

## チャノホソガの効率的な防除に関する研究

上室 剛

### 要 約

チャノホソガ *Caloptilia theivora* (Walsingham) は、老齢幼虫がチャの新葉に三角巻葉を形成する。製造した茶に三角巻葉が多量に混入すると内部に堆積された虫糞の影響で茶の浸出液が赤みを帯び、製品の品質を落とすため、チャにおいて本種は重要害虫である。本研究は本種の効率的な防除に貢献するための知見を得ることを目的に研究を行い下記の結果を得た。

#### 1. チャノホソガの発育と交尾・産卵行動

チャノホソガを 24 °C で室内飼育し、各発育ステージの所要日数を調べた結果、卵から羽化までの総発育日数は 26.6 ~ 28.1 日であった。また、雄は雌より 1.5 日早く羽化した。次に、本種の発育および交尾・産卵行動を調査した。羽化当日、雄はほとんど交尾しなかったが、雌は交尾可能であった。このことから、雄は雌より先に羽化することで、雌の羽化と同時に交尾できる体制を整えるという繁殖戦略をとっている可能性が示唆された。次に、成虫の交尾頻度が寿命や産卵数に及ぼす影響を調査したところ、未交尾の雌雄は既交尾の雌雄より寿命が有意に長かった。ただし、雌雄とも 16 日齢以降は交尾能力が低下した。また、雌雄共に複数回の交尾が可能であり、雌は複数回の交尾で産卵数が増加した。さらに、8 月の自然採光の条件下で雌は 20 ~ 24 時の間に産卵することが明らかになった。

#### 2. チャノホソガの異なる発育ステージにおける各種殺虫剤の効果

チャノホソガの各発育ステージ(卵期、潜葉前期、潜葉後期、葉縁巻葉期)における各種殺虫剤の効果を室内試験において検討した。その結果、殺虫剤により効果を発揮する発育ステージが異なりその効果にも差異があることが明らかになった。すなわち、IGR 系の殺虫剤は卵期処理において殺卵およびふ化後幼虫に対する殺虫効果があり、潜葉前期処理においても殺虫効果が認められた。ネオニコチノイド系の殺虫剤は殺卵効果が高く、ピレスロイド・ピレトリン、アベルメクチン、スピノシン、ネライストキシシンおよびジアミドの各系統の殺虫剤は試験をした全ての発育ステージで効果が高かった。BT 剤と一部の IGR 剤の殺虫剤は、葉縁巻葉期に処理すると、三角巻葉は形成されるものの、三角巻葉内で幼虫を死亡させ、緑茶品質を悪化させる原因となる虫糞の堆積を抑制した。一方、供試した有機リンと METI の両系統の殺虫剤は全ての発育ステージで効果が低かった。

#### 3. チャノホソガの IGR 剤に対する薬剤抵抗性

鹿兒島県内各地の茶園においてチャノホソガに対するベンゾイル尿素系 IGR 剤の防除効果を検討した。その結果、南薩地域では防除効果が低いことが明らかになった。次に、県内各地の地域個体群について感受性検定を行った結果、南薩地域個体群ではフルフェノクスロンに対する LC<sub>50</sub> 値が 21.5 ~ 57.0 ppm(抵抗性比 239 ~ 356 倍)を示し、感受性低下が確認された。その原因は他の害虫を含めた防除に本剤を約 10 年以上連用したことにありと推測された。なお、南薩地域以外の個体群ではベンゾイル尿素系 IGR 剤の効果は高かった。一方、ジアシルヒドラジン系 IGR 剤のメトキシフェノジド、および非 IGR 剤であるネオニコチノイド系のジノテフランとジアミド系のクロラントラニプロールは県内のいずれの地域でも効果が認められた。

#### 4. 茶園におけるチャノホソガに対する BT 剤等の効果

茶園におけるチャノホソガに対して、BT 剤の従来の剤型であるエスマルク<sup>®</sup>DF の散布適期は、チャの新芽の生育ステージでは 3 葉期であることが明らかになった。また、フロアブルタイプの BT 剤であるサブリーナ<sup>®</sup>フロアブルは、チャの新芽の生育ステージでは 0.5 葉期または 3 葉期のいずれの葉期の散布でも効果を示し、散布適期幅が広いことが示唆された。

## 5. チャノホソガ成虫に対する各種殺虫剤の効果

チャノホソガ成虫に対して、殺虫剤の局所施用による直接処理の影響を調べた。さらに、茶葉等に付着した殺虫剤成分が間接的に本種成虫の生存や産卵数及びその次世代の卵の孵化率や孵化幼虫の生存などに及ぼす影響をドライフィルム法と葉片浸漬法を組み合わせた方法により調査した。局所施用法によりクロラントラニリプロール、シアントラニリプロール、スピネトラムの LD<sub>50</sub> 値は非常に低い値を示し、これらの殺虫剤は本種成虫に対して接触毒が強いことが明らかになった。後者の 2 剤は、成虫の生存に影響しない低濃度でも産卵数を抑制することが分かった。クロラントラニリプロール、シアントラニリプロール、フルベンジアミド、スピネトラム、スピノサド、アバメクチン、エマメクチン安息香酸塩、サブリーナ<sup>®</sup>フロアブルおよび脂肪酸グリセリドは、茶葉および飼育容器に付着した殺虫剤成分が未交尾雌雄成虫に対して殺虫効果と交尾阻害効果を示し、雌成虫には産卵抑制効果も示した。これらの殺虫剤は既交尾の雌成虫に対しても殺虫効果と産卵抑制効果が認められた。以上の結果から、チャノホソガの防除に利用されている殺虫剤の一部は、成虫の生存や産卵数、および次世代の卵の孵化率低下などに影響し、個体群の抑制に貢献している可能性が示唆された。

キーワード：殺虫剤，生態，チャノホソガ，防除，薬剤抵抗性

## 第 1 章 緒 言

鹿児島県におけるチャ *Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze 栽培の記録は古く、口碑によると、足利尊氏(1305 ~ 1358)が吉松(現 湧水町)の般若寺に本陣を定めたとき、宇治からチャ種子を取り寄せ、境内に播き、それ以来村内に伝わったとされる(鹿児島県茶業振興連絡協議会，1986)。また、「吉松町沿革史」によると、般若寺の開山住持が宇治から下山し、寺の境内にチャの木を植え、門徒に製法を伝授したと記されており、これらが本県におけるチャに関する最も古い記録となっている<sup>30)</sup>。その後、江戸時代では島津藩政時代に歴代藩主の多くが茶に感心を持ち、茶の奨励を行った。しかし、文化年間に茶を藩の専売品として、国外への自由な輸出を禁じたため、幕末までは振るわなかった。1860年(万延元年)には藩の専売制度が解かれ、自由貿易が盛んになり、長崎、神戸、横浜に送って、これ以降、鹿児島茶が産業的に価値を認められるようになった<sup>30)</sup>。その後、明治時代に入り、紅茶の製造を奨励した時期もあったが、1884年(明治 17年)、農商務省令により茶業組合準則が発布されたのを機会に、鹿児島県でも茶業組合が結成された。さらに、1887年(明治 20年)の省令による組合規則に基づき組織を改めて、翌年の 1888年(明治 21年)に県茶業組合聯合会議所(現 鹿児島県茶業会議所)が発足し、生産改良、販路拡張など県下茶業の発達を図られた<sup>30)</sup>。その後は関係諸氏、関係機関の精力的な取り組みにより着実な発展を経て、2015年の鹿児島県の茶の栽培面積は 8,610 ha、

年間荒茶生産量は 25,600 t となり、栽培面積、年間荒茶生産量ともに静岡県に次ぎ、全国第 2 位の茶の生産県に位置している<sup>119)</sup>。

チャにおける害虫は国内では 126 種が記録されており<sup>65)</sup>、中でも鹿児島県のチャ栽培においては、チャノミドリヒメヨコバイ *Empoasca onukii* Matsuda (カメムシ目：ヨコバイ科)、チャノキイロアザミウマ *Scirtothrips dorsalis* Hood (アザミウマ目：アザミウマ科)、カンザワハダニ *Tetranychus kanzawai* Kishida (ダニ目：ハダニ科)、クワシロカイガラムシ *Pseudauleacaspis pentagona* (Targioni-Tozzetti) (カメムシ目：マルカイガラムシ科)、チャノコカクモンハマキ *Adoxophyes honmai* Yasuda (チョウ目：ハマキガ科)、チャハマキ *Homona magnanima* Diakonoff (チョウ目：ハマキガ科)およびチャノホソガ *Caloptilia theivora* (Walsingham) (チョウ目：ホソガ科)が、収量や品質に影響をおよぼす重要な害虫として位置付けられ、基幹防除の対象となっている。

このうち、チャノホソガは、チャノハマキホソガとも称されるガの一種である。本種成虫(図 1-1)は新葉の葉裏に 1 粒ずつ産卵する(図 1-2)。ふ化直後に幼虫は、卵底から直接葉の組織に潜り込み、しばらく葉組織内部を食害する(潜葉期)(図 1-3)。生育が進むと葉の縁を巻く(葉縁巻葉期)(図 1-4)。老齢期になると葉縁巻葉から葉表に出て新しい葉を三角形状に巻葉し(三角巻葉期)(図 1-5)、その内部で葉表を食害し<sup>66)</sup>、三角巻葉内に虫糞を排出する(三角巻葉期)<sup>69)</sup>(図 1-6)。三角巻葉が混入した新芽から製造された茶は、巻葉内に排出された虫糞の影響で浸出液が赤みを帯び、製品の品質を落とす<sup>46)</sup>。上質茶

指向の我が国では品質低下には厳しいことから、本種の被害許容水準は、三角巻葉数では  $1\text{m}^2$  当たり 30 ~ 40 枚<sup>46)</sup>、三角巻葉が形成された被害芽の比率では 3.7%<sup>75)</sup>、新芽に対する三角巻葉の重量割合で 2%以上<sup>29)</sup>と低く設定されており、茶樹害虫のなかで本種ほど茶の品質低下に強く影響を与える害虫は他にない<sup>59)</sup>とされるくらい本種はチャの重要害虫である。また、幼木や中切りおよび深刈りなどの更新園では、再生芽に本種が多数加害するとその後のチャの生育が遅延するとされている<sup>59)</sup>。本種の分布は、本州以南の日本各地および台湾、中国、インド<sup>107)</sup>で、加害植物は、ツバキ科植物に限られ、チャ、ツバキ、サザンカ、サカキおよびヒサカキの 5 種類とされている<sup>58)</sup>。



図 1-3 チャノホソガの潜葉期



図 1-1 チャノホソガの成虫



図 1-4 チャノホソガの葉縁巻葉期



図 1-2 チャノホソガの卵 (円内)



図 1-5 チャノホソガの三角巻葉期



図 1-6 三角巻葉内の老齢幼虫と虫糞

本種がチャの重要害虫として最初に記録されたのは、1890年にセイロンで Green が報告したとされる、1891年にはセイロン産の標本によって Walsingham が *Gracilaria theivora* という種名を与えた<sup>58)</sup>。我が国においてもチャの害虫としての記録は古く、1900年の農商務省製茶試験所報告第4次にあるハマキムシの記事の中に「尚他の1種は前2種に比して害少なく幼虫の体は白色にして1枚の葉を巻き其内に生息す。此幼虫に蜂1種寄生するが故に多くは蛹化前に於て死せるを以てほとんど其成虫を見ることは能はざりき」(原文のまま)と記され、これがチャノホソガの最初の記録であると推定されている<sup>60)</sup>。その後、1911年に堀田は「新害虫葉掘虫」という題で、新葉に潜行する初期幼虫にのみ記している<sup>59)</sup>。翌1912年に岡田は、初めてサンカクハマキの名称を用い発表した<sup>58)</sup>。この2つの報告の中で本種の加害により、茶の品質が著しく低下すると指摘されている<sup>59)</sup>。1918年には静岡県立農事試験場は、アメリカの Howard に標本を送って、種名が *Gracilaria theivora* (Walsingham)であることを確認し、1922年には台湾において一色によって「チャノホソガ」の和名が与えられた<sup>58)</sup>。

本種は鹿児島県では年間に6～7回発生する<sup>56)</sup>。そのうち、本県では二、三、四番茶および秋芽生育期の時期に発生する場合に被害が生じるため、年間で計2～4回防除を行っている。本種に対する薬剤防除は、三角巻葉の形成を防ぐため、萌芽期から開葉期に実施するのが効果的とされており<sup>56)</sup>、本種の防除に使用されてきた殺虫剤は、昆虫成長制御剤(Insect growth regulator; 以下、IGR剤)、ネオニコチノイド系またはジアミド系の薬剤などであった。2009年頃より IGR 剤のうち、脱皮阻害作用を有するベンゾイル尿素系 IGR 剤について、本種に対する防除効果の低下が本県の枕崎市、南九州市を一带とする薩摩半島南部地域(以下、南薩地域)において指摘さ

れ始め、薬剤抵抗性個体の出現が疑われた。しかし、本種の薬剤感受性についてはこれまで調べられていなかった。一般に薬剤感受性を検定する場合はその薬剤が最も効果を発揮する発育ステージに処理するが、本種については各薬剤が効果を発揮する発育ステージも明らかになっていなかった。

一方、近年、食の安全・安心や環境に配慮した生産活動に関する消費者の関心の高まりから、生産者からは農産物の生産性および品質の維持と、減農薬・減化学肥料等環境負荷の低減化との両立が可能な IPM(Integrated Pest Management: 総合的病害虫・雑草管理)の確立が求められている<sup>106),62)</sup>。さらに、国内における茶の生産額は、国内消費の低迷から減少の一途をたどっているものの、海外では和食ブームや緑茶の機能性評価等により日本茶の輸出は拡大している。農産物を輸出する際は輸出相手国の残留農薬基準(MRL: Maximum Residue Limit, 以下、MRL)をクリアすることが必要であるが、チャを栽培していない輸出相手国では MRL が設定されている農薬が少なかったり、または極端に低い MRL が設定されたりするため日本国内で通常に防除して栽培されている茶をそのまま輸出することは困難な状況にある<sup>68)</sup>。これらのことから、チャノホソガに対しても MRL が設定されている農薬または MRL の設定対象外となる化学的防除法以外の防除法の確立が急務であった。チョウ目害虫に対する化学的防除法以外の方法として、BT(*Bacillus thuringiensis*)剤や合成性フェロモンを用いた交信攪乱法による生物的防除法および光源を利用した物理的防除法<sup>106)</sup>があるが、本種についてはこれらの防除法も確立していなかった。さらに、交信攪乱法を検討する上では必要である本種成虫の交尾・産卵に関する基礎的な知見がこれまでなかった。

そこで、チャノホソガの効率的な防除法を確立するため、本論文では以下の研究を行った。まず、室内における本種の実験系を確立するため各発育ステージの所要日数を調査した。その後、合成性フェロモンを用いた交信攪乱法や光源を利用した物理的防除法を今後行っていく上では必要となる交尾・産卵行動を明らかにした(第2章)。次に、各種殺虫剤が効果を発揮する卵から幼虫の発育ステージおよび殺虫剤に加用する展着剤等の効果を室内試験で明らかにした(第3章)。また、第3章で得られた結果を基に鹿児島県内各地から採集した個体群を試し、IGR 剤など各殺虫剤が効果を発揮する発育ステージについて薬剤感受性検定を実施した(第4章)。さらに、第3章で BT 剤が効果を発揮する発育ステージが室内試験で明らかになったことから、茶園において BT 剤の本

種に対する防除時期を明らかにした(第 5 章). また, 従来のチョウ目害虫の防除適期は若齢幼虫とされてきたが, 本種の実際の防除適期は, 茶園で成虫が飛翔する時期でもあることから, 成虫に対する各種殺虫剤の効果について明らかにした(第 6 章). 最後にこれらの知見をふまえてチャノホソガの効率的な防除について考察した(第 7 章).

本研究の主要な成果は, 上室<sup>32)</sup>, 上室ら<sup>33)</sup>, 上室ら<sup>34)</sup>, 上室ら<sup>35)</sup>, Kamimuro et al.<sup>36)</sup>において発表している.

## 第 2 章 チャノホソガの発育と交尾・産卵行動

チャノホソガの各発育ステージにおける殺虫剤の効果を検討するためには, 本種を室内で累代飼育し, 各発育ステージの所要日数を把握する必要がある. また, 本種の基礎的な生態のひとつである交尾・産卵行動を把握することは, 未確立である本種の交信攪乱法や雄除去法などの性フェロモンを用いた防除法を検討する上では不可欠であるがこれらに関連する報告はない. 本種以外のチャのチョウ目害虫であるチャノコカクモンハマキおよびチャハマキに対しては, 合成性フェロモンを利用した交信攪乱法が既に実用化されている<sup>78)</sup>. 一方で, チャノホソガの性フェロモンは, Ando et al.<sup>4)</sup>により分離・同定され, 発生予察に利用されている<sup>59,76)</sup>が, 上述の様に交信攪乱法や雄除去法への応用研究は進んでいない. また, 本種の産卵時刻が解明されれば黄色ナトリウム灯を用いた物理的防除<sup>118)</sup>において点灯時間を短縮でき, 低コスト化や効率化に寄与できる可能性がある.

そこで本章では, 近年開発されたチャノホソガの潜葉期幼虫の飼育法<sup>85)</sup>を利用し, 本種の各発育ステージの所要日数を調査した(第 1 節). 次に, 本種の性フェロモンを利用した交信攪乱法や光源を利用した物理的防除法の開発につながる基礎的知見を得るために, 本種雌雄の羽化後の経過日数が交尾率に及ぼす影響を調査した(第 2 節). また, 交尾頻度の違いが, 寿命や交尾率・産卵数に及ぼす影響について調査した(第 3 節). さらに, 雌の産卵時刻についても調査した(第 4 節). なお, 本章の主要な結果は, 上室ら<sup>35)</sup>において発表している.

### 第 1 節 チャノホソガの発育

#### 1. 材料および方法

##### (1) 供試虫の累代飼育

チャノホソガの累代飼育は上室<sup>32)</sup>および上室ら<sup>33)</sup>に従い, 具体的には以下のように行った. 飼育個体群の採集については, 本種は葉縁巻葉期まで葉内で生育していることからこの時期までの採集はその後の飼育を困難にす

る. そのため, 三角巻葉を形成した時期に採集を行った. すなわち, 各年の 4 ~ 6 月に, 鹿児島県農業開発総合センター茶業部(鹿児島県南九州市知覧町永里)内のチャ園から本種の三角巻葉を採集し, その中から回収した幼虫にチャ(品種: やぶきた)の新芽(2 ~ 3 葉期)を与えて飼育し, 雌雄合わせて約 60 ~ 150 頭の成虫を得た. 飼育に用いた新芽や以下に記載する採卵用のチャの新葉(新芽の上位 1 ~ 2 葉目の完全展開葉)は, 試験期間中に継続して得られるよう, 複数の時期にせん枝して, 新芽の生育ステージを段階的に制御した茶園から採取した.

採卵用に採取した新葉はチャノホソガの卵や幼虫による潜葉痕がない健全なものを選び, 坂巻ら<sup>85)</sup>の方法によって以下のように調整した. すなわち, 新葉を葉柄基部で切除し, 中肋を残して基部側半分の左右の葉身を切除した(図 2-1 右). 次に新葉の残った中肋部分を脱脂綿で巻き, 5 %のショ糖液を入れた試験管(口径 1.2 cm, 高さ 6 cm)に 1 本ずつ挿した(以下, 「採卵用試験管」)(図 2-2). この採卵用試験管 10 本をプラスチック製台座(直径 12.9 cm, 高さ 5.9 cm で, 試験管とほぼ同じ大きさの穴が 10 個開いている)にセットし(以下, 「採卵用台座」), これを採卵ケージに入れた(図 2-3). 採卵ケージは直径 20 cm, 高さ 25 cm の透明なアクリル製の円筒容器で上部はゴース張りになっている. 採卵ケージには, 下記の交尾機会を与えた雌雄 2 ペアを同居させた. 雌雄は, 羽化当日から飼育箱(20×27 cm, 高さ 36 cm で 2 面はゴース張り)で, 5 %のショ糖液を餌として 3 ~ 4 日間飼育した個体(雌雄合計 60 ~ 80 頭)から任意に選んだ. 産卵された採卵用試験管は翌日に回収し, 実験に用いる卵が葉当たり卵数 1 ~ 2 卵になるよう, 余剰となる卵は針で潰して卵数を調整した. 採卵ケージは毎世代 8 ~ 15 個セットし, 数日間にわたり毎日採卵した. なお, 採卵期間中に成虫が死亡した場合はその都度成虫を補充した.

採卵用試験管を室内に静置しておくと, 幼虫が孵化し, 順次潜葉を開始する. 幼虫は産卵後 8 ~ 9 日で葉縁に達し, 縁から内側に巻葉し始める(葉縁巻葉期)ので, この時期に葉を試験管開口部で切除した. 切除した葉は, 湿らせたろ紙(直径 9 cm)を敷いたプラスチックシャーレ(直径 9.5 cm×高さ 2.2 cm)に移した. このシャーレには, 葉縁巻葉から脱出した老齢幼虫に三角巻葉を形成させるための健全な新芽と, 営繕場所としてのパラフィン紙(約 5×7 cm)を投入し, 成虫が羽化するまでこの中で飼育した. なお, 毎世代, 雌雄合計で約 150 ~ 200 頭の成虫を維持した. これらの系統維持は, 23.9±0.7 °C, 14L:10D の実験室内で行った.

(2)発育日数調査

本試験は 2015 年に採集した系統を用いて飼育第 3 世代目に行った。この試験では、個体飼育できるように産卵後の卵を針で潰して葉当たり 1 卵になるように調整し、累代飼育と同じ条件で飼育を行った。産卵を確認した採卵用試験管は、毎日ほぼ定時刻(10 ~ 11 時)に供試個体の発育を調査した。羽化した成虫は腹端の形状で雌雄を判別し、雌雄それぞれの発育日数を記録した。最終的には雄 15 頭、雌 14 頭のデータが得られた。

(3)統計解析

発育日数の雌雄間差は Welch の *t* 検定で検出した。検定は、統計ソフト JMP ver. 12.2.0<sup>86)</sup>(SAS Institute, 2015)を用いて行った。

2. 結果

24 °Cにおけるチャノホソガ雌雄の発育日数を表 2-1 に示した。卵期間は 3 日、潜葉期は 4.8 ~ 5.1 日、葉縁巻葉期は 2.4 ~ 2.6 日、三角巻葉期は 5.1 ~ 5.3 日、蛹期間は 11.1 ~ 12.4 日、卵から羽化までの発育日数は 26.6 ~ 28.1 日であった。発育日数について雌雄間で比較すると、卵、潜葉期、葉縁巻葉期および三角巻葉期については差を認めず(Welch の *t* 検定, *p*>0.05)、蛹期間のみ雄の方が短く(Welch の *t* 検定, *p*<0.05)、卵~羽化までの発育日数も雄の方が 1.5 日短かった。



図 2 - 1 チャノホソガ幼虫飼育用の葉 (右側)



図 2 - 2 産卵用試験管



図 2 - 3 産卵用容器

表 2 - 1 チャノホソガの発育日数 (平均±SE) (24°C, 14L:10D)

雌雄	n <sup>注1)</sup>	卵期間 <sup>注2)</sup>	幼虫期間			蛹期間 <sup>注2)</sup>	卵から羽化 までの期間 <sup>注2)</sup>
			潜葉期 期間 <sup>注2)</sup>	葉縁巻葉期 期間 <sup>注2)</sup>	三角巻葉期 期間 <sup>注2)</sup>		
雄	15	3.0 ± 0.0	4.8 ± 0.2	2.6 ± 0.2	5.1 ± 0.3	11.1 ± 0.3	26.6 ± 0.3
雌	14	3.0 ± 0.0	5.1 ± 0.1	2.4 ± 0.2	5.3 ± 0.2	12.4 ± 0.3	28.1 ± 0.5
雌雄計	29	3.0 ± 0.0	5.0 ± 0.1	2.5 ± 0.2	5.2 ± 0.2	11.7 ± 0.3	27.3 ± 0.3

注1) 供試数

注2) \*は有意差あり (Welch's *t*-test, *p*<0.05, N.S.:有意差なし)

## 第2節 羽化後の経過日数に伴う交尾率の推移

### 1. 材料および方法

#### (1) 同じ日齢同士の雌雄組み合わせにおける交尾率の推移

本節および次節「交尾頻度が成虫の寿命や産卵数に及ぼす影響」の試験に供試したチャノホソガは、本章第1節の「(1)供試虫の累代飼育」に示した方法で飼育した2016年に採集した個体群の累代2～5世代目の未交尾成虫を用いた。湿らせたろ紙を敷いたプラスチックシャーレに、三角巻葉から脱出して蛹化した個体を1頭ずつ移し、毎日羽化状況を確認した。羽化当日を0日齢とし、腹端の形状で雌雄を判別した。雌雄別々に約10頭ずつプラスチック容器(直径12.9 cm, 高さ9.7 cm)に移し、餌として5%のショ糖液をしみ込ませた脱脂綿を与えて実験当日まで飼育した。

羽化0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 14, 16 および18日後に、同じ日齢の未交尾雌雄1ペアを交尾確認容器に同居させた。この容器は、採卵用台座にプラスチック容器(直径12.9 cm, 高さ9.7 cm, 容器底部は2 cm四方の穴空きでゴース張り)を逆さまにかぶせたものである。雌雄を同居させた翌日に雌の腹部を解剖し、精包の有無により交尾成立を判断した。各日齢に対して雌雄20ペアずつ供試した。

#### (2) 雄または雌成虫の日齢が交尾率に及ぼす影響

上記(1)と同様な手法で得た羽化2日齢の未交尾の雌または雄1頭と、羽化後0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 および16日経過した未交尾の雄または雌1頭を交尾確認容器に同居させた。翌日、雌の腹部を解剖し、精包の有無により交尾成立を判断した。各日齢に対して雌雄15ペアずつ供試した。

#### (3) 統計解析

羽化同一日齢同士の交尾率の日齢経過に伴う変化、異なる日齢間の交尾率の区間差は Steel-Dwass 法で検出した。検定は、統計ソフト JMP ver. 12.2.0<sup>80)</sup>を用いて行った。

### 2. 結果

同じ日齢の雌雄を組み合わせた場合、羽化当日同士の交尾率は2～10日齢同士に比べて有意に低かった(Steel-Dwass 法,  $p<0.05$ )(図 2-4A)。1～16日齢同士の組み合わせでは、2日齢にピークに達したが、16日齢まで交尾率に有意な低下は見られなかった。しかし、18日齢同士の組み合わせになると交尾率は10%と2～10日齢同士に比べて有意に低下した(Steel-Dwass 法,

$p<0.05$ )(図 2-4A)。

日齢経過に伴う雄成虫の交尾率の変化を、2日齢の雌成虫を相手に調べた結果、羽化当日(0日齢)の雄成虫の交尾率は6.7%であり、2～4日齢の交尾率と比べて有意に低かった(Steel-Dwass 法,  $p<0.05$ )(図 2-4B)。一方で、2日齢の雄成虫を相手に同様の試験を行った結果、雌の交尾率は羽化当日(0日齢)でも67%で、2日齢以降の雌の交尾率と差が認められなかった(Steel-Dwass 法,  $p>0.05$ )(図 2-4C)。また、雌雄ともに16日齢になると、交尾相手が2日齢であっても交尾率は20%に低下した(図 2-4B, 2-4C)。

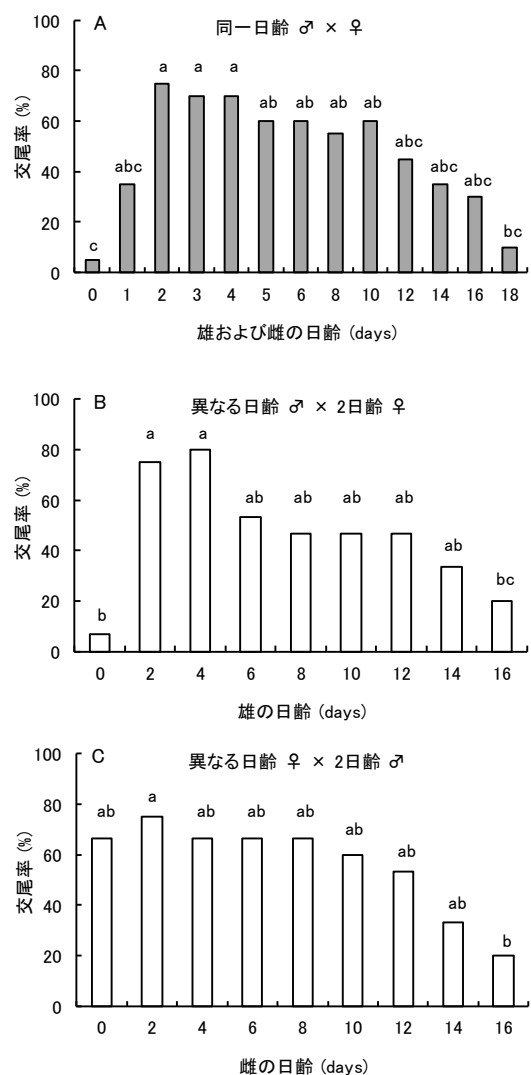


図 2-4 羽化後の経過日数に伴う交尾率の推移  
注 1) A: 同一日齢の雌雄の組み合わせ, B: 異なる日齢の雄と2日齢の雌組み合わせ, C: 異なる日齢の雌と2日齢の雄の組み合わせ。

注 2) 異なる小文字間には有意差あり (Steel-Dwass 法,  $p<0.05$ ) .

