

ミニ特集：低濃度エタノールによる土壤還元消毒

# 低濃度エタノールを利用した土壤還元作用による 土壤消毒技術実施マニュアルの紹介

独立行政法人農業環境技術研究所 有機化学物質研究領域 小 原 裕 三

## はじめに

野菜をはじめとする畑作物栽培においては、連作を前提とした生産体系が組まれていることが多く、土壤病害虫が発生しやすい。我が国では、これらの連作に伴って発生する土壤病害虫を防除するため、臭化メチルによる土壤くん蒸消毒が広く行われてきた。特に、ピーマン、トマト、メロン、ショウガ等に代表される園芸農業では、臭化メチルを用いることで連作障害を回避し、集約的な生産体系を維持してきたと言える。しかし、臭化メチルはオゾン層破壊物質であることが明らかとなり、地球環境保全のために臭化メチルに代わる新たな土壤消毒技術の開発が不可欠となった。従来からの土壤くん蒸剤についても世界的な農薬規制に関する動向の中では、長期的に使用可能であるとの保証はなく、常に施用技術などの改善による環境やヒトへの負荷軽減を施用者自らが心がけることが重要である。筆者らは、土壤を低濃度のエタノールで処理することにより、安価、省力、かつ効率的に土壤病害等を抑制できることを見いだした。高濃度のエタノールには殺菌・殺虫あるいは雑草の発生抑制効果があるが、低濃度では直接的なこれらの効果は期待できない。しかしエタノールを低濃度で用いることにより、土壤を還元状態へと移行させることができる。土壤が還元状態になることによって病原性微生物や雑草の発生を抑制できることが明らかになった。低濃度エタノールを用いた土壤消毒は、酸化還元制御を利用したあらたな連作障害回避技術として利用価値が高い。

低濃度のエタノール処理による土壤還元作用を利用した連作障害回避技術の開発経緯とこれまで明らかになった作用機構、資材の取り扱いに関して紹介する。

## I 新規土壤消毒技術の研究の経緯

これまで最も有効な土壤消毒資材として利用されてきた臭化メチルはオゾン層破壊物質であり、モニトリオー

Implementation Manual for Biological Soil Disinfestation  
Techniques with Diluted Ethanol. By Yusō KOBARA

(キーワード：低濃度エタノール、生物的土壤消毒、土壤還元消毒、土壤くん蒸剤、土壤病害)

ル議定書締約国会議において、日本を含む先進国では、臭化メチル以外では代替不可能な一部の用途（不可欠用途）を除いて2005年に使用が禁止された。UNEP (United Nations Environment Programme：国連環境計画)の下部機関であるTEAP (Technology & Economic Assessment Panel：技術・経済評価委員会)・MBTOC (Methyl Bromide Technical Options Committee：臭化メチル技術選択肢委員会)により、不可欠用途においても2013年の全廃に向けた勧告が出されたことから、日本では土壤消毒用の使用を2012年、収穫後消毒用の使用を2013年で最後とすることになった (UNEP, 2011)。日本において最後まで認められていた不可欠用途は、ショウガ根茎腐敗病、メロンのえそ斑点病とモザイク病、キュウリとスイカの緑斑モザイク病、トウガラシ類のモザイク病等、臭化メチルの規制以前の適用作物と適用病害虫に比較してごく限られた用途でしかない。代替技術があるとされ、既に臭化メチルの適用が撤廃された作物と対象土壤病害虫においても、必ずしも経済的な実行可能性と臭化メチルに比較して十分な消毒効果が得られているとは限らない。また、土壤消毒に利用する農薬はヒトや環境への危険性が大きいことが懸念されており、例えば米国環境保護庁 (USEPA) では、ヒトや周辺環境への影響軽減のため、臭化メチル、クロロピクリン、D-D, MITC, ヨウ化メチルの処理圃場周辺にバッファゾーン (緩衝帯) を設けることが義務づけられている。このような状況下、ヒトへの影響や環境負荷のより小さな新規土壤消毒技術の開発が求められている。

