

農業から放出される臭化メチルの環境影響とその軽減方法

農林水産省農業環境技術研究所 小 ぼら 原 ゆう 裕 そう 三

はじめに

臭化メチルは、Le Gouffil (1932) によって殺虫活性を有することが報告されて以来、植物検疫用に、後に倉庫、製粉所、船、鉄道貨車などのくん蒸消毒に広く使用されるようになった。1940年、アメリカで土壌くん蒸剤としても有効であることが明らかになり、現在も広く使用されている。有害生物に対する臭化メチルの作用性は、他の薬剤と比較すると高くはないが、ウイルス、バクテリア、かび、線虫、害虫、雑草など広範囲の生物に有効である。特にウイルスに有効なものは本剤以外にない。さらに、生物の全発育段階において有効で、その作用機構から抵抗性、耐性の発達が困難である。臭化メチルの蒸気圧 (1.9×10^5 Pa, 20°C) は高く、低温 (地温が 5°C 以上) でもくん蒸が可能である。これらの特徴が、効果的なくん蒸剤として今日でも臭化メチルが広く使用されている理由である。上記の条件を満たす臭化メチルに代わりうる薬剤や防除技術は、現在も得られていない。

ところが、成層圏のオゾン層破壊に対して、臭素は塩素の50倍以上の破壊能力を持ち、その臭素の最大の供給源が臭化メチルであることが明らかになった (Butler, 1996; WMO Rep. 37, 1995)。現在、2010年の全廃に向けて、臭化メチルの使用規制が行われている。臭化メチルの消費量は、世界で 75 Gg ($\times 10^9 \text{ g}$, 1992年)、日本では1992年 9.4 Gg であったものの93年、94年と 10 Gg を超え、95年には 8.7 Gg まで減少した。その用途は、土壌くん蒸用が世界で76%を占め、日本でも66%と最大である (Methyl Bromide Global Coalition, 1995; 植物防疫課, 1996)。

ここでは、臭化メチルの規制の現状とその背景、および現在進められている土壌くん蒸からの臭化メチル放出抑制技術開発の概要を紹介する。

I 臭化メチルの規制

臭化メチルは、1992年の第4回モントリオール議定

Environmental Impacts and Reducing Techniques of Methyl Bromide from Soil Fumigation By Yusuo Kobara

(キーワード: 臭化メチル, オゾン層破壊, 放出抑制法, 土壌くん蒸)

書締約国会議において、オゾン層破壊物質として規制対象物質とされた。さらに1996年の第7回締約国会議において使用規制措置が決定され、先進諸国は1991年を基準として、2001年から25%削減、2005年から50%削減、そして2010年100%削減すなわち全廃することとなった。これまでは検疫と輸出用くん蒸を例外としていたが、農業に必要不可欠なもの (Critical Agricultural Use: CAU) も例外規定に加えられ、具体的に何を指すかについては、97年の技術・経済アセスメントパネルで検討されることになっている。

II 臭化メチルについての最近の知見

現在、大気中の臭化メチルは北半球平均で約 11 pptv ($\times 10^{-12}$, 体積比)、南半球平均で約 9 pptv の濃度で存在し、この濃度差は両半球のソース (放出源) とシンク (吸収, 分解先) の大きさと同大気中での寿命に起因している。臭化メチルには人為起源と自然起源のものがあり、それらの放出量の正確な評価は困難で、大きな不確実性が残っている。使用量が最も多い土壌消毒からの放出量評価は、全使用 57 Gg のうち最も確からしい値として 32 Gg ($16.7 \sim 47.3$) と見積もられている (Butler, 1996; WMO Rep. 37, 1995)。他のソースとしては海洋の 60 Gg ($26 \sim 100$) が最大で、他に焼畑やサバンナの火事などバイオマスの燃焼 20 Gg ($10 \sim 50$)、ガソリン 15 Gg ($0.5 \sim 22$) などがある。シンクとしては、大気、海洋、土壌があり、全体で 185 Gg ($132 \sim 232$) と見積もられている (Butler, 1996)。

さらに、大気中の臭化メチル濃度の増減の傾向を示す明確なデータは現在のところ得られていない。その原因は、試料の保存期間中に見掛け上臭化メチル濃度の増加が認められ、その増加程度も試料により異なるなど、過去に採取した大気中の分析が困難なことにある。最近のオゾン層破壊係数 (ODP) の再評価では、臭化メチルの ODP は 0.43 (Butler, 1996) と報告され、これは WMO (1995) による評価値 0.6 よりもかなり小さく、大気中の寿命は 1.3 年 ($0.8 \sim 1.7$) から 0.8 年 ($0.6 \sim 1.4$) (Yvon, 1996) にまで小さくなっている。

