

# 生物的防除に必要な天敵数の求め方

株式会社ペコ IPM パイロット <sup>うら</sup> 浦 <sup>の</sup> 野 <sup>さとる</sup> 知

## はじめに

生物的防除において、「天敵を撒く。害虫が減る。」あるいは「土着天敵が発生したが、害虫は減らない。」というような出来事は目に見え、計測することができる。しかし、その背後にあるメカニズムは目に見えない。天敵による害虫の減少の背後にあるメカニズムは何であろうか。メカニズムを知れば、個体群管理の定量的指針を立てることができる。また、常と異なる個体群の挙動を解釈したり、予測のずれを修正したりすることができる。

URANO et al. (2011) は、生物的防除のメカニズムベースモデルを作成し、それを用いて害虫個体群抑制に必要な天敵数の求め方を立てた。以下に概説するこの研究は、生物系特定産業技術研究支援センターによる生物系産業創出のための異分野融合研究支援事業「天敵の行動制御による中山間地（京都府美山町）における減農薬害虫防除技術の開発」の支援を受けた研究グループの成果である。

## I 天敵による害虫個体群抑制の理論

害虫個体群が減るメカニズムは、一定期間における害虫の増加量を天敵の捕食量が上回ることである。

$$\text{害虫増加量} < \text{天敵による捕食量} \quad (1)$$

また、害虫個体群が少なくとも増えないメカニズムは、

$$\text{害虫増加量} \leq \text{天敵による捕食量} \quad (2)$$

と表わせる。

このメカニズム理解に基づき、害虫個体群抑制に必要な捕食性天敵の数を算出する方法が立てられた(浦野ら, 2003; URANO et al., 2003)。一方、寄生蜂をはじめとする捕食寄生性天敵による生物的防除においても、害虫が減る原理、あるいは増えない原理は式(1)(2)と同様である。この原理は、どのような形で目に見える事象に表れているだろうか。この問題をテーマとする研究は、雨よけビニールハウス栽培のミズナ (*Brassica rapa* Linnaeus) を加害するコナガ (*Plutella xylostella* Linnaeus) とその幼虫寄生蜂コナガサムライコマユバチ

(*Cotesia vestalis* Haliday) の3者系を想定して行われた。まず、式(1)(2)の左辺の害虫増加量は、世代あたり増殖率(増加倍数)  $R_0$  として計測できる。 $R_0$  は、個体群生態学で純増殖率と呼ばれる特性量である。では、世代あたり増殖率  $R_0$  が、例えば4倍であるとき、どのくらいの寄生率があれば害虫個体群を抑制できるだろうか。

ここに、100頭のコナガ幼虫がいるとする。これらが羽化し産卵し、ふ化・発育して、1世代時間で400頭になるとする ( $R_0 = 4$ ; 図-1A)。もし、寄生により、1世代後のコナガ幼虫が、400頭でなく100頭になるならば、害虫は抑制された(増えなかった)と言える。世代あたり4倍に増える生物が1世代後100頭になるとしたら、もとの個体数は25頭であったはずだ。つまり、 $R_0 = 4$  のとき害虫個体群が増えないために必要な寄生率は75%であると言える (図-1B)。

以上を、考察のプロセスごとに一般化して表わす。

1. 寄生のないとき、害虫の第2世代の個体数は第1世代の  $R_0$  倍になる。

$$G_2 = R_0 G_1 \quad (3)$$

ここで、 $G_1$ ,  $G_2$  はそれぞれ第1世代と第2世代の害虫個体数である。

2. 寄生率  $p$  で寄生のあるとき、第1世代個体数のうち、 $1-p$  の割合で生き残った個体が  $R_0$  倍に増殖して第2世代となる。

$$G_2 = R_0 (1-p) G_1 \quad (4)$$

3. 式(4)を変形して、

$$R_0 (1-p) = \frac{G_2}{G_1} \quad (5)$$

を得る。

4. 第1世代から第2世代にかけて、害虫個体群が増えないならば、 $G_2 = G_1$ , すなわち  $\frac{G_2}{G_1} = 1$  となる。したがって、式(5)より、

$$R_0 (1-p) = 1 \quad (6)$$

5. 式(6)を変形して、第2世代が第1世代と変わらないようになる寄生率は、

$$p = 1 - \frac{1}{R_0} \quad (7)$$

6. したがって、第1世代から第2世代にかけて、害虫が増えないための条件は、

Prediction of the Number of Parasitoids that should be Released to Control Pest Insects. By Satoru URANO

