

生産現場における熱水土壤消毒の実用利用

神奈川県農業総合研究所 北 宜裕

Kita,N.: Practical Use of the Hot Water Soil Sterilization in Agricultural Production

Summary

Hot water soil sterilization provides the most promising alternative to methyl bromide. There are 2 types of the application systems: dragging and tube-watering systems, both of which apply hot water of 80 to 95°C onto soil surface and raise the soil temperature to inactivate plant pathogens, pests and weeds by wet-heat pasteurization. Actually, when hot water is applied onto the soil, temperature over 55°C, the lethal heat for the *Fusarium*, can be maintained for as long as 22hr even in the 30cm depth. Conspicuous disinfestation effects of the treatment have been confirmed in various crops such as tomato, melon, spinach, rose and carnation etc. As an additional effect, prominent growth promotion has been observed in these crops probably due to the improvement of the chemical and physical soil properties as a result of the washout of the soil by huge amount of hot water. Although the total system is still expensive, the hot water soil sterilization is expected to come into the wider use after the MB fadeout.

はじめに

熱水土壤消毒法は、旧農業研究センターと旧神奈川県園芸試験場で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あり、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 (Kita et al.2003)。その原理は言うまでもなく、熱水が持つ湿熱によって土壤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、効果的に土壤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。開発当初は、熱水の有効性は直感的に理解できても「畑に熱水を散布すること自体がナンセンスだ。」と受け取られ、正しく評価されなかった。けん引式の熱水土壤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 (林 1998)。しかし、本技術は土壤病害虫の防除のみならず卓越した土壤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、臭化メチル全廃という時代背景や農林水産省の技術開発支援もあって、現在では全国各地で実用利用されるようになった。すでに複数の熱水土壤消毒装置が実用化され、販売に至っており、今後、さらに普及が進むものと期待される。

ここでは、生産現場で実際に利用されている熱水土壤消毒について、具体的な処理方法と効果及び留意点等を中心に取りまとめた。なお、熱水土壤消毒全般に関しては、「熱水土壤消毒—その理論と実践の記録—」(西和文編 2002)に詳述されているのでそれを参考にされたい。

1. システム構成と処理方法

(1) システム構成

熱水土壤消毒装置の基本的なシステムは、ボイラー、送湯チューブ及び熱水散布装置からなる (図 1)。ボイラーについては、通常型の他にパルスジェットエンジンを利用した小

型で大容量のタイプも開発されている。熱水の散布システムとしては、旧神奈川県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、大規模施設向けの「けん引方式」(林 1979)と旧農研センターで開発した耐熱性のチューブを用いた中小施設や傾斜地向けの「チューブ方式」(国安・竹内 1986)の二つがある。

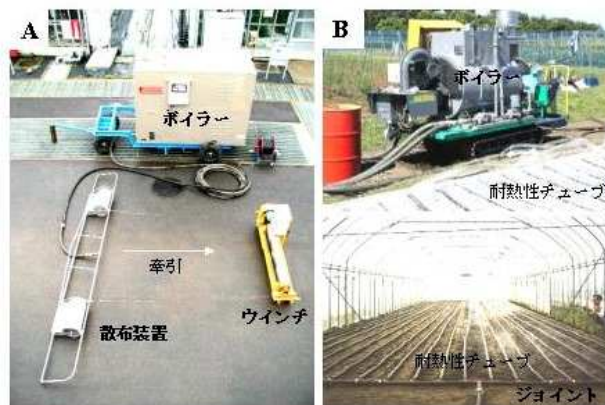


図1 熱水土壌処理装置のシステム構成
A：けん引方式、B：チューブ方式

けん引方式では、ボイラー、熱水散布装置及びこれをけん引するウインチを組み合わせて、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(図1,2)。チューブ方式では、耐熱性のチューブを用いて熱水を土壌に処理する(図1)。いずれもポリフィルム等で土壌表面を被覆した状態で熱水を処理することによって、土壌表面からの熱の損失を抑制し、土壌深くまで高温処理するのがポイントになる(北 2003、北・岡本 2004)。

