



生物的防除部会ニュース No. 85

2026年1月22日発行

目 次

【講演要旨】

- マメシクイガ成虫の行動リズムに及ぼす光の影響と光照射による防除効果
齊藤美樹 2
- 害虫の細胞内共生微生物をターゲットとした害虫防除について
大畑裕太 7
- バクテリオファージによる難防除害虫の防除 – 青枯革命を例として –
原島俊明 17

【お知らせ】

2025年度第2回講演会のお知らせ 24

※会場および Zoom ウェビナーによるハイブリッド形式

日時：2026年2月26日 13:00~17:10

会場：東京農業大学 国際センター

演題：

1. 八瀬順也 氏（兵庫県森林林業技術センター）・高橋國人 氏(兵庫県養蜂振興会)
「天敵寄生蜂(ヨーロッパトビチビアメバチ)で蘇ったレンゲ」
2. 對馬誠也 氏（圃場診断システム推進機構）
「新土壌病害管理「ハソディム」における輪作・おとり植物等の活用法」
3. 和田美由紀 氏（雪印種苗株）
「緑肥作物を活用した線虫および土壌病害の防除方法について」
4. 酒井啓充 氏（農研機構 越境性・高リスク病害虫対策グループ）
「テンサイシストセンチュウの生態と耕種的防除」

[講演要旨]

マメシンクイガ成虫の行動リズムに及ぼす光の影響と光照射による防除効果

齊藤美樹*

北海道立総合研究機構中央農業試験場

*e-mail: saito-miki@hro.or.jp

1. はじめに

近年では有機栽培作物の需要が高まっており、慣行栽培作物と比較して有利な価格で取引されることから有機栽培に取り組む生産者が増加している。特にダイズは作業が機械化されていることから畑作の輪作体系に組み込みやすく、北海道では作付面積が増加している。しかし、煮豆などに利用される付加価値が高い粒の大きな品種のダイズにはマメシンクイガ *Leguminivora glycinivorella* (ハマキガ科)の被害が発生しやすい。本種の幼虫はダイズ莢の内部へ侵入して直接子実を食害するため、多発したときの被害が深刻である。一般栽培では殺虫剤の2回散布により被害抑制が可能であるが、有機栽培では防除手段がほとんどないことから、収量は当年の本種の発生量に大きく影響されるといっても過言ではない。

2. 光を利用した防除

殺虫剤を使用しない害虫防除技術として、昆虫が光に誘引される性質を利用したライトトラップや夜行性昆虫の活動を抑制する防蛾灯などが古くから利用されてきた。近年では様々な単波長の光を放射できるLEDが開発されたことで、昆虫の光に対する多様な応答反応が調査され、新たな害虫防除技術の開発へと展開しつつある⁽¹⁾。なかでも、光照射により昆虫の概日時計を攪乱させて繁殖を妨げる防除法は実用レベルに近づいている。昆虫の羽化、飛翔、摂食、交尾などの行動は一日の環境サイクルに応じて種ごとに一定のリズムを示す。多くの場合、行動リズムは体内にある概日時計によるものである。概日時計を同調させる最も強い因子の一つが明暗サイクルであるが、夜間に一定時間の人工照明を行うと、概日時計が攪乱され行動リズムがずれた

り、消失したりするなど様々な異常が生じることが知られている⁽²⁾。チャノコカクモンハマキ *Adoxophyes honmai*(ハマキガ科)で確認されている夜間照明による交尾行動の異常は圃場においても再現可能で、次世代密度抑制効果を実証されている⁽³⁾。以上のことから、概日時計の攪乱によって生じる様々な行動リズムの異常は、昆虫の繁殖に広く影響を与えられ、代替防除手段がなく化学農薬に頼らざるを得なかった害虫種の防除にも適用できる可能性がある。

3. マメシクイガ成虫の行動リズムに及ぼす光の影響

チャノコカクモンハマキと同じ科に属するマメシクイガについては、夕方頃にダイズの草冠上を一団となって飛翔し、それ以外の時間は葉裏で動かないことが観察されている⁽⁴⁾。なお、徐ら⁽⁵⁾や藤村⁽⁶⁾は、夕方の飛翔は交尾のためであると述べている。これらの記述から、交尾が行われる時間帯は夕方を中心とした短い時間に限られると推測される。本種の行動が概日時計により制御されているならば、チャノコカクモンハマキでの報告にあるように、夜間照明による概日時計の攪乱で繁殖に関わる行動リズムに異常を生じさせ、次世代幼虫密度を低減させられる可能性があると考えた。

本種に対する光防除法開発の前段階として、まずは成虫の行動リズムの解明を行った。温度条件 24℃、日長条件 12L:12D のインキュベータ内で、2 対の赤外線センサーからなる行動記録装置(図 1)を用い、羽化当日の供試虫の飛翔または歩行による赤外線遮断時刻を 0.1 秒単位でおよそ 5 日間記録した。

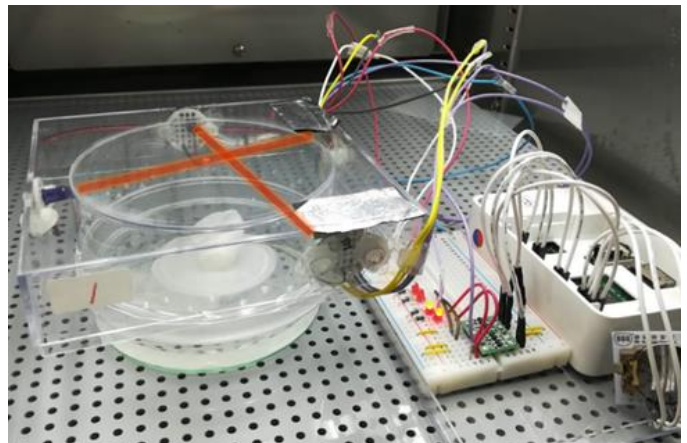


図 1 行動記録装置

マメシクイガ成虫が赤外線 LED 光(赤い線でイメージ表示)を遮った日時を 0.1 秒単位で記録。

その結果、雄雌ともに 1 日のうちにまとまった活動期と休息期が認められ、およそ 24 時間の明瞭な周期性が見いだされた(図 2 上)。なお、24 時間活動量の中央値は明期から暗期に切り替わる時刻を中心としてその前後に認められたことから、本種は日没前後に活動を開始する薄

暮性の性質を持つことが示された。0L:24D の恒暗条件下でもほぼ同様のパターンを示し、本種の行動リズムは概日時計に制御されることが明らかになった。さらに、恒暗に切り替える時刻を6時間遅くすると、その分リズムが後退した(図2中)。さらに、暗期がない24L:0Dの恒明条件下では周期性は認められなかったことから(図2下)、明期から暗期に切り替わる光の刺激が概日リズムの位相に影響を与える因子の一つであると考えられた。これらのことから、野外では夜の到来によって概日時計がセットされると推測され、人為的な光照射によって夜の到来を誤認するような条件下においては行動リズムが変化する可能性が示唆された。

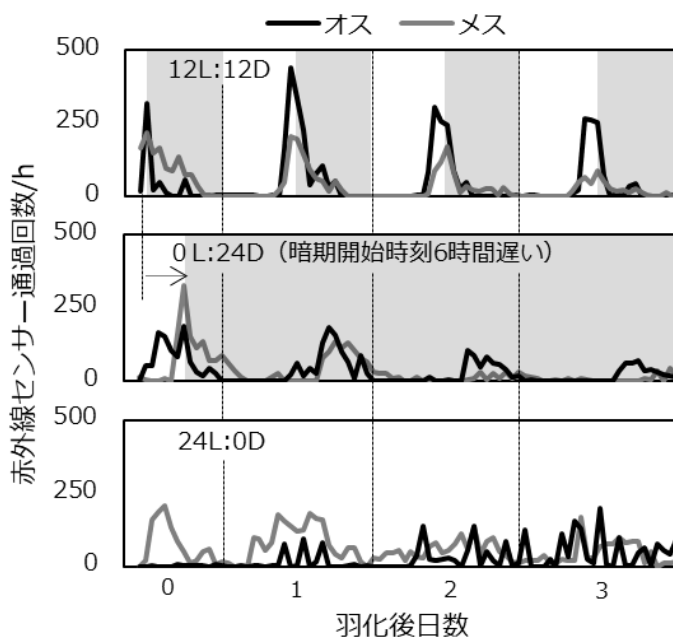


図2 日長条件が羽化直後のマメシクイガ成虫の行動に与える影響

12L:12D 条件下で羽化した成虫1頭を行動記録装置に入れ、センサー通過回数を測定。各区2~3反復(頭)の平均。網掛け部分は暗期。0L:24Dの暗期開始時刻は12L:12Dより6時間遅く設定。

