

奄美群島におけるアリモドキゾウムシの生態と根絶防除に関する研究

誌名	鹿児島県農業開発総合センター研究報告. 耕種部門
ISSN	18818609
著者名	山口, 卓宏
発行元	鹿児島県農業開発総合センター
巻/号	3号
巻号補足	
掲載ページ	p. 73-146
発行年月	2009年3月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター

Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



奄美群島におけるアリモドキゾウムシの生態と根絶防除に関する研究

山口卓宏

要 約

アリモドキゾウムシはサツマイモの重要害虫で、わが国では北緯 30 度以南の南西諸島と小笠原群島で発生しており、植物防疫法の規制を受けずに、これらの地域から未発生地へ自由にサツマイモ等を出荷するためには本種の根絶が必須となる。本研究では、奄美群島で最初に本格的な不妊虫放飼による根絶防除を実施する喜界島での本種の分布、発生消長、雄成虫数の推定を行うとともに、奄美群島での本種の発生生態ならびに根絶技術の改善について考察した。

喜界島において、アリモドキゾウムシは島内ほぼ全域に生息しており、野外の成虫は冬季（12～2月）に最も密度が低く、春季から次第に増加し9月から10月頃をピークとする1山型の発生消長を示した。また、低密度期における全島での雄成虫総数は80万頭以下と推定された。奄美大島ではいずれのステージでも越冬し、主な越冬態は成虫と3齢幼虫と考えられた。また、サツマイモ塊根内のアリモドキゾウムシは冬季においても発育が認められ、幼虫、蛹期における冬季の休眠はないものと考えられた。一方、雄成虫は冬季も交尾活動が可能な状態であったが、雌成虫はほとんど交尾、産卵が認められなかった。冬季において雌成虫は未交尾にもかかわらず、性フェロモンを放出していないことから、生殖休眠の可能性が示唆された。したがって、冬季は不妊虫放飼に先行する密度抑圧防除時期の適期であり、生物的防除資材の利用可能性について検討した。また、不妊虫放飼の開始時期としては2月下旬から3月上旬・中旬頃が最も効果が高いと結論された。

不妊虫放飼法によるアリモドキゾウムシの根絶技術において、生物的防除資材の探索、不妊虫生産コストの低減、放飼不妊虫の虫質向上は重要な課題である。昆虫病原性線虫 *Steinernema carpocapsae* (All系統) をサツマイモ圃場に施用すると、無処理と比べてアリモドキゾウムシによる被害塊根率が約 60%、塊根の被害度が約 40% 減少し、本種の密度抑圧防除の一手段として利用できることを示した。また、不妊虫の生産コスト低減策の一つとして、安価な原料用サツマイモ3品種がアリモドキゾウムシ増殖用の餌として代替可能であることを明らかにした。放飼虫の虫質向上を図るために不完全不妊虫の利用を検討し、妊性、寿命、性的競争力の試験から、蛹期にγ線を照射する場合、50Gy 照射虫が利用可能と考えられた。また、50Gy 照射雄成虫について、未交尾野生雌の発見能力を明らかにし、不完全不妊虫の利用を想定した根絶モデルの補正を提言した。さらに、冬季における不妊雄成虫の分散能力を明らかにし、冬季に定点放飼する場合の放飼地点間隔を示した。以上の結果に基づき、アリモドキゾウムシ根絶防除計画の問題点と今後の展望について論議した。

キーワード：奄美群島、アリモドキゾウムシ、根絶、サツマイモ、不妊虫放飼法

第 I 章 緒 言

サツマイモ *Ipomoea batatas* (L.) Lam. は南アメリカ北西部、あるいはその周辺を原産地とし、少なくとも紀元前 3000 年頃には、熱帯アメリカの広い地域で食料とされていた（小林, 1984; Austin, 1988）。サツマイモが原産地から世界中に広まった経路は、実際にはかなり複雑であるが、呼称に関する言語学上の証拠から三つの主要経路があったものと一般に認められている（O'Brien, 1972; Yen, 1982; 小林, 1984; Austin, 1991）。一つ目は、南米から南太

平洋の島々への伝播ルートである。有史以前の伝播については、記録がなく詳しく分かっていないが、考古学や言語年代学上の資料によると、紀元前 1000 年頃にはポリネシアの島々には伝わっていたらしい（小林, 1984）。二つ目は、1493 年にコロンブスが新大陸からスペインに持ち帰り広まったルートである。その後、ヨーロッパでは、スペインを中心に南欧に広がり、さらに、ヨーロッパ人の東洋進出に伴い、1500 年の初頭にはアフリカ、インドへ、1600 年頃には中国の福建省、日本へと伝えられた。三つ目は、16 世紀以降の大航海時代に、スペイン人がメキシコから太平

洋を横切り、フィリピンに運んだルートである。日本への渡来についても諸説あるが、1605年に野國總管により中国福建から沖縄に種いもがもたらされ、儀間真常が栽培普及に努めた記録が確かで、これがサツマイモ渡来の最初とされている（坂井, 1989; 伊波ら, 2004）。その後、1612年から1615年頃に九州へ伝えられ、さらに四国、本州と逐次伝播し、1825年には仙台、1856年には山形にも伝えられた（坂井, 1989）。

サツマイモは、ヨーロッパでは栽培に不適な寒冷地が多く、また洋食に不向きなことから、それほど重視されなかった（坂井, 1989）。一方、アフリカ、東南アジアに伝わったサツマイモは、救荒作物として広く受け入れられ、近世のヨーロッパを救った作物がジャガイモなら、近世のアジアを救った作物はサツマイモと言われている（池部, 1995）。サツマイモの生産量は塊根、塊茎作物の中では、ジャガイモ、キャッサバに続き3番目で、2002年の生産量は全世界で1億3,613万t、その約84%が中国で生産されている重要作物である（FAO, 2002）。日本では1955年の700万tをピークに、食生活が安定するとともに生産量は激減し、2000年から2004年では栽培面積4.0～4.3万ha、生産量94～107万t程度の水準である（農林水産省統計部 統計情報データベース作物統計（普通作物・飼料作物・工芸農作物）
<http://www.tdb.maff.go.jp/toukei/toukei>, 2006）。しかしながら、その用途は青果用や菓子用などの加工食品用、でん粉原料用、焼酎原料と幅広く利用されている。また、近年の全国的な健康志向の高まりにより、サツマイモの食品機能が見直され、高品質の青果用、原料用品種の育成、普及が行われつつあり、南九州や関東などの畑作地帯においては、地域産業の振興にはなくてはならない重要な作物となっている（永浜, 1993; 日本いも類研究会, 2002）。

サツマイモの生産に対しては、世界共通の各種の要因によって制約を受けており、このうち害虫としては100種の昆虫と3種のダニ（West, 1977）、あるいは280種の昆虫と18種のダニが報告されている（Jasson and Raman, 1991）。主要な害虫は地域によって異なるが、ゾウムシ類は世界的に最も重要な害虫であり、特に *Cylas* 属は防除が困難とされている（Wolfe, 1991）。

アリモドキゾウムシ *Cylas formicarius* (Fabricius) は、ミツギリゾウムシ科 (Brentidae) *Cylas* 属に分類されるゾウムシ類の一種で、インド、ミャンマー等のアジアが起源と考えられている（榮, 1968; 森本, 1984, 1999; 杉本, 1990; Wolfe, 1991）。成虫は、体長が6mm前後で細長く、一見アリに似ている（第I-1図）。本種は世界の熱帯、亜熱帯地域の50か国以上に広く分布し（IIE, 1993; CAB

International, 2005）、サツマイモ栽培において、収量や品質を著しく低下させる重要害虫である（Jayaramaiah, 1975; Talekar, 1982; Rajamma, 1983; Sutherland, 1986; Chalfant et al., 1990; Jansson and Raman, 1991; Mason 1996; Smit, 1997）。また、サツマイモ以外にノアサガオ *Ipomoea indica* (Burm.) Merrill (= *Pharbitis congesta* (R.Br.) H.Hara), グンバイヒルガオ *Ipomoea pes-caprae* (L.) Sweet アサガオ *Ipomoea nil* (L.) Roth (= *Pharbitis nil* Choisy), ハマヒルガオ *Calystegia soldanella* (L.) Roem. et Schult., ルコウソウ *Quamoclit vulgaris* Choisy 等、*Ipomoea* 属を中心に30種以上のヒルガオ科 (Convolvulaceae) 植物を加害することが知られている（Cockerham, 1943; Sutherland, 1986; Chalfant et al., 1990; Austin, 1991; 宮崎ら, 2001）。

日本では既に1903年に沖縄県、1914年には小笠原諸島における発生がそれぞれ報告されており、侵入はそれ以前と考えられる（名和, 1903; 東京府小笠原島廳, 1914; 小濱, 1990）。また、最近の遺伝子解析によると、南西諸島と小笠原諸島では、それぞれ侵入地が異なることが示唆されている（Kawamura et al. 2007; 杉本ら, 2007）。南西諸島では、その後分布域が次第に北上し、奄美群島では1915年に与論島で発見された後、群島内各地で発生が確認され、1940年までに奄美群島全域に分布域が広がった（榮, 1968）。また、トカラ列島では1933年に中之島、1942年に口之島、平島、悪石島、1948年に宝島、子宝島、諏訪之瀬島、1950年には臥蛇島で発見され、1950年までにトカラ列島全域に発生が拡大した（榮, 1962, 1968）。さらに、1951年に口永良部島、1959年に種子島、馬毛島、1965年に鹿児島県本土の開聞町と分布は北上を続けたが（沢・水流, 1959; 沢, 1960; 井上, 1960; 永井, 1965）、緊急防除等により開聞町と種子島が1969年、馬毛島が1971年、口永良部島が1978年にそれぞれ根絶された（上, 1964; 鹿児島県農政部, 1968; 山崎, 1972; 中須, 1978; 上門・西岡, 1994）。

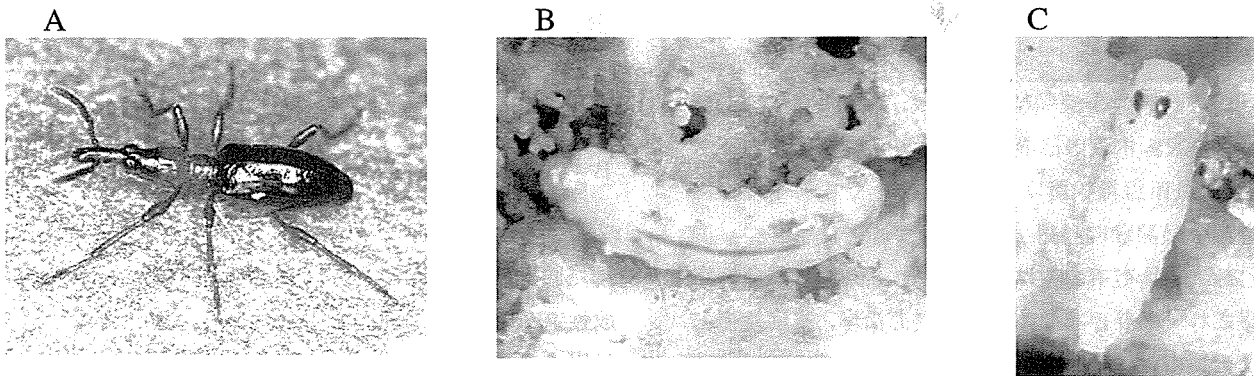
その後、一時期発生の拡大は認められなかったが、1990年に種子島で発生が確認された後、1994年と1998年に鹿児島県本土の山川町、1995年と2000年に高知県室戸市、1997年に鹿児島県鹿児島市と屋久島、1998年に甕島列島と相次いで発生がみられた（木村・宮後, 1991; 羽生, 1994; 平松, 1996; 前原, 1997, 1998; 末吉, 1998b; 伊藤, 1998; 高知県農業改良普及協会, 1999）。いずれの地域も、緊急防除により迅速な防除が実施され、2001年までに根絶された（桑原, 1996; 伊藤ら, 1999; 末吉, 1998a, 1999; 平田, 1999; 高曾根, 1999; 藤本ら, 2000; Komi, 2000; 西岡ら, 2000; 大形・横山, 2002; 鹿児島県農政部食の安全推進課・農林水産省門司植物防疫所, 2004）。しかし、2006年に

鹿児島県指宿市で再び発生が確認され、現在緊急防除が行われている。

2008年8月現在、上述した緊急防除地域を除くと、国内での本種の発生地は北緯30度以南の南西諸島（トカラ列島、奄美群島、沖縄諸島、宮古群島、八重山群島）と小笠原諸島であるが（中根, 1970; 吉田, 1982; 安田・小濱, 1990; 末永ら, 1987; 宮路・田中, 1998; 杉本, 2000; 大林ら,

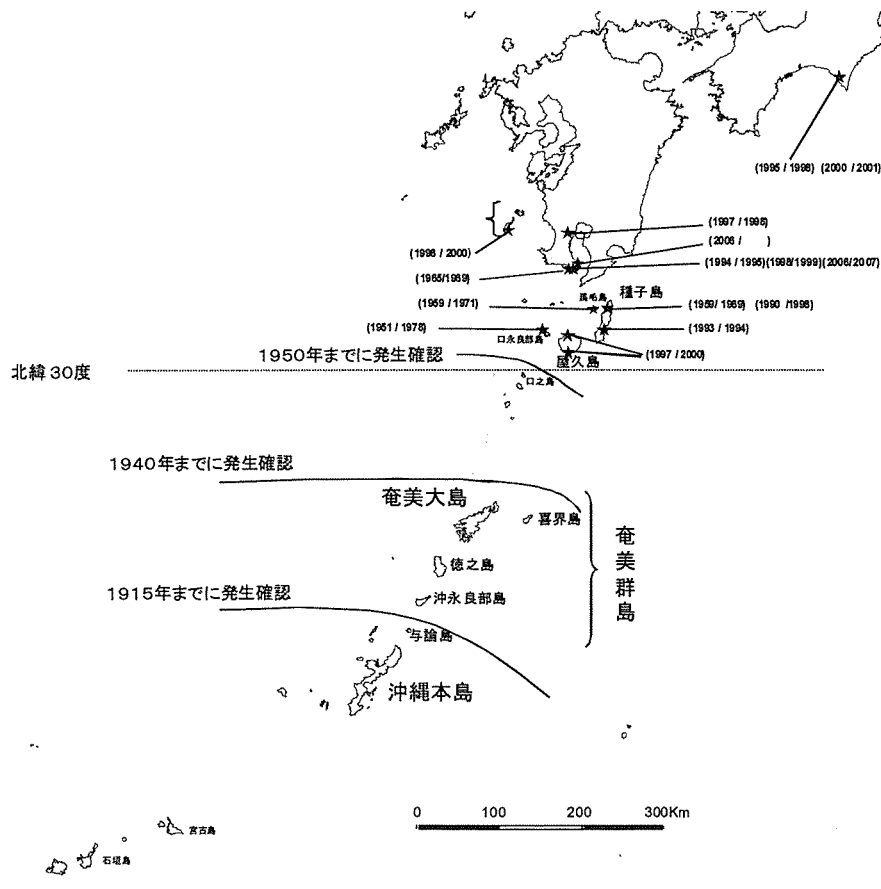
2003), 今後も分布の拡大が懸念されている（第I-2図）。

本種は主に幼虫がサツマイモ塊根内に食入し、加害されたサツマイモはイポメアマロン（Ipomeamarone）を生産し、特有の異臭と強い苦みを伴う（Akazawa et al., 1960; Sato et al., 1977, 1981, 1982; 永浜ら, 1993）。イポメアマロンは哺乳類に対して毒性を持つため（瓜谷, 2001）、食用はもとより家畜用の餌としても不適となる（第I-3図）。



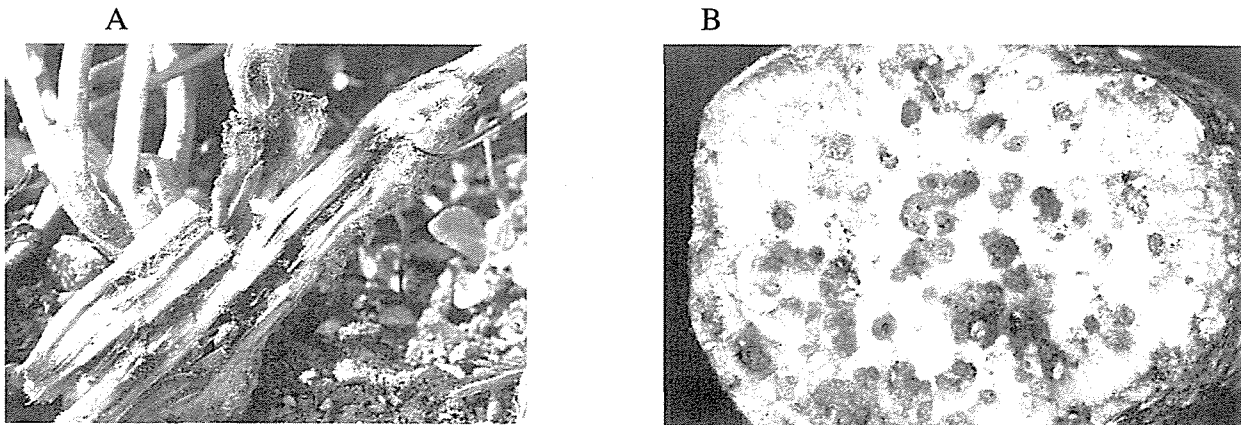
第I-1図 アリモドキゾウムシ *Cylas formicarius* (FABRICIUS)

A: 成虫（雄）, B: 幼虫（3齢）, C: 蛹



第I-2図 アリモドキゾウムシの日本への侵入と北上

図中の括弧内の数字は北緯30度以南における発生地の（発生確認年／根絶確認年）を示す。2008年8月現在。



第1-3図 アリモドキゾウムシ被害

A：サツマイモ被害茎

B：被害イモの内部

また、本種は日本本土では鹿児島県、高知県で侵入、定着が確認されており、北九州、瀬戸内海沿岸、東海地方、あるいは千葉市付近の太平洋沿岸まで発生の危険性が指摘されている（井上, 1960; Kandori et al., 2006; 杉本ら, 2007）。さらに、主に幼虫が土中の塊根内を食害するため、農薬での防除が困難な難防除害虫である。これらのことから、本種が本土に侵入、発生した場合、甚大な被害が予想されることから、日本では本種は植物防疫法により国内移動規制対象有害動物（特殊病害虫）に指定されており、発生地域から未発生地へのサツマイモ等の寄主植物の移動が制限または禁止されている。この規制は南西諸島の地域農業振興を図る上で、大きな障害の一つとなっており（栄, 1988; 瀬戸口, 2002, 2005）、サツマイモを自由に本土へ出荷するためには本種の根絶が必要となる。そこで、鹿児島県と沖縄県では農林水産省の特殊病害虫防除事業の一環として、アリモドキゾウムシの根絶防除に関する研究を開始した（瀬戸口, 1990; Moriya, 1995a; 守屋, 1995; 久場ら, 2000; 大村, 2000）。

種子島や屋久島等でアリモドキゾウムシの根絶に成功した緊急防除では、サツマイモなどの寄主植物の移動禁止、栽培サツマイモを含めた寄主植物の除去、合成性フェロモンによる発生地の特特定、農薬散布等などの手法が用いられた（Setokuchi et al., 1996; 西岡ら, 2000）。しかし、これらの方法は人力に頼るところが大きく、また大量の殺虫剤、除草剤を使用することから、生態系に対する負荷が強いと考えられ、大面積で行うには問題がある。アリモドキゾウムシの根絶の方法としては、これまでγ線を用了本種の不妊化に関する研究の結果、不妊虫放飼法（sterile insect technique; SIT）による根絶の可能性が示唆されていた（Walker, 1966; Dawes et al. 1987）。また、本種の雌が放出する性フェロモン（(Z)-3-dodecenyl (E)-2-butenate）が発

見、同定され（Coffelt et al., 1978; Heath et al., 1986）、合成性フェロモンが、野外において本種の雄に対して強力な誘引力を有することが実証された（Proshold et al., 1986; Talekar, 1987; Jansson et al., 1989, 1991a; Talekar and Lee, 1989; Heath et al., 1991; 安田ら, 1992）。強力な合成性フェロモンは不妊虫放飼法を実施するにあたり、モニタリングや密度抑圧防除の有用な資材になる。鹿児島県ではこれらの点に着目し、1988年から不妊虫放飼法（Knipling, 1955, 1964; Itô and Koyama, 1982）を主体とした防除方法について、近畿大学農学部ならびに岐阜大学農学部、鹿児島大学農学部、農林水産省門司植物防疫所名瀬支所、九州沖縄農業研究センター、沖縄県農業研究センター、沖縄県病害虫防除技術センター等の協力のもと検討を始めた。

不妊虫放飼法は、野生虫を上回る大量の不妊虫を野外に放す方法である。不妊化された雄成虫と野生の雌成虫が交尾することにより、次世代が減少し、最後には根絶に至る。この方法を用い、国内では小笠原諸島でのミカンコミバエ *Bactrocera dorsalis* (Hendel)、南西諸島のウリミバエ *Bactrocera cucurbitae* Coquillett で根絶に成功している（鹿児島県農政部・大島支庁ウリミバエ防除対策室, 1991; 小山, 1994; 沖縄県農林水産部, 1994; 吉澤, 1993; Yoshizawa, 1997）。本方法を実施するには、野生虫の密度抑圧、対象害虫の大量増殖と不妊化、不妊虫放飼、防除効果確認などの技術確立が不可欠となる。そこで、まず1988年度から1993年度まで、「アリモドキゾウムシ根絶技術確立事業」が実施され（大村, 2000; 瀬戸口, 2005）、アリモドキゾウムシの大量増殖、不妊化、小規模な不妊虫放飼試験等の基礎的な研究が、主に奄美大島と奄美大島に近接する無人島（木山島）で行われた（岩元・荒巻, 1990; 伊藤ら, 1991, 1993; 上門ら, 1993; 林ら, 1994; 櫻井ら, 1994, 1998b; Setokuchi et al., 2001）。また、合成フェロモンを用いた防

除資材の開発, モニタリングトラップの開発も取り組まれた(瀬戸口ら, 1991; 川添ら, 1993). さらに, 1994 年度から 2000 年度まで, 喜界島上嘉鉄地区の 280ha において, 不妊虫放飼法を主体とした「アリモドキゾウムシ根絶実証事業」が行われ, 同地区のうち重点防除地区とした 32ha について, ほぼ根絶状態にすることに成功した(湯田ら, 2000; 末永・藤川, 2003). また, この間に実際に不妊虫放飼を行う上での問題点を抽出し, 技術の改良を重ねた. これらの成果を踏まえ, 2001 年度からは同島において, 本格的な根絶を目指し「アリモドキゾウムシ根絶防除事業」が開始された(林川, 2005). ここでは本格的な不妊虫放飼による根絶防除に着手するにあたり, 奄美群島でのアリモドキゾウムシの発生生態と, 根絶技術の改善に関する一連の研究について報告する.

本論文は, まず第Ⅱ章で奄美群島で最初に根絶防除が開始された喜界島でのアリモドキゾウムシの発生生態について述べる. 次に第Ⅲ章で分布域の北限に近い奄美大島, 喜界島における本種の冬季における生態について述べる. 第Ⅳ章では不妊虫放飼法の成功に不可欠な密度抑圧防除について, 生物的防除法の効果を評価する. さらに, 第Ⅴ章では本格的な防除事業に向けて大量増殖, 不妊化, 不妊虫放飼に関し, これまでの技術に対する改善点について述べる. 最後に第Ⅵ章で以上の研究結果を総括し, 奄美群島におけるアリモドキゾウムシの根絶防除の進め方, ならびに課題について論議する.

第Ⅱ章 喜界島におけるアリモドキゾウムシの発生生態

喜界島では 2001 年度より不妊虫放飼法を用いたアリモドキゾウムシの根絶防除が本格的に開始されている. 根絶防除を開始するにあたり, 喜界島における本種の生態を明らかにすることは, 防除計画を策定する上で重要な基礎資料となる. 本章ではフェロモントラップを用い, 根絶防除開始前の喜界島における本種野生虫の誘殺状況を調査し, 分布ならびに発生消長について検討した. また, 5 月(低密度期)と 9 月(高密度期)に密度推定を行い, 年間の増加率を推定するとともに, 得られた推定値と Sugimoto et al. (1994) のデータを用いて, 低密度期における喜界島全島での雄成虫密度を試算した. さらに, 雄成虫では体サイズが性的競争力に関係すると考えられたことから, 野生虫に対して, 生産する不妊虫の体サイズを決定するための指標として, フェロモントラップで誘殺された野生雄成虫の体長を調査した.

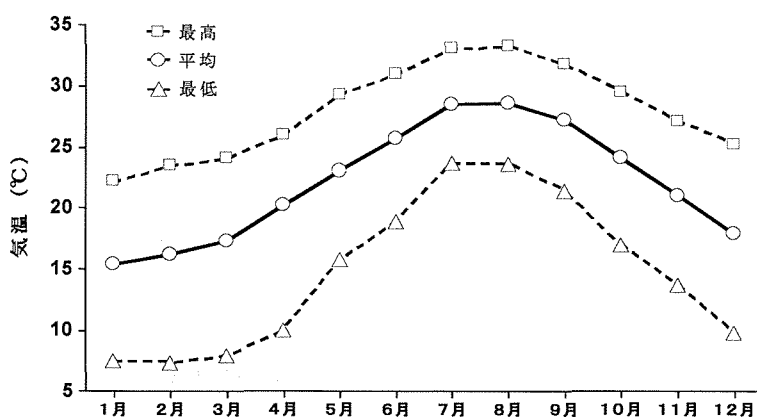
第 1 節 分布および発生消長

不妊虫放飼法では, 対象となる野生虫に対して放飼される不妊虫の数が多ければ多いほどその効果は大きい. このため, 不妊虫放飼に先立ち野生虫の密度を極力低くするため, 密度抑圧防除が行われる(土生・沼沢, 1985). 密度抑圧防除を効率よく行い, また防除効果を評価するためには, 密度抑圧防除実施前に, 対象地域における野生虫の発生状況を十分把握しておく必要がある. 特に防除時期の決定には年間の発生消長の情報が重要となる. また, 防除区域での対象害虫の分布状況を把握することは, 防除区域や防除圧の計画策定, あるいは防除効果の評価を行う上で必要不可欠である. そこで, 喜界島の荒地地区において, 性フェロモントラップを用い, 本種の誘殺消長調査を 4 年間継続して実施した. さらに, 根絶防除開始の前年には喜界島全域にトラップを設置して, 喜界島全島における誘殺状況を調査し, 喜界島におけるアリモドキゾウムシの分布と年間の発生消長を検討した.

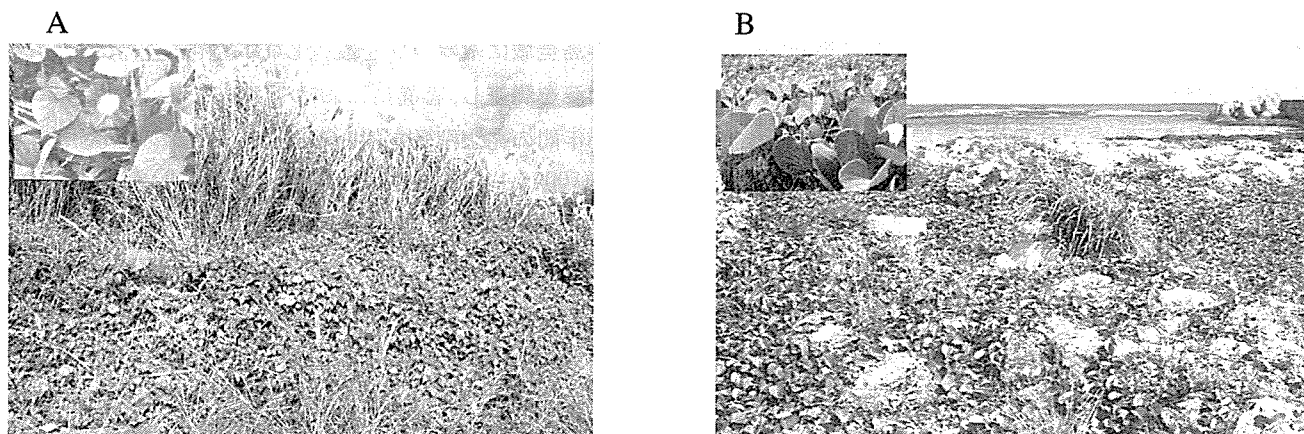
試験材料および方法

1 喜界島

喜界島は奄美群島の東北端に位置し, 鹿児島市から約 380 km, 名瀬市から約 69 km の北緯 28 度 19 分, 東経 130 度 00 分の洋上にある. 亜熱帯海洋性の気候に属し, 年平均気温が 22 °C 前後である(第Ⅱ-1 図). 総面積は 56.91km² で, 35.5 % にあたる 20.20km² が耕地, 19.1 % にあたる 10.85km² が林野面積である. 島は南南西から北東に長く 14.0km, 南北の最長 7.8km, 周囲 48.6km である. 集落は海岸線に沿って展開し, 各集落の背部は農耕地となり, 東南から南北に走る百之台丘陵に連なっている. 概して平坦な島であり, 大きな河川はなく, 島の大半は隆起サンゴ礁である(喜界町 <http://www.town.kikai.lg.jp/>, 2008; 名瀬測候所 <http://www.fukuoka-jma.go.jp/kagoshima/naze/tokusei.htm>, 2005). サツマイモは周年栽培することができ, 2005 年の作付面積は約 3ha である(グラフと統計でみる農林水産業; <http://www.tdb.maff.go.jp/machimura/>, 2008). また, これ以外にも山羊等の飼料用として放任栽培が見られる. アリモドキゾウムシの野生寄主植物としては, 海岸線には主にグンバイヒルガオが, その他の場所にはノアサガオが, 島内ほぼ全域に自生している(第Ⅱ-2 図).



第II-1図 鹿児島県喜界町（喜界島）における2001年から2004年までの月平均気温、最高気温、最低気温の推移（アメダス観測）



第II-2図 喜界島におけるアリモドキゾウムシの野生寄主植物

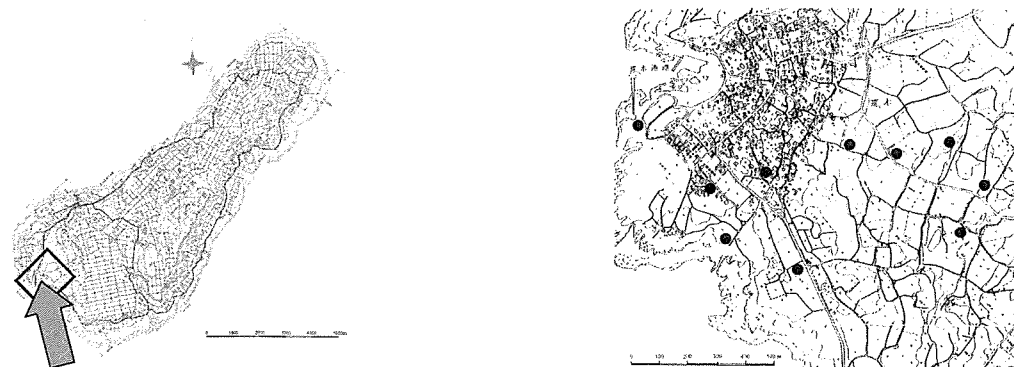
A：ノアサガオ *Ipomoea indica* (Burm.) Merrill

B：グンバイヒルガオ *Ipomoea pes-caprae* (L.) Sweet

2 荒木地区

喜界島の南西部に位置する荒木集落周辺の面積約50haを「荒木地区」として調査を行った。調査地区内には中央から北西部に集落があり、集落の周囲は南から西側にかけては海岸、港があり、東側には大きく畑地が広がっている。また、地区内にはサツマイモ圃場や野生寄主植物のノアサガオ、グンバイヒルガオが散在している（第II-3図）。

では海岸、港があり、東側には大きく畑地が広がっている。また、地区内にはサツマイモ圃場や野生寄主植物のノアサガオ、グンバイヒルガオが散在している（第II-3図）。



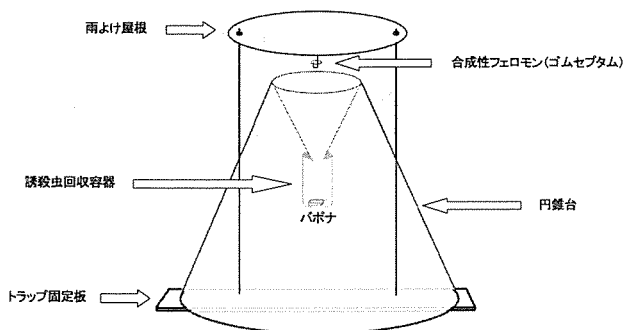
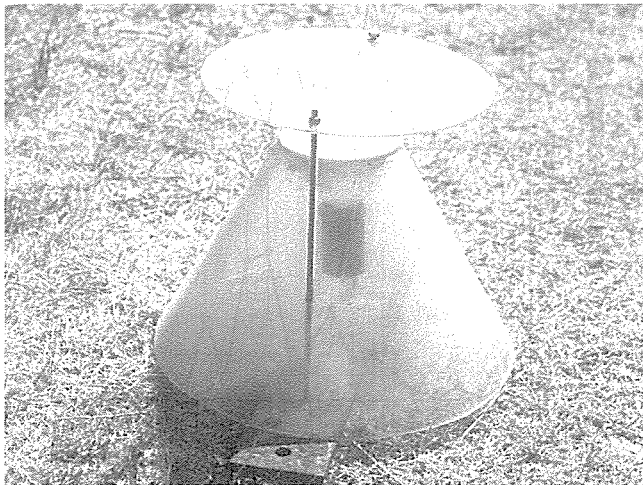
試験地域

第II-3図 喜界島荒木地区におけるフェロモントラップ設置位置

上段：喜界島での荒木地区の位置 下段：荒木地区拡大図 ●：トラップ設置場所

3 使用トラップ

トラップはロート型フェロモントラップ(安田ら, 1992)(第Ⅱ-4図)を用いた。このトラップは底面の直径が約28cm, 高さ約23cmのプラスチック製の円錐台と, その円錐台の中央に口径約9cmのロートと回収容器をはめ込んだ構造となっており, 円錐台の上部には雨よけとして直径約18cmの屋根が取り付けられている。また, 回収容器には殺虫のためパポナ殺虫プレート(シェルジャパン株式会社製)小片を入れた。



第Ⅱ-4図 ロート型フェロモントラップ

4 設置数

荒木地区ではそれぞれのトラップは100m以上離し, 集落に2基, 海岸に2基, 畑地に6基, 合計10基(第Ⅱ-3図)を設置した。

喜界島全域には約100haに1基の割合で, 全島にほぼ均一になるように合計58基を設置した。また, 設置場所はアリモドキゾウムシの野生寄主植物のノアサガオ, またはグンバイヒルガオの群落内あるいは近接した場所とし, ノアサガオ群落54か所, グンバイヒルガオ群落4か所に, それぞれ1か所に1基を地表に静置した。

5 誘引剤

アリモドキゾウムシ合成性フェロモン (Z)

-3-dodecenyl (E) -2-butenate (Heath et al., 1986) を100 μ g 含浸させたゴムセプタム(サンケイ化学株式会社製)を誘引源とし, 各トラップに1個ずつ取り付け付けた。また, ゴムセプタムは各調査毎に新品を用いた。

6 調査時期, 調査間隔

荒木地区での調査は, 1997年4月から2001年3月まで, 2~3週間隔で毎月2回, それぞれ連続した2日間合成性フェロモンを設置した。喜界島全域での調査は, 2000年4月から2001年3月まで, 毎月1回, 連続した2日間行った。いずれの調査も, 誘殺されたアリモドキゾウムシ雄成虫は, トラップ毎に容器に入れて持ち帰り, 室内で虫数を計数した。

結 果

1 荒木地区での誘殺状況

1998-1999年を除くと, 他の3年間はほぼ同様な誘殺パターンを示した(第Ⅱ-5図)。すなわち, 誘殺虫数は7, 8月頃から次第に増加し, 9月下旬から10月にかけてピークを示した後, 急激に減少し, 12月以降は翌年6月頃まで低く推移した。1998-1999年は7月下旬頃に誘殺ピークがみられたことが, 他の3年間の調査結果と異なった。

各調査年とも12月から翌年3月までは, 誘殺虫数が1日1トラップ10頭以下を示すことが多く, 特に1月下旬から2月上旬は1日1トラップ2頭以下と最も誘殺虫数の少ない時期であった。

2 喜界島全域での誘殺状況

喜界島において, アリモドキゾウムシ雄成虫は島内ほぼ全域で誘殺が確認された(第Ⅱ-6図)。年間の1トラップ当たりの総誘殺虫数は, 平均が $1,548 \pm 171$ 頭, 最も少ない場所(赤連)が0頭, 最も多い場所(嘉鈍)が5,624頭であった。住宅地が広がる喜界町役場から空港周辺部にかけての島内西部の北側地域は, 誘殺虫数が少なかった。

誘殺虫数は4月から8月までは, 1日1トラップ当たり16~46頭で推移したが, 9月には急激に増加し, 8月の約11倍にあたる1日1トラップ当たり267頭が誘殺された(第Ⅱ-7図)。10月はさらに増加して1日1トラップ当たり313頭が誘殺されピークとなった。誘殺虫数は11月には急激に減少し, 11月, 12月は4~8月とほぼ同レベルとなった。1月, 2月は1日1トラップ当たり1頭前後とほとんど誘殺されなかった。3月はやや増加傾向がみられ, 1日1トラップ当たり誘殺虫数が6頭程度となった。

3 喜界島全域における2種の野生寄主植物群落内の誘殺状況の比較

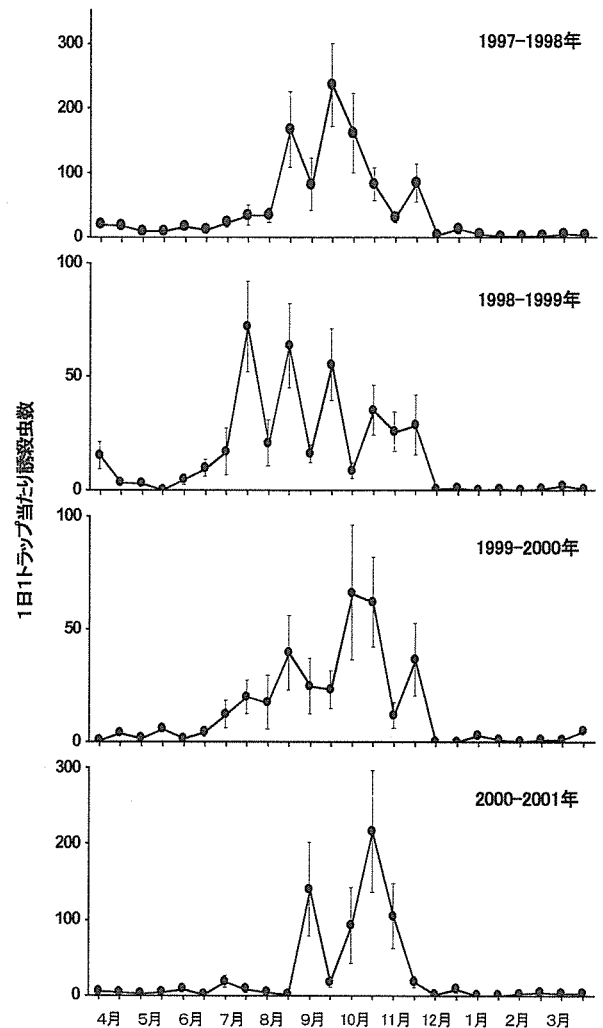
喜界島での主要な野生寄主植物である、ノアサガオとグンバイヒルガオ群落内に設置したトラップの誘殺状況を比較した。誘殺虫数はいずれの月もグンバイヒルガオ群落に設置したトラップが、ノアサガオ群落に設置したトラップに比べて多く、誘殺虫数が非常に少ない1, 2月を除くと、グンバイヒルガオではノアサガオに比べて1.4～6.1倍程度誘殺虫数が多かった（第Ⅱ－8図）。誘殺消長はノアサガオ、グンバイヒルガオの両寄主植物群落内に設置したトラップとも、ほぼ同じ傾向を示した。すなわち、9, 10月に急激に誘殺虫数が増加してピークを形成し、1, 2月はほとんど誘殺されなかった。

