

特集：ポスト臭化メチル時代の土壌病害虫防除

# 蒸気土壌消毒の効果と普及

高知県農業技術センター <sup>たけうち</sup>竹内 <sup>しげはる</sup>繁治・<sup>しももと</sup>下元 <sup>みつ き</sup>満喜  
高知県農業技術課営農支援室 <sup>もり</sup>森 <sup>た</sup>田 <sup>やす</sup>泰 <sup>あき</sup>彰

## はじめに

蒸気土壌消毒は、床土消毒や隔離床栽培での土壌消毒技術として古くから利用されてきたが、最近では2004年末で全廃された臭化メチルの代替技術の一つとして、野菜や花き類栽培での本圃の土壌消毒技術としての利用が検討されている。高知県では、臭化メチル緊急対策事業の一環として蒸気土壌消毒機の導入促進を図っており、県内での保有台数が徐々に増加している。本稿では、高知県農業技術センターが実施したメロンの黒点根腐病とえそ斑点病、サツマイモネコブセンチュウ（以下ネコブセンチュウ）を対象とした試験の結果を中心に、蒸気土壌消毒の防除効果や問題点、今後の課題などについて紹介する。

## I 蒸気土壌消毒の原理と特徴

既に藤村（1966）や加藤（1982）によって詳しく解説されているように、蒸気土壌消毒は気体の蒸気を土壌中に連続して送り込むと、土壌間隙に充満して土壌粒子と接して潜熱を放出し、土壌粒子の温度を上昇させながら液体になることを利用したものである。土壌粒子の温度が100℃に上昇すると蒸気の熱量は土壌に吸収されなくなり、蒸気はさらに温度の上がない土壌間隙に進んでいく。このように100℃に上昇した土と冷たい土との間で層状に熱前線を形成しながら温度の上昇が進んでいく。

土壌への蒸気の供給方法にはいくつかの技術があり、一定間隔に蒸気噴出口がある金属製の管を土壌中に埋設して蒸気を噴出するホジソンパイプ法や、布製のホースを地表面に設置し、ポリエチレンなどのシートで被覆したうえでホースに蒸気を送り、ホースの布目から噴出した蒸気で地表面から地温を上昇させるキャンバスホース法などがよく知られている。地温の上昇効率の点では地中に蒸気を噴出させるホジソンパイプ法が優るといわれ

ているが、キャンバスホース法がより簡便に実施でき、作業性の点では優れている。

くん蒸剤を用いた土壌消毒と比較して、蒸気土壌消毒は作業に長時間を要するが、地温が低下すればすぐに作物を植えることが可能であるため、消毒開始から植付け可能になるまでの期間は短い。また、既に作物が植えられている施設内で、部分的な土壌消毒を行うこともできるという利点がある。このため、短期間で土壌消毒を終え、直ちに作物を植え付けたい場合や、ハウス内を分割して時期をずらしながら植付けと収穫を繰り返すような栽培体系に適した土壌消毒法である。

## II 施設メロンの土壌病害虫に対する防除効果

高知県の施設メロンは、一つのハウスで1年に3回作付けされる場合が多い。土壌病害虫の被害が問題とならない圃場では、夏場に一度土壌消毒を行うだけで3作とも栽培できる場合もあるが、多くは黒点根腐病やえそ斑点病の被害に悩まされており、毎回土壌消毒を実施しなければ被害を回避することが難しい。前作が終了してから次の苗を定植するまでの間隔は、10～14日程度しかないこともあり、この限られた期間内に土壌消毒を終えなければならない。クロルピクリンなどの代替剤はいずれもくん蒸とガス抜きに長期間を要し、特に低温期にこの傾向が強いため、メロンでの低温期の土壌消毒用には使用できない。そのため、消毒後に地温が低下すれば直ちに定植が可能であるという蒸気土壌消毒の利点に着目し、低温期を中心とした臭化メチル代替技術としての利用が検討されている。

