

内閣府：SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）
「次世代農林水産業創造技術」
「持続可能な農業生産のための新たな総合的植物保護技術の開発」

新規土壌還元消毒を主体とした トマト地下部病害虫防除体系 マニュアル

技術版

初版（web版）



はじめに

トマトは近年の産地化、施設化に伴う連作により、青枯病や線虫等の土壌伝染性病害虫が発生し安定生産にとって大きな問題となっています。土壌病害虫の防除対策として一般的にはクロルピクリン剤やD-D等の土壌くん蒸剤による土壌消毒が行われています。土壌くん蒸剤は環境及び処理者への負担が大きいことや圃場の深層部に存在する青枯病菌や線虫等の病害虫に対する消毒効果が不十分なことから新たな消毒技術の開発が求められています。近年、易分解性の有機物を利用した土壌還元消毒が開発され、環境にやさしい消毒法として普及が進んでいます。しかしながら、米ぬか、フスマを用いた土壌還元消毒は、深層部まで消毒効果が届かないことや、糖蜜等の液体の有機物を用いた還元消毒は、深層部の消毒効果が高いものの、重労働である糖蜜の希釈作業や液肥混入器の利用等が普及の妨げとなっています。

そこで本プロジェクトでは、青枯病菌及び線虫等を対象として、処理作業が容易で圃場の深層部まで消毒効果の高い資材の選抜を行うとともに地域や作型に応じた処理方法や他の防除技術と組み合わせた体系化の検討を行いました。その結果、可溶性の糖を多く含むアミノ酸副生物である「糖含有珪藻土」と飼料である「糖蜜吸着資材」の新規資材による土壌還元消毒技術を開発するとともに、青枯病に対する防除技術である「高接ぎ木栽培」を組み合わせた総合防除体系を確立しました。本技術版マニュアルでは、新規資材の特性、処理方法、青枯病菌や線虫等に対する土壌還元消毒効果と体系防除に加え、生産者、普及指導員等から問い合わせの多い施肥や栽培管理についても記載しました。さらに土壌還元消毒の現場で利用できる「土壌還元化程度判定方法」、「農業用支柱による灌がい水の浸透具合の確認」、「病害虫の検出定量法」等の実践的な項目についても掲載しており、土壌還元消毒一般においても広く活用できる内容になっています。

本プロジェクトでは、技術版のほか、全国的な普及のための地域版（北日本、関東、北信越、東海、西日本）マニュアルも作成いたしました。これらのマニュアルが、新規土壌還元消毒技術と「高接ぎ木栽培」を組み合わせた総合防除体系の普及のため、研究者、農業指導者および生産者の皆様の理解を深める有効な手引きになることを期待いたします。

農研機構 野菜花き研究部門
野菜病害虫・機能解析研究領域
中保 一浩
(執筆者を代表して)

目次

1. 新規土壌還元消毒について-----	1
2. 新規資材（糖含有珪藻土、糖蜜吸着資材）について-----	5
3. 処理方法について-----	12
4. 新規土壌還元消毒による防除効果について-----	24
5. 栽培管理について-----	35
6. 高接ぎ木法について-----	37
7. 体系防除について-----	39
8. 資料・参考データ-----	41
参考文献-----	60

1. 新規土壌還元消毒について

[新規土壌還元消毒とは]

土壌還元消毒は、還元資材である米ぬか、フスマや糖蜜等の有機物を土壌に混和して灌水し、ビニールで土壌表面を被覆して空気の流入を遮断しながら、高い地温を維持する土壌消毒方法です。土壌中の微生物が、資材をエサとして分解しながら爆発的に増殖する際に、土壌中の酸素を一気に消費することにより、土壌が酸欠状態（還元状態）となり、青枯病菌、褐色根腐病菌や線虫等の病害虫を死滅させることができます。

消毒作用のメカニズム（図 1-1）は、還元状態における低酸素濃度の他、太陽熱による高温、還元状態で生成する酢酸や酪酸等の有機酸、二価鉄や二価マンガン等の金属イオン（二価鉄濃度と消毒効果の関係→8. 資料・参考データ参照）による抗菌活性や土壌微生物の競合等が作用しています（Monma et al. 2011）。

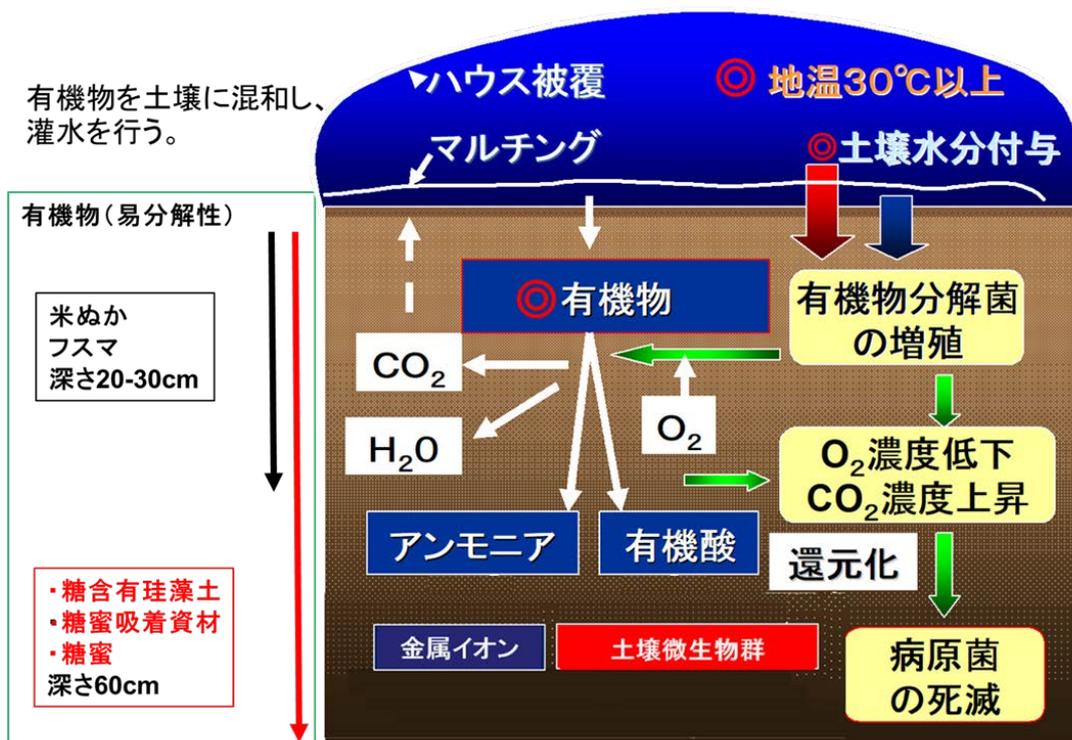


図 1-1 土壌還元消毒の消毒メカニズム

本消毒は化学薬剤を使用しないので、作業員への身体的な影響や、周辺環境への薬剤の飛散等のリスクがありません。また、物理的・耕種的な防除方法のため、環境にやさしいクリーンな消毒技術であるといえます。ただし、米ぬかやフスマ

による土壌還元消毒は還元化により悪臭（ドブのような臭い）が発生するため、住宅地近接地帯での使用には不向きです。また、還元消毒の範囲は有機物が届いた深さに依存するため、米ぬか、フスマは深さ 30cm 程度までしかすき込むことができず、耕盤層以下の深い層に分布する青枯病菌や線虫等に対する消毒効果は不十分です。

深層の還元消毒のために主に液体の有機物である糖蜜や低濃度エタノールが利用されています。糖蜜を利用した還元消毒は、10a 当たり 900 kg（一斗缶 24 kg が 37.5 缶）の糖蜜を使用します。粘性の高い糖蜜は希釈が必要で、そのための作業が重労働となっています。また、糖蜜液処理（0.6%糖蜜液を 150L/m² 灌水）のための液肥混入器等が必要となります。本プロジェクトでは、新規資材である「糖含有珪藻土」および「糖蜜吸着資材」を用いた処理が容易で深層まで効果の高い新規土壌還元消毒技術の開発を行いました。両資材は可溶性の有機物を含む粉（粒）状の資材で、①米ぬかやフスマと同様に圃場に散布、耕耘機で混和、②灌水チューブで灌水することで可溶性の有機物（糖）が溶解、③糖を含む灌がい水が深層まで移行することで、深さ 60cm まで還元消毒することが可能です（図 1-2）。米ぬか、フスマの土壌還元消毒を実施している生産者は「新規資材」に替えるだけで深層まで効果の高い消毒技術を導入できます。

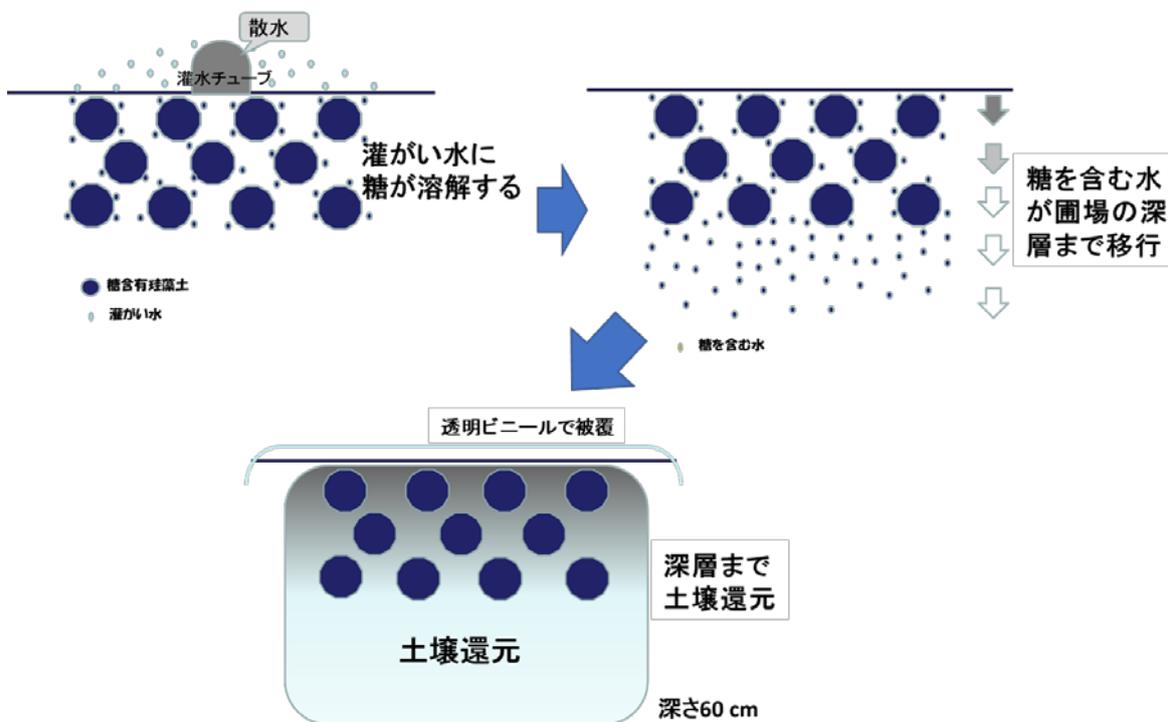


図 1-2 新規資材を用いた土壌還元消毒のイメージ

[対象病害虫]

<青枯病>

植物病原細菌 *Ralstonia solanacearum* によって引き起こされるトマト青枯病は土壌伝染性の難防除病害です（図 1-3）。近年のトマト栽培の産地化、施設化に伴う連作により青枯病の被害が大きな問題となっています。また、温暖化により発生時期や冷涼地域への拡大が危惧されている重要病害です。本病の防除法として、耕種的防除である輪作は施設化により導入が困難です。また、化学的防除であるクロルピクリン等の土壌くん蒸剤は環境や作業者への負荷が大きく、青枯病菌が存在する圃場の深層まで消毒できないため、その利用は限られています。このような状況下で抵抗性品種を台木、栽培品種を穂木とした接ぎ木栽培が比較的安定した効果の高い防除法として広く普及しています（野菜茶業研究所、2011）。

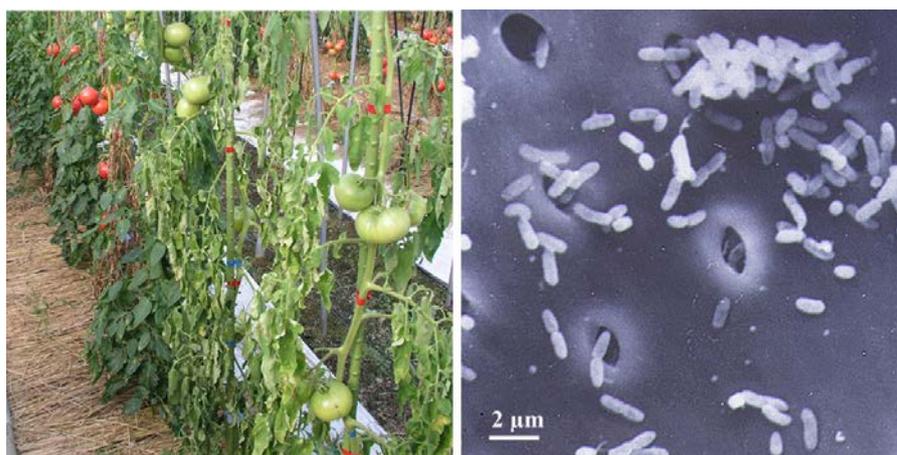


図 1-3 トマト青枯病（左）と病原細菌（右）

<ネコブセンチュウ>

線虫は土壌に生息する線形動物で、その中でも植物を加害し根にコブを生じさせるものがネコブセンチュウ (*Meloidogine* spp.) と呼ばれます。ネコブセンチュウの中では、サツマイモネコブセンチュウが北海道から沖縄まで国内に広く分布し、700 種以上の寄主植物が報告され、最も経済的被害が大きい植物寄生線虫です（図 1-4）。サツマイモネコブセンチュウに寄生された作物は根に特有のこぶ（ゴール）が形成され、養水分の吸収が阻害されて生育不良となります。また、サツマイモネコブセンチュウが土壌病害を助長することも知られており、トマトでは萎凋病や青枯病の発病を助長し、キュウリではつる割病の発病を助長することが知られています。サツマイモネコブセンチュウ以外ではアレナ

リアネコブセンチュウ本州型も東北地方から沖縄にかけて国内に広く分布しており、根にサツマイモネコブセンチュウと同じようなこぶを形成する農業上の被害が大きい重要種の一つです。



図 1-4 サツマイモネコブセンチュウ（左）と寄生を受けたトマトの根（右）

<褐色根腐病>

褐色根腐病は、発病株の根がコルク化し、水や養分の吸収が阻害されることにより、トマトの生育や収量を低下させる病害です。発病株の根は褐変・離脱し、根量が著しく減少します（図 1-5）。病原菌（*Pyrenochaeta lycopersici*）は低温性で、寒い時期に定植する作型で被害が大きくなります。多発圃場では、日中に株全体が萎れることがあります。地上部に顕著な症状を示さない場合が多く、発生に気がついていない生産者も多いとされています。北海道における減収程度は半促成作型（4月上旬定植）で最大5割、夏秋どり作型（5月下旬～6月中旬定植）で最大2割であることが明らかとなっており、多発生圃場では、減収します。



図 1-5 トマト褐色根腐病（発病根）

2. 新規資材（糖含有珪藻土、糖蜜吸着資材）について [糖含有珪藻土]

糖含有珪藻土（図 2-1）は、資源循環型の生産サイクルにおいて、糖化液を濾過する工程の副生物として産出されます（図 2-2）。副生物の有効利用の観点から環境配慮型の製品といえます。糖含有珪藻土はタピオカスターチの糖化液由来の糖と濾過助剤である珪藻土を主成分とします。