4 喜界島全域における周辺環境の違いによる誘殺状況の比較

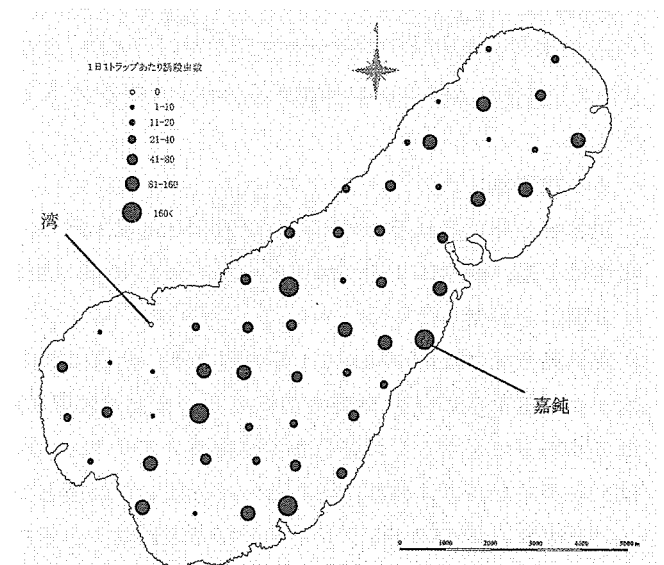
土地利用あるいは地形等の環境条件による本種の発生状況の相違を検討するため、トラップの設置場所を、海岸部、島内北部の畑地、南部の畑地、標高100 m以上の山間部、集落の5つの環境に分けて、誘殺状況を比較した。その結果、誘殺虫数は周年を通じ海岸部が他の環境より多く、逆に集落部は少なかった。その差はピーク時で比較すると約1.7倍であった（第Ⅱ－9図）。また、いずれの環境に設置したトラップも、ほぼ同様な誘殺消長を示し、9, 10月に急激に発生が多くなり、冬季は非常に少なかった。発生ピークは集落部が9月、他の環境では10月であった。

考 察

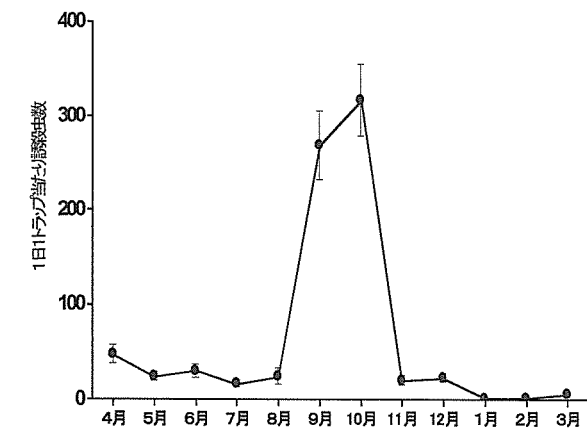
網かごに入れて野外に放置したサツマイモ塊根からのアリモドキゾウムシの羽化消長と、フェロモントラップでの本種雄成虫の誘殺消長はよく一致している（安田, 1993; 湯田ら, 2000）。また, Reinhard (1923) は活動期に野外で成虫を採集した結果, 雌雄はほぼ同数であったと報告している。野外に放飼したアリモドキゾウムシ雄成虫をフェロモントラップで再捕獲した場合, 再捕獲率は平均気温と正の相関があることから (Miyatake et al., 2000), 低温期の捕獲効率は高温期に比べて低くなると考えられ, フェロモントラップにおける誘殺消長と野外での発生消長を単純に読み替えることはできない。しかし, これまでフェロモントラップの捕獲効率和気温に関する詳細な報告なく, また年間を通じた密度推定は行われていない。そこで, ここではフェロモントラップにおける雄成虫の誘殺消長をもとに, 本種成虫の発生消長について考察した。



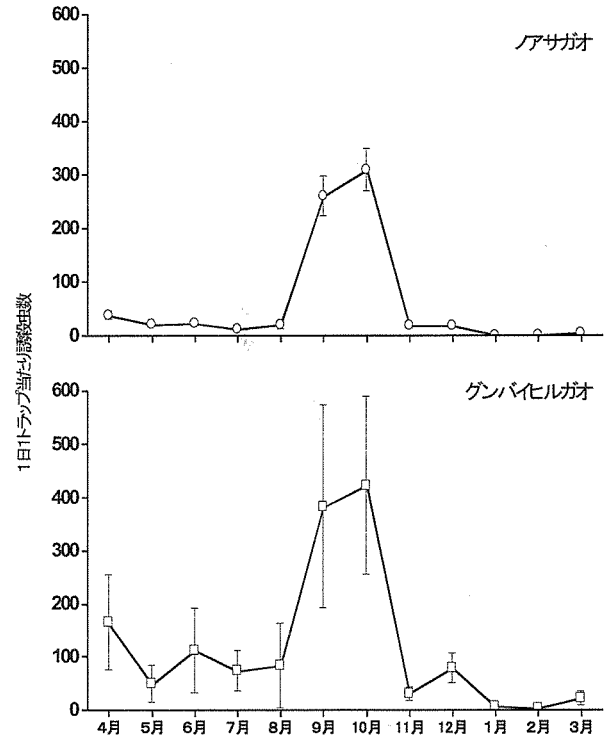
第Ⅱ－5図 喜界島荒木地区における性フェロモントラップへのアリモドキゾウムシ雄成虫の誘殺消長(平均±SE)



第Ⅱ－6図 喜界島における各地点でのアリモドキゾウムシ雄成虫1日1トラップ当たり誘殺虫数 2000年4月－2001年3月

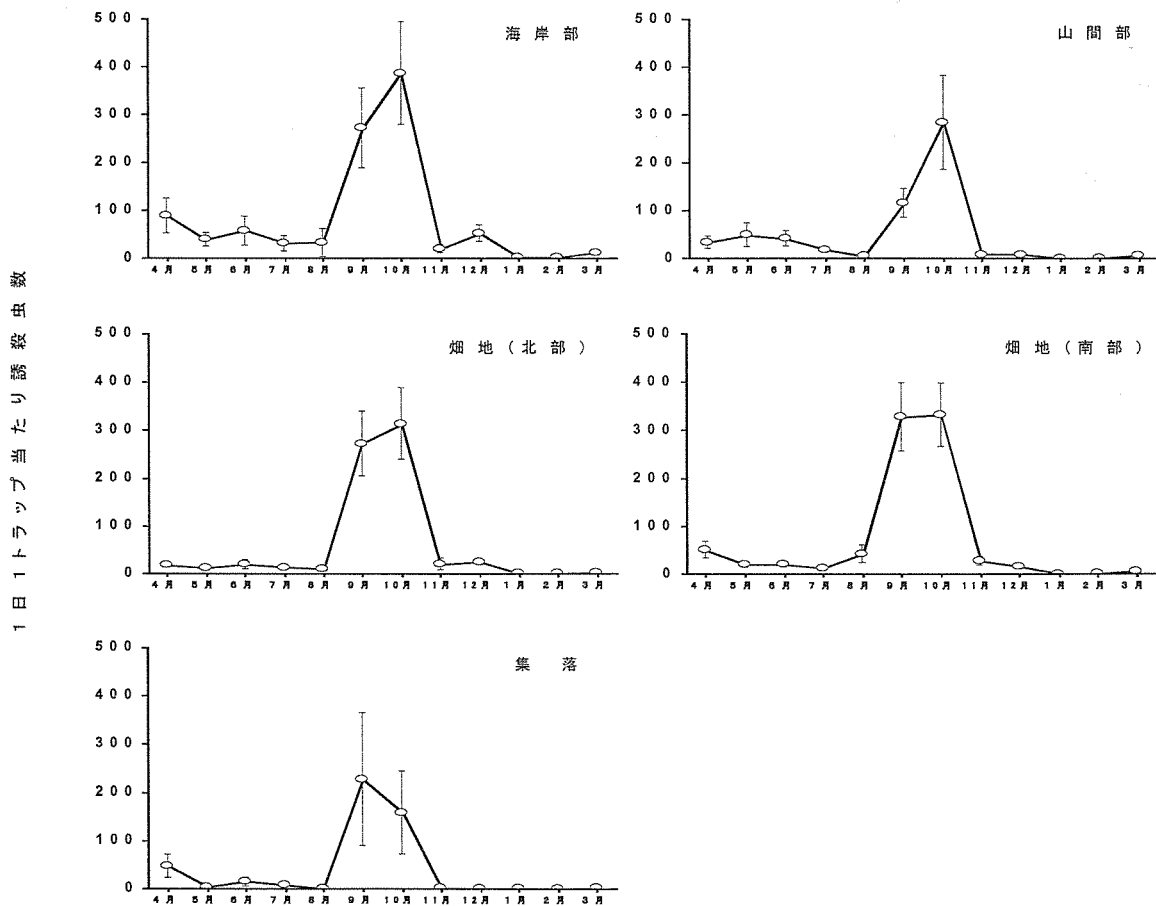


第II-7図 喜界島におけるアリモドキゾウムシ雄成虫の誘殺消長 2000 - 2001 年 (平均±SE)



第

第II-8図 喜界島の寄主植物群落におけるアリモドキゾウムシ雄成虫の誘殺消長 2000 - 2001 年 (平均±SE)



第II-9図 喜界島の異なった環境条件におけるアリモドキゾウムシ雄成虫の誘殺消長 2000 - 2001 年 (平均±SE)

喜界島全域におけるアリモドキゾウムシ雄成虫の年間誘殺消長は、冬季が著しく少なく、10月をピークとする1山型であった。また、荒木地区で4年間継続して行った調査においても、ほぼ同様な誘殺パターンが認められた。このことから、喜界島におけるアリモドキゾウムシ成虫の年間の発生消長は、9月から10月頃にピークを示す1山型と考えられる。また、いずれの調査においても、冬季は著しく誘殺虫数が少なく、低温によるトラップの捕獲効率の低下を考慮しても、冬季は低密度であることが推測されるが、詳細な成虫密度については、今後検討を要する。

フェロモントラップを用いたアリモドキゾウムシ雄成虫の誘殺調査において、石垣島では7月から8月に、宮古島では6月から7月に誘殺ピークがみられる1山型の誘殺消長を示した（佐々木ら, 2002）。また、沖縄本島では誘殺ピークが8月（安田, 1993; 正木ら, 2002a）にみられる1山型、あるいは、3月ならびに8月から10月にみられる2山型（正木ら, 2002a）と報告されている。これらに対し、喜界島における誘殺消長は、概して9月から10月に誘殺ピークをつくる1山型で、上述の地域よりやや誘殺ピークが遅くなる傾向がみられた。石垣島と宮古島では逆転するが、緯度が高くなるほど誘殺ピークが夏季から秋季に移る傾向がみられた。この原因としては気温や日照等の気象要因、あるいは野生寄主植物の状態などの影響が考えられるが、詳細は不明である。一方、冬季は喜界島を含め、いずれの地域においても誘殺虫数が非常に少ない。また、第Ⅲ章で述べるように、冬季はほとんど産卵がみられず、寄主植物からの羽化脱出成虫も少ないと考えられる。このため、喜界島では2、3月は年間で最もアリモドキゾウムシ野生成虫が少ない時期と推察され、成虫を対象にした密度抑圧防除を行う上で重要な時期と考えられる。

吉村ら（1999）が奄美大島で行ったノアサガオ、グンバイヒルガオにおけるの生息調査では、1月から4月までのアリモドキゾウムシの密度は極めて低いか、あるいは認められず、その傾向はグンバイヒルガオに比べてノアサガオで顕著であると報告している。また、今回の調査においても、グンバイヒルガオ群落に設置したトラップでの誘殺虫数が、ノアサガオ群落のトラップに比べて多い傾向がみられ、特に3月から8月にかけてはその差が顕著であり、越冬個体数が多いことが推察された。これらのことから、喜界島の冬季において、グンバイヒルガオはノアサガオに比べて本種の生息場所として好適、あるいはアリモドキゾウムシの選好性が高く、相対的に生息虫数が多いことが示唆された。

沖縄本島、奄美大島において、アリモドキゾウムシは標高200 m以上の地点においても発生が認められるが、発

見個体数は標高が高くなるほど少なくなる傾向がある（大原ら, 2000; 正木ら, 2002b）。喜界島の最高地点の標高は224 mで（<http://www.pref.kagoshima.jp/infra/port/kuko/kikai.html>, 2008）、ほとんどの地域は標高200 m以下である。また、山林は20 %以下で、多くの地域にはノアサガオやグンバイヒルガオなどの野生寄主植物が自生しており、アリモドキゾウムシが島内全域に生息できる環境である。さらに、アリモドキゾウムシが喜界島に侵入してから既に65年以上が経過しており、島全域に分布を拡大するための時間が十分あったと推察される。これらのことから、海岸部、山間部、畑地部では、土地利用や地形等の環境条件に関係なく誘殺虫数に大差がなかったものと考えられる。一方、集落部は、全般的に空き地や畑地が少なく、特に役場から空港周辺部にかけては、島内では最も家屋が密集している地域である。このため、集落部では他の地域と比較して野生寄主植物が自生できる場所が少なく、アリモドキゾウムシの誘殺虫数が顕著に少なかったものと推察される。したがって、喜界島での密度抑圧防除においては、家屋が密集した集落部を除いた島内全域において、同じ防除圧で防除を行う必要があると考えられる。

第2節 低密度時期のアリモドキゾウムシ雄成虫の密度推定

不妊虫放飼法を成功させる上で、年間発生の低密度時期における野外個体密度を把握することは必要条件の一つである（Knippling, 1964）。低密度時期の野外個体群の密度推定値は、前節で述べた分布状況、年間の発生消長とともに密度抑圧防除を実施する際の防除圧を決定するために必要である。また、不虫放飼頭数の決定など、不妊虫放飼計画を策定する上でも必要な情報と考えられる。しかし、これまでに喜界島におけるアリモドキゾウムシの密度調査は Sugimoto et al. (1994a) が8月下旬から9月に行った報告しかない。

前節で報告したように、喜界島におけるアリモドキゾウムシの発生は、9月から10月がピークで、11月から6月頃までは低密度と考えられる。そこでアリモドキゾウムシの低密度時期である5月と、発生ピーク時期の9月に、標識再捕法による雄成虫の密度推定を行った。さらに、得られた推定値と Sugimoto et al. (1994) のデータを用い、5月における喜界島全島での雄成虫の度を推定した。

試験材料および方法

1 試験地区

試験は喜界島の南西部に位置し、集落内にサツマイモ畑や野生寄主植物が散在する荒木地区の約30haを対象に行

った。Sugimoto et al. (1994)は喜界島全体の密度を推定する際、アリモドキゾウムシの密度が高い地区 (Dense area) と低い地区 (Sparse area) に大きく2つに分けて調査、試算している。この区分方法では、今回の試験地区は Sparse area に相当すると考えられる。

2 試験時期

密度推定は1996年と1998年に低密度時期と発生ピーク時にそれぞれ1回ずつ行った。1996年は5月10日から18日と9月17日から25日に、1998年は5月19日から27日と9月14日から22日に実施した。

3 供試虫

放飼用の雄成虫は奄美大島の笠利町、ならびに龍郷町のサツマイモ畑において、放飼日のおよそ5日から10日前に、フェロモントラップによって捕獲した個体を用いた。

4 マーキング、保管、輸送

マーキングならびに試験地区への輸送までの保管は、鹿児島県農業試験場大島支場（以下、'農試大島支場'）で行った。マーキングは油性インク（ペイントペン® 金色又は銀色、PILOT株式会社製）を用い、翅鞘の片側に慎重に着色した。なお、翅が開かなくなる恐れがある個体や歩行が異常な個体については、供試虫から除外した。供試虫はマーク後放飼まで、丸形のプラスチック容器（内径9cm、高さ6cm、蓋は網張り）に1容器当たり80～110頭入れ、餌としてサツマイモ小片を与えた。輸送までは27℃±1℃、70±10% RH、14L10Dの恒温室で飼育した。また、農試大島支場から喜界島の試験地区までは保冷剤（アイスノン®, 白元株式会社製）をいれたコンテナに容器を保管し輸送した。

5 放飼

放飼は1回の試験で1回、13時から15時に行った。放飼地点はそれぞれの間隔を100m以上離し、試験区内に均等になるよう22地点を設定した。供試虫はマーキング後、保管、輸送中に死亡することが予想された。そこで、放飼後直ちに、放飼虫と同じようにマーキング、保管、輸送したモニター用雄成虫240～440頭（プラスチック容器3～5個に収容）について、死亡虫、生存虫を計数し、実放飼虫数を推定した。

6 捕獲、マークの識別

捕獲にはファネル型フェロモントラップ (Proshold, et al. 1986) を改良したプラスチックボックス型フェロモン

トラップ (瀬戸口ら, 1991) (第Ⅱ-10図) を用いた。捕獲は1回の試験で2回行った。1回目の捕獲は放飼3日後にトラップを設置し、翌日回収した。また、2回目の捕獲は放飼7日後にトラップを設置し、翌日回収した。いずれもトラップの設置、回収は13時から15時に行った。トラップは試験地区内に均一になるように16基または30基を配置し、それぞれのトラップが20～100m以上、放飼地点から20～50m以上離れた。

誘引剤は第Ⅱ節第1節5と同じものを用い、各トラップのボックス内に1個ずつ入れた。また、殺虫のため、併せてバボナ殺虫プレート (シエルジャパン株式会社製) もボックス内に入れた。

試験地区で回収した虫はトラップ毎に封筒に入れて農試大島支場に持ち帰り、肉眼により油性インクによるマーク虫を計数した。

7 密度推定法

密度推定はYamamura法を用い (Yamamura et al., 1992), 試験地区内の野生雄成虫の密度推定値 (U) は次式で求めた。

$$\hat{\phi} = \frac{u_1 m_2}{m_1 u_2} + \frac{m_1}{M_0}$$

$$\hat{U} = \phi M_0 u_1 / m_1$$

ここで

$\hat{\phi}$: マーク虫のうち調査期間の個体群内での生存率 (推定値)

$\hat{U}$: 野生虫数 (推定値)

M_0 : 放飼されたマーク虫数

m_1 : 1回目に再捕獲されたマーク虫数

m_2 : 2回目に再捕獲されたマーク虫数

u_1 : 1回目に捕獲された野生虫数

u_2 : 2回目に捕獲された野生虫数

結果

供試したアリモドキゾウムシ雄成虫のうち、マーク後から放飼までに3.8～8.3%程度の死亡率が認められた。得られた死亡率の結果から、放飼虫数は1996年5月が2,239頭、同年9月が2,017頭、1998年5月が1,694頭、同年9月が1,637頭と推定され、この値を密度推定の算出に用いた。

8日間の調査期間中の個体群内でのマーク虫の生存率

$\wedge$
(ϕ) は 0.069 ～ 0.481 であった（第Ⅱ－1表）。荒木地区におけるアリモドキゾウムシ野生雄成虫の密度は、1996年5月が 51 頭/ha、同年9月が 283 頭/ha と推定された（第Ⅱ－1表）。また、1998 年は 5 月が 35 頭/ha、9 月が 147 頭/ha と推定された。5 月と 9 月の密度推定値を比較すると、1996 年が 5.7 倍、1998 年が 4.2 倍、9 月が 5 月より密度推定値が高かった。この結果から、9 月の雄成虫の密度は 5 月の 5 倍程度と推測された。

考 察

Sugimoto et al. (1994) は、Yamamura 法 (Yamamura et al., 1992) を用いて行った喜界島における密度推定試験から、発生ピーク時（8 月下旬から 9 月上旬）の喜界島全域での雄成虫を 400 万頭以下と推定した。そこで、この Sugimoto et al. (1994) の推定結果（400 万頭）と、今回求めた 9 月と 5 月の密度推定値の差（約 5 倍）から、低密度時期である 5 月の喜界島全島におけるアリモドキゾウムシ雄成虫の密度を試算すると 80 万頭以下となった。なお、この試算には以下の 3 つの仮定を前提としている。

1. Sugimoto et al. (1994) が密度推定を行った 1992 年と今回調査した 1996 年、1998 年まで野外個体群が同レベルである。

2. Sugimoto et al. (1994) が試算した Dense area と Sparse area の面積が 1992 年以降変化がない。

3. 「9 月と 5 月の密度差 5 倍」が今回調査した荒木地区 (Sparse area) と密度の異なる Dense area では変わらない。

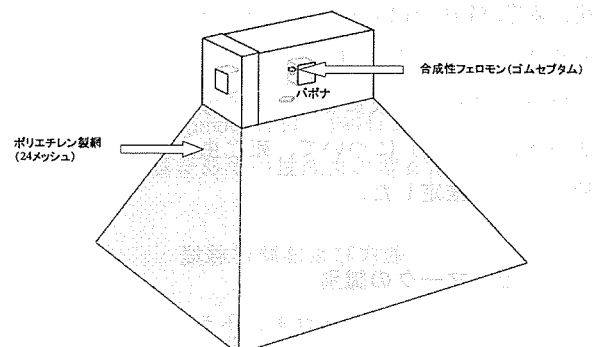
南西諸島において根絶に成功したウリミバエでは、トラップに誘殺される野生虫に対する不妊虫の虫数が 10 倍以上になると、不妊虫放飼法による防除効果が顕著に表れることが多かった（沖縄県農林水産部, 1994）。ウリミバエとアリモドキゾウムシは、分散性、寿命など異なる点が多く単純には比較できないが、ここでは 1 週当たりの不妊虫放飼可能頭数 300 万頭、性比 1:1、不妊雄成虫数と野生雄成虫数の比を 10:1 以上にした場合、喜界島全域の野生雄成虫の個体数を 15 万頭（26 頭/ha）以下にする必要がある。この値は今回求めた低密度時期の雄成虫個体数の約 1/6（15 万頭/80 万頭）にあたる。したがって、密度抑圧防除においては、低密度時期から不妊虫放飼を開始した場合、今回求めた低密度時期の雄成虫個体数を少なくとも 18% 以下に減少させることが目標となる。また、第Ⅱ章第 1 節で述べた荒木地区における 4 年間のトラップ調査では、発生ピーク時期の 1 日 1 トラップ当たりの誘殺虫数の年次変動幅は約 3 倍程度であった。したがって、低密度時期から不妊虫放飼を開始する場合、定

期的に行っているフェロモントラップ調査の誘殺虫数を、低密度時期で少なくとも防除前の 1/6 以下、年次間差を考慮すると最大で 1/18 以下にすることが、密度抑圧防除を行う場合の一つの指標となる。

第 3 節 野生雄成虫の体長

Sakuratani et al. (2001) は、アリモドキゾウムシにおいて、おそらく小さな大量増殖虫は飛翔、交尾の面で野生虫より劣ると述べている。また、野外で行った予備試験の結果、アリモドキゾウムシ雄成虫は、体長が大きい個体が小さい個体に比べて、性フェロモンに到達するまでの時間が短い傾向がみられた。アリモドキゾウムシ雌成虫はフェロモンの分泌特性から、野外においては大部分の個体が 1 回交尾と思われる (Sugimoto et al., 1996; 桜谷ら, 2000)。このため、体長の大きな雄成虫は、より早くフェロモンを放出している未交尾雌個体に到達することができ、性的競争力が高いと推察される。

不妊虫放飼においては、より高い性的競争力をもった不妊虫を生産することが、重要な課題のひとつであり、アリモドキゾウムシの大量増殖において、野生虫と同等かそれ以上の大きさの個体を効率よく増殖することが求められる。この場合、生産する不妊虫の体長を決めるひとつの目安として、野外個体群の体長、特に不妊虫放飼法においては野生雄成虫の体長が重要と考えられる。しかし、これまで奄美群島において、野外個体群の体長に関する詳細な調査は行われていない。そこで、喜界島に設置した性フェロモントラップに誘殺された雄成虫の体長を計測し、野外雄個体群の体長を把握した。



第Ⅱ－10図 プラスチックボックス型フェロモントラップ

第Ⅱ－１表 荒木地区におけるアリモドキゾウムシ雄成虫の Yamamura 法による密度推定

	1996 年 5 月 ^{a)}			1996 年 9 月 ^{b)}		
	日付	野生虫	マーク虫	日付	野生虫	マーク虫
放 飼	10		2,239	17		2,017
1 回目捕獲	13-14	332	175	20-21	4,007	111
2 回目捕獲	17-18	140	21	24-25	5,266	9
ϕ		0.363			0.117	
推定密度 (虫数/ha)		51			283	
9 月の密度推定値/5 月密度推定値			5.7 倍			

	1998 年 5 月 ^{a)}			1998 年 9 月 ^{a)}		
	日付	野生虫	マーク虫	日付	野生虫	マーク虫
放 飼	19		1,694	14		1,637
1 回目捕獲	22-23	278	214	17-18	774	20
2 回目捕獲	26-27	22	6	21-22	676	1
ϕ		0.481			0.069	
推定密度 (虫数/ha)		35			147	
9 月の密度推定値/5 月密度推定値			4.2 倍			

^{a)} 設置トラップ数は 16 基^{b)} 設置トラップ数は 30 基

試験材料および方法

調査虫は第Ⅱ章第2節において、フェロモントラップに誘殺された野生雄成虫を用いた。誘殺虫のうち、2000年5月ならびに2000年8月から翌年3月について、固定した30トラップから、1トラップ当たり各月100頭を任意に選んだ。なお、誘殺虫数が100頭未満の場合は、計測可能な個体すべてを調査した。計測は透過型拡大装置 (PROFILE PROJECTOR, Nikon 株式会社製) を用い、虫体を十分乾燥させた後、口吻先端部から腹部末端までの長さを0.1mm単位で測定し、体長とした。

結 果

フェロモントラップに誘殺されたアリモドキゾウムシ雄成虫の体長は、最小2.7mm、最大6.8mmで、その差は約2.5倍あった (第Ⅱ－2表)。また、月毎の平均体長は5月が最も小さく5.56mm、逆に10月が最も大きく5.77mmで、その差は約1.04倍であった。いずれの月も標準誤差は0.1mm以下で、平均体長と大きく異なる個体は少なかった。

た。総誘殺虫数8,711頭の体長のヒストグラムは、5.7～5.8mmをピークとした、ほぼ1山型の分布を示した (第Ⅱ－1図)。4.8mm以下、あるいは6.5mm以上の個体は、それぞれ全体の0.8%、0.2%で、99%の個体が5.1mm以上、6.4mm以下の体長であった。

考 察

喜界島でフェロモントラップに誘殺されたアリモドキゾウムシ雄成虫の平均体長は約5.7mmであった。月毎の平均体長に大きな差はみられず、各月の体長のヒストグラムも、ほぼ同じ傾向を示した。また、体長の分布は、やや小型の個体が多いが、ほぼ平均体長を中心とした1山型を示したことから、生育条件の異なる個体群が混在している可能性は少ないと考えられる。

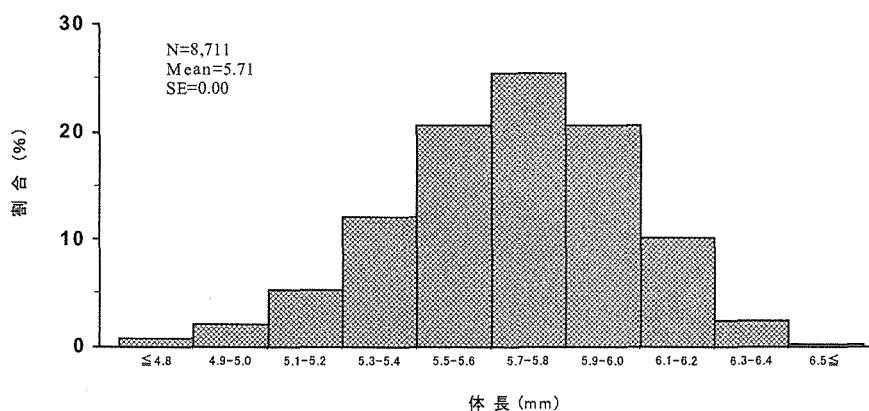
今回の調査は、1年間のみであることから、年次変動についてはさらに調査が必要であるが、喜界島における野外個体群の雄成虫の体長は、時期によって大きく変わらないものと考えられ、アリモドキゾウムシ大量増殖におい

て、野外個体群の雄成虫の平均体長 5.7mm 以上の大きさの個体を効率よく生産することが目標となる。アリモドキゾウムシの大量増殖において、サツマイモ塊根 1 g 当たりから脱出した成虫数が 2.4 頭前後の時、雄成虫の体長は平均 5.7mm 前後であった（山口、未発表）。また、アリモドキゾウムシは、サツマイモ塊根内の幼虫が高密度になると、羽化する成虫が小型化する傾向がある（上門ら、1993）。このため、産卵数を調整することにより、ある程度の範囲内で羽化する成虫の大きさを調整することが可能である。したがって、野外個体群の雄成虫とほぼ同程度の体長の成虫を大量増殖の生産虫の目標とする場合、サツマ

イモ塊根 1 g 当たりから脱出する成虫数を 2.4 頭以下になるよう、塊根に対する母虫密度と産卵期間を調整することが必要と考えられる。通常の大量増殖工程において生産されたアリモドキゾウムシ成虫について、サンプル調査したところ、1,600g のサツマイモ塊根に対して 2,300 頭の成虫（性比はほぼ 1 : 1）を母虫として 3 ~ 4 日間放飼して産卵させた場合、得られた羽化成虫の体長は 5.6 ~ 5.9mm であり（鹿児島県大島支庁農林課特殊病害虫係・農業試験場大島支場、2003）、現在の生産虫はほぼ目標となる体長を満たしていると考えられた。

第Ⅱ-2表 喜界島においてフェロモンに誘殺されたアリモドキゾウムシ雄成虫の体長

捕獲年月	調査虫数	体長 (mm)		
		平均± SE	最小	最大
2000. 5	1,034	5.56 ± 0.01	4.2	6.6
8	666	5.64 ± 0.01	4.2	6.4
9	2,387	5.73 ± 0.01	3.1	6.4
10	2,483	5.77 ± 0.01	2.7	6.8
11	682	5.70 ± 0.01	4.6	6.4
12	1,073	5.74 ± 0.01	4.2	6.6
2001. 1	50	5.62 ± 0.05	4.9	6.6
2	13	5.60 ± 0.06	5.2	5.9
3	323	5.77 ± 0.02	4.2	6.6



第Ⅱ-1 1

図 喜界島において、フェロモントラップに誘殺されたアリモドキ

ゾウムシ雄成虫の体長のヒストグラム

2000年5, 8 ~ 12月, 2001年1 ~ 3月の合計値

第Ⅲ章 冬季のアリモドキゾウムシの生態

奄美群島は世界的にみてもアリモドキゾウムシの分布北限に位置している (International Institute of Entomology, 1993; CAB International, 2005)。特に、奄美群島の最北に位置する奄美大島 (28° 21' N, 129° 26' E)、喜界島 (28° 19' N, 130° 00' E) は、いずれも北緯 28 度に位置し、最寒月 (1

月) の平均気温は 14 °C 前後となる (第Ⅱ-1 図, 第Ⅲ-1 図) (気象庁 気象統計情報 気象観測 (電子閲覧室); <http://www.data.kishou.go.jp/etm/>, 2006)。この温度は本種の発育零点 13 ~ 14 °C (Mullen, 1981; 永山, 1993; 安田, 1998) や、交尾可能な最低温度 15 °C (Sugimoto et al., 1996)、産卵可能な最低温度 14 °C (Sugimoto et al., 1996) とほぼ同程度である。このため、冬季の奄美群島における本種の生

態は、春季から秋季、あるいは原産地と考えられている熱帯や亜熱帯地域における生態と大きく異なると考えられる。しかし、これまでに冬季の生態についての調査は少なく(小林, 1960; 栄, 1968), 海外ではアメリカ合衆国ルイジアナ州で行われた成虫越冬(Overwinter)に関する報告(Dozier, 1937)以外ない。不妊虫放飼法の効率的な実施や根絶モデルを構築するためには、対象昆虫の冬季を含めた年間の生活史を明らかにする必要がある。また、野外での成虫の越冬場所や冬季の成虫の移動、分散、あるいは交尾や産卵に関する情報は不妊虫の放飼場所や放飼頭数を決定する上で不可欠である。そこで、奄美大島、喜界島において本種の冬季における生態について調査を行った。

第1節 冬季におけるサツマイモ塊根内でのステージと発育

冬季はフェロモントラップでの雄成虫の誘殺虫数が減少し(第II章第1節), また、サツマイモ塊根を餌としたイモトラップに蟄集する成虫数も同様に少なくなることから(安田, 1993; 湯田ら, 2000; 佐々木ら, 2002), 野外での成虫数が減少していることが予想された。これに対し、これまで冬季の寄主植物からの成虫脱出、あるいは寄主植物内での越冬ステージや幼虫の発育状況についての報告は少なく、不明な点が多い。そこで、アリモドキゾウムシの冬季におけるサツマイモ塊根内部での発育ステージについて、サツマイモ圃場から塊根を定期的に採取し、越冬ステージを明らかにした。さらに、飼育虫を用い、冬季におけるアリモドキゾウムシのサツマイモ塊根内での発育と塊根からの成虫の脱出状況を調査した。

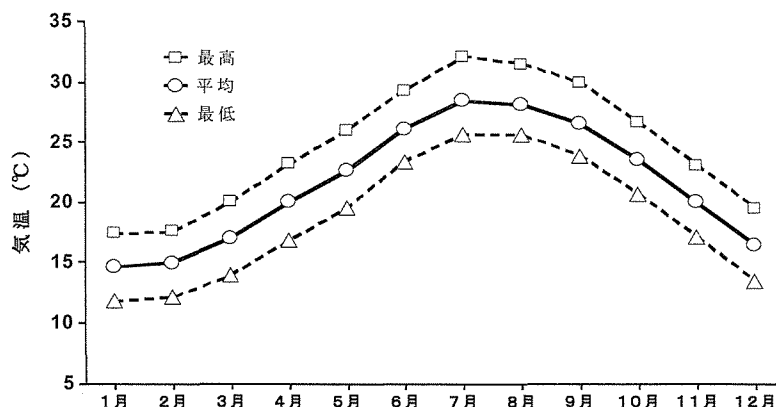
試験材料および方法

1 サツマイモ塊根内の越冬ステージ

試験は鹿児島県農業試験場大島支場(以下、'農試大島支場')のサツマイモ圃場で行った。1987年10月から1988年2月までは面積100 m²、品種コガネセンガン、1987年7月5日挿苗のサツマイモ圃場から、1988年10月から1989年2月までは面積20 m²、品種コガネセンガン、1988年5月25日挿苗のサツマイモ圃場から、毎月1回6~20個のサツマイモ塊根を掘り取り、分解して、塊根内部の越冬ステージを調査した。幼虫の齢期は5齢との説もあるが(福田, 1933; Jayaramaiah, 1975; Rajamma and Premkumar, 1984), ここでは Sherman and Tamashiro (1954) に従い、頭幅から3つに分けた。雌は塊根の表面に穴をあけて卵を産下し、穴は排泄物で蓋をするため(Sherman and Tamashiro, 1954; Subramanian, 1959), 掘り取った塊根で卵を見つけるのは困難であり、卵についての調査は行わなかった。統計解析には JMP Release 5.1.1J を用い、性比のデータを2項検定によって解析した(SAS Institute Japan Inc., 2002)。

2 冬季のサツマイモ塊根内での発育ならびに成虫の塊根からの脱出

サツマイモ塊根3個を入れたポリプロピレン製容器に、雌雄各50頭のアリモドキゾウムシを放飼し、27 ± 1 °C, 75 ± 5 % RH, 自然日長の恒温室内で3日間飼育し、この方法で1997年9月16日から10月17日まで毎週1回、1回15個の産卵させたサツマイモ塊根を得た。産卵させたサツマイモ塊根は水分含量50%前後に湿らせたノコズを入れた飼育容器に埋め込み、大島支庁農林課特殊病害虫係(以下、'特殊病害虫係')敷地内の野外に設置した網ゲージ(1.8 m × 1.8 m × 1.8 m, 天井はビニール張り)で保管した。サツマイモ塊根はノコズ保管後20日目から塊根からの成虫脱出がみられるまで、ほぼ15日間隔で2



III-1 図 鹿児島県名瀬市(奄美大島)における1971年から2000年までの月平均気温、最高気温、最低気温移(名瀬測候所観測)

個ずつ分解し、発育ステージを調査した。塊根からの成虫脱出がみられた後は残りの塊根は分解せず、8～17日間隔で、塊根からの脱出成虫数を調査した。産卵させたアリモドキゾウムシは1990年または1994年（両系統の比率は約1:1）に、奄美大島の龍郷町または笠利町から採集し、恒温室（ $27 \pm 1^\circ\text{C}$ 、 $75 \pm 5\%$ RH、14L10D）で上門ら（1993）の方法により、サツマイモ塊根で飼育している個体群を用いた（以下、累代飼育虫）。なお、文中で用いる‘冬季’は季節予報で用いられる定義に従い、12月から2月までの期間を示す（気象庁 気象の知識 気象用語; http://www.kishou.go.jp/know/yougo_hp/toki.html, 2005）。

結 果

1 サツマイモ塊根内の越冬ステージ

秋季から冬季におけるサツマイモ塊根内のアリモドキゾウムシのステージを第Ⅲ－2図に示した。奄美大島において、冬季のサツマイモ塊根内でのアリモドキゾウムシは、1988年1月の調査で成虫がみられなかったことを除くと10月、11月（秋季）と同様、幼虫および蛹、成虫が認められた。冬季のサツマイモ塊根内での各虫態の比率は幼虫が最も高く、蛹と成虫がほぼ同程度であった。このうち幼虫では大部分が3齢幼虫であった。また、10月から2月にかけて3齢幼虫の割合が次第に高くなる傾向があった。12月から2月には1齢幼虫は認められなかった。冬季にサツマイモ塊根内でみつけた成虫は各調査時とも雌が多かったが、性比は0.5と有意な差はみられなかった（2項検定、 $p>0.05$ ）。

2 冬季のサツマイモ塊根内での発育ならびに成虫の塊根からの脱出

9月中、下旬に産卵され野外に置いたサツマイモ塊根では、最も発育の早い個体で、産卵40日後（10月下旬から11月上旬）には蛹化し、産卵約50日後（11月中旬）には成虫に達した（第Ⅲ－3図A, B）。一方、10月中旬に産卵されたサツマイモ塊根では、産卵から蛹化まで約60日（12月中旬）、成虫までは100日以上（1月下旬）要した（第Ⅲ－3図E）。産卵時期が遅いほど、成虫までの発育期間は長くなる傾向がみられたが（第Ⅲ－3図A～E）、冬季においてもサツマイモ塊根内でアリモドキゾウムシの発育が認められた。

産卵後、野外に置いたサツマイモ塊根から成虫が脱出するまでの期間は、9月中、下旬に産卵させた場合では70日以上（12月上旬以降）、10月上旬では80日以上（1月上旬以降）、10月中旬では130日以上（2月下旬以降）であった（第Ⅲ－4図）。秋季から冬季においては、サツマ

イモ塊根に産卵される時期が遅いほど、産卵されてから成虫が塊根から脱出するまでの期間が長くなったが、冬季においても継続的にサツマイモ塊根からのアリモドキゾウムシ成虫の脱出がみられた。

考 察

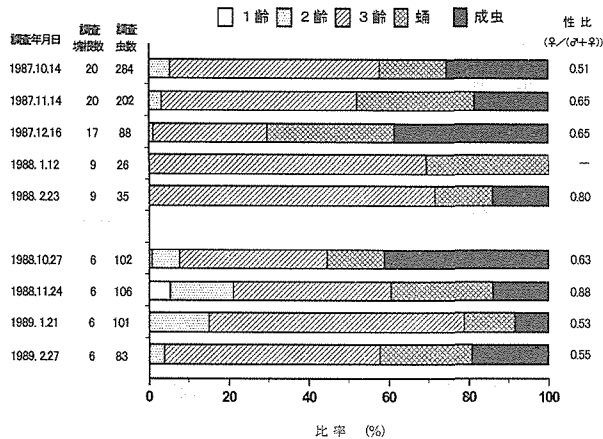
サツマイモ塊根内部では、調査しなかった卵を除く全ステージがみられ、いずれのステージでも越冬するものと考えられた。主となる越冬ステージ態は成虫と3齢幼虫と考えられた。1、2齢幼虫の割合は少なく、特に1、2月は1齢幼虫は確認できず、秋季から冬季にかけては産卵が少ないことが示唆された。人為的に産卵させ、野外条件下においたサツマイモ塊根内のアリモドキゾウムシは、低温により遅延するもの、冬季においても発育が認められ、塊根からは冬季間も継続した成虫の脱出が確認された。Mullen（1981）は、 15°C で雌は産卵し、一部の幼虫は明らかに発育すると報告している。今回の実験では、最寒月の月平均気温が 15°C 前後の変温下の野外条件においても、同様にサツマイモ塊根内のアリモドキゾウムシは発育することが明らかになった。これらのことから、土中のサツマイモ塊根内のアリモドキゾウムシは冬季も発育を続けており、幼虫、蛹による冬季の休眠はないものと推察される。また、奄美大島においては、個体数は少ないが、冬季も成虫が継続的に寄主植物から脱出していると考えられる。

