

施設野菜害虫モモアカアブラムシに対するギフアブラバチの 生物的防除資材としての有効性評価と利用技術の開発に関する研究[†]

太田 泉

(平成 23 年 8 月 5 日受理)

Practical Evaluation of an Indigenous Aphid Parasitoid, *Aphidius gifuensis* (Hymenoptera, Braconidae) as a Biological Control Agent against Green Peach Aphid, *Myzus persicae* (Heteroptera, Aphididae) and Its Effective Applications in Greenhouses

Izumi Ohta

| 目 次 | |
|---------------------------------------|----|
| I 緒 言 | 1 |
| II モモアカアブラムシの生活史パラメータ | 3 |
| 1 目 的 | 3 |
| 2 材料および方法 | 3 |
| 3 結果と考察 | 4 |
| III ギフアブラバチの生活史パラメータ | 6 |
| 1 目 的 | 6 |
| 2 材料および方法 | 6 |
| 3 結 果 | 8 |
| 4 考 察 | 11 |
| IV 低温短日がギフアブラバチの休眠反応に 与える影響 | 13 |
| 1 目 的 | 13 |
| 2 材料および方法 | 13 |
| 3 結果と考察 | 13 |
| V ギフアブラバチの放飼による モモアカアブラムシの抑制効果 | 15 |
| 1 目 的 | 15 |
| 2 材料および方法 | 15 |
| 3 結 果 | 15 |
| 4 考 察 | 18 |
| VI マミーの状態でのギフアブラバチの 低温保存性 | 19 |
| 1 目 的 | 19 |
| 2 材料および方法 | 19 |
| 3 結果と考察 | 20 |
| VII ギフアブラバチのバンカー法のための 代替寄主アブラムシの選定 | 21 |
| 1 目 的 | 21 |
| 2 材料および方法 | 21 |
| 3 結 果 | 23 |
| 4 考 察 | 24 |
| VIII 総合考察 | 25 |
| IX 摘 要 | 27 |
| 引用文献 | 29 |
| Summary | 32 |

I 緒 言

アブラムシは、カメムシ目アブラムシ上科アブラムシ科に属する昆虫類を指し、全世界で約 4,300 種が記載さ

〒514-2392 三重県津市安濃町草生 360

野菜病害虫・品質研究領域

[†] 本論文は東北大学学位審査論文(平成 23 年 3 月, 農第 754 号)を基に編集・加筆したものである。本報告の一部は, *Appl. Entomol. Zool.*, 36, 103-109 (2001); 応動昆., 46, 259-261 (2002); *Appl. Entomol. Zool.*, 39, 113-117 (2004); 応動昆., 49, 78-82 (2005); *Appl. Entomol. Zool.*, 41, 555-559 (2006); *Appl. Entomol. Zool.*, 45, 233-238 (2010) において発表した。

れている。体長は数 mm と小型で、一部の例外を除いて柔らかな外皮で被われた軟弱な体を持つ。一部もしくはすべての世代が単為生殖を行う胎生の雌からなること、多くの種で無性生殖世代と有性生殖世代を繰り返す周期性単為生殖を行うこと、有性生殖世代のみが卵を産むこと、その生活環の中で顕著な多型性を示すこと、などの特徴を有する（深津，2000）。アブラムシは、針状に変形した口器を植物組織内に挿入して師管液を吸汁するため、植物に奇形や萎縮、落葉を誘発したり、高濃度の糖類が含まれた甘露を植物上に排泄してすす病を発生させる。我が国では、199種のアブラムシが、農作物や花木に寄生して被害を発生させる害虫として記録されている（日本応用動物昆虫学会，2006）。



図-1 モモアカアブラムシ *Myzus persicae* Sulzer

モモアカアブラムシ *Myzus persicae* (Sulzer) (図-1) は、北半球の極北部を除く全世界に広く分布する (Blackman, 1974)。寄主範囲はきわめて広く、40科以上の植物に寄生し (Blackman and Eastop, 2000)、日本国内でも96種類の作物への加害が記録されている (日本応用動物昆虫学会，2006)。また、本種は、100種類以上の植物病原ウイルスを媒介することでも知られている (van Emden ら，1969)。我が国では、1970年頃よりビニールハウスやガラス温室等を利用した施設園芸農業が本格的に取り組み始め、2001年には施設の総面積は約53,000 haまで増加している (日本施設園芸協会，2003)。モモアカアブラムシは、施設で頻繁に発生する重要害虫の一つとされており、特にナス、ピーマン、トマト、アブラナ科葉菜類を加害する (松崎，1972)。一般に施設の内部は、害虫の増殖に好適な環境条件が保たれ、野外で害虫の大きな死亡要因となる天敵や降雨の影響もないため、アブラムシが侵入すると急激に増加し、

被害の発生、拡大も速い (村井・積木，1996)。そのため、モモアカアブラムシの防除は、おもに化学合成殺虫剤によって行われてきたが、頻繁な薬剤散布によって、殺虫剤の効きにくい抵抗性個体群が多く出現した (森下・東，1990; 浜，2000)。また、生産者にとって、密閉空間である施設内での薬剤散布は重労働であり (国本ら，1995)、薬剤の被ばく量も多く (臼谷，1991)、労働環境上の問題も大きい。さらに、近年、消費者の食品に対する安心・安全志向の高まりから、減農薬栽培された農作物への関心も増加している。このような背景から、特にモモアカアブラムシなどの施設重要害虫に対しては、殺虫剤に代わる新たな防除技術の開発が望まれていた。

害虫を捕食もしくは寄生する昆虫や病原性微生物などの天敵を利用して害虫を制御する手法を生物的防除法という。生物的防除では、殺虫剤のような化学的防除資材とは異なり、天敵に対する抵抗性の発達や薬害の発生はない (安松，1970)。天敵の放飼は、薬剤散布よりもはるかに省力的であり (矢野，2003)、害虫防除作業の大幅な軽減化が可能である。

アブラムシにも多くの天敵が存在する。中でもナミテントウ *Harmonia axyridis* (Pallas) やナナホシテントウ *Coccinella septempunctata* (Linnaeus) が良く知られているが、これらの天敵はコロニーサイズが大きいアブラムシを好んで捕食する傾向があるため、作物上に人為的に放してもアブラムシ小発生時には定着性が低く、圃場外へ逃亡する個体が多くなる。また、飼育に大量の餌アブラムシを必要とするため、高い増殖コストなどが問題とされており、アブラムシ類の生物的防除資材としてはほとんど普及していない。一方、コレマンアブラバチ *Aphidius colemani* Viereck は、モモアカアブラムシとワタアブラムシ *Aphis gossypii* Glover に寄生する天敵として導入され、おもに施設栽培の果菜類で利用されている。しかし、コレマンアブラバチは、地中海沿岸からインド大陸にかけての地域が原産地とされており、我が国には元来生息していない外来生物である (Starý, 1975)。また、本種は海外で増殖されたものが輸入、市販されているため、販売価格も殺虫剤に比べてかなり割高となっている。

本研究で扱ったギフアブラバチ *Aphidius gifuensis* Ashmead (図-2) は、日本や台湾、中国、朝鮮半島などの東アジア地域に生息する土着のアブラムシ寄生蜂である (Takada, 1992)。日本国内では、北海道、本州、四国、九州、沖縄に広く分布し (Takada, 2002)、ジャガイモやナスの露地圃場では、モモアカアブラムシ寄生蜂



図-2 ギファブラバチ *Aphidius gifuensis* Ashmead

の優占種として記録されることが多い（高田，1976；山本，1997）．本種は土着の昆虫であるため，施設圃場に放した個体が野外に逃亡しても，自然生態系に与える影響は少なく，我が国の自然環境により適した特性を保持している可能性が考えられる．また，国内で容易に採集し飼育できるため，より低いコストで大量増殖することが可能である．このような背景から，本研究では，土着生物資源の有効利用と低コスト生物的防除資材の開発を目的とし，施設重要害虫モモアカアブラムシの生物的防除資材として寄生蜂ギファブラバチの有効性評価を行い，本種を施設内で利用するための条件を明らかにした．

まず，Ⅱ，Ⅲ章では，いくつかの異なった温度条件下でモモアカアブラムシとギファブラバチを個体別に飼育して，発育期間や生存率，産卵（子）数等の生活史パラメータを明らかにした．得られたデータを基に増殖率を算出して両種間で比較し，モモアカアブラムシの生物防除資材としてのギファブラバチの有効性を判断した．Ⅳ章では，冬季施設内におけるギファブラバチの利用を想定して，ギファブラバチによって寄生されたモモアカアブラムシを低温短日条件下で飼育し，アブラバチの休眠性を明らかにした．Ⅴ章では，ガラス温室の中でモモアカアブラムシとギファブラバチの個体群動態を調査し，アブラムシの初期密度やアブラバチの放飼方法が両種の個体数変動に与える影響を解析した．また，実際に作物を栽培しているビニールハウス内にモモアカアブラムシとギファブラバチを放して，ギファブラバチによるモモアカアブラムシの抑制効果を実証した．Ⅵ章では，ギファブラバチの寄生によって形成されたモモアカアブラムシマミーをいくつかの異なる低温条件下に置き，マミーからのアブラバチ成虫の羽化率を比較することにより，低温下におけるギファブラバチの保存性能を明らかにし

た．Ⅶ章では，飼育が容易でナスやピーマンを加害しないアブラムシの中から，ギファブラバチの増殖に適した代替寄主アブラムシを選定し，ギファブラバチ用のバンカー法の確立を目指した．

本論文の基となる学位審査論文の執筆にあたっては，東北大学大学院農学研究科の昆野安彦教授，堀雅敏准教授，遠藤宜成教授，伊藤幸博准教授にご指導を頂いた．また，元近畿中国四国農業研究センターの小林正弘氏，近畿中国四国農業研究センターの三浦一芸氏，日本植物防疫協会の宮井俊一氏，元近畿中国四国農業研究センターの大泰司誠氏，京都府立大学農学部の高田肇名誉教授，元中央農業研究総合センターの鈴木芳人氏，近畿大学農学部矢野栄二教授，高知農業技術センターの下八川裕司氏からは，本研究を進めるにあたって，ご指導や助言，各原著論文の校閲，実験材料の提供などを頂いた．さらに，元近畿中国四国農業研究センターの中島泉氏には，実験に使用するアブラムシやアブラバチの飼育，寄主植物の栽培管理にご尽力頂いた．この場を借りて厚く御礼申し上げる．

Ⅱ モモアカアブラムシの生活史パラメータ

1 目的

寄生蜂ギファブラバチの飼育には，寄主アブラムシが必要である．また，本種の効率的増殖法や施設圃場への放飼技術を開発する上で，寄主アブラムシの生活史パラメータは重要な情報である．そこで，本章では，モモアカアブラムシをいくつかの異なった定温条件下で個体別に飼育し，幼虫の発育速度や生存率，成虫の産子数や生期間などの生活史パラメータを明らかにし，個体群の増殖率を求めた．

2 材料および方法

試験に使用したモモアカアブラムシは，1996年に近畿中国四国農業研究センター（広島県福山市）のキャベツ圃場から採集した無翅胎生雌成虫1頭をもとに増殖したクローン個体群である．累代飼育は温度 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ ，日長 16 L-8 D に調節した恒温室内で行い，寄主植物として 100 ml 容量の三角フラスコに水挿したダイコン葉（品種‘時無’）を与えた．

直径 7.5 cm，高さ 7 cm のビニールポットに植えたチンゲンサイ（品種‘青帝’）の第2もしくは第3本葉の表面に，誕生後 12 時間以内のモモアカアブラムシ 1 齢無翅幼虫 1 頭を接種した後，直径 2.5 cm，高さ 2.5 cm

のガラス管製のリーフケージ (高田, 1991) を被せて密閉した。チンゲンサイ各株を温度 $15 \pm 0.5^\circ\text{C}$, $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$, $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ もしくは $30 \pm 0.5^\circ\text{C}$, 相対湿度 $60 \pm 10\%$, 日長 16 L-8 D に調節した定温器内に置き, リーフケージ内の各アブラムシの齢と産子数を死亡するまで毎日記録した。アブラムシ幼虫の齢と成虫への羽化は, 脱皮殻によって判断した。供試個体数は 15°C で 20 頭, 20°C で 16 頭, 25°C で 17 頭, 30°C では 22 頭だった。なお, 成虫が産んだ幼虫は毎日取り除き, チンゲンサイ各株には適宜水を与えた。得られたデータをもとに, 各飼育温度におけるモモアカアブラムシ幼虫の生存率 (供試した 1 齢幼虫のうち成虫まで発育した個体の割合), 発育期間 (1 齢幼虫が成虫に発育するまでに要した時間), 成虫の生存期間 (成虫に羽化してから死亡するまでの期間) および総産子数を明らかにした。また, Birch (1948) による下記の計算式から, 個体群の純増加率 R_0 , 世代時間 T および内的自然増加率 r_m も求めた。

$$R_0 = \int_0^{\infty} l_x m_x dx$$

$$T = \sum x \cdot l_x \cdot m_x / R_0$$

$$\int_0^{\infty} e^{-rx} l_x m_x dx = 1$$

r_m は上式を満たす r の値。

l_x は日齢別の生存率, m_x は日齢別の産子数。

各飼育温度におけるモモアカアブラムシ幼虫の生存率は χ^2 検定で, 成虫の総産子数と生存期間は Tukey-Kramer test を用いて有意差検定を行った。

3 結果と考察

チンゲンサイで飼育したモモアカアブラムシ幼虫の生存率と発育期間を表-1 に示した。生存率は各温度とも

90%以上の高い値となり, 試験した 4 温度間で有意な差は認められなかった (χ^2 検定, $p > 0.05$)。発育期間は温度が高くなるにしたがって短くなる傾向が認められた。

有効積算温度の法則にもとづき, 飼育温度 (T) と幼虫期全体の発育速度 (発育期間の逆数) (V) との関係性を単回帰分析した結果, 有意な回帰式 $V = 0.0088 T - 0.0491$ ($r^2 = 0.999$, $p < 0.05$) が得られた。発育零点 T_0 と有効積算温度 K はそれぞれ 5.6°C と 113.1 日度となった。なお, 30°C では 25°C と比較して 2 齢の段階で明らかかな発育遅延が認められたので (表-1), 同温度でのデータは単回帰分析に用いなかった。Liu and Meng (1999) が調査したモモアカアブラムシ (寄主植物: タイサイ, *Brassica campestris* ssp. *chinensis*) では, $T_0 = 3.9^\circ\text{C}$, $K = 119.8$ 日度, Kocourek and Berankova (1989) では $T_0 = 6.0^\circ\text{C}$, $K = 116.3$ 日度 (寄主植物: テンサイ), また Rabasse and Shalaby (1980) によれば $T_0 = 4.8^\circ\text{C}$, $K = 124.5$ 日度 (寄主植物: ナス) と報告されており, 本研究で得られた結果と比較して大きな違いは認められなかった。

成虫 1 頭あたりの平均総産子数は 20°C の 89.3 頭が最も多く, 次いで 25°C , 15°C , 30°C の順となった。平均生存期間も 20°C の 41.4 日が最も長かった (表-2, 図-3)。一方, 30°C での総産子数は他の温度に比べて有意に少なく, 生存期間も 20°C や 25°C と比べて有意に短かった (Tukey-Kramer test, $p < 0.05$)。

Liu and Meng (1999) は, モモアカアブラムシの幼虫を 30°C 以上の高温で飼育すると発育速度が低下し, 33°C ではすべての個体が発育途中で死亡することを示した。また, Barlow (1962) も, 30°C では幼虫期 (寄主植物: タバコ) の死亡率が 100% に達すると報告している。本研究では, 30°C で飼育したモモアカアブラムシ幼虫に生存率の低下は認められなかったが, 成虫の産子数は有意に減少した。これらの結果を総合すると, 概ね

表-1 モモアカアブラムシ幼虫 (無翅胎生虫)^a の生存率と発育期間

| 飼育温度 ($^\circ\text{C}$) | 生存率 ^b (%) | 発育期間 (日, 平均値 \pm 標準誤差) | | | | |
|------------------------------|-------------------------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------------------|
| | | 1 齢 | 2 齢 | 3 齢 | 4 齢 | 合計 |
| 15 | 100.0 (20) ^c | 2.7 \pm 0.28 | 2.5 \pm 0.17 | 3.1 \pm 0.22 | 3.7 \pm 0.15 | 11.9 \pm 0.25 (20) ^d |
| 20 | 94.1 (17) | 2.3 \pm 0.11 | 1.4 \pm 0.13 | 2.0 \pm 0.09 | 2.3 \pm 0.11 | 7.9 \pm 0.09 (16) |
| 25 | 100.0 (17) | 1.6 \pm 0.12 | 1.1 \pm 0.08 | 1.3 \pm 0.11 | 1.8 \pm 0.10 | 5.8 \pm 0.13 (17) |
| 30 | 95.5 (22) | 1.5 \pm 0.11 | 1.3 \pm 0.11 | 1.1 \pm 0.08 | 1.2 \pm 0.10 | 5.2 \pm 0.10 (21) |

^a 日長 16L-8D, 寄主植物としてチンゲンサイを与えて飼育

^b (成虫まで発育した個体数 / 供試個体数) $\times 100$, 4 温度間で有意差なし (χ^2 検定, $p > 0.05$)

^c 供試したアブラムシ個体数

^d 発育期間の測定に使用したアブラムシ個体数 (成虫まで発育した生存個体数)

表-2 モモアカアブラムシ成虫(無翅胎生虫)^aの産子数, 生存期間とモモアカアブラムシ個体群の増殖率

| 飼育温度 (°C) | 供試虫数 | 総産子数 ^b (/成虫1頭) | 生存期間 ^b (日) | 純増殖率 R_0 (/世代) | 世代時間 T (日) | 内的自然増加率 r_m (/日) |
|--------------|------|------------------------------|--------------------------|---------------------|-----------------|-----------------------|
| 15 | 20 | 34.6 ± 3.3 b | 19.0 ± 1.8 a | 34.8 | 22.2 | 0.183 |
| 20 | 16 | 89.3 ± 3.9 d | 41.4 ± 2.5 c | 84.2 | 17.5 | 0.333 |
| 25 | 17 | 66.1 ± 4.0 c | 26.6 ± 1.8 b | 70.3 | 14.4 | 0.420 |
| 30 | 22 | 11.9 ± 1.4 a | 13.1 ± 0.6 a | 11.3 | 8.7 | 0.290 |

^a 日長16L-8D, 寄主植物としてチンゲンサイを与えて飼育

^b 平均値±標準誤差, 同ジアルファベット文字の付いた値の間では有意差なし (Tukey-Kramer test, $p>0.05$)

