

特集号：IPM—技術開発と普及の課題

線虫と土壤病害の防除

中央農業総合研究センター ^{みずくほ}水久保 ^{たか}隆 ^{ゆき}之
 近畿中国四国農業研究センター ^{なげ}竹 ^{はら}原 ^{とし}利 ^{あき}明

はじめに

線虫（サツマイモネコブセンチュウ）と土壤病害は共に日本の施設野菜栽培の大きな生産阻害要因であり、難防除病害虫としても知られている。耕地には線虫と土壤病原菌が併存し、これらの間には病害複合で知られる直接の相互関係がある。従来、両者の防除技術の多く、特に化学農薬や物理的防除手段、は重複しており、同時防除されていた。しかし、IPMで主に用いられる生物的防除手段のスペクトラムは狭い。そのため、生物資材を軸にする土壤病害と線虫の同時防除のIPM技術は、多くの資材を組み合わせた複雑な体系となる。このようなIPMでは、対象外病害虫や有用根圏生物への影響評価に多くの時間と労力が必要であり、二つ以上の標的の防除要求を同時に満たす体系の早期実現は困難である。しかし、両分野のIPMを妨げる条件や普及戦略は基本的に同一であり、防除戦略の共有が線虫と土壤病害のそれぞれのIPMの確立と統合に有益と考えられる。

I 土壤線虫のIPM技術

1 土壤線虫のIPMの目標

近年の日本農業はIPM（またはICM）、環境保全型農業、持続的農業等の用語をキーワードにして動いているように見える。これらは関連する概念であっても同じものではない。三つの概念の中では持続的農業（ALLEN et al., 1991）が最も広く、環境保全型農業は持続的農業の一面を代表するだけであろうし、IPMは持続的農業を実現する一つの手段に位置付けられるだろう。理想的には、線虫のIPMは農業生態系を管理する全体的なアプローチに基づくものでなければならない。IPMシステムは、用いる新しい技術のそれぞれが、作物、物理的環境要素、他の虫害や病害も含む生物的環境要素にどのように影響するかかわったうえで実施されるものである。生産者には肥料、灌漑、耕起作業、有機物処理、除草剤、

殺菌剤が線虫密度へ及ぼす影響に関する知識も必要である。線虫のIPMは、はじめは線虫以外の病害虫が作物の減収に大きくかかわっていないとみなせるケースで、様々な線虫密度管理法を総合的に利用することから始まり、線虫と他の土壤病害虫や土壤要因との相互関係の理解を深めて、土壤病害虫全体の防除体系を統合化するものに向かわなければならない。

2 現実のIPM

しかし、新しい技術が作物や物理的・生物的環境要素に及ぼす影響の評価は多くの費用、労力、時間、そして研究者の熱意を必要とする。生産者に線虫防除戦略が標的の線虫以外の生物、土壤、水質に及ぼす影響にまで注意を向けるよう期待するための情報や制度は準備されていない。さらに、線虫のIPMでは目に見えるコストが発生する。線虫のモニタリングである。これは農家自身で行うことはないから、そのコストは有償無償にかかわらず他機関が負うことになる。線虫のIPMでもリスクがあるから、損益を補償する制度も必要である。したがって、言い古されたことだが、幅広い公的な援助、社会的支持、指導体制の確立、農業者教育等が要求される。

当面の線虫のIPMは、減農薬を目標に低リスク、低コストで、生産者に見返りがある線虫単独の防除体系として構築する必要がある。

3 IPMを妨げる要因の克服

(1) 農薬使用の忌避を見直す

IPMの目標はしばしば減農薬と混同されている。しかし、減農薬を特に強調するのは賢明ではない。農薬は農業の持続性を妨げる一つのマイナス要因に過ぎない。持続的農業の確立がIPMの大きなゴールであり、農薬の適正な使用がゴールへの到達を促進するなら、農薬の使用は正当化されるべきである。生物のモニタリングと経済的許容水準に基づく農薬の使用はIPMの普通の手段である。

例として、少量のくん蒸剤を使ったネコブセンチュウのIPMの実例を以下に示す。このIPMでは天敵細菌のパスツリアベネトランス剤、アーバスキュラー菌根菌が用いられた（水久保, 2005 a; 2005 b）。処理の概要は図-1の通りである。結果の概要を図-2に示す。くん