### 第 3 節 交尾頻度が成虫の寿命や産卵数に及ぼす影響

#### 1. 材料および方法

##### (1) 交尾頻度が雌成虫の寿命・産卵数に及ぼす影響

2 日齢の未交尾雌成虫に対して、雄を同居させる方法を 3 通り設定した。ペア飼育(雌雄 1 頭ずつ同居させて飼育すること)せずに未交尾雌 1 頭を死亡するまで飼育する区(以下、雌未交尾区)、未交尾雌 1 頭に 2 日齢の未交尾雄 1 頭を実験初日の 1 日間だけペア飼育する区(以下、1 日ペア飼育区)、未交尾雌 1 頭にその生涯にわたって 3 日おきに 2～4 日齢の未交尾雄 1 頭を更新する区(以下、継続ペア飼育区)を設けた。飼育は採卵用試験管を設置した交尾確認容器で行い、生存と産下卵数を毎日調査し、産下卵はその都度針で潰した。飼育中、採卵用試験管は随時、交換した。死亡した雌は腹部を解剖し、精包を計数した。1 日ペア飼育区と継続ペア飼育区については、精包が確認された雌成虫のみデータを集計した。雌の供試頭数は、雌未交尾区は 20 頭、1 日ペア飼育区は 17 頭、継続ペア飼育区は 18 頭とした。

##### (2) 交尾頻度が雄成虫の寿命に及ぼす影響

2 日齢の未交尾雄成虫に対して、雌を同居させる方法を 3 通り設定した。ペア飼育せずに未交尾雄 1 頭を死亡するまで飼育する区(以下、雄未交尾区)、未交尾雄 1 頭に対して死亡するまでの間、2～4 日齢の未交尾雌を 1 頭(以下、雄雌 1:1 区)、あるいは 3 頭(以下、雄雌 1:3 区)ずつ、1 日おきに更新する区を設けた。飼育は交尾確認容器で行い、毎日生存を調査し、雌は更新した際に腹部を解剖し、精包数の確認により交尾成立を判断した。雄の供試頭数は、雄未交尾区は 23 頭、雄雌 1:1 区は 22 頭、雄雌 1:3 区は 18 頭とした。

##### (3) 統計解析

交尾頻度の影響に関する試験のうち日当たり産卵数と、1 頭の雄が交尾した雌の数の区間差は Welch の  $t$  検定で、寿命の区間差は ANOVA の後、Tukey-Kramer 法

で検定した。また、総産卵数の区間差の解析では、雌雄の組み合わせ方法(3 処理)を説明変数、総産卵数を応答変数とし、ゼロカウントデータが多いことを考慮して(下野, 2010)、負の二項分布を誤差構造とする一般化線形モデル(GLM)による解析を、3 処理のうち 2 処理の組み合わせ全て(3 組)に実施した。その後、得られた 3 つの対比較の  $p$  値を Holm 法により補正した。精包保有数別の雌個体数の区間差は Mann-Whitney の  $U$  検定で検出した。Welch の  $t$  検定、Tukey-Kramer 法および Mann-Whitney の  $U$  検定は、統計ソフト JMP ver. 12.2.0<sup>86)</sup> を用いて行った。GLM は統計ソフト R ver. 2.15.1<sup>88)</sup> R を用いて行った。

#### 2. 結果

表 2-2 にチャノホソガ雌成虫の交尾頻度が寿命や産卵数に及ぼす影響を示した。雌成虫の寿命は、交尾頻度が異なる処理間に有意差が認められた(ANOVA,  $df=2$ ,  $F=26.88$ ,  $p<0.05$ )。雌未交尾区の寿命は、1 日ペア飼育区や継続ペア飼育区に比べて有意に長かった(Tukey-Kramer 法,  $p<0.05$ )。しかし、交尾頻度が異なる後者の 2 つの処理間の寿命に有意差はなかった(Tukey-Kramer 法,  $p>0.05$ )。総産卵数は、雌未交尾区が 0 個であったのに対して、雄と同居させると 150 個以上を産卵した。ただし、総産卵数は交尾頻度の多かった継続ペア飼育区の方が 1 日ペア飼育区より有意に多かった(GLM,  $z=45.19$ ,  $p<0.05$ )。しかし、1 日当たり産卵数は、1 日ペア飼育区と継続ペア飼育区の間には差は認められなかった(Welch の  $t$  検定,  $p>0.05$ )。雌成虫の精包の保有数は、1 日ペア飼育区では、全個体が 1 個であった。これに対して、継続ペア飼育区の雌はほとんどの個体が精包を 2 個保有しており、精包の保有数は処理間に有意差が認められた(Mann-Whitney の  $U$  検定,  $p<0.05$ )。

表 2-3 にチャノホソガ雄成虫の交尾頻度が寿命や交尾能力に及ぼす影響を示した。雄成虫の寿命は、交尾頻

表 2-2 雌の交尾頻度が生存や産卵数に及ぼす影響

雌の交尾組み合わせ	n <sup>注1)</sup>	生存日数 <sup>注1)</sup> (日, 平均±SE)	総産卵数 <sup>注2)</sup> (平均±SE)	日当たり 産卵数 <sup>注3)</sup> (平均±SE)	保有精包数 <sup>注4)</sup>		
					1	2	3
雌生涯未交尾区	20	33.2±2.0 a	0.0 a	—	—	—	—
1 日ペア飼育区 <sup>注5)</sup>	17	19.2±1.3 b	161.6±19.6 b	9.3±1.2	N.S.	17	0
継続ペア飼育区 <sup>注6)</sup>	18	20.8±0.8 b	195.5±15.6 c	9.6±0.8		2	16

注1) 供試数(2 日齢の雌成虫を供試)。

注2) 異なる小文字は有意差あり(生存日数: Tukey-Kramer test,  $p<0.05$ 、

総産卵数: GLM 後、Holm の補正,  $p<0.05$ )。

注3) N.S. は試験区間に有意差がないことを示す(Welch's  $t$ -test,  $p>0.05$ )。

注4) アスタリスク(\*) は試験区間に有意差あり(Mann-Whitney's  $U$  test,  $p<0.05$ )。

注5) 2 日齢の未交尾の雄を試験の初日のみペア飼育した。

注6) 2-4 日齢の未交尾の雄を雌が死亡するまで 3 日おきに取り替えた。



度の異なる処理間に有意差が認められた(ANOVA,  $df=2$ ,  $F=82.89$ ,  $p<0.05$ ). 雌成虫と同様に未交尾雄成虫も、既交尾雄成虫に比べて寿命が有意に長かった(Tukey-Kramer 法,  $p<0.05$ ). ただし、交尾をさせた2処理間では、同居した雌成虫数の違いに関わらず、寿命に有意差はなかった(Tukey-Kramer 法,  $p>0.05$ ). また、雄成虫が受精させた雌成虫の数は、1日おきに未交尾雌1頭を更新し続けた区より、3頭を更新し続けた区の方が有意に多かった(Welchの $t$ 検定,  $p<0.05$ ).

表2-3 雄の交尾頻度が生存や交尾能力に及ぼす影響

雄の交尾組み合わせ	$n$ <sup>注1)</sup>	生存日数 <sup>注2)</sup> (日, 平均±SE)	受精させた雌数 <sup>注3)</sup> (平均±SE) (Min-Max)
雄生誕未交尾区	23	33.8±2.1 a	—
雄雌1:1区 <sup>注4)</sup>	22	13.5±0.6 b	3.0±0.3 (0-5) *
雄雌1:3区 <sup>注4)</sup>	22	12.0±0.7 b	3.9±0.3 (1-7) *

注1) 供試数(2日齢の雄成虫を供試).

注2) 異なる小文字は有意差あり (Tukey-Kramer test,  $p<0.05$ ).

注3) アスタリスク(\*)は試験区間に有意差あり (Mann-Whitney's  $U$  test,  $p<0.05$ ).

注4) 2-4日齢の未交尾の雌を雄が死亡するまで1日おきに取り替えた.

## 第4節 産卵時刻

### 1. 材料および方法

#### (1) 時刻別産卵数の推移

本試験は本章第1節の「(1)供試虫の累代飼育」に示した方法で飼育した2014年系統を用いて飼育第4世代目に行った。羽化直後の雌雄合わせて50~60頭を飼育箱内で同居させ、3~4日齢のときに雌雄2ペアを任意に抽出した。これらの成虫は、採卵用試験管を10本挿した採卵用台座を設置した採卵ケージ内に放飼した。採卵ケージは18個準備し、これらの採卵ケージを2014年8月13日18時に自然採光の室内(温度の調整はなし)に静置した。採卵ケージはセット後、2時間間隔で20, 22, 24, 2, 4 および6時に任意に3個ずつ回収し、回収時点までにチャ葉に産下された卵数を計数した。同一の採卵ケージを経時的に調査しなかったのは、調査時の照明が、それ以降の産卵行動に悪影響を及ぼす可能性を考慮したためである。

#### (2) 統計解析

時刻別累積産卵数の区間差の区間差はSteel-Dwass法で検出した。検定は、統計ソフトJMP ver. 12.2.0<sup>86)</sup>を用いて行った。

## 2. 結果

図2-5にチャノホソガ雌成虫の時刻別累積産卵数の推移を示した。8時および20時に回収した葉から卵は確認されず、その後、産卵数は増加して24時以降はほ

ぼ一定になった。なお、24時以降の累積産卵数に有意な差は認められなかった(Steel-Dwass法,  $p>0.05$ )。

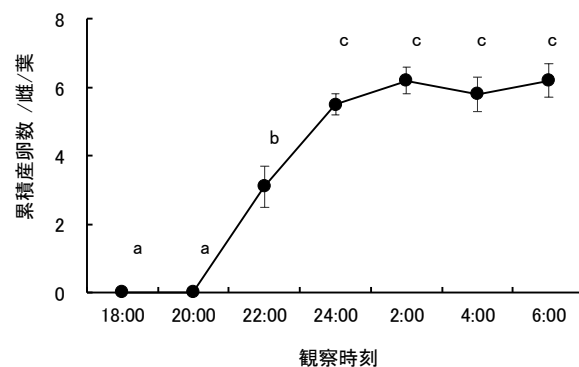


図2-5 8月の自然日長におけるチャノホソガ雌成虫の累積産卵数の推移

注) 異なる英文字は有意差あり (Steel-Dwass法,  $p<0.05$ ) .

## 第5節 考察

チャノホソガは24℃において産下から葉縁巻葉期まで約8日必要で、葉縁巻葉期は約2.5日であり、卵から羽化まで約27日であった(表2-1)。これは、25℃卵から成虫羽化までの発育所要日数を26.3日(雌雄の区別なし)とした古野<sup>16)</sup>の結果とほぼ同じ値であった。これらの結果から、第3章における各発育ステージの殺虫剤処理時期は、卵期を産卵1日後、潜葉前期を産卵4日後、潜葉後期を産卵6日後、葉縁巻葉期を産卵8日後に行うこととした。

チャノホソガは、同じ日齢の雌雄を組み合わせさせた場合、羽化当日(0日齢)はほとんど交尾しなかった(図2-4A)。しかし、雌雄別々に交尾能力を調べると、雄は0日齢ではほとんど交尾しないものの、雌は0日齢から交尾可能であることが明らかとなった(図2-4B, C)。従って、羽化当日同士の交配で交尾率が低い原因は雄にあると考えられた。羽化当日の雌雄同士がほとんど交尾しない原因として、チョウ目の他種では雌成虫のコーリングの少なさ(イモキバガ *Brachmia macroscopa* Meyrick(チョウ目: キバガ科)<sup>21)</sup>や、雌雄における配偶行動の時間帯のずれ(ナシカワホソガ *Spulerina astauota* (Meyrick)(チョウ目: ホソガ科)<sup>74)</sup>などが挙げられている。チャノホソガの雄が羽化当日に交尾をしない原因は、本研究では明らかにできなかったが、今後は羽化当日の性フェロモンへの反応活性などを調査する必要がある。

チャノホソガの雄は、雌より約1.5日早く羽化することが明らかとなった(表2-1)。本種のように雌よりも雄

で羽化時期が早い雄性先熟は数多くの昆虫で知られており、近親交配の回避や交尾機会の確保など、交尾をめぐる雌雄の繁殖戦略のひとつとされている<sup>31),81),112)</sup>。チャノホソガの雄も雄性先熟の繁殖戦略をとることにより、羽化当日に交尾しないという不利益を埋めているのかもしれない。一方で、チャノホソガの雌は、未交尾の場合、交尾済みの個体よりも約 13 日長く、約 33 日間生存した(表 2-2)が、16 日齢以降は交尾能力が大きく低下した(図 2-4)。これらのことから、本種を対象として合成性フェロモンによる交信攪乱を行う場合、16 日齢頃まで交尾の阻害を継続できれば、防除効果が期待できると考えられる。実際、チョウ目の他種でも交尾遅延による増殖率低下が防除効果につながった例が報告されている(例えば、若村<sup>109)</sup>; Fraser and Trimble<sup>11)</sup>)。ただし、チャハマキやシロイチモジヨトウ *Spodoptera exigua* (Hübner)(チョウ目: ヤガ科)では交尾遅延により増殖率を低下させるためには 90 % 以上の高い交尾阻害率が必要とされている<sup>42),109)</sup>。また、チャ園のハマキムシ類に対して合成性フェロモンによる交信攪乱を試みた事例では、フェロモン成分の大気中濃度が低くなると交信攪乱効果が低くなることも報告されている<sup>78)</sup>。このため、チャノホソガの交信攪乱を行う場合も、合成性フェロモンによる交尾阻害程度やその持続性について検討する必要がある。

チャノホソガの未交尾雌は、複数回の交尾により産卵数が増加した(表 2-2)。チョウ目害虫では複数回の交尾により産卵数が増加する事例がほとんどなく、多くの種は 1 回の交尾で生涯の受精卵をまかなえる量の精子を受け取るとされている<sup>39),69),77)</sup>。そのため、このような本種雌の性質はチョウ目害虫では珍しい事例と考えられる。一方で、チョウ目害虫の雄が複数回、交尾することは多くの種で報告されている(例えば、Fujiie<sup>12)</sup>; 山田<sup>114)</sup>; 野口<sup>69)</sup>; 加納ら<sup>39)</sup>など)。チャノホソガの未交尾雄も、複数の雌と交尾し、同居相手の雌成虫を増やすと交尾頻度も高まったが、その寿命は同居相手が 1 頭の場合と同程度であった(表 2-3)。性フェロモンを用いて雄を大量誘殺する場合、雄が複数回交尾する種では、誘殺されなかった雄が複数の雌と交尾することを防ぐため、雄成虫を確実に誘殺する必要がある<sup>101)</sup>。そのため、チャノホソガにおいても、合成性フェロモンを用いた雄の大量誘殺は防除効果が期待できないと考えられる。

チャノホソガの雌は夜間に産卵する<sup>60)</sup>ことが報告されているが、これまで産卵時刻は不明であった。本研究において、夜間に 2 時間間隔で調査したところ、本種は 20 時から 24 時の間に集中的に産卵し、24 時から 6 時にはほぼ産卵しないことが明らかになった(図 2-5)。本研究

では 24 時以降も、葉には産卵可能なスペースが十分残されていたことから、産卵場所の減少が産卵行動を制限していたとは考えにくい。実際に、筆者が本研究とは別に行った観察では、1 葉に 10 数個以上産卵することもあった。以上のことから、本種は夜間のうち 20 時から 24 時に産卵する生態的特徴を有していると考えられる。ただし、夜間に行動するチョウ目害虫ではその時の天候や照度によって行動様式が変化すること<sup>38)</sup>から、季節に伴う日の入り時刻の変動などが、産卵開始時刻を若干変動させる可能性も考えられる。

チャノホソガの物理的防除として、黄色ナトリウム灯を夜間連続点灯させる方法が試みられ、雄成虫の飛来阻害と三角巻葉数の減少を確認している<sup>112)</sup>。一般に、ヤガ類に対する黄色光の防除機構は、照明により複眼が明反応を起こし活動抑制が生じることによるとされている<sup>49)</sup>。また、ナシヒメシンクイ *Grapholita molesta* (Busck)(チョウ目: ハマキガ科)では光照射下において産卵数の減少が報告されている<sup>73)</sup>。さらに、イチゴのハスモンヨトウ *Spodoptera litura* (Fabricius) (チョウ目: ヤガ科)の防除に黄色灯を用いた事例では、終夜点灯から点灯時間を午後 5 ~ 9 時に短縮しても産卵抑制効果が認められている<sup>61)</sup>。本研究においてチャノホソガの産卵時刻が明らかになったことから、本種においても黄色ナトリウム灯の点灯時間を短縮できる可能性があり、今後はほ場での実証試験も必要となろう。

本研究で得られた、チャノホソガ成虫の交尾行動や雄性先熟、雌雄の多数回交尾および産卵時刻の解明は、チャノホソガの合成性フェロモンを用いた交信攪乱法および光源を用いた物理的防除法の開発に繋がる有用な知見になると考えられる。今後は、本種雌のコーリング行動などの配偶行動や交尾場所、およびその時間帯に関する詳細な調査も必要であろう。

### 第 3 章 チャノホソガの各発育ステージにおける各種殺虫剤の効果

チャノホソガに対する薬剤防除は、三角巻葉の形成を防ぐため、「チャの萌芽期から開葉期に実施する」のが効果的とされる<sup>56)</sup>。しかし、この防除時期の設定はチャの新芽の生育に合わせたものであり、本種の発育ステージ毎の殺虫剤の効果は考慮されていない。本種はふ化直後に卵底から直接葉の組織に潜り込み、しばらく葉組織内部を食害し、老齢期になると葉表に出て新しい葉を三角に巻葉し、その内部で葉表を食害する<sup>60)</sup>。このため、浸透移行性か接触型かなど、使用する殺虫剤の性質により、

各発育ステージに対する防除効果が異なることが予想される。また、薬剤感受性検定を行うに当たっては、供試殺虫剤が最も効果を発揮する発育ステージを対象に実施する必要がある。

小杉<sup>50,51)</sup>は、本種の卵や幼虫が寄生した新芽を枝ごと茶園から採取してこれに薬剤処理を施し、異なる発育ステージに対する殺虫剤の効果の違いを報告した。しかし、これまで室内で本種幼虫の発育を管理し、発育ステージ別に様々な殺虫剤の効果の評価した報告はない。そこで、第2章で明らかになった各発育ステージの所要日数を基に、各発育ステージにおける各種殺虫剤の効果を判定し、それらの結果から各種殺虫剤の効果的な使用時期について検討した(第1節)。さらに、各種殺虫剤に加用する展着剤等の効果についても検討した(第2節)。なお、本章の主要な結果は、上室<sup>33)</sup>において発表している。

## 第1節 各発育ステージにおける各種殺虫剤の効果

### 1. 材料および方法

#### (1) 供試虫および供試薬剤

試験に供試したチャノホソガは、第2章第1節の「(1) 供試虫の累代飼育」に示した方法で飼育した2012年および2013年に採集した個体群の累代1~4世代目とした。採卵ケージは各実験の都度8~14個セットし、産卵された採卵用試験管(以下、試験管)は翌日に回収し、ふ化後の幼虫同士の競合を防ぐため、実験に用いる卵が葉当たり卵数1~2卵になるよう、余剰となる卵は針で潰して卵数を調整した。各殺虫剤の検定には、各採卵ケージからランダムに2~3本ずつ選んだ合計12~20本ずつの試験管を供試した。回収後の試験管はそのまま恒温室内に静置し、採卵ケージから回収した日を産卵0日目とした。

試験に供試した殺虫剤は、12系統28種類とした(表3-1)。供試殺虫剤の系統名はIRAC(Insecticide Resistance Action Committee)の作用機構分類<sup>29)</sup>に従った。ただし、殺虫剤の処理時期によっては一部試験しなかった殺虫剤があった。それぞれの殺虫剤は蒸留水で常用濃度に希釈し、対照区は蒸留水で処理した。なお、展着剤は加用しなかった。

#### (2) 薬剤処理時期および方法

第2章第1節の結果から、薬剤処理時期として、卵期:産卵1日後、潜葉前期:産卵4日後、潜葉後期:産卵6日後、葉縁巻葉期:産卵8日後を設定した。

卵期、および潜葉前期、潜葉後期の薬剤処理は、試験管を逆さまにして葉を薬液に5秒間浸漬し、葉に付着し

た余分な薬液をティッシュペーパーに吸収させた後、試験管立てに静置して風乾させることにより行った。

葉縁巻葉期の薬剤処理は、葉縁巻葉を直接薬液に浸漬する(以下、巻葉直接処理)か、薬剤処理していない葉縁巻葉を薬液に浸漬した新芽と並置する(以下、巻葉間接処理)ことにより行った。

巻葉直接処理では、薬液に5秒間浸漬処理後、風乾した葉縁巻葉を試験管開口部(脱脂綿部分)で切り離し、湿らせたろ紙(直径9cm, 以下同様)を敷いたプラスチックシャーレ(直径9cm, 以下同様)内に、薬剤無処理の新芽と並置した。

巻葉間接処理では、葉縁巻葉を薬剤処理せずに試験管開口部で切除した。その葉縁巻葉を、湿らせたろ紙を敷いたプラスチックシャーレ内に、薬液に10秒間浸漬し風乾した健全な新芽とともに並置した。なお、巻葉直接・間接処理とも、プラスチックシャーレ内にパラフィン紙(約5×7cm, 以下同様)を入れ営巣場所とした。なお、各区の供試虫数は17~40個体とした。

#### (3) 調査方法

本種は葉縁巻葉期まで潜葉するため、処理後の発育ステージの進展を観察することにより殺虫剤の効果の間接的に評価した。すなわち、第2章第1節の結果から次ステージに達することが想定される期間を定め、調査時にそのステージに達していない個体を死亡とした。なお、発育遅延等で生存虫を死虫にしたことはなかった。

具体的な生死判別は以下のように行った。卵期(産卵1日後)処理;産卵4日後のふ化の有無,産卵8日後の葉縁巻葉の有無,潜葉前期(産卵4日後)および潜葉後期(産卵6日後)処理;産卵8日後の葉縁巻葉の有無,産卵13日後の三角巻葉の有無,葉縁巻葉期(産卵8日後)処理;産卵13日後の三角巻葉の有無,産卵約20日後の蛹化の有無。なお、三角巻葉や蛹化を調査する場合は、調査後の葉縁巻葉を試験管開口部で切り離し、三角巻葉を形成させるための健全な新芽とともに湿らせたろ紙を敷いたプラスチックシャーレ内に入れて飼育を継続した。また、シャーレ内には営巣場所としてパラフィン紙を入れた。

巻葉間接処理では、三角巻葉を形成するものの蛹化が阻害された殺虫剤について上記の三角巻葉、蛹化の調査とは別に、虫糞量を調査した。虫糞量を調査するために三角巻葉を分解するとその後の調査に悪影響を与えるため、本調査は、薬剤処理後、三角巻葉が形成される産卵14日後(処理6日後)を目処に一度ずつ行った。本調査は、三角巻葉を分解し、堆積されている虫糞量を以下のグレ

表 3-1 供試薬剤

殺虫剤の分類	IRAC Code <sup>注1)</sup>	農薬名 (成分名)	希釈倍率	試験年
ベンゾイル尿素系 IGR	15	カスケード <sup>®</sup> 乳剤(フルフェノクスロン)	×4000	2012
		マツチ <sup>®</sup> 乳剤(ルフェスロン)	×2000	2013
		ノーモルト <sup>®</sup> 乳剤(テフルベンズロン)	×2000	2012
ジアシルヒドランジン系 IGR	18	ファルコン <sup>®</sup> フロアブル(メトキシフェンジド)	×4000	2012
ピレスロイド・ピレトリン	3A	トレボン <sup>®</sup> 乳剤(エトフェンブロックス)	×2000	2013
		ロディー <sup>®</sup> 乳剤(フェンプロバトリン)	×1000	2013
		除虫菊乳剤3(ピレトリン)	×1000	2013
有機リン	1B	スプラサイド <sup>®</sup> 乳剤(DMTP)(メチダチオン)	×1000	2013
		エンセダ <sup>®</sup> 乳剤(プロフェノホス)	×1000	2013
アベルメクテン	6	アグリメック <sup>®</sup> (アバメクテン)	×1000	2013
		アフーム <sup>®</sup> 乳剤(エマメクテン安息香酸塩)	×2000	2013
ネオニコチノイド	4A	ダントツ <sup>®</sup> 水溶液(クロチアニジン)	×2000	2013
		スタークル <sup>®</sup> 顆粒水溶液(ジノテフラン)	×2000	2012
		アドマイヤー <sup>®</sup> 顆粒水和剤(イミダクロプリド)	×5000	2013
		バリアード <sup>®</sup> 顆粒水和剤(チアクロプリド)	×2000	2013
		アクトラ <sup>®</sup> 顆粒水溶液(チアメトキサム) <sup>注3)</sup>	×2000	2013
ネライストキシン	14	バダ <sup>®</sup> SG水溶液(カルタップ塩酸塩)	×1500	2013
スピノシン	5	ディアナ <sup>®</sup> SC(スピネトラム)	×5000	2013
		スピノエース <sup>®</sup> フロアブル(スピノサド)	×4000	2013
ジアミド	28	サムコ <sup>®</sup> フロアブル10(クロラントラニリプロール)	×4000	2012
		エクシレル <sup>®</sup> SE(シアントラニリプロール)	×2000	2012
		フェニックス <sup>®</sup> フロアブル(フルベンジアミド)	×4000	2012
ピロール	13	コテツ <sup>®</sup> フロアブル(クロルフェナピル) <sup>注3)</sup>	×2000	2012
METI <sup>注2)</sup>	21A	ハチハチ <sup>®</sup> 乳剤(トルフェンピラト)	×1000	2012
BT	11A	デルフィン <sup>®</sup> 顆粒水和剤 <sup>注4)</sup>	×1000	2013
		エスマルク <sup>®</sup> DF <sup>注4)</sup>	×1000	2012
		サブリーナ <sup>®</sup> フロアブル <sup>注4)</sup>	×1000	2013
		ゼンターリ <sup>®</sup> 顆粒水和剤 <sup>注4)</sup>	×1000	2013

注1) IRAC (2016)による分類。

注2) ミトコンドリア電子伝達系複合体 I 阻害剤。

注3) これらの殺虫剤は2019年7月現在、チャノホソガに対し農業登録を有していない。

注4) *B. thuringiensis* の芽胞と結晶性毒素を含有。

一ドにわけ、下記の式により虫糞指数を算出した。

- 1: 巻葉内に虫糞がわずかに認められる。
- 2: 巻葉内のスペースの 1/4 未満に虫糞が認められる。
- 3: 巻葉内のスペースの 1/4 以上～ 1/2 未満に虫糞が認められる。
- 4: 巻葉内のスペースの 1/2 以上～ 3/4 未満に虫糞が認められる。
- 5: 巻葉内のスペースの 3/4 以上に虫糞が認められる。

$$\text{虫糞指数} = 100 \times (\sum(\text{上記のグレード数} \times \text{各グレードに該当する巻葉数}) / (5 \times \text{調査巻葉数}))$$

#### (4) 統計解析

各調査時のふ化数、葉縁巻葉数、三角巻葉数、蛹化数のデータは、各処理区と対照区を対にして Fisher の正確確率検定で比較した。その際、得られた有意確率が、有意水準 5% を試験殺虫剤数で割った値より小さい場合に有意差ありと判定した (Bonferroni 法)。また、葉縁巻葉期の巻葉間接処理における虫糞量調査の虫糞指数は、対照区との多重比較検定 (Steel 法) を行った。検定は、統計ソフト JMP ver. 12.2.0<sup>86)</sup> を用いて行った。ふ化率、葉縁巻葉形成率、三角巻葉形成率、蛹化率は、各供試数を分母にし、それぞれの結果から求め、Abbott<sup>1)</sup> の補正式により、それぞれ補正殺卵率 (以下、殺卵率)、補正巻葉形成阻害率 (以下、巻葉形成阻害率)、補正蛹化阻害率 (以下、

蛹化阻害率) を求めた。さらに、虫糞指数についても同補正式から虫糞抑制率を求めた。

## 2. 結果

### (1) 卵期処理

ピレスロイド・ピレトリン系、ネオニコチノイド系、およびネライストキシン系の全供試殺虫剤、さらにスピノシン系、ジアミド系、および BT 剤の一部の殺虫剤は、90% 以上の高い殺卵率を示した (図 3-1)。特に、ピレスロイド・ピレトリン系とネオニコチノイド系は 100% の殺卵率を示す殺虫剤が多かった。さらに、BT 剤の中ではサブリーナ<sup>®</sup>フロアブルのみが特異的に 100% の高い殺卵率を示した。IGR 系、アベルメクテン系、ピロール系の全供試殺虫剤、さらにスピノシン系とジアミド系の供試殺虫剤の一部およびサブリーナ<sup>®</sup>フロアブルを除く BT 剤は殺卵率が低かったが、これらのうち IGR 系で効果の低かったメトキシフェンジド (64%) を除いた供試殺虫剤は、葉縁巻葉形成までには比較的高い葉縁巻葉形成阻害率 (79 ~ 100%) を示した。

一方、有機リン系と METI の全供試殺虫剤およびサブリーナ<sup>®</sup>フロアブルを除く BT 剤は、卵およびその後の葉縁巻葉形成までの幼虫に対し全く効果を示さなかった。

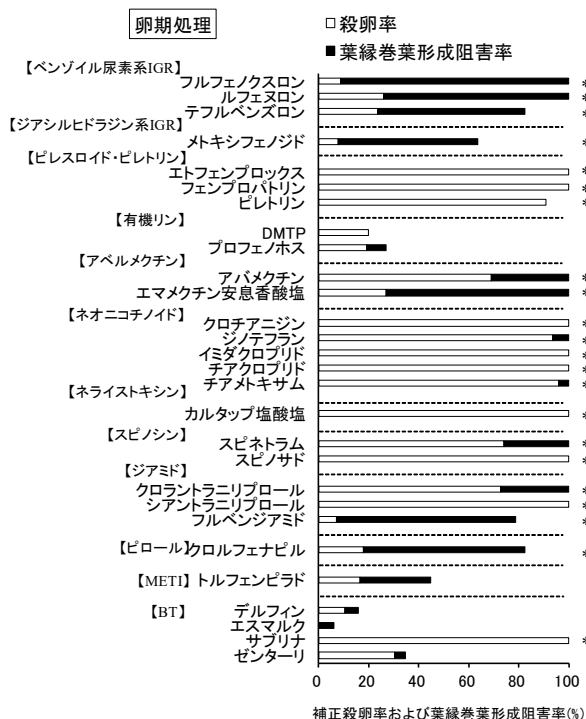


図 3 - 1 チャノホソガの卵期に対する各種殺虫剤の効果

注) \*は対照と比較して有意差あり (Fisher の正確確率検定の後, Bonferroni の補正,  $p < 0.05$ ).

(2) 潜葉前期処理

ピレスロイド・ピレトリン系とアベルメクチン系の殺虫剤は葉縁巻葉の形成を完全に阻害した(図 3-2). スピノシン系とジアミド系は, 一部の殺虫剤だけが葉縁巻葉期までに高い葉縁巻葉形成阻害率を示したが, 三角巻葉を形成するまでの殺虫率で評価すると, 全殺虫剤が 96 %以上の高い三角巻葉形成阻害率を示した. その他, ネライストキシン系, ピロール系の全供試殺虫剤と, IGR 系, ネオニコチノイド系, および BT 剤の一部の殺虫剤は, 葉縁巻葉は形成されるものの, 三角巻葉を形成する前までに殺虫効果を示した(三角巻葉形成阻害率が 70 %以上).

一方, 有機リン系と METI の全供試殺虫剤は, ほとんど効果を示さなかった.

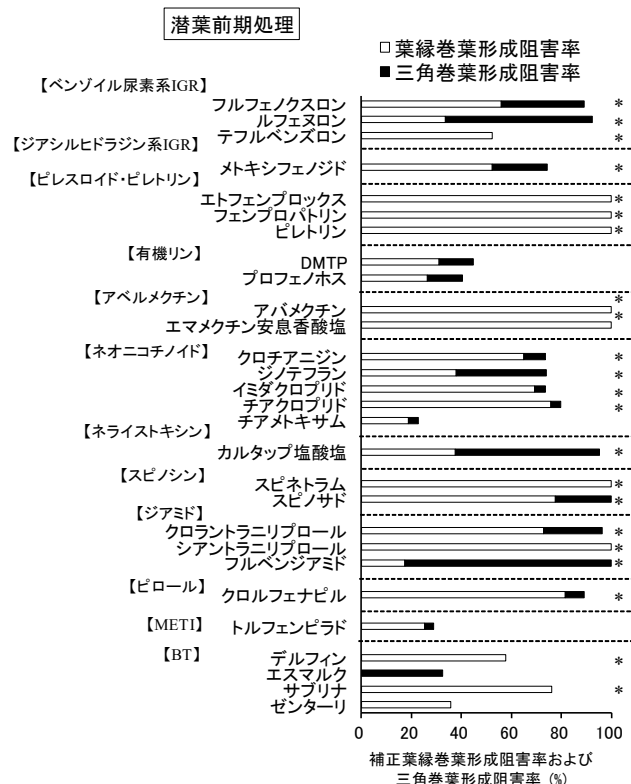


図 3 - 2 チャノホソガの潜葉前期に対する各種殺虫剤の効果

注) \*は対照と比較して有意差あり (Fisher の正確確率検定の後, Bonferroni の補正,  $p < 0.05$ ).

