

特集：ポスト臭化メチル時代の土壤病害虫防除

熱水土壤消毒の効果と普及

神奈川県農業技術センター ^{きた}北 ^{のぶひろ}宜裕・^{うえくさ}植草 ^{ひでとし}秀敏

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 年代初めにそれぞれ独自に開発された我が国のオリジナル技術であり、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)。熱水土壤消毒の原理は、熱水がも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。しかし、本技術は土壤病害虫防除効果のみならず卓越した土壤のリフレッシュ効果を有し、結果として処理コストを上回る収量増が得られることから、臭化メチル全廃という時代背景を受けて、施設園芸や軟弱野菜生産を中心に急速に普及が進んでいる (北, 2005; 西, 2005)。

I 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、送湯ホースおよび熱水散布装置からなる (口絵①, ②)。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、大規模施設向きの「けん引方式」(林, 1979; 北, 2005) 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きの「チューブ方式」(国安・竹内, 1986; 西ら, 1999) の二方式がある。

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、チューブ方式では耐熱性のチューブを用いて灌水と同様に熱水を土壤に処理する (口絵③, ④)。

いずれもポリフィルムなどで土壤表面を被覆して熱の損失を抑制する。一般に燃料には A 重油または灯油を用い、ボイラーとウインチのモーターを動かすための 200 V 電源が必要となるが、燃料として LP ガスを使用したり、100 V 電源で操作できるシステムも市販されている。用水は井戸水、水道水、ため池や灌漑用水などが利用できる。熱水の散布量は、栽培期間が長いトマトやバラなどでは 1 m² 当たり 200 ~ 300 l、栽培期間が短いホウレンソウなどの軟弱野菜類では 100 ~ 150 l 程度とする。通常 3 ~ 4 日で 10 a を処理でき、透水性がよい圃場なら処理 2 日後には施肥・耕うん作業ができる。

II 熱水土壤消毒の効果

1 土壤病害抑止効果

熱水土壤消毒による土壤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壤病害虫を対象に検討され、これまでに 25 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 (西, 2005)。熱水処理後の地温の変化を図-1 に示したが、30 cm までの作土層では、*Fusarium* 属菌の死滅温度である 55℃以上の温度が実に 22 時間にもわたって保たれることがわかる。トマト萎凋病菌ほか 5 種の土壤病原菌の汚染土壤を不織布で包み、土中に埋設した後、熱水処理を行った実験で

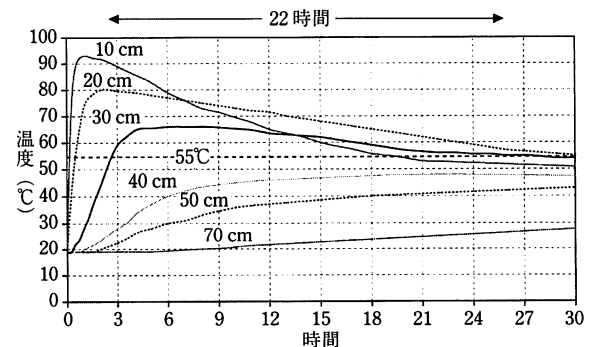


図-1 熱水処理後の土壤深度別の地温変化

黒ぼく土壤で、散布幅 5.4 m、けん引速度 2.4 m/h で 95℃の熱水を 300 l/m² 処理したときの状況 (北, 2003)。

Effect of Hot Water Soil Sterilization and its Practical Application.

By Nobuhiro KITA and Hidetoshi UEKUSA

(キーワード: 熱水土壤消毒)

表-1 埋設各種病原菌した汚染土に対する熱水処理効果 (生物検定)

処理	埋設深度 (cm)	病原菌別の発病度				
		トマト 萎凋病菌	トマト半身 萎凋病菌	トマト褐色 根腐病菌	ホモブシス 根腐病菌	苗立枯病菌
熱水処理	10	0	0	0	0	0
	20	0	0	0	0	0
	30	0	0	0	0	0
	50	4.2	0	0	0	5.0
	70	8.3	0	0	0	20.0
無処理	埋設汚染土	45.8	0	29.2	100	45.0