Control of Nematodes and Soilborne Diseases in Japan. By Takayuki MIZUKUBO and Toshiaki TAKEHARA

(キーワード：施設野菜、トマト、サツマイモネコブセンチュウ、フザリウム病)

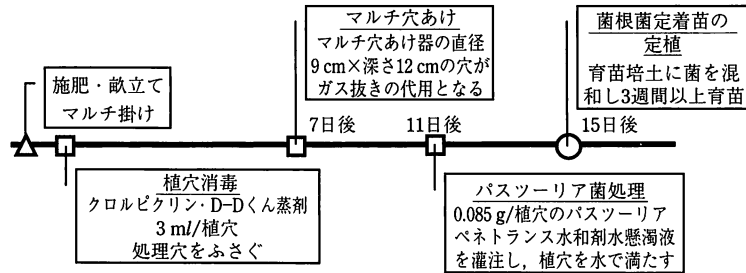


図-1 植穴消毒と微生物資材処理の概要

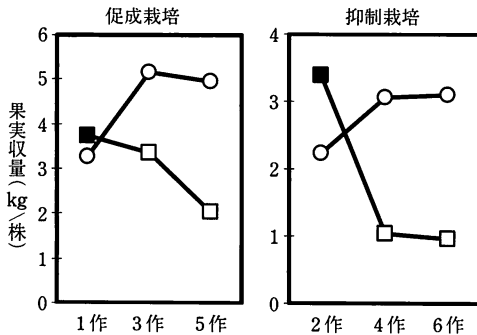


図-2 微生物（出芽細菌と菌根菌）と植穴くん蒸による施設トマトのIPM：収量への効果
収量レベルが異なるため、促成栽培と抑制栽培を分けて表示（栽培期間112日）。○：微生物処理+植穴くん蒸処理（第1，第2，第6作は植穴くん蒸なし），■：慣行くん蒸処理（1，2作），□：無防除（4～6作）（中央農研試験データ，原図）。

蒸剤をうまく利用すると、第3作で実用的なレベルの線虫抑制が実現し、6作後には植穴くん蒸処理を省略できる。

パストゥリア菌の利用で、あらかじめ考慮しなければならない重要なポイントが二つある。パストゥリア菌は絶対寄生性であることと、線虫を殺さないことの2点である。植穴くん蒸処理は、パストゥリア菌を基幹手段とする線虫のIPM戦略のかなめである。定植予定位置に灌注すると、くん蒸剤は拡散し灌注位置から半径15cmの範囲の線虫や土壤病原菌を死滅させ、侵入を遅延させる。作物は移植直後の線虫感染や土壤病害感染を免れるため、初期生育が優れ、慣行防除と同等の収量が得られる。

この植穴くん蒸とパストゥリア菌処理の組み合わせ（パストゥリア菌を処理した土壤への植穴くん蒸、または植穴くん蒸後の本菌の株元処理）が、パストゥリア菌の大量増殖に役立つ。つまり、くん蒸領域で栽培終了時まで新根が発生し、ここで線虫が世代交代を通じて維持されて、パストゥリア菌の継続的な再生産を可能にする。植穴くん蒸とパストゥリア菌の併用を3作程度繰り返す

間に、パストゥリア菌の密度はその単独効果だけで線虫を抑制できる水準に到達する。もし農薬を使わなければ、線虫の攻撃を受けて作物の初期生育が阻害され、新根の発生が阻害される。その結果、線虫の再生産の遅滞とパストゥリア菌の再生産の減少を招く。逆に農薬を全面処理した場合、パストゥリア菌に無害であっても処理後1，2か月間線虫が増殖しないため、パストゥリア菌は寄生増殖できないだけでなく、待機中に捕食・分解され密度も減少する。要するに、くん蒸剤を使った植物の健全な生育と線虫の増殖が両立する環境がパストゥリア菌の短期間の密度増大、ひいては定着促進の要件であり、絶対寄生菌を用いたIPMの成否の鍵である。