図 2-1 糖含有珪藻土

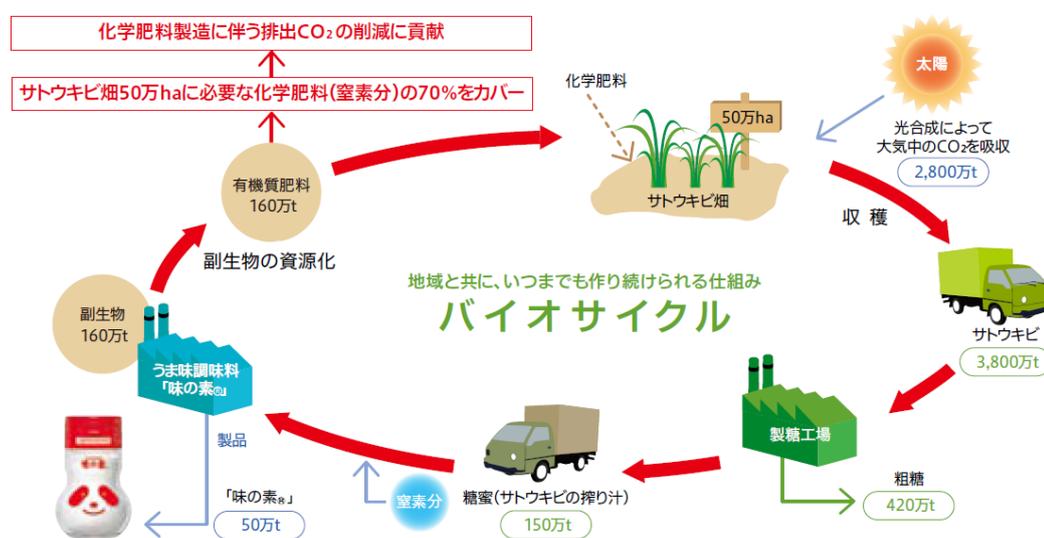


図 2-2 アミノ酸生産のバイオサイクル（味の素グループ、2018）

<資材の特性、成分（水溶性炭素源等）、保存方法>

糖含有珪藻土は、炭素源（糖）を多く含みます。糖は水に溶けやすく土壤に吸着しにくいため（井原ら、2016）、資材をすき込んだ土壤に灌水すると、水の流れによって下層土に糖が到達し、表層土だけでなく下層土まで還元化できます。これは、糖含量が少ない米ぬかやフスマにはない特徴です。

糖含有珪藻土は全炭素含量が高い一方で、窒素、リン酸、カリウム等の肥料成分含量は低いものの（表 2-1）、土壤還元消毒後のトマト栽培では、利用できる窒素成分が増加することから基肥減肥し追肥で調整します（→5.栽培管理について参照）。

表 2-1 糖含有珪藻土（未乾燥品（含水率 0.32））の含有成分

全炭素 (g/100g-現物)	全窒素 (g/100g-現物)	カリウム ※ク溶性 (mg-K ₂ O/g-現物)	リン酸 ※ク溶性 (mg-P ₂ O ₅ /g-現物)
17	0.7	0.3	1.4

※ク溶性は 2%クエン酸溶液に溶解（越野ら、1988）した成分量。

上記は計測例であり、保証値ではない点ご注意ください。

未乾燥の糖含有珪藻土は圃場に施用する前の段階で、常温保存中にも微生物による分解を受ける可能性があり、長期保存には適しません（井原ら、2018）。保存状態や気象条件によっては、まれにカビ、臭気を発する場合があります。しかし、実際に輸送用のフレコンバッグに入れて保管した場合には数ヶ月間、水溶性の有機性成分（COD）が低下しなかった（図 2-3）ことから、消毒開始までの期間は、冷蔵保存等の特別な保管方法は不要であり、雨よけのために防水シートをかぶせれば、ハウスわき等に一時的に保管できると考えられます。なお、糖含有珪藻土は乾燥させると、長期保存できることがわかっています。タイ国で製造した乾燥品の糖含有珪藻土については、少なくとも 7 か月間 COD が低下しないことを確認しています（図 2-4）。

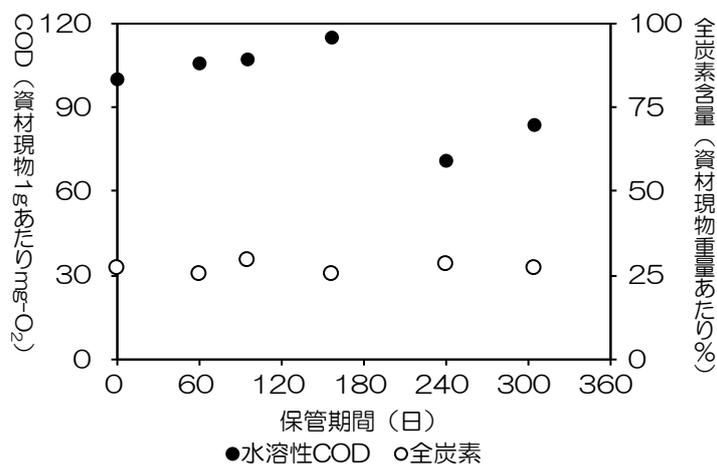


図 2-3 フレコンバッグ保管中の糖含有珪藻土の COD、炭素含量の推移

2018 年 1 月に佐賀市内で糖含有珪藻土をフレコンバッグに充填し、雨のかからない半屋外倉庫で保管して、その後図中に示す日数経過後に、バッグ内の資材を上端から深さ約 40cm の箇所から採取した（井原ら、2018）。水溶性 COD は、資材 1：純水 200 で資材が含有する有機性成分（糖等）を抽出し、そのろ液を水質の分析方法に準じて COD を計測。

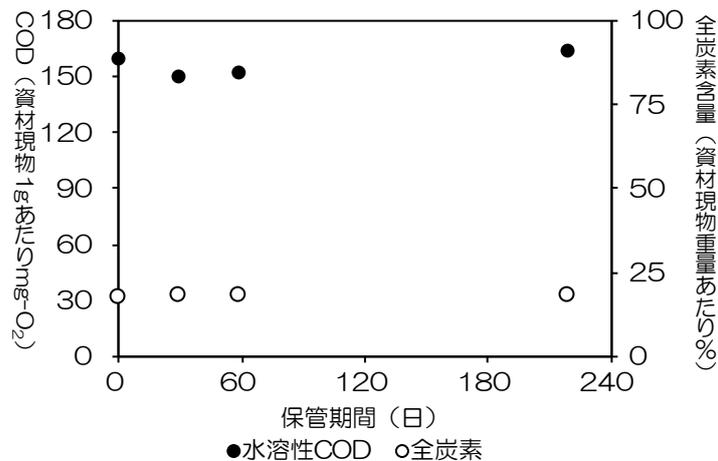


図 2-4 ガラスビン保管中の糖含有珪藻土の COD、炭素含量の推移

含水率 4%まで乾燥させた糖含有珪藻土(味の素グループのタイ国 FD Green 社 製造)を 100mL 容のガラスビンに入れ、培養温度 30℃で保管した結果。

資材を圃場に散布後は、数日以内に(すき込んだら当日～翌日には)土壌中の微生物により糖が分解されるので注意が必要です(図 2-5)。

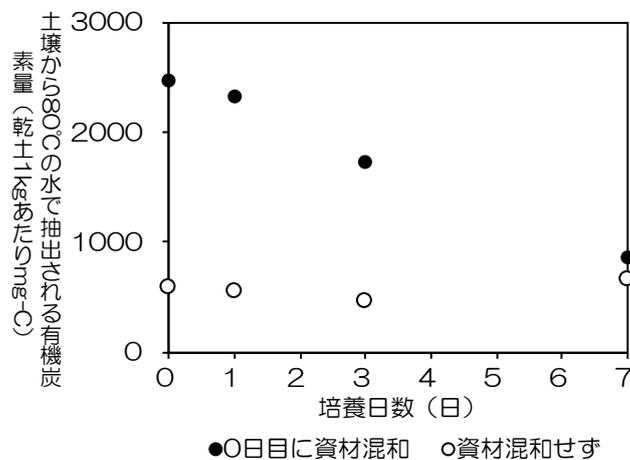


図 2-5 土壌の易分解性有機物含量の指標値(土壌から 80℃の水で抽出される有機炭素量)の推移

1L のガラスビンに淡色黒ボク土畑土壌を深さ約 14.5cm 充填し、糖含有珪藻土を土壌に 2%混和して、30℃の一定温度の室内で保管した。

<糖含有珪藻土の販売>

本資材の荷姿や購入方法は、各地域の研究機関へ問い合わせください(→ p.10)。

[糖蜜吸着資材]

糖蜜吸着資材は水溶性の糖を含む家畜飼料であり、乳牛、肉牛や馬の飼料として使用されています（図 2-5）。本資材は大豆皮にサトウキビ糖蜜を吸着させたもので、大豆皮 33%とサトウキビ糖蜜 67%を含んでおり、水分含有量は 6%程度の乾燥した粒状資材のため取り扱いが容易です。



図 2-5 糖蜜吸着資材

本資材は糖含有珪藻土と同様に土壤還元消毒資材として利用する際に多くの利点がありますが、主に以下の4点、1) 粒状のため、作業性がよい、2) 水溶性のため、土壤の奥深くまで消毒できる、3) 自然物由来で、安全性が高い、4) 消毒時の臭いが少ない点が挙げられます。使用方法は前述の糖含有珪藻土と同様であり、土壤消毒効果に関してもほぼ同じです。資材経費に関しては、10a 当たり 15 万円前後となっています。

<資材の成分>

本資材には土壤還元化をもたらす炭素源が多く含まれます（表 2-2）。また、ミネラル分として、液体の糖蜜と同様に、肥料成分であるカリウムが豊富に含まれます。

表 2-2 糖蜜吸着資材（含水率 0.07）の含有成分

全炭素 (g/100g-現物)	全窒素 (g/100g-現物)	カリウム ※ク溶性 (mg-K ₂ O/g-現物)	リン酸 ※ク溶性 (mg-P ₂ O ₅ /g-現物)
39	1.3	32.1	1.8

※ク溶性は 2%クエン酸溶液に溶解（越野ら、1988）した成分量。

上記は計測例であり、保証値ではない点ご注意ください。

<資材の保存方法>

本資材の保管に関しては糖含有珪藻土と同様に、冷蔵保存等の特別な保管方法は不要です。しかし、本資材には若干の吸湿性があるため、高湿度下で長期間保存をすると資材が固まってしまう場合があります。その際には資材を袋の上から木槌等で叩き、扱いやすいサイズの粒状にしてください。

また、本資材を圃場に散布したら数日以内に（すき込んだら当日～翌日には）土壌中の微生物により糖が分解されます。注意が必要な点は糖含有珪藻土と同様になりますので、散布後は速やかに土壌還元消毒を行ってください。

<資材の荷姿と販売>

本資材は 25kg の紙バッグでの提供となります。資材の価格に関しては為替や配達方法等によって変わります。資材の購入方法は、各地域の研究機関へ問い合わせください（→p.10）。

[問い合わせ先]

北日本地域：

北海道立総合研究機構 道南農業試験場

電話：0138-84-5869

青森県産業技術センター 野菜研究所

電話：0176-53-7085

関東地域：

千葉県農林総合研究センター 病理昆虫研究室

電話：043-291-0151（代表）

北信越地域：

新潟県農業総合研究所 基盤研究部

電話：0258-35-0826

富山県農林水産総合技術センター 園芸研究所

電話：0763-32-2259

石川県農林総合研究センター 農業試験場

電話：076-257-6911（代表）

東海地域：

岐阜県農業技術センター 病理昆虫部

電話：058-239-3131（代表）

西日本地域：

和歌山県農業試験場 環境部

電話：0736-64-2300（代表）

熊本県農業研究センター 生産環境研究所

電話：096-248-6447

[新規還元消毒資材の経費と特徴]

「糖含有珪藻土」、「糖蜜吸着資材」、既存の還元消毒資材および土壤くん蒸剤との経費と特徴の比較は表 2-3のとおりです。既存の還元消毒資材と比較して導入コストがやや高めですが、処理が楽で匂いも少なく青枯病や線虫等の病害虫が分布する深層の土壤を消毒することができます。

表 2-3 土壤還元消毒資材の経費と特徴の比較

	糖含有珪藻土	糖蜜吸着資材	糖蜜	米ぬかやフスマ	ダゾメット剤
資材経費 (10a 当たり)	未定	15万円前後	10万円前後	5万円前後	6~8万円
特徴	○環境にやさしい。 ○深く（地下60cm程度）まで消毒できる。 ○処理の労力・時間軽減。 ○消毒時の臭いが少ない。	○環境にやさしい。 ○深く（地下60cm程度）まで消毒できる。 ○処理の労力・時間軽減。 ○消毒時の臭いが少ない。	○環境にやさしい。 ○深く（地下60cm程度）まで消毒できる。 △処理の労力・時間必要。 △液肥混入器等が必要。	○環境にやさしい。 ○資材が入手しやすい。 △深耕ロータリーを使用しないと、地下深くまで消毒できない。 △消毒時のドブ臭が強い。	○冬期間でも消毒効果が得られる。 ○処理時間が短い。 △地下深くまで消毒できない。

注) ダゾメット剤は土壤くん蒸剤

3. 処理方法について

土壌還元消毒で高い消毒効果を得るためには、ビニール被覆して消毒開始後の最初の3日間に良好な天候が続くことが重要であるとされています。そのため、天気予報をみて晴天が続く日を選んで処理を開始しなければなりません。消毒期間は3週間以上を目安としますが、天候不順等の影響で地温の上昇が十分でないと考えられる場合は、消毒期間を延長します。処理開始後3～5日後にドブ臭がすると（新規資材の場合は臭気が非常に弱い）、土壌の還元化が進んでいる証拠となります（→土壌還元化程度判定方法参照）。

[地温と処理期間]

促成・半促成栽培では、ハウス内が高温となるため栽培を行わない夏季に処理を行うことができ、30℃以上の地温の確保が容易となるため、土壌還元消毒に適しています（表3-1）。

夏に処理する場合、処理期間中の平均地温が20cm深で33℃以上、40～60cm深で30℃以上の時に実施します。この温度が確保できる7月上旬～8月下旬に処理を開始し、消毒期間は20日間以上を設けてください。

表3-1 夏季の土壌還元消毒処理期間中の地温（℃）

年次	試験場所	処理期間	20～30cm深	40～60cm深
2016	北海道北斗市	8/4～8/25	23.8～39.2 (33.7)	23.8～33.9 (30.8)
	岐阜県海津市	7/8～8/14	24.6～44.3 (37.2)	25.0～38.4 (33.5)
	和歌山県紀の川市	7/29～8/19	28.1～44.8 (40.2)	—
2017	石川県白山市	7/26～8/21	22.0～41.3 (35.5)	23.8～37.0 (32.0)
	和歌山県紀の川市	8/28～9/18	—	24.4～46.8 (34.4)
	熊本県長州町	7/19～9/4	30.7～42.9 (38.6)	28.8～40.6 (36.4)
2018	岐阜県海津市	6/26～7/27	25.0～40.6 (33.6)	24.5～39.0 (32.4)
	和歌山県印南町	7/17～8/8	20.9～44.7 (35.0)	—
	熊本県玉名市	7/17～8/12	19.9～42.3 (37.3)	19.4～41.0 (32.9)

表中の値は処理期間中地温の最低～最高（平均）値

一方、夏秋栽培では、定植直前の春処理と、栽培終了直後の秋処理の2通りが考えられますが、天候が安定し地温の上昇が得られやすい春処理が推奨されま（表3-2）。しかし、夏季と比較して消毒開始時の地温の低さ、また地温上昇には長期間必要なことから、消毒効果が不安定となりやすいことを考慮に入れておかなければなりません。

春に処理する場合、処理期間中の平均地温が 20cm 深で 23℃以上、40～50cm 深で 21℃以上の時に実施します。この温度が確保できる 5 月上旬～6 月上旬に処理を開始し、消毒期間は 30 日間以上を設けてください。

表 3-2 春季の土壤還元消毒処理期間中の地温 (℃)

年次	試験場所	処理期間	20cm深	40～50cm深
2017	北海道木古内町	5/1～6/1	13.6～30.1 (23.1)	11.5～26.6 (21.4)
	北海道森町	5/16～6/15	11.3～33.0 (25.6)	11.4～30.1 (24.4)
	青森県七戸町	5/9～6/12	16.7～33.2 (26.1)	16.5～25.4 (21.8)
	青森県南部町	6/6～6/25	20.3～37.1 (31.2)	20.0～31.5 (26.9)
	岐阜県中津川市	5/1～5/30	14.2～33.5 (25.6)	12.9～25.8 (20.5)
2018	北海道木古内町	5/2～6/4	16.1～35.4 (25.6)	13.9～29.8 (22.3)
	北海道北斗市	5/7～6/1	14.8～34.3 (24.4)	14.0～28.3 (21.3)
	岐阜県飛騨市	5/24～6/21	18.0～35.2 (29.0)	15.7～30.4 (25.0)

表中の値は処理期間中地温の最低～最高（平均）値

消毒期間中のアメダスの平均気温が 15～18℃以上あれば、土壤還元消毒が可能であると報告されています（新村、2004）。そのため、地温を測定することが難しい場合は、圃場近辺のアメダスデータを参考にすることにより、その地域での適切な処理時期を推定することができます。

[圃場の準備]

