕捉して、家畜体内での吸収を妨げる方法があるが、その効果については判断が分かれている。近年の研究では、紫外線照射がDONやゼアラレノンの減弱に有効であることが確認され、紫外線照射によるマイコトキシン除去装置(特開2008-237108)が考案されている。對馬ら(特開2008-220179)はムギの根圏に生息する微生物の中からDONを唯一の炭素源として増殖する微生物を分離し、麦粒でのDONの低減に成功している。このように、自然界の中にいるかび毒分解微生物を有効に利用することができれば、将来的にはサイレージ発酵過程においてかび毒を低減できる可能性がある。

#### おわりに

本稿では、北海道での調査事例を主に紹介したが、自 給飼料のかび毒汚染を全国的に調査した報告(平岡、 2007)によると、北海道、東北および九州地域で生産さ れたトウモロコシサイレージの89%からDONが検出されたという。また、同トウモロコシサイレージの一部からは、東北および九州産からはニバレノール、フモニシンが検出され、北海道および東北産からはゼアラレノンが検出されている。赤かび病菌はこれらのかび毒の主要な産生菌であり、我が国の飼料作物栽培圃場には赤かび病菌が常在しているものと推察される。かび毒の汚染程度としては、飼料安全法の基準値を上回る事例はわずかであったが、気象条件によって汚染程度が高まる危険性もあるため、今後もモニタリング調査が必要である。

また,前章までに述べたとおり,汚染飼料からのかび 毒の除去は現状困難であるため,圃場での高濃度汚染を 防ぐために,赤かび病の発生生態をより詳細に解明する とともに,発生助長要因の解析を進めることが重要であ る。今後,トウモロコシの品種や栽培条件(連作,不耕 起,施肥管理)とかび毒汚染の関連等を明らかにしてい きたい。

なお,本稿の作成に当たっては,畜産草地研究所の岡 部郁子博士に赤かび病の写真の提供および病害に関する ご助言をいただいた。ここに記して謝意を表する。

### 引 用 文 献

- 1) 出口健三郎ら (2005): 北海道草地研報 39:49.
- 3) Gilbertson, R. L. et al. (1985): Plant Disease 69: 1065 ~ 1068.
- 4) 平岡久明 (2007): 平成 18 年度獣医師会年次大会, 講演要旨集: 90~92.
- 5) 飯田憲司ら (2007 a): 北海道草地研報 41:65.
- 6) ―――ら (2007 b): 日草誌 53(別): 162 ~ 163.
- 7) 小泉信三ら (1993):農研センター研報 23:1~104.
- 8) 三木一嘉ら (2008): 日草誌 54(別): 258~259.
- 9) 湊 啓子ら (2006):北海道草地研報 40:52.
- 10) ―――ら (2007): 日草誌 53(別): 160 ~ 161.
- 11) 岡部郁子ら (2008):同上 54(別):382~383.
- 12) ―――ら(2009): 同上 55(別): 180.
- 13) 外側正行(1994): 土と微生物 44:77~88.
- 14) Reid, L. M. et al. (1999) : Phytopathology  $89:1028 \sim 1037$ .