

# 二酸化炭素くん蒸による貯蔵穀類の植物検疫消毒法

農林水産省横浜植物防疫所調査研究部調査課 <sup>かわ</sup>川 <sup>かみ</sup>上 <sup>ふさ</sup>房 <sup>お</sup>男

## はじめに

貯蔵穀類に寄生する害虫の消毒には、世界的に永年にわたり、臭化メチルや燐化アルミニウムによるくん蒸方法が採用されてきた。これは、殺虫作用及び浸透性が強いこと、適用害虫の範囲が広いこと、各種の施設で大量の穀類を簡便に処理できることなど、くん蒸剤としての長所を多く持ち合わせているためである。

しかしその一方で、両剤はその使用に偏重をきたした結果として、少なからず問題を抱えている。臭化メチルでは、臭素の残留問題に加え、1992年のモントリオール議定書締約国会議においてオゾン層を破壊する物質として指定され、その生産量及び消費量は、検疫用及び出荷前処理用を除き1991年レベルに凍結されることになった。さらに、その後開催された締約国会議作業部会において、検疫用といえども使用量の削減に努力すべきとの強い意見が出されている。燐化アルミニウムでは、33か国以上で抵抗性が発達している昆虫の存在が明らかにされており、深刻な状況に立ちいたっている。このように、両剤は使用の制限や使用方法の再検討が迫られている。

このような状況下にあつて、横浜植物防疫所調査研究部は、両剤の代替消毒法として、穀類害虫を対象に二酸化炭素を用いたくん蒸方法の確立に関する基礎データを集積してきた。そして、社団法人日本くん蒸技術協会による大型サイロを使用した実用化試験の実施、公聴会の開催などを経て、世界に先駆け、二酸化炭素くん蒸方法が植物検疫処理法として採用されたので、その概要について紹介したい。

## I 主要穀類害虫の殺虫試験

### 1 二酸化炭素くん蒸に対する穀類害虫の感受性

多種類の穀類害虫すべてを対象に試験を行うことは困難であるため、内外の文献を調査し、二酸化炭素くん蒸に対する感受性が低い順に、ヒメアカカツオブシムシ>コクゾウムシ類>コクヌストモドキ類>シンクイムシ、シバンムシ、メイガ類の4グループに分けた。わが国への侵入を警戒しているヒメアカカツオブシムシはきわめて感受性が低く、また、コクジツセンチュウはゴールを

作り耐久体であることから、完全殺虫には長期間を要し、別の消毒基準を作成する必要があると判断されたため、試験の対象から除外した。したがって、感受性試験はグラナリアコクゾウムシ、コクゾウムシ及びヒラタコクヌストモドキの3種を主体に、最も感受性が低い種及びその態を決定し、その種(態)を完全殺虫できる消毒基準を作成することとした。

3種害虫の各態を1反復当たり100~200頭、少量の餌とともにゴース袋に入れ、これを5~8lのガラス製くん蒸ビンに収容し、ガス混合装置を用いて所定の濃度になるように二酸化炭素と空気を混合してビン内を一定時間通気させ、かくはんしながら20°C及び25°Cで一定期間くん蒸した。ガス濃度は、炭酸ガス・酸素濃度同時測定装置を用いて測定した。くん蒸終了後は25°C、湿度70%の条件下に保管し、成虫については翌日、その他の態については羽化の有無により殺虫率を調査した。試験は3回以上反復して行った。

濃度40、50、60、70、80及び100%で5日間くん蒸した場合の感受性について、コクゾウムシ及びヒラタコクヌストモドキの結果を示すと図-1のとおりである。ヒラタコクヌストモドキでは、温度が高いほど、また、濃度が高いほど殺虫率が高くなった。これは、一般的に考えられている農業の昆虫に対する反応と同様であり、穀類害虫のほとんどに共通していることが知られている。これに対してコクゾウムシでは、ヒラタコクヌストモドキと同様に温度が高いほど殺虫率が高くなったが、ガス濃度との関係を見ると、幼虫及び蛹の殺虫率は、濃度40~50%において最も高く、50%以上になると濃度が高くなるほど低下し、80%以上になると極端に低下するなど、ヒラタコクヌストモドキとはまったく異なる反応がみられた。この原因を明らかにするため、コクゾウムシの蛹を用いて調査したところ、酸素が少ない状態では極端に殺虫率が低下することが確認され、高濃度の二酸化炭素が存在する状況下においては、一部の態は発育が停止することが示唆された。コクゾウムシやココクゾウムシの幼虫や蛹の殺虫率を高めるためには、二酸化炭素濃度を80%以下に抑え、ある程度酸素が存在する状況下でくん蒸することが必要である。