① 残渣の持ち出し

発病株の残渣は土壤病害虫の第一次伝染源となります。そのため、残渣はなるべく根ごと抜き取って圃場外へ持ち出し、埋却や焼却等適切に処分します。耕起しても除去できない大型の雑草は、被覆したビニールを持ち上げて地表面との空間を広げてしまう可能性があるため、抜き取っておきます。

② 圃場の均平化

土壤還元消毒で高い消毒効果を得るためには、灌水した水が土壤中に均一に行き渡ることが重要で、傾斜や高低差があると高くなった箇所では土壤水分が不十分となるため、消毒効果が劣ることになります。そのため、耕起して畝を崩した後、圃場内の高低差が少なくなるよう均平化します。特に、ハウスの出入り口やトラクター等の農業機械が旋回する箇所では、土が高くなりやすい傾向にあります。また、ハウスサイドは耕起した際に寄せられた土が盛り上がっていることが多いです。これらは、できるだけ土をハウスの中央側へ寄せて均平化して

ください。ハウスサイドが低い圃場の場合、灌水時にハウス外へ水が流出しやすくなるため、土を寄せて均平化するか、畦波板を周囲に入れます。

大型施設の場合、鉄骨支柱のある周囲部分や支柱基部近辺等は耕起することができないため、消毒効果が不十分となる可能性が高くなります。そのため、そのような箇所は無理に耕起せず、土壌の拡散を避けます。

③ 土壌の耕起と砕土

灌水が均一に行き渡るようにするには、土壌が細かいほうがよいため、事前に一度耕起し、なるべく細くなるように砕土します。乾いた圃場であれば、資材散布後に耕起するだけでも十分ですが、土壌水分が高い、または粘土質等で土塊が大きいと考えられる圃場の場合は、事前耕起を入念に行います。

④ その他

暗渠がある場合、排水口を閉じておき、土壌中の水分が抜けるのを防いでおきます。また、圃場内に暖房機や制御盤等の機器がある場合は、消毒期間中の高温による障害を受けないように、遮熱シート等で覆うか、ハウス内の温度が50℃を超えるようであれば天窓を一部開放しておく等、十分な熱対策をしておく必要があります。

[圃場条件]

土壌還元消毒法は、作物が栽培できる圃場環境においては導入可能な技術となっていますが、透水性の悪い圃場については、水が土壌に浸透しないため下層土を消毒することができません。このような圃場で土壌還元消毒を行うためにはサブソイラー等により事前に透水性を確保しておく必要があります。一方で、砂質土壌等の排水のよい土壌については、土壌の水分保持力が低いため、十分な還元化が認められず、消毒効果が劣る事例が認められています。圃場内に暗渠がある場合には、排管を閉じることにより他の土性と同様に土壌を還元化し、高い消毒効果を得ることができます。

圃場内に高低差のある山間地や傾斜地のハウスでは、灌水した水は高い位置から低いほうに流れてしまうため、圃場全体を湛水することは困難です。斜度が6~7%以上であれば、土壌還元消毒には適さない圃場と判断してください。それ以下の斜度であれば、前述の「圃場の準備」で記載されているように、圃場内の高低差をなくすように土壌を移動してから消毒を行います。

[還元資材の施用方法]

10a 当たり 1～2t の資材を、ブレンドキャスト等の肥料散布機で散布します（図 3-1）。小規模ハウスの場合、一輪車やトラクターのバケット等に資材を入れ、スコップ・シャベル等で散布します（図 3-2）。いずれも、なるべく圃場内に均一になるよう散布します。



図 3-1 ブレンドキャストを用いた資材の散布



図 3-2 バケットやスコップ・シャベルを用いた資材の散布

資材が土壌とよく混和するように2、3回ロータリー耕起します（図 3-3）。可能な限り深くまで耕耘したほうが、土壌深層までの消毒効果が高くなります。大型施設における鉄骨支柱の基部やその周囲部分等、耕起することができない場合は、その土壌表面に資材を散布しておきます。大量の灌水を行うことにより、

資材から可溶性の有機物が溶出して土壌中へ移行するため、ある程度の深さまでは土壌の還元化が期待できます。

土壌還元消毒で高い消毒効果を得るためには、灌水した水分を土壌が長期間保持することも重要です。そのため、排水性がよい圃場や土質の違い等により圃場内で排水性が異なる箇所がある場合、予めクローラー等で土壌を鎮圧しておきます（図 3-4）。トラクターを低速で走行させるだけでも、ある程度の鎮圧効果があります。これらの鎮圧処理により、土壌の空隙が狭まり透水性が低下して水を貯めやすくなることや、気相率が少なくなることで土壌中の酸素の消費が促進される効果等が期待できるため、還元化がより早く進むと考えられます（三木ら、2012）。



図 3-3 ロータリー耕起による資材の混和作業



図 3-4 耕起後のトラクター走行による土壌の鎮圧

[灌水チューブ設置とビニール被覆]

圃場全面に均一に灌水させるため、栽培時よりも狭い間隔で灌水チューブを設置します。概ね 60cm~1m おきに 1 本の間隔で設置することが推奨されています (図 3-5)。



図 3-5 灌水チューブの設置

ビニールは透明のポリエチレンフィルム、またはPOフィルムを用います(図3-6)。中古を用いる場合は、空気の流入を防ぐため、穴等の破損箇所がないものかテープで補修済みのものを用います。また、太陽光を効果的に地表面に当てるため、なるべく透明度を維持しているものを使用します。被覆する際は、密閉度を高めるため、ビニールの周囲を土壌中に埋め込むか、周囲に土壌をかけておきます。ビニールが小さく、重ね合わせて使用する場合は、重なった部分の面積をなるべく広くとっておきます。被覆後は空気の流入を防ぎ、地温を高く維持させるために、ハウスの開口部を全て閉じて密閉します(灌水後にビニール被覆を行う場合→8. 資料・参考データ参照)。



図3-6 ポリエチレンフィルムによる被覆

[灌水方法]

灌水量は、一般的に1 m²当たり 100~150L の水が必要で、水田の代かき時のように足が潜るようになるまで灌水します(図 3-7)。流量が不明な場合は、農業用支柱等を土壤に差し込み、土壤下層まで十分に水が浸透しているか確認する方法もあります(農業用支柱による判定法→8. 資料・参考データ参照)。



図 3-7 ビニール被覆後の灌水状況

新規資材は水に溶けやすい炭素源(糖)を多く含んでいるため、灌水することにより、糖が水の流れにのって下層土まで到達し還元化することができます。そのため、灌水量の不足は消毒効果が劣ることに繋がります。下層土まで十分に水が浸透しているか、必ず確認することが大切です。

土壤深層での安定した防除効果を得るためには、圃場条件に応じて以下の 3 種類の灌水方法があります。

1) 灌水処理当日に圃場表面が湛水状態になる場合

慣行灌水：1 日で湛水状態になるまで灌水

2) 灌水処理当日に圃場表面が湛水状態にならない場合、または2日以内に表面が乾くほど透水性が高い場合

分割灌水：1 日で可能な限り湛水状態になるまで灌水し、翌日さらに灌水

3) 強固な耕盤層が存在し、下層へ水が浸透しにくい場合

耕盤層破壊：資材施用前にサブソイラーで耕盤層を破壊後、慣行あるいは分割灌水

北日本地域、高冷地等の地温が低い地域や灌がいのための水量が一日では十分に取れない圃場では、「分割灌水」で灌水を実施することが有効です。表 3-3 で示すように分割灌水区は、慣行灌水区より圃場の深層の還元化を確認できます。

表 3-3 分割灌水による土壤還元消毒後の還元程度

灌水方法	地点	ジピリジル反応で陽性を示した 土壤の深さ (cm)
分割灌水 1日目67L/m ² 2日目120L/m ²	①	60
	②	60
	③	45
	④	40
	平均	51
慣行灌水 1日目200L/m ²	①	30
	②	40
	③	40
	④	35
	平均	36
無処理	①	—
	②	—
	③	—
	平均	—

土壤還元消毒は 2017 年 8 月～9月に糖含有珪藻土 1t/10a 用いて実施した。

豆知識 一灌水量の考え方の基本一

処理に必要な灌水量は、届けたい下層土までの保水量により見積もります。全国で調査された土壤の種類と農地の平均的な保水量 [土壤物理用語事典 (2002)、滝本ら (2017) や e-土壤図 (<https://soil-inventory.dc.affrc.go.jp/figure.html>)] からみて、深さ 0-60cm の土層の保水量は、1 m² 当たり 100 (砂丘未熟土) ~300L (黒ボク土) ほどあります。土壤の保水量を大幅に超えて灌水すると糖も流亡し、土壤が還元化しない可能性があります。そのため、本マニュアルでは 1 m² 当たり 100~150L 程度灌水し、下層土まで水が浸透しないなど水量が不足しているようであれば、追加灌水することをお勧めします。

[土壌還元化程度判定方法]

土壌が還元化しているかどうかは、特有の還元臭の有無、ジピリジル反応および土壌色によって判定します。

<還元臭>

施用した資材に含まれる窒素が分解される際に発生する臭気で、どぶ臭とも呼ばれます。臭いの有無で判定するため簡便ですが、新規資材は窒素含有量が少ないために臭気が非常に弱いという特徴があります。

<ジピリジル反応>

(採土器を用いたジピリジル反応)

還元消毒中の圃場から採土器を用いて土壌を採取し、ジピリジル試薬(α - α' ジピリジル試薬 1g を 10% (v/v) 酢酸溶液 500ml に溶かしたもの)を噴霧して色彩の変化をみます(図 3-8)。赤く着色すれば還元化しています。

	深度0~30cm	深度30~60cm	深度60~90cm
糖含有珪藻土			
糖蜜 吸着資材			
米ぬか			
無処理			

図 3-8 採土器で採取した土壌のジピリジル反応(矢印の深さまで反応)

糖含有珪藻土、糖蜜吸着資材は深度 60-90cm まで還元化している

(圃場断面におけるジピリジル反応)

消毒後の圃場において、穴(縦 50cm、横 50cm、深さ 60cm)を掘り、土壌断面の地表付近から下に向かってにジピリジル試薬をかけます(図 3-9)。ジ

ピリジル反応は、採土器を用いた場合と同様です。 α - α' ジピリジルが二価鉄イオンと反応して赤色の錯体を形成することを利用して、還元状態の判定を行います。土壌が還元化していれば、即時に呈色反応が認められ、発色の程度から還元の強弱を判断することもできます。

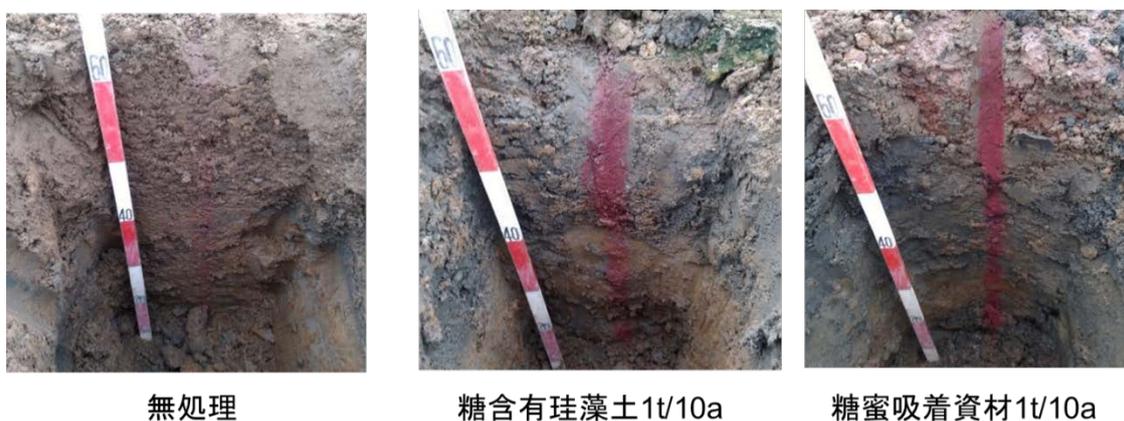


図 3-9 土壌還元消毒後の土壌断面におけるジピリジル反応

(ろ紙を用いたジピリジル反応)

黒ボク土では、直接土壌に噴霧しても色彩の変化がみえにくいので、ジピリジル試薬をしみこませたろ紙に土壌を置床する等工夫します(図 3-10)。ろ紙上の赤みの面積や色の濃さからジピリジル反応の強弱を判定します。

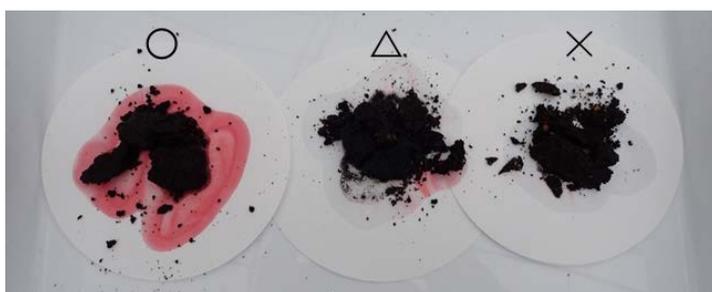


図 3-10 紙の上におけるジピリジル反応の判定(黒ボク土)

○：還元化、△：やや還元化、×：還元化していない

＜土壌色＞

処理後の土壌にスコップで深さ約 20 cm の穴を掘り、土壌色を観察し、還元化程度を以下の 5 段階（還元化程度：4、3、2、1、0）で判定します（図 3-11）。

1 試験区当たり 9 カ所（縦 3×横 3）程度観察すると処理区全体の還元化程度を評価できます。

- 4：穴全体が鮮やかな青灰色を呈する
- 3：鮮やかな青灰色と青灰色と原土の中間的な色が混在する
- 2：穴全体が青灰色と原土の中間的な色を呈する
- 1：青灰色と原土の中間的な色と原土の色が混在する
- 0：原土の色を呈する



図 3-11 土壌色による還元化程度の判定（還元化程度：4）

[消毒終了後の処理]

ハウスを開放して通風し、ビニール被覆を除去して、圃場を乾燥させます。トラクターが入れるぐらいに乾いたら、圃場全体をよく耕耘し、地温を下げるとともに、土壌中に酸素を供給して確実に酸化状態に戻します。排水性の悪い圃場や還元状態のドブ臭が残っている場合は、再度耕耘します。耕耘が不十分の場合、作物に生育障害が発生することがありますので注意してください。

糖含有珪藻土および糖蜜吸着資材は肥料成分含量が少ないものの、土壌還元消毒後は土壌診断を行い、施肥設計を実施してください。一般的に土壌還元消毒後の作付けは、基肥減肥し追肥で調整します（→5 栽培管理について参照）。その後、各栽培地域の適切な畝間、畝幅で畝立を行い、トマトを定植してください。

4. 新規土壌還元消毒による防除効果について

新規土壌還元消毒により、トマトでは青枯病 (*Ralstonia solanacearum*)、ネコブセンチュウ (*Meloidogine spp.*)、褐色根腐病 (*Pyrenochaeta lycopersici*)、株腐病 (*Rhizoctonia solani*)、半身萎凋病 (*Verticillium dahliae*) *、かいよう病 (*Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis*) *、キュウリではホモフシス根腐病 (*Phomopsis sclerotioides*) やネコブセンチュウ (*Meloidogine spp.*) に対する防除効果が明らかとなっています (*実験室レベルで殺菌効果を確認)。

[褐色根腐病に対する防除効果]

糖含有珪藻土および糖蜜吸着資材を用いた新規土壌還元消毒はトマト褐色根腐病に対する防除効果が認められます (三澤ら、2018)。

春(4-5月)処理した還元消毒前後の土壌を用いた生物検定(褐色根腐病に対する生物検定方法→8. 資料・参考データ参照)の結果、従来の資材であるフスマでは、深さ20~40cmの土壌の根部病斑面積率にほとんど違いがありません。それに対し、糖含有珪藻土および糖蜜吸着資材では、消毒前後で根部病斑面積率の低下が認められます(図4-1)。栽培終了時においても糖含有珪藻土および糖蜜吸着資材を用いた土壌還元消毒では20~40cmの深い層では無処理より根部の発病度が少なく防除効果を示します(図4-2)。ただし、防除効果は次作まで持続しないため、1作毎に消毒を行う必要があります。