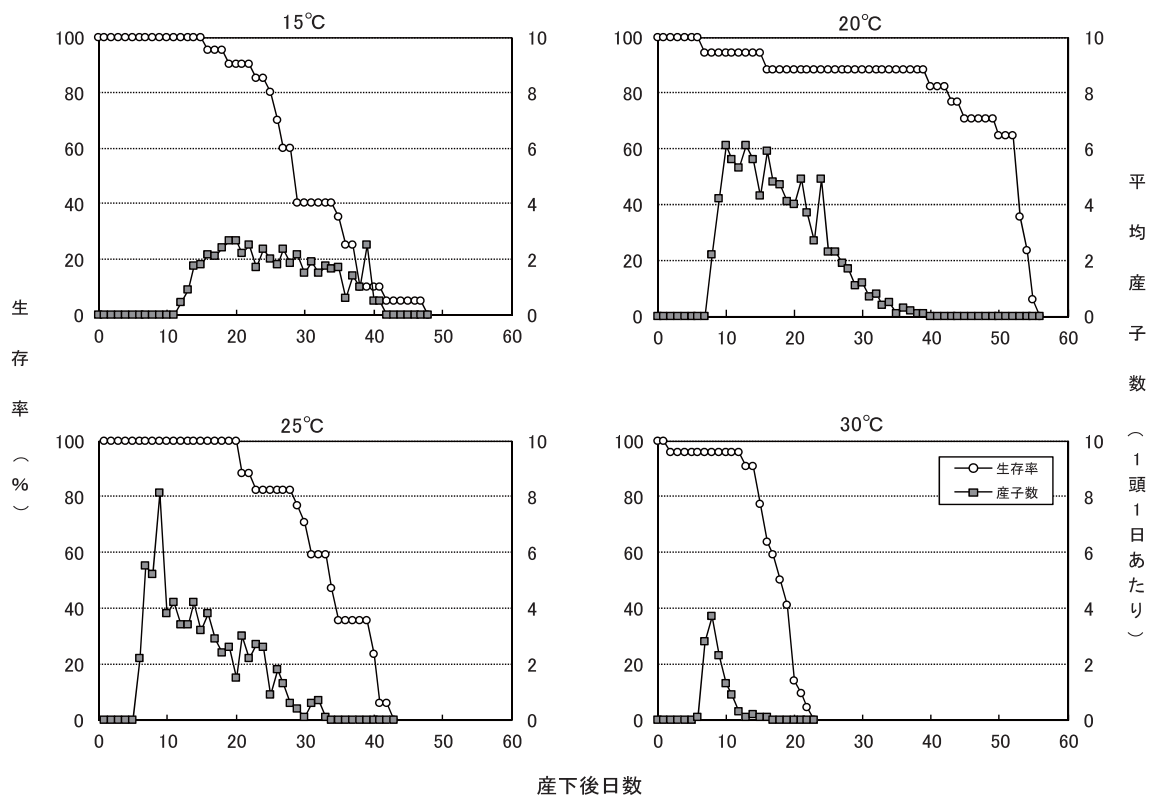


図-3 モモアカアブラムシ(無翅胎生虫)の生存率と産子数の推移 (日長16L-8D, 寄主植物としてチンゲンサイを与えて飼育)

30°C以上の高温は, モモアカアブラムシの発育および繁殖に適していないと考えられる。

モモアカアブラムシの内的自然増加率 r_m は 25°C の 0.420 が最大値となり, 次いで 20°C の 0.333, 30°C の 0.290, 15°C の 0.183 の順となった (表-2)。一方, Liu (1991) が調査したモモアカアブラムシ個体群 (寄主植物: タイサイ) の r_m は, 22.4°C で最大の 0.3717 となり, 次いで 26.0°C の 0.2999, 19.9°C の 0.2991, 16.9°C の 0.1960, 14.3°C の 0.1612, 28.1°C の 0.1296 となった。また, Barlow (1962) は, 15°C におけるモモアカアブラ

ムシの r_m を 0.340, 20°C で 0.447, 25°C では 0.450 と報告している。 r_m の最大値や最大となる温度域が異なったのは, 各試験に使用した寄主植物の違いが影響した可能性が考えられる。さらに, モモアカアブラムシでは, 殺虫剤に対する感受性や体内のエステラーゼ活性, 各寄主植物上での産子数などがクローン個体群間で異なる事例も知られている (浜, 2000; 高田, 1983; Takada, 1986)。したがって, 前述の r_m の違いは, 各実験で使用したクローン個体群の遺伝的な違いが影響した可能性も考えられる。

Ⅲ ギファブラバチの生活史パラメータ

1 目的

発育期間、生存率、産卵数、寿命、性比などの生活史パラメータは、天敵の様々な生態的特性を表し、飼育増殖法を構築する上で重要なデータとなる。また、これら生活史パラメータを用いて算出される内的自然増加率 r_m は、種特有の個体群の増殖率を示す値であり、天敵としての潜在能力や放飼方法を決定するための指標となる (van Lenteren, 1986)。ギファブラバチの生活史パラメータは、高田 (1976)、高田・竹中 (1982)、福井・高田 (1988)、金子ら (1992) などによって明らかにされているが、いずれも内的自然増加率 r_m の解析までには至っていない。また、海外では、Chao ら (1980)、Tang and Chen (1984)、Bi and Ji (1993, 1996)、Lu ら (1994)、Kuo (1995)、Wang and Li (1996) などによるギファブラバチの報告があるが、いずれも中国や台湾で採集されたギファブラバチ個体群の結果である。別種のアブラムシ寄生蜂のダイコンアブラバチ *Diaeretiella rapae* (M'Intosh) では、地域個体群によって発育の温度反応が異なる事例が示されている (Campbell ら, 1974)。そのため、ギファブラバチの生態的特性についても、日本国内と海外に生息する個体群の間で異なる可能性が考えられる。そこで、本章では、日本国内で採集し増殖したギファブラバチ個体群をいくつかの異なった定温条件下で飼育し、各生活史パラメータや増殖率を求めて、既存のモモアカアブラムシの生物的防除資材であるコレマンアブラバチと比較した。

2 材料および方法

a 供試虫

モモアカアブラムシは、II章と同様に、1996年に近畿中国四国農業研究センター (広島県福山市) 内の圃場に栽植したキャベツから無翅胎生雌成虫1頭を採集し、温度 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 、日長 16 L-8 D に調節した恒温室内でダイコン (品種 '時無') の葉を寄主植物として与えて増殖した。ダイコンはガラス温室内でプランターを用いて栽培し、地際付近の葉柄を切除して 100 ml 容量の三角フラスコに水挿したものを使った (以下の実験も同じ)。実験には、誕生後3日目のモモアカアブラムシ無翅幼虫 (大部分が3齢) を用いた。

ギファブラバチは、同年、同敷地内に栽植したジャガイモからモモアカアブラムシのマミーを採集し、室内でマミーから羽化させたアブラバチ成虫数十頭をもとに、

モモアカアブラムシを寄主として与えて増殖した。飼育条件はモモアカアブラムシと同じ温度 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 、日長 16 L-8 D とした。

b 産卵成功率

以下の実験はすべて温度 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ に調節した恒温室内で行った。

直径 6 cm、高さ 1.5 cm のガラスシャーレの内側底面に、同サイズに切り抜いたダイコン葉を両面テープで貼り付けた。20~30頭のモモアカアブラムシを水で湿らせた面相筆を用いてダイコン葉上に静かに移した後、羽化後24時間以内で交尾後産卵未経験のギファブラバチ雌成虫1頭をシャーレ内に導入し、アブラバチの行動を観察した。アブラバチ1頭あたり最大でモモアカアブラムシ10頭まで寄生させた。なお、本実験では、ギファブラバチ雌成虫が腹部末端をアブラムシの体表面に突き刺す行動が認められたものを「寄生」と定義した。シャーレ導入後5分以内にアブラムシに全く寄生しないアブラバチは実験から除外した。寄生されたアブラムシ (以下「被寄生アブラムシ」と称する) は、同じアブラバチによる重複寄生を防ぐため、その都度面相筆を用いてシャーレ内から取り出し、他のダイコン葉に移動させた後、温度 $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 10\%$ 、日長 16 L-8 D に調節した定温器内に置いた。寄生から3日後に被寄生アブラムシを実体顕微鏡下で解剖して、アブラムシ体内に存在するギファブラバチ幼虫の数を記録した。モモアカアブラムシに対するギファブラバチの産卵成功率は以下の式によって求めた。

産卵成功率 (%) = (体内にギファブラバチ幼虫が含まれていた被寄生アブラムシ数 / 解剖した被寄生アブラムシ数) $\times 100$

福井・高田 (1988) によれば、寄生から解剖に供試した3日間でのギファブラバチの卵および若齢幼虫の死亡率はきわめて低いとされているので、今回、産卵成功率を計算するに当たって、この間のアブラバチの死亡率は無視した。

c 発育期間、生存率

ギファブラバチは、図-4に示した生活環を営む。本実験では、被寄生アブラムシの体型が紡錘形から球状に変形し、表皮が不透明な灰白色に硬化した状態を「マミー化」と定義した。前述と同じ方法で得た被寄生アブラムシをダイコン葉上に移した後、温度 $15 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、 $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、 $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ もしくは $30 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 10\%$ 、

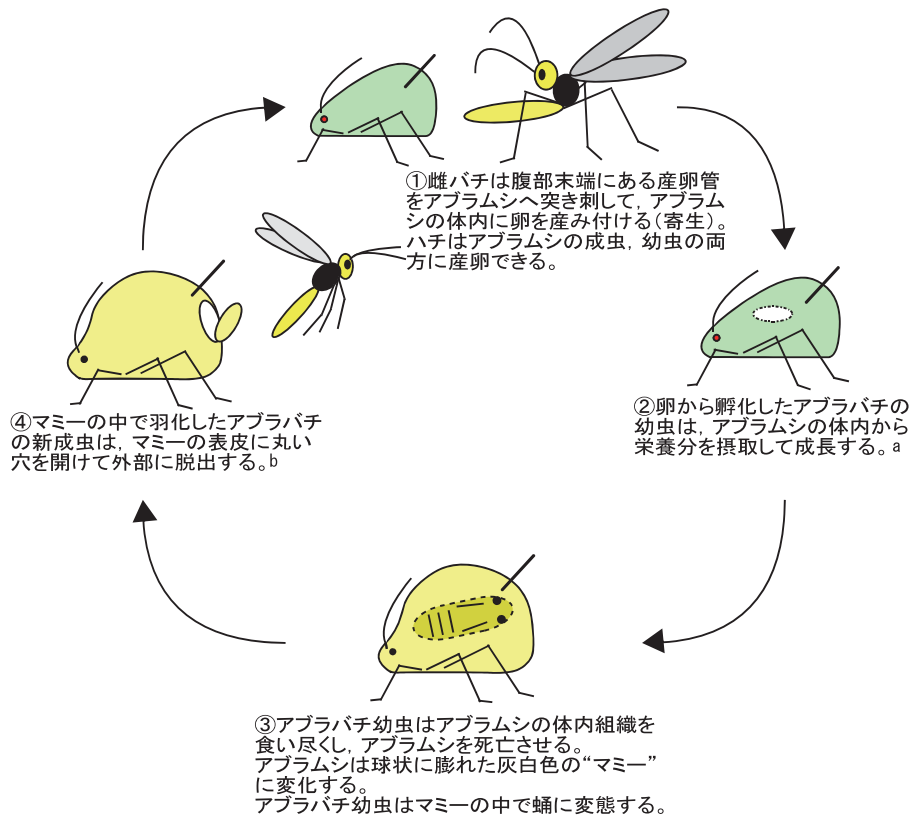


図-4 ギフアブラバチの生活環

- ^a ギフアブラバチは、1頭のアブラムシから1頭のハチしか发育できない単寄生性である。そのため、1頭のアブラムシに2個以上のアブラバチの卵が産み付けられても(過寄生)、1個のマミーから羽化するアブラバチ成虫の数は1頭のみである。
- ^b 新成虫は羽化後すぐに交尾し、寄主アブラムシを探索して産卵を始める。

日長 16 L-8 D に調節した定温器内に置いた。マミー化したアブラムシは、1個ずつ周囲の葉ごと切り取って直径 2.1 cm、高さ 4.5 cm のガラス管に入れてパラフィンフィルムで密閉し、もとの定温器内に戻した。各アブラムシとマミーの状態を 8 時間毎に観察して、寄生からマミー化までに要した期間、マミー化からアブラバチ成虫の羽化までに要した期間、および羽化したアブラバチ成虫の雌雄を記録した。なお、最後のマミー化が認められてから 3 日目以降もマミーにならなかったアブラムシや、最後のアブラバチ成虫の羽化から 3 日目以降も成虫が羽化しなかったマミーについては、観察を中止して死亡と判断した。

被寄生アブラムシのマミー化率、マミーからのアブラバチ成虫の羽化率、および寄生から成虫羽化までの发育期間全体を通しての生存率は、以下の式にもとづいて計算した。

マミー化率 (%) = [マミー化した被寄生アブラムシ数 / (供試した被寄生アブラムシ数 × 産卵成功率 0.849*)] × 100 * (表-3 参照)

羽化率 (%) = (アブラバチ新成虫が羽化したマミー数 / マミー数) × 100

生存率 (%) = マミー化率 (%) × 羽化率 (%) / 100

d 雌成虫の機能の反応

機能の反応とは、食う者と食われる者の関係を説明する概念の一つであり、食われる者の密度の変化に対する食う者 1 個体当たりの食べる量の変化の関係をあらわす (Solomon, 1949)。一般に、食う者の捕食量は、食われる者の密度増加に伴って増加するが、ある一定以上の密度で飽和に達することが知られている。本研究では、食う者がギフアブラバチ、食われる者がモモアカアブラムシとなり、ギフアブラバチ雌成虫 1 頭に与えたモモアカアブラムシの個体数と被寄生アブラムシ数の関係が機能の反応に該当する。本実験は、ギフアブラバチ雌成虫の総産卵数や生存期間を明らかにする次項の実験で、各雌成虫に与えるモモアカアブラムシの頭数を決めるため、ギフアブラバチ雌成虫の機能の反応を調べた。

実験はすべて、温度 25 ± 1 °C、相対湿度 60 ± 10 %、日

長 16 L-8 D に調節した恒温室内で行った。前項と同じ方法で、直径約 1.5 cm、高さ 4 cm のガラス管内にギフアブラバチの寄生によってできたモモアカアブラムシマミーを 1 個ずつ入れた。マミーから羽化して 24 時間以内のアブラバチ成虫を雌雄一組ずつ別のガラス管に移し替えた。交尾が確認された雌成虫 1 頭と、10~500 頭の異なる数のモモアカアブラムシを付けたダイコン葉を幅 15 cm、奥行 15 cm、高さ 30 cm の透明アクリル飼育容器内に導入して、アブラバチに自由に寄生させた。24 時間後にアブラバチを除去し、アブラムシはダイコン葉と共に飼育容器内で保存した。3 日後に全てのアブラムシを実体顕微鏡下で解剖して、アブラムシ体内に存在するアブラバチ幼虫の数を記録した。

e 雌成虫の産卵数、生存期間

この実験は、温度 $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ もしくは $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 10\%$ 、日長 16 L-8 D に調節した定温器内で行った。前項と同じ方法で、透明アクリル飼育容器内に羽化後 24 時間以内で交尾済みのギフアブラバチ雌成虫 1 頭と 200 頭のモモアカアブラムシを付けたダイコン葉を導入し、アブラバチに自由に寄生させた。24 時間後に寄生されていないモモアカアブラムシ 200 頭を付けた別のダイコン葉と交換し、これをアブラバチが死亡するまで毎日続けた。飼育容器から取り出したダイコン葉は、同条件に設定した別の定温器内に置き、 20°C で 10 日後に、 25°C では 7 日後にダイコン葉上のアブラムシマミーの数を記録した。なお、ギフアブラバチに寄生されたモモアカアブラムシがマミー化するまでに要する時間は、先の実験で 20°C では平均 8.3 日、 25°C では 5.9 日だったので (表-4)、上述の保存期間に設定した。アブラバチ雌成虫の日当たり産卵数は、観察されたマミー数を前述の実験で明らかにされたマミー化率 (20°C で 0.953、 25°C で 0.977) で除することによって得た。なお、前項の実験でモモアカアブラムシを 200 頭以上与えた場合には、1 頭のアブラムシから 2 頭以上のアブラバチ幼虫が観察される事例はごく少なかったため、過寄生の影響は無視した。成虫の生存期間は、実験を開始してからアブラバチが死亡するまでの期間とした。 20°C では 10 頭、 25°C では 20 頭のギフアブラバチ雌成虫を供試した。

f 増殖率

前項までの実験で明らかにしたギフアブラバチの卵(寄生)から羽化までの生存率、発育期間、雌成虫の日別産卵数および生存期間のデータと以下の Birch

(1948) の式により、モモアカアブラムシを寄主とした場合のギフアブラバチ個体群の純増殖率 R_0 、平均世代時間 T 、内的自然増加率 r_m を求めた。なお、雌比は、ギフアブラバチ累代飼育個体群の平均雌比である 0.61 を用いた。

$$R_0 = \int_0^{\infty} l_x m_x dx$$

$$T = \sum x \cdot l_x \cdot m_x / R_0$$

$$\int_0^{\infty} e^{-rx} l_x m_x dx = 1$$

r_m は上式を満たす r の値。

l_x は日齢別の生存率、 m_x は日齢別の雌卵産卵数 (= 雌比 $0.61 \times$ 産卵数)。

g 統計解析

各飼育温度におけるギフアブラバチの発育期間は、Bonferroni 補正による t 検定で雌雄間の比較を行った。被寄生アブラムシのマミー化率、マミーからのアブラバチ成虫の羽化率、および寄生から成虫羽化までの発育期間全体を通してのギフアブラバチの生存率は、Tukey-type multiple comparison test で飼育温度間の比較を行い、 20°C と 25°C で飼育したギフアブラバチ雌成虫の総産卵数と生存期間の比較には t 検定を用いた。

3. 結果

a 産卵成功率

モモアカアブラムシに対するギフアブラバチの産卵成功率を表-3 に示した。ギフアブラバチ雌成虫の寄生を受けた被寄生アブラムシのうち、84.9%の個体からアブラバチ幼虫が観察された。なお、2 頭以上のアブラバチ幼虫に寄生されたアブラムシは認められなかった。

表-3 モモアカアブラムシに対するギフアブラバチの産卵成功率

| 解剖した被寄生アブラムシ数 ^a | 被寄生アブラムシ 1 個体の体内に含まれていたアブラバチ幼虫数 | | | 産卵成功率 ^b (%) |
|----------------------------|---------------------------------|----|------|------------------------|
| | 0頭 | 1頭 | 2頭以上 | |
| 73 | 11 | 62 | 0 | 84.9 |

^a アブラバチ雌成虫が腹部末端(産卵管)をアブラムシの体表面に突き刺す行動が観察されたもの。13頭のアブラバチを用いて得た。

^b (アブラバチ幼虫が含まれていた被寄生アブラムシ数/解剖した被寄生アブラムシ数) $\times 100$

b 発育期間と生存率

15、20、25、 30°C におけるギフアブラバチの発育期間を表-4 に示した。発育期間は飼育温度が高いほど短く

表-4 モモアカアブラムシに寄生したギファブラバチ^aの発育期間

| 飼育温度 (°C) | 性別 | 供試虫数 | 発育期間 (日, 平均値±標準誤差) ^b | | |
|--------------|----|------|---------------------------------|--------------------|---------------------|
| | | | 寄生～マミー | マミー～羽化 | 合計 |
| 15 | ♀ | 36 | 12.0±0.07 <i>ns</i> | 7.9±0.06 * | 19.9±0.10 * |
| | ♂ | 87 | 12.2±0.06 | 7.3±0.05 | 19.5±0.08 |
| 20 | ♀ | 36 | 8.3±0.05 <i>ns</i> | 4.7±0.06 * | 13.0±0.05 * |
| | ♂ | 102 | 8.3±0.02 | 4.3±0.02 | 12.6±0.03 |
| 25 | ♀ | 27 | 5.9±0.05 <i>ns</i> | 3.8±0.04 * | 9.7±0.06 * |
| | ♂ | 81 | 5.9±0.03 | 3.5±0.03 | 9.4±0.04 |
| 30 | ♀ | 36 | 6.6±0.07 <i>ns</i> | 4.1±0.07 <i>ns</i> | 10.7±0.10 <i>ns</i> |
| | ♂ | 65 | 6.6±0.06 | 4.0±0.06 | 10.6±0.10 |

^a 日長16L-8Dで飼育^b * 雌雄間で有意差あり (Bonferroni補正による t 検定, $p<0.05$), *ns* 有意差なし ($p>0.05$)表-5 モモアカアブラムシに寄生したギファブラバチの発育零点と有効積算温度^a

| 発育ステージ | 雌雄 | 回帰直線 ^b | r^2 | 発育零点 (°C) | 有効積算温度 (日度) |
|---------------|----|--------------------|-------|--------------|----------------|
| 寄生～マミー | ♀ | $V=0.0087T-0.0491$ | 0.976 | 5.6 | 115.0 |
| | ♂ | $V=0.0087T-0.0507$ | 0.977 | 5.8 | 114.5 |
| マミー～羽化 | ♀ | $V=0.0138T-0.0742$ | 0.927 | 5.4 | 72.2 |
| | ♂ | $V=0.0152T-0.0828$ | 0.927 | 5.5 | 65.9 |
| 全体 (寄生～羽化) | ♀ | $V=0.0053T-0.0295$ | 0.988 | 5.5 | 187.8 |
| | ♂ | $V=0.0055T-0.0313$ | 0.985 | 5.7 | 181.0 |

^a 日長16L-8Dで飼育^b 15°C, 20°C, 25°Cのデータを用いて得た回帰式. T は温度(°C), V は発育速度(日⁻¹, 発育期間の逆数)を表す.

