鹿児島県のチャハマキ (チョウ目: ハマキガ科) における ジアミド系殺虫剤抵抗性の出現とその遺伝様式

上室 剛^{*,†}

鹿児島県農業開発総合センター茶業部

Resistance to Diamide Insecticides and Its Inheritance in the Oriental Tea Tortrix, *Homona magnanima* (Lepidoptera: Tortricidae), in Kagoshima Prefecture, Japan. Takeshi KAMIMURO^{*,††} Kagoshima Prefectural Institute for Agricultural Development, Tea Division; Minamikyushu, Kagoshima 897-0303, Japan. *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 65: 87–97 (2021)

Abstract: We investigated the efficacy of various insecticides, including diamide, on the oriental tea tortrix, *Homona magnanima* Diakonoff (Lepidoptera: Tortricidae), a major pest of tea (*Camellia cinensis*), in Kagoshima Prefecture, Japan. The results showed that diamide insecticides had low efficacy against the oriental tea tortrix in the southern part of the prefecture (Nansatsu region; Makurazaki City, Minamikyushu City). The LC₅₀ values ranged from 28.26 to 267.62 ppm (Resistance Ratio (RR): 41.0–387.9) for flubendiamide, 40.60 to 67.75 ppm (RR: 24.9–41.6) for chlorantraniliprole, and 40.33 to 107.49 ppm (RR: 93.8–250.0) for cyantraniliprole, indicating that the oriental tea tortrix has developed resistance to diamide insecticides. The insecticides other than diamide and benzoylurea IGR were highly effective. However, in other areas of the prefecture, all insecticides (including diamide) tested showed high efficiency. Furthermore, crossbreeding experiments showed that diamide resistance is autosomal, incompletely recessive. In the future, it is necessary to monitor the recovery of susceptibility against diamide insecticides in the Nansatsu region while avoiding the expansion of resistance development.

Key words: Diamide; inheritance; insecticide; resistance; susceptibility

緒 言

チャハマキ *Homona magnanima* Diakonoff (チョウ目: ハマキガ科) およびチャノコカクモンハマキ *Adoxophyes honmai* Yasuda (チョウ目: ハマキガ科) は、いずれも幼虫がチャ *Camellia cinensis* (L.) O. Kuntze の葉をつづり合わせながら巻葉し、その中で葉を加害する (南川・刑部, 1979)。多発すると新芽の生育遅延を起し収量や製茶品質の低下を招く (南川・刑部, 1979) ことからチャの重要害虫である。鹿児島県では両種ともに年間に 4 から 5 回、概ね同時期に発生する (鬼丸ら, 1969) ことから、防除時期も重なっている。これまで本県における両種の防除には、顆粒病ウイルス製剤、または昆虫成長制御剤 (以下、IGR 剤)、アベルメクチン系、スピノシン系、ジアミド系の殺虫剤が使用されてきた。しかし、ジアミド系殺虫剤に

ついて 2014 年秋からチャハマキ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) の一部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。

ジアミド系殺虫剤は、細胞内カルシウム濃度調節に関与するリアノジン受容体に作用することで、持続的な筋収縮を引き起こし、殺虫活性を発揮する (Tohnishi et al., 2005; Cordova et al., 2006; Ebbinghaus-Kintscher et al., 2006; Masaki, 2008; 藤岡, 2018)。本系統は比較的新しい殺虫剤であり、国内ではフルベンジアミドが 2007 年 (廣岡, 2007)、クロラントラニリプロールが 2009 年 (島, 2009)、シアントラニリプロールが 2014 年 (島, 2014)、シクラニリプロールが 2017 年 (森田, 2018)、テトラニリプロールが 2020 年 (安宅, 2020) にそれぞれ農薬登録された。しかし、近年、本系統殺虫剤に対するチョウ目害虫の抵抗性発

*E-mail: kamimuro-takesi@pref.kagoshima.lg.jp

†現在 鹿児島県農業開発総合センター大隅支場

††Present address: Kagoshima Prefectural Institute for Agricultural Development, Osumi Branch, Kanoya, Kagoshima 893-1601, Japan.

2020 年 8 月 6 日受領 (Received 6 August 2020)

2020 年 12 月 23 日登載決定 (Accepted 23 December 2020)

DOI: 10.1303/jjaez.2021.87

達やその疑いが国内外で報告されている。例えば、海外ではコナガ *Plutella xylostella* (Linnaeus) (チョウ目：コナガ科) (Trocza et al., 2012; Wang and Wu, 2012), コブノメイガ *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée) (チョウ目：メイガ科) (Zhang et al., 2014), トマトキバガ *Tuta absoluta* (Meyrick) (チョウ目：キバガ科) (Roditakis et al., 2015), 国内ではコナガ (福田・林川, 2014; 柴田ら, 2017; 名雪ら, 2018), チャノコカクモンハマキ (Uchiyama and Ozawa, 2014), シロイチモジヨトウ *Spodoptera exigua* (Hübner) (チョウ目：ヤガ科) (岡本, 2018) において、ジアミド系殺虫剤に対する抵抗性発達が報告されている。しかしチャハマキについてはジアミド系殺虫剤に対する抵抗性発達の報告は見当たらない。

持続的な害虫制御を成功させるためには、殺虫剤抵抗性の発達を抑えることが重要である (山本, 2012)。さらに殺虫剤抵抗性が発達した場合、感受性の回復過程の予測やシミュレーションは、抵抗性対策の指導にとって重要となる。実際に、感受性が速く回復するための条件のひとつとして抵抗性が劣性遺伝をすることが挙げられている (山本, 2012)。また、殺虫剤抵抗性発達の速度は抵抗性の遺伝様式に左右されると考えられる (宮田・斉藤, 1978) ことから、殺虫剤抵抗性の遺伝様式を明らかにすることは害虫管理において重要である (Roush and Croft, 1986)。これまでにチョウ目害虫においてジアミド系殺虫剤抵抗性の遺伝様式が解明されている例として、中国におけるコナガのクロラントラニプロール抵抗性 (Guo et al., 2014) や、静岡県におけるチャノコカクモンハマキのフルベンジアミドおよびクロラントラニプロール抵抗性があり、その遺伝様式と抵抗性発達の速度などが議論されている (内山・小澤, 2017)。

そこで本研究では、鹿児島県の各地域の茶園から採集したチャハマキの各個体群について、各種殺虫剤の常用濃度における効果を評価した。また、そのうちのジアミド系殺虫剤を含む数種殺虫剤については、LC₅₀ 値を算出し抵抗性の程度について評価した。さらに、ジアミド系殺虫剤抵抗性が確認された個体群については、その遺伝様式を明らかにしたので報告する。

