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

上室 剛*・東垂水 昭子・末永 博†

鹿児島県農業開発総合センター茶業部

Resistance of the Tea Leaf Roller, *Caloptilia theivora* (Lepidoptera: Gracillariidae), to Flufenoxuron in Kagoshima Prefecture, Japan. Takeshi KAMIMURO, Shoko HIGASHITARUMIZU and Hiroshi SUENAGA^{††}. Kagoshima Prefectural Institute for Agricultural Development, Tea Division; Minamikyushu, Kagoshima 897-0303, Japan. *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 61: 99–107 (2017)

Abstract: We investigated the efficacy of insecticides to control the tea leaf roller, *Caloptilia theivora*, which is a major pest of tea fields throughout Kagoshima Prefecture. Benzoylurea analog insect growth regulator insecticides (IGRs) exhibited low efficacy against the tea leaf roller in the Nansatsu region (Makurazaki City, Minamikyushu City). In a subsequent investigation on the sensitivity of different tea leaf roller populations in different regions of Kagoshima Prefecture, the LC₅₀ 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. We speculate that this is due to the continuous use of this chemical to control a range of insects, including the tea leaf roller, 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 leaf roller in all regions of the prefecture. In the future, it will be important to implement integrated pest management using insecticides with different modes of action depending on the region.

Key words: *Caloptilia theivora* (Walsingham); susceptibility; IGR; insecticide

緒 言

チャノホソガ *Caloptilia theivora* (Walsingham) の幼虫はチャ *Cammellia cinere* (L.) Kuntze の新葉を三角形状に巻葉 (以下, 三角巻葉) し, 食害する (南川・刑部, 1979). 三角巻葉が混入した新葉から製造された茶は, 巻葉内の虫糞の影響で浸出液が赤みを帯び, 製品の品質を落とすこと (小泊, 1975) から, 本種はチャの重要害虫である. 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いる (松比良ら, 1999). 鹿児島県では二, 三, 四番茶および秋芽生育期の時期に年間で計 2~4 回防除を行っている. これまで本種の防除に使用されてきた殺虫剤は, 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薬剤であった. しかし IGR 剤のうち, 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, 薬剤抵抗性個体の出現が疑われた. そのため, 県内各地域における本種に対する各種薬剤の防除効果と薬剤感受性を検証する必要があるが生じた.

害虫の薬剤感受性検定では, 薬剤毎に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. 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. 近年, チャ葉の延命処理により本種の幼虫の飼育が可能になり (坂巻ら, 2011), この方法の活用により本種に対する IGR 剤, ネオニコチノイド系, ジアミド系など各種薬剤が効果を発揮する発育ステージが明らかになった (上室ら, 2016).

*責任著者

†現在 鹿児島県農業開発総合センター熊毛支場

††Present address: Kagoshima Prefectural Institute for Agricultural Development, Kumage Branch, Nishinoomote, Kagoshima 891-3101, Japan.

2016 年 7 月 11 日受領 (Received 11 July 2016)

2017 年 1 月 23 日登載決定 (Accepted 23 January 2017)

DOI: 10.1303/jjaez.2017.99

そこで筆者らは、まず鹿児島県各地域の現地チャ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。つぎに、各地域から採集した個体群を供試し、数種薬剤に対する薬剤感受性を検定した。そして、そのうち感受性の低下が認められた薬剤を含む数種の薬剤について LC_{50} を求め、抵抗性の程度について評価したので報告する。

本文に先立ち、現地試験の調査に御協力くださった JA 鹿児島県経済連、各農薬メーカーの皆様および感受性試験における各地域個体群の採集に御協力くださった鹿児島県各地域振興局農政普及課の皆様へ深謝する。なお、本試験の一部は全農農薬委託試験（2010～2012）で実施した。

材料および方法

1. 各地域チャ園における防除効果試験

試験は2010～2012年の3カ年に鹿児島県内各地域のチャ園で行った。供試薬剤は、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®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®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®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®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®フロアブル10、同10%、同4,000倍）とした。なお、供試薬剤の系統名はIRACの作用機構分類（IRAC, 2016）に従った。また、全ての薬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は行わなかった。

