

# 高压炭酸ガスを用いたクリシギゾウムシ殺虫技術

食品総合研究所 <sup>みやのした</sup>宮ノ下 <sup>あきひろ</sup>明大・<sup>いまむら</sup>今村 <sup>たろう</sup>太郎

## はじめに

販売されているクリの多くは、収穫後に臭化メチル ( $\text{CH}_3\text{Br}$ ) というくん蒸剤で殺虫処理が行われている。この処理を行わなければ、クリ果実からクリシギゾウムシ *Curculio sikkimensis* (HELLER) の終齢幼虫が円形の穴を開けて脱出するため、クリは商品価値を失ってしまう (図-1)。

臭化メチルは地球のオゾン層を破壊するおそれがあることから、モントリオール議定書締約国会合によって、その生産が段階的に制限され先進国では2005年に生産中止になった (途上国では2015年の予定)。現在、日本では植物検疫用あるいは国際的に不可欠用途申請を行い許可された量のみが使用されている。

特にクリシギゾウムシ防除の場合は、臭化メチル以外に有効な殺虫技術がないため、日本は不可欠用途申請を行い2008年はクリ用として6.3トン (09年は5.8トン) の使用が許可された。クリシギゾウムシに対する臭化メチルの不可欠用途申請をした国は、日本とフランスの2箇国であり、最近フランスは臭化メチルの全廃を宣言した。現在使用しているのは日本だけで、今後も継続して使用が許可されることは難しくなると予想される。このような背景を受けて、クリシギゾウムシに対する臭化メチル代替殺虫技術の開発は急務となっている。

食品総合研究所・食品安全研究領域・食品害虫ユニットでは高压炭酸ガスを用いたクリシギゾウムシ殺虫技術を開発した。高压炭酸ガスを用いた殺虫技術は、貯蔵食品害虫に対して開発された方法であったが (NAKAKITA and KAWASHIMA, 1994; SHAZALI et al., 2004), 今回クリシギゾウムシの殺虫に適用する条件を検討した。その成果を基にして、2007年7月に高压炭酸ガスは日本液炭 (株) により、クリに対して農薬登録された。

## I クリシギゾウムシ *Curculio sikkimensis*

クリシギゾウムシは、成虫が象の鼻のように長い口吻をもつゾウムシの仲間に属する甲虫である。成虫の体長

は約9mm (口吻を除く)、口吻の長さは雌成虫で約8mmに達する。日本 (本州・四国・九州)、中国、インド等に分布し、雌成虫は9月下旬から10月上旬にかけてクリのきゅう果に口吻で穴をあけて産卵する。ふ化した幼虫はクリの果実内を食害し、1~2か月後、成長した終齢幼虫 (体長: 約20mm) はクリ果実に穴をあけて外へ脱出する。脱出した幼虫は、土中に潜り越冬し、翌年5月ごろ蛹になり7月下旬から8月下旬にかけて成虫が地上に出現する。年1世代を経過するものと、蛹態でさらに数年経過するものがある。

## II 炭酸ガスの安全性

農薬を用いて食品害虫を防除する際には、食品に対する残留性、ヒトへの健康被害、地球環境に与える影響が配慮された安全性の高いものが望まれている。炭酸ガス ( $\text{CO}_2$ ) は、通常、我々が呼吸の過程で呼気として排出し、ビールや炭酸飲料からも体内に取り込んでおり、安全性の高いガスである。高濃度の炭酸ガスはヒトにも害を与えるが、その毒性はくん蒸剤として使われてきた臭化メチルやリン化水素 ( $\text{PH}_3$ ) と比較すると極めて低い。

## III 高压炭酸ガスの殺虫メカニズム

高压炭酸ガス殺虫法は、炭酸ガスを高圧力で昆虫体内に注入することにより、短時間で高い殺虫効果が得られる方法である。昆虫に対して低濃度の炭酸ガスは麻酔作用があり、濃度が35%以上になると致死作用を示す。