(3) 潜葉後期処理

ピレスロイド・ピレトリン系, アベルメクチン系, およびジアミド系の一部の殺虫剤が 90 %以上の高い葉縁巻葉形成阻害率を示し, 三角巻葉の形成阻害までで評価すると, ジアミド系の一部を除いて阻害率 100 %を示した(図 3-3). その他, ネライストキシン系, スピノシン系の全供試殺虫剤と BT 剤の一部の殺虫剤は, 葉縁巻葉は形成されるものの, 90 %以上の高い三角巻葉形成阻害率を示した.

一方, IGR 系, 有機リン系, ネオニコチノイド系, METI 剤, およびピロール系の全供試殺虫剤と BT 剤の 3 殺虫剤は, ほとんど効果を示さなかった.

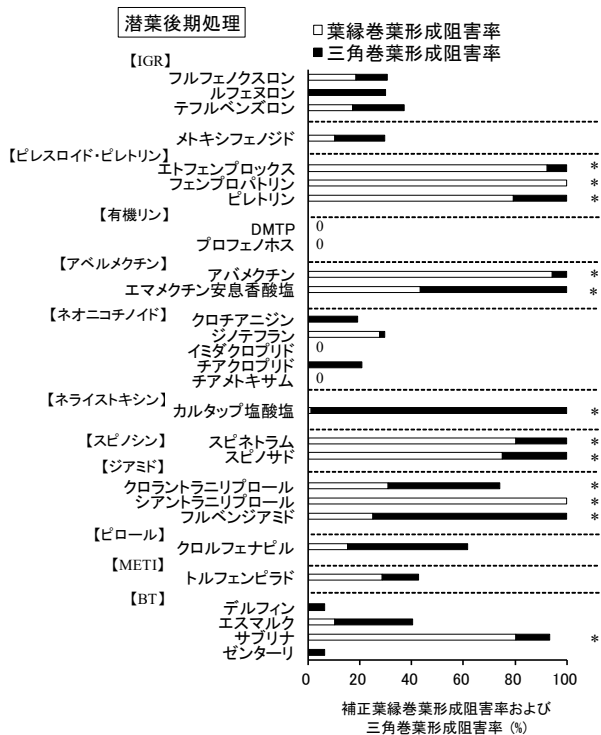


図 3-3 チャノホソガの潜葉後期に対する各種殺虫剤の効果

注) \*は対照と比較して有意差あり (Fisher の正確確率検定の後, Bonferroni の補正,  $p < 0.05$ ).

(4) 葉縁巻葉期処理(巻葉直接処理)

ピレスロイド・ピレトリン系, アベルメクチン系, ネライストキシシン系, およびスピノシン系の全供試殺虫剤とジアミド系の一部の殺虫剤が 90 %以上の高い三角巻葉形成阻害率を示した(図 3-4). また, 三角巻葉は形成されるものの, 80 %以上の蛹化阻害率を示した殺虫剤として, IGR 系のルフェヌロンがあった.

一方, 有機リン系, ネオニコチノイド系, ピロール系, および METI 剤の全供試殺虫剤と, IGR 系の 3 殺虫剤, BT 剤の 2 殺虫剤は, ほとんど効果を示さなかった.

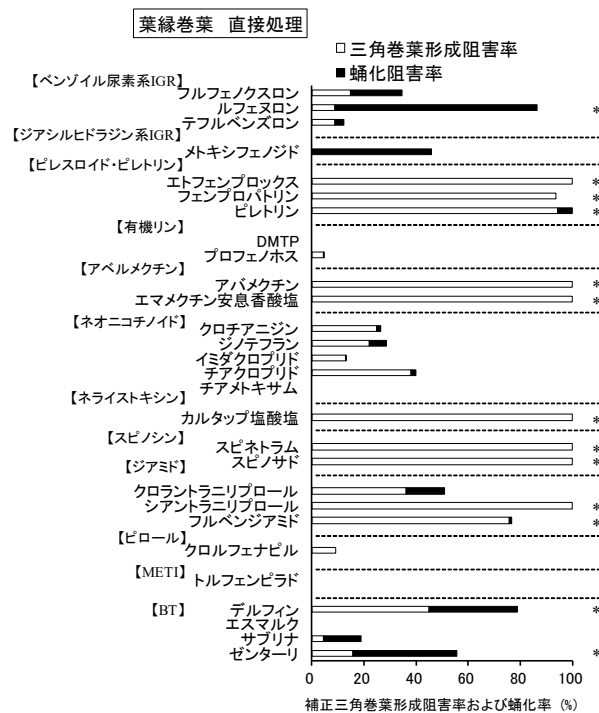


図 3-4 チャノホソガの葉縁巻葉に対する各種殺虫剤の効果 (巻葉直接処理)

注) \*は対照と比較して有意差あり (Fisher の正確確率検定の後, Bonferroni の補正,  $p < 0.05$ ).

(5) 葉縁巻葉期処理(巻葉間接処理)

ネライストキシシン系, スピノシン系, およびジアミド系の全供試殺虫剤とピレスロイド・ピレトリン系, アベルメクチン系の一部の殺虫剤が 90 %以上の高い三角巻葉形成阻害率を示した(図 3-5). また, IGR 系, ピロール系, および BT 剤の全供試殺虫剤と, ピレスロイド・ピレトリン系, アベルメクチン系, およびネオニコチノイド系の一部の殺虫剤は三角巻葉が形成されるものの, いずれも 90 %以上の高い蛹化阻害率を示した. このうち, ピロール系, BT 剤の全供試殺虫剤と, アベルメクチン系の 1 殺虫剤, IGR 系の 3 殺虫剤, ネオニコチノイド系の 1 殺虫剤は, 70 %以上の虫糞抑制率を示した(図 3-6).

一方, 有機リン系, METI 剤, およびネオニコチノイド系の 5 殺虫剤のうち 4 殺虫剤は, 多くの幼虫が蛹化し, 効果が認められなかった.

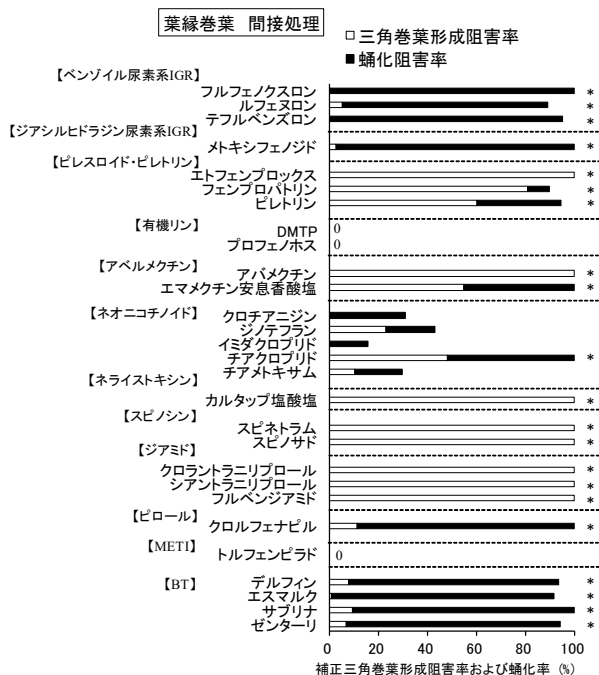


図 3-5 チャノホソガの葉緑巻葉期に対する各種殺虫剤の効果 (巻葉間接処理)

注) \*は対照と比較して有意差あり (Fisher の正確確率検定の後, Bonferroni の補正,  $p < 0.05$ ).

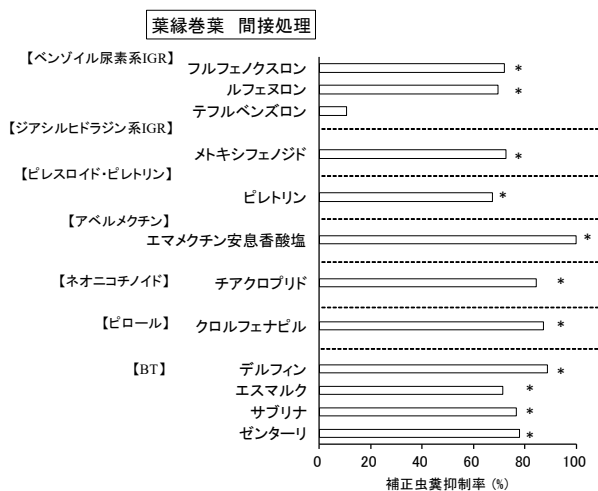


図 3-6 チャノホソガの葉緑巻葉期に対する各種殺虫剤の虫糞抑制効果 (巻葉間接処理)

注) \*は対照と比較して有意差あり (Fisher の正確確率検定の後, Bonferroni の補正,  $p < 0.05$ ).

## 第 2 節 展着剤等の加用効果

### 1. 材料および方法

#### (1) 供試虫, 薬剤処理時期および方法

試験に供試したチャノホソガは, 第 2 章第 1 節の「(1) 供試虫の累代飼育」に示した方法で飼育した 2014 年に採集した個体群の累代 1 ~ 4 世代目とした. 処理の発育ステージは, 本章第 1 節の「(2) 薬剤処理時期および方法」と同様の卵期: 産卵 1 日後, 潜葉前期: 産卵 4 日後, 潜葉後期: 産卵 6 日後, 葉緑巻葉期: 産卵 8 日後を設定した. 各処理時期における処理方法も上記の第 1 節の「(2) 薬剤処理時期および方法」に示した方法で行った. すなわち, 卵期, および潜葉前期, 潜葉後期の薬剤処理は, 試験管を逆さまにして葉を薬液に 5 秒間浸漬した. 葉緑巻葉期の薬剤処理は, 葉緑巻葉を直接薬液に浸漬する(以下, 巻葉直接処理)か, 薬剤処理していない葉緑巻葉を薬液に浸漬した新芽と並置する(以下, 巻葉間接処理)ことにより行った.

#### (2) 供試薬剤

殺虫剤は, エスマルク<sup>®</sup>DF(BT)(10%), フルフェノクスロン(10%), メトキシフェノジド(10%)(以上, IGR)を供試した. これらの殺虫剤は本章第 1 節において効果を発揮する本種の発育ステージが限定されている(IGR は卵期および潜葉前期, BT は葉緑巻葉期)ことが明らかになった殺虫剤である. 展着剤等は展着作用のある植物油成分由来の殺虫剤である脂肪酸グリセリド, およびポリオキシエチレンヘキシタン脂肪酸エステルなどの展着剤を含む表 3-2 に示す 7 剤とした.

#### (3) 調査方法

本章第 1 節の「(3) 調査方法」に準じ, 発育ステージ毎の処理に応じて調査を行った.

#### (4) 統計解析

本章第 1 節の「(4) 統計解析」に準じ, 発育ステージ毎に各処理区と対照区を比較した.

#### (5) 脂肪酸グリセリドの感受性

脂肪酸グリセリドに対するチャノホソガ卵の半数致死濃度(LC<sub>50</sub>)を求めるため, 本剤を蒸留水で 2 倍ずつ段階希釈し, 対照(蒸留水のみ)を含み 9 段階の濃度の薬液を調整した. 産卵 1 日後の産卵された試験管(以下, 試験

表3-2 供試展着剤および殺虫剤

農薬名 (成分名)	分類	希釈倍率
サンクリスタル <sup>®</sup> 乳剤(脂肪酸グリセリド)	Spiracle blocking (insecticide)	×1582
アブローチ <sup>®</sup> BI(ポリオキシエチレンヘキシタン脂肪酸エステル)	Adjuvant	×1000
スカッシュ <sup>®</sup> (ソルビタン脂肪酸エステル, ポリオキシエチレン樹脂酸エステル)	Adjuvant	×1000
ワイドコート <sup>®</sup> (ジオクチルスルホコハク酸ナトリウム, ポリオキシエチレンアルキルエーテル)	Spreader	×3000
まくびか <sup>®</sup> (ポリオキシエチレンメチルポリシロキサン)	Spreader	×3000
ベタリン <sup>®</sup> A(ポリオキシエチレンアルキルフェニルエーテル)	Spreader	×1000
アビオン <sup>®</sup> E(パラフィン)	Sticker	×500

管) を逆さまにし、葉を薬液に 5 秒間浸漬して殺虫剤を処理し、葉に付着した余分な薬液をティッシュペーパーに吸収させた後、試験管立てに静置して風乾させた。対照には蒸留水を使用した。各濃度の供試虫数は 23 ~ 25 個体とした。調査は本章第 1 節に従い、産卵 8 日後の葉縁巻葉の有無を調査した。LC<sub>50</sub> 値は幼虫の死亡率を基に Bliss<sup>9)</sup> の Probit 法により求め、回帰直線の適合度の判定には  $\chi^2$  検定を用いた。これらの算出には日本環境毒性学会が公表している

Ecotox-Statics(<http://www.intio.or.jp/jset/ecotox.htm>)を用いた。

2. 結果

(1) 卵期処理

展着剤等の単用では、脂肪酸グリセリドのみ殺卵効果が認められた(図 3-7)。エスマルク<sup>®</sup>DF、フルフェノクスロンは、展着剤等との混用効果が認められなかったが、メトキシフェノジドは単用より、ポリオキシエチレンヘキサン脂肪酸エステル(アプローチ<sup>®</sup>BI)を加用すると葉縁巻葉の形成阻害効果が高まった。

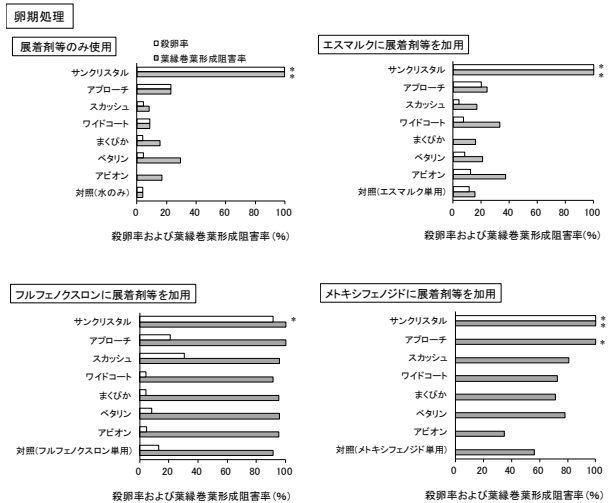


図 3-7 チャノホソガの卵期に対する展着剤等を加用した殺虫剤の効果

注) \*は各対照と比較して有意差あり (Fisher の正確確率検定の後, Bonferroni の補正,  $p < 0.05$ ).

(2) 潜葉前期処理

展着剤等の単用では、脂肪酸グリセリドのみ葉縁巻葉の形成阻害効果が認められた(図 3-8)。展着剤等との混用効果が認められなかったが、メトキシフェノジドは単用より、ポリオキシエチレンヘキサン脂肪酸エステル(アプローチ<sup>®</sup>BI)を加用すると卵期処理と同様に葉縁巻葉の形成阻害効果が高まった。

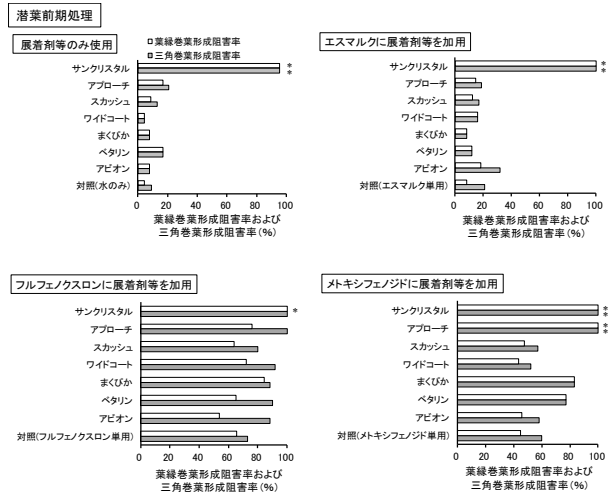


図 3-8 チャノホソガの潜葉前期に対する展着剤等を加用した殺虫剤の効果

注) \*は各対照と比較して有意差あり (Fisher の正確確率検定の後, Bonferroni の補正,  $p < 0.05$ ).

(3) 潜葉後期処理

展着剤等の単用では、脂肪酸グリセリドのみ葉縁巻葉の形成阻害効果が認められた(図 3-9)。メトキシフェノジドは、展着剤等との混用効果が認められなかったが、エスマルク<sup>®</sup>DF、フルフェノクスロンは単用より、ポリオキシエチレンアルキルフェニルエーテル(ベタリン<sup>®</sup>A)またはポリオキシエチレンメチルポリシロサキン(まくびか<sup>®</sup>)をそれぞれ加用すると葉縁巻葉の形成阻害効果が高まった。

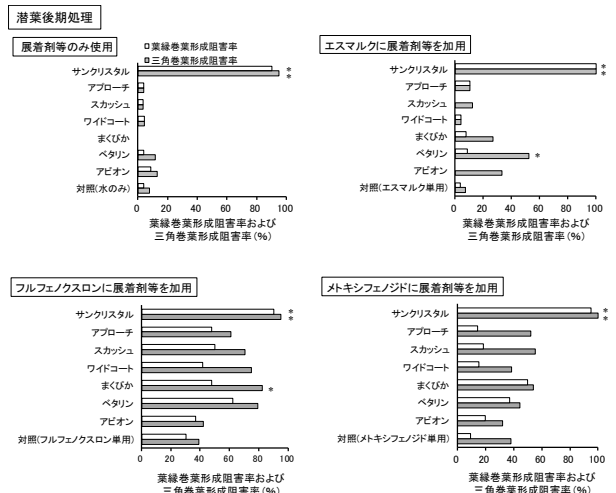


図 3-9 チャノホソガの潜葉後期に対する展着剤等を加用した殺虫剤の効果

注) \*は各対照と比較して有意差あり (Fisher の正確確率検定の後, Bonferroni の補正,  $p < 0.05$ ).



(4) 葉縁巻葉期処理(巻葉直接処理)

展着剤等の単用では、三角巻葉の形成阻害効果は認められなかった(図 3-10)。エスマルク®DF、フルフェノクスロンは、展着剤等との混用効果が認められなかったが、メトキシフェノジドは単用より、脂肪酸グリセリドを添加すると三角巻葉の形成阻害効果が高まった。

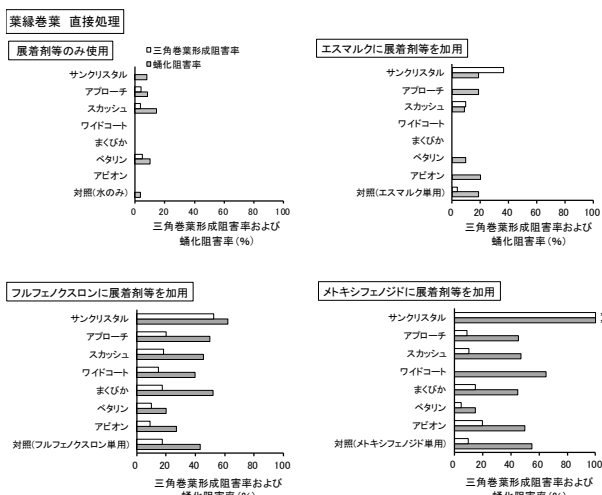


図 3 - 10 チャノホソガの葉縁巻葉期に対する展着剤等を加用した殺虫剤の効果 (直接処理)  
注) \*は各対照と比較して有意差あり (Fisher の正確確率検定の後, Bonferroni の補正,  $p < 0.05$ ).

(5) 葉縁巻葉期処理(巻葉間接処理)

展着剤等の単用および殺虫剤との混用で三角巻葉の形成阻害効果は認められなかった(図 3-11)。

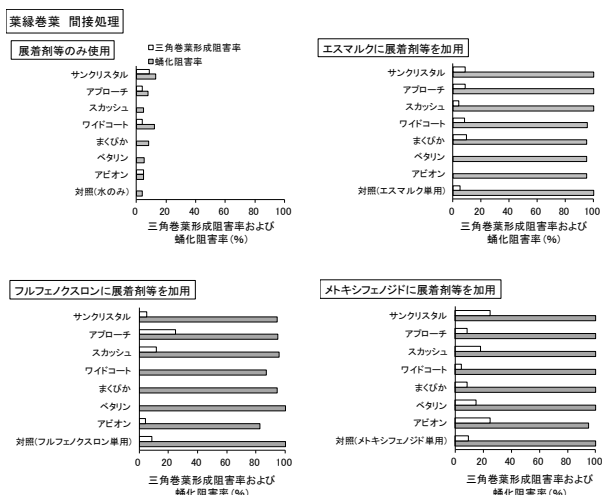


図 3 - 11 チャノホソガの葉縁巻葉期に対する展着剤等を加用した殺虫剤の効果 (間接処理)  
注) \*は各対照と比較して有意差あり (Fisher の正確確率検定の後, Bonferroni の補正,  $p < 0.05$ ).

(6) 脂肪酸グリセリドの感受性

脂肪酸グリセリドのチャノホソガの卵期に対する効果

は濃度依存的で、LC<sub>50</sub> 値は 56.61ppm であった(表 3-3)。

表 3 - 3 チャノホソガ卵に対する脂肪酸グリセリドの半数致死濃度

殺虫剤	n <sup>注1)</sup>	LC <sub>50</sub> (ppm)	95% confidence limit of LC <sub>50</sub> (ppm)	Slope	$\chi^2$ value <sup>注2)</sup>
脂肪酸グリセリド	214	56.61	41.45-79.85	2.16	2.09

注1) 供試数(対照を含む)。

注2) プロビット死亡率直線はデータと適合していることを示す ( $p < 0.05$ )。

第 3 節 考察

本種に対する IGR 系の殺虫剤について小杉<sup>51)</sup>は、フルフェノクスロン、テフルベンズロンが、茶園から採集した卵および潜葉期幼虫に対して効果があり、葉縁巻葉期の幼虫に対しても、三角巻葉は形成されるものの、三角巻葉内で幼虫を死亡に至らすことを報告している。本試験においては、IGR 系の殺虫剤は卵期および潜葉前期の処理で、潜葉期幼虫に対する殺虫効果を示したが、それ以降の処理では葉組織内の幼虫にはほとんど効果がなかった。ただし葉縁巻葉期の間接処理では、蛹化の阻害効果が高く、フルフェノクスロン、ルフェヌロン、メトキシフェノジドでは虫糞の排出も比較的抑えられた。このことは IGR 系の一部の殺虫剤は、生育後半の葉縁巻葉脱出後の幼虫にも殺虫効果を示し、使用方法によって防除効果をあげられることを示している。今回、葉縁巻葉期の薬剤処理を直接処理と間接処理に分けたことで、IGR 系の殺虫剤が巻葉内の幼虫に直接作用したのではなく、葉縁から脱出後の幼虫に主に作用することが明らかになった。なお、本調査では間接処理における虫糞量調査を産卵 14 日後に行ったが、この時期は正常に発育すれば蛹化直前にあたる。虫糞が少ない薬剤処理区では、巻葉内で幼虫はほとんどが衰弱するか死亡していたため、発育遅延などによりこの調査日以降に虫糞がさらに堆積される可能性は低いと考えられた。

ピレスロイド・ピレトリン系、アベルメクチン系、スピノシン系、ネライストキシシン系、およびジアミド系の殺虫剤は、他のチョウ目害虫に対しても幅広いステージで効果が認められている<sup>19),20),64),72),84),96),113)</sup>。本試験においても、本種に対して卵から葉縁巻葉期までの幅広い発育ステージで高い効果が確認され、これらの系統の殺虫剤は、散布適期が広いと考えられた。

ネオニコチノイド系の殺虫剤は、殺卵効果がいずれもほぼ 100%と高かったが、それ以降の生育ステージでは効果が低下し、特に潜葉後期以降ではほとんど効果が認められなかった。ただし、チアクロプリドは葉縁巻葉期の間接処理でも高い効果を示した。ネオニコチノイド系の殺虫剤は、コナジラミ類やアブラムシ類など吸汁性害

虫に対して効果が高い殺虫剤である<sup>45)</sup>が、Cranberry fruitworm *Acrobasis vaccinii* Riley(チョウ目：メイガ科)やモモシクイガ *Carposina sasakii* Matsumura (チョウ目：シクイガ科)などチョウ目害虫に対する殺卵効果も認められている<sup>26),113)</sup>。そのため、本系統の殺虫剤は、主に卵期を対象に散布することが適当と考えられる。

ピロール系のクロルフェナピルは、潜葉前期までの処理で 80 %前後の殺幼虫効果を示したが、その後はネオニコチノイド系と同様に効果が低下した。しかし、葉縁巻葉期の間接処理では高い殺虫効果と虫糞抑制効果を示した。本剤は、他のチョウ目害虫に対しても効果が認められており<sup>3),20)</sup>、本種に対しては、主に生育前半の発育ステージか葉縁巻葉期を対象とした利用で防除効果が期待される。ただし本剤は、2019 年 1 月現在、本種に対する農薬登録はない。

BT 剤の全供試殺虫剤は葉縁巻葉期の間接処理で三角巻葉を形成されるものの、蛹化を阻害し、虫糞排出の抑制効果も確認された。BT 剤は、有効成分を虫が摂食することで効果を発揮する殺虫剤であり<sup>22),111)</sup>、ふ化直後から葉縁巻葉期まで葉組織内で生育する本種は、有効成分が葉内に浸透しない限りこれを摂食する機会がない。しかし、幼虫が葉縁巻葉を脱出後に三角巻葉を形成する際には、新葉と殺虫剤成分を同時に摂食する可能性があり、これにより三角巻葉形成後に巻葉内で衰弱・死亡し、本種の実害の原因となる虫糞の排出が抑制されたと考えられる。小杉<sup>50)</sup>は、茶園から採集した本種の葉縁巻葉期幼虫(日齢は不明)に対して、BT 剤(ダイポール<sup>®</sup>水和剤、デルフィン<sup>®</sup>顆粒水和剤)を処理し、処理 3～4 日後に全ての個体が死亡することを報告している。本試験の結果もこれと同様の傾向を示し、BT 剤の散布適期としては葉縁巻葉期が妥当であると考えられた。なお、佐藤・佐藤<sup>87)</sup>は、幼虫の半数程度が葉縁巻葉期に達した時期とその 5 日後の 2 回の BT 剤散布が本種に対して高い防除効果を発揮することを報告している。一般的にチャノホソガに対する防除殺虫剤の評価は、萌芽期～開葉期に散布し、その後に三角巻葉数で行うことが通例であった<sup>56)</sup>が、本試験結果は、殺虫剤によってはその評価方法として三角巻葉数以外の方法を再検討する必要性も示唆した。

なお、今回供試した BT 剤のうち、サブリーナ<sup>®</sup>フロアブルのみが、殺卵効果と潜葉前期および後期処理で潜葉期幼虫に対する殺虫効果を示した。今回供試した BT 剤は全て生菌であり、菌株の系統は、エスマルク<sup>®</sup>DF とデルフィン<sup>®</sup>顆粒水和剤がクルスターキ系統、サブリーナ<sup>®</sup>フロアブルとゼンターリ<sup>®</sup>顆粒水和剤がアイザワイ系統

であり、これらの結果は菌株の違いによるものではないと考えられる。ただ、サブリーナ<sup>®</sup>フロアブルのみがフロアブル剤であり、有効成分(BT)の他、植物由来の油脂成分である脂肪酸グリセリドが配合されている<sup>13)</sup>。第 3 節の試験により脂肪酸グリセリドは単用でも本種の卵、潜葉期幼虫に効果があり、低い LC<sub>50</sub> 値からその効果は高いことが明らかになった。そのため、サブリーナ<sup>®</sup>フロアブルの卵および潜葉期幼虫に対する効果は脂肪酸グリセリドに由来するものと考えられる。これまで、脂肪酸グリセリドの殺虫作用機構は、コナジラミ類などでは気門封鎖とみられていた<sup>98)</sup>が、チャノホソガの卵および潜葉期幼虫に示した殺虫作用機構は不明である。卵に対する効果は、成分が卵表面を被覆することによる呼吸阻害の可能性もあるが、潜葉期幼虫に対する効果は、成分が葉内に浸透し、幼虫に作用したものと推察される。脂肪酸グリセリドの他種チョウ目害虫に対する効果としては、コナガ *Plutella xylostella* (Linnaeus) (チョウ目：コナガ科)の卵に本剤またはサブリーナ<sup>®</sup>フロアブルを処理することで殺虫効果が認められている<sup>13)</sup>。今後、さらに他種チョウ目害虫の卵や幼虫に対する脂肪酸グリセリドの効果について検討が待たれる。なお、脂肪酸グリセリドは 2019 年 1 月現在、チャではカンザワハダニ、チャノナガサビダニに対する農薬登録を有しているが、チャノホソガに対しては農薬登録を有していない。

有機リン系の DMTP(メチダチオン)、プロフェノホス、METI のトルフェンピラドは、本種の全ての発育ステージで効果が低かった。本試験に供試した個体群を採集した茶園では、過去にこれらの殺虫剤をほとんど散布していないため、供試個体群の感受性低下の可能性は低いと考えられる。小泊・大場<sup>48)</sup>は本種に対して有機リン系の殺虫剤のうち、クロルフェンビンホス(CVP)の効果は高いものの、DDVP、PAP の効果は低く同じ有機リン系の殺虫剤でも本種に対する効果に違いがあることを報告している。

本試験により、各種殺虫剤が効果を発揮するチャノホソガの発育ステージが殺虫剤により異なることが明らかになった。この結果は前述したように殺虫剤の系統による性質の他、有効成分そのものの浸透性や浸達性、あるいは水に対する溶解度の違いなども関与していると考えられる。これらの知見は今後、本種の薬剤感受性の動向を把握するのに不可欠な知見であり、新規殺虫剤候補のスクリーニングなどにも応用できると考えられる。

現在本種に対しては、チャの新芽が生育する時期に年間 2～4 回の防除が行われている。薬剤抵抗性の獲得を回避するためには種々の系統の殺虫剤を体系的に使用する

ることが求められるが、本試験の結果はこの参考になると考えられる。また、降水などで生育前半の薬剤散布適期を逃した場合は、生育後半のステージにも効果があることが明らかになったジアミド系やスピノシン系などの殺虫剤を後日散布することで一定の防除効果が期待されることが明らかとなった。また、ピレトリンや BT 剤の効果的な使用時期が明らかになったことは、有機栽培や国内とは残留基準が異なり使用薬剤が制限される輸出用茶の栽培においても利用可能な知見と考えられる。

チャの新芽が生育する時期は、チャノホソガ以外にも新芽を加害する害虫であるチャノミドリヒメヨコバイやチャノキイロアザミウマの防除も必要となる<sup>59)</sup>。本試験でチャノホソガに対して効果が確認できた合成ピレスロイド系、ネオニコチノイド系、ジアミド系の一部は、チャノミドリヒメヨコバイ・チャノキイロアザミウマに対しても効果があり同時防除が期待できるが、両種は地域により薬剤感受性が異なる<sup>52),117)</sup>ため、殺虫剤の選択には留意する必要がある。

