

高濃度二酸化炭素くん蒸処理による
イチゴの主要害虫に対する防除技術
の実用化に関する研究

Studies on practical application of concentrated carbon dioxide for pest
control in strawberry cultivation

2016.9

東京農工大学大学院
連合農学研究科
生物生産科学専攻

小山田 浩一

目 次

第 1 章	緒言	1
第 2 章	高濃度 CO ₂ のイチゴ主要害虫に対する殺虫効果	4
第 3 章	高濃度 CO ₂ のイチゴ苗に対する影響	23
第 4 章	ナミハダニに対する高濃度 CO ₂ くん蒸処理の本圃における 防除効果実証試験	35
第 5 章	総合考察	45
要 旨		53
謝 辞		54
引用文献		56

第 1 章 緒言

平成 26 年の農林水産統計(農林水産省)によると国内のイチゴの作付面積は、5,570ha、収穫量約 16 万 t で、主要卸売市場における売上高は約 1,600 億円にのぼる。この額は青果物卸売市場調査報告の統計では全作物中第 1 位となる。また、1 kg 当たりの卸売価格も 1,043 円と国産果実では、おうとうに次ぐ金額である。これらのことから、イチゴは国内において極めて重要な作物であるといえる。栃木県においてイチゴは最重要品目であり、平成 26 年産の作付面積 603ha、出荷量 23,600t および販売額 259 億円はいずれも日本一である。

しかし、近年、微小害虫による被害増加がイチゴ生産にとって大きな障害になっており、生産量や販売金額に影響を与えている。特に、ナミハダニ *Tetranychus urticae* Koch は、イチゴ栽培において育苗期から本圃まで、栽培期間を通して加害することから、栃木県をはじめ全国的に極めて重要な害虫である。

ナミハダニは、多くの農作物を加害する難防除害虫で(江原・真梶, 1975)、注意報発表件数が最も多い野菜および花卉類の害虫である(農林水産省消費・安全局, 2016)。また、近年、登録された各種殺ダニ剤に対しても感受性の低下が認められ(吉川, 2003; 香西, 2006; 福岡県病虫害防除所, 2007; 栃木県農業環境指導センター, 2012)、育苗期間中の発生を十分に抑制できず、本圃において年内の収穫開始期から発生が見られるようになっている。さらに、食の安全・安心、あるいは環境に配慮した農作物生産に対する消費者の関心が高まっている。そのため、イチゴ生産者からナミハダニをはじめとする化学合成薬剤抵抗性害虫の防除対策、農作物の収量・品質の維持と減化学合成農薬栽培による環境負荷低減の確立に向けた総合的病虫害・雑草管理(IPM: Integrated Pest

Management) 技術開発への期待は大きい(梅川ら, 2005; 宮井ら, 2009)。このような背景から, 栃木県においてもイチゴ栽培でカブリダニ類をはじめとする天敵を用いた IPM 技術の導入・普及が図られているところである。しかし, カブリダニ類を用いた生物防除では, ナミハダニの発見の遅れにより適切な放飼時期を逃してしまうなど, 十分な防除効果が得られない場合もある。また, 収穫期に入ると収穫・出荷作業に時間を割かれ, 防除が遅れ被害が拡大するなど, 生産現場ではナミハダニの防除に苦慮している。このため, 本圃での防除労力軽減に資する防除技術の開発が必要と考えられる。

1970 年頃から欧米諸国やオーストラリアなどで Controlled Atmosphere Storage 法 (CA 法) による殺虫法が注目され始め, ココクゾウムシ *Sitophilus oryzae* (Linnaeus) などの貯穀害虫に対して防除試験が行われている (Banks and Annis, 1977)。CA 法には, 窒素を置換ガスとして用い, 酸素 (以下, O_2) 濃度を数%以下の低濃度状態にして窒息を図る方法と殺虫作用を有する 40%以上の二酸化炭素 (以下, CO_2) (Bailey, 1965) を充填し殺虫を図る, 二通りの方法がある (中北, 1986)。1980 年代以降は, 野菜, 果樹, 花き類の害虫に対して CO_2 処理の防除効果が検討され始め, 米国やオーストラリアなどの輸出用農産物の鮮度維持と殺虫を兼ねて $0\sim 5^{\circ}C$ の低温域で高濃度 CO_2 を処理する試験が行われ, イチゴでのミカンキイロアザミウマ *Frankliniella occidentalis* (Pergande) 成・幼虫 (Aharoni et al., 1981), 生食用ブドウの Pacific spider mite, *Tetranychus pacificus* McGregor 雌成虫, 幼虫, 若虫および卵 (Miticham et al., 1997) などの報告がある。また, キウイフルーツのナミハダニ休眠雌成虫でも CO_2 濃度, 処理温度および処理時間の影響が検討されている (Whiting and Heuvel, 1995)。

日本国内における CO_2 を利用した農業害虫防除においては, 臭化メチルに替わる貯穀物のくん蒸処理 (中北・宮ノ下, 2003), 輸出用果実のリンゴ, ニホン

ナシのシンクイムシ類，ナミハダニ休眠雌成虫（土田ら，2011），貯蔵ショウガのショウガクロバネキノコバエ *Bradysia zingiberis* (Sasakawa) 幼虫（小山，2009，2010），ミカンキイロアザミウマを含む数種アザミウマ類の成・幼虫および卵に対する殺虫効果（関・村井，2011；Seki and Murai, 2012a, b)が検討されている．いずれも，CO₂濃度 40～60%，処理温度 20～35℃，処理時間 24 時間以内の処理で高い殺虫効果が認められている．イチゴの栽培体系の中で高濃度 CO₂ くん蒸処理が主要害虫に対する防除技術として利用できれば，大幅な防除労力の軽減が期待できる．そこで，本研究では高濃度 CO₂ くん蒸処理のイチゴでの主要害虫に対する殺虫効果とイチゴへの影響を調査し，処理苗を定植した本圃におけるナミハダニに対する防除試験を行い，本防除法の実用性を検討することとした．

まず，第 2 章では，イチゴで発生する主要な害虫であるナミハダニ，ワタアブラムシ *Aphis gossypii* Glover およびオンシツコナジラミ *Trialeurodes vaporariorum* (Westwood) に対して効果的な殺虫効果を得られる高濃度 CO₂ くん蒸処理の温度，時間を明らかにした．続く第 3 章では，高濃度 CO₂ くん蒸処理が定植直前のイチゴ苗（品種，とちおとめ）の生育および花芽分化に悪影響を与えないことを処理後の外観上の障害，頂花房の開花状況の調査を通じて明らかにした．イチゴにおける主要害虫に対する高い殺虫効果(第 2 章)とイチゴ苗に対する悪影響が認められなかった結果(第 3 章)を受け，第 4 章では，高濃度 CO₂ くん蒸処理の農薬登録に向けて栃木農業試験場（以下，本場）内と現地生産者ほ場において実証試験を行い，圃場での防除効果および実用性を明らかにした．第 5 章では，以上の研究より得られた知見，課題を整理し，今後の普及に向けた展望について考察した．

第2章 高濃度 CO₂ のイチゴ主要害虫に対する殺虫効果

イチゴ栽培において問題となる主要な害虫としてナミハダニ, アブラムシ類, オンシツコナジラミおよびアザミウマ類があげられる. この中でもナミハダニは緒言でも述べたように極めて重要な害虫である. 従来は, 「本圃定植前の育苗期までに十分な防除を行い, 害虫を本圃に持ち込むことがないように」との防除指導がなされてきた. しかし, ナミハダニなどは薬剤感受性の低下が顕著で薬剤による防除は極めて困難になっている. このことにより, 近年, 親株や仮植苗で天敵のカブリダニが利用される場面が見られるようになってきた. しかしながら, この際もカブリダニ類が圃場に定着するまで薬剤の使用に制限がかかるため, その間にアブラムシ類やオンシツコナジラミなどが寄生する恐れが生じる. そこで, 本章ではこれら三種類の害虫に対し, 効率的かつ効果的な高濃度 CO₂ くん蒸処理条件を明らかにすることを目的とし, ナミハダニ雌成虫と卵, ワタアブラムシ無翅成虫, オンシツコナジラミ幼虫に対する殺虫実験を行った. なお, アザミウマ類もイチゴの重要な害虫であるが, 先行研究の, 関・村井(2011), Seki and Murai (2012a, b) により各種アザミウマ類に対する殺虫効果が明らかにされているので本研究では割愛した.

第1節 ナミハダニ, ワタアブラムシおよびオンシツコナジラミに対する高濃度 (60%) CO₂ 処理の予備実験

1 材料および方法

(1) 供試虫

本予備実験に供試したナミハダニ (黄緑型) は, 2007年10月に本場内のイ

チゴより採集し，累代飼育した系統である．累代飼育は，インゲンマメ初生葉のリーフディスクを用いて，人工気象器内（25℃，16L-8D）で行った．累代飼育に用いたリーフディスク（直径約 7 cm）は，寒天を入れた直径 9 cm，深さ 2 cm のプラスチックシャーレ（以下，寒天シャーレ）に葉表を上にして置いた．

ワタアブラムシは，2007 年 9 月に本場内のイチゴ苗より採集し，累代した系統を用いた．累代飼育は，ナミハダニと同様である．

オンシツコナジラミに関しては，2007 年 2～3 月に本場内のイチゴ栽培圃場から成虫を採集し，飼育箱内で栽培したインゲンマメ株（本葉 1 枚目展葉時に芯を詰め，初生葉のみとしたもの）に放虫して得られた次世代を用いた．

(2)試験区および処理操作

実験は，成分構成 CO_2 ：60%， N_2 ：20%， O_2 ：20% に調整したガス（以下，60% CO_2 ）の処理を殺虫効果実験処理装置（図 2-1）を用いて行った．供試虫は，寒天シャーレ上のインゲン葉片（図 2-2，5 cm × 5 cm）に放虫あるいは産卵させ，専用の架台（図 2-3 左，自作）に載せて処理容器（図 2-3 右，容量 1000ml）（関・村井，2011；Seki and Murai, 2012a, b）に入れた．処理区では，容器内のガス置換を行うため，上部，下部のノズルコックを開けた状態で下部のノズルから流量計を介して容器容量に対して 10 倍量（10L）の 60% CO_2 を流し入れ，上部のノズルコックから閉め，わずかに遅れて下部のノズルコックを閉めた．処理直後に温度設定したインキュベータに移し，30℃で 24 時間静置した．60% CO_2 無処理区では，同容器を用いて 60% CO_2 は入れずに処理区と同様の操作を行った．