二酸化炭素くん蒸に対して耐性の態は、ヒラタコクヌストモドキでは、濃度50%以上においては20°Cでは蛹、

Plant Quarantine Treatment for Stored Grains by Carbon Dioxide. By Fusao KAWAKAMI

25°Cでは幼虫であり、また、コクゾウムシでは濃度 40～80%の範囲においては蛹であることが判明し、両種の中では、コクゾウムシの蛹が最も耐性であった。グラナリアコクゾウムシはコクゾウムシとほぼ同様の殺虫曲線であったが、幼虫と蛹の殺虫率はコクゾウムシよりもかな

り低く、3種の各態の中では最も耐性であることが判明した。

2 消毒基準の設定及び完全殺虫の確認

温度 20°C及び 25°C、濃度 50%及び 80%で処理日数を換え、1 反復当たり 100～200 頭を供試して 3 反復以上の

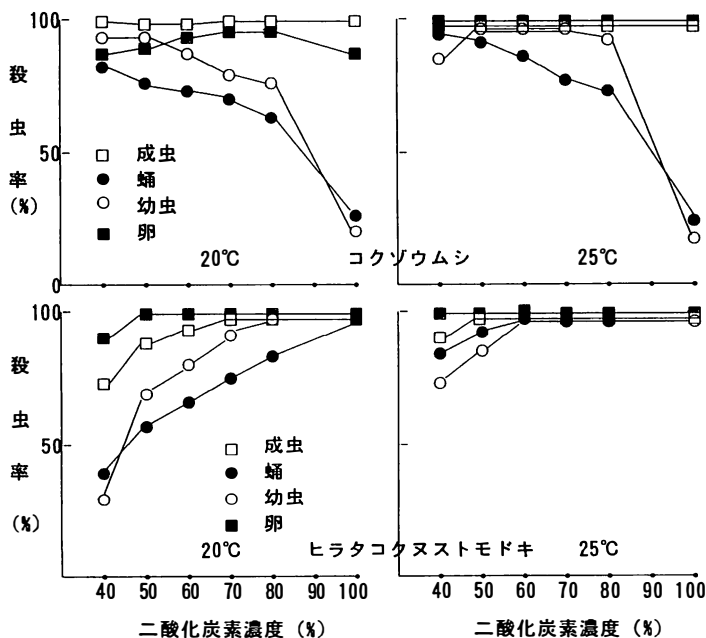


図-1 コクゾウムシ及びヒラタコクヌストモドキを二酸化炭素濃度別に 5 日間くん蒸した場合における態別殺虫効果

表-1 コクゾウムシ、グラナリアコクゾウムシ及びヒラタコクヌストモドキ蛹及び幼虫の二酸化炭素くん蒸に対する感受性

くん蒸温度	CO <sub>2</sub> 濃度	害虫の種類	態	LT <sub>50</sub> (95%FL)	LT <sub>95</sub> (95%FL)
				(日)	(日)
20°C	50%	コクゾウムシ	蛹	3.6 (3.5-3.8)	7.5 (7.2- 7.9)
			グラナリアコクゾウムシ	4.0 (2.5-5.0)	11.4 (8.1-32.2)
			ヒラタコクヌストモドキ	3.9 (2.9-5.3)	6.9 (5.1-19.4)
	80%	コクゾウムシ	蛹	3.6 (2.9-4.2)	10.3 (8.0-15.7)
			グラナリアコクゾウムシ	2.3 (1.3-3.2)	12.3 (8.0-30.8)
			ヒラタコクヌストモドキ	3.1 (2.8-3.4)	5.9 (5.1- 7.4)
25°C	50%	コクゾウムシ	蛹	2.4 (2.0-2.7)	5.3 (4.5- 6.9)
		グラナリアコクゾウムシ	蛹	2.7 (2.1-3.3)	7.7 (6.2-11.0)
		幼虫	2.9 (2.6-3.1)	5.5 (4.8- 6.8)	
		ヒラタコクヌストモドキ	蛹	2.8 (2.4-3.2)	4.3 (3.6- 6.6)
	80%	コクゾウムシ	蛹	2.8 (2.7-2.9)	6.6 (6.1- 7.1)
		グラナリアコクゾウムシ	蛹	2.5 (1.6-3.1)	9.4 (6.9-18.7)
		幼虫	—	<5*	
		ヒラタコクヌストモドキ	蛹	—	<5*

\* : 5 日間のくん蒸で完全殺虫されたため、プロビット解析に必要な処理区数が少なく解析できず。

