物理的消毒法の効果と普及

誌名	野菜茶業研究集報 = Proceedings of vegetable and tea science
ISSN	13490702
著者名	北,宜裕
発行元	農業・生物系特定産業技術研究機構野菜茶業研究所
巻/号	3号
巻号補足	
掲載ページ	p. 7-15
発行年月	2006年3月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council Secretariat

物理的消毒法の効果と普及

北　宜裕
神奈川県農業技術センター

Physical Soil Sterilization for Soil-Borne Disease Control

Nobuhiro KITA
Kanagawa Agricultural Technology Center

Summary

Physical soil sterilization using solar energy, steam and/or hot water for soil-borne diseases will provide promising alternatives to methyl bromide. Solar soil sterilization developed in early 1970 in Israel has already been widely utilized in Japan as one of the most cost-effective and easy methods, though the effect primarily depends on the weather in summer. Recently, an innovative modification of solar sterilization that can be used even in relatively cool weather conditions has been developed; reducing the soil redox state by amending organic substrates such as wheat or rice bran followed by supplying large amounts of water to the soil before solar heating. Steam soil sterilization, on the contrary, can be applied regardless of the weather and season but the effect is restricted to the soil surface and a depth of 20 cm. The hot water soil sterilization, which applies large amounts of hot water at 80 to 95℃ onto soil surface, overcomes these problems. When hot water is applied onto the soil, a temperature over 55℃, which is the lethal for Fusarium, can be maintained for as long as 22 hr even to a depth of 30 cm, leading to the conspicuous disinfestation effect. In addition, prominent growth promotion has been observed in various crops probably due to the washout of the soil by the huge amounts of hot water. Integration of these methods with other chemical and biological disease control practices will contribute in an eco-friendly manner to a sustainable production system in intensive agriculture after the MB fadeout.

キーワード：物理的消毒法，太陽熱消毒，蒸気消毒，熱水土壌消毒，総合防除
Keywords：Physical Soil Sterilization, Solar Sterilization, Steam Sterilization, Hot Water Sterilization, Integrated Disease Control

1　緒言

経済性を最優先する集約的な農業生産では，同一作物を連作することは避けられない現実である．連作すれば当然「連作障害」に悩まされることになる．したがって，どのように連作障害を克服するかは極めて重要な課題となる．連作障害には様々な要因が関与するが，主要因としては土壌病害虫の発生と塩類集積があげられる．このうち土壌病害虫の防除には，これまでは簡易で扱い易く，効果も安定している臭化メチル剤が広く利用されてきた．しかし，主要先進国では臭化メチル剤の使用がオゾン層破壊防止対策の一環として2005年1月1日をもって原則全廃された．代替農薬としてクロルピクリンやダゾメット等の利用や新たな剤の開発が進められているものの，作業性，扱い易さあるいは効果の点で臭化メチルには及ばない．一方，環境にやさしい物理的防除法として，太陽熱消毒あるいはその変法である土壌還元消毒，蒸気消毒，そして熱水土壌消毒法などがある．いずれも熱を利用して病害虫を死滅させる手法であるが，蒸気消毒は作業労力や実施規模が制約要因となり，太陽熱消毒・土壌還元消毒は実施時期と効果の不安定さが課題となる．これに対して，熱水土壌消毒法には消毒効果のみならず土壌の顕著なリフレッシュ効果があるため，結果として処理コストを上回る収量増が得られるなどその効果は抜群である[1]．

ここでは，生産現場で実際に利用されている物理的消毒法の効果と普及状況について概説する．とくに，今後，普及が期待される熱水土壌消毒については，その具体的

な処理効果，実施上の留意点および普及上のポイント等についてより詳しく解説する．

2 太陽熱消毒

太陽熱消毒は，夏季に土壌表面を透明なポリフィルム等で被覆し，太陽熱で10～20cm程度の土壌表層を40℃以上に上げたうえで20～30日間処理することにより土壌病原菌を死滅させる方法である．この方法は，主に施設栽培における土壌病害対策として1970年代はじめにイスラエルで開発され[2]，我が国では1970年代後半になって奈良県農業試験場でイチゴの萎黄病対策として体系化された技術で[3]，簡便でコストがかからないためすでに全国規模で普及している．これまでに様々な改良が加えられ，再汚染防止のため基肥施用を含めて定植直前の状態にしてから太陽熱処理を行う宮崎方式や，フスマなどの有機質資材を土壌混和したうえで大量の水分を供給して土壌を還元化することにより低温でも消毒効果が得られる土壌還元消毒法等なども開発されている[4,5]．

2.1 効果

太陽熱消毒の実用レベルでの効果については，1978～79年に関東東山東海地域連絡試験で幅広く検討され，キュウリつる割病，ピーマン疫病，エンドウ立枯病，キュウリ・トマトのネコブセンチュウおよびイチゴのネグサレセンチュウに対しては高い防除効果が，また，イチゴ萎黄病とすくみ症およびトマト褐色根腐病と黒点根腐病に対しては高い被害軽減効果があることが確認された[6]．一方，太陽熱消毒は病原菌が土壌深層まで分布するトマト青枯病や根腐萎凋病あるいは45℃でも死滅しないメロン黒点根腐病等に対してはその効果は低く，またTMVには全く効果が認められないので[6]，本手法を適用する場合にはあらかじめ対象となる病原菌を特定しておく必要がある．

