

土壌還元消毒の消毒メカニズムと実践事例

公益財団法人園芸植物育種研究所 研究開発部環境科

研究員 門馬 法明

はじめに

日本とオランダで同時期にそれぞれ独立して開発された土壌還元消毒は、両国では古くから土壌くん蒸消毒の代替として利用されおり、近年ではアメリカや中国でも注目を集めている。オランダでは Biological soil disinfestation (BSD)、日本では Reductive soil disinfection (RSD) と呼ばれてきたが、現在では Anaerobic soil disinfestation (ASD) という呼称が一般的になっている。世界各地で行われている研究が、それぞれ対象とする作物や病害虫、用いる資材などに違いがあっても、共通の呼称を用いることによって、各論的な議論に終止することなく、技術の開発や普及がより促進されることが期待される。

土壌還元消毒は、①易分解性有機物の添加（土壌微生物の活性化）、②プラスチックフィルムによる被覆（大気とのガス交換の遮断、地温の上昇）、③灌水処理（酸素の追い出し、還元過程における水溶性の分解産物の拡散促進）の 3 つのステップで構成される。易分解性の有機物としては、米糠や小麦フスマ、緑肥といった固形有機物、糖蜜や低濃度のエタノールといった液体有機物などが用いられ、例えば糖蜜やエタノールを使う場合には、高濃度の液を希釈しながら処理することが多い。被覆（消毒）期間は、地温や用いる有機物の種類によって異なるが、日本においては、通常 2～3 週間程度である。消毒が終了した後は、フィルムを除去するか、植え穴を開けるなどして、土壌への酸素の供給による酸化状態への回復と嫌気発酵に伴い蓄積した物質の分解促進を図る。

土壌還元消毒による病原菌の抑制作用については、いまだはっきりとした消毒メカニズムは明らかとなつてはおらず、対象とする微生物種によって主たる要因が異なっている可能性も示唆されている。しかし、嫌気発酵に伴う有機酸の蓄積、抗菌性の揮発性成分、消毒過程における微生物相のシフトなど、多くの事例で共通の事象が観察されており、いずれも重要な要因であると考えられる。本講演では、還元消毒のメカニズムについて概説するとともに、特に低濃度エタノールを用いた土壌還元消毒の普及の現状を紹介する。

1. 還元消毒の消毒メカニズム

(1) 土壌微生物群の働きと還元条件

土壌還元消毒を施す際に、あらかじめ蒸気消毒やオートクレーブにより土壌中の微生物群を殺菌しておいた場合には、土壌還元消毒の作用が発揮されない。一方で、生土を用いた場合には、還元処理後速やかに土壌の酸化還元電位が低下し、1～2 週間でトマト萎凋病菌の生存が抑制される。このことから、土壌還元消毒には土着の微生物群の働き

が必須であること、土壌の還元化が必要条件となっていることが明かである。

土壌微生物群集構造の変化を調査した研究では、病原菌が効果的に抑制される一方で、多くの土壌微生物群が生存していること、また、嫌気条件下において有機酸を産生するような *Clostridium* spp.などの細菌群が顕在化してくることを明らかにした。このように、これまでの研究では、微生物群集構造が変化すること明らかになっているものの、それらの機能についてはほぼ未解明な状態であり、今後の詳細な検討が望まれる。

また、土壌消毒後の病原菌による再汚染を想定した試験では、土壌還元消毒ではクロルピクリン処理と比較して、トマト萎凋病の発病が低く抑えられることを明らかにした。これにより、土壌還元消毒では、病原菌に対する抑制効果に加えて、土壌の発病抑止性が高く維持されるという副次的な作用も期待できることを示した。カバークロップを用いた土壌還元消毒では、白絹病菌の菌核への *Trichoderma* sp.の寄生が高頻度に観察され、そういった副次的な作用も病害の防除に関与していることが示唆されている¹⁾。

次に、嫌気条件および還元条件がトマト萎凋病菌の生存におよぼす影響を調査した。寒天培地上で培養したトマト萎凋病の培養菌体を、嫌気状態の容器内または、水素バブリングをすることで還元状態とした蒸留水中に 2 週間保持した後、病原菌の生存を確認した。その結果、いずれの場合にも病原菌の生存が維持されることを確認した。このことから、土壌還元消毒による本菌の抑制が単純な酸欠が原因ではないことを明らかにした。

(2) 金属イオンと有機酸

低濃度エタノールを用いた還元処理を施した土壌から採取した土壌抽出液中において、トマト萎凋病菌が完全に抑制されることを見いだした。この抽出液中には、無処理区や水処理区からはほとんど検出されない酢酸や酪酸などの有機酸、 Fe^{2+} や Mn^{2+} などの金属イオンが多量に含まれていた。これらが還元処理土壌中から実際に検出される濃度帯の溶液中に、トマト萎凋病や疫病菌、ウリ科野菜ホモプシス根腐病菌、黒点根腐病菌の寒天培養菌体を浸漬することで、それらの生存が効果的に抑制されることを見いだした。一方で、土壌還元消毒後にも生存している糸状菌群には、これらの成分に対し耐性が高いものが多いことを明かにした。これらの結果より、有機酸や金属イオンが土壌還元消毒の作用機構に大きく関与しており、土壌還元消毒の選択性がこれらの因子に対する感受性の違いによって説明できることが示唆された。 Fe^{2+} によるトマト萎凋病菌の生存抑制作用は 5°C という比較的低温条件下でも安定で、低温による影響を受けない。このことは、低温下での土壌還元消毒の効果の向上・安定化のヒントとなるものであると考える。