高压炭酸ガスの殺虫メカニズムは十分に解明されていないが、次の4点が考えられる。①炭酸ガスが神経軸索に作用して、神経伝達に重要な役割を果たすNa/Kイオ

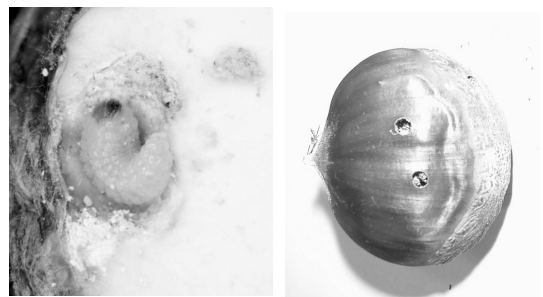


図-1 クリシギゾウムシの幼虫 (左) とクリ被害 (右)

Control of the Chestnut Weevil Using Carbon Dioxide under High Pressure. By Akihiro MIYANOSHITA and Taro IMAMURA

(キーワード: クリ, 高压炭酸ガス, 殺虫技術, クリシギゾウムシ, 臭化メチル代替, 農薬登録)

ンのバランスを崩す。②昆虫の体液を酸性化し、各種の酵素作用を阻害する。③昆虫が酸素を取り入れる気門という孔を開閉する筋肉に作用し、気門を開放状態にして体内水分を奪う。④炭酸ガスを高圧で昆虫体内へ注入することにより、昆虫の体液に溶け込むガス量が増加し、常圧よりも短時間で殺虫される。これらの効果が複合的に作用して昆虫が死亡すると考えられている。

また、圧力の放出条件として、高圧の状態から緩やかに減圧する「加圧法」と瞬時に減圧する「加圧爆砕法」の2種類がある。加圧爆砕法の場合、瞬時に高圧から大気圧に戻すことで急激な圧力差が生じ、昆虫体内に溶解していた炭酸ガスが瞬時に沸騰、膨張して内臓器官が爆砕し体外に飛び出すため死亡する(図-2)。この方法では炭酸ガス自体の効果と爆砕の物理的效果の両方で殺虫効果が上がると思われる。爆砕は体の硬い甲虫類の成虫に対してよく観察される現象であるが、体の柔らかいガ類の幼虫や成虫では顕著ではない。

#### IV 高圧炭酸ガスを用いた貯蔵食品害虫の防除

高圧炭酸ガスを用いた害虫防除は主に貯蔵食品害虫を対象に研究されてきた。これまで甲虫目7種・チョウ目2種に対する高圧炭酸ガス処理の条件(温度、圧力、処理時間、減圧時間)と致死効果が報告されている(NAKAKITA et al., 2001; 宮ノ下・今村, 2006)。この技術は、5分から120分の極めて短時間で多種の害虫を完全殺虫できることがわかる。その効果は卵の時期が最も耐性が強く、卵を十分に殺すことのできる条件は、殺虫効果を高めるうえで重要であり、昆虫種ごとに検討が必要になる。



図-2 高圧炭酸ガス処理(加圧爆砕法)で殺虫したコクゾウムシの成虫

#### V 高圧炭酸ガス処理装置とクリシギゾウムシ殺虫手順

高圧炭酸ガス処理装置は、耐圧容器が必要であるが、装置の構造は比較的簡単である。主要なものは「液化炭酸ガスボンベ」と「耐圧容器」とそれらをつなぐ配管器具である。食品害虫ユニットでは、小型処理装置(図-3)と大型処理装置(図-4)を試作してクリシギゾウムシの殺虫条件を検討した。

図-5に大型処理装置によるクリシギゾウムシ殺虫の手順を示す。まず、①耐圧容器にクリを搬入し、圧力漏れがないように密閉する。②液化炭酸ガスボンベから炭酸ガスと圧力を耐圧容器に充てんする。③一定の時間放置し殺虫する。④炭酸ガスと圧力を放出する。⑤圧力が低下したらクリを搬出する。作業時間は、ガスと圧力の注入に10分、加圧処理30分、圧力とガスの放出に10分である(図-6、点線)。1回の処理が約1時間であることから、臭化メチルによる2~3時間のくん蒸処理に比べると短時間で殺虫できる。ただし、クリ果実を処理する場合はガスと圧力を瞬時に放出すると割れてしま