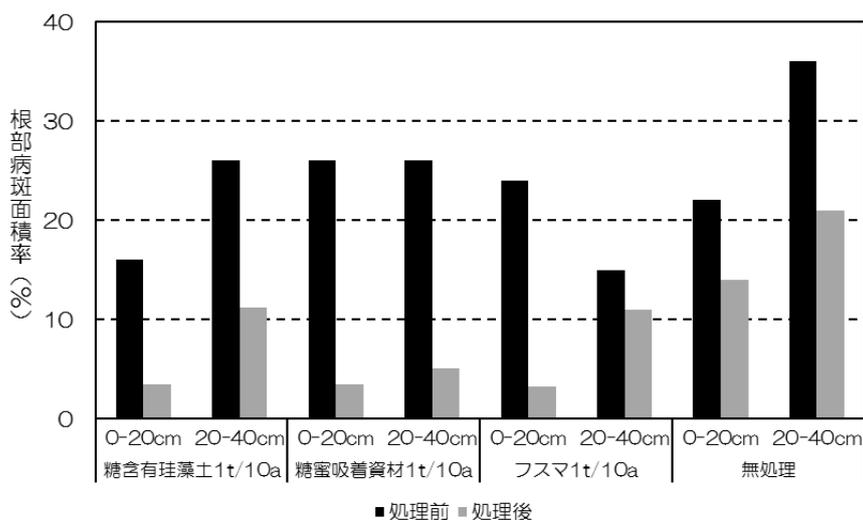


図 4-1 処理前後の土壌を用いた生物検定での各資材の土壌還元消毒効果

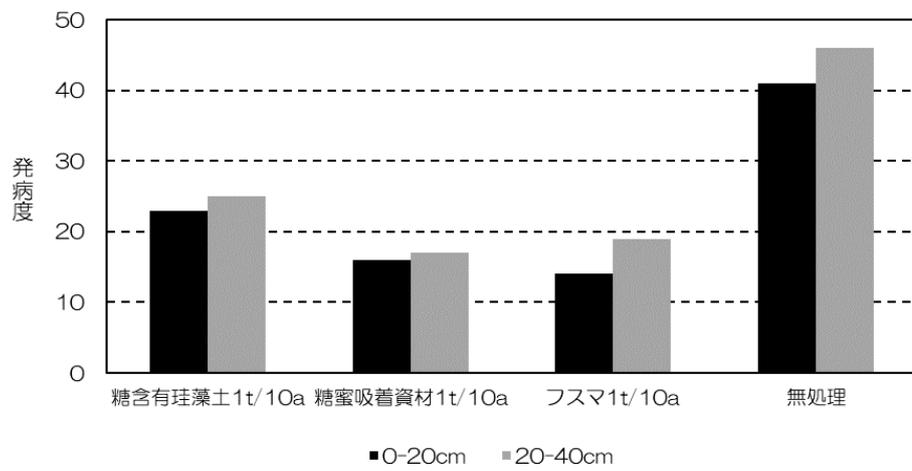


図 4-2 栽培終了時の根部発病度（2018 年北海道 春処理）

[青枯病に対する防除効果]

糖含有珪藻土および糖蜜吸着資材を土壤還元消毒用の資材として用いることで、トマト栽培期間中の青枯病の発生を低く抑えることが可能です。安定した消毒効果を得るためには、資材量は必ず 1t/10a 以上必要です。消毒時期は 6 月～9 月（地温 30℃以上を確保できる時期）、湛水状態になるまで灌水することで、地表下約 60cm 程度まで土壤は還元し、土壤深層部に生残している青枯病菌を消毒することができます（表 4-1）。それによりトマトの栽培期間中の青枯病の発生を抑えます（図 4-3、4-4）。

表 4-1 新規土壤還元消毒法による土壤中の青枯病菌に対する殺菌効果

試験区	処理期間	調査日	青枯病菌数 (CFU/g 土壤)			
			0～15cm深	15～30cm深	30～45cm深	45～60cm深
Aハウス						
糖含有珪藻土		6/4	1100	210	43	23
1t/10a		7/3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3
糖含有珪藻土	2017.6/5 ～7/3	6/4	2400	1100	23	7.2
1.5t/10a		7/3	<0.3	<0.3	<0.3	3.6
無処理		6/4	2400	2400	210	28
		7/3	1100	2400	64	15
Bハウス						
糖含有珪藻土		5/31	1100	210	43	23
1t/10a		6/25	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3
糖含有珪藻土		5/31	2400	1100	23	7.2
2t/10a	2018.6/1 ～6/25	6/25	<0.3	<0.3	<0.3	3.6
糖蜜吸着資材		5/31	2400	120	410	9.2
1t/10a		6/25	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3
無処理		5/31	2400	2400	210	28
		6/25	1100	2400	64	15

青枯病菌数の測定は MPN-PCR 法（→8. 資料、参考データ参照）により測定

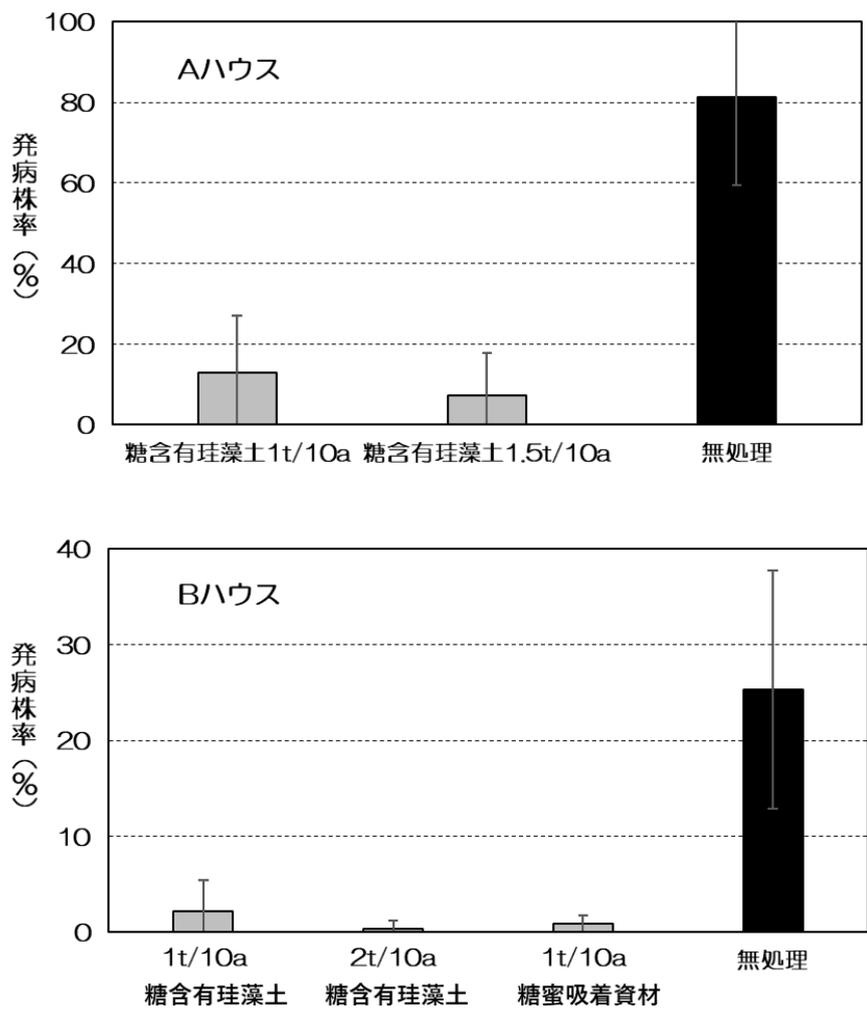


図 4-3 新規土壌還元消毒によるトマト青枯病に対する防除効果

Aハウス 消毒期間：2017年6月5日～7月3日

栽培期間：7月16日～11月28日

供試品種 穂木：りんか409、台木：Bバリア

Bハウス 消毒期間：2018年6月1日～6月25日

栽培期間：7月12日～11月26日

供試品種 穂木：りんか409、台木：Bバリア



図 4-4 糖含有珪藻土の土壤還元消毒による青枯病に対する防除効果

<防除効果の持続性>

糖含有珪藻土を用いた土壤還元消毒法の青枯病に対する防除効果は、消毒後にトマトを複数作栽培しても持続します（図 4-5）

本消毒法は、青枯病に対して高い防除効果を示しますが、その効果は地域や圃場条件によっても影響を受けます。消毒時に地温が確保できない時期（10月下旬）に土壤還元消毒を行った圃場では、消毒後1作目では防除効果が得られたものの、2作目では青枯病が多発する事例が認められています。1度の土壤還元消毒により、複数作にわたり青枯病を防除するためには、適切な時期（地温の確保）と手順で消毒することが重要です。

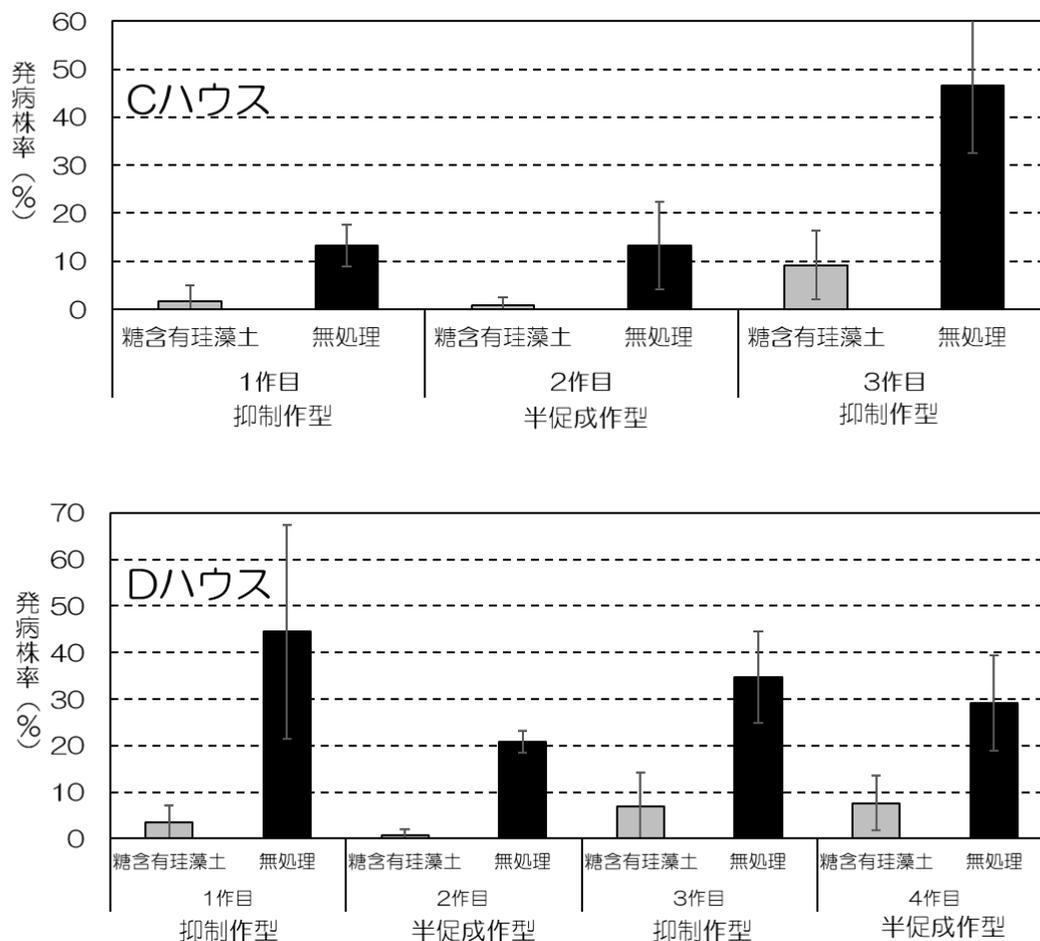


図 4-5 糖含有珪藻土を用いた土壌還元消毒のトマト青枯病に対する防除効果の持続性

Cハウス 消毒期間：2016年6月8日～6月30日

栽培期間 1作目：2016年7月10日～11月27日、2作目：2017年3月5日～7月1日、3作目：2017年7月8日～11月19日

供試品種 1作及び3作目 穂木：りんか409、台木：Bバリア、
2作目 穂木：麗容、台木：ブロック

Dハウス 消毒期間：2016年6月1日～6月25日

栽培期間 1作目：2016年7月8日～11月24日、2作目：2017年3月1日～7月10日、3作目：2017年7月15日～11月24日、4作目：2018年3月6日～7月10日

供試品種 1及び3作目 穂木：りんか409、台木：Bバリア、
2及び4作目 穂木：麗容、台木：ブロック

＜土壌還元消毒を実施するタイミング＞

青枯病防除と経済性を考えると、最初に土壌還元消毒により土壌中の青枯病密度と発病を抑制した上で、2～3年に一度の消毒が経済的に有効です。青枯病は発病してからでは防除できないため、前作の青枯病の発病程度やネコブセンチュウ密度（線虫は青枯病の発病を助長します）を調査しつつ、高接ぎ木栽培（→6. 高接ぎ木法について）と組み合わせた体系防除を実施します（図4-6）。

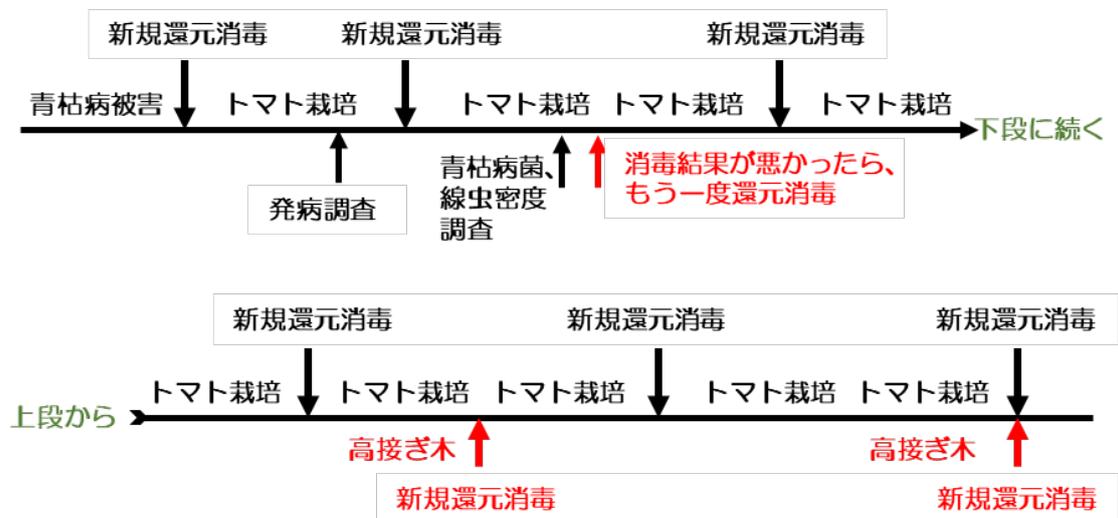


図 4-6 土壌還元消毒を基幹とした防除体系の例

[線虫に対する防除効果]

糖含有珪藻土および糖蜜吸着資材を土壤還元消毒の資材として用いることで、圃場の深層部に生残しているネコブセンチュウ（以下：線虫）を効率よく防除できます。処理方法や作業は青枯病の場合と同様で、期間は約 3 週間かかりますが、防除効果は粒剤タイプの殺線虫剤より、新規土壤還元消毒の方が極めて優れています。

<防除効果>

線虫に対する防除効果は土壤中に生息する線虫の数を処理前後で比較することで評価します。還元消毒前後に土壤をそれぞれサンプリングして線虫数を比較すると（ネコブセンチュウの検出法および評価法→8. 資料、参考データ参照）、還元消毒後は、土壤の深さが 0～30cm の作土層、深さ 30～45cm、45～60cm の深層でも、線虫が検出限界以下（0）になります（表 4-2～4-4）。また、還元消毒の後作トマトの栽培終了後根こぶが観察されないことから、新規土壤還元消毒は、線虫に対して高い防除効果を示すことがわかります（表 4-5、図 4-7）。還元消毒後は栽培終了後トマトの根にこぶが観察されない状態にまでになります。新規資材を用いた土壤還元消毒は、線虫に対して非常に高い防除効果があるといえます。

