

博士學位論文

侵入害虫マメハモグリバエに対する生物的防除資材
としての土着寄生蜂類の利用技術に関する研究

平成 18 年 3 月

近畿大学大学院 農学研究科
農学専攻 (杉本 毅教授)

本 藤 智 雄

(和文題目)

侵入害虫マメハモグリバエに対する生物的防除資
としての土着寄生蜂類の利用技術に関する研究

近畿大学大学院 農学研究科

農学専攻

本 藤 智 雄

(杉本 毅教授)

(英文題目)

Use of Native Species of Eulophid Parasitoids as The
Biological Control Agent Against *Liriomyza trifolii*

Tomoo Hondo

March, 2006

Graduate School, Kinki University

Division of Agricultural Science

Major: Entomology

(Advisor: Prof. Tuyosi Sugimoto)

目次

第1章 緒言・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・1

第2章 マメハモグリバエ及び寄生蜂類・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・5

 第1節 マメハモグリバエ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・5

 分布

 形態及び生態

 本種による被害

 殺虫剤抵抗性

 第2節 ハモグリバエ寄生蜂類・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・9

 寄生戦略

 繁殖

 繁寄主体液摂取

 ハモグリバエ類殺傷寄生蜂の寄主利用戦略

 ハモグリバエ類寄生蜂の寄主探索

第3章 マメハモグリバエに対する天敵資材としての土着寄生蜂7種の温度耐性の比較・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・12

 第1節 はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・12

 第2節 実験材料と方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・14

 マメハモグリバエ類

 寄生蜂類

 実験装置

 温度と発育の関係

 雌成虫の寿命，寄生及び寄主体液摂取に及ぼす温度の影響

 第3節 結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・16

温度と発育の関係

雌成虫の寿命，寄生及び寄主体液摂取に及ぼす温度の影響

第4節 考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 22

土着寄生蜂の温度耐性

放飼と大量生産の各段階における捕食寄生蜂の有効性の総合的な評価

第4章 ハモグリミドリヒメコバチの大量増殖法の確立・・・・・・・・・・ 27

第1節 はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 27

第2節 実験の準備・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 27

大量生産工程設計の概要

産卵装置の設計

羽化成虫回収装置の設計

梱包資材

第3節 実験方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 37

産卵装置における成虫回収

羽化成虫回収装置における成虫回収率

剤型・保蔵が寄生蜂におよぼす影響

最適放飼密度の決定

第4節 結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 39

産卵装置における成虫回収

羽化成虫回収装置における成虫回収率

剤型・保蔵が寄生蜂におよぼす影響

最適放飼密度の決定

第5節 考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 44

第5章 ハモグリミドリヒメコバチの生物的防除資材としての有効性とバンカ

ープラント法の検討	48
第1節 はじめに	48
第2節 材料と方法	49
供試植物	
供試昆虫	
実験の準備	
マメハモグリバエ幼虫高密度時における寄生蜂放飼の防除効果	
マメハモグリバエ幼虫低密度時における寄生蜂放飼の防除効果	
ハモグリミドリヒメコバチの寄主選好性の検討	
第3節 結果	55
マメハモグリバエ幼虫高密度時における寄生蜂放飼の防除効果	
マメハモグリバエ幼虫低密度時における寄生蜂種放飼の防除効果	
ハモグリミドリヒメコバチの寄主選好性の検討	
第4節. 考察	60
ハモグリミドリヒメコバチの放飼密度および放飼時期	
代替寄主キツネノボタンハモグリバエ, バンカー植物ラナンキュラスを用いたバンカー植物法の可能性	
第6章 総合考察	64
謝辞	75
要約	76
Summary	79
引用文献	82

第1章 緒言

わが国における施設栽培は1965年には栽培延面積6387haだったが、その後急速に拡大し、1999年では70525haと10倍を超え、現在、わが国の園芸において重要な位置を占めている（(社)日本施設園芸協会, <http://www.jgha.com/>）。これら施設栽培を含めた戦後の農業技術の向上は、作物の品種改良とともに合成農薬の急速な発達に負うところが大きかった。しかし、合成農薬の大量使用により、生態系へのリスクおよび人間や家畜への健康被害がもたらされ（Carson, 1962; 根本, 1997）、また、誘導多発生（リサージェンス）や天敵の減少した圃場に新たに害虫が侵入し、大発生をしばしば引き起こした（van Driesche and Bellows, 1996）。さらに、害虫の薬剤抵抗性の獲得により従来の薬剤がほとんど効果を示さない殺虫剤抵抗性害虫系統が出現した（WHO, 1998a,b）。近年の交通網の整備や航空輸送など流通技術の進歩により農産物の物流が飛躍的に高速化かつ広域化したため、輸送農産物と共に薬剤抵抗性を獲得した害虫も急速に拡散した。本研究で取り上げるマメハモグリバエ *Liriomyza trifolii* Burgess も、1990年にわが国に侵入する以前に、既に強度の殺虫剤抵抗性を獲得していたため化学的防除が非常に困難であった。

近年、マメハモグリバエのように高度の薬剤抵抗性害虫の出現、環境保全、食の安全を求める消費者ニーズの高まりなどを受けて、合成農薬に対する過度の依存には限界があり、その打開策の一つとして天敵を用いた生物的防除が注目を集めるようになった。

天敵とは他の生物から栄養を摂取して生活し、その生物を死亡させたり、繁殖能力を低下させたりする捕食者、寄生者、病原微生物を指す（広瀬, 1979; 矢野, 1995）。天敵昆虫は一般的に栄養摂取の過程で他の昆虫を殺害するので、自然界において昆虫個体群の密度制御の重要な担い手である。天敵昆虫は、人為的に制御したり、利用したりし易かったので、古来から害虫防除に利用されてきた。古くは1世紀頃に中国で柑橘害虫を駆除するためにツムギアリを利用

したという記録もあるが(斉藤ら, 1986), 近代における生物的防除の画期的な成功例としては, 1888年, カリフォルニアにおけるベダリアテントウによるイセリアカイガラムシ防除の成功が有名であり, これを機に世界的に天敵利用が試みられた(Debach, 1964). わが国においては, ベダリアテントウによるイセリアカイガラムシ防除, シルベストリコバチによるミカントゲコナジラミ防除, ワタムシヤドリコバチによるリンゴワタムシの防除(安松, 1970; 森・村上, 1981; 広瀬, 1987), さらに近年においてはヤノネカイガラムシ(Furuhashi and Nishino, 1983; 古橋・西野, 1984; 高木, 1983; 高木・氏家, 1986)やクリタマバチ(Moriya et al. 1989, 1990; 村上, 1997)などで成功を収めた. これらの天敵の利用方法は永続的利用法または伝統的生物的防除法(Classical biological control)とよばれ, 主に果樹を中心とした永年作物の侵入固着害虫に対して効果を上げたが(Clausen, 1978; Debach and Rosen, 1991), 土着害虫や周期的に作物が除去されることにより生息環境が大きく変動する1年生作物ではあまり効果が得られなかった. しかし, 近年, 生物的防除法は急速に改善が進み, 下記の2タイプに大別される. 第1は, 害虫の発生時に, 直接的, 即時的防除効果を期待して天敵を大量放飼する大量放飼法—生物農薬的利用法とよばれている. 第2は, 比較的少量の天敵を放飼して後世代における持続的防除効果を期待する接種的放飼法である. どちらも化学農薬のように害虫の発生時に合わせて天敵を逐次放飼するので, 土着天敵のいない, あるいは低密度のためにそれらによる防除が期待できない施設圃場, 永続的利用法ではあまり効果が得られなかった1年生作物圃場においても有効であった. 天敵放飼の例としては, 鱗翅目害虫に対するタマゴバチ類(Li, 1994; Smith, 1996), ハダニ類に対するチリカブリダニ(森・真梶, 1977; 井上, 1993; 森, 1993; 江原・真梶, 1996), オンシツコナジラミに対するオンシツツヤコバチ(矢野, 1979, 1988), アザミウマ類に対するヒメハナカメムシ(永井, 1994; Riudavets, 1995; Yano, 1996; Castane et al., 1999), アブラムシ類に対するコレマンアブラバチ(山下・藤富, 1998), そして, 強度の殺虫剤抵抗性を獲得し, 化学的防除が困難であったマメハモグ

リバエに対してもイサエアヒメコバチとハモグリコマユバチといったヒメコバチ科や、コマユバチ科の寄生蜂が実用化されている (Minkenberg and van Lenteren, 1990; Parrella et al., 1987; Heintz et al., 1990; 小澤, 2001)。

こうした天敵昆虫の利用には生きた昆虫そのものを利用するが故の技術的な困難を伴うが、反面、害虫が天敵に対して抵抗性を獲得する危険性が極めて低いこと (安松, 1970)、合成農薬のような人体、特に薬剤散布者の健康への影響が無いこと、天敵成虫のボトル梱包や蛹を貼り付けたカード等、軽量の剤型梱包が可能で、省力的化につながることなど多くの利点がある。また欧米において天敵生産を専門に扱う企業が現れ、天敵を商品化して販売を始めたことにより、天敵昆虫が生物農薬として安定して供給されるようになったことも天敵普及のきっかけとなった。ところで、オーストラリア、タスマニア島において送粉昆虫として導入されたセイヨウオオマルハナバチが野生化し急速に拡大した (Hingston, 1997)。わが国においても、施設内の送粉昆虫として放飼した同種が野外へ分散、定着し (保全生態学研究会, 1997a, b)、在来種との間に雑種が形成されるに至った (Mitsuhata & Ono, 1996)。導入天敵についても対象害虫だけでなく、対象外の土着生物をも攻撃し、絶滅または絶滅寸前に追い込んでいくことが指摘され (Howarth, 1991)、天敵も含めた外来昆虫導入にともなう固有生態系へのリスクが世界的関心事となった (Hirose, 1994, 1999; 日本生態学会, 2002; van Lenteren, et al. 2003)。

1995年、国連食糧農業機関 (FAO) (http://www.fao.org/index_en.htm)は「外来の生物的防除素材の輸入と放飼のための取り扱い規約」を出し、各国政府に遵守を求めた。わが国においても、1999年3月に環境庁水質保全局が環境影響評価ガイドラインを示し (環境庁水質保全局, 1999)、土着天敵を含め、天敵昆虫の導入に際して環境影響調査が行われる事となった。こうした背景から、導入天敵に代わり、地域個体群間の交雑など一定の環境リスクはあるものの、導入天敵と比べリスクの低い土着天敵を用いた防除法確立の必要性が高まっている。

そこで、本研究では侵入害虫マメハモグリバエに対する生物的防除資材とし

て導入されているイサエアヒメコバチ導入系統と日本未記録である（小西，1998）ハモグリコマユバチに代わる防除資材としての土着寄生蜂の選抜とその大量生産技術の確立および施設内放飼のための基礎資料を得ることを試みた。初めに，現在わが国の施設内において，マメハモグリバエに寄生することが確認された土着寄生蜂4科，27種より（小西，1998），西日本のハモグリバエ寄生蜂群において優占的なヒメコバチ科寄生蜂類のうち7種を選び，それらの温度特性を明らかにした後，その温度特性に基づいて温度変化の激しい西日本に最適な寄生蜂種を選抜した。続いて，選抜種の大量増殖のための技術確立を行った。最後に，選抜した寄生蜂を実際に温室に放飼して，防除効果を検討した。さらに，近年生物的防除の補強法として期待されているバンカープラント法について多少検討を試みた。

第2章 マメハモグリバエ及び寄生蜂類

第1節 マメハモグリバエ

潜葉虫(Leaf miner)は、幼虫が植物の柔組織内や表皮組織内に潜り食害するものの、表皮組織や外壁を無傷で残す昆虫のグループであり (Hering, 1951), これら潜葉虫は分類学上、鱗翅目、双翅目、甲虫目、膜翅目の4つの目に属している。ハモグリバエ類(Agromyzidae)は、幼虫は主に葉や茎に潜孔するが、中には茎に穿入するものや根や花頭を食害するものも含まれる (Spencer, 1990)。これらの分布域は広く、グリーンランド北部から南米末端、ニュージーランドの南極に近い島々にまで分布し、それらの寄主植物はゼニゴケ類から被子植物に及び、現存380科の被子植物のうち160科と広範に及ぶものの、寄主特異性が極めて発達しているため真の広食性は16種のみである(Spencer, 1990)。

日本において200種以上のハモグリバエが確認されており(Sasakawa, 1961), これらの幼虫が葉に潜ることによって生じる食害痕のくねくねとした形状から、日本では俗にエカキムシと呼ばれている。これらのハモグリバエ類は、農業上問題となる種も少なくなく(笹川, 1966a, b), マメハモグリバエ *Liriomyza trifolii* (Burgess)はこうした潜葉性害虫の1種である。

分布 本種の起源はフロリダ地方を含む北アメリカ東部やカリブ海諸国とされている (Spencer 1965, 1973, 1990)。近年、航空機などの輸送手段の急速な発達によって、植物の輸送が高速かつ世界的な規模に広域化されたことにより、本種に寄生された植物が北アメリカ大陸東部から輸送され、本種はアメリカ国内全域に (Parrella et al. 1981, Trumble 1981), さらにはアフリカ、ヨーロッパそしてアジアへと伝搬し、その生息範囲を拡大していった(Minkenbergh and van Lenteren 1986, Minkenbergh, 1988)。

本種については、日本では1949年に北海道のマメ科植物からの採集報告があったが(Sasakawa 1961), 後に *L. congesta* Becker と訂正された(Sasakawa 1992)。

本種は1990年に静岡県と愛知県で初めて侵入が確認され（西東,1992a）、その後、加害植物の流通に伴い急速に分布域を拡大し、全国的に発生が確認されるに至った（小澤 2000）。

形態及び生態 マメハモグリバエ成虫の体長は約2mmで、雌がやや大きい。複眼はプラムレッド、頭部、胸部側板および脚の大部分が黄色で、その他の部分は黒色である（Minkenberg, 1990）（図1）。雌成虫は腹部に発達した産卵管を持ち、葉の表皮に0.15～0.3mmの穴を開け、内部組織にゼリー状で半透明の卵（0.23×0.12mm）を産卵し、その穴よりにじみ出た汁液をしばしば摂食する（Spencer, 1973）。その際に生じた穴は、葉に白い斑点状の痕として残る（図2）。



図1. マメハモグリバエ雌成虫

雌は摂食または産卵行動のために1日に100回以上も葉に穴を開けるが、それら痕跡の多くは摂食痕である（Parrella et al. 1983, Parrella 1984, Smith and Hardman 1986）。雄は産卵管を持たないため単独で摂食することはできず、雌成虫が作った摂食、産卵痕を利用して吸汁すると思われる。成虫は、数時間で100m程度の移動能力がある（van de Vrie and Dirkse 1982）。本種の活動のピークは12:00～16:00であり、夜間にはほぼ活動を休止する（Chandler 1985）。また、成虫は黄色に誘引される特性があり（Zehnder and Trumble, 1984）、この性質を利

用して発生調査法として黄色粘着トラップが使用される（小澤ら，1999b）。

本種幼虫は淡い黄色をした無脚のウジであり，孵化後は葉内に潜り鎌状の口鉤で内部組織を摂食し，この際にくねくねとした食害痕が葉に残る（図2）。糞は孔道内に連なり，幼虫が体の向きを変えるたびに糞粒は側面に沿って交互に2列になる。幼虫は3齢期で成熟し，体長3mm程度に成長する。成熟した幼虫は葉の表皮を破って脱出し，葉上や土の表面や隙間に潜り，数時間後に2mm程度の囲蛹となる（Spencer, 1973；西東, 1992a, 1992b）。本種の発育は，温度や寄主植物種により異なるものの（西東ら，1995a；小澤ら，1999a），発育零点はおよそ10℃前後であり，35℃以上では高温障害が生じる（西東，1992b，1994）。また，地域個体群によって発育零点，有効積算温度が多少異なる（西東ら，1995a；小澤，2001；坂巻ら，2003；徳丸・阿部，2003）。

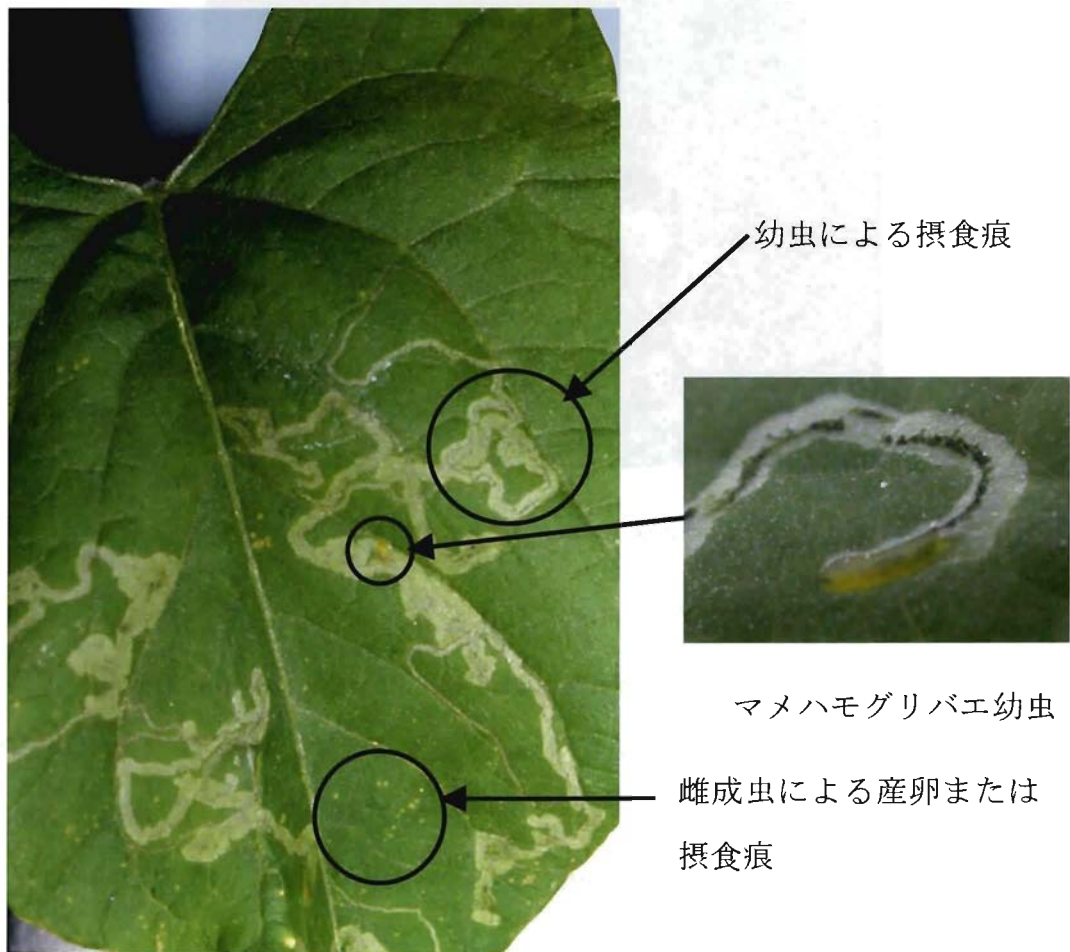


図2. マメハモグリバエ雌成虫による産卵および摂食痕と，幼虫による摂食痕

本種は、海外では 21 科 120 種以上の植物に寄生することが確認されており (Minkenberg and van Lenteren, 1986), 日本においてもマメ科, ウリ科, ナス科, キク科, セリ科, アブラナ科など 12 科 50 種以上の植物で寄生が確認されているが (西東 1997a), 産卵数は寄主作物種により大きく異なる (西東ら, 1995a; 小澤ら, 1999a; 小澤, 2001).

本種による被害 本種による被害は、成虫による摂食・産卵、および幼虫による摂食により引き起こされる。セルリーやチンゲンサイなどの葉菜類、キク、ガーベラなどの花卉作物は、産卵痕および食害痕が生じただけで商品価値が低下する。特に花卉類は深刻で、作物に僅かな摂食痕や産卵痕が生じただけでその商品価値は著しく低下する。また、幼虫によって葉内部組織が摂食されると光合成が阻害され (Jonson et al., 1983) 植物体の生育不良が起こり、その結果、収量の減少や収穫期の遅延を引き起こす (Trumble et al., 1985, 西野・内田 1999)。幼虫による食害が深刻な場合には、表皮組織だけを残して葉の内部組織が食い尽くされ、植物体が枯死することもある。また、わが国では確認されていないものの、成虫がキクの斑点細菌病菌 *Pseudomonas cichorii* を媒介したり、成虫の摂食痕、産卵痕がその感染口となっているとの報告もある (Price and Harbaugh, 1981; Mateoni and Broadbent, 1988; Broadbent and Matteoni, 1990)。

殺虫剤抵抗性 1940 年代には *Liriomyza* 属が殺虫剤抵抗性を獲得することが確認され (Genung, 1957; Wolfenbarger, 1958), その中でも本種の殺虫剤抵抗性の発達速度は高く (Parrella and Keil, 1984; Parrella, 1987), ペルメトリンに対する感受性が 2 年で 20 倍に低下した事例もある (Parrella and Keil, 1984)。日本に侵入したマメハモグリバエについても高い殺虫剤抵抗性が確認され、侵入後合成ピレスロイド剤によるリサージェンスが頻発した (西東ら, 1992a, b; 西東ら, 1993, 1996)。

第2節 ハモグリバエ寄生蜂類

植食性昆虫の重要天敵としての捕食寄生者 (parasitoid) には, 世界で双翅目 (8科, 約 14925 種以上), 鞘翅目 (2科, 2400 種), 撚翅目 (10 種), 脈翅目 (50 種) など多岐にわたるが (Godfray, 1994), 種数, 個体数共に最も多いのは, 13 上科, 46 科にわたり 15 万種をはるかに超える膜翅目寄生蜂類である (LaSalle and Gauld, 1991). 日本の土着ハモグリバエ類も多種にわたる寄生蜂の攻撃にさらされており (Takada and Kamijo, 1979, Sugimoto et al., 1983a, Kato, 1994), 侵入害虫マメハモグリバエの生物防除資材として大きな関心が寄せられている.

寄生戦略 Askew and Shaw (1986)によると, 寄主利用戦略に基づき, 寄生蜂を2つのカテゴリーに大別できる. すなわち, 寄主を生かしたまま寄生し, 発育を完了すると寄主を殺す飼殺し寄生種 (Koinobiont) と, 寄主に産卵管を挿入して毒液を注入して殺害したり, 永久麻痺させて寄生する殺傷寄生種 (Idiobiont) である. また, 寄生様式は, 寄主の体内に産卵する内部寄生 (endoparasitism) (図 3a) と寄主の体表面やその周辺に産卵する外部寄生 (ectparasitism) (図 3b) に分けられ, さらに1寄主に1卵を産む単寄生と (solitary parasitism), 複数卵を生む多寄生 (gregarious parasitism), 寄主自体に寄生を行う一次寄生 (primary parasitism) と寄主に寄生している寄生者に寄生する高次寄生 (hyper parasitism) に分類される. さらに, 寄生対象となる寄主の発育段

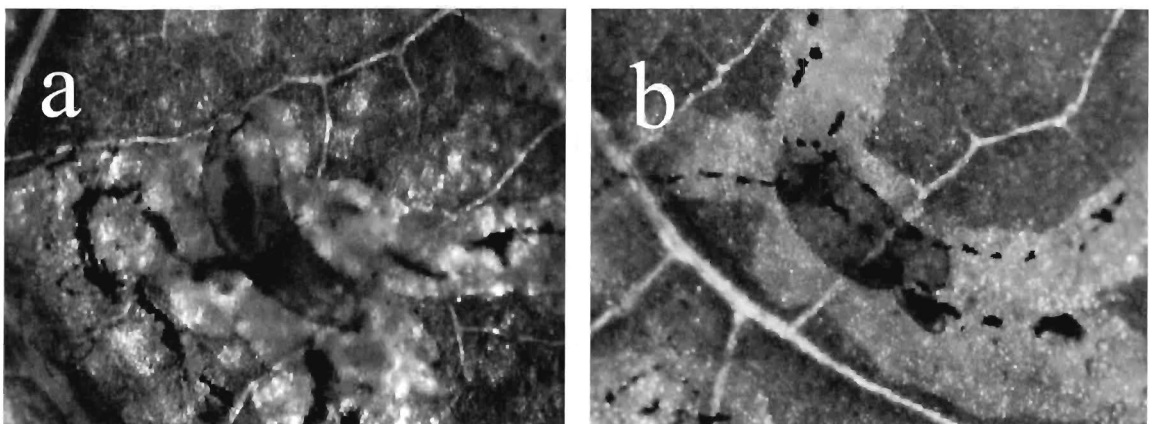


図 3. 内部寄生 (a) と外部寄生 (b)

階により、卵寄生 (egg parasitism)、幼虫寄生 (larval parasitism)、蛹寄生 (pupal parasitism)、卵・幼虫寄生 (egg-larval parasitism) や幼虫・蛹寄生 (larval-pupal parasitism) などに分類される。こうした寄生様式の多様性は、同一寄主種を攻撃する複数の寄生蜂の種間競争を緩和していると思われる。

繁殖 寄生蜂を含む膜翅目は、原則として半数倍数性 (haplodiploidy) といった特殊な性決定様式を持つ。膜翅目では、雄が未受精卵から発生するので半数体であり、その精子は、体細胞突然変異を除き全て遺伝的に同一で、雄ゲノムを全て持っている。一方、雌は倍数体であり、各卵子は雌ゲノムの 1/2 を持つ。母蜂は、交尾によって得た精子を受精囊に貯蔵し、産卵時に精子を少しずつ出して受精させる。受精の成否は母蜂次第であり、母蜂は雌雄を産み分けることができる (例えば Gauld and Bolton, 1988 ; Godfray, 1944)。未受精卵から雄が生まれる現象を産雄単為生殖 (arrhenotoky) と呼ぶ。一方、主に生殖細胞がリケッチア *Wolbachia* に感染された寄生蜂では、未受精卵からも雌が生じる、いわゆる産雌単為生殖 (thelytoky) を行う。*Wolbachia* は無脊椎動物の精巣や卵巣から発見され、感染種には天敵も多く含まれている (例えば, Steevens and Wade, 1990; Stouthamer and Luck, 1993; Werren, 1997)。

寄主体液摂取 寄生蜂類の中には、雌成虫が、寄主の排泄する甘露、花粉、蜜などを餌とする他に、産卵管や口器を用いて寄主体壁に孔をあけ、体液を摂取する種がいる。この行動は寄主体液摂取 (host-feeding) と呼ばれ、特に幼虫寄生蜂ではよく見られる現象であり (Clausen, 1940)、18 科 142 種の寄生蜂で寄主体液摂取行動が確認されている (Jervis and Kidd, 1986)。寄主体液摂取は雌成虫のみが行い、卵形成が産卵開始に先行して完了する斉一成熟性 (proovigenic) 寄生蜂では寄主体液摂取はほとんど見られないが、卵形成が産卵と平行して行われる逐次成熟性 (synovigenic) 寄生蜂ではよく見られ、主に卵形成のためのタンパク質確保と、雌成虫のエネルギー補充のために行われると考えられてい

る (Frlanders, 1935; Chan and Godfray, 1993). さらに、後者についてみると、ヒメコバチ科寄生蜂 *Chrysocharis pentheus* (Walker)の羽化直後の雌成虫に3日間寄主を与えた後、蜂蜜または水のみを与えて飼育すると、卵巣内の成熟卵はいったん増加した後減少したことから、タンパクの供給が断たれると、いったん形成した卵を分解、再吸収し、生存のためのエネルギー源にする (Sugimoto et al., 1983b). 卵再吸収は体液中のタンパク量の低下が引き金となっておこる (King and Richards, 1968).

ハモグリバエ類殺傷寄生蜂の寄主利用戦略 スイカズラハモグリバエ野外個体群の調査において、ヒメコバチ類の寄生により死亡した寄主のうち、大型寄主から雌蜂が、小型寄主から雄蜂が多く羽化した (Kato, 1985). また、*C. pentheus* を用いた実験において、小型の若齢寄主を寄主体液摂取に、大型の寄主を産卵に使い分けることが確認された (Sugimoto and Ishii, 1979).

ハモグリバエ類寄生蜂の寄主探索 寄主であるハモグリバエ幼虫は生息場所に連続的に存在しているのではなく、葉や株を単位 (パッチ) として不連続に分布している. Sugimoto et al (1986, 1987, 1988 a, b, c) は、不連続的に分布する寄主の効率的な探索行動についてコマユバチ科 *Dapsilarthra rufiventris* (Nees) を用いて検討した. その結果、寄生蜂は単一の手がかりによって寄主探索を行うのではなく、まず匂い物質を、続いて寄主幼虫の摂食によって生じた食害痕、さらに寄主幼虫が植物をかじる際に生じる摂食音を順次手がかりにして寄主探索を効率的に行うことが明らかにされた. さらにその探索時間は寄主密度が高いほど長くなり、雌蜂が寄主密度に比例的に探索時間を配分する最適戦略を採っている (Sugimoto et al., 1987).