各種殺虫剤に加用する展着剤等の効果評価では、上述のとおり脂肪酸グリセリド以外の展着剤は単用では効果が認められなかった。但し、ごく一部の展着剤については殺虫剤との加用効果が認められた。チャの葉は濡れやすいことからウイルス製剤など一部の場合を除き、展着剤を加用しないことが多い。展着剤の機能として進展性や固着性を高めることで耐雨性等を付与し、殺虫剤の残効性を高めることも期待できるので茶園においても加用効果を検討する必要がある。

本章の試験では卵に対する効果確認のため、産卵後の卵を対象に殺虫剤処理を行った。しかし、実際の茶園における本種の防除においては、成虫が飛翔し、産卵する前に殺虫剤が散布されることも想定される。これらの場合においては、成虫への殺虫剤の直接的な効果や産卵忌避、殺虫剤が付着した後に葉に産下された卵の殺卵効果などについての検討も必要であることから、第 6 章では本種の成虫に対する殺虫剤の効果を検討する。また、チャの新芽は生育に伴い新葉が展開し伸長するので、各種殺虫剤の散布後に展開する葉への残効についても今後さらに検討する必要がある。

#### 第 4 章 チャノホソガの IGR 剤に対する抵抗性

チャノホソガに対する防除薬剤は、昆虫成長制御剤(以下、IGR 剤)、ネオニコチノイド系またはジアミド系の殺虫剤が使用されてきた。IGR 剤は脱皮阻害作用を示すベンゾイル尿素系 IGR 剤と脱皮促進作用を示すジアシ

ルヒドラジン系 IGR 剤に大別できるが、ベンゾイル尿素系 IGR 剤については、本種に対する防除効果の低下が鹿児島県の枕崎市、南九州市を一带とする薩摩半島南部地域(以下、南薩地域)において 2009 年頃から指摘され始め、殺虫剤抵抗性個体の出現が疑われた。そのため、本県内各地域における本種に対する各種殺虫剤の防除効果と薬剤感受性を検証する必要が生じた。

害虫の薬剤感受性検定では、殺虫剤毎にその殺虫剤が最も効果を発揮する発育ステージに処理する。そのため、発育ステージが揃った虫を大量に準備する必要がある。しかし、チャノホソガについてはそのような飼育技術がなかったため、本種を対象に登録されている農薬に対する感受性の実態については不明であった。そのような中、第 3 章で本種に対する IGR 剤、ネオニコチノイド系、ジアミド系など各種殺虫剤が効果を発揮する発育ステージが明らかになった<sup>33)</sup>。

そこで、まず鹿児島県各地域の現地茶園においてチャノホソガを対象に使用されている IGR 剤を含む農薬について防除効果を検討した(第 1 節)。次に、各地域から採集した個体群を供試し、数種殺虫剤に対する薬剤感受性を検定した(第 2 節)。そして、そのうち感受性の低下が認められた殺虫剤を含む数種の殺虫剤について LC<sub>50</sub>を求め、抵抗性の程度について評価した(第 2 節)。なお、本章の主要な結果は、上室ら<sup>34)</sup>において発表している。

### 第 1 節 各地域茶園における防除効果

#### 1. 材料および方法

試験は 2010 ~ 2012 年の 3 カ年に鹿児島県内各地域の茶園で行った。供試殺虫剤は、以下の計 5 剤、すなわち、ベンゾイル尿素系の IGR 剤であるフルフェノクスロン乳剤(商品名:カスケード<sup>®</sup>乳剤、有効成分 10%、常用希釈倍率 4,000 倍)およびテフルベンズロン乳剤(商品名:ノーモルト<sup>®</sup>乳剤、同 5%、同 4,000 倍)、ジアシルヒドラジン系の IGR 剤であるメトキシフェノジド水和剤(商品名:ファルコン<sup>®</sup>フロアブル、同 20%、同 4,000 倍)、ネオニコチノイド系のジノテフラン水溶剤(商品名:スタークル<sup>®</sup>顆粒水溶剤、同 20%、同 2,000 倍)、ジアミド系のクロラントラニプロロール水和剤(商品名:サムコル<sup>®</sup>フロアブル 10、同 10%、同 4,000 倍)とした。なお、供試殺虫剤の系統名は IRAC の作用機構分類(IRAC, 2016)に従った。また、全ての殺虫剤名の表記については、以下、成分名のみで略記する。2010 年はこのうちメトキシフェノジドおよびジノテフランについては試験を行わなかった。

2010 年の試験は、鹿児島県南九州市知覧、同市穎娃、霧島市牧園、志布志市有明の各茶園で実施し、8 月 23 日～9 月 6 日に各殺虫剤を散布した。2011 年の試験は、枕崎市板敷本町、同市別府西町、南九州市知覧の各茶園で実施し、8 月 31 日～9 月 1 日に各殺虫剤を散布した。2012 年の試験は、南九州市知覧、薩摩川内市入来の各茶園で実施し、8 月 24 日～9 月 6 日に各殺虫剤を散布した。

いずれの年の試験も試験時期は秋芽の生育期にあたり散布当日の芽の葉期は 0.5～3 葉期であった。試験区の面積は 1 区 5～6.3m<sup>2</sup>、3 反復の試験区を設け、無処理区もそれぞれ設けた。殺虫剤は水道水で常用濃度に希釈し、200L/10a 相当量を背負式動力噴霧機で散布した。

散布 14～16 日後に各区の三角巻葉数を計数し、3 反復の平均を用いて下記の式<sup>67)</sup>(日本植物防疫協会, 2012)により防除率を算出した。防除率 90%以上を防除効果は高い、75%以上～90%未満を防除効果はある、60%以上～75%未満を防除効果はあるもののその程度は低い、60%未満を防除効果は低い、と判定した。

防除率(%)=(1- 散布区の三角巻葉数/無散布区の三角巻葉数)×100

各区の三角巻葉数は、統計ソフト JMP ver. 12.2.0<sup>68)</sup>の Tukey-Kramer 法を用いて処理間差を検定した。

## 2. 結果

各地域における防除効果を表 4-1 に示した。試験年や地域によりチャノホソガの発生量は異なるため、主に防除率で評価を行った。2010 年の試験では南九州市の 1 地区(知覧)においてフルフェノクスロンおよびテフルベンズロンの試験区は、防除率が 60%未満と効果が低かった。これらの殺虫剤は、その他の地区(南九州市穎娃、霧島市、志布志市)では防除率が 71%以上と効果を示した。一方、クロラントラニプロールはいずれの茶園でも三角巻葉をほぼ抑え、防除率も 98%以上と高かった。

2011 年の試験は、南薩地域のみで試験を行った。枕崎市の別府西町のテフルベンズロンの区を除き、フルフェノクスロンおよびテフルベンズロンともに防除率が 60%を下回り防除効果が低かった。メトキシフェノジド、およびジノテフラン、クロラントラニプロールは南薩地域のいずれの地区でも防除効果が認められた。

2012 年の試験では、南九州市の知覧においてフルフェノクスロンおよびテフルベンズロンの試験区では防除率が 60%未満と防除効果が低かった。一方、薩摩川内市ではいずれの殺虫剤も防除効果が認められた。

## 第 2 節 薬剤感受性検定

### 1. 材料および方法

#### (1) 供試個体群と供試殺虫剤

供試個体群は 2013 年の 4～8 月まで、以下の鹿児島県内 10 市町村の 13 茶園から採集した(図 4-1)。具体的な採集時期と場所は、4 月は枕崎市の国見町およびまかや町、5 月は錦江町田代麓および鹿屋市東原、6 月は南九州市の穎娃および知覧(鹿児島県農業開発総合センター茶業部内茶園)、屋久島町の安房および楠川、7 月は霧島市溝辺、湧水町木場、さつま町求名、曾於市末吉、8 月は西之表市古田で、各 1 ほ場ずつから、三角巻葉を約 80～120 葉採集した。このうち、一部の個体群については後述の半数致死濃度(LC<sub>50</sub>)を求める試験にも供試した。三角巻葉から回収した幼虫にチャ(品種：やぶきた)の新芽(2～3 葉)を与えて飼育し、雌雄合わせて約 60～100 頭の成虫を得た。第 2 章第 1 節(上室ら<sup>33)</sup>)の方法にしたがって、恒温室内(23.9±0.7℃)で飼育し、得られた後代(F1～F3)を供試した。なお、毎世代、雌雄合計で約 50～100 頭の成虫を維持した。

各個体群の採卵ケージは各実験の都度 8～10 個セットし、数日間にわたり毎日採卵した。なお、採卵期間中に成虫が死亡した場合はその都度、補充した。各殺虫剤の検定には、各採卵ケージからランダムに 2～3 本ずつ選んだ合計 12～20 本ずつの試験管を供試した。

検定殺虫剤として、フルフェノクスロン、テフルベンズロン、ジノテフラン、クロラントラニプロールを供試した。それぞれの殺虫剤は蒸留水で希釈し、展着剤は加用しなかった。

#### (2) 検定方法

採卵ケージから回収した日を産卵 0 日目とした。本種はふ化直後に卵底から直接、葉内組織に潜入し、潜葉期、葉縁巻葉期、三角巻葉期の発育ステージを経て蛹化する。殺虫剤の処理時期は、それぞれの供試殺虫剤が効果を発揮する発育ステージ(第 3 章第 1 節；上室ら<sup>33)</sup>)として、フルフェノクスロン、テフルベンズロン、クロラントラニプロールは卵期(産卵 1 日後)および潜葉前期(産卵 4 日後)を、ジノテフランは卵期(産卵 1 日後)を設定した。

最初に、各殺虫剤の常用濃度における死亡率を調べた。その後、一部の個体群と殺虫剤については半数致死濃度(LC<sub>50</sub>)を求めるため複数濃度を処理して死亡率を調べた。この実験では各殺虫剤を蒸留水で 2 倍ずつ段階希釈し、対照(蒸留水のみ)を含み 6～14 段階の濃度の薬液を調整した。試験管を逆さまにし、葉を薬液に 5 秒間

表4-1 各地域茶園のチャノホソガに対する各種殺虫剤の効果

試験地域		試験年	散布日	ベンゾイル尿素系IGR				ジアシルヒドラジン系IGR	
				フルフェノクスロン(×4,000) <sup>注1)</sup>		テフルベンズロン(×4,000) <sup>注1)</sup>		メトキシフェノジド(×4,000) <sup>注1)</sup>	
市町名	地域名		三角巻葉数 /m <sup>2</sup> (±SE)	防除率 (%) <sup>注3)</sup>	三角巻葉数 /m <sup>2</sup> (±SE)	防除率 (%) <sup>注3)</sup>	三角巻葉数 /m <sup>2</sup> (±SE)	防除率 (%) <sup>注3)</sup>	
南九州市	知覧	2010	Aug. 23	144.5 ± 1.9 b	59.6	255.0 ± 48.8 ab	28.8		
	顕桂	2010	Aug. 23	11.8 ± 0.2 b	73.8	11.3 ± 1.5 b	74.9		
霧島市	牧園	2010	Sep. 6	2.1 ± 0.6 b	94.9	2.5 ± 0.2 b	94.1		NT <sup>注2)</sup>
志布志市	有明	2010	Aug. 24	0.0 ± 0.0 c	100	1.5 ± 0.2 b	71.0		
枕崎市	板敷本町	2011	Aug. 31	2.2 ± 0.6 ab	32.1	3.3 ± 0.9 a	0.0	0.9 ± 0.2 b	73.6
	別府西町	2011	Aug. 31	22.7 ± 1.5 b	47.2	15.2 ± 0.4 c	64.7	10.2 ± 0.6 cd	76.3
南九州市	知覧	2011	Sep. 1	34.9 ± 0.7 a	22.1	42.2 ± 1.9 a	5.9	12.0 ± 0.6 b	73.3
南九州市	知覧	2012	Aug. 24	11.3 ± 3.8 ab	10.7	5.6 ± 0.5 abc	56.1	1.0 ± 0.5 c	91.7
薩摩川内市	入来	2012	Sep. 6	1.9 ± 1.3 bc	89.9	3.3 ± 0.7 b	82.2	0.0 ± 0.0 c	100

表4-1 (表の続き)

試験地域		ネオニコチノイド		ジアミド		無処理
		ジノテフラン(×2,000) <sup>注1)</sup>		クロラントラニリプロロール(×4,000) <sup>注1)</sup>		
市町名	地域名	三角巻葉数 /m <sup>2</sup> (±SE)	防除率 (%) <sup>注3)</sup>	三角巻葉数 /m <sup>2</sup> (±SE)	防除率 (%) <sup>注3)</sup>	三角巻葉数 /m <sup>2</sup> (±SE)
南九州市	知覧			0.7 ± 0.7 c	99.8	358.0 ± 7.5 a
	顕桂			0.0 ± 0.0 b	100	45.2 ± 10.4 a
霧島市	牧園		NT <sup>注2)</sup>	0.0 ± 0.0 b	100	41.8 ± 8.1 a
志布志市	有明			0.1 ± 0.1 c	98.0	5.3 ± 0.2 a
枕崎市	板敷本町	0.6 ± 0.3 b	81.1	0.1 ± 0.1 b	98.1	3.3 ± 0.6 a
	別府西町	7.7 ± 2.6 d	82.2	0.2 ± 0.2 e	99.6	43.0 ± 2.2 a
南九州市	知覧	7.2 ± 2.1 bc	83.9	0.5 ± 0.3 c	98.9	44.9 ± 4.8 a
南九州市	知覧	3.9 ± 0.4 bc	69.4	0.1 ± 0.1 c	99.0	12.7 ± 0.7 a
薩摩川内市	入来	0.4 ± 0.1 bc	97.7	0.0 ± 0.0 c	100	18.4 ± 0.4 a

注1) 常用濃度

注2) NT: 試験なし.

注3) 防除率(%) = (1? (処理区における三角巻葉数 / 無処理区における三角巻葉数)) × 100.

注4) 同行内の異小文字間は有意差あり (Tukey-Kramer test, p < 0.05).

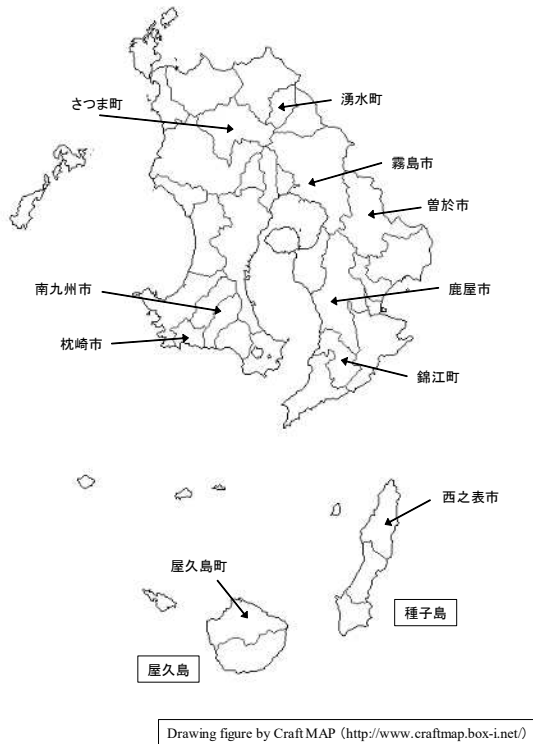


図4-1 感受性検定に供試したチャノホソガ個体群の採集地域

浸漬して殺虫剤を処理し、葉に付着した余分な薬液をティッシュペーパーに吸収させた後、試験管立てに静置して風乾させた。対照には蒸留水を使用した。各殺虫剤区・濃度の供試虫数は17～29個体とした。

### (3) 調査方法

調査は第3章第1節(上室ら<sup>33)</sup>)に従った。なお、飼育・調査は毎回一定温度(23.9±0.7℃)で行ったため、発育遅延などで生存虫を死虫と判断したことはなかった。具体的な生死判別は、卵期処理の場合は、産卵8日後の葉縁巻葉の有無、潜葉前期処理の場合は、産卵13日後の三角巻葉の有無を調査することで行った。なお、三角巻葉を調査する場合は、産卵8日後に葉縁巻葉を試験管開口部で切除し、三角巻葉を形成させるための健全な新芽とともに湿らせたろ紙を敷いたプラスチックシャーレ(直径9cm内)に入れて飼育を続けた。

### (4) 統計解析

卵および幼虫の死亡率は、それぞれ葉縁巻葉形成阻害率、および三角巻葉形成阻害率として求めた後、対照区(蒸留水処理)の死亡を考慮するため Abbott<sup>1)</sup>の補正を行った。また、各区の生存数を「1」、死亡数を「0」と変換した後、Steel-Dwass の検定により多重比較を行った。Steel-Dwass の検定は JMP ver. 12.2.0<sup>86)</sup>を用いた。

表 4-2 各薬剤の常用濃度に対するチャノホソガ各地域個体群の補正死亡率

個体群		ベンゾイル尿素系 IGR							
		フルフェノクスロン(×4,000) <sup>注1)</sup>				テフルベンズロン(×4,000) <sup>注1)</sup>			
		卵期処理		潜葉前期処理		卵期処理		潜葉前期処理	
市町名	地域名	n <sup>注3)</sup>	死亡率 (%) <sup>注4, 5)</sup>	n <sup>注3)</sup>	死亡率 (%) <sup>注4, 5)</sup>	n <sup>注3)</sup>	死亡率 (%) <sup>注4, 5)</sup>	n <sup>注3)</sup>	死亡率 (%) <sup>注4, 5)</sup>
枕崎市	国見町	22	50.9 ab	19	48.3 ab	27	80.0 c	23	81.0
	まかや町	26	11.7 a	23	9.5 a	25	17.9 a	21	68.7
南九州市	知覧	20	85.0 bc	18	100 b	20	75.0 abc	23	100
	穎娃	26	85.9 bc	18	87.8 b	29	49.2 ab	20	78.0
霧島市	溝辺	21	100 c	23	100 b	24	87.0 c	22	84.3
湧水町	木場	23	100 c	20	100 b	24	95.1 c	21	100
さつま町	求名	27	100 c	21	100 b	27	100 c	24	100 NS
曾於市	末吉	23	100 c	22	100 b	23	100 c	19	100
錦江町	田代麓	26	100 c	26	100 b	24	90.6 c	27	88.1
鹿屋市	東原	26	100 c	28	100 b	27	86.9 c	27	90.8
西之表市	古田	23	95.1 c	25	95.4 b	23	90.2 c	23	90.0
屋久島町	安房	28	100 c	21	100 b	28	95.8 c	21	100
	楠川	22	100 c	22	100 b	26	95.3 c	26	95.4

表 4-2 (表の続き)

個体群		ネオニコチノイド		ジアミド			
		ジノテフラン(×2,000) <sup>注1)</sup>		クロラントラニリプロール(×4,000) <sup>注1)</sup>			
		潜葉前期処理 <sup>注2)</sup>		卵期処理		潜葉前期処理	
市町名	地域名	n <sup>注3)</sup>	死亡率 (%) <sup>注4, 5)</sup>	n <sup>注3)</sup>	死亡率 (%) <sup>注4, 5)</sup>	n <sup>注3)</sup>	死亡率 (%) <sup>注4, 5)</sup>
枕崎市	国見町	23	100	28	100	26	100
	まかや町	23	100	26	100	23	100
南九州市	知覧	23	100	21	100	22	100
	穎娃	26	100	25	100	21	95.3
霧島市	溝辺	22	100	20	100	22	100
湧水町	木場	22	100	24	100	21	100
さつま町	求名	26	100 NS	25	100 NS	20	100 NS
曾於市	末吉	23	100	23	100	17	100
錦江町	田代麓	26	100	26	100	27	100
鹿屋市	東原	27	100	26	100	25	100
西之表市	古田	23	100	24	100	22	100
屋久島町	安房	27	100	26	100	18	100
	楠川	25	100	25	100	25	100

注1) 常用濃度

注2) ジノテフランは、潜葉前期以降のステージには効果が低いこと(上室ら, 2016)から卵期処理のみとした。

注3) 供試個体数。

注4) 死亡率は、葉緑巻葉形成阻害率(卵期処理)または三角巻葉形成阻害率(潜葉前期処理)を用いて算出した。死亡率はAbbott(1925)の式により補正した。

注5) 同列内の異なる小文字間は有意差あり(Steel-Dwass test,  $p < 0.05$ )。NS: 有意差なし。

LC<sub>50</sub> 値は幼虫の死亡率を基に Bliss<sup>9)</sup> の Probit 法により求め、回帰直線の適合度の判定には  $\chi^2$  検定を用いた。これらの算出には日本環境毒性学会が公表している Ecotox-Statics(<http://www.intio.or.jp/jset/ecotox.htm>)を用いた。

## 2. 結果

各殺虫剤の常用濃度に対する各地域の個体群の効果を表 4-2 に示した。フルフェノクスロンに対しては、南薩地域の枕崎市の 2 地区の個体群が卵期および潜葉前期処理のいずれの処理も死亡率が約 10 ~ 51 % と低かつ

た。しかし同地域南九州市の 2 地区および南薩地域以外の個体群ではいずれの発育ステージに処理しても 85 ~ 95 % 以上の高い死亡率を示した。テフルベンズロンに対しては、南薩地域の枕崎市および南九州市の各 1 地区の個体群が卵期処理で死亡率が約 18 ~ 49 % と低かった。潜葉前期処理ではいずれの地域の個体群も 69 % 以上の死亡率を示した。一方、ジノテフラン、クロラントラニリプロールは、全ての個体群が 95 % 以上の高い死亡率を示した。

各地域の個体群のフルフェノクスロン、ジノテフラン、クロラントラニリプロールに対する LC<sub>50</sub> 値を表 4-3 に

表4-3 チャノホソガ各地域個体群の薬剤感受性

殺虫剤の 作用分類	殺虫剤名	個体群		卵期処理					潜葉前期処理			
		市町名	地域名	n <sup>注2)</sup>	LC <sub>50</sub> (ppm)	95% confidence limit of LC <sub>50</sub> (ppm)	Slope	RR <sup>注3)</sup>	n <sup>注2)</sup>	LC <sub>50</sub> (ppm)	95% confidence limit of LC <sub>50</sub> (ppm)	Slope
IGR	フルフェノクスロン (×4,000 ; 25 ppm) <sup>注1)</sup>	枕崎市	国見町	218	21.48	11.74-33.79	1.09	238.67	115	24.01	12.53-45.73	1.14
			まかや町	134	57.01	38.52-78.77	—	—	2.08			
		南九州市	知覧	229	1.22	0.33-2.23	0.89	13.56	211	1.46	0.83-2.11	1.83
			錦江町	300	0.02	0.01-0.02	1.61	0.22	216	0.05	0.02-0.09	0.81
			鹿屋市	293	0.01	0.01-0.02	1.06	0.11	249	0.06	0.03-0.09	1.04
			屋久島町	310	0.06	0.03-0.09	0.89	0.67	237	0.12	0.04-0.22	0.77
	楠川	289	0.09	0.05-0.15	0.88	—	280	0.16	0.08-0.27	0.85		
ネオニコチノイド	ジノテフラン (×2,000 ; 100 ppm) <sup>注1)</sup>	枕崎市	国見町	159	13.85	9.68-21.69	2.06	3.13				
			まかや町	177	5.95	3.10-8.89	1.40	1.34				
		南九州市	知覧	130	14.26	11.24-18.00	3.53	3.22			— <sup>注5)</sup>	
			安房	183	6.92	4.60-9.68	1.85	1.56				
			楠川	170	4.43	2.32-6.29	1.93	—				
ジアミド	クロラントラ ニリプロール (×4,000 ; 25 ppm) <sup>注1)</sup>	枕崎市	国見町	323	0.05	0.03-0.08	1.30	1.00	342	0.22	0.14-0.34	1.04
			まかや町	209	0.12	0.08-0.18	—	—	1.71			
		南九州市	知覧	182	0.07	0.05-0.12	1.15	1.40	231	0.20	0.11-0.39	0.75
			錦江町	224	0.01	0.00-0.05	0.70	0.20			NT <sup>注4)</sup>	
			鹿屋市	209	0.01	0.01-0.02	1.97	0.20			NT <sup>注4)</sup>	
			屋久島町	291	0.03	0.02-0.05	1.15	0.60	146	0.13	0.08-0.19	1.71
	楠川	282	0.05	0.03-0.08	1.04	—	244	0.18	0.11-0.27	1.32		

注1) 常用濃度

注2) 供試個体数(対照(蒸留水)処理を含む)。

注3) 抵抗性比 = 各地域個体群のLC<sub>50</sub>値 / 楠川地域個体群(感受性個体群)のLC<sub>50</sub>値。

注4) NT: 試験なし。

注5) ジノテフランは、潜葉前期以降のステージには効果が低いこと(上室ら, 2016)から卵期処理のみとした。

示した。フルフェノクスロンに対する LC<sub>50</sub> 値は、枕崎市国見町個体群の卵期処理で 21.48 ppm、潜葉前期処理で 24.01 ppm、同市まかや町個体群の潜葉前期処理で 57.01 ppm であった。これらの値は感受性個体群(屋久島町楠川個体群)の LC<sub>50</sub> 値(卵期処理 : 0.09 ppm、潜葉前期処理 : 0.16 ppm)に比べて約 150 ~ 356 倍(抵抗性比)と高く、常用希釈濃度(25 ppm)と比べてもほぼ同値か高い値となった。また南九州市知覧町の LC<sub>50</sub> 値も 1.22 ~ 1.46 ppm で抵抗性比が約 9 ~ 14 倍であり、南薩地域以外の LC<sub>50</sub> 値(0.01 ~ 0.16 ppm)と比べると比較的高い値を示した。ジノテフランに対する LC<sub>50</sub> 値は、供試した全ての個体群で 4.43 ~ 14.26 ppm の範囲にあり、常用希釈濃度(100 ppm)と比べて約 1/7 ~ 1/23 程度の低い値を示した。クロラントラニリプロールに対する LC<sub>50</sub> 値は、供試した全ての個体群が卵期処理で 0.01 ~ 0.07 ppm、潜葉前期処理で 0.12 ~ 0.22 ppm と常用希釈濃度(25 ppm)と比べて 1/100 以下と非常に低い値を示した。

### 第3節 考察

本章により鹿児島県の南薩地域(枕崎市、南九州市)におけるチャノホソガ個体群は、フルフェノクスロンに対する抵抗性の発達が明らかになり、また、テフルベンズロンも感受性の低下が認められることからベンゾイル尿

素系 IGR 剤全体に対しても抵抗性を示すことが推察される。本県は地域ごとにほぼ同一の防除体系が実施されており、各地域内においてはチャノホソガに対する防除圧が一定であることや、感受性検定に供試した個体群を採集した茶園はそれぞれの地区でチャが集团的に栽培されている地区内にある茶園を選定した。これらのことから、今回の感受性検定結果はそれぞれの地区を代表する結果と考えられる。

フルフェノクスロンは、本県の茶園では 1994 年から使用され始め、当初はチャノミドリヒメヨコバイ、チャノキイロアザミウマ、チャノコカクモンハマキ、およびチャハマキなどのチャノホソガ以外の重要害虫に対しても卓効を示していた。そのため、南薩地域ではチャノホソガを含めこれら害虫を対象に、本剤を約 10 年以上に渡って毎年 2 ~ 3 回を使用していた事例があった。南薩地域以外ではこのような事例はなく、この高い淘汰圧が本地域のチャノホソガがフルフェノクスロンに対して抵抗性を発達させた要因のひとつと推測される。コナガがベンゾイル尿素系 IGR 剤の殺虫剤に対して抵抗性を獲得した事例でも本系統殺虫剤の連続使用がその要因として挙げられている<sup>2)</sup>。

なお、チャノホソガ以外のホソガ科の薬剤感受性については、*Phyllonorycter mespilella* (Hübner) (チョウ目 : ホソガ科)が有機リン系薬剤に対して<sup>108)</sup>、*Phyllonorycter*

*blancardella* (Fabricius) (チョウ目：ホソガ科)が有機リン、ピレスロイド、メソミルの各殺虫剤に対して抵抗性を獲得した報告がある<sup>82)</sup>。一方、ベンゾイル尿素系 IGR 剤については、ミカンコハモグリ *Phyllocnistis citrella* Stainton (チョウ目：ホソガ科)<sup>54)</sup>や *P. blancardella*<sup>55)</sup>では効果が確認されており、ベンゾイル尿素系 IGR 剤に対する抵抗性の報告は現在まで見当たらない。

他のチョウ目害虫の IGR 系殺虫剤に対する抵抗性事例としてはコナガの報告が国内外で多い<sup>15),25),100)</sup>。コナガのベンゾイル尿素系 IGR 剤に対する抵抗性の事例では、クロルフルアズロン(実用濃度：25 ppm)に対する LC<sub>50</sub> 値として 1.25 ~ 46.2 ppm(抵抗性比 25 ~ 924 倍)<sup>2)</sup>や、11.8 ~ 329 ppm<sup>95)</sup>の報告がある。一方、テフルベンズロン(実用濃度：25 ppm)に対する LC<sub>50</sub> 値としては 0.80 ppm(抵抗性比 12 倍)<sup>80)</sup>や、23.9 ~ 100 ppm<sup>95)</sup>の報告がある。また、チャノホソガ以外のチャ害虫であるチャハマキについてもベンゾイル尿素系 IGR 剤に対する抵抗性の事例が報告されている。例えば、クロルフルアズロンに対する LC<sub>50</sub> 値として 27.4 ~ 189 ppm(抵抗性比 48.1 ~ 332 倍)<sup>53)</sup>、フルフェノクスロン(実用濃度：25 ppm)に対する LC<sub>50</sub> 値として 107.0 ppm(抵抗性比 305.7 倍)<sup>79)</sup>が報告されている。本研究の南薩地域のチャノホソガもフルフェノクスロンに対してこれらの事例と同程度の抵抗性(枕崎市の個体群の抵抗性比 239 ~ 356 倍)を有していることが推測される。

なお、テフルベンズロンについては LC<sub>50</sub> 値を求めているものの、南薩地域の現地茶園における防除効果は 60 %未満と低く、やはり抵抗性を有している可能性が推測された。しかし、テフルベンズロンは南薩地域では多数回の散布を行っていた事例はない。したがって、テフルベンズロンの抵抗性獲得は、フルフェノクスロンの抵抗性獲得と交差している可能性が考えられる。実際、コナガ<sup>28)</sup>やコドリガ *Cydia pomonella* (L.) (チョウ目：ハマキガ科)<sup>88)</sup>ではベンゾイル尿素系の IGR 剤間での交差抵抗性が報告されている。

殺虫剤抵抗性発達のメカニズムは一般的に、①皮膚透過性の低下、②標的部位の感受性の低下、③解毒分解酵素活性の増大、に大別される<sup>6),89)</sup>。このうち、大きな問題となる抵抗性には主に解毒分解酵素の増大と標的部位の感受性の低下のいずれかあるいは両方が関与していると考えられている<sup>93)</sup>。チョウ目害虫のベンゾイル尿素系 IGR 剤に対する抵抗性メカニズムについては、解毒分解酵素活性の増大が関与しているという報告があり、その中でチトクローム P450 などが主な解毒分解酵素として挙げられている<sup>93)</sup>。本研究で明らかになったチャノホソ