くん蒸を行った。得られた処理日数一致死率の関係データをプロビット解析して、50%及び95%殺虫に要する日数(LT<sub>50</sub>及びLT<sub>95</sub>)を推定した結果は表-1のとおりである。グラナリアコクゾウムシは両温度区において、他の2種よりも50%及び95%殺虫に要する日数は長く、特に、20°Cでは、処理期間が長くなっても生き残る個体が見られるなど、コクゾウムシとは異なる反応が見られた。コクゾウムシでは濃度80%よりも50%において、また、ヒラタコクヌストモドキでは50%よりも80%において、コクゾウムシよりも短い日数で50%及び95%殺虫が得られるなど、図-1の結果と一致した。

これらの結果から、グラナリアコクゾウムシは二酸化炭素くん蒸に対しコクゾウムシよりもかなり耐性であり、完全殺虫には長い期間を必要とするため、別の消毒基準を作成することとし、以後の試験から除外した。

プロビット解析により推定した処理日数に検疫の安全度を考慮した日数を加え、処理基準を設定(濃度30, 40, 50, 60, 70, 80及び100%, 温度20, 25及び30°C, 処理日数10, 14及び21日)し、数種の害虫の各態が完全殺虫されるか、1反復当たり200~1,000頭(メイガ類は40~60頭)供試し、3反復以上のくん蒸を行って確認した。結果は表-2のとおりで、コクゾウムシ及びココクゾウムシは、濃度40~80%の範囲において、20°Cでは21日、25°Cでは14日及び30°Cでは10日で完全殺虫された。ヒラタコクヌストモドキを含むその他の害虫は、濃度40, 50~100%の範囲において、20°Cで14日、25°C以

上では10日で殺虫され、コクゾウムシよりもそれぞれ短い日数で完全殺虫されることが確認された。

## II 大規模実用化試験

横浜市にある大型鉄鋼板サイロ2基にアメリカ産小麦を搬入して実用化試験を行い、くん蒸中におけるガス濃度、圧力及び温度の変化、被くん蒸物への二酸化炭素収着量、殺虫効果、被くん蒸物の品質の変化などについて調査した。

### 1 施設の気密度審査

二酸化炭素は臭化メチルよりも浸透性が優れており、サイロからのガスの漏洩が懸念されるため、あらかじめ圧力降下法による気密度試験を行った。試験は、空サイロ内を500 mmAqに加圧して20分後の圧力を測定したところ、438~453 mmAqで気密度はきわめて良好であった。さらに、空サイロ内容積の50%に相当する量の二酸化炭素を投薬し、48時間後の濃度を測定した結果、濃度の低下はほとんど認められなかった。二酸化炭素くん蒸に使用される施設は、臭化メチルによるガス保有力審査において、48時間後の濃度が投薬量の85%以上(特A級)であることが条件になっているが、本施設はこれと同等のガス保有力があると認められた。