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

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5～6.3m²、3反復の試験区を設け、無処理区もそれぞれ設けた。薬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（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(%)

$$=(1-\text{散布区の三角巻葉数}/\text{無散布区の三角巻葉数})\times 100$$

各区の三角巻葉数は、統計ソフト JMP ver. 5.1.2 (SAS Institute Japan Inc., 2002) の Tukey-Kramer 法を用いて処理間差を検定した。

2. 薬剤感受性検定

(1) 供試個体群と供試薬剤

供試個体群は2013年の4～8月まで、以下の鹿児島県内11市町村の13チャ園から採集した。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月は南九州市の頰娃および知覧（鹿児島県農業開発総合センター茶業部内チャ園）、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圃場から、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_{50}) 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）のシュート（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。この成虫に後述の上室ら（2016）の方法に従って、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。本飼育に用いたシュート、採卵および後述の薬剤感受性に用いたチャの新葉は、チョウ目害虫の防除を行っていないチャ園（品種：やぶきた）から採取した。本チャ園は、試験時に継続してシュートや新葉が得られるよう、せん枝時期をずらして管理した。なお、毎世代、雌雄合計で約50～100頭の成虫を維持した。

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

(2) 供試虫の準備

検定および飼育に用いた採卵用のチャの新葉は、チャノホソガの卵や潜葉がない健全なものを選び、坂巻ら（2011）の方法によって以下のように調整した。すなわち、採取したシュートから上位1～2葉目の完全展開葉を1枚ずつ葉柄基部で切除し、中肋を残して基部側の半分の葉身を切除した。次に葉身を切除し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1.2cm、高さ6cm）に1本ずつ挿した（以下、試験管）。この試験管10本を採卵ケージ（直径20cm、高さ25cmの亚克力製円筒容器で上部はゴース張り、底部はプラスチック製の箱のふたを使用）に入れた。採卵ケージには、羽化当日の成虫（雌雄合計約40～80頭）を飼育箱（20×27cm、高さ36cm

で2面はゴース張り、5%のショ糖液をしみ込ませた脱脂綿入り)内で3~4日間飼育し、交尾させた雌雄2ペアを入れて産卵させた。産卵された試験管は翌日に回収し、孵化後の幼虫同士の競合を防ぐため、余計な卵は針で潰して葉当たり卵数1~2卵に調整した。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。各薬剤の検定には、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。

(3) 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。本種は孵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。薬剤の処理時期は、それぞれの供試薬剤が効果を発揮する発育ステージ(上室ら, 2016)として、フルフェノクスロン、テフルベンズロン、クロラントラニリプロールは卵期(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、各薬剤の常用濃度における死亡率を調べた。その後、一部の個体群と薬剤については半数致死濃度(LC₅₀)を求めるため複数濃度を処理して死亡率を調べた。この実験では各薬剤を蒸留水で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秒間浸漬して薬剤を処理し、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。各薬剤区・濃度の供試虫数は17~29個体とした。

(4) 調査方法

調査は上室ら(2016)に従った。すなわち、予備試験で次のステージに達するまでの期間を確認し、その期間を過ぎても次のステージに達しない個体を死亡とした。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シュート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)に入れて飼育を継続した。

(5) 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(1925)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の検定は統計ソフトR ver. 2.15.1(R Development Core Team, 2012)用にインターネット上で公開しているプログラム(青木, 2004)を用いた。

LC₅₀値は卵および幼虫の死亡率を基にBliss(1935)のProbit法により求め、回帰直線の適合度の判定には χ^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。

結 果

1. 各地域のチャ園における防除効果

各地域における防除効果をTable 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。これらの薬剤は、その他の地区(南九州市頤娃、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、クロラントラニリプロールはいずれのチャ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、クロラントラニリ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薬剤も防除効果が認められた。

2. 各地域個体群の薬剤感受性

各薬剤の常用濃度に対する各地域の個体群の効果をTable 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%と低かった。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LC₅₀値をTable 3に示した。フルフェノクスロンに対するLC₅₀値は、枕崎市国見町個体群の卵期処理で21.48ppm、潜葉前期処