2.2 露地栽培への適用

露地でも適切な手法を用いれば太陽熱処理により土壌病害を防ぐことができる．神奈川県三浦半島では，露地メロンが定植から収穫終了時までトンネルがけされて栽培されている．これを利用して，収穫終了時にトンネルをそのまま再被覆して太陽熱処理を行い，熱に弱いホモプシス根腐病菌を省力的，かつ効果的に防除している[7]．メロンホモプシス根腐病菌は42℃以上なら1時間で死滅する．35℃程度の温度でも5～10日程度処理できれば十分消毒効果が認められる．表1に土壌深度別の35℃以上の積算時間と防除効果とを示したが，積算時間が46時間以上になると防除効果が認められ，100時間を超えればほぼ完全に防除できる．ただし，この方法だとトンネル被覆部分以外と地表面から20cm以下の深層部は消毒できない．しかし，メロンの根の大部分はトンネルマルチ内の表層に存在していること，病原菌の密度は連年の太陽熱処理により確実に低下していくことなどから，現地での栽培体系にこの太陽熱処理を組み込むことによって，実用レベルでの発病抑制効果が得られている．

表1 太陽熱消毒による土壌深度別35℃以上の地温の積算時間とメロンホモプシス根腐病の防除効果

処理	土壌深度別35℃以上の積算期間（h）			
	0cm	10cm	20cm	30cm
	時間(効果)	時間(効果)	時間(効果)	時間(効果)
トンネル被覆	110（◎）	135（◎）	0（×）	0（×）
ビニル被覆	424（◎）	46（○）	0（×）	0（×）
裸地	0（×）	0（×）	0（×）	0（×）
シルバーマルチ	419（△）	0（×）	0（×）	0（×）

効果：発病度で◎＜25，○：25～50，△：50～75，×：>75を示す．小林（1999）[16]より作成

2.3 土壌還元消毒

太陽熱消毒の弱点を補えるよう，より低い温度条件で，より効率良く，より確実に，より短期間での土壌消毒を可能にした画期的な手法が土壌還元消毒法である[5]．本法の開発者である新村[5]は，実際の圃場試験結果から，処理期間のアメダスの平均気温が15～18℃以上あれば消毒可能であるとしている．この条件で地温が30℃以上に上昇すれば，土壌の還元化が急速に進み，5日前後で土壌からドブ臭がしてくる．この状態になれば15～20日程度で消毒が完了する．

土壌の還元化を促進するための有機物は，糖質を多く含み，微生物の餌となりやすい特性を有することが第一条件であり，加えて分解されやすい粉末に近い形状で，価格が安いことが求められる．この条件に合致するのはフスマと米糠で，いずれも同等の土壌還元効果を有する．しかし，この場合は土壌表層混和処理のみとなるため，土壌深層部は消毒できない．そこで，有機物として糖蜜溶液を用いた処理が検討され，0.6%のテンサイ糖蜜処理によりトマト萎凋病，半身萎凋病，青枯病等に対し60cmの深さまで十分な防除効果が得られることが確認

表2 還元消毒前後の土壌に移植したトマトの萎凋病発病程度

糖蜜処理量 (t/10a)	土壌深度 (cm)	消毒前土壌		消毒後土壌	
		発病株率(%)	発病度	発病株率(%)	発病度
1.2	0-20	80	54	0	0
	20-40	80	69	0	0
	40-60	100	95	0	0
0.9	0-20	60	33	0	0
	20-40	60	28	0	0
	40-60	100	80	0	0
0.6	0-20	100	80	0	0
	20-40	80	74	40	20
	40-60	80	54	20	5

品種はハウス桃太郎．糖蜜0.9t/10aで0.6%液150mmかん注に相当．新村（2004）[24]から作成

された（表2）．しかし，土壌の還元状態を維持できないような排水の良すぎる圃場では消毒効果が劣るので，後述するように熱水処理と組み合わせるなどの工夫が必要である．

2.4 普及に向けて

太陽熱消毒あるいは土壌還元消毒はいずれも安全で安価な手法であることに加え，拮抗微生物などいわゆる有用微生物を温存させることができるため，処理後も土壌の潜在的な防御反応を維持することができる[3]．さらに，緑肥作物やイナワラ等の有機物の投入あるいは除塩効果や脱窒効果などもあるため，それに伴う生育促進効果も期待できる．また，露地においては処理後，そのままの状態で不耕起栽培すれば雑草の抑制効果は極めて高くなり，タマネギや葉菜類の直播栽培も可能となる．いずれにしても，的確な効果が得られる基本的な処理条件を確保した上で，抵抗性台木や拮抗微生物などと組み合わせればより効果的な防除が可能となるので，簡易に実施できる基幹防除技術として通常の栽培体系に組み込んでおきたい技術である．

3 蒸気消毒

蒸気消毒は120℃前後の水蒸気が持つ潜熱を利用して土壌を消毒する手法で，その開発経緯は20世紀初頭までさかのぼる．我が国では，静岡県中西部の温室メロンの隔離床栽培での実用利用をきっかけに，現在では，ネギ，ホウレンソウ，大葉等の軟弱野菜類，ユリ，キク，トルコキキョウ，カーネーション等の切花，あるいは鉢物・苗物生産など中心とした付加価値の高い施設園芸作物栽培で全国的に広く利用されている．