(2) 増殖モデル，被害予測モデルを確立する

害虫の初期密度から最終密度や被害量を推定する数理モデルは、防除意思の決定や経済的被害許容水準の見積りに欠かせない。線虫においてもこのようなモデルはいくつも提案されている（SEINHORST, 1965；NOLING and FERRIS, 1987；McSORLEY and DUNCAN, 1995）が、一般化は困難である。第1に、土壤線虫の正確な密度推定ができない：(i) 既知の手法の線虫抽出率はせいぜい50%であり、抽出率は土壤要因によって振れる、(ii) 常法では重要な感染源である休眠態の線虫が検出されない、(iii) 作土層以下（20cmより深い）の深層部の線虫密度の調査には膨大な労力と時間がかかる。第2に、線虫の増殖率、ひいては被害量に土壤要因（物理的、生物的要素）、気象的要因、作型が大きく影響する。第3に、線虫と併発する土壤病害および土壤病害と線虫の相互関係が線虫による減収（被害）量の推定を困難にする。したがって、ある地域条件において得られた被害モデルは直接異なる地域条件に適用できない。線虫のIPMでは、ごく狭い地域の栽培品種、作型ごとに増殖モデルが必要である。栽培型が被害を規定する例を図-3に示す。サツマイモネコブセンチュウの密度が施設トマトの根の被害へ及ぼす影響は、抑制栽培において促成栽培より大きい。また、

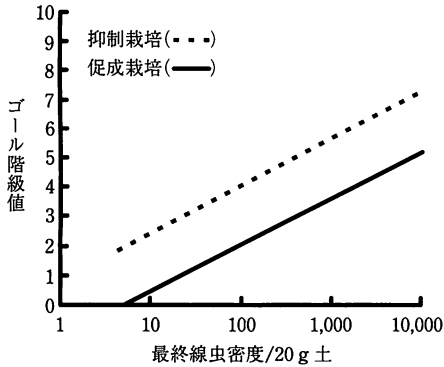


図-3 施設トマトにおけるサツマイモネコブセンチュウの最終線虫密度とゴール階級値との関係
ゴール階級値は最終線虫密度の対数で近似され、同一レベルの線虫密度では抑制栽培が促成栽培より2階級ほど高いゴール階級値となる。中央農業総合研究センターの同一施設における3年間のデータから作成（水久保原図）。

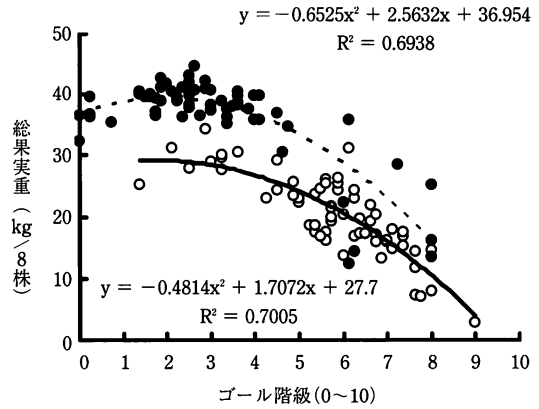


図-4 施設トマトにおけるサツマイモネコブセンチュウのゴール階級値と収量の関係
収量はゴール指数の二次関数となり、そのピークはゴール指数2～3にある。●：促成栽培，○：抑制栽培。中央農業総合研究センターの同一施設における2年間のデータから作成（水久保，原図）。

天敵細菌の収量への寄与は抑制栽培において顕著である（データ省略）。

(3) 経済的被害水準を周知させる

臭化メチル、D-D 剤等のくん蒸処理、うまくいった熱水土壤消毒では根に線虫の被害が全く認められない。一方、IPM 戦略では部分的な効果しかないか、遅効的な資材を使う場合が多い。農薬と同等の高い防除効果を期待すると、線虫の IPM のほとんどは無効な技術としかみなされないだろう。しかし、少量の線虫被害がむしろ作物の発根を促進することはよく知られている。施設トマトの例（図-4）を示せば、11段階評価の被害度4以下（おおむねゴール着生根が10%以下）は収量に影響しない。むしろ、無被害の場合より少量の根こぶ着生（被害度1～3）において収量は最高となる。被害許容水準は、作物（品種）ごとに設けることができる。根こぶの被害許容水準の設定が合理的であることを、生産者に啓蒙していくことが重要である。

