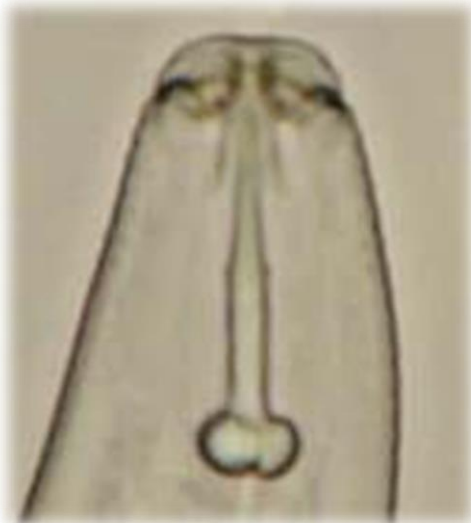


有害線虫総合防除技術マニュアル



2013年3月

独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構
九州沖縄農業研究センター

序 言

九州沖縄地域は温帯から亜熱帯までの広い地域を含み、有害線虫の増殖に好適な温暖地域である。また、高冷地などの一部地域では、関東以北と共通する北方系の線虫種が分布している。従って、九州沖縄地域は他地域と比べて問題となる線虫の種類も多い。

九州沖縄地域における主な有害線虫は、第一にネコブセンチュウ (*Meloidogyne* spp.) であり、トマト、サツマイモ、スイカ等、本地域の主要作物ほとんどに被害を生じさせるため問題が大きい。ネグサレセンチュウ (*Pratylenchus* spp.) はそれに次ぎ、ネコブセンチュウ同様多くの作物に寄生するほか、種によってはキクなどの花卉やカンキツ類などの果樹にも被害を及ぼす。シストセンチュウ (*Heterodera* spp., *Grobodera* spp.) は九州沖縄地域での検出例は少ないものの、ジャガイモやダイズ産地の一部で問題となる。

これら有害線虫の地理的分布は古くから調査がおこなわれてきたが、最近 10 年間での精力的な調査によって従来知られていた有害線虫の地理的分布に次々と新たな知見が付け加えられてきた。中でも大きな成果は、従来知られていなかった新規発生有害線虫の検出例が多数加えられたことであろう。また、既知であった種の中でも、寄生性の異なる個体群やレースの存在が一部の有害線虫で明らかになってきたため、圃場における有害線虫に対して、より詳細な調査が必要とされている。これらの調査は、有害線虫 1 頭を用いた DNA 解析による分類同定法を用いることで、簡便・正確・迅速に多量サンプルの処理を行うことが可能になった。本稿では、九州沖縄地域の主要な有害線虫と、これらの地理的分布、PCR-RFLP 法による同定法、生態、防除法について紹介するとともに、線虫実験のための基本的な手法も併せて紹介する。

現在、有害線虫の防除は主に殺線虫剤の使用に依存しており、また、汚染実態を把握せぬままの過剰施用が行われている可能性が高い。従って、圃場における有害線虫汚染の現状を把握し、より環境に負担の少ない防除法の選択が必要である。しかしながら、有害線虫に関する専門書は少なく、自治体の農業研究・調査・普及機関等の線虫担当者が防除対策策定の参考として用いることができるような情報源が求められている。本マニュアルがその必要性に応えられるような資料となれば幸いである。内容的に不十分な点、また不備等多々あると思われるが何卒お許し頂きたい。

本稿を作成するにあたり、中央農業総合研究センター・水久保隆之氏、北海道農業研究センター・奈良部孝氏、相場聡氏、串田篤彦氏、九州沖縄農業研究センター・立石靖氏に有害線虫に関する貴重な情報をご提供いただいた。この場を借りて篤く御礼申し上げる。

なお、本マニュアルは独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構 第 2 期中期計画期間 (2006~2010 年度) において、九州沖縄農業研究センター難防除害虫研究チーム [チーム長：松村正哉 (九州沖縄農業研究センター)] 研究課題「暖地における長距離移動性、新規発生等難防除害虫の発生メカニズムの解明と総合防除技術の開発」における研究で得られた成果を中心にまとめたものである。その一部は、九州沖縄農業病虫害推進部会 2010 年度成果情報 (技術・参考) として提出された。

2013 年 3 月

独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構
九州沖縄農業研究センター 生産環境研究領域
線虫害研究グループ 岩堀英晶・上杉謙太
〒861-1192 熊本県合志市須屋 2421
Tel: 096-242-7734 Fax: 096-249-1002

目次

線虫の種を同定する

1. 線虫調査用土壌サンプルの採取と線虫の分離.....	1
1.1 土壌の採取.....	1
1.2 線虫の分離.....	1
1.3 シストの分離.....	3
2. 土壌から分離される主要線虫.....	6
3. DNA解析による種同定法.....	7
3.1 手法.....	7
3.1.1 鋳型DNAの調整.....	7
3.1.2 PCR.....	8
3.1.3 制限酵素処理.....	9
3.2 ネコブセンチュウ.....	9
3.3 ネグサレセンチュウ.....	11
3.4 シストセンチュウ.....	11
3.5 ニセフクロセンチュウ.....	12

線虫の生態を知る

4. ネコブセンチュウ、ネグサレセンチュウ、シストセンチュウの重要種.....	13
4.1 ネコブセンチュウ.....	13
4.2 ネグサレセンチュウ.....	16
4.3 シストセンチュウ.....	19

防除対策を立てる

5. 防除法.....	22
5.1 殺線虫剤.....	22
5.2 対抗植物.....	23
5.2.1 ネコブセンチュウ.....	24
5.2.2 ネグサレセンチュウ.....	25
5.3 物理的防除.....	27
5.3.1 熱による方法.....	27
5.3.2 湛水および土壌還元による方法.....	28
5.4 生物的防除.....	29
5.5 その他の注意事項.....	29
5.6 有害線虫防除法の策定に関わる要因と防除法の選択.....	30

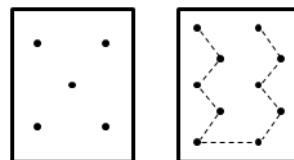
資料 九州沖縄地域で検出される主要な有害線虫.....	32
図版.....	33

1. 線虫調査用土壌サンプルの採取と線虫の分離

1.1 土壌の採取

ネコブセンチュウやネグサレセンチュウなどの調査では、圃場より土壌を採取して線虫を分離し、発生種の同定や密度推定を行うのが一般的である。本節では、線虫調査時の土壌サンプリングの基本的な流れと、その際の注意点を述べる。サンプリングに関する理論的な背景については参考資料に詳しいため、そちらを参照いただきたい。なお、土壌の線虫相はこれまでの栽培履歴や雑草などの影響も受ける点に注意する必要がある。すでに被害が発生している圃場で線虫を同定する場合は、被害作物から直接線虫を採集するのが最も確実である。

①調査圃場の複数点（5点程度以上※）から土壌を採取してポリ袋にまとめ、その圃場の試料とする（各点小型スコップ1～2すくい程度）。圃場の線虫密度を推定する場合には、採取場所はランダムに決めるのではなく、図の例のような系統的な採取が良い。土壌は深さ10～15 cm程度を目安に、作物の根圏を考慮して採取する。低高温、乾燥にさらされる地表近くの土壌は避けた方がよい。線虫分離前に袋の土壌はよく混和する。



②採取した土壌は直射日光や高温、乾燥を避けて保存し、線虫分離に供試する。数日であれば室温で保存可能であるが、長期保存する場合は10℃が適温とされる。1週間以上室内に放置するようなことは避ける。また、5℃程度まで低下する冷蔵庫も温度が下がりすぎて線虫密度の低下を招く可能性がある。同定依頼等で土壌を送付する際は普通便でよい（夏の高湿期を除く）。なお、冬季に採取された土壌は分離前に暖房した室内で数日加温するとベルマン法での分離数が多くなる。

③採集時期は、検出・同定が目的の場合は、線虫密度の高まる収穫期のサンプリングが適するが、被害予測や防除対策の策定等のためには栽培開始前（作付前）の線虫密度が重要となる。

※) どの程度の広さの圃場から、どのように、何点採取すればよいのかは、調査の目的、対象、求められる精度によって異なり、様々な手法が提案されている（例えば2 ha未満の圃場の診断目的では系統的に20～50点など。参考資料を参照）。線虫は一般に不均一な集中分布をするため、精度の高い線虫密度推定を行うには非常に大きなサンプルサイズが必要となり、時間的・労力的な面から実現が困難な場合が多い。そのため、実際には調査者の可能な範囲でサンプリング計画を立てることになる。小規模な圃場試験などでは1区5～6点程度からの土壌を混和して区の試料とすればよい。例えば、日本植物防疫協会の新農薬実用化試験でも1区5点以上の土壌採取を行うこととされている。

（参考資料）線虫の見分け方（日本植物防疫協会 2004）、線虫学実験法（日本線虫学会 2004）

1.2 線虫の分離

九州沖縄地域で重要なネコブセンチュウ、ネグサレセンチュウの分離にはベルマン漏斗法（以下ベルマン法）が適しており、広く用いられている。本法は線虫の運動性を利用した分離法で、簡便であり、混入物の少ない状態の良いサンプルが得られる。また、ネグサ

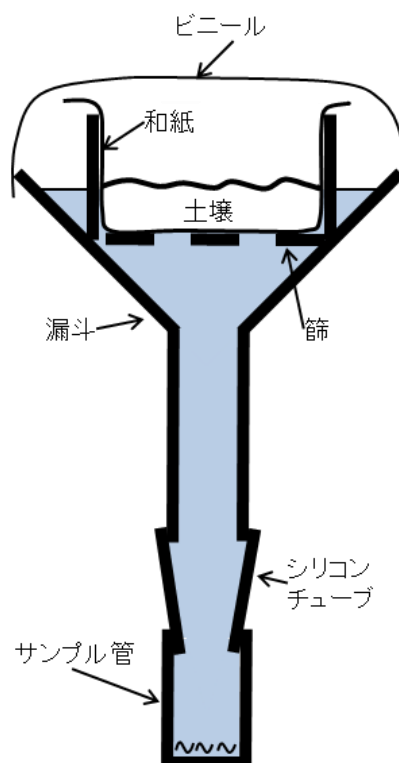
レセンチュウ被害根などの植物体からの分離にも応用できる。ここではベルマン法による線虫の分離法とその注意点について述べる。

☆用具（九州沖縄農業研究センターの例）

- ・ガラス漏斗（φ9 cm）、ふるい（φ7 cm；目は粗くてよい）
- ・シリコンチューブ（外φ11 mm、内φ8 mm；長さ約5 cm）
- ・サンプル管（内φ10 mm）：サンプル管の代わりにピンチコックでチューブを止めてもよい
- ・和紙またはティッシュペーパー（キムワイプなど）
- ・ビニールフィルム（ゴミ袋などを広げたものでよい）

☆手順

- ①ガラス漏斗にシリコンチューブを取り付け、その下にサンプル管をとりつける。取り付ける際には、線虫のサンプル管への落下を妨げないよう漏斗-チューブ-サンプル管の内外関係に注意する（図を参照）。
- ②漏斗の口近くまで水道水を満たす。漏斗の足やチューブ内に気泡が残っていないか確認する。
- ③和紙を敷いたふるいにサンプル土壌 20g を入れ、均等に広げる。1 圃場の試料につき 3 反復をベルマン法に供試する。
- ④土壌を入れたふるいを漏斗にのせる。しばらくすると土壌に水が浸透して水位が低下するので、土壌表面と同じ高さになるよう水を足す。
- ⑤漏斗をビニールフィルム（ビニール袋を切り開いたものでよい）で覆い、3 日間分離する。分離期間中に水位が下がっていたら適宜水を足す。
- ⑥管を取り外して線虫を検鏡する。土壌から遊出した線虫はサンプル管の底に沈んでいるので、しばらく静置した後は底部約 1.5 cm まで上澄みを除去してよい。なお、線虫懸濁液を扱う際は、線虫が内壁に張り付いてしまうため、マイクロピペットチップなどのプラスチック製品を用いてはならない。必ずガラス製の器具を用いる。有害線虫の密度を推定する場合は、3 反復で得られた計数値の平均を圃場の代表値とする。



【ベルマン法の注意点】

※漏斗の足、チューブ内の気泡に注意する

漏斗に水を入れる作業の際、漏斗の足やシリコンチューブをふさぐように大きな気泡が残り、線虫のサンプル管までの落下を妨げることがある。サンプル管内に自活性線虫やワムシなどがまったく見られなかった場合は気泡による分離失敗が疑われる。また、漏斗内壁面に付着した小さな気泡に線虫が捕らえられることもある。

※分離時の温度に注意する

ベルマン法は線虫の運動性を利用しているため、分離中は線虫の運動に適した温度を保つ必要がある。ほとんどの場合、適温は 25℃ 前後である。20℃ 以下になるとサツマイモネコブセンチュウなど暖地型の線虫は分離率が低下する。一方、ナミクキセンチュウは 10

～20℃が適温とされる。

※ベルマン法では分離されてこない線虫がいる

ナガハリセンチュウ、オオハリセンチュウ、ワセンチュウといった分類群はベルマン法での分離効率が大きく低下する。また、卵、シストといった運動性の無いステージは分離されてこない。これらの分離は参考文献を参照されたい。また、根こぶ内で定住生活をするネコブセンチュウの雌成虫もベルマン法では分離できないため、被害根を解剖して直接取り出す必要がある。

※漏斗の代わりにシャーレなどでも代用可能

漏斗ではなく水を張ったシャーレ等にふるいを乗せても分離できる。ただし、シャーレ底面には土壤粒子等の混入物が多くなり、検鏡しづらくなる。

※根・葉からの分離にも利用できる

ベルマン法はネグサレセンチュウやクキセンチュウなどを根や葉から分離する際にも利用可能である。この場合は細断した植物体を供試する。ネグサレセンチュウなどでは根をミキサーで10秒ほど磨砕して供試すると分離効率が高くなる。根の磨砕液はベルマンふるい上に敷いたティッシュでろ過し（ろ液は捨てる）、ティッシュ上に残った残渣を土壤と同様にベルマン法に供試する。いずれの場合も分離液が腐敗して線虫が不動化しやすいため、分離期間を1日～2日とする。腐敗防止のため分離液に過酸化水素水を加えても良い（30%溶液 10 mL/水 1 L）。

※ベルマン法は分離効率が低い

ベルマン法で分離されてくる線虫は土壤に生息する有害線虫の一部である。ネコブセンチュウ2齢幼虫の分離効率は分離24時間後で0.1～3.1%とする報告もある。3日間の分離では、良好に分離されても分離効率は概ね50%前後とされる。

1.3 シストの分離

シストセンチュウは、土中ではシストに蔵された卵の形で生残り、寄主植物が存在しない状態では容易に孵化しない。したがって、作付前にシストセンチュウの密度を知りたい場合、上述のベルマン法は適さない。そのため、シストセンチュウの密度は土中からシストを分離し、さらにシストより卵を抽出することにより、土壤 1g（乾土）当たりの卵密度として調査を行う。

シストの分離は、シストが水に浮遊することを利用して分離を行う。フェンウィック法とふるい分け法がある。フェンウィック法は簡便であるが、この方法に用いるフェンウィック缶は比較的高価であり、また、多数サンプルの処理時には缶の洗浄に手間がかかる。ふるい分け法は、直接ふるいを用いてシストを分離する方法であり、多数サンプルの処理に向く反面、土壤や夾雑物が多く混入するためシストが数えづらい。

（1）シスト分離法

☆用具

- ・ふるい：第1ふるい（18～22メッシュ）（夾雑物を取り除く）、第2ふるい（70～130メッシュ）（シストを受け止める）
- ・フェンウィック缶〔フェンウィック法〕（ふるいとのセット購入できる）
- ・ポリビーカー、ポリバケツ、あるいはボウル（2～3 L）〔ふるい分け法〕
- ・ろ紙、漏斗、漏斗台、洗浄瓶
- ・先の尖ったピンセット

- ・シラキユース時計皿
- ・実体顕微鏡
- ・乾燥器（あれば）

☆手順

- ①土壌の乾燥:土壌 50~100g を薄く広げ、十分に風乾する。乾燥器が使用できる場合は、70℃で1日処理する。

[フェンウィック法]

- ②フェンウィック缶にセットした第1ふるいに土壌を広げ、上部より水道水を注いで洗い落とす。土壌が固まっている場合は指で押し砕きながら水を流し、土壌を完全に缶内に落とす。
- ③缶の溢流環より流れ落ちてくる浮遊物を第2ふるいで受ける。

[ふるい分け法]

- ②ポリビーカー等に土壌を入れ、水道水を注いで十分に攪拌する。固まった土壌は充分に砕く。
- ③第1ふるい（上）と第2ふるい（下）を重ね合わせ、浮遊物を上澄みごと第1ふるいに流す。これを数回繰り返す。
- ④ろ紙を漏斗にセットし、洗浄瓶を用いて第2ふるいに残ったシストを夾雑物ごと漏斗に移す（おおよそのシスト数のみを知りたい場合は、ホーローのボウルに移し、水面周辺部に集まったシストを肉眼で確認して計数してもよい）。
- ⑤ろ紙を広げ、シストを実体顕微鏡下で観察しながら先の尖ったピンセットを用いて拾い上げ、少量の水を入れたシラキユース時計皿に移す。
- ⑥シストを計数する。

【シスト分離の注意点】

※シストを確実に見分け、拾い上げる

シストは大きさもまちまちで、色も成熟度により淡褐色から濃褐色に変わる。また、微細な種子や土壌粒子、糸状菌の菌核をシストと見間違えやすい。図版④を参照し、突起部があることを確認する。疑わしい場合は先の尖ったピンセットで割ってみる。シストであれば中から卵や2期幼虫がこぼれ出てくる。

※シストが検出された場合

土壌サンプルはむやみに破棄せず、オートクレーブあるいは煮沸消毒により熱殺処理を行う。ジャガイモシストセンチュウが疑われる場合は直ちに専門家に相談する。

(2) 卵数調査法

☆用具

- ・シストを破砕する道具（持ち手側の平滑なペンなど）
- ・シラキユース時計皿
- ・先の尖ったピンセット
- ・メスシリンダー（100 mL）
- ・マイクロピペットまたは駒込ピペット（1 mL）
- ・実体顕微鏡
- ・カウンター

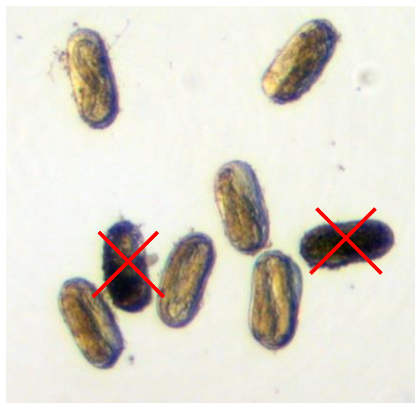
☆手順

- ①シスト分離の手順⑤のシストを移したシラキユース時計皿を、乾燥しないようにシャーレやラップ等で封をして2日程度静置し、シストを十分に吸水・膨潤させると破碎しやすくする。
- ②シラキユース時計皿から駒込ピペットで水を除き、先の尖ったピンセットでシストをシラキユース時計皿の中心部に集める。
- ③シストを破碎する道具を使ってシストを押しつぶす（力を入れすぎないように注意）。
- ④破碎物を全て100 mLメスシリンダーに移し入れ（破碎道具にも付着しているのでよく洗い落とす）、メスアップし、よく攪拌する。可能であれば超音波処理を施すことによってシスト殻より卵が離脱しやすくなる。
- ⑤1 mLを取り、少量の水を入れたシラキユース時計皿に入れる。
- ⑥実体顕微鏡下でカウンターを用いてシストを計数する。
- ⑦乾土1g当たりの卵数を算出する。