(キーワード: ミズナ, コナガ, コナガサムライコマユバチ, 数理モデル, 捕食寄生性天敵, 放飼天敵数)

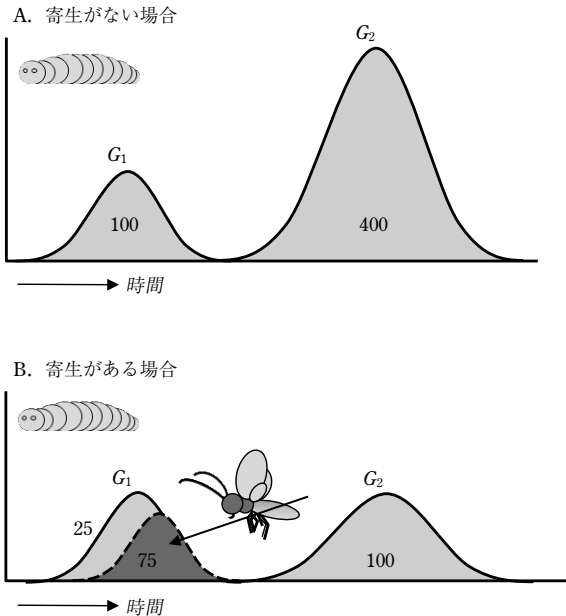


図-1 捕食寄生性天敵による害虫個体群抑制のメカニズム  
 G<sub>1</sub>: 害虫第1世代. G<sub>2</sub>: 害虫第2世代. 下段の点線で囲まれた濃い灰色部分は、捕食寄生された個体数.  
 A: 純増殖率 ( $R_0$ ) が4倍のとき、第1世代の幼虫が100頭であれば、第2世代の幼虫は400頭になる。  
 B: 純増殖率 ( $R_0$ ) が4倍で、寄生率が0.75であれば、第1世代の幼虫100頭は、第2世代でも100頭になる。

$$\hat{p} \geq 1 - \frac{1}{R_0} \quad (8)$$

となった。

これが、必要寄生率の理論式である。

一般に、栽培環境における害虫の純増殖率は、種の生物的特性として実験室で計測されたものより低い。そこで、式(8)に代入する純増殖率は、適用対象となる作目・作型における実測値であることが望ましい。生物防除を計画している地域における実測値がなければ、似た作目・作型における害虫増殖率を用いる。実圃場における害虫増殖率のデータを複数採取すれば、大きくばらつくに違いない。一定の危険率のもとに信頼区間を設定すれば、それらは  $R_0 \pm \epsilon$  ( $\epsilon$  はギリシア文字 “イプシロン”) の形で表される。 $R_0$  がばらつき  $\epsilon$  を伴うとき、 $\hat{p}$  のばらつきは、誤差伝搬式を用いて、

$$\hat{p} \geq 1 - \frac{1}{R_0} \pm \frac{\epsilon}{R_0^2} \quad (9)$$

となる。

例えば、危険率5%であれば、 $\epsilon = 1.96 \times \text{S. E.}$  (S. E. は標準誤差) である。いま、知りたいのは、害虫の世

代間増殖率が様々にばらついても、高い確率で生物防除に成功するような寄生率であるから、信頼区間の上限をとって

$$\hat{p} \geq 1 - \frac{1}{R_0} + \frac{\epsilon}{R_0^2} \quad (10)$$

これが、データに適用する際の必要寄生率の式である。

必要寄生率を用いて、必要天敵数を算出するには、まず抑制対象となる害虫個体群の大きさを知らねばならない。それは、一定面積の圃場における要防除密度時の害虫総個体数である。要防除密度時の害虫個体群が抑制できれば、低密度で侵入後、増殖しつつある、それ以下の密度の個体群も抑制可能と考える。一定面積の圃場にある作物の株数を  $C$ 、株当たり要防除密度を  $N_{ct}$  とおくと、要防除密度時の害虫総個体数は  $CN_{ct}$  である。このうち、生物防除が成功するために、寄生されなければならない個体数は、必要寄生率を乗じて、 $\hat{p}CN_{ct}$  と表される。

