

園芸作物害虫に対する高濃度炭酸ガスの殺虫効果に関する研究

Studies on insecticidal effects of high carbon dioxide atmospheres on insect pests in horticultural crops

2013.3

関 昌 夫

Masao Seki

目次

第 1 章	緒言	1
第 2 章	炭酸ガスのバナナ寄生 2 種カイガラムシに対する殺虫効果	6
第 3 章	炭酸ガス濃度と殺虫効果との関係	17
第 4 章	炭酸ガスの 5 種アザミウマ成虫に対する殺虫効果	23
第 5 章	炭酸ガスの 4 種アザミウマ卵に対する殺虫効果	33
第 6 章	炭酸ガスの 2 種アブラムシ成虫に対する殺虫効果	39
第 7 章	炭酸ガスの 2 種コナカイガラムシ成虫に対する殺虫効果	45
第 8 章	炭酸ガスのハスモンヨトウ幼虫体液 pH に対する影響	51
第 9 章	総合考察	60
	要旨	75
	謝辞	77
	引用文献	78
	本論文を構成する論文	85

第 1 章 緒 言

21 世紀を迎えて、我が国における生鮮農作物をとりまく農業環境が大きく変わってきた。生産方法における施設栽培の比重の高まり、輸入生鮮農産物の比重の高まり及び害虫防除剤として臭化メチルが先進国で 2005 年から使用禁止となっている。このような情勢変化に応じて、施設栽培育苗過程での害虫フリー及び物流過程、特に検疫対策としての害虫フリーのための害虫防除手段として地球環境負荷低減に寄与する高濃度炭酸ガス殺虫法（後述するように欧米では **Controlled Atmosphere treatments** と称される）の適用は有意義であると考えられる。Mitcham et al. (2006) によれば、果実・堅果・野菜などの生鮮農産物の国際的な流通活動にとって農産品中の害虫防除技術は岐路に直面している。これまで生鮮農産品の害虫防除には臭化メチルなど化学的くん蒸処理が一般的であったが、臭化メチルは先進国では 2005 年すでに全面的に使用禁止され、発展途上国についても 2015 までに使用禁止されることになっている。加えて、食品に対する化学物質の使用を抑制して非化学的害虫防除技術の適用を迫る国際的な消費者団体の圧力が高まっている。臭化メチル等のくん蒸処理に代わる非化学的手段として **Controlled Atmosphere treatments**（以降、CA）の開発が注目される（Mitcham et al. 2006）。

高濃度炭酸ガス殺虫法で用いられる炭酸ガス（以降、CO₂）は、現在の地球大気中に約 400 ppm 弱の濃度で含まれており、人為的に合成される臭化メチル（CH₃Br）やホスヒン（PH₃）等の化学的くん蒸剤と違って有毒性や残留毒性の問題がない。また、CO₂ は地球温暖化原因ガスではあるが、工業原料としての CO₂ は石油精製工程などから発生する廃棄ガスを回収して副生することにより製造されているので、高濃度 CO₂ 殺虫法のための新たな CO₂ 生産は不要であり、

高濃度 CO₂ 殺虫法の運用が温室効果を加速することはない (Newton 1993). したがって、高濃度 CO₂ 殺虫法は生物や地球環境にとってクリーンで安全性の高い農作物・農産品害虫の防除技術として期待できる.

ローマ時代の著述家で初期の害虫防除の研究に貢献したプリニウス (A.D.23~79) による siri (サイロ; silo の語源) の記述の中で種子の呼吸により二酸化炭素が充満している気密室の中で穀物を貯蔵する方法が紹介されているように (Berenbaum 1995), 高濃度 CO₂ 大気の実験的な殺虫効果は古くから知られていた. 収穫後農産品の CA 殺虫法は欧米, オーストラリア及びニュージーランドなどでは Controlled Atmosphere storage または Controlled Atmosphere treatments と称されて 20 世紀後半から現在まで半世紀にわたって息長く関心もたれ続けている. CA 殺虫法としては, 貯穀害虫の防除を目的に, 密閉穀物サイロ内に窒素ガス (以降, N₂) を封入して酸素 (以降 O₂) 濃度 1% 以下のほぼ 100% N₂ の酸欠状態を形成する方法と殺虫作用のある CO₂ を封入して高濃度 CO₂ 大気を形成する方法 (以降, 高濃度 CO₂ 殺虫法または CO₂ 殺虫法) がある. オーストラリアにおける 2000 トン規模の穀物貯蔵サイロ内に N₂ または CO₂ を封入した CA 殺虫法の試験では, ココクゾウムシ *Sitophilus oryzae* (Linnaeus) など貯穀害虫に対する 100% 殺虫期間は, 25℃ における CO₂ (60~35%) + Air 大気で 10 日間以上, また, 26℃ における 99% N₂ + 1% O₂ 大気では 3 週間以上が必要とされた (Banks and Annis 1977). 1970 年代以降には, 貯穀害虫以外の野菜, 果実, 花きなど園芸作物害虫に対する CO₂ の殺虫効果と 5℃ 以下の低温による園芸作物の鮮度維持効果とを組み合わせた低温域 CO₂ 殺虫法の試みがなされ, 1980 年代からは 20℃ 以上の非低温域 CO₂ 殺虫法も調査されるようになった. イチゴやブドウに寄生するミカンキイロアザミウマ *Frankliniella occidentalis* (Pergande) に対する 2.5℃ で 90% CO₂ / 2% O₂ の

CO₂殺虫法による幼虫・成虫の100%殺虫期間が2日間 (Aharoni et al. 1981) 及び5℃で45% CO₂ / 11.5%O₂のCO₂殺虫法によるLT₉₀が卵で約4日間, 幼虫・成虫で約5日間 (Mitcham et al. 1997) と報告された. さらに, 果実・野菜に寄生するアザミウマ New Zealand flower thrips, *Thrips obscuratus* (Crawford) に対する24℃で60%CO₂ / 20%O₂のCO₂殺虫法において1日間で100%殺虫が可能であると報告された (Carpenter et al. 1996). また, 切り花・葉物野菜などに寄生するモモアカアブラムシ *Myzus persicae* (Sulzer) に対する20℃で60%CO₂ / 8%O₂のCO₂殺虫法による100%殺虫期間は1.5日間であったという報告がある (Cantwell et al. 1996). このように, 高濃度CO₂殺虫法による100%殺虫所要期間は, コクゾウムシ類などの貯穀害虫の10日間以上に比べてアブラムシやアザミウマ類などの園芸作物害虫では1~2日と大幅に殺虫期間が短いことが示唆された. しかしながら, これまでの調査結果は昆虫種ごとの個別的な知見であり, 高濃度CO₂殺虫法の実用化を図るに当たって必要なCO₂濃度や処理温度等の処理条件と殺虫効果の関係及び殺虫メカニズム等の総合的な知見は十分とは言い難い.

日本では, 1987年に採択されたモントリオール議定書 (オゾン層保護条約) において臭化メチルが規制対象物質とされたことを受けて, 1988年オゾン層保護法が制定され, 臭化メチルは2005年全廃 (検疫用は除く)とされた. 1993年当時の農林水産省を中心とする植物検疫行政関連機関を訪問して聞き取り調査を行ったところ, 臭化メチルに代わる安全性の高いくん蒸剤の開発に早急に取り組むべきであるという気運にあったが, 未だに効果的な解決策は確立されていない.

筆者は, 1993年に高濃度CO₂殺虫法のクリーンで安全な環境負荷低減性に着目し, 1994年から生鮮農作物・農産品害虫 (以降, 園芸作物害虫) の防除手段

としての実地適用を目指して幅広い園芸作物害虫に対する高濃度 CO₂ 殺虫法の殺虫効果を調査した。12 種の園芸作物害虫に対する調査結果を評価し、本論文に取りまとめた。第 2 章でミンダナオ島バナナプランテーション栽培バナナに寄生する重要害虫の 2 種カイガラムシ、バナナコナカイガラムシ *Dysmicoccus neobrevipes* (Beardsley) 及びウスイロマルカイガラムシ *Aspidiotus destructor* (Signoret) に対する CO₂ 殺虫法による 100% 殺虫所要日数を現地調査で明らかにした。第 3 章でミカンキイロアザミウマ及びモモアカアブラムシ成虫を用いて CO₂ 濃度と死亡率の関係を調査し、殺虫効果を発揮する CO₂ 濃度の下限値を明らかにするとともに高濃度 CO₂ 大気中の高 CO₂ 分圧が昆虫気管系からの好氣的エネルギー代謝産物 CO₂ の体外排気を困難にする可能性を指摘した。第 4 章から第 7 章までそれぞれ対象とした昆虫種に対して CO₂ 殺虫法による死亡率と温度及び処理時間との関係を調査し、死亡率が種にかかわらず共通して温度が高いほど高まるという温度依存性及び処理時間経過にともなって高まるという処理時間比例性を示すことを明らかにした。また、CO₂ 殺虫法による 100% 殺虫所要時間が種に特異的な値を示すことを明らかにした。第 4 章では重要害虫である 5 種アザミウマ成虫、外来種のミカンキイロアザミウマ及びミナミキイロアザミウマ *Thrips palmi* Karny, 在来種のヒラズハナアザミウマ *Franklinealla intonsa* (Trybom) 及びネギアザミウマ *Thrips tabaci* Lindeman 及び今後侵入が危惧される *Thrips parvispinus* Karny に対する殺虫効果を明らかにした。第 5 章では植物組織内に産卵されるために発見が困難な 4 種アザミウマ（ミカンキイロアザミウマ、ヒラズハナアザミウマ、ネギアザミウマ、ミナミキイロアザミウマ）の卵ステージに対する殺虫効果を明らかにした。第 6 章では、アザミウマ類とともに重要害虫である 2 種アブラムシ成虫、在来種のモモアカアブラムシ及びワタアブラムシ *Aphis gossypii* Glover に対する殺虫

効果を明らかにした。第 7 章では輸出果物害虫として問題となる 2 種コナカイガラムシ成虫，在来種であるフジコナカイガラムシ *Planococcus kraunhiae* (Kuwana) 及びクワコナカイガラムシ *Pseudococcus comustocki* (Kuwana) 成虫 に対する殺虫効果を明らかにした。第 8 章ではハスモンヨトウ幼虫 *Spodoptera litura* (Fabricius) を用いて CO₂ 処理による体液 pH の変化を調査し，CO₂ 処理により死亡した個体の体液 pH は無処理個体の弱酸性側の 6.9 から KHCO₃ 等重炭酸塩の飽和水溶液の pH にほぼ匹敵するアルカリ性側の 8.1~8.2 に上昇していることを明らかにした。第 9 章では本研究で用いた 12 種の昆虫に 一様に示された殺虫効果の温度依存性は昆虫の基本的特徴である温度が高いほど活動が活発になるという変温動物性に起因するとして，100%死亡到達期間と 発育に関する有効積算温度との相関性を明らかにするとともに高濃度 CO₂ 殺虫 法の実用設計手法を提案した。さらに，高濃度 CO₂，たとえば 60% CO₂=60 kPa CO₂ では通常大気中 380ppm CO₂=0.038 kPa CO₂ の約 1600 倍という高 CO₂ 分 圧のため，気管系からの体外排気を阻まれた細胞内好氣的エネルギー代謝産物 CO₂=KHCO₃ 等重炭酸塩の体液内蓄積・飽和によって体液中の水素イオン濃度 [H⁺] と水酸化物イオン濃度[OH⁻]のバランスが弱酸性側の適正状態からアルカ リ性側の異常状態へと変化して昆虫細胞内における生命維持に必要な各種酵素 活性の低下が進み，最終的には好氣的エネルギー代謝反応が停止するとした高 濃度 CO₂ 殺虫メカニズムを提起した。

第 2 章 炭酸ガスのバナナ寄生 2 種カイガラムシに対する殺虫効果

1993 年当時，フィリピンから日本に輸入されるバナナの年間輸入量は約 70 万トンであり（財務省貿易統計 1993），そのほとんどが検疫くん蒸処理されていた。しかも，くん蒸剤としてはオゾン層破壊物質として使用規制対象物質である臭化メチル（ CH_3Br ）または人体や動物にとって致死性の毒物である青酸（ HCN ）などが使用されていた。農林水産省横浜植物防疫所による植物検疫統計「輸入植物病菌・害虫発見記録（1987～1991）」では輸入バナナから発見される主要な害虫はバナナコナカイガラムシ及びウスイロマルカイガラムシなどのカイガラムシ類であった。バナナ・パイナップル・ブロッコリー・レタスなど各種青果物の国際的な流通事業を手がける米国ドールフード社系列のドール・ジャパン社（以下ドール Jpn.）及びドール・フィリピン社（以下ドール Phil.）は，自社扱い商品の検疫くん蒸フリー化を強く望んでいた。ドール Phil. は日本の年間輸入バナナ約 70 万トンの約 20% を生産し，6 日間ほどの海上輸送を経て日本まで運び，ドール Jpn. がその全量を荷揚げから流通末端まで配送しているが，荷揚げ港の植物防疫害虫検査により，ほとんどの品物がくん蒸処理扱いとされる。日本の検疫くん蒸可能な荷揚げ港が限定されていることによる配船配車のやり繰りの煩雑さ，くん蒸処理コストの負担はもとより，配送遅れや品質劣化など流通上のネックとなっていたからである。そこで，筆者らは，フィリピンの輸出港でのバナナの船積みから日本の輸入港での陸揚げまで 6 日間ほどの海上輸送中にバナナ寄生害虫の殺虫処理を済ませて検疫くん蒸フリー化する方策として，高濃度 CO_2 殺虫法の適用性に関する調査研究を石川島播磨重工業(株)（当時，著者は同社横浜技術研究所に在職）とドール Jpn. とで共同実施する運びとなった。1994 年度に入って，フジコナカイガラムシを用いての高濃度 CO_2

殺虫試験装置（図 2-1）の試作試験及び川崎港荷上げバナナによる高濃度 CO₂ 殺虫処理バナナ品質評価試験などの予備試験を行った上で、1995 年春、ドール Jpn.及びドール Phil. 傘下スタンフィルコ社の全面的協力を得て、同社の日本への輸出バナナの主要な生産基地であるミンダナオ島ダバオ市郊外の大規模バナナプランテーションにおいて、ほぼ 1 カ月間にわたって農園内栽培バナナに寄生するカイガラムシ類を採取して、高濃度 CO₂ 殺虫法による 100% 殺虫所要期間を調査した。

1. 材料及び方法

供試虫は、ミンダナオ島栽培バナナの二大害虫であり、日本の植物検疫で多数発見されているバナナコナカイガラムシ及びウスイロマルカイガラムシの雌成虫とした。バナナコナカイガラムシは 1959 年にハワイで採集された標本から、パイナップルコナカイガラムシ *Dysmicoccus brevipes* (Cockerell) とは異なる新種として分類された (Beardsley 1959)。フィジー、ジャマイカ、マレーシア、メキシコ、ミクロネシア、フィリピン、台湾、そしてハワイ諸島等の熱帯全域に生息し、パイナップル、バナナ、ココナッツ等各種寄生植物の葉、幹、茎、花、果房等の表面に寄生している。卵胎生で繁殖し、3 回脱皮して成虫となる (Beardsley, 1959)。ウスイロマルカイガラムシは、ココナッツやバナナをはじめ南太平洋地域の多くの果樹の害虫である。soft scale ではなく armored scale の一種であり、ワックス質の糸を撚り合わせた天蓋状の保護皮膜をすっぽり被っており（図 2-4a）、雌は保護皮膜の中に産卵する。孵化した幼虫は成虫の保護膜から這い出して自分の居場所を決めると直ぐに自分の保護皮膜を撚り合わせて籠り、雌は 2 回の脱皮を経て成虫となって産卵し、一生をその保護被膜の中で過ごす。単為生殖による未受精卵は雄となる (Taylor 1935)。



図 2-1 高濃度 CO₂ 殺虫試験装置

供試虫は、バナナコナカイガラムシについては農園内バナナ集果工場に集められた洗浄前のバナナの果房や果柄に寄生している(図 2-2a) 雌成虫(図 2-2b)を筆で採集箱に掃き落として採集し、また、ウスイロマルカイガラムシについては農園内バナナ畑で栽培中のバナナ葉に寄生する雌成虫・幼虫集団をバナナ葉ごと採集した(図 2-3a)。なお、バナナコナカイガラムシについてはシャーレ(直径 9cm) 当たり 60~70 個体を、ウスイロマルカイガラムシについては 60~80 個体が群生する葉切片(図 2-3b) をシャーレに入れて通気性ゴース布で蓋をした後、当該シャーレを気密殺虫容器内に収納した。

殺虫試験装置は、日本から移送した気密容器、圧力調整弁、ガス流量計などをスタンフィルコ社バナナ農園内研究所の実験室内に組み立てた。気密容器は、ボルト締めフランジ上蓋のある透明アクリル製の底付き円筒からなる 3.3L 及び 1.5L の容量とした。容器の側壁下部にガス入口弁を付け、上蓋にはガス出口弁及びガス濃度検査用抽気弁のほか温湿度計挿入口を設けた(図 2-1)。

ガス組成は、実用的にバナナを積載したコンテナに CO₂ を吹き込むことによって所定の CO₂ 濃度に設定することを想定した 3 種類(40%CO₂ / 13%O₂ / 47%/N₂ , 30%CO₂ / 15%O₂ / 55%N₂ , 20%CO₂ / 17%O₂ / 63%N₂) と低 O₂ 濃度である輸送船駆動エンジン排ガス利用の可能性を検討するための模擬燃焼排ガス(12%CO₂ / 2%O₂ / 86%N₂) を加えた 4 種類とした。予め現地調達しておいた所定組成の高圧ガスボンベから、圧力調整弁・ガス流量計を介して、供試個体が入ったシャーレを納めた気密容器に内容量の約 10 倍量のガスを送入しながら排気して容器内 CO₂ 濃度が所定濃度に置換されたのを確認して密封した。気密容器内の CO₂ 濃度は、試験中毎日 1 回測定して不足があれば所定の濃度になるまで追加補給し、試験終了直前にも確認した。CO₂ 濃度の測定は、気密容器抽気口と CO₂ 濃度検知管とガス吸引ポンプを直列に繋いで定量定速で抽気して行



a) バナナ果柄上の寄生状況（白い斑点）



b) 雌成虫

図 2-2 バナナコナカイガラムシ



a) バナナ葉上

b) 葉切片上

図 2-3 ウスイロマルカイガラムシ

った。

処理温度は、実際のバナナの海上輸送温度である 14℃（バナナのでんぷん質を変質させない最適温度）とし、気密容器を収納した恒温器（MIR-151, サンヨー）内温度を 14℃に設定した。湿度は、気密容器の底面に水で濡らした紙タオルを敷きつめてほぼ 100%を維持した。処理期間は、死亡率 100%を達成できる処理日数を求めることとして、あらかじめ 1 日、3 日、5 日及び 7 日間用の供試虫入りシャーレをセットしておき、所定日数経過ごとにシャーレを取り出して 100%殺虫達成回数を調査した。生死の判別は、所定の処理日数経過後、殺虫容器の上蓋を外してシャーレを取り出して大気中に 2 時間以上放置してから行った。バナナコナカイガラムシの場合、光学顕微鏡下で体脚の動きの有無を観察した。ウスイロマルカイガラムシの場合、まず、透明な円形天蓋状の外套皮膜（図 2-4a）をピンセットで慎重に剥がした。外套皮膜を剥いだ生存個体（図 2-4b）は、淡い緑黄色で身体が柔らかく弾力性があり、体液の流れが透けて見えるほど透明感があり、脚や触覚は判然としないが、身体を面相筆の穂先で触ればかすかに動く。一方、外套皮膜を剥いだ死亡個体（図 2-4c）は、身体が収縮して固さがあり、体色がやや褐色に変色して不透明になり、面相筆で触れても全く動かない。光学顕微鏡下でこれらの違いを観察した。