3.1 処理方法

蒸気消毒には，蒸気の噴出口を一定間隔で空けたホジソンパイプを深さ20～30cmの土壌中に埋設して処理するホジソンパイプ法，先端に蒸気の噴出口を空けたスパイクを1.5m四方に複数配置して順次消毒を進めていくスパイク・パイプ法，スパイク状の蒸気噴出パイプを数本鋤状にとりつけて土壌に刺し込み，蒸気を噴出させながらウインチでゆっくり引くスチーミング・プラウ法，および布製のホースを土壌表面に設置し，その上からポリシート等で被覆したうえで蒸気を通すキャンバスホース法（図1）などがある[8]．また，床土やポット用土の消毒には底部から蒸気が噴出する蒸気消毒槽が利用されている．このほか，蒸気消毒後に1㎡当たり20～50散水することで，土壌深層部の消毒効果を高めることができる蒸気散水土壌消毒法や70℃程度の比較的低温で耐熱性の有用微生物を温存させたまま病原菌・線虫等を滅菌し，再汚染の抑止や土壌の硝酸化成能が維持できる低温蒸気消毒法なども開発されている．実際，Phaeら[9]は，イナワラと拮抗微生物のBacillus subtilisを混和処理した後，蒸気消毒することによりトマト根腐萎凋病を効果的に抑制している．

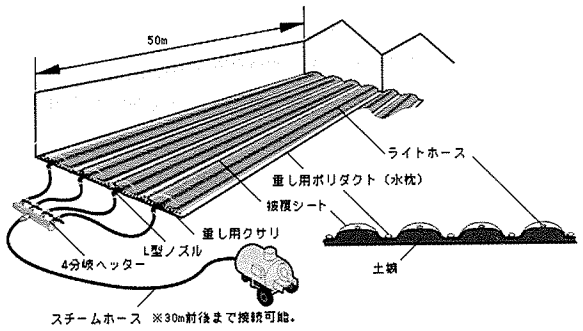

図1 キャンバスホース法による蒸気消毒
㈱丸文製作所HPより

3.2 処理上の留意点

いずれの手法においても，処理する高温の水蒸気は噴出口から上方向のみに動くため，ホジソンパイプ法では通常地下20～30cm，スパイク・パイプ法あるいはスチーミング・プラウ法ではスパイクの長さ（15～20cm）程度の深さまでしか消毒できない．キャンバス法ではホースから下方に向かって蒸気が噴出する仕組みになっているものの，地下30cm以下の土壌になると40℃を確保するのはやはり難しい[10]．また，いずれの手法も労力的に一回に処理できる面積が限られているので大規模な施設には適用しにくいなどの問題点があるため，導入にあたっては経費や施設規模あるいは土壌条件等を十分考慮する必要がある．なお，蒸気消毒ではマンガン過剰症が発生しやすいので，非交換態に自然変換するまで20～30日程度待ってから定植したほうが無難である[11]．

4 熱水土壌消毒

熱水土壌消毒法は，旧農業研究センター[12]と旧神奈川県園芸試験場[13,14]で1980年代はじめにそれぞれ独立して開発された我が国のオリジナル技術で[1]，有望な臭化メチル代替技術の一つとして海外でも高く評価されている[15]．その原理は言うまでもなく，熱水が持つ湿熱によって土壌病害虫を死滅させるという極めて単純なものである．しかし，生産現場でその湿熱をロスなく，効果的に土壌深層部まで行きわたらせることはなかなか難しく，逆にそこが技術のポイントになる．

4.1 システム構成

熱水土壌消毒装置の基本的なシステムは，ボイラー，送湯チューブおよび熱水散布装置からなる（図2）．ボイラーについては，通常型の他に軽トラックに積載可能（350kg未満）でありながら大熱容量を有するパルスジェットエンジンを利用したタイプも開発されている

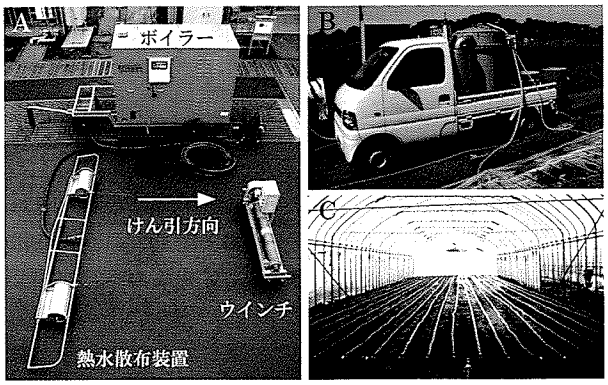

図2　熱水土壌消毒装置のシステム構成
A：けん引方式，B：パルスジェットボイラー，
C：チューブ方式

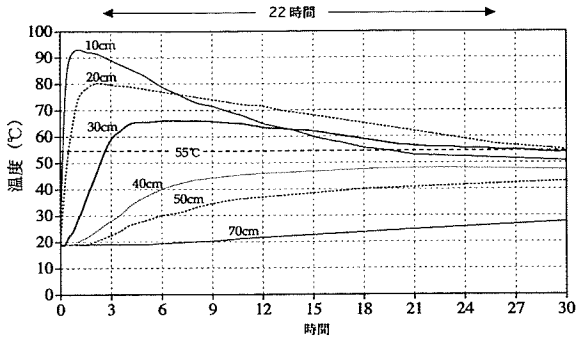

図3　熱水処理後の土壌深度別の地温変化
黒ぼく土壌で，散布幅5.4m，けん引速度2.4m/hで95℃の熱水を300 ℓ / ㎡処理した．（北 2004[11]）

(図2B)．熱水の散布システムとしては，旧神奈川園試で開発した熱水散布装置をウインチでけん引する平坦地，大規模施設向きの「けん引方式」(図2A) と旧農研センターで開発した耐熱性のチューブを用いて熱水を散布する中小施設，傾斜地向きの「チューブ方式」(図2C) の二つがある[11,16]．

