

バイオフィューミゲーションに関する 近年の研究と技術開発の動向

国立研究開発法人

農業・食品産業科学技術研究推進機構

西日本農業研究センター

たけはらとしあき
竹原利明

はじめに

アブラナ科植物を輪作したり土壌に鋤き込んだりすると、後作の土壌伝染性病害などが軽減される現象が以前から知られていた (PAPAVIZAS, 1966; 國安, 1989; ANGUS et al., 1991)。この現象 (防除技術) は、1994 年ころからバイオフィューミゲーション (Biofumigation: 生物的くん蒸) と呼ばれるようになった (ANGUS et al., 1994; KIRKEGAARD and SARWAR, 1998; SARWAR and KIRKEGAARD, 1998)。防除対象は土壌病原菌、線虫、土壌害虫、雑草に及び、その作用機構としては、アブラナ科植物の茎葉・根・種子に含まれるグルコシノレート (glucosinolate: カラシ油配糖体) が土壌中で加水分解されて生じるイソチオシアネート類 (揮発性の殺生物性物質) (図-1) とその他の硫黄関連化合物が、土壌中の有害生物の密度低下や活性低下に寄与しているという見方が一般的であった (BROWN and MORRA, 1997; MORRA and KIRKEGAARD, 2002)。これらイソチオシアネート類が、土壌くん蒸剤として使われているメチルイソチオシアネートと似ていることから、オーストラリアの KIRKEGAARD らがバイオフィューミゲーションという言葉を考案したのである。

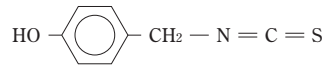
しかし、実際の圃場におけるバイオフィューミゲーションの作用機構や有効な処理条件等は、いまだ十分には解明されていない。植物のグルコシノレート含量とは関係なく効果が発揮される例も多く報告され、最近では、アブラナ科植物に限らず、イソチオシアネート以外の効果も含めて有機物鋤き込みの全般的効果をバイオフィューミゲーションと呼ぶ傾向もある (KIRKEGAARD, 2009)。

ちなみに、図-1 のアリルイソチオシアネートは「からし」や「わさび」の辛み成分そのものであり、辛みの強い和がらしはカラシナ (*Brassica juncea*) の黄色い種子から作る。辛みの少ない洋がらし (一般にマスタード



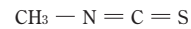
アリルイソチオシアネート

↑ カラシナ (*Brassica juncea*) などから生じる



パラヒドロキシベンジルイソチオシアネート

↑ シロガラシ (*Sinapis alba*) などから生じる



メチルイソチオシアネート

(土壌くん蒸剤)

図-1 アブラナ科植物から生じるイソチオシアネートの例と土壌くん蒸剤との類似性

と呼ばれる) の主原料がシロガラシ (*Sinapis alba*) の種子 (淡黄色) である。これらは香辛料であるとともに、例えば寿司のわさびはその抗菌力によりネタの刺身の腐敗を防止する役割があり、日本人は古 (いにしえ) からの知恵でアリルイソチオシアネートを利用していることになる。

バイオフィューミゲーションについては、現在オーストラリアのほか、イタリア、米国、英国等欧米で研究が盛んであるが、アジアなどの他の多くの国々でも圃場試験が実施されている。化学農業である土壌くん蒸剤ほどの効果は認められないが、環境保全や作業への安全性などの観点からくん蒸剤の使用に対する規制が世界的に強まっている状況の中で、注目されている技術である。近年の海外および日本の研究開発事例について、以下に紹介する。

I 海外の事例

これまでに国際バイオフィューミゲーションシンポジウム (International Biofumigation Symposium) が5回開かれ (第1回 2004年イタリア, 第2回 2006年米国, 第3回 2008年オーストラリア, 第4回 2011年カナダ, 第5回 2014年英国), 筆者はこのうち第2回, 第3回, 第5回に出席した。これらの会議の中で注目されたものに以下のようなものがある。

一つは、バイオディーゼルの開発との共同研究と

Recent Advances in Research and Technological Development on Biofumigation. By Toshiaki TAKEHARA