殺虫効果は、100%殺虫到達回数/反復試験回数として評価した。なお、処理期間ごとに無処理区を設けた。

2. 結果

5 日間、7 日間処理を含めて無処理区の個体には若干の死虫が認められたものもあったがほとんどが生存していたので、試験区の個体の大量死亡が餓死ではなく主因が CA 処理によるものであったことの証明になった。また、100%殺虫



a)被膜している雌成虫



b)被膜を剥いだ生存個体



c)被膜を剥いだ死亡個体

図 2-4 ウスイロマルカイガラムシ

到達回数をチェックする本評価方法においては補正の必要はなかった。各ガス組成における殺虫評価結果は、バナナコナカイガラムシを（表 2-1）に、ウスイロマルカイガラムシを（表 2-2）に示した。40%CO₂では、5日間処理の場合、バナナコナカイガラムシ及びウスイロマルカイガラムシともに3回の試験とも死亡率100%であった。3日間処理の場合、ウスイロマルカイガラムシは3回中2回が死亡率100%であり、バナナコナカイガラムシについては3回とも死亡率100%には達しなかった。30%CO₂では、5日間処理の場合、ウスイロマルカイガラムシでは3回中2回が死亡率100%であり、バナナコナカイガラムシでは3回中1回が死亡率100%であった。3日間処理の場合もほぼ同様の傾向が示された。20%CO₂では、5日間処理のみ調査したがバナナコナカイガラムシが2回中1回が死亡率100%であり、ウスイロマルカイガラムシでは1回中1回が死亡率100%であったが、反復回数が少なく30%CO₂との差異が不明確であった。7日間処理の場合、40%CO₂及び30%CO₂についてバナナコナカイガラムシでは2回中2回とも死亡率100%であり、ウスイロマルカイガラムシでは1回中1回が死亡率100%であった。12%CO₂/2%O₂（模擬燃焼排ガス）では、ウスイロマルカイガラムシに対しては30%CO₂とほぼ同様の殺虫効果を示したがバナナコナカイガラムシに対しては7日間処理の場合に2回中1回が死亡率100%であった以外はいずれの処理期間においても死亡率100%に達せず、40%CO₂及び30%CO₂よりも殺虫効果が低い傾向が示された。

したがって、CO₂濃度と殺虫効果の関係は40%CO₂に比べて、30%CO₂及び20%CO₂は同等以下、12%CO₂は低い傾向が示され、CO₂濃度が高いほど殺虫効果が高い傾向が認められた。

3. 考察

表 2-1 バナナコナカイガラムシに対する CO₂ 処理期間と殺虫効果^{1) ~ 3)}

ガス組成 CO ₂ (%)/O ₂ (%)	1 日間処理	3 日間処理	5 日間処理	7 日間処理
40/13	0/2	0/3	3/3	2/2
30/15	0/2	0/3	1/2	2/2
20/17	—	—	1/2	—
12/2 (模擬排ガス)	0/2	0/3	0/2	1/2

1) 供試個体数 ≥ 60 個体 2) 殺虫効果 : 100% 殺虫達成回数/反復回数

3) 処理温度 : 14℃

表 2-2 ウスイロマルカイガラムシに対する CO₂ 処理期間と殺虫効果^{1) ~ 3)}

ガス組成 CO ₂ (%)/O ₂ (%)	1 日間処理	3 日間処理	5 日間処理	7 日間処理
40/13	0/2	2/3	3/3	1/1
30/15	0/2	1/3	2/3	1/1
20/17	—	—	1/1	—
12/2 (模擬排ガス)	0/2	1/3	2/3	1/1

1) 供試個体数 ≥ 60 個体 2) 殺虫効果 : 100% 殺虫達成回数/反復回数

3) 処理温度 : 14℃

CO₂濃度と組み合わせた O₂濃度 (2% O₂ / 12% CO₂, 13% O₂ / 40% CO₂, 15% O₂ / 30% CO₂, 及び 17% O₂ / 20% CO₂) は殺虫効果に対して直接に影響を与えておらず, CO₂濃度そのものが殺虫効果を示すものと考えられる. 特に 2% O₂ / 12% CO₂ (模擬燃焼排ガス) における 2% O₂ という通常大気中の約 1/10 に相当する低 O₂濃度でも 40% CO₂の高濃度 CO₂と比べて殺虫効果が低かったことから, 2% O₂程度の低酸素濃度では酸欠による死亡効果が現れないものと考えられる.

また, 40% CO₂の3日間処理における殺虫効果を比べると, ウスイロマルカイガラムシの3回の試験の内2回は100%の殺虫効果が認められたのに対してバナナコナカイガラムシは3回とも殺虫効果は100%には達せず, CO₂感受性は昆虫種によって特異性があることが示唆された.

これまでのカイガラムシ類に対する CO₂殺虫法に関する試験は限られているが, 本調査のウスイロマルカイガラムシと同じマルカイガラムシ科に属するナシマルカイガラムシ *Diaspidiotus perniciosus* (Comstock) 幼虫に対する 12°C で 90% CO₂ / 1% O₂による100%殺虫所要時間が2日間 (Morgan and Guance 1975) という報告がある. ナシマルカイガラムシとウスイロマルカイガラムシとの処理条件を比べると, 処理温度が 12°C と 14°Cで同程度, CO₂濃度が 90%と 40%で約2倍であり, 100%殺虫所要時間が2日と3~5日ということはナシマルカイガラムシはウスイロカイガラムシのほぼ 1/2 になっている. これは, 100%殺虫所要時間が CO₂濃度にほぼ逆比例して短くなっていることを示しており, CO₂濃度が高いほど殺虫効果が高いという傾向が認められる. 本調査におけるバナナコナカイガラムシと同じコナカイガラムシ科に属するナガオコナカイガラムシ *Pseudococcus longispinus* (Targioni) 幼虫・成虫に対する 20°C の 5% CO₂ / 0.5% O₂による100%殺虫所要時間が7日間という報告がある (Dentener et al. 1990, 1992). 本調査における 14°C の 40% CO₂によるバナナ

コナカイガラムシの 100%殺虫所要時間≒5 日間に対して処理温度が 20℃と比較的高く, 0.5%O₂という極めて低い O₂濃度で 5%CO₂という低 CO₂濃度におけるナガオコナカイガラムシの 100%殺虫所要時間が 7 日間と長期間を要するという事は, 種の違いというよりは高 CO₂濃度の方が低 O₂濃度よりも殺虫効果が高いことを示唆しているものと考えられる. 本調査で得られた結果をまとめると, 実験室飼育ではない現地栽培バナナに寄生中のバナナコナカイガラムシ及びウスイロマルカイガラムシに対する 14℃で 40%CO₂の CO₂殺虫法による 100%殺虫所要期間は 5 日間であった. 40%の高濃度 CO₂は, 13%の O₂が共存した状態で殺虫作用を示し, 2%以下の低濃度 O₂よりも高い殺虫効果を示した. また, CO₂濃度が高いほど殺虫効果が高まる傾向が認められた.

そして, 処理温度 14℃で 100%殺虫所要期間が 5 日間という結果はフィリピンから日本へのバナナ海上輸送期間にほぼ匹敵し, 実用設計に当たっては余裕がない. 海上輸送中の殺虫では処理温度 14℃に制約されるので, 海上輸送中に拘らず船積み前の殺虫をも視野に入れて, 処理温度を高めることも含めて殺虫期間を短縮する方法を探求してゆくことになった.

第3章 炭酸ガス濃度と殺虫効果との関係

近年，国内農業では，野菜・花き類に対する施設園芸の普及が目覚しく，最近の30年間における施設園芸実面積は5倍という驚異的な増加を示し，2003年において約52000ヘクタールである（篠原2006）．施設園芸においては，まず，専用の小規模育苗施設で害虫フリー苗を作って栽培施設への害虫持込を防ぎ，以後は施設内で遮蔽などによる害虫侵入防止と薬剤散布及び天敵昆虫放飼などによる害虫蔓延防止を図るものである．外界からの物理的・化学的・生物的異変に対して防御態勢が整っていない幼苗に対しては薬剤の大量散布は避けるべきであり，施設園芸作物の育苗期の害虫防除方法としてはクリーンなCO₂大気で苗を包むCO₂殺虫法が有益であると考えられた．また，世界有数の農作物輸入国であるわが国の生鮮野菜（冷蔵野菜を含む）の輸入量の増加は目覚しく，年間（1～12月累計）輸入量について，1993年は対前年比8.9%増の約29.3万トン余りであったものが翌94年には約2倍の58.2万トンに増加し，その後も着実な伸びを示し，それから10年後の2004年には88.7万トンに達している（財務省貿易統計1992，1993，1994，2004）．また，わが国の植物検疫による輸入野菜・花きの被くん蒸処理率は50%以上とされる．したがって，バナナに限らず輸入農産物の害虫フリー化のための殺虫方式として残留毒性の心配がないクリーンなCO₂大気で青果物を包むCO₂殺虫法が有益であると考えられた．したがって，今後のCO₂殺虫法の研究では，輸入農産物の検疫フリー化にこだわらず野菜・果実・花きなど施設園芸作物の育苗期における害虫フリー化手段としての適用性を含めて検討することとした．そこで，まずCO₂濃度と殺虫効果との関係を明らかにした．

1995年当時，農林水産省・植物検疫統計「輸入植物病菌・害虫発見記録（1899

～1993)」における野菜類からの害虫発見回数の調査によれば、ミカンキイロアミウマ、ネギアザミウマ及びモモアカアブラムシの発見回数をもっとも多かった。それから10年後の2003年の植物検疫統計における輸入野菜寄生害虫の発見回数も、ミカンキイロアザミウマが約2000回、ネギアザミウマが約3000回及びモモアカアブラムシが約300回を超えており、アザミウマ類を代表するミカンキイロアザミウマとネギアザミウマ及びアブラムシ類を代表するモモアカアブラムシが植物検疫で発見される主要な輸入野菜寄生害虫であることに変わりはない。そこで、調査対象昆虫としてアザミウマ目アザミウマ科のミカンキイロアザミウマとカメムシ目アブラムシ科のモモアカアブラムシを選定し、CO₂濃度と殺虫効果の関係を調査した。

ミカンキイロアザミウマは北米西部を原産地とし、1970～1980年代にヨーロッパ、中南米、オセアニアなど世界各地に広がり(Tommacini and Maini 1995)、我が国では1990年に千葉県及び埼玉県の花き類で初めて確認され(早瀬・福田1991)、1992年に静岡県で確認された後(土屋ら1992)、全国的に発生地域が確認された。本種は寄主範囲が極めて広く(片山1998)、多くの野菜や花き類を加害し(片山・池田1995)、果樹のモモやブドウやウンシュウミカンなども加害する(土屋ら1995; 増井1998)ほか多くの雑草にも寄生する(Yudin et al. 1988; Chellemi et al. 1994; 森下2005)。加えて、ミカンキイロアザミウマはネギアザミウマなどと同様にトマト黄化えそウイルス(TSWV)を媒介することが知られている(Wijkamp et al. 1995)。さらに本種は各種の薬剤に対して高度に抵抗性を発達させている上に(Immaraju et al. 1992; 多々良・鈴木1993; Brodsgaard 1994)、増殖率も高いため(片山1997)、甚大な被害を与える場合も少なくない。

モモアカアブラムシはキュウリ、ナス及びアブラナ科植物など広範囲に寄生

して食害痕や生育障害を与えるとともに植物病原ウイルスの媒介者（石川 2000）としても重要な害虫であり，有機リン剤や合成ピレスロイド剤などの薬剤抵抗性が発達し防除が極めて困難な害虫である（Takada 1979；浜 1987）。

1. 材料と方法

1) 供試虫

ミカンキイロアザミウマは1995年に島根県内ガーベラより採集した個体群をソラマメ催芽種子による飼育方法（Murai and Loomans 2001）に準じて累代飼育した成虫を供試した。飼育温度は24℃とし，明暗周期は15L9Dとした。モモアカアブラムシは1996年に島根県内で採集した個体群をソラマメ実生苗による飼育方法（Murai 1991）に準じて累代飼育した雌成虫を供試した。飼育温度は20℃とし，明暗周期は15L9Dとした。湿度は飼育容器の底面に水で濡らした紙タオルを敷いてほぼ100%を維持した。

2) 試験方法

殺虫試験装置は前章に準じ，組成調合ボンベガスは100%CO₂を空気で希釈した組成に相当する60%CO₂/8%O₂，40%CO₂/13%O₂，30%CO₂/15%O₂，20%CO₂/17%O₂及び10%CO₂/19%O₂の5種類を予め用意した。供試虫を入れた通気性のある収納容器（底面及び側面口に60μmゴース張りの透明アクリル製の直径8cm×高さ5cmの円筒）を納めた気密容器内に組成調合ボンベガスを単独または混合して封入することにより所定のガス組成に置換した後，気密容器を24℃に設定した恒温器（MIR-151，サンヨー）に入れ，処理時間は24時間とした。湿度は気密殺虫容器の底面に水で濡らした紙タオルを敷いてほぼ100%を維持した。24時間経過後，気密容器を2時間開放し，生死を判定した。CO₂濃度は，60%と40%の各1点，30%以下10%まで数%刻みで7点としたが，モモア

カアブラムシについては 60%濃度を除外した。

なお、各濃度とも無処理区を設置し、各試験の供試成虫数は 60 個体とした。

2. 結果

無処理区では各濃度ともに死亡個体は認められなかった。ミカンキイロアザミウマ成虫の場合、10% CO₂ で死亡した個体は認められなかったが 15% CO₂ で 50%前後が死亡し、20% CO₂ で 95%が死亡し、25% CO₂ 以上では 100%の個体が死亡した。モモアカアブラムシ成虫の場合、10% CO₂ で約 30%が死亡し、15% CO₂ で 80%が死亡し、20% CO₂ 以上では 100%の個体が死亡した（図 3-1）。

3. 考察

分類上の目が異なり、基礎的な体内好氣的エネルギー代謝速度が異なるミカンキイロアザミウマとモモアカアブラムシがともに、CO₂濃度が約 20%以上ではほぼ死亡率 100%であったものが約 20%を境に濃度の減少にともない死亡率が急激に減少するパターンを示した。24 時間という処置時間は 24℃における最小限の 100%殺虫到達時間よりも十分に長いという前提に立てば、昆虫に対して有効な殺虫効果を及ぼす CO₂濃度の下限が 20%程度であることを示唆していると考えられる。20% CO₂ = 20 kPa CO₂ 大気と 380ppm CO₂ = 0.038 kPa CO₂ の通常大気との CO₂ 分圧比を求めると、 $20 \text{ kPa} / 0.038 \text{ kPa} \div 526$ 倍となる。好氣的エネルギー代謝生物である昆虫にとって、生体が生存する限り細胞内好氣的エネルギー代謝すなわち細胞内ミトコンドリアにおける O₂ の消費と CO₂ の放出が生起するから、細胞内好氣的エネルギー代謝産物 CO₂ は先ずは細胞外へ、究極的には体外へ排気される必要がある。そして、気管系呼吸を行う昆虫は通常の大気中においては、水溶性の高い CO₂ は、KHCO₃ または NaHCO₃ (重炭酸塩)

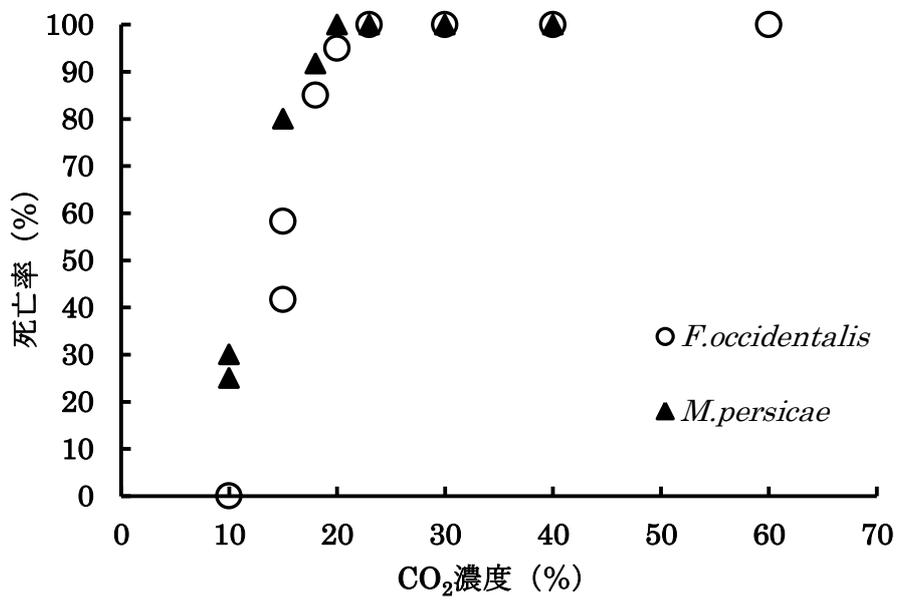


図 3-1 ミカンキイロアザミウマ及びモモアカアブラムシ成虫に対する
24°Cの24時間処理におけるCO₂濃度と死亡率の関係

として細胞組織液中を拡散して至近の毛細気管を経て気管内を満たし、気管内 CO_2 分圧が上昇することによって、体水分損失防止のために閉じている気門が短時間だけ開口して突発的に大気中に噴出される（池庄司ら 1997）。したがって、 $20\% \text{CO}_2 = 20 \text{ kPa}$ CO_2 大気中では、気管系からの CO_2 の体外排気速度は通常大気中の $1/526$ に低下しているので CO_2 の体外廃棄が滞り、 KHCO_3 等重炭酸塩として体液中に蓄積することになる。体液量は有限であるから、 KHCO_3 等重炭酸塩がいずれは体液中で飽和に達することになる。 KHCO_3 等重炭酸塩の飽和状態が長引けば、エネルギー代謝作用が完全に停止して昆虫生体は死亡することになるというのが最も単純化した推論である。さらに、前章バナナ害虫カイガラムシ類に用いた $40\% \text{CO}_2$ 大気中では $40 \text{ kPa} / 0.038 \text{ kPa} \approx 1026$ 倍、前章で引用したナシマルカイガラムシに用いられた $90\% \text{CO}_2$ 大気中では $90 \text{ kPa} / 0.038 \text{ kPa} \approx 2368$ 倍となり、体液中への KHCO_3 等重炭酸塩の飽和到達時間はさらに短くなるので、 CO_2 濃度が高いほど殺虫効果は大となるものと考えられる。なお、 KHCO_3 等重炭酸塩の体液中飽和到達時間に関しては厳密には昆虫生体の給水と排水などによる KHCO_3 等重炭酸塩に対する自浄能力のファクターもあり単純ではない。