ガのベンゾイル尿素系 IGR 剤に対する抵抗性も解毒分解酵素活性の増大が関与している可能性があるが詳細は今後の検討が必要である。

本研究では、南薩地域以外の霧島市、薩摩川内市、志布志市の茶園においてはフルフェノクスロンの防除効果は高かった。また、室内試験においても南薩地域以外の個体群は常用濃度で効果が高かった。さらに、南薩地域以外の個体群のフルフェノクスロンに対する LC<sub>50</sub> 値は卵で 0.01 ~ 0.09 ppm、潜葉前期の幼虫で 0.05 ~ 0.16 ppm であり、いずれも感受性個体群と同程度の低い値であった。さらにこれらの値は、本剤の効果が高いとされるエジプトのヤガの一種 *Spodoptera littoralis* (Boisduval)(チョウ目：ヤガ科)の LC<sub>50</sub> 値(0.05 ~ 0.09 ppm)<sup>9)</sup>と比べても同程度の低い値であり、鹿児島県内でも地域によってチャノホソガの本剤に対する感受性が大きく異なることが明らかになった。なお、ベンゾイル尿素系 IGR 以外のジアシルヒドラジン系 IGR 剤のメトキシフェノジド、ネオニコチノイド系のジノテフランおよびジアミド系のクロラントラニプロールは、どの地域の茶園でも防除効果が認められた。

薬剤抵抗性発達の抑制技術の基本は、作用特性の異なる殺虫剤のローテーション使用である<sup>18)</sup>。そのため、現在、本県ではチャノホソガに対して、地域に応じて系統の異なる殺虫剤を組み合わせた体系防除により抵抗性発達の遅延を図っている。具体的には、ベンゾイル尿素系 IGR に対する抵抗性が確認された南薩地区では二番茶でフルフェノクスロンに代えてメトキシフェノジドまたはクロラントラニプロール、三番茶でジノテフランの体系防除を勧めている。ベンゾイル尿素系 IGR の効果が認められている南薩以外の地域では二番茶でフルフェノクスロンまたはクロラントラニプロール、三番茶ではジノテフランの体系防除を勧めている。

チャではチャノホソガ以外にも重要なチョウ目害虫としてチャノコカクモンハマキ、チャハマキが発生し、これら 2 種害虫の防除時期は、必ずしもチャノホソガと一致しないもののチャノホソガと類似した殺虫剤が防除に使用されている。そのため、今後も引き続きこれら害虫の各種殺虫剤に対する感受性を注視する必要がある。また、さらなる薬剤抵抗性発達や有機栽培、海外輸出に対応していくためにも BT 剤など化学合成殺虫剤以外の防除法も積極的に取り入れた体系防除を各地域や用途に応じて構築する必要がある。BT 剤の茶園における効果については第 5 章で検討する。



## 第5章 チャノホソガに対するBT剤等の効果

BT剤(*Bacillus thuringiensis*, 以下BT剤)は、昆虫病原性細菌が産生する毒素を製剤化した薬剤であることから人畜および天敵に影響が小さいとされ<sup>41)</sup>、有機栽培でも使用できる薬剤である。本剤の作用過程は一般的に次のように進行すると考えられている<sup>23,111)</sup>。本剤の菌体あるいは結晶性タンパク質は植物の葉などの餌と共に昆虫の幼虫に接触されると、中腸に達し、その中のアルカリ性消化液により可溶化される。その過程で殺虫型活性分子が中腸上皮に結合し、細胞膜に小孔を形成する。その結果、細胞内外の浸透圧バランスが崩れ、細胞が壊死し、個体の死に至る。チャノホソガでは卵期、潜葉期に幼虫が葉の表面を摂食する機会がないため、経口で効果を発揮する大部分のBT剤は、卵期や潜葉期では効果が低い。しかし、葉縁巻葉期に処理することで三角巻葉を形成時に本剤を摂食することにより三角巻葉は形成されるが、三角巻葉内で幼虫が衰弱または死亡し、水色悪化の要因となる虫糞の排出抑制が室内試験で明らかになった(第3章第1節;上室ら<sup>33)</sup>)。また、従来のドライフロアブルや水和剤とは異なる剤型のフロアブル剤であるBT剤のサブリーナ<sup>®</sup>フロアブルは、葉縁巻葉期のみではなく卵期や潜葉期にも効果があることも明らかになっている(第3章第1節;上室ら<sup>33)</sup>)。さらに、サブリーナ<sup>®</sup>フロアブルに混用されている脂肪酸グリセリドは、単用で本種の卵や潜葉期に効果があることが明らかになっている(第3章第2節)。しかし、これらの結果はいずれも室内試験における結果であり、茶園におけるBT剤の効果的な使用時期については調べられていない。そこで本章では、これらBT剤および第3章第1節で効果的な発育ステージが明らかになった他の殺虫剤について、茶園における効果的な散布時期を検討する。試験は3年に渡って行った。

### 第1節 茶園におけるBT剤等の効果

#### 1. 材料および方法

##### (1) 2013年試験

試験は2013年、2015年、2016年にそれぞれ鹿児島県農業開発総合センター茶業部(南九州市知覧町永里)内の茶園(品種:‘やぶきた’)で二番茶期に行った。供試殺虫剤は、BT剤のエスマルク<sup>®</sup>DF(有効成分10%、常用希釈倍率1,000倍)、サブリーナ<sup>®</sup>フロアブル(有効成分10%、常用希釈倍率1,000倍)、ベンゾイル尿素系のIGR剤であるフルフェノクスロン乳剤(商品名:カスケード<sup>®</sup>乳剤、有効成分10%、常用希釈倍率4,000倍)、ネオニコ

チノイド系のジノテフラン水溶剤(商品名:スタークル<sup>®</sup>顆粒水溶剤、同20%、同2,000倍)、ジアミド系のクロラントラニリプロール水和剤(商品名:サムコル<sup>®</sup>フロアブル10、同10%、同4,000倍)および脂肪酸グリセリド(商品名:サンクリスタル<sup>®</sup>乳剤、同90%、同1,500倍)とし、無散布区も設けた。試験年によっては試験しなかった殺虫剤があった。BT剤以外の殺虫剤名の表記については、以下、成分名のみで略記する。散布時期は各殺虫剤共に新芽の生育に合わせ、2ないし3つの散布時期を設けた。なお、本試験の供試殺虫剤のうち、脂肪酸グリセリドは2019年1月現在、チャノホソガの防除薬剤としての農薬登録はない。

2013年の二番茶期の萌芽期は5月25日であった。1区10.8m<sup>2</sup>の3反復で行った。この年の試験では、エスマルク<sup>®</sup>DF、フルフェノクスロン、ジノテフラン、クロラントラニリプロールを用いた。萌芽直前(5月22日)に散布する区として、フルフェノクスロン、ジノテフラン、クロラントラニリプロールを、0.5葉期(5月27日)に散布する区としてエスマルク<sup>®</sup>DFと上記の3殺虫剤を、3葉期(6月3日)に散布する区として全ての4殺虫剤とした。散布は200L/10a相当量を背負い動力噴霧器で行った。なお、エスマルク<sup>®</sup>DFの萌芽直前散布区を設けなかったのは、本剤は浸透性を見込めない上、チャノホソガの卵期および潜葉期には効果が低いことが明らかになっているため(第3章第1節;上室ら<sup>33)</sup>)である。

また、それぞれの殺虫剤散布日にその際のチャノホソガの発育ステージを明らかにするため、試験茶園とは別の隣接する茶園(1区21.6m<sup>2</sup>)から無作為に新芽を1カ所あたり100芽で計3カ所から採取し、発育ステージ別数(卵期、潜葉期、葉縁巻葉期、三角巻葉期)を計数した。効果の調査は、摘採時期の6月10日(萌芽期から16日後)に、全ての試験区の三角巻葉を計数後、採取して行った。室内に持ち帰った三角巻葉を分解し、中に排出された虫糞量を以下のグレード(第3章第1節;上室ら<sup>33)</sup>)にわけ、下記の式により虫糞指数を算出した。

- 1: 巻葉内に虫糞がわずかに認められる。
  - 2: 巻葉内のスペースの1/4未満に虫糞が認められる。
  - 3: 巻葉内のスペースの1/4以上～1/2未満に虫糞が認められる。
  - 4: 巻葉内のスペースの1/2以上～3/4未満に虫糞が認められる。
  - 5: 巻葉内のスペースの3/4以上に虫糞が認められる。
- 虫糞指数=100×(Σ(上記のグレード数×各グレードに該当する巻葉数))/(5×調査巻葉数)

さらに、いずれの試験年も試験場内にチャノホソガの

性フェロモンを誘引源とするルアー(SE ルアーチャノホソガ用, サンケイ化学(株))を取り付けた粘着板トラップ(SEトラップ用粘着板, サンケイ化学(株))を2基設置し、ほぼ毎日誘殺数を調査した。誘殺数は、2基のトラップの平均値から5日間の移動平均で表した。

#### (2) 2015年試験

2015年の二番茶期の萌芽期は5月16日であった。1区21.6m<sup>2</sup>の3反復で行った。エスマルク<sup>®</sup>DF, サブリナ<sup>®</sup>フロアブル, 脂肪酸グリセリド, クロラントラニプロールを用いた。0.5葉期(5月20日)に散布する区としてサブリナ<sup>®</sup>フロアブル, 脂肪酸グリセリドおよびクロラントラニプロールを、3葉期(5月29日)に散布する区としてクロラントラニプロールを除く3殺虫剤とした。散布は200L/10a相当量を乗用型防除機((株)松元機工)で行った。チャノホソガの発育ステージ調査は、2013年と同様に試験茶園に隣接する茶園で、1カ所あたり100芽を計3カ所から0.5葉期(5月20日), 2葉期(5月25日), 3葉期(5月29日)に採取し、調査した。効果の調査は、摘採時期の6月4日(萌芽期から19日後)に、全ての試験区の三角巻葉を計数後、採取し、2013年の試験と同様に行った。

#### (3) 2016年試験

2016年の二番茶期の萌芽期は5月20日であった。1区21.6m<sup>2</sup>の3反復で行った。エスマルク<sup>®</sup>DF, サブリナ<sup>®</sup>フロアブル, 脂肪酸グリセリド, クロラントラニプロールを用いた。0.5葉期(5月23日)に散布する区としてサブリナ<sup>®</sup>フロアブル, 脂肪酸グリセリドおよびクロラントラニプロールを、3葉期(6月2日)に散布する区としてクロラントラニプロール水和剤を除く3殺虫剤とした。散布は200L/10a相当量を乗用型防除機((株)松元機工)で行った。チャノホソガの発育ステージ調査は、2013年と同様に試験茶園に隣接する茶園で、1カ所あたり100芽を計3カ所から0.5葉期(5月23日), 3葉期(6月2日)に採取し、調査した。効果の調査は、摘採時期の6月6日(萌芽期から17日後)に、全ての試験区の三角巻葉を計数後、採取し、2013年の試験と同様に行った。

#### (4) 統計解析

三角巻葉数および単位面積当たりの虫糞量(1m<sup>2</sup>当たりの三角巻葉数に虫糞指数を乗じた)は各薬剤処理区間差をTukey-Kramer法を用いて検定した。また、虫糞指数はSteel-Dwassの検定により多重比較を行った。これらの検定にはJMP ver. 12.2.0<sup>®</sup>を用いた。

## 2. 結果

### (1) 2013年試験

萌芽期は5月25日であり、チャノホソガ雄成虫の誘殺ピークは5月17日であった(図5-1)。各散布日におけるチャノホソガの発育ステージは、萌芽直前(5月22日)は卵期が、0.5葉期(5月27日)は潜葉期が、3葉期(6月3日)は葉縁巻葉期および三角巻葉期が、それぞれ主体であった(図5-2)。なお、二番茶期のチャの新芽は概ね3~4日で1枚の新葉が展開する。

BT剤のエスマルク<sup>®</sup>DFは、0.5葉期の散布では三角巻葉が形成され、虫糞も堆積された。しかし、3葉期、すなわち葉縁巻葉期から三角巻葉の巻き始めに散布することで三角巻葉は形成されるものの虫糞が少なかった(Tukey-Kramer,  $p < 0.05$ ) (図5-3 上図)。

一方、フルフェノクスロン(IGR), ジノテフラン(ネオニコチノイド)は、萌芽前や0.5葉期の散布では三角巻葉を抑制したものの、3葉期の散布では三角巻葉と虫糞の抑制ができなかった(Steel-Dwass,  $p < 0.05$ )。クロラントラニプロールは全ての散布時期で三角巻葉の形成が抑制された(Tukey-Kramer,  $p < 0.05$ )。

### (2) 2015年試験

萌芽期は5月16日であり、チャノホソガの雄成虫の誘殺ピークは5月17日であった(図5-1)。各散布日におけるチャノホソガの発育ステージは、0.5葉期(5月20日)は卵期および潜葉期が、3葉期(5月29日)は葉縁巻葉期が、それぞれ主体であった(図5-2)。

BT剤のエスマルク<sup>®</sup>DFは、3葉期に散布することで三角巻葉は形成されるものの虫糞が少なかった(図5-3 中図)。一方、同じBT剤であるサブリナ<sup>®</sup>フロアブルは、0.5葉期の散布で三角巻葉の形成を抑え(Tukey-Kramer,  $p < 0.05$ )、さらに3葉期の散布でも三角巻葉は形成されるものの虫糞が少なかった(Steel-Dwass,  $p < 0.05$ )。

脂肪酸グリセリドは、0.5葉期の散布では三角巻葉を抑制したものの、3葉期の散布では三角巻葉と虫糞の抑制ができなかった。

### (3) 2016年試験

萌芽期は5月20日であり、チャノホソガの雄成虫の誘殺ピークも5月20日であった(図5-1)。各散布日におけるチャノホソガの発育ステージは、0.5葉期(5月23日)は卵期が、3葉期(6月2日)は葉縁巻葉期が、それぞれ主体であった(図5-2)。

BT剤のエスマルク<sup>®</sup>DFは、3葉期散布で、サブリナ<sup>®</sup>フロアブルは、0.5葉期散布と3葉期散布の両方で、脂肪酸グリセリドは3葉期散布で効果を示し、2015年と

同様の結果であった(図 5-3 下図).

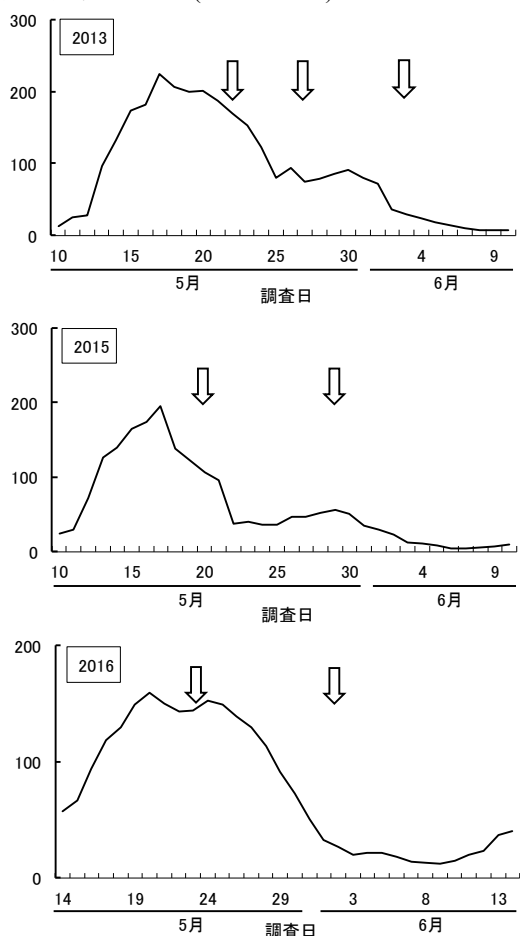


図 5-1 フェロモントラップに誘殺されたチャノホソガ成虫数の推移  
 注1) 誘殺数は5日間の移動平均で示した。  
 注2) 矢印は薬剤散布を示す。

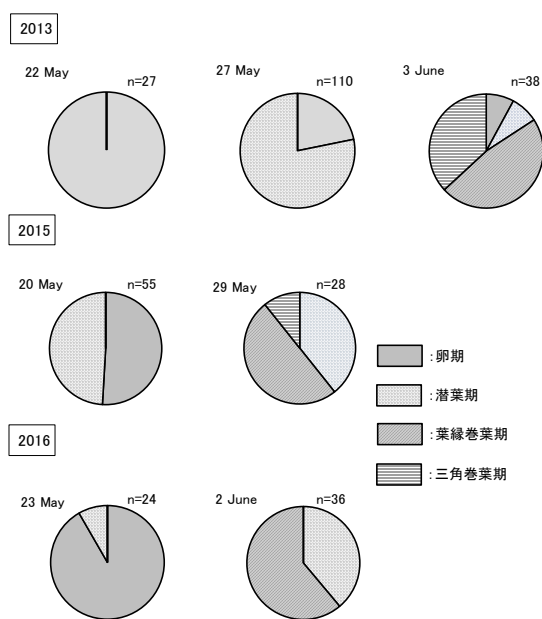


図 5-2 各試験年の各散布日におけるチャノホソガ発育ステージの割合

## 第 2 節 考察

チャにおけるチャノホソガの被害は、摘採した新芽に三角巻葉が混入することにより生じる<sup>46)</sup>。また、チャの萌芽から摘採までは茶時期や品種、その年の気温により若干の変動はあるが二番茶では 17 日、三番茶では約 14 日である<sup>90)</sup>。さらに、本種成虫はチャの新葉にのみ産卵する<sup>59)</sup>ことや、本種は 24 °C 下では卵から三角巻葉形成開始まで約 12 日である(第 2 章第 1 節; 上室ら<sup>35)</sup>)ことから、チャの萌芽期前後に成虫が発生しない限り、被害は発生しない。すなわち、チャの萌芽期より本種成虫の発生が、早い場合は新葉がなく産卵できず、遅い場合は三角巻葉が形成される前に摘採されるためである。本章による研究ではいずれの試験年もチャの萌芽期とチャノホソガ成虫の発生が概ね合致している条件下での試験であった。この場合、チャの新芽の生育では 0.5 葉期が、本種の卵または潜葉期に、3 葉期が本種の葉縁巻葉期(一部、三角巻葉期)に概ね相当していた(図 5-2)。

茶園におけるチャノホソガに対して、BT 剤の従来の剤型であるエスマルク<sup>®</sup>DF の散布適期は、チャの新芽の生育ステージでは 3 葉期であることが明らかになった。チャの新芽の 3 葉期は、前述のとおりチャノホソガの発育ステージでは葉縁巻葉期に概ねあたり、室内試験により明らかになっている従来の剤型である BT 剤の効果的な発育ステージ(葉縁巻葉期)と一致した(第 3 章第 1 節; 上室ら<sup>33)</sup>)。これらのことから、チャノホソガに対して化学薬剤の従来の防除適期は、三角巻葉の形成を抑制するため萌芽期から開葉期とされていたが、エスマルク<sup>®</sup>DF の防除適期としては、チャの新芽の生育ステージでは 3 葉期が適していると考えられる。なお、エスマルク<sup>®</sup>DF の農薬登録上の摘採前日数は 7 日であることから、チャの新芽の生育ステージである 3 葉期と散布日が近接する場合がある。近年、エスマルク<sup>®</sup>DF と同一成分で農薬登録上の摘採前日数が前日であるレピクリーン<sup>®</sup>DF が上市されたことから摘採期に近い場合はレピクリーン<sup>®</sup>DF の利用も有効と考えられる。フロアブルタイプの BT 剤であるサブリーナ<sup>®</sup>フロアブルはチャの新芽の生育ステージでは、0.5 葉期または 3 葉期のいずれの葉期の散布でも効果を示し、散布適期幅が広いことが示唆された。サブリーナ<sup>®</sup>フロアブルには植物油由来の脂肪酸グリセリドが含有されており<sup>13)</sup>、脂肪酸グリセリドは 3 葉期では効果を示さず、0.5 葉期のみ効果を示した。室内試験においてもサブリーナ<sup>®</sup>フロアブルは本種の卵、潜葉期幼虫に効果があることが示されている(第 3 章第 1 節; 上室ら<sup>33)</sup>)。これらのことから、サブリーナ<sup>®</sup>

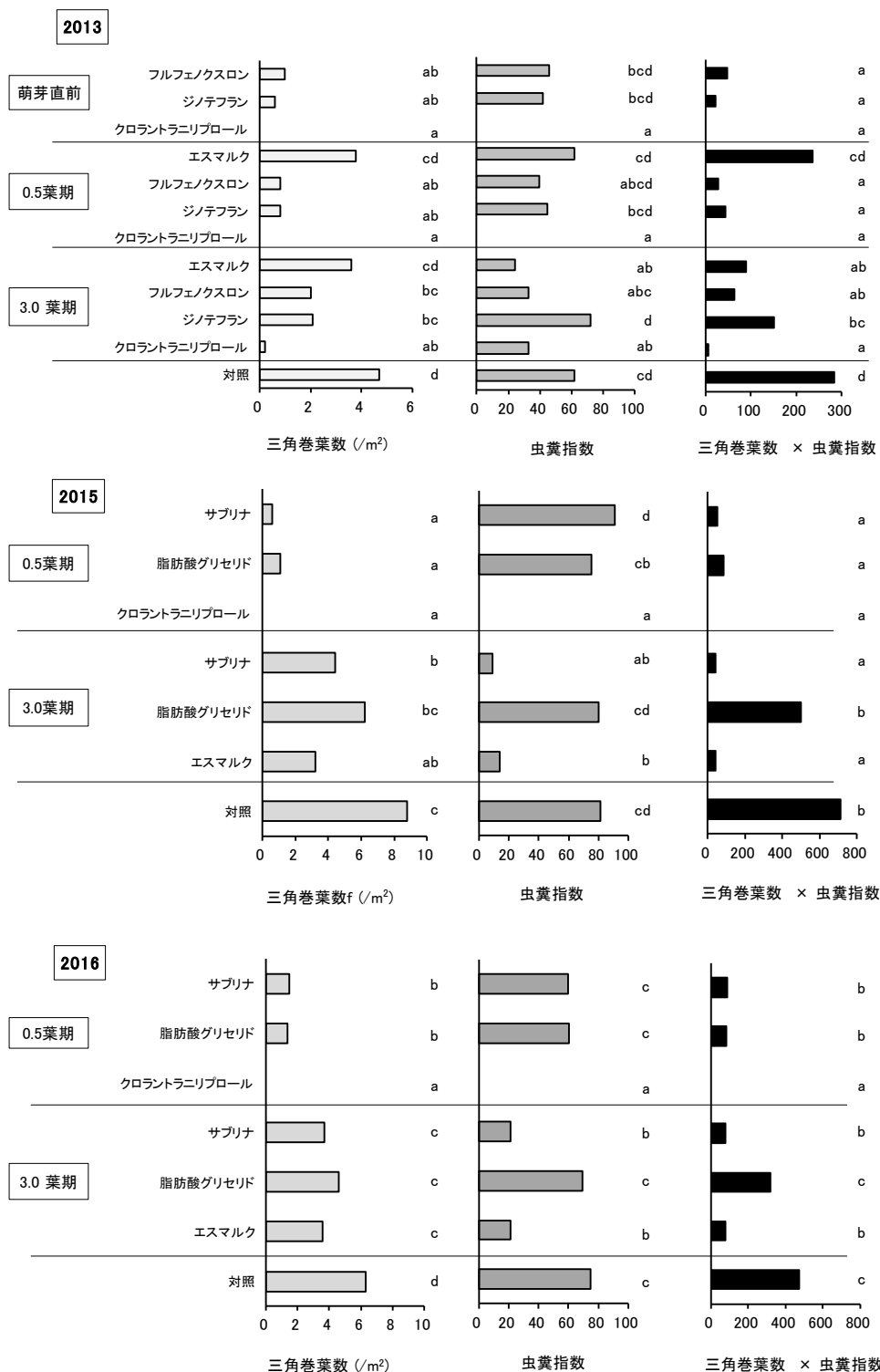


図 5-3 各試験年におけるチャノホソガに対する各種薬剤の効果

注) 異小文字間は有意差あり (Tukey-Kramer test or Steel-Dwass,  $p < 0.05$ ).

フロアブルの 0.5 葉期散布の効果は含有される脂肪酸グリセリドによるもので、3 葉期散布の効果は本来の成分である BT によるものと考えられた。但し、サブリーナ<sup>®</sup>フロアブルも摘採前日数は 7 日である。

チャノホソガの被害許容水準は、三角巻葉数では 1m<sup>2</sup> 当たり 30 ~ 40 枚<sup>46)</sup>とされているが、これは虫糞が堆積

された三角巻葉を想定している。BT 剤の散布により三角巻葉は形成されるものの、品質低下の原因となる虫糞の堆積は抑制されることが明らかになったことから、今後は BT 剤を散布した場合の本種の被害許容水準について、製茶後の品質により検証する必要がある。

## 第 6 章 チャノホソガ成虫に対する各種殺虫剤の効果

一般にチョウ目害虫の防除は殺虫剤の効果を引き出すため若齢幼虫期に行うことが多い(例えば, 中村・玉木<sup>63)</sup>; 早田<sup>94)</sup>). チャノホソガの防除についても, 三角巻葉の形成を防ぐため, 卵から潜葉期(チャの萌芽期から開葉期)に実施するのが効果的とされている<sup>56)</sup>. 防除殺虫剤としては, IGR 剤, ネオニコチノイド系, スピノシン系およびジアミド系などが使用されており, 第 3 章でこれらの殺虫剤の作用機作に応じた効果的な発育ステージ(卵から幼虫期)を明らかにした<sup>33)</sup>.

しかし, これらの殺虫剤において, 直接処理が本種の成虫の生存や産卵行動に及ぼす影響は明らかになっていない. さらに, 茶葉等に付着した殺虫剤成分が散布時期以降, つまり間接的に成虫やその次世代の卵やふ化幼虫に及ぼす影響も不明である. このような影響評価は, 殺虫剤散布期間及びそれ以降も本種の成虫が発生し続け, 産卵も続く実際の茶園では防除効果を評価する上で重要である. 近年, 一部の殺虫剤は, 何種ものチョウ目害虫の成虫に対して, その寿命の短縮化や産卵数の減少などの効果を示すことが明らかになっている<sup>43),97),104)</sup>.

そこで本章では, まず殺虫剤のチャノホソガ成虫への直接処理の影響を局所施用法で調べた(第 1 節). さらに, 茶葉等に付着した殺虫剤成分が間接的に本種成虫やその次世代の卵や孵化幼虫に及ぼす影響をドライフィルム法と葉片浸漬法を組み合わせる方法で調べた(第 2 節).

### 第 1 節 殺虫剤の直接処理が成虫に及ぼす影響

#### 1. 材料および方法

##### (1) 供試虫の累代飼育

試験に供試したチャノホソガは, 第 2 章第 1 節の「(1) 供試虫の累代飼育」に示した方法で飼育した 2016 年に採集した個体群の累代 2~4 世代目とした. 蛹から個体飼育し, 羽化当日に腹部末端の形状により雌雄に分別した. 本種成虫は, 羽化当日は交尾しない(第 2 章; 上室ら, 2018)ため, 羽化 2~4 日後の未交尾雌雄成虫を供試した. 累代飼育や後述の試験はすべて 23.9±0.7 °C, 14L:10D の実験室内で行った. なお, 本試験で供試したチャノホソガ個体群は本項目や次項目で供試した殺虫剤に対しては感受性と考えられる(第 4 章; 上室ら<sup>34)</sup>).

##### (2) 供試薬剤

局所施用が成虫の生存に及ぼす影響を調べる試験では, クロラントラニプロール(97.14%; ジアミド系), シアントラニプロール (99.3%; ジアミド系) (以上, FMC Corporation), スピネトラム(95.0%; スピノシン

系), ジノテフラン(99.0%; ネオニコチノイド系)(以上, 富士フィルム和光純薬(株)), 脂肪酸グリセリド(90.0%; 気門封鎖)(サンケイ化学(株))を用いた.

局所施用が成虫の交尾や産卵数に及ぼす影響を調べる試験では, 上記のクロラントラニプロール, シアントラニプロール, スピネトラムを用いた. いずれの試験においても殺虫剤はアセトンで希釈した.

#### (3) 麻酔方法と薬剤処理方法

予備試験においてチャノホソガの成虫は, CO<sub>2</sub> のみでは麻酔がかかりにくかったため, CO<sub>2</sub> 処理後に冷却処理を併用した<sup>37)</sup>. すなわち, 成虫 5 頭ずつを丸底試験管(長さ 18 cm×内径 1.5 cm)に入れた後, CO<sub>2</sub> を試験管に注入し(流量: 約 10 L/min, 注入時間: 30 秒間), 試験管の側面を, あらかじめ冷凍しておいた 2 つの保冷剤(15 cm×21 cm, ダイセロックス, 広島市)を用いてはさみ, さらに試験管底部を別の保冷剤に乗せて 30 秒間静置した(CO<sub>2</sub> 処理開始からの合計 1 分間). 麻酔が効いた成虫はガーゼを敷いた時計皿に移し, 成虫の胸部背面に 1 頭当たり 0.1μl の薬液をマイクロアPLICATOR(Arnold automatic microapplicator, Burkard Manufacturing Co., Ltd.)で局所施用した. 局所施用にあたっては以下の 2 つの実験を行った.

まず, 成虫の生存に及ぼす影響を調べる試験では, 1 段階または LD<sub>50</sub> 値を算出するために 2 倍量ずつ 6 から 9 段階に希釈した各濃度の殺虫剤を, 未交尾の雌雄成虫それぞれ 20 頭に処理した. 処理後の成虫は, プラスチック製容器(直径 12.9 cm, 高さ 9.7 cm)に 5% のショ糖を含ませた脱脂綿と共に雌雄別々に 10 頭ずつ収容した.

次に, 交尾・産卵に及ぼす影響を調べる試験では, 成虫への影響が少ない LD<sub>50</sub> 値以下の 1 から 3 段階に希釈した各濃度の殺虫剤を, 未交尾の雌雄成虫それぞれ 20 頭に処理した. 処理後の成虫は, 葉片を水差した試験管(口径 1.2 cm, 高さ 6 cm で 5% のショ糖溶液入り)を挿した採卵用台座(直径 12.9 cm, 高さ 5.9 cm で, 試験管とほぼ同じ大きさの穴が 10 個開いている)に上記のプラスチック製容器(容器底部は 4cm<sup>2</sup> の穴空きでゴース張り)(図 6-1)をかぶせ, 雌雄 2 ペアずつ放飼した. 1 濃度につき 10 容器をセットした. なお, 両試験共に対照として, 薬剤区と同数の未交尾成虫にアセトンのみを局所施用し, 薬剤区と同様にセットした.

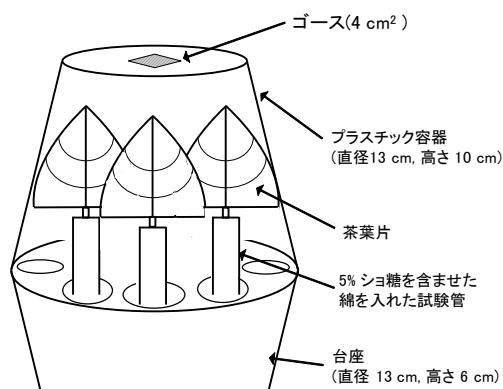


図 6-1 局所施用した雌雄の交尾と産卵調査用容器

#### (4)調査方法

成虫の生存に及ぼす影響を調べる試験では、処理 1, 3, 5, 7 日後に生存状況を調査した。動くものの横向きに倒れて起き上がれない個体は死亡虫に含めた。また、試験時に、供試成虫をサンプリングした飼育集団から、雌雄それぞれ任意に選んだ 30 頭を上記の丸底試験管に移し、計量後、1 頭当たりの体重を算出した。この作業をそれぞれ別の個体に交換して 3 回繰り返しその平均を 1 頭当たりの体重とした。

交尾・産卵に及ぼす影響を調べる試験では、1 日おきに 18 日後まで産卵数と雌雄それぞれの生死数を計数し、生存時間を求めた。調査の都度、死亡していた雌成虫は回収し、腹部を解剖し精包の確認により交尾の有無を判断した。18 日後の最終調査時点まで生存していた雌成虫も調査終了後に同様に交尾の有無を判断した。なお、生存調査を 18 日後までとしたのは、本種の雌は、雄と同居させた場合の平均寿命が約 19 日であることや、雌雄共に 16 日齢以降は交尾率が低下するためである(第 2

章；上室ら, 2018).