本文に先立ち、殺虫剤抵抗性の遺伝様式の試験において貴重なご助言と情報を賜った静岡県農林技術研究所茶業研究センターの内山 徹博士に深謝する。

材料および方法

1. 薬剤感受性検定

(1) 供試個体群と供試薬剤

実験には、2015 年と 2016 年に鹿児島県内の 7 市町村から採集した以下の 10 個体群を供試した。各個体群の採集時期は、枕崎市の瀬戸と同市まかや町 (両地点間の距離約 2.5km)、および南九州市知覧町永里 (鹿児島県農業開発総合センター茶業部内) と同市松山町 (両地点間の距離約 9km) が 2015 年の 5 月、志布志市有明町が同年 8 月、南九州市頴娃町青戸と同町牧之内 (両地点間の距離約 5km) が同年 10 月、鹿屋市東原と霧島市牧園が 2016 年の 4 月、最後に曾於市末吉町が同年 8 月である。これらのうち、南九州市知覧町永里の個体群は本試験における結果をふまえて感受性個体群とした。いずれも約 100~200 個体の幼虫 (F₀) を採集した。餌として人工飼料 (インセクタ LFS, 日本農産工業 (株) 製) を与えて、野口 (1991) の方法を基に 23.9±0.7°C, 14L:10D の条件下で累代飼育し、1~5 世代後の 2~3 齢幼虫を供試した。なお、供試する幼虫は、試験時に茶葉を好んで摂食するようにふ化直後から農薬未処理

Table 1. Insecticides tested

Type of insecticide	Common Japanese name ^a	Active component (%)	Recommended field rate
Diamide	Phoenix [®] FL	Flubendiamide (18)	×2,000
	Samcor [®] FL 10	Chlorantraniliprole (10)	×2,000
	Exirel [®] SE	Cyantraniliprole (10.2)	×2,000
Spinosyn	Diana [®] SC	Spinetoram (11.7)	×2,500
	Spinoace [®] FL	Spinosad (25)	×4,000
Avermectin	Affirm [®] EC	Emamectin benzoate (1.0)	×1,000
Benzoylurea IGR	Cascade [®] EC	Flufenoxuron (10)	×4,000
Diacylhydrazine IGR	Falcon [®] FL	Methoxyfenozide (20.0)	×4,000
	Romudan [®] FL	Tebufenozide (20.0)	×1,000
Pyrethroid	Rody [®] EC	Fenpropathrin (10.0)	×1,000
	Agrosrin [®] WP	Cypermethrin (6.0)	×1,000
	Telstar [®] WP	Bifenthrin (2.0)	×1,000

^aFL, flowable; SE, suspo emulsion; SC, suspension concentrate; EC, emulsifiable concentrate; WP, wettable powder.

の茶葉 (品種: やぶきた) を与えた。

常用濃度における薬剤感受性検定に供試した薬剤を Table 1 に示した。系統名は Insecticide Resistance Action Committee (IRAC) (<https://irac-online.org/content/uploads/MoA-classification.pdf>) に従った。それぞれの殺虫剤は蒸留水で常用濃度に希釈し、展着剤は加用しなかった。対照は蒸留水のみとした。また、これらの殺虫剤のうち、ジアミド系のフルベンジアミド 18% フロアブル、クロラントラニリプロール 10% フロアブルおよびシアントラニリプロール 10.2% SE, ジアシルヒドラジン系 IGR のメトキシフェノジド 20.0% フロアブル, アベルメクチン系のエマメクチン安息香酸塩 1.0% 乳剤, スピノシン系のスピネトラム 11.7% SC については、各有効成分の LC_{50} 値を算出するため、5~9 段階に希釈して用いた。 LC_{50} 値を算出した個体群は、枕崎市瀬戸と同市まかや町、志布志市有明町、南九州市穎娃町青戸および同市知覧町永里とした。

(2) 検定方法

検定方法は小杉 (1998) に従った。すなわち鹿児島県農業開発総合センター茶業部内の農薬無使用の茶園から成葉 (品種: やぶきた) を採集し、各薬剤・濃度の薬液に 10 秒間浸漬した。浸漬後の茶葉は風乾し、湿らせたろ紙を敷いたプラスチック製容器 (直径 12.9 cm, 高さ 5.9 cm) に各薬剤・濃度の組み合わせ毎に 5 枚ずつを投入し、幼虫を 10 頭ずつ放飼した。このような処理を 3 反復 (計 30 頭) 実施し、処理 2, 4, 6 および 8 日後に生死を判定し、結果は 8 日後の死亡率を示した。なお、苦悶虫や正常に歩行できない個体は死虫として扱った。常用濃度における死虫率は Abbott (1925) により補正した。各薬剤処理区の死虫率の比較は、Steel-Dwass 法で行った。この分析は統計ソフト JMP ver. 12.2.0 (SAS Institute, 2015) を用いて行った。 LC_{50} 値は 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。 LC_{50} 値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。さらに得られた各個体群の LC_{50} 値を感受性個体群 (南九州市知覧町永里採集) の LC_{50} 値で除することにより抵抗性比 (RR) を求めた。

2. ジアミド系殺虫剤抵抗性の遺伝様式

(1) 供試個体群と交配方法

ジアミド系殺虫剤抵抗性の遺伝様式を調べるため、抵抗性個体群と感受性個体群の正逆交配を行った。抵抗性個体群には、上記の試験でジアミド系殺虫剤抵抗性が明らかになった枕崎市瀬戸と同市まかや町の各個体群、感受性個体群には南九州市知覧町永里の個体群を用いた。抵抗性個体 (♂) × 感受性個体 (♀) の次世代を F_1 , 感受性個体 (♂) × 抵抗性個体 (♀) の次世代を F_1' とした。交配方法は内山・小澤 (2017) と同様の方法で行い、具体的な方法を下記に示した。グラシン紙を敷いたプラスチック製容器 (22 ×

30 × 6 cm) に、5% ショ糖液を含ませた脱脂綿とともに、感受性および抵抗性個体群の雌雄成虫を 20 頭前後ずつ投入した。正逆交配毎に 2~3 箱準備した。成虫投入 5~7 日後および 13~15 日後にグラシン紙を回収し、産卵された卵塊をグラシン紙ごと切り分け、交配組み合わせが同じ複数の箱から、同じ日に得られた卵塊はまとめた。回収した卵塊は「1. 薬剤感受性検定 (1) 供試個体群と供試薬剤」に示した方法と同様に飼育した。

(2) 供試薬剤と検定方法

供試薬剤はジアミド系のフルベンジアミドフロアブル、クロラントラニリプロールフロアブル、シアントラニリプロール SE の 3 薬剤とした。各薬剤を蒸留水で 7~9 段階に希釈した。各薬液の調製、検定方法および LC_{50} 値の算出は上記に示した「1. 薬剤感受性検定 (2) 検定方法」と同様に行った。 F_1 または F_1' 個体群のプロビット死亡率を算出し、薬剤濃度に対するそれらの回帰直線の傾きの差の解析は共分散分析で行った。この解析は統計ソフト JMP ver. 12.2.0 (SAS Institute, 2015) を用いて行った。 F_1 または F_1' 個体群における優性度 D は、Stone (1968) の次式により求めた。

$$D = (2X_2 - X_1 - X_3) / (X_1 - X_3)$$

ここで、 $X_1 = \log_{10}$ (抵抗性個体群の LC_{50} 値), $X_2 = \log_{10}$ (F_1 または F_1' 個体群の LC_{50} 値), $X_3 = \log_{10}$ (感受性個体群の LC_{50} 値) を示す。 $D = 1$ の場合は完全優性, $0 < D < 1$ の場合は不完全優性, $-1 < D < 0$ の場合は不完全劣性, $D = -1$ の場合は完全劣性の遺伝様式と判断される。