なる傾向が認められたが, 30°Cでの発育期間は25°Cよりもやや長くなった. 寄生からマミー化までに要した期間は, いずれの飼育温度でも雌雄間で有意な差はなかった (Bonferroni補正による t 検定, $p>0.05$). 一方, マミーから羽化までの期間は, 15, 20, 25°Cで雄よりも雌が有意に長かった (Bonferroni補正による t 検定, $p<0.05$). 15, 20, 25°Cのデータを用いて飼育温度と発育速度 (発育期間の逆数) の間の回帰分析を行った結果, 雌雄とも有意な回帰直線が得られた (表-5). これにより, ギファブラバチの発育零点は, 雌で5.5°C, 雄で5.7°C, 有効積算温度は雌で188.6日度, 雄で181.0日度となった.

被寄生アブラムシのマミー化率, マミーからのアブラバチ成虫の羽化率, および卵 (寄生) から羽化までの全発育期間を通してのギファブラバチの生存率を表-6に示した. マミー化率は飼育温度15°Cで89.9%, 20, 25, 30°Cでは90%以上, 羽化率は15, 20, 25°Cで90%以上, 30°Cで87.1%となり, 全発育期間を通しての生存率は

15°Cと30°Cで80%台, 20°Cと25°Cで90%台となった. 30°Cでの生存率80.9%は, 20°Cや25°Cでの生存率に比べて有意に低くなった (Tukey-type multiple comparison test, $p<0.05$).

c 雌成虫の機能の反応

ギファブラバチ雌成虫1頭によって寄生されたモモアカアブラムシの数と寄生率, 過寄生率 (2頭以上のアブラバチ幼虫が寄生していたアブラムシ個体の割合) の関係を図-5に示した. ギファブラバチに与えたモモアカアブラムシが100頭以下の場合, 被寄生アブラムシの数は供試アブラムシの数に比例して増加し, 寄生率も90%以上となった. 過寄生率は13.5~44.8%であった. 過寄生されたアブラムシの体内には, 2~5頭のアブラバチ幼虫が観察された. 一方, 200頭以上のアブラムシを与えた場合には, 被寄生アブラムシ数と供試アブラムシ数の間に明瞭な関係は見出せなかったが, 被寄生アブラムシ数が200頭を超えることはなかった. 過寄生率は低

表-7 ギファブラバチ雌成虫^aの産卵数と生存期間およびギファブラバチ個体群^aの増殖率

| 飼育温度 (°C) | 供試虫数 | 総産卵数 ^b (/雌1頭) | 生存期間 ^b (日) | 純増殖率 R_0 (/世代) | 世代時間 T (日) | 内的自然増加率 r_m (/日) |
|--------------|------|-----------------------------|--------------------------|---------------------|-----------------|-----------------------|
| 20 | 10 | 529.0±17.7 | 12.8±0.8 | 306.2 | 17.3 | 0.351 |
| 25 | 20 | 536.7±35.3 | 12.3±0.7 | 312.0 | 13.2 | 0.463 |

^a 日長16L-8D, モモアカアブラムシ幼虫を毎日200頭与えて飼育

^b 平均値±標準誤差, 20°Cと25°Cの間で有意差なし (t 検定, $p>0.05$)

°Cで0.351, 25°Cで0.463となった。

4 考 察

一般に、寄生蜂の卵や幼虫が寄主の体内に寄生している時の生存率を正確に把握することは難しい。その理由は、寄生蜂の雌成虫が寄主昆虫に寄生する行動を示したときに、実際の産卵の有無を寄主の外見から識別できないためである。そのため、本章ではまず初めに、ギファブラバチの生存率を推測するために、本種の1回の寄生行動あたりの産卵成功率を求める実験を行った。その結果、産卵成功率は84.9%となり、これは同アブラムシに対するコレマンアブラバチと同程度に高い値となった(van Tol and van Steenis, 1994)。さらに、1回の寄生行動で2個以上の卵が産卵されたアブラムシは存在しなかった。これは高田(1975)の観察結果と一致しており、ギファブラバチは1回の寄生行動で1個の卵を産むことが改めて確認された。

二つ目の実験では、ギファブラバチの寄生を受けたモモアカアブラムシを一定の条件下で個別に飼育し、マミー化率、羽化率、発育全期間を通しての生存率および発育期間を求めた。その結果、15, 20, 25, 30°Cの4温度すべてにおいて、マミー化率、羽化率、生存率が80%以上の高い値となった(表-6)。コレマンアブラバチによって寄生されたモモアカアブラムシのマミー化率は約90%であり(飼育温度は不明)(van Tol and van Steenis, 1994)、ワタアブラムシに寄生したコレマンアブラバチの生存率は20°Cで85.9%、25°Cで72.2%とされている(van Steenis, 1993)。したがって、モモアカアブラムシに寄生した場合のギファブラバチの生存率は、コレマンアブラバチと同程度に高いと考えられた。

Kuo(1995)が明らかにしたギファブラバチの蛹化率、羽化率のデータから10, 15, 20, 25, 30°Cでの生存率を求めた結果、それぞれ0%, 50.3%, 80.0%, 32.0%, 18.0%となった。これらの値は本実験で得られた生存率よりも全般的に低い。本実験では25°Cで飼育した3日齢のモモアカアブラムシ幼虫を使用したが、Kuo

(1995)は1日齢のモモアカアブラムシ幼虫を供試している。しかし、金子ら(1992)は、ギファブラバチの羽化率に寄生時の寄主の齢は影響しないと報告しており、供試時のモモアカアブラムシの日齢の違いがギファブラバチの生存率に大きく影響したとは考えにくい。よって、Kuo(1995)の実験でギファブラバチの生存率が低くなった理由は不明である。

Tang and Chen(1984)、金子ら(1992)、Bi and Ji(1993)、Luら(1994)、Kuo(1995)も、雌雄の区別はしていないが、ギファブラバチの発育期間を明らかにしている。Kuo(1995)は台湾で採集されたギファブラバチについて、卵から羽化までの発育期間を15°Cで23.1日としているが、これは、本研究で明らかにした同温度での発育期間より約3日長い。また、札幌で採集されたギファブラバチも20°Cでの発育期間が15.4~16.3日となり、本結果よりも約3日長い時間を要している(金子ら, 1992)。Campbellら(1974)は、アメリカのバークレー(Berkeley)で採集されたダイコンアブラバチの発育期間が、カナダのバンクーバー(Vancouver)で採集された同種個体群よりも長かったと報告している。したがって、先に示したギファブラバチの発育期間の違いは、地域個体群間での遺伝的な違いが影響した可能性も考えられる。

30°Cにおけるギファブラバチの発育期間は、25°Cに比べて雌雄とも約1日長くなった(表-4)。通常、昆虫の発育速度(発育期間の逆数)は、飼育温度に比例して増加する。しかし、ある温度を超えると、発育速度の比例的な増加は見られなくなる(Campbellら, 1974)。例えば、寄生蜂*Aphidius smithi* Sharma and Subba Rao(寄主: エンドウヒゲナガアブラムシ *Acyrtosiphon pisum* (Harris))の発育は、25°Cより高い温度では遅延する(Foxら, 1967)。また、寄生蜂*Aphidius matricariae* Haliday(寄主: モモアカアブラムシ)の発育期間も、26.7°Cより29.5°Cの方が長い(Giriら, 1983)。したがって、本結果も、ギファブラバチの発育が30°C以上で遅延する可能性を示している。

一方, Kuo (1995) が調査した台湾産のギファブラバチでは, 30°Cでの発育遅延が認められない。そのため, ギファブラバチの発育遅延が生じる温度も, 発育期間と同様に地域個体群によって異なる可能性が考えられる。

本研究では, 有効積算温度の法則により, ギファブラバチの発育零点と有効積算温度も明らかにした。発育零点は雌で 5.7°C, 雄で 5.5°Cとなり, 台湾産のギファブラバチの 5.8°Cとほぼ同じ値であり (Kuo, 1995), 他のアブラムシ寄生蜂の *A. matricariae* の 6.0°C (Rabasse and Shalaby, 1980) や, *A. smithi* の 6.2°C, *Aphidius ervi ervi* の 6.1°C, *Aphidius ervi pulcher* の 6.1°Cなどとも近似している (Campbell and Mackauer, 1975)。しかし, 有効積算温度は雌で 188.6 日度と雄で 181.0 日度となり, *A. matricariae* の 189.4 日度 (Rabasse and Shalaby, 1980), *A. smithi* の 178.6 日度, *A. ervi ervi* の 196.8 日度, *A. ervi pulcher* の 187.9 日度など (Campbell and Mackauer, 1975), 寄生蜂の種によって異なる値が示されている。桐谷 (1997) によれば, 昆虫の発育零点は比較の変異の少ないパラメータであるが, 有効積算温度は, 同種内でも系統などによって異なることもあるという。上述の一連の結果もこれに一致している。

コレマンアブラバチの発育期間については, ワタアブラムシを寄主とした場合, 20°Cで 13.9 日 (Harizanova and Ekblom, 1997), 20°Cで雌 12.7 日, 雄 12.6 日, 25°Cで雌 10.0 日, 雄 9.6 日 (van Steenis, 1993), またモモアカアブラムシを寄主とした場合には, 25°Cで雌 9.5 日, 雄 9.4 日 (太田, 未発表) となっており, これらの値は, 本研究で示されたギファブラバチの 20°Cと 25°Cでの発育期間とと大きな差がないことを示している。

Hågvar and Hofsvang (1991) は, 寄生蜂の潜在的な産卵能力を評価するための実験条件として, 寄生蜂に対して, 寄生に好適な発育ステージでかつ十分な数の寄主の提供を挙げている。ギファブラバチ雌成虫の産卵数と生存期間を調べる実験では, 各成虫に対して毎日 200 頭のコモアカアブラムシ 3 日齢幼虫 (大部分が 3 齢) を死亡するまで与え続けた。この頭数は, 機能の反応の実験で, ギファブラバチ雌成虫 1 頭に与えるコモアカアブラムシの頭数として十分量であることが示されている。また, 高田 (1975) によれば, ギファブラバチは 3 齢のコモアカアブラムシ幼虫を最も好んで寄生するという。したがって, 本実験では, 適切な条件の下でギファブラバチの産卵能力が評価されたと考えられる。

寄生蜂は, 雌成虫の卵 (巣) 発育様式によって, 斉一

成熟性 (proovigenic) と逐次成熟性 (synovigenic) に分類できる。斉一成熟性の寄生蜂は, 卵巣内に多数の成熟卵を持った状態で羽化するため, 十分な数の寄主が存在すれば, 羽化直後から集中的に産卵する (Quicke, 1997), 一方, 逐次成熟性では, 羽化後に卵巣内の卵発育が活性化されて, ある程度の産卵前期間を経てから産卵を開始する。本実験では, ギファブラバチ雌成虫は羽化直後に最も多く産卵し, 以後産卵数が漸減する傾向が見られた (図-6)。これは, 高田・竹中 (1982) や福井・高田 (1988) が示した本種の産卵パターンとも一致し, ギファブラバチが斉一成熟性の寄生蜂であることを示唆している。斉一成熟性の寄生蜂を生物的防除に利用する場合, その産卵特性から, 羽化後の比較的短い期間だけ天敵として有効に作用するものと考えられる。したがって, ギファブラバチについても, 羽化後の若い雌成虫個体群が継続的に存在するような利用手法が必要であり, そのためには, ギファブラバチを数日~1 週間の間隔で複数回放飼する方法や, 予めギファブラバチの代替寄主を圃場内に設置して寄生蜂個体群の維持を図るバンカー法などが考えられる。なお, ギファブラバチ雌成虫の総産卵数は, 飼育温度 20°Cと 25°Cで有意な差は認められなかった。同様な傾向は, コレマンアブラバチやダイコンアブラバチでも示されており (van Steenis, 1993; Bernal and González, 1997), 羽化後に卵巣内での卵生産は行わない斉一成熟性の特徴を表しているものと考えられる (Bernal and González, 1997)。

ギファブラバチのような単寄生性の捕食寄生者の場合, 天敵の内的自然増加率が対象害虫 (寄主) のそれよりも高くなることは, 十分な害虫抑制効果を得るための条件とされている (van Lenteren and Woets, 1988; 矢野, 2003)。本種の内的自然増加率 r_m は 20°Cで 0.351, 25°Cで 0.462 となり, 寄主のコモアカアブラムシの内的自然増加率 r_m の 0.333 (20°C), 0.420 (25°C) よりも高くなった。したがって, ギファブラバチは, コモアカアブラムシの生物的防除資材として有用な特性を保持していると結論できる。一方, 上述の内的自然増加率は, 理想的な餌条件下で得られた値であり, ビニールハウスやガラス温室のような広い空間内に寄主がパッチ状に点在する環境下では, その最大増殖能力を発揮することは現実的には難しい (van Lenteren and Woets, 1988; 矢野, 2003)。そのため, 天敵としてのギファブラバチの能力評価においては, 広い開放空間での本種のアブラムシ探索能力を明らかにすることも重要と考えられる。

IV 低温短日がギファブラバチの休眠反応に与える影響

1 目的

温帯地域に生息するアブラムシ寄生蜂の多くは、秋季の温度や日長の変化に反応して、休眠が誘導される (Christiansen-Weniger and Hardie, 1997). 我が国では、施設でのナスやピーマンの促成栽培は9月から翌年の6月頃まで行われ、この期間の最短日長は約10時間である (国立天文台, 2010). 夜間の温度はナス栽培で10~12°C, ピーマンでは18~20°Cに管理されるため (石橋, 2004; 高橋, 2004), 低温短日となる冬期施設内の環境条件がギファブラバチの休眠を誘導し、モモアカアブラムシの天敵としての抑制効果を阻害する可能性が考えられる. Brodeur and McNeil (1989) や Christiansen-Weniger and Hardie (1997, 1999) は、エルビアブラバチ *Aphidius ervi* Haliday と *Aphidius nigripes* Ashmead の2種では、3齢もしくは終齢幼虫時にアブラムシマミーの中で休眠し、日長反応への感受性は寄主アブラムシ体内に寄生している若齢幼虫時に最も高くなるとしている. そこで、本研究では、ギファブラバチに寄生されたモモアカアブラムシを低温短日条件下に置き、得られたアブラムシマミーからの成虫の羽化状況を観察して、本種の休眠反応を明らかにした.

2 材料および方法

ギファブラバチとモモアカアブラムシの採集、飼育条件は、Ⅲ章と同じである. ギファブラバチは、羽化後24時間以内で、5%ハチミツ水溶液を与えて集団飼育中の個体群から得た雌成虫を供試した.

100頭のモモアカアブラムシ3日齢幼虫 (大部分が3齢) を予め付けておいたダイコン葉 (葉柄部分をスポンジで巻き、100 ml 容量の三角フラスコに水挿ししたもの) 4枚を、約50頭のギファブラバチ雌成虫と共に、幅30 cm, 奥行25 cm, 高さ30 cmの透明アクリル飼育容器内に入れ、自由に寄生させた. 温度25±1°C, 相対湿度60±10%の定温器内に6時間、明条件で置いた後、アブラバチを除去した. アブラムシは、ダイコン葉とともに温度15±1°C・日長14 L-10 D (低温長日), 15±1°C・10 L-14 D (低温短日), 25±1°C・14 L-10 D (高温長日), もしくは25±1°C・10 L-14 D (高温短日) に調節した4つの定温器にそれぞれ移動した. 相対湿度は全て60±10%に保った. アブラムシの状態を毎日観察し、マミー化したアブラムシは、直径2.1 cm, 深さ

4.5 cmのガラス管に個別に移し替えて、成虫が羽化するまで静置した. 最後のマミー化が観察されてから3日目以降もマミーにならなかったアブラムシは、実験から除外した. また、最後のアブラバチ羽化が認められてから3日目以降も成虫が羽化しなかったマミーは、マミーを切開してアブラバチの状態 (生死, 発育ステージ) を調べた. この実験で得られたデータから、被寄生アブラムシのマミー化率, マミーの羽化率, 羽化成虫の雌比および発育期間を求めて、異なる4条件の間で比較した (各値の求め方はⅢ章と同じ). 飼育途中で消失もしくは死亡したアブラムシの数は非常に少なかったため、データから除外した.

この実験は5回行い、反復毎に得られたマミー化率, 羽化率, 雌比の値を逆正弦変換した後に二元配置分散分析を行った. 発育期間については、15°Cと25°Cおよび雌雄間で有意差があることはすでに分かっているため (表-4), Bonferroni補正による t 検定により、温度別, 雌雄別に異なる日長間で比較した.

3 結果と考察

被寄生アブラムシのマミー化率, マミーからのアブラバチ成虫の羽化率および羽化成虫の雌比を表-8に示した. マミー化率と羽化率は、すべての飼育条件においてそれぞれ80%以上, 90%以上の高い値となった. 寄生蜂成虫が羽化しなかったマミーには、死亡したアブラバチの蛹もしくは成虫が含まれており、休眠している生存幼虫は観察されなかった. 雌比は0.60~0.64であった. 二元配置分散分析の結果, マミー化率, 羽化率, 雌比に対する温度と日長の効果は認められず, 温度と日長間の交互作用もなかった ($p>0.05$).

発育期間については、15°Cで飼育した場合のマミーから羽化までの期間が、雌雄とも長日 (14 L-10 D) よりも短日 (10 L-14 D) で有意に長くなったが (Bonferroni補正による t 検定, $p<0.05$), それ以外の条件では有意な差は認められなかった (表-9).