沖縄県那覇市では野外に置かれサツマイモ塊根へのアリモドキゾウムシの産卵数が、11月以降減少し、12月から2月まではほとんどみられない（安田, 1993）。同様に、奄美大島、喜界島においても野外に置かれたサツマイモ塊根へのアリモドキゾウムシの産卵数は、12月中旬から2月中旬まではほとんどみられない（第Ⅲ章第3節）。また、サツマイモ圃場あるいは野外の網室へ12月以降に放飼された成虫は翌年3月まで再捕獲された（第Ⅲ章第2節）。これらのことから、3月頃に産卵する雌成虫の多くは、12月以降にサツマイモ塊根から羽化脱出してきた個体と考えられた。今回の実験で、9月中・下旬に産卵させたサツマイモ塊根を野外条件下に置いた場合、12月上旬からサツマイモ塊根からの成虫の脱出がみられ、10月中旬に産卵させた場合は、2月以降にサツマイモ塊根から脱出がみられた。これらのことから、越冬後の春季の増殖に関わる成虫の多くは、前年の9月から10月までに産卵された卵に由来すると推察される。

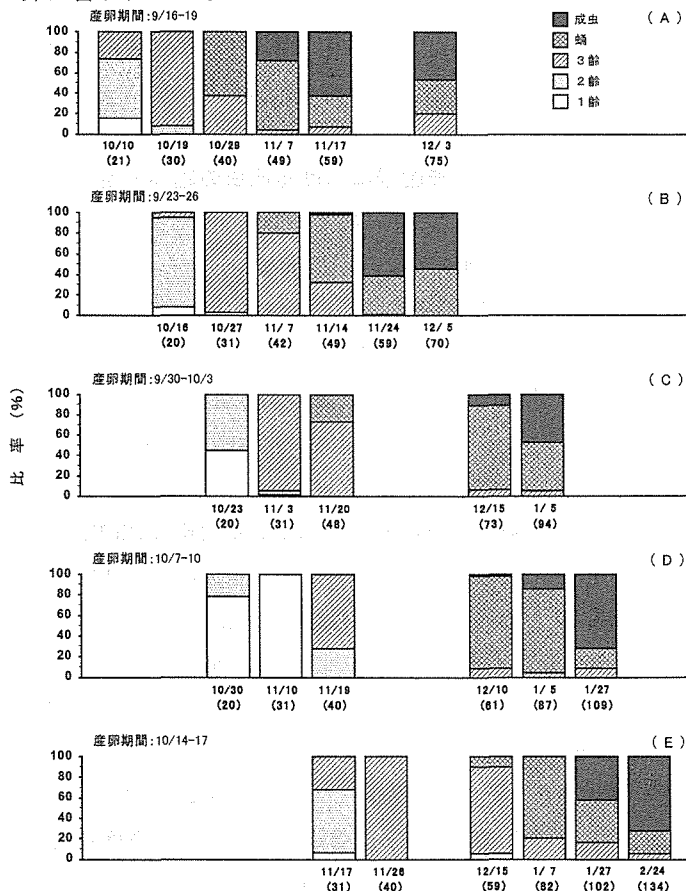
喜界島でのアリモドキゾウムシ根絶防除事業では、サツマイモ栽培の作付け制限を行わず、防除を進める方針である。奄美群島では、サツマイモを周年栽培することが可能

であり、一般的に栽培期間が長くなる。また、喜界島では茎葉部が山羊等の家畜の餌として利用されるため、長期放任栽培圃場が散見される。前述したように、9、10月に産卵された卵に由来する成虫が、翌年春季の増殖源となることから、越年栽培されるサツマイモは、これら越冬世代の餌資源となることが示唆される。したがって、防除対象

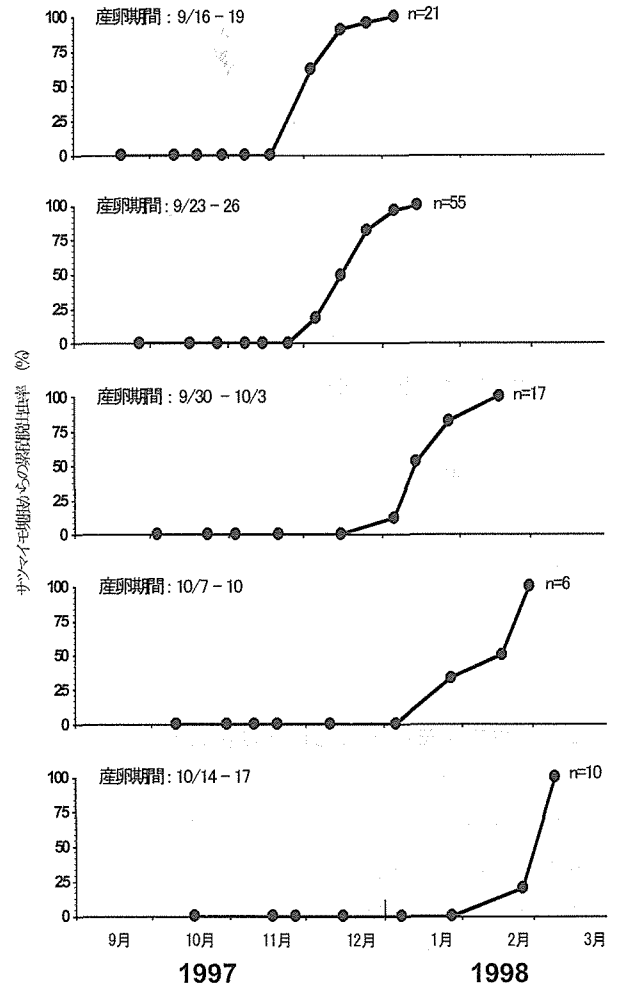
地域でサツマイモを栽培する場合、適切な栽培管理のもと春植え秋収穫を行って栽培期間をできるだけ短くし、特に秋から翌春までの栽培は控える等、アリモドキゾウムシの増殖場所をつくらないような地域全体での栽培体系の統一が求められる。



第三-2図 10月から2月までに奄美大島の野外部場から採取したサツマイモ塊根内のアリモドキゾウムシの年齢構成卵は含まれていない。



第三-3図 1997年9月から10月に室内で産卵させた後に野外に置いたサツマイモ塊根におけるアリモドキゾウムシの年齢構成の推移 ()の数字は産卵後の日数を示す。



第三-4図 1997年9月から10月に室内で産卵させた後に野外に置いたサツマイモ塊根から脱出したアリモドキゾウムシ成虫の推移 nは脱出した成虫数を示す。

第2節 成虫の越冬状況

これまでアリモドキゾウムシ成虫の越冬に関する報告は、Dozier（1937）がケージを用いて行った試験しかなく、成虫の冬季の生息場所や生存率に関する詳細な知見はない。根絶防除事業を実施するにあたり、成虫の越冬場所や冬季の生存率など、成虫の越冬状況に関する情報は、不妊虫放飼あるいは密度抑圧防除を行う場合に不可欠である。また、低温により冬季の成虫の生存率は他の時期と大きく異なることが予想され、冬季の成虫の生存率は根絶モデルを策定するためにも必要なパラメータである。そこで、野外における成虫の越冬状況、越冬場所について、サツマイモ圃場において調査した。また、飼育虫を用い、サツマイモ圃場、あるいは野外網ケージに成虫を放飼し、定期的に捕獲して冬季の生存状況を調査した。

試験材料および方法

1 サツマイモ圃場における成虫の越冬状況

野外における成虫の越冬状況を把握するため、農試大島支場の面積 380 m²、品種ベニオトメ、1996 年 4 月挿苗のサツマイモ圃場において、1996 年 11 月から 1997 年 4 月まで毎月 1 回、アリモドキゾウムシ成虫を見取りにより捕獲し、個体数を計数した。計数後、捕獲虫は同圃場へ放飼した。

2 サツマイモ圃場における成虫の越冬場所

農試大島支場の面積 50 m²、品種コガネセンガン、1990 年 4 月挿苗のサツマイモ圃場において、1991 年 1 月に畝を中心に 60cm × 60cm の範囲をランダムに選び、アリモドキゾウムシ成虫の生息場所を層別に調査した。地上部はサツマイモ茎葉上と地表面に分けて見取り調査し、地下部は深さ 20cm まで、地表面から 5cm 間隔の深さで掘り取って調査した。調査は 1 月 5 日から 31 日までに 7 回実施し、毎日日気温が最も高くなる午後 2 時前後に行った。

3 冬季における野外へ放飼した累代飼育成虫の生存状況

成虫の野外での越冬の可能性を実験的に明らかにするために、農試大島支場において、1996 年 11 月 1 日から 1997 年 3 月 1 日まで、ほぼ 1 月間隔で 5 回、1 回当たり 700 ～ 1200 頭の羽化後 10 ～ 14 日のアリモドキゾウムシ雌成虫をサツマイモ圃場に放飼した。放飼虫には累代飼育虫を用い、鞘翅には放飼日毎に異なる色の油性インク（ペイントペン®：桃・紫・橙・銀・金色、PILOT 株式会社製）でマークした。調査は野生虫を調査した 1 と同一圃場で、1996 年 11 月から 1997 年まで毎月行い、放飼虫は野生虫と同時に調査した。発見した成虫は手で捕獲し、マーク個

体を計数後、再放飼した。

また、冬季の成虫の生存率を調査するため、農試大島支場敷地内に設置した野外網ゲージ（2m × 2m、高さ 2m）に、羽化後 5 日齢前後（サツマイモ塊根脱出後 1 ～ 3 日）の累代飼育虫のアリモドキゾウムシ雌雄成虫各 200 頭を、1998 年 12 月 16 日に放飼した。網ゲージ内には餌として、サツマイモ塊根 6 個（品種、土佐紅）を、ケージの中央にそれぞれを 20 ～ 40cm 離して置き、毎週更新した。1999 年 3 月 31 日まで、約 2 週間間隔で見取りにより放飼個体の生死を調査した。

4 統計解析

統計解析には JMP Release 5.1.1J（SAS Institute Japan Inc., 2002）を用いた。

結 果

1 サツマイモ圃場における成虫の越冬状況

サツマイモ圃場では、冬季間も継続的にアリモドキゾウムシ成虫の生息が、雌雄いずれも確認された（第Ⅲ－1 表）。各調査時とも雌が多かったが、冬季の性比は 0.5 と有意な差ははみられなかった（Pearson の χ^2 検定、 $p > 0.05$ ）。冬季から春季にかけて、性比は次第に雌に偏る傾向が認められ、3、4 月の性比は 0.5 と有意に異なり（Pearson の χ^2 検定、 $p < 0.05$ ）、雌成虫が多かった。

2 サツマイモ圃場における成虫の越冬場所

1 月のサツマイモ圃場においてアリモドキゾウムシ成虫は、雌雄とも地表面の石や枯葉の下、ロールした枯葉の中などに最も多く生息しており、次いで地下部の深さ 5cm までに多くみられた（第Ⅲ－5 図）。地下部では深さ 10cm まで生息が認められた。雌雄による生息場所の差はみられなかった（尤度比検定、 $df=3$ 、 $\chi^2=1.1$ 、 $p=0.78$ ）。

3 冬季における野外へ放飼した累代飼育成虫の生存状況

マークして放飼した雌成虫のうち、1996 年 12 月 2 日以降にサツマイモ圃場へ放飼した標識雌成虫は、最終調査日の 1997 年 4 月 21 日まで継続的に捕獲された。ただし、再捕獲率は非常に低かった（第Ⅲ－2 表）。調査時には *Beauveria* 菌で死亡した成虫がしばしば見られた。

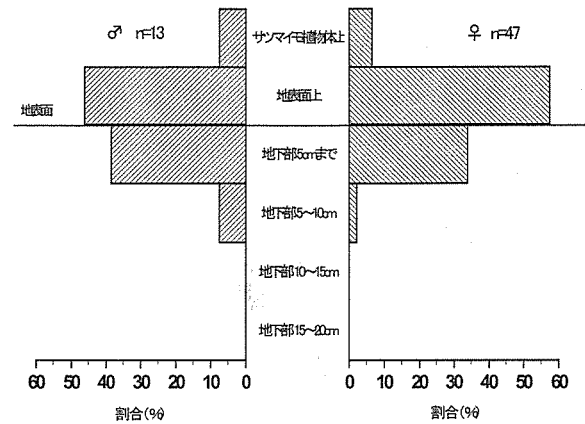
野外ケージ試験において、1 月上旬まではアリモドキゾウムシ成虫の生存率は雌雄とも同程度で推移したが、その後、3 月上旬までは雌の生存率がやや高い傾向がみられた（第Ⅲ－6 図）。最終調査の 3 月 31 日の生存率は雄が 1.0 %、雌が 0.5 %であった。Proportional Hazards Model を用いて雌雄の生存率曲線を比較した結果、有意な差は認

められなかった（尤度比検定, $df=1$, $\chi^2=2.5$, $p=0.11$ ）.
放飼後の平均生存日数は雌成虫が 61.2 日, 雄成虫が 39.3
日で, 雌雄とも 1999 年 1 月 6 日（放飼 21 日後）には生
存率がほぼ 50 % となった. また, 1 月から 3 月の調査時
の観察では, *Beauveria* 菌に感染し, 死亡している個体が
合計で十数頭認められた.

第Ⅲ－1表 1996 年 11 月から 1997 年 4 月までにサツマ
イモ圃場で捕獲されたアリモドキゾウムシ野生成虫

捕獲年月日	成虫数		性 比 雌／(雄+雌)
	雄	雌	
1996.11.15	98	122	0.55
1996.12.17	77	82	0.52
1997. 1.16	50	68	0.58
1997. 2.17	60	76	0.56
1997. 3.17	35	73	0.68 ^{a)}
1997. 4.21	14	42	0.76 ^{a)}

^{a)} 性比が 0.5 と有意に異なることを示す ($p < 0.05$)

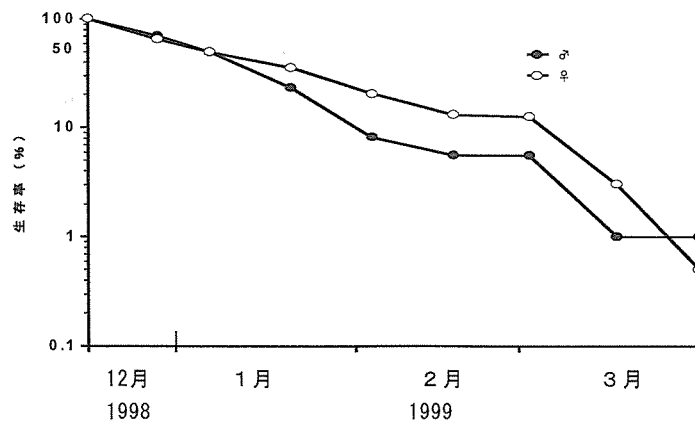


第Ⅲ－5図 1月にサツマイモ圃場で確認されたアリ
モドキゾウムシ成虫の生息場所
1991 年 1 月の 14 時前後に 7 回調査した結果の合計値.
n は発見虫数を示す.

第Ⅲ－2表 1996 年 11 月から 1997 年 4 月までにサツマイモ圃場で再捕獲された
アリモドキゾウムシ標識雌成虫数

捕獲年月日	放飼年月日				
	1996.11. 1 (700) ^{a)}	1996.12. 2 (1000)	1996.12.26 (1200)	1997. 1.31 (1000)	1997. 3. 1 (1000)
1996.11.15	2	—	—	—	—
1996.12.17	3	30	—	—	—
1997. 1.16	3	11	10	—	—
1997. 2.17	1	4	9	39	—
1997. 3.17	0	1	1	5	69
1997. 4.21	0	1	11	5	22

^{a)} () 内の数字は放飼した累代飼育雌成虫数を示す.



第Ⅲ－6図 鹿児島県農業試験場大島支場内（奄美大島; 名瀬市）の
野外網ケージに放飼したアリモドキゾウムシ成虫の冬季生存率の推移

およそ羽化 5 日後の室内飼育虫を雌雄 200 頭ずつを 1998 年 12 月 16 日に放飼した.

考 察

今回の調査において、奄美大島ではサツマイモ圃場でアリモドキゾウムシ成虫が、冬季の間も継続して発見された。また、マークしてサツマイモ圃場に放飼した雌成虫のうち、12月以降に放飼した雌成虫は4月まで、再捕率は低いが、生存が確認された。さらに、野外に設置した網ケージにおいても、12月に放飼したアリモドキゾウムシ成虫は雌雄とも、生存率は低率であったが、3月下旬まで生存が認められた。Dozier (1937) もルイジアナ州における野外ケージを用いた実験で同様な結果を報告している。これらの結果から、奄美大島においては、生存率は非常に低いものの、成虫での越冬が可能であることが明らかになった。

今回のサツマイモ圃場でのアリモドキゾウムシ捕獲虫の調査では、性比は冬季から春季にかけて次第に雌に偏る傾向がみられ、その理由の一つとして雌雄による生存率の違いが示唆された。しかし、野外ケージで行った冬季の成虫生存状況調査では、雌雄の生存率に差はみられなかった。また、Mullen (1981) が行った室内試験では、15℃下では雌雄の生存期間に大きな差はみられていない。不妊虫放飼法では野外個体群の性比の大きな偏りは、不妊虫放飼の防除効果に影響を与えると考えられる。野外におけるアリモドキゾウムシの性比に関してはReinhard (1923) の報告しかなく、今後、野外個体群の性比の変動については、さらに調査が必要であろう。

アリモドキゾウムシ成虫は夕刻から夜間にかけて、飛翔を伴った活発な活動を行い (Jayaramaiah, 1975; Howard, 1982; Sakuratani et al., 1994), 昼間は雌雄とも主に地表面や地下部にいることが知られている (Sakuratani et al., 1994)。冬季のサツマイモ圃場における生息場所の調査では、アリモドキゾウムシ成虫は昼間は地表面や地下部 5cm 以内で多く発見され、気温が上昇する昼間に特に活動が活発になることはなかった。一方、冬季の夜間については、低温が成虫の行動を抑制すると推測される。すなわち、奄美大島の冬季は夜間気温 15℃を下回ることが多く、12月から2月の月平均最低気温は 11.3 ~ 13.1℃である。Sakuratani et al. (1994) は、奄美大島で野外のケージを用いた試験において、10月から1月の冷涼な季節では、アリモドキゾウムシ成虫は、夜間も地表面や地下部に多く、低温により行動が鈍ることを報告している。また、室内試験では、アリモドキゾウムシ成虫は 13℃以下では、飼育容器の隅や餌のサツマイモ塊根の下などに集合しほとんど動かなかったことが確認されている (Sakuratani et al., 1994)。これらのことから、冬季においてはアリモドキゾウムシのサツマイモ等寄主植物からの移動、分散は非常に

小さいと推察される。奄美大島では冬季もサツマイモが栽培されており、ノアサガオやグンバイヒルガオなどの野生寄主植物も繁茂している。冬季、アリモドキゾウムシはサツマイモと同様、これらの野生寄主植物においても、植物内部あるいはその周辺で越冬しているものと考えられる。

不妊虫放飼法では、不妊虫放飼の効果を高めるためには、野生虫の密度が不妊虫に比べて十分低くなくてはならない。また、野生虫の個体数を低く抑圧するための実用的な防除方法が必要となる (Knippling, 1955, 1964)。アリモドキゾウムシは春季の産卵開始時期である3月頃までは、新たに野外個体群に加入する成虫も少なく (第Ⅲ章第1節)、最も野生成虫の密度が低くなる時期と考えられる。さらに、雌成虫の交尾率も低い (第Ⅲ章第3節)。したがって、密度抑圧防除の観点からは、この時期の野生虫をさらに抑制することが重要である。3月に野外で生息する成虫の多くは、前年の9月から10月に産下された個体と考えられる (第Ⅲ章第1節)。このため、3月の野外での成虫密度を低くするには、その前世代に相当する成虫による9月から10月の産卵数を減らすか、あるいは越冬個体数を減少させるかが考えられる。近年、本種の防除に関して *Beauveria bassiana* などの昆虫寄生菌や、*Steinernema* 属線虫などの昆虫病原性線虫等の天敵微生物の利用に関する研究が多くなされている (Villacarlos and Granados-Polo, 1989; Jansson et al., 1990; Khan et al., 1990; Jansson, 1992; 安田ら, 1997)。前述したように、奄美群島においては、冬季間、アリモドキゾウムシ成虫はほとんど移動せず、湿度の高い寄主植物の株元周辺に生息していることが推察されているので、これら天敵微生物との接触が多く感染を受けやすい時期と考えられる。冬季における防除の一手段として、今後、これらの天敵微生物を利用した成虫の密度抑圧に関する検討も進めていく必要がある。

第3節 冬季の交尾と産卵

冬季の不妊虫放飼における放飼計画の策定や防除効果の調査、あるいは根絶モデルを構築する上で、冬季の交尾や産卵について明らかにすることが不可欠である。また、低温の影響で性成熟までの期間が長くなると考えられる冬季に羽化した個体群について、交尾時期を明らかにすることも重要である。

これまで南西諸島など国内の分布地域を含め、冬季の交尾状況に関する詳細な報告はない。また、産卵についても、寄主植物内の生息状況による間接的な調査結果が示されているだけである (栄, 1968; 吉村ら, 1999)。そこで、本節では、冬季に野外で採集した雌成虫を個体飼育または解剖し、冬季の雌成虫の交尾状況と産卵状況を明らかにした。

また、飼育した未交尾雌成虫をアリモドキゾウムシ発生サツマイモ圃場に放飼して、野生雄成虫との交尾状況を調査し、冬季における羽化雌成虫ならびに雄成虫の交尾活動について推察した。さらに、野外に置いたサツマイモ塊根への産卵数の推移、ならびに11月下旬から12月下旬に交尾させ、野外条件下で個体飼育した既交尾雌成虫の産卵消長を調査し、冬季から春季にかけての産卵状況を明らかにした。

試験材料および方法

1 冬季における野生雌成虫の交尾率と卵胞の発育

冬季の野生雌成虫の交尾ならびに産卵状況を推測するため、野生雌成虫を捕獲し、解剖して交尾率と卵胞の発育状況を調査した。試験は農試大島支場の面積130～200 m²の挿苗後6か月以上経過したサツマイモ圃場（品種サツマオトメ、また土佐紅）で行った。調査は第1回が1996年10月から1997年4月まで、第2回が1997年12月から1998年4月まで、第3回が1998年11月から1999年5月まで行い、ほぼ1か月に1回、アリモドキゾウムシ雌成虫を見取りにより10頭から30頭捕獲した。第1回の調査では、捕獲した雌成虫にサツマイモ小片を与えて27±1℃、70±10% RH、14L10Dの恒温室で個体飼育し、次世代がみられた個体を既交尾雌とした。第2、3回の調査では、捕獲した雌成虫を解剖し、受精のう内の精子の有無を調査し、精子がみられた個体を既交尾雌とした。また、併せて最大卵胞の短径（卵胞サイズ）を計測した。なお、アリモドキゾウムシの産下卵の短径は400～500 μmと報告されていることから（Reinhard, 1923; 福田, 1933; Sherman and Tamashiro, 1954; 栄, 1968; Sutherland, 1986）、ここでは卵胞サイズ500 μm以上のものを成熟卵とした。

2 冬季に羽化した野生雌成虫の交尾と産卵

冬季に寄主植物から脱出した野生雌成虫の交尾活動を推測するため、羽化後、野外条件下で飼育した未交尾雌成虫を野外に放飼し、再捕獲して交尾状況を調べた。未交尾雌成虫は累代飼育虫を使用した。試験は農試大島支場の面積130 m²、品種ベニオトメ、1997年4月8日挿苗のサツマイモ圃場で行った。1997年12月1日に900頭、1997年12月26日に1,000頭の未交尾雌成虫を放飼し、放飼21日後から、ほぼ1か月間隔で4月まで、見取りにより放飼虫の再捕獲を行った。さらに、同一圃場に1998年12月11日、1999年1月20日に未交尾雌成虫をそれぞれ1,000頭放飼し、放飼13～19日後から、約1か月間隔で4月まで放飼虫の再捕獲を行った。捕獲した個体は解剖し、受精

のう内に精子がみられた個体を既交尾個体とした。また、卵胞サイズを計測した。

放飼した未交尾雌成虫は冬季に雌成虫が塊根から脱出したことを想定し、性的に未熟な状態を保つため、羽化後、放飼まで以下に述べる野外条件下で飼育した。まず、累代飼育虫に産卵させたサツマイモ塊根を、産卵から約25日後に分解して雌の蛹を分別し（Ram et al., 1980; 岩元・伊藤, 1989）、シャーレに保管して羽化まで27±1℃、70±10% RH、14L10Dの恒温室で飼育した。羽化個体は放飼まで餌としてサツマイモ小片を入れたプラスチック製の容器に入れ、農試大島支場内の野外網室で飼育した。野外網室は屋根と両側の入口はガラス張り、側面が網張りで、気温、日長は野外とほぼ同条件である。放飼時の日齢は羽化後7～14日で、鞘翅には野生雌成虫と区別するため、放飼毎に異なる色の油性インキ（ペイントペン® 緑・桃・金色、PILOT株式会社製）でマークした（第II章第2節）。

3 冬季の野生雄成虫の交尾活動

冬季における野生雄成虫の交尾活動を推測するために、性成熟した未交尾飼育雌成虫をサツマイモ圃場に放飼し、再捕獲して交尾状況を調べた。未交尾飼育雌成虫は累代飼育虫を用い、前述2と同じサツマイモ圃場で行った。1998年は2月2日に500頭、1999年は1月20日に280頭の性成熟した未交尾雌成虫をサツマイモ圃場に放飼した。放飼18～19日後からほぼ1か月間隔で見取りにより放飼虫の再捕獲を行った。捕獲した個体は解剖して、受精のう内の精子の有無を調査し、精子がみられた個体を既交尾個体とした。

放飼した未交尾雌は累代飼育虫を用い、性成熟させるため、羽化までは前述2と同様な方法で飼育した後、引き続き27±1℃、70±10% R.H、14L10Dの恒温室で放飼まで飼育した。放飼時の日齢は羽化後7～14日で、鞘翅に油性インキ（橙・銀色）でマークし（第II章第2節）、野生雌成虫と区別した。なお、アリモドキゾウムシの産卵前期間は27～28℃の条件では6～9日間である（Reinhard, 1923; Mullen, 1981）。したがって、放飼時には十分に性成熟しているものと見なされた。

4 冬季におけるイモトラップでの野生虫の産卵消長

冬季における野生雌成虫の産卵消長を把握するため、サツマイモ塊根を用いたトラップを野外に設置し、回収したイモから脱出する成虫数を調べた。試験は喜界島の南西部に位置する荒木地区（第2章第1節 参照）で行った。1996年から1998年の毎年11月から翌年3月まで、荒木地区

内（約50ha）10か所に、プラスチックの網かごにサツマイモ塊根を入れたトラップ（イモトラップ）を設置した。サツマイモ塊根は1トラップに3～4個（約600g）入れ、約2週間間隔で更新した。

回収したサツマイモ塊根は、ポリプロピレン製容器に入れた水分含量50%前後に湿らせたノコクズ内に2週間埋め込み、さらにノコクズから取りだして4週間保管し、塊根から脱出する成虫数を調べた。ポリプロピレン容器は $27 \pm 1^\circ\text{C}$ 、 $70 \pm 5\%$ RH、自然日長の恒温室に置いた。なお、アリモドキゾウムシは塊根の表面に穴をあけて1卵ずつ産下し、排泄物で穴に蓋をするため（Sherman and Tamashiro, 1954; Subramanian, 1959）、産卵数を正確に計数することは極めて難しいので、ここではサツマイモ塊根から脱出した成虫数を便宜的に産卵数と見なした。後述の5についても同様な理由で、ふ化幼虫数を産卵数とみなした。

5 冬季における既交尾雌成虫の産卵消長

野外個体群の産卵状況とは別に、冬季における個々の雌成虫の産卵状況を観察するため、野外条件下において既交尾雌成虫にサツマイモ塊根を与えて個体飼育し、塊根内のふ化幼虫数を調査した。1998年10月28日と11月9日に農試大島支場のサツマイモ圃場から採取したサツマイモ塊根を $27 \pm 1^\circ\text{C}$ 、 $70 \pm 10\%$ R.H、14L10Dの恒温室で保管した。塊根から脱出した野生成虫は11月13日から12月4日まで2～3日間隔で別の容器に移し、既交尾雌を得るため、同条件下の恒温室において10～17日間飼育した。その後、雌成虫は3～5cmの厚さに切ったサツマイモの小片（以下、'イモ小片'）を入れたポリプロピレン製の容器（6cm×6cm、深さ6cm、蓋孔ゴース張り）に1頭ずつ移し、前述2と同じ野外網室において個体飼育した。

11月30日から12月14日の間に順次個体飼育を開始し、合計60頭を調査した。イモ小片は1週間に1回新しいものと交換し、取り出したイモ小片は、ノコクズの中に入れ $27 \pm 1^\circ\text{C}$ 、 $70 \pm 10\%$ RH、14L10Dの恒温室で16日間保管した後、分解して幼虫数を計数した。供試虫が死亡ならびに産卵イモが腐敗等で調査できなかった場合は、調査数から除いた。交尾状況を確認するため、個体飼育した雌とは別に30頭の雌成虫を、交尾期間終了後に解剖して受精のう内の精子の有無を調べ、交尾率を調査した。

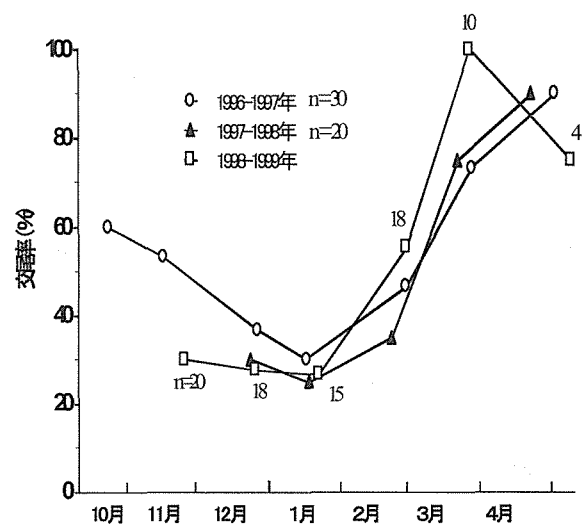
結 果

1 冬季における野生雌成虫の交尾率と卵胞の発育

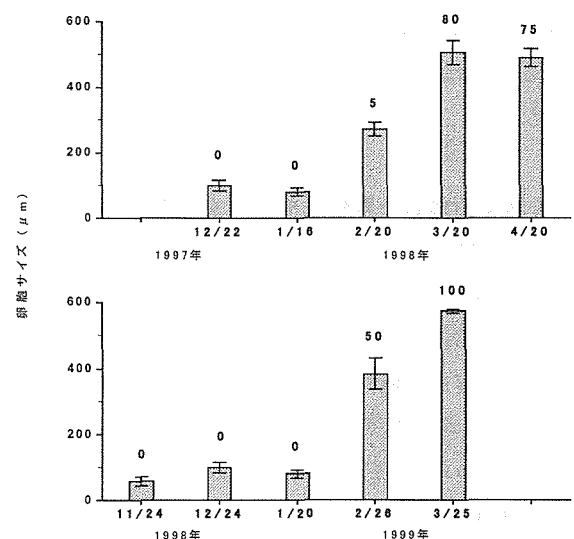
野生雌成虫の交尾率は、秋季から次第に低下し、1月

が最も低く25～30%であった（第Ⅲ－7図）。交尾率は2月以降次第に高くなり、4月には80%以上となった。冬季の交尾率は25～56%で、いずれの年も2月下旬は12、1月と比べて高く、また、年次間差が大きかった。

卵胞サイズも交尾率とほぼ同様な傾向で推移した。すなわち、11月から1月までは100 μm 前後であったが、2月下旬には270～383 μm 、3月下旬以降は505～573 μm と大きくなった（第Ⅲ－8図）。成熟卵を持つ個体は11月から1月までは認められなかった。2月下旬には、1998年は5%、1999年は50%の雌で成熟卵が確認されたが、年によってその比率が大きく異なった（第Ⅲ－8図）。



第Ⅲ－7図 秋季から春季にかけてサツマイモ圃場で採集したアリモドキゾウムシ野生雌成虫の交尾率
1998-1999年の調査個体数は図中の数値。

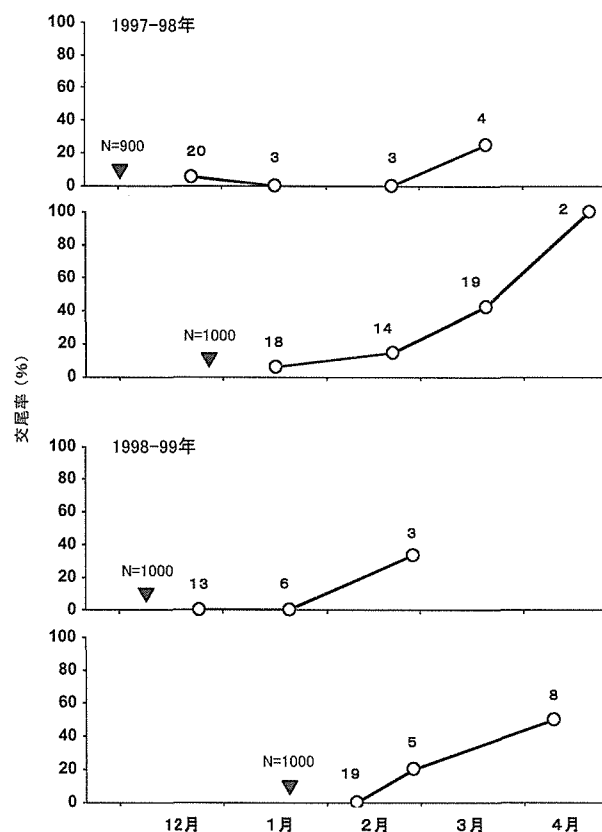


第Ⅲ－8図 秋季から春季にかけてサツマイモ圃場で採集したアリモドキゾウムシ野生雌成虫の卵胞サイズの推移（平均±SE）

図中の数字は成熟卵が認められた雌の比率（%）を示す。

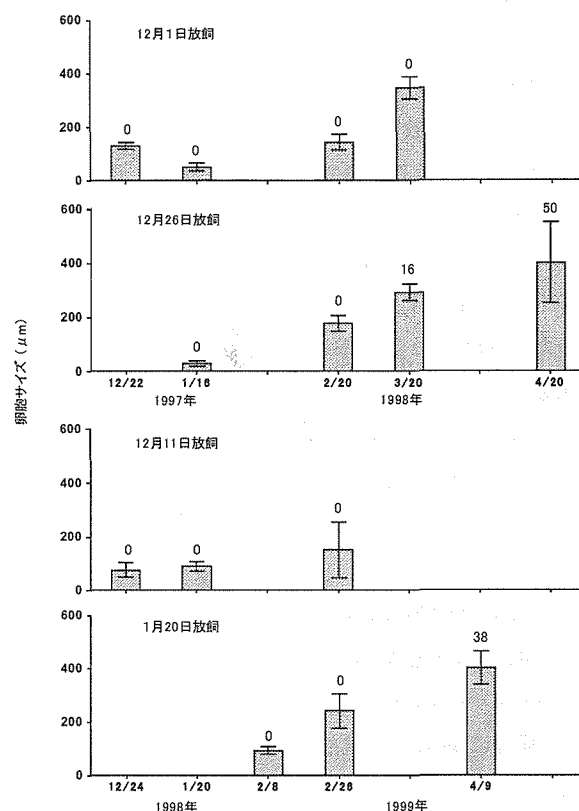
2 冬季に羽化した雌成虫の交尾ならびに卵胞の発育

羽化後、野外条件下で飼育した未交尾雌成虫を、12月、1月に野外に放飼し、再捕獲したところ、2月上旬までは既交尾個体は非常に少なかった。交尾率は2月下旬以降、次第に高くなる傾向がみられた（第Ⅲ－9図）。卵胞サイズは放飼後次第に大きくなる傾向がみられたが、冬季は成熟卵を持つ雌は認められなかった（第Ⅲ－10図）。奄美大島において、冬季に羽化し、サツマイモから脱出する野生雌成虫は、冬季間中ほとんど交尾、産卵を行わないと推測された。



Ⅲ－9図 冬季にサツマイモ圃場に放飼したアリモドキゾウムシ雌成虫の交尾率

累代飼育未交尾雌成虫を羽化後野外条件下で7～14日間飼育した後に野外へ放飼した。図中の▼は放飼日、Nは放飼頭数、数字は調査個体数を示す。



第Ⅲ－10図 冬季にサツマイモ圃場に放飼したアリモドキゾウムシの卵胞サイズ（平均±SE）

累代飼育雌成虫を羽化後野外条件下で7～14日間飼育した後に放飼した。図中の数字は成熟卵が認められた雌の比率（%）を示す。

3 冬季の野生雄成虫の交尾活動

性成熟させ、野外に放飼した未交尾雌について、1998年は放飼18日後の2月20日に4頭再捕獲し、そのうち3頭が交尾していた。また、3月20日に再捕獲した9頭、4月20日に再捕獲した1頭はすべて交尾していた。1999年は放飼20日後の2月9日に6頭を再捕獲し、そのうち5頭が交尾していた。また、2月26日は再捕獲した2頭のうち1頭が交尾していた（第Ⅲ－3表）。これらのことから、野生雄成虫は冬季においても交尾活動が可能な状態にあると推測された。

第Ⅲ－3表 冬季のサツマイモ圃場におけるアリモドキゾウムシ雌成虫^{a)}の交尾率の推移

放飼日	放飼頭数	捕獲日	既交尾雌数／捕獲虫数	交尾率(%)
1998年 2月 2日	500	2月 20日	3／4	75
		3月 20日	9／9	100
		4月 20日	1／1	100
1999年 1月 20日	280	2月 9日	5／6	83
		2月 26日	1／2	50

^{a)} 成熟させた未交尾雌成虫を圃場に放飼し、一定期間後を捕獲して交尾の有無を調査

4 冬季における産卵

イモトラップに対する野生雌成虫の産卵数は10月以降次第に少なくなり、12月下旬から2月中旬までは1トラップ当たりの産卵数が0.3卵以下で、ほとんど産卵が認められなかった（第Ⅲ-11図）。産卵数は2月下旬から3月上旬以降、増加し、1997年と1998年は4月下旬には1トラップ当たりの産卵数が30卵前後となった。1999年は3月上旬以降も4月下旬まではほとんど産卵数は増加しなかった。1999年の冬春季の気温は、暖冬で経過した1998年と比較すると同等かやや低かったが、1997年と比較すると逆に同等か高温で推移した（第Ⅲ-12図）。気温が1999年の春季の産卵数が少なかったことに影響したとは考えにくく、原因は不明であった。

5 既交尾雌の冬春季の産卵

交尾期間後に別途解剖した30頭の雌成虫は、すべての個体で受精のう内に十分な精子が認められた。したがって、個体飼育に供試した雌成虫も交尾を十分に行っていると考えられた。第Ⅲ-13図に産卵した雌の比率と雌1頭の週当たり産卵数の推移を示した。産卵した雌は12月は90%前後で推移したが、1月上旬から徐々に下がり、2月中旬が最も低く5.9%であった。2月下旬以降は上昇に転じ、3月中旬から4月下旬までは80%前後の雌が産卵した。産卵数も産卵雌率と同様な傾向を示し、2月中旬が最も少なく1雌週当たり平均0.1個であった。2月下旬以降、産卵数は増加し3月中旬以降は、1雌週当たり3.7～6.7個で推移した。

