

対抗植物、天敵微生物等を利用した線虫防除技術

虫害防除部 線虫害研究室 水久保隆之

I. 線虫の生態

線虫は動物界で独立した線形動物門を構成する大きなグループである。あまり知られていないが、地球上の多細胞動物の中で最大の種数をもつと推定されている。その大半は海棲種であるが、地上にも莫大な種数が棲息している。土壤中に棲息する細菌食、糸状菌食の線虫類は物質循環に寄与している。また、いわゆる「寄生虫」の大半は線虫であり、軟体動物、節足動物、脊椎動物から多くの種が知られている。植物寄生性線虫は針の口（口針）を進化させた糸状菌食線虫から派生したと考えられる。農作物の有害線虫はネコブセンチュウ（*Meloidogyne* 属）、ネグサレセンチュウ（*Pratylenchus* 属）およびシストセンチュウ（*Heterodera* 属と *Globodera* 属）に代表される。世界の線虫害の 80% 以上はこれら 3 群によって引き起こされている。ネコブセンチュウとシストセンチュウの幼虫は、根に侵入した後中心柱に口針を突き立てる。中心柱の細胞は線虫が送る刺激物質によって線虫に栄養を輸送するように改変される。これを哺育細胞（nurse cell:ネコブセンチュウでは巨大細胞（図2）、シストセンチュウでは多核質細胞）とよぶ。これらの線虫は定着性の生存様式をもち、哺育細胞なしには生存できない。なお、ネコブセンチュウが誘導するゴール（虫こぶ）は巨大細胞の周辺に増生した植物組織であって、巨大細胞そのものではない。シストセンチュウはゴールを作らない。ネコブセンチュウとシストセンチュウの雌は卵巣が発達してほぼ球形に成熟する。ネコブセンチュウの雌はゼラチン状の物質（卵嚢）を体外に分泌し、その中に数百個の卵を産む。一方、シストセンチュウの雌はほとんどの卵を体内に保持し、その体皮は硬い鞘に変化する（シスト）。シスト内の卵は乾燥や低温などの極限環境から保護されており、寄主植物の根から溶け出した刺激物質を感知するとふ化する。卵は寄主植物に出会うまで5年以上でも土壤中で生存できる。ネグサレセンチュウは成虫も幼虫と同じくウナギ状の形態をしており、運動性があるので作物の根の組織を出入りしながら摂食する。このとき、土壌病原菌や腐生性の菌が二次的に感染することによって被害は著しく増幅される。シストセンチュウはマメ科（ダイズシストセンチュウ）、ナス科（ジャガイモシストセンチュウ）等に寄主が限定される（狭食性）が、ネコブセンチュウやネグサレセンチュウは一般に広範な科の植物の数百種に寄生できる（広食性）。

II. 線虫対抗植物

対抗植物（Feindpflanzen、antagonistic plant）という用語はもともと根の内外で有害線虫（センチュウ）に直接作用し、これを殺す物質をもった植物に使われていた。しかし、英語圏ではその根の機能が土壤中の有害線虫を減らすのに役立つ栽培植物群を **nematode suppressive crops**（線虫抑制作物群）等とよんで、直接の殺線虫作用物質だけでなく、どのような作用であれ有害線虫を減らす効果をもつ植物を含めている。近年は **antagonistic plant**（対抗植物）という用語はほとんど用いられなくなった。現代の日本で植物防疫関係者が使う「対抗植物」は英語圏の線虫抑制作物とほぼ同じ意味である。対抗植物と呼ばれるものには家畜飼料、土壌被覆、緑肥、景観などの用途で開発された非食用作物が多いが、ここでは食用作物、工芸作物も含めて広い意味でこの用語を用いることにする。

○ 対抗植物とその標的

対抗植物の多くはイネ科、マメ科、キク科の植物である（表1）。前述した3つの有害線虫グループには複数の有害種が含まれており、種ごとに対抗植物の効果が異なる。クロタラリア・スペクタビリスのように標的にできる有害線虫種の範囲が広いものもあるが、サンヘンブのようにキタネグサレセンチュウを増やす植物もある。さらに、同じ植物種の対抗植物にも様々な品種があり、品種間に有害線虫を減少させる能力の大きな相違がある（表1）。

表1 利用可能な対抗植物と適用対象有害線虫

植物名	学名	対象線虫種						代表品種(商品)名
		Mi	Ma	Mh	Pp	Pc	Hg	
イネ科								
ギニアグラス	<i>Panicum maximum</i>	○	○	○	○			ナツカゼ、ソイルクリーン
野生エンバク	<i>Avena strigosa</i>					○		ヘイオーツ
野生エンバク	<i>Avena sterilis</i>	×				○		ネグサレタイジ
ソルゴー	<i>Sorghum vulgare</i>	○	○	○	△		×	つち太郎、スタックス
マメ科								
サンヘンブ	<i>Crotalaria juncea</i>	○	○	○	×		○	ネマコロリ
クロタラリア・スペクタビリス	<i>Crotalaria spectabilis</i>	○	○	○	○	○	○	ネマキング
クロタラリア・ブレビフロラ	<i>Crotalaria breviflora</i>	○				○		ネコブキラーⅡ
ハブソウ	<i>Cassia torosa</i>	△		○	○			ハブエース
アカクローバー	<i>Trifolium pratense</i>	×	×	×	×		○	はるかぜ
クリムソンクローバー	<i>Trifolium incarnatum</i>					×	○	くれない
キク科								
アフリカンマリーゴールド	<i>Tagetes erecta</i>	○	○	○	○			アフリカントール
フレンチマリーゴールド	<i>Tagetes patula</i>	○	○	○	○	○		プチイエロー
メキシカンマリーゴールド	<i>Tagetes minuta</i>	○	○	○				

