



**HAL**  
open science

浸透性殺虫剤に関する世界的な統合評価書 (WIA) の更新版 第  
3 部 浸透性殺虫剤に関する世界的な統合評価書 (WIA) の更新  
版 第 3 部 : 浸透性殺虫剤の代替手段

Lorenzo Furlan, Alberto Pozzebon, Carlo Duso, Noa Simon-Delso, Francisco  
Sánchez-Bayo, Patrice Marchand, Filippo Codato, Maarten Bijleveld van Lexmond,  
Jean-Marc Bonmatin

► To cite this version:

Lorenzo Furlan, Alberto Pozzebon, Carlo Duso, Noa Simon-Delso, Francisco Sánchez-Bayo, et al.. 浸透性殺虫剤に関する世界的な統合評価書 (WIA) の更新版 第 3 部 浸透性殺虫剤に関する世界的な統合評価書 (WIA) の更新版 第 3 部 : 浸透性殺虫剤の代替手段. 2020. <hal-01966114>

HAL Id: hal-01966114

<https://hal.science/hal-01966114>

Preprint submitted on 6 Mar 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## 浸透性殺虫剤に関する世界的な統合評価書(WIA)の更新版 第3部：浸透性殺虫剤の代替手段

Lorenzo Furlan<sup>1</sup>・Alberto Pozzebon<sup>2</sup>・Carlo Duso<sup>2</sup>・Noa Simon-Delso<sup>3</sup>・Francisco Sánchez-Bayo<sup>4</sup>・Patrice A. Marchand<sup>5</sup>・Filippo Codato<sup>6</sup>・Maarten Bijleveld van Lexmond<sup>7</sup>・Jean-Marc Bonmatin<sup>8</sup>

受付：2017年8月8日/受理：2017年12月13日

Environ Sci Pollut Res <https://doi.org/10.1007/s11356-017-1052-5>

©The Author(s) 2017. This article is an open access publication

ネオニコチノイド研究会監訳初版：2019年10月

### 要旨

害虫防除のため農薬を過信することは、農業の生産性を支える環境サービスに深刻なダメージを与える。浸透性殺虫剤の広範な使用、特にネオニコチノイド系とフェニルピラゾール系フィプロニルの、害虫防除における実際の使用、収量への効果、20年近い使用時期を経てこれらの化合物に対して生じた害虫の耐性について検証する。耐性は、長期的には、合成農薬以外の手段方法によってのみ克服しうる。さまざまな害虫防除戦略がすでに存在し、経済的な損害を被ることなく、収量を維持しながら、十分な害虫の防除を達成できる。収量減に対する斬新な共済保険を、殺虫剤を使うことなく生産者の作物と生活を守る代替手段として例示する。最後に、真に持続可能な農業のために、自然の生態系サービスを主体とした、化学物質に頼らない新しい枠組みが必要であるという結論を示す。これは WIA 第1版(以下、WIA1)の結論を再度支持するものである(van der Sluijs et al. Environ Sci Pollut Res 22:148-154, 2015)。

キーワード 浸透性殺虫剤、ネオニコチノイド、共済制度、保険、害虫防除、耐性、生物的防除、IPM、総説

1 Veneto Agricoltura, Legnaro (PD), Italy

2 Department of Agronomy, Food, Natural Resources, Animals and Environment, University of Padova, Viale dell'Università 16, 35020 Legnaro (PD), Italy

3 Beekeeping Research and Information Centre, Louvain la Neuve, Belgium

4 School of Life and Environmental Sciences, The University of Sydney, 1 Central Avenue, Eveleigh, NSW 2015, Australia

5 Institut Technique de l'Agriculture Biologique (ITAB), 149 Rue de Bercy, 75595 Paris, France

6 Condifesa Veneto, Associazione regionale dei cnsorzi di difesa del Veneto, Via F.S. Orologio 6, 35129 Padova (PD), Italy

7 Task Force on Systemic Pesticides, 46 Pertuis-du-Sault, 2000 Neuchâtel, Switzerland

8 Centre de Biophysique Moléculaire, Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Rue Charles Sadron, 45071 Orléans, France

### 序論

浸透性殺虫剤に関する統合的な評価書(WIA1)(Bijleveld van Lexmond et al. 2015; van der Sluijs et al. 2015)の出版以降、いくつかの新しいネオニコチノイドとフィプロニルに関する研究がなされた。この更新版では、2014年以降出版されたすべての情報を集め、WIA1と同じく検討する。第1部(Giorio et al. 2017, this special issue)はネオニコチノイドとフィプロニルの作用機序と代謝、他の農薬やストレス因子との協働、分解産物、環境汚染について取り扱う。第2部は、ネオニコチノイドとフィプロニルの、水生、陸生の無脊椎動物、脊椎動物への致死および亜致死作用と生態系への悪影響を扱う。本第3部は、一年生および多年生の作物への浸透性殺虫剤使用の代替手段に焦点を置く。ネオニコチノイドとフィプロニルに対する害虫の耐性についても検討する。

作物防除のためのネオニコチノイドとフィプロニルの予防的使用は、害虫防除のための総合的病害虫管理(integrated pest management; IPM)の対極にある(Barzman et al. 2015; Furlan et al. 2016; Stenberg 2017)。IPMについては、(a)一年生作物、(b)多年生作物(果樹やブドウ)の2種類の作物に分けて説明した。IPM実施に伴うリスクを補償する新しい共済制度(Mutual Fund)の手法は、イタリアではコムギ栽培に広く適用されており、IPMを導入する生産者と生態系にとって多くの利点がある。

ネオニコチノイドとフィプロニルの環境への悪影響を示す情報は多く、(1)無脊椎動物への非常に高い毒性(Pisa et al. 2015, 2017)、(2)脊椎動物への高い毒性(Gibbons et al. 2015; Pisa et al. 2017)、(3)土壌への高い残留性と表層水汚染の両方による生態系および生態系サービスへの悪影響(Bonmatin et al. 2015; Chagnon et al. 2015; Giorio et al. 2017; Pisa et al. 2017)、(4)農地以外の場所を含むあらゆる作物への広範かつ大量の施用(Simon-Delso et al. 2015; Douglas and Tooker 2015)などがある。それでもこれらの殺虫剤の削減や段階的廃止が進まない理由として、作物収量と生産者収入が減ること

への恐れがあるようだ。浸透性殺虫剤の予防的施用の有効性と、施用が引き起こす環境破壊に関する正確な情報は、合理的な解決策を探る一助になるはずだ。そして、殺虫剤耐性を考慮すれば、すでに存在する代替手段が害虫防除としてより持続可能であることを、規制する側に提示すべきである。

## 農業におけるネオニコチノイドとフィプロニル

### ネオニコチノイドと収量

ネオニコチノイドが実際のところ防除にどれだけ役立っているかを示す情報は少ない。しかし、ヨーロッパで3種のネオニコチノイド(クロチアニジン、イミダクロプリド、チアメトキサム)とフィプロニルに暫定禁止措置が講じられて(EU 2013a, b)以降、作物収量が著しく下落するのではないかという懸念がメディアや科学誌で表明されたが(例: Matyjaszczyk et al. 2015 のポーランドのトウモロコシとナタネ)、信頼できるデータや統計に基づいたものではなかった。

フィンランドでは、虫媒花作物の収量は変動が大きいが、風媒花作物はここ数十年安定した伸びを示している。虫媒花作物の収量減に関連すると考えられる要因を分析すると、ナタネの収量の動向と地域でのネオニコチノイド粉衣種子使用の増減との間に有意な線形相関が見られた(Hokkanen et al. 2017)。具体的には、ネオニコチノイドによる種子粉衣の増加につれ、ナタネの収量が減少している。同時に、昆虫による授粉の恩恵を受ける作物の栽培地においてミツバチの群が利用可能であることは、ナタネの収量の動向に、線形の有意な影響を与えた。(訳者注: ナタネの授粉および収量には、野生の授粉生物が重要な役割を担うが、その数を知ることは難しい。そこで野生の授粉生物の足りない部分をミツバチが補えば収量は維持されると考え、ナタネ畑の周辺の養蜂家が管理しているミツバチの群の数を調べたところ、ミツバチの群がナタネ畑の周辺にあると、収量維持に役立っている傾向が検出された。)ナタネの調査期間中、景観とミツバチの群の数は変化しなかったため、著者らは、収量減の唯一の原因として考えられるのは、15年間に及ぶネオニコチノイドの種子処理だろうと述べている。

イギリスでは、Budge et al. (2015)は、イミダクロプリド種子処理によりナタネの収量は有意に増加しないことを示した。種子処理をすると、その後の殺虫剤葉面散布回数を減らせるため、数年間は、生産者にとり収益がよくなるが、11年間にわたる蜂群喪失とイングランドおよびウェールズでのイミダクロプリド使用パターンには相関関係があることも明らかになった。このナタネの収量についての知見は、以前報告されたネオニコチノイドの

ダイズ(Seagraves and Lundgren 2012)およびコムギ(Macfadyen et al. 2014)への有用性の否定と一致している。

トウモロコシについては、入手可能な主にイタリアでの研究論文によれば、穀物の収量に対するネオニコチノイド種子処理の効果はほとんど認められなかった(15年間分の野外試験に関する研究、Furlan and Kreutzweiser 2015を参照)。これは、主として害虫集団の大半が、経済的損害を与えるレベル以下であったことに起因する。

ネオニコチノイドの発芽への作用を示す研究結果もある。シンジェンタが共著者となったNogueira Soares et al. (2017)の論文では、チアメトキサムのメロンとスイカの種子処理は、生理的能力を高めるという。対照的に、Tamindžić et al. (2016)は、製剤3種(ポンチョ、ガウチョ、クルーザー)は近交系のコムギ数種の発芽を阻害するという結果を発表している。最も有害なのは、ガウチョ(有効成分イミダクロプリド)で、クルーザー(有効成分チアメトキサム)とポンチョ(有効成分クロチアニジン、チアメトキサム派生物)と比べて有害だった。

Deguines et al. (2014)は、過去20年にわたるフランスの54種の主要作物に関する全国規模のデータを解析した。農業集約化による利益は、授粉者への依存が高まるにつれ減少しており、集約化した農地では、授粉者に依存する作物の収量増加に失敗し収量の不安定化が繰り返していることを指摘した。著者らは、農業集約化の利益は、授粉サービスの減少と相殺関係にあると考えられるため、生態系サービスの最適化による生態学的農業集約化(reviewed by Kovács-Hostyánszki et al. 2017)が必要だと結論づけている。言い換えれば、浸透性農薬の予防的施用は、管理下および野生の授粉者双方に影響を与え(Pisa et al. 2015, 2017)、授粉者に依存する作物の増収を妨害する。

## 農業における浸透性殺虫剤の代替策

### 一年生作物

#### 一年生作物の主要害虫に対する浸透性殺虫剤の施用

一年生作物の主な害虫に対するネオニコチノイドとフィプロニルの使用については、Furlan and Kreutzweiser (2015)、Simon-Delso et al. (2015)の論文で述べた。その中で浸透性殺虫剤の主な用途は、例えば粉衣処理など予防的なもので、それゆえIPM原則に反するものであると強調された(Furlan et al. 2016)。

#### 一年生作物の害虫防除に対する代替策

最新のIPM技法により、ネオニコチノイド施用の需要を確実に抑制しうることが2015年のFurlan and Kreutzweiser (2015)の論文で示された。生産者の実践的

技術向上と IPM 導入を補助する特別な共済制度創設のために、トウモロコシなどの感受性の高い作物への土壌中虫害、主に線虫被害の危険をもたらす因子のデータが、もっと必要であることが強調されている。実際には、害虫のレベル評価は行なわれないことが多い。なぜなら、手間のかからない安価な方法(低収益の作物には必須である)や害虫の個体数予測が外れるリスクを補填する保険がないからである。この問題に取り組んだ最近の興味深い研究がある：イタリアでは 29 年間にわたる長期研究の結果、線虫被害のリスクを高める最重要因子を抽出し、作物の防除の必要に見合った、低コストで信頼できる予報が可能になった(Furlan et al. 2017)。

リスク評価に単変量解析を適用し、被害発生に影響を与える主な因子を特定した。そして、この特定された因子群を用いた多因子モデルを適用した。このモデルは、最も強く影響を与える因子を見出し、それぞれの因子が互いにどのように被害の危険性に影響を与えるかを分析することができる。最も強いリスク因子は、害虫種コメツキムシ(*Agriotes brevis*)の優勢、有機物含有 5%以上、牧草地および二毛作を含む輪作、水はけの悪さ、別の害虫種コメツキムシ(*Agriotes sordidus*)の優勢だった。周辺環境に害虫発生した草地があることも重要なリスク因子であることが以前に他の研究者によって確認されている(Blackshaw and Hicks 2013; Benefer et al. 2012; Hermann et al. 2013; Saussure et al. 2015)。多因子モデルは、前述したリスク因子が2つ以上同時に存在することがトウモロコシの線虫被害リスクを著しく上昇させ、いっぽう、リスク因子が存在しない場合の被害可能性は常に低い(1%以下)ことを示した。この結果により、どの国でも低リスク地域と高リスク地域を特定し、地図化して準備することが可能になった。

この情報は、IPM 実施に利用することができ、ヨーロッパ全土でトウモロコシの土壌害虫食害に備えることができる(Furlan et al. 2016)だけではなく、土壌への殺虫剤施用を大幅に削減し、生産者の収入を減らさずに、ただちに農業の環境影響を低減することに役立つだろう。実施には2段階の過程がある：(i)フェロモントラップを用いたコメツキムシ個体数モニタリングを含む「地域全体の」リスク評価(Furlan and Kreutzweiser 2015)と、(ii)リスク評価によりリスク因子の存在を確認した畑の追加モニタリング調査(Furlan et al. 2016)である。有害な集団を見つけた時、土壌の湿度や温度に基づいた線虫活動予測モデルを用いて、幼虫が実際に被害をもたらすかどうか判断することができる(Jung et al. 2014; Milosavljević et al. 2016)。

この作業の結果に基づき、耕地ごとにマッピングし、高リスク地域をピンポイントで見つけることができる。この調査で見出されたリスク因子のマッピングと、イタリア外での Saussure et al. (2015) の研究により、これま

での土壌殺虫剤施用の収支が非常に大きなマイナスだったことが証明された。この地図の第1レイヤーには主な土壌特性(有機物含有、粒子の粗さ、pH)；第2レイヤーには主な農業上の性質(輪作、水はけ)；第3レイヤーには利用可能な昆虫情報、すなわち主要コメツキムシ種の個体数レベル、数年間ベイトトラップ(誘引餌を使った罠)で調査した線虫の有無と生息密度が記されている。第4レイヤーで、存在するリスク因子が相互作用して起きる効果を再現する。このシステムによって、地域ごとのリスクレベルの違いが一覧できる。線虫リスク区分(例：リスク因子の数に基づいた低・中・高)に応じて、それぞれ固有の IPM 戦略を設定する、例えば、高リスク地域では線虫生息密度を評価し、低リスク地域では殺虫剤施用やモニタリング継続を中止するなどである。リスク因子が複数存在するところでは、経済的問題となりうる線虫個体数がある場所を特定する詳しい方法が記されている。この方法で、トウモロコシへの経済的閾値を超えた時その場所にだけ防除を実施し、それ以外は高価な土壌用殺虫剤の使用を回避することが可能である。実は、トウモロコシに線虫大発生を引き起こすリスク因子は、トウモロコシ以外の作物でも同じである。したがって、この方法はどの畑作物の IPM においても適用可能だ。

リスク因子のない畑を選ぶことで、虫に弱い野菜を含め、あらゆる作物の病虫害リスクが低減できる。線虫被害リスクの評価は、農期ごとに対策不要な農地の範囲を見積もる強固な基盤で、収量が落ちるリスクがない。イタリアでは、IPM 実施により、土壌殺虫剤ないし殺虫剤種子処理を使用しているトウモロコシ畑は最大でも約4%となった。つまり、96%の畑には殺虫剤施用が不要なのである。トウモロコシの土壌害虫に正確な IPM 閾値を設定することは、どの場所でも可能なはずだ。例えばリスクのない地域では、土壌殺虫剤や殺虫剤処理種子が必要な土地はトウモロコシ畑の1%以下だろう。土壌有機物が5%を超える土地では、広く分布するコメツキムシ種 *Agriotes sordidus* の防除に殺虫剤を要するトウモロコシ畑は全体の約20%になる。広大なエリアにリスクが散在する場合の IPM 閾値は、さまざまなリスク因子によって生じる被害リスクの平均と、それぞれのリスク因子が存在する耕地の表面積を勘案した値となるだろう。この値は、調査された種が潜在する地域ですぐに適用できるし、他のエリアにも広げることができる。実際、生物種およびまたは気候条件が異なる地域では、地域ごとの確認と修正の作業が必要だが、同じ主要なリスク因子が鍵となるのだから、これまで述べた IPM アプローチを用いるべきである。この仕事で研究されたコメツキムシ種が広く分布するところではどこでも IPM を適用することが可能だろうし、正確な比較がなされれば、その他のコメツキムシ科の分布するところでも適用可能であろう。