【卵数調査の注意点】

※空の卵、死んだ卵は計数しない

健全な卵は内部に細胞あるいは幼虫が観察される。空の卵は透き通って内部構造が何も見えず、死んだ卵は全体に黒ずんで見える（下図参照）。



シストセンチュウ卵の生死判別（原図：串田篤彦氏）

※幼虫は卵として数える

幼虫はシスト破碎時に卵が壊れて中から出てきたものであるから、これらは卵として数えておく。

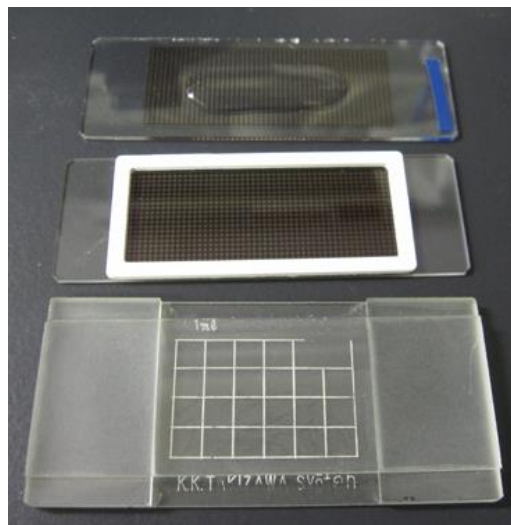
（参考資料）線虫の見分け方（日本植物防疫協会 2004）、線虫学実験法（日本線虫学会 2004）

2. 土壌から分離される主要線虫

ベルマン法によって得られる線虫サンプルには、植物寄生性線虫の他に細菌食性、菌食性、捕食性、雑食性などの多様な自由生活性線虫が含まれる。そのため、まずこれら雑多な線虫群集の中に調査対象の有害線虫類が含まれているかどうかを顕微鏡観察により判断する必要がある。この段階ではネコブセンチュウ、ネグサレセンチュウといった属や科レベルのグループ単位で認識・計数できればよい。次の段階である種レベルの同定にはPCR-RFLP法を用いる（次章参照）。

観察は実体顕微鏡でも可能だが、生物顕微鏡（通常時 60 倍～細部観察時 150 倍程度）の方が線虫を識別しやすい。観察はスライドグラス上に少量ずつ懸濁液を広げるか（図上）、枠付きスライドグラス（図中）や線虫計数板（図下）も利用できる。

主要植物寄生性線虫の識別には検索表も利用可能だが、本マニュアルでは「絵合わせ」と「特徴の確認」で主要有害線虫グループの簡易識別を行えるよう、巻末に図版を掲載した。ただし、これらの図版はあくまでも検鏡の際の手助けとなるよう作成した簡易資料であり、厳密な同定には不十分なものである。判断に迷った場合は顕微鏡写真やサンプルを専門家に送るなどして確認してもらおうとよい。



【観察の流れ】

- ①植物寄生性線虫であれば頭部に口針があるので、まずは口針を持つ線虫を探す。
- ②口針を持つ線虫がいたら、いくつかの特徴に基づき、有害線虫のグループか否かを判断する。重要となるのは、体形（細長さの程度）、体長、口針の形・大きさ、頭部前縁の形、尾部の形、生殖器の有無（土壌に遊出するステージと合致しているか）などである。なお、最重要有害線虫（ネコブセンチュウ、ネグサレセンチュウ、シストセンチュウ）はグループ内の形態的変異が小さく、同じグループであればほとんど同じ外見をしている。

（参考資料）線虫の見分け方（日本植物防疫協会 2004）、線虫研究の歩み（日本線虫研究会 2004）、植物のセンチュウ（1）生態と防除の基礎（誠文堂新光社 1971）、植物のセンチュウ（2）防除の実際（誠文堂新光社 1972）、Plant-parasitic nematodes -A pictorial key to genera-（Cornell University Press 1996）

3. DNA 解析による種同定法

線虫の形態による同定には専門知識が必要であり、かなりの習熟が必要である。修得には専門家の指導を受けることが必要で、教科書を読んだだけで行うことは困難である。一方、多くの生物同様、線虫学の分野においてもこの 20 年で DNA による生物の同定技術法の開発が飛躍的に進み、誰もが手軽に線虫の DNA の塩基配列まで解析できるようになった。極端なことを言えば、線虫の形態や生理生態を知らなくても、DNA の塩基配列情報さえ分かれば種の同定が可能である（ただし塩基配列情報と形態による同定情報が対応している場合に限る）。PCR-RFLP や DNA 塩基配列決定といった、今や基礎的技術となった DNA 解析法を用いて、既報あるいはインターネット上の情報と比較することにより、現在主要な有害線虫については同定できる。ここでは、日本でよく検出される有害線虫について PCR-RFLP による識別法を述べる。

3.1 手法

1 頭の線虫からの鋳型 DNA の調整、PCR、および制限酵素処理までの手順について、線虫を用いる場合に特徴的な手法に関して解説する。電気泳動については一般的な手法であるのでここでは記さない。手法は線虫研究者によって様々なものが用いられているが、ここでは著者らが用いている方法を紹介する。その他の方法については、下記資料を参照されたい。

(参考資料) 線虫学実験法 (日本線虫学会 2004), 酒井 (2008) 植物防疫 62:581-584.

3.1.1 鋳型 DNA の調整

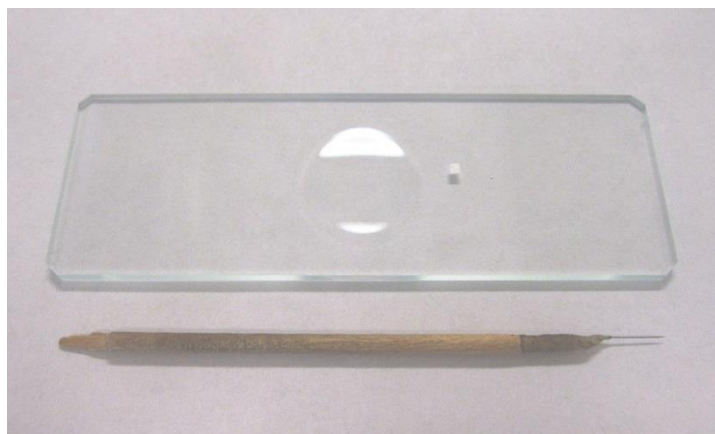
☆用意するもの

- ・線虫釣り具：爪楊枝の先に、2～3 cm 程度の昆虫標本用微細針をパラフィルムで取り付けたもの。
- ・実体顕微鏡：少なくとも 40 倍ぐらいまでズーム可能のものが望ましい。
- ・ピンセット：先端が硬く、鋭く尖ったもの。
- ・血液反応板 (2×3 穴) またはホールスライドグラス。血液反応板の方が、ガラスが厚く使いやすい。
- ・ろ紙：ADVANTEC 社の No. 4A のような、薄手で硬質のものが扱いやすいが、No. 1 や No. 2 でも差し支えない。
- ・ハサミ
- ・ガラスシャーレ (径 9 cm)
- ・駒込ピペット (2 mL)
- ・マイクロピペット (20 μ L)
- ・DNA 抽出用緩衝液：10 mm Tris-HCl (pH8) + 1% ノニデット P-40 + プロテイナーゼ K (100ng/ μ L)
- ・サーマルサイクラー
- ・-80 $^{\circ}$ C または -20 $^{\circ}$ C の冷凍庫

☆手順

- ①ろ紙をハサミで裁断し、一辺約 2 mm 以下の小片を大量に作り、シャーレに入れてオートクレーブする。オートクレーブ後、乾燥器でろ紙片を十分に乾燥させておく。
- ②血液反応板あるいはホールスライドグラスの穴に駒込ピペットで線虫懸濁液を入れる。線虫は少なめの方が釣りやすい。
- ③穴の横の平らな部分にマイクロピペットで約 1～2 μ L の蒸留滅菌水を置き、その中へ

- 実体顕微鏡下で線虫釣り具を用いて線虫を1頭だけ釣り入れる。
- ④蒸留滅菌水が蒸発するのを待つ。
 - ⑤実体顕微鏡下で観察しながら、蒸留滅菌水が蒸発して線虫が動けなると同時に、ピンセットでろ紙片の中央部をつまみ、線虫の上に乗せ、線虫を押しつぶす。数度力を込めて線虫をつぶした後、そのまま PCR 用マイクロチューブにろ紙片を入れる。チューブにはあらかじめ DNA 抽出用緩衝液を 5 μ L 入れておく。
 - ⑥65°C, 30 分→95°C, 5 分→80°C, 15 分 (または-20°C, 1 時間) の順に処理する。処理にはサーマルサイクラーを用いるとよい。



ホールスライドガラス、線虫釣り具、ろ紙小片

3.1.2 PCR

PCR の手順は他の生物の場合と変わりはない。ここでは反応液の組成および PCR プログラムについていくつか紹介する (下表)。PCR は、ホットスタートで行うこと、およびチューブにミネラルオイルを添加することで成功率が上がる。

表 線虫のDNA増幅用プライマー

	プライマー配列 (5'→3')	増幅する遺伝子	対象線虫
Powers and Harris (1993)	GGTCAATGTTTCAGAAATTTGTGG TACCTTTGACCAATCAGCT	ミトコンドリアDNA	ネコブセンチュウ
Harris et al. (1990)	TAAATCAATCTGTTAGTGAA ATAAACCAGTTTTCAAACT	ミトコンドリアDNA	ネコブセンチュウ
Ferris et al. (1993)	CGTAACAAGGTAGCTGTAG TCCTCCGCTAAATGATATG	核DNA(リボソーム ITS領域)	ネグサレセンチュウ、シスト センチュウ、その他多数

表 PCR用反応液組成	(μ L)
10xPCR緩衝液	2.5
2.5mM dNTP	2.0
10 μ Mプライマー1	1.0
10 μ Mプライマー2	1.0
TaqDNAポリメラーゼ	0.1
鋳型DNA	5.0
滅菌蒸留水	13.4
合計	25.0

表 PCRプログラム

プライマー	Powers and Harris (1993)	Harris et al. (1990)	Ferris et al. (1993)
熱変性	94°C, 2分	94°C, 2分	94°C, 2分
熱変性	94°C, 1分	94°C, 1分	94°C, 1分
アニーリング	48°C, 2分	48°C, 2分	48°C, 1分
伸長	68°C, 3分	68°C, 3分	72°C, 1分
サイクル数	35	35	35
最終伸長	72°C, 5分	72°C, 5分	72°C, 5分
PCR後保存温度	4°C	4°C	4°C

- ・プライマー：3.2以下の各論で述べるように、本マニュアルではプライマーを3つに絞り込んでいる。
- ・PCR用反応液組成：これは我々が用いている一例に過ぎず、文献では多くの組成が紹介されている。近年ではプレミックスタイプのPCR用商品も多い。このような商品を用いる場合は、プライマー1および2と鋳型DNAの量は変えず、滅菌蒸留水で合計量を調整する。
- ・PCRプログラム：Powers and Harris (1993)とHarris et al. (1990)のプライマーについては、プログラムは全く同じである。Powers and Harris (1993)で報告されているプログラムでは増幅しないことが多く、代わりにHarris et al. (1990)のプログラムを用いる。

(参考文献) Powers and Harris (1993) J. Nematol. 25: 1-6, Harris T.S. et al. (1990) J. Nematol. 22: 518-524, Ferris V.R. et al. (1993) Fundam. appl. Nematol. 19: 177-184.

3.1.3 制限酵素処理

3.2以下の各論に記された、種の同定に必要な制限酵素を入手する。PCR産物を電気泳動で確認して十分な増幅バンドが見られたサンプル8μLを別のチューブに移し、制限酵素1μLと添付の10x緩衝液1μLを加え計10μLとし、よく混合して制限酵素の反応適温に4~6時間置く。24時間以上放置するのは好ましくなく、すぐに電気泳動を行わない場合は必ず冷蔵あるいは冷凍庫に保存する。多くの場合、このまま全量の5μLを用いて電気泳動を行い、PCR-RFLPバンドパターンを確認することができる。うまく制限酵素が働かない場合は制限酵素の比率を高くするか、PCR産物の精製を行って余分な塩類等を除去した後、制限酵素反応を行う。

3.2 ネコブセンチュウ

ネコブセンチュウのPCR-RFLP法やDNA塩基配列決定による識別には、Powers and Harris (1993)のプライマーを用いてPCRを行い、ミトコンドリアDNAのCOIIから16SrDNAの領域を増幅させて解析に用いる。この領域は既報文献のみならず、インターネット上の塩基配列検索サイトにも数多くのネコブセンチュウ種のDNA情報が登録されている。

(例:ネコブセンチュウ属Meloidogyneとミトコンドリア遺伝子COIIで検索する → <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/nuccore/?term=Meloidogyne+COII>)

代表的なネコブセンチュウを識別する手順としては、まずPCR産物サイズでアレナリアネコブセンチュウ沖縄型(1,100bp)とキタネコブセンチュウ(540bp)が識別される^{注)}。その他のネコブセンチュウはすべて1,700bpであるので、続いて制限酵素によるPCR産物の切断

を行う。サツマイモネコブセンチュウは *Hinf* I で切断され、ナンヨウネコブセンチュウは *Tsp45* I で切断されることから識別できる。残るアレナリアネコブセンチュウ本州型とジャワネコブセンチュウは *Mse* I でそれぞれ 160 bp と 85 bp のバンドが現れることから識別できるため、九州沖縄地域の主要なネコブセンチュウ類は 3 つの制限酵素を用いた PCR-RFLP 法によって同定可能である。*Mse* I はサツマイモネコブセンチュウも識別できるので *Hinf* I を省略することもできる。

注) PCR 産物が 540 bp 前後のサイズを持つ希少種がいくつかあり、一般的な圃場から検出されることはまずないと考えてよいが、これらの可能性もあることを考慮しておく必要がある。

Powers and Harris (1993) のプライマーはすべてのネコブセンチュウ種で PCR による増幅が見られるため、きわめて有用である反面、*Mse* I によるサツマイモネコブセンチュウ、アレナリアネコブセンチュウ本州型、ジャワネコブセンチュウの識別には DNA 断片の小ささからアクリルアミドゲルを用いることが望ましく、手軽なアガロースゲルで判定を行うことが難しい。そこで、調査圃場に生息する線虫種がこれら 3 種である可能性が高い場合には Harris et al. (1990) のプライマーを用いる。九州沖縄地域の平地圃場ではほとんどこのプライマーで事足りると考えてよい。アレナリアネコブセンチュウ本州型とナンヨウネコブセンチュウは識別できないが、これらは寄主反応がほぼ同一と考えてよいため、実用上の問題は少ない。生ずる DNA 断片サイズが大きいため、アガロースゲルでも容易に識別できる。

主要種について、PCR-RFLP の結果を下表に示す。これら以外の種については、Orui and Mizukubo (1999) を参照する。

表 ネコブセンチュウ類の Powers and Harris (1993) プライマーを用いた PCR-RFLP による塩基断片サイズ(bp)

線虫	PCR産物 サイズ	制限酵素断片サイズ		
		<i>Hinf</i> I	<i>Mse</i> I	<i>Tsp45</i> I
サツマイモネコブセンチュウ	1,700	1,300, 400	100	1,700
アレナリアネコブセンチュウ				
本州型	1,700	1,700	160	1,700
沖縄型	1,100	1,100	60	1,700
ナンヨウネコブセンチュウ	1,700	1,700	160	1,000, 700
ジャワネコブセンチュウ	1,700	1,700	85	1,700
キタネコブセンチュウ	540	540	110 (130)	540

—: 切断部位なし, (): 種内変異

表 ネコブセンチュウ類の Harris et al. (1990) プライマーを用いた PCR-RFLP による塩基断片サイズ(bp)

線虫	PCR産物 サイズ	制限酵素断片サイズ
		<i>Hinf</i> I
サツマイモネコブセンチュウ	1,770	900, 410, 290, 170
アレナリアネコブセンチュウ		
本州型	1,770	900, 700, 170
沖縄型	—	—
ナンヨウネコブセンチュウ	1,770	900, 700, 170
ジャワネコブセンチュウ	1,770	1,600, 170
キタネコブセンチュウ	—	—

—: 増幅なし

(参考文献) Orui Y. (1998) Appl. Entomol. Zool. 33: 43-51, Orui and Mizukubo (1999) Appl. Entomol. Zool. 34: 205-21.

3.3 ネグサレセンチュウ

日本産ネグサレセンチュウの分子生物学的識別法には、Ferris et al. (1993)のプライマーを用いたリボソーム DNA の ITS 領域の PCR-RFLP 法が適する。主要種については PCR 産物長と制限酵素 *Alu* I、*Hinf* I による断片のサイズにより識別できる (下表)。

表 日本産主要ネグサレセンチュウの PCR 産物長と *Alu* I、*Hinf* I 消化物の断片長¹⁾

種名 ³⁾	PCR 産物長 ²⁾	制限酵素断片長 ²⁾		参考文献
		<i>Alu</i> I	<i>Hinf</i> I	
ミナミ A 型	1100	470、215、180、100	670、240、160	②、⑤
ミナミ B 型	1100	470、205、100	670、240、160	②
ミナミ C 型	1100	470、205、100	670、400	②、⑤
ニセミナミ	1100	390、320、200	620、240、130	⑥
チャ	1100	330、230、210、190、110	470、230、182、180	③
クルミ	800	400、380、280、105	450、420、330、310、270 260、190、170、110	④
キタ ⁴⁾	800	380、320	380、140、100	⑤
クマモト	800	380、280、(210)、120	800、450、340	⑥
モロコシ	800	370、350	300、290、220、200	⑤
ムギ	800	650、50	600、135	⑤
パイナップル	800	400、370、300	450、200、80	⑤
ノコギリ	900	430、250、120	250、190、160	⑤
<i>P. japonicus</i>	900	350、80	400、340、130、160、190	①

1) プライマーは Ferris et al. (1993) を用いる (3.1.2 節参照)。

2) PCR 産物長、制限酵素断片長は原典の図版から読み取ったおおよその値であり、読み取り誤差により実際の値から大きくずれている可能性がある。判断に迷った場合は確認のため原図を参照すること。

3) 種名の「センチュウ」は省略

4) (筆者の経験から) キタネグサレセンチュウは PCR による増幅が失敗/不十分であることが多いようである。

(参考文献) ① Mizukubo et al., 1997, *Esakia* 37: 203-214、② Mizukubo et al., 2003, *Jpn. J. Nematol.* 33: 57-76 ③ 水久保, 2004, 植物防疫 特別増刊号 No. 8: 17-22、④ Orui, 1996, *Appl. Entomol. Zool.* 31: 505-514、⑤ Orui & Mizukubo, 1999, *Appl. Entomol. Zool.* 34: 205-211、⑥ Uesugi et al., *Nematol. Res.* 39: 17-22.

