

温室栽培におけるコナジラミ類の
総合的病害虫管理（IPM）に関する研究*

Studies on Integrated Pest Management (IPM) of Whitefly in
Greenhouses

杉山恵太郎
Keitaro Sugiyama

* 岐阜大学大学院連合農学研究科審査論文 2016 年（平成 28 年）

目 次

	頁
第 1 章 緒言	1
第 2 章 静岡県におけるコナジラミ類の発生実態と 2002 年の IPM	6
第 1 節 発生実態	6
第 2 節 2002 年の IPM	10
第 3 章 強制換気システムの侵入防止効果	14
第 1 節 防虫ネットの選定	14
第 2 節 陰圧式強制換気と寄生蜂を組み合わせた IPM	16
第 3 節 陽圧式強制換気の侵入抑制効果	19
第 4 章 寄生蜂による生物的防除	24
第 1 節 オンシツツヤコバチ, サバクツヤコバチおよびチチュウカイツヤコバチの 防除効果の比較	24
第 2 節 チチュウカイツヤコバチの産卵行動	29
第 3 節 DNA マーカーを用いた寄生蜂の識別法	33
第 4 節 殺虫剤と微生物農薬の影響	35
第 5 章 総合考察	42
第 6 章 摘要	44
Summary	45
引用文献	47

第1章 緒言

温室栽培は高品質の農作物をより早く安定的に生産できることから、1950年代以降にその栽培面積が急速に増加し(清水, 1964), 最近では1ha以上の大規模温室もみられるようになってきた。このような施設規模の拡大には温室構造の技術的な進歩があった(森山, 2015)。一方、作物の生育に適した温室環境は病害虫にとっても好適な環境であることから、温室内に侵入した病害虫は急増し、しばしば甚大な被害を与えている。

国の内外を問わず、温室栽培で問題となっている害虫はオンシツコナジラミ *Trialeurodes vaporariorum* (Westwood) (van Lenteren and Noldus, 1990) (Fig. 1 a, b), タバココナジラミ *Bemisia tabaci* (Gennadius) (Stansly and Naranjo, 2010), マメハモグリバエ *Liriomyza trifolii* (Burgess) (Spencer, 1973; 西東, 1992b), トマトハモグリバエ *Liriomyza sativae* Blanchard (Spencer, 1973; Parrella, 1987; 岩崎ら, 2000), ミカンキイロアザミウマ *Frankliniella occidentalis* (Pergande) (早瀬・福田, 1991; Brødsgaard, 2004) などである。これらの害虫には、微小、広食性、高い増殖率、殺虫剤抵抗性といった共通の特徴がある(Stansly and Naranjo, 2010)。このうち、タバココナジラミは世界各地の熱帯、亜熱帯地域を中心に様々な植物や農作物を宿主として生息し、ベゴモウイルスの媒介昆虫としても広く知られている(Brown and Bird, 1992; Brown, 2000)。現在、本種は数多くのパイオタイプや遺伝的に異なる変異体等に分類されており、種としてのタバココナジラミは種複合体(species complex)という認識が一般化している(Brown et al., 1995; Brown, 2000; Perring, 2001)。国内では1986年にタバココナジラミパイオタイプB (Fig. 1 d, e, f)の海外からの侵入が初めて確認され(大戸, 1990), 2004年にはタバココナジラミパイオタイプQ (Fig. 1 c)が確認されている(Ueda and Brown, 2006; Ueda et al., 2009)。国内ではこれらのパイオタイプ以外に、スイカズラを主要寄主とし在来とされるパイオタイプJpLが分布している(Ueda and Brown, 2006; Ueda et al., 2009)。コナジラミ類は吸汁により農作物の生育を阻害するばかりでなく、排泄物(甘露)に発生するすす病が果実を汚損するとともに光合成を阻害する(Schuster et al., 1996) (Fig. 3 a)。さらに、タバココナジラミの寄生はトマト果実の着色異常(西東・尾崎, 1991; 松井, 1992; Schuster et al., 1996; Masuda et al., 2016) (Fig. 3 b), ウリ科, アブラナ科, マメ科作物など

に葉茎の白化や退緑(西東, 1992a; 廣田ら, 1993; 外間ら, 1993; 青木, 1994; Schuster et al., 1996; 上門・大藪, 2008; 松浦, 2010; Masuda et al., 2016) (Fig. 3 c) など色素に関連した生理障害の原因となっている。

タバココナジラミは300種以上のジェミニウイルス科のウイルスを媒介することが知られている(Varma et al., 2011)。国内ではジェミニウイルス科ベゴモウイルス属のトマト黄化葉巻ウイルス *Tomato yellow leaf curl virus* (TYLCV) (Fig. 3 d, e) が1996年に静岡県, 愛知県, 長崎県のトマト産地で初めて発生が確認され(Kato et al., 1998), それ以降, 九州, 西日本, 関東に発生が拡大した(本多, 2005)。本ウイルスに感染したトマトは葉巻症状を呈するとともに、結実しなくなることから(Czosnek and Laterrot, 1997), 経済的に多大な損失を引き起こしている。また、クロステロウイルス科クリニウイルス属のウリ類退緑黄化ウイルス *Cucurbit chlorotic yellows virus* (CCYV) (行徳ら, 2009; Okuda et al., 2010) (Fig. 3 f, g) は、2004年熊本県の施設栽培メロンで発生が確認されて以降(行徳, 2009), 九州全県に拡大し、静岡県内でも2014年に温室メロンで発生が確認された。発病の初期は葉に退緑小斑点が生じ、斑点が増加・癒合しながら黄化・拡大して斑状の黄化葉となり、草勢が低下するとともに品質が低下し減収となる(行徳ら, 2009; Okuda et al., 2010)。農作物にこのような多様な被害を与えることから、コナジラミ類は温室栽培における重要害虫となっている。これまで、コナジラミ類に対しては一般に殺虫剤が使用されてきたが、殺虫剤に対する抵抗性が発達してきていることから殺虫剤一辺倒の防除は困難となっている(Horowitz et al., 2005; Nauen and Denholm, 2005; 徳丸・林田, 2010)。また、TYLCVやCCYVなどの昆虫媒介性ウイルス病の防除においては、ウイルス媒介昆虫とウイルス源、栽培作物の間の伝染環を断ち切ることが重要であるため(本多, 2005), ウイルスを保毒したタバココナジラミの温室内への侵入、温室内での増殖、温室外への移出などの対策が重要とされている。

温室栽培における害虫対策としては特に二つの視点が重要である。ひとつは害虫を侵入させない温室構造、もうひとつは温室内に侵入してしまった際の対策である。害虫を侵入させない温室構造については、開口部への防虫ネットの設置が基本となる。防虫ネットの目合いを小さくすればするほど侵入防止効果は高まるが、その分換

気効率が落ちて高温・多湿となる (Sase and Christianson, 1990 ; Montero et al., 1996 ; Munoz et al., 1999)。従って、防虫ネットの選定に際しては害虫の侵入防止と換気効率の両面を考慮しなければならない。換気効率を従来の2倍に高めた強制換気システムが開発され、トマト温室に導入されている (大石・守谷, 2004)。この温室は従来の自然換気温室に比べると、夏季の温室内の気温が約 2℃ 低い。つまり、植物体からの蒸散効率が高まることから、生育が促進し果実の品質が著しく向上するという (大石・守谷, 2004)。強制換気には陰圧式と陽圧式があり、陰圧式が一般的であるが、陽圧式の方が害虫の侵入は少ないとされている (Berlinger and Lebiush-Mordechi, 1996 ; 辻, 2007)。いずれの換気方式も害虫の侵入防止のため防虫ネットと組み合わせたシステムとして開発する必要がある。

一方、温室内に侵入してしまった害虫の防除対策としては、前述した害虫種は殺虫剤に対して抵抗性を発達させていることから (Horowitz et al., 2005 ; Nauen and Denholm, 2005 ; 徳丸・林田, 2010)、天敵と殺虫剤を組み合わせた総合的病害虫管理 (Integrated Pest Management, IPM) が開発され、欧米では主流となっている (Heinz et al., 2004 ; Stansly and Naranjo, 2010)。事実、生物農薬として開発された天敵の種類は急速に増加しており、2014 年刊行された *The Manual of Biocontrol Agents* (Roma, 2009) によると、天敵昆虫としては 81 種、天敵微生物としては 39 種 (内、Bt は 11 種) が掲載されている。コナジラミ類の天敵については、オンシツツヤコバチ *Encarsia formosa* Gahan (Fig. 2 a) の歴史が最も古く、1920 年代にはすでにイギリスで大量生産が行われ (Hoddle et al., 1998)、世界中で利用されており、国内では 1995 年に初めて生物農薬として登録された。次いで、国内では 2003 年にサバクツヤコバチ *Eretmocerus eremicus* Rose & Zolnerowich (Fig. 2 b) が、2007 年にチチュウカイツヤコバチ *Eretmocerus mundus* (Mercet) (Fig. 2 c) が相次いで登録され、いろいろな寄生蜂を利用できるようになってきた。これらツヤコバチ類の雌成虫がコナジラミ類幼虫に寄生や寄主体液摂取 (ホストフィーディング) をすることによりコナジラミ類の密度が抑制される。しかし、これら 3 種の寄生蜂の防除効果を同時に比較・検討した報告はみあたらず、生物農薬としての特性の違いは必ずしも明らかになっていない。また、チチュウカイツヤコバチは寄生探索能と産卵能が高いことから、上記 3 種の寄生蜂の中では最も有望視されているが (Hudák et al., 2003 ; Stansly et al., 2005)、コナジラミ類に対する嗜好性の違いや産卵行動の違いには不明な点が多い。さらに、コナジラミ類が多発した場合、殺虫剤と寄生蜂、あるいは

微生物農薬と寄生蜂を組み合わせた防除が想定されるが、そのためには殺虫剤や微生物農薬の寄生蜂に対する影響を事前に把握しておく必要がある。

本研究は温室栽培におけるコナジラミ類の新しい総合的病害虫管理 (IPM) の構築を目指したものである。はじめに静岡県におけるコナジラミ類の発生実態を明らかにするとともに、殺虫剤と寄生蜂を組み合わせた 2002 年の IPM の課題を明らかにした (第 2 章)。次にコナジラミ類を温室内に侵入させない強制換気システムを検討した (第 3 章)。次に温室内に侵入してしまったコナジラミ類の対策として寄生蜂の利用法を検討した (第 4 章)。最後に強制換気システムと寄生蜂を中心とした IPM の将来像を考察した (第 5 章)。

なお、本研究の主要な部分は *Applied Entomology and Zoology* (Sugiyama et al., 2008, 2011, 2014)、日本応用動物昆虫学会誌 (杉山ら, 2011)、関西病害虫研究会報 (杉山ら, 2012) および *BioControl* (Sugiyama et al., 2013) に発表した。

本論文の取りまとめに際して、懇切丁寧な御指導と審査を賜りました静岡大学農学部教授西東力博士に厚く感謝の意を表します。また、論文の審査を賜った静岡大学農学部教授鈴木克己博士並びに岐阜大学応用生物科学部教授土田浩治博士に深く感謝の意を表します。

本研究を遂行するに当たり、元静岡県農業試験場病害虫部長池田二三高氏には多くの御指導と御助言を賜り、またコナジラミ類とツヤコバチ類の写真を提供頂き深く感謝申し上げます。元静岡県農業試験場病害虫部長妻木和一氏、太田光輝博士並びに鈴木則夫氏には多くの御指導と御助言を賜りました。静岡県農林技術研究所片山晴喜博士には論文の執筆について多くの御指導と御助言を賜りました。静岡大学農学部田上陽介博士、元静岡県果樹研究センター多々良明夫博士、静岡県農林技術研究所土井誠氏、静岡県病害虫防除所芳賀一氏、静岡県果樹研究センター増井伸一博士、同加藤光弘氏並びに西部農林事務所松野和夫氏には研究に関する御指導と御助言を賜るとともに励ましのお言葉をいただいた。静岡県茶業研究センター小澤朗人博士には特に統計解析に関する御助言と御指導を賜りました。静岡県経済産業部産業革新局大石直記氏には強制換気システムおよびトマト栽培管理に関する御指導と御助言を賜りました。諸氏に深く感謝申し上げます。

近畿大学農学部教授矢野栄二博士には寄生蜂に関する有益な御助言や文献等の貴重な情報をいただきました。元農業生物資源研究所野田隆志博士、農業・食品産業技術総合研究機構生物機能利用研究部門前田太郎博士、同

機構中央農業研究センター日本典秀博士，同センター光永貴之博士並びに国際農林水産業研究センター小堀陽一博士には依頼研究員として旧農業生物資源研究所で研修をさせていただいた際に寄生蜂に関する研究の御指導を賜りました。農業・食品産業技術総合研究機構野菜花き研究部門長本多健一郎氏にはタバココナジラミ及びトマト黄化葉巻病ウイルスの防除技術に関する有益な御助言を賜りました。農業・食品産業技術総合研究機構北海道農業研究センター上田重文博士にはタバココナジラミ及びトマト黄化葉巻病ウイルスの遺伝子診断に関する有益な御助言を賜りました。農業・食品産業技術総合研究機構中央農業研究センター奥田充博士並びに熊本県農業研究センター行徳裕氏にはウリ類退緑黄化ウイルスに関する有益な御助言を賜りました。アリスタライフサイエンス株式会社の桃下光敏氏並びに山中聡博士には寄生蜂の提供いただくとともに寄生蜂に関する御助言をいただきました。菊川市湯張敏司氏並びに有限会社エムズ・トマト前田保雄氏には現地試験に際し便宜を図っていただくとともにトマトの栽培管理に関する御助言をいただきました。併せて深く感謝申し上げます。

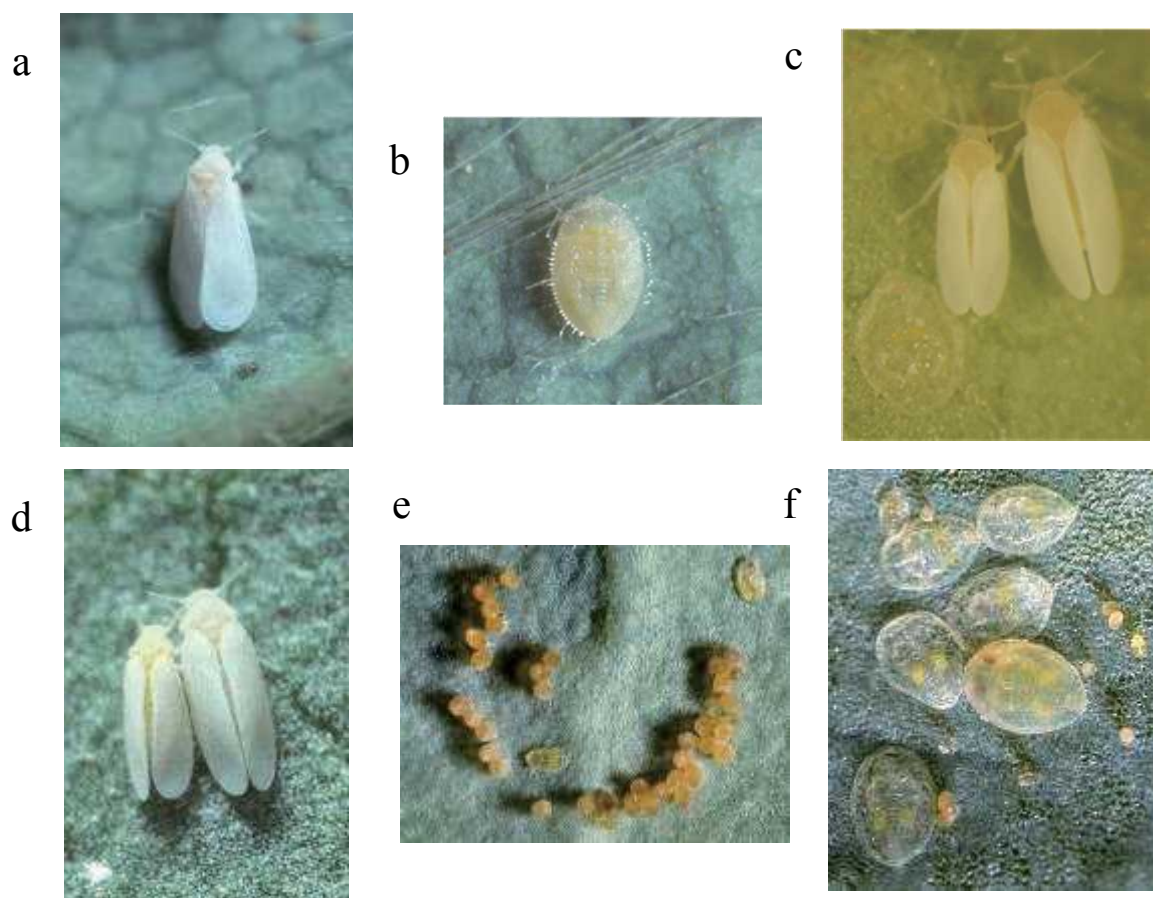


Fig.1. Whiteflies; (a) *Trialeurodes vaporariorum* adult and (b) fourth instar nymph. (c) *Bemisia tabaci* Q biotype male (left), female and third instar nymph, (d) *B. tabaci* B biotype male (left) and female, (e) eggs, and (f) eggs, third and fourth instar nymphs.

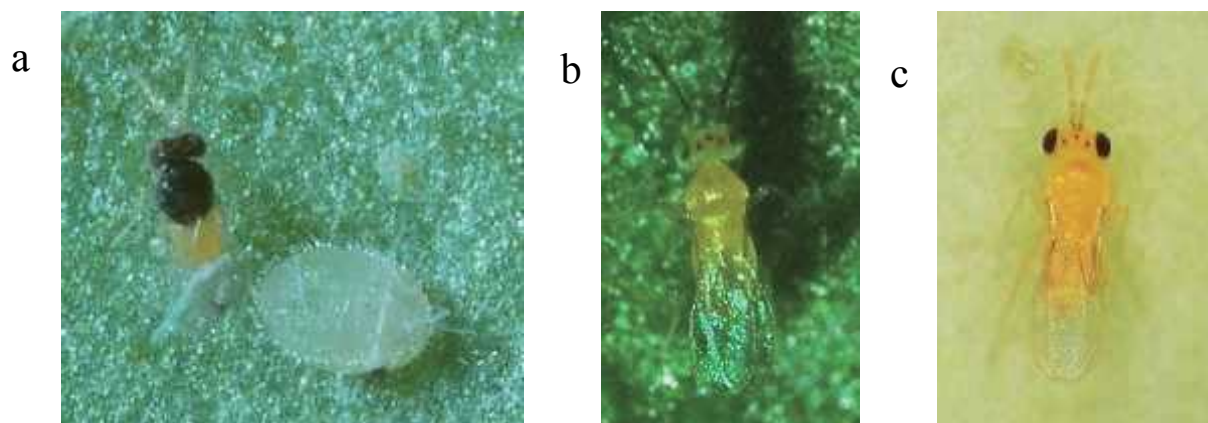


Fig.2. Whitefly parasitoids; (a) *Encarsia formosa*, (b) *Eretmocerus eremicus*, (c) *Eretmocerus mundus*.

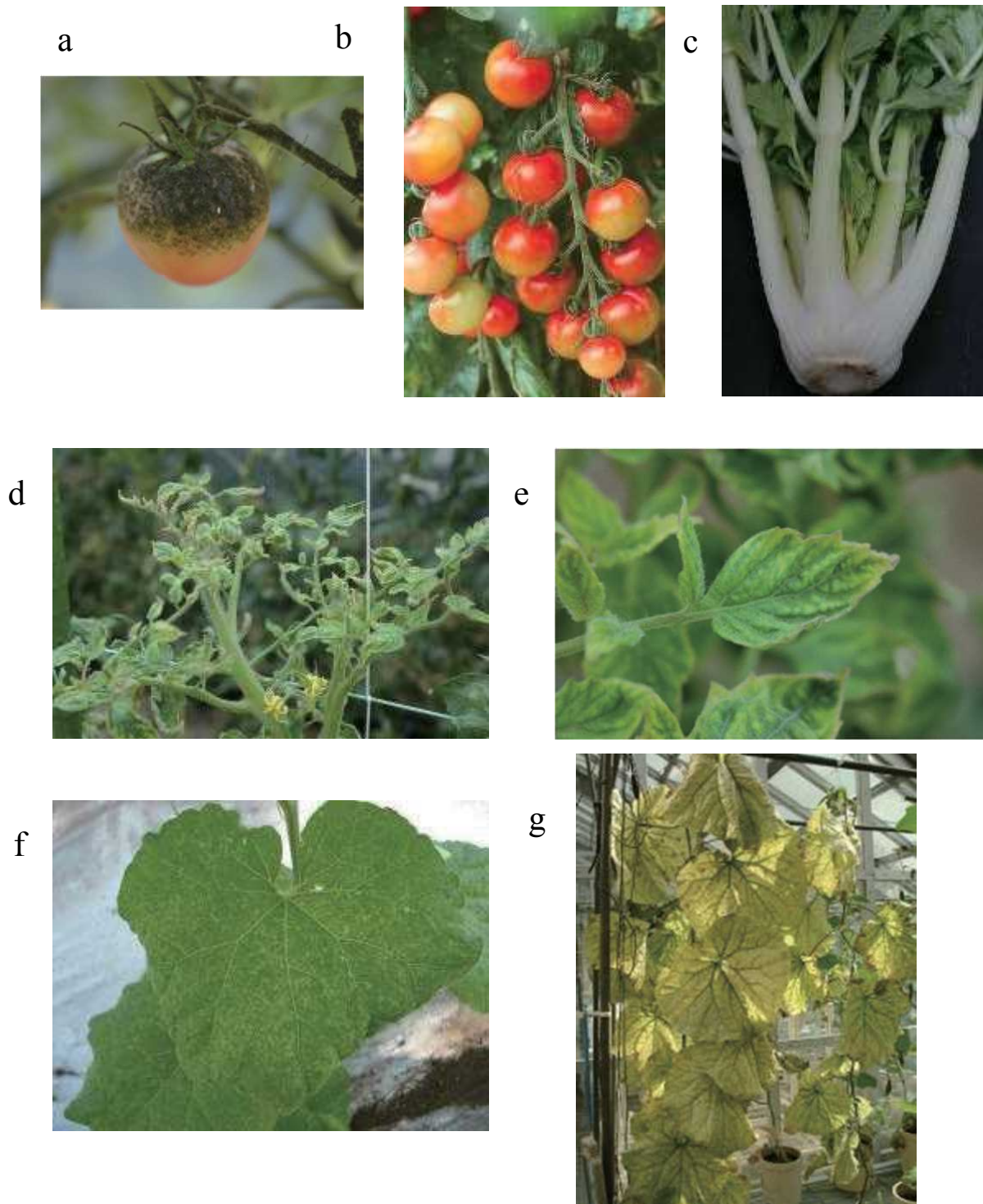


Fig.3. Damages to various crops by whitefly; (a) black sooty mold contamination by whitefly honeydew on a tomato fruit, (b) irregular ripening of tomato fruits, (c) discoloration of celery, (d) *Tomato yellow leaf curl virus* (TYLCV) symptoms upward curling of leaves, (e) mottling chlorotic leaf margins, (f) *Cucurbit chlorotic yellows virus* (CCYV) symptoms on foliar chlorosis on a leaf and (g) systemic foliar chlorosis of melon.

第2章 静岡県におけるコナジラミ類の発生実態と2002年のIPM

温室栽培ではタバココナジラミとそれが媒介するTYLCVが問題となっている(第1章)。タバココナジラミは1889年にギリシャのタバコの害虫として初めて記載され、現在では、熱帯、亜熱帯および温帯地域の世界各地に広く生息している(Brown et al., 1995)。タバココナジラミは寄主適合性、ウイルス媒介能、殺虫剤感受性などの生物学的性質が異なる多くのバイオタイプが存在し、ミトコンドリアCOI遺伝子配列の系統解析を用いた分類法により、少なくとも24以上のグループに分けられ(Dinsdale et al., 2010; De Barrow et al., 2011; Lee et al., 2013)、タバココナジラミは1つの生物種ではなく、多くの生物種からなる種複合体(species complex)であると認識されている(Boykin, 2013)。バイオタイプAはアメリカ南西部とメキシコで1981年にワタとウリ科作物の重要害虫となっていたが、1991年までに本種はバイオタイプBに代わり、バイオタイプBは5年ほどの間にほぼ全世界に広がった(Brown et al., 1995)。日本でもバイオタイプBは1988年頃からトマト、ポインセチア、ミツバなどで発生が確認されるようになった(浜村, 1999)。バイオタイプBは合成ピレスロイド系剤、有機リン系剤などに対して抵抗性を獲得しており(Brown et al., 1995)、国内で発生していたオンシツコナジラミとも有効薬剤が異なることから有効薬剤の探索が行われ、エトフェンプロックス乳剤、アセタミプリド水溶剤、ニテンピラム水溶剤、イミダクロプリド水和剤など効果のある殺虫剤が明らかになった(浜村, 1999)。バイオタイプQはイベリア半島南部に局所的に分布していたが、その後、1997年にスペイン、1999年にイスラエル、2003年に中国、2004年にイタリア、2005年に韓国に分布が拡大し、日本でも2004年に発生が確認された(Ueda and Brown, 2006)。バイオタイプQは海外ではピリプロキシフェンやネオニコチノイド系殺虫剤に対する感受性の低下が報告され(Nouen et al., 2002; Horowitz et al., 2003)、国内でも有効農薬の探索が行われ、ピリダベン水和剤、スピノサド水和剤、ミルベメクチン乳剤、ニテンピラム水溶剤など効果のある殺虫剤が明らかになった(松浦, 2006; 樋口, 2006; 小林, 2007; 徳丸・林田, 2010)。

静岡県の温室栽培で発生しているコナジラミ類の種類とタバココナジラミのバイオタイプおよびTYLCVの保毒状況を総合的に調査した報告はこれまでないことから、これらの発生状況を調査した(第1節)。次に、温室栽培

で発生するコナジラミ類を含む害虫に対して寄生蜂と殺虫剤を組み合わせた2002年のIPMの防除効果を検討し、その課題を明らかにした(第2節)。

第1節 発生実態

材料および方法

1. コナジラミ類の採集地と採集方法

2006年の1月～2月に3種類の果菜類(トマト、メロンおよびイチゴ)と2種類の花き類(トルコギキョウ、ポインセチア)のあわせて48温室から作物の葉に寄生しているコナジラミ類の成虫を吸虫管で20分間採集し、まとめて直接エタノール液(99.8%)に浸漬した。採集地は静岡県三島市、長泉町、富士市、富士宮市、静岡市、御前崎市、菊川市、掛川市、磐田市、浜松市である(Table 1)。コナジラミ類のTYLCV保毒状況とTYLCVの病徴の関係をみるため、作物の葉巻症状の有無を目視で調査した。葉縁の黄化と葉の小型化および新葉に葉巻症状のみられる株は感染株と判断した。

2. コナジラミ類の同定

コナジラミ類の成虫を採集後、採集した全てのオンシツコナジラミとタバココナジラミを形態的な特徴から識別した(林, 2000)。タバココナジラミバイオタイプBとタバココナジラミバイオタイプQ(以下、前者をバイオタイプB、後者をバイオタイプQとする)の形態的な識別は難しいため、Ueda and Brown (2006)に従いPCR-RFLP法によりミトコンドリアCOI領域を用いて識別した。すなわち、DNAは20μLのTris-EDTAバッファー液(5N NaCl, 500nM EDTA [pH8.0], 1M Tris-HCl [pH8.0])中で1頭のコナジラミ類の成虫をプラスチックの棒でつぶして抽出した。抽出液は1.3μLのプロテインゼンK(20 mg/mL)を加え、少なくとも1時間30分、56°Cでインキュベートした。抽出液はプロテインゼンKで不活性化し、PCRテンプレートとして使うため、3分間煮沸させた。PCRは20μLの反応容量(0.6 UのAmpliTaq polymerase (Applied Biosystems, CA), 0.2 μL 20 nM dNTP mix, 400 nMのforwardとreverseプライマー, 2 μL 10×PCRバッファー, 2 μL 25 nM MgCl₂, 0.1 μL DNAテンプレート、最後に滅菌水で最終的な容量に調整)で、サーマルサイクラー(Applied Biosystems PCR System 2700: Applied Biosystems, CA)を用いて次のプログラム

で行った。最初の変性は 92°C で 1 分間、増幅は 35 サイクル 92°C で 1 分間、アニーリングは 1 分間、伸長は 72°C で 1 分 30 秒間と最後の伸長は 72°C で 2 分間行った。DNA 断片を増幅するために通常のプライマーを用いた。制限酵素と電気泳動処理は PCR 反応溶液 (5 μ l) に 10 倍濃度の制限酵素バッファー (2 μ l)、制限酵素 (0.5 μ l)、滅菌蒸留水 (12.5 μ l) を加えて懸濁し、37°C で 1 時間反応させた後、1% アガロースゲル電気泳動を行い DNA 断片の泳動像によりバイオタイプを識別した。

3. TYLCV の検出

検定に用いたバイオタイプ B と Q は、バイオタイプの同定のために抽出した DNA サンプルを用いた。また、葉巻症状が観察されたトマト温室の 5 棟およびポインセチア温室から採集したオンシツコナジラミも供試した。大貫ら (2004) に従いコナジラミ類が保毒している TYLCV の検出を行った。すなわち、プライマーは TYLCV の長崎県大村市由来のウイルス株と静岡県静岡市清水区由来のウイルス株とともに検出するための TYLCV 種特異的プライマー (TY プライマー) を用いた。PCR の温度条件は 95°C、2 分処理を 1 回、増幅は 35 サイクル (95°C、50 秒、 $\rightarrow$ 55°C、1 分 $\rightarrow$ 72°C、1 分 30 秒) の反応を繰り返す、最後に 72°C、10 分間の処理を行った。温室あたり 5 個体のタバココナジラミ成虫 (採集個体数が 5 個体以下の場合は全ての個体) について個体ごとに TYLCV の検出を行った。さらに、TYLCV が検出され、10 個体以上の成虫が採集された温室は全ての個体の保毒状況を調査し、TYLCV 保毒個体の比率を計算した。

結果

1. コナジラミ類の種類とバイオタイプ

静岡県内の主要な作物の温室では、バイオタイプ B、バイオタイプ Q およびオンシツコナジラミが発生していた。特にバイオタイプ B は 48 温室のうち 30 温室で発生し、オンシツコナジラミとの混発は 8 温室であった (Table 1)。バイオタイプ Q はポインセチアのみで発生していた (Table 1)。トルコギキョウではコナジラミ類を採集できなかった (Table 1)。イチゴからはコナジラミ類は採集されたが、イチゴコナジラミと識別ができなかったため *Trialetrodes* sp. とした (Table 1)。

2. TYLCV の保毒状況

TYLCV による葉巻症状はトマトのみで観察された (Table 1)。TYLCV はトマト、ポインセチアおよびメロン温室から採集したバイオタイプ B とオンシツコナジラ

ミから検出された (Table 2)。23 棟のトマト温室の内、9 棟から採集したバイオタイプ B から TYLCV が検出された。この 9 棟の内、10 頭以上採集された温室の 6 棟の内 4 棟では TYLCV を保毒虫の比率が 100% で、6 棟の内 2 棟でも保毒虫の比率は 50% 以上であった (Table 2)。

考察

調査した 48 棟の温室のうち 30 棟の温室でバイオタイプ B が発生していた (Table 1)。トマト温室については 23 棟のうち 9 棟で採集したバイオタイプ B から TYLCV が検出され (Table 2)、この 9 棟のうち 4 棟では TYLCV の保毒比率は 100% であった (Table 2)。これらのことから、県内の主要な温室栽培作物で問題となっているコナジラミ類はバイオタイプ B であることが明らかになった。

TYLCV の主な宿主植物はトマトであり、ポインセチアでの感染は確認されていないが、メロンには感染しない (加藤, 1999)。また、トマト以外のトルコギキョウなどの農作物やノゲシなどハウス周辺の雑草は感染しても本病の継続的な発生源となることは少ない (加藤, 1999 ; 善ら, 2001 ; 芳賀・土井, 2002)。静岡県中部地域のトマト産地における TYLCV の調査では、県が推奨する 1.0 mm 目合以下の防虫ネットを設置していない温室の割合は 73% と高く (芳賀・土井, 2002)、TYLCV は側窓や天窓の開口部から侵入したタバココナジラミにより媒介されることが明らかになっている (芳賀・土井, 2002 ; 杖田・田口, 2006)。これらのことから、ポインセチアとメロン温室で採集したコナジラミ類が TYLCV を保毒していたのは (Table 2)、屋外の罹病トマトで保毒し温室内に侵入したと考えられ、外部から温室内への侵入防止対策が非常に重要であり、本研究では第 3 章で検討した。

九州地方 (樋口, 2014) や関東地方 (桑原ら, 2007 ; 井田ら, 2007 ; 山城 2007) では、バイオタイプ B の発生はわずかで、バイオタイプ Q が優占しており、静岡県のコナジラミ類の種構成とは異なっていた (Table 1)。バイオタイプ Q はバイオタイプ B に比べネオニコチノイド系殺虫剤、ピリプロキシフェン剤などの薬剤に対して高い殺虫剤抵抗性を有している (Nauen et al., 2002 ; Horowitz et al., 2003)。トマト黄化葉巻病の発生以降、本病の防除対策として殺虫剤の使用頻度が高まり、バイオタイプ B の発生が抑制されたと考えられている (樋口, 2014 ; 桑原ら, 2007 ; 大井田ら, 2007)。また、オンシツコナジラミのネオニコチノイド系殺虫剤に対する感受性はバイオタイプ B に比べ高く (小林, 2000 ; 井田・津金, 2008)、メロンではミナミキイロアザミウマ *Thrips palmi* Karny に対するネオニコチノイド系剤などによる防除圧も高い

Table 1. The occurrences of leaf curl symptoms and number of adults of each whitefly species in various host plants in 2006 in Shizuoka Pref.