(2) 処理方法—けん引方式での事例—

すでに述べたように、熱水の処理方法には「けん引方式」と「チューブ方式」の二つがあるが、ここではけん引方式における処理方法について説明する。

①装置と必要資材

熱水消毒は、ボイラー、熱水散布器及びこれをけん引するウインチなどを組み合わせた装置(図1)を用いて熱水を散布する(図2)。これに、給湯ホース、土壌表面を被覆するための熱水散布幅に合わせた大きさのポリフィルムが必要となる。アルミ蒸着フィルムがあればより保温性が高くなる。燃料にはA重油を用いるので、一般の施設栽培で温風・温湯暖房している施設なら手持ちのタンクと直接つなぐことができる。このほか、ボイラーとウインチのモーターを動かすための200V電源が必要となる。給水用の原水は井戸水でも水道水でもかまわないが、10aあたり150~300t程度必要となるので、十分供給できるようにしておく。また、当然のことだが原水の温度はできるだけ高い方がエネルギー効率はよくなる。

②作業手順

全体の作業手順のフローを図2に示した。処理作業は、栽培後の後片づけが終われば、基本的には季節にかかわらず随時実施できる。透水性を良くするため、十分深耕し、2~3日ほど土壌を乾燥させてから熱水散布作業に入る。熱水散布は、まず、散布を開始する場所に熱水散布装置を置き、施設の間口に合わせて熱水散布幅を決める。次に、ボイラーへの給水と燃料供給系を組み立て、

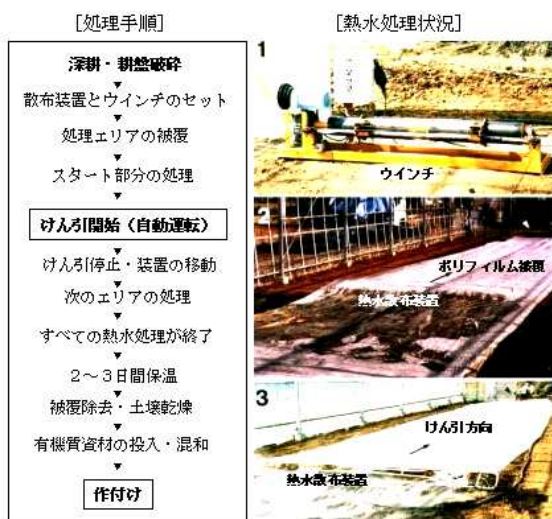


図2 牽引方式による熱水処理方法

ボイラーのスイッチを入れ、湯を沸かす。その間に、ウインチの位置を調整し、熱水散布装置の上から熱水処理するエリア全体をポリフィルム等で被覆し、四隅を土嚢などで固定する。ボイラー内の水温が 95℃を越えたら自動的にギアポンプが作動するので、熱水散布作業に入る。

まず、最初に熱水散布装置をおいた場所付近のデッドスペースを、けん引せずに 15 分ほどかけて処理した後、ウインチ (図 2-1) を用いて 1 時間に 1.5~4.5m のスピードでけん引を始め、自動運転に入る (図 2-2,3)。けん引速度は、散布する熱水量と供給可能水量及び使用するボイラーの熱量との関係を考慮して調整する。熱水の散布量は、栽培期間が長く根張りが深いトマトやバラなどでは 1 m²あたり 200~300l、栽培期間が短いハウレンソウなどの軟弱野菜類では 150l 程度とする。一工程が終了したら、次の処理エリアにウインチと熱水散布装置を移動し、再び作業に入る。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 10a を処理することができる。できるだけ深い作土層まで消毒効果を得るために、施設であれば少なくとも 3 日は締め切っておく。その後、ポリフィルムをはずし、耕耘できる程度まで土壌を乾燥させる。また、熱水消毒なら同じ施設内に作物が栽培されていても消毒作業ができるので、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が可能となる。

2. 熱水土壌消毒の効果

(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 (国安・竹内 1986) やダイズ黒根腐病 (西ら 1999) 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、これまでに 19 作物 36 病害虫に対して極めて高い効果が認められている (Uematsu et al. 2003)。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 時間にもわたって保たれる。トマト萎凋病菌ほか 5 種の土壌病原菌の汚染土壌を不織布で包み、土中に埋設した後、熱水処理を行い、7 日後に取り出してトマトまたはキュウリ苗を用いた生物検定を実施した。その結果、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、岡本ら 2002)。そこで、生産現場での実際の処理効果について検討するため、施設全面に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での現地ほ場で 300 l/m²の熱水処理を行った。