第3章 マメハモグリバエに対する天敵資材としての土着寄生蜂7種の温度耐性の比較

第1節 はじめに

マメハモグリバエは、わが国に侵入する前に欧米において既に高い薬剤抵抗性を獲得しており、侵入後リサージェンスがしばしば発生し、化学農薬による防除には問題があることが明らかになった(第2章)。現在、日本では、本種の生物的防除を目的としてヨーロッパからハモグリコマユバチ *Dacnusa sibirica* Telenga とイサエアヒメコバチ *Diglyphus isaea* (Walker)の2種寄生蜂が輸入され、1997年12月に農薬登録され、利用されている(小澤, 1999; 小澤ら, 1999c; 西東ら, 1995b; 市川ら, 1996; 柴尾ら, 1996; 松村ら, 2001)。一方、我が国には200種以上のハモグリバエ類が生息しているが(Sasakawa, 1961)、研究、調査の進んでいるハモグリバエ(Takada and Kamijo, 1979)、キツネノボタンハモグリバエ(Sugimoto et al., 1983a)、スイカズラハモグリバエ(Kato, 1994)は多種の寄生蜂類の攻撃にさらされていることが実証された。マメハモグリバエの侵入後しばらくして行われたハウス内の調査によると、土着ハモグリバエ類の寄生蜂種として記録されている4科27種が寄生することが確認された(小西 1998)。本章後半で述べるが、西日本の温室は外気温と比べ年間を通じて激しく変動するため、生物的防除資材にはその温度変化への耐性が求められる。そこで本章では、西日本の土着ハモグリバエ寄生蜂群において優勢なヒメコバチ科寄生蜂類(Takada and Kamijo, 1979; Sugimoto et al., 1983a; Kato, 1994; 1996a,b)より7種を選び(Table 1, Fig. 4)、それらの発育、雌成虫の寿命、繁殖能力に対する温度耐性を明らかにした。さらにその結果をもとにマメハモグリバエの生物的防除資材として最適な寄生蜂を選抜するために、それらの防除効率を包括的に評価した。ところで、本実験に用いたヒメコバチ科寄生蜂は、殺傷寄生、単寄生性の寄生様式をとる(第2章)。また Eulophinae の *P. katonis* Ishii, *H. varicornis*, *D. isaea*, *D. minoicus*, *D. pusztensis* は、殺害した寄主幼

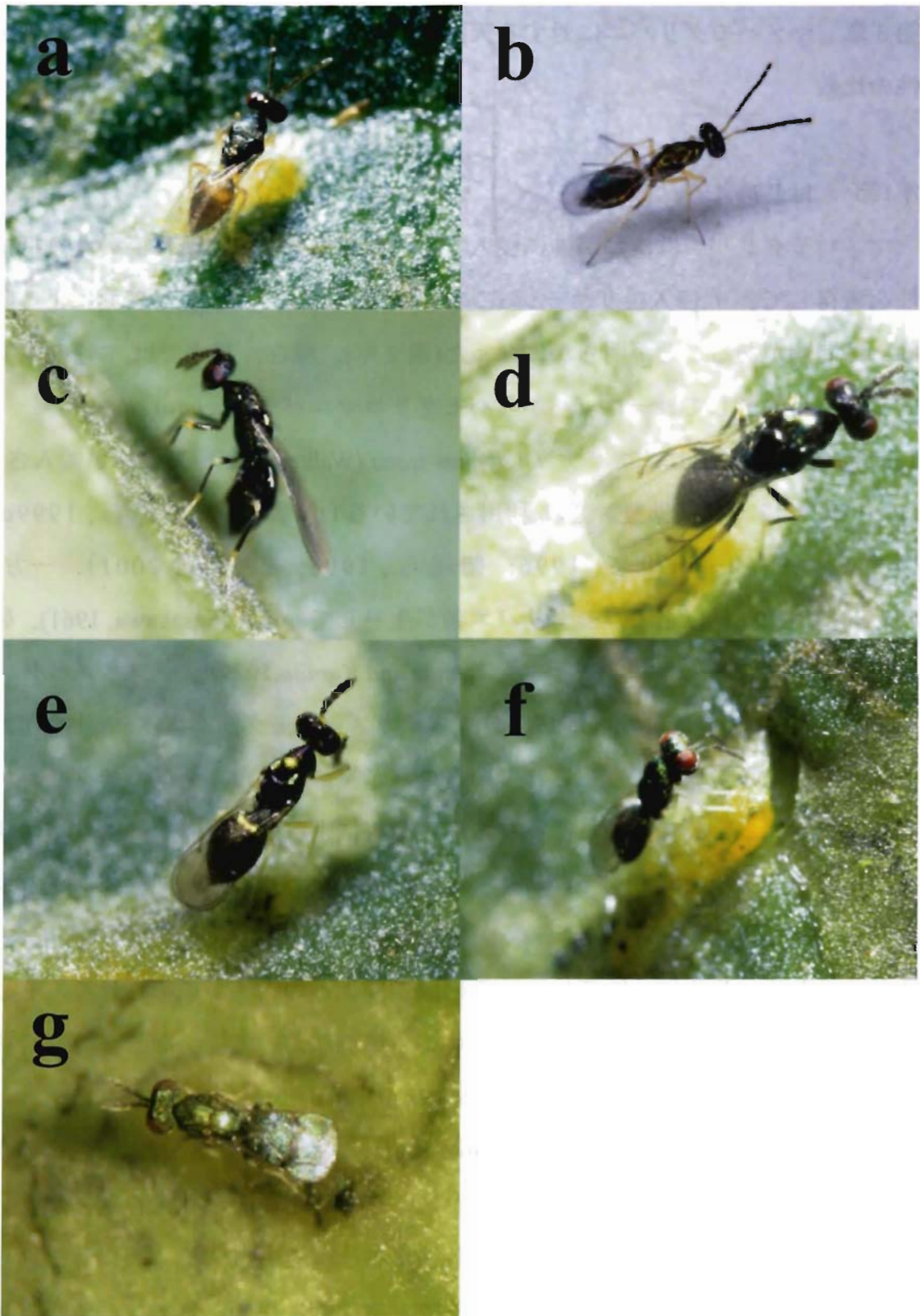


Fig. 4. Eulophid parasitoids examined in this study. a, *P. katonis*; b, *H. varicornis*; c, *D. isaea*; d, *D. minoeus*; e, *D. pusztensis*; f, *C. pentheus*; g, *N. formosa* (cf. Table 1)

虫の表皮上やその周辺に産卵する外部寄生蜂であり, Entedontinae の *C. pentheus*, *Neochrysocharis formosa* は寄主体内に産卵する内部寄生蜂である. また, 本研究で用いた寄生蜂は, リケッチア *Wolbachia* に感染されて産雌単為生殖を行う *N. formosa* (Arakaki and Kinjo, 1998)を除き, 全て半数倍数性のため産雄単為生殖を行う (第2章).

Table 1. List of eulophid parasitoids examined in this study

Species	Body length (mm)	Parasitization ^a
Eulophinae		
<i>Pnigalio katonis</i> Ishii	1.3-1.7	Ect
<i>Hemiptarsenus varicornis</i> (Girault)	1.1-1.9	Ect
<i>Diglyphus isaea</i> (Walker) (イサエアヒメコバチ)		
native strain (土着系統)	0.9-1.6	Ect
introduced strain (導入系統)		
<i>D. minoeus</i> (Walker)	1.0-1.6	Ect
<i>D. pusztensis</i> (Erdős & Novicky)	0.9-1.5	Ect
Entedontinae		
<i>Chrysocharis pentheus</i> (Walker)	0.8-1.5	End
<i>Neochrysocharis formosa</i> (Westwood)	0.8-1.6	End
(ハモグリミドリヒメコバチ)		

^a Ect: Ectoparasitoid, End: Endoparasitoid

第2節 実験材料と方法

飼育および実験は全て, 70%RH, 14L10D に維持した近畿大学農学部昆虫飼育室内で行い, 温度は必要に応じて種々に設定した.

マメハモグリバエ類 マメハモグリバエは, 静岡県農業試験場から 1992 年に譲り受け, 恒温室内(25°C)で, インゲンマメ *Phaseolus vulgaris* (品種: つるなしすじなし黒菜豆)の初生葉を用いて累代飼育し, 実験に供試した.

寄生蜂類 *H. varicornis* と *N. formosa* 以外の寄生蜂については, 1998 から 2000 年の春に近畿大学農学部実験圃場に栽培されたエンドウ *Pisum sativum* L. か

ら寄生蜂に寄生されたナモグリバエ *Chromatomyia horticola* (Goureau) 幼虫を含んだ葉を採集し、実験室に持ち帰り羽化させた。 *H. varicornis* は、1996年に静岡県農業試験場より成虫を譲り受けた。 *N. formosa* は、1998年に鹿児島県農業試験場より寄生されたマメハモグリバエ幼虫含んだスイカの葉を譲り受け、それらより回収した。さらに比較として用いた生物的防除資材として用いられている *D. isaea* (以後導入系統とよぶ) は株式会社トーメン TOMEN (現、株式会社アスタライフサイエンス) より提供を受けた MINEX より選別して供試した。これら全ての寄生蜂は、同一条件下でマメハモグリバエ幼虫を寄主にして累代飼育し、各実験に供試した。

実験装置 全ての実験は、上面にガーゼを張った直径 10 cm、高さ 20 cm の透明なプラスチック円筒を用いて行なった(Fig. 5)。初生葉 2 枚のついたインゲンマメ株を、水を入れた広口ビン (50ml) に差し、これを綿で固定して円筒内に静置し、その中へ寄主母虫を放飼し、インゲンマメ株へ 24 時間産卵させ、その後幼虫が 2 齢後期から 3 齢中期に成長したものを全ての実験に用いた。



Fig. 5. Transparent plastic cylinder used in this study (20 cm high, 10 cm wide)

温度と発育の関係 20℃において実験装置内に最低 60 匹のマメハモグリバエ幼虫に被害されたインゲンマメ株を設置し,*N. formosa* は 5 匹,その他の寄生蜂においては 5 対を放し, 24 時間寄生させた. その後, この株を 15,20,25,30,33℃, に設定した恒温室へ移し, 寄生蜂成虫が羽化するまでの発育所要日数を調べた. さらに, 33℃で高温障害による発育遅延が認められなかった種については, 35℃と 37℃についても実験を行った. その際寄生させた寄生蜂幼虫がいるインゲンマメ株は, 蜂の羽化が完了するまで各温度を維持した.

雌成虫の寿命, 寄生及び寄主体液摂取に及ぼす温度の影響 羽化後 24 時間以内の *N. formosa* は雌成虫 1 匹, その他の寄生蜂種は雌成虫 1 匹と雄成虫 3 匹をランダムに選び, 15, 20, 25, 30℃の恒温室に設置した実験装置内に放飼し, 死亡するまで毎日最低 60 匹以上の 2 齢後期から 3 齢前期のハモグリバエ幼虫に被害された株を与えて飼育した. その際, 寄主幼虫のいる株は毎日新しい株と交換し, 寄生させた株は 20℃の恒温室に移し, 寄生蜂成虫が羽化するまで保管し, 雌雄を確認した. 回収した株にいる死亡した寄主幼虫については, 双眼実体顕微鏡を用いて寄生または寄主体液摂取のいずれによる死亡かを毎日確認した. *C. pentheus* と *N. formosa* を除く外部寄生蜂については, 死亡したハエ幼虫の体表やその付近に寄生蜂の卵が確認された場合に寄生による死亡と認定し, 内部寄生蜂については, 卵の確認が困難だったため, 寄生 3 日後から検鏡して, 孵化した寄生蜂幼虫が確認された場合に寄生とみなした. 寄主体液摂取による寄主幼虫殺害数は, 殺害総寄主幼虫数から寄生による殺害寄主幼虫数を引くことによって求めた.

第 3 節 結果

温度と発育の関係

各種土着寄生蜂の平均発育日数を Table 2 に示した. 15℃では *D. isaea* の両

Table 2. Effect of temperatures upon developmental period (d) from oviposition to adult eclosion of seven eulophid parasitoids on *L. trifolii* (mean ± SD)

	15°C		20°C		25°C		30°C		33°C		35°C		37°C	
	n		n		n		n		n		n		n	
Female														
<i>P. katonis</i>	47	32.7 ± 2.3 cd	42	16.0 ± 1.9 ce	52	11.4 ± 1.3 b	48	9.6 ± 1.0 b	11	8.5 ± 0.8 cd				
<i>H. varicornis</i>	116	46.7 ± 8.3 b	120	16.1 ± 1.7 de	139	9.8 ± 0.9 c	191	7.6 ± 1.2 d	99	7.3 ± 1.2 d	49	7.5 ± 0.6 ^a	43	7.6 ± 0.9 ^a
<i>C. pentheus</i>	69	35.2 ± 2.3 c	69	19.9 ± 1.8 b	69	14.1 ± 1.7 a	79	12.0 ± 1.1 a	2	14.5 ± 0.5 a				
<i>N. formosa</i>	32	52.5 ± 3.9 a	137	21.4 ± 1.4 a	137	14.0 ± 1.6 a	99	11.9 ± 1.3 a	75	11.3 ± 1.6 ab	71	9.3 ± 0.7	105	9.1 ± 0.7
<i>D. minoëus</i>	25	28.5 ± 4.9 ef	18	17.1 ± 2.9 cd	28	11.6 ± 0.9 b	All died ^b		All died ^b					
<i>D. pusztensis</i>	26	32.2 ± 0.9 cde	15	17.5 ± 2.8 c	20	11.2 ± 1.7 b	17	9.4 ± 0.6 bc	27	11.7 ± 1.6 ab				
<i>D. isaea</i> (native)	117	28.8 ± 3.2 f	178	15.5 ± 1.6 e	170	10.1 ± 1.2 c	136	8.8 ± 1.1 c	34	10.6 ± 2.6 b				
<i>D. isaea</i> (introduced)	38	31.4 ± 3.7 def	52	15.9 ± 1.7 de	36	11.0 ± 1.1 b	43	8.6 ± 0.7 b	35	9.1 ± 0.5 cd				
Male														
<i>P. katonis</i>	59	30.4 ± 3.2 de	66	15.6 ± 0.9 d	52	11.6 ± 3.6 b	82	8.9 ± 0.9 b	15	8.1 ± 0.7 cd				
<i>H. varicornis</i>	102	43.7 ± 8.3 a	155	14.9 ± 1.4 e	153	9.2 ± 0.9 d	146	7.1 ± 0.9 d	123	6.9 ± 1.1 d	50	6.9 ± 0.6	47	6.9 ± 0.6
<i>C. pentheus</i>	98	33.8 ± 3.1 b	144	18.8 ± 1.4 a	132	13.7 ± 1.4 a	134	11.5 ± 1.3 a	7	15.1 ± 3.4 a				
<i>D. minoëus</i>	23	26.9 ± 1.2 e	26	16.4 ± 2.1 b	35	11.3 ± 0.6 b	3	11.7 ± 0.9 a	All died ^b					
<i>D. pusztensis</i>	19	31.4 ± 1.2 bcd	20	16.4 ± 1.2 acd	15	11.5 ± 2.7 b	14	9.0 ± 0.7 bc	18	10.3 ± 0.9 b				
<i>D. isaea</i> (native)	144	28.3 ± 3.5 ce	255	14.9 ± 1.5 bc	192	10.0 ± 1.2 c	248	8.3 ± 1.1 c	89	9.4 ± 2.3 b				
<i>D. isaea</i> (introduced)	76	29.3 ± 2.3 cde	78	15.0 ± 1.1 bcd	80	10.0 ± 1.0 c	61	8.3 ± 0.6 c	53	8.5 ± 0.8 c				

Means in the same column, followed by same letters were not significantly different at $p < 0.05$ (Tukey-Kramer test).

^a Significantly shorter at $p < 0.05$ compared with *N. formosa* (t-test).

^b All died prior to adult eclosion

系統と *D. minoews* の発育所要日数が他の寄生蜂種と比べて短く、一方 *H. varicornis* と *N. formosa* が長かった。特に *N. formosa* は、*D. minoews* の約 2 倍長かった (Tukey-Kramer の多重比較検定, $p < 0.05$)。20°C 以上では、*C. pentheus* と *N. formosa* が他の寄生蜂よりも発育所要日数が長かった ($p < 0.05$)。全ての種で 25°C までは温度の上昇に伴って、発育所要日数が短くなった。しかし、30°C において、*D. minoews* の雌成虫では供試虫数が 50 匹以上であったにもかかわらず羽化個体数が 0 匹であり、雄についても羽化成虫数が 3 匹と少なく、それらの発育所要日数は 25°C と比べ遅延した。*P. katonis*, 両系統の *D. isaea*, *D. minoews*, *D. pusztensis* および *C. pentheus* は、33°C において発育途中で多くの幼虫が死亡し、かつ、羽化した場合も発育所要日数が遅延した。33°C において、高温障害による発育遅延が見られなかった *H. varicornis* と *N. formosa* については、さらに 35°C, 37°C で実験を試みた。35°C 以上で *H. varicornis* が雌雄ともに多少の発育遅延が見られたが、*N. formosa* では見られなかった。

D. minoews では 15 °C から 25 °C, 他種の寄生蜂は 15 °C から 30°C の発育遅延の見られなかった温度範囲で得られた結果 (Table 2) から、発育零点(t_0)および有効積算温度(K)を有効積算温度の法則($(t - t_0)D = K$ t : 飼育温度, D : 発育所要日数)をもとに求めた (Table 3)。その結果、発育零点は雌雄ともに *C. pentheus*

Table 3. Regression equations of reciprocals (Y) of developmental period (d), on temperatures (X , °C), and threshold temperatures for development (°C) and thermal constants (day-degree) of seven eulophid parasitoids on *L. trifolii*

	Regression equation	Threshold temperatures for development (°C)	Thermal constants (day-degree)
Female			
<i>P. katonis</i>	$Y = 0.0049 X - 0.0395$ ($R^2 = 0.986$, $F = 71.6$, $P = 0.075$)	8.1	204.1
<i>H. varicornis</i>	$Y = 0.0074 X - 0.0872$ ($R^2 = 0.992$, $F = 120.9$, $P = 0.058$)	11.8	135.1
<i>C. pentheus</i>	$Y = 0.0037 X - 0.0251$ ($R^2 = 0.982$, $F = 54.4$, $P = 0.086$)	6.8	270.3
<i>N. formosa</i>	$Y = 0.0044 X - 0.0439$ ($R^2 = 0.977$, $F = 84.4$, $P = 0.012$)	9.7	227.3
<i>D. minoews</i>	$Y = 0.0051 X - 0.0426$ ($R^2 = 0.998$, $F = 425.4$, $P = 0.031$)	8.4	196.1
<i>D. pusztensis</i>	$Y = 0.0052 X - 0.0460$ ($R^2 = 0.987$, $F = 156.5$, $P = 0.006$)	8.8	192.3
<i>D. isaea</i> (native)	$Y = 0.0054 X - 0.0444$ ($R^2 = 0.977$, $F = 84.3$, $P = 0.012$)	8.5	185.2
<i>D. isaea</i> (introduced)	$Y = 0.0057 X - 0.0518$ ($R^2 = 0.998$, $F = 1149.9$, $P = 0.001$)	9.1	175.4
Male			
<i>P. katonis</i>	$Y = 0.0052 X - 0.0437$ ($R^2 = 0.996$, $F = 450.4$, $P = 0.002$)	8.4	192.3
<i>H. varicornis</i>	$Y = 0.0079 X - 0.0926$ ($R^2 = 0.995$, $F = 397.4$, $P = 0.003$)	11.7	126.6
<i>C. pentheus</i>	$Y = 0.0039 X - 0.0261$ ($R^2 = 0.988$, $F = 166.6$, $P = 0.006$)	6.7	256.4
<i>D. minoews</i>	$Y = 0.0051 X - 0.0404$ ($R^2 = 0.998$, $F = 581.1$, $P = 0.026$)	7.9	196.1
<i>D. pusztensis</i>	$Y = 0.0053 X - 0.0458$ ($R^2 = 0.998$, $F = 1072.6$, $P = 0.001$)	8.6	188.7
<i>D. isaea</i> (native)	$Y = 0.0058 X - 0.0490$ ($R^2 = 0.985$, $F = 193.5$, $P = 0.005$)	8.4	172.4
<i>D. isaea</i> (introduced)	$Y = 0.0059 X - 0.0521$ ($R^2 = 0.991$, $F = 232.4$, $P = 0.004$)	8.8	169.5

が最も低く、逆に *H. varicornis* が最も高かった。有効積算温度についても、*C. pentheus* が最も大きく、*H. varicornis* が最も小さかった。

雌成虫の寿命、寄生及び寄主体液接種に及ぼす温度の影響

雌成虫の寿命は、7種類とも高温になるにつれて短くなった(Table 4)。 *H. varicornis*, *N. formosa*, および *D. isaea* の両系統は、全ての温度で、寿命は長く、逆に *D. minoews*, *D. pusztensis*, および *C. pentheus* は、全ての温度区で寿命は短かった。 *P. katonis* は、15°C では寿命が長かったものの、30°C では非常に短かった。

全ての温度区で寄生による殺害寄主幼虫数(Table 4)が多かったのは、*D. isaea* (土着系統) で、特に 15°C と 20°C での寄生数は標準偏差が大きいものの他種と比べて極めて多かった。しかし、20°C をピークにそれ以上の温度では寄生数が減少した。*D. isaea* (導入系統) は *D. isaea* (土着系統) と同様の傾向を示したが、その殺害数は土着系統と比べて明らかに少なかった。*C. pentheus* は、15°C, 20°C で、寄生による死亡寄主幼虫数が比較的多かったが、25°C 以上では低下し、30°C ではほとんど寄生が見られなかった。*P. katonis* も、15°C から 25°C では比較的多かったが、30°C ではほとんど寄生が見られなかった。*D. pusztensis* と *D. minoews* は全ての温度区で他の寄生蜂と比べて寄生による寄主幼虫殺害数は非常に少なかった。特に *D. minoews* は全ての温度区でほとんど寄生が見られなかった。*H. varicornis* と *N. formosa* は 15°C では寄生数が少なかったものの、温度の上昇とともに寄生数は増加し、30°C では *D. isaea* (土着系統) と同程度の寄生数となった。この2種は高温に適応していることが分かった。寄主体液摂取数による寄主幼虫殺害数は、*H. varicornis* と *D. isaea*, *N. formosa* が実験した全ての温度区で他の寄生蜂種よりも多く、特に *D. isaea* (導入系統) は 25°C においてもっとも多く寄主を寄主体液摂取によって殺害した (Table 4)。一方、これら3種を除く土着寄生蜂種では全ての温度区で寄主体液摂取数は少なかった。

Table 4. Effects of temperatures upon female longevity (d), numbers of hosts killed by parasitization and by host-feeding per female throughout lifetime (mean ± SD)

	15°C			20°C			25°C			30°C		
	n			n			n			n		
Longevity (d)												
<i>P. katonis</i>	10	30.2 ± 25.7	abc	10	17.2 ± 17.5	cd	10	14.0 ± 13.4	ad	10	2.3 ± 1.3	d
<i>H. varicornis</i>	10	31.6 ± 14.7	abc	10	26.8 ± 7.4	ab	10	20.7 ± 7.0	bc	10	16.6 ± 9.6	ab
<i>C. pentheus</i>	10	22.0 ± 11.7	bc	9	17.2 ± 10.0	bcd	9	10.2 ± 4.3	abd	10	2.2 ± 1.8	d
<i>N. formosa</i>	10	29.0 ± 16.6	abc	10	23.3 ± 10.0	abc	10	23.4 ± 9.2	abc	10	20.5 ± 8.4	a
<i>D. minoeus</i>	10	12.6 ± 6.6	c	9	5.3 ± 3.6	d	10	2.3 ± 1.5	d	10	1.7 ± 0.8	d
<i>D. pusztensis</i>	10	13.4 ± 7.2	c	10	11.5 ± 9.1	cd	10	7.3 ± 5.0	ad	10	3.6 ± 1.4	cd
<i>D. isaea</i> (native)	20	44.1 ± 16.2	a	15	33.9 ± 10.4	a	15	19.5 ± 5.6	c	10	16.8 ± 6.5	ab
<i>D. isaea</i> (introduced)	10	39.5 ± 18.4	ab	10	31.9 ± 10.1	a	10	16.0 ± 5.4	c	10	10.8 ± 5.4	bc
No. of hosts killed by parasitization												
<i>P. katonis</i>	10	79.6 ± 81.8	b	10	58.1 ± 90.0	b	10	79.2 ± 106.0	cd	10	1.0 ± 1.8	b
<i>H. varicornis</i>	10	37.1 ± 30.7	b	10	80.1 ± 46.0	b	10	135.5 ± 80.5	bc	10	151.3 ± 98.7	a
<i>C. pentheus</i>	10	65.2 ± 66.0	b	9	128.4 ± 129.4	b	9	35.8 ± 31.7	d	10	3.2 ± 10.1	b
<i>N. formosa</i>	10	17.4 ± 27.8	b	10	141.9 ± 93.2	b	10	201.2 ± 58.7	ab	10	172.3 ± 70.0	a
<i>D. minoeus</i>	10	13.0 ± 14.6	b	9	5.4 ± 7.1	b	10	0.1 ± 0.3	d	10	0.5 ± 0.8	b
<i>D. pusztensis</i>	10	14.8 ± 22.1	b	10	39.5 ± 38.4	b	10	32.9 ± 33.3	d	10	4.8 ± 8.1	b
<i>D. isaea</i> (native)	20	180.2 ± 138.2	a	15	334.5 ± 229.5	a	15	253.0 ± 74.9	a	10	174.4 ± 85.0	a
<i>D. isaea</i> (introduced)	10	66.9 ± 39.5	ab	10	157.1 ± 104.4	b	10	161.8 ± 83.3	bc	10	101.1 ± 76.1	a
No. of hosts killed by host-feeding												
<i>P. katonis</i>	10	32.8 ± 36.2	b	10	45.2 ± 31.2	c	10	34.1 ± 44.9	cd	10	3.5 ± 5.3	b
<i>H. varicornis</i>	10	76.8 ± 53.7	ab	10	117.0 ± 51.3	bc	10	151.6 ± 48.7	ab	10	157.8 ± 90.7	a
<i>C. pentheus</i>	10	15.1 ± 7.6	b	9	25.9 ± 16.9	c	9	7.3 ± 5.4	d	10	2.1 ± 4.2	b
<i>N. formosa</i>	10	32.3 ± 29.0	b	10	140.3 ± 75.9	bc	10	218.1 ± 114.8	a	10	177.0 ± 96.8	a
<i>D. minoeus</i>	10	26.5 ± 22.7	b	9	15.6 ± 19.7	c	10	5.9 ± 7.7	d	10	4.8 ± 5.4	b
<i>D. pusztensis</i>	10	6.1 ± 6.0	b	10	28.7 ± 22.2	c	10	7.6 ± 6.2	d	10	6.1 ± 5.6	b
<i>D. isaea</i> (native)	20	82.3 ± 88.7	a	15	238.9 ± 205.1	b	15	121.5 ± 98.7	bc	10	138.6 ± 78.2	a
<i>D. isaea</i> (introduced)	10	109.7 ± 120.3	a	10	465.6 ± 213.0	a	10	234.0 ± 37.4	a	10	138.8 ± 99.0	a

Means in the same column, followed by same letters were not significantly different at $p < 0.05$ (Tukey-Kramer test).

Table 5. Net reproductive rate (R_0) and intrinsic rate of increase (r_m) of seven eulophid parasitoids on *L. trifolii* at various temperatures

	R_0								r_m^b			
	15°C		20°C		25°C		30°C		15°C	20°C	25°C	30°C
	n		n		n		n					
<i>P. katonis</i>	10	11.92	10	7.63	10	10.97	10	0.40	0.0424	0.070	0.099	-0.102
<i>H. varicornis</i>	10	7.19	10	18.51	10	38.22	10	49.40	0.0269	0.108	0.200	0.278
<i>C. pentheus</i>	10	10.09	9	16.38	9	3.46	10	All died ^a	0.0444	0.092	0.060	All died ^a
<i>N. formosa</i>	10	4.54	10	79.94	10	114.24	10	103.97	0.0215	0.083	0.200	0.258
<i>D. minoeus</i>	10	2.30	10	0.90	10	All died ^a	10	All died ^a	0.0220	-0.006	All died ^a	All died ^a
<i>D. pusztensis</i>	10	4.20	10	18.70	10	17.30	10	1.90	0.0320	0.112	0.188	0.042
<i>D. isaea</i> (native)	20	42.03	10	115.75	10	74.26	10	40.01	0.0709	0.150	0.205	0.203
<i>D. isaea</i> (introduced)	10	13.02	15	33.09	15	31.71	10	23.02	0.0491	0.119	0.183	0.215

^a All progeny had died prior to adult eclosion due to high temperatures.