(キーワード: バイオフィューミゲーション, 生物的くん蒸, カラシナ, バイオディーゼル, 土壌還元消毒, 生物的土壌消毒, 嫌氣的土壌消毒)

して米国のアイダホ大学が進めている、シロガラシの種子の絞りかす（ナタネ油かすに相当する）を用いた雑草防除の研究である。シロガラシの種子を圧搾すると油が出てきてこれをバイオディーゼル燃料の原料として用いるが、油かす（seed meal と呼ぶ）のほうに高濃度のグルコシノレートが含まれるため、これを土壤に処理して雑草防除を行う（BOREK and MORRA, 2005）。アイダホ大学内には、シロガラシ由来のバイオディーゼル燃料で動く自動車・トラクターや、バイオフェューミゲーション用カラシナ類の育種圃場もあった。

また、イタリアでは、カラシナ類から絞った油をバイオリファイナリー（biorefinery：石油の代わりにバイオマス为原料にして、燃料と潤滑油、樹脂等の化学製品を製造する設備や技術体系のこと）に用いる研究、また、その油かすから作った資材を土壤病虫害防除に用いる研究が盛んで、この資材を既に有機肥料として市販しているようである（例：商品名 BioFence など）（BALDI et al., 2014）。

第5回のシンポジウムでは、現在市販されているバイオフェューミゲーション用のアブラナ科作物品種の圃場で



図-2 巨大な細断同時鋤き込み機（オランダ イマンツ社製）によるアブラナ科植物の鋤き込み・鎮圧
イマンツ社ホームページの動画より。

の展示会があり、各種苗会社が色々な品種を紹介していた。線虫害用のものと土壤病害用のもの等、2種類以上の種子を混ぜて売っている場合もある。また、図-2に示すような巨大な鋤き込み用機械の実演もあった。これはトラクターの前方につけたハンマーナイフモアで植物を碎き、後方のロータリーで鋤き込んだ後にさらに後ろの鎮圧ローラーで土壤を固めていくものである。日本ではハウス内の小面積に鋤き込んで透明シートで被覆をする処理が主流だが、海外では広大な畑で大型の機械を使う例が多く、多くの場合被覆はしない。

KIRKEGAARD (2009) や REDDY (2013) による総説には、バイオフェューミゲーションに用いられる各種植物の解説や、各作物病害や線虫、雑草、害虫に対する適用例が豊富に載っている。アブラナ科ではカラシナやシロガラシのほか、セイヨウアブラナ (*Brassica napus*)、アビシニアガラシ (*Brassica carinata*)、キバナズシロ (*Eruca sativa*)、ダイコン類 (*Raphanus sativus*) が多く使われ、非アブラナ科ではネギ属やソルガムの例もある。しかし試験事例が豊富な一方で、各国で用いている土壤や鋤き込み植物、対象作物・病虫害が異なっており、処理時の土壤水分や温度もまちまちのため、各病虫害に対して、どうすれば確実に防除効果を出せるのか、統一的な指針はいまだに示されていない印象がある。

II 日本の事例

我が国では、バイオフェューミゲーションの効果の向上を目指す過程で、フザリウム病菌などに対する抗菌活性の高いカラシナ (*Brassica juncea*) を主に用い、また、エンバクや他の緑肥作物等も用いて、土壤還元消毒（新村, 2000）や太陽熱消毒（児玉・福井, 1979；児玉ら, 1979）を組合せた研究が多く見られる。以下にそれらを紹介する。

1 農林水産省の委託プロジェクト

農林水産省の委託プロジェクト「生物機能を活用した環境負荷低減技術の開発（生物機能プロ, 2004～08年度）、「地域内資源を循環利用する省資源型農業確立のための研究開発」（省資源プロ, 2009～10年度）、「気候変動に対応した循環型食料生産等の確立のための技術開発」（気候変動プロ, 2011～12年度）、「有機農業を特徴づける客観的指標の開発と安定生産技術の開発」（新有機農業プロ, 2013～17年度）等の中で、バイオフェューミゲーション関連の課題が多面的に取り組みされた（竹原, 2012）。その成果としては次のようなものがある。いずれも植物の鋤き込み（混和）後に灌水してポリフィルムなどで土壤表面を被覆または密封した試験である。