次に、 $\hat{p}CN_{ct}$  頭の害虫に寄生するために、何頭の寄生蜂が必要であろうか。天敵寄生蜂の日当たり産卵数を  $V$ 、寄生効率を  $a$ 、日当たり産卵数  $V$  が持続する期間を  $L$  (日) とすると、1頭の寄生蜂に期待される寄生数は、これらを乗じた  $VaL$  で求められる (ただし、天敵は単寄生蜂で、互いに重複寄生はしないと仮定する。また、寄主である害虫の被寄生可能期間は  $L$  日より長いものとする)。生物防除に必要な寄生蜂数を  $P_n$  と置くと、

$$P_n = \frac{\hat{p}CN_{ct}}{VaL} \quad (11)$$

となる。

## II 生物防除に必要な天敵数の事前評価

上記の理論を、京都府の中山間地におけるミズナ・コナガ・コナガサマライコマユバチ系に適用した。以下、コナガサマライコマユバチの生物的特性量と放飼数はすべて雌のものである。

対象地域の典型的なミズナ雨よけハウスは、約  $150 \text{ m}^2$  で、約 9,000 株 ( $C$ ) のミズナを植栽している。要防除密度は、聞き取り調査によりコナガ幼虫 0.05 頭/株 ( $N_{ct}$ ) と定めた (浦野, 未発表)。この地域におけるコナガの増殖率について事前の調査がなかったので、1996 ~ 2002 年にかけて実施された、岩手県の露地キャベツ圃場におけるコナガ個体数調査 (Noda et al., 2000; 高篠, 未発表データ) をもとに、平均世代密度法 (久野, 1968) を用いて、純増殖率を算定した。5年間の純増殖率は、 $R_0 = 4.45 \pm 1.33$  (95% 信頼区間) であった。式(10)に代入したところ、必要寄生率  $\hat{p}$  は 84.2% と推定

された。室内実験により、コナガサムライコマユバチの日当たり産卵数 ( $V$ ) は、24 (蜜を給餌した場合) または 9 (水のみを与えた場合) であった (MITSUNAGA et al., 2004)。ハチミツを給餌した場合、成虫寿命は羽化後 7 日以上であったが、利用できる蜂の齢が不明であるため、産卵持続期間は約 1/2 の 3 日間とした。一方、水のみを与えた場合の産卵持続期間は 1 日であった (MITSUNAGA et al., 2004)。また、コマツナ 20 株にコナガ幼虫 1 頭接種した際の寄生効率 ( $a$ ) は、0.8 であった (光永, 未発表)。コナガサムライコマユバチが寄生できるコナガの齢期は 2 齢および 3 齢であり、2 ~ 3 齢期の発育期間は 20℃ 条件下で 6 日間である (KAWAGUCHI and TANAKA, 1999)。以上を用いて、事前評価を行った結果を表-1 に示す。

抑制の対象となる 1 ハウス内のコナガ個体群は 450 頭 (0.05 頭/株  $\times$  9,000 株) であった。最大 450 頭のコナガを抑制するためには、その 84.2% すなわち 378 頭に寄生しなければならない。蜜給餌した場合は、蜂 1 頭が生涯に寄生できる寄主は 57.6 頭であるのに対して、蜜給餌のない場合はわずか 7.2 頭であった。想定した地域において典型的な 150 m<sup>2</sup> の雨よけハウスでは、蜜給餌のある場合の必要天敵数 6.6 頭と驚くほど少ない数値が推定された (表-1)。

### III 生物的防除に必要な天敵数の事後評価

以上のように、農家圃場における害虫の増加率と実験室内での天敵の生物的特性に基づいて、生物的防除に必要な寄生率、必要な天敵 (寄生蜂) 数を事前に求めることができた。しかし、なお、この頭数を農家圃場で生物的防除を成功させるために必要十分な天敵数とするには、二つの点で不確実と考えられた。第一は、実用栽培レベルの規模を持つビニールハウス内で、コナガサムライコマユバチが蜜源を探索し利用できるかどうか不明であること。第二は、式 (10) に用いられた天敵の能力、

特に寄生効率  $a$  が、実用栽培レベルの広いビニールハウス内でも同様に発揮されるかどうか不明であることである。

そこで、上記の事前評価に基づいて、実用栽培レベルの圃場実験が安部ら (2007) によって行われた。目的は、生物的防除に必要な十分な天敵数を求めることである。実験では、1 回の放飼実験を終えるごとに実験結果を事後評価し、事後評価に基づいて次の実験における放飼数を求めた。これは、フィードバック管理と呼ばれる、個体群管理手法を模している。すなわち、個体群を制御しようとする操作を実験とみなして、その結果を解析し、解析結果に基づいて次の操作を改善する。この一連の手順を繰り返すことで、適当な管理法 (ここでは放飼天敵数) に近づこうとするものである。