Host plant	Collection			Leaf curl symptom ^a	<i>B. tabaci</i> B biotype	<i>B. tabaci</i> Q biotype	<i>T. vaporariorum</i> (<i>Trialeurodes</i> sp.) ^b
	No.	site	date				
Tomato	2	Mishima	Jan. 25	+	3	0	0
	3	Mishima	Jan. 25	+	3	0	3
	4	Mishima	Jan. 25	-	10	0	0
	6	Fuji	Jan. 24	-	0	0	34
	8	Fuji	Jan. 24	-	0	0	8
	12	Fujinomiya	Jan. 24	-	0	0	0
	13	Shizuoka	Feb. 1	+	0	0	0
	14	Shizuoka	Feb. 1	+	0	0	52
	15	Shizuoka	Feb. 1	-	3	0	0
	16	Shizuoka	Feb. 1	+	0	0	0
	17	Shizuoka	Feb. 1	+	0	0	0
	18	Shizuoka	Feb. 1	-	0	0	0
	19	Shizuoka	Feb. 1	+	11	0	9
	23	Yaizu	Feb. 20	-	1	0	0
	21	Yaizu	Feb. 23	+	21	0	0
	22	Yaizu	Feb. 23	-	0	0	5
	29	Omaezaki	Jan. 18	+	10	0	0
	30	Omaezaki	Jan. 18	-	0	0	0
	31	Kikugawa	Jan. 18	-	4	0	0
	32	Kikugawa	Jan. 18	+	4	0	1
	33	Kikugawa	Jan. 18	-	2	0	0
	35	Kikugawa	Jan. 18	+	6	0	0
	24	Kakegawa	Jan. 18	+	18	0	2
	26	Kakegawa	Jan. 18	+	5	0	0
	27	Kakegawa	Jan. 18	+	16	0	3
	28	Kakegawa	Jan. 18	-	0	0	0
	34	Kakegawa	Jan. 18	+	16	0	0
	39	Iwata	Feb. 15	+	8	0	0
	40	Iwata	Feb. 16	+	6	0	1
	41	Iwata	Feb. 16	+	1	0	0
	42	Iwata	Feb. 16	+	10	0	0
	48	Hamamatsu	Feb. 3	+	0	0	8
	49	Hamamatsu	Feb. 3	-	0	0	27
	50	Hamamatsu	Feb. 3	+	20	0	0
	51	Hamamatsu	Feb. 3	+	43	0	0
	52	Hamamatsu	Feb. 3	+	15	0	13
Prairie gentian	11	Fuji	Jan. 24	-	0	0	0
Poinsettia	1	Nagaizumi	Jan. 25	-	8	1	0
	9	Fujinomiya	Jan. 24	-	0	12	4
Melon	37	Iwata	Feb. 15	-	6	0	0
	38	Iwata	Feb. 15	-	6	0	0
	43	Iwata	Feb. 16	-	5	0	0
	44	Kakegawa	Jan. 16	-	5	0	0
	45	Iwata	Feb. 20	-	6	0	0
	47	Hamamatsu	Jan. 20	-	13	0	0
Strawberry	5	Fuji	Jan. 24	-	0	0	(34)
	7	Fuji	Jan. 24	-	0	0	(28)
	10	Fujinomiya	Jan. 24	-	0	0	0

^a +: observed, -: not observed^b Number in parentheses indicate unidentified *Trialeurodes* sp.

Table 2. TYLCV detection in whiteflies collected from various host plants

Host plant	Collection no.	Leaf curl symptom ^a	Detection of TYLCV ^b		
			<i>B. tabaci</i> B biotype	<i>B. tabaci</i> Q biotype	<i>T. vaporariorum</i>
Tomato	2	+	-(3)		
	3	+	+(2)		+(2)
	4	-	100%(10) ^c		
	15	-	-(3)		
	19	-	-(5)		
	23	-	-(1)		
	21	+	100%(10) ^c		
	29	+	-(5)		
	31	-	-(4)		
	32	+	-(5)		
	33	+	-(2)		
	35	-	-(5)		
	24	+	100%(18) ^c		+(2)
	26	+	+(5)		
	27	+	56%(16) ^c		+(3)
	34	+	69%(16) ^c		
	39	+	-(5)		
	40	+	-(5)		
	41	+	+(1)		
	42	+	-(5)		
	48	+			+(5)
	50	+	-(5)		
	51	+	-(5)		
	52	+	100%(15) ^c		+(5)
Poinsettia	1	-	-(8)	-(1)	
	9	-		0%(12) ^c	+(4)
Melon	37	-	-(5)		
	38	-	-(5)		
	43	-	-(5)		
	44	-	-(5)		
	45	-	-(5)		
	47	-	+(5)		

^a +: positive, -: negative.

^b Number in parentheses indicate tested individuals.

^c When more 10 individuals per greenhouse were tested, the percentage of TYLCV-positive adults was calculated.

ため、本調査においてメロン温室でオンシツコナジラミの発生がなかったと考えられる (Table 1)。一方、トマト温室では23棟のうちTYLCVの病徴が観察された6棟全ての温室で、オンシツコナジラミとバイオタイプBが混発していたことから (Table 1)、これらの温室の防除圧は低かったと考えられる。温室内に侵入してしまったコナジラミ類に対して寄生蜂を利用した防除対策について第4章で検討した。

オンシツコナジラミとバイオタイプBがそれぞれ

1974年、1989年に国内で初めて発生が確認された時、これらは輸入されたポインセチアの栽培用苗木に寄生して侵入したと考えられている (大戸, 1990; 林, 2000)。ポインセチアの苗はパテント栽培され、新品種は外国から導入される場合がほとんどである (林, 2000)。本調査ではポインセチアのみからバイオタイプQが県内で初めて確認されたが (Table 1)、本バイオタイプも海外から輸入されたポインセチアの苗木とともに侵入した可能性が高い。海外からの輸入苗はもちろん購入苗についても病害虫の感染や寄生について育苗時からの防除対策が今後の課題である。

TYLCVはタバココナジラミの吸汁により虫体内に取り込まれ、中腸内腔の中腸上皮細胞から昆虫組織内部に入り、唾液腺細胞から唾液に放出され、吸汁中に唾液とともにウイルスが健全植物に放出される (大西, 2009)。オンシツコナジラミの場合、中腸上皮細胞膜によりTYLCVの組織への侵入が阻止されるためTYLCVは媒介されない (大西, 2009)。このため、本調査でトマトから採集したオンシツコナジラミからTYLCVが検出されたのは (Table 2)、罹病株から吸汁し消化管内に残っていたTYLCVを検出したと考えられ、トマトのTYLCVはバイオタイプBにより媒介されていることが明らかになった。

以上のように、現行の温室構造ではコナジラミ類が温室内に侵入することが明らかになったことから、温室内への侵入を防除する対策が必要と考えられる。そこで、コナジラミ類が侵入しない温室構造について第3章で、侵入してしまったコナジラミ類に対する防除対策について第4章で検討した。

第2節 2002年のIPM

材料および方法

1. 試験温室

静岡県菊川市内の2戸の土耕ミニトマトの屋根型連棟温室（軒高約3m, 硬質フィルム被覆）で試験を行った。2戸の距離はおよそ8km離れている。寄生蜂と選択性殺虫剤を組み合わせたIPM区（12m×41m）と非選択性殺虫剤を中心とした対照区（12m×50m）を設定した。両区とも温室は自然換気で、側窓はビニル手動巻上げにより開閉し、1.0mm目合いの防虫ネットを展張した。両屋根プッシュプル自動開閉による天窗（高さ約5m）には防虫ネットを展張しなかった。温室内は重油暖房機により最低気温を12℃に設定して管理した。IPM区はミニトマト（品種：チカ）を2002年8月30日に定植した。対照区はミニトマト（品種：ココ）を2002年7月26日に定植した。

2. 供試天敵

コナジラミ類に対してIPM区の温室にはオンシツツ

ヤコバチ（エンストリップ®）のマミーカード（株当たり7.7頭）を2002年10月4日、10月11日および10月18日の3回トマトの複葉に吊り下げた（Table 3）。ハモグリバエ類に対してイサエアヒメコバチ *Diglyphus isaea* (Walker), ハモグリコマユバチ *Dacnusa sibirica* Telengaの成虫が入ったボトル（マイネックス®）（各種株当たり0.4頭）を2002年10月4日および10月18日の2回温室内の中央に静置して放飼した（Table 3）。

3. 供試殺虫剤

IPM区では定植時にニテンピラム粒剤を土壌に処理し、ピメトロジン剤、フルフェノクスロン剤、シロマジン剤、エマメクチン安息香酸塩剤、Bt剤、ルフェヌロン剤およびイオウ剤を使用した（Table 3）。対照区では生産者が使用しているピメトロジン剤、アセタミプリド剤、ブプロフェジン剤、クロチアニジン剤、ニテンピラム剤、フルフェノクスロン剤、シロマジン剤、Bt剤、ルフェヌロン剤およびイオウ剤を使用した。農薬は生産者が害虫の発生状況に応じて判断し散布した（Table 3）。

Table 3. Frequency of pesticides application in IPM and control tomato greenhouses

Main target pest	IPM		Control	
	Insecticides, parasitoids	Spraying year and day	Insecticides	Spraying year and day
		2002		2002
<i>Bemisia tabaci</i>	Nitenpyram	30 Aug.	Pymetrozine	26 Aug., 23 Nov., 5 Feb., 14, 28 May
	Pymetrozine	15 Dec., 11 Jan., 9 Apr.	Acetamiprid	26 Sept., 21 Oct., 23 Nov., 30 Jan., 1 Apr.
	<i>Encarsia formosa</i> (7.7 / plant) ¹⁾	4, 11, 18 Oct.	Buprofezin	21 Oct., 30 Jan., 1 Apr.
			Clothianidin ²⁾	14 May
			Nitenpyram ²⁾	28 May
<i>Liriomyza trifolii</i>	Flufenoxuron	30 Aug.	Flufenoxuron	6 Aug.
	Cyromazine	14 Feb.	Cyromazine	26 Aug., 26 Sept., 11 Dec., 23 Apr.
	<i>Diglyphus isaea</i> (0.4 / plant) ¹⁾	4, 18 Oct.		
	<i>Dacnusa sibirica</i> (0.4 / plant) ¹⁾			
<i>Spodoptera litura</i>	Emamectin-benzoate	14 Sept.	Bt	6, 26 Aug., 21 Oct., 11 Dec.
	Bt	19 Oct.	Lufenuron	20 Sept.
	Lufenuron	20 Jun.		
<i>Aculops lycopersici</i>	Sulfur	14 May	Sulfur	20 Sept., 5 Feb., 23 May
Frequency of pesticides application	Insecticide	10	Insecticide	28
	Fungicide	5	Fungicide	8
	Sum	15	Sum	36

1) No. of parasitoids per plant, 2) These insecticides are effective for *L. trifolii*.

4. 調査方法

温室全体から均等に選んだ 30 株のミニトマトを調査株とし、株の上位、中位および下位から任意の各 1 複葉 (株当たり 3 複葉) についてコナジラミ類の成虫数および 4 齢幼虫数を数えた。コナジラミ類と併せてその他の害虫も調査した。マメハモグリバエは複葉に寄生している幼虫数と脱出孔数を、ハスモンヨトウとオオタバコガはヨトウガ類とし、複葉に寄生している幼虫数を調査し、食害の有無から食害株率を算出した。調査は 2002 年 8 月下旬～2003 年 6 月下旬まで月に 2 回行った。

おんどとり® (TR-72S: ティアンドデイ) は逆さにした容器 (直径 15 cm, 高さ 20 cm) 内に吊るし、容器は遮光のためアルミ箔を巻き、通風処理は行わなかった。容器は温室内の中央に設置し温室内の温度を 1 分間隔で測定し、1 時間ごとの平均気温を算出した。

試験区温室の中央の 1 列を選んで (IPM 区は 32 株、対照区は 46 株)、収穫開始 (2002 年 10 月 31 日) から終了 (2003 年 7 月 4 日) まで収穫したミニトマトの重量を計測し、10a 当たりの収量を算出した。

結果

対照区ではコナジラミ類に対して栽培初期からピメトロジン剤、アセタミプリド剤、ブプロフェジン剤、クロチアニジン剤およびニテンピラム剤を合計 15 回散布したところコナジラミ類の成虫は試験開始から 4 月中旬まで株 3 複葉当たり 0.10～2.43 頭、幼虫は株当たり 0.20～5.33 頭で低い密度で推移したが、4 月下旬以降、成虫、幼虫とも増加した (Fig. 4 a, b)。IPM 区では定植時にニテンピラム剤を施用し、その後寄生蜂を 3 回放飼し、ピメトロジン剤を合計 3 回散布したところ、コナジラミ類の成虫は試験開始から 4 月中旬までは株当たり 0～0.57 頭、幼虫は株当たり 0～1.97 頭と対照区より低い密度で推移したが、6 月上旬以降に増加した (Fig. 4 a, b)。対照区ではマメハモグリバエに対してフルフェノクスロン剤およびシロマジン剤を合計 4 回の散布したところ、試験開始から 3 月下旬まで脱出数孔数は株当たり 0～2.03 個と低い密度で推移した (Fig. 4 d)。しかし、4 月上旬以降、幼虫が発生し、4 月下旬にシロマジン剤を散布したが、脱出孔数は増加した (Fig. 4 c, d)。IPM 区では定植後のフルフェノクスロン剤の散布と寄生蜂を 2 回の放飼と 1 月下旬にシロマジン剤を散布したところ、10 月から 2 月までは脱出孔数が対照区より多くみられ、試験開始から終了まで脱出孔数は株当たり 0～1.73 個で推移した (Fig. 4 d)。

ヨトウガ類の食害株率は両区とも試験開始から 11 月

下旬まで発生したが、エマメクチン安息香酸塩剤および Bt 剤を 2～5 回散布したところ 12 月には密度が減少した (Fig. 4 f)。IPM 区では 5 月下旬に孵化幼虫が発生した (Fig. 4 e)。

2002 年 9 月 5 日晴天時の 10 時～14 時の温度は、IPM 区 (36.6～38.6℃) に比べ、対照区は (39.7～42.2℃) がやや高かったが、いずれも屋外 (32.9～34.8℃) に比べ 5～9℃高かった (Fig. 5)。

IPM 区のミニトマトの収量は 10a 当たり 12.4 t で対照区 (12.2 t) と同程度であった。

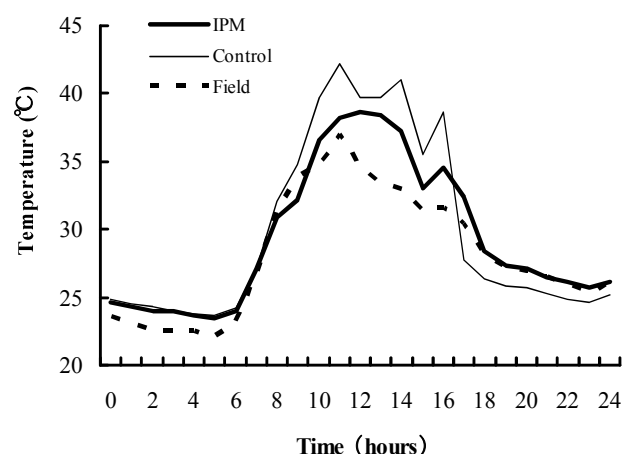


Fig. 5. Hourly temperatures on 5 September 2002.

考察

タバココナジラミの温室内への侵入は天窓と側窓の開閉口からで、天窓より側窓から多く侵入する (芳賀・土井, 2002; 杖田・田口, 2006)。タバココナジラミ類の侵入を防止するためには 0.4 mm 目合いの防虫ネットが推奨されている (勝山ら, 2005; 松浦ら, 2005; 大井田ら, 2007; 杖田・田口, 2006)。両試験区の温室は 1.0 mm 目合いの防虫ネットを側窓に展開した自然換気温室であったため、タバココナジラミの侵入防止対策は不十分であったと考えられる。ヨトウガ類の食害被害が 8 月～11 月にみられた (Fig. 4 f) のは、大型のヨトウガ類成虫が防虫ネットを展開していない天窓から侵入したためと考えられ、天窓への防虫ネットの展開も重要であると考えられる。防虫ネットの目合いが細くなるほど害虫の侵入抑制効果は高まるが、換気効率は低下し温室内の温度上昇による栽培作物への悪影響が懸念される。本試験では 9 月 5 日の両温室の温度はトマト限界最高温度 35℃ (高橋, 1977) を IPM 区では 10～14 時、対照区では 9～16 時の間超えていた。そこで、第 3 章では侵入防止と昇温抑制を兼ね備えた温室構造について検討した。

オンシツツヤコバチはタバココナジラミに比べるとオンシツコナジラミを好むとされているが (Arnó et al., 2009), タバココナジラミに対しても密度抑制効果がある (松井, 1992, 1995)。IPM 区の温室周辺はタバココナジラミが発生するサツマイモほ場が多いため (小澤ら, 1992), IPM 区のコナジラミ類はタバココナジラミが主体であったと考えられる。IPM 区は試験前半までは対照

区と比較してコナジラミ類の密度を抑制したが, 6 月上旬以降に増加したことから (Fig. 4 a, b), 防除効果としては不十分であった。タバココナジラミに対しては 2002 年にサバクツヤコバチが, 2007 年にチチュウカイツヤコバチが生物農薬として登録された。チチュウカイツヤコバチはタバココナジラミに対して極めて有効であることが知られている (Hudák et al., 2003 ; Qiu et al., 2004 ;

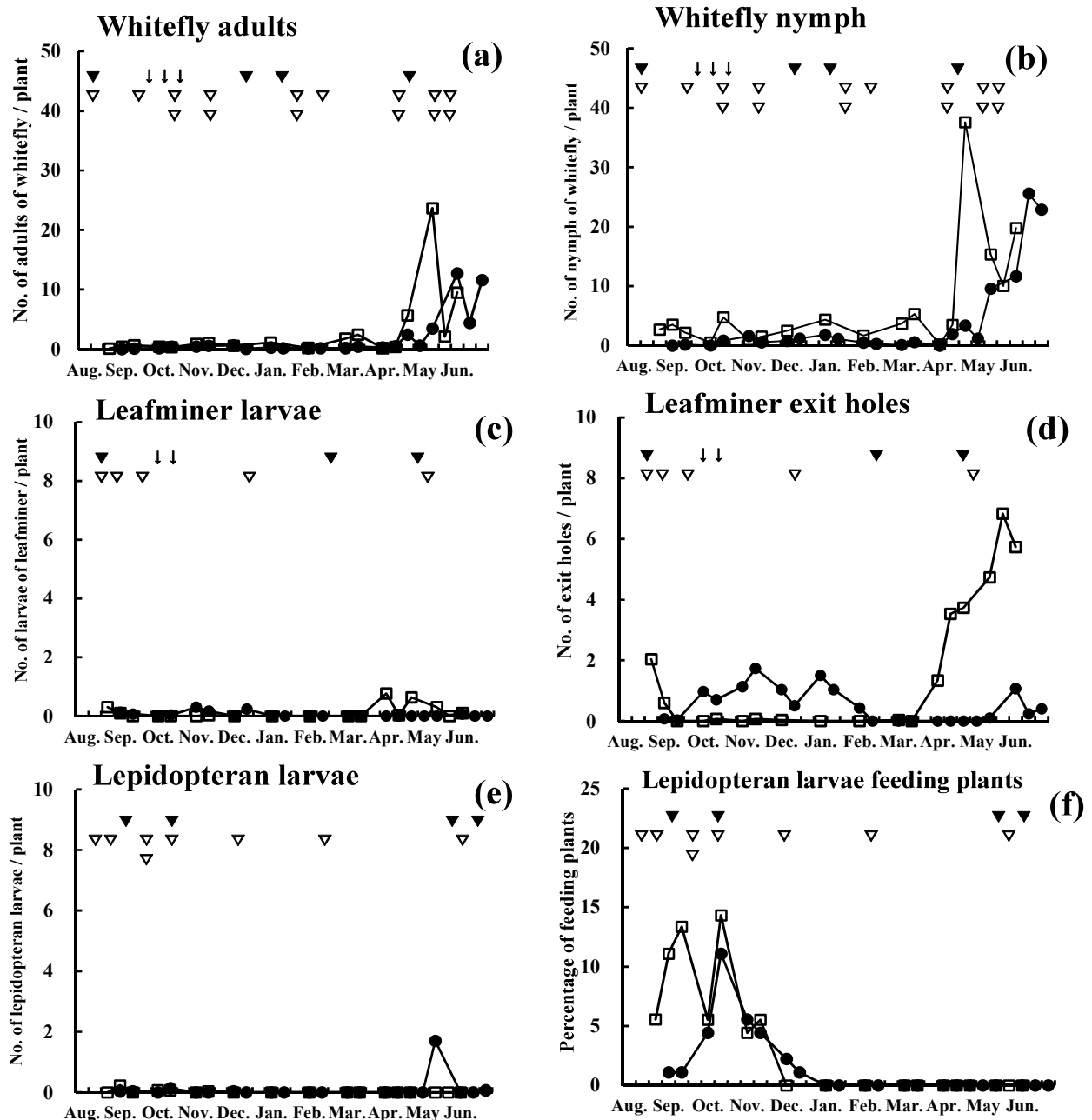


Fig. 4. Number of (a) whitefly adults, (b) whitefly nymph, (c) leafminer larvae, (d) leafminer exit holes, and (e) Lepidopteran larvae per plant and (f) percentage of feeding plants.

Closed circle (●) and open square (□) is indicated the IPM greenhouse and the control greenhouse, respectively. Arrow is indicated the day of parasitoids release. Closed triangle (▼) and open triangle (▽) is indicated the day of pesticides spraying in the IPM greenhouse and the control greenhouse, respectively.

Arnó et al., 2009)。ただし、これら3種寄生蜂を同時に比較・検討した報告はみあたらず、生物農薬としての特性の違いが必ずしも明らかになっていない。そこで、3種寄生蜂のコナジラミ類に対する防除効果について第4章で検討した。

また、IPM区で6月以降コナジラミ類は増加したが(Fig. 4 a, b)、このような場合は殺虫剤による緊急的な防除も必要となってくる。タバココナジラミに対してジノテフラン剤、ピリダベン剤、およびニテンピラム剤が比較的效果が高いとされている(徳丸・林田, 2010; 小林, 2007; 山城, 2007; 大井田・津金, 2008)。しかし、これら殺虫剤は寄生蜂に対しても悪影響を与える懸念がある。そこで、主要な殺虫剤の寄生蜂に対する影響については第4章で検討した。

第3章 強制換気システムの侵入防止効果

静岡県内の温室栽培で発生しているコナジラミ類は主にタバココナジラミバイオタイプBであり、現行の2002年および2006年の温室構造ではTYLCVを保毒したバイオタイプBの侵入を完全に防止できず、TYLCVが発生してしまうことが明らかとなった(第2章)。このため、コナジラミ類の侵入防止効果の高い温室構造を検討する必要がある。昇温抑制のために強制換気システムが開発されたが(大石・守谷, 2004)、本システムはコナジラミ類の侵入対策にも利用ができると考えられる。そこで、温室の開口部に設置する防虫ネットの目合いを検討した。防虫ネットの目合いは0.4 mm以下になるとタバココナジラミの侵入をほぼ完全に防止することがわかっているが(勝山ら, 2005; 松浦ら, 2005; 大井田ら, 2007; 杖田・田口, 2006)、強制換気の場合にも侵入を防止できるかどうか検討した(第1節)。

強制換気温室内には風速1~2 m/s程度の風が常に流れていることから(大石・守谷, 2004)、害虫や天敵の発生や行動などに影響があると考えられる。特にツヤコバチ類のように微小な寄生蜂の利用にあたっては、風が寄生蜂の探索行動を妨げて、寄生率が低下し、防除効果が低下することが懸念される。そこで、第2節では普及している陰圧式強制換気システムとタバココナジラミの寄生蜂であるサバクツヤコバチを組み合わせた防除効果を検討した。一方、陽圧式強制換気は空気を温室の隙間から外へ押し出すため害虫の侵入は陰圧式より少ないとされている(Berlinger and Lebiush-Mordechi, 1996; 辻, 2007)。そこで、第3節では陽圧式強制換気システムの害虫侵入防止効果を検討した。温室栽培ではコナジラミ類以外にもいくつかの微小害虫が発生することから、これら害虫も調査対象として調査した。

第1節 防虫ネットの選定

材料および方法

1. タバココナジラミ

バイオタイプBは2001年に静岡県農林技術研究所内(静岡県磐田市)のトマトから採集し、実験室内(25°C, 16L:8D)においてキャベツ(品種:初秋)で累代飼育している個体群を供試した(以下、バイオタイプB(静岡農技研累代飼育個体群)とする)。

2. 風のない条件下の試験

試験は風ない条件で行い、Berlinger and Lebiush-Mordechi (1996)の方法に従った。すなわち、防虫ネットで上下に半分に分けたポリエチレン容器(63 mm×63 mm×110 mm)の下側にタバココナジラミの成虫(16~37頭)を入れ(Fig. 6)、タバココナジラミを誘引するために(正の走光性)2本の蛍光灯(100 W)を容器の上20 cmに設置した。4種類の目合いの防虫ネット(0.25 mm×0.28 mm(N-5800), 0.38 mm×0.38 mm(PX-50), 0.55 mm×0.55 mm(N-3230)および1.00 mm×0.93 mm(N-2220):ダイオ化成)を供試し、対照として12.0 mm×7.0 mm目合いの防虫ネット(SH-25:サンキンプラスチック工業)を供試した。試験は各防虫ネットについて10反復行った。容器は恒温室内(25°C, 16L8D)に静置し、24時間後、容器の上部と下部のタバココナジラミ数をそれぞれ数えた。また、無作為に選んだ10頭のタバココナジラミの体長と胸部の最大幅を双眼実体顕微鏡下(SMZ-U:ニコン)で測定した。

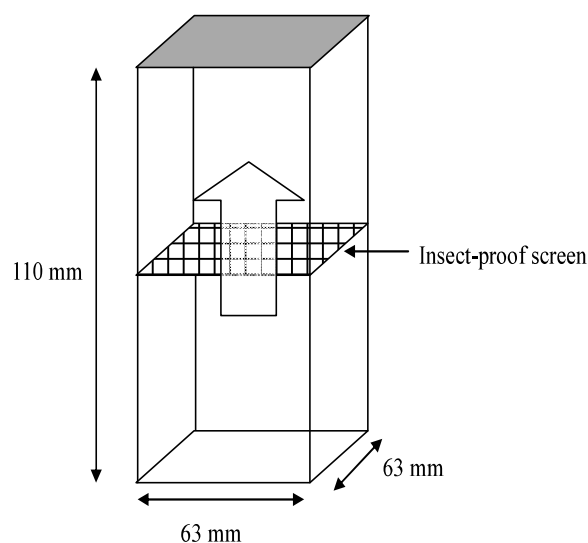


Fig. 6. The polyethylene box used to test insect-proof screens without ventilation.