結 果

1. 各地域個体群の薬剤感受性

供試個体群における各薬剤の常用濃度の死亡率を Table 2 に示した。南薩地域の多くの地点 (枕崎市瀬戸、同市まかや町および南九州市穎娃町青戸) では、チャハマキに対するジアミド系 3 殺虫剤の効果が低下し、一部地点ではベンゾイル尿素系 IGR の効果も低下していた。ジアミド系のフルベンジアミドに対しては、枕崎市の 2 地区と南九州市の穎娃町青戸で死亡率が 34.5~70.0%, クロラントラニリプロールに対しては、枕崎市の 2 地区と南九州市の穎娃町青戸で死亡率が 41.4~62.1%, シアントラニリプロールに対しては、枕崎市の瀬戸と南九州市の穎娃町青戸で死亡率が 55.2~65.5% であった。これらの死亡率は、これら以外の 7 地区のジアミド系殺虫剤の高い死亡率と対照的であった。ベンゾイル尿素系 IGR であるフルフェノクスロンの死亡率も、枕崎市と南九州市の個体群 (65.5~89.7%) で、これら以外の個体群 (90.0~100%) と比べても低かった。

スピノシン系の 2 薬剤, アベルメクチン系の 1 薬剤, ジ

Table 2. Corrected mortality of *Homona magnanima* larvae exposed for 8 d to tea leaves treated with tested insecticides at the recommended field rate

Type of insecticide	Insecticides	Collection sites									
		Makurazaki C.		Minamikyushu C.				Kirishima C.	Soo C.	Shibushi C.	Kanoya C.
		Seto	Makaya	Chiran Nagasato	Chiran Matsuyama	Ei Aoto	Ei Makinouchi	Makizono	Sueyoshi	Ariake	Higashibaru
Diamide	Flubendiamide	34.5 dc	70.0 b	100 a	100 a	69.0 ab	96.4 a	100 a	100 a	100 a	100 a
	Chlorantraniliprole	41.4 dc	46.7 b	100 a	93.1 a	62.1 b	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a
	Cyantraniliprole	55.2 bc	86.7 b	100 a	93.1 a	65.5 b	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a
Spinosyn	Spinetoram	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a
	Spinosad	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a
Avermectin	Emamectin benzoate	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a
Benzoylurea IGR	Flufenoxuron	75.9 ab	70.0 b	80.0 a	89.7 a	65.5 b	75.0 a	100 a	100 a	100 a	90.0 a
Diacylhydrazine IGR	Methoxyfenozide	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a
	Tebufenozide	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a
Pyrethroid	Fenpropathrin	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a
	Cypermethrin	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a
	Bifenthrin	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a
Control (Distilled water)		3.3 d	0 c	0 b	3.3 b	3.3 c	6.7 b	0 b	0 b	0 b	3.3 b

The number of larvae tested was 30 for all combinations of populations and insecticides. Mortality data were corrected according to Abbott (1925). Values followed by the same letter in the same column are not significantly different from each other (Steel-Dwass test, $p > 0.01$).

アシルヒドラジン系 IGR の 2 薬剤および合成ピレスロイド系の 3 薬剤については地域を問わず 10 個体群全てにおいて死亡率が 100% と高い効果が認められた。

ジアミド系およびその他 3 系統の薬剤に対する各地域個体群の LC_{50} 値を Table 3 に示した。常用濃度でジアミド系殺虫剤の効果が低かった南薩地域 (枕崎市瀬戸, 同市まかや町および南九州市頴娃町青戸) の個体群の LC_{50} 値は高い値を示した。ジアミド系のフルベンジアミドに対する LC_{50} 値は, 枕崎市瀬戸個体群で 267.62 ppm, 同市まかや町個体群で 28.26 ppm, 南九州市頴娃青戸個体群で 35.47 ppm であった。これらの値は, 感受性個体群 (南九州市知覧町永里個体群) の LC_{50} 値 (0.69 ppm) に比べて抵抗性比が約 41~388 倍と高く, 特に枕崎市瀬戸個体群は常用希釈濃度 (90 ppm) と比べても高い値となった。また, これら 3 個体群は, その他のジアミド系殺虫剤に対しても LC_{50} 値が高かった。クロラントラニプロールでは 40.60~67.75 ppm (感受性個体群の LC_{50} 値 1.63 ppm), シアントラニプロールでは 40.33~107.49 ppm (感受性個体群の LC_{50} 値 0.43 ppm) と高く, 抵抗性比もクロラントラニプロールでは約 24~42 倍, シアントラニプロールでは約 94~250 倍と高い値を示した。一方, ジアミド系以外のスピネトラム, エマメクチン安息香酸塩, メトキシフェノジドに対する LC_{50} 値は, 全ての個体群で常用希釈濃度に比べて非常に低い値を示した。

2. ジアミド系殺虫剤抵抗性の遺伝様式

前節で高度のジアミド系殺虫剤抵抗性が確認された枕

崎市瀬戸個体群 (R) と感受性個体群である南九州市知覧町永里個体群 (S) およびこれらの正逆交配で得られた F_1 と F_1' の LC_{50} 値を Table 4 に示した (両親のデータは Table 3 を参照)。 F_1 および F_1' の LC_{50} 値はそれぞれ, フルベンジアミドは 4.52 ppm と 3.89 ppm, クロラントラニプロールは 6.70 ppm と 7.19 ppm, シアントラニプロールは 4.12 ppm と 4.14 ppm と算出された。薬剤濃度に対する F_1 と F_1' の死亡率の回帰直線はいずれの薬剤も, どちらかの親の回帰直線に近寄ることなく, R および S 個体群の回帰直線の間に位置した (Fig. 1 (A), 2 (A), 3 (A))。また, F_1 および F_1' の回帰直線の傾きにいずれの薬剤でも有意差は認められなかった (共分散分析, $p > 0.05$)。これより, 枕崎市瀬戸個体群のジアミド系 3 種殺虫剤に対する抵抗性は伴性遺伝ではなく, 常染色体性の遺伝様式であることが示唆された。さらに, F_1 と F_1' の優性度 D (Stone, 1968) はそれぞれ, フルベンジアミドは -0.369 と -0.420, クロラントラニプロールは -0.108 と -0.064, シアントラニプロールは -0.023 と -0.021 と算出され, いずれの薬剤ともに $-1 < D < 0$ であった (Table 4)。これより, 本個体群のジアミド系 3 種殺虫剤に対する抵抗性は不完全劣性の遺伝様式であることが示唆された。

次に, 枕崎市まかや町の抵抗性個体群 (R) の場合も, 同様に感受性個体群である南九州市知覧町永里個体群 (S) との正逆交配の次世代について, ジアミド系 3 種殺虫剤の LC_{50} 値を Table 4 に示した (両親のデータは Table 3 を参照)。 F_1 と F_1' の LC_{50} 値はそれぞれ, フルベンジアミ

Table 3. Susceptibility of *H. magnanima* larvae to diamide and 3 other types of insecticides

