

線虫をめぐる最近の話題

農林水産省農業研究センター 清 水 啓

日本の線虫研究も、20年間続いた日本線虫研究会（日本線虫研究会、1992）から脱皮し、農業線虫から広く線虫研究分野全体を包含した日本線虫学会を発足させた。そして、今年で3回目の大会を迎えた。

1995年10月12～14日の3日間、佐賀大学において第3回日本線虫学会大会（1995）が開催され、その開催中、西南暖地の線虫—主にネコブセンチュウとネグサレセンチュウ防除の現状と展望と題するシンポジウムも行われた。本稿では、これらの大会発表及び線虫学会誌などから、わが国の植物寄生性線虫及び昆虫寄生性線虫の分類、生態、防除に関するものをピックアップし、最近の線虫の話題として紹介する。

I 線虫分類

植物寄生種は世界中で2,000種、その内わが国からは250種が記載されている。そしてこれらの寄生種は2目、14科の分類群に分けられている。これらの線虫の種あるいは系統を正確に分類することは熟練と手間がかかり、線虫関係者ですら専門家に同定を委ねる場合がある。現場の線虫問題に日々携わり、まず線虫の種を把握したい人々たちにとって、同定作業は第一の難関といってよい。また一方で、分類形質自体が変異に富み、種・系統間で形態計測値のオーバーラップが存在するなど、種の判断の上で混乱を招いている部分が少なくない。そこで最近の分子生物学的手法を取り入れて、クリアカットな分類を行おうとする新たな動きが線虫分野でも出始めている。それらのいくつかを紹介する。

1 DNA解析による線虫分類

PCR-RFLP法により線虫の特定のDNA断片の増幅を行い、それらPCR産物を用いて、種の識別に有効な制限酵素を選抜した。その結果、*Hinf* I、*Dde* I、*Taq* I、*Hha* I、*Alu* Iの5酵素を処理したときは、ネグサレセンチュウ4種で泳動パターンが顕著に異なり、この4種の識別が容易であった。

PCR-RAPD法により、マツノザイセンチュウとニセマツノザイセンチュウは明確に区別することができ、同一種での産地間の区別も、同手法により判定が可能とな

った。

2 アイソザイムによる線虫分類

タンパク質電気泳動法を用いて、エステラーゼとリンゴ酸脱水素酵素の泳動パターンを種間で比較することにより、ネコブセンチュウ4種の分類が可能となり、さらに出芽細菌の宿主特異性と組み合わせることにより、簡便で正確な種の分類が可能となった。本法によると、今まで、本州、四国、九州に分布するジャワネコブセンチュウといわれていたものはアレナリアネコブセンチュウのA2型であり、ジャワネコブセンチュウは琉球列島の八重山諸島に分布することが判明した。

昆虫寄生性線虫の *Steinernema carpocapsae*、*S. glaseri*、*S. kushidai* 及び *Heterorhabditis bacteriophora* は、グリセロリン酸脱水素酵素の電気泳動パターンの違いによりそれぞれの種が明確に区別できることが判明した。

II 生態と防除

環境と調和した線虫防除技術確立の要請はますます強まっている（技会事務局、1995）。特に、臭化メチルは殺線虫剤として効果が高いことから、広く用いられているが、近年オゾン層破壊の原因物質とされ、その使用規制が高まる中で、その代替農業（殺線虫剤）あるいは代替技術（物理的防除など）の早期確立が求められている。線虫防除もIPM（総合的害虫管理）の理念の基に、土壌生態系に調和し、有害線虫以外への影響を極力減らす方向での防除を目指している。具体的には、くん蒸性の薬剤から接触型の粒剤タイプ使用への移行、天敵微生物利用、対抗植物利用、抵抗性品種の育成・導入、太陽熱利用、土壌の熱水処理などを輪作体系の中に組み入れ、総合的に線虫密度を被害許容水準以下に維持していく、害虫管理の考え方である。