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、Mh-キタネコブセンチュウ

Pp-キタネグサレセンチュウ、Pc-ミナミネグサレセンチュウ、Hg-ダイズシストセンチュウ

○-密度抑制効果がある、×-効果がない・線虫が増える、空欄-寄生しない・試験例がない

○ 利用法

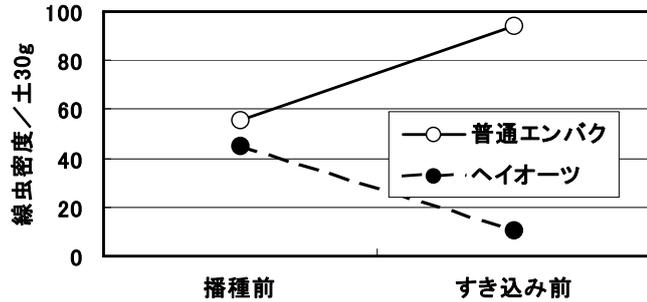
対抗植物の草種選定にあたっては、圃場にいる線虫の種の同定と前作の線虫被害の程度（根こぶ指数等）を見極めなければならない。対抗植物にはそれぞれ生育に適した気候帯があり、クロタラリアなどは寒地では育たないから、気候帯に応じた草種選定も必要である。前作の被害が著しいときには、播種前の土壌消毒剤処理やすき込み時に石灰窒素併用処理などを行うことを推奨する。

対抗植物の播種時期は栽培期間とすき込み時期、後作との間隔を考えて決める。寄主範囲が広いネコブセンチュウやネグサレセンチュウは多くの雑草に寄生して増殖するから、雑草の放置は対抗植物の線虫抑制効果を大きく損ねる。雑草の発生を招く要因は播種むらと発芽むらであるから、播種を均一にし、覆土と鎮圧により発芽を揃える。栽培中の除草管理も大変重要である。線虫抑制効果は栽培期間が長いほど優れるので、通常80～90日の栽培期間をとることが望ましい。また、線虫の活動が活発な6～10月に栽培すると線虫防除効果が高い。春夏作ではイネ科植物の場合は雄穂の出穂期、マメ科植物の場合は開花期がすき込みの目安になる。未熟有機物が残ると土壌害虫の発生や後作物への生理障害が現われやすいため、普通はすき込み後の分解期間を30～45日程度とるとよい。しかし、茎葉が柔らかいヘイオーツは速く腐熟するため、すき込み後20日程度で作物を播種できる。

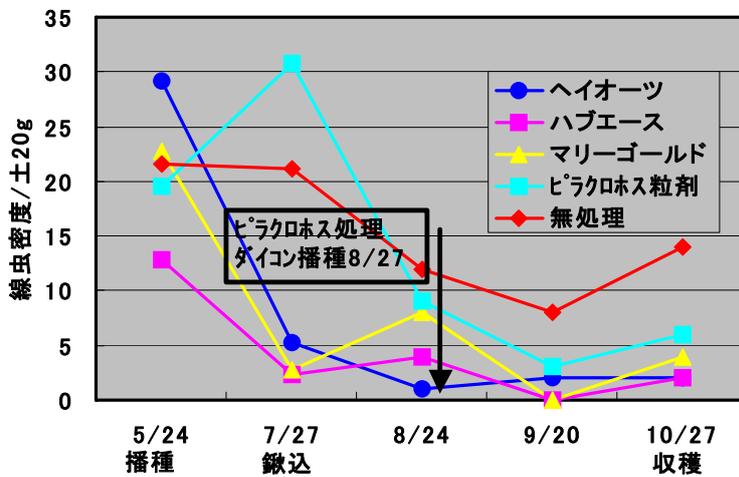
○ 事例1

1. ヘイオーツの植物としての性質と線虫に対する効果

ヘイオーツはエンバク的一种である。エンバクの中ではヘイオーツだけにネグサレセンチュウ密度を減らす効果があり、これ以外のエンバクはネグサレセンチュウを増やすので、草種を良く調べて導入するようにしたい。ヘイオーツはネグサレセンチュウの密度を大幅に減らす、同じくネグサレセンチュウの防除に用いられるマリーゴールドのよう



2種エンバク作付後のキタネグサレセンチュウ密度変化の比較



ヘイオーツのキタネグサレセンチュウ密度抑制効果
広島県農業技術センター, 1995

な完全な防除効果がない。そのため、ネグサレセンチュウが高密度のときは、後作のダイコンに若干の線虫害が発生する。また、マリーゴールドにみられるような土壌深層の線虫防除効果や数年に及ぶ残効も認められていない。しかし、ヘイオーツには市販のダイコン用播種機を用いて容易に播種でき、発芽・成育が雑草よりも早くて雑草を圧倒するため除草作業が省略できるという作業上

ヘイオーツの播種と後作ダイコンの線虫害防除効果

大分県農業技術センター(1995)