代替技術として化学的防除以外にも、太陽熱や熱水、蒸気消毒 (物理的防除)、生物農薬や拮抗微生物の導入 (生物的防除)、病害虫抵抗性品種および抵抗性台木の導入、アブラナ科植物の鋤込み、完熟堆肥の施用、菌根菌の接種や輪作 (耕種の防除) の単用あるいは組合せなどの開発と普及も鋭意進められている。しかし、これらの代替技術によっても、連作障害の低減化効果と効果の安定性、環境への影響、また経済性等の観点から、現状において完全に代替することは困難な状況にある。

また、農業従事者の高齢化が進む中、優れた土壤消毒効果があったとしても、これまで以上の労力や経済的負

担を強いるような技術は、容易には受け入れられず普及は困難である。さらに、新規土壌消毒技術を開発するうえで、土壌消毒に関する日本の諸事情に留意しなければならない。土壌消毒に関して欧米諸国と最も異なる点は、欧米諸国では土壌消毒を生業とする専門業者が大型のくん蒸機械を用いて土壌消毒処理を行うのに対して、日本では栽培農家自身が土壌消毒処理を行っている点である。そのため、栽培農家にも容易に導入が行えるよう、初期投資が不要で低コストの土壌消毒技術が必要であり、化学的な防除資材を用いた技術においても可能な限り安全性の確認されたものを用いる必要がある。

## II 土壌消毒用資材としてエタノールの選択

新規土壌消毒用資材として、ごく普通の有機溶媒を中心に毒性などのデータの得られているものを対象にしてスクリーニングを行った。病原菌が対象ではないが、各種有機溶媒処理による土壌中の細菌数および活性への影響に関しては、既に1909年にRUSSEL and HUTCHINSON (1909)が報告しており、エタノールは有機溶媒の中でも硝化と生物活性への影響が小さいものとして報告されている。我々の実験結果でも、エタノールの直接的な土壌消毒効果(殺生物活性)は小さく、さらに土壌中での拡散性も小さいため、必ずしも有望な土壌消毒用薬剤ではなかった。これは、一般的な消毒用エタノール(別名:消毒用アルコール)が、15℃でエタノールを76.9~81.4%含有していること、最も殺菌効果があるとされている濃度が79%付近であることから容易に理解できる。無水エタノール(99.5%以上)を直接畑土壌中に注入した場合に、種々の植物の種子の萌芽抑制効果を指標とした試験では、他の土壌消毒剤と比較しても10倍以上必要であり、経済的にも実用的なものではなかった。しかし、ヒトなどへの毒性に関する情報の豊富さ(低い毒性)や、環境中で容易に分解され消失する(環境残留性が小さい)こと等、エタノールは多くの利点を有しているため、処理方法の改良によって土壌消毒効果の改善が可能か検討を行った。

## III 低濃度エタノールを用いた土壌還元消毒法

農林水産省の「新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業、低濃度エタノールを用いた新規土壌消毒技術の開発(課題番号:2019)」の研究費を得て、平成8年度から平成11年度の間、低濃度エタノールを用いて土壌消毒処理方法の改良・検討を行った。その成果として、「低濃度エタノールを利用した土壌還元作用による土壌消毒」の実施マニュアル」と「技術資料」をとり

まとめ公表を行った。その結果、実施マニュアルより一部抜粋した図-1に示すような簡便な方法で実用的な効果が得られるまでに至った。手順としては、エタノールを水で1%程度の濃度に希釈し、灌水装置などを用いて消毒したい深さまで土壌を湿潤状態にすると同時に、農業用ポリエチレンフィルム(農ポリ)で土壌表面を1週間以上覆うという簡便な技術で主要な土壌くん蒸剤に比較しても十分に効果が得られることがわかった(小原ら, 2007)。また、エタノールは容易に水中で均一化し、プラスチック資材などを劣化させる影響もないため、あらかじめ散水チューブを土壌表面に設置して、農ポリで土壌表面を被覆した後、液肥混入器などを用いて低濃度エタノールを処理するなど、手順の変更は容易である。農ポリで被覆する目的は、空気(酸素)を遮断するためと、エタノールと水の蒸発による損失を防ぐためである。農ポリはエタノールの透過性が小さいので、エタノールの揮発による大気への損失を防ぐ目的のためにガスバリアー性フィルムを敢えて用いる必要はない(KOBARA et al., 2012)。しかし、農ポリは酸素の透過性が大きいので、大気からの酸素の流入を遮断したい場合には、酸素ガスの透過性の小さなガスバリアー性フィルムを用いて被覆するとより高い効果を得ることができる。また、土壌を低濃度のエタノールで湿潤状態にするための処理量は、先に述べたようにエタノールの土壌中での拡散性が小さ