以下に、いくつかを紹介する。

(1) 主要有害線虫3種の増殖率と薬剤による増収効果

植物寄生種の宿主となる植物（作物・品種）には線虫にとって好適なものとはそうでないもの、あるいは中間的なものと様々だが、その程度が直接線虫の増殖率に表れる。増殖率に関与する要因は、このほかに温度あるいは水分といった環境条件などもあるが、宿主が大きく関与

していることは間違いない。最近10年間の全国の農業試験場の農業試験の圃場でのデータから、主要3属線虫の増殖率（作物栽培前の土壌中の線虫数に対する収穫時の線虫数の比率）と増収効果（無処理区収量に対する薬剤処理区の収量の比率）をまとめると、以下のとおりである。

1) ネコブセンチュウ

11作物の無処理区における増殖率は29.9~1.9倍で、高い順からメロン、トマト、サツマイモ、コンニャク、ピーマン、ナス、ニンジン、ラッカセイ、スイカ、キュウリ、ショウガであった。また寄生程度（ゴール指数）は81.7~39.7で、タバコ、キュウリ、メロンで高かった。増収効果は159~99%で、ニンジン、ピーマンで高かった。

2) ネグサレセンチュウ

6作物の増殖率は43.7~2.2倍で、高い順からイチゴ、レタス、ゴボウ、キク、ニンジン、ダイコンであった。褐変指数では92.4~39.9で、サトイモ、ゴボウで高かった。増収効果は169~108%で、サトイモ、ゴボウで高かった。

3) シストセンチュウ

ジャガイモとアズキについてそれぞれの増殖率、シスト寄生程度及び増収効果を見ると、前者ではそれぞれ5.8倍、79%、131%、後者ではそれぞれ3.6倍、79%、360%であった。

(2) 薬剤防除の諸問題

現在多種類の登録殺線虫剤があり、線虫の種類と作物の組合せで、効果的に使用されている。くん蒸性のクロルピクリン、D-D、DCIP、カーバム、メチルイソチオシアネート、ダゾメット及び臭化メチル、非くん蒸型のオキサミル、ピラクロホス、ホスチアゼートなどが畑作物、野菜などで用いられている。くん蒸剤と非くん蒸剤（接触型粒剤）はそれぞれ長所、短所が異なり、一般に前者はガス抜きが欠かせないが、後者はその必要がなく、播種・定植直前処理が可能のため寒冷地あるいは年間栽培が複数回行われる野菜栽培地帯での利用が期待される。作用機作の面から前者は殺線虫性が高いが、後者は静線虫的に作用し、宿主への侵入行動あるいは生育に異常を来す。粒剤によっては浸透移行の作用とあいまって、宿主生育後期まで、線虫の増殖抑制作用を発揮するものもある。一方前者の長所である高い土壌拡散性は後者では劣り、線虫は薬剤と接触あるいは作物に侵入後、作物内に浸透した薬剤を吸収して初めて影響を受ける。したがって、その作用は粒剤の拡散している範囲に留まり、特に深根性の作物（ゴボウ、ダイコンなど）では薬

剤の届かない深部に被害をもたらすことが多い。そこで最近拡散性を物理的に補助し、土壌深部に粒剤を到達させるために深耕混層ロータリーによる処理が行われるようになり、効果をあげている。ただし現状では登録要件である施薬量の規制を受け、通常の耕土層に適用する濃度を施用しなくてはならないため、深耕することによって薬剤濃度が薄まり、効果を十分発揮し得ない結果となっている。

くん蒸性薬剤は、殺線虫効果並びに土壌拡散性に優れており、かつ薬剤費も殺線虫剤の中では比較的安価なことから、主として、土壌に生息し、作物に甚大な被害をもたらす有害線虫の防除に広く利用されてきた。しかし以下に述べる技術的な側面と社会的側面から、くん蒸性薬剤の使用に関して検討の必要性が高まっている。前者の問題点としては、くん蒸剤といえども土壌中すべて万遍なく拡散し、すべての有害な線虫を殺すわけではなく、土壌温度あるいは土壌水分といった処理条件が十分満足されない場合、一部に残存した線虫が増殖し、収穫時には無処理区同等ないしそれ以上の線虫密度になることがあげられる。この、いわゆるリサージェンス現象は関係者の頭を悩ませている。