処理	線虫密度/±20g(ベルマン法)					ダイコン被害度	
	処理前	薬剤後/ヘイオーツ播種前	ヘイオーツ鎌込み前	ダイコン播種時	ダイコン収穫時	ダイコン被害度	無処理比
ヘイオーツ10kg/10a	262	208	23	8	16	25	44
堆肥(8t)+ヘイオーツ(10kg/10a)	346	200	21	11	22	39	68
ネマトリン+ヘイオーツ(10kg/10a)	444	105	18	7	24	23	39
ネマトリン	353	83	160	33	102	61	106
無処理	300	225	113	31	92	58	100
備考(処理日)	3/20	5/30	8/12	9/1	11/11		
	ネマトリン処理5月30日; 播種6月7日						

の利点があり、これが普及の主な原動力と言える。

ヘイオーツの線虫抑制効果はあまり強くないとはいえ、殺線虫剤のネマトリンよりも残効があり、併用するとダイコンの被害程度を最も低く抑えた。また、ヘイオーツの残効はダイコン直前に施用した殺線虫剤のピラクラホス(商品名:ボルテージ)のと同様かやや優れていた。

2. 線虫防除に適切な播種量は？

大分県で行われた試験では、ヘイオーツの 10kg/10a 播種量は 5kg/10a よりも線虫防除効果は優れたが、後作ダイコンの被害の抑制効果では大差がないという結果であった。また、20kg/10a の播種量は 10kg/10a 播種と比べ、栽培すき込み後の線虫防除効果も後作ダイコンの収穫時の線虫密度と被害程度は抑制でも差異を示していない。したがって、線虫対策としてのヘイオーツ播種量は 10kg/10a で十分と考えられる。

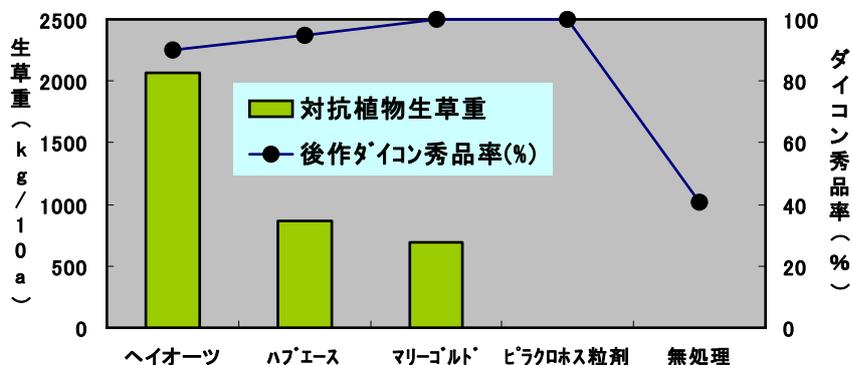
ヘイオーツの播種量と後作ダイコンの線虫害防除効果の関係

大分県農業技術センター(1995)

処 理		ヘイオーツ播種時	ダイコン播種時	ダイコン収穫時	ダイコン被害度	無処理比
1993	ヘイオーツ5kg/10a	27.8	29.7	51.2	62.9	72.9
秋播き試験	ヘイオーツ10kg/10a	43.2	27.3	18.8	66.0	76.5
	無処理	45.0	55.0	108.2	86.3	100.0
1994	ヘイオーツ10kg/10a	123.8	313.7	78.7	86.3	90.8
秋播き試験	ヘイオーツ20kg/10a	53.0	135.0	83.0	85.0	89.5
	無処理	148.5	291.8	89.7	95.0	100.0

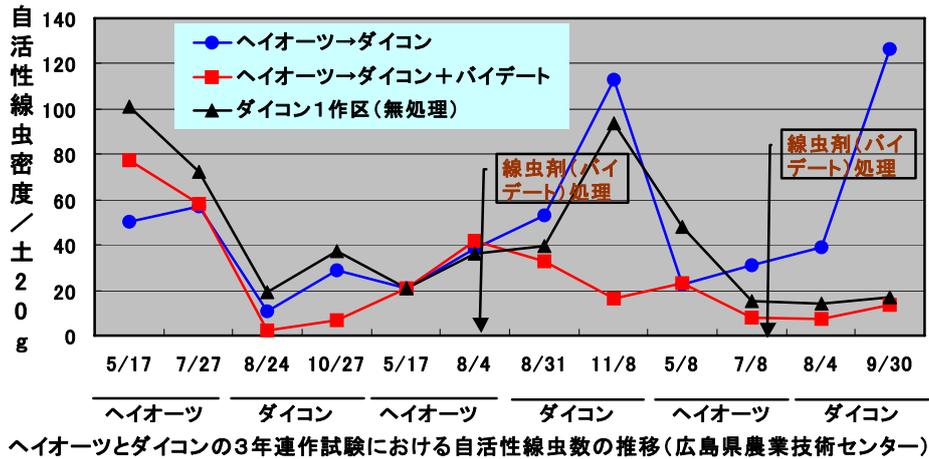
3. 緑肥としての効果

キタネグサレセンチュウの防除効果がある対抗植物の中で、ヘイオーツはハブソウ（品種名：ハブエース）やマリーゴールドと比べて2倍以上の生草重があり、明らかに多収である。また、茎葉が柔らかいためすき込みやすく、腐熟も速く、すき込み後 20 日程度でダイコンの播種ができる。これは、マリーゴールドの腐熟が遅く、その後作のダイコンに岐根が生じやすいという欠点に比べて、大きな利点となっている。