### 1 黒点根腐病に対する防除効果

黒点根腐病はメロンに発生する土壌病害のなかでも特に被害が大きい。果実が肥大してネット形成が終了したところから萎凋が始まるため、栽培農家にとっては経済的被害だけでなく、精神的ショックも大きい病害である。本病に対する蒸気土壌消毒の防除効果を明らかにするため、2000年から05年にかけて、農業技術センター内の黒点根腐病汚染圃場でキャンバスホース法による蒸気土壌消毒を実施した（表-1）。

Control Effect and Utility of Steam Soil Sterilization. By Shigeharu TAKEUCHI, Yasuaki MORITA and Mitsuki SHIMOMOTO

(キーワード：蒸気土壌消毒，キャンバスホース法，メロン黒点根腐病，メロンえそ斑点病，サツマイモネコブセンチュウ)

表-1 蒸気土壌消毒によるメロン黒点根腐病防除試験の実施概要と結果

実施年度	処理面積	蒸気注入時間	地下 20 cm の最高到達温度 (°C)	防除値 <sup>a)</sup>	対照剤の防除値	無処理区の発病度	備考
2000 年	26.4 m <sup>2</sup> (1.2 m × 22 m)	1 時間 58 分	99.7	75.3	63.7 (クロロピクリン 30 l/10 a) 76.9 (臭化メチル 30 kg /10 a)	65.9	含水率 13.0%
2001 年	52.8 m <sup>2</sup> (1.2 m × 22 m × 2 畦)	1 時間 32 分	100.0	78.5	74.1 (クロロピクリン 30 l/10 a)	99.2	畦高 36 cm, 含水率 23%
			63.0	28.6			畦高 36 cm, 含水率 11%
			70.0	50.0			畦高 19 cm, 含水率 23%
			47.0	24.7			畦高 19 cm, 含水率 11%
2002 年	26.4 m <sup>2</sup> (1.2 m × 22 m)	1 時間 53 分	75.0	72.6	80.0 (クロロピクリン 30 l/10 a)	95.9	含水率 22.1%
			74.0	68.7			含水率 17.6%
	26.4 m <sup>2</sup> (1.2 m × 22 m)	1 時間 01 分	62.0	10.0			含水率 22.1%
			75.0	15.2			含水率 17.6%
2003 年	18.0 m <sup>2</sup> (1.2 m × 15 m)	1 時間 15 分	74.0	54.1	86.7 (クロロピクリン 30 l/10 a)	98.0	
	18.0 m <sup>2</sup> (1.2 m × 15 m)	1 時間 00 分	72.0	29.6			
2005 年	5.5 m <sup>2</sup> (1.3 m × 4.2 m)	53 分	83.4	100.0	81.0 (クロロピクリン・1, 3-ジクロロプロペン 30 l/10 a)	52.5	地床栽培
			100.0	81.0			
	10.9 m <sup>2</sup> (1.3 m × 8.4 m)		100.0	92.4			
			100.0	100.0			遮根シート栽培

<sup>a)</sup> 栽培終了後に根を掘り出し、褐変の程度を下に示した基準に従って評価し、根部褐変度と防除値を算出した。

<根部褐変指数> 0: 褐変なし。1: 一部の細根が褐変。2: 30%未満の根が褐変。3: 30%以上 70%未満の根が褐変。4: 70%以上の根が褐変。

$$\text{根部褐変度} = \frac{\sum (\text{指数} \times \text{指数別株数})}{4 \times \text{調査株数}} \times 100$$

黒点根腐病の発生程度は試験によってやや異なるが、比較のために用いたクロロピクリンなどの土壌くん蒸剤は、いずれの場合も一貫して高い防除効果を示した。これに対して、蒸気土壌消毒の防除効果は試験によって大きく異なり、くん蒸剤と同等～やや高い防除効果が得られた場合と、著しく低い防除効果しか得られない場合があった。このような防除効果の違いは、地下 20 cm の最高到達温度の高低によって生じており、地下 20 cm の地温が 100°C 付近まで上昇した場合にはおおむね高い防除効果が得られているが、70°C 以下の場合には防除効果が低かった。また、75°C 付近まで上昇した場合の防除効果も不安定であった。

