

1 - 3 赤かび病防除及びマイコトキシン産生制御の研究動向

九州沖縄農業研究センター 地域基盤研究部 中 島 隆

1. はじめに

麦類の赤かび病は、登熟期間中に降水量の多い我が国では避けることのできない病害である。本病は、近年の世界的な異常気象が原因で従来発生がなかった地域でも大きな問題となってきた。このため、今までほとんど無視されてきた本病原菌が産生するカビ毒による健康被害が国際的にクローズアップされている。BSE およびカドミウム汚染とともに我が国農産物の新たなハザードとして緊急対応が迫られている。

本稿では、筆者の行っている防除試験と耕種的防除試験に欧米の研究情報をまじえて赤かび病の防除対策の現状と今後の研究方向について話題提供する。

2. 薬剤防除

現在、麦類赤かび病に対して登録のある薬剤は赤かび病の被害を軽減することを目的に選抜され、残留毒性等の試験に合格したものが農薬取締法に基づく農薬登録を受け、実際の防除に使用されている。しかしながら、これら薬剤が DON, NIV 等のマイコトキシンを軽減するか否かはほとんど明らかではない。そこで、筆者は本年から西日本で優占している赤かび病菌である *Fusarium graminearum* と九州における主要品種「チクゴイズミ」を用いてマイコトキシンの汚染程度を指標にして有効薬剤のスクリーニングを行っている。表 1 に示す作用機作の異なる 14 の薬剤を選択し、出穂 4 日後の 4 月 9 日と 4 月 19 日の 2 回、10a あたり 150g/ha 散布した。また、4 月 16 日（開花盛期）と 4 月 24 日に *Fusarium graminearum* H3 菌株の分生孢子懸濁液 (5×10^5 /ml) を 10a あたり 100g/ha 背負い式の噴霧器で接種した。その後、病勢進展を促進するためにスプリンクラーによる散水を行い、5 月 9 日に各試験区 50 穂について発病穂率と罹病程度を図 1 の基準 (Ban and Suenaga, 2000) で調査し、発病度 ((発病株率 × 罹病程度)) を求めた。試験は 3 反復の乱塊法で行い、1 試験区の大きさは 4m × 0.8m に設定した。収穫後、各試験区につき 2.2mm の縦目篩にかけ、整粒とし 300g を穀物検定協会に送付し HPLC 法により DON, NIV, Zearalenone の 3 成分を分析した。

今回は初年度であり、薬剤の散布時期や回数及び病原菌の接種時期を固定して、スクリーニングする薬剤の数を増やすことを第一に考えた。また、麦類に登録がある薬剤にこだわらず我が国が独自に開発した微生物農薬、イネ病害や果樹病害対象の薬剤も選択した。つまり、赤かび病の発生は防除できないが、毒素の量を低減するような薬剤がないかを検討した。

図 1 ~ 3 に本試験の結果を示した。赤かび病の発生状況は無処理の発病穂率 100%、発病度 39.8 の甚発生となり、試験区内のバラツキがほとんど無い均一な発病が得られた。

防除価を比較するとテブコナゾール 1, キャブタン, 有機銅が 80 近くの優れた赤かび病抑制効果を示した。それ以外の EBI 剤 (エルゴステロール合成阻害剤) は 50 前後の防除価しかなかった。イネ用に

表1 防除試験に供試した薬剤

番号	一般名	作用機作	農業登録
1	テブコナゾール 1	細胞膜合成阻害	小麦
2	テブコナゾール 2	細胞膜合成阻害	
3	ミクロブタニル	細胞膜合成阻害	
4	シプロコナゾール	細胞膜合成阻害	麦類
5	プロピコナゾール	細胞膜合成阻害	
6	クレソキシムメチル	呼吸阻害	麦類
7	トリフミゾール	細胞膜合成阻害	麦類
8	イミノクタジンアルベシル酸塩	細胞膜機能および脂質合成阻害	
9	微生物農薬 <i>Bacillus subtilis</i>	微生物競合	
10	キャプタン	エネルギー代謝阻害	
11	有機銅	各種酵素作用の阻害	
12	フェナリモル	細胞膜合成阻害	
13	ヒドロキシイソキサゾール	不明	
14	プロベナゾール	抵抗性誘導	
15	無処理		