1. 共済制度による補償

IPMにおいて、リスク因子と限定的な畑の直接モニタリングから害虫に対し低リスクと判定し、低コストの手法を適用する際に重要となってくるのは、IPM 予測に反して自然の変動性により土壌害虫被害が起こった畑に対して、生産者が適切な補償を受けることである。このような場合にはリスク保険の補償金が大いに役立つ。保険による補償/共済制度は、個々の農業者組合、あるいはEU指令(1305/2013/EU)の支援を受けて行ないうる。リスクが1%以下の場合、被害を受けた畑への支払いは1ヘクタール当たり数ユーロ(土壌殺虫剤の10分の1以下)で間に合い(Ferrari et al. 2015)、土壌殺虫剤を使用していたにもかかわらず被害が生じる可能性の方が高い(Saussure et al. 2015)。共済制度は生産者の組合が運営する手法で、地域間のリスクを分散して補償するのが目的である。この制度は非営利的で透明性の高いルールを持つ。補償は基金の原資に見合った額となっている。予測したコストより支出が少ないので、基金の貯蓄は増加している。私営の保険会社が現在カバーしていないリスク(洪水などの天災、畑作物の発芽直前直後の野生動物や害虫による被害など)も補償している。ここで紹介したイタリアの導入事例では、農業面で重要な2州、ヴェネト州とフリウリ＝ヴェネツィア・ジュリア州の広範な地域(47000ヘクタール以上)が加入している。

上記地域では、長期研究調査(29年以上)によって、土壌害虫に起因する経済的損失リスクが4%以下となり、防除の必要エリアを特定できる信頼性の高いIPMが行なわれている。先に述べたように、リスク因子がなければ、経済的損失を受ける可能性は非常に少なく、ほとんどの土地で土壌殺虫剤の施用が不要となる。リスク因子がある場所では、ベイトトラップで線虫個体数を適確に把握し、トウモロコシの経済的閾値を上回る場所と時点でのみ防除戦略を実施する。これが、浸透性殺虫剤の全体的かつ予防的な施用の正反対であることは明白である。共済保険は、IPMの誤り、例えば地域内の線虫の個体数の経済的リスクの過小評価などのリスクもみている(Furlan et al. 2015)。このリスク評価に基づき、特有の「トウモロコシ共済制度」が創設された。主な特徴を表1にまとめる。概要は、生産者に「一年生作物公報」で推奨するIPM手順を踏まえ、どうしても必要な場合にのみ農薬を使用することを義務づけ、失敗した場合や不測の被害があった場合に保険金を受け取る。

トウモロコシ共済制度の実施により、2015-2016年で以下の経済面、管理面の効果があった：2年間で平均47,558ヘクタールが契約対象；費用は1ヘクタール当たり3.3ユーロ(土壌殺虫剤の約10分の1)；線虫、トウ

表1 イタリアのトウモロコシ共済制度の概要

加入者	農業協同組合のメンバー
義務	・播種後7日以内に契約 ・適正耕作規範の履行 ・EU指令128/2009/ECの履行 ・"一年生作物公報"の推奨事項の履行
補償されるリスク	・天候不良(例、干ばつ、洪水、低温)による植物密度(畑に生えた作物)の不良 ・土壌害虫(ハリガネムシ、タマナヤガ)による植物密度(畑に生えた作物)の不良 ・フザリウムなどによる病害(根腐れ、赤カビ病など)による植物密度(畑に生えた作物)の不良 ・トウモロコシ根切り虫(WCR)による被害 ・野生動物による収量減少
費用	3-5ユーロ/ha(洪水、多雨、低温、干ばつ、害虫リスク、病気、野生動物すべてを含む)
補償	・WCR被害による転作(1000ユーロ/haを上限) ・以下の費用に対し500ユーロ/haを上限： ○1m <sup>2</sup> 当たりの生存種子が4以下の場合の再播種(250ユーロ/haを上限) ○播種の遅れによる収量減(250ユーロ/haを上限)

モロコシハムシ、雑草などによる被害を補償するための歳入が160,335ユーロ、実際の支払金が83,863ユーロ(52%以下)。したがって、次年度以降の共済制度資金は大幅な黒字になった。

表2では、トウモロコシの種子や植え付け時の苗に対する土壌殺虫剤の予防的施用というアプローチと、共済制度に基づくIPMアプローチを比較した。IPM実施に関する生産者のコストと、共済制度運営のコストは、それぞれ以下にまとめた：

1. 生産者のIPM実施コストを表2の左から5列目に記載した。生産者の義務は「一年生作物公報」のIPMガイドに則してIPM原則を実施することだ。リスク因子の存在を評価するだけなら(表の4行目参照)、1人の技術者が4~5時間のみ必要である(約100ユーロ/100ha)。フルにIPM実施が必要ならば(表の3行目参照)、総コスト見積りは1,000ユーロ/100haとなる。ベイトトラップでのモニタリングにより、このリスクがある地域は16ha(ヘクタール)だったと仮定する。2時間のモニタリングで約40ユーロ/haかかることから、小計40×16=640ユーロ、60ユーロの資材費、100ユーロの旅費と手数料、200ユーロの耕地ほかのマッピングを含む正確なリスク分析費用という内訳となる。なお、これらの費用は、ヨーロッパではIPM原則の順守とIPM公報を参照することがEU加盟国に義務付けられているため、追加コストと見なすべきではない。

表2 イタリアのトウモロコシ栽培の農業戦略4種の比較

戦略	基準面積 (ha)	殺虫剤面積 (ha)	殺虫剤費用 (€)	IPM費用 (€)	共済制度費用 (€)	戦略費用 (€)	損害額 (€)	総額 (€)	差額 a (€)	2009/128/CE指令の遵守	環境と公衆衛生へのリスク	総合評価 (5段階)
共済制度のみ	100	0	0	0	500	500	2000	2500	-1500	yes	なし	+++++
リスク因子によるIPM+モニタリング+共済制度		10	400	1000	500	1900	500	2400	-1600	yes	低い	+++
リスク因子によるIPM+共済制度		20	800	100	500	1400	750	2150	-1850	部分的	中等度	+
土壌殺虫剤(予防的)		100	4000	0	0	4000	0	4000	0	No	高い	+

データは、最重要リスクがある土地が16%を占める耕作地100haについての信頼できる仮定に基づく：(1)共済制度の費用は5€/ha(最悪の場合)、(2)土壌殺虫剤費用は40€/ha(現実的)、(3)100ha中4haが500€/haの甚大な被害(最悪の場合)、(4)土壌処理剤の効果は100%(最善の場合)

a 土壌殺虫剤戦略による違い

2. 組織に必要なコストを表2の6列目に記した。これは全共済制度で5ユーロ/haの費用となる。内訳は、実際の損害リスクをカバーする4ユーロ/haの純保険料(正確な見積もり額よりも高めの数値)と、1ユーロ/haは事務手数料(固定費を含む)および生産者が招聘する専門家による耕地の被害評価費用である。4年以上共済を実施すると、後者の1年あたりの費用は、不測の被害をカバーするために生産者から集めた収入の5から15%になる。より正確には最大 $4 \times 0.15 = 0.6$ ユーロ/haだが、さらに慎重を期して、表2では、このコストを1ユーロ/haとしている。

このように総じてリスクレベルが低い場合、農作物保険制度(栽培初期のトウモロコシ共済制度)は大規模な殺虫剤防除より手軽である。栽培者は土壌殺虫剤を購入する代わりに共済制度に出資して、収量減少の際に、その原因が虫害であろうと天候不順であろうと、金銭的補償を受け取ることができる。実際、殺虫剤未施用畑のトウモロコシ被害総額(例：再播種の必要、播種の遅れや作柄不良による減収)に共済制度の費用を足しても、予防的防除による土壌殺虫剤にかかる総額(表2)より安く、すべての畑で施用をやめてもまだ安い。

表2に挙げた2つの中間IPMシナリオにおける仮定は、(1)ボーダーライン事例を含め明確なリスク因子のある土地より若干広範囲に施用し、予測できない被害を最小化する；(2)したがって、施用地を拡大することにより、経済的被害を受ける畑が生じる確率は非常に少なくなるため、土壌殺虫剤の効果は100%とする(楽観的予測)。この2つのIPMシナリオの実際の適用事例で、イタリア北東部で見られた経済的被害は0.1%以下で、ほとんど気にしなくてよい程度だった。しかし、極端な事例の検証のために、表2で、実際の最悪事例より悪いシナリオ

を検討してみた：100ヘクタールのうち1ヘクタールの被害(500ユーロ)というリスク因子評価に基づくIPMの予測が外れ、モニタリングなしのシナリオで100ヘクタールのうち1.5ヘクタール(750ユーロ)という予想外の被害が生じる場合である。それでも、予防的施用の代わりにIPMを用いる方の利点が明らかに大きい。経済的側面に加えて、共済制度は殺虫剤が益虫、生物多様性および人の健康に及ぼす環境面の副作用を防止できる(Furlan et al. 2015; van der Sluijs et al. 2015; Cimino et al. 2017; Pisa et al. 2017)。

リスクが低い場合、この保険を用いた手法は、上記のごとく、生産者に手軽で、人、生物多様性(授粉者を含む)、環境、生態系に安全である。殺虫剤を複数年にわたり広範囲に施用するより、保険を用いた手法はずっと費用対効果が高く、共済制度のコストは、生産者にとって殺虫剤を使用するより安上がりなことが示されている。明らかに、被害リスクが低いほど共済制度は効果的になり、公的な補助金なしでも成立するようになる。共済制度による保険を用いた手法は、ただちに農薬の使用を削減し、農薬に代わる低コスト戦略により生産者の収入が増える。興味深いことに、IPM実施に伴う失敗を共済制度が補填することで、生産者がIPMを手がけやすくなり、IPMの実施が広がる。

## 2. 生物的防除と天然由来農薬

畑作物を害虫から保護するための生物的防除と天然由来農薬に関する研究はほとんど発表されていない。ある新しい提案として、生物的資材を用いた土壌害虫に対する誘引駆除戦略がある。Brandl et al. (2017)によれば、この方法によりドイツの下部ニーダーザクセン州のオーガニック栽培ジャガイモにおいて線虫被害が軽減された。この戦略の基本は、パン焼きに用いるイースト

(*Saccharomyces cerevisiae*)を人工的な二酸化炭素放出源として線虫を誘引し、昆虫病原糸状菌 *Metarhizium brunneum* の分生子(菌類の無性胞子)を線虫に感染させることである。この戦略は、殺虫剤使用の代替法として生物的線虫防除を促進する可能性があり、昆虫病原糸状菌分生子の菌液大量浸漬法と比較して、材料削減の可能性がある(Kabaluk et al. 2007)。この方法は、Furlan and Kreutzweiser (2015)による殺菌性植物と粕の利用と同じく、トウモロコシで実用化成功例がいくつかある(Kabaluk and Ericsson 2007)。Kabaluk (2014)は、昆虫病原糸状菌分生子が、コメツキムシ科 *Agriotes obscurus* 成虫に高い死亡率をもたらすという野外試験を示している。また、コメツキムシ成虫に対する誘引駆除戦略は、性フェロモンを用いた実験でも採用されている(Kabaluk et al. 2015)。

しかし、殺菌性植物と粕がすでに生産者が入手可能な市販品となっているのに対して、上記の昆虫病原物質を防除資材とする方法はいまだ改良の余地がある。こうした代替手段の実用性を評価する際には、詳細な収支分析も必要だ。

### 3. 害虫抑制のための生態工学：害虫防除と耕作管理のための生息環境操作

イネに関して、生態工学の実践が最初中国で開発され(Gurr et al. 2012)、中国、タイ、ベトナムの3ヶ国で複数年にわたる野外研究が行なわれている(Gurr et al. 2016; Spangenberg et al. 2015)。イネ田の畔に顕花植物を育てると、殺虫剤の使用が70%削減され、生物的防除効果が45%向上し、害虫個体数が30%減少し、収量が5%増加する結果となった。この生態工学的実践は、今ではベトナム(Heong et al. 2014)と中国で普及している(Lu et al. 2015)。

### 多年生作物

#### 多年生作物の主要害虫に対するネオニコチノイドの施用

温帯の果物(リンゴ、ナシ、モモ、オウトウなど)およびブドウの害となる多くの節足動物に対し、有機リン系やカーバメート系などの合成農薬が長年使用されてきた。その広範な使用に関連した問題として、殺虫剤耐性、害虫のリサージェンス(天敵の駆除による大発生)、有益な無脊椎動物や哺乳類の減少が進み、多くの発展途上国で有用性が低下している。哺乳類への毒性が比較的低いピレスロイド系がこれらの農薬の代替として推奨されているが、害虫の天敵(捕食者と捕食寄生者)に対する影響とともに、その帰結である二次害虫大発生を招くことから、多年生作物のIPMを実施する生産者の間で評判が落ちつつある(Duso et al. 2014)。加えて、水生無脊椎動物に対しネオニコチノイドと同じリスクがあることも報告さ

れている(Douglas and Tooker 2016)。次いで、キチン合成阻害剤が、標的害虫に対し長期の残効性があり、哺乳類への毒性が比較的低いため人気が出た。その後、いくつかの有効成分に起因する技術的問題(殺虫剤耐性)と環境リスク(水生甲殻類へのリスク)のため、この流行にも陰りが出た(Castro et al. 2012; Rebach and French 1996)。より最近になって、ヒトへの健康影響リスクを低減するための殺虫剤としてネオニコチノイドが提案された。多数の有効成分が、吸汁性害虫などの防除に高い有効性を示し、それはおそらくは新しい作用機序と植物への浸透性によると思われる(Bonmatin et al. 2015 and Giorio et al. 2017)。

アブラムシはリンゴやモモの果樹園における主要害虫である。開花期前の殺虫剤施用は、果実収量減の被害を減らすために不可欠とされており、果樹園の害虫数を経済的閾値以下に保つためにはネオニコチノイドが有効であることも証明されている(Shearer and Frecon 2002; Beers et al. 2003; Lowery et al. 2005; Brück et al. 2009)。ヨーロッパでは、3種の有効成分(イミダクロプリド、チアメトキサム、クロチアニジン)の開花期後の使用がミツバチへの副作用を理由に制限され(EU Regulation 485/2013a, b; Pisa et al. 2015, 2017)、いくつかの国ではさらなる規制が設けられている。地域によっては、多数の広域スペクトル殺虫剤(多種の昆虫に効く殺虫剤)を排除したためオオバコアブラムシ(*Dysaphis plantaginea* Passerini)が増加したこと(Cross et al. 1999; Solomon et al. 2000; Dib et al. 2016)を理由に、ネオニコチノイド防除に拍車がかかっている。ネオニコチノイドは、ナシマルカイガラムシ(San José scale: *Diaspidiotus perniciosus* Comstock)防除にも大きな役割を果たしている。利点のひとつは高い浸透性で、この害虫を効果的に防除する(Buzzetti et al. 2015)。果樹園では、コドリंगा *Cydia pomonella* (L.)や東洋由来の芯喰い虫であるナシヒメシクイ *Grapholita molesta* (Busck)などの害虫防除にもネオニコチノイドが用いられている(Jones et al. 2010; Magalhaes and Walgenbach 2011; Yang et al. 2016)。

モモとネクタリンの果樹園では、チチュウカイミバエ(*Ceratitis capitata* Wiedmann)と南アメリカ産ミバエ *Anastrepha fraterculus* (Wiedemann) 防除の代替手段としてネオニコチノイドが推奨された(Raga and Sato 2011; Rahman and Broughton 2016)。しかし常に成功するわけではなく、誘引駆除など他の防除手段も推奨されている(Broughton and Rahman 2017)。

オウトウシヨウジョウバエ *Drosophila suzukii* Matsumura は、オウトウなどの果実作物の深刻な害虫である。北米で行なわれた試験では、数種のネオニコチノイドと有機リンがこの害虫に効果的だった(Beers et al. 2011)が、別の試験ではネオニコチノイドは他の殺虫剤

よりも効果が低かった (Bruck et al. 2011; Shower et al. 2018)。実験室実験では、オウトウショウジョウバエの卵の付着前のアセタミプリド施用で十分な防除効果が見られた。Wise et al. (2015)は、害虫の侵入後にネオニコチノイドを使用するのはあまり良策ではないとした。

クサギカメムシ (BMSB) *Halyomorpha halys* (Stål) (Hemiptera: Pentatomidae) も世界的に深刻さが増している害虫である。アメリカ合衆国とヨーロッパへの侵入により、クサギカメムシの被害がさまざまな作物で見られる (Leskey et al. 2012)。この害虫に対しては、ネオニコチノイドは害虫防除の効果的な選択肢と見なされている (Kuhar and Kamminga 2017)。

アジア産のミカンキジラミ *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Liviidae) は世界規模で深刻な経済的被害をもたらす柑橘類の害虫で、植物師部に限局して存在しカンキツグリーンング病の病原菌と推定されている原核生物 *Liberi bacterasiaticus* を媒介する。ネオニコチノイド系殺虫剤はこの病気に対して最も有効な選択肢のようだ (Ichinose et al. 2010)。

浸透性殺虫剤 (イミダクロプリド、アセフェート、ジノテフラン) の樹幹注入は、カリフォルニアのアボカドでアザミウマ防除のため試験された (Byrne et al. 2003)。EU では禁止されているアセフェートがこの害虫の防除に効果的であることがすぐにわかったものの、「許容しがたい」殺虫剤残留が果実から検出された。イミダクロプリドとジノテフランの残留は葉で有意に高かったが、果実では検出限界値以下だった。この研究の著者によれば、ネオニコチノイドがこの害虫防除の適切な代替策であるという。