黒点根腐病菌の死滅に要する温度と時間について、子う殻を形成した培養菌叢を温湯に浸漬する方法で調べた結果、55°C では 3 日以上必要であるが、60°C では 90

分、65°C になると 30 分で死滅することがわかった。また、汚染土壌に対して蒸気土壌消毒を実施し、処理後深さ別に回収してポットに詰め、メロンを栽培して病原菌の生存を調べたところ、地温が 65°C 以上に上昇した深さの土壌では菌が完全に死滅していたが、65°C に達していない深さの土壌では菌の生存が確認された。このことから、地下 20 cm の最高到達温度が 100°C 付近まで上昇した場合には、それより下層の地温もかなり上昇しており、広範に菌密度が低下していたが、70～75°C 程度までしか上昇しなかった場合には、下層土の温度が十分に上昇しておらず、その付近に生息する菌が死滅しないまま発病をもたらしたのではないかと推察された。

このように、黒点根腐病に対して安定して高い防除効果を得るためには、地下 20 cm の最高温度が 100°C 付近まで上昇するような条件で消毒を行い、それより下層の

土壌も病原菌の死滅に有効な 65℃以上にまで上昇させる必要があると考えられた。

## 2 えそ斑点病に対する防除効果

えそ斑点病も黒点根腐病と並んでメロンの安定生産を阻害する難防除土壌病害である。特に、果実内部の空洞化や肉質劣化とえそ斑点病との関係が明らかにされてからは、防除の重要度が著しく高くなっている。えそ斑点病に対する蒸気土壌消毒の効果を明らかにするため、通常地床栽培と、深さ 20 cm 幅 50 cm にポリエステル製の遮根シートを埋設した遮根シート栽培でキャンパスホース法によって防除試験を行った。蒸気土壌消毒の処理面積は、地床栽培区が 5.5 m<sup>2</sup> (1.3 m × 4.2 m)、遮根シート栽培区が 10.9 m<sup>2</sup> (1.3 m × 8.4 m) で、蒸気の注入時間は 2 時間 28 分であった。本試験は病原ウイルスと媒介菌を大量に投入してメロンを数回栽培し、えそ斑点病が高率に発生することを確認した圃場で実施した。このため、えそ斑点病に対して登録のあるクロロピクリン・1,3-ジクロロプロベン処理区でも防除効果が認め

られない甚発生条件となった。地床栽培において、蒸気土壌消毒区は無処理区やクロロピクリン・1,3-ジクロロプロベン処理区よりも早期から発病が見られ、収穫時期に調査した発病程度もこれらの区より高くなるなど、防除効果が全く認められない結果となった。一方、遮根シート栽培で蒸気土壌消毒を行った場合は、発病を完全に抑えることはできなかったものの、遮根シート栽培の無処理区と比較して初発時期が大きく遅延し、収穫時の発病程度も低くなった(表-2)。これらの結果から、本試験のような強汚染圃場においては、蒸気土壌消毒でえそ斑点病を完全に防除することは困難であるが、遮根シート栽培は蒸気土壌消毒の防除効果を安定させるうえで有効であると考えられた。一方、伝染源となる罹病残渣の量が蒸気土壌消毒の防除効果に及ぼす影響を調べたところ、残渣の量が多い場合には防除効果が低下することが確認された(表-3)。したがって、蒸気土壌消毒を実施する際には、前作の残渣を可能な限り取り除いておくことが、高い防除効果を得るうえで極めて重要であると