3. 風のある条件下の試験

強制換気を想定して風のある条件で試験を行った。100頭のタバココナジラミの成虫を入れたシャーレ(直径9 cm, 深さ2 cm)を防虫ネットで左右に半分に分けた透明なアクリル箱(80 cm×80 cm×200 cm)の一方の端の台(高さ32 cm)の上に上蓋を取り静置した(Fig. 7)。

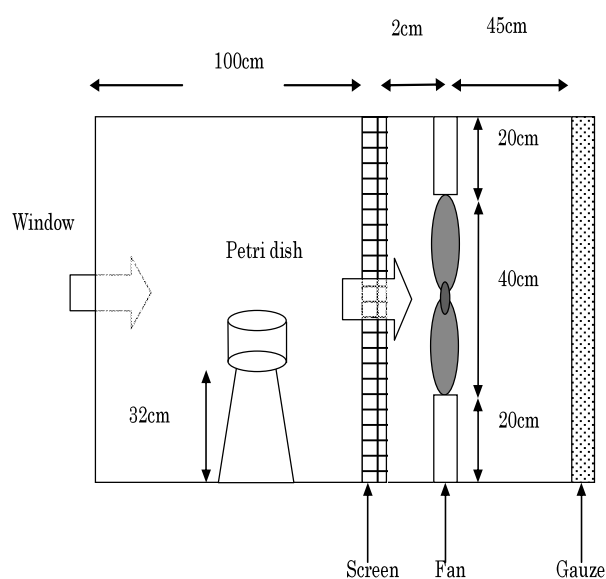


Fig. 7. The transparent acrylic box used to test insect-proof screens with forced ventilation.

タバココナジラミをシャーレから飛び出させるため白熱電球 (100 W) をシャーレから 60 cm 上に設置した。2 種類の目合いの防虫ネット、1.00 mm × 0.93 mm (N-2220: ダイオ化成) および 0.30 mm × 0.23 mm と 0.30 mm × 0.45 mm 目合いが 1 列ずつ交互に混合した防虫ネット (EX-B: サカセ・アドテック) を供試した。対照は防虫ネットを供試しなかった。換気扇 (VPZ404201: フルタ電機: 直径 40 cm, 風量 84 m³/min) とタバココナジラミを捕獲するためのガーゼ布をアクリル箱の一方の端に設置した。風速は強制換気温室で想定される 3 段階 (Level 1: 0.49~0.73 m/s, Level 2: 1.41~1.63 m/s および Level 3: 2.29~2.38 m/s) で 2 反復行った。試験は気温 26~29°C の室内で行った。風速は変圧器で調節し、風速計 (No. 435: テストー) で計測した。シャーレを設置 30 分後にシャーレ内とガーゼ布に捕獲されたタバココナジラミの成虫数を数えた。

各防虫ネットのタバココナジラミの通過率の差は 2 元配置分散分析によって比較し、風のない条件下の試験では Tukey-Kramer HSD 法で多重比較を行い、風のある条件下では Student's t-test で比較した。統計解析には JMP5 (SAS Institute, 2002) を用いた。

結果

1. 風のない条件下の試験

防虫ネットを通過したタバココナジラミの割合は防虫ネット間で有意な差が認められた (ANOVA, $P < 0.001$; Fig. 8)。0.25 mm × 0.28 mm 目合いと 0.38 mm × 0.38 mm

目合いの防虫ネットは、0.55 mm × 0.55 mm 目合いと 1.00 mm × 0.93 mm 目合いおよび対照の防虫ネットに比べタバココナジラミ成虫の通過率が有意に少なかった (Tukey-Kramer HSD test, $p < 0.05$; Fig. 8)。供試したタバココナジラミの体長は 0.87 ± 0.05 mm, 最大胸部幅は 0.28 ± 0.04 mm であった。

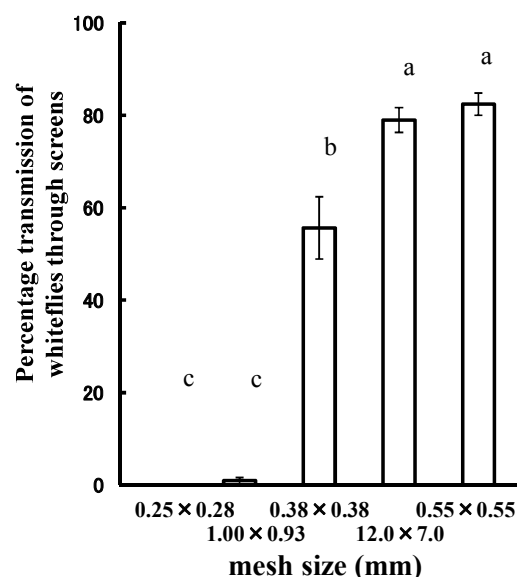


Fig. 8. Transmission of whitefly adults through screens of different mesh sizes without ventilation. The bars represent standard error (SE), bars labeled with the same letter are not significantly different (two-factor ANOVA followed by Tukey-Kramer HSD test, $p < 0.05$).

2. 風のある条件下の試験

同一の防虫ネットでは風速が早くなっても通過したタバココナジラミの割合は変わらなかったが (ANOVA, $P = 0.212$; Fig. 9), 異なる防虫ネット間ではコナジラミの割合は異なった (ANOVA, $P = 0.003$; Fig. 9)。0.30 mm × 0.23 mm / 0.45 mm 目合いの防虫ネットを通過したタバココナジラミの割合は 1.00 mm × 0.93 mm 目合いの防虫ネットと対照に比べ有意に少なかった (Student's t-test, $p < 0.05$; Fig. 9)。

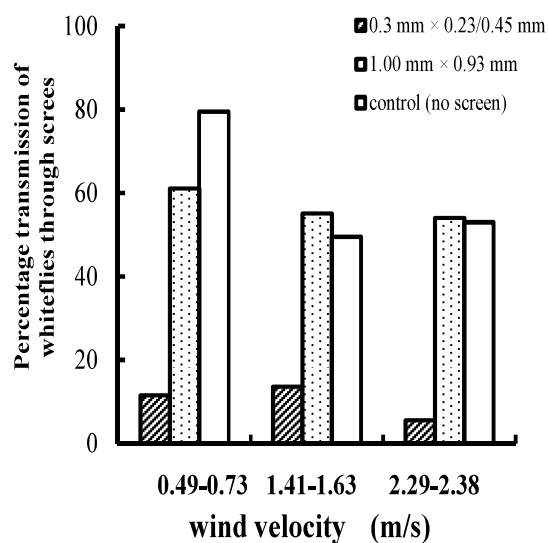


Fig. 9. Transmission of whitefly adults through screens of different mesh sizes with forced ventilation. Capital letters refer to significance of the difference between wind velocities within each mesh size. Lower-case letters refer to significance of the difference between mesh sizes within each wind velocity (two-factor ANOVA followed by Student's *t*-test, $p < 0.05$).

考察

温室栽培における換気は昇温抑制, 二酸化炭素の補給, 湿度の調整, ガス交換の促進など作物の生育に大きな影響を与える (Bournet and Boulard, 2010)。このため防虫ネットを選定する場合, 目合いをできるだけ大きく, かつ, 害虫の侵入率が低い防虫ネットを選択する必要がある。

0.55 mm × 0.55 mm および 1.0 mm × 0.93 mm 目合いと比べて, 風のない条件下において有意にタバココナジラミの通過が少なかったのは 0.25 mm × 0.28 mm 目合 (通過率 0%) および 0.38 mm × 0.38 mm 目合 (0.9%) の防虫ネットであった (Fig. 8)。この結果はこれまでの報告と同様であった (Bethke et al., 1994; Bell and Baker, 2000; 松浦ら, 2005; 大井田ら, 2007)。一方, 0.38 mm 目合いと同程度の 0.30 mm × 0.23 mm / 0.45 mm の目合いの防虫ネットを風のある条件下で試験したところ, 平均 10.2% (5.5~13.5%) のタバココナジラミが通過することが明らかとなった (Fig. 9)。以上のことから, 強制換気温室に設置する防虫ネットは 0.38 mm 目合いが適当と結論づけられた。

第2節 陰圧式強制換気と寄生蜂を組み合わせた IPM

材料および方法

1. 温室

試験は 2004 年の 8~11 月に静岡県農林技術研究所内 (静岡県磐田市) の隣接した 2 棟の同じ規模の屋根型ガラス温室 (14.6 m × 7.4 m) で行った。一方の温室を陰圧式強制換気温室 (強制換気温室) (Fig. 10 a) とし, 温室の北側妻面に 0.4 mm 目合いの防虫ネットを張った排気換気扇 (TCW8944BF: フルタ電気; 羽根の直径 0.8 m, 風量 350 m³/min (400 W)) 3 台を高さ約 1.2 m に設置し, 南側妻面に 0.4 mm 目合いの防虫ネットを張った吸入口 (0.8 m × 0.8 m) 2 つを高さ約 1.2 m に設置した。また, 温室内の出入り口は南側とし, 内部に防虫ネット (0.4 mm) で覆った部屋を設けてコナジラミ類等の侵入を防止した。さらに, 高さ 4 m の両側全面天窓と側窓 (いずれもプッシュプル開閉式) には防虫ネット (1.0 mm) を設置した。換気扇は 6 時~18 時の間は室温が 25℃以上の時に稼働するように設定し, 換気扇の稼働時間帯は天窓と側窓は閉めた。温室内の畝間の風速が約 1 m/s になるように調節した。もう一方の温室は自然換気温室 (Fig. 10 b) とし, 天窓と側窓に防虫ネット (1.0 mm) を展張し開閉温度は 25℃に設定した。

2. 作物

トマト (品種: 桃太郎ヨーク) はロックウール培地の 3.5 号ポットに 2004 年 8 月 6 日に植え, 高設ベンチ (高さ 50 cm, ベンチ当たり 16 株の 2 列) 4 台に設置しチューブによる点滴灌水を行った。定植時にコナジラミ類成虫の寄生はなかった。育苗時および試験期間中に病害虫防除のための農薬の散布は行わなかった。

3. タバココナジラミ

バイオタイプ B (静岡農技研累代飼育個体群) を供試した。2004 年 9 月 9 日に各温室に成虫 200 頭を入れた管瓶を温室の南北に 1 瓶ずつ静置して放虫し (温室当たり 400 頭 (株当たり 3.1 頭)), 換気扇は翌日まで止めた。

4. 寄生蜂

タバココナジラミの寄生蜂はサバクツヤコバチ (エルカード®) のマミーカードを供試し, 2004 年 9 月 16 日および 9 月 24 日は温室当たり 3 カード (株当たり 1.4 頭), 9 月 30 日は温室あたり 6 カード (株当たり 2.8 頭) を畝の中央部のトマトの複葉に吊り下げた。

5. 調査方法

トマト株の上位、中位および下位の各1複葉に寄生したタバココナジラミの成虫数、3齢および4齢（以下、3〜4齢とする）幼虫数および被寄生幼虫数を調査し、株当たり頭数とした。4畝の各畝2株（合計8株）について2004年9月16日〜11月25日まで5〜14日間隔で調査した。被寄生幼虫数を3〜4齢幼虫数で除して寄生率を求めた。調査日ごとのタバココナジラミの成虫数、3〜4齢幼虫数および被寄生幼虫数の各試験区の差はStudent's t-testによって比較した。各試験区の調査日ごとの寄生率の差は3〜4齢幼虫数と被寄生幼虫数からFisher's exact testによって比較した。統計解析にはJMP5 (SAS Institute, 2002) を用いた。

11月2日に4畝の各畝12株（合計48株）について、タバココナジラミの排泄する甘露が原因で発生するすす病の発病程度を次の4段階に分けて数え、発病指数 ($100 \times \sum \text{発病程度} \times \text{発病株数} / 3 \times 48$) を算出し、各

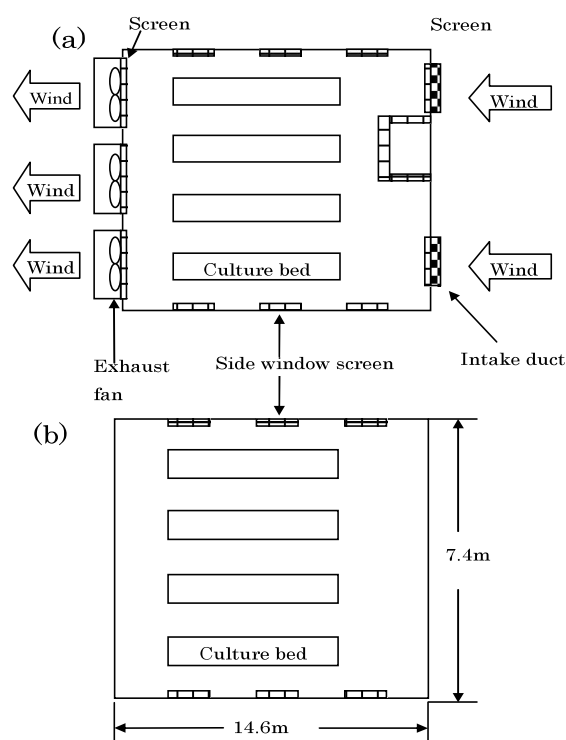


Fig. 10. Illustration of (a) a tomato greenhouse with a negative-pressure forced ventilation (NFB) system and (b) a tomato greenhouse with natural ventilation (NV). The mesh size 1 mm insect proof screen was spread on the roof and side of greenhouse (a, b). The mesh size 0.4 mm insect proof screen was spread on the intake duct and exhaust fan (a). The ventilator operates between 6 o'clock and 18 o'clock when it is over 25°C (a).

試験区の発病指数の差はPearson's chi-square testにより比較した。統計解析にはJMP5 (SAS Institute, 2002) を用いた。発病程度は次のように類別した。発病程度0：発生なし、1：一部の複葉に発生が見られる、2：複葉の半分程度に発生が見られる、3：複葉全体に発生がみられる。各温室中央 (MP6661：チノー) と屋外の両温室の間 (MP9201：チノー) にデータロガーを高さ1.5mに設置し気温を20分間隔で調べ、6時〜18時の気温から10日ごとの平均気温を算出した。

結果

タバココナジラミの成虫数は強制換気温室、自然換気温室ともほぼ同じ推移を示し、自然換気温室では10月28日 (株当たり66.9頭) に、強制換気温室では11月11日 (株当たり40.3頭) にピークとなり、その後減少した (Fig. 11)。自然換気温室の成虫数が強制換気温室に比べ有意に多かったのは10月28日、11月16日および11月25日であった (Student's t-test, $p < 0.05$; Fig. 11)。

タバココナジラミの幼虫数も成虫数とほぼ同様の推移を示し、強制換気温室では10月28日 (株当たり31.4頭) に最大となり、自然換気温室では11月11日 (株当たり61.3頭) に最大となったが、試験期間中、両温室のタバココナジラミの幼虫数に有意な差は認められなかった (Fig. 12)。

サバクツヤコバチによる寄生は強制換気温室、自然換気温室のいずれにおいても確認された (Fig. 13)。被寄生幼虫数と寄生率は9月30日以降増加し、自然換気温室の被寄生幼虫数が強制換気温室に比べ11月16日および11月25日に有意に多く (Student's t-test, $p < 0.05$; Fig. 13)、寄生率は10月7日、11月16日および11月25日に有意に高くなった (Fisher's exact test, $p < 0.01$; Fig. 13)。すす病の発生程度については、強制換気温室では「発生なし」の株が最も多く、発病指数は18.1で、自然換気温室の38.2と比べ有意に低かった (Pearson's chi-square test, $p < 0.05$; Table 4)。

試験期間中の日中の平均気温は自然換気温室、強制換気温室、屋外の順に高く、強制換気温室の平均気温は自然換気温室に比べ0.2〜1.6°C低かった (Fig. 14)。月別にみると、9月の平均気温は自然換気温室では27.7〜31.1°C、強制換気温室では26.8〜29.6°C、屋外では25.7〜28.3°Cあったが、11月は自然換気温室では19.7〜23.4°C、強制換気温室では19.7〜22.2°C、屋外では15.7〜19.3°Cと低かった (Fig. 14)。

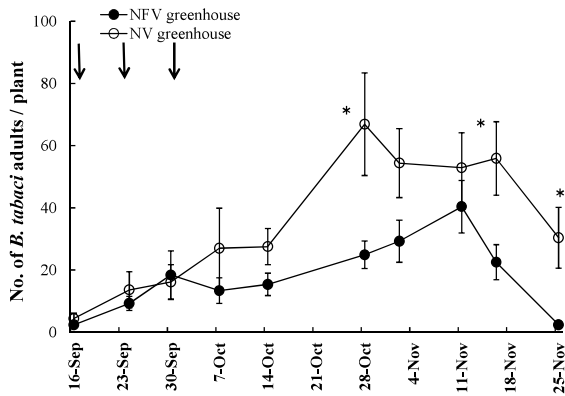


Fig. 11. Number of *Bemisia tabaci* adults per plant in the greenhouse with a negative-pressure forced ventilation (NFV) system and in the greenhouse with natural ventilation (NV). The bars represent standard error (SE), and the asterisks (*) indicate significant differences (Student's *t*-test, * $p < 0.05$). The arrows are indicated the days of

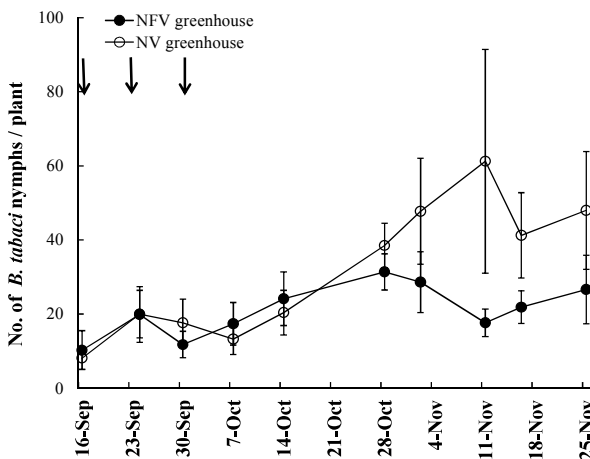


Fig. 12. Number of *Bemisia tabaci* nymphs per plant in the greenhouse with a negative-pressure forced ventilation (NFV) system and in the greenhouse with natural ventilation (NV). The bars represent standard error (SE), and the asterisks (*) indicate significant differences (Student's *t*-test, * $p < 0.05$). The arrows are indicated the days of parasitoids release.

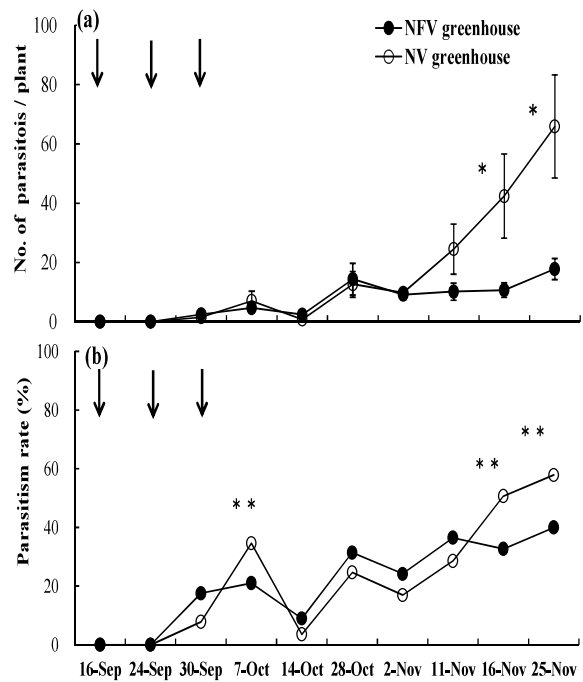


Fig. 13. (a) Number of parasitoids per plant and (b) rate of parasitism in the greenhouse with a negative-pressure forced ventilation (NFV) system and in the greenhouse with natural ventilation (NV). The bars represent standard error (SE), and the asterisks (*) indicate significant differences (* : Student's *t*-test, $p < 0.05$; ** Fisher's exact test, $p < 0.01$). The arrows are indicated the days of parasitoids release.

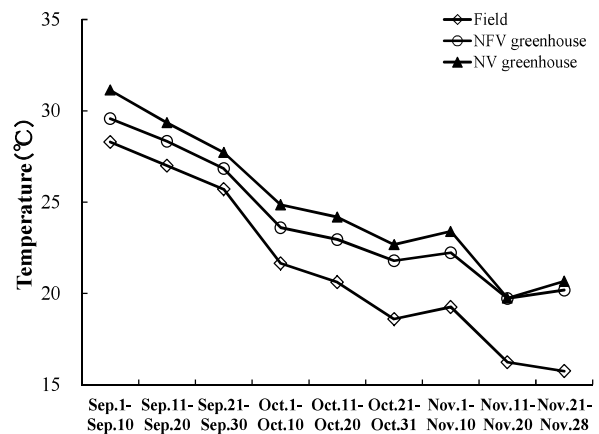


Fig. 14. Mean daytime (Am 6-Pm 6) temperatures every ten days in the field, the greenhouse with negative-pressure forced ventilation (NFV) system, and the greenhouse with natural ventilation (NV).

Table 4. The number of plants with various grades of black sooty disease in the greenhouse with negative-pressure forced ventilation and in the greenhouse with natural ventilation

	Grade				Total	Occurrence index
	0	1	2	3		
Greenhouse with natural ventilation	16	13	15	4	48	38.2
Greenhouse with negative-pressure forced ventilation	30	10	8	0	48	18.1*

Grade 0: no occurrence of black sooty disease, 1: black sooty disease on less than half a leaf, 2: black sooty disease on half a leaf, 3: black sooty disease on the whole leaf.

Occurrence index = $\{[(\text{number of grade 3 plants} \times 3) + (\text{number of grade 2 plants} \times 2) + (\text{number of grade 1 plants})] \div (\text{total number of plants} \times 3)\} \times 100$

Asterisks (*) indicate significant difference (Chi-square test, $p < 0.05$).

考察

強制換気温室におけるサバクツヤコバチによる被寄生幼虫数は11月2日まで、寄生率は10月7日を除き11月11日まで自然換気と有意な差はなく (Fig. 13)、タバココナジラミ成虫は10月7日を除き11月11日まで (Fig. 11)、幼虫数は調査期間中有意な差がなく (Fig. 12)、すす病の発病指数はいずれも自然換気温室よりも低かった (Table 4)。これらの結果から、強制換気温室の寄生蜂は自然換気と同程度にタバココナジラミを抑制したと考えられ、強制換気温室内の風が寄生蜂の探索行動を妨げて寄生率が低下することはないと考えられる。

サバクツヤコバチの寄生は20℃以下に比べ25℃が適している (Qiu et al., 2004)。しかし、11月の強制換気温室の日中の平均気温は17.9～22.2℃で (Fig. 14)、換気により屋外の20℃以下の風が温室内に入ると一時的に温度が低くなることも考えられ、寄生蜂には不適当な環境であったと考えられる。このような環境により寄生蜂の探索活動が低下し、強制換気温室の11月16日以降の被寄生幼虫数、寄生率、タバココナジラミ成虫数は自然換気温室に比べ有意に少なくなったと考えられる。このため、屋外の気温の下がる10月以降の晩秋季の換気は温室内の温度が寄生蜂に適する制御が必要と考えられる。

サバクツヤコバチはタバココナジラミに対して優れた防除効果を示すと報告されている (Hoddle et al., 1998; Hoddle and Van Driesche, 1999; Van Driesche et al., 2001)。しかし、本試験では両試験区ともタバココナジラミの排泄する甘露が原因で発生するすす病が確認されたことから (Table 4)、コナジラミの密度抑制効果は不十分であったと考えられる。そこで、第4章ではサバクツヤコバチ以外の寄生蜂の利用についても検討した。

ちなみに、強制換気温室における9月1日～9月10日の日中の平均気温は自然換気温室に比べ1.6℃低かった

ことから (Fig. 14)、温室内部に約1 m/sの風速が得られる陰圧式強制換気は昇温対策としても有効であることが明らかとなった。

第3節 陽圧式強制換気の侵入抑制効果 材料および方法

1. 試験温室

静岡県農林技術研究所内 (静岡県磐田市) の隣接した2棟の同じ規模で両側全面天窓 (高さ4 m) と側窓 (いずれもプッシュプル開閉式) のある屋根型ガラス温室 (14.6 m × 7.4 m) を供試した。1棟を陽圧式強制換気システムの温室 (強制換気温室-1) (Fig. 15 a) とし、一方の温室は自然換気温室-1 (Fig. 15 b) とした。実験1は2006年8月～12月に行った。実験1では強制換気温室-1の北側妻面にL型のダクト (直径0.2 m) のカバーを付けた吸気用の換気扇 (TCW8944BF: フルタ電気; 羽根の直径0.8 m, 風量350 m³/min (400 W)) を3台高さ約1.2 mに設置した (Fig. 15 c)。吸気用のダクトは0.4 mm × 0.2 mm 目合いの防虫ネットで覆い、排気口は温室の南側妻面に設置した。入り口の前室 (1.0 m × 3.0 m × 1.8 m) もまた温室の南側妻面に設置した (Fig. 15 a)。天窓と側窓には1.0 mm 目合いの防虫ネットを展張した。自然換気温室-1も同じ1.0 mm 目合いの防虫ネットを天窓、側窓に展張した (Fig. 15 b)。

実験2は2007年8月～12月に行った。実験2では強制換気温室-1で設置したL型吸気ダクトを吸気ボックス (4 m × 5 m) に変え (Fig. 15 d)、実験1と同じ防虫ネット (0.4 mm × 0.2 mm 目合い) を使用し、天窓、側窓の防虫ネットは1.0 mm から0.4 mm 目合いに変えた。この温室を強制換気温室-2とした。自然換気温室-1もまた天窓、側窓を0.4 mm 目合いの防虫ネットに変え、この温室を自然換気温室-2とした。

2つの実験では、強制換気温室の中央の風速は約1.0 m/sに調整した。換気扇は6時～18時の間は室温が25℃以上の時に稼働するように設定し、換気扇の稼働時間帯は天窓と側窓は閉めた。実験1では、コナジラミ類の密度を下げるため、10月17日に2つの温室に植えたトマトと屋外の雑草に殺虫剤のトルフェンピラド乳剤を散布した。各温室中央(MP6661:チノー)と屋外の両温室の間(MP9201:チノー)にデータロガーを高さ1.5 mに設置し気温を調べた。

2. 調査方法

トマト(桃太郎ヨーク)はロックウール培地の3.5号ポットに植え、実験1では2006年8月21日、実験2では2007年8月10日に高設のベンチ(高さ50 cm)に設置し、チューブで点滴灌水を行った。温室内の害虫を捕獲するため誘因用に黄色粘着トラップ(ホリバー®, 10 cm × 26 cm)をトマトの上部20 cmに設置した。実験1では強制換気温室-1の施設内に4つのトラップ(Fig. 15 a, No. 1-4)と屋外に2つのトラップを設置し(Fig. 15 a, No. 5, 6)、自然換気温室-1には3つを設置した(Fig. 15 b, No. 2-4)。実験2では、強制換気温室-2および屋外では実験1と同じ数のトラップを設置し、自然換気温室-2には4つのトラップを設置した(Fig. 15 b, No. 1-4)。トラップは1週間に1度取り替え、コナジラミ類とアザミウマ類の数を双眼実体顕微鏡(SMZ-U:ニコン)

下で数え、1日当たり1トラップ当たりの誘殺数を算出した。ハモグリバエ類とアザミウマ類に加害されたトマトの小葉数について両温室の全ての株を数えた。また、TYLCVの病徴を示していた株数について両温室の全ての株を数えた。いずれも調査は実験1では2006年の9月26日および11月20日に行った。実験2では実験期間中ハモグリバエ類の被害とTYLCVの病徴を観察していたがこれらの発生はなかったため調査は行わなかった。

3. 統計解析

各害虫の個体数を反復測定分散分析により調査場所(2つの試験温室と屋外)とトラップの調査日を要因に比較した。調査場所と調査日の交互作用が有意であった場合は、Tukey-Kramer HSD testで多重比較した。アザミウマ類に加害されたトマトの小葉数はStudent's *t*-testにより比較した。実験結果の統計解析にはJMP5(SAS Institute, 2002)を用いた。

結果

1. 実験 1

強制換気温室-1と屋外の1日あたり1トラップあたりのコナジラミ類の成虫数は10月10日に最大となり、それぞれ2.0頭(Fig. 16 c), 1.2頭(Fig. 16 a)であった。自然換気温室-1の成虫数は9月20日以降増加し、10月17日に最大17.1頭となった(Fig. 16 b)。自然換気温

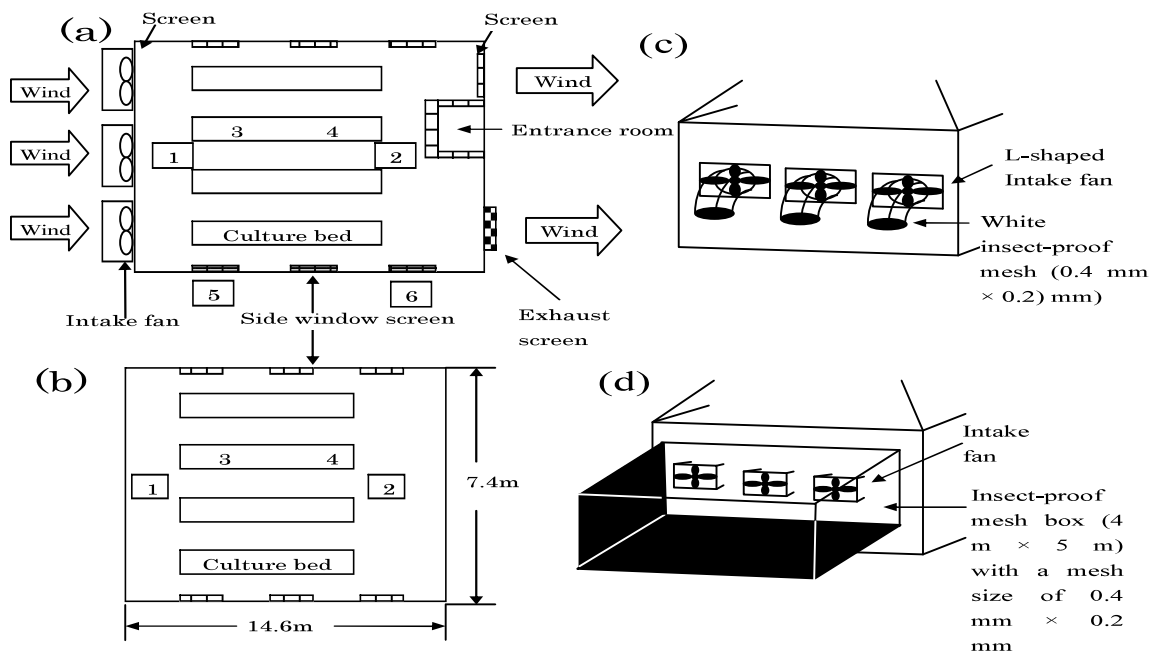


Fig. 15. (a) Layout of the positive - pressure forced - ventilation (PFV) system: a tomato greenhouse with PFV. (b) Layout of the NV system: a tomato greenhouse with natural ventilation (NV). Air intakes were fitted with (c) L - shaped covers in Trial 1 and (d) an intake box in Trial 2. Numbers 1 - 6 indicate the locations of sticky traps.