2. 土壌還元消毒の普及の現状

土壌還元消毒が必要とされる背景には、土壌くん蒸剤や土壌消毒剤の使用に対する規制や作業者、近隣住民への影響、有機農業への意識の高まりがある。さらに、これまで慣行

的に使われてきた消毒法の多くが深層部での効果が弱いという問題点がある一方で、糖蜜や低濃度エタノールを用いた方法では、土壌の深層部でも高い消毒効果が得られるという利点がある。埼玉県露地圃場において行った試験では、1% (v/v) のエタノール水溶液を1m²あたり 100L の処理したところ、地中 90cm まで還元状態となっていることが確認された。群馬県農業技術センターが行った試験では、低濃度エタノールを用いた場合、60cm の深さまでネコブセンチュウが検出されなくなり、その後抑制キュウリの栽培が終了した時点においても、ネコブセンチュウ密度の回復はほとんど見られなかった²。一方、小麦フスマを用いた土壌還元消毒では、深さ 20～30cm 程度ではネコブセンチュウへの抑制効果が低く、キュウリの栽培終了時には処理前と同程度かそれ以上に密度が回復していた。山形県のキュウリ・トマト農家圃場では、ネコブセンチュウやホモプシス根腐病の対策として、毎年土壌くん蒸を行っていたが、安定した病害防除効果が得られていなかった。しかし、低濃度エタノールを用いた土壌還元消毒を行ったところ、現時点で 3 年間は被害がほとんど発生していないとのことで、現場レベルでも非常に高い成果が得られている。

演者らは、2013 年～15 年にかけて、日本各地で実施された低濃度エタノールによる土壌還元消毒の試験に係わる土壌分析を行った。我々が把握しているだけでも、29 の都道府県で使用実績がある。対象とした病原菌や作物をそれぞれ表にまとめた (表 1, 2)。数百件におよぶ実証試験の中で、特に強い要請があったものについては現地圃場への立ち会いも行い、技術説明や実際の作業の補助などを行ってきた。また、フロリダ、カリフォルニアで行われている実証試験圃場へも視察に訪れた。一連の活動を通じ、現場レベルでは以下の様な問題がある明らかとなってきた。

- ①適切な病害診断が行われていない
- ②土壌還元消毒の原理が十分に理解されていない
- ③暗渠の有無や、圃場の整備履歴などの記録がない
- ④コストに対する意識があいまいである

例えば原理の理解が不十分だったために、適切な被覆が行われなない、不適切な季節に処理を行ってしまい、ほとんど消毒効果が得られなかったというケースもあった。こういった問題点については、普及指導者などによる継続的な指導が必要であると考えられる。

表 1. 低濃度エタノールによる土壌還元消毒の実証試験における対象作物

トマト	メロン	レタス	チンゲンサイ
トルコギキョウ	アスパラガス	スイカ	インゲン
ピーマン・シシトウ	ゴボウ	ストック	ホウレンソウ
キュウリ	サツマイモ (苗)	セルリー	ミズナ
イチゴ	サヤインゲン	ダイコン	ヤマノイモ

表 2. 低濃度エタノールによる土壌還元消毒の実証試験における対象病原菌

萎凋病菌 (<i>Fusarium oxysporum</i>)	褐色根腐病菌
ネコブセンチュウ	白絹病菌
青枯病菌	ホモプシス根腐病菌
半身萎凋病菌	萎凋細菌病菌
疫病菌	黒点根腐病菌

まとめ

今後、土壌還元消毒の普及を拡大していく上での課題は、第一に低温下での消毒効果の向上とコストの低減化であると考ええる。仮に 15℃程度の地温でも十分な消毒効果が得られるように改良が進めば、日本だけで考えても、処理時期を選ばず、あらゆる地方で利用できるようになり、その利用は飛躍的に拡大することが期待される。未だ予備試験の段階ではあるが、10～15℃の地温でもトマト萎凋病に対して十分な消毒効果が得られるような土壌や、還元処理技術も開発されつつあり、こういった事例を比較・解析することで、さらに詳細な消毒メカニズムの解明が明らかになると考える。

コストについては1回の処理費用が土壌くん蒸剤と比較して高くなることが多いため、コストの話をしたとたん興味を失う農家も少なく無い。しかし、カリフォルニアのイチゴ農家圃場での大規模試験において、土壌還元消毒は、クロルピクリンと 1,3-ジクロロプロペンの混合剤処理と比較した場合にも、可販収量に優れるという結果が得られているし、上述した山形県の例のように、毎年土壌くん蒸消毒をしても病害の発生が抑えられなかったにもかかわらず、土壌還元消毒に切り替えたところ、少なくとも 3 年は土壌消毒を行わなくても再汚染等による問題が生じていないという例もある。このように、1回の処理費用だけに注目すると決して安価とは言えない技術も、総合的な観点から評価すると、十分に現場で受け入れられるものであったりする。また繰り返しになるが、詳細な消毒メカニズムが解明されることで、より効果が安定していて、よりコストが低い技術の開発につながるはずである。日本発祥の土壌還元消毒の今後に期待いただきたい。

引用文献

1. Butler et al. 2012 Plant and Soil 355: 149-165
2. 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技術 技術資料
(<http://www.niaes.affrc.go.jp/techdoc/ethanol/data-1.pdf>)

参考文献

3. Shennan, et al. 2014 Acta Hort. (ISHS) 1044: 165-175
4. Momma et al. 2013 Appl. Microbiol. Biotechnol. 97: 3801-3809