この原因としては、土壌生態系に生息する有用生物を死滅させる結果、天敵となる微生物が消滅し、薬剤を処理しない場合よりも線虫密度の回復が早く、増殖が高まる結果と説明されている。特にネコブセンチュウのように増殖率が高く、年間世代数の多い種では環境温度が高い施設栽培や暖地で顕著に起こっている現象である。そのため、土壌消毒は毎作慣行的に行わねばならず、おのずと薬量も高まる傾向にある。

後者の社会的側面としては、近年環境保全の立場から、土壌生態系に調和した薬剤の選択が求められており、死滅をねらった薬剤は敬遠される傾向にある。またわが国の耕地の縮小が進行し、農村と都市の混住化が拡大する中で、大気中に拡散する刺激性のくん蒸剤の使用は隣接住民の反対を受け、各地で規制を余儀なくされている。特に臭化メチル剤は冒頭にも述べたように使用規制が高まっており、農用臭化メチル剤は代替薬剤（防除法）の検討が急務となっている。試験研究においてもその解決のための特別プロジェクトが組まれようとしている。

(3) 生物農薬の現状

化学農薬が害虫防除にとって欠かすことができないことはいまでもないが、前述したような種々の問題を含んでいることもまた事実である。そこで近年環境保全を背景に登場してきたのが、天敵生物を利用して害虫を防

除し、化学農薬の抱える種々の問題を解決しようという考え方である。本来生物的防除という天敵を放飼し、農生態系の中に定着させ、以後天敵とバランスを保って害虫密度を被害許容水準以下に保持していくことが理想である。しかし、現実にはほとんどの生物農薬が化学農薬のように害虫発生に合わせて一定時期野外あるいは施設内に大量放飼を行い、従来の化学農薬のようなやり方で害虫防除を行おうとするもので、既に実用化され登録のとれたものや試験段階のものまでである。様々な生物農薬が世の中に出ようとしている。

線虫を対象にした生物農薬も登録されたものから現在検討が進められているものまで様々だが、現在登録農薬としては二つあり、そのうちの一つはタバコのネコブセンチュウを対象とした天敵糸状菌のモノクロスポリウム菌剤である。タバコの育苗培土にこの菌を混合してタバコを播種すると、育苗中に根圏に十分本菌がまん延する結果、線虫汚染本圃に処理苗を定植後もネコブセンチュウによる根部侵入を抑制する。タバコの初期生育阻害を防止する狙いがある。もう一つは芝の害虫を対象とした昆虫病原性線虫の *Steinernema carpocapsae* (スタイナーネマ・カーポカプサエ) に寄生された害虫の体内では、線虫自身の持つ共生細菌が爆発的な増殖を起こし、害虫は敗血症で死亡する。このように、現在の登録生物農薬はタバコ、芝に限られ、野菜栽培等で問題となっている線虫を対象にした資材は世に出ていない。以下に、現在検討中の生物資材について述べる。