4. 有効な波長の検討

実際の圃場で夜間照明を行うことで次世代の発生を低減させて被害を抑制できるか明らかにするため、2019~2023年に0.5a程度の小規模ダイズ圃場(品種「トヨムスメ」)に異なる波長のLEDを照射し有効性の検討を行った。近縁種チャノコカクモンハマキに対し効果が認められる波長(450nm;佐藤,2016)近辺の青色(ピーク波長448,450,454,458nm),より長波長の青色(ピーク波長468nm),ヤガ類などに対し活動抑制効果が認められている緑色(ピーク波長525nm)や黄色(ピーク波長585nm)の単色のLEDをそれぞれ圃場の外側の一方向から照射した。いずれのLEDも14:00~14:30の間に点灯を開始し、翌朝7:00に消灯した。照射開始時期は7月上旬~中旬,照射終了時期は本種成虫の発生終了後の8月下旬~9月下旬とした。その結果,450nm近辺の青色LED照射圃場では圃場全体の被害粒率が無処理

比 30~50 程度に抑制され、照度が高い場所ではより被害粒率が低い傾向が認められた(図 3)。一方で、長波長の青色、緑、黄色 LED 照射ではほとんど効果が認められなかった。450 nm 近辺と 468 nm の青色はヒトの目には同じような色に見えるが、この波長間でも防除効果に大きな差が認められたことから、本種に対する被害抑制効果は 450 nm 近辺の青色に特有であり、チャノコカクモンハマキでの報告とほぼ一致することが確認された。

黄色 LED を用いてヤガ類などの行動抑制を行う場合に必要な照度はおよそ 1 lx 以上で⁽⁷⁾、光強度としてはおよそ $0.01 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上であるが、本研究ではこれと同程度の光強度においてマメシクイガ被害を十分に抑制でき、また LED 直下を除いてダイズの生育にも影響がなかったことから、実用的な技術になり得ると考えた。

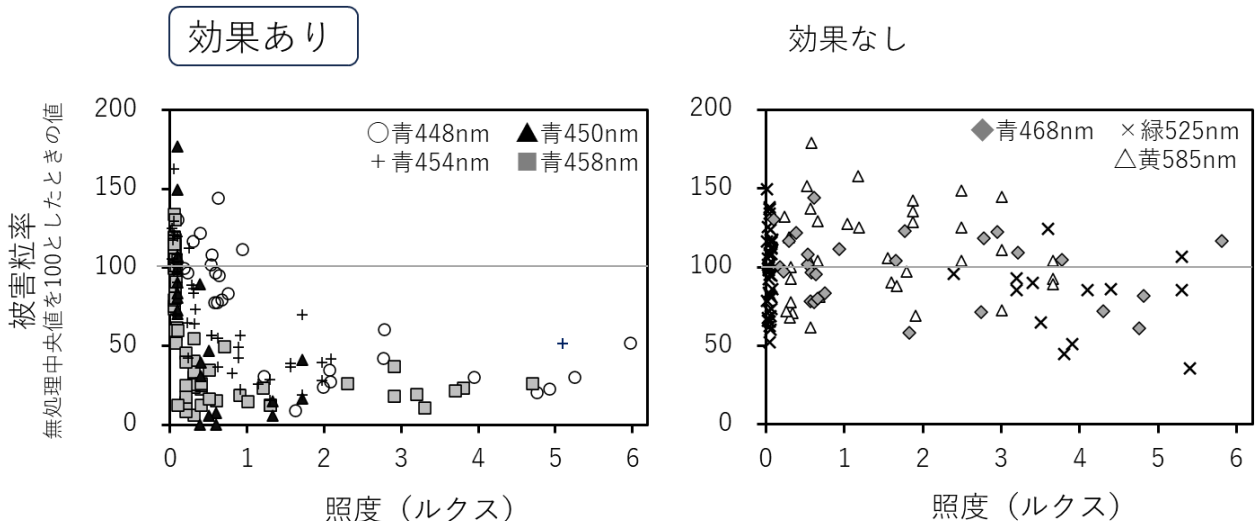


図 3 各波長の被害抑制効果

各圃場とも照射区および無処理区を 5~40 か所ずつ調査し、無処理区の被害粒率の中央値を 100 としてプロットした。

緑や黄色の波長はヒトの目で認識しやすいため、青色と同程度の照度であっても光強度はおよそ 1/8 程度である。しかし、緑や黄色の LED を照射した圃場ではこの光強度条件でもダイズの生育に顕著な影響が認められた(データ未記載)。

5. 被害抑制効果の実証と今後の展望

前項で効果の認められたピーク波長 458nm の青色 LED を用い、2a 程度のダイズ圃場全体を照射して効果を実証した。圃場の両辺または四隅から LED を照射し試験を行ったところ、供試した 4 圃場全てにおいて効果が認められた。無処理の被害粒率 10%程度の中発生条件の圃場では照射によって無処理比 30 程度まで抑制できた。ただし、小さい圃場であれば全面照射は実現可能であるが、より広大な現地圃場においては圃場全面を照射することは非常に困難で

あると考えられる。現在、圃場外縁部のみを重点的に照射する「光の障壁」によって圃場内部の被害も抑制可能であるかについて引き続き試験中である。なお、これと平行して LED 機器メーカーと協力して防除専用機種の開発中である(図 4)。将来的には現地の大規模圃場においても本技術を導入できるようにしたいと考えている。なお、本技術の実用化にあたっては、非標的昆虫や周辺環境への影響評価も今後の課題である。



図 4 防除専用機試験のようす

この写真の試験では圃場全体照射を行ったが、現在では圃場外縁部のみを照射する方法を検討中である。

6. 引用文献

- (1) Shimoda M, Honda K. Insect reactions to light and its applications to pest management. *Appl. Entomol. Zool.* 48: 413–421. 2013.
- (2) Saunders DS, Steel CGH, Vafopoulou X, Lewis RD. *Insect Clocks*. 3rd ed. Elsevier Science, Amsterdam, 576 pp; 2002.
- (3) 佐藤安志. 青色光照射の概日リズム攪乱機構を活用したチャノコカクモンハマキ制御技術の開発. *JATAFF ジャーナル* 4: 22–25. 2016.
- (4) 松本 蕃. マメシンクイガとその防除法. *農薬の進歩* 2: 27–31. 1956.
- (5) 徐 慶豊・郭 守桂・韓 玉梅・馮 真・張 榮・李 義忠. 大豆食心虫 *Leguminivora glycinivorella* (Mats.) Obraztsov 的研究. *昆虫学報* 14: 461–480. 1965.
- (6) 藤村建彦. マメシンクイガ. In 湯嶋 健ら編. *昆虫の飼育法*. 日本植物防疫協会. 東京. pp.100–102. 1991.
- (7) 内田正人. 果樹園における防蛾施設の設計法. *農業および園芸* 58: 57–63. 1983.

[講演要旨]

生物間相互作用に基づく昆虫制御の基礎的理解に向けて：細胞内共生微生物と トライコームの役割

大畑裕太*

静岡大学農学部

*e-mail: ohhata.yuhta.15@shizuoka.ac.jp

1. はじめに

農業害虫の防除は、殺虫剤を中心とした化学的防除を基盤として発展してきた。一方で、薬剤抵抗性の発達や環境負荷への懸念を背景に、化学農薬への過度な依存を避けるための多様な手法が模索され、天敵昆虫を利用した生物的防除を含む総合的害虫管理(IPM)が重要な選択肢として位置づけられてきた⁽¹⁾。現在の IPM は、化学農薬・生物農薬・天敵利用・栽培管理など複数の手段を組み合わせる害虫個体群を抑制する枠組みであり、これまでの研究と実践の積み重ねの中で、「害虫個体」への直接的な作用(致死・発育阻害・行動攪乱)を中心に洗練されてきた。近年では、これら既存手段に加えて、害虫や天敵の繁殖様式・個体群動態を左右し得る要因を IPM にどう組み込むかが、新たな検討課題として浮上している。

その一つが、昆虫の体内に共生する細胞内共生微生物である。*Wolbachia* や *Rickettsia* に代表されるこれらの細菌は、宿主細胞の内部に感染し、母から子へと垂直伝播する。その過程で、宿主の生殖様式を操作することで、自らの感染拡大を達成していることが知られている^(2,3)。この「生殖操作」は、宿主昆虫の性比や個体群動態を大きく変化させるため、害虫防除への応用可能性が指摘されてきた⁽⁴⁾。

本稿では、2025年11月17日の生物防除部会講演で紹介した三つの話題――

1. 共生微生物による寄生蜂の産雌性単為生殖メカニズムと天敵昆虫への応用可能性
2. 殺菌剤散布による共生微生物の攪乱を介した害虫防除と天敵への影響

3. インゲンマメの物理的な防御構造による害虫・天敵の選択的トラップ機能

について、研究の背景とこれまでに得られた知見を、生物防除の視点から概説する。

2. 共生微生物による産雌性単為生殖と天敵利用への展望

2.1 産雌性単為生殖とは何か

多くのハチ目昆虫は、半数倍数性(haplodiploidy)という性決定様式をもつ。すなわち、未受精卵からは半数体のオスが、受精卵からは2倍体のメスが発生する。一方、*Wolbachia* や *Rickettsia* に感染した一部の寄生蜂では、未受精卵であるにもかかわらず、2倍体のメスしか生まれない「産雌性単為生殖」が誘導される^(5,6)。この現象は、共生細菌が染色体の二倍体化および性分化経路のメス化を引き起こすことで成立すると考えられている⁽⁷⁾。