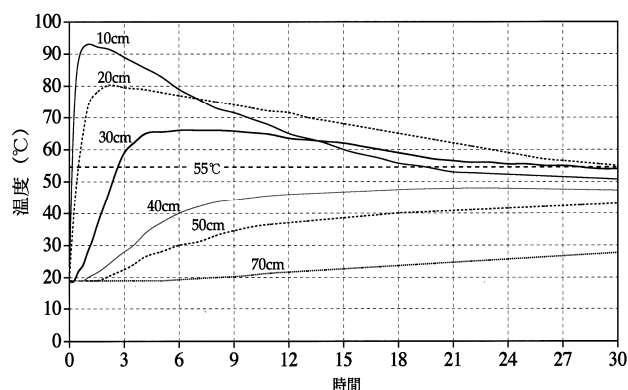


図 3 熱水処理後の土壌深度別の地温変化
黒ぼく土壌で、散布幅 5.4m、牽引速度 2.4m/h
で 95℃の熱水を 300 l/m²散布した。(北 2003)

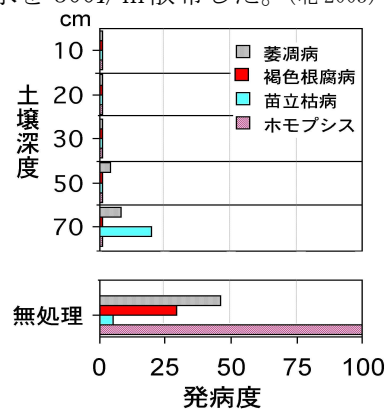


図 4 各種土壌病原菌に対する熱水処理 (300 l/m²) 効果

その結果、処理前には施設全面に激しい半身萎凋病が発生していたのに対し、熱水処理後は半身萎凋病の発生は劇的に抑えられ、結果として収量は倍増した（図5、表1、植草ら2003）。

次にこの顕著な土壌病害抑制効果がどのくらい持続するのかを明らかに

するため、対照として化学合成農薬処理区を設定し、3作、3年間にわたる促成トマト栽培で、褐色

根腐病の発生を指標にした実証試験を行った。実証区では、第1作目の作付け前に95℃の熱水を300l/m²処理布した。一方、対照区では、第1作目はダズメット剤を、第2作目はカーバムNa塩を及び第3作目はクロルピクリン剤をそれぞれ各年度の作付け前に処理した。その結果、実証区では、第3作目でも褐色根腐病の発生はわずかに認められたものの、その発病度は薬剤処理した対照区と同レベルで、収量には全く影響しなかった（図6-A）。これらの結果から、施設トマト栽培での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（岡本ら2002）。同様に、雨よけハウレンソウ栽培でのチューブ方式による熱水処理で、柳瀬ら（2003）はその防除効果が5作維持されることを認めている（図6-B）。

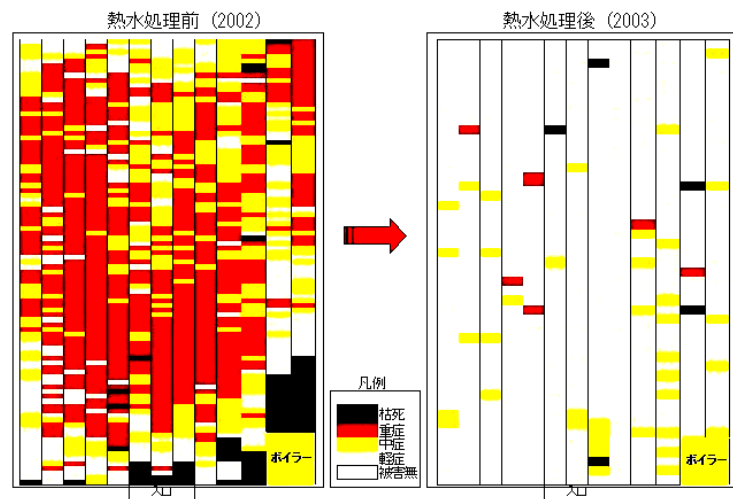


図5 トマト半身萎凋病発生ほ場（神奈川県海老名市）における熱水処理効果。処理前（2002年6月20日）及び処理後（2003年6月28日）の半身萎凋病の発生状況を示す。