ヘイオーツの収量/10aと後作ダイコンの秀品率(広島県農業技術センター1995)

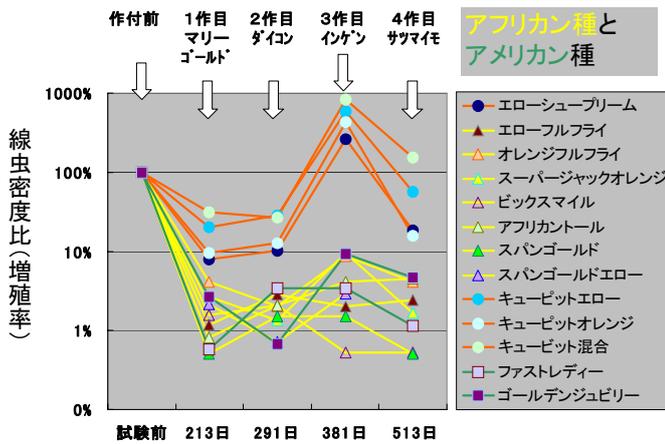
土壌中には作物に寄生する有害線虫の他に、カビやバクテリアを食物にしている自活性線虫がいる。土壌中の有機物の量とカビやバクテリアの密度は相関しているため、この自活性線虫の密度は土壌の肥沃さの指標と考えることができる。ヘイオーツとダイコンを3年間輪作すると3年目にはヘイオーツを入れた処理区の自活性線虫の密度はダイコンだけを単作した無処理区より高くなり、ヘイオーツの毎年すき込みにより土壌の肥沃度が上昇していることが示唆された。



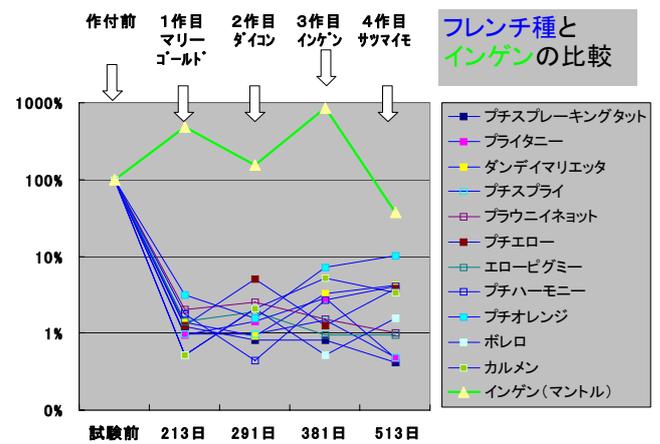
○ 事例2

1. どんなマリーゴールドが有効か(作用機作と線虫に対する防除効果の品種間差異)

マリーゴールドはキク科に属す植物で、 α -ターチニールと呼ばれる成分を根から分泌する。この成分は土壌有害線虫(特にネグサレセンチュウ)に毒性を示し、鋤込まなくても線虫防除効果が得られる。アフリカン種、アメリカン種、フレンチ種など分類学上異なった種があり、それぞれの種に多数の品種があるが、アフリカン種の一部の種を除きほとんどの品種が線虫の長期間抑制効果を示す。



マリーゴールドの長期ネグサレセンチュウ抑制効果の品種間差異
注) 本来、ダイコンとサツマイモはキタネグサレセンチュウの良い寄主作物ではない。



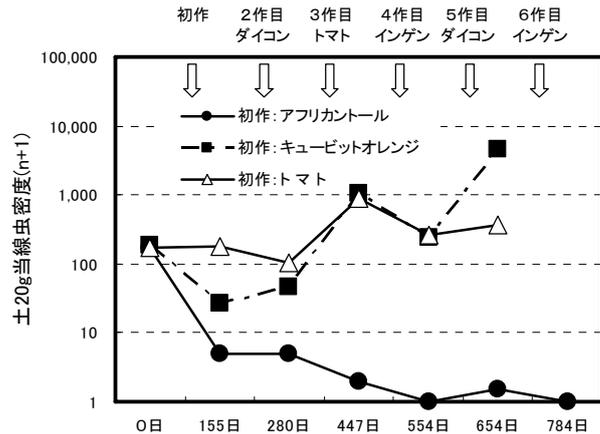
マリーゴールドの長期ネグサレセンチュウ抑制効果の品種間差異
注) 本来、ダイコンとサツマイモはキタネグサレセンチュウの良い寄主作物ではない。

2. 線虫の復元が遅く、3年に1回の作付けで十分な効果が得られる

キタネグサレセンチュウ抑制に有効なアフリカン種の作付け後は、線虫が増える作物を連作しても線虫密度がほぼゼロにとどまっている。密度が低い期間は少なくとも2年半継続するので、マリーゴールドの作付けは3年に1回で充分である。

3. 土壌消毒剤と比較して深層の線虫の線虫にも高い効果が得られる

マリーゴールドを作付けすると地表下 40cm 層の深層の線虫密度もゼロになり、後作のダイコンの線虫被害は大きく低下するが、農薬では深層の線虫が残るため、ダイコンに線虫害が現れる。



2種マリーゴールド栽培後のキタネグサレセンチュウ密度の推移

マリーゴールドのアフリカントールの後作では6作後（2年後）でも線虫密度が回復しない（近岡，1983のデータより作図）

マリーゴールドによる守口ダイコンのキタネグサレセンチュウの防除効果 (愛知県:平成2年度)