(1) カラシナやエンバクの鋤き込みの防除効果 (ブレンダー試験)

カラシナ混和時の土壤水分含量がハウレンソウ萎凋病の防除効果に及ぼす影響を小規模なブレンダーを用いた試験で検討したところ、混和時の土壤水分含量が飽和条件の場合にハウレンソウ萎凋病の防除効果が高く、持続性もあった (前川, 2011)。また、カラシナやエンバクの鋤き込み・灌水・密封処理は、有機物として米ぬかを用いた土壤還元消毒と同程度のハウレンソウ萎凋病防除効果があった (吉田ら, 2011)。

(2) 処理土壤中の微生物変化

カラシナ, エンバク野生種 (*Avena strigosa*), フスマ等の植物バイオマスを混和した密閉容器内のモデル土壤で、還元状態とした土壤試料中の細菌群集構造を PCR-DGGE 法やクローンライブラリー法を用いて解析した結果、バイオマス混和土壤中ではいずれも、偏性嫌気性細菌である *Clostridia* 綱関連細菌 (クロストリジウム菌など) の系統が圧倒的に優占し、群集内の種構成は混和したバイオマスの違いにより大きく異なった。処理土壤から分離した嫌気性細菌のほとんどが *Clostridia* 綱であり、酢酸, 酪酸, ブタノール等を生成した (Mowlick et al., 2012; 2013 a; 竹原ら, 2014)。

(3) ハウレンソウ萎凋病に対する圃場試験

エンバク野生種, カラシナまたはブロッコリー残渣を鋤き込み、最大容水量に灌水後被覆密封処理したところ、ハウレンソウ萎凋病に対してフスマを利用した土壤還元消毒と同様の防除効果があった (安川ら, 2012; Mowlick et al., 2013 b)。ハウレンソウ生産者の現地圃場で、雨よけハウス内で栽培したカラシナを鋤き込み後、多量灌水により土壤を還元状態にした場合の萎凋病防除効果について検討したところ、太陽熱処理の単独よりも効果が高く (伊藤ら, 2014)、7月の高温時処理では透明フィルムの1重被覆で防除効果があり、梅雨時期の低温時では2重被覆により地温を上昇させることで防除効果が向上した (前川, 2011)。

(4) ナス青枯病に対する露地圃場試験

カラシナなどを用いた土壤還元消毒によるナス青枯病の防除効果について検討した結果、カラシナ処理区、ヘアリーベッチ処理区、無処理区とも最終的な発病率は100%となったが、カラシナおよびヘアリーベッチを用いた土壤還元消毒は、青枯病の発病遅延効果があると考えられた (広田ら, 2008)。

(5) ダイコン残渣の利用

選果場から廃棄されるダイコンを鋤き込み資材として用い、粉碎後 20 t/10 a を鋤き込み、十分量の灌水後 3

週間の密封処理を行ったところ、ハウレンソウ萎凋病の発生を顕著に抑制した (井上ら, 2011; Mowlick et al., 2014)。

これらの成果を含めてまとめたハウレンソウなどの有機栽培マニュアルが、農研機構のホームページ上で公開されている (竹原ら, 2013)。

2 その他の取り組み

農林水産省の「先端技術を活用した農林水産研究高度化事業」の一環として、雪印種苗 (株) を中心に取り組みされた課題「土壤病原菌や有害線虫を駆除する薫蒸作物の開発と利用方法の確立」(2006～10年度)の中では、グルコシノレートの含有量が高い緑肥作物としてのカラシナ品種‘辛神’が育成され、また、ハウレンソウ萎凋病、テンサイ根腐病、ジャガイモ黒あざ病、トマト青枯病等の土壤病害に対してカラシナの抑制効果を確認した (橋爪, 2011; 佐久間, 2012)。

