

高圧炭酸ガスによる貯蔵食品害虫の新駆除法

筑波大学生物科学系

平

の

耕

じ

農林水産省食品総合研究所貯蔵害虫研究室

中

北

宏

は じ め に

I 実用化に至る経緯

貯蔵食品害虫の化学的防除法として、臭化メチルやホスフィンによるくん蒸が各国で広く用いられているが、最近、前者は地球のオゾン層を破壊することが明らかになり (SINGH et al., 1988; 楯谷, 1993)、後者は害虫の抵抗性の発達が問題となっている。(中北, 1993)。1980 年代に入り残留性や環境破壊の問題を解決する防除法として、常圧の炭酸ガスを貯蔵室に送入し、炭酸ガスの濃度を高くすることによって、害虫の生息できない環境を作る方法 (以下、CA 法と略す) が世界的に関心をもたれるようになった。わが国では 1990 年に、炭酸ガスは貯蔵害虫の殺虫剤として登録された。しかし、CA 法は炭酸ガス濃度 60~90% の条件下で通常 7~10 日間の処理が必要であり、従来のくん蒸剤による化学的防除法の 1~4 日間の処理に比べて、かなり長い処理日数を必要とする (ANNIS, 1987; 中北, 1993)。そのため CA 法は、迅速な処理が要求される農産物の検疫や食品加工場では適用が難しい状況にある (NAKAKITA and KAWASHIMA, 1994)。これらの諸問題を解決するものとして、近年、ドイツ、フランスで高圧炭酸ガスを用いて貯蔵食品害虫を短時間で駆除する方法が開発され、一部の食品加工場で既に用いられている。

このたび、高圧炭酸ガスによる駆除法を研究しているフランスの国立農業研究所貯蔵食品害虫研究室の Francis FLEURAT-LESSARD 博士とドイツの連邦農林生物学研究センター貯蔵食品保護研究所の Christoph REICHMUTH 博士を訪問する機会を得た。また、ドイツでは高圧炭酸ガス送入式貯蔵食品害虫駆除法を開発し、本駆除法を使用している薬用植物 (ハーブ) の加工会社の施設を見学できた。現地で得られた知見を基に、本稿では、高圧炭酸ガス送入式貯蔵食品害虫駆除法の実用化に至る経緯、実用例、これまでの研究成果、今後の課題と発展性について述べる。

光榮ら (1973) は、炭酸ガスを送入して 16 bar (=16 × 10⁵ Pa) の高圧にした圧力釜の中で、製粉食品を加害するケナガコナダニを 30 分で駆除できることを示した。これは、高圧炭酸ガスを用いた駆除法としては世界で初めての研究であったが、当時は貯蔵食品害虫の駆除法として注目されるに至らなかった。1985 年にドイツの Saarbrücken 大学の STAHL 教授らは、高圧炭酸ガスを用いることによって、収穫した薬用植物から害虫を短時間で駆除できることを示した (STAHL et al., 1985; STAHL and RAU, 1985)。この研究が契機となり、現在ドイツでは 10 数名の研究者が高圧炭酸ガスを用いた貯蔵食品害虫駆除法 (以下、高圧炭酸ガス駆除法と略す) の研究に取り組み、その成果を発表している (GERARD et al., 1988, 1990; POHLEN et al., 1989; REICHMUTH, 1990, 1991, 1993; FINKENZELLER, 1991; PROZELL and REICHMUTH, 1991; RAU, 1993, REICHMUTH and WOHLGEMUTH, 1994)。ドイツでの高圧炭酸ガス駆除法の成果に刺激され、フランスでは FLEURAT-LESSARD 博士らがこの駆除法について研究を行っている (Le TORCH and FLEURAT-LESSARD, 1991)。ドイツで高圧炭酸ガス駆除法の研究が注目された時期に、日本では中北らが独自に同様な研究を進めていた (中北・川嶋, 1992; NAKAKITA and KAWASHIMA, 1994)。