表-2 メロンえそ斑点病に対する蒸気土壌消毒の防除効果

栽培様式	土壌処理	反復	供試株数	地下 20 cm の最高到達温度 (°C)	定植から初発確認までの日数	発病度 <sup>a)</sup>	発病株率 <sup>a)</sup>	異常果率 <sup>b)</sup>	MNSV 陽性果率 <sup>b)</sup>
地床	蒸気土壌消毒	I	4	67.4	50.3	56.3	100	100	100
		II	4	99.2	57.3	50.0	100	100	100
		平均			53.8	53.1	100	100	100
	クロロピクリン・1,3-ジクロロプロベン	I	4		62.0	31.3	100	50.0	100
		II	4		65.3	37.5	100	75.0	100
		平均			63.6	34.4	100	62.5	100
	無処理	I	4		84.5	25.0	100	25.0	80.0
		II	4		86.3	18.8	75.0	0	100
		平均			85.4	21.9	87.5	12.5	90.0
遮根シート	蒸気土壌消毒	I	5	99.9	78.8	15.0	60.0	0	60.0
		II	5	99.1	68.6	25.0	100	50.0	100
		平均			73.7	20.0	80.0	25.0	80.0
	無処理	I	5		36.4	70.0	100	100	100
		II	5		40.0	60.0	100	40.0	100
		平均			38.2	65.0	100	70.0	100

<sup>a)</sup> 栽培終了時に各株の発病程度を下に示した基準に従って評価し、発病度と発病株率を算出した。

<発病指数> 0: 病斑なし。1: 数枚の葉に病斑が認められる。2: 株全体の半分程度の葉に病斑が認められる。3: ほぼ全体の葉に病斑が認められる、または小斑点型病斑を生じ、全体の生長が不良。4: 萎凋、枯死。

$$\text{発病度} = \frac{\sum (\text{指数} \times \text{指数別株数})}{4 \times \text{調査株数}} \times 100$$

<sup>b)</sup> 収穫 9 ~ 10 日後の果実を割断して果肉の異常を肉眼観察した。ウイルスの感染は ELISA によって調べた。

表-3 罹病残渣の量が蒸気土壌消毒の防除効果に及ぼす影響<sup>a)</sup>

処理	地下 20 cm の 最高地温 (℃) <sup>b)</sup>	罹病残渣 混和量 (kg/m <sup>2</sup> )	感染株率 (%) <sup>c)</sup>
蒸気土壌消毒	62.8 ~ 76.2	0	0
		0.3	28.6
		0.9	71.4
無消毒		0	100
		0.3	100
		0.9	100

<sup>a)</sup> えそ斑点病の常発圃場で実施した。蒸気消毒直前にメロンえそ斑点病に感染したメロンの茎と葉を細断して 1 m<sup>2</sup> 当たり 0.3 kg または 0.9 kg 土壌に混和した。蒸気土壌消毒の処理面積は 21.8 m<sup>2</sup> (1.3 m × 8.4 m × 2 畦), 蒸気注入時間は 2 時間 45 分。遮根シート栽培 (幅 50 cm, 深さ 20 cm に敷設)。<sup>b)</sup> キャンパスホースの直下 2 地点で測定した。<sup>c)</sup> 感染は ELISA で確認した。

考えられる。

### 3 ネコブセンチュウに対する防除効果

ネコブセンチュウは高い増殖力と広い寄種範囲をもつことから、野菜や花き類栽培において防除上最も重要な土壌害虫の一つである。特にメロンでは、多発すると株が萎凋し、枯死する場合もあることから被害は深刻である。ネコブセンチュウの死滅に有効な温度と時間について、卵と 2 期幼虫を温湯に浸漬する方法で調べたところ、40℃では 24 時間処理でも死滅しなかったが、45℃では 2 期幼虫、卵ともに 1 時間処理で死滅することがわかった。次に、ネコブセンチュウの卵のうが着生したメロンの根をサーモラベル (日油技研工業株式会社製) とともにハウス内に作成した二つの畦 (1.35 m × 16.8 m, 22.7 m<sup>2</sup>) の地下 20 cm と 35 cm の位置にそれぞれ 3 個ずつ埋め込み、キャンパスホース法による蒸気土壌消毒を実施した。この際、一方の畦は地下 20 cm の地温が 60℃を超えた時点で蒸気の注入を停止し、もう一方の畦は、75℃を超えた時点で蒸気を停止した。処理後に根とサーモラベルを掘り出し、メロンの根についてはポット植えのミニトマト根圏部に埋め込んで、ミニトマト根部への卵のうの着生の有無によってネコブセンチュウ卵の生死を判定した。サーモラベルで調べた地下 20 cm の最高到達温度はいずれも 65℃を超えており、この地点に埋め込んだネコブセンチュウ卵はすべて死滅していた。しかし、地下 35 cm の最高到達温度について見ると、75℃で蒸気を停止した畦では 45℃以上に上昇していたが、60℃で蒸気を停止した畦では 2/3 が 45℃に到達しておらず、ネコブセンチュウ卵も生存していた。比較のために用いた臭化メチル処理区では、地下 20 cm