Table 1. Effects of each insecticide on populations of *Caloptilia theivora* in tea fields for each examination district

Examination district		Examination year	Application date	Benzoylurea IGR				Diacylhydrazine IGR				Neonicotinoid				Diamide			
				Flufenoxuron EC ($\times 4,000$) ^a		Teflubenzuron EC ($\times 4,000$) ^a		Methoxyfenozide F ($\times 4,000$) ^a		Dinotefuran SG ($\times 2,000$) ^a		Chlorantraniliprole F ($\times 4,000$) ^a		No-treatment					
				Number of triangular- shaped leaf/m ² ($\pm$ SE)	Protective value (%) ^c	Number of triangular- shaped leaf/m ² ($\pm$ SE)	Protective value (%) ^c	Number of triangular- shaped leaf/m ² ($\pm$ SE)	Protective value (%) ^c	Number of triangular- shaped leaf/m ² ($\pm$ SE)	Protective value (%) ^c	Number of triangular- shaped leaf/m ² ($\pm$ SE)	Protective value (%) ^c	Number of triangular- shaped leaf/m ² ($\pm$ SE)	Protective value (%) ^c	Number of triangular- shaped leaf/m ² ($\pm$ SE)	Protective value (%) ^c	Number of triangular- shaped leaf/m ² ($\pm$ SE)	Protective value (%) ^c
Minamikyushu	Chiran	2010	Aug. 23	144.5 $\pm$ 1.9 b	59.6	255.0 $\pm$ 48.8 ab	28.8					0.7 $\pm$ 0.7 c	99.8	358.0 $\pm$ 7.5 a					
	Ei	2010	Aug. 23	11.8 $\pm$ 0.2 b	73.8	11.3 $\pm$ 1.5 b	74.9			NT ^b		0.0 $\pm$ 0.0 b	100	45.2 $\pm$ 10.4 a					
Kirishima	Makizono	2010	Sep. 6	2.1 $\pm$ 0.6 b	94.9	2.5 $\pm$ 0.2 b	94.1					0.0 $\pm$ 0.0 b	100	41.8 $\pm$ 8.1 a					
Shibushi	Ariake	2010	Aug. 24	0.0 $\pm$ 0.0 c	100	1.5 $\pm$ 0.2 b	71.0					0.1 $\pm$ 0.1 c	98.0	5.3 $\pm$ 0.2 a					
Makurazaki	Itashikihonmachi	2011	Aug. 31	2.2 $\pm$ 0.6 ab	32.1	3.3 $\pm$ 0.9 a	0.0					0.1 $\pm$ 0.1 b	98.1	3.3 $\pm$ 0.6 a					
	Beppunishimachi	2011	Aug. 31	22.7 $\pm$ 1.5 b	47.2	15.2 $\pm$ 0.4 c	64.7					0.2 $\pm$ 0.2 e	99.6	43.0 $\pm$ 2.2 a					
Minamikyushu	Chiran	2011	Sep. 1	34.9 $\pm$ 0.7 a	22.1	42.2 $\pm$ 1.9 a	5.9					0.5 $\pm$ 0.3 c	98.9	44.9 $\pm$ 4.8 a					
Minamikyushu	Chiran	2012	Aug. 24	11.3 $\pm$ 3.8 ab	10.7	5.6 $\pm$ 0.5 abc	56.1					0.1 $\pm$ 0.1 c	99.0	12.7 $\pm$ 0.7 a					
Satsumasendai	Iriki	2012	Sep. 6	1.9 $\pm$ 1.3 bc	89.9	3.3 $\pm$ 0.7 b	82.2					0.0 $\pm$ 0.0 c	100	18.4 $\pm$ 0.4 a					

^a Recommended field rate. EC: Emulsifiable concentrate, F: Flowable, SG: Water soluble granule.^b NT: Not tested.^c Protective value (%) = $(1 - (\text{Number of triangular-shaped leaves on treatment block} / \text{Number of triangular-shaped leaves on no-treatment block})) \times 100$.^d Means followed by the same letter within the same rows are not significantly different (Tukey-Kramer test, $p > 0.05$).

