

リレー連載

農薬製剤・施用技術の最新動向⑤

土壌くん蒸剤～利用の現状と課題～

農研機構 農業環境変動研究センター
有害化学物質研究領域

小原 裕三 (こばら ゆうそう)

はじめに

ピーマン、トマト、キュウリ、メロン、イチゴ、ショウガ等に代表される園芸作物においては、連作を前提とした栽培体系が組まれていることが多く、様々な土壌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壌病害虫を防除するために、広く土壌くん蒸剤を用いた土壌消毒が実施されている。土壌くん蒸剤の製剤・施用については、すでに技術が確立されていて新規な開発はないと思われるかもしれないが、既存の有効成分の新規剤型や処理方法の改善等の地道な努力は続けられている。この背景には、オゾン層破壊物質として臭化メチルが規制対象となって以後、種々の代替薬剤や代替技術の開発が精力的に行われてきたものの、土壌くん蒸剤に関して実行可能な臭化メチルに替わり得る新規薬剤が日本でいまだに登録されていないこと、世界的にも新たな土壌くん蒸剤の有効成分としてはDMDS（ジメチルジスルフィド）（EPA, 2016）に限られることなどがあげられる。このことから新規薬剤の開発の困難さが容易に理解でき、既存の土壌くん蒸剤の製剤型と施用方法を改善し、土壌くん蒸処理の省力化、低コスト化、さらには土壌消毒効果を高めて安定的な防除効果を目指すことが重要になる。

本稿では既存の土壌くん蒸剤の有効成分を基にした製剤や施用法について概観するとともに、新たな知見なども含めて整理・紹介する。

I 土壌くん蒸剤の種類と剤型

日本のガイドラインでは、くん蒸剤は「当該農薬の有効成分または有効成分に由来する活性物質を密閉または

それに相当する条件下で気化させて、殺虫、殺菌等に用いられる製剤」と定義されている（倉浪・渡辺, 2016）。本稿では土壌くん蒸剤についてのみ触れることにするが、一般的にイメージされる農薬とは異なり、土壌くん蒸剤の有効成分の物理化学的性質としては蒸気圧が高いことと空気に対してガスの比重が大きいことが特徴となっている（表-1）。これは、土壌中作物の根圏や作土層に均一に分散・処理させて消毒効果を得るためであり、製剤のみならず施用法についても工夫がなされている。そのままでは大気への散逸が大きいため、土壌中への灌注処理と土壌中に封じ込めて有効に効力を発揮させるために農業用ポリエチレン（農ポリ）等のフィルムで被覆して用いている。国内登録のある土壌くん蒸剤は、クロロピクリン、D-D（1,3-ジクロロプロペン）、メチルイソチオシアネート（MITC）等の揮発性有効成分を含み気化させて使用する製剤が該当する。ここでは、土壌と接触することで分解し有効成分MITCを発生するカーバム（NCS）やカーバムナトリウム塩（キルパー）、土壌中水分によって分解しMITCを発生するダゾメットも同様に扱うこととする。

通常、よく用いられているクロロピクリン剤については、有効成分濃度が99.5%のものと80.0%のものがあり、有効成分濃度が非常に高いこと、希釈せずにそのまま用いることが特徴である。D-D剤についても、有効成分濃度が97.0%のものと92.0%のものがあり、クロロピクリンと同様である。これらの薬剤は、マルチ畦内同時消毒機や全面マルチ土壌消毒機により土壌灌注処理と同時に被覆フィルムを設置するのが理想であるが、これらの同時マルチ機能を有する土壌消毒機が高価であるために土壌灌注処理機能のみの土壌消毒機も使われており、小規模な場合には手動式土壌消毒機も用いられている。同様の処理方法が利用できる単一有効成分の薬剤には、MITC油剤（20.0%）、カーバム（N-メチルジチオカルバミン酸アンモニウム50.0%）、カーバムナトリウム塩（キ

Current Status and Issues of Soil Fumigants. By Yusuo KOBARA
（キーワード：土壌くん蒸剤、製剤、処理方法、ガスバリアー性フィルム）

表-1 土壌くん蒸剤有効成分の物理化学的性質

土壌くん蒸剤有効成分	分子量 (g mol ⁻¹)	密度 (g ml ⁻¹)	融点 (°C)	沸点 (°C)	蒸気圧 (kPa)	水溶解度 (g l ⁻¹)	ガスの比重
臭化メチル (MeBr)	94.9	1.73 (0°C)	-93.0	4.5	190 (20°C) 227 (25°C)	13.40 (25°C)	3.3
クロルピクリン (CP)	164.4	1.66 (20°C)	-64.0	112.4	3.2 (25°C)	2.27 (0°C) 1.62 (25°C)	5.7
1,3-ジクロロプロペン (trans-D-D)	111.0	1.22 (20°C)	-84.5	104.3	3.5 (20°C)	2.32 (25°C)	3.8
メチルイソチオシアネート (MITC)	73.1	1.07 (37°C) 1.05 (24°C)	35.5	118.5	2.13 (25°C)	8.2 (20°C)	2.5