^b Nos. of replications in r_m are the same as in R_0 , respectively.

本実験結果に基づく (Table 4) 7種の寄生蜂の雌成虫の日齢別生存率(l_x),日齢別産卵数(m_x)から求めた純増加率(R_0)と内的自然増加率は(r_m) (Birch, 1948) ($T = \sum x l_x m_x / \sum l_x m_x$, $R_0 = \sum l_x m_x$, $\sum e^{-r_m} l_x m_x = 1$) (Table 5), *D. isaea* (土着系統) が 15°C, 20°C で純増加率が最も高く, 特に 15°C では,他の寄生蜂と比べ3倍以上となったが, 25°C, 30°C では平均的だった. *D. isaea* (導入系統) も土着系統とほぼ同様の温度傾向となった. 内的自然増加率も *D. isaea* (土着・導入系統) が 15 °C, 20 °C で他種と比べて非常に高かった. *H. varicornis* と *N. formosa* は純増加率, 内的自然増加率ともに 15°C では低いが, 温度の上昇に伴って高くなった. 特に *N. formosa* の純増加率は 30°C で他の寄生蜂の2倍以上の値となった. 一方, *P. katonis*, *C. pentheus*, *D. minoews*, *D. pusztensis* は, 純増加率, 内的自然増加率ともに 20°C 以上の温度では, 上記4種と比べて極めて低い値で推移した. 特に *D. minoews* は 20 °C で内的自然増加率がマイナスとなり, 25°C 以上の温度では雌成虫が羽化しなかった.

第4節 考察

土着寄生蜂の温度耐性

van Lenteren (1986)は, 外来の天敵から生物的防除資材選抜するにあたり, 8つの事前評価基準を示した. それらの基準のうち6つの基準は, 温室における接種的放飼法による生物的防除と密接に関連している. そのうちの3つの基準だけが土着天敵の有用性に関連する. すなわち適した飼育方法と同様に際立った繁殖能力と密度反応性である (Walde and Murdoch, 1988). これらは特に温度と密接に関連する. 西日本の温室は外気温と異なり1年を通じて激しく変動する; 例えば, 静岡農事試験場における1995年から1997年までの記録によると, 平均気温は冬季で 15.6 °C (6.0 ~ 31.6 °C), 夏季は平均 28 °C (19.0 ~ 44.9 °C) であった (小澤博士, 私信). したがって, そのような温度環境で用いられる生物的防除資材は, 極端な温度変化に対する高い適

応性が求められ、それは van Lenteren の導入天敵の事前評価における 3 番目の基準である「気候への適応」に相当する。ゆえに、施設内で接種的放飼するための生物的防除資材を土着寄生蜂類から選抜するにあたり、温度耐性、特にそれらの発育と寿命および繁殖能力に関する評価は必須である。

本研究では、西日本における有力なハモグリバエ類寄生蜂類であり(Takada and Kamijo, 1979; Sugimoto et al., 1983a; Kato, 1994, 1996a, b), かつわが国の施設圃場においてマメハモグリバエに寄生が確認された(小西, 1998)7 種のヒメコバチ科寄生蜂に注目し、マメハモグリバエの生物的防除資材として最適な寄生蜂種を選抜するために、それらの発育および繁殖能力における温度耐性を実験的に比較、検討した。その結果、それらは高温適応的な 2 種、*H. varicornis*, *N. formosa* および低温適応的な他の種に大別することができた。*D. isaea* (土着系統) の寄生による寄主の死亡率が 25°C 以上で大きく減少したものの、全ての温度区において 7 種の中で最も高かったことは注目される (Table 4)。逆に、*D. minoews* のそれは概して非常に低いものの、試験されたすべての温度区では 15 °C で最も高かった。わが国では、*D. minoews* は高地における捕食寄生蜂群で優勢種であるものの、低地では劣勢であることから(Kato, 1996a,b), *D. minoews* は、より低温に適応的な種であるようである。

杉本 (1998) は、わが国に生息するハモグリバエ類と、それらの土着寄生蜂類に関して各々の世界的な分布域の間には明白な対応関係があり、それぞれ南方型と北方型に大別できる事、そして、その類型化は個々の種の温度特性と密接な関係があることを明らかにした。本研究において解明された温度特性に基づく 2 つのカテゴリーは、杉本の説と良く一致した。

放飼と大量生産の各段階における捕食寄生蜂の有効性の総合的な評価

生物的防除資材として有効な捕食寄生蜂は、その寄主と同等またはより大きい繁殖能力 (r_m) を持つべきであることはしばしば述

べられる。

本研究に供試した全ての寄生蜂は，寄生だけでなく寄主体液摂取によっても寄主を殺害した。寄主体液摂取による寄主殺害は，害虫の防除において有効である(Yamamura and Yano, 1988; Kidd and Jarvis, 1989)。それゆえ，寄生蜂の効率的評価のためには，寄生だけでなく寄主体液摂取にも基づくべきである(van Lenteren, 1986)。しかし，寄主体液摂取によって寄主を殺さない寄生蜂と異なり，寄主体液摂取によって寄主殺害を行う寄生蜂の評価は複雑である。すなわち圃場での「寄生蜂放飼段階」においては寄主体液摂取による寄主殺害によって，高い防除効果を得られる。しかし，寄主体液摂取により殺害された寄主は，次世代虫生産に直接には寄与しないので，寄主体液摂取による寄主殺害は「大量増殖段階」においては寄主の無駄な利用ということになる。その結果，寄主体液摂取による寄主殺害の生物的防除全体に及ぼす効果は，生物的防除の「放飼段階」と「大量増殖段階」の2段階間で相反することになる。したがって，生物的防除資材としての寄生蜂の効率評価は，これらの2段階における効率を総合的に考慮して行われるべきである。

Hondo et al. (2006) は，生物的防除資材としての有効性を増殖段階から放飼段階まで通して総合評価するため，生物的防除効率 Biological Control Efficiency (BCE) を提案した。BCE は以下の式で求められる。

$$BCE = (N'_{ov} + N'_{hf})aRN_{ov} / (N_{ov} + N_{hf})$$

この方程式は，1匹の母蜂によって寄生のために殺害された寄主数を N_{ov} ，寄主体液摂取によって殺害された寄主数を N_{hf} ，同様に娘蜂によって寄生のために殺害され寄主数を N'_{ov} ，寄主体液摂取のために殺害された寄主数を N'_{hf} とする。さらに寄主1匹あたり

の平均産卵数を a 、次世代雌成虫比を R とする。 aRN_{ov} は、母蜂の純増加率 (R_0) にほぼ等しい。 $(N'_{ov} + N'_{hf}) / (N_{ov} + N_{hf})$ は、母蜂の「増殖段階」における温度と娘蜂の「放飼段階」における温度の組み合わせにより変化する (Table 4)。また、生物的防除行程における2段階間の総寄主殺害比率を示すだけである (Table 5)。したがって BCE は R_0 に依存し、特に「増殖段階」と「放飼段階」の温度が等しいと R_0 に等しい。娘蜂の寄主体液摂取による寄主殺害の利益により母蜂の寄主体液摂取による寄主殺害の損害が相殺されるため、 BCE は寄主体液摂取に直接影響されない。上記の方程式において、なんらかの方法によって N_{hf} を減らすことができれば、 BCE は増大する。Ueno(1997年)は効率的な大量生産のために、メスに寄主の代わりに人工飼料を給餌して寄主体液摂取の割合を減らすことを提案したが、それは人工飼料の生産コストが寄主生産コストより安い場合のみ当てはまる。Table 6 は、20°C で生産された7種の寄生蜂の娘蜂が、種々の温度区に放飼されたと仮定して計算された BCE 値である。*N. formosa* (産雌単為生殖系統) の BCE は、25°C 以上で供試寄生蜂のなかで最も高く、逆に *D. isaea* (土着系統) のそれは、15°C と 20°C で最も高かった。また、これらの2種の BCE は供試されたすべての種の間で一貫して高かった。*D. isaea* の導入系統は、土着系統と比べて寄主体液摂取による寄主殺害数が多いので、導入系統の BCE は土着系統より劣った。

これらの結果より、この研究で実験に供試されたどの寄生蜂種も、温度の変化の激しい西日本の施設圃場において年間を通した一貫使用には適さないことが分かった。 BCE の優れた *D. isaea* (土着系統) と *N. formosa* (産雌単為生殖系統) についてみると、*D. isaea* (土着系統) が相対的に広い温度範囲で適用可能であるが、 BCE は 30°C で減少した。一方、高温耐性の高 *N. formosa* では、30°C 以上の

高温で高い防除効果が期待できるが、反面 20°C 以下では期待できない。したがって、西日本の施設圃場では、平均気温 20 から 25°C を目安として、秋の後半から春にかけての低温季には *D. isaea*（土着系統）を、高温季には高温耐性の高い *N. formosa*（産雌単為生殖系統）を使い分けるのが最適と思われた。

Table 6. *BCE* calculated assuming that parasitoids, after mass-produced at 20°C, were released at various temperatures

	Temperatures in the release stage			
	15°C	20°C	25°C	30°C
<i>P. katonis</i>	8.30	7.63	8.37	0.33
<i>H. varicornis</i>	10.70	18.51	26.96	29.03
<i>C. pentheus</i>	8.52	16.38	4.58	0.56
<i>N. formosa</i>	14.08	79.94	118.78	98.95
<i>D. minoews</i>	1.69	0.90	0.26	0.23
<i>D. pusztensis</i>	5.73	18.70	11.10	2.99
<i>D. isaea</i> (native)	52.99	115.75	75.60	63.18
<i>D. isaea</i> (introduced)	9.38	33.09	21.03	12.75

第4章 ハモグリミドリヒメコバチの大量増殖法の確立

第1節 はじめに

第3章においてわが国のハモグリバエ類の優勢な寄生蜂群であるヒメコバチ科から、温度特性と生物的防除効率（BCE）に基づいてイサエアヒメコバチ *D. isaea* とハモグリミドリヒメコバチ *N. formosa* の2種をマメハモグリバエ（本章において以後ハエと表記）に対する有望な生物的防除資材として選抜した。

寄生蜂を生物的防除資材として商品化するためには、効率の高いそして低コストな寄生蜂の大量生産工程の確立が必要である。わが国の高い人件費を考慮すると、全作業工程の中でも最も人件費を要すると考えられる寄主および寄生蜂の増殖工程の省力化・効率化が求められる。さらに、剤型、梱包、保蔵方法といった品質管理についても検討が必要である。そこで、本章ではまずハエの生物的防除資材として、ハモグリミドリヒメコバチ産雌単為生殖系統（本章において以後ハチと表記）を採用することとし、その効率的な大量増殖工程を設計した。ついで作業の省力化・効率化のための大量増殖装置の試作とその性能評価、さらに剤型、梱包、保蔵について検討した。ところで、ハエおよびハチともに、寄主植物1株あたり可能な限り多くの個体を生産することが求められるが、ハエが寄主植物に過剰産卵すると、過密の弊害が生じてハエ幼虫の発育不良や死亡率上昇を招き、さらには寄主植物の枯死を招く。また、ハチ成虫の過剰放飼は寄生蜂の寄主体液摂取による寄主死亡率を高め、その結果寄生効率の低下を招く（大野ら、1999）。そこで本研究では、寄主植物1株あたりのハエとハチの最適放飼密度を実験的に検討した。

第2節 実験の準備

大量生産工程設計の概要

図6に本研究で設計したハエおよびハチの大量生産工程の概略を示した。ここ

に提案する大量増殖工程は、寄主植物栽培、ハエ生産、ハチ生産およびハチの梱包・保蔵の4工程からなる。このうち、ハチの増殖は、はじめの3工程を経る必要がある。生産コストを抑えつつ天敵の安定供給を行うためには、第1に生物的防除資材として性能が高く、かつ生産効率が高い寄生蜂種の選抜、第2に栽培容易な寄主植物と増殖容易な寄主種の選定 (Finney and Fisher, 1964)、第3に寄主および寄生蜂の生理、生態的特性を考慮した各作業工程における各種装置の作成とその稼動時間の設定などが必要である。本研究では、候補寄生蜂種として、温度特性を加味した基準である生物的防除効率 (BCE) によって選抜したイサエアヒメコバチとハモグリミドリヒメコバチのうち、増殖および管理が容易な寄生蜂ハモグリミドリヒメコバチの共生微生物 *Wolbachia* に感染された (Stouthamer and Luck, 1993) 産雌単為生殖系統 (Hondo et al., 2006) を採用した。本系統は、鹿児島県農業試験場の好意により入手した。

一般的に天敵生産における大幅なコスト低減と省力化のために代替寄主・人工飼料の利用が求められるが (Stinner, 1977)、ハエ寄生蜂に関しては有望な人工飼料は未開発であること、また代替寄主の使用によって寄主選好性に影響を与える危険性があることから (Morison and King, 1977)、寄主としてハエ幼虫を用い、寄主植物としてはインゲンマメ (*Phaseolus vulgaris* L.) の十分に展開した初生葉を採用した。インゲンマメは他種寄主植物と比べて寄主幼虫の発育が速く、繁殖能力も高いなど (西東ら, 1995a; 小澤ら, 1999a) 食草として優れており、さらに栽培が容易で、20°C~25°C下の温室では初生葉が実験に必要な大きさに成育するまでに播種後10日から2週間程度と短い (西東, 1993; 1997a; b)。

ハチの生物的防除効率 (BCE) は25°Cで最も高く (Hondo et al., 2006)、ハエの増殖能力も25°Cが最も高かった (小澤, 1999)。これらの理由から、大量増殖工程の温度を25°Cに設定した。

ハエ幼虫は、25°C下でインゲンマメを寄主植物として飼育すると、卵期間は 3.1 ± 0.2 日 (mean \pm SD 以下同様)、幼虫期間は 4.0 ± 0.2 日で、産卵後平均7.1日

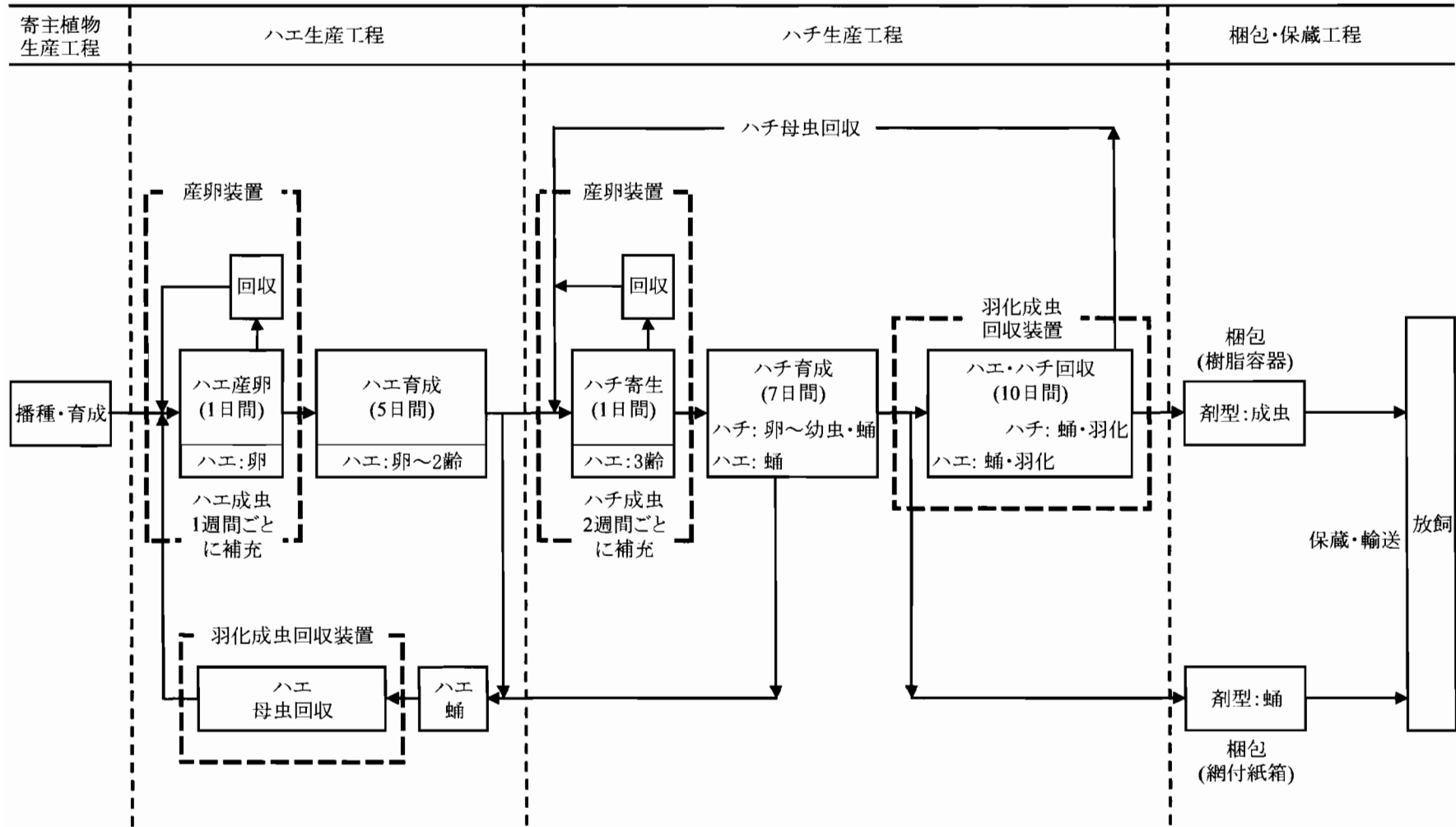


図6. 放飼寄生蜂ハモグリドリヒメコバチの大量増殖工程

目に蛹化のために寄主植物を脱出する（西東ら，1995a）．トマトを寄主植物とすると若干発育が遅れるといわれているが（西東ら，1995a），トマトの場合には産卵後平均 5.5 日でハチの寄生適齢期である 3 齢期まで発育したことから（Minkenberg, 1990），これらを参考にハエ増殖工程においてハエ産卵期間を 1 日間，そしてハエ幼虫の育成期間を産卵後 5 日間と設定した．一方，ハエの寿命，生涯産卵数は，飼育環境や採集地域によって変動するが（西東ら，1995a；小澤ら，1999a；徳丸・阿部，2003），本研究で用いた系統の 25℃における平均寿命は 7.9 ± 2.0 日であり，生残寄主成虫の日当たり産卵数は羽化後 8 日まで比較的多かった(図 7)．そこで，寄主生産工程においては，活発な産卵を持続するために羽化直後のハエ成虫を母虫として 7 日ごとに補充することとした．

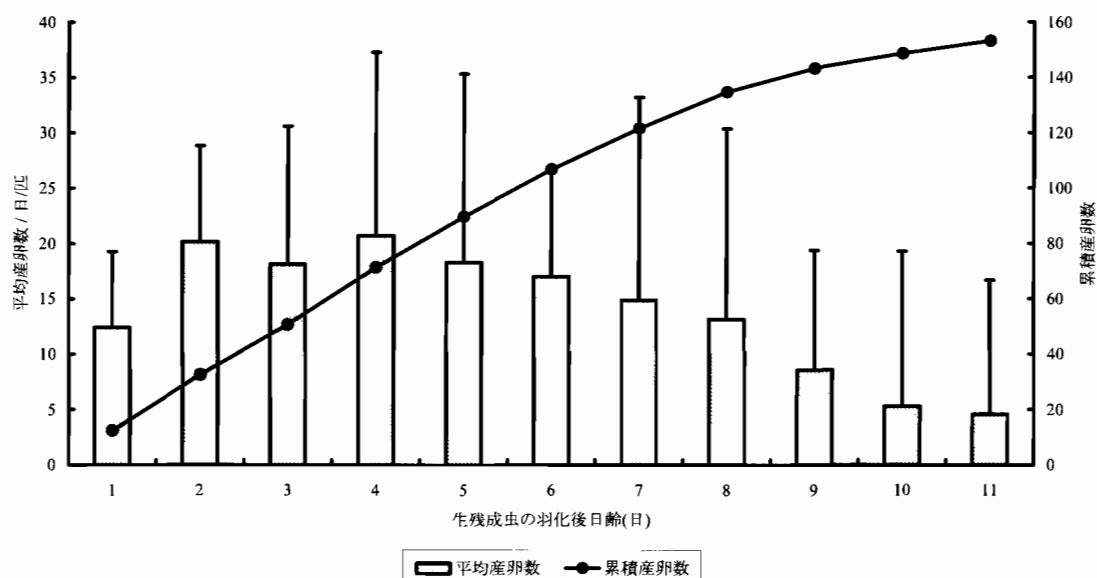


図 7. マメハモグリバエ生残成虫 1 匹による日齢ごとの平均産卵数および累積産卵数の推移（本藤，1999）

25℃におけるハチの産卵後蛹化までの発育期間は 5.9 ± 0.7 日（mean±SD），蛹期間は 8.1 ± 1.7 日，雌成虫寿命は 23.4 ± 9.2 日であった（Hondo et al., 2006）．これらの結果をもとに，寄生蜂生産工程においてハチの寄生のための産卵期間を 1 日間，そして育成期間を寄生後 7 日間に設定した．そして，成虫剤型の場合

(図 6) の羽化成虫回収期間を发育期間の個体差を考慮し 10 日間と幅を持たせた。生残ハチ成虫の日当たりの寄生数は、羽化後 2 週間までは比較的多かったので (図 8)、活発な寄生を持続するために羽化直後のハチ成虫を母虫として 2 週間ごとに補充することとした。ハチによる寄生と寄主体液摂取による殺害を免れたハエ幼虫は、ハチ育成期間中にインゲンマメ葉より脱出して多くは床面で蛹化する。これらのハエ蛹は回収し、ハチ母虫回収用の羽化成虫回収装置 (図 6) へ放飼することとした。つぎに、ハエの平均发育全期間は、前述した卵期間、幼虫期間と蛹期間 9.7 ± 0.5 日を合わせ 16.8 日 (西東ら, 1995a) なので、ハエ生産工程において、たとえばハエ産卵 (1 日間) 終了間際に産卵されたハエのうち幼虫期に寄生を免れて葉上で蛹化した個体は、ハチ羽化成虫回収装置内に移して 4 日後に羽化することになる。一方、ハチについてみると、産卵後、羽化までの发育全期間は 14.0 ± 1.6 日 (Hondo et al., 2006) であった。したがって上記において寄生されたハエ幼虫についてみると、ハチ寄生 (1 日) 開始直後に寄生したハチは、羽化成虫回収装置に移して 6 日後に羽化することになる。したがってもっとも遅れて羽化するハエと、もっとも早く羽化するハチの羽化予定

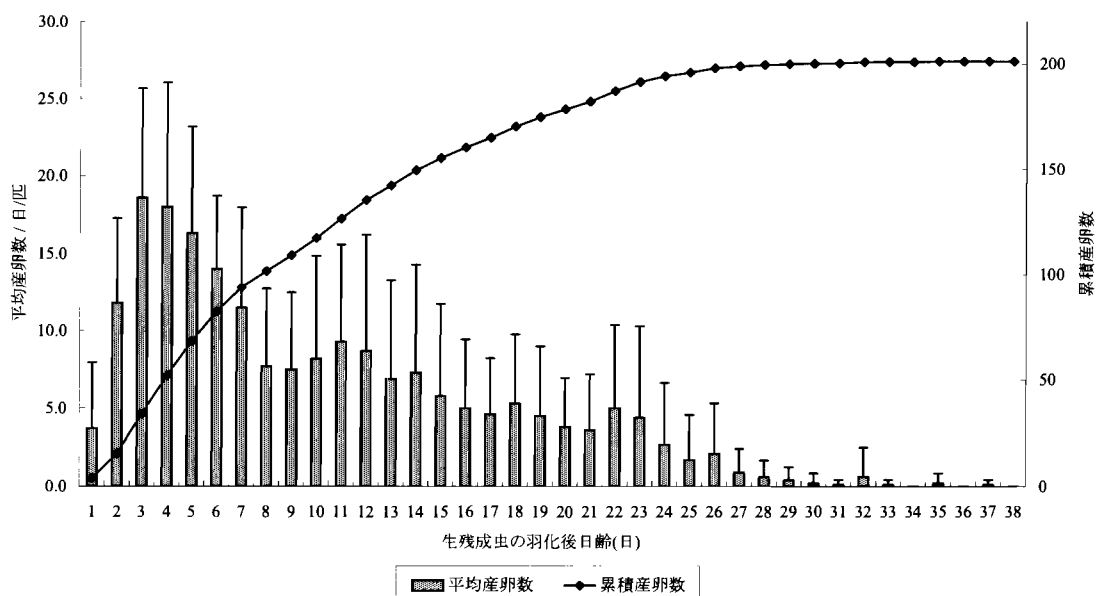


図 8. ハモグリミドリヒメコバチ生残成虫 1 匹による日齢ごとの平均寄生数および累積産卵数の推移(Hondo et al., 2006 より)

日には2日程度のずれが生じることとなり、羽化したハチ成虫にハエ成虫が混在して回収される可能性はほとんど無いと考えられる。しかし、成虫剤型の場合には、ハエ成虫の混入を1匹たりとも防がなければならないので、羽化成虫回収装置の回収部底面に1mm目の網を貼り、ハチ成虫だけが移動可能とした。

現在、導入寄生蜂ハモグリコマユバチとイサエアヒメコバチは、植物検疫上の理由から剤型が成虫態に限られているが（農薬登録情報、<http://www.acis.go.jp/>）、成虫剤型ではその保蔵および輸送過程でハチ成虫の寿命の損耗、さらに温度環境の変化や栄養不足による品質低下を引き起こす。特に、ヒメコバチ類のほとんどの種は逐次成熟性（synovigenic）であるので、成虫の生存や卵形成に必要なたんぱく質を得るために寄主体液摂取をするため

（Flanders, 1935 ; Jervis and Kidd, 1986）、成虫保蔵は寿命や繁殖能力に大きく影響を与える恐れがある（Sugimoto et al., 1983b）。一方、蛹剤型は設置したハウスにおいて寄生蜂は羽化後直ちに寄主攻撃が可能であるので、保蔵・輸送過程における成虫寿命の損耗、栄養不足などによる品質低下の恐れが少ない。本研究では成虫剤型と蛹剤型について品質を検討した。

産卵装置の設計

従来の実験において一般的に行なわれてきた吸虫管による成虫の回収作業は、全生産工程の中でも特に労力を要し（Parrella et al., 1989）、より省力的な回収装置の作成が求められる。嶽崎ら（1999）は連結した2つの飼育箱を用い、正走光性を利用して産卵を終えたハエ成虫および寄生蜂成虫を効率よく回収する産卵装置を考案した。他方、正走光性に加え、負走地性も利用した回収装置も考案された（小澤ら、1998 ; 大野、1998 ; 大野ら、1999）。本研究では、これらを参考に、以下の2通りの産卵装置を試作した。

まず、正走光性を利用して成虫を隣りの産卵区画へ移動させる横移動式産卵装置を試作した。この装置は木製フレーム（横70cm、高さ25cm、奥行き46cm）の内側側面にアクリル板（厚さ0.5mm）、底面はベニヤ板、天井面は通気性を

考慮してさらし布を張り，上・下端に移動用開口部（縦 3cm，横 30cm）を開けた仕切り板を装置中央部に設置して装置を 2 区画に分割した（図 9）．増殖は 2 区画で交互に行うこととし，寄主生産工程ではまず，一方の区画にインゲンマメ株を設置した後，ハエ成虫を放飼して産卵させた．産卵終了後，その区画を暗幕で遮光して，正走光性により成虫が明るい他方の区画に移動するようにした．寄生蜂生産工程では，ハエ 3 齢幼虫がいるインゲンマメ株を一方の区画に設置した後，ハチを放飼して寄生させた．寄生終了後，ハエと同様にして他方の区画に移動させた．