以上のように、臭化メチルの環境動態については不確実な部分が多く残されていることがわかる。そのため、臭化メチルの使用規制が大気中濃度にどの程度反映する

かは予想が困難である。

Ⅲ 臭化メチルによる土壌くん蒸法

臭化メチルによる土壌くん蒸は、土壌表面を高分子フィルムで被覆して土壌表面もしくは土壌中に臭化メチルを放出させ、土壌中濃度を一定期間保持し、目的とする効果を得るものである。主な土壌くん蒸法を紹介すると、

a ホットガス法：ポリエチレンやポリ塩化ビニルなどの高分子フィルムなどで土壌表面を被覆し、外部のポンペから導入管を用いてガス状臭化メチルを被覆資材下に導く方法である。世界的に最も用いられている方法で、特に温室の土壌くん蒸に適している。

b コールドガス法：開缶具を取り付けた臭化メチルの小缶を土壌表面に設置し、上述のフィルムで土壌表面を被覆した後、開缶することにより液体状の臭化メチルを放出させ、被覆資材下で気化させる方法である。多くの国で一般的に行われている方法で、主に露地で用いられている。

c ハウス全面くん蒸法：ハウス全体を臭化メチルガスが漏洩しないように密閉した後、時限式噴出装置を作動させて臭化メチルを噴出させる。

d 機械化注入法：土壌中 25～30 cm に液体状臭化メチルを注入する複数のノズルと、注入と同時に土壌表面をフィルムで被覆する機械を装備したトラクターで行う方法である。大規模な圃場に適しており、主にアメリカで行われている。

e 単木位置（サイト）施用法：果樹園などで罹病した木、もしくは移植の位置ごとに専用の注入ノズルを用いて土壌中に臭化メチルを施用する方法である。

Ⅳ 臭化メチル放出フラックスの測定

土壌くん蒸で使用される臭化メチルの大気への放出割合は、全使用量の 30 から 85% と見積もられている (WMO, 1995)。われわれは、土壌くん蒸から大気への放出量評価における大きな不確実性の解消と放出抑制技術の開発のため、日本で広く用いられているコールドガス法により臭化メチルくん蒸を行い、臭化メチルの放出機構を明らかにした。大気への放出量の評価は様々な手法で行われているが、測定結果には大きなばらつきがあった。そして、その主な要因は土壌の pH、有機物含量、水分量、処理方法であるとされていたが、われわれの研究により、それらは主因でないことが明らかになった。これまでの報告では、被覆期間中の放出速度の日内変動については考慮されておらず、昼間の測定によるも

のがほとんどであった。ところが、放出フラックスは気温、日射に敏感に反応し、日内変動は 10 倍以上に達した。測定の時間分解能を増して放出量の測定を行った結果、大気中に放出した臭化メチルの割合は約 32～44% の範囲であった。このような放出フラックスの日内変動の主な要因は、被覆資材の透過速度の温度依存性と被覆資材による温室効果であった。そして、これらの要因を組み込んだモデルによって、放出フラックスをほぼ完全に再現することができた。このモデルを用い、過去に報告されたデータを当時の気象データと日内変動を考慮して再解析した結果、従来の放出量評価は 3 分の 1 程度小さくなり、従来の評価は過大であったことが明らかとなった。