4.2　処理方法

けん引方式では，ボイラー，熱水散布装置およびこれをけん引するウインチを組み合わせ，熱水散布装置をけん引しながら熱水を土壌表面に散布する．チューブ方式では耐熱性のチューブを用いて熱水を散布する．処理作業は，栽培後の片づけが終われば季節にかかわらず随時実施できる．チューブ方式では，散湯チューブを圃場にセットすればあとは散湯処理するだけであるし，けん引方式でも熱水散布装置はウインチを用いた自動けん引方式なので熱水処理中ずっと付き添っている必要はない．

熱水処理量は，栽培期間が長く，根張りの深いトマトやバラなどでは1㎡当たり200～300，栽培期間が短いホウレンソウなどの軟弱野菜類では150程度で十分である．10a当たりの処理日数は，処理する熱水の量とボイラーの能力によるが，施設の形状をうまく考慮して作業すれば3～4日で処理できる．熱水消毒ならキクのように同一施設内で連続的に栽培する場合でも処理は可能である．

4.3　効果

4.3.1　土壌病害抑止効果

熱水土壌消毒による土壌病害抑止効果については，トマト萎凋病[12]やダイズ黒根腐病[17]をはじめとする数多くの作物の土壌病害虫を対象に検討され[18]，これまでに24作物50病害虫に対して極めて高い効果が認められている[19]．熱水処理後の地温の変化を図3に示したが，30cmまでの作土層ではFusariumの死滅温度である55℃以上の温度が実に22時間にわたって保たれる．トマト萎凋病菌他5種の土壌病原菌に対する処理効果試験で

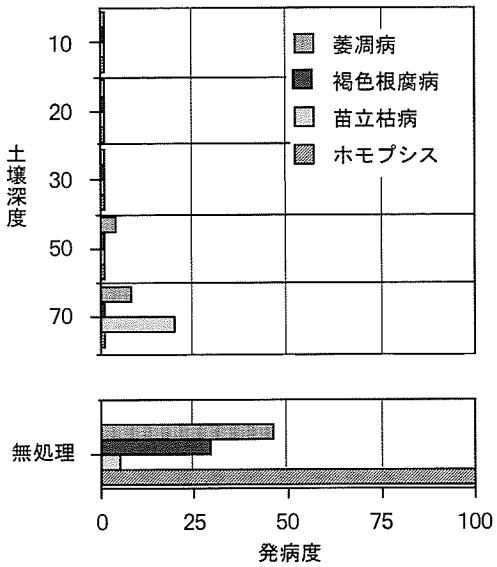

図4　各種土壌病原菌に対する熱水処理（300 ℓ / ㎡）の効果（岡本ら 2002[20]）

は，いずれも埋設深度30cmまでは全く発病が認められず，70cmにおいても高い発病抑止効果が認められた（図4）[20]．半身萎凋病が激発していた神奈川県海老名市の促成トマト栽培現地圃場での熱水処理試験でも，熱水処理により半身萎凋病の発生が劇的に抑えられ，結果として収量が40%も増加した[21]．

この顕著な土壌病害抑制効果の有効持続期間を明らかにするため，促成トマト栽培で褐色根腐病を指標にした実証試験を実施した[20]．その結果，第3連作目でも褐色根腐病の発病度は薬剤処理区と同レベルで，収量にも全く影響しなかった（図5A）．このことから，熱水土壌消毒の発病抑止効果は少なくとも3年3作維持されることが確認された20)．同様に，雨よけホウレンソウ栽培でのチューブ方式による熱水処理では，柳瀬ら[22]はその防除効果が1年・4連作維持されることを認めている（図5B）．

熱水土壌消毒では，深さ50cmになると40℃程度まで

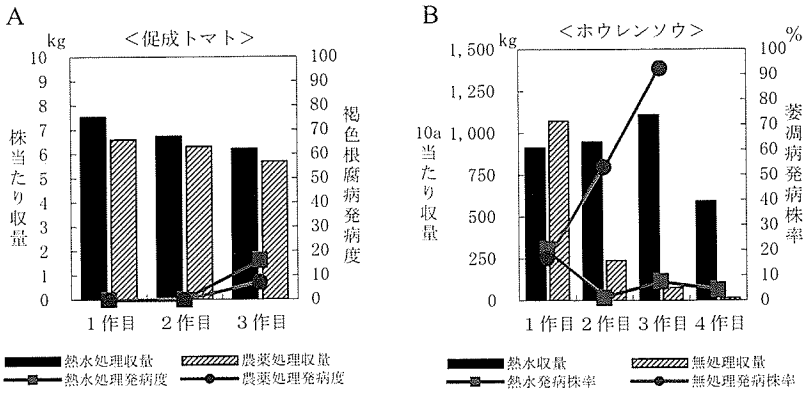

図5　熱水土壌消毒による土壌病害発病抑止持続効果
A：施設トマト（岡本ら 2002[20]），B：雨よけホウレンソウ（柳瀬 2003[22]）．熱水処理はいずれも第1作の作付け前のみの1回処理．

表3　熱水[1]および有機物土壌混和処理の組合せがトマト萎凋病菌密度[2]に及ぼす影響

添加剤	深さ (cm)	熱水処理 A区	熱水処理 B区	熱水処理 平均	水処理 A区	水処理 B区	水処理 平均	無処理 A区	無処理 B区	無処理 平均
無処理	30	95	15	55	132	123	130	135	211	170
	45	144	3	73	138	103	120	200	167	180
	60	140	128	130	114	79	96	199	243	220
フスマ	30	8	97	53	99	138	120	−	−	−
	45	88	52	70	170	103	140	−	−	−
	60	162	142	150	109	−	110	−	−	−
ショ糖	30	1	ND	0.64	200	119	160	−	−	−
	45	ND	ND	ND	197	115	160	−	−	−
	60	36	9	22	245	135	190	−	−	−