Christiansen-Weniger and Hardie (1999) によれば、休眠中のエルビアブラバチは、マミーから羽化までの期間が長くなる他、マミーの色も濃茶色 (普通は薄茶色) になると指摘している. さらに、休眠個体群の性比は通常よりも雄に偏るとしている. 本実験では、他とは異なった色彩を持つマミーや性比の偏りは見られなかった. また、15°Cでマミー化から羽化までに要する期間は、雌雄とも10 L-14 Dの短日条件の方が14 L-10 Dの長日条件よりも有意に長くなったが、その差は1日未満であ

表-8 異なる温度日長条件で飼育したギファブラバチ^aのマミー化率, 羽化率, 雌比

| 温度 (°C) | 日長 | 供試虫数 ^b | マミー化率 ^{c, d} (%) | 羽化率 ^{c, e} (%) | 雌比 ^c |
|-----------------------|---------|-------------------|------------------------------|----------------------------|-----------------|
| 15 | 14L-10D | 442 | 87.7 | 98.1 | 0.60 |
| | 10L-14D | 425 | 89.8 | 97.3 | 0.64 |
| 25 | 14L-10D | 477 | 92.0 | 96.0 | 0.64 |
| | 10L-14D | 467 | 87.7 | 97.8 | 0.61 |
| <i>p</i> ^f | 温度 | | 0.575 | 0.512 | 0.794 |
| | 日長 | | 0.489 | 0.882 | 0.733 |
| | 温度×日長 | | 0.125 | 0.475 | 0.064 |

^a 寄主: モモアカアブラムシ^b 5反復での合計頭数^c 5反復での平均値^d マミー数/(マミー数+マミー化しなかったアブラムシ数)×100^e (アブラバチ成虫が羽化したマミー数/マミー数)×100^f 各データを逆正弦変換した値による二元配置分散分析表-9 異なる温度日長条件で飼育したギファブラバチ^aの発育期間

| 温度 (°C) | 日長 | 雌雄 | 供試虫数 | 発育期間 (日, 平均値±標準誤差) | | |
|------------|---------|----|------|---------------------|---------------------|-----------|
| | | | | 産卵~マミー ^b | マミー~羽化 ^b | 合計 |
| 15 | 14L-10D | ♀ | 228 | 12.7±0.05 <i>ns</i> | 8.9±0.05 * | 21.6±0.07 |
| | 10L-14D | | 239 | 12.8±0.05 | 9.3±0.07 | 22.1±0.07 |
| 15 | 14L-10D | ♂ | 152 | 12.9±0.06 <i>ns</i> | 7.9±0.06 * | 20.8±0.09 |
| | 10L-14D | | 132 | 12.8±0.07 | 8.5±0.07 | 21.2±0.10 |
| 25 | 14L-10D | ♀ | 275 | 6.6±0.03 <i>ns</i> | 3.7±0.03 <i>ns</i> | 10.3±0.03 |
| | 10L-14D | | 245 | 6.5±0.03 | 3.6±0.03 | 10.1±0.02 |
| 25 | 14L-10D | ♂ | 156 | 6.6±0.05 <i>ns</i> | 3.4±0.04 <i>ns</i> | 10.0±0.04 |
| | 10L-14D | | 156 | 6.5±0.05 | 3.3±0.04 | 9.8±0.05 |

^a 寄主: モモアカアブラムシ^b * 異なる日長間で有意差あり (Bonferroni補正による*t*検定, *p*<0.05), *ns*有意差なし (*p*>0.05)

り, その他の条件では発育期間に差はなかった. したがって, これらの結果から, モモアカアブラムシに寄生したギファブラバチは, 15°C・10L-14Dの低温短日条件下でも休眠することなく, 発育可能と考えられる.

一般に, 長日型の昆虫は短日条件下で休眠を誘導されるが, 高温時にはそれが阻害される (Tauber ら, 1986). 例えば, アブラバチの一種 *A. nigripes* は, 温度 15°C・日長 12L-12D の条件下で飼育すると, 全個体が休眠を誘導される. しかし, 同日長下でも温度 20°C では休眠率が 50% となり, 25°C では 25% まで減少する (Brodeur and McNeil, 1989). さらに, 温度は昆虫の様々な行動にも影響を与える. Langer ら (2004) は, アブラバチの産卵, 歩行, 飛翔活動には 10°C 以上の温度が必要としている. 冬期の施設内の温度は, ナス栽培の場合におよそ 10~30°C, ピーマンでは 18~30°C の間

を変動するが (石橋, 2004; 高橋, 2004), いずれも 1 日全体での平均温度は, 本実験で低温と設定した 15°C を上回る. したがって, ギファブラバチが上述の長日型の昆虫と同じ温度反応を示すとすれば, 本種はナスやピーマンを栽培中の冬期施設内においても休眠することなく発育可能と考えられる. さらに, ナス, ピーマン栽培の施設では温度が 10°C 以上に保たれることや, アブラバチ類が昼行性であることなどから, ギファブラバチ成虫の寄主探索行動や産卵行動が低温によって阻害される可能性も低い. このことから, ナス, ピーマン栽培の施設内では, 低温短日条件となる冬期間においても, ギファブラバチによるモモアカアブラムシの抑制効果は維持可能と考えられる.

昆虫の休眠反応が地域個体群によって変異することは, 多くの種で報告されている. 例えば, 低緯度の地域に生

息する個体群は短い日長条件にのみ休眠反応を示すが（場合によっては休眠しない）、高緯度の同種個体群はより長い日長でも休眠が誘導される（Tauber ら, 1986）。ギファブラバチは、日本では北海道（北緯約 34 度）から沖縄（北緯約 26 度）まで広く分布している（Takada, 2002）。本研究では、広島県福山市（北緯 34.5 度）で採集されたギファブラバチ個体群を使用した。そのため、他地域由来のギファブラバチ個体群（特に高緯度の北日本地域で採集されたギファブラバチ）を冬期施設内で利用する場合には、低温短日条件下での休眠反応を改めて調査する必要がある。

V ギファブラバチの放飼によるモモアカアブラムシの抑制効果

1 目的

生物的防除資材として天敵の有効性を評価するに当たっては、生活史パラメータや増殖率、休眠性などの生態的特性を明らかにする以外に、害虫とその寄主植物が存在する環境下で天敵を放飼して、天敵による害虫抑制効果を検証することも重要である（van Lenteren and Manzaroli, 1999）。Chao ら（1980）は、モモアカアブラムシが発生しているタバコ圃場にギファブラバチを放飼して、アブラムシ個体群の増加が低く抑えられることを示した。しかし、Chao らの試験は露地圃場で行われたものであるため、他の土着天敵や高次寄生蜂などがモモアカアブラムシやギファブラバチの個体群動態に影響を及ぼした可能性もあり、アブラバチの放飼方法の検討までには至っていない。オンシツツヤコバチ *Encarsia formosa* Gahan やハモグリバエ類の天敵寄生蜂では、天敵の放飼時期や密度、回数が、害虫の抑制効果に強く影響することが示されている（矢野, 1988; Boot ら, 1992; Heinz ら, 1993; van Roermund ら, 1997）。そこで、本研究では、小型の閉鎖系ガラス温室を用いてギファブラバチの放飼試験を行い、モモアカアブラムシの初期密度やギファブラバチの放飼回数、放飼間隔等がモモアカアブラムシの抑制効果に与える影響について検討した。また、ビニールハウスでも放飼試験を行い、ギファブラバチによるモモアカアブラムシの抑制効果を実証した。

2 材料および方法

ギファブラバチとモモアカアブラムシの採集、飼育条件は、Ⅲ章と同じである。

a ガラス温室

広さ 3.7 m × 2.8 m、最大高 4.9 m の小型ガラス温室 3 室を試験に使用した（以後それぞれをガラス温室 A, B, C と称する）。各室中央部に幅 80 cm、長さ 140 cm、高さ 50 cm の栽培棚を置き、その上に播種後約 1 ヶ月のチンゲンサイ（品種‘青帝’）1 株を植えたプラスチックポット（サイズ 1/10,000 a）24 個を 20 cm 間隔で 4 × 6 列に配置した。試験は 2000 年 9 月 19 日～10 月 23 日（試験 1）、同年 11 月 21 日～12 月 4 日（試験 2）および 2001 年 4 月 10 日～5 月 18 日（試験 3）の計 3 回行った。なお、チンゲンサイの播種から収穫までに要する日数は、温暖期の露地栽培で概ね 1.5 ヶ月、厳寒期のハウス内トンネル栽培で 3 ヶ月とされている。各ガラス温室内の温度は、温湿度データロガー（TR-72 S, 株式会社ティアンドディ）を用いて 30 分毎に測定し、防虫網（SUS 40 メッシュ）付きの天窓、側窓の開閉および空調設備により、約 15～30℃の範囲内になるように制御した。また、自然日長が 12 時間未満となる試験 1 および試験 2 では、午前 5 時から日の出までの間と日没から午後 7 時の間に室内の蛍光灯（40 W 4 本）を点灯し、長日条件（14 L-10 D）になるように調節した。

試験開始日に羽化後 24 時間以内のモモアカアブラムシ無翅胎生雌成虫をチンゲンサイ各株に一定数ずつ接種した。また、ギファブラバチは、羽化後 24 時間以内で所定の数の雌雄成虫を入れた小型ガラス管を栽培棚上の中央に置いて放飼した。試験 1～3 の各ガラス温室におけるモモアカアブラムシの接種密度やギファブラバチの放飼日、放飼数は表-10 に示した。試験開始から 3～4 日ごとに、チンゲンサイに付いているモモアカアブラムシおよびモモアカアブラムシマミーの数を全株全葉について記録した（アブラバチ成虫が脱出した後のマミーは除去した）。なお、試験期間中にガラス温室外からの他の昆虫の侵入は認められなかった。

b ビニールハウス

試験は、近畿中国四国農業研究センター（広島県福山市）内に設置したビニールハウス（幅 4.5 m、奥行き 13.5 m、最大高 2.7 m、側面部には 0.6 mm 目合いの防虫網を展張）2 棟を用いて行った。ハウス 1 棟につき幅 100 cm、長さ 12 m の畝 3 本を立てて、2000 年 3 月 1 日に各畝にチンゲンサイ（品種‘青帝’）を 2 条播きした（条間 50 cm、株間 30 cm、40 株/条、240 株/ハウス）。4 月 9 日に 2 棟のハウスの各条南端から 3, 8, 13, 18, 23, 28, 33, 38 番目のチンゲンサイに羽化後 24 時間以

表-10 モモアカアブラムシとギファアブラバチの接種、放飼方法

| 試験No. (期間) | モモアカアブラムシ | | ギファアブラバチ | | 温度 (°C) ^b |
|----------------------------|-----------|-------------|----------|--|----------------------|
| | ガラス 温室 | 接種数 (/株) | 接種日 | 放飼日 ^a (/回) | |
| 1 (2000/9/19 ~10/23) | A | 3 | 9/19 | ♀12, ♂12 9/19 (0), 9/26 (7), 10/3 (14), 10/10 (21) | 22.1 (14.2-29.9) |
| | B | 3 | 9/19 | ♀12, ♂12 9/19 (0), 9/22 (3), 9/26 (7), 9/29 (10) | 22.9 (16.1-29.6) |
| | C | 3 | 9/19 | ♀48, ♂48 9/19 (0) | 22.4 (16.2-32.3) |
| 2 (2000/11/21 ~12/3) | A | 6 | 11/21 | ♀12, ♂12 11/21 (0), 11/28 (7) ^c | 21.6 (16.9-36.3) |
| | B | 6 | 11/21 | ♀12, ♂12 11/21 (0), 11/24 (3), 11/28 (7), 12/1 (10) | 21.8 (18.1-37.8) |
| | C | 6 | 11/21 | ♀48, ♂48 11/21 (0) | 未記録 |
| 3 (2001/4/10 ~5/18) | A | 1 | 4/10 | ♀12, ♂12 4/10 (0), 4/17 (7), 4/23 (13), 5/1 (21) | 21.2 (13.4-32.7) |
| | B | 1 | 4/10 | ♀12, ♂12 4/10 (0), 4/13 (3), 4/17 (7), 4/20 (10) | 21.8 (13.0-31.7) |
| | C | 1 | 4/10 | ♀48, ♂48 4/10 (0) | 21.1 (11.8-33.3) |

^a 括弧内の数字は、モモアカアブラムシを接種してからの経過日数を示す。

^b 平均値 (最低値-最高値)

^c アブラバチは4回放飼する予定だったが、アブラムシ数の急増により2回目の放飼後に調査を打ち切った。

内のモモアカアブラムシ無翅成虫を1頭/株の密度で接種した。ギファアブラバチは、4月9日、20日、26日、5月1日に、1棟のハウスの中央部にマミー240個を置いて放飼した。マミーからの成虫の羽化率はそれぞれ98.8%、90.8%、87.5%、91.7%だった。別の1棟にはアブラバチは放飼しなかった。

調査はアブラムシを接種した日から3~7日ごとに行った。アブラムシ接種株のうち各条から4本ずつ系統抽出して(奇数番目の株もしくは偶数番目の株、ただし、条および調査日ごとに任意に選定)、モモアカアブラムシおよびマミーの数を記録した。アブラバチ成虫が羽化したマミーは除去した。また、モモアカアブラムシによるチンゲンサイの被害程度を明らかにするため、5月14日に全株の見取り調査を行った。目視によってアブラムシが確認された株を被害株とし、条ごとに被害株数を求めた。

3 結果

a ガラス温室

1) 試験1

全てのガラス温室において、モモアカアブラムシ個体群の増加が抑制された(図-7a)。モモアカアブラムシの個体数は、試験開始17日後の10月6日に最も多くなり、ギファアブラバチを1週間間隔で4回放飼したガラス温室Aでは株あたり平均28.3頭、3日間間隔で4回放飼したガラス温室Bでは58.0頭、4倍量のアブラバチを試験開始日にのみ1回放飼したガラス温室Cでは117.1頭まで増加したが、最終調査日の10月23日(試験開始34日後)には、ガラス温室Aでは0頭となり、ガラス温室B、Cにおいても株あたり平均1頭、5.2頭まで減少した。一方、ギファアブラバチの寄生によってできたモモアカアブラムシマミーは、ガラス温室BおよびCでは試験開始24日後(10月13日)に最も多くなり、それぞれ株あたり平均40.4個、95.3個まで増えたが、モモアカアブラムシの増加が最も抑制されたガラス温室Aでは、試験開始10日後(9月29日)に最大20.0個となり、以後漸減した(図-7b)。

2) 試験2

モモアカアブラムシの初期密度を試験1の2倍の6頭/株とした試験2では、全てのガラス温室においてモモアカアブラムシの個体数が急増し、試験開始13日後の12月4日(ガラス温室Aは試験開始10日後の12月1日)に調査を打ち切った(図-7c)。マミーは試験開始10日後から観察され始めて、13日後(12月4日)には

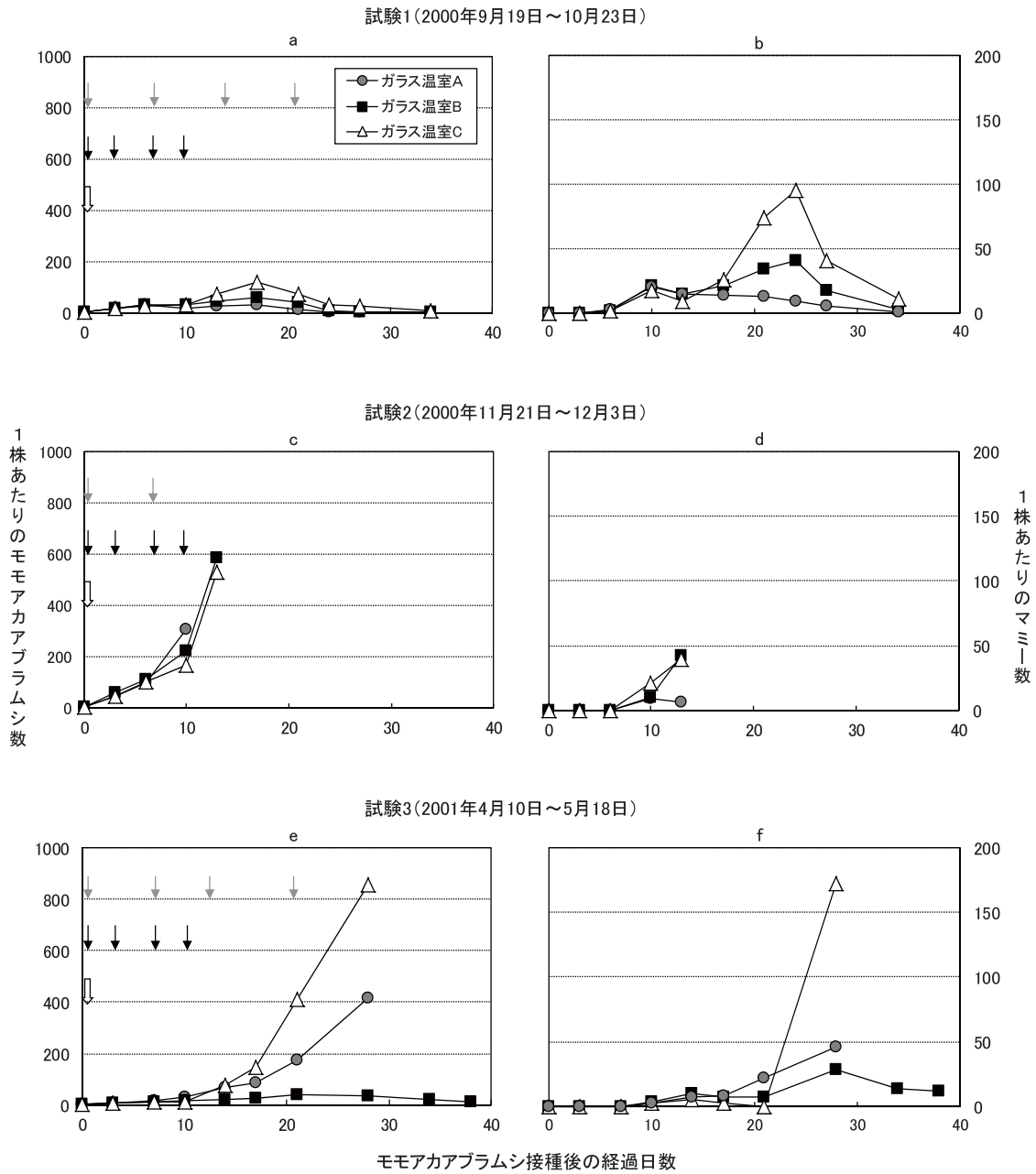


図-7 ギファブラバチ放飼によるモモアカアブラムシの増殖抑制効果(小規模ガラス温室)

左グラフ a, c, e はモモアカアブラムシ数, 右グラフ b, d, f はマミー数の推移を表す.

灰色矢印↓, 黒矢印↓, 白抜き矢印↓は, ガラス温室 A, B, C でのギファブラバチの放飼日を示す.

ガラス温室 B で株あたり平均 42.5 個, ガラス温室 C では 39.3 個まで増えたが, ガラス温室 A では逆に 5.9 個に減少した(図-7d).