2.2 天敵昆虫生産における意義

寄生蜂を用いた生物防除では、「メスの供給効率」が実用性を大きく左右する。多くの寄生蜂では、交尾が成立しなければメスが生まれず、かつオスは寄生能力を持たないという制約がある。したがって、人為的に産雌性単為生殖を誘導できれば、未交尾条件下でもメスのみを生産でき、天敵製剤の生産および放飼効率を飛躍的に高めることが可能になると考えられる。

2.3 寄生蜂の性決定遺伝子と *Wolbachia* の作用点

産雌性単為生殖の実用化には、その分子メカニズムの解明が不可欠である。本研究では、チョウ目害虫の卵寄生蜂 *Trichogramma kaykai* を対象に、性決定遺伝子の探索を行った。その結果、本種では *wom*(wasp overruler of masculinization) が性決定カスケードの最上流因子として機能し、その下流で *tra* (transformer), さらに *dsx* (doublesex) が性分化を制御していることが示唆された(図1)。一方で、ミツバチやハバチなどに広くみられる相補的性決定(CSD)関連遺伝子は検出されなかった。

非感染系統の受精卵・未受精卵と *Wolbachia* 感染系統の未受精卵を経時的に採取し、*wom*, *tra*, *dsx* の発現パターンを RT-PCR で比較した結果、感染系統の *tra* および *dsx* の

発現パターンは非感染系統の受精卵と同様であった。すなわち、*Wolbachia* は宿主の *wom* またはその下流の *tra* を操作することにより、本来オスになるはずの未受精卵をメス化していることが示唆された。

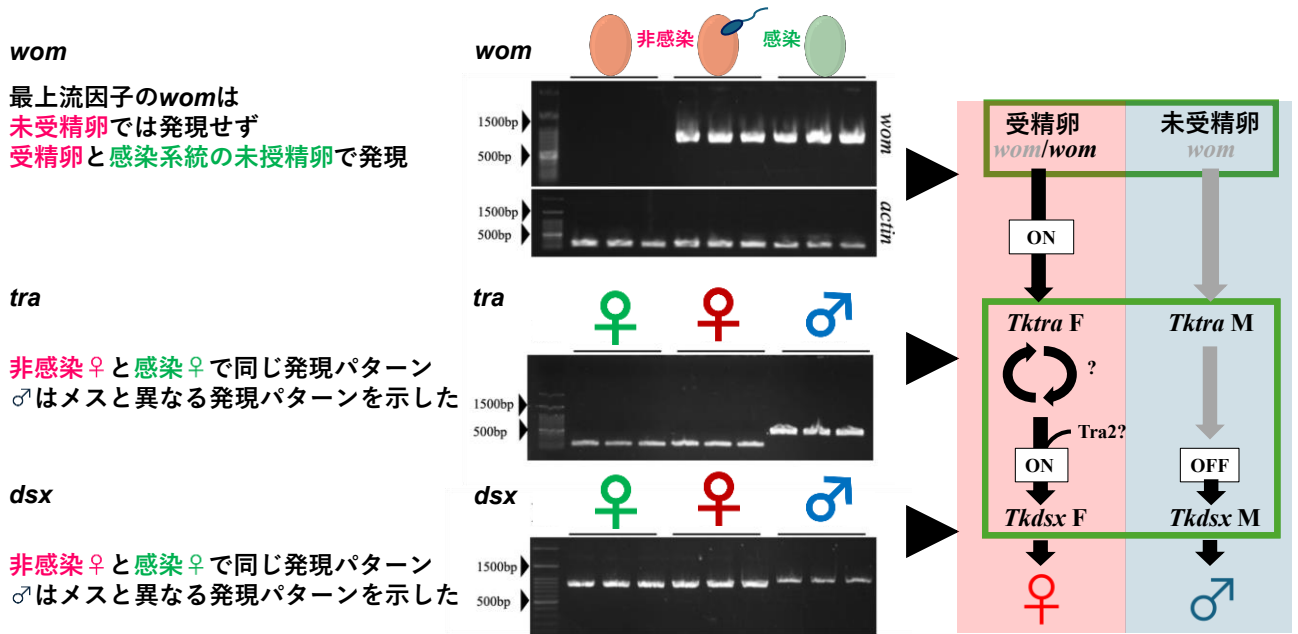


図 1. *T. kaykai* の *Wolbachia* 感染系統および非感染系統における性決定遺伝子の発現比較

2.4 生態進化的背景と応用の指針

ハチ目昆虫のうち CSD をもつ種では、単為生殖において二倍体化するとホモ接合性が生じ、致死や不具合が発生するため、共生細菌による産雌性単為生殖の誘導が困難になると予想される。一方、*Trichogramma* 属のように CSD を欠く系統では、共生細菌による産雌性単為生殖の誘導が進化的に成立しやすかったと考えられ、この特性は天敵昆虫に対する共生細菌の応用可能性を見極める重要な指標になりうる。

実装面では少なくとも、生産性(メス率・放飼後の定着)、品質(探索行動・寄生能・耐環境性)、リスク(圃場での感染安定性など)の三軸での評価が必要になる。ここで次章の「殺菌剤曝露」が、感染の安定性に直結するテーマとして浮上する。

3. 農地における殺菌剤散布と共生微生物の攪乱

3.1 なぜ殺菌剤に注目するのか

農地では、害虫防除とは別の目的で、植物病害防除のために殺菌剤・抗菌剤が散布されている。これらの薬剤は植物病原菌を標的としているが、昆虫体内の共生細菌にも影響を与える可能性がある。特に、産雌性単為生殖のような「共生細菌に依存した繁殖」を行っている種にとって、殺菌剤による除菌は、オス性比への偏重による繁殖様式の崩壊を招くことが予想される^(8, 9)。

本試験では、マメハモグリバエ(害虫; *Wolbachia*)、クリバネアザミウマ(害虫; *Wolbachia*, 産雌性単為生殖)、ハモグリミドリヒメコバチ(天敵; *Rickettsia*, 産雌性単為生殖)を対象に、殺菌剤の昆虫への曝露が、共生関係および生殖操作にどう影響するかを調査した⁽¹⁰⁾。

3.2 標準濃度殺菌剤が共生微生物に与える影響

マイコシールド(有効成分:オキシテトラサイクリン)を農地で用いられる標準濃度(1,000 倍希釈)で、3 種の昆虫に 24 時間処理したところ、マメハモ *Wolbachia* 感染率 6.7%(2/30)、クリバネ *Wolbachia* 感染率 3.3%(1/30)、ミドリヒメ *Rickettsia* 感染率 0%(0/30)と、3 種昆虫の次世代の共生細菌感染率は著しく低下した。さらに産雌性単為生殖を誘導されている種では、感染率の低下に伴って性比が急激にオスへと偏重した。

この結果から、実際の農地においても、殺菌剤散布によってこれらの昆虫種の共生関係が崩れている可能性がある。

3.3 取り込み経路の同定

マメハモグリバエ:成虫および幼虫期にも取り込みが起こり得る

成虫曝露および幼虫曝露の双方で、曝露日数に応じて次世代の感染率が低下し、幼虫期には葉内組織に浸透したマイコシールドを取り込む可能性が示唆された(図 2)。

ハモグリミドリヒメコバチ:葉から“直接”は取り込まないが、宿主を介して取り込む

ミドリヒメでは、葉に散布されたマイコシールドを成虫が直接取り込む経路、あるいは蛹への浸透による取り込みは支持されなかった。一方で、宿主摂食や寄生を介した間接取り込みでは感染