なお、抗菌性の高い (すなわち、アリルイソチオシアネートの発生量の多い) カラシナ品種の例として、上記の‘辛神’以外にも、カネコ種苗やタキイ種苗の‘黄からし菜’、タキイ種苗の‘いぶし菜’等がある (いずれも *Brassica juncea*)。目時 (2010) もカラシナを用いたハウレンソウ萎凋病防除試験を実施している。これらを含めた緑肥作物の使い方の例を記載した書籍も出版された (橋爪, 2014)。

カラシナなどの緑肥作物鋤き込みによる土壤還元消毒時の一酸化二窒素 (N_2O) 発生と、被覆資材の違いが与える影響についての興味深い試験結果もある (石岡ら, 2014)。これによると、フィルム被覆下の還元状態での植物の分解では、温室効果ガスとして問題になる N_2O は大気中にほとんど放出されず、ガス低透過性フィルムを用いるとさらにその放出を低減できた。

また、バイオフューミゲーションに直接関係はないが、バイオディーゼル燃料の開発研究の一環で、ナタネの後作にヒマワリを作ると生育が抑制される原因として、ナタネに含まれるグルコシノレートとその分解産物であるイソチオシアネート類が関与している可能性が示された (岡田ら, 2008; Yasumoto et al., 2010)。

農研機構西日本農業研究センター (旧近畿中国四国農業研究センター) では、2015年度から農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業の一環として、「中山間の未利用有機性資源を活用した人にも環境にもやさしい土壤消毒技術の実用化」という課題名で研究を開始し、機械メーカー、大学および近隣の県と共同で、未利用有機物の活用、消毒メカニズムの解明、省力化技術の開発を中心に研究開発を行っている。省力化技術の開発では、



図-3 小型の細断同時鋤き込み機（試作機）による植物の細断・鋤き込み

植物の細断と鋤き込みを同時にできる小型の機械の開発も目指している（図-3）。細断と同時に鋤き込むことによって、カラシナの細断時に生じるイソチオシアネートの揮散を防ぎ、作業者の目などに対するイソチオシアネートの刺激も軽減することができるはずである。

III 効果のメカニズムと技術の名称の問題

技術の名称は、効果のメカニズムの本質を表すことが望ましい。バイオフィューミゲーションの本来の意味は、先に述べたようにグルコシノレートから生じる揮発性のイソチオシアネート類を利用するものだが、実用化が進む一方で、その作用機構はいまだ十分には解明されていないため、この名称が最適かどうかわからない。現実の圃場で生の植物を鋤き込んだ場合の効果は、イソチオシアネートだけでは説明できない。圃場で面積当たりに栽培できる植物体の絶対量の不足、グルコシノレートからイソチオシアネートへの変換効率の低さ、イソチオシアネートの土壌有機物への吸着や分解による消失の問題等により、土壌中のイソチオシアネートの濃度が必ずしも十分でないからである。地表面に被覆をしない場合はなおさらである。したがって鋤き込み植物の持つ抗菌性の強弱が必ずしも土壌消毒効果の高低に直接結びつくわけではなく（VERVOORT et al., 2014）、グルコシノレートが関与するメカニズムとそれ以外のメカニズムに分けて考える必要がある（MOTISI et al., 2009；KIRKEGAARD, 2009）。処理後に形成された土壌微生物相が効果をもたらすとの報告もある（MAZZOLA et al., 2015）。

また、バイオフィューミゲーションにおいても、処理時の土壌温度や土壌水分が重要なこともわかってきた。鋤き込んだ後に灌水して鎮圧したり、プラスチックフィルムで被覆をしたりした場合は、太陽熱による熱死滅や、

還元状態（酸欠状態）で増殖してくるクロストリジウム菌により生産される酢酸、酪酸等の抗菌成分（Mowlick et al., 2013 a）なども効果に関与していると考えられる。高い効果を追求すると、太陽熱消毒や土壌還元消毒との違いが不明確になってくるのである。なお、グルコシノレートが濃縮されている、カラシナ種子の搾油かす（seed meal）を鋤き込んだ場合は、イソチオシアネートの効果が発揮される可能性が高いだろう。