#### (5)統計解析

成虫の生存に及ぼす影響を調べる試験では、LD<sub>50</sub> 値は処理 7 日後の死亡数から Bliss<sup>5)</sup>の Probit 法により求め、回帰直線の適合度の判定には  $\chi^2$  検定を用いた。これらの算出や検定には、日本環境毒性学会が公表している Ecotox-Statics(<http://www.intio.or.jp/jset/ecotox.htm>)を用いた。

交尾・産卵に及ぼす影響を調べる試験では、産卵数に及ぼす各希釈濃度の影響は、処理濃度を説明変数、総産卵数を応答変数とし、ポアソン分布を誤差構造とする一般化線形モデル(GLM)で解析した。また、交尾数に及ぼす各希釈濃度の影響は、2 項ロジスティック回帰分析で解析した。生存時間分析は、Kaplan-Meier 法<sup>40)</sup>により解析し、各試験区間の生存率の比較は Log-rank 検定で解析した。いずれの解析においても、得られた *p* 値を Holm 法<sup>23)</sup>により補正した。これらの検定は、統計ソフト JMP ver. 12.2.0<sup>86)</sup>を用いて行った。

## 2. 結果

局所施用した 5 殺虫剤のうち、ジアミド系とスピノシン系の 3 殺虫剤は死亡率が濃度依存的に変化した。しかしその他の 2 殺虫剤は高濃度でも死亡しなかった(表 6-1)。効果が認められた 3 殺虫剤の LD<sub>50</sub> 値は、雌雄間で大きな差は認められず、0.9 ~ 3.9 ng/moth であった。これら 3 殺虫剤のうち、クロラントラニリプロール以外の 2 殺虫剤は LD<sub>50</sub> 値より低い濃度で産卵を阻害した(表 6-2)。ただし、これらの処理濃度では、寿命は対照区と比べて有意な差は認められず(Log-rank test, *p*>0.05)、ま

表 6-1 局所施用したチャノホソガ成虫に対する各種殺虫剤の半数致死濃度

殺虫剤名	性別	供試した濃度段階 <sup>注1)</sup>	LD <sub>50</sub> (ng/moth)	95% Confidence limit of LD <sub>50</sub> (ng/moth)	Slope	$\chi^2$ value <sup>注2)</sup>	体重 (mg)	LD <sub>50</sub> ( $\mu$ g/g body weight)
クロラントラニリプロール	♀	6	2.7	1.0 - 4.8	2.53	6.64	3.0	0.9
	♂	7	2.8	1.6 - 4.5	3.12	6.64	2.0	1.4
シアントラニリプロール	♀	8	2.4	0.7 - 5.1	1.27	11.34	(3.0) <sup>注3)</sup>	0.8
	♂	9	3.9	2.1 - 7.0	1.53	13.28	(2.0) <sup>注3)</sup>	1.9
スピネトラム	♀	7	0.9	0.4 - 4.9	2.01	6.64	(3.0) <sup>注3)</sup>	0.3
	♂	7	1.2	0.7 - 2.2	2.15	9.21	(2.0) <sup>注3)</sup>	0.6
ジノテフラン	♀	1	>3960					
	♂	1	>3960					
脂肪酸グリセリド	♀	1	>900					
	♂	1	>900					

注1) 濃度段階には対照 (アセトン) を含む。各段階と対照は20頭を供試した。対照は全て生存していた。

注2) プロビット死亡率直線はデータと適合していることを示す(*p*<0.05)。

注3) カッコ内の体重の計量は1回であることを示す。

表6-2 半数致死濃度より低濃度の殺虫剤を局所施用したチャノホソガ成虫に及ぼす影響

殺虫剤	LD <sub>50</sub> <sup>注1)</sup> (ng/female moth)	殺虫剤濃度 <sup>注2)</sup> (ng/moth)	供試雌成虫数	総産卵数/雌 <sup>注3)</sup> (mean ± SE)	雌成虫生存日数 <sup>注4)</sup> (days, mean ± SE)	雄成虫生存日数 <sup>注4)</sup> (days, mean ± SE)	交尾率 <sup>注3)</sup> (%)
クロラントラニプロロール	2.7	1.5	20	58.4 ± 10.9	15.6 ± 0.7	16.4 ± 0.7	100.0
シアントラニプロロール	2.4	1.5	20	8.4 ± 3.4 *	16.3 ± 1.0	13.7 ± 1.3	70.0
		0.4	20	21.6 ± 8.6 *	14.3 ± 0.8	N.S. 15.1 ± 0.8	N.S. 80.0
		0.1	20	55.5 ± 10.8	17.6 ± 0.3	16.0 ± 0.7	100.0
スピネトラム	0.9	0.7	20	7.6 ± 2.2 *	15.1 ± 1.2	14.7 ± 1.0	65.0
		0.2	20	57.2 ± 8.4	16.1 ± 0.9	16.6 ± 0.9	90.0
対照 (アセトン)	-	-	20	84.6 ± 7.8	16.4 ± 0.3	16.2 ± 0.8	100.0

注1) 表6-2に結果を示した。

注2) それぞれの殺虫剤のLD<sub>50</sub>より低い1~3濃度を供試した。

注3) \*は対照と比較して有意差あり (Holm法で補正,  $p < 0.05$ ). N.S.: 有意差なし

注4) N.S.は各試験区間に有意差なし (Log-rank test 後, Holm法で補正,  $p > 0.05$ ).

た交尾も阻害されなかった(2項ロジスティック回帰分析,  $p > 0.05$ ) (表 6-2).

## 第2節 殺虫剤の間接処理が成虫に及ぼす影響

### 1. 材料および方法

#### (1)供試成虫の準備

交尾への影響を調べるために未交尾の雌雄成虫を、また産卵数や次世代の孵化率への影響を調べるために既交尾の雌成虫を供試した。未交尾成虫は上記の局所施用の試験と同様に準備し、羽化後2~4日目の成虫を供試した。既交尾の雌成虫は、上記の方法で得られた未交尾の雌雄成虫の約60~80頭を2~3日間、飼育箱内で同居させた後に供試した。

#### (2)供試薬剤と薬剤処理方法

表 6-3 に示す 13 殺虫剤を供試した。殺虫剤は蒸留水で常用倍率に希釈した。対照には蒸留水を用いた。薬液、蒸留水共に界面活性剤の Tween20(富士フィルム和光純薬(株))を 10,000 倍の濃度で加用した。殺虫剤を散布した茶園において、本種の成虫が殺虫剤が付着した茶葉や枝に接触し続けることを想定し、薬剤処理方法として、ドライフィルム法と葉片浸漬法を組み合わせた方法(内山・小澤, 2014)を改変して行った。すなわち、開口部をパラフィルム® (Bemis Company, Inc)で覆った試験管(口径 1.2 cm, 高さ 6 cm で 5%のショ糖溶液入り)に葉片を水差ししたものを 10 個準備した。これらを薬液に 5 秒間浸漬し、風乾後に採卵用台座に固定した(図 6-2A)。

表6-3 供試薬剤

殺虫剤分類	殺虫剤名 <sup>注1)</sup>	成分名 (%)	常用希釈倍率	ng/2μl <sup>注2)</sup>
ジアミド	サムコル®FL 10	クロラントラニプロロール (10)	×4000	50
	エクシレル®SE	シアントラニプロロール (10.2)	×2000	102
	フェニックス®FL	フルベンジアミド (18)	×4000	90
スピリシン	ディアナ®SC	スピネトラム (11.7)	×5000	46.8
	スピノエース®FL	スピノサド (25)	×4000	125
アベルメクテン	アグリメック®	アバメクテン (1.8)	×1000	36
	アフアーム®EC	エマメクテン安息香酸塩 (1.0)	×2000	10
ネオニコチノイド	スタークル/アルバリン®SG	ジノテフラン (20)	×2000	200
昆虫成長制御剤 (IGR)	カスケード®EC	フルフェノクスロン (10)	×4000	50
	ファルコン®FL	メトキシフェノジド (20)	×4000	100
BT	エスマルク®DF	<i>Bacillus thuringiensis</i> (10) <sup>注4)</sup>	×1000	200
	サブリーナ®FL <sup>注3)</sup>	<i>Bacillus thuringiensis</i> (10) <sup>注4)</sup>	×1000	200
気門封鎖剤	サンクリスタル®EC <sup>注5)</sup>	脂肪酸グリセリド (90.0)	×1500	1197

注1) 各殺虫剤の剤型を以下に示した。示していない剤型は殺虫剤名に剤型名が含まれる。FL, フロアブル; EC, 乳剤; SG, 顆粒水和剤。

注2) 単位面積あたりに含まれる成分量を示す。

注3) 本剤にはBT成分の他に脂肪酸グリセリドが含まれている。

注4) *B. thuringiensis* の芽胞と結晶性毒素を含有。

注5) 本剤は2019年7月現在、チャノホソガに対し農薬登録を有していない。

一方、この台座にかぶせる透明なプラスチック製容器(直径 12.9 cm, 高さ 9.7 cm, 容器底部は  $4\text{cm}^2$  の穴空きでゴース張り)の内側にもハンスプレーで  $2 \mu\text{l}/\text{cm}^2$  の薬液量を噴霧し風乾後(図 6-2B), 採卵用台座にかぶせた(図 6-2C). このような容器を 10 個準備し, それぞれに未交尾の雌雄成虫 2 ペアあるいは既交尾の雌成虫 2 頭を放飼した. 餌源として, 5 % のショ糖液を含ませた脱脂綿を  $2\text{cm} \times 2\text{cm} \times 0.5\text{cm}$  のシャーレに入れて台座の上に置いた.

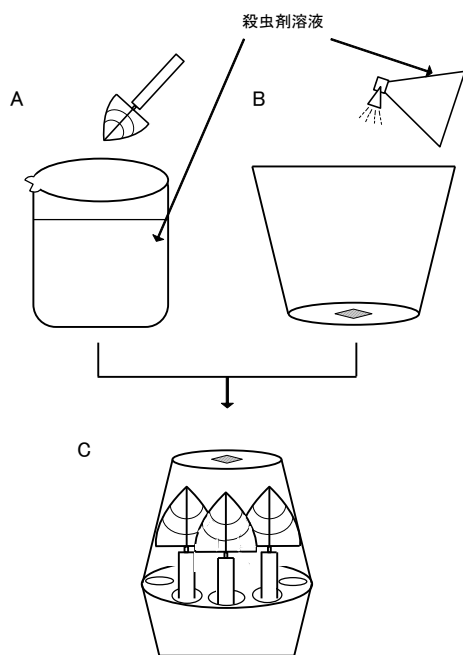


図 6-2 ドライフィルム法と葉片浸漬法を組み合わせた処理方法  
A: 葉片浸漬法, B: ドライフィルム法,  
C: ドライフィルム法と葉片浸漬法を組み合わせた容器

### (3)調査方法

上記の薬液処理した容器内に放飼した成虫は, 2 および 4 日後に生存状況と産下した卵数を調査した. 短期間の薬剤との接触がその後も成虫に影響を及ぼし続けるのか調べるため, 処理 4 日後の調査終了後に殺虫剤無処理の容器・葉片に交換し, さらにその 2 日後(処理 6 日後)と 4 日後(同 8 日後)に同様の調査を行った. 調査時点で死亡した雌成虫および処理 8 日後まで生存した雌成虫は 70 % エタノールに回収後, 腹部を解剖し精包の有無により交尾の有無を確認した. 産下卵とふ化後の幼虫への影響を調べるために, 処理 4 日後に回収した殺虫剤処理された葉片および処理 8 日後に回収した殺虫剤無処理の葉片は, それぞれさらに 5 日経過後に孵化率を, 10 日経過後に潜葉の形成から幼虫の生存率を調査した.

### (4)統計解析

各調査日の死亡率は, Abbott<sup>1)</sup>の補正式により算出した. 各薬剤処理区間の死亡率の比較は Steel-Dwass 法で解析した. 雌雄間の死亡率の比較, 孵化率, 幼虫の生存率の比較は, 2 項ロジスティック回帰分析(Binomial logistic regression analysis)で解析した. 総産卵数は, 各薬剤処理区と対照区との比較を, 薬剤処理を説明変数, 総産卵数を応答変数とし, ポアソン分布を誤差構造とする一般化線形モデル(GLM)で解析した. また, 各薬剤処理区間の死亡率および雌雄間の死亡率の比較以外の解析では, 得られた  $p$  値を Holm 法<sup>23)</sup>により補正した. さらに BT 成分と脂肪酸グリセリドの効果を明らかにするため, サプリナ<sup>®</sup>フロアブル(BT 成分と脂肪酸グリセリドの両方を含む), エスマルク<sup>®</sup>DF(BT 成分のみ), サンクリスタル<sup>®</sup>乳剤(脂肪酸グリセリドのみ)および蒸留水(対照)について, BT 成分の有無と脂肪酸グリセリドの有無を説明変数, 死亡の有無を応答変数とし, 2 項分布を誤差構造とする一般化線形モデル(GLM)で解析した. これらの検定は, 統計ソフト JMP ver. 12.2.0<sup>86)</sup>を用いて行った.

## 2. 結果

### (1)未交尾雌雄

茶葉および容器に付着した 13 殺虫剤のうち, ジアミド系, スピノシン系, アベルメクチン系, BT 剤のサプリナ<sup>®</sup>フロアブルおよび脂肪酸グリセリドの 9 殺虫剤は未交尾雌雄成虫の死亡率を対照区より有意に高めた(Steel-Dwass 法,  $p < 0.05$ ) (表 6-4). これら 9 殺虫剤のうち, 6 殺虫剤は, 殺虫剤に接触していた 4 日間でほとんどの個体が死亡した. 残りの 3 殺虫剤も, 殺虫剤との接触を断った 4 日間で 63 ~ 100 % と多くの個体が死亡した. これに対して他の IGR 剤の 2 剤と BT 剤のエスマルク<sup>®</sup>DF は殺成虫効果がほとんどなく, 対照区の死亡率と比べて有意な差が認められなかった(Steel-Dwass 法,  $p > 0.05$ ). ネオニコチノイド系のジノテフランは両群の中間的な殺成虫効果を示した.

殺成虫効果の高かった 9 殺虫剤(表 6-4)は, 生存虫に対して交尾率をほぼ 10 % 以下に低下させ, 産卵もほぼ完全に抑えた(表 6-4). 一方, 殺成虫効果が低かった IGR 剤の 2 剤と BT 剤のエスマルク<sup>®</sup>DF は, 交尾率や産卵数に対しても影響はみられず対照区並の値を示した(GLM,  $p > 0.05$ ). この内, IGR 剤のフルフェノクスロンとメト



表6-4 チャノホソガ未交尾雌雄成虫を殺虫剤塗布の容器で飼育後無処理の容器で飼育した際の直接的および間接的影響

殺虫剤分類	殺虫剤名	性別	n	殺虫剤塗布した容器で飼育した1-4日間				
				累積死亡率 (%)		総産卵数/ 雌/4日間 (mean ± SE)	孵化率 (%)	幼虫 生存率 (%)
				2d	4d			
ジアミド	クロラントラニプロール	♀	20	45.0 *	52.6 *	0 *	-	-
		♂	20	45.0 *	57.9 *			
	シアントラニプロール	♀	20	90.0 *	100 *	0 *	-	-
		♂	20	85.0 *	94.7 *			
	フルベンジアミド	♀	20	40.0 *	84.2 *	0 *	-	-
		♂	20	30.0	78.9 *			
スピノシン	スピネトラム	♀	20	95.0 *	100	0 *	-	-
		♂	20	100 *	-			
	スピノサド	♀	20	70.0 *	100 *	0 *	-	-
		♂	20	85.0 *	100 *			
アベルメクチン	アバメクチン	♀	20	100 *	-	0 *	-	-
		♂	20	100 *	-			
	エマメクチン安息香酸塩	♀	20	100 *	-	0 *	-	-
		♂	20	100 *	-			
ネオニコチノイド	ジノテフラン	♀	20	0	10.5	3.5 ± 2.5 *	0 *	-
		♂	20	0	42.1			
昆虫成長制御剤 (IGR)	フルフェノクスロン	♀	20	0	0	36.2 ± 7.5	63.5 *	0 *
		♂	20	0	0			
	メトキシフェノジド	♀	20	0	5.3	34.5 ± 5.9	79.8 *	0 *
		♂	20	0	10.5			
BT	エスマルク*	♀	20	0	0	39.6 ± 8.4	100	100
		♂	20	0	5.3			
	サブリーナ*	♀	20	40.0 *	84.2 *	0 *	-	-
		♂	20	20.0	78.9 *			
気門封鎖剤	脂肪酸グリセリド	♀	20	45.0 *	100 *	0 *	-	-
		♂	20	55.0 *	100 *			
	蒸留水 (対照)	♀	20	0	5.0	39.1 ± 5.3	99.2	100
		♂	20	0	5.0			

表6-4 (表の続き)

殺虫剤分類	殺虫剤名	性別	n	無処理の容器で飼育した5-8日間					
				累積死亡率 (%)		総産卵数/ 雌/4日間 (mean ± SE)	孵化率 (%)	幼虫 生存率 (%)	交尾率 (%)
				2d	4d				
ジアミド	クロラントラニプロール	♀	20	68.4 *	68.4 *	0 *	-	-	5.0 *
		♂	20	57.9 *	63.2 *				
	シアントラニプロール	♀	20	-	-	-	-	-	0 *
		♂	20	94.7 *	94.7 *				
	フルベンジアミド	♀	20	84.2 *	84.2 *	0 *	-	-	5.0 *
		♂	20	100 *	-				
スピノシン	スピネトラム	♀	20	-	-	-	-	-	10.0 *
		♂	20	-	-				
	スピノサド	♀	20	-	-	-	-	-	0 *
		♂	20	-	-				
アベルメクチン	アバメクチン	♀	20	-	-	-	-	-	5.0 *
		♂	20	-	-				
	エマメクチン安息香酸塩	♀	20	-	-	-	-	-	0 *
		♂	20	-	-				
ネオニコチノイド	ジノテフラン	♀	20	15.8	31.6	0.9 ± 0.9 *	100	100	25.0 *
		♂	20	42.1	42.1				
昆虫成長制御剤 (IGR)	フルフェノクスロン	♀	20	0	0	53.4 ± 5.8	100	100	100
		♂	20	0	0				
	メトキシフェノジド	♀	20	5.3	36.8	46.7 ± 2.5	100	100	95.0
		♂	20	10.5	21.1				
BT	エスマルク*	♀	20	0	0	46.0 ± 4.1	100	100	100
		♂	20	5.3	5.3				
	サブリーナ*	♀	20	100 *	-	0 *	-	-	0 *
		♂	20	100 *	-				
気門封鎖剤	脂肪酸グリセリド	♀	20	-	-	-	-	-	0 *
		♂	20	-	-				
	蒸留水 (対照)	♀	20	5.0	5.0	54.1 ± 7.3	99.0	100	95.0
		♂	20	5.0	5.0				

注1) \*は対照と比較して有意差あり (Holm 法で補正,  $p < 0.05$ ).

注2) “-”はその前回の調査で累積死亡率が100%に達した, または産卵が認められなかったためふ化がなかったことを示す.

表6-5 チャノホソガ既交尾雌成虫を殺虫剤塗布の容器で飼育後無処理の容器で飼育した際の直接的および間接的影響

殺虫剤名		n	殺虫剤塗布した容器で飼育した1-4日間				
			累積死亡率 (%)		総産卵数/ 雌/4日間 (mean ± SE)	孵化率 (%)	幼虫 生存率 (%)
			2 d	4 d			
ジアミド	クロラントラニプロール	20	80.0 *	80.0 *	5.5 ± 1.4 *	0 *	-
	シアントラニプロール	20	70.0 *	95.0 *	4.2 ± 1.1 *	0 *	-
	フルベンジアミド	20	65.0 *	100 *	10.5 ± 1.8 *	0 *	-
スピノシン	スピネトラム	20	100 *	-	3.3 ± 1.5 *	0 *	-
	スピノサド	20	100 *	-	4.8 ± 1.2 *	0 *	-
アベルメクチン	アバメクチン	20	100 *	-	8.5 ± 1.3 *	0 *	-
	エマメクチン安息香酸塩	20	100 *	-	5.4 ± 1.7 *	0 *	-
ネオニコチノイド	ジノテフラン	20	5.0	10.0	31.3 ± 3.7 *	0 *	-
昆虫成長制御剤 (IGR)	フルフェノクスロン	20	0	5.0	72.5 ± 3.4	86.5	1.7 *
	メトキシフェノジド	20	0	5.0	72.1 ± 4.1	92.1	0 *
BT	エスマルク®	20	0	0	70.4 ± 6.7	100	100
	サブリーナ®	20	65.0 *	90.0 *	0.9 ± 0.7 *	0 *	-
気門封鎖剤	脂肪酸グリセリド	20	10.0	80.0 *	0 *	-	-
	蒸留水 (対照)	20	0	0	69.9 ± 3.7	99.7	100

表6-5 (表の続き)

殺虫剤名		n	無処理の容器で飼育した5-8日間				
			累積死亡率 (%)		総産卵数/ 雌/4日間 (mean ± SE)	孵化率 (%)	幼虫 生存率 (%)
			2 d	4 d			
ジアミド	クロラントラニプロール	20	85.0 *	85.0 *	0 *	-	-
	シアントラニプロール	20	100 *	-	0 *	-	-
	フルベンジアミド	20	-	-	-	-	-
スピノシン	スピネトラム	20	-	-	-	-	-
	スピノサド	20	-	-	-	-	-
アベルメクチン	アバメクチン	20	-	-	-	-	-
	エマメクチン安息香酸塩	20	-	-	-	-	-
ネオニコチノイド	ジノテフラン	20	20.0	25.0	53.8 ± 9.4 *	99.3	100
昆虫成長制御剤 (IGR)	フルフェノクスロン	20	5.0	10.0	46.7 ± 2.5 *	99.6	100
	メトキシフェノジド	20	5.0	5.0	25.8 ± 2.8 *	100	100
BT	エスマルク®	20	5.0	5.0	67.9 ± 2.3	100	100
	サブリーナ®	20	100 *	-	0 *	-	-
気門封鎖剤	脂肪酸グリセリド	20	100 *	-	0 *	-	-
	蒸留水 (対照)	20	0	0	72.5 ± 5.3	99.6	100

注1) \*は対照と比較して有意差あり (Holm 法で補正,  $p < 0.05$ ).

注2) “-” は表6-4の脚注に示す.

キシフェノジドでは、殺虫剤が付着した茶葉に産下された卵はふ化したが、幼虫は潜葉期までに全て死亡した。ただし、この2殺虫剤は、殺虫剤が付着していない茶葉に交換すると、産下卵や幼虫への影響は消失した。BTのエスマルク®DFは本剤との接触期間およびその後も産卵数やふ化率、および幼虫発育への影響はほとんどなかった。殺成虫効果が比較的低かったネオニコチノイド系のジノテフランは、生き残った成虫に対して産卵数を減少させ、しかもふ化を完全に抑制した。

サブリーナ®フロアブルに含まれるBT成分と脂肪酸グリセリドの効果について、エスマルク®DF、サンクリスタル®乳剤および蒸留水のそれぞれの未交尾雌雄の生存

を用いて解析した結果、脂肪酸グリセリドの効果が有意であった (GLM for female,  $df = 1$ , likelihood ratio = 94.822,  $p < 0.05$ ; for male,  $df = 1$ , likelihood ratio = 81.618,  $p < 0.05$ ). しかし、BT成分の効果 (GLM for female,  $df = 1$ , likelihood ratio = 2.824,  $p = 0.093$ ; for male,  $df = 1$ , likelihood ratio = 1.779,  $p < 0.182$ ) と両要因の交互作用は有意ではなかった (GLM for female,  $df = 1$ , likelihood ratio = 0,  $p = 1.000$ ; for male,  $df = 1$ , likelihood ratio = 1.779,  $p < 0.182$ ).

## (2)既交尾雌

茶葉および容器に付着した 13 殺虫剤のうち、ジアミド系、スピノシン系、アベルメクチン系、BT 剤のサブリーナ<sup>®</sup>フロアブルおよび脂肪酸グリセリドの 9 殺虫剤は、既交尾雌成虫の死亡率を対照区より有意に高め (Steel-Dwass 法,  $p < 0.05$ ), 産卵数も有意に低下させた (GLM,  $p < 0.05$ ) (表 6-5). 一方、IGR 剤の 2 剤と BT 剤のエスマルク<sup>®</sup>DF は殺成虫効果が低く、産卵数にも影響しなかった(表 6-5).

殺成虫効果の高かった 9 殺虫剤は、殺虫剤に接触していた 4 日間で 80 %以上の個体が死亡し、生存虫の産卵数も対照区より有意に低かった(GLM,  $p < 0.05$ ) (表 6-5). 一方、殺成虫効果の低かった IGR 剤の 2 剤と BT 剤のエスマルク<sup>®</sup>DF は、産卵数(GLM,  $p > 0.05$ )やふ化率も対照区と差がなかった(2 項ロジスティック回帰分析,  $p > 0.05$ ). ただし、これらのうち IGR 剤は、殺虫剤との接触がなくなると、産卵数が対照区に比べて有意に減少した(GLM,  $p < 0.05$ ). ただし、ふ化率への影響はなかった(2 項ロジスティック回帰分析,  $p > 0.05$ ). ネオニコチノイド系のジノテフランは殺成虫効果が低く、産卵も見られたものの、産下卵は全くふ化しなかった(表 6-5). しかし、殺虫剤と接触しなくなるとふ化率は対照区並みに回復した(2 項ロジスティック回帰分析,  $p > 0.05$ ). なお、本試験に用いた雌は死亡後や調査終了後に解剖して精包の有無を調べた結果、全て交尾済みであった.

サブリーナ<sup>®</sup>フロアブルに含まれる BT 成分と脂肪酸グリセリドの効果について、エスマルク<sup>®</sup>DF、サンクリスタル<sup>®</sup>乳剤および蒸留水のそれぞれの既交尾雌の生存を用いて解析した結果、脂肪酸グリセリドの効果が有意であった(GLM,  $df = 1$ , likelihood ratio = 75.667,  $p < 0.05$ ). しかし、BT 成分の効果 (GLM,  $df = 1$ , likelihood ratio =  $1.085 \times 10^{-8}$ ,  $p = 0.999$ ) と両要因の交互作用は有意ではなかった(GLM,  $df = 1$ , likelihood ratio =  $1.085 \times 10^{-8}$ ,  $p = 0.999$ ).