と 35 cm のいずれにおいても、卵の死滅が確認された (表-4)。

また、この試験を実施した畦でキュウリを栽培し、蒸気土壌消毒前、蒸気土壌消毒後定植前、栽培終了後に地下 15 cm の位置から土壌を採取してベルマン法でネコブセンチュウの密度を調べるとともに、栽培終了後のキュウリの根についてこぶの着生程度を調べた。その結果、蒸気土壌消毒後定植前の土壌からはネコブセンチュウが検出されなかったが、栽培終了時には高密度のネコブセンチュウが検出され根にも被害が認められた。この傾向は、60℃で蒸気の注入を停止した畦で顕著であった (表-5)。

このように、ネコブセンチュウに対しても、十分な防除効果を得るためには黒点根腐病の場合と同様に、下層土壌の地温をできるだけ上昇させることが重要であることがわかった。

### III 今後の課題

以上のように、施設メロンの主要な土壌病害虫に対する蒸気土壌消毒の防除効果を安定させるためには、地下 20 cm 以下の下層土まで、対象病害虫の死滅温度以上に上昇させる必要があることがわかった。しかし、地表面から蒸気を注入するキャンパスホース法では、下層土壌の温度を思うように上昇させることが難しく、むやみに長時間をかけて温度上昇を待つのは、燃料費や消毒時間の点で実用的とは言いがたい。このような問題を解決することが蒸気土壌消毒の普及を図るうえでの大きな課題である。この点を克服する手段の一つとして、現在遮根シート栽培との組み合わせに期待が寄せられている。筆者らが黒点根腐病に対して行った 2005 年の試験や、えそ斑点病を対象とした防除試験でも、遮根シート栽培では地床栽培と比較して蒸気土壌消毒の防除効果が高くなることが確認されており、蒸気土壌消毒の効率化と防除効果の安定化に有効な手段であると考えられる。ただし、遮根シートは病原菌やネコブセンチュウの通過を阻止するわけではないので、土壌の汚染程度によっては、栽培途中で病原菌やネコブセンチュウがシートを通過して根域土壌に侵入し、被害が発生する可能性もある。また、圃場内の未消毒部分に残された病原菌が、植物の栽培中に侵入する危険性もあるが、根域が制限されているために、地床の場合よりも被害程度が高くなる可能性も示唆されている。

一方、黒点根腐病に対して実施した 2001 年の試験から、畦の高さや含水率が地温上昇に影響する可能性が示唆されている。そこで、含水率が異なる土壌に対して蒸

表-4 蒸気土壌消毒時の地温とネコブセンチュウ卵の生存

土壌処理	埋設深度 (cm) <sup>a)</sup>	反復	最高到達温度 (°C) <sup>b)</sup>	ネコブセン チュウ卵の 生死 <sup>c)</sup>
蒸気土壌消毒Ⅰ (地下20cmの地 温が60°Cを超え た時点で蒸気の注 入を停止)	20	I	65 ≤	-
		II	65 ≤	-
		III	65 ≤	-
蒸気土壌消毒Ⅱ (地下20cmの地 温が75°Cを超え た時点で蒸気の注 入を停止)	20	I	40 ≤ < 45	+
		II	40 ≤ < 45	+
		III	50 ≤ < 55	-
蒸気土壌消毒Ⅱ (地下20cmの地 温が75°Cを超え た時点で蒸気の注 入を停止)	35	I	65 ≤	-
		II	65 ≤	-
		III	65 ≤	-
臭化メチル 30kg/10a	20	I	45 ≤ < 50	-
		II	50 ≤ < 55	-
		III	55 ≤ < 60	-
無処理	20	I		+
		II		-
		III		-
無処理	35	I		+
		II		-
		III		-