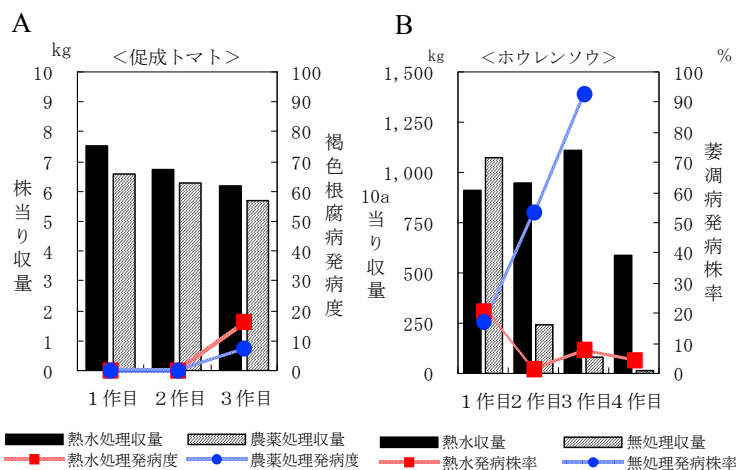


図6 熱水土壌消毒による土壌病害発病抑止持続効果。A：施設トマト（岡本ら2002）、B：雨よけハウレンソウ（柳瀬2003）。熱水処理はいずれも第1作の作付け前のみの1回処理。

(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ことから、土壌養分に大きな変化が生じる。そのため、熱水処理後には従来とは違った肥培管理が必要となる。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、結果として灰色低地土では深さ10cm程度、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)は顕著に低下する (図 7-A:岡本ら 2002、永井ら 2003)。土壌の塩類は、硝酸、カリ、苦土、石灰の順で流亡しやすく、灰色低地土ではさらにリン酸も流亡する (永井ら 2003)。したがって、熱水処理後、土壌化学性がどの程度変化したかを把握するためにも、土壌分析は不可欠となる。

(3) 作物の生育促進効果

現地で熱水処理を行った施設トマト農家の事例調査では、いずれも処理前に悩まされていた褐色根腐病が全く発生しなかった。また、トマトの生育は極めて順調で、処理前には収量が皆無に近かった農家でも、熱水処理後は初作時かそれ以上の収量が得られている。実際に、熱水土壌処理により作物の窒素吸収量が増加し、多くの作物で 10～40%の顕著な生育促進及びそれに伴う増収効果が認められている (表 1)。

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ているが、まだ十分には解明されていない。いずれにしても、初めて熱水土壌消毒をした場合、こうした生育促進効果は予測できないため、基肥の窒素量を減らし、生育を見ながら追肥で生育を調節するのがよい。

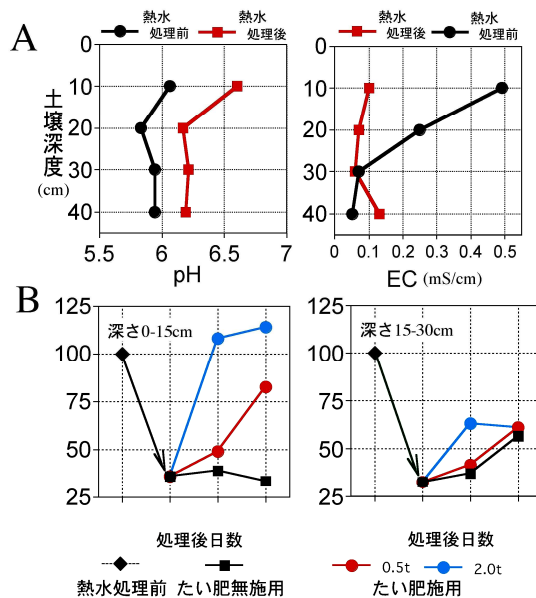


図 7 熱水処理による土壌化学性及び生物性の変化. A : pH 及び EC の変化、B : 土壌抽出液のセルロース分解能の変化で、熱水処理前を 100 としたときの相対値を示す。

(岡本ら 2002)

表 1 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		収量性		備考	
		項目	数値	比	収量		比
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日まき。 草丈は翌2月15日に調査。
	対照	草丈	145cm	100	6.20 kg/株	100	
促成トマト (ハウス桃太郎)	熱水	—	—	—	16.0t/10a	139	H14年度の総出荷量
	対照	—	—	—	11.5t/10a	100	H13年度の総出荷量
ハウレンソウ (アトラス)	熱水	草丈	32cm	110	30.2 g/株	112	2002年9月20日まき、 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日まき、 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日まき、 翌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日まき、 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	1.78t/10a	123	2000年9月20日定植 で、収量は翌3月末ま までの値
	対照	1果重	11.9g	100	1.45t/10a	100	
温室バラ (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。 収量は切り花本数。
	対照	—	—	—	306 本/坪	100	

(北ら2003)