耐圧容器

クリ果実を入れる

図-3 小型高圧炭酸ガス処理装置

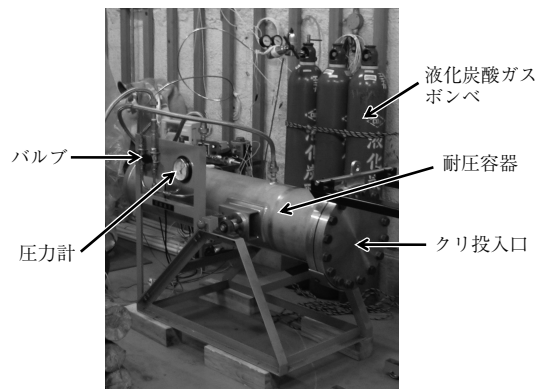


図-4 大型高圧炭酸ガス処理装置(外径40cm・長さ155cm)  
処理量:クリ70kg/回。

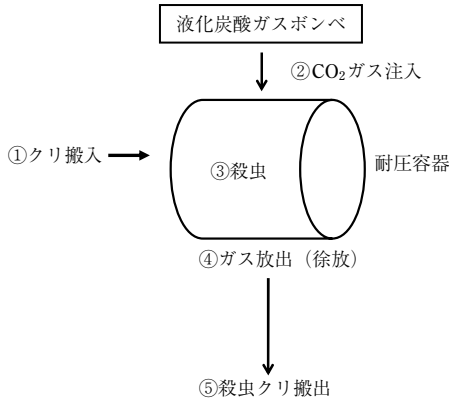


図-5 クリシギゾウムシ殺虫処理手順

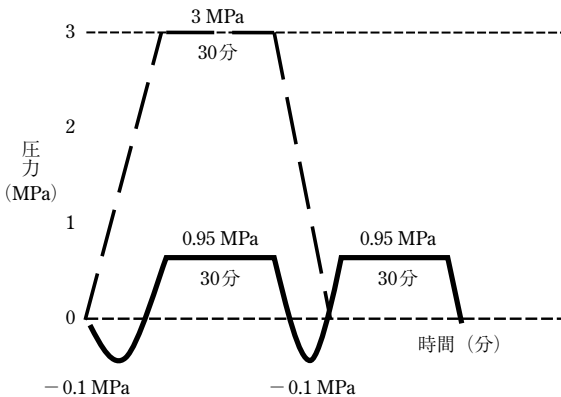


図-6 高圧炭酸ガス殺虫の処理条件模式図  
 点線：3 MPa・30分処理1回。太線：-0.1 MPa・0.95 MPa・30分処理2回繰り返す。

うため、2分以上かけて放出する必要がある。

### VI 高圧炭酸ガスによるクリシギゾウムシの殺虫効果

前章に述べたような小型処理装置を使い、終齢幼虫(クリから脱出してきた個体)に対して、温度25℃、圧力1, 2, 2.5 MPaのそれぞれで処理時間5, 10, 30分の条件により加圧処理したときの死亡率を調べた。その結果、1, 2 MPaの条件では殺虫効果が十分ではなく、完全殺虫には2.5 MPaで10分以上の処理が必要であった(未発表)。実際にはクリ果実内の幼虫に対して効果がなくてはならないので、臭化メチルでくん蒸処理をしていないクリ(品種：筑波)10 kgを用いて大型処理装置で殺虫試験を行った。その結果、圧力3 MPa(約30 kg/cm<sup>2</sup>)、処理時間30分で完全殺虫された(表-1)

表-1 高圧炭酸ガスで処理したクリから出現したクリシギゾウムシ幼虫の平均個体数

圧力 (MPa)	処理時間 (分)	幼虫の平均個体数
2.5	10	4
	30	0
	30	0
3	10	1.33
	30	0
	30	0
無処理	0	262.6