考 察

サツマイモ圃場で12月、1月に採集した野生雌成虫の交尾率は30%前後で推移し、春季（3、4月）の70%以上と比較すると明らかに低かった。アリモドキゾウムシの雌は一度交尾すると性フェロモンの分泌が抑制されるため、野外では大部分の雌の交尾は1回と考えられる（Sugimoto et al., 1996; 桜谷ら, 2000）。したがって、特定の雌が継続的に交尾しているとは考えにくい。また、冬季に寄主植物から脱出する個体は認められるが、個体数は少ないと考えられる（第Ⅲ章第1節）。さらに、冬季に寄主植物から脱出する未交尾野生雌成虫の大部分は、冬季には交尾しないと推測される。これらのことから、奄美大島、喜界島において冬季にアリモドキゾウムシ野生雌成虫はほとんど配偶行動を行わないと考えられる。

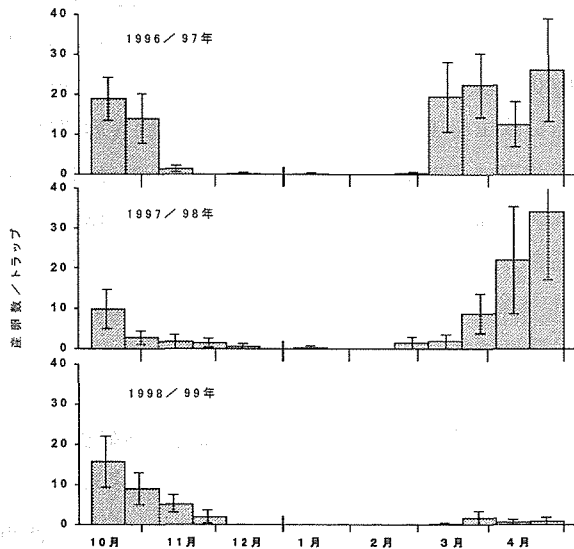
一方、雄成虫は冬季も交尾活動が行える状態にあり、雌成虫が性フェロモンを放出していれば、雌成虫を探索し交尾すると考えられた。沖縄県で冬春季に交尾率が低下する

一因として、雌成虫のフェロモン放出量の低下との関係が指摘されている（金城, 未発表）。奄美大島において、冬季に交尾が著しく抑制されているのは、野生雌成虫が未交尾にも関わらず性フェロモンを放出しないことが大きな要因と推察される。サツマイモ圃場で11月下旬から1月下旬までに採集した野生雌成虫のうち、成熟卵をもつ個体は確認できなかった。また、イモトラップのサツマイモ塊根に対する野生雌成虫の産卵も、12月下旬から2月中旬まではほとんど認められなかった。さらに、自然条件下の網室で個体飼育した既交尾雌成虫も、1、2月は産卵数が著しく少なく、イモトラップでの観察結果と一致した。吉村ら（1999）は、奄美大島で行った野生寄主植物の分解調査において、若齢幼虫の発見個体数が春に比べ、秋以降の調査で明らかに少なく、10月から翌年3月までの時期は産卵されなかったか、あるいは卵期の死亡率が極めて高かったのではないかと報告している。これらのことから、奄美大島、喜界島において、冬季のアリモドキゾウムシ野生雌成虫の卵胞は未発達で、産卵はほとんど行わないと考えられる。沖縄本島のサツマイモ圃場でイモトラップと同様な方法でアリモドキゾウムシの産卵数を調査した結果、冬季は産卵が認められないか、著しく少なかった（安田, 1993）。また、石垣島ならびに宮古島の野生寄主植物群落で同様な方法で行った調査においても、冬季は産卵がほとんどみられていない（佐々木ら, 2002）。これら気温の異なる南西諸島の島々において、冬季に相当する同一時期に産卵の著しい減少が観察されており、卵巣発達に対する光周期の影響（金城, 未発表）が示唆された。

野生雌成虫の卵胞は2月下旬以降発達し、成熟卵を持つ個体も認められた。また、イモトラップにおいても、2月下旬以降、産卵数は次第に増加しており、奄美大島、喜界島では、アリモドキゾウムシ野生雌成虫は2月下旬頃から産卵を活発に行うようになると考えられる。ただし、野外条件下で飼育し、12月から1月に野外に放飼した未交尾雌では、2月下旬に成熟卵を持つ個体は確認できず、成熟卵をもつ雌は3月下旬以降の調査ではじめて認められた。このことから、冬季に入ってから羽化する野生雌成虫については、産卵は3月下旬頃から始まるものと推測される。

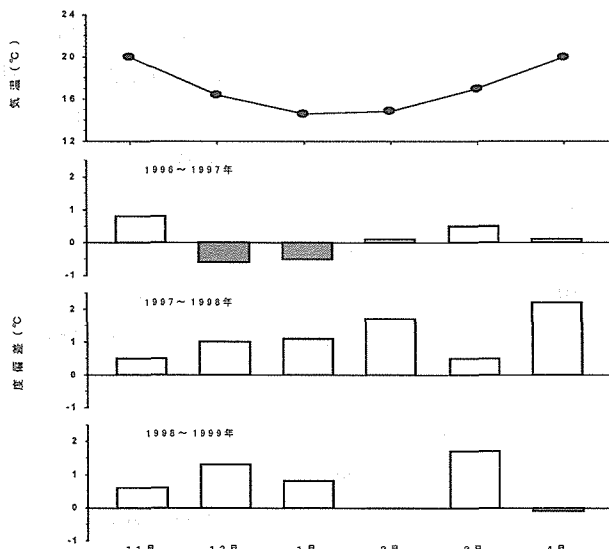
本節において、アリモドキゾウムシは冬季にほとんど交尾しないことが明らかになった。不妊虫放飼法では放飼した不妊雄成虫と未交尾の野生雌成虫が交尾しないと防除効果が発揮されない。したがって、12月、1月の不妊虫放飼は、その効果がほとんど期待できないと考えられる。一方、2月下旬から3月にかけては、野生雌成虫の交尾率が30%前後から80%以上となることから、雌成虫が活

発に交尾を開始する時期と考えられる。また、この時期は野生個体群に加わる新成虫も少なく、野生虫の密度が低い時期と推察される（第Ⅱ章第1節、第Ⅲ章第1節）。不妊虫放飼法による防除を効率よく行うためには、不妊虫に対して野生虫の密度が十分低くなくてはならない(Knipling, 1955, 1964)。したがって、野生虫の密度が低く、かつ野生雌成虫の交尾活発が高まる2月下旬から3月は、不妊虫放飼を効果的に行う上で重要な時期と考えられる。



第Ⅲ－11図 イモトラップにおけるサツマイモ塊根へのアリモドキゾウムシ

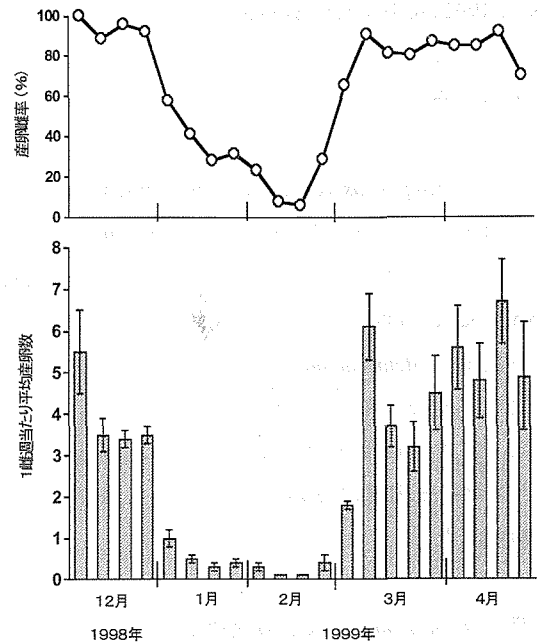
野生雌成虫の産卵数（平均±SE）



第Ⅲ－12図 奄美大島における11月から4月までの月平均気温の比較

名瀬測候所（鹿児島県名瀬市）観測（気象庁；
<http://www.data.kishou.go.jp/etn/index.html>）

1段目は月平均気温の平年値の推移を示す。2～4段目は月平均気温の平年値からの偏差を示す。



第Ⅲ－13図 冬季から春季における野外条件下で個体飼育した既交尾のアリモドキゾウムシ野生雌成虫の産卵消長
上段：産卵した雌の比率（%） 下段：1雌週当たり産卵数（平均±SE）

第Ⅳ章 アリモドキゾウムシ野外個体群の密度抑圧防除法

不妊虫放飼法では、不妊虫の生産頭数に制限があるため、野生個体群を不妊虫放飼法が行えるレベルまで、他の方法で減少できること（密度抑圧防除）が条件の一つである（Knipling, 1964）。喜界島で行われたアリモドキゾウムシ根絶実証事業においては、密度抑圧防除法として、合成性フェロモン（Heath et al., 1986）に殺虫剤を含浸させた誘殺板散布（瀬戸ら, 1991）や、殺虫剤散布などが主に用いられた（湯田ら, 2000）。しかし、本格的な根絶防除事業では、喜界島全域（5,690ha）で密度抑圧防除を実施するため、より環境負荷の小さい生物的防除法の開発が求められた。また、本種の根絶までは長い期間がかかることが予想されるため、生物的防除法の開発はサツマイモの経済栽培においても、環境保全型農業を推進する上で有益と考えられる。

アリモドキゾウムシに対する生物的防除法としては、これまでに天敵糸状菌の *Beauveria bassiana*, *Metarhizium anisopliae*, *Verticillium lecanii*, *Paecilomyces lilacinus* (Burdeos and Villacarlos, 1989; Villacarlos and Granados-Polo, 1989; Khan et al., 1990; Jansson, 1992; 安田ら, 1997; 鳥越ら, 2000) や、昆虫病原性線虫の *Steinernema* 属線虫, *Heterorhabditis* 属線虫 (Jansson et al., 1990, 1991b, 1993; 井上・上門, 1992;

Jansson, 1992; Jansson and Lecrone, 1994, 1997; Mannion and Jansson, 1992a,b, 1993a,b; Ekanayake et al., 2001) 等の利用が試みられている。しかし、根絶防除における密度抑圧防除のため野外に広域に使用する場合、容易に供給できることが必要条件の一つとなる。そこで、既に芝のシバオサゾウムシ (*Sphenophorus venatus vestitus* Chittenden) 幼虫等を対象に市販されている *Steinernema carpocapsae* (バイオセーフ, エス・ディ・エス バイオテック社製) (Kinoshita and Yamanaka, 1988), ならびに大量増殖技術が確立されている数種の *Steinernema* 属線虫について、まず、室内試験によりアリモドキゾウムシに対する殺虫活性を調べた。さらに、室内で殺虫活性の高かった *S. carpocapsae* について、サツマイモ圃場において試験を行い、野外での防除効果を検討した。

第1節 *Steinernema* 属線虫の殺虫活性

アリモドキゾウムシに対する昆虫病原性線虫の殺虫活性は、これまで *Steinernema* 属線虫、あるいは *Heterorhabditis* 属線虫の各種系統について、室内で試験が行われている (Jansson et al., 1990; Mannion and Jansson, 1992a, 1993a,b)。これらの試験では、昆虫病原性線虫の種間、系統間、あるいはアリモドキゾウムシの発育ステージによって殺虫活性に差がみられている。また、寄主植物に昆虫病原性線虫を散布する場合、防除対象は主に地表面の成虫と、土壌中の塊根内の幼虫、蛹となるが、これまで土壌中にあるサツマイモ塊根内のアリモドキゾウムシに対する殺虫活性について検討されたことはない。そこで、供給可能な *Steinernema* 属線虫4種7系統について、室内で成虫あるいは土壌中のサツマイモ塊根内の幼虫、蛹に対する殺虫活性について調査した。

試験材料および方法

1 試験場所、供試虫、昆虫病原性線虫

鹿児島県農業試験場大島支場（農試大島支場）内の実験室で行った。供試虫のアリモドキゾウムシは1990年から1994年に奄美大島の笠利町または龍郷町で採集し、上門ら(1993)の方法を基本として、 $27 \pm 1^\circ\text{C}$, $70 \pm 5\%$ RH, 14L10Dの恒温室内で、サツマイモ塊根を用いて累代飼育されている個体群を用いた。

Steinernema 属線虫の *S. carpocapsae* (系統名 All), *S. feltiae*, *S. riobrave*, *S. glaseri* (系統名 326, 328, Mungyeong, Dongraeh) の4種, 7系統を供試した。いずれの昆虫病原性 *Steinernema* 属線虫（以下、'線虫'）もエス・ディ・エス バイオテック（株）で増殖あるいは販売されている個体群を供試した。なお、*S. feltiae*, *S. riobrave*, *S. glaseri*

(326), *S. glaseri* (328) は、米国 Rutgers 大学の Randy Gaugler 教授, *S. glaseri* (Mungyeong), *S. glaseri* (Dongraeh) は、韓国 Gyeongsang 大学の Ho Yul Choo 教授由来の系統である (Choo et al., 1995; Yamanaka et al., 1995; Stock et al., 1997)。

2 成虫に対する殺虫活性

砂土（土壌水分量約12%）を深さ3cm程度入れた円形プラスチック容器（内径9cm, 深さ6cm, 蓋孔ゴース張り）に、25,000頭/100mlの線虫懸濁液12.7mlをマイクロピペットを用い複数回に分けて土壌表面に処理し（500,000頭/m²）、直ちに羽化7日齢前後のアリモドキゾウムシ成虫を10頭放飼した。放飼後、飼育容器には餌としてサツマイモ小片を入れ、 $25 \pm 1^\circ\text{C}$, $70 \pm 10\%$ RH, 14L10Dの恒温室内で保管した。また、線虫散布以外は同様な処理を行った無処理を設けた。線虫散布3日後、7日後、11日後にアリモドキゾウムシ成虫の生死数を計数した。試験は雌雄別に、各3反復実施した。

3 サツマイモ塊根内の幼虫、蛹に対する殺虫活性

砂土（土壌水分量約12%）を深さ4cm程度入れた角形ポリプロピレン製の容器（12cm×12cm, 深さ8.5cm, 蓋孔ゴース張り）に、アリモドキゾウムシの幼虫、蛹が在虫するサツマイモ塊根（約100g）を埋めこみ、25,000頭/100mlの線虫懸濁液28.8mlをマイクロピペットを用い複数回に分けて土壌表面に処理した（500,000頭/m²）。塊根内のアリモドキゾウムシは、産卵から線虫散布までの期間を調整して、およそ2～3齢幼虫前期、3齢幼虫期、3齢幼虫後期～蛹期の3ステージにそろえ、各3反復で試験を行った。また、線虫散布以外は同様に処理を行った無処理をそれぞれのステージに設けた。線虫散布後、 $25 \pm 1^\circ\text{C}$, $70 \pm 10\%$ RH, 14D10Lの恒温室内で保管した。線虫散布10～16日後に塊根を切開し、塊根内のすべてのステージのアリモドキゾウムシについて生死数を計数した。

4 統計解析

統計解析には JMP Release 5.1.1J を用い、得られたデータはアークサイン変換後に Tukey's HSD Test によって解析し、処理間の有意差を検出した (SAS Institute Japan Inc., 2002)。

結 果

1 成虫に対する殺虫活性

アリモドキゾウムシ成虫の性別に関係なく、供試した線虫のうち *S. carpocapsae* (All) は、成虫に対して最も殺虫

活性が高く、処理 11 日後の死亡率（以下、'11 日後死亡率'）は雄成虫が 90.0 %、雌成虫が 100 %を示し、無処理に対して有意な差が認められた（第IV-1 表）。また、他の供試線虫と比べて、顕著に死亡率が高く、いずれの供試線虫とも有意な差がみられた。*S. riobrave*、ならびに *S. glaseri* (Mungyeong), *S. glaseri* (326) は、雌成虫に対する 11 日後死亡率が 40 ~ 50 %で、無処理と有意な差が認められたが、雄成虫に対しては、いずれも無処理と有意な差はみられなかった。*S. feltiae*、ならびに *S. glaseri* (328), *S. glaseri* (Dongrae) は、アリモドキゾウムシ成虫に対し、死亡率に無処理と有意な差がみられず、殺虫活性は認められなかった。*S. glaseri* はいずれの系統も、雌に比較して雄の死亡率が低かった。殺虫効果が現れるまでの期間は、*S. riobrave* が若干、遅効的な傾向がみられた。また、*S. carpocapsae* は雌成虫に比べて、雄成虫に対する殺虫効果がやや遅れて発現した。他の供試線虫は、処理 3 日後と処理 7 日後、あるいは処理 7 日後と処理 11 日後の死亡率に大きな差はなく、アリモドキゾウムシ成虫に対する殺虫効果が、処理 7 日後までには現れたと考えられた。

2 サツマイモ塊根内の幼虫、蛹に対する殺虫活性

塊根内アリモドキゾウムシのステージが 2 ~ 3 齢幼虫前期（以下、'2 ~ 3 齢幼虫前期'、他の 2 ステージも同様に表記）のサツマイモ塊根に線虫を処理した場合、*S. glaseri* (Mungyeong) が最も死亡率が高く 59.3 %を示し、無処理と有意な差がみられた（第IV-2 表）。また、3 齢幼虫期、ならびに 3 齢幼虫後期から蛹期に線虫を処理した場合、供試線虫のうち *S. riobrave* が 54.2 %と 42.7 %、*S. glaseri* (Dongrae) が 63.4 %と 39.5 %の死亡率をそれぞれ示し、無処理と有意な差が認められた。他の供試線虫は、いずれの処理時期においても無処理と有意な差がみられず、殺虫活性が認められなかった。

考 察

室内でのアリモドキゾウムシ成虫に対する殺虫活性試験では、*S. carpocapsae* (All) が他の線虫と比較して、顕著に高い効果を示した。Mannion and Jansson (1992a) による 5 系統の *S. carpocapsae* を用いた室内試験においても、今回と同様に All 系統が最も高い死亡率を示したが、死亡成虫の 96 %以上が雄成虫であり、雌雄で死亡率に大きな差がみられた。しかし、今回の試験では、雌雄いずれのアリモドキゾウムシ成虫に対しても 90 %以上の高い死亡率を示し、雌雄の死亡率に大きな差はみられなかった。また、Burdeos and Villacarlos (1989)、鳥越ら (2000) が室内で行った天敵糸状菌 *B. bassiana*、ならびに *M. anisopliae*

によるアリモドキゾウムシ成虫に対する殺虫活性試験では、 $1.0 \times 10^7 \sim 1.0 \times 10^8$ / ml の孢子濃度液の噴霧で、ほぼ 100 %の死亡率を示しており、*S. carpocapsae* (All) の 500,000 頭 / m² 処理は、これらと同程度の強い殺虫活性を示した。

一方、土壌中のサツマイモ塊根内の幼虫、蛹を対象に行った殺虫活性試験では、*S. glaseri* の Mungyeong 系統、Dongrae 系統ならびに *S. riobrave* の効果が高かった。*Steinernema* 属線虫のうち、*S. carpocapsae* は伏兵型 (ambusher)、*S. glaseri* は探索型 (cruiser) と呼ばれる宿主探索行動を行い、*S. riobrave* や *S. feltiae* はその中間型である (Lewis, 2002; 石橋, 2003)。線虫を土壌表層に散布した場合、伏兵型の線虫は大部分が土壌表層にとどまり、深部への移行は少ない。逆に探索型は大部分が土壌深部に移行して、表層にとどまるものは極めて少ない。また、*S. glaseri* の土壌中における垂直分散性は系統間で差があることが報告されている (Yamanaka et al., 1995)。伏兵型の *S. carpocapsae* は土壌表面のアリモドキゾウムシ成虫に対し、探索型の *S. glaseri* (Mungyeong)、*S. glaseri* (Dongrae) は土壌中の塊根内の幼虫や蛹に対して効果がみられた。また、*S. riobrave* は成虫、あるいは塊根内の 3 齢幼虫、蛹のいずれに対しても、40 %以上の死亡率を示した。これらの結果は、線虫の宿主探索行動の特徴が、殺虫効果に反映したものと考えられる。また、土壌中の塊根内の幼虫、蛹に効果がみられた *S. glaseri* (Mungyeong)、*S. glaseri* (Dongrae) は、特に高い活動性をもっていたと推察される。*S. glaseri* は、いずれの系統も雄成虫に対する殺虫効果が雌成虫より低かった。アリモドキゾウムシでは、雄成虫は雌成虫と比較して活動性が高く (守屋, 1994; Sakuratani et al., 1994; Moriya, 1995b; Shimizu and Moriya, 1996a,b; Moriya and Hiroyoshi, 1998; 加来ら, 1999)、このようなアリモドキゾウムシの雌雄による活動性の違いが、*S. glaseri* における雌雄での死亡率の差に影響した要因の一つと推察される。

これらのことから、野外のアリモドキゾウムシを対象に *Steinernema* 属線虫を散布する場合、主に地表や寄主植物上を徘徊する成虫を防除対象とする場合は *S. carpocapsae* (All) が、またサツマイモ塊根内など、土壌中の寄主植物内の幼虫や蛹に対しては、*S. glaseri* (Mungyeong)、*S. glaseri* (Dongrae)、ならびに *S. riobrave* が、最も効果が期待できると考えられる。ただし、*S. glaseri* (Mungyeong)、*S. glaseri* (Dongrae)、*S. riobrave* のサツマイモ塊根内の幼虫、蛹に対する死亡率は室内試験においても 60 %以下であり、野外におけるサツマイモ塊根内の本種を対象とした場合は、殺虫効果が不十分であることが起こり得る。したが

って、これらの線虫の利用してアリモドキゾウムシの抑圧
防除を行う場合は、他の防除法との組み合わせを考慮する
必要があろう。*S. carpocapsae* (All) については、室内で

高い殺虫活性がみられたことから、野外圃場での防除効果
試験を実施し、次節でその結果を詳述する。

第IV-1表 アリモドキゾウムシ成虫に対する昆虫病原性 *Steinernema* 属線虫の殺虫活性

線虫の種類（系統）	死亡率（%）		
	雄		
	3日後 ^{b)}	7日後	11日後
<i>S. carpocapsae</i> (All)	66.7 ± 8.82	80.0 ± 10.00	90.0 ± 5.77 a ^{a)}
<i>S. feltiae</i>	10.0 ± 5.77	23.3 ± 8.82	30.0 ± 5.77 b
<i>S. riobrave</i>	13.3 ± 8.82	30.0 ± 10.00	46.7 ± 3.33 b
<i>S. glaseri</i> (326)	6.7 ± 3.33	10.0 ± 5.77	10.0 ± 5.77 b
<i>S. glaseri</i> (328)	10.0 ± 0	10.0 ± 0	10.0 ± 0 b
<i>S. glaseri</i> (Mungyeong)	3.3 ± 3.33	13.3 ± 3.33	13.3 ± 3.33 b
<i>S. glaseri</i> (Dongrae)	10.0 ± 5.77	10.0 ± 5.77	10.0 ± 5.77 b
Control	10.0 ± 0	16.7 ± 6.67	20.0 ± 5.77 b

線虫の種類（系統）	死亡率（%）		
	雌		
	3日後	7日後	11日後
<i>S. carpocapsae</i> (All)	96.7 ± 3.33	100.0 ± 0	100.0 ± 0 a ^{a)}
<i>S. feltiae</i>	10.0 ± 5.77	20.0 ± 5.77	20.0 ± 5.77 bc
<i>S. riobrave</i>	14.3 ± 9.88	32.1 ± 7.07	46.7 ± 1.85 b
<i>S. glaseri</i> (326)	27.6 ± 2.59	41.4 ± 5.96	41.4 ± 5.96 b
<i>S. glaseri</i> (328)	16.7 ± 3.33	16.7 ± 3.33	26.7 ± 3.33 bc
<i>S. glaseri</i> (Mungyeong)	40.0 ± 11.55	46.7 ± 8.82	50.0 ± 11.55 b
<i>S. glaseri</i> (Dongrae)	20.7 ± 10.00	20.7 ± 10.00	20.7 ± 10.00 bc
Control	0.0 ± 0	3.3 ± 3.33	3.3 ± 3.33 c

^{a)} 1区当たりの平均±SE, アークサイン変換後に Tukey's HSD Test を行った。

異なった記号間では死亡率に有意な差があることを示す ($p<0.05$)。

^{b)} 線虫処理後の日数。

第IV-2表 アリモドキゾウムシ幼虫、蛹に対する昆虫病原性 *Steinernema* 属線虫の殺虫活性

線虫の種類（系統）	2～3 齢幼虫前期 ^{a)}	
	調査個体数 ^{b)}	死亡率（%） ^{c)}
<i>S. carpocapsae</i> (All)	280.7	1.3 ± 0.26 b
<i>S. feltiae</i>	302.0	1.2 ± 1.18 b
<i>S. riobrave</i>	239.3	3.8 ± 0.75 b
<i>S. glaseri</i> (326)	299.7	9.5 ± 4.63 b
<i>S. glaseri</i> (328)	250.0	2.3 ± 1.48 b
<i>S. glaseri</i> (Mungyeong)	141.0	59.3 ± 5.89 a
<i>S. glaseri</i> (Dongrae)	244.0	10.7 ± 5.03 b
Control	287.7	16.6 ± 11.69 b

線虫の種類 (系統)	3 齡幼虫期	
	調査個体数	死亡率 (%)
<i>S. carpocapsae</i> (All)	125.7	23.4 ± 5.88 bc
<i>S. feltiae</i>	170.7	13.8 ± 7.51 c
<i>S. riobrave</i>	68.0	54.2 ± 11.09 ab
<i>S. glaseri</i> (326)	114.0	29.9 ± 5.56 bc
<i>S. glaseri</i> (328)	191.3	17.6 ± 2.10 c
<i>S. glaseri</i> (Mungyeong)	184.0	44.9 ± 7.61 abc
<i>S. glaseri</i> (Dongrae)	57.7	63.4 ± 8.49 a
Control	79.0	8.5 ± 1.21 c

線虫の種類 (系統)	3 齡幼虫後期～蛹期	
	調査個体数	死亡率 (%)
<i>S. carpocapsae</i> (All)	91.0	3.7 ± 0.95 bc
<i>S. feltiae</i>	138.7	0.2 ± 0.17 c
<i>S. riobrave</i>	162.7	42.7 ± 11.76 a
<i>S. glaseri</i> (326)	136.7	10.4 ± 5.76 abc
<i>S. glaseri</i> (328)	128.7	7.5 ± 1.67 abc
<i>S. glaseri</i> (Mungyeong)	101.0	31.6 ± 11.07 abc
<i>S. glaseri</i> (Dongrae)	113.3	39.5 ± 12.24 ab
Control	108.0	0.0 ± 0 c

a) 線虫処理時のサツマイモ塊根内のアリモドキゾウムシの推定ステージ。

b) 1区当たりの調査個体数 (幼虫, 蛹, 成虫合計虫数) の平均。

c) 1区当たりの平均 ± SE, アークサイン変換後に Tukey's HSD Test を行った。

異なった記号間では死亡率に有意な差があることを示す ($p < 0.05$)。

第2節 *Steinernema carpocapsae* のサツマイモ圃場における防除効果

Steinernema 属線虫 4 種, 7 系統のアリモドキゾウムシに対する室内殺虫活性試験において, *S. carpocapsae* (系統名 All) は, アリモドキゾウムシ成虫の雌雄いずれに対しても 90 % 以上の死亡率を示し, 最も高い効果が認められた (第 IV 章第 1 節)。さらに, 地表や寄主植物上を徘徊するアリモドキゾウムシ成虫に対して, 防除効果が期待された。一方, 土壌中のサツマイモ塊根内の幼虫や蛹に対しては, 供試した線虫によるアリモドキゾウムシの死亡率はいずれも 60 % 以下であったため, 野外において, 寄主植物内のアリモドキゾウムシ幼虫, 蛹を対象とした, これらの線虫単用処理だけでは, 防除効果が不十分と予測された。本節では, 室内試験で殺虫活性が高かった *S. carpocapsae* (All) について, さらに野外のアリモドキ

ゾウムシに対する密度抑制効果を検証するため, サツマイモ圃場に本線虫を散布し防除効果を検討した。

試験材料および方法

試験は農試大島支場の面積約 780 m² のサツマイモ圃場で行った。サツマイモは品種ベニオトメを用い, 畝間 90cm, 株間 30cm で 1997 年 4 月 8 日に挿苗した。供試した昆虫寄生性線虫の *S. carpocapsae* (All) は, エス・ディ・エスバイオテック (株) で増殖, あるいは販売されている個体群を供試した。*S. carpocapsae* (All) 区, サツマイモのアリモドキゾウムシに農薬登録があるカーバメイト系殺虫剤のカルボスルファン粒剤区, ならびに無処理区の 3 処理を設けた。いずれも 1 区 64.8 m² (9m × 7.2m) とし, 3 反復で行った。1997 年 5 月 7 日, 6 月 6 日, 7 月 7 日の 3 回, *S. carpocapsae* (All) 250,000 頭 / 2 l / m² をジョウ

口を用いて畝上に散布し、カルボスルファン粒剤 6 kg/10 a を株元に手散布した。散布は 16 時から 17 時に行い、散布時の天候は 5 月 7 日と 7 月 7 が曇り、6 月 6 日が曇り時々晴れであった。試験圃場においてアリモドキゾウムシが自然発生しないことが考えられたため、羽化 2 週間以内のアリモドキゾウムシ成虫を雌雄それぞれ 1 区当たり、1997 年 5 月 2 日と 5 月 30 日は 150 頭、6 月 26 日は 100 頭放飼した。

密度抑圧効果の検証を目的にしていることから、試験結果は各区の成虫個数の変動によって判定すべきであるが、野外でアリモドキゾウムシの個体群度を直接把握するのは困難である。そこで、アリモドキゾウムシによるサツマイモ塊根の食害状況を調査し、間接的に密度抑圧効果を判定した。1997 年 8 月 20 日に各区中央部の畝から 12 株のサツマイモ塊根を掘り取り、最大直径 1cm 以上の塊根について、スライサーを用いて 3mm 幅に輪切りにし、食害の有無を調べるとともに、切り口の加害孔数を計数して、下記の式により被害度を求めた。なお、加害孔数が 11 以上の場合、加害孔がつながり、正確な孔数を調査することが困難なため、加害孔数を 15 とみなした。また、わずかでも食害が認められた塊根は被害塊根とし、被害塊根率を求めた。

$$\text{被害度} = \frac{\sum (\text{加害孔数} \times \text{該当スライス数})}{\text{調査スライス数} \times 15} \times 100$$

なお、奄美大島では、サツマイモにアリモドキゾウムシと同様な被害様相を示すイモゾウムシ *Euscepes postfasciatus* (Fairmaire) も発生しており、被害度の算出に影響を与える可能性がある。そこで、試験圃場でのイモゾウムシの発生状況を把握するため、無処理区から 1 区 3 株を選び、掘り取った塊根を 2 か月間室内で保管し、塊根から脱出したアリモドキゾウムシ、イモゾウムシ成虫を計数した。

統計解析には JMP Release 5.1.1J を用い、得られたデータはアークサイン変換後に Tukey's HSD Test によって解析し、処理間の有意差を検出した (SAS Institute Japan Inc., 2002)。

結 果

無処理区から掘り取った 9 株の塊根からは、アリモドキゾウムシ成虫のみ 615 頭が脱出し、イモゾウムシ成虫は認められなかった。したがって、試験場でのサツマイモ塊根の食害痕はアリモドキゾウムシによるものとみなした。*S. carpocapsae* (All) 処理区はアリモドキゾウムシに

よる被害塊根率が 33.3 %、被害度が 4.1 で、無処理の被害塊根率 53.5 %、被害度 9.7 と比べ、被害塊根率を約 60 %、被害度を約 40 % 抑制し、被害塊根率には有意な差が認められた (第 IV-3 表)。しかし、カルボスルファン粒剤処理区と比較すると、被害塊根率、被害度とも高く、被害塊根率には有意な差がみられた。

考 察

Steinernema carpocapsae (All) は、化学殺虫剤のカルボスルファン粒剤には劣るが、殺虫効果が認められた。また、現行の密度抑圧防除に用いられる合成性フェロモンを用いた誘殺板が、雌成虫への効果がないのに対し、*S. carpocapsae* (All) は雌雄いずれの成虫にも効果が期待できる。さらに、喜界島におけるアリモドキゾウムシの発生源の一つとなっている海岸部のグンバイヒルガオ群落等に対し、病原性線虫は海洋汚染や地下水汚染の危険性がなく散布できる利点がある。これらのことから、*S. carpocapsae* (All) は喜界島での密度抑圧防除の一手段として利用できると考えられる。ただし、アリモドキゾウムシの密度が高い場所や散布条件によっては、線虫だけでは効果が不十分なことも考えられる。線虫の散布場所や時期については、その特性を十分考慮して決定する必要がある。

昆虫病原性線虫は紫外線や乾燥に弱く、防除効果は土壌水分、土質や地温等による影響を受ける (山中, 2001)。したがって、線虫を散布する場所としては、茎葉が繁茂したサツマイモ圃場、あるいはブッシュ内の野生寄主植物などが適当と考えられる。喜界島ではブッシュ内にもノアサガオなどの蔓が繁茂しており、茎内からアリモドキゾウムシが発見される。特にブッシュ内はほとんど直射日光が遮断され、土壌が湿潤であることが多く、線虫を使用するには好適な環境であると考えられる。また、*S. carpocapsae* を散布する場合、1 m² 当たり 2 l の水を要することから、給水環境の厳しい喜界島における散布は、スポット的な利用が実用的と考えられる。さらに、昆虫病原性線虫を散布した土壌では、一時的に散布した線虫が優占種になるが、2 ～ 6 週間以内には散布前の状態に回復する (Ishibashi and Kondo, 1986; Smits, 1996; 山中, 2001)。このため、散布した線虫の殺虫効果をあげるには、2 ～ 4 週間間隔の複数回散布が必要と考えられる。

アリモドキゾウムシ成虫は、昼間は雌雄とも主に地表面や土壌表層部に生息しており、飛翔を伴った活動時間帯は夕刻から夜間である (Jayaramaiah, 1975; Howard, 1982; Sakuratani et al., 1994)。また、奄美大島で野外のケージを用いて行った試験では、冷涼な時期 (10 月～1 月) は、夜間もアリモドキゾウムシ成虫が地表面や土壌表層の浅い

地中に留まり、歩行、飛翔活動が低下する (Sakuratani et al., 1994). これらのことから、特に低温期においてアリモドキゾウムシ成虫は、寄主植物の周りの地表面や地下の湿度の高い場所に滞在している時間が長く、線虫との接触機会が高まると思われる。一方、線虫の殺虫能力は地温が 16℃以下になると著しく低下する (山中, 2001). したがって、喜界島での線虫の散布時期としては、平均気温が 16℃以上で、かつ野外のアリモドキゾウムシ成虫の歩行・飛翔活動性が低く、低密度時期と考えられる 3 月から 5 月頃が適当と思われる。

今回の圃場試験では、*S. carpocapsae* 区のサツマイモ被害塊根率は 30 % 以上を示し、密度抑圧防除に加えて、被害の有無が問題となるサツマイモの経済栽培においては、線虫利用だけでは防除効果が不十分と推察される。Grullo Ravelo and Perez Machado (1994) は、アリモドキゾウム

シに対する天敵糸状菌 *B. bassiana* と合成性フェロモンを組み合わせ防除方法の有効性を報告している。また、Yasuda (1999) は、圃場において *B. bassiana* と合成性フェロモンを利用した感染装置を用い、アリモドキゾウムシに対する病原菌の感染率を向上させている。

鳥越ら (2000) は、天敵糸状菌 *M. anisopliae* (櫻井ら, 1998a) を用いたサツマイモ圃場でのアリモドキゾウムシ防除試験において、*M. anisopliae* 1 回処理とカルボスルファン粒剤 1 回散布処理の組合せ、あるいは *M. anisopliae* とポリフィルムマルチ栽培の組合せは、カルボスルファン粒剤 2 回処理とほぼ同等の効果が得られたと報告している。今後、サツマイモ栽培での被害軽減、あるいは密度抑圧防除資材として線虫をより効果的に用いるためには、線虫と化学殺虫剤、あるいは合成性フェロモン剤等を組み合わせた利用方法についても検討する必要がある。

第IV－3表 サツマイモ圃場における *S. carpocapsae* のアリモドキゾウムシに対する効果

供試線虫または薬剤	散布量	調査株数	調査塊根数 ^{a)}	被害塊根率 (%) ^{b)}	被害度 ^{c)}
<i>S. carpocapsae</i> (All)	25 万頭/2 l / m ²	12	56.7 ± 1.8	33.3 ± 4.4 b	4.1 ± 1.7
カルボスルファン粒剤 (カルボスルファン 3 %) ^{d)}	6 kg/10a	12	56.3 ± 1.2	7.0 ± 1.9 a	0.4 ± 0.3
無 処 理	—	12	49.3 ± 2.9	53.5 ± 2.8 c	9.7 ± 2.7

^{a)} 平均 ± SE

^{b)} 平均 ± SE, アークサイン変換後に Tukey's HSD Test を行った。異なった記号間では死亡率に有意な差があることを示す ($p < 0.05$)。

^{c)} 被害度の算出方法は本文参照。

^{d)} 有効成分名と含有量。

第V章 アリモドキゾウムシの大量増殖と不妊虫放飼技術の改善

不妊虫放飼法では、まず不妊化する昆虫を大量に増殖する必要がある (Knippling, 1955, 1979)。根絶実証事業から本格的な根絶防除事業への拡大に伴い、不妊虫生産コストの低減は、予算に制約がある根絶防除事業の大きな命題の一つである。鹿児島県ではアリモドキゾウムシの増殖は、サツマイモ塊根を餌として用いており (上門ら, 1993; 宮路ら, 2000)、生産頭数の増加にほぼ比例してサツマイモ塊根の確保にかかるコストが増加する。このため、サツマイモにかかるコストを抑えることは、生産コストの低減に大きく寄与する。そこで、現在使用している青果用サツマイモに比べて安価な原料用サツマイモを用いたアリモドキゾウムシの大量増殖について検討を行った。

また、喜界島における根絶実証事業では、当初、完全に不妊化した成虫を放飼していたが、放飼効果は不十分であった (湯田ら, 2000)。その原因の一つとして、放飼不妊虫の虫質が低いことが考えられたため、解決策の一つとして、完全不妊虫と比較し、生存日数あるいは性的競争力で優る不完全不妊虫の利用の可能性について検討を行った。不完全不妊虫の利用にあたっては、妊性が残る個体を放飼するため、鈴木・宮井 (1997, 2000) はモデルを用い、放飼条件を明らかにした。一方、このモデルに基づいて放飼条件を決定するため、不完全不妊虫の妊性程度、生存日数、ならびに雄成虫の性的競争力、野生雌成虫への移動能力などのパラメータが必要である。そこで、まず妊性の残存程度、生存日数を指標として、不完全不妊虫に関する適切なγ線の照射線量を検討した。次に蛹期に 50Gy 照射した不完全不妊虫として最も適当と考えられる雄成虫につい

て、性的競争力ならびに野生雄への到達能力を明らかにした。さらに、放飼虫の定点放飼時の放飼間隔を決定するため、50Gy 照射した不完全不妊雄について、まず低温期の12月に移動分散距離を計測した。

第1節 原料用サツマイモを用いた大量増殖

サツマイモは主な利用目的によって、食用とする青果用サツマイモと、でんぷんや焼酎の原料となる原料用サツマイモの大きく2つに分けられる。青果用サツマイモは生食あるいは加工用として、外観に優れ、糖度が高く良食味の品種である。一方、原料用サツマイモは高でんぷん含量、あるいは高収量の品種である。価格は原料用サツマイモは青果用サツマイモと比較し、大きさを問わない場合は1/6以下、選別などの手数料を加味しても1/2程度と安価である。これまでアリモドキゾウムシの増殖、あるいは増殖に関する試験は、原料用サツマイモに比べて、比較的容易に目的の品質、形状のものが購入できる青果用サツマイモが使用されており（上門ら, 1993; 宮路ら, 2000）、原料用サツマイモについて検討した報告はない。そこで、大量増殖のコスト低減をはかるために、原料用サツマイモ3品種のアリモドキゾウムシ増殖用の餌としての利用について検討を行った。

