

マイクロ波を用いた土壤消毒技術の開発の現状

中央農業総合研究センター ^{なか} 仲 ^{がわ} 川 ^{あき} 晃 ^お 生

はじめに

臭化メチル剤は、海外からの侵入病害虫対策におけるくん蒸消毒のほか、多くの土壤伝染性病害虫に対する土壤くん蒸剤として多用されてきたが、1992年に開催された「第4回オゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書締約国会合」においてオゾン層破壊物質に指定され、一部の不可欠用途を除いて先進国では2005年までに全面的に使用禁止となった。これに伴い、代替技術の開発が積極的に取り組まれ、クロルピクリン剤やD-D剤などの土壤くん蒸剤の利用や太陽熱消毒、熱水土壤消毒および蒸気消毒などの効果が検討されてきた。ポスト臭化メチル剤時代の土壤消毒法としては、代替化学農薬（土壤くん蒸剤）や熱などを用いた物理的消毒法が効果のうえでその中心技術となるものとして期待されている。

物理的な殺菌・殺虫の一方法として、マイクロ波を用いた土壤消毒法が谷脇ら（2006）により検討されている。マイクロ波は、周波数で約300 MHz～30 GHz（波長1 m～1 cm）の通常電波と称される電磁波を指す（表-1）。ここで言うマイクロとは電波の中で最も短い波長であることを意味し、いわゆる「 $\mu = 10^{-6}$ 」とは無関係である。マイクロ波は衛星テレビ放送やレーダーなどの通信分野で活用され、加熱用には我が国では2,450 MHzの周波数が主に使われている。照射されたマイクロ波は、物体に当たると反射・透過・吸収といった現象を示す。すなわち、金属表面では反射し、プラスチック類やガラス・陶器等の中は透過するが、水分などの誘電体損失の大きい物質に当たると吸収され、分子摩擦によって熱エネルギーが生じて発熱する性質をもっている。照射された対象物は内部加熱により発熱することから、プラスチックフィルムや紙などで包装した食品でも中の食品だけを加熱することが可能となり、包装食品の加熱殺菌に利用されている。マイクロ波による殺菌・消毒はすなわち、基本的には熱利用による消毒法である。内部加熱により被加熱物自身が発熱するため外部からの加熱に比べて高速加熱が可能となり、被加熱物自体が直接発熱体

となるために高い熱効率が得られるとされる。しかし、本手法は農業用には現実的に利用されておらず試験例も少ない。この原因は、マイクロ波を用いた土壤消毒法を開発するには、機器の開発が不可欠であり、農業機械関連の研究者との共同研究が必須となる。筆者らはこの度2004年度先端技術を活用した農林水産研究高度化事業「マイクロ波の土壤中誘導による効率的な土壤消毒システムの開発」の中において、農業機械関連の研究者と共同研究を行い、実際の現場での利用を目的として試作したマイクロ波土壤消毒機（谷脇，2006）を用いたハウレンソウ萎凋病防除効果について試験を行った（仲川ら，2007）のでその概略を以下に示したい。

試験は中央農研内の隔離圃場（黒ボク土）を使い、クロルピクリン剤で土壤くん蒸消毒した圃場に、ふすま培地で培養したハウレンソウ萎凋病菌（M2-1菌株 *nit* 変異株）接種し、ハウレンソウ（品種‘おかめ’）を一作栽培して汚染圃場を調整し試験に供した。試作マイクロ波土壤消毒機はサブソイラ型およびロータリー型の2型を試作し、トラクター連結式とした。

I サブソイラ型マイクロ波土壤消毒機による防除効果

①試験方法：サブソイラ型（口絵①A）土壤消毒機は、装置上部においたマグネトロンから発生させたマイクロ波を、導波管を通じてサブソイラのチゼル支柱に組み込み、チゼル支柱の側面に設けた照射口から照射して土壤を加熱するものである。チゼル支柱（幅40 cm×高さ40 cm）は2枚を23 cm間隔で配し、出力3 kWのマイクロ波照射部位を片側4箇所ずつ設け、2枚のチゼル間に入った土壤（幅23 cm×深さ20 cm）に対し8×3 kWのマイクロ波を照射することが可能である（口絵①B）。本試験では、試験に要する電力を別にトラクターを併走させ、トラクター直結式発電機を用いて供給した。