実験は、京都府綾部市青野にある近畿中国四国農業研究センターの雨よけハウス (120 m<sup>2</sup>) 2 棟を用い、2004 ~ 05 年にかけて 3 回行われた。雨よけハウス 2 棟を天敵放飼区と無放飼区とし、それぞれコマツナ計約 4,000 株を植栽した (約 2,000 株を 16 ~ 25 日ずらして 2 回播種した)。コナガおよびコナガサムライコマユバチの移出入を防ぐため、両ハウスの開口部に防虫ネット (0.6 mm 目合い) を展張した。寄生蜂の餌となる蜜源として、蒸留水で 50% 希釈したハチミツを黄色のスポンジに浸み込ませたものを六つ、それぞれ地上 50 cm に吊るされた黄色の台の上に設置した。無放飼区も同様に蜜源を設置した。両ハウスそれぞれにおいて、1 回目播種のコマツナ生育初期に、要防除密度 0.05 頭/株に等しくなるよう、コナガ 2 齢幼虫を 20 株に 1 頭の割合で接種した。天敵放飼区では、コナガ幼虫接種の 1 ~ 3 日後にコナガサムライコマユバチを放飼した。週 1 回、無作為抽出したコマツナ 150 ~ 300 株上のコナガを計数し、株あたり密度を求めたうえで、ハウス内のコマツナの総株数を乗じて総個体数を推定した。計数したコナガは捕獲しなかった。純増殖率の算出のため、試験ハウス内の

表-1 コナガ個体群の生物的防除に必要なコナガサムライコマユバチ数の事前評価  
要防除密度をコナガ幼虫 0.05 頭/株とした。

| 給餌   | 必要寄生率 <sup>1</sup> (%) | 寄生蜂 1 頭に期待される寄生数 | 必要寄生蜂数 <sup>2</sup>                           |                                        | 放飼比率 (寄生蜂: 寄主) |
|------|------------------------|------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------|----------------|
|      |                        |                  | 典型的な雨よけハウス <sup>3</sup> (150 m <sup>2</sup> ) | 実験区 <sup>4</sup> (120 m <sup>2</sup> ) |                |
| なし   | 84.2                   | 7.2              | 52.6                                          | 13.8                                   | 1 : 8.6        |
| ハチミツ | 84.2                   | 57.6             | 6.6                                           | 1.7                                    | 1 : 68         |

<sup>1</sup> 本文式 (10) より導出。危険率 5%。<sup>2</sup> 本文式 (11) より導出。<sup>3</sup> 9,000 株。<sup>4</sup> 天敵放飼区・無放飼区ともに、約 2,000 株を植栽し、のちにそれぞれ約 2,000 株を追加した。

地上 20 cm に簡易データロガーを設置し、1 時間ごとの気温を記録して、有効積算温度による世代区分に用いた。コナガの発育零点は 8.5℃、必要発育積算温度は 274.0 日度（山田・川崎，1983）とした。久野（1968）の方法を用いて、各実験、各区におけるコナガの平均世代個体数を求めた。各実験において、放飼区と無放飼区の増殖率の差を寄生によるものと仮定して、放飼区の寄生率を推定した。結果を表-2 に示す。

実験 I では、放飼区においてコナガサムライコマユバチ 15 頭を放飼した。コナガの純増殖率は、無放飼区で 37 倍、放飼区で 1.0 倍であった。放飼区における推定寄生率は 97.0% であった。無放飼区の  $R_0$  は、事前評価 ( $R_0 = 4.45 \pm 1.33$ ) より高かったが、放飼区では結果的にコナガ個体群の抑制に成功した。この実験の放飼数は、上述の不確実条件を考慮して、事前評価（表-1）より高く設定していたので、実験結果の事後評価と事前評価を見くらべた上で、次の実験では、より事前評価に近い放飼頭数を採用した。