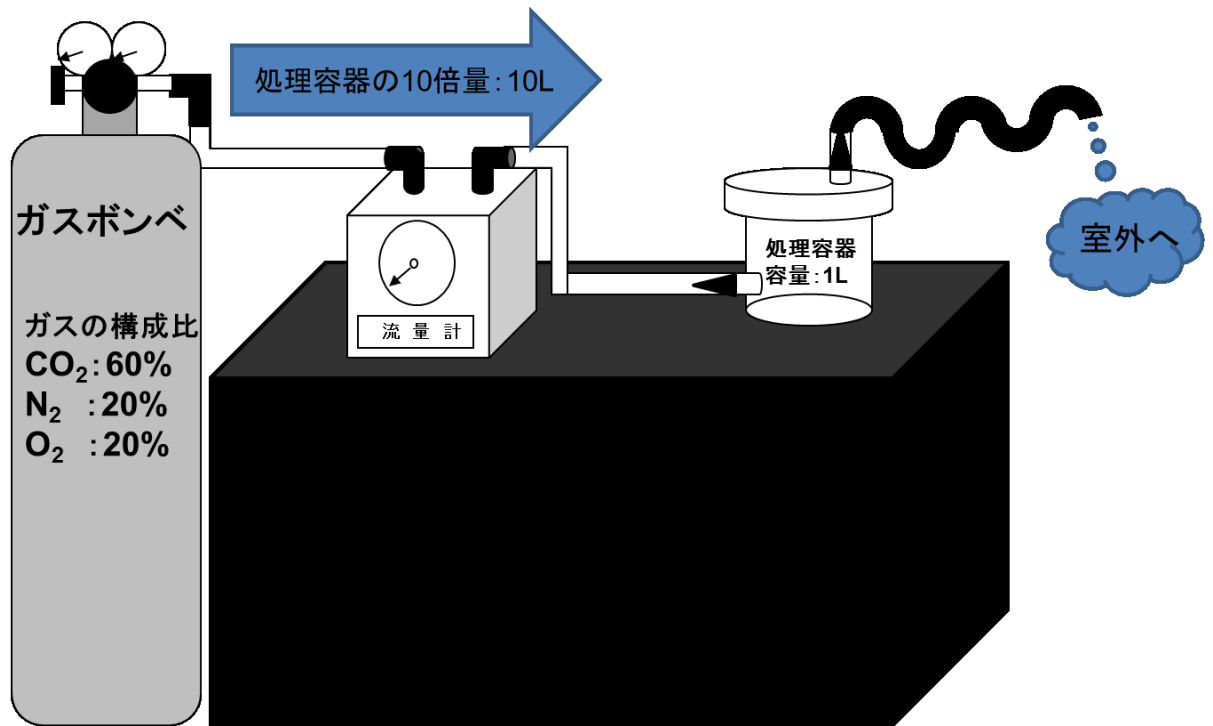


図 2-1 殺虫効果実験処理装置の概略図

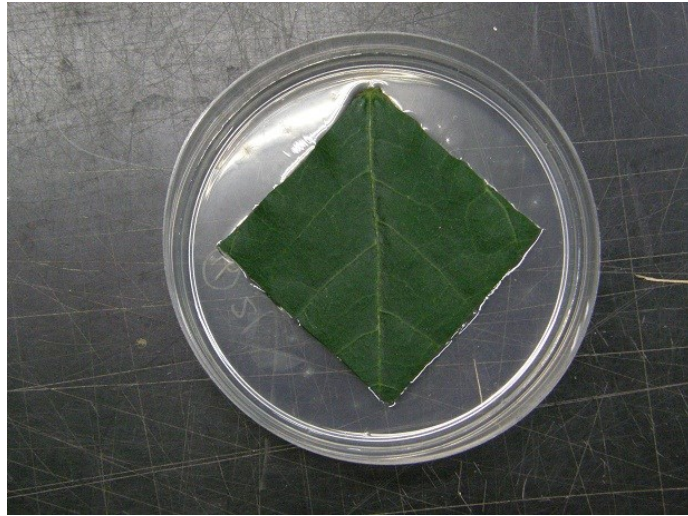


図 2-2 処理に用いた寒天シャーレ上のインゲン初生葉片

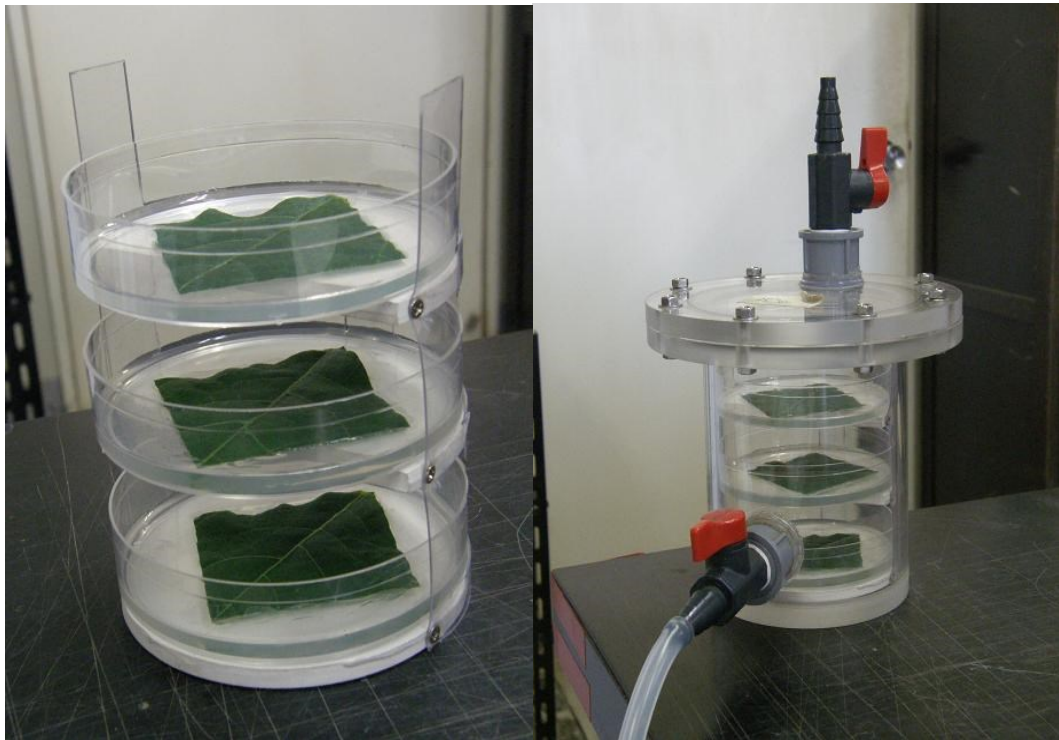


図 2-3 実験処理容器の概要（左：寒天シャーレを乗せる架台，
右：処理容器

(3) ナミハダニ雌成虫および卵に対する効果

ナミハダニ雌成虫への処理実験を行うにあたり、供試までの飼育条件を 25℃、15L:9D とした。3 枚のリーフディスク上に 20 頭／枚の雌成虫を放虫し、24 時間産卵させた後、雌成虫を取り除き、産下卵を成虫まで飼育した。処理区あたり羽化 24 時間以内の雌成虫 100 頭を 3 枚の寒天シャーレ上のインゲン葉片（5 cm × 5 cm、葉表を上）に分けて移し、48 時間後に実験に供試した。生死判定は、処理終了 24 時間後に行い、面相筆で刺激して動かない個体は死亡とみなした。ただし、インゲン葉上から逃亡した個体や行方不明の個体は解析から除外した。調査結果を基に Abbott の補正式 (Abbott, 1925) を用い、補正死虫率を求めた。

ナミハダニ卵への処理実験を行うにあたり、供試までの飼育条件を 25℃、15L:9D とした。3 枚の寒天シャーレ上のインゲン葉片に 25 頭／枚の雌成虫を放虫し、24 時間産卵させた。その後、雌成虫を取り除き、産下後 24 時間以内の卵(以下、24h 卵)、産下後 48～72 時間以内の卵(以下、48～72h 卵)を実験に供試した。なお、供試した 24h 卵は 197 卵、48～72h 卵は 240 卵である。生死判定の調査は、処理終了 5 日後に行い、ふ化幼虫を計数した。調査結果を基に Abbott の補正式を用い、補正殺卵率を求めた。

(4) ワタアブラムシ無翅成虫に対する効果

供試までの飼育条件を 20℃、16L:8D とした。3 枚のインゲンリーフディスク上に 15 頭／枚の無翅成虫を放虫し、24 時間幼虫を産下させた後、無翅成虫を取り除いた。産下幼虫をそのまま飼育し、羽化 24 時間以内の雌成虫 100 頭を各区 3 枚の寒天シャーレ上のインゲン葉片（5 cm × 5 cm、葉表を上）に分けて移し、24 時間後に実験に供試した。生死判定は、処理直後に行った。ただし、インゲン葉上から逃亡した個体や行方不明の個体は解析から除外した。調査結果を基に Abbott の補正式を用い、補正死虫率を求めた。

(5) オンシツコナジラミ 1 齢幼虫および 4 齢幼虫（脱皮後 3～4 日，脱皮後 6～7 日）に対する効果

1 齢幼虫に対する処理実験を行うために，飼育箱内で育成したインゲン株に成虫を放虫して 25℃，15L-8D 条件下で 24 時間産卵させた。その後，成虫を取り除き，葉裏を上にし，作製したリーフディスク上で卵を飼育した。孵化後 6 時間以内の 1 齢幼虫 106 頭を寒天シャーレ上のインゲン葉片（5 cm×5 cm，葉裏を上）に移し，24 時間後に実験に供試した。

脱皮後 3～4 日の 4 齢幼虫に対する処理実験を行うために，飼育箱内で育成したインゲン株に成虫を放虫して 25℃，15L-8D 条件下で 24 時間産卵させた。その後，成虫を取り除き，葉裏を上にし，作製したリーフディスク上で卵を飼育した。6 時間以内に孵化した 1 齢幼虫 400 頭を 4 枚の寒天シャーレ上のインゲン葉片（5 cm×5 cm，葉裏を上）に分けて飼育した。脱皮後 24 時間以内の 4 齢幼虫（60%CO₂ 処理区:109 頭，無処理区:97 頭，24 時間以内に脱皮しなかった 3 齢幼虫は竹串でつぶして除いた）について 3 日後に実験に供試した。

脱皮後 6～7 日の 4 齢幼虫に対する処理実験を行うために，上記と同様に供試虫の準備を行い，脱皮後 24 時間以内の 4 齢幼虫（60%CO₂ 処理区:141 頭，無処理区:127 頭）について 6 日後に実験に供試した。

生死判定は，処理 7 日後までに行い，1 齢幼虫に対する処理では 2 齢脱皮虫数，4 齢幼虫に対する処理では羽化虫数を計数した。調査結果を基に Abbott の補正式を用い，補正死虫率を求めた。

2 結果

(1) ナミハダニ雌成虫および卵に対する効果

60%CO₂ くん蒸処理後のナミハダニ雌成虫の処理終了 24 時間後の補正死虫率

は 100%であった（表 2-1）。また，24h 卵および 48～72h 卵に対する処理 5 日後の補正死虫率も 100%であった（表 2-1）。

(2)ワタアブラムシ無翅成虫に対する効果

60%CO₂くん蒸処理のワタアブラムシ無翅成虫の補正死虫率は 100%であった（表 2-1）。ただし，処理後のワタアブラムシ死亡個体は黒化し，腐敗しており 24 時間より短い時間で死亡している可能性が示唆された。

(3)オンシツコナジラミ 1 齢幼虫および 4 齢幼虫（脱皮後 3～4 日，脱皮後 6～7 日）に対する効果

1 齢幼虫および脱皮後 6～7 日後の 4 齢幼虫に対する補正死虫率は 100%であった（表 2-1）。一方，脱皮後 3～4 日後の 4 齢幼虫に対する補正死虫率は 81.7%であった（表 2-1）。

第 2 節 60%CO₂ のナミハダニ雌成虫および卵に対する殺虫効果

第 1 節における予備実験において，60%CO₂ をナミハダニ雌成虫および卵に対して 30℃で 24 時間処理した場合，高い殺虫効果が得られた。本節では，さらに現場で利用する際の汎用性を検討するために，より効率的かつ効果的な殺虫効果を得られる処理温度と処理時間を明らかにする。

1 材料および方法

(1)供試虫

本実験に供試したナミハダニ（黄緑型）は，2008 年 8 月に本場内のイチゴ苗より採集し，累代飼育した系統である。累代飼育は，第 1 節で述べた。

表2-1 60%CO₂を30℃24時間処理した場合のナミハダニ、ワタアブラムシおよびオンシツコナジラミに対する殺虫効果(予備実験)

	ナミハダニ		ワタアブラムシ		オンシツコナジラミ	
	雌成虫	24h卵	48~72h卵	無翅成虫	1齢幼虫	4齢幼虫 脱皮後3~4日 脱皮後6~7日
CO ₂ 処理あり	供試虫数 100	197	240	100	106	109
	補正死亡率(%) 100	100	100	100	100	81.7
CO ₂ 処理なし	供試虫数 100	197	240	100	106	97
	死亡率(%) 5.0	13.8	9.8	18	4.7	0
						3.1

※補正死亡率は、以下のAbbottの補正式により算出した。

$$\text{補正死亡率(\%)} = \frac{\text{無処理区の生存率(\%)} - \text{処理区の生存率(\%)}}{\text{無処理区の生存率(\%)}} \times 100$$

(2)試験区および処理操作

試験区は 60%CO₂ に関して 2 つ（有無），処理温度，処理時間に関してそれぞれ，3 つ（25，30，35℃），5 つ（4，8，12，16，20 時間）とし，以上を組み合わせた 30 区を設けた．実験の処理装置および処理操作は第 1 節で述べた．処理終了時の CO₂ 濃度は，高濃度二酸化炭素検知器（xp3140，新コスモス電機，大阪市）を用い，下部のノズルコックより計測した．

(3)ナミハダニ雌成虫に対する殺虫効果

羽化 3 日後のナミハダニ雌成虫を寒天シャーレ上のリーフディスク（直径約 7 cm）上に放虫し，24 時間産卵させた後，雌成虫を取り除いた．産下卵は，成虫まで飼育した．1 区あたり羽化 24 時間以内の雌成虫 102 頭を 3 枚の寒天シャーレ上のインゲン葉片（5 cm × 5 cm）に分け，48 時間後に実験に供試した．1 区 1 反復とした．なお，処理前後の飼育条件は 25℃，16L-8D とした．生死判定は，第 1 節に述べた通りであるが，本実験では処理終了 24 時間後および 72 時間後の 2 回行った．ただし，インゲン葉上から逃亡した個体や行方不明の個体は解析から除外し，Abbott の補正式により 60%CO₂ 区の補正死虫率を求めた．

(4)ナミハダニ卵に対する殺卵効果

60%CO₂ に対する感受性が産卵直後とふ化直前の卵で異なるかどうかを明らかにするため，24h 卵と 48～72h 卵に対する殺卵効果を検討した．1 区あたりナミハダニ雌成虫 30 頭を寒天シャーレ上のインゲン葉片（5 cm × 5 cm）に放虫し 24 時間産卵させた後，雌成虫を取り除き，第 1 節に述べた通り，24h 卵および 48～72h 卵を用いた．1 区 1 反復とした．処理前後の飼育条件は 25℃，16L-8D とした．生死判定は，24h 卵に対しては処理 5～10 日後まで，48～72h 卵に対しては処理 2～7 日後まで行い，この間のふ化幼虫を 24 時間ごとに計数した．24h 卵においては 10 日後，48～72h 卵においては 7 日後の調査結果より Abbott の

補正式を用い、60%CO₂ 区の補正殺卵率を求めた。

2 結果

雌成虫に対して、25℃では4～8時間の処理における補正死虫率の上昇は緩やかであったが、8～12時間の処理で補正死虫率は急上昇し、20時間の処理で補正死虫率は100%に達した。30℃と35℃では両区とも4～8時間の処理で補正死虫率は急上昇し、16時間の処理で100%に達した(図 2-4)。

24h 卵に対して30℃と35℃では12時間の処理で補正殺卵率が100%に達した。25℃では20時間の処理でも補正殺卵率は100%に達しなかった(図 2-5)。

48～72h 卵に対して、30℃では16時間、35℃では12時間の処理で補正殺卵率は100%に達した。25℃では、20時間の処理でも補正殺卵率は100%に達しなかった(図 2-6)。

第3節 60%CO₂ のワタアブラムシ無翅成虫に対する殺虫効果

第1節における予備実験から、60%CO₂ をワタアブラムシ無翅成虫に対して30℃で24時間処理した場合、高い殺虫効果が得られた。しかし、処理後の虫体の状態から補正死虫率が100%に達する時間は24時間より短いと考えられた。そのため、本節では、25℃、30℃および35℃の処理温度において補正死虫率が100%に達する時間を明らかにする。