各処理はクリ10 kgで行い、3回繰り返した。

(宮ノ下・今村, 2006)。

### VII 農薬登録の経緯

クリシギゾウムシ殺虫のための臭化メチル代替技術として、高圧炭酸ガス処理が有効であることは示されたが、この技術を現場で実用化するためには農薬登録が必要である。そこで、農薬登録に必要なデータをそろえる実験をこの5年ほど地道に行ってきた。炭酸ガスは米、麦、トウモロコシ等の穀物に対するくん蒸剤として登録済であり、安全性に関する評価は既に問題がなかった。しかしクリシギゾウムシに対する安定した殺虫効果を示す必要があった。数年にわたり、複数地域から採集されたクリを用いて、年や地域によって殺虫効果に違いがないこと示した。また、クリは東北地方でも生産されているので、低温で処理しても効果があることを示すために、10℃の低温倉庫内での殺虫試験も行った(表-2)。2006年にこれらのデータをそろえることができ、申請書を提出した。2007年7月4日付けで、高圧炭酸ガスはクリシギゾウムシ殺虫のためのくん蒸剤として農薬登録された(登録番号：第18194号・農薬名：エキカ炭酸ガス)。本くん蒸剤の農薬登録適用表を表-3に示す。

クリシギゾウムシ殺虫技術としては、くん蒸剤「ヨウ化メチル」(CH<sub>3</sub>I)が有力で、その農薬登録は間近と言われていたが、今回の高圧炭酸ガスの登録はヨウ化メチルより迅速に行われた。現時点(2009年2月)で、臭化メチル代替殺虫技術として、クリシギゾウムシ殺虫に使える唯一のくん蒸剤となった。

### VIII 高圧炭酸ガスのクリ品質への影響

高圧炭酸ガス処理がクリ果実の品質に与える影響を調べるために、処理グリ(3 MPa・30分)と未処理グリを用いて食味試験を行った。ゆでグリ断面の目視調査では明瞭な差は見られなかったが、貯蔵時間が長くなるにつれて処理グリの評価が低下した(未発表)。今後検討が必要だが、3 MPa処理グリは長期貯蔵には不適と考

表-2 10℃と25℃でのクリシギゾウムシ殺虫率

処理条件		殺虫率 (%)	
圧力 (MPa)	処理時間 (分)	10℃	25℃
2.5	10	87.1	98.5
2.5	30	99.2	100
3	10	97.3	99.5
3	30	99.7	100

処理量：クリ果実 8 kg (茨城・宮崎・熊本産を含む)，実験繰り返し 3 回以上。

表-3 高圧炭酸ガスの農薬登録適用表

登録番号	第 18194 号
農薬の種類	二酸化炭素くん蒸剤
農薬の名称	エキカ炭酸ガス
製剤毒性	普
適用作物名	クリ
適用場所	気密性耐圧容器
適用病害虫名	クリシギゾウムシ
使用量	くん蒸中ガス圧力 2.5 ~ 3 MPa を維持するに必要な量
くん蒸時間	10 ~ 30 分
くん蒸温度	10 ~ 25℃
本剤の使用回数	1 回
使用方法	気化器を用いて所定量投入する

えられる。また、果実にダメージを与える可能性があり、処理圧力には検討が必要である。

## IX 高圧炭酸ガス殺虫法の改善

### 1 高圧炭酸ガス殺虫法の課題

高圧炭酸ガスのクリに対する農薬登録は、本技術の実用化に向けて大きな一歩であるが、まだ多くの課題を抱えている。

3 MPa を用いたクリシギゾウムシの殺虫には、くん蒸処理に比べて以下のような短所がある。①圧力耐性の基準を満たした容器が必要である。②装置製作に伴う高価な費用と炭酸ガスのランニングコストがかかる。③高圧ガス保安法により、1 MPa 以上の高圧処理の取り扱いには、都道府県知事への届出と管理責任者の設置が必要である。④クリ果実の品質に高圧によるダメージがある。