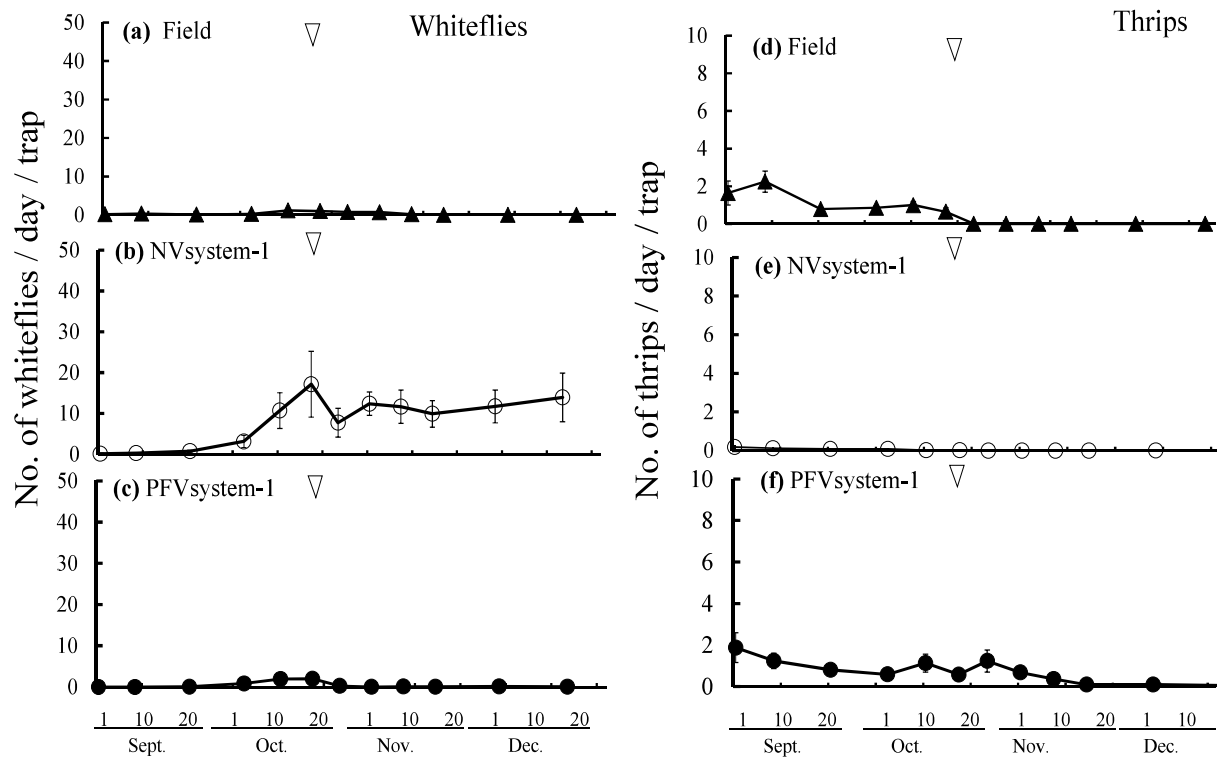


Fig. 16. Mean numbers of (a – c) whiteflies adults and (d – f) thrips trapped in the (a, d) field, (b, e) NV – 1, and (c, f) PFV in Trial 1. Bars indicate SEM. ▽: Application of insecticide

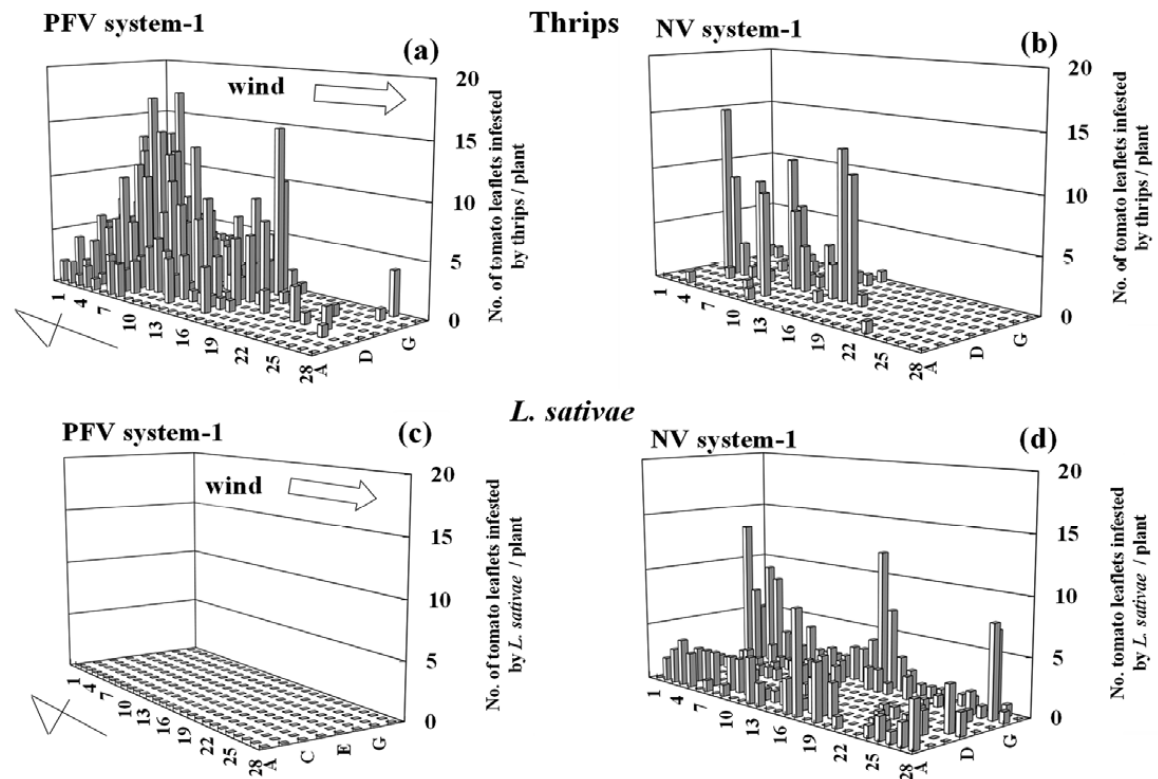


Fig. 17. Severity of damage to tomato plants by (a, b) thrips and (c, d) *Liriomyza sativae* as a function of location in the (a, c) PFV – 1 and (b, d) NV – 1 in Trial 1.

室-1の成虫数は10月17日にトルフェンピラド乳剤を散布したが減少しなかった (Fig. 16 b)。反復測定分散分析の結果、調査場所の間に有意差が認められたが ($df=2$, $F=31.733$, $p<0.0001$)、調査日の間に有意差は認められなかった ($df=11$, $F=2.210$, $p=0.055$)。強制換気温室-1と屋外は自然換気温室-1に比べ有意に少なかった (Tukey-Kramer HSD test, $p<0.05$)。

強制換気温室-1と屋外の1日あたり1トラップあたりのアザミウマ類の成虫数は自然換気温室-1に比べ試験の開始(8月31日)から多く (Fig. 16 d, f)、8月31日に屋外は最大2.3頭で、強制換気温室-1は1.9頭で、自然換気温室-1は0.2頭であった (Fig. 16 e)。10月17日に全ての調査場所でトルフェンピラド乳剤を散布した後、自然換気温室-1と屋外ではゼロになったが (Fig. 13 d, e)、強制換気温室-1ではその後も捕獲された (Fig. 16 f)。反復測定分散分析の結果、調査場所に有意差が認められ ($df=2$, $F=13.652$, $p<0.0001$)、調査日にも有意差が認められた ($df=11$, $F=3.639$, $p=0.005$)。8月31日のアザミウマ類の成虫数は11月13日、27日および12月12日に比べ有意に多かった (Tukey-Kramer HSD test, $p<0.05$)。アザミウマ類に加害されたトマト小葉数は強制換気温室-1が自然換気温室-1に比べ有意に多かった (Student's t -test, $p<0.001$; Fig. 17 a, b)。また、加害されたトマト小葉数は吸気側が排気側に比べ多かった (Fig. 17 a, b)。トマトの葉から採集したアザミウマ類を同定したところネギアザミウマであった。

一方、ハモグリバエ類による加害は強制換気温室-1ではなかった (Fig. 17 c, d)。自然換気温室-1では、特に温室の側窓に沿って加害がみられた (Fig. 17 c, d)。加害していたハモグリバエ類を同定したところトマトハモグリバエであった。調査データは示していないが、TYLCVの病徴は強制換気温室-1では確認されなかったが、自然換気温室-1では9月26日に224株中2株(0.9%)、11月20日に4株(1.8%)確認された。

2006年8月18日晴天の日の11時~15時の間の強制換気温室-1の最高気温は37~39°Cの間で、屋外(34~35°C)と自然換気温室-1(39~41°C)のほぼ中間的な気温であった (Fig. 18)。

2. 実験2

屋外の1日あたり1トラップあたりのコナジラミ類の成虫数は試験期間中0.1~4.6頭であった (Fig. 19 a)。自然換気温室-2では、コナジラミ類の成虫数は試験の開始(8月21日)から9月18日の間0.03~0.5頭であったが (Fig. 19 b)、10月31日に最大(8.6頭)となった (Fig. 19

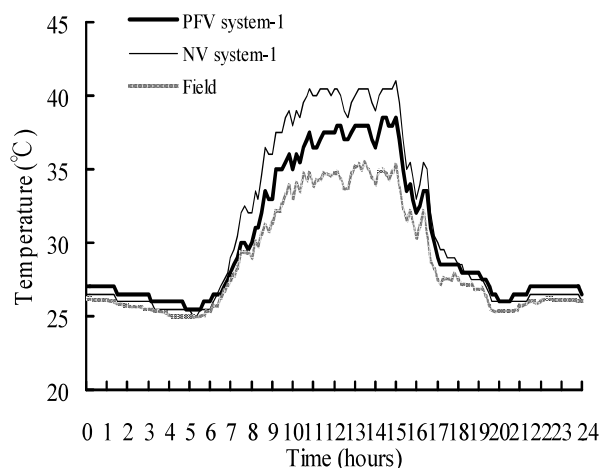


Fig. 18. Hourly temperatures on 18 August 2006.

b)。強制換気温室-2のコナジラミ類の成虫数は試験の開始から10月24日まで0~1.1頭であったが、12月4日に最大(29.5頭)になった (Fig. 19 c)。実験2では、試験の前半にコナジラミ類の成虫数の著しい増加がなかったため殺虫剤の散布は行わなかった。調査場所間 ($df=2$, $F=0.489$, $p=0.619$)と調査日 ($df=13$, $F=1.456$, $p=0.200$)にはそれぞれコナジラミ類の成虫数に有意差はみられなかった。

屋外と強制換気温室-2の1日あたり1トラップあたりのアザミウマ類の成虫数は自然換気温室-2と比べて調査期間を通して多かった。例えば、屋外では8月28日にアザミウマ類の成虫数が最大5.1頭になったが (Fig. 19 d)、強制換気温室-2では8月21日に最大1.8頭であった (Fig. 16 f)。反復測定分散分析の結果、アザミウマ類の成虫数は異なった調査場所間で有意に異なり ($df=2$, $F=31.775$, $p<0.0001$)、また、調査日間で有意に異なった ($df=13$, $F=3.263$, $p=0.005$)。アザミウマ類の成虫数は屋外で有意に多く、次いで強制換気温室-2で自然換気温室-2の順であった (Tukey-Kramer HSD test, $p<0.05$)。8月21日と9月4日のアザミウマ類の成虫数は、11月27日と12月4日に比べ有意に多かった (Tukey-Kramer HSD test, $p<0.05$)。

両温室ともハモグリバエ類による被害とTYLCVの病徴は観察されなかった。

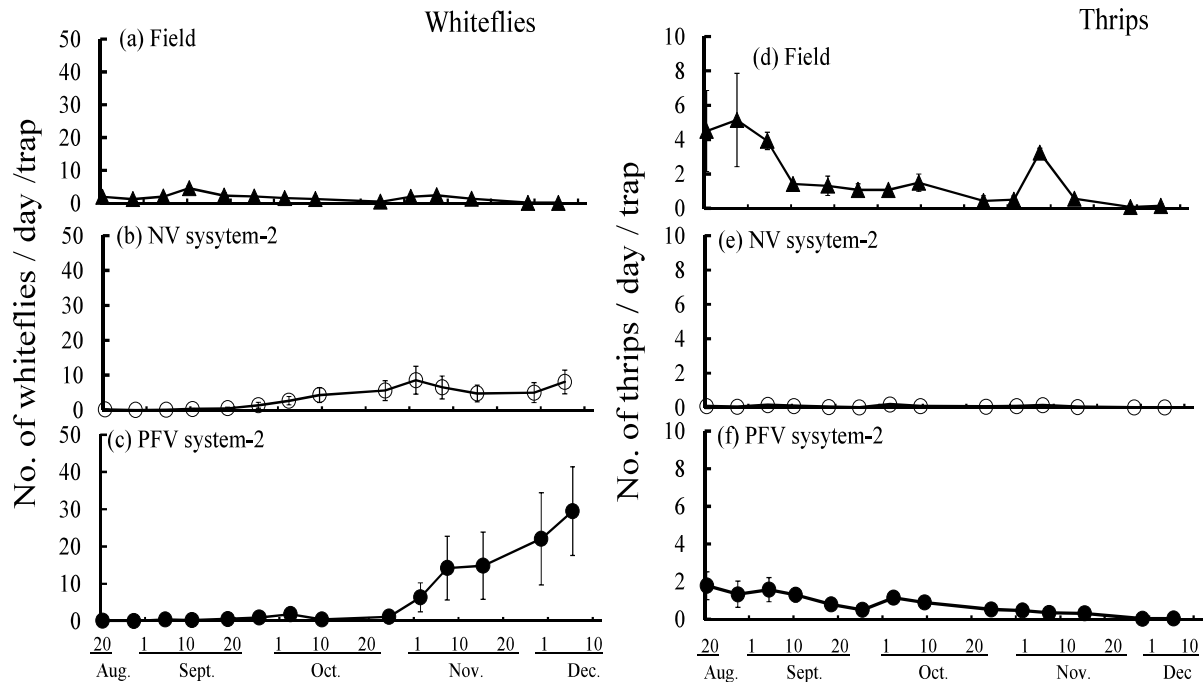


Fig. 19. Mean numbers of (a-c) whiteflies and (d-f) thrips trapped in the (a, d) field, (b, e) NV-2, and (c, f) PFV-2 in Trial 2. Bars indicate SEM

考察

害虫の侵入を防止するための温室構造の基本は防虫ネットの展張であるが、細かな目合の防虫ネットは温室の換気効率を下げるため、換気効率を高め、昇温抑制効果のある強制換気は有効とされている。Berlinger and Lebiush-Mordechi (1996) は、 $0.8 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm}$ 目合の防虫ネットを展張した陰圧式強制換気温室は自然換気に比べコナジラミ類の侵入が多く、TYLCV 罹病トマト株の割合が高いと報告している。陰圧式強制換気は吸気口以外の天窓や側窓の隙間からも風が侵入するため害虫は侵入しやすい。一方、陽圧式強制換気は空気を温室の隙間から外へ押し出すため害虫の侵入は陰圧式より少ないとされている (Berlinger and Lebiush-Mordechi, 1996; 辻, 2007)。このため、実験 1 の自然換気温室-1 では TYLCV の病徴を示す株が 9 月と 11 月に認められたが、強制換気温室-1 では TYLCV の病徴を示す株はみられなかった。このことから陽圧式強制換気温室のコナジラミ類の侵入防止効果は高いと考えられる。

実験 2 では強制換気温室-2 でコナジラミ類の成虫数が徐々に増加した (Fig. 19 c)。しかし、屋外では 10 月後半以降増加していないことから (Fig. 19 a)、コナジラミ類の増加はすでに侵入していたコナジラミ類が温室内で増殖したためと考えられる。以上のように、陽圧式強制換気温室の侵入防止効果は高いもののコナジラミ類の侵入は完全に防げないと考えられる。そこで、第 4 章において侵入したコナジラミ類に対する防除対策について詳

りやや細かな $0.4 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$ 目合いを使用したが、強制換気温室ではハモグリバエ類の侵入を完全に防止できた (Fig. 17 c, d)。この理由として、防虫ネットの目合い ($0.4 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$) がハモグリバエの最大胸部幅 (0.64 mm) (Bethke and Paine, 1991) より小さいためと考えられる。

一方、強制換気温室ではアザミウマ類による被害が自然換気に比べ有意に多かった (Fig. 17 a, b)。アザミウマの胸部の幅は 0.19 mm で (Bethke and Paine, 1991)、防虫ネットの目合い $0.4 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$ より小さいため、ネットをすり抜けて侵入したと考えられる。このことは空気の取り入れ側でアザミウマの被害が大きかったことからわかる。

第4章 寄生蜂による生物的防除

オンシツツヤコバチについては2002年のIPM体系において(第2章)、また、サバクツヤコバチについては自然換気と強制換気下において(第3章)それぞれ防除効果を検討したが、その効果は不十分であった。この原因として、これら寄生蜂の行動や発育にはそれぞれ適温があり(Arnó et al., 2009)、利用する季節によっては期待される効果が得られなかった可能性も考えられる。一方、寄主探索能と産卵能の高いチチュウカイツヤコバチが新たな寄生蜂として注目され、ヨーロッパでは急速に普及しつつある(Hudák et al., 2003; Stansly et al., 2005)。そこで、本章でははじめにこれら3種がどの季節に適しているのか検討した(第1節)。次に、チチュウカイツヤコバチの産卵行動は詳しく調べられているが(Foltyn and Gerling, 1985; Drost et al., 2000; Hudák et al., 2003; Ardeh et al., 2005)、いずれもバイオタイプBを対象としたものであり、他のコナジラミ類については、産卵率を比較したいくつかの報告(Heinz and Parrella, 1994; Greenberg et al., 2002)や若齢幼虫によく産卵するとした報告(Arnó et al., 2009)を除いて詳しい知見はみあたらない。そこで、第2節ではオンシツコナジラミとバイオタイプBとバイオタイプQの1齢~4齢幼虫に対する本種の産卵行動の違いを検討した。

オンシツツヤコバチは主にオンシツコナジラミの、サバクツヤコバチとチチュウカイツヤコバチはタバココナジラミの寄生蜂としてよく知られているが、いずれの寄生蜂もオンシツコナジラミとタバココナジラミの双方に寄生する(Greenberg et al., 2000; Kajita, 2000)。このため、複数種の寄生蜂を同時に放飼する方法も試みられている(Heinz and Nelson, 1996)。海外ではサバクツヤコバチとチチュウカイツヤコバチ、あるいはオンシツツヤコバチとサバクツヤコバチの混合剤が販売されており、今後、国内でもこうした混合剤が導入されると考えられる。この場合、各寄生蜂の寄生率を把握することも必要となってくる。そこで、第3節ではオンシツツヤコバチ、サバクツヤコバチおよびチチュウカイツヤコバチを容易に識別するためのマルチプレックスPCR法を開発した。

コナジラミ類の防除は殺虫剤抵抗性の発達により難しくなっているが(第1章)、殺虫剤は依然として防除技術の柱のひとつである。また、温室栽培ではコナジラミ類以外の害虫も発生するため、寄生蜂と併用できる殺虫剤をあらかじめ検討しておく必要がある。殺虫剤の天敵に

対する影響についてはIOBC(国際有害動植物生物的防除機関)で検討されており(例えば, Hassan and Van de Veire, 2005)、国内でもオンシツツヤコバチに影響の小さい殺虫剤が選定されている(松井, 2006)。しかし、チチュウカイツヤコバチとサバクツヤコバチに対する殺虫剤の影響は調べられていない。また、微生物農薬のマイコタール®(*Lecanicillium muscarium*)、バータレック®(*Lecanicillium longisporum*)、ボタニガードES®(*Beauveria bassiana*)なども登録されているが、これらの昆虫病原性糸状菌は寄生蜂に感染する可能性がある。そこで、第4節では施設野菜に適用のある殺虫剤と微生物農薬の寄生蜂に対する影響を検討した。

第1節 オンシツツヤコバチ、サバクツヤコバチおよびチチュウカイツヤコバチの防除効果の比較

材料および方法

1. 試験温室と作物

静岡県農林技術研究所内(静岡県磐田市)の2棟の温室で試験を行った。1棟の屋根型単棟温室(3.6 m × 28 m)の内部をガラス戸により3つの試験区(3.6 m × 9.3 m)に分け、試験区に寄生蜂のオンシツツヤコバチ、サバクツヤコバチおよびチチュウカイツヤコバチを別々に放飼し、それぞれEF区、EE区およびEM区とした。この温室はポリカーボネイト樹脂板被覆で、両側全面天窓と側窓はいずれもプッシュプル開閉式による換気を行った。もう1棟の屋根型ガラス温室(8.2 m × 7.2 m)を対照区とし、寄生蜂は放飼しなかった。この温室はプッシュプル開閉式の両側全面天窓で、自動開閉式による引戸型側窓で換気を行った。両温室は室内温度が25℃以上で換気するように設定した。

試験は次の3回行った。春季試験: 2005年3月14日~8月3日。初夏試験: 2006年5月20日~7月26日。夏季試験: 2004年6月10日~8月4日。春季試験と初夏試験では、試験区のトマト(品種: 桃太郎ヨーク)はロックウール培地の養液栽培のベッド(列幅150 cm, 株間30 cm)に2005年3月11日および2006年5月19日に16株を2列に定植し、対照区では24株を3列に定植した。夏季試験の試験区では2004年6月10日にトマト(品種: ハウス桃太郎)をポット(直径18 cm, 深さ20 cm)に植え、16ポットを2列に並べ(列幅150 cm, 株間40 cm),

対照区では 24 株を 3 列に並べた (列幅 150 cm, 株間 40 cm)。

2. タバココナジラミ

バイオタイプ B (静岡農技研累代飼育個体群) を供試した。シャーレ (直径 9 cm, 深さ 2 cm) 内に入れたタバココナジラミを各試験区と対照区の中央に設置し放飼した。タバココナジラミ成虫の放飼日と放飼量は Table 5 に示した。

3. 寄生蜂

生物農薬として登録されているチチュウカイツヤコバチ (ベミパール®), サバクツヤコバチ (エルカード®, サバクトップ®) およびオンシツツヤコバチ (エンストリップ®, ツヤパラリ®) のマミーカードを供試した。マミーカードは放飼するまで恒温器 (8°C, 暗黒下) で数日間保管した。各試験で区当たり 2 カードを試験区のトマトの複葉に吊り下げ, 各試験 4 回放飼した。マミーカードの設置日と寄生蜂の放飼量は Table 5 に示した。オンシツツヤコバチはタバココナジラミに寄生するがオンシツ

コナジラミに比べ効果が劣るとされているため (Enkegaard, 1993 ; Hu et al., 2003), 初夏試験ではカード当たりのマミー数が 2 倍量のツヤパラリ®を供試した。

4. 調査方法

トマト株の上位, 中位および下位の任意の各複葉 (株当たり 3 複葉) についてタバココナジラミの成虫数, 3~4 齢幼虫数, 被寄生幼虫数を最初に寄生蜂を放飼した 1 週間後から 6 週間後まで毎週調査した。被寄生幼虫数を 3~4 齢幼虫数で除して寄生率を求めた。各試験区 8 株と対照区 12 株のトマトを調査した。温室内の温度は, おんどとり® (TR-72S : ティアンドデイ) を温室中央の高さ 1.5 m に設置して測定し, Table 5 に試験期間中の最高, 最低および平均気温を示した。おんどとり®は逆さにした容器 (直径 15 cm, 高さ 20 cm) 内に吊るし, 容器は遮光のためアルミ箔を巻き, 通風処理は行わなかった。

5. 統計解析

タバココナジラミ成虫数, 幼虫数, 被寄生幼虫数および角変換した寄生率は, 試験区, 試験季節, 調査した週

Table 5. Release schedule of whitefly parasitoids and *Bemisia tabaci* in greenhouses

No. of Trial (season)	Compartment (Parasitoid)	Parasitoids release			<i>B. tabaci</i> release		Average temperature in greenhouse (°C) (Min.-Max.)	Tomato variety and planted date
		Trade name	Number of cards ^a	Date	Number ^b	Date		
1 (spring)	EF (<i>Encarsia formosa</i>)	EN-STRIP®	2(3.1)	2005, 14 Apr., 21 Apr., 28 Apr., 13 May	6.25	2005, 14 Mar., 17 Mar., 5 Apr.	20.6(8.9-39.6)	Momotaro-York 2005, 11 Mar.
	EE (<i>Eretmocerus eremicus</i>)	ERCAL®	2(3.8)				20.9(7.3-40.4)	
	EM (<i>Eretmocerus mundus</i>)	BMIPAR®	2(3.1)				21.7(11.2-42.9)	
	Control	-	-				22.5(9.3-41.7)	
					(Control)			
2 (early summer)	EF (<i>Encarsia formosa</i>)	Tuyaparari®	2(6.2)	2006, 8 Jun., 15 Jun., 22 Jun., 28 Jun.	7.6	2006, 20 May	26.0(17.3-42.1)	Momotaro-York 2006, 19 May
	EE (<i>Eretmocerus eremicus</i>)	ERCAL®	2(3.8)				26.3(17.1-42.7)	
	EM (<i>Eretmocerus mundus</i>)	BMIPAR®	2(3.1)				25.6(17.1-40.2)	
	Control	-	-				25.7(17.0-40.4)	
3 (summer)	EF (<i>Encarsia formosa</i>)	EN-STRIP®	2(3.1)	2004, 24 Jun., 1 Jul. 8 Jul., 16 Jul.	10	2004, 10 Jun.	29.9(20.6-44.2)	House-Momotaro 2004, 8 Jun.
	EE (<i>Eretmocerus eremicus</i>)	Sabaku-top®	2(3.8)				29.8(21.3-44.0)	
	EM (<i>Eretmocerus mundus</i>)	BMIPAR®	2(3.1)				29.5(21.1-43.7)	
	Control	-	-				30.2(21.9-43.7)	

^a Per single release. Numbers in parentheses indicate number of parasitoids released per plant.

^b Per single release. Number indicate number of *B. tabaci* released per plant.