ブドウではコナカイガラムシ (*Planococcus ficus* Signoret など) の防除にネオニコチノイドが使用されてきた (Wallingford et al. 2015)。ブドウ畑でコナカイガラムシやカイガラムシと共生するアリに対しても用いる (Daane et al. 2008)。ネオニコチノイド、中でもイミダクロプリドは、ヨーロッパの一部で再び猛威を振るっているブドウネアブラムシ *Daktulosphaira vitifoliae* (Fitch) に対して推奨されてきた。これらの殺虫剤は、ヨーロッパおよび北米のブドウ畑でヨコバイ類 (例えばチャノミドリヒメヨコバイ *Empoasca vitis* Goethe、*Erythroneura elegantula* Osborn、*Scaphoideus titanus* Ball) の防除に効果がある (Van Timmeren et al. 2011; Žežlina et al. 2013)。アメリカ合衆国では、コナカイガラムシとヨコバイに対するネオニコチノイドの浸漬施用が行なわれている (Daane et al. 2008; Van Timmeren et al. 2011)。

## 多年生作物の害虫防除に対する代替策

### 1. 交尾阻害

合成性フェロモン使用による交尾阻害 (表 3) は、いく

つかの害虫、特にコドリシガ *C. pomonella* やホソバヒメハマキ *G. molesta*、*Lobesia botrana* (Den. and Schiff.) などのハマキガ類に対し有効な防除手段になる (例: Witzgall et al. 2008; Ioriatti and Lucchi 2016)。地形が均一でない果樹園やブドウ園や、害虫の生息密度が高い、あるいは一般的に植え付け後最初の数年は、これらの方法の効果には限界がある。これらの害虫の防除には、交尾阻害を用いることで、殺虫剤の削減と殺虫剤耐性の予防に成功を収めてきた (Trimble 1993; Angeli et al. 2007; Bohnenblust et al. 2011; Bosch et al. 2016; Calkins and Faust 2003; Ioriatti et al. 2011)。しかし最近のスペインでの研究では、交尾阻害の実施によって、それまで目立たなかった害虫がブドウ畑で増える事例が生じたことが報告されている (Gallardo et al. 2016)。フェロモンによる交尾阻害は、ブドウ畑のコナカイガラムシにも成果を上げている (Walton et al. 2006; Cocco et al. 2014; Sharon et al. 2016)。交尾阻害は基質媒介性振動によっても誘導できるので、交尾時のコミュニケーションに振動信号を利用することが知られている吸汁性害虫に対し、特に有効性が期待されている。これらの害虫に対し、振動を使った交尾阻害装置が試験されており、広く利用できる可能性が示されている (Polajnar et al. 2016)。

### 2. 防除ネット

防虫スクリーンを使った防除ネットも防除代替手段である (表 3)。果樹園ではガの侵入を防ぎ、アブラムシの生息密度を減らすことに効果を上げている (Dib et al. 2010; Sauphanor et al. 2012)。最近ではさらに、クサギカメムシ *H. halys* やオウトウショウジョウバエ *D. suzukiim* などの外来昆虫の防除にも防除ネットが使用されている (Dobson et al. 2016; Rogers et al. 2016; Leach et al. 2016)。これらの害虫は、あらゆる植物部位を食害し、シーズン中に何度も果樹園に飛来する。防除ネットは作物への営巣に対して物理的な障壁となる。さらに、ネットにはピレスロイドなどの化学的処理を施すことが可能だ。このツールはクサギカメムシ *H. halys* の防除に利用できるかもしれない (Kuhar et al. 2017)。

### 3. 生物的防除

多年生作物の栽培システムに生物的防除を担う種を導入し、害虫防除を行なう事例がこの十年増加している (表 3)。ホソバヒメハマキ *L. botrana* に対する卵寄生生物の大量放飼が提案されている (El Wakeil et al. 2008)。しかし、生物的防除では常に満足のいく害虫抑制レベルの達成が保証できないため、果樹園やブドウ畑におけるハマキガ類防除への適用についてはさらなる研究が必要である。アメリカのブドウ畑では、コナカイガラムシの一種 *Planococcus ficus* の防除に天敵導入が提案されているが、

表3 大規模、慣行、集約農法と比較した代替農法のまとめ

景観	農法	生物	その他
非均一（より小規模な畑） 灌木や他の作物を周囲に植える 堤に頭花植物がある 湿地がある（池など） 生態学的回廊（緑の回廊） 林（森林農法）	共済制度（補償） 輪作 抵抗性品種（昆虫、病害） 遅蒔き 複数品種の栽培 耕起栽培 間作 防除ネット 偽の苗床（雑草のすき込み） 病害原因植物の除去 不要枝の剪定 地表の被覆（草など）	生物 捕食寄生性生物 捕食者（脊椎動物、無脊椎動物）  微生物 菌類 細菌 線形生物 ウイルス	トラップ 誘引/フェロモン 忌避剤 基本的素材 糖類/油脂 イラクサ抽出物 ミネラルバリア（粉） お湯（苗床） 交尾阻害 化学物質 植物自己防御活性化 音による妨害 天然由来殺虫剤

これらの方法は一般的に有機農業用の低リスク農薬と併用または併用せずに組み合わせて用いられる。これらの方法は、ネオニコチノイドやフィプロニルなどの強毒性の農薬の予防的使用の対極にある。表は Bonmatin(2016)より改変引用。

この戦略の有効性は気候条件の制約を受ける (Daane et al. 2004)。リンゴワタムシ *Eriosoma lanigerum* Haussmann 防除の成功例として、寄生虫ワタムシヤドリコバチ *Apheleus mali* (Hald.) を使った昔ながらの生物的防除がある。リンゴワタムシの大発生は、しばしば捕食寄生者集団に対する非選択的殺虫剤のマイナス効果として生じる。同様の機序が、ナシ畑のキジラミ科 *Cacopsylla pyri* L. の大発生にも関与することがある (Solomon et al. 1989; Solomon et al. 2000; Vrancken et al. 2015)。キジラミ防除における捕食者の役割についてはよく研究されているが(例: Pappas and Koveos 2011)、害虫個体数を経済的閾値レベル以下に抑制し続けることの実現可能性については、さらなる調査が必要である。最近のアブラムシ防除の研究によれば、アリを排除するかアリに代替餌の砂糖を与えることで、アブラムシとアリとの共生関係を弱め、間接的な生物的防除の向上が得られることが報告されている (Nagy et al. 2013, 2015)。

微生物による害虫防除としては、昆虫病原糸状菌 (*Beauveria bassiana*、赤きょう病菌 *Paecilomyces fumosoroseus* (Wize)) のモモアカアブラムシ *M. persicae* などアブラムシ種に対する効果がいくつか研究され、期待できる成果が上がっている (Andreev et al. 2012; Lefort et al. 2014; Lee et al. 2015)。しかし、野外条件下での効果はあまり調べられていない。

コドリンガ顆粒ウイルス *C. pomonella granulovirus* (Cp GV-M) の芯喰い虫防除への適用も提案されているが (Cross et al. 1999; Beers et al. 2003)、この製品にも耐性が生じている (Schmitt et al. 2013)。昆虫病原性線虫 (*Steinernema carpocapsae* (Weiser)、*Steinernema feltiae* Filipjev) の越冬幼虫に対する施用は、芯喰い虫防除に好成績を上げているが、その有効性は気候条件に大きく左

右される。防除用微生物で、ハマキガ類など鱗翅目害虫に対して効果があるものとして、バチルス・チューリングゲンシス菌 *Bacillus thuringiensis* Berliner があり (Cross et al. 1999; Lacey and Shapiro-Ilan 2008; Vassiliou 2011)、鱗翅目 Lepidoptera、双翅目 Diptera、鞘翅目 Coleoptera に特異的に効果があるのが特徴で、人体や環境への影響も少ない。バチルス・チューリングゲンシス菌の有効性は、いくつかの気候条件(温度など)と農業上の条件(幼虫の齢による感受性差、散布範囲、施用量)により決まるので、使う時にはこれらを考慮して行なうべきである。

#### 4. 天然由来殺虫剤

生物的防除と交尾阻害のほかに、多年生作物の吸汁性害虫防除の代替手段として、天然由来殺虫剤の施用がある(表3)。リンゴ栽培において、粘土鉱物のカオリンの複数回施用は、リンゴアブラムシ *Aphis pomi* (DeGeer) などの害虫防除に効果的であることがわかっている (Markó et al. 2008)。同じ研究で、カオリンが施用された区画で深刻なリンゴワタムシ被害が生じているが、これはおそらくカオリン施用により天敵が悪影響を受けた結果と考えられる。最近では、ブドウ畑のヨコバイ被害にもカオリンの使用が推奨されている (Tacoli et al. 2017)。他の選択肢として、脂肪酸塩(とくにカリウム塩)の利用があり、フタホシナシキジラミに対し有効性が認められている (Souliotis and Moschos 2008)。

ニーム *Azadirachta indica* や天然ピレスロイドを基にした植物性殺虫剤は、果樹園のアブラムシやブドウ畑の他の害虫に推奨されている(例: Andreev et al. 2012; Cichon et al. 2013; Dercks et al. 2014)が、効果は必ずしも満足のいくものではない。最近では、バンレイシ科 Annonaceae 由来物質が実験室実験で試され、モモアカアブラムシ *M. persicae* 防除に成功を収めている (Ribeiro

et al. 2014)。天然由来殺虫剤の中で、スピノサドは、土壌放線菌 *Saccharopolyspora spinosa* が生成した毒素の自然混合物である (Mertz and Yao 1990)。この化合物は、芯喰い虫、ブドウにつくハマキガ類、潜葉性昆虫、アザミウマ、双翅類の防除に対して、オーガニック栽培で反復使用できる選択肢として効果が証明されている (Reissig 2003; Mota-Sánchez et al. 2008; Vassiliou 2011)。しかし、その使用は、果樹園やブドウ畑に欠かせない天敵(節足動物の捕食者など)にマイナス効果をもたらす (Ahmad et al. 2013; Tirello et al. 2013; Duso et al. 2014; Pozzebon et al. 2014; Beers and Schmidt 2014; Malagnoux et al. 2015)。

#### 5. 害虫防除のための食物由来バイオラショナル

さらに近年では、天然もしくは食物由来の殺虫剤(植物性油脂など)、昆虫忌避剤(イラクサ抽出物など)、植物増強剤(ショ糖、果糖など)、誘引トラップ(リン酸二アンモニウムなど)が、残留基準値を設定する必要がない基本防除剤として、ヨーロッパ殺虫剤規則に承認されている。(訳者注：これらをバイオラショナルという)

#### 6. 害虫抑制のための生態工学：害虫防除と栽培調節のための生息環境操作

農業生態学(アグロエコロジー)的手法は、害虫圧を低くするための天敵効果を高めることを目的とし、いくつかの多年生作物の栽培システムのために、防除のための殺虫剤の有効な代替物を提案している。

果樹園でモモアカアブラムシの個体数は、化学的防除手段だけでなく、栽培方法や自然の摂理の影響も受ける。アブラムシの動態と防除への施肥の効果については、議論が多い。ある随時実験(周到な準備なしに直観的に行なう試験)では、モモアカアブラムシの個体数は、中程度の施肥回数では増えるが、施肥回数が多いと減少する。植物中の一次および二次代謝物が、施肥の回数により変動し、この機序が対照的な効果をもたらしたとされている (Sauge et al. 2010)。アブラムシ防除の4つの戦略、名付けて「集約」「最適化」「投入資材の代用」「統合的防除」がフランスで比較実施された (Penvern et al. 2010)。殺虫剤の使用でアブラムシの密度は低くなったが、同じく天敵の個体数も減った。いっぽう、栽培方法(地表を被覆する植物の使用、不要枝の剪定)では、害虫と益虫双方の節足動物の個体数が増加した。データは、生物多様性保護の枠組み内での害虫防除を目的として、果樹園防除戦略を見直すため批判的に検討された。同アプローチは地域ごとの修正が必要である。例えば中国では、モモの果樹園でシロツメクサ (*Trifolium repens* L.) を地表の被覆に利用したところ、アブラムシとナシヒメシンクイ (*G. molesta*) の個体数が著しく減少(31%以上)したが、これ

は雑食性の捕食者の増加(115%以上)によるものだろう。梨状果(芯のあるリンゴやナシのような果実)の果樹園に存在する天敵は、樹木や草を選択して農業生態系における顕花植物の多様性を増やすなど生息環境を管理することで、増やすことができる (Rieux et al. 1999)。生垣づくりもコドリंगाに寄生する益虫を増やす効果がある (Maalouly et al. 2013; Monteiro et al. 2013)。

ブドウ畑での吸汁性害虫の脅威は、主にヨコバイ(例：*E. vitis*, *E. elegantula*)、コナカイガラムシ(例：*P. ficus*)、アザミウマ(例：*Drepanothrips reuteri* Uzel)、ハダニ (*Panonychus ulmi* Koch、*Eotetranychus carpini* Oudemans) によるものである。これらは一般的に、ブドウ畑に天敵を増やすことで管理できる二次害虫と見なされている (Duso et al. 2012, Walton et al. 2012)。生息環境の複雑さと多様性を増し、捕食者および捕食寄生者に避難場所と代替宿主や餌を確保し (Costello and Daane 2003; Duso et al. 2004; Ponti et al. 2005; Zanolli and Pavan 2011; Pozzebon et al. 2015a; Wilson et al. 2015)、非選択的殺虫剤の使用量を削減することで、天敵の増加は達成できる。吸汁性害虫に対する生物的防除戦略もまた、天敵の導入や増強により効果が上がる (Duso et al. 1985; Daane et al. 1996; Duso and Vettorazzo 1999; Daane et al. 2008)。灌漑、施肥、品種選択を工夫することも、虫害を減らして経済的損失を防ぐことにつながる (Daane and Williams 2003; Costello 2008; Fornasiero et al. 2012, 2016; Cocco et al. 2015)。

#### ネオニコチノイドとフィプロニルへの耐性

1991年に商品化されて以来、ネオニコチノイドはさまざまな害虫防除の手段として用いられてきた。ネオニコチノイドへの耐性が初めて報告されたのは1996年で、その後、この問題について多数の研究が世界中から発表されている (Gorman et al. 2010)。殺虫剤使用の増加は、ほとんどの作物害虫において耐性の発現を促進する。この点でネオニコチノイドの使用は、発展途上国数ヶ国でも、イミダクロプリド導入後急速に耐性を増加させた (Simon-Delso et al. 2015)。同様の状況が、アメリカ合衆国でも2003年に畑作物の種子処理が導入されて以降生じた。この殺虫剤の予防的施用への大規模なシフトはかつてないことで、2011年だけで大豆の33-44%、トウモロコシの79-100%の作付面積に施用され、10-20年前と比較して殺虫剤使用量を削減できるという事前の予想は裏切られた (Douglas and Tooker 2015)。したがって、処理種子を播いた地域でネオニコチノイドへの耐性が急増することは、耐性機序の発現はかなり早いことがあるため予測可能だった。例えば、綿花害虫のクロテンカイガラムシ *Phenacoccus solenopsis* Tinsley (Hemiptera:

Pseudococcidae)は、耐性集団の生物学的な適応力を犠牲にしながらも、管理条件下では5世代でアセタミプリドに315倍の耐性を持つようになる(Afzal et al. 2015)。他の研究では、綿花畑におけるアセタミプリドの耐性発現には7年かかり、他のネオニコチノイドやカーバメート、有機リン、ピレスロイドより遅いという結果も報告されている(Ahmad and Akhtar 2016)。

### 一年生作物

畑作物の害虫がネオニコチノイドへの耐性を持つ可能性が指摘され(Clements et al. 2017)、一年生作物害虫集団の大発生例がいくつか報告されている(2016年、ブラジルのイミダクロプリド処理大豆 Santos et al. 2016)。さらに踏み込んだ研究として、Santos et al. (2016)はカメムシ *Euschistus heros* の生存と繁殖を調べた。成虫になったばかりの雌に畑の面積当たり残留量の1%に相当するイミダクロプリドを48時間曝露させた。雌の生存率は低下したが、生殖率と繁殖率は対照群よりも高くなった。著者らは、カメムシ雌の繁殖成績が、イミダクロプリドの亜致死曝露への反応として上昇したことを示した。このような結果から、ブラジルの大豆畑で最近起こった同種カメムシの大発生にネオニコチノイドの亜致死曝露が関与した可能性が示唆される。

稲作では、トビイロウンカ (*Nilaparvata lugens* Stål) のイミダクロプリド耐性が2003年に初めてタイで観察され、次いでベトナム、日本ほかアジア諸国に広がった(Matsumura et al. 2008)。この害虫のネオニコチノイド耐性は中国でも広がりを見せ、2012年の耐性率(RR: 大きいほど耐性が高い)は209-617倍になっている。この値は2009年よりずっと高い。2012年に、チアメトキサムではRRが17-47、ニテンピラムでは1.41-3.7だった(Zhang et al. 2014)。現在の耐性レベルは2008年時点のMatsumura et al.の報告よりかなり高くなっている。同様に、セジロウンカ *Sogatella furcifera* (Horvath) 集団のフィプロニル耐性が東南アジアのあらゆる国で生じている。日本の熊本県の水田では、ヒメトビウンカ (*Laodelphax striatellus*) のフィプロニル耐性はRR1700超に達し、同じ作用機序の新しい化合物(GABA受容体およびグルタミン酸作動性塩素イオンチャネルに作用するフルララネルなど)のほうが効くようになっている(Asahi et al. 2015)。東南アジアに生息するイミダクロプリド耐性をもつウンカ集団(例えば *N. lugens*、*S. furcifera*)では、チトクロームP450 CYP6ER1が有意に過剰発現していて、実験室で感受性のある系統と比較して10-90倍の耐性を示した。しかし、他の害虫集団では、異なる遺伝子多型のP450酵素の過剰発現がイミダクロプリド耐性と関連して見られた(Garrood et al. 2016)。ある研究では、2つのニコチン性アセチルコリン受容体サブユニットの保存