3) 試験 3

モモアカアブラムシ個体群の増加が抑制されたのはガラス温室 B のみだった(図-7e). ガラス温室 A および C では, 試験開始 28 日後の 5 月 8 日にアブラムシの数が株あたり平均 414.2 頭と 858.3 頭まで増加したため,

その後の調査は打ち切った. マミーは試験開始 17 日後(4 月 27 日)まで, 全てのガラス温室において株あたり平均 10 個未満の少ない状態が続いたが, その後増加した. ガラス温室 C では 28 日後(5 月 8 日)にマミー数が 171.9 個に急増した(図-7f).

b ビニールハウス

モモアカアブラムシ数とアブラムシマミー数の推移を

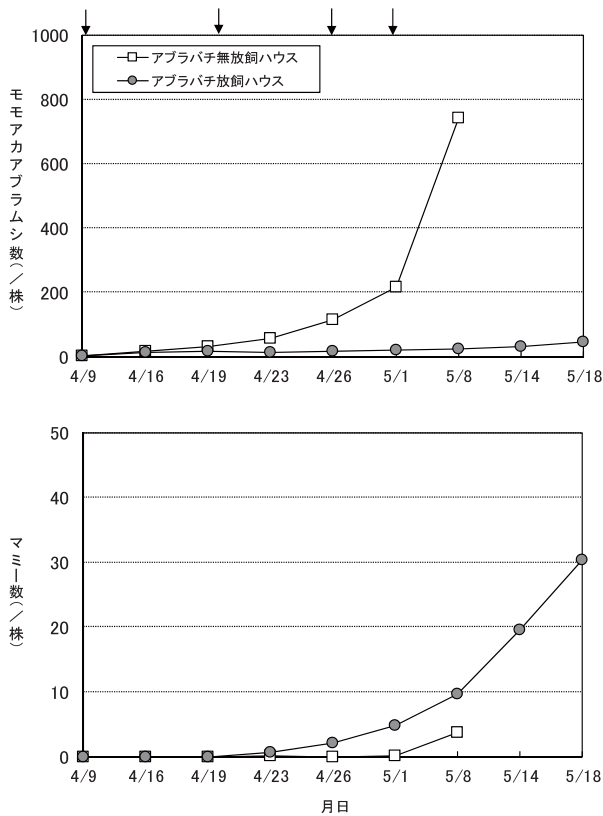


図-8 ギファブラバチ放飼によるモモアカアブラムシの増殖抑制効果 (ビニールハウス)
 グラフ上の矢印↓は、ギファブラバチの放飼日を示す。

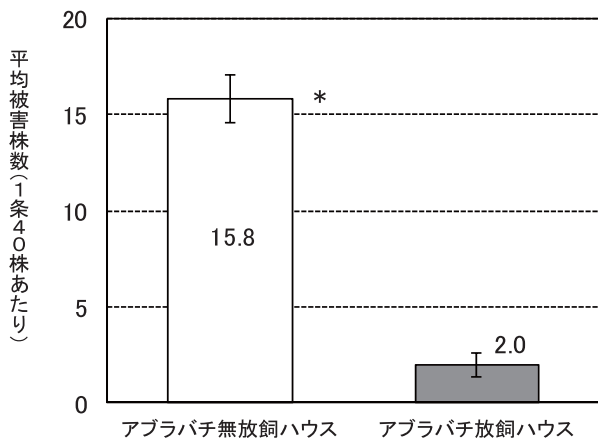


図-9 ギファブラバチの放飼とチンゲンサイのモモアカアブラムシ被害株数の関係
 グラフ上に付したバーは標準誤差を示す。
 * 2つのハウス間で有意差あり (マン・ホイットニーの U 検定, $p < 0.005$)

図-8に示した。ギファブラバチ無放飼ハウスではモモアカアブラムシの個体数が急増した(調査は5月8日で打ち切り)。一方のギファブラバチ放飼ハウスでは、モモアカアブラムシ数は大きく増加することなく、ほぼ横

ばい傾向を示した。マミー数は時間の経過とともに増加した。また、被害株数はギファブラバチ無放飼ハウスで有意に多かった(マン・ホイットニーの U 検定, $p < 0.005$) (図-9)。

4 考 察

ガラス温室における放飼試験では、ギファブラバチの放飼によってモモアカアブラムシ個体群の増加が抑制されたのは、試験1のガラス温室3室と試験3のガラス温室B(ギファブラバチを約3日間隔で4回放飼)だった。その他の試験区では、アブラバチ放飼によるモモアカアブラムシの抑制効果が認められず、アブラムシ数は増加した。

試験期間中のガラス温室内の平均温度は、試験1, 2, 3で21.1~22.9°Cの範囲であった(表-10)。これらの温度域におけるギファブラバチの発育期間は、表5に示された直線回帰式により、寄生からマミーまでは雌で6.7~7.4日、雄で6.7~7.5日、羽化までは雌で10.9~12.1日、雄で10.6~11.8日と推定される。また、ギファブラバチの雌成虫は、斉一成熟性(proovigentic)の産卵様式により羽化直後に集中的に産卵する傾向があり、20°Cで羽化後4日間、25°Cでは羽化後3日間に生涯総産卵数の50%以上を産卵する(図-4)。したがって、ギファブラバチ雌成虫が放飼直後からモモアカアブラムシに寄生したとすれば、アブラムシのマミーは放飼から約7~11日後に出現すると考えられる。本試験でギファブラバチの第1回放飼10日後(試験開始10日後)に確認されたマミーの数は、試験1のガラス温室Aでは株あたり平均20.0個、ガラス温室Bでは21.2個、ガラス温室Cでは17.5個、試験2ではそれぞれ9.0個、9.9個、20.9個、試験3では2.3個、3.5個、2.3個だった(図-7b, d, f)。また、アブラムシに対するマミーの存在比率(マミー数/(アブラムシ数+マミー数)×100)は、試験1のガラス温室Aでは56.1%、ガラス温室Bは40.7%、ガラス温室Cは36.5%であったのに対して、試験2ではそれぞれ2.9%、4.2%、11.1%、試験3では7.4%、18.7%、14.8%となり、試験2と試験3におけるマミーの存在比率が、試験1に比べて総じて低い傾向が認められた。試験2はモモアカアブラムシの初期密度が高かったため(6頭/株)、試験開始時からギファブラバチの寄生数がモモアカアブラムシの個体数増加に追いつけず、その結果、アブラムシの増加を抑制できなかった可能性が考えられる。一方の試験3は、モモアカアブラムシの初期密度が最も低かったにもかかわらず(1頭/

株), 2つのガラス温室でアブラムシの増加を抑制できなかった。本試験では, 試験開始後17日目までマミー数が平均10個未満と非常に少ない状態が続いた点や, ガラス温室Bでのみモモアカアブラムシの増加が抑制されたこと, ガラス温室Cでは28日目にマミー数が急増したことなど, 試験1, 2では観察されなかった結果が得られており, その原因を含めて今後の再検討が必要と考えられる。

矢野(1988)は, 個体群動態モデルを用いてオンシツコナジラミ *Trialeurodes vaporariorum* (Westwood) に対するオンシツツヤコバチの放飼条件を検討し, 同じ放飼頭数であれば多くの回数に分けて寄生バチを放飼することによって, 害虫の抑制効果をより高めることができると推測した。試験1では, ギフアブラバチを4回に分けて放飼したガラス温室AとBが, 1回にまとめてアブラバチを放飼したガラス温室Cよりもモモアカアブラムシの増加をより低く抑えており(図-7b), 矢野(1988)の推論と一致した。

本試験の結果を総合すると, 放飼したギフアブラバチが次世代を生産し, かつアブラバチによって増殖抑制が可能なモモアカアブラムシの密度レベルが存在することが明らかになった。また, ギフアブラバチは複数回に分けて放飼する方が, 1回にまとめて放飼するよりもモモアカアブラムシの抑制効果がより高くなることも示された。なお, 放飼間隔については明瞭な違いが認められず, 今後より詳細な検討が必要と思われる。今回はポット植えのチンゲンサイを用いて放飼試験を行ったが, 同じ天敵と害虫の組み合わせでも, 植物の種類によって天敵の効果に差が生じた事例も報告されている(矢野, 2003)。したがって, チンゲンサイ以外の作物に寄生しているモモアカアブラムシに対してギフアブラバチを放飼する際には, 植物の種類がアブラムシの増殖率やアブラバチの寄主探索行動などに与える影響について予め調査しておく必要がある。

一方, ビニールハウスにおけるギフアブラバチの放飼試験では, 無処理のハウスでチンゲンサイ上のモモアカアブラムシ数が急増したのに対して, ギフアブラバチを放飼したハウスでは, モモアカアブラムシの増加や被害の発生が抑制された(図-8, 9)。前述のガラス温室の試験で示したように, 本試験でモモアカアブラムシの防除に成功した要因として, モモアカアブラムシの個体数が大きく増加していない条件でギフアブラバチを放飼したこと, アブラバチを複数回に分けて放飼したことなどが考えられる。しかし, 本試験におけるギフアブラバチ

の放飼密度(1回当たり約4頭/㎡)が, チンゲンサイにおけるモモアカアブラムシの防除に最も適した値であるかは不明である。天敵の最適放飼密度を害虫天敵両種の個体群動態シミュレーションによって明らかにする研究も進められているが(矢野, 2003), 作物の種類や栽培様式, 圃場の広さ, 気候条件などの様々な要因に大きく影響されるため, 未だ実用化までに至っていない。そのため, 実際にモモアカアブラムシが発生している作物栽培圃場でギフアブラバチを利用する場合には, いくつかの異なる密度でアブラバチを放飼してアブラムシの抑制効果を検証し, 最適な放飼密度を経験的に明らかにしていく手法が現実的と考えられる。

VI マミーの状態でのギフアブラバチの低温保存性

1 目的

天敵の低温保存は, 天敵を商業的に生産販売する際に必要とされる技術であり, 天敵の輸送や増殖量の調整などを可能にする(Abdel-Wali and Mustafa, 2006)。アブラムシマミーの中にいるアブラバチは, マミーの硬い外皮によって保護されているため, アブラバチの発育全期間を通して最も扱いやすい形態をしている。また, アブラムシマミーは, アブラバチの低温保存に最も適したステージとされており(Singh and Srivastava, 1988), いくつかのアブラバチでは, マミーを保存した温度やその時間とマミーからの成虫の羽化率との関係が明らかにされている(Abdel-Wali and Mustafa, 2006; Archer ら, 1973; Hofsvang and Hågvar, 1977; Levie ら, 2005; Scopes ら, 1973; Shalaby and Rabasse, 1979; Singh and Srivastava, 1988)。そこで, 本研究では, マミーの状態でのギフアブラバチの低温保存性を明らかにするため, 本種の寄生によって得られたモモアカアブラムシマミーを5~12.5℃の低温暗黒条件下に置き, 所定の時間が経過した後に室温25℃に戻して, マミーからのアブラバチ成虫の羽化率を明らかにした。

2 材料および方法

a 供試虫

モモアカアブラムシは, 2004年4月に三重県津市で栽培されたキャベツから採集し, ビニールポット植えのダイコン(品種‘早生四十日’)の葉を与えて増殖した。ギフアブラバチは, 2004年4月に高知県南国市のナスからモモアカアブラムシのマミーを採集し, 室内で羽化

させた成虫をもとに、上述のモモアカアブラムシを寄主として与えて増殖した。両種ともに温度 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 、日長 14 L-10 D に調節した恒温室内で継代飼育した。なお、以下の試験には、羽化後 48 時間以内で、5%ハチミツ水溶液を与えて集団飼育したギファブラバチ成虫を使用した。

b 低温保存したモモアカアブラムシマミーからのギファブラバチ成虫の羽化率

500~800 頭のモモアカアブラムシ 3 日齢幼虫（大部分が 3 齢）が付いたビニールポット植えのダイコン（品種‘早生四十日’）と約 50 頭のギファブラバチ雌成虫を透明塩化ビニル製飼育容器（幅 30 cm，奥行き 25 cm，高さ 30 cm）内に導入し、温度 25°C 、明条件下でアブラバチに自由に寄生させた。6 時間後にアブラバチを取り除き、アブラムシはダイコンの葉に付けたままの状態に温度 25°C 、日長 14 L-10 D の条件下で保存した。アブラバチの寄生から 8 日後に、モモアカアブラムシマミーが付いたダイコンの葉を切除し、そのうち 150~200 個のマミーを温度 25°C 、全暗条件下に移した。その後、マミーから羽化した成虫の数を雌雄別に記録した。残りのマミーは、温度 5°C 、 7.5°C 、 10°C もしくは 12.5°C に調整した定温器内（全暗）に置き、7、14 もしくは 21 日後に 25°C （全暗）に戻して、マミーからの羽化成虫数を調べた。なお、定温器内の温度は、V 章に示した温湿度データロガーを用いて 30 分ごとに測定した。低温保存を行わずに 25°C で飼育したマミーからの羽化率を 100% とし、保存温度、保存期間別に補正羽化率を求めた。なお、最後の羽化が認められてから 3 日目以降も成虫が羽化しなかったマミーは、外皮を切開して内部のアブラバチの状態（生死、発育ステージ）を調べた。

3 結果と考察

各低温条件に所定の日数置いた後に 25°C に戻したモモアカアブラムシマミーからのギファブラバチ成虫の羽化率を図-10 にまとめた。温度 5°C 、 7.5°C 、 10°C および 12.5°C に調整した定温器内の平均温度は、 4.6°C 、 7.6°C 、 10.1°C 、 12.5°C だった。7 日間低温保存したマミーからの羽化率は、 4.6°C で 59.8%、 7.6°C で 76.9%、 10.1°C で 78.7%、 12.5°C では 80.9% だった。 4.6°C での羽化率がやや低かったが、他の 3 温度では 80% 前後と高かった。一方、 10°C 未満の低温下に 14 日間もしくは 21 日間保存したマミーからの羽化率は、 4.6°C で 7.6% と 0%、 7.6°C では 7.0% と 0.5% となり、いずれも 7 日間保存し

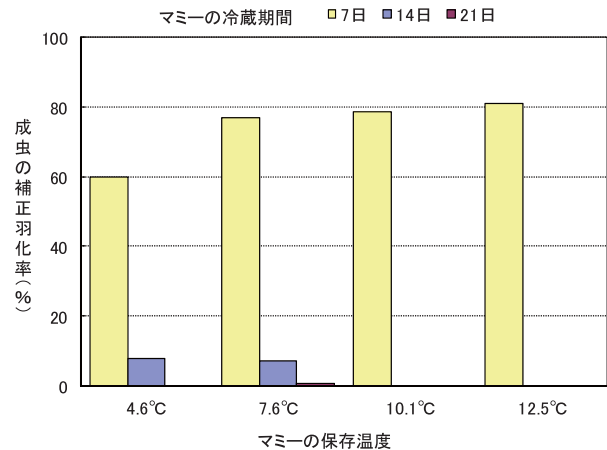


図-10 低温保存したモモアカアブラムシマミーからのギファブラバチ成虫の羽化率

温度 10.1°C と 12.5°C では、冷蔵開始から 7 日目以降にアブラバチ成虫の羽化が認められたため、冷蔵期間 14 日及び 21 日の調査は行わなかった。

た場合と比較して羽化率が大幅に減少した。アブラバチ成虫が羽化しなかったマミーの内部には、死亡したアブラバチの蛹や成虫のみが認められ、休眠している生存幼虫はなかった。なお、 10.1°C と 12.5°C では、保存開始から 7 日目以降にアブラバチ成虫が羽化するマミーが現れたため、マミーを 14 日間以上保存する試験は行わなかった。これらの結果から、マミーの状態でのギファブラバチの低温保存は、試験した $4.6\sim 12.5^\circ\text{C}$ のいずれの温度でも 7 日間以下が適当であった。一方、マミーを 10°C 未満の低温下に 14 日以上置くと、マミーの中のギファブラバチの生存や羽化に著しい悪影響を与える可能性が示唆された。

増殖した天敵昆虫を日本国内で販売する場合、現在の宅配事業を利用すれば、低温保存した状態で最長でも 3 日以内に配送できる。また、上述の試験結果より、マミーの状態でのギファブラバチの低温保存期間を最大 7 日とすれば、生産者がマミーを受け取った後に 4 日間の低温保存が可能になる。したがって、7 日間というマミーの低温保存期間は、将来、ギファブラバチを生物農薬として利用する上で実用的な値と考えられる。

アブラバチの一種 *A. matricariae*（寄主：モモアカアブラムシ）では、 7°C に 20 日間保存したマミーからの成虫羽化率が 98% と非常に高く、 4°C に 30 日間保存した場合でも 80% の羽化率だった (Scopes ら., 1973)。また、コレマンアブラバチ（寄主：モモアカアブラムシ）も、 7°C に 2 週間保存したマミーからの羽化率が 82%、 4°C に 2 週間保存でも 50% だったとしている (Hofsvang and Hågvar, 1977)。本研究では、 4.6°C

および7.6℃に14日以上保存したモモアカアブラムシマミーからのギファブラバチの羽化率が10%未満ときわめて低く、上述の他のアブラバチの結果と大きく異なっている。マミーを低温保存する前と後の飼育温度は *A. matricariae* で22℃ (Scopes ら, 1973), コレマンアブラバチでは20℃であり (Hofsvang and Hågvar, 1977), 本研究の飼育温度25℃よりも低く、飼育時と低温保存時の温度差がより小さくなっている。また、アブラムシマミーを飼育温度から目的の保存温度に直接移すのではなく、保存温度よりも少し高い温度に短時間置いてから低温下に置く「順化 (acclimation)」処理を行うことにより、マミーからの成虫の羽化率を高い状態に維持できることが知られている (Levie ら, 2005; Singh and Srivastava, 1988)。そのため、本研究で取り扱ったギファブラバチも、寄生から低温保存を行う前までと低温保存後の飼育を25℃よりも低い温度で行い、かつ、マミーの低温保存時には上記の順化処理を行うことにより、10℃未満の低温下に14日以上保存しても高い成虫羽化率が得られる可能性がある。よって、ギファブラバチが寄生したモモアカアブラムシマミーを7日以上低温保存する手法の開発は、今後に残された課題である。

VII ギファブラバチのバンカー法のための代替寄主アブラムシの選定

1 目的

一般にアブラムシ類は、害虫の中でも増殖率が高い昆虫である。そのため、作物上でアブラムシを発見した後に天敵を導入しても、天敵の捕食寄生効率がアブラムシの増殖率に追いつかず、防除に失敗することが少なくない。また、V章でも述べたように、天敵は害虫の発生初期に放飼する必要がある (矢野, 2003)。しかし、圃場での害虫密度の正確なモニタリングには多くの労力を必要とし (長坂・大矢, 2003), 農作業上、現実的に行え

る作業ではない。

「バンカー法」とは、天敵とその餌 (寄主) 昆虫、およびそれを維持するための植物を圃場内に置き、常に十分量の天敵を圃場内に維持して対象害虫を制御する技術である (van Lenteren and Woets, 1988)。害虫の侵入発生前から天敵を予防的に圃場内に導入することができ、天敵の放飼時期を決めるための害虫密度のモニタリングを必要としない。また、天敵の放飼は、経験的に1週間間隔で3回程度放飼する方法が推奨されているが (日本植物防疫協会, 2006), バンカー法では、天敵の導入は1回で済む。バンカー法で使用する代替餌 (寄主) 昆虫には、対象作物を加害しないこと、天敵が正常に発育増殖すること、成長した天敵が害虫に対して高い捕食寄生能力を示すことが求められる。本章では、ギファブラバチ用のバンカー法を開発する目的で、代替寄主候補として取り上げたアブラムシ6種に対するギファブラバチの寄生効率や発育、各種アブラムシから羽化したギファブラバチのモモアカアブラムシに対する寄生能力を明らかにし、ギファブラバチの代替寄主アブラムシの選定を行った。

