

第1回殺虫剤抵抗性対策シンポジウム 講演要旨

令和3年12月17日

オンライン開催（ZOOM）

（令和4年11月11日 改訂）

主催：農林害虫防除研究会
（殺虫剤抵抗性対策タスクフォース）
後援：（一社）日本植物防疫協会
日本農薬学会
（一社）日本応用動物昆虫学会
（国研）農研機構

農林害虫防除研究会

Agricultural and Forest Insect Pest Management Society of Japan

農林害虫防除研究会 第1回 殺虫剤抵抗性対策シンポジウム
開催要領

1. 日時 2021年12月17日(金) 9:45 ~ 17:00
2. 主催 農林害虫防除研究会(殺虫剤抵抗性対策タスクフォース)
3. 後援 日本植物防疫協会、日本農薬学会、日本応用動物昆虫学会、農研機構

4. 開催趣旨

殺虫剤抵抗性対策シンポジウムを、防除関係者の所属の枠を超えた薬剤抵抗性リスクコミュニケーションの場とする。講演・総合討論をとおして、殺虫剤抵抗性管理・対策に関する施策・研究と生産現場の情報を交換・共有し、抵抗性対策を現場で実践・普及するためのスキルアップを図る。

5. 開催形式 オンライン開催(Zoom)

6. プログラム

総合司会 井口雅裕(シンポジウム実行委員会、和歌山県果樹試験場)

午前の部 9:45 ~ 12:00

事務連絡

開会挨拶 農林害虫防除研究会会長 八瀬順也(兵庫県立農林水産技術総合センター)

10:00 ~ 10:20

座長: 井口雅裕

講演1 IPMを考慮した殺虫剤抵抗性管理の実践と連携を! (開催にあたって)

シンポジウム実行委員会: 山本敦司(日本曹達株)・土井誠(静岡農林研)
井口雅裕(和歌山果試)・宮崎仁実(JA全農)・野田隆志(日植防)

10:20 ~ 11:00

講演2 薬剤抵抗性病害虫の発生状況と対策の取組について

岡田和秀・井田仁(農林水産省消費・安全局 植物防疫課)

11:00 ~ 12:00

座長: 土井 誠

講演3 GAPによるIPMと薬剤抵抗性対策の実践

(殺菌剤耐性菌研究会とのコラボレーション企画)
鈴木啓史(殺菌剤耐性菌研究会幹事長, 三重県農産園芸課)

午後の部 13:00 ~ 17:00

13:00 ~ 14:00

講演4 殺虫剤抵抗性の進化を阻止するための最適な薬剤散布計画

山村光司(農研機構 農環研)

14:00 ~ 15:00

座長: 宮崎仁実

講演5 私が関わった殺虫剤抵抗性研究42年 - 基礎から現場の問題解決へ -

本山直樹(千葉大学名誉教授、東京農業大学総合研・農薬部会長)

15:00 ~ 15:15 休憩

15:15 ~ 16:15

講演6 薬剤抵抗性コナガの過去と現在、これからの防除対策

上杉龍士(農研機構 東北農研)

16:15 ~ 16:55

総合討論 テーマ:「殺虫剤抵抗性管理の現場への普及について(仮題)」

ファシリテーター: 野田隆志(シンポジウム実行委員会、日本植物防疫協会)

閉会挨拶: 山本敦司(シンポジウム実行委員会、日本曹達株)

目 次

講演 1	IPM を考慮した殺虫剤抵抗性管理の実践と連携を！（開催にあたって） ……1
	シンポジウム実行委員会：山本敦司（日本曹達(株)）・土井誠（静岡農林研） 井口雅裕（和歌山果試）・宮崎仁実（JA 全農）・野田隆志（日植防）
講演 2	薬剤抵抗性病害虫の発生状況と対策の取組について …… 10
	岡田和秀・井田仁（農林水産省消費・安全局植物防疫課）
講演 3	GAP による IPM と薬剤抵抗性対策の実践 …… 21
	（殺菌剤耐性菌研究会とのコラボレーション企画） 鈴木啓史（殺菌剤耐性菌研究会幹事長，三重県農産園芸課）
講演 4	殺虫剤抵抗性の進化を阻止するための最適な薬剤散布計画 …… 29
	山村光司（農研機構-農環研）
講演 5	私に関わった殺虫剤抵抗性研究 42 年 - 基礎から現場の問題解決へ …… 38
	本山直樹（千葉大学名誉教授、東京農業大学総合研-農薬部会長）
講演 6	薬剤抵抗性コナガの過去と現在，これからの防除対策 ……52
	上杉龍士（農研機構-東北農研）
	第 1 回シンポジウムの事後アンケート結果について ……59

Contents

1. Preface: The 1st Symposium on the Insecticide Resistance Management Practice and Cooperation! The Insecticide Resistant Management based on IPM. 1
Atsushi YAMAMOTO^{1,2}, Makoto DOI^{1,3}, Masahiro IGUCHI^{1,4}, Hitomi MIYAZAKI^{1,5},
Takashi NODA^{1,6}
¹ Executive Committee of the Symposium. ² Nippon Soda Co., Ltd.
³ Shizuoka Pref. R.I. Agri. and Forest. ⁴ Wakayama Fruit Tree Exp. Sta.
⁵ Zen-Noh Agric. R&D Center. ⁶ Japan Plant Protection Association
2. Status and countermeasures for pesticide-resistant pests in Japan.10
Kazuhide Okada, Masashi Ida
Plant Protection Division, Food Safety and Consumer Affairs Bureau, Ministry of
Agriculture, Forestry and Fisheries (MAFF)
3. Practice of IPM and Chemical Resistance Management through GAP. 21
Hirofumi SUZUKI
Mie Prefecture Agriculture and Horticulture Division
4. Optimal rotation of insecticides to prevent the evolution of resistance. 29
Kohji YAMAMURA
Institute for Agro-Environmental Sciences, National Agriculture and Food Research
Organization (NARO)
5. My History of the Studies on Insecticide Resistance Management for the past 42
years.
The Solution from the Basic to the Farm.38
Naoki MOTOYAMA
Emeritus professor of Chiba University
6. Past, present, and future control methods for insecticide resistance of
diamondback moth.52
Ryuji UESUGI
NARO Tohoku Agricultural Research Center

- Post-Questionnaire of the 1st Symposium59

IPM を考慮した殺虫剤抵抗性管理の実践と連携を！

(シンポジウムの開催にあたって)

○山本敦司^{1,2}・土井誠^{1,3}・井口雅裕^{1,4}・宮崎仁実^{1,5}・野田隆志^{1,6}

¹農林害虫防除研究会・シンポジウム実行委員・²日本曹達・³静岡農林研

⁴和歌山果試・⁵JA 全農・⁶日植防

はじめに 薬剤抵抗性管理・対策に取り組む我々の使命

薬剤抵抗性管理・対策は、それを研究し施策を作ったら終わりと言うのでは無く、農業生産者に伝わり実践されてはじめて意味を持つ。薬剤抵抗性対策を組んだミスのない防除体系を生産者目線で共に考え、適切に現場へ伝え満足していただく。このような顧客(生産者)満足度を高める視点を持って、薬剤抵抗性リスクコミュニケーション(以下、抵抗性リスクミ；後述)を円滑に進めて薬剤抵抗性管理・対策に取り組むのが、我々、防除に関わる全ての者の使命である(図1)。特に、抵抗性リスクミの中心となるのが、現場の普及指導員とJA営農指導員である。行政・研究・企業の情報発信側は所属の立場を超えて、現場を支える指導員へ技術と情報を惜しみなく提供し連携することが大切である。すなわち、「みんなが得する薬剤抵抗性管理」(山本, 2019; 2020)のキャッチフレーズが、抵抗性リスクミ成功へのピクトリーロードを開きトライへと導く。

一方、後述のように薬剤抵抗性問題は「古くて新しい」課題であり、解決へのハードルは高い。しかし、薬剤抵抗性の発達は、言わば生物進化の現象であり、薬剤防除を続ける限り避けられない。したがって、この難題に取り組むには、「病虫害雑草、特に薬剤抵抗性の彼・彼女らと戦い駆逐する」という考えを捨てた方が得策である。むしろ病虫害雑草たちと「上手に付き合い折合いをつけ」経済的被害許容水準に抑えながら、薬剤抵抗性を遅延させる防除方法を工夫するのが賢明である(藤岡, 2019; 山本・土井, 2020)。これは、総合的生物多様性管理(Integrated Biodiversity Management: IBM)(Kiritani, 2000)の考え方の延長線上にある(図4)。

本講演ではシンポジウムの開催にあたり、殺虫剤抵抗性研究の歴史を振り返るとともに、総合的病虫害・雑草管理(Integrated Pest Management: IPM)を考慮した薬剤抵抗性管理の基本的な考え方を概説する。

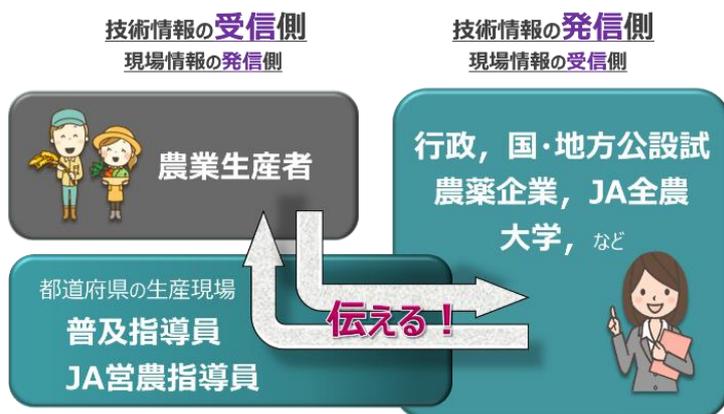


図 1.
薬剤抵抗性リスクコミュニケーション
研究と生産現場の間の農業技術情報の流れ 山本(2019)

農林害虫防除研究会「殺虫剤抵抗性対策タスクフォース」

農林害虫防除研究会では、2019年に殺虫剤抵抗性対策に対応した専門委員会「殺虫剤抵抗性対策タスクフォース」を設置した(山本・土井, 2019)。その目的は、①農業生産現場の薬剤抵抗性対策のニーズに応え、「抵抗性対策の技術集約と普及」を進めること、②抵抗性リスクを進めるため、第三者的立場から「行政-研究者-現場指導者-生産者が、所属組織に関わらず垣根を越えて意見交換・情報共有できる広場」を提供することである。これまでの主な活動として、農林害虫防除研究会 HP (以下、本研究会 HP) で情報発信を開始し、2020年に殺虫剤抵抗性リスク評価表(山本・土井, 2021)を本研究会 HP で公開し、そして今回のシンポジウムの企画・開催に至った。

そもそも、なぜ薬剤抵抗性が問題となったのか？

農業経済学はやや大きな観点から薬剤抵抗性問題のきっかけを説明する。1940年代、いわゆる「緑の革命」での3大技術、灌漑システム整備、品種改良および化学肥料によって、農作物の生産は飛躍的に増大し人口増加に対応できた。一方、農作物生産の拡大・増収に伴い病害虫・雑草の発生リスクとそれを解決する作物保護策の重要性が高まった。それに応じた化学農薬の発明と使用は、簡便で性能が良い作物保護技術として病害虫・雑草の発生リスクを大幅に低減した。しかしその当時は、虫害防除分野を例にすると、生物的・物理的防除等の IPM 技術は研究開発の萌芽・過渡期であり、化学農薬ほど安定的で確実な作物保護技術ではなかった。そのため、化学農薬に頼らざるを得ない防除となり、薬剤抵抗性が新たな作物保護上の問題としてクローズアップされた。

その後の化学合成技術の向上とともに新規作用機構の農薬が次々と開発され代替剤としても使用されたが、薬剤抵抗性管理・対策の技術確立と現場への周知は十分でなく、抵抗性問題が繰り返された。これは現在でも同様である。薬剤抵抗性管理が問題となる近年の背景・要因は、化学農薬に関してその強み (S)・弱み (W)・機会 (O)・脅威 (T) から課題抽出する手法、SWOT 分析、で解説されているので参考にされたい(山本, 2012; 2021)。

一方、2000年前後から、耕種的防除技術の進展に加え、生物的・物理的防除技術資材の実用化も進み、その防除効果も安定した。これらの技術・資材は実践的な IPM 技術として実使用されるだけでなく、薬剤抵抗性管理技術としても必要であり(柿元, 2021; 山本, 2019)、今後の開発・実用化の継続を期待する。

温故知新 日本における殺虫剤抵抗性研究の歩み

1960年代初頭に日本では水稻害虫(ニカメイガ、ツマグロヨコバイなど/有機りん剤)や果樹ハダニの防除において、殺虫剤抵抗性の顕在化が全国的にも防除上の関心事となった。そこで日本植物防疫協会の主導で、殺虫剤抵抗性対策委員会(1962~1972: 稲作害虫部会と果樹ハダニ部会)と殺虫剤抵抗性研究会(1974~1981)が、期間を連続して研究コンソーシアムとして結成された。期間に応じて4名の委員長と43名の委員のもと、農林水産省・農業技術研究所、大学、地方公設試が研究に参画した。抵抗性研究の実施、試験成績書の発行、シンポジウム開催、現地検討会開催、抵抗性実態アンケート調査などが多角的に実施された(日植防, 1983)。

この2期にわたる対策委員会・研究会の数々の成果は、現在の殺虫剤抵抗性管理の考え方の礎になった。詳しくは割愛するが、例えば、抵抗性機作の生理・生化学的研究、数理

モデルを用いたシミュレーション研究、薬剤の共力作用、薬剤ローテーションの有効性の有無、交差抵抗性・負相関交差抵抗性などが研究された。

初期の殺虫剤抵抗性研究から得たもの (1) 薬剤抵抗性の検定等

この初期 2 つの対策委員会・研究会の研究活動は、その後の研究者と施策を作る立場のモチベーションアップに寄与した。現在の殺虫剤抵抗性研究（リスク評価）、抵抗性管理や抵抗性リスクミを考える礎となり現在に至る。

その中でも、薬剤抵抗性検定法（生物検定）の開発は、農林水産省の薬剤抵抗性検定事業を後押ししたと考える。農林水産省では、1971 年から、都道府県病害虫防除所に対して薬剤抵抗性検定の実施と結果の公表を促し、さらに全国的な抵抗性実態アンケートを適宜実施した。これは 2021 年現在でも、IPM を推進する諸事業の一環で継続されている。

2014～18 年には、農林水産省委託プロジェクト研究「ゲノム情報等を活用した薬剤抵抗性管理技術の開発」が問題害虫 6 種で実施され、農研機構、大学、都道府県公設試、民間企業が参画した。6 種害虫で最新の技術を用い抵抗性リスク評価（研究）が実施され、その結果を基に「薬剤抵抗性農業害虫管理のためのガイドライン案」が作成・公開された（農研機構、2019）。また、日本植物防疫協会では、薬剤抵抗性をテーマにしたシンポジウムをタイムリーに開催し、抵抗性リスクミに寄与している。

初期の殺虫剤抵抗性研究から得たもの (2) 薬剤ローテーションへの警鐘

さらに、初期 2 つの対策委員会・研究会では、薬剤ローテーションの有効性の有無の実証研究と基礎研究も行われた。その結果、薬剤が有効な総使用回数は、連続使用でも薬剤ローテーションでも変わらないと総合的に報告された。これは、薬剤ローテーションを成功に導く諸条件（Georghiou, 1983; Yamamura, 2021）を、防除の現場では現実的に満たすことができない難しさを示唆した。そしてこの初期研究から、薬剤ローテーションは問題解決の全てではなく予防的対策として考えるべき、との指摘もあった。当時既に鳴らした警鐘は、薬剤ローテーションは普及しているが万能・万全ではないことである。しかし残念ながら、この警鐘は現在でも現場へ広く引継がれているとは言えない。そして現在の我々が学ぶ重要なことは、全ての IPM 技術を駆使・実践すること、現場で薬剤ローテーションを成功させる方法を学び直すことである。先人達の成果・努力を謙虚に受け止めたい。

薬剤ローテーションには、作用機構（RAC コード）が異なる薬剤を組合せて輪番に使用することだけでなく、次の処理までの薬剤感受性回復（抵抗性の繁殖力低下や感受性個体群との交流などによる）も必要である（Georghiou, 1983）。この 2 条件も忘れてはならない。なお、本シンポジウムの講演 4（演者：山村光司）では、薬剤ローテーションについて、数理モデルを用いた最適な条件・方法等（Yamamura, 2021）が報告される。

初期の殺虫剤抵抗性研究から得たもの (3) IPM

この初期 2 つの対策委員会・研究会の研究が始まった 1960 年代当時は、「総合的病害虫・雑草管理（IPM）」という用語は未だなく、「総合防除」がそれに相当した。薬剤抵抗性対策や農薬の安全性対策もきっかけとして総合防除が唱えられ、その後さまざまな研究が進み現在の IPM へと至る。初期の委員会・研究会の報告書等で印象に残った一文を記す。「…（中略）…、ひろく総合された防除技術を駆使して対応しなければ，“薬剤抵抗性

ハダニ対策”というこの古くて新しい言葉は、いつまでたっても“古くて新しい”という形容詞がいつまでもつけられたまま、将来へ残される課題となるであろう。」(上住, 1979)。

薬剤抵抗性問題の2つの解決策

薬剤抵抗性問題には2つの解決策がある(山本, 2017a)。まず、①使用できる薬剤数を増やすための「新規作用機構の薬剤開発」と、②抵抗性発達を遅延させ薬剤をできるだけ長く使用するための「後手に廻らない薬剤抵抗性管理の普及」である。生産現場で実践できるのは、後者の薬剤抵抗性管理である。

そして、現場では安易に新規薬剤の使用に頼りすぎない薬剤抵抗性管理の工夫が必要である。さらに、開発企業には新規薬剤を開発する際には、上市・販売までに作用機構の研究に加え薬剤抵抗性管理をあらかじめ提案することも期待したい。

薬剤抵抗性リスク分析のステップ

この2つの解決策を踏まえて薬剤抵抗性問題に取り組むために、抵抗性発達を“抵抗性リスク”として考えて、“リスク分析”の考え方を取り入れる(山本, 2019)。一般的にリスク分析とは、さまざまなリスクに対応する考え方の道筋であり、3つのステップ、「リスク評価→リスク管理→リスクコミュニケーション」から成る(図2)。



図2. 薬剤抵抗性リスク分析 山本(2019)

第1ステップ: 抵抗性の実態や特性を明らかにする研究、「薬剤抵抗性リスク評価」である。これは薬剤感受性検定やさまざまな抵抗性の諸特性などを研究・解明して、抵抗性対策を伝える資料や抵抗性対策ツールを作成する上での基盤となる。特に、研究を集約したものが「抵抗性リスク評価表」であり、抵抗性リスクの大きさを数値化する。この表は、地域ごとの抵抗性対策をわかりやすく考える抵抗性対策ツールとなる(山本・土井, 2021)。

第2ステップ: 「薬剤抵抗性(リスク)管理」で、後手に廻らない抵抗性リスクコントロールの施策である。抵抗性リスク評価をベースとした薬剤抵抗性対策マニュアルやガイドライン、各地域・作物の防除暦、GAP(農業生産工程管理)による指導が相当する。

第3ステップ: 先述の「薬剤抵抗性リスクコミュニケーション(抵抗性リスクコミ)」である(図1)。抵抗性リスクコミでは、研究者・指導員・行政などの技術側が生産者へ抵抗性リスクの重大性や被害・損失の程度を正しく伝え、抵抗性対策ツールや方法を分かりやすく説明する。また、生産者からの現場情報・問題を汲み上げることができれば、双方向のリ

スコミが機能し、薬剤抵抗性管理が多くの作物／地域で普及するだろう。

「抵抗性リスクミ」という用語は、農林害虫防除研究会・岩手大会にて提案された（山本, 2017b）。抵抗性リスクミの成功事例の一部は山本（2020）が紹介しており、本シンポジウムの講演 5（演者：本山直樹）でも具体的に紹介される。

そして、さまざまな地域・現場での今後の抵抗性リスクミの事例増加に期待したい。

薬剤抵抗性管理を構成する要素

ここで薬剤抵抗性管理に関する用語を整理する（山本, 2019; 2020）（図 3）。“薬剤抵抗性管理”とは、薬剤抵抗性という難敵を抑えるための大きな「戦略」、すなわち大作戦である。そして、“抵抗性対策ツール”という様々な「武器」を活用して、“抵抗性対策”という「戦術」、すなわち適切な薬剤の使用方法や防除法を実行して難敵を制御し折り合いをつける。ここで、抵抗性対策ツールをどれだけ準備し活用できるか、IPM 技術を駆使して薬剤ローテーションや混用などの薬剤処理をいかに適切に実施できるかが、薬剤抵抗性管理のポイントであるのは言うまでもない。

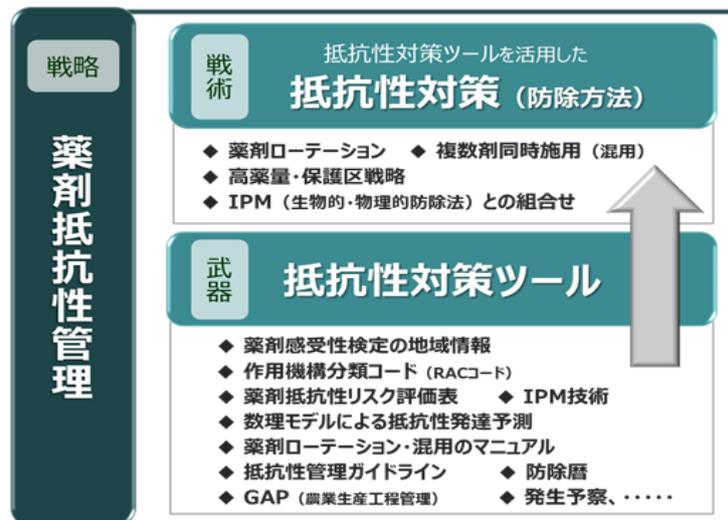


図 3. 薬剤抵抗性管理を構成する要素 山本 (2019, 2020)