また、 CO_2 濃度が 20% 以下おける死亡率についてミカンキイロアザミウマとモモアカアブラムシを比べると、 $10\% \text{CO}_2$ では前者が 0% に対して後者が 30% 、 $15\% \text{CO}_2$ では前者が 50% に対して後者が 80% とミカンキイロアザミウマよりもモモアカアブラムシの方が高かった。これは、モモアカアブラムシの方がミカンキイロアザミウマよりも種に固有の体液量当たりの細胞内好氣的エネルギー代謝速度が速いことに起因していると考えられる。

第 4 章 炭酸ガスの 5 種アザミウマ成虫に対する殺虫効果

アザミウマ類は農作物の重要害虫であり，花きや野菜類を食害するだけでなく多くの植物ウイルス（メロン黄化えそウイルス（MYSV），トマト黄化えそウイルス（TSWV），アイリスイエロースポットウイルス（IYSV），ピーマン退緑斑紋ウイルス（CaCV）など）を伝搬する（Wilkamp et al. 1995；土井 2003；Nault 1997；Kato et al. 2000）。また，アザミウマ類は前述したように我が国の植物防疫所における輸入生鮮農作物からの発見回数をもっとも多い害虫である。ミカンキイロアザミウマ及びミナミキイロアザミウマは外来種であるが今では日本の施設栽培におけるもっとも危険な害虫である。加えて，これらは薬剤抵抗性を急速に発達させている（Immaraju et al. 1992；多々良・鈴木 1993；Brodskaade 1994）。日本在来種であるヒラズハナアザミウマ及びネギアザミウマは，野菜や花き類を広く加害する（今井ら 1988；村井 1988, 2003；松本 2000；森下・大植 2001；土屋 2002；藤川・牟田 2003）。*Thrips parvispinus* Karny は太平洋地域の広範囲に分布し，野菜類（Talekar 1991）を加害する。本種は特にチリペッパー（Vos and Frinking 1998）やイチゴ（村井，未発表）に深刻なダメージを与える。本種は日本では今のところ分布していないが最近ギリシャで発見され，強力なくん蒸対策の確立が必要とされる（Mound and Collins 2000）。

前章までの研究結果から，高濃度 CO₂ 殺虫法の実地適用という観点から確実な殺虫効果を発揮させるためには，CO₂ 濃度が 40%（CO₂ 分圧が 40kPa）以上すなわち通常大気中との CO₂ 分圧比が $40\text{kPa}/0.038\text{kPa} \geq 1000$ 倍以上であることが望ましいと考えられた。そして，高濃度 CO₂ の殺虫作用は，CO₂ 大気中の CO₂ 分圧が通常大気中のその 1000 倍以上という高 CO₂ 分圧のために気官

系からの体外排気遅れとなった昆虫生体細胞内ミトコンドリアにおける好氣的エネルギー代謝産物 CO_2 が KHCO_3 等重炭酸塩として昆虫体液中への蓄積と飽和に起因することが見通された。好氣的エネルギー代謝産物 $\text{CO}_2 = \text{KHCO}_3$ 等重炭酸塩の体液中蓄積量は CO_2 処理時間（ CO_2 大気に晒される時間）に比例して増加すると考えられるから、殺虫効果は処理時間に比例して高まることが予想される。本章では、アザミウマ目アザミウマ科 5 種アザミウマを対象にして温度と CO_2 処理時間を変化させて 100% 殺虫到達時間までの死亡率の変化を調査した。

1. 材料及び方法

1) 供試虫

ミカンキイロアザミウマは前章と同じ系統から、ネギアザミウマは 1995 年に島根県のタマネギ (*Allium cepe* L.) から、ヒラズハナアザミウマは 2006 年に宇都宮市のクロバーから、ミナミキイロアザミウマは 1993 年に岡山県のナスから、*T. parvispinus* は農林水産省指令横植第 340 号で輸入許可を得て 2008 年にインドネシア・バリ島のトウガラシから採集し、いずれもソラマメ催芽種子による飼育法 (Murai and Loomans 2001) により累代飼育した雌成虫を供試した。飼育条件は 20℃ で明暗周期は 16L8D とした。

2) 試験方法

殺虫試験装置は前章に準じ、ガス組成が 60% CO_2 / 8% O_2 / 32% N_2 の調合ボンベガスを用いた。供試個体はソラマメ催芽種子ごと通気性を確保した収納容器に納めて気密殺虫容器内にセットし、調合ボンベガスを封入した。気密容器をそれぞれ所定の温度に設定した恒温器 (MIR-151, サンヨー) に入れて所定の処理時間を維持した。湿度は気密容器底面に水で濡らした紙タオルを敷いてほぼ

100%を維持した。供試個体数はそれぞれ 50 個体とし、試験は反復 3 回とした。温度ごとに無処理区を設け、生死の判別は大気開放後 24 時間経過後に行った。

処理温度は 20, 25, 30 及び 34℃の 4 点とし、処理時間は 20℃及び 25℃では 2, 4, 6, 8, 12, 16, 20 及び 24 時間, 30℃では 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 及び 10 時間, 34℃では 1, 2, 2.5, 3, 3.5 及び 4 時間とした。

統計処理として、Polo PC software (LeOra Software, CA, USA)を用いて死亡率（プロビット値に換算）に関する 50%死亡時間（LT₅₀）を求め、LT₅₀ 値を種間でノンパラメトリック Friedman test により比較した。

2. 結果

全ての無処理区で死亡個体は認められなかった。5 種ともに CO₂ による明らかな殺虫効果が認められた（表 4-1）。5 種ともに死亡率（%）は処理時間経過にともなって高まり、また、処理温度が高いほど同一の処理時間における死亡率は高まって 100%死亡到達時間は短くなった（第 4-1 ~4-5 図）。LT₅₀ 値は 5 種間で有意差が認められた（表 4-2, $\chi^2=13.8$, $p<0.01$ ）。

3. 考察

本研究では、5 種アザミウマ成虫に対する 60% CO₂ における死亡率と温度及び処理時間の関係を明らかにする（図 4-1~4-5）とともに、LT₅₀ 値を明らかにした（表 4-2）。5 種アザミウマ成虫に共通して、死亡率（%）は温度ごとに処理時間経過に正比例して高まり、100%死亡到達時間は温度が高いほど短くなるという傾向が認められ（図 4-1 ~4-5）、殺虫効果の温度依存性及び処理時間比例性が明らかになった。また、LT₅₀ 値には 5 種間で有意差が認められ、殺虫効果の昆虫種による特異性が明らかになった。殺虫効果の温度依存性は昆虫の環境

表 4-1 アザミウマ成虫の 60% CO₂における死亡率と温度及び処理時間との関係(各温度で無処理区的全個体が生存した)

種名	温度(℃)	処理時間(h)に対する死亡率(%)											
		1 h	2 h	2.5 h	3 h	3.5 h	4 h	6 h	8 h	12 h	16 h	20 h	24 h
<i>F. occidentalis</i>	20								9.3	28.6	60.0	90.0	100.0
	25							20.0	62.0	92.0	100.0		
	30		4.7				56.0	100.0					
	34	12.0	76.0	90.6	100.0								
<i>F. intonsa</i>	20							0.7	4.0	20.7	44.0	81.3	100.0
	25						2.0	16.7	32.7	51.3	100.0		
	30		3.3				42.6	90.0	100.0				
	34	6.6	24.0	56.0	95.3	100.0							
<i>T. tabaci</i>	20						6.0	11.3	30.0	47.3	85.0	100.0	
	25						11.8		64.7	96.5	100.0		
	30	12.7	40.7				80.0	100.0					
	34	12.7	56.0	94.7	100.0								
<i>T. palmi</i>	20		3.3					20.7	34.0	36.0	74.7	100.0	
	25		4.0					32.7	62.0	92.0	100.0		
	30	4.0	21.				86.7	100.0					
	34	13.3	72.7	98.7	100.0								
<i>T. parvispinus</i>	20		1.3				10.7	37.8	68.7	100.0			
	25		18.9				74.7	94.7	100.0				
	30	18.0	44.7				96.7	100.0					
	34	50.0	91.3	100.0									

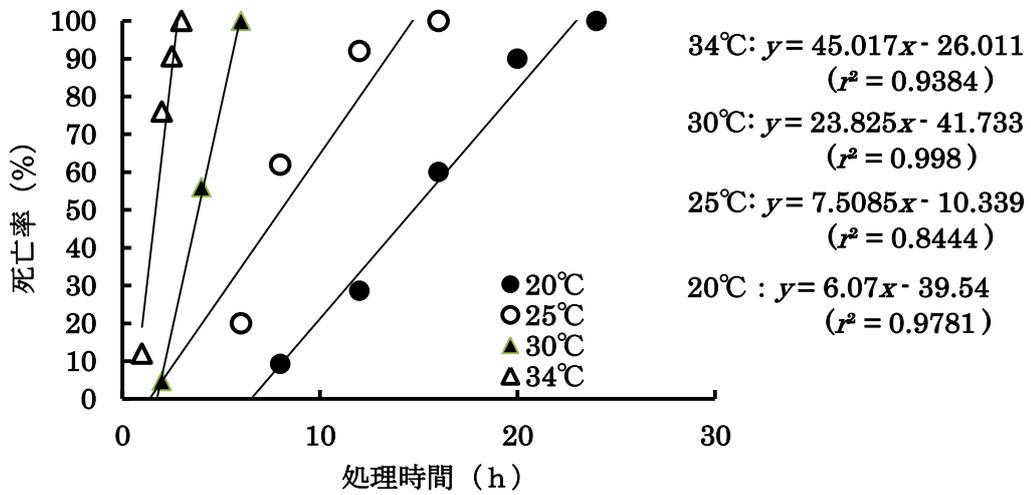


図 4-1 ミカンキイロアザミウマの死亡率と温度及び処理時間との関係

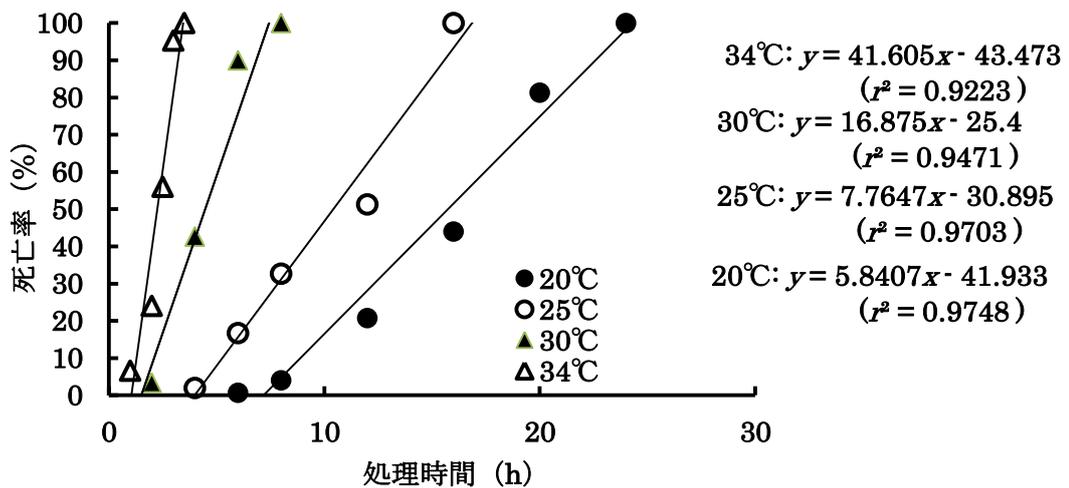


図 4-2 ヒラズハナアザミウマの死亡率と温度及び処理時間との関係

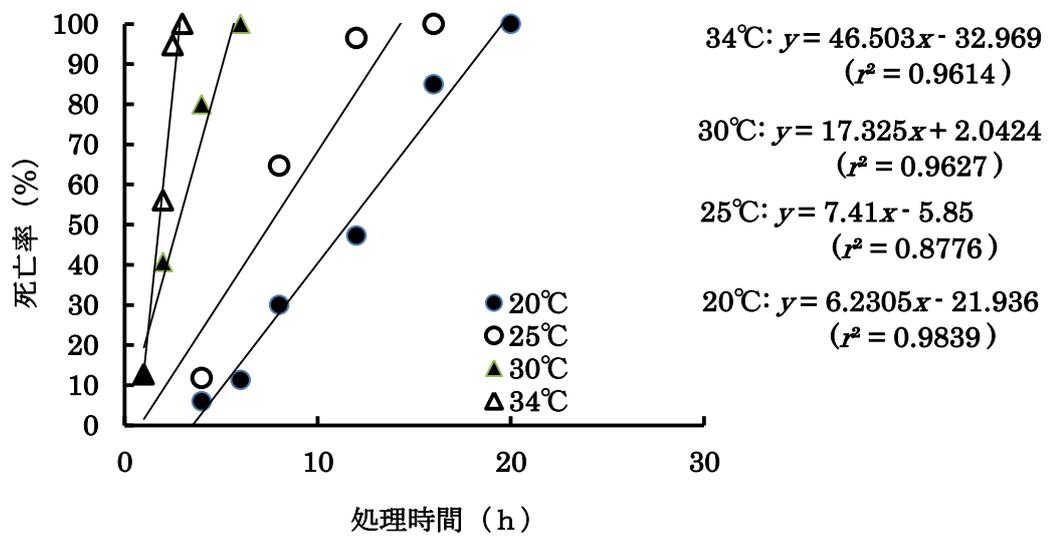


図 4-3 ネギアザミウマの死亡率と温度及び処理時間との関係

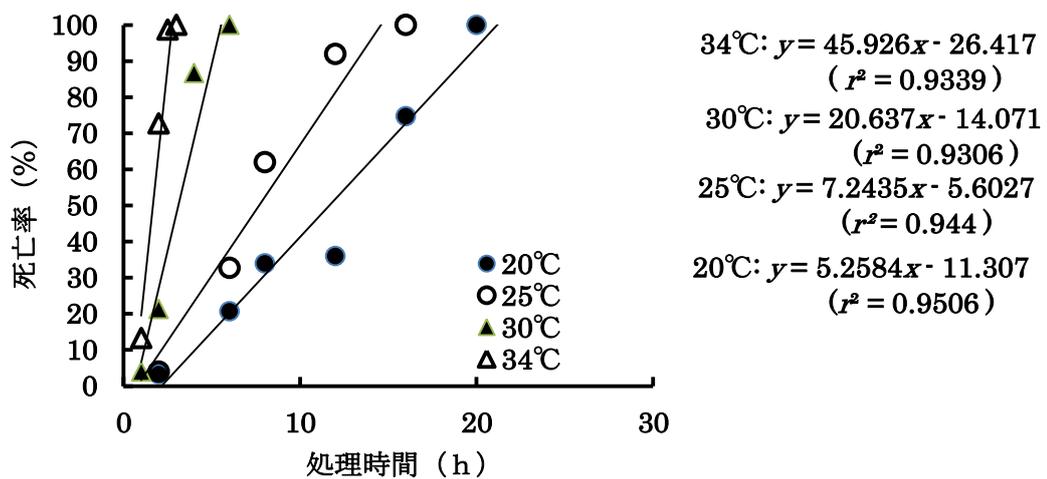


図 4-4 ミナミキイロアザミウマの死亡率と温度及び処理時間との関係

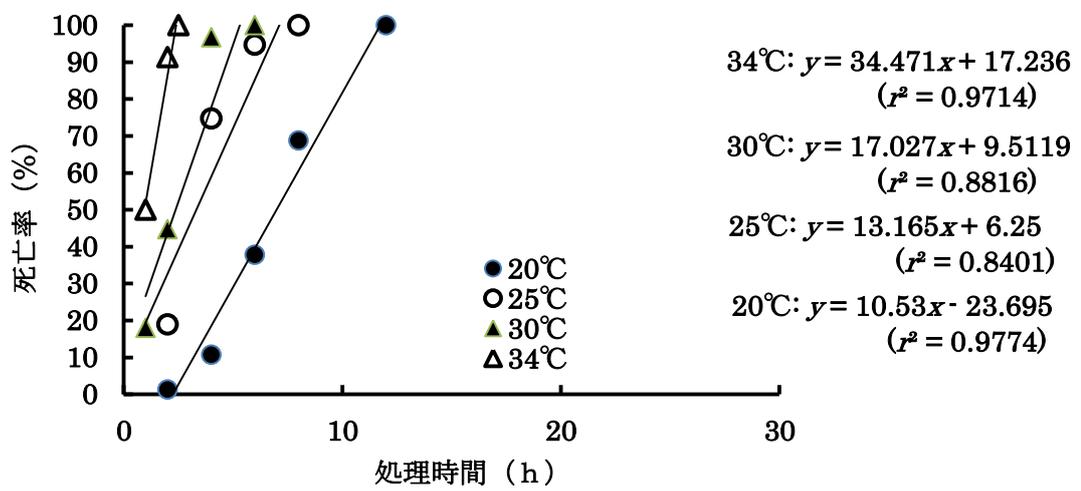


図 4-5 *T. parvispinus* の死亡率と温度及び処理時間との関係

表 4-2 アザミウマ成虫の 60% CO₂ における温度と LT₅₀ (95%CI) の関係

種 名	50% 死亡時間 LT ₅₀ (h)			
	20℃	25℃	30℃	34℃
<i>F. occidentalis</i>	14.5 (13.1-15.0)	7.9 (7.6-8.3)	3.8 (3.6-4.0)	1.7 (1.6-1.8)
<i>F. intonsa</i>	14.0 (13.7-14.3)	9.3 (8.9-9.7)	4.3 (4.1-4.5)	2.3 (2.2-2.4)
<i>T. tabaci</i>	11.4 (10.0-13.0)	7.1 (6.7-7.5)	2.6 (2.4-2.8)	1.9 (1.8-2.0)
<i>T. palmi</i>	8.9 (8.3-9.5)	5.2 (5.0-5.5)	2.8 (2.7-3.0)	1.6 (1.5-1.7)
<i>T. parvispinus</i>	6.8 (6.5-7.2)	3.2 (3.0-3.4)	2.1 (1.9-2.2)	1.0 (0.8-1.1)