ルパー、ナトリウム＝メチルジチオカルバマート 30.0%) 等がある。また、クロルピクリンと D-D の混合剤であるクロルピクリン・D-D くん蒸剤があり、有効成分含量の異なる 2 剤 (41.5%, 54.5%) と (35.0%, 60.0%) があり、さらに MITC と D-D の混合剤の MITC・D-D 剤 (20.0%, 40.0%) もあり、対象とする土壌病害などの状況によって薬剤の選択の範囲は広がっている。

土壌消毒機を必要とせず、液肥混入器で希釈混合しながら、灌水チューブで処理ができる土壌くん蒸剤として、クロルピクリンの乳剤 (水に希釈させて乳濁液として使用する液体製剤、クロピクフロー：有効成分濃度 80.0%, 界面活性剤等 20%) が上市されており、また、カーバムやキルパーも同様の処理方法が可能である。日本では、D-D を有効性成分とする乳剤が上市されていないのは残念であるが、D-D を有効性成分とする乳剤が上市されれば、農家にとっては施用法の選択肢がより広がり好ましいと考えられる。米国では D-D を有効成分とする乳剤が登録されており (AJWA et al., 2002; 2003; 2004), D-D 単独の乳剤としては Telone® II (97.5%) や Telone® EC (93.6%) があり、また、D-D・クロルピクリンの混合乳剤では InLine® (60.8%, 33.3%), Telone® C-17 (81.2%, 16.5%), Telone® C-35 (63.4%, 34.7%) 等、混合比の異なるラインナップが揃い、土壌病害虫の状況により薬剤の選択肢が広がっており、また、Telone C35 EC はイタリアでも臭化メチル代替薬剤として試験が実施され、登録が検討されていた (MINUTO et al., 2006)。これらの土壌くん蒸剤の乳剤型は、被覆資材下の灌水処理システムにより処理することを前提に開発されており、高額な土壌消毒機を導入する必要がないことが利点である。現状、日本では上市されていないが、小規模な施設や農耕地では、高額な同時マルチ機能を有する土壌消毒機の導入のための投資も必要でなく、容易に土壌くん蒸処理が実施できることになり、農家の選択肢

も増えることになる。

一方、日本に特有な土壌くん蒸剤の剤型として、クロルピクリン錠剤 (70%) とクロルピクリンテープ剤 (55.0%) がある。クロルピクリン錠剤は、クロルピクリンをゲル化剤などで固形化、錠剤型にし、1 錠ずつ水溶性のガスバリアー性フィルムで包装したものである。取り扱いやすいよう 1 錠はクロルピクリン液剤 3 ml に相当し、1 m² 当たり 10 錠が処理量の目安である。土壌中の水分で水溶性フィルムが溶解し、クロルピクリンが放出される徐放性の機能を持たせてある。また、クロルピクリンテープ剤についても同様に、ガスバリアー性かつ水溶性であるポリビニルアルコール (PVA) フィルム製の袋の中に給油性粉末とともに 3 ml のクロルピクリンが包装されており、それが連なりテープ状となっている。これらの製剤は、小規模の農耕地や施設内の土壌消毒処理に適しており、まさしく日本の農耕地条件に適した製剤型と言える。

中国では連作に伴う土壌病害による被害が近年ますます大きくなっており、土壌くん蒸剤に対する需要も旺盛で、土壌くん蒸剤の生産量と使用量ともに年々増えている。土壌くん蒸剤処理時の環境への漏洩防止のための技術として、クロルピクリンや D-D のゼラチンカプセル剤の開発が進められており (WANG et al., 2009; 2010; YAN, 2012), クロルピクリンの場合には Pic gel cap と呼ばれている。このゼラチンカプセル剤の平均体積は 1 ml で、殻 (shell) の厚さは 0.6 mm であり、1 粒当たり D-D の場合には 0.8 g, クロルピクリンの場合には 1.13 g が含まれている。

ここで紹介したように、土壌くん蒸剤においても新規製剤の開発は地道に進められている。生産者がどのような製剤を望み、必要としているのか、現場ニーズに基づいた製剤開発が、今後ますます重要になる