[1] 熱水処理区では98℃の熱水を150 ℓ / ㎡，水処理区は水道水を150 ℓ / ㎡それぞれ散布した．[2] 値は× 10^3 cfu/乾土1gを示す．菌密度の測定は，処理後10日間被覆した後，埋設した汚染土を回収して行った．NDは検出限界以下（< 40/乾土1g）を，−はデータなしを示す．

しか温度が上昇しないため（図3），土壌深層部の消毒がどうしても不十分となる．そこで，植草ら[23]は，熱水処理と土壌還元処理を併用することにより，土壌深層部での殺菌効果を相乗的に高めることができるのではないかと考え，トマト萎凋病をモデルに併用処理の可能性について検討した．その結果，有機質としてショ糖を10a当たり900kgレベルで混和した後，98℃の熱水を150 ℓ / ㎡処理した場合には菌密度の低下が認められたが，フスマ処理では明確な処理効果は認められなかった（表3）．しかし，モデル実験系でフスマの熱水抽出液に殺菌作用があることが確認されていることから，今後，より安定した熱水処理と土壌還元消毒との併用処理手法の開発が期待される．

4.3.2　土壌のリフレッシュ効果

熱水土壌消毒では，土壌を大量の熱水で処理するため，土壌養分に大きな変化が生じる．とくに，土壌中に残存している施肥由来の硝酸態窒素や化成肥料の副成分である塩素などは熱水処理により除去され，結果として火山灰土壌では深さ30～45cm程度までの土壌でpHが酸性から中性に近づき，電気伝導度（EC）は顕著に低下す

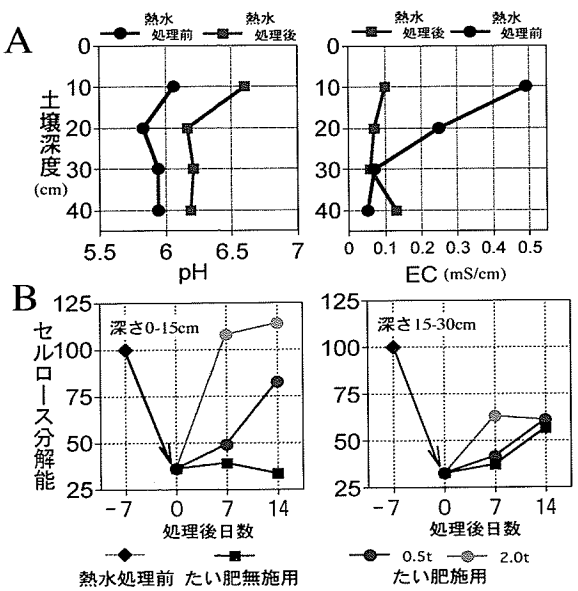

図6　熱水処理による土壌化学性及び生物性の変化
A：pHおよびECの変化，B：土壌抽出液のセルロース分解能の変化で，熱水処理前を100としたときの相対値を示す．

る（図 6A）[20]．また，土壌物理性も改善され，熱水処理を重ねていくと土壌の透水性が高まっていくのを実感することができる．

このように熱水処理により土壌の化学性・物理性は向上し，クロルピクリン等の化学農薬処理には認められない顕著な土壌のリフレッシュ効果が得られる．実際に，これまでに熱水処理を実施した多くの作物における収量の変化について調べたところ，いずれの作物においても熱水処理により 10～40％の生育促進およびそれに伴う増収効果が認められている（表 4）．なお，この原因としては，地力窒素の増加や除塩による化学性の向上，日和見的な病原菌の除去などが関与していると考えられるが，そのメカニズムについては十分に解明されていない．

4.4 コスト

熱水土壌消毒にかかるコストについては，神奈川農総研が施設トマトにおける実証試験で詳細な分析を行っている[20]．必要な資材は，10a 当たり 300t の熱水を処理するとして，A 重油が約 2kℓ，水が約 300t および 3 相 200V 電源などである．経費は A 重油の値段に大きく左右されるが，前述の促成トマト栽培での実証試験の試算では 10a 当たり約 23 万円となった．しかし，この場合，消毒効果は 3 年 3 作持続するので，1 年当たりにすると 77,500 円（水道代を除けば 59,300 円）となり（表 5），バスアミド微粒剤あるいはキルパー液剤に比べればやや高いもののクロルピクリン錠剤よりは安いことがわかる．最も利用頻度の高いクロルピクリンくん蒸剤処理でも 5 万円程度かかるうえ，消毒作業が 3 年に 1 回で済むという労力の軽減効果を勘案すればこの程度のコストは許容範囲であろう．加えて，熱水処理によって収量は確実に増加するので（表 4），それが投入コストを上回る収益増に結びつく．施設トマト生産者の中には熱水土壌消毒により前年比で 200 万円も収益を上げ，その増益分で熱水土壌消毒機を購入した人もいるなど，生産現場では化学農薬処理と比較した時の経費の差は顕著な増収効果で十分カバーされているのが実態のようである．

4.5 実施上の注意点

熱水土壌消毒のポイントは熱水の持つ湿熱を効率よく土壌に伝えることである．したがって，耕盤がある場合にはサブソイラーや圧搾破砕機あるいは深耕等により事前に破砕しておく．土壌水分状態については，土壌吸引圧で－30～－40Pa 程度の適湿状態で最も熱水の浸透が速く，過湿でも過乾燥でも浸透性は劣ることがモデル実験系で明らかにされているので[24]，握った土が崩れない程度の土壌水分状態で処理する．傾斜地圃場では，チューブ方式の熱水土壌消毒装置を適用し，傾斜面に対して平行に，等高線に合わせてチューブを設置すれば