を要因に反復測定分散分析を行った。反復測定分散分析の結果、試験区と試験季節、調査した週に有意差が認められた時、多重比較のための Tukey-Kramer HSD test により試験区と試験季節、調査した週の有意差を比較した。試験結果の統計解析には JMP5 (SAS Institute, 2002) を用いた。

結果

1. 春季試験

対照区のタバコナジラミ成虫数は試験開始後3週と6週に増加した (Fig. 20 a)。幼虫数は5週まで少なく推移したが6週には急増した (株当たり 54.3 頭) (Fig. 20 b)。寄生蜂を放飼した EF 区と EE 区ではタバコナジラミ成虫数の大きな増加はなく、幼虫は緩やかに増加した (Fig. 20 a, b)。EM 区は3週と6週にタバコナジラミ成虫数がやや増加し (Fig. 20 a), 6週に最大 (株当たり 34.5 頭) となった (Fig. 20 b)。いずれの区の被寄生幼虫数はほとんど増加せず、6週の寄生率は 15.8~27.3% になった (Fig. 20 c)。

2. 初夏試験

対照区のタバコナジラミ成虫数は試験開始後3週から増加し、6週に株当たり 14.1 頭となり (Fig. 21 a)、幼虫数は6週に急増し株当たり 35.6 頭となった (Fig. 21 b)。寄生蜂を放飼した区では、タバコナジラミ成虫数は3週以降対照区に比べ少なく (Fig. 21 a)、幼虫数は3週に最大となったが、その後減少した (Fig. 21 b)。被寄生幼虫数はわずかに増加し、調査期間中の最大の寄生率は 20.5~42.2% (Fig. 21 c) であった。

3. 夏季試験

対照区のタバコナジラミ成虫数と幼虫数は試験開始後2週以降に増加し、6週にそれぞれ株当たり 102.1 頭、65.9 頭となった (Fig. 22 a, b)。EF 区と EM 区ではタバコナジラミの成虫数、幼虫数は2~4週に増加したが6週には減少した (Fig. 22 a, b)。EE 区ではタバコナジラミ成虫数は増減し、5週に最大 (株当たり 46.3 頭) となり (Fig. 22 a)、幼虫数は3週、4週に増加したが5週、6週に減少した (Fig. 22 b)。被寄生幼虫数は次第に増加し、6週には寄生率は 69.6~89.2% になった (Fig. 22 c)。

4. 統計解析

3 種寄生蜂の各試験区におけるタバコナジラミ成虫数、幼虫数、被寄生幼虫数および寄生率を比較した反復測定分散分析の結果を Table 6 に示した。タバコナジラ

ミ成虫数と幼虫数は、試験区と試験季節間で有意に異なり、幼虫数は調査週により有意に異なった。試験区のタバコナジラミ成虫数は対照に比べ有意に少なかった (Tukey – Kramer HSD test, $p < 0.05$)。タバコナジラミ成虫数は夏季、春季、初夏試験の順で有意に多かった ($p < 0.05$)。EF 区と EE 区のタバコナジラミ幼虫数は、対照に比べ有意に少なく ($p < 0.05$)、EF 区は EM 区に比べ有意に少なかった ($p < 0.05$)。初夏試験のタバコナジラミ幼虫数は、夏季試験、春季試験に比べ有意に少なかった ($p < 0.05$)。被寄生幼虫数と寄生率は、寄生蜂の種間に有意な差はなく、調査週と試験季節間で有意に異なった。春季試験と初夏試験の被寄生幼虫数と寄生率は、夏季試験に比べ有意に低かった (Tukey – Kramer HSD test, $p < 0.05$)。

考察

寄生蜂を放飼した EF 区と EE 区はタバコナジラミ成虫数と幼虫数ともに対照区に比べ有意に少ないことから (Fig. 20 a, b, 21 a, b, 22 a, b)、オンシツツヤコバチとサバクツヤコバチはいずれの季節もタバコナジラミの防除に利用できると考えられる。EM 区はタバコナジラミの成虫数は対照区に比べ有意に少なかったが (Fig. 20 a, 21 a, 22 a)、幼虫数は対照区と有意な差が認められなかった (Fig. 20 b, 21 b, 22 b)。春季試験の平均気温は 21.7°C、最低気温は 11.2°C であった (Table 5)。チチュウカイツヤコバチの寄生率は 20°C 以下では低下するため (Qiu et al., 2004)、春季の気温はチチュウカイツヤコバチの探索活動には低かったと考えられる。一方、寄生蜂は 25°C 以上でより多く寄生し (Qiu et al., 2004)、オンシツツヤコバチは 30°C 以上でも活動が可能である (松井, 1995)。しかし、タバコナジラミの純増殖率 (R_0) は 25°C が最も高く、内的増殖率 (r) は 30°C でより高い (Yang and Chi, 2006)。夏季試験の平均気温は 30°C で (Table 5)、夏季試験の被寄生幼虫数、寄生率はともに春季と初夏に比べ有意に高かったが、寄生蜂の増殖がタバコナジラミの増殖に追いつかなかった可能性が考えられる。

これらのことから、寄生蜂の初夏の防除効果はいずれの寄生蜂を利用しても防除は可能であるが、春季と夏季は防除効果が劣り、季節により大きく異なることが明らかになった。寄生蜂の利用については第5章で考察する。

Spring trial

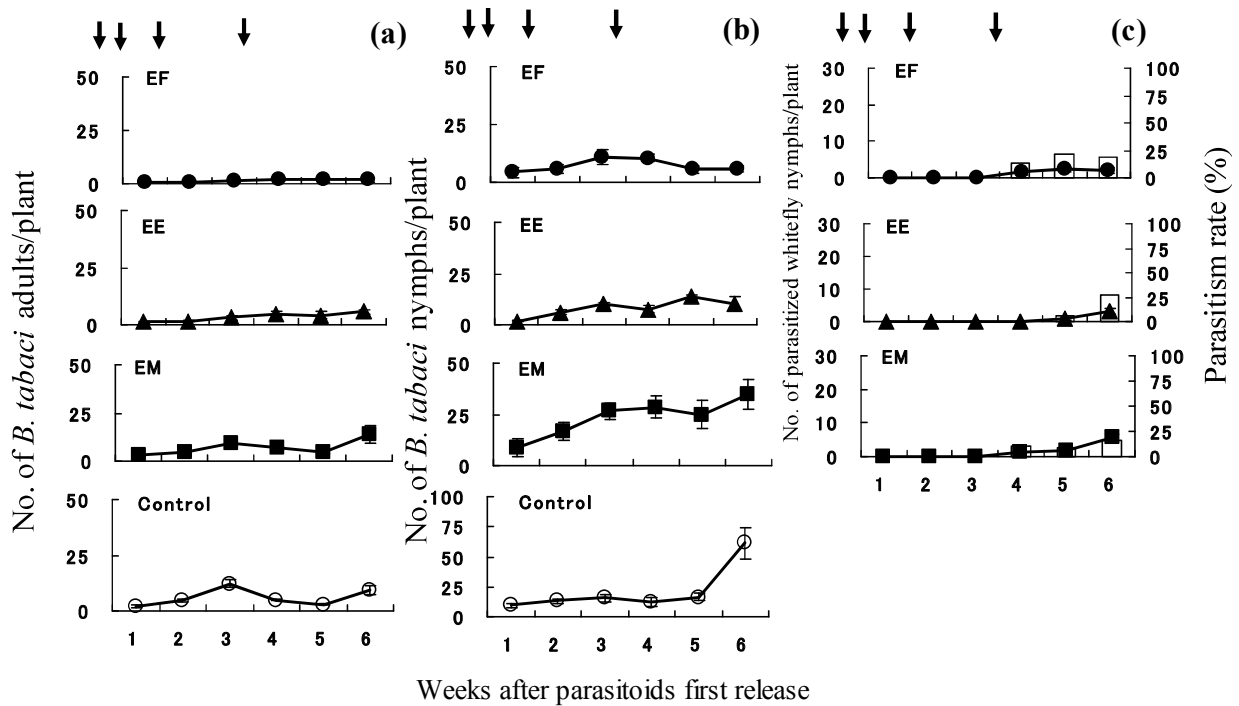


Fig. 20. Mean number of *Bemisia. tabaci* (a) adults and (b) nymphs and (c) parasitoids and the parasitism rate in spring trial. The lines indicated the number of *B. tabaci* adults and nymphs and parasitized *B. tabaci* nymphs and the bars indicated the parasitism rate. The arrows indicated the parasitoids released days. The bars represent standard error (SE). EF, EE and EM indicate *Encarsia formosa*, *Eretomocerus eremicus* and *Eretomocerus mundus*, respectively

Early summer trial

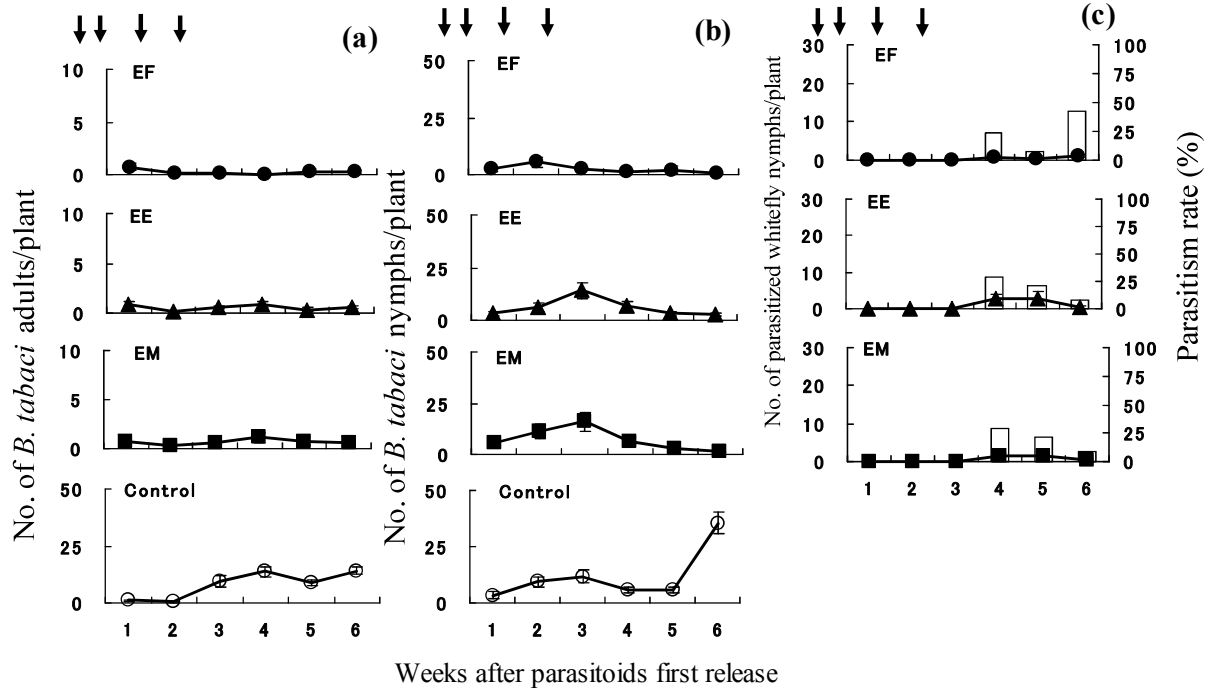


Fig. 21. Mean number of *Bemisia tabaci* (a) adults and (b) nymphs and (c) parasitoids and the parasitism rate in early summer trial. The lines indicated the number of *B. tabaci* adults and nymphs and parasitized *B. tabaci* nymphs and the bars indicated the parasitism rate. The arrows indicated the parasitoids released days. The bars represent standard error (SE). EF, EE and EM indicate *Encarsia formosa*, *Eretomocerus eremicus* and *Eretomocerus mundus*, respectively

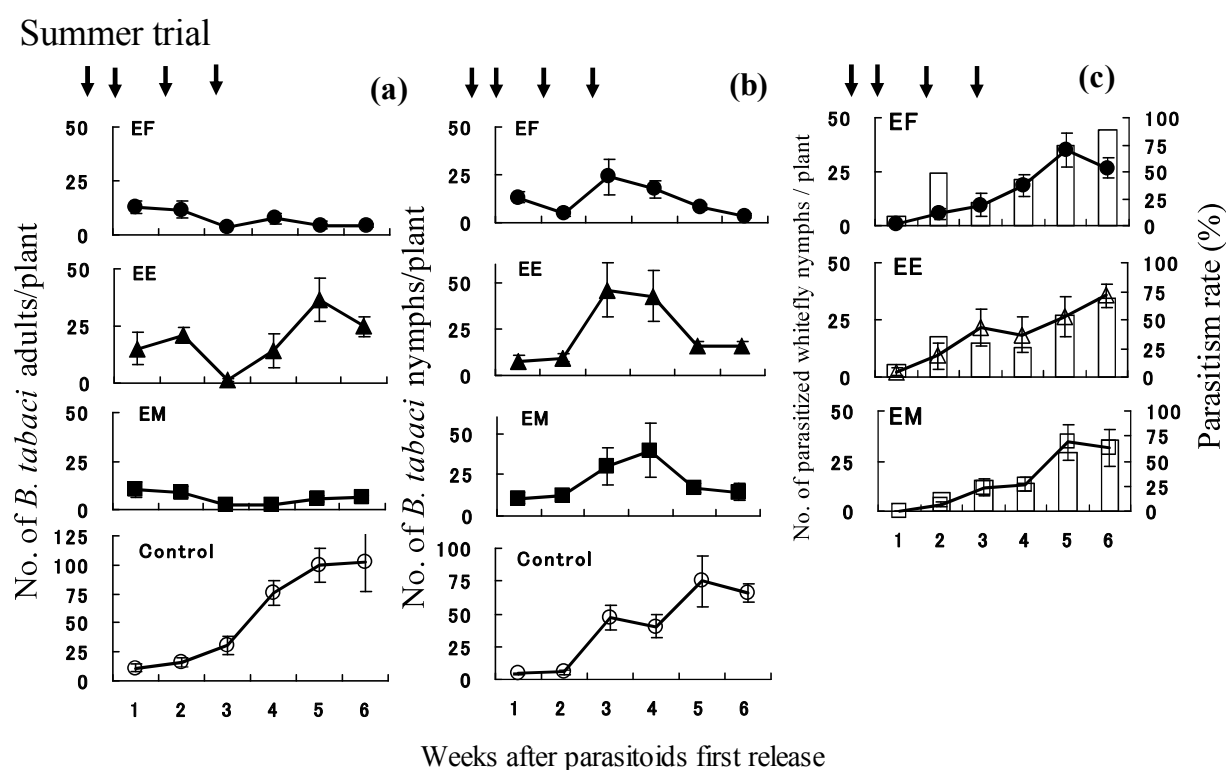


Fig. 22. Mean number of *Bemisia tabaci* (a) adults and (b) nymphs and (c) parasitoids and the parasitism rate in summer trial. The lines indicated the number of *B. tabaci* adults and nymphs and parasitized *B. tabaci* nymphs and the bars indicated the parasitism rate. The arrows indicated the parasitoids released days. The bars represent standard error (SE). EF, EE and EM indicate *Encarsia formosa*, *Eretomocerus eremicus* and *Eretomocerus mundus*, respectively

Table 6. Repeated mesasured ANOVA tables for comparison of effectiveness three whitefly parasitoids on *Bemisa tabaci* adults, nymphs, parasitized whitefly nymphs and parasitism rates

Variable / Source of variance	d.f	SS	F value	p
Number of <i>B. tabaci</i> adults per plant				
The species of parasitoids	3	4.723	15.808	<0.0001
Week & random effects	5	0.779	1.564	0.184
Season & random effects	2	10.406	52.242	<0.0001
Erro	61	6.075		
Number of <i>B. tabaci</i> nymphs per plant				
The species of parasitoids	3	2.165	9.608	<0.0001
Week & random effects	5	1.564	4.165	0.003
Season & random effects	2	3.383	22.517	<0.0001
Erro	61	4.582		
Number of parasitized whitefly nymphs per plant				
The species of parasitoids	2	0.029	0.228	0.798
Week & random effects	5	6.076	18.944	<0.0001
Season & random effects	2	13.420	104.597	<0.0001
Erro	44	2.826		
Parasitism rates ^a				
The species of parasitoids	2	253.028	2.028	0.144
Week & random effects	5	8306.620	26.636	<0.0001
Season & random effects	2	8441.770	67.673	<0.0001
Erro	44	2744.367		

a) Parasitism rates was angular transformed followed by repeated measured ANOVA.

第2節 チチュウカイツヤコバチの産卵行動材料及び方法

1. コナジラミ類

2006年に静岡県富士宮市のポインセチア温室から採集したタバココナジラミバイオタイプQと富士市のトマト温室から採集したオンシツコナジラミおよびバイオタイプB(静岡農技研累代飼育個体群)を供試した。バイオタイプBは鉢植えのキャベツ(品種:初秋),バイオタイプQはインゲン(品種:キーストンすじなし江戸川),オンシツコナジラミはメロン(系統:温室メロン春系)でそれぞれ飼育した。トマト(品種:桃太郎ヨーク)の小葉24枚は液体肥料(ハイポネックス®, 1000倍希釈)を加えた養液に浸した吸水性スポンジ(オアシス®, 10 cm × 25 cm × 5 cm)に挿し,種別に20~30頭のコナジラミ類成虫を放飼し,飼育ケージ(18 cm × 44 cm × 35 cm)内で2日間維持した。全てのコナジラミ類成虫を取り除き,コナジラミ類の卵が産卵された小葉を他の飼育ケージに移し,孵化した幼虫を試験に供試した。また,全ての植物とコナジラミ類は恒温室内(25 °C, 47% RH, 16L8D)で飼育した。コナジラミ類幼虫齢は体の大きさから判断した(Table 7)。

2. チチュウカイツヤコバチ

生物農薬として販売されているチチュウカイツヤコバチ(ベミパール®)のマミーカードのマミーの部分のみを切ってガラス管(口内径10 mm, 胴径21 mm, 高さ45

mm)内に1カードを入れ,恒温室内(25 °C, 47% RH, 16L8D)に置き羽化した成虫を供試した。ガラス管の壁面にあらかじめ寄生蜂の餌として蜂蜜を5~8滴つけた。産卵経験はその後の産卵行動に影響を与えるため(van Alphen and Jervis, 1996),産卵未経験の交尾した雌成虫(1~2日齢)を試験に供試した。試験は寄生蜂1頭についてコナジラミ類の幼虫1頭を遭遇させ,試験のたびに新しい寄生蜂に新しいコナジラミ類幼虫を与えた。

3. 調査方法

寄生蜂の雌成虫を小さなダークラム管(胴径6 mm, 長さ30 mm)に1頭ずつ入れ,タバココナジラミまたはオンシツコナジラミの各齢(1齢, 2齢, 3齢, 4齢前期および4齢後期)の幼虫1頭が寄生したトマトの葉片(1 cm × 5 cm)上にダークラム管から寄生蜂を移した。葉片は観察中に回転できるように木製の棒(長さ10 cm, 直径2 mm)にポリ酢酸ビニル樹脂エマルジョン接着剤(木工用ボンド:コニシ)でコナジラミ類幼虫の寄生していない葉表を接着した。寄生蜂の産卵行動は,CCDカメラ(IC-A digital CCD:Leica, Solms, Germany)とDVDレコーダー(DMR-EH73V:パナソニック)をつけた実体顕微鏡(MZ125:Leica, Solms, Germany)で録画した。寄生蜂がコナジラミ類に向かって歩き遭遇した後,標準的な産卵行動(Fig. 23)に従って行動する様子を記録した。

寄生蜂が産卵行動の1または2の後(Fig. 23),コナジ

Table 7. The body sizes of tested nymphal instars of the *Bemisia tabaci* B and Q biotypes and of *Trialeurodes vaporariorum*

Whitefly species	Stage	No. of whiteflies tested	Mean length (mm) ± SE	Mean width (mm) ± SE
<i>Bemisia tabaci</i> B biotype	first	6	0.26 ± 0.01	0.14 ± 0.02
	second	14	0.30 ± 0.01	0.18 ± 0.03
	third	17	0.50 ± 0.02	0.31 ± 0.05
	early fourth	17	0.61 ± 0.02	0.38 ± 0.06
	late fourth	6	0.68 ± 0.02	0.44 ± 0.05
<i>Bemisia tabaci</i> Q biotype	first	17	0.25 ± 0.004	0.15 ± 0.01
	second	23	0.32 ± 0.01	0.19 ± 0.03
	third	20	0.47 ± 0.02	0.28 ± 0.07
	early fourth	11	0.63 ± 0.03	0.41 ± 0.08
	late fourth	11	0.65 ± 0.02	0.41 ± 0.07
<i>Trialeurodes</i> <i>vaporariorum</i>	first	5	0.24 ± 0.00	0.12 ± 0.03
	second	8	0.41 ± 0.03	0.20 ± 0.04
	third	30	0.56 ± 0.01	0.32 ± 0.07
	early fourth	13	0.71 ± 0.01	0.40 ± 0.04
	late fourth	5	0.73 ± 0.03	0.48 ± 0.18

ラミ類から離れた場合は産卵を拒否したと判断し、寄生蜂が産卵行動の3に進んだ場合は（Fig. 23）寄主を受け入れ寄生したと判定した。産卵行動の1から4は次のように分け各行動時間を記録した。（1）ドラミング：コナジラミ類幼虫の上ののぼり周りを回転しながら触角でコナジラミを叩く行動、（2）プロービング：コナジラミ類の体の下に産卵管を挿入するための探索行動、（3）産卵：産卵管を挿入し静止して卵を産む行動、（4）マーキング：後脚でコナジラミ類幼虫の背の部分叩く行動。寄生蜂が実際に産卵したことはコナジラミ類幼虫の下に産卵した卵により確認した。寄主の受け入れ率は（3）の産卵を完了した寄生蜂数を寄主に遭遇した全寄生蜂数で除して算出した。試験は恒温室（25℃、47% RH、16L8D）内で行った。寄生蜂1頭に対してコナジラミ類幼虫1頭を与え、コナジラミ類幼虫の齢別に5頭から30頭の寄生蜂を供試した。

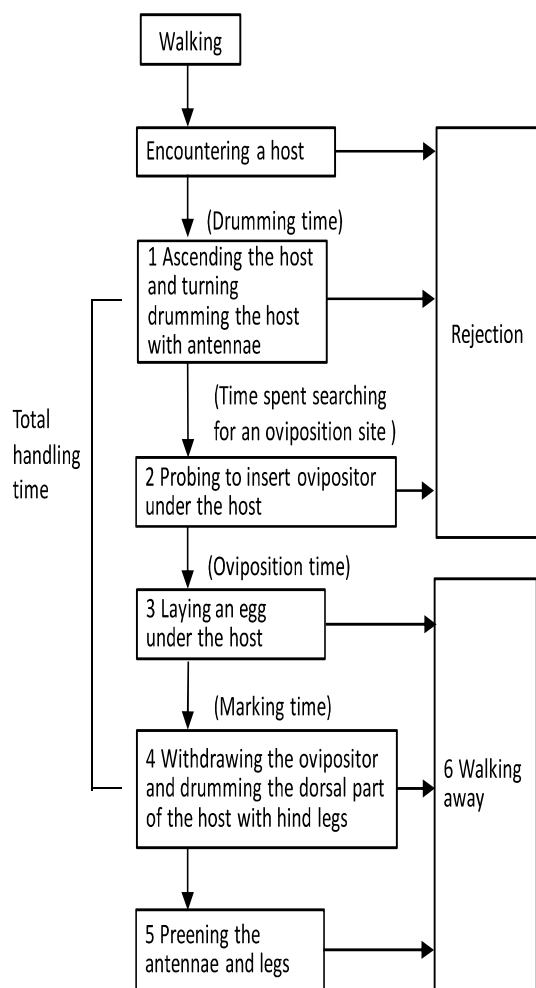


Fig. 23. The sequence of behaviors shown by an *Eretmocerus mundus* female while searching for and after encountering whitefly nymphs.

4. 統計分析

寄主の齢別受け入れ率とドラミングとプロービング後の寄主の拒否率はロジスティック回帰分析を用いた。ロジスティック回帰分析の結果、寄主の受け入れ率または拒否率と寄主齢の間に有意な影響がみられたときは、カイ二乗検定を行った後に、Ryan's test による多重比較を行った。寄主齢と種を要因として各行動時間を2要因の分散分析により比較した。各寄主の同一齢間、異なる齢間の行動時間の比較はTukey - Kramer HSD test またはStudent's *t*-test 検定を用いた。調査結果の統計解析にはJMP5（SAS Institute, 2002）を用いた。

結果

チチュウカイツヤコバチの寄生の受け入れ率は寄主の種間で有意な差はなかったが（ロジスティック回帰分析： $\chi^2=0.313$, $df=2$, $p=0.855$; Fig. 24），寄主の齢間で有意に異なった（ロジスティック回帰分析： $\chi^2=22.599$, $df=4$, $p=0.0002$ ）。パイオタイプB（カイ二乗検定, $\chi^2=4.674$, $df=4$, $p=0.322$ ）とオンシツコナジラミ（カイ二乗検定, $\chi^2=2.353$, $df=3$, $p=0.503$ ）の寄主の齢間では有意な差はなかったが、パイオタイプQでは寄主の齢間で有意に異なり（カイ二乗検定, $\chi^2=13.514$, $df=4$, $p=0.009$ ），4 齢後期の幼虫の受け入れ率は若齢に比べ有意に低かった（Ryan's test, $p<0.05$ ）（Fig. 24）。また、オンシツコナジラミの4 齢後期の幼虫には産卵しなかった（Fig. 24）。なお、全ての寄生蜂の内14 個体（4.7%）がホストフィーディング（寄主体液摂取）を行った。

チチュウカイツヤコバチが寄主を拒否する行動はドラミングまたはプロービングの後に観察された。ドラミング後の寄主拒否率は寄主の齢間で有意に異なったが（ロジスティック回帰分析： $\chi^2=34.664$, $df=4$, $p<0.0001$ ），寄主の種間では有意な差がなかった（ロジスティック回帰分析： $\chi^2=1.240$, $df=2$, $p=0.538$ ）（Table 8）。オンシツコナジラミ4 齢幼虫に対する拒否は全てドラミング後にみられた（Table 8）。全ての種の2 齢以上の幼虫に対する寄主拒否率はドラミング後に比べプロービング後の方が低かった（Table 8）。プロービング後の寄主拒否率に寄主の齢と種は両方ともに影響しなかった（ロジスティック回帰分析:寄主齢： $\chi^2=6.656$, $df=4$, $p=0.155$, 寄主：X2 = 1.367, $df=2$, $p=0.505$; Table 8）。

チチュウカイツヤコバチはオンシツコナジラミの4 齢後期の幼虫に対してドラミングは行わなかった（Fig. 25 a）。それ以外の種に対するドラミング時間は寄主の齢に関わらず寄主の種間で差がなかったが（ANOVA:F 2, 161

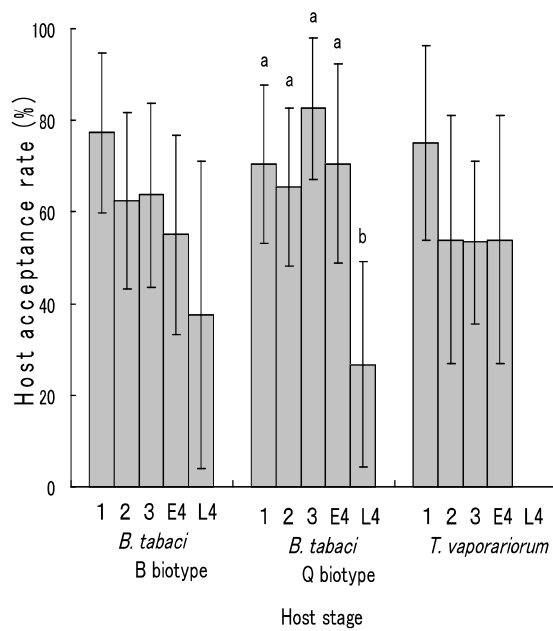


Fig. 24. The acceptance rates with Wald 95 percent confidence interval of *Eretmocerus mundus* for different nymphal instars of the *Bemisia tabaci* B and Q biotypes and of *Trialeurodes vaporariorum*. Bars labeled with different letters differ significantly among nymphal instars of the same host species (Ryan's test for multiple comparisons, $p < 0.05$). There were no significant differences in *B. tabaci* B biotypes and *T. vaporariorum* (Ryan's test for multiple comparisons, $p > 0.05$). The numbers of parasitoids tested are shown in Table 7. E4 and L4 indicate the early and late fourth instar stages, respectively.

= 0.270, $p = 0.764$), 寄主の齢間では有意に異なった (F 4, 161 = 5.009, $p = 0.0024$; Fig. 25 a)。パイオタイプ Q の 4 齢前期の幼虫に対するドラミング時間は、1 齢と 3 齢幼虫に比べ有意に長かった (Tukey - Kramer HSD test, $p < 0.05$; ANOVA : F 4, 68 = 3.337, $p = 0.015$; Fig. 25 a)。

プロービング時間は寄主の種間で有意差はなく (ANOVA : F 2, 161 = 0.051, $p = 0.950$), 寄主の齢間で有意に異なった (F 3, 161 = 14.145, $p < 0.001$; Fig. 25 b)。パイオタイプ B の 4 齢後期幼虫に対するプロービング時間は 1 齢, 2 齢および 3 齢幼虫に比べ有意に長かった (Tukey - Kramer HSD test : ANOVA : F 4, 55 = 6.511, $p = 0.0002$; Fig. 25 b)。パイオタイプ Q の 4 齢の前期と後期幼虫に対しては、1 齢, 2 齢, 3 齢幼虫に比べ有意に長かった (Tukey - Kramer HSD test, $P < 0.05$; ANOVA : F 4, 68 = 13.886, $p < 0.001$; Fig. 25 b)。

産卵時間は寄主の種間で有意な差はみられなかったが (ANOVA : F 2, 161 = 1.548, $p = 0.216$), 寄主の齢間では有意な差がみられた (F 3, 161 = 2.7626, $p = 0.044$; Fig. 25 c)。パイオタイプ B の産卵時間は、2 齢と 3 齢幼虫に比べ、4 齢後期幼虫で有意に長かった (種ごとに寄主の齢間で Tukey - Kramer HSD test で比較, $p < 0.05$; ANOVA : F 4, 55 = 3.381, $P = 0.015$; Fig. 25 c)。

マーキング行動はオンシツコナジラミでは観察されなかった (Fig. 25 d)。マーキング時間は寄主の種間で有意な差はなかったが (ANOVA : F 2, 161 = 0.009, $p = 0.991$), 寄主の齢間で有意に異なった (F 4, 161 = 5.006, $p =$

Table 8. The host rejection rates by *Eretmocerus mundus* for different nymphal instars of the *Bemisia tabaci* B and Q biotypes and of *Trialeurodes vaporariorum* after completion of the drumming and probing behaviors

Host species	Host stage	No. of parasitoids tested	Host rejection rate after drumming (%)	No. of probing parasitoids	Host rejection rate after probing (%)
<i>Bemisia tabaci</i> B biotype	first	22	9.1 a	20	15.0 a
	second	24	33.3 a	16	6.3 a
	third	22	18.2 a	18	22.2 a
	early fourth	20	30.0 a	14	21.4 a
	late fourth	8	50.0 a	4	25.0 a
<i>Bemisia tabaci</i> Q biotype	first	27	3.7 b	26	26.9 a
	second	29	24.1 ab	22	13.6 a
	third	23	13.0 b	20	5.0 a
	early fourth	17	17.6 ab	14	14.3 a
	late fourth	15	53.3 a	7	42.9 a
<i>Trialeurodes vaporariorum</i>	first	16	12.5 b	14	14.3 a
	second	13	46.2 ab	7	0 a
	third	30	46.7 ab	16	0 a
	early fourth	13	38.5 ab	8	12.5 a
	late fourth	5	100 a	0	—

Values followed by different letters differ significantly among the host stages within a host species or biotype (logistic regression analysis followed by Ryan's test, $p < 0.05$).