2 材料および方法

a 供試虫

試験に使用したギファブラバチとモモアカアブラムシの採集データ、飼育条件は、VI章と同じである。

本試験では、ギファブラバチの代替寄主候補として、エンドウヒゲナガアブラムシ *Acyrtosiphon pisum* (Harris), マメアブラムシ *Aphis craccivora* Koch, ソラマメヒゲナガアブラムシ *Megoura crassicauda* Mordvilko, トウモロコシアブラムシ *Rhopalosiphum maidis* (Fitch), ムギクビレアブラムシ *Rhopalosiphum padi* (L.), ムギヒゲナガアブラムシ *Sitobion akebiae* (Shinji) の6種を供試した (図-11)。6種はいずれもマメ科もしくはイネ科植物を寄主とする

表-11 試験に用いた代替寄主候補アブラムシ6種

| アブラムシ | 採集地 | 採集年月 | 採集時の寄主植物 | 継代飼育 ^a と試験に使用した寄主植物 | 供試時のアブラムシ日齢 ^c |
|---------------|---------|---------|----------|--------------------------------|--------------------------|
| エンドウヒゲナガアブラムシ | 岩手県盛岡市 | 1998年8月 | エンドウ | ソラマメ | 1~2 |
| マメアブラムシ | 三重県津市 | 2004年4月 | カラスノエンドウ | ソラマメ | 3~4 |
| ソラマメヒゲナガアブラムシ | 三重県津市 | 2004年4月 | カラスノエンドウ | ソラマメ | 1~2 |
| トウモロコシアブラムシ | 京都府美山町 | 不明 | 不明 | オオムギ ^b | 1~2 |
| ムギクビレアブラムシ | 香川県善通寺市 | 不明 | 不明 | オオムギ ^b | 3~4 |
| ムギヒゲナガアブラムシ | 岡山県倉敷市 | 2005年5月 | オオムギ | オオムギ ^b | 2~3 |

^a 20℃, 14L-10Dで飼育

^b 品種: カシマムギ

^c アブラムシ6種の体サイズがなるべく同じになるように、標記の日齢の幼虫を使用した (詳細はOhta and Honda (2010) を参照)。



ママアブラムシ *Aphis craccivora* Koch



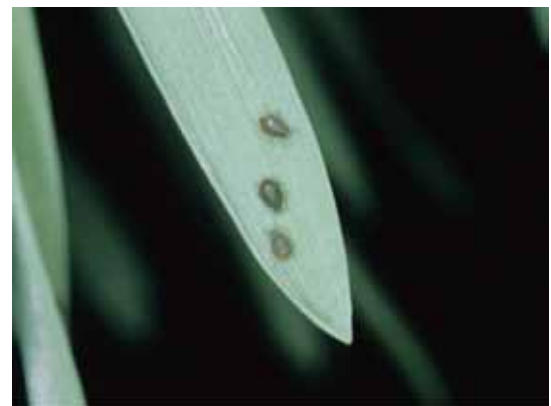
ソラマメヒゲナガアブラムシ *Megoura crassicauda* Mordvilko



エンドウヒゲナガアブラムシ *Acyrtosiphon pisum* (Harris)



トウモロコシアブラムシ *Rhopalosiphum maidis* (Fitch)



ムギクビレアブラムシ *Rhopalosiphum padi* (L.)



ムギヒゲナガアブラムシ *Sitobion akebiae* (Shinji)

図-11 ギファブラバチの代替寄主候補アブラムシ6種

アブラムシで、ギフアブラバチの利用が想定されるアブラナ科やナス科野菜類は加害しない（日本応用動物昆虫学会，2006）．代替寄主候補アブラムシ6種の採集データや継代飼育，供試条件は表-11に示した．

b 代替寄主候補アブラムシ6種に対するギフアブラバチの寄生効率

内寸が幅15 cm，奥行25 cm，高さ30 cmの透明塩化ビニル製の飼育容器内に，予め約100頭のアブラムシを付けておいた各寄主植物（直径7.5 cm，高さ6.5 cmのビニールポット植え）と羽化後2日以内で産卵未経験のギフアブラバチ雌成虫5頭を導入し， $25\pm 1^{\circ}\text{C}$ ・明条件に調整した定温器内に置いた．6時間後にアブラバチを取り除き，アブラムシは寄主植物に付いたままの状態に温度 $25\pm 1^{\circ}\text{C}$ ・日長14 L-10 Dに調整した定温器内に保存した．8日後にマミー化したアブラムシの数（マミー数）とマミー化しなかったアブラムシの数（生存虫数），さらに13日後にマミーから羽化したアブラバチ成虫の数を記録し，アブラムシ種別にギフアブラバチによるマミー化率（マミー数／（マミー数＋生存虫数））と羽化率（羽化数／マミー数）を求めた．また，比較として，モモアカアブラムシについても同条件で試験を行い，マミー化率と羽化率を求めた．試験は各アブラムシ種で5～8反復行った．

c ギフアブラバチの発育期間と体サイズ

前述の試験でギフアブラバチによる寄生が認められたエンドウヒゲナガアブラムシとムギヒゲナガアブラムシの2種について，各アブラムシに寄生したギフアブラバチの発育期間と羽化した成虫の体サイズを調べた．比較としてモモアカアブラムシも試験した．なお，トウモロコシアブラムシはごく少ない数のマミーしか得られないため，当試験から除外した．

bと同じ方法で，ギフアブラバチの寄生を受けたアブラムシを温度 $25\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，日長14 L-10 Dの条件下で飼育し，アブラムシの状態を毎日観察した．マミー化したアブラムシは直径2.1 cm，高さ4.5 cmのガラス管瓶に個別に移動し，ふたをした後に上記と同じ条件で保存した．マミーから新成虫が羽化するまでに要した期間と羽化した寄生蜂の雌雄を記録した．羽化した雌成虫は同上のガラス管瓶の中で放置し，死亡後に実体顕微鏡を用いて前翅の長さや後脚の脛節長を測定した．最後のマミー化が観察されてから3日以上経過してもマミー化しなかったアブラムシと，最後の成虫羽化が観察されてから3日以

上経過しても成虫が羽化しなかったマミーは死亡と判断した．

d ムギヒゲナガアブラムシで継代飼育したギフアブラバチのモモアカアブラムシに対する寄生効率

aで記した継代飼育中のギフアブラバチ個体群（寄主：モモアカアブラムシ）の一部にムギヒゲナガアブラムシを与えて寄生させた．ムギヒゲナガアブラムシマミーから羽化したギフアブラバチ成虫にさらに同アブラムシを与えて3世代以上飼育し，得られたアブラバチ個体群（寄主：ムギヒゲナガアブラムシ）を本試験に用いた．bに示した同じ方法でギフアブラバチ雌成虫にモモアカアブラムシを与えてマミー化率と羽化率を求めて，元のギフアブラバチ個体群（寄主：モモアカアブラムシ）によるモモアカアブラムシのマミー化率，羽化率と比較した．

e 統計解析

代替寄主候補アブラムシ6種の間でのマミー化率と羽化率の比較には Tukey-type multiple comparison test，異なるアブラムシに寄生したギフアブラバチの発育期間と羽化成虫の体サイズの比較は Tukey-Kramer test，また，ムギヒゲナガアブラムシとモモアカアブラムシで継代飼育したギフアブラバチ個体群によるモモアカアブラムシのマミー化率と羽化率は χ^2 検定で比較した．

3 結 果

a 代替寄主アブラムシ候補6種に対するギフアブラバチの寄生効率

供試した代替寄主候補のアブラムシ6種のうち，ギフアブラバチの寄生を受けてマミーの形成が認められたのは，エンドウヒゲナガアブラムシ，トウモロコシアブラムシおよびムギヒゲナガアブラムシの3種だった（表-12）．マメアブラムシ，ソラマメヒゲナガアブラムシおよびムギクビレアブラムシではマミーが観察されなかった．マミー化率はムギヒゲナガアブラムシが71.7%と最も高く，モモアカアブラムシの78.0%と有意な差がなかった（Tukey-type multiple comparison test， $p>0.05$ ）．一方，エンドウヒゲナガアブラムシ，トウモロコシアブラムシのマミー化率はそれぞれ34.7%と1.8%であり，ムギヒゲナガアブラムシやモモアカアブラムシよりも有意に低かった（ $p<0.05$ ）．マミーからのアブラバチ成虫の羽化率は，ムギヒゲナガアブラムシの96.7%が最も高かった．エンドウヒゲナガアブラムシとモモアカアブラムシの羽化率は，ムギヒゲナガアブラムシと比べて有

表-12 代替寄主候補アブラムシ6種に対するギファブラバチの寄生効率

| アブラムシ | 試験 反復数 | 各アブラムシに対する寄生効率 | | |
|---------------|-----------|----------------------------|---------------------------|-------------------------|
| | | マミー数+ 生存虫数 ^a | マミー化率 (%) ^b | 羽化率 (%) ^c |
| 代替寄主候補 | | | | |
| エンドウヒゲナガアブラムシ | 6 | 331 | 34.7 b | 84.3 b |
| ソラマメヒゲナガアブラムシ | 5 | 432 | 0 d | - |
| トウモロコシアブラムシ | 8 | 573 | 1.8 c | 77.8 |
| マメアブラムシ | 5 | 351 | 0 cd | - |
| ムギクビレアブラムシ | 6 | 423 | 0 d | - |
| ムギヒゲナガアブラムシ | 6 | 779 | 71.7 a | 96.7 a |
| 害虫 | | | | |
| モモアカアブラムシ | 5 | 441 | 78.0 a | 90.1 b |

^a 全反復の合計値。アブラバチの寄生から8日後に計数した。

^b マミー数 / (マミー数 + 生存虫数) × 100

^c 羽化数 / マミー数 × 100

^{b, c} 同じアルファベット文字の付いた値の間では有意差なし (Tukey-type multiple comparison test, $p > 0.05$)。但し、トウモロコシアブラムシのマミー数はごく少なかったため、当アブラムシの羽化率は比較から除外した。

意に低かったが (Tukey-type multiple comparison test, $p < 0.05$)、どちらも80%以上あった。

b ギファブラバチの発育期間と体サイズ

エンドウヒゲナガアブラムシ、ムギヒゲナガアブラムシ、モモアカアブラムシに寄生したギファブラバチの発育期間と羽化成虫の体サイズを表-13に示した。エンドウヒゲナガアブラムシに寄生したギファブラバチは、発育期間がムギヒゲナガアブラムシやモモアカアブラムシに寄生した場合よりも有意に長く、羽化成虫の体サイズも有意に大きかった (Tukey-Kramer test, $p < 0.05$)。一方、ムギヒゲナガアブラムシとモモアカアブラムシに寄生したギファブラバチは、発育期間や羽化成虫の体サイズに有意な差は認められなかった ($p > 0.05$)。

c ムギヒゲナガアブラムシで継代飼育したギファブラバチのモモアカアブラムシに対する寄生効率

ムギヒゲナガアブラムシを用いて3世代以上継代飼育して得られたギファブラバチのモモアカアブラムシに対する寄生効率は、マミー化率が85.5%、マミーからの羽化率は93.2%となり、モモアカアブラムシを用いて継代飼育したギファブラバチとの間に有意な差は認められなかった (χ^2 検定, $p > 0.05$) (表-14)。

4 考 察

供試した代替寄主候補アブラムシ6種のうち、ギファブラバチが最もよく寄生したのはムギヒゲナガアブラムシだった。本アブラムシのマミー化率は71.7%、マミーからのアブラバチ新成虫の羽化率は96.7%であり、これらはモモアカアブラムシを与えた場合と同程度に高かった (表-12)。また、ムギヒゲナガアブラムシに寄生したギファブラバチが卵から成虫まで発育するのに要した期間とムギヒゲナガアブラムシのマミーから羽化したアブラバチ成虫の体サイズも、モモアカアブラムシに寄生

表-13 異なるアブラムシに寄生したギファブラバチ (雌)^a の発育期間と羽化成虫の体サイズ

| アブラムシ | 供試 個体数 | 発育期間 (日) ^b | 体サイズ | |
|---------------|-----------|--------------------------|-----------------------|-------------------------|
| | | | 前翅長 (mm) ^b | 後脚脛節長 (mm) ^b |
| エンドウヒゲナガアブラムシ | 136 | 11.6 ± 0.06 a | 1.95 ± 0.007 a | 0.79 ± 0.004 a |
| ムギヒゲナガアブラムシ | 196 | 11.3 ± 0.06 b | 1.79 ± 0.008 b | 0.71 ± 0.004 b |
| モモアカアブラムシ | 148 | 11.2 ± 0.04 b | 1.79 ± 0.007 b | 0.69 ± 0.003 b |

^a 25°C, 14L-10Dで飼育

^b 平均値 ± 標準誤差, 同じアルファベット文字の付いた値の間では有意差なし (Tukey-Kramer test, $p > 0.05$)

表-14 異なるアブラムシで継代飼育したギファアブラバチのモモアカアブラムシに対する寄生効率

| 供試したギファアブラバチ | 試験 反復数 | モモアカアブラムシに対する 寄生効率 | | |
|--------------------------------------|-----------|----------------------------|---------------------------|-------------------------|
| | | マミー数+ 生存虫数 ^a | マミー化率 (%) ^b | 羽化率 (%) ^c |
| ムギヒゲナガアブラムシで 継代飼育した個体群 | 7 | 744 | 85.5 ns | 93.2 ns |
| モモアカアブラムシで 継代飼育した個体群 ^d | 5 | 441 | 78.0 | 90.1 |

^a 全反復の合計値、アブラバチの寄生から8日後に計数した。
^b マミー数 / (マミー数 + 生存虫数) × 100
^c 羽化数 / マミー数 × 100
^{b, c} ns アブラバチ個体群間で有意差なし (x² 検定, p > 0.05)
^d 表14のデータを使用

した場合と比べて有意差がなかった (表-13)。これらの結果は、ギファアブラバチがムギヒゲナガアブラムシを寄主として容認し、寄生したムギヒゲナガアブラムシの体内で正常に発育できることを示唆している。

アブラバチの雌成虫に異なる種類のアブラムシを与えると、自分が発育した同種のアブラムシに好んで寄生する場合がある (Storeck ら, 2000)。イギリスでは、エルビアブラバチはアルファルファ上のエンドウヒゲナガアブラムシやイラクサ上のアブラムシの一種 *Metopolophium dirhodum* (Walker) に寄生しているが、室内でエンドウヒゲナガアブラムシを寄主として継代飼育したエルビアブラバチは、*M. dirhodum* にほとんど寄生しない (Cameron ら, 1984)。これは、バンカー法に用いる代替寄主アブラムシの価値が、害虫アブラムシと代替寄主アブラムシに対するアブラバチの寄主選好性に影響されることを意味している (Powell and Wright, 1988)。本試験では、寄主としてムギヒゲナガアブラムシを与えて継代飼育したギファアブラバチ個体群が、害虫のモモアカアブラムシに高率で寄生し、モモアカアブラムシを与えて継代飼育したアブラバチ個体群と比べて、その寄生効率が低下することはなかった (表-14)。このことは、ムギヒゲナガアブラムシを代替寄主として増殖したギファアブラバチが、作物上で発生した害虫のモモアカアブラムシにも十分に寄生できることを示している。以上、本章で示した三つの試験結果から、ギファアブラバチのバンカー法に用いる代替寄主としてムギヒゲナガアブラムシが最も適していると結論した。

導入天敵のコレマンアブラバチはムギクビレアブラムシに寄生するが、ムギヒゲナガアブラムシには寄生しない (太田, 未発表)。そのため、ムギヒゲナガアブラムシを用いたギファアブラバチ用のバンカーは、コレマンア

ブラバチに利用できない。また、ギファアブラバチはムギクビレアブラムシに寄生しないため (表-12)、コレマンアブラバチ用のバンカーをギファアブラバチに利用することもできない。したがって、ギファアブラバチとコレマンアブラバチの2種の天敵をそれぞれのバンカーと共に圃場内に設置すれば、同じアブラムシを巡って寄生競争が発生する可能性は低く、アブラバチ2種は共存可能と推察される。一方で、上述のムギヒゲナガアブラムシとムギクビレアブラムシはどちらもムギ類に付くアブラムシであり、同じ寄主植物上で種間競争が発生する可能性がある。そのため、ギファアブラバチとコレマンアブラバチをそれぞれのバンカーと共に導入して、複数種の野菜害虫アブラムシを同時に防除する技術の開発には、さらに検討が必要である。

VIII 総合考察

本研究では、アブラナ科およびナス科野菜類を加害するモモアカアブラムシとその天敵寄生蜂ギファアブラバチに関して、モモアカアブラムシを寄主として与えた場合の寄生蜂の様々な生態的特性を明らかにすることにより、モモアカアブラムシの生物的防除資材としてのギファアブラバチの有効性を検討した。また、ガラス温室やビニールハウスを利用して、モモアカアブラムシを発生増殖させた作物上にギファアブラバチを放飼する試験を行い、本種によるモモアカアブラムシの抑制効果を検証した。さらに、ギファアブラバチを生物農薬として生産販売する際に必要となる低温保存技術や、圃場でより安定的な防除効果を得るために有効なバンカー法の開発も行った。

II章では、対象害虫であるモモアカアブラムシについて、発育期間や生存率、産子数などの生活史パラメータ

から増殖率を明らかにした。Ⅲ章では、ギファブラバチがモモアカアブラムシに高率で産卵（寄生）し、アブラムシ体内に寄生したギファブラバチ幼虫も正常に発育できることを示した。また、ギファブラバチの雌成虫は生涯に500頭以上のモモアカアブラムシに寄生する能力を持ち、本種個体群の内的自然増加率も寄主のモモアカアブラムシよりも高くなることを示した。このことから、ギファブラバチはモモアカアブラムシの生物的防除に用いる天敵として有望であることを確認した。Ⅳ章では、ギファブラバチは低温短日の環境下でも休眠が誘導されずに正常に発育し、秋から翌春まで行われる野菜の施設栽培でもモモアカアブラムシの天敵として活動可能と判断した。Ⅴ章では、ガラス温室やビニールハウス内に放飼したギファブラバチが作物上のモモアカアブラムシの増加を抑制することを実証し、ギファブラバチの放飼回数や放飼間隔、放飼開始時のアブラムシの密度が、アブラムシ防除の成否に大きく影響することを示した。Ⅵ章では、ギファブラバチはアブラムシマミーの状態でも低温保存できることを示し、保存する温度や期間とアブラバチの生存率の関係を明らかにした。Ⅶ章では、ギファブラバチの増殖に適した代替寄主としてムギヒゲナガアブラムシを見出し、寄主植物のコムギやオオムギ上で本アブラムシを増殖させたものをギファブラバチ用のバンカーとして利用できることを示した。以上の一連の結果から、本研究は、土着のアブラムシ寄生蜂であるギファブラバチが、野菜の施設栽培で発生する害虫モモアカアブラムシの生物的防除資材として利用できることを初めて明らかにし、ギファブラバチを生物農薬として市販する場合に必要な飼育、増殖、保存技術や、野菜栽培圃場における本種の放飼方法を提示する成果が得られた。本研究は、過去の論文、知見などから有望とされた天敵昆虫一種に着目し、基礎的な生態的特性の解明から応用的な利用方法の開発まで行ったものであり、今後の我が国において、土着天敵昆虫利用の促進にも大きく貢献する成果と考えられる。