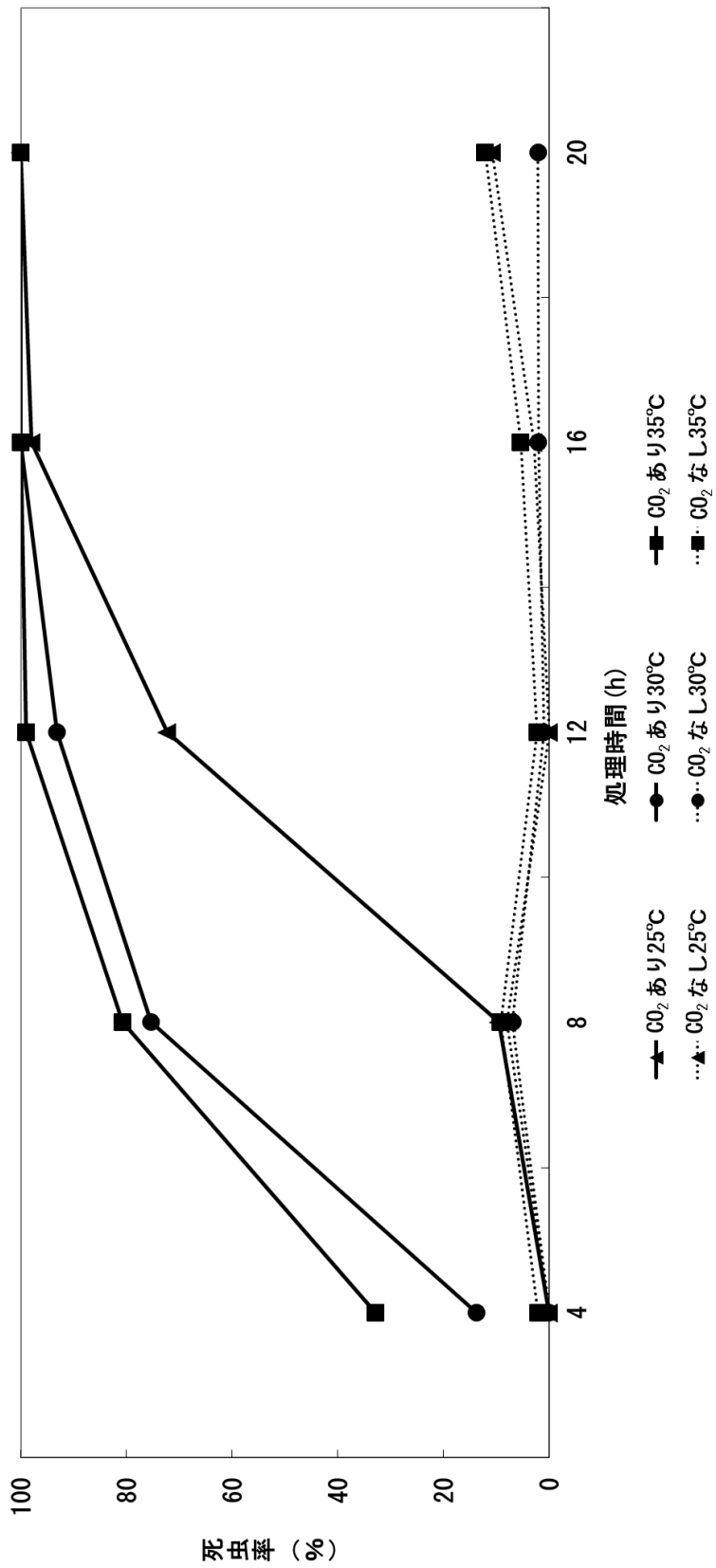


図2-4 異なる処理温度、処理時間における60%CO₂のナミハダニ雌成虫に対する殺虫効果

1. 反復数：1反復/区
2. 供試虫数：102頭/区
3. CO₂処理あり（試験区）は補正死亡率（実線）、CO₂処理なし（対照区）は死亡率（点線）を示す。

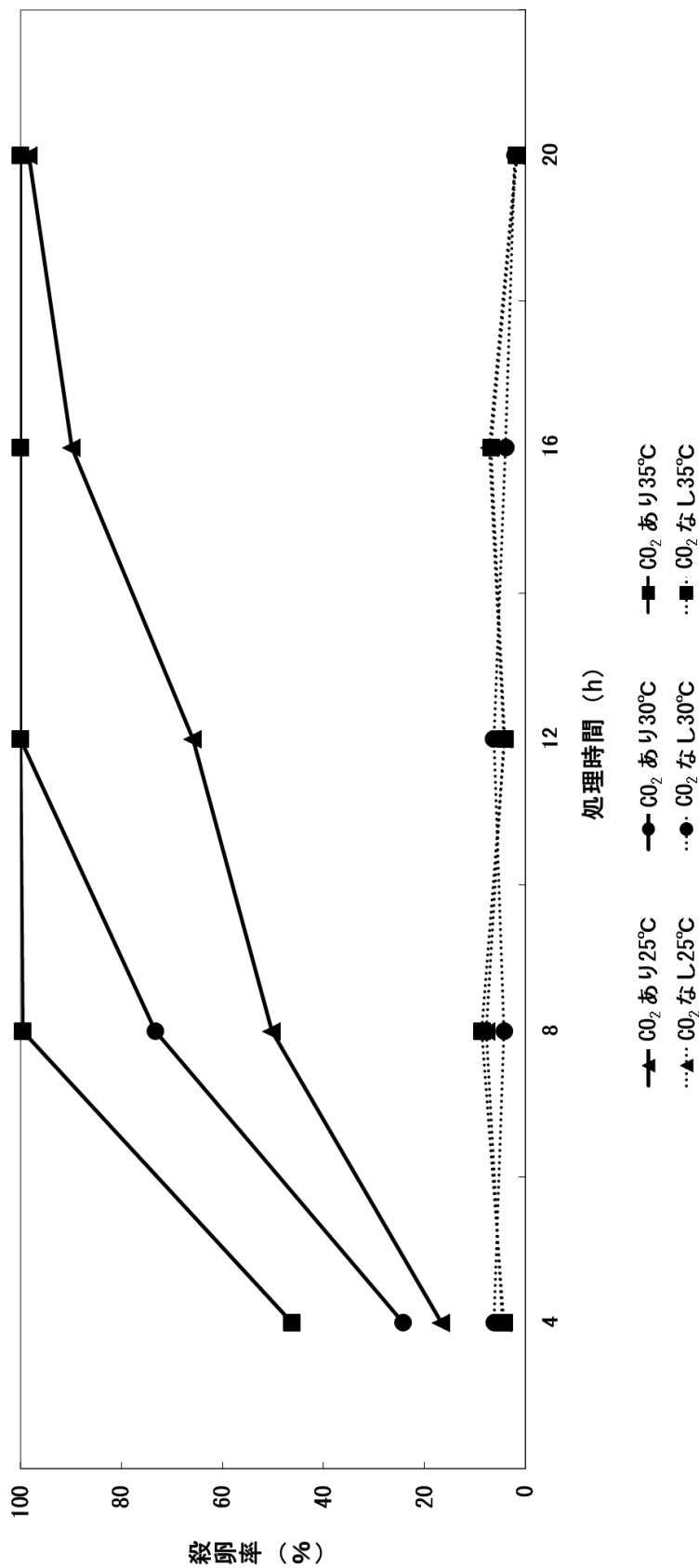


図2-5 異なる処理温度、処理時間における60%CO₂のナミハダニ卵(産卵後0~24h)に対する殺卵効果

1. 反復数: 1反復/区
2. 供試卵数: 4時間処理: 173~216卵, 8時間処理: 215~243卵,
12時間処理: 230~242卵, 16時間処理: 221~236卵, 20時間処理: 236~258卵
3. CO₂処理あり(試験区)は補正死亡率(実線), CO₂処理なし(対照区)は死亡率(点線)を示す.

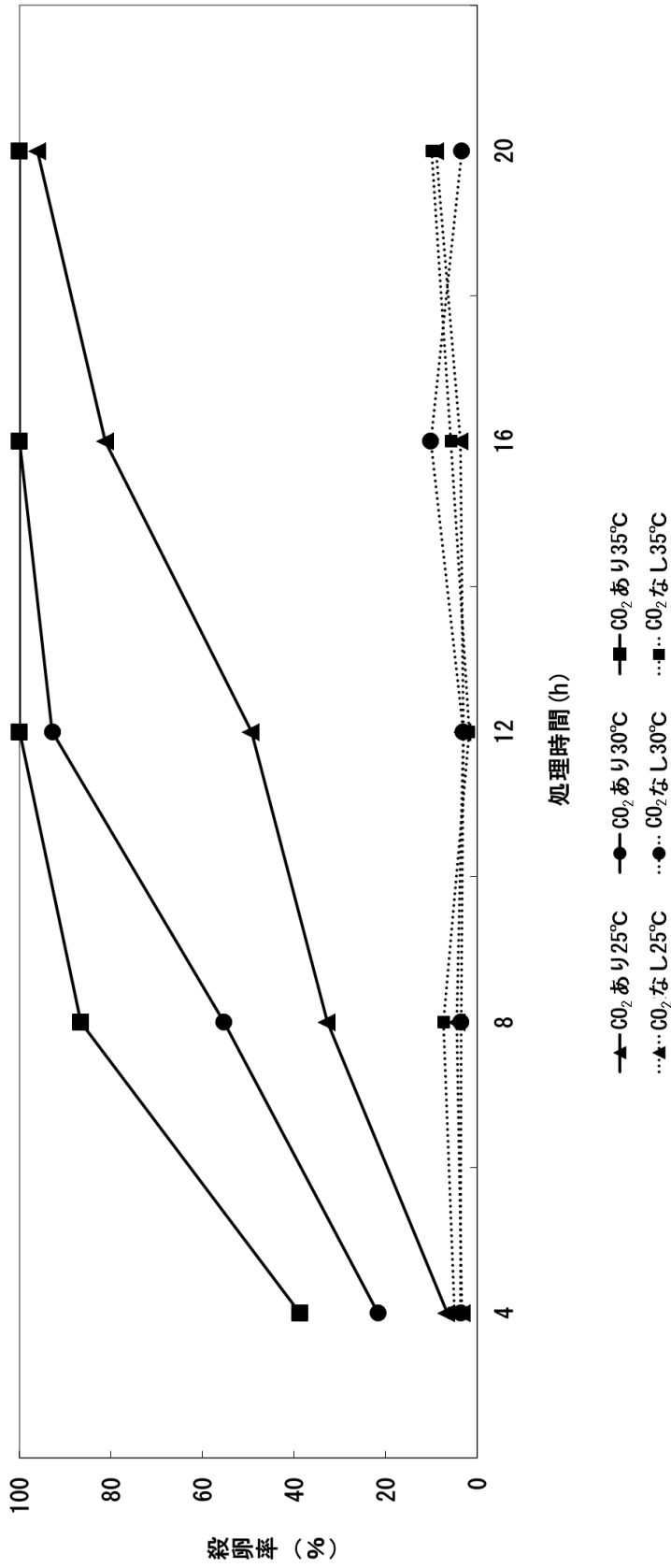


図2-6 異なる処理温度、処理時間における60%CO₂のナミハダ二卵（産卵後48～72h）に対する殺卵効果

1. 反復数:1反復/区
2. 供試卵数: 4時間処理: 269~304卵, 8時間処理: 241~261卵,
12時間処理: 164~175卵, 16時間処理: 172~194卵, 20時間処理: 254~282卵
3. CO₂処理あり(試験区)は補正死亡率(実線), CO₂処理なし(対照区)は死亡率(点線)を示す.

1 材料および方法

(1)供試虫

本実験に供試したワタアブラムシは、2008年8月に本場内のイチゴ苗より採集し、累代飼育した系統である。累代飼育は、第1節で述べた。

(2)試験区および処理操作

試験区は60%CO₂に関して2つ（有無）、処理温度（25、30、35℃）、処理時間（2、4、6時間）を組み合わせた18区を設けた。実験の処理装置および処理操作は第1節で述べた。

(3)ワタアブラムシ無翅成虫に対する殺虫効果

インゲン葉片上に15頭/枚の無翅成虫を放虫し、24時間幼虫を産下させた後、無翅成虫を取り除いた。産下幼虫をそのまま飼育し、羽化24時間以内の雌成虫（102頭/処理区）を3枚の供試用のインゲン葉片（5cm×5cm）に三等分して移し、24時間後に供試した。なお、処理前後の飼育条件は25℃、16L-8Dとした。生死判定は、第1節に述べた。ただし、糸状菌病との複合により死亡した考えられる個体や行方不明の個体は解析から除外し、Abbottの補正式により60%CO₂区の補正死虫率を求めた。