Type of insecticide	Insecticides	Populations		<i>n</i> ^b	LC ₅₀ (ppm)	95% confidence interval of LC ₅₀ (ppm)	Slope	χ^2 value ^c	RR ^d
		City	District						
Diamide	Flubendiamide (×2,000, 90 ppm) ^a	Makurazaki	Seto	300	267.62	29.16–806.03	0.57	18.5	387.9
			Makaya	300	28.26	7.88–66.20	0.89	15.1	41.0
		Shibushi	Ariake	210	0.40	0.38–3.29	1.35	6.6	0.6
		Minamikyushu	Ei Aoto	210	35.47	1.00–75.52	1.14	11.3	51.4
			Chiran Nagasato	240	0.69	0.33–1.33	2.60	6.6	—
	Chlorantraniliprole (×2,000, 50 ppm) ^a	Makurazaki	Seto	240	38.78	12.18–83.74	1.28	11.3	23.8
			Makaya	240	67.75	15.62–263.00	0.85	13.3	41.6
		Shibushi	Ariake	210	1.81	1.02–3.23	1.92	6.6	1.1
		Minamikyushu	Ei Aoto	240	40.60	16.67–73.61	1.39	13.3	24.9
			Chiran Nagasato	240	1.63	0.81–3.38	1.53	11.3	—
	Cyantraniliprole (×2,000, 51 ppm) ^a	Makurazaki	Seto	240	43.98	19.65–86.12	1.50	11.3	102.3
			Makaya	240	107.49	61.79–191.67	1.86	11.3	250.0
		Shibushi	Ariake	210	1.04	0.60–1.71	2.38	9.2	2.4
		Minamikyushu	Ei Aoto	300	40.33	20.41–74.14	1.32	15.1	93.8
			Chiran Nagasato	210	0.43	0.04–0.93	1.15	11.3	—
Spinosyn	Spinetoram (×2,500, 46.8 ppm) ^a	Makurazaki	Seto	180	0.04	0.02–0.29	2.52	6.6	2.0
			Makaya	180	0.03	0.0003–0.056	2.17	6.6	1.5
		Shibushi	Ariake	210	0.03	0.01–0.04	2.22	9.2	1.5
		Minamikyushu	Ei Aoto	210	0.06	0.03–0.11	1.97	9.2	3.0
			Chiran Nagasato	180	0.02	0.01–0.03	3.96	6.6	—
Avermectin	Emamectin benzoate (×1,000, 10 ppm) ^a	Makurazaki	Seto	210	0.004	0.0024–0.0060	2.68	9.2	1.3
			Makaya	210	0.004	0.0022–0.0086	1.98	9.2	1.3
		Shibushi	Ariake	210	0.005	0.0031–0.0087	2.00	11.3	1.7
		Minamikyushu	Ei Aoto	210	0.005	0.0033–0.0093	2.02	11.3	1.7
			Chiran Nagasato	240	0.003	0.0014–0.0042	3.00	6.6	—
Diacylhydrazine IGR	Methoxyfenozide (×4,000, 50 ppm) ^a	Makurazaki	Seto	180	0.26	0.11–0.61	1.49	6.6	0.9
			Makaya	180	0.56	0.28–1.10	1.81	6.6	1.9
		Shibushi	Ariake	210	0.09	0.05–0.15	3.00	6.6	0.3
		Minamikyushu	Ei Aoto	210	0.59	0.39–0.92	2.90	9.2	2.0
			Chiran Nagasato	180	0.29	0.12–0.46	2.91	6.6	—

^aRecommended field rate, concentration.^bNumber tested, including control.^c χ^2 values indicate good fit of the data to the probit model ($p < 0.01$).^dResistance Ratio = LC₅₀ value of each population / LC₅₀ value of a susceptible population (Chiran Nagasato).

ドは 3.47 ppm と 3.19 ppm, クロラントラニプロールは 6.26 ppm と 6.92 ppm, シアントラニプロールは 2.51 ppm と 2.96 ppm と算出された。薬剤濃度に対する F_1 と F_1' の死亡率の回帰直線はいずれの薬剤も, R および S 個体群の回帰直線の間に位置し (Fig. 1 (B), 2 (B), 3 (B)), 両回帰直線のそれぞれの傾きに有意差は認められなかった (共分散分析, $p > 0.05$)。さらに, F_1 と F_1' の優性度 D (Stone, 1968) はそれぞれ, フルベンジアミドは -0.130 と -0.175 , クロラントラニプロールは -0.278 と -0.224 , シアントラニプロールは -0.361 と -0.301 と算出され, いずれの薬剤ともに $-1 < D < 0$ であった (Table 4)。これらのことから,

枕崎市まかや町個体群のジアミド系殺虫剤抵抗性も枕崎市瀬戸個体群と同様, 常染色体性の不完全劣性の遺伝様式であることが示唆された。

考 察

本研究により鹿児島県南薩地域の枕崎市, 南九州市の一部地域において, チャハマキがジアミド系殺虫剤に対して抵抗性を発達させていることが明らかになった。これまで, 日本国内のチャハマキは, カーバメート系のメソミル (尾崎・竹島, 1984; 白井ら, 1988), およびベンゾイル尿素系 IGR 剤のクロルフルアズロン (小杉, 1998) とフ

Table 4. Insecticide susceptibility of the larvae of *H. magnanima* in crossbred progeny

Insecticides Cross combinations	Crossbred progeny	<i>n</i> ^a	LC ₅₀ (ppm)	95% confidence interval of LC ₅₀ (ppm)	Slope	χ^2 value ^b	RR ^c	<i>D</i> ^d
Flubendiamide								
Makurazaki/Seto (R)	F ₁ (R♂×S♀)	240	4.52	2.53–9.25	2.02	9.2	6.6	−0.369
×Chiran/Nagasato (S)	F ₁ ' (S♂×R♀)	240	3.89	2.29–6.50	2.37	9.2	5.6	−0.420
Makurazaki/Makaya (R)	F ₁ (R♂×S♀)	240	3.47	1.86–5.82	2.23	9.2	5.0	−0.130
×Chiran/Nagasato (S)	F ₁ ' (S♂×R♀)	240	3.19	1.69–5.17	2.31	9.2	4.6	−0.175
Chlorantraniliprole								
Makurazaki/Seto (R)	F ₁ (R♂×S♀)	240	6.70	4.04–17.60	2.05	9.2	4.1	−0.108
×Chiran/Nagasato (S)	F ₁ ' (S♂×R♀)	240	7.19	3.45–12.27	2.09	9.2	4.4	−0.064
Makurazaki/Makaya (R)	F ₁ (R♂×S♀)	240	6.26	3.76–10.43	2.06	11.3	3.8	−0.278
×Chiran/Nagasato (S)	F ₁ ' (S♂×R♀)	240	6.92	2.98–12.07	1.97	9.2	4.2	−0.224
Cyantraniliprole								
Makurazaki/Seto (R)	F ₁ (R♂×S♀)	240	4.12	2.01–7.63	1.96	9.2	9.6	−0.023
×Chiran/Nagasato (S)	F ₁ ' (S♂×R♀)	240	4.14	2.02–7.70	1.96	9.2	9.6	−0.021
Makurazaki/Makaya (R)	F ₁ (R♂×S♀)	210	2.51	1.60–4.11	2.63	9.2	5.8	−0.361
×Chiran/Nagasato (S)	F ₁ ' (S♂×R♀)	210	2.96	1.68–5.22	1.91	6.6	6.9	−0.301

^{a, b, c}For susceptibility of parents, refer to Table 3.^dThe degree of dominance ranging from −1 (completely recessive) to +1 (completely dominant).