STAHL 教授らの研究に注目したドイツの Martin Bauer 社は、自社の薬用茶の原料を加害する害虫駆除の目的で、STAHL 教授らの協力を得て 1986 年に高圧炭酸ガス駆除装置の開発のための基礎研究に参加した。本装置の製造は 1987 年に始まり、1988 年に第一作目が完成した。なお、本装置の圧力釜の製造に直接かかわったのは Kohlensäure-Werke Rud. Buse 社で、炭酸ガス制御装置の製造を担当したのはフランスの S.I.A.C. 社であった。Martin Bauer 社は、この高圧炭酸ガス駆除装置が害虫駆除に効果をもち、ハーブの品質には影響しないことを確認した後、ハーブの害虫駆除に本装置を用い、現在に至っている。

1980 年代後期にはドイツ、フランスで高圧炭酸ガス駆除法が注目されるにつれ、前述の会社以外に数社が本装

置の圧力釜を現在製造している。

現在のところ、高圧炭酸ガス駆除法は、装置の製造費と駆除に要する費用が従来の駆除法に比べてかなり高いため（後述）、ドイツ、フランスではハーブ、ペットフード、スパイスなど付加価値の高い食品に適用範囲が限られている。

なお、これまでの研究では高圧炭酸ガス駆除法は糸状菌や細菌に対しては効果が期待できないと報告されている（KUHN and KNORR, 1990；FLEURAT-LESSARD, 私信；Martin Bauer 社, 私信）。

II 実 用 例

高圧炭酸ガス駆除法を実用化している例として、Martin Bauer 社を取り上げる。この会社は、ハーブを買い取り、調製・精製して、国内外へ販売している。精製したハーブの販売会社としては、世界有数の会社の一つである。年間、約 10,000 t（乾燥重）のハーブを加工する。顧客の注文に迅速に対応できるように、あらゆる種類のハーブが倉庫に貯蔵してある。ハーブの貯蔵期間は、2 か月～2 年である。倉庫内の温度は、最高約 25°C である。

ハーブの害虫駆除は、63 m³ の容量の円筒形の高圧釜（直径約 2 m、長さ約 20 m）を備えた高圧炭酸ガス処理装置を用いて、室温（冬期は、15～20°C）で行っている（図-1）。高圧炭酸ガス（圧力 20 bar）による処理時間は 2 時間、加圧・減圧はそれぞれ 15 分、ハーブの搬入・搬出はそれぞれ 30 分である。搬入・搬出は電動の貨車を用いている。ペパーミント、バラの類、ハイビスカス、野菊

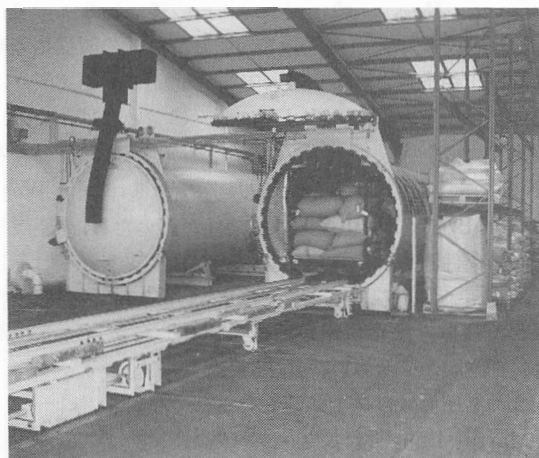


写真-1 高圧炭酸ガスによる害虫駆除処理を終えたハーブ入りの袋が、高圧釜から電動貨車によって搬出される場所。

の類のほか、多種類のハーブを本装置を用いて処理している。これまで、本装置を用いた害虫駆除で問題は生じていない。

本装置の製造費は、85～95%の二酸化炭素を再利用する装置の場合、約 2,300,000～3,000,000 ドイツマルク（約 1 億 5 千万～1 億 9 千 5 百万円）である。これは、高圧釜が 2 基、炭酸ガス回収タンクと液体二酸化炭素のタンクがそれぞれ 1 基で構成される。高圧釜使用 1 回当たりの運用コスト（維持管理費も含む）が約 2,500 ドイツマルク（約 16 万円）である。