表 4-2 土壤還元消毒前後の線虫密度推移（作土層：0～30cm）

処理	処理前線虫密度		処理後線虫密度
糖含有珪藻土	378.2	→	0
糖蜜吸着資材	422.7	→	0
無処理	381.4	→	38.5

表 4-3 土壤還元消毒前後の線虫密度推移（土壤深度 30～45cm）

処理	処理前線虫密度		処理後線虫密度
糖含有珪藻土	136.9	→	0
糖蜜吸着資材	118.6	→	0
無処理	61.3	→	11.8

表 4-4 土壤還元消毒前後の線虫密度推移（土壤深度 45～60cm）

処理	処理前線虫密度		処理後線虫密度
糖含有珪藻土	2.9	→	0
糖蜜吸着資材	24.4	→	0
無処理	14.3	→	0.1

表 4-5 後作トマト栽培終了後の根こぶ指数

処理	根こぶ指数
糖含有珪藻土	0
糖蜜吸着資材	0
無処理	92.5

調査株数各区30株



図 4-7 根こぶに対する新規土壤還元消毒の抑制効果（右から糖含有珪藻土区、糖蜜吸着資材区、無処理区）トマト品種：アニモ TY10

<還元消毒の防除効果（線虫の被害）>

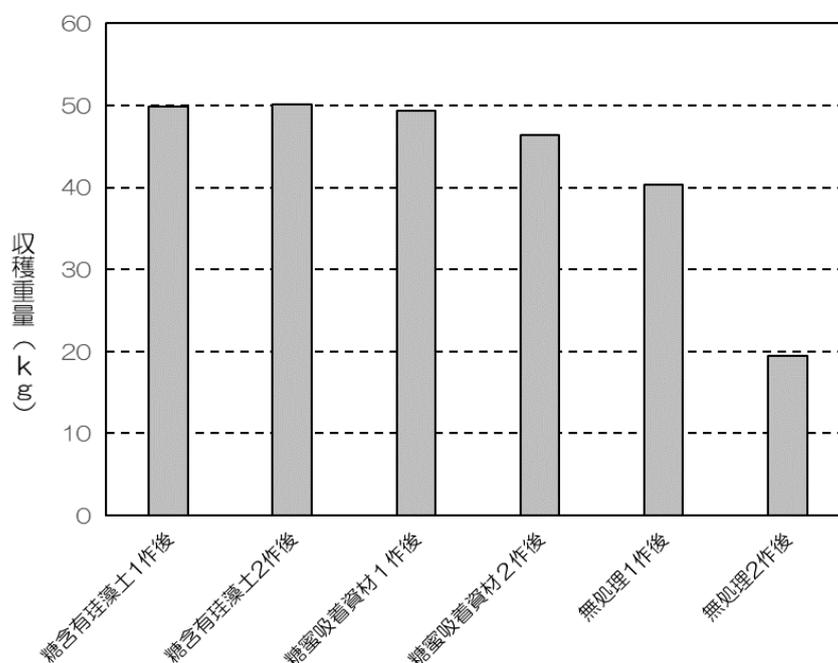
線虫汚染圃場でのトマトの生育を比較した結果を表 4-6 に示します。新規資材による土壤還元消毒を行うと 1 作目（栽培期間 66 日間）も 2 作目（栽培期間 93 日間）でもトマトの生育は正常です。しかし、還元消毒を行わない無処理区では、2 作目にはトマトの生育が劣り生育不良になります。これは、トマトを栽培する 1 作目で線虫が増殖し、2 作目の生育初期に線虫が根に侵入し根こぶを作ることにより、生育に大きな影響があることを示しています。

表 4-6 土壌還元消毒後のトマトの生育程度（草丈 cm）

処理	草丈 (cm : 5月24日)	草丈 (cm : 6月6日)
糖含有珪藻土1作後	80.8 ± 1.3 a	123.7 ± 1.2 a
糖含有珪藻土2作後	81.9 ± 0.7 a	121.3 ± 1.1 a
糖蜜吸着資材1作後	82.5 ± 1.2 a	123.3 ± 1.4 a
糖蜜吸着資材2作後	80.1 ± 1.6 a	120.3 ± 1.6 a
無処理1作後	83.8 ± 1.0 a	122.5 ± 1.1 a
無処理2作後	57.7 ± 2.2 b	87.4 ± 4.1 b

- 定植4月26日、品種アニモTY10、n=28
- 異なるアルファベット間で有意差あり (p<0.05 : Tukey-KramerのHSD検定)

次にトマトの収量を比較した結果を図 4-8 に示します。土壌還元消毒区は 1 作目、2 作目ともに収量に有意差はありませんが、無処理区は 1 作目から収量が減少します（図 4-8）。これは、トマトの生育が正常に見えても、収穫時期に根に多量の線虫が寄生すると、収量に影響があることを示します。



定植4月26日、収穫7月5日～28日の間に7回収穫した合計重量kg
各区28株

図 4-8 土壌還元消毒後のトマトの収量調査

栽培終了後の根こぶ程度を評価した結果を表 4-7 に示します。新規土壌還元消毒区は、1 作目では根こぶが観察されず、2 作目では根こぶが僅かに認められます。しかし、無処理区は 1 作目から甚大な根こぶの発生が観察されます。このように持続的な高い防除効果が認められ生育や収量への負の影響がない新規土壌還元消毒は線虫の発生を抑制できる有効な防除法と考えられます。

表 4-7 栽培終了後の根こぶ指数

処理	株数	根こぶ指数（平均値）	範囲
糖含有珪藻土1作後	28	0.00	0
糖含有珪藻土2作後	28	0.04	0~0.5
糖蜜吸着資材1作後	28	0.00	0
糖蜜吸着資材2作後	28	0.10	0~1.5
無処理 1 作後	28	3.10	1.5~4.0
無処理 2 作後	28	4.00	4

- 指数は0~4の5段階、整数の間も評価して実質9段階

5. 栽培管理について

〔資材の肥料としての効果〕

米ぬか、フスマを利用した土壌還元消毒では、消毒後のトマト栽培において、基肥窒素量を半量～無として、液肥、追肥を中心とした栽培を行っています。新規資材においては以下の肥料効果が挙げられます。

1) 糖含有珪藻土は、窒素、リン酸、カリウム成分が少ないため（表2-1）、米ぬかやフスマに比べ土壌還元消毒後の作物に対する窒素肥料としての効果は小さくなります。

2) 還元消毒では土壌微生物の前作残肥窒素の取り込みと死滅によって、消毒前の土壌に蓄積していた窒素が消毒後に発現してきます（土壌微生物による養分取り込み→8. 資料・参考データ参照）。

3) 消毒期間中にはビニール被覆するため、日中には地温が上昇し、土壌の有機物の分解が促進され窒素成分が作物に利用されやすい無機態窒素（アンモニウム態窒素と硝酸態窒素）に変化します（井原ら、2018）。

4) 糖蜜吸着資材は、カリウムを多く含むことから（表2-2）、カリウム施肥効果があります。窒素、リン酸については糖含有珪藻土と同様に含有量は少ないです。

このことから新規土壌還元消毒においても、消毒前に土壌中に無機態窒素が存在すると考えられる場合、少なくとも数割の基肥窒素の減肥が望ましいと考えられます。消毒から栽培まで期間が取れるようであれば土壌診断の結果をもとに施肥設計をしてください。

〔肥料や堆肥の施用タイミングと効果〕

土壌還元消毒では、圃場を耕起して有機物をすき込み、灌水、ビニールでの被覆、ハウスの締め切り（3週間程度）、土壌を酸化させるために耕起・畝立を行います。そのため、肥料や堆肥を施用するタイミングは以下ようになります。

1) 化成肥料、緩効性肥料や有機質肥料は、灌水や還元化によって成分が下層土へ流亡、あるいは肥効が落ちる可能性があるため、消毒後の耕起・畝立時に施用します。

2) 堆肥は、消毒後に施用した場合、慣行と肥料効果に違いはありません。消毒前に施用した場合、堆肥が含有する水溶性のカリウムや窒素成分の一部（硝酸態窒素）が灌水により下層土に流亡するため、速効性肥料としての効果が低下します。ただし、緩効的に効く窒素成分である有機態窒素は灌水しても作土中に留まりやすいので、肥効がなくなるわけではありません。物理性改善効果、地力窒素の維持効果は大きく損なわれないと考えられます。

[栽培、収量への影響]

新規資材を用いた土壌還元消毒は、適切な肥培管理を行えばトマトの生育や収量に大きな影響を与えません(表 5-1、図 5-1)。また、初期生育時の茎径は、無処理区や化学農薬区と差異がなく(表 5-1)、米ぬか、フスマによる土壌還元消毒の後作トマトでよくみられるような窒素過多による「樹ボケ」(草勢が強くなること)の症状が生じ難いことがわかります。

表 5-1 還元消毒区・化学合成農薬区・無処理の生育と収量(2017年)

試験場所	試験区	7月19日		総収量 (kg/a)	A+B品 収量
		草丈(cm)	茎径(mm)		
青森県	糖含有珪藻土(0.8t/10a)	102.6	12.9	539	145
六戸町	糖含有珪藻土(1.2t/10a)	101.8	14.2	484	146
	ダゾメット粉粒剤(20kg/10a)	103.4	13.2	457	168
	無処理	96.3	13.0	456	123

注) 規格は全農あおもり野菜出荷規格による。8月~10月の収穫物について調査
品種：りんか 409、定植：6月 21 日 基肥窒素施用量：12kg/10a

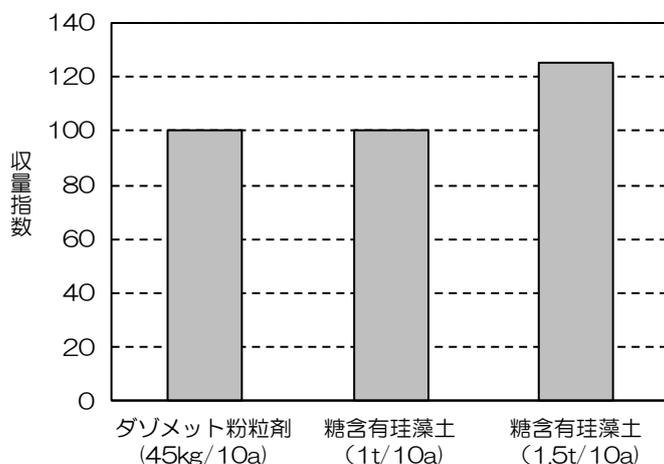


図 5-1 土壌還元消毒後に栽培したトマトの収量比較(石川県)

注 1) 収量指数は、ダゾメット粉粒剤を 100 とした収量比を示す。

注 2) 土壌還元消毒および化学合成農薬の処理は 8 月に実施し、その後トマト(穂木/台木：CF 桃太郎はるか/がんばる根)を栽培した。収穫物調査は 10 月~12 月に実施した。

6. 高接ぎ木法について

[台木品種の青枯病抵抗性]

土壌中にいる青枯病菌はトマト根の傷や自然開口部から感染して導管に侵入し、莖部へ移行・増殖し、萎凋、枯死の症状を引き起こします。青枯病抵抗性の台木品種は青枯病菌に感染するものの、植物体内で青枯病菌の移行と増殖の抑制機構が働き発病には至りません（無病徴感染しています）。この抑制機構には木部組織（導管、木部柔細胞）および随組織での物理的な防御反応の関与が明らかとなっています。近年、前述した産地化や施設化に伴う連作や温暖化に伴い従来の慣行接ぎ木では青枯病の発生を抑えることができない事例が多く報告されています。これは高温や高湿度条件、菌密度が高い条件では「台木の抑制機構」が十分に働かず、無病徴感染した台木から穂木へ青枯病菌が移行し穂木が感染・発病することが主な原因と考えられています。

[高接ぎ木法の青枯病発病抑制機構]

高接ぎ木法は、慣行接ぎ木（接ぎ木部位：子葉上）より高い位置（同：地際から10cm以上）に接いだ苗を利用した防除技術です（図6-1）。

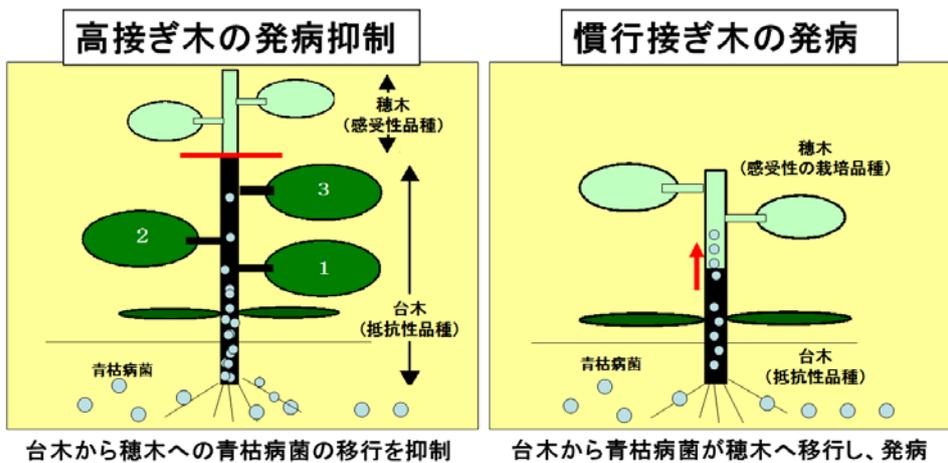


図6-1 高接ぎ木法の発病抑制メカニズム

高接ぎ木トマトは台木品種の持つ“植物体内での青枯病菌の移行と増殖の抑制能力”を最大限に活用し、穂木への青枯病菌の感染を抑制します。地際から12cm（およそ第2葉）上より15cm（およそ第3葉）上の高接ぎ木のほうがより高い発病抑制効果が認められます。

[高接ぎ木法による青枯病防除効果]

高接ぎ木法は、北日本地域の夏秋作型、北信越地域の半促成、抑制作型、西日本の促成作型等、地域、作型にかかわらず慣行接ぎ木よりも安定した高い発病抑制効果が実証されています（図 6-2）。



図 6-2 半促成作型における青枯病発病抑制効果（新潟県）

高接ぎ木法による持続的な青枯病防除には、圃場の深層まで消毒可能な土壌還元消毒や土壌診断に基づいた防除法の選択等の総合防除体系の中での利用が極めて重要です。

[発病株から青枯病菌の土壌への移行]

還元消毒による土壌中の青枯病菌密度低減も重要ですが、発病株を早期に抜き取ることで青枯病菌による土壌の汚染悪化を防ぐことができます。また、強度の青枯病抵抗性台木品種は発病した穂木からの青枯病菌の土壌への移行を抑制します（表 6-1）。発病の多い圃場では青枯病抵抗性の強い台木品種を用い、青枯病菌の汚染程度を高めないことが重要です。

表 6-1 発病した接ぎ木株から土壌への青枯病菌の移行

深さ	台木品種	2014年	2015年
0-30cm	感受性台木	3.15*	3.38
	中度抵抗性台木	2.11	3.20
	強度抵抗性台木	0.56	1.34
30-60cm	感受性台木	1.99	2.86
	中度抵抗性台木	0.73	2.79
	強度抵抗性台木	0.39	0.32

*土壌に移行した青枯病菌密度を対数で示した。

7. 体系防除について

〔高接ぎ木栽培との組み合わせによる防除効果〕

新潟県では夏季の高温期に定植する抑制作型において、高接ぎ木栽培の導入を進めています。既に青枯病の発生株率が30%以下の圃場では、高接ぎ木苗を用いることで、慣行接ぎ木苗に比べて青枯病の発病株率を半分程度に抑えられます。

糖含有珪藻土を用いた土壤還元消毒法の実施直後は、土壤中の青枯病菌は検出限界以下まで低下します。消毒後のトマト作付回数とともに土壤中の病原細菌数は増加するため、青枯病の発病リスクは高まることが想定されます。新規土壤還元消毒は複数作栽培しても消毒効果が維持されますが、青枯病は発病してからは防除できないため、耕種的防除法である高接ぎ木栽培と組み合わせることで、より効果的に本病の発生を抑制することが可能になります。図7-1、7-2のように土壤還元消毒後、青枯病の発生が懸念されるトマト3連作、4連作時に高接ぎ木栽培を導入することで、慣行接ぎ木栽培に比べて青枯病の発病を軽減することができます。土壤還元消毒の処理が上手くいかなかった場合や、前作の発病状況等を考慮し、高接ぎ木栽培の導入時期を判断することで、青枯病を持続的に防除することができます。

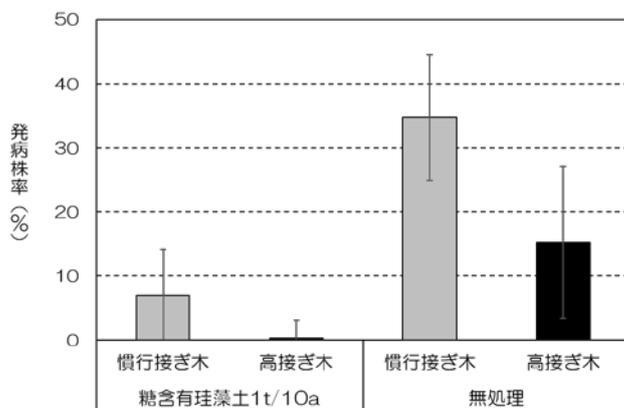


図7-1 土壤還元消毒法と高接ぎ木栽培によるトマト青枯病に対する防除効果
(消毒後3連作目のトマト栽培における実証試験)