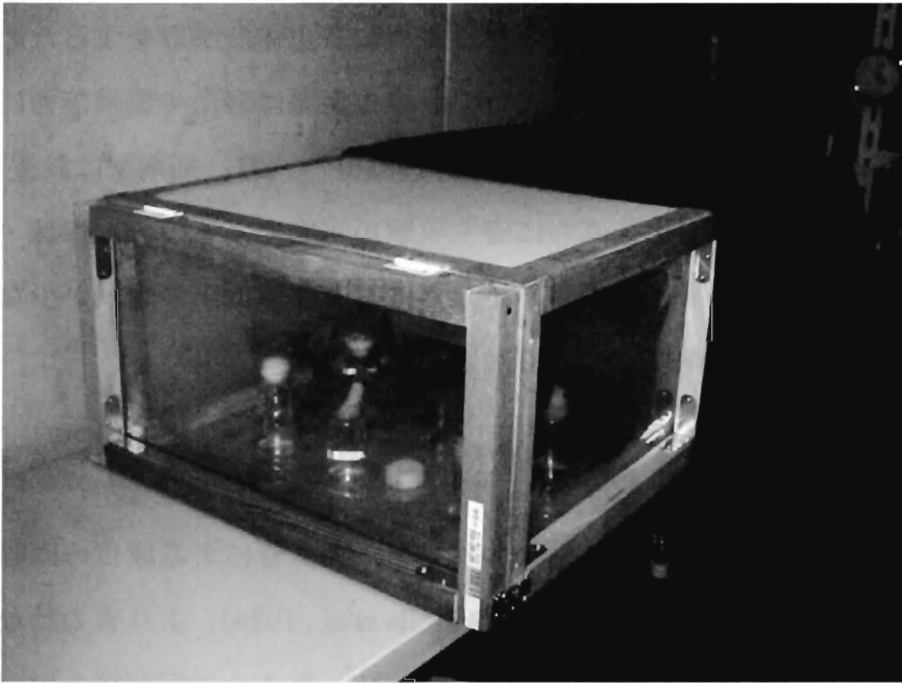


図 9. 横移動式産卵装置（詳細は本文参照）

つぎに，寄生終了後のハチ成虫の回収率の上昇を目指して，正走光性と負重力走性を利用した縦移動式産卵装置を試作した．この装置は木製フレーム（幅 35 cm，高さ 30 cm，奥行き 35 cm）の内側側面にアクリル板（0.5mm），天井面は通気性の確保とハチ脱出を防止するために 0.1mm 目の網を張り，天井面の中央部に穴（縦 10cm，横 8.5cm）を開け，上部を切断したペットボトルの開口部

をこの穴に取り付けた（図 7）。ハチの寄生については，成虫回収口にあたるペットボトルの注ぎ口をキャップで閉めた後，この装置内に 3 齢ハエ幼虫のいるインゲンマメ株を設置し，ハチを放飼して寄生させた．寄生終了後，キャップを外し，あらかじめ用意したペットボトルのキャップ 2 つを両面粘着テープで張り合わせて，そこ穴（直径 20mm）を開けたものをペットボトルに取り付けた．次いで，ペットボトル部を除く産卵装置全体を暗幕で遮光して，正走光性を利用してハチを明るいペットボトル部に移動させた．この際，回収部を産卵装置の天井面に設置したことにより負走地性の相乗効果による回収率の向上が期待できる．

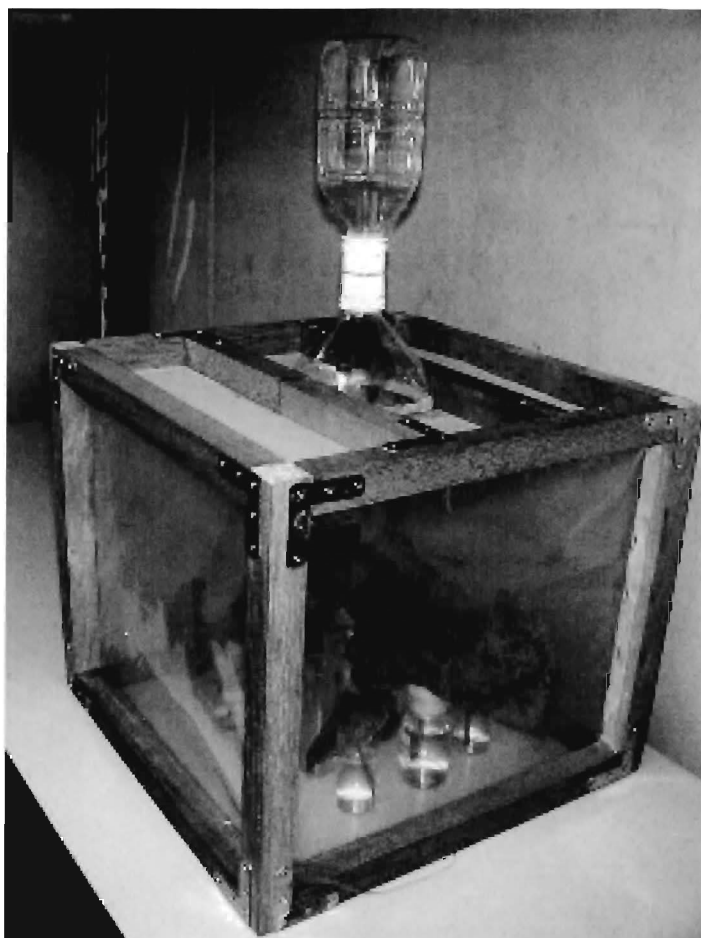


図 10. 縦移動式産卵装置（詳細は本文参照）

羽化成虫回収装置の設計

大野（1998）や小澤ら（1998）は、寄生蜂成虫の正走光性を利用した羽化成虫回収装置を考案し、効率的回収に成功した。特に、小澤ら（1998）は、寄生蜂の種間差にかかわり無く、高い回収効率を得たので、本研究ではこれに準じて羽化成虫回収装置を試作した。この装置は木製フレーム（幅 60.5cm，奥行き 36cm，高さ 33cm）の内側面と底面に樹脂板（厚さ 5mm）を貼った本体部分と、木製フレーム（幅 60.5cm，奥行き 36cm，高さ 2.5cm）の上面に樹脂板を貼りその中央部に穴（直径 9 cm）をあけ、ガラス製ロート（外径，最大：9cm，最小 1cm，高さ 20cm）を取り付けた回収部を兼ねる上蓋からなる。この装置内にハエ蛹を静置し、またはハチ蛹がいるインゲンマメ葉を設置する。羽化後，成虫

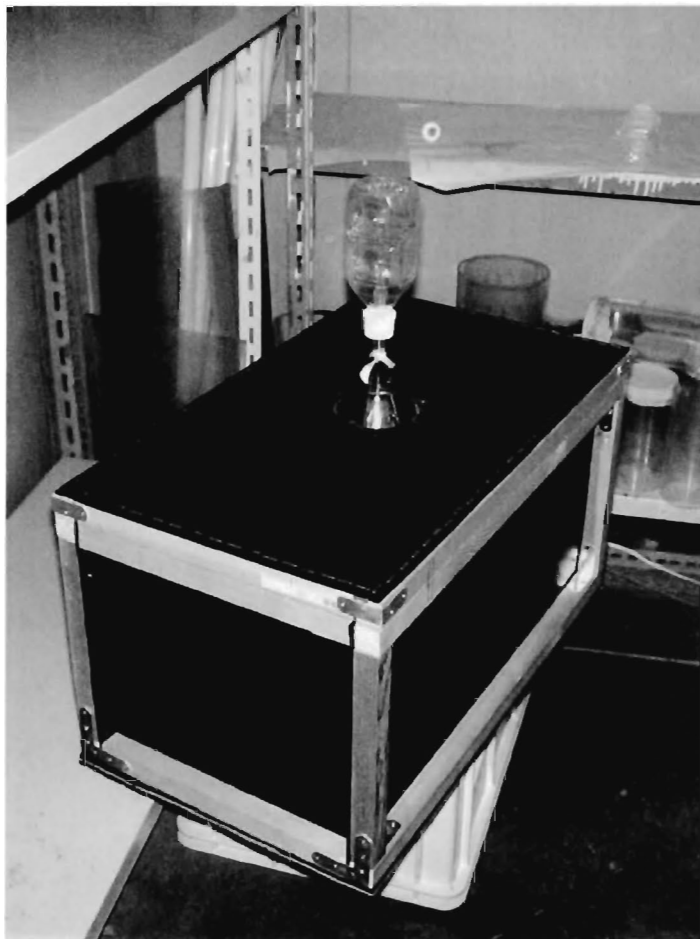


図 11. 縦移動式産卵装置（詳細は本文参照）

は正走光性によりロート内を移動してその先端に逆さに差し込んだペットボトルに回収される（図 11）。なお、ハチ回収の時に設置した葉にハエ蛹が付着している危険性があるので、ハエ成虫の混合回収を避けるために蓋に開けた回収穴に網（1mm 目）を貼ってハエ成虫の通過を防いだ。回収装置内にハチ蛹がいるインゲンマメ葉を一緒に入れるため、装置内部で葉が腐敗するのを防止するため、装置内に設置する前に葉を茎から切り離して 25°C の恒温器で乾燥処理を施した。また、装置内で葉が重なり合ってハチの羽化、脱出を妨げる恐れがあるので、内箱として紙箱（16×13×2.0cm）を用い、1 箱あたり葉 2 枚を入れて装置内に縦方向に配置して、効率的に蛹を収納することができた。

梱包資材

従来の成虫態に加えて蛹態についても梱包資材を試作した。成虫態梱包材として、マイネックス[®]（アリスライフサイエンス社）を参考に、ハチの餌として底面に 10% 蜂蜜水入り小皿を取り付け、上面にガーゼを張ったプラスチック製円筒（高さ 10 cm，内径 2 cm）を用いた。蛹態梱包材として、一方の開口蓋の半分を切除してハチは通過可能だがハエは不可能な網（1mm 目）を貼った紙箱（16×13×2.2cm）を試作し、葉 2 枚を収納することとした。（図 12）。開口部に



図 12. 蛹梱包用網付き紙箱（詳細は本文参照）

網を貼ることによって、害虫であるハエを箱外へ脱出させないだけでなく、インゲンマメ葉内にわずかでも残存している可能性があるハエ蛹を検査・除去する作業が省ける。

第3節 実験方法

産卵装置における成虫回収

横移動式産卵装置は、一方の区画に200ccのプラスチック製広口瓶の中蓋に穴（直径2mm）を開け、その穴に差したインゲンマメ6株を装置内に設置し、そこにハエ成虫30対を放飼して24時間産卵させ、その後、他方の区画に新しいインゲンマメ6株を設置し、前者の区画を暗幕によって遮光し、24時間後に後者の区画に移動したハエ個体数を計数した。ハチについては、2齢後期から3齢前期のハエ幼虫が最低30匹いるインゲンマメ株を一方の区画に設置し、ハチを50匹放飼してハエと同様の方法で実験を行った。つぎに、縦移動式産卵装置については、成虫回収口をペットボトルのキャップで閉め、2齢後期から3齢前期のハエ幼虫が最低30匹いるインゲンマメ株を装置内に設置し、その中にハチ50匹を放飼して、12時間寄生させた。寄生終了後、回収口のキャップを外し、成虫回収用のペットボトルを装着した後、回収筒を除く装置全体を暗幕によって遮光し、12時間後、ペットボトル内に移動した成虫数を計数した。

羽化成虫回収装置における成虫回収率

まず、当日羽化したハエ、ハチ成虫をそれぞれ羽化成虫回収装置内に放飼し、回収筒内に回収された個体数を6時間後と24時間後に計数した。つぎに、蛹化後9日経過したハエ蛹100個体をプラスチック皿に載せて、装置内に設置した。ハチについては、寄生後12日間経過したインゲンマメ葉を、腐敗防止のため25℃で24時間乾燥させてから装置内に設置した。ハエ、ハチともに24時間後に、回収筒に回収された成虫数を計数した。

剤型・保蔵が寄生蜂におよぼす影響

まず、成虫態梱包保蔵について検討するため、梱包容器に羽化直後のハチ成虫を入れ、15℃、70%RH 下で3日間または5日間保蔵した。その後、天井にガーゼ布を貼ったプラスチック円筒（直径10cm、高さ20cm）内に30匹以上の2齢後期から3齢前期のハエ幼虫がいるインゲンマメ1株を設置し、そこに1匹の寄生蜂を放し、寄生させた。ハチが死亡するまで、毎日新しいインゲンマメ株と交換し、寿命と寄生および寄主体液摂取による殺害ハエ幼虫数を計数した。なお、内部寄生蜂であるために卵の確認が困難だったので、孵化幼虫数を産卵数とみなした。つぎに、蛹態梱包・保蔵について検討するために寄生7日後に茎から葉を切り離し、腐敗防止のため25℃で24時間乾燥させて蛹態梱包容器に収納した場合と、乾燥処理を施さずにそのまま梱包容器に収納した場合の2通りについて検討した。まず5℃で5日間保蔵した後、野外の小型ハウス（平均温度：24.9℃最高：34.9℃、最低：19.6℃、平均相対湿度：97.1%、最高：99.0%、最低：80.0%）において、プラスチック円筒（直径20cm、高さ30cm）内に両方の剤を入れ、羽化率を調べた。次に、上記と同様にして乾燥処理を施した後、梱包容器に収納した蛹を5℃で5日間保蔵した後、25℃下で上記と同様のプラスチック円筒内にそれぞれ収納して、羽化率を調べた。対照区として、5℃処理を施さないで終始25℃下において同様の実験も行った。

最適放飼密度の決定

まず、インゲンマメ1株を、天井面にさらし布を貼ったプラスチック円筒（直径20cm、高さ30cm）内に設置し、その中に羽化当日のハエ成虫を3対、5対、10対放飼し、24時間産卵させた後産卵数を計数した。つぎに、ハエ3齢幼虫50匹が寄生したインゲンマメ1株（余剰なハエ幼虫は事前に柄付き針で除去した）を上記と同様のプラスチック円筒内に設置し、3対、5対、7対、10対のハチ成虫をそれぞれ放飼して24時間寄生させ、寄生および寄主体液摂取によって殺害された寄主幼虫数を計数した。なお、内部寄生蜂であるために卵の確認が

困難だったので、孵化幼虫数を寄生数とみなした。

第4節 結果

産卵装置における成虫回収

横移動式産卵装置における回収率は、ハエで75.3%、ハチで66.4%となり、ハエの回収率が有意に高かった ($P < 0.05$: χ^2 -test) (表1)。遮光区画に残った両種成虫の多くは葉の上か装置の天井面に止まっていた。次に、縦移動式産卵装置におけるハチの回収率は、回収時間が12時間と横移動式の半分であったが、68.4%とほぼ同じであった (表7)

表7. 産卵装置における成虫回収率 (mean±SD)

種	n ¹⁾	放飼虫数	回収虫数	回収率 (%) ²⁾
横移動式				
<i>L. trifolii</i>	5	60(30対)	45.2 ± 4.2	75.3 a ³⁾
<i>N. formosa</i>	5	50	33.2 ± 4.5	66.4 b

縦移動式				
<i>N. formosa</i>	5	50	27.4 ± 3.6	68.4

¹⁾ 繰り返し数を示す

²⁾ 全繰り返し数の総回収数 / 全繰り返し数の総放飼数

³⁾ 同じアルファベットの数値間で有意差なし ($P < 0.05$: χ^2 -test)

羽化成虫回収装置における成虫回収率

成虫放飼の場合、24時間後の回収率は、ハエで雌：86.9%、雄：82.4%、ハチで94.4%となり、ハチの方が有意に高く ($P < 0.05$: χ^2 -test with Bonferroni correction) (表8)、多くのハエとハチは、実験開始後6時間以内に回収された。蛹放飼の場合の回収率は、ハエで81.7%、ハチで92.5%となり、両種ともに高く、また、ハチはハエよりも回収率は有意に高かった ($P < 0.05$: χ^2 -test) (表8)。蛹放飼の場合における未回収ハエの多くは、羽化失敗によるものだった。

表8. 成虫回収装置における回収率 (mean±SD)

		n ¹⁾	供試虫数	6時間後 回収虫数	24時間後 回収虫数	未回収虫数	回収率 (%) ²⁾
成虫放飼							
<i>L. trifolii</i>	♀	10	45.7 ± 5.8	31.8 ± 7.5	39.7 ± 5.2	6.0 ± 3.9	86.9 a ³⁾
	♂	10	46.6 ± 5.1	30.8 ± 5.7	38.4 ± 5.2	8.2 ± 3.8	82.4 a
<i>N. formosa</i>	♀	10	50.0 ± 0.0	30.5 ± 5.8	47.2 ± 2.0	2.8 ± 2.0	94.4 b
蛹放飼							
<i>L. trifolii</i>		3	100.0 ± 0.0		81.7 ± 6.8	18.3 ± 6.8	81.7 a ⁴⁾
<i>N. formosa</i>		5	130.8 ± 40.4		120.4 ± 36.7	9.8 ± 4.8	92.5 b

¹⁾ 繰り返し数を示す

²⁾ 全繰り返し数の総回収数 / 全繰り返し数の総放飼数

³⁾ 同じアルファベット記号を持つ数値間では有意差なし (P<0.05: χ^2 -test with Bonferroni correction)

⁴⁾ 同じアルファベット記号を持つ数値間では有意差なし (P<0.05: χ^2 -test)

剤型・保蔵が寄生蜂におよぼす影響

羽化後3日間または5日間15°C下で蜂蜜水を与えて飼育した後、25°C下で飼育した時、ハチ雌成虫の寿命、寄生および寄主体液摂取による寄主殺害数は、羽化直後から25°C下で飼育した雌成虫のそれ (Hondo et al., 2006) と比べて、保蔵日数に関係なく、大幅に減少した ($P < 0.05$: Tukey-Kramer test) (表9)。

表9. ハモグリミドリヒメコバチ成虫の15°C保蔵が寿命、寄生数および寄主体液摂取数におよぼす影響 (mean \pm SD)

保蔵期間	寿命 (日) ³⁾	寄生による ハエ殺害数	寄主体液摂取に よるハエ殺害数
3日 (10) ¹⁾	14.1 \pm 6.2 a	60.2 \pm 37.7 a	38.5 \pm 22.2 a
5日 (8)	15.0 \pm 7.0 a	56.3 \pm 34.1 a	35.3 \pm 23.5 a
Control ²⁾	23.4 \pm 9.2 b	201.2 \pm 58.7 b	218.1 \pm 114.8 b

¹⁾ 繰り返し数を示す

²⁾ Hondo et al. (in preparation) の結果を引用

³⁾ 3日間および5日間保蔵における寿命は保蔵期間を含む

同じアルファベット記号を持つ平均値間では有意差なし ($P < 0.05$: Tukey-Kramer test)

表10. 蛹の5°C保蔵がハモグリミドリヒメコバチの羽化に与える影響 (mean \pm SD)

	保蔵日数(日)	n ¹⁾	供試蛹数	羽化成虫数	羽化率 (%) ²⁾
ハウス内実験					
葉・乾燥処理あり	5	5	21.6 \pm 6.0	20.4 \pm 6.5	94.4 a ⁴⁾
葉・乾燥処理なし	5	5	35.0 \pm 4.6	30.0 \pm 2.9	85.7 b

室内実験					
	3	8	31.8 \pm 7.4	30.3 \pm 6.8	95.3 a ⁵⁾
	5	5	32.2 \pm 7.2	32.2 \pm 7.2	100.0 b
Control ³⁾	0	13	24.2 \pm 4.6	23.4 \pm 4.8	96.5 a

¹⁾ 繰り返し数を示す

²⁾ 全繰り返し数の総回収数 / 全繰り返し数の総放飼数

³⁾ 5°C下で保蔵せず、25°C下の恒温室に設置した

⁴⁾ 同じアルファベット記号を持つ数値間では有意差なし ($P < 0.05$: x^2 -test)

⁵⁾ 同じアルファベット記号を持つ数値間では有意差なし ($P < 0.05$: χ^2 -test with Bonferroni correction)

つぎに、ハウス内実験において、葉を乾燥処理しなかった場合、葉を乾燥処

理した方が羽化率は有意差に高くなった ($P<0.05$: χ^2 -test). 乾燥処理をしなかった葉の多くでは、カビが発生し、腐敗が激しい場合も見られた. 室内実験では、5°Cで保蔵しても、羽化率は全て95%以上と高く (表10), 5°Cで5日間保蔵したときの羽化率が他と比べて有意に高くなるなど ($P<0.05$: χ^2 -test with Bonferroni correction), 蛹での低温保蔵による羽化率の低下はほとんどみられなかった.

最適放飼密度の決定

ハエについては、放飼虫数の増加につれて産卵数、蛹数が有意に増加したが ($P<0.05$: Tukey-Kramer test), 蛹化率は10対放飼で他の区に比べて有意に低かった ($P<0.05$: χ^2 -test with Bonferroni correction) (表11). 10対放飼区における蛹化率の低下は、過密なハエ幼虫による過剰食害のため葉が枯死したことに起因した.

表11. インゲンマメ1株に1日間産卵が許された時のマメハモグリバエ成虫の放飼密度と産卵数、蛹化数および蛹化率の関係 (mean \pm SD)

放飼成虫数	n ¹⁾	産卵数 ³⁾	蛹数 ⁴⁾	蛹化率(%) ^{2),5)}
3対	10	28.3 \pm 8.8 a	27.5 \pm 7.9 a	97.2 a
5対	10	55.1 \pm 16.7 b	53.0 \pm 15.1 b	96.2 a
10対	10	122.6 \pm 24.4 c	75.5 \pm 11.6 c	61.6 b

¹⁾ 繰り返し数を示す

²⁾ 全繰り返し数の総蛹化数/全繰り返し数の総産卵数

^{3),4)} 同じアルファベット記号を持つ平均値間では有意差なし ($P<0.05$: Tukey-Kramer test)

⁵⁾ 同じアルファベット記号を持つ数値間では有意差なし ($P<0.05$: χ^2 -test with Bonferroni correction)

ハチについては、放飼個体数の増加にともなって、寄生、寄主体液摂取によるハエ死亡数はともに増加した (表12). 一方、ハチ1匹あたりの殺害ハエ幼虫数は、放飼密度の上昇とともに低下したが、5, 7, および10匹放飼区の間では有意差は見られなかった ($P<0.05$: Tukey-Kramer test). 寄主殺害率と寄生率は、放飼数の増加に伴って有意に増加し ($P<0.05$: χ^2 -test with Bonferroni correction), 10匹放飼区において、供試したハエのほとんどが殺害された.

表12. 寄主50匹を1日間攻撃することを許されたハモグリミドリヒメコバチ成虫の放飼密度と寄生と寄主体液摂取によるマメハモグリバエ幼虫の殺害数, 殺害率および寄生率の関係 (mean ± SD)

放飼雌成虫数(匹)	n ¹⁾	殺害されたハエ総数		殺害されたハエ数/成虫(匹) ⁶⁾	寄生されたハエ数/成虫(匹) ⁷⁾	殺害率(%) ^{2),8)}	寄生率(%) ^{3),9)}
		寄生(匹) ⁴⁾	寄主体液摂取(匹) ⁵⁾				
3	10	10.9 ± 6.5 a	11.9 ± 4.3 a	7.6 ± 2.3 a	3.6 ± 2.2 a	45.6 a	21.8 a
5	10	12.7 ± 5.3 ab	17.5 ± 5.2 a	6.0 ± 1.6 ab	2.5 ± 1.1 a	60.4 b	25.4 a
7	10	19.8 ± 3.3 bc	16.4 ± 2.7 a	5.2 ± 0.5 b	2.8 ± 0.5 a	72.4 c	39.6 b
10	10	24.4 ± 10.9 c	25.0 ± 9.6 b	4.9 ± 0.6 b	2.4 ± 1.1 a	98.8 d	48.8 c

¹⁾ 繰り返し数を示す

²⁾ (全繰り返し数の総寄生数+全繰り返し数の総寄主体液摂取数) / 全繰り返し数の総供試寄主幼虫数

³⁾ 全繰り返し数の総寄生数 / 全繰り返し数の総供試寄主幼虫数

^{4),5),6),7)} 同ジアルファベット記号を持つ平均値間では有意差なし (P<0.05: Tukey-Kramer test)

^{8),9)} 同ジアルファベット記号を持つ数値間では有意差なし (P<0.05: χ^2 -test with Bonferroni correction)

第5節 考察

本研究において試作した産卵装置は、ハエ、ハチともに回収率が低かったが(表7)、羽化成虫回収装置については高かった(表8)。食植生昆虫は食草探索の際、食草が発する匂い物質を利用する(平野, 1960; 大崎, 1996)。また、チリカブリダニ *Phytoseiulus persimilis* (Takabayashi et al., 1994) やヒメハナカメムシ *Orius* 類 (Venzon et al., 1999) では、寄主探索の際に寄主の摂食によって植物が発する匂い物質 (HIPV) を利用したり、ハモグリバエ類寄生蜂の *Dapsilarthra rufiventris* では、寄主の食草の匂いや (Sugimoto et al. 1988b)、寄主幼虫の摂食音を (Sugimoto et al. 1988a) 寄主探索に利用することが実験的に実証されている。本研究で用いたハエは産卵装置内に設置したインゲンマメ株から発する匂い物質によって、ハチは上記に加えて寄生や寄主体液摂取による殺害を免れて装置内に生残しているハエ幼虫が発する摂食音によって正走光性や負走地性によるハエやハチの移動が阻害され、回収率が低下した可能性がある。一方、ハエ成虫は、黄色に誘引される特性があることが知られている (Zehnder and Trumble, 1984)。正走光性や負走地性に加えて、こうした誘引刺激を利用することによって回収率の向上を試みる必要がある。ハエ羽化成虫回収では蛹だけを、ハチ羽化成虫回収では蛹のいる葉を乾燥させてそれぞれ装置内に設置するため、ハエやハチの回収を阻害すると思われる匂い物質はほとんど発生しないため、正走光性や負走地性を用いた回収装置は期待通りの性能を発揮したと思われる。

ハチと比べて回収率が有意に低かったハエ蛹の放飼では(表8)、未回収のハエの多くは羽化失敗によるものであった。これはハエ老熟幼虫が葉から脱出し蛹化する際、蛹殻を床面に接着するため、回収の際に、それらをはがすことによって蛹殻が傷ついたことが原因と考えられる。産卵後のインゲンマメ株を保管している床面を取り外し可能な2層式にして、蛹の付着した板ごと羽化成虫回収装置内に設置したり、床面に微粒珪砂を散布し(嶽崎, 1999)、ハエ蛹が床

面に付着するのを防ぎ、蛹回収の際に蛹殻の損傷を防ぐなど、ハエ羽化率の向上のための蛹回収法について検討する必要がある。

羽化直後のハチ成虫を 15°C で蜂蜜水を与えて 3 日間または 5 日間保蔵した後、25°C 下で十分なハエ幼虫のいるインゲンマメを与えて飼育した時、ハチ雌成虫の寿命や繁殖能力は、羽化直後から 25°C 下で同様にハエ幼虫を与えて飼育した雌成虫 (Hondo et al., 2006) と比べて、大幅に減少した (表 9)。前述したように本種は逐次成熟性 (synovigenic) であることから、成虫の生存や卵形成に必要なたんぱく質を得るために寄主体液摂取をする (Flanders, 1935 ; Sugimoto et al., 1983b ; Jervis and Kidd, 1986)。本研究より、ハチは繁殖のためだけでなく、成虫の栄養補給のためにも寄主体液摂取が必要であることが明らかとなった。したがって、ハチ成虫を梱包し、保蔵・輸送した後に放飼すると、羽化当日にハチをそのまま放飼した場合と比べ、保蔵・輸送そのものによる寿命の損耗と、その間、寄主体液摂取ができなかったことによる寿命短縮の影響のために、生物的防除資材として利用可能な期間は大幅に減少することになる。したがって、ハチ成虫態による製剤化は適さないと思われる。一方、ハチは蛹態で梱包し、5°C で 5 日間保蔵した場合でも高い羽化率を示した (表 10)。ハチは野外では蛹越冬すると考えられるが、本研究結果からも蛹の低温耐性は高いことが分かった。羽化後のハチの寿命や繁殖能力の検討は行っていないが、本種の野外における主な分布地域である西日本の気温は、年間を通じ温度差が大きく、冬はたびたび氷点を下回ることもあるので、本研究で設定した蛹保蔵温度である 5°C は、その生態的特性に大きく影響を与える温度ではないと思われる。さらに、ハチの蛹態放飼は、羽化当日の成虫を放飼することになるため、成虫剤のような保蔵・輸送期間における成虫寿命の損耗や寄主体液摂取ができないことによる成虫寿命の短縮もなく、高い効果が期待できる。しかし、ハチは植物体内で蛹化するの、ハチ蛹だけの回収は困難である。オンシツツヤコバチのように蛹数を一定にそろえることが困難であるため、製品化にあたっては、製剤内の蛹数を一定基準に保ち、商品品質を安定化するための検討が必要である。

近年、タマゴコバチ類に寄生されたバクガ卵を、休眠を利用して長期保蔵する技術が開発された (Greenberg et al., 1996). ハチの低温長期保蔵が可能となれば、過剰生産分の廃棄による損失が削減でき、さらに低需要期に生産した天敵を蛹態で低温保蔵し、高需要期に出荷することによって総合的な生産コストの削減が可能となる. 本研究では、5°Cでの保蔵期間は最長で5日間しか試みなかったが、羽化率は非常に高いことから更なる長期保存の可能性があり、ハチ蛹の長期低温保蔵技術について検討する必要がある.