LT₅₀ は各温度において 5 種間で有意差があった (Friedman test, $\chi^2 = 13.8$, $p < 0.01$)

温度が高いほど活動が活発になるという変温動物性に起因し、殺虫効果の昆虫種による特異性は好氣的エネルギー代謝速度の種による特異性に起因すると考えられる。活動が活発になれば好氣的エネルギー代謝速度が速まり、体外廃棄すべき CO₂ 量が増加して体液中への KHCO₃ 等重炭酸塩の蓄積速度が速まるからである。好氣的エネルギー代謝速度の種による特異性は有効積算温度の種による特異性によって証明されるように、必要とされる CO₂ の体外排気速度が種によって異なり、体液中への KHCO₃ 等重炭酸塩の蓄積速度が種によって異なるからであると考えられる。このように、殺虫効果の温度依存性及び種による特異性を示すという結果は、高濃度 CO₂ 大気の殺虫作用は高 CO₂ 分圧による体液中への KHCO₃ 等重炭酸塩の蓄積によるとした推論を支持している。

Aharoni et al. (1981) によれば、ミカンキイロアザミウマ成虫・幼虫に対する 2.5℃の 60% CO₂ による 100% 死亡到達時間は 2 日間であった。Mitcham et al. (1997) によれば、ミカンキイロアザミウマに対する 5℃で 45% CO₂ による LT₉₀ は卵が約 4 日間、幼虫及び成虫が約 5 日間であり、また、5℃の 45% CO₂ で 10～15 日間 CO₂ 処理したブドウの品質（硬さ・可溶性固形物・酸味・褐色化・崩れ・腐敗及び食感）には有意な影響が認められなかったとした。これらの報告は、ブドウ付着害虫のくん蒸目的の試験であったため、処理温度が発育零点の約 9.5℃（片山 1997）を大きく下回る 5℃という好氣的エネルギー代謝活性が低い状態にあったことにより 100% 死亡到達時間が長時間を要したものと考えられる。Carpenter et al. (1996) によれば、野菜・果実の害虫 *Thrips obscuratus* (Crawford) に対する 24℃の 60% CO₂ による 100% 死亡到達時間は 1 日間とされ、24℃という常温域のため短くなっている。

本章調査によれば、60% CO₂ によるアザミウマ類の 100% 殺虫所要時間は、30℃で 8 時間以内、25℃で 16 時間以内、20℃で 24 時間以内であったことから、

高濃度 CO₂ 殺虫法は園芸農作物の施設栽培におけるアザミウマ類フリー苗の作成手段として殺虫効果としては実地に適用が可能と考えられる。なお、実地に適用するに当たっては、対象となる園芸作物側に CO₂ 処理による悪影響が及ばないことを確認する必要がある。

第 5 章 炭酸ガスの 4 種アザミウマ卵に対する殺虫効果

前章までの研究で、5 種アザミウマ成虫に対する 30℃の 60% CO₂ によれば、アザミウマ類成虫の 100% 殺虫所要時間は 8 時間以内であり、また、ミカンキイロアザミウマ幼虫に対する CO₂ 処理の殺虫効果は成虫に対するそれとほぼ同等であったことから、高濃度 CO₂ 処理殺虫法の有用性が見通された。しかしながら、*Frankliniella* 及び *Thrips* 属のアザミウマ類は植物組織内に産卵する（宮崎・工藤 1988）ため、検査員や農家にとって卵の発見が困難な害虫である。理想的には、農作物・農産品等として流通される植物は卵ステージを含めてアザミウマ類フリーを実現するために非毒性で安全な CO₂ 殺虫処理を受けることが望ましい。そこで、本章では *Frankliniella* 及び *Thrips* 属の 4 種アザミウマ、ミカンキイロアザミウマ、ヒラズハナアザミウマ、ネギアザミウマ及びミナミキイロアザミウマの植物組織内に産卵された卵ステージに対する CO₂ 殺虫法の殺虫効果を精査して、CO₂ 殺虫法が発育ステージに関わりなく殺虫効果を発揮することを明らかにした。

1. 材料と方法

1) 供試虫

供試した 4 種アザミウマは前章で用いた系統の個体群をそれぞれ累代飼育して用いた。飼育方法は前章に準じた。

2) 採卵方法

側面に通気口を設けた内径 4cm×4cm 高の亚克力円筒容器の底面をシーロンフィルム(富士フィルム製)で蓋をして、インゲン葉片 (*phaseolus vulgaris* L.) を敷きつめ、約 50 個体の雌成虫を収納した後シーロンフィルムで上面を密閉し

た。なお、葉片の下には水で湿らせたろ紙を敷いてほぼ湿度 100%を維持した。25℃及び 16L8D に設定した恒温器（コイトロン KG-50MLA-II，小糸工業(株)製）内で容器ごと所定の採卵期間を維持した後，被産卵インゲン葉片を取り出して底面に水で湿らせたろ紙を敷いたシャーレ（直径 8.5cm）に移し，シャーレを上記恒温器内で所定の日齢に達するまで維持した後 CO₂殺虫処理を施した。

3) 殺卵試験

殺卵試験装置は前章に準じ，ガス組成が 60%CO₂ / 8%O₂ / 32%N₂ の調合ボンベガスを用いた。供試個体は被産卵インゲン葉片入りシャーレを気密容器内にセットし，調合ボンベガスを封入した。気密容器をそれぞれ所定の温度に設定した恒温器（MIR-151，サンヨー）に入れて所定の処理時間を維持した。湿度は気密容器底面に水で濡らした紙タオルを敷いてほぼ 100%を維持した。供試卵数はそれぞれ約 60 卵とし，温度ごとに無処理区を設けた。所定時間処理後大気解放してから，毎日，卵及びふ化個体数を記録し，7 日後までにふ化しなかった個体を死亡と判定した。無処理区でも 7 日後までにふ化しなかった個体を死亡と判定した。卵及びふ化個体数の計測は実体顕微鏡の視野に置かれた被産卵インゲン葉片に下方から光を投射して行った。

1～2 日齢卵について，処理温度は 20，25，30 及び 34℃の 4 点とし，処理時間は 20℃及び 25℃では 4，8，12，16，20，24，及び 28 時間，30℃では 2，4，8，12，16 及び 20 時間，34℃では 4，6，8，10，12，16 及び 20 時間とした。

0 日齢卵及び 3 日齢卵について，処理温度は 25℃で処理時間は 24 時間の 1 条件とした。

4) 統計処理

1～2 日齢卵について，死亡率をプロビット変換し，JMP ver. 9 (SAS Institute, NC, USA)を用いて処理時間ごとの死亡率を温度間及び種間で共分散分析により

比較した。

2. 結果

60% CO₂は4種アザミウマ全ての卵ステージに対して殺虫効果を示した。1～2日齢卵の死亡率(%)は処理時間経過にともなって上昇した(表5-1)。100%死亡到達時間は温度ごとに種間で異なり、20℃ではヒラズアザミウマが28時間、ミカンキイロアザミウマが24時間、ミナミキイロアザミウマが20時間及びネギミウマが16時間、25℃ではヒラズアザミウマが24時間、ミカンキイロアザミウマが20時間、ミナミキイロアザミウマが16時間及びネギミウマが12時間、30℃ではヒラズハナアザミウマが12時間で他の3種は8時間、34℃ではヒラズアザミウマ及びミナミキイロアザミウマが12時間、ネギアザミウマが8時間及びミカンキイロアザミウマが6時間であった。4種間でヒラズハナアザミウマが全ての温度で100%死亡到達時間がもっとも長かった。必要な殺虫効果を発揮するための処理時間はミナミキイロアザミウマを除いて温度が高いほど短くなり、温度間 ($F_{3,41}=7.24, p<0.0005$) 及び種間 ($F_{3,41}=5.76, p<0.0022$) で有意差があった。

60% CO₂における0日齢及び3日齢卵に対する25℃の24時間処理では4種ともふ化個体は認められなかった。

また、殺虫試験に供されたインゲン葉片は最大28時間に亙って60% CO₂に曝された後も何らダメージを受けることなく新鮮さを保っていた。

3. 考察

本研究では、4種アザミウマの卵ステージに対するCO₂殺虫法の殺虫効果を温度及び処理時間を変えて調査した。1～2日齢卵を用いて殺虫効果を評価した理

表 5-1 アザミウマ卵の 60% CO₂ における死亡率と温度及び処理時間との関係

種名	温度 (°C)	無処理区 死亡率(%)	処理時間 (h) に対する死亡率 (%)									
			2 h	4 h	6 h	8 h	10 h	12 h	16 h	20 h	24 h	28 h
<i>F. intonsa</i>	20	7.8		0.0		8.8		56.0	78.6	60.5	87.7	100.0
	25	0.0		21.2		24.5		77.7	87.5	96.0	100.0	100.0
	30	0.0	0.0	8.9		53.1		100.0	100.0	100.0		
	34	0.0		9.5	50.0	77.8	85.7	100.0	100.0	100.0		
<i>F. occidentalis</i>	20	5.5		39.8		37.9		68.0	79.6	89.3	100.0	100.0
	25	0.0		10.0		24.2		84.3	97.5	100.0	100.0	100.0
	30	0.0	6.1	54.7		100.0		100.0	100.0	100.0		
	34	4.2		36.7	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		
<i>T. palmi</i>	20	9.2		9.0		8.1		86.4	74.9	100.0	100.0	100.0
	25	0.0		20.9		60.2		98.1	100.0	100.0	100.0	100.0
	30	0.0	20.0	93.9		100.0		100.0	100.0	100.0		
	34	0.0		37.5		96.2	100.0	100.0	100.0	100.0		
<i>T. tabaci</i>	20	0.0		0.0		15.7		74.7	100.0	100.0	100.0	100.0
	25	8.5		4.0		28.6		100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	30	0.0	16.7	56.8		100.0		100.0	100.0	100.0		
	34	8.3		38.9	89.2	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		

死亡率は無処理区の死亡率からアボットの補正式で補正した。

由は、アザミウマ類は非常に短期間でふ化するので実地に卵の防除を図るには 1～2 日齢卵が適していると考えたからである。

1～2 日齢卵の死亡率 (%) は 4 種ともに処理時間に比例して高まった。1～2 日齢卵の 100% 死亡到達時間は、30℃以下では 4 種ともに温度が高いほど短くなったが、ミナミキイロアザミウマ卵のみ 34℃の方が 30℃より長かった。この理由として、ミナミキイロアザミウマ卵は 30℃を超える高温度域では好氣的エネルギー代謝活性が低下する特性を有している可能性が考えられる。また、100% 死亡到達時間は種間及び温度間で異なっていた。4 種とも全ての日齢 (0, 1～2 及び 3 日齢) 卵が、60% CO₂における 25℃の 24 時間処理で 100% 死亡したことにより、CO₂殺虫法は全ての卵ステージに対して殺虫作用があると考えられる。

100% 死亡到達時間について卵ステージ/ 成虫で比べると、20℃においてヒラズハナアザミウマは 28/24 時間、ミカンキイロアザミウマは 24/24 時間、ミナミキイロアザミウマは 20/20 時間及びネギアザミウマは 16/20 時間、25℃において、ヒラズハナアザミウマは 20/16 時間、ミカンキイロアザミウマは 20/16 時間、ミナミキイロアザミウマは 16/16 時間及びネギアザミウマは 12/16 時間、30℃においてヒラズハナアザミウマは 12/8 時間、ミカンキイロアザミウマは 8/6 時間、ミナミキイロアザミウマは 8/6 時間及びネギアザミウマは 8/6 時間であった (表 4-1)。100% 死亡到達時間について、ネギアザミウマ以外の 3 種は成虫に比べて卵の方が同等またはやや長かったのは、卵が植物組織の中にあるために CO₂ 大気に間接的に触れているのに対して、成虫は CO₂ 大気に直に曝されていることによると考える。前述の通り、Mitcham et al.(1997) によれば、ミカンキイロアザミウマに対する 5℃で 45% CO₂の CO₂殺虫法による LT₉₀ は卵が約 4 日間、成虫及び幼虫が約 5 日間と長時間を要したとともに卵の方が成虫よりや

や短かった。その理由は、処理温度がミカンキイロアザミウマの発育零点 9.5℃（片山 1997）を大きく下回る 5℃という好氣的エネルギー代謝活性が低い状態にあったこと及び好氣的エネルギー代謝活性が低い状態の中で卵の方が成虫より好氣的エネルギー代謝活性がやや高いという可能性が考えられる。

本研究によって、卵ステージについても、CO₂殺虫効果の処理時間比例性、温度依存性及び種による特異性が認められた。これは、高 CO₂ 分圧下における昆虫の変温動物性と好氣的エネルギー代謝速度の種による特異性に基づいた好氣的エネルギー代謝産物 CO₂ = KHCO₃ 等重炭酸塩の体液中への蓄積が CO₂ 殺虫効果の原因であるとする推論を支持している。また、60%CO₂ の CO₂ 殺虫法は、30℃の処理温度を採用すればアザミウマ類の全ステージに対して処理時間が 12 時間以内で 100%殺虫が可能であり、対象農作物側に悪影響がない限り、殺虫効果としてはその実用性の見通しがより確かなものとなった。

第 6 章 炭酸ガスの 2 種アブラムシ成虫に対する殺虫効果

前章までに 5 種アザミウマ成虫及び 4 種アザミウマの卵ステージに対する CO₂ の殺虫効果を明らかにし、CO₂ 殺虫法のアザミウマ類フリー化手段としての実用性を見通した。本章ではより多くの昆虫種に対する CO₂ 殺虫法の適用性を検討するために、アザミウマ類とともに最も重要な園芸作物害虫であるアブラムシ類の中からモモアカアブラムシ及びワタアブラムシの 2 種を対象として、温度及び処理時間を変化させて CO₂ 殺虫法の殺虫効果を明らかにした。

モモアカアブラムシの特徴については第 3 章で述べた。ワタアブラムシは、ほぼ世界中に分布し、特に太平洋諸島を含む熱帯地域で多くみられ、また、冷涼な地域では温室内に生息する (Blackman and Eastop, 2006)。日本では全土に分布する (九州大学農学部昆虫学教室, <http://konchudb.agr.agr.kyushu-u.ac.jp/mokuroku/index-j.html>)。本種は広食性で寄主植物は世界中で栽培作物を含む 100 科以上に及ぶ。主な寄主植物は以下のとおり (Holman 2009; 稲泉 1980; 森津 1983; 日本応用動物昆虫学会 2006) である。ダイズ, インゲンマメ, アズキ, ナス, トマト, トウガラシ, キク, シュンギク, ガーベラ, シソ, ホウレンソウ, サトイモ, イチゴ, ナシ, イチジク, テンサイ, ワタ, カーネーション, ユリ, チューリップ, シクラメン, ケイトウ, キュウリ, メロン, ハイビスカス, ムクゲ, フヨウ, アオギリ, キンセンカ, フダンソウ, サボテン, ハゲイトウ, ラン類, カンキツ, サクラ類, バラ類, バナナ, セキチク, ナデシコ, キリ類。本種はアブラムシ類に共通の吸汁被害及び植物ウィルス伝搬に関与する。特に、日本では施設栽培によるキュウリ, ナス, ピーマン, イチゴ, キクなどに寄生して被害を与える (農文協 1991)。

1. 材料と方法

1) 供試虫

モモアカアブラムシ及びワタアブラムシは2006年に宇都宮大学にて採集した個体群を累代飼育して用いた。モモアカアブラムシはかいわれ大根の実生苗及びワタアブラムシはソラマメの実生苗で飼育した(20℃, 16L8D)。両種とも無翅胎生雌成虫を用いた。

2) 試験方法

殺虫試験装置は前章に準じ、ガス組成は100%CO₂を空気で希釈した組成に相当する60%CO₂/8%O₂/32%N₂の調合ボンベガスを用いた。供試個体を実生苗ごと入れた通気性容器(250ml)を納めた気密容器(直径10cm, 高さ13cm, 1.0l.)内に調合ボンベガスを封入することにより所定のガス組成を形成した後、気密容器を所定の温度に設定した恒温器(MIR-151, サンヨー)に入れ、所定の処理時間を維持した。湿度は気密容器の底面に水で濡らした紙タオルを敷いてほぼ100%を維持した。所定の処理時間経過後、実生苗ごと供試個体を24℃の大気中に開放してから24時間経過後に生死を判定した。温度は20℃, 25℃, 30℃, 34℃の4点とした。処理時間は20及び25℃では2, 4, 6, 8, 10及び16時間, 30及び34℃では1, 2, 3, 及び4時間とした。なお、各濃度とも無処理区を設置し、各試験の供試個体数は60個体とした。

1) 統計処理

死亡率をプロビット変換し、JMP ver. 9 (SAS Institute, Cary, NC, USA)を用いて、共分散解析により死亡率を温度間及び種間で比較するとともに、1次回帰分析により50%死亡時間(LT₅₀)を算定した。

2. 結果

各濃度における無処理区の個体の死亡は認められなかった。60% CO₂ は兩種アブラムシに対して明らかな殺虫効果を及ぼした。死亡率 (%) は全ての温度で処理時間経過にともなって高まった (表 6-1)。兩種の 100% 死亡到達時間を比べる (モモアカアブラムシ/ワタアブラムシ) と、20℃で 16 h / 6 h , 25℃で 4 h / 4 h, 30℃で 3 h / 4 h 及び 34℃で 2 h / 4 h であり、25℃を境に低温側ではワタアブラムシの方が短く、高温側ではモモアカアブラムシの方が短い傾向が示された。必要な死亡率を示す処理時間は温度間で有意差が認められ ($F_{3,21}=5.67$, $p < 0.01$)、種間では有意差が認められなかった ($F_{1,21}=0.01$, $p=0.99$)。LT₅₀ 値が 20, 25, 30 及び 34℃で算定され (表 6-2)、20℃を除いてモモアカアブラムシがワタアブラムシよりも小さな値を示した。