Table 2. Corrected mortality against each insecticide at recommended field rate of *C. theivora* collected from each district

Populations		Benzoylurea IGR				Neonicotinoid				Diamide			
		Flufenoxuron EC ($\times 4,000$) ^a		Teflubenzuron EC ($\times 4,000$) ^a		Dinotefuran SG ($\times 2,000$) ^a		Chlorantraniliprole F ($\times 4,000$) ^a					
City/Town	District	Application at egg stage		Application at early/leaf-mining stage		Application at egg stage ^b		Application at egg stage		Application at early/leaf-mining stage			
		<i>n</i> ^c	Mortality rate (%) ^{d,e}	<i>n</i> ^c	Mortality rate (%) ^{d,e}	<i>n</i> ^c	Mortality rate (%) ^{d,e}	<i>n</i> ^c	Mortality rate (%) ^{d,e}	<i>n</i> ^c	Mortality rate (%) ^{d,e}	<i>n</i> ^c	Mortality rate (%) ^{d,e}
Makurazaki C.	Kunimichou	22	50.9 ab	19	48.3 ab	27	80.0 c	23	81.0	28	100	26	100
	Makayamachi	26	11.7 a	23	9.5 a	25	17.9 a	21	68.7	26	100	23	100
Minamikyushu C.	Chiran	20	85.0 bc	18	100 b	20	75.0 abc	23	100	21	100	22	100
	Ei	26	85.9 bc	18	87.8 b	29	49.2 ab	20	78.0	25	100	21	95.3
Kirishima C.	Mizobe	21	100 c	23	100 b	24	87.0 c	22	84.3	20	100	22	100
Yusui T.	Koba	23	100 c	20	100 b	24	95.1 c	21	100	24	100	21	100
Satsuma T.	Gunyou	27	100 c	21	100 b	27	100 c	24	100 NS	25	100 NS	20	100 NS
Soo C.	Sueyoshi	23	100 c	22	100 b	23	100 c	19	100	23	100	17	100
Kinko T.	Tashirofumoto	26	100 c	26	100 b	24	90.6 c	27	88.1	26	100	27	100
Kanoya C.	Higashibaru	26	100 c	28	100 b	27	86.9 c	27	90.8	26	100	25	100
Nishinoomote C.	Furuta	23	95.1 c	25	95.4 b	23	90.2 c	23	90.0	24	100	22	100
Yakushima T.	Anbou	28	100 c	21	100 b	28	95.8 c	21	100	26	100	18	100
	Kusukawa	22	100 c	22	100 b	26	95.3 c	25	95.4	25	100	25	100

^a Recommended field rate. Abbreviations of each formulation refer to Table 1.

^b Dinotefuran is relatively less effective against early leaf-mining stage of *C. theivora* (Kamimuro et al., 2016).

^c Number tested.

^d Mortality rate were estimated by failure rate of leaf edge (application at egg stage) or triangular-shaped leaf (application at early leaf-mining stage). Mortality data were corrected according to Abbott (1925).

^e Values followed by the same letter in the same column are not significantly different (Steel–Dwass test, $p > 0.05$). NS: Not significant.