II 土壌くん蒸剤の施用法と改善について

土壌くん蒸剤は、人への毒性や環境負荷の面で多くの問題を抱えつつも、連作障害を回避するために不可欠な防除手段として、日本全国で大量に使用されていることは否めない事実である。しかし、クロルピクリンやD-D等の土壌くん蒸剤は、欧州連合（EU）では既に全廃されており、米国では非常に厳しい条件下での使用に制限されるなどのリスク削減管理策が実施されている。例えば、土壌くん蒸剤の処理は農業生産者には許可されおらず、免許を有した土壌くん蒸請負業者のみである。米国では、圃場規模も大きく、農業生産工程においても様々な作業工程が分業され外注されているので、土壌くん蒸処理についても外注するのは容易であり、自然の流れであると言えよう。この点については、中国も同様で、クロルピクリン剤の処理は農業生産者には許可されおらず、各省ごとに免許を有した土壌くん蒸処理請負業者のみである。D-D剤の処理については、農業生産者と土壌くん蒸処理請負業者の割合はほぼ半々とのことである。これは、中国では土壌くん蒸剤の使用の歴史が比較的最近で、米国の土壌くん蒸システムを導入してきたからである。

日本においては、土壌くん蒸剤の使用は60年以上の歴史があり、農業生産者自身によって処理が実施されてきた長い歴史がある。農耕地の規模も小さく、生産工程を外注する素地もないためであるが、農業生産者自身によって土壌くん蒸剤の処理が実施されているのは、世界的にもまれである。土壌くん蒸剤に関する物理化学的な性質や、特性等に関する情報が不足している場合もあり、土壌くん蒸処理において、煩わしい作業を省略してしまい、環境への漏洩ばかりではなく、本来得られるべき有効な防除効果も得ることができなくなっている場合が散見される。このことについて顧みれば、農業生産者は責任を持って土壌くん蒸剤を適正使用することはもちろんのこと、自ら最新の知見、技術を導入して改善していかなければならないことを意味している。

土壌くん蒸剤は先にも述べたが、土壌中作物の根圏、作土層全体を均一に消毒するために用いるため蒸気圧が高いのが特徴であり、一般的には何らかの方法で土壌中、土壌表面に均一に分散処理し、大気への散逸を防ぐため農ポリなどのフィルムで被覆するのが一般的である。我々は、日本における土壌くん蒸剤の施用（処理）技術の改善について、どのようなことが実施可能かを検討するため、環境省環境研究総合推進費を得て「日本型農業環境条件における土壌くん蒸剤のリスク削減と管理

技術の開発（平成25年から27年）」の課題を実施した（環境省、2013）。

本研究では、日本における土壌くん蒸（剤）に関する問題点を整理し、まず土壌くん蒸に用いる被覆フィルムについて着目した。ガスバリアー性フィルムは、それまでも上市されていたが、普及は必ずしも進んでいなかった。その理由の一つは、農業生産者の多様なニーズを十分に汲み取れていなかったことである。そこで、ガスバリアー性ポリマーや農業用フィルムのメーカーの協力を得て、各地の農作物の栽培に用いられている土壌くん蒸用被覆フィルムをそのまま置き換えることのできる厚さ、幅、長さ、色、強度、ガスバリアー性能等を有した数多くのグレードのフィルムを試作、上市していただいた（表-2）。これにより、ガスバリアー性フィルムの選択の幅が拡がり、目的に応じて最適なものを採用することが可能になってきた。

当初、本研究では、ガスバリアー性フィルムの性能評価（KOBARA et al., 2012）と土壌くん蒸剤処理量の最適化を行い、さらに土壌中に残留する土壌くん蒸剤の分解除去技術の適用により大気への漏洩防止を図り、大気中暴露濃度を指標とした科学的に裏付けられた合理的かつ、より効果的な処理方法の適用によって、各地域の栽培・立地・環境条件に適応した「日本型のリスク削減・管理策」の提案を行うことを目標としていた。しかし、日本では土壌くん蒸剤に関する経気道の評価値がないため、この論点からのリスク管理措置の提案は本研究課題を通じてはできなかった。

一方、環境影響軽減の面からではなく、従来の農ポリなどで期待した防除効果が得られていなかった地域では、ガスバリアー性フィルムを用いることで防除効果が大幅に改善した結果が得られ、ガスバリアー性フィルムの普及が大きく進んだ地域もある。このことは、ガスバリアー性フィルムを用いた場合の防除効果の改善など、生産者にとってメリットとなる技術情報の提供が重要であることを意味している。

農業は一般的に連用により土壌中での分解消失が早くなる傾向があることが知られており、土壌くん蒸剤でも同様の報告がある。D-Dの場合には米国やオランダでの研究事例があり（LEBBINK et al., 1989；SMELT et al., 1989 a；1989 b；VERHAGEN et al., 1996）、MITCの連用により分解消失が早くなる効果についても研究報告されている（LEBBINK et al., 1989；SMELT et al., 1989 b；VERHAGEN et al., 1996）。しかし、ガスバリアー性フィルムを用いた場合には、土壌中での半減期が急に長くなる事例が得られており、これはラベルに標示の処理量の数倍程度で生じる