試験材料および方法

1 試験場所、供試虫、使用サツマイモ

試験は奄美大島の鹿児島県大島支庁農林課特殊病害虫係アリモドキゾウムシ大量増殖施設（以下、'大島支庁特病係'）と鹿児島県農業試験場大島支場（以下、'農試大島支場'）で行った。アリモドキゾウムシは1990年または1994年に奄美大島の笠利町で採集し、上門ら（1993）の方法を基本として、 $27 \pm 1^\circ\text{C}$ 、 $70 \pm 5\%$ RH、14L10Dの恒温室内で、サツマイモ塊根を用いて累代飼育している個体群を用いた（以下、'累代飼育虫'）。原料用サツマイモとして、鹿児島県で多く栽培されているコガネセンガン、シロユタカ、シロサツマの3品種（以下、'原料用サツマイモ3種'）を用いた。また、対照の青果用サツマイモとして、大量増殖で使用している土佐紅を用いた（宮路ら, 2000）。サツマイモ塊根の重量は、現行の大量増殖で用いる塊根と同じ1個180g～210gとした。

2 サツマイモ塊根への産卵方法と塊根の保管方法

アリモドキゾウムシのサツマイモ塊根への産卵、ならびに産卵させたサツマイモ塊根の保管は、大島支庁特病係で行っているアリモドキゾウムシの大量増殖方法（宮路ら, 2000）にしたがった。すなわち、発泡スチロール小片（ア

スパックサラサラ、旭化成株式会社製）を充てんしたポリプロピレン製の母虫飼育容器（30cm×36.5cm、深さ12cm、2段式、蓋孔ゴース張り）に、サツマイモ塊根4個（計780～800g）を埋め込み（以下、'産卵イモ'）、約1,500頭のアリモドキゾウムシ成虫（性比はほぼ1:1）を放飼し、2週間産卵させた。母虫飼育容器は $27 \pm 1^\circ\text{C}$ 、 $70 \pm 5\%$ RH、14L10Dの恒温室に保管した。その間に産卵イモは3～4日間隔で新しいものと交換した。産卵させた産卵イモは、水分含量を50%程度に調整したノコクズを入れた大型のポリプロピレン製の容器（30cm×36.5cm、深さ12cm、蓋孔ゴース張り）の中に9～10日埋め込んだ後、ノコクズを除去して、さらに2週間程度同容器で保管した。容器は $27 \pm 1^\circ\text{C}$ 、 $70 \pm 5\%$ RH、自然日長下の恒温室に静置した。その後、産卵イモは中型のポリプロピレン製の容器（21.5cm×28cm、深さ10cm、蓋孔ゴース張り）に移し替え、 $27 \pm 1^\circ\text{C}$ 、 $70 \pm 5\%$ RH、14L10Dの恒温室で試験終了まで保管した。試験は3反復で行った。なお、産卵イモの交換にあわせ、産卵開始日から最初の交換までの3日間を産卵1期、以下同様に産卵2期（4日間）、産卵3期（3日間）、産卵4期（4日間）と2週間を4つの産卵期に分けて示す。

3 サツマイモ塊根からの成虫の脱出推移、1頭重、体長

産卵イモから脱出した成虫は産卵終了28日後から52日後まで、毎日13時から16時に回収し、直ちに総重量を計数した。その後、雌雄別に虫数を計数し、性比、1頭重を算出した。さらに、4つの産卵期間からそれぞれ雌雄30頭を任意に抽出し、体長を測定した。

産卵終了52日後には、産卵イモは乾燥して硬化し、また、脱出する成虫もほとんど認められなかった。そこで、この時点ですべての羽化個体が産卵イモから脱出したと見なし調査を終了した。また、鹿児島県が行っている不妊虫放飼では、サツマイモ塊根から脱出した成虫を、産卵終了32～36日後のいずれかの日に1回、さらにその1週間後（産卵終了39～43日後）に1回、計2回回収を行い、放飼に供している（宮路ら, 2000）。そこで、産卵終了36日後までに脱出した成虫を'第1週脱出虫'、産卵終了37～43日後までに脱出した成虫を'第2週脱出虫'、第1週脱出虫と第2週脱出虫の合計を'適期脱出虫'、総脱出虫数に対する適期脱出虫数の割合を'適期脱出虫率'とした。

4 放射線照射時の齢期

鹿児島県ではアリモドキゾウムシを不妊化するために、

蛹後期のアリモドキゾウムシが在虫する産卵終了 27 ～ 28 日後の産卵イモに、 ^{60}Co の γ 線を照射している（以下、' 蛹照射'）。虫質を維持し確実に不妊化するには、照射時に塊根内の各個体の齢期が揃い、かつ蛹後期の比率が高いことが望ましい。そこで、産卵 28 日後の塊根内の齢期を把握するために、産卵 2 期と産卵 4 期の産卵イモ各個について、およそ半分を分解して、在虫数を齢期別に計数した。幼虫の齢期は Sherman and Tamashiro (1954) にしたがって、頭幅により 3 つに分けた。また蛹については岩元・伊藤 (1989) に従い、複眼、体色の色調から羽化 1 ～ 2 日前とそれ以外に分けた。成虫については翅鞘の色と硬化状態から、およそ羽化 1 ～ 2 日後とそれ以外に分けた。

5 統計解析

統計解析には JMP Release 5.1.1J (SAS Institute Japan Inc., 2002)、または R Version 2.1.1 (<http://cran.md.tsukuba.ac.jp/> (2005)) を用いた。

結 果

1 産卵イモからの脱出時期と適期脱出虫率

いずれの品種も第 1 週脱出虫が第 2 週脱出虫と比べて多く、最も低かったコガネセンガンで適期脱出虫の 70 % 以上、最も高かったシロユタカでは適期脱出虫の 88 % 以上を占めた（第 V-1 表）。土佐紅と比較して、シロユタカは第 1 週脱出虫の割合が高く、逆にコガネセンガンは低い傾向がみられた。適期脱出虫率は、シロサツマでの産卵 4 期、ならびにコガネセンガンでの産卵 3 期、4 期を除くと、その他はいずれの産卵期間、品種も 99.5 % 以上であった。コガネセンガンはいずれの産卵期間も土佐紅と比べて適期脱出虫率が低く (Holm's method, $p < 0.05$)、最大で 2.7 % の差がみられた。また、シロサツマは産卵 3 期、4 期において、土佐紅と比べて適期脱出虫率が低かった (Holm's method, $p < 0.05$)。

2 サツマイモ重量当たりの適期脱出虫数

産卵イモ 1g 当たりの適期脱出虫数（以下、' 歩留まり'）は、産卵期間を平均するとシロサツマとコガネセンガンが 2.4 頭、土佐紅が 2.7 頭、シロユタカが 2.8 頭となった（第 V-1 図）。また、原料用サツマイモ 3 種は土佐紅と比較し、後半の産卵期間ほど、歩留まりが下がる傾向がみられた。MANOVA を用い、品種、産卵期間による歩留まりを比較した結果、4 品種間について産卵期間には有意な差がみられたが ($p < 0.05$)、品種間には有意な差は認められなかった ($p > 0.05$)。

3 1 頭重・体長

第 V-2 図に適期脱出虫の 1 頭重を、第 V-3 図に体長を雌雄別に示した。1 頭重と体長はほぼ同調しており、産卵 1 期、2 期では、原料用サツマイモ 3 種は土佐紅と比較して、1 頭重、雌雄の体長とも有意な差は認められなかった (Tukey's HSD Test, $p > 0.05$)。また、産卵 3 期、4 期では、原料用サツマイモ 3 種はいずれの品種も、土佐紅と比較して 1 頭重は重く、体長も大きかった (Tukey's HSD Test, $p < 0.05$)。雌雄間の体長は、4 品種とも同じ産卵期間では、有意な差は認められなかった (MANOVA, $p > 0.05$)。

4 性比

産卵 1 期、2 期では適期脱出虫の性比（雄 / (雄 + 雌)）は、原料用サツマイモ 3 種と土佐紅の間に差は認められなかった（第 V-2 表）。産卵 3 期ではシロユタカとコガネセンガンが、4 期ではシロサツマとコガネセンガンが、土佐紅と比べて雄が有意に多かった (Holm's method, $p < 0.05$)。また、産卵期間を通算すると原料用サツマイモは土佐紅と比べて雄が有意に多かった (Holm's method, $p < 0.05$)。いずれの品種も全般的には雌の比率が高い傾向が認められ、産卵 1 期、2 期では特に顕著であった。また、いずれの品種も、歩留まりが高いほど、性比が雌に偏る傾向がみられた（第 V-4 図）。

5 放射線照射時の齢期

産卵終了 28 日後の齢期は、産卵 2 期の調査では、原料用サツマイモ 3 種、土佐紅とも羽化 1 ～ 2 日後の成虫が主体であった。また、産卵 4 期の調査では、蛹または羽化 1 ～ 2 日後の成虫が主体であった（第 V-5 図）。シロユタカは 2 回の調査とも、土佐紅と比べて若干齢期が進んでいた。コガネセンガンは産卵 2 期の調査では土佐紅と比べて若干齢期が遅れていたが、産卵 4 期の調査ではほぼ同程度の齢構成であった。シロサツマは 2 回の調査とも、土佐紅とほぼ同じ齢構成であった。

考 察

喜界島では毎週 1 回、50 ～ 60 万頭（2000 年現在）の不妊虫放飼を行っている（湯田ら、2000）。供試した原料用サツマイモ 3 種のうち、シロユタカとコガネセンガンは土佐紅と比較し、第 1 週脱出虫と第 2 週脱出虫の割合が若干異なる傾向がみられた。しかし、その差は最大で 15 % 以下であり、現状の週 1 回の不妊虫放飼間隔であれば、放射線照射後の塊根の保管方法、あるいは放飼計画の変更を行わなくても、毎回の放飼頭数の変動は小さく、問題ないと考えられる。ただし、シロユタカは現行の照射時期で

第V-1表 原料用サツマイモ3品種ならびに青果用サツマイモ「土佐紅」の塊根からの
アリモドキゾウムシ成虫の適期脱出虫数と適期脱出虫率

産卵期間 ^{a)}	品 種	塊根重 ^{b)} (g)	第1週脱出虫数 ^{c)}	第2週脱出虫数 ^{d)}	適期脱出虫数 ^{e)}
産卵1期	シロサツマ	800 ± 0.0	1721.3 ± 188.2 (83.79)	330.0 ± 50.2 (16.06)	2051.3 ± 176.3 (99.85)ab
	シロユタカ	800 ± 0.0	2595.7 ± 59.4 (96.79)	83.3 ± 8.7 (3.11)	2679.0 ± 61.6 (99.90)a
	コガネセンガン	800 ± 0.0	1859.7 ± 139.6 (87.16)	266.0 ± 34.1 (12.47)	2125.7 ± 147.9 (99.63)b
	土佐紅	800 ± 0.0	1907.3 ± 195.1 (89.51)	221.3 ± 48.0 (10.39)	2128.7 ± 169.7 (99.89)a
産卵2期	シロサツマ	600 ± 0.0	1644.7 ± 170.8 (98.58)	23.0 ± 5.7 (1.38)	1667.7 ± 166.9 (99.96)a
	シロユタカ	590 ± 10.0	1839.3 ± 113.1 (99.19)	14.0 ± 8.3 (0.76)	1853.3 ± 120.5 (99.95)a
	コガネセンガン	597 ± 3.3	1385.0 ± 194.5 (88.29)	175.7 ± 26.4 (11.20)	1560.7 ± 185.9 (99.49)b
	土佐紅	603 ± 8.8	1343.0 ± 76.5 (97.98)	26.7 ± 9.2 (1.95)	1369.7 ± 70.4 (99.93)a
産卵3期	シロサツマ	787 ± 6.7	1667.3 ± 68.1 (88.25)	217.3 ± 47.0 (11.50)	1884.7 ± 34.4 (99.75)a
	シロユタカ	780 ± 0.0	1934.7 ± 199.8 (96.49)	68.0 ± 21.2 (3.39)	2002.7 ± 178.8 (99.89)ab
	コガネセンガン	797 ± 3.3	1410.0 ± 92.9 (77.23)	363.7 ± 14.6 (19.92)	1773.7 ± 103.0 (97.15)c
	土佐紅	790 ± 5.8	2234.3 ± 88.7 (94.42)	130.7 ± 22.4 (5.52)	2365.0 ± 107.4 (99.95)b
産卵4期	シロサツマ	580 ± 10.0	776.3 ± 178.6 (75.96)	228.7 ± 35.5 (22.38)	1005.0 ± 150.0 (98.34)a
	シロユタカ	597 ± 6.7	1113.0 ± 259.9 (88.54)	139.7 ± 17.5 (11.11)	1252.7 ± 242.8 (99.66)b
	コガネセンガン	603 ± 8.8	877.0 ± 195.7 (70.84)	330.3 ± 45.9 (26.68)	1207.3 ± 152.3 (97.52)c
	土佐紅	590 ± 10.0	1463.3 ± 90.9 (86.38)	224.7 ± 33.9 (13.26)	1688.0 ± 93.4 (99.65)b

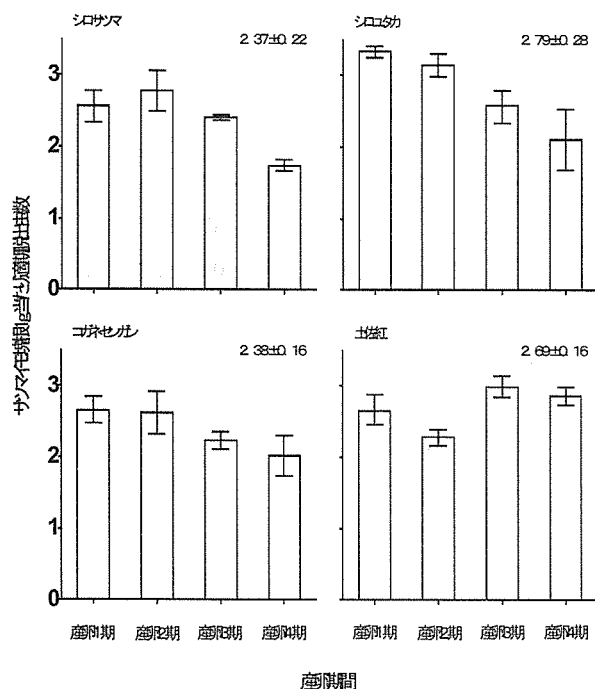
^{a)} 塊根の交換にあわせ、産卵開始日から最初の交換までの3日間を産卵1期、以下同様に産卵2期（4日間）、産卵3期（3日間）、産卵4期（4日間）と2週間を4つの産卵期に分けて示す。

^{b)} 平均±SE 産卵1, 3期は塊根4個の合計値、産卵2, 4期は塊根3個の合計値。

^{c)} 産卵終了36日後までに脱出した成虫数、平均±SE（ ）は総脱出虫数に対する割合（％）を示す。

^{d)} 産卵終了37～43日後に脱出した成虫数、平均±SE（ ）は総脱出虫数に対する割合（％）を示す。

^{e)} 産卵終了43日後にまで脱出した総成虫数、平均±SE（ ）は総脱出虫数に対する割合；適期脱出虫率（％）を示す。同一産卵期間内の異なった記号間では適期脱出虫率に有意な差があることを示す（Holm's method, $p<0.05$ ）。

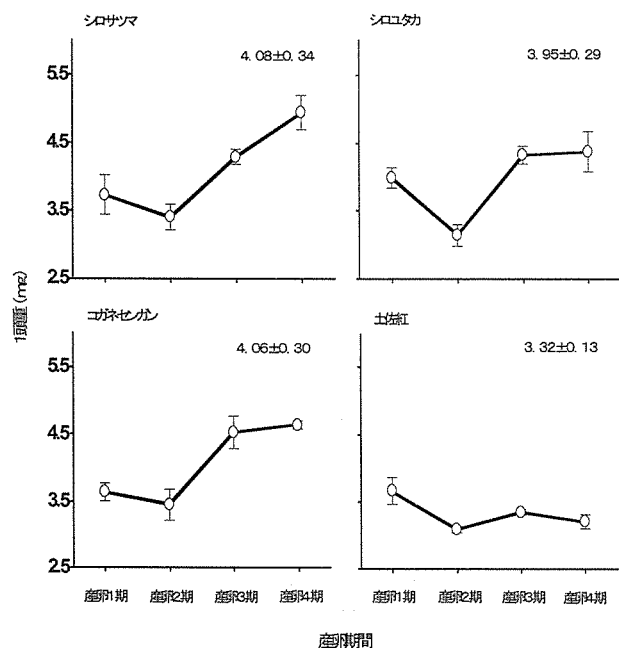


第V-1図 サツマイモ塊根1g当たりのアリモドキゾウムシ成虫の適期脱出虫数（平均±SE）

図中の数字は全産卵期の平均±SEを示す。

産卵期間については第V-1表脚注a)を参照。

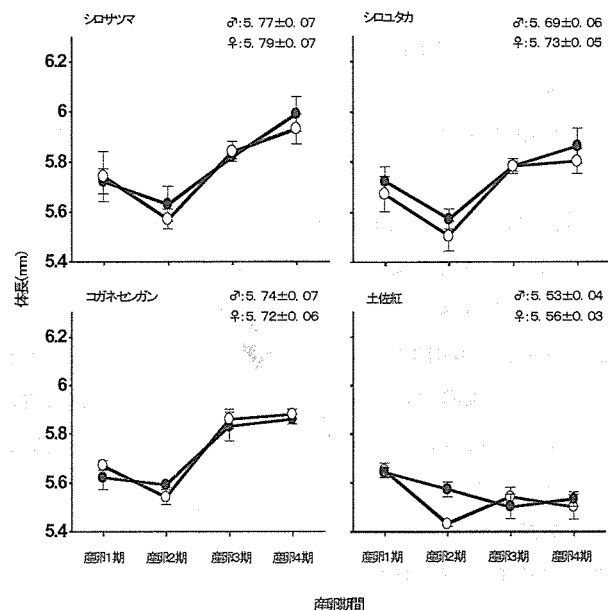
適期脱出虫数は産卵終了43日後までに塊根から脱出した成虫数。



第V-2図 アリモドキゾウムシ適期脱出虫の1頭重の推移（平均±SE）

図中の数字は全産卵期の平均±SEを示す。

産卵期間については第V-1表脚注a)を参照。



第V-3図 アリモドキゾウムシ適期脱出虫の体長の推移（平均±SE） ○：♂ ●：♀

図中の数字は全産卵期の平均±SEを示す。

産卵期間については第V-1表脚注a)を参照。

は塊根内の齢期が若干進んでおり、シロユタカを利用する場合は、照射時期を1～2日程度早めるなどの対応が求められる。

適期脱出虫率は、シロユタカとシロサツマは土佐紅と差はほとんどなく問題はないと考えられるが、コガネセンガンは土佐紅と比べると最大2.7%低かった。コガネセンガンのみを利用する場合は、産卵終了43日以降の脱出虫も不妊虫放飼に利用する、あるいは塊根からの成虫脱出を促す方法等を検討する必要がある。

原料用サツマイモ3種を用いた場合、土佐紅と比較して、体サイズが特に小型化する現象はみられず、幼虫の餌としては原料用サツマイモ3種と土佐紅に差は認められない。原料用サツマイモ3種で飼育した成虫は、産卵3期、4期は土佐紅より体重、体長とも優った。一方、体サイズが大きくなると、歩留まりは低下する傾向がみられた。アリモドキゾウムシは、サツマイモ塊根内の幼虫が高密度になると、羽化する成虫が小型化する傾向があり（上門ら、1993）、このことを裏付ける結果となった。また、親成虫密度が増加すると、子世代成虫の1頭あたり体重は減少する（Sakuratani et al., 2001）。したがって、土佐紅と比べ、原料用サツマイモ3種は産卵3期、4期で体サイズが大きくなり、逆に歩留まりが低下した原因として、産卵数が減少したことが推察された。今回、産卵期間中の母虫の死亡率を調査していないことから、産卵数の減少が雌成虫の死亡によるものか、あるいは雌成虫の平均産卵数

が減少したことによるものか不明である。

2週間の産卵期間を平均すると、原料用サツマイモ3種と土佐紅の間に歩留まりの差はみられなかった。しかし、原料用サツマイモ3種は産卵期間の後半に歩留まりが下がる傾向が認められることから、3週間以上産卵させる場合は、母虫の補充などの対策が必要となる。

性比は産卵期間によっては原料用サツマイモ3種と土佐紅の間に差がみられたが、2週間を合計した場合、その差は0.013～0.018であり、また原料用サツマイモは土佐紅と比べて雄の比率が高かった。さらに、イモから脱出した成虫の性比は、塊根内の幼虫密度による影響が指摘されており（アリモドキゾウムシ研究会, 1992）、今回も歩留まりが高いほど雌が多かった。これらのことから、原料用サツマイモ3種を利用するにあたり性比の変動を考慮する必要はないと考えられる。

サツマイモ塊根に3～4日間産卵させる場合、母虫による過度の摂食と産卵による腐敗を避けるための実用的なサツマイモ上の成虫密度は、塊根表面積1cm²当たり2.0～2.5頭である（上門ら, 1993）。したがって、同重量の産卵イモを用いる場合でも、サツマイモの形状が大きく異なっていれば、母虫頭数を調整しなければならない。紡錘形の土佐紅に対し、供試した原料用サツマイモは、シロユタカが紡錘形、シロサツマが紡錘形から短紡錘形、コガネセンガンが紡錘形から下膨れ紡錘形で（鹿児島県農政部流通対策室・鹿児島県農産物加工研究指導センター 1993; 日本いも類研究会; http://www.jrt.gr.jp/var_s/index_spv.html, 2005）、比較的類似した形状である。また、母虫数に差が無いと考えられる産卵1期、2期の適期脱出虫数に差はなかったため、今回供した原料用サツマイモを用いる場合、初期の母虫数を調整する必要はないとみなされ

る。原料用サツマイモは収穫後、直ちに加工にまわされるため、JA等の集荷場、販売店等で貯蔵されない。さらに、現在の大量増殖施設のサツマイモ貯蔵能力は、週300万頭のアリモドキゾウムシを生産する場合、1か月程度である。このため、原料用サツマイモを利用できる期間は、1年間のうち収穫期（秋季）の3か月間と貯蔵分の1か月間、計4か月間程度となる。週産300万頭体制では、不妊虫大量増殖用の餌塊根、ならびにその他飼育用の塊根、貯蔵中の腐敗、痛み等によるロスも含め、月10t程度のサツマイモ塊根が必要と試算されている。青果用サツマイモの平均価格が200円/kg、原料用サツマイモが100円/kgとし、原料用サツマイモを4か月間、残りの8か月間は青果用サツマイモを使用した場合、サツマイモの年間購入費用は2,000万円となる。これは、青果用サツマイモのみを利用した場合の2,400万円と比べて、およそ17%のコスト低減となる。

蛹照射によるアリモドキゾウムシの不妊化では、照射時期に塊根内の齢期を揃えるため、塊根の形状や大きさを一定にする必要がある。沖縄県ではアリモドキゾウムシの不妊化は、塊根から脱出した成虫に直接放射線を照射して行う「成虫照射」により行われている（宮路ら, 2000）。成虫照射の場合、蛹照射に比べると塊根内の齢期を厳密に揃える必要がなく、アリモドキゾウムシ増殖に用いる餌イモは、蛹照射に比べて大きさや形状の選択範囲が広がると考えられる。大量増殖虫の生産単価をさらに低減する上で、成虫照射の適用可能性についても検討が必要である。また、原料用サツマイモは不定形で大重量のイモが多いことから、塊根の形状や重量に関する制約が少ない飼育方法、および原料用サツマイモの長期保存方法についても、今後コスト低減の観点から技術開発が求められるであろう。

第V-2表 原料用サツマイモ3品種ならびに青果用サツマイモ「土佐紅」の適期脱出虫の性比

品 種	産卵1期 ^{a)}		産卵2期	
	適期脱出虫数	性比 ^{b)}	適期脱出虫数	性比
シロサツマ	6,154	0.494	5,003	0.482 * ^{c)}
シロユタカ	8,037	0.489 *	5,560	0.476 *
コガネセンガン	6,377	0.486 *	4,682	0.481 *
土佐紅	6,386	0.491	4,109	0.474 *

品 種	産卵3期		産卵4期	
	適期脱出虫数	性比	適期脱出虫数	性比
シロサツマ	5,654	0.492ab ^d	3,015	0.502 a
シロユタカ	6,008	0.502b	3,758	0.494 ab
コガネセンガン	5,321	0.506b	3,622	0.516 * c
土佐紅	7,095	0.471 * a	5,064	0.471 * b

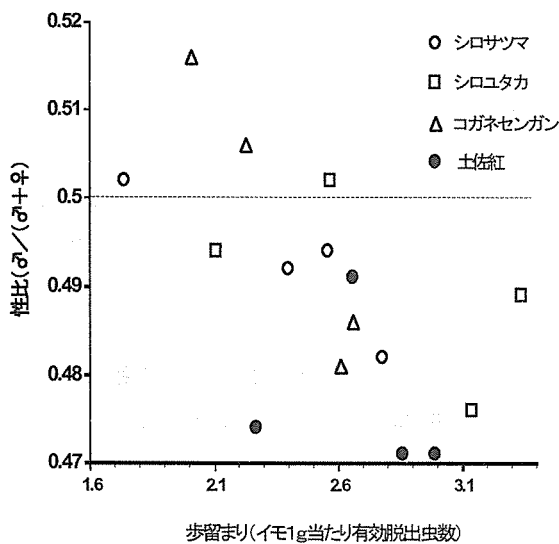
品 種	合 計	
	適期脱出虫数	性比
シロサツマ	19,826	0.491 * a
シロユタカ	23,363	0.490 * a
コガネセンガン	20,002	0.495 a
土佐紅	22,654	0.477 * b

a) 第V-1表脚注a)を参照.

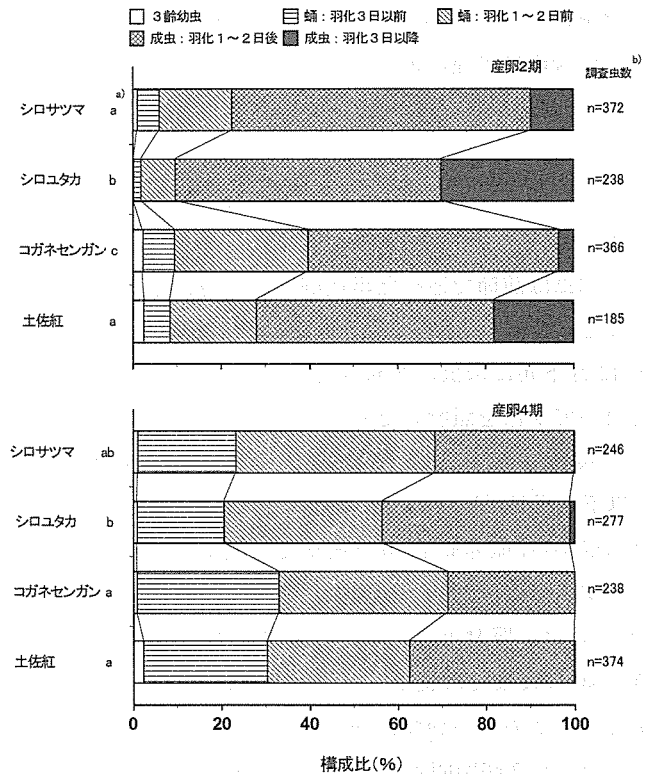
b) 雄比: 雄成虫数/適期脱出虫数 (産卵終了43日後までに塊根から脱出した成虫数)

c) *は性比0.5と有意に異なることを示す (binomial test, $p < 0.05$).

d) 各産卵期において, それぞれ異なった記号間では有意な差があることを示す (Holm's method, $p < 0.05$).



第V-4図 歩留まりと性比の関係



第V-5図 産卵終了28日後におけるサツマイモ塊根内のアリモドキゾウムシの齢構成

産卵期については第V-1表脚注a)を参照.

a) 各産卵期において, それぞれ異なった記号間では構成比に有意な差があることを示す (Holm's method, $p < 0.05$).

b) サツマイモ塊根のおよそ半分を分解調査.

第2節 蛹期にγ線を40~70Gy照射された成虫の妊性と生存率

喜界島で実施されたアリモドキゾウムシ根絶実証事業では, 当初, 完全不妊化に必要な最低線量である80Gyのγ線を蛹期に照射した完全不妊虫 (岩元ら, 1990) を放飼していた (湯田ら, 2000). しかし, 野生虫の密度は減少せず, 不妊虫放飼の効果は不十分であった. そこで, その解決策の一つとして, 不妊化率は100%ではないが, 完

全不妊虫と比較し, 生存日数, あるいは性的競争力で優る不完全不妊虫 (Knippling, 1989) の利用が検討された. 不完全不妊虫の利用にあたっては, 妊性のある個体も放飼することになるため, 不完全不妊虫の放飼適用条件を, 予め明確にしておく必要がある. 鈴木・宮井 (1997, 2000) は, 不完全不妊虫の放飼を念頭においたアリモドキゾウムシ根絶モデルを作成し, シミュレーションによってモデルの適用条件について検討を行った. このモデルでは, 一定頭数

の不妊虫を放飼する場合、不完全不妊虫が利用できる放飼条件の判定指標に、合成性フェロモントラップで捕獲されるマーク虫（照射雄成虫）と無マーク虫（野生雄成虫）との比（以下、'M/U比'）を用いており、照射虫の生存日数や残存妊性、性的競争力などにより、不完全不妊虫の放飼が実施可能なM/U比の範囲が規定される。そこで、ここでは蛹期のアリモドキゾウムシが在虫しているサツマイモ塊根に、40～70Gyの γ 線を照射し、塊根から脱出した成虫の妊性、ならびに雄成虫の生存日数について調査を行った。さらに、不完全不妊虫を放飼する場合の照射線量として有望と考えられた50Gy照射について、現在行われている根絶防除事業レベルを想定して、産卵、飼育、不妊化を行った塊根から得られた雌成虫の妊性を調査し、実際の大量増殖工程に近い条件で得られた不完全不妊虫の不妊化率を明らかにした。

試験材料および方法

1 供試虫

供試虫は前節で述べた累代飼育虫を用いた。以下に述べる2と3では、照射雄成虫（以下、'照射雄'）として、1995年12月下旬に母虫に産卵させ、産卵終了27日後に ^{60}Co を用いて γ 線を照射したサツマイモ塊根から、産卵終了35日後までに脱出した個体を用いた。また、照射雌成虫（以下、照射雌）は、照射雄と同様に産卵、 γ 線を照射した塊根から、産卵終了40日後までに脱出した個体である。健全雌成虫（以下、'健全雌'）と健全雄成虫（以下、'健全雄'）は、照射虫と同時期に産卵させた塊根から、産卵終了40日後までに脱出した個体を用いた。なお、未交尾雌を得るために、照射雌と健全雌は塊根から脱出してきた個体を1～2時間間隔で回収して供試した。照射虫、健全虫とも試験開始時には羽化10日程度と推測された。後述4の供試虫は、 γ 線を50Gy照射した雌成虫（以下、'50Gy照射雌'）と健全雄であり、50Gy照射雌は1999年7月12～16日に母虫に産卵させ、8月12日に ^{60}Co を用いて γ 線を50Gy照射したサツマイモ塊根を、8月13日に分解して蛹を取り出し、羽化した未交尾雌を用いた。健全雄は50Gy照射雌と同日に母虫に産卵させ、同じ条件下で保管されたサツマイモ塊根から脱出した雄成虫を用いた。いずれも試験には、羽化後1週間程度経過した個体を使用した。塊根を分解して蛹を取り出すまでの飼育、ならびに不妊化等は、現行の根絶防除事業レベルの大量増殖工程と同様な方法で行った。

2 蛹期に γ 線を40～70Gy照射されたアリモドキゾウムシの妊性

40Gy, 50Gy, 60Gy, 70Gyの照射線量について、照射雄と健全雌、ならびに照射雌と健全雄の組合せで、雌雄それぞれ10頭ずつをポリプロピレン容器（27cm×12.5cm、深さ9cm、蓋孔ゴース張り）に入れ、 $27 \pm 1^\circ\text{C}$ 、 $70 \pm 5\%$ RH、14L10Dの条件下で20日間飼育した。飼育容器にはサツマイモ塊根1個を入れ、4日間隔で新しいものと取り替えた。取り出したサツマイモ塊根は実体顕微鏡下で産卵数を計数した後、別の飼育容器に保管し、産卵終了45日後までに塊根から脱出した成虫を計数した。いずれの雌雄の組み合わせも9反復行った。

3 蛹期に γ 線を40～80Gy照射されたアリモドキゾウムシ雄成虫の生存日数

40Gy, 50Gy, 60Gy, 70Gy, 80Gyの照射線量について、照射雄と健全雌それぞれ10頭ずつをポリプロピレン容器（27cm×12.5cm、深さ9cm、蓋孔ゴース張り）に入れ、 $27 \pm 1^\circ\text{C}$ 、 $70 \pm 5\%$ RH、14L10Dの条件下で飼育した。餌としてサツマイモ塊根1個を与え、照射雄が全頭が死亡するまで3～4日間で生存虫数を調査した。9反復行った。

4 根絶防除事業レベルの大量増殖工程において蛹期に γ 線を50Gy照射された雌成虫の妊性

50Gy照射雌700頭と健全雄700頭を、発泡スチロール小片（アスパックサラサラ、旭化成株式会社製）を充てんし、サツマイモ塊根を埋めこんだポリプロピレン製容器（30cm×36.5cm、深さ12cm、蓋は網張り）に4日間同居させ、交尾機会を与えた。次に、生存していた569頭の50Gy照射雌のうち550頭について、10頭ずつプラスチック容器（内径9cm、深さ6cm、蓋は網張り）に入れ、3cm前後に切ったサツマイモ（以下、'スライスイモ'）を与えて約3週間飼育した。その間、ほぼ1週間間隔でスライスイモは新しいものと取り替え、供試虫の生死数を調査した。取り出したスライスイモは、ノコズを充てんしたプラスチック容器に埋め込み、恒温室（ $27 \pm 1^\circ\text{C}$ 、 $70 \pm 10\%$ RH、14L10D）で17日間保管した後、分解して内部の幼虫数を計数した。

結果

1 蛹期に γ 線を40～70Gy照射されたアリモドキゾウムシの妊性

照射雄と健全雌の組合せでは、線量の増加とともに産卵数に対する次世代成虫数が減少したが、40Gyから70Gyの範囲ではいずれの線量でも次世代成虫が確認された（第V-3表）。照射雌と健全雄の組合せでは、線量の増加と

ともに産卵数、次世代成虫数とも減少し、40Gy、50Gyの線量では次世代成虫が確認されたが、60Gy、70Gyの線量では卵、次世代成虫とも認められなかった。

第V-3表 蛹期にγ線を照射されたアリモドキゾウムの線量の違いによる妊性

線 量 (Gy)	照射雄×健全雌		
	産卵数	脱出虫数 ^{a)}	脱出虫率(%) ^{b)}
40	2,216	40	1.81
50	2,770	10	0.36
60	2,361	3	0.13
70	1,728	1	0.06

線 量 (Gy)	照射雌×健全雄		
	産卵数	脱出虫数	脱出虫率(%)
40	131	22	16.79
50	0	3	0 ^{c)}
60	0	0	0
70	0	0	0

^{a)} 産卵後45日目までに塊根から脱出してきた次世代の数

^{b)} 産卵数に対する塊根からの脱出虫数の割合(%)

^{c)} 産卵は確認できなかったが、脱出虫がみられた。

産卵期間20日間、9反復合計値

2 蛹期にγ線を40～80Gy照射されたアリモドキゾウムシ雄成虫の生存日数

平均生存日数は線量の増加とともに短くなる傾向がみられ、40Gy、50Gyを照射された個体は41日前後、60Gy、70Gyを照射された個体は29日前後、80Gyを照射された個体は22日程度であった(第V-4表)。また、40Gy、50Gyを照射された個体は、60Gy、70Gy、80Gyを照射された個体に比べて生存日数が有意に長かった。

第V-4表 蛹期にγ線を照射されたアリモドキゾウムシ雄成虫の生存日数

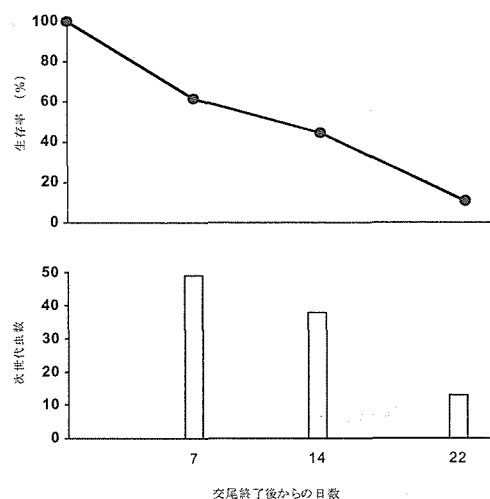
線 量 (Gy)	調査虫数	平均生存日数 ^{a)}
40	90	40.9 ± 28.1a
50	90	41.5 ± 20.4a
60	90	29.1 ± 13.6 b
70	90	28.8 ± 10.0 b
80	90	21.7 ± 9.2 b

^{a)} 平均±S.D.