農業生産に関わる管理体系と薬剤抵抗性管理の位置づけ

農業生産には図 4 に示す様々な管理体系が関わる。この中で病虫害・雑草防除に関わる管理度合いが深くなるのは、総合的作物管理 (Integrated Crop Management: ICM) からである。その中で、薬剤抵抗性管理 (Pesticide Resistance Management: PRM) を効率的に進めるためには、総合的作物管理 (ICM) の重要な基盤技術の一つである耕種的防除の利用や、総合的病虫害・雑草管理 (Integrated Pest Management: IPM) の生物的防除や物理的防除資材の活用が不可欠である。すなわち、薬剤抵抗性管理 PRM は ICM・IPM の基盤の上に成り立つ (山本, 2019)。IPM 実践指針の考え方 (農水省植防課, 2005) を組込んだ IPM ベースの抵抗性対策が農水省植物防疫課から推進されている (白石, 2017)。

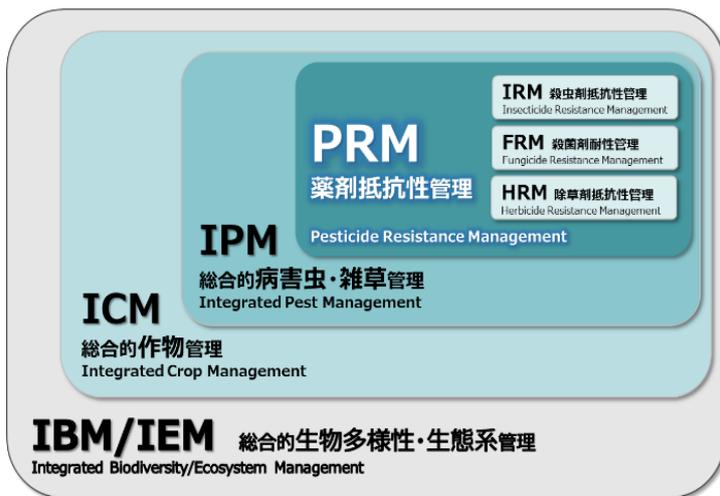


図 4. 農業生産に関わる管理体系と
薬剤抵抗性管理の位置づけ
山本 (2019)

殺虫剤抵抗性の発達段階の区分

殺虫剤抵抗性リスク評価と抵抗性リスクの実践には、評価薬剤・害虫の地域や圃場における抵抗性発達段階・レベルの適切な判断が必要となる。だが、例えば「感受性低下」「抵抗性が疑われる」と「抵抗性」は本来異なるが、同義とする使用ミス・判断ミスが散見される。そのため農林害虫防除研究会・殺虫剤抵抗性対策タスクフォースでは、殺虫剤抵抗性の定義に従い、殺虫剤抵抗性の発達段階・レベルを区分する指標を作成し用語を明確にした。(表 1)。また、殺菌剤耐性菌研究会では、菌の薬剤感受性に関するベースラインデータと圃場での防除効果に基づいて耐性菌発達段階の用語を定義しており(石井, 2010)、その指標も参考にした。因みに殺菌剤耐性菌研究分野では、この基準を用いた耐性菌研究報告が一般的である。

表 1. 殺虫剤抵抗性発達段階・レベルの区分

殺虫剤抵抗性の発達段階の区分		参考：殺虫剤抵抗性に関するさまざまな指標	
抵抗性発達の段階	①圃場での防除効果 実用量・濃度 ②室内での生物検定 薬剤感受性ベースライン ¹⁾ との比較	遺伝子診断による 抵抗性リスクレベル (農研機構) 山村・須藤・山中(2019)	都道府県下での 抵抗性の広がりフェーズ 白石 (2017) 農水省植防課 鈴木 (2019) 三重県植防会議
抵抗性	①圃場：防除効果不十分、無し ②室内：効果不十分、無し	リスクレベル 3 既に抵抗性が発達	フェーズⅢ ・都道府県下で広域に広がる
感受性低下	①圃場：防除効果あり ②室内：効果不十分 ²⁾	リスクレベル 2 抵抗性が発達中	フェーズⅡ ・ある程度の面積規模に広がる フェーズⅠ ・一部の圃場の現象にとどまる
感受性	①圃場：防除効果あり ②室内：効果あり(ベースラインと同等)	リスクレベル 1 抵抗性は未発達	フェーズⅠ-a ・感受性低下は認められない ・他の都道府県では発達あり フェーズⅠ-b ・感受性低下は認められない
参考：非感受性	もともと効果が無い	—	—

¹⁾ 薬剤感受性ベースライン：薬剤使用前の個体群，あるいは標準感受性個体群における薬剤感受性

²⁾ 補足説明：実用量・濃度よりも低い薬量・濃度で効果があっても、ベースラインと比較して効果が不十分であれば「感受性低下」となる。

殺虫剤抵抗性発達段階の区分には、殺虫剤抵抗性の定義に基づく判断が基本で必須であるが、FAO (2012) や IRAC (2022) の定義は農薬使用者には難解である。「殺虫剤抵抗性とは、農薬使用基準に準じて使用しても、期待される防除効果を発揮できない現象が繰り返し観察される、害虫個体群における感受性の遺伝的変化」である (IRAC, 2021, 訳：農薬工業会)。その定義をかみ砕きキーワードを明確にすると、「同じ作用機構の薬剤を使用し続けると、実用薬量で使用しても、圃場での期待される防除効果がなくなること」と簡略し理解できる。

「感受性、感受性低下、抵抗性」の抵抗性発達段階の用語を区別するには、まず次の2点が重要で必須である。それは、当該薬剤の実用薬量での、①使用前と使用後の効果の変化、②圃場の防除効果と室内感受性検定の効果を併せて変化を判断すること、である。補足説明すると、薬剤使用の前後の比較 (時間的変化)、また標準的な感受性系統の個体群との比較をするためには、まず薬剤感受性のベースライン (薬剤使用前の感受性、基本性能) を知る必要がある。以下に、抵抗性リスク評価したい地域・圃場の害虫個体群における「感受性、感受性低下、抵抗性」の区分を説明した。

- 抵抗性: 実用薬量で圃場の防除効果でも室内の生物検定等でも効果が不十分な段階。
- 感受性低下: 室内の生物検定等で実用薬量や低薬量で効果がベースラインよりも不十分な場合でも、圃場では実用薬量の防除効果がある段階。
- 感受性: 室内の生物検定等でベースラインと同等であり、圃場でも防除効果がある段階。

この抵抗性発達段階の区分指標には、「遺伝子診断を用いたリスクレベル区分 (山村・須藤・山中, 2019)」と、農林水産省植防課の「抵抗性広がりフェーズ区分 (白石, 2017; 鈴木, 2019)」を対応させた (表 1)。さらに、室内生物検定で感受性系統との抵抗性比を用いた判断 (林, 1983) もある。

圃場での抵抗性発達段階区分の判断を迷わせる点について述べておきたい。まず、圃場の防除効果を十分に考慮せずに、主に室内の生物検定等に頼り切った判断をしがちである点があげられる。また、薬剤の圃場防除効果へ影響する気象条件 (好天続きによる光分解や降雨影響による薬剤流亡など) や防除タイミングが合わずに防除が不十分であった場合に、抵抗性発達と勘違いし判断する場合もある。さらに、生物検定や遺伝子診断した害虫個体群の採集場所が限られていたり、採集個体数が少なかったりすれば、その地域全体の薬剤感受性の状況を反映しているとは言えない。いわゆるサンプルサイズの問題にも留意する必要がある。このような留意点も併せて抵抗性発達段階を判断すると、判断ミスや現場指導員・生産者へ適切な情報提供ができる。

さらに、個々の殺虫剤の「薬剤感受性ベースライン」データの設定方法やそのデータの共有方法について、現場だけでなく研究者間でも十分に議論されていない。これは解決したい今後の課題である。例えば、感受性データのメタアナリシスを行うなど (日本・園田, 2018)、標準化手法の検討も含めて取組みたい。

おわりに

殺虫剤抵抗性管理・対策を主題としたシンポジウムはこれまでも農林害虫防除研究会以外の団体で開催されてきた。今回の本シンポジウムは、過去の各シンポジウムの趣旨を尊重し受け継ぎたい。それに加え本シンポジウムでは、防除関係者が所属の枠を超えて連携

し、薬剤抵抗性リスクコミュニケーションを深めることも趣旨としている。そして、抵抗性対策を現場で実践・普及するためのスキルアップに貢献できればと考える。さらに、殺菌剤耐性菌研究会の活動には見習うべきことが多く、今後は連携をお願いしたい。

また、日本植物防疫協会の資料館館長・植野節子氏には貴重な資料をご提供いただき、厚く御礼申し上げます。

最後に、先述の殺虫剤抵抗性対策委員会・研究会の委員でもご活躍され、殺虫剤抵抗性研究を国内外で牽引された齋藤哲夫様（名古屋大学名誉教授）が、2020年12月にご逝去された（享年96歳）。先生の殺虫剤抵抗性研究の多大なる業績に敬意を払い、本シンポジウムにおいて追悼する。

引用文献

- FAO (2012) Guideline on Prevention and Management of Pesticide Resistance.
藤岡伸祐 (2019) 農林害虫防除研究会 News Letter 43:1-4.
- Georghiou, G. P. (1983) Management of Resistance in Arthropods, "Pest Resistance to Pesticides (eds. G. P. Georghiou & T. Saito), Plenum, Press": pp.769-792.
- 林晃史 (1983) 薬剤抵抗性 -新しい農薬開発と総合防除の指針- (編: 深見順一・上杉康彦・石塚皓造): pp.31-53.
- 日本典秀・園田昌司 (2019) 薬剤抵抗性農業管理のためのガイドライン案 (2019年3月/農研機構): pp.45-55.
- IRAC (2021) IRAC Mode of Action Classification Scheme Ver.10.1.
- 石井英夫 (2010) 第20回殺菌剤耐性菌研究会シンポジウム講演要旨集: 1-10.
- 柿元一樹 (2021) 農業 1676号, 2021.4: 6-24.
- Kiritani K. (2000) Integrated Pest Management Reviews 5: 175-183.
- 日本植物防疫協会 (1983) 30年の活動 (30周年記念誌): pp.60-64.
- 農研機構 (2019) 薬剤抵抗性農業管理のためのガイドライン案 (2019年3月)
- 農林水産省 (2005) 「総合的病害虫・雑草管理 (IPM) 実践指針」
- 白石正美 (2017) 植物防疫 71(4): 269-277.
- 鈴木啓史 (2019) 植物防疫 73(10): 615-622.
- 上住泰 (1979) 野菜害虫の殺虫剤抵抗性に関するシンポジウム講演要旨 (昭和54年度), 日本植物防疫協会: pp.23-32.
- 山村光司・須藤正彬・山中武彦 (2019) 薬剤抵抗性農業管理のためのガイドライン案 (2019年3月/農研機構): pp.16-29.
- Yamamura K. (2021) Population Ecology, 63: 190-203.
- 山本敦司 (2012) 日本農薬学会誌 37(4): 392-398.
- 山本敦司 (2017a) 植物防疫 71(5): 337-346.
- 山本敦司 (2017b) 第22回農林害虫防除研究会岩手大会, 講演要旨: 9.
- 山本敦司 (2019) 植物防疫 73(12): 766-773.
- 山本敦司 (2020) 関東東山病害虫研究会報 67: 1-8.
- 山本敦司 (2021) 東京農業大学総合研究所研究会, 生物的防除部会ニュース 72: 15-23.

山本敦司・土井誠（2019）農林害虫防除研究会 News Letter 43: 4-7.

山本敦司・土井誠（2020）農林害虫防除研究会 News Letter 44: 3-4.

山本敦司・土井誠（2021）植物防疫 75(1): 16-24.

（2021年11月12日受領，2022年9月5日改訂）

Preface: The 1st Symposium on the Insecticide Resistance Management
Practice and Cooperation! The Insecticide Resistant Management based on IPM

Atsushi Yamamoto^{1,2}, Makoto Doi^{1,3}, Masahiro Iguchi^{1,4}, Hitomi Miyazaki^{1,5},
Takashi Noda^{1,6}

¹ Executive Committee of the Symposium. ² Nippon Soda Co., Ltd.

³ Shizuoka Pref. R.I. Agri. and Forest. ⁴ Wakayama Fruit Tree Exp. Sta.

⁵ Zen-Noh Agric. R&D Center. ⁶ Japan Plant Protection Association

(Received: 12 Nov. 2021, Revised: 5 Sep. 2022)

薬剤抵抗性病害虫の発生状況と対策の取組について

岡田和秀¹・井田仁¹

¹農林水産省 消費・安全局 植物防疫課 防疫対策室

1. はじめに

化学農薬の使用は病害虫・雑草防除の根幹である一方で、病害虫・雑草の薬剤抵抗性の発達が切り離せない課題であり、その管理が重要となる。このような背景のもと、都道府県が主体となり、薬剤感受性検定の実施による薬剤抵抗性の発生状況の把握や、検定結果に基づく生産者への適切な防除指導が行われてきた。例えば、多くの都道府県において、普及指導員などが生産者に対して病害虫・雑草防除の指導を行う際に使用される「防除指針」が作成されているが、その中にも薬剤抵抗性に関する情報、それに基づく農薬使用上の注意事項等が記載され、適切な防除指導に役立てられてきた。

しかしながら、薬剤抵抗性を獲得した病害虫や雑草（以下「薬剤抵抗性病害虫・雑草」という。）がますます顕在化している。薬剤抵抗性病害虫・雑草を適切に管理していくためには、その発生を可能な限り早期に発見し、必要な対策を講じることが重要となる。加えて、薬剤抵抗性病害虫・雑草が発生していない時からそれらが発生させない対策に取り組む必要があり、そのためにはそれらの発生情報を、作用機構分類や薬剤耐性の発生リスクといった情報と合わせて生産者に提供することが重要となる。

本講演においては、適切な薬剤抵抗性管理に必須となるモニタリングとその結果の活用取組として、都道府県による薬剤感受性検定に基づく薬剤抵抗性管理について、また、国内の薬剤抵抗性病害虫・雑草の発生状況に関して、全国薬剤抵抗性病害虫・雑草発生状況調査の概要について紹介したい。

2. 薬剤感受性検定に基づく薬剤抵抗性管理

(1) 発生予察事業

発生予察事業は、病害虫の発生状況、気象、作物の生育状況等に関する調査を実施し、調査結果の解析に基づく病害虫のその後の発生予測を防除対策と合わせて農業生産者を含めた関係者に提供するものである。都道府県では、本事業の一環として薬剤感受性検定を実施しており、その結果は国へ報告されるとともに、この情報に基づいた県内の指導者・生産者への指導を通じて、農業生産現場における適切な防除の実践へとつなげている。

(2) 薬剤感受性検定の実施状況

平成 27 年度以降の各都道府県の報告を基に、薬剤感受性検定の実施状況を整理し、各年度の検定実施件数の推移を図 1 に示した。年による変動が見られるが、平成 27 年度から令和元年度までの報告件数を平均すると 587 件となり、1 都道府県あたり平均年 12 件

が報告されている。報告件数の内訳は、各年度とも殺虫剤がおよそ4分の3、殺菌剤がおよそ4分の1となっている。他方、除草剤に関しては検定実績が報告されていない。

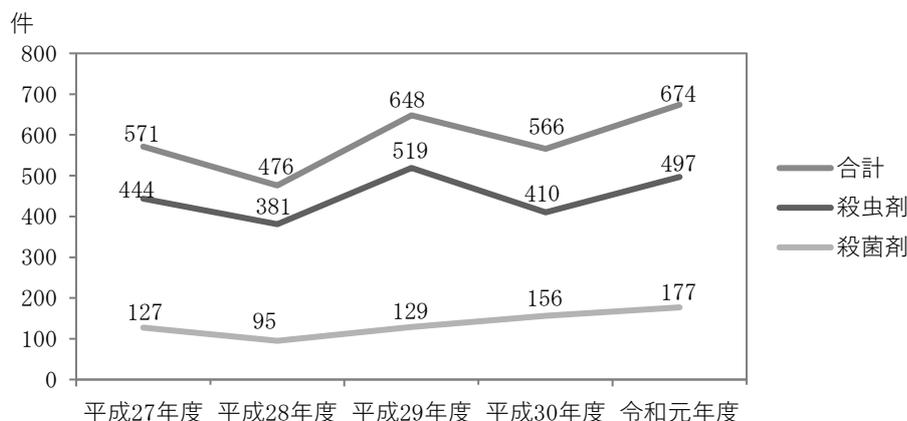


図1. 感受性検定の実施件数（農薬種類別）※

※個別農薬名の記載が無く、農薬の作用機構グループでまとめた報告の場合も1件として数えた。

各都道府県で検定が行われる病害虫の種類は年によって異なるが、害虫ではハダニ類（ナミハダニ、ミカンハダニ）、アザミウマ類（ミカンキイロアザミウマ、ネギアザミウマ、ミナミキイロアザミウマ）、ヨトウムシ類（シロイチモジヨトウ、ハスモンヨトウ）、コナガ、トビイロウンカ、病害では野菜類及び花卉類の各種灰色かび病の報告件数が多くなっている。殺虫剤の作用機構^{注)}別では、ネオニコチノイド系、アベルメクチン系/ミルベマイシン系、ジアミド系、スピノシン系、β-ケトニトリル誘導体、ピレスロイド系/ピレトリン系、ピロール系/ジニトロフェノール系/スルフルラミド、殺菌剤の作用機構別では、QoI 殺菌剤、DMI 殺菌剤、SDHI 殺菌剤、MBC 殺菌剤が毎年上位を占める。これらの報告件数の多い病害虫及び化学農薬グループは、次に示す全国薬剤抵抗性病害虫・雑草発生状況調査において、抵抗性の報告事例が多いものとなっている。平成28年に都道府県に対して薬剤感受性検定の実施対象に関するアンケート調査を実施したところ、現場で薬効の低下が疑われる農薬や病害虫のほかに、薬剤耐性/抵抗性の発達リスクが高い農薬や病害虫、他の都道府県や試験研究等で薬剤感受性の低下が報告されている農薬や病害虫等を対象にしているとの回答が得られていることから、都道府県では、薬剤抵抗性病害虫・雑草の早期発見のため、薬剤抵抗性病害虫・雑草の発達リスクに応じた検定が実施されていると考えられる。

注) 本稿で表記する農薬の「作用機構」名については、IRAC (Insecticide Resistance Action Committee、殺虫剤抵抗性対策委員会)、FRAC (Fungicide Resistance Action Committee、殺菌剤耐性菌対策委員会) 及び HRAC (Herbicide Resistance Action Committee、除草剤抵抗性対策委員会) で定められている作用機構分類（農薬工業会ホームページに掲載）に基づき、殺虫剤は“サブグループまたは代表的有効成分”、殺菌剤は“グループ名”、除草剤は“化学グループ”を記載した（参考文献①）。

(3) 薬剤感受性検定の結果の活用

薬剤感受性検定の結果は、ホームページでの公表、発生予察情報や技術情報への掲載、

各種病害防除対策会議での報告等を通じて情報提供されている。また、検定結果に基づく防除指導のために、防除指針への反映、防除暦の掲載薬剤に関する関係者との協議等の取組が行われている。

3. 全国薬剤抵抗性病害虫・雑草発生状況調査

植物防疫課では、都道府県における薬剤抵抗性病害虫・雑草の発生状況や防除指導等の実態を把握するため、平成 23 年度から 25 年度にかけて及び平成 28 年度に都道府県の協力の下、全国薬剤抵抗性病害虫・雑草調査を実施した。続いて、令和 2 年度に当該調査を 4 年振りに実施した。ここでは、令和 2 年度の調査結果を中心に説明する。平成 23～25 年度、平成 28 年度の結果については、白石（2017）（参考文献②）を参照いただきたい。

（1）指標（フェーズ）の分類

全国の薬剤抵抗性病害虫・雑草の発生状況を把握するにあたり、都道府県における薬剤抵抗性病害虫・雑草の発生度合い等の状況を踏まえて、薬剤抵抗性の発達度合いを示す指標（フェーズ）を用いて整理を行った。本指標は、フェーズ 0 を薬剤抵抗性の発達を警戒している段階とし、都道府県内での薬剤抵抗性病害虫・雑草の発生度合いに従ってフェーズ I、II、III に設定したものとなっている（表 1）。

表 1. フェーズの分類

フェーズ	状況
フェーズ 0	感受性低下は認められていないものの、モニタリング調査等により薬剤抵抗性の発達を警戒している。
フェーズ I	一部のほ場での現象にとどまっている状況。指導者には周知するが、農家への指導の必要性は低い。
フェーズ II	ある程度の面積規模で薬剤抵抗性の発達が見られており、農家への注意喚起を要する（どの程度の広がりや注意喚起を行うべきかは、ケースバイケースであり、防除指導機関の判断による）。
フェーズ III	県下で広域に広がり、対象薬剤の使用については何らかの指導が必要。

（2）報告事例数の推移

平成 23～25 年度、平成 28 年度、令和 2 年度の各年度における薬剤抵抗性病害虫・雑草の報告事例数を、「都道府県-作物-病害虫・雑草-農薬（作用機構）」を 1 件として集計し、結果を図 2 に示した。また、フェーズ別の報告事例数を表 2、病害虫・雑草別の報告事例数を表 3 に示した。年度間で取りまとめ要領が若干異なり、また、統計的な調査ではないことに留意する必要があるが、報告事例数は年を追って年増加している。また、フェーズ別では、II、III の報告が多くなっている。殺虫剤、殺菌剤、除草剤別では殺虫剤が最も多く、近年その割合が高まっている。