(4) 土壌還元消毒との併用処理効果

最近、新村ら（2000）によって開発された土壌還元消毒は、30℃程度の地温でも土壌が還元状態であれば病原菌が死滅しやすいことに着目した画期的な土壌消毒法である。本法は、土壌中に還元化を促進する資材としてフスマまたは米ぬかをを用い、これを10a当たり1t程度作土層に混和した後、太陽熱処理するもので、その有効性は全国各地で確認されている。処理条件としては、土壌へのフスマの混和、十分な土壌水分及び30℃以上温度の維持の3点であり、これらが満たされれば十分な土壌消毒効果が得られるものとされている。一方、熱水土壌消毒では、深さ50cmになると40℃程度までしか温度が上昇しないため、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（2002、2003）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、実際にトマト萎凋病菌を用いて併用処理の可能性について検討した。その結果、トマト萎凋病菌汚染土壌にフスマを1%レベルで混和し、温室内で所定の深さに埋設した後、98℃の熱水を270l/m²処理したところ、深さ40cmの位置でもフスマと混和した病原菌は完全に死滅した（表2）。しかし、トマト萎凋病菌汚染土壌のみを埋設し、温室内土壌にフスマまたはショ糖を10a当たりそれぞれ1t及び900kgレベルで混和した後、98℃の熱水を150l/m²処理した場合には、ショ糖処理で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）。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。

表2 熱水処理とフスマ添加の有無がトマト萎凋病菌密度に及ぼす影響

フスマの添加量	処理	菌密度 (cfu/g · dry soil)*		
		20cm	30cm	40cm
1%	熱水	0.0	0.0	0.0
	水	5.87E+04	3.89E+04	4.50E+04
なし	熱水	0.0	0.0	2.58E+04
	水	5.77E+04	4.02E+04	4.44E+04

*0.0：検出限界以下 (<5.0E+01/g · dry soil), 植草ら2003)

表3 熱水及び有機物土壌混和処理の組合せがトマト萎凋病菌密度に及ぼす影響

処 理*1	深さ (cm)	菌密度*2			
		A区	B区	平均	
熱水処理	無処理	30	95	15	55
		45	144	3	73
		60	140	128	130
	フスマ	30	8	97	53
		45	88	52	70
		60	162	142	150
	ショ糖	30	1	ND	1
		45	ND	ND	ND
		60	36	9	22
水処理	無処理	30	132	123	130
		45	138	103	120
		60	114	79	96
	フスマ	30	99	138	120
		45	170	103	140
		60	109	—	110
	ショ糖	30	200	119	160
		45	197	115	160
		60	245	135	190
無処理	30	135	211	170	
	45	200	167	180	
	60	199	243	220	

*1熱水処理区は98℃の熱水を散布150l/m²、水処理区は水道水を150l/m²散布した。*2値は×10³ cfu/d · s · g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/g · dry soil) を、—はデータなしを示す。

3. 労力とコスト

(1) 労力

1回の熱水土壤消毒にかかる10a当たりの延べ作業時間は、施設トマトでのけん引方式による事例では4.2人・時間で、ガス抜き作業を含むクロルピクリン処理の5.6人・時間に比べ少なく、さらに3年間処理効果が持続するので1作当たりでは1.4人・時間と4.2人・時間も少なくすむ(岡本ら2002)。一方、チューブ方式による雨よけハウレンソウでの事例では、10a当たり17.9人・時間で、クロルピクリン処理の13人・時間に比べ5人・時間程度多く必要となった(柳瀬ら2002)。しかし、熱水処理そのものはいずれの方式でも自動運転であり、必要なのは装置の準備・敷設にかかる労力のみとなる。また、雨よけハウレンソウ栽培でも1回の処理で5作は防除効果が持続するため(図6-B)、作業労力的にマイナスになることはない。さらに、薬剤処理では不可欠なガス抜き作業が全く不要となるため、作業者の心理的な負荷が大幅に軽減されるなど生産者の評価は高い。

(2) コスト

熱水土壤消毒にかかるコストについては、神奈川農総研で実施した施設トマトでの実証試験で詳細な分析がなされている(岡本ら2002)。必要な資材は、10aあたりA重油が約2kl、水が約300t及び3相200V電源などである。したがって、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作間持続するので、1年あたりにすると77,000円(水道代を除けば59,000円)となる(表4)。これは、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、クロルピクリンくん蒸剤でも5万円程度かかることや、消毒作業が3年に1回で済んだという労力的なことを勘案すれば許容範囲と考えられる。農家数や1戸あたりの使用面積が増加すれば、全体としての費用はさらに低くなるものと考えられる。これに対し、岐阜中山間農技研が実施した雨よけハウレンソウでの事例では、慣行のクロルピクリン処理では10a当たり5万円で済むのに対し、熱水処理では14万7千円と3倍の費用が必要であると試算されている(柳瀬ら2003)。この場合、燃料と