異なった記号間では死亡率に有意な差があることを示す(Tukey's HSD Test, $p < 0.01$)。

3 根絶防除事業レベルの大量増殖工程において蛹期にγ線を50Gy照射された雌成虫の妊性

供試した55容器の内、特定の2容器のスライスイモから、3週間継続して次世代虫がみられた(第V-6図)。次世代虫数は合計で、1週目が49頭、2週目が38頭、3週目が13頭であった。また、1雌当たりの日当たり次世代数は、1週目が0.0127頭、2週目が0.0161頭、3週目が0.0109頭であった。50Gy照射雌の生存率はほぼ直線的に減少し、交尾終了後(セット日)から22日後には約10%となった。



第V-6図 蛹期50Gy照射雌成虫の生存率と健全雄との交尾による次世代虫数の推移

考 察

鈴木・宮井(1997, 2000)が提案した根絶モデルでは、特に放飼する照射雌の妊性が高いと、完全不妊虫に代わって不完全不妊虫が利用できることを示すM/U比が低くなり、実際に利用できる場面が非常に少なくなる。このため、雌成虫については完全不妊化させる、あるいはほとんど妊性を残さない線量が、雌雄の不完全不妊虫を放飼する場合の照射線量の一つの目安となる。今回の試験では、蛹期にγ線を照射した場合、60Gy以上の線量ですべての雌成虫が不妊化され、50Gy照射においても次世代はわずかで、ほとんどの雌成虫が不妊化された考えられる。また、アリモドキゾウムシの蛹期にγ線を照射したこれまでの不妊化試験においても、40～70Gyの照射線量で、雌成虫は完全に不妊化されており(Dawes et al, 1987; 荒巻, 1989; 岩元ら, 1990; 伊藤ら, 1993)、今回の試験とほぼ同じ結果を示している。一方、雄成虫の生存日数は、照射線量が50Gy以下であれば、80Gyと比較して約2倍、60Gyと比較して約1.4倍長くなり、虫質の向上が認められた。これらのことから、不完全不妊虫放飼のための照射線量としては、50Gyが適当と考えられた。

根絶防除事業レベルの大量増殖工程で、50Gyの照射線量で不妊化し、健全雄と交尾させた550頭の雌成虫を7日間産卵させたところ、次世代虫数は49頭であった。アリモドキゾウムシの平均産卵数は1～2個/日であることから（荒巻ら, 1987; 上門ら, 1993; Sugimoto et al., 1996）、1雌あたりの産卵数を1.5個/日と仮定し、幼虫期の死亡率を無視すれば、550頭のうち約5頭（供試虫の約0.9%）の雌が妊性を持っていると推測される。

産卵した不完全不妊雌が、健全雌と同様な寿命、日当たり産卵数の場合、寿命の短い完全不妊雌は早期に死亡してしまうため、1雌・日当たりの次世代虫数は次第に上昇すると予測される。しかし、今回の試験では、産卵数は減少し、1雌・日当たりの次世代虫数は0.0127～0.0161頭で3週間ともほぼ一定であった。このことから、正常卵を産下した不完全不妊雌は健全雌と比べて、産卵数または生存日数のいずれか、あるいは両方についてγ線照射による影響を受けているものと考えられる。根絶モデル（鈴木・宮井, 1997, 2000）では、正常卵を産下する不完全不妊雌の生存率の低下については考慮されていないことから、今回の結果を取り入れて根絶モデルの再検討を行えば、不完全不妊虫放飼の適用場面が広まる可能性も考えられる。

不完全不妊虫の利用では、野生虫が根絶状態に近づくと完全不妊虫の放飼に切り替える必要がある。鈴木・宮井（1997, 2000）が提案したモデルでは、照射された雌成虫の妊性が低いほど、より根絶が近くなるまで、放飼効果が高い不完全不妊虫を継続して利用できることを示している。沖縄県では久米島のアリモドキゾウムシ根絶実証事業において、不完全不妊虫を用いており、不妊化は塊根から脱出後の成虫に放射線を照射する成虫照射を採用している（宮路ら, 2000）。さらに、照射前に成虫を合成性フェロモンを用いて雌雄の分別行い、放飼虫の雌比率を低くするとともに、逆に累代飼育用の母虫では雌比率を高めている（宮田ら, 1999; 宮路ら, 2000）。限られた放飼頭数でより高い防除効果を得るためには、不完全不妊虫の放飼条件の拡大も重要な方策であり、今後、このような方法を参考にし、雄成虫を選択的に放飼するような方法を講じて、放飼個体群中の妊性を持った雌成虫の絶対数を減らす必要があると考えられる。

第3節 蛹期にγ線を50Gy照射された雄成虫の性的競争力

不完全不妊法実施の初期段階で、完全不妊虫放飼により不完全不妊虫放飼が効率的である条件を示す鈴木・宮井（1997, 2000）の根絶モデルでは、条件設定のためのパラメータとして、不完全不妊雄成虫の性的競争力の値が必要である。このため、不完全不妊虫作出のための照射線量と

して有望と考えられる50Gyを照射した不完全不妊雄成虫の利用にあたっては、その性的競争力も明らかにしておく必要がある。また、放飼雄の性的競争力の測定方法を確立し、測定値を明らかにすることは、根絶防除事業を効率的に推進するためにも重要である。

放飼雄（照射雄）の包括的な性的競争力は、野生雄1頭に対する放飼雄1頭の生涯授精卵数で定義される。これを式に表せば、

$$SC = BP \times FT$$

$$FT = DA \times (CS \times AF)$$

SC：放飼雄（照射雄）の包括的な性的競争力

BP：放飼雄の野生雄に対する相対繁殖期間

FT：単位時間当たり相対授精卵数

DA：未交尾雌の発見能力

CS：交尾成功率

AF：1交尾当たりの平均授精卵数

となる。

これらの式から導かれる $BP \times DA$ は、根絶実証事業で利用している合成性フェロモントラップ（安田・杉江, 1990; 安田ら, 1992; 瀬戸口・安田, 2000）によってモニターされるマーク虫と無マーク虫の比（ M/U 比）、および照射雄と野生雄の加入率によって推定することができる。また、 $CS \times AF$ （以下、'性的競争力'）は、雌の産卵数が交尾相手によって影響を受けないと仮定した場合には、Fried（1971）の指数 C_f によって置き換えることができる。

これまで、伊藤ら（1993）により、サツマイモ塊根から取り出した蛹化5日齢の蛹にγ線を50Gy照射して測定したアリモドキゾウムシの C_f 値が求められているが、喜界島の根絶防除事業では羽化日前後の個体を含むサツマイモ塊根にγ線を照射している。そこで、蛹期にγ線50Gyを照射したサツマイモ塊根から脱出してきた雄成虫（以下、'50Gy照射雄'）を用い、雄密度と照射雄/野生雄の比率が性的競争力に及ぼす影響ならびに性的競争力を実験室内で調べた。

試験材料および方法

1 性的競争力に及ぼす雄密度の影響

野生雄成虫（以下、'野生雄'）は、奄美大島の笠利町または龍郷町の植付後2か月以上経過したサツマイモ圃場において、1998年9月21日から24日に合成性フェロモントラップ（瀬戸口ら, 1991; 第II-10図）によって捕

獲した。50Gy 照射雄および健全雌成虫（以下、'健全雌'）には累代飼育虫を用いた。供試した 50Gy 照射雄は 1998 年 8 月 21 日から 25 日に母虫に産卵させ、9 月 21 日に ^{60}Co の γ 線で 50Gy 照射したサツマイモ塊根から 9 月 28 日以前に脱出した個体である。また、健全雌は、1998 年 8 月 21 日から 25 日に産卵された塊根を、9 月 21 日に解剖して蛹を取り出し、 $27 \pm 1^\circ\text{C}$ 、 $70 \pm 10\%$ RH、14L10D の恒温温室で羽化させた未交尾雌である。50Gy 照射雄、健全雌とも実験に供した 9 月 30 日には羽化 10 日齢前後と推測された。

試験は、まず発泡スチロール小片（アスパックサラサラ、旭化成株式会社）を充てんしたポリプロピレン製の容器（ $30\text{cm} \times 36.5\text{cm}$ 、深さ 12cm、蓋孔ゴース張り）に、青果用サツマイモ塊根（品種：ベニオトメまたは土佐紅、重さ約 200g）1 個を埋め込み、第 V-4 表に示す頭数の供試虫を 9 月 30 日に放飼し、交尾機会を与えた。供試虫のいずれの組み合わせも反復数は 4 回とした。次に、放飼 2 日後の 10 月 2 日に、発泡スチロール小片を充てんし、サツマイモ塊根 1 個を入れた別のポリプロピレン製の容器（ $19\text{cm} \times 27\text{cm}$ 、深さ 13cm、蓋孔ゴース張り）に健全雌のみを移し、2 週間産卵させた。産卵用のサツマイモ塊根は 1 週間後に 1 回交換した。さらに取り出したサツマイモ塊根は、ポリプロピレン製の容器に入れた水分含量 50～55% のノコクズに 19 日間埋め込んで保管した。ノコクズから取り出したサツマイモ塊根は、別のポリプロピレン製の容器に移し、取り出した後 4 週間以内にサツマイモ塊根から脱出してきた成虫を計数し、次世代羽化数とした。試験は $27 \pm 1^\circ\text{C}$ 、 $70 \pm 10\%$ RH、14L10D の恒温温室で行った。

2 50Gy 照射雄成虫の性的競争力

野生雄として、農試大島支場のサツマイモ圃場で 1998 年 10 月 28 日と 11 月 9 日に掘り取った被害塊根から、11 月 28 日から 12 月 28 日の期間に脱出した雄成虫を用いた。また、50Gy 照射雄と健全雌には累代飼育虫を用いた。供試した 50Gy 照射雄は 1998 年 11 月 20 日から 24 日に産卵され、12 月 21 日に ^{60}Co の γ 線で 50Gy 照射したサツマイモ塊根から 12 月 28 日以前に羽化し、脱出した個体である。健全雌は 1998 年 11 月 17 日から 20 日に産卵させた塊根を 12 月 18 日に分解して蛹を取り出し、 $27 \pm 1^\circ\text{C}$ 、 $70 \pm 10\%$ RH、14L10D の恒温温室で羽化させた未交尾雌である。供試時には 50Gy 照射雄は羽化 8 日齢前後、健全雌は羽化 11 日齢前後と推測された。

試験は、まず発泡スチロール小片を充てんしたポリプロピレン製の容器（ $30\text{cm} \times 36.5\text{cm}$ 、深さ 12cm、蓋孔ゴース張り）に、サツマイモ塊根 1 個を埋め込み、第 V-2 表に示す頭数の雌雄供試虫を 12 月 28 日に放飼し、交尾機会を与えた。供試虫のいずれの組み合わせも反復数は 3 回とした。次に、放飼 2 日後の 12 月 30 日に、健全雌のみを発泡スチロール小片を充てんし、サツマイモ塊根 1 個を入れた別のポリプロピレン製の容器（ $19\text{cm} \times 27\text{cm}$ 、深さ 13cm、蓋孔ゴース張り）に移した。供試虫は 2 週間産卵させ、その間、1 週間目にサツマイモ塊根を 1 回交換した。さらに取り出したサツマイモ塊根をノコクズ（水分含量 50～55%）を入れたポリプロピレン製の容器に 16 日間保管した後、取り出して分解し、塊根内のアリモドキゾウムシの虫数を計数した。試験は $27 \pm 1^\circ\text{C}$ 、 $70 \pm 10\%$ RH、14L10D の恒温温室で行った。

性的競争力は Fried (1971) の指数 C_f の孵化率を次世代幼虫数に置き換えた次式 C_f' によって推定した。

$$C_f' = (Hn' - Hc') / (Hc' - Hs') \times N/S$$

ここで

Hn' : 健全虫同士が交尾したときの 1 雌当たりの次世代幼虫数

Hs' : 照射雄と健全雌が交尾したときの 1 雌当たりの次世代幼虫数

Hc' : 健全雌をめぐって S 頭の照射雄と N 頭の健全雄を競争させた時の 1 雌当たりの次世代幼虫数

結 果

1 性的競争力に及ぼす雄密度の影響

C_f 値、 C_f' 値に及ぼす雄密度の影響についてはこれまで考慮されていないことから、まず雄密度が性的競争力に与える影響を調査した。第 V-5 表に健全雌数ならびに 50Gy 照射雄：野生雄の比率を一定にし、雄密度のみを変えた場合の次世代成虫数（塊根からの脱出成虫数）を示した。いずれの組み合わせにおいても、1 週目産卵と 2 週目産卵でほぼ同程度の平均脱出成虫数がみられた。2 週間産卵させて得られた平均脱出成虫数は、50Gy 照射雄：野生雄が 48：48 の時に最も多く、平均 103.5 頭であった。次いで 24：24、12：12、96：96 の順であり、平均脱出成虫数が最も多かった 48：48 と、最も少なかった 96：96 では約 2.4 倍の差があった。しかし、各密度間で統計的に有意な差は認められなかった（Kruskal-Wallis test, $p > 0.05$ ）。

2 50Gy 照射雄成虫の性的競争力

次世代幼虫数から求めた、50Gy 照射雄の性的競争力 C_f' を第 V-6 表に示した。 C_f' 値は、産卵 1 週目が 0.94～1.79

平均 1.33, 産卵 2 週目が 0.39 ~ 1.51, 平均 1.13 を示し, 50Gy 照射雄: 野生雄が 16:8 の場合を除き, 他の比率では Cf' 値は 1 以上となった. また, 全平均 Cf' 値は 1.21 となり, 今回用いた 50Gy 照射雄は, ポリプロピレン製容器内の狭い空間では野生雄と同等以上の性的競争力を有しているものと考えられた.

考 察

アリモドキゾウムシ雌成虫は, 交尾すると雄に対する誘引性を失うため, 野外では一度交尾すると, 以後の交尾機会はほとんどないとされている (Sugimoto et al., 1996). 一方, 本種の羽化脱出時の性比は, ほぼ 1:1 (Reinhard, 1923; Mullen, 1981; Chiranjeevi et al., 2002) であるが, 雄の寿命は長く, かつ多数回の交尾が可能であるので (Sugimoto et al., 1996), 野外では交尾可能な未交尾雌数に対する交尾可能な雄数の比率 (実効性比) が高く, 今回

行った試験で最も高かった 16 倍より高くなる可能性も考えられる. 今回の試験では, 統計的な有意差はみられなかったが, 雄密度が雌の 2 ~ 8 倍の範囲であれば, 雄密度が高いほど 50Gy 照射雄の性的競争力は下がり, 逆に雄密度が雌の 16 倍になると, 50Gy 照射雄の性的競争力が高くなる傾向がみられた. この原因は不明であるが, 野外では局部的に雄密度が雌密度の 16 倍より高くなることも考えられることから, さらに雄密度が高い場合の検討が必要かもしれない.

伊藤ら (1993) は累代飼育虫を用い, 蛹化 5 日齢に対して, γ 線を 50Gy 照射して測定した Cf 値を 0.38 ~ 0.63 と報告している. Cf 値と Cf' 値では算出方法が異なるため単純には比較できないが, 今回行った試験条件での照射雄は, 伊藤らの用いた照射雄より高い性的競争力をもっていると考えられた. その要因の一つとして, 供試虫の照射時期の差が考えられた. すなわち, 伊藤ら (1993) の試

第 V - 5 表 照射雄および野生雄の密度が性的競争力に及ぼす影響

供試虫数			I/W ^{a)}	$(I+W)/F$ ^{b)}
50Gy 照射雄	野生雄	健全雌		
96	: 96	: 12	1.0	16.0
48	: 48	: 12	1.0	8.0
24	: 24	: 12	1.0	4.0
12	: 12	: 12	1.0	2.0

供試虫数			塊根脱出成虫数 (次世代成虫数) ^{c)}			比 率 ^{d)}
50Gy 照射雄	野生雄	健全雌	産卵 1 週目	産卵 2 週目	計	
96	: 96	: 12	17.8 ± 4.4	24.8 ± 8.5	42.5 ± 8.7	0.63
48	: 48	: 12	46.5 ± 15.2	57.0 ± 15.7	103.5 ± 26.3	1.53
24	: 24	: 12	43.0 ± 14.2	45.0 ± 11.5	88.0 ± 25.6	1.30
12	: 12	: 12	34.3 ± 11.2	33.3 ± 7.4	67.5 ± 14.4	1.00

*¹ 27 ± 1 °C, 70 ± 10 % RH, 14L10D 条件下

^{a)} 50Gy 照射雄 / 野生雄

^{b)} (50Gy 照射雄 + 野生雄) / 健全雌

^{c)} 平均値 ± SE

^{d)} 50Gy 照射雄: 野生雄: 健全雌が 12:12:12 の塊根脱出成虫数の合計値に対する, 各区の塊根脱出成虫数の合計値の比率.

第V-6表 蛹期に50Gy照射した成虫の平均性的競争力

交尾時供試虫数 ^{a)}				I/W ^{b)}	$(I+W)/F$ ^{c)}	産卵 1 週目 ^{d)}			
50Gy 照射雄：野生雄：健全雌						健全雌	幼虫数 ^{e)}	Cf ^{f)}	
24	:	0	:	12	∞	2.0	10.7	0.0 ± 0.0	—
20	:	4	:	12	5.0	2.0	11.7	35.0 ± 25.5	1.12
16	:	8	:	12	2.0	2.0	11.7	80.3 ± 9.9	0.94
12	:	12	:	12	1.0	2.0	11.0	93.5 ± 15.1	1.47
8	:	16	:	12	0.5	2.0	11.7	122.1 ± 12.9	1.79
0	:	24	:	12	0.0	2.0	12.0	231.3 ± 20.4	—

交尾時供試虫数 ^{a)}				産卵 2 週目			合 計		
50Gy 照射雄：野生雄：健全雌				健全雌	幼虫数	Cf ^{f)}	幼虫数	Cf ^{f)}	
24	:	0	:	12	9.0	0.0 ± 0.0	—	0.0 ± 0.0	—
20	:	4	:	12	10.0	35.2 ± 24.0	1.12	70.2 ± 49.5	1.12
16	:	8	:	12	10.0	130.7 ± 23.6	0.39	211.0 ± 32.8	0.60
12	:	12	:	12	10.0	94.2 ± 36.9	1.48	187.7 ± 49.5	1.48
8	:	16	:	12	11.0	132.9 ± 35.7	1.51	254.9 ± 48.5	1.65
0	:	24	:	12	12.0	233.3 ± 38.4	—	464.7 ± 33.5	—

*) 27 ± 1 °C, 70 ± 10 % RH, 14L10D 条件下

a) 50Gy照射雄／野生雄

b) (50Gy照射雄＋野生雄)／健全雌

c) 平均値 ± SE

d) 健全雌12頭当たり幼虫数

f) 本文参照

験では、蛹化5日齢（羽化2～3日前）の蛹にγ線を照射し供試虫としたのに対し、今回の試験で用いた供試虫は、羽化前後2日程度の蛹と成虫が寄生するサツマイモ塊根にγ線を照射し、イモから脱出してきた成虫を用いた。岩元・荒巻（1990）は、アリモドキゾウムシは若いステージほどγ線に対して感受性が高く、蛹期でも日齢が若いほど感受性が高いと述べている。今回の試験で用いた供試虫は、伊藤ら（1993）の試験と比較し、照射時期の違いによってγ線によるダメージがより少ない個体が多かったためではないかと考えられる。喜界島で行われている根絶防除事業では、不妊虫を粉末状蛍光色素でマーキングした後、15℃前後に冷却して輸送し、放飼している。このため、野外に放飼不妊虫に近い条件下で性的競争力を比較するためには、これらマーキングや輸送の影響も考慮に

入れた実験条件を設定する必要がある。

第4節 蛹期にγ線を50Gy照射された雄成虫の未交尾野生雌発見能力

放飼照射雄の包括的な性的競争力を決定するパラメータのうち、（相対繁殖期間）×（未交尾雌への移動能力）は、根絶防除事業での合成性フェロモントラップによって誘殺される照射雄と野生雄の比（ M/U 比）、および照射雄と野生雄の加入率によって推定することができる（第V章第3節）。このうち、合成性フェロモンにおける M/U 比は、設置期間2日間の誘殺虫数を用いて算出される。一方、アリモドキゾウムシの雌成虫は初期多回交尾型で、フェロモンの分泌特性から、野外における雌成虫の交尾回数は1回が大部分と思われる（Sugimoto et al., 1996; 桜谷ら, 2000）、

より早く未交尾雌に到達した雄個体が、交尾を有利に行うことができると考えられる。したがって、根絶防除事業において、合成性フェロモンの誘殺虫数を用いて雄成虫の包括的性的競争力を求める場合、短時間で未交尾雌へ到達できる個体数を、照射雄と野生雄で比較し、より正確な包括的性的競争力を得るために値を補正する必要がある。そこで、合成性フェロモンからの距離をかえて 50Gy 照射雄と野生雄を放飼し、合成性フェロモンへの単位時間あたりの到達数（捕獲数）を比較した。

試験材料および方法

試験は 1999 年に 2 回、2000 年に 3 回の合計 5 回実施し、1999 年は農試大島支場内で、2000 年は奄美大島の笠利町和野で行った。農試大島支場では未耕作の圃場を、和野ではサトウキビ畑作地帯にある、各種雑草やリュウキュウマツが点在しているほぼ平坦な約 2ha の空き地を用いた。

供試虫には 50Gy 照射雄と野生雄を用いた。50Gy 照射雄の飼育状況、野生雄の捕獲日、ならびに放飼日、放飼地点毎の放飼頭数とマーク色を第 V-6 表に示した。野生雄は奄美大島の笠利町、または龍郷町のサツマイモ圃場において、プラスチック型のフェロモントラップ（第 II-10 図）を用いて捕獲した個体である。また、50Gy 照射雄には累代飼育虫を用い、蛹期に ^{60}Co の γ 線を 50Gy 照射したサツマイモ塊根から脱出した個体を用いた。

野生雄と 50Gy 照射雄は異なる色の油性インク（ペイントペン[®]、緑、青、橙、紫、金、銀色、PILOT 株式会社製）を用いて翅鞘にマークし区別した（第 II 章第 2 節）。マーク後、放飼までは、丸形のプラスチック容器（内径 9cm、高さ 6cm、蓋孔はゴース張り）に 1 容器当たり 10 ～ 80 頭入れ、餌としてサツマイモ小片を与えた。27 ± 1 °C、70 ± 10 % RH、14L10D の恒温室で飼育した。供試した 50Gy 照射雄は放飼時には羽化 1 ～ 2 週間齢と推測され、合成性フェロモンに反応した個体のみを使用した。

放飼は実験地の中央部からそれぞれ 45° おきの 8 方向の、中央部から 2.5 m、5 m、10 m、20 m、30 m 離れた地点から行い（以下、'放飼距離'）、試験回毎に 2 つあるいは 3 つの距離の組合せを同時に実施した（第 V-7 表）。16 時から 17 時に放飼を行い、放飼後、直ちに試験地の中央部にロート型のフェロモントラップ（第 II-4 図）を設置して合成性フェロモン（Heath et al., 1986）を 100 μg 含浸させたゴムセブタム（アリモドキコール II、サンケイ化学株式会社製）をセットした。トラップへの捕獲虫は、最初の 30 分は 10 分間隔で、その後は放飼 1 時間

後、2 時間後、1 日後、2 日後に回収し、マーク色別に虫数を計数した。なお、今回は捕獲容器に入らなくても、回収時にトラップのいずれかの部分に到達した個体はすべて捕獲虫とみなした。

結 果

50Gy 照射雄で最も早い個体は、放飼後 10 分以内に 5 m、11 ～ 20 分以内に 20 m、31 ～ 60 分以内に 30 m の放飼距離から、フェロモントラップに到達した。一方、野生雄は放飼距離が 20 m 以内であれば、最も早い個体はほぼ 10 分以内にフェロモントラップに到達した（第 V-8 表）。また、野生雄では 1 頭だけではあるが、10 分以内に 30 m の放飼距離からフェロモントラップに到達した個体もみられた。捕獲された 50Gy 照射雄と野生雄の比（= 捕獲 50Gy 照射雄 / 捕獲野生雄 以下、'IC/WC'）は、放飼 60 分後で、放飼距離 2.5 m が 0.34、5 m が 0.49、10 m が 0.18、20 m が 0.07、30 m が 0.04 を示し、2.5 m と 5 m では 5 m がやや高い値を示したが、10 m 以遠では遠くなるほど低くなった。また、放飼後、時間の経過とともに IC/WC は高くなり、放飼 2 日後には放飼距離 2.5 m、5 m、10 m が 0.83 ～ 0.88、20 m と 30 m が 0.42 ～ 0.43 となったが、いずれの放飼距離も 1 以下であった。

考 察

放飼 2 日後における IC/WC は、放飼距離が 10 m 以下においても 0.9 以下であり、性フェロモンを放出する未交尾雌までの距離、個体数が同じ場合、50Gy 照射雄は野生雄に比べて、未交尾雌に到達できる個体が少ないことが示唆された。また、IC/WC は時間が経過して初めて 1 に近づくことから、未交尾雌を発見して到達するまでの時間（以下、'到達速度'）についても、50Gy 照射雄は野生雄に比べて劣っていると考えられる。アリモドキゾウムシ雌成虫は交尾後、性フェロモンを放出しなくなることから（Sugimoto et al., 1996）、未交尾雌に対する到達速度が性的競争力に大きく影響すると考えられる。アリモドキゾウムシの交尾時間に関する知見がないことから、交尾継続時間を 60 分程度と仮定し、放飼 60 分後の IC/WC を、未交尾雌に到達できる照射雄と野生雄の競争力を示す指標とみなすと、未交尾雌と雄成虫の距離が 2.5 m ～ 5 m の場合、50Gy 照射雄の競争力は、野生雄の 1/2 ～ 1/3 程度と考えられる。また、この値は未交尾雌までの距離が離れるほど、さらに小さくなることが示唆された。したがって、放飼雄の包括的性的競争力を、根絶防除事業での合成性フェロモントラップによって得られる誘殺虫の M/U 比を利用して

第V-7表 供試虫の飼育状況、捕獲日ならびに放飼頭数

試験回	供試虫	産卵期間	照射日	捕獲日	放飼日
1	50Gy 照射雄	1999. 3.15-19	4.15	—	5. 1
	野生雄	—	—	4.19-23	
2	50Gy 照射雄	1999. 5.21-25	6.21	—	6.30
	野生雄	—	—	6.17-28	
3	50Gy 照射雄	2000. 7.28-8. 1	8.28	—	9. 5
	野生雄	—	—	8.28-9. 1	
4	50Gy 照射雄	2000. 8.21-25	9.21	—	10. 4
	野生雄	—	—	9.25-29	
5	50Gy 照射雄	2000. 9.11-15	10.12	—	10.25
	野生雄	—	—	10.16-20	

試験回	供試虫	放飼頭数 ^{a)}				
		2.5m ^{b)}	5m	10m	20m	30m
1	50Gy 照射雄	120	160	—	—	—
	野生雄	120	160	—	—	—
2	50Gy 照射雄	80	160	320	—	—
	野生雄	80	160	320	—	—
3	50Gy 照射雄	—	—	—	480	640
	野生雄	—	—	—	480	640
4	50Gy 照射雄	—	—	320	480	640
	野生雄	—	—	320	480	640
5	50Gy 照射雄	—	—	320	480	640
	野生雄	—	—	320	480	640

^{a)} 8地点の合計放飼頭数.^{b)} 放飼距離を示す. 詳細は本文を参照.

第V-8表 放飼距離毎の累積再捕虫率

放飼距離 ^{a)}	試験回	供試虫	捕虫率 (%)						
			10分後 ^{b)}	20分後	30分後	60分後	120分後	1日後	2日後
2.5 m	1	照射雄 ^{c)}	0.0	2.5	5.0	12.5	20.8	75.8	77.5
		野生雄	1.7	13.3	30.8	46.7	75.0	96.7	96.7
	2	照射雄	2.5	8.8	15.0	26.3	46.3	86.3	86.3
		野生雄	21.3	37.5	43.8	63.8	77.5	97.5	97.5
	平均	IC / WC ^{d)}	0.06	0.21	0.25	0.34	0.44	0.83	0.84
5 m	1	照射雄	0.0	1.3	3.8	13.1	23.8	70.6	71.9
		野生雄	0.0	5.6	14.4	27.5	51.9	83.8	84.4
	2	照射雄	2.5	7.5	15.0	25.6	37.5	88.1	88.1
		野生雄	16.3	31.3	40.0	50.6	61.3	96.3	96.3
	平均	IC / WC	—	0.24	0.32	0.49	0.54	0.88	0.88
10 m	2	照射雄	0.0	1.3	1.9	5.6	15.9	80.3	82.5
		野生雄	1.3	7.2	16.6	25.6	42.8	81.6	82.2
	4	照射雄	0.0	0.0	0.9	4.4	6.3	47.2	52.5
		野生雄	4.1	11.3	12.2	14.7	21.6	71.6	73.8
	5	照射雄	0.0	0.0	0.0	0.6	5.0	46.9	52.2
		野生雄	7.5	12.8	15.9	24.7	46.6	65.0	67.2
	平均	IC / WC	0.00	0.06	0.06	0.18	0.26	0.79	0.83
20 m	3	照射雄	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.3	—
		野生雄	0.6	2.7	3.8	11.5	22.1	75.2	—
	4	照射雄	0.0	0.0	0.0	0.8	2.1	30.4	36.7
		野生雄	0.4	1.7	2.5	5.0	9.8	57.7	60.2
	5	照射雄	0.0	0.4	0.4	0.8	2.7	9.2	15.4
		野生雄	0.8	6.3	10.0	20.4	40.8	61.7	64.2
	平均	IC / WC	0.00	0.02	0.01	0.07	0.09	0.28	0.42 ^{d)}
30 m	3	照射雄	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	7.0	—
		野生雄	0.0	0.3	0.5	5.8	11.4	57.2	—
	4	照射雄	0.0	0.0	0.0	0.5	1.4	22.8	29.8
		野生雄	0.0	0.8	1.9	4.1	6.3	54.4	57.5
	5	照射雄	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	11.6	18.6
		野生雄	0.2	2.2	4.2	12.2	27.7	51.1	54.2
	平均	IC / WC	—	0.00	0.00	0.04	0.09	0.26	0.43 ^{d)}

^{a)} 合成性フェロモントラップからの距離を示す。^{b)} 放飼後の経過時間を示す。^{c)} γ 線 50Gy 照射虫。^{d)} 捕獲 50Gy 照射雄／捕獲野生雄。

求める場合、性的競争力を算出するための M/U 比の値を少なくとも $1/2 \sim 1/3$ 程度低く見積もることが妥当と考えられる。

不完全不妊雄を用いて不妊虫放飼法による防除を行った場合、根絶間際には照射虫の性的競争力に関係なく、完全不妊雄に切り替えることになる。鈴木・宮井のモデル(2000)を用いて、不完全不妊虫から完全不妊虫に放飼を切り替えるべき時期をより正確に推定するためには、今後、完全不妊雄である 80Gy 照射雄成虫の到達速度についても調査が必要である。

第5節 蛹期に50Gy照射された雄成虫の冬季における分散能力

アリモドキゾウムシ成虫の移動分散については、従来は定性的な観察、実験に基づく報告が多かったが(Rainhard, 1923; Cockerham et al., 1954; Sherman and Tamachiro, 1954; Chalfant et al., 1990; Sakuratani et al., 1994)、近年、実験機器の進歩により、室内でアクトグラフやフライトミルを用いた定量的な試験が行われるようになった(守屋, 1994, 1997; Moriya, 1995b; Shimizu and Moriya, 1996b; Moriya and Hiroyoshi, 1998; 守屋・宮竹, 2000; Moriya and Miyatake, 2001)。また、雄成虫については、性フェロモンの同定、合成後(Heath et al., 1986)、合成性フェロモンを利用した野外での放飼・再捕獲試験が活発に行われ、分散距離や分散の季節的変動などについて調査がなされている(Mason et al., 1990; 安田ら, 1992; Sugimoto et al., 1994b; Miyatake et al., 1995, 1997, 2000)。しかし、これらの試験はいずれも飼育虫、あるいは野外で捕獲した野生虫を未照射のまま用いた結果であり、照射虫(不妊虫)に関する試験はこれまで報告がない。不妊虫放飼法の実施に際して、野生虫の多発生場所が特定されない不妊虫放飼開始当初、あるいは根絶後の侵入警戒防除時など、広範囲に不妊虫放飼を行う場合、対象地域全域に均一に不妊虫を放飼することが困難なため、一定間隔の距離をおいた定点にまとめて放飼されること(定点放飼)が予想される。不妊虫の移動分散距離は、このような定点放飼を行う場合、放飼地点の間隔を決定するために重要な情報となる。そこで、まず、移動分散行動が少ないため、比較的小面積で精度の高いデータが得られると考えられる低温期に、標識再捕法により不妊雄成虫の分散距離を測定し、低温期における放飼地点の間隔について検討した。さらに、高温期における過去の同様な試験結果も踏まえて、高温期における照射虫の移動分散試験について考察する。

試験材料および方法

試験はいずれも12月に行い、1996年は奄美大島の笠利町節田、1997年は笠利町和野で行った。節田はサトウキビを主体とした畑作地帯で、一部にサツマイモ畑がみられる。試験地の中央には北西から南南東、東北東から西南西に走る農業用道路が、ほぼ直角に交わる交差点がある。和野は第V章4節と同じ試験地である。

供試虫には、4種類の雄成虫(野生雄、飼育雄、50Gy照射雄、50Gy照射M雄)を用いた。野生雄は奄美大島の笠利町または龍郷町のサツマイモ圃場において、プラスチック型のフェロモントラップ(第II-10図)で捕獲した。飼育雄、50Gy照射雄、50Gy照射M雄は累代飼育虫を用い、飼育雄は放射線を照射していない健全雄成虫、50Gy照射雄は蛹期に ^{60}Co の γ 線を50Gy照射した雄成虫、50Gy照射M雄は根絶防除事業で放飼している照射虫と同様に、50Gy照射雄に粉末蛍光色素(Corona magenta)を10,000頭当たり1gの割合で放飼前日に粉衣した雄成虫である。なお、飼育雄は累代飼育の影響を、50Gy照射M雄は蛍光色素によるマーキングによる影響を、それぞれ調査するため併せて試験を行った。

供試虫は各々の種類を区別するために、異なる色の油性インク(ペイントペン[®]、緑、青、橙、金、銀色、PILOT株式会社製)のうち、1回の試験でいずれか4色を用いて翅鞘にマークした(第II章第2節)。マーク後、放飼までは、ポリプロピレン製の容器(30cm×36.5cm、高さ12cm、蓋は網張り)に入れ、餌としてサツマイモ塊根を与えた。27±1℃、70±10%RH、14L10Dの恒温室で飼育した。供試した50Gy照射雄と50Gy照射M雄は、放飼時には羽化後1～2週齢と推測された。

放飼は14時～16時の間に行い、1回の試験で各供試虫を、それぞれ900頭から2,200頭程度放飼した(第V-9表)。捕獲は放飼1, 3, 5, 7日後に、放飼地点から90度角の4方位の5, 10, 25, 50, 75, 100m地点(和野は2方向は75mまで)に、ロート型フェロモントラップ(第II-4図)を一定期間(2時間以内)設置して捕獲した。捕獲された虫は、その場で肉眼によりマーク色別に計数し、捕獲されたトラップの周辺に再放飼した。なお、トラップ内の捕獲容器に入らなくても、トラップのいずれかの部分にいた個体はすべて捕獲虫とみなした。平均分散距離は、捕獲されたすべてのマーク虫の分散距離を合計し、合計値を捕獲虫数で割って求めた。また、統計解析にはR Version 2.1.1(<http://cran.md.tsukuba.ac.jp/> (2005))を用いた。

結 果

試験期間中の平均気温は1996年が15.5℃、1997年が18.8℃であった(第V-7図)。1996年の日平均気温は

放飼日が20℃を超え試験期間中で最も高く、その後は徐々に低下し、3日目以降は13～15℃で推移した。1997年の日平均気温は放飼日、ならびに放飼後3～5日は20℃前後で推移した。試験期間中16℃を下回ることにはなかった。再捕率は放飼後次第に低下し、放飼7日後で1996年、1997年それぞれ、野生虫が5.2%、7.8%、飼育虫が2.1%、6.4%、照射雄が1.4%、1.9%、照射M雄が1.0%、4.8%であった（第V-9表）。全般的に野生虫、飼育虫は照射雄、照射M雄に比べて再捕率が高い傾向がみられた。最大分散距離は、野生虫、飼育虫が100m、照射雄が25m、照射M雄が50mであった（第V-9表）。また、平均分

散距離は、1996年は飼育雄を除くと、放飼1日後から7日後までほとんど変わらなかった（第V-8図）。一方、1997年は放飼後次第に長くなる傾向がみられたが、その伸びは非常に緩慢であった。放飼7日後の平均分散距離は、野生雄が9～13m、飼育雄が9～12m、照射雄が7m、照射M雄が7～8mであった。

放飼7日後の分散距離について、1996年は供試虫間に有意な差はみられなかった（Scheffe's method, $P>0.05$ ）。また、1997年は飼育雄と照射M雄の間のみ有意な差が認められた（Scheffe's method, $P<0.05$ ）。

第V-9表 アリモドキゾウムシ雄成虫の再捕率ならびに最大分散距離の推移

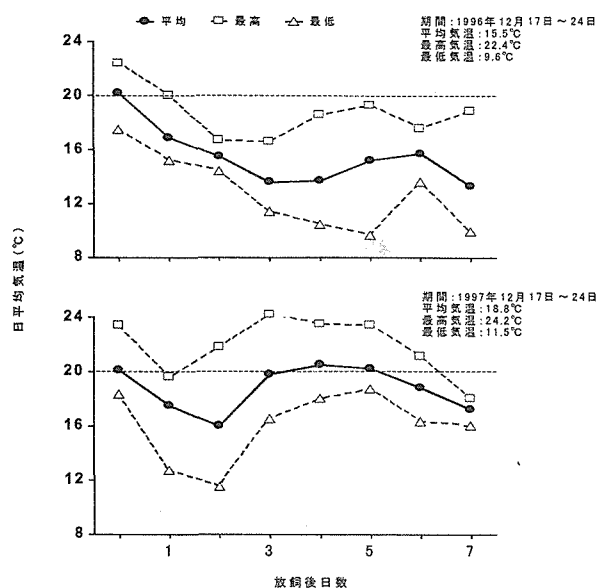
試験期間 試験地	供試虫	放飼頭数	再捕率 (%) / 最大分散距離 (m)			
			1日後	3日後	5日後	7日後
1996.12.17-24 節田	野生雄 ^{a)}	1,152	13.5/100	9.6/100	5.8/100	5.2/ 75
	飼育雄 ^{b)}	1,281	10.3/ 75	6.2/ 50	3.7/ 25	2.1/ 75
	照射雄 ^{c)}	1,163	7.7/ 25	5.2/ 25	2.2/ 25	1.4/ 25
	照射M雄 ^{d)}	936	2.8/ 50	2.1/ 25	1.1/ 25	1.0/ 25
1997.12.17-24 和野	野生雄	2,056	29.9/ 10	26.7/ 50	3.5/100	7.8/100
	飼育雄	2,199	29.8/ 50	20.9/ 50	3.2/100	6.4/ 50
	照射雄	1,412	10.9/ 10	9.4/ 25	0.7/ 25	1.9/ 25
	照射M雄	1,815	17.1/ 10	16.5/ 10	2.0/ 50	4.8/ 25

^{a)} 性フェロモントラップで野外で採集した雄成虫

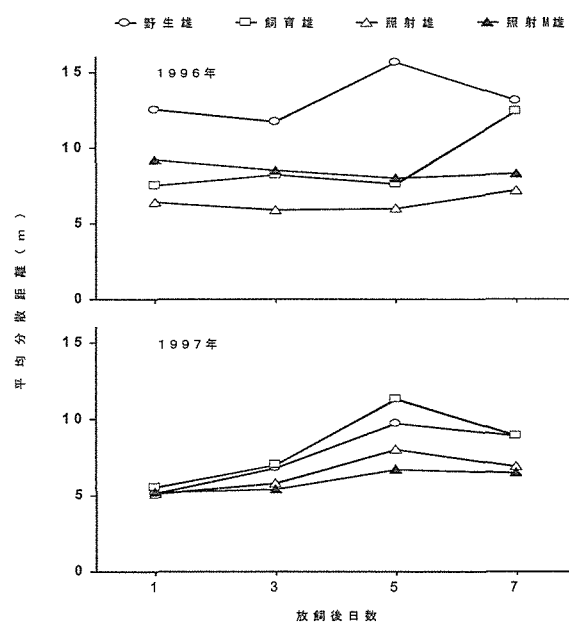
^{b)} 1990年または1994年から室内で累代飼育している雄成虫。

^{c)} 蛹期にγ線を50Gy照射した累代飼育雄成虫。

^{d)} 照射雄に粉末蛍光色素（Corona magenta）を1g当たり10,000頭の割合で、放飼前日に粉衣した雄成虫。



第V-7図 アリモドキゾウムシ雄成虫分散試験期間中の日平均気温、最高気温、最低気温の推移
名瀬測候所（鹿児島県名瀬市）観測



第V-8図 奄美大島の12月におけるアリモドキゾウムシ雄成虫の平均分散距離の推移

考 察

平均分散距離ならびに最大分散距離の結果から、累代飼育を開始してから2～7年程度経過しても、累代飼育雄成虫の明らかな分散能力低下はみられず、今のところ、現在の大量増殖法（上門ら, 1993; 宮路, 2000）による累代飼育が、雄成虫の分散能力へ与える悪影響は少ないと考えられる。また、放飼前日に粉衣する蛍光色素は、放飼時には肉眼でははっきり確認できる程度に虫体に付着しており、分散能力に対する悪影響が予想された。しかし、今回の試験では、照射雄と照射M雄で分散能力に明らかな差はなく、粉末蛍光色素によるマーキングが、アリモドキゾウムシ雄成虫の分散能力に与える影響は少ないと考えられる。

今後、 γ 線照射による分散への影響については、高温期に同様な試験を行い、分散行動に及ぼす気温の影響を明らかにする必要がある。その場合、これまでの分散能力に関する報告（安田ら, 1992; Sugimoto et al. 1994; Shimizu and Moriya, 1996b; Miyatake et al., 2000）から、野生虫では7日間で平均300～500 m程度分散することが予想される。また、本試験ならびに予備試験の結果から、照射虫は野生虫に比較して再捕率が低いことが予想される。放飼頭数は1回10,000頭以上、トラップは放飼地点から最低500 mまで、100 m以遠では8方位以上に設置する必要がある。

Miyatake et al. (1995, 2000) は標識再捕法によるアリモドキゾウムシ雄成虫の分散を調べた結果、分散距離は風向と気温の影響を受け、分散距離と試験期間の平均気温と正の相関があると述べている。奄美大島における実験では、分散傾向が比較的大きかった1996年の放飼初日と1997年は放飼3日目から5日目にかけて、日平均気温が20℃前後で推移しており、これらのことから、日平均気温20℃前後が本種雄成虫の分散が活発化する気温の目安と考えられる。Miyatake et al. (2000) は、試験期間中の平均気温が23℃を超えると雄成虫の分散距離が長くなることを示しており、今回の試験結果はこの値よりやや低く、より低温で雄成虫の活動が活発化する可能性が示唆された。