2 結果

ワタアブラムシ無翅成虫の補正死虫率が100%に達するのに要した処理時間は、いずれの処理温度とも6時間であった（図2-7）。

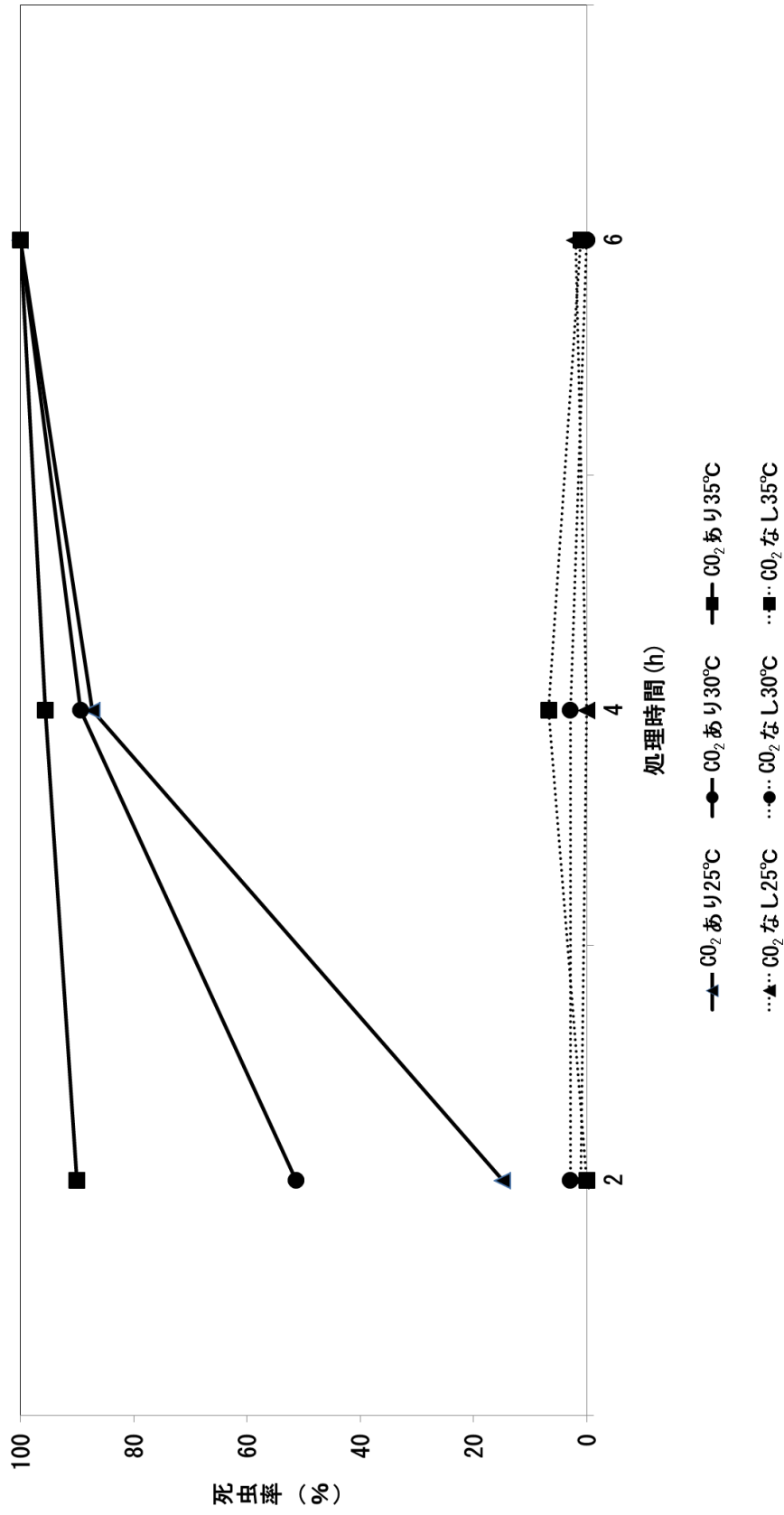


図2-7 異なる処理温度、処理時間における60%CO₂のワタアブラムシ無翅胎生雌虫に対する殺虫効果

1. 反復数：1反復/区
2. 供試頭数：102頭/区
3. CO₂処理あり（試験区）は補正死亡率（実線），CO₂処理なし（対照区）は死亡率（点線）を示す。

第 4 節 60%CO₂ のオンシツコナジラミ 4 齢幼虫に対する殺虫効果

第 1 節における予備実験から、60%CO₂ をオンシツコナジラミ 1 齢幼虫、脱皮後 6～7 日の 4 齢幼虫に対して 30℃ で 24 時間処理した場合、高い殺虫効果が得られた。しかし、脱皮後 3～4 日の 4 齢幼虫では補正死虫率が 100% に達しなかった。そのため、本節では脱皮後 3～4 日の 4 齢幼虫の補正死虫率が 100% になるための処理条件を明らかにする。

1 材料および方法

(1) 供試虫

2009 年 4～6 月に本場内のイチゴ栽培ほ場から採集したオンシツコナジラミ成虫を飼育箱内で栽培したインゲンマメ（本葉 1 枚目が展葉時に芯を詰めたもの）に放虫し、産卵させた。放虫 24 時間後に成虫を取り除き、葉裏を上にして作製したリーフディスク上で卵を飼育した。孵化後 6 時間以内の 1 齢幼虫 300 頭を供試用インゲン葉片 (5 cm × 5 cm, 葉裏を上) に移して飼育した。脱皮後 24 時間以内の 4 齢幼虫 (24 時間以内に脱皮しなかった 3 齢幼虫は竹串でつぶして除いた) を実験に供試した。

(2) 試験区および処理操作

試験区は 60%CO₂ に関して 2 つ (有無)、処理温度、処理時間に関してそれぞれ、3 つ (25, 30, 35℃)、4 つ (6, 12, 18, 24 時間) とし、以上を組み合わせた 24 区を設けた。実験の処理装置および処理操作は第 1 節で述べた。

(3) オンシツコナジラミ 4 齢幼虫に対する殺虫効果

各処理区あたり 3 枚のインゲン葉片を組み合わせる虫数を調整し (60%CO₂ 処理区 : 71～103 頭, 無処理区 : 50～72 頭), 3 日後に供試した。なお, 処理前

後の飼育条件は 25℃，16L-8D とした．生死判定は，処理 10 日後までの羽化成虫数を 24 時間ごとに計数し，Abbott の補正式により 60%CO₂ 区の補正死虫率を求めた．

2 結果

脱皮後 3～4 日後 4 齢幼虫に対しては，35℃では 24 時間の処理で補正死虫率は 100%となった．25℃および 30℃では処理 24 時間後の補正死虫率は 70～80%となった（図 2-8）

第 5 節 考 察

Seki and Murai (2012a, b) は，アザミウマの成虫（ミカンキイロアザミウマ，ヒラズハナアザミウマ *Frankliniella intonsa* (Trybom) ，ネギアザミウマ *Thrips tabaci* Lindeman，ミナミキイロアザミウマ *Thrips palmi* Karny および *Thrips parvispinus* (Karny) の 5 種）および卵（ミカンキイロアザミウマ，ヒラズハナアザミウマ，ネギアザミウマおよびミナミキイロアザミウマの 4 種）に対して，60% CO₂ 処理を行い，30℃では成虫は 6～8 時間，卵は 8～12 時間の処理で死虫率が 100%に達することを報告している．また，小山(2010)は，40%CO₂ をショウガクロバネキノコバエの幼虫と卵に対して，20℃で 24 時間処理した場合の死虫率は 100%となることを報告している．本研究では，60%CO₂ くん蒸処理によりナミハダニ雌成虫および卵に対して 100%の死虫率を得るには，30℃で 16 時間以上，35℃で 12 時間以上の処理が必要であった．

以上の結果より，高濃度 CO₂ に対する感受性は種によって異なり，ナミハダニはアザミウマ類やショウガクロバネキノコバエと比較して感受性が低いと考えられる．今後，高濃度 CO₂ 処理の実用化を進めるために様々な害虫種に対す

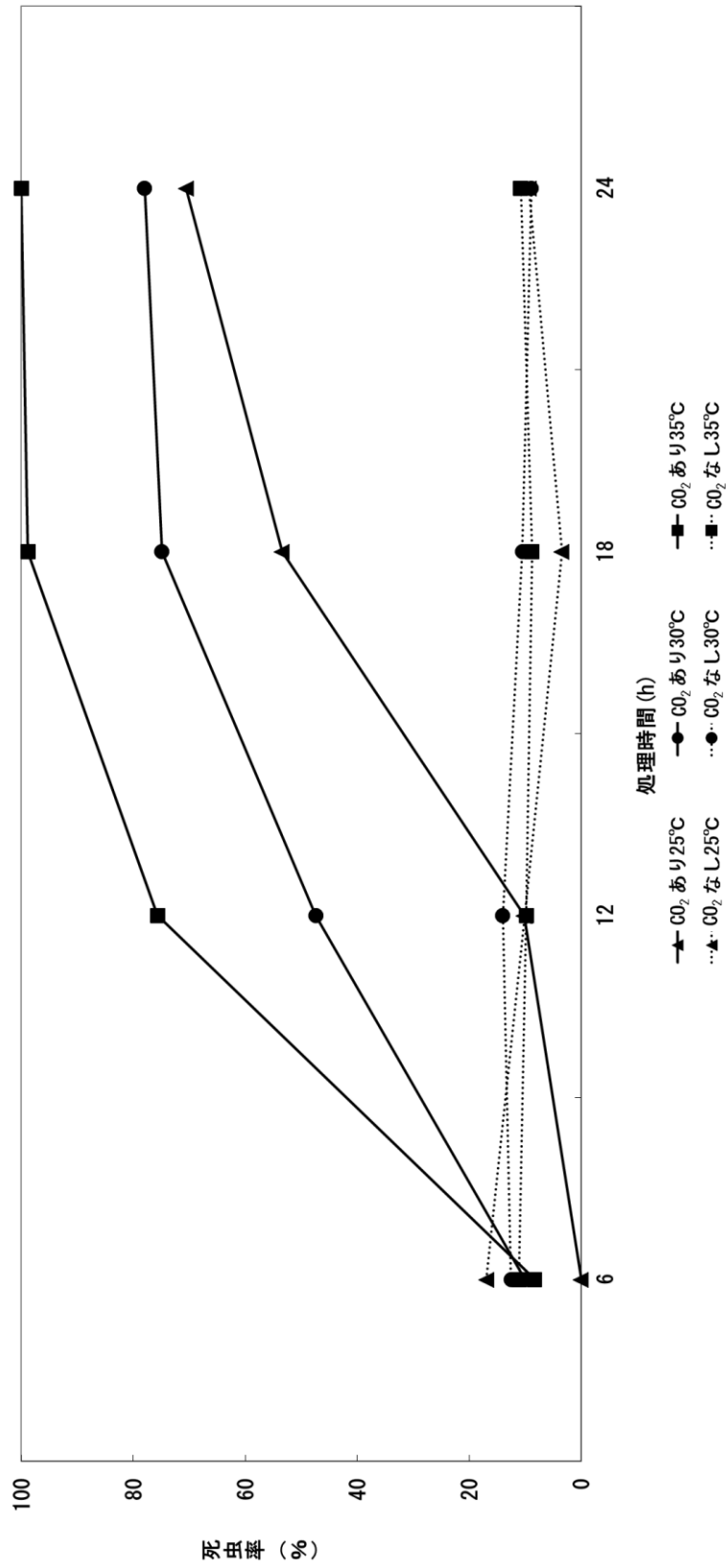


図2-8 異なる処理温度、処理時間における60%CO₂のオンシツコナジラミ4齢幼虫（脱皮後3～4日）に対する殺虫効果

1. 反復数: 1反復/区
2. 供試虫数: CO₂あり71～103頭/区, CO₂なし50～72頭/区
3. CO₂処理あり (試験区) は補正死亡率 (実線), CO₂処理なし (対照区) は死亡率 (点線) を示す.

る殺虫効果を検討し、知見の蓄積および殺虫の機作を明らかにする必要がある。

土田ら(2011)は、ナミハダニ休眠雌成虫を40%CO₂および60%CO₂に、35℃で24時間暴露した場合、処理24時間後では40%CO₂で9.4%、60%CO₂で2.1%の苦悶虫が認められたと報告している。ただし、処理72時間後には、いずれの濃度においても死虫率は100%に達した。本研究では、100%の死虫率を得た処理条件では処理24時間後の苦悶虫は認められなかった。このように休眠雌成虫では、高濃度CO₂への感受性は低くなると見られ、今後、試験条件や供試個体群を揃えての検証が必要である。ただ、促成栽培のイチゴ苗に対して高濃度CO₂処理時期は夏季なので休眠雌成虫については考慮する必要はなく、60%CO₂を用いる場合、30℃において24時間程度の処理で十分な効果があると考えられる。

ワタアブラムシ無翅成虫に対しては、25℃、30℃、35℃のいずれの温度でも6時間処理で100%の殺虫が可能なことから、ナミハダニ防除の処理条件で実用上問題ないと考えられる。一方、オンシツコナジラミ4齢期前半の幼虫に対しては35℃、18時間の処理では死虫率は100%に達したが、25℃、30℃では24時間処理しても死虫率は70~80%とやや効果が劣った。このことから、ナミハダニの殺虫処理条件より高温にするか処理時間を延長する必要があると示唆される。しかしながら、オンシツコナジラミに関しては、定植後の飛来による侵入が不可避であるため、高濃度CO₂処理による積極的な防除を行う必要性は低いと考えられる。以上より、イチゴ苗への高濃度CO₂処理条件に関してはナミハダニの殺虫を最優先に設定することが望ましいと考えられる。

第 3 章 高濃度 CO₂ のイチゴ苗に対する影響

第 2 章では 60% CO₂ によるナミハダニの雌成虫と卵，ワタアブラムシの無翅成虫およびオンシツコナジラミの 4 齢幼虫の殺虫・殺卵に有効な処理温度と処理時間について明らかにした。しかし，この実験は，インゲン葉片を用いて実験室で行ったものである。高濃度 CO₂ 処理を実用レベルで実施する際には，定植直前のイチゴ苗に対しても同時に処理を行うことになる。この時のイチゴ苗は，30℃以上の温度で 60%という高濃度の CO₂ に 24 時間暴露されるため，その後の生育への影響が懸念される。特に，定植直前のイチゴ苗は，花芽形成中の状態のため，定植後の開花に対する障害が懸念される。この花芽に障害が起こった場合，収量に甚大な影響を与えることとなり，高濃度 CO₂ くん蒸処理はイチゴ栽培に取り入れられる防除技術ではなくなる。そこで，本章ではナミハダニの殺虫に有効な高濃度 CO₂ くん蒸処理が，イチゴ頂花房の開花に及ぼす影響について明らかにする。

1 材料および方法

60%CO₂ が定植直前のイチゴ苗の生育および花芽分化に与える影響を調べるために処理後の外観上の障害，頂花房の開花状況を調査した。

栃木県農業試験場いちご研究所（栃木市）で 24 穴セルトレイ（すくすくトレイ，丸三産業 KK，栃木市）により普通夜冷育苗したイチゴ苗（品種，とちおとめ）を供試苗として用いた。供試苗は，2009 年 9 月 10 日に本場へ運搬し，実験までガラスハウス内で慣行の管理を行った。

試験は，60% CO₂ 処理の有無，処理温度（30℃，35℃）および処理時間（12 時間，24 時間）を組み合わせた 8 処理区を設け，各区 10 株を供試した。処理

は、ナミハダニ殺虫試験に準じ、処理前日の夕方に灌水したイチゴ苗をプラスチックトレイに載せてガス置換デシケーター（図 3-1, CR 型, アズワンKK, 大阪, 内寸法 287 mm×297 mm×328 mm, 容量 28L）に入れた。容器容量に対して 10 倍量を超える 300L の 60% CO₂ を流し入れた後、所定温度に設定したインキュベータ内に所定時間静置した。無処理区の苗は、プラスチックトレイに載せ、所定温度に設定したインキュベータ内に所定時間静置した。30℃の処理区は 2009 年 9 月 11～12 日、35℃の処理区は 9 月 12～13 日に実験を行った。第 2 章と同様に試験終了時に CO₂ 濃度を計測した。苗は処理後 24 時間以内にプランター（235 mm×640 mm×183 mm）あたり 3 株ずつ、株間 20 cm で定植して屋外で管理（図 3-2）した。10 月 20 日からはガラスハウス内で管理した。また、未供試苗を 10 株選び、処理時点の花芽ステージを実体顕微鏡により確認した。