表 4　熱水土壌消毒に伴う作物の生育促進と増収効果

作物（品種名）	処理区	生育 項目	数値	比	収量性 収量	比	備考
促成トマト（ハウス桃太郎）	熱水	草丈	177cm	122	6.83 kg/ 株	110	1998 年 9 月 15 日播種，11 月 5 日定植．草丈は翌年 2 月 15 日調査
	対照	草丈	145cm	100	6.20 kg/ 株	100	
促成トマト[1]（ハウス桃太郎）	熱水	－			16.0 t/10a	139	H14 年度の総出荷量
	対照	－			11.5 t/10a	100	H13 年度の総出荷量
ホウレンソウ（アトラス）	熱水	草丈	32cm	110	30.2 g/ 株	112	2002 年 9 月 20 日播種，10 月 28 日調査
	対照	草丈	29cm	100	26.9 g/ 株	100	
シュンギク（中葉春菊）	熱水	草丈	25cm	114	15.1 g/ 株	104	2002 年 9 月 20 日播種，10 月 28 日調査
	対照	草丈	22cm	100	14.5 g/ 株	100	
セルリ（コーネル 619）	熱水	草丈	65cm	116	2600 g/ 株	123	2002 年 8 月 16 日定植，11 月 20 日調査
	対照	草丈	56cm	100	2110 g/ 株	100	
ダイコン（耐病総太り）	熱水	根長	40cm	118	2230 g/ 根	141	2001 年 9 月 25 日播種，翌年 1 月 22 日調査
	対照	根長	34cm	100	1580 g/ 根	100	
チンゲンサイ（夏賞味）	熱水	－			147 g/ 株	139	2001 年 9 月 20 日播種，10 月 19 日調査
	対照	－			106 g/ 株	100	
イチゴ（女峰）	熱水	1 果重	12.7g	107	1.78 t/10a	123	2000 年 9 月 20 日定植．収量は翌年 3 月末まで
	対照	1 果重	11.9g	100	1.45 t/10a	100	
温室バラ[2]（パスカル）	熱水	－			384 本 / 坪	125	改植時の 1977 年 6 月 26～29 日に熱水処理
	対照	－			306 本 / 坪	100	
ダイズ[3]（フクユタカ）	熱水	－			1070 g/20 株	187	2001 年 5 月 16 日熱水処理，6 月 25 日は種
	対照	－			573 g/20 株	100	

[1] トマト半身萎凋病が発生した神奈川県海老名市の現地圃場での結果．熱水処理は H13 年度作終了後の 2001 年 7 月 25 日，
[2] 神奈川県秦野市の現地圃場での結果．[3] 西．（北 2004[16] より作成）

表5　施設促成トマト栽培における熱水処理と薬剤処理の経費比較　　(10a 当たり (千円))

項　目	熱水土壌消毒区		薬剤防除 (対照) 区				
			第1作	第2作	第3作	3作計	1作平均
	1処理3作た当り	1作平均	バスアミド微粒剤	キルパー	クロルピクリンテープ[3]		
薬剤費	−		28.1	22.8	225.0	275.9	92.0
資材費	16.7	5.6	16.7	16.7	16.7	50.2	16.7
機械費[1]	60.5	20.2	−	2.9	−	2.9	2.9
	(64.8)	(21.6)					
光熱水費[2]	152.3	50.8	−	0.4	−	0.4	0.4
内水道料	51.5	17.2	−	−	−		
内重油代	100.8	33.6	−	−	−		
合　計	229.5	76.5	44.9	42.8	241.7	329.4	109.8

[1] 機械設置・リース料で，( ) は購入の場合の値を示す．熱水土壌消毒機購入の場合の使用価格は，機械価格 3,600 千円，耐用年数 10 年，残存価格 10%，3 戸共同利用，1 戸当たり施設面積 50a として，薬剤利用の場合，第 2 作の機械費は機械価格 81 千円，耐用年数 5 年，残存 10%，年間 10 時間利用としてそれぞれ算出した．[2] 水道料 203 円 / m³，重油 32 円 / ℓ，ガソリン 90 円 / ℓ で計算した．[3] クロルピクリンくん蒸剤の場合，52 千円となる．(岡本ら，2002[20])

6.7%程度の傾斜条件でもほぼ均一な熱水処理が可能となる[25]．

処理後は，硝化作用が熱水処理後 4 週間以上にわたって抑制されるので，早期に硝酸化成能を回復させる必要がある．実用的には，熱水処理後すみやかに 10a 当たり 1〜2t 程度の堆肥を施用するだけでよく，それによって処理 2 週間後には少なくとも土壌上層部の微生物相は処理前のレベルまで急速に回復させることができる (図 6 B)．なお，熱水処理に伴う生育促進効果は予測できないため，肥培管理では基肥の窒素量を減らし，追肥で生育を調節する．

ネコブ線虫害については，とくに施設キュウリ栽培で熱水処理効果が認められない事例が多い．栽培期間の長い施設キュウリ栽培では土壌中の線虫密度が極めて高くなっていることおよび作付け終了後土壌を乾燥させてしまうと土壌深層部まで線虫が逃避してしまうことなどが原因と考えられる．これは今後検討していかなければならない大きな課題ではあるが，トマト，キュウリなどでは，熱水処理後であっても定植時にホスチアゼート剤を併用すれば確実にネコブセンチュウ害を抑えることができるので，とりあえずは農薬との併用処理によりセンチュウ密度を下げることが第一であろう．