低温期の12月における50Gy照射雄の平均分散距離は、1週間で7～8 mであった。したがって、週1回50Gy照射雄を定点放飼し、放飼後1週間以内に、自力分散によって放飼対象地域内に均一に分布することを期待する場合、冬季の放飼地点の間隔は15 m前後が一つの目安と考えられる。しかしながら、放飼地点を15 m間隔で設置すると仮定した場合、喜界島全域での放飼地点数は約285,000となる。現在の予算、労力等を考慮した場合、1日で285,000地点に放飼する、あるいは毎週の放飼日数を増やすことは事実上不可能と考えられる。したがって、冬季に定点放飼を行う場合は、物理的な制約条件により、

放飼地域をある程度絞り込む必要があろう。また、放飼地点を数週間間隔でローテーションさせて、放飼することも一つの手段と考えられる。

第VI章 総合考察

不妊虫放飼法（SIT）は、大量の不妊化した雄成虫を継続的に放飼することにより、野生虫同士の交尾機会を減らし、次世代を次第に減少させて最終的には根絶を目指す方法である。SITの特徴として、対象害虫のみに効果があり、環境に対する影響が非常に小さく、また、地域全体の対象害虫を根絶可能なことがあげられる。一方、SITによって害虫の防除を行う場合、この技術を成立させるために、Knippling (1964, 1989) は、次のような条件や要因を提起している。(1)実用的な方法で、虫質をなるべく正常な状態を保ち、対象昆虫を大量増殖できること。(2)交尾行動、交尾競争力に悪影響を及ぼすことなく昆虫を不妊にできること。(3)低密度期における自然個体群の密度が知られていること。(4)SITを行えるレベルまで他の方法で自然個体群を減らすことができること。(5)放飼不妊虫が、交尾のために自然個体群と十分競争できるように空間的に配置され、交尾時間についても野生個体群と一致すること。(6)最初の不妊虫放飼倍率を決定するために自然個体群の通常の増殖率が知られていること。(7)従来の防除費用プラス被害額が、抑圧防除費用プラス不妊虫放飼に要する費用より高いこと。(8)再侵入により根絶状態を保つことが困難な場合、不妊虫放飼を継続する費用が従来の防除費用プラス被害額に見合うこと。(9)費用の点で見合わなくても、従来の防除法では人間や環境に対して危険が生ずる場合。(10)放飼する不妊虫が無害であるか、あるいはその被害が防除の利益に比べてはるかに小さい場合。

これらの条件を満たすためには、野外個体群の密度抑圧防除技術、放飼虫の大量増殖技術、不妊化技術、放飼技術、ならびに防除効果確認技術などの根絶防除技術の開発を行わなければならない。また、防除地域での対象害虫の発生生態についての調査が不可欠である。さらに、実施にあたっては、SITと従来の防除法について、コストならびに周辺環境に与える影響などの比較検討を行う必要がある。本研究では、サツマイモの重要害虫であるアリモドキゾウムシについて、奄美群島での発生生態を明らかにするとともに、SITを主体とした本種の根絶防除技術に関する研究を行った。ここでは、同地域で根絶に成功したウリミバエの事例（鹿児島県農政部・大島支庁ウリミバエ防除対策室, 1991）と比較しつつ、本研究の結果を総括し、今後の

奄美群島におけるアリモドキゾウムシの根絶防除について考察する。

1 奄美群島でのアリモドキゾウムシ根絶事業

鹿児島県から沖縄県にかけての南西諸島では、本土には侵入していない農業上重要な病害虫が発生しており、植物防疫法により特殊病害虫として指定され、未発生地への寄主植物等の移動が禁止または制限されている。これまで、特殊病害虫のミカンコミバエ、ウリミバエについては、雄除去法あるいは不妊虫放飼法による根絶防除事業が実施され、それぞれ1987年と1993年に南西諸島全域からの根絶を達成した（Yoshizawa, 1997）。奄美群島におけるアリモドキゾウムシの根絶防除は、同群島でのウリミバエ根絶を目前にした1988年から、後継事業として実施されることになった（大村, 2000）。まず、1988年度から1993年度までが「アリモドキゾウムシ根絶技術確立事業」として、不妊虫放飼に関する各種の基礎的な研究、ならびに無人島でのパイロット試験が行われた。続いて、1994年度から2000年度までは、「アリモドキゾウムシ根絶実証事業」として、喜界島上嘉鉄地区において、不妊虫放飼法による防除試験が実施された（大村, 2000; 湯田ら, 2000; 末永・藤川, 2003, 杉本, 2006）。さらに、2001年度から2012年にかけて、喜界島での本格的な根絶を目指し「アリモドキゾウムシ根絶防除事業」が行われている（林川, 2005）。

2 密度抑圧防除

SITでは、防除地域の野生虫に対して放飼する不妊虫数が多いほど、その効果は高まる。しかし、放飼する不妊虫数は、予算、増殖施設の規模等の制約により限界があるため、不妊虫放飼前に密度抑圧防除を行ない、野生虫の密度を低下させることが、SIT成功の重要な要件の一つとなる。喜界島でのウリミバエ根絶防除では、密度抑圧防除として、雄成虫を対象に誘引剤と殺虫剤を含浸させた木綿ロープ、あるいはファイバボード製誘殺板が定期的に散布された。また、雌雄成虫を対象にマイクロカプセル化誘殺剤（キュウルア+MEP等）とプロテインを混合した、あるいは殺虫剤（マラソン）とプロテインを混合した誘殺剤が散布された（福島・田中, 1985）。一方、アリモドキゾウムシの密度抑圧防除においては、雄成虫を対象に、合成性フェロモン（スウィートルビルア）と殺虫剤（MEP）を6cm×6cm×厚さ0.5cmのファイバボードに含浸させた誘殺板（アリモドキコール、サンケイ化学株式会社製、'テックス板'；瀬戸口ら, 1991）が利用されている。また、直径2mmの珪藻土の粒子に合成性フェロモンと殺虫剤を含浸させた粒剤（アリモドキコール粒剤、サンケイ化

学株式会社製; 安田ら, 2004）についても、実験的に散布が行われた。これらは、いずれも合成性フェロモンを誘引剤とする雄成虫の大量誘殺用防除資材で、雌成虫に対しては効果が期待できない。また、フェロモン剤の特性上、拡散が妨げられる遮蔽物がある場所では効果が低減することが予想される。アリモドキゾウムシ根絶実証事業では、殺虫剤による密度抑圧防除も試みられたが、今後広域での殺虫剤散布は、環境保全上、実行不可能である。生物的防除法は、一般的に環境負荷が少なく、雌雄の性別に関係なく効果があるため、理想的な防除法である。アリモドキゾウムシに対する生物的防除法に関する試験は、1990年以降、昆虫病原性線虫を中心に報告がみられるようになった。今回供試した昆虫病原性線虫 *S. carpocapsae* (All) は、室内では雌雄のアリモドキゾウムシ成虫に対して高い殺虫活性がみられた（第IV章第1節）。また、サツマイモ圃場での試験においては、防除効果は認められるものの化学殺虫剤には劣り、サツマイモの経済栽培上、単剤使用では効果不足であったが、密度抑圧防除資材としては利用可能と考えられた（第IV章第2節）。国内では、アリモドキゾウムシの生物的防除資材として、天敵糸状菌 *M. anisopliae* や *B. bassiana* についても検討がされているが、いずれも *S. carpocapsae* と同様に、室内では高い効果が認められるものの、圃場レベルでは十分な効果は得られていない（安田, 1998; 鳥越ら, 2000）。したがって、これら昆虫病原性線虫や天敵糸状菌を野外で有効に利用するには、Yasuda（1999）が *B. bassiana* の感染率を高めるために用いた合成性フェロモンを利用した感染装置、あるいはオイル混入（安田ら, 2000）など、他の資材を用いた複合的な防除方法についての検討が不可欠である。

奄美群島では、まず喜界島においてSITを主体としたアリモドキゾウムシの本格的な根絶防除が着手される。これに先立ち、喜界島におけるアリモドキゾウムシ雄成虫の低密度期の密度を推定した結果、80万頭以下と見積もられた。SITによる根絶を目指すには、不妊虫の放飼可能頭数の制約から、野生雄個体総数を最低15万頭（26頭/ha）程度まで低減する必要があると考えられる（第II章第2節）。喜界島でのアリモドキゾウムシ根絶防除は、全島を同時に行うのではなく、島内を数ブロックに分けて、順次不妊虫放飼、根絶を実施する計画である（鹿児島県大島支庁農林課特殊病害虫係・農業試験場大島支場, 2004, 2006; 林川, 2005; 春原, 2007）。根絶防除計画には期限が設けられているため、各ブロックの根絶防除実施期間は短くなり、より密度抑圧防除の重要性が増す。一方、防除区域が小さくなる分、綿密な密度抑圧防除の実施が可能になることから、SITの妨げとなるアリモドキゾウムシ

のいわゆるホット・スポット (Shiga, 1986; 仲盛ら, 1993) を効率よく探索し、防除していくことが、早期根絶を目指す上で重要と考えられる。喜界島全島での本種の分布を調査した結果、ほぼ島内全域で分布が確認され (第Ⅱ章第1節)、本種の分布は寄主植物のノアサガオ、グンバイヒルガオの分布と関係があることが示唆された。喜界島では、ノアサガオは道路法面や空き地、畑地の畦畔部などほぼ島内全域に、グンバイヒルガオは海岸線の石灰岩地帯に広がっていることが多い。また、喜界島は奄美群島の他の島嶼と比べて急峻な山間部が少なく、野外作業の障害となるハブ (毒蛇) も居ないことから、密度抑圧防除の手段として、これら寄主植物の除去作業は十分実行可能と考えられる。一方、山間部が多い奄美大島、徳之島での今後の防除計画を視野に入れ、喜界島での根絶防除をモデルケースとして考えた場合、あるいは労力面から、寄主植物除去による物理的な密度抑圧防除は可能な限り回避すべきである。しかし、世界的にみて本種の SIT による大面積での根絶の成功例はなく、手段の如何を問わず、まず喜界島で根絶を達成することを優先させるべきであると考えられる。この観点に立てば、不妊虫放飼の効率を少しでも高めるため、本格的な不妊虫放飼直前の密度抑圧防除の手段として、物理的な寄主植物除去についても検討が必要と考える。

密度抑圧防除の効果判定は、厳密には防除の前後で密度推定調査を行う必要がある。しかし、推定に要する労力や広域な面積を考えると、寄主植物における寄生率やフェロモントラップでの誘殺虫数の推移から判断することになるであろう。アリモドキゾウムシ雄成虫の低密度期と発生ピーク期の密度推定値は、調査期間の2年ともほぼ5倍前後 (第Ⅱ章第2節)、また、フェロモントラップでの発生ピーク時の誘殺虫数の年次変動は、4年間で3倍程度と比較的変動幅が小さかった (第Ⅱ章第1節)。このことから、現在定期的に行っているフェロモントラップ調査において、密度抑圧防除前後の発生ピーク時のデータから、密度抑圧防除の効果が判断できると考えられる。また、発生ピーク時と考えられる時期に、毎年フェロモントラップを追加して調査すれば、さらに詳細な地域毎の防除効果状況を把握することができ、その後の防除のための有益な情報が得られるであろう。

3 大量増殖

SIT において、放飼虫の大量増殖には、質、量とも安定的に供給することができる安価な人工飼料を利用することが望ましい。南西諸島において SIT により根絶に成功したウリミバエでは、幼虫飼育用に小麦フスマ培地を主体とした人工飼料が用いられ、沖縄県では最大で週産2億

頭以上の蛹を生産可能とした (垣花, 1996, 沖縄県農林水産部, 1994; 小山重郎, 1994)。世界で人工飼料を用いて飼育されている昆虫の種類は、湯島 (1962), Singh (1977), Singh and Moore (1985a,b) によると、約1,400種におよぶ。このうち、ゾウムシ類において、SIT を目的に人工飼料を用いた大量増殖に成功した事例としては、ワタの害虫であるワタミゾウムシ *Anthonomus grandis* Boheman の報告がある (Gast and Davich, 1966; Griffin et al., 1983)。また、サツマイモ害虫のイモゾウムシについては、現在、沖縄県において人工飼料による大量増殖技術の開発がすすめられている (Shimoji and Kohama, 1996; 下地, 2004)。アリモドキゾウムシの人工飼料については、イモゾウムシの人工飼料を用いた基礎的な試験 (Shimizu et al., 2007)、あるいは本種の摂食に対するサツマイモの刺激、阻害成分等の解明を目的にした報告 (Kays et al, 1993) があるだけで、大量増殖を目的にした研究報告はない。国内ではこれまで近畿大学農学部、沖縄県病害虫防除技術センター、ならびに鹿児島大学農学部・鹿児島県蚕業試験場・鹿児島県農業試験場大島支場のグループが、それぞれ幼虫の人工飼料の開発に取り組んでいるが、実用的な段階に至っていない。また、採卵方法が確立していないこともあり、当面、放飼虫の大量増殖は寄主植物であるサツマイモ塊根の利用に頼らざるを得ない。このような状況下では、生産頭数に比例して費用が増加するサツマイモ塊根のコスト低減は重要な課題である。第Ⅴ章第1節で示したように、原料用サツマイモ3品種 (コガネセンガン、シロユタカ、シロサツマ) は、アリモドキゾウムシ増殖用の餌として現在大量増殖に使用している青果用サツマイモ (土佐紅) と、ほとんど差がなく、利用可能であることが確かめられた。青果用サツマイモは、品質、形状がクラス分けされており、比較的容易に飼育目的あった品質、形状の塊根を安定的に手に入れることができる。反面、原料用サツマイモと比べて価格が高い。一方、原料用サツマイモは安価ではあるが、塊根の形状、大きさに大きなばらつきがあり、選別する場合、青果用サツマイモに比べて手間がかかることが予想される。このため、コスト低減をはかるために原料用サツマイモを利用する場合、選別費用をいかに抑えるかが重要な要素となる。また、一定の品質も確保する必要がある。選別を行う出荷元のJA等の生産団体、あるいは生産農家などの協力と理解が不可欠であろう。

鹿児島県でのアリモドキゾウムシの大量増殖では、当初、サツマイモ塊根重当たりの生産頭数を高めることに主眼が置かれ、生産された虫の大きさや虫質については、あまり考慮されなかった。これに対し、SIT の防除効果を高めるために、塊根重当たりの生産頭数は若干減少して

も、虫質の高い虫を生産すべきことが「ゾウムシ研究会^{*)}」で提唱された。これを受け、2004年までには母虫飼育密度を1998年の約60%に減少させたが、飼育方法の改善等により、塊根量あたりの生産頭数を減少させずに虫体サイズを大型化することに成功した。生産個体の体長は野外個体群と同等かそれ以上と推察され(第II章第3節)、また、照射虫の生存期間も長くなり虫質が大きく改善された(鹿児島県大島支庁農林課特殊病害虫係・農業試験場大島支場, 2005)。今後は、宮路ら(未発表)による羽化成虫に対する給餌など羽化後の成虫保管、あるいは放飼地までの輸送方法の改善など、羽化後放飼までの成虫の虫質管理方法に関しても検討が求められる。

沖縄県の大量増殖施設のウリミバエでは、大量累代飼育を続けることにより分散能力の低下が認められている(Nakamori and Soemori, 1981; Koyama, 1982; 仲盛, 1988)。また、ウリミバエでは長期の累代飼育によって、累代飼育虫と野生虫の間に多くの形質で差違がみられており(Suzuki and Koyama, 1980; Suenaga et al., 2000; 宮竹, 2002)、交尾時間の違いなど、SITを行う上で致命的となる事態が起こりうる可能性も報告されている。昆虫を人工的な環境で大量に飼育を続けると、飼育条件に適したもの以外は淘汰され続けていくことにより、飼育個体群の遺伝子プールが小さくなり、飼育虫の虫質の低下を招くか、野外個体群と異なる特質をもつ飼育系統を分化させることが知られている(Boller, 1972)。一方、上門ら(1993)の方法を基本とした大量増殖法で2~7年程度累代飼育したアリモドキゾウムシ雄成虫は、分散能力が低下していないことが明らかになった(第V節第5章)。このことは、大量増殖での累代飼育を起因とする虫質低下や形質変化を避けるための端緒となる可能性もあり、今後解析が必要であろう。

4 不妊化

⁶⁰Coのγ線を蛹期に50Gy照射されたアリモドキゾウムシは、妊性をもつ個体がわずかに残るものの、完全不妊化線量の80Gyを照射された個体に比べて、生存期間が延び、虫質の改善がみられた(第V章第2節)。また、飼育容器内の狭い空間で行った性的競争力の試験では、野生虫と同等の性的競争力があることが示唆された(第V章第3節)。ここで求めた性的競争力は、Fried(1971)の指数 C_f の孵化率を次世代幼虫数に置き換えて求めた指数 C_f' を用いた。 C_f' は算出するにあたり、雌の産卵数が交尾相手によって影響を受けないことを仮定している。しかし、これまでアリモドキゾウムシで行われた性的競争力試験では(杉本・桜谷, 1992; 伊藤ら, 1993; 林ら, 1994)、いずれも照射雄と交尾した正常雌の産卵数が少ない傾向がみら

れ、雌の産卵数が照射雄と野生雄によって異なることが示唆された。今回の試験では産卵数については調査をしていないが、同様な現象が生じていた場合には、照射雄の性的競争力は交尾させた正常雌の産卵数の減少に比例して高くなり、 C_f' の値が、これまで報告されたアリモドキゾウムシ照射虫の C_f に比べて高く、1前後を示したことが説明できる。 C_f' の算出には、産卵数に孵化率を乗じて得られた次世代幼虫数を使用しており、孵化率のみを用いる C_f より現実に近い性的競争力と考える。ただし、これはアリモドキゾウムシ雌成虫が、交尾後に性フェロモンの放出を停止する初期多回交尾型である(Sugimoto et al., 1996)ことを前提としている。

アリモドキゾウムシでは、照射雄の貯精囊内の精子数が激減し、また、照射雄と交尾した正常雌の受精囊内の精子数がわずかである(桜井ら, 1994; 桜井, 2000)。このため、今回みられた照射雄との交尾による産卵数の減少が、雌成虫受精囊内の精子数が少ないことに起因していることも考えられる。雌成虫が十分な精子を持っていない場合には、雌成虫が性フェロモンを再び放出し、交尾行動を行う可能性が考えられる。もし、アリモドキゾウムシの正常雌が、受精囊が精子で満たされるまで、再交尾を繰り返すのであれば、不妊雄の性的競争力は著しく低下することが予測される。これまで、不妊雄と交尾させた正常雌について、交尾後の性フェロモンの放出状況や交尾行動に関する検討は行われておらず、今後、早急に詳細な調査が求められる。

ウリミバエでは、実用不妊化線量である70Gyを照射した雄成虫の飛翔能力は、非照射の雄成虫と有意な差がみられず(仲盛, 1988)、照射による雄成虫の分散能力への影響は少ないと思われる。これに対し、アリモドキゾウムシ雄成虫の場合、蛹期にγ線を50Gy照射された不完全不妊虫においても、照射による分散能力の低下が示唆された(第V章第4、5節)。飛翔力におよぼす放射線照射の影響は、ヨトウガの一種 *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) やラセンウジバエと近縁の *Cochliomyia macellaria* (Fabricius)、あるいはオリーブミバエ *Bactrocera oleae* Gmelin、ミカンコミバエ等で調べられており(Noblet et al., 1968; Shepard et al., 1968; Sharp and Chambers, 1976; Fletcher and Economopoulos, 1976)、その影響は照射線量や照射時期、種や雌雄によって様々である。このことから、アリモドキゾウムシにおいても、照射時期や照射方法を組み合わせることにより、実用不妊化線量でも、照射による成虫の分散能力の低下を緩和できる可能性も考えられる。また、最近の研究では、200Gyを成虫照射された雄成虫では分散能力に影響がないことが示されている(Kumano et al., 2007)。このような観点からも、蛹照射から成虫照射への

変更を検討する必要があるが指摘され、鹿児島県では2006年10月から、蛹照射に代わり成虫照射による不妊化が実施されるようになった(鹿児島県大島支庁農林課特殊病害虫係・農業試験場大島支場, 2007)。

5 不妊虫放飼

野生虫と不妊虫の比率により防除効果が決定されるSITでは、不妊虫放飼開始の適期は、野外成虫個体群の密度が最も低い時期と考えられる。また、交尾が活発に行われ交尾雌率が高い時期であることも、放飼開始時期を決定するための重要な要因となる。奄美大島において、冬季(12～2月)はサツマイモ塊根内の幼虫の発育期間は低温のため長くなり、塊根から羽化、脱出する成虫は少なかった(第Ⅲ章第2節)。また、喜界島での合成性フェロモントラップによる誘殺虫数は、12月から6月にかけて少なく、特に1月から3月まではほとんど誘殺がみられなかった(第Ⅱ章第1節)。低温によるフェロモントラップの誘殺効率の低下を考慮しても、冬季は野外の成虫個体群密度が低い時期であることと考えられた。

一方、野外から採集した野生雌成虫の交尾率は、12月、1月は30%程度と低く、2月下旬以降次第に上昇し、4月には80%前後に達した(第Ⅲ章第3節)。また、野外条件下で飼育した未交尾雌を野外に放飼し再捕獲したところ、2月下旬以降、交尾率の上昇がみられており、喜界島におけるアリモドキゾウムシの配偶行動は2月下旬以降、次第に活発化すると見なされた。当初、アリモドキゾウムシは熱帯、亜熱帯を起源とする昆虫であることから、光周期による休眠の可能性は低いと予測された。しかし、南西諸島における冬季、あるいは冬季に相当する時期に、本種の交尾、産卵が著しく低下する現象がみられ、金城(未発表)は光周期による休眠を示唆した。本研究においても、奄美大島での圃場試験において、12月から2月中旬にかけてのアリモドキゾウムシの配偶行動は著しく不活発で、未交尾雌成虫の性フェロモン放出抑制が推察された。これらのことから、奄美群島においてアリモドキゾウムシに対してSITを実施する場合、不妊虫放飼を開始する時期としては、2月下旬から3月上・中旬頃が最も効果が高いと考えられた。

本研究において、奄美群島におけるアリモドキゾウムシは、冬季の配偶行動が著しく低下することが明らかになった(第Ⅲ章第3節)。このため、不妊虫雄が未交尾野生雌と交尾することによって効果が発揮されるSITでは、冬季の不妊虫放飼の効果は低いことが予想される。これに対して、上述したように2月下旬から3月にかけては不妊虫放飼の効果が最も高いと考えられる。そこで、2月下

旬から3月に大量の不妊虫を集中放飼するとすれば、増殖頭数を一時的に多くするか、生産した成虫を直ちに放飼せず、放飼時期まで保管しておく方法が考えられる。蛹照射を前提としたアリモドキゾウムシの大量増殖工程(宮路ら, 2000)では、一時的に不妊虫の生産量を増加させることは、労働力の集中、資材や生産スペースの確保等の面から実行が困難である。一方、生産したアリモドキゾウムシ成虫を放飼まで保管しておくことは、資材や必要スペースが少なく、通常の増殖作業行程に組み込みが可能である。アリモドキゾウムシの不妊化には、サツマイモ塊根内の蛹に対し、 ^{60}Co の γ 線を照射する方法と、成虫に γ 線を照射する方法がある(宮路ら, 2000)。不妊化した個体は寿命が短くなるため(岩元ら, 1990; 伊藤ら, 1993)、蛹に照射する方法では羽化した成虫は直ちに放飼する必要がある。一方、成虫照射の場合、放飼直前に不妊化すれば、成虫を必要な時期まで高い生存率で保管しておくことが可能である。上述したように、鹿児島県においても2006年10年から成虫照射による不妊化を行っており、冬季の成虫保管の可能性については、長期保管方法、虫質への影響などを明らかにする必要はあるが、より効率よく不妊虫放飼法を実施する上で、今後検討を進めていく必要がある。

6 今後の展望

奄美群島におけるアリモドキゾウムシのSITに関する技術開発は、ウリミバエのSITによる根絶防除の成功に引き続き1988年に開始された。これまで、SITを用いた害虫防除としては、ハエ目ではラセンウジバエ *Cochliomyia hominivorax* (Coquerel) やウリミバエ、ミカンコミバエ、チチュウカイミバエ *Ceratitidis capitata* (Wiedemann)、ツエツエバエ *Glossina austeni* Newstead 等のミバエ類で成功を収めた(Steiner, 1965; Cunningham, 1980; Knipling, 1989; Novy, 1991; Yoshizawa, 1997; 伊藤, 2008)。これに対し、コウチュウ目では、ワタミゾウムシにおいて一定の成果を得た以外報告がなく(Pencoe and Phillips, 1987; Knipling, 1989)、参考となる事例が極めて少なかった。そのため、アリモドキゾウムシのSITの技術開発は、ウリミバエで用いた施設や資材を利用しながら、試行錯誤をくり返して進められた。これまでの研究の成果として、野外個体群の密度抑圧防除、サツマイモ塊根を用いた大量増殖、不妊化、輸送・放飼に関して、基本的な体系はほぼ確立したと考えられる。しかし、これまで述べてきたことを含め、まだ多くの点で技術開発、あるいは作業労力やコスト低減、不妊虫の野外における生態等について、さらに検討が進められるべきであり、以下に、今後の課題と考えられる事項をあげたい。

現在、アリモドキゾウムシ増殖用のサツマイモ塊根は、本種が未分布の鹿児島県本土から購入しており、野生個体の混入を避けることがその理由の一つとなっている。今後、喜界島での根絶防除事業が順調にすすめば、喜界島島内の根絶された地域で栽培されたサツマイモの利用も考えられる。喜界島ではサツマイモを加害するイモゾウムシも認められているが、分布はまだ一部地域に限られている（宮路・田中, 1998; 徳永, 私信）。また、現在検討している成虫照射で不妊化を行えば、仮に塊根内に野生虫が混入しても、必ず照射過程を経るので、正常虫がそのまま野外に放飼されることはない。根絶の意義を明確にして地元と密着した防除事業の推進を図るという観点から、あるいはコスト低減の意味からも、地元産塊根の利用は、今後考慮すべき課題と考える。なお、アリモドキゾウムシの産卵や摂食が少ない品種も報告されている（Nottingham et al., 1989）ことから、青果用、原料用を問わず、新しいサツマイモ品種の使用にあたっては、予備試験等を実施し、増殖用の餌として問題ないことを確認した上で導入すべきと考えられる。

昆虫病原性線虫や天敵糸状菌を利用する上で、奄美群島における冬季は、アリモドキゾウムシ成虫の活動が鈍く、寄主植物の株元など湿潤な生息環境に留まっていると思われることから、これらの天敵微生物と接触する機会が多くなる時期と考えられる。一方、低温により、アリモドキゾウムシに対する感染率が低下する。冬季から春季にかけては、野外での成虫密度が最も低くなり、密度抑圧防除を最も効果的に行うことのできる重要な時期と考えられるため、より低温時に効果が発揮できる生物的防除資材の探索が求められる。また、これまでアリモドキゾウムシの幼虫、蛹に対する捕食性あるいは寄生性昆虫に関して、コマユバチ科の寄生蜂を中心に十数種が報告されているが（Gonzales, 1925; Cockerham, 1944; Cockerham et al. 1954, Rajamma, 1980; Jansson and Lecrone, 1991; Jansson, 1991, 1992; Maeto and Uesato, 2007）、南西諸島においては、捕食性、寄生性昆虫については、ほとんど調査が行われておらず、発生種、寄生状況等について不明な点が多い。安田（1998）は、沖縄県では地域によってはイモゾウムシ、アリモドキゾウムシに対して、コマユバチ科の一種が高い寄生率を示すことを報告している。今後、これら捕食性、寄生性天敵についても探索が必要と考えられる。

アリモドキゾウムシ雌成虫の冬季の休眠については、野外の実験データを裏付けるための室内での詳細な研究報告がなされていない。室内において、11L13Dの短日条件、14L10Dの長日条件について、それぞれ21℃、または27℃の温度条件下で雌成虫の産卵個体率を4週間調査した

結果、日長条件による産卵個体率の差はみられなかった（山口, 未発表）。光周反応が温度条件によって影響されることはよく知られており（ダニレフスキー, 1996）、本種の冬季の休眠に関しては、その生態学的な意味を含め、さらに検討をすすめるべきである。

不妊虫放飼による防除効果調査の精度向上と省力化は重要な課題の一つと考える。ウリミバエでは、キュウルアを誘引源とするトラップに誘殺される不妊雄と野生雄の捕獲虫数比（S/N比）、ならびに寄主植物での寄生率調査によって判断された（井上, 1985; 鹿児島県農政部・大島支庁ウリミバエ防除対策室, 1991）。この時、トラップに誘殺された雄成虫を不妊虫と野生虫に区別するために2段階の調査が行われた。すなわち、捕獲虫をまず紫外線下の蛍光色素による発光の有無により、マーク虫（Mark）と無マーク虫（Unmark）に識別した（マーク虫数と無マーク虫数の比；M/U比）。次に、無マーク虫については、解剖して精巣を取り出し、染色された生殖細胞の形状から不妊虫（Sterile）と正常虫（Normal）に分別し、最終的にS/N比を求めた。ウリミバエの場合は、蛹期に処理した粉末蛍光色素が羽化時に前額囊に取り込まれるため、誘殺された不妊虫のマーク脱落率は1%以下で、また、同時に誘殺された野生虫へ蛍光色素が付着してしまうコンタミネーションの問題もほとんど生じなかった（福島・田中, 1985; 照屋ら, 1995; 鹿児島県農政部・大島支庁ウリミバエ防除対策室, 1991）。これに対して、アリモドキゾウムシでの防除効果調査は、現在、フェロモントラップに誘殺された雄成虫のM/U比調査、寄主植物での寄生率調査、さらに、サツマイモ塊根トラップへの産卵状況調査によって行われている（湯田ら, 2000）。このうち、フェロモントラップによる調査では、粉末蛍光色素を放飼不妊虫の体表に単に付着させているだけであるため、マーク脱落や、フェロモントラップの捕獲個体収容容器内で他個体への付着が懸念されている（林ら, 1997）。また、アリモドキゾウムシでは、虫体が乾燥あるいは腐敗すると、精巣が急速に萎縮あるいは溶解してしまい、解剖による精巣観察も困難であるため、無マーク虫について、マークが脱落した不妊虫と野生虫の判別ができないなどの問題がある。

フェロモントラップによる誘殺虫数のS/N比、あるいはM/U比は、アリモドキゾウムシのSITの進捗状況を客観的に判断するための最も有効な手段である。しかしながら、不妊虫と野生虫を正確に識別できる実用的手法が未開発な現状のままでは、根絶確認調査時に野生虫のみを誘殺するため、予め不妊虫放飼を止めてフェロモントラップ調査を継続するか、不妊虫放飼を続けながらフェロモントラップ調査に依存しない根絶確認調査を行うことになる。前

者は不妊虫放飼を止める適切な時期を見極めることが非常に難しく、判断を誤れば野生虫の再発生を招くおそれがある。また、後者は寄主植物調査などに膨大な労力を投入せねばならない。Moriya(1997)は、根絶計画を実施する上で、最も解決が急がれる課題の一つとして、野生虫と照射虫を死亡個体であっても明確に見分ける方法の確立をあげている。フェロモントラップに捕獲された不妊虫と野生虫の識別方法の確立は、今後解決しなければならない大きな課題の一つといえよう。

アリモドキゾウムシと同じサツマイモの大害虫であるイモゾウムシでは、幼虫にカルコオイルレッド N-1700[®] (Pylam Products Co. Inc., 以下 'カルコオイル') を含有させた人工飼料を摂食させることで、性成熟期間以外には虫質にほとんど影響なく体内にマークすることができる (Sugiyama et al., 1998; Simoji et al., 1999; 山岸・下地, 2000)。アリモドキゾウムシについても、成虫にカルコオイルを含有させたサツマイモ主体の人工飼料を摂食させたところ、通常飼育個体と識別できることが確認された (山口, 未発表)。また、那覇植物防疫事務所ではルビジウムを用いたマーキング法 (Berry et al., 1972) について検討を進めている。これらは、いずれも摂食によって虫体内に標識物質を取り込ませるマーキング法のため、幼虫飼育用の人工飼料に加える、あるいは羽化後、放飼までの間に与える餌飼料 (生サツマイモ, 人工飼料) に混入させるなど、虫質に影響なく体内に取り込ませるための方法の開発が必要である。さらに、アリモドキゾウムシは地域によって DNA や色彩が異なる事が明らかにされており (Kawamura et al., 2002; 川村ら, 2003; Kawamura et al., 2005), この DNA や色彩の違いを利用する遺伝的マーカーの検討や、近年注目されているタンパク質マーキング (Hagler and Jackson, 2001) について、沖縄県病害虫防除技術センターや沖縄県農業研究センターで検討されているが (舞木ら, 2007; 小濱・久場, 2008), 実用には至っていない。今後、これらの方法を複数組み合わせた識別方法についても早急な検討が望まれる。また、現在のフェロモントラップ調査では、乾燥等により誘殺虫の解剖が困難であるため、体内マーキング手法を用いる場合、トラップ捕獲個体収容容器にアルコール等の保存溶液を入れ、捕獲虫を新鮮なまま回収するなどの方法も考えられる。フェロモントラップの構造、特に捕獲個体収容容器部分については検討する余地がある。

アリモドキゾウムシ根絶防除に関するこれまでの一連の技術開発は、鹿児島県の関係者だけではなく、大学をはじめ、多くの試験研究機関の研究者や行政担当者などの協力の成果である。また、奄美大島、喜界島での各種現地試験、あるいは不妊虫放飼効果の実証試験は、現場の行政機関職

員や地元住民の協力がなくては成り立たなかった。早期の根絶達成を目指すには、今後も、研究者、行政、地元住民がアリモドキゾウムシ根絶防除事業に対して、有機的に連携することが何よりも重要である。

*) ゾウムシ研究会：アリモドキゾウムシ、イモゾウムシの根絶技術開発研究をより効率的に推進するため、近畿大学、鹿児島大学、植物防疫所、独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構、沖縄県、鹿児島県などの研究者によって組織されている研究プロジェクトチーム。

第七章 摘要

アリモドキゾウムシは熱帯、亜熱帯地域に広く分布するサツマイモの重要害虫で、わが国では北緯 30 度以南の南西諸島と小笠原群島が発生地域である。本種は植物防疫法により特殊害虫に指定されており、発生地域から未発生地域への寄主植物の移動が制限または禁止されている。このため、サツマイモを発生地域である南西諸島から未発生地の本土へ自由に出荷するためには、本種の根絶が必須となる。鹿児島県と沖縄県では、1988 年より農林水産省の特殊病害虫防除事業の一環として、不妊虫放飼法を主体としたアリモドキゾウムシの根絶防除に関する研究を開始した。これまで、サツマイモ塊根を用いた本種の大量増殖、不妊化、合成性フェロモンを用いた防除資材、モニタリングトラップ等に関する技術開発が行われ、不妊虫放飼法を主体とした小規模の根絶防除試験が試みられた。これらの成果を踏まえ、鹿児島県では 2001 年度から喜界島において「アリモドキゾウムシ根絶防除事業」が開始された。本研究は、本格的な不妊虫放飼による根絶防除に着手するにあたり、奄美群島でのアリモドキゾウムシの発生生態と、根絶技術の改善に関する一連の成果を示したものである。

1 喜界島でのアリモドキゾウムシの発生生態

(1) 分布

喜界島において、アリモドキゾウムシ雄成虫は島内ほぼ全域で、合成性フェロモントラップへの誘殺が確認された。平均誘殺虫数は海岸部、山間部、畑地部では、大差はなかったが、集落部ではそれらの地域より、やや少ない傾向がみられた。特に家屋が密集している地域で顕著に誘殺虫数が少なかった。この原因として、集落部では他の地域と比較して野生寄主植物が自生できる場所が少なかったためと考えられた。グンバイヒルガオ群落に設置したトラップでの誘殺虫数は、ノアサガオ群落のトラップに比べて多

い傾向がみられ、特に3月から8月にかけてはその差が顕著であった。

(2) 発生活長

合成性フェロモントラップによる、アリモドキゾウムシ雄成虫の誘殺消長から、本種の年間発生活長を明らかにした。喜界島における雄成虫の誘殺数は、7月から8月にかけて次第に増加し、9月下旬から10月にピークを示した後、急激に減少し、12月以降は翌年6月頃まで低く推移した。このことから、喜界島における本種の発生活長は、冬季に最も密度が低く、春季から次第に増加し9月から10月頃をピークとする1山型と考えられた。

(3) 低密度期の密度推定

Yamamura 法 (Yamamura et al., 1992) を用いて推定したアリモドキゾウムシ発生盛期の9月と、低密度期の5月の雄成虫の密度を比較した結果、発生盛期の密度は、低密度期の約5倍程度であった。この結果、ならびに Sugimoto et al. (1994) が推定した発生盛期の喜界島全島での雄成虫総数400万頭以下から、低密度期における全島での雄成虫総数は80万頭以下と推定された。

(4) 野生雄成虫の体長

喜界島でフェロモントラップに誘殺されたアリモドキゾウムシ野生雄成虫の平均体長は約5.7mmであった。平均体長とその分散には大きな季節変動はみられなかった。

2 冬季のアリモドキゾウムシの生態

(1) 冬季の発育

奄美大島において、冬季のサツマイモ塊根内部では、アリモドキゾウムシは未調査の卵を除く全ステージがみられ、いずれのステージでも越冬するものと考えられた。主な越冬態は成虫と3齢幼虫と考えられた。また、サツマイモ塊根内のアリモドキゾウムシは、低温による遅延があるものの、冬季においても発育が認められ、幼虫、蛹期における冬季の休眠はないものと考えられた。また、塊根からは冬季間も継続した成虫の脱出が確認された。

(2) 冬季の成虫の生存

冬季のサツマイモ圃場では、アリモドキゾウムシ成虫は主に地表面の石や枯葉の下ならびに地下部の深さ5cm以内で発見され、生息場所からの移動は小さいことが示唆された。12月以降にサツマイモ圃場または野外ケージに放飼した成虫の生存率は低かったが、一部は翌年3月または4月まで生存した。春季の増殖に関わる成虫の多くは、

前年の9月から10月までに産卵された卵に由来すると推察された。

(3) 冬季の交尾

サツマイモ圃場で捕獲した野生雌成虫の交尾率は、秋季から徐々に低下し、1月が最も低かった。交尾率は2月以降次第に高くなり、4月には80%以上となった。また、野外条件下で飼育した未交尾雌成虫を、12月、1月に野外に放飼し、再捕獲したところ、2月上旬までは既交尾個体が非常に少なかった。これらのことから、奄美大島において、アリモドキゾウムシは冬季はほとんど交尾を行っていないとみなされた。雄成虫は冬季においても交尾活動が可能な状態にあることから、冬季に交尾が著しく抑制されているのは、雌成虫が未交尾にもかかわらず、性フェロモンを放出していないためであると考えられた。

(4) 冬季の産卵

雌成虫の卵胞は11月下旬から1月下旬まで未発達で、成熟卵をもつ個体は確認できなかった。2月下旬以降、卵胞は次第に発達し、成熟卵をもつ個体が認められたが、年によって成熟卵をもつ雌の割合が大きく異なった。また、野外に設置したイモトラップにおける産卵数は、10月以降次第に少なくなり、12月下旬から2月中旬までは著しく少なかった。これらのことから、冬季において、アリモドキゾウムシはほとんど産卵を行わないと考えられた。また、冬季に羽化した個体の産卵開始は、3月下旬以降と推察された。

3 アリモドキゾウムシ野外個体群の密度抑圧防除法

(1) *Steinernema* 属線虫の殺虫活性

Steinernema carpocapsae (All), *S. feltiae*, *S. riobrave*, *S. glaseri* (326, 328, Mungyeong, Dongrae) の4種、7系統の *Steinernema* 属線虫について、アリモドキゾウムシに対する殺虫活性を室内で比較した。供試線虫のうち、*S. carpocapsae* (All) は、雌雄成虫に対して90%以上の殺虫率を示した。また、サツマイモ塊根内の幼虫、蛹に対しては *S. riobrave*, *S. glaseri* (Mungyeong), *S. glaseri* (Dongrae) が殺虫率30～60%程度を示した。