部位(Y151S)、N1a1とN1a3の単一突然変異が、イミダクロプリドとの特異的結合の実質的減少と関連することを見出した(Liu et al. 2005)。たとえIPPA08のようなネオニコチノイド専用の相乗剤を追加使用しても、耐性を持つウンカ集団には大した効き目がないようだ(Bao et al. 2016)。したがって、ウンカ防除の最善策はネオニコチノイドを使用しないIPM戦略である。興味深いことに、このIPM戦略がフィリピンで採用されている。長年ネオニコチノイドを極力使わないIPMを実践してきた結果(Hadi et al. 2015)、フィリピンのウンカ集団ではネオニコチノイドの効き目が失われていない(Matsumura et al. 2008)。実際、浸透性殺虫剤耐性の明らかな増加は、化学的処置以外の防除戦略が早急に求められていることを示唆する。

北米のジャガイモ畑では、害虫コロラドハムシ *Leptinotarsa decemlineata* (Say) のイミダクロプリド耐性が1995年のイミダクロプリド導入以来進展した。

2009年までの約10年間で広がり、北東部と中西部では害虫集団の95%以上が耐性を持つようになった(Szendrei et al. 2012)。高い耐性レベルは施用した畑から100km以内の地域で見られる。3種のチトクロームP450と1種のグルタチオン合成酵素関連タンパクの発現上昇が多剤耐性集団の耐性発現の主な機序のようだが、その耐性機序のうちいくつかは、遺伝子変化や表現型以外の変化のようだ(Clements et al. 2016)。その他のネオニコチノイド、チアメトキサムに対するこの甲虫種の耐性は、2003年に初めてマサチューセッツ州の群集から発見されており(Szendrei et al. 2012)、化学的防除をやめて、より厳格なIPM戦略を取ることが提唱されている。

綿花では、ウスグロアザミウマ (*Frankliniella fusca* Hinds) のイミダクロプリドとチアメトキサムに対する耐性がアメリカ合衆国南部で予想以上に早く進展した。2015年にモニターされた集団の約57%(イミダクロプリド)と65%(チアメトキサム)がネオニコチノイド処理種子への耐性を示し、RRはイミダクロプリドが55、チアメトキサムが39だった(Huseth et al. 2016)。ワタアブラムシ *Aphis gossypii* (Glover) のチアメトキサム耐性は、アメリカ合衆国ではRRが29から526に達しているが、中国ではこの害虫のイミダクロプリド耐性は42という中程度の値にとどまり、他のネオニコチノイドより低い値になっている(Shi et al. 2011)。

雑食性で全世界に分布するコナジラミのタバココナジラミ *Bemisia tabaci* (Gennadius) は、食害と植物ウイルス媒介によりさまざまな野菜、繊維、観賞用植物に被害を及ぼす。イミダクロプリドおよびその他のネオニコチノイドに耐性を示した最初の種はこの生物種だった(Gorman et al. 2010)。これらの化学物質の交差耐性(Prabhaker et al. 2005)は、畑のアメリカタバコが減少後

表4 耐性率 (RR) により示したネオニコチノイド系殺虫剤に対する一般的な作物害虫の耐性レベル

種/一般名	分類群	化学物質	RR-fold	作物	国	文献
<i>Amrasca devastans</i> (Distant) コットンホッパー	Hemiptera: Delphacida 半翅目: ウンカ科	アセタミプリド	2.3-29.3	ワタ	パキスタン	Saeed et al. (2017)
		イミダクロプリド	4.8-95.0	ワタ	パキスタン	Saeed et al. (2017)
		チアメトキサム	19.1-1197.9	ワタ	パキスタン	Saeed et al. (2017)
<i>Aphis gossypii</i> (Glover) ワタアブラムシ	Hemiptera: Aphididae 半翅目: アブラムシ 上科	アセタミプリド	4.5	ワタ	中国	Shi et al. (2011)
		クロチアニジン	1.2	ワタ	中国	Shi et al. (2011)
		ジノテフラン	1.1	ワタ	中国	Shi et al. (2011)
		イミダクロプリド	41.7	ワタ	中国	Shi et al. (2011)
		ニテンピラム	5.8	ワタ	中国	Shi et al. (2011)
		チアクロプリド	3.7	ワタ	中国	Shi et al. (2011)
		チアメトキサム	1.1	ワタ	中国	Shi et al. (2011)
		チアメトキサム	29(3d)-526(2d)	ワタ	米国	Gore et al. (2013)
<i>Bemisia tabaci</i> (Gennadius) シルバーリーフコナ ジラミ/サツマイモコ ナジラミ	Hemiptera: Aleyrodidae 半翅目: コナジラミ 科	アセタミプリド	17->2727	ワタ	オーストラリア	Bingham et al. (2008)
		アセタミプリド	32-183	メロン、ワ タ、野菜	米国 (アリゾ ナ、カリフォル ニア)	Castle and Prabhaker (2013)
		アセタミプリド	3.1	キャベツ	中国	Liang et al. (2012)
		アセタミプリド	5-8	ワタ、メロン	米国 (アリゾ ナ、カリフォル ニア)	Prabhaker et al. (2005)
		アセタミプリド	23	メロン	グアテマラ	Prabhaker et al. (2005)
		アセタミプリド	36.6	ワタ	パキスタン	Basit et al. (2012)
		ジノテフラン	52-168	メロン、ワ タ、野菜	米国 (アリゾ ナ、カリフォル ニア)	Castle and Prabhaker (2013)
		イミダクロプリド	741->2000	ワタ	オーストラリア	Bingham et al. (2008)
		イミダクロプリド	58-126	ワタ	ガテマラ	Byrne et al. (2003)
		イミダクロプリド	156-1830	メロン、ワ タ、野菜	米国 (アリゾ ナ、カリフォル ニア)	Castle and Prabhaker (2013)
		イミダクロプリド	6	ワタ	エジプト	Kady and Devine (2003)
		イミダクロプリド	6	キャベツ	中国	Liang et al. (2012)
		イミダクロプリド	13(幼虫), 580(成虫)	キャベツ	ドイツ、スベ イン、英国	Nauen et al. (2008)
		イミダクロプリド	120-160	ワタ、メロン	米国 (アリゾ ナ、カリフォル ニア)	Prabhaker et al. (2005)

		イミダクロプリド	109	メロン	ガテマラ	Prabhaker et al. (2005)
		イミダクロプリド	8.7-75	キャベツ	中国	Yuan et al. (2012)
		イミダクロプリド	7.25	ワタ	パキスタン	Basit et al. (2012)
		ニテンピラム	5	キャベツ	中国	Liang et al. (2012)
		ニテンピラム	7.5-46.4	ワタ	中国	Yuan et al. (2012)
		ニテンピラム	28.4	ワタ	パキスタン	Basit et al. (2012)
		チアクロプリド	28.8	ワタ	パキスタン	Basit et al. (2012)
		チアメトキサム	7-125	メロン、ワタ、野菜	米国 (アリゾナ、カリフォルニア)	Castle and Prabhaker (2013)
		チアメトキサム	2-22	ワタ、メロン	米国 (アリゾナ、カリフォルニア)	Prabhaker et al. (2005)
		チアメトキサム	24	メロン	ガテマラ	Prabhaker et al. (2005)
		チアメトキサム	52.4	ワタ	パキスタン	Basit et al. (2012)
<i>Cimex lectularius</i> L トコジラミ	Hemiptera: Cimicidae 半翅目: トコジラミ科	アセタミプリド	31.7->33,000		米国 (オハイオ、ミシガン)	Romero and Anderson (2016)
		ジノテフラン	46.8-358		米国 (オハイオ、ミシガン)	Romero and Anderson (2016)
		イミダクロプリド	2.0-462.6		米国 (オハイオ、ミシガン)	Romero and Anderson (2016)
		チアメトキサム	2.4-546		米国 (オハイオ、ミシガン)	Romero and Anderson (2016)
<i>Cydia pomonella</i> コドリンガ	Lepidoptera: Tortricidae 鱗翅目: ハマキガ科	チアクロプリド	5.5-16.5	リンゴ	トルコ	İşci and Ay (2017)
<i>Diaeretiella rapae</i> 寄生スズメバチ	Hymenoptera: Aphidiidae ハチ目: アブラムシ亜科	フィプロニル	20.8 以下	野菜	中国	Wu et al. (2007)
		イミダクロプリド	74.7 以下	野菜	中国	Wu et al. (2007)
<i>Frankliniella fusca</i> (Hinds) タバコアザミウマ	Thysanoptera: Thripidae アザミウマ目; アザミウマ科	イミダクロプリド	55	ワタ	米国	Huseth et al. (2016)
		チアメトキサム	39	ワタ	米国	Huseth et al. (2016)
<i>Frankliniella occidentalis</i> (Pergande) ミカンキイロアザミウマ	Thysanoptera: Thripidae アザミウマ目; アザミウマ科	アセタミプリド	8.7 以下	野菜、バラ	中国	Wang et al. (2016a)
		イミダクロプリド	2.8-24.4	野菜、バラ	中国	Wang et al. (2016a, b)
<i>Laodelphax striatellus</i> ヒメトビウンカ	Hemiptera: Delphacidae 半翅目: ウンカ科	フィプロニル	>1700	コメ	日本	Asahi et al. (2015)
<i>Leptinotarsa decemlineata</i> (Say) コロラドハムシ	Coleoptera: Chrysomelida 甲虫目: ハムシ科	イミダクロプリド	1.8-27	ジャガイモ	米国 (ウィスコンシン)	Clements et al. (2016)
		イミダクロプリド	20-50	ジャガイモ	米国	Alyokhin et al. (2007)
		チアメトキサム	6-9	ジャガイモ	米国	Alyokhin et al. (2007)
<i>Maconelliococcus hirsutus</i> (Green) ピンクコナカイガラムシ	Hemiptera: Pseudococcidae 半翅目: コナカイガラムシ科	イミダクロプリド	10.2	マルベリー、ワイン用ブドウ	インド	Mruthunjayaswamy et al. (2016)
<i>Musca domestica</i> L イエバエ	Diptera: Muscidae 双翅目: イエバエ科	チアクロプリド	6-76	家畜農場	デンマーク	Kristensen and Jespersen (2008)
<i>Myzus persicae</i>	Hemiptera: Aphididae	イミダクロプリド	まだ	果樹園、ピー	オーストラリ	Edwards et al. (2008)

(Sulzer) モモアカアブラムシ	半翅目：アブラムシ 上科			ツ、穀物	ア	
<i>Nilaparvata lugens</i> (Stål) トビイロウンカ	Hemiptera: Delphacidae 半翅目：ウンカ科	フィプロニル	3.7-5.4	コメ	日本、台湾、ベ トナム、中国	Matsumura et al. (2008)
		イミダクロプリド	10-90	コメ	東南アジア	Garrood et al. (2016)
		イミダクロプリド	3.5	コメ	インド	Garrood et al. (2016)
		イミダクロプリド	100	コメ	インド	Gorman et al. (2008)
		イミダクロプリド	2006 に耐性ま だなし	コメ	中国、インド、 インドネシア、 マレーシア、タ イ、ベトナム	Gorman et al. (2008)
		イミダクロプリド	22-89	コメ	日本、台湾、ベ トナム、中国	Matsumura et al. (2008)
		イミダクロプリド	209-616	コメ	中国	Zhang et al. (2014)
		ニテンピラム	1.4-3.7	コメ	中国	Zhang et al. (2014)
		チアメトキサム	2-3.4	コメ	日本、台湾、ベ トナム、中国	Matsumura et al. (2008)
		チアメトキサム	17.4-47.1	コメ	中国	Zhang et al. (2014)
<i>Phenacoccus solenopsis</i> (Tinsley) ワタコナカイガラム シ	Hemiptera: Pseudococcidae 半翅目：コナカイガ ラムシ科	アセタミプリド	9.7-315	ワタ	パキスタン	Afzal et al. (2015)
		アセタミプリド	30 以下	ワタ	パキスタン	Ahmad and Akhtar (2016)
		イミダクロプリド	7.6-217	ワタ	パキスタン	Afzal et al. (2015)
		イミダクロプリド	151 以下	ワタ	パキスタン	Ahmad and Akhtar (2016)
		チアクロプリド	338 以下	ワタ	パキスタン	Ahmad and Akhtar (2016)
<i>Sogatella furcifera</i> (Horváth) ホオジロウンカ	Hemiptera: Delphacidae 半翅目：ウンカ科	フィプロニル	37 以下	コメ	日本、台湾、ベ トナム、中国	Matsumura et al. (2008)
		イミダクロプリド	5 以下	コメ	日本、台湾、ベ トナム、中国	Matsumura et al. (2008)
<i>Trialeurodes vaporariorum</i> (Westwood) オンシツコナジラミ	Hemiptera: Aleyrodidae 半翅目： コナジラミ科	アセタミプリド	2.6-18.6	野菜	英国	Karatolos et al. (2010)
		イミダクロプリド	2.6-21.8	野菜	英国	Karatolos et al. (2010)
		イミダクロプリド	2.5	ナス	中国	Liang et al. (2012)
		ニテンピラム	3.7	ナス	中国	Liang et al. (2012)
		チアメトキサム	1.3-20.4	野菜	英国	Karatolos et al. (2010)

トコジラミ寄生虫への耐性も含む。

に優勢となる吸汁昆虫を防除するためにネオニコチノイドが恒常的に散布されている遺伝子組換えワタの化学的防除プログラムを脅かしている (Basit et al. 2012)。

オンシツコナジラミ *Trialeurodes vaporariorum* (Westwood) も、欧州と中国で野菜作物に施用された数種のネオニコチノイドに対して耐性を獲得した (表 4)。ミカンキイロアザミウマ *Frankliniella occidentalis* (Pergande) は、国際貿易を通じて中国の園芸植物や観賞用植物の多くに侵入しており、イミダクロプリド耐性は 24 倍、アセタミプリド耐性は 8.7 倍まで発達した (Wang et al. 2016a)。この侵略的外来害虫はトマトとトウモロコシを死滅させる植物ウイルスも媒介するため、ネオニコチノイドへの耐性は、化学的防除から IPM 戦略への転換を強く奨めるものである。

### 多年生作物

Bass et al. (2015) は、ネオニコチノイドの耐性に関する論文のほとんどを網羅した総説を発表した。多年生収穫栽培の害虫では、果樹の害虫の中でモモアカアブラムシ *Myzus persicae* Sulzer の耐性が最も多く報告されている。これは、宿主植物への適応 (タバコを餌にすることで生じたニコチン耐性) による事前選択と、宿主植物の範囲の拡大による事例と思われる。耐性は、チトクローム P450 の発現促進による代謝解毒と関連がありそうだ。クチクラを通じた透過の変化が、解毒増強とともに耐性に寄与したことがいくつかの事例で見出された (Puinean et al. 2010)。標的部位における耐性も、モモアカアブラムシの耐性をもたらす機序として示唆されている (Bass et al. 2015)。このことは、モモに生息するアブラムシ集団のニコチン性アセチルコリン受容体サブユニット遺伝子 R81T の変異と関連があることがわかった。Toda et al. (2017) は、ニコチン性アセチルコリン受容体遺伝子  $\beta 1$  サブユニットの D ループ領域における R81T 変異を調べる分子診断法を開発した；この変異は、綿花につくワタアブラムシ *Aphis gossypii* (Hemiptera: Aphididae) にネオニコチノイド耐性をもたらす。この突然変異はモモに生息するアブラムシ集団にも見られ、スペイン南部、フランス南部、イタリア北部および中央部およびギリシャの作物と密接な関係があるようだ (Bass et al. 2015; Voudouris et al. 2016)。Bass et al. (2015) は異なる作用機序をもつ殺虫剤を用いて、ネオニコチノイドにより誘導される選択圧を低くする必要があると主張している。

果樹園では、南ヨーロッパでモモアカアブラムシ *M. persicae* 群集にイミダクロプリドとチアクロプリドの耐性が生じている。イタリアでは、Panini et al. (2014) が調べたアブラムシの 65% がネオニコチノイドに特異的な R81T 変異をもち、P450 由来の代謝耐性プロセスを示す遺伝子型も見出されている (Panini et al. 2014)。このアブ

ラムシ種の殺虫剤耐性が多くの個体で発現していることから、突然変異遺伝子 81T は半劣性で、野生型 81R がより優性であることが示唆される (Mottet et al. 2016)。ネオニコチノイドのスルホキサフルロは新しく開発されたニコチン受容体作動物質で (Giorio et al. 2017)、同じモモアカアブラムシ *M. persicae* の耐性集団に対して同様に振る舞う (Cutler et al. 2013) ようだが、この変異の影響は受けないと主張する研究者もいる (Wang et al. 2016b)。ギリシャのこのアブラムシ集団では、2013 年に採集されたクローン (単一個体から生まれた遺伝的に同一の集団) の 58% 以上で、P450 による解毒機序に関わる CYP6CY3 遺伝子が 9-36 倍過剰に発現していた (Voudouris et al. 2016)。耐性が非常に速く進展しうるため懸念すべきである。

リンゴ果樹最大の害虫である芯喰い虫のコードリング *Cydia pomonella* にも、チアクロプリド耐性がトルコの果樹園で RR 5.5 から 16.5 で観察されている (İşci and Ay 2017)。この害虫のチアクロプリド耐性は複合機能酸化酵素活性と相関している (Reyes et al. 2007)。この現象は世界中に広がっており (Bass et al. 2015; İşci and Ay 2017)、有機リンなど他の化合物との交叉耐性とも関連がある：その場合、耐性機序は解毒酵素に基づいているようだ。コードリング *C. pomonella* に関する他の研究では、解毒遺伝子のいくつか (CYP9A61、CpGST1、CpCE1) は、さまざまな殺虫剤 (イミダクロプリドを含む) によって特異的に誘導ないし抑制されるが、対照群と比較すると、これらの遺伝子発現はアセタミプリドの影響を受けないとされた (Yang et al. 2016)。

他の論文では、Cyp6g1 という単一遺伝子産物の過剰転写がキイロショウジョウバエ *Drosophila melanogaster* 幼虫のネオニコチノイド代謝耐性と関連し、生体実験で 3 つのイミダクロプリド代謝物を有意に増加させることが示された (Joussen et al. 2008; Hoi et al. 2014)。変異頻度の高さとこの研究から得られたデータにより、耐性の機序が複数存在すること (解毒の増強、突然変異、酵素の過剰発現) が立証されたので、従来とは異なる防除戦略が必要かもしれない。

アジアの柑橘キジラミであるミカンキジラミ *D. citri* について、フロリダでネオニコチノイド感受性が低下した集団が発見され、ネオニコチノイド耐性がこの害虫防除の妨げとなることが懸念されている (Tiwari et al. 2011)。効果的な殺虫剤ローテーションと地域全体での防除を奨励することがこの害虫の耐性への対抗手段と見なされている (Coy et al. 2016)。

ミカンキイロアザミウマ *Frankliniella occidentalis* (Pergande) は、果樹園とブドウ畑の脅威となる雑食性害虫だ。ネオニコチノイドへの代謝耐性がこの害虫について報告されていて、おそらく他の殺虫剤との交叉耐性に起因するものである (Zhao et al. 1995; Minakuchi et al.