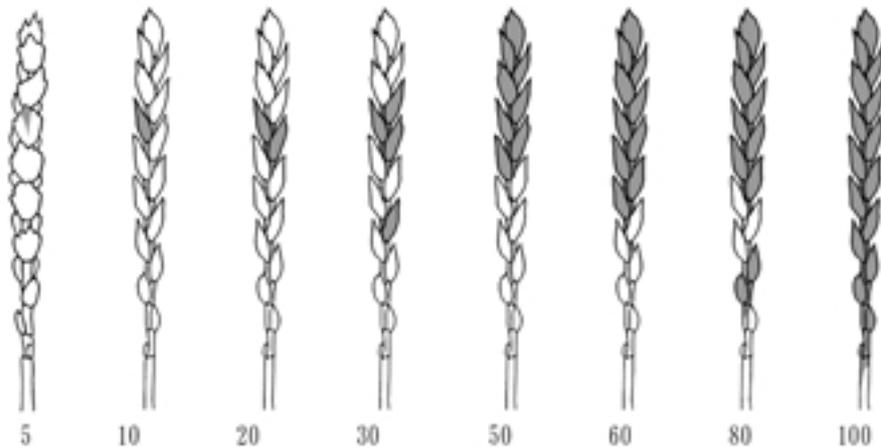


図1 赤かび病罹病程度の評価指数

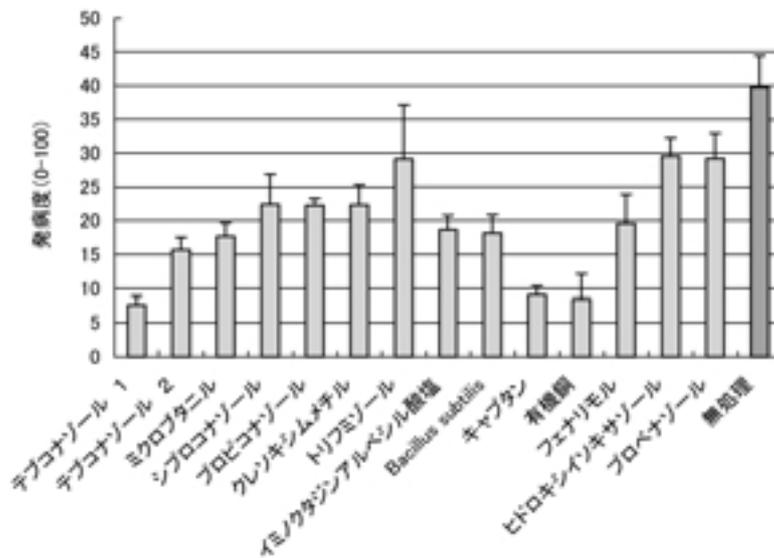


図2 各種薬剤処理によるの発病度の差異 (九州沖縄農研:2002)