処理直後から 7 日後まで葉枯れ、株枯れについて全ての供試苗を目視観察し、その後は全株の頂花房全花の開花日および開花数を頂花房の開花終了まで毎日調査した。なお、開花調査は頂花房のみとし、出蕾した腋花房は、調査の混乱を避けるため除去した。

60% CO₂ のイチゴ苗の頂花房開花への影響を解析するため、各区の頂花房第 1 花の定植日から開花までの日数と開花数について処理の有無、処理温度、処理時間を要因とした三元配置分散分析を行った。また、処理要因による頂花房各花の開花斉一性への影響を解析するために、各花の開花をイベントと見なし、定植後から 80 日目（11 月末）までの期間における頂花房各花の定植から開花までの日数について累積開花率としてとりまとめ、パラメトリック生存時間モデル（対数正規分布）への適合性を検定した。一連の統計解析には JMP バージョン 9.0.3 日本語版 (SAS Institute) を用いた。



図 3-1 ガス置換デシケーターを利用したイチゴ苗処理容器



図 3-2 60%CO₂ 処理後のイチゴ苗定植状況



図 3-3 60%CO₂ を 35℃ で 24 時間 処理 した 後 の イ チ ゴ 苗

2 結果

処理時の苗の花芽ステージは，分化期から萼片形成期であった．処理後，葉枯れ，株枯れなどの有無を観察したが，外観上の障害は認められなかった(図 3-3)．また，定植日から頂花房第 1 花開花までの平均日数は 42.7～44.7 日，定植 80 日後までの平均開花数は 10.0～11.6 花となり(表 3-1)，60%CO₂，温度および時間の処理要因および交互作用による影響は認められなかった(表 3-2，表 3-3)．定植 80 日後までの各区累積開花率の推移を図 3-4 に示す．パラメトリック生存時間のあてはめによる解析から，定植から 80 日後までの各区頂花房全体の開花に対して，いずれの処理要因および交互作用による影響も認められず，頂花房各花の開花時期のばらつきは各区で同等であった(モデル全体の検定： $df=7$ ， $\chi^2=1.84$ ， $p=0.968$) (表 3-4)．

3 考察

本実験では，花芽形成中である定植直前のとちおとめ苗を 60%CO₂ に 30℃ および 35℃ において最長 24 時間暴露したが，枯れなどの外観上の障害発生は認められなかった．また，各処理条件による定植後から頂花房の開花までの日数および開花数への影響は認められなかった．このことから，イチゴの開花に関して 60%CO₂ を用いたくん蒸処理は，イチゴ苗に対して問題なく利用できる防除技術と考えられる．しかし，リンゴ，ニホンナシの果実に対する高濃度(40% および 60%) CO₂ くん蒸処理は，品種により果肉の褐変などの品質の低下が認められる場合がある(土田ら，2011)．また，小山(2010)は，20℃ において 20，40，60，80，100%の CO₂ に 24 時間暴露された種ショウガに外観的障害は見られなかったが，同温度で 100%の CO₂ に 48 時間以上暴露された場合は，外観に障害の発生が認められたと報告している．さらに，定植後の発芽率，茎長

表3-1 60%CO₂の処理温度および処理時間がイチゴ苗の定植から第1花開花までの日数
および定植80日後までの開花数に及ぼす影響

CO ₂ 処理	処理条件	供試株数 (<i>n</i>)	定植から初開花までの日数 (平均±標準誤差)	開花数 (平均±標準誤差)
あり	30°C-12 h	10	44.3±1.0	10.6±0.7
	30°C-24 h	10	43.9±0.8	10.0±0.4
	35°C-12 h	10	43.5±0.5	10.8±0.8
	35°C-24 h	10	43.6±0.8	11.6±0.6
なし	30°C-12 h	10	44.7±1.4	10.7±0.6
	30°C-24 h	10	43.8±0.9	11.6±1.0
	35°C-12 h	10	42.7±0.8	11.0±0.8
	35°C-24 h	10	44.5±0.8	10.6±0.4

表3-2 CO₂処理、処理温度(T)、処理時間(D)がイチゴ苗定植から頂花房第1花開花までの日数に及ぼす影響の分散分析表

要因	平方和	自由度	平均平方	F値	P値	有意性 ($p=0.05$)
CO ₂	0.2	1	0.2	0.023	0.879	ns
T	7.2	1	7.2	0.836	0.364	ns
D	0.5	1	0.5	0.052	0.820	ns
CO ₂ ×T	0.0	1	0.0	0.006	0.939	ns
T×D	12.8	1	12.8	1.486	0.227	ns
CO ₂ ×D	1.8	1	1.8	0.209	0.649	ns
CO ₂ ×T×D	6.1	1	6.1	0.702	0.405	ns
誤差	620.2	72	8.6			
計	648.8	79				

表3-3 CO₂処理、処理温度(T)、処理時間(D)がイチゴ苗定植から80日後までの頂果房開花数に及ぼす影響の分散分析表

要因	平方和	自由度	平均平方	F値	P値	有意性 ($p=0.05$)
CO ₂	1.01	1	1.01	0.219	0.641	ns
T	1.51	1	1.51	0.327	0.569	ns
D	0.61	1	0.61	0.132	0.717	ns
CO ₂ ×T	7.81	1	7.81	1.688	0.198	ns
T×D	0.01	1	0.01	0.003	0.959	ns
CO ₂ ×D	0.11	1	0.11	0.024	0.877	ns
CO ₂ ×T×D	9.11	1	9.11	1.968	0.165	ns
誤差	333.30	72	4.63			
計	353.47	79				

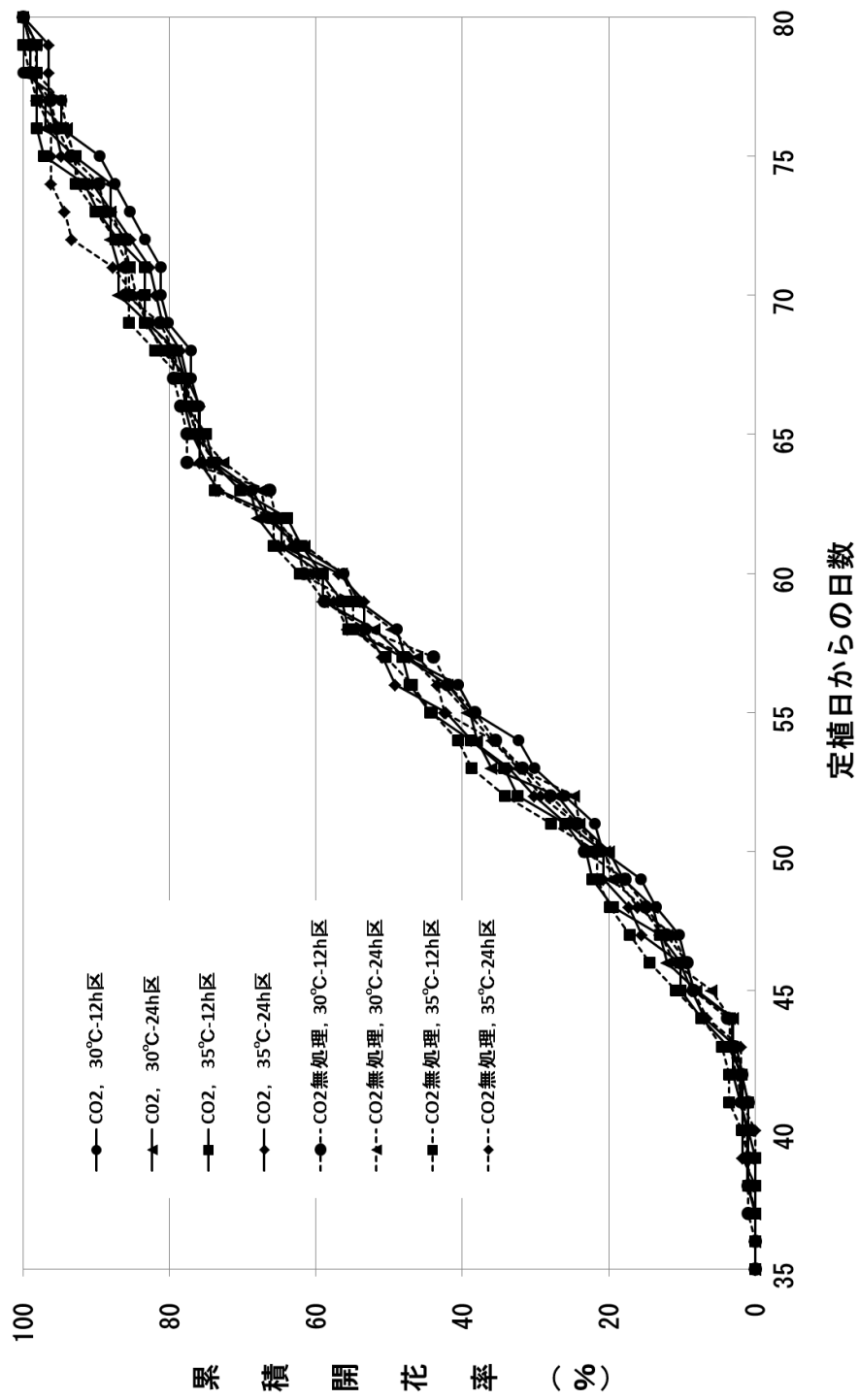


図3-4 定植80日後までの各処理区の累積開花率の推移

表3-4 CO₂処理、処理温度 (T)、処理時間 (D) がイチゴ苗定植から80日後までの頂果房各花の開花に及ぼす影響

要因	パラメータ数	自由度	尤度比 χ^2	p値	有意性 ($p=0.05$)
CO ₂	1	1	0.414	0.520	ns
T	1	1	0.021	0.886	ns
D	1	1	0.006	0.938	ns
CO ₂ ×T	1	1	0.007	0.934	ns
T×D	1	1	0.548	0.459	ns
CO ₂ ×D	1	1	0.668	0.414	ns
CO ₂ ×T×D	1	1	0.214	0.644	ns

※パラメトリック生存時間分析 (対数正規分布) によるあてはめ
モデル全体の検定: $df=7$, $\chi^2=1.84$, $P=0.968$

および収穫時重量は、前者の処理では無処理と比べて差はないが、後者の処理では発芽率、茎長および収穫重量の低下が認められたことを報告している（小山，2010）。CO₂の他に O₂ や N₂ がある程度混合されることにより障害が回避される可能性がある。今後、様々な植物での CO₂ 濃度と障害発生の関係と障害発生に関する生理的機構を解明する必要がある。また、本実験では、とちおとめ 1 品種のみを用いて試験を行った。イチゴ栽培において高濃度 CO₂ 一般的に利用されるために、より多くの品種での調査や障害発生に関する知見を集める必要がある。

第4章 ナミハダニに対する高濃度CO₂くん蒸処理の本圃における防除効果実証試験

第2章において60%CO₂のナミハダニに対する高い殺虫効果を明らかにした。第3章では60%CO₂はイチゴ苗に悪影響を及ぼさないことを示した。本章では、60%CO₂によるナミハダニ管理の実用化に向けて防除効果、障害等の発生などに関する圃場レベルでの実証試験を本場内の小規模圃場およびイチゴ生産者圃場において行った。

第1節 本場内小規模試験圃場における防除効果

1 材料および方法

本場内でポット育苗したイチゴ苗(品種, とちおとめ)を試験に用いた。2009年7月21日, 細粒の鹿沼土と籾殻くん炭を容量で2:1に混ぜた仮植用培土をいれた直径9cmのビニルポットに仮植した。

試験区として60%CO₂処理区と無処理区を設けた。供試イチゴ苗600株に対し, 処理前日の2009年9月13日にナミハダニ(黄緑型)100頭を放虫した。翌日9月14日に(独)農研機構果樹研究所(茨城県つくば市)内に設置されている高濃度CO₂くん蒸処理装置(図4-1, 土田ら, 2011)を用いて供試苗300株に対して60%CO₂処理を24時間行った。処理中の温湿度計測は自記記録温湿度計(おんどとりTR-71, ティーアンドディーKK, 松本市)を用いて1時間ごとに記録した。残りの300株は定植まで慣行管理を行い無処理苗とした。供試苗は, 2009年9月17日に本場内に設置されている単棟パイプハウス1棟(面積約1a)に畝幅60cm, 株間25cmで定植した。肥培管理については慣行とした。



・くん蒸処理装置前面の様子



・処理装置庫内の様子



・くん蒸処理用CO₂ボンベ

図4-1 イチゴ苗の高濃度CO₂くん蒸処理装置

※茨城県つくば市 農研機構 果樹研究所内設置

定植苗は、各処理区の 300 株から任意に選び出し、3 畝のうち両端の畝を 3 区画ずつに区切り、処理区と無処理区を交互に配置し、1 区画(約 8m²)あたり 56 株植え付けた(図 4-2)。

60%CO₂ 処理後のナミハダニの寄生状況調査については、処理 24 時間後の 2009 年 9 月 16 日に両処理区から任意に 100 株を選び、株ごとにナミハダニ生存虫数および死亡虫数を調査した。なお、面相筆で刺激して反応のない個体は死亡とした。

定植後の本圃におけるナミハダニ発生状況調査は、調査株を区画ごとに無作為に 10 株を選び出し、2009 年 11 月 10 日から 2010 年 2 月 1 日まで、概ね 1 週間間隔で株ごとに 1 複葉を選定し、寄生するナミハダニ雌成虫を計数した。

2 結果

60%CO₂ 処理中の CO₂ 濃度、処理装置内温度および湿度の推移を図 4-3 に示す。処理期間中の平均温度、平均湿度はそれぞれ、 $32.5 \pm 0.9^{\circ}\text{C}$ (平均値±標準偏差) および $93.5 \pm 8.8\%$ (平均値±標準偏差) であった。60%CO₂ で 24 時間処理した後のイチゴ苗上ではナミハダニの生存個体は認められず、死亡個体が株あたり 0.09 ± 0.03 頭(平均±標準誤差)確認された。無処理区では生存個体が株あたり 0.05 ± 0.02 頭(平均±標準誤差)確認され、死亡個体は認められなかった(表 4-1)。