2013)。インドのブドウ畑と桑畑では、コナカイガラムシ *Maconellicoccus hirsutus* のイミダクロプリド耐性が RR10.2 に達し、他系列の殺虫剤群と同じレベルになった (Mruthunjayawamy et al. 2016)。

ヒメヨコバイ *Empoasca vitis* 集団は、中国南東部で数々の殺虫剤への耐性を発達させてきたが、イミダクロプリド、クロルフェナピル、インドキサカルブの間での交叉耐性が高い (Wei et al. 2017)。

ネオニコチノイドとフィプロニルへの耐性は益虫にも観察されている。例えば、寄生バチ *Diaeretiella rapae* にはフィプロニルとイミダクロプリドに交叉耐性があり、過去と比較して、今ではそれぞれ 20 倍、75 倍の耐性を持つ (Wu et al. 2004)。

確かに、農作物と観賞用植物で通常よく見られる害虫の浸透性殺虫剤への耐性は今や広範に拡大し、急速に発達し、GST と P450 酵素系による解毒の亢進が典型的に認められる。ネオニコチノイドの場合、ニコチン性アセチルコリン受容体の  $\alpha$  サブユニットの特異的な変異がこの系列すべての化学物質に対する長期的耐性をもたらしている (Thany 2010)。最初に上市されたネオニコチノイドのイミダクロプリドには最高レベルの耐性が生じていて、ジノテフランやニテンピラムなどの最新の化合物への耐性は低い (Shi et al. 2011; Zhang et al. 2014)——表 4 参照。解毒機序による耐性は他の化合物との相乗的混合物を使うことで克服できるが (Bingham et al. 2008; Basit et al. 2013; Darriet and Chandre 2013)、変異により耐性を生じた個体は比較的速やかに自然選択され、やがて畑に生息する害虫の集団の大半を占めるようになるかもしれない。

### 他のネオニコチノイド耐性

アメリカ合衆国では、農作物のみならずトコジラミ (*Cimex lectularius* L.) にもネオニコチノイド耐性が生じている。その結果、2 種のネオニコチノイドやピレスロイドを混合した製剤が米国では一般的になってきた。しかし、4 種のネオニコチノイドに対する強い耐性——アセタミプリド (RR が最大 33,000)、イミダクロプリド (RR が 2-463)、ジノテフラン (RR が 47-359)、チアメトキサム (RR が 2.4-546)——が米国のトコジラミ集団に生じている。この事例では、グルタチオン S-トランスフェラーゼとチトクローム P450 の誘導による解毒機序が耐性の発展に関与するため、化学的防除の代替方法は限られている (Romero and Anderson 2016)。

### 結論

殺虫剤には収量と純利益の増加を実現することが期待されているが、収量と生産者の利益の関係はそれほど明

白なものではない。例えば、収量に対する殺虫剤の効果はさほど大きなものではなく (上記の例を参照)、オーガニックや「統合型」栽培法 (農林畜で資源循環を行なう農法) で生産する高品質の農産物は殺虫剤を用いた慣行農法の作物よりも高値がつき、収量減を補うことができる。Batáry et al. (2017) による東西ドイツにまたがる規模の実践例がある。他の大規模事例として、ここでは共済制度と IPM を示したが、この方法は、生産者の収入を増やし、平均収量への悪影響を与えることなく殺虫剤使用量を減らし、同時に環境への悪影響を回避する。

ネオニコチノイドとフィプロニルに関する最近の総説によって、いくつかの作物について、線虫や根切り虫などの土壌害虫や、吸汁性害虫、とくにアブラムシ、ウンカ、アザミウマ、コナカイガラムシ、カイガラムシ類、植物内部を移動する化学物質のみ到達しうる植物中の幼虫などの被害から守る役割をこれらの浸透性殺虫剤が果たしていることが示された。しかし、その有効性は防除作物の収量増加を保証するものではなく、とりわけ授粉が必要な作物では疑わしい。これは決して例外的なことではなく、最近のフランスの研究によれば、どの畑作物においても殺虫剤使用が増収につながることはほとんどない (Lechenet et al. 2017)。昆虫による多少のダメージは植物自体で補えるし、年単位で見れば害虫大発生リスクは低いからだ。

本論で簡潔に述べたように、IPM の多面的な手法を使うことで害虫防除は効果的に行なうことができる。さらに経済的保護の構想は、イタリアにおけるトウモロコシ共済の事例で示したとおり、生産者の凶作時の損失を埋め合わせることができ、環境への負荷もない。いっぽう、ネオニコチノイドとフィプロニルは生物多様性、生態系、生態系サービスに深刻な影響をもたらしている (Pisa et al. 2017)。この意味において、ヨーロッパでは、農業生産を続けながら殺虫剤使用量を大きく削減すること (Lescourret 2017) を、環境および生態系サービスの保全と農業生産力の維持とを目的とした IPM 実施を義務づけることで担保している (Sgolastra et al. 2017)。他の国 (例えばカナダ) でも、非農業用途および農業用途のネオニコチノイド使用を法的に規制する決定を下した。

われわれは、標的害虫の耐性の急速な進展により、ネオニコチノイドの使用には限界があることを述べた。耐性の背後にある機序のほとんどは、他の殺虫剤系統 (ピレスロイド、コリンエステラーゼ阻害物質など) と共通しており、新しいネオニコチノイド (例えばスルホキサフロル、フルピラジフロル; Pisa et al. 2017 参照) や同様の作用機序をもつ物質の使用は、中長期的に見て解決策になりえない。これらは今や環境中のあらゆる場所に存在する他のネオニコチノイドと相乗作用する可能性があり、非標的無脊椎動物への影響を悪化させるかもしれない

(Mitchell et al. 2017)。Barzman et al. (2015)は、以下のよう述べている。「農作物生産の将来は、今や、殺虫剤耐性の出現と、利用できる有効成分の減少によっても脅かされている。したがって、浸透性殺虫剤への依存を下げる栽培システムを構築することが必要だ」。さらに、こうした浸透性殺虫剤の種子処理による予防的施用はIPMに逆行するため、ただちに廃止すべきである。化学物質のみに信をおかない新しい栽培システムのための手段は従来から入手可能だが、殺虫剤の持続可能な使用を実現する地域アクションの枠組み構築をめざすEU指令の初期目標(EU 2009)にもかかわらず、IPMの実践は不足している(Hokkanen 2015)。

とりあえず、授粉者と節足動物に対するマイナス効果の圧倒的な証拠を、これらの浸透性殺虫剤がもたらすはずの防除の利益と比較検討することが必要である(Chagnon et al. 2015)。化学的防除の偏重は、生態系の汚染(Bonmatin et al. 2015; Pisa et al. 2015; Mineau and Whiteside 2013; Beketov et al. 2013; Giorio et al. 2017)と望まざる健康影響(Scott et al. 2014; Cimino et al. 2017; Wang et al. 2018)と結びついているが、ネオニコチノイドとフィプロニルの場合は現在まで人体影響の研究が少ないため、明確な評価ができない。この神経系への作動

物質に人体が慢性曝露すること(生産者と関連作業従事者、飲料や食品からの曝露、ペットや家畜への施用、木材への施用、大気汚染などすべての曝露経路からの総量)によって生じる影響について調査を進めるよう、さらなる注力が必要である(Salis et al. 2017)。

この総説が一助となり、浸透性殺虫剤の持続的で増加し続ける広範囲での使用の可否について、規制当局が入念に検討するよう願う。ネオニコチノイドとフィプロニルの害虫防除への有効性は、農業を支える天敵や他の生態系サービスへの損害という不利益と、科学的根拠に基づいて比較検討されなければならない。

近年の殺虫剤市場のほとんどを代表していることから、WIA2ではネオニコチノイドとフィプロニルに絞って言及した。しかし将来的には、ひとつの分子を他の分子で置き換えることが農業生産の持続可能な戦略にはならないこと、同じ作用機序を持つ新しい分子(スルホキサフロルやフルピラジフロロンなど)が環境や公衆衛生にとって新たな脅威となることを、規制当局は考慮すべきである。IPMのように持続可能な農業実施基準のために、(現在も未来も)毒性の高い殺虫剤は最終手段としてしか使用しないという強固な意志を持って、より厳しい規制の枠組みが必要であることを規制当局は認識すべきである。

## 参考文献

- Afzal MBS, Shad SA, Abbas N, Ayyaz M, Walker WB (2015) Crossresistance, the stability of acetamiprid resistance and its effect on the biological parameters of cotton mealybug, *Phenacoccus solenopsis* (Homoptera: Pseudococcidae), in Pakistan. *Pest Manag Sci.* 71: 151–158
- Ahmad M, Akhtar S (2016) Development of resistance to insecticides in the invasive mealybug *Phenacoccus solenopsis* (Hemiptera: Pseudococcidae) in Pakistan. *Crop Prot* 88:96–102
- Ahmad S, Pozzebon A, Duso C (2013) Augmentative releases of the predatory mite *Kampimodromus aberrans* in organic and conventional apple orchards. *Crop Prot* 52:47–56. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2013.05.008>
- Alyokhin A, Dively G, Patterson M, Castaldo C, Rogers D, Mahoney M, Wollam J (2007) Resistance and cross-resistance to imidacloprid and thiamethoxam in the Colorado potato beetle *Leptinotarsa decemlineata*. *Pest Manag Sci.* 63:32–41
- Andreev R, Kutinkova H, Rasheva D (2012) Non-chemical control of *Aphis spiraecola* Patch. and *Dysaphis plantaginea* Pass. on apple. *J Biopesticides* 5:239–242
- Angeli G, Anfora G, Baldessari M, Germinara GS, Rama F, De Cristofaro A, Ioriatti C (2007) Mating disruption of codling moth *Cydia pomonella* with high densities of Ecodian sex pheromone dispensers. *J Appl Entomol* 131:311–318. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.2007.01172.x>
- Asahi M, Kobayashi M, Matsui H, Nakahira K (2015) Differential mechanisms of action of the novel  $\gamma$ -aminobutyric acid receptor antagonist ectoparasiticide fluralaner (A1443) and fipronil. *Pest Manag Sci.* 71:91–95
- Bao H, Shao X, Zhang Y, Deng Y, Xu X, Liu Z, Li Z (2016) Specific synergist for neonicotinoid insecticides: IPPA08, a cis-neonicotinoid compound with a unique oxabridged substructure. *J Agric Food Chem.* 64:5148–5155
- Barzman M, Bärberi P, Birch ANE, Boonekamp P, Dachbrodt-Saaydeh S, Graf B, Hommel B, Jensen JE, Kiss J, Kudsk P et al (2015) Eight principles of integrated pest management. *Agron Sustain Develop.* 35:1199–1215
- Basit M, Sayyed AH, Saeed S, Saleem MA (2012) Lack of fitness costs associated with acetamiprid resistance in *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae). *J Econ Entomol.* 105:1401–1406
- Basit M, Saeed S, Saleem MA, Sayyed AH (2013) Can resistance in *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae) be overcome with mixtures of neonicotinoids and insect growth regulators? *Crop Prot* 44: 135–141
- Bass C, Denholm I, Williamson MS, Nauen R (2015) The global status of insect resistance to neonicotinoid insecticides. *Pest Biochem Physiol* 121:78–87
- Batáry P, Gallé R, Riesch F, Fischer C, Dormann CF, Mußhoff O, Császár P, Fusaro S, Gayer C, Happe AK et al (2017) The former Iron Curtain still drives biodiversity–profit trade-offs in German agriculture. *Nat Ecol Evol.* <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0272-x>
- Beers EH, Schmidt RA (2014) Impacts of orchard pesticides on *Galendromus occidentalis*: Lethal and sublethal effects. *Crop Prot* 56:16–24. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2013.10.010>
- Beers EH, Suckling DM, Prokopy RJ, Avilla J (2003) Apples: botany, production and uses. In: Ferree DC, Warrington IJ (eds) *Ecology and management of apple arthropod pests*. CABI Publishing, Wallingford, pp. 489–519. <https://doi.org/10.1079/9780851995922.0489>
- Beers EH, Van Steenwyk RA, Shearer PW, Coates WW, Grant JA (2011) Developing *Drosophila suzukii* management programs for sweet cherry in the western United States. *Pest Manag Sci.* 67:1386–1395
- Beketov MA, Kefford BJ, Schäfer RB, Liess M (2013) Pesticides reduce regional biodiversity of stream invertebrates. *PNAS* 110:11039–11043
- Benefer CM, Knight ME, Ellis JS, Hicks H, Blackshaw RP (2012) Understanding the relationship between adult and larval *Agriotes* distributions: the effect of sampling method, species identification and abiotic variables. *Appl Soil Ecol.* 53:39–48. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.11.004>
- Bijleveld van Lexmond M, Bonmatin JM, Goulson D, Noome DA (2015) Worldwide integrated assessment on systemic pesticides. *Environ Sci Pollut Res.* 22:1–4
- Bingham G, Gunning RV, Delogu G, Borzatta V, Field LM, Moores GD (2008) Temporal synergism can enhance carbamate and neonicotinoid insecticidal activity against resistant crop pests. *Pest Manag Sci.* 64:81–85
- Blackshaw RP, Hicks H (2013) Distribution of adult stages of soil insect pests across an agricultural landscape. *J Pest Sci.* 86:53–62. <https://doi.org/10.1007/s10340-012-0413-6>
- Bohnenblust E, Hull LA, Krawczyk G (2011) A comparison of various mating disruption technologies for control of two internally feeding Lepidoptera in apples. *Entomol Exp Appl.* 138:202–211. <https://doi.org/10.1111/j.1570-7458.2010.01089.x>
- Bonmatin JM (2016) Néonicotinoïdes: impacts directs ou indirects sur les abeilles et la biodiversité & développement des alternatives. Forum Eco-Tox de la Fondation Rovaltain, 11-13 October 2016. [http://fcsrovaltain.org/assets/4-8-s2-eco-tox2016\\_bonmatin.pdf](http://fcsrovaltain.org/assets/4-8-s2-eco-tox2016_bonmatin.pdf). Assessed 21 Oct 2017
- Bonmatin JM, Giorio C, Girolami V, Goulson D, Kreuzweiser DP, Krupke C, Liess M, Long E, Marzaro M, Mitchell EAD et al (2015) Environmental fate and exposure; neonicotinoids and fipronil. *Environ Sci Pollut Res.* 22:35–67
- Bosch D, Rodríguez MA, Avilla J (2016) Captures of MFO-resistant *Cydia pomonella* adults as affected by lure, crop management system and flight. *Bull Entomol Res.* 106:54–62. <https://doi.org/10.1017/S0007485315000772>
- Brandl MA, Schumann M, Przyklenk M, Patel A, Vidal S (2017) Wireworm damage reduction in potatoes with an attract-and-kill strategy using *Metarhizium brunneum*. *J Pest Sci.* 90:479–493. <https://doi.org/10.1007/s10340-016-0824-x>
- Broughton S, Rahman T (2017) Evaluation of lures and traps for male and female monitoring of Mediterranean fruit fly in pome and stone fruit. *J Appl Entomol.* 141:441–449
- Brück E, Elbert A, Fischer R, Krueger S, Kühnhold J, Klueken AM, Nauen R, Niebes J, Reckmann U, Schnorbach H, Steffens R, van Waetermeulen X (2009) Movento®, an innovative ambimobile insecticide for sucking insect pest control in agriculture: biological profile and field performance. *Crop Prot* 28:838–844. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2009.06.015>
- Bruck DJ, Bolda M, Tanigoshi L, Klick J, Kleiber J, Defrancesco J, Gerdeman B, Spitler H (2011) Laboratory and field comparisons of insecticides to reduce infestation of *Drosophila suzukii* in berry crops. *Pest Manag Sci.* 67:1375–1385. <https://doi.org/10.1002/ps.2242>
- Budge GE, Garthwaite D, Crow A, Boatman ND, Delaplane KS, Brown MA, Thygesen HH, Pietra-Valle S (2015) Evidence for pollinator cost and farming benefits of neonicotinoid seed coatings on oilseed rape. *Sci Rep.* 5:12574. <https://doi.org/10.1038/srep12574>
- Buzzetti K, Chorbajian RA, Nauen R (2015) Resistance management for San Jose Scale (Hemiptera: Diaspididae). *J Econ Entomol.* 108: 2743–2752
- Byrne FJ, Castle S, Prabhaker N, Toscano NC (2003) Biochemical study of resistance to imidacloprid in B biotype *Bemisia tabaci* from Guatemala. *Pest Manag Sci.* 59:347–352
- Calkins CO, Faust RJ (2003) Overview of areawide programs and the