ルフェノクスロン (打土井ら, 1994) に対して抵抗性を発達させたことが報告されている。しかし、同種においてはジアミド系殺虫剤への抵抗性発達の報告はなく、効果は高いとされてきた (小澤・内山, 2013)。今回、国内においてチャハマキのジアミド系殺虫剤抵抗性が初めて確認されたことになる。他のチョウ目害虫におけるジアミド系殺虫剤抵抗性発達の事例として、チャノコカクモンハマキとコナガがある。チャノコカクモンハマキの LC₅₀ 値はフルベンジアミドが 161 ppm, クロラントラニリプロールが 98.8 ppm (Uchiyama and Ozawa, 2014) であり、コナガの LC₅₀ 値はフルベンジアミドが >200 ppm, クロラントラニリプロールが >50 ppm (福田・林川, 2014) と報告されている。南薩地域のチャハマキは、ジアミド系殺虫剤に対してこれらと同等かそれ以上の LC₅₀ 値を示したことになる。本研究で確認されたチャハマキにおけるジアミド系殺虫剤に対する抵抗性の発達は、国内で最初のジアミド系殺虫剤であるフルベンジアミドが上市 (2007 年) されてから 8 年後という短期間の出来事である。

また、南薩地域のチャハマキはベンゾイル尿素系 IGR のフルフェノクスロンに対しても、常用濃度の死亡率が他の地域個体群より低かった (Table 2) ことから、同剤に対しても抵抗性を有している可能性が示唆された。なお、チャハマキのベンゾイル尿素系 IGR に対する抵抗性発達は、国内では上述のように早くから静岡県で報告されている (打土井ら, 1994; 小杉, 1998)。

鹿児島県内の茶園において、フルベンジアミドは 2007 年の農薬登録以降、主に秋期 (9 月上中旬) のチャハマキおよびチャノコカクモンハマキを対象に利用されてきた。一方、同系統のクロラントラニリプロールは 2009 年の農薬登録以降、主に二番茶 (5 月上中旬) のチャノホソガ *Caloptilia theivora* (Walsingham) (チョウ目: ホソガ科) を対象に基幹防除薬剤として広く使用されてきた。9 月が防除時期のチャハマキとチャノコカクモンハマキ、および 5 月が防除時期のチャノホソガでは防除時期が約 4 か月開いており、この間に別系統の殺虫剤が使用されるとともにチャハマキで数世代が経過することから、これらの防除がジアミド系殺虫剤抵抗性発達の直接的な要因になったとは考えにくい。実際、南薩地域と同様の防除体系を組んでいる他の地域では、チャハマキに対するこれら 2 薬剤の効果は安定して高かった (Table 2, 3)。両地域間で防除体系に違いがあるとすれば、それは枕崎市の一部茶園で少なくとも過去 3 年以上、8, 9 月の連続した月にフルベンジアミドとクロラントラニリプロールをそれぞれ散布していた事例があったということぐらいである。こうしたジアミド系殺虫剤の連用により、当該地域のチャハマキにおいてフルベンジアミドとクロラントラニリプロールに対する抵抗性が発達した可能性もある。ジアミド系殺虫剤に対する抵抗性個体群が確認された 3 地点の直線距離は、枕崎市瀬戸～同市まかや町間が約 2.5 km, 枕崎市瀬戸～南九州市穎娃町青戸が約 13 km であり比較的近い距離関係にある。ま

Fig. 1. Relationship between larval mortality and the concentration of flubendiamide in crossbreeding of resistant populations with a susceptible population of *H. magnanima*. (A) Seto population (R) × Nagasato population (S), (B) Makaya population (R) × Nagasato population (S).

Fig. 3. Relationship between larval mortality and the concentration of cyantraniliprole in crossbreeding of resistant populations with a susceptible population of *H. magnanima*. (A) Seto population (R) × Nagasato population (S), (B) Makaya population (R) × Nagasato population (S).

Fig. 2. Relationship between larval mortality and the concentration of chlorantraniliprole in crossbreeding of resistant populations with a susceptible population of *H. magnanima*. (A) Seto population (R) × Nagasato population (S), (B) Makaya population (R) × Nagasato population (S).

た今回、ジアミド系殺虫剤の効果が高かった地域は、枕崎市瀬戸からの直線距離が、志布志市有明町で約 72km、鹿屋市東原で約 56km、霧島市牧園で約 74km と遠い関係にある一方、南九州市知覧町永里で約 15km、同市松山町で約 6km、同市穎娃町牧之内で約 18km と比較的近い場合もあった。チャハマキの野外の茶園における飛翔能力は明らかになっていないが、フライトミルを用いた室内試験によると本種の飛翔距離は、日齢の若い雌で一晩で約 4.8km (Shirai et al., 1998) と推定されている。しかし、今回チャハマキを採集した地域は周辺地域一帯で、隣接してチャの栽培が広く行われており、そのような環境ではチャハマキも本来有している能力より飛翔距離は短くなる可能性もある。そのため、チャハマキの移動分散とジアミド系殺虫剤抵抗性の今後の拡大範囲については、後述する遺伝様式も含めてさらに検討が必要である。なお、上市から 4 年後にジアミド系殺虫剤に対する抵抗性発達が確認された静岡県県のチャノコカクモンハマキ (Uchiyama and Ozawa, 2014) では、早期の抵抗性発達に抵抗性遺伝子の初期頻度の高さが関係している可能性も指摘されており (内山・小澤, 2017)、本県のチャハマキにおいても地域個体群間に抵抗性遺伝子頻度に差があるのか検討が必要である。

シアントラニリプロールは、2014 年 10 月に農薬登録され (島, 2014)、ジアミド系殺虫剤の中では比較的新しい

殺虫剤である。そのため、枕崎市と南九州市の抵抗性個体群を採集した2015年5月の時点では、シアントラニプロールは当該地域でほとんど散布されていなかったことになる。したがって、シアントラニプロールに対する抵抗性発達は、フルベンジアミドとクロラントラニプロールに対する抵抗性発達と交差している可能性が考えられる。ジアミド系殺虫剤間の交差抵抗性として、コナガでは海外のフルベンジアミド抵抗性個体群がクロラントラニプロールに対して交差抵抗性を示した報告 (Trocza et al., 2012) があるほか、国内でもフルベンジアミドとクロラントラニプロールに対する抵抗性コナガが、シアントラニプロールへの交差抵抗性を疑われた報告がある (柴田ら, 2017)。しかし、ハマキガ類で、フルベンジアミドとクロラントラニプロールの抵抗性個体群がシアントラニプロールに交差抵抗性を示したという報告はない。シアントラニプロールの上市以降に新規に上市されたジアミド系殺虫剤もあること (森田, 2018; 安宅, 2020) から、新規ジアミド系殺虫剤における抵抗性発達の程度をシミュレーションする上でも交差抵抗性の機構については他種のチョウ目害虫の事例も含めて今後検討する必要がある。