率が低下し、感染率の低下に伴ってオス率が増加することが示された(図 2)。

マイコシールドはどのように影響を与えるのか？

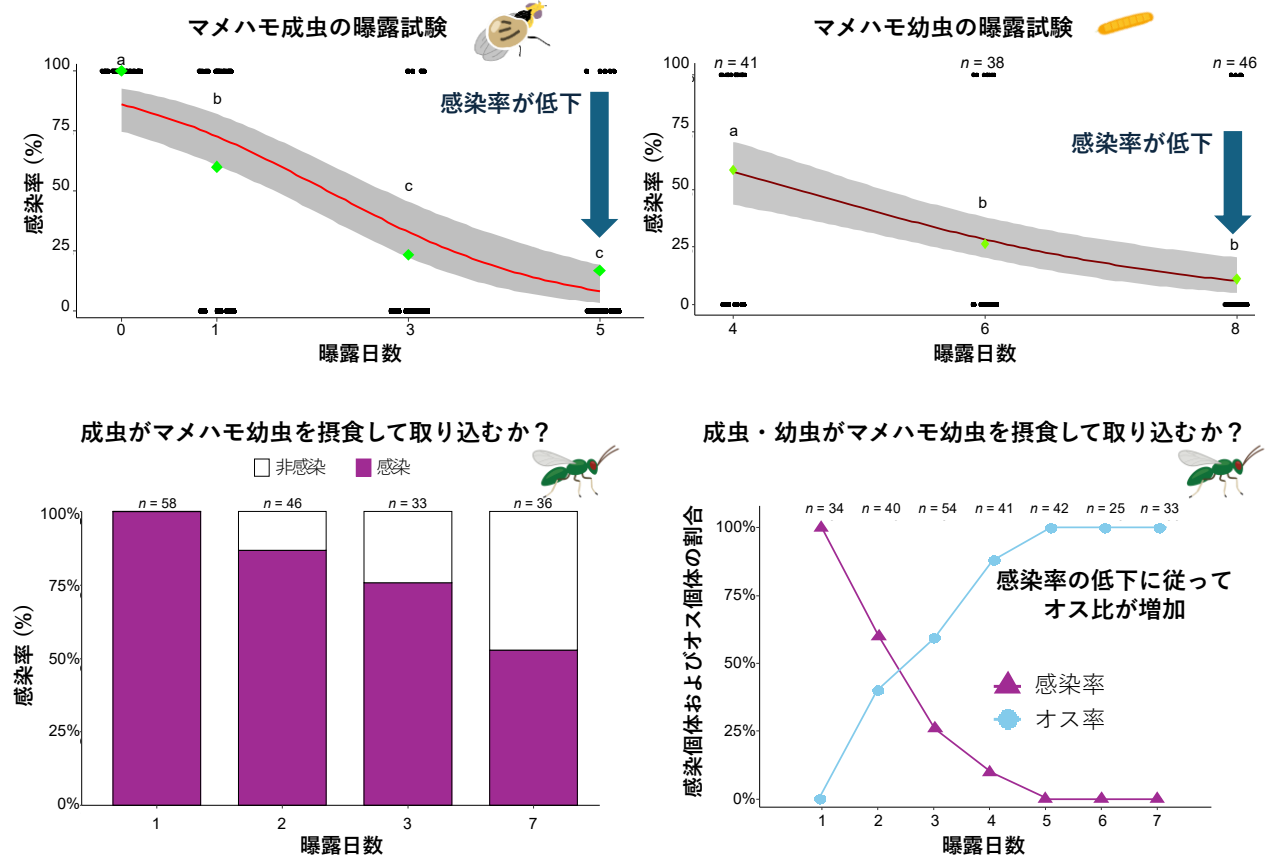


図 2. マイコシールドによる共生細菌感染の抑制と天敵への取り込み・宿主性比への影響

3.4 長期散布による個体群動態への影響

標準濃度マイコシールドを処理したインゲンマメを 20 日ごとに供試し、クリバネアザミウマを 100 日間にわたって複数ケージで継代して、幼虫数・成虫数・性比を追跡した。その結果、メス比が 0% に近づいた後、個体群そのものが消失するという現象が観察された(図 3)。具体的には、幼虫数は 40 日目以降低下し、成虫数は大きな差がない一方、メス比が 40 日目から急激に低下した。さらに、80 日目にメス比 0% のケージでは 100 日目に幼虫・成虫とも消失した。さらに 100 日目時点でメス比が 0% となった 5 つのケージにおいても同様の消失リスクを内在していると予想される。

これは、共生微生物の除去→産雌性単為生殖の破綻によるオス偏重性比→繁殖不能→個体

群消失という明確な因果関係を示している。このことから、産雌性単為生殖を誘導する共生細菌（主に *Wolbachia*）を標的とした害虫防除戦略は、有望な選択肢の一つと考えられる。

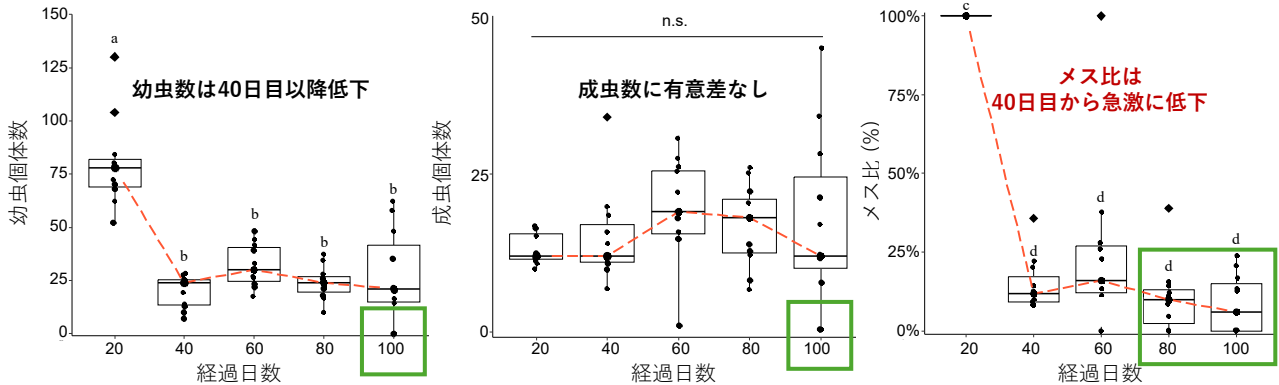


図 3. クリバネアザミウマにおける性比操作を介した害虫個体群制御の実証：長期抗生物質処理

3.5 今後の課題

他方で、共生細菌を対象とした戦略はリスクも内包している。ハモグリミドリヒメコバチの例が示すように、天敵昆虫の繁殖様式も共生細菌に依存している場合、同じ殺菌剤散布によって天敵個体群の性比もオスに偏重し、長期的には天敵による抑止力を失う恐れがある。今後は、生殖操作型共生細菌に加え、栄養共生や腸内定着菌、酵母類などを含む非生殖型共生系についても対象に含め、「害虫の共生系のみを選択的に攪乱し、天敵の共生系は維持する」といった、より選択性に優れた抗菌剤投与設計の検討が必要になるだろう。特に、薬剤の種類や濃度、処理時期などを調整することで、共生微生物群集の攪乱あるいはその回復を、人為的に操作できる可能性があり、今後の応用に向けた重要な展開として位置づけられる。

4. 植物構造による害虫と天敵の選択的トラップ

4.1 圃場で観察される現象

インゲンマメ圃場では、ハモグリバエ成虫が葉裏や茎に引っかかって死亡している一方で、同じ葉上を探索する寄生蜂が捕捉される例はほとんど見られない。この違いに着目し、インゲンマメの葉面などに生えるトライコーム(毛状突起)および昆虫の付着の有無を解析した⁽¹¹⁾。

4.2 トライコームの構造と捕捉メカニズム

電子顕微鏡観察により、インゲンマメの葉には針状毛状鉤状の3種類のトライコームが存在し、特に本葉裏面で高密度に分布することが確認された。ハモグリバエ(マメハモグリバエ, トマトハモグリバエ, ナモグリバエ)はこの高密度部位で高頻度に捕捉された一方、寄生蜂(ハモグリミドリヒメコバチ, カンムリヒメコバチ)はほとんど捕捉されなかった(図4)。