- program for suppression of codling moth in the western USA directed by the United States Department of Agriculture—Agricultural Research Service. *Pest Manag Sci.* 59:601–604. <https://doi.org/10.1002/ps.712>
- Castle SJ, Prabhaker N (2013) Monitoring changes in *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) susceptibility to neonicotinoid insecticides in Arizona and California. *J Econ Entomol.* 106:1404–1413
- Castro A, Lacerda M, Zanuncio T, Ramalho FS, Polanczyk R, Serrão J, Zanuncio J (2012) Effect of the insect growth regulator diflubenzuron on the predator *Podisus nigrispinus* (Heteroptera: Pentatomidae). *Ecotoxicology* 21:96–103
- Chagnon M, Kreutzweiser D, Mitchell ED, Morrissey CA, Noome DA, Van der Sluijs JP (2015) Risks of large-scale use of systemic insecticides to ecosystem functioning and services. *Environ Sci Pollut Res.* 22:119–134
- Cichon LI, Garrido SAS, Lago JD, Menni MF (2013) Control of green peach aphid *Myzus persicae* in organic plum orchards (conference paper). *Acta Hortic.* 1001:115–120. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.1001.11>
- Cimino AM, Boyles AL, Thayer KA, Perry MJ (2017) Effects of neonicotinoid pesticide exposure on human health: a systematic review. *Environ Health Perspect.* 125:155–162
- Clements J, Schoville S, Peterson N, Lan Q, Groves RL (2016) Characterizing molecular mechanisms of imidacloprid resistance in select populations of *Leptinotarsa decemlineata* in the Central Sands Region of Wisconsin. *PLoS One* 11:e0147844
- Clements J, Schoville S, Clements N, Chapman RGL (2017) Temporal patterns of imidacloprid resistance throughout a growing season in *Leptinotarsa decemlineata* populations. *Pest Manag Sci.* 3:641–650
- Cocco A, Lentini A, Serra G (2014) Mating disruption of *Planococcus ficus* (Hemiptera: Pseudococcidae) in vineyards using reservoir pheromone dispensers. *J Insect Sci* 14(1):144. <https://doi.org/10.1093/jisesa/ieu006>
- Cocco A, Marras PM, Muscas E, Mura A, Lentini A (2015) Variation of life-history parameters of *Planococcus ficus* (Hemiptera: Pseudococcidae) in response to grapevine nitrogen fertilization. *J Appl Entomol.* 139:519–528. <https://doi.org/10.1111/jen.12192>
- Costello MJ (2008) Regulated deficit irrigation and density of *Erythroneura* spp. (Hemiptera: Cicadellidae) on grape. *J Econ Entomol.* 101:1287–1294. [https://doi.org/10.1603/00220493\(2008\)101\[1287:RDIAD0\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1603/00220493(2008)101[1287:RDIAD0]2.0.CO;2)
- Costello MJ, Daane KM (2003) Spider and leafhopper (*Erythroneura* spp.) response to vineyard ground cover. *Environ Entomol.* 32: 1085–1098. <https://doi.org/10.1603/0046-225X-32.5.1085>
- Coy MR, Bin L, Stelinski LL (2016) Reversal of insecticide resistance in Florida populations of *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae). *Fla Entomol* 99:26–32
- Cross JV, Solomon MG, Chandler D, Jarrett P, Richardson PN, Winstanley D, Bathon H, Huber J, Keller B, Langenbruch GA, Zimmermann G (1999) Biocontrol of pests of apples and pears in northern and central Europe: 1. Microbial agents and nematodes. *Biocontrol Sci Technol.* 9:125–149. <https://doi.org/10.1080/09583159929721>
- Cutler P, Slater R, Edmunds AJF, Maienfisch P, Hall RG et al (2013) Investigating the mode of action of sulfoxaflor: a fourth-generation neonicotinoid. *Pest Manag Sci.* 69:607–619
- Daane KM, Williams LE (2003) Manipulating vineyard irrigation amounts to reduce insect pest damage. *Ecol Appl.* 13:1650–1666. <https://doi.org/10.1890/02-5328>
- Daane KM, Yokota GY, Zheng Y, Hagen KS (1996) Inundative release of common green lacewings (Neuroptera: Chrysopidae) to suppress *Erythroneura variabilis* and *E. elegantula* (Homoptera: Cicadellidae) in vineyards. *Environ Entomol.* 25:1224–1234. <https://doi.org/10.1093/ee/25.5.1224>
- Daane KM, Malakar-Kuenen RD, Walton VM (2004) Temperature-dependent development of *Anagyrus pseudococci* (Hymenoptera: Encyrtidae) as a parasitoid of the vine mealybug, *Planococcus ficus* (Homoptera: Pseudococcidae). *Biol Control* 31:123–132
- Daane KM, Bentley WJ, Millar JG, Walton VM, Cooper ML, Biscay P, Yokota GY (2008) Integrated management of mealybugs in California vineyards. *Acta Hortic.* 785:235–252. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.785.30>
- Darriet F, Chandre F (2013) Efficacy of six neonicotinoid insecticides alone and in combination with deltamethrin and piperonyl butoxide against pyrethroid-resistant *Aedes aegypti* and *Anopheles gambiae* (Diptera: Culicidae). *Pest Manag Sci.* 69:905–910
- Deguines N, Jono C, Baude M, Henry M, Julliard R, Fontaine C (2014) Large-scale trade-off between agricultural intensification and crop pollination services. *Front Ecol Environ.* 12:212–217
- Dercks W, Hackel S, Witte H, Michaelsen M, Neuber M, Gärber U, Kleeberg H (2014) Plant Protection with Plant Extracts (Botanicals): background, Two Case Studies, Conclusions and Positioning | [Pflanzenschutz mit Pflanzenextrakten (Botanicals): Hintergründe, zwei Fallstudien, Schlussfolgerungen und Standortbestimmung] *Gesunde Pflanzen* 66: 1–16. <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10343-013-0313-6>. Assessed 12 July 2017
- Dib H, Sauphanor B, Capowiez Y (2010) Effect of codling moth exclusion nets on the rosy apple aphid, *Dysaphis plantaginea*, and its control by natural enemies. *Crop Prot* 29:1502–1513. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2010.08.012>
- Dib H, Sauphanor B, Capowiez Y (2016) Effect of management strategies on arthropod communities in the colonies of rosy apple aphid, *Dysaphis plantaginea* Passerini (Hemiptera: Aphididae) in southeastern France. *Agric Ecosyst Environ.* 216:203–206. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.10.003>
- Dobson RC, Rogers M, Moore JL, Bessin RT (2016) Exclusion of the brown marmorated stink bug from organically grown peppers using barrier screens. *Hortic Technol.* 26:191–198
- Douglas M, Tooker JF (2015) Large-scale deployment of seed treatments has driven rapid increase in use of neonicotinoid insecticides and preemptive pest management in U.S. field crops. *Environ Sci Technol.* 49:5088–5097
- Douglas M, Tooker JF (2016) Meta-analysis reveals that seed-applied neonicotinoids and pyrethroids have similar negative effects on abundance of arthropod natural enemies. *PeerJ* 4:e2776. <https://doi.org/10.7717/peerj.2776>
- Duso C, Vettorazzo E (1999) Mite population dynamics on different grape varieties with or without phytoseiids released (Acari: Phytoseiidae). *Exp Appl Acarol* 23:741–763. <https://doi.org/10.1023/A:1006297225577>
- Duso C, Trentin R, Borgo M, Egger E (1985) Influenza della termoregolazione estiva mediante acqua sulle popolazioni di *Planococcus ficus* Sign. su vite. *Rivista di Viticoltura e di Enologia* 38:567–607
- Duso C, Fontana P, Malagnini V (2004) Diversity and abundance of phytoseiid mites (acari: phytoseiidae) in vineyards and the surrounding vegetation in northeastern Italy. *Acarologia* 44:31–47 [https://www1.montpellier.inra.fr/cbgrp/acarologia/export\\_pdf.php?id=42&typefile=pd](https://www1.montpellier.inra.fr/cbgrp/acarologia/export_pdf.php?id=42&typefile=pd). Assessed 09 September 2017
- Duso C, Pozzebon A, Kreiter S, Tixier M, Candolfi M (2012) Management of phytophagous mites in European Vineyards. In: Bostanian NJ, Vincent C, Isaacs R (eds) *Arthropod management in vineyards: pests, approaches, and future directions*. Springer,

- Netherlands, pp 191–217
- Duso C, Ahmad S, Tirello P, (...), Malagnini V, Angeli G (2014) The impact of insecticides applied in apple orchards on the predatory mite *Kampimodromus aberrans* (Acari: Phytoseiidae). *Exp Appl Acarol* 62:391–414
- Edwards OR, Franzmann B, Thackray D, Micic S (2008) Insecticide resistance and implications for future aphid management in Australian grains and pastures: a review. *Aust J Exp Agric*. 48: 1523–1530
- El Wakeil NE, Farghaly HT, Ragab ZA (2008) Efficacy of inundative releases of *Trichogramma evanescens* in controlling *Lobesia botrana* in vineyards in Egypt. *J Pest Sci*. 81:49–55. <https://doi.org/10.1007/s10340-007-0184-7>
- EU (2009) Directive 2009/128/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for Community action to achieve the sustainable use of pesticides, OJ EU L309, 71–86, 24.11.2009
- EU (2013a) Commission implementing Regulation (EU) No 485/2013 of 24 May 2013 amending Implementing Regulation (EU) No 540/2011, as regards the conditions of approval of the active substances clothianidin, thiamethoxam and imidacloprid, and prohibiting the use and sale of seeds treated with plant protection products containing those active substances. OJ EU L139, 12–26, 25.05.2013
- EU (2013b) Commission implementing Regulation (EU) No 781/2013 of 14 August 2013 amending Implementing Regulation (EU) No 540/2011, as regards the conditions of approval of the active substance fipronil, and prohibiting the use and sale of seeds treated with plant protection products containing this active substances. OJ EU L219, 22–25, 15.08.2013
- Ferrari R, Tassini C, Furlan L, Fracasso F, Sartori E, Codato F, Bin O (2015) La gestione degli elateridi con i fondi mutualistici. *Terra e Vita* 14:42–45 (in Italian). <http://novagricoltura.edagricole.it/wpcontent/uploads/sites/10/2015/04/La-gestione-degli-elateridiPagina-da-TV14-2015-2.pdf>, assessed 9 September 2017
- Fornasiero D, Duso C, Pozzebon A, Tomasi D, Gaiotti F, Pavan F (2012) Effects of irrigation on the seasonal abundance of *Empoasca vitis* in North-Italian vineyards. *J Econ Entomol*. 105:176–185. <https://doi.org/10.1603/EC11218>
- Fornasiero D, Pavan F, Pozzebon A, Picotti P, Duso C (2016) Relative infestation level and sensitivity of grapevine cultivars to the leafhopper *Empoasca vitis* (Hemiptera: Cicadellidae). *J Econ Entomol*. 109(1):416–25. <https://doi.org/10.1093/jee/tov313>
- Furlan L (2014) IPM thresholds for *Agriotes* wireworm species in maize in southern Europe. *J Pest Sci*. 87:609–617. <https://doi.org/10.1007/s10340-014-0583-5>
- Furlan L, Kreutzweiser D (2015) Alternatives to neonicotinoid insecticides for pest control: case studies in agriculture and forestry. *Environ Sci Pollut Res*. 22:135–147. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3628-7>
- Furlan L, Contiero B, Sartori E, Fracasso F, Sartori A, Vasileiadis VP, Sattin M (2015) Mutual funds are a key tool for IPM implementation: a case study of soil insecticides in maize shows the way. IPM Innovation in Europe, Poznan 14–16 January, Abstract book, 159. [http://www.pure-ipm.eu/sites/default/files/content/files/Book%20of%20Abstracts%20-%20IPM%20Innovation%20in%20Europe\\_sessions-annuals.pdf](http://www.pure-ipm.eu/sites/default/files/content/files/Book%20of%20Abstracts%20-%20IPM%20Innovation%20in%20Europe_sessions-annuals.pdf). Assessed 9 Sept 2017
- Furlan L, Vasileiadis VP, Chiarini F, Huiting H, Leskovšek R, Razinger J, Holbe JJ, Sartori E, Urek G, Verschweleg A, Benevegnù I, Sattin M (2016) Risk assessment of soil-pest damage to grain maize in Europe within the framework of integrated pest management. *Crop Prot* 97:52–59. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.11.029>
- Furlan L, Contiero B, Chiarini F, Colauzzi M, Sartori E, Benevegnù I, Giandon P (2017) Risk assessment of maize damage by wireworms (Coleoptera: Elateridae) as the first step in implementing IPM and in reducing the environmental impact of soil insecticides. *Environ Sci Pollut Res*. 24:236–251. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7692-z>
- Gallardo A, López MÁ, Lara M, Maistrello L, Molejón A, Ocete R (2016) Resurgence of minor pests following the implementation of mating disruption against *Lobesia botrana* (Denis & Schiffermüller) (Lepidoptera, Tortricidae) in Sherry vineyards (Spain). *Vitis J Grapevine Res* 55:37–43. <https://doi.org/10.5073/vitis.2016.55.37-43>
- Garrood WT, Zimmer CT, Gorman KJ, Nauen R, Bass C, Davies TGE (2016) Field-evolved resistance to imidacloprid and ethiprole in populations of brown planthopper *Nilaparvata lugens* collected from across south and east Asia. *Pest Manag Sci*. 72:140–149
- Gibbons D, Morrissey C, Mineau P (2015) A review of the direct and indirect effects of neonicotinoids and fipronil on vertebrate wildlife. *Environ Sci Pollut Res*. 22:103–118
- Giorio C, Anton Safer A, Sánchez-Bayo F, Tapparo A, Lentola A, Girolami V, Bijleveld van Lexmond M, Bonmatin JM (2017) An update of the Worldwide Integrated Assessment (WIA) on systemic insecticides. Part 1: new molecules, metabolism, fate and transport. *Environ Sci Pollut Res*. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0394-3>
- Gore J, Cook D, Catchot A, Leonard BR, Stewart SD, Lorenz G, Kerns D (2013) Cotton aphid (Heteroptera: Aphididae) susceptibility to commercial and experimental insecticides in the southern United States. *J Econ Entomol*. 106:1430–1439
- Gorman K, Liu Z, Denholm I, Brügggen K-U, Nauen R (2008) Neonicotinoid resistance in rice brown planthopper, *Nilaparvata lugens*. *Pest Manag Sci*. 64:1122–1125
- Gorman K, Slater R, Blande JD, Clarke A, Wren J, McCaffery A, Denholm I (2010) Cross-resistance relationships between neonicotinoids and pymetrozine in *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae). *Pest Manag Sci*. 66:1186–1190
- Gurr GM, Heong KL, Cheng JA, Catindig J (2012) Ecological engineering against insect pests in Asian irrigated rice. In: Gurr GM, Wratten SD, Snyder WE, Read DMY (eds) *Biodiversity and insect pests: key issues for sustainable management*. John Wiley & Sons, Ltd., UK, pp 214–229
- Gurr GM, Lu Z, Zheng X, Xu H, Zhu P, Chen G, Yao X, Cheng J, Zhu Z, Catindig JL et al (2016) Multi-country evidence that crop diversification promotes ecological intensification of agriculture. *Nature Plants* 2:16014. <https://doi.org/10.1038/nplants.2016.14>
- Hadi BAR, García CPF, Heong KL (2015) Susceptibility of *Nilaparvata lugens* (Hemipteran: Delphacidae) populations in the Philippines to insecticides. *Crop Prot* 76:100–102
- Heong KL, Escalada MM, Chien HV, Cuong LQ (2014) Restoration of rice landscape biodiversity by farmers in Vietnam through education and motivation using media. *Surv Perspect Integrating Environ Soc (S.A.P.I.E.N.S.)* 7(2). <http://sapiens.revues.org/1578>. Assessed 9 Aug 2017
- Herbert KS, Hoffmann AA, Powell KS (2008) Assaying the potential benefits of thiamethoxam and imidacloprid for phylloxera suppression and improvements to grapevine vigour. *Crop Prot* 27:1229–1236
- Hermann A, Brunner N, Hann P, Wrbka T, Kromp B (2013) Correlations between wireworm damages in potato fields and landscape structure at different scales. *J Pest Sci*. 86:41–51. <https://doi.org/10.1007/s10340-012-0444-z>