3.4 シストセンチュウ

ネグサレセンチュウ類同様、Ferris et al. (1993) のプライマーを用いて解析する。主要種について PCR-RFLP の結果を下表に示す。制限酵素は、ヘテロデラ属では *Alu* I と *Rsa* I、グロボデラ属では *Alu* I と *Hinf* I を用いる。九州沖縄地域での検出例はないか稀であるが、ダイズシストセンチュウと同属であるクローバーシストセンチュウ (*H. trifolii*)、イネシストセンチュウ (*H. elachista*)、およびジャガイモシストセンチュウと同属であるヨモギシストセンチュウ (*G. hypolysi*)、タバコシストセンチュウ (*G. tabacum*)、ジャガイモシロシストセンチュウ (*G. pallida*) (国内未発生) についても比較のため併せて示した。

表 シストセンチュウ類のFerris et al.(1993)プライマーを用いたPCR-RFLPによる塩基断片サイズ(bp)

線虫	PCR産物 サイズ	制限酵素断片サイズ		
		<i>Alu</i> I	<i>Hinf</i> I	<i>Rsa</i> I
ヘテロデラ属				
ダイズシストセンチュウ	1,020	340, 280, 190, 130		820, 230
クローバーシストセンチュウ	1,020	340, 280, 190, 160		820, 580, 230
イネシストセンチュウ	1,090	330, 200, 170		630, 460
グロボデラ属				
ジャガイモシストセンチュウ	1,000	380, 360, 150, 100	920, 80	620, 220, 170
タバコシストセンチュウ	1,000	510, 380, 100	920, 80	
ジャガイモシロシストセンチュウ	1,000	510, 380, 100	770, 150, 80	
ヨモギシストセンチュウ	1,020	910, 100	1,020	

一部の数値は一桁目を四捨五入した。

(参考文献) 大類幸夫 (1997) 日本線虫学会誌 27: 67-75, Uehara T. (2008) 植物防疫 62:567-570.

3.5 ニセフクロセンチュウ

本種は作物への加害性は明らかでなく、一概に有害線虫と言えないが、南九州および沖縄県ではサツマイモネコブセンチュウと同じくらい検出頻度および密度が高く、また、形態に不慣れなうちは本種の雄をネコブセンチュウ、あるいはネグサレセンチュウの若齢雄と混同しやすいため、これらと間違って解析する 경우가多々あると思われるのでここで紹介する。

識別にはネグサレセンチュウ類同様、Ferris et al. (1993) のプライマーを用いて解析する。先述の2つの型についてPCR-RFLPの結果を下表に示す。制限酵素は*Rsa* I と *Taq* I を用いるが、いずれかのみでも差し支えない。

表 ニセフクロセンチュウのFerris et al.(1993)プライマーを用いたPCR-RFLPによる塩基断片サイズ(bp)

線虫	PCR産物サイ ズ(bp)	制限酵素	
		<i>Rsa</i> I	<i>Taq</i> I
ニセフクロセンチュウ			
単為生殖型	950	860, 90	520, 310
有性生殖型	940	560, 380	520, 230, 70

4. ネコブセンチュウ、ネグサレセンチュウ、シストセンチュウの重要種

4.1 ネコブセンチュウ (*Meloidogyne* spp.)

ネコブセンチュウは九州沖縄地域において最も広域に分布し、寄主範囲が広いものが多い。世界的にも最重要種であるサツマイモネコブセンチュウ (*Meloidogyne incognita*) は、メロン、スイカ、キュウリ、ニガウリなどのウリ科作物や、ナス、トマト、ピーマン、タバコなどのナス科作物の他、根菜類を好んで寄生する。多数の線虫の寄生を受けることによって作物は大きな減収を招き、初期密度が高い場合には萎凋枯死に至ることも多い。施設栽培は線虫の好む高温が維持されるため、その被害はより激しい。サツマイモ、ゴボウ、ニンジン、ダイコンなどの根菜類は線虫の寄生によって枯死することはないものの、根系の形状が大きく奇形化するため、外見の良好さを重視する日本では商品価値を失うことによる経済的損失が大きい。これらの直接的な加害に加え、土壌伝染性の病気を助長することから、線虫対策として土壌燻蒸剤を中心とした殺線虫剤の使用が欠かせないのが現状である。



図 ネコブセンチュウによる被害 (左：ニガウリ、右：サツマイモ[下2つ])

(1) サツマイモネコブセンチュウ (*Meloidogyne incognita*)

本種は東北から南西諸島まで広く分布し、本地域でも最も普遍的に検出される最重要線虫種である。北海道では自然分布は見られないが、移入したと思われる個体群がハウス内で越冬することが確認されている。寄主範囲も広く、イチゴやラッカセイを除けば、被害程度の差はあるものの、主要な作物のほぼすべてに寄生する。九州沖縄地域の主要作物であるサツマイモは本種の好適な寄主であり、減収とともに、加害を受けた塊茎にくびれ、亀裂、発育不良が生じることから商品価値が低下するため被害が大きい (図参照)。

サツマイモには古くから抵抗性品種が知られていたが、抵抗性品種を犯す線虫個体群の存在もまた知られていた。このことから、佐野ら (2002) は、いくつかの線虫個体群と様々なサツマイモ品種の組み合わせで接種試験を行った結果、サツマイモネコブセンチュウにはサツマイモ品種に対して寄生性の異なる4つのレースが存在することを明らかにした。また、各レースと寄主反応が同じサツマイモ品種から5品種を用いることでレースを判別する手法を開発した。九州沖縄地域で収集した多数の個体群についてレースの調査を行ったところ、

これまでに先述の4レースを含む9のレースが確認されている(下表)。興味深いことには、これらレースの地理的分布には特徴があり、熊本県以北では最も寄生できる品種が少ないSP1、宮崎県、鹿児島県ではSP2、沖縄県では寄生できる品種が多いSP4およびSP6が優占レースとなっていた。

表 サツマイモネコブセンチュウのサツマイモ5品種に対するレース反応

サツマイモ検定品種	レース								
	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5	SP6	SP7	SP8	SP9
農林1号	+	+	+	+	-	+	-	+	-
農林2号	-	+	-	+	+	-	+	+	-
種子島紫7	-	-	+	+	+	+	-	-	-
エレガントサマー	-	-	-	+	-	+	-	-	+
ジェイレッド	-	-	-	-	-	-	-	+	-

+:感受性, -:抵抗性*

(Sano and Iwahori, 2005より)

*ポット試験において500頭接種した時に着生した卵嚢数が平均2個以下。

表 九州沖縄地域におけるサツマイモネコブセンチュウレースの分布

調査県	調査個体群数	レース出現率(%)								
		SP1	SP2	SP3	SP4	SP5	SP6	SP7	SP8	SP9
佐賀	4	75.0	25.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
長崎	11	63.6	18.2	0.0	0.0	0.0	9.1	9.1	0.0	0.0
熊本	30	83.3	10.0	3.3	0.0	0.0	3.3	0.0	0.0	0.0
宮崎	28	25.0	67.9	0.0	0.0	0.0	7.1	0.0	0.0	0.0
鹿児島	43	9.3	74.4	0.0	4.7	2.3	0.0	7.0	2.3	2.3
沖縄	13	15.4	0.0	0.0	53.8	7.7	23.1	0.0	0.0	0.0
計	129	37.2	43.4	0.8	7.0	1.6	5.4	3.1	0.8	0.8

(Sano and Iwahori, 2005より)

このように、サツマイモネコブセンチュウには様々なサツマイモ品種に対して寄生性を異にするレースが存在する。圃場に生息するレースが判定できれば、それに対抗する非寄主品種を選択でき、防除をする必要もなくなる。しかしながら、現在九州沖縄地域で主に作付けされている高系14号やコガネセンガンはすべてのレースに対して感受性であり、これら品種の圃場では線虫対策が不可欠である。また、九州沖縄地域ではレースの地理的分布がほぼ明らかにされたが、他の地域ではほとんど解明されていないため、サツマイモの産地では今後明らかにしてゆく必要がある。

トマト栽培においては、抵抗性打破系統の発生が問題となっており、九州沖縄地域のみならず各地域で線虫抵抗性遺伝子のひとつであるMi geneを持ったトマト品種(台木を含む)で被害が発生している。抵抗性打破系統もまたレースの一種と考えられ、長年連作を行っているハウス栽培で発生が多いようである。抵抗性打破系統のネコブセンチュウは、他にアレナリアネコブセンチュウ、ジャワネコブセンチュウで知られている。キタネコブセンチュウにはもともとMi geneは効果がない。

(2) アレナリアネコブセンチュウ (*Meloidogyne arenaria*)

本種には後述するミトコンドリアDNAの解析により遺伝的に大きく異なる2系統が存在し、それぞれ本州型および沖縄型と呼ばれている。本州型は東北から九州にかけて、沖縄型は主に沖縄県に分布している。日本では分布範囲の狭い沖縄型が本種の原因種と考えられ、より世界的に分布している。従来、沖縄型は沖縄県で稀に見つかる程度であったが、最近の著者らの調査により、沖縄県ではむしろ最も広く分布する種であることが明らかとなった。

本州型と沖縄型は寄生性において若干の違いが見られ、前者がサツマイモの高系14号に対して寄生性を持つのに対し、後者はまったく寄生性を持たない(下表)。また、本州型の中にも寄生性の違いが見られ、一部の個体群はピーマンと高系14号に強い寄生性を示した。

九州ではダイズ圃場（特に畑ダイズ）において、高い頻度で本種の本州型が検出される。サトイモ圃場では本種とサツマイモネコブセンチュウが概ね半々の割合で検出される。

表 ネコブセンチュウ類の各種作物に対する寄生性

線虫	トマト	タバコ	ピーマン	ラッカセイ	イチゴ	サツマイモ
	ブリッツ	NC95	カリフォルニアワウンダー	フローランナーまたは千葉半立	さちのか	高系14号
サツマイモネコブセンチュウ	+	-	+	-	-	+
アレナリアネコブセンチュウ						
本州型	+	+	+(±)	-	-	+(±)
沖縄型	+	+	±(-)	-	-	-
ナンヨウネコブセンチュウ	+	+	±	-	-	±
ジャワネコブセンチュウ	+	+	- (±)	-	-	-
キタネコブセンチュウ	+	+	+	+	+	-

+:感受性(>20), ±:やや感受性(2-20), -:抵抗性(<2):()内の数値はポット試験において500頭接種した時に着生した平均卵囊数。

()は一部個体群で見られた反応。

検定品種が異なれば、それぞれの線虫に対する反応が変わる可能性がある。

(3) ナンヨウネコブセンチュウ (*Meloidogyne microcephala*)

本種はアレナリアネコブセンチュウ本州型ときわめて近縁な種と考えられ、エステラーゼのアイソザイムパターンが異なること、尾部形態がわずかに異なることなどで識別できる。また、先述のPCR-RFLP法によっても識別可能である。これまでの調査では、寄主範囲はアレナリアネコブセンチュウ本州型とほぼ同じである。九州沖縄地域における分布は限られており、これまでに宮崎県と沖縄県で数例検出されているにすぎないが、これは両者の識別が困難なことによるものと思われる、今後検出例が増える可能性がある。

(4) ジャワネコブセンチュウ (*Meloidogyne javanica*)

本種はこれまで形態的に近似するアレナリアネコブセンチュウ本州型と混同されてきたが^{注)}、エステラーゼのアイソザイムパターンが異なり、また、PCR-RFLP法によって識別が可能である。また、サツマイモネコブセンチュウとは寄主範囲が異なり、イチゴとラッカセイのほか、サツマイモとピーマンにも寄生しない。九州沖縄地域における分布はきわめて限られており、これまでに鹿児島県最南部と沖縄県先島諸島などで数例検出されているのみである。

注) 1995年以前の文献のジャワネコブセンチュウは、ほとんどの場合アレナリアネコブセンチュウ本州型と考えてよい。

(5) キタネコブセンチュウ (*Meloidogyne hapla*)

本種は北方系の線虫とされ、従来その地理的分布は九州の比較的標高の高い地域に限られ、平地では少ないと考えられてきたが、近年の調査で、九州の平地林野ではサツマイモネコブセンチュウよりも普通に生息していることが明らかにされた。また、沖縄本島の一部においても本種が確認されている。イチゴ、ラッカセイ、ジャガイモでの被害が見られる一方、スイカ、アスパラガス、サツマイモ、イネ科には寄生しない。

(6) 亜熱帯性ネコブセンチュウの分布拡大と寄主

主に日本において沖縄県にその分布の中心を持つ種を亜熱帯性線虫と呼ぶことにする。アレナリアネコブセンチュウ沖縄型、ナンヨウネコブセンチュウ、ジャワネコブセンチュウの3種がこれに該当する。近年問題となっている気候の温暖化に伴い、これらの種の分布域が北上することが懸念される。実際、アレナリアネコブセンチュウ沖縄型は福岡県で、ナンヨウネコブセンチュウは宮崎県で、ジャワネコブセンチュウは鹿児島県で検出されている。今後これら3種のより詳細な地理的分布が明らかとなれば、いっそう温暖化の影響が明白になってくるかも知れない。

一方で、これら3種の発育零点を調査した結果では、温帯域のネコブセンチュウとさほど変わるところはなく（下表）、さらには九州沖縄農研センター（熊本県合志市）の露地試験圃場で越冬できることが確認されている。従って、これらの分布拡大には種苗や種芋の移動によるなどの人為的要因の方が大きく関わっているとも考えられる。しかしながら、温暖化によって1世代経過に要する日数が短縮され、増殖が加速されることから、たとえ人為的要因で分布が広がったにしても、より容易に新しい土地での定着が可能になると予測される。

表 ネコブセンチュウ5種類21個体群の発育零点と1世代所要有効積算温度

線虫種	採集地	発育零点(°C)	1世代所要有効積算温度(日度)
キタネコブセンチュウ	熊本県高森町	11.2	523
	熊本県合志市	10.4	544
	高知県黒潮町(大方町)	11.0	481
	平均	10.9	516
サツマイモネコブセンチュウ	茨城県つくば市	13.5	356
	熊本県合志市	13.2	377
	宮崎県都城市	13.5	346
	沖縄県石垣市	13.3	357
	平均	13.3	359
アレナリアネコブセンチュウ 本州型	福岡県*	14.0	389
	熊本県菊陽町	13.2	430
	高知県香北町	13.2	430
	平均	13.5	416
アレナリアネコブセンチュウ 沖縄型	福岡県久留米市	13.6	408
	東京都伊豆大島	13.1	420
	鹿児島県奄美市	13.8	352
	沖縄県大宜味村	13.6	361
	沖縄県石垣市	13.6	408
	平均	13.5	390
ナンヨウネコブセンチュウ	宮崎県*	13.5	393
	沖縄県うるま市(具志川市)	13.1	404
	沖縄県竹富町	12.7	474
	平均	13.1	424
ジャワネコブセンチュウ	高知県香美市(香北町)	13.8	414
	鹿児島県奄美市	14.1	374
	不明*	13.1	404
	平均	13.7	397

*: 詳細な地理情報は不明

調査法: ミトマト「ブリッツ」に各線虫を500頭接種し、それぞれ28、24、20°Cで培養した。次世代の2期幼虫が出現するまでの日数を調査し、その日数と温度との関係を回帰することによって発育零点および1世代所要有効積算温度を推定した。

(参考文献) 佐野ら (2002) 日本線虫学会誌 32: 77-86, Sano and Iwahori (2005) Jpn. J. Nematol. 35: 1-12, 岩堀ら (2008) 九病虫研会報 54: 132-137.

4.2 ネグサレセンチュウ (*Pratylenchus* spp.)

ネグサレセンチュウは *Pratylenchus* 属に属する移動性の内部寄生性線虫である。卵以外のすべてのステージが根へと侵入し、移動しながら摂食・発育・産卵を行う。雄が出現せず雌のみで単為生殖をする種も多いが、日本産の重要ネグサレセンチュウ(キタネグサレセンチュウ、ミナミネグサレセンチュウ、クルミネグサレセンチュウ)は雌雄が出現し両性生殖を行う。

一般に寄生による地上部の病徴は乏しく、被害はダイコンでの病斑形成やニンジンのすづまり症状などの根菜類で顕在化する場合が多い。一方、イチゴ、サトイモ、キクでは線虫密度が高くなると顕著な株の生育抑制と枯れ上がりが見られる。また、*Verticillium* 菌など他の病原菌との複合病を引き起こすことが知られている。

(1) ミナミネグサレセンチュウ
(*Pratylenchus coffeae*)

サトイモの連作障害の主因の一つとなり、要防除水準は 10 頭前後/50g 土壌（ベルマン法 48 時間：8 月下～9 月上旬調査）と推測されている（中園，1984）。サトイモ以外では、サツマイモ、ジャガイモ、コンニャク、ダイズ、陸稲での被害が知られる。海外ではバナナ、コーヒーの被害が大きい。この他、100 種以上の寄主植物が報告されており、寄生範囲は広い。



図 サツマイモのネグサレセンチュウ害（左：高系 14 号、右：コガネセンガン）

雌雄が出現し、両性生殖を行う。1 日の平均地温が 14℃前後から根への侵入が見られるが、20℃以下は増殖に不適である。好適温度は 25～30℃であり、発育零点は 12.2℃、1 世代所要有効積算温度は 325 日度、25℃では 25.4 日で 1 世代が経過するという報告がある（水久保，1997）。ただし、近年下記のような種内多型が見出されたため、今後これらの間の発育温度特性差を再検討する必要がある。

日本産のミナミネグサレセンチュウはリボソーム DNA の ITS 領域の RFLP パターンにより A 型、B 型、C 型に分けられる（Mizukubo et al., 2003）。これらの型間には不完全な生殖的隔離が生じており、サトイモ、サツマイモに対する寄生性も異なることが報告されている（下表）。しかし、その他の植物での寄生性の違いは明らかになっていない部分が多く、今後の検討が待たれる。

表 ミナミネグサレセンチュウ A, B, C 型のサツマイモ
およびサトイモに対する寄生性

	サトイモ	サツマイモ
A 型	○	○
B 型	○	×
C 型	×	×

○：増殖する、×：増殖しない 但し、○でも個体群によっては増殖しないものもある

本種は東北（青森）から南西諸島（石垣島）にかけて広く記録されているが、調査時期が古く RFLP 型は不明のものが多い。RFLP 型が明らかとなっている記録では、A 型が関東（栃木）～南西諸島（西表島）、B 型が関東（埼玉）～九州（鹿児島）、C 型が東北（青森）～中部（岐阜）より報告される。海外では熱帯域を中心に汎世界的に分布する。

(2) キタネグサレセンチュウ (*Pratylenchus penetrans*)

ダイコンでの病斑形成（下図）、ニンジンのすづまり、ゴボウのヤケ症状などの被害を引き起こす。特にダイコンでは要防除密度がおよそ 10 頭/50 g 土壌（ベルマン法）と低く（大林，1989）、防除が困難な要因となっている。このほか、キクの連作障害の一因となり、レタス、ジャガイモなどでも生育、収量の低下を引き起こすことが知られる。また、パーティシリウム病等の病害を助長する例が多く知られ、線虫が根に侵入・摂食する際の物理的な損傷が病原菌の侵入口として働いていると推測されている。寄主範囲は広く、350 種以上の植物から記録されている。