3. 考察

60% CO₂ の 2 種アブラムシに対する殺虫効果について比較検討する。モモアカアブラムシは死亡率 (%) が全ての温度で明らかな処理時間比例性を示すとともに明らかな温度依存性を示した。ワタアブラムシは死亡率 (%) が全ての温度で明らかな処理時間比例性を示したが 100% 死亡時間が見かけ上 25℃以上で一致して温度依存性が不明確であった。しかし、LT₅₀ を見ると 34℃を除く 30℃以下で明らかな温度依存性を示した。ワタアブラムシにおけるこの現象は本種の成長速度が約 22℃を極大として高温側で低下する特性がある (Komazaki, 1982) ためと考えられる。高温側で成長速度が低下するということは高温側で好氣的エネルギー代謝活性が低下してエネルギー代謝産物 CO₂ の産生速度が低下することを意味しているからである。また、100% 死亡時間は、25℃以上で 2 種ともに 4 時間以下であり、アザミウマ類に比べて全ての温度で短かった。これは、アブ

表 6-1 アブラムシ成虫の 60% CO₂における死亡率と温度及び処理時間との関係(各温度で無処理区の全個体が生存した)

種名	温度(℃)	処理時間(h)に対する死亡率(%)								
		0.5 h	1h	2 h	3 h	4 h	6 h	8 h	10 h	16 h
<i>M. persicae</i>	20			31.7		55.0	51.7	93.3	95.0	100.0
	25		51.7	40.0	91.7	100.0				
	30		41.7	95.0	100.0	100.0				
	34	10.0	41.7	100.0	100.0	100.0				
<i>A. gossypii</i>	20			6.7	21.7	88.3	100.0			100.0
	25		3.3	8.3	71.7	100.0				
	30		41.7	76.7	95.0	100.0				
	34		20.0	81.7	91.7	100.0				

表 6-2 アブラムシ成虫の 60% CO₂ における温度と LT₅₀ (95%CI) との関係

種 名	50% 死亡時間 LT ₅₀ (h)			
	20℃	25℃	30℃	34℃
<i>M. persicae</i>	4.1 (3.3-4.7)	1.4 (0.9-1.8)	1.1 (0.9-1.3)	0.9 (0.8-1.0)
<i>A. gossypii</i>	3.3 (3.2-3.5)	2.7 (2.5-2.9)	1.2 (0.9-1.5)	1.6 (1.3-1.7)

ラムシ類の方がアザミウマ類よりも種に固有の体液量当たりの細胞内好氣的エネルギー代謝速度が速いことに起因していると考えられる。

本章研究により、CO₂殺虫法はアザミウマ類のみならずアブラムシ類に対しても明らかな殺虫効果を発揮することが確かめられ、その適用範囲が広がって実用性が増した。すなわち、アザミウマ類フリー目的の条件で CO₂ 殺虫処理を行えば同時にアブラムシ類フリーも達成されることになるメリットがある。また、アブラムシ類の死亡率もアザミウマ類と同様に処理時間比例性及び温度依存性を示したことから、高濃度 CO₂ の殺虫作用は高 CO₂ 分圧による体液中への KHCO₃ 等重炭酸塩の蓄積によることとした推論が支持された。

第7章 炭酸ガスの2種コナカイガラムシに対する殺虫効果

前章までの研究により，CO₂殺虫法の確かな殺虫効果を発揮させるためには，CO₂濃度が40%（CO₂分圧が40kPa）以上すなわち通常大気中とのCO₂分圧比が40kPa/0.038kPa \geq 1000であり，実地適用の観点から60%CO₂によるアザミウマ及びアブラムシ類に対する殺虫効果を明らかにした．そして，高濃度CO₂の殺虫作用は，CO₂分圧が通常大気中のその1000倍以上という高CO₂分圧のために気管系からの体外排気遅れとなった昆虫生体細胞内ミトコンドリアにおける好氣的エネルギー代謝産物CO₂=KHCO₃等重炭酸塩が昆虫体液中に蓄積して飽和することに起因するものと見通された．さらに，CO₂の殺虫効果には昆虫の変温動物性にに基づく温度依存性があったことから，昆虫の温度依存性の表現として昆虫種ごとに定量的に確かめられている有効積算温度（ K ）との相関性が予測される．前章までの調査対象であったモモアカアブラムシは $K=113.1$ DD（太田・大森司 2002）及びミカンキイロアザミウマは $K=194$ DD（片山 1997）と有効積算温度（ K ）が小さく成長速度の速い昆虫種に属するが本章では有効積算温度（ K ）が600日度を超えて成長速度が遅い昆虫種として $K=643$ DD（澤村・奈良井 2008）のフジコナカイガラムシ及び $K=676$ DD（澤村・奈良井 2008）のクワコナカイガラムシに対して処理温度と殺虫効果の関係及び100%死亡到達時間を調査して前章までの研究結果と合わせて比較検討した．

フジコナカイガラムシ及びクワコナカイガラムシはともに日本国内で発生し，果樹に寄生する難防除害虫である．フジコナカイガラムシはブドウ，ナシ，イチジク，カキなどの果樹に寄生し（上野 1963；河合 1980，；柴尾・田中 2000），カキでは本種の加害により果実の着色不良や軟化，すす病による汚損などの被害が生じる．近年，合成ピレスロイド剤に対する感受性の低下についても報告

されている（森下 2006）。クワコナカイガラムシは、ナシ、ブドウ、モモ、アンズ、イチジクなどの果実、葉、新梢に寄生加害し、鳥取県では薬剤感受性の低下についても報告されている（伊澤 1990）。また、両種は、農林水産省植物防疫所による植物検査統計レポートの「輸出植物検査病菌・害虫発見記録（1997~2009）」によれば輸出生果実から発見される代表的害虫であり、フジコナカイガラムシは輸出用カキ等から、クワコナカイガラムシは輸出用ナシやブドウ等から発見されている。

1. 材料及び方法

1) 供試虫

フジコナカイガラムシ及びクワコナカイガラムシは 2000 年に島根県のブドウ樹より採集した個体群をソラマメ催芽種子による飼育法（Narai and Murai 2002）により累代飼育した雌成虫を用いた。飼育条件は 20℃で明暗周期は 16L8D とした。

2) 試験方法

殺虫試験装置は前章に準じ、ガス組成が 60%CO₂ / 20%O₂ / 20%N₂ の調合ボンベガスを用いた。供試虫はソラマメ催芽種子ごと通気性を確保した収納容器に納めて気密容器内にセットして、調合ボンベガスを封入した。気密容器をそれぞれ所定の温度に設定した恒温器（MIR-151, サンヨー）に入れ、所定の時間を維持した。湿度は気密容器底面に水で濡らした紙タオルを敷いてほぼ 100%を維持した。生死の判別は大気開放後 24 時間経過後に行った。

3) 処理温度と殺虫効果

処理温度を 24℃, 26℃, 28℃及び 30℃の 4 処理とし、処理時間は 24 時間一定とした。供試成虫数は 50 個体とした。

4) 100%死亡到達時間

処理温度は 24℃, 30℃及び 34℃の 3 処理とし, 処理時間は 12 時間, 24 時間, 48 時間及び 72 時間の 4 処理とした.

2. 結果

1) 処理温度と殺虫効果の関係

60%CO₂の 24 時間処理における処理温度 x (℃) と死亡率 y (%) との回帰式はそれぞれ, フジコナカイガラムシでは $y=11.41x-250.3$ ($r^2=0.9748$, $p<0.001$), クワコナカイガラムシでは $y=11.13x-238.3$ ($r^2=0.9233$, $p<0.001$) となり, 両種ともにほぼ直線関係を示した(図 7-1).

2) 100%死亡到達時間

60%CO₂における 100%死亡到達時間は, フジコナカイガラムシ及びクワコナカイガラムシともに, 24℃で 48 時間以内, 30℃で 24 時間以内及び 34℃では 12 時間以内であり, 両種ともに処理温度が高いほど殺虫効果が高かった(表 7-1).

3. 考察

フジコナカイガラムシ及びクワコナカイガラムシに対する 60%CO₂による死亡率は両種ともに処理温度にほぼ比例して高まり(図 7-1), 100%死亡到達時間は両種ともに 24℃で 48 時間, 30℃で 24 時間, 34℃で 12 時間(表 7-1)と温度が高いほど短くなって, CO₂殺虫効果の温度依存性が確かめられた. これは, 昆虫の活動は環境温度が高いほど活発になるという昆虫の変温動物性に起因し, 環境温度が高いほど好氣的エネルギー代謝速度が速まり(有効積算温度の値によって定量化される), 好氣的エネルギー代謝産物 CO₂の気管系からの体外排気停滞による KHCO₃等重炭酸塩の体液中への蓄積速度が速まるとしたこれまで

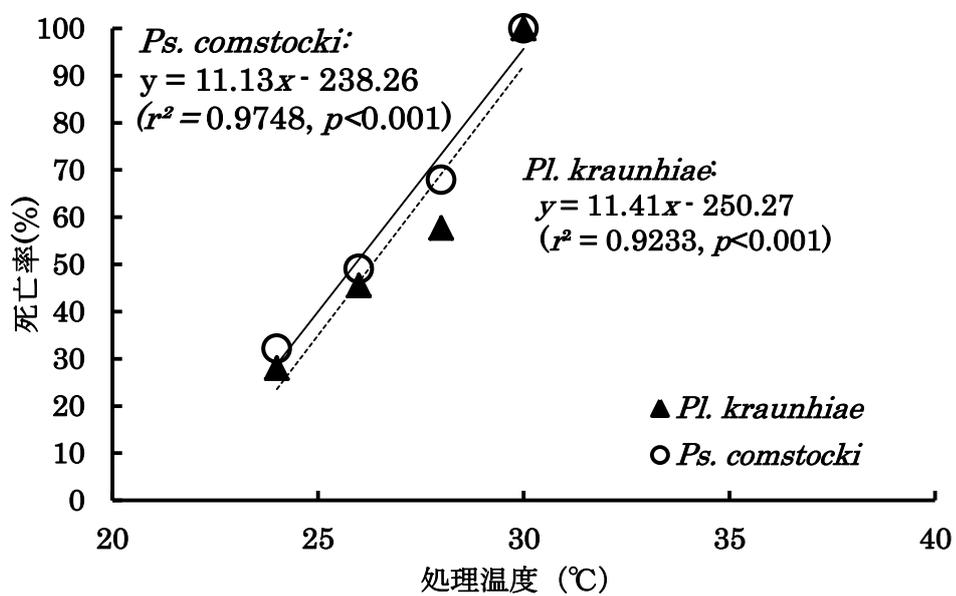


図 7-1 2種カイガラムシの 60%CO₂(24 h 処理)による死亡率と温度との関係

表 7-1 2種コナカイガラムシ雌成虫の死亡率と処理時間の関係

処理温度 ℃	昆虫種	処理時間 (h) における死亡率(%)			
		12h	24h	48h	72h
24	<i>Pl.kraunhiae</i>	—	28.0 (68)	100(32)	100(52)
	<i>Ps.comstocki</i>	—	32.1(56)	100(81)	100(42)
30	<i>Pl.kraunhiae</i>	65.6(32)	100(31)	—	—
	<i>Ps.comstocki</i>	69.8(43)	100(45)	—	—
34	<i>Pl.kraunhiae</i>	100(40)	100(45)	—	—
	<i>Ps.comstocki</i>	100(49)	100(52)	—	—

() は供試個体数を示す。

の推論を支持する結果である。また、100%死亡到達時間の長さが両種間ではいずれの温度においてもほとんど違いがなかったのは、両種の細胞内ミトコンドリアにおける好氣的エネルギー代謝速度の類似性（有効積算温度がフジコナ 643 DD 及びクワコナ 676 DD と類似している）に起因すると考えられる。2種コナカイガラムシの100%死亡到達時間の長さが前述のアザミウマ類及びアブラムシ類に比べて数倍も長く、30℃で比べるとアザミウマ類に対して $24\text{h} / (6\sim 8)\text{h} = (3\sim 4)$ 倍、アブラムシ類に対して $24\text{h} / 4\text{h} = 6$ 倍であった。これは、有効積算温度の値で表現される好氣的エネルギー代謝速度の差異にほぼ相応しているものと考えられる。また、100%死亡到達時間の長さが第2章におけるバナナコナカイガラムシに対する14℃の40%CO₂で5日間に対して本章における2種フジコナカイガラムシに対する24℃の60%CO₂で2日間という違いはCO₂濃度の違いよりも温度の違いの影響が大きいと考えられる。

このように本章までに調査した全ての昆虫種を通して示された、温度が高いほど殺虫効果が高いというCO₂殺虫効果の温度依存性の共通性と昆虫種ごとに100%死亡到達時間の長さが異なるというCO₂感受性の昆虫種による特異性がより明確になった。

第 8 章 炭酸ガスのハスモンヨトウ幼虫体液 pH に対する影響

前章までのバナナコナカイガラムシ, ウスイロマルカイガラムシ, ミカンキイロアザミウマ, ヒラズハナアザミウマ, ネギアザミウマ, ミナミキイロアザミウマ, *T. parvispinus*, モモアカアブラムシ, ワタアブラムシ, フジコナカイガラムシ及びクワコナカイガラムシという 11 種の昆虫に対する高濃度 CO₂ 殺虫試験結果から, 高濃度 CO₂ 大気中に曝された昆虫生体の細胞内好氣的エネルギー代謝産物 CO₂ は, 体外大気中の高 CO₂ 分圧によって気管系を通じた体外排気が阻まれて, 体液中に KHCO₃ 等の重炭酸塩として蓄積されて行くものと推論された. 体液中の KHCO₃ 等重炭酸塩蓄積量の増加すなわち重炭酸塩濃度が増加するとすれば, 体液の pH が変化することが予想される. 理化学辞典(長倉ら, 2000)によれば, 重炭酸塩である KHCO₃ 及び NaHCO₃ の水溶液の pH はアルカリ性を示し, その飽和水溶液の pH は KHCO₃ では 8.2 及び NaHCO₃ では 8.3 とされる. 本章ではチョウ目ヤガ科ハスモンヨトウ幼虫を用いて, CO₂ 処理による昆虫体液 pH の変化と昆虫個体死亡との関係を明らかにした.

ハスモンヨトウは, インド, 日本, 中国など東南アジアの多くの国々に分布する害虫である. 広食性で各種野菜や花き類の葉や茎, 花, 蕾, 果実などを加害するが, 幼虫の齢期が進むほど薬剤に対する感受性が低下し, 中齢幼虫になると蕾, 果実や結球内に食入するため薬剤がかかりにくくなるなど防除が困難な害虫である(本間 2004). 本種は中型のガであり, 幼虫は体内の各種生理的変化を調査するのに適しており, 体液量も比較的多いので, 採取して pH を測定するのに適していた.

1. 材料及び方法

1) 供試虫

2010年に宇都宮市峰町のダイズで採集したハスモンヨウトウの個体群を人工飼料（インセクタ LF，日本農薬工業）により累代飼育した5齢幼虫個体を用いた。

2) 試験方法

殺虫試験装置は前章に準じ，ガス組成はCO₂を空気で希釈して60%CO₂とした組成に相当するボンベガス（60%CO₂/8%O₂/32%N₂）を用いた。供試虫は通気性を確保した収納容器に納めて気密容器内にセットして，調合ボンベガスを封入した。気密容器をそれぞれ24℃に設定した恒温器（MIR-151，サンヨー）に入れ，所定の処理時間を維持した。湿度は気密容器底面に水で濡らした紙タオルを敷いてほぼ100%を維持した。生死の判別は大気開放後24時間経過後に行った。

(1) 処理時間と体液 pH の測定

処理時間は3，6，12，24時間区として，各区とも20個体以上を供試した。所定処理時間経過ごとに各試験区の全個体から体液30μLほどを腹脚から吸引採取して，コンパクト pH メーター（LAQUA twin pH B-712，HORIBA）のセンサー部分に置いて pH を測定した。pH 測定後24時間大気中に開放した後，生死を判別し，生存個体の体液 pH を再び測定した。無処理区は24時間経過直後に生死の判別及び pH の測定を行った。

(2) 死亡率と温度の関係

温度は24℃，30℃，34℃の3点とし，処理時間は24℃では3時間，6時間，12時間及び24時間の4点，30℃及び34℃では4時間，8時間，12時間，16時間及び20時間の5点とした。生死の判別は大気開放後24時間経過後に行った。供試虫数は20～40個体とした。

2. 結果

1) CO₂ 処理時間と体液 pH の関係

無処理区では 24 時間後 20 個体が全て生存し、その体液 pH は 6.89 ± 0.11 であった。3 時間処理区では処理直後の 21 個体の pH は 7.77 ± 0.16 、大気開放 24 時間後 20 個体が生存し、その pH は 6.88 ± 0.12 であった。6 時間処理区では処理直後の 21 個体の pH は 8.12 ± 0.15 、大気開放 24 時間後 18 個体が生存し、その pH は 6.81 ± 0.07 であった。12 時間処理区では処理直後の 20 個体の pH は 8.10 ± 0.18 、大気開放 24 時間後 6 個体が生存し、その pH は 7.05 ± 0.08 であった。24 時間処理区では処理直後の 20 個体の pH は 8.16 ± 0.18 、大気開放 24 時間後は生存個体が認められなかった (表 8-1)。

2) 死亡率と温度の関係

無処理区では死亡個体は認められなかった。死亡率は各温度とも処理時間に比例して高まった。100% 死亡到達時間は、24℃で 24 時間、30℃で 16 時間及び 34℃で 12 時間であり、温度が高いほど短くなった。(表 8-2)。

3. 考察

供試個体の体液は、通常大気中では中性ではなく酸性側の $\text{pH} \approx 6.9$ にあったものが、CO₂ 処理時間の経過に伴って体液 pH が上昇してアルカリ性を示し、 $\text{pH} \approx 8.1 \sim 8.2$ に近づくと死亡する個体が出現し始め、 $\text{pH} \approx 8.1 \sim 8.2$ に留まる時間が比較的短ければ大気解放後には通常大気中における値 $\text{pH} \approx 6.9$ に復帰して生存を続ける個体が多く、体液 $\text{pH} \approx 8.1 \sim 8.2$ に留まる時間が長ければ長いほど体液 pH の通常値への復帰率が減少し、ついにはすべての個体の死亡が確定するということが明らかになった。ここで、 $\text{pH} \approx 8.1 \sim 8.2$ という値は重炭酸塩飽和水

表 8-1 24℃の 60% CO₂におけるハスモンヨトウ幼虫の体液 pH の変化

処理時間	pH 測定時期	供試個体数	生存個体数	pH*
0	24 時間後	20	20	6.89±0.11
3	処理直後	21	—	7.77±0.16
	大気開放 24 時間後		20	6.88±0.12
6	処理直後	21	—	8.12±0.15
	大気開放 24 時間後		18	6.81±0.07
12	処理直後	20	—	8.10±0.18
	大気開放 24 時間後		6	7.05±0.08
24	処理直後	20	—	8.16±0.18
	大気開放 24 時間後		0	—