- Hoi KK, Daborn PJ, Battlay P, Robin C, Batterham P, O'Hair RAJ, Donald WA (2014) Dissecting the insect metabolic machinery using twin ion mass spectrometry: a single P450 enzyme metabolizing the insecticide imidacloprid in vivo. *Anal Chem.* 86:3525–3532
- Hokkanen HMT (2015) Integrated pest management at the crossroads: science, politics, or business (as usual)? *Arthropod-Plant Interactions* 9:543–545
- Hokkanen HMT, Menzler-Hokkanen I, Keva M (2017) Long-term yield trends of insect-pollinated crops vary regionally and are linked to neonicotinoid use, landscape complexity, and availability of pollinators. *Arthropod-Plant Interactions* 11:449–461
- Huseth AS, Chappell TM, Langdon K, Morsello SC, Martin S et al (2016) *Frankliniella fusca* resistance to neonicotinoid insecticides: an emerging challenge for cotton pest management in the eastern United States. *Pest Manag Sci.* 72:1934–1945
- Ichinose K, Bang DV, Tuan DH, Dien LQ (2010) Effective use of neonicotinoids for protection of citrus seedlings from invasion by *Diaphorina citri* (Hemiptera: Psyllidae). *J Econ Entomol.* 103:127–135
- Ioriatti C, Lucchi A (2016) Semiochemical strategies for tortricid moth control in apple orchards and vineyards in Italy. *J Chem Ecol.* 42: 571–583
- Ioriatti C, Anfora G, Tasin M, De Cristofaro A, Witzgall P, Lucchi A (2011) Chemical ecology and management of *Lobesia botrana* (Lepidoptera: Tortricidae). *J Econ Entomol.* 104:1125–1137. <https://doi.org/10.1603/EC10443>
- İşci M, Ay R (2017) Determination of resistance and resistance mechanisms to thiacloprid in *Cydia pomonella* L. (Lepidoptera: Tortricidae) populations collected from apple orchards in Isparta Province, Turkey. *Crop Prot* 91:82–88
- Jepsen SJ, Rosenheim JA, Bench ME (2007) The effect of sulfur on biological control of the grape leafhopper, *Erythroneura elegantula*, by the egg parasitoid *Anagrus erythroneurae*. *BioControl* 52:721–732. <https://doi.org/10.1007/s10526-006-9058-9>
- Jones MM, Robertson JL, Weinzierl RA (2010) Susceptibility of oriental fruit moth (Lepidoptera: Tortricidae) larvae to selected reduced-risk insecticides. *J Econ Entomol.* 103:1815–1820
- Joussan N, Heckel DG, Haas M, Schuphan I, Schmidt B (2008) Metabolism of imidacloprid and DDT by P450 CYP6G1 expressed in cell cultures of *Nicotiana tabacum* suggests detoxification of these insecticides in Cyp6g1-overexpressing strains of *Drosophila melanogaster*, leading to resistance. *Pest Manag Sci.* 64:65–73
- Jung J, Racca P, Schmitt J, Kleinhenz B (2014) SIMAGRIO-W: development of a prediction model for wireworms in relation to soil moisture, temperature and type. *J Appl Entomol.* 138:183–194. <https://doi.org/10.1111/jen.12021>
- Kabaluk T (2014) Targeting adult Elateridae as a concept for wireworm biocontrol. *BioControl* 59:607. <https://doi.org/10.1007/s10526-0149603-x>
- Kabaluk JT, Ericsson JD (2007) *Metarhizium anisopliae* seed treatment increases yield of field corn when applied for wireworm control. *Agron J.* 99:1377–1391
- Kabaluk JT, Vernon RS, Goettel MS (2007) Mortality and infection of *Agriotes obscurus* (Coleoptera: Elateridae) with inundative field applications of *Metarhizium anisopliae*. *Phytoprotection* 88:51–56
- Kabaluk JT, LaFontaine JP, Borden JH (2015) An attract and kill tactic for click beetles based on *Metarhizium brunneum* and a new formulation of sex pheromone. *J Pest Sci.* 88:707–716
- Kady HE, Devine GJ (2003) Insecticide resistance in Egyptian populations of the cotton whitefly, *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae). *Pest Manag Sci.* 59:865–871
- Karatolos N, Denholm I, Williamson M, Nauen R, Gorman K (2010) Incidence and characterisation of resistance to neonicotinoid insecticides and pymetrozine in the greenhouse whitefly, *Trialeurodes vaporariorum* Westwood (Hemiptera: Aleyrodidae). *Pest Manag Sci.* 66:1304–1307
- Kovács-Hostyánszki A, Espíndola A, Vanbergen AJ, Settele J, Kremen C, Dicks LV (2017) Ecological intensification to mitigate impacts of conventional intensive land use on pollinators and pollination. *Ecol Lett.* 20:673–689
- Kristensen M, Jespersen JB (2008) Susceptibility to thiamethoxam of *Musca domestica* from Danish livestock farms. *Pest Manag Sci.* 64:126–132
- Kuhar TP, Kamminga K (2017) Review of the chemical control research on *Halyomorpha halys* in the USA. *J Pest Sci.* 90:1021–1031
- Kuhar TP, Short BD, Krawczyk G, Leskey TC (2017) Deltamethrin incorporated nets as an integrated pest management tool for the invasive *Halyomorpha halys* (Hemiptera: Pentatomidae). *J Econ Entomol.* 110:543–545
- Lacey LA, Shapiro-Ilan DI (2008) Microbial control of insect pests in temperate orchard systems: potential for incorporation into IPM. *Annu Rev Entomol.* 53:121–144. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.53.103106.093419>
- Lacey LA, Arthurs SP, Unruh TR, Headrick H, Fritts R Jr (2006) Entomopathogenic nematodes for control of codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) in apple and pear orchards: effect of nematode species and seasonal temperatures, adjuvants, application equipment, and post-application irrigation. *Biol Control* 37:214–223. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2005.09.015>
- Leach H, Van Timmeren S, Isaacs R (2016) Exclusion netting delays and reduces *Drosophila suzukii* (Diptera: Drosophilidae) infestation in raspberries. *J Econ Entomol.* 109:2151–2158
- Lechenet M, Dessaint F, Py G, Makowski D, Munier-Jolain N (2017) Reducing pesticide use while preserving crop productivity and profitability on arable farms. *Nat Plants* 3:17008
- Lee WW, Shin TY, Bae SM, Woo SD (2015) Screening and evaluation of entomopathogenic fungi against the green peach aphid, *Myzus persicae* using multiple tools. *J Asia-Pac Entomol.* 18:607–615
- Lefort F, Fleury D, Fleury I, Coutant C, Kuske S, Kehrlı P, Maignet P (2014) Pathogenicity of entomopathogenic fungi to the green peach aphid *Myzus persicae* Sulzer (Aphididae) and the European tarnished bug *Llygus rugulipennis poppius* (Miridae). *Egyptian J Biol Pest Control* 24:379–386
- Lescourret F (2017) Toward a reduced use of pesticides in European farming systems: an introduction to the PURE project. *Crop Prot* 97:7–9
- Leskey TC, Lee D, Short BD, Wright SE (2012) Impact of insecticides on the invasive *Halyomorpha halys* (Hemiptera: Pentatomidae): analysis of insecticide lethality. *J Econ Entomol.* 105:1726–1735. <https://doi.org/10.1603/EC12265>
- Liang P, Tian Y-A, Biondi A, Desneux N, Gao X-W (2012) Short-term and transgenerational effects of the neonicotinoid nitenpyram on susceptibility to insecticides in two whitefly species. *Ecotoxicology* 21:1889–1898
- Liu Z, Williamson MS, Lansdell SJ, Denholm I, Han Z, Millar NS, Casida JE (2005) A nicotinic acetylcholine receptor mutation conferring target-site resistance to imidacloprid in *Nilaparvata lugens* (Brown Planthopper). *PNAS* 102:8420–8425
- Lowery DT, Smirle MJ, Foottit RG, Zurowski CL, Beers Peryea EH (2005) Baseline susceptibilities to imidacloprid for green apple aphid and spirea aphid (Homoptera: Aphididae) collected from apple in the Pacific Northwest. *J Econ Entomol.* 98:188–194.

- <https://doi.org/10.1603/0022-0493-98.1.188>
- Lu Z, Zhu P, Gurr GM, Zheng X, Chen G, Heong KL (2015) Rice Pest Management by Ecological Engineering: A Pioneering Attempt in China. In: Heong K, Cheng J, Escalada M (eds) Rice Planthoppers. Springer, Dordrecht, pp 161–178. [https://doi.org/10.1007/978-94017-9535-7\\_8](https://doi.org/10.1007/978-94017-9535-7_8). Assessed 9 Aug 2017
- Maalouly M, Franck P, Bouvier J, Toubon J, Lavigne C (2013) Codling moth parasitism is affected by semi-natural habitats and agricultural practices at orchard and landscape levels. *Agric Ecosyst Environ.* 169:33–42. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.02.008>
- Macfadyen S, Hardie DC, Fagan L, Stefanova K, Perry KD, DeGraaf HE, Holloway J, Spafford H, Umina PA (2014) Reducing insecticide use in broad-acre grains production: an Australian study. *PLoS One* 9: e89119
- Magalhaes LC, Walgenbach JF (2011) Life stage toxicity and residual activity of insecticides to codling moth and oriental fruit moth (Lepidoptera: Tortricidae). *J Econ Entomol.* 104:1950–1959
- Malagnoux L, Capowiez Y, Rault M (2015) Impact of insecticide exposure on the predation activity of the European earwig *Forficula auricularia*. *Environ Sci Pollut Res.* 22:14116–14126. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4520-9>
- Marchand PA (2015) Basic Substances: an approval opportunity for low concern natural products under EU pesticide regulation. *Pest Manag Sci.* 71:1197–1200. <https://doi.org/10.1002/ps.3997>
- Marchand PA (2016) Basic substances under EC 1107/2009 phytochemical regulation: experience with non-biocide and food products as biorationals. *J Plant Protect Res.* 56:312–318. <https://doi.org/10.1515/jppr-2016-0041h>
- Marchand PA (2017) Basic substances under EU pesticide regulation: an opportunity for organic production? *Org Farming* 3:16–19. <https://doi.org/10.12924/of2017.03010016>
- Markó V, Blommers LHM, Bogya S, Helsen H (2008) Kaolin particle films suppress many apple pests, disrupt natural enemies and promote woolly apple aphid. *J Appl Entomol.* 132:26–35. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.2007.01233.x>
- Matsumura M, Takeuchi H, Satoh M, Sanada-Morimura S, Otuka A, Watanabe T, van Thanh D (2008) Species-specific insecticide resistance to imidacloprid and fipronil in the rice planthoppers *Nilaparvata lugens* and *Sogatella furcifera* in east and south-east Asia. *Pest Manag Sci.* 64:1115–1121
- Matyjaszczyk E, Sobczak J, Szulc M (2015) Is the possibility of replacing seed dressings containing neonicotinoids with other means of protection viable in major Polish agricultural crops? *J Plant Protect Res.* 55:329–335
- Mertz FP, Yao RC (1990) *Saccharopolyspora spinosa* sp. nov. isolated from soil collected in a sugar mill rum still. *Int J Syst Bacteriol.* 40: 34–39. <https://doi.org/10.1099/00207713-40-1-34>
- Milosavljević I, Esser AD, Crowder DW (2016) Seasonal population dynamics of wireworms in wheat crops in the Pacific Northwestern United States. *J Pest Sci.* 90:77–86. <https://doi.org/10.1007/s10340-016-0750-y>
- Minakuchi C, Inano Y, Shi XY, Song DL, Zhang YJ, Miura K (2013) Neonicotinoid resistance and cDNA sequences of nicotinic acetylcholine receptor subunits of the western flower thrips *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae). *Appl Entomol Zool.* 48: 507–513
- Mineau P, Whiteside M (2013) Pesticide acute toxicity is a better correlate of U.S. grassland bird declines than agricultural intensification. *PLoS One* 8:e57457
- Mitchell EAD, Mulhauser B, Mulot M, Mutabazi A, Glauser G, Aebi A (2017) A worldwide survey of neonicotinoids in honey. *Science* 358:109–111. <https://doi.org/10.1126/science.aan3684>
- Monteiro LB, Lavigne C, Ricci B, Franck P, Toubon J-F, Sauphanor B (2013) Predation of codling moth eggs is affected by pest management practices at orchard and landscape levels. *Agric Ecosyst Environ.* 166:86–93. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.10.012>
- Mota-Sánchez D, Wise JC, Poppen RV, Gut LJ, Hollingworth RM (2008) Resistance of codling moth, *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae), larvae in Michigan to insecticides with different modes of action and the impact on field residual activity. *Pest Manag Sci.* 64:881–890. <https://doi.org/10.1002/ps.1576>
- Mottet C, Fontaine S, Caddoux L, Brazier C, Mahéo F, Simon J-C, Micoud A, Roy L (2016) Assessment of the dominance level of the R81T target resistance to two neonicotinoid insecticides in *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae). *J Econ Entomol.* 109: 2182–2189
- Mruthunjayaswamy PV, Thiruvengadam J, Sushil Kumar J (2016) Resistance in *Maconellicoccus hirsutus* (Green) in India to selected insecticides and quantification of detoxifying enzymes imparting resistance. *Crop Prot* 89:116–122
- Nagy C, Cross JV, Markó V (2013) Sugar feeding of the common black ant, *Lasius niger* (L.), as a possible indirect method for reducing aphid populations on apple by disturbing ant-aphid mutualism. *Biol Control* 65:24–36. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2013.01.005>
- Nagy C, Cross JV, Markó V (2015) Can artificial nectaries outcompete aphids in ant-aphid mutualism? Applying artificial sugar sources for ants to support better biological control of rosy apple aphid, *Dysaphis plantaginea* Passerini in apple orchards. *Crop Prot* 77: 127–138. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.07.015>
- Nauen R, Bielza P, Denholm I, Gorman K (2008) Age-specific expression of resistance to a neonicotinoid insecticide in the whitefly *Bemisia tabaci*. *Pest Manag Sci.* 64:1106–1110
- Nogueira Soares V, da Silva Almeida A, Deuner C, Jauer A, Madruga de Tunes L (2017) Neonicotinoid insecticide treatment improves physiological performance of melon and watermelon seeds. *Afr J Agric Res* 12:1678–1683
- Panini M, Dradi D, Marani G, Butturini A, Mazzoni E (2014) Detecting the presence of target-site resistance to neonicotinoids and pyrethroids in Italian populations of *Myzus persicae*. *Pest Manag Sci.* 70:931–938
- Pappas ML, Koveos DS (2011) Life-history traits of the predatory lacewing *Dichochrysa prasina* (Neuroptera: Chrysopidae): temperature-dependent effects when larvae feed on nymphs of *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae). *Ann Entomol Soc Am.* 104:43–49. <https://doi.org/10.1603/AN10036>
- Pavlova AK, Dahlmann M, Hauck M, Reineke A (2017) Laboratory bioassays with three different substrates to test the efficacy of insecticides against various stages of *Drosophila suzukii* (Diptera: Drosophilidae). *J Insect Sci.* 17:8. <https://doi.org/10.1093/jisesa/iew100>
- Penvern S, Bellon S, Fauriel J, Sauphanor B (2010) Peach orchard protection strategies and aphid communities: towards an integrated agroecosystem approach. *Crop Prot* 29:1148–1156. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2010.06.010>
- Pisa LW, Amaral-Rogers V, Belzunces LP, Bonmatin JM, Downs CA, Goulson D, Kreutzweiser DP, Krupke C, Liess M, McField M et al (2015) Effects of neonicotinoids and fipronil on non-target invertebrates. *Environ Sci Pollut Res.* 22:68–102
- Pisa L, Goulson D, Yan EC, Gibbons D, Sánchez-Bayo F, Mitchell E, van der Sluijs J, MacQuarrie C, Giorio C, Long EY, McField M, Bijleveld van Lexmond M, Bonmatin JM (2017) An update of the World Integrated Assessment (WIA) on systemic insecticides. Part 2: impacts on organisms and ecosystems. *Environ Sci Pollut Res.* <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0341-3>
- Polajnar J, Eriksson A, Virant-Doberlet M, Mazzoni V (2016) Mating