本種には雌雄が出現し、両性生殖を行う。発育零点は 5.1℃、1 世代所要有効積算温度は 564 日度であり、25℃では 28.1 日で 1 世代を経過する (Mizukubo and Adachi, 1997)。サツマイモネコブセンチュウやミナミネグサレセンチュウなどの暖地型の線虫と異なり、15℃の低温化でも根への侵入は活発におこなわれる。増殖に好適な温度は 24~25℃とされ、30℃になると増殖率は低下する。本種は他の線虫種に比べ薬剤感受性が低いとする報告がある (D-D では LD95 がクルミネグサレの 21 倍、サツマイモネコブの 1.7~3.5 倍 (近岡, 1983))。

キタネグサレセンチュウは北海道から南西諸島 (沖縄本島) まで広く記録されている。寒地型の線虫とされるが、温暖な九州地域の低地であってもキク圃場での検出率は比較的高く、沖縄本島での記録もキクからのものである。海外では温帯域を中心に汎世界的に分布する。



図 ダイコンのネグサレセンチュウ害

(3) クルミネグサレセンチュウ

(*Pratylenchus vulnus*)

イチゴ根腐萎凋症の主な発生要因となり、矮化や下位葉の枯れ上がり、枯死などを引き起こす。被害は線虫が 100 頭/200 mL 土壌 (ふるい別・2 層遠心浮遊法分離) 以上の圃場で見られている (脇部, 1992)。本州・四国ではジャガイモでの被害報告もある。海外ではサクラ属果樹やカンキツ類の害虫として知られる。日本における果樹の被害報告は少ないが、九州沖縄地域ではカンキツ台木のカラタチで検出されたことがある。イチゴを始め、リンゴ、モモ、ブドウなど木本類を中心に 80 種以上の植物から記録されている。

雌雄が出現し、両性生殖を行う。増殖には 20~25℃程度が好適であり、高温になる夏季には密度が低下する。26℃では 26 日で 1 世代を経過するとされているが、発育零点や有効積算温度などの詳細な調査例はない。

日本では北海道から九州 (種子島) にかけて検出記録がある。海外では温帯域を中心に汎世界的に分布する。

(4) クマモトネグサレセンチュウ (*Pratylenchus kumamotoensis*)

キクに寄生し、根の褐変化 (図)、下位葉の枯れ上がり、生育不良を引き起こす (杉村・川崎, 2008)。従来キクより検出されるネグサレセンチュウはキタネグサレセンチュウが主体であったが、九州ではクマモトネグサレセンチュウが最も検出率が高い種となっていることが明らかとなった (Uesugi et al., 2009)。キク以外での被害記録はないが、非耕地ではヨモギから検出されている。キクにおける増殖性は高いが、圃場に自生する植物 25 種の根からはほとんど検出されず、22 植物種に対する接種試験でもキク以外ではシュンギク、インゲンのみでわずかな増殖が見られ



図 クマモトネグサレセンチュウの加害により褐変化したキク (神馬) の根

ただけだった(杉村・川崎, 2008; Uesugi et al., 2011)。

本種は雌雄が出現し、両性生殖を行う。九州沖縄農研の調査(未発表)では、発育零点が11℃とキタネグサレセンチュウに比べ6℃程度高かった。

九州および南西諸島(沖縄本島)から記録されている。海外での報告はない。

(5) ニセミナミネグサレセンチュウ (*Pratylenchus pseudocoffeae*)

本種はキクに寄生し、キタネグサレセンチュウ、クマモトネグサレセンチュウと類似した被害を引き起こす(Uesugi et al., 2012)。九州のキク圃場での検出率は9%と比較的低かった(Uesugi et al., 2009)。接種試験の結果では、キク以外でもレタス、ゴボウ、シュンギク、インゲンでの増殖性が高く、ダイズ、ナス、トマト、キュウリでも増殖が確認された。耕地外ではヨモギからの検出例がある。

雌雄が出現し、両性生殖を行う。発育温度などの温度特性は未調査である。九州から広く記録されているが、それ以外の地域では検出されていない。海外ではアメリカのアスター、ベルギーのイネ科植物から検出されており、イランからはキクの害虫として報告されている。

(6) モロコシネグサレセンチュウ (*Pratylenchus zae*)

世界の温帯、熱帯域に広く分布し、日本では本州から南西諸島にかけて記録されている。イネ科をはじめ多くの作物に寄生し、畑地以外にも牧草地や未耕地に普通に見られる。雄が出現せず、雌のみで単為生殖を行う。海外ではトウモロコシやサトウキビの害虫として知られるが、日本での被害実態は明らかでない。

(7) チャネグサレセンチュウ (*Pratylenchus loosi*)

茶園で普通に見られる。世界的にチャを加害する害虫として知られるが、日本では防除の対象とされることはほとんど無い。雌雄が出現し、両性生殖を行う。

(参考資料) 近岡(1983) 神奈川農総研報 125:1-72, 水久保(1997) 九病虫研会報 43:139, Mizukubo and Adachi(1997) J. Nematol. 29: 306-314, Mizukubo et al. (2003) Jpn. J. Nematol. 33: 57-76, 中園(1984) 地力維持・連作障害対策新技術 p.287-293, 大林(1989) 神奈川園試研報 39:1-90, 杉村・川崎(2008) 日本線虫学会誌 38: 71-77, Uesugi et al. (2009) Jpn. J. Nematol. 39: 17-22, Uesugi et al. (2011) Nematol. Res. 41: 23-25, Uesugi et al. (2012) Nematol. Res. 42(2) (in press), 脇部(1992) 線虫研究の歩み p.155-158.

4.3 シストセンチュウ (*Heterodera* spp., *Grobodera* spp.)

シストセンチュウ類は、成熟して蔵卵した雌がそのまま死んでシスト(被囊)となり、寄主から離れ落ちて土壤中に散逸する。表皮がタンニン化することによって物理的に防御され、また乾燥にも強くなることで高い耐久性を持ち、種によって数年から十数年間土壤中で生存する。このため防除は困難を極め、輪作による防除も困難となる。寄主範囲は狭く、特定の作物およびその近縁種に限られることが多い。寄主植物の根から出される孵化促進物質に感応して孵化し、それ以外の要因では容易に孵化しない。比較的冷涼な気候を好むため、九州沖縄地域の大部分ではさほど問題とはなっていないものの、1992年に長崎県に侵入したジャガイモシストセンチュウは現地ジャガイモ生産に大きな被害を与えている。

1シスト内の卵数は、ジャガイモシストセンチュウで200~500卵、ダイズシストセンチュウで200~400卵であるが、個体差が著しいため、1.3で述べたように圃場における密度の指標としては幼虫密度よりも卵密度が用いられる。

(1) ジャガイモシストセンチュウ (*Grobodera rostochiensis*)

本種はジャガイモ、トマト、ナスに寄生し、世界的にも最も重要な種の一つとされ、植物検疫上汚染土壌を含め移動が厳しく制限されている。ジャガイモ生産では減収が問題になるとともに、本種が検出された圃場では「種馬鈴しょ検疫規程」によって種芋生産ができなくなる。南米アンデスが起源とされ、1972年に北海道で初検出され、九州沖縄地域では1992年には長崎県で検出されている。近年、青森県や三重県でも発生が報告され、今後全国的に分布拡大する可能性がある。本地域では現在のところ長崎県以外での発生のほか、2011年には熊本県のごく一部の地域で発生が確認された。今後とも分布地拡大に対する警戒が必要である。

本種の発育適温は20℃前後であり、25℃ではほとんど成熟しないとされる。長崎県の調査では、本種は1世代経過に約1ヵ月を要するとされている(寺本ら1998,長崎総農林試研報24:39-62)。線虫密度がかなり高くなっても被害は顕在化せず、下図のような下位葉の黄化萎凋症状(毛叩き症状)が見られるようになった時には土壌中のシスト密度はかなり高い。根に黄色球形のシストを着生し、成熟するにつれて脱落しやすくなる。また、塊茎にはほとんど寄生しないため、線虫の存在に気付くのが遅れがちになり、また、蔓延の一因となっている。

本種にはRo1~Ro5の5つのレースが知られている。日本の個体群はすべて同一のRo1であるため、ジャガイモのジャガイモシストセンチュウ抵抗性遺伝子であるH1遺伝子を持つ品種には寄生できないが、市場的に商品価値のある男爵、メークイーン、ニシユタカは抵抗性遺伝子を持たない。すでにいくつかの品質のよい抵抗性品種の育成が進んでいるものの、普及が遅れているのが現状である。

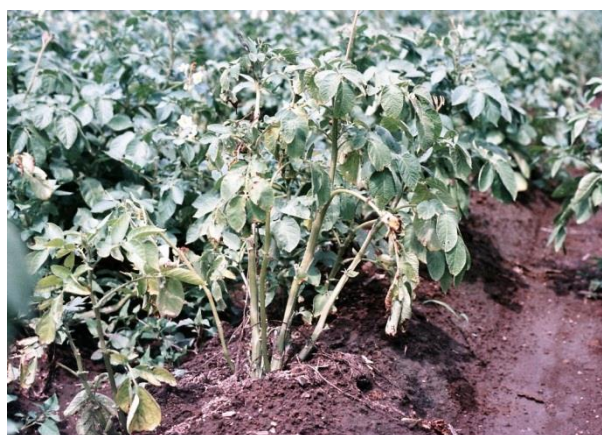


図 ジャガイモシストセンチュウによるジャガイモのしおれ症状[原図:稲垣春郎氏]

(2) ダイズシストセンチュウ (*Heterodera glycines*)

本種はダイズ、アズキ、インゲンなどのマメ科作物を好んで寄生する、世界的にも重要な線虫である。関東以北では普通に分布するが、九州では散発的に検出されるに過ぎない(岩堀ら,2010)。ダイズ連作圃場での検出が主であり、水田転換畑での発生は今のところほとんど見られていない。

感受性の高い品種では外観的な被害がないまま15~30%の減収を引き起こす。病徴としては、葉の黄化・萎凋・枯死が挙げられるが、密度がかなり高い場合でも顕在化しないことがある。圃場の線虫密度の高い場所では葉の黄化した株が円形に分布して見られることから、古くから「ダイズの月夜病」として知られている。

本種にはダイズに対して寄生性の異なるレースの存在が明らかとなっている。保持する抵抗性遺伝子が異なるダイズ4品種に対する寄生性の差から判別する国際基準レースでは、理論上16のレースが考えられるが、これまでに12レースが知られている。日本では3つのレ

ース（1, 3, 5）のみが知られている。近年、レース3と判別されながらも、抵抗性の下田不知系品種に対して寄生性を持つ個体群ともたない個体群が存在し、国際基準レースでは対応できない事例が報告されている。

（参考文献）相場ら（2003）総合農業研究叢書第44号：pp. 360-364, 岩堀ら（2010）九病虫研会報 56:42-45.

5. 防除法

5.1 殺線虫剤

2010年11月10日時点で、農業上の有害線虫類（マツノザイセンチュウを除く）に登録のある農薬は、生物農薬2種を含め100種（商品）を超え、これらに含まれる有効成分はおよそ30種に上る。これらは、定植、播種の一定期間前に土壌処理するいわゆる燻蒸剤タイプのものと、定植、播種時に処理する粒剤、液剤タイプのものに大別される。これ以外に生育期間中に処理できる薬剤もあるが、ほとんどはイネシנגアレセンチュウやイチゴセンチュウなど地上部寄生性線虫に対する登録であり、ネコブセンチュウやネグサレセンチュウに対して生育期処理の登録のある薬剤・作物は少ない。以下では、これら殺線虫剤を項目ごとに五十音順で紹介した。また、利便性を考慮し、各剤で線虫類に登録のある代表的な農薬の名称も五十音順に併記した。

農薬の使用にあたっては最新の農薬登録情報（参照：農林水産消費安全技術センター <http://www.famic.go.jp/>）、および、農薬のラベルを必ず確認し、登録のある作物、使用時期、適用病害虫等、適切に使用するよう注意すること。

【定植、播種の一定期間前に処理する薬剤】

◎液剤、油剤等

- ・D-D剤（テロン、DC、D-D）
- ・カーバムナトリウム塩液剤（キルパー）
- ・カーバム剤（NCS）
- ・クロルピクリン燻蒸剤（クロピク、クロルピクリン、クロールピクリン、ドジョウピクリン、ドロクロール）
- ・メチルイソチオシアネート油剤（トラペックサイド）
- ・ヨウ化メチル燻蒸剤（ヨーカヒューム）
- ・DCIP・D-D燻蒸剤（プラズマ）
- ・クロルピクリン・D-D燻蒸剤（ソイリーン、ダブルストッパー）
- ・メチルイソチオシアネート・D-D油剤（ディ・トラペックス）

◎粉粒剤

- ・ダゾメット粉粒剤（ガスタード、バスアミド）

【定植・播種前、あるいは生育期に処理する薬剤】

◎液剤、乳剤、水和剤

- ・DCIP乳剤（ネマモール）
- ・ホスチアゼート液剤（ガードホープ、ネマバスター）
- ・メソミル水和剤（ランネート）

◎粒剤、粉剤等

- ・DCIP粒剤（ネマモール）
- ・イミシアホス粒剤（ネマキック）
- ・オキサミル粒剤（バイデートL）
- ・カズサホスマイクロカプセル剤（ラグビーMC）
- ・カルボスルファン粒剤（アドバンテージ、ガゼット）
- ・ベンフラカルブ粒剤（オンコル）
- ・ホスチアゼート粒剤（ネマトリンエース）
- ・メソミル粉粒剤（ランネート）

【種子、種イモ処理および地上部寄生性線虫に処理する薬剤】

- ◎イネシンガレセンチュウ
 - ・カルタップ水和剤（パダン）
 - ・金属銀水和剤（シードラック）
 - ・チラウム・チオファネートメチル水和剤（ホーマイ）
 - ・チラウム・ベノミル水和剤（ベンレート T）
 - ・チオシクラム水和剤（エビセクト）
 - ・フィプロニル粒剤（プリンス）
 - ・ベノミル水和剤（ベンレート）
 - ・ベンフラカルブ・プロベナゾール粒剤（オリゼメートオンコル、ジャッジ）
 - ・ベンフラカルブ粒剤（オンコル）
- ◎イチゴセンチュウ、イチゴメセンチュウ
 - ・メソミル水和剤（ランネート）
- ◎ネグサレセンチュウ
 - ・カルタップ水和剤（パダン）： 種イモ浸漬
- ◎イモグサレセンチュウ
 - ・チラウム・ベノミル水和剤（ベンレート T）： 種球粉衣

【その他】

- ・石灰窒素： 石灰窒素にはいも類・野菜類・豆類（種実）でセンチュウ類・ネコブセンチュウに農薬登録をもつものがある。
- ・パストーリア・ペネトランス水和剤（パストリア水和剤）： ネコブセンチュウの天敵細菌である *Pasteuria penetrans* の生物農薬である。5.4 節参照。
- ・モナクロスポリウム・フィマトパガム剤（ネマヒトン）： 線虫捕食菌 *Monacrosporium phymatophagum* の生物農薬である。5.4 節参照。

5.2 対抗植物

対抗植物とは、圃場で栽培することにより、休閒もしくはそれ以上の線虫密度低減効果を示す植物で、線虫抑制作物とも呼ばれている。緑肥、飼料、景観植物としての利用を兼ねている場合が多い。作用機作としては、殺線虫作用を持つ物質により直接的に根内外の線虫に作用するものもあるが、不明なものも多い。圃場に生息する有害線虫が寄生・増殖できない食用作物を、抵抗性品種も含め非寄主作物と呼ぶが、ここでは対抗植物に含めておく。

対抗植物は線虫の活動が活発な時期に3ヵ月程度栽培するのが望ましく、緑肥作物を兼ねてすき込みを行うもの場合は、さらに1ヵ月程度の分解期間が必要となる。種類によって、また、同じ種類でも品種によって対象となる線虫種が異なる場合があるため、圃場に生息する線虫種を特定しておかなければならない。少なくともネコブセンチュウ、ネグサレセンチュウ、シストセンチュウのどの仲間が生息しているかを知っておく必要がある。

対抗植物を利用する場合、寄主範囲の広いネコブセンチュウ、ネグサレセンチュウは多くの雑草に寄生し増殖する可能性があるため、雑草の繁殖には充分注意する。雑草の発生を抑えるため播種むらをなくし、また、発芽のそろった種子を用いることが重要である。発生した雑草は極力放置しない。

線虫抑制的な作付体系を策定する上で、対抗植物および非寄主作物の利用はきわめて重要で、最も基本的な耕種的防除法であるといえる。

5.2.1 ネコブセンチュウ

ネコブセンチュウに対する対抗植物はよく研究されており、数多くの候補となる植物が報告されている。その代表的なものを下表に示す。

表 主要線虫の対抗植物

植物名	対象線虫 ¹⁾	植物名	対象線虫
イネ科		<i>Cajanus cajan</i>	Mi
ギニアグラス	Mi, Mj, Mh	<i>Centrosema pubescens</i>	Mi
グリーンパニック	Mi, Mj, Mh	<i>Clitoria sp.</i>	Mi
ダリスグラス	Mi, Mj, Mh, Ma	<i>Crotalaria brevifrola</i>	Mi
バヒアグラス	Mi, Mj, Mh, Ma	<i>Crotalaria incana</i>	Mi, Mj, Mh, Pc
ペレニアルライグラス	Mi, Mh	<i>Crotalaria juncea</i>	Mi, Ma, Mh, Hg
パールミレット	Mi, Mj, Mh	<i>Crotalaria lanceolata</i>	Mi, Mj, Mh, Pc
ウィーピンググラブグラス	Mi, Mj, Mh, Ma	<i>Crotalaria mucronata</i>	Mi, Mj, Mh, Ma
パンゴラグラス	Mi, Mh	<i>Crotalaria nubica</i>	Mi, Mj
ローズグラス	Mj, Mh	<i>Crotalaria retusa</i>	Mi, Mj, Mh, Pc
カーベットグラス	Mj, Mh	<i>Crotalaria spectabilis</i>	Mi, Mj, Mh, Ma, Pc, Pv, Hg
レスクグラス	Mi, Mj, Mh, Ma	<i>Crotalaria striata</i>	Mi
コースタルバーミューダグラス	Mi, Mj, Mh, Ma	<i>Desmodium tortuosum</i>	Mi, Mj, Ma
スイッチグラス	Mi, Mj, Mh, Ma	<i>Glycine wightii</i>	Mi
ビッグブルーテム	Mi, Mh	<i>Pueraria phaseoloides</i>	Mi
ブッフエルグラス	Mi, Mh	<i>Stizolobium deeringianum</i>	Mh
ベイズイグラス	Mi, Mh	キク科	
エンバク ²⁾	Mi	アフリカンマリーゴールド	Mi, Mj, Ma, Pp
野生エンバク	Pp	フレンチマリーゴールド	Mi, Mj, Mh, Ma, Pc, Pp, Pv
<i>Agropyron trachycaulum</i>	Mi, Mh	メキシカンマリーゴールド	Mi, Mj, Mh
<i>Bromus ciliatus</i>	Mi, Mh	ベニバナ	Mi, Mh
<i>Calamagrostis purpurascens</i>	Mi, Mh	バラ科	
<i>Cenchrus fulva</i>	Mi, Mj, Mh	イチゴ	Mi, Mj, Ma
<i>Cenchrus grahamiana</i>	Mi, Mj, Mh	ナス科	
<i>Digitaria exilis</i>	Mi, Mh	トウガラシ	Mj
<i>Digitaria sanguinalis</i>	Mi, Mh, Ma	ピーマン	Mj
<i>Eragrostis lehmanniana</i>	Mi, Mj, Ma	<i>Lycopersicon peruvianum</i>	Mi
<i>Panicum deustum</i>	Mi, Mh	アオイ科	
<i>Pennisetum spicatum</i>	Mi, Mj, Mh	ワタ	Mi, Mj, Mh, Ma
<i>Sorghum vulgare</i>	Mi, Mh, Ma	ヒルガオ科	
<i>Trisetum spicatum molle</i>	Mi, Mh	サツマイモ ³⁾	Mj, Mh, Ma, Pp
マメ科		ウリ科	
ラッカセイ	Mi, Mj, Pc, Pp	スイカ	Mh
サイラトロ	Mi, Mj, Mh, Pp	ヒユ科	
ハブソウ	Mh, Pp	アオゲイトウ	Mh
アカクローバー	Hg	ユリ科	
クリムゾンクローバー	Hg	アスパラガス	Mh, Pc, Pp, Tr