なお、令和 2 年度の調査において、フェーズ III の事例は、殺虫剤が 30 道県、殺菌剤

が 36 都道府県、除草剤が 12 県からの報告があった。平成 28 年度の調査では、それぞれ 27 道県、35 都道府県、8 県からの報告となっており、平成 28 年度から令和 2 年度の調査にかけて、殺虫剤、殺菌剤、除草剤の全てにおいて、フェーズ III の報告があった都道府県の増加が認められた。

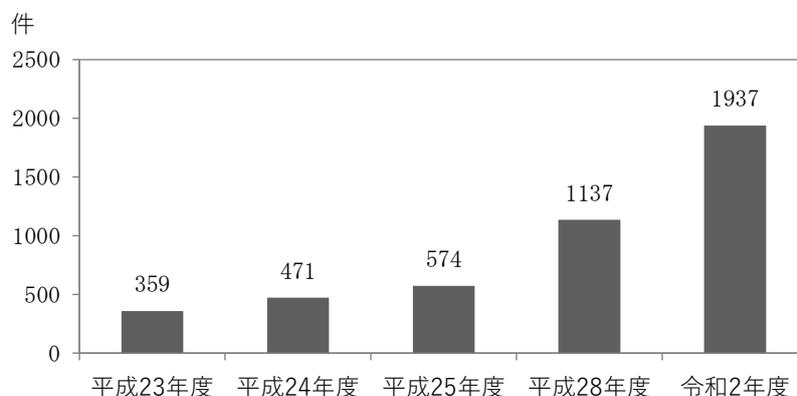


図 2. 薬剤抵抗性の報告事例数（フェーズ 0 を除く）

表 2. フェーズ別の報告事例数

	平成 23 年度	平成 24 年度	平成 25 年度	平成 28 年度	令和 2 年度
フェーズ 0	—	54	59	146	292
フェーズ I	29	62	79	153	243
フェーズ II	159	208	265	513	1005
フェーズ III	158	195	218	449	654
不明など	13	6	12	22	35
合計	359	525	633	1283	2229

表 3. 殺虫剤、殺菌剤、除草剤別の報告事例数（フェーズ 0 を除く）

	平成 23 年度	平成 24 年度	平成 25 年度	平成 28 年度	令和 2 年度
殺虫剤	190 (53)	236 (50)	292 (51)	711 (63)	1233 (64)
殺菌剤	147 (41)	211 (45)	258 (45)	365 (32)	602 (31)
除草剤	22 (6)	24 (5)	24 (4)	61 (5)	102 (5)
合計	359	471	574	1137	1937

※括弧内は各年度の報告事例数の合計に占める割合 (%)

(3) 令和 2 年度の報告事例の内訳

① 作物別、病害虫・雑草種別

殺虫剤、殺菌剤、除草剤ごとに、作物別の報告事例数（上位 5 又は 10 作物）及び各作物の病害虫・雑草種別の内訳を表 4 に示した。殺虫剤では、イチゴ、キュウリ、ネギ、ナシの順に事例数が多く、作物－害虫種の組合せでは、イチゴのナミハダニが最も多く、続

いて、ナシのナミハダニ、キュウリのミナミキイロアザミウマ、ネギのネギアザミウマ、ネギのシロイチモジヨトウの順に多い。殺菌剤では、トマト、水稲、イチゴ、キュウリの順に事例数が多く、作物一病害種の組合せでは、トマトの灰色かび病が最も多く、続いて、水稲のいもち病、イチゴの炭疽病、キュウリの褐斑病の順に多い。除草剤では、水稲に関する報告がほとんどで、ホタルイ類、アゼナ類、コナギが多くなっている。

② 農薬の作用機構別

殺虫剤、殺菌剤、除草剤の作用機構別の報告事例数を表5に示した。殺虫剤では、ネオニコチノイド系、ジアミド系、アベルメクチン系/ミルベマイシン系、ピレスロイド系/ピレトリン系、 β -ケトニトリル誘導体の順に事例数が多く、殺菌剤では、QoI 殺菌剤、MBC 殺菌剤、DMI 殺菌剤、SDHI 殺菌剤、N-フェニルカーバメート類の順に多い。除草剤では、スルホニルウレアに関する報告事例が多く割合を占めている。

表4. 作物別の報告事例数（フェーズ0を除く）と各作物の病虫害・雑草種別の内訳

① 殺虫剤（上位10作物）

No.	報告事例数	作物名	害虫種別の内訳
1	174	イチゴ	ナミハダニ 111, ヒラズハナアザミウマ 27, ミカンキイロアザミウマ 14, オンシツコナジラミ 8, ハダニ類 8, ハスモンヨトウ 2, モモアカアブラムシ 2, ミナミキイロアザミウマ 1, ワタアブラムシ 1
2	91	キュウリ	ミナミキイロアザミウマ 62, タバココナジラミ 11, ナミハダニ 5, ワタアブラムシ 4, オンシツコナジラミ 3, ミカンキイロアザミウマ 2, アザミウマ類 1, ハスモンヨトウ 1, ヒラズハナアザミウマ 1, ワタヘリクロノメイガ 1
2	91	ネギ	ネギアザミウマ 45, シロイチモジヨトウ 44, ネギハモグリバエ 1, ネダニ類 1
4	74	ナシ	ナミハダニ 66, カンザワハダニ 3, クワオオハダニ 2, チュウゴクナシキジラミ 1, リンゴコカクモンハマキ 1, ワタアブラムシ 1
5	65	トマト	タバココナジラミ 35, オンシツコナジラミ 17, ミカンキイロアザミウマ 6, ハスモンヨトウ 3, タバココナジラミ類 2, モモアカアブラムシ 2
6	63	キク	ミカンキイロアザミウマ 38, ヒラズハナアザミウマ 7, ナミハダニ 6, ミナミキイロアザミウマ 6, クロゲハナアザミウマ 4, シロイチモジヨトウ 1, ネギアザミウマ 1
6	63	ナス	ミナミキイロアザミウマ 42, ナミハダニ 11, ハスモンヨトウ 5, タバココナジラミ 3, タバココナジラミ類 2
8	60	水稲	ヒメトビウンカ 21, イネクビホソハムシ（イネドロオイムシ） 16, トビイロウンカ 14, アカヒゲホソミドリカスミカメ 3, セジロウンカ 3, コブノメイガ 2, コバネイナゴ 1
9	45	キャベツ	コナガ 33, シロイチモジヨトウ 10, ハスモンヨトウ 2
10	40	ミカン	ミカンハダニ 36, ミカンキイロアザミウマ 2, ミカンサビダニ 2

②殺菌剤（上位 10 作物）

No.	報告事例数	作物名	病害種別の内訳
1	121	トマト	灰色かび病 92, 葉かび病 25, すすかび病 4
2	96	水稻	いもち病 70, もみ枯細菌病 11, 褐条病 7, ばか苗病 7, Pythium 属菌による苗立枯病 1
3	85	イチゴ	炭疽病 40, 灰色かび病 35, うどんこ病 10
4	71	キュウリ	褐斑病 39, うどんこ病 18, べと病 8, 灰色かび病 6
5	55	ブドウ	べと病 28, 褐斑病 12, 晩腐病 11, 灰色かび病 2, 芽枯病 2
6	33	リンゴ	黒星病 13, 褐斑病 9, 斑点落葉病 6, 炭疽病 3, うどんこ病 2
7	26	ナシ	黒星病 17, 炭疽病 4, 赤星病 2, 黒斑病 2, 紅粒がんしゅ病 1
8	18	ナス	すすかび病 11, 灰色かび病 6, 黒枯病 1
9	14	ダイズ	紫斑病 14
10	6	小麦	うどんこ病 3, 赤かび病 2, 眼紋病 1

③除草剤（上位 5 作物）

No.	報告事例数	作物名	雑草種別の内訳
1	90	水稻（移植）	ホタルイ類 23, アゼナ類 22, コナギ 18, オモダカ 12, ミゾハコベ 3, ウリカワ 2, キクモ 1, タイヌビエ 1, ミズアオイ 1
		水稻（移植, 直播）	アゼトウガラシ 1, アゼナ類 1, オモダカ 1, コナギ 1, ホタルイ類 1
		水稻（直播）	コナギ 1, ネズミムギ 1
2	4	水田畦畔	ネズミムギ（イタリアンライグラス）2, オヒシバ 2
3	3	小麦	ネズミムギ（イタリアンライグラス）2, スズメノテッポウ 1
4	2	ナシ	ネズミムギ（イタリアンライグラス）2
5	1	大麦	スズメノテッポウ 1
5	1	麦類	スズメノテッポウ 1
5	1	サトウキビ	オヒシバ 1

表 5. 作用機構別の報告事例数（フェーズ 0 を除く）

①殺菌剤

IRAC コード	サブグループまたは代表的有効成分	報告 事例数
4A	ネオニコチノイド系	202
28	ジアミド系	109
6	アベルメクチン系／ミルベマイシン系	99
3A	ピレスロイド系／ピレトリン系	96
25A	β -ケトニトリル誘導体	79
5	スピノシン系	78
21A	METI 剤	74
13	ピロール系／ジニトロフェノール系／スルフルラミド	68
1B	有機リン系	56
UN	（作用機構が不明あるいは不明確な剤）	43
15	ベンゾイル尿素系	36
20D	ビフェナゼート	34
2B	フェニルピラゾール系（フィプロール系）	28
10B	エトキサゾール	28
20B	アセキノシル	26
1A	カーバメート系	25
25B	カルボキサニリド系	23
9B	ピリジン アゾメチン誘導体	19
23	テトロン酸およびテトラミン酸誘導体	17
18	ジアシル-ヒドラジン系	13
10A	クロフェンテジン／ジフロビダジン／ヘキシチアゾクス	10
16	ブプロフェジン	10
14	ネライストキシン類縁体	9
22B	セミカルバゾン系	9
29	フロニカミド	7
11A	<i>Bacillus thuringiensis</i> と生産殺虫タンパク質	6
12B	有機スズ系殺ダニ剤	5
12C	プロパルギット	4
12D	テトラジホン	4
19	アミトラズ	4
22A	オキサジアジン系	4
34	フロメトキン	4
7C	ピリプロキシフェン	2
20C	フルアクリピリム	1
30	メタジアミド系／イソオキサゾリン系	1
	合計	1233

②殺菌剤

FRAC コード	グループ名	報告 事例数
11	QoI 殺菌剤 (Qo 阻害剤)	211
1	MBC 殺菌剤 (メチルベンゾイミダゾールカーバメート)	121
3	DMI 殺菌剤 (脱メチル化阻害剤) (SBI : クラス I)	62
7	SDHI 殺菌剤 (コハク酸脱水素酵素阻害剤)	44
10	N-フェニルカーバメート類	43
2	ジカルボキシイミド類	29
16.2	MBI-D (メラニン生合成阻害剤-脱水酵素)	29
31	カルボン酸類	14
9	AP 殺菌剤 (アニリノピリミジン類)	13
25	グルコピラノシル抗生物質	8
24	ヘキソピラノシル抗生物質	6
4	PA 殺菌剤 (フェニルアミド類)	5
12	PP 殺菌剤 (フェニルピロール類)	5
19	ポリオキシン類	4
6	ホスホロチオレート類/ジチオラン類	1
17	KRI-殺菌剤 (ケト還元酵素阻害剤) (SBI : クラス III)	1
29	(2,6-ジニトロアニリン類)	1
50	アリルフェニルケトン類	1
U13	チアゾリジン	1
M3	ジチオカーバメート類及び類縁体 (求電子剤)	1
M7	ビスグアニジン類 (細胞膜攪乱剤、界面活性剤)	1
未記入		1
	合計	602

③殺菌剤

HRAC コード	化学グループ	報告 事例数
2	スルホニルウレア	80
9	グリシン	7
2	スルホンアニリド	6
2	トリアゾロピリミジン (タイプ 2)	4
10	ホスフィン酸	3
1	アリールオキシプロピオン酸エステル (FOPs)	1
3	ジニトロアニリン	1
	合計	102

(4) 発生状況に基づく薬剤抵抗性管理

本調査において報告事例の多い病害虫・雑草や報告事例の多い作用機構を有する農薬は薬剤抵抗性リスクが高いと考えられ、モニタリングの実施や発生状況に応じた対策を進める必要がある。一方、代替可能な農薬・技術がない、又は、既存の代替農薬・技術に何らかの課題がある等有効な対策が確立されていない場合は、報告事例が多く薬剤抵抗性が顕在化している場合はもちろんのこと、報告事例が少ない場合も薬剤抵抗性の顕在化に備えて、新たに代替農薬・技術の確立を検討する必要がある。本調査では、新たな代替農薬・技術の確立の必要性が高い事例を抽出する目的で、各事例について取組の緊急性を尋ねたところ、121 事例について緊急性があるとの回答があった。その中で、複数の都道府県から緊急性があると回答があった病害虫（病害については作物 - 病害の組合せ）を表 6 にまとめた。これらの事例の多くで、効果の高い代替剤がない、代替技術の効果が低いとのコメントがある。また、イネばか苗病については、現行の農薬の作用機構が限定されることが指摘されている。こうした事例を中心に、新たな代替農薬・技術の確立が求められている。

表 6. 複数の都道府県から代替技術の確立の取組に緊急性があると回答のあった病害虫

①害虫

作物名	害虫名	主なコメント	IRAC コード ^{a)}
キュウリ, トマト, ピーマン, メロン	タバココナジ ラム	・効果の高い剤が少ない ・大規模経営に対応するため、常温煙霧 処理などの開発・普及が必要	1A, 1B, 3A, 4A, 5, 6, 9B, 21A, 15, 16, 28, 29
イチゴ, スモモ, ブドウ, リンゴ	ナミハダニ	・有効な薬剤に限られる ・代替薬剤が少なく、対策技術も確立さ れていない ・天敵導入において、天敵に影響がなく 効果の高い薬剤が少ない	1B, 3A, 6, 10A, 10B, 12B, 12C, 12D, 13, 15, 20B, 20D, 21A, 23, 25A, 25B, UN
キュウリ, ナス	ミナミキイロ アザミウマ	・代替技術（天敵）の導入コストが高い ・ローテーション散布ができるほど、効 果が高く、使用可能な剤がない	1A, 1B, 2B, 3A, 4A, 5, 6, 7C, 13, 15, 21A, 28, UN
ネギ	ネギアザミウ マ	・ローテーション散布が未確立 ・現行の防除体系は労力がかかる ・卓効が見込める薬剤が不明	1A, 1B, 3A, 4A, 5, 6, 13, 14, 21A, 29, UN

a) 本調査で当該害虫に抵抗性が報告されている殺虫剤の RAC コード

②病害（作物－病害の組合せ）

作物名	病害名	主なコメント	FRAC コード ^{b)}
水稻	ばか苗病	・有効な防除剤は同一グループのみ ・化学農薬以外の防除手段は効果が低い か不安定	1, 3
水稻	もみ枯細菌病	・効果の高い代替剤がない ・化学農薬以外の防除手段は効果が低い か不安定	24, 31
ナシ	黒星病	・代替剤の選択肢が少ない ・代替技術が確立されていない	1, 3, 9
リンゴ	黒星病	・効果の高い代替剤がない	3, 11
ブドウ	晩腐病	・効果の高い代替剤がない	1, 3, 7, 11

b) 本調査で当該病害（作物-病害の組合せ）に抵抗性が報告されている殺菌剤の RAC コード

4. おわりに

平成 27 年に都道府県に対して、今後の薬剤抵抗性対策において何が必要かアンケート調査を実施したところ、全国 47 都道府県から「薬剤感受性検定結果に関する情報共有体制は重要である」との回答があった。当課では、これまでも、国、都道府県だけでなく、農薬メーカーや関係団体・研究会など、農薬と病害虫・雑草防除に関わる様々な立場の人々が協力して薬剤抵抗性対策に取り組めるよう、薬剤感受性検定や全国薬剤抵抗性病害虫・雑草発生状況調査の結果の共有等を行ってきたが、引き続き、薬剤抵抗性管理に関する各種情報が現場での病害虫・雑草防除指導に活用されるよう、情報共有体制の強化に取り組む必要があると考えている。

また、同アンケート調査では、薬剤感受性検定の課題として、薬剤ごとの検定方法や評価方法についての情報が不足していることや、都道府県担当機関の人員不足による検定対応の難しさ等が挙げられた。都道府県では、産地の実態や周辺地域の状況を踏まえた薬剤感受性検定が実施されているが、人員が不足している中で手間と時間をかけずに済む簡便な検定手法の開発が期待されている。このため、農林水産省では、令和 2 年度から消費・安全対策交付金により、現場で使用できる簡便・迅速な薬剤感受性検定方法の確立及び薬剤抵抗性のモニタリング手法や判断基準の確立についての支援を開始した。引き続き、課題解決のための支援を継続するとともに、事業で得られた成果について情報共有を進めたい。

令和 3 年 5 月に農林水産省が策定した「みどりの食料システム戦略」では、食料・農林水産業の生産力向上と持続性の両立をイノベーションで実現することを目指しており、関連する取組として、化学農薬のみに依存しない総合防除の推進や主要病害に対する抵抗性

を有した品種の育成等の薬剤抵抗性管理に資する技術の確立も挙げている。今後、本戦略での目指すべき姿を実現するためにも、薬剤抵抗性病害虫・雑草の管理を更に推進していくことが重要と考えている。

5. 参考文献

- ① RAC コード（農薬の作用機構分類）、農薬工業会、
<https://www.jcpa.or.jp/labo/mechanism.html>
- ② 白石正美（2017）. 農林水産省における薬剤抵抗性対策に向けた取組状況. 植物防疫
71 : 269-277.

Status and countermeasures for pesticide-resistant pests in Japan

Kazuhide Okada¹, Masashi Ida¹

¹Plant Protection Division, Food Safety and Consumer Affairs Bureau, Ministry of
Agriculture, Forestry and Fisheries (MAFF)

GAP による IPM と薬剤抵抗性対策の実践

○鈴木啓史

殺菌剤耐性菌研究会幹事長（三重県農産園芸課）

はじめに

米国における耐性菌の研究グループは、伝統的にカンキツの病原菌、リンゴ黒星病菌やウリ類うどんこ病菌の研究で知られる California 大学や Cornell 大学、テンサイ褐斑病菌の North Dakota 大学、イチゴ炭疽病菌の Florida 大学、それに我が国の農研機構に相当する USDA（米国農務省）-ARS（Agricultural Research Service）などがあり、それらが主に耐性菌研究を行っている（石井、2021）。日本においても、米国と同様に耐性菌の研究グループが組織化され、研究が継続的、体系的に実施されることを願っている。

より効果的で、効率的な薬剤抵抗性対策が、このような研究グループによって今後開発されることを期待する一方で、すでに先輩研究者の努力により、一定の薬剤抵抗性対策の道筋をつけていただいている。今は、この道筋をしっかりと実践することこそ重要な時期と考え、本講演では、殺菌剤耐性菌研究会の取り組みや今後の方針を紹介するとともに、GAP や IPM の考え方を活用した薬剤抵抗性対策の実践のための手順を述べたい。

殺菌剤耐性菌研究会の使命

殺菌剤耐性菌研究会は、「殺菌剤耐性菌研究に携わる研究者（関係者）を広く集め、情報交換を行う中で、特に研究手法、薬剤感受性の判定基準等の統一を図り、耐性菌発生の回避対策に資すること」を目的としている（鈴木、2021）。

1. 殺菌剤耐性菌シンポジウムの開催

研究者（関係者）を広く集め、情報交換を行うため、シンポジウムを主催している。1991年の第1回から2021年3月で30回を数えた。

このシンポジウムでは、新規剤の感受性検定法とその検定法による感受性ベースラインとともに耐性菌マネジメントが提案されている。

このようにこの30年間のシンポジウム、耐性菌に関する情報を集積するという役割を果たしてきた。さらにこれからの10年は、耐性菌マネジメントの仮説検証を議論する場としてもシンポジウムを発展させていきたい。

2. 各種薬剤の感受性検定マニュアルを作成

薬剤感受性試験法は、その試験結果を比較・統合するため、研究手法、薬剤感受性の判定基準等の統一を行う必要がある。そこで、各種薬剤の感受性検定マニュアルを作成し、出版してきた。また、日本植物病理学会主催による植物病害診断教育プログラムの中で、薬剤感受性試験法の実習が導入された（第10回神戸大学、第13回佐賀大学）。今後も、耐性菌マネジメントの将来を担う若手の育成を目指し、実習の場を提供できるように病理学会との連携を検討していきたい。

3. 殺菌剤耐性菌に関する文献集の作成

薬剤感受性試験結果は、データベースとして未来に残すことが望ましい。しかし、これらの結果を網羅的に収集し、評価し、報告書を取りまとめるような国立研究機関は、残

念ながら存在しない。今我々にできることとして、耐性菌研究に取り組む研究者は、地域の病害虫研究会などに論文投稿し、知見を残していただくことだと考える。そして、これら発表論文を殺菌剤耐性菌研究会において文献集を作成し、情報を一元化することである。今後もこのような形で、薬剤感受性検定結果に関する情報共有を実施していきたい。

4. 各種薬剤使用ガイドラインを策定

以上の耐性菌に関する知見を集積して、薬剤抵抗性の発達回避のため、QoI 剤、SDHI 剤 CAA 剤、DMI 剤の薬剤使用ガイドラインとして、その耐性菌対策の方向性を示してきた（宗・山口、2008、石井、2012、石井、2014、稲田、2017）。今後、これらガイドラインを耐性菌対策の仮説として実践してほしい。その際は、後述のリスクコミュニケーションや GAP、IPM の考え方は有用である。