0.0024)。バイオタイプ B に対するマーキング時間は 3 齢幼虫が最も長く、1 齢幼虫が最も短かった (Tukey-Kramer's HSD test, $p < 0.05$; ANOVA: F 4, 55 = 3.243, $p = 0.0185$; Fig. 25 d)。バイオタイプ Q に対するマーキング時間は寄主の齢間で有意な差がなかった (ANOVA: F 4, 68 = 1.615, $p = 0.181$)。

バイオタイプ Q とバイオタイプ B の 1 齢およびバイオタイプ Q とオンシツコナジラミの 3 齢の総産卵時間を比べると、いずれもバイオタイプ Q が有意に短く、その他では産卵した寄生蜂の総産卵時間は寄主の種間で差はなく (ANOVA: F 2, 161 = 0.472, $p = 0.625$)、寄主の齢間では有意に差があった (ANOVA: F 2, 161 = 17.297, $p < 0.0001$)。全ての種の老齢幼虫に対する総産卵時間が長くなった (Tukey-Kramer HSD test, $p < 0.05$; バイオタイプ B F 4, 55 = 7.820, $p < 0.001$, バイオタイプ Q F 4, 68 = 17.556, $p < 0.001$, オンシツコナジラミ F 3, 38 = 3.005, $p = 0.042$; Fig. 25 e)。

考察

寄生蜂の産卵行動は決まった順序で行われる (Vinson,

1998)。チチュウカイツヤコバチの産卵行動は、従来、3 つに分けられていたが (Foltyn and Gerling, 1985; Headrick et al., 1996), Ardeh et al. (2005) は 5 つに細分している。本研究では Ardeh et al. (2005) による「触角による寄主のプロービング」と「寄主に上にのぼって、その周辺を触角により探索」の行動は明確に分けることが困難であったことから、「プロービング」のひとつの行動とした。また、「産卵管の挿入と産卵」については、寄生蜂が産卵管を挿入している時は腹部を何度も動かし、産卵時には腹部を動かさない様子が観察されたため、「産卵管の挿入」と「産卵」に分け、「産卵管の挿入」は「プロービング」に含めた。従って、本研究では、「ドラミング」、「プロービング」、「産卵」および「マーキング」の 4 つに分類して調査した。

チチュウカイツヤコバチの寄主としてタバココナジラミはオンシツコナジラミより適していると考えられている。たとえば、タバココナジラミに対する寄生率はオンシツコナジラミより高く、孵化率も高いうえ、幼虫の発育期間も短く、成虫の寿命も長いと報告されている (Heinz and Parrella, 1994; Greenberg et al., 2002)。

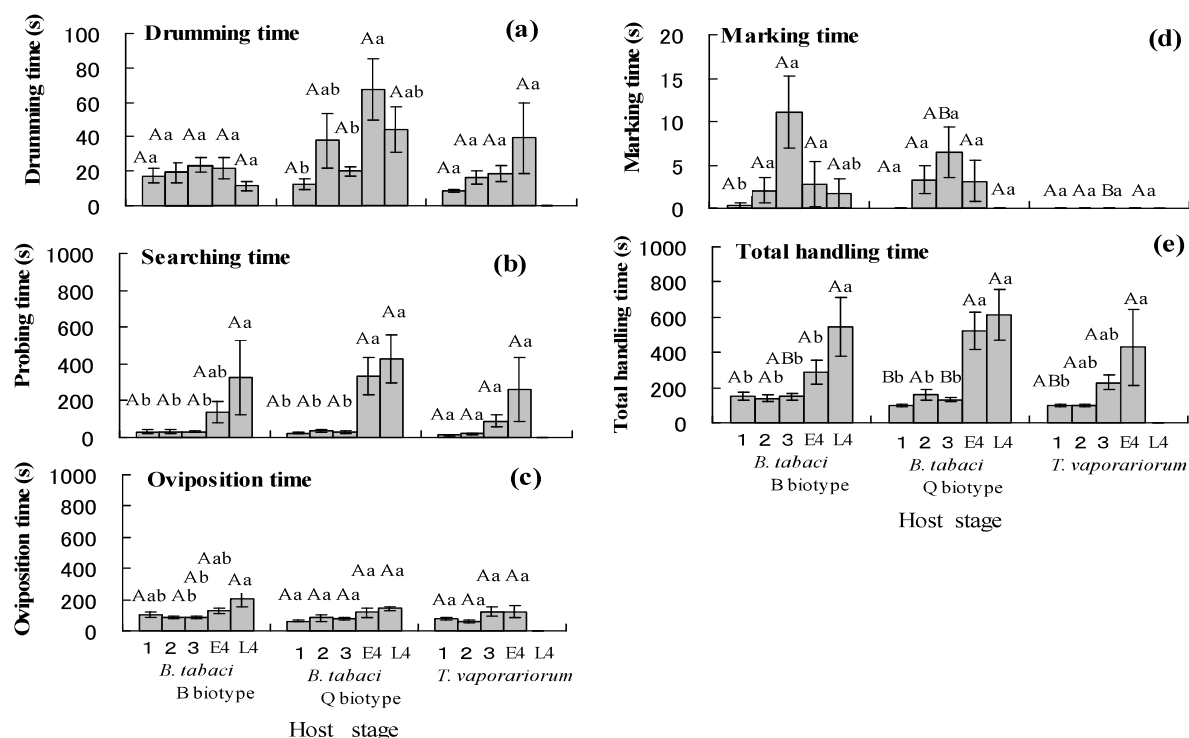


Fig. 25. Time required for behavioral events. (a) drumming time, (b) probing time, (c) oviposition time, (d) marking time, and (e) total handling time of *Eretmocerus mundus* on different nymphal instars of the *Bemisia tabaci* B and Q biotypes and of *Trialeurodes vaporariorum*. Values are means $\pm$ S.E. Bars labeled with different capital letters differ significantly among host species or biotypes; bars labeled with different lowercase letters differ significantly among host stages, except for the late fourth instars, within a species or biotype (two-factor ANOVA followed by the Tukey-Kramer HSD, or the Student's *t*-test for L4, $p < 0.05$). E4 and L4 indicate the early and late fourth instar stages, respectively.

Greenberg et al. (2002) もタバココナジラミに対する寄生率はオンシツコナジラミの 3.4 倍で、孵化率もタバココナジラミの 84.9%に対してオンシツコナジラミでは 19.9%であったと報告している。一方、寄生蜂に産卵経験がある場合や寄生蜂が複数種を選択できる場合には寄生蜂の寄生率が寄主により異なることが報告されているが (Cornell and Pimentel, 1978; van Alphen and Vet, 1986), 本試験ではタバココナジラミとオンシツコナジラミの間で寄生率に有意な差は認められなかった (Fig. 24)。この原因は、本試験では産卵未経験の成虫 1 頭に 1 個体のコナジラミ幼虫を供試したため、選択の余地がなく、これまでの報告と異なる結果が得られたのかもしれない。

チチュウカイツヤコバチはタバココナジラミの 4 齢幼虫に対する寄生は少ないと報告されているが (Urbaneja and Stansly, 2004; Qiu et al., 2004), 本試験でも 4 齢後期の寄主の寄生率は若齢幼虫に比べ有意に低く (Fig. 24), これまでの報告と同じ結果であった。

Table 8 に示した寄主拒否率をみると、チチュウカイツヤコバチは主にドラミング中に遭遇した幼虫を寄主として受け入れるかどうか判断しているようにみえる。また、寄生蜂が寄主を不適と判断した場合には産卵行動を直ちに中止している。寄生蜂の産卵行動は寄主の大きさ (Salt, 1958) や体表のワックス成分の違い (Muratori et al., 2006) が影響していると考えられているが、その詳細は不明である。

寄主と遭遇後のドラミングから産卵終了までの総産卵時間はいずれにおいても 4 齢幼虫 (288~522 秒) が最も長く、1~3 齢幼虫 (96~231 秒) に比べて約 2~4 倍も長かった (Fig. 25 e)。バイオタイプ B と Q では 4 齢のプロービング時間が 1~3 齢幼虫に比べ長い (Fig. 25 c)。若齢幼虫に比べ、4 齢幼虫は葉に固着していることから、寄主と葉の隙間が狭い。また、チチュウカイツヤコバチの産卵管は湾曲し、薄肉であるため (Gerling et al., 1998), こうした狭い隙間に挿入することが困難とみられる (Ardeh et al., 2005)。そのため、プロービング時間は増加し、総産卵時間は長くなったと考えられる。

多くの寄生蜂は過寄生を避けるため産卵後の寄主にマークをつける (Vinson, 1998; Nufio and Papaj, 2001)。チチュウカイツヤコバチの場合は産卵後の寄主を後脚で叩くドラミングの際にマークをつける (Ardeh et al., 2005)。Buckner and Jones (2005) は、この化学物質は寄生蜂の腹部または後脚にある特別の腺から分泌されたメチル分枝アルカンと脂質 (additional lipids) の混合物であると報告している。本研究では、マーキング行動はバイオタイプ B とバイオタイプ Q で観察されたが、オンシツ

コナジラミでは観察されなかった (Fig. 25 d)。この興味深い現象の詳細については今後の検討を待ちたい。

以上のとおり、チチュウカイツヤコバチはタバココナジラミバイオタイプ B、バイオタイプ Q およびオンシツコナジラミのいずれも寄生するが、老齢幼虫より若齢幼虫を好むことが明らかになった。

第 3 節 DNA マーカーを用いた寄生蜂の識別法

材料および方法

生物農薬として販売されているオンシツツヤコバチ、サバクツヤコバチおよびチチュウカイツヤコバチを用いた (Table 9)。寄生蜂のマミーカードをマミーの部分のみを切ってガラス管 (口内径 10 mm, 胴径 21 mm, 高さ 45 mm) 内に 1 カードを入れ、恒温室内 (25 °C, 47% RH, 16L8D) で保存し、羽化した成虫を 1 個体ずつ 0.5mL マイクロチューブ中に入れて -80°C で保存した。なお、サバクツヤコバチおよびチチュウカイツヤコバチは、保存に先立ち形態により雌雄識別を行った。また、対照として、エタノール中に保存したタバココナジラミ (バイオタイプ B および Q) およびオンシツコナジラミも用いた (Table 9)。

プライマーの設計は国際塩基配列データベースに登録されているリボゾーム RNA 遺伝子領域 (rDNA) の塩基配列を元に行った。用いたデータはチチュウカイツヤコバチの 18SrDNA から 5.8SrDNA の領域 (AF273631-AF273636) およびオンシツツヤコバチの Internal Transcribed Spacer 1 (ITS1) 領域を含む、18SrDNA の 3' 末端から 5.8SrDNA の 5' 末端にかけての領域 (AY615782-AY615783) である。

個体ごとに Wizard® Genomic DNA Purification Kit (プロメガ) により DNA 抽出を行い、最終的に得られた DNA は Tris-EDTA (10mM-0.1mM, pH 8.0) 溶液中に溶解して、以後の PCR 反応に供試した。

PCR 反応は 1 反応あたり dNTP 0.2μmol/mL, 各プライマー 0.2μmol/mL, ゲノム DNA 0.5μL, ExTaq (タカラ) 0.2unit, および添付バッファー 10 分の 1 量を含む、全量 10μL の水溶液中で行った。PCR 反応には iCycler サーマルサイクラー (バイオラッド) を用い、94°C 3 分の後、94°C 30 秒, 55°C 30 秒, 72°C 60 秒のサイクルを 35 回繰り返した後、72°C で 10 分間保持した。増幅した DNA 断片は TAE 緩衝液中の 1.5% アガロースゲル上にて 100V で 40 分間電気泳動を行って分離し、エチジウムブロマイド溶液で染色後、UV 照射下でバンドパターンを確認した。なお、作成したプライマーでの増幅確認に先立ち、rDNA

Table 9. Strains of whitefly parasitoids and whiteflies used for this study

Species	Strain*	Supplier	No. of females	No. of males
<i>Encarsia formosa</i>	Tsuya-Top	Agrisect	16	
	En-Strip	Arysta LifeScience	16	
	Tsuyakobachi EF30	Syngenta	16	
<i>Eretmocerus remicus</i>	Sabaku-Top	Agrisect	12	12
	Er-Card	Arysta LifeScience	8	8
<i>Eretmocerus mundus</i>	Bemipar	Arysta LifeScience	8	8
<i>Trialeurodes vaporariorum</i>			8**	
<i>Bemisia tabaci</i>	B-type		8**	
	Q-type		8**	

* For parasitoid wasps, strain names are commercial names.

** Sex were not identified.

の 28S 部分領域を増幅する汎用的なプライマー (D3-4046F および D3-4413R; Gillespie et al., 2005, Table 10)を用いた PCR によって DNA 抽出を確認した。また、得られた増幅 DNA 断片が ITS1 領域かどうか確認するため、オンシツツヤコバチ (エンストリップ®およびツヤトップ®)、サバクツヤコバチ (エルカード®およびサバクトップ®) 各系統 1 個体ずつ、チチュウカイツヤコバチ (ベミパール®) の 2 個体の増幅 DNA 断片の塩基配列を次に示す方法で決定した。上記 PCR 条件にて全量 30μL の反応液中で増幅を行った後、MinElute PCR purification kit (キアゲン) を用いて精製したものを鋳型とし、PCR で用いたプライマーを使用して BigDye® Terminator v3.1 Cycle Sequencing Kit (アプライドバイオシステムズ) によりサイクルシーケンス反応を行った。塩基配列の決定には ABI PRISM® 3100 ジェネティックアナライザー (アプライドバイオシステムズ) を用いた。得られた塩基配列は国際塩基配列データベースにおいて提供される BLAST により類似配列の検索を行った。

結果

DNA を抽出したすべての個体において、D3-4046F および D3-4413R を用いた PCR によって増幅産物が確認できた。このことから、DNA は抽出できたと考えられた。オンシツツヤコバチの 235bp の領域を増幅させるように設計したプライマー (EfF および EfR; Fig. 26, Table 10) による PCR の結果、オンシツツヤコバチからは期待通り約 250bp の増幅断片が確認されたが、チチュウカイツヤコバチ、サバクツヤコバチおよびコナジラミ類では全く増幅が確認できなかった。チチュウカイツヤコバチの 527bp を増幅するように設計したプライマー (EmF およ

び EmR; Fig. 26, Table 10) による PCR によって、チチュウカイツヤコバチおよびサバクツヤコバチの両種で約 500bp の PCR 産物の増幅が確認でき、また増幅断片長はサバクツヤコバチのほうがやや長かった。一方、オンシツツヤコバチおよびコナジラミ類では増幅産物は得られなかった。

オンシツツヤコバチでは EfF と EfR および EfF と EmR によって得られた 2 種類の増幅 DNA 断片を、サバクツヤコバチとチチュウカイツヤコバチでは EmF と EfR に

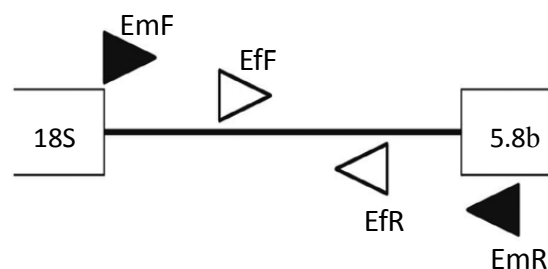


Fig. 26. Schematic diagram of primers designed on the sequences of ribosomal RNA gene in this study. White and black arrows indicate the primers designed on the sequences of *Encarsia formosa* and *Eretmocerus mundus*, respectively.

Table 10. Primers of whitefly parasitoids used in this study

Name	Sequence (5'-3')
Eff	CCTTCTCGTTTTGCACTTGG
EffR	TCGACGAGTTCATTGATGTGA
EmF	AACGTATGCGGATAACAACG
EmR	GCAATTAGCTGCGTTCTTCA
D3-4046F *	GACCCGTCTTGAAACACGGA
D3-4413R *	TCGGAAGGAACCAGCTACTA

* Gillespie et al. (2005)

よって得られた断片の塩基配列の解析を行った。その結果、オンシツツヤコバチから得られた配列 (AB662969–AB662972) は、ともに既知のオンシツツヤコバチの配列 (AY615782 もしくは AY615783) と 99% から 100% 一致した。チチュウカイツヤコバチの配列 (AB662975, AB662976) は既知のチチュウカイツヤコバチの配列 (AY878190) と 99% 一致した。また、サバクツヤコバチの配列はこれまで国際塩基配列データベースに登録されていなかったが、今回得られた配列 (AB662975, AB662976) は *Er. warrae* Naumann and Schmidt と 98% 一致した。このことから、得られた増幅 DNA 断片はプライマーを設計した ITS1 領域のものであると確認できた。

設計した 4 つのプライマーのうち 3 つ (Eff, EmF および EmR) を用いた増幅では、3 種ツヤコバチ全てから増幅断片が得られた (Fig. 27)。また、3 種間で増幅断片長が異なり (オンシツツヤコバチ約 300~400bp, サバク

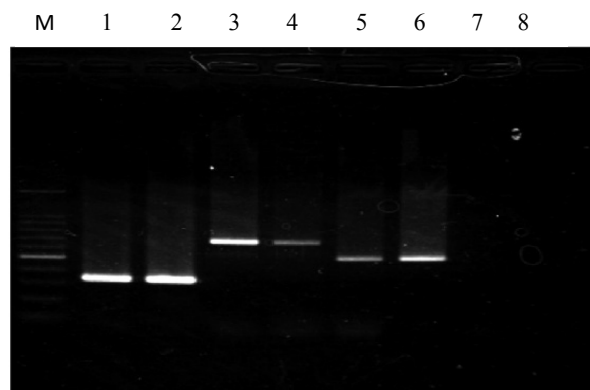


Fig. 27. Electrophoregram of amplified fragments for three parasitoid wasps of whitefly by multiplex polymerase chain reaction using three primers Eff, EmF and EmR. Lanes are: M: 100bp ladder molecular weight marker; 1-2: *Encarsia formosa*; 3-4: *Eretmocerus eremicus*; 5-6: *Eretmocerus mundus*; 7: *Trialeurodes vaporariorum*; 8: no DNA template.

ツヤコバチ約 600~700bp, チチュウカイツヤコバチ約

500bp), 分子量マーカーとして 100bp ラダーマーカーを用いることにより、明確に区別可能であった。また、コナジラミ類からは増幅断片が確認されなかった (Fig. 27)。

考察

rDNA 領域には塩基配列の変異が少なく塩基配列がよく保存されている領域と変異が多く多型検出が容易な領域が含まれていることから、昆虫の種間・種内変異の解析によく用いられている (Ardeh et al., 2005; Heraty et al., 2007; Ji et al. 2003; Vickerman et al., 2004; Yara and Kunimi, 2009)。本研究では、このうち変異の多いとされる Internal Transcribed Spacer 1 (ITS1) 領域の塩基配列を解析することによって、種間変異を検出することに初めて成功した。本法により、オンシツツヤコバチ、サバクツヤコバチおよびチチュウカイツヤコバチを容易に識別することが可能となった。本研究では我が国で生物農薬として登録のある 3 種のみを対象としたが、国内ではコナジラミ類の土着寄生蜂が多く知られており (梶田, 1980; Kajita, 2000; 小澤ら, 1992), 土着天敵を利用した害虫防除が求められている。今後は、本方法をより発展させ、土着寄生蜂も含めた識別法の開発が期待される。

海外ではミトコンドリア DNA の PCR-RFLP により *Encarsia* 属の識別法が開発されているが (Monti et al., 2005), この手法は制限酵素処理のために時間とコストがかかり、切断面が不十分な場合には解析が困難になることがある。一方、本研究で開発したマルチプレックス PCR 法は 1 回の PCR 反応で 3 種を同時に識別できることから Monti et al., (2005) の手法より優れている。

第 4 節 殺虫剤と微生物農薬の影響

材料および方法

1. 寄生蜂に対する殺虫剤の影響

(1) 殺虫剤

トマトに登録のある殺虫剤のうち 24 剤を供試した (Table 11, 12)。

(2) 寄生蜂

生物農薬として販売されているチチュウカイツヤコバチ (ベミパール®), サバクツヤコバチ (エルカール®) およびオンシツツヤコバチ (エンストリップ®) のマミーカードを供試した。マミーカードは試験まで冷蔵庫 (8°C) 内で保管した。成虫はマミーカードを恒温室内 (25°C, 16L8D) に移動し、羽化した 2~3 日齢を供試した。

(3) 寄生蜂のマミーに対する殺虫剤の影響

松井(2006)の方法に準じて調査した。すなわち、各殺虫剤を常用濃度(400~5000倍)に蒸留水で希釈し、マミーカード(蛹数80~100程度)を10秒間浸漬した。各寄生蜂とも3枚のマミーカードを供試した。対照は蒸留水とした。マミーカードは浸漬後、ペーパータオルの上で乾燥し、シャーレ(直径9cm、深さ2cm)に入れ、恒温器内(25℃, 16L8D)に2週間静置した。羽化数と非羽化数を双眼実体顕微鏡(SHZ-U:ニコン)下で数え、薬剤ごとにAbbott(1925)の補正式で死虫率を計算し、次のIOBCの評価基準(Hassan, 1992; Amano and Haseeb, 2001)に基づき4段階に分けた; レベル1(死亡率30%以下、影響がない), レベル2(30~79%, 僅かに影響がある), レベル3(80~99%, 中程度に影響がある), レベル4(99%以上、非常に影響がある)。

(4) 寄生蜂の成虫に対する殺虫剤の影響

試験は薄膜法(小澤ら, 1998; 松井, 2006)で行った。すなわち、各殺虫剤をアセトン(99.5%)に溶かし常濃度とし、その0.1mlを管瓶(口内径5.4mm, 胴径11.7mm, 高さ35mm)に投入した後、管瓶を水平に回転させて内面に薄膜を作った。その後、管瓶の底に5%の蜂蜜を染みこませたろ紙(5mm×5mm)を餌として入れた。管瓶あたり10頭の寄生蜂成虫を入れ、管瓶の口をナイロンゴースで覆い、恒温室内(25℃, 16L8D)に静置した。殺虫剤ごと管瓶を6本ずつ供試した。処理24時間後に、生存虫数、死亡虫数を双眼実体顕微鏡(SHZ-U:ニコン)下で数え、Abbott(1925)の補正式で死虫率を計算した。上記のIOBCの評価基準に基づき4段階に分けた。

2. 寄生蜂に対する微生物農薬の影響

(1) 微生物農薬

3種類の微生物農薬(マイコタール®, パータレック®およびボタニガードES®)を供試した。有効成分量はそれぞれ、 3.0×10^9 spores/g, 5.0×10^8 spores/g, および 2.1×10^{10} spores/mlである。各微生物農薬は規定の濃度に蒸留水で希釈して使用した(マイコタール®およびパータレック®は1000倍, ボタニガードES®は500倍)。

(2) 寄生蜂

オンシツツヤコバチ(エンストリップ®)とサバクツヤコバチ(エルカード®)のマミーカード(カード当たりのマミー数80~100頭)を冷蔵庫内(8℃)で数日間保管し使用した。

(3) 寄生蜂のマミーに対する微生物農薬の影響

マミーカードを各微生物農薬の溶液に約10秒間浸漬し、余分な水を払い落とした後、シャーレ(直径9cm, 深さ2cm)内に静置した。対照区として蒸留水を用いた。1剤1回につき1枚の同一の箱のマミーカードを使用した。シャーレはパラフィルムで密封し、6日間恒温器内(25℃, 16L8D)に静置した。羽化数と非羽化数を双眼実体顕微鏡(SHZ-U:ニコン)下で数え、死亡率を算出した。各処理とも3反復で行った。

(4) 寄生蜂の成虫に対する微生物農薬の影響

ろ紙(直径9cm)を各微生物農薬の溶液に約10秒間浸漬し、余分な水を払い落とした後シャーレ内に敷いた。マミーカード1枚をろ紙の上に置きパラフィルムでシャーレの縁を密封し、7日間恒温器内(25℃, 16L8D)に静置した。対照区として蒸留水を用いた。羽化数と非羽化数、死亡成虫数を双眼実体顕微鏡(SHZ-U:ニコン)下で数えた。死亡成虫の体上の糸状菌の有無を確認した。マミーカードは同一の箱のものを使用し、各処理とも3反復で行った。

(5) 統計分析

寄生蜂の羽化率と死亡率は反復ごとに角変換し、寄生蜂の種と微生物農薬の種類の2要因の分散分析(2元配置分散分析)を行った。交互作用が認められた場合は、多重比較検定(Tukey-Kramer test)を行い、交互作用が認められなかった場合は各要因の水準間の多重比較(Tukey-Kramer test および Student's *t* test)を行った。なお、データの解析にはエクセル統計2012(SSRI)またはJMP5(SAS Institute, 2002)を用いた。

結果

1. 寄生蜂のマミーに対する殺虫剤の影響

殺虫剤に浸漬処理した3種の寄生蜂マミーの死亡率をTable 11に示した。IGR剤の4剤(ブプロフェジン剤, シロマジン剤, フルフェノクスロン剤およびルフェヌロン剤), チノメチオネート剤, Bt剤, ピメトロジン剤およびイオウ剤は3種寄生蜂に対して全てレベル1であった。エトフェンプロックス剤, アセフェート剤およびクロルフェナピル剤は3種の寄生蜂の内いずれかに対して

Table 11. The side effects of pesticides on pupae of parasitoids in pupae of whitefly by direct dipping method

pesticides	Formulation (%a.i. & type) ^{a)}	Dilution	<i>Eremiocerus mundus</i>		<i>Eremiocerus eremicus</i>		<i>Encarsia formosa</i>	
			Mortality ^{b)}	Evaluation Categories ^{c)}	Mortality ^{b)}	Evaluation Categories ^{c)}	Mortality ^{b)}	Evaluation Categories ^{c)}
Neonicotinoids								
Acetamiprid	20	S.P. ×2,000	99.3	4	87.9	3	100	4
Clothianidin	16	S.P. ×2,000	100	4	96.1	3	99.6	4
Dinotefuran	20	S.G. ×3,000	98.5	3	79.7	2	99.1	4
Imidacloprid	10	W.P. ×2,000	90.1	3	53.0	2	61.0	2
Nitenpyram	10	S.P. ×1,000	95.5	3	55.1	2	92.2	3
Thiacloprid	30	W.D.G. ×4,000	92.7	3	62.2	2	76.8	2
Synthetic pyrethroids								
Etofenprox	20	E.C. ×1,000	25.0	1	33.7	2	98.2	3
Permethrin	20	E.C. ×2,000	53.5	2	54.3	2	95.7	3
Organophosphates								
Acephate	50	W.P. ×1,000	52.0	2	15.4	1	47.9	2
Fenitrothion	15	E.C. ×2,000	93.7	3	93.1	3	97.4	3
Insect growth regulators								
Buprofezin	40	W.P. ×1,000	23.3	1	13.8	1	0	1
Cyromazine	8.3	S.L. ×1,000	10.1	1	13.9	1	1.7	1
Flufenoxuron	10	E.C. ×2,000	18.4	1	20.1	1	17.6	1
Lufenuron	5	E.C. ×3,000	0	1	0	1	10.8	1
Acaricides								
Chinomethionat	25	W.P. ×1,500	23.0	1	9.6	1	13.1	1
Milbemectin	1	E.C. ×1,500	72.0	2	67.4	2	42.5	2
Pyridaben	20	F.L. ×1,000	100	4	89.2	3	90.9	3
Others								
Bt	10	W.D.G. ×1,000	0	1	3.8	1	6.9	1
Chlorphenapyr	10	F.L. ×2,000	51.8	2	23.5	1	3.2	1
Emamectin-benzoate	1	E.C. ×2,000	86.7	3	49.8	2	46.8	2
Py metrozine	25	W.P. ×3,000	23.4	1	20.0	1	15.6	1
Spinosad	25	W.D.G. ×5,000	100	4	97.5	3	99.1	4
Tolfenpyrad	15	E.C. ×1,000	100	4	100	4	100	4
Sulfur	52	F.L. ×400	13.2	1	14.6	1	20.4	1

^{a)}S.P.:water soluble powder, W.P.:wetable powder, W.D.G.:water dispersion concentrate, S.G.:soluble granule, E.C.:emulsifiable concentrate, S.L.:soluble concentrate, F.L.:flowable

^{b)}Corrected mortality according to Abbott's formula based on check value

^{c)}Evaluation categories: The results of expressed as safe(1), slightly harmful(2), moderately harmful(3), harmful(4) whereby 1=<30% mortality, 2=30-79% mortality, 3=80-98% mortality, 4=99-100% mortality.

Table 12. The side effects of pesticides on adults of whitefly parasitoids using residual film method.

pesticides	Formulation (%a.i. & type) ^{a)}	Dilution	<i>Eretmocerus mundus</i>		<i>Eretmocerus eremicus</i>		<i>Encarsia formosa</i>	
			Mortality ^{b)}	Evaluation Categories ^{c)}	Mortality ^{b)}	Evaluation Categories ^{c)}	Mortality ^{b)}	Evaluation Categories ^{c)}
Neonicotinoids								
Acetamiprid	20 S.P.	×2,000	100	4	100	4	100	4
Clothianidin	16 S.P.	×2,000	100	4	100	4	100	4
Dinotefuran	20 S.G.	×3,000	100	4	100	4	100	4
Imidacloprid	10 W.P.	×2,000	100	4	100	4	100	4
Nitenpyram	10 S.P.	×1,000	100	4	100	4	100	4
Thiacloprid	30 W.D.G.	×4,000	37.3	2	98.3	3	85.3	3
Synthetic pyrethroids								
Etofenprox	20 E.C.	×1,000	100	4	100	4	100	4
Permethrin	20 E.C.	×2,000	—	—	100	4	100	4
Organophosphates								
Acephate	50 W.P.	×1,000	100	4	100	4	100	4
Fenitrothion	15 E.C.	×2,000	100	4	100	4	100	4
Insect growth regulators								
Buprofezin	40 W.P.	×1,000	25.4	1	32	1	1.2	1
Cyromazine	8.3 S.L.	×1,000	19	1	51.3	2	4.4	1
Flufenoxuron	10 E.C.	×2,000	0	1	0	1	0	1
Lufenuron	5 E.C.	×3,000	0	1	8.8	1	0	1
Acaricides								
Chinomethionat	25 W.P.	×1,500	95.6	3	100	4	100	4
Milbemectin	1.0 E.C.	×1,500	—	—	92.6	3	100	4
Pyridaben	20 F.L.	×1,000	100	4	98.3	3	98.5	3
Others								
Bt	10 W.D.G.	×1,000	—	—	0	1	4.9	1
Chlorphenapyr	10 F.L.	×2,000	100	4	—	—	—	—
Emamectin-benzoate	1.0 E.C.	×2,000	100	4	100	4	100	4
Py metrozine	25 W.P.	×3,000	11.7	1	14.8	1	0	1
Spinosad	25 W.D.G.	×5,000	100	4	100	4	100	4
Tolfenpyrad	15 E.C.	×1,000	100	4	100	4	100	4
Sulfur	52 F.L.	×400	—	—	28.3	1	1.6	1

^{a)}S.P.:water soluble powder,W.P.:wetttable powder,W.D.G.:water dispersion concentrate,S.G.:soluble granule,E.C.:emulsifiable concentrate,S.L.:soluble concentrate,F.L.:flowable

^{b)}Corrected mortality according to Abbott's formula based on check value

^{c)}Evaluation categories:The results of expressed as safe(1), slightly harmful(2), moderately harmful(3), harmful(4) whereby 1=<30% mortality, 2=30-79% mortality, 3=80-98% mortality, 4=99-100% mortality.