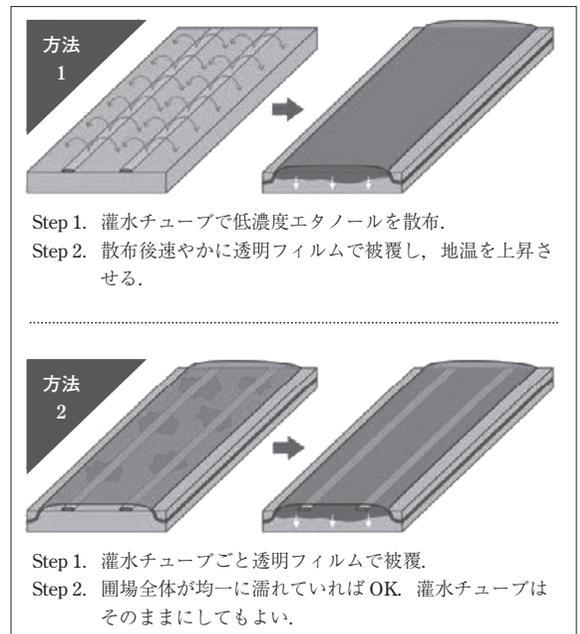


図-1 低濃度エタノールの処理方法(実施マニュアルより抜粋)

いため、土壤を低濃度のエタノールで湿潤状態にすることにより、水を媒体としてエタノールを消毒が必要とする土壤深さまで到達させることができる。また湿潤処理は酸素の供給を制限するという働きも持つ。このため湿潤状態とするための必要水量は圃場条件や作物の種類（作土層の厚さ）、灌水処理速度と浸透速度等の条件によって異なる。そのため、あらかじめ条件に合った処理量を把握しておく必要があるが、これは土壤の気相率から容易に推算可能である。一般的には表流水が生じたところで灌水処理を終えている。また、波板などで処理圃場を囲った後、灌水処理を一気に行い、湛水状態とすることで、意図する深さまで低濃度エタノールを均一かつ十分に短時間で行き渡らせることも可能である。いずれの処理方法も圃場の条件に依存するので、圃場や施設の条件にあった方法を適宜採用することが必要である。

#### IV 土壤消毒効果の範囲と作用特性

本土壤消毒方法で用いる数%程度の低濃度エタノール水溶液では、エタノールによる直接的な殺菌・殺虫等の効果は期待できない。これは、キュウリつる割病菌、トマト青枯病菌等を用いた室内実験の結果からも明らかであり、この程度のエタノール濃度であれば2週間程度の暴露期間でも死滅させることは難しく、辛うじて静菌作用程度の効果しか得られていない。現在のところ、臭化メチルやクロルピクリン、1,3-ジクロロプロペン、メチルイソチオシアネート等が持つ広範囲の病害虫への適用

について評価ができていないわけではない。しかし、実際に低濃度のエタノールを畑土壤に処理した場合、代表的な作物種と対象病害虫に対し、細菌、糸状菌、線虫、土壤害虫、雑草に至る広い範囲の土壤病害虫および雑草に、十分な密度の低減効果が得られている（表-1）。キュウリのネコブセンチュウに対しては、0.5から1.0%の低い濃度でも十分な密度低減効果が得られており（図-2）、さらに低濃度化が期待でき、また、雑草の発生抑制効果については、0.25%の非常に希薄な濃度でも効果が得られている（UEMATSU et al., 2007）。