Ⅴ 臭化メチルの放出抑制技術

土壌くん蒸からの臭化メチルの放出抑制技術が切実に望まれ、現在、世界的にいくつかの方法が試みられているので、それらを問題点と共に紹介する。

(1) バリアー性フィルムを用いる方法

バリアー性フィルムを用いて、被覆期間中の漏洩を抑えることにより投薬量を減らし、土壌中で分解を促進させて大気への放出量を抑制しようとする技術がある。問題点は、投薬量の低減化の程度が不明なことである。それは以下の理由による。一般にガス状物質の効果は、暴露濃度と暴露時間の積に依存するという HABER の法則がある。この暴露濃度と暴露時間の積 (ct-product もしくは CTP) は、相対的な効果の判断基準となる。この法則には、実際のくん蒸に際して、くん蒸期間が決まれば、必要な暴露濃度を計算できるという利点があり、その例を表-1 に示す。しかし、臭化メチルはある濃度以下になるとこの法則に従わなくなり、暴露濃度が低くなればより大きな CTP が必要となることが報告されている (MUNNECKE, 1978)。さらに、臭化メチルの暴露濃度には必要とされる閾値があり、土壌くん蒸においては明らかではない。従来の効果試験では、初期の投薬量のみによって判断が行われており、くん蒸期間中の土壌中濃度の測定は行われていない。このため、閾値と CTP の設定が困難で、投薬量をどこまで低減化できるのか明らかではない。その効果を正確に把握するために、土壌くん蒸における効果試験では、投薬量と経時的な濃度の推移を把握する必要がある。現場における安価な簡易臭化メチル分析法として、テフロンチューブとシリリングにより被覆下のガスを採取、テドラーバッグを用いてガスを希釈、検知管式ガス測定器による方法がある。

表-1 臭化メチルに対する各種生物の感受性*と土壌くん蒸(被覆1週間)に必要な土壌中平均濃度

生物種	Concentration Time Product (mg l ⁻¹ h)	ppm(v/v)**
高等植物(種子を除く)	200~600	300~890
ダニ類		
昆虫類	50~200	75~300
線虫類	600~1,000	890~1,500
菌類	2,500~4,000	3,700~6,000
バクテリア		
ウイルス		

*:MAFF/PSD Advisory Committee on Pesticides, (1992)Evaluation of Fully Approved or Provisionally Approved Products: Evaluation of Methyl Bromide.

** :被覆7日間(168時間),地温15°Cとした場合に必要とされる平均土壌中臭化メチル濃度(体積混合比).

そのほかに解決されなければならない問題点として、利用可能なバリアー性フィルムの供給が限られること、高価なこと、使用済みフィルムの廃棄、などがある。

われわれのナイロンフィルムを用いた試験では、被覆7日間における投薬量に対する大気への放出割合は、フィルムを通して1.4%、処理区の周囲からの漏れ(横漏れ)6.2%、計7.6%であった。しかし、被覆資材を除去した後も継続して測定を行ったところ、合計33%が大気へ放出された。放出削減については、被覆除去後の問題が大きいことを示唆している。

(2) 高分子フィルムと水封を組み合わせる方法

高分子フィルムと水封を組み合わせた方法(JIN et al., 1995)が報告されている。これは機械化注入法を改良したもので、臭化メチルの土壌中への注入と同時に灌漑(4または8mmに相当)を行い、土壌表面を被覆することで、初期の大きな放出を防ぐことができたという。しかし、これは注入法にのみ有効で、ホットガス法やコールドガス法のような土壌表面に臭化メチルを施用する方法では、灌漑を行えば、臭化メチルの土壌中への拡散が妨げられてしまうことになる。

(3) 深土壌注入法

深土壌注入法(YATES, et al., 1997)が試みられている。この方法は、従来の機械化注入法に改良を加え、注入深さ68cm、ノズル間隔1.68mで深注入を行った後、ノズルによって破碎された土壌表面をローラーパッカーで鎮圧するものである。この試験では、土壌表面は高分子フィルムでの被覆はしていない。大気への放出量は1.9~4.9%と小さくなり、十分な抑制効果があった。しかし、くん蒸開始28時間後における、土壌25cmの深さでの臭化メチルの濃度は、測定場所により10倍を超えるばらつきがあった。土壌表面を被覆していない

め、より浅い層で必要な濃度が保たれていたのかについて興味があるが、これについての情報は無い。

(4) 微生物分解による方法

微生物分解により、臭化メチルの大気への放出を抑制することも試みられている(Ou et al., 1997)。硫酸アンモニウムと石灰を施肥することで硝化細菌を活性化し、この硝化細菌により臭化メチルを共酸化分解しようとするものである。石灰処理により土壌pHが5.6から7.7になっており、このことも臭化メチルの分解が促進された一因であろう。しかし、石灰のようなアルカリ性肥料を施用、もしくは多湿土壌でのくん蒸は葉害の起こる可能性があるため、施用から1か月ほど期間をあける必要がある。特に、セルリー、カーネーションなどが葉害を生じやすい。この放出抑制技術については慎重な議論が必要である。