さて、2015 年 8 月、都道府県指導機関に対して薬剤抵抗性対策の現状と課題を把握するため実施した薬剤抵抗性対策に関するアンケートでは、全都道府県から①「薬剤感受性検定結果に関する情報共有体制が重要」、②「薬剤抵抗性の検定方法や検定結果の評価に関する情報の集積が必要」、③「薬剤抵抗性が発達した場合の実用的な代替防除技術の開発や現場導入の検討が急務」等の意見があり（白石、2018）、まさに本研究会の今後の方向性を考える上で重要な指摘となった。

私としては、農林害虫防除研究会及び殺菌剤耐性菌研究会が、まずは①と②の情報集積及び共有体制を構築し、これらの情報を統合して③のような状態にならないための薬剤使用ガイドラインを提案することが、今できる最善だと考える。

薬剤抵抗性対策の要点

薬剤抵抗性対策について以下に 5 つ述べる（鈴木、2019）。

1. 薬剤抵抗性対策の重要性の認識

薬剤抵抗性病害虫が、不適切な防除方法により顕在化しているとするならば、適正な防除方法を行えば、薬剤抵抗性対策になる。適切な防除方法に取り組むということは、病害虫対策がしっかりでき、農産物の品質・収量が得られるということであり、農業者にとっても得する話である。他方、薬剤抵抗性病害虫が発生し、代替剤が無い場合、農業者はその被害を受け入れざるを得なくなり、農業経営に深刻な影響を及ぼす。また、個々の農業者の防除の成否が地域全体に波及する可能性もある。このような薬剤抵抗性対策の重要性を認識するための薬剤抵抗性リスクコミュニケーションは重要である（山本、2019）。

2. 農薬使用量のモニタリング

農薬の使用量が増えれば、薬剤抵抗性病害虫の発生確率も高まると考えられることから、農薬使用量を把握することは、薬剤抵抗性病害虫の顕在化のアラートとして活用できる。例えば、オリサストロビンの累積使用面積率が 68%に達した時点で、QoI 剤耐性菌の発生確率は 50%であることが、ロジスティック回帰モデルにより解析されている（鈴木、2017）。

3. 意味のあるローテーション散布の実践

ラベルに指示「作用性の異なる薬剤と輪番で使用する」がある場合、RAC コードを活

用した防除計画の作成と実践が有効である。

しかしながら、ナシ黒星病菌の DMI 剤耐性、ブドウ褐斑病菌やべと病菌の QoI 剤耐性などの事例をみると、意外なことに今日でも、耐性発達リスクの高い薬剤の連用が一部でなされていることに気付く。つまり、歴史は繰り返すというべきか、過去の失敗例から同じ轍を踏まないという学習効果が必ずしも働いていない（石井、2010）。10年前の石井さんの言葉である。これらを教訓とし、薬剤抵抗性事例の農業者への啓蒙と RAC コードを活用した「意味のある」ローテーション散布の実践を進めたい。

4. 農薬使用ガイドラインの実践

生産現場における耐性菌による被害を未然に防ぐためには、薬剤や病原菌の特性に合わせた適切な使用ガイドラインを作成し、それを守って実践することが重要である（宗、2009）

殺菌剤耐性菌研究会の農薬使用ガイドラインは、①薬剤防除だけに頼るのではなく、圃場や施設内を発病しにくい環境条件にする、②薬剤防除にあたって留意することを確認する、③薬剤使用回数に注意するガイドラインとなっている。

5. IPM の実践

IPM とは、①予防・②観察・③対策の 3 ステップを組み込んだ防除計画の作成と実践のことである。4 で紹介した農薬使用ガイドラインに書かれていることは、IPM を前提としている。つまり、IPM の実践と前述のガイドラインの実践はほぼ同義であるといえ、化学的防除だけに頼らず、耕種的、物理的、生物的な防除法を統合することにより、どの化学的作用点とも異なる手法により、薬剤抵抗性病害虫の遺伝子を断つことが薬剤抵抗性対策である。

三重県では、IPM 実践指標を、①予防・②観察・③対策の 3 ステップの順に並び替えて、農業者に利用しやすいように改変作業を令和元年度から順次行っている。

家畜衛生分野における薬剤抵抗性対策

JVARM（動物由来薬剤耐性菌モニタリング）は、①家畜衛生分野における全国的な薬剤耐性調査を行い、主要な抗菌性物質に対する耐性菌の発現状況等を把握する。②調査結果をリスク管理措置の策定に役立てる。③食品安全委員会に対して、家畜に使用する抗菌性物質の薬剤耐性菌に関する人の健康へのリスク評価に必要な資料を提供すること等を目的とし、大きく分けて以下の 3 つの調査を実施している（内山、2018）。

1. 食用動物における動物用抗菌剤販売量の調査
2. 食品媒介性病原細菌・指標細菌の薬剤耐性調査
3. 野外流行株の薬剤耐性調査

このような薬剤耐性調査を、全国の各家畜保健衛生所で病性鑑定材料から分離した家畜病原細菌を対象として、平成 7 年度から実施している。

また、薬剤耐性（AMR）対策を推進するため、AMR アクションプランでは現状と課題を整理したうえで、①普及啓発・教育、②動向調査・監視、③感染予防・管理、④抗微生物剤の適正使用、⑤研究開発・創薬、⑥国際協力の 6 分野における目標とそれぞれに対する戦略を示している（内山、2018）。

植物防疫分野においても、サーベイランスの構築が必要と考える。植物防疫研究部門もしくは FAMIC にて、動物医薬品検査所の役割を担っていただき、さらに、農林水産省の

リーダーシップのもと、このようなアクションプランが示されることを願う。

GAP とは

GAP (Good Agricultural Practice) とは、農業者が主体的に活用する農業における生産工程管理の手法である。自己点検を通じて農場管理を継続的に改善する経営管理体制を構築することができる。GAP を実施することにより、作業手順の標準化や効率化が図れ、さらに安全性が確保され、その結果として良い農産物を作り出すことができるようになるといった効果がある。さらに、農業人材の育成、競争力強化にも有効であり、農業者が自らの品質保証の仕組みとして導入するものである。

一方で、第三者による審査・認証制度を活用することで、適切な農場管理を実践している信頼性の高い農業生産者や団体であることを社会全般へアピールすることができる。ただし、毎年認証経費がかかることから、認証が必要かどうかは、農業者の経営判断による。

GAP とはチェックリストのように捉えられることがあるが、GAP で使用するチェックリストは、GAP の思考結果としての一つの対策に過ぎない。GAP の真髄は、この思考にあり、具体的には、①危害要因 (リスク) の洗い出し、②その危害要因による被害の程度と頻度からリスク評価を実施し、③そのリスクの程度に応じた農業者が実践できる対策を自ら講じることである。

この GAP の考え方およびその実践は、後述の病害虫管理をはじめ、ひいては IPM (≒ガイドライン)、薬剤抵抗性対策のそれぞれの実践へと密接に繋がっており、それぞれを実践することで、自然とその他も実践されていく関係にある。以降に GAP の考え方から見たそれぞれの実践を述べる。

GAP による病害虫管理

病害虫管理は、まさにリスク管理であり、GAP とは抜群に相性が良い。まずは、病害虫が発生する危害要因を洗い出すことから始まる (鈴木、2019)。

GAP に取り組むことで、以下の 5 つの病害虫 (農薬) 管理を実践できる。

1. 農産物に農薬を残留させない食品安全のための農薬管理
2. 農薬散布者の健康を害しない、労働安全のための農薬管理
3. 生物多様性を維持し、環境を保全するための農薬管理
4. 良い農産物を作り出す生産工程としての病害虫管理 (IPM)
5. IPM の実践により、薬剤抵抗性遺伝子を断つための薬剤抵抗性管理

GAP による IPM の実践

GAP では先に紹介したようなリスクの洗い出しやそのリスク評価に基づき、それぞれの対策を決めていくことが主であるが、リスク評価を待つまでもなく、重要なことは管理点に整理されている。これら管理点に適合するためには、臨機応変の対応ではなく、事前に入念に検討された防除計画が必要になる (図 1)。この防除計画には、過去の病害虫の発生状況、防除実績による改善策を検討し、その結果を反映する。検討には、病害虫・天敵の発生消長、作物の生育状況、環境状況 (温度・湿度・降水量・日射量など) の記録や、薬剤の選択、タイミング、散布方法がそれぞれ適切であったかといった記録が必要である。

このような GAP の取り組みは、しばしばその記録の煩雑さから敬遠されることがある。

しかし、煩雑に感じるのは、その記録に必要性がないからであって、上記の記録が防除判断や、次期作の防除計画に役立つものであれば、農業者に必要なものとして理解が得られやすい。

要は、予防対策の実施→観察・記録→防除の判断→防除対策の実施→病害虫の抑制→農産物の品質・収量向上へとつながるイメージを、農業者と共有することが大切で、これらの重要性が農業者に認識されることで、記録は煩雑なものから必要なものとなり実践される。

このように GAP の管理点として、IPM の実践が位置付けられているため、GAP に取り組むことで、確実に IPM が実践される。

GAP による薬剤抵抗性対策の実践

薬剤抵抗性とは、薬剤を不適切に使い続けて、薬剤が効かなくなることである。裏を返せば、適切に薬剤を使用することが薬剤抵抗性対策となる（山本、2019）（図 2）。

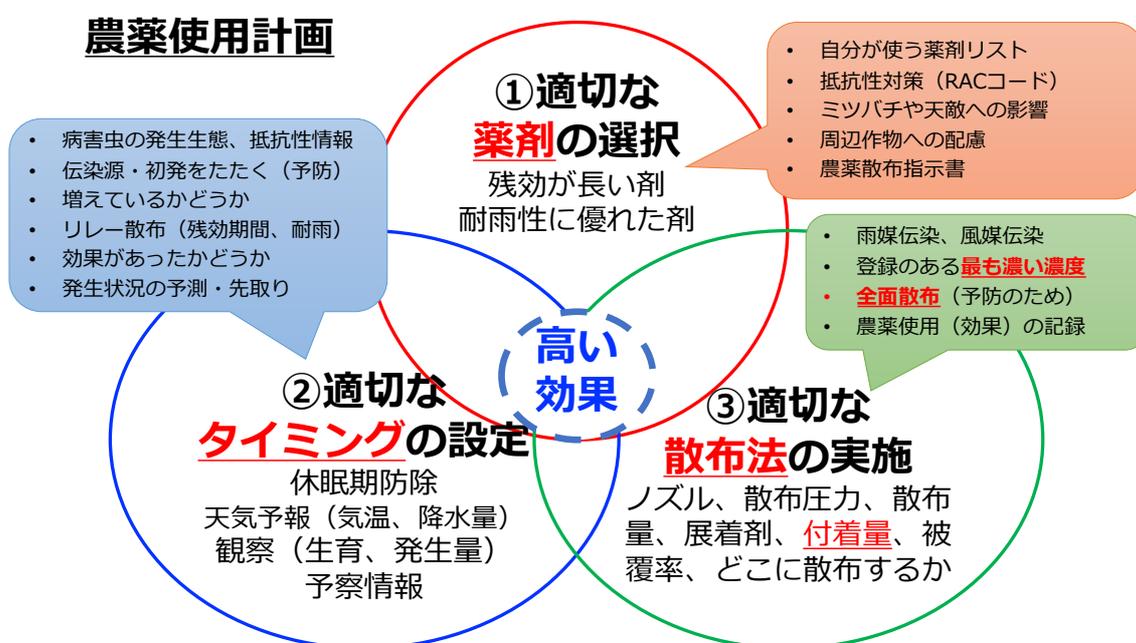


図 2 薬剤防除の考え方（田代、2007 を改変）

では、適切に薬剤を使用するためにどうすればよいか。

①適切な薬剤を選択するためには、使用する予定の農薬使用計画を立てる（JGAP24.1.2 農薬の選択・計画）。その際、使用する農薬の RAC コードを把握することで意味のあるローテーション散布を計画する（JGAP24.1.3 耐性・抵抗性の防止）。計画が実践されるように、農薬散布指示書として確実に作業者に伝える（JGAP24.2.1 農薬使用の決定、JGAP24.2.2 農薬の準備・確認）。

②適切なタイミングを設定するために、病害虫の発生生態を学び（JGAP11.4 農薬管理の責任者）、病害虫の伝染源への対策や初発に対する予防対策を行う。この予防対策の効果が持続しているかどうか観察し、対応策を実施する（JGAP24.1.1 IPM の実践）。病害虫の発生状況に臨機応変対応するのではなく、前作での発生状況や発生予察情報等か

ら、事前に防除計画を立てる（JGAP24.1.2 農薬の選択・計画）。

③適切な散布法の実施のために、農薬を正確に計量し、正確に希釈する（JGAP24.2.3 散布液の調整、JGAP24.2.4 農薬の計量・希釈）。農薬の使用記録を作成し、いつどのような状態で散布し、その効果がどうであったかを記録する（JGAP24.3.7 農薬使用の記録）。農薬散布機のノズル、ホース、タンク及び接合部のチェックを行い、正確に散布できることを確認する（JGAP18.1 機械等の点検・整備・清掃・保管）。

このように、適切に薬剤を使用するための GAP の管理点に取り組むことで、適切な薬剤の使用ができ、薬剤抵抗性対策の実践となる。

また、薬剤抵抗性が発達する要因として、抵抗性対策の考え方や用語が難しいため、正しい情報が農業者に伝わっておらず、農業者の抵抗性対策への意識・優先度が高まっていないことや、知っていても経済性優先や、うっかり…なども考えられる。つまり、薬剤抵抗性対策を組み込んでいない防除は、ヒューマンエラーの側面をもつと言える（山本、2017）。

一方で、GAP の取り組みは病害虫防除に限らず、労働安全や、食品安全といったヒューマンエラーを無くすためのリスク管理ツールである。薬剤抵抗性発達の一要因であるヒューマンエラーを無くすためにも、GAP の取り組みは有効である。

おわりに

GAP に取り組むということは、年に 1 回以上、自己点検により自らの農場管理の有効性を検証することを意味する。GAP には防除計画の作成が求められており、その防除計画には、過去の病害虫・雑草の発生状況及び前防除計画の実績による改善策を検討し、その結果を次期作の防除計画に反映することまでを求めている。よって、各農場では毎年防除計画の検証が実施される。さらに、GAP 認証を取得されている農場では、このことを毎年、認証機関の審査員により確認される。なお、GAP 認証を取得していなくても、GAP に取り組んでいれば JA 営農指導員や普及指導員がこれらの実践を確認可能であろう。このように GAP に取り組むことは IPM と薬剤抵抗性対策の実践を確実なものとする。

今まで IPM と薬剤抵抗性対策について、掛け声だけの運動に終始する場面もあったが、今回紹介した GAP の取り組みが、確実な実践への転機になることを期待している。

引用文献

- 稲田 稔（2017）第 27 回殺菌剤耐性菌研究会シンポジウム講演要旨集：55-64.
石井英夫（2010）第 20 回殺菌剤耐性菌研究会シンポジウム講演要旨集：1-10.
石井英夫（2012）第 22 回殺菌剤耐性菌研究会シンポジウム講演要旨集：49-60.
石井英夫（2014）第 24 回殺菌剤耐性菌研究会シンポジウム講演要旨集：64-71.
石井英夫（2021）第 30 回殺菌剤耐性菌研究会シンポジウム講演要旨集：52-62.
JGAP 基準書 日本 GAP 協会ホームページ <https://jgap.jp/jgap/crops/>
白石正美（2018）第 28 回殺菌剤耐性菌研究会シンポジウム講演要旨集：12-20.
宗 和弘・山口純一郎（2008）第 18 回殺菌剤耐性菌研究会シンポジウム講演要旨集：70-80.
宗 和弘（2009）植物病原菌の薬剤感受性検定マニュアル II（編：日本植物病理学会 殺

菌剤耐性菌研究会) : pp.1-4.

鈴木文彦 (2017) 関東東山病害虫研究会報 64 : 6-9.

鈴木啓史・黒田勝利・湊 裕史 (2011) 関西病虫研報 (53) : 13-19

鈴木啓史 (2019) 植物防疫 73 (10) : 13-20.

鈴木啓史 (2021) 植物防疫 75 (8) : 413.

田口裕美・鈴木啓史・黒田勝利 (2012) 関西病虫研報 (54) : 53-59

田代暢哉 (2007) だれでもできる果樹の病害虫防除 社団法人農山漁村文化協会

内山万利子 (2018) 第 28 回殺菌剤耐性菌研究会シンポジウム講演要旨集 : 21-29.

山本敦司 (2017) 植物防疫 71 (5) : 337-346.

山本敦司 (2019) 植物防疫 73 (12) : 766-773.

	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月
対象病害虫	親株圃場	→	(採苗) 育苗圃場		(定植) 本圃場 (開花)			→					
基本	マルチ・防草シート・草取り、草刈り												
	防虫ネットの展張												
ハダニ類	天敵への影響期間を考慮した徹底薬剤防除		ミヤコカブリダニ放飼		定植前 高濃度炭酸ガスくん蒸処理 or 23スピロテラマト(45日程度影響)	レスキュー防除6 ミルベメクテン	レスキュー防除 20Dピフェナゼート			レスキュー防除 20Bアセキノシル			必要があれば、天敵に影響のある薬剤でリセット防除(天敵利用終了)
アザミウマ類 (ヒラズハナアザミウマを想定)						青色粘着版による大量捕殺 28シアントラニリプロール 4Aアセタミプリド				アカメガシワクダアザミウマ放飼 レスキュー防除 15ルフェヌロン			必要に応じて、薬剤防除への切り替え 蒸しこみ処理 レスキュー防除 4Aアセタミプリド レスキュー防除 5スピノサド
アブラムシ類 (ワタアブラムシを想定)		4Aアセタミプリド	29フロニカミド		バンカー準備(オオムギ「てまいらず」30g、ムギクビレアブラムシ 0.6mm/10a) 目合い防虫ネット)	バンカープラント設置(6個/10a)	コレマンアブラバチ	バンカー準備(2ヶ月更新)	バンカープラント設置(6個/10a)	※ヒゲナガアブラムシに注意			
					(再掲) 4Aアセタミプリド			レスキュー防除 29フロニカミド(プランターにかけない)		レスキュー防除 9Bピメトロジン(プランターにかけない)			レスキュー防除 4Aアセタミプリド(プランターにかけない)
萎黄病	プランターの消毒 培土の消毒		ポットの消毒 育苗培土の消毒										太陽熱消毒 土壌還元消毒
炭そ病	雨除けノンシャワー育苗				薬剤防除(田口ら, 2012)								
灰色かび病						圃場衛生(換気、花がらの清掃)							
						薬剤防除(鈴木ら, 2011)							
うどんこ病		UV-B照射 薬剤防除						硫黄燻煙					
						薬剤防除							

図1 イチゴ防除計画(例)

殺虫剤抵抗性の進化を阻止するための最適な薬剤散布計画

山村光司
農研機構・農環研

1. 抵抗性管理法への素朴な疑問

殺虫剤抵抗性の発達を管理するためにさまざまな指導が行われているが、それらの指導内容には簡単には受け入れがたいものも多いように思える。一般の人からの素朴な疑問としては次のようなものが想定できるのではないだろうか。

(1) 抵抗性発達を遅らせるためには **refuge** を設けよ。

Bt 作物における薬剤抵抗性管理から派生した管理法として、薬剤を散布しない **refuge** (避難所) を設けて、ここで害虫を発生させることが推薦される場合がある。

→ **想定される疑問**: 害虫の総合防除では「圃場の周辺を清浄に保って害虫を圃場に侵入させないこと」が昔から基本とされていたはずだ。なのに、逆に「圃場周辺で害虫をたくさん発生させる方がよい」というのか。まったく理解できない。

(2) 抵抗性発達を遅らせるためには「撃ち漏らし」をせよ。

→ **想定される疑問**: 殺虫率の高い薬剤を使わずに殺虫率の低い薬剤を使えということか。その場合には、害虫の被害を避けるために、何度も薬剤を散布することになる。まったく理解できない。

(3) 抵抗性発達を遅らせるためには世代間ローテーションをせよ。

IRAC (Insecticide Resistance Action Committee) はブロックローテーションとして、同じ作用機作の薬剤を隣接した世代で用いないことを推薦している。

→ **想定される疑問**: 使用できる薬剤の種類は限られている。世代間で異なる薬剤を用いるためには、1世代内で同じ薬剤を連用せざるを得ない。以前から「薬剤の連用はよくない」と聞いていた。世代内連用の結果として抵抗性が発達した場合に、IRAC は私らの被った損害を補償してくれるのか、あるいは何の責任も取らないのか。

(4) 抵抗性発達を詳細にモニタリングせよ。

→ **想定される疑問**: 農研機構の「薬剤抵抗性農業害虫管理のためのガイドライン案」を見ると p28 で「サンプリングによって実際の抵抗性発達状況を把握し、これに対するリスクレベルの設定があってはじめて、有効な抵抗性管理が可能になる」と言っている。一方では、抵抗性対策は「抵抗性が発達する前にあらかじめ行う必要がある」とも聞いている。どちらが正しいのか。労力をかけて抵抗性の発達をモニタリングすると、学者の先生はそれで論文業績数を増やせるから良いのかもしれないが、抵抗性の発達自体は防げないので、私らには何のメリットもない。

2. 単純薬剤ローテーションに効果はない

これら想定される疑問について考えるために、まず単純ローテーションの問題について整理したい。いま二つの薬剤（1と2）について、これらの薬剤は相互に独立して作用し、抵抗性の発達のしやすさは同程度であると想定する。このとき薬剤を施用する際の順番について比較しよう。図1aでは薬剤1を1世代に1回ずつ連用し、抵抗性が顕在化したら薬剤2に切り替え、以降は薬剤2に抵抗性が顕在化するまで薬剤2を連用する（単純連用）。図1bでは薬剤1と薬剤2を交互に用い、両方の薬剤に抵抗性が顕在化するまでそれを続ける（単純ローテーション）。薬剤1,2の両方に抵抗性が顕在化するまでの時間（その意味での「薬剤の寿命」）は図1a,bのどちらの方が長いのだろうか。