1) Mi=サツマイモネコブセンチュウ, Ma=アレナリアネコブセンチュウ, Mj=ジャワネコブセンチュウ(古い文献によるものではMaの可能性あり), Mh=キタネコブセンチュウ, Pc=ミナミネグサレセンチュウ, Pp=キタネグサレセンチュウ, Pv=クルマネグサレセンチュウ, Hg=ダイズシストセンチュウ, Tr=ユミハリセンチュウ

2) 販売品種では「たちいぶき」のみ

3) サツマイモネコブセンチュウに対しては、品種や生息する線虫のレースによって抵抗性が異なる

このように対抗植物には多数のものがあるが、現在多く用いられ、市販されているものとしては、クロタラリア・スペクタビリス *Crotalaria spectabilis* (ネマキング等)、クロタラリア・ジュンセア [サンヘンブ] *C. juncea* (ネマコロリ、ネコブキラー等)、ギニアグラス (ナツカゼ、ソイルクリーン、グリーンパニック等)、フレンチマリーゴールド (セントール、プチイエロー等)、アフリカンマリーゴールド (アフリカントール等)、ソルガム *Sorghum vulgare* (つちたろう、スダックス等) などの、イネ科、マメ科、キク科植物である。最近ではエンバク (たちいぶき) のネコブセンチュウ密度抑制効果が報告されている。

主要ネコブセンチュウ種における研究が盛んに行われている一方で、先述の亜熱帯性ネコブセンチュウに対して効果を持った対抗植物についてはほとんど研究されていなかった。ま

た、対抗植物の効果が、同じ線虫種でも系統によって異なるかどうかについても明らかでなかった。筆者らはまず、多くのネコブセンチュウ系統に対する主要対抗植物6種の効果をポット試験によって調査した（下表）。

表 対抗植物6種に対するネコブセンチュウ4種16個体群の寄生性

線虫種および系統	トマト 「ブリッツ」	ソルガム 「つちたろう」	ギニアグラス 「ソイルクリーン」	スーダングラス 「ねまへらそう」	エンバク 「たちいぶき」	マリーゴールド 「セントール」	クロタリヤ 「ネマキング」
MiSP1西	+	-	-	±	-	-	-
MiSP2都	+	-	-	-	-	-	-
MiSP4つくば	+	-	-	-	-	-	±
MiSP6石2	+	-	-	-	-	-	-
Ma本菊陽	+	-	-	-	±	-	-
Ma本福岡	+	-	-	±	±	-	-
Ma本高知	+	-	-	±	±	-	-
Ma沖バ	+	-	-	-	-	±	±
Ma沖トリ	+	-	-	-	-	-	-
Ma沖外2	+	-	-	-	-	-	-
Mm大類	+	-	-	-	±	±	-
Mmハーブ	+	-	-	-	±	±	-
Mm⑨	+	-	-	-	±	±	-
Mj笠利	+	-	-	-	-	-	-
Mj高知	+	-	-	-	-	-	-
Mjヤエ	+	-	-	±	-	-	-

1) Mi=サツマイモネコブセンチュウ, Ma=アレナリアネコブセンチュウ, Mm=ナンヨウネコブセンチュウ, Mj=ジャワネコブセンチュウ

2) ポット試験において500頭接種した時に着生した平均卵嚢数; +:10以上=感受性, ±:2以上10未満=やや感受性, -:2未満=抵抗性

また、亜熱帯性ネコブセンチュウを含めたネコブセンチュウ5種類を用い、圃場試験において対抗植物3種の効果を調査した（下表）。2カ年の圃場試験の結果より、線虫密度低減効果が休閑より劣る線虫種-対抗植物の組み合わせが見られたものの、線虫密度は概ね低く抑えられ、これら対抗植物の緑肥効果を考え合わせれば、応用的にこれらを利用する価値はあると判断できた。

表 ネコブセンチュウ5種類に対する対抗植物3種3ヵ月栽培の効果

線虫種および系統	ソルガム 「つちたろう」	スーダングラス 「ねまへらそう」	クロタリヤ 「ネマキング」
サツマイモネコブセンチュウ	△	×	△
アレナリアネコブセンチュウ 本州型	○	△	△
アレナリアネコブセンチュウ 沖縄型	○	○	○
ナンヨウネコブセンチュウ	○	△	○
ジャワネコブセンチュウ	○	○	○

○:休閑より線虫密度が低下する, △:休閑と同等の密度低下が見られる, ×:休閑より密度は高くなる(2カ年の圃場試験における結果から判断)

5.2.2 ネグサレセンチュウ

ネグサレセンチュウに対する対抗植物はネコブセンチュウと共通のものも多く、これらについては5.2.1の表に取りまとめられている。以下では九州沖縄地域で検出頻度の高い種について、5.2.1の表を踏まえて知見を補足する。

(1) キタネグサレセンチュウ

キタネグサレセンチュウに対してはマリーゴールド類（アフリカンマリーゴールド（アフ

リカントール等)とフレンチマリーゴールド(セントール等)の試験例が多く、約3カ月栽培で実用的な効果が確認されている(近岡, 1983)。また、線虫抑制エンバク(ハイオーツ(山田, 1998)、ネグサレタイジ、ニューオーツ、ソイルセイバー等)の2カ月栽培も線虫被害の抑制に効果がある。この他、ハブソウ(ハブエース等)、エビスグサ(エビスグサ等)、スーダングラス(ねまへらそう等)、ギニアグラス(ソイルクリーン、ナツカゼ等)などが、キタネグサレセンチュウを抑制するとして市販されている。ネコブセンチュウ対抗植物として有効なクロタラリアやソルガムでは効果が認められない、あるいは、結果が安定していない。本種は温度が低くても活動できるため、対抗植物の導入できる季節が比較的限定されないものと考えられ、北海道におけるライムギ類の越冬栽培による被害抑制の事例もある(山田ら, 2009)。

(2) ミナミネグサレセンチュウ

ミナミネグサレセンチュウに対しては、ラッカセイ(後藤, 1964)、マリーゴールド(鳥越, 1992)の効果が高く、試験実績も多い。この他、クロタラリア(*C. spectabilis*) (ネマキング、ネマクリーン等)の抑制効果も認められている。ギニアグラス(ナツカゼ、ソイルクリーン等)もミナミネグサレセンチュウに一定の効果があるとして市販されているが、線虫が増殖した事例(ナツカゼ)もある(鳥越, 1996)。線虫抑制エンバクについてはポットレベルでは密度抑制効果が認められている一方、圃場での栽培試験例はほとんどない。9月下旬からの約2カ月半の栽培により線虫密度は休閑より低く抑えたものの、翌年のサツマイモ被害抑制効果は認められなかった事例がある(上杉ら, 2010)。本種はキタネグサレセンチュウに比べ寄生活動に比較的高い温度が必要なため、栽培時期を検討する必要があるだろう。ネコブセンチュウに有効なソルガム(つちたろう、スダックス等)はミナミネグサレセンチュウを増殖させる可能性がある。キタネグサレセンチュウ対抗植物として市販されているスーダングラス(ねまへらそう等)についてはデータがない。なお、4章で述べたようにミナミネグサレセンチュウには寄生性の異なる3系統が存在するが、それらの対抗植物への反応が異なるかは未検討のみである。

(3) クルミネグサレセンチュウ

クルミネグサレセンチュウの被害が大きいイチゴは夏季に休耕するため、太陽熱消毒等による物理的防除が検討される場合が多く、対抗植物の利用については試験例が少ない。ポット試験ではアフリカンマリーゴールド(アフリカントール)による一定の密度抑制効果が認められている(大野ら, 1992)。フレンチマリーゴールド(セントール)、クロタラリア(*C. spectabilis*)、ソルガム類も根内線虫が少ないとの報告がある(高橋, 1984; 五味・千本木, 1989)。

(4) クマモトネグサレセンチュウ

キタネグサレセンチュウの対抗植物であるアフリカンマリーゴールド(アフリカントール)、フレンチマリーゴールド(フレンチ)、ラッカセイ(千葉半立)、サツマイモ(高系14号)、ハブソウ、エンバク(ハイオーツ)の3か月栽培がクマモトネグサレセンチュウの密度低減にも有効とされた(杉村・川崎, 2008)。別の試験ではフレンチマリーゴールド(セントール)、クロタラリア(ネマキング)、エビスグサ(エビスグサ)、エンバク(ハイオーツ)、ソルガム(つちたろう)、スーダングラス(ねまへらそう)、ギニアグラス(ソイルクリーン)の7作物でクマモトネグサレセンチュウの増殖が認められなかったが(Uesugi et al., 2011)、線虫密度低減効果までは検証されていない。

(5) ニセミナミネグサレセンチュウ

フレンチマリーゴールド(セントール)、クロタラリア(ネマキング)、エビスグサ(エビスグサ)、エンバク(ハイオーツ)、ソルガム(つちたろう)、スーダングラス(ねまへらそ

う)、ギニアグラス(ソイルクリーン)の7作物でニセミナミネグサレセンチュウの増殖が認められなかったが(Uesugi et al., 2012)、線虫密度低減効果までは検証されていない。

(参考資料) 近岡(1983) 神奈川農総研報 125:1-72, 五味・千本木(1989) 関東東山病虫研報 36:209-211, 後藤(1964) 宮崎農試研報 5:1-121, 大野ら(1992) 九病虫研報 38: 146-148, 杉村・川崎(2008) 日本線虫学会誌 38: 71-77, 高橋(1984) 関東東山病虫研報 31: 190, 鳥越(1992) 九病虫研会報 38:105-108, 鳥越(1996) 九病虫研会報 42:83-88, 上杉ら(2010) 九病虫研会報 56:46-51, Uesugi et al.(2011) Nematol. Res. 41: 23-25, Uesugi et al.(2012) Nematol. Res. 42 (in press), 山田(1998) 牧草と園芸 46: 8-14, 山田ら(2009) 日本線虫学会誌 39: 31-43.

5.3 物理的防除

物理的防除法には、太陽熱消毒、熱水消毒、蒸気消毒などの、主に熱によって線虫を殺す方法と、湛水や土壌還元消毒などの、酸素欠乏や殺線虫効果のある有機酸の生成などによって効果を示すものがある。

5.3.1 熱による方法

線虫は 60℃程度に数分さらされることで死滅する。これより低い温度でも死滅するが、温度が低いほど時間を要する。40℃以下では死滅しない場合が多い。熱による方法の特徴としては、消毒効果が安定していることや、コガネムシやキスジノミハムシなどの土壌害虫に対しても有効で、雑草防除効果を併せ持つことが挙げられる。また、比較的多様な土壌微生物が残存し、熱水土壌消毒後の土壌からは、腐生菌、自由生活性線虫、根粒菌などの有用菌が検出される。作物の生育に影響はなく、現在まで消毒後の圃場で栽培された作物に生育障害が出た事例はないようである。反面、設備が大がかりで燃料費がかかり、寒い時期には実施が困難などの欠点もある。以下に方法を記すが、これらは概略に過ぎず、また、多くの変法・改良法があるため、実際に行う場合には各県の農業研究・調査・普及機関等に問い合わせる。

(参考資料) 植物防疫 61 巻 2 号(2007) 特集「ポスト臭化メチル時代の土壌消毒」、皆川ら(2004) 中央農研研報 4:25-34, 野菜茶業試験場ホームページ「注目の新技術 熱水土壌消毒」: <http://www.naro.affrc.go.jp/vegetea/joho/vegetables/cultivation/018164.html>

(1) 太陽熱消毒

夏期の高温を利用した消毒法。施設や亜熱帯地域ではより有効な手段となる。有機物や石灰窒素を同時にすき込むことにより、土壌改良効果も得ることができる。

☆手順および注意事項

- ①圃場をなるべく深耕し、うね立てする。有機物や石灰窒素を同時に施用する場合は土壌と充分混和する。
- ②うね間に充分灌水する(一時湛水状態になるまで)。
- ③マルチ被覆する。周囲は隙間のないように盛り土で完全に密封する。
- ④最も暑い盛夏で 30 日程度そのまま置く。その際、必ず温度を測定する。作土層(15~20 cm)で、少なくとも 40℃以上の温度が 1 週間程度継続しない場合は効果が少ない。
- ⑤露地では線虫防除効果は表層の 10 cm 程度であり、深層の土壌と混ざらないように、耕耘せずそのまま播種・定植をおこなう必要がある。

(2) 熱水消毒

圃場に70～95℃の熱水を1m²あたり100～150 L散水することで地温を上昇させ、線虫防除を行う方法。太陽熱消毒よりも安定性が高く、深部(20～30 cm)まで効果がおよび、厳冬期を除いて処理が可能であるが、熱水土壌消毒機や専用の熱水注入装置が必要となる。

☆手順および注意事項

- ①圃場をなるべく深耕し、地表面は平らにする。
- ②熱水注入装置を設置する。
- ③処理区全体をマルチ被覆する。マルチの材質の耐熱性を確認しておく必要がある。
- ④熱水土壌消毒機を圃場に搬入し、熱水注入装置と連結する。水源と電源を確保する必要がある。
- ⑤流量計の目盛を見ながら目標量に達するまで熱水を注入する。
- ⑥熱水注入終了後、一晚以上放置して高温状態を持続させる。地温50℃以上が数時間以上持続するようにする。

(3) 蒸気消毒

ボイラーから発生させた120℃前後の蒸気を土壌中に放出し、地温を上昇させて線虫防除を行う方法。蒸気を土表面から下層に浸透させる。20 cm程度まで効果がおよぶ。キャンバスホース式、スパイクパイプ式、ホジソンパイプ式がある。熱水消毒と同様、厳冬期を除いて処理が可能であるが、蒸気土壌消毒機や専用の蒸気注入装置が必要となる。土壌水分が多すぎると熱が伝わりにくいので注意する。

☆手順および注意事項

- ①圃場をなるべく深耕し、地表面は平らにする。
- ②蒸気注入装置を設置する。キャンバスホース式：土壌表面に布製のホースを置く。スパイクパイプ式：パイプから出ている針(針先に蒸気噴出孔がある)を土壌中に差し込む。ホジソンパイプ式：一定間隔で蒸気噴出孔のあるパイプを30 cm前後の深さに埋設する。
- ③キャンバスホース式は労力が少なく済むが、熱の損失が大きい。スパイクパイプ式は蒸気が通りやすく温度むらが少ない。ホジソンパイプ式は他の方法よりも深部まで効果が及ぶが、パイプの埋設や移動に労力が必要となる。
- ④処理区全体をマルチ被覆する。マルチの材質の耐熱性を確認しておく必要がある。
- ⑤蒸気土壌消毒機を圃場に搬入し、蒸気注入装置と連結する。
- ⑥地温が65～80℃を超えたら終了し、一晚以上放置して高温状態を持続させる。

5.3.2 湛水および土壌還元による方法

湛水は古くから行われている線虫防除法であり、線虫汚染圃場を1年間水田にするだけでほぼ有害線虫はいなくなると言われている。殺線虫メカニズムは十分解明されているとはいえないが、長期にわたる低酸素状態と、これに起因する有機酸などの線虫に対して有害な物質の生成が関係していると考えられている。湛水防除は灌漑設備や農業経営が許せば現在でも十分に有効な方法といえる。

湛水の線虫密度抑制効果を短期間で引き出す方法と考えられるのが土壌還元消毒法で、フスマや米ぬか等を大量にすき込んで一時的に湛水し、人為的に低酸素・有機酸生成状態を作り出すことによって線虫密度を低下させる。これを夏期に行うことで熱による効果も加わり、よりいっそう線虫密度を低下させることができる。以下にその処理法および推測されている作用機作を記す。

- ①フスマや米ぬか等の有機物を大量にすき込み(1 t/10 a)、土壌が飽水状態になるまで

かん水処理した後、農業用ポリエチレンフィルムで土壌表面を覆い、1週間以上放置する。

- ②地温 30～40℃の下でこれらを栄養分として土壌微生物が急激に増殖する(通常 20 日間、7月から8月の高温時には 10 日間)。
- ③土壌水分が圃場容水量から最大容水量に達していると、酸素の消費によって土壌は無酸素状態になり、還元状態に移行していく。この過程で有機酸が生成される。さらに微生物同士の競合が起こる。
- ④土壌中に生息する病原菌や線虫類に対し、無酸素状態、有機物から生成される有機酸、微生物による拮抗作用、太陽熱や発酵熱による高温などの複合的な要因によって防除効果が得られる。

この方法は、熱による方法と同様、これまでに、細菌、糸状菌、線虫、土壌害虫など広い範囲の土壌病害虫や雑草に対し防除効果が確認されている。欠点としては、10～20日間程度 30～40℃の地温が保持される必要があり、かつ、還元状態において少なからず臭気が発生することから、その利用は密封可能な施設地床栽培に限られている。フスマや米ぬかを用いる代わりに 1%程度の低濃度エタノールを用いて土壌還元消毒を行う方法が近年開発され、農業技術環境研究所より技術利用に関するマニュアルが公開されている。

<http://www.niaes.affrc.go.jp/techdoc/ethanol/index.html>

土壌還元消毒法は環境保全型農業の推進上極めて有効な方法と考えられ、今後露地栽培においても応用できる技術の開発が望まれる。

5.4 生物的防除

5.1 で記したように、日本において有害線虫防除に使用できる生物農薬は、ネコブセンチュウの天敵細菌 *Pasteuria penetrans* を利用したパストゥーリア・ペネトランス水和剤(パストゥーリア水和剤)、および線虫捕食菌 *Monacrosporium phymatophagum* を利用したモナクロスポリウム・フィトパガム剤(ネマヒトン)が登録されているのみである。

パストゥーリア・ペネトランス水和剤は、*P. penetrans* の胞子を 1g 当たり 1.0×10^9 個含んだものであり、サツマイモネコブセンチュウ、アレナリアネコブセンチュウ、ジャワネコブセンチュウに有効であるが、キタネコブセンチュウには寄生しない。他の農薬との併用、作物成育中の処理が可能である。ただし、クロルピクリン全面処理および熱による物理的防除との併用は避ける。