今回供試したチャハマキのジアミド系殺虫剤に対する抵抗性の遺伝様式は、3薬剤ともに常染色体性の不完全劣性であることが示された (Table 4, Fig. 1~3)。ハマキガ科で殺虫剤抵抗性の遺伝様式に関する研究事例は少ないものの、コドリシガ *Cydia pomonella* (Linnaeus) (チョウ目: ハマキガ科) のピレスロイド剤抵抗性の遺伝様式は常染色体性の不完全劣性であることが示されている (Bouvier et al., 2001)。また、殺虫剤抵抗性の遺伝様式の研究事例が多いコナガでも、常染色体性の不完全劣性の報告が多い (例えば、フェニルピラゾール系, Sayyed and Wright, 2004; アベルメクチン系, Liang et al., 2003; ジアシルヒドラジン系 IGR, Sun et al., 2010; ジアミド系, Guo et al., 2014 など)。ただし、有機リン系では不完全優性を示した事例もある (宮田, 1989)。一方、前述の静岡県内のチャノコカクモンハマキ個体群ではジアミド系殺虫剤に対する抵抗性の遺伝様式は、常染色体性の不完全優性である (内山・小澤, 2017)。この個体群はジアシルヒドラジン系 IGR 剤のテブフェノジド抵抗性においても常染色体性の不完全優性遺伝をする (内山・小澤, 2015)。このように害虫種や殺虫剤の種類によって殺虫剤抵抗性の遺伝様式は異なる。一般に感受性回復には主要3要因 (遺伝様式が劣性~不完全劣性、抵抗性系統の適応度低下、感受性個体群の存在) が関与すると考えられている (山本, 1998)。本試験における南薩地域のチャハマキの場合は、この3要因のうち遺伝様式と周辺地域における感受性個体群の存在が当てはまる。3要因のうち抵抗性系統の適応度低下については未解明だが、当該地域では現在、チャハマキを対象にジアミド系殺虫剤

を使用していないことから、今後、感受性の回復についても生物検定でモニタリングするなど検討が必要である。

コナガのジアミド系殺虫剤抵抗性の発現機構は、リアノジン受容体の複数のアミノ酸の変異 (Trocza et al., 2012; Guo et al., 2014; Sonoda et al., 2017; Jouraku et al., 2020; Richardson et al., 2020)、リアノジン受容体遺伝子の発現レベルの低下や増大 (Sun et al., 2012; Gong et al., 2014) または解毒分解酵素 (Li et al., 2018; Mallott et al., 2019; Wang et al., 2020) が関与しているとの報告があるものの不明な点も多い (園田, 2015)。今回供試した鹿児島県のチャハマキのジアミド系殺虫剤抵抗性の発現機構は今後解明すべき課題である。ただ、本個体群は静岡県のチャノコカクモンハマキのジアミド系殺虫剤抵抗性個体群と異なり、ジアシルヒドラジン系 IGR 剤の効果が高い点や、遺伝様式が不完全劣性である点から抵抗性の発現機構も異なる可能性がある。なお、静岡県のチャノコカクモンハマキのジアミド系殺虫剤抵抗性は複数因子によって支配されていることが明らかになっている (内山・小澤, 2017)。抵抗性遺伝子は、複数因子よりも単一因子に支配されている方が面的な拡散をしやすい (Hoy et al., 1980; Roush and Hoy, 1981) ことから、本研究におけるチャハマキのジアミド系殺虫剤に対する抵抗性の遺伝も複数因子によるものか単一因子によるものか今後検討する必要がある。

本研究において南薩以外の地域のチャハマキは、ジアミド系殺虫剤を含むどの系統の殺虫剤も効果が高く、LC₅₀ 値も低かった。この要因は前述のようにジアミド系殺虫剤の連用がなかったことや抵抗性遺伝子の頻度が地域間で異なることなどが推察されるが現時点でははっきりしない。なお、チャハマキと同時期に発生し、同時防除の対象となるチャノコカクモンハマキについては現在、県内のどの地域においても防除効果に懸念材料はない。ただし前述のとおり、既に静岡県のチャノコカクモンハマキは、種々の殺虫剤に複合抵抗性を発達させている (内山・小澤, 2017) ことから、鹿児島県内の本種についてもチャハマキと同様、薬剤感受性の動向を今後も注視する必要がある。

鹿児島県では、1985年から県と農協が主体となり、チャハマキとチャノコカクモンハマキを対象とした顆粒病ウイルスの増殖施設を整備し (野中ら, 1994)、1995年には県内の7割を超える茶園で本剤を使用していた (和田, 2015)。しかし、その後の農薬取締法の改正や効果の高い化学殺虫剤の開発により顆粒病ウイルスの生産は中止され、本剤の利用は減少した (和田, 2015)。薬剤抵抗性発達の抑制技術の基本は、従来から作用特性の異なる薬剤のローテーション使用とされている (浜, 1996)。近年ではさらに国際的な取り組みとしてIRAC (Insecticide Resistance Action Committee) の主導による殺虫剤抵抗性管理戦略のもと、作用機作分類に基づくローテーション使用等が推奨されて

いる (Sparks and Nauen, 2015)。これらのことから、今回の南薩地域におけるチャハマキのジアミド系殺虫剤抵抗性確認により同地域では現在、農薬登録を取得し農薬メーカーから販売されている顆粒病ウイルス製剤または交信攪乱製剤にスピノシン系の殺虫剤を組み合わせた体系防除を構築している。今後も引き続きチャハマキおよびチャノコカクモンハマキの各種殺虫剤に対する感受性を確認しつつ、両種におけるジアミド系殺虫剤に対する抵抗性発達を回避する対策を講じるとともに、南薩地域ではジアミド系殺虫剤の感受性回復もモニタリングする必要がある。

摘 要

鹿児島県内 10 地域の茶園からチャハマキ個体群を採集し、各種殺虫剤の常用濃度における効果を検討した結果、南薩地域ではジアミド系殺虫剤の効果が低いことが明らかになった。次に、ジアミド系殺虫剤の効果が低下した個体群について、3 種ジアミド系殺虫剤の LC_{50} 値を算出した。その結果、フルベンジアミドは 28.26~267.62 ppm (抵抗性比: 41.0~387.9)、クロラントラニリプロールは 40.60~67.75 ppm (抵抗性比: 24.9~41.6)、シアントラニリプロールは 40.33~107.49 ppm (抵抗性比: 93.8~250.0) と高い値を示し、本系統への抵抗性発達が確認された。さらに、ジアミド系殺虫剤抵抗性の遺伝様式について感受性系統と正逆交配を行った結果、常染色体性の不完全劣性であることが示された。ただし、南薩地域のジアミド系殺虫剤抵抗性個体群はベンゾイル尿素系 IGR 以外の殺虫剤への感受性は高かった。南薩地域以外の個体群はジアミド系殺虫剤も含む全ての供試殺虫剤に感受性であった。今後は抵抗性発達の拡大を回避しながら、南薩地域においては感受性回復のモニタリングも必要である。