ギファブラバチはジャガイモヒゲナガアブラムシ *Aulacorthum solani* (Kaltenbach) にも寄生することが知られている (Takada, 2002; Ohta and Honda, 2010)。小野ら (2004) は、ダイズ圃場で発生したジャガイモヒゲナガアブラムシの主要な天敵としてギファブラバチを挙げている。ジャガイモヒゲナガアブラムシは、モモアカアブラムシと同様に多くの野菜類を加害するが (日本応用動物昆虫学会, 2006)、近年は、天敵利用を中心とした害虫管理を行っている施設栽培のピーマンで多

く発生している。ピーマンを加害するアザミウマやハダニの防除のために放飼した天敵への影響を避けるため、アブラムシ防除に効果のある殺虫剤や他の農薬の散布を最小限に抑えたことが原因の一つと考えられている (柿元, 私信)。また、生物農薬として市販されているコレマンアブラバチは、ジャガイモヒゲナガアブラムシに寄生しない (太田, 未発表)。そのため、ジャガイモヒゲナガアブラムシによる被害が増加している施設栽培ピーマンの産地においても、ギファブラバチの導入が期待されている。

我が国では、天敵昆虫や天敵微生物を農作物の病害虫防除に使用する目的で市販する場合、農薬取締法上、一般的な化学合成殺虫剤や殺菌剤と同様に農薬として登録する必要がある。2010年5月現在、18種の天敵昆虫・ダニ類が生物農薬として登録されている。当初は海外から輸入された外来種が多かったが、圃場内に放した個体が野外に逃亡した場合、生態系に与える影響が不明である。このため、土着の天敵から有望な種を探索して開発試験を行い、農薬登録に至る事例が増加している。現在では登録天敵18種中11種が日本在来の土着種になっている。ギファブラバチも日本国内に広く分布する寄生蜂であるため、採集が容易であり、流通に関わるコストも海外産の導入天敵を輸入する場合に比べて低く抑えることが可能と考えられる。また、アブラムシ防除のために放飼した本種個体群が、圃場周辺の生態系を攪乱する可能性も外来種に比べてきわめて低いと推測される。大韓民国では、既にギファブラバチが天敵として販売されており、野菜害虫アブラムシ類の防除資材として普及し始めている。そのため、我が国においても、ギファブラバチがモモアカアブラムシやジャガイモヒゲナガアブラムシの生物農薬として早期に登録、販売されることが望まれる。また、土着の天敵は、採集地と同じ都道府県内で増殖、放飼（使用）する場合に限って“特定防除資材”の指定を受けることができ、農薬登録の義務がない（農薬取締法第2条第1項）。したがって、生産者やそのグループ、農業法人などが自らギファブラバチを採集して増殖し、同じ都道府県内の野菜栽培圃場で“特定防除資材”として使用する方法も考えられる。

ギファブラバチをモモアカアブラムシやジャガイモヒゲナガアブラムシの生物的防除資材として実用化するためには、いくつかの解決すべき問題点が残されている。

1つめの問題点は、ギファブラバチの天敵である二次寄生蜂の存在である。

ギファブラバチは、寄生したアブラムシから栄養源を

搾取し、最終的に寄主を死亡させる昆虫であるため(図4)、食物連鎖の上では、本種はアブラムシの天敵と位置付けられる。しかし、ギファブラバチにもいくつかの天敵生物が存在する。特に、アブラバチを用いてアブラムシの生物的防除を行う際、寄生蜂の防除効果を著しく低下させる有害な天敵は二次寄生蜂である(高田・巽, 2002)。二次寄生蜂とは、アブラムシ体内に寄生中の一次寄生蜂(ギファブラバチなど)幼虫の体内や、一次寄生蜂が寄生しているアブラムシの体内に特異的に産卵し、孵化した幼虫が一次寄生蜂幼虫から栄養源を摂取して死亡させる昆虫である。ギファブラバチには、ヒメタマバチ科 *Alloxysta* 属、コガネコバチ科 *Asaphes* 属、*Pachynueron* 属、トビコバチ科 *Syrphophagus* 属、オオクロモンコバチ科 *Dendroserus* 属などの二次寄生蜂が寄生する(太田, 未発表)。長坂(2005)は、導入天敵のコレマンアブラバチを用いた施設栽培ナスでのアブラムシ防除において、外気温が上昇する春以降に防除効果が低下する事例を報告しており、その原因の一つとして、野外から施設圃場内に侵入した二次寄生蜂によるアブラバチ密度の低下を挙げている。二次寄生蜂の寄生から一次寄生蜂を保護する手法は未だ確立されておらず、ギファブラバチを用いた野菜害虫アブラムシの生物的防除技術の普及においても、今後に残された課題である。

2つめは、ギファブラバチに対する農薬の影響である。

天敵を利用した害虫防除法は、農薬を主体とした従来の害虫防除法に比べて、環境負荷の軽減や防除作業の省力化などのメリットがある。しかし、野菜類で発生する害虫は多種多様であり、天敵だけですべての病害虫を制御することは困難であるため、殺虫剤、殺菌剤との併用が現実的である。そのため、天敵を組み入れた害虫防除を行う際には、他の害虫や病害に対して散布される農薬が天敵に与える影響を予め理解しておく必要がある。ギファブラバチに対する農薬の影響は Kobori and Amano (2004) が明らかにしているが、供試薬剤が8種類と少なく、最近10年ほどの間に登録された新規の殺虫剤、殺ダニ剤、殺菌剤は含まれていない。また、日本バイオリジカルコントロール協議会は、コレマンアブラバチに対する各種農薬の影響評価を公表している(<http://www.biocontrol.jp/index.html>)、ギファブラバチの利用が想定されるアブラナ科、ナス科野菜類での登録農薬がすべて網羅されていない。そのため、施設栽培のアブラナ科、ナス科野菜類でよく使用される各種薬剤についても、ギファブラバチに対する影響を明らかにしておく必要がある。

3つめは、ギファブラバチの地域個体群間差異である。

本研究で使用したギファブラバチは、II~V章が広島県福山市で採集された個体群、VI, VII章は高知県南国市で採集された個体群由来のものである。III章とIV章の考察でも述べたように、昆虫の発育期間や休眠反応などの生態的特性は、同種であっても地域個体群によって異なる可能性がある。そのため、各地域に生息するギファブラバチ個体群を特定防除資材として利用する際には、増殖に利用するアブラムシも含めて、本研究で示された生活史パラメータとは若干異なる可能性も考慮に入れる必要がある。特に、北日本などの高緯度地域で採集されたギファブラバチ個体群は、低温短日下で休眠が誘導される可能性が高く、冬期施設内での利用には留意する必要がある。

現在、生物農薬として登録のある18種の天敵昆虫・ダニ類が使用できる対象作物は、一部を除いて施設栽培の野菜類や花き類であり、露地で栽培する農作物への利用はほとんど進んでいない。これは、露地圃場に人為的に天敵を放飼しても、天候の変動や他の天敵との競争、圃場外への逃亡など天敵の活動や個体群動態に大きな影響を与える要因が多く、安定した害虫防除効果を得ることが難しいためである。本研究においても、ギファブラバチの利用対象となる作物は、モモアカアブラムシが加害する施設栽培のアブラナ科、ナス科野菜類を想定している。しかし、近年、土着天敵昆虫の餌や隠れ場所となる植物を圃場の周囲に配置して天敵の活動を積極的に保護、増強し、他の物理的・化学的防除手法と組み合わせ、露地圃場で害虫制御を試みる研究も行われている。Heimpel and Jervis (2005) は、露地圃場において寄生蜂の生存、定着に有効な蜜源植物としてソバを挙げている。したがって、圃場周辺の植生管理などを工夫することにより、露地栽培においてもモモアカアブラムシなどの天敵として本寄生蜂を有効に活用できる可能性があり、今後の研究の進展が期待される。

IX 摘要

本研究は、アブラムシの捕食寄生性天敵であるギファブラバチの生物学的特性を明らかにし、本寄生蜂を活用した野菜害虫モモアカアブラムシの生物的防除技術の確立を目的として行われた。得られた研究結果の概要は、以下の通りである。

モモアカアブラムシを15~30℃の定温条件下で個体別に飼育し、幼虫期の生存率(誕生直後の幼虫で成虫まで

に発育した個体の割合)、発育期間(幼虫が成虫に羽化するまでに要した期間)、成虫の生涯総産子数、生存期間(成虫に羽化してから死亡するまでの期間)および個体群の増殖率を明らかにした。

チンゲンサイを与えて飼育したモモアカアブラムシ幼虫の生存率は90%以上と高く、発育期間は温度が高くなるにしたがって短くなった。有効積算温度の法則にもとづき、発育零点は5.6℃、有効積算温度は113.1日度となった。成虫1頭あたりの生涯総産子数と生存期間は20℃で最大となったが、個体群の増殖率を示す内的自然増加率は25℃の0.420が最も高かった。

モモアカアブラムシに寄生中のギファブラバチを15~30℃の定温条件下で飼育し、アブラバチが成虫に羽化するまでの間の生存率と発育期間、雌成虫の産卵成功率(1回の産卵行動でモモアカアブラムシの体内に卵を産み付ける確率)、機能の反応(1頭の雌成虫が1日あたりに寄生できるモモアカアブラムシの頭数)、生涯総産卵数、生存期間を明らかにした。また、これらのデータをもとに内的自然増加率を求めて、モモアカアブラムシと比較した。

ギファブラバチの発育期間は、飼育温度が高いほど短くなる傾向が認められた。しかし、30℃での発育期間は25℃より約1日長くなり、高温による発育遅延が認められた。発育零点は雌5.5℃、雄5.7℃、有効積算温度は雌188.6日度、雄181.0日度となった。モモアカアブラムシに寄生したギファブラバチの生存率は、飼育温度20℃と25℃で90%以上と非常に高く、15℃と30℃でも80%台だった。

モモアカアブラムシに対するギファブラバチ雌成虫の産卵成功率は84.9%だった。機能の反応では、ギファブラバチ雌成虫1頭が1日に寄生できるモモアカアブラムシの頭数は、最大で150~200頭だった。ギファブラバチ雌成虫は、羽化直後にモモアカアブラムシに最も多く産卵し、以後その数は減少した。1雌あたりの生涯総産卵数は平均500個余り、生存期間は12日程度だった。内的自然増加率は20℃で0.351、25℃で0.463となり、同温度でのモモアカアブラムシよりも高く、ギファブラバチはモモアカアブラムシの生物的防除資材として有用と結論した。

ギファブラバチを秋~冬期の施設圃場内で利用することを想定して、低温短日の環境条件が本種の休眠反応に与える影響を調べた。ギファブラバチに寄生されたモモアカアブラムシ幼虫を温度15℃・日長10L-14Dの低温短日下に置いた結果、成虫の羽化率は90%以上と高

く、14L-10Dの長日条件で飼育した場合と差はなかった。さらに、マミーが形成されてから成虫が羽化するまでの期間は、長日条件より短日条件下で有意に長くなったが、その差は約1日未満であり、休眠の誘導は観察されなかった。このことから、ギファブラバチは低温短日となる秋~冬期の施設内でも発育、増殖が可能であり、モモアカアブラムシの天敵として利用可能と推測した。

チンゲンサイを置いたガラス温室やビニールハウス内にギファブラバチを放飼して、寄生蜂によるモモアカアブラムシの抑制効果を検証した。試験は、モモアカアブラムシの初期密度やギファブラバチの放飼間隔、放飼回数などを変えて行った。

モモアカアブラムシの初期密度を3頭/株とした場合、ギファブラバチの放飼によってアブラムシの増加が抑制された。アブラムシの初期密度が6頭/株では、アブラムシ数はアブラバチ放飼後も急増し、防除に失敗した。一方、アブラムシの初期密度を最も少ない1頭/株とした試験では、アブラバチを3日間隔で4回放飼した場合にのみアブラムシ数の増加が抑制された。これらの結果から、放飼したギファブラバチが次世代を生産し、かつアブラバチによって増殖抑制が可能なモモアカアブラムシの密度レベルが存在することが明らかになった。また、アブラバチは複数回に分けて放飼する方が、1回にまとめて放飼するよりもアブラムシの抑制効果が高くなる傾向も認められた。なお、3番目の試験結果については、再検討が必要と考えられた。

チンゲンサイを植えたビニールハウスでギファブラバチを放飼する試験も行った。ギファブラバチを導入したハウスでは、モモアカアブラムシの増加が抑制されたが、アブラバチを放飼しなかったハウスでは、アブラムシ数が増加した。この結果から、モモアカアブラムシに対するギファブラバチの防除効果は、圃場スケールの空間においても実証された。

アブラムシマミーの中にあるギファブラバチは、マミーの硬い外皮によって保護されているため、輸送や圃場で放飼する際に最も扱いやすい形態をしている。また、アブラムシマミーは、アブラバチの低温保存に最も適したステージとされている。そこで、ギファブラバチの寄生によって形成されたモモアカアブラムシマミーを4.6~12.5℃の低温下に7~21日間保存した後で室温25℃に戻し、アブラムシマミーからのアブラバチ成虫の羽化率を調べた。

7.6℃、10.1℃および12.5℃の低温下に7日保存した場合、羽化率は約80%と高く、4.6℃でも60%だった。

一方、低温下に14日もしくは21日保存した場合、羽化率は10%未満に低下した。成虫が羽化しなかったマミーの中には、死亡したアブラバチの蛹や成虫が観察され、休眠している生存幼虫は認められなかった。以上の結果から、ギフアブラバチが寄生中のモモアカアブラムシマミーは、温度4.6~12.5°Cの低温下で最大7日間保存可能と推測した。

「バンカー法」とは、天敵とその餌（寄主）昆虫、およびそれを維持するための植物を圃場内に置き、常に十分量の天敵を圃場内に維持して対象害虫を制御する技術である。増殖率の非常に高いアブラムシには、害虫の侵入発生前から天敵を圃場内に導入することができるため、効率的なアブラムシ防除が可能になる。そこで、ギフアブラバチ用のバンカー法を構築するため、野菜類を加害せず、ギフアブラバチの増殖が可能なモモアカアブラムシに代わるアブラムシを探索した。供試した6種の候補アブラムシのうち、ギフアブラバチの寄生効率が最も高かったのは、ムギヒゲナガアブラムシだった。ムギヒゲナガアブラムシに寄生したギフアブラバチは、モモアカアブラムシを与えた場合と同程度に発育できた。また、ムギヒゲナガアブラムシで継代飼育したギフアブラバチは、害虫のモモアカアブラムシに高率で寄生した。これらの結果から、ギフアブラバチの代替寄主としてムギヒゲナガアブラムシを選定し、ムギヒゲナガアブラムシを増やしたムギ類の株をギフアブラバチ用のバンカーとした。

引用文献

- 1) Abdel-Wali, M. I. and T. M. Mustafa (2006) : Response of *Aphidius matricariae* Haliday (Hym.: Aphidiidae) from mummified *Myzus persicae* Sulzer (Hom.: Aphididae) to short term cold storage. *Int. Pest Cont.*, **48**, 262-265.
- 2) Archer, T. L., C. L. Murray, R. D. Eikenbary, K. J. Starks and R. D. Morrison (1973) : Cold storage of *Lysiphlebus testaceipes* mummies. *Environ. Entomol.*, **2**, 1104-1108.
- 3) Barlow, C. A. (1962) : The influence of temperature on the growth of experimental populations of *Myzus persicae* (Sulzer) and *Macrosiphum euphorbiae* (Thomas). *Can. J. Zool.*, **40**, 145-156.
- 4) Bernal, J. and D. González (1997) : Reproduction of *Diaeretiella rapae* on Russian wheat aphid hosts at different temperatures. *Entomol. Exp. Appl.*, **82**, 159-166.
- 5) Bi, Z. and Z. Ji (1993) : Bionomics of *Aphidius gifuensis* Ashmead I. Development stages and morphology of larval stage. *J. Hebei Agr. Univ.*, **16** (2), 1-6 (in Chinese with English summary).
- 6) Bi, Z. and Z. Ji (1996) : Bionomics of *Aphidius gifuensis* IV. Fertility, intrinsic rate of increase, functional response and population suppression of peach green aphids. *J. Hebei Agr. Univ.*, **19** (3), 1-6 (in Chinese with English summary).
- 7) Birch, L. C. (1948) : The intrinsic rate of natural increase of an insect population. *J. Anim. Ecol.*, **17**, 15-26.
- 8) Blackman, R. L. (1974) : Life-cycle variation of *Myzus persicae* (Sulz.) (Hom., Aphididae) in different parts of the world, in relation to genotype and environment. *Bull. Entomol. Res.*, **63**, 595-607.
- 9) Blackman, R. L. and V. F. Eastop (2000) : Aphids on the World's Crops: An Identification and Information Guide. Second Edition. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester.
- 10) Boot, W. J., O. P. J. M. Minkenberg, R. Rabbinge and G. H. de Moed (1992) : Biological control of the leafminer *Liriomyza bryoniae* by seasonal inoculative releases of *Diglyphus isaea*: simulation of a parasitoid-host system. *Neth. J. Plant Pathol.*, **98**, 203-212.
- 11) Brodeur, J. and J. N. McNeil (1989) : Biotic and abiotic factors involved in diapause induction of the parasitoid, *Aphidius nigripes* (Hymenoptera: Aphidiidae). *J. Insect Physiol.*, **35**, 969-974.
- 12) Cameron, P. J., W. Powell and H. D. Loxdale (1984) : Reservoirs for *Aphidius ervi* Haliday (Hymenoptera: Aphidiidae), a polyphagous parasitoid of cereal aphids (Homoptera: Aphididae). *Bull. Entomol. Res.*, **74**, 647-656.
- 13) Campbell, A., B. D. Frazer, N. Gilbert, A. P. Gutierrez and M. Mackauer (1974) : Temperature requirements of some aphids and their parasites. *J. Appl. Ecol.*, **11**, 431-438.
- 14) Campbell, A. and M. Mackauer (1975) : Thermal constants for development of the pea aphid (Homoptera: Aphididae) and some of its parasites. *Can. Entomol.*, **107**, 419-423.
- 15) Chao, W., C. Ting, T. Dong and Y. Wang (1980) : The bionomics of *Aphidius gifuensis* Ashmead and its utilization for the control of tobacco aphid *Myzus persicae* Sulzer. *Zool. Res.*, **1** (3), 405-415.
- 16) Christiansen-Weniger, P. and J. Hardie (1997) : Development of the aphid parasitoid, *Aphidius ervi*, in asexual and sexual females of the pea aphid, *Acyrtosiphon pisum*, and the blackberry-cereal aphid, *Sitobion fragariae*. *Entomophaga* **42**, 165-172.
- 17) Christiansen-Weniger, P. and J. Hardie (1999) : Environmental and physiological factors for diapause induction and termination in the aphid parasitoid, *Aphidius ervi* (Hymenoptera: Aphidiidae). *J. Insect Physiol.*, **37**, 699-702.
- 18) van Emden, H. F., V. F. Eastop, R. D. Hughes and M. J. Way (1969) : The ecology of *Myzus persicae*. *Ann. Rev. Entomol.*, **14**, 197-270.
- 19) Fox, P. M., B. C. Pass and R. Turston (1967) : Laboratory studies on the rearing of *Aphidius smithi* (Hymenoptera: Braconidae) and its parasitism of *Acyrtosiphon pisum* (Homoptera: Aphididae). *Ann. Entomol. Soc. Am.*, **60**, 1083-1087.
- 20) 深津武馬 (2000) : 分類と系統進化. 石川 統 編, アブラ