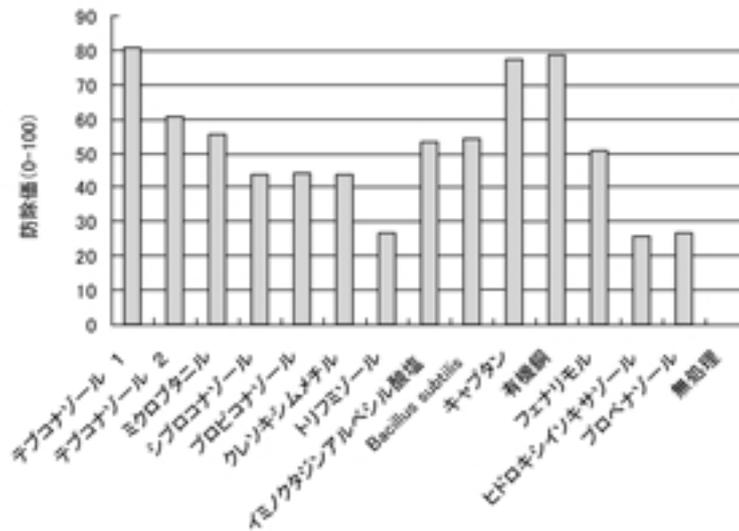


図3 各種薬剤のコムギ赤かび病防除価（九州沖縄農研：2002）

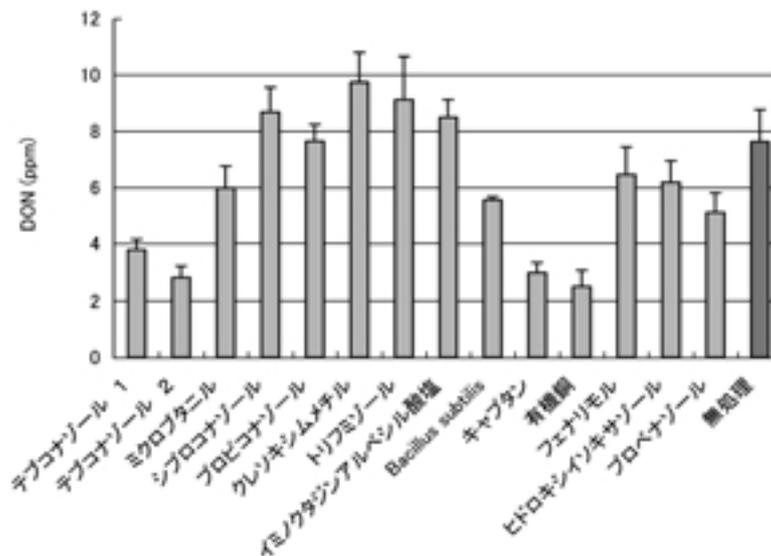


図4 各種薬剤のDON低減効果（九州沖縄農研：2002）

使用されているヒドロキシイソキサゾール及びプロベナゾールは25前後の防除価にとどまった。市販されている微生物農薬の *Bacillus subtilis* は平均防除価 54.27 となり、一般の農薬と同等の効果を示し注目される。一方、DONは無処理が7.6ppmに対してテブコナゾール1,2が3.8ppm及び2.8ppmにそれぞれ減少した。また、キャプタン及び有機銅は3.0ppm及び2.5ppmにそれぞれ減少し、これらはDON含量を低減する効果が高かった。これらの薬剤は赤かび病の防除効果により病原菌の感染量を低減させることでDONを減少させたと考えられる。赤かび病の発病は抑えなくてもDONの産生を抑制するタイプのなお薬剤は今年のスクリーニングでは見いだせなかった。本試験におけるNIV,ZEAは0.1ppm以下であり、増減を議論するのは意味がないと思われる。

テブコナゾールはコムギに登録があるが、キャプタン及び有機銅は非登録農薬である。今後、残留毒性の問題等を調査して有望であればメーカーに登録を働きかけたい。

3. 防除薬剤の海外における技術開発の状況

アメリカ合衆国

13 州の植物病理関係機関が参加した大規模な連絡試験を行っている。供試する農薬と散布方法等を統一して様々な条件下で防除効果を比較している。

http://www.scabusa.org/pdfs/01_CBC_Web.pdf (http://turgidum.pw.usda.gov/scab/pdfs/01_CBC_Web.pdf) の p75-79 を参照されたい。

前年までの結果から有望な薬剤として 2001 年度は以下の薬剤を連絡試験に供試した。

フォリキュア (Folicur[®]) 一般名テブコナゾール (日本における商品名: シルバキア)

AMS12619 (バイエル社の開発中の農薬)

BAS505 (BASF 社の開発中の農薬)

TrigoCor1448 (コーネル大学で開発中の生物農薬)

OH182.9 (USDA/Peoria で開発中の生物農薬)

その結果、全試験区を平均した場合は圃場発病度 (発病株率×罹病程度) で評価すると処理の効果があるが、被害粒率と DON 濃度で評価すると、減少はしているが有意ではなかった。また、少発生の場合は薬剤の効果が有意になるが、多発生の場合は防除効果が判然としない試験例が多かった。DON の減少も無処理 6.2ppm から最大で 4.4ppm に低下するにとどまった。

ヨーロッパ諸国

関与する病原菌がアメリカ合衆国よりも多様である (北海道に近い)。このため、病原菌により有効な薬剤が異なることが明らかにされている (Jennings et al 2000, Simpson 2001)。

F. graminearum に最も有効なテブコナゾールは *Microdochium nivale* には効果が低く、両者が混発する地域ではアジキシストロピンと混用して散布すると有効であるとしている。ただし、両者を混用しても圃場試験による防除価 (完全防除で 100) は良くて 60 であり、DON の減少も平均すると 50% が限界のようである。

さらに、図 4 に示す英国での試験例にあるようにアジキシストロピン単独処理では DON の濃度を逆に増加させるとする報告もある。この例ではテブコナゾールとメトコナゾールが DON 低減には有効であるがメトコナゾールはわが国では登録されていないため使用することができない。本剤の原体はわが国のメーカーが生産していることから、早急な製剤化と登録が望まれる。