マイクロ波の照射方法としては消毒機を1箇所止めて照射を行う定置処理と、トラクターを走行させながら連続照射する走行処理を行った。定置処理では幅23 cm×長さ1.5 m×深さ20 cm規模で3箇所についてマイクロ波を照射した。本処理では、照射部位の温度は照射後5分程度で90℃前後に到達するため、地温を測定しながら90℃に達した段階で照射を止めた。処理後

表-1 電波の波長による電波帯の区分の概略

波長	0.1 mm	1 mm	1 cm	10 cm	1 m	10 m	100 m	1 km	10 km	100 km
周波数 (Hz)	3,000 G	300 G	30 G	3 G	300 M	30 M	3 M	300 k	30 k	3 k
メートル区分	デシミリ メートル波	ミリ メートル波	センチ メートル波	デシ メートル波	メートル波	デカ メートル波	ヘクト メートル波	キロ メートル波	ミリア メートル波	
周波数の区別		EHF	SHF	UHF	VHF	HF	MF	LF	VLF	

国際電気通信条約付属無線通信規則.

土壌の温度変化は、定置処理について経時的に計測した。

一方、走行処理では、幅 23 cm × 深さ 20 cm で約 16 m にわたりトラクターを速度約 0.01 m/秒で稼働させながらマイクロ波を連続照射させた。

マイクロ波処理翌日に、ハウレンソウ（品種‘おかめ’）を条間 20 cm 株間 7 cm で 1 箇所 2 粒播種し、播種 7 日後に出芽率を調査するとともに収穫時に下記基準に基づいて発病程度別に調査し、発病株数を調査するとともに、以下の基準に従って発病度を求めた。

発病指数は、0：無発病、1：下葉の黄化・わずかな萎凋、2：軽い萎凋、3：株全体に激しい萎凋、4：枯死。

発病度 = $100 \times (\sum \text{発病指数} \times \text{程度別発病本数}) / 4$

× 調査本数

また、各処理土壌中の菌量は処理後に地表面下約 5 cm 深部の土壌を採集し、平板希釈法により総糸状菌数（ストレプトマイシン加用ローズベンガル培地）、総細菌数（アルブミン寒天培地）およびハウレンソウ萎凋病菌数（GMBP 培地；竹原ら、1995）を各培地を用いて求めた。

②試験結果：サブソイラ型土壌消毒機を使いマイクロ波照射を行ったときの土壌の地温変動を（図-1）に示した。マイクロ波照射により照射の中心部の地温は 80℃ 近くまで急激に達し、その後 2 時間の間に 40℃ 近くに低下した。しかし、照射中心部から 10 cm 離れた地点の地温は、照射中心部からの熱伝導によりゆっくりと高まるものの、処理 1 時間程度で 40℃ 近くまで高まっただけで以降は徐々に低下した。

ハウレンソウ萎凋病の発病株率は、マイクロ波の定置処理および連続走行処理とも低下する傾向が認められた（図-2、3）。処理土壌中の総糸状菌数および総細菌数は、係数レベルの低下は認められるが、オーダーレベルでの低下は認められず、このことは、ハウレンソウ萎凋病菌の密度についても同様であり消毒効果はないと判断された（図-4）。