試験区名	土壌線虫密度(±20g当たり)				ダイコン 根部被害度
	初期	対抗植物 栽培終了7 日前	ダイコン収穫時		
			深度15cm	深度40cm	
マリーゴールド	0.5	0.0	0.0	0.0	0.5
D-D剤単用	1.5	0.0	0.0	1.0	73
バイデート粒剤単用	1.0	0.0	0.0	1.0	40.5
D-D・バイデート粒剤併用	1.5	0.0	0.0	1.5	63.5

4. マリーゴールド処理の費用と労力

マリーゴールドの栽培による線虫防除では種子代の他に育苗、定植、除草などの作業が必要である。それに要する20時間の労賃も含めるとその費用は10a当たり17,500円と見積もられる。粒剤型線虫剤の処理では圃場への散布と処理後のロータリー混和だけの作業で済み、労働時間はわずかであるが、最もよく使われているDD等の燻蒸剤を処理する場合は灌漑作業の他に、処理後のマルチ掛け、

主要殺線虫剤とマリーゴールドの単位面積(10a)当たりの処理費用比較

商品名	包装単位	単価(円)	最小使用量(/10a)	費用(円)
燻蒸剤 D-D	20 l	6,762	20 l	6,762
カヤヒューム(臭化メチル)	500 g	745	5 kg	7,450
キルバー	20 l	10,790	40 l	21,580
バスアミド微粒剤	10 kg	14,036	20 kg	28,072
クロルピクリン	1 kg	1,023	20 l	34,782
クロルピクリン錠剤	400錠	3,894	500錠	48,675
粒剤 ネマトリン	3 kg	1,453	20 kg	9,686
バイデートL粒剤	5 kg	2,283	25 kg	11,415
ボルテージ粒剤6	3 kg	1,816	30 kg	18,160
対抗植物 マリーゴールド種子	?	?	3 dl	1,500
同上 労賃	1時間	800	20時間	16,000
マリーゴールド計				17,500

線虫剤の処理労働時間は、処理後マルチ、ガス抜き作業の有無によって異なる。マルチガス抜きは燻蒸剤では必須だが、粒剤では不要である。

農業価格はJA土佐香美より聞取り(1999年)。マリーゴールドの経費は神奈川県農総試より聞取り(2001年)

マルチはぎ、トラクターなどを用いたガス抜き作業が必要である。マリーゴールド栽培にはD-D剤の2倍程度の費用がかかるが、バスアミド(ダズメット)やクロルピクリン処理よりは安価に実施できる。

○ 事例3

1. ギニアグラスのネコブセンチュウ防除効果

土壌中のネコブセンチュウ密度推移

作付体系	土壌50g当たりサツマイモネコブセンチュウ数			
	7月	8月	9月	10月
サツマイモ→サツマイモ(無消毒)	1	15	97	1,006
サツマイモ→サツマイモ(D-D処理)	0	1	22	50
ギニアグラス→サツマイモ(無消毒)	0	1	1	1

収量調査結果

作付体系	総いも重 (kg/a)	A品 (%)	A+B品 (%)	条溝発生率 (%)
サツマイモ→サツマイモ(無消毒)	316.8	6.0	18.0	33.0
サツマイモ→サツマイモ(D-D処理)	340.3	11.0	27.0	15.0
ギニアグラス→サツマイモ(無消毒)	369.7	17.0	50.0	3.0

千葉県資料(環境保全型野菜新技術、平成10年)

2. 対抗植物のネコブセンチュウ防除効果比較

対抗植物によるサツマイモネコブセンチュウの防除効果(神奈川園試, 1989)

	センチュウ密度/±50g			対抗植物		後作トマト
	栽培前	栽培後	増殖率	草丈cm	重量kg	根こぶ被害度
ハブエース	213	19	9%	155	5.1	2.5
ハブソウ	226	85	38%	97	0.2	1.5
ギニアグラス(ナツカゼ)	187	16	9%	175	10.5	2.0
ギニアグラス(ソイルクリーン)	254	7	3%	185	14.0	15.0
クロタリヤ(スペクタリス)	184	94	51%	115	1.0	1.5
クロタリヤ(サンヘンブ)	239	52	22%	222	4.8	1.5
マリーゴールド(アフリカントール)	220	29	13%	86	1.2	2.5
オオテニンギク	150	27	18%	98	2.9	2.0
カボチャ	237	3,700	1561%			3.5
休耕	169	27	16%			1.0

II. 天敵微生物の利用

パストーリア ペネトランス剤（商品名『パストリア水和剤』）はネコブセンチュウの天敵微生物 *Pasteuria penetrans* を主成分とする微生物農薬である（登録 1998 年）。トマト、きゅうり、メロン、かぼちゃ、かんしょ、いちじく、ネコブセンチュウに登録がある。パストーリア菌は①乾燥耐性、耐熱性、耐寒性に優れ、粉剤等への製剤化が容易で品質を落とすことなく長期間の保存ができる、②圃場に定着できるため農薬のように毎作施用する必要がない、③農薬との併用ができる等天敵防除資材として優れた特性を持っているほか、通常の線虫剤と異なり作物立毛中の処理ができる。製剤は粉末 1g 当たり 1.0×10^9 個の孢子を含んでいる。市販系統はサツマイモネコブセンチュウ、ジャワネコブセンチュウ、アレナリア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。