II 土壤病害の IPM

1 土壤病害の IPM とは

土壤病害防除に関する世界的権威であるイスラエルの Jaakov KATAN（私信，1999）によれば、IPM とは次の①～⑦のようであるべきという。①利用できるあらゆる手段を統合、②農業使用の削減（必ずしも全面排除でない）、③環境に配慮、④効果的防除（必ずしも根絶でない）、⑤病害虫発生へのモニタリング→必要なときのみ防除、⑥その作物のあらゆる病害虫を考慮、⑦経済性を

考慮。

①にあるように、利用できるあらゆる手段を、作物ごとに適切に組み合わせる必要がある。その際、発生している病害の種類によって当然選択手段は大きく異なり、土壤条件や気象条件を合わせて考えれば地域ごとの IPM があって然るべきであろう。また、②にあるように、農薬を必ずしも排除せず、最小限で適切に使用する姿勢もあってよいだろう。

理想的には、抵抗性品種が使える病害では抵抗性品種を用い、それがいない場合は輪作を行うというのが、土壤病害回避の大原則であると考えられ、これらも①でいう手段の一つに含めて考えるべきである。しかし、実際問題としてそれが困難な場合に、その他の手段を組み合わせることが必要となる。使える可能性のある手段としてこれまでに報告があるのは、耐病性品種（抵抗性品種ほど完璧には抑えないが、ある程度発病が軽減される品種）、接木、土壤消毒（化学農薬、太陽熱、蒸気、熱水、湛水、土壤還元消毒（新村，2000）等）、抵抗性誘導剤、キチン質資材、生物的防除資材（拮抗性細菌・糸状菌、非病原性フザリウム菌、VA 菌根菌、植物生育促進根圏細菌、植物生育促進菌類）、土壤動物（ダニ、トビムシ、食菌性線虫、ミミズ、食菌性アメーバ等）、アブラナ科植物（國安，1989）や緑肥作物の前作・すき込み、おとり植物（村上ら，1998）、移植栽培、遮根シート、健全種苗の利用、圃場衛生、土壤 pH・土壤水分の調整、栽培時期の移動、有機物の投入等である。これらは、単独では土壤病害を完璧に抑えることはできないとしても、

IPMの中に組み入れられるかもしれないものである。

2 現実のIPM

実際には、現在土壤病害に対して試みられているIPMの多くは、土壤消毒と他の手法の組み合わせであろう。クロルピクリン剤やメチルイソチオシアネート関連薬剤（メチルイソチオシアネート油剤、ダゾメット粉粒剤、カーバム剤、カーバムナトリウム塩液剤等）などの土壤消毒剤、または太陽熱や蒸気消毒、熱水消毒等の物理的土壤消毒法で消毒した後に、耐病性品種を用いたり、生物的防除資材を利用したりする場合が多い。しかし、多くの場合、連作に伴って病原菌密度が復活するという困難に直面しているようである。

3 IPMの確立に向けて

今後のIPMを考えるうえで、注意したい点を以下に列挙する。

まず、病原菌の基本的な生態を知ることが第一である。過去の研究の蓄積によって各土壤病原菌について多くのことがわかってきているが、現場で防除に当たろうとするときにそれらを忘れがちになる。大変参考になる本としては、「新版 土壤病害の手引き」（1984年、日本植物防疫協会発行）、「作物のフザリウム病」（松尾卓見ら編、1980年、全国農村教育協会発行）、「講座 微生物段階の土作り—4 土壤病害をどう防ぐか」（小川 奎著、1988年、農山漁村文化協会発行）、「野菜の土壤病害 その発生のかみと防ぎ方」（駒田 旦著、1998年、タキイ種苗株式会社広報出版部発行）等がある。現在では手に入らない本もあるが、大きな図書館などで見つけることができるだろう。

また、病原菌のみならず、土壤中の微生物全体を視野に入れた戦略が必要である。そのための基礎的事柄を学ぶには、「土壤微生物の基礎知識」（西尾道徳著、1989年、農山漁村文化協会発行）などが役に立つ。例えば、線虫によって土壤病害が助長されることがある。これは、線虫による傷口から土壤病原菌が侵入するためと考えられ、線虫防除が土壤病害の軽減に役立つこともある。