ムギ類赤かび病は難防除病害であり現状の農薬のレベルでは大発生時には十分な防除効果が得られない。このため、より有効な薬剤の開発、特にマイコトキシンの生合成経路をブロックする機作を持つ新規薬剤の開発が必要である。

当面の対策として既存薬剤では海外でも最も評価の高いテブコナゾールの普及を図るべきである。本剤は我が国では小麦にのみ登録があり大麦には未登録であるため、大麦でも早急に登録のためのデータを揃える必要がある。さらに、小麦においてもメーカーの販売戦略から北海道でのみ市販されており、それ以外の地域では入手できない。このため全国的な普及にはメーカーに対する働きかけが必要である。また、メトコナゾールの登録への要請も必要である。さらに、本州では薬剤散布特に水和剤を散布

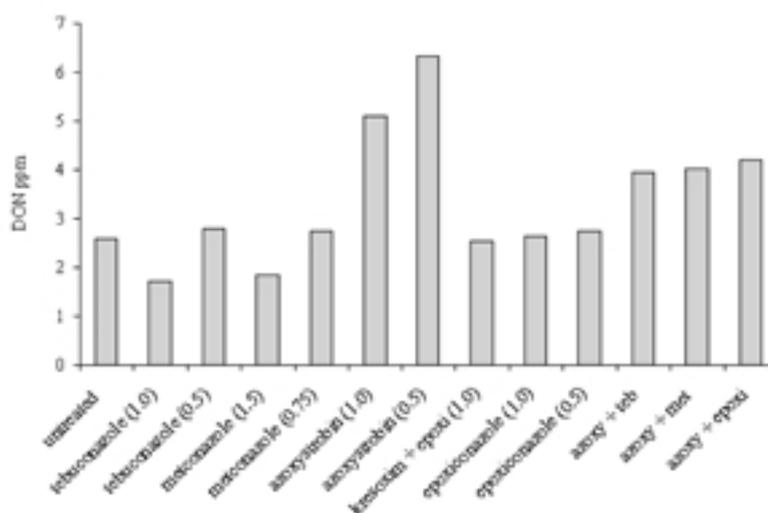


図5 英国 Central Science Laboratory における薬剤処理と DON 量との関係 (2000) (Jennings et al 2000)

する器具を持ち合わせていない農家が多いことと、麦類への薬剤散布の時期に水が確保されにくいことから粉剤の散布がほとんどである。近年開発された薬剤では粉剤は製品化されておらず、水和剤がほとんどである。今後、DON 低減に有効な薬剤を普及させていくには水和剤を散布できる栽培管理ピークル及び無人ヘリの有効活用と無人ヘリ用薬剤の開発と登録促進が欠かせない。

4. 耕種的防除

赤かび病の伝染源は種子伝染よりも前作物の残渣上に形成される子のう胞子がより重要と考えられている (Sutton, 1982)。このため、輪作と残渣処理により伝染源の密度を低下させることが耕種的防除のための基本戦略である。

アメリカ合衆国やカナダでは土壌の流亡や侵食を防ぐために不耕起栽培や耕起を最小限にとどめるミニマムティレッジが普及しつつある。しかしながら、不耕起栽培の普及が進むと同時並行的に赤かび病の多発が問題となってきた。表2はこれらの関係を実際の圃場試験で確認したもので、不耕起やチゼルブラウによる部分耕起栽培では罹病残渣が次作に残り、発病度が高くなるばかりか DON の汚染度も高