実験 II では、放飼区においてコナガサムライコマユバチ 10 頭を放飼した。コナガの純増殖率は、無放飼区で 5.4 倍、放飼区で 0.13 倍であった。放飼区における推定寄生率は 95.7% であった。放飼した寄生蜂数 10 頭は、蜜給餌のない場合の事前評価数にほぼ相当し、蜜給餌のある場合の事前評価の 6.3 倍であった。実験結果の事後評価と事前評価を見くらべて、次の実験では、より事前評価に近い放飼頭数を採用した。

実験 III では、放飼区においてコナガサムライコマユバチ 5 頭を放飼した。コナガの純増殖率は、無放飼区で 9.2 倍、放飼区で 0.4 倍であった。放飼区における推定寄生率は 96.0% であった。放飼した寄生蜂数 5 頭は、蜜給餌のない場合の事前評価数の（13.8 頭；表-1 参照）

の半分以下しかなく、もしコナガサムライコマユバチが蜜を利用していないならば、コナガ個体群を抑制できなかったと考えられる。一方、この放飼数は、蜜給餌のある場合の事前評価の 3 倍であった。これにより、寄生蜂は、実用栽培レベルの雨よけハウス内でも蜜を探索・利用できること、また、式（11）に当てはめることにより探索効率  $a$  が少なくとも 0.25 以上であることが示唆された。

実験 III の結果から、害虫：天敵 = 1：22、典型的圃場の 9,000 株のミズナ植物群では少なくとも 20 頭のコナガサムライコマユバチがいれば、コナガ個体群を要防除密度以下に抑えることができると考えられた。この実験結果は、その後、天敵誘引剤を現地の雨よけハウスに設置する実験において、ハウス内に誘引すべき土着のコナガサムライコマユバチ数の目標値として用いられ、コナガ防除法の確立をサポートしている。

## おわりに

捕食性天敵による害虫個体群抑制の理論（URANO et al., 2003；浦野ら，2003）と本稿で紹介した必要寄生率の理論（URANO et al., 2011）によってマクロ天敵による生物防除のメカニズムベースモデルが整備され、天敵放飼数の事前評価が可能となった。

害虫個体群抑制に必要な天敵数の事前評価値を求めるとき、必要とされているのは、変動の大きい圃場害虫個体群を、失敗の危険を少なく管理するための十分な天敵数である。このため、「最悪の場合でもこれ以上ではない」というリスクの上限をとる。そこで、パラメータの値を指定する際、害虫の増殖パワーは有り得る範囲で大きく見積り、天敵の捕食パワーは必ず達成できるよう低く仮定する。これらの値とモデルが、ある生産現場を対象とした生物防除について、例えば、「この数の天敵が存在すれば、このような仕組みで害虫は増えない」という仮説を構成することになる。生物防除に限らず、害虫個体群を管理する際には、不確かであっても管理失敗のリスクを大きく見積もる仮説を採用し、推定されたリスクの上限を許容以下に下げる管理努力をすることが推奨される。これは害虫管理における予防原則と言えるものである。

得られた事前評価値は、順応的管理法に従って運用することを提案したい。順応的管理（Adaptive management）とは、個体群を管理する際に生ずる不確実さに対処するための方法である（SHEA et al., 1998）。その主なアイデアは、管理手法を、管理のためだけでなく、系を支配しているメカニズムについて学ぶために用いるこ

表-2 寄生蜂コナガサムライコマユバチ放飼によるコナガ個体群抑制実験

| 実験  | 区     | 接種幼虫数<br>(2 齢) | 放飼<br>寄生蜂数<br>(雌) | コナガ推定個体数 <sup>1</sup> |       |                |
|-----|-------|----------------|-------------------|-----------------------|-------|----------------|
|     |       |                |                   | $N_0$                 | $N_1$ | $N_2$          |
| I   | 無放飼区  | 96             | 0                 | 2.6                   | 97    | —              |
|     | 天敵放飼区 | 96             | 15                | 26                    | 27    | —              |
| II  | 無放飼区  | 111            | 0                 | 14                    | 75    | 91             |
|     | 天敵放飼区 | 111            | 10                | 50                    | 6.3   | 0              |
| III | 無放飼区  | 111            | 0                 | 32                    | 295   | 0 <sup>2</sup> |
|     | 天敵放飼区 | 111            | 5                 | 65                    | 26    | 6 <sup>2</sup> |

<sup>1</sup> 1 世代あたりコナガ 3 ～ 4 齢幼虫数（久野，1968；平均世代密度法による）。 $N_0$ ；接種世代， $N_1$ ；第 1 世代， $N_2$ ；第 2 世代。