サブソイラ型土壌消毒機では、2 枚のチゼル支柱の間に挟んだ土壌（約 23 ～ 25 cm）に対し、両脇からマイ

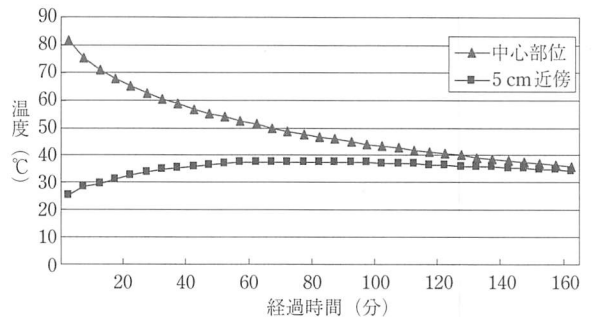


図-1 マイクロ波土壌消毒後の地温の変化（サブソイラ型）

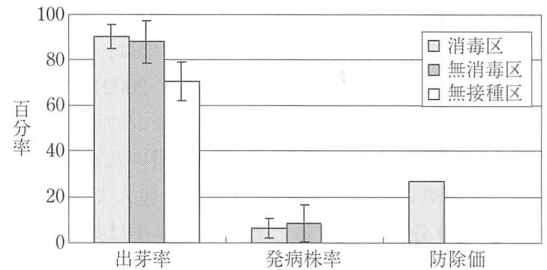


図-2 サブソイラ型マイクロ波土壌消毒機によるハウレンソウ萎凋病防除効果

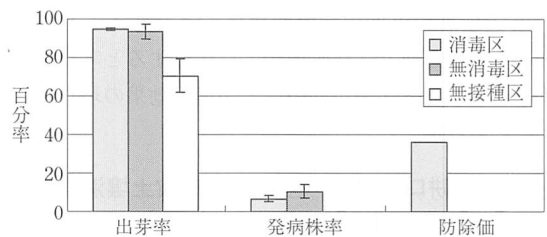


図-3 サブソイラ型マイクロ波土壌消毒機の走行処理によるハウレンソウ萎凋病防除効果

クロ波を照射するものである。この方式は、畦の両端をチゼル支柱で挟み、左右からマイクロ波を照射することで畦部分の消毒を想定したものと考えれば理解しやす

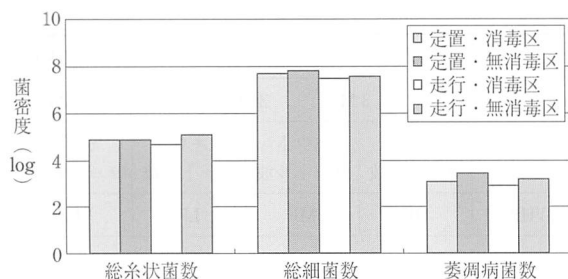


図-4 サブソイラ型土壤消毒機によるマイクロ波の照射が土壤中の糸状菌数、細菌数およびハウレンソウ萎凋病菌数に及ぼす影響

い。照射は土壤中に約 20 cm の深さに挿入されたチゼル支柱の約半分位に位置する照射口より行われるが、今回の結果からは十分な効果が得られていない。この原因としては、マイクロ波の照射は土壤中の約 10 cm 深部で行われるものの表層付近での加熱効果がないことと、照射部分以外は照射部位からの熱伝導により温度が伝えられることから、加熱むらが生じやすく、このため病原菌が生残するものと考えられる。一般に土壤病原菌は 40 ~ 50℃ の熱が数時間持続すると死滅する (KATAN, 1981) とされ、特にハウレンソウ萎凋病菌について見れば、湿潤な土壤 (含水率 27%) 条件下では、50 ~ 55℃ 以上の温度で短時間に死滅する (竹内, 2002) ことが知られている。岡山ら (2003) もハウレンソウ萎凋病菌に対して家庭用電子レンジ (500 W) を用いた試験を行ったが、この際に汚染土をビニルなどで包んで 60℃ 以上の温度を 30 分間保持すると萎凋病の発生は抑えられることを報じている。本試験で用いたハウレンソウ萎凋病は、発病には表面の浅い部分に存在する病原菌が大きく関与する (竹内, 2002) とされている。本試験では地表面の温度変化を測定していないが、同時に測定した 5 cm 近傍への温度の伝導が悪いことを考えると、サブソイラ型の処理では病原菌が主に棲息すると考えられる地表面への加熱効果が低いことが消毒効果の現れない原因と考えられた。