表2 赤かび病発病度および DON 汚染に及ぼす前作物と耕起法の影響

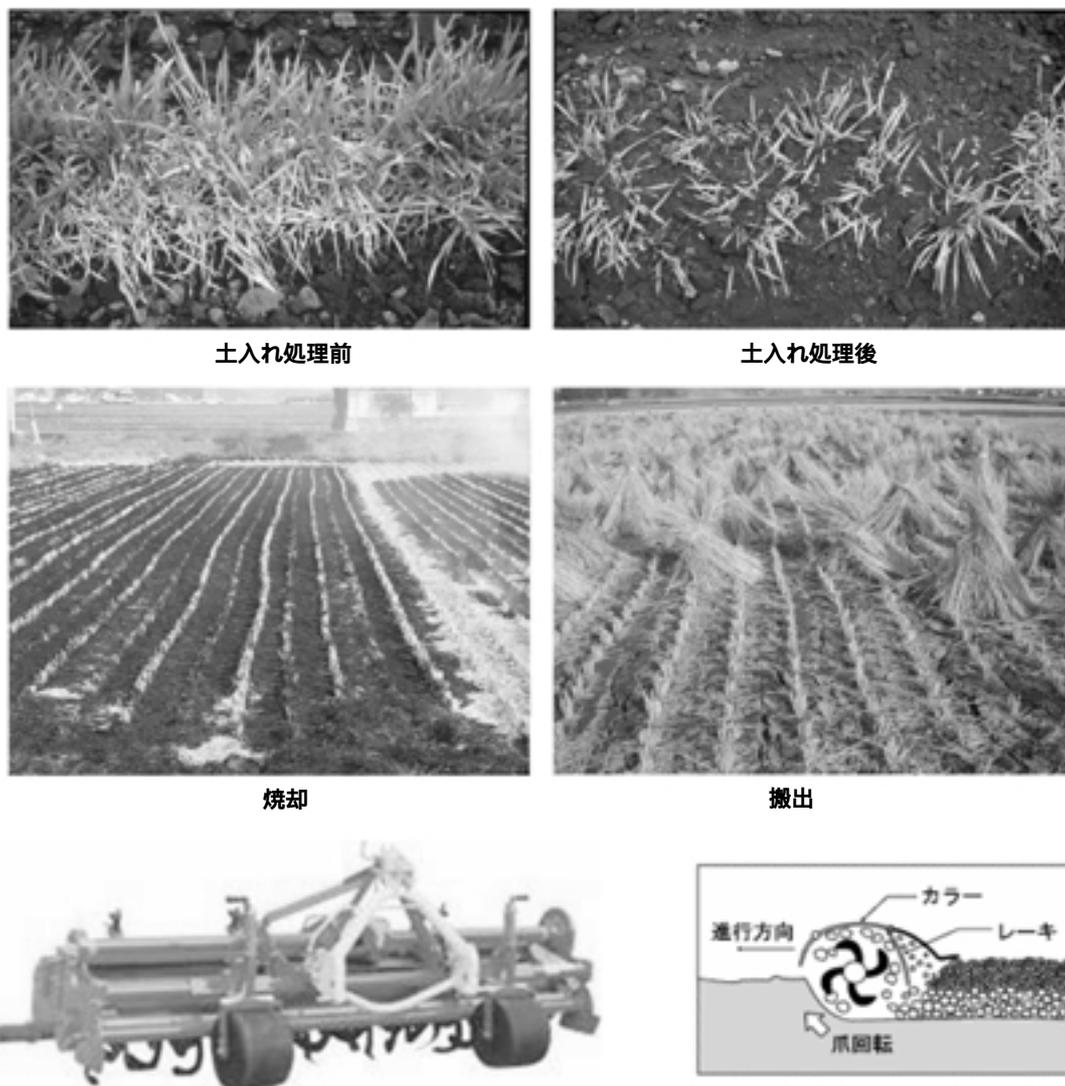
	トウモロコシ	コムギ	ダイズ	平均
発病度 (%)				
反転ブラウ	17.4	15.6	13.9	15.6
チゼルブラウ	25.9	19.0	16.0	20.3
不耕起	25.6	20.4	17.4	21.3
平均	23.0	18.3	15.8	
DON (ppm)				
反転ブラウ	9.7	7.9	6.5	8.1
チゼルブラウ	15.0	9.2	7.4	10.6
不耕起	15.6	10.7	6.9	11.1
平均	13.5	9.2	6.9	

R. Dill-Macky (2000) Univ. of Minnesota

くなる。特にトウモロコシの不耕起栽培で顕著である (Dill-Mackey, 2000)。

海外では土壌侵食の問題が深刻で、その対策として不耕起栽培は重要であり、これを中止することは困難である。この点我が国では農家一戸あたりの栽培面積が小さいこともあり、図6に示すような焼却、持ち出し、土入れ等の多様な残渣処理が可能であり、現在でも行われている。さらに、アップカットロータリーを使用すると地表面の稲わらを効率よく地中に埋設することが可能とされている (青森農試, 1990)。筆者らはこれらの耕種的方法で我が国の主要な伝染源である稲わらの量を低下させることで赤かび病の被害を低減させることを目的に試験を開始している。ここでは東北農試 (盛岡) の畑作麦で行った試験について紹介する (Nakajima, 1998)。この場合の伝染源は越冬中に枯死した茎葉に形成される分生孢子で主な病原菌は *Microdochium nivale* である。