パストーリア属菌はグラム陽性の絶対寄生性の細菌である。*Pasteuria penetrans* の内生孢子（以下孢子）の形態は直径 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ の球状粒子（本体）に直径 $3 \sim 4 \mu\text{m}$ の広いつば（副側孢子繊維）が付いた特徴的なもので、外観は空飛ぶ円盤（UFO）に似ている。この菌は 17°C 以上で発育を開始し、最適生育温度は概ね 28°C と 35°C の間にある。 28°C では 35 日以内に成熟した孢子が生産される。孢子のネコブセンチュウ 2 期幼虫への付着数は 30°C まで高温になるほど増加し、 30°C を超えると減少する。温度は病原力にも影響し、感染した線虫の卵巣発達は 20°C では抑制されず蔵卵することもあるが、 30°C では完全に抑制される。孢子は線虫の体表（クチクラ）に強固に付着すが、孢子に運動性がないため、付着には移動中の線虫との遭遇が必要である。体表にパストーリアを付着させた線虫が植物の根に侵入し、定着して養分吸収を始めて 1 週間程たつと孢子が発芽し、発芽管が線虫の擬体腔内に伸びる。発芽管の先端では 2 又分裂が繰り返され、いくつもの発育ステージをたどって最終的には 1 頭のメスの体内におよそ 2 百万個の孢子が再生産される（下図）。

圃場で増殖したパストーリア孢子ははじめ根の残渣中に凝集し、土壌中には残渣とともにパッチ状（島状）に存在しているが、根残渣が崩壊してゆく過程で次第に土壌中に拡散していくものと考えられる。作を重ねる毎に土壌中の孢子密度が高まるとともに均一になり、ほとんどのネコブセンチュウ幼虫が孢子に感染するようになると、線虫の再生産に対し著しい抑制力が現れ、線虫個体数密度が急速に低下する。この結果、作物の被害も回避される。しかし、必ず未感染の線虫が残るので、パストーリアは線虫を全滅させない。パストーリア菌のセンチュウ抑制機作は、主に上記の雌の蔵卵阻害であるが、孢子の感染量によって産卵の抑制・阻害から致死まで質的な違いが認められる。高密度付着個体 (>15 孢子) は根への侵入が阻害され、根に侵入した後も死亡個体が多くなる。したがって、孢子には致死

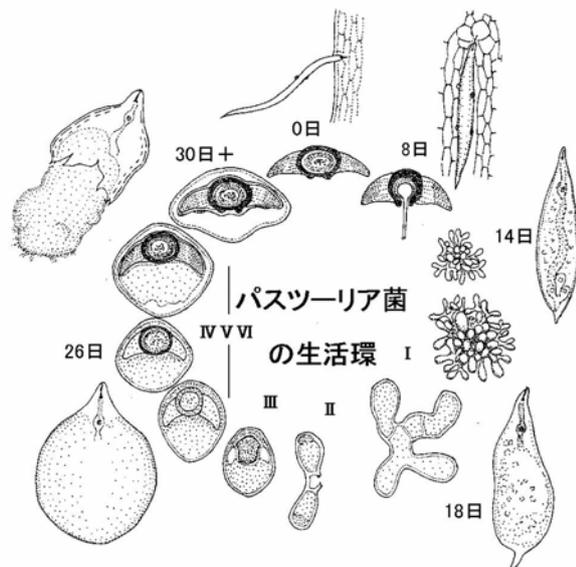


図 線虫天敵細菌パストーリア ペネトランスの生活

作用もあると見て良い。つまり、孢子が多数付着した線虫幼虫の増加は直接線虫密度の低下につながる。本菌がいったん定着すると10年以上長期にわたりネコブセンチュウ害が抑制される。

○ 処理法

1) 圃場均一混和法（全面処理法）

i) 処理のプロセス

圃場均一混和法は登録された標準的な処理法である。パストゥーリアの処理は初回作付け前に行い、次作以降は追加処理をしない。ネコブセンチュウ高密度圃場では、処理後の初作および次作に無処理と同等かそれ以上の線虫害が発生するのが普通であるため、粒剤型殺線虫剤（ホスチアゼート剤等）と併用することが推奨されている。

①処理の1週間前に施設土壌を灌水チューブで十分に灌水し、除塩する。②処理の2、3日前までにロータリーで耕耘する。③処理量は10a当たり1kg（1g/1㎡）が適当である。粉剤を大量の水に溶かして一度に土壌表面に散布する（10l/㎡処理）。タンクにパストリア水和剤の希釈液を作り、動力噴霧器で圃場表面に散布する方法が一般的である。少量の水に溶かした散布では、孢子が表層の粘土粒子に吸着され下層へ浸透しないため、ジョウロを用いて散布する場合は同時にホースに取り付けたジョロ口から散水する（下図）。④処理の2日後、ロータリーで数回深さ20cmまで耕耘し、孢子を作土層に均一分散させる。⑤処理後4～7日後に定植する。孢子の付着率は加湿4日後から高くなるから、苗の定植は孢子圃場処理の4～7日後が適当である。⑥栽培終了後は根に大量のパストゥーリアの孢子が含まれているため、作物根を回収せず、土壌にすき込み腐敗を促す。休閑中の定期的な灌水は根の腐敗と孢子の分散のために不可欠である。

ii) 処理効果の発現

露地トマトの根の被害指数（ネコブ指数）はパストゥーリア処理の4作（3年め）以降、無処理より顕著に低下し、対照の殺線虫剤区や無処理区より増収する。概ね5作めまでに防除効果が発現し、対象の慣行防除（線虫剤処理）に優る線虫害抑制効果が得られる。また、露地トマト、施設トマト、施設キュウリなどでパストゥーリアと粒剤型殺線虫剤との併用を行う体系処理で、パストゥーリア単独処理と比べて有意な根こぶの減少、線虫幼虫密度の減少、果実の増収が確認される（下図）。