本土壤消毒技術が、土壤病害虫などの密度低減に有効な理由について、詳細な検討と解明が今後も必要であるが、本技術を適用することで、土壤中の環境が酸化（好氣的）状態から還元（嫌氣的）状態に急速に変化すること、還元状態へ推移していく過程で土壤溶液中へ鉄やマンガン等が還元されて溶出することや、酢酸や酪酸等の有機酸の濃度が増加することなどが要因として考えられる（KOBARA et al., 2007）。

土壤還元が急速に進行するメカニズムは以下のように考えている（図-3）。土壤の部分殺菌により、土壤微生物全体のうち、エタノールに感受性の高い微生物が死滅し、その死菌体、それから発生した有機物質やエタノールを基質として他の土壤微生物が増殖する。この時に土壤中の酸素が消費され還元的な環境となる。また、土壤が湛水状態または湿潤状態であること、かつ土壤表面を農ポリフィルムで被覆することで酸素の流入を制限して

表-1 既存の土壤消毒技術との比較

代替技術名	登録年	毒劇物の分類	許容濃度*2 ppm (mg/m <sup>3</sup> )	ウイルス	細菌	糸状菌	線虫	土壤害虫	雑草
物理的・耕種的技術	太陽熱消毒			×	○	○	○	○	△
	熱水・蒸気消毒			△～×	○	○	○	○	○～△
	抵抗性品種（台木）*1			(○)	(○)	(○)	(○)	×	×
	対抗植物			×	×	×	△	×	×
化学的手法	ダゾメット剤	1980	劇物	×	○	○	○	○	○
	カーバム Na 剤	1993	普通物	×	○	○	○	○	○
	D-D 剤	1950	劇物	1 (4.5)	×	×	×	○	×
	クロルピクリン剤	1948	劇物	0.1 (0.67)	×	○	○	○	△
	臭化メチル	1957	劇物	1 (3.89)	○	○	○	○	○
	低濃度エタノール		普通物	—	○～△	○	○	○	○

○：効果がある，△：やや効果がある，×：効果なし。

\*1 一部作物（品種）に限られる。また、すべてに有効でない。

\*2 ACGIH（米国産業衛生監督会議）による TVL-TWA（時間荷重平均限界濃度）。

1日8時間，週40時間の正規の労働時間中の時間荷重平均濃度。

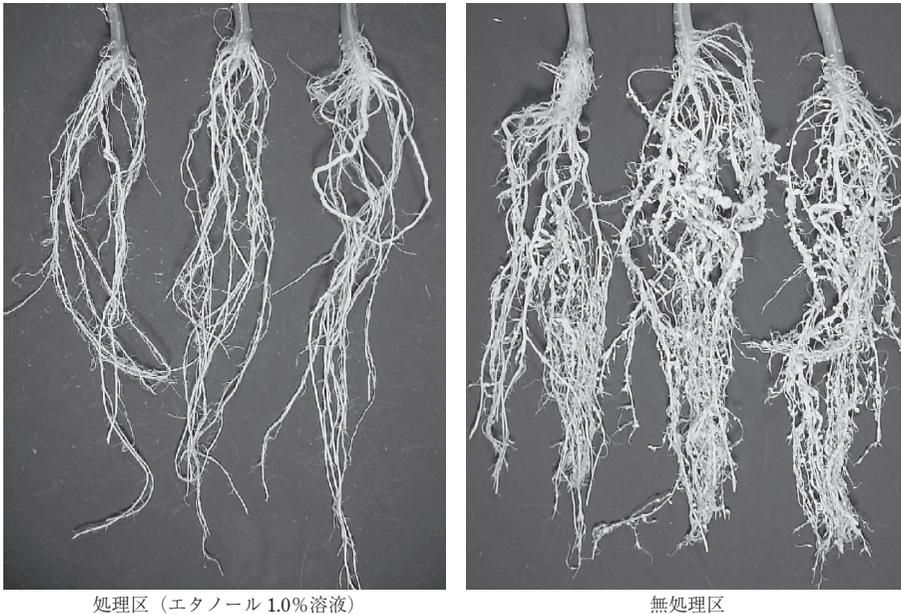


図-2 効果の一例：キュウリ根のネコブセンチュウへの効果  
エタノール 1.0% 溶液で処理した畑で栽培したキュウリの根には、ネコブセンチュウの被害が全く見られない。