Table 3. Susceptibility of each insecticide to each population of *C. theivora*

Type of insecticide	Insecticides	Populations			Application at egg stage				Application at early leaf-mining stage				
		City/Town	District	^b <i>n</i>	LC ₅₀ (ppm)	95% confidence limit of LC ₅₀ (ppm)	Slope	RR ^c	^b <i>n</i>	LC ₅₀ (ppm)	95% confidence limit of LC ₅₀ (ppm)	Slope	RR ^c
IGR	Flufenoxuron EC (×4,000; 25 ppm) ^a	Makurazaki C.	Kunimichou	218	21.48	11.74–33.79	1.09	238.67	115	24.01	12.53–45.73	1.14	150.06
		Minamikyushu C.	Makayamachi			NT ^d			134	57.01	38.52–78.77	2.08	356.31
			Chiran	229	1.22	0.33–2.23	0.89	13.56	211	1.46	0.83–2.11	1.83	9.13
		Kinko T.	Tashirotumoto	300	0.02	0.01–0.02	1.61	0.22	216	0.05	0.02–0.09	0.81	0.31
		Kanoya C.	Higashibaru	293	0.01	0.01–0.02	1.06	0.11	249	0.06	0.03–0.09	1.04	0.38
		Yakushima T.	Anbou	310	0.06	0.03–0.09	0.89	0.67	237	0.12	0.04–0.22	0.77	0.75
			Kusukawa	289	0.09	0.05–0.15	0.88	—	280	0.16	0.08–0.27	0.85	—
Neonicotinoid	Dinotefuran SP (×2,000; 100 ppm) ^a	Makurazaki C.	Kunimichou	159	13.85	9.68–21.69	2.06	3.13					
		Minamikyushu C.	Makayamachi	177	5.95	3.10–8.89	1.40	1.34					
			Chiran	130	14.26	11.24–18.00	3.53	3.22					— ^e
		Yakushima T.	Anbou	183	6.92	4.60–9.68	1.85	1.56					
			Kusukawa	170	4.43	2.32–6.29	1.93	—					
Diamide	Chlorantraniliprole F (×4,000; 25 ppm) ^a	Makurazaki C.	Kunimichou	323	0.05	0.03–0.08	1.30	1.00	342	0.22	0.14–0.34	1.04	1.22
		Minamikyushu C.	Makayamachi			NT ^d			209	0.12	0.08–0.18	1.71	0.67
			Chiran	182	0.07	0.05–0.12	1.15	1.40	231	0.20	0.11–0.39	0.75	1.11
		Kinko T.	Tashirotumoto	224	0.01	0.00–0.05	0.70	0.20			NT ^d		
		Kanoya C.	Higashibaru	209	0.01	0.01–0.02	1.97	0.20			NT ^d		
		Yakushima T.	Anbou	291	0.03	0.02–0.05	1.15	0.60	146	0.13	0.08–0.19	1.71	0.72
			Kusukawa	282	0.05	0.03–0.08	1.04	—	244	0.18	0.11–0.27	1.32	—

^a Recommended field rate. Abbreviations of each formulation refer to Table 1.^b Number tested, including control.^c Resistance Ratio = LC₅₀ value of each population/LC₅₀ value of Kusukawa district (susceptible population).^d NT: Not tested.^e Dinotefuran is relatively less effective against early leaf-mining stage of *C. theivora* (Kamimuro et al., 2016).

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_{50} 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が高い値となった。また、南九州市知覧町の LC_{50} 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_{50} 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_{50} 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_{50} 値は、供試した全ての個体群で卵期処理で 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。

考 察

本研究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。また、感受性検定に供試した個体群を採集したチャ園はそれぞれの地区でチャが集団的に栽培されている地区内にあるチャ園を選定した。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、本県のチャ園では 1994 年から使用され始め、当初はチャノミドリヒメヨコバ *Empoasca onukii* Matsuda, チャノキイロアザミウマ *Scirtothrips dorsalis* Hood, チャノコカクモンハマキ *Adoxophyes honmai* Yasuda, およびチャハマキ *Homona magnanima* Diakonoff 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 *Plutella xylostella* (Linnaeus) がベンゾイル尿素系 IGR 剤の薬剤に対して抵抗性を獲得した事例でも本系統薬剤の連続使用がその要因として挙げられている (足立・山下, 1994)。

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) が有機リン系薬剤に対して (Varela et al., 1997), *Phyllonorycter blancardella*