(5) 投薬日時の選択

投薬日時の選択を、われわれは簡単に実行できる放出抑制技術として提案したい。先に述べたように被覆フィルムを通しての臭化メチルの放出は、日射量と気温に依存している。そこで、夕方、もしくは曇りの日に投薬を行うことで、従来の被覆資材を用いた場合でも初期の大きな放出を抑制できる。このため、土壌中への拡散を促し、晴天の昼間に投薬した場合に比べ全体で数割程度の放出抑制が可能になる。これは新たな投資を行うことなく放出を抑制できる方法であり、ぜひ実行してもらいたい。さらに、適正な薬量で正しい使用方法を実施することにより、相当程度の放出抑制が可能である。

土壌くん蒸を行っている現場では、労力の軽減のために被覆資材の裾の十分な埋設や押え土を怠り、水管などで代用している場合がある。これは、被覆資材周辺からの大きな漏洩があり、過剰な投薬につながる。ハウス全

面くん蒸についても、省力化の面で魅力的であるが、他のくん蒸方法に代えて投薬量を抑制することが必要である。また、コールドガス法などでは、土壤表面への直接の被覆（平張り）の場合、横方向へのガスの拡散が妨げられるため周辺部の効果にむらを生じやすく（原田ら、1982）、これも過剰な投薬を生じる原因となる。被覆資材と土壤表面との間に空間を設けることで効果の改善と投薬量の抑制が可能である。くん蒸期間については、夏3日、冬7～10日が目安とされているが、可能であるならば夏季のくん蒸を避け、くん蒸期間をさらに延ばすことが望ましい。

おわりに

土壤病害の軽減は薬剤のみによらない総合的な病害虫防除によるべきである。種々の試みが行われているが、いまだに臭化メチルに代わる薬剤、防除技術は得られていない。くん蒸剤はその物理化学的性質から農薬のなかでも特異なものである。くん蒸剤の環境動態はこれまで

ほとんど研究されておらず、当然データの蓄積もほとんどない。現在行っている研究を機会に、臭化メチルの環境動態を明確に把握し、環境負荷の小さな施用技術を開発することが、他のくん蒸剤の環境動態把握、施用技術の改善につながるものと考えられる。

引用文献

- 1) BUTLER, J. H. and J. M. RODRIGUEZ (1996): The Methyl Bromide Issue. John Wiley & Sons Ltd., New York, pp. 27~91.
- 2) 原田敏男ら (1982): 関東東山病虫研報 29: 185~187.
- 3) JIN, Y. and W. A. JURY (1995): J. Environ. Qual. 24: 1002~1009.
- 4) LE GOUFFL, M. (1932): Revue de Pathologie Vegetale et d'Entomologie Agricole de France 19: 169~172.
- 5) MUNNECKE, D. J. E. et al. (1978): Phytopathology 68: 1210~1216.
- 6) OU, L. et al. (1997): Environ. Sci. Technol. 31: 717~722.
- 7) "Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1994," WMO Rep. 37 (1995).
- 8) YATES, S. R. et al. (1997): Environ. Sci. Technol. 31: 1136~1143.
- 9) YVON, S. R. and J. H. BUTLER (1996): Geophys. Res. Lett. 23: 53~56.

■ 農薬に関する唯一の統計資料集

■ 登録のある全ての農薬名を掲載

1996年版 (平成7農薬年度)

農薬要覧

農林水産省農産園芸局植物防疫課 監修

主な目次

- I 農薬の生産, 出荷—種類別生産出荷数量・金額/製剤形態別生産数量・金額/主要農薬原体生産数量/種類別会社別農薬生産・出荷数量/など
- II 農薬の流通, 消費—県別農薬種類別出荷金額/農薬の農家購入価格の推移/など
- III 農薬の輸出, 輸入—種類別輸出数量/種類別輸入数量/仕向地別輸出金額/など
- IV 登録農薬—平成6年9月末現在の登録農薬一覧/農薬登録のしくみ/など
- V 新農薬解説
- VI 関連資料—6年度農作物作付(栽培)面積/主要病害虫の発生面積・防除面積/など
- VII 付録—農薬の毒性及び魚毒性一覧表/関係機関等名簿/登録農薬索引/など

- ◆ B6判・683ページ
- ◆ 定価 5,505円 (本体 5,243円)
- ◆ 送料サービス

バックナンバー

- 1995年版—5,505円 送料サービス
- 1994年版—5,301円 //
- 1993年版—5,301円 //
- 1989年版—4,485円 送料 340円
- 1983年版—3,360円 送料 310円

※定価は税込価格です。

■品切絶版

1963~82, 84~88, 90~92年版

■ご注文は、個人は前金（現金・振替）で、機関は後払いも可、本会へ