### 2 サイロ内圧力、二酸化炭素濃度、二酸化炭素収着量及び温度の推移

図-2に示したとおり、投薬装置、ガス循環装置、安全弁付きのサイロ2基にガス濃度測定パイプ、供試虫のコ

表-2 主要殺類害虫の二酸化炭素くん蒸殺虫効果

害虫の種類	二酸化炭素濃度	態	20°C		25°C		30°C
			14日	21日	10日	14日	10日
コクゾウムシ	40~80%	卵, 成虫	○	—	○	—	○
		幼虫	○	○	×	○	○
		蛹	×	○	×	○	○
ココクゾウムシ	40~80%	卵, 成虫	○	—	○	—	○
		幼虫	—	○	—	○	—
		蛹	×	○	×	○	—
ヒラタコクヌストモドキ	50~100%	卵, 成虫	○	○	○	○	○
		幼虫	○	○	○	○	○
		蛹	○	○	○	○	○
タバコシバンムシ	40~60%	全態	○	—	○	—	—
ジンサンシバンムシ	50%	卵, 成虫	○	—	○	—	—
		幼虫	○	—	○	—	—
スジマダグラメイガ	50~100%	全態	○	—	○	—	—
スジコナマダグラメイガ	50~100%	全態	○	—	○	—	—
ノシメマダグラメイガ	40~100%	全態	○	—	○	—	—

○: 完全殺虫, ×: 不完全殺虫

クゾウムシ蛹、温度測定センサーなどを配置し、これにアメリカ産小麦を収容（内容積1,886 m<sup>3</sup>サイロに1,422 t：収容比0.75 t/m<sup>3</sup>及び2,698 m<sup>3</sup>サイロに2,100 t：

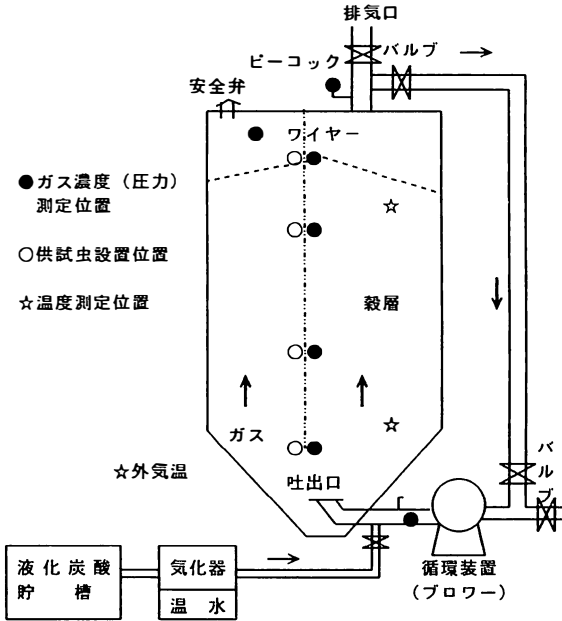


図-2 サイロにおける二酸化炭素くん蒸実用化試験概要図

収容比0.78 t/m<sup>3</sup>) してくん蒸した。投葉は、液化炭酸を大型の気化器を通してサイロ下部から空気と置換しながら穀層上部まで5~6時間かけて注入した（投葉量は1,886 m<sup>3</sup>サイロでは1.4 t；内容積の37%相当量及び2,698 m<sup>3</sup>サイロでは1.8 t；内容積の34%相当量）。次いで、循環系統に切り換えてガスを均一化し、14日間くん蒸した。

2,698 m<sup>3</sup>のサイロでくん蒸した場合のサイロ内圧力、二酸化炭素濃度及び二酸化炭素収着量の推移を示す図-3のとおりである。ガス濃度は、ガス循環終了後の濃度が約80%であったが、その後は穀層へのガスの収着により濃度が低下し、7日後には72~52%、14日後には64~52%になった。くん蒸中のガス損失率は投葉量の28%であった。穀層表面の濃度は穀層下部よりも低く推移しているが、これは、ガスの収着に伴ってサイロ内が減圧状態になり、安全弁を通して外気が流入して希釈されたことによるものである。サイロ内の圧力は、投葉及び循環が終了した時点で+180 mmAqとなり、圧力が最大になったが、数時間後には収着により圧力は下がりはじめ、負圧になった。穀物へのガスの収着は投葉と同時に始まり、2~3日間は急激に進み、以後は緩慢になる。収着が進んでいる間はサイロ内が減圧状態になるので、減圧による施設の破壊防止対策として、安全弁の設備が