本圃に定植後、無処理区では放虫したナミハダニが調査開始時の 11 月 10 日から認められ、12 月中旬以降からは密度が急増した(図 4-4)。このため、2 回の殺ダニ剤散布(2010 年 1 月 6 日:アセキノシル水和剤, 1 月 20 日:プロピレングリコールモノ脂肪酸エステル乳剤)を行ったが、十分な防除効果が得られずに調査終了時までナミハダニが多発し続けた。一方、処理区では 12 月末まで

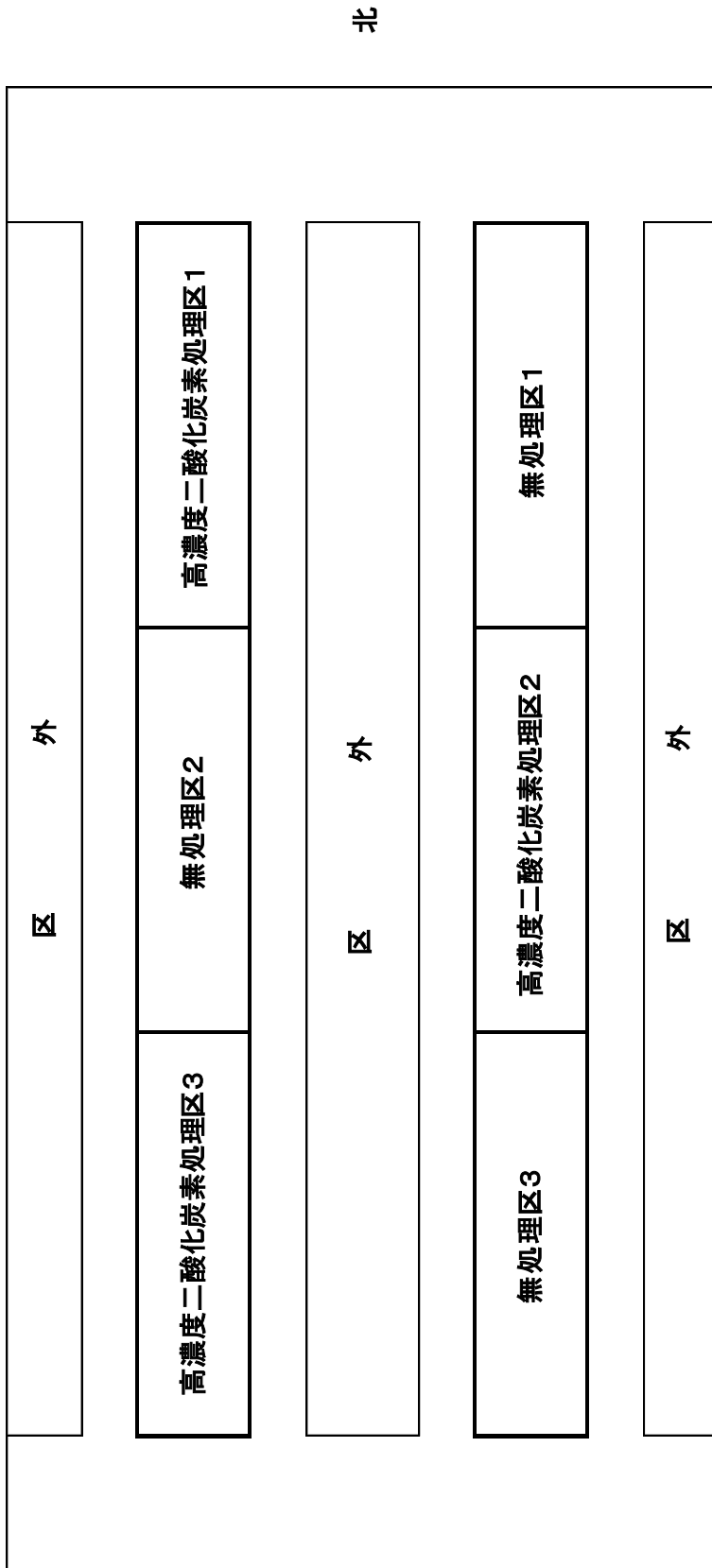


図4-2 本場内圃場の試験区配置図

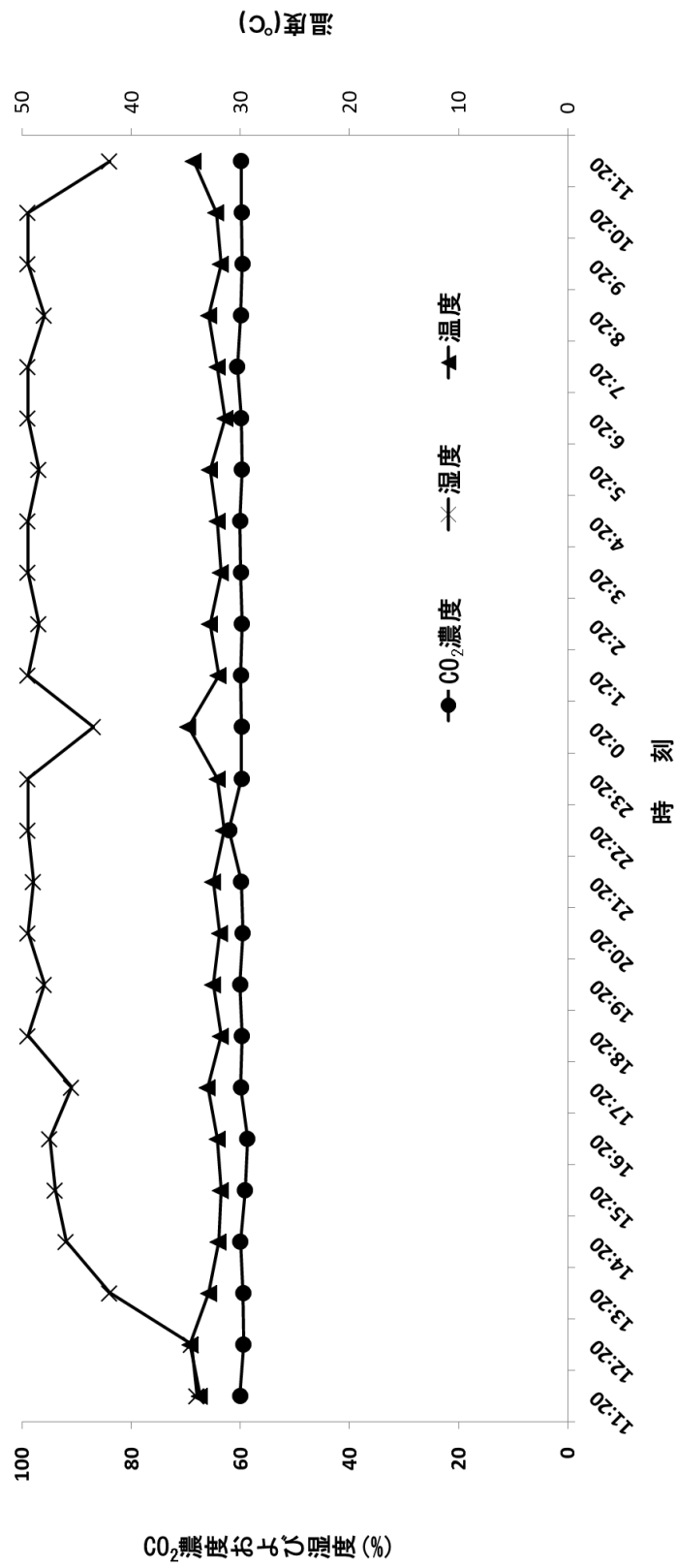


図4-3 高濃度CO₂処理中のCO₂濃度、処理装置内湿度および温度の推移

表4-1 高濃度CO₂処理後のイチゴ苗におけるハダニ類の生存個体数及び死亡個体数¹⁾

	調査株数	株あたり生存個体数 ²⁾	株あたり死亡個体数 ²⁾
高濃度二酸化炭素処理区	100	0	0.09±0.032
無処理区	100	0.05±0.022	0

1) 調査は、高濃度CO₂処理終了24時間後に行った。

2) 平均±標準誤差

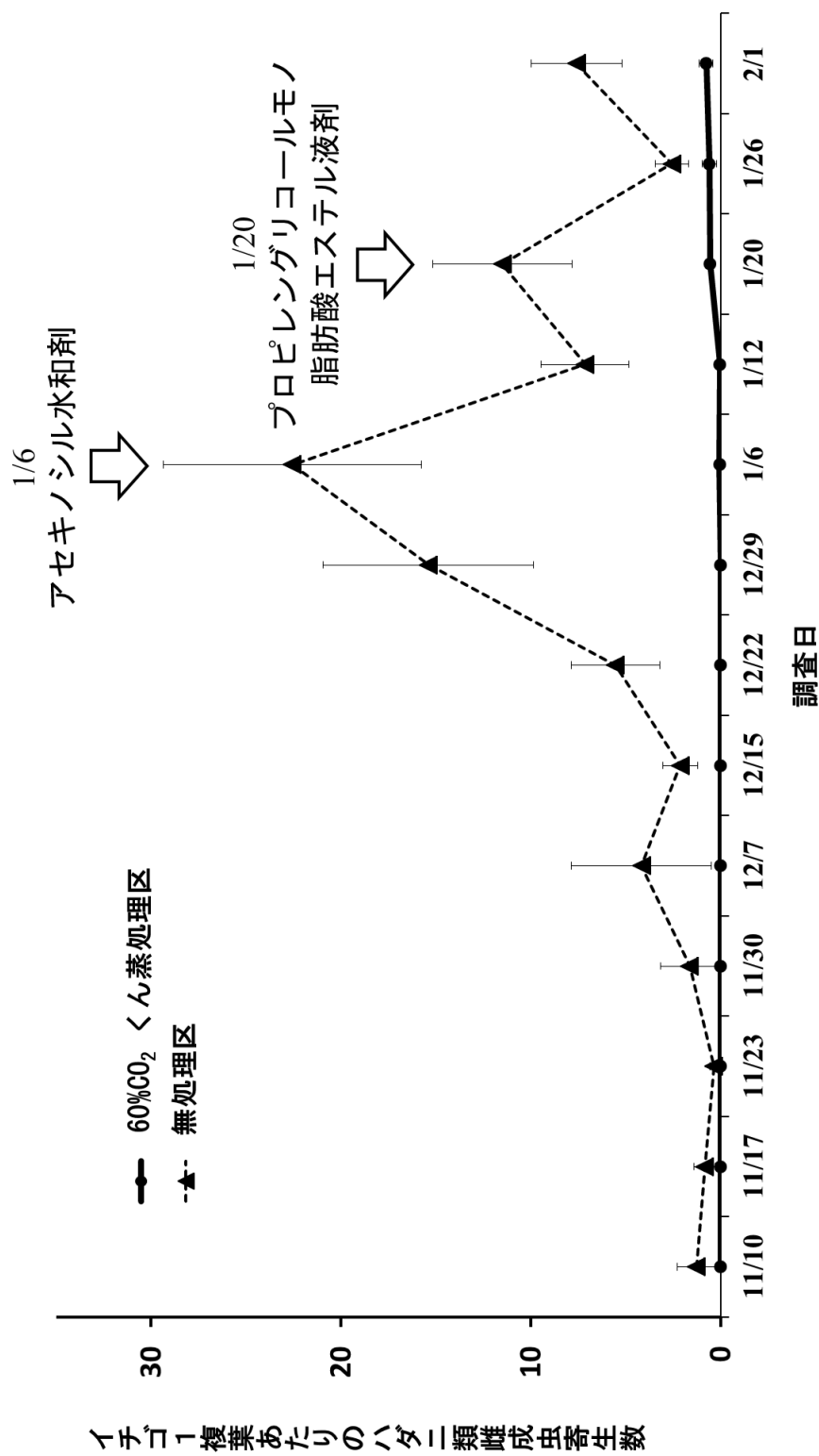


図4-4 本場内における60%CO₂処理および無処理のハダニ類雌成虫発生推移

※図中の白矢印は、無処理区での殺ダニ剤散布を示す。図中のエラーバーは標準誤差を示す

ナミハダニの発生は認められず，調査終了時まで低密度で推移した（図 4-4）。

第 2 節 現地生産者圃場における防除効果

1 材料および方法

生産者宅で 35 穴セルトレイ（すくすくトレイ，丸三産業 KK，栃木市）により普通夜冷育苗したイチゴ苗（品種，とちおとめ）4000 株を試験に用いた。

試験区として 60%CO₂ 処理区と無処理区を設けた。2009 年 9 月 7 日，第 1 節と同様に果樹研究所内に設置されている高濃度 CO₂ くん蒸処理施設でイチゴ苗 2000 株に対して 60%CO₂ 処理を 24 時間行った。この間の平均温度は，31.7±0.1℃（平均値±標準偏差）であった。温度の計測は，処理装置内蔵の記録計を用いて，1 時間ごとに行った。CO₂ 濃度および湿度は計測しなかった。残りの 2000 株は無処理苗とした。

処理終了当日の 9 月 8 日，単棟パイプハウス（面積 2a）2 棟をそれぞれ処理区，無処理区として全株を定植した。両処理区ともナミハダニの放虫は行わず，自然な発生に任せた。なお，無処理区は，生産者の意向により 10 月 10 日にハダニ類に対して還元澱粉糖化物液剤とピリダベン水和剤，10 月 29 日にシフルメトフェン水和剤を散布した。一方，処理区ではハダニ類に対する薬剤防除は行わなかった。両区ともハダニ類以外の病虫害防除と肥培管理は現地生産者の慣行に従った。ナミハダニの発生は 2009 年 10 月 14 日から 12 月 26 日まで概ね 1 週間間隔で調査した。各ハウスから無作為抽出した 100 株について，それぞれ 1 複葉を選び，寄生するナミハダニ雌成虫を計数した。