## 第 3 節 考察

本研究により、チャノホソガに対し、ジアミド系、スピノシン系の殺虫剤は、局所施用による直接処理が成虫の生存率や産卵数を抑制した。また、これらの殺虫剤の一部は、成虫の生存率にほとんど影響しない LD<sub>50</sub> より低い濃度で、産卵を抑制した。さらに、これらのジアミド系、スピノシン系とアベルメクチン系、BT 剤のサブリーナ<sup>®</sup>フロアブルおよび脂肪酸グリセリドは、茶葉や容器に付着した成分が間接的に成虫の生存率や産卵数、お

よび次世代の卵の孵化率も抑制することが明らかになった。以上の結果は、これらの殺虫剤が、成虫およびその次世代の卵やふ化幼虫に影響を及ぼすため、成虫が発生し続け、産卵が続く実際の防除茶園では、従来期待していたよりも高い防除効果を発揮している可能性がある。

他のチョウ目害虫の成虫における局所施用法による LD<sub>50</sub> 値の報告例として、Tufted apple bud moth, *Platynota idaeusalis* (チョウ目: ハマキガ科)の雄成虫に対する Azinphosmethy(有機リン)の  $35.2 \mu\text{g/g}$ <sup>77)</sup>, 同薬剤のコードリング(チャノホソガと同程度の体長)の感受性系統に対する  $218 \text{ng/moth}$ <sup>81)</sup>などがある。これらの LD<sub>50</sub> 値に比べて、本試験のクロラントラニプロール、シアントラニプロール、およびスピネトラムの LD<sub>50</sub> 値は低く、これらの殺虫剤は、チャノホソガ成虫に対して強い接触毒を発揮することが示唆された。さらに、これら 3 剤のうち、シアントラニプロールとスピネトラムは、成虫の生存に影響のない低い濃度でも産卵数を抑制した(表 6-2). 他のチョウ目害虫の成虫においても、成虫の生存に影響を及ぼさない処理濃度でも、交尾率や産卵数に影響を及ぼす殺虫剤の事例が報告されている。例えば、コードリングの雌雄両方または片方ずつにクロラントラニプロールを局所施用すると交尾率を低下させることから<sup>44)</sup>。彼らはその原因を雄の交尾行動が悪影響を受けているためと推測している。本試験では、シアントラニプロールとスピネトラムの低濃度処理区で交尾率の低下は認められなかった(表 6-2). したがって、この 2 殺虫剤の処理区で産卵数が減少した要因は、交尾率の低下ではなく雌の産卵能力が低下したためと推測される。コードリング成虫の飼育ケージと産卵器質(リンゴ)にテブフェノジドまたはメトキシフェノジドを処理すると、産卵数や孵化率が低下することが報告されている<sup>97)</sup>。この場合は雌の排卵や産卵行動に影響を及ぼした<sup>92)</sup>ことが原因とされている。

ジアミド系、スピノシン系の殺虫剤は、チョウ目の他種害虫の成虫に対してもドライフィルム法で効果を示す事例が報告されている。例えば、スピネトラム(スピノシン系)がコードリングの雌成虫の寿命を短くすること、およびクロラントラニプロール(ジアミド系)が同種の交尾率を低下させること<sup>43)</sup>が報告されている。さらにクロラントラニプロールはモモシクイガに対して、処理 7~9 日後には約 50 %の成虫を死亡させることや、産卵数を減少させることが報告されている<sup>27)</sup>。スピノサド(スピノシン系)は、チャノコカクモンハマキの雄成虫に殺虫活性を示し、雌成虫には殺虫活性はないものの、産卵数を減少させるという報告もある<sup>104)</sup>。これらの報

告例から、ジアミド、スピノシン系の殺虫剤はチョウ目害虫の成虫に接触毒を示すことが期待できる。

しかし、これらの殺虫剤とは系統が異なるアベルメクテン系やサブリナ<sup>®</sup>フロアブルおよび脂肪酸グリセリドについてはチョウ目成虫への効果に関する報告が見あたらない。BT 剤のサブリナ<sup>®</sup>フロアブルは、エスマルク<sup>®</sup>DF など他の BT 剤とは異なりフロアブルタイプの BT 剤で、BT 成分以外に植物油由来の脂肪酸グリセリドが含有されている<sup>13)</sup>。今回の試験で殺虫剤成分と接触させると BT 成分単独のエスマルク<sup>®</sup>DF はチャノホソガ成虫に効果を示さなかったが、脂肪酸グリセリドは殺成虫効果を示した(表 6-4, 6-5)。このことから、サブリナ<sup>®</sup>フロアブルの殺成虫効果は、BT 剤の成分によるものではなく含有されている脂肪酸グリセリドによるものと考えられる。しかし、脂肪酸グリセリドは接触毒を評価する局所施用では殺成虫効果が認められなかった(表 6-2)。そのため、本剤がドライフィルム法と葉片浸漬法を組み合わせた方法で殺成虫効果を発揮した原因は、本剤の残留成分が接触以外に何らかの経路で成虫に取り込まれたためと推測されるが、詳細はさらに検討が必要である。

ネオニコチノイド系のジノテフランは、殺虫剤が付着した茶葉および容器の試験において、未交尾雌雄成虫、既交雌成虫ともに直接的な殺虫効果は低かった(表 6-4, 6-5)が、未交尾雌雄の交尾を抑制し、産卵数も減少させた(表 6-4)。また、既交尾雌の産卵数も減少させた(表 6-5)。本殺虫剤も局所施用による接触毒は認められなかった(表 6-2)ことから、接触以外で効果が現れたと推測された。ジノテフランと同一系統のネオニコチノイド系の殺虫剤が他のチョウ目害虫の成虫に対して効果を示した事例として、アセタミプリドがドライフィルム法によりコドリガの雌成虫の寿命を低下させることが報告されている<sup>43)</sup>。

ジアミド系とスピノシン系、アベルメクテン系、BT 剤のサブリナ<sup>®</sup>フロアブルおよび脂肪酸グリセリドなどの 9 殺虫剤は、殺虫剤が付着した茶葉に産下された卵にも孵化抑制効果を示すことが明らかになった(表 6-5)。この結果は、散布後も継続して産下される卵に対してもこれらの殺虫剤が効果を発揮することを示しており、茶園での防除効果に貢献すると考えられる。また、フルフェノクスロン、メトキシフェノジド(IGR)を処理した葉上に産下された卵は、孵化するもののその後の発育が進まず死亡した(表 6-5)。これらの殺虫剤は卵への直接処理でも、孵化するものの幼虫は正常に発育できないことが明らかになっている(第 3 章; 上室ら<sup>33)</sup>)。本試験結

果から、これらの殺虫剤が散布された茶園に産下された卵は、散布薬剤の影響を受ける可能性がある。

モモシクイガでは、リンゴほ場においてクロラントラニリプロールを産卵開始に散布することにより、殺成虫効果や交尾阻害による産卵数抑制効果、さらに次世代の孵化幼虫の殺虫効果などの複数の効果が総合的に作用している<sup>27)</sup>。チャノホソガの防除においても、今回試した殺虫剤の一部は卵や潜葉幼虫に対する直接散布の効果(第 3 章; 上室ら<sup>33)</sup>)のみではなく、成虫に対する直接散布の効果、および茶葉等に付着した殺虫剤成分との接触が、成虫やその次世代の卵の孵化率や孵化幼虫にも影響を及ぼしている可能性が示唆された。このような複合的な効果や残効が実際の茶園の防除において、どのように貢献しているのか今後検証する必要がある。

## 第 7 章 総合考察

チャノホソガは、これまで著名なチャの害虫であったにも関わらず飼育が困難な昆虫であったことから研究が進んでおらず、その生態や薬剤感受性など不明な点が多かった。飼育困難な理由として、本種は新葉にのみ産卵を行う<sup>47)</sup>が、餌となるチャの新葉(芽)は日持ちが悪く、枝から切除して水差ししてもすぐに萎れてしまうこと、本種は孵化後、葉縁巻葉期まで潜葉することからこの間の餌の交換が不可能なこと、さらに本種の加害作物はツバキ科植物に限られ<sup>58)</sup>、新葉が常時利用可能な代替餌植物がないこと等による。近年、チャ葉の延命処理による本種の飼育法が開発され<sup>85)</sup>、本法を用いることにより本種の基礎的な生態や薬剤感受性など様々な不明な点が明らかになった。本研究の第 2 章では、各種薬剤が効果を発揮する発育ステージを検討する上で必要な室内飼育条件下におけるチャノホソガの発育所要日数を明らかにした。また将来、チャノホソガに対して交信攪乱法や物理的防除法を検討する上で重要な知見となる本種の交尾・産卵行動の一部について明らかにした。第 3 章では、本種の薬剤感受性を検定する上で必要な各種殺虫剤の効果的な発育ステージが明らかになった。第 4 章では第 3 章で得られた知見を基に本種の薬剤感受性検定を行い、鹿児島県の南薩地域において IGR 剤に対する抵抗性個体群が出現していることが明らかになった。ただし、本地域以外の個体群は IGR 剤に対して感受性であることも明らかになった。第 5 章では、MRL の対象外であり有機栽培にも利用可能な BT 剤の茶園における効果的な散布適期について、第 3 章で得られた知見を基にチャの新芽の生育ステージでは 3 葉期前後であることを明らか

にした。また、フロアブルタイプの BT 剤の効果的な散布適期は 0.5 葉期または 3 葉期であることも明らかになり、防除適期幅が広がる可能性も示した。さらに、チョウ目害虫に対する従来の防除適期は若齢幼虫であったが、チャノホソガ成虫に効果を示す殺虫剤があることを第 6 章で明らかにした。本章では本研究で得られたこれらの知見を基にチャノホソガの現在および今後の防除法について議論し、本種の効率的な防除について総合的な考察を試みる。

チャノホソガ以外のチョウ目で茶葉を直接加害することによりチャの生育を阻害する害虫であるチャハマキやチャノコカクモンハマキの防除は若齢幼虫期が対象となる。そのため、これらの害虫の防除適期は成虫の発生ピークから 7 ~ 10 日後である<sup>66)</sup>。しかしチャノホソガの場合、前述のとおり新葉にのみ産卵すること<sup>47)</sup>や被害が茶の品質に直接影響することから防除の可否やその時期の決定は、単に本種の発生の有無や量のみでは判断できない。すなわち、成虫の発生が多くてもチャの新葉がない時期であれば産卵ができず、チャの新芽より本種が遅れて発生した場合、摘採期に三角巻葉が形成されないためである。また萌芽から摘採までの期間は二番茶では 17 日、三番茶では約 14 日<sup>90)</sup>と短い。そのため、新芽を対象に本種を防除する際は農薬登録内容である摘採前日数に留意する必要がある。さらに二番茶や三番茶は降雨が多い時期でもあることから、予定していた防除が実施不可能な場合もある。また中切りなどの更新園や秋芽など、新芽が製造する茶の対象にならない場合のチャノホソガの防除は、殺虫剤の摘採前日数に余裕を持つことができる。これまで本種に対する防除は、ほとんどの殺虫剤がチャの新芽の生育ステージの萌芽期から開葉期に散布されていた。しかし、本種を防除対象にする場合、前述の様に様々な使用場面を想定し、目的に合った殺虫剤を選択しないと防除効果を得られないなど効率的な防除に結びつかない可能性がある。

チャノホソガを効率的に防除するために、使用目的に沿った殺虫剤の選択について以下に考察する。まず、二番茶や三番茶では摘採前日数が 14 日以内の殺虫剤を選択する。第 3 章で効果を発揮する本種の発育ステージが卵や潜葉前期に限定されることが明らかになった IGR 剤のフルフェノクスロン(摘採前日数:7 日)、テフルベンズロン(同:7 日)およびメトキシフェノジド(同:7 日)やネオニコチノイド系のジノテフラン(同:7 日)などはチャの新芽の生育ステージの前半である萌芽期から開葉期に使用する必要がある。但し、ジノテフランは第 3 章で明らかになったように殺卵効果のみを有しているの

で、散布時期が遅れないように注意が必要である。この時期に降雨などで防除が実施できない場合は、本種の発育ステージが進展することや摘採までの日数も短くなることから、第 3 章で全ての発育ステージに効果が高いことが明らかになった殺虫剤で、かつ摘採前日数が短い殺虫剤であるジアミド系のクロラントラニプロール(摘採前日数:3 日)やスピノシン系のスピネトラム(同:1 日)などを補完的に選択する。

また、第 4 章では鹿児島県の南薩地域において脱皮阻害作用のあるベンゾイル尿素系 IGR 剤(フルフェノクスロンとテフルベンズロン)に対する抵抗性個体群が確認された。そのため、当該地域ではベンゾイル尿素系 IGR 剤の使用は避け、他系統の殺虫剤を使用することが必要である。但し、本地域以外ではベンゾイル尿素系 IGR 剤の効果が認められていることからその使用に問題はないと考えられる。今後は、新規開発の農薬数が減少することや多数の害虫に殺虫剤スペクトルを有する殺虫剤の開発は難しくなる<sup>116)</sup>ことから、現在ある殺虫剤を長期間使用可能にするための殺虫剤抵抗性マネジメント<sup>115)</sup>が益々重要になると考えられる。Georghiou and Taylor<sup>17)</sup> および FAO<sup>10)</sup>は、殺虫剤抵抗性の発達に関与する要因として、遺伝的要因、生物的要因、防除的要因の 3 つを挙げ、これらの要因の中にさらに具体的に殺虫剤抵抗性発達に寄与する項目について整理している。今回確認されたチャノホソガの事例ではこれらの要因にあてはまる項目がある。それは、遺伝的要因の中では、交差抵抗性(ベンゾイル尿素系 IGR 剤の交差抵抗性については第 4 章で述べた)、生物的要因の中では、年回発生世代数の多さ、防除的要因の中では、二次害虫(当該害虫以外に殺虫剤処理が必要な害虫)の存在、対象作物が長期間にわたり広い範囲で栽培および殺虫剤の残効性の長短が挙げられる。具体的にはチャノホソガでは、年間 6 ~ 7 回発生し<sup>56)</sup>、チャは永年性作物で鹿児島県では団地化された茶園が多いこと、本種以外のチョウ目害虫であるチャハマキやチャノコカクモンハマキにもチャノホソガと同様の殺虫剤が使用されるといったことがあてはまる。また抵抗性個体群が確認されたベンゾイル尿素系 IGR 剤は、残効性が長いことが報告されている<sup>103)</sup>。なお内山<sup>103)</sup>は、ジアミド系殺虫剤も残効性が長いと報告している。本研究では新しい作用を有する殺虫剤であるジアミド系のクロラントラニプロールの効果は非常に高かった(第 4 章)が、海外ではコナガ<sup>102),110)</sup>、コブノメイガ *Cnaphalocrocis medinalis* Guenée(チョウ目:メイガ科)<sup>120)</sup>、国内ではコナガ<sup>14)</sup>、チャノコカクモンハマキ<sup>105)</sup>でジアミド系殺虫剤に対する抵抗性個体群の報告が既にあ

る。殺虫剤抵抗性の可能性を予測することは、後手に回らない抵抗性対策を構築することにもつながる<sup>115)</sup>。そのひとつに殺虫剤の効果が高い時点における感受性を把握することは重要である<sup>7)</sup>。そのため、第 4 章で明らかになったジアミド系のクロラントラニプロールの非常に低い LC<sub>50</sub> 値は、今後の本剤の感受性動向を比較する上で指標となる重要な知見と考えられる。また、抵抗性発達を遅延させるために作用機構の異なる殺虫剤をローテーションで使用することは有効である<sup>18),116)</sup>。

これらの考え方を基にチャノホソガに対する慣行防除の散布事例を図 7-1 に示した。南薩地域以外では効果のあるフルフェノクスロン(系統名：ベンゾイル尿素系 IGR、以下同様)を二番茶に、ジノテフラン(ネオニコチノイド)を三番茶に、シアントラニプロール(ジアミド)を秋芽の防除にそれぞれ配した。ベンゾイル尿素系 IGR に対する抵抗性個体群が確認された南薩地域ではメトキシフェノジド(ジアシルヒドラジン系 IGR)を二番茶に配し、三番茶以降は南薩地域以外と同様の殺虫剤を配した。さらに、クロラントラニプロール(ジアミド)またはスピネトラム(スピノシン)をこれらの補完防除に配した。これらの中でシアントラニプロールおよびスピネトラムはチャノホソガの成虫に対する効果も第 6 章で明らかになっており、成虫が飛翔する時期に散布した場合は成虫に対する効果も含め総合的に効果を発揮するものと考えられる。

有機栽培で使用可能な農薬は制限されている<sup>70)</sup>。その中でチャノホソガに対する効果と使用時期が第 3 章および第 5 章で明らかになった除虫菊乳剤や BT 剤であるエスマルク<sup>®</sup>DF(レピクリーン<sup>®</sup>DF)およびサブリナ<sup>®</sup>フロアブルは有機栽培で使用可能である。但し、除虫菊乳剤は、チャノホソガの幅広い発育ステージに効果がある(第 3 章)が、天然成分で分解が速く、残効が短いため実際の使用には注意が必要である。また、エスマルク<sup>®</sup>DF(レピクリーン<sup>®</sup>DF)はチャの新芽の発育ステージである 3 葉期の散布が効果的で、サブリナ<sup>®</sup>フロアブルは 0.5 葉期または 3 葉期のいずれの時期の散布でも効果的であるが、サブリナ<sup>®</sup>フロアブルの成虫に対する効果も期待する(第 3 章、第 5 章)場合は、0.5 葉期の散布がより効果的であると考えられる(図 7-1)。

今後さらに増加が予想される輸出用の茶は、輸出相手国の MRL を取得した農薬を使用することが前提である<sup>99)</sup>。鹿児島県では輸出相手国として主に米国を想定している<sup>99)</sup>ことから、米国で MRL を取得している農薬<sup>71)</sup>の中からチャノホソガに効果的な殺虫剤を配した(図 7-1)。

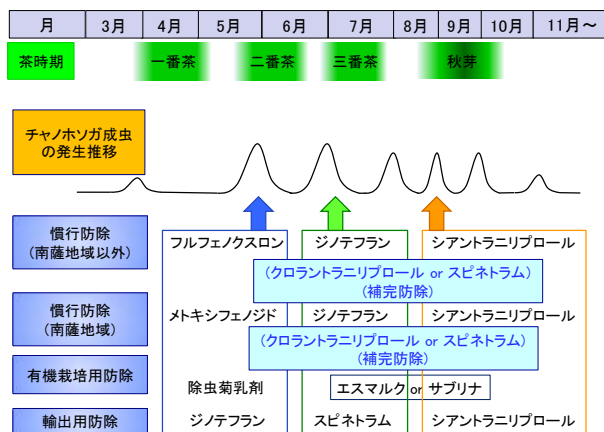


図 7-1 チャノホソガの効率的防除の概念図  
注) 矢印は薬剤散布を示す。

チャノホソガの防除時期では、本種と同様に新芽を加害する他種害虫であるチャノミドリヒメヨコバイ、チャノキロアザミウマも防除の対象として重要である。図 7-1 に示した殺虫剤のうち両種に効果のある殺虫剤は、ジノテフラン、シアントラニプロールおよび除虫菊乳剤である。そのため、これら以外の殺虫剤を使用する場合にチャノミドリヒメヨコバイ、チャノキロアザミウマの防除も必要な場合は、フロニカミドやピリフルキナゾンなど両種に活性のある殺虫剤を混用する必要がある。

第 2 章では、チャノホソガ成虫の交尾行動や産卵時刻などが明らかになった。雌雄共に多回交尾を行うことが明らかになったことから、性フェロモンによる雄の大量誘殺による防除は困難であるものの、性フェロモンを利用した交信攪乱法や光源を用いた物理的防除法に寄与できる新たな知見も明らかになった。

本研究による成果は、チャノホソガを防除対象にした際に殺虫剤の選択や使用方法を検討する際に参考となる情報で今後、本種の殺虫剤に対する感受性動向を把握する上でも重要である。また、新規殺虫剤候補のスクリーニングをする際にも重要な知見である。さらに、本種の交尾行動等の知見は、今後、検討される可能性がある性フェロモンによる交信攪乱法など化学的防除法に頼らない防除法にも利用可能と考えられる。本研究で明らかになった多くの知見がチャノホソガの効率的かつ実践的な防除にさらに活用されることを期待する。

## 謝 辞

本論文をとりまとめるに際して、懇切なご指導とご鞭撻を賜った千葉大学園芸学部准教授の野村 昌史 博士に深く感謝の意を表します。また、千葉大学園芸学部教授の中牟田 潔 博士、同学部教授の近藤 悟 博士、同学部准教授の宇佐見 俊行 博士には、本論文の審査を賜り深く感謝いたします。本研究を遂行するにあたり、投稿論文のご校閲やご助言を賜った鹿児島県農業開発総合センター 元熊毛支場長の末永 博 氏に併せて深く感謝いたします。

農研機構中央農業研究センターの日本 典秀 博士、農研機構生物機能利用研究部門の前田 太郎 博士、元農業生物資源研究所の野田 隆志 博士には依頼研究員で大変お世話になり、さらに研究手法のご助言や文献の恵与を賜りました。深く感謝いたします。

農研機構果樹茶業研究部門茶業研究領域の佐藤 安志 氏には、チャの害虫全般の情報や研究手法のご助言を賜り深く感謝いたします。また、同領域の根角 厚司 氏、吉田 克志 博士、萬屋 宏 博士には、チャに関する情報提供や研究手法のご助言を賜りました。併せて深く感謝いたします。

静岡県立農林大学校の小澤 朗人 博士、静岡県農林技術研究所茶業研究センターの内山 徹 博士、福岡県農林業総合試験場八女分場の吉岡 哲也 博士、埼玉県農業技術研究センターの小俣 良介 博士、京都府農林水産技術センター農林センターの徳丸 晋 博士には、チャの害虫に関する情報や研究手法の情報交換で大変お世話になりました。深く感謝いたします。また、東京農工大学名誉教授の濱野 國勝 博士、千葉県農林総合研究センターの大井田 寛 博士には本論文の執筆に関してご協力賜りました。深く感謝いたします。

鹿児島大学農学部教授の津田 勝男 博士、同学部准教授の坂巻 祥孝 博士には、チャノホソガの飼育手法についてのご助言や文献の恵与を賜りました。深く感謝いたします。

鹿児島県農業開発総合センター茶業部の元茶業部長の佐藤 昭一 氏、田中 敏弘 氏、西郷 哲美 氏および茶業部長の徳田 明彦 氏、茶業部大隅分場長の内村 浩二 氏には、本研究の遂行に関するご協力とご助言および激励を賜りました。深く感謝いたします。また、同部環境研究室技術補佐員の東垂水 昭子 氏、臨時職員の高城 節子 氏、田代 きみ子 氏、田代 美代子 氏には、チャノホソガの飼育全般や試験に関して多大なご協力を賜りました。深く感謝いたします。さらに、加工研究室の長ヶ原 智 氏、栽培研究室の鹿子木 聡 氏をはじめ茶業部

の皆様にはチャの栽培・加工に関するご助言やご協力を賜りました。深く感謝いたします。併せて、鹿児島県茶業関係者の皆様にも本研究の遂行にご協力を賜りました。深く感謝いたします。

鹿児島県農業開発総合センター元副所長の下西 恵 氏および生産環境部長の井上 栄明 博士には本論文の執筆や学位取得に関して常に激励とご助言を賜りました。深く感謝いたします。また、鹿児島県農業開発総合センターの病害虫部門の先輩や同僚である徳永 太蔵 氏、宮路 克彦 氏、野島 秀伸 氏、山口 卓宏 博士、尾松 直志 氏、松比良 邦彦 氏、林川 修二 氏、松田 浩 氏、西 八束 博士、福田 健 氏、田布尾 尚子 氏、樋口 康一 博士、嶽崎 研 氏、尾川 宜広 氏、嶽崎(大司) さえき 氏、富濱 毅 博士、下津 文宏 氏、柿元 一樹 博士、中西 善裕 氏には、多くのご助言やご協力を賜りました。深く感謝いたします。さらに、鹿児島県の病害虫部門のOBである深町 三朗 氏、田中 章 氏、野中 壽之 氏、牧野 晋 氏、瀬戸口 脩 博士、和泉 勝一 氏、牟田 辰朗 氏、上和田 秀美 氏、神崎 保成 氏、鳥越 博明 博士、西岡 稔彦 氏には、多くのご助言と激励を賜りました。深く感謝いたします。

鹿児島県農業開発総合センター大隅支場の元支場長の田丸 保夫 氏、支場長の古江 広治 博士、環境研究室長の森 清文 氏、同研究室の主任技術補佐員の田中 和治 氏、新保 百合子 氏、技術補佐員の松崎 浩樹 氏、二見 良一 氏をはじめ大隅支場の皆様には、論文執筆にあたりご協力と温かい励ましを賜りました。深く感謝いたします。

本研究は、全農農薬委託試験(2010 ~ 2012)、農食研事業「劇的な茶少量農薬散布技術と天敵類が融合した新たなIPM(総合的病害虫管理)の創出」(2015 ~ 2017)および地域戦略プロジェクト「一番茶の海外輸出を可能とする病害虫防除体系の構築と実証」(2016 ~ 2018)の一部として実施しました。

なお、本論文の以下の図表は、日本応用動物昆虫学会発行の「日本応用動物昆虫学会誌」および「Applied Entomology and Zoology」より転載しました。転載をご承諾くださった同学会に感謝いたします。

表 3-1, 図 3-1, 3-2, 3-2, 3-3, 3-4, 3-5, 3-6

上室 剛・東垂水昭子・末永 博 (2016) チャノホソガ(チョウ目:ホソガ科)の異なる発育ステージに対する各種薬剤の効果. 日本応用動物昆虫学会誌 60: 111-118.

表 4-1, 4-2, 4-3

上室 剛・東垂水昭子・末永 博 (2017) 鹿児島県におけるチャノホソガ(チョウ目:ホソガ科)のフルフェノ

クスロンに対する薬剤抵抗性. 日本応用動物昆虫学会誌 61: 99-107.

表 2-1, 2-2, 2-3, 図 2-4, 2-5

上室 剛・東垂水昭子・末永 博 (2018) チャノホソガ(チョウ目: ホソガ科)の交尾・産卵行動. 日本応用動物昆虫学会誌 62: 115-121.

表 6-1, 6-2, 6-3, 6-4, 6-5, 図 6-1, 6-2

Kamimuro, T., S. Higashitarumizu, T. Fukuda, H. Suenaga and M. Nomura (2019) Effects of direct or indirect treatment with insecticides on adult tea leafroller, *Caloptilia theivora* (Lepidoptera: Gracillariidae), and its progeny. Applied Entomology and Zoology 54: 377-387.

最後に、本論文の執筆は家族の協力なくしては進められなかった。ここに深く感謝したい。

#### 引用文献

- 1) Abbott, W. S. (1925) A method of computing the effectiveness of an insecticide. *J. Econ. Entomol.* 18: 265-267.
- 2) 足立年一・山下賢一 (1994) コナガのキチン合成阻害剤に対する感受性低下. 応動昆 38: 194-196. [Adachi, T. and K. Yamashita (1994) Decline of susceptibility to chitin synthesis inhibitor in diamondback moth, *Plutella xylostella* L. *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 38: 194-196.]
- 3) Adameczyk, J. J., Jr, B.R. Leonard and J. B. Graves (1999) Toxicity of selected insecticides to fall armyworms (Lepidoptera: Noctuidae) in laboratory bioassay studies. *Flo. Entomol.* 82: 230-236.
- 4) Ando, T., K. Taguchi, M. Uchiyama and T. Horikawa (1985) Female sex pheromone of the tea leafroller, *Caloptilia theivora* Walsingham (Lepidoptera: Gracillariidae). *Agric. Biol. Chem.* 49: 233-234.
- 5) Bliss, C. I. (1935) The calculation of the dosage-mortality curve. *Ann. Appl. Biol.* 22: 134-167.
- 6) Brattsten, L., C. W. Holyoko, J. R. Leeper and K. F. Raffa (1986) Insecticide resistance: challenge to pest management and basic research. *Science* 231: 1255-1260.
- 7) Brent, K. J. (1986) Pesticide Resistance: Strategies and Tactics for Management. *Committee on Strategies for the Management of Pesticide Resistant Pest Populations*. National Academy Press, Washington, D.C., pp. 298-312.
- 8) Dunley, J. E. and S. C. Welter (2000) Correlated insecticide cross-resistance in azinphosmethyl resistant codling moth (Lepidoptera: Tortricidae). *J. Econ. Entomol.* 93: 955-962.
- 9) El-Sayed, A. E. and M. M. Aamir (2011) Comparative effectiveness and field persistence of insect growth regulators on a field strain of the cotton leafworm, *Spodoptera littoralis*, Boisid (Lepidoptera: Noctuidae). *Crop Prot.* 30: 645-650.
- 10) FAO (2012) Guidelines on prevention and management of pesticide resistance. 55pp.
- 11) Fraser, H. W. and R. M. Trimble (2001) Effect of delayed mating on reproductive biology of the oriental fruit moth (Lepidoptera: Tortricidae). *Can. Entomol.* 133: 219-227.
- 12) Fujii, A. (1973) Further studies on the reiterative mating ability in males of *Spodoptera litura* F. (Lepidoptera: Noctuidae). *Appl. Entomol. Zool.* 8: 131-137.
- 13) 福田 健 (2018) コナガに対する脂肪酸グリセリドの殺虫効果. 九病虫研会報 64: 47-54. [Fukuda, T. (2018) Lethal effect of decanoyloctanoylglycerol on the diamondback moth, *Plutella xylostella* (Lepidoptera). *Kyushu Pl. Prot. Res.* 64: 47-54.]
- 14) 福田 健・林川修二 (2014) 鹿児島県内におけるコナガのジアミド系殺虫剤に対する感受性低下. 九病虫研会報 60: 75-78. [Fukuda, T. and S. Hayashikawa (2014) Decline in susceptibility to diamide insecticides of the diamondback moth, *Plutella xylostella* L. (Lepidoptera), collected in Kagoshima Prefecture. *Kyushu Pl. Prot. Res.* 60: 75-78.]
- 15) Furlong, M. J., D. J. Wright and L. M. Dossall (2013) Diamondback moth ecology and management: problems, progress, and prospects. *Annu. Rev. Entomol.* 58: 517-541.
- 16) 古野鶴吉(1982) 暖地におけるチャノホソガの生態と防除. 宮崎総農試研報 16: 43-51. [Furuno, T. (1982) Ecology of tea leaf roller (*Caloptilia theivora* WALSINGHAM) and its control in warm resion. *Bull. Miyazaki Agr. Exp. Sta. Japan* 16: 43-51.]
- 17) Georgiou, G. P. and C. E. Taylor (1977) Genetic and biological influences in the evolution of insecticide resistance. *J. Econ. Entomol.* 70: 319-323.
- 18) 浜 弘司 (1996) 殺虫剤抵抗性問題の現状と抵抗性



- 管理. 研究ジャーナル 19(11): 25-31. [Hama, H. (1996) Present status of insecticide resistance and resistance management in agricultural insect pests. *Res. J. Food and Agriculture* 19(11): 25-31.]
- 19) Hardke, J. T., J. H. Temple, B. R. Leonard and R. E. Jackson (2011) Laboratory toxicity and field efficacy of selected insecticides against fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae). *Flo. Entomol.* 94:272-278.
- 20) 平野忠美・子安英雄 (2013) 愛知県におけるケブカノメイガおよびハスモンヨトウの薬剤感受性の差異. 関西病虫研報 55: 51-55. [Hirano, T. and H. Koyasu (2013) The difference of insecticide susceptibility between the cabbage web worm, *Crocidolomia pavonana* (Fabricius) and the common cutworm, *Spodoptera litura* (Fabricius) in Aichi prefecture. *Ann. Rept. Kansai Pl. Prot.* 55: 51-55.]
- 21) Hirano, C. and H. Muramoto (1976) Effect of age on mating activity of the sweet potato leaf folder, *Brachmia macroscopa* (Lepidoptera: Gelechiidae). *Appl. Entomol. Zool.* 11: 154-159.
- 22) Höfte, H. and H. R. Whiteley (1989) Insecticidal crystal proteins of *Bacillus thuringiensis*. *Microbiol. Rev.* 53: 242-255.
- 23) Holm, S. (1979) A simple sequentially rejective multiple test procedure. *Scand. J. Stat.* 6:65-70.
- 24) IRAC (2016) IRAC Mode of Action Classification Scheme. Version 8.1  
<http://www.iraac-online.org/documents/moa-classification/?ext=pdf>
- 25) 諫山真二・小川正臣・笠松紀美 (2004) 兵庫県神戸市岩岡におけるコナガ(*Plutella xylostella* L.)の各種薬剤に対する感受性の変遷. 応動昆 48: 337-343. [Isayama, S., M. Ogawa and K. Kasamatsu (2004) Observable changes in diamondback moth's (*Plutella xylostella* L.) susceptibility to insecticides in Iwaoka, Kobe city, Hyogo Prefecture, Japan. *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 48: 337-343.]
- 26) 石栗陽一 (2005) リンゴのモモシクイガに対するネオニコチノイド系殺虫剤の効果. 東北農業研究 58: 145-146. [Ishiguri, Y. (2005) The effects of neonicotinoid insecticides on the eggs, neonate larvae and adults of the peach fruit moth, *Carposina sasakii*. *Tohoku Agric. Res.* 58: 145-146.]
- 27) 石栗陽一 (2011) クロラントラニリプロール水和剤のモモシクイガに対する繁殖阻害効果. 北日本病虫研報 63: 209 - 214. [Ishiguri, Y. (2011) Effects of Chlorantraniliprole, an anthranilic diamide insecticide, on reproductive success of peach fruit moth, *Carposina sasakii*. *Ann. Rept. Plant Prot. North Japan* 63: 209 - 214.]
- 28) Ismail, F. and D. J. Wright (1991) Cross-resistance between acylurea insect growth regulators in a strain of *Plutella xylostella* L. (Lepidoptera: Yponomeutidae) from Malaysia. *Pestic. Sci.* 33: 359-370.
- 29) 磯部宏治・富所康広 (2009) チャ摘採面付近の気温を用いたチャノホソガ発生時期の予測. 生物機能を活用した病害虫・雑草管理と肥料削減: 最新技術集 農研機構中央農研 pp201-204. [Isobe, K and Y. Todokoro (2009) "Predict the occurrence of the tea leaf roller using temperature on plucking surface of tea. *Pest and weed management and fertilizer reduction using biological function: the newest technology.*" National Agriculture and Food Research Organization, Central Region Agricultural Research Center, Japan. pp201-204.]
- 30) 鹿児島県茶業振興連絡協議会 (1986) 鹿児島県茶業史. 1317pp.
- 31) Kainoh, Y. (1986) Mating behavior of *Ascogaster reticulatus* WATANABE (Hymenoptera: Braconidae), an egg-larval parasitoid of the smaller tea tortrix moth, *Adoxophyes* sp. (Lepidoptera: Tortricidae): I. Diel patterns of emergence and mating, and some conditions for mating. *Appl. Entomol. Zool.* 21: 1-7.
- 32) 上室 剛 (2017) チャノホソガの殺虫剤検定法と薬剤感受性. 植物防疫 71: 595-600. [Kamimuro, T. (2017) Methods for testing the effects of pesticides and susceptibility on the tea leaf roller, *Caloptilia theivora* (Lepidoptera: Gracillariidae). *Plant Prot.* 71: 595-600.]
- 33) 上室 剛・東垂水昭子・末永 博 (2016) チャノホソガ(チョウ目: ホソガ科)の異なる発育ステージに対する各種薬剤の効果. 応動昆 60: 111-118. [Kamimuro, T., S. Higashitarumizu and H. Suenaga (2016) Laboratory evaluation of insecticides against different life stages of the tea leaf roller, *Caloptilia theivora* (Lepidoptera: Gracillariidae). *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 60: 111-118. ]
- 34) 上室 剛・東垂水昭子・末永 博 (2017) 鹿児島県におけるチャノホソガ(チョウ目: ホソガ科)のフルフェノクスロンに対する薬剤抵抗性. 応動昆 61:

- 99-107. [Kamimuro, T., S. Higashitarumizu and H. Suenaga (2017) Resistance of the tea leaf roller, *Caloptilia theivora* (Lepidoptera: Gracillariidae), to flufenoxuron in Kagoshima Prefecture, Japan. *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 61: 99-107.]
- 35) 上室 剛・東垂水昭子・末永 博 (2018) チャノホソガ(チョウ目: ホソガ科)の交尾・産卵行動. 応動昆 62: 115-121. [Kamimuro, T., S. Higashitarumizu and H. Suenaga (2018) Copulation and egg-laying behavior of the tea leafroller, *Caloptilia theivora* (Lepidoptera: Gracillariidae) in the laboratory. *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 62: 115-121.]
- 36) Kamimuro, T., S. Higashitarumizu, T. Fukuda, H. Suenaga and M. Nomura (2019) Effects of direct or indirect treatment with insecticides on adult tea leafroller, *Caloptilia theivora* (Lepidoptera: Gracillariidae), and its progeny. *Appl. Entomol. Zool.* 54: 377-387.
- 37) 上室 剛・下津文宏・里島伸司・上福元 彰 (2013) 局所施用による薬剤感受性検定におけるアリモドキゾウムシの麻酔方法と fenitrothion に対する感受性. 応動昆 57: 95-99. [Kamimuro, T., F. Shimotsu, S. Satoshima and A. Kamifukumoto (2013) Susceptibility of the sweetpotato weevil, *Cylas formicarius* (Fabricius), to fenitrothion and anesthesia method for topical application of insecticides. *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 57: 95-99.]
- 38) 神田健一・内藤 篤 (1979) アワヨトウ成虫の羽化から産卵までの行動. 応動昆 23: 69-77. [Kanda, K. and A. Naito (1979) Behavior of oriental armyworm moth, *Leucania separata* WALKER, from emergence to oviposition. *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 23: 69-77.]
- 39) 加納昌彦・桐谷圭治・川崎建次郎 (1983) チャハマキの配偶行動と産卵. 応動昆 27: 40-45. [Kanoh, M., K. Kiritani and K. Kawasaki (1983) Mating behavior and oviposition in the oriental tea tortrix, *Homona magnanima* Diakonoff. *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 27: 40-45.]
- 40) Kaplan, E. L. and P. Meier (1958) Nonparametric estimation from incomplete observations. *J. Am. Stat. Assoc.* 53:457-481.
- 41) 河合 章 (1998) 環境にやさしい病害虫防除の最新技術. 第1部 IPM と防除技術. 野菜害虫の防除における BT 剤の利用. 今月の農業 10: 38-41.
- 42) Kiritani, K. and M. Kanoh (1984) Influence of delay in mating on the reproduction of the oriental tea tortrix, *Homona magnanima* Diakonoff (Lepidoptera: Tortricidae), with reference to pheromone-based control. *Prot. Ecol.* 6: 137-144.
- 43) Knight, A.L. (2010) Targeting *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae) adults with low-volume applications of insecticides alone and in combination with sex pheromone. *Pest Manag. Sci.* 66: 709-717.
- 44) Knight, A. L and L. Flexner (2007) Disruption of mating in codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) by chlorantranilipole, an anthranilic diamide insecticide. *Pest Manag. Sci.* 63: 180-189.
- 45) Kodandaram, M. H., A. B. Rai and J. Halder (2010) Novel insecticides for management of insect pests in vegetable crops: A review. *Veg. Sci.* 37: 109-123.
- 46) 小泊重洋 (1975) チャノサンカクハマキの加害が茶の品質および収量に及ぼす影響. 茶研報 42: 25-30. [Kodomari, S. (1975) The effect of the injury caused by tea leaf roller, *Caloptilia theivora* on the quality and yield of tea. *Tea Res. J.* 42: 25-30.]
- 47) 小泊重洋 (1976) チャノサンカクハマキの生態と防除. 植物防疫 30: 43-47.
- 48) 小泊重洋・大場正明 (1971) チャノホソガの防除に関する研究 (第1報) ほ場試験による各種殺虫剤の効果の検討. 静岡茶研報 4: 59-76. [Kodomari, S. and M. Oba (1971) Studies on the control of the tea leaf roller, *Caloptilia theivora* Walsingham (Part I). Effect of several insecticides in the field tests. *Bull. Shizuoka Tea Exp. Sta.* 4: 59-76.]
- 49) 向阪信一 (2002) 黄色光による夜行性ガ類の忌避. 環動昆 13: 157-162. [Kosaka, S. (2002) Control of nocturnal pests by yellow fluorescent lamps. *Jpn. J. Environ. Entomol. Zool.* 13: 157-162.]
- 50) 小杉由紀夫 (2000a) チャノホソガに対する BT 剤の殺虫効果. 関西病虫研報 42: 85-86. [Kosugi, Y. (2000a) Efficacy of BT (*Bacillus thuringiensis*) products against tea leaf roller, *Caloptilia theivora*. *Ann. Rept. Kansai Pl. Prot.* 42: 85-86.]
- 51) 小杉由紀夫 (2000b) チャノホソガに対する昆虫成長制御剤の殺虫効果. 関西病虫研報 42: 87-88. [Kosugi, Y. (2000b) Efficacy of insect growth regulator against tea leaf roller, *Caloptilia theivora*. *Ann. Rept. Kansai Pl. Prot.* 42: 87-88.]
- 52) 小杉由紀夫・芳賀 一 (2013) 静岡県の茶園から採集したチャノキイロアザミウマに対する薬剤の殺

- 虫効果. 関西病虫研報 55: 79-81. [Kosugi, Y. and H. Haga (2013) The effect of insecticides on yellow tea thrips, *Scirtothrips dorsalis* Hood collected from tea fields in Shizuoka prefecture. *Ann. Rept. Kansai Pl. Prot.* 55: 79-81.]
- 53) 小杉由紀夫・太田 充 (2001) クロルフルアズロン剤抵抗性チャハマキに関する研究 (1) 静岡県における抵抗性の実態. 静岡茶試研報 23: 1-6. [Kosugi, Y. and M. Oota (2001) Resistance of oriental tea tortrix, *Homona magnanima* Diakonoff to chlorfluazuron in Shizuoka Prefecture. *Bull. Shizuoka Tea Exp. Stn.* 23: 1-6.]
- 54) Mafi, S. A. and N. Ohbayashi (2006) Toxicity of insecticides to the citrus leafminer, *Phyllocnistis citrella*, and its parasitoids, *Chrysocharis pentheus* and *Sympiesis striatipes* (Hymenoptera: Eulophidae). *Appl. Entomol. Zool.* 41: 33-39.
- 55) Marshall, D. B., D. J. Pree and B. D. McGarvey (1988) Effects of benzoylphenylurea insect growth regulators on eggs and larvae of the spotted tentiform leafminer *Phyllonorycter blancardella* (Fabr.) (Lepidoptera: Gracillariidae). *Can. Entomol.* 120: 49-62.
- 56) 松比良邦彦・西 八東・神寄保成 (1999) 摘採時期が異なる茶園に設置した性フェロモントラップによるチャノホソガの発生消長. 九病虫研究会報 45: 123-129. [Matsuhira, K., Y. Nishi and Y. Kozaki (1999) Seasonal prevalence of occurrence of the tea leaf roller, *Caloptilia theivora* Walsingham (Lepidoptera: Gracillariidae) collected in a synthetic sex-pheromone trap, and difference in collection among pluckings in a tea garden. *Kyushu Pl. Prot. Res.* 45: 123-129.]
- 57) Meagher, R. L. Jr and Hull L. A. (1986) Techniques to measure azinphosmethyl resistance in *Platynota idaeusalis* (Lepidoptera: Tortricidae). *J. Econ. Entomol.* 79: 1130-1133.
- 58) 南川仁博 (1960) チャノホソガ(サンカクハマキ)の生態と防除法. 茶 13(6): 32-36.
- 59) 南川仁博・刑部 勝 (1979) 茶樹の害虫. 日本植物防疫協会, 東京. 322pp. [Minamikawa, J. and M. Osakabe (1979) *Insect Pests of Tea Plant*. Japan Plant Protection Association, Tokyo. 322pp.]
- 60) 南川仁博・植田熊治 (1960) チャノホソガの生態的研究. 茶研報 16: 17-22. [Minamikawa, J. and K. Ueda (1960) The ecological studies of the tea leaf roller (*Caloptilia theivora* (Walsingham)). *Tea Res. J.* 16: 17-22.]
- 61) 宮 睦子・伊村 務・出口美里・癸生川真也 (2003) 黄色蛍光灯を用いたイチゴのハスモンヨトウ防除技術の評価. 関西病虫研報 50: 151-155. [Miya, M., T. Imura, M. Deguchi and S. Kebukawa (2003) Evaluation of control of the common cutworm, *Spodoptera litura* (Fabricius) on strawberry by yellow fluorescent lights. *Ann. Rept. Kanto Pl. Prot. Soc.* 50: 151-155.]
- 62) 宮井俊一・河合 章・萩原 廣・高橋賢司・吉田幸二・吉富 均 (編) (2009) 生物機能を活用した病害虫・雑草管理と肥料削減: 最新技術集. 農研機構中央農研, つくば. 225pp.
- 63) 中村和雄・玉木佳男 (1983) 性フェロモンと害虫防除. 古今書院, 東京. 202 pp. [Nakamura, K. and Y. Tamaki (1983) "*Sex pheromone and pest control-Experiment and Effect.*" Kokon Syoin, Tokyo. 202 pp.]
- 64) Nasir, M., M. Imran and M. Ahmad (2013) Pyrethroids synergize new chemical insecticides in field populations of *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae). *Pakistan J. Zool.* 45: 629-633.
- 65) 日本応用動物昆虫学会 (2006) 農林有害動物・昆虫名鑑 増補改訂版. 日本応用動物昆虫学会 編. 東京. 387pp. [Japanese Society of Applied Entomology and Zoology (2006) Major insect and other pests of economic plants in Japan revised edition. Japanese Society of Applied Entomology and Zoology. Ed. Tokyo. 387pp.]
- 66) 日本植物防疫協会 (2000) フェロモン剤利用ガイド. 日本植物防疫協会. 東京. 111pp.
- 67) 日本植物防疫協会 (2012) 新農薬実用化試験(茶農薬) 殺虫剤圃場試験法. 日本植物防疫協会. 東京. <http://www.jppa.or.jp/test/data/tyamusil.pdf>. [Japan Plant Protection Association (2012) "*Methods of field test for insecticides of practical application in tea field.*"]
- 68) 日本茶輸出促進協議会 (2018) 国産茶輸出拡大等促進支援事業 平成 27 年度～ 29 年度事業実施報告. 東京. 23pp.
- 69) 野口 浩 (1981) チャノコカクモンハマキの交尾回数と産卵量およびふ化率. 応動昆 25: 259-264. [Noguchi, H. (1981) Mating frequency, fecundity, and egg hatchability of the smaller tea tortrix moth,

- Adoxophyes* sp. (Lepidoptera: Tortricidae). *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 25: 259-264.]
- 70) 農林水産省 (2000) 有機農産物の日本農林規格. 農林水産省告示平成 12 年制定.
- 71) 農林水産省 (2018) 品目別残留農薬基準値. [http://www.maff.go.jp/j/export/e\\_shoumei/attach/pdf/zannou\\_kisei-105.pdf](http://www.maff.go.jp/j/export/e_shoumei/attach/pdf/zannou_kisei-105.pdf) (2018 年 10 月アクセス確認)
- 72) 沼田 智・中谷 清・梅本光政・郷原雅敏 (1992) 低毒性殺虫剤エトフェンプロックスの研究開発. 有機合成化学 50: 160-166. [Numata, S., K. Nakatani, M. Umemoto and M. Gohbara (1992) Research and development of a low toxic insecticide, etofenprox. *J. Syn. Org. Chem., Japan* 50: 160-166.]
- 73) 小倉愉利子 (2007) 光照射がナシヒメシンクイの産卵に及ぼす影響. 関東病虫研報 54: 177-180. [Ogura, Y. (2007) Effect of light irradiation on oviposition of oriental fruit moth, *Grapholita molesta* (Busck). *Ann. Rept. Kanto Pl. Prot. Soc.* 54: 177-180.]
- 74) 大林華菜子・Nguyen Duc Do・中田 健・安藤 哲・中 秀司 (2013) ナシカワホソガの性フェロモンを介した配偶行動の観察. 応動昆 57: 159-166. [Ohbayashi, K., Nguyen Duc Do, K. Nakada, T. Ando and H. Naka (2013) Observation of courtship behaviors mediated by a female sex pheromone in the pear barkminer moth, *Spulerina astaurota* (Meyrick) (Lepidoptera: Gracillariidae). *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 57: 159-166.]
- 75) 大橋 透 (2000) 茶におけるチャノホソガまたはウスミドリメクラガメの被害許容水準. 神奈川農総研報 141: 49-55. [Ohhashi, T. (2000) Economic injury level in tea buds for damages caused by tea leafroller or pale green plant bug. *Bull. Agric. Res. Inst. Kanagawa Pre.* 141: 49-55.]
- 76) 大谷一哉 (1992) チャノホソガの性フェロモンの発生予察への利用. 三重農技研報 20: 41-48. [Ohtani, K. (1992) Use of two sex pheromones for monitoring of the tea leafroller (*Caloptilia theivora*). *Bull. Mie Agric. Tech. Cent.* 20: 41-48.]
- 77) 小山光男 (1985) 性フェロモン利用によるハスモンヨトウの防除に関する基礎的研究. 四国農試報 45: 1-92. [Oyama, M. (1985) Studies on basic problems on the use of sex pheromone for the control of *Spodoptera litura* F. (Lepidoptera: Noctuidae). *Bull. Shikoku. Agric. Exp. Stn.* 45: 1-92.]
- 78) 小澤朗人 (2012) 静岡県の現地茶園におけるチャハマキとチャノコカクモンハマキに対するトートルア剤の実用性評価. 植物防疫 66: 128-134. [Ozawa, A. (2012) Evaluation of the practicality of a new mating disruptant “Tortorilure” for the control of the smaller tea tortrix, *Adoxophyes honmai* Yasuda, and the oriental tea tortrix, *Homona magnanima* Diakonoff, in commercial tea fields in Shizuoka prefecture. *Plant Prot.* 66: 128-134.]
- 79) 小澤朗人・内山 徹 (2013) 静岡県の茶園から 2004 年～ 2008 年に採集されたチャハマキの薬剤感受性. 関東病虫研報 60: 139-142. [Ozawa, A. and T. Uchiyama (2013) Susceptibility to 12 insecticides in the oriental tea tortrix, *Homona magnanima* Diakonoff (Lepidoptera: Tortricidae), collected at tea fields in Shizuoka Prefecture, Japan from 2004 to 2008. *Annu. Rep. Kanto-Tosan Plant Prot. Soc.* 60: 139-142.]
- 80) Perng, F. S., M. C. Yao, C. F. Hung and C. N. Sun (1988) Teflubenzuron resistance in diamondback moth (Lepidoptera: Plutellidae). *J. Econ. Entomol.* 81: 1277-1282.
- 81) Pompanon, F., P. Fouillet and M. Bouletréau (1995) Emergence rhythms and protandry in relation to daily patterns of locomotor activity in *Trichogramma* species. *Evol. Ecol.* 9: 467-477.
- 82) Pree, D. J., D. E. Archibald and K. J. Cole (1990) Insecticide resistance in spotted tentiform leafminer (Lepidoptera: Gracillariidae): Mechanisms and Management. *J. Econ. Entomol.* 83: 678-685.
- 83) R Development Core Team (2012) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. <http://www.R-project.org>
- 84) Rafiee-Dastjerdi, H., Z. Mashhadi and A. S. Garjan (2013) Lethal and sublethal effects of abamectin and deltamethrin on potato tuber moth, *Phthorimaea operculella* (Lepidoptera: Gelechiidae). *J. Crop Prot.* 2: 403-409.
- 85) 坂巻祥孝・杉谷詩麻・近藤岳美・津田勝男 (2011) チャ葉の延命処理によるチャノホソガの室内飼育法. 蝶と蛾 62: 51-55. [Sakamaki, Y., S. Sugitani, T. Kondo and K. Tsuda (2011) Laboratory rearing method of *Caloptilia theivora* (Walsingham) with a leaf preservative treatment. *Lepidoptera Science* 62: 51-55.]
- 86) SAS Institute (2015) *JMP: Statistic and Graphics Guide*,

version 12.2.0. SAS Institute, Cary, NC.

- 87) 佐藤邦彦・佐藤健一郎 (2009) 複合抵抗性品種「みなみさやか」を活用した暖地茶園における減農薬防除体系. 生物機能を活用した病害虫・雑草管理と肥料削減: 最新技術集. 農研機構中央農研, つくば. pp185-188. [Sato, K and K. Sato (2009) ("Reduced pesticide control system for tea field of warm region using resistant cultivar 'Minamisayaka'. *Pest and weed management, and fertilizer reduction using biological function: the newest technology.*" National Agriculture and Food Research Organization, Central Region Agricultural Research Center, Tsukuba, Japan. pp185-188.)]
- 88) Sauphanor, B. and J. C. Bouvier (1995) Cross-resistance between benzoylureas and benzoylhydrazines in the codling moth, *Cydia pomonella* L. *Pestic. Sci.* 45: 369-375.
- 89) Scott, J. G. (1990) Investigating mechanisms of insecticide resistance: methods, strategies, and pitfalls. In: *Pesticide resistance in arthropods.* (R. T. Rousch and B. E. Tabashnik eds.) New York: Chapman and Hall, pp 39-57.
- 90) 関谷直正・田中勝夫・山下正隆 (1979) 茶樹の新芽の生育に及ぼす気温の影響. 茶研報 49: 11-18. [Sekiya, N., K. Tanaka and M. Yamashita (1979) Effects of air temperature on the shoot growth of tea plants. *Tea Res. J.* 49: 11-18.]
- 91) 下野嘉子 (2010) Rを用いた一般化線形モデル(回帰係数編): カウントデータを例に. 雑草研究 55: 287-294. [Shimono, Y. (2010) An introductory guide to statistical analysis-generalized linear models for count data using R. *J. Weed Sci. Tech.* 55: 287-294.]
- 92) Smagghe, G., H. Salem, L. Tirry and D. Degheele (1996) Action of a novel insect growth regulator tebufenozide against different developmental stages of four stored product insects. *Parasitica* 52: 61-69.
- 93) 園田昌司 (2012) 殺虫剤抵抗性機構の解析と今後の課題. 植物防疫 66: 162-167. [Sonoda, S. (2012) Mechanisms of insecticide resistance. *Plant Prot.* 66: 162-167.]
- 94) 早田 栄一郎 (1998) オオタバコガ幼虫に対する有効薬剤の検定. 九病虫研究会報 44: 64-66. [Souda, E. (1998) Effect of some insecticides on the corn earworm, *Helicoverpa armigera* Hübner (Lepidoptera: Noctuidae). *Kyushu Pl. Prot. Res.* 44: 64-66.]
- 95) 末永 博・田中 章・村田麻美・堀切正俊 (1992) 鹿児島県におけるコナガのキチン合成阻害剤抵抗性の発達 第2報 感受性検定. 九病虫研究会報 38: 129-131. [Suenaga, H., A. Tanaka, M. Murata and M. Horikiri (1992) Development of a chitin synthesis inhibitor resistance in the diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.) (Lepidoptera: Yponomeutidae). *Kyushu Pl. Prot. Res.* 38: 129-131.]
- 96) 杉山恵太郎・水井陽介 (2009) ジャガイモガに対する各種薬剤の殺虫効果. 関東東山病虫研報 56: 125-126. [Sugiyama, K. and Y. Mizui (2009) Effect of insecticides on the potato tuber worm *Phthorimaea operculella* (Zeller). *Annu. Rep. Kanto-Tosan Plant Prot. Soc.* 56: 125-126.]
- 97) Sun, X. and B. A. Barrett (1999) Fecundity and fertility changes in adult codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) exposed to surfaces treated with tebufenozide and methoxyfenozide. *J. Econ. Entomol.* 92: 1039-1044.
- 98) 高橋 匠・山中 聡・糸山 亨 (2011) *Beauveria bassiana* 乳剤と気門封鎖剤の混用によるタバココナジラミに対する防除効果向上の検討. 関東病虫研報 58: 107-110. [Takahashi, T., S. Yamanaka and K. Itoyama (2011) Synergistic effects of *Beauveria bassiana* and spiracle-blocking insecticides for *Bemisia tabaci*. *Ann. Rept. Kanto Pl. Prot. Soc.* 58: 107-110.]
- 99) 武田 善行 (2015) 日本茶の多様性・可能性について提言する. 第5回 茶業に関わる最近の動向. 茶 796: 10-14.
- 100) Talekar, N. S. and A. M. Shelton (1993) Biology, ecology, and management of the diamondback moth. *Annu. Rev. Entomol.* 38: 275-301.
- 101) 田付貞洋 (1995) 性フェロモンの利用: 今後の展望と問題点. 北日本病虫研報 46: 1-5. [Tatsuki, S. (1995) Use of sex pheromones: Future prospects and problems. *Ann. Rept. Plant Prot. North Japan* 46: 1-5.]
- 102) Troczka, B., C. T. Zimmer, J. Elias, C. Schorn, C. Bass, T. G. E. Davies, L. M. Field, M. S. Williamson, R. Slater and R. Nauen (2012) Resistance to diamide insecticides in diamondback moth, *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae) is associated with a mutation in the membrane-spanning domain of the ryanodine receptor. *Insect Biochem. Molec.* 42: 873-880.
- 103) 内山 徹 (2012) 各種薬剤のチャノコカクモンハマ

- キに対する残効期間. 関西病虫研報 54: 151-154. [Uchiyama, T. (2012) Residual activity of various insecticides against the smaller tea tortrix *Adoxophyes honmai* Yasuda. *Ann. Rept. Kansai Pl. Prot.* 54: 151-154.]
- 104) 内山 徹・小澤朗人 (2014) スピノシン系殺虫剤のチャノココクモンハマキ成虫に対する産卵抑制効果. 関西病虫研報 56: 99-101. [Uchiyama, T. and A. Ozawa (2014) Insecticidal activity of spinosyn insecticides in the adult of the smaller tea tortrix *Adoxophyes honmai* Yasuda. *Ann. Rept. Kansai Pl. Prot.* 56: 99-101.]
- 105) Uchiyama, T. and A. Ozawa (2014) Rapid development of resistance to diamide insecticides in the smaller tea tortrix, *Adoxophyes honmai* (Lepidoptera: Tortricidae), in the tea fields of Shizuoka Prefecture, Japan. *Appl. Entomol. Zool.* 49: 529-534.
- 106) 梅川 學・宮井俊一・矢野栄二・高橋賢司 (編) (2005) IPM マニュアルー総合的病害虫管理技術ー. 養賢堂, 東京. 236pp.
- 107) 梅谷献二・岡田利承 (2003) 日本農業害虫大辞典. 全国農村教育協会. 東京. 1203pp. [Umeya, K. and T. Okada (2003) Agricultural insect pests in Japan. Zenkoku Noson Kyoiku Association Tokyo. 1203pp.]
- 108) Varela, L. G., P. W. Shearer, V. P. Jones, H. Riedl and S. C. Welter (1997) Monitoring of insecticide resistance in *Phyllonorycter mespilella* (Lepidoptera: Gracillariidae) in four western states. *J. Econ. Entomol.* 90: 252-260.
- 109) 若村定男 (1990) シロイチモジヨトウの産卵と交尾遅延の影響. 応動昆 34: 43-48. [Wakamura, S. (1990) Reproduction of the beet armyworm, *Spodoptera exigua* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae), and influence of delayed mating. *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 34: 43-48. ]
- 110) Wang, X. and Y. Wu (2012) High levels of resistance to chlorantraniliprole evolved in field populations of *Plutella xylostella*. *J. Econ. Entomol.* 105: 1019-1023.
- 111) Whalon, M. E. and B. A. Wingerd (2003) Bt: mode of action and use. *Arch. Insect Biochem.* 54:200-211.
- 112) Wiklund, C. and T. Fagerström (1977) Why do males emerge before females? *Oecologia* 31: 153-158.
- 113) Wise, J. C., P. E. Jenkins, R. V. Poppen and R. Isaacs (2010) Activity of broad-spectrum and reduced-risk insecticides on various life stages of cranberry fruitworm (Lepidoptera: Pyralidae) in highbush blueberry. *J. Econ. Entomol.* 103: 1720-1728.
- 114) 山田偉雄 (1979) コナガ成虫の交尾習性. 応動昆 23: 43-45. [Yamada, H. (1979) Mating habits of the diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.). *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 23: 43-45.]
- 115) 山本敦司 (1998) ハダニ類の殺ダニ剤抵抗性管理における問題点. 植物防疫 52: 215-218. [Yamamoto, A. (1998) Problems in management of acaricide resistance. *Plant Prot.* 52: 215-218.]
- 116) 山本敦司 (2012) 持続的な害虫制御に向けた殺虫剤抵抗性マネジメントの課題. 農薬誌 37: 392-398.
- 117) 山下幸司・村松 功・福永晃士 (2011) 各種殺虫剤のチャノミドリヒメヨコバイに対する殺虫効果. 関西病虫研報 53: 95-97. [Yamashita, K., I. Muramatsu and K. Fukunaga (2011) Effects of several insecticides on tea green leafhopper, *Empoasca onukii* Matsuda. *Ann. Rept. Kansai Pl. Prot.* 53: 95-97.]
- 118) 吉岡哲也 (2012) チャの減農薬栽培に関する研究. 福岡農総試特報 36: 1-75. [Yoshioka, T. (2012) Studies on a tea cropping system with reduced application of chemical pesticides-For enhancing the reputation of Yame green tea. *Special Bull. Fukuoka Agric. Res. Cen.* 36: 1-75.]
- 119) 全国茶生産団体連合会 (2016) 平成 28 年版 茶関係資料. 公益社団法人日本茶業中央会編. 203pp.
- 120) Zhang, S. K., X. B. Ren, Y. C. Wang and J. Su (2014) Resistance in *Cnaphalocrocis medinalis* (Lepidoptera: Pyralidae) to new chemistry insecticides. *J. Econ. Entomol.* 107: 815-820.

## Study of efficient control for the tea leafroller, *Caloptilia theivora* (Walsingham)

Takeshi Kamimuro

### Summary

The tea leafroller, *Caloptilia theivora* (Walsingham) (Lepidoptera: Gracillariidae), is one of the serious pests of tea plants in Japan. There is significant discoloration of green tea extracts with infested leaves by larval feces, which causes a serious economic problem for the tea industry in Japan. The aim of this study is obtaining the knowledge that lead to efficient control of the tea leafroller inhabiting Japanese tea field.

Keywords : Control, Ecology, Insecticide, Insecticide resistance, Tea leafroller

### 1. Copulation and egg-laying behavior of the tea leafroller at laboratory condition

First, I conducted a laboratory investigation on growth of the tea leafroller. Adult males emerged earlier than adult females by 1.5 days at 24 °C. Second, I investigated mating and egg-laying behavior of the tea leafroller at laboratory condition. Female moths were able to copulate from the day of emergence, but male adults did not have mating ability. These observations suggested that males have adopted a mating strategy in which emerging earlier than females, and getting mature before females emerge. Next, I investigated the influence of copulation frequency on the adult longevity and number of eggs laid by females. The male and female adult moths did not allow mating were significantly live longer than the mated males and females. Male and female mated multiple times during adult period when allowed to mate freely; females exposed to males for adult period were laying more eggs than those exposed to a male for only one day. Females laid eggs from at 22:00 to 24:00.

### 2. Laboratory evaluation of insecticides against different life stages of the tea leafroller

The effects of 28 insecticides of 11 types on different life stages of the tea leaf roller were investigated at laboratory condition. The following life stages were examined: egg stage, early leaf-mining stage, late leaf-mining stage, and leaf edge rolling stage. I compared the effects of the different insecticides and examined which life stages were most sensitive to each agent. Insect growth regulators (IGR) were found to be highly effective from the egg stage to the early leaf-mining stage. Neonicotinoid was highly effective in inhibiting egg hatching. Pyrethroid · pyrethrin, avermectin, spinosyn, nereistoxin, and diamide were all highly effective against all the life stages tested. Application of BT and some IGRs during leaf edge rolling allowed making triangular-shaped leaves, however, it killed the larvae in these leaves, reducing the excretion of the larval feces that is responsible for discoloration of green tea extracts. Organophosphate and METI were comparatively less effective against all life stages tested.

### 3. Resistance of the tea leafroller to flufenoxuron in Kagoshima prefecture

I investigated the efficacy of insecticides to control the tea leafroller in tea fields throughout Kagoshima Prefecture. Benzoylurea analog insect growth regulator insecticides (IGRs) exhibited low efficacy against the tea leafroller in the Nansatsu region (Makurazaki City, Minamikyushu City). In a subsequent investigation on the sensitivity of different tea leafroller populations in different regions of Kagoshima Prefecture, the LC<sub>50</sub> for flufenoxuron in the Nansatsu population was found to range from 21.5 to 57.0 ppm (resistance ratio of 239- to 356-fold), confirming the population's reduced sensitivity. I supposed that this is due to the continuous use of this chemical to control a range of insects, including the tea leafroller, for more than ten years. In addition, benzoylurea analog IGRs exhibited high efficacy in all other populations outside the Nansatsu region. Meanwhile, diacylhydrazine analog IGRs (methoxyfenozide), neonicotinoid (dinotefuran), and diamide

(chlorantraniliprole) were confirmed to be effective against the tea leafroller in all regions of the prefecture.

#### **4. Effect of BT agent against the tea leafroller in tea field**

The effects of BT agent to the tea leafroller in tea field were evaluated. It was revealed that the suitable spraying stage of Esumaruku<sup>®</sup>DF, which is a conventional formulation of BT agent, is in the 3 leaf stage at the growing stage of tea sprouts. In addition, Saburina<sup>®</sup>FL, a flowable type BT agent, showed effects in spraying of leaves at 0.5 leaf stage or 3 leaf stage at the growing stage of tea sprouts, suggesting that the suitable spreading range is wide.

#### **5. Effect of direct and indirect treatment of insecticides on the adult tea leafroller**

I investigated the effects of the direct and indirect application of insecticides on the tea leafroller. Chlorantraniliprole, cyantraniliprole and spinetoram showed low LD<sub>50</sub> values with topical application, indicating a strong adult killing effect with contact of insecticides. The latter two insecticides suppressed the number of eggs laid even at low concentrations, but did not affect the survival of adults. Chlorantraniliprole, cyantraniliprole, flubendiamide, spinetoram, spinosad, abamectin, emamectin benzoate, Saburina<sup>®</sup> FL, and decanoyloctanoylglycerol adhering to the tea leaves and rearing containers inhibited the mating of virgin adults and suppressed the oviposition of mated females. The obtained results showed that these insecticides decrease the survival rate of adult insects, number of eggs laid and hatching rate of eggs, and are effective in controlling the tea leafroller.