表4 施設促成トマト栽培における熱水土壤消毒と薬剤処理の経費比較

項目	熱水土壤消毒区		薬剤防除(対照)区 ¹⁾				
	10aあたり(千円)		10aあたり(千円)			10aあたり(千円)	
	1処理3作当り	1作平均	第1作	第2作	第3作	3作計	1作平均
薬剤費	—	—	バスアミド微粒剤 28.1	キルパー 22.8	クロルピクリンテープ ³⁾ 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 (64.8)	20.2 (21.6)	—	2.9	—	2.9	2.9
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。熱水土壤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戸あたり施設面積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水道料203円/m³、重油32円/l、ガソリン90円/lで計算した。

(岡本ら2002)

して用いる灯油代が全体の約 60%を占めているので、燃料費の節減対策さえうまく行けば、経営全体としてはそれほど大きな負担にはならない。いずれにしても、本土壤消毒法は単なる熱水処理なので完全な有機栽培となる。したがって、有利販売ができれば処理費用の相殺あるいはそれ以上の経済効果が期待できる。さらに、熱水土壤消毒には、クロルピクリン等の化学農薬処理にはない顕著な土壤のリフレッシュ効果があるため、この程度の経費の差は熱水処理による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. 実施上の注意点

(1) 土壤物理性の確保

熱水土壤消毒のポイントは熱水の持つ湿熱を効率よく土壤に伝えることである。したがって、できるだけ水はけのよい土壤が望ましいことはいうまでもない。耕盤がある場合には、熱水が耕盤に妨げられて水平方向に拡散し、土壤深層部まで到達しないので、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耕盤を破砕しておくことよい。耕盤破砕後は、処理する熱水が均一に浸透するようできるだけほ場を均平化する。なお、土壤水分状態については、土壤吸引圧で $-30\sim-40\text{Pa}$ 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(土本・石合 2002)。

(2) 傾斜地での処理

傾斜地ほ場には、チューブ方式の熱水土壤消毒装置を適用する。傾斜方向に向かって 20cm 程度の間隔で、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 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(岩本ら 2000)。また、時間当たりの熱水処理量は、熱水が土壤にすみやかに浸透し、土壤表面を流れない程度の量とし、熱水のトータルな目標処理量に合わせて処理時間を設定する。4~5m おきに畦シートを設置し、オーバーフローした熱水の流失を防止する方法もある。最近、チューブ素材の耐熱性が向上し、最高で 95°C程度の熱水でも処理できるようになるとともに、チューブの電動巻き取り機も開発されるなど作業性も向上しているので今後の普及が期待される。なお、パイプハウスなどでは、畦シートや古ビニルあるいは廃材等をハウスサイドに設置し、処理した熱水の流失を防止する措置をとるなどの工夫が必要である(柳瀬ら 2003)。

(3) 処理時期

基本的に年間いつでも実施可能である。ただ、エネルギー効率を考慮すれば夏期が最も適しているのは言うまでもなく、施設を密閉状態にして熱水処理すれば、地下 40cm の深さでも 55°C以上の温度が得られる。厳冬期や秋期あるいは春先の気温がやや低い時期の処理については、地域やほ場の立地場所によって処理条件が異なるので個別に検討する必要がある。長野県の施設セルリー栽培で厳冬期に実施した事例では、1 m²当たり 175 l程度の熱水処理量で少なくとも 30cm までの作土層は十分消毒することができ、クロルピクリン処理と同等の収量が得られている(小松 2001)。なお、この場合利用する原水の温度が熱水を作成する上での熱効率に最も影響するので、地下水等できるだけ熱量の高い原水を利用するのがポイントになる。

(4) 処理後の土壤管理

熱水土壤消毒では、土壤処理薬剤や蒸気消毒処理と同様に、熱水処理によって土壤病原菌のみならず他の一般土壤微生物数も顕著に減少し、結果として土壤微生物による硝酸化

成作用が低下する。アンモニア態窒素は土壤に保持されやすいので、熱水土壤消毒後、窒素をアンモニア態として施用すれば硝酸態窒素への変換が遅くなり、窒素の流亡を抑制できるという利点がある。しかし、この場合アンモニアが土壤に過剰に蓄積すると、施設栽培のような閉鎖空間では作物にアンモニアガス障害が発生する危険があるので注意する必要がある。この硝酸化成作用は、熱水処理後 4 週間以上にわたって抑制されるため、早期に硝酸化成を回復させるには良質な堆肥の施用が有効となる。岡本ら(2002)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ことにより、処理 2 週間後には少なくとも土壤上層部ではその微生物相は処理前のレベルまで急速に回復することを認めている (図 7-B)。