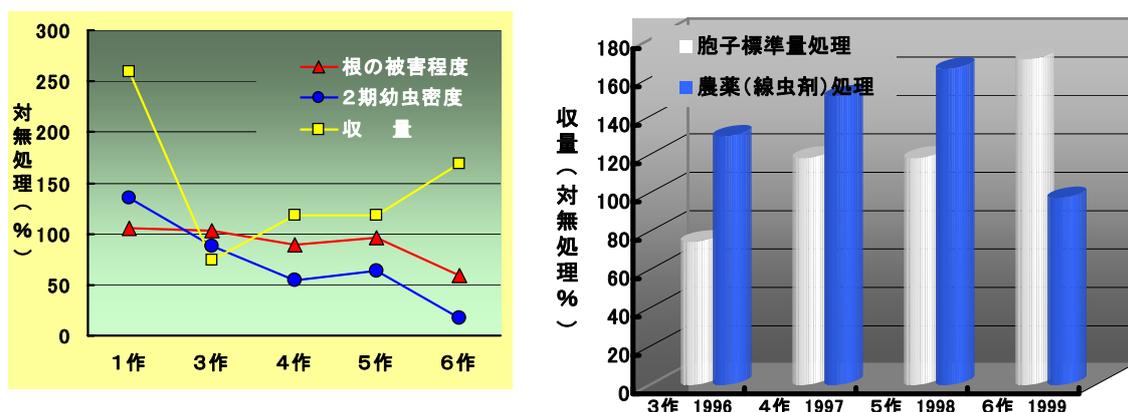


図 露地トマトにおけるパストゥーリアの収量改善効果ならびに線虫害抑制効果（圃場均一混和法；農業研究センター）

iii) 問題点

現在の登録処理法では孢子密度が高まり線虫害の防除効果を発現するまでに、長期の連作を要しているが、それまでの作物の被害も無視できないほど大きい。特に線虫密度が高い圃場では粒剤型殺線

虫剤（ホスチアゼート剤等）を併用しても作物生育は著しく減退する。初期の線虫加害は根量の減少と根の腐敗をもたらす。ここでの重大な問題は無処理とほぼ同様の被害が生じることだけでなく、被害が著しい根では次世代の線虫がほとんど再生産されないため、線虫の絶対寄生菌であるパストゥーリア菌も再生産されないことである。また、本菌を全面土壌燻蒸処理と併用すれば線虫防除効果は当然高いが、パストゥーリアの費用は完全に無駄な投資になる。この併用処理体系では栽培の中盤まで線虫がほぼ皆無なため、パストゥーリアが再生産されることがないからである。

2) 灌水処理法（部分連続処理）

作物作付け後、灌水チューブを用い液肥と共にパストゥーリアを点滴処理する方法である。1.75g/m²（1.75kg/10a）の処理量で処理した当年に顕著な根こぶの抑制効果が得られる。また、低濃度のパストゥーリア懸濁液をジョウロで作物の株元に灌水する方法でも同様の効果が得られる。これらの処理法は登録にないが、メーカーにより登録が準備されつつある。

3) 植穴処理（部分毎作処理）

i) 処理のプロセス

植穴処理法は燻蒸剤による植穴部分燻蒸と併用し、少量の処理を毎年繰り返す処理法である。

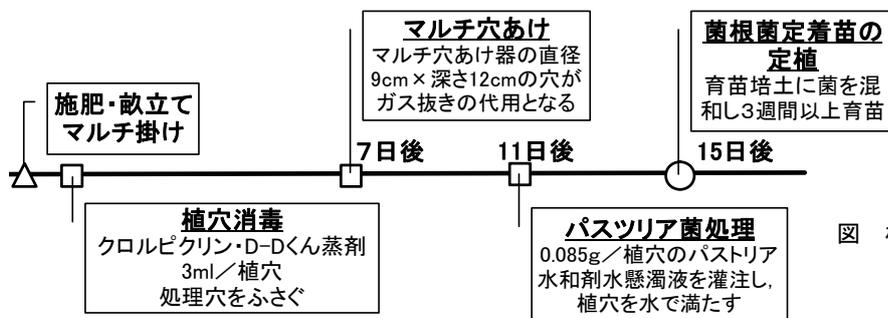


図 植穴消毒と微生物資材処理の概要

①定植予定日の約3週間前に施肥・整地し、マルチ掛けをする。線虫と土壌病原菌に有効な D-D クロルピクリン燻蒸剤（ソイリーン）を定植予定位置に2～3ml 灌注する。灌注穴はガムテープ等で塞ぐ。②1週間後、マルチ穴開け器を用い直径9cm、深さ12cmの植穴を穿ち、ガス抜きする。③さらに1週間後、パストゥーリア懸濁液を穴当たり0.09g（90g/10a）処理し、灌水して穴を満たす。④処理後4日～7日後に苗を定植する。⑤次作～4作まで同上の処理を繰り返す。

ii) 植穴燻蒸とパストゥーリア組み合わせ処理の合理性

植穴燻蒸処理は、単純な技術とはいえ、パストゥーリアを基幹手段とする線虫のIPMで戦略的に用いることができる。植穴燻蒸処理自体は線虫や土壌病害の侵入を遅延させるだけの手段である。燻蒸剤が灌注位置から半径15cmに拡散し、この範囲の線虫が死滅するため、予め定植位置を燻蒸すると、作物は移植直後の線虫感染や土壌病害感染を免れ、初期生育が優れる。一方、周辺に残った未消毒領域に根が伸長すると、線虫や土壌病原菌が侵入するため、この防除効果は一作に限られる。