わが国には「土入れ」(土ふるいと言う地方もある)と呼ばれる伝統農法がある。これは越冬後の小麦に土壌をふりかける耕種法であり、そのための農機具も存在する。土入れは凍霜害で傷んだ根の機能回復、畦間の肥料成分を株元に寄せる、無効分けつの抑制、倒伏防止、雑草の抑制などに効果があり、



稲わらのすき込みに効果があるアップカットロータリー
図6 赤かび病菌の伝染源を低減することが期待される残渣処理方法

昭和 30 年代まで麦踏みと並ぶ麦栽培の基本技術であった。この伝統技術が小麦の代表的な病害の発生を抑える効果も持っていたことが明らかになった。

コムギ紅色雪腐病菌は融雪後、雪腐病を起こすだけでなく、気温の低い時には穂にも発生し赤かび病を引き起こす。うどんこ病は発生面積が大きいコムギの重要病害であり、病原菌が葉の内部にはびこって冬を越し、春になると地面に近い下葉から発病する。土入れによって下葉が土壤に埋まり、葉の中の病原菌が死滅することと、下葉にある病原菌の胞子が周りに飛び散ることができなくなることにより両病原菌の伝染環を断ち、その結果、発病が抑制されると想定し試験を行った。

試験は 1991 年から 95 年にかけて東北農業試験場（現：東北農業研究センター：岩手県盛岡市）で行い、一部の圃場には赤かび病の発病を促すために根雪前に紅色雪腐病菌を接種した試験区を配置し、条播したコムギの節間伸長開始期および穂孕期の 2 回、紅色雪腐病の被害茎葉および黄化した下位葉が土壤で完全に隠れるように処理した。処理後、収穫期まで両病害の発生推移及びコムギの収量に及ぼす影響を調査した。

その結果、年次や試験区により効果に差はあるが、赤かび病罹病穂率は著しく減少した（図 7、図 8）。罹病穂数の減少率（防除価）を算出すると 94 年は 76.0、95 年は 62.1 であり、予防的に散布される農薬と同等の効果があった。また、うどんこ病の発生消長にも差があり発生初期（6 月中旬まで）の抑制効果が大きかった。両病害を抑制した結果、95 年の生育調査では草丈、穂数は変わらないが収量は 1 割以上増加した（表 3）。

表 3 「土入れ」がコムギの生育・収量に及ぼす影響（1995）

調査項目	土入れ区 (%)	無処理区 (%)	t 検定
穂数 (/m ²)	550 (97)	567 (100)	NS
稈長 (cm)	110 (101)	108 (100)	NS
収量 (kg/10a)	316 (113)	280 (100)	5% 有意

品種：「チホクコムギ」、根雪前接種区

表 4 「土入れ」がコムギ赤かび病菌の動態に及ぼす影響（1995）

M.nivale の接種の有無	調査項目	土入れ区	無処理区
根雪前接種	子のう殻形成茎率	0.25	95.0
	止め葉病斑形成茎率	5.5	25.2
無接種	子のう殻形成茎率	0.30	60.5
	止め葉病斑形成茎率	4.8	21.0

病害抑制のメカニズムとして以下の 4 点が想定された。光を遮断することが赤かび病菌の子のう殻形成を妨げる。下位葉からの赤かび病うどんこ病の分生胞子の近距離飛散（風媒・雨媒）を断つ。土壤に埋没することで被害茎葉中の病原菌の死滅を促進する。接触刺激に小麦が反応し抵抗性が増す。これらの仮説のうち前 3 者を検証した。

まず、紅色雪腐病菌の動態（子のう殻形成株率、止め葉病斑形成率、赤かび病罹病穂率）を追跡調査した結果、赤かび病の子のう殻形成率、止め葉病斑形成率は土入れにより大きく減少した（表 4）。