II 深耕ロータリー型マイクロ波土壤消毒機による防除効果

①試験方法：深耕ロータリー型土壤消毒機 (口絵②) ではロータリー部 (ベース：NIPLO 社製 PZ1200 型, 180 × 120 × 100 cm, 800 kg。回転数 PTO540 時 80 rpm) 付近に出力 3 kW の照射機を 6 基配し、土壌をかくはんしながらマイクロ波を照射するとともに、土壌均平板部にも 6 基の照射部位を配し、幅 1.2 m × 深さ

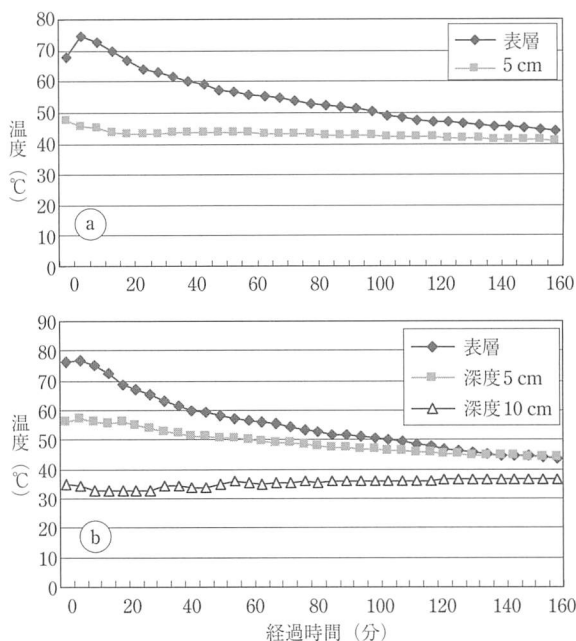


図-5 マイクロ波土壤消毒後の地温の変化 (深耕ロータリー型)

①：マイクロ波 40 秒間処理, ②：同 60 秒間処理。

20 cm の土壤に対して 12 × 3 kW のマイクロ波を照射できるものとした。本試験では、電力はトラックに乗せた工事作業用発電機を用いて供給した。マイクロ波の処理法としてはサブソイラ型と同様に定置処理と走行処理を行い、定置処理では、幅 1.2 m × 長さ 1.5 m × 深さ 25 cm の土壤に対し 40 秒間または 60 秒間マイクロ波を照射した。処理後、試験区上をエアーキャップ (幅 1.2 m, 粒径 10 mm, 粒高 4 mm, 川上産業製ポリエチレンフィルム製包装緩衝剤) で被覆し、処理後の温度変化を計測した。一方、走行処理では幅 1.2 m × 長さ 18 m × 深さ 25 cm の土壤に対し前述に準じて連続走行照射 (速度約 0.01 m/秒) を行った。ハウレンソウ (品種 ‘おかめ’) の播種、発病調査および土壌中の菌密度測定法は前述の通りである。

②試験結果：深耕ロータリー型土壤消毒機を用いた場合のマイクロ波を定置処理後の土壌の温度変化は図-5 ①, ②に示した通りである。表層の地温はマイクロ波照射により 80℃ 近くまで急激に上昇しその後約 2 時間 (40 秒間照射区：1 時間 45 分, 60 秒間照射区：2 時間) 近くも 50℃ 以上の地温を維持できた。また、地下部について見れば、深度 5 cm の地温は 40 秒間照射区では測定期間中は 50℃ を超えないものの、60 秒間照射区では処理後 1 時間以上にわたって 50℃ 以上を保持してい