蒸気や熱水で土壤消毒を行う際には、退治しようとする土壤病原菌の耐熱性と生息深度を知っておくことが極めて重要である。当然であるが、耐熱性が高いほど、また生息深度が深いほど消毒効果は低くなる。

いま、深さ30 cmまで生息している菌に対し、熱なり薬剤なりで、20 cmまで完璧に消毒ができたとして。しかし、その下の層に 3×10^4 CFU/g 土壤の密度で菌が残っていた場合、30 cmの深さまで耕起すると、単純に計算して、菌密度は全層で 1×10^4 CFU/g 土壤になってしまう。これではほとんど消毒していないことと同

じである。土壤消毒後の耕起に注意が必要な理由がここにある。

病原菌は、一つのしくみで死滅するのではないと考えられる。例えば、土壤還元消毒では、土壤の酸欠状態、熱、有機酸等の抗菌物質が複雑に絡み合って病原菌の死滅に至っていると思われる。40～45℃程度の、病原菌が死滅には至らない程度の高熱処理（sub-lethal heating）では、病原菌はいわばアップアップ状態であり、もう少しの刺激で死滅させることができる。それが、組み合わせる薬剤であったり、有機酸であったりするのではないだろうか。実際、脂肪酸やアリルイソチオシアネートは、カビの熱死滅を促進することが知られている。

また、組み合わせ効果が得られない場合もあるので、注意を要する。例えば、アブラナ科野菜の根こぶ病に対して「おとり植物」もフルスルファミド粉剤も効果的であるが、フルスルファミド粉剤の処理後におとり植物を用いた場合、根こぶ病菌の休眠胞子の発芽が抑えられておとり効果が発揮できないという興味深い知見もある（村上ら、2002）。

これまでの研究で、病原菌の土壤中の動態が次第に明らかになってきている。例えば、フザリウム病の場合、土壤消毒後も病原菌は土壤の深部や、ハウス内周辺部の土壤では生き残りやすい。また、残根も次作の汚染源になる。クロルピクリンなどの土壤消毒剤は、新鮮な残根中の病原菌には到達しにくいいため、新鮮な罹病根を残したままでも土壤消毒剤をしても効果が劣ることを知っておく必要がある。また、土壤消毒剤を連用すると、その農薬を分解する菌が土壤中で増えてくるため、消毒剤が効きにくくなることがある（WARTON et al., 2001）。

消毒後に残った病原菌は、次作でかなり急速に増殖する。これは、作物の根から分泌される栄養分によって、病原菌が増殖しているものと思われる。また、土壤の深いところから作物の根が病原菌を釣り上げてくることで、トマト萎凋病菌を使った実験で推定された。

この再増殖をいかに抑えるかが、土壤病害のIPMのカギを握っていると考えられる。病原菌が利用しようとする栄養分をすべて奪ってしまうような微生物を作物の根圏に生息させることが、一つの手法であると考えられるが、実際にそのような微生物は見つかっていない。現時点では、フザリウム病に対し、土壤消毒と非病原性フザリウム菌を組み合わせた研究が比較的良いデータを出している。非病原性フザリウム菌は、根圏での病原菌の増殖を抑える力はそれほど強くないかも知れないが、誘導抵抗性も引き起こすことによって高い効果を示しているようである。

生物的防除に使える菌を、今後も探索し続けるのも重要なことと思う。一つの菌で土壤病害を完璧に抑えられる魔法のような微生物は現れないだろうというのが一般的な見方だが、現有の菌より良い菌が見つかる可能性はある。「有用微生物は有名観光地のすぐそばで見つかる」という冗談がある。微生物探しに観光地に行く口実と取れないこともないが、実際には、行楽に出かけた研究者がそこでも研究のことが頭から離れず、土壤を採取して持ち帰って来た結果、いい菌が見つかったということであろう。そのような情熱がよい結果に結びつくのではないだろうか？ さらに、広範なスクリーニングで有用菌を見つけ出す努力も必要である。農耕地以外の場所（松林やスキなど）から効果的な菌が見つかったという例も聞く。