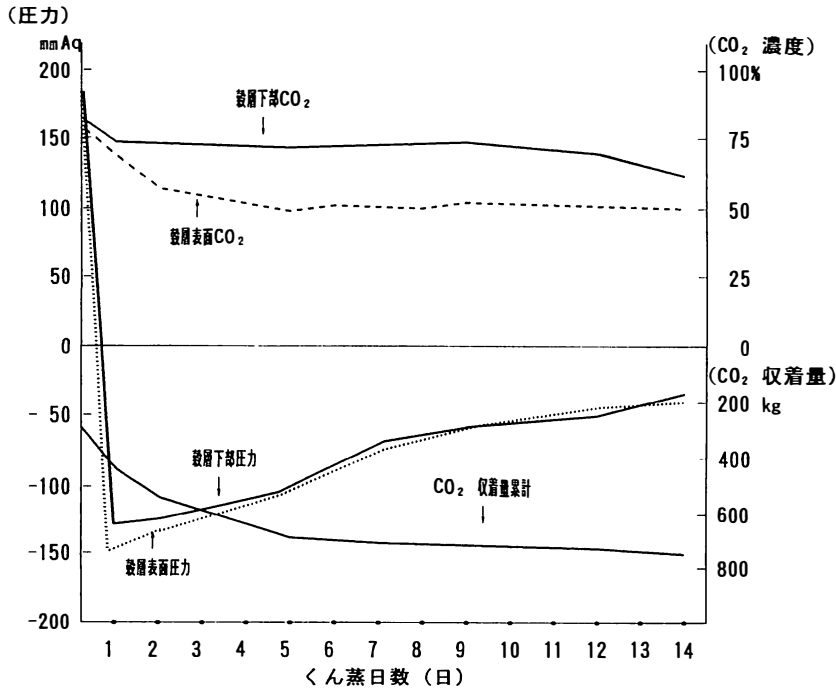


図-3 実用化試験におけるサイロ内圧力(圧力安全弁は-150 mmAqで作動)、二酸化炭素濃度及び二酸化炭素収着量の推移

不可欠である。くん蒸中の温度については、投葉終了時の温度が1,886 m<sup>3</sup>サイロでは25°C及び2,698 m<sup>3</sup>サイロでは33°Cであったが、14日間のくん蒸中に外気温との差が20°Cを超えることがしばしば認められたにもかかわらず、穀層温度は外気温の影響をまったく受けることなく、同じ温度で14日間推移した。

### 3 殺虫効果の確認及び穀類の品質

二酸化炭素くん蒸に最も耐性のクゾウムシの蛹を穀層上、中、下部及び穀層表面に合計約600~1,200頭を配置して殺虫効果を調査した結果、2,698 m<sup>3</sup>サイロ（濃度80~52%、33°Cでくん蒸し、7日目に取り出して殺虫効果を確認）及び1,886 m<sup>3</sup>サイロ（濃

表-3 植物検疫における穀類の二酸化炭素くん蒸消毒基準

対象害虫	くん蒸基準	摘要
袋詰めされた米, 麦, トウモロコシ, キビ, モロコシ等 (粉状及びかさ状のものを除く) に付着する有害動物 (グラナリアコクゾウムシ, ヒメアカカツオブシムシ及びコクジツセンチュウを除く)	薬量: 二酸化炭素濃度 40~80% くん蒸時間及び温度: 21日 (20~25°C) 14日 (25~30°C) 10日 (30°C以上)	1. 倉庫においてくん蒸する場合は, 倉庫内のガス濃度を均一にするよう考慮すること。 2. サイロにおいてくん蒸する場合は, ばら積みされた植物の内部にガスが浸透するよう一定時間ガスを循環させること。
袋詰めされた米, 麦, トウモロコシ, キビ, モロコシ等 (粉状及びかさ状のものを除く) に付着する有害動物 (グラナリアコクゾウムシ, コクゾウムシ, ココクゾウムシ, ヒメアカカツオブシ及びコクジツセンチュウを除く)	薬量: 二酸化炭素濃度 50%以上 くん蒸時間及び温度: 14日 (20~25°C) 10日 (25°C以上)	3. 85%以上のガス保有力を有する倉庫又はサイロを使用すること。