<sup>2</sup> 第 2 世代のコナガ 3 ～ 4 齢幼虫が全て出現する前に寄生植物を収穫し実験を終了。

とである(順応的学習)。本稿で紹介した圃場実験では、寄生蜂を放飼して害虫防除を行なう一方で、害虫の増殖率、蜂の蜜利用の有無、広い空間における探索効率などを調べた。また、順応的管理では、管理を通して学んだことに基づいて仮説を修正し、新たな管理計画を立てる(フィードバック管理)。今回の圃場実験では、1回の実験結果の解析により、次の実験の天敵放飼数を決めた。このとき、管理を可能にする仕組みに関する仮説と数理モデルによる解析は直感的に納得できることが大切であるが(松田, 2000)、本研究では、式(8)と式(11)が、目に見えない蜂の行動(寄生した数)と目に見える害虫抑制の成功(計測した害虫個体群の変動)の関係の理解をよく助けてくれた。

順応的管理は、従来、生産現場で行われてきた継続的

改善に、科学的根拠を与える方法と言える。メカニズム理解に基づく数理モデルは、天敵を用いた作物生産の順応的管理に必須の道具を提供するものである。

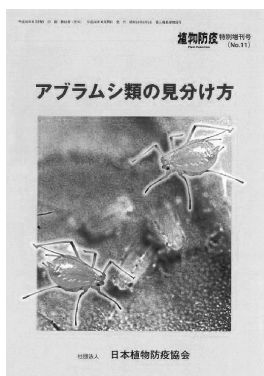
### 引用文献

- 1) 安部順一郎ら(2007): 近畿中国四国研究センター研報 6: 125 ~ 132.
- 2) KAWAGUCHI, M. and T. TANAKA (1999): Appl. Entmol. Zool. 34: 213 ~ 221.
- 3) 久野英二(1968): 九州農試彙報 14: 131 ~ 246.
- 4) 松田裕之(2000): 環境生態学序説, 共立出版, 東京, p. 123 ~ 124.
- 5) MITSUNAGA, T. et al. (2004): Appl. Entmol. Zool. 39: 691 ~ 697.
- 6) NODA, T. et al. (2000): Appl. Entmol. Zool. 35: 87 ~ 92.
- 7) SHEA, K. et al. (1998): TREE 13: 371 ~ 375.
- 8) URANO, S. et al. (2003): Population Ecology 45: 97 ~ 103.
- 9) 浦野 知ら(2003): 植物防疫 61: 699 ~ 703.
- 10) URANO, S. et al. (2011): Journal of Plant Interactions 6: 151 ~ 154.
- 11) 山田偉雄・川崎健次(1983): 応動昆 27: 17 ~ 21.

## 植物防疫特別増刊号 No.11 アブラムシ類の見分け方

社団法人 日本植物防疫協会 編 B5判 103ページ 口絵カラー  
価格 2,520円(本体2,400円+税) 送料80円(メール便)

◆ 農作物を加害するアブラムシ類の見分け方を詳しく解説。薬剤感受性の検定法も掲載。



- |                         |         |
|-------------------------|---------|
| § 1. 農作物のアブラムシの見分け方<総説> | (宗林 正人) |
| § 2. 水稻・畑作物のアブラムシ類      | (鳥倉 英徳) |
| § 3. 野菜のアブラムシ類          | (高橋 滋)  |
| § 4. 果樹のアブラムシ類          | (宗林 正人) |
| § 5. 花きのアブラムシ類          | (木村 裕)  |
| § 6. 緑化樹木のアブラムシ類        | (宗林 正人) |
| § 7. 主要アブラムシの有翅虫による見分け方 | (杉本俊一郎) |

### 付録

- |                        |         |
|------------------------|---------|
| 1. 果樹のアブラムシの見分け方       | (宮崎 昌久) |
| 2. 「果樹のアブラムシの見分け方」への補足 | (宮崎 昌久) |
| 3. 薬剤感受性検定法            | (西東 力)  |

お問い合わせとご注文は

社団法人 日本植物防疫協会 支援事業部

郵便振替口座 00110-7-177867

ホームページ <http://www.jpapa.or.jp/>

〒114-0015 東京都北区中里 2-28-10

TEL 03-5980-2183 FAX 03-5980-6753

メール: [order@jpapa.or.jp](mailto:order@jpapa.or.jp)