天敵微生物のため安全性が極めて高い反面、定着して効果が現れるまでに時間がかかる傾向がある。また、絶対寄生菌であるため、製造コストがかかり高価である。これらの理由から、有害線虫防除における生物農薬の割合は現在非常に小さい。しかしながら、有機農業のような、環境保護に重点を置いた持続型農業生産の重要性が高まる中で、天敵微生物の効果的な利用法における今後さらなる開発が必要であろう。

5.5 その他の注意事項

その他、線虫害を抑制する農作業上の基本的注意として、「線虫汚染作物の持ち込み・持ち出しをしない」「残渣・野良生えを放置しない」「圃場間を移動する場合は、農機具・長靴に付着した土壌をよく洗い落とす」が挙げられる。線虫自身に移動能力はほとんどない。したがって多くの場合、有害線虫を畑に運び込むのは人間の営みである。これらの事項を遵守することにより有害線虫の侵入を未然に防ぎ、また、汚染圃場の拡大を防止することが重要である。

5.6 有害線虫防除法の策定に関わる要因と防除法の選択

作物に有害線虫によると思われる被害が発生した場合、まず始めにそれが本当に線虫害であるかどうかを確かめる必要がある。作物の萎凋や葉の黄化は、植物病害あるいは微量元素欠乏や作物に不適な土壌での作付けによる生理障害に酷似しているからである。1で紹介した線虫分離法により線虫の分離を試み、ある程度高い密度で同一の有害線虫が検出された場合、その線虫が被害の原因になっている可能性が高いと判断する。

一般に、有害線虫の防除は作付前に行われるため、防除法の選定には、作付前線虫密度調査、および生息する種の同定が最も重要である（下図）。

作付前線虫密度

「低」：被害はほとんど発生しない、要防除水準以下（減収率 5%程度）の状態。予防的に粒剤タイプの殺線虫剤を使用するか、生物的防除法、対抗植物を利用して線虫密度が低い状態を維持する。無防除という選択肢もありうる。

「中」：減収率が 10%~30%程度となるような状態。線虫密度を低い状態に戻さなければならない。殺線虫剤の使用による防除が中心となるが、作付体系に組み込めるのであれば対抗植物の栽培や物理的防除を選択することが望ましい。

「高」：減収率が 30%程度以上、シストセンチュウでは 50%程度以上にもなる場合がある。感受性の高いウリ科、ナス科作物では作期の終わりには枯死し、全く収穫できなくなる恐れもある。殺線虫剤や物理的防除を用いても線虫密度が下がりきらない場合は、抵抗性品種を作付けするか、非寄主作物に転換を行う必要もある。

図中の線虫密度はあくまでおおまかな目安であり、作物と線虫種の関係、地中温度、作期の長さで変わりうる。シストセンチュウについては、作付前に 2 期幼虫が見られることはほとんどなく、幼虫密度よりも卵密度が重視されているため、シストセンチュウの発生が考えられる場合は卵密度を調査する必要がある。この場合、作付前の卵密度は「低：~10、中：10~100、高：100~/乾土 1g」を基準とする。

ウリ科やナス科作物、サツマイモやニンジンなどの根菜類は、初期密度が低い場合でも線虫被害が生じやすいので、常に密度が高い場合の防除法を選択せざるを得ない場合もある。

図中の線では示されていないが、農薬に頼らない防除法はどの線虫密度においても推奨される。農業経営上の支障がなければ、抵抗性品種や非寄主作物への転換が最も効果的である。

線虫種の同定

生物的防除、対抗植物、非寄主作物や抵抗性品種を選択するのに重要となる。一部の殺線虫剤（粒剤）では、線虫種による効果に差があるものも知られている。また、生息する種やレースを特定することにより、有害線虫の特性（寄主範囲、発育温度特性など）をあらかじめ知ることができ、作物の被害予測が可能となる。作付予定の作物が、生息する線虫種やレースの寄主でない場合は、防除を行う必要はない。

近年、環境保全型農業への意識が高まり、世界的にも毒性の高い農薬（燻蒸剤、有機リン剤）の人体への危険性が叫ばれている。環境に優しい、持続的な農業をおこなって行く上で、農薬への依存を少しでも減らしてゆく必要がある。各々の圃場の作付前線虫密度および生息する種に応じて適切に対処し、殺線虫剤の過剰使用を改めるよう心がける。また、より毒性の低い殺線虫剤を選択し、農薬以外による防除法を組み合わせることにより、より安全性の高い防除法を策定する。

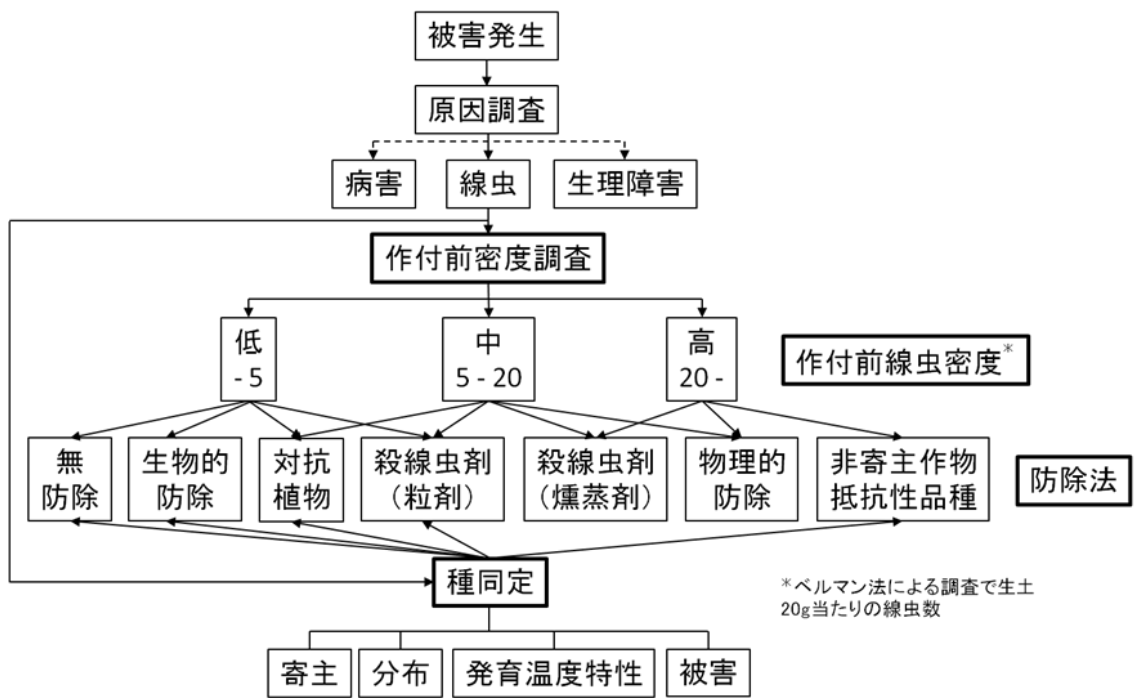


図 有害線虫防除法の策定に関わる要因と防除法の選択

資料 九州沖縄地域で検出される主要な有害線虫

種	学名	九州沖縄における 主な分布域	主要な寄生作物	備考
ネコブセンチュウ類				
アレナリアネコブセンチュウ 本州型 沖縄型	<i>Meloidogyne arenaria</i>	九州 沖縄県	ナス科、ウリ科野菜他多数 ナス科、ウリ科野菜他多数	ダイズ、サトイモ圃場で検出例多い
キタネコブセンチュウ	<i>M. hapla</i>	九州	ナス科、ウリ科野菜他多数	イチゴ、ジャガイモ圃場で検出例多い
サツマイモネコブセンチュウ	<i>M. incognita</i>	全域	ナス科、ウリ科野菜他多数	サツマイモに対して寄生性の異なる9レースが知られている
ジャワネコブセンチュウ	<i>M. javanica</i>	鹿児島県、沖縄県	ナス科、ウリ科野菜他多数	検出例は少ない
ナンヨウネコブセンチュウ	<i>M. microcephala</i>	宮崎県、沖縄県	ナス科、ウリ科野菜他多数	検出例は少ない
ネグサレセンチュウ類				
ミナミネグサレセンチュウ	<i>Pratylenchus coffeae</i>	全域	サツマイモ、サトイモ、ダイズ	寄生性の異なる2系統が知られている
クマモトネグサレセンチュウ	<i>P. kumamotoensis</i>	九州南部	キク	
チャネグサレセンチュウ	<i>P. loosi</i>	全域	チャ	バラ科果樹、カンキツ類、カキにも寄生する
キタネグサレセンチュウ	<i>P. penetrans</i>	九州(冷涼地域)	ダイコン、ゴボウ、ニンジン、キク	
ニセミナミネグサレセンチュウ	<i>P. pseudocoffeae</i>	九州南部	キク	検出例は少ない
クルミネグサレセンチュウ	<i>P. vulnus</i>	九州	イチゴ、バラ科果樹	カラタチに寄生する個体群の報告あり
モロシネグサレセンチュウ	<i>P. zeae</i>	全域	イネ科作物	実害は少ない
シストセンチュウ類				
ダイズシストセンチュウ	<i>Heterodera glycines</i>	九州	ダイズ、アズキ、インゲン	検出例は少ない
ジャガイモシストセンチュウ	<i>Globodera rostochiensis</i>	長崎県、熊本県	ジャガイモ、トマト、ナス	九州ではジャガイモ圃場のみで検出
ニセアフロセンチュウ	<i>Rotylenchulus reniformis</i>	全域(特に南部)	ナス科、ウリ科野菜他多数	サツマイモ圃場で検出例多い
ハセンチュウ類				
イネシシガレセンチュウ	<i>Aphelencooides besseyi</i>	九州	イネ、イチゴ	地上部に寄生する
イチゴセンチュウ	<i>A. fragariae</i>	大分県	イチゴ、各種花卉	地上部に寄生する
ハガレセンチュウ	<i>A. ritzemabosi</i>	九州(詳細不明)	キク、ユリ	地上部に寄生する

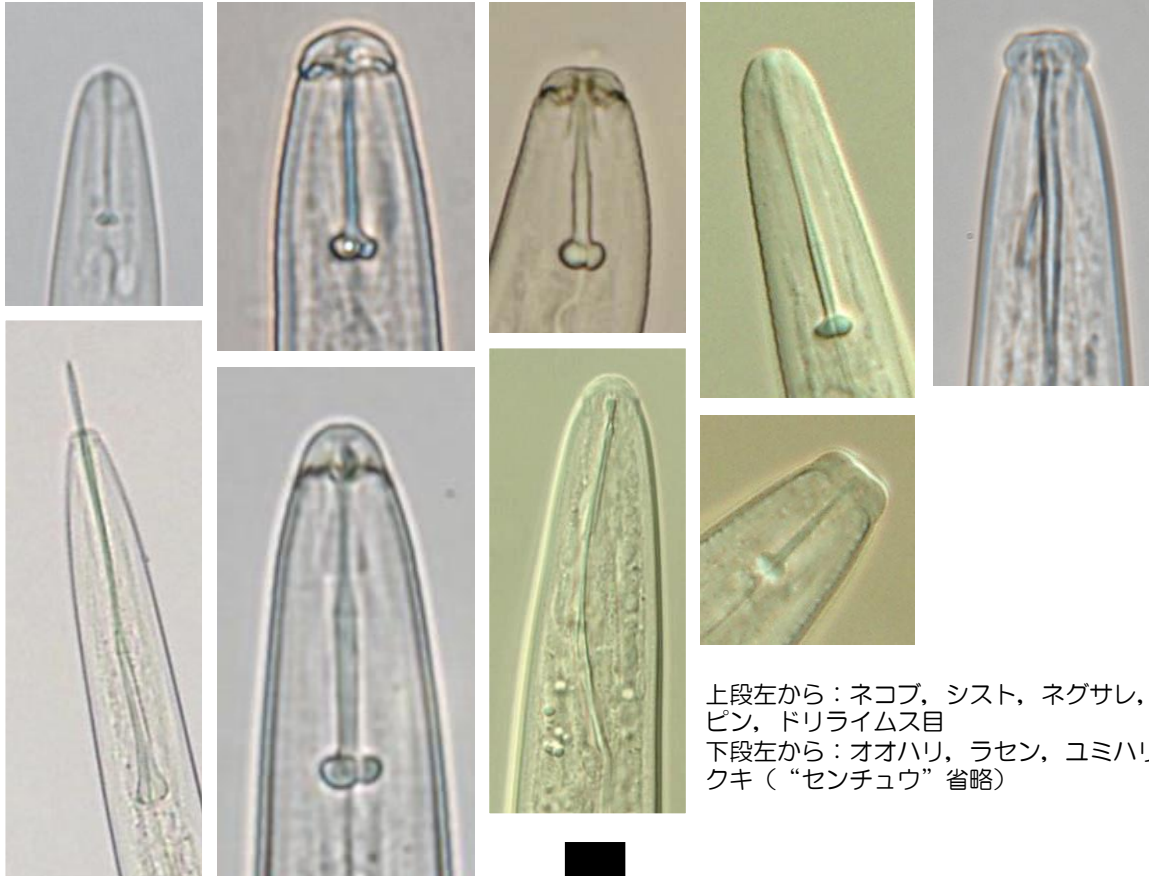
図版

- 図版 1: ①口針がある線虫とない線虫
- 図版 2: ②ネコブセンチュウ
- 図版 3: ③ネグサレセンチュウ
- 図版 4: ④シストセンチュウ
- 図版 5: ⑤クキセンチュウ、⑥ハセンチュウ、⑦ピンセンチュウ
- 図版 6: ⑧オオハリセンチュウ、ナガハリセンチュウ ⑨ユミハリセンチュウ
- 図版 7: ⑩ニセフクロセンチュウ
- 図版 8: ⑪ラセンセンチュウ、⑫イシユクセンチュウ
- 図版 9: ⑬ネセンチュウ、⑭ワセンチュウ
- 図版 10: ⑮口針を持つその他の線虫の例
- 図版 11: ⑮-2 口針を持つその他の線虫の例 (続き)
- 図版 12: ⑯口針を持たない線虫の例

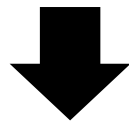
①口針がある線虫とない線虫

口針がある

重要種の多くは口針後端にこぶ状の節球を持つ



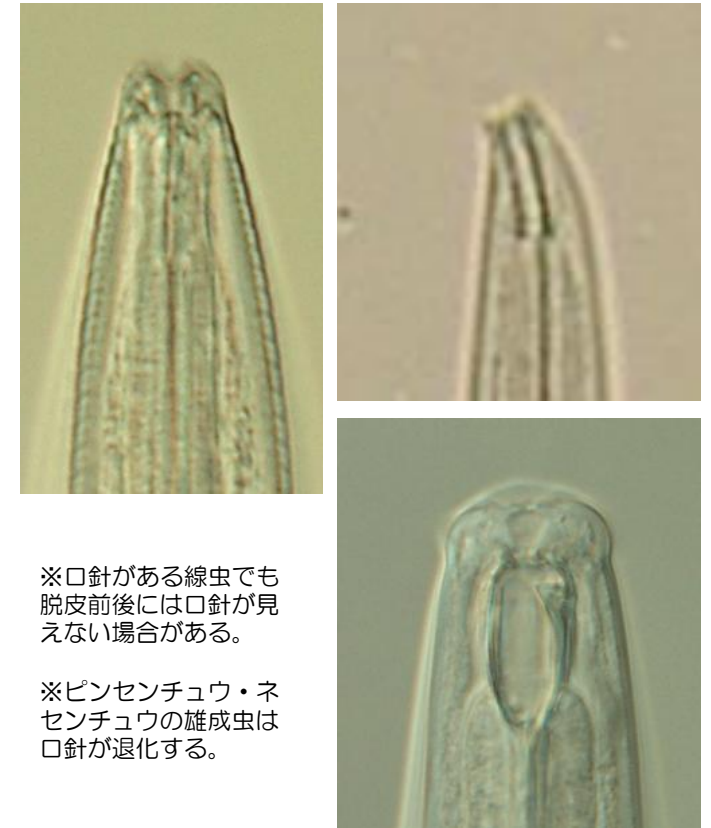
上段左から：ネコブ、シスト、ネグサレ、
ピン、ドリライムス目
下段左から：オオハリ、ラセン、ユミハリ、
クキ（“センチュウ”省略）



有害植物寄生性線虫の可能性がある
(植物寄生性線虫以外に、糸状菌食や捕食性線虫の一部も口針を持つ)

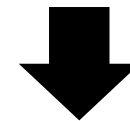
口針がない

咽頭は筒状や管状



※口針がある線虫でも
脱皮前後には口針が見
えない場合がある。

※ピンセンチュウ・ネ
センチュウの雄成虫は
口針が退化する。

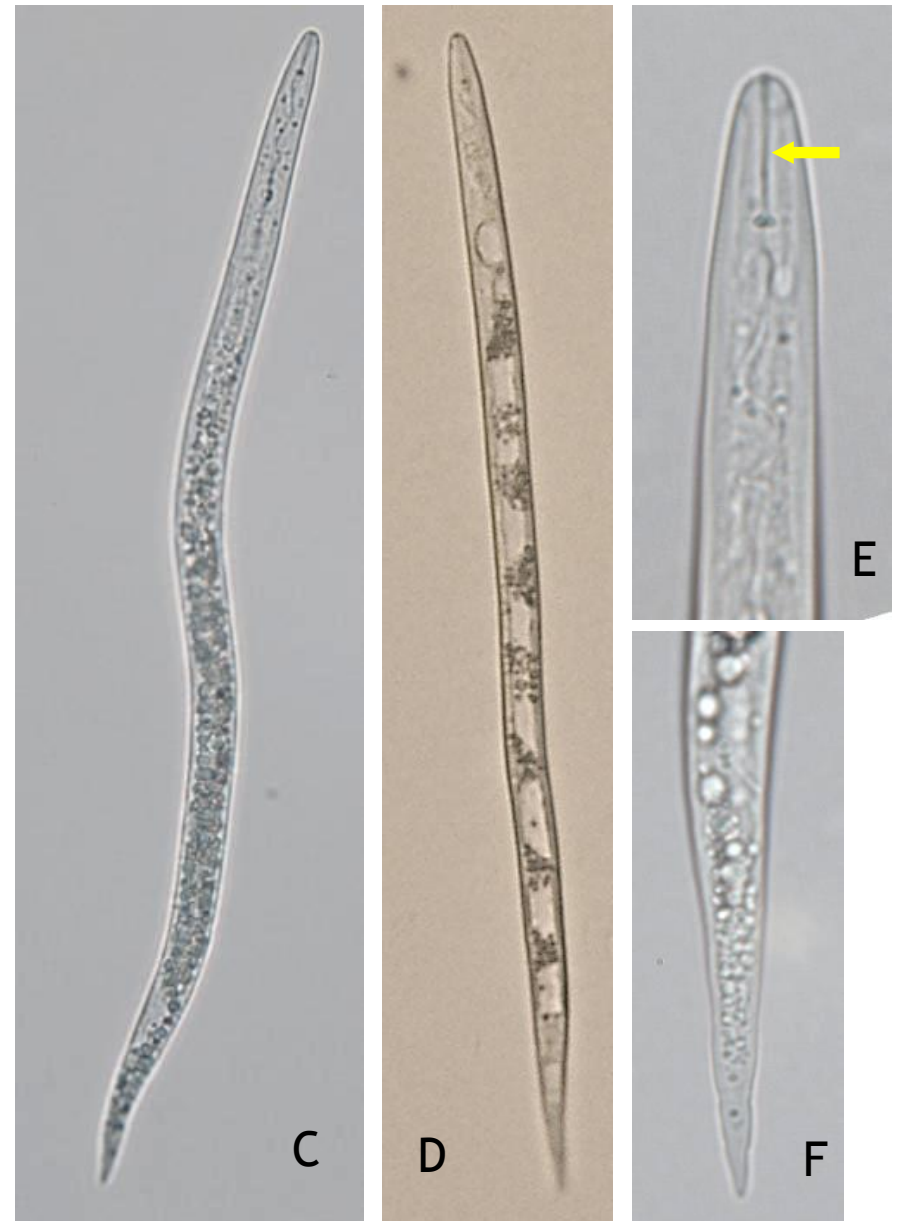
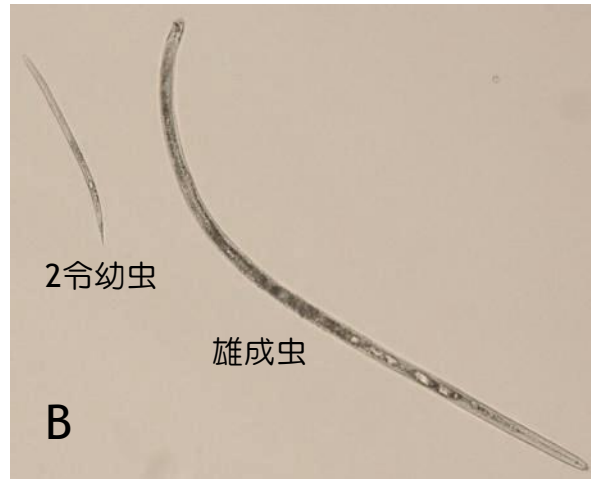