度 74~59%, 25°C でくん蒸し, 14 日目に取り出して殺虫効果を確認) 内に配置した供試虫は, それぞれ完全殺虫された。

実用化試験時にくん蒸された小麦及び米の品質については, 小麦では原麦, 製粉及びテストミル 60% の段階を含めて 21 項目, 米では玄米及び精米段階を含めて 14 項目について調査した結果, 両品目ともに各項目において, 未くん蒸物との間には特に差が認められなかった。その他の品目については文献で調査したところ, くん蒸によって障害が発生するとの報告はなく, 逆に, 品質の維持を図るうえで好ましい旨の記載があることが確認された。

### III 検疫処理法への導入

ヒメアカカツオブシムシ, コクジツセンチュウ及びグラナリアコクゾウムシを除く穀類害虫を二酸化炭素くん蒸で殺虫する場合, その感受性の差から, 表-3 のとおり二通りの消毒基準が作成された。すなわち, 一つはコクゾウムシ及びココクゾウムシまたはこれらを含むすべての害虫を対象に濃度 40~80% の範囲で, 二つはコクゾウムシ及びココクゾウムシを除くすべての害虫を対象に濃度 50~100% の範囲でコクゾウムシ及びココクゾウムシよりも短い日数で殺虫する基準である。

検疫現場への適用については, ①最初に濃度 100~80% 投薬すれば, 穀物への取着量を考慮しても, くん蒸期間中に再循環や追加投薬を行うことなくくん蒸が可能である。また, 投薬量は従来の 1m<sup>3</sup> 当たり何 g の表示と異なり, ガス濃度で規定されているため, 仮にガス濃度が維持できなくなった場合は追加投薬により対応でき, さらに, 殺虫効果を確認するための“テスター虫”も不要であること, ②くん蒸中の穀温は変化しないので, ガ

ス循環後の温度を基準に処理日数を決定できる。また, 気化器の温度を調節することによってくん蒸温度を調節できること, ③収着による減圧対策として安全弁のほか, 循環装置が必要であるが, これらは既存の検疫くん蒸指定サイロにはすべて設備されている。また, 倉庫では, 既に検疫処理法として導入されている「三種混合ガス (臭化メチル, 燐化水素及び二酸化炭素) による輸入切り花のくん蒸」(本誌第 49 巻第 10 号参照) で使用される倉庫 (特 A 級, 循環・かくはん装置, 安全弁, 上部排気口, 堅ろうなドア, 投薬, 排気装置付き) がそのまま使用できることなど, 既存のくん蒸指定施設及び二酸化炭素の理化学的特性を最大限生かし, より柔軟に消毒が実施できるよう配慮されている。

### おわりに

現在, 輸入検疫においてコクゾウムシやココクゾウムシが発見された場合, 燐化アルミニウムは蛹の殺虫に難点があるため使用できず, 臭化メチルを選択せざるを得ない状況にある。

二酸化炭素は昆虫に対する毒性が低いため, 高濃度で長時間のくん蒸を必要とするが, 一方では, 発火性や引火性がない, 浸透性が強い, 被くん蒸物への残留毒性がない, 被くん蒸物の品質の保持効果が高いなどの長所を持ち合わせている。二酸化炭素くん蒸は, 倉庫やサイロに一定期間保管が可能な米, 小麦, トウモロコシなどには適した消毒方法であると思われる。

今後, 二酸化炭素単独くん蒸の欠点を改善するため, 他のくん蒸剤との併用により, 投薬量の大幅な減少及び処理期間の大幅な短縮を図ることが課題である。