### 2 減圧と 0.95 MPa の加圧を繰り返す殺虫法

これら上記の課題の解決のためには、1 MPa 以下の圧力条件で十分な殺虫効果が期待できる手法の開発が望まれる。1 MPa 以下であれば、耐圧容器製作のコストも下がり、装置の設置や管理にも法的な許可が不要である。また、クリ果実の品質への影響を低減できる可能性

表-4 減圧と加圧を繰り返した処理によるクリシギゾウムシ殺虫率

処理条件				殺虫率 (%)
減圧 (MPa)	加圧 (MPa)	時間 (分)	繰り返し数	
—	0.95	30	1	0
—	0.95	30	2	10.6
- 0.1	0.95	30	1	89.4
- 0.1	0.95	30	2	96

各処理はクリ 8 kg で行い、3 回繰り返した。

がある。

そこで、減圧と加圧を繰り返して処理する殺虫法を開発した。具体的には、クリを装置に導入し、- 0.1 MPa まで減圧し、その後 0.95 MPa まで加圧・30 分処理する。この過程を 2 回繰り返す方法である (図-6、太線)。本方法は、加圧は 1 MPa 以下だが、減圧と加圧を 2 回繰り返すことで 3 MPa と同様の効果を期待したものである。

実験の結果、減圧なしで加圧するとその繰り返し数に関わりなく殺虫効果は低かったが、減圧すると、処理を繰り返すことで 96% の高い殺虫効果を得ることができた (表-4) (未発表)。

減圧 - 0.1 MPa ・加圧 0.95 MPa ・処理 30 分を 2 回繰り返す処理を、3 MPa ・30 分処理と比べた際の長所と短所を記す。長所は、耐圧容器製造の費用と炭酸ガスの使用量の削減になり、高圧ガス保安法の適用を受けないこと、そしてクリ果実の品質に影響を与えず、長期保管も可能なこと (未発表) である。短所は、2 回繰り返すため加圧時間が 30 分長く 60 分となり、設備として減圧ポンプが必要になることである。導入費用を比較すると、減圧と加圧を繰り返す処理の方が安価になると思われる。

今後、クリシギゾウムシの殺虫効果とクリ果実の品質への影響を考えながら、最適な殺虫条件の検討が必要であろう。

## X 実用化に向けて

### 1 炭酸ガスの地球温暖化への影響

炭酸ガスは地球温暖化の原因となるため、その排出量の削減が問題となっている。本技術で使用する炭酸ガスは石油精製過程での副産物をトラップして利用するため、その排出量の増加には負担しない。また、殺虫に使用した炭酸ガスを回収し、再利用するシステムを導入することで環境への影響を低減できる。



## 2 海外での導入事例

海外に目を移すと、高圧炭酸ガスによる大規模な殺虫装置（直径2m、長さ約20mの円筒形耐圧容器）が実用化され、ドイツでは薬用茶（ハーブティー）の殺虫に使われている。その処理条件は2MPaで2時間である（平野・中北，1995）。また、フランスでもペットフードやスパイスの害虫防除に使用されている。このように装置導入コストが高くと、付加価値の高い加工食品では実用化されている。

## 3 有機JAS認証可能なクリの生産

高圧炭酸ガス処理は、短時間で十分な殺虫効果を期待でき、残留性がなく人間に対しても安全性が高いことは大きな利点である。クリの生産にこの技術を導入するためには、クリの付加価値を高めることが望ましい。例えば、炭酸ガスは残留性がないので、農薬のポジティブリスト制度の対象外物質であり、有機JAS認証制度においても使用が認められている。高圧炭酸ガス処理したクリを用いた加工品は、有機JASの認証を受けることが可能と思われる。「安全性の高いクリの生産」は、クリの付加価値を高める一つの方法ではないだろうか。

## おわりに

臭化メチルに代わるクリシギゾウムシの殺虫技術としては、現在農業登録を申請中のくん蒸剤である「ヨウ化メチル」が有力である（2009年2月現在未登録）。農林水産省は、ヨウ化メチル登録の後、3年の移行期間を経てクリ生産者への普及を予定している。従来の臭化メチルくん蒸の施設がそのまま使用できることが普及の大き