うどんこ病の分生胞子の飛散量は5月20日から6月10日までは「土入れ」処理区が対照区よりも少なかった。6月10日以降はうどんこ病菌の孢子飛散量が多すぎて、計数不能であった。赤かび病菌の子の孢子および分生胞子はスライドガラスで補足する方法では採集できなかった。土入れにより土壌に埋められた紅色雪腐病菌に罹病した葉を経時的に回収し、葉片からの病原菌の分離率を測定した(図8)。対照区の土壌表面に置いたままのものは75日後でも30%以上生存していたが、土壌に埋没したものは60日後で死滅していた。「土入れ」処理により株腐病が多くなる事例があった。株腐病は2核のRhizoctonia AG-Dにより起こり、北陸地方のオオムギでは被害が問題になっている。コムギの場合はオオムギよりも稈が強く、かつ「土入れ」により地際部が土壌で補強されることから、本病による倒伏等の被害は問題にならないと考えられる。本試験ではこれ以外の病害に対する効果は判定できなかった。

今回の研究は「土入れ」という伝統的な栽培法が無意識のうちに病害の防除にも結びついていたことを科学的に証明したものである。ところが、この栽培方法をそのまま現代の大規模省力化が進んだ麦の栽培にとり入れるのは簡単ではない。たとえば、ドリル播きや全面全層播種法では畦間がほとんどないため小麦にふりかける土壌を確保することが困難である。しかし、うどん粉病や赤かび病の防除のために何度も行われる農薬散布を「土入れ」によって減らすことができれば、低コストかつ環境保全的な栽

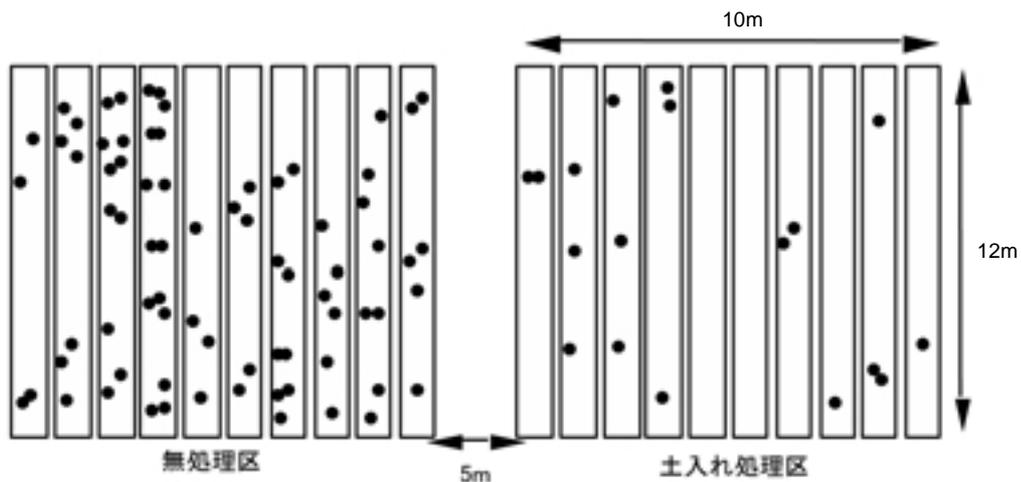


図7 「土入れ」によるコムギ赤かび病の抑制と空間分布(1994年)
根雪前に *F. nivale* を接種 品種:チホクコムギ(が発病穂を示す。)