いることは酸素濃度の低下を促進し、土壌の還元化に寄与している。よって、本消毒法で用いる低濃度のエタノールは、土壌の還元反応を進行させる反応のトリガーとして機能する。1週間程度でエタノールに感受性でない土壌生物のうち、酸素を必要とするものも死滅させることが可能で、広範な土壌伝染性の病害虫や雑草抑制に効果が得られるものと考えている。これらの土壌の還元状態への反応は、滅菌した土壌では起きず、また、滅菌した土壌へ新たに植物病原性微生物（トマト萎凋病菌など）を接種した場合、未滅菌土壌のような消毒効果が得られなかった。よって、本土壌消毒技術は常在の土壌微生物を用いた土壌消毒法であることが裏付けられる (MOMMA et al., 2010)。

低濃度のエタノールを土壌処理した場合に、この濃度領域で常在の土壌微生物のフザリウム菌 (*Fusarium solani sens lato*) やトリコデルマ菌 (*Trichoderma* sp.) 等が特異的に増殖していることもあるが、増殖した菌類の播種・移植する作物への病原性はないことを確認している。これまでに得られている結果より、土壌病害虫および雑草の密度の低減効果は、単独の要因によって効果が得られているとは考えられず、複数の要因が相互に影響して効果が得られていると考えている。特に、作物病原性フザリウム菌 (*Fusarium oxysporum*) は、 $Fe^{2+}$  や  $Mn^{2+}$  に対する感受性が高く、病原性フザリウムの密度

低減には、有機酸よりも、これらの遊離金属イオンによる影響が大きいことが明らかになっている (MOMMA et al., 2011)。

土壌病害虫および雑草の密度低減効果へ寄与する要因は一樣ではなく、対象の生物種により大きく異なることが明らかになっているが、土壌消毒効果の得られるエタノールの処理濃度や処理量に関しては、いまだに得られた経験から判断するしかない状況にある。いずれにせよ、今後、本土壌消毒技術のより詳細な作用機構の解明を行い、得られた科学的知見に基づいた土壌消毒法の省資材化のための至適化が必要である。すなわち、低濃度のエタノールを処理することによって、効率よく土壌の還元化を行うため、 $Eh-pH$  と土壌溶液中の  $Fe^{2+}$ 、 $Mn^{2+}$  や有機酸の濃度、病原性土壌微生物の密度を低減する効果の関心の科学的な知見が必要である。これには SHENNAN et al. (2011) が、200 mV 以下の酸化還元電位の積算値 ( $Eh$  mVhr) により消毒効果の定量化に成功していることから、最適化のための指標を求めの一助になると考えられる。

また、本土壌消毒法はこれまでに述べてきたように、従来の土壌くん蒸剤と全く異なった作用機構であるため、土壌消毒後も一般微生物はある程度の密度で維持されている。そのため、病原性微生物による再汚染に関しても抑制効果（発病抑止性）があることが確認できてお