III これまでの研究成果

1 高圧炭酸ガス処理が貯蔵食品害虫に与える影響

（1）発育ステージと炭酸ガスの圧力及び処理時間

ANNIS (1987) は CA 法の効果について、これまでに発表された文献に基づいて検討した。その結果、CA 法に対して耐性の強い発育ステージは種によって異なるが、蛹の時期に耐性が強い場合が多いと述べている。一方、高圧炭酸ガス処理の場合には、卵の時期に最も耐性が強いことがいくつかの種で報告されている（Le TORC'CH and FLEURAT-LESSARD, 1991；PROZELL and REICHMUTH, 1991；REICHMUTH and WOHLGEMUTH, 1994；NAKAKITA and KAWASHIMA, 1994）。

表 1, 2 は、これまでに報告された高圧炭酸ガス処理による貯蔵食品害虫の卵の死亡率を示す。高圧炭酸ガスを用いると数分から 3 時間程度のきわめて短時間で害虫を駆除できることがわかる。そして、同一温度条件下では炭酸ガスの圧力が高いほど、害虫の完全駆除に必要な処理時間は短くなった（表 1, 2）。

REICHMUTH and WOHLGEMUTH (1994) は、15 bar の圧力で炭酸ガス処理をノシメダグラメイガの卵に行い、死亡率が 100% になるまでの処理時間は、1 日齢未満の卵では 40 分、1 日齢以降の卵では 30 分であることを示した。このように、同一ステージでも、日齢によって高圧炭酸ガスに対する耐性が異なるので、それぞれの害虫種の完全駆除に要する処理時間を正確に知るためには、最も耐性の強い発育ステージの日齢別の耐性を今後調べる必要がある。

（2）炭酸ガス濃度

CA 法の場合、炭酸ガス濃度と殺虫効果との関係は、種あるいは発育ステージによって異なり、一般的な傾向はみられない（ANNIS, 1987）。高圧炭酸ガス処理では、炭酸ガス濃度が高い場合ほど死亡率が高いことがグラナリアコクゾウムシで報告されている（PROZELL and REICHMUTH, 1991）。高圧炭酸ガス処理の場合、炭酸ガスの送込時に他

表-1 高圧炭酸ガス処理条件と甲虫類の貯蔵食品害虫の卵死亡率

害虫名	温度条件 (°C)	圧力 (bar)	処理時間 (分)	死亡率 (%)
<i>Sitophilus zeamais</i> ^{a)} (コクゾウムシ)	25	30	5	100
<i>S. granarius</i> ^{b)} (グラナリアコクゾウムシ)	10	20	180	100
	20	20	120	100
	30	20	60	100
<i>Tribolium confusum</i> ^{c)} (ヒラタコクヌストモドキ)	10	37	10	100
	10	30	40	100
	10	20	120	100
<i>Stegobium panciceum</i> ^{c)} (ジンサンシバンムシ)	10	37	10	100
	10	30	15	100
	10	20	120	100
<i>Lasioderma serricorne</i> ^{c)} (タバコシバンムシ)	10	37	30	100
	10	30	50	100
	10	20	120	99.7

^{a)} NAKAKITA and KAWASHIMA(1994), ^{b)} PROZELL and REICHMUTH(1991), ^{c)} GERARD et al. (1988).

の気体 (例えば、酸素) と混合して炭酸ガスの濃度を変えた実験の事例が少なく、一般的結論を出すには至っていないが、本処理の二酸化炭素の昆虫に対する作用機作を考えると (後述)、炭酸ガス濃度が高いほど死亡率が高くなると思われる。

(3) 温度と湿度の影響

表-1 のグラナリアコクゾウムシ及び表-2 のケナガコナダニをみると、温度が高いほど高圧炭酸ガスによる処理時間を短くできた。一般に温度が低下すると、殺虫効果が減少する (REICHMUTH, 私信)。

これまで高圧炭酸ガス処理時の相対湿度に関する研究報告はないが、REICHMUTH博士及びFLEURAT-LESSARD博士は、相対湿度は処理の効果を左右する要因とは考えていない。

(4) 加圧・減圧速度の影響

加圧・減圧速度が、処理した害虫の死亡率に与える影響について研究した事例は少ない。REICHMUTH and WOHLGEMUTH (1994) は、ノシメダグラメイガの卵に高圧炭酸ガス (15~20 bar) 処理を行った。その際、加圧・減圧速度を1秒と1分以内で処理した卵の死亡率に差はなかった。

この問題について、FLEURAT-LESSARD博士は、害虫の死亡率に対する効果よりもむしろ、以下の点を留意すべきだと述べている。液体二酸化炭素を用いて急激に加圧すると、高圧釜内の温度が低下するので避けるべきであ