蒸気や熱水を用いた物理的土壤消毒や化学薬剤による土壤消毒では、各種土壤微生物が軒並み減少するため、土壤静菌作用が失われて病原菌の再増殖が起きやすいことから、消毒後に投入する微生物（資材）の選定が重要になるだろう。今後、土壤消毒法として、太陽熱消毒が

見直されるとともに、アブラナ科植物などのすき込みによるバイオフィューミゲーションや、土壤還元消毒が重要性を増してくるのではないかとと思われる。

研究体制の面では、病害関係者だけでなく、栽培・土壤肥料・土壤微生物分野の研究者と協力した総合的研究が必要であろう。また、抵抗性育種においては、育種分野の研究者と病害関係者とのよりいっそうの協力が望まれる。

参 考 文 献

- 1) ALLEN, P. A. et al. (1991): Am. J. Agric. 7: 48 ~ 58.
- 2) 國安克人 (1989): 農業および園芸 64: 955 ~ 959.
- 3) McSORLEY, R. and L. W. DUNCAN (1995): In Advances in plant pathology 11: 147 ~ 171.
- 4) 水久保隆之 (2005 a): 農耕と園芸 60(4): 50 ~ 54.
- 5) ——— (2005 b): IPM マニュアル, 養賢堂 (近刊).
- 6) 村上弘治ら (1998): 平成9年度研究成果情報 (総合農業): 138 ~ 139.
- 7) ——— (2002): 平成13年度共通基盤研究成果情報 (総合研究部会): 156 ~ 157.
- 8) 新村昭恵 (2000): 農業技術体系土壤施肥編5—①, 東京, 農山漁村文化協会, 畑212の6-212の9.
- 9) NOLING, J. W. and H. FERRIS (1987): J. Nematol. 19: 108 ~ 118.
- 10) SEINHORST, J. W. (1965): Nematologica 11: 137 ~ 154.
- 11) WARTON, B. et al. (2001): Biol. Fertil. Soils 34: 264 ~ 269.

！発行図書！

鳥獣害防止対策の決定版

鳥獣害対策の手引 2002

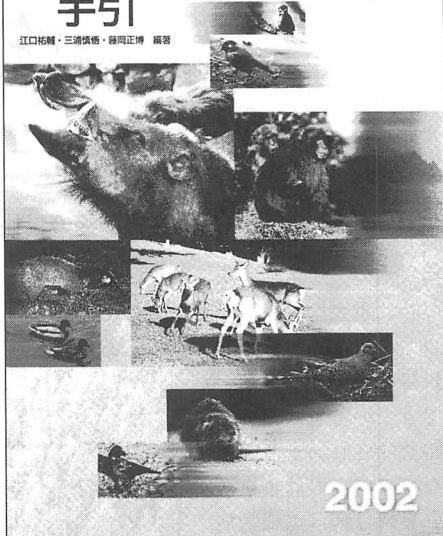
江口祐輔・三浦慎悟・藤岡正博 編著
A4判 154頁オールカラー
定価 3,780 円税込み 送料 340 円

豊富なカラー写真を本文中にちりばめ、図・表・写真により一般農家の方にも分かりやすく解説した手引き書です。内容項目は、農林業被害状況、獣害編（ニホンザル、イノシシ、シカ、カモシカ、ツキノワグマ、タヌキ、ハクビシン、アライグマ、ヌートリア）、鳥害編（被害防止対策の基本、主な農作物加害鳥の特徴、カラス、ヒヨドリ、ムクドリ、ハト、スズメ、カモ）、資料編（行政対応、用語解説、文献資料）

資料提供：農林水産省植物防疫課・林野庁・環境省・文化庁

鳥獣害対策の手引

江口祐輔・三浦慎悟・藤岡正博 編著



お申し込みは直接当協会へ、前金（現金書留・郵便振替）で申し込むか、お近くの書店でお取り寄せ下さい。

社団法人 日本植物防疫協会 出版情報グループ 〒170-8484 東京都豊島区駒込1-43-11

郵便振替口座 00110-7-177867 TEL (03) 3944-1561(代) FAX (03) 3944-2103 メール: order@jppa.or.jp