[パストリア剤] *Pasteuria penetrans* は出芽細菌の一種で、ネコブセンチュウに寄生する。宿主の生育に伴って増殖し、宿主体内に胞子を充満させて宿主を倒す。そして、再び土壤中で遊出する第二期幼虫に寄生し、線虫の植物体内寄生・生育とともに増殖を繰り返す完全寄生菌である。それゆえ人工培養が難しく、現在まで完全人工培地で増殖に成功した例はなく、生物農薬の増産にとって最も難しい問題を抱えている。本細菌は以下のような種々の優れた特性を備えている。まず、環境耐性が高いことが挙げられる。乾燥、高・低温に強く、またくん蒸性の殺菌剤を除くと通常濃度の範囲の農薬では大した影響を被らない。また本菌は宿主特異性が高い。ネコブセンチュウ各種にそれぞれ寄生する系統があり、同種内でも菌の系統によって増殖に違いがある。現在、日本植物防疫協会から委託が出されている製剤はサツマイモネコブセンチュウに寄生する系統で、胞子密度 $10^9/m^2$ ($10^4/g$ 土壌) の処理で、単独処理あるいは粒剤半量併用処理の検討が進められている。全国の試験研究機関に委託され、トマトなどを3~4作継続栽培した圃場では、土壌中

の菌の胞子密度が高まり、線虫に対する胞子付着率及び付着数が上昇することにより、防除率が向上することが判明した。実験的には胞子付着率が80%を超えると線虫に著しい増殖抑制効果が見れることがわかっている。土壌中の線虫の初期密度(播種時あるいは定植時)が高い場合には本剤のみで線虫増殖を抑えることは難しいので、粒剤との併用処理を行い、まず粒剤で線虫密度を抑えてから、本細菌で線虫を持続的に抑え込んでいくことが重要である。その場合の粒剤の施用量は通常の半量で十分である。一度併用処理を行い、線虫密度を低下させれば、それ以降栽培前の粒剤施用量は半量で済むことが各地のデータで証明されつつある。パストリアは宿主特異性が高いゆえに、他の生物に負荷をかけない生態系に優しい防除資材といえよう。また前述したように本来の生物的防除の理想である土壌生態系の中でバランス良く線虫密度を低下させることができる防除法として期待されるが、そのためにも今後パストリアと宿主線虫とのかわりについての基礎的研究が深められねばならない。畑作物あるいは野菜に限らず、永年性作物の果樹のように新植すると改植まで長期にわたり同一場所での栽培を余儀なくされる作物への適用の検討も必要である。

[卵寄生菌] *Daizysistocentru* の卵に寄生し、卵のステージの段階で線虫を殺すことができる天敵微生物の探索と実用化に向けた試験が行われており、各種の有効なデータが発表されている。それによると糸状菌は *Paecilomyces*, *Verticillium*, *Fusarium*, *Dactylopleura* 属の糸状菌で、人工培地でも培養可能である。鉢植えの接種実験によって、それぞれの菌により生育に最適な温度あるいは pH の範囲があることが示されている。*Fusarium* 属菌の場合、比較的その範囲が広く $20\sim 30^\circ C$, pH は 6.5 以下に最適域があること、そして卵の寄生菌率が8%に高まると非寄生時の50%に増殖が抑制されるという効率の高い結果が得られている。今後は大量培養と施用法の確立が待たれる。

(4) 耕種的防除

線虫防除の基本が輪作にあることは論を待たないが、現実には連作が行われ、各地で線虫に起因する連作障害が起こっている。商品作物を除く多くの畑作物で線虫害を回避しようとする、高価な農薬に頼る訳にはいかず、おのずと耕種的防除にたどりつく。耕種的防除としては、以下のようなものがあげられる。非宿主作物、抵抗性品種、対抗植物をそれぞれ合理的に選択し、栽培体系の中に組み合わせることによって線虫害を回避すること、畑圃場を湛水(水田化)し、一定時間経過することによって線虫を死滅させること、太陽熱を利用し、ハウ

スを夏季密閉することによって地温を線虫の生育適温以上に高め、線虫を死滅させること、有機資材・家畜糞の利用により、土壌中有用微生物の増加・活性を図り、有害線虫の増殖を抑制すること、家畜糞の施用時期と播種時期をずらして、早くふ化した幼虫の飢餓・死滅を図ること、などが挙げられる。これらの各種手段を組み合わせることにより、線虫防除に有効な対策がとられている。