(Fabricius) が有機リン、ピレスロイド、メソミルの各薬剤に対して抵抗性を獲得した報告がある (Pree et al., 1990)。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 (Mafi and Ohbayashi, 2006) や *P. blancardella* (Marshall et al., 1988) 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 系薬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 (Talekar and Shelton, 1993; 諫山ら, 2004; Furlong et al., 2013)。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_{50} 値として 1.25~46.2 ppm (抵抗性比 25~924 倍) (足立・山下, 1994) や、11.8~329 ppm (末永ら, 1992) 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_{50} 値としては 0.80 ppm (抵抗性比 12 倍) (Perng et al., 1988) や、23.9~100 ppm (末永ら, 1992) 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_{50} 値として 27.4~189 ppm (抵抗性比 48.1~332 倍) (小杉・太田, 2001), フルフェノクスロン (実用濃度: 25 ppm) に対する LC_{50} 値として 107.0 ppm (抵抗性比 305.7 倍) (小澤・内山, 2013) 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_{50} 値は求めているものの、南薩地域の現地チャ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 (Ismail and Wright, 1991) やコドリシガ *Cydia pomonella* (L.) (Sauphanor and Bouvier, 1995) 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。

本研究では、南薩地域以外の霧島市、薩摩川内市、志布志市のチャ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_{50} 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) の LC_{50} 値 (0.05~0.09 ppm) (El-Sayed and Aamir, 2011) 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、どの地域のチャ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、作用特性の異なる薬剤のローテーション使用である(浜, 1996)。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薬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薬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薬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。

摘 要

鹿児島県内各地のチャ園においてチャの重要害虫である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_{50} 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ると推測された。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。今後は地域により作用性の異なる殺虫剤を用いた体系防除を行うことが重要である。

引 用 文 献

- Abbott, W. S. (1925) A method of computing the effectiveness of an insecticide. *J. Econ. Entomol.* 18: 265–267.
- 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.]
- 青木繁伸 (2004) スティール・ドゥワス (Steel-Dwass) の方法による多重比較。http://aoki2.si.gunma-u.ac.jp/R/Steel-Dwass.html [Aoki, S. (2004) Multiple comparisons by Steel-Dwass method. http://aoki2.si.gunma-u.ac.jp/R/Steel-Dwass.html]
- Bliss, C. I. (1935) The calculation of the dosage-mortality curve. *Ann. Appl. Biol.* 22: 134–167.
- 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*, Boisdu (Lepidoptera: Noctuidae). *Crop Prot.* 30: 645–650.
- Furlong, M. J., D. J. Wright and L. M. Dosdall (2013) Diamondback moth ecology and management: problems, progress, and prospects. *Annu. Rev. Entomol.* 58: 517–541.
- 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.]
- IRAC (2016) IRAC Mode of Action Classification Scheme. Version 8.1. http://www.irac-online.org/documents/moa-classification/?ext=pdf
- 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.]
- Ismail, F. and D. J. Wright (1991) Cross-resistance between acyl-urea insect growth regulators in a strain of *Plutella xylostella* L. (Lepidoptera: Yponomeutidae) from Malaysia. *Pestic. Sci.* 33: 359–370.
- 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.]
- 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.]
- 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.]
- Mafi, S. A. and N. Ohbayashi (2006) Toxicity of insecticides to the citrus leafminer, *Phyllocnistis citrella*, and its parasitoids, *Chrysoschelis pentheus* and *Sympiesis striatipes* (Hymenoptera: Eulophidae). *Appl. Entomol. Zool.* 41: 33–39.
- 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.
- 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.]
- 南川仁博・刑部 勝 (1979) 茶樹の害虫. 日本植物防疫協会, 東京. 322 pp. [Minamikawa, J. and M. Osakabe (1979) *Insect Pests of Tea Plant*. Japan Plant Protection Association, Tokyo. 322 pp.]
- 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. <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.”]
- 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. *Ann. Rept. Kanto Pl. Prot. Soc.* 60: 139–142.]
- 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.
- 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.
- R Development Core Team (2012) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. <http://www.R-project.org/>
- 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.]
- SAS Institute Japan Inc. (2002) JMP® 統計解析およびグラフ機能ガイド 5 日本語版. SAS Institute Japan Inc., 東京. 187 pp. [SAS Institute Japan Inc. (2002) *JMP® Statistics and Graphics Guide Version 5 Japanese Edition*. SAS Institute Japan Inc., Tokyo. 187 pp.]
- 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.
- 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.]
- Talekar, N. S. and A. M. Shelton (1993) Biology, ecology, and management of the diamondback moth. *Annu. Rev. Entomol.* 38: 275–301.
- 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.