我が国で開発された「土壌還元消毒」（Reductive Soil Disinfestation）は、土壌を還元状態にする（すなわち酸化還元電位を下げる）ことに主眼を置いて名付けられた。オランダで提唱された「Biological Soil Disinfestation」（生物的土壌消毒）（Goud et al., 2004）は、土壌が還元状態（嫌気状態）になる点では同じだが、土壌中の微生物活動に重きを置いている。また、両者を参考に米国で実施されている「Anaerobic Soil Disinfestation」（嫌氣的土壌消毒）（SHENNAN et al., 2007）は、嫌氣的な（酸素のない）状態を表すように名付けられた。しかし、これら三つはいずれも、現在ほぼ同様の概念になってきている（村本, 2015）。バイオフィューミゲーションも、灌水と被覆をした場合には土壌が嫌気状態になるので、これに含まれることになるだろう（しかし、鋤き込む有機物によって処理後の土壌中の糸状菌相や細菌相が異なるので、作用機構が異なる可能性はある）。逆に、Anaerobic Soil Disinfestation などにおいても、有機物としてアブラナ科植物を使った場合、または、揮発性物質が効果の主因であることが判明した場合には、バイオフィューミゲーションと呼んでもいいかも知れない。これら区別の難しい諸技術を、生物的プロセスを含む土壌消毒法の意味を込めて、広義の「生物的土壌消毒」と一括して呼ぶ考えもある（竹原, 2008）。

おわりに

以上のように、現在、バイオフィューミゲーションと土壌還元消毒（嫌氣的土壌消毒）の技術の明確な境目はなくなっている。今後メカニズムの解明と併せて必要なのは、どの作物のどの病害虫に、どんな植物や有機物をいつどれくらい鋤き込んで処理をすれば効果的に防除できるか、という実践例を積み重ねて一般化していくことである。まだ未解明の部分が多いため技術の確立が難しい反面、研究のしがいがある分野である。究極的には、鋤き込む有機物として、作物残渣や食品残渣、搾油残渣、雑草のような、通常なら捨てられるものを用いるのが目標と言えるだろう。各地域で利用可能な有機物を見いだして活用することで、環境負荷の少ない持続型農業の構