- disruption of a grapevine pest using mechanical vibrations: from laboratory to the field. *J Pest Sci.* 89:909–921.  
<https://doi.org/10.1007/s10340-015-0726-3>
- Ponti L, Ricci C, Veronesi F, Torricelli R (2005) Natural hedges as an element of functional biodiversity in agroecosystems: the case of a central Italy vineyard. *Bull Insectol.* 58:19–23
- Pozzebon A, Ahmad S, Tirello P, Lorenzon M, Duso C (2014) Does pollen availability mitigate the impact of pesticides on generalist predatory mites? *BioControl* 59:585–596
- Pozzebon A, Loeb GM, Duso C (2015a) Role of supplemental foods and habitat structural complexity in persistence and coexistence of generalist predatory mites. *Sci Rep.* 5:14997.  
<https://doi.org/10.1038/srep14997>
- Pozzebon A, Tirello P, Moret R, Pederiva M, Duso C (2015b) A fundamental step in IPM on grapevine: evaluating the side effects of pesticides on predatory mites. *Insects* 6:847–857.  
<https://doi.org/10.3390/insects6040847>
- Prabhaker N, Castle S, Henneberry TJ, Toscano NC (2005) Assessment of cross-resistance potential to neonicotinoid insecticides in *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae). *Bull Entomol Res.* 95:535–543
- Puinean AM, Foster SP, Oliphant L, Denholm I, Field LM, Millar NS (2010) Amplification of a cytochrome P450 gene is associated with resistance to neonicotinoid insecticides in the aphid *Myzus persicae*. *PLoS Genet.* 6:e1000999
- Raga A, Sato M (2011) Toxicity of neonicotinoids to *Ceratitis capitata* and *Anastrepha fraterculus* (Diptera: Tephritidae). *J Plant Protect Res.* 51:413–419
- Rahman T, Broughton S (2016) Evaluation of thiacloprid and clothianidin (neonicotinoids) as alternative to fenthion (organophosphate) for control of Mediterranean fruit fly (Diptera: Tephritidae) in deciduous fruit orchards. *Crop Prot* 90:170–176
- Rebach S, French DP (1996) Effects of Dimilin on the blue crab, *Callinectes sapidus*, in shallow-water habitats. *Estuaries* 19: 279–287
- Reissig WH (2003) Field and laboratory tests of new insecticides against the apple maggot, *Rhagoletis pomonella* (Walsh) (Diptera: Tephritidae). *J Econ Entomol.* 96:1463–1472.  
<https://doi.org/10.1603/0022-0493-96.5.1463>
- Reyes M, Franck P, Charmillot PJ, Ioriatti C, Olivares J, Pasqualini E, Sauphanor B (2007) Diversity of insecticide resistance mechanisms and spectrum in European populations of the codling moth, *Cydia pomonella*. *Pest Manag Sci.* 63:890–902
- Ribeiro LP, Akhtar Y, Vendramim JD, Isman MB (2014) Comparative bioactivity of selected seed extracts from Brazilian *Annona* species and an acetogenin-based commercial bioinsecticide against *Trichoplusia ni* and *Myzus persicae*. *Crop Prot* 62 (Supplement C):100–106
- Rieux R, Simon S, Defrance H (1999) Role of hedgerows and ground cover management on arthropod populations in pear orchards. *Agric Ecosyst Environ.* 73:119–127.  
[https://doi.org/10.1016/S01678809\(99\)00021-3](https://doi.org/10.1016/S01678809(99)00021-3)
- Rogers MA, Burkness EC, Hutchison WD (2016) Evaluation of high tunnels for management of *Drosophila suzukii* in fall-bearing red raspberries: potential for reducing insecticide use. *J Pest Sci.* 89: 815–821
- Romero A, Anderson TD (2016) High levels of resistance in the common bed bug, *Cimex lectularius* (Hemiptera: Cimicidae), to neonicotinoid insecticides. *J Med Entomol.* 53:727–731
- Saeed R, Razaq M, Abbas N, Jan MT, Naveed M (2017) Toxicity and resistance of the cotton leaf hopper, *Amrasca devastans* (Distant) to neonicotinoid insecticides in Punjab, Pakistan. *Crop Prot* 93:143–147
- Salis S, Testa C, Roncada P, Armorini S, Rubattu N, Ferrari A, Miniero R, Brambilla G (2017) Occurrence of imidacloprid, carbendazim, and other biocides in Italian house dust: potential relevance for intakes in children and pets. *J Environ Sci Health B* 52:699–709.  
<https://doi.org/10.1080/03601234.2017.1331675>
- Santos MF, Santos RL, Tomé HVV, Barbosa WF, Martins GF, Guedes RNC, Oliveira EE (2016) Imidacloprid-mediated effects on survival and fertility of the Neotropical brown stink bug *Euschistus heros*. *J Pest Sci.* 89:231–240
- Sauge M-H, Grechi I, Poëssel J-L (2010) Nitrogen fertilization effects on *Myzus persicae* aphid dynamics on peach: vegetative growth allocation or chemical defence? *Entomol Exp Appl.* 136:123–133.  
<https://doi.org/10.1111/j.1570-7458.2010.01008.x>
- Sauphanor B, Severac G, Maugin S, Toubon JF, Capowiez Y (2012) Exclusion netting may alter reproduction of the codling moth (*Cydia pomonella*) and prevent associated fruit damage to apple orchards. *Entomol Exp Appl.* 145:134–142. <https://doi.org/10.1111/j.1570-7458.2012.01320.x>
- Saussure S, Plantegenest M, Thibord J-B, Larruodè P, Poggi S (2015) Management of wireworm damage in maize fields using new, landscape-scale strategies. *Agron Sustain Dev.* 35:793–802.  
<https://doi.org/10.1007/s13593-014-0279-5>
- Schmitt A, Bisutti IL, Ladurner E, Benuzzi M, Sauphanor B, Kienzle J, Zingg D, Undorf-Spahn K, Fritsch E, Huber J, Jehle JA (2013) The occurrence and distribution of resistance of codling moth to *Cydia pomonella* granulovirus in Europe. *J Appl Entomol.* 137:641–649.  
<https://doi.org/10.1111/jen.12046>
- Scott JG, Duhig M, Hamlyn J, Norman R (2014) Environmental contributions to autism: explaining the rise in incidence of autistic spectrum disorders. *J Environ Immunol Toxicol* 1(2):75–79. <https://eprints.qut.edu.au/84191/>
- Seagraves MP, Lundgren JG (2012) Effects of neonicotinoid seed treatments on soybean aphid and its natural enemies. *J Pest Sci.* 85:125–132
- Sgolastra F, Porrini C, Maini S, Bortolotti L, Medrzycki P, Mutinelli F, Lodesani M (2017) Healthy honey bees and sustainable maize production: why not? *Bull Insectol.* 70:156–160
- Sharon R, Zahavi T, Sokolsky T, Sofer-Arad C, Tomer M, Kedoshim R, Harari AR (2016) Mating disruption method against the vine mealybug, *Planococcus ficus*: effect of sequential treatment on infested vines. *Entomol Exp Appl.* 161:65–69
- Shawer R, Tonina L, Tirello P, Duso C, Mori N (2018) Laboratory and field trials to identify effective chemical control strategies for integrated management of *Drosophila suzukii* in European cherry orchards. *Crop Prot* 103:73–80
- Shearer PW, Frecon JL (2002) Managing *Brachycaudus persicae* (Homoptera: Aphididae) during peach orchard establishment. *J Econ Entomol.* 95:368–371
- Shi X, Jiang L, Wang H, Qiao K, Wang D, Wang K (2011) Toxicities and sublethal effects of seven neonicotinoid insecticides on survival, growth and reproduction of imidacloprid-resistant cotton aphid, *Aphis gossypii*. *Pest Manag Sci.* 67:1528–1533
- Simon-Delso N, Amaral-Rogers V, Belzunces L, Bonmatin JM, Chagnon M, Downs C, Furlan L, Gibbons D, Giorio C, Girolami V et al (2015) Systemic insecticides (neonicotinoids and fipronil): trends, uses, mode of action and metabolites. *Environ Sci Pollut Res* 22:5–34.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-014-3470-y>
- Solomon MG, Cranham JE, Easterbrook MA, Fitzgerald JD (1989) Control of the pear psyllid, *Cacopsylla pyricola*, in south east England by predators and pesticides. *Crop Prot* 8:197–205.  
[https://doi.org/10.1016/0261-2194\(89\)90027-6](https://doi.org/10.1016/0261-2194(89)90027-6)
- Solomon MG, Cross JV, Fitzgerald JD, Campbell CAM, Jolly RL, Olszak RW, Niemczyk E, Vogt H (2000) Biocontrol of pests of apples and

- pears in northern and central Europe—3. Predators. *Biocontrol Sci Technol.* 10:91–128.  
<https://doi.org/10.1080/09583150029260>
- Souliotis C, Moschos T (2008) Effectiveness of some pesticides against *Cacopsylla pyricola* and impact on its predator *Anthocoris nemoralis* in pear-orchards. *Bull. Insectol.* 61:25–30
- Spangenberg JH, Douguet JM, Settele J, Heong KL (2015) Escaping the lock-in of continuous insecticide spraying in rice: developing an integrated ecological and socio-political DPSIR analysis. *Ecol Model.* 295:188–195
- Stenberg JA (2017) A conceptual framework for integrated pest management. *Trends Plant Sci.* 22:759–769
- Szendrei Z, Grafius E, Byrne A, Ziegler A (2012) Resistance to neonicotinoid insecticides in field populations of the Colorado potato beetle (Coleoptera: Chrysomelidae). *Pest Manag Sci.* 68: 941–946
- Tacoli F, Pavan F, Cargnus E, Tilatti E, Pozzebon A, Zandigiacomo P (2017) Efficacy and mode of action of kaolin in the control of *Empoasca vitis* and *Zygina rhamni* (Hemiptera: Cicadellidae) in Vineyards. *J Econ Entomol.* 110:1164–1178
- Tamindžić G, Nikolić Z, Milošević D, Ignjatov M (2016) Field & vegetable crops research. *Ratarstvo i povrtarstvo* 53:90–95
- Thany SH (2010) Neonicotinoid insecticides. Historical evolution and resistance mechanisms. *Adv. Exp Med Biol.* 683:75–83
- Tirello P, Pozzebon A, Duso C (2013) The effect of insecticides on the non-target predatory mite *Kampimodromus aberrans*: laboratory studies. *Chemosphere* 93:1139–1144
- Tiwari S, Mann RS, Rogers ME, Stelinski LL (2011) Insecticide resistance in field populations of Asian citrus psyllid in Florida. *Pest Manag Sci.* 67:1258–1268
- Toda S, Hirata K, Yamamoto A, Matsuura A (2017) Molecular diagnostics of the R81T mutation on the D-loop region of the  $\beta 1$  subunit of the nicotinic acetylcholine receptor gene conferring resistance to neonicotinoids in the cotton aphid, *Aphis gossypii* (Hemiptera: Aphididae). *Appl Entomol Zool.* 52:147–151
- Trimble RM (1993) Efficacy of mating disruption for controlling the grape berry moth, *Endopiza viteana* (Clemens) (Lepidoptera: Tortricidae), a case study over three consecutive growing seasons. *Can Entomol.* 125:1–9. <https://doi.org/10.4039/Ent1251-1>
- Unruh TR, Lacey LA (2001) Control of codling moth, *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae), with *Steinernema carpocapsae*: effects of supplemental wetting and pupation site on infection rate. *Biol Control* 20:48–56.  
<https://doi.org/10.1006/bcon.2000.0873>
- van der Sluijs JP, Amaral-Rogers V, Belzunces LP, Bijleveld van Lexmond M, Bonmatin JM, Chagnon M, Downs CA, Furlan L, Gibbons DW, Giorio C et al (2015) Conclusions of the Worldwide Integrated Assessment on the risks of neonicotinoids and fipronil to biodiversity and ecosystem functioning. *Environ Sci Pollut Res* 22: 148–154
- Van Timmeren S, Wise JC, VanderVoort C, Isaacs R (2011) Comparison of foliar and soil formulations of neonicotinoid insecticides for control of potato leafhopper, *Empoasca fabae* (Homoptera: Cicadellidae), in wine grapes. *Pest Manag Sci.* 67:560–567
- Vassiliou VA (2011) Effectiveness of insecticides in controlling the first and second generations of the *Lobesia botrana* (Lepidoptera: Tortricidae) in table grapes. *J Econ Entomol.* 104:580–585.  
<https://doi.org/10.1603/EC10343>
- Voudouris CC, Kati AN, Sadikoglou E, Williamson M, Skouras PJ, Dimotsiou O, Georgiou S, Fenton B, Skavdis G, Margaritopoulos JT (2016) Insecticide resistance status of *Myzus persicae* in Greece: long-term surveys and new diagnostics for resistance mechanisms. *Pest Manag Sci.* 72:671–683
- Vrancken K, Trekels H, Thys T, Beliën T, Bylemans D, Demaeght P, Van Leeuwen T, De Clercq P (2015) The presence of beneficial arthropods in organic versus IPM pear orchards and their ability to predate pear suckers (*Cacopsylla pyri*). *Acta Hort.* 1094:427–429. <https://doi.org/10.17660/ActaHort.2015.1094.55>
- Wallingford AK, Fuchs MF, Martinson T, Hesler S, Loeb GM (2015) Slowing the spread of grapevine leafroll-associated viruses in commercial vineyards with insecticide control of the vector, *Pseudococcus maritimus* (hemiptera: pseudococcidae). *J Insect Sci.* 15:112. <https://doi.org/10.1093/jisesa/iev094>
- Walton VM, Daane KM, Bentley WJ, Millar JG, Larsen TE, MalakarKuenen R (2006) Pheromone-based mating disruption of *Planococcus ficus* (Hemiptera: Pseudococcidae) in California vineyards. *J Econ Entomol* 99:1280–1290.  
<https://doi.org/10.1093/jisesa/iev006>
- Walton VM, Daane KM, Addison P (2012) Biological control of arthropods and its application in vineyards. In: Bostanian NJ, Vincent C, Isaacs R (eds) *Arthropod Management in Vineyards: Pests, Approaches, and Future Directions*. Springer, Netherlands, pp 91–117
- Wan N-F, Ji X-Y, Gu X-J, Jiang J-X, Wu J-H, Li B (2014) Ecological engineering of ground cover vegetation promotes biocontrol services in peach orchards. *Ecol. Eng.* 64:62–65.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.12.033>
- Wang ZH, Gong YJ, Jin GH, Li BY, Chen JC, Kang ZJ, Zhu L, Gao YL, Reitz S, Wei SJ (2016a) Field-evolved resistance to insecticides in the invasive western flower thrips *Frankliniella occidentalis* (Pergande) (Thysanoptera: Thripidae) in China. *Pest Manag Sci.* 72:1440–1444
- Wang NX, Watso GB, Loso MR, Sparks TC (2016b) Molecular modeling of sulfoxaflor and neonicotinoid binding in insect nicotinic acetylcholine receptors: impact of the *Myzus*  $\beta 1$  R81T mutation. *Pest Manag Sci.* 72:1467–1474
- Wang X, Anadón A, Qinghua W, Qiao F, Ares I, Martínez-Larrañaga MR, Yuan Z, Martínez M-A (2018) Mechanism of neonicotinoid toxicity: Impact on oxidative stress and metabolism. *Annu Rev Pharmacol Toxicol* 58:(1):471–507. <https://doi.org/10.1146/annurev-pharmtox-010617-052429>. Assessed 9 Oct 2017
- Wei Q, Mu XC, Yu HY, Niu CD, Wang LX, Zheng C, Chen Z, Gao CF (2017) Susceptibility of *Empoasca vitis* (Hemiptera: Cicadellidae) populations from the main tea-growing regions of China to thirteen insecticides. *Crop Prot* 96:204–210
- Wilson H, Miles AF, Daane KM, Altieri MA (2015) Vineyard proximity to riparian habitat influences Western grape leafhopper (*Erythroneura elegantula* Osborn) populations. *Agric Ecosyst Environ.* 211:43–50.  
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.04.021>
- Wise JC, Vanderpoppen R, Vandervoort C, O'Donnell C, Isaacs R (2015) Curative activity contributes to control of spotted-wing drosophila (Diptera: Drosophilidae) and blueberry maggot (Diptera: Tephritidae) in highbush blueberry. *Can Entomol.* 147:109–117
- Witzgall P, Stelinski L, Gut L, Thomson D (2008) Codling moth management and chemical ecology. *Annu Rev Entomol.* 53:503–522. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.53.103106.093323>
- Wu G, Jiang S, Miyata T (2004) Effects of synergists on toxicity of six insecticides in parasitoid *Diaeretiella rapae* (Hymenoptera: Aphidiidae). *J Econ Entomol.* 97:2057–2066
- Wu G, Miyata T, Kang CY, Xie LH (2007) Insecticide toxicity and synergism by enzyme inhibitors in 18 species of pest insect and natural enemies in crucifer vegetable crops. *Pest Manag Sci* 63:500–510
- Yang XQ, Wu ZW, Zhang YL, Barros-Parada W (2016) Toxicity of six insecticides on codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) and effect on expression of detoxification genes. *J Econ Entomol* 109:320–326

- Yuan L, Wang S, Zhou J, Du Y, Zhang Y, Wang J (2012) Status of insecticide resistance and associated mutations in Q-biotype of whitefly, *Bemisia tabaci*, from eastern China. *Crop Prot* 31:67–71
- Zanolli P, Pavan F (2011) Autumnal emergence of *Anagrus* wasps, egg parasitoids of *Empoasca vitis*, from grapevine leaves and their migration towards brambles. *Agric Forest Entomol* 13:423–433. <https://doi.org/10.1111/j.1461-9563.2011.00546.x>
- Žežlina I, Škvarč A, Bohinc T, Trdan S (2013) Testing the efficacy of single applications of five insecticides against *Scaphoideus titanus* on common grapevines. *Int J Pest Manag* 59:1–9
- Zhang X, Liu X, Zhu F, Li J, You H, Lu P (2014) Field evolution of insecticide resistance in the brown planthopper (*Nilaparvata lugens* Stal) in China. *Crop Prot* 58:61–66
- Zhao GY, Liu W, Brown JM, Knowles CO (1995) Insecticide resistance in-field and laboratory strains of western flower thrips (Thysanoptera, Thripidae). *J Econ Entomol* 88:1164–1170