引 用 文 献

- Abbott, W. S. (1925) A method of computing the effectiveness of an insecticide. *J. Econ. Entomol.* 18: 265–267.
- 安宅 雅 (2020) 新規殺虫剤テトラニリプロールの特長. 植物防疫 74: 545–550. [Ataka, M. (2020) “Characteristics of tetra-niliprole, a novel insecticide.” *Plant Prot.* 74: 545–550.]
- Bliss, C. I. (1935) The calculation of the dosage-mortality curve. *Ann. Appl. Biol.* 22: 134–167.
- Bouvier, J. C., R. Buès, T. Boivin, L. Boudinhon, D. Beslay and B. Sauphanor (2001) Deltamethrin resistance in the codling moth (Lepidoptera: Tortricidae): inheritance and number of genes involved. *Heredity* 87: 456–462.
- Cordova, D. et al. (2006) Anthranilic diamides: A new class of insecticides with a novel mode of action, ryanodine receptor activation. *Pestic. Biochem. Phys.* 84: 196–214.
- Ebbinghaus-Kintscher, U., P. Luemmen, N. Lobitz, T. Schulte, C. Funke, R. Fischer, T. Masaki, N. Yasokawa and M. Tohnishi (2006) Phthalic acid diamides activate ryanodine-sensitive Ca^{2+} release channels in insects. *Cell Calcium* 39: 21–33.
- 藤岡伸祐 (2018) リアノジン受容体モジュレーター—ジアミド系—. 植物防疫 72: 267–271. [Fujioka, S. (2018) Review of ryanodine receptor modulators. *Plant Prot.* 72: 267–271.]
- 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. 九病虫研究会報 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.]
- Gong, W., H. H. Yan, L. Gao, Y. Y. Guo and C. B. Xue (2014) Chlorantraniliprole resistance in the diamondback moth (Lepidoptera: Plutellidae). *J. Econ. Entomol.* 107: 806–814.
- Guo, L., P. Liang, X. Zhou and X. Gao (2014) Novel mutations and mutation combinations of ryanodine receptor in a chlorantraniliprole resistant population of *Plutella xylostella* (L.). *Sci. Rep.* 4: Article number 6924.
- 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 Agric.* 19(11): 25–31.]
- 廣岡 卓 (2007) 新規殺虫剤：フルベンジアミド顆粒水和剤の特徴と使い方. 植物防疫 61: 284–288. [Hirooka, S. (2007) Characteristics of flubendiamide, a novel insecticide. *Plant Prot.* 61: 284–288.]
- Hoy, M. A., N. F. Knop and J. L. Joos (1980) Pyrethroid resistance persists in spider mite predator. *Calif. Agr.* 34: 11–12.
- Jouraku, A., S. Kuwazaki, K. Miyamoto, M. Uchiyama, T. Kurokawa, E. Mori, M. X. Mori, Y. Mori and S. Sonoda (2020) Ryanodine receptor mutations (G4946E and I4790K) differentially responsible for diamide insecticide resistance in diamondback moth, *Plutella xylostella* L. *Insect Biochem. Molec.* 118: 103308.
- 小杉由紀夫 (1998) 農業害虫の薬剤感受性検定マニュアル (17) 茶害虫：チャノコカクモンハマキ, チャハマキ. 植物防疫 52: 48–50. [Kosugi, Y. (1998) Methods for measurement of susceptibility of agricultural insect pests to insecticides (17). The smaller tea tortrix *Adoxophyes honmai* and the oriental tea tortrix *Homona magnanima*. *Plant Prot.* 52: 48–50.]
- Li, X., R. Li, B. Zhu, X. Gao and P. Liang (2018) Overexpression of cytochrome P450 CYP6BG1 may contribute to chlorantraniliprole resistance in *Plutella xylostella* (L.). *Pest Manag. Sci.* [https://DOI 10.1002/ps.4816](https://doi.org/10.1002/ps.4816)
- Liang, P., X. W. Gao and B. Z. Zheng (2003) Genetic basis of resistance and studies on cross-resistance in a population of diamondback moth, *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae). *Pest Manag. Sci.* 59: 1232–1236.
- Mallott, M. et al. (2019) A flavin-dependent monooxygenase confers resistance to chlorantraniliprole in the diamondback moth, *Plutella xylostella*. *Insect Biochem. Molec.* 115: 103247.
- Masaki, T. (2008) Study on the mechanism of insecticidal activity through disruption of intracellular calcium homeostasis. *J. Pestic. Sci.* 33: 271–272.
- 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.]
- 宮田 正 (1989) コナガの殺虫剤抵抗性発達—現状と課題. 北日本病虫研報 40: 1–5. [Miyata, T. (1989) Development of resistance to insecticides in the diamondback moth. Current status and countermeasures. *Ann. Rept. Plant Prot. North Japan* 40: 1–5.]
- 宮田 正・斉藤哲夫 (1978) ウンカ・ツマグロヨコバイの殺虫剤抵抗性と変異・適応. 農薬誌 3: 179–184. [Miyata, T. and T. Saito (1978) Adaptation and resistance to insecticides in the planthopper and leafhopper. *J. Pestic. Sci.* 3: 179–184.]
- 森田雅之 (2018) 殺虫剤シクラニリプロールの特長と使い方. 植物防疫 72: 475–477. [Morita, M. (2018) “Characteristics of cyclaniliprole, a novel insecticide.” *Plant Prot.* 72: 475–477.]
- 名雪将史・清水敏夫・大井田寛 (2018) 千葉県銚子市におけるコナガ (チョウ目: コナガ科) のジアミド系殺虫剤を含む6薬剤に対する感受性. 関東病虫研報 65: 118–120. [Nayuki, M., T. Shimizu and H. Oida (2018) Susceptibility to six insecticides including diamide insecticides on diamondback moth, *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae) in Choshi City, Chiba Prefecture, Japan. *Ann. Rept. Kanto Pl. Prot. Soc.* 65: 118–120.]
- 野口 浩 (1991) 鱗翅目 26 チャノコカクモンハマキ, リンゴコカクモンハマキ, チャハマキ. 昆虫の飼育法 (湯島 健ら編). 日本植物防疫協会, 東京, pp. 91–96. [Noguchi, H. (1991) “Lepidoptera: 26 *Adoxophyes honmai*, *Adoxophyes orana fasciata*, *Homona magnanima*.” In *Rearing Method of Insects* (T. Yushima et al., eds.). Japan Plant Protection Association, Tokyo, pp. 91–96.]
- 野中寿之・西 八東・長友 繁・當 直樹・鬼丸照雄 (1994) 顆粒病ウイルス利用によるチャのハマキムシ類防除—実証防除効果の事例とその解析—. 鹿児島茶試研報 10: 1–42. [Nonaka, T., Y. Nishi, S. Nagatomo, N. Atari and T. Onimaru (1994) Biological control of tea tortrix with the granulosis virus—Examples on proved effects of control and their analyses—. *Bull. Kagoshima Tea Exp. Stn.* 10: 1–42.]
- 岡本 崇 (2018) 和歌山県におけるシロイチモジヨトウに対する各種薬剤の殺虫効果. 関西病虫研報 60: 149–151. [Okamoto, T. (2018) Susceptibility of the beet armyworm *Spodoptera exigua* (Hübner) to insecticides in Wakayama. *Ann. Rept. Kansai Pl. Prot.* 60: 149–151.]
- 鬼丸照雄・長友 繁・野中寿之 (1969) 茶樹病害虫発生予察に関する研究 第1報 鹿児島県におけるハマキムシ類の発生消長について. 九病虫研会報 15: 177–180. [Onimaru, T., S. Nagatomo and H. Nonaka (1969) “Research about occurrence prediction of pests in tea fields. Part 1 Seasonal prevalence of occurrence of the leaf rollers.” *Proc. Assoc. Pl. Prot. Kyushu* 15: 177–180.]
- 尾崎 丞・竹島節夫 (1984) 静岡県中部地域におけるチャハマキのランネット感受性低下と薬剤の防除効果について. 関東病虫研報 31: 171–172. [Ozaki, S. and S. Takeshima (1984) Decline in the susceptibility of *Homona magnanima* to methomyl and its chemical control in the middle part of Shizuoka Prefecture. *Ann. Rept. Kanto Pl. Prot. Soc.* 31: 171–172.]
- 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.]
- Richardson, E. B., B. J. Troczka, O. Gutbrod, T. G. E. Davies and R. Nauen (2020) Diamide resistance: 10 years of lessons from lepidopteran pests. *J. Pest Sci.* 93: 911–928.
- Roditakis, E., E. Vasakis, M. Grispou, M. Stavrakaki, R. Nauen, M. Gravouil and A. Bassi (2015) First report of *Tuta absoluta* resistance to diamide insecticides. *J. Pest Sci.* 88: 9–16.
- Roush, R. T. and B. A. Croft (1986) Experimental population genetics and ecological studies of pesticide resistance in insects and mites. In *Pesticide Resistance: Strategies and Tactics for Management*. National Academy Press, Washington, pp. 271–278.
- Roush, R. T. and M. A. Hoy (1981) Laboratory, glasshouse, and field studies of artificially selected carbaryl resistance in *Metaseiulus occidentalis*. *J. Econ. Entomol.* 74: 142–147.
- SAS Institute (2015) *JMP: Statistic and Graphics Guide, version 12.2.0*. SAS Institute, Cary, NC.
- Sayyed, A. H. and D. J. Wright (2004) Fipronil resistance in the diamondback moth (Lepidoptera: Plutellidae): Inheritance and number of genes involved. *J. Econ. Entomol.* 97: 2043–2050.
- 柴田真信・上杉龍士・平山千穂 (2017) 長崎県のブロッコリー圃場から採集したコナガ個体群における各種薬剤の殺虫効果とジアミド系薬剤の抵抗性遺伝子頻度. 九病虫研会報 63: 91–95. [Shibata, M., R. Uesugi and C. Hirayama (2017) Effect of several insecticides in the diamondback moth, *Plutella xylostella* Linnaeus Hood collected from broccoli fields in Nagasaki Prefecture, and frequency of diamide resistance gene. *Kyushu Pl. Prot. Res.* 63: 91–95.]
- 島 克弥 (2009) 新規殺虫剤クロラントラニリプロール剤の作用特性と特長. 植物防疫 63: 723–729. [Shima, K. (2009) Characteristics of chlorantraniliprole, a novel insecticide. *Plant Prot.* 63: 723–729.]
- 島 克弥 (2014) 新規殺虫剤シアントラニリプロール剤の特長と使い方. 植物防疫 68: 788–792. [Shima, K. (2014) Characteristics of cyantraniliprole, a novel insecticide. *Plant Prot.* 68: 788–792.]
- 白井 満・小林久俊・伊藤善文・堀田 柏・竹島節夫 (1988) 静岡県におけるチャハマキに対するランネットの感受性低下について. 関東病虫研報 35: 189–190. [Shirai, M., H. Kobayashi, H. Itoh, K. Hotta and S. Takeshima (1988) Decline in the susceptibility of *Homona magnanima* Diakonoff to methomyl in Shizuoka Prefecture. *Proc. Kanto Pl. Prot. Soc.* 35: 189–190.]
- Shirai, Y., Y. Kosugi and H. Noguchi (1998) Effects of sex, mating status and temperature on flight activity of the Oriental tea tortrix, *Homona magnanima* (Lepidoptera: Tortricidae). *Appl. Entomol. Zool.* 33: 413–418.
- 園田昌司 (2015) アブラナ科作物の害虫コナガの殺虫剤抵抗性—海外の事例を中心に—. 農業および園芸 90: 446–455. [Sonoda, S. (2015) “Insecticide resistance in *Plutella xylostella*