* 値は平均値±標準偏差

表 8-2 60% CO₂におけるハスモンヨトウ幼虫の死亡率と温度の関係

処理時間 (h)	死亡率 (%)		
	24℃	30℃	34℃
3	4.8 (21)	—	—
4	—	75.0 (48)	81.2 (48)
6	14.3 (21)	—	—
8	—	80.0 (50)	88.0 (50)
12	70.0 (20)	93.9 (49)	100.0 (40)
16	—	100.0 (47)	100.0 (40)
20	—	100.0 (45)	100.0 (40)
24	100.0 (20)	—	—

() は供試個体数を示す。

溶液の pH 値にほぼ一致する。前述の通り， KHCO_3 では $\text{pH} \approx 8.2$ ， NaHCO_3 では $\text{pH} \approx 8.3$ である（長倉ら 2003）。ここで，昆虫の体液の無機物組成の特徴として K^+/Na^+ 比 ≈ 8 （ヒトでは $1/2$ ）と高いので（池庄司ら 1997），昆虫体液中の重炭酸塩は KHCO_3 が主体と考えられる。そして，高 CO_2 分圧下におけるエネルギー代謝産物 CO_2 を細胞外へ除去できない状態がある時間以上長く続けばエネルギー代謝機能は完全に失われ，生体活動を支える主要な細胞が死亡するに至るものと考えられる。以下，詳しく考察する。

1) CO_2 処理時間経過と体液中の水酸化物イオン濃度 $[\text{OH}^-]$ 及び水素イオン濃度 $[\text{H}^+]$ の変化

pH とは，水溶液中の水素イオン濃度 $[\text{H}^+]$ を示す数値を n とするとき， n の対数の逆数のことであるから（水素イオン指数： $\text{pH} = -\log n$ ），水溶液の酸性・アルカリ性の度合いを示す指標に過ぎず，水溶液の化学的性質は，水溶液中の水素イオン濃度 $[\text{H}^+]$ （ mol/l ；以下省略）と水酸化物イオン濃度 $[\text{OH}^-]$ （ mol/l ；以下省略）のバランスによって顕われる。その場合，水溶液の水素イオン濃度 $[\text{H}^+]$ と水酸化物イオン濃度 $[\text{OH}^-]$ との積の値は，温度が一定であれば常に一定であるという水のイオン積の法則が成立し，温度 25°C では $K_w = [\text{H}^+][\text{OH}^-] = 1.0 \times 10^{-14} (\text{mol/l})^2$ であることが援用できる。

3時間及び6時間処理区個体の体液中の水酸化物イオン濃度 $[\text{OH}^-]$ と無処理区の供試個体の体液中の水酸化物イオン濃度 $[\text{OH}^-]$ との比（ y ）と CO_2 処理時間（ x ）との回帰式を求めると， $y = 2.5x + 0.8333$ （ $r^2 = 0.9985$ ， $p < 0.001$ ）となり，正比例関係が認められた（図 8-1）。

ここで，水酸化物イオン濃度 $[\text{OH}^-]$ の増加比を以下のように算定した。

$$\begin{aligned} \cdot \text{処理前 } \text{pH} = 6.9 &\rightarrow \text{水酸化物イオン濃度 } [\text{OH}^-] = 10^{-14} / [\text{H}^+] = 10^{-14} / 10^{-6.9} \\ &= 10^{-7.1} \rightarrow \text{水酸化物イオン濃度 } [\text{OH}^-] \text{ の増加比} : 10^{-7.1} / 10^{-7.1} = 1 \end{aligned}$$

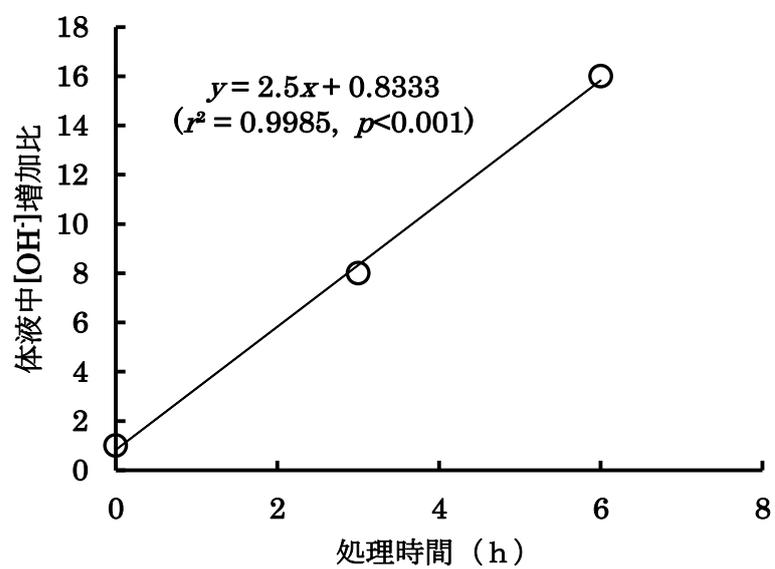


図 8-1 60%CO₂ の 24℃ における処理時間とハスモンヨトウ幼虫体液中
水酸化物イオン濃度の増加比との関係

・ 3 時間後 pH = 7.8 →水酸化物イオン濃度 $[\text{OH}^-]=10^{-14} / 10^{-7.8}=10^{-6.2}$

→水酸化物イオン濃度 $[\text{OH}^-]$ の増加比： $10^{-6.2} / 10^{-7.1}=10^{0.9} \doteq 8$

・ 6 時間後 pH = 8.1 →水酸化物イオン濃度 $[\text{OH}^-] = 10^{-14} / 10^{-8.1} = 10^{-5.9}$

→水酸化物イオン濃度 $[\text{OH}^-]$ の増加比： $10^{-5.9} / 10^{-7.1}=10^{1.2} \doteq 16$

なお、12 時間及び 24 時間後の水酸化物イオン濃度 $[\text{OH}^-]$ の増加比は 6 時間処理後のままの約 16 倍であった。一方、水素イオン濃度 $[\text{H}^+]$ は水のイオン積の法則から CO_2 処理時間に反比例して減少したのは明らかであり、水素イオン濃度 $[\text{H}^+]$ の減少比は以下のように算定できる。

・ 処理前 $[\text{H}^+] = 10^{-6.9}$ →水素イオン濃度 $[\text{H}^+]$ の比： $10^{-6.9} / 10^{-6.9} = 1$

・ 3 時間処理後 $[\text{H}^+] = 10^{-7.8}$ →水素イオン濃度 $[\text{H}^+]$ の減少比： $10^{-7.8} / 10^{-6.9}$
 $= 10^{-0.9} = 1 / 10^{0.9} = 1 / 8$

・ 6 時間処理後 $[\text{H}^+] = 10^{-8.1}$ →水素イオン濃度 $[\text{H}^+]$ の減少比： $10^{-8.1} / 10^{-6.9}$
 $= 10^{-1.2} = 1 / 10^{1.2} = 1 / 16$

また、水素イオン濃度 $[\text{H}^+]$ と水酸化物イオン濃度 $[\text{OH}^-]$ のバランスで比べると、処理前は水素イオン濃度 $[\text{H}^+]$ /水酸化物イオン濃度 $[\text{OH}^-]=10^{-6.9}/10^{-7.1} \doteq 10^{-0.2} \doteq 1.6$ であり水素イオン濃度 $[\text{H}^+]$ の方が 1.6 倍大きかったものが、3 時間処理区では $[\text{H}^+]/[\text{OH}^-]=10^{-7.8}/10^{-6.2} \doteq 10^{-1.6} \doteq 1/40$ 、6 時間処理後以降では $[\text{H}^+]/[\text{OH}^-]=10^{-8.1}/10^{-5.9} \doteq 10^{-2.2} \doteq 1/160$ となって大幅に逆転し、水酸化物イオン濃度 $[\text{OH}^-]$ の方が著しく大きくなっている。さらに、 $[\text{H}^+]/[\text{OH}^-]$ の減少比で見ると、 $1/160 \div 1.6 = 1/256$ となっている。このような処理前と処理後で大幅な変化を示した体液中の水素イオン濃度 $[\text{H}^+]$ と水酸化物イオン濃度 $[\text{OH}^-]$ のバランスと供試個体の生死の関係を見ると、通常大気中における $[\text{H}^+]/[\text{OH}^-]$ の適正值 $\doteq 1.6$ に対して約 $1/64$ までの低下であればほとんどの個体が生存していたが、適正值の約 $1/256$ に低下すれば生存個体と死亡個体が混在するようになり、 $1/256$ 以下

の状態における時間経過にともなって死亡個体が増加し続けて遂には 100% 死亡に至るといった結果であった。また、 $[H^+]/[OH^-]$ が一度は適正值の 1/256 に低下しても、そこでの滞留時間が短ければ、大気開放されることにより、体液中 $[H^+]/[OH^-]$ は適正值の 1.6 に回復して生存を維持できることも明らかになった。

CO₂ 処理による個体死亡の原因としては、開放血管系の昆虫においては体液と細胞液はほぼ均質であるから、細胞内液の水素イオン濃度 $[H^+]$ と水酸化物イオン濃度 $[OH^-]$ のバランスが適正状態から大幅に変化することにより、細胞内で営まれる生命維持反応を主導する多くの酵素の活性（最適 $[H^+]/[OH^-]$ を頂点とする山型を形成する）が低下することより生命維持反応が正常に作動しなくなる可能性が高いと考えられる。また、細胞内外に行き渡る低水素イオン濃度 $[H^+]$ 状態が細胞内ミトコンドリアにおける ATP 合成の最終プロセス・電子伝達系が正常に作動するために必要なミトコンドリア内膜内外の水素イオン濃度勾配（瀬名・大田 2000）に影響をあたえる可能性も考えられる。

2) 死亡率と温度との関係

100% 死亡到達時間が、24℃で 24 時間、30℃で 16 時間及び 34℃で 12 時間（表 8-2）というように、これまでに調査した他の昆虫種と同様に温度が高いほど死亡率が高くなる温度依存性を示した。また、100% 死亡到達時間の値はアザミウマ類よりは長く、コナカイガラムシ類よりは短い傾向が示された。30℃で比べると、アザミウマ類成虫が 6~8 時間、ハスモンヨトウ幼虫が 16 時間、コナカイガラムシ類成虫が 24 時間であったから、ハスモンヨトウはほぼ中間の値を示した。これらはそれぞれの有効積算温度の値に対応するものと推測される。

第 9 章 総合考察

高濃度炭酸ガス殺虫法は、炭酸ガス自体に毒性がなく残留毒性の心配もない上に原料炭酸ガスが石油精製工程などの廃棄ガスからの副産品であるため温室効果の増幅要因にならないので、人類を含む生物や地球環境にとってクリーンで安全な農作物害虫の防除法である。

本研究では、アザミウマ類を中心として、アブラムシ類、コナカイガラムシ類、マルカイガラムシ及びハスモンヨトウなど 12 種の園芸作物害虫を用いて炭酸ガスの殺虫効果を評価し、園芸作物の施設栽培育苗過程及び物流過程における害虫フリー化手段としての高濃度炭酸ガス殺虫法の実用化への道筋をつけることができた。それぞれの害虫種に対する 100% 殺虫所要時間は、30℃の 60% CO₂ 処理の場合、アブラムシ類は 4 時間、アザミウマ類の成虫は 8 時間及び卵は 12 時間、ハスモンヨトウ幼虫は 16 時間及びコナカイガラムシ成虫は 24 時間であることを明らかにした。併せて、高濃度炭酸ガスの殺虫効果の特徴として、処理時間経過にともなって死亡率が高まるという処理時間への比例性、処理温度が高いほど死亡率が高まるという温度への依存性、昆虫種による殺虫効果の特異性及び有効積算温度が小さいほど 100% 殺虫所要時間が短くなるという有効積算温度との相関性などを示すことを明らかにした。また、ハスモンヨトウ幼虫を用いて、CO₂ 処理による体液 pH の変化を調査し、CO₂ 処理時間経過にともなって体液 pH は弱酸性側 (pH≒6.9) からアルカリ性側 (pH≒8.2: 重炭酸塩 KHCO₃ の飽和水溶液 pH に匹敵) へと大きく変化し、その状態での時間経過にともなって死亡個体数が増加し、ついには 100% の個体が死亡するに至ることを明らかにした。

本章では、それらの成果を総合して評価することにより、高濃度炭酸ガス殺

虫法は園芸作物の施設栽培育苗過程及び物流過程における害虫フリー化手段として、対象農作物側に悪影響を及ぼさない限り、殺虫効果としては実地に適用可能であると判断し、各種害虫に対する実用殺虫条件設計手法を提案した。加えて、高濃度炭酸ガスの殺虫メカニズムについて検討した。

1. 高濃度 CO₂ 殺虫法の園芸作物害虫フリー苗作成等実用条件設計手法の提案

1) 100% 致死時間と有効積算温度の関係

本研究において調査した 12 種の昆虫の内、これまでに有効積算温度の測定値が公表されている 9 種（表 9-1）について、本研究において 9 種共通に 100% 死亡到達時間（以降、100% 致死時間）（h）の測定値がある 30℃ の 60% CO₂ における昆虫種ごとの 100% 致死時間（h）の値と有効積算温度（ K ; DD）の値から両者の関係を検討した。

100% 致死時間 y （h）と有効積算温度 x （ K ; DD）との回帰式を求めると、 $y = 0.0366x - 1.0738$ （ $r^2 = 0.9603$, $p < 0.001$ ）となり（図 9-1）、100% 致死時間（h）と有効積算温度（DD）は直線関係を示し、強い相関性が認められた。これは、変温動物たる昆虫の種に特有の好氣的エネルギー代謝速度が種に特有な CO₂ 処理による 100% 致死時間の値を決める要因であることを示している。

また、図 9-1 図及び本回帰式（ $y = 0.0366x - 1.0738$ ）を用いて、殺虫試験データがない場合でも有効積算温度（ K ; DD）が既知の害虫に対して、30℃ の 60% CO₂ 処理を適用する場合の 100% 致死時間を推定することが可能である。

2) 致死有効積算温度（ K_{CO_2} ; DD）の案出

上記 1 項の 100% 致死時間と有効積算温度との比例関係の成立という結果に基づいて、CO₂ 致死時間に関わる仮称「致死速度（ $1/D$ ）」及び「致死有効積算温度（ K_{CO_2} ; DD）」を定義・導入して、致死有効積算温度（ K_{CO_2} ; DD）と発育期

表 9-1 60%CO₂ の 30℃ における 9 種昆虫の 100% 致死時間と有効積算温度

昆虫種	100% 致死時間 (h)	有効積算温度 (引用文献) (DD)
<i>M. persicae</i>	3	113.1 (太田・大秦司, 2002)
<i>A. gossypii</i>	4	181.8 (Komazaki, 1982)
<i>F. occidentalis</i>	6	194 (片山, 1997)
<i>F. intonsa</i>	8	160.1 (村井, 1988)
<i>T. tabaci</i>	6	232.6 (Murai, 2000)
<i>T. palmi</i>	6	189.1 (Kawai, 1986)
<i>S. litura</i>	16	526.3 (Miyashita, 1971)
<i>Pl. kraunhiae</i>	24	643 (澤村・奈良井, 2008)
<i>Ps. Comstocki</i>	24	676 (澤村・奈良井, 2008)

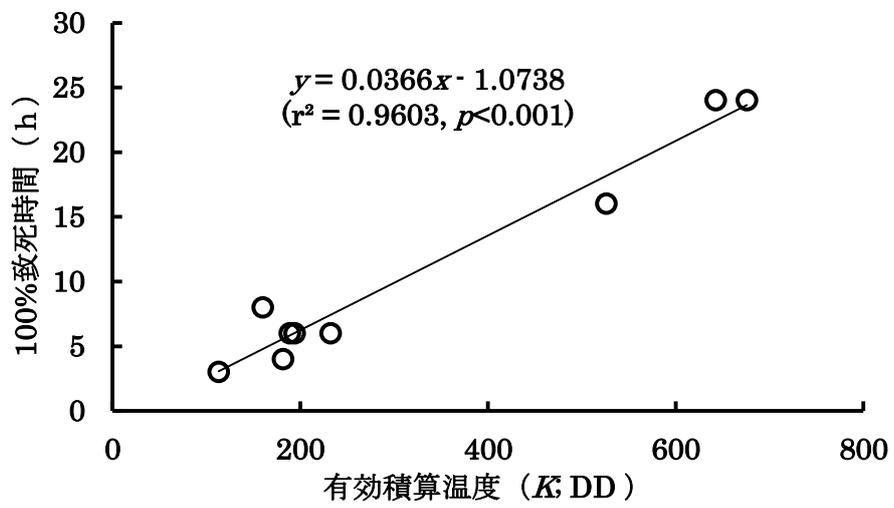


図 9-1 60% CO₂*における 9 種昆虫の 100% 致死時間と有効積算温度との関係

* 処理温度は 30℃

間に関わる有効積算温度 (K ; DD)との相関性について検討した。

(1) 致死速度 ($1/D$) 及び致死有効積算温度 (K_{CO_2} ; DD) の定義

以下のとおり定義する。

① 致死速度($1/D$) とは, 100%致死時間 (D ; 日数) の逆数であり, 発育期間に関する有効積算温度 (K ; DD) の算定の基礎となる発育速度 ($1/D$) に相当する。

② 致死零点 (t_0)とは, 規則性のある細胞増殖活動が生起してエネルギー代謝産物 CO_2 が産生される下限温度を指す。致死速度 [y 軸] と処理温度 [x 軸] との関係図において, $y = 0$ に対応する処理温度 ($^{\circ}C$) の値であり, 発育期間に対する有効積算温度に関わる発育零点(t_0)に相当する。

③ 致死有効積算温度 (K_{CO_2}) とは, 温度を T とすれば, $K_{CO_2} = D(T - t_0)$ であり, 発育期間における有効積算温度 (K) に相当する。

(2) 致死有効積算温度 (K_{CO_2} ; DD) と発育有効積算温度 (K ; DD)との相関性

60% CO_2 処理による $20^{\circ}C$, $24^{\circ}C$ または $25^{\circ}C$ 及び $30^{\circ}C$ における 100%致死時間を用いて昆虫種ごとに致死速度を算定した (表 9-2)。なお, 実用されている有効積算温度 (K ; DD) の算定に当たっては $30^{\circ}C$ 以下のデータが用いられているので, 本検討においても $34^{\circ}C$ のデータは除外した。次に, 昆虫種ごとに致死速度 (y) と温度 (x) との回帰式を求めたところ, それぞれの回帰式はほぼ直線関係を示した。そこで, 回帰式の傾斜の逆数を以って致死有効積算温度 (K_{CO_2} ; DD) とした (表 9-3)。その上で, 致死有効積算温度 y (DD) と発育有効積算温度 x (DD) との回帰式を求めると, $y = 0.0184x + 0.4888$ ($r^2 = 0.9232$, $p < 0.001$) となってほぼ直線関係を示し (図 9-2), 致死有効積算温度 (K_{CO_2} ; DD) と発育有効積算温度 (K ; DD) との間には強い相関性が認められた。