消毒期間：2015年8月17日～9月20日、栽培期間：2017年7月15日～

11月24日、供試品種 穂木：りんか409、台木：Bバリア、慣行接ぎ木：子葉上で接ぎ木、高接ぎ木：3葉上で接ぎ木

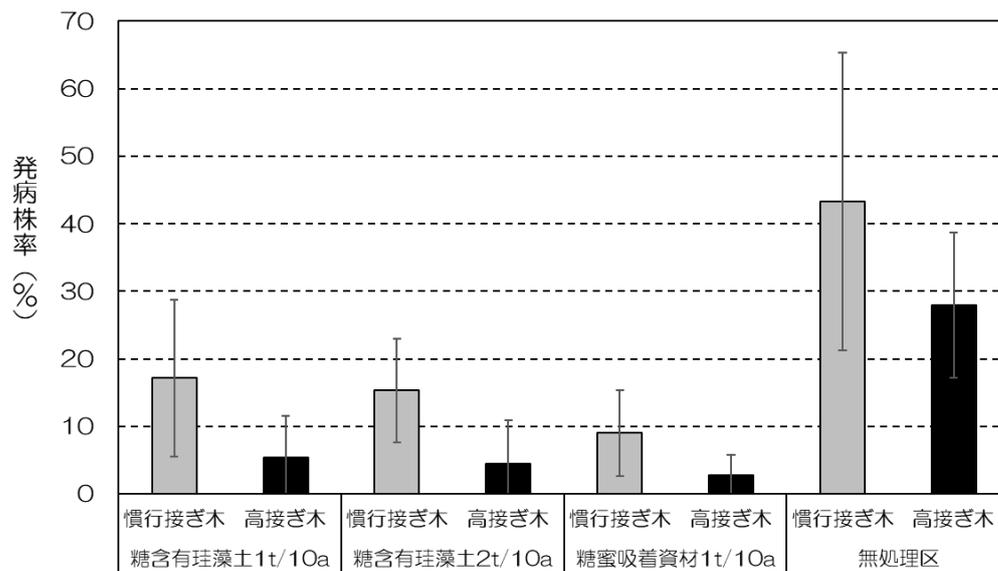


図 7-2 土壤還元消毒法と高接ぎ木栽培によるトマト青枯病に対する防除効果の持続性（消毒後 4 連作目のトマト栽培における実証結果）

消毒期間：2016 年 8 月 18 日～9 月 12 日、栽培期間：2018 年 7 月 12 日～

11 月 24 日、供試品種 穂木：りんか 409、台木：B バリア、慣行接ぎ木：子葉上で接ぎ木、高接ぎ木：3 葉上で接ぎ木

8. 資料・参考データ

[二価鉄濃度と消毒効果の関係]

土壌が還元化していく過程において、鉄やマンガン等が還元されて二価鉄 (Fe^{2+}) や二価マンガン (Mn^{2+}) といった金属イオンが遊離してきます。この二価鉄をジピリジル反応による比色法等によって検出することにより、土壌還元化の程度を評価することができます。

新規資材を用いた土壌還元消毒技術における土壌深層への還元力は、糖蜜とほぼ同等であることから（表 8-1）、深層の青枯病菌に対する消毒効果も高いことが確認できます（表 8-2）。

表 8-1 消毒後の各試験区における土壌中の二価鉄 (Fe^{2+}) 含量

	土壌深度	太陽熱	糖含有珪藻土 (1t/10a)	糖蜜吸着資材 (1t/10a)	糖蜜 (0.6%)
Fe^{2+} 含量 ($\mu\text{g/g}$ 土壌)	0-13cm	12.4±8.2	15.4±23.1	50.1±40.7	55.9±48.6
	13-25cm	1±1.2	39.2±26	88.2±17.3	67.4±30.7
	25-38cm	0	44.8±28.7	32.3±28.2	8.1±12.1
	38-50cm	0	1.1±1.0	10.1±16.5	1.4±2.4

注) 土壌還元消毒42日後の各試験区3地点の土壌を用いて、ジピリジル比色法によって測定した。

表 8-2 各資材による深層の青枯病菌に対する消毒効果

試験区	処理量	土壌深度	消毒前		消毒後	
			菌数 (cfu/g乾土)	菌検出 箇所数	菌数 (cfu/g乾土)	菌検出 箇所数
水処理 (太陽熱)		0-17cm	240 ~ 460	3/3	N.D.	0/3
		17-33cm	93 ~ >2400	3/3	N.D. ~ 3.6	2/3
		33-50cm	3.6 ~ 1100	3/3	N.D. ~ 23	2/3
糖含有珪藻土	1t/10a	0-17cm	240 ~ >2400	4/4	N.D.	0/4
		17-33cm	210 ~ >2400	4/4	N.D.	0/4
		33-50cm	23 ~ >2400	4/4	N.D.	0/4
糖蜜吸着 資材	1t/10a	0-17cm	3.6 ~ 93	4/4	N.D.	0/4
		17-33cm	36 ~ >2400	4/4	N.D.	0/4
		33-50cm	N.D. ~ >2400	2/4	N.D.	0/4
廃糖蜜	0.6%液	0-17cm	23 ~ 240	4/4	N.D.	0/4
		17-33cm	9.2 ~ >2400	4/4	N.D.	0/4
		33-50cm	N.D. ~ >2400	2/4	N.D. ~ 23	2/4

注) N.D.はMPN-PCR法による検出限界値以下 (< 3cfu/g) を示す。

[灌水後にビニール被覆を行う場合]

頭上やサイドから灌水を行う施設では、初めに灌水をし、圃場内に水が溜まった時点でビニールを被覆しなければなりません(図 8-1)。このような施設では、追加灌水を行うことができないため、湛水状態になるまで灌水を行ってからビニールを被覆します。また、土壌還元消毒法に初めて取り組む方や、施設の性質上、水源が細く、一定時間内に十分な灌水量を確保できない圃場や、緩やかな傾斜がある圃場においても、灌水後のビニール被覆を勧めています(図 8-2)。ビニールの上からだと確認しづらい灌水チューブの目詰まりや(散水状況)、圃場内で水が溜まりにくい部分を確認できる利点があり、灌水時に問題点を改善することができます。ビニール被覆時は、足元が不安定で重労働となりますが、生産者自らが、圃場条件を確認することができます。



図 8-1 ハウスサイド(灌水チューブ)からの灌水事例(ビニール被覆前)



図 8-2 灌水後にビニール被覆を行っている事例

〔農業用支柱による灌がい水の浸透具合の確認〕

土壤深層部への水の浸透具合を確かめる方法の一つです。灌水時に小さな水溜まりができ始めたら農業用支柱（市販の園芸用 直径18～21mm、長さ120cm～210cm）を小刻みに数回に分けて地面に突き刺します（図8-3）。一度に強く突き刺すと支柱が折れてしまいますので注意が必要です。土壤深層部まで、水が溜まっていれば、地表下60cm～100cmの深さまで支柱が突き刺さりやすくなります。また、土壤から抜き出すと支柱には泥水が付着するため、水の溜まり具合を確認することができます。土壤の表層に水が溜まっていなくても、支柱が土壤にスムーズに刺されれば、地下部では水が順調に溜まっている証拠です。圃場内の1カ所だけではなく、ハウスサイド、ハウスの出入り口とその反対側等で行い、水の溜まり具合を確認するようにしてください。



図8-3 農業用支柱による土壤深層部の湛水状況の確認

[新規資材を用いた場合の労力の比較]

土壌深層への消毒効果が高い既存の土壌還元消毒資材で代表的なものとして、糖蜜や低濃度エタノールが普及しています。これらと比較して、新規資材は深層への消毒効果が同等以上でありながら、より省力的に消毒作業が行えるというメリットがあります。

ここでは、岐阜県における現地実証試験での作業状況（10a 当たりの作業時間に換算）を1例として示します。事前耕起に1時間30分、新規資材の散布はブレンドキャストを使用して45分間（手散布の場合、3人で1時間15分）、灌水チューブの設置に1時間15分（3人）、ビニール被覆（3人）に30分間かかりました。糖蜜や低濃度エタノールを使用する場合と比較して、資材の散布時間が余分にかかります。しかし、糖蜜や低濃度エタノールは、希釈液を常に調製・混入しながら灌水作業を行う必要があります。灌水作業時間は、個々の圃場条件によって水量や水圧等が異なりますが、1平米当たり100～150Lの灌水を完了するには、6時間から24時間以上かかる場合もあり、新規資材の場合はこの灌水処理中の希釈液調製・混入等の作業時間が不必要なため、省力的といえます。

[経済性評価]

本技術体系は、「青枯病等の土壌病害虫に起因する収獲量減少に悩む生産者の農業所得復元」に向けて有用であるといえます。特に慣行防除が効かなくなってきた地域では非常にニーズが高いと考えられます。化学農薬に比べ安全であることや詳細なマニュアルに従い施用することで効果を得やすい、という点も魅力の1つです。

一方、低温下での防除効果が得づらい等、環境条件にも一定の制約がある点には留意する必要があります。また新規土壌還元消毒の費用が慣行技術に比べ若干高くなるため、導入に当たっては複数作での適用を考えることで、1作当たりの負担を減らすということも考える必要があります（表8-3）。

表8-3 本技術導入の経営的メリットと留意点

メリット	① 糖蜜施用やダゾメット粉粒剤といった慣行技術が効かなくなった圃場でも利用可能です。 ② ダゾメット粉粒剤のような化学農薬に比べ、近隣や自身にとってより安全な技術です。 ③ 地域に合わせた施用量や施用方法が厳密に規定されるため、防除作業が容易です。 ④ 地域によっては、複数作を対象にした防除が可能であり、年間の負担を軽減していくことも可能です。
留意点	① 低温下では十分な効果を得づらい可能性があります。 ② 新規土壌還元消毒の価格は現時点では未確定ですが、慣行技術に比べて若干高くなることが予想されます。

実証各地域におけるモデル事例に基づき、農業所得の改善（復元）程度について試算した結果、導入すべき生産者の条件として以下の点があるといえます（表8-4）。

- 発病率（ここでは減収率と同率とします）の改善度合いが15%を上回れば農業所得は10%以上改善する傾向がみられます。つまり、減収見込が15%を上回ることが予想される場合、本技術は生産者にとって非常に有用です。
- 夏秋作型や低温地域等、消毒時期に十分な地温が得られない場合は、還元消毒の効果を得づらいといえます。
- 新潟県等、複数作に渡って1回の消毒で防除効果を持続できる場合、農業所得は大きく復元します。複数作に渡って防除効果を持続させることは経済的評価の面からも非常に重要です。

表 8-4 各地域における農業所得改善のモデル事例（注 3、注 8）

	東北地域	
	青森県	千葉県
栽培条件		
作型	夏秋	促成
モデル面積	20a	20a
慣行消毒方法	ダゾメット粉粒剤	フスマ
導入技術と条件		
新規土壌還元消毒	・1t/10a ・1作に1度	・1t/10a ・1作に1度
高接ぎ木栽培	導入なし	導入 (78千円/10a)
1年間の経営収支		
青枯病発病率 ^(注2)	15.5%⇒6.5%	30%⇒0%
収量 (kg/10a) ^(注1)	6,253⇒6,919 10.7%増	5,600⇒8,000 42.9%増
農業所得 (千円) ^(注1,注4)	3,156⇒3,336 5.7%増	-596⇒432 -%増

	北信越地域		
	新潟県 ^(注5)	富山県	石川県 ^(注6)
栽培条件			
作型	抑制・半促成	半促成	半促成・抑制
モデル面積	30a	40a	40a
慣行消毒方法	—（無処理）	—（無処理）	—（無処理）
導入技術と条件			
新規土壌還元消毒	・1t/10a ・4作に1度	・1t/10a ・1作に1度	・1.5t/10a ・2作に1度
高接ぎ木栽培	導入 (676千円/10a)	導入 (78千円/10a)	導入 (520千円/10a)
1年間の経営収支			
青枯病発病率 ^(注2)	32.3%⇒3.0%	23.8%⇒8.8%	18.5%⇒0.0%
収量 (kg/10a) ^(注1)	11,122⇒15,471 39.1%増	9,144⇒10,944 19.7%増	14,077⇒18,000 27.9%増
農業所得 (千円) ^(注1,注4)	3,151⇒6,156 95.4%増	4,183⇒4,706 12.5%増	5,556⇒7,627 37.3%増

	東海地域		西日本地域	
	岐阜県		和歌山県	熊本県 (注7)
栽培条件				
作型	促成	夏秋雨よけ	促成	促成
モデル面積	50a	30a	25a	26a
慣行消毒方法	糖蜜処理	－（無処理）	太陽熱消毒	－（無処理） なす台木
導入技術と条件				
新規土壌還元消毒	・1t/10a ・1作に1度	・1.5t/10a ・1作に1度	・1t/10a ・1作に1度	・2t/10a ・1作に1度
高接ぎ木栽培	導入 (275千円/10a)	導入なし	導入 (567千円/10a)	導入 (563千円/10a)
1年間の経営収支				
青枯病発病率 (注2)	15.7%⇒0%	26.5%⇒12.7%	10.8%⇒0.0%	0%⇒8%
収量 (kg/10a) (注1)	15,703⇒18,627 18.6%増	6,646⇒7,894 18.8%増	5,364⇒6,000 11.9%増	9,311⇒12,636 35.7%増
農業所得 (千円) (注1,注4)	4,118⇒6,350 54.2%増	3,368⇒3,555 5.5%増	3,377⇒3,419 1.2%増	3,658⇒5,723 56.4%増

注1：％は増減率を表します。

注2：青枯病発病率は、収量の減少率と定義しています。熊本県のみ実証実験区における株の発病率の実績を記載しています。ただし、青森県は褐色根腐病発病率で評価した。

注3：全てのモデルで導入前後の販売単価は同一です。

注4：農業経営費の主な増加（減少）要因は以下のとおりです。

- ① 新規土壌還元消毒の導入費用および高接ぎ木栽培の導入費用。新規土壌還元消毒は15万円/tとして計算。
- ② 収量増減に伴う雇用労賃や物流・出荷費の増減。

注5：新潟県の青枯病発生率は、各作の導入前後の発生率の単純平均で計算しています。なお各作の発病率は以下のとおりです。

- ・抑制作1回目：44.4%⇒3.5%、半促成作1回目：20.9%⇒0.3%、
抑制作2回目：34.7%⇒0.7%、半促成作2回目：29.2%⇒7.6%

注6：石川県の青枯病発生率は、各作の導入前後の発生率の単純平均で計算しています。なお各作の発病率は次のとおりです。抑制作：3.4%⇒0%、半促成作：33.5%⇒0%

注7：熊本県の慣行技術であるナスの台木は青枯病に対する抵抗性が非常に高い一方収量が大きく減少する特性を有します。新規土壌還元消毒と高接ぎ木栽培を導入することで、青枯病の発病率は若干上がるものの、高接ぎ木栽培によりそれを上回る収量増を得ることができました。

注8：上記は実証研究の成果に基づくモデル試算であり、同様の効果が得られることを保証するものではありません。

[消毒前後の土壌化学性の変化]

本プロジェクトでは 10 を超える圃場において消毒前後の土壌化学性を調査しました。表 8-5 に、その 1 例を示します。糖含有珪藻土や糖蜜吸着資材は、土壌中で分解しやすい有機態窒素成分を多く含むフスマと比較して、消毒後土壌の無機態窒素 (NH₄) 含量が低下します。トルオーグリン酸 (有効態リン酸) 含量は消毒後で減少しましたが、他の圃場では大きな変化はみられません。糖蜜吸着資材はカリウムを大量に含むため、消毒後土壌中の交換性カリウム含量が高まります。

還元消毒で大量に灌水することで除塩効果が認められます。消毒前に比べて消毒後では EC (電気伝導度) が低下し、NO₃、カルシウム、マグネシウム、ナトリウムの土壌中含量が減少します (表 8-5)。一方、還元化によりマンガン等は消毒中～直後の土壌では可給性が高まるとともに、可給化したマンガンの一部は作土から下層土へ移動することから、長期的には不足する可能性があります。消毒後は定期的に土壌診断を行い、養分状況を確認することが重要です。