表-2 高圧炭酸ガス処理条件と蛾類とダニ類の貯蔵食品害虫の卵死亡率

害虫名	温度条件 (°C)	圧力 (bar)	処理時間 (分)	死亡率 (%)
蛾類				
<i>Plodia interpunctella</i> (ノシメダグラメイガ)	10 ^{a)}	37	5	100
	10 ^{a)}	30	20	100
	10 ^{a)}	20	30	100
	25 ^{b)}	15	40	100
<i>Ephestia kuehniella</i> ^{c)} (スジコナダグラメイガ)	室温	40	5	100
ダニ類				
<i>Acarus sirid</i> ^{a)} (アシフトコナダニ)	10	37	20	100
	10	30	40	100
	10	20	120	100
<i>Tyrophagus putrescentiae</i> ^{d)} (ケナガコナダニ)	20	16	55	100
	20	21	30	100
	20	26	15	100
	30	16	25	100
	30	21	10	100

^{a)} GERARD, et al. (1988), ^{b)} REICHMUTH and WOHLGEMUTH (1994), ^{c)} STAHL and RAU(1985), ^{d)} 光榮ら(1973)。

る。ゆっくり加圧したほうが処理する農作物や食品のためにも良いと思われる。一方、急激な減圧は、農作物や食品を包装している袋を破裂させる可能性がある。加圧・減圧速度は、最大でも1 bar/分がよい。なお、Martin Bauer 社での加圧・減圧速度は、約1.3 bar/分である。

(5) 致死の原因

CA 法の場合、二酸化炭素が昆虫の神経軸索部に溶存し、Na/K イオンのバランスの崩壊や液体の酸性化等複合的作用が推定されている (中北, 1993)。高圧炭酸ガス処理が昆虫を死亡させるメカニズムについては、十分に解明されていないが、次のように推定されている (NAKAKITA and KAWASHIMA, 1994; REICHMUTH and WOHLGEMUTH, 1994)。二酸化炭素は水溶性が高いため、高圧炭酸ガスの条件下では多量に昆虫の体内に吸収される。そして、高圧条件から減圧して常圧に戻す際に、体内に吸収された液体二酸化炭素が急速に気化して蒸散するために、細胞膜が破壊され、昆虫は死亡する。

2 高圧炭酸ガスで処理した食品の品質

Martin Bauer 社は、20 bar の高圧炭酸ガス処理をした様々な加工形態 (原形のまま、切り詰めたもの、細かく刻んだもの、粉状のもの) のハーブの品質を色、香り、味、構成成分などの項目について、Brunswick の連

邦生物学研究所と Nuremberg の Erlangen 大学の化学工学科に検査を依頼した。そして、本駆除法はハーブの品質に影響しないことを確認している（例えば、POHLEN et al., 1989）。

穀類の品質への影響に関しては、ハーブの場合のように広範囲にわたり厳密な検討は行われていない。以下に、これまでに得られた知見を記す。REICHMUTH 博士によると、米、豆の品質への影響は、20 bar の高圧炭酸ガス処理ではほとんど問題ない。しかし米粳の場合、30 bar 以上の圧力になると発芽率が低下する（CALIBOSO の未発表論文）。FLEURAT-LESSARD 博士によると、小麦の品質に影響はないが、含脂肪率の高いものでは品質が低下する可能性がある。

3 高圧炭酸ガス処理の農産物や食品のパッケージ様式

高圧炭酸ガス処理をする農産物や食品が袋詰めの場合、密封式でなく取り出し口が糸で縫ってあるものがよい。その理由は、縫目の隙間を通して空気の入出があるので、減圧中に袋が破裂する危険性が少ないためである（FLEURAT-LESSARD, 私信）。Martin Bauer 社によると袋が通気性のない材質（例えばプラスチック）でも、編んで作った袋であれば通気性は保証されるので問題はないということである。