トマト萎凋病菌：1区にトマト苗8株を断根し汚染土に移植し、発病指数1～3より算出した。トマト半身萎凋病：1区にトマト苗8株を断根し汚染土に移植し、発病指数1～3より算出した。トマト褐色根腐：1区にトマト苗8株を断根し汚染土に移植し、発病指数1～3より算出した。苗立枯病 (*Rhizoctonia solani*)：1区にキュウリ種子8粒を汚染土に播種し、発病指数1～3より算出した。発病指数：0＝健全、1＝胚軸・根に小さい病斑が認められる、2＝胚軸・根全体に病斑が認められる、3＝萎凋および枯死。熱水処理量は300 l/m² (植草ら2002)。

は、埋設深度30 cmまでは全く発病が認められず、70 cmにおいても高い発病抑止効果が認められた(表-1)。施設全面に半身萎凋病が激発していた促成トマト栽培における熱水処理の現地試験では、処理前は施設全体に激しく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(図-2；植草ら、2003)、結果として収量は倍増した(表-2；北、2005)。

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(岡本ら、2002)。実証区では、第1作目の作付け前に95℃の熱水を300 l/m²処理した。一方、対照区では第1作目はダゾメット剤を、第2作目はカーバム Na 塩液剤をおよび第3作目はクロルピクリンテープ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作目に褐色根腐病の発生が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-3 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。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(2003)はその防除効果が4作維持されることを認めている(図-3 B)。

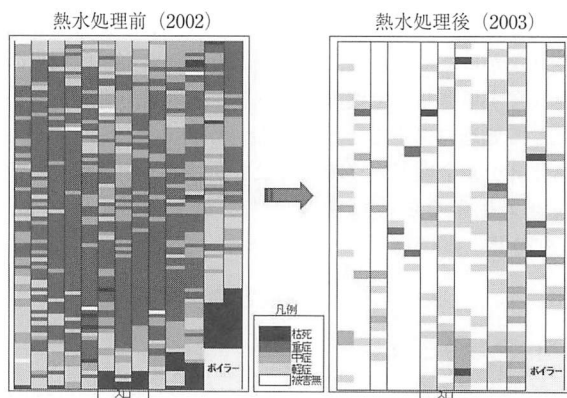


図-2 トマト半身萎凋病発生圃場(神奈川県海老名市)における熱水処理効果

処理前(2002年6月20日)および処理後(2003年6月28日)の半身萎凋病の施設内での発生状況を示す。95℃の熱水を300 l/m²処理(植草ら、2003)。

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。特に、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、結果として作土層のpHは酸性から中性に近づき、電気伝導度(EC)は顕著に低下するなど(図-4)土壌の顕著なりフレッシュ効果が認められる。なお、土壌の塩類は、硝酸、カリ、苦土、石灰の順に流亡しやすく、灰色低地土ではさらにリン酸も流亡するので、熱水処理後の土壌分

表-2 熱水土壤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	177 cm	122	6.83 kg/株	110	1998年9月15日まき, 草丈は翌2月15日調査
	対照	草丈	145 cm	100	6.20 kg/株	100	
促成トマト ^{a)} (ハウス桃太郎)	熱水		—		16.0 t/10 a	139	2002年度の総出荷量
	対照		—		11.5 t/10 a	100	
ハウレンソウ (アトラス)	熱水	草丈	32 cm	110	30.2 g/株	112	2002年9月20日まき, 10月28日調査
	対照	草丈	29 cm	100	26.9 g/株	100	
シュンギク (中葉春菊)	熱水	草丈	25 cm	114	15.1 g/株	104	2002年9月20日まき, 10月28日調査
	対照	草丈	22 cm	100	14.5 g/株	100	
セルリ (コーネル 619)	熱水	草丈	65 cm	116	2,600 g/株	123	2002年8月16日定植, 11月20日調査
	対照	草丈	56 cm	100	2,110 g/株	100	
ダイコン (耐病総太り)	熱水	根長	40 cm	118	2,230 g/根	141	2001年9月25日まき, 翌1月22日調査
	対照	根長	34 cm	100	1,580 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	12.7 g	107	1.78 t/10 a	123	2000年9月20日定植, 収量は翌3月末まで
	対照	1果重	11.9 g	100	1.45 t/10 a	100	
温室バラ ^{b)} (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 ^{c)} (フクユタカ)	熱水		—		1,070 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	

^{a)} 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2001年度作終了後の2001年7月25日, ^{b)} 神奈川県秦野市の現地圃場での結果, ^{c)} 西, 2002.