植物寄生性線虫ではない
(細菌食・捕食性の線虫)

②ネコブセンチュウ *Meloidogyne* 属

- 雌成虫は根のこぶ内で定住生活をし、こぶ上に卵嚢を生み出す
- 土壌中には2令幼虫のみが遊出し、根に侵入する*
- 2令幼虫の特徴
 - 体長：約0.4mm
 - 口針は細く、節球も小さい。マチ針のような外観
 - 頭端前縁は丸い
 - 尾端は細長く尖る
 - 消耗により脂肪球が消失すると縞模様に見える
 - 生殖器（陰門や交接刺：ネグサレセンチュウの項目参照）は無い

※2令幼虫に比べ非常に大型な雄成虫も時々出現する（下図）。しかし、主要ネコブセンチュウは単為生殖し、雄は生殖に無関係なため普通は考慮しない

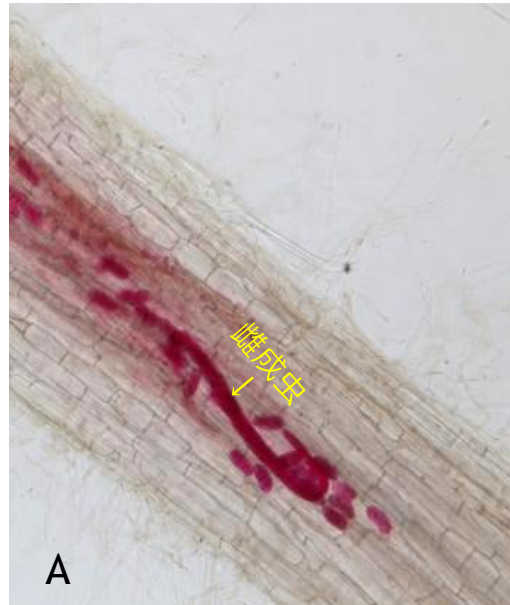


サツマイモネコブセンチュウ

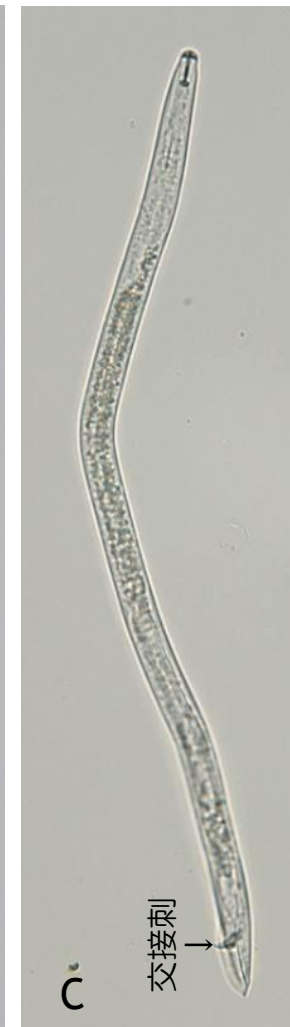
- A: トマト根上に形成された根こぶと卵嚢（雌成虫はこぶ内に埋もれている）
B: 2令幼虫と雄成虫 C: 2令幼虫 D: 2令幼虫（消耗時）
E: 2令幼虫の頭部（矢印は口針） F: 2令幼虫の尾部

③ネグサレセンチュウ *Pratylenchus* 属

- 土壌には2令幼虫～雌雄成虫が混在し、土壌一根中を自由に出入する
- 雌雄が出現する種（キタネグサレ、ミナミネグサレ、クルマネグサレなど）と、雌しか出現しない種（ムギネグサレ、モロコシネグサレなど）がいる
- 体長： 令期によって異なる約0.2-0.7mm
- 口針は太短く、低倍率でも目立つ
- 頭部前縁は平たくつぶされた感じで、唇部骨格により黒っぽく見える
- 雌成虫は体の後ろ70-80%の位置に陰門（＝生殖口、裂け目のように見える）を持つ、雄成虫は尾端に交接刺を持つ
- 幼虫、雌成虫の尾端は丸～やや尖る
- ニセフクロセンチュウやラセンセンチュウと似ているので注意

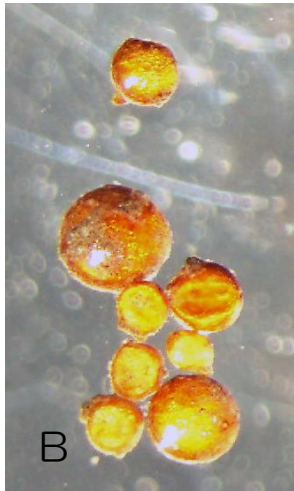


クマモトネグサレセンチュウ
A: キク根中に産卵する雌成虫（赤く染色している）
B: 雌成虫 C: 雄成虫 D: 2令幼虫
E: 雌尾部 F: 雌頭部



④シストセンチュウ Heteroderinae亜科

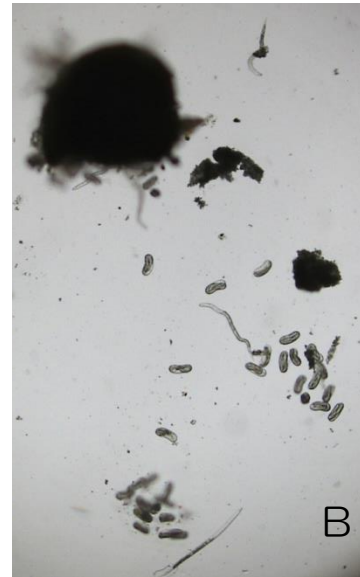
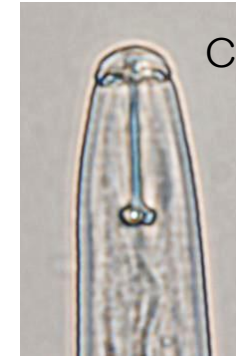
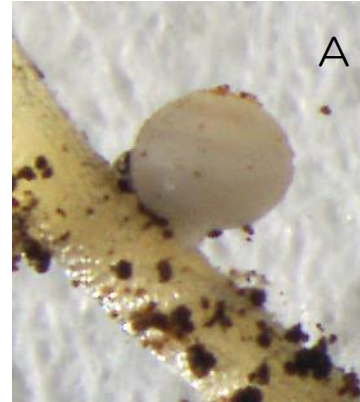
- 雌成虫は根上に露出する。成熟すると卵を内包したまま表皮がなめし皮化し、球形・洋ナシ型・レモン形など（属によって異なる）のシストとなって脱落する
- 土壤中に遊出するのは2令幼虫と雄成虫（通常は幼虫ではなくシストを検出する）
- 2令幼虫の特徴
 - 体長：約0.4-0.5mm
 - 生殖器（陰門や交接刺：ネグサレセンチュウの項目参照）は無い
 - 口針は太くはっきりと見える
 - 頭端前縁は丸く、くびれあり
 - 尾端は細長く尖る



ジャガイモシストセンチュウ

A: 土壤中に遊出した2令幼虫

B、C: シスト。いずれも根から脱落して土壤中で数年経過した古いシスト。根から脱落前のジャガイモシストセンチュウは一時期濃黄色となることからゴールデン・ネマトーダと呼ばれる。



タケシストセンチュウ

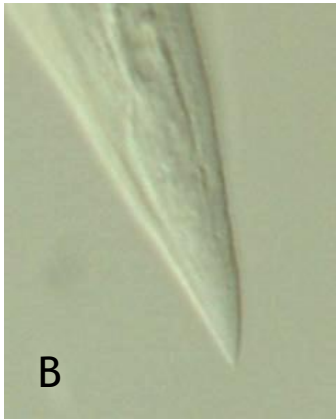
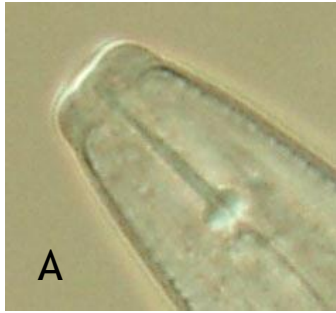
A: 竹の根上の雌成虫

B: 雌を解剖したところ。多量の卵を内包している（左上の黒い影が雌。一部幼虫が孵化している）

C: 頭部 D: 尾部 E: 2令幼虫

⑤クキセンチュウ *Ditylenchus*属

- 問題となるナミクキセンチュウ，イモグサレセンチュウは植物の地下茎，地上茎に寄生する。属の多くの種は菌食性
- 2令幼虫～雌雄雌成虫が混在
- 細長く，上記2種では成虫が1mm以上になる
- 口針は小さく目立たない



ナミクキセンチュウ
A: 頭部 B: 尾部 C: 幼虫



⑥ハセンチュウ *Aphelenchooides*属

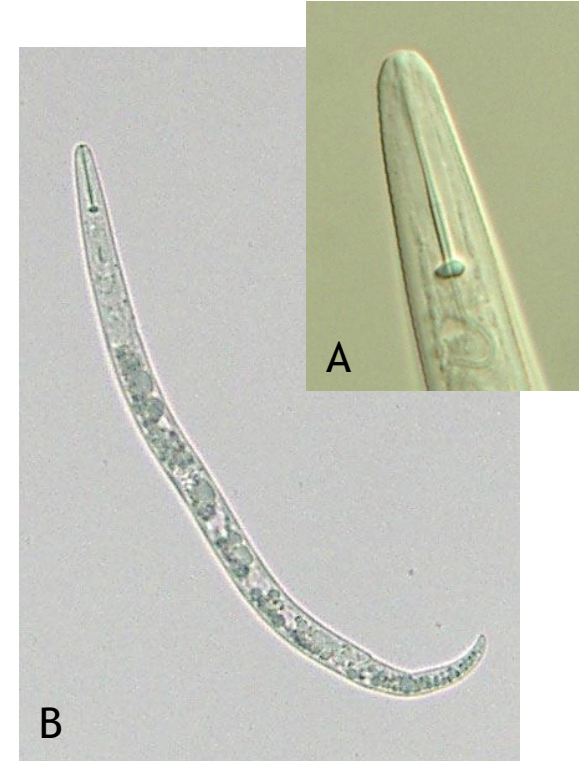
- 問題となるのはハガレセンチュウ，イチゴセンチュウ，イネシンガレセンチュウで植物の地上部に寄生する
- 2令幼虫～雌雄雌成虫が混在
- 成虫0.5-1.2mm程度（上記3種）
- 頭部前端は胴体からややくびれてドーム型
- 口針は華奢で目立たない



イネシンガレセンチュウ
A: 雄成虫
B: 頭部

⑦ピンセンチュウ Paratylenchidae科

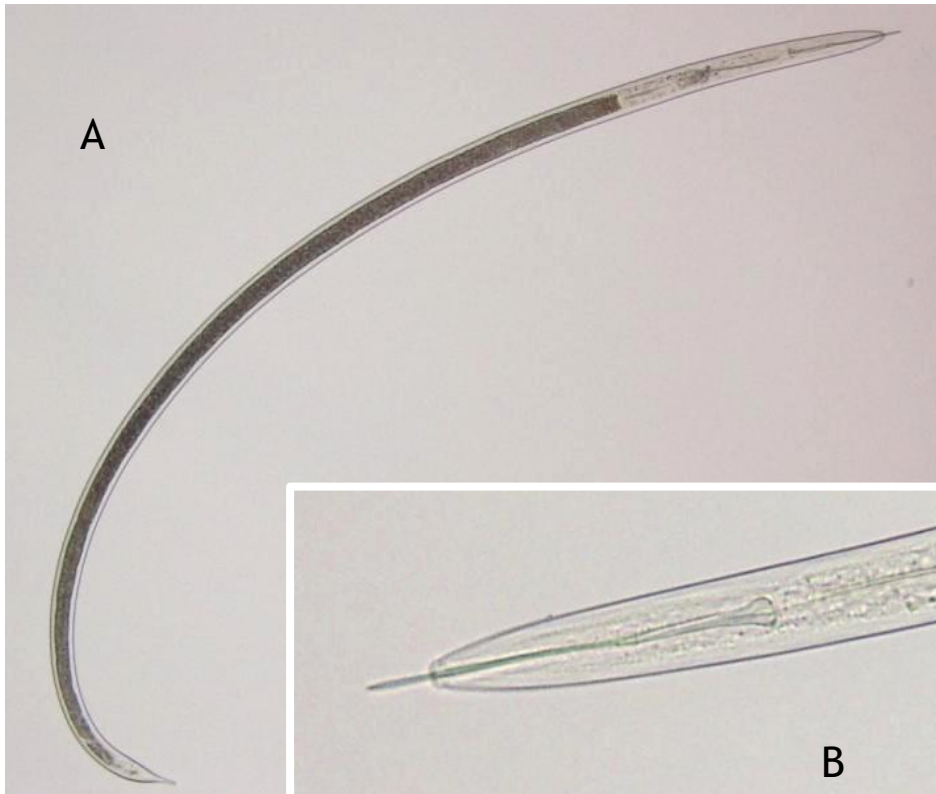
- 耕地土壌から普通に検出され，時としてかなりの高密度となるが，日本で問題となったのはハッカのチャピンセンチュウのみ
- 雌成虫は普通0.5mm以下で，口針が体に対して大きい。一部の種では肥大する
- 雄成虫は口針が退化する



ピンセンチュウの一種
A: 頭部 B: 雌成虫

⑧オオハリセンチュウ *Xyphinema*属,
ナガハリセンチュウ *Longidorus*属

- 体長が長く（成虫：オオハリセンチュウ1-6mm，ナガハリセンチュウ2-12mm）、口針も非常に長い
- 主に木本植物から検出され，畑地では稀
- 植物ウイルスを伝搬する種がいる
- 根の先端部にゴール状の肥大や褐色の斑紋が生じる
- ベルマン法での分離効率は低い



オオハリセンチュウの一種 A: 幼虫 B: 頭部 (幼虫)

⑨ユミハリセンチュウ
Trichodoridae科

- 成虫0.5-0.9mm，ずんぐりした体形を持つ
- 口針が弓状の特徴的な形をしているため，識別は容易
- 畑地では稀
- 植物ウイルスを伝搬する種がいる
- ナガイモに黒点病を引き起こす

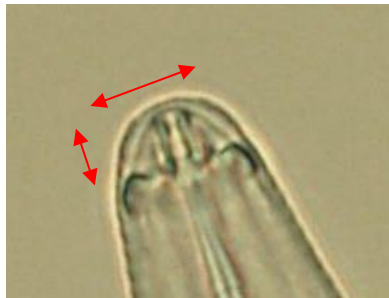


ユミハリセンチュウの一種
A: 頭部 (雄成虫) B: 雄成虫

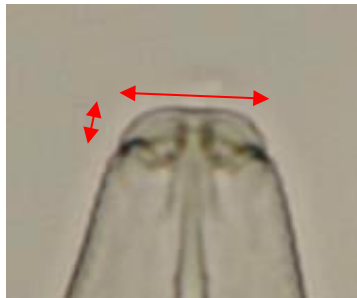
⑩ニセフクロセンチュウ

Rotylenchulus reniformis

- 畑地に普通に見られる
- 海外ではワタ、ダイズ、サツマイモなどの害虫として知られるが、日本では問題となっていない
- 体長：若雌0.4mm程度。土壌中には2令幼虫～若雌までが混在するが大きさはあまり変わらない
- 若雌は根に侵入，定住し，袋状に発育・成熟してネコブセンチュウに似た卵嚢を形成する（こぶは形成しない）
- 雌雄が出現する型（沖縄に多い）と，雌のみの型（九州以北に多い）が存在する
- 口針は太くしっかりしている
- 頭端前縁はドーム状、ネグサレより丸い外観
- 若雌では口針～食道球間の食道がクランク型に曲がり，目立つことが多い
- 若雌は体長の70%の位置に陰門
- 尾部は狭く，尾端に向かって先細になる

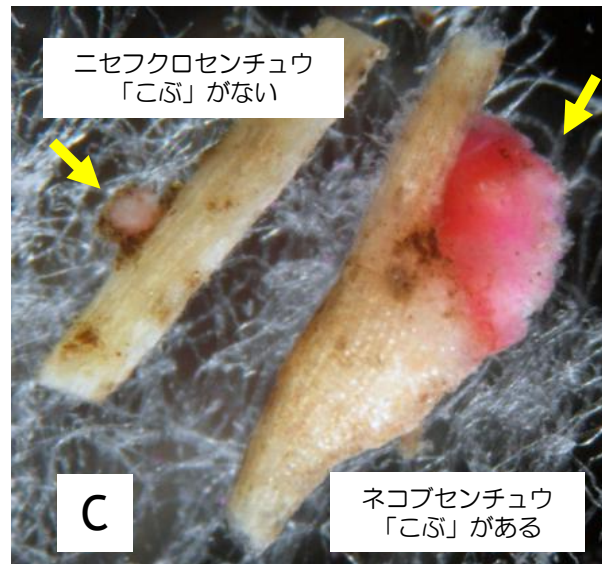
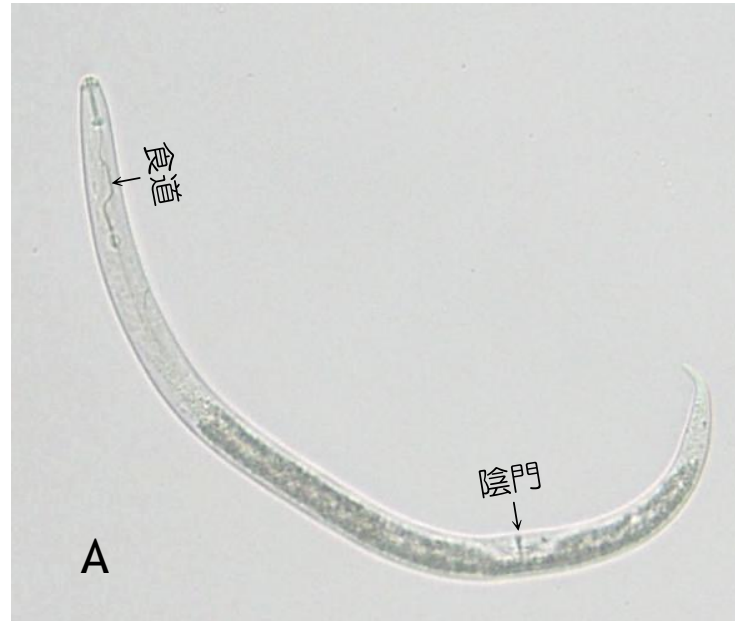