レベル1であった。ネオニコチノイド系剤のアセタミプリド剤、クロチアニジン剤、ジノテフラン剤、ダニ剤のピリダベン剤、その他の系統のスピノサド剤およびトルフェンピラド剤は3種寄生蜂の内いずれかに対してレベル4であった。

2. 寄生蜂の成虫に対する殺虫剤の影響

殺虫剤の薄膜処理した3種の寄生蜂成虫の死亡率をTable 12に示した。IGR剤の3剤（プロフェジン剤、フルフェノクスロン剤およびルフェヌロン剤）およびピメトロジン剤は3種寄生蜂に対して全てレベル1であった。Bt剤およびイオウ剤はサバクツヤコバチとオンシツツヤコバチに対してレベル1であった。IGR剤のシロマジジン剤はチチュウカイツヤコバチとオンシツツヤコバチに対してレベル1であったが、サバクツヤコバチに対してレベル2であった。ネオニコチノイド系剤、合成ピレスロイド系剤、有機リン系剤、ダニ剤およびその他の系統剤（クロルフェナピル剤、エマメクチン安息香酸塩剤、スピノサド剤およびトルフェンピラド）はいずれも3種寄生蜂に対してレベル3またはレベル4であった。

3. 寄生蜂のマミーに対する微生物農薬の影響

微生物農薬に浸漬処理した寄生蜂マミーの羽化率をTable 13に示した。マミー表面に菌糸が観察された (Fig. 28)。寄生蜂の羽化率に対する2要因の分散分析の結果、寄生蜂の間で有意な差はなかったが ($F_{1,16} = 1.580$, $p = 0.227$)、微生物農薬間では有意な差があった ($F_{3,16} = 73.382$, $p < 0.0001$)。寄生蜂と微生物農薬間の相互作用は認められなかった ($F_{3,16} = 0.514$, $p = 0.678$)。マイコタール®の羽化率 (40.5~40.6%) とバータレック®の羽化率 (55.1~56.2%) および対照 (19.3~60.4%) には有意な差がなかった (Tukey-Kramer HSD test, $p < 0.05$)。ボタニガード ES® の羽化率はマイコタール®, バータレック® および対照に比べ有意に低かった ($p < 0.05$)。

4. 寄生蜂の成虫に対する微生物農薬の影響

微生物農薬の寄生蜂の成虫に対する死亡率をTable 14に示した。死亡した成虫の体上に菌糸が観察された (Fig. 29)。寄生蜂の羽化率について2要因の分散分析の結果、寄生蜂の羽化率は種により有意に異なったが ($F_{1,16} = 4.84$, $p = 0.04$)、微生物農薬間では有意な差はなかった

Table 13 Emergence rates of aphelinid species pupae following treatment with mycoinsecticides

Parasitoid species	Product (Entomopathogenic fungus)	No. of parasitoids mummy tested	No. of emerged parasitoids	Emergence rate (%)
<i>Encarsia formosa</i>	Mycotal® (<i>L. muscarium</i>)	81.7 ± 6.1	32.7 ± 2.0	40.6 ± 4.6 aA
	Vertalec® (<i>L. longisporum</i>)	87.7 ± 7.1	47.7 ± 6.9	55.1 ± 8.4 aA
	BotaniGard ES® (<i>B. bassiana</i>)	87.3 ± 2.6	2.0 ± 0.6	2.3 ± 0.6 bA
	Water (Control)	79.7 ± 6.8	39.0 ± 2.6	49.3 ± 3.5 aB
<i>Eretmoserus eremicus</i>	Mycotal® (<i>L. muscarium</i>)	86.0 ± 5.5	35.3 ± 6.9	40.5 ± 6.1 aA
	Vertalec® (<i>L. longisporum</i>)	81.3 ± 4.8	45.3 ± 0.9	56.2 ± 4.0 aA
	BotaniGard ES® (<i>B. bassiana</i>)	92.7 ± 8.7	5.3 ± 3.4	5.2 ± 2.9 bA
	Water (Control)	79.0 ± 1.5	47.7 ± 0.7	60.4 ± 1.2 aA

The different lower case letters refers to significance of the difference between entomopathogenic fungus within same parasitoid (two-factor ANOVA followed by Tukey Kramer HSD test, $p < 0.05$). The different upper case letters refers to significance of the difference between parasitoids within same entomopathogenic fungus (two-factor ANOVA followed by Student t test, $p < 0.05$).

Table 14 Emergence rates and mortalities of aphelinid species adults following treatment with mycoinsecticides

Parasitoid	Product (Entomopathogenic fungus)	No. of parasitoids mummy tested	No. of emerged parasitoids	Emergence rate (%) ^a	No. of infected dead parasitoids	Mortality (%) ^b
<i>Encarsia formosa</i>	Mycotal [®] (<i>L. muscarium</i>)	77.0 ± 2.3	35.7 ± 6.6	45.9 ± 7.3 aA	27.0 ± 5.0	75.8 ± 4.6 a
	Vertalec [®] (<i>L. longisporum</i>)	79.0 ± 2.3	37.7 ± 4.1	47.9 ± 5.7 aA	11.0 ± 1.5	29.2 ± 2.5 bc
	BotaniGard ES [®] (<i>B. bassiana</i>)	78.7 ± 2.9	37.7 ± 3.5	47.7 ± 2.9 aA	34.0 ± 3.1	90.3 ± 1.1 a
	Water (Control)	76.7 ± 3.8	42.3 ± 5.4	56.1 ± 9.6 aA	12.0 ± 2.6	30.5 ± 10.2 bc
<i>Eretmocerus eremicus</i>	Mycotal [®] (<i>L. muscarium</i>)	83.0 ± 7.6	39.7 ± 4.8	47.6 ± 2.3 aA	35.3 ± 3.9	89.3 ± 0.9 a
	Vertalec [®] (<i>L. longisporum</i>)	86.0 ± 5.2	33.7 ± 3.0	39.1 ± 2.5 aA	20.7 ± 2.9	61.9 ± 8.1 ab
	BotaniGard ES [®] (<i>B. bassiana</i>)	80.7 ± 6.8	32.7 ± 4.1	40.3 ± 2.1 aA	26.7 ± 6.6	79.0 ± 11.1 a
	Water (Control)	78.0 ± 7.1	30.3 ± 3.4	38.8 ± 1.6 aA	6.3 ± 1.2	22.1 ± 5.7 c

a) The different lower case letters refers to significance of the difference between entomopathogenic fungus within same parasitoid (two-factor ANOVA followed by Tukey Kramer HSD test, $p < 0.05$). The different upper case letters refers to significance of the difference between parasitoids within same entomopathogenic fungus (two-factor ANOVA followed by Student t test, $p < 0.05$).

b) The combination of all parasitoids and entomopathogenic fungus were compared (Tukey Kramer HSD test, $p < 0.05$). There is no significant difference between the same characters.



Fig. 28. The pupae of *Eretomocerus eremicus* after BotaniGardES® treatment.

($F_{3,16} = 0.31$, $p = 0.82$)。また、死亡率に寄生蜂間では有意な差はなかったが ($F_{1,16} = 1.69$, $p = 0.21$)、微生物農薬間では有意な差が認められた ($F_{3,16} = 33.68$, $p < 0.01$)。また、寄生蜂と微生物農薬間で交互作用が認められたため ($F_{3,16} = 4.07$, $p = 0.03$)、寄生蜂と微生物農薬の全ての組み合わせによる多重比較検定を行ったところ、マイコタール®のオンシツツヤコバチとサバクツヤコバチの死亡率 (それぞれ 75.8%, 89.3%)、ボタニガード ES® を処理したときのオンシツツヤコバチとサバクツヤコバチの死亡率 (それぞれ 90.3 %, 79.0 %) はバータレック® を処理したオンシツツヤコバチの死亡率 (29.2%) と対照の死亡率 (30.5%) に比べ有意に高かった (Tukey-Kramer HSD test, $p < 0.05$)。組み合わせによる多重比較検定を行ったところ、マイコタール® のオンシツツヤコバチとサバクツヤコバチの死亡率 (それぞれ 75.8%, 89.3%)、ボタニガード ES® を処理したときのオンシツツヤコバチとサバクツヤコバチの死亡率 (それぞれ 90.3 %, 79.0 %)



Fig. 29. The adult of *Eretomocerus eremicus* after Myctal® treatment.

はバータレック® を処理したオンシツツヤコバチの死亡率 (29.2%) と対照の死亡率 (30.5%) に比べ有意に高かった (Tukey-Kramer HSD test, $p < 0.05$)。

考察

河合 (1988) と林 (1996) はブプロフェジン剤, Bt 剤およびイオウ剤はオンシツツヤコバチの成虫とマミーに影響はないと報告しており、本試験も同様の結果であった。また、これらの殺虫剤はサバクツヤコバチとチチュウカイツヤコバチの成虫とマミーに対して影響が小さいことが明らかになった (Table 11, 12)。これまで影響が不明であった IGR 剤のフルフェノクスロン剤とルフェエロン剤は 3 種寄生蜂の成虫とマミーに対する影響は小さいことが明らかになった (Table 11, 12)。チノメチオネート剤はオンシツツヤコバチの成虫にほとんど影響がないと報告しているが (河合, 1988 ; 林, 1996), 本試験では成虫に対しては影響がみとめられた (Table 11, 12)。また、ネオニコチノイド系剤, 合成ピレスロイド系剤および有機リン系剤はオンシツツヤコバチの成虫とマミーに対して影響があると報告されているが (河合, 1988 ; 林, 1996), 本試験でも同様の結果が得られた (Table 11, 12) ことから、寄生蜂と併用できないと考えられる。

昆虫病原性糸状菌はオンシツツヤコバチとサバクツヤコバチのマミーに感染しにくいと報告されている (Fransen and van Lenteren, 1993 ; Shipp et al., 2003)。本試験でもマイコタール® とバータレック® はマミーに感染しなかった (Table 13)。しかし、ボタニガード ES® の羽化率はマイコタール® とバータレック® に比べ有意に低く (Table 13)、マミーに感染したものと考えられる。オンシツツヤコバチとサバクツヤコバチの成虫に対する昆虫病原性糸状菌の感染は高湿度環境下で高まる (Faria and Wraight, 2001 ; Ludwing and Oetting, 2001)。本試験はシャーレ内の高湿度環境下 (95%RH) で行ったため、感染しやすかったのかもしれない。

以上のように殺虫剤や昆虫病原性糸状菌によっては寄生蜂に大きな影響を与える可能性がある。寄生蜂を利用する場合、寄生蜂に影響の大きい剤を使わない防除体系の構築が重要であるが、影響の大きい剤を使用する場合は、その影響を低減させるための工夫を別途検討する必要がある。

第5章 総合考察

コナジラミ類、アザミウマ類、ハモグリバエ類など微小害虫は、微小、広食性、高い増殖率、殺虫剤抵抗性といった共通の特徴を持ち、これら害虫による温室栽培作物の被害が問題となっている (Stansly and Naranjo, 2010)。その対策として殺虫剤と天敵を組み合わせた IPM が主流となっている (Heinz et al., 2004 ; Stansly and Naranjo, 2010)。IPM では経済的被害許容水準 (EIL) の概念と種々の技術を組み合わせることの重要性が強調され、要防除水準により防除が行われる。たとえば、オンシツコナジラミのトマトの要防除水準は株あたり成虫約 25 頭 (中沢ら 1979)、タバココナジラミのメロンでは葉あたり成虫 50 頭 (広瀬, 1997) とされている。しかし、こうした従来の IPM はすでに発生している害虫を対象としたものであり、被害を未然に防止するという観点からは必ずしも十分とは言えない。たとえば、TYLCV を媒介するコナジラミ類の場合、ごくわずかな個体でも温室内に侵入してしまえば、ウイルス病が蔓延しかねない (第2章)。このため、温室栽培における IPM の策定に当たっては、まず害虫の侵入防止策を講じることが先決である。そこで、本研究ではコナジラミ類の侵入防止策として強制換気システムを検討した (第3章)。そのうえで、温室内で発生してしまったコナジラミ類に対しては寄生蜂を用いた生物的防除法 (第4章) さらに寄生蜂と併用できる殺虫剤と昆虫病原性糸状菌を検討した (第4章)。本章では、これらの研究成果を基にして新しい IPM を提案したい。

温室内に害虫を侵入させない温室構造の基本は開口部への防虫ネットの展張である。現行の温室では 1.0 mm 目合いの防虫ネットが展張されているが、この防虫ネットでは TYLCV を保毒したコナジラミ類が温室内に侵入してしまうため (第2章)、コナジラミ類を侵入させないより細かな目合いの防虫ネットが必要である。本研究によって 0.38 mm 目合いの防虫ネットに高い侵入防止効果があることが明らかとなった (第3章)。しかし、屋外からの風圧力と温室内外の気温差によって換気される現行の自然換気温室 (Bournet and Boulard, 2010; 佐瀬, 2015) では、細かな目合いの防虫ネットほど換気効率は落ちて高温・多湿となりやすい (Sase and Christianson, 1990 ; Montero et al., 1996 ; Muoz et al., 1999)。その結果、作物の生育に悪影響を及ぼすことになる (高橋, 1977 ; Díaz and Fereres, 2007)。一方、強制換気は自然換気に比べ空

気の交換効率が高い (Ganguly and Ghosh, 2011)、除湿効果もある (Hu et al., 2013)。こうしたことから、強制換気は特に防虫ネットを展張する温室に適している (Kittas and Katsoulas, 2005 ; Flores-Velazquez et al., 2014)。一般的な陰圧式強制換気は害虫が温室の隙間から温室内に容易に侵入できるが、陽圧式強制換気は空気が温室の隙間から外へ出るため害虫の侵入は少ないとされている (Berlinger and Lebiush-Mordechi, 1996 ; 辻, 2007)。陰圧式強制換気温室は自然換気温室に比べ TYLCV の発生が高いという報告がある (Berlinger and Lebiush-Mordechi, 1996)。本研究において、陽圧式強制換気システム (換気扇: 直径 0.8m, 風量 350 m³/m (400w), 吸気ダクト 0.4 mm × 0.2 mm 目合いの防虫ネット, 天窓・側窓 1mm 目合いの防虫ネットを展張) では TYLCV の発生は認められず、さらに室内の温度は自然換気 (天窓・側窓 1mm 目合いの防虫ネットを展張) のそれに比べ 2~3℃ 低くなることがわかった (第3章 第3節)。陽圧式強制換気は害虫の侵入防止と換気効率の向上の両面を兼ね備えた優れたシステムと考えられる。

次に、温室内に侵入してしまった害虫に対する防除対策について考察する。オンシツツヤコバチ、サバクツヤコバチ、チチュウカイツヤコバチはいずれもタバココナジラミの密度を低下させることが明らかになったが、寄生蜂の防除効果は季節によりやや異なったことから (第4章 第1節)、次に述べるような利用法が考えられる。初夏は、いずれの寄生蜂を利用してもパイオタイプ B の防除は可能と考えられる。一方、夏季はパイオタイプ B の増殖率が高まるため寄生蜂の放飼量を通常より多くする必要があり、春季の低温期は寄生蜂の適温に温室内環境を管理することが必要である。寄生蜂はコナジラミ類幼虫への寄生のほか、蔵卵のための栄養摂取の行動であるホストフィーディング (寄主体液摂取行動) により密度を抑制する。本研究で供試した 3 種のツヤコバチ類でもこのような行動は報告されている (Headrick et al., 1995, 1996 ; van Lenteren et al., 1980)。オンシツツヤコバチのホストフィーディングの割合は 20% と比較的高く、チチュウカイツヤコバチでは 7~9% と推定されている (van Lenteren et al., 1996 ; Urbaneja et al., 2007)。本研究では供試したチチュウカイツヤコバチのうち 14 個体 (4.7%) のホストフィーディングが観察された (第4章 第2節)。実際の温室におけるツヤコバチ類の防除効果は

寄生とホストフィーディングの両方の効果によるものと考えられる。

チチュウカイツヤコバチはタバココナジラミの若齢幼虫によく寄生するが (第4章 第2節), 実際の温室ではいろいろな齢期の幼虫が混在している。このため, ヨーロッパでは3 齢と4 齢初期のコナジラミを好むオンシツツヤコバチ (Arnó, et al., 2009) と若齢幼虫を好むチチュウカイツヤコバチやサバクツヤコバチの組合せによる防除が行われている (Qiu, et al., 2004)。この場合, 本研究で開発したマルチプレックス PCR 法を用いれば各寄生蜂の寄生率を容易に調べることができよう (第4章 第3節)。スペイン, アメリカおよびオーストラリアでは, 土着の *Eretmocerus* 属の寄生蜂が導入した寄生蜂に置き換わったことが報告されている (Stansly and Natwick, 2009)。国内ではコナジラミ類の土着寄生蜂 *Encarsia transvena* (Tinberlake) などが知られているが (梶田, 1980; Kajita, 2000; 小澤ら, 1992), 本マルチプレックス PCR 法を応用することでこれらの識別が可能であると期待される。

これまで, オンシツツヤコバチと併用可能な殺虫剤が選抜されているが (例えば, Hassan and Van de Veire, 2005; 松井, 2006), チチュウカイツヤコバチおよびサバクツヤコバチに対する殺虫剤の影響は十分にわかっていなかった。本研究によってこれら3 種の寄生蜂と併用できる殺虫剤として IGR 剤, Bt 剤, ピメトロジン剤およびイオウ剤が選抜された (第4章 第4節)。一方, ネオニコチノイドなどその他の剤の多くには悪影響が認められ, 寄生蜂と同時に使用できないとみられる (第4章 第4節)。悪影響の大きい殺虫剤については育苗期や定植直後など栽培初期に利用し, 寄生蜂への影響が小さくなってから寄生蜂を放飼することになろう (河合, 1988; 林, 1996; 松井, 2006)。

微生物農薬 (マイコタール®, バータレック®およびボタニガード ES®) はボタニガード ES®を除いて, 寄生蜂の羽化に影響を与えないが, 寄生蜂の成虫に感染するため (第4章 第4節), 微生物農薬の散布と寄生蜂の放飼の時期をずらすなどの工夫が必要となろう。たとえば, 寄生蜂放飼の4 日から5 日後に微生物農薬の散布, または, 微生物農薬の散布2 日後に寄生蜂を放飼が可能である (Avery et al., 2008; Fransen and Van Lenteren, 1993; Van Lenteren and Fransen, 1994)。微生物農薬の感染を促進するため, 温度, 湿度などの環境要因を複合的に制御する環境複合制御装置を強制換気温室に導入することも考えられる。

さらに, コナジラミ類の屋外からの侵入を抑制するため, 温室周辺のコナジラミ類の寄主作物や雑草の管理,

害虫の生態的な特性を利用した防除資材, たとえば, 光反射シート (戸田ら, 2009), 黄色粘着長尺フィルム (徳丸 2009), 近紫外線除去フィルム (Antignus, 2000; Antignus et al., 2001; Kumar・Poehling, 2006; 太田・武田, 2014) の利用, また, 栽培終了時の蒸し込みや残渣処理 (西野ら, 2008; 松野ら, 2008; 水越ら, 2007; 本多, 2010) などを IPM と組み合わせることで侵入抑制効果は高まると考えられる。

本研究の結果, 静岡県内の主要な温室作物に発生しているコナジラミ類はバイオタイプ B が主体で, TYLCV を高率に保毒していることが明らかとなった。このコナジラミ類対策として, 最も重要なことは温室内にコナジラミ類を侵入させないことであり, この点において強制換気システムは極めて有効と考えられる。温室内に侵入してしまったコナジラミ類に対しては寄生蜂を利用する生物防除法を基本技術に据え, そのうえで必要に応じて寄生蜂に悪影響を及ぼさない殺虫剤や昆虫病原性糸状菌を利用する手法を提案したい。

第6章 摘要

温室栽培ではコナジラミ類、ハモグリバエ類、アザミウマ類などの海外から侵入した殺虫剤抵抗性の発達した微小害虫による被害が問題となっている。このうち、コナジラミ類のオンシツコナジラミ *Trialeurodes vaporariorum* (Westwood) とタバココナジラミ *Bemisia tabaci* (Gennadius) は、排泄された甘露に発生したすす病による葉や果実の汚損、吸汁による生育阻害、果実の着色異常などの被害を与えるほか、病原ウイルスを媒介することから重要害虫となっている。本研究ではコナジラミ類を対象とし、温室栽培の強制換気システムによる侵入防止と寄生蜂による生物的防除法を組み合わせた新しい総合的病害虫管理 (IPM) を提案する。

静岡県内の主要な温室作物 (トマト、メロン、トルコギキョウおよびポインセチア) では、タバココナジラミ バイオタイプ B (以下、バイオタイプ B) が最も多く 48 温室中 30 温室で発生し、トマトの 23 温室中 9 温室では、トマト黄化葉巻ウイルス *Tomato yellow leaf curl virus* (TYLCV) の保毒虫が 56~100% の割合で確認され、従来の温室構造ではコナジラミ類の侵入を防ぐことは難しいと考えられた。また、寄生蜂のオンシツツヤコバチ *Encarsia formosa* Gahan と殺虫剤を組合せた従来の IPM では、6 月以降コナジラミ類が多発し密度を低く抑制できなかった。このため、温室栽培における害虫対策では、害虫を侵入させない温室構造と温室内で発生した害虫対策が重要であると考えられた。

害虫を侵入させない温室構造は防虫ネットの展張が基本である。目合いの大きさが 0.38 mm 以下の防虫ネットは従来の 1.0 mm の防虫ネットに比べタバココナジラミの通過率は有意に低かった。自然換気温室において防虫ネットの目合いを小さくすることで害虫の侵入防止効果は高まるが換気効率は下がるため、夏季の昇温抑制のために開発された強制換気システムとの組み合わせを検討した。陰圧式強制換気と寄生蜂のサバクツヤコバチ *Eretmocerus eremicus* Rose & Zolnerowich を組み合わせた IPM は寄生蜂の寄生率の低下は認められず、寄生蜂の探索行動に換気による風速 1~2 m/s の風の影響はなかったと考えられた。陰圧式に比べ害虫の侵入が少ないとされる陽圧式強制換気温室では、コナジラミ類の侵入が僅かにみられたが TYLCV の発生はなく、温室内の温度は自

然換気温室に比べ 2~3℃ 低く昇温抑制効果があった。

温室内で発生した害虫対策としては寄生蜂による生物的防除法を検討した。生物農薬として登録されている 3 種の寄生蜂 オンシツツヤコバチ、サバクツヤコバチとチチュウカイツヤコバチ *Eretmocerus mundus* (Mercet) のバイオタイプ B に対する防除効果を同時に比較したところ、全ての寄生蜂は対照に比べバイオタイプ B を有意に低く抑制したが、その程度は季節により異なった。タバココナジラミに対する寄主探索能、産卵能が高いとされるチチュウカイツヤコバチの選好性や産卵行動を明らかにするため本種の産卵行動を調査した。本種はバイオタイプ B、タバココナジラミ バイオタイプ Q および オンシツコナジラミの 1~4 齢幼虫に産卵したが、1~3 齢幼虫に対する総産卵時間 (96~231 秒) が 4 齢幼虫 (288~522 秒) より有意に短く好適であることが明らかになった。寄生蜂にはそれぞれ選好するコナジラミ類の幼虫齢があることから、複数の寄生蜂の同時放飼による防除が考えられる。この場合、寄生蜂の寄生率を把握することが必要となるため、1 回の PCR で 3 種の寄生蜂を容易に識別できるマルチプレックス PCR 法を開発した。

コナジラミ類の多発やそれ以外の害虫が発生した場合に殺虫剤の散布が必要となるため、上記 3 種の寄生蜂に対する主要な殺虫剤 (24 剤) の影響を検討した。その結果、IGR 剤、ピメトロジン剤、Bt 剤およびイオウ剤は寄生蜂に対する影響が小さく、ネオニコチノイド系剤などは影響が大きいことが明らかになった。一方、昆虫病原性糸状菌の微生物農薬は寄生蜂の成虫に感染するが、ボタニガード ES® 剤を除いて、寄生蜂の羽化率に影響しないことが明らかになった。これら影響の小さな殺虫剤については寄生蜂と併用できると考えられた。

これらの結果から、0.38 mm 目合いの防虫ネットを展張した陽圧式強制換気温室はコナジラミ類の侵入防止と昇温抑制を兼ね備えた温室構造と考えられた。また、温室内で発生したコナジラミ類に対して、寄生蜂あるいは寄生蜂と殺虫剤の併用が有効と考えられた。温室栽培におけるコナジラミ類に対して強制換気システムを基幹防除技術としたうえで、必要に応じて生物的防除法と化学的防除法を組み合わせる防除体系を新しい IPM として提案する。

Summary

Studies on Integrated Pest Management (IPM) of Whitefly in Greenhouses

Small insect pests, such as whiteflies, leafminers, and thrips, have been developing insecticide resistance. These pests invaded from overseas and they have been causing extensive damage to ornamental and vegetable crops in greenhouses (e.g., tomatoes), either by causing direct physical damage or through the transmission of plant viruses. Among these insects, the whiteflies, *Trialeurodes vaporariorum* (Westwood) and *Bemisia tabaci* (Gennadius), are serious pests that spread black sooty mold, which damages fruits, as well as transmitting *tomato yellow leaf curl virus* (TYLCV) in tomatoes. The aim of this study was to develop a new integrated pest management (IPM) method that combines intrusion prevention measures (forced air ventilation system) and biological control (parasitoids) to prevent whiteflies from becoming established in greenhouses.

First, to identify the whitefly species in greenhouses that are used to produce major horticultural crops (e.g., tomato, melon, strawberry, showy prairie gentian, and poinsettia), the current viruliferous whitefly TYLCV status and efficacy of conventional IPM methods was assessed in Shizuoka Prefecture, Japan. The initial findings showed that the *Bemisia tabaci* B biotype occurred in 30 of 48 (63%) horticultural greenhouses. The percentage of the TYLCV viruliferous *B. tabaci* B biotype in 9 of 23 (39%) tomato greenhouses ranged from 56 to 100%. Conventional IPM methods in 2002, such as combining the parasitoid, *Encarsia formosa* Gahan, with insecticides inhibited whitefly species densities from August to June but failed to decrease whitefly species densities since June. In addition, preventing the invasion of whiteflies in conventionally structured greenhouses was difficult because, although these greenhouses have insect-proof screens on the roofs and sides, the mesh size of these nets was too coarse. It was therefore considered that a greenhouse structure that is impervious to insect pests, combined with methods for controlling insect pests that arise inside the greenhouse, are both important for developing IPM measures in greenhouse cultivation.

Altering the greenhouse structure so that it is more impervious to insect pests essentially requires the extension of insect-proof screens. For example, significantly fewer *B. tabaci* B biotype individuals passed through a screen with a mesh size of 0.38×0.38 mm (0.9%) compared to a conventional coarse-screened mesh size of 1.00×0.93 mm (79.0%). The effect of combining a screen with a fine mesh and a forced ventilation system, employed to moderate temperature increases in summer, was investigated. Because the inverse relationship that exists between the increased efficacy of pest exclusion and the decrease in ventilation efficiency due to the small mesh size in naturally ventilated greenhouses.

An IPM method combining a negative-pressure ventilation system and the parasitoid, *Eretmocerus eremicus* Rose & Zolnerowich, showed that there was no reduction in the rate of parasitoid parasitism in a naturally ventilated greenhouse. In addition, the findings showed that ventilation (wind speed: 1 to 2 m/s) had no effect on parasitoid

exploratory behavior. In a positive-pressure, forced-ventilation greenhouse, there was a slight increase in the number of whiteflies, but TYLCV did not occur. The temperature inside the greenhouse was 2 to 3°C lower than that of a naturally ventilated control greenhouse, and a temperature moderating effect was observed in the greenhouse.

Biological control using parasitoids against whiteflies that were generated in the greenhouse was also studied. The efficacy of three parasitoid, *En. formosa*, *Er. eremicus*, and *Er. mundus*, were compared by using simultaneous trials in separate naturally ventilated greenhouses. The results showed that all of the parasitoids suppressed *B. tabaci* B biotype to levels significantly below the levels observed in the control; however, the efficacy of each agent varied depending on the season. Since *E. mundus* was expected to be the most efficient parasitoid for controlling *B. tabaci*, the host-handling behavior of this parasitoid on *B. tabaci* B biotype, Q biotype, and *T. vaporariorum* was compared. The parasitoid oviposited on the first to forth instar nymphs of *B. tabaci* B biotype, Q biotype and *T. vaporariorum* with markedly higher incidence of oviposition on the younger instar stages of *B. tabaci* B and Q biotypes. The total handling time for this parasitoid when laying an egg on first to third instar nymphs (96 to 231 s) was shorter than the handling time on fourth instar nymphs (288 to 522 s). Since parasitoids prefer to oviposit for host nymphs at different stages of development. Thus, to control whitefly using several parasitoids simultaneously it is necessary to accurately clarify the parasitoid parasitism rate and a multiplex PCR method capable of distinguishing between the three parasitoids in a single PCR run was developed.

If whiteflies or other pests frequently occur in a greenhouse, then spraying with insecticides may occasionally be necessary. However, for successful biocontrol of whiteflies by parasitoids, careful consideration needs to be given to the pesticides that can be used in conjunction with specific parasitoids. The toxicity of 24 insecticides used for the biological control of whiteflies was therefore evaluated for *En. formosa*, *Er. eremicus*, and *Er. mundus* using the residual film method for adults and the dipping method for pupae. The results showed that mortality due to insect growth regulators, *Bacillus thuringiensis*, pymetrozine, and sulfur was less than 30% for adults and pupae of all three species, indicating that the parasitoids were not severely affected by these insecticides. Neonicotinoids, synthetic pyrethroids, organophosphates, etc., were moderately to seriously harmful (> 92% mortality) to adult parasitoids.

In biological control experiments combining parasitoids and entomopathogenic fungi against whiteflies, the fungi can infect the parasitoids and decrease the efficacy of the method. The effect of three microbial pesticides, Mycotal®, Vertalec®, and BotaniGard ES®, on the parasitoids *En. formosa* and *Er. eremicus* was evaluated under laboratory conditions. The results showed that while the microbial pesticides affected parasitoid adults, except for BotaniGard ES®, they did not affect the emergence of parasitoids. Of the insecticides and microbial pesticides tested, those with relatively minor effects could be used in combination with parasitoids.

These findings clearly show that the combination of a forced-ventilation greenhouse and an insect-proof screen with a mesh size of 0.38 mm can prevent whitefly intrusion and suppress temperature increases. Thus, the use of several parasitoids, or combining parasitoids and insecticides, is effective for combatting whiteflies in a greenhouse. As a new IPM method, I propose using a forced ventilation system as the core control methodology for controlling whiteflies in greenhouse horticulture, and combining this system with biological and chemical control methods, if necessary.