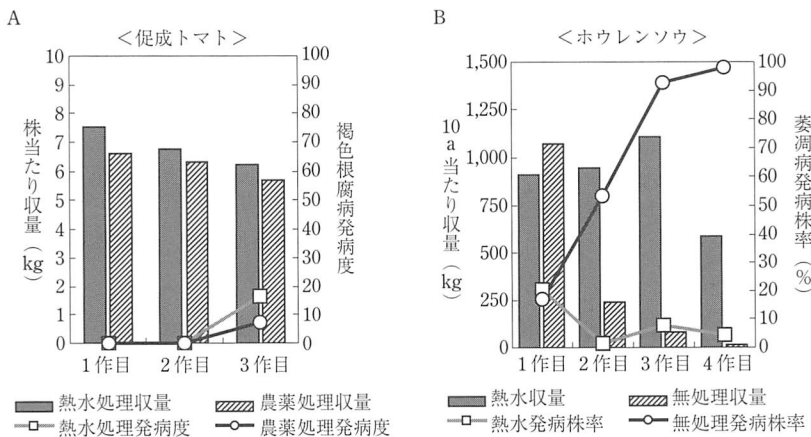


図-3 熱水土壤消毒による土壌病害発病抑制持続効果

A: 施設トマト, 95℃の熱水を300 l/m²処理 (岡本ら, 2002), B: 雨よけハウレンソウ, 95℃の熱水を150 l/m²処理 (柳瀬, 2003). 熱水処理はいずれも第1作の作付け前のみ実施.

析は不可欠となる。

3 作物の生育促進効果

熱水土壤消毒では, 土壌病害による減収が取り戻せるだけでなく, 土壌のリフレッシュ効果により初作時以上の収量が得られることが経験的に知られている。実際に

多くの作物で熱水処理により10~40%の顕著な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-2)。この原因としては, 地力窒素の増加や土壌化学性の向上, 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(北, 2003)。

この生育促進・増収効果は経営的には極めて有利であり、熱水土壤消毒が普及する大きな要因の一つとなっている。

III 労力とコストおよび処理上の留意点

1 労力

熱水処理そのものは自動運転であり、必要なのは装置の準備・敷設にかかる労力のみである。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・時間である(岡本ら, 2002)。さらに、クロルピクリンなどの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は大幅に軽減される。

2 コスト

熱水土壤消毒にかかる経費はA重油の値段に大きく左右されるが、促成トマトおよび雨よけハウレンソウ栽培で試算してみたところ、1処理10a当たりそれぞれ

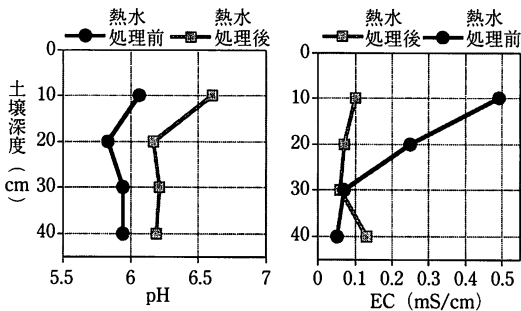


図-4 熱水処理による土壤化学性の変化
95℃の熱水を300 l/m²処理したときのA: pH,
B: EC値(北, 2003)。

18～22万円および13～15万円となった。しかし、この場合、消毒効果は促成トマトでは3年・3作、雨よけハウレンソウでは4作持續するので(図-3)、1作当たりではそれぞれ6～7.3万円および3.3～3.8万円となる(表-3)。クロルピクリンくん蒸剤でも5万円程度かかることや、苦しい消毒作業をしなくてすむこと、さらに熱水処理に伴う顕著な土壤のリフレッシュ・増収効果を勘案すると、現場ではこの程度の経費負担は十分カバーされているのが実態である。

3 処理上の留意点

熱水土壤消毒のポイントは熱水のもつ湿熱を効率よく土壤に伝えることである。したがって、できるだけ透水性のよい土壤が望ましいことは言うまでもない。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などにより事前に耕盤を破碎しておく。また、他の土壤消毒手法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、結果として土壤中での硝酸化成が抑制される(岡本ら, 2002)。したがって、早期に硝酸化成を回復させるためにも、処理後は早めに良質な堆肥を施用する。

一方、ネコブセンチュウ害については、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、土壤中のセンチュウ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壤を乾燥させてしまうと熱水処理効果が得られない土壤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などの薬剤処理によりセンチュウ密度を低下させてから熱水処理する、抜根処理後できるだけ早く熱水処