本研究では、ハエ幼虫密度がインゲンマメ1株あたり100匹を超えると、蛹化率の低下や過密なハエ幼虫による過剰食害のため葉が枯死した (表11). ヒメコバチ科寄生蜂は、成熟した大型な寄主を産卵に、若齢寄主などの小型な寄主を体液摂取に使い分けることが知られており (Sugimoto and Ishii, 1979), 過剰産卵によって小型化したハエ幼虫の多くが寄主体液摂取される恐れがある. 寄主体液摂取によって殺害されるハエ幼虫が増加すると、その分供試したハエ幼虫におけるハチの寄生率が減少するので、次世代ハチ成虫の生産効率の低下を招くこととなる. 本研究では、ハエ幼虫はインゲンマメ1株あたり50匹程度の密度で寄主が正常に発育したので、1株あたりハエ幼虫密度は50匹が実用的であると思われる. このときの放飼密度は5対であったが、ハエは地域によって増殖能力が異なると報告されていることから (西東ら, 1995a; 小澤ら, 1999a; 徳丸・阿部, 2003), 増殖に用いるハエの採集地によって、ハエ放飼密度は変動すると思われる.

ハチ生産工程では、ハチによる寄生と寄主体液摂取による殺害を免れ、ハチ育成期間中にインゲンマメ葉より脱出し、床面で蛹化したハエ蛹を回収することとしているが、省力化のためには、ハエ幼虫の殺害率を高め、可能な限りハエ蛹回収を行わないほうが望ましい. 反面、蔵卵に寄主体液摂取を必要とする逐次成熟性 (synovigenic) の寄生蜂では (Flanders, 1935; Jervis and Kidd, 1986), 放飼密度が高くなると、供試ハエ幼虫に対する寄主体液摂取による殺害ハエ幼虫の割合が増加するので、寄生数が低下すると指摘された (大野ら, 1999). 本

研究では、ハエ幼虫 50 匹に対しハチ雌 10 匹を放飼した場合、ほぼ全てのハエ幼虫が利用され、殺害された (表 12)。また、ハチ 1 匹あたりの寄生数は全ての放飼密度で有意差がなく、その結果、ハチの放飼密度の上昇に伴い寄生率は高くなった。本研究結果が大野ら (1999) と異なったのは、本研究の実験規模が小規模だったこともあり、放飼密度が低かったためと思われるが、ハチ 10 匹放飼で供試したハエ幼虫のほぼ全てを殺害したので、本研究の規模においては、ハチの実用的な放飼密度はハエ幼虫 50 匹あたり 10 匹が適していると思われる。また、寄主体液摂取はハチ生産段階では有利に働き、ハチ放飼段階では不利に働くため、生物的防除効率 (*BCE*) を向上させ大量増殖工程におけるコスト削減のためにはハチ母虫の寄主体液摂取によるハエ幼虫の殺害数が少ないほうが望ましい (Hondo et al., 2006)。反面、ハチの潜在的な繁殖能力を完全に引き出すためには、産卵に際して十分な栄養を与える必要がある (Waage, et al., 1985)。寄主体液摂取によって消費されるハエ幼虫の生産コストよりも安価に生産できれば、寄主体液摂取以外の方法での栄養分の給餌は (Ueno, 1997) コスト低減に有効であり、検討する必要があると思われる。

第5章 ハモグリミドリヒメコバチの生物的防除資材としての有効性とバンカープラント法の検討

第1節 はじめに

Hassan (1985) は、タマゴコバチ類の実用化に際し、系統選抜や大量増殖技術の開発だけでなく、放飼技術、すなわち放飼時期、放飼回数および放飼密度の最適化、さらに天敵の有効性向上技術の開発の必要性を指摘した。一般的に天敵を利用した防除を有効に行うためには、天敵の放飼時期と適切な放飼量が重要であるため、継続的モニタリングによって害虫の発生を確認してから、天敵を放飼する方法(ドリブル法)がとられている(矢野, 2003)。しかし、目的とする害虫の発生モニタリングは、栽培者にとっては困難であるので(村井, <http://ss.cgk.affrc.go.jp/kiban/tenteki/Volume3/index3.html>), 害虫発生の有無にかかわらず作期中に定期的に繰り返し天敵を放飼する繰り返し放飼法が採用されることが多い。この方法は害虫の発生調査が不要であり、さらに防除効果が安定するといった利点があるが、単価が高い天敵では栽培コストの上昇を招く。そこで、対象害虫を先に導入してから天敵を導入するペスト・イン・ファースト法(Pest in first)が考案され、安定した防除効果が得られ、省力化においても効果的であったが(Vet et al., 1980), この方法は、発生していない害虫を導入するため栽培者の不安感を拭うことが困難であった(Hoddle et al., 1998; van Lenteren and Martin, 1999)。そこでペスト・イン・ファースト法を改良したバンカープラント法の研究が進められた(Bennison, 1992; Bennison and Corless, 1993)。バンカープラント法とは、天敵だけでなく、防除対象作物を加害しない代替寄主や餌昆虫をそれらの餌植物や花蜜・花粉をとともに温室内に設置して、対象害虫が施設内で発生する以前から天敵をそこで維持する方法で、open rearing system (開放型飼育システム)とも呼ばれる(Hansen, 1983; van Lenteren, 1995; 桐谷, 2004)。この方法は、代替寄主の継続的供給によって天敵を施設内で維持するため、ドリブル法のように害虫発生のモニタリングが不要であり、

かつ合成農薬散布のように圃場全体に薬剤を散布する必要がないため農家の負担が少なく、接種的放飼法や繰り返し放飼法に比べ、放飼する天敵数が比較的少量で済むため経済的である。さらに、餌資源が常に施設圃場内に存在するため餌不足時における施設外への天敵の分散や、餓死による防除効果の低下を抑えることができる。ヨーロッパでは、施設栽培キュウリのアブラムシ防除に用いる寄生蜂、コレマンアブラバチ *Aphidius colemani* Viereck を代替寄主ムギクビレアブラムシ *Rhopalosiphum padi* (L.) とバンカー植物コムギを用いた維持増殖システムが実用化された (Bennison and Corless, 1993)。また、施設栽培レタスのアシグロハモグリバエ *L. huidobrensis* (Blanchard) 防除に、代替寄主としてハモグリバエの一種 *Phytomyza caulinaris*、バンカー植物としてラナンキュラス *Ranunculus asiaticus* を用いてハモグリコマユバチまたはイサエアヒメコバチを維持する方法が試みられた (van der Linden, 1993)。

本章では、施設栽培トマトにおけるマメハモグリバエの生物的防除資材として、ハモグリミドリヒメコバチをガラス温室などに実際に放飼して有効性を検討し、さらに最適な放飼タイミングと放飼密度を決定するために実証試験を行った。続いて、キツネノボタンハモグリバエ *Phytomyza ranunculi* Schrank を代替寄主、ラナンキュラスをバンカー植物とするバンカープラント法の実用性を実験的に検討した。

第2節 材料と方法

供試植物

ミニトマト *Lycopersicon esculentum* Mill (品種:ココ, ピコ) 近畿大学農学部実験圃場のガラス温室において小型のビニールポット (高さ 7 cm, 直径 9 cm) に 2 粒を播種し、育苗した。30 cm 程度に生育した株をプラスチック製の菊鉢 (高さ 32 cm, 直径 27 cm, プラスチック製) に移植して各実験に用いた。肥料としてハイポネックス®1000 倍希釈液を用い、1 週間ごとに十分に施肥した。

ランキュラス *Ranunculus asiaticus* L. あらかじめ灌水したバーミキュライトを入れた1号ポット(直径7cm)に球根を植え、急激な給水による球根の転球を防ぐため、5℃の冷蔵庫に7日間保蔵した。発根を確認後、秋季から春季は、5号ビニールポット(高さ12cm, 直径15cm)に移植した後、温室内で栽培した。夏季は15±2℃, 光周期L:D=14:10, 照度12000luxのグロスキャビネットにおいて栽培した。15~20cm程度に生育したものをキツネノボタンハモグリバエの増殖および各実験に使用した。

供試昆虫

マメハモグリバエ 第4章で設計した大量増殖工程で増殖した。羽化成虫は、10%砂糖水を含ませた脱脂綿入りの容器を取り付けたプラスチック製円筒(高さ10cm, 直径3cm)に回収し、実験に使用するまで15℃で保管した。

キツネノボタンハモグリバエ(図13) 近畿大学農学部実験圃場付近に生えていたキツネノボタンを採取し、寄生していた幼虫を羽化させ、以下の手順で増殖、使用した。恒温室(20℃, 70%RH, 14L:10D)内において上面をガーゼで覆った透明なプラスチック円筒(高さ45cm, 直径30cm)にランキュラス



図13. キツネノボタンハモグリバエ成虫

1～2 株と 10%砂糖水を含ませた脱脂綿を入れ，キツネノボタンハモグリバエ成虫 5～6 対を放飼して産卵させた．48 時間後ランキュラスを回収し，同恒温室内で保管した．蛹化のため葉から脱出した 3 齢幼虫および蛹をネジカップ（高さ 6 cm，直径 10 cm）に回収し，20℃で保管した．羽化成虫は 10%砂糖水を含ませた脱脂綿入りの容器を取り付けたプラスチック製円筒（高さ 10 cm，直径 3 cm）に回収し，15℃で保管した．

ハモグリミドリヒメコバチ 第 4 章で用いた大量増殖工程で増殖し，羽化当日のハチに 10%蜂蜜水を 2 時間与えた後，実験に用いた．

実験の準備

本実験は，主に近畿大学農学部圃場のガラス温室（高さ 3.8m，幅 6m，奥行き 10m，コンクリート床）（図 14）で行った．ガラス温室の側窓に 0.4mm 格子の網戸を設置し，ウレタンで隙間を埋めて，ハモグリバエや寄生蜂の出入りを防いだ．また，気温が 25℃を超えると窓を自動開放させ，最低気温が 22℃以下になると自動加温した．



図 14. ガラス温室（詳細は本文参照）

本実験中に発生したオンシツコナジラミに対してはエンストリップ®(オンシツツヤコバチ *Encarsia formosa* 剤：Koppad 社)を放飼した。アブラムシ類にはオレート液剤®(オレイン酸ナトリウム：大塚化学株式会社)をアブラムシ発生部に散布した。うどん粉病には、供試昆虫への影響がほとんど無い殺菌剤サプロール®(トリホリン 15%乳剤：武田薬品工業株式会社)1000 倍溶液を罹病部に散布した。薬剤散布は、実験への影響を最小限にとどめるため、ハモグリミドリヒメコバチを放飼する 2 日以前に行った。

寄生または寄主体液摂取により殺害されたハエ幼虫の体色は褐変するので、体色によってハエ幼虫の生死を判別した。その際、小型の若齢幼虫の判定は、拡大鏡を用いて行った。両種のハエ幼虫は、いずれも蛹化の際に植物体より脱出するので、脱出痕数を以って累積脱出蛹数とした。

マメハモグリバエ幼虫高密度時における寄生蜂放飼の防除効果

ガラス温室 (6×10×3.8m, コンクリート床) 内に株ごとにポット (高さ 27cm, 直径 32cm, プラスチック製) に植え付けたトマト 80 株 (16 株×5 列) を設置した (図 15)。これにマメハモグリバエ成虫を放飼して産卵させ、幼虫 (平均

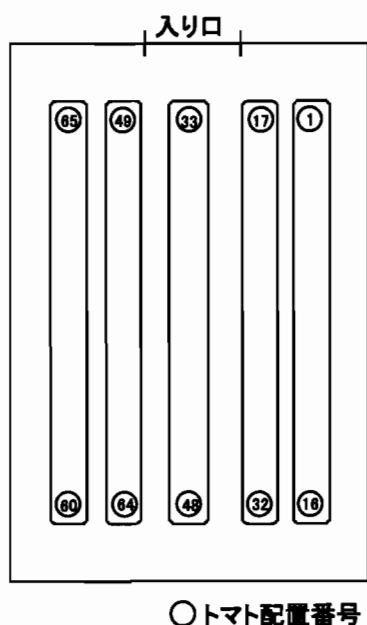


図 15. トマト配置図

10 匹以上/株) の孵化を確認後、羽化後 3 日以内のハモグリミドリヒメコバチ成虫を 6, 30, 180 匹 (それぞれ 0.1, 0.5, 3.0 匹/m²に相当) の 3 通りの放飼密度で温室中央部に放飼し、逐次生存ハエ幼虫数、累積殺害ハエ幼虫数および葉からの累積脱出蛹数を計数した。

マメハモグリバエ幼虫低密度時における寄生蜂放飼の防除効果

同様のガラス温室内に同様のポットに植えたミニトマト (8 株×5 列) を設置し (図 16)、ハエ幼虫 (平均 2 匹/株) がふ化すると羽化当日のハチ幼虫を 3, 6, 18 匹 (それぞれ 0.05, 0.1, 0.3 匹/m²に相当) の 3 通りの放飼密度で温室中央部で放飼し、上記と同様に生存ハエ幼虫数、累積殺害ハエ幼虫数および累積脱出蛹数を計数した。

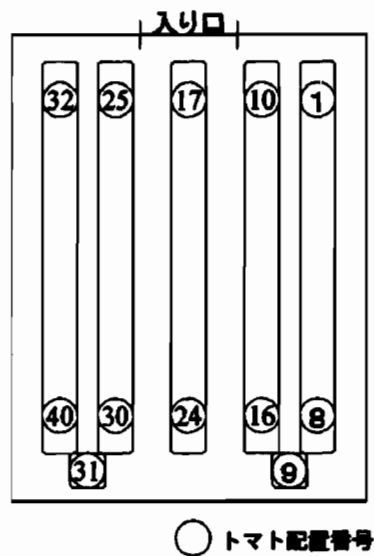


図 16. トマト配置図

ハモグリミドリヒメコバチの寄主選好性の検討

野外に設置された家庭園芸用小型ビニール温室 (2.0×2.0×1.8 m) (図 17) 内に、育苗ポット (高さ 12 cm, 直径 15 cm) に植え付けたマメハモグリバエ幼虫が加害しているトマトとキツネノボタンハモグリバエ幼虫が加害しているランキュラス株を各 4 株設置した。これにハモグリミドリヒメコバチ成虫 20 匹 (6.2 匹 / m²) を放飼し、寄生させて生存幼虫数、殺虫数、および蛹化数を計

数した。



図 17. 家庭園芸用小型ビニール温室

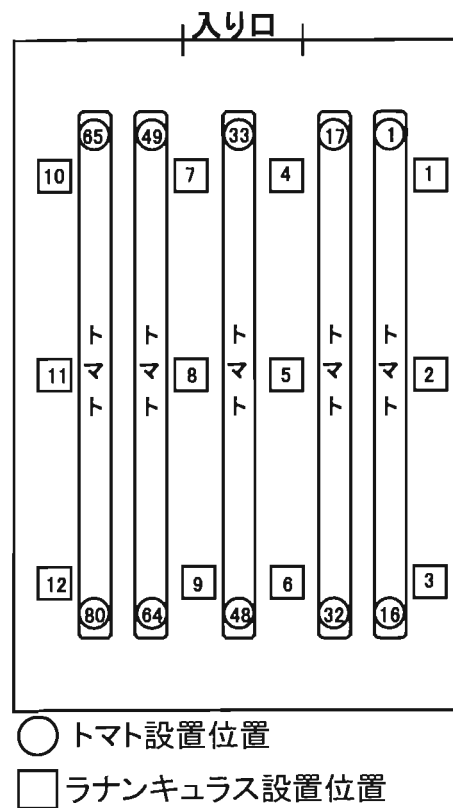


図 18. トマトおよびラナンキュラス配置図

続いて、マメハモグリバエ多発生時に於ける寄生蜂放飼の即時的防除効果実験（ハチ 30 匹放飼）終了後のガラス温室内に、キツネノボタンハモグリバエ幼

虫に寄生されたラナンキュラス 12 株を加えて設置し (図 18), 羽化後 3 日以内のハモグリミドリヒメコバチ成虫を 30 匹 (0.5 匹/m²) 放飼し, マメハモグリバエ, キツネノボタンハモグリバエ幼虫それぞれの生存幼虫数, 累積殺害幼虫数, および累積脱出蛹数を計数した. ただしマメハモグリバエ幼虫については列ごとにトマト 6 株をランダムに選抜し, 計数した.

第 3 節 結果

マメハモグリバエ幼虫高密度時における寄生蜂放飼の防除効果

ハチ 6 匹放飼区では, 放飼後 5 日目までは殺害ハエ幼虫数は多少増加したものの, 以降ほとんど増加せず, 最終的な累積ハエ幼虫殺害率は 16.9%と低かった (図 19 a). ハチ 30 匹放飼区では, 殺虫数は次第に増加し, 放飼 24 日後の累積ハエ幼虫殺害率は 34.1%に達した (図 19 b).

ハチ 180 匹放飼区では, ハエ幼虫殺害数は他区と比較して常に非常に高く, 放飼後 9 日目の累積ハエ幼虫殺害率は 66.4%に達した. しかし, その後ハエの累積脱出蛹数の割合が大きく増加した (図 19 c).

放飼ハチ雌成虫 1 匹あたりのハエ幼虫殺害数は, 6 匹放飼区で 41.2 匹, 30 匹放飼区で 31.8 匹, 180 匹放飼区で 5.2 匹となり, 放飼密度の上昇に伴い 1 匹あたりのハエ幼虫殺害数は減少した.

マメハモグリバエ幼虫低密度時における寄生蜂種放飼の防除効果

ハチ 3 匹放飼区では, 放飼後 3 日目から殺害ハエ幼虫が確認され, 最終的な累積ハエ幼虫殺害率は 15%に留まった (図 20a). 6 匹放飼区では, 放飼後 2 日目から殺害ハエ幼虫が確認され, 殺害幼虫数は 3 日目に急増したが, 6 日目以後はほとんど増加せず, 最終的な累積ハエ幼虫殺害率は 58%であった (図 20b). 18 匹放飼区でも, 同様に放飼後 2 日目に僅かに殺害幼虫が観察され, 殺害幼虫数は 3 日目に急増し, 5 日目には殺害幼虫数は 74%に達した. 加温装置の故障

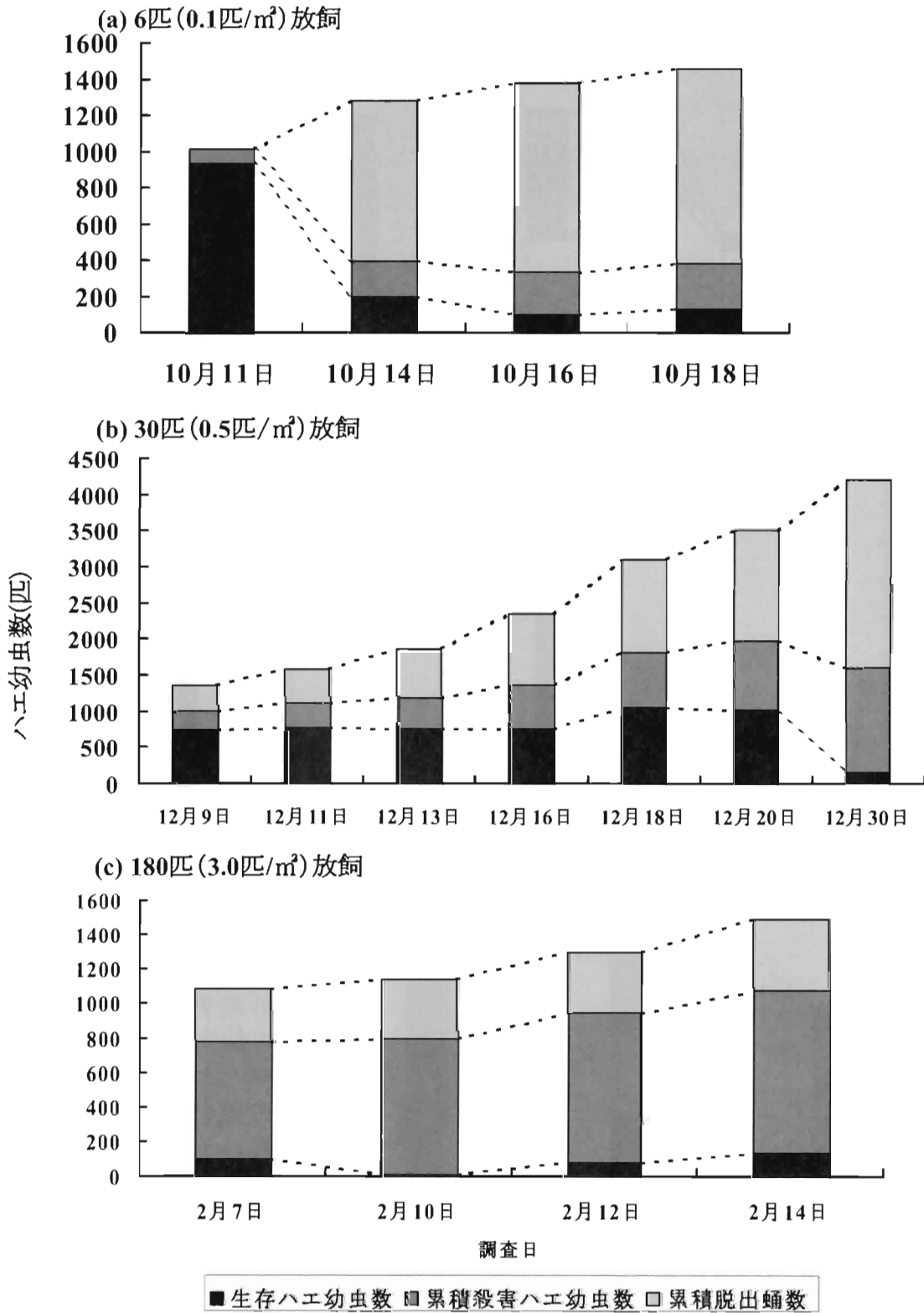
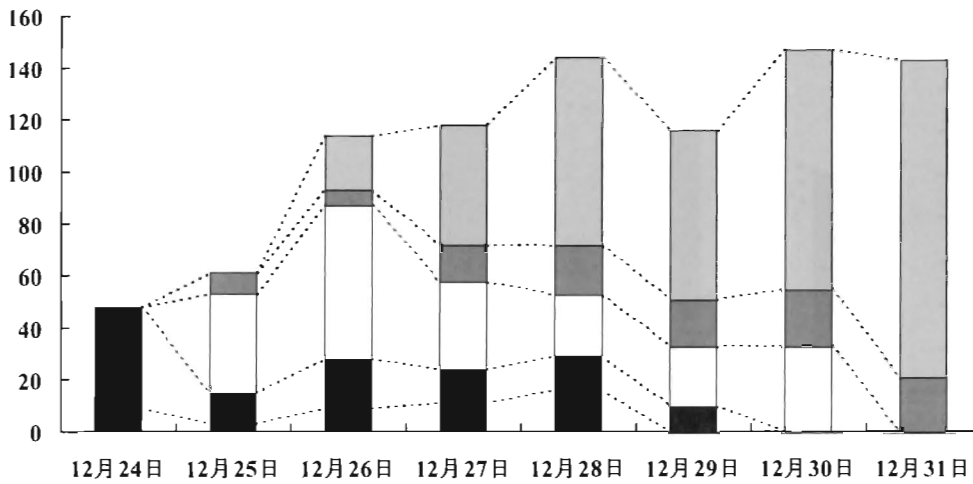
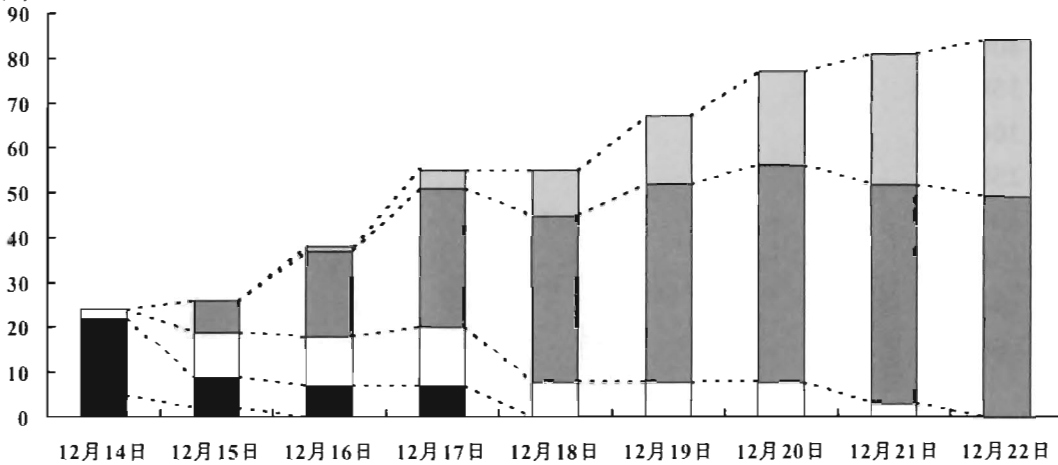