引用文献

- Abbott, W. S. (1925) A method of computing the effectiveness of an insecticide. *Journal of Economic Entomology* 18: 265–267.
- Amano, H. and M. Haseeb (2001) Recently-proposed methods and concepts of testing the effects of pesticides on the beneficial mite and insect species: study limitations and implications in IPM. *Applied Entomology and Zoology* 36: 1–11.
- Antignus, Y. (2000) Manipulation of wavelength-dependent behaviour of insects: an IPM tool to impede insects and restrict epidemics of insect-borne viruses. *Virus Research* 71: 213–220.
- Antignus, Y., D. Nestel, S. Cohena and M. Lapidot (2001) Ultraviolet-deficient greenhouse environment affects whitefly attraction and flight-behavior. *Environmental Entomology* 30: 394–399.
- 青木克典 (1994) エダマメにおけるタバココナジラミの防除対策. 関西病虫害研究会報 36: 43–44.
- Ardeh, M. J., P. W. de Jong and J. C. van Lenteren (2005) Selection of *Bemisia* nymphal stages for oviposition or feeding, and host-handling times of arrhenotokous and thelytokous *Eretmocerus mundus* and arrhenotokous *E. eremicus*. *BioControl* 50: 449–463.
- Arnó, J., R. Gabarra, T. X. Liu, A. M. Simmons and D. Gerling (2009) Natural enemies of *Bemisia tabaci*: predators and parasitoids. In *Bemisia: Bionomics and Management of a Global Pest* (Stansly, P. A. and S. E. Naranjo, eds.). Springer, Netherlands, pp. 385–421.
- Avery, P. B., J. Faull and M. S. Simmonds (2008) Effects of *Paecilomyces fumosoroseus* and *Encarsia formosa* on the control of the greenhouse whitefly: preliminary assessment of a compatibility study. *BioControl* 53: 303–316.
- Bell, M. L. and J. R. Baker (2000) Comparison of greenhouse screening materials for excluding whitefly (Homoptera: Aleyrodidae) and thrips (Thysanoptera: Thripidae). *Journal of Economic Entomology* 93: 800–804.
- Berlinger, M. J. and S. Lebiush-Mordechi (1996) Physical methods for the control of *Bemisia*. In : *Bemisia 1995: Taxonomy, Biology, Damage Control and Management* (Gerling, D. ed.). Intercept, Andover, UK, pp. 617–634.
- Bethke, J., R. Redak and T. Paine (1994) Screens deny specific pests entry to greenhouses. *California Agriculture* 48: 37–40.
- Bethke, J. A. and T. D. Paine (1991) Screen hole size and barriers for exclusion of insect pests of glasshouse crops. *Journal of Entomological Science* 26: 169–177.
- Bournet, P. E. and T. Boulard (2010) Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouses: A review of experimental and CFD studies. *Computers and Electronics in Agriculture* 74: 195–217.
- Boykin, L. M., C. D. Bell, G. Evans, I. Small and P. J. De Barro (2013) Is agriculture driving the diversification of the *Bemisia tabaci* species complex (Hemiptera: Sternorrhyncha: Aleyrodidae)? Dating, diversification and biogeographic evidence revealed. *BMC Evolutionary Biology* 13: 228.
- Brødsgaard, H. F. (2004) Biological control of thrips-ornamentals. In *Biocontrol in Protected Culture* (Heinz, K. M., R. G. van Driesche and M. P. Parrella, eds.). Ball Publishing, Batavia, IL, USA. pp. 253–264.
- Brown, J. K. (2000) Molecular markers for the identification and global tracking of whitefly vector-Begomovirus complexes. *Virus Research* 71: 233–260.
- Brown, J. K. and J. Bird (1992) Whitefly-transmitted geminiviruses and associated disorders in the Americas and the Caribbean Basin. *Plant Disease* 76: 220–225.
- Buckner, J. S. and J. A. Jones (2005) Transfer of methyl-branched hydrocarbons from the parasitoid, *Eretmocerus mundus*, to silverleaf whitefly nymphs during oviposition. *Comparative Biochemistry and Physiology, Part A: Molecular and Integrative Physiology* 140: 59–65.
- Brown, J. K., D. R. Frohlich and R. C. Rosell (1995) The sweetpotato or silverleaf whiteflies: biotypes of *Bemisia tabaci* or a species complex? *Annual Review of Entomology* 40: 511–534.
- Cornell, H. and D. Pimentel (1978) Switching in the parasitoid *Nasonia vitripennis* and its effect on host competition. *Ecology* 59: 297–308.
- Czosnek, H. and H. Laterrot (1997) A worldwide survey of tomato yellow leaf curl viruses. *Archives of Virology* 142: 1391–1406.
- De Barro, P. J., S. S. Liu, L. M. Boykin and A. B. Dinsdale (2011) *Bemisia tabaci*: a statement of species status. *Annual Review of Entomology* 56: 1–19.
- Diaz, B. and A. Fereres (2007) Ultraviolet-blocking materials as a physical barrier to control insect pests and plant

- pathogens in protected crops. *Pest Technology* 1: 85–95.
- Dinsdale, A., L. Cook, C. Riginos, Y. M. Buckley and P. J. De Barro (2010) Refined global analysis of *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Sternorrhyncha: Aleyrodidae: Aleyrodidae) mitochondrial cytochrome oxidase 1 to identify species level genetic boundaries. *Annals of the Entomological Society of America* 103: 196–208.
- Drost, Y. C., Y. T. Qiu, C. J. A. M. Posthuma-Doodeman and J. C. van Lenteren (2000) Comparison of searching strategies of five parasitoid species of *Bemisia argentifolii* Bellows and Perring (Homoptera: Aleyrodidae). *Journal of Applied Entomology* 124: 105–112.
- Faria, M. and S. P. Wraight (2001) Biological control of *Bemisia tabaci* with fungi. *Crop Protection* 20: 767–778.
- Flores-Velazquez, J., J. I. Montero, E. J. Baeza and J. C. Lopez (2014) Mechanical and natural ventilation systems in a greenhouse designed using computational fluid dynamics. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 7: 1–16.
- Foltyn, S. and D. Gerling (1985) The parasitoids of the aleyrodid *Bemisia tabaci* in Israel: development, host preference and discrimination of the Aphelinid wasp *Eretmocerus mundus*. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 38: 255–260.
- Fransen, J. J. and J. C. van Lenteren (1993) Host selection and survival of the parasitoid *Encarsia formosa* on greenhouse whitefly, *Trialeurodes vaporariorum*, in the presence of hosts infected with the fungus *Aschersonia aleyrodis*. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 69: 239–249.
- Ganguly, A. and S. Ghosh (2011) A review of ventilation and cooling technologies in agricultural greenhouse application. *Iranica Journal of Energy and Environment* 2: 32–46.
- Gillespie, J. J., J. B. Munro, J. M. Heraty, M. J. Yoder, A. K. Owen and A. E. Carmichael (2005) A secondary structural model of the 28S rRNA expansion segments D2 and D3 for chalcidoid wasps (Hymenoptera: Chalcidoidea). *Molecular Biology and Evolution* 22: 1593–1608.
- Gerling, D., D. L. J. Quicke and T. Orion (1998) Oviposition mechanisms in the whitefly parasitoids *Encarsia transvena* and *Eretmocerus mundus*. *BioControl* 43: 289–297.
- Greenberg, S. M., B. C. Legaspi, W. A. Jones and A. Enkegaard (2000) Temperature-dependent life history of *Eretmocerus eremicus* (Hymenoptera: Aphelinidae) on two whitefly hosts (Homoptera: Aleyrodidae). *Environmental Entomology* 29: 851–860.
- Greenberg, S. M., W. A. Jones and T. X. Liu (2002) Interaction among two species of *Eretmocerus* (Hymenoptera: Aphelinidae), two species of whiteflies (Homoptera: Aleyrodidae), and tomato. *Environmental Entomology* 31: 397–402.
- 行徳裕・岡崎真一郎・古田明子・衛藤友紀・溝辺真・久野公子・林田慎一・奥田充 (2009) 新規クリニウイルスによるメロン退緑黄化病 (新称) の発生. 日本植物病理学会報 75: 109–111.
- 芳賀一・土井誠 (2002) 静岡県におけるトマト黄化葉巻病の多発生要因と防除対策. 植物防疫 56: 153–156.
- 浜村徹三 (1999) 各種散布薬剤に対するシルバーリーフコナジラミの感受性 (シルバーリーフコナジラミの薬剤感受性). 野菜・茶業試験場研究報告 14: 177–187.
- Hassan, S. A. (1992) Meeting of the working group "Pesticides and Beneficial Organisms". University of Southampton, UK, September 1991. *IOBC/WPRS Bulletin* 15: 1–3.
- Hassan, S. A. and M. Van de Veire (2004) Compatibility of pesticides with biological control agents. In *Biocontrol in protected culture* (Heinz, R. G., Van Driesche and M. P. Parrella, eds.). Ball Publishing, Batavia, IL, pp. 129–147.
- 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.
- 林英明 (1996) オンシツツヤコバチに対する農薬の影響. 広島県立農業技術センター研究報告 64: 33–43.
- 林英明 (2000) コナジラミ類 (虫害). 農業および園芸 75: 158–173.
- Headrick, D. H., T. S. Bellows Jr and T. M. Perring (1996) Behaviors of female *Eretmocerus sp. nr. californicus* (Hymenoptera: Aphelinidae) attacking *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae) on Cotton, *Gossypium hirsutum*, (Malvaceae) and Melon, *Cucumis melo* (Cucurbitaceae). *Biological Control* 6: 64–75.
- Heinz, K. M. and J. M. Nelson (1996) Interspecific

- Interactions among natural enemies of *Bemisia* in an inundative biological control program. *Biological Control* 6: 384–393.
- Heinz, K. M. and M. P. Parrella (1994) Poinsettia (*Euphorbia pulcherrima* Wild. ex Koltz.) cultivar-mediated differences in performance of five natural enemies of *Bemisia argentifolii* Bellows and Perring, n. sp. (Homoptera: Aleyrodidae). *Biological Control* 4: 305–318.
- Heinz, K. M., R. G. Van Driesche and M. P. Parrella (2004) *Biocontrol in Protected Culture*. Ball Publishing, Batavia, IL, 552 pp.
- Heraty, J. M., J. B. Woolley, K. R. Hopper, D. L. Hawks, J. W. Kim and M. Buffington (2007) Molecular phylogenetics and reproductive incompatibility in a complex of cryptic species of aphid parasitoids. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 45: 480–493.
- 廣田耕作・加藤晋朗・大野徹 (1993) タバココナジラミによるフキ白化症の発生と防除対策. 関西病虫害研究会報 (講演要旨) 35: 111.
- 樋口聡志 (2014) 九州地域におけるタバココナジラミの発生と防除. 日本応用動物昆虫学会誌 58: 333–341.
- 樋口聡志 (2006) 農作物生産の最新技術 熊本県におけるタバココナジラミバイオタイプ Q の発生状況と薬剤の殺虫効果. 今月の農業 50: 84–88.
- Hoddle, M. S., R. G. Van Driesche and J. P. Sanderson (1998) Biology and use of the whitefly parasitoid *Encarsia formosa*. *Annual Review of Entomology* 43: 645–669.
- Hoddle, M. S. and R. G. Van Driesche (1999) Evaluation of inundative releases of *Eretmocerus eremicus* and *Encarsia formosa* Beltsville strain in commercial greenhouses for control of *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae) on poinsettia stock plants. *Journal of Economic Entomology* 92: 811–824.
- Hoddle, M. S., R. G. Van Driesche, J. S. Elkinton and J. P. Sanderson (1998) Discovery and utilization of *Bemisia argentifolii* patches by *Eretmocerus eremicus* and *Encarsia formosa* (Beltsville strain) in greenhouses. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 87: 15–28.
- Horowitz, A. R., K. Gorman, G. Ross and I. Denholm (2003) Inheritance of pyriproxyfen resistance in the whitefly, *Bemisia tabaci* (Q biotype). *Archives of Insect Biochemistry and Physiology* 54: 177–186.
- Horowitz, A. R., S. Kotsedlov, V. Khasdan and I. Ishaaya (2005) Biotypes B and Q of *Bemisia tabaci* and their relevance to neonicotinoid and pyriproxyfen resistance. *Archives of Insect Biochemistry and Physiology* 58: 216–225.
- 外間也子・松井正春・河野伸二・渡嘉敷唯助 (1993) タバココナジラミ新系統の放飼により発生した各種野菜の異常症. 関東東山病害虫研究会年報 40: 217–219.
- 本多健一郎 (2005) トマト黄化葉巻病と媒介コナジラミをめぐる最近の研究情勢. 植物防疫 59: 299–304.
- 本多健一郎 (2010) トマト黄化葉巻病の総合防除マニュアル作成. 植物防疫 64: 657–659.
- Hu, J. S., D. B. Gelmana and M. B. Blackburn (2003) Age-specific interaction between the parasitoid, *Encarsia formosa* and its host, the silverleaf whitefly, *Bemisia tabaci* (Strain B). *Journal of Insect Science* 3: 1–10.
- Hudák, K., J. C. van Lenteren, Y. T. Qiu and B. Péntzes (2003) Foraging behavior of parasitoids of *Bemisia argentifolii* on poinsettia. *Bulletin of Insectology* 56: 259–267.
- 岩崎暁生・春日井健司・岩泉連 (2000) 日本におけるトマトハモグリバエ (*Liriomyza sativae* Blanchard) の新発生. 植物防疫 54: 142–147.
- Ji, Y. J., D. X. Zhang and L. J. He (2003) Evolutionary conservation and versatility of a new set of primers for amplifying the ribosomal internal transcribed spacer regions in insects and other invertebrates. *Molecular Ecology Notes* 3: 581–585.
- 上門隆洋・大藺正史 (2008) タバココナジラミバイオタイプ Q によるサイヤインゲン白化葉の発生. 九州病虫害研究会報 54: 109–111.
- 梶田泰司 (1980) 野外のトマトに寄生したオンシツコナジラミの生存率と在来天敵の働き. 日本応用動物昆虫学会誌 24: 24–26.
- Kajita, H. (2000) Geographical distribution and species composition of parasitoids (Hymenoptera: Chalcidoidea) of *Trialeurodes vaporariorum* and *Bemisia tabaci*-complex (Homoptera: Aleyrodidae) in Japan. *Applied Entomology and Zoology* 35: 155–162.
- Kato K., M. Onuki and K. Hanada (1998) The first occurrence of Tomato yellow leaf curl virus in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) in Japan. *Japanese Journal of Phytopathology* 64: 552–559.
- 加藤公彦 (1999) トマトの新しいウイルス TYLCV の発生. 植物防疫 53: 308–311.
- 勝山直樹・福田富幸・越川兼行・田口義広 (2005) トマ

- ト黄化葉巻ウイルスを媒介するシルバーリーフコナジラミの物理的防除法に関する研究. 岐阜県農業技術研究所研究報告 5: 13-19.
- 河合章 (1988) オンシツツヤコバチに対する殺虫剤及び殺菌剤の影響. 野菜・茶業試験場研究報告 1: 59-67.
- Kittas, C., M. Karamanis and N. Katsoulas (2005) Air temperature regime in a forced ventilated greenhouse with rose crop. *Energy and Buildings* 37: 807-812.
- 小林政信 (2007) コナジラミ類の薬剤感受性の特性. 植物防疫 61: 21-26.
- Kumar, P. and H. M. Poehling (2006) UV-blocking plastic films and nets influence vectors and virus transmission on greenhouse tomatoes in the humid tropics. *Environmental Entomology* 35: 1069-1082.
- 桑原克也・蓼沼優・酒井宏 (2007) 群馬県におけるトマト黄化葉巻病およびタバココナジラミバイオタイプ Q の発生状況. 関東東山病害虫研究会報 2007: 127-132.
- Lee, W., J. Park, G. S. Lee, S. Lee and S. I. Akimoto (2013) Taxonomic status of the *Bemisia tabaci* complex (Hemiptera: Aleyrodidae) and reassessment of the number of its constituent species. *PLoS One* 8: e63817.
- Ludwig, S. W. and R. D. Oetting (2001) Susceptibility of natural enemies to infection by *Beauveria bassiana* and impact of insecticides on *Ipheseius degenerans* (Acari: Phytoseiidae). *Journal of Agricultural and Urban Entomology* 18: 169-178.
- Masuda, K., M. Kato and T. Saito (2016) Reduction in carotenoid and chlorophyll content induced by the sweet potato whitefly, *Bemisia tabaci*. *Scientia Horticulturae* 200: 102-104.
- 松井正春 (1992) タバココナジラミの吸汁によるトマト果実の着色異常. 日本応用動物昆虫学会誌 36: 47-49.
- 松井正春 (1995) 施設栽培トマトでのタバココナジラミ新系統に対するオンシツツヤコバチの密度抑制効果. 日本応用動物昆虫学会誌 39: 25-31.
- 松井正春 (2006) オンシツツヤコバチ (天敵生物等に対する化学農薬の影響評価法). 植物防疫 60: 18-30.
- 松浦明 (2006) 宮崎県におけるタバココナジラミバイオタイプ Q の発生と防除対策. 今月の農業 50: 57-61.
- 松浦明 (2010) タバココナジラミバイオタイプ Q と B における交雑の可能性およびカボチャ白化症の発現能力の差. 九州病害虫研究会報 56: 72-76.
- 松浦明・田村真理子・志摩五月 (2005) シルバーリーフコナジラミに対する防虫ネットの目合いと侵入防止効果との関係. 九州病害虫研究会報 51: 64-68.
- 松野和夫・土井誠・杉山恵太郎・田上陽介・多々良明夫 (2008) 夏期におけるトマト栽培終了時のハウス閉め切りによるコナジラミ類の防除. 関東東山病害虫研究会報 55: 123-128.
- 水越小百合・福田充・中山喜一・深澤郁男・石原良行・山城都 (2007) 促成栽培トマトにおける蒸し込み処理によるコナジラミ類 (タバココナジラミ, オンシツコナジラミ) の防除. 関東東山病害虫研究会報 54: 109-112.
- Montero, J. I., A. P. Munoz and A. Anton (1996) Discharge coefficients of greenhouse windows with insect-proof screens. *International Conference on Greenhouse Technologies* 443: 71-78.
- Monti, M. M., A. G. Nappo and M. Giorgini (2005) Molecular characterization of closely related species in the parasitic genus *Encarsia* (Hymenoptera: Aphelinidae) based on the mitochondrial cytochrome oxidase subunit I gene. *Bulletin of Entomological Research* 95: 401-408.
- 森山秀樹 (2015) 第2章 施設の設計・施工と保守管理. 施設園芸・植物工場ハンドブック ((一社) 日本施設園芸協会 企画・編集) 農文協, 東京, pp. 36-54.
- Muratori, F., A. Le Ralec, G. Lognay and T. Hance (2006) Epicuticular factors involved in host recognition for the aphid parasitoid *Aphidius rhopalosiphii*. *Journal of Chemical Ecology* 32: 579-593.
- Munoz, P., J. I. Montero, A. Antón and F. Giuffrida (1999) Effect of insect-proof screens and roof openings on greenhouse ventilation. *Journal of Agricultural Engineering Research* 73: 171-178.
- Nauen, R., N. Stumpf and A. Elbert (2002) Toxicological and mechanistic studies on neonicotinoid cross resistance in Q-type *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae). *Pest Management Science* 58: 868-875.
- Nauen, R. and I. Denholm (2005) Resistance of insect pests to neonicotinoid insecticides: current status and future prospects. *Archives of Insect Biochemistry and Physiology* 58: 200-215.
- 西野実・北上達・本多健一郎 (2008) タバココナジラミ防除を目的とした栽培終了後の施設密閉処理にお

- けるトマト抜き取り時期の重要性. 関西病害虫研究会報 50:185-187.
- Nufio, C. R. and D. R. Papaj (2001) Host marking behavior in phytophagous insects and parasitoids. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 99: 273-293.
- 大石直記・守谷栄樹 (2004) 高温時期に温室内気温の上昇を抑制する新しい強制換気システム. 農耕と園芸 59: 51-54.
- 大貫正俊・小川哲治・内川敬介・加藤公彦・花田薫 (2004) 九州で発生したトマト黄化葉巻ウイルスの分子的特徴とその特異的検出. 九州沖縄農業研究センター報告 44: 55-77.
- 大井田寛・津金胤昭・久保周子・草川知行・清水喜一・野々宮弘明・風戸治子・中臺敬子 (2007) 千葉県におけるタバココナジラミバイオタイプ Q の発生状況および物理的防除法の検討. 関東東山病害虫研究会報 54: 143-150.
- 大井田寛・津金胤昭 (2008) 千葉県におけるタバココナジラミバイオタイプ Q 成虫の薬剤感受性. 関東東山病害虫研究会報 55: 155-158.
- 大西純 (2009) 新たな展開を見せる TYLCV の虫媒研究—媒介・非媒介虫の比較から見てきた媒介を阻止する障壁の存在. 植物防疫 63: 630-634.
- 大戸謙二 (1990) タバココナジラミの発生とその見分け方. 植物防疫 44: 264-266.
- Okuda, M., S. Okazaki, S. Yamasaki, S. Okuda and M. Sugiyama (2010) Host range and complete genome sequence of *Cucurbit chlorotic yellows virus*, a new member of the genus *Crinivirus*. *Phytopathology* 100: 560-566.
- 太田泉・武田光能 (2014) 紫外線除去フィルムがオンシツコナジラミの移動分散行動に及ぼす影響. 日本応用動物昆虫学会誌 58: 303-312.
- 小澤朗人・西東力・池田二三高 (1998) マメハモグリバエの天敵寄生蜂 *Diglyphus isaea* および *Dacnusa sibirica* に対する各種農薬の影響. 日本応用動物昆虫学会誌 42: 149-161.
- 小澤朗人・佐藤允通・増田壽彦 (1992) 露地サツマイモのタバココナジラミにおける在来寄生蜂の寄生状況. 関東東山病害虫研究会年報 39: 199-200.
- Parrella, M. P. (1987) Biology of *Liriomyza*. *Annual Review of Entomology* 32: 201-224.
- Perring, T. M. (2001) The *Bemisia tabaci* species complex. *Crop Protection* 20: 725-737.
- Qiu, Y. T., J. C. Van Lenteren, Y. C. Drost and C. J. A. M. Postuma-doodeman (2004) Life-history parameters of *Encarsia formosa*, *Eretmocerus eremicus* and *E. mundus*, aphelinid parasitoids of *Bemisia argentifolii* (Hemiptera: Aleyrodidae). *European Journal of Entomology* 101: 83-94.
- Roma, L. G. (2009) *The manual of biocontrol agents: a world compendium* (No. Ed. 5). British Crop Production Council. UK. pp. 278.
- 西東力 (1992a) タバココナジラミによる各種作物の異常症. 今月の農業 36: 69-71.
- 西東力 (1992b) マメハモグリバエのわが国における発生と防除. 植物防疫 46: 103-106.
- 西東力・尾崎丞 (1991) タバココナジラミによって起こるトマト果実の着色異常. 農業及び園芸 66: 747-748.
- Salt, G. (1958) Parasite behaviour and the control of insect pests. *Endeavour* 17: 145-148.
- SAS Institute (2002) JMP statistics and graphics guide, version 5. SAS Institute, Cary, NC.
- 佐瀬勘紀 (2015) 第6章 換気・気流制御 (1) 自然換気. 施設園芸・植物工場ハンドブック ((一社) 日本施設園芸協会 企画・編集). 農文協, 東京, pp. 191-200.
- Sase, S. and L. L. Christianson (1990) Screening greenhouses-some engineering considerations. *American Society of Agricultural Engineers. Paper No. NABEC*, 90-201.
- Schuster, D. J., P. A. Stansly and J. E. Polston (1996) Expressions of plant damage by *Bemisia*. In: *Bemisia 1995: Taxonomy, Biology, Damage Control and Management* (Gerling, D. ed.). Intercept, Andover, UK, pp. 153-165.
- Shipp, J. L., Y. Zhang, D. W. A. Hunt and G. Ferguson (2003) Influence of humidity and greenhouse microclimate on the efficacy of *Beauveria bassiana* (Balsamo) for control of greenhouse arthropod pests. *Environmental Entomology* 32: 1154-1163.
- 清水茂 (1964) 1. 施設園芸と気象 [ソ菜]. 農業気象 20: 69-73.
- Spencer, K. A. (1973) *Agromyzidae* (Diptera) of Economic Importance. Series Entomologica, 9. Junk, The Hague. xi+18 pp.
- Stansly, P. A., F. J. Calvo and A. Urbaneja (2005) Augmentative biological control of *Bemisia tabaci* biotype "Q" in Spanish greenhouse pepper production using *Eretmocerus* spp. *Crop Protection* 24: 829-835.

- Stansly, P. A., and S. E. Naranjo (2010) *Bemisia: Bionomics and Management of a Global Pest*. Springer, Netherlands, 528 pp.
- Stansly, P. A., and E. T. Natwick (2010) Integrated systems for managing *Bemisia tabaci* in protected and open field agriculture. In *Bemisia: Bionomics and Management of a Global Pest*. Springer, Netherlands, pp. 467–497.
- 杉山恵太郎・日本典秀・大矢武志・二村友彬 (2011) DNAマーカーによるコナジラミ類寄生蜂3種の識別法の開発. 日本応用動物昆虫学会誌 55: 258–260.
- Sugiyama, K., H. Katayama and T. Saito (2011) Effect of insecticides on the mortalities of three whitefly parasitoid species, *Eretmocerus mundus*, *Eretmocerus eremicus* and *Encarsia formosa* (Hymenoptera: Aphelinidae). *Applied Entomology and Zoology* 46: 311–317.
- Sugiyama, K., K. Matsuno, M. Doi, A. Tataru, M. Kato and T. Tagami (2008) TYLCV detection in *Bemisia tabaci* (Gennadius) (Hemiptera: Aleyrodidae) B and Q biotypes, and leaf curl symptom of tomato and other crops in winter greenhouses in Shizuoka Pref., Japan. *Applied Entomology and Zoology* 43: 593–598.
- Sugiyama, K., T. Noda, T. Maeda and N. Hinomoto (2013) Comparison of the host-handling behavior of *Eretmocerus mundus* on *Bemisia tabaci* B biotype, Q biotype and *Trialetrodes vaporariorum*. *BioControl* 58: 615–623.
- Sugiyama, K., N. Ohishi and T. Saito (2014) Preliminary evaluation of greenhouses employing positive-pressure forced ventilation to prevent invasion by insect pests. *Applied Entomology and Zoology* 49: 553–559.
- 杉山恵太郎・大石直記・西東力・守谷栄樹 (2012) 陰圧式強制換気温室におけるタバココナジラミに対する天敵寄生蜂サバクツヤコバチの防除効果. 関西病虫害研究会報 54: 77–81.
- 高橋和彦 (1977) 施設果菜の温度管理. 施設園芸の環境と栽培 (位田藤久太郎編著) 誠文堂新光社, 東京, pp. 85–108.
- 戸田浩子・大野徹・山本岳・丹羽桂子・山口和広 (2009) 光反射シートによるタバココナジラミのトマト施設への侵入防止とトマト黄化葉巻病の発生抑制. 関西病虫害研究会報 51: 111–113.
- 徳丸晋・樋口俊男・田口義広 (2009) 施設トマトにおける黄色粘着長尺フィルムを利用したコナジラミ類の防除. 関西病虫害研究会報 51: 87–88.
- 徳丸晋・林田吉王 (2010) タバココナジラミ・バイオタ
イプ Q (カメムシ目: コナジラミ科) の薬剤感受性. 日本応用動物昆虫学会誌 54: 13–21.
- 杖田浩二・田口義広 (2006) トマト黄化葉巻病の発病分布とタバココナジラミの施設への侵入状況について. 関西病虫害研究会報 48: 23–28.
- 辻英明 (2007) 微小飛来昆虫の屋内侵入と屋内気圧および吸入風速との関係. 日本環境動物昆虫学会誌 18: 39–41.
- 内川敬介・小川恭弘 (2005) トマト黄化葉巻病の病原ウイルスおよび媒介虫の生態解明に基づいた防除. 長崎県総合農林試験場研究報告 農業部門 31: 29–81.
- Ueda, S. and J. K. Brown (2006) First report of the Q biotype of *Bemisia tabaci* in Japan by mitochondrial cytochrome oxidase I sequence analysis. *Phytoparasitica* 34: 405–411.
- Ueda, S., T. Kitamura, K. Kijima, K. Honda and K. Kanmiya (2009) Distribution and molecular characterization of distinct Asian populations of *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) in Japan. *Journal of Applied Entomology* 133: 355–366.
- Urbaneja, A. and P. A. Stansly (2004) Host suitability of different instars of the whitefly *Bemisia tabaci* biotype Q' for *Eretmocerus mundus*. *BioControl* 49: 153–161.
- van Alphen, J. J. M. and L. E. M. Vet (1986) An evolutionary approach to host finding, and selection. In: *Insect Parasitoids* (Waage, J. K. and D. J. Greathead eds.). Academic Press, London, UK, pp 23–61.
- van Alphen, J. J. M. and M. A. Jervis (1996) Foraging behaviour. In: *Insect Natural Enemies* (Jervis, M. and N. Kidd eds.). Chapman Hall, London, UK, pp 1–62.
- van Driesche, R. G., M. S. Hoddle, S. Lyon and J. P. Sanderson (2001) Compatibility of Insect Growth Regulators with *Eretmocerus eremicus* (Hymenoptera: Aphelinidae) for Whitefly (Homoptera: Aleyrodidae) Control on Poinsettias: II. Trials in Commercial Poinsettia Crops. *Biological Control* 20: 132–146.
- van Lenteren, J. C. and L. P. J. J. Noldus (1990) Behavioural and ecological aspects of whitefly-plant relationships. In: *Whiteflies: their bionomics, pest status and management* (Gerling, D. ed.). Intercept, Andover, UK, pp. 47–89.
- van Lenteren, J. C. and J. J. Fransen (1994) Survival of the parasitoid *Encarsia formosa* after treatment of parasitized

- greenhouse whitefly larvae with fungal spores of *Aschersonia aleyrodis*. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 71: 235–243.
- Varma, A., B. Mandal and M. K. Singh (2011) Global emergence and spread of whitefly (*Bemisia tabaci*) transmitted geminiviruses. In: *The Whitefly, Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae) interaction with geminivirus-infected host plants (Thompson, W. M. O. ed.). Springer, Netherlands, pp. 205–292.
- Vickerman, D. B., M. S. Hoddle, S. Triapitsyn and R. Stouthamer (2004) Species identity of geographically distinct populations of the glassy-winged sharpshooter parasitoid *Gonatocerus ashmeadi*: morphology, DNA sequences, and reproductive compatibility. *Biological Control* 31: 338–345.
- Vinson, S. B. (1998) The general host selection behavior of parasitoid hymenoptera and a comparison of initial strategies utilized by larvaphagous and oophagous species. *Biological Control* 11: 79–96.
- 山城都 (2007) 栃木県におけるタバココナジラミバイオタイプ Q の発生分布と薬剤感受性. 関東東山病害虫研究会報 54: 113–115.
- Yang, T. A., and H. Chi (2006) Life tables and development of *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae) at different temperatures. *Journal of Economic Entomology* 99: 691–698.
- Yara, K. and Y. Kunimi (2009) Discrimination of *Torymus sinensis* Kamijo (Hymenoptera: Torymidae) and *T. beneficus* Yasumatsu et Kamijo and their hybrids by allele-specific PCR. *Applied Entomology and Zoology* 44: 275–280.
- 善正二郎・古田明子・糸山享・篠田徹郎・河合章 (2001) 佐賀県におけるトマト黄化葉巻病の発生経過とその要因について. 九州病害虫研究会報 47: 25–28.

静岡県農林技術研究所 〒438-0803 静岡県磐田市富丘 678-1
電話(0538) 35-7211

茶業研究センター 〒439-0002 菊川市倉沢 1706-11
電話(0548) 27-2880

果樹研究センター 〒424-0101 静岡市清水区茂畑
電話(054) 376-6150

伊豆農業研究センター 〒413-0411 賀茂郡東伊豆町稲取 3012
電話(0557) 95-2341

森林・林業研究センター 〒434-0016 浜松市浜北区根堅 2542-8
電話(053) 583-3121

平成 30 年 3 月 23 日 印刷
平成 30 年 3 月 31 日 発行

〒438-0803 静岡県磐田市富丘 678-1

編集兼
発行者

静岡県農林技術研究所

電話(0538) 35-7211

住所 静岡県袋井市新屋 4 丁目 5-2
印刷所 名称 松本印刷株式会社
電話 (0538) 43-6300