表-3 施設トマトおよび雨よけハウレンソウにおける経費試算事例

項目	施設トマト		雨よけハウレンソウ	
	使用量	経費	使用量	経費
A重油 ^{a)}	2 kl	10～14万円	1 kl	5～7万円
水(自家用水)	200 t	0	100 t	0
電気 ^{b)}	3相200V	3,000	3相200V	3,000
被覆資材(農ポリ)	5.4 m幅	17,000	5.4 m幅	17,000
機器レンタル料 ^{c)}		60,000		60,000
計		18～22万円		13～15万円
1作当たり	3年に1回	6～7.3万円	1処理で 年4作	3.3～3.8万円

^{a)} 重油単価が50～70円/lの範囲での試算値。^{b)} 電源が確保できない場合は発電機を使用する。^{c)} 1処理についてだが、共同購入の場合は不要な場合が多い。

表-4 熱水土壤消毒の臭化メチル代替技術としての採用状況

作目	地域	対象病害虫	普及のポイント	課題・留意点	その他
イチゴ	千葉	炭疽病, 萎黄病	隔離ベッドと本圃の両方で利用	機械が高価, コスト・処理時間がかかる, センチュウに対する効果が低い	機械の共同購入
キュウリ	鹿児島	ネコブセンチュウ		機械が高価	機械の共同購入
	神奈川	つる割病, センチュウ類	畑作地帯での利用, 処理後の的確な土壤診断	大量の水の確保, センチュウ多発圃場では薬剤で別途対応	レンタル対応, 機械の共同購入
トマト	千葉	青枯病, ネコブセンチュウ, 褐色根腐病	土壌深層部の防除可能, ガス抜き不要, 消毒期間が短縮可能, 殺センチュウ剤との併用効果大	機械が高価, コスト・処理時間がかかる, 既設配管の施設外への持ち出しが必要	レンタル対応, 機械の共同購入
	神奈川	萎凋病, 褐色根腐病, 半身萎凋病, センチュウ類	畑作地帯での利用, 処理後の的確な土壤診断	機械が高価, 土壌の透水性の確保, 接ぎ木・殺センチュウ剤との併用	レンタル対応, 機械の共同購入
	愛知	青枯病	深耕などにより土壌の透水性を確保, 透水性の事前調査	処理期間が長い, 透水性の悪い圃場には適用不可	
	佐賀	萎凋病	深耕などにより土壌の透水性を確保, 太陽熱処理との併用	土壌が透水性不良だと効果不安定, 毎年実施する必要あり	
	大分	青枯病, かいよう病, 萎凋病	抵抗性台木の利用など, 総合防除対策として実施	機械が高価, コスト・処理時間がかかる	機械の共同購入
メロン	鹿児島	黒点根腐病, ネコブセンチュウ	土性に応じた処理量の決定と処理後の肥培管理・草勢コントロール	機械が高価, 大量の水が必要	機械の共同購入
ピーマン	鹿児島	ネコブセンチュウ		機械が高価	機械の共同購入
ホウレンソウ	千葉	萎凋病	有機認証制度に対応できる土壤消毒手法	周年作付け体系に合わせた効率的な熱水処理	
	兵庫	萎凋病	同上	傾斜圃場での処理に工夫が必要	
	宮城	萎凋病	効果的な地温上昇が得られるよう処理	大量の水と燃料が必要, 時間がかかる	機械の共同購入
ショウガ	静岡	根茎腐敗病	前作の残渣除去と代替農薬との併用処理	残渣処理に時間がかかる, 処理コストと労力がかかる	
青ネギ	福岡	土壤病害一般, 雑草	土壌の塩基バランスの改善効果と除草効果大, チューブ方式でパイプハウスの自動連続処理	ダゾメット剤と同等コストにするためには2ha以上の処理が必要	機械の共同購入
輪ギク	鹿児島	センチュウ	ガス抜き不要, 除草効果大	透水性不良地・傾斜地は対象外, 水源の確保	機械の共同購入, 実証段階