図 19. ハエ多発生時におけるハモグリミドリヒメコバチ放飼密度ごとの生存ハエ幼虫数、累積殺害ハエ幼虫数および累積脱出蛹数の推移

(a) 3匹 (0.05匹/m²) 放飼



(b) 6匹 (0.1匹/m²) 放飼



(c) 18匹 (0.3匹/m²) 放飼

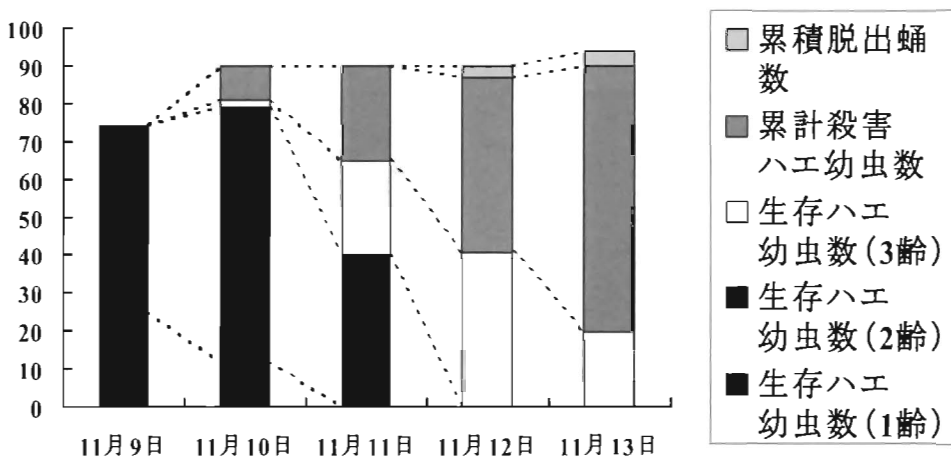


図 20. ハエ低密度発生時におけるハモグリミドリヒメコバチ放飼密度ごとの生存ハエ幼虫数、累積殺害ハエ幼虫数および累積脱出蛹数の推移

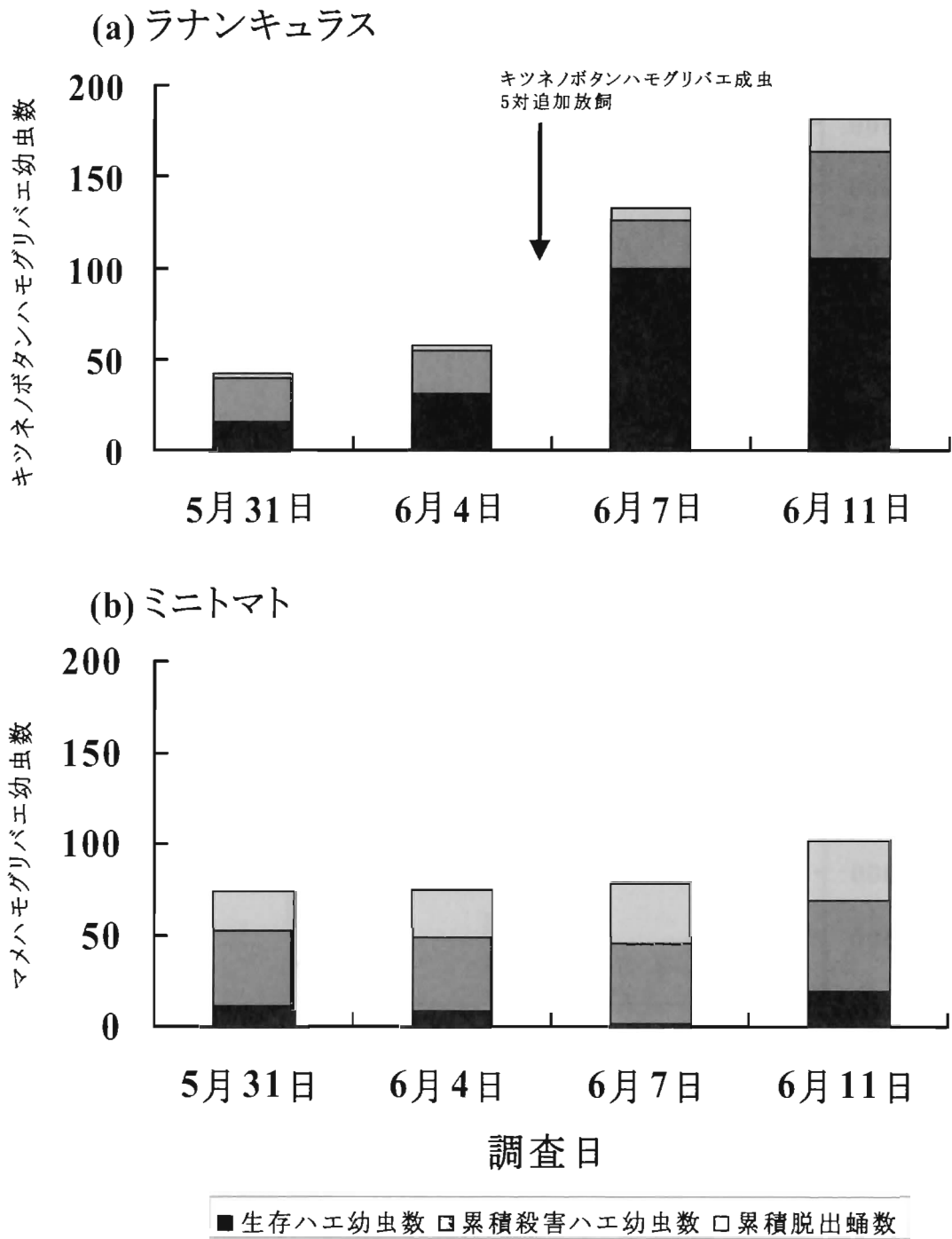
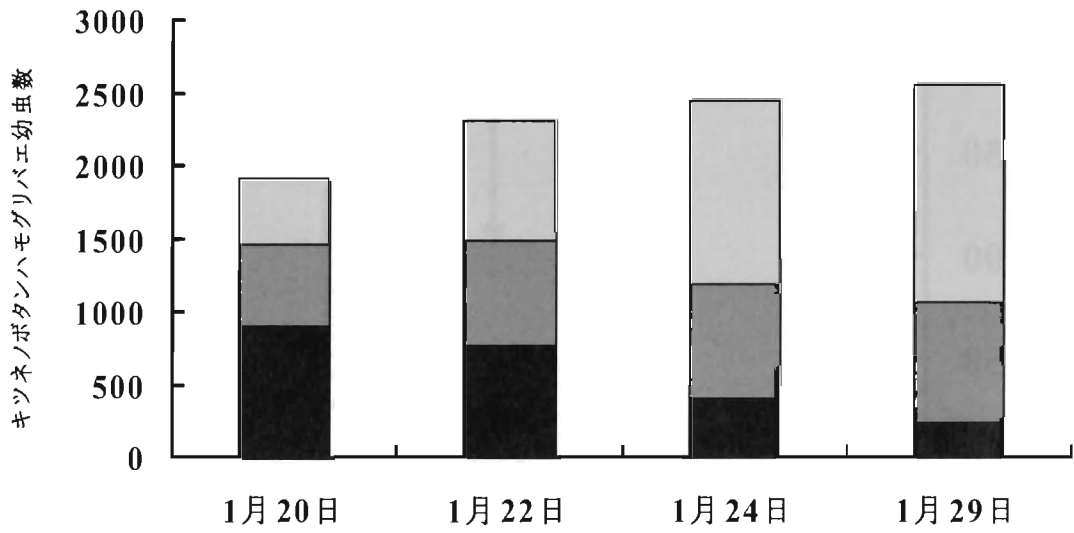
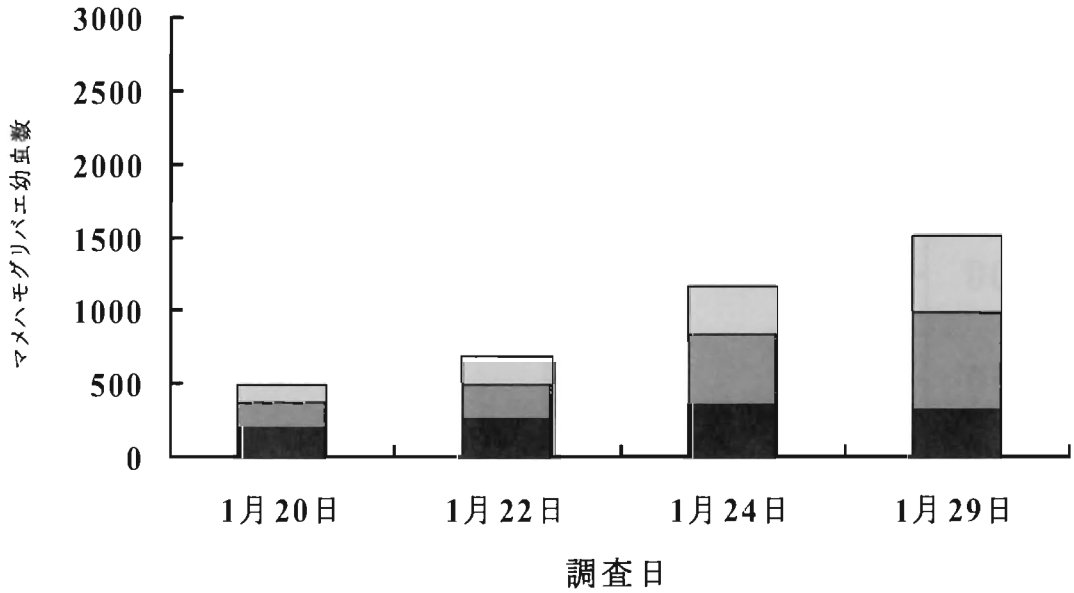


図 21. 園芸用小型ビニール温室においてハモグリミドリヒメコバチに寄主植物ラナンキュラスに加害させたキツネノボタンハモグリバエ幼虫とミニトマトに加害させたマメハモグリバエ幼虫を寄生させた際の両種生存ハエ幼虫数、累積殺害ハエ数および累積脱出蛹数の推移

(a) ラナンキュラス



(b) ミニトマト



■ 生存ハエ幼虫数 ■ 累積殺害ハエ幼虫数 □ 累積脱出蛹数

図 22. ガラス温室においてハモグリミドリヒメコバチに寄主植物ラナンキュラスに加害させたキツネノボタンハモグリバエ幼虫とミニトマトに加害させたマメハモグリバエ幼虫を寄生させた際の両種生存ハエ幼虫数、累積殺害ハエ数および累積蛹化脱出数の推移

により以後の計数は中断したが、その時点の累積脱出蛹数は4%に過ぎなかった。(図 20c).

放飼ハチ雌成虫 1 匹あたりのハエ幼虫殺害数は、3 匹放飼区で 7.0 匹、6 匹放飼区で 8.2 匹、18 匹放飼区で 3.9 匹となり、6 匹放飼区の殺害数が最も多かった。

ハモグリミドリヒメコバチの寄主選好性の検討

小型温室では、ハチ放飼当日はマメハモグリバエ幼虫、キツネノボタンハモグリバエ幼虫ともに 1~2 齢幼虫がほとんどであったが、その後孵化したため幼虫数はそれぞれ増加した。キツネノボタンハモグリバエ幼虫がマメハモグリバエ幼虫に比べて少なかったため、前種の幼虫数を増やすため 6 月 4 日に成虫 5 対を追加放飼した。ハチの攻撃による最終的な累積ハエ幼虫殺害率は、キツネノボタンハモグリバエ幼虫で 31.9%、マメハモグリバエ幼虫で 49.0%であった ($p < 0.05$: χ^2 -test) (図 21)。一方、ガラス温室では、ハチ放飼後マメハモグリバエ幼虫の殺害数は増加を続け、放飼後 13 日目の累積ハエ幼虫殺虫率は 43.9%であったが、キツネノボタンハモグリバエ幼虫では、放飼後 7 日目まではハチによる殺害幼虫数増加が見られたが、以降はそれほど増加は見られず、最終的な累積ハエ幼虫殺害率は 32.5%でマメハモグリバエ幼虫の殺害率より有意に低かった ($p < 0.05$: χ^2 -test) (図 22)。

第 4 節 考察

ハモグリミドリヒメコバチの放飼密度および放飼時期

天敵利用技術の開発研究には、一般的に 2 つのアプローチすなわち経験的手法とシミュレーションによる演算的手法がある (Parr et.al, 1976; 矢野, 1988; Yano, 1989a, b)。土着寄生蜂類を生物的防除資材として実用化するためには、選抜した寄生蜂種を実際に施設圃場内に放飼し、その防除効果を検証する必要がある。

ある。本章では、土着寄生蜂ハモグリミドリヒメコバチを実際にマメハモグリバエによって加害されたミニトマト小規模施設圃場に放飼し、本種の生物的防除資材としての有効性と、放飼時期、放飼密度について基礎的な知見を得た。

ハエ幼虫が多発している施設に種々の各放飼密度でハチを放飼した場合、6匹 (0.1 匹/ m^2) の放飼密度では、雌ハチ成虫 1 匹が寄生や寄主体液摂取によって殺害したハエ幼虫数は多かったものの、殺害ハエ幼虫数よりもハエ発生量が勝り、防除効果が認められなかった (図 19a)。一方、180 匹 (3.0 匹/ m^2) の密度でハチを放飼した場合、若齢幼虫を除くほぼ全ての幼虫が殺虫された (図 19c)。よって、マメハモグリバエが高密度発生している施設に本種を放飼する場合、本実験結果より、雌ハチ成虫を 3.0 匹/ m^2 程度の放飼密度が必要であるが、この放飼密度は現在使用されている導入系統のイサエアヒメコバチの放飼密度 10a あたり 100~200 匹 (石井, 1999) と比べて極めて高密度であり、本種は産雌単為生殖をするので両性生殖をする導入寄生蜂よりも生産コストが低いとはいえ、防除コストが高額になることは避けられない。一方、マメハモグリバエ侵入初期段階のようなハエ幼虫の低密度発生段階の施設に本種を放飼した場合、雌ハチ 6 匹 (0.3 匹/ m^2) の放飼密度で高い防除効果を得られた (図 20c)。よって、本種を生物的防除資材として用いる場合、マメハモグリバエ侵入初期段階のようなハエ幼虫の低密度段階で、本種寄生蜂を放飼密度 0.3 匹/ m^2 で放飼すると 1 回の放飼である程度即時性のある防除効果を得られる。

本研究において、マメハモグリバエ幼虫高密度段階にハチ雌 30 匹 (0.5 匹/ m^2) を放飼した際、調査期間後半の 12 月 18 日以降累積ハエ殺害数が増した (図 19b)。これは放飼した母ハチから生まれた娘ハチが羽化し、寄生を開始したためと考えられる。また、マメハモグリバエ幼虫が高密度発生している施設にハチ雌 180 匹 (3.0 匹/ m^2) を放飼した場合、放飼約 10 日後の 2 月 14 日には累積脱出蛹数が大幅に増加した。同様に、マメハモグリバエ幼虫低密度段階にハチを放飼した場合、放飼 6 日以降は寄主であるハエ幼虫発見の困難さもあり、殺害ハエ幼虫数がほとんど増加しなかった (図 20a, b)。以上から、放飼したハモ

グリミドリヒメコバチの防除有効期間はおよそ放飼後 7~10 日間と考えられる。

ところで、現在わが国でマメハモグリバエの防除のために導入寄生蜂を、1 週間ごとに連続して 3 回以上放飼している (石井, 1999)。本実験より、ハモグリミドリヒメコバチは、放飼後 2 週間目から次世代寄生蜂が羽化し、それらによる防除効果が期待できることが明らかになった。したがって、放飼後 7~10 日までに追加放飼を行うとより高い防除効果が期待できる。

代替寄主キツネノボタンハモグリバエ、バンカー植物ラナンキュラスを用いたバンカー植物法の可能性

現在、マメハモグリバエ幼虫寄生蜂の放飼方法として主に用いられているのは、害虫個体群の発生状況のモニタリング結果に基づく逐次放飼法である (Parr, 1976 ; 矢野, 2003)。しかし、本種幼虫のトマトにおける 2 齢期と 3 齢期を合わせた期間が、20°C で 4.4 日、25°C では 3.2 日である (Minkenberg, 1988)。このように寄生可能な幼虫な発育期間が短いマメハモグリバエに対して、ハチの最適な放飼時期の決定を個々の農家に求めるのは無理がある。この難題に対する対策として、害虫発生の有無にかかわらず、作物の定植後天敵の定期的繰り返し放飼は、発生調査を行う必要が無く、早期放飼によって防除効果が期待でき、さらに農家の労力負担軽減という点からも有効である (van Lenteren, 1995)。しかし、生産コストの高いマメハモグリバエ寄生蜂では、費用対効果の面で問題がある。一方、バンカー植物法は、対象作物を加害しない代替寄主を施設内へ持ち込んだその寄主植物上で発生させて天敵を施設内に維持する方法である。本方法は、発生調査が不要である点、施設内に寄主が常時存在するので放飼天敵の維持が可能である。その結果寄生蜂の放飼回数を低減することが可能な点で接種的放飼法よりも有利である。小型温室実験において、対象害虫マメハモグリバエと代替寄主キツネノボタンハモグリバエが共存した条件下で、ハモグリミドリヒメコバチのハエ幼虫殺害率はマメハモグリバエのほうが多少高かった (表 21a, b)。これはラナンキュラスの草丈は地上より 10cm、ミニトマトは

30cm と異なったため両種ハエ幼虫の存在位置が異なり、ハチがマメハモグリバエのほうにアクセスしやすかったことが原因と考えられる。また、本実験で、寄主数の多いキツネノボタンハモグリバエ幼虫よりも多くのマメハモグリバエ幼虫を殺害した。キツネノボタンハモグリバエ幼虫を代替寄主として用いても、ハモグリミドリヒメコバチはマメハモグリバエ幼虫を探索、殺害することがわかった。さらに、ガラス温室内実験においても、ハモグリミドリヒメコバチはマメハモグリバエ、キツネノボタンハモグリバエ幼虫どちらをも攻撃することが確認された（図 22a, b）。以上からキツネノボタンハモグリバエとラナンキュラスを用いたバンカー植物法はマメハモグリバエ防除に有効と結論できる。

ところで、図 22a において 1 月 24 日以降、キツネノボタンハモグリバエの殺虫率に大きな増加が認められなかった。これはラナンキュラスに過剰に寄生したキツネノボタンハモグリバエ幼虫数とラナンキュラスの設置場所の日当たりのせいと思われた。すなわち、キツネノボタンハモグリバエ幼虫数があまりに多かったためにハチの攻撃が追いつかず、多くのハエ幼虫が蛹化してしまったため殺虫率が減少した。次に正走光性の故にハチの攻撃が日当たりの良いトマトの上位葉に集中し、地上 10cm の比較的日当たりの悪い場所に設置されたラナンキュラスに対する攻撃が減少したことも原因と推察された。

ラナンキュラスは多数のキツネノボタンハモグリバエの寄生を受けたにもかかわらず新葉を出し、設置後 1 ヶ月以上が経過しても枯死しなかった。したがって、1 株あたりのキツネノボタンハモグリバエ幼虫数が過密になりすぎないよう成虫放飼密度を調節すれば、ラナンキュラスはバンカー植物として 1 ヶ月以上使用可能であると推察された。

第6章 総合考察

第二次世界大戦後、化学肥料と共に開発、普及が爆発的に進んだ化学合成農薬は、世界的な食糧増産に多大な貢献をした。しかし、化学農薬による環境汚染、生産物の薬剤汚染、防除対象害虫以外の生物や土着天敵の死滅による生態系の破壊や、それに伴う二次的害虫の害虫化（リサージェンス）、薬剤抵抗性害虫の頻発などを引き起こし、化学農薬に依存した農業の限界が指摘されてきた。現在、農薬に代わるまたは農薬を補完できる害虫防除技術が求められており、総合的害虫管理（IPM）（Smith and Reynolds, 1966）を通じた防除への試みが世界的に行われてきた。我が国においても、1992年6月に「新しい食料・農業・農村政策の方向」が画策され（農林水産省、<http://www.maff.go.jp/>）、環境への負荷軽減に配慮した農法、すなわち環境保全型農業の研究が進められてきた。中でも、天敵利用は世界的に総合的害虫管理の基幹技術として位置付けられ、実用化に向けた研究が進んでいる。しかし、海外からの天敵導入にともなって、国内の生態系への悪影響や交雑による遺伝子かく乱といった環境リスクが新たに問題化してきた（Hirose, 1999; 矢野, 1999）。こうしたことから、現在、土着寄生蜂の利用技術の確立、実用化に向けた研究が行われている（小澤ら 1998; 大野 1998; 大野ら 1999; 嶽崎ら 1999）。

マメハモグリバエはわが国への侵入以前に既に高い殺虫剤抵抗性を獲得し、化学的防除が困難であったために、物的防除資材として、現在イサエアヒメコバチとハモグリコマユバチ用いられている。本研究ではこれらの導入寄生蜂による環境リスク回避を目的として、土着ハモグリバエ寄生蜂類の中から温度変化の厳しい西日本の施設栽培に適した種の選抜およびその実用化を目指して研究を行った。

van Lenteren（1986）は、天敵の事前評価基準のひとつに「気候適応」を上げている。特に、西日本の温室のような温度差の厳しい環境で用いられる寄生蜂種は、その温度変化に対する高い適応性が求められるので、温度耐性、特にそ

これらの発育と寿命および繁殖能力に関する評価は必須である。第3章では、西日本の温室で用いるのに最適な土着寄生蜂を選抜するため、西日本における有力なハモグリバエ寄生蜂類であり(Takada and Kamijo, 1979; Sugimoto et al., 1983a; Kato, 1994, 1996a, b), かつわが国の施設圃場においてマメハモグリバエ幼虫に寄生が確認されたヒメコバチ科寄生蜂のうち7種に注目し、それらの発育および繁殖能力における温度耐性を実験的に比較、検討した。その結果、これら7種のヒメコバチ類は、高温適応的な2種、カンムリヒメコバチ *H. varicornis* とハモグリミドリヒメコバチ *N. formosa* と低温適応的な他5種に大別することができた。杉本(1998)は、わが国に生息するハモグリバエ類とそれらの土着寄生蜂類に関して、各々の世界的分布域の間には明白な対応関係があり、それぞれ南方型と北方型に大別でき、そして個々の種の温度特性と密接な関係があると指摘した。本研究において解明された温度特性に基づく2つのカテゴリーは、杉本の説に良く対応している。

van Lenteren(1993)は、施設栽培で用いる天敵の選抜基準として対象害虫を寄主とした場合の発育と繁殖能力、すなわち内的自然増加率(r_m)を重要視し、生物的防除資材として有効な捕食寄生蜂は、その寄主と同等またはより大きい繁殖能力を持つべきであることを主張した。一方、同氏は本研究で用いられた寄生蜂のような、寄主体液摂取によっても寄主を殺す捕食者としての一面も持つ天敵について、寄主体液摂取による寄主殺害は、放飼段階では防除において効果的であることから(Yamamura and Yano, 1988; Kidd and Jarvis, 1989), 寄生蜂の生物的防除資材としての評価は、寄生だけでなく寄主体液摂取にも基づくべきであるとも指摘している(van Lenteren, 1986)。しかし、寄主体液摂取によって寄主を殺さない寄生蜂と異なり、寄主体液摂取によって寄主殺害を行う寄生蜂の評価は複雑である。すなわち、寄主体液摂取による寄主殺害は、圃場での寄生蜂放飼段階においては防除上有利である。しかし、寄主体液摂取のために消費された寄主は、次世代の生産に直接

寄与しないので，大量増殖段階においては無駄死ということになる．その結果，寄主体液摂取による寄主殺害の効果が，生物的防除の「放飼段階」と「大量増殖段階」の2段階間で相反することになる．したがって，生物的防除資材としての寄生蜂の有効性は，これらの2段階における有効性を総合的に評価されるべきである．そこで，生物的防除資材としての有効性を両段階を通して総合評価するため，1匹の母親による寄生と寄主体液摂取のための総殺害寄主数に対する，その母親から得られたすべての子孫を放飼したときに得られた総被殺害寄主数の比を生物的防除効率（*BCE*）として表わした（Hondo et al., 2006）．いま，20℃で生産された7種寄生蜂の娘蜂が，種々の温度区に放飼されたと仮定して *BCE* を計算すると（表 6），ハモグリミドリヒメコバチ（産雌単為生殖系統）では 25℃以上で *BCE* が最も高く，逆に *D. isaea*（土着系統）では 15℃と 20℃で最も高かった．一方，イサエアヒメコバチの導入系統は，土着系統と比べて寄生による寄主殺害が少なく，寄主体液摂取による寄主殺害が多かったので *BCE* は土着系統よりも劣った．これらの結果より，この研究に供試されたどの寄生蜂種も，温度変化の激しい西日本の施設圃場において，年間を通して一貫使用には適さず，平均気温 20 から 25℃を目安として，秋の後半から春にかけての低温の季節には相対的に広い温度範囲で適用可能であるイサエアヒメコバチの土着系統を，高温な季節には高温耐性の高いハモグリミドリヒメコバチの産雌単為生殖系統を使い分けるのが最適と結論できた．

選抜した2種寄生蜂を生物的防除資材として商品化するためには，高効率かつ低コストな寄生蜂の大量生産工程の確立が必要である．わが国の高い人件費を考慮すると，全作業工程の中で最も人件費を要すると考えられる寄主および寄生蜂の増殖工程の省力化・効率化が求められる．さらに，剤型，梱包，保蔵方法といった品質管理についても検討が必要である．西日本の施設栽培における生物的防除資材として適している2種寄生蜂を大量増殖について比較した場

合、ハモグリミドリヒメコバチの産雌単為生殖系統は、性比管理の必要がないため (Parrella et al., 1989; Rathman et al., 1991), 大量増殖工程の確立が容易である。そこで4章では、ハモグリミドリヒメコバチ (産雌単為生殖系統) を選抜し、つぎに、大量増殖工程の温度として、ハチの生物的防除効率 (BCE) (Hondo et al., 2006) とハエの増殖能力が最も高かった (小澤, 1999) 25°Cに設定した。寄主植物栽培とハエ生産の方法については主に文献資料を、ハチ生産方法については3章の実験結果を基にして、寄主植物栽培、ハエ生産、ハチ生産およびハチの梱包・保蔵の4工程からなる大量増殖工程を設計した (図6)。次いで、作業の省力化・効率化のための大量増殖装置の試作とその性能評価、さらに剤型、梱包、保蔵について検討した。

試作した産卵装置についてはハエ、ハチともに回収率が低くかったが (表7), 羽化成虫回収装置については回収率が高かった (表8)。食植性昆虫は食草探索の際、食草が発する匂い物質を利用する (平野, 1960; 大崎, 1996)。また、チリカブリダニ (Takabayashi et al., 1994) やヒメハナカメムシ類 (Venzon et al., 1999) では、寄主探索の際に寄主の摂食によって植物が発する匂い物質 (HIPV) を利用したり、ハモグリバエ類寄生蜂の *Dapsilarthra rufiventris* では、寄主の食草の匂いや (Sugimoto et al. 1988b), 寄主幼虫の摂食音を (Sugimoto et al. 1988a) 寄主探索に利用することが実験的に実証されており、本研究で試作した産卵装置において、ハエは産卵装置内に設置したインゲンマメ株から発する匂い物質によって、ハチはこれに加えて寄生や寄主体液摂取による殺害を免れて装置内に生残しているハエ幼虫が発する摂食音といった、ハエやハチを装置内の回収筒へ移動させる正走光性や負走地性と相反する刺激によってハエやハチの移動が阻害され、回収率が低下した可能性がある。一方、ハエ成虫は、黄色に誘引されるので (Zehnder and Trumble, 1984), 正走光性や負走地性の利用に加えて、こうした誘引刺激を利用することによって回収率の向上を試みる必要がある。一方、ハエ羽化成虫回収では蛹だけを、ハチ羽化成虫回収ではハチ蛹のいる葉を乾燥させてそれぞれ装置内に設置するため、ハエやハチの回収を阻害すると

思われる匂い物質はほとんど発生しないため、正走光性や負走地性を用いた回収装置は期待通りの性能を発揮したと思われる。

ハモグリミドリヒメコバチと比べて回収率が有意に低かったマメハモグリバエ蛹の放飼では(表 8), 未回収のハエの多くは羽化を失敗した。これは、ハエ老熟幼虫は蛹化する時に蛹殻を床面に接着するが、回収のためそれをはがしたため蛹殻が傷ついて羽化失敗したと考えられる。産卵後のインゲンマメ株を保管装置の床面を取り外し可能な 2 層式にして、蛹の付着した板ごと羽化成虫回収装置内に設置したり、床面に微粒珪砂を散布してハエ蛹が床面に付着するのを防ぐことで(嶽崎, 1999), 蛹回収時の蛹殻の損傷を防ぐなど、ハエ羽化率の向上のための蛹回収法についてさらに検討する必要がある。

羽化直後のハチ成虫を 15°C で蜂蜜水を与えて 3 日間または 5 日間保蔵した後、25°C 下で十分なハエ幼虫のいるインゲンマメを与えて飼育した。この時のハチ雌成虫の寿命や繁殖能力は、羽化直後から 25°C 下で一貫して同様にハエ幼虫を与えて飼育した雌成虫 (Hondo et al., 2006) と比べて、大幅に減少した(表 9)。本種成虫は逐次成熟性 (synovigenic) であるため、生存や卵形成に必要なたんぱく質を寄主体液摂取によって得る (Flanders, 1935 ; Sugimoto et al., 1983 ; Jervis and Kidd, 1986)。ハモグリミドリヒメコバチは、繁殖のためだけでなく、成虫の栄養補給のためにも寄主体液摂取が必要のようである。したがって、ハチ成虫を梱包し、保蔵・輸送した後に放飼すると、羽化当日にハチをそのまま放飼した場合に比べて、保蔵・輸送過程における寿命の損耗と、その間に寄主体液摂取ができなかったことによる寿命短縮の影響を受ける。このため、生物的防除資材として利用可能な期間が、大幅に減少するので、ハチ成虫態による製剤化は望ましくないことが明らかとなった。一方、ハモグリミドリヒメコバチは、蛹態で梱包し、5°C で 5 日間保蔵しても高い羽化率を示した(表 10)。本種は、野外では蛹越冬すると考えられるが、本研究結果からも蛹の低温耐性は高いことが分かった。蛹梱包したときの羽化後のハモグリミドリヒメコバチの寿命や繁殖能力の検討は行っていない。しかし、本種の野外における主な生息地域で

ある西日本の気温は、年間を通じ温度差が大きく、冬はたびたび氷点を下回るので、本研究で設定した蛹保蔵温度 5°C では、その生理生態的特性にはそれほど大きく影響を受けないと思われる。さらに、ハモグリミドリヒメコバチの蛹態放飼は、成虫剤のような保蔵・輸送期間における成虫寿命の損耗や寄主体液摂取ができないことによる成虫寿命の短縮もなく、高い効果が期待できる。しかし、本種は植物体内で蛹化するので、ハチ蛹だけの回収は困難である。オンシツツヤコバチのように蛹数を一定にそろえることが困難であるため、製品化にあたっては、製剤内の蛹数を一定基準に保つための検討がさらに必要である。

近年、タマゴバチ類に寄生されたバクガ卵を、休眠を利用して長期保蔵する技術が開発された (Greenberg et al., 1996)。ハモグリミドリヒメコバチの低温長期保蔵が可能となれば、過剰生産分の廃棄による損失が低減でき、さらに低需要期に生産した天敵を蛹態で低温保蔵し、高需要期に出荷することによって総合的な生産コストの低減が可能となる。本研究では、5°Cでの保蔵期間は最長で 5 日しか試みなかったが、羽化率は非常に高いことから更なる長期保存の可能性があり、本種蛹の長期低温保蔵技術について検討する必要がある。

ところで、マメハモグリバエおよびハモグリミドリヒメコバチともに、寄主植物 1 株あたり可能な限り多くの個体を生産することが求められるが、ハエが寄主植物に過剰産卵すると、過密の弊害が生じてハエ幼虫の発育不良や死亡率上昇を招き、さらには寄主植物の枯死を招く。また、ハチ成虫の過剰放飼は、寄生蜂の寄主体液摂取による寄主死亡率を高め、その結果寄生効率の低下を招く (大野ら, 1999)。そこで、寄主植物 1 株あたりのハエとハチの最適放飼密度を実験的に検討した。その結果、ハエ幼虫密度が 2 枚の子葉が十分に展開したインゲンマメ 1 株あたり 100 匹を超えると、ハエの蛹化率の低下や過密なハエ幼虫による過剰食害のため葉が枯死した (表 11)。ヒメコバチ科寄生蜂は、成熟した大型寄主を産卵のために、若齢寄主などの小型寄主を体液摂取に使い分けることが知られており (Sugimoto and Ishii, 1979)、過剰産卵によってハエ幼虫が小型化すると多くが寄主体液摂取のために利用され、次世代ハチ成虫の生産

効率の低下を招く。本研究では、ハエ幼虫はインゲンマメ 1 株あたり 50 匹程度の密度で正常な大きさに発育したので、1 株あたりハエ幼虫密度は 50 匹が実用的であると思われる。このときの放飼密度は 5 対であったが、マメハモグリバエは地域によって増殖能力が異なると報告されているので（西東ら, 1995a ; 小澤ら, 1999a ; 徳丸, 阿部, 2003), ハエの採集地によってハエ放飼密度は変動すると思われる。

ハチ生産工程では、ハモグリミドリヒメコバチによる寄生と寄主体液摂取による殺害を免れ、ハチ育成期間中にインゲンマメ葉より脱出し、床面で蛹化したハエ蛹を回収することとしているが、省力化のためには、ハエ幼虫の殺害率を高め、可能な限りこのようなハエ蛹回収を行わないほうが望ましい。大野ら（1999）は、蔵卵に寄主体液摂取を必要とする逐次成熟性の寄生蜂では（Flanders, 1935 ; Jervis and Kidd, 1986), 放飼密度が高くなると、供試ハエ幼虫に対する寄主体液摂取による殺害ハエ幼虫の割合が増加するので、寄生率が低下すると指摘した。本研究では、マメハモグリバエ幼虫 50 匹に対しハモグリミドリヒメコバチ雌成虫 10 匹を放飼した場合、ほぼ全てのハエ幼虫が殺害された（表 12）。また、ハチ 1 匹あたりの寄生数は全ての放飼密度で有意差がなく、その結果、ハチの放飼密度の上昇に伴い寄生率は高くなった。本研究結果が大野ら（1999）と異なったのは、本研究の実験規模が小規模だったことの他に、放飼密度が低かったためと思われる。本研究の規模においては、ハチ 10 匹を放飼した場合、供試したハエ幼虫のほぼ全てを殺害したので、ハチの実用的な放飼密度はハエ幼虫 50 匹あたり 10 匹が適当と思われる。また、寄主体液摂取は、ハチ増殖段階とハチ放飼段階では有利、不利が相反するため、大量増殖におけるコスト低減のためには、ハチ母虫が寄主体液摂取によって殺害するハエ幼虫数が少ないほうが望ましい。反面、ハチの潜在的な繁殖能力を完全に引き出すためには、産卵に際して十分な栄養を与える必要がある（Waage, et al., 1985）。ハチの蔵卵のために必要な栄養分を備えた人工飼料を、寄主体液摂取によって消費されるハエ幼虫の生産コストよりも安価に生産できれば、寄主体液摂取以外の方法での

栄養分の給餌は (Ueno, 1997) コスト低減に有効であり, 検討する必要があると思われる.