な利点である。しかし、ヨウ化メチルの沸点は約43℃で常温では液体であるため、速やかに気化させるためには湯煎を必要とすることから、簡易なくん蒸技術の開発が望まれる（大竹ら，2006）。特に寒冷地では、最適なくん蒸方法の検討が必要になるだろう。

クリシギゾウムシの殺虫法が、臭化メチルからヨウ化メチルの使用へ移行することで、その他の殺虫技術開発が滞ってしまう可能性が高い。食の安全を考えると、殺虫技術には多様な選択肢がある状態が望ましいのではないだろうか。現在、くん蒸剤を用いないクリシギゾウムシ殺虫技術としては、高圧炭酸ガス、温湯浸漬、低温貯蔵等が開発され、十分に殺虫効果が認められている。これらの方法は環境に優しく、人体への安全性が高いことが特徴であり、それぞれの長所を生かして現場に導入されていくことを期待している。

**謝辞** 高圧炭酸ガスの殺虫試験および農業登録に当たり、液化炭酸株式会社（現 日本液炭(株)）、横浜植物防疫所、株式会社ツムラの方々に多くのご協力をいただいた。ここに感謝の意を申し上げたい。

## 引用文献

- 1) 平野耕治・中北 宏 (1995): 植物防疫 49: 24 ~ 28.
- 2) 宮ノ下明大・今村太郎 (2006): 食糧 44: 59 ~ 72.
- 3) NAKAKITA, H. and K. KAWASHIMA (1994): Proc. 6<sup>th</sup> Int. Work. Conf. Stored-product Protection, Australia, p. 126 ~ 129.
- 4) ——— et al. (2001): Proc. Int. Conf. Controlled Atmosphere and Fumigation in Stored Products, USA, p. 421 ~ 430.
- 5) 大竹恵乃ら (2006): 茨城県農業総合センター園芸研究所研究報告 14: 53 ~ 58.
- 6) SHAZALI, M. E. H. et al. (2004): Appl. Entomol. Zool. 39: 49 ~ 53.

(新しく登録された農薬23ページからの続き)

### 「除草剤」

●オキサジクロメホン・クロメプロップ・シメトリン・ベン  
スルフロンメチル粒剤

22351: ホクコーキメワザ1キログラム粒剤51 (北興化学工業)  
09/03/04

22352: キメワザ1キログラム粒剤51 (デュボン) 09/03/04

オキサジクロメホン: 0.80%, クロメプロップ: 3.5%, シメ  
トリン: 1.5%, ベンスルフロンメチル: 0.51%

移植水稻: 水田一年生雑草, マツバイ, ホタルイ, ウリカワ,  
ミズガヤツリ, ヒルムシロ, セリ, アオミドロ・藻類による  
表層はく離

●シメトリン・ピリミノバックメチル・ベンフレセート・  
MCPB粒剤

22353: クミメートSM1キログラム粒剤 (クミアイ化学工業)  
09/03/04

シメトリン: 4.5%, ピリミノバックメチル: 1.0%, ベンフ

レセート: 6.0%, MCPB: 2.4%

移植水稻: 水田一年生雑草, マツバイ, ホタルイ, ウリカワ,  
ミズガヤツリ (北海道を除く), ヘラオモダカ (北海道,  
東北, 九州), ヒルムシロ, アオミドロ・藻類による表層  
はく離 (九州を除く)

●フェントラザミド・ベンゾビシクロン・ベンゾフェナップ  
粒剤

22354: バイエルスマート1キログラム粒剤 (バイエルクロップサイ  
エンス) 09/03/04

フェントラザミド: 2.0%, ベンゾビシクロン: 2.0%, ベン  
ゾフェナップ: 8.0%

移植水稻: 水田一年生雑草, マツバイ, ホタルイ, ウリカワ,  
ミズガヤツリ, ヘラオモダカ, ヒルムシロ

●ピラゾスルフロンエチル水和剤

22358: アグリーン顆粒水和剤 (日産化学工業) 09/03/18

ピラゾスルフロンエチル: 70.0%

日本芝: 一年生及び多年生広葉雑草