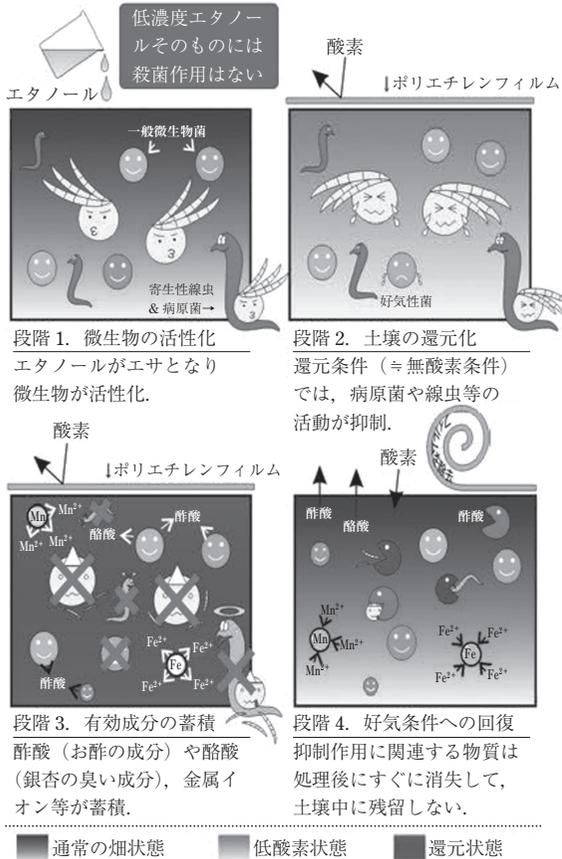


図-3 低濃度エタノールによる土壤還元消毒のメカニズム（実施マニュアルより抜粋）

り、従来の土壤くん蒸剤のように毎作ごとの土壤消毒処理が必要のないことが大きな利点である。

### V 「低濃度エタノールを利用した土壤還元消毒技術」に係る規制について

本土壤消毒技術または本技術で用いる低濃度エタノールについて、農家にとって安心して実用可能な技術を目指し、開発段階から農業資材としての位置づけを明確にするため、関連諸機関と相談・協議を重ねてきた。その結果として、農林水産省から本技術や本技術に用いる低濃度エタノール資材については「低濃度エタノールで殺菌をするというのではなく、低濃度エタノールを土壤に投入することでこれを利用する土壤微生物が増殖して酸素が消費され、土壤中の環境が無酸素（還元）状態となることで病原性の土壤微生物などが減少・死滅するというものであり、本技術で用いられる低濃度エタノールは農薬ではないと判断している。」との見解があった。

そのため、現在、新たなカテゴリーの農業用資材「土壤還元消毒資材」としてエタノール資材の販売と普及を進めている。

これらの理由のため、普及関連諸機関関係者には、本技術を普及する場合に、「低濃度エタノールによる病害虫防除」などと安易な説明をせず、低濃度エタノールが農薬であると誤解されないようにていねいな説明をお願いしている。

### VI 土壤消毒にかかる経費について

一般にエタノールはととても高価であると認識されているが、原料アルコール（約0.95%）は、米国、ブラジル、タイ、インドネシア、中国等から、年間約36万klが輸入され、価格は50～60円/l程度である。この原料アルコールを使用した場合に、1.0%エタノールを100l/m<sup>2</sup>の処理量で処理するとの仮定で、エタノール資材の費用は、60,000円/10aである。ここでの計算は、エタノールの処理量を過剰に見積もっているが、エタノール濃度を半減することができれば30,000円/10aとなり、また、さらに処理量を減らすことが可能であればさらに経費の削減は可能である。また、原料アルコールの蒸留精製過程で、高濃度のエタノールを含有した副生アルコール（約89%）が1%程度生じている。この副産物を有効に利用することができれば、一層の経費削減が可能であり、他の土壤消毒技術と比較しても、経費面で十分に利点がある。

本土壤消毒法で用いるエタノールは、直接的な効果ではないことにより、農薬に該当せず、土壤還元消毒資材として取り扱われ、不可飲処置された資材は、日本アルコール産業株式会社より「エコロジアル」の名称で本年度より市販されている。現状、危険物に該当しないよう65%希釈し、20l入りのバックインボックス（BIB）の包装形態のため、上記の資材コスト評価の倍程度の経費がかかっている。今後の需要動向にもよるが、繰り返し利用可能な1klコンテナや、タンクローリーによる直送など、包装形態の見直しや流通の合理化によって、低コスト化は十分可能である。