天敵の実用化には, 生物的防除資材として有効な種の選抜, 大量増殖技術の確立だけでなく, 放飼技術, すなわち放飼時期や, 放飼回数および放飼密度の最適化といった利用技術の開発の必要性がある (Hassan, 1985). 特に経済性の面からも最少の天敵放飼数により安定した防除効果を得るための天敵の最適利用技術の確立は重要である. 5 章では, 施設栽培トマトにおけるマメハモグリバエの生物的防除資材としての利用技術の確立を目的として, ハモグリミドリヒメコバチを実際に放飼し, その有効性を検証し, 同時にマメハモグリバエの発生状況によるハモグリミドリヒメコバチの最適放飼タイミングと放飼密度を決定するために基礎的な実証試験を行ない, 基礎的な知見を得た.

ハエ幼虫が高密度発生している施設に, 種々の放飼密度でハチを放飼した場合, 6 匹, すなわち 0.1 匹/ m^2 の放飼密度では, 雌ハチ成虫 1 匹が寄生や寄主体液摂取によって殺害したハエ幼虫数は多かったものの, 殺害ハエ幼虫数よりもハエ発生量が勝り, 防除効果が認められなかった (図 19a). 一方, 180 匹, すなわち 3.0 匹/ m^2 の密度でハチを放飼した場合, 若齢幼虫を除くほぼ全ての幼虫が殺虫された (図 19c). よって, マメハモグリバエが高密度発生している施設で即時的効果を期待してハチを放飼する場合, 雌ハチ成虫を 3.0 匹/ m^2 の密度で放飼する必要があるが, この放飼密度は現在使用されている導入系統のイサエアヒメコバチの放飼密度, 10a あたり 100~200 匹 (石井, 1999) と比べても極めて高密度であり, 本種は産雌単為生殖系統で導入寄生蜂よりも低価格に増殖できる見込みがあるとはいえ, 防除コストが高額になることは避けられない. 一方, 侵入初期に見られるハエ幼虫の低密度発生の施設では, 雌ハチ 6 匹, すなわち 0.3 匹/ m^2 の放飼密度で高い防除効果が得られた (図 20c). よって, 低密度発生段階で, 本種寄生蜂を放飼密度 0.3 匹/ m^2 で放飼すると 1 回の放飼である程度即時性の在る高い防除効果が得られるといえる.

幼虫高密度発生の施設にハチ雌 30 匹 (0.5 匹/ m^2 密度) を放飼した際, 調査期

間後半の12月18日以降累積ハエ殺害数が増した(図19b)。これは娘ハチが母ハチの寄生後14から16日後に羽化し、寄生を開始したためと考えられる。同様の施設にハチ雌180匹(3.0匹/m²密度)を放飼した場合、放飼から約10日後の2月14日には累積蛹化脱出数が大幅に増加した(図19c)。また、幼虫が低密度発生している施設にハチを放飼した場合、放飼6日以降は殺害ハエ幼虫数がほとんど増加しなかった(図20a, b)、本実験における1度放飼したハモグリミドリヒメコバチの防除有効期間はおよそ放飼後7~10日間と考えられる。

現在わが国でマメハモグリバエの生物的防除資材として使用されている導入寄生蜂は、1週間ごとに3回以上の複数回放飼による接種的防除(van Lenteren, 1986; Minkenberg, 1990)を行っている(石井, 1999)。本実験より、本種は、放飼後2週間目から次世代寄生蜂による防除効果が期待できるので、放飼後7~10日までに追加放飼を行うことにより、より高い防除効果が期待される。

現在、マメハモグリバエ幼虫寄生蜂の放飼方法として主に用いられているのは、害虫の発生調査に基づく放飼法である(Parr, 1976; 矢野, 2003)。しかし、この方法は、ハモグリミドリヒメコバチにとって寄生可能な幼虫のステージが短い(Minkenberg, 1988)マメハモグリバエにおいて、最適な放飼時期の決定を個々の農家に求めるのは無理がある。また、害虫発生の有無にかかわらず、作物の定植後、天敵の定期的繰り返し放飼による防除法は、発生調査を行う必要が無く、早期放飼によって防除効果が期待でき、さらに農家の労力負担軽減という点からも有効であるが(Heinz et al., 1993; van Lenteren, 1995)、生産コストの高いマメハモグリバエ寄生蜂では費用対効果の面で問題がある。一方、バンカー植物法は、害虫以外の代替寄主とその寄主植物を施設内へ持ち込んで天敵を施設内に維持する方法である。この方法は、発生調査が不要である点、施設内に常時寄主が存在するので放飼天敵が寄主不在によって死滅することを防ぐ点、それに伴い寄生蜂の放飼回数を低減することが可能な点において上記2つの放飼法よりも有利である。

ハモグリミドリヒメコバチが対象害虫のマメハモグリバエと代替寄主のキ

ツネノボタンハモグリバエが共存させた小型ビニール温室実験において、それほど偏りなしに双方を攻撃することが明らかとなった（表 21a, b）。また、この実験で、寄主数の多いキツネノボタンハモグリバエ幼虫よりも優先してマメハモグリバエ幼虫を殺害したことから、キツネノボタンハモグリバエ幼虫を代替寄主として用いても、ハモグリミドリヒメコバチは代替寄主だけではなく、マメハモグリバエ幼虫を探索、殺害することがわかった。続いてガラス温室内で行った実験においても、ハモグリミドリヒメコバチはマメハモグリバエ、キツネノボタンハモグリバエ幼虫どちらにも攻撃することが確認され（図 22a, b）、キツネノボタンハモグリバエとラナンキュラスを用いたバンカー植物法の有効性が示唆された。その際、ラナンキュラスは多数のキツネノボタンハモグリバエによる寄生を受けていたにもかかわらず、新葉を出しながら設置後 1 ヶ月以上が経過しても枯死株はなかった。本法を確立する際、キツネノボタンハモグリバエ幼虫数が過密になりすぎないように成虫の最適放飼密度を決定することにより、バンカー植物としての有効期間を 1 ヶ月以上延ばすことが可能であると推察された。この事は、比較的高価な花卉植物であるラナンキュラスをバンカー植物として用いるに当たって、コストの面から有効である。

以上、本研究において、生物的防除資材として最適な種を選抜するための総合的基準である生物的防除効率（BCE）を確立し、その評価法に基き、気温差の激しい西日本における侵入害虫マメハモグリバエに対する生物的防除資材として有効な土着寄生蜂を選抜した。本研究で提案した BCE は、1999 年沖縄県に侵入後、急速に分布域を拡大し施設栽培の農作物に重大な被害を与えているトマトハモグリバエ *Liriomyza sativae* (Blanchard) (岩崎ら, 2000; 徳丸ら, 2002), さらに 2001 年北海道に侵入したアシグロハモグリバエ *Liriomyza huidobrensis* (Blanchard) (岩崎ら, 2004) の生物的防除資材の選抜をはじめ、今後の生物的防除資材選抜においても、この総合的基準は重要な指標となるだろう。

また、今回設計した土着寄生蜂の大量増殖工程および放飼に関する基礎技術は、これら寄生蜂種の商業的利用に向けたプラントレベルでの大規模増殖シス

テム構築のための重要な知見となるであろう。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、終始懇切なご指導とご援助を賜った近畿大学農学部農業生産科学科昆虫生態制御研究室 杉本 毅教授に対し厚く御礼を申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、有益な御指導と御助言および本論文の御校閲を賜った近畿大学農学部環境管理学科環境生態学研究室 櫻谷 保之教授、近畿大学農学部農業生産科学科昆虫生態制御研究室 香取 郁夫講師に対し感謝の意を表す。

また、本論文を御校閲頂いた近畿大学農学部農業生産科学科園芸植物学研究室 宇都宮 直樹教授に対し厚く御礼申し上げます。

本研究に供試したマメハモグリバエおよびカンムリヒメコバチを御提供頂いた静岡県農業試験場 小澤 朗人氏、ハモグリミドリヒメコバチを御提供頂いた鹿児島県農業試験場 嶽崎 研氏、導入系統のイサエアヒメコバチを御提供頂いたアリスタライフサイエンス株式会社に感謝の意を表す。

最後に、本研究を遂行するにあたり、絶大なる御助力を頂いた近畿大学農学部農業生産科学科 昆虫生態制御学研究室（旧昆虫学研究室）の各位に心から御礼申し上げます。

要約

わが国に 1990 年に侵入した世界的に重要な園芸作物害虫マメハモグリバエに対する生物的防除資材としてイサエアヒメコバチ（導入系統）とハモグリコマユバチが導入されている。本研究では、これらに代わる防除資材として土着寄生蜂の中から優良な種を選抜し、その大量生産技術を確立し、さらに施設内放飼のための基礎資料を得ることを目的とした。

1. マメハモグリバエに対する天敵資材としての土着寄生蜂 7 種の温度耐性の比較

本実験では、西日本の土着ハモグリバエ寄生蜂群において優勢なヒメコバチ科寄生蜂類より 7 種、*Pnigalio katonis*, *Hemiptarsenus varicornis*, *Diglyphus isaea*, *D. minoicus*, *D. pusztensis*, *Chrysocharis pentheus* および *Neochrysocharis formosa* を選び、それらの発育、雌成虫の寿命、繁殖能力に対する温度耐性を実験的に比較した。その結果、高温適応的な 2 種、*H. varicornis* と *N. formosa* と低温適応的な他 5 種に大別することができた。

本実験に用いた寄生蜂は寄生だけでなく、寄主体液摂取によっても寄主を殺す。寄生蜂の放飼段階では、寄主体液摂取による寄主殺害は防除上有利であるが、大量増殖段階では増殖に直結しないため寄主の無駄遣いとなって不利である。そこで、生物的防除資材としての有効性を両段階を通して総合評価するため、費用対効果の観点から、1 匹の母親による寄生と寄主体液摂取のための総殺害寄主数に対する、その母親から得られたすべての子孫を放飼したときに得られた総被殺害寄主数の比を生物的防除効率（*BCE*）として表わした。上記の温度耐性と得られた *BCE* から、温度変化の激しい西日本の施設では、秋から翌春の低温期には *D. isaea*（土着系統）、初夏から初秋の高温期には *N. formosa*（産雌単為生殖系統）を使い分けるのが最適と結論できた。

2. 生物的防除資材としてのハモグリミドリヒメコバチの大量増殖法の確立

前章の結果から、マメハモグリバエに対する優良な生物的防除資材として土着寄生蜂ハモグリミドリヒメコバチ *N. formosa* を採用し、マメハモグリバエを寄主、インゲンマメを寄主植物として、寄主植物栽培、寄主生産、ハチ生産およびハチの梱包・保蔵の4工程からなる大量増殖工程を設計した。つぎに、大量生産工程における作業の省力化・効率化のために産卵装置および羽化成虫回収装置を試作し、その性能評価、ハチの剤型・梱包・保蔵方法について検討した。その結果、横移動式産卵装置による産卵済み両種成虫の回収率はマメハモグリバエで75.3%、ハモグリミドリヒメコバチで66.4%、また縦移動式産卵装置におけるハモグリミドリヒメコバチの回収率は68.4%となり、あまり高くなかった。羽化成虫回収装置の回収率は、装置内に成虫を放飼した場合にマメハモグリバエ雌で86.9%、雄で82.4%、ハモグリミドリヒメコバチ雌で94.4%、蛹を放飼した場合、マメハモグリバエで81.7%、ハモグリミドリヒメコバチで92.5%となり、ともに高かった。ハモグリミドリヒメコバチ成虫の寿命や繁殖能力は、羽化直後に15℃で3日および5日間保蔵すると、大幅に低下した。ハモグリミドリヒメコバチ蛹の羽化率は、蛹を含んだインゲンマメ葉をある程度乾燥させてから5℃で5日間保蔵すると94.4%となり、葉を乾燥させずに保蔵した場合の85.7%と比べて高かった。また、ハモグリミドリヒメコバチ蛹を5℃で3日間保蔵した後の羽化率95.3%および5日間保蔵した後の羽化率100%は、5℃で保蔵しなかった場合の96.5%と同様に高かった。

大量生産における産卵のための最適放飼成虫密度は、子葉を十分に展開させたインゲンマメ1株あたり50匹のマメハモグリバエ幼虫が最適であり、そのためにはマメハモグリバエ成虫5対を1日間放飼するのが適当と推定された。一方、ハモグリミドリヒメコバチ成虫の最適放飼密度はマメハモグリバエ幼虫50匹あたり10匹を1日間放飼するのが推定された。

3. ハモグリミドリヒメコバチの生物的防除資材としての有効性とバンカープラント法の検討

本実験では、施設栽培トマトにおけるマメハモグリバエの生物的防除資材として、ハモグリミドリヒメコバチをガラス温室に実際に放飼し、その有効性を検証し、同時に最適放飼タイミングと放飼密度を決定するための基礎資料を得ることを目的とした。その結果、マメハモグリバエ幼虫が高密度発生施設に、180 匹 (3.0 匹/m²) の密度でハチを放飼した場合、若齢幼虫を除くほぼ全ての幼虫が殺虫された。マメハモグリバエ幼虫低密度発生施設に本種を放飼した場合、雌ハチ 6 匹 (0.3 匹/m²) の放飼密度で高い防除効果を得られた。防除コストを考慮すると、侵入初期に見られるハエ幼虫低密度段階で本種寄生蜂を放飼密度 0.3 匹/m²で放飼すると、1 回の放飼によってある程度即時性のある防除効果が得られることがわかった。

つぎに、キツネノボタンハモグリバエ *Phytomyza ranunculi* Schrank を代替寄主、ラナンキュラス *Ranunculus asiaticus* L.をバンカー植物とするバンカープラント法の構築を目指して基礎的実験を行った。その結果、ハモグリミドリヒメコバチは、対象害虫のマメハモグリバエと代替寄主のキツネノボタンハモグリバエが共存した温室で行った実験において、それほど偏りなく双方を攻撃することが明らかとなり、本バンカー植物法の有効性が示唆された。また、この実験過程においてラナンキュラスは多数のキツネノボタンハモグリバエの加害を受けたにもかかわらず、新葉を出しながら設置後 1 ヶ月以上が経過しても枯死株はなかった。キツネノボタンハモグリバエ幼虫数の過密を避けることができれば、バンカー植物として 1 ヶ月以上の利用が可能ながわかった。

Summary

The serpentine leafmining fly, *Liriomyza trifolii* (Burgess) is one of the most serious pests of vegetables and ornamentals throughout the world. It was first found in Japan in 1990, and is presently distributed throughout the country. Two introduced European species of parasitoids, *Diglyphus isaea* (Walker) and *Dacnusa sibirica* Telenga, have been used as biological control agents. Nowadays, a risk of exotic organisms to the indigenous environments is a worldwide concern. Thus, native natural enemies are desired as an alternative agent for avoiding this risk. In this study, we tried to select candidates suitable for biological control in greenhouses native eulophid parasitoids in western Japan, to establish the mass production process of them and tested their efficiency as biological control agent by them in the greenhouse.

1. Comparison of thermal tolerance of seven native species of parasitoids as biological control agents against *Liriomyza trifolii* in Japan.

The efficiencies of seven native species of eulophid parasitoids (*Pnigario katonis*, *Hemiptarsenus varicornis*, *Diglyphus isaea*, *D. minoicus*, *D. pusztensis*, *Chrysocharis pentheus* and *Neochrysocharis formosa*) as biological control agents against *Liriomyza trifolii* in the greenhouse were evaluated by comparing their thermal tolerance among each other. Those species could be roughly classified into two groups, i.e., *H. varicornis* and *N. formosa* which are more adapted to high temperatures, and the other five species which are more adapted

to low temperatures. In biological control, host-killing by host-feeding will be profitable in the release stage, but will be unprofitable in the mass-production stage because it does not result directly in production of progeny. Thus, the following biological control efficiency (*BCE*) evaluation method was proposed in this study as a comprehensive criterion for evaluating the efficiency of those parasitoids as biological control agents. Collectively, the thermal tolerance and *BCE* clarified in this study revealed that *D. isaea* should be discriminatively used in cool seasons and *N. formosa* in hot seasons, based on a borderline temperature of 20 to 25°C in the greenhouse.

2. Mass production process of *Neochrysocharis formosa* as the biological control agent against *Liriomyza trifolii*.

We designed the mass production process of *N. formosa* which was selected as one of the biological control agent. Also, the equipments for oviposition and collection of the eclosed adults of hosts and parasitoids were produced and their efficiencies were tested the techniques for packaging and storing parasitoids were established. The recovery rates of both host and parasitoid adults after oviposition were not high by both the horizontal-moving type and the vertical-moving type of oviposition equipment. The recovery rates of both eclosed host and parasitoid adults by the collection equipment were high when they were released as adults and pupae in the equipment. The longevity and reproduction of adult parasitoids were sharply decreased by their storage at 15 °C during 3 or 5 days after eclosion. When damaged leaves of kidney bean including parasitoid pupae in them were stored for 5 days at 15 °C after drying them, the eclosion rate of adult parasitoids was higher than when those leaves were stored without drying them. The eclosion rate of adult parasitoids was as high

when stored at 5 °C for 3 or 5 days as when not stored at 5 °C.

The most suitable density of hosts was estimated as 50 larvae per plant which could be attained by releasing 5 pairs of host adults per plant for 24 hours, and that of parasitoids as 10 adults per 50 host larvae for 24 hours.

3. Evaluation of efficiency of *N. formosa* as a biological control agent and application of banker plants system.

The controlling efficiency in the inoculative release and the most suitable release timing and density of *N. formosa* were determined in the greenhouse experiments. When 180 female adults of *N. formosa* (corresponding to 3.0 adults/m²) were released in the greenhouse with the high density of *L. trifolii* larvae, almost all of host larvae were killed by parasitization and host-feeding. When 6 female of adults wasps (0.3 adults/m²) were released in the greenhouse by their low density, their controlling effect was high. The release of 3.0 adults/m² would be the most suitable in the greenhouse with low density of host larvae.

In application of banker plant system *Phytomyza ranunculi* Schrank was used as an alternative host and *Ranunculus asiaticus* L. as a banker plant. *N. formosa* killed *L. trifolii* and *P. ranunculi* larvae with nearly equal ratio. All *R. asiaticus* as the banker plant were not blighted by feeding of *P. ranunculi* larvae in this study. This validity term of *R. asiaticus* as a banker plant would be for a month and a little more.

引用文献

- Arakaki, N. and K. Kinjo (1998) Notes on the parasitoid fauna of the serpentine leafminer *Liriomyza trifolii* (Burgess) (Diptera: Agromyzidae) in Okinawa, southern Japan. *Appl. Entomol. Zool.* 33: 577-581.
- Askew, R. R. and M. R. Shaw (1986) Parasitoid communities: their size, structure and development. In *Insect Parasitoids* (J. K. Waage and D. Greathead eds.). Academic Press, London, pp. 225-264.
- Bennison, J. A. (1992) Biological control of aphides on cucumbers, use of open rearing systems or “Banker plants” to aid establishment of *Aphidoletes aphidimyza*. *Medekingen van de Faculteit Landbouwwetenschappen, Universiteit Gent.* 57: 457-466.
- Bennison, J.A. and S.P. Corless (1993) Biological control of aphids on cucumbers: further development of open rearing units or banker plants to aid establishment of aphid natural enemies. *IOBC/WPRS Bull.* 16(2): 5-8.
- Birch, L. C. (1948) The intrinsic rate of natural increase of an insect population. *J. Anim. Ecol.* 17: 15-26.
- Broadbent, A. B. and J. A. Matteoni (1990) Acquisition and transmission of *Pseudomonas cichorii* by *Liriomyza trifolii* (Diptera, Agromyzidae). *Proc. Entomol. Soc. Ont.* 121: 79-84.
- Carson, R. (1962) *Silent Spring*. Houghton Mifflin, Boston. 368 pp.
- Castane, C., J. Ruidavets and E. Yano (1999) Biological control of thrips. In *Integrared pest and disease management in greenhouse crops* (Albajes, R., M. A. Gullino, J. C. van Lenteren and Y. Elad eds.). Kluwer academic publishers,

- Dordrecht, The Netherlands, 244-253.
- Chan, M. S. and H. C. J. Godfray (1993) Host-feeding strategies of parasitoid wasps. *Evol. Eco.* 7: 593-604.
- Chandler, L. D. (1985) Flight activity of *Liriomyza trifolii* (Diptera Agromyzidae) to placement of yellow traps in bell pepper. *J. Econ. Entomol.* 78: 825-828.
- Clausen, C. P. (1940) *Entomophagous Insects*. McGraw-Hill Book, New York. 688 pp.
- Clausen, C. P. ed. (1978) *Introduced Parasites and Predators of Arthropod Pests and Weeds: A World Review. agricultural Handbook No. 480 U.S. Department of Agriculture, Washington D.C., U.S.A..* 545 pp.
- DeBach, P. ed. (1964) *Biological Control of Insect Pests and Weeds*. Chapman and Hall, London. 844pp.
- DeBach, P. and D. Rosen (1991) *Biological control by Natural Enemies* (2nd ed.). Cambridge Univ. Press, U.K., 440 pp.
- 江原昭三, 真梶徳純 (1996) 植物ダニ学. 全国農村教育協会, 東京, 419 pp.
- FAO (1995) Code of conduct for the import and release of exotic biological control agents. International Standards for Phytosanitary Measures no.3. FAO, Rome (IT).
- Finney, G.L. and T.W. Fisher (1964) Culture of entomophagous insects and their hosts. In *Biological Control of Insects and Their Hosts*. (Debach, P. ed.). Reinhold, New York. 328-355.
- Flanders, S.E. (1935) An apparent correlation between the feeding habits of certain pteromalids and the condition of their ovarian follicles. *Ann. Ent. Soc. Am.* 28: 438-444.
- Furuhashi, K. and M. Nishino (1983) Biological control of arrowed scale, *Unaspis*, by parasitic wasps introduced from the People's Republic of China. *Entomophaga* 28: 277-286.
- 古橋嘉一, 西野操 (1984) ヤノネカイガラムシの導入天敵とその防除効果. 植物防疫 38: 258-262.

- Gauld, I. and B. Bolton (eds.) (1988) *The Hymenoptera*. Oxford University Press, New York. 332 pp.
- Genung, W. G. (1957) Some possible cases of insect resistance to insecticides in Florida. *Proc. Fla. State Hort. Soc.* 70: 148-152.
- Godfray, H. C. J. (1994) *Parasitoids: Behavioral and Evolutionary Ecology*. Princeton University Press, Princeton. 473 pp.
- Greenberg, S.M., D.A. Nordlund and E.G. King (1996) Mass production of *Trichogramma* spp.: experiences in the former Soviet Union, China, the United States and western Europe. *Biocontrol News and Information* 17: 51N-60N.
- Hansen, L. S. (1983) Introduction of *Aohidoletes aphidimyza* (Rond) (Diptera: Cecidomyiidae) from an open rearing unit for the control of aphids in glasshouse. *IOBC/WPRS Bull.* 6: 146-150.
- Hassan, S. A. (1985) Massenproduktion und Anwendung von *Trichogramma*: 7. Siebenjährige Erfahrungen bei der Bekämpfung des Maiszünslers *Ostrinia nubilalis* Hübner. *Gesunde Pflanzen* 37: 197-202.
- Heintz, K. M., L. Nunney and M. P. Parrella (1990) Predictability of biological control of the leafminer *Liriomyza trifolii*, infesting greenhouse cut chrysanthemum. *IOBC/WPRS Bull.* 13: 76-82.
- Hering, E. M. (1951) *Biology of Leaf Miners*. Dr W. Junk, 's-Graenhage. 420 pp.
- Hingston, A. B. (1997) The impact of the large earth bumblebee, *Bombus terrestris* on Tasmanian ecosystems. *University of Tasmania. Honours Thesis*.
- 平野千里 (1960) 食植性昆虫の寄主選好における化学物質の役割. *生物科学* 12 : 104-110.
- 広瀬義躬 (1979) 寄生行動の生態学-寄生バチの場合-. 種の生活における昆虫の行動 (石井象二郎, 大島長造, 立田栄光, 日高敏隆 共編) pp. 105-149.
- 広瀬義躬 (1987) 導入天敵の永続的利用技術, バイオ農薬・生青調節剤開発利用マニュアル. エル・アイ・シー, 東京, pp. 130-142.