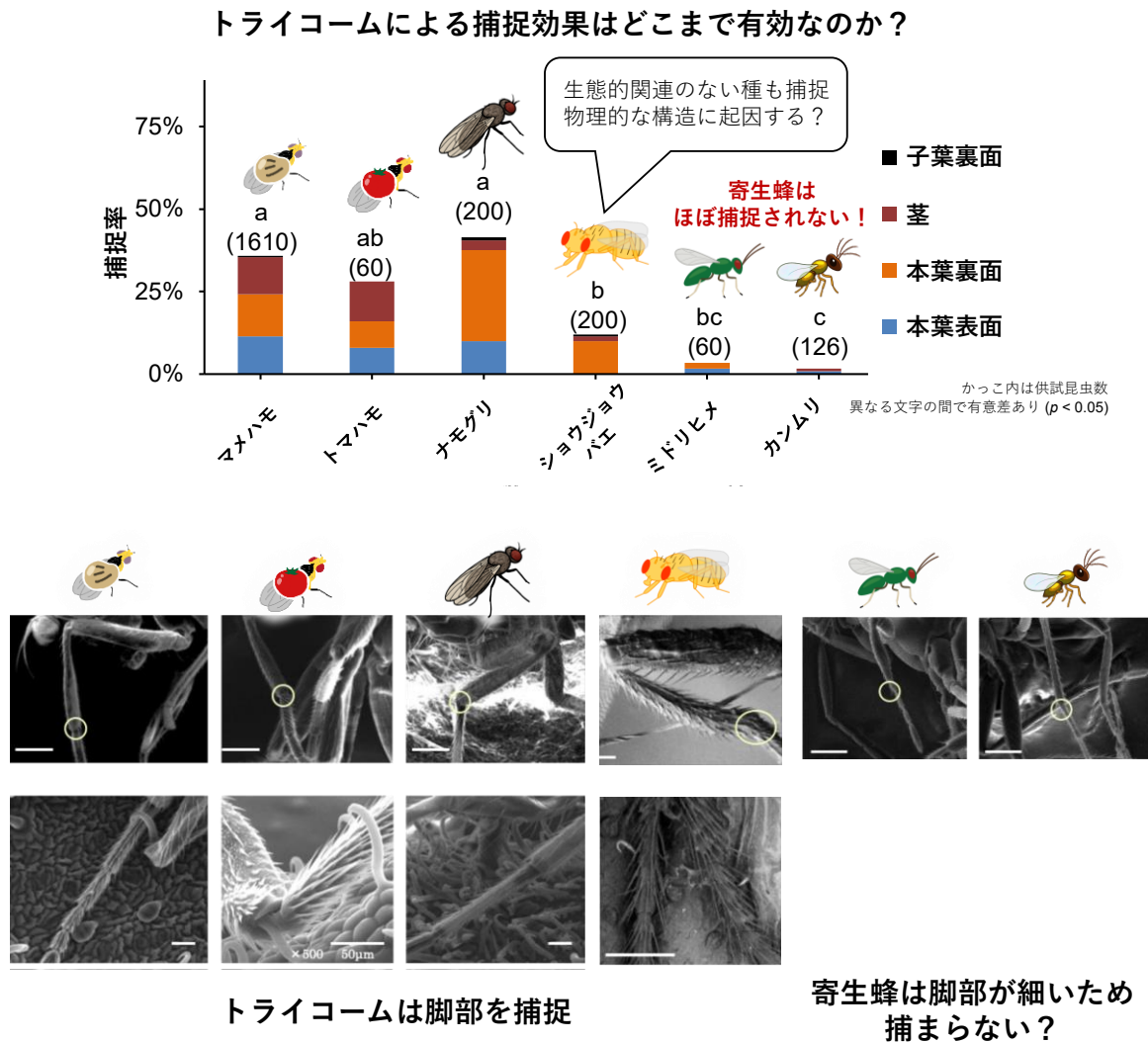


図4. トライコームによる脚部構造特異的な付着機構の比較

4.3 なぜ寄生蜂は捕捉されないのか

種間比較により、寄生蜂は脚が細く、脛節と附節の間隔が狭いため、トライコームが物理的に引っかかりにくいことが示された。さらに、トライコームを除去した区と対照区とで、ハモグリミドリ

ヒメコバチの寄生率は有意に変化しなかった。つまり、インゲンマメのトライコームは「ハモグリバエを構造特異的に捕捉し、寄生蜂の探索行動は阻害しない」植物由来の選択的防除要因として機能している。

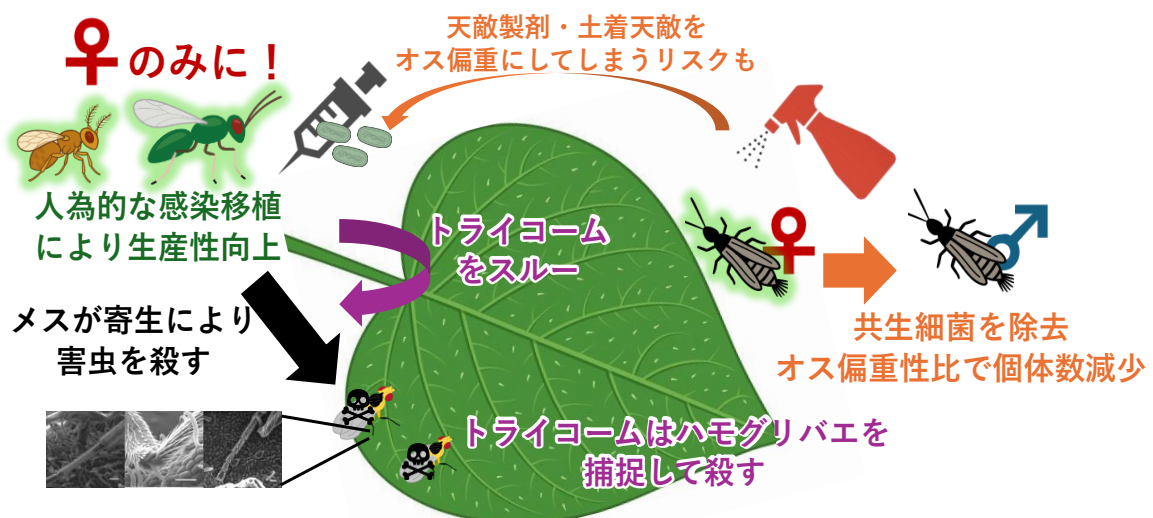
4.4 トライコームは害虫による被害を減らせるのか

トライコーム除去(切除・強ブラッシング等)により付着個体数は有意に低下し、産卵数は増加傾向を示した。付着個体は葉裏で捕捉・死亡するため、本来は葉間移動および産卵機会の減少につながると思われる。ただし、本試験は葉 1 枚系で実施しており、個体の分散や葉間移動が起こらない条件であったため、トライコームの影響は産卵数の差として検出されにくかった可能性がある。したがって、トライコームの効果は葉単位よりも、葉群・株・圃場といった空間スケールでより顕在化する可能性があり、今後は複数葉系や開放系条件での検証が必要である。

5. おわりに

本稿では、共生微生物、農薬、植物形質といった異なる階層の要因が、害虫および天敵の動態に関与していることを紹介した。特に、殺菌剤による共生微生物の除去が、害虫の繁殖を断ち、

微生物-天敵-植物の相互作用を利用する防除戦略の可能性



微生物×抗生物質×植物機能の組み合わせで効果的な害虫防除&天敵運用が可能か？
ただし抗生物質施用にはリスクも内在しており長期的な圃場調査が今後の課題

図 5. 微生物・植物・農薬を統合した次世代 IPM の可能性

個体群を崩壊させ得るという知見は、薬剤の新たな活用法を示唆するものである。現状では天敵への影響という課題も残るものの、将来的にターゲットとなる微生物のみを特異的に制御できれば、害虫のみを狙い撃ちする強力なツールになり得る。また、植物の微細構造(トライコーム)が持つ選択的な防除機能も、天敵利用を補完する重要な要素である。これらの知見を、既存の化学的・生物的・栽培的手法と柔軟に組み合わせることで、環境負荷を抑えつつ、より確実に持続可能な農業を支える次世代 IPM の構築につながると期待している。

6. 引用文献

- (1) Kogan M. Integrated Pest Management: Historical Perspectives and Contemporary Developments. *Annu Rev Entomol* 43: 243-270. 1998.
- (2) Werren JH, Baldo L, Clark ME. *Wolbachia*: master manipulators of invertebrate biology. *Nat Rev Microbiol* 6: 741-751. 2008.
- (3) Kaur R, Shropshire JD, Cross KL, Leigh B, Mansueto AJ, Stewart V, Bordenstein SR, Bordenstein SR. Living in the endosymbiotic world of *Wolbachia*: A centennial review. *Cell Host Microbe* 29: 879-893. 2021.
- (4) Bourtzis K. *Wolbachia*-based technologies for insect pest population control. *Adv Exp Med Biol* 627: 104-113. 2008.
- (5) Stouthamer R, Luck RF, Hamilton WD. Antibiotics cause parthenogenetic *Trichogramma* (Hymenoptera/Trichogrammatidae) to revert to sex. *Proc Natl Acad Sci U S A* 87: 2424-2427. 1990.
- (6) Stouthamer R, Kazmer DJ. Cytogenetics of microbe-associated parthenogenesis and its consequences for gene flow in *Trichogramma* wasps. *Heredity* 73: 317-327. 1994.
- (7) Ma WJ, Pannebakker BA, van de Zande L, Schwander T, Wertheim B, Beukeboom LW. Diploid males support a two-step mechanism of endosymbiont-induced thelytoky in a parasitoid wasp. *BMC Evol Biol* 15:

-
84. 2015.
- (8) Hagimori T, Abe Y, Date S, Miura K. The First Finding of a *Rickettsia* Bacterium Associated with Parthenogenesis Induction Among Insects. *Curr Microbiol* 52: 97–101. 2006.
- (9) Adachi-Hagimori T, Miura K. Development of a Multiplex Method to Discriminate Between *Neochrysocharis formosa* (Hymenoptera: Eulophidae) Reproductive Modes. *J Econ Entomol* 101: 1510–1514. 2008.
- (10) Ohata Y, Tagami Y. Antibiotic agrochemical treatment reduces endosymbiont infections and alters population dynamics in leafminers, thrips, and parasitoid wasps *Front Microbiol* 16: 1605308. 2025.
- (11) Ohata Y, Sawada Y, Ishihara Y, Tagami Y. Selective leaf surface defenses: trichomes trap herbivorous leafminers but spare parasitoid wasps. *Pest Manag Sci* (in press).