- (Lepidoptera: Plutellidae) on cruciferous plants—Overseas examples for the most part—.” *Agriculture and Horticulture* 90: 446–455.]
- Sonoda, S., K. Inukai, S. Kitabayashi, S. Kuwazaki and A. Jouraku (2017) Molecular evaluation of diamide resistance in diamond-back moth (Lepidoptera: Yponomeutidae) populations using quantitative sequencing. *Appl. Entomol. Zool.* 52: 353–357.
- Sparks, T. C. and R. Nauen (2015) IRAC: Mode of action classification and insecticide resistance management. *Pestic. Biochem. Phys.* 121: 122–128.
- Stone, B. F. (1968) A formula for determining degree of dominance in cases of monofactorial inheritance of resistance to chemicals. *Bull. World Health Org.* 38: 325–326.
- Sun, J., P. Liang and X. Gao (2010) Inheritance of resistance to a new non-steroidal ecdysone agonist, fufenozide, in the diamond-back moth, *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae). *Pest Manag. Sci.* 66: 406–411.
- Sun, L., L. Cui, C. Rui, X. Yan, D. Yang and H. Yuan (2012) Modulation of the expression of ryanodine receptor mRNA from *Plutella xylostella* as a result of diamide insecticide application. *Gene* 511: 265–273.
- Tohnishi, M. et al. (2005) Flubendiamide, a novel insecticide highly active against lepidopterous insect pests. *J. Pestic. Sci.* 30: 354–360.
- Trocza, B. et al. (2012) Resistance to diamide insecticides in diamond-back 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.
- 打土井利春・森 雄三・朝比奈一也 (1994) 静岡県におけるチャハマキのベンゾイルフェニル尿素系殺虫剤に対する感受性低下. 関東病虫研報 41: 261–263. [Uchidoi, T., Y. Mori and K. Asahina (1994) Decline in the susceptibility of oriental tea tortrix to benzoyl phenyl urea insecticides in Shizuoka Prefecture. *Proc. Kanto Pl. Prot. Soc.* 41: 261–263.]
- 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.
- 内山 徹・小澤朗人 (2015) チャノコカクモンハマキ (チョウ目: ハマキガ科) におけるテブフェノジド剤抵抗性の遺伝様式. 応動昆 59: 127–131. [Uchiyama, T. and A. Ozawa (2015) Inheritance of tebufenozide resistance in the smaller tea tortrix, *Adoxophyes honmai* (Lepidoptera: Tortricidae). *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 59: 127–131.]
- 内山 徹・小澤朗人 (2017) チャノコカクモンハマキ (チョウ目: ハマキガ科) におけるジアミド系殺虫剤抵抗性の遺伝様式. 応動昆 61: 109–117. [Uchiyama, T. and A. Ozawa (2017) Inheritance of resistance to diamide insecticides, flubendiamide, and chlorantraniliprole in the smaller tea tortrix, *Adoxophyes honmai* (Lepidoptera: Tortricidae). *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 61: 109–117.]
- 和田哲夫 (2015) 茶のハマキ類に対する昆虫ウイルスの利用. JATAFF ジャーナル 3: 30–33. [Wada, T. (2015) Control of tea tortrix, *Homona magnanima*, *Adoxophyes honmai* and *A. orana fasciata* by granulosis virus mixture. *JATAFF Journal* 3: 30–33.]
- 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.
- Wang, N. M., J. J. Li, Z. Y. Shang, Q. T. Yu and C. B. Xue (2020) Increased responses of phenoloxidase in chlorantraniliprole resistance of *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae). *J. Insect. Sci.* 20 (4): 1–6.
- 山本敦司 (1998) ハダニ類の殺ダニ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.]
- 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. [Yamamoto, A. (2012) “Problems of insecticide resistance management for sustainable pest control.” *J. Pestic. Sci.* 37: 392–398.]
- 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.