<sup>a)</sup> 畦の上面からの深さを示す。<sup>b)</sup> 埋設した根とともに置いたサ  
ーモラベルの変色から判定した。<sup>c)</sup> +: 生存, -: 死滅, 接種し  
たトマト根への卵の着生の有無で判定した。

気土壌消毒を行い、地温の上昇を比較した結果、過度の  
湿潤条件や乾燥状態では地温上昇が遅くなることが明らか  
になった。また、稲わらなどの有機質資材の施用が温度  
上昇に有効であることもわかった（いずれも未発表デー  
タ）。このような結果に基づき、過湿や過乾燥にならない  
よう土壌水分を調整したうえで有機質資材を施用するこ  
とで、より深層まで効率よく地温を上昇させることが可  
能になると考えられる。ただし、有機質資材を施用後  
に蒸気土壌消毒を実施すると、資材に由来する還元糖  
や有機酸が溶出し、土壌中のマンガン酸化物を還元・溶  
解して有効態マンガンの増加することで、植物にマンガ  
ン過剰障害を発生させる可能性があることが、辻ら  
(2006) によって明らかにされている。有機質資材のマ  
ンガン酸化物溶解能は、その素材によって異なるとされ

表-5 サツマイモネコブセンチュウの密度推移とキュウリ栽培  
終了時におけるネコブ指数

土壌処理 <sup>a)</sup>	2期幼虫数/生土20g <sup>b)</sup>			ネコブ 指数 <sup>c)</sup>
	処理前 (5月7日)	定植前日 (5月13日)	栽培終了後 (8月7日)	
蒸気土壌消毒Ⅰ	26.5	0	1,024.0	62.5
蒸気土壌消毒Ⅱ	192.9	0	254.0	37.5
臭化メチル	94.7	0	27.0	7.4
無処理	21.9	26.5	1,389.2	98.2

<sup>a)</sup> 蒸気土壌消毒ⅠとⅡは表-4と同じ。<sup>b)</sup> 数字は3反復の平均  
値を示す。分離はベルマン法(25°C, 72時間分離)による。

<sup>c)</sup>  $\text{ネコブ指数} = \frac{\sum(\text{階級値} \times \text{株数})}{4 \times \text{調査株数}} \times 100$

<階級値> 0: 無, 1: (小), 2: (中), 3: (多), 4: (甚)。

ているので、地温上昇に有効でマンガンの溶解能  
が低い資材を探索することが急務である。田中ら(2006)  
は蒸気土壌消毒後に堆肥を施用すると、消毒によるアン  
モニア態窒素の増加が軽減されると同時に、マンガ  
ン酸化物が導入され、可溶化したマンガンの再酸化される  
可能性を明らかにしている。このような技術を総合的に組  
み合わせ、マンガンのアンモニア態窒素の過剰障害など  
蒸気土壌消毒特有の問題点を改善していくこともこれか  
らの課題である。

## おわりに

蒸気土壌消毒は古くから知られている技術であるが、  
大面積の圃場を消毒する技術としてはまだまだ検討して  
いかなければならない点が多い。蒸気土壌消毒の普及に  
向けては、関連する各分野の連携と協力がこれまで以上  
に重要である。

なお、ここに紹介した試験は、高知大学農学部との連  
携促進研究として実施したものである。また、えそ斑点  
病に関する試験成績は、先端技術を活用した農林水産研  
究高度化事業の成果である。

## 引用文献

- 1) 藤村 良(1966): 農及園 41: 673 ~ 676.
- 2) 加藤喜重郎(1982): 植物防疫 36: 452 ~ 456.
- 3) 田中社太ら(2006): 日本土壌肥科学雑誌 77: 307 ~ 311.
- 4) 辻 美希ら(2006): 同上 77: 257 ~ 263.