[講演要旨]

バクテリオファージによる難防除病害虫の防除 ―青枯革命を例として―

原島俊明*

パネフリ工業株式会社 環境科学研究所

*e-mail: toshiaki.harashima@panefri.jp

1. はじめに

バクテリオファージ(単にファージとも言われる)は細菌に感染するウイルスである。バクテリオファージは地球上で極めて多様な存在であり、細菌の多様性の形成に関与するとともに、細菌群集の動態制御にも関わっていると考えられている。バクテリオファージはその感染機構の違いにより溶菌性ファージと溶原性ファージの2種類に大別される(図1)。溶菌性ファージは細菌に吸着して遺伝物質を宿主に注入し、宿主細胞内で増殖した後、宿主細胞を溶菌することによって、多数の娘ファージを菌体外に放出する。一方、溶原性ファージは宿主に注入された自身の遺伝物質が宿主のゲノム中に組み込まれ、プロファージとして宿主のゲノムの一部となり、次の世代へ

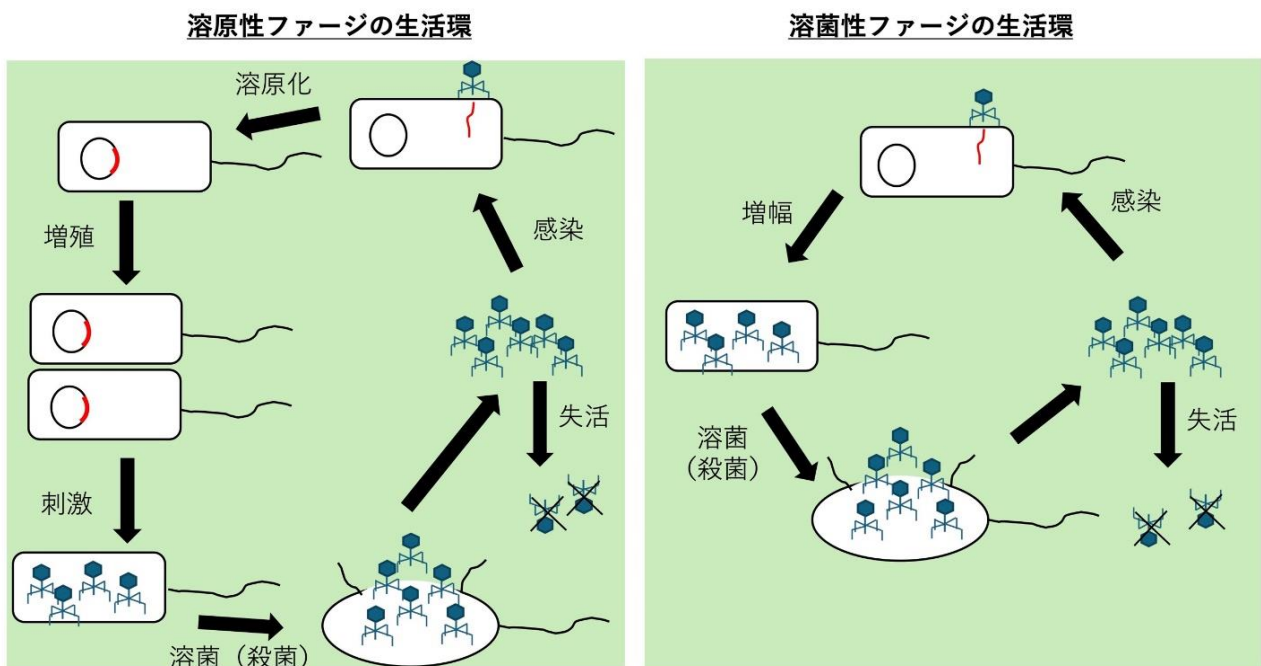


図1. バクテリオファージの生活環
左パネル：溶原性ファージの生活環 右パネル：溶菌性ファージの生活環

引き継がれる。プロファージは、宿主が生命の危機に瀕した場合などの条件下で溶原状態から誘導され、娘ファージが合成された後、宿主細胞が溶菌して菌体外へ放出される。

両ファージともその特徴としては高い宿主特異性が挙げられる。この特徴を活かし、例えばアメリカでは細菌性感染症の緊急医薬品として活用され、食肉で生じる細菌性食中毒の予防用食品添加物としても認可されている⁽¹⁾。また、ジョージアなどの東欧諸国では抗生物質の入手が難しい時代に細菌性感染症の医薬品として使用されていた。近年においては、細菌性感染症の動物医薬品としての活用も国内を始め、世界各国で検討されているところである。農業分野においても海外では、OMNILYTICS 社によってカンキツかいよう病やトマトかいよう病、トマト班点細菌病、そして A&P Inphatec 社がブドウピアス病に対してバクテリオファージを有効成分とする生物農薬を開発している。

本稿では、国内で初めてバクテリオファージを有効成分とする生物農薬として登録された、難防除土壌細菌病害である青枯病に対する防除剤「青枯革命」について解説する。

青枯病は *Ralstonia solanacearum* に起因する土壌病害で、ナス科果菜類を中心に 300 種以上の植物が罹病する防除が困難な病害の一つである⁽²⁾。その被害額は、国内だけでも 300 億円以上にのぼるとされている。

青枯病菌に感染するバクテリオファージは多様であり、それらの特性を活かしたバイオコントロール資材としての活用が検討されてきた。例えば、溶菌性ファージは殺菌剤としての利用が提案されており⁽³⁾、宿主域の異なる複数のファージを組み合わせたファージカクテルによる防除も検討されている⁽⁴⁾。また、溶原性ファージの中には、感染によって宿主菌の病原性を低下させるものがあり、感染菌を植物に処理することで抵抗性を誘導する、いわゆる植物ワクチンとしての利用も提案されている⁽⁵⁾。青枯革命の有効成分である RKP181 ファージは青枯病菌に特異的に感染する溶菌性ファージである。

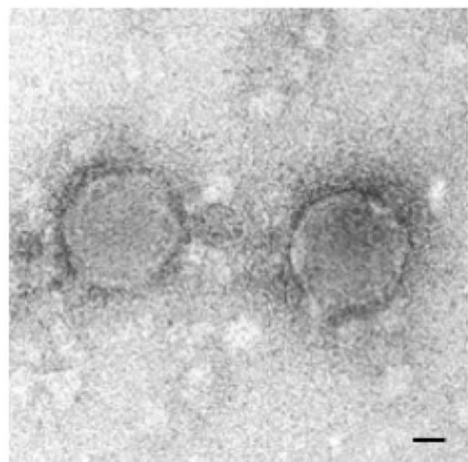


図 2. RKP181ファージの電子顕微鏡写真
RKP181ファージがポドウィルスであることが分かる。
図中のバーは20nmである。

2. RKP181 ファージの分子生物学的特徴—青枯革命の有効成分として

RKP181 ファージは国内の土壌から分離されたもので、そのゲノムサイズは 39,455 bp、50 個の ORF をコードする。最近縁種は *Ralstonia* phage phiITL-1 (87% 相同性, 被覆率 84%), 続いて *Ralstonia* phage RSB2 (77% 相同性, 被覆率 70%) である⁽⁶⁾。また, DNA packaging protein B 遺伝子産物のアミノ酸配列に基づく系統解析から, RKP181 ファージは phiITL-1 や RSB2 と同じカウドウイルス目 Autographiviridae 科に属すると考えられる。このことは, 電子顕微鏡解析の結果からも支持される(図2)。phiITL-1 は *Serkorvirus* 属, RSB2 は *Kelmasvirus* 属に分類されており, 両者は異なる属に属する。さらに, RKP181 ファージはいずれのファージとも相同性が低いことから, 青枯病菌に感染する RKP181 ファージは, Autographiviridae 科に属する *Ralstonia* virus RKP181 として位置付けられる新種のウイルスであると考えられる⁽⁶⁾。

RKP181 の感染サイクルは青枯病菌との接触(吸着)から娘ファージの放出まで 80 分で完結し, 1回の感染で1個のファージが約 60 個までに増える(図3)。放出された娘ファージは次の青

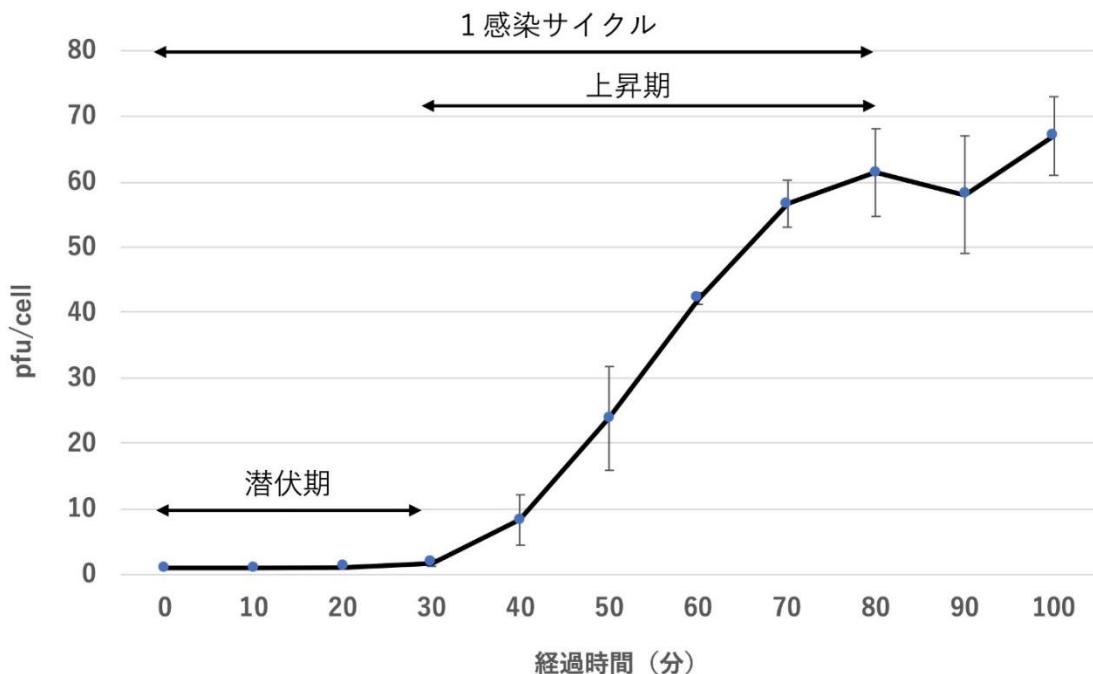


図3. ワンステップ増殖法による感染サイクルの評価

RKP181 ファージの感染サイクルはワンステップ増殖方により, 潜伏期 30 分, 上昇期 50 分であることが示され, 感染1サイクル 80 分であることがわかった。また, 1回の感染で1個のファージが 61 ± 7 にまで増幅することが示された。