- ムシの生物学, 15-34, 東京大学出版会, 東京.
- 21) 福井昌夫・高田 肇 (1988) : モモアカアブラムシを寄主とする2種のアブラバチ *Diaeretiella rapae* (M'Intosh) と *Aphidius gifuensis* Ashmead の産卵数, 産卵期間および寿命. 応動昆., **32**, 331-333.
 - 22) Giri, M. K., B. C. Pass and K. V. Yeargan (1983) : The effects of temperature on the rate of development of *Aphidius matricariae* Haliday (Hymenoptera: Aphidiidae). *Trans. Ky. Acad. Sci.*, **44**, 145-147.
 - 23) Hågvar, E. B. and T. Hofsvang (1991) : Aphid parasitoids (Hymenoptera, Aphidiidae) : biology, host selection and use in biological control. *Biocontrol News and Information*, **12**, 13-41.
 - 24) 浜 弘司 (2000) : 殺虫剤抵抗性. 石川 統 編, アブラムシの生物学, 74-94, 東京大学出版会, 東京.
 - 25) Harizanova, V. and B. Ekbom (1997) : An evaluation of the parasitoid, *Aphidius colemani* Viereck (Hymenoptera: Braconidae) and the predator *Aphidoletes aphidimyza* Rondani (Diptera: Cecidomyiidae) for biological control of *Aphis gossypii* Glover (Homoptera: Aphididae) on cucumber. *J. Entomol. Sci.*, **32**, 17-24.
 - 26) Heimpel, G. E., and M. A. Jervis (2005) : Does floral nectar improve biological control by parasitoids? F. L. Wäckers, P. C. van Rijn and J. Bruin eds., Plant-Provided Food for Carnivorous Insects: a protective mutualism and its application, 267-304, Cambridge University Press, Cambridge.
 - 27) Heinz, K. M., L. Nunney and M. P. Parella (1993) : Toward predictable biological control of *Liriomyza trifolii* (Diptera: Agromyzidae) infesting greenhouse cut chrysanthemums. *Environ. Entomol.*, **22**, 1217-1233.
 - 28) Hofsvang, T. and E. B. Hågvar (1977) : Cold storage tolerance and supercooling points of mummies of *Ephedrus cerasicola* Stary and *Aphidius colemani* Viereck (Hym.: Aphidiidae). *Norw. J. Ent.*, **24**, 1-6.
 - 29) 石橋泰之 (2004) : 温度管理. 農山漁村文化協会編, 野菜園芸大百科 (第2版) 6 ナス, 285-286, 農山漁村文化協会, 東京.
 - 30) 金子順一・菅原信治・遠藤知二 (1992) : *Aphidius gifuensis* による寄生時のモモアカアブラムシの日齢がその後の産子数に及ぼす影響. 応動昆., **36**, 137-139.
 - 31) 桐谷圭治 (1997) : 日本産昆虫, ダニ, 線虫の発育零点と有効積算温度. 農業環境技術研究所資料, **21**, 1-72.
 - 32) Kobori, Y. and H. Amano (2004) : Effects of agrochemicals on life-history parameters of *Aphidius gifuensis* (Hymenoptera: Braconidae). *Appl. Entomol. Zool.*, **39**, 255-261.
 - 33) Kocourek, F. and J. Berankova (1989) : Temperature requirements for development and population growth of the green peach aphid *Myzus persicae* on sugar beet. *Acta Entomol. Bohemoslov.*, **86**, 349-355.
 - 34) 国立天文台 (編) (2010) : 理科年表 (平成22年版). 国立天文台, 東京.
 - 35) 国本佳範・井上雅央・谷川元一 (1995) : 夏秋ナスの薬剤散布作業に影響を及ぼす要因の抽出. 奈良農試研報, **26**, 39-46.
 - 36) Kuo, M. H. (1995) : Development of green peach aphid parasitoid *Aphidius gifuensis* Ashmead and hyperparasitoid *Pachyneuron aphidis* (Bouche) at various temperatures. *Plant Prot. Bull.*, **37**, 393-401 (in Chinese with English summary).
 - 37) Langer, A., G. Boivin and T. Hance (2004) : Oviposition, flight and walking capacity at low temperatures of four aphid parasitoid species (Hymenoptera: Aphidiinae). *Eur. J. Entomol.*, **101**, 473-479.
 - 38) van Lenteren, J. C. (1986) : Parasitoids in the greenhouse: Successes with seasonal inoculative releases systems. J. Waage and D. Greathead eds., *Insect Parasitoids*, 341-374, Academic Press, London.
 - 39) van Lenteren, J. C. and J. Woets (1988) : Biological and integrated pest control in greenhouses. *Annu. Rev. Entomol.*, **33**, 239-269.
 - 40) van Lenteren, J. C. and G. Manzaroli (1999) : Evaluation and use of predators and parasitoids for biological control of pests in greenhouses. R. Albajes, M. Lodovica Gullino, J. C. van Lenteren and Y. Elad eds., *Integrated Pest and Disease Management in Greenhouse Crops*, 183-201, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
 - 41) Levie, A., P. Vernon and T. Hance (2005) : Consequences of acclimation on survival and reproductive capacity of cold-stored mummies of *Aphidius rhopalosiphii* (Hymenoptera: Aphidiidae). *J. Econ. Entomol.*, **98**, 704-708.
 - 42) Liu, S. (1991) : The influence of temperature on the population increase of *Myzus persicae* and *Lipaphis erysimi*. *Acta Entomologica Sinica*, **34** (2), 189-197 (in Chinese with English summary).
 - 43) Liu, S. and X. Meng (1999) : Modeling development time of *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae) at constant and natural temperatures. *Bull. Entomol. Res.*, **89**, 53-63.
 - 44) Lu, H., B. Shi, Y. Niu and Z. Zhang (1994) : Development thresholds and thermal constants of *Aphidius gifuensis* and *Diaeretiella rapae*. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, **9** (3), 72-75 (in Chinese with English summary).
 - 45) 松崎征美 (1972) : ハウスにおけるアブラムシ類の発生とその問題点. 植物防疫, **28**, 241-246.
 - 46) 森下正彦・東勝千代 (1990) : 合成ピレスロイド剤に対するモモアカアブラムシの感受性低下. 応動昆, **34**, 163-165.
 - 47) 村井 保・積木久明 (1996) : モモアカアブラムシとワタアブラムシの個体群増殖. 岡大資生研報, **4**, 59-65.
 - 48) 長坂幸吉・大矢慎吾 (2003) : バンカー植物の活用: アブラバチ類. 植物防疫, **57**, 505-509.
 - 49) 長坂幸吉 (2005) : アブラムシ対策としての「バンカー法」技術マニュアル2005年版. (独) 農業・生物系特定産業技術研究機構 近畿中国四国農業研究センター編, 京都.
 - 50) 日本応用動物昆虫学会 (編) (2006) : 農林有害動物・昆虫名鑑 (増補改訂版). 日本応用動物昆虫学会, 東京.
 - 51) 日本施設園芸協会 (編) (2003) : 施設園芸ハンドブック (5訂版). 日本施設園芸協会, 東京.
 - 52) 日本植物防疫協会 (編) (2006) : 生物農薬+フェロモンガイドブック2006. 日本植物防疫協会, 東京.
 - 53) Ohta, I. and K. Honda (2010) : Use of *Sitobion akebiae* (Hemiptera: Aphididae) as an alternative host aphid for a banker-plant system using and indigenous parasitoid, *Aphidius gifuensis* (Hymenoptera: Braconidae). *Appl. Entomol. Zool.*, **45**, 233-238.
 - 54) 小野 亨・城所 隆・小山 淳・大場 淳司 (2004) : ダイズにおけるジャガイモヒゲナガアブラムシの発生とギョファブラバチの影響. 北日本病虫研報, **55**, 180-185.

- 55) Powell, W. and A. F. Wright (1988) : The abilities of the aphid parasitoids *Aphidius ervi* Haliday and *A. rhopalosiphii* De Stefani Perez (Hymenoptera: Braconidae) to transfer between different known host species and the implications for the use of alternative hosts in pest control strategies. *Bull. Entomol. Res.*, **78**, 683-693.
- 56) Quicke, D. L. J. (1997) : Parasitic Wasps. Chapman & Hall, London.
- 57) Rabasse, M. J. and F. F. Shalaby (1980) : Laboratory studies on the development of *Myzus persicae* Sulz. (Hom., Aphididae) and its primary parasite, *Aphidius matricariae* Hal. (Hym., Aphidiidae) at constant temperatures. *Acta Oecologica / Oecologica Applicata*, **1**, 21-28.
- 58) van Roermund, H. J. W., J. C. van Lenteren and R. Rabbinge (1997) : Biological control of greenhouse whitefly with the parasitoid *Encarsia formosa* on tomato: An individual-based simulation approach. *Biol. Control*, **9**, 25-47.
- 59) Scopes, N. E. A., S. M. Biggerstaff and D. E. Goodall (1973) : Cool storage of some parasites used for pest control in greenhouses. *Pl. Path.*, **22**, 189-193.
- 60) Shalaby, F. F. and J. M. Rabasse (1979) : Effect of conservation of the aphid parasite *Aphidius matricariae* Hal. (Hymenoptera: Aphidiidae) on adult longevity, mortality and emergence. *Annals of Agric. Sc., Moshtohor*, **11**, 59-73.
- 61) Singh, R. and M. Srivastava (1988) : Effect of cold storage of *Aphis craccivora* Koch subjected to different pre-storage temperature on per cent emergence of *Trioxys indicus* Subba Rao & Sharma. *Insect Sci. Applic.*, **9**, 655-657.
- 62) Solomon, M. E. (1949) : The natural control of animal population. *J. Anim. Ecol.*, **18**, 1-35.
- 63) Starý, P. (1975) : A checklist of the Far East Asian Aphidiidae (Hymenoptera). *Beitr. Entomol.*, **25**, 53-76.
- 64) van Steenis, M. J. (1993) : Intrinsic rate of increase of *Aphidius colemani* Vier. (Hym., Braconidae) , a parasitoid of *Aphis gossypii* Glov. (Hom., Aphididae) , at different temperatures. *J. Appl. Entomol.*, **116**, 192-198.
- 65) Storeck, A., G. M. Poppy, H. F. van Emden and W. Powell (2000) : The role of plant chemical cues in determining host acceptance in the generalist aphid parasitoid *Aphidius colemani*. *Entomol. Exp. Appl.*, **97**, 41-46.
- 66) 高田 肇 (1975) : 2種の寄生蜂 *Diaeretiella rapae* (M'Intosh) と *Aphidius gifuensis* Ashmead のモモアカアブラムシに対する選好性の差異. 応動昆., **19**, 260-266.
- 67) 高田 肇 (1976) 十字花蔬菜, 馬鈴薯のアブラムシおよびその寄生蜂に関する研究: I. アブラムシの寄生蜂群構成. 昆虫, **44**, 234-253.
- 68) 高田 肇 (1983) : モモアカアブラムシの生活環と寄主植物: クローンレベルの動きに注目して. ポテトサイエンス, **3**, 57-64.
- 69) Takada, H. (1986) : Genotypic composition and insecticide resistance of Japanese populations of *Myzus persicae* (Sulzer) (Hom., Aphididae). *J. Appl. Entomol.*, **102**, 19-38.
- 70) 高田 肇 (1991) : モモアカアブラムシ. 湯島 健・釜野静也・玉木佳男 編, 昆虫の飼育法, 71-74, 日本植物防疫協会, 東京.
- 71) Takada, H. (1992) : Aphid parasitoids as biological control agents of vector aphids of papaya ring spot virus and banana bunchy top virus. *FFTC Tech. Bull.*, **132**, 1-11.
- 72) Takada, H. (2002) : Parasitoids (Hymenoptera: Braconidae, Aphidiinae; Aphelinidae) of four principal pest aphids (Homoptera: Aphididae) on greenhouse vegetable crops in Japan. *Appl. Entomol. Zool.*, **37**, 237-249.
- 73) 高田 肇・竹中洋治 (1982) : タバコを寄主とするモモアカアブラムシの寄生蜂群構成. 昆虫, **50**, 556-568.
- 74) 高田 肇・巽えり子 (2002) アブラムシの一次および二次捕食寄生バチ. 植物防疫, **56**, 415-420.
- 75) 高橋英生 (2004) 環境管理. 農山漁村文化協会 編, 野菜園芸大百科 (第2版) 7 ピーマン, トウモロコシ, オクラ, 174-176, 農山漁村文化協会, 東京.
- 76) Tang, Y. and Z. Chen (1984) : Preliminary study on the biology and the ecology of *Aphidius gifuensis* (Ashmead). *J. Fujian Agr. College*, **13** (2), 119-125 (in Chinese with English summary).
- 77) Tauber, M. J., C. A. Tauber and S. Masaki (1986) : Seasonal Adaptations of Insects. Oxford University Press, Oxford.
- 78) van Tol, S. and M. J. van Steenis (1994) : Host preference and host suitability for *Aphidius matricariae* Hal. and *A. colemani* Vier. (Hym.: Braconidae) , parasitizing *Aphis gossypii* Glov. and *Myzus persicae* Sulz. (Hom.: Aphididae). *Med. Fac. Landbouww. Univ. Gent*, **59/2 a**, 273-279.
- 79) 白谷三郎 (1991) : ハウス病. 日農医誌, **40** (特別号), 36-37.
- 80) Wang, W. and Q. Li (1996) : Effect of host density on reproductive rate of *Aphidius gifuensis*. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, **11** (4), 52-57 (in Chinese with English summary).
- 81) 山本雅則 (1997) : 施設栽培ナスのアブラムシ類の寄生蜂群に関する研究. 滋賀農試特研報, **20**, 1-70.
- 82) 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.
- 83) 矢野栄二 (2003) : 天敵: 生態と利用技術. 養賢堂, 東京.
- 84) 安松京三 (1970) : 天敵: 生物的防除へのアプローチ. 日本放送協会, 東京.

Practical Evaluation of an Indigenous Aphid Parasitoid,
Aphidius gifuensis (Hymenoptera, Braconidae) as a
Biological Control Agent against Green Peach Aphid,
Myzus persicae (Heteroptera, Aphididae) and Its
Effective Applications in Greenhouses

Izumi Ohta

Summary

Apterous viviparous nymphs and adults of *M. persicae* on qing-geng-cai were kept at constant temperatures of 15, 20, 25 and 30°C under a 16 L-8 D photoperiod. Mean developmental times from first instar to adult emergence decreased as the temperature increased. Survival rates were over 90% at all temperatures and showed no significant difference between each temperature. The lower developmental threshold and total effective temperature were calculated as 5.6°C and 113.1 degree-days. The adult fertility and longevity reached a maximum at 20°C, but the intrinsic rate of population increase was highest as 0.420 at 25°C.

Micro-dissection of *M. persicae* attacked by *A. gifuensis* showed that all parasitized aphids contained one parasite progeny in their bodies; no superparasitism occurred by single attacking. The rate of successful parasitization was 84.9%. The survival rates and developmental times of immature *A. gifuensis* were examined at four constant rearing temperatures of 15, 20, 25 and 30°C with a photoperiod of 16 L-8 D. The survival rates from egg to adult emergence were more than 80% at all temperatures tested. The developmental times decreased with increasing temperatures in both sexes, except that the periods at 30°C were slightly longer than those at 25°C. The lower developmental threshold and total effective temperature were 5.5°C and 188.6 degree-days for the females, and 5.7°C and 181.0 degree-days for the males. Single female parasitoids of *A. gifuensis* produced 529.0 progenies at 20°C and 536.7 at 25°C during their life spans. Longevities were 12.8 days and 12.3 days at 20°C and 25°C, respectively. The number of eggs laid by the female wasps peaked on the first days after the emergence at the two temperatures tested, indicating their proovigenic status. Intrinsic rates of natural increase for *A. gifuensis* were calculated as 0.350 at 20°C and 0.462 at 25°C. These values are higher than those for *M. persicae*, suggesting a significant character of *A. gifuensis* that indicates its great potential for use as a biological control agent for *M. persicae*.

Developmental responses of *A. gifuensis* were compared when incubated at a low or high temperature and a short or long day length. Host aphid mummification and parasitoid emergence from mummies were observed with very high probabilities of over 80% and 90%, respectively, at all treatments. Sex ratios of emerged parasitoids remained constant at approximately 0.6. Developmental periods of parasitoid progenies reared with a short day length (10 D-14 L) were approximately equal to those with a long day length (14 L-10 D) for both sexes, although the duration from mummy to emergence at 15°C significantly differed between short and long day lengths. These results were summarized as *A. gifuensis* completed development under low temperature and short day length conditions of 15°C and 10 L-14 D instead of entering larval diapause as mummies. I thus

Accepted: August 5, 2011

Vegetable Pest Management and Postharvest Division
360 Kusawa, Ano, Tsu, Mie, 514-2392 Japan

conclude that *A. gifuensis* populations introduced into domestic greenhouses can increase and work effectively as biological control agents against pest aphids even during the hibernal season with low temperature and short day length conditions.

A. gifuensis were released on qing-geng-cai plants infested with *M. persicae* in greenhouses. The tests were conducted from September to October 2000 (Trial 1), from November to December 2000 (Trial 2) and from April to May 2001 (Trial 3). Three, six and one adult aphids per plant were put on the first days of trials 1, 2 and 3, respectively. Each trial consisted of three treatments: four-time releases of one female and one male adult parasitoid per plant with 7-day intervals in Greenhouse A, four-time releases of one female and one male per plant with 3-day intervals in Greenhouse B and a single release of four females and four males per plant in Greenhouse C. In Trial 1, aphid populations were suppressed in all of the greenhouses. Trial 2 resulted in an exponential increase of the aphid populations in all of the greenhouses. In Trial 3, the aphid population was controlled only in Greenhouse B. These results suggest that *A. gifuensis* should be released in greenhouses to control *M. persicae* at the right aphid-density: *A. gifuensis* introduction at high population density of *M. persicae* may result in failure of aphid control. And a multiple releasing of parasitoid wasps with an interval of days should be more effective to suppress aphid population increase than the single releasing.

A. gifuensis in *M. persicae* mummies were placed under low temperatures to evaluate cold storage capability of the parasitoids. Adult emergence rates of parasitoids from aphid mummies kept at 7.6°C, 10.1°C or 12.5°C during 7 days were all approximately 80%. The emergence rate was 59.8% at 4.6°C. On the other hand, successful emergence of *A. gifuensis* from mummies exposed to low temperatures during 14 and 21 days were rarely observed with emergence rates of less than 10%. I conclude that *M. persicae* mummies with *A. gifuensis* progenies can be stored under low temperatures to maximum of a week.

Six species of legume or cereal-feeding aphids, *Acyrtosiphon pisum*, *Aphis craccivora*, *Megoura crassicauda*, *Rhopalosiphum maidis*, *Rhopalosiphum padi* and *Sitobion akebiae* were tested as candidates for alternative hosts of *A. gifuensis*. *A. pisum*, *R. maidis* and *S. akebiae* were accepted by *A. gifuensis*. *S. akebiae* showed the most successful parasitism by *A. gifuensis* among the six aphid species tested, with a mummification rate of 71.7% and emergence rate of 96.7%. No parasitism was observed on *R. padi*, an alternative host available in the banker-plant system with an exotic parasitic wasp, *Aphidius colemani*. *A. gifuensis* females reared on *S. akebiae* had the same developmental period and body size as those reared on *M. persicae*, with no significant differences. They also demonstrated successful parasitic performance in *M. persicae*. These results suggest that *S. akebiae* should be a promising alternative host for use in a banker-plant system with *A. gifuensis*.