表 8-5 消毒前後の土壌化学性の例

	含水率		pH(水)		EC mS/cm		全窒素 %乾土重量あたり		全炭素 %乾土重量あたり		トルオーグリン酸 mg-P ₂ O ₅ /100g乾土	
	前	後	前	後	前	後	前	後	前	後	前	後
無処理	0.24	0.23	6.1	6.5	0.79	0.21	0.34	0.29	3.5	3.2	51	45
糖含有珪藻土	0.29	0.26	5.9	6.5	0.49	0.18	0.32	0.31	3.7	3.5	51	41
フスマ	0.26	0.25	5.9	6.7	0.84	0.18	0.33	0.31	3.5	3.4	51	39
糖蜜吸着資材	0.28	0.25	6.2	6.6	0.57	0.16	0.31	0.28	3.5	3.4	50	36

	NH ₄ mg-N/kg乾土		NO ₃ mg-N/kg乾土		交換性Ca mg-CaO/100g乾土		交換性K mg-K ₂ O/100g乾土		交換性Mg mg-MgO/100g乾土		交換性Na mg-Na ₂ O/100g乾土	
	前	後	前	後	前	後	前	後	前	後	前	後
無処理	0	29	280	11	533	485	56	51	94	80	56	41
糖含有珪藻土	0	51	111	6	518	474	56	56	81	68	43	36
フスマ	2	134	283	1	568	480	58	62	96	80	53	42
糖蜜吸着資材	1	83	119	2	568	468	56	90	78	69	44	37

- 糖含有珪藻土、フスマ、糖蜜吸着資材は各 1 t/10a 施用した。

[土壌微生物による養分取り込み]

糖含有珪藻土は窒素、リン酸、カリウム成分が少ない資材です（表 2-1）。しかし、糖含有珪藻土は（全炭素含量）÷（全窒素含量）（C/N 比と呼ばれる）が高いことから、土壌中にすき込むと、土壌微生物は、糖含有珪藻土から炭素を、土壌中から（前作の残肥として残っている）窒素を取り込みます。取り込まれた窒素は、土壌微生物が死滅していく過程で再び土壌にはき出されます（図 8-4）。そのため、前作の残肥が多かった場合には、土壌微生物に取り込まれた窒素成分が、消毒後の栽培初期に、作物に供給されます。前作後の土壌診断で、残肥窒素量が多いことがわかっている場合には、特に注意が必要です。

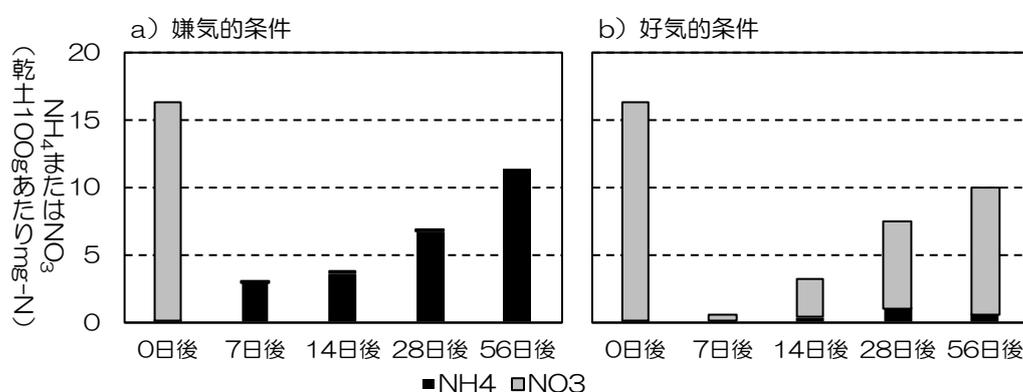


図 8-4 土壌中に硝酸態窒素を 16 mg 100 g⁻¹ 含む土壌に糖含有珪藻土を混和した後の土壌中無機態窒素含量の推移。

a) はゴム栓で密閉したガラス容器中で嫌氣的に培養、b) は通氣性のあるポリエチレン製フィルムでフタをして好氣的に培養した場合。培養温度は 30℃。糖含有珪藻土は土壌重量の 2% 混和。井原（2017）より引用。

[土壌還元消毒による土壌微生物組成の変化]

- 1) 還元消毒を行うと好気性菌（酸素があるところで育つ菌）が減り、嫌気性菌（酸素がないところで育つ菌）が増えます。
- 2) 病原微生物は好気性菌なので還元消毒により、無害な嫌気性菌に置き換わります（図 8-5）（李ら、2019）。

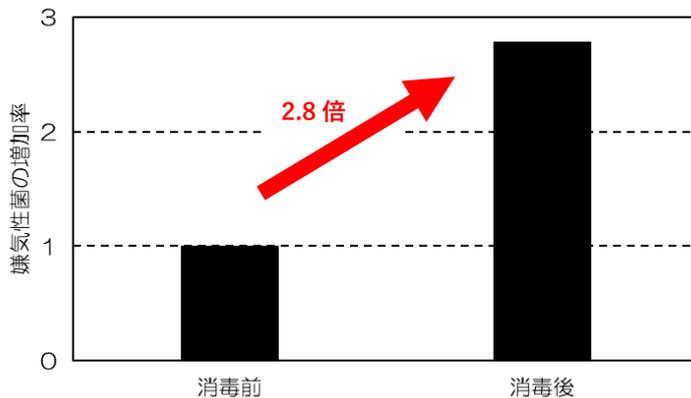


図 8-5 還元消毒後の嫌気性菌増殖率

- 3) 還元消毒により病原菌を殺す嫌気性菌（*Clostridium* 属細菌）が増えることが報告されています（門馬ら 2007、Ueki et al. 2017）。
- 4) *Clostridium* は畑の土ではよくみられる細菌です。この菌は酪酸や酢酸等の有機酸を作り、二価鉄や二価マンガンを遊離させ、これらの作用で病原菌が死滅します（Momma et al. 2009）。
- 5) 化学薬品を使った消毒法は土壌微生物をほとんど殺してしまうので、病原菌の侵入に弱くなります。しかし還元消毒は消毒前後の土壌微生物の多様性が変わらないため（図 8-6）（李ら、2019）、外から病原菌が侵入しても優先的な増殖を許しません。

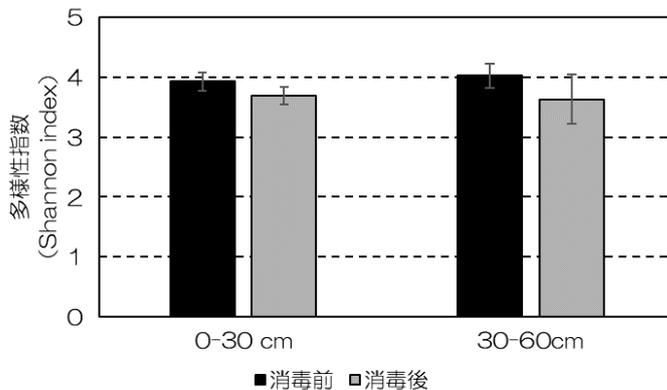


図 8-6 還元消毒前後の土壌微生物多様性の変化

[褐色根腐病に対する生物検定方法]

西脇（2014）の生物検定法により土壌の褐色根腐病汚染状況を判定できます（図8-7）。

1）現地汚染圃場から1試験区当たり5カ所の土壌を深さ別に採土管で採取し、十分混和した後に2mmのふるいを通します。検定時までは5℃で保管します。

2）供試土壌20mlを、200mlのバーミキュライトに混和して、径9cmのビニールポットに詰めます。

3）200穴のセルトレイで30日前後育苗した矮性トマト「レジナ」を1株／ポット移植します。

4）移植後100ml／ポットで灌水した後、ハイポネックス（N6-P10-K5）の100倍液を10ml／ポット灌注します。

5）地温19～20℃で35日間栽培し、苗を抜き取り流水で洗浄した後、根部の褐変面積率を調査します。

6）検定は1試験区当たり5ポット以上で行い、必ず殺菌土壌区を設けます。温室で実施する場合は、秋～冬季に下面に電熱マットを敷いて行うとよいです。



図8-7 褐色根腐病に対する生物検定方法

[青枯病菌の検出定量法]

これまで、青枯病菌の土壌からの検出には選択培地による分離が広く用いられてきました。しかし、選択培地上に生えた菌のどれが青枯病菌か見分けるには経験が必要であり、検出感度も高くありません(図 8-8)。一方で近年では PCR 法等の遺伝子を用いた検出方法が盛んに研究されています。これらの方法では青枯病菌と他の菌を簡便に識別できますが、その多くは DNA の抽出作業等の手順が煩雑な上、定量性に問題がありました。

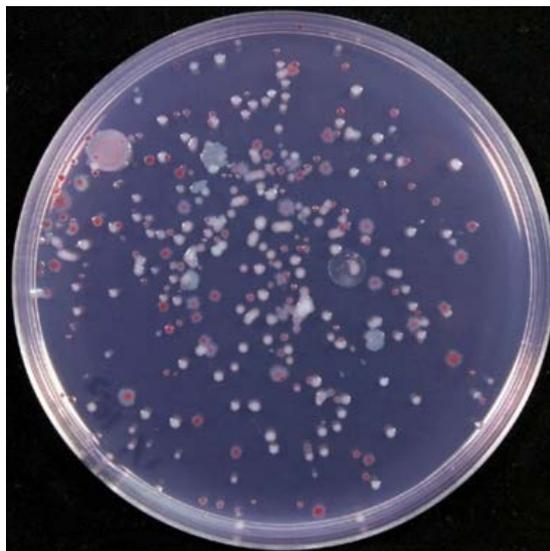


図 8-8 土壌抽出液を選択培地上に塗布した際に生じる細菌集落
白く流動性のある集落のみ青枯病菌

そこで、PCR 法を改良し、従来の方法よりも高感度で定量的に土壌中の青枯病菌を検出する手法、MPN-PCR を開発しました。本手法は 1g 当たり 3 個以上の青枯病菌数を定量的に検出できます。これは従来の選択培地を用いる方法の 100~1000 倍の検出感度です。さらに MPN-PCR 法を改良し、より実用性を高めました。

<準備するもの>

分離バッファー：1mM HEPES-HCl (pH7.0)、0.5%スキムミルク
培養バッファー：1mM HEPES-HCl (pH7.0)、0.5mg/L ペニシリン G、50 mg/L バシトラシン、15mg/L トリフェニルテトラゾリウムクロライド(TTC)、0.25 mg/L クロラムフェニコール

機器類：攪拌機、マイクロプレート用遠心分離機、サーマルサイクラー、電気泳動槽等

<方法>

※図 8-9 を参照してください。

1. 土壌 5g くらい (A) を 100ml ビーカーにとって、乾燥機で 180°C2 時間または電子レンジ (500w) で 10 分加熱。加熱後の重さ (B) を量って、含水量と $(A/B) \times 6 = Cg$ を計算する。
2. 50ml ファルコンチューブに Cg の土壌を入れる。
3. 重量が 30g となるように 0.5%スキムミルクを加える。

4. よく攪拌する。静置した時に上清の透明度が高くなる（チューブの反対側の文字がみえる程度）まで行う。

※（オプション：透明度が低いときには、NaCl を全体の 1%を超えないように微量ずつ加えながら攪拌する。若しくは、赤玉土を 1.5g 加えて攪拌する）

5. 上清をおよそ 2 mL 回収し、

0.1g 区：15 mL チューブに 4.5 mL 培養バッファー＋上清 0.5mL

0.01g 区：1.5 mL チューブに 450 μ L 培養バッファー＋上清 50 μ L

0.001g 区：0.6 mL チューブに 100 μ L 培養バッファー＋上清 5 μ L を各 3 本ずつ作製し、35°Cで培養する。

※（反応阻害確認用 control）4.5 mL 培養バッファー＋上清 0.5 mL に青枯病菌数 10 cfu 程度を加えたものも作製するとよい。

6. 20 時間程度培養後、ミリポア マルチスクリーン-GV（または HV でも可）のウェルに培養液を 100-150 μ L 入れる。

7. 0.6ml ディープウェルプレートを受け皿にして 4,000rpm（2,200g）で 3 分間遠心する。※バキューム式のろ過を行ってもよい。

8. マルチスクリーンのウェルに滅菌蒸留水 150 μ L を入れる（洗浄 1 回目）。4,000rpm（2,200g）で 3 分間遠心する。

9. マルチスクリーンのウェルに滅菌蒸留水 150 μ L を入れる（洗浄 2 回目）。4,000rpm（2,200g）で 3 分間遠心する。

10. マルチスクリーンのウェルに滅菌蒸留水 30 μ L を入れ、軽く揺すってから 5 分静置する。

11. PCR プレートに 10 μ L 分取する。

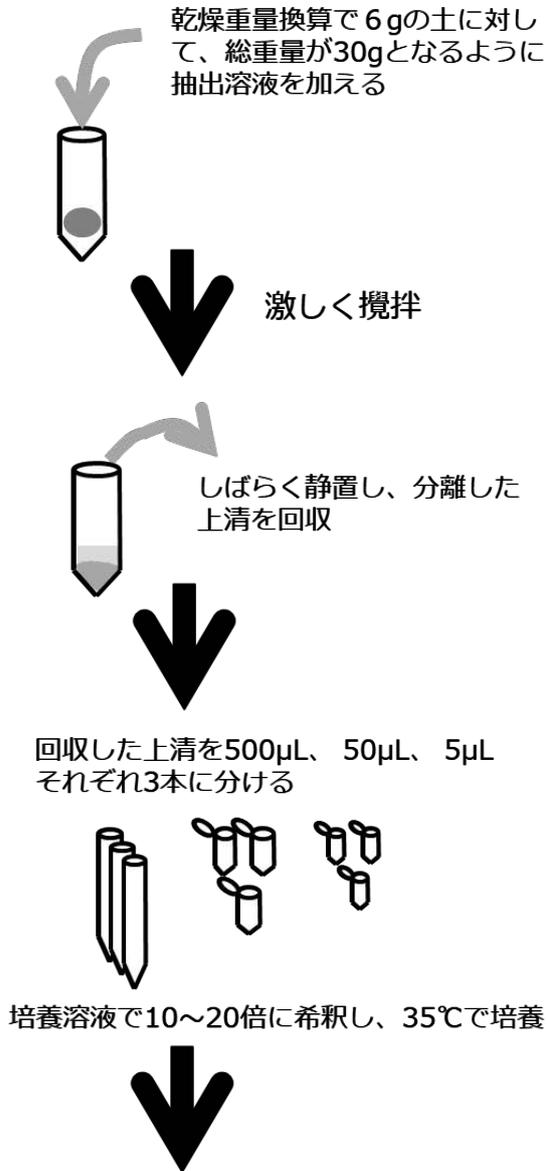
12. サンプルを 95°C 2 分間熱処理し、表 8-6 の PCR ミクスチャー 10 μ L を加える。

13. 表 8-7 で示す反応条件で PCR を行う。

14. PCR 終了後、電気泳動して確認。確実に増幅が確認できたものは“+”、増幅の認められないものは“-”とする。

15. 最確数表（表 8-8）に当てはめて菌密度を判定する。

1日目



2日目

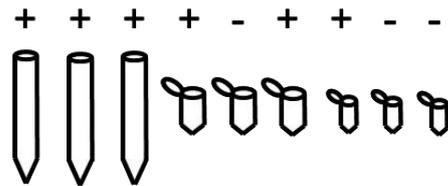
培養液150μLをマルチスクリーンGVでろ過洗浄2回

遠心分離機なら4000rpm3分

30μLの蒸留水に再懸濁



10μLを鑄型にしてPCR



3, 2, 1

最確数に当てはめる(表8-8)

3,2,1 = 150

150 cells/ g

図 8-9 改良 MPN-PCR 法
井上・中保 (2015) を改変

表 8-6 PCR ミクスチャー

滅菌水	4.2 μ L
反応バッファー	2.0 μ L
dNTP(各2.5mM)	1.6 μ L
primer fliCf(3.2pmol)	1.0 μ L
primer fliCr(3.2pmol)	1.0 μ L
GeneTaq NT Hot Start	0.2 μ L
Total	10.0 μ L

表 8-7 PCR 反応条件

95°C	3分	1回
95°C	30秒	↓
66.5°C	30秒	
72°C	45秒	↓
95°C	30秒	↓
65°C	15秒	
72°C	15秒	↓
72°C	5分	1回