これは, CO_2 処理による殺虫効果が細胞増殖速度すなわち好氣的エネルギー代

表 9-2 60%CO₂における9種昆虫の致死速度

昆虫種	温度 (°C)	100%致死時間 (h)	100%致死時間 (D)	致死速度 (1/D)
<i>M.persicae</i>	20/25/30	16/4/3	(16/24)/(4/24)/(3/24)	1.5/6/8
<i>A.gossypii</i>	20/25/30	6/4/4	(6/24)/(4/24)/(4/24)	4/6/6
<i>F.occidentalis</i>	20/25/30	24/16/6	(24/24)/(16/24)/(6/24)	1/1.5/4
<i>F.intonsa</i>	20/25/30	24/16/8	(24/24)/(16/24)/(8/24)	1/1.5/3
<i>T.tabaci</i>	20/25/30	20/16/6	(20/24)/(16/24)/(6/24)	1.2/1.5/4
<i>T.palmi</i>	20/25/30	20/16/6	(20/24)/(16/24)/(6/24)	1.2/1.5/4
<i>S.litura</i>	24/30	24/16	(24/24)/(16/24)	1/1.5
<i>Pl.kraunhiae</i>	24/30	48/24	(48/24)/(24/24)	0.5/1
<i>Ps.comstocki</i>	24/30	48/24	(48/24)/(24/24)	0.5/1

表 9-3 60%CO₂における9種昆虫の致死有効積算温度

昆虫種	致死速度(y)と温度(x)との回帰式	致死有効積算温度 (K_{CO_2} ; DD)
<i>M.persicae</i>	$y = 0.65x - 11.08$ ($r^2 = 0.953, p < 0.05$)	1.54
<i>A.gossypii</i>	$y = 0.2x + 0.33$ ($r^2 = 0.75, p < 0.05$)	5.0
<i>F.occidentalis</i>	$y = 0.3x - 5.33$ ($r^2 = 0.871, p < 0.05$)	3.33
<i>F.intonsa</i>	$y = 0.2x - 3.17$ ($r^2 = 0.9231, p < 0.05$)	5.0
<i>T.tabaci</i>	$y = 0.28x - 4.77$ ($r^2 = 0.8293, p < 0.05$)	3.57
<i>T.palmi</i>	$y = 0.28x - 4.77$ ($r^2 = 0.8293, p < 0.05$)	3.57
<i>S.litura</i>	$y = 0.0833x - 1$ ($r^2 = 1$)	12.0
<i>Pl.kraunhiae</i>	$y = 0.0833x - 1.5$ ($r^2 = 1$)	12.0
<i>Ps.comstocki</i>	$y = 0.0833x - 1.5$ ($r^2 = 1$)	12.0

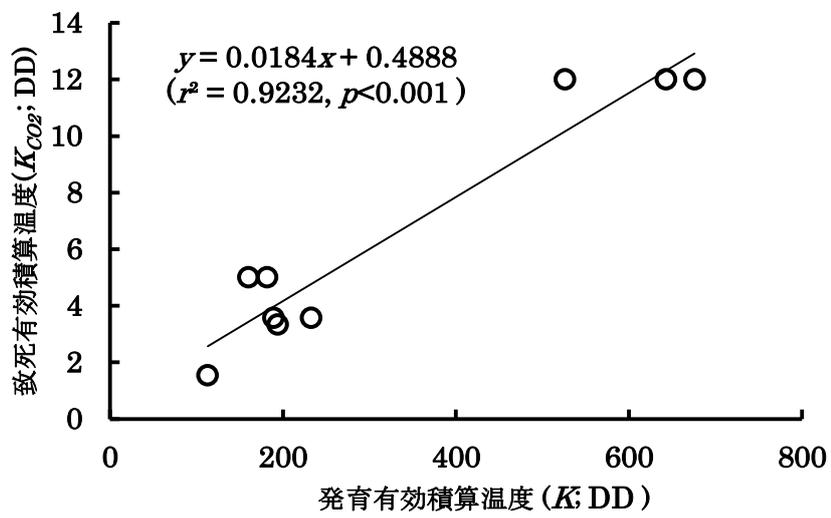


図 9-2 9 種昆虫の发育有効積算温度と致死有効積算温度との関係

謝速度と比例関係にあることを示しており、好氣的エネルギー代謝産物 CO_2

(KHCO_3 等重炭酸塩) の体液中への蓄積・飽和が昆虫生体死亡の原因であるとする推論を支持しているとともに 1) 項で求めた 100% 殺虫所要時間と有効積算温度との回帰式の有効性を裏付けている。

3) 実用設計の手順

本研究により、高濃度 CO_2 殺虫法は園芸作物害虫フリー苗作成への実用が可能となった。なお、最終的な適用可否を判断するに当たっては、防除対象害虫の寄主植物である農作物側の炭酸ガス処理による悪影響がないことを確認する必要がある。その実用設計に当たっては、以下の手順を推奨する。

(1) CO_2 濃度の初期設定値は 60% CO_2 とし、終了時において 40% CO_2 を下回らないこととする。その他の組成成分は、 CO_2 を空気で希釈した 60% CO_2 / 8% O_2 / 32% N_2 が実用的である。

(2) 温度は 30°C を目安とするが、処理時間を長くして 25°C としてもよい。

(3) 処理時間は、防除対象害虫種によって 24 時間以内の適正時間とする。防除対象害虫が本研究で調査した昆虫種であれば、それぞれ求めた 100% 致死時間を採用し、複数の害虫を対象にする場合には長い方の種の 100% 致死時間を採用するのは当然である。本研究で未調査の昆虫種の場合、「日本産昆虫、ダニ、線虫の発育零点と有効積算温度」(桐谷 1997) などによって有効積算温度 (K ; DD) が既知の場合は上述の式 $y(100 \text{ 致死時間}) = 0.0366x - 1.0738$ (図 9-1) の x に既知の有効積算温度 (DD) の値を代入して算定された $y(h)$ の値を目安とする。例えば、アブラナ科植物を加害する難防除害虫 (浜, 1990) として重要かつ輸入青果物の検疫でも発見回数が多い(輸入植物害虫発見記録) 代表的な害虫コナガ *Plutella xylostella* (Linnaeus) を取り上げて殺虫効果を推算する。上記の桐谷 (1997) によれば、コナガは $K = 294.1$ (DD) であるから、 $y(h)$

$=0.0366 \times 294.1 - 1.0738 = 9.69 \div 10$ と求まり、設計処理時間は 30°C で 10 時間となる。なお、ほとんどの園芸作物害虫の有効積算温度 ($K; DD$) は本研究で調査したクワコナカイガラムシの $K=676$ (DD) (澤村・奈良井 2008) よりは小さいので 100% 殺虫所要時間は 30°C で 24 時間以内となる。

2. 殺虫メカニズムのまとめ

これまでの研究成果を総合して、高濃度炭酸ガスの殺虫メカニズムについてまとめる。殺虫メカニズムに関与する要因は以下の通りである。

1) 昆虫の体制の特徴

(1) 昆虫の変温動物性：有効積算温度の法則によって定量化されるように好氣的エネルギー代謝速度は環境温度が高いほど速まる。

(2) 気管呼吸の仕組み： KHCO_3 等重炭酸塩として細胞組織液中に溶けているエネルギー代謝産物・ CO_2 は、気管内 CO_2 分圧と体外 CO_2 分圧差によって突発的に気門が開口して体外大気中に排気される (池庄司ら, 1997)。通常大気中の CO_2 分圧は $380\text{ppm CO}_2=0.038\text{ kPa CO}_2$ である。

(3) 開放血管系の仕組み：全ての細胞は体液中に浮遊した状態にあり、細胞液と体液は細胞膜を介して一体となっている。

2) 高濃度 CO_2 =高 CO_2 分圧大気における高 CO_2 分圧の影響

(1) 高 CO_2 分圧下においては、昆虫細胞内好氣的エネルギー代謝産物 CO_2 の気管系からの体外排気が停滞する。それは、 $380\text{ppm CO}_2=0.038\text{kPa CO}_2$ の通常大気中に比べて $60\% \text{CO}_2=60\text{kPa CO}_2$ の大気における CO_2 排気速度は $0.038\text{ kPa}/60\text{ kPa} \div 1/1600$ に低下するからである。

(2) 体外排気を阻まれた CO_2 が KHCO_3 等重炭酸塩として細胞内から体液中へ溶出して蓄積が進む。それは、開放血管系の昆虫では細胞が体液中に浮遊してい

るため、細胞内液中で飽和した KHCO_3 等重炭酸塩は細胞膜内外の重炭酸塩濃度勾配により細胞膜を通過して体液中に溶出せざるを得ないからである。

3) 細胞増殖速度と温度との関係

開放血管系からなる変温動物の昆虫生体内における好氣的エネルギー代謝反応に基づく昆虫細胞の増殖の実態に関する報告は見当たらないが、木村(2000)の「昆虫バイオ工場」が参考になる。開放血管系からなる昆虫生体において細胞が体液中に浮かんだ状態で増殖する生理反応と昆虫の培養細胞が培養容器内の培地に浮かんだ状態で増殖する生理反応とは同一の原理に基づいていると考えることができる。木村(2000)によれば、「からだの仕組みを反映して昆虫の細胞は体液の中で浮遊している状態にあることから、培養容器の中でも浮遊している状態で培地に溶けているアミノ酸や炭水化物、ビタミン、ミネラルなどの栄養素や酸素を細胞内に取り込んでいる。昆虫は変温動物なのでその細胞の培養温度は、動物細胞の培養温度が 37°C 一定であるのに比べて低い温度の 18°C から 29°C の比較的広範囲の温度で増殖する。昆虫細胞の増殖速度は温度に比例して速まる傾向がある。細胞が増殖して培養フラスコ一杯の高密度になって、培養液の栄養素の減少や細胞が排泄した老廃物の蓄積が原因で細胞が死に始めるので新しい培地に植え継ぎが必要となる。植え継ぎまでの時間は、カイコ細胞の場合、 18°C で約 3 週間、 25°C で約 1 週間、 29°C で 3~4 日である」(木村 2000)。そこで、上述の培養温度と植え継ぎまでの細胞増殖期間 (D) との関係に着目して、細胞増殖速度 $y(1/D)$ と培養温度 $x(^\circ\text{C})$ との回帰式を求めると、 $y(1/D) = 0.0179x(^\circ\text{C}) - 0.28717$ ($r^2 = 0.9634$, $p < 0.01$) という直線関係を示した(図 9-3)。これは、昆虫細胞の増殖速度が環境温度に正比例して速まることを示している。

4) 細胞増殖と体液中 KHCO_3 等重炭酸塩の蓄積との関係

成長速度が速くなるということは細胞増殖速度が速くなるからであり、細胞

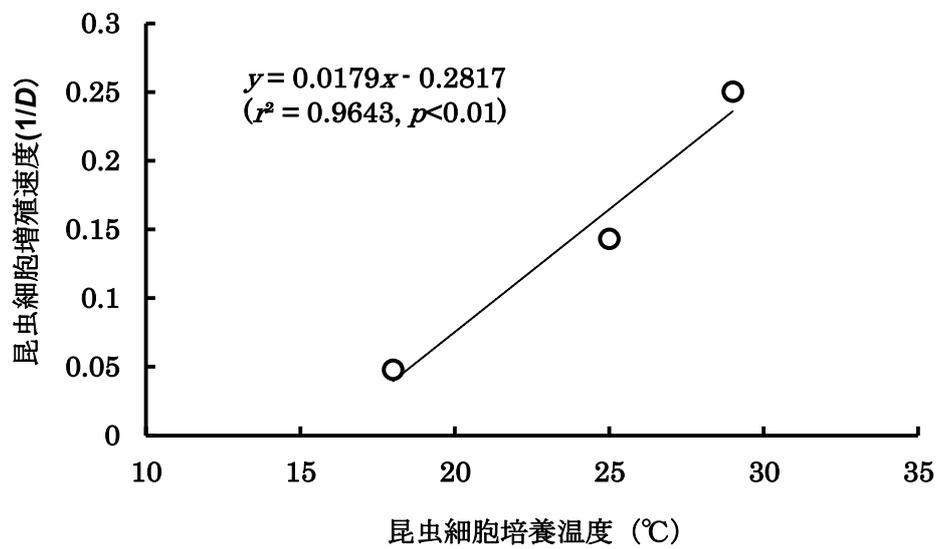


図 9-3 昆虫細胞培養における培養温度と細胞増殖速度の関係*

* 昆虫バイオ工場（木村 2000）のデータから算出した。

増殖速度が速くなるのは細胞内ミトコンドリアにおける好氣的エネルギー代謝速度が速まるからである。この特性は DNA 上にプログラムされた特性であり、発育ステージを問わず細胞が活着している限り細胞内ミトコンドリアにおける好氣的エネルギー代謝速度のレベルは環境温度律則で不可避的に発現するのであって生育時に限定的に発現するのではないことはいうまでもない。好氣的エネルギー代謝速度が速まれば、好氣的エネルギー代謝産物 CO_2 の産生速度が速まり、エネルギー代謝産物 CO_2 の体外排気速度を速める必要が生じる。それにもかかわらず、高濃度 CO_2 、たとえば $60\% \text{CO}_2=60 \text{ kPa CO}_2$ に曝された昆虫体内の CO_2 排気速度は通常大気中の $1/1600$ に低下しているの分、その分、体外排気が滞った好氣的エネルギー代謝産物 $\text{CO}_2=\text{KHCO}_3$ 等重炭酸塩は細胞膜内外に生じた濃度勾配に応じて細胞膜を透過して体液中への蓄積が進み、体液中の KHCO_3 等重炭酸塩濃度の上昇が進むことになる。 KHCO_3 等重炭酸塩水溶液はアルカリ性を示し、その飽和水溶液の pH は 8.2 を示すこと（長倉ら 2003）は前述した。第 8 章によれば昆虫体液 pH は CO_2 処理時間経過にともなって高まり、最終的には約 8.2 に到達した。

5) 体液 pH の上昇と昆虫個体生死の関係

以下、指標である pH を実態である水素イオン濃度 $[\text{H}^+]$ と水酸化物イオン濃度 $[\text{OH}^-]$ のバランスに置き換えて考察する。通常の大気中における昆虫体液中の $[\text{H}^+]/[\text{OH}^-] \doteq 1.6$ の状態から CO_2 処理時間経過にともなって $[\text{H}^+]/[\text{OH}^-] \doteq 1/160$ の状態へと変化した。 $[\text{H}^+]/[\text{OH}^-]$ の減少比としては $1/160 \div 1.6 \doteq 1/256$ となる。 $[\text{H}^+]/[\text{OH}^-] \doteq 1/160$ に変化した当初はほとんどの個体は生存していたが、その状態における滞留時間の経過にともなって死亡個体数が増加し、一定時間後には 100% の個体死亡に到達した。また、一度、 $[\text{H}^+]/[\text{OH}^-] \doteq 1/160$ の状態に達しても、そこでの滞留時間が一定時間以内で短ければ短いほど大気解放

後は $[H^+]/[OH^-] \approx 1.6$ の状態に回復して生存できる個体が多かった。前述のように開放血管系からなる昆虫では体液と細胞液はほぼ均質であるから、各種生命維持反応の場である細胞液中も $[H^+]/[OH^-] \approx 1.6$ の適正值から $[H^+]/[OH^-] \approx 1/160$ という大幅にかい離した状態にあることになる。細胞内で生起する各種生命維持反応には各種酵素の触媒作用が必須である。酵素の働きの強さを表す酵素活性は酵素ごとに最適 $pH=[H^+]/[OH^-]$ を極大値とする山型を示すことが知られている。通常大気中の体液が弱酸性であるならば、多くの酵素の最適 $pH=[H^+]/[OH^-]$ が弱酸性側にあると考えられる。CO₂処理時間経過にともなってアルカリ性側に大きく変化した細胞液中では各種酵素活性は大幅に低下するので各種生命維持反応が滞るものと考えられる。特に、ミトコンドリアにおける好氣的エネルギー代謝反応に関与する諸酵素の活性低下及びミトコンドリア内外の水素イオン濃度勾配(瀬名・大田 2000)に異常を来すことが考えられる。なお、多くの昆虫体液の $pH=[H^+]/[OH^-]$ の適正範囲が弱酸性であることは、昆虫細胞を培養して株化するために発明された培地の公開特許(今西重雄・楊春英 2007)によって傍証される。それには、培地の pH の適正範囲は6.0~7.0であり、本培地は鱗翅目、双翅目、鞘翅目、半翅目等総ての昆虫細胞の培養に使用することができる。とされている。

6) 結論

高濃度CO₂による殺虫メカニズムを以下のように提起する。高濃度CO₂大気たとえば60%CO₂=60kPa CO₂大気では380ppm CO₂=0.038kPa CO₂の通常大気中に比べて60kPa/0.038kPa \approx 1600倍という高CO₂分圧に曝された昆虫体内では気管系からのCO₂排気速度が通常大気中の1/1600に低下するので体外排気を阻まれた細胞内好氣的エネルギー代謝産物CO₂がKHCO₃等重炭酸塩として体液中に蓄積を続けて飽和に達することにより、体液中の水素イオン濃度 $[H^+]$

と水酸化物イオン濃度 $[\text{OH}^-]$ のバランスが通常大気中における適正值である $[\text{H}^+]/[\text{OH}^-]>1$ という弱酸性側から $[\text{H}^+]/[\text{OH}^-]\leq 1/160$ という異常なアルカリ性側に変化する。この状態で長時間経過（昆虫種ごとに形質発現する特有の好氣的エネルギー代謝速度によって、昆虫種ごとに時間の長さは異なる）することで、昆虫細胞内における各種酵素活性が低下して生命維持に必要な諸反応が停滞し、最終的には好氣的エネルギー代謝反応が停止するに至る。これは、昆虫の温度が高いほど活動が活発になるという変温動物性によって、細胞内好氣的エネルギー代謝産物 $\text{CO}_2=\text{KHCO}_3$ 等重炭酸塩の産生速度すなわち体液中への蓄積速度は温度が高いほど速まるので温度が高いほど100%殺虫所要時間が短くなり、また、成長速度が速く有効積算温度の値が小さい昆虫種ほど好氣的エネルギー代謝産物 $\text{CO}_2=\text{KHCO}_3$ 等重炭酸塩の体液量（体重の $1/3\sim 1/5$ ）当たりの産生速度は速いので100%殺虫所要時間が短くなることと整合する。