薬剤を1回散布するたびに「1回の進化」が生じ、図1aと図1bではその順番が異なるだけである。したがって、両方の薬剤に抵抗性が発達するまでの時間は図1a,bで同じである。しかし、ここで私らは錯覚に陥りがちである。図1aでは先に薬剤1だけで進化が進行するため、薬剤1で先に抵抗性が顕在化するのに対して、図1bでは両方の薬剤で均等に進化が進むために、最後の段階になってから二つの薬剤に同時に抵抗性が顕在化する。このため、図1bの方が抵抗性の発達を遅らせることができるのではないかと錯覚してしまう。また、抵抗性を発現した個体の増殖率が小さいなど「抵抗性コスト (fitness cost for resistance)」が存在する場合には、図1bでは抵抗性が一度も発達せず、図1aでは一度抵抗性が発達してその後には消滅するといった場合もありうる。いずれにせよ、両方の薬剤に抵抗性が発達するまでの時間は、単純連用散布を行っても単純ローテーション散布を行っても $1+1=2$ であり、決して $1+1=3$ などになったりはしない。

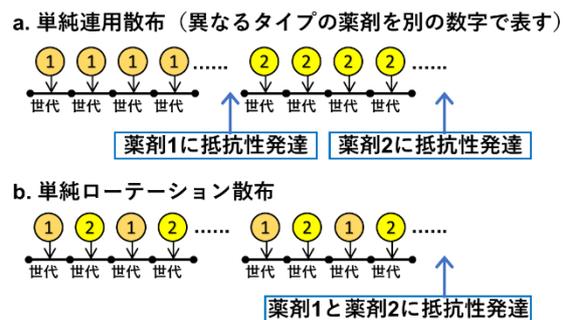


図1. 単純ローテーションの効果

3. 抵抗性進化を阻止する「原理」

単純ローテーションには抵抗性の進化を阻止する効果はない。しかし、ある種の空間構造がそこに加わると話は異なってくる（Yamamura, 2021）。現実にはありうる状況として、図2aに示されるように、空間の一部に定期的に圃場が生成される場面を想定しよう。この環境では、図2bに示されるように、害虫個体群は耕作開始時に二つの個体群に分かれる。一部の害虫は圃場内に侵入し、そこで1世代～数世代を経過する。残りの害虫は圃場外環境で生活し続ける。そして耕作終了時には圃場内個体群は圃場外個体群と十分に混ざり合う。このような環境で薬剤抵抗性の進化がどのように進むかを考えよう。

図2cは時間経過とともに抵抗性個体数と感受性個体数がどのように変わるかを表現している。斜線部分の面積が抵抗性個体数を示し、白抜き部分の面積が感受性個体数を示している。まずケース1の「圃場内死亡率が低い場合」を見ると、圃場に侵入した個体群では抵抗性の進化が進み、斜線部の割合が増えるのに対して、圃場外の個体群では薬剤を受けないために進化が進まず、斜線部の割合は変わらない。耕作終了時には両個体群が一つ

になるのだが、圃場から移出してきた個体群の影響で、この混合個体群では斜線部の割合が増えている。一方、ケース2の「圃場内死亡率が高い場合」はどうか。圃場に侵入した個体群では抵抗性の進化が進み、斜線部の割合が増えるのはケース1と同じである。しかし、ケース2では抵抗性の割合は変わらないものの、圃場での死亡率が高いために圃場個体群自体が小さくなっている。その結果として抵抗性個体の絶対数が小さくなるため、耕作終了時に圃場外個体群と混ざり合った際に、抵抗性個体の割合はケース1よりも小さくなる。この「原理」を活用すれば、抵抗性の進化を適切に阻止することができる。基本的には圃場で「追加死亡圧」をかければよい

ため、収穫時に残渣を適切に処理したり、天敵や耕種的防除を併用したりすれば、たとえ薬剤散布回数自体は減らすことができなくても抵抗性の進化は起こりにくくなる。ただし、追加死亡圧として薬剤散布を追加する場合には、その追加薬剤によって進化が進むため、その場合には次に述べるような厳密な計算が必要となる。

4. 抵抗性遺伝子率の基本増加率 R_0 の計算

抵抗性の進化を阻止できる条件を定量的に求めるためには、抵抗性遺伝子率の「基本増加率 (R_0)」を計算する必要がある。基本増加率（基本再生産数）は病気が系に侵入できるか否かを計算する際に昔からよく用いられてきた。侵入時には感染者や免疫者の割合がゼロに近い場合、その意味で添え字に0が付けられている。（なお、2020~2021年に新型コロナウイルス流行の関係で「実効再生産数」がしばしば報道されたが、これは「0から離れた場面」での再生産数のことである。）単為生殖の場合には、抵抗性遺伝子率の R_0 の対数値は次式で表現できる。なお、有性生殖の場合も基本的には同じ式が使用できる。

$$\begin{aligned} \log_e(R_0) &= \log_e(\text{抵抗性率が小さいときの抵抗性率の増加率}) \\ &= \log_e(\text{抵抗性個体の増加率}) - \log_e(\text{感受性個体の増加率}) \end{aligned} \tag{1}$$

ここに次のようにパラメーターを定義する。

θ : 耕作期の（圃場外の個体数）/（圃場内の潜在個体数）。分配率 q と増加率比 ρ から算出。

C : 抵抗性コスト（1耕作サイクルあたり）。

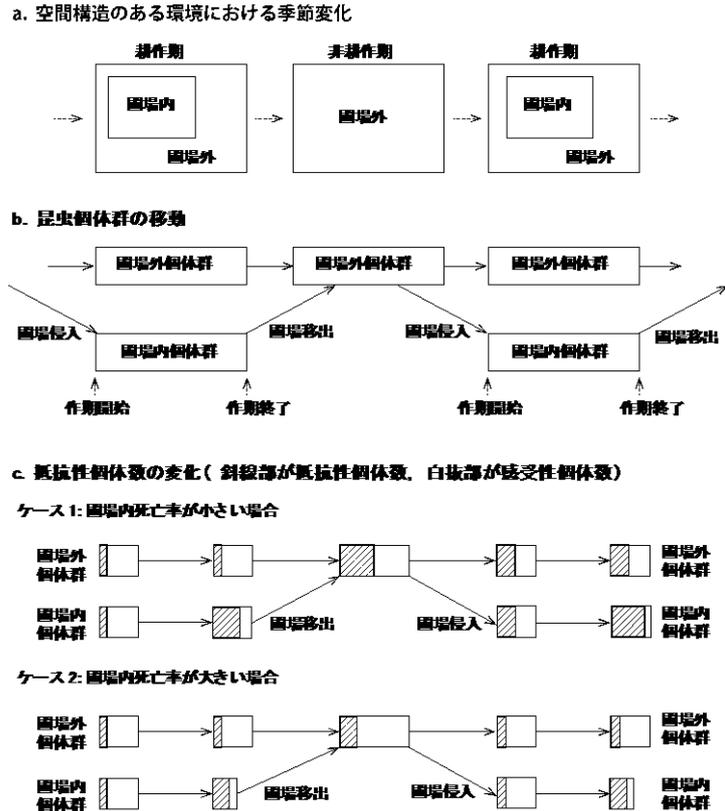


図2. 薬剤抵抗性の進化を阻止する「原理」

n : 1 耕作期の薬剤散布回数。

k : うち同一タイプ薬剤の薬剤散布回数。

このとき、大雑把に表現すれば(1)式は次のように書ける。

$$\log_e(R_0) = \log_e(\text{抵抗性個体の薬剤生存率} + \theta) - \log_e(\text{感受性個体の薬剤生存率} + \theta) - \log_e(C) \quad (2)$$

基本増加率の対数値に関して $\log_e(R_0) > 0$ ならば、つまり $R_0 > 1$ ならば抵抗性が進化する。したがって、さまざまな薬剤散布計画で $\log_e(R_0)$ を比較し、 $\log_e(R_0) \leq 0$ となる散布計画のうちのもっとも使いやすい計画を採用すればよいであろう。

上の(2)式を用いて、さまざまな薬剤散布計画について比較してみよう。薬剤による濃度-生存率曲線としてはWillrich *et al.* (2003) のデータから計算した曲線を使用する。また簡単のため $\theta = 0.25$, $\log_e(C) = 0.1$ を使用する。散布パターンの分類法にはさまざまな様式が考えられるが、ここでは次の三つの分類軸で考えてみたい。

- ・一様：全耕作期間で同じパターンで散布（この逆は「集中」）。
- ・反復：同じ耕作期間内で同じタイプの薬剤を反復散布。
- ・ローテーション：同じ耕作期間内で複数タイプの薬剤を散布。

図3には典型的な三つの組み合わせを示した。散布回数を増やせば進化が生じやすいため、散布パターンの影響を見るためには薬剤毎の総散布回数を一定に保ったまま比較する必要がある。そこで、図3aと図3bの比較すなわち簡略表記では $\{1,2,3,4\}\{1,2,3,4\} \dots$ と $\{1,1,2,2\}\{3,3,4,4\} \dots$ などの比較を行う。先ほどのパラメーターの定義で言えば、前者は $k = 1$ であり、後者 $k = 2$ に該当する。図4には $k = 1, 2, 3, 4$ の比較を示したが、 k が小さい方が $\log_e(R_0) \leq 0$ になりやすいことが、この図から見て取れる(数式証明はYamamura, 2021 論文電子付録 SI-7)。すなわち、特定の耕作期間の内部、より正確に言えば「害虫の分散時期と分散時期の間」に異なる薬剤を用いた方が、抵抗性の進化は生じにくい。この現象は「抵抗性のローカル進化速度を上回る率で抵抗性個体を殺すことにより抵抗性のグローバル進化を阻止している」として解釈することが

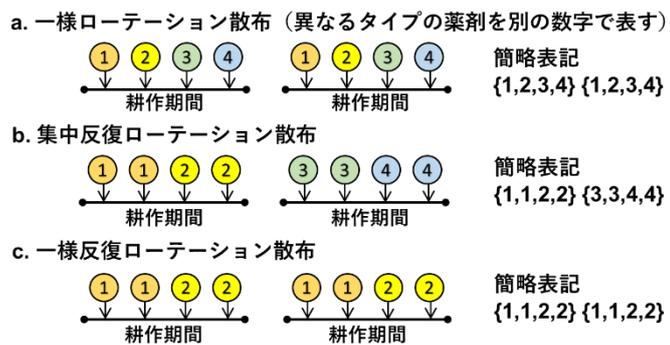


図3. 散布パターンの例

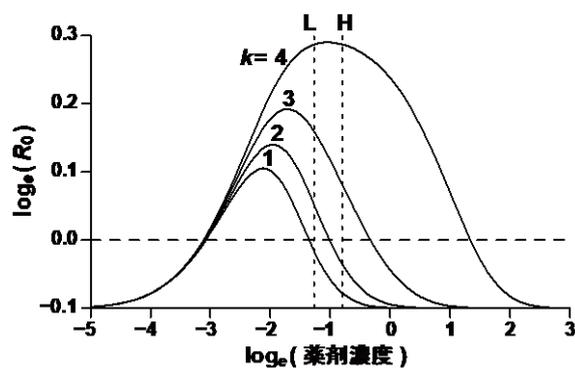


図4. 耕作期間内の連用回数 k の影響。薬剤散布回数が $n = 4$ 回の場合を示す。すべての薬剤の散布回数を同じに保って比較している。耕作期間内の連用数が多くなるとして抵抗性率の対数基本増加率 $\log_e(R_0)$ が大きくなる。対数基本増加率が0以下であれば進化を阻止できる。L, HはWillrich *et al.* (2003) の用いた二つの濃度。

できるであろう。Willrich *et al.* (2003) は 2 種類の濃度 (L, H) を用いた。今の例では高濃度 H だと $k = 1$ と $k = 2$ のいずれを採用しても進化を阻止することができる。一方、低濃度 L を用いた場合には $k = 1$ しか採用することができない。

5. 害虫発生量に応じた最適散布計画

図 4 では 1 耕作期間内の薬剤散布回数 n を固定して 1 耕作期間内の連用回数 k の影響を見てきた。しかし実際には、防除暦散布を行うにせよ順応的の散布を行うにせよ、野外での害虫の発生密度に応じて薬剤死亡圧を決める必要がある。図 5 には、全耕作期間で同一の散布パターン (一様散布パターン) を採用する場合において、散布計画の決定の仕方を例示した。ここでは死亡圧を $-\log_e(\text{生存率})$ と定義しており、必要死亡圧を決めれば、適切な n と k の組み合わせがグラフから読み取れるようにしている。たとえば必要死亡圧が $-\log_e(\text{生存率}) = 6$ の場合には $n = 4$ 回の散布が必要であり、ここで $\log_e(R_0) \leq 0$ を得るためには連用回数は $k = 1$ 回でなければならないことが読み取れる。つまりこの場合に抵抗性の進化を阻止するためには連用は不可であり、 $\{1,2,3,4\}\{1,2,3,4\} \dots$ といった散布を行わなければならないことがわかる。一方、より害虫密度が高いために必要死亡圧が $-\log_e(\text{生存率}) = 9$ となる場合を想定すると、この場合には $n = 6$ 回の散布が必要であり、ここで $\log_e(R_0) \leq 0$ を得るためには連用回数は $k \leq 3$ でなければならないことが読み取れる。この場合には、害虫密度を抑えながら抵抗性の進化を阻止するためには $\{1,1,1,2,2,2\}\{1,1,1,2,2,2\} \dots$ といった散布を行う必要があることがわかる。

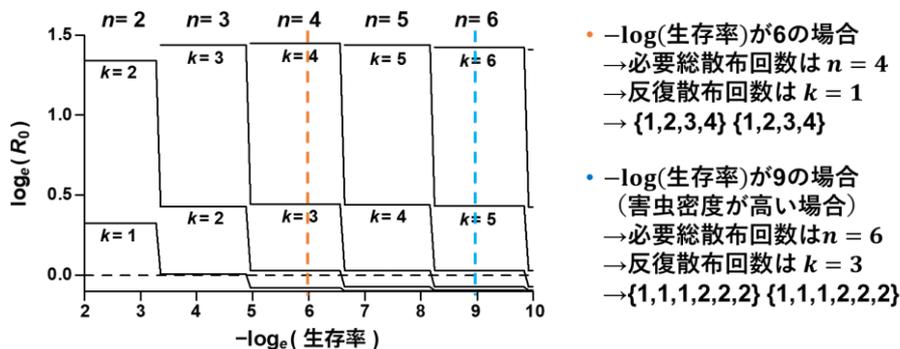


図 5. 必要とされる死亡率のもとでの最適な散布計画を求めるための図の例。必要死亡圧を $-\log_e(\text{生存率})$ で示す。対数基本増加率が 0 以下であれば進化を阻止できる。

6. 世代毎の害虫移動が主体となる場合

IRAC ではブロックローテーションを考える際に耕作期の不連続性は考慮していないようである。そのように耕作期の不連続性が存在しない場合 (あるいは不連続性が無視できる場合) には、害虫の移動に関しては、毎世代ごとの成虫期の移動が大きなウェイトを占めることになる。そのため、図 2 や図 3 の「耕作期間」は「世代期間」に置き換えて、非耕作期間をゼロとして計算する必要がある。図 6 では世代内ローテーション $\{1,2\}\{1,2\}\{1,2\}\{1,2\} \dots$ と世代間ローテーション $\{1,1\}\{2,2\}\{1,1\}\{2,2\} \dots$ で $\theta = 0.25$ の場合の比較について示した。この場合は薬剤散布回数は $n = 2$ であり、世代内連用回数は前者では $k = 1$ であり、後者 $k = 2$ である。先述のように k が小さい方が進化を阻止しやすい、つま

り非ブロックローテーションの方が進化を阻止しやすいことが例示されている (図 7)。これは最初に想定された疑問(3)に対して一つの示唆を与えているであろう。

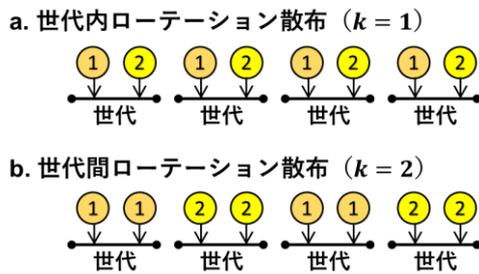


図 6. 世代内ローテーションと世代間ローテーションの例。前者は非ブロックローテーション、後者はブロックローテーションに相当する。

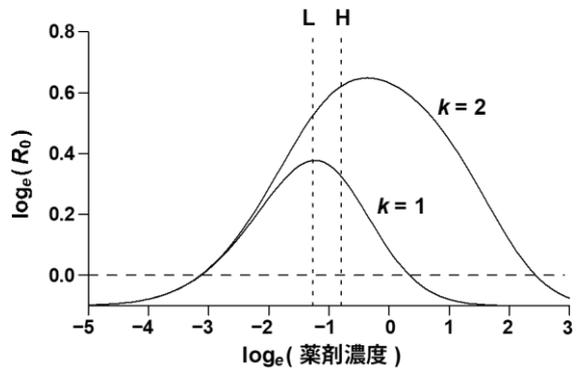


図 7. 世代内ローテーションと世代間ローテーションでの抵抗性遺伝子率の対数基本増加率。

7. 圃場外環境が存在しない場合はどうする？

圃場外環境が存在しない場合 ($\theta = 0$ の場合) には、高濃度領域では抵抗性の進化を阻止することができないことが証明されている (Yamamura, 2021 論文電子付録 SI-3, SI-4)。そのように圃場外環境が存在しない場合にはどうすればよいのか？ 圃場外部からの害虫の侵入が完全にゼロというのは室内の植物工場のような状況であろう。圃場を創設した時点でクリーンな状態からスタートすれば害虫は発生しないはずである。したがって、害虫発生が問題になる限りは、必ず圃場外環境が存在し $\theta > 0$ だと考えてよいかもしれない。そして最適な散布計画を計算するためには θ を適切に推定しなければならない (Yamamura, 2021 論文電子付録 SI-2)。とはいえ、現実には圃場内に常に害虫が残存するなどの多様な状況が考えられるため、 $\theta = 0$ の場面を想定した管理法も準備しておく必要があるであろう。

圃場外環境が存在しない場合に、害虫発生を抑えながら抵抗性の進化を阻止する手法としては、ある種の「モザイク施用」が有効ではないかと「理論上」は考えられる。例えば単純のため二つの薬剤 1,2 を考え、両者の作用は独立であり、同じ濃度・生存率曲線にしたがうとする。閉鎖空間内に 2 種類の小区画を同じ数だけ設けて一様に配置する。耕作期間中は各小区画の間には障壁を設けて昆虫の移動を阻止し、作期が終わった際には障壁を除いて害虫を完全に混合させる。モザイク施用とは言っても、今回はかなり特殊な設定であることに注意してほしい。図 8 では説明のため多数の小区画のうちの 2 個だけを取り出して示している。この条件のもとで、1 耕作期間の間に各小区画では薬剤 1 か薬剤 2 のいずれかを 2 回ずつ連用散布する場面を考える。Bt 作物の抵抗性管理では、閉鎖系を念頭に置いて、いわゆる high-dose/refuge 戦略が議論されることが多い。このとき refuge で薬剤を散布しない場合には害虫の多発生の問題が生じる。これに対してモザイク施用では、薬剤 1 に関しては、薬剤 1 を散布しない小区画が refuge の効果をもたらすが、その小区画では薬剤 2 を散布しているために害虫の多発生の問題は生じない。この場合の抵抗性遺伝子率の基本増加率 R_0 について、Roush (1989) が行ったように単純ローテーションと比較してみよう。

薬剤 1 に注目すれば、今のモザイク施用は{1,1}{1,1}{1,1}{1,1}... の形の散布であり $\theta = 1$ の場合に相当する。2 タイプの小区画への分配率は等しく ($q = 0.5$)、各小区画での増加率は同じ ($\rho = 1$) なので $\theta = 1$ となる。(Yamamura, 2021 ではここで{1,1}{2,2}{1,1}{2,2}... とし、 $\theta = 0.5$ と印刷してしまっていたが、これらは誤植であった。) 一方、各耕作期間に 2 回連用散布する場合の単純ローテーションでは、{1,1}{2,2}{1,1}{2,2}... で $\theta = 0$ の場合に相当する。このモザイク施用と単純ローテーションの間で $\log_e(R_0)$ を比較したのが図 9 である。先述のように、単純ローテーションには抵抗性の進化を抑える効果はなく、薬剤濃度が上がるとともに $\log_e(R_0)$ は単調に増加するのに対して、今の場合の特殊なモザイク施用では進化を阻止することが可能である。ただし、現在のパラメーターの組み合わせのもとでは、低濃度と高濃度 (L, H) のいずれを採用しても $\log_e(R_0) > 0$ であり、このままでは進化を阻止することはできないため、図 4 の $k = 2$ の世代内ローテーションなどを追加する必要がある。このとき、2 タイプのモザイク間では共通する薬剤が入ってはいけないことに注意しなければならない。その点ではブロックローテーションの場面と形式的に似ている。ブロックローテーションではブロックが「直列接続 (serial)」なのに対してモザイク施用ではブロックが「並列接続 (parallel)」となっていると言える。