枯病菌に感染することによってさらに増幅し、殺菌剤としての効果の持続性が生まれる。

3. 青枯革命による青枯病防除のメカニズム

青枯病菌は根の傷口、特に脆弱な根の先端部分の傷口や開口部から組織内に侵入し、組織を破壊しながら導管へと進む⁽⁷⁾。その過程で、青枯病菌は皮層においてバイオフィルムを形成し、これが組織内の新たな青枯病菌の供給源となり、菌がどんどん導管へと浸潤する。導管に入った青枯病菌はさらに増殖し、導管を詰まらせると共に維管束に損傷を与え、機能不全に陥れることで萎凋症状、そして枯死と、青枯病に特徴的な病徴を発現する。

ここで強調すべき点は、青枯病の初期症状として萎凋症状が挙げられるが、萎凋症状として確認できる時期は上記の通り、青枯病の発病メカニズムからすると、すでに末期ということである。つまり、青枯病を防除するには症状の出していない感染初期、それもバイオフィルム形成前の極々初期に青枯病菌を駆除しなければならない。したがって、青枯病を効率良く防除するには根の組織に侵入した直後の青枯病菌を殺菌することである。

表 1. 青枯革命の適用表

作物名	適用病害虫名	希釈倍数	使用液量	使用時期	本剤の使用回数	使用方法	青枯病菌感性 バクテリオファージRKP181を 含む農薬の総使用回数
トマト ミニトマト	青枯病	100倍	50mL/株	定植2日前～定植直前	—	株元 灌注	—
えごま (葉)			—			5分間 苗浸漬	
えごま (種子)							

現在の青枯革命の適用はトマトとミニトマトにおいては定植 2 日前から定植直前までの苗浸漬処理か株元灌注処理、エゴマにおいては同じく苗浸漬処理となっている(表1)。定植前の苗に予め薬剤処理することによって、有効成分である RKP181 ファージを植物体内に移行させる。これが薬効を効率よく発揮する上で重要になる。全長 $0.2\mu\text{m}$ に満たない RKP181 ファージは定植前の処理により根に移行し、移行した 90%以上の RKP181 ファージが根に均等に局在することで、根に侵入直後の青枯病菌に感染し、溶菌・殺菌する(図4)。1回の感染により 60 倍に増幅した RKP181 ファージはさらに次の感染に備え青枯病菌を待ち伏せし、殺菌することでさらに増幅し、効果を持続させる。青枯革命の残効は青枯病菌と出会う事がなければ1ヶ月程度だが、

その間に青枯病菌に感染することによって、増幅と感染が繰り返され、効果の持続性が生まれる。このため、感染のタイミングを見計らい、定植後 1~1.5 ヶ月以内に発病する場合には定植前の処理が有効となる。

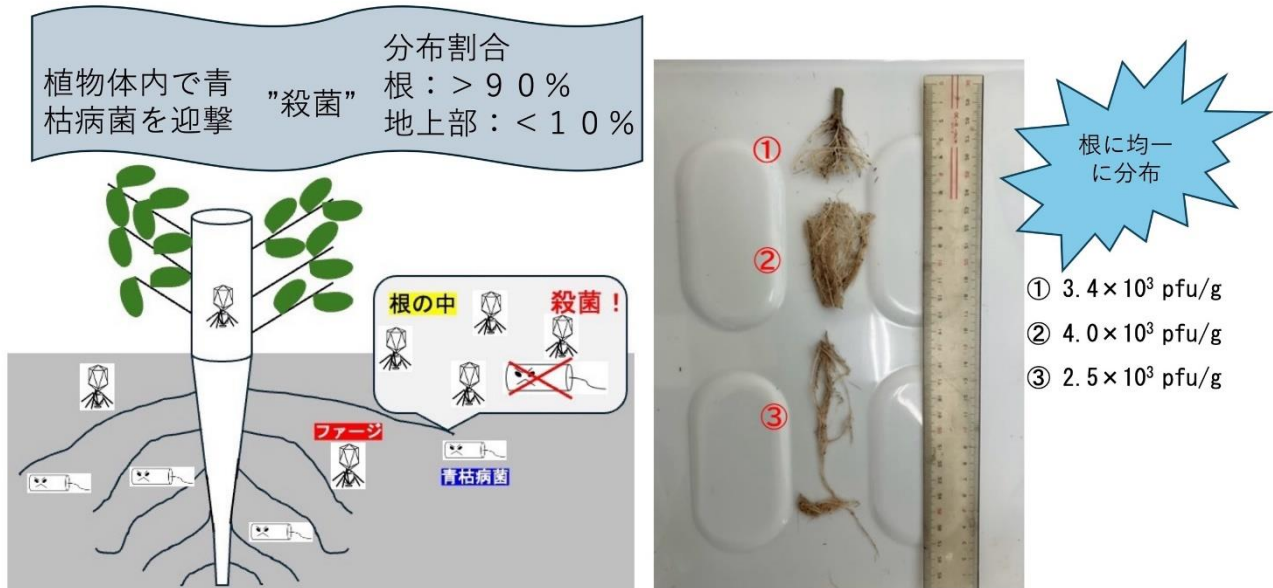
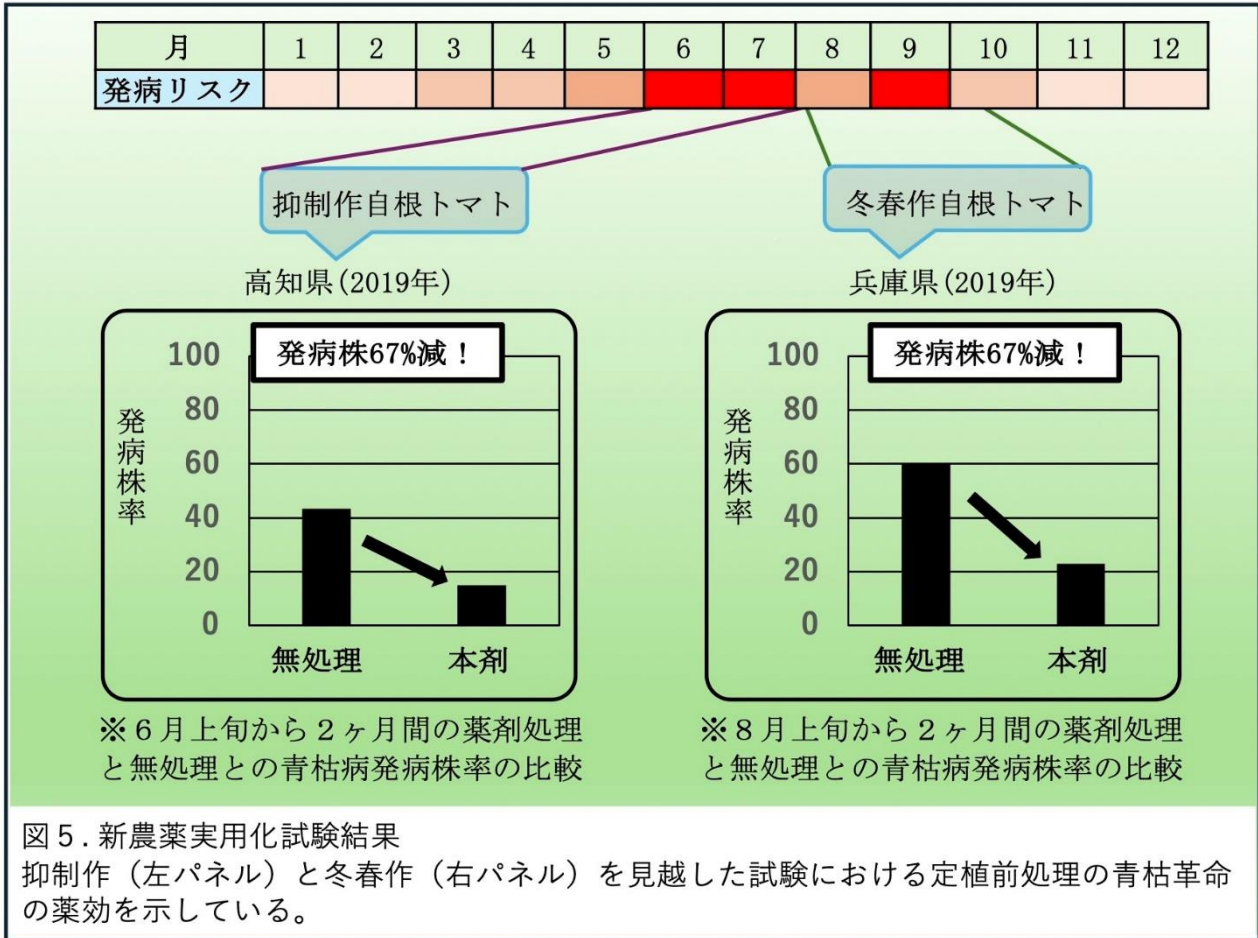