築が期待される。

引用文献

- 1) ANGUS, J. F. et al. (1991): Austral. Jour. Exp. Agric. **31**: 669 ~ 677.
- 2) ——— et al. (1994): Plant and Soil **162**: 107 ~ 112.
- 3) BALDI, E. et al. (2014): Aspects of Applied Biology **126**: 5.
- 4) BOREK, V. and M. J. MORRA (2005): J. Agric. Food Chem. **47**: 3837 ~ 3842.
- 5) BROWN, P. D. and M. J. MORRA (1997): Advances in Agronomy **61**: 167 ~ 231.
- 6) GOUD, J. C. et al. (2004): Plant Dis. **88**: 688 ~ 694.
- 7) 橋爪 健 (2011): 農業技術大系土壌施肥編 追録第22号 第5-1巻, 農文協, 東京, 畑172の64 ~ 172の71.
- 8) ——— (2014): 緑肥作物 とことん活用読本, 農文協, 東京, 211 pp.
- 9) 広田恵介ら (2008): 四国植防 **43**: 54 ~ 55 (講要).
- 10) 井上 興ら (2011): 日植病報 **77**: 176 (講要).
- 11) 石岡 敏ら (2014): 日本土壌肥科学雑誌 **85**: 341 ~ 348.
- 12) 伊藤陽子ら (2014): 日植病報 **80**: 54 (講要).
- 13) KIRKEGAARD, J. A. and M. SARWAR (1998): Plant and Soil **201**: 71 ~ 89.
- 14) ——— (2009): Disease control in crops: biological and environmentally-friendly approaches (Ed D. Walters), Wiley-Blackwell Oxford, Chichester, UK, p.172 ~ 195.
- 15) 児玉孝司・福井俊男 (1979): 奈良県農試研報 **10**: 71 ~ 82.
- 16) ———ら (1979): 奈良県農試研報 **10**: 83 ~ 92.
- 17) 國安克人 (1989): 農業および園芸 **64**: 955 ~ 959.
- 18) 前川和正 (2011): 農業技術大系土壌施肥編 追録第22号, 第5-1巻, 農文協, 東京, 畑172の98 ~ 172の107.
- 19) MAZZOLA, M. et al. (2015): Phytopathology **105**: 460 ~ 469.
- 20) 日時梨佳 (2010): 植物防疫 **64**: 575 ~ 579.
- 21) MORRA, M. J. and J. A. KIRKEGAARD (2002): Soil Biol. Biochem. **34**: 1683 ~ 1690.
- 22) MOTISI, N. et al. (2009): Plant Pathol. **58**: 470 ~ 478.
- 23) MOWLICK, S. et al. (2012): Soil Science and Plant Nutrition **58**: 273 ~ 287.
- 24) ——— et al. (2013 a): Appl. Microbiol. Biotechnol. **97**: 8365 ~ 8379.
- 25) ——— et al. (2013 b): Crop Protection **54**: 185 ~ 193.
- 26) ——— et al. (2014): ibid. **61**: 64 ~ 73.
- 27) 村本穰司 (2015): 土と微生物 **69**: 65 ~ 74.
- 28) 岡田謙介ら (2008): 日作紀 **77**(別号1): 96 ~ 97.
- 29) PAPAIVAS, G. C. (1966): Phytopathology **56**: 1071 ~ 1075.
- 30) REDDY, P. P. (2013): Recent Advances in Crop Protection, Springer India, New Delhi, India, p.37 ~ 60.
- 31) 佐久間 太 (2012): 植物防疫 **66**: 555 ~ 558.
- 32) SARWAR, M. and J. A. KIRKEGAARD (1998): Plant and Soil **201**: 91 ~ 101.
- 33) SHENNAN, C. et al. (2007): Proceedings of 2007 Annual International Research Conference on Methyl Bromide Alternatives and Emissions Reductions: 40.1 ~ 40.4.
- 34) 新村昭憲 (2000): 農業技術大系土壌施肥編5-①, 農文協, 東京, 畑212の6 ~ 212の9.
- 35) 竹原利明 (2008): 土壌伝染病談話会レポート **24**: 70 ~ 81.
- 36) ——— (2012): 同上 **26**: 30 ~ 38.
- 37) ———ら (2013): 有機農業実践の手引き: 46 ~ 77. http://www.naro.afrc.go.jp/publicity_report/publication/laboratory/narc/manual/046975.html.
- 38) ———ら (2014): 近畿中国四国農業研究センター研究成果情報 (2013年).
- 39) VERVOORT, M. T. W. et al. (2014): Soil Biol. Biochem. **68**: 200 ~ 207.
- 40) 安川人央ら (2012): 奈良農総セ研報 **43**: 11 ~ 16.
- 41) YASUMOTO, S. et al. (2010): Plant Prod. Sci. **13**: 150 ~ 155.
- 42) 吉田祐子ら (2011): 園芸学研究 **10**(別2): 499 (講要).

発生予察情報・特殊報 (28.6.1 ~ 6.30)

各都道府県から発表された病害虫発生予察情報のうち, 特殊報のみ紹介。発生作物: 発生病害虫 (発表都道府県) 発表月日。都道府県名の後の「初」は当該都道府県で初発生の病害虫。

※詳しくは各県病害虫防除所のホームページまたは JPP-NET (<http://www.jpnn.ne.jp/>) でご確認下さい。

- レタス: オオクビキレガイ (広島県: 初) 6/6
- ブルーベリー: ブルーベリータマバエ (仮称) (静岡県: 初) 6/22
- インパチエンス: ベと病 (広島県: 初) 6/6
- ネギ, ニンジン: クロバネキノコバエ科の一種 (埼玉県: 初) 6/28
- ニンジン: キクノネハネオレバエ (静岡県: 初) 6/7
- ホウレンソウ: ハコベハナバエ (千葉県: 初) 6/10