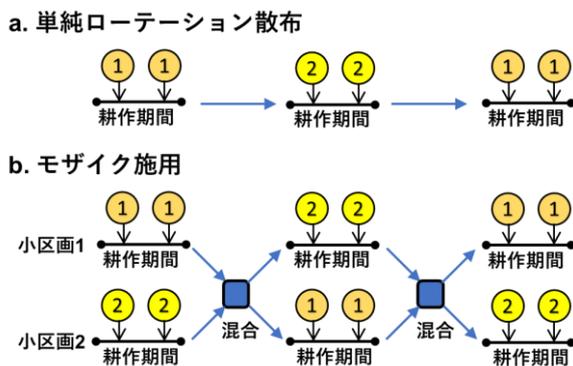


図 8. 単純ローテーション散布と、ある種のモザイク施用。後者では耕作期間終了後に害虫が相互に完全に混合されるように操作される。

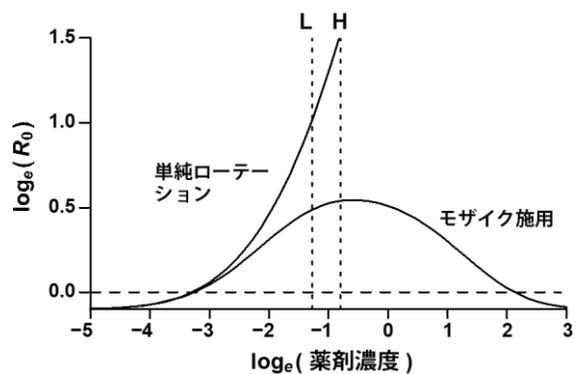


図 9. ある種のモザイク施用における対数基本増加率。

8. Refuge の功罪

図 2a の中に見られる圃場外環境は Bt 作物でよく用いられている refuge と似ている部分がある。しかし、圃場外環境はあくまでも環境であり、与えられた環境のもとで最適な散布計画を計算するのがここでの主な趣旨であった。圃場外環境が存在せず害虫の侵入数がゼロであれば、それに越したことはない。モデルで計算を行う際には設定が自由であるから、個体群動態が平衡状態に近い状態にあると考えて、refuge と圃場との間の移動を人為的に制限して抵抗性遺伝子率の変化を計算することができる。その場合には、計算するまでもなく原則として refuge が大きい方が有利であろう。しかし、実際にはそのような都合の良いことは必ずしも起こらない。私らは抵抗性遺伝子率を制御する以前に害虫個体数自体を制御しなければならない。このような場面では圃場内での個体群は非平衡状態であろうし、移動個体数は総個体数にある程度は比例する。したがって、refuge の大きい方が

侵入害虫数は増加し、その結果として薬剤散布回数が増加することによって抵抗性の進化が加速されることが多いかもしれない。これは最初に想定された疑問(1)に対して一つの示唆を与えているであろう。

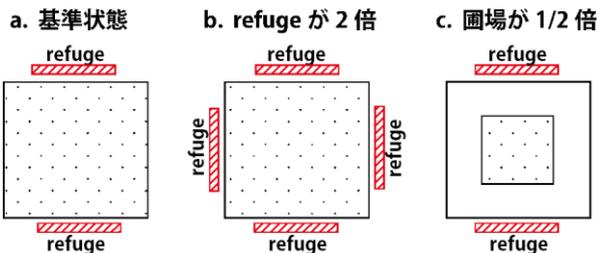


図 10. refuge 面積や圃場面積を変えた場合のイメージ

図 10 には例として refuge の三つの特殊なパターンについて示した。図 10a

は基準状態であり、正方形の圃場の 2 面に refuge が張り付いているとする。図 10b では refuge を圃場の 2 面から 4 面へと 2 倍に大きくしている。この場合には refuge サイズが 2 倍になっているが、害虫の侵入数も 2 倍になると期待できる。(2)式の θ は耕作期の (圃場外の個体数)/(圃場内の潜在個体数)であるから、この場合には θ は変わらずに、害虫の絶対数だけが大きくなることも多いであろう。一方、図 10c では refuge を大きくするのは反対に圃場サイズを小さくしている。この場合には、refuge からの距離が増すために、圃場外からの侵入数が減少するだけでなく、refuge から圃場に侵入する割合も小さくなるために θ は大きくなるかもしれない。このように圃場サイズを小さくすることは潜在的に有効となる可能性はある。

Refuge 問題と関連として、最初に想定された疑問(2)についても考察する必要がある。野外で薬剤を散布する際には「撒きむら」が生じるため、野外での死亡率は室内実験から得られる死亡率とは異なってくる (Yamamura, 2021 論文電子付録 SI-1)。これは、2016 年に山村が薬剤抵抗性問題に取り組み始めた際に、最初に検討した問題であった。「撃ち漏らし」が良いように言われていたのは「圃場外個体群の存在」と「撃ち漏らし個体群」を混同しているからのようだ。実際には「撃ち漏らし」自体は抵抗性進化にさほど影響はなく単に殺虫効率が悪いだけのようである。ただし、高濃度領域においては「撒きむら」は抵抗性の進化を促進する場合がある (Yamamura, 2021 論文電子付録 SI-1)。

9. 薬剤抵抗性モニタリングの位置づけ

最初に想定された疑問(4)に関しては、かつて鈴木 (2012) が日本農薬学会誌で以下のように指摘していた。「抵抗性発達のきざしが現れたらもう手遅れであることを現場は熟知している。抵抗性対策が議論される場では抵抗性発達モニタリングの重要性がしばしば取り上げられるけれども、それは現在使用している殺虫剤が間もなく効かなくなることを承知して備えをするうえでは有益であるが、抵抗性管理対策には役立たない。抵抗性管理では、抵抗性遺伝子の頻度が測定しがたいほど低い段階から、長期的かつ持続的に取り組むことが肝要である。」一般的な見地からは、薬剤抵抗性対策は最初から一貫して同程度にしっかりと行わなければならないであろう。農研機構の「薬剤抵抗性農業害虫管理のためのガイドライン案」において、必要サンプル数に関する部分は山村が計算して執筆した。しかし、薬剤抵抗性問題では 10%未満の低頻度の率を推定しないとイケないため、サンプル数は一般にかなり大きくなる。そのため、たとえ遺伝子検査が可能であったとしても、コストベネフィットの面で実行することが難しいことが多いのではないかとと思われる。古い文献ではあるが、Roush and Miller (1986) では「For those species where it is difficult

to collect large numbers of individuals, resistance detection may not be a practical component of resistance management.」とし、抵抗性モニタリングは抵抗性管理の主要コンポーネントではないとしていた。これは想定される疑問(4)に対して一つの示唆を与えているであろう。

10. おわりに

どのようにすれば有害生物の密度を低下させながら薬剤抵抗性の進化を阻止できるかについては、農業分野だけでなく医療分野でも重要な問題である。マラリアを媒介するハマダラカの薬剤抵抗性の問題もそうであるが、より広い問題としては、抗生物質の服用日数の決定についても同様の問題が存在する。抗生物質の服用日数は理論的ではなく経験的に決められており、医師は耐性菌の進化を回避するために必要以上に長く抗生物質の服用を薦める傾向があるという (Wallis, 2021)。いずれの分野においても、これらの問題を解決するためには、従来型の定性的な啓蒙活動から定量的な計算へとシフトしなければならないであろう。

11. 引用文献

- Roush RT (1989) Designing resistance management programs: How can you choose? *Pesticide Science*, 26:423-441
- Roush RT, Miller GL (1986) Considerations for design of insecticide resistance monitoring programs. *Journal of Economic Entomology*, 79:293-298
- Wallis C (2021) With antibiotics, less is often more. *Scientific American*, 325:28
- Willrich MM, Leonard BR, Cook DR (2003) Laboratory and field evaluations of insecticide toxicity to stink bugs (Heteroptera: Pentatomidae). *The Journal of Cotton Science*, 7:156–163
- Yamamura K (2021) Optimal rotation of insecticides to prevent the evolution of resistance in a structured environment. *Population Ecology*, 63:190–203
- 鈴木芳人 (2012) 殺虫剤抵抗性の発達をどう制御するか. *日本農薬学会誌*, 37:405-408

Optimal rotation of insecticides to prevent the evolution of resistance.

Kohji Yamamura

Institute for Agro-Environmental Sciences, National Agriculture and Food Research Organization (NARO)

私に関わった殺虫剤抵抗性研究42年 —基礎から現場の問題解決へ—

恩師 齋藤哲夫先生を偲んで

本山直樹

千葉大学名誉教授
東京農業大学総合研究所研究会農薬部会長
メール: motoyama335@aol.com

1

本日の話題

話題1 本山らの殺虫剤抵抗性に関する研究の紹介

話題2 千葉県柏市大室園芸団地で発生した殺虫剤抵抗性コナガ対策は何故成功したのか

話題3 殺虫剤抵抗性研究に大きな足跡を残した恩師 齋藤哲夫先生を偲んで

2

[話題1]

本山が殺虫剤抵抗性研究に関わった時代

(1) 1966年～1969年 名古屋大学大学院生時代

- ・ ハダニの抵抗性発達が全国的に注目を集め始めた
- ・ ツマグロヨコバイの抵抗性発達が西日本で問題化
- ・ 抵抗性現象の実態把握とメカニズム研究が開始
- ・ 大学紛争が全国で吹き荒れた

3

38

本山が殺虫剤抵抗性研究に関わった時代

(2) 1969年～1978年 ノースカロライナ州立大学時代

- ・ 米国ではワタの害虫タバコガの抵抗性発達
- ・ 天敵で抵抗性発達が初めて確認された
- ・ 抵抗性メカニズムに関する研究が進展
- ・ ベトナム戦争が泥沼化

4

本山が殺虫剤抵抗性研究に関わった時代

(3) 1978年～2008年 千葉大学勤務時代

- ・ 複合抵抗性発達でコナガとハダニが難防除害虫化
- ・ 東京都夢の島で見られたようにごみ埋め立て地でのイエバエの抵抗性発達による大発生が問題化
- ・ 分子生物学の発展－抵抗性遺伝子の研究が開始
- ・ 日本で国際昆虫学会議、国際農薬化学会議を開催

5

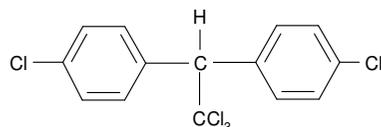
ナミハダニにおけるジメトエート抵抗性の機構

- ・ まだ有機リン剤でハダニの防除ができた時代
- ・ 3種類の薬剤(ジメトエート[®]、ケルセン[®]、ニツソール[®])でナミハダニ混合個体群(遺伝子プールを大きくした)を選抜
選抜個体群の交差抵抗性発達を検定
有機リン剤抵抗性の機構を解析
32P-ジメトエートの *in vivo* 代謝活性比較
コリンエステラーゼ(ChE)活性の *in vitro*
阻害実験 → 作用点の感受性低下を確認

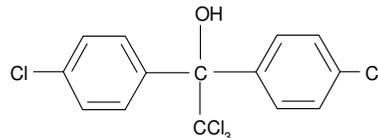
6

ディコホル(ケルセン[®])の選択毒性の機構

- ・ ディコホルが夢のようなハダニ特効薬の時代
- ・ ミカンハダニでディコホル抵抗性の兆し
- ・ ディコホルとDDTの選択毒性は正反対の不思議



p,p'-DDT



dicofol

ディコホルもPBOでP450活性を阻害すれば昆虫に殺虫活性あり！ → 昆虫にはディコホルを解毒するチトクロムP450が存在？

(高田ら)

7

カブリダニ(天敵)における薬剤抵抗性

- ・ 天敵には薬剤抵抗性が発達しないと考えられていた時代
- ・ 米国ノースカロライナ州のアパラチア山脈地帯のリンゴ園では、リンゴ害虫防除に有機リン剤のアザメチホス(グチオン[®])だけを長年使用
- ・ リンゴ葉上にカブリダニ *Amblyseius fallacis* が多数観察され、ハダニの被害はない
- ・ 室内で高レベルのアジンホスメチル抵抗性を確認！

天敵で最初の薬剤抵抗性発達の事例！

J.Econ.Entomol. 63:1439-1442 (1970)

8



人家から隔離された場所にあるアパラチア山脈地帯のリンゴ園

9

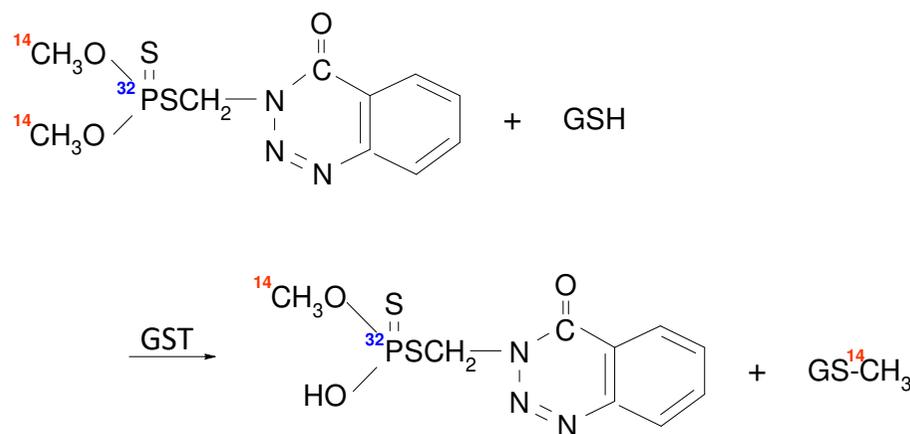
抵抗性(R)、感受性(S)系統のホモジネートによる³²P-アジンホスメチルの解毒分解に及ぼす補酵素の影響

系統	補酵素	分解量 (μg/100mg カブリダニ)		
		30	60	120 min
S	None	-	-	0
	GSH	-	-	10.8
	NADPH	-	-	9.8
	GSH + NADPH	16.4	17.4	25.0
R	None	-	-	6.0
	GSH	-	-	61.2
	NADPH	-	-	17.2
	GSH + NADPH	55.2	67.4	75.8

→ 抵抗性系統では、特にGSHで活性化される酵素による解毒活性が高い

10

アジンホスメチルのGSTによる分解



GSTと抵抗性機構の関係を証明した最初の事例!

Pestic. Biochem. Physiol. 1: 205-215(1971)

11

イエバエにおけるGST活性の異常性差

- ・ 第3夢の島(3rd-Y)系イエバエは複合抵抗性
- ・ フェントロチオン抵抗性にはGSTによる解毒が関与
- ・ 長期飼育によってGST活性は♂ > ♀に変化
- ・ GST高活性は第2染色体の遺伝子 *MdGST* が支配
- ・ *MdGST* の mRNA コピー数は ♂ > ♀
- ・ *MdGST* の DNA コピー数は ♂ > ♀ (遺伝子重複)
- ・ 3rd-Yの性染色体はXX型のみ(性決定機構異常)
- ・ Y染色体上の♂決定因子(M)は第2染色体に転座
- ・ GSTの遺伝子重複とM因子の関係?

(関根・山田里砂・森・大谷・岡村、他)

12

40

ピレスロイド剤抵抗性(1)

イエバエー益子系

- ・ **日本で最初のピレスロイド剤抵抗性事例**
当時は抵抗性個体群の分布は点に過ぎなかった
- ・ kdr(神経軸策膜のNaチャンネルの感受性低下)
- ・ チトクロームP450による解毒活性の増大
- ・ 協力剤(PBO)で抵抗性は防除可能レベルに下がる

(船城ら)

13

ピレスロイド剤抵抗性(2)

チャバネゴキブリー銀座系

- ・ **フラッシングアウト効果に対する忌避(行動異常)**
- ・ kdr(神経軸策膜のNaチャンネルの感受性低下)
イエバエの場合と電気生理学的に反対の症状
- ・ 皮膚の薬剤透過性低下
- ・ 解毒活性は関与していない

(Mahmoodら)

14

ピレスロイド剤抵抗性(3)

コナガータイ系(輸入)

- ・ kdr(神経軸策膜のNaチャンネルの感受性低下)
- ・ チトクロームP450による解毒活性の増大
- ・ **皮膚の薬剤透過性の低下**
拡散セルを用いた昆虫皮膚の透過性実験
- ・ フィットネス(適応度)に差なし
- ・ **抵抗性の不安定性**
50世代連続選抜系統でも選抜中断で感受性回復
抵抗性ON/OFFスイッチの存在?

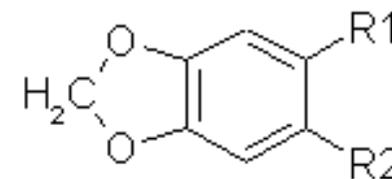
(菅沼・前越・鎌田博之、他)

15

41

選択的MDP化合物(P450阻害剤) —高砂香料工業(株)との共同研究—

- ・ 従来の殺虫協力剤ピペロニルブトキシド(PBO)には
哺乳動物・昆虫間に選択性がない
- ・ 選択的MDP化合物は人畜毒性の増強なしに
ピレスロイド剤抵抗性を克服
主剤の薬量低減が可能

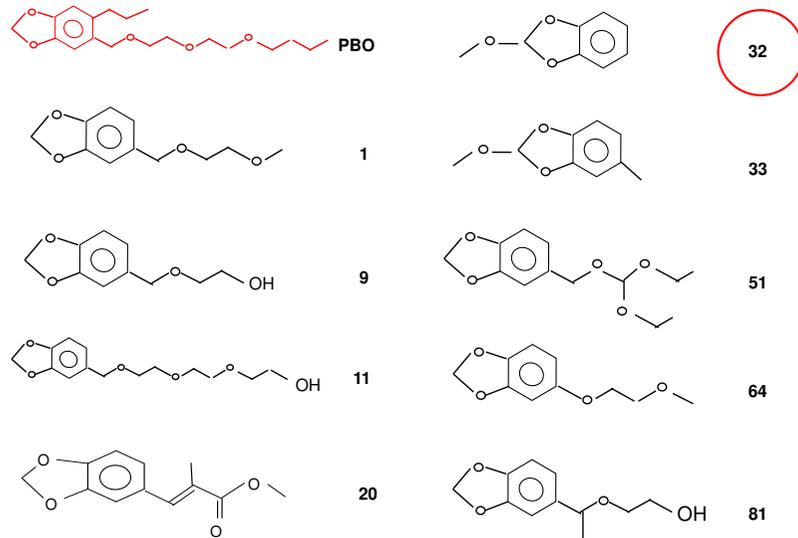


メチレンジオキシフェニル(MDP)化合物

(西澤ら)

16

PBO(非選択的)と選択的MDP化合物



17

抵抗性の複合機構の薬物速度論的解析

八千代系イエバエのダイアジノン抵抗性に関わる因子

- ・皮膚の薬剤透過性低下
- ・代謝活性の変化
 - チトクロームP450による解毒活性の増大
 - GSTによる解毒活性の増大
 - アリールエステラーゼによる解毒活性の増大
 - チトクロームP450による活性化能の低下
- ・作用点(アセチルコリンエステラーゼ)の感受性低下

ダイアゾクソンの分解 / 活性化能の低下 / 変異型AChE

(大井:日本農薬学会奨励賞)

18

In vivo における抵抗性因子の単独ならびに複合効果(AChE阻害)

Mechanism					I ₅₀ (μg/♀)	Mechanism					I ₅₀ (μg/♀)
1;	2;	3;	4;	5		1;	2;	3;	4;	5	
+	+	+	+	+	∞	+	+	+	+	-	∞
-	+	+	+	+	∞	-	+	+	+	-	2.11
+	-	+	+	+	∞	+	-	+	+	-	4.35
-	-	+	+	+	∞	-	-	+	+	-	1.27
+	+	-	+	+	∞	+	+	-	+	-	0.562
-	+	-	+	+	1.52	-	+	-	+	-	0.384
+	-	-	+	+	1.89	+	-	-	+	-	0.392
-	-	-	+	+	0.96	-	-	-	+	-	0.272
+	+	+	-	+	2.55	+	+	+	-	-	0.526
-	+	+	-	+	1.12	-	+	+	-	-	0.357
+	-	+	-	+	1.29	+	-	+	-	-	0.370
-	-	+	-	+	0.73	-	-	+	-	-	0.254
+	+	-	-	+	0.27	+	+	-	-	-	0.0783
-	+	-	-	+	0.2	-	+	-	-	-	0.0581
+	-	-	-	+	0.2	+	-	-	-	-	0.0579
-	-	-	-	+	0.14	-	-	-	-	-	0.0433

1:皮膚の薬剤透過性 2:解毒分解全体 3:活性化
4:ダイアゾクソン分解 5:AChE阻害

19

[話題2]

今から約20年前の2000年代初期に千葉県柏市大室の園芸団地で中国野菜のチンゲンサイに大発生して農家を困らせていたコナガの殺虫剤抵抗性対策は何故成功したか？

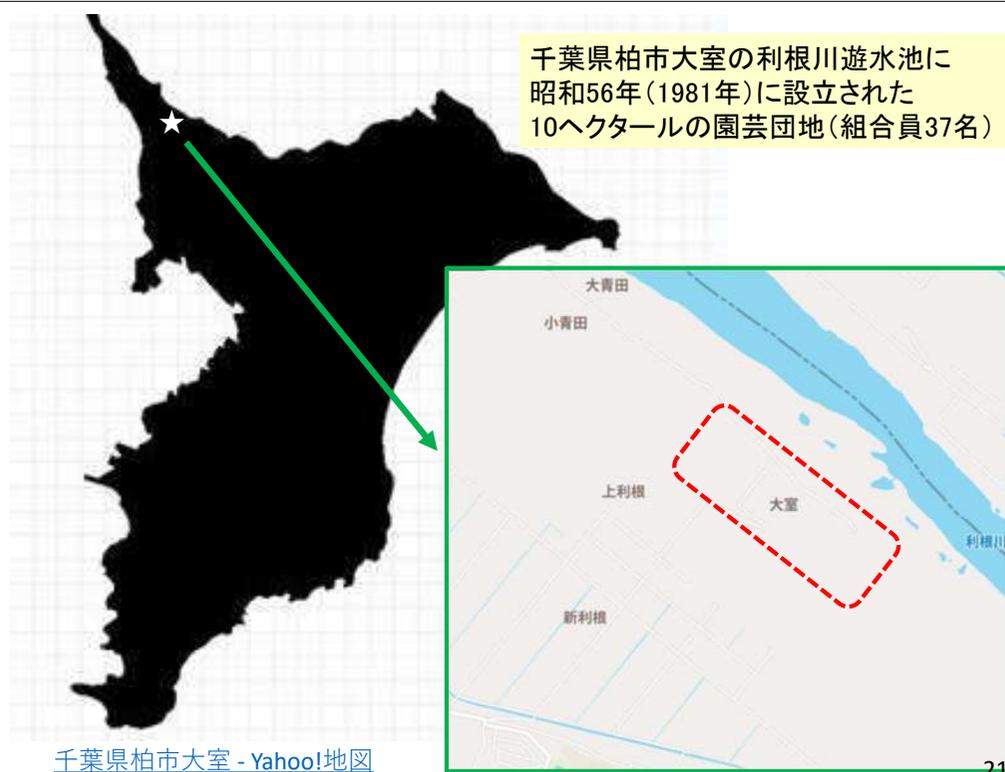


古臭いありふれた対策だったが、現在の抵抗性遺伝子の精緻な分子遺伝学研究全盛時代にも何らかの教訓になるかも？

42

20

千葉県柏市大室の利根川遊水池に
昭和56年(1981年)に設立された
10ヘクタールの園芸団地(組合員37名)