図4. RKP181ファージの作用機作

定植前の苗に処理されたRKP181ファージは植物体に移行し、その90%以上が根に局在する（左パネル）。RKP181ファージは根の地際部、中間部、先端部いずれにも均等に局在することで、根から侵入した青枯病菌に感染し、殺菌する（右パネル）。

4. 青枯革命の適用作物と防除効果

RKP181 ファージは国内のトマトやナス、ピーマン、バレイショ、タバコといったナス科植物やシソやエゴマといったシソ科植物、ショウガやウコンといったショウガ科植物などから分離した青枯病菌 250 株以上全てに感染することを確認している。さらに、新農薬実用化試験やそれに準じた圃場試験でトマトやナス、ピーマン、ショウガ、エゴマといった植物の青枯病に対して効果のあることを確認している(図 5)。青枯革命は 2024 年に新規農薬登録されたが、2025 年には適用拡大登録され、現在に至るまで試験的な販売を行い、生産者の圃場でご使用頂いている。青枯革命に適用のあるトマト/ミニトマトとエゴマは作期が長く、青枯病のリスクの高い時期を通しての栽培となる。このため、定植前の処理だけで作期を通しての防除は難しいが、定植後まもなくに発病するリスクについては発病株率が 30%程度までなら良好な薬効が報告されており、前年比で 50~90%程度の発病抑制効果を確認している。これまでのところ、使用された生産者の大部分で効果を確認できている。



5. おわりに

現在のところ、土壌消毒や抵抗性台木の活用といった対策が難防除土壌細菌病である青枯病に対して主に用いられている。しかし、これらの対策を講じても、依然として青枯病による被害は大きく、さらなる防除手段の開発が求められてきた。青枯革命は青枯病に特化した生物農薬であり、既存の防除技術と組み合わせることで、単独よりも高い防除効果を発揮することが期待される。また、台木の種類を選ばずに使用できる点や、多くの資材・農薬との併用が可能である点も、本剤の利点である。

青枯革命が農薬登録されたことにより、土壌消毒、抵抗性台木、ファージ製剤という三つの異なる防除手段を組み合わせた防除体系が構築可能となった。青枯病防除の基本は、土壌中の菌密度を可能な限り低く保つことであり、発病を抑え、菌密度を増加させない管理を継続することが重要である。これらの防除手段を適切に組み合わせることで、青枯病の発病を年々抑制し、長期的にはより安定した栽培環境の構築につながることを期待される。

最後に、青枯革命の開発ではバクテリオファージや青枯病菌の分離に際し、北は北海道から

南は九州・沖縄までの各都道府県の生産者の方々をはじめ、県研究所や普及所・防除所の方々、また JA や農研機構の方々など、非常の多くの方々のご協力を頂いた。ここに感謝申し上げたい。

6. 引用文献

- (1) 岩野英知, 藤木純平, 中村暢宏, 権平 智, 樋口豪紀. ファージセラピーの現状と動物医療への応用. 産業動物臨床医誌 10(2):53. 2019.
- (2) Chachar Z, Xue X, Fang J, Chen M, Jiarui C, Chen W, Ahmed N, Chachar S, Narejo M un N, Ahmed N, Fan L, Lai R, Q Y. Key mechanisms of plant-*Ralstonia solanacearum* interaction in bacterial wilt pathogenesis. Front Microbiol 16:1521422. 2025.
- (3) Fujiwara A, Fujisawa M, Hamasaki R, Kawasaki T, Fujie M, Yamada T. Biocontrol of *Ralstonia solanacearum* by treatment with lytic bacteriophages. Appl Environ Microbiol 77(12):4155-4162. 2011.
- (4) He H, Yi K, Yang L, Jing Y, Kang L, Gao Z, Xiang D, Tan G, Wang Y, Liu Q, Xie L, Jiang S, Liu T, Chen W. Development of a lytic *Ralstonia* phage cocktail and evaluation of its control efficacy against tobacco bacterial wilt. Front Plant Sci 16: 1554992. 2025.
- (5) 山田 隆. ファージを利用した青枯病防除技術の開発. 化学と生物 52(6): 371-379. 2014.
- (6) 原島俊明, 中野和真, 狩俣 徹, 外間久美子. パネフリ工業株式会社. バクテリオファージ, 青枯病防除剤および青枯病防除方法. 国際特許出願(PCT/JP2020/029189). 2020.
- (7) Inoue K, Takemura C, Senuma W, Maeda H, Kai K, Kiba A, Ohnishi K, Tsuzuki M, Hikichi Y. The behavior of *Ralstonia pseudosolanacearum* strain OE1-1 and morphological changes of cells in tomato roots. J Plant Res 136: 19-31. 2023.

[お知らせ]

2025年度 第2回講演会

※会場および Zoom ウェビナーによるハイブリッド形式

日時: 2026年2月27日(金)13:00~17:10

会場: 東京農業大学 国際センター カンファレンスルーム 2

13:00 「天敵寄生蜂(ヨーロッパトビチビアメバチ)で蘇ったレンゲ」

八瀬順也 氏(兵庫県森林林業技術センター)・高橋國人 氏(兵庫県養蜂振興会)

これは、侵入害虫アルファルファタコゾウムシからレンゲを守るために、養蜂家たちが天敵放飼に取り組んだ記録である。試行錯誤を繰り返しながら、自らの手で寄生蜂の増殖と放飼を10年間続け、永続的な効果が見込めるまでに至った過程を実践者側からの視点で紹介したい。試験事例などでは見られない真剣勝負がそこにある。

14:00 「新土壌病害管理「ヘソディム」における輪作・おとり植物等の活用法」

對馬誠也 氏(特定非営利活動法人 圃場診断システム推進機構)

土壌病害対策で輪作, おとり植物の活用は極めて重要である. しかし, それらを効果的に活用することは必ずしも簡単とはいえない. その理由は土壌中の病原菌密度や環境条件など様々な要因が防除効果に影響しているからである. 2012年に土壌病害克服を目指して演者らが提案した「健康診断に基づく土壌病害管理(ヘソディム)」は「あらゆる防除技術のプラットフォーム」として有効と考えている. ここでは, 輪作, おとり植物のヘソディム的活用法について紹介したい.

15:00 休憩

15:10 「緑肥作物を活用した線虫および土壌病害の防除方法について」

和田美由紀 氏(雪印種苗株)

近年, 緑肥作物の種類や用途はバラエティに富み, 土壌への粗大有機物の補給を満たすだけの役割ではなくなっている. なかでも機能性緑肥作物は, 栽培することによって植物寄生性線虫や土壌病害の増殖を抑制する効果をもち, 輪作の一つに組み

込むことによって主作物の収量や品質の維持が期待できるものである。緑肥作物の栽培注意点を交えながらそれぞれの場面に応じた緑肥作物のラインナップをご紹介します。

16:10 「テンサイシストセンチュウの生態と耕種的防除」

酒井啓充 氏（農研機構 植物防疫研究部門 基盤防除技術研究領域 越境性・高リスク病害虫対策グループ）

テンサイやアブラナ科野菜の有害線虫であるテンサイシストセンチュウの発生が2017年に我が国で初めて確認され、公的防除が実施されている。本線虫は多数の卵を抱えた耐久態である「シスト」を形成し、土壤中に数年以上生残する。ふ化するために寄主植物が出す「ふ化促進物質」を必要とする卵が存在し、生残リスクを高めている。抵抗性品種は寄主同様にふ化を促進するため本線虫の防除に有効であるが、発生地域の主要作物であるアブラナ科野菜やハウレンソウでは有効な品種がなく、抵抗性緑肥作物が利用されている。

17:30 懇親会

講演会終了後、演者の皆さんを囲んで懇親会を行います(参加費 3,000 円)。
参加を希望される方は講演会参加申込の際、懇親会への参加有無をお知らせ下さい。

< 講演会参加 申し込み要領 >

以下のリンクまたは QR コードよりフォームにアクセスし、お名前とメールアドレス、会場またはオンラインによる参加の希望、懇親会への参加の有無をご入力の上送信してください。オンライン参加を希望される方には、開催日前日までに Zoom ミーティングの接続情報をメールでお知らせ致します。



<https://forms.gle/HNj5F8PFQkHTSi9Y9>

生物的防除部会ニュース No. 85
2026 年 1 月 22 日発行
発行所 東京農業大学総合研究所 生物的防除部会
<http://www.ipm-bio.jp/>
部会長 河津 圭 / 連絡幹事 足達 太郎