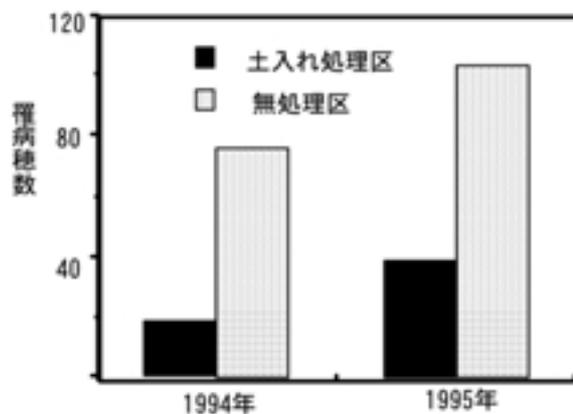


図8 「土入れ」によるコムギ赤かび病の抑制

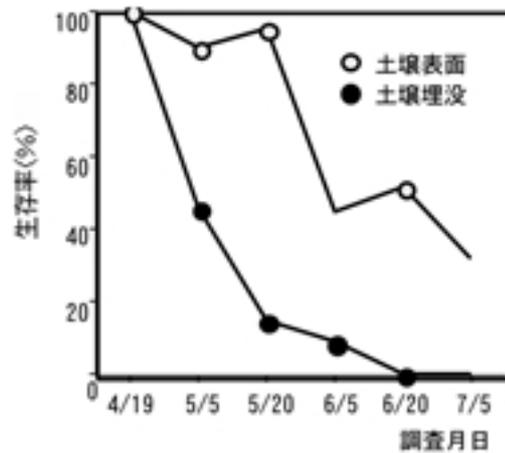


図9 「土入れ」による罹病残渣中の紅色雪腐病菌の死滅の促進

培法として捨てがたい魅力がある。今後この技術の実用化にあたっては、農業機械による作業性や経営面からも総合的に検討し、現代の栽培法に合うように改良する必要がある。

5. 今後の展開方向

赤かび病は難防除病害であり、さらにマイコトキシンの汚染は病害防除以上に複雑な条件が絡み困難な課題となっている。今後の戦略を議論する際には短期的な対応と中長期的対応に分けて考える必要がある。短期的対応としては現状の農薬では DON 産生を完全には抑制できないが、他に有効な手段がない。このため、早急にメトコナゾール及びテブコナゾールの普及を図るべきである。栽培法では圃場の伝染源を減少させる以外に選べるオプションが少ないが、品種の選択と栽培法の工夫によりマイコトキシン汚染リスクを分散させることが必要な対策と思う。具体的には開花期の短い品種の利用と開花期の分散をねらった栽培法、つまり播種期の移動により開花期を分散させ、赤かび病感受性の最も高い時期を分散させることが、筆者の考えつく対応策である。このためには、出穂期及び開花期の予測技術の向上、気象予測情報の利用等が合わせて必要である。さらに現場で問題になっている毒素分析のためのサンプリング法の開発に役立つ病原菌の疫学的解析を急ぐ必要がある。つまり、赤かび病菌はどこから来るのか、どれくらい孢子は飛散するのか、圃場内の病原菌の分布（時間的・空間的）と遺伝的多様性についての知見が必要がある。また赤かび病の発病度と DON 含量が一致しないことが JEFCA (2002) のレポートで指摘されているが、理由として *Microdochium nivale*: 毒素非産生菌の関与 毒素産生能の差異（圃場、地域による） 一部農薬による毒素産生の増加 初期に感染し、激発した場合は屑粒となり除かれる 穂軸への感染により、上部は菌がいなくても発病と見なされる 登熟後期の感染は発病まで菌が進展しないが、毒素は産生 毒素耐性型の品種の存在等が上げられる。しかし、これらはいずれも仮説にとどまっており、今後の試験研究のより、その検証が必要である。

中長期対策としては 赤かびゲノム計画（米国）への協力・参画 DON 生合成経路をブロックする薬剤の開発 抵抗性機作の解明に基づく DNA マーカー選抜と育種 毒素非産生・弱病原性菌系の選抜と生物防除等を提案したい。

参考文献

- 青森県農業試験場・水田利用部 (1990) 輪換田畑の残渣処理技術 平成2年度東北農業試験場研究成果情報 : 77-78
- Ban, T. and K. Suenaga (2000). Genetic analysis of resistance to *Fusarium* head blight caused by *Fusarium graminearum* in Chinese wheat cultivar Sumai 3 and the Japanese cultivar Saikai 165. *Euphytica* 113: 87-99.
- Dill Macky, R. and Jones, R. K. (2000) The effect of previous crop residues and tillage on *Fusarium* head blight of wheat. *Plant Disease*. 84: 71-76
- Jennings, P., Turner, J.A. and Nicolson, P. (2000) Overview of fusarium ear blight in the UK-effect of fungicide treatment on disease control and mycotoxin production. In: The BCPC Conference Pests & Diseases 2000 13-16 November. Brighton. Farnham: British Crop Protection Council, 2, pp 707-712.
- Joint FAO/WHO Food Standards Programme Codex Committee on food additives and contaminants 34th Session Rotterdam, The Netherlands, 11-15 March 2002 Discussion Paper on Deoxynivalenol
- Nakajima, T. and Naito, S. (1998) Effect of traditional cultural practice of soil top dressing on the disease incidence in winter wheat. *Phytopathology* 88: 66
- Simpson DR, Weston, GE, Turner, JA, Jennings, P. and Nicholson, P. (2001) Differential control of head blight pathogens of wheat by fungicides and consequences for mycotoxin contamination of grain. *European Journal of Plant Pathology*. 107: 421-431
- Sutton JC, (1982) Epidemiology of wheat headblight and maize ear rot caused by *Fusarium graminearum*. *Canadian Journal of Plant Pathology* 4: 195-209