千葉県柏市大室 - Yahoo!地図

21



野菜産地総合整備対策事業
野菜集団産地育成事業
(指定野菜都市近郊産地整備型)
事業主体 大室園芸団地組合

2021.11.10

22

昭和56年(1981年)に柏市の田中遊水池内に
設立された大室園芸団地(組合員数37名)は、
基盤整備事業にともなう義務転作による10ヘ
クタールのビニールハウス団地であり、新鮮・
有機質堆肥の利用・安全をスローガンにチン
ゲンサイなどの中国野菜を、主に地元スーパ
ー、生協との契約により周年栽培していた。
しかし、同一作物の周年栽培により度重なる
コナガの大発生で、食害のため出荷できない
農家が、量販店に違約金を支払う事態になり、
大室園芸団地存続の危機的状況に見舞われて
いた。

(渡邊善保)

23

43



利根川堤防から見る大室園芸団地の現在の姿 2021.11.10

24



大室園芸団地の現在の姿 2021.11.10

25



大室園芸団地の現在の姿 2021.11.10

26



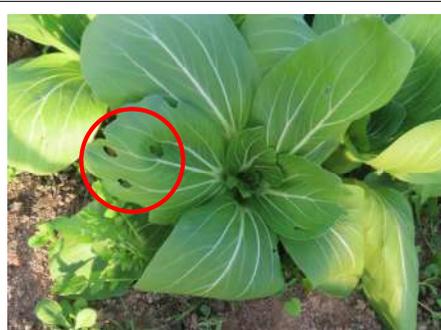
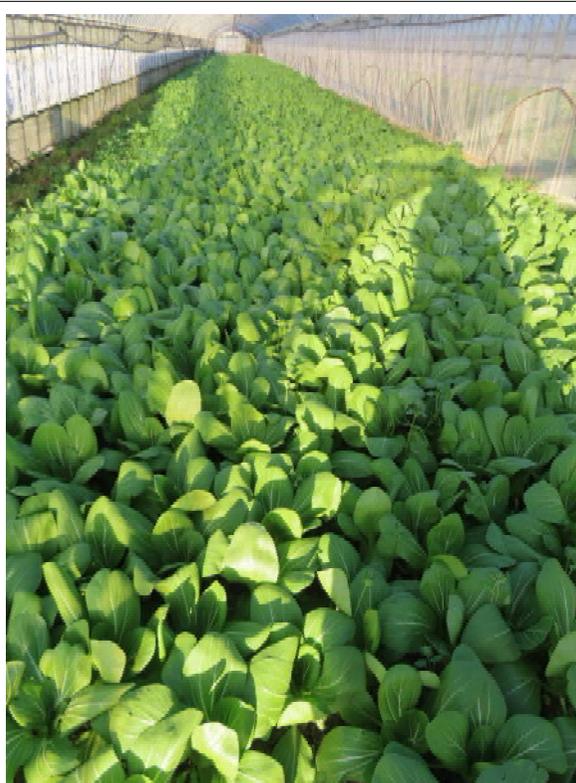
案内をしてくれた大室園芸団地の生産者と千葉県東葛飾農業事務所のグループリーダー早崎知子氏 2021.11.10

27



大室園芸団地の収穫時期のチンゲンサイ 2021.11.10

28



大室園芸団地のチンゲンサイに
チラホラ見られた害虫食害痕
2021.11.10

29



大室園芸団地のコマツナにチラホラ
見られた害虫食害痕 2021.11.10

30



大室園芸団地のトマトの苗の一部に
見られた生長点の葉の黄化 2021.11.10

31



最近、沼津駅近くのTully's Coffee 店で久しぶりに会った渡邊善保氏
一元千葉農業事務所長(当時は東葛飾農業改良普及所で畜産と野菜担当) 2021.10.30

32

渡邊氏らが実施した抵抗性対策

- (1) 使用薬剤の全戸対象のアンケート調査による把握
- (2) 研修会の開催

夜7時頃から、大室地区公民館に組合員、農協、コナガで困っている農家を招集し、**本山(当時千葉大学)**がコナガの生態と薬剤抵抗性コナガの発生メカニズムについて説明した。また、アンケート調査の結果から、管内で使用されている多くの薬剤が効力を失っている可能性があることを説明し、団地内における全戸のコナガ薬剤感受性試験の実施と発生消長のチェックの重要性を認識させた

- (3) 全戸のコナガ薬剤試験の実施

研修会の翌日、大学・普及所・農協・農家の協力で全戸のハウスからコナガ幼虫をできるだけたくさん採取し、アンケートに記載された薬剤に加えてコナガに登録のある計23農薬について大学研究室で薬剤感受性試験を実施¹⁾

33

- 1) ラベル記載の希釈倍数1濃度を調製してチンゲンサイ葉を浸漬し、風乾後コナガ幼虫(発育齢期はバラバラ)を5頭ずつ接種、翌日生死を観察した。その結果、次の4薬剤だけは防除効果があることを確認

BT(バシレックス®、チューリサイド®等)、IGR(ジフルベンズロン、クロルフルアズロン等)、サリチオンとカーバリルの混合剤、ベンゾエピン(マリックス®)(有機塩素系で水質汚濁性農薬)



供試虫は不揃いで、供試頭数も不十分で、反復試験もなく、試験方法としては原始的だが、緊急事態に迅速に必要な情報を得るには有効な方法であった!

34

- (4) 防除体系の地域合意

有機塩素系殺虫剤のベンゾエピンは水質汚濁性農薬であり、大室園芸団地は利根川遊水池にあるということから使用を除外し、効果が確認されたそれ以外の3薬剤を月別に使用する農薬として指定し²⁾、ローテーションすることにした。コナガ成虫は飛翔して移動するので、地域全体で散布日時を決めて一斉防除を行った。大室園芸団地では、グループ編成して交代で防除作業を実施した。³⁾

- 2) 月別使用農薬の厳守について、大室園芸団地組合員が中心になって、農協や農薬取扱店に対し、自らの死活問題に繋がることを認識させるとともに、田中地区の農家への販売農薬について、月別使用農薬表に基づく薬剤を徹底させた。



農薬を売る側と買う側が協力して
ローテーションプログラムを地域全体で徹底できた

35 46

- 3) チンゲイサイは季節によって播種から収穫まで4~6週間かかるということ、コナガは卵から成虫に発育するのに約1ヶ月かかるということを考慮し、播種から約1週間後に1回目、約3週間後に2回目の計2回散布することにした。



コナガ密度が低い(発生が見られない)時期の1回目散布は無駄だとして反対する組合員もいたが、その後のコナガの密度増大を予防するために1回目散布は重要であった!

36

(5) 効果

コナガの食害は急速に減少した。これにより、病害虫防除は地域合意による一斉防除が最も効率的・効果的であることを農協や地域リーダーに認識させることができた。この成果は、薬剤抵抗性で苦慮する周辺の野菜産地にも広く普及した。⁴⁾

4) 当初は、ローテーション使用した薬剤にもいずれは抵抗性が発達してくる可能性を想像し、コナガが再発生し始めたら現地に行って幼虫を採取して3薬剤に対する感受性レベルを検定してモニタリングする計画だったが、結局地域全体からコナガがいなくなって(密度が極端に低下して)、薬剤感受性レベルの変化をモニタリングできなかった。

37

コナガは何故ローテーション使用した3薬剤に抵抗性を発達させずに、地域からいなくなった(密度が極端に低下した)のか？



地域一斉の共同防除(有効薬剤のローテーション使用)でコナガ密度が極端に低下し、その後は野外(ハウス外)の天敵その他の影響で低密度に保たれたので、抵抗性遺伝子の頻度が高まることがなくなったからか？
つまり、シミュレーションでの高淘汰圧モデルと同様の現象？

38

(6) 新に認識された問題

月別に使用できる薬剤を限定したことによって、それまで地域で一定量が販売できていた特定の薬剤の販売が皆無になり、該当する農薬メーカーの地域営業担当者は営業成績不振で社内で苦しい立場に追い込まれ、大学が末端の農家が使う農薬を限定するのは「**営業妨害で怪しからん**」という苦情につながった



本山の反論—効果のない薬剤を農家に販売し続けるのは倫理に反して「もっと怪しからん」。農薬メーカー本社は地域営業担当者を「今月の売り上げ成績」だけで評価するべきではない。むしろ、販売している農薬に対する地域の害虫の感受性を研究所の協力でモニタリングして農家に提供するようなサービスを提供することで、信頼関係を築いて販売促進につなげるべきだと思うのだが・・・

39

[話題3]

恩師 齋藤哲夫先生のプロフィール



2016年1月23日 92才

- 1924年9月29日 京都市に生まれる
- 1949年 京都大学農学部農林生物学科卒業
- 1950年 農林省東海近畿農業試験場茶業部
- 1954年 名古屋大学農学部助教授
- 1972年 名古屋大学農学部教授
- 1979年 日本応用動物昆虫学会会長
- 1988年 名古屋大学名誉教授
- 1989年 日本農学賞(殺虫剤抵抗性に関する一連の研究)
- 1990年 紫綬褒章
- 1996年 勲二等旭日重光章
- 1997年 タイ国カセサート大学名誉博士

2020年12月27日 ご逝去(享年96才)

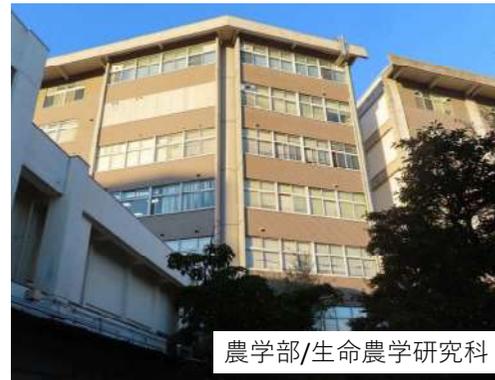
40



1990 US-Japan Pesticide Seminar (Rockville, MD, USA) 41



名古屋大学のシンボリックな豊田講堂



農学部/生命農学研究科



害虫制御学研究室 42



害虫制御学研究室の談話室のドア 2021.10.29



名古屋大学農学部害虫学教室の談話室にて 昭和43年(1968年)頃
一午前10時と午後3時には教室員が全員集まってお茶をする時間があつたー



弥富喜三教授 勝利カップを持つ 平井篤造教授 兼久勝夫助手 岡村敏栄事務官
本多八郎技官 齋藤哲夫助教授 西澤 務助手

名古屋大学(植物病理/害虫)チーム 昭和42年(1967年)頃
—京都大学(植物病理/昆虫)チームとの野球定期戦の勝利の後で—



談話室の棚に保管してある卒業論文



談話室の棚に保管してある修士論文



名大害虫学教室における殺虫剤抵抗性等に関する修士論文(一部)

- 1968年 イエバエのアミノ酸代謝に及ぼす殺虫剤の影響 山田富夫
 1968年 ハダニの薬剤抵抗性に関する研究—主としてナミハダニにおける交差抵抗性とその機作について— 本山直樹
 1969年 薬剤抵抗性ハダニ類に対する共力剤に関する研究:主として有機リン剤抵抗性ミカンハダニに対するMalathionの共力剤と共力作用の機作について 高橋洋治
 1969年 線虫捕食菌に関する研究、特に数種殺線虫剤と線虫捕食菌の関係について 大羽克明
 1970年 Biological and toxicological studies on the armyworm: *Leucania separata* Walker (LEPIDOPTERA: NOCTUIDAE) Neungpanich Sinchaisri
 1972年 ハダニの薬剤抵抗性に関する研究 井上智廣
 1973年 浸透殺虫剤の殺卵作用—特に有機リン系殺虫剤のトビイロウンカ卵に対する殺卵作用— 伊藤高明

49

- 1973年 殺虫剤抵抗性に関する研究—主としてミカンハダニのジメエート抵抗性機構について—平井一男
 1974年 殺虫剤抵抗性に関する研究、特にマラチオン抵抗性イエバエによるマラチオンの in vitro における代謝 丹羽吉和
 1974年 浸透殺虫剤の天敵に与える影響、特にアブラムシとその捕食性テントウムシとの関係について 浅井俊朗
 1980年 ハダニの薬剤抵抗性に関する研究:ミカンハダニのベンゾメート抵抗性 辰巳 勲
 1982年 The toxicity and mode of action of synthetic pyrethroids in the armyworm *Paeuda serarata* (walker) C. Y. Brempong-Yeboah
 1984年 Studies on resistance to insecticides in the daiamondback moth, *Plutella xylostella* L. Virapong Noppun
 1988年 フェンバレレート光学異性体に関する研究 永田啓一
 1992年 有機リン剤抵抗性ヒメトビウンカにおけるエステラーゼ活性増大機構 坂田和之
 1994年 コナガにおける殺虫剤抵抗性に関する研究 加藤政泰

50

- 1994年 クロルフルアズロンの生理作用に関する研究:特に、ハスモンヨトウの繁殖に及ぼす影響について 吉田和史
 1999年 ツマグロコバイの殺虫剤抵抗性発現機構に関する研究 加藤洋平
 1999年 ミナミキイロアザミウマの殺虫剤抵抗性に関する研究 石田 仁
 2002年 ピレスロイド系殺虫剤抵抗性および感受性シロイチモジトウのチトクロームP450遺伝子の単離とその発現特性 島田 佳
 2004年 パーメスリン抵抗性シロイチモジトウにおける作用点感受性低下に関する研究 大森康弘
 2004年 Studies on the development of resistance to Spinosad in the western flower thrips, *Frankliniella occidentalis* (Pergande) (Thysanoptera: Thripidae) 張 淑芸
 2005年 幼虫内部寄生蜂コナガマユコバチの寄生がコナガの殺虫剤感受性に及ぼす影響 武田智子
 2005年 ナミハダニにおけるピリダベン抵抗性機構 富田貴文
 2006年 Cytochromes P450 and their involvement in permethrin resistance of the diamondback moth, *Plutella xylostera* (L.) MA. Anita Mascarenas Bautista

51

- 2006年 ハスモンヨトウの精巢におけるピリプロキシフェンの生理作用 鈴木竜也
 2009年 各種殺虫剤が体内捕食寄生蜂の幼虫の発育に与える影響 神真信悟
 2016年 ミカンキイロアザミウマにおけるキチン合成阻害剤への抵抗性に関する研究 鈴木洋平
 2019年 ネオニコチノイド系殺虫剤に関する研究:天敵微生物との併用効果、および行動変化誘発作用につて 関 公貴
 2020年 Involvement of insect cuticular function-related genes in resistance to chemical pesticides ONGSIRIMONGKOL Paratthakorn
 2020年 ホソヘリカメムシ胚発生に対する幼若ホルモン様活性物質の影響および殺卵活性の評価 荻野真由子
 2021年 殺虫剤プロフェンのトビイロウンカに対する選択毒性の分子機構 解明 後藤健一郎

52



恩師齋藤哲夫先生と本山（最後の表敬訪問） 2019.7.24

53

齋藤哲夫先生

日本の昆虫毒物学 / 殺虫剤抵抗性研究
を育てて下さりありがとうございました

私自身を含めて、多くの弟子を育てて下
さりありがとうございました

先生のお言葉、「絶対に戦争をしてはいけ
けない」、を生ある限り受け継いでまいり
ます

54

薬剤抵抗性コナガの過去と現在、これからの防除対策

○上杉龍士¹

¹農研機構東北農業研究センター

1. コナガの薬剤抵抗性発達の歴史

コナガは、薬剤抵抗性を発達させやすい難防除害虫である。IRAC (2021) によると、コナガは今日に至るまで 101 種類もの殺虫剤に対して抵抗性を発達させてきた。したがって、コナガに関しては、薬剤抵抗性に関する関心が高く、感受性試験等の文献が多い。これらの文献を集め、統計学的な解析により抵抗性発達の歴史を要約することで、抵抗性リスクに関する科学的な評価とそれにもとづく抵抗性管理のあり方（特にローテーション防除の有効性と最適化）を考える。

1-1. 年代ごとのコナガの薬剤抵抗性の状況のまとめ

1970 年代までは、コナガ防除は有機リン剤に頼るところが大きかった。しかし、新規化合物の有機リン剤が次々と開発されたにも関わらず、抵抗性発達によるコナガの被害は止まるところを知らなかった。Bt 剤本格利用の開始を皮切りに、ピレスロイドやカルタップ、IGR 剤といった新しい作用機作を殺虫剤がコナガ防除に利用され始めた。上市当初、これらの殺虫剤は抵抗性コナガに対しても非常に効果的であった。

しかし、1990 年代までに、コナガはこれらの新剤に対しても次々と抵抗性を獲得していった。1990 年代後半には、エマメクチン安息香酸塩、クロルフェナピル、スピノサド、アセタミプリド等が上市された。これら新系統の殺虫剤は、抵抗性コナガに対して卓効を示した。

2000 年に入って、その他にも新しい作用機作を持つ殺虫剤が次々

表 1：コナガ（アブラナ科作物）に適用のある殺虫剤系統 MOA の一覧、最初の薬剤名と上市した年。

MOA	CODE	有効成分	年
DDT	3B	DDT	1948
有機リン	1B	Parathion, Methyl parathion	1952
環状ジエン/有機塩素	2A	Aldrin, Endrin, Dieldrin	1954
カーバメート	1A	Carbaryl	1959
ネライスキシン類縁体	14	Cartap	1967
BT	11A	ToarroCT (Btk)	1981
ピレスロイド	3A	Permethrin	1985
ベンゾイル尿素	15	Chlorfluzuron	1988
ネオニコチノイド	4A	Acetamiprid	1995
フェニルピラゾール	2B	Fipronil	1996
ピロール	13	Chlorfenapyr	1996
ジアフェンチウロン	12A	Diafenthiuron	1997
アベルメクチン/ミルベマイシン	6	Emamectin benzoate	1997
スピノシン	5	Spinosad	1999
オキサジアジン	22A	Indoxacarb	2001
ジアシルヒドラジン	18	Methoxyfenozide	2001
METIS	21A	Tolfenpyrad	2002
ピリダリル	UN	Pyridalyl	2004
ジアミド	28	Flubendiamide	2007
セミカルバゾン	22B	Metaflumizone	2009
フロメキン	UN	Flometoquin	2018

上市された。2007年にはフルベンジアミド、2010年にはクロラントラニリプロールが上市された。これらジアミド系殺虫剤は、コナガを含むチョウ目害虫に卓効を示し、アブラナ科など野菜類の基幹的殺虫剤となった。また2010年から、JIRACの活動が開始し、ブロックローテーションという考え方の普及が始まった。コナガに効果的な殺虫剤系統が増えたこととローテーション防除体系の一般化によって、コナガの被害は沈静化した。この時期には、コナガの抵抗性に関する関心が薄れ、感受性に関する情報を知ることができる文献がほとんど残っていない。

しかし、2013年の秋に、関東以西でジアミド剤に対してコナガの感受性低下事例が各地で報告され、2014年には東北地方でもジアミド抵抗性の発達が確認された。コナガの抵抗性発達に伴い、日本各地でコナガが多発生し、アブラナ科野菜の生産に大きな被害を引き起こしている。したがって、コナガの抵抗性問題に再度関心が向けられ始めた。それに伴いおこなわれてきた各種殺虫剤に対する感受性試験によると、2000年以降に上市された新しい作用機作の殺虫剤に対して、多かれ少なかれ感受性の低下が起こっていることが判明した。

1-2. コナガ抵抗性の文献解析とローテーション防除の有効性に関する結論

コナガの抵抗性発達の歴史をみると、抵抗性の問題は、新系統の殺虫剤の開発によって場当たりの解決してきたように見える。一方で、抵抗性は着実に蓄積し、新剤開発が止まれば、ローテーション防除の実践に関わらず、最終的には全ての殺虫剤で抵抗性が発達してしまうという予測もできる。ここで、コナガ抵抗性文献（表2）のメタアナリシスを行い、統計学的に歴史を要約し、ローテーション防除の有効性を検証した。

解析の結果、抵抗性に適応度コストが見ついている有機リン剤、ネライストキシン類縁体、Bt剤では、ローテーションが普及した2010年以降で感受性の回復が見られた（図1）。また、同様に抵抗性適応度コストが見ついているスピノシンの感受性の低下はほとんど見られない。一方で、抵抗性に適応度コストがないとされる、ベンゾイル尿素、カーバメート、ピレスロイドなどで、そのような感受性の回復は見られなかった。