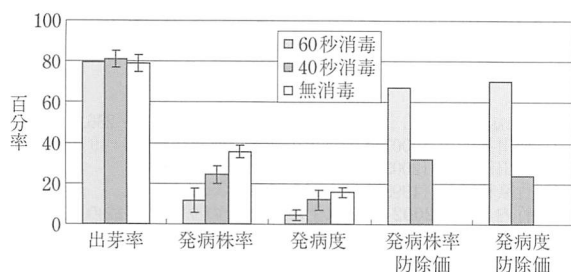


図-6 深耕ロータリー型土壤消毒機によるマイクロ波の定置処理がハウレンソウ萎凋病の発生に及ぼす効果

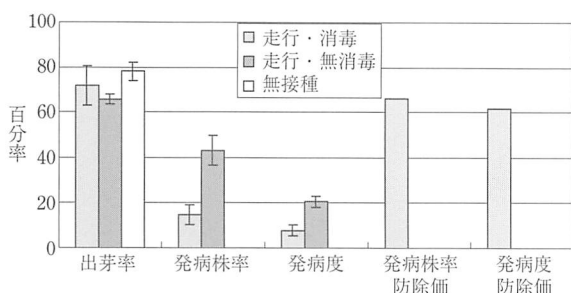


図-7 深耕ロータリー型土壤消毒機によるマイクロ波の走行処理がハウレンソウ萎凋病の発生に及ぼす効果

る。この結果、ハウレンソウ萎凋病に対してマイクロ波の60秒間定置処理は高い防除効果を示し、発病株率からの防除価は67.2、発病度からの防除価は70.4を示した。しかし、処理時間が40秒間の場合は効果は十分ではなかった(図-6)。一方、マイクロ波を連続走行処理した場合もハウレンソウ萎凋防除効果は高く、発病株率による防除価は65.9、発病度からの防除価は62.0となり有効な結果が得られた(図-7)。

マイクロ波照射後の土壤中の微生物数を見てみると、総糸状菌数は定置処理では60秒処理区で、また連続処理区でも無処理区に比べて係数レベルでの菌量低下は認められるが、オーダー(10の4乗)レベルでの低下は認められなかった(図-8)。しかし、ハウレンソウ萎凋病菌数について見ると、走行処理では菌数は係数段階の低下に留まったが、定置処理では60秒間照射処理区でオーダーレベルでの低下が認められ、GMBP培地を用いた平板希釈法では菌はほとんど検出できなかった(口絵③)。

深耕ロータリー型土壤消毒機は、かくはんした土壤にマイクロ波照射機能するとともに、かくはん後の土壤を均平板により平坦にさせながらマイクロ波を再度照射さ

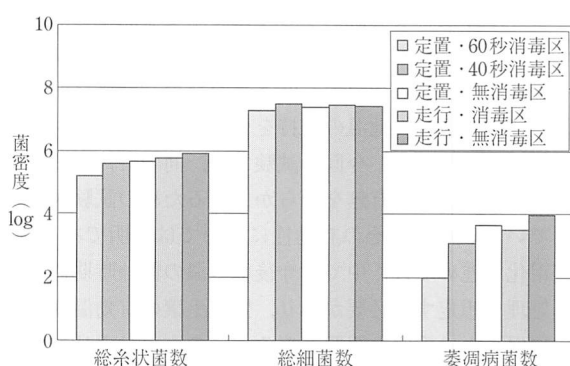


図-8 深耕ロータリー型土壤消毒機によるマイクロ波の照射が土壤中の糸状菌数、細菌数およびハウレンソウ萎凋病菌数に及ぼす影響

せるものであり、地表面への加熱を重視したものである。本試験では、これにより地表面から5cm深部への土壤加熱効果が高まり、60秒間照射区では処理後1時間5分にわたり50℃以上を維持できるなど高い地温維持効果が認められている。走行処理区では温度測定していないため明確ではないが、ハウレンソウ萎凋病防除効果は本処理区でも認められた。しかし、土壤中のハウレンソウ萎凋病菌数は定置60秒間処理に比べて大きくは低下していないことから、この原因は単純に土壤中の菌密度の低下によるものに求めることはできないだろう。このため、走行処理後の温度変化を克明に調べるとともに、マイクロ波照射もしくは死滅に至らないまでもある程度の加熱処理を受けた場合の萎凋病菌の活性を明らかにする必要がある。