しかし、パストゥーリアを処理した土壌への植穴燻蒸または植穴燻蒸後のパストゥーリア株元処理を行えば、相乗効果とともに、パストゥーリアの大量生産にも役立つ。何故ならば、燻蒸領域では栽培終了時まで新根が発生するため、一定レベルの線虫が世代交代を通じて維持され、当然パストゥーリア菌も継続的に再生産されるからである。植穴燻蒸とパストゥーリアの併用を3作程度繰り返す間に、パストゥー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ので、少なくとも5作後には植穴燻蒸処理を省略しても実用的なレベル（防除水準）の線虫抑制が実現することになる。

同時に、土壌生態系を完全に破壊しないため、植穴燻蒸は線虫抑制に役立つ有用な土壌微生物群の

保全と増殖にも寄与する。耕地には線虫抑制機能が明らかな菌根菌、線虫捕捉菌、線虫の卵寄生菌等の「有用」微生物のほか、まだ機能が分からない微生物類が土着している。「有用」微生物は、単独で培養し圃場に接種した場合には概して目立った線虫密度抑制効果がない事例が多いため、それらの線虫抑制力は過小評価されている。しかし、機能不明な微生物を含めて、多様な種が複合的に働けば、土壤生態系の中に大きな線虫抑止の場が形成されるであろうことは容易に想像できる。

最後に、植穴燻蒸処理との組合せを行うと、毎作慣行防除区とほぼ同程度の収量が確保できる。粒剤型殺線虫剤とパストゥーリアとの併用処理の初期の3、4作がほぼ捨て作りになるのに比べて、植穴燻蒸処理との併用は、大きな実用上のメリットである。

iii) 処理効果の発現

植穴燻蒸処理とパストゥーリア菌の併用処理では、順調に根の被害が軽減される（下左図）。抑制栽培（第2作、4作）でやや慣行の全面燻蒸処理に劣るものの、半促成栽培では慣行防除と同等の高い収量性が確保される（下右図）。

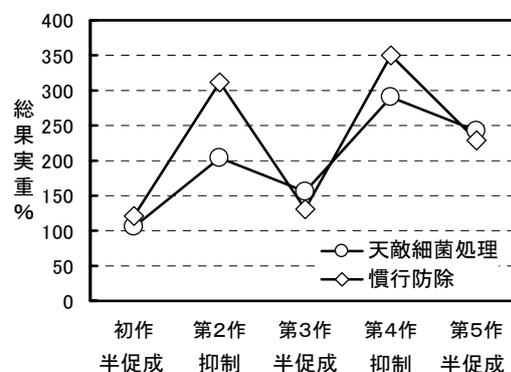
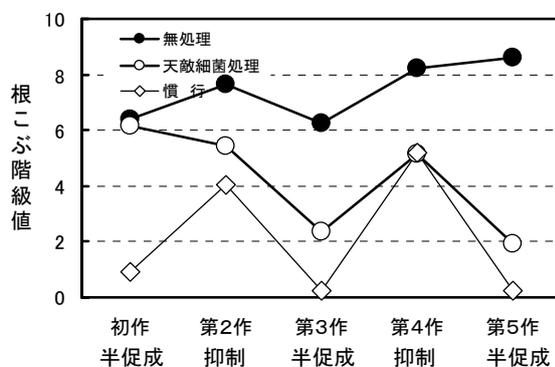


図 植穴燻蒸と天敵処理による線虫被害の減少
●無処理：防除をしない；○天敵細菌処理：植穴燻蒸後天敵植穴灌注処理；□慣行防除：D-D・クロロピクリン燻蒸剤全面処理

図 植穴燻蒸と天敵処理による果実の増収（無防除区の総収量(g)を100としたとき）
○天敵細菌処理：植穴燻蒸後天敵植穴処理；□慣行防除：D-D・クロピク燻蒸剤全面処理

4) 使用上の留意点

パストゥーリアは砂土、砂壤土、壤土で使用できるが、重粘土質土壤には適さない。砂質土壤では内生孢子が表層土へ保持され、水の浸透により内生孢子が土壤中へ分散するが、重粘土質土壤では内生孢子が土壤に吸着されて分散が悪く、増殖率が著しく低い。促成栽培より、抑制栽培の作型で効果が高い。

人工培養技術が確立していないため、パストゥーリア水和剤の生産コストは高く、販売価格は梱包1袋(500g)当たり50,000円と高額である。反当費用は最低登録使用量(1g/1㎡)でも10万円かかる。一方、2,000株/10aの栽植密度で植穴処理を行う場合、パストゥーリアのコストは登録の1/5量以下(17,000円/10a)になる。くん蒸剤の使用量も登録(全面処理)の1/5量(6l/10a)に削減される。5作(2年半)でならずと、両者併用のコストは1作当たり51,000円/10aである。