4 他の高圧ガスの効果

光榮ら（1973）は、加圧した4種のガス、二酸化炭素、亜酸化窒素、窒素、水素のケナゴコナダニに対する殺ダニ効果を調べ、炭酸ガス（二酸化炭素）に比べ他の3種のガスの効果はかなり劣ることを示した。PROZELL and REICHMUTH（1991）は、グラナリアコクゾウムシに対して窒素ガスの効果が炭酸ガスに比べかなり低いことを示した。これまでの研究報告から、食品に有毒化学物質が残留する可能性のない上記の4種のガスの中では、二酸化炭素が最も害虫の駆除効果があると考えられる。

IV 高圧炭酸ガス駆除法の今後の課題と発展性

1 今後の研究課題

高圧炭酸ガス駆除法は、穀物を加害するコクゾウムシをはじめ多数の貯蔵食品害虫に対して、従来の駆除法に比べてきわめて短時間の処理（2～3時間）で完全駆除が可能であることが、これまでの研究から明らかである。しかし、ハーブの害虫駆除実験を除くこれらの実験のほとんどは、きわめて小型の圧力釜（400 ml 程度）を用いている。そこで、大型の圧力釜で各種の農産物の害虫に対し同じ効果が得られるかを確かめる必要がある。特に、大型の高圧釜内の農産物の外側と内部に対する高圧

炭酸ガスの効果の差異の有無に関する検討は重要である。

炭酸ガスの圧力を低くすると、100%の殺虫効果を達成するためには、処理時間を長くする必要がある（表-1, 2）。これは、他の条件が一定の場合、高圧炭酸ガスの殺虫効果は、圧力数と処理時間の積の関数で表せることを意味する。また、高圧炭酸ガス処理において、炭酸ガス濃度あるいは温度と殺虫率との間に正の関係がみられた。これまでの研究から、効果的に貯蔵食品害虫を駆除するには、15 bar 以上の圧力が必要であると考えられる（FLEURAT-LESSARD, 私信）。一方、20 bar 以上の圧力に耐える圧力釜の製造には、安全性の観点から製造費が高くなる（REICHMUTH, 私信）。したがって、問題となる貯蔵食品害虫に対して約15～20 bar の範囲内で圧力数、炭酸ガス濃度、温度条件、処理時間、それぞれの運用コストに関するデータが得られれば、低コストの観点から高圧炭酸ガス駆除法の最適圧力数、温度条件、炭酸ガス濃度、処理時間を得られるであろう。今後、この観点からの研究が必要である。

20 bar の高圧炭酸ガス処理であれば、穀類の品質への影響は特に問題ないと思われる。しかし、穀類に対する実用化においては、当然ながらより広範囲な項目を厳密に調査する必要がある。

2 今後の発展性

高圧炭酸ガス駆除法の炭酸ガスのコスト（85～95%の炭酸ガスを回収する場合）は、米1tに対し1,300～1,625円（20～25ドイツマルク）である。一方、CA法の場合1,000～2,000円、くん蒸剤の臭化メチルの場合は約30円である。運用コストに限ってみれば、高圧炭酸ガス駆除法とCA法とではそれほど差がない。しかし、高圧炭酸ガス駆除法の場合、装置の製造費がきわめて高い。

高圧炭酸ガス駆除法は、従来の駆除法に比べコストがかなり高いが、短時間で害虫を駆除でき、しかも環境破壊や残留性の問題がないため、既に述べたようにドイツ、フランスでは付加価値の高い加工食品に対し実用化が始まっている。今後、本駆除法は、付加価値の高い加工食品の分野では、普及すると思われる。

高圧炭酸ガス駆除法の低コスト化のための装置の改良は、汎用性を高めるために必要である。そのために、搬出・搬入に要するコストの軽減のため、ベルトコンベアーを利用して連続処理が可能な装置の開発も検討されている。