- 広瀬義躬 (1994) 天敵導入の生態系へのリスク. 農業技術, 49: 145-149.
- Hirose, Y. (1999) Evaluation of environmental impacts of introduced natural enemies. In *Biological Invasions of Ecosystem by Pests and Beneficial Organisms* (E. Yano, K. Matsuo, M. Shiyomi and D. A. Andow eds.). National Institute of Agro-Environmental Sciences, Tsukuba. pp. 224-232
- Hoddle, M.S., R.G van Driesche and J. Sanderson (1998) Biology and use of the whitefly parasitoid *Encarsia formosa*. *Annu. Rev. Entomol.* 43: 645-669.
- 本藤智雄 (1999) 侵入害虫マメハモグリバエの生物的防除資材としての土着寄生蜂の利用に関する研究. 近畿大学大学院修士論文. 59pp.
- Hondo, T., A. Koike and T. Sugimoto (2006) Comparison of thermal properties of seven native species of parasitoids (Hymenoptera: Eulophidae) as biological control agents against *Liriomyza trifolii* (Diptera: Agromyzidae) in Japan. *Appl. Entomol. Zool.* 41; 73-82.
- Howarth, F. G. (1991) Environmental impacts of classical biological control. *Annu. Rev. Entomol.* 36: 485-509.
- 保全生態学研究会 (1997a) マルハナバチの一斉調査について/セイヨウオオマルハナバチの帰化問題に関するインターネットを用いた情報収集. 保全生態学研究 2: 36-41.
- 保全生態学研究会 (1997b) セイヨウオオマルハナバチの目撃・標本採集についての情報. 保全生態学研究 2: 103.
- 市川耕治, 大野 徹, 中込暉雄 (1996) トマトにおけるマメハモグリバエの防除. 愛知農総試研報 28: 177-187.
- 井上雅央 (1993) ハダニ. 農山漁村文化協会, 東京, 127pp.
- Jervis, M. A. and N. A. C. Kidd (1986) Host-feeding strategies in

hymenopteran parasitoids. *Biol. Rev.* 61: 395-434.

石井俊彦 (1999) 天敵昆虫類を用いた野菜害虫の実践的防除. シンポジウム生物農薬: その現状と利用講演要旨. 日本植物防疫協会, 東京. pp. 86-92.

伊藤嘉昭, 山村則男, 嶋田正和 (1992) 動物生態学. 蒼樹書房, 東京, 508 pp.

岩崎 暁雄, 春日井 健司, 岩泉 連, 笹川 満廣 (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(4): 142-147.

岩崎暁生, 岩泉 連, 高野俊一郎 (2004) 日本におけるアシグロハモグリバエ *Liriomyza huidobrensis* (Blanchard) の新発生. 植物防疫 58: 13-19.

Johnson, M.W., Welter, S.C., Toscano, N.C., Ting, I. P., Trumble, J.T., (1983) Reduction of tomato leaflet photosynthesis rates by mining activity of *Liriomyza sativae* (Diptera : Agromyzidae). *J. Environ. Entomol.* 15: 268-73.

環境庁水質保全局 (1999) 天敵農薬環境影響調査検討会報告書—天敵農薬に係る環境影響評価ガイドライン—. 46 pp.

Kato, M. (1985) Life history and mortality pattern of the honeysuckle leafminer *Phytomyza loniceradae* Robineau-Desboidy (Diptera, Agromyzidae). *Kontyu* 53: 604-615.

Kato, M. (1994) Structure, organization, and response of species-rich parasitoid community to host leaf-miner population dynamics. *Oecologia* 97: 17-28.

Kato, M. (1996a) Effects of parasitoid community structure upon the population dynamics of the honeysuckle leafminer, *Chromatomyia suikazurae* (Diptera: Agromyzidae). *Res. Popul. Ecol.* 38: 27-40.

加藤 真 (1996b) 寄生蜂の群集構造と寄主潜葉虫の個体群動態. 昆虫個体群生態学の展開 (久野英二 編著). 京都大学学術出版会, 京都, pp. 195-215.

Kidd, N. A. C. and M. A. Jervis (1989) The effects of host-feeding behaviour on the dynamics of parasitoid-host interactions, and the

- implications for biological control. *Res. Popul. Ecol.* 31: 235-274.
- King, P. E. and G. Richards (1968) Oosorption in *Nasonia vitripennis* (hymenoptera: Pteromalidae). *J. Zool., London* 154: 495-516.
- 桐谷 圭治 (2004) 「ただの虫」を無視しない農業 生物多様性管理. 築地書館, 東京, 192 pp.
- 小西 和彦 (1998) マメハモグリバエの図解検索. 農環研資 22: 27-76.
- LaSalle, J. and I. D. Gauld (1991) Parasitic Hymenoptera and the biodiversity crisis. *Redia* 74: 315-334.
- Li L. Y. (1994) Worldwide use of *Trichogramma* for biological control on different crops: a survey. In *Biological Control with Egg Parasitoids* (Wajinberg, E. and S. A. Hassan eds.). CAB International, Wallingford, UK. pp. 37-53.
- Mateoni, J.A. and A. B. Broadbent (1988) Wounds caused by *Liriomyza trifolii* (Diptera, Agromyzidae) as sites for infection of *Chrysanthemum* by *Pseudomonas cichorii*. *Can. J. Pl. Path.* 10: 47-52.
- 松村美小夜, 西本登志, 福井俊男 (2001) 半促成栽培トマトにおける生物農薬少量放飼による害虫防除. 奈良農技セ研報 32: 19-26.
- Minkenbergh, O. P. J. M. (1988) Dispersal of *Liriomyza trifolii*. *Bull. Euro. Medit. Plant Prot. Org.* 18: 173-182.
- Minkenbergh, O. P. J. M. (1990) *On seasonal inoculative biological control*. Agric. Univ. Wageningen PhD thesis, Netherlands. 230 pp.
- Minkenbergh, O. P. J. M. and J. C. van Lenteren (1986) The leafminers *Liriomyza bryoniae* and *L. trifolii* (Diptera: Agromyzidae), their parasites and host plants: a review. *Agric. Univ. Wageningen Papers* 86: 1-50.
- Minkenbergh, O. P. J. M. and J. C. van Lenteren (1990) Evaluation of parasitoids for the biological control of leafminers on glasshouse tomatoes: development of a preintroduction selection procedure. *IOBC/WPRS Bull.* 13:

124-128.

Mitsuhashi, M. and M. Ono (1996) Hybridization between Japanese and European bumblebees (*Bombus spp.*). *Summaries of the 7th International Pollination Symposium, Lethbridge, Canada.*

森 燐須(1993)天敵農薬-チリカブリダニその生態と応用. 日本植物防疫協会, 東京, 130 pp.

森 燐須, 真梶徳純 (1977) チリカブリダニによるハダニ類の生物的防除. 日本植物防疫協会, 東京, 89 pp.

森 燐須, 村上陽三 (1981) 生物的防除における捕食・寄生性天敵の役割と利用. 昆虫学最近の進歩 (石井象二郎 編) pp. 279-295.

Morison, R.K. and E.G. King (1977) Mass production of natural enemies. In *Biological control by Augmentation of Natural enemies* (Ridgway, R.L. and S.B. Vinson eds.). Plenum Press, New York. 183-217.

Moriya, S., K. Inoue, A., Otake, M. Shiga and M. Mabuchi (1989) Decline of the chestnut gall wasp population, *Dryocosmus kuriphisis* Kamijo (Hymenoptera: Cynipidae) after the establishment of *Torymus sinensis* Kamijo (Hymenoptera : Torymidae). *Appl. Entomol. Zool.* 24: 231-233.

Moriya, S., K. Inoue and M. Mabuchi (1990) The use of *Torymus sinensis* to control chestnut gall wasp, *Dryocosmus kuriphilus*, in Japan. In *The Use of Natural Enemies to control Agricultural Pests.* (Bay – Petersen, J. ed.). FFTC Book Series No. 40, Taiwan. republic of China. pp. 94-105.

村上陽三 (1980) 寄生性・捕食性天敵の利用による害虫防除, 作物保護の新段階-その生物学的アプローチ. 農林水産技術情報協会, 東京, pp. 102-108.

村上陽三 (1997) クリタマバチの天敵-生物的防除へのアプローチ. 九州大学出版会, 福岡, 308 pp.

永井一哉 (1991) ハナカメムシによるミナミキイロアザミウマの生物的防除. 植物防疫 45: 423-426.

- 永井一哉 (1994) ミナミキイロアザミウマ. 農山漁村文化協会, 東京, 113pp.
- 根本 久 (1995) 天敵利用と害虫管理. 農山漁村文化協会, 東京, 181pp.
- 根本 久 (1997) 世界の天敵利用 2: 日本での問題点. 農耕と園芸. 164-166.
- 日本生態学会 (2002) 外来種ハンドブック. 地人書館, 東京, 390pp.
- 西野精二, 内田有紀 (1999) マメハモグリバエがナスの収量に及ぼす影響とその寄生蜂の発生活長. 奈良農技セ研報 30: 11-16.
- 大野和朗 (1998) マメハモグリバエの寄生性天敵 *Diglyphus isaea* の飼育方法. 今月の農業 42: 68-72.
- 大野和朗, 山口大輔, ニナ マリヤナ, 嶽崎 研, 嶽本弘之 (1999) マメハモグリバエ (双翅目: ハモグリバエ科) 幼虫寄生蜂の増殖効率. 昆虫 (N.S.) 2: 1-9.
- 大崎直太 (1996) モンシロチョウ属の植生幅を決めている要因. 昆虫個体群生態学の展開. 京都大学学術出版, 京都, pp. 323-346.
- 小澤朗人 (1999) 天敵生物: マメハモグリバエの寄生蜂. 植物防疫 53: 464-469.
- 小澤朗人 (2000) 最近話題の病虫害: マメハモグリバエ. 農及園 75: 174-180.
- 小澤朗人 (2001) 侵入害虫マメハモグリバエ *Liriomyza trifolii*(Burgess)の発生活態と寄生蜂による生物的防除法に関する研究. 静岡県農業試験場特別報告 23: 77 pp.
- 小澤朗人, 小林久俊, 天野高士, 井狩徹・西東力 (1993) 輸入天敵によるマメハモグリバエの防除 II. 施設ミニトマトにおける現地試験事例. 関東病虫研報 40: 239-241.
- 小澤朗人, 太田光昭, 小林久俊 (1998) マメハモグリバエ寄生蜂の羽化成虫回収装置の効率. 関東東山病虫害研究会年報 45: 179-180.
- 小澤朗人, 西東 力, 池田二三高 (1999a) マメハモグリバエの増殖に及ぼす寄主作物と温度の影響. 応動昆 43: 41-48.
- 小澤朗人, 西東 力, 池田二三高 (1999c) 施設栽培トマトにおける寄生蜂によるマメハモグリバエの生物的防除 I. 小規模温室に

- おけるイサエアヒメコバチ *Diglyphus isaea* の放飼効果. 応動昆
43: 161-168.
- 小澤朗人, 西東 力, 太田光昭 (1999b) マメハモグリバエ成虫の
野外における移動分散. 応動昆 43: 49-54.
- 小澤朗人 (2001) 侵入害虫マメハモグリバエ *Liriomyza trifolii*(Burgess)の発生動
態と寄生蜂による生物的防除法に関する研究. 静岡県農業試験場特別報告
23: 77 pp.
- Parr, W. J., H. J. Gould, N. H. Jessop and F. A. B. Ludlam (1976)
Progress towards a biological control programme for glasshouse
whitefly (*Trialeur vaporariorum*) on tomatoes. *Ann. Appl. Biol.* 83:
349-363.
- Parrella, M. P. (1984) Effect of temperature on oviposition, feeding
and longevity of *Liriomyza trifolii* (Diptera: Agromyzidae). *Can.*
Entomol. 116: 85-92.
- Parrella, M. P. (1987) Biology of *Liriomyza*. *Ann. Rev. Entomol.* 32: 201-24.
- Parrella, M. P., K. M. Heintz and G. W. Ferrentino (1987) Biological control of
Liriomyza trifolii on glasshouse chrysanthemums. *IOBC/WPRS Bull.* 10: 149-151.
- Parrella, M. P. and C. B. Keil (1984) Insect pest management lesson of *Liriomyza*. *Bull.*
Entomol. Soc. Am. 30: 22-25.
- Parrella, M. P., K. L. Robb and J. Bethke (1983) Influence of selected host plants on
the biology of *Liriomyza trifolii* (Diptera: Agromyzidae). *Ann. Entomol. Soc. Am.*
76: 112-115.
- Parrella, M. P., W. W. Allen and P. Morishita (1981) Leafminer species causes
California mum growers new problems. *Calif. Agric.* 35: 28-30.
- Parrella, M.P., J.T. Yost, K.M. Heinz and G.W. Ferrentino (1989) Mass rearing of
Diglyphus bigini (Hymenoptera: Eulophidae) for biological control of *Liriomyza*
trifolii (Diptera: Agromyzidae). *J. Econ. Entomol.* 82: 420-425.

- Price, J. F. and B. K. Harbaugh (1981) Effect of cultural practices on *Liriomyza*. In *Proc. IFAS – Ind. Conf. Biol. Cont. Liriomyza Leafminers.* (Schuster, D. J. ed.) San Diego, Calif. pp. 66-78.
- Rathman, R. J., M. W. Johnson and B. E. Tabashnik (1991) Production of *Ganaspidium utilis* (Hymenoptera: Eucolidae) for biological control of *Liriomyza* spp. (Diptera Agromyzidae). *Biol. Cont.* 1: 256-260.
- Riudavets, J. (1995) Predators of *Frankliniella occidentalis* (Perg.) and *Thrips tabaci* Lind.: A review. *Wageningen Agr. Univ Papers* 95: 43-87.
- 斎藤哲夫, 松本義明, 嶋義宏, 久野英二, 中島敏夫 (1988) 新応用昆虫学-改訂版-. 朝倉書店, 東京, 280 pp.
- 西東 力(1992a) マメハモグリバエにおける発生と防除. 植物防疫 46: 103-106.
- 西東 力 (1992b) わが国におけるマメハモグリバエの発生と防除対策 [1]. 農業および園芸 68: 1308-1312.
- 西東 力 (1993) わが国におけるマメハモグリバエの発生と防除 [2] 農業および園芸 68: 47-50.
- 西東 力 (1994) マメハモグリバエ. 農山漁村文化協会, 東京, 103pp.
- 西東 力(1997a) マメハモグリバエ: おもしろ生態とかしこい防ぎ方. 農文教, 東京, 103 pp.
- 西東 力 (1997b) 野菜・花卉害虫: マメハモグリバエ. 植物防疫 51: 337-340.
- 西東 力 (1997c) マメハモグリバエの寄生蜂 *Hemiptarsenus varicornis*. 植物防疫 51: 530-533.
- 西東 力, 池田二三高, 大石剛裕 (1993) ガーベラにおけるマメハモグリバエの薬剤防除とニーム及びアバメクチンの殺虫力検定. 関東病虫研報 40: 231-232.
- 西東 力, 池田二三高, 小澤朗人 (1996) 静岡県におけるマメハモグリバエの寄生者相と殺虫剤の影響. 応動昆 40: 127-133.

- 西東 力, 小澤朗人, 池田二三高 (1995b) マメハモグリバエに対する輸入寄生蜂の放飼効果. 関東病虫研報 42: 235-237.
- 西東 力, 大石剛裕・池田二三高・沢木忠雄 (1992) マメハモグリバエ *Liriomyza trifolii*(Burgess)に対する各殺虫剤の効力. 応動昆 36: 183-191.
- 西東 力, 大石剛裕, 小澤朗人, 池田二三高 (1995a) マメハモグリバエ *Liriomyza trifolii*(Burgess)の発育と産卵に対する温度, 日長, 寄主植物の影響. 応動昆 39: 127-134.
- 坂巻祥孝, 遅 玉成, 櫛下町鉦敏 (2003) トマトハモグリバエの発育零点と有効積算温度. 鹿児島大学農学部学術報告 53: 21-28.
- Sasakawa, M. (1961) A study of the Japanese Agromyzidae (Diptera). Part 2. *Pacific Insects* 3: 307-472.
- 笹川 満廣 (1966a) 農作物を害するハモグリバエの見分け方—成虫編—. 植物防疫 20: 181-184.
- 笹川 満廣 (1966b) 農作物を害するハモグリバエの見分け方—幼虫編—. 植物防疫 20: 311-314.
- Sasakawa, M. (1992) Unrecorded leaf-miners (Diptera, Agromyzidae) from Japan. *Jpn. Ent.* 60: 558.
- 柴尾 学, 田中 寛, 木村 裕 (1996) 寄生蜂によるトマトのマメハモグリバエの防効果. 関西病虫研報 38: 31-32.
- Smith, S. M. (1996) Biological control with *Tricogramma*: Advances, successes, and potential of their use. *Annu. Rev. Entomol.* 41: 375-406.
- Smith, R. F. and H. T. Reynolds (1966) Principles, definitions and scope of integrated pest control. *Proc. FAO Symposium on Integrated Pest Control* 1: 11-17.
- Smith, R. F. and J. M. Hardman (1986) *Can. Entomol.* 118: 753-759.
- Spencer, K. A. (1965) A clarification of the status of *Liriomyza trifolii* (Burgess) and some related species (Diptera: Agromyzidae). *Proc Entomol. Soc. Wash.* 67: 32-40.
- Spencer, K. A. (1973) *Agromyzidae (Diptera) of Economic Importance.*

- Dr. W. Junk, The Hague. 405 pp.
- Spencer, K. A. (1990) *Host Specialization in the World Agromyzidae (Diptera)*. Kluwer Academic Publ., Dordrecht. 444 pp.
- Stevens, L. and M. J. Wade (1990) Cytoplasmically Inherited reproductive incompatibility in tribolium flour Beetles – the rate of spread and effect on population-size. *Genetics* 124: 367-372.
- Stinner, R.E. (1977) Efficiency of inundative releases. *Ann. Rev. Entomol.* 22: 515-531.
- Stouthamer, R. and R. F. Luck (1993) Influence of microbe-associated parthenogenesis on the fecundity of *Trichogramma deion* and *T. pretiosum*. *Entomol. Exp. Appl.* 67: 183-192.
- 杉本 毅 (1998) マメハモグリバエの土着寄生蜂に関する最近の知見. 植物防疫 52: 358-362.
- Sugimoto, T. and M. Ishii (1979) Mortality of the larvae of a ranunculus leaf mining fly, *Phytomyza ranunculi* (Diptera: Agromyzidae), due to parasitization and host-feeding by its eulophid parasite, *Chrysocharis pentheus* (Hymenoptera: Eulophidae). *Appl. Entomol. Zool.* 14: 410-418.
- Sugimoto, T., H. Kameoka, S. Kusatani, O. Inui and K. Otsuka (1988b) Foraging for patchily-distributed leaf-miners by the parasitoid, *Dapsilarthra rufiventris* (Hymenoptera: Braconidae) V. Plant odour as a cue to long range patch-location. *Appl. Entomol. Zool.* 23: 135-143.
- Sugimoto, T., H. Murakami and R. Yamazaki (1987) Foraging for patchily-distributed leaf-miners by the parasitoid, *Dapsilarthra rufiventris* (Hymenoptera: Braconidae). II. Stopping rule for host search. *J. Ethol.* 5: 95-103.

- Sugimoto, T., M. Uenishiki and F. Machida (1986) Foraging for patchily-distributed leaf-miners by the parasitoid, *Dapsilarthra rufiventris* (Hymenoptera: Braconidae). I. Discrimination of previously searched leaflets. *Appl. Entomol. Zool.* 21: 500-508.
- Sugimoto, T., T. Ichikawa, M. Mitomi and Y. Sakuratani (1988c) Foraging for patchily-distributed leaf-miners by the parasitoid, *Dapsilarthra rufiventris* (Hymenoptera: Braconidae). IV. Analyses of sounds emitted by a feeding host. *Appl. Entomol. Zool.* 23: 209-211.
- Sugimoto, T., T. Imoarai and H. Tsuji (1983b) Oosorption in Eulophid Wasp, *Chrysocharis pentheus* WALKER (Hymenoptera : Eulophidae). *Appl. Entomol. Zool.* 14: 287-289.
- Sugimoto, T., Y. Sakuratani, Y. Siroo and I. Haneda (1983a) Communities of parasitoids attacking leaf mining hosts, *Phytomyza ranunculi* Schrank (Hymenoptera: Eulophidae). *Mem. Fac. Agric. Kinki Univ.* 16: 41-47.
- Sugimoto, T., Y. Shimono, Y. Hata, A. Nakai and M. Yahara (1988a) Foraging for patchily-distributed leaf-miners by the parasitoid, *Dapsilarthra rufiventris* (Hymenoptera: Braconidae) III. Visual and acoustic cues to a close range patch-location. *Appl. Entomol. Zool.* 23: 113-121.
- Takabayashi, J., M. Dicke and M.A. Posthumus (1994) Volatile herbivore-induced terpenoids in plant – mite interactions: variation caused by biotic and abiotic factors. *IOBC/WPRS Bull.* 22: 243-246.
- Takada, H. and K. Kamijo (1979) Parasite complex of garden pea leaf-miner, *Phytomyza horticola* Gourea, in Japan. *Kontyu* 47: 18-37.

- 高木一夫 (1983) ヤノネカイガラムシ (*Unaspis yanonesis* (Kuwana)) に対する導入寄生蜂ヤノネキイロコバチ (*Aphytis* sp.) とヤノネツヤコバチ (*Coccobius fulvus* Compere et Annecke) の日本における定着. 果樹試報 D5: 93-110.
- 高木一夫, 氏家武 (1986) ヤノネカイガラムシ (*Unaspis yanonesis* (Kuwana)) に対する導入寄生蜂ヤノネキイロコバチ (*Aphytis yanonensis* Debach et Rosen) とヤノネツヤコバチ (*Coccobius fulvus* Compere et Annecke) の防除効果, 果樹試報 D8: 53-64.
- 嶽崎 研, 大野和朗, 和泉勝一 (1999) マメハモグリバエの大量増殖法. 植物防疫 53: 355-358.
- 徳丸 晋, 阿部芳久 (2003) トマトハモグリバエ, マメハモグリバエおよびナスハモグリバエの発育に及ぼす温度・日長の影響ならびに増殖能力. 応動昆 47: 143-152.
- 徳丸 晋, 栗田秀樹, 林田吉王, 石山正弘, 福井正男 (2002) トマトハモグリバエの発生生態と殺虫剤感受性. 植物防疫 56: 289-292.
- Trumble, J. T. (1981) *Liriomyza trifolii* could become a problem on celery. *Calif. Agric.* 35: 30-31.
- Trumble, J.T., I.P. Ting and L. Bates (1985) Analysis of physiological, growth and yield responses of celery to *Liriomyza trifolii*. *Entomol. Exp. Appl.* 38: 15-21.
- Ueno, T. (1997) Effects of superparasitism, larval competition, and host feeding on offspring fitness in the parasitoid *Pimpla nipponica* (Hymenoptera: Ichneumonidae). *Ann. Entomol. Soc. Am.* 90:682-688.
- van de Vrie, M. and F. B. Dirkse (1982) Biology and control of the leafminer, *Liriomyza trifolii* (Burgess) on glasshouse chrysanthemum. *Acta Fort.* 125: 257-261.
- van der Linden, A. (1993) Biological control of leafminer in green house lettuce. In Proceedings of the CIRAD Conference of Leaf Mining Flies in Cultivated plants, *IOBC/WPRS Bull.* 16: 93-95.

- van Driesche, R. G. and T. S. Bellows, Jr. (1996) *Biological Control*. Chapman & Hall, New York, 539 pp.
- van Lenteren, J. C. (1986) Parasitoids in the greenhouse: Successes with seasonal inoculative release systems. In *Insect Parasitoids* (J. Waage and D. Greathead eds.). Academic Press, London, pp. 341-374.
- van Lenteren, J. C. (1993) Parasites and predators play a paramount role in pest management. In *Pest management: Biologically Based Technologies* (Lumsden, R. D. and J. L. Vaughn eds.). American Chemical Society, Washington DC. pp.66-81.
- van Lenteren, J. C. (1995) Integrated pest management in protected crops. In *Integrated Pest Management: Principles and Systems Development* (Dent, D. R. ed.). Chapman and Hall, London. pp. 311-343.
- van Lenteren, J. C. and N. A. Martin (1999) Biological control of whiteflies. Albajes, In *Integrated Pest and Disease Management in Greenhouse Crops* (R., M. A. Gullino, J. C. van Lenteren and Y. Elad eds.). Kluwer academic Publishers, Dordrecht, The Neatherlands, pp. 202-216.
- van Lenteren, J. C., D. Babendreier, F. Bigler, G. Burgio, H. M. T. Hokkanen, S. Kuske, A. J. M. Loomans, I. Menzler-Hokkanen, P. C. J. van Rijn, M. B. Thomas and M. G. Tommasini (2003) Regulation of import and release of mass-produced natural enemies: a risk-assessment approach. In *Quality Control and Production of Biological Control Agents. Theory and Testing Procedures* (J. C. van Lenteren ed.). CABI Publishing, Wallingford, pp. 191-204.
- Venzon, M. A., A. Janssen and M. W. Sabelis (1999) Attraction of generalist predator towards herbivore-infested plants. *Entomol. Exp. Appl.* 93: 305-314.
- Vet, L.E.M., J.C. Van Lenteren, and J. Woets (1980) The parasite-host

- relationship between *Encarsia formosa* (Hymenoptera: Aphelinidae) and *Trialeurodes vaporariorum* (Homoptera: Aleyrodidae) IV. A review of the biological control of the greenhouse whitefly with suggestions for future research. *Zeit. angew. Entmol.* 90: 26-51.
- Waage, J.K., K.P. Carl, N.J. Mills and D.J. Greathead (1985) Rearing entomophagous insects. In. *Handbook of Insect Rearing vol. I* (Singh, P. and R.F. Moore eds.). Elsevier, Amsterdam, pp. 44-66.
- Walde, S. J. and W. W. Murdoch (1988) Spatial density dependence in parasitoids. *Ann. Rev. Entomol.* 33: 441-466.
- Werren, J. H. (1997) Biology of *Wolbachia*. *Ann. Rev. Entomol.* 42: 587-609.
- WHO/CDS/CPC/MAL (1998a) Techniques to detect insecticide resistance mechanisms (Field and laboratory manual). 42 pp.
- WHO/CDS/CPC/MAL (1998b) Test procedures for insecticide resistance monitoring in Malaria vectors, bio-efficiency and persistence of insecticides on treated surfaces. 43 pp.
- Wolfenbarger, D. O. (1958) serpentine leaf miner: brief history and summary of a decade of control measures in South California. *J. Econ. Entomol.* 51: 357-359.
- Yamamura, N. and E. Yano (1988) A simple model of host-parasitoid interaction with host-feeding. *Res. Popul. Ecol.* 30: 353-369.
- 山下賢一, 藤富正昭 (1998) コレマンアブラバチ (*Aphidius colemani*) によるイチゴのワタアブラムシの防除. 応動昆中国支部会報 40: 15-22.
- 矢野栄二 (1979) *Encarsia formosa* によるオンシツコナジラミの生物的防除. 植物防疫 33: 490-497.
- 矢野栄二 (1988) オンシツコナジラミとその寄生蜂 *Encarsia formosa* Gahan の個体群動態に関する研究. 野菜茶試研報 A.2: 143-200.

- Yano, E. (1989a) A simulation study of population interaction between the greenhouse whitefly, *Trialeurodes vaporariorum* Westwood (Homoptera: Aleyrodidae), and the parasitoid *Encarsia formosa* Gahan (Hymenoptera: Aphelinidae). I. Description of the model. *Res. Popl. Ecol.* 31: 73-88.
- Yano, E. (1989b) A simulation study of population interaction between the greenhouse whitefly, *Trialeurodes vaporariorum* Westwood (Homoptera: Aleyrodidae), and the parasitoid *Encarsia formosa* Gahan (Hymenoptera: Aphelinidae). II. Simulation analysis of population dynamics and strategy of biological control. *Res. Popul. Ecol.* 31: 89-104.
- 矢野栄二 (1995) 天敵利用の世界. 天敵利用のはなし (根本久・矢野栄二編著). 技報堂出版, 東京, pp. 6-11.
- Yano, E. (1996) Biology of *Orius sauteri* (Poppius) and its potential as a biocontrol agent for *Thrips palmi* Karny. *IOBC/WPRS Bull.* 19: 203-206.
- 矢野栄二 (1999) 害虫防除のための導入天敵のリスク. 農業および園芸 74: 435-436.
- 矢野栄二 (2003) 天敵 生態と利用技術. 養賢堂, 東京, 296pp.
- 安松京三 (1970) 天敵 生物制御へのアプローチ. 日本放送出版協会, 東京, 204 pp.
- Zehnder, G.W. and J.T. Trumble (1984) Host selection of *Liriomyza* species (Diptera: Agromyzidae) and associated parasites adjusting plantings of tomato and celery. *Environ. Entomol.* 13: 492-496.