(5) 作業上の注意

熱水処理には薬剤処理とは異なる作業上の注意が必要となる。最も深刻なトラブルは火傷で、チューブ方式では散湯チューブの破裂や送湯ホースの付け替え作業時、けん引方式では熱水散布装置の引っかかり事故や被覆フィルムの巻き込み事故対策時に起こりやすい。いずれのケースにおいても、熱水処理済エリアに入り込んで対処せざるをえないので、口の締まった水田用の長靴を履き、少なくとも 30cm 程度の幅の板を敷いて処理エリア内に入るしかない。この際、万が一転倒したりすると致命的な火傷を負うので、基本的には熱水処理を中断して熱水が土壤に浸透するのを待ってから補修作業を行う。最近では、システムの改良が進み、散湯チューブの耐熱性も 100℃を越え、また、熱水散布装置にも改良が加えられたのでこのような作業上のトラブルはほとんど発生しなくなった。熱水処理の基本は、散布する熱水を効率よく土壤深層部まで到達させることであり、そのためには深耕や耕盤の破碎あるいは十分な有機物施用による膨軟な土作りなどが必要となる。このような点に留意し、トラブルのない安全な熱水処理ができるようにするためには、薬剤処理と同様に作業機の整備、周到な準備そして余裕のあるスケジュールを持って熱水処理作業に取り組むことが大切である。

(6) その他

このほか熱水処理に伴う注意点としては、マンガン過剰症の発生がある (柳瀬ら 2003、北・岡本 2004)。熱水処理により土壤に存在する微量要素のマンガンが、作物に吸収されやすい交換態に変化する。このため、熱水処理直後に作付けすると、マンガン過剰症が発生しやすくなる。実際、土壤中の交換態マンガン量は、90℃以上の熱水を処理したときに顕著に増加し、ま

た、熱水処理量が多くなるほどその量も増加する。しかし、処理後 40 日程度経過すれば、耕起などしなくても非交換態に自然変換し、交換態マンガンは過剰症が懸念される濃度以下まで低下するのでそれほど心配する必要はない。ただ、水田転換畑のような排水の悪いほ場では、熱水

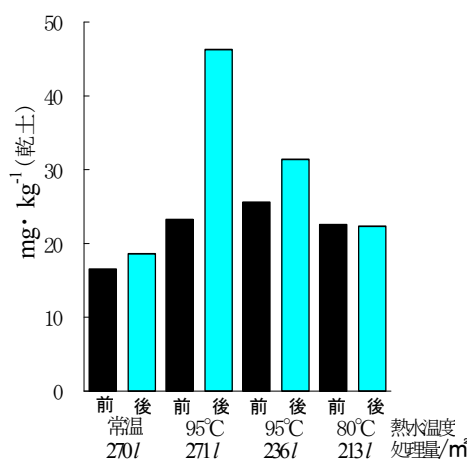


図 8 熱水の温度と処理量の違いが土壤中の交換性マンガン量に及ぼす影響。淡色黒ボク土における表層から 15cm 深までの処理 1 週間後の結果。前は処理前土壤、後は処理後土壤の交換性マンガン量。(北・岡本 2004)

処理後、作付けまでの期間を少し長めにとるとともに、多かん水を避けたり、土壌 pH を 6 以下に下げないよう、一度に多量の施肥をしないなどの耕種的対策をとったほうがよい。

ネコブセンチュウ害については、とくに施設キュウリ栽培で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センチュウ密度が極めて高くなっていること及び作付け終了後土壌を乾燥させてしまうと熱水処理効果が得られない土壌深層部までセンチュウ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、現状ではセンチュウ密度が高い場合には D-D 等の薬剤処理により全体のセンチュウ密度を低下させてから熱水処理する、あるいは抜根処理後できるだけ早く熱水処理を行うことなどが考えられる。