おわりに

土壤くん蒸剤を用いて土壤消毒する際は、土壤の水分条件が大きな要因となる。クロルピクリン剤では注入した薬剤が土壤にくまなく拡散する必要から、手に握った土が手を開いた際に軽く崩れる程度の状態を目途としている。マイクロ波消毒では被加熱物自体が直接発熱体となる内部加熱により発熱することから、発熱のための媒体となる土壤の水分含量は消毒効果を左右する大きな要因となることが考えられる。室内において家庭用電子レンジを用いた行った試験においても、土壤水分が低い場合には菌の生残が認められた。すなわち、マイクロ波土壤消毒では土壤水分量が少ない場合は効果が安定しない可能性があることを示唆しており、処理するうえでの有効土壤水分の範囲を明らかにすることが必要である。またこのことは、土壤温度の上昇傾向は土性により異なる(谷脇, 2006)ことから、土質などを絡めて明確にす

ることが今後普及を想定するうえで重要な点である。

サブソイラ型の土壤消毒では、マイクロ波により高まった地温は、処理後急激に低下したため、深耕ロータリー型では処理後の地温の維持を目的にエアークャップによる被覆を行った。今回の試験では、同一条件においてエアークャップの有無を明らかにするための試験区を設けていないため、その有効性については不明であるが、実用化を進めて行く中で、今後は気温の低い時期における処理も想定する必要がある、処理土壌の有効温度をいかに保つかは重要な課題となる。このため、ポリフィル

ムなどを用いた被覆の有効性について明らかにする必要があるだろう。

引 用 文 献

- 1) KATAN, J. (1981): Ann. Rev. Phytopath. 19: 211 ~ 236.
- 2) 仲川晃生ら (2007): 関東東山病害虫研究会報 54: 19 ~ 26.
- 3) 岡山建夫ら (2003): 日植病報 69: 284 (講要).
- 4) 竹原利明ら (1995): 同上 61: 606 (講要).
- 5) 竹内将史 (2002): 熱水土壤消毒その原理と実践の記録, 西和文ら編, (社)日本施設園芸協会, 東京, p. 32 ~ 38.
- 6) 谷脇 憲 (2006): 農業技術体系 土壤施肥編 5-①, 農村文化協会, 東京, 追録第 17 号畑 216 の 7, p. 16 ~ 18.

好評発売中 天敵生物等に対する化学農薬の影響評価法

社団法人 日本植物防疫協会 編 B5判 158 ページ 口絵カラー
価格 5,040 円 (本体 4,800 円 + 税) 送料 116 円



天敵昆虫, 天敵微生物, 訪花昆虫, 蚕などに対する化学農薬の影響を評価するための実験手法を, 国内の第一人者が詳しく解説しました。IPM 実践のため, 生物農薬や土着天敵そして訪花昆虫と, 化学農薬を上手に組み合わせるための裏付けとなるデータ取得に必携です。

■掲載生物種

タマゴバチ類, オンシツツヤコバチ, マメハモグリバエの寄生蜂, アブラバチ類, 土着のアブラバチ, クサカゲロウ類, テントウムシ, ヒメハナカメムシ類, クモ・メクラガメ等, イトトンボオオメカメムシ, ハネカクシ, チリカブリダニ, ケナガカブリダニ類, クケメリスカブリダニ, コハリダニ, 昆虫病原性線虫 (スタイナーネマ), 線虫寄生性細菌 (パスツールシア), 糸状菌製剤ミツバチ, マルハナバチ, カイコ

お問い合わせとご注文は

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

郵便振替口座 00110-7-177867 TEL 03-3944-1561 FAX 03-3944-2103

ホームページ <http://www.jpपा.or.jp/> メール: order@jpपा.or.jp