農林水産省植物防疫課（2004年3月および2006年3月）より抜粋・作成。一部加筆。

理を行う、あるいは熱水処理とホスチアゼート剤などの殺センチュウ剤を併用処理するなどの対応策をとる。

IV 普及に向けて

熱水土壤消毒には、なんと言っても処理時期を選ばない効果の安定性と確実に増収に結びつく土壤のリフレッシュ効果がある。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、その意味では様々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。また、1990年以降は、トマトを中心とした施設野菜農家でも利用され(北, 2005)、近年では、千葉、兵庫、岐阜などのハウレンソウ栽培で有機認証制度に適合した栽培を行ううえで欠かせない土壤消毒手法として実用利用されている。農林水産省の調査では2004年までに全国で少なくとも9県、9品目で臭化メチルの代替技術として熱水土壤消毒が公式に採用されている(表-4; 農林水産省消費・安全局植物防疫課, 2004; 2006)。熱水土壤消毒装置についても既に10社を超える企業が実用システムを販売している(西, 2003)。導入に当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が多い(表-4)。

熱水土壤消毒は薬剤処理と異なり、同じ施設内に作物が栽培されていても土壤消毒作業ができる環境にやさしい手法である(富田, 2006)。また、苗床やロックウール培地の消毒などでもその効果の高さが確認されるなど(Uematsu, 2003)、多方面での利用が進んでいる。

おわりに

熱水土壤消毒は、太陽熱消毒あるいはその変法である

土壤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、防除効果は安定している。植草ら(2002)は、熱水処理と土壤還元処理を併用することにより、土壤深層部での殺菌効果を相乗的に高められることを認めている。このほか薬剤のみならず拮抗微生物や対抗作物の利用などを含めた他の防除手法との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(北, 2003)。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、土壤病害防除に関する個別技術をもう一度見直す中で、熱水土壤消毒を連作障害対策のキーテクノロジーとした総合的な土壤病害防除体系が確立されることを期待したい。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, 2002)に詳述されているのでそれを参考にされたい。

引用文献

- 1) 林 勇 (1979): 神奈川園試研報 26: 60 ~ 72.
- 2) 北 宜裕 (2003): 施設園芸ハンドブック (五訂版), 日本施設園芸協会, 東京, p. 433 ~ 439.
- 3) Kita, N. et al. (2003): Proceedings of International Research Conference on Methyl Bromide Alternatives and Emissions Reductions: 26-1 ~ 26-2.
- 4) 北 宜裕 (2005): 野菜茶業研究集報 3: 7 ~ 15.
- 5) 国安克人・竹内昭士郎 (1986): 野茶試験場報告 A14: 141 ~ 148.
- 6) 西 和文ら (1999): 農研センター研報 30: 11 ~ 109.
- 7) ———編 (2002): 熱水土壤消毒—その理論と実践の記録—, 日本施設園芸協会.
- 8) ———編 (2003): 熱水土壤消毒技術マニュアル, 日本施設園芸協会.
- 9) ——— (2005): 野菜茶業研究集報 2: 9 ~ 17.
- 10) 農林水産省消費・安全局植物防疫課 (2004, 2006).
- 11) 岡本昌広ら (2002): 神奈川農総研報 142: 17 ~ 35.
- 12) 富田恭範 (2006): 植物防疫 60: 99 ~ 102.
- 13) 植草秀敏ら (2002): 関東東山病虫研報 49: 23 ~ 29.
- 14) ———ら (2003): 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: 99 ~ 124.
- 15) Uematsu, S. et al. (2003): Proceedings of International Research Conference on Methyl Bromide Alternatives and Emissions Reductions: 123-1 ~ 123-2.
- 16) 柳瀬関三 (2003): 農耕と園芸 58: 71 ~ 75.

(登録が失効した農業 22 ページからの続き)

- 19803: [DIC] ライガードフロアブル (日本曹達) 2006/12/12
 19806: バイエルライガードLフロアブル (バイエルクロップサイエンス) 2006/12/12
 19807: [DIC] ライガードLフロアブル (日本曹達) 2006/12/12
 ●イマズスルフロロン・ダイムロン・ピリブチカルブ・メフェナセット水和剤

- 19815: バイエルロンゲットフロアブル (バイエルクロップサイエンス) 2006/12/12
 ●シメトリン・ベンチオカーブ粒剤
 13771: サターンS粒剤 (クミアイ化学工業) 2006/12/19
 ●シメトリン・ベンチオカーブ・MCPB粒剤
 13530: クミリードSM粒剤 (クミアイ化学工業) 2006/12/19

(39 ページに続く)