ニセフクロセンチュウ
比較的丸いドーム型



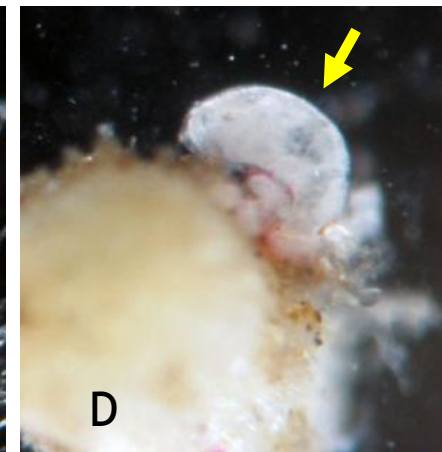
ネグサレセンチュウ
扁平

ニセフクロ（若雌）とネグサレ（雌） 頭部前縁の比較



C

ネコブセンチュウ
「こぶ」がある



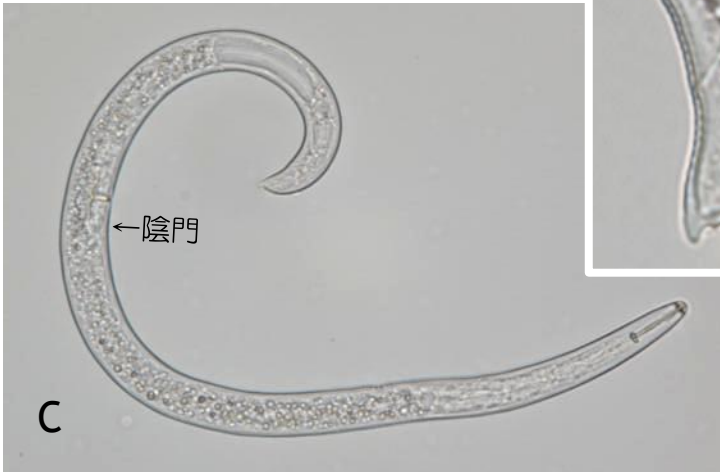
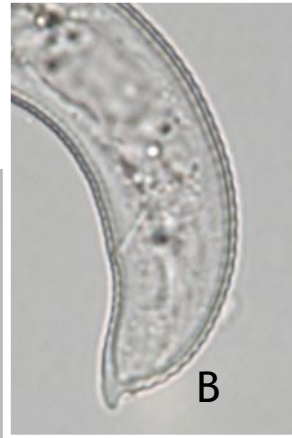
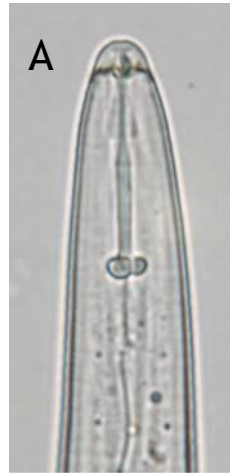
D

A, B: 若雌
C: サツマイモに形成されたニセフクロセンチュウとネコブセンチュウの卵嚢（卵嚢は赤く染色している）
D: 卵嚢を除去して現れた雌成虫（頭端は根に突き刺っている）

⑪ラセンセンチュウ

*Helicotylenchus*属, *Rotylenchus*属, *Scutellonema*属

- 畑地に普通に見られる
- 通常はほとんど問題とならないが、サトウキビ減収の要因となることが報告されている
- 土壌には2令幼虫～成虫が存在
- 雌成虫は約0.4-1.0mm
- 雌のみ出現する種と雌雄が出現する種がいる
- 口針は太くはっきりとし、比較的長い
- 頭端は丸く、唇部骨格の前に大きく発達
- 雌尾端は包丁型～丸型
- 熱殺すると体がC型～ラセン型に巻く

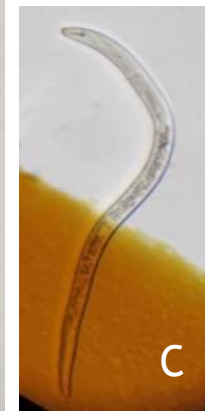


ラセンセンチュウの一種 A: 頭部 B: 尾部 C: 雌成虫

⑫イシユクセンチュウ

Telotylenchidae科

- 畑地にみられる。サトウキビでは検出頻度が高い
- 日本で問題となるのはナミイシユクセンチュウ, リュウキュウイシユクセンチュウで、それぞれツツジ, サトウキビを加害する
- 土壌には2令幼虫～成虫が存在し、上記2種の雌成虫は約0.5-0.7mm
- 雌尾端はナミイシユクでは尖り、リュウキュウイシユクでは広がる



リュウキュウ
イシユクセンチュウ

A: 雌成虫
B: 雄成虫
C: 幼虫

⑬ネセンチュウ Tylenchulidae科

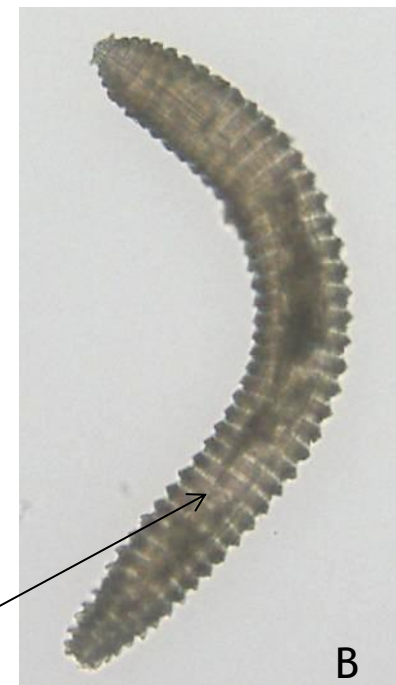
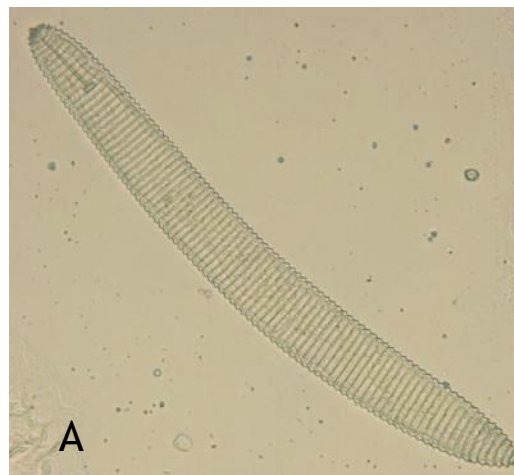
- 問題となるのはミカンネセンチュウで、世界的にカンキツの害虫として知られる。日本でも幼苗の生育不良の原因となるが、成木では被害はないとされる。
- 雌成虫は約0.3-0.5mm。根の表面に口針を刺して定着、肥大する。



ネセンチュウの一種
A: キンモクセイの根上で肥大したネセンチュウ
B: 根に寄生しているがまだ肥大していない幼虫
C: 2令幼虫

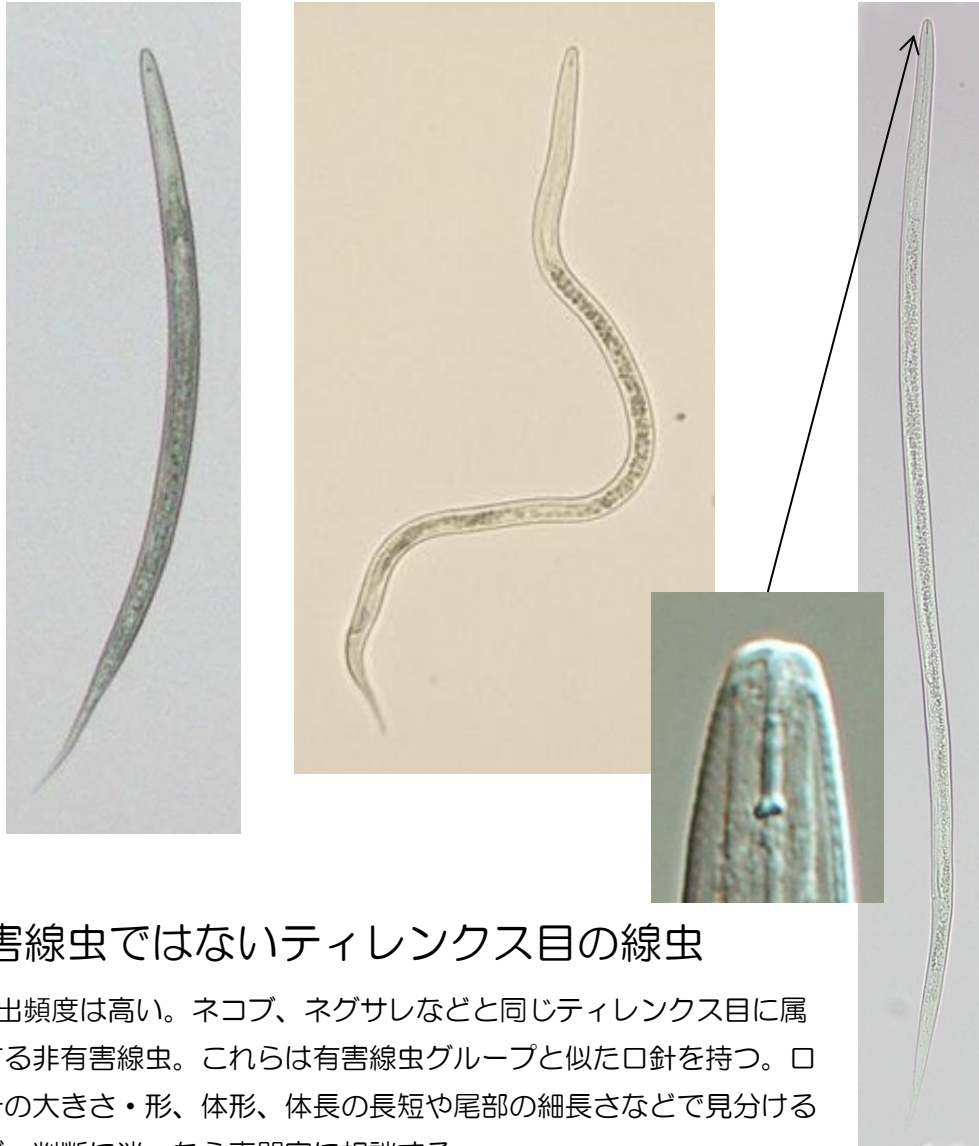
⑭ワセンチュウ Cricomematidae科

- 太い体形。体環が目立ち、体が多数のワからなるように見える。一部では体環に装飾を持つ
- 国内で作物被害についての報告はほとんどない
- ベルマン法での検出率は低い
- 体長や形態は多様



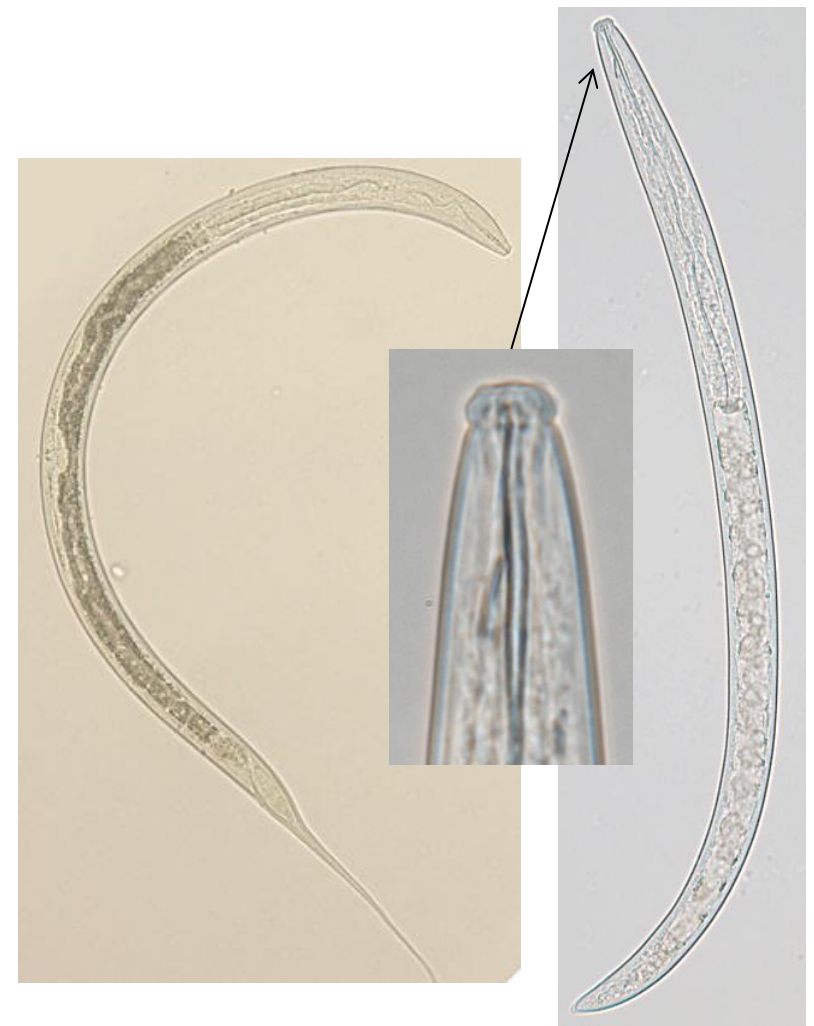
ワセンチュウ
A: ワセンチュウの一種
B: ワセンチュウの一種 (Aとは別種)
C: Bのワセンチュウの体環拡大図。このように、ワセンチュウは体環に突起を持つことがある

⑮口針を持つその他の線虫の例



有害線虫ではないティレンクス目の線虫

- 検出頻度は高い。ネコブ、ネグサシなどと同じティレンクス目に属する非有害線虫。これらは有害線虫グループと似た口針を持つ。口針の大きさ・形、体形、体長の長短や尾部の細長さなどで見分けるが、判断に迷ったら専門家に相談する
- これらは植物寄生性あるいは菌食性であると考えられるが、有害線虫ではないためほとんど未調査で食性も不明の場合が多い



ドリライムス目の線虫

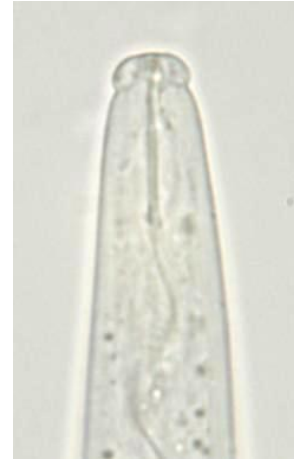
- 検出頻度は高い
- オオハリ、ナガハリセンチュウと同じグループだが、口針はより短く、先の尖った中空の棒のような形をしている。口針後端に節球（膨らみ）がないので重要有害線虫と見分けられる
- 菌食、捕食、植物寄生性など多様な食性を持つグループだが、ほとんどの種では食性不明

⑮-2 口針を持つその他の線虫の例（続き）



アフエレンクス目

- 検出頻度は高い
- ネグサレセンチュウに似る場合もあるが、口針は細い
- ハセンチュウやマツノザイセンチュウを含むグループだが、ほとんどの種は菌食性で無害である



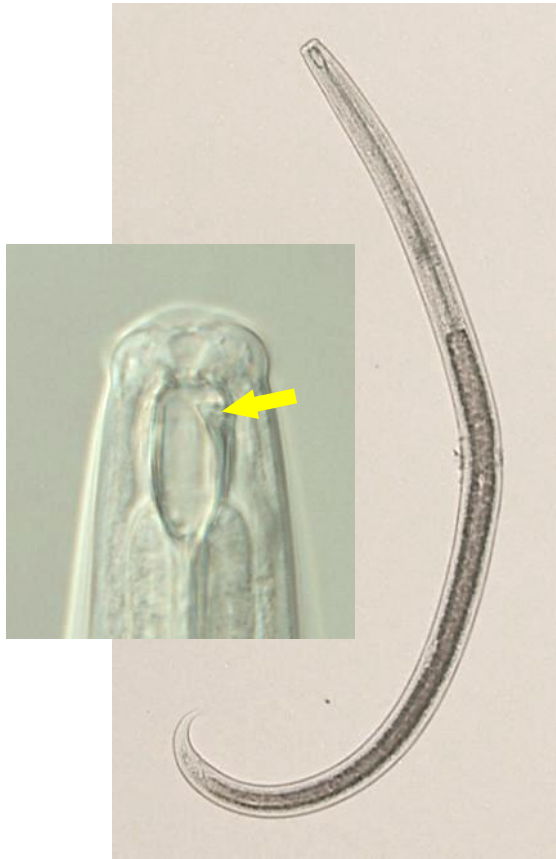
マツノザイセンチュウ
Bursaphelenchus xylophilus

- マツノマダラカミキリにより媒介され、松枯れを引き起こす重要害虫であるが、畑地では問題とならない。参考資料として掲載した

マツノザイセンチュウ（雌）

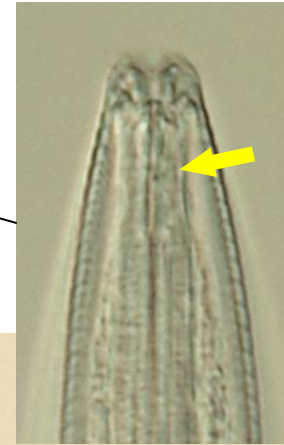


⑩口針を持たない線虫の例



捕食性の線虫

- 咽頭（口）が円筒形で、内壁に歯（矢印）を持つ
- 他の線虫を捕食する



細菌性の線虫

- 咽頭（口）は筒状～管状になっている
- 大きさ、形は多様
- 普通は最も個体数が多い

有害線虫総合防除技術マニュアル

2013年（平成25年）3月 発行

著者/発行者：岩堀英晶・上杉謙太

発 行 所：独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構

九州沖縄農業研究センター

〒861-1192 熊本県合志市須屋 2421

Tel:096-242-1150（代） Fax:096-249-1002

© 岩堀英晶・上杉謙太 2013 〈無断複写・転載を禁ず〉