高圧炭酸ガス駆除法の低コスト化を今後進めて行ったとしても、従来の駆除法に比べればかなり高いであろう。穀物に対する実用化の可否は、割高なコストを環境

破壊の防止と食品への安全性への代償として、社会（消費者）が受け入れるか否かによるところが大きいと思われる。

引用文献

- 1) ANNIS, P. C. (1987): Proceedings of the Fourth International Working Conference on Stored-Product Protection, Maor-Wallach, Israel, pp. 128~148.
- 2) FINKENZELLER, E. (1991): Procedure and Installation to Disinfest Organic Produce, European Patent, No. 0458359A1, 6p.
- 3) GERARD, VOU D. et al. (1988): Pharm. Ind. 50: 1298~1300.
- 4) 光榮昭雄ら (1973): 食衛誌 14: 511~516.
- 5) KUHNE, K. and D. KNORR (1990): ZFL, Internationale zeitschrift für Lebensmittel & Technik, Marketing Verpackung und Analytik 41: 55~57.
- 6) LE TORCH, J. M. and F. FLEURAT-LESSARD (1991): Proceedings 5th International Working Conference on Stored-Product Protection, Vol. II, Bordeaux, France, pp. 847~856.
- 7) 中北 宏 (1993): 化学と生物 31: 665~673.
- 8) ———・川嶋浩二 (1992): 第36回応動昆学会大会講演要旨, 弘前, pp. 270.
- 9) NAKAKITA, H. and K. KAWASHIMA (1994): Proceedings of 6th International Working Conference on

- Stored-Product Protection, Canberra, Australia, vol. 1, 126~129.
- 10) POHLEN, VON W. et al. (1989): Pharm. Ind. 51: 917~918.
- 11) PROZELL S. and C. REICHMUTH (1991): Proceedings 5th International Working Conference on Stored-Product Protection, Bordeaux, France, pp. 911~919.
- 12) RAU, G. (1993): Deutsch Lebensmittel-Rundschau 89: 216~219.
- 13) REICHMUTH, C. (1990): Getreide, Mehl und Brot 44: 166~170.
- 14) ——— (1991): Proceedings 5th International Working Conference on Stored-Product Protection, Bordeaux, France, pp. 709~725.
- 15) ——— (1993): Practical Use of Fumigants and Phermones—an International Conference and Workshop, Lubeck, Germany.
- 16) ——— and R. WOHLGEMUTH (1994): Proceedings of 6th International Working Conference on Stored-Product Protection, Canberra, Australia, vol. 1, 163~172.
- 17) SINGH, O. N. et al. (1988): Nature 334: 593~595.
- 18) STAHL, VON E. and G. RAU (1985): Anz. Schadlingskde., Pflanzenschutz, Umweltschutz 85: 133~136.
- 19) STAHL, VON E. et al. (1985): Pharm. Ind. 47: 528~530.
- 20) 楯谷昭夫 (1993): 植物防疫 47: 193~195.

中央だより

○土壌病害虫対策（臭化メチル関連）担当者会議を開催

土壌くん蒸場面で利用されている臭化メチルを巡る問題点等を検討する、土壌病害虫対策担当者会議が11月10日、農水省共用会議室で開催された。会議には、臭化メチルの使用が多い県の担当者、日植防、農研センター、農環研、農薬検査所、農政局、各作物原課（農産課、果樹花き課、畑作振興課、野菜振興課）、植物防疫課の担当等約50名が参加した。

会議では、①臭化メチルを巡る状況、②臭化メチルの土壌くん蒸場面での使用状況、③代替剤及び代替技術の開発状況等について検討を行った。

なお、臭化メチルは、オゾン層破壊物質としてモントリオール議定書に基づく規制対象物質となっており、1995年からは、検疫用途を除き1991年レベルに生産・消費量を凍結することとなっており、今後さらに、規制見直しを行うこととなっている。

tection Congress) が1995年7月2~5日、オランダ、ハーグ市で開催される。オランダの会議事務局（大会組織委員長 J. C. Zadoks）では、日本から多数の関係者の参加を望んでいる。

プログラムの主な課題は、

- ・IPMの実施戦略
- ・生物防除法の進歩
- ・作物保護の知識移転
- ・新しい薬剤（Pesticides）
- ・植物保護における分子生物学
- ・植物育種

などである。

参加費は1995年4月15日以前の申込分については、1人750ギルダー（約¥43,500）、それ以後は850ギルダーとなっている。

申込は、XIII IPPC

C/O Holland Organizing Centre
Parkstraat 29, 2514 JD, The Hague
The Netherlands
Fax +31 70 364 57 48

なお、IPPC 常任委員会の日本委員は、堀野 修（京都府大）、玉木佳男（農水省農環研）、山本 出（東京農大）の各氏である。

学界だより

○第13回国際植物保護会議（IPPC）の開催について

第13回国際植物保護会議（International Plant Pro-