2 結果および考察

現地圃場の無処理区では，定植後にハダニ類に対する薬剤防除を2回行ったにも関わらず，12月8日にはナミハダニの発生が確認され，12月末には葉あたり雌成虫数が約2頭まで増加した（図4-5）．一方，処理区ではハダニ類への防除を行わなかったが12月26日までナミハダニの発生は全く認められなかった（図4-5）．以上の結果より，60%CO₂処理は実用レベルでも非常に高い防除効果があると考えられる．

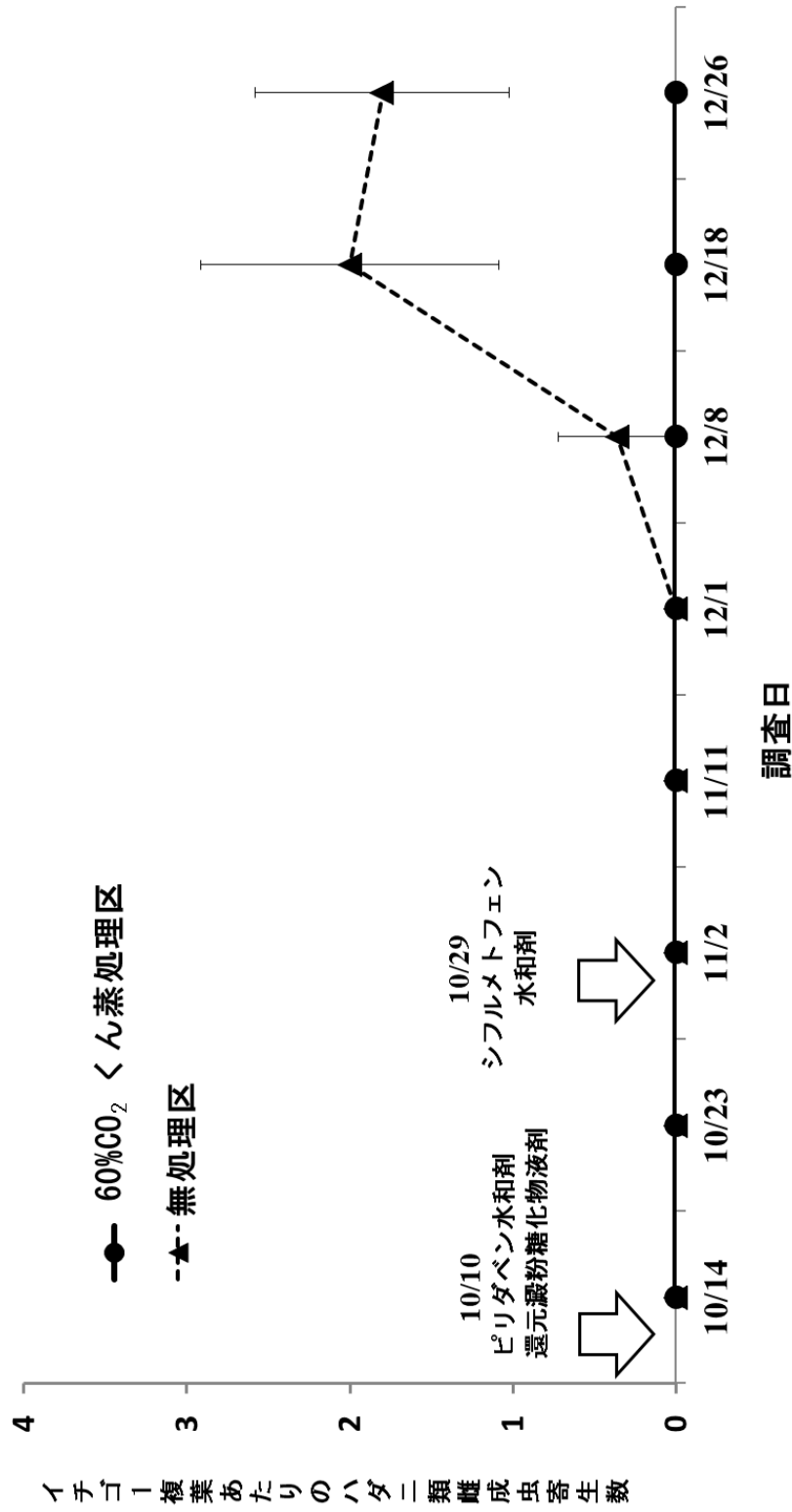


図4-5 現地圃場における60%CO₂処理および無処理のハダニ類雌成虫発生推移

※図中の白矢印は、無処理区での殺ダニ剤散布を示す。図中のエラーバーは標準誤差を示す

第 5 章 総合考察

Arthropod Pest Resistance Database (APRD;<http://www.pesticideresistance.org/>)によると、ナミハダニはハダニ科の中で薬剤抵抗性の初報告が 1943 年と最も古い。また、節足動物で最も多い 94 種の薬剤成分について抵抗性を発達させている。ワタアブラムシの薬剤抵抗性の初報告は 1965 年で、抵抗性が認められた薬剤成分はカメムシ目では、モモアカアブラムシ *Myzus persicae* (Sulzer) に次いで多い。また、近年、ネオニコチノイド系殺虫剤抵抗性ワタアブラムシ確認の日本国内初報告 (Matsuura and Nakamura, 2014) があった。オンシツコナジラミについては海外において 27 薬剤成分に対する抵抗性が認められている。中でもネオニコチノイド系殺虫剤に加え、IPM 技術による防除体系の中で利用が推奨されるピメトロジンおよびピリプロキシフェンなど (Gorman et al, 2007 ; Karatolos et al, 2010 ; Karatolos et al, 2012 ; Longhurst et al, 2013 ; Pappas et al, 2013 ; Ovcarenko et al, 2014) に対する抵抗性の報告が相次いでいる状況には危機感を抱かざるを得ない。APRD においてオンシツコナジラミの日本国内での薬剤抵抗性に関する報告は見あたらないが、海外同様に薬剤抵抗性の獲得が進んでいるのかもしれない。実際、使用薬剤に以前ほどの効果が実感できないという生産者の声をしばしば耳にする。かつてのイチゴ栽培の病害虫防除では、薬剤利用を中心とした防除が収量および品質を高く保ち、低コスト生産を続けるためには必須とされてきた。このような理念の下防除が行われてきたため、特に、ナミハダニは様々な薬剤に対して抵抗性を獲得してきたものと思われる。ワタアブラムシやオンシツコナジラミに関しては、イチゴにおける IPM 技術の導入がハダニ類に比べると遅れている。今後、より多くの薬剤に対する抵抗性獲得も考えられ、カブリダニ類

の利用で始まった天敵による防除が停滞する恐れがある。

本研究では、イチゴで発生する主要な害虫であるナミハダニ、ワタアブラムシおよびオンシツコナジラミを高濃度 CO₂ くん蒸処理により死滅させるための温度および処理時間を明らかにすることができた。併せて、高濃度 CO₂ くん蒸処理が定植直前のイチゴ苗（品種，とちおとめ）の生育および花芽分化に悪影響を及ぼさないことを明らかにすることができた。さらに、高濃度 CO₂ くん蒸処理の農薬登録に向けて本場内および現地生産者圃場において実証試験を行い、推奨される高濃度 CO₂ くん蒸処理の温度条件と処理時間を定めるとともに、圃場での防除効果および実用性を明らかにすることができた。本研究で開発した高濃度 CO₂ くん蒸処理によるイチゴの害虫防除技術は、従来のポストハーベストでの利用ではなく、プレハーベストで利用できることから新規性のある害虫防除技術である。また、薬剤抵抗性害虫に対しても高い防除効果が期待でき、なおかつ農作物の収量・品質，安全性を維持しつつ、減化学合成農薬栽培による環境負荷軽減にも貢献できる IPM 技術であるといえる。

本研究で得られた成果のイチゴ栽培での実用化，イチゴ以外の作物での適用拡大など今後の展望について以下に述べたい。

1 イチゴ栽培での高濃度 CO₂ くん蒸処理技術の実用化に向けて

実験室での殺虫試験や本場内および現地生産者圃場試験を通じて高濃度 CO₂ くん蒸処理は、ナミハダニを始めとするイチゴの主要害虫に対する防除技術として実用性の高い方法であると考えられた。イチゴ栽培において本防除技術の導入により期待される効果は、単なる殺虫効果にとどまらない。収穫繁忙期となる 12 月下旬までナミハダニの加害が回避されるため、生産者の精神的負担と労力を含めた防除コストの軽減が可能になる。また、イチゴ株が健全生育する

ことで収量が増加し、生産額の向上が図れる。さらに、持ち込みなどによりナミハダニが発生したとしても低密度時から天敵のカブリダニ類が利用でき、防除リスクが低減されるなどの副次的効果も期待できる。

本研究の成果により、既に米、麦、くり等で農薬登録のある「二酸化炭素くん蒸剤」が2012年12月19日付けでイチゴのナミハダニに対して適用拡大された。この適用拡大を受け、現在、栃木県では新技術導入広域事業により、ファスナーバックによる処理装置(図5-1)が生産現場で導入されている、また、宇都宮大学を中心に生産者の実情にあわせた処理装置の形状や規模、さらなる低コストシステムの開発・実証が行われ、水封式処理装置(図5-2)やイチゴ苗の夜冷システムに組み込んだ処理装置(図5-3)などがイチゴ栽培の現地生産者圃場に導入されている。

2 イチゴ苗供給システムへの高濃度CO₂処理の導入

これまでイチゴ生産者圃場におけるイチゴ苗の定植直前の高濃度CO₂処理を想定して研究を進めてきたが、苗の供給ルート(図5-4)の各育苗施設に本防除法を組み込むことも想定できる。苗流通段階での導入は、生産者各々に処理装置を購入させる場合に比べて費用対効果が高いと考えられる。そのため、高性能な空調設備の追加など、ある程度の付加的な設備コストをかけることが可能で、天候などに左右されない確実な防除効果が期待できる。ナミハダニなどはイチゴ苗の供給ルートの中で薬剤抵抗性を発達させると考えられる。本防除法は、この流れを断つことができ、苗流通段階での防除コスト低減や配布苗の付加価値の向上も見込める。一方、生産者側でも、経営規模の事情から高濃度CO₂処理システムの導入が困難な場合でもハダニ類による被害リスクの低減が期待できる。現在、ナミハダニに対する薬剤防除は気門封鎖剤の多回数使用が