表 8-8 最確数表

MPN値	最確数	MPN値	最確数	MPN値	最確数	MPN値	最確数
0,0,0	<3	1,0,0	3.6	2,0,0	9.1	3,0,0	23
0,0,1	3	1,0,1	7.2	2,0,1	14	3,0,1	39
0,0,2	6	1,0,2	11	2,0,2	20	3,0,2	64
0,0,3	9	1,0,3	15	2,0,3	26	3,0,3	95
0,1,0	3	1,1,0	7.3	2,1,0	15	3,1,0	43
0,1,1	6.1	1,1,1	11	2,1,1	20	3,1,1	75
0,1,2	9.2	1,1,2	15	2,1,2	27	3,1,2	120
0,1,3	12	1,1,3	19	2,1,3	34	3,1,3	160
0,2,0	6.2	1,2,0	11	2,2,0	21	3,2,0	93
0,2,1	9.3	1,2,1	15	2,2,1	28	3,2,1	150
0,2,2	12	1,2,2	20	2,2,2	35	3,2,2	210
0,2,3	16	1,2,3	24	2,2,3	42	3,2,3	290
0,3,0	9.4	1,3,0	16	2,3,0	29	3,3,0	240
0,3,1	13	1,3,1	20	2,3,1	36	3,3,1	460
0,3,2	16	1,3,2	24	2,3,2	44	3,3,2	1100
0,3,3	19	1,3,3	29	2,3,3	53	3,3,3	>2400

豆知識 ー最確値 (MPN) 法による菌数予測ー

たとえば 1g の土を 3 つ用意し、それぞれに菌がいるかいないかを調査した時に、1 つは菌がいて 2 つは菌がいなかったとします。では 10g の土に菌はどのくらいいたでしょう・・・というのを考えます。

1g	合計 10g									
+	-	-	+	-	-	+	-	-	+/-	当りは 3~4 個

つまり 10g には 3~4 個菌がいたと想像できます。しかし、1g の土 3 つの結果だけでは偶然の可能性が高いので、前後 3 段階、合計 9 つの結果を基に計算したものが最確値となります。

たとえば 1g は 3 つ、0.1g は 2 つ、0.01g は 1 つ菌がいたとします。

1g	1g	1g	0.1g	0.1g	0.1g	0.01g	0.01g	0.01g
+	+	+	+	-	+	-	+	-

このときは 3、2、1 と表し、複雑な計算をすると、10g 当たり 150 個の菌がいたと推測できます。実際には最確値表というものがあって、例えば (3、2、1) = 150、(2、0、0) = 9.1 という値が計算しなくても分かるようになっています。

大雑把ですが、1g ≒ 1ml とすれば、1g 当たり 1、000 個の菌が検出されたときは直径 1.2mm の土玉に 1 個の菌がいると変換できます。実際には菌が 1 個ずつバラバラにいるわけではなくある程度固まっていると思われるので、おおよその考え方の目安としてください。

[ネコブセンチュウの検出法および評価法]

<土壌の採取>

圃場から数点、線虫スコップ（図 8-10、園芸用スコップでも可能）等で土壌を採取して、ビニール袋に収納します。この時、表土よりその下 5～20 cm にネコブセンチュウは多く生息しています。採取した土壌の保存は数日ならば室温（20～25℃）で保存、1 週間以上保存する場合は 10℃で保存します。ネコブセンチュウは表面より 5 cm～20 cm のところに多く生息します。



図 8-10 線虫スコップ

<ベルマン分離>

ネコブセンチュウの分離はベルマン法が一般的に使われます（図 8-11）。用具はガラス漏斗（φ9cm）、ふるい（φ7cm：目は粗い）、シリコンチューブ、ガラス管瓶、ティシュペーパー（キムワイプ等）と土壌の重さを測定する秤が必要です。セットした漏斗に水道水を入れ、シリコンチューブ内に空気や気泡がないかを確認します。その後、採取した土壌をビニール袋の中で攪拌し、20g ずつキムワイプ等を敷いたふるいに計り取ります。そのふるいを水道水で満たしている漏斗に載せて、ふるいの下に気泡がないか確認して、ある場合は取り除きます。25℃前後で 72 時間静置します。ベルマン法は分離効率が悪いといわれており、3 日間の分離で、良好に分離されても分離効率は 50%前後といわれています。

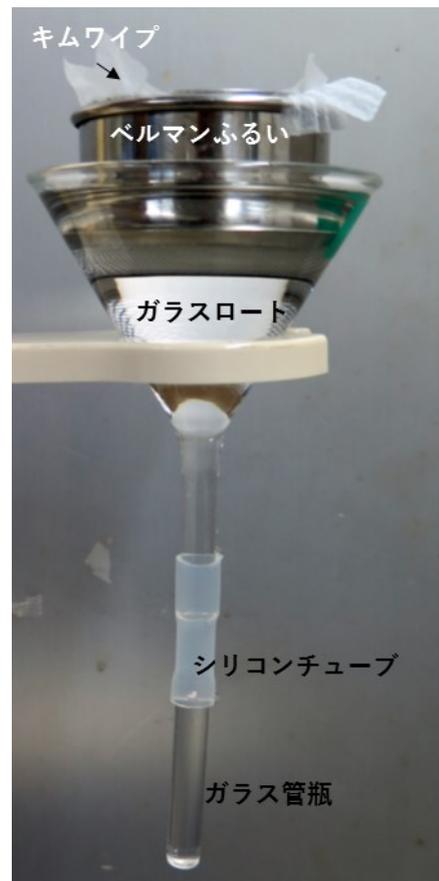


図 8-11 ベルマン分離

＜顕微鏡観察、計数＞

土壌線虫は小さくて、大きくても1~2mm、多くは1mm以下の生物であり、顕微鏡で観察し、数える必要があります。線虫はミミズ状の形で、形態的特徴に乏しく、ネコブセンチュウを見分けるには若干の慣れ、訓練が必要となります。植物寄生線虫は全て頭部に口針を持っており、それが識別の1つのポイントになります。図8-12に植物寄生線虫として特に重要なネコブセンチュウ、ネグサレセンチュウ、シストセンチュウの幼虫を示します。長さはどれも0.5ミリ以下程度です。ネグサレセンチュウは尾端が丸まっている感じ、シストセンチュウとネコブセンチュウはとがっている感じで、シストセンチュウのほうが幾分太めでしっかりした口針があります。ベルマン分離された管瓶中の線虫をパスツールピペットで、格子線・枠付スライド等(図8-13)に移して生物顕微鏡で観察し、他の線虫と識別しながらネコブセンチュウを数取器で数えていく作業を行います。



図8-12 シストセンチュウ、ネグサレセンチュウとの比較

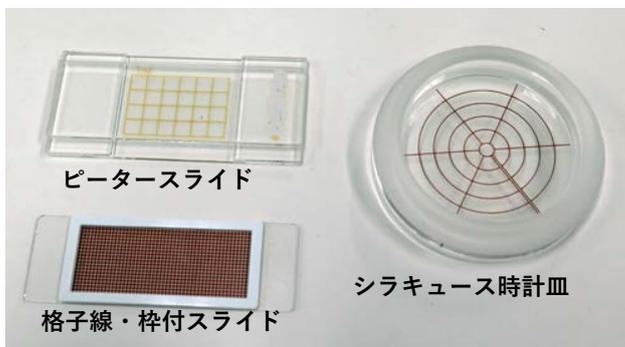


図8-13 顕微鏡下で線虫を計数するとき使用する道具

<被害査定法：根こぶ程度と根こぶ指数>

根を掘り上げるとネコブセンチュウにより被害を受けた根には、根こぶが形成されています。この根こぶの形成程度を数段階の階級に分けて評価することが、ネコブセンチュウの被害査定法として広く採用されています。被害程度は0から4までの5段階（0：無、1：少、2：中、3：多、4：甚）で評価されることが多いですが、5段階法に中間値を与えて実質9段階で判定する場合があります。根こぶ指数とは、株ごとの根こぶ程度を調査区の平均値に直したもので、百分率に換算して示されます。その式は

$$\text{根こぶ指数} = \text{調査区の根こぶ程度の平均値} / 4 \times 100$$

となります。調査区の統計検定はノンパラメトリックな統計手法で行うことが必要です。

参考文献

1. 新規土壌還元消毒について

野菜茶業研究所（2011）野菜の接ぎ木栽培の現状と課題. 野菜茶業研究所研究資料 7：1-142

2. 新規資材（糖含有珪藻土、糖蜜吸着資材）について

味の素グループ（2018）統合報告書 2018 https://www.ajinomoto.com/jp/aboutus/integrated_report/

越野正義（1988）リン（リン酸）. 第二改訂詳細肥料分析法. 養賢堂. 東京. p.96

井原啓貴・中保一浩・植原健人・立石靖・井上康宏（2016）固形の有機質資材を用いて下層土まで消毒する新規土壌還元消毒法. 日本土壌肥料学会講演要旨集 62：5

井原啓貴（2018）土壌還元消毒に用いられる糖含有資材の保管中の品質変化と施用土壌中での炭素動態. 日本土壌肥料学会九州支部例会講演要旨集 p.5

3. 処理方法について

三木静恵・漆原寿彦・池田健太郎・柴田聡（2012）ハウレンソウ萎凋病に対する土壌還元消毒法の防除効果安定化への処理条件. 群馬県農業技術センター研究報告 9：43-50

新村昭憲（2004）還元消毒法の原理と効果. 日本植物病理学会土壌伝染病談話会レポート 22：2-12

土壌物理学学会（2002）土壌物理用語事典. 養賢堂. 東京

滝本卓弘ら（2017）土壌温度・水分変動を予測するための都道府県別土壌物理環境データベースの作成. 日本土壌肥料学雑誌 88（4）：309-317

4. 新規土壌還元消毒による防除効果について

前田征之・太田沙由理・古川勇一郎・白鳥豊・原澤良栄・中保一浩（2017）新潟県における糖含有珪藻土を用いた土壌還元消毒法によるトマト青枯病の防除効果. 日本植物病理学会報 83：212（講要）

前田征之・渡辺喜芳・中保一浩（2017）糖含有珪藻土を用いた土壌還元消毒法によるトマト青枯病の防除効果. 環境微生物系学会合同大会講演要旨 P-217

5. 栽培管理について

井原啓貴 (2017) 糖を含有する有機質資材を混和した還元消毒土壌中における窒素・炭素動態. 日本土壌肥料学会講演要旨集 63 : 142

井原啓貴・尾崎哲郎・橋本真穂・有簾隆男・篠原陽子・三宅英伸・茶谷正孝・橋本知義・高橋茂・加藤直人 (2018) 太陽熱土壌消毒の高地温条件下における土壌中の有機態窒素無機化およびその予測. 日本土壌肥料学雑誌 89(2):136-145

6. 高接ぎ木法について

中保一浩・野津あゆみ・前田征之・鍛冶原寛 (2012) 高接ぎ木法によるトマト青枯病総合防除. 農業技術大系土壌施肥編 第5-1巻:畑106の12-30

7. 体系防除について

前田征之・渡辺喜芳・太田沙由理・白鳥豊・中保一浩 (2018) 糖含有珪藻土を用いた土壌還元消毒法と高接ぎ木法によるトマト青枯病の防除効果. 日本土壌微生物学会講演要旨集 p43

8. 資料・参考データ

Elphinstone JG, Hennessey JK, Wilson JK and Stead DE (1996) Sensitivity of different methods for the detection of *Pseudomonas solanacearum* (Smith) Smith in potato tuber extracts. Bulletin OEPP/EPPO Bulletin 26 : 663-678

井原啓貴 (2017) 糖を含有する有機質資材を混和した還元消毒土壌中における窒素・炭素動態. 日本土壌肥料学会講演要旨集 63 : 142

Inoue Y. and Nakaho K. (2014) Sensitive quantitative detection of *Ralstonia solanacearum* in soil by the most probable number-polymerase chain reaction (MPN-PCR) method. Appl. Microbiol. Biotechnol. 98 : 4169-4177

井上康宏・中保一浩 (2015) 最確数 (Most Probable Number) と Bio-PCR 法を応用した、MPN-PCR 法による青枯病菌の高感度定量検出法. 植物防疫 69 : 439-443

Inoue, Y., Kawaguchi A. and Nakaho K. (2018) Bacterial wilt-resistant tomato rootstock suppresses migration of *Ralstonia solanacearum* into soil. J. Gen. Plant Pathol. 84: 118-123.

- 井上康宏・中保一浩（2018） 圃場での青枯病発症トマトを介した土壌の病原細菌汚染. 関東東山病害虫研究会報 65：16-18
- 川部眞登・井上康宏・植原健人・中保一浩・守川俊幸（2019） 富山県における糖含有珪藻土および糖蜜吸着資材を用いた土壌還元消毒によるトマト青枯病とキュウリ根こぶ線虫病に対する防除効果. 北陸病害虫研究会報. 投稿中
- 李哲揆・飯田敏也・角野晶大・三澤知央・加賀友紀子・前田征之・川部眞登・松田絵里子・大谷洋子・村元靖典・渡辺秀樹・中保一浩・大熊盛也（2019） 新規資材糖含有珪藻土を用いた土壌還元消毒法における細菌群集の変化. 平成31年度日本植物病理学会大会講演要旨集
- 三澤知央・角野晶大・青木元彦・中保一浩（2018） 北海道における糖含有珪藻土を用いた土壌還元消毒のトマト褐色根腐病に対する防除効果. 北日本病虫研報 69：77-84
- Momma（2008） Biological Soil Disinfestation（BSD） of Soilborne Pathogens and Its Possible Mechanisms. JARQ 42：7-12
- 門馬法明・宇佐み俊行・穴戸雅宏（2007） 土壌還元消毒効果を示す *Clostridium* sp.の検出と還元土壌から発生する気体のトマト萎凋病菌および青枯病菌の抑制効果. 土と微生物 61：3-9
- 西脇由恵（2014） 北海道におけるトマト褐色根腐病の発生実態と総合防除対策. 土壌伝染病談話会レポート 27：67-76
- Ueki A., Takehara T., Ishioka G., Kaku N. and Ueki K.（2017） Degradation of the fungal cell wall by clostridial strains isolated from soil subjected to biological soil disinfestation and biocontrol of *Fusarium* wilt disease of spinach. Appl. Microbiol. Biotechnol. 101：8267-8277

内閣府：SIP「次世代農林水産業創造技術」
「持続可能な農業生産のための新たな総合的植物保護技術の開発」
新規土壌還元消毒を主体としたトマト地下部病害虫防除体系マニュアル

参画機関・執筆者一覧

農研機構

中央農業研究センター 井上康宏、植原健人
九州沖縄農業研究センター 井原啓貴
野菜花き研究部門 中保一浩

理化学研究所バイオリソース研究センター

微生物材料開発室 李 哲揆

北海道立総合研究機構

道南農業試験場 三澤知央、青木元彦、角野晶大

青森県産業技術センター

野菜研究所 加賀友紀子、新藤潤一

千葉県農林総合研究センター

病理昆虫研究室 鐘ヶ江良彦

新潟県農業総合研究所

基盤研究部 前田征之

富山県農林水産総合技術センター

園芸研究所 川部眞登

石川県農林総合研究センター

農業試験場 資源加工研究部 吉田佳代、八尾充睦

岐阜県農業技術センター

病理昆虫部 村元靖典、渡辺秀樹

和歌山県農業試験場
環境部 林 佑香

熊本県農業研究センター
生産環境研究所 江口武志、山崎尚美、坂本幸栄子、本田裕貴、古家 忠、
行徳 裕

味の素株式会社
イノベーション研究所 フロンティア研究所 武田泰斗

日本総合研究所
リサーチ・コンサルティング部門 下野雄介

(所属は事業実施時で記載)

本マニュアルは、できるだけ最新の情報を掲載し、情報の正確性には万全を期していますが、掲載された情報をご利用になったことによるいかなる損害についても責任を負いません。ご指摘、訂正事項等がございましたら、下記までご連絡ください。

国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構
中央農業研究センター
〒305-8666 茨城県つくば市観音台 2-1-18
TEL : 029-838-8481 (代表)
E-mail : koho-carc@ml.affrc.go.jp

新規土壌還元消毒を主体としたトマト地下部
病虫害防除体系マニュアル
技術版

本マニュアルは、平成 26～30 年度に実施した内閣府：SIP「次世代農林水産業創造技術」（管理法人：農研機構生研センター）の支援を受けて行った「持続可能な農業生産のための新たな総合的植物保護技術の開発」の成果をとりまとめたものです。

本マニュアルの複製・転載を希望される場合は、下記の発行機関までご連絡ください。

編 集

国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構
野菜花き研究部門
〒514-2392 三重県津市安濃町草生 360
TEL：059-268-1331（代表）

発 行

国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構
中央農業研究センター
〒305-8666 茨城県つくば市観音台 2-1-18
TEL：029-838-8481（代表）
E-mail：koho-carc@ml.affrc.go.jp
発行日：2019年4月 初版（web版）