要 旨

高濃度炭酸ガス殺虫法は、炭酸ガス自体に毒性がなく残留毒性の心配もない上に原料とする炭酸ガスが石油精製工程などの廃棄ガスからの回収・副産品であるため温室効果の増幅要因にはならないので、人類を含む生物や地球環境にとってクリーンで安全な農作物害虫の防除技術である。

本研究では、アザミウマ類を中心として、アブラムシ類、コナカイガラムシ類、マルカイガラムシ及びハスモンヨトウなど 12 種の園芸作物害虫を用いて炭酸ガスの殺虫効果を評価し、園芸作物の施設栽培育苗過程及び物流過程における害虫フリー化手段としての高濃度炭酸ガス殺虫法の実用化への道筋をつけることができた。それぞれの害虫種に対する 100%殺虫所要時間は、30℃の 60% CO₂ 処理の場合、アブラムシ類は 4 時間、アザミウマ類の成虫は 8 時間及び卵は 12 時間、ハスモンヨトウ幼虫は 16 時間及びコナカイガラムシ成虫は 24 時間以内であることを明らかにした。併せて、高濃度炭酸ガスの殺虫効果の特徴として、処理時間経過にともなって死亡率が高まるという処理時間への比例性、処理温度が高いほど死亡率が高まるという温度への依存性、昆虫種による殺虫効果の特異性及び有効積算温度が小さい昆虫種ほど 100%殺虫所要時間が短くなるという有効積算温度との相関性などを明らかにした。また、ハスモンヨトウ幼虫を用いて、CO₂ 処理による体液 pH の変化を調査し、CO₂ 処理時間経過にともなって体液 pH は弱酸性側 (pH≒6.9) からアルカリ性側 (pH≒8.2: 重炭酸塩 KHCO₃ の飽和水溶液 pH に匹敵) へと大きく変化し、その状態での時間経過にともなって死亡個体数が増加し、ついには 100%の個体が死亡するに至ることを明らかにした。

これらの成果を総合して、高濃度炭酸ガス殺虫法は園芸作物の施設栽培育苗

過程及び物流過程における害虫フリー化手段として、対象農作物側に悪影響を及ぼさない限り、殺虫効果としては実地に適用可能であると判断した。本研究で調査した9種昆虫の30℃の60%CO₂処理による100%殺虫所要時間 y (h)とそれぞれの有効積算温度 x (DD)との回帰式 $y=0.0366x-1.0738$ を用いて、園芸作物害虫に対する実用設計手法を提案した。ほとんどの園芸作物害虫は、有効積算温度がコナカイガラムシ類の約700(日度)より小さいので、30℃の60%CO₂処理による100%殺虫所要時間が24時間以内となる。

加えて、高濃度CO₂の殺虫作用の要因に関する各章の考察結果を集約して、以下のCO₂殺虫メカニズムを提起した。高濃度CO₂大気中のCO₂分圧は通常大気中に比べて非常に高く、たとえば、60%CO₂=60 kPa CO₂の大気中では、380 ppm CO₂=0.038 kPa CO₂の通常大気中に比べて $60 \text{ kPa} / 0.038 \text{ kPa} \approx 1600$ 倍に高まる。60%CO₂=60 kPa CO₂大気に曝された昆虫体内で、細胞内好氣的エネルギー代謝産物CO₂の気管系からの体外排気速度は大気中の1/1600に低下することになり、体外排気を阻まれた好氣的エネルギー代謝産物CO₂がKHCO₃等重炭酸塩として体液中に蓄積せざるを得ず、最終的には体液中で飽和に達する。これにより、体液中の水素イオン濃度[H⁺]と水酸化物イオン濃度[OH⁻]のバランスが通常大気中における[H⁺]/[OH⁻] >1 という弱酸性側からKHCO₃等重炭酸塩の飽和水溶液の値に近い[H⁺]/[OH⁻] $\leq 1/160$ というアルカリ性側に変化する。この状態で長時間経過することで、昆虫細胞内における生命維持に必要な各種酵素活性が低下して最終的には好氣的エネルギー代謝反応の停止に至るとした。

謝 辞

本研究の遂行全般にわたって、真摯なご指導と惜しみないご支援及びご協力を賜るとともに、本稿のとりまとめに当たっても懇切なご指導とご校閲を賜った宇都宮大学農学部村井 保教授に衷心よりの感謝とお礼申し上げます。

本稿のとりまとめに際して丁寧なご校閲とご指導をいただいた宇都宮大学川崎秀樹教授ならびに茨城大学 後藤哲雄教授，東京農工大学 国見裕久教授，岩淵喜久雄教授に厚くお礼申し上げます。

コナカイガラムシの同定及びカイガラムシ類の生態等についてご教示を賜った河合省三博士及びアザミウマ類の同定を賜った東京農業大学 岡島秀治博士に厚くお礼申し上げます。

本研究の予備調査の際にそれぞれの専門分野からのご教示をいただいた農林水産省の横浜植物防疫所の田尾政博氏をはじめとする食品・果樹・昆虫・環境関連研究機関の諸氏に感謝申し上げます。

本研究の端緒を開いたミンダナオ島現地殺虫試験の推進及びその後の研究継続を後押しするご支援とご協力をいただいた(株)ドール・ジャパン社の米倉幸夫氏をはじめとする諸氏に深甚なる感謝とお礼申し上げます。併せて、現地殺虫試験の際に、親身なご協力をいただいたドール・フィリピン社スタンフィルコ支社の A. B. Guevarra 氏をはじめとする諸氏に感謝申し上げます。

石川島播磨重工業（株）においてご協力をいただいた大月 利氏をはじめとする諸氏及び宇都宮大学においてご協力をいただいた浅井拓也，小林誠，小林政文の各氏に感謝とお礼申し上げます。

そして、本学究のみちのりをそっと見守り支えてくれた妻 富美，娘 知愛子と真理子に万感込めてありがとう。

引用文献

- Aharoni, Y., J. K. Stewart and D. Guadagni (1981) Modified atmospheres to control Western flower thrips on harvested strawberries. *J. Econ. Entomol.* 74: 338-340
- Banks, H. J. and P. C. Annis. (1977) Suggested procedures for controlled atmosphere storage of dry grain. C.S.I.R.O. Div. Entomol. Tech. Paper. No. 13: 23 pp.
- Beardsley, J. W. (1959) On the Taxonomy of Pineapple Mealybugs in Hawaii with a Description of a Previously Unnamed Species (Homoptera: Pseudococcidea). *Proc. Hawaiian Entomol. Soc.* 17(1):29-37.
- Berenbaum, R. M. (1995) *Bugs in The System: Insects And Their Impact On Human Affairs.* Herix Books. Perseus Publishing. 377pp
- Blackman, R. L. and V. F. Eastop (2006) *Aphids on the World's Herbaceous Plants and Shrubs.* Wiley. 1460pp.
- Brodsgaard, H. F. (1994) Insecticide resistance in European and African strains of western flower thrips (Thysanoptera: Thripidae) tested in a new residue-on-glass test. *J. Econ. Entomol.* 87: 1141-1146
- Carpenter, A., S. Wright, and P. Lash. (1996) Response of adult New Zealand flower thrips, *Thrips obscuratus* (Thysanoptera: Thripidae) to high carbon dioxide and to oxygen atmospheres at various temperatures. *Bull. Entomol. Res.* 86: 217-221.
- Chellemi, D. O. , L. E. Funderburg and D. W. Hall (1994) Seasonal abundance of flower-inhabiting *Frankliniella* species (Thysanoptera: Thripidae) on

wild plant species. *Environ. Entomol.* 23: 337-342

Dentener, P. R., E. A. Waclac, and P. J. Jackson (1990) Insect Disinfestations of New Zealand persimmons. In: Abstracts of Contributed Papers, 23rd International Horticulture Congress, Firenze, Italy 27 August-1 September 1990. Abstracts of No.2163, p 518.

Dentener, P. R., S. M. Peetz and D. B. Birtles (1992) Modified atmospheres for the postharvest disinfestations of New Zealand persimmons (*Diospyros kaki* L.) *New Zealand J. Crop Hort. Sci.* 20: 203-208

土井 誠 (2003) ネギアザミウマが媒介する新しいウイルス病 (IYSV) . 植物防疫 57: 69-71.

浜 弘司 (1987) アブラムシの薬剤抵抗性. 植物防疫 41 : 159-164

浜 弘司 (1990) コナガの薬剤抵抗性の現状と対策. 関東東山病虫研報 37 : 1-4

早瀬 猛・福田 寛 (1991) ミカンキイロアザミウマの発生と見分け方. 植物防疫 45 : 59-61.

Holman, J.(2009) Host Plant Catalog of Aphids Palaearctic Region, Springer.1216pp.

本間広基(2004)千葉県におけるハスモンヨトウの薬剤感受性 関東東山病害虫研究会会報 51:155-158

藤川和博・牟田辰朗 (2003) カンキツにおけるネギアザミウマの発生と防除. 植物防疫 57: 61-64

今井国貴・小野木静夫・富岡 暢 (1988) ネギアザミウマ. 農作物のアザミウマ分類から防除まで (梅谷献二・工藤 巖・宮崎昌久 編) 全国農村教育協会. 東京. pp.283-292.

- 池庄司敏明・山下興亜・桜井宏紀・山元大輔・正野俊夫(1997) 昆虫生理・生化学. 朝倉書店, 東京. pp. 42-61
- 石川 統 (2000) アブラムシの生物学 紀伊国屋書店. 東京. 344pp
- Immaraju, J. A., T. D. Pain, J. A. Bethke, K. L. Robb and J. P. Newman (1992) Western Flower Thrips (Thysanoptera: Thripidae) resistance to insecticides in Coastal California greenhouse. *J. Econ. Entomol.* 85: 9-14
- 今西重雄・楊春秀 (2007) 昆虫細胞培養用培地. 特開 2007-75102
- 稲泉三丸(1980)ワタアブラムシの生活環とその多型に関する研究, 宇都宮大農学報特輯37, 132pp.
- 伊澤宏毅 (1990) ナシに寄生するクワコナカイガラムシの防除対策. 植物防疫 44: 260-263.
- 片山晴喜(1997) ミカンキイロアザミウマ *Frankliniella occidentalis* (Pergande) の発育と産卵に対する温度の影響. 応動昆 41 : 225-231.
- 片山晴喜・池田二三高 (1995) 静岡県西部地域におけるミカンキイロアザミウマの越冬実態. 静岡農試験報 40 : 63-73.
- 片山晴喜 (1998) 特集ミカンキイロアザミウマ—野菜と花き類における発生実態と防除対策. 植物防疫 52: 176-179.
- Kato K., K. Hanada, M. Kameya-Iwaki (2000) Melon yellow spot virus a distinct species of the genus *Tospovirus* isolated from melon. *Phytopathology* 90: 422-426
- 河合省三 (1980) 日本原色カイガラムシ図鑑. 東京: 全国農村教育協会, 455 p
- 木村 滋 (2000) 昆虫バイオ工場. 東京: 工業調査会, pp.84-85
- 桐谷圭治 (1997) 日本産昆虫, ダニ, 線虫の発育零点と有効積算温度. 農業環 352 境技術研究所資料第 21 号 72pp.

Komazaki, S. (1982) Effects of constant temperatures on population growth of three aphid species, *Toxoptera ciricidus* (Kirikaldy), *Aphis citricola* Van Der Goot and *Aphis gossypii* Glover (Homoptera: Aphidae) on *Citrus* Appl. Entomol. Zool. 17: 75-81

増井伸一 (1998) ミカンキイロアザミウマ, 果樹における発生実態と防除対策. 植物防疫 52 : 172-175.

松本英治 (2000) ネギアザミウマによるアスパラガス若茎の被害. 香川農試研報 52: 33-40

Mitcham, E. J., S. Zhou and V. Bikoba (1997) Controlled atmospheres for quarantine control of three pest of table grape. J. Econ. Entomol. 90 (5): 1360-1370

Mitcham, E. J., T. Martin and S. Zhou (2006) The mode of action of insecticidal controlled atmospheres. Bull. Entomol. Res. 96: 213-222

Miyashita, K. (1971) Effects of constant and alternating temperatures on the development of *Spodoptera litura* F. (Lepidoptera: Noctuidae). Appl. Entomol. Zool. 6:105-111

森下正彦・大植晴之 (2001) ネギアザミウマによるカキ果実の被害と薬剤防除. 関西病虫研報 43 : 43-44

森下正彦 (2005) 和歌山県のカキ園及びカンキツ園の雑草におけるミカンキイロアザミウマとネギアザミウマの発生消長. 応動昆 49 : 195-203

森下正彦 (2006) 虫体・葉片散布法によるフジコナカイガラムシの薬剤感受性. 応動昆 50 : 211-216

宮崎昌久・工藤 巖 (1988) 概説 農作物のアザミウマ分類から防除まで (梅谷 献二・工藤 巖・宮崎昌久 編) 全国農村教育協会. 東京. pp.33-91.

- Mound, L. A. and D. W. Collins (2000) A south east Asian pest species newly recorded from Europe: *Thrips parvispinus* (Thysanoptera: Thripidae), its confused identity and potential quarantine significans. Eur. J. Entomol. 97: 197-200
- Morgan, C.V. G, and A.P. Guance (1975) Carbon dioxide as a fumigant against the San Jose scale (Homopetera:Daspidae) on harvested apples. Canadian Entomol. 107: 935-936
- 森津孫四郎 (1983) 日本原色アブラムシ図鑑, 全国農村教育協会.545pp.
- Murai ,T (2000) Effect of photoperiod and temperature on development and reproduction of the onion thrips, *Thrips tabaci* Lindeman (Thysanoptera:Thripidae) on pollen and honey solution. Appl. Entomol. Zool. 35 : 499-504.
- Murai, T. and A.J.M. Loomans (2001) Evaluation of an improved method for mass-rearing of thrips and a thrips parasitoid, Entomol.Exp.Appl. 103:281-289
- 村井 保 (1988) ヒラズハナアザミウマの生態と防除に関する研究. 島根農試研報 23 : 1-7
- 村井 保 (1991) アブラムシ類のクローン別飼育法 島根農試研報 25:78-82
- 長倉三郎・井口洋夫・江沢 洋・岩村 秀・佐藤文隆・久保亮五 (2003) 理化学事典 第5刷 岩波書店 東京, pp 814.
- Narai, Y. and T. Murai (2002) Individual rearing of the Japanese mealybug, *Planococcus kraunhiae* (Kuwana) (Homoptera: Pseudococcidae) ongerminated broad bean seeds. Appl. Entomol. Zool. 37:295-298
- Nault L.R. (1997) Arthropod transmission of plant viruses: a new synthesis.

Ann. Entomol. Soc. Am. 90: 521-541

Newton, J. (1993) Carbon dioxide as a fumigant to replace methylbromide in the control of insects and mites damaging stored products and artefacts.

In: Widely KB, Robinson WmH (eds) Proceedings of the first international conference on urban pests. pp 329-338

日本応用動物昆虫学会編 (2006) 農林有害動物・昆虫名鑑増補改訂版, 日本植物防疫協会, 東京, 日本.387pp.

農山漁村文化協会(1991)新版原色野菜の病害虫診断 農文協 編 290pp

太田 泉・大秦司 誠 (2002) チンゲンサイで飼育したモモアカアブラムシの生活史形質. 応動昆 46 (4) : 259-261

澤村信生・奈良井祐隆 (2008) フジコナカイガラムシ及びクワコナカイガラムシの発育と増殖能力に及ぼす温度の影響. 応動昆 52(3) : 113-121

瀬名秀明・大田成男 (2000) ミトコンドリアと生きる. 角川文庫, 東京. 221p

篠原 温 (2006) 施設栽培に求められるもの. 農畜産業振興機構 / 野菜情報 22 : 6-10

柴尾 学・田中 寛 (2000) イチジクにおけるフジコナカイガラムシの発生活消長と薬剤防除効果. 応動昆中国 42 : 1-6

Takada, H. (1979) Esterase variation in Japanese population of *Myzus persicae* (Sulzer) (Homoptera:Aphididae), with special reference to resistance to organophosphorus insecticides. Appl. Entomol. Zool. 14, 245-254

Talekar. N.S. (1991) Thrips in Southeast Asia: proceeding of a regional consultation workshop, Bangkok, Thailand, 13 March 1991. Asian vegetable Research and Development Center, Taipei

- 多々良明夫・鈴木正紀 (1993) ミカンキイロアザミウマの防除薬剤の探索. 関東病虫研報 40: 315-316
- Taylor, T.H.C.(1935) The Campaign Against *Aspidiotus destructor* Sign. in Fiji. Bull. Entomol. Res. 26: 1-102.
- Tommacini, M.G. and S. Maini (1995) *Frankliniella occidentalis* and other thrips harmful to vegetable and ornamental crops in Europe. Biological control of Thrips pest. Wageningen Agric. Univ. Papers 95-1: 1-42
- 土屋雅利・多々良明夫・池田二三高 (1992) 静岡県におけるミカンキイロアザミウマの発生と防除上の問題点. 植物防疫 46: 437.
- 土屋雅利・外側正之・古橋嘉一・増井伸一 (1995) ウンシュウミカンにおけるミカンキイロアザミウマの寄生特性と被害の特徴. 応動昆 39: 253-259.
- 上野晴久 (1963) カキを加害するカイガラムシ類の研究 第 I 報 フジコナカイガラムシ越冬行動. 応動昆 7: 85-91
- Wijkamp, I., N. Almarza, R. Goldbach and D. Peters (1995) Distinct levels of specificity in thrips transmission of tospoviruses. Phytopathology 85: 1069-1074
- Yudin, L. S., B. E. Tabashnik, J. J. Cho and W. C. Mitchel (1988) Colonization of weeds and lettuce by thrips (Thysanoptera: Thripidae). Environ. Entomol. 17: 522-526

本論文を構成する論文

- 関 昌夫・村井 保 (2011) ミカンキイロアザミウマ *Frankliniella occidentalis* (Pergande) に対する高濃度炭酸ガスの殺虫効果. 応動昆 55: 174-177
- Masao Seki and Tamotsu Murai (2012) Responses of five adult thrips species (Thysanoptera; Thripidae) to high carbon dioxide atmospheres at different temperatures. Appl. Entomol. Zool. 47: 125-128
- Masao Seki and Tamotsu Murai (2012) Insecticidal effect of high carbon dioxide atmospheres on thrips eggs oviposited in plant tissue. Appl. Entomol. Zool. 47: 433-436