### おわりに

エタノールは、一般の土壤環境中では数日で分解消失し、環境への負荷も小さく、また、ヒトに対する毒性データも十分に得られており、安全性の高い技術であると考えられる。フスマや糖蜜を用いた土壤還元消毒法が鋭意実施されているが、最適温度条件、臭気、肥料成分の管理等の問題点があり、適用が制約されることがあった。本

土壤消毒技術では、これらの問題点が改善される可能性がある。しかし、本土壤消毒技術には、まだまだ検討しなければならないことも多く残されており、より詳細な作用機構の解明とそれに基づいて処理するエタノール濃度や処理量の至適化（資材量の削減）等、処理方法の検討、目的とする作物・土壤病害虫への拡大と効果の確認、土壤消毒から収穫まで、さらに次作への効果の持続性に関するより詳細な評価などが必要である。

本研究成果は、農林水産省の「新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業」, 「低濃度エタノールを用いた新規土壤消毒技術の開発（課題番号：2019）」により得られたものである。本研究プロジェクトの成果物として、「低濃度エタノールを利用した土壤還元消毒」の実施マニュアル（農業者用）と技術資料（指導者用）が農業環境技術研究所のホームページより入手可能である。

## 引用文献

- 1) 小原裕三ら (2007): 特許 4436426 号.
- 2) KOBARA, Y., et al. (2007): 2007 Annual International Research Conference on Methyl Bromide Alternatives and Emissions Reductions, 74.1 ~ 74.2.
- 3) ——— et al. (2012): J. Pestic. Sci. 37: 28 ~ 36.
- 4) MOMMA, N. et al. (2010): J. Gen. Plant Pathol. 76: 336 ~ 344.
- 5) ——— et al. (2011): ibid. 77: 331 ~ 335.
- 6) RUSSEL, E. J. and H. B. HUTCHINSON (1909): J. Agr. Sci. 3: 111 ~ 144.
- 7) SHENNAN, C. et al, (2011): 2011 Annual International Research Conference on Methyl Bromide Alternatives and Emissions Reductions, 44.1 ~ 44.3.
- 8) UEMATSU, S. et al, (2007): 2007 Annual International Research Conference on Methyl Bromide Alternatives and Emissions Reductions, 75.1 ~ 75.2.
- 9) UNEP (2011): Report of the Methyl Bromide Technical Options Committee Assessment Report 2010., Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer., UNEP, Republic of Kenya, p. 397.

植物防疫 特別増刊号 No.15

# 土壤病害の見分け方

発売中!

B5判 129ページ 口絵カラー 9ページ  
定価 2,520円(税込)  
送量 80円(メール便)

◆麦類、いも類、豆類、野菜類、果樹類、花き類、花木類に発生する土壤病害の見分け方を分かり易く解説。



## 【掲載内容】

§ 1 小麦	相馬 潤	(北海道中央農試)
§ 2 じゃがいも	田中 文夫	(北海道中央農試)
§ 3 さつまいも	渡邊 健	(茨城県防除所)
§ 4 だいず	仲川 晃生	(独)農研機構)
§ 5 メロン	小河原 孝司	(茨城県園研)
§ 6 ビーマン	森田 泰彰	(高知県農技セ)
§ 7 トマト	新村 昭憲	(北海道中央農試)
§ 8 キャベツ	漆原 寿彦	(群馬県農政部)
§ 9 はくさい	小木曾 秀紀	(長野県野菜試)
§ 10 レタス(夏秋作)	藤永 真史	(長野県野菜試)
§ 11 レタス(越冬作)	相野 公孝	(兵庫県農技セ)
§ 12 しょうが	矢野 和孝	(高知県農技セ)
§ 13 てん菜	清水 基滋	(北海道中央農試)
§ 14 果樹類	中村 仁	(独)果樹研)
§ 15 きく	築尾 嘉章	(独)花き研)
§ 16 ばら	渡辺 秀樹	(岐阜県農技セ)

お問合せ

〒114-0015 東京都北区中里 2-28-10

一般社団法人日本植物防疫協会 支援事業部 出版担当

TEL 03-5980-2183, FAX 03-5980-6753