5. 普及に向けて

熱水土壌消毒システムの特徴は何と言ってもその実用性の高さにある。理論的には作土を加熱して病原微生物を死滅させるために必要な量の熱水を散布すればよく、その意味ではさまざまな熱水処理手法がありうる。しかし、できるだけ低コスト、省労力で熱水処理できる装置でなければ実用的な利用は期待できない。その点、けん引方式は、生産現場における試行錯誤の繰り返しを通して作り上げられた実践的なシステムであり、すでに実用レベルに達している。神奈川県では、1983 年に実用新案化された後、県内の 70% 近くのバラ栽培農家が本法を慣行技術として採用してきた（石井 1990、林 1998）。また、1990 年以降は、トマトを中心とした施設野菜農家でも実用的に利用され、横浜、藤沢及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（北・岡本 2004）。全国的にも熱水土壌消毒の有効性は再認識され、熱水土壌消毒装置についてもすでに 10 社を越える企業が実用的なシステムを販売している（熱水土壌消毒技術マニュアル参照）。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。現状では、野菜ではトマト、ハウレンソウ、キュウリ、イチゴ、メロン等で、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的な利用・普及が進んでいる。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いる（植松ら 2001、Uematsu et al.2003）。

おわりに

熱水土壌消毒は、太陽熱消毒あるいはその変法である土壌還元消毒と比べると、処理時期を選ばず、外的環境条件にもほとんど影響されないため、防除効果はかなり安定している。したがって、薬剤のみならず拮抗微生物や対抗作物の利用等を含めた他の防除手法と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。2005 年に臭化メチル剤が全面使用禁止になるという国際情勢の変化を機に、くしくも土壌病害対策のあり方が見直されることになった。これを機会に土壌病害防除に関する個別技術をもう一度見直し、連作障害対策のキーテクノロジーとして、熱水土壌消毒を核とした総合的な土壌病害防除体系が確立されることを期待したい。

引用文献

- 熱水土壤消毒-その理論と実践の記録-. 西和文編(2002). 日本施設園芸協会.
- 熱水土壤消毒技術マニュアル. 西和文編(2003). 日本施設園芸協会.
- 林勇(1979). 施設における温湯土壤消毒法の開発 (第1報). 温室バラを中心にした温湯土壤消毒法の開発と実用化試験. 神奈川園試研報 26:60-72.
- 林勇 (1998). 温湯土壤消毒法による新改植技術. 切り花栽培の新技术 (改訂) バラ (下巻). 林勇編著. pp.73-79. 誠文堂新光社.
- 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壤消毒によるハウレンソウ萎ちょう病防除. 関西病虫研報 42:53-54.
- 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.
- 北宜裕・岡本昌広(2004). 熱水土壤消毒. 農業技術体系土壤肥料編. 追録第15号 第5-①巻. 畑 216:7・2-7・7・4. 農文協.
- Kita,N., Nishi,K. and Uematsu,S. 2003. Hot water treatment as a promising alternative to methyl bromide. Proceedings of International Research Conference on Methyl Bromide Alternatives and Emissions Reductions. pp.26-1-2.
- 小松和彦(2001). セルリー萎黄病に対する熱水消毒の効果. -冬期(農閑期)一回処理による効果-. 平成13年度熱水等利用土壤管理園芸栽培実用化技術開発事業報告書 pp.69-77
- 国安克人・竹内昭士郎(1986). 熱水注入による土壤消毒のトマト萎凋病に対する防除効果. 野茶試験場報告 A14:141-148.
- 永井耕介・牧浩之・小河甲(2003). 平成14年度近畿中国四国農業研究推進会議成果情報. 近畿中国四国農業研究センター編. pp.161-162.
- 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.
- 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.
- 新村昭憲(2000). 農業技術体系土壤肥料編. 追録第11号 第5-①巻. 畑 212:6-9. 農文協.
- 土本善洋・石合正暢(2002). 土壤条件(土質・土壤水分)の違いと熱水土壤消毒の効果. 熱水土壤消毒-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.
- 植草秀敏・岡本昌広・草野一敬 (2002). 熱水と土壤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.
- 植草秀敏・岡本昌広・草野一敬 (2003). 熱水処理による土壤・病害虫への影響解明及び実証試験. 平成13年度熱水等利用土壤管理園芸栽培実用化技術開発事業報告書 pp.99-124
- 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.
- Uematsu,S., Nishi,K, and Kita,N. 2003. Hot water soil sterilization begins in Japan. Farming Japan 37-2:35-41.
- Uematsu,S., Uekusa,H., Kusano,K., Okamoto,M. and Kita,N. 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
- 柳瀬関三(2003). 夏どりハウレンソウの熱水土壤消毒法. 農耕と園芸 58(4):71-75.