表-2 土壌くん蒸用ガスバリアー性フィルムと慣行フィルムの比較

	商品名	色	厚さ(mm)*		幅 (cm)	バリアー層	繰り返し 利用	畔内処理	全面 くん蒸	カット・貼 り合わせ等 の加工	参考価格 (円/本)	参考価格 (円/m ²)
			平均	CV(%)								
1	ハイバリアー	黒	0.020	5.9	95、135、150、 180、210、270、 300、420、600	EVOH	-	○	-	○	10,500 26,250	25
2	ハイバリアー	透明	0.020	5.4	95、135、150、 180、210、270、 300、420、600	EVOH	-	○	-	○	10,500 26,250	25
3	ソアノール	黒	0.031	3.9		EVOH	-	○	-	?	-	-
4	ソアノール	透明	0.029	5.9		EVOH	-	○	-	?	-	-
5	ソアノール	透明	0.052	3.6		EVOH	○	-	○	?	-	-
6	バリアースター	透明	0.046	5.3	300、420、460、 600、700	EVOH alloy	○	-	○	○	18,400	80
7	グランドキング5	透明	0.072	7.0	原反 600 加工品 230 800	EVOH	○	-	○	○	50,000 70,000	88 217 88
8	オークラFC50 ノーポリ	黒	0.020	5.5		-	-	○	-	-	7,360	16
9	オークラFC50 ノーポリ	透明	0.018	7.8		-	-	○	-	-	7,360	16
10	ノーポリ	グリーン	0.030		230	-	-	○	-	-	7,360	16

* 実測値.

場合がある。このことは、土壌中での分解消失に寄与する微生物が影響を受けているためであると考えられるが、葉害の原因になるので、土壌くん蒸剤の処理量については細心の注意を払う必要がある。

おわりに

土壌くん蒸剤の製剤・施用法に関しては、まだまだ改善の必要があり、技術革新の余地もあることが理解していただけたと考える。これには、農薬、土壌消毒機、被覆フィルム等のメーカー相互の情報交換、協力が必要である。また、ガスバリアー性フィルムに関しては、米国環境保護庁では各フィルムの土壌くん蒸剤に関するガスバリアー性能を試験・評価することで格付けを行い、リスク管理措置に用いている (EPA, 2016)。我が国でも複数種のガスバリアー性フィルムが上市されてきているが、ガスバリアー性能は様々であり (KOBARA et al., 2012)、使用者に対してガスバリアー性能に関する情報の提供が必要であると考え。また、土壌くん蒸剤の処理が農業生産者自身であることもあり、技術の普及やリスク管理

措置を実施するにも裾野が非常に広いため、従来の概念にとらわれない革新的なアイデアも求められている。

引用文献

- 1) ARWA, A. H. et al. (2002): *Phytopathology* **92**: 1349 ~ 1355.
- 2) ——— et al. (2003): *Phytopathologia Mediterranea*; Vol 42, No 3.
- 3) ——— et al. (2004): *HortScience* **39**: 1707 ~ 1715.
- 4) EPA (2016): *Soil Fumigant Toolbox*.
<https://www.epa.gov/soil-fumigants>.
- 5) 環境省環境研究総合推進費 (2013):
<https://www.env.go.jp/houdou/gazou/16882/pdf/5-1303.pdf>.
- 6) 倉浪佑実子・渡辺高志 (2016): *植物防疫* **70**: 405 ~ 411.
- 7) KOBARA, Y. et al. (2012): *Journal of Pesticide Science* **37**: 28 ~ 36.
- 8) LEBBINK, G. et al. (1989): *Acta Horticulturae* **255**: 361 ~ 371.
- 9) MINUTO, A. et al. (2006): *Crop Protection* **25**: 1244 ~ 1252.
- 10) SMELT, H. J. et al. (1989 a): *Journal of Environmental Science and Health, Part B* **24**: 437 ~ 455.
- 11) ——— et al. (1989 b): *Netherlands J. Agric. Sci.* **37**: 173 ~ 183.
- 12) VERHAGEN, C. et al. (1996): *Soil Biology and Biochemistry* **28**: 1753 ~ 1756.
- 13) WANG, Q. et al. (2009): *J. Agric. Food Chem.* **57**: 8414 ~ 8420.
- 14) ——— et al. (2010): *J. Environ. Qual.* **39**: 917 ~ 922.
- 15) YAN, D. et al. (2012): *J. Agric. Food Chem.* **60**: 5023 ~ 5027.