ローテーションによる薬剤の持続的な利用は、抵抗性コストの存在を前提としている。メタアナリシスによるコナガ抵抗性発達の歴史の解析は、ローテーション理論による抵抗性抑制理論を実証した。つまり、抵抗性に適応度コストが存在すれば、ローテーションによる永続的な抵抗性の抑制が可能であり、そうでなければそれ以外の対策（混合利用など）が必要であるとの結論に至った。

その他の新しい作用機作の殺虫剤については、2010年代に大小の感受性低下がみられる（表3）。しかし、これらの殺虫剤が上市された2000年代における感受性情報の文献の数が決定的に不足しており（表2）、抵抗性発達リスクを数値化するには至らなかった。

表2：コナガ感受性試験の文献情報。2000年代は抵抗性への関心が薄れた時代であり、文献数が少ない。

年代	試験個体数	試験数	文献数
1989年以前	25,142	790	22
1990年代	47,668	1,485	32
2000年代	<u>9,235</u>	<u>179</u>	<u>4</u>
2010年代	53,715	1,792	27

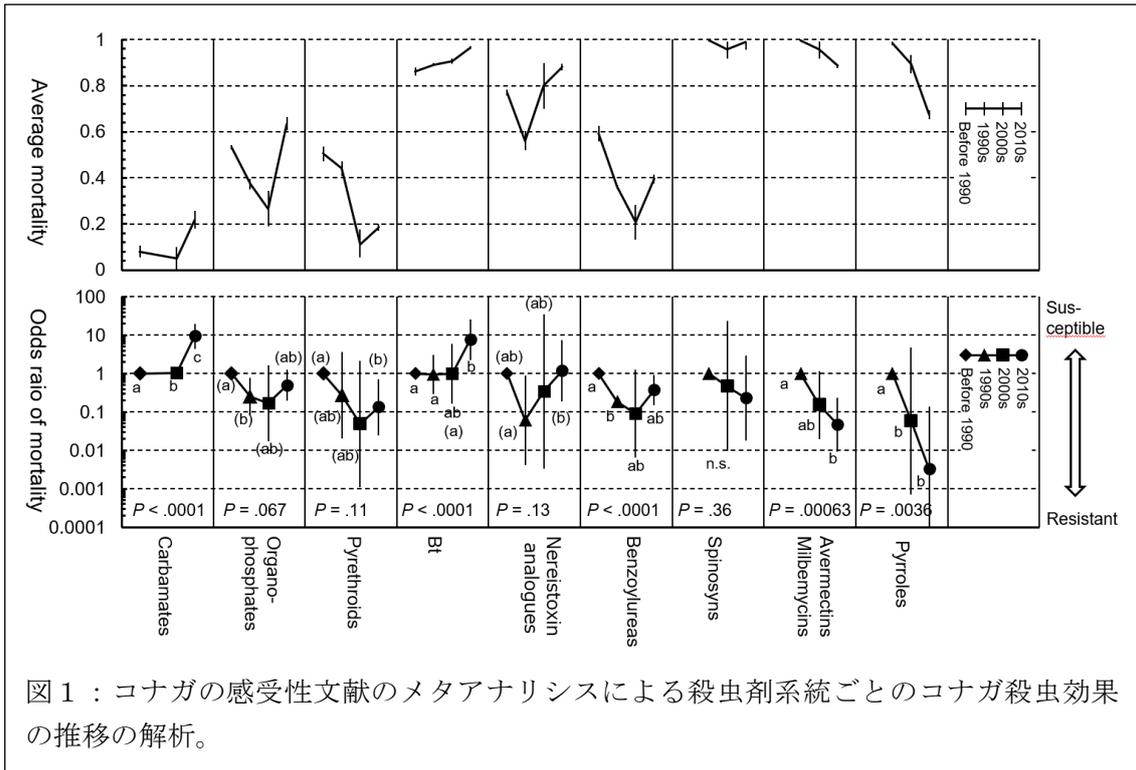


図 1：コナガの感受性文献のメタアナリシスによる殺虫剤系統ごとのコナガ殺虫効果の推移の解析。

表 3：コナガ感受性試験の 2010 年代 27 文献のメタアナリシスによる殺虫剤系統ごとの殺虫効果のランキング。

MOA	試験個体数	試験数	成分	オッズ比	平均死亡率 (95%CI)
スピノシン	4,200	138	2	1	a 0.99 (0.99-0.99)
BT	3,350	117	2	0.30	b 0.97 (0.96-0.97)
アベルメクチン/ミルベマイシン	4,080	134	2	0.087	c 0.89 (0.88-0.90)
ネライストキシン類縁体	2,260	78	2	0.075	c 0.88 (0.87-0.89)
ジアフェンチウロン	120	4	1	0.066	cde 0.88 (0.83-0.94)
ピリダリル	2,730	89	1	0.044	d 0.80 (0.79-0.82)
オキサジアジン	2,400	78	1	0.033	e 0.72 (0.71-0.74)
セミカルバゾン	2,010	67	1	0.026	e 0.71 (0.69-0.73)
ピロール	2,310	77	1	0.020	f 0.67 (0.66-0.69)
フェニルピラゾール	1,860	62	1	0.015	g 0.62 (0.59-0.64)
有機リン	1,030	37	3	0.013	g 0.63 (0.60-0.66)
METIS	2,280	74	1	0.0093	h 0.56 (0.54-0.58)
ベンゾイル尿素	2,940	98	5	0.0060	il 0.40 (0.38-0.42)
ジアミド	8,250	373	3	0.0049	jl 0.41 (0.40-0.42)
ネオニコチノイド	2,110	70	3	0.0041	jl 0.31 (0.29-0.33)
カーバメート	480	16	2	0.0019	kl 0.22 (0.18-0.25)
ピレスロイド	2,500	86	4	0.0016	kl 0.19 (0.17-0.20)
ジアシルヒドラジン	120	4	1	0.00063	l 0.017 (0-0.033)

1-3. 歴史から学ぶ抵抗性コナガの現在の防除対策

抵抗性コナガに対する防除体系は、殺虫効果ランキング（表3）中で上位のものを中心とした殺虫剤をローテーションで利用するのが基本的となる。スピノシン、Bt、アベルメクチン/ミルベマイシン、ネライストキシソリン類縁体といった系統の殺虫剤は、現状で殺虫効果が高く、メタアナリシス研究によって抵抗性発達リスクが低いことがわかっているので、持続可能なローテーション防除体系における基幹な殺虫剤として適している。また、ピリダリルやオキサジアジンに関しては、現状で殺虫効果が高いので、今後の動向に気を付ける必要があるが、ローテーションの中心となりうる。有機リンやジアミドに関しては、感受性の低下がみられるが、適応度コストについての知見があり、特に有機リンでは抵抗性発達リスクが低いことがわかっているので、ローテーションの補助剤として適している。また、混合剤（ファルコンエースフロアブルやアフームエクセラ顆粒水和剤など）には、抵抗性発達の遅延効果があるといわれており、積極的に活用したい。その他の系統の殺虫剤については、今後、抵抗性発達リスクが推定可能になる程度の感受性試験の文献数が集まれば、ローテーション防除体系における役割が明確になると考えられる。

2. コナガのジアミド剤抵抗性発達の事例から学ぶ

コナガのジアミド剤抵抗性の発達の原因の1つは、長距離移動にともなう抵抗性遺伝子の海外からの飛来である。これまで、有機リン剤抵抗性など過去の抵抗性も海外からの飛来が疑われていたが、ジアミド剤抵抗性発達プロセスを遺伝学的に明らかになり、海外飛来説は実証された。このことは、新剤の抵抗性に対する迅速な対策を講じるにおいて、海外（東南アジアや東アジア）情報の重要性が高いことを示している。また、もう1つの原因は、ジアミド剤に過度に偏った防除体系にある。コナガに対するジアミド剤の効果は、冬期に一定程度、回復することが分かっている。この殺虫効果の回復力を上回る過度なジアミド剤の使用が、抵抗性の問題を深刻化させたのである。したがって、ジアミド剤の効果の高い春期～初夏期をメインに、ローテーション防除の一角としての適度な利用を心がければ、今後もジアミド剤をコナガの防除に有効活用できるであろう。

2-1. コナガのジアミド剤抵抗性遺伝子の由来（＝海外からの飛来）について

ジアミド系殺虫剤であるフルベンジアミドおよびクロラントラニリプロールは、世界ではフィリピンでそれぞれ2006年および2007年に、日本ではそれぞれ2007年および2010年に上市された。ジアミド剤は、様々な系統の殺虫剤に対して抵抗性を獲得したコナガに対しても極めて高い効果を持っていたので、コナガ防除の基幹として世界的に利用されてきた。ところが、2010年代に入って、東南アジアおよび東アジアでの抵抗性の報告が相次いだ。日本においても、2013年秋に効果の低下が関東以西の広い地域で報告され、2014年には北日本においても報告された。

コナガのジアミド剤に対する抵抗性獲得は、リアノジン受容体の1つのアミノ酸置換（G4946E）によるものである。日本と海外（タイ）のリアノジン受容体G4946E周辺領域の塩基配列の比較から、東アジアにおけるジアミド剤抵抗性遺伝子（G4946E突然変異）

は、短い期間に少なくとも独立して7回進化したことが分かっている。したがって、コナガのジアミド抵抗性発達は偶発的に生じたものではなく、起きるべくして起きたといえる。日本とタイのコナガは、同じ由来のジアミド剤抵抗性遺伝子（G4946E）を共有している（図2）。東南アジア・東アジアにおけるジアミド剤抵抗性の北上の経緯も考慮に入れば、日本のジアミド抵抗性遺伝子は、タイなど東南アジアで進化したのちに日本へと長距離移動したコナガがもたらしたものと考えられる。

2-2. コナガのジアミド抵抗性の冬季における感受性回復について

コナガのジアミド剤への感受性は回復する。この理由は不明であるが、ジアミド剤抵抗性を持つコナガ個体の越冬能力が低い（ジアミド剤抵抗性遺伝子の適応度コスト）ことに原因があるか、秋から春にかけて河川敷で繁茂するアブラナ科雑草で繁殖する感受性コナガ個体が入ることによって原因があるか、もしくはその両方が原因であると考えられる。

ジアミド剤の抵抗性リスクレベルは、北日本と福島・関東以西では異なる。つまり、北日本に比べて福島・関東以西は、抵抗性リスクレベルが一様に高い。このリスクレベルの違いは、コナガの越冬可能性と一致している。北日本では、コナガは毎冬の寒さ（12～2月の月平均気温0℃以下）あるいは根雪（60日以上）で死滅する。これによって、毎冬にコナガの個体群がリセットされる。毎春に西南地域の雑草由来の感受性の高い飛来個体群から新しい世代が始まることで、抵抗性リスクレベルが低くなると考えられる。一方で、コナガが越冬可能な福島・関東以西では、抵抗性が圃場で翌年まで持ち越されて、リスクレベルが年をまたいで維持されていると考えられる。

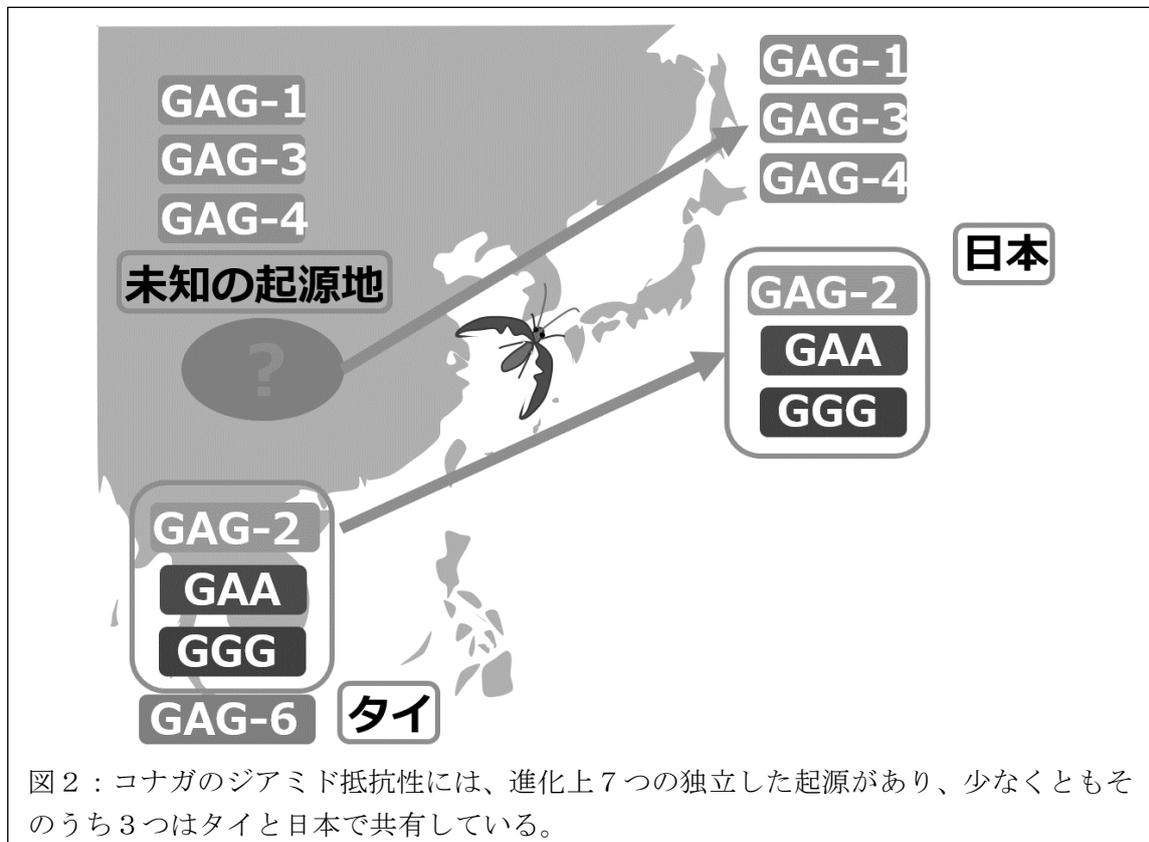


図2：コナガのジアミド抵抗性には、進化上7つの独立した起源があり、少なくともそのうち3つはタイと日本で共有している。

3. これからの抵抗性コナガ対策

日本政府は、未来社会の目指すところとして **Society 5.0** を提案している。**Society 5.0** では、サイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立させる。害虫の薬剤抵抗性に関しては、有形（感受性試験論文や報告書など）や無形（生産者間の薬効に関する口コミなど）問わず情報があふれている。これらの情報を、自然科学的に処理するのではなく、情報工学的に数値化・データベース化して解析を行い、誰にでもアクセスを可能とするシステムを構築すれば、統一された抵抗性リスクの数値に基づいて、生産者や農薬メーカーが個別に抵抗性対策を可能にできる。これは、**Society 5.0** の概念に則った抵抗性管理となる。

3-1. 文献情報のメタアナリシスによる殺虫効果ランキングと抵抗性発達予報の提供

文献情報のメタアナリシスによって、統計学的な数値による殺虫剤系統MOAごとの殺虫殺虫効果のランク化と抵抗性発達予報が可能であることはすでに示した。今後、継続的に感受性試験データを取得できる体制を整えることで、毎年、ランキングと予報を最新情報に更新することができる。

農林害虫防除研究会「殺虫剤抵抗性タスクフォース」において、その年に行われた感受性試験情報（論文・報告書等）の取りまとめを行うことでこれが可能となる。この情報をもとにして、殺虫剤各系統の感受性の動向を解析することで、感受性低下が危惧される系統や、古くても効果的な系統などが分かり、後手に回らないコナガの抵抗性対策が可能になることを期待している。

将来的には、ベイズ推定などを利用して室内感受性試験と圃場における薬剤効果試験データを統合して、より現場の状況に近いリスク推定を行うことも可能となるう。

他の害虫でも同じ手法が有効である。現在、ネギアザミウマの文献を集めているが、少なくとも有効な殺虫殺虫効果ランキングを作ることができている。

3-2. 感受性試験データ収集案

1. 新剤のベースライン感受性検定の推奨

（感受性低下の早期判断に重要）

2. 卓効剤の低濃度検定（同上の理由で重要）

3. 薬剤抵抗性農業害虫管理のためのガイドライン案に則った統一的な試験方法の採用

4. データフォーマットの統一（エクセル表）

データフォーマット案

(エクセル入力方式)

文献 ID: Hokkaido-SatoK-2021

有効成分: Permethrin

製品中成分濃度(%): 20

製品推奨希釈倍率下限(倍):
2000

製品推奨希釈倍率上限(倍):
3000

IRAC 分類番号: 03A

IRAC 分類名: Pyrethroids

寄主作物種名: B_rapa

寄主作物名: cabbage

都道府県: Hokkaido

採集市町村: Hokuto

採集年: 2020

採集月: 9

試験齢: 3

採集から試験までの日数(約):
60

飼育温度(期間中平均°C): 20

試験温度(°C): 25

試験希釈倍率(倍): 3000

4. 参考文献

本講演の内容については、以下の文献に詳細が記載されている。

1. Uesugi R (2021) Historical changes in the lethal effects of insecticides against the diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.). *Pest Man Sci.* 77: 3116-3125.
2. Uesugi R, Jouraku A, Sukonthabhirom na Pattalung S, Hinomoto N, Kuwazaki S, Kanamori H, Katayose Y, Sonoda S (2021) Origin, selection, and spread of diamide insecticide resistance allele in field populations of diamondback moth in East and Southeast Asia. *Pest Man Sci.* 77: 313-324.
3. 平成 26～30 年度農林水産省委託プロジェクト研究「ゲノム情報等を活用した薬剤抵抗性管理技術の開発」コンソーシアム（編）（2019）薬剤抵抗性農業害虫管理のためのガイドライン案.
https://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/publication/pamphlet/tech-pamph/121745.html
4. 上杉龍士（2020）コナガの薬剤抵抗性の過去、現在とこれからの防除対策. グリーンレポート 36 (3) 18-19. 東京, J A全農

Past, present, and future control methods for insecticide resistance of diamondback moth

Ryuji Uesugi¹

¹ NARO Tohoku Agricultural Research Center

最後に、シンポジウムに参加してのご感想やご意見を頂きましたので、その一部を表 1 で紹介させていただきます。皆様から多くの労いのお言葉、お褒めのお言葉、励ましのお言葉を頂き、我々実行委員会を勇気づけていただきました。皆様から頂いた貴重なご回答を、第 2 回、第 3 回のシンポジウムに還元していきたいと思っております。ご協力いただき、ありがとうございました。

第 1 回殺虫剤抵抗性対策シンポジウム実行委員会
井口雅裕（和歌山県かき・もも研究所）

表1 アンケート「シンポジウムに参加しての感想や、その他のご意見」に対する回答(抜粋)

たいへん良いシンポジウムでした。今後も積極的に参加したいと思います。リモートは参加の機会を広げていただきました。ありがとうございました。
楽しく、学ばせていただきました。ありがとうございました。
コロナ禍で研修イベント等が開催しにくい環境のなか、このようなシンポジウムを開催していただき、ありがとうございました。演者のバランスもとれており、オンラインの限られた条件でしたが、良いシンポジウムだったと思います。職場からのオンライン参加だと、部分的に業務対応が必要なことがあり、対面開催できる状況に早くなって欲しいと思いました。
今回の参加者名簿を見ると、名簿上の都道府県職員は96名で、内訳として試験場関係が約8割を占めており技術面での関心の高さがうかがわれました。一方で普及・防除所関係者は16名で現場で農家と接する機会が多い方々の参加が少なかったことは残念です。 平日の開催で致し方ないところですが、普及関係の方にも参加ないし後日でも内容を見てもらえる仕組み(例えば会員無料/非会員有料の配信など)があると良いかと思っております。 農林害虫防除研究会も発足当時と比べて所帯が大きくなりましたが、引き続き現場の防除に直結した課題にフォーカスして行っていただきたいです。 今回の内容に加えて耐性菌研究会とのコラボも進め、現場への定着を目指したより具体的な取り組み(現在ここで足踏みしている感あり)を、規模と影響力が大きい日植防シンポを活用するなど実際の普及に近づけていただきたい。因みに日植防シンポ等でも総花的な講演から、より現実的な農家普及を目指した講演・アピールを行う時期かと思っております。
専門分野以外の者へもわかりやすい、平たい言葉で表現していただけると助かります。
抵抗性管理を現場に浸透させていく難しさを感じた。
リモートは参加しやすいが、寂しくもある
大成功だったと思います。実行委員の皆様ご苦労様でした。
都道府県やブロック単位でこのようなシンポジウムを開催して多数の関係者に情報共有を図ってほしい。
興味深い内容が多く、勉強になりました。次回も期待しています。
殺虫剤抵抗性対策に関する有益な情報を得ることができました。
関係機関が一丸になって、良い取り組みになることを、期待しています。開催していただき、ありがとうございました。
殺菌剤耐性菌研究会は30年継続されているとの話題があった。殺虫剤についても継続してこのような会を重ねて、議論を深めることを期待します。
多くの良い講演を聴かせていただき、ありがとうございました。
私自身は退職してメーカーの研究開発、技術普及の場を離れましたがIPMは今後も必須技術ですので引き続きこのようなシンポジウムを定期的実施して下さい。

第1回殺虫剤抵抗性対策シンポジウム実行委員

実行委員	井口 雅裕	(和歌山県 果樹試験場)
	土井 誠	(静岡県 農林技術研究所)
	野田 隆志	(日本植物防疫協会)
	宮崎 仁実	(JA全農)
	山本 敦司	(日本曹達株式会社)

第1回殺虫剤抵抗性対策シンポジウム講演要旨

令和3年(2021年)11月22日 発行

令和4年(2022年)11月11日 改訂

事務局：第1回殺虫剤抵抗性対策シンポジウム
静岡県農林技術研究所
〒438-0803 静岡県磐田市富丘678-1
農林害虫防除研究会事務局
(一社)日本植物防疫協会 茨城研究所
〒300-1212 茨城県牛久市結束町535