4.6　普及に向けて

開発当初は，熱水の有効性はわかっていても「畑にお湯をまくなんてナンセンスだ」と受け取られ，正しく評価されなかった．けん引式の熱水土壌消毒システムを生産者とともに開発した神奈川県でさえも，はじめは収益性の高い施設バラ生産者のみの利用に限られていた[5]．しかし，本技術は土壌病害虫の防除のみならず卓越した土壌のリフレッシュ効果を有することから，1990 年代に入ってから神奈川県内の施設トマト農家を中心に次第に普及しはじめ，横浜，藤沢および平塚地区を中心に延べ 50 戸以上の施設農家がこの熱水土壌消毒装置を用いて土壌消毒を行い，大きな効果を上げてきた[11]．その後，全国的にも熱水土壌消毒の有効性が十分認識されるようになり，現在では消毒装置もすでに 10 社を越える企業から実用的なシステムとして販売されている[26]．なお，装置の導入にあたっては一定の条件を満たせば国からの補助も受けられるため，農協単位で共同利用を前提として購入する事例も多い．利用対象も，野菜ではトマト，ホウレンソウ，キュウリ，イチゴ，メロン等，花きではバラ，カーネーション，スイートピー，キク，ユリ，リンドウ，チューリップ等を中心に全国で 130 件以上の実施実績があるなど (2005 年 9 月，神奈川肥料㈱調べ)，その利用・普及は急速に進んでいる．また，苗床やロックウールの消毒などでもその効果の高さが確認されるなど，多方面で利用されるようになってきている[27,28]．

5　今後の方向性

物理的防除法は，農薬を用いた化学的防除法に比べ環境負荷の少ない土壌消毒法である．しかし，太陽熱や土壌還元消毒では被覆資材として少なくともビニルという石油に由来する資材を使わざるを得ないし，さらにその製造過程で多大な二酸化炭素を排出していることも事実である．熱水処理に至っては熱水作製にかなりの量の石油を使う．しかし，いずれの熱処理法とも，クロルピクリンや D-D 油剤などのように母なる大地に石油そのものを処理するような手法に比べればはるかに環境にやさしい技術であることは直感的に理解できる．計画的な輪作体系に基づいた農業生産を行えば連作障害に悩まされることはないことは周知の事実である．それを知りながら，一方で近代科学の粋を尽くして経済性を最優先する集約的な農業生産をあえて行うというのは人間社会の内包的矛盾である．しかし，この現状を容認せざるを得な

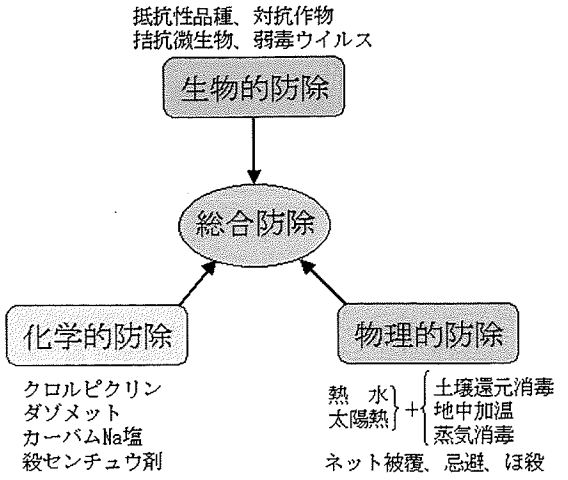

図 7　総合防除の方向性

いとすれば，たとえば火力発電所やごみ焼却場等で毎日大量に発生している冷却水由来の熱水を熱水土壌消毒に利用しようというアイデアも現実味を帯びてくる．

このような社会的矛盾を抱えてはいるものの，現実としては土壌病害をいかに的確に，効率よく防除していくかは技術者サイドに投げかけられた社会的課題でもある．これまでの化学農薬に頼り切った単一防除技術から，今回紹介した熱を利用した物理的防除，そして拮抗微生物や対抗作物を利用した生物的防除の三者を的確に組み合わせれば，経済レベルでも持続可能で効果的な総合防除が可能となるはずである．総合防除のポイントは，被害を許容水準以下に抑えるための最も合理的な個別技術を選択し，それらを総合的に組み合わせた的確な栽培管理を行うことにある（図 7）[29]．実際には，土壌条件やこれまでの作付け経過以外に，個々の経営条件，圃場・施設が立地している社会環境条件等が相互に複雑に関与するので，個別性の高い技術対応が求められる．しかし，結果として成功させることができれば収入は安定し，次の新たな投資へと発展的に経営が展開していく．そして，なにより連作障害を克服したという達成感はその後の自信につながる．自分の栽培ができるようになれば作物は健全に育つものである．今回の臭化メチル利用の全廃を契機に，もう一度これまでに培ってきた個別技術を見直し，農薬を用いた化学的防除のみならず生物防除や太陽熱・熱水土壌消毒等を組み合わせた総合的な土壌病害防除体系の確立が望まれるところである．

摘要

物理的防除法は，農薬を用いた化学的防除法に比べ環境負荷の少ない土壌消毒法であり，太陽熱消毒あるいはその変法である土壌還元消毒，蒸気消毒，そして熱水土壌消毒法などがある．太陽熱消毒・土壌還元消毒は実施時期と効果の不安定さが課題となり，蒸気消毒は作業労力や実施規模が制約要因となる．これに対して，熱水土壌消毒法には消毒効果のみならず土壌の顕著なリフレッシュ効果があるため，結果として処理コストを上回る収量増が得られる．今後は，農薬を用いた化学的防除のみならず，物理的防除，拮抗微生物や対抗作物を利用した生物的防除の三者を的確に組み合わせた総合的な土壌病害防除体系の確立が望まれる．