図 5-1 ファスナーバックによる高濃度 CO₂ 処理装置



图 5-2 水封式高浓度 CO₂ 处理装置

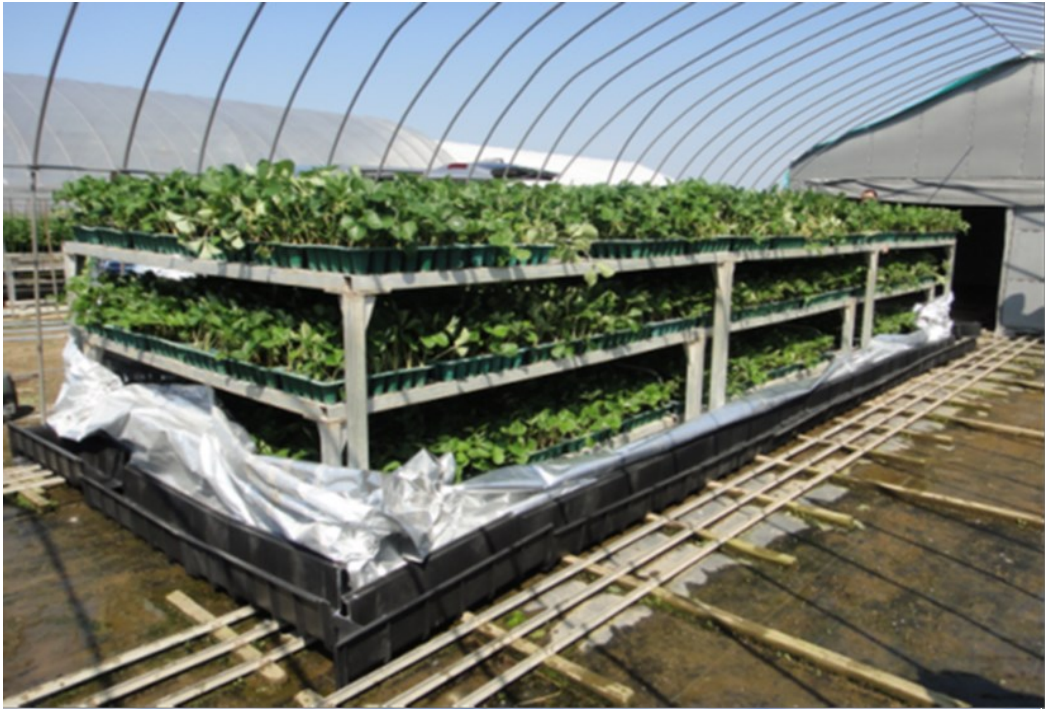


図 5-3 イチゴ苗夜冷システムを利用した高濃度 CO₂ 処理装置

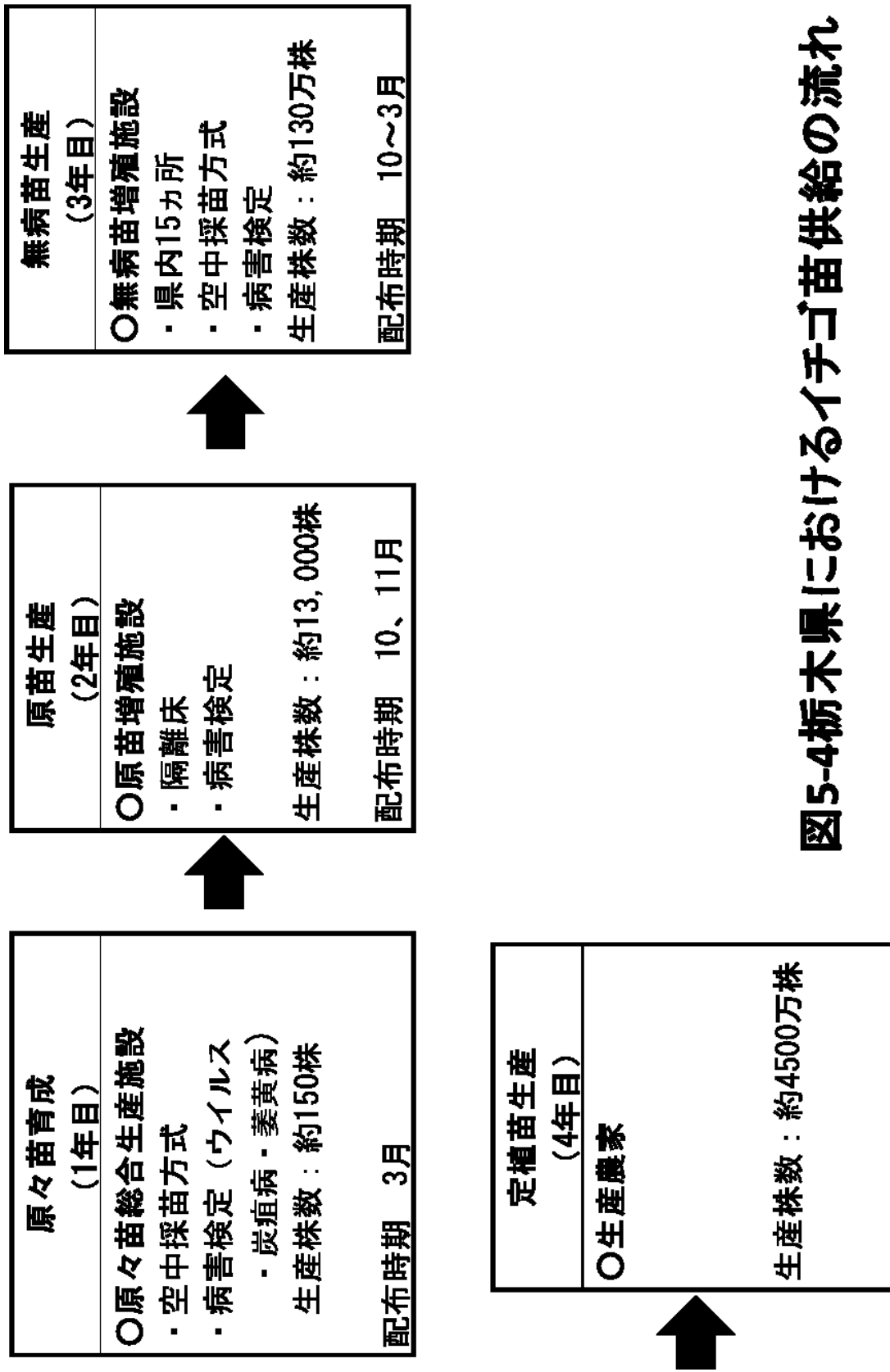


図5-4栃木県におけるイチゴ苗供給の流れ

恒常的になっているが、散布回数が減り労力軽減が図れると考えられる。

3 適用拡大に向けて

高濃度 CO₂くん蒸処理による高い防除効果は、本研究のナミハダニ、ワタアブラムシ、オンシツコナジラミに加え、貯蔵ショウガのショウガクロバネキノコバエ幼虫（小山，2009，2010），輸出用果実のリンゴ，ニホンナシのシンクイムシ類，ナミハダニ休眠雌成虫（土田ら，2011），アザミウマ類（関・村井，2011; Seki and Murai, 2012a, b），においても報告されている。しかし，30℃前後の温度における高濃度 CO₂くん蒸処理の植物苗への影響を検討した報告は見あたらない。このことから，今後，各種農作物への適用拡大を図るために，様々な野菜，花卉類等の苗に高濃度 CO₂くん蒸処理が及ぼす影響を調べる必要がある。

4 結び

高濃度 CO₂くん蒸処理は，ナミハダニを始めとするイチゴの主要害虫に対して非常に殺虫効果が高く，有効な防除技術と考えられる。しかし，本研究において天敵昆虫等に対する影響については検討していない。現在，土着天敵を含めた天敵利用による害虫防除が主流となりつつある中，高濃度 CO₂くん蒸処理を天敵との併用技術として発展させるためには，天敵生物に対する影響についても明らかにする必要がある。また，本技術は処理方法についても検討する余地が残っていると考えられる。例えば，くん蒸ガスの成分比率をコントロールすることで殺虫効果が変化したり，植物に対する薬害などの影響が変化するかもしれない。さらに，処理温度，処理時間についても目的や対象とする害虫や植物にあわせた条件を検討する必要があると考えられる。今後の研究に期待したい。

本研究では高濃度 CO₂ くん蒸処理の農業生産者の利用を想定して研究を進めてきたが、一方で農産物輸出の動きも活発化しつつある。野菜、花卉類の苗の輸出に対応した利用も考えられる。このような害虫フリー苗生産を「攻めの農政」の一戦略として位置づけることもできるのではないだろうか。

要 旨

高濃度(60%)CO₂くん蒸処理の 1)ナミハダニ雌成虫および卵（産下後 24 時間以内および産下後 48～72 時間以内）に対する殺虫効果，2)定植直前のイチゴ苗（品種：とちおとめ，普通夜冷処理苗）の外観および花芽形成に及ぼす影響，3)イチゴ栽培ほ場での実証試験による防除効果の検討を行った．その結果，ナミハダニ雌成虫においては 25℃では 20 時間，30℃および 35℃では 16 時間の処理で補正死虫率が 100%に達した．産下後 24 時間以内卵においては，25℃では 20 時間の処理でも補正殺卵率は 100%に達しなかったが，30℃および 35℃では 12 時間の処理で補正殺卵率が 100%に達した．産下後 48～72 時間以内の卵においては，25℃では 20 時間の処理でも補正殺卵率は 100%に達しなかったが，30℃および 35℃では 16 時間の処理で補正殺卵率が 100%に達した．ワタアブラムシ無翅成虫においては，25℃，30℃および 35℃とも 6 時間の処理で補正死虫率が 100%に達した．脱皮後 3～4 日齢のオンシツコナジラミ 4 齢幼虫においては，25℃，30℃では 24 時間の処理で補正死虫率が 70～80%であったが，35℃では 24 時間の処理で補正死虫率が 100%に達した．また，定植直前のイチゴ苗に 60%CO₂くん蒸処理を 30℃と 35℃において 12 時間および 24 時間行ったが，処理後の枯れなどの障害，定植後のイチゴの頂花房開花に対する影響は認められなかった．圃場における実証試験では，60%CO₂くん蒸処理区では無処理区に比較してナミハダニの発生が大幅に抑制され，高い防除効果が認められた．これらの成果から，イチゴ栽培における主要害虫防除技術として定植直前の 60%CO₂くん蒸処理は有望と考えられた．

謝 辞

本研究の遂行にあたり、懇切なご指導とご鞭撻を賜るとともに本稿のとりまとめについても丁寧なご助言、ご校閲を賜った宇都宮大学農学部名誉教授の村井保博士並びに同大学農学部応用昆虫学研究室准教授園田昌司博士に深く感謝の意を表する。

本論文の審査および校閲を賜り、丁寧なご指導をいただいた東京農工大学農学部教授岩淵喜久男博士、茨城大学農学部教授後藤哲雄博士、宇都宮大学農学部教授川崎秀樹博士、宇都宮大学農学部准教授岩永将司博士に厚くお礼申し上げます。

イチゴ苗に対する高濃度 CO₂ くん蒸処理影響試験に際して供試用のとちおとめ苗を分譲いただいた栃木県農業試験場いちご研究所元所長伊藤浩氏をはじめ、同所開発研究室元室長植木正明氏、研究所職員の皆様に厚くお礼申し上げます。

圃場での実証試験の際に高濃度 CO₂ くん蒸処理施設の使用について、ご配慮いただいた（独）農研機構果樹研究所元果実鮮度保持研究チーム長中村ゆり博士に厚くお礼申し上げます。

現地実証試験において快く圃場をお貸しいただいたイチゴ生産者の関口史男氏に厚くお礼申し上げます。

本研究の遂行にあたり、ご理解と多大なるご指導、ご支援をいただいた栃木県農業試験場元環境技術部長石川成寿博士に感謝申し上げます。また、本研究の実験、調査および圃場管理に多大なご協力をいただいた病理昆虫研究室の皆様へ感謝申し上げます。

折あるごとに心の支えとなる暖かい励ましの言葉を賜った学部生時代の恩師である宇都宮大学農学部名誉教授岩下嘉光博士に深く感謝申し上げます。

最後に、本研究の成果は、家族の支えと理解がなければ得られなかった。本研究を行っていた当時は休日返上で毎日のように出勤せねばならず、育ち盛りで多感な時期の二人の子供の面倒をほとんど妻に負わせてしまったこと、ここに深く謝罪し、心より感謝の意を表したい。

引用文献

- Abbott, W. S. (1925) A method of computing the effectiveness of an insecticide. *J. Econ. Entomol.* 18:265-267.
- Aharoni, Y., J. K. Stewart and D. G. Guadagni (1981) Modified atmospheres to control western flower thrips on harvested strawberries. *J. Econ. Entomol.* 74:338-340.
- Bailey, S. W. (1965) Air-tight storage of grain; its effect on insect pests. IV. *Rhyzopertha dominica* (F.) and some other Coleoptera that infest stored grain. *J. Stored Prod. Res.* 1:25-33.
- Banks, H. J. and P. C. Annis. (1977) Suggested procedures for controlled atmosphere storage of dry grain. C.S.I.R.O. Div. Ent. Tech. Paper. 13:23pp.
- 江原昭三・真梶徳純 (1975) 農業ダニ学, 全国農村教育協会, 東京, 328pp.
- 福岡県病虫害防除所(2007) <http://www.jppn.ne.jp/fukuoka/yakuzai/yakuzaikannjyusei.html>
- Gorman, K., G. Devine, J. Bennison, P. Coussons, N. Punched and I. Denholm (2007) Report of resistance to the neonicotinoid insecticide imidacloprid in *Trialeurodes vaporariorum* (Hemiptera: Aleyrodidae). *Pest Manag. Sci.* 63:555-558.
- Karatolos, N., I. Denholm, M. Williamson, R. Nauen and K. Gorman (2010) Incidence and characterization of resistance to neonicotinoid insecticides and pymetrozine in the greenhouse whitefly, *Trialeurodes vaporariorum* Westwood (Hemiptera: Aleyrodidae). *Pest Manag. Sci.* 66:1304-1307.
- Karatolos, N., M. Williamson, I. Denholm, K. Gorman and R. ffrench-Constant

- (2012) Over-expression of a cytochrome p450 is associated with resistance to pyriproxyfen in the greenhouse whitefly *Trialeurodes vaporariorum*. PLoS ONE 7.
- 小山昌志(2009) ショウガクロバネキノコバエに対する二酸化炭素くん蒸の殺虫効果. 関西病虫研報 51:79-80.
- 小山昌志(2010) 二酸化炭素くん蒸処理時間がショウガクロバネキノコバエの殺虫効果とショウガの生育に及ぼす影響. 関西病虫研報 52:149-151.
- 香西宏(2006) <http://www.pref.kagawa.lg.jp/USERS/s16300/noshi/seika/houzyou/44pdf/44veg3.pdf>
- Matsuura, A. and M. Nakamura (2014) Development of neonicotinoid resistance in the cotton aphid *Aphis gossypii* (Hemiptera: Aphididae) in Japan. *Appl. Entomol. Zool.* 49:535-540.
- Mitcham, E. J., S. Zhou and V. Bikoba (1997) Controlled atmospheres for quarantine control of three pests of table grape. *J. Econ. Entomol.* 90:1360-1370.
- 宮井俊一・河合章・荻原廣・高橋賢司・吉田幸二・吉富均(編)(2009) 生物機能を活用した病虫害・雑草管理と肥料削減:最新技術集. 中央農業総合研究センター, つくば, 225pp.
- 中北宏(1986) 貯蔵食品の害虫防除技術と IPM. 植物防疫 40:307-315.
- 中北宏・宮ノ下明大(2003) 貯穀害虫防除のイノベーション技術. 家屋害虫 25:13-26.
- 農林水産省(2015) 農林水産統計 <http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/kensaku/hin5.html>
- 農林水産省消費・安全局 植物防疫課・農産安全管理課農薬対策室(2016) 平成 27 年病虫害の発生と防除. 植物防疫 66:3-12.

- Ovcarenko, I., L. Lindstrom, K. Saikkonen and I. Vanninen (2014) Variation in mortality among populations is higher for pymetrozine than for imidacloprid and spiromesifen in *Trialeurodes vaporariorum* in greenhouses in Finland. *Pest Manag. Sci.* 70:1524-1530.
- Pappas, M., F. Migkou, and G. Broufas (2013) Incidence of resistance to neonicotinoid insecticides in greenhouse populations of the whitefly, *Trialeurodes vaporariorum* (Hemiptera: Aleyrodidae) from Greece. *Appl. Entomol. Zool.* 48:373-378.
- 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.
- Seki, M. and T. Murai (2012a) Response of five adult thrips species (Thysanoptera:Tripidae) to high carbon dioxide atmospheres at different temperatures. *Appl. Entomol. Zool.* 47:125-128.
- Seki, M. and T. Murai (2012b) Insecticidal effect of high carbon dioxide atmospheres on thrips egg oviposited in plant tissue. *Appl. Entomol. Zool.* 47: 433-436.
- 栃木県農業環境指導センター(2012) <http://www.jppn.ne.jp/tochigi/file/gijutu/kanjyusei/2012-engei-namihadani.pdf>
- 土田聡・中村ゆり・羽山裕子・村井保・中田健・望月雅俊(2011) 高温・高濃度炭酸ガスくん蒸の殺虫効果とリンゴ・ナシ果実品質への影響. 果樹研究所研究報告 12:15-26.
- 梅川學・宮井俊一・矢野栄二・高橋賢司(編)(2005) IPM マニュアル-総合的病害虫管理技術-. 養賢堂, 東京, 236pp.

Whiting, D. C. and J. V. D. Heuvel (1995) Oxygen, carbon dioxide, and temperature effects on mortality responses of diapausing *Tetranychus urticae* (Acari:Tetranychidae). *J. Econ. Entomol.* 88:331-336.

吉川誠(2003) 栃木県におけるイチゴおよびニホンナシに寄生するナミハダニの薬剤感受性. 関東東山病虫研報 50:161-163.