1) 対抗植物・抵抗性作物利用

主としてキク科（マリーゴールドが含まれる）、マメ科、イネ科植物の中から、これらを栽培することにより有害線虫の密度を低下させ、増殖を抑制する作用のある植物を、以下に挙げる。

[マリーゴールド] 北海道の函館市に隣接する七飯町では平成6年度より4年計画で、280 haのダイコン、ニンジン圃場がマリーゴールドの花で埋めつくされるという北海道ならではの壮大な事業に着手した。近年北海道は本州向けの根菜類の出荷が盛んになり、連作に伴ってネグサレセンチュウの密度増加、被害の顕在化に悩まされてきた。そこで本線虫の対抗植物として、20年前から防除効果が実証済みのマリーゴールドが登場してきた。マリーゴールドはその根に含有する物質によって根の周辺及び根に侵入した線虫を有効に死滅させる作用を持っている。品種、栽植密度、栽培法などが検討され、現在ではフレンチ、アフリカン、メキシカン種を用い、移植栽培3か月と栽培後の鍬き込みが推奨されている。特にネグサレセンチュウに対して高い効果を示し、休閑に比較しても十分線虫密度を低下させることができ、鍬き込みにより、3~4作の長期にわたり線虫増殖抑制作用を発揮する。それゆえに、マリーゴールド自体の商品価値は無いに等しいが、薬剤防除に要する費用は全くかからず、長期的にみればかなりの経済効果が期待できる。このことをもっと農家に徹底させれば、栽培の手間の割りに収入につながらないという消極姿勢が解消され、本法による線虫防除の普及・拡大につながるものと思われる。ともあれ、七飯農家からの嬉しい便りが待たれる。

[イネ科、マメ科植物、抵抗性作物] イネ科では野生エンバクの「ヘイオーツ」がネグサレセンチュウ防除に卓

効を示すこと、ギニアグラス、ソルガム類が緑肥を兼ね、線虫密度も休閑並みに下げるところから対抗植物としてよく用いられる。マメ科ではネコブセンチュウの対抗植物としてクロタリヤ属の *C. spectabilis* が有名で安定した効果が期待できる。佐野はサツマイモネコブセンチュウの防除のため輪作作物として、26種、41品種・系統をあげ、それらを栽培すると卵のう形成が認められず、線虫密度低下が大きいことを報告している。

サツマイモ、ジャガイモ、ダイズなど畑作物で、またトマトなど野菜で各種線虫に対する抵抗性品種の育成が行われ、数多くの品種が栽培されている。抵抗性品種の長期連作はその抵抗性を打破する線虫系統を生む温床ともなる危険性があり、これら抵抗性品種といえども合理的に他作物と組み合わせて栽培することが必要である。

2) 家畜糞によるダイズシストセンチュウ防除

松尾は乾燥牛糞をダイズシストセンチュウ汚染土壌に処理し、直ちにダイズを播種し栽培した結果、牛糞を処理しない区に比較して、ダイズの葉の黄化が著しく、多数の雌成虫が根に寄生することを認め、家畜糞に本線虫の卵のふ化促進効果があることを示唆した。ダイズ播種時期と家畜糞処理時期に時間をおけば、ふ化した幼虫は宿主であるダイズに寄生できず、飢餓・死滅することを防除に応用すべく検討を進めている。

おわりに

昨年、関東地域の数県から心枯線虫病の被害発生の連絡を受け驚いている。既に箱施薬等で解決済みと思っていたが、少しでも手を抜くと線虫は油断できないなと実感した。諸先輩が築き上げた技術を有効に活用し、環境に配慮した防除を実践したいものである。

引用文献

- 1) 日本線虫学会(1995): 日本線虫学会第3回大会講演予稿集, 49 pp.
- 2) 日本線虫研究会(1992): 線虫研究の歩み, 日本線虫研究会創立20周年記念誌, 383 pp.
- 3) 農林水産技術会議事務局(1995): 農林水産技術会議事務局編, 環境保全型農業技術, 農林水産研究文献解題, No. 21, 876 pp.