引用文献

1) 西　和文（編）．2002．熱水土壌消毒－その理論と実践の記録－．日本施設園芸協会
2) Katan, J., A.Greenberger, H.Alon, and A.Grinstein. 1976. Solar heating by polyethylene mulching for the control of diseases caused by soil-borne pathogens. Phytpathology 66：683-688.
3) 岡山健夫．1999．「太陽熱土壌消毒」農業技術体系第 5 －①巻．追録第 10 号．213～216-1-4．農山漁村文化協会
4) 白木己歳・小岩崎規寿・串間秀敏・高橋英生・岩下　徹・野間　史．1998．太陽熱利用土壌消毒の効果安定策としての土壌管理体系の開発．宮崎県総農試研報 32：1-11
5) 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
6) 農林水産省農業研究センター（編）．1982．「太陽熱利用による土壌消毒に関する実証的研究」．関東東山東海地域技術連絡会議
7) 小林正伸．1999．収穫後のトンネルマルチ利用太陽熱消毒（メロン）．農業技術体系第 5 －①巻．追録第 10 号．216-1-22～216-1-25．農山漁村文化協会
8) 池谷保緒．1968．ハウス土壌の蒸気消毒について．静岡県農業技術対策資料．園芸部門　No.24, pp16
9) Phae, C.G., M.Shoda, N.Kita, M.Nakano and K.Ushiyama.. 1992. Biological control of crown and root rot and bacterial wilt of tomato by Bacillus subtilis NB22. Ann.Phytopath.Soc.Japan 58：329-339
10) 竹内繁治．2004．高知県における蒸気消毒による土壌病害防除．日本植物病理学会土壌伝染病談話会レポート．22：49-60
11) 北　宜裕・岡本昌広．2004．熱水土壌消毒．農業技術体系土壌肥料編．追録第 15 号　第 5 －①巻．畑 216：7・2-7・7・4．農文協
12) 国安克人・竹内昭士郎．1986．熱水注入による土壌消毒のトマト萎凋病に対する防除効果．野茶試報告．A14：141-148
13) 林　勇．1979．施設における温湯土壌消毒法の開発（第 1 報）．温室バラを中心にした温湯土壌消毒法の開発と実用化試験．神奈川園試研報．26：60-72
14) 林　勇．1998．温湯土壌消毒法による新改植技術．切り花栽培の新技術（改訂）バラ（下巻）．林勇編著．pp.73-79．誠文堂新光社
15) Kita,N., K.Nishi, and S.Uematsu. 2003. Hot water treatment as a promising alternative to methyl bromide. Proceedings of International Research Conference on Methy Bromide Alternatives

and Emissions Reductions. pp.26-1 － 2. HP：www.mbao.org

16) 北　宜裕．2004．生産現場における熱水土壌消毒の実用利用．日本植物病理学会土壌伝染病談話会レポート．22：38-48

17) 西　和文・佐藤文子・唐澤哲二・佐藤剛・福田徳治・高橋廣治．1999．ダイズ黒根腐病の発生生態と防除．農研センター研報．30：11-109

18) 竹原利明．2004．熱水土壌消毒の原理と効果．日本植物病理学会土壌伝染病談話会レポート．22：22-37

19) 西　和文．2005．環境に優しい熱水土壌消毒技術．野茶研集報．2：9-17

20) 岡本昌広・北畠晶子・深山陽子・深澤智恵妙・吉田　誠・渡邊清二・奥村　一・浅田真一・小林正伸・小清水正美・阿久津四良・植草秀敏・北　宜裕・佐々木皓二．2002．施設トマトにおける環境保全型栽培の実証．神奈川農総研報．142：17-35

21) 植草秀敏・岡本昌広・草野一敬．2003．熱水処理による土壌・病害虫への影響解明及び実証試験．平成13年度熱水等利用土壌管理園芸栽培実用化技術開発事業報告書．pp.99-124

22) 柳瀬関三．2003．夏どりホウレンソウの熱水土壌消毒法．農耕と園芸．58（4）：71-75

23) 植草秀敏・岡本昌広・草野一敬．2002．熱水と土壌還元処理の併用によるトマト萎凋病菌の密度低減効果．関東東山病虫研報．49：23-29

24) 土本善洋・石合正暢．2002．土壌条件（土質・土壌水分）の違いと熱水土壌消毒の効果．熱水土壌消毒－その理論と実践の記録－．西和文編（2002）pp.85-93. 日本施設園芸協会

25) 岩本　豊・高木　廣・長田靖之・西村いつき．2000．傾斜地ほ場における熱水土壌消毒によるホウレンソウ萎凋病防除．関西病虫研報．42：53-54

26) 西　和文（編）．2003．熱水土壌消毒技術マニュアル．日本施設園芸協会

27) 植松清次・海老原克介・今井亜希子．2001．ガーベラ根腐病菌に汚染したロックウール資材の熱水消毒法．平成12年度関東東海農業研究成果情報．pp.254-255

28) Uematsu,S., H.Uekusa, K.Kusano, M.Okamoto, and N.Kita. 2003. Use of hot water for soil-borne disease control. Proceedings of International Research Conference on Methyl Bromide Alternatives and Emissions Reductions. pp.123-1 － 2

29) 北　宜裕．2003．臭化メチル代替技術．施設園芸ハンドブック pp.433-439. 日本施設園芸協会