(2) *Steinernema* 属線虫の防除効果

室内での殺虫活性試験で、効果の高かった *S. carpocapsae* (All) について、サツマイモ圃場に本種を散布し、アリモドキゾウムシに対する防除効果を評価した。その結果、*S. carpocapsae* (All) は、無処理と比べ、アリモドキゾウムシによる被害塊根率を約60%、塊根の被害

度を約 40 % 減少させたことから、アリモドキゾウムシの密度抑圧防除の一手段として利用可能とみなされた。

4. アリモドキゾウムシの大量増殖と不妊虫放飼技術の改善

(1) 原料用サツマイモを用いた大量増殖

安価な原料用サツマイモ 3 品種（シロサツマ、シロユタカ、コガネセンガン）を、現行のアリモドキゾウムシ大量増殖工程で用いられている青果用サツマイモ（土佐紅）と比較し、大量増殖用の餌としての利用可能性について検討した。成虫の塊根からの脱出時期は、土佐紅と比べて、シロユタカはやや早く、コガネセンガンはやや遅い傾向がみられた。コガネセンガンは全脱出虫数に対する不妊虫放飼に利用可能な脱出成虫数（適期脱出虫数）の割合が、土佐紅より最大 2.7 % 低かった。サツマイモ塊根 1g 当たりの適期脱出虫数は、原料用サツマイモ 3 品種とも土佐紅との間に差はみられなかった。原料用サツマイモの脱出成虫数は、土佐紅に比べて有意に雄が多かった。γ 線照射時期におけるシロユタカ塊根内のアリモドキゾウムシの齢期は、土佐紅より 1 ~ 2 日程度進む傾向がみられた。以上の結果に基づき、原料用サツマイモ 3 品種はアリモドキゾウムシ増殖用の餌として利用可能であると結論された。

(2) 蛹期に γ 線を 40 ~ 70Gy 照射された成虫の妊性と生存率

^{60}Co の γ 線を蛹期に 40 ~ 70Gy 照射された成虫について、雌雄の妊性と雄の生存率を調査した。照射雄×健全雌では、40Gy から 70Gy の範囲でいずれの線量でも次世代成虫が確認された。照射雌×健全雄では、40Gy, 50Gy で次世代成虫が確認されたが、60Gy, 70Gy では卵、次世代成虫とも認められなかった。実際の大量増殖工程を想定した蛹期に 50Gy 照射した雌成虫と健全雄の組合せでは、次世代虫が出現した。産卵雌の日当たり産卵数を正常雌と同じと仮定した場合、照射雌の約 0.9 % が産卵したと推測された。また、産卵した照射雌は健全雌と比べて、産卵数または寿命のいずれか、あるいはいずれについても、γ 線照射の影響を受けているものと考えられた。γ 線を照射された雄成虫の平均寿命は、線量の増加とともに短くなり、40Gy, 50Gy 照射雄は 60Gy, 70Gy, 80Gy 照射雄に比べて寿命が有意に長かった。

(3) 性的競争力に及ぼす雄成虫密度の影響

γ 線を 50Gy 照射した雄成虫を用い、性的競争力に及ぼす雄密度の影響を調査した。雄密度（同数の照射雄+野生雄）が雌の 2 ~ 8 倍の範囲であれば、雄密度が高いほ

ど照射雄の性的競争力は下がり、雄密度が雌の 16 倍になると、逆に照射雄の性的競争力が高くなる傾向がみられ、いずれも統計的な有意差は検出されなかった。

(4) 蛹期に γ 線を 50Gy 照射された雄成虫の性的競争力
γ 線を 50Gy 照射した雄成虫の性的競争力を実験室内で調査した。雄成虫（照射雄+野生雄）と雌成虫の比率を 2 : 1 とし、野生雄に対する照射雄の割合を 0.5, 1, 2, 5 に変化した場合、2 以外では性的競争力を示す指数 C_f 値は 1 以上となった。また、 C_f 値の平均値は 1.21 となり、今回用いた 50Gy 照射虫は室内条件下では野生虫と同等以上の性的競争力を有しているものと考えられた。

(5) 蛹期に γ 線を 50Gy 照射された雄成虫の未交尾野生雌発見能力

γ 線を 50Gy 照射した雄成虫について、性フェロモンを放出する未交尾雌への移動・発見能力を、合成性フェロモントラップを用いて調査した。照射雄のうち、最も早い個体は放飼後 10 分以内に 5 m, 20 分以内に 20 m, 60 分以内に 30 m の放飼距離からフェロモントラップに到達した。一方、野生雄は放飼距離が 20 m 以内であれば、最も早い個体はほぼ 10 分以内にフェロモントラップに到達した。放飼 2 日後における、捕獲された照射雄と野生雄の比 (IC/WC) は、1 以下であり、50Gy 照射雄は野生雄に比べて、未交尾雌に到達できる個体が少ないことが示唆された。また、 IC/WC は時間の経過とともに次第に 1 に近づくことから、未交尾雌を発見して到達するまでの時間、すなわち発見、移動速度についても、50Gy 照射雄は野生雄に比べて劣っていると考えられた。したがって、未交尾雌への到達能力が低下している放飼不妊雄の包括的性的競争力を、合成性フェロモントラップに誘殺された放飼虫と野生虫の比率 (M/U 比) を利用して求める場合、 M/U 比を 1/2 ~ 1/3 程度低く見積もることが妥当と推定された。

(6) 蛹期に γ 線を 50Gy 照射された雄成虫の冬季における分散能力

γ 線を 50Gy 照射した雄成虫について、冬季の分散能力を合成性フェロモントラップを用いて調査した。平均分散距離ならびに最大分散距離の値から、累代飼育開始後 2 ~ 7 年経過した雄成虫の分散能力は低下していなかった。また、粉末蛍光色素によるマークも、雄成虫の分散能力に対する影響は認められなかった。蛹期に γ 線 50Gy を照射された雄成虫の最大分散距離は野生虫に比べて短い傾向が認められたが、放飼 7 日後の平均分散距離の比較からは、γ 線照射が雄成虫の分散能力に及ぼす影響はみら

れなかった。日平均気温が20℃を超えると、アリモドキゾウムシ雌成虫の分散は活発化した。蛹期に50Gy照射された雄成虫の低温期12月における平均分散距離は、1週間で7～8mであったことから、週1回不妊虫を定点放飼する場合、冬季の放飼地点の間隔は15m前後が一つの目安となる。

5 今後の展望

(1) 喜界島産サツマイモ塊根の利用

島内を複数地区に分割して実施される喜界島の根絶防除事業では、事業の進展に伴って出現する島内の既根絶地域において栽培されたサツマイモ塊根を、アリモドキゾウムシの大量増殖に利用することが可能である。現在検討が進められている成虫照射で不妊化すれば、仮に塊根内に野生虫が混入しても、必ず照射過程を経るので、正常虫がそのまま野外に放飼されることはない。地元と密着した防除事業の推進を図るという観点から、あるいはコスト低減の意味からも、喜界島産サツマイモ塊根の利用は、考慮すべき課題と考える。

(2) 生物的防除資材の探索

奄美群島において、冬季から春季にかけては、野外での成虫密度が最も低くなり、不妊虫放飼に先行する密度抑圧防除を行う上で、最も重要な時期と考えられる。一方、冬季は、アリモドキゾウムシ成虫の活動が鈍く、寄主植物の株元など湿潤な生息環境に留まっていると思われることから、昆虫病原性線虫や天敵糸状菌と接触し、感染する機会が多くなる時期と考えられる。これらの防除資材を密度抑圧防除に利用する上で、より低温時に効果が発揮できる種あるいは系統の探索が求められる。また、南西諸島においては、アリモドキゾウムシの捕食性、寄生性昆虫については、ほとんど調査が行われておらず、これらの天敵類についても探索が必要と考えられる。

(3) アリモドキゾウムシ雌成虫の休眠生態の解明

アリモドキゾウムシ雌成虫の冬季の休眠については、野外における観測事例を裏付ける室内での詳細な研究報告がなされていない。本種の冬季休眠の有無は、不妊虫放飼法の成否に重大な影響を及ぼす可能性があり、その生態学的な意味を含め、さらに検討をすすめるべきである。

(4) 防除効果調査

フェロモントラップに捕獲された不妊虫と野生虫の確実な識別方法は、今後解決しなければならない大きな課題の一つである。特にフェロモントラップ調査を効率よく行う

上で、脱落率・誤認識率が低い安定したマーキング方法の早急な開発が求められている。現在検討されているルビジウム、あるいはカルコオイルレッド N-1700 を用いたマーキング法は、いずれも摂食によって虫体内に標識物質を取り込ませる体内マーキング法のため、標識物質を加えた幼虫飼育用人工飼料、あるいは羽化後、放飼までの間に与える成虫用の餌飼料の開発が不可欠となる。また、現在のフェロモントラップ調査では、乾燥等により誘殺虫の解剖が困難であるため、体内マーキング法を用いる場合、トラップの捕獲個体収容容器にアルコール等の保存溶液を入れ、誘殺虫を生体状態に近いまま回収するなど、フェロモントラップの構造、特に捕獲個体収容容器部分については細部にわたる改良が要求される。

(5) 地元、各組織の連携

アリモドキゾウムシ根絶防除事業に関するこれまでの一連の技術開発は、鹿児島県の関係者だけではなく、大学をはじめ多くの試験研究機関の研究者や行政担当者などの協力の成果である。また、奄美大島、喜界島での各種現地試験、あるいは不妊虫放飼効果の実証試験は、現場の行政機関職員、あるいは地元住民の協力がなくては成り立たなかった。早期の根絶達成を目指すためには、今後も、研究者、行政、地元住民がアリモドキゾウムシ根絶防除事業に対して有機的に連携することが何よりも重要であろう。

謝 辞

本論文を取りまとめるに際し、懇切丁寧なご指導、ならびにご校閲を賜った九州大学農学研究院附属生物的防除研究施設 高木正見教授、清水 進教授、上野高敏助教授に対して厚くお礼申し上げる。また、本論文について多くの有益なご助言、ご校閲、ならびにご配慮を賜った中央農業総合研究センター 守屋成一博士に心からお礼申し上げます。

恩師である湯川淳一九州大学・鹿児島大学名誉教授には、長期にわたり終始ご指導、ご鞭撻を賜った。ここに深く感謝の意を表する。

本研究の大部分は「アリモドキゾウムシ根絶技術確立事業」ならびに「アリモドキゾウムシ根絶実証事業」の一部として実施されたものであり、多くの方々にご指導、ご援助をいただいた。冬季のアリモドキゾウムシの生態に関しては、農業試験場大島支場長 瀬戸口脩博士（現シンジェンタ ジャパン株式会社）と病害虫防除所大島駐在 宮路克彦氏（現農業開発総合センター大島支場病害虫研究室

長), また不完全不妊虫に関する一連の試験は, 九州農業試験場害虫管理システム研究室長 鈴木芳人博士(現中央農業総合研究センター総合的害虫管理研究チーム長), 大島支庁農林課特殊病害虫係 鳩野哲也氏(現大隅地域振興局農政普及課技術主幹兼係長)との共同研究であり, 絶えず貴重なご意見, ご指導をいただいた。喜界島での発生生態, ならびに原料用サツマイモを用いた大量増殖に関する研究では, 大島支庁農林課特殊病害虫係長 田中丈雄氏(現南薩地域振興局農林水産部指宿支所農業普及課技術主幹兼係長), 同係長 中村孝久氏(現南薩地域振興局農政普及課技術主幹兼係長), 同係長 徳永太蔵氏(現始良・伊佐地域振興局農政普及課技術主幹兼係長), 當 直樹氏(現始良・伊佐地域振興局農政普及課), 原 洋一氏(現始良・伊佐地域振興局農林水産部大口支所農林普及課), 時村金愛氏(現農業開発総合センター), 樋口康一博士(現農業開発総合センター), 里島伸司氏, 西原 悟氏(現農業開発総合センター大隅支場), 木村浩司氏(現南薩地域振興局農政普及課), 和田朋彦氏(現大隅地域振興局曾於畑地かんがい農業推進センター), 湯田達也氏(現農業開発総合センター大島支場)をはじめ職員の各位, ならびに喜界町経済課の職員の各位に供試虫の提供, 試験協力など, 多くの面でご協力, ご援助をいただいた。農業環境技術研究所 桐谷圭治博士(現静岡県伊東市在住), 田中幸一博士, 中央農業総合研究センター 水谷信夫博士には, 本研究に対し多くのご指導をいただいた。データの統計解析については, 農業環境技術研究所 山村光司博士, 中央農業総合研究センター 伊藤健二博士(現農業環境技術研究所)に, 懇切丁寧なご指導, ご助言をいただいた。昆虫病原性線虫については, 株式会社エス・ディ・エスバイオテック 田辺博司氏, 木下正次氏, 山中 聡博士(現アリスライフサイエンス株式会社), 中央農業総合研究センター 吉田睦浩氏にご教示いただいた。農業試験場大隅支場営農研究室長 上妻道紀氏(現鹿児島県鹿児島市在住), 農産物加工研究指導センター 下園英俊氏(現農業開発総合センター)には, サツマイモに関して, 試験品種の提供ならびにご助言をいただいた。高知県農業研究センター生産環境部長 山下 泉氏(現高知県農業技術センター技術次長), 古味一洋氏(現高知県農業技術センター), 東京都病害虫防除所 大林隆司氏には, 文献に関する情報を提供いただいた。以上の方々に深く感謝申し上げます。

本研究当初から近畿大学農学部 杉本 毅名誉教授, 桜谷保之教授, 岐阜大学農学部 櫻井宏紀名誉教授には, 絶えず多くのご教示, ご助言をいただいた。研究の遂行, 本論文の取りまとめに際して, 中央農業総合研究センター研究管理監 宮井俊一博士(現中央農業総合研究センター北

陸研究センター農業研究監), 農業試験場大島支場長 内園正昭氏(現鹿児島県出水市在住), 同病害虫研究室長 和泉勝一氏(現 JA 鹿児島県経済農業協同組合連合会), 同室長 鳥越博明博士(農業開発総合センター果樹部環境研究室長), 同室長 末永 博氏(現農業開発総合センター茶業部環境研究室長), 同総務室長 田島充将氏(現北薩地域振興局建設総務課長), 川添幸治氏(現北薩地域振興局農政普及課), 野島秀伸氏(現農業開発総合センター), 尾松直志氏(現農業総合開発センター), 林川修二氏(現農業開発総合センター大隅支場), 蚕業試験場応用昆虫研究室長 井上栄明博士(現農業開発総合センター病理昆虫研究室長), 柿元一樹博士(現大隅地域振興局曾於畑地かんがい農業推進センター)には, 暖かいご指導, ご支援をいただいた。これらの方々に深く感謝申し上げます。

農業試験場大島支場環境研究室長 嶋田浩一氏(現鹿児島県奄美市在住), 農業試験場徳之島支場長 田中 章氏(現バイエルクロップサイエンス株式会社), 徳之島農業改良普及センター所長 牧野 晋氏(現住友化学株式会社), 農業試験場大島支場長 牟田辰朗氏(現サンケイ化学株式会社), 農業試験場大隅支場畑作病虫研究室長 西岡稔彦氏(現農業開発総合センター病害虫防除室長), 農業試験場病虫部長 上和田秀美氏(現農業開発総合センター大島支場長), 同病虫部 西 八束氏(現農業開発総合センター), 福田 健氏(現農業開発総合センター), 尾川宣広氏(農業開発総合センター果樹部), 上室 剛氏(現大島支庁農政普及課), 鎌田 茂氏(現フラワーセンター), 中西善裕氏(現始良・伊佐地域振興局農林水産部大口支所農林普及課), には, 数々のご指導と励ましをいただいた。ここに厚くお礼申し上げます。

アリモドキゾウムシの野外での発生生態調査, 放飼試験等は非常に労力がかかり, 個人ですべてを行うことは困難である。農業試験場大島支場 上田秋則氏(現鹿児島県奄美市在住), 重井郁宣氏(現農業開発総合センター大島支場), 前崎一章氏(現農業開発総合センター大島支場), 吉田房子氏(現鹿児島県奄美市在住), 奥純子氏(現鹿児島県奄美市在住), 小浜初恵氏(現農業開発総合センター大島支場), 中村美津乃氏(現農業開発総合センター大島支場), 里見美喜子氏(現鹿児島県奄美市在住)には, 供試虫の採集, 飼育, マーキング, あるいはサツマイモ圃場での野生虫の捕獲をはじめとする根気と体力を要する野外試験において, 多大なご助力をいただいた。また, 多くの文献整理については徳石真弓氏(現鹿児島県国分市在住)にご協力いただいた。これらの方々のご支援がなければ, 本研究の遂行は不可能であった。ここに記して深甚なる感謝の意を表する。

引用文献

- Akazawa, T., I. Uritani and H. Kubota 1960. Isolation of ipomeamarone and two coumarin derivatives from sweet potato roots injured by the weevil, *Cylas formicarius elegantulus*. *Arch. Biochem. Biophys.* 88: 150-156.
- 荒巻弥弘 1989. アリモドキノウムシの生態に関する調査－放射線利用のための基礎調査－. 九州植物防疫 504: 3.
- 荒巻弥弘・吉田 隆・田代 好 1987. 奄美群島におけるアリモドキノウムシ及びイモゾウムシの生態調査－産卵状況について－. 植物研報 23: 67-69.
- アリモドキノウムシ研究会 1992. アリモドキノウムシの根絶に向けて（最近の研究成果の概要）. 鹿児島県農業試験場大島支場, 名瀬. 216pp.
- Austin, D. F. 1988. The Taxonomy, evolution and genetic diversity of sweet potatoes and related wild species. In *Exploration, maintenance and utilization of sweet potato genetic resources* (P. Gregory ed.). International Potato Center, Lima, Peru, pp. 27-60.
- Austin, D. F. 1991. Associations between the plant family convolvulaceae and *Cylas* weevils. In *Sweet Potato Pest Management: A Global Perspective* (R. K. Jansson and K. V. Raman eds.). Westview Press, Boulder, Colorado, pp. 45-57.
- Boller, E. 1972. Behavioral aspects of mass-rearing of insects. *Entomophaga* 17: 9-25.
- Breey, W. L., J. N. All and P. B. Bush 1972. Marking native phytophagous insects with rubidium: a proposed technique. *Ann. Entomol. Soc. Am.* 65: 236-238.
- Burdeos, A. T. and L. T. Villacarlos 1989. Comparative pathogenicity of *Metarhizium anisopliae*, *Beauveria bassiana* and *Paecilomyces lilacinus* to adult sweet potato weevil, *Cylas formicarius* (F.) (Coleoptera: Curculionidae). *Philippine Entomol.* 7: 561-571.
- CAB International 2005. *Crop Protection Compendium: 2005 Edition*. CAB International, Wallingford, UK. CD-ROM.
- Chalfant, R. B., R. K. Jansson, R. S. Dakshina and J. M. Schak 1990. Ecology and management of sweet potato insects. *Annu. Rev. Entomol.* 35: 157-180.
- Chiranjeevi, Ch., D. D. R. Reddy, T. B. Gour, Y. N. Reddy and Abida Sultana 2002. Biology of sweet potato weevil, *Cylas formicarius* (Fabricius) in Andhra Pradesh. *Indian J. Plant Prot.* 30(1): 39-42.
- Choo, H. Y., K. K. Harry and S. P. Stock 1995. Isolation of entomopathogenic nematodes (Steinernematidae and Heterorhabditidae) from Korea. *Jpn. J. Nematol.* 25: 44-51.
- Cockerham, K. L. 1943. The host preference of the sweetpotato weevil. *J. Econ. Entomol.* 36: 471-472.
- Cockerham, K. L. 1944. Some parasites of the sweetpotato weevil. *J. Econ. Entomol.* 37: 546-547.
- Cockerham, K. L., O. T. Deen, M. B. Christian and L. D. Newsom 1954. The biology of the sweet potato weevil. *La. Agric. Exp. Stn. Tech. Bull.* 483: 1-30.
- Coffelt, J. A., K. W. Vick, L. L. Sower and W. T. McClellan 1978. Sex pheromone of the sweetpotato weevil, *Cylas formicarius elegantulus* laboratory bioassay and evidence for a multiple component system. *Environ. Entomol.* 7: 756-758.
- Cunningham, R. T., W. Routhier, E. J. Harris, G. Cunningham, L. Johnson, W. Edwards, R. Rosander and W. G. Vettel 1980. Eradication of medfly by sterile-male release. *Citrograph* 65: 63-69.
- ダニレフスキー, ア・エス 1966. 昆虫の光周性. (日高敏隆・正木進三 訳) 東京大学出版会, 東京. 293 pp.
- Dawes, M. A., R. S. Saini, M. A. Mullen, J. H. Brower and P. A. Loretan 1987. Sensitivity of sweet potato weevil (Coleoptera: Curculionidae) to gamma radiation. *J. Econ. Entomol.* 80: 142-146.
- Dozier, H. L. 1937. Sweet potato root weevil overwinters as adult in Louisiana. *J. Econ. Entomol.* 30: 968.
- Ekanayake, H. M. R. K., A. M. C. P. Abeyasinghe and Y. Toida 2001. Potential of entomopathogenic nematodes as bio-control agents of sweet potato weevil, *Cylas formicarius* (Fabricius) (Coleoptera: Brentidae). *Jpn. J. Nematol.* 31: 19-25.
- FAO 2002. *FAO production yearbook 2002*. FAO, Rome. 261 pp.
- Fletcher, B. S. Economopoulos, A. P. 1976. Dispersal of normal and irradiated laboratory strains and wild strains of the olive fly *Dacus oleae* in an olive grove. *Ent. Exp. Appl.* 20: 183-194.
- 藤本健二・平田建彦・松岡拓穂 2000. 近年におけるゾウムシ類の緊急防除(2) 高知県室戸市. 植物防疫 54: 453-454.
- 福田 計 1933. 甘藷害虫に関する調査報告(一) ありもどきぞうむし. 台湾総督府中央研究所農業部報告 62: 1-35.
- 福島 満・田中 章 1933. 奄美におけるウリミバエの発生とその根絶(石井象二郎・桐谷圭治・古茶武男 編

- 集). ミバエの根絶 —理論と実際—. 農林水産航空協会, 東京, pp. 317-342.
- Fried, M. 1971. Determination of sterile-insect competitiveness. *J. Econ. Entomol.* 64: 869-872.
- Gast, R. T. and T. B. Davuch 1966. Boll weevils. In *Insect colonization and mass production* (C.N. Smith ed.). Academic press, New York and London, pp. 405-418.
- Gonzales, S. S. 1925. The sweetpotato weevil (*Cylas formicarius* Fbr.). *Philippine Agric.* 14: 257-281.
- Griffin, J. G., P. P. Sikorowski and O. H. Lindig 1983. Mass rearing boll weevils. *Agriculture Handbook*, USDA 589: 265-301.
- Grullo Ravelo, H and G. Perez Machado 1994. A new method for the control of *Cylas formicarius elegantulus* (Fab.) in sweet potato crops. *Centro Agricola* 21(3): 10-14.
- 土生昶毅・沼沢健一 1985. ミバエ類の根絶法 不妊虫放飼法 (石井象二郎・桐谷圭治・古茶武男 編集). ミバエの根絶 —理論と実際—. 農林水産航空協会, 東京, pp. 111-124.
- 羽生道則 1994. アリモドキゾウムシ山川町に発生. 九州植物防疫 535: 1-2.
- Hagler, J. R. and C. G Jackson 2001. Methods for marking insects: current techniques and future prospects. *Ann. Rev. Entomol.* 46: 511-543.
- 春原正信 2007. 喜界島におけるアリモドキゾウムシ根絶防除事業の進捗状況. 九州植物防疫 609: 1.
- 林 義則・吉田 隆・木場文博・山下文男・伊藤俊介 1994. アリモドキゾウムシ *Cylas formicarius* (FABRICIUS) 蛹の低線量 γ 線照射による不妊化について II. 最適な照射条件の検討. 植防研報 30: 111-114.
- 林 義則・米田雅典・徳永太蔵 1997. 野外条件下におけるアリモドキゾウムシ不妊化成虫の生存日数及び蛍光色素マークの検出率. 植防研報 33: 65-70.
- 林川修二 2005. 奄美群島におけるアリモドキゾウムシの発生と防除. 今月の農業 49(9): 35-39.
- Heath, R. R., J. A. Coffelt, P. E. Sonnet, F. I. Proshold, B. Dueben and J. H. Tumlinson 1986. Identification of sex pheromone produced by female sweetpotato weevil, *Cylas formicarius elegantulus* (SUMMERS). *J. Chem. Ecol.* 12: 1489-1503.
- Heath, R. R., J. A. Coffelt, F. I. Proshold, R. K. Jansson and P. E. Sonnet 1991. Sex pheromone of *Cylas formicarius*: history and implications of chemistry in weevil management. In *Sweet Potato Pest Management: A Global Perspective* (R. K. Jansson and K. V. Raman eds.). Westview Press, Boulder, Colorado, pp. 79-96.
- 東 正裕・伊藤俊介 1992. 成虫寿命, 雌の生殖能力と次世代発育および性比. アリモドキゾウムシの根絶に向けて (アリモドキゾウムシ研究会 編). 鹿児島県農業試験場大島支場, 名瀬市, pp. 43-49.
- 平松 正 1996. アリモドキゾウムシ高知県室戸市に発生. 神戸植物防疫情報 916: 6.
- 平田健彦 1999. 室戸市における特殊害虫アリモドキゾウムシの根絶対策. 高知県農業改良普及協会「くらしと農業」 13(3): 21-23.
- Howard, F. W. 1982. Diurnal rhythm in *Cylas formicarius elegantulus* and some other arthropods in a sweet potato field. *Florida Entomologist* 65: 194-195.
- 伊波勝雄・屋嘉比収・崎原恒新・宮平友介・座間味栄議 2004. 甘藷と野國總管. 嘉手納町「野國總管甘藷伝来 400 年祭実行委員会」, 沖縄. 209 pp.
- International Institute of Entomology 1993. *Distribution Maps of Pests: Cylas formicarius (F.)*. Series A(Agricultural), Map Number 278, International Institute of Entomology, London.
- 池部誠 1995. 野菜探検隊世界を歩く. 文藝春秋, 東京. 239 pp.
- 井上栄明・上門隆洋 1992. 昆虫寄生性線虫 *Steinernema carpocapsae* のアリモドキゾウムシに対する殺虫性. 九農研 54: 116.
- 井上 享 1960. アリモドキゾウムシと防除の現況. 植物防疫 14:522-526.
- 井上 享 1985. 生息密度推定法と根絶の根絶法 根絶の確認法 (石井象二郎・桐谷圭治・古茶武男 編集). ミバエの根絶 —理論と実際—. 農林水産航空協会, 東京, pp. 209-222.
- 石橋信義 2003. 昆虫病原性線虫の感染行動. 線虫の生物学 (石橋信義 編). 東京大学出版会, 東京, pp. 210-221.
- Ishibashi, N. and E. Kondo 1986. A possible quiescence of the applied entomogenous nematode, *Steinernema feltiae*, in soil. *Jpn. J. Nematol.* 16: 66-67.
- 伊藤俊介 1998. 鹿児島県山川町でアリモドキゾウムシ再発生. 九州植物防疫 558: 3.
- 伊藤俊介・永山才朗・後藤誠太郎・浜砂武久・東 正裕 1991. アリモドキゾウムシ *Cylas formicarius* (FABRICIUS) 成虫の γ 線照射による不妊化について —成虫寿命, 交尾能力, 内部生殖器官および次世代数への影響—. 植防研報 27: 69-73.
- 伊藤俊介・東正裕・吉田隆・永山才朗・亀田尚司・徳永太

- 蔵・押川幹夫・前田力 1993. アリモドキノウムシ *Cylas formicarius* (FABRICIUS) 蛹の低線量 γ 線照射による不妊化について. 一妊性, 性的競争力, 生存率, および奇形の発生に与える照射の影響一. 植防研報 29: 45-48.
- 伊藤俊介・末吉澄隆・林 義則・中村伸一・山下文男・宮後 優 1999. 鹿児島市におけるアリモドキノウムシの発生と防除. 植防研報 35: 35-42.
- 伊藤嘉昭 2008. 不妊虫放飼法の歴史と世界における成功例. 不妊虫放飼法 侵入害虫根絶の技術 (伊藤嘉昭編). 海遊舎, 東京, pp. 1-17.
- Itô, Y. and J. Koyama 1982. Eradication of the melon fly: Role of population ecology in the successful implementation of the sterile insect release method. *Protect. Ecol.* 4: 1-28.
- 岩元順二・伊藤俊介 1989. アリモドキノウムシの生態に関する調査. 九州植物防疫 503: 2.
- 岩元順二・荒巻弥弘 1990. ガンマ線照射によるアリモドキノウムシの不妊化. 植物防疫 44: 124-126.
- 岩元順二・伊藤俊介・真野 勝・山崎英明 1990. アリモドキノウムシ蛹の γ 線照射による不妊化について. 成虫の妊性, 寿命および交尾能力に与える照射の影響. 植防研報 26: 69-72.
- Jansson, R. K. 1991. Biological control of *Cylas* spp. In *Sweet Potato Pest Management: A Global Perspective* (R. K. Jansson and K. V. Raman eds.). Westview Press, Boulder, Colorado, pp. 169-201.
- Jansson, R. K. 1992. Biological approaches for management of weevils of root and tuber crops: A review. *Florida Entomologist* 75: 568-584.
- Jansson, R. K., R. R. Heath and J. A. Coffelt 1989. Temporal and spatial patterns of sweetpotato weevil (Coleoptera: Curculionidae) counts in pheromone-baited traps in white-fleshed sweet potato fields in southern Florida. *Environ. Entomol.* 18: 691-697.
- Jansson, R. K., S. H. Lecrone, R. R. Gaugler and G. C. Smart, Jr. 1990. Potential of entomopathogenic nematodes as biological control agents of sweetpotato weevil (Coleoptera: Curculionidae). *J. Econ. Entomol.* 83: 1818-1826.
- Jansson, R. K. and K. V. Raman 1991. Sweet potato pest management: A global overview. In *Sweet Potato Pest Management: A Global Perspective* (R. K. Jansson and K. V. Raman eds.). Westview Press, Boulder, Colorado, pp. 1-12.
- Jansson, R. K., L. J. Mason and R. R. Heath 1991a. Use of sex pheromone for monitoring and managing *Cylas formicarius* In *Sweet Potato Pest Management: A Global Perspective* (R. K. Jansson and K. V. Raman eds.). Westview Press, Boulder, Colorado, pp. 97-138.
- Jansson, R. K. and S. H. Lecrone 1991. *Euderus purpureas* Yoshimoto (Hymenoptera: Eulophidae): parasitoid of sweetpotato weevil (Coleoptera: Apionidae) in southern Florida. *Florida Entomologist* 74: 596-598.
- Jansson, R. K., S. H. Lecrone and R. Gaugler 1991b. Comparison of single and multiple releases of *Heterorhabditis bacteriophora* Poinar (Nematoda: Heterorhabditidae) for control of *Cylas formicarius* (Fabricius) (Coleoptera: Apionidae). *Biol. Cont.* 1: 320-328.
- Jansson, R. K., S. H. Lecrone and R. Gaugler 1993. Field efficacy and persistence of entomopathogenic nematodes (Rhabditida: Steinernematidae, Heterorhabditidae) for control of sweetpotato weevil (Coleoptera: Apionidae) in southern Florida. *J. Econ. Entomol.* 86: 1055-1063.
- Jansson, R. K. and S. H. Lecrone 1994. Application methods for entomopathogenic nematodes (Rhabditida: Heterorhabditidae): Aqueous suspensions versus infected cadavers. *Florida Entomologist* 77: 281-284.
- Jansson, R. K. and S. H. Lecrone 1997. Effect of sweet potato cultivar on efficacy and persistence of entomopathogenic nematodes for control of *Cylas formicarius*. *Nematropica* 27: 41-52.
- Jayaramaiah, M. 1975. Bionomics of sweet potato weevil *Cylas formicarius* (FABRICIUS). *Mysore J. Agric. Sci.* 9: 99-109.
- 鹿児島県農政部 1968. 侵入害虫アリモドキノウムシの西之表市ならびに揖宿郡閑間町における緊急防除事業の概要. 鹿児島県, 鹿児島. 46 pp.
- 鹿児島県農政部流通対策室・鹿児島県農産物加工研究指導センター 1993. サツマイモ その成分と栄養. 鹿児島県, 鹿児島. 40 pp.
- 鹿児島県農政部・大島支庁ウリミバエ防除対策室 1991. 奄美群島ウリミバエ根絶記念誌. 鹿児島県, 名瀬. 122 pp.
- 鹿児島県農政部食の安全推進課・農林水産省門司植物防疫所 2004. 屋久島におけるゾウムシ2種の緊急防除と根絶. 植物防疫 58: 28-29.
- 鹿児島県大島支庁農林課特殊病害虫係・農業試験場大島支場 2003. 平成14年度アリモドキノウムシ根絶事業に関する試験成績書. 鹿児島県大島支庁農林課特殊病害虫係・農業試験場大島支場, 名瀬. 132 pp.
- 鹿児島県大島支庁農林課特殊病害虫係・農業試験場大島支場 2004. 平成15年度アリモドキノウムシ根絶事業

- に関する試験成績書. 鹿児島県大島支庁農林課特殊病害虫係・農業試験場大島支場, 名瀬. 143 pp.
- 鹿児島県大島支庁農林課特殊病害虫係・農業試験場大島支場 2005. 平成16年度アリモドキゾウムシ根絶事業に関する試験成績書. 鹿児島県大島支庁農林課特殊病害虫係・農業試験場大島支場, 名瀬. 112 pp.
- 鹿児島県大島支庁農林課特殊病害虫係・農業試験場大島支場 2006. 平成17年度アリモドキゾウムシ根絶事業に関する試験成績書. 鹿児島県大島支庁農林課特殊病害虫係・農業試験場大島支場, 名瀬. 127 pp.
- 鹿児島県大島支庁農林課特殊病害虫係・農業試験場大島支場 2007. 平成18年度アリモドキゾウムシ根絶事業に関する試験成績書. 鹿児島県大島支庁農林課特殊病害虫係・農業試験場大島支場, 名瀬. 147 pp.
- 垣花廣幸 1996. ウリミバエの大量増殖法に関する研究. 沖縄県農業試験場研究報告 16: 1-102.
- 加来健治・米田雅典・吉村仁志・伊藤 登 1999. アリモドキゾウムシ雌雄成虫の移動行動について. 植防研報 35: 81-82.
- 上 忠衛 1964. 鹿児島県西之表市におけるアリモドキゾウムシの防除について. 植物防疫 18: 197-200.
- 上門隆洋・瀬戸口脩・前田 力 1993. サツマイモによるアリモドキゾウムシの大量飼育法. 鹿児島県農業試験場研究報告 21: 11-22.
- 上門隆洋・西岡稔彦 1994. アリモドキゾウムシ. 鹿児島県植物防疫のあゆみー植物防疫協会 30周年記念誌一, 鹿児島県植物防疫協会, 鹿児島, pp. 139-141.
- Kandori, I., T. Kimura, H. Tsumuki and T. Sugimoto 2006. Cold tolerance of the sweet potato weevil, *Cylas formicarius* (Fabricius) (Coleoptera: Brentidae), from the Southwestern Islands of Japan. *Appl. Entomol. Zool.* 41: 217-226.
- 川添幸治・瀬戸口脩・中川耕人 1993. 性フェロモン剤と薬剤を組み合わせたアリモドキゾウムシの防除効果. 九病虫研会報 39: 85-87.
- Kawamura, K., T. Sugimoto, Y. Matsuda and H. Toyoda 2002. Detection of polymorphic patterns of genomic DNA amplified by RAPD-PCR in sweet potato weevils, *Cylas formicarius* (Fabricius) (Coleoptera: Brentidae). *Appl. Entomol. Zool.* 37: 645-648.
- 川村清久・豊田秀吉・杉本毅 2003. RAPD-PCR法によるDNA多型をもとにしたアリモドキゾウムシの分類. 近畿大学農学部紀要 36: 13-20.
- Kawamura, K., I. Kandori, Y. Sakuratani and T. Sugimoto 2005. On elytral color dimorphism of sweet potato weevil, *Cylas formicarius* (Fabricius), in the Southwest islands, Japan. *Memoirs of the Faculty of Agriculture of Kinki University* 38: 1-7.
- Kawamura, K., T. Sugimoto, K. Kakutani, Y. Matsuda and H. Toyoda 2007. Genetic variation of sweet potato weevils, *Cylas formicarius* (Fabricius) (Coleoptera: Brentidae), in main infested areas in the world based upon the internal transcribed spacer-1 (ITS-1) region. *Appl. Entomol. Zool.* 42: 89-96.
- Kays, S. J., J. A. Harrison, D. D. Wilson and R. F. Severson 1993. Semiartificial diet for the sweetpotato weevil (Coleoptera: Curculionidae). *J. Econ. Entomol.* 86: 957-961.
- Khan, H. K., S. Jayaraj and R. J. Rabindra 1990. Evaluation of mycopathogens against sweet potato weevil *Cylas formicarius* (F.). *J. Biol. Control* 4: 109-111.
- 木村秀徳・宮後優 1991. アリモドキゾウムシ種子島に発生. 九州植物防疫 512: 2.
- Kinoshita, M and S. Yamamura 1998. Development and prevalence of entomopathogenic nematodes in Japan. *Jpn. J. Nematol.* 28 (Special Issue): 42-45.
- Knipling, E. F. 1955. Possibilities of insect control or eradication through the use of sexually sterile males. *J. Econ. Entomol.* 48: 459-462.
- Knipling, E. F. 1964. The potential role of the sterility method for insect population control with special reference to combining this method with conventional methods. *USDA ARS 33-98: 1-54.*
- Knipling, E. F. 1979. *The basic principles of insect population suppression and management.* USDA Agriculture Handbook No.512. Washington, D.C. 659 pp.
- Knipling, E. F. 1989. 害虫総合防除の原理 (小山重郎・小山晴子 共訳). 東海大学出版会, 東京. 357 pp.
- 小林 仁 1984. サツマイモのきた道. 古今書院, 東京. 214 pp.
- 小林宏義 1960. 奄美群島におけるアリモドキゾウムシの発消長. 九州植物防疫 197:1-2.
- 小濱継雄 1990. 沖縄におけるアリモドキゾウムシ及びイモゾウムシの侵入の経過と現状. 植物防疫 44: 115-117.
- 小濱継雄・久場洋之 2008. 性フェロモンと不妊虫放飼法の組み合わせによるアリモドキゾウムシの根絶ー沖縄県久米島における防除の現状と課題ー. 不妊虫放飼法 侵入害虫根絶の技術 (伊藤嘉昭 編). 海遊舎, 東京, pp. 277-316.
- Komi, K. 2000. Eradication of sweetpotato weevil, *Cylas*

- formicarius* Fabricius from Muroto City, Kochi, Japan.
FFTC Ext. Bull. 493: 15-22.
- 高知県農業改良普及協会 1999. 特殊害虫アリモドキゾウムシの根絶作戦. *くらしと農業* 13(3): 20-47.
- Koyama, J. 1982. Quality problems in the mass-rearing for the melon fly, *Dacus cucurbitae* Coquillett. *JARQ* 16: 181-187.
- 小山重郎 1994. 日本におけるウリミバエの根絶. *応動昆* 38: 219-229.
- 小山重郎 1994. 530 億匹の闘い ウリミバエ根絶の歴史. 築地書館, 東京. 217 pp.
- 久場洋之・照屋 匡・榊原充隆 2000. 不妊虫放飼法によるゾウムシ類の根絶 (9) 久米島における根絶実証事業. *植物防疫* 54: 483-486.
- Kumano, N., T. Kohama and S. Ohno 2007. Effect of Irradiation on dispersal ability of male sweetpotato weevils (Coleoptera: Brentidae) in the Field. *J. Econ. Entomol.* 100: 730-736.
- 桑原浩和 1996. 鹿児島県本土山川町に侵入したアリモドキゾウムシの発生と根絶の経緯. *今月の農業* 40(1): 38-44.
- Lewis, E. E. 2002. Behavioural Ecology. In *Entomopathogenic Nematology* (R. Gaugler ed.). CABI Publishing, New York, pp. 205-223.
- 前原重信 1997. アリモドキゾウムシ鹿児島市で発生. *九州植物防疫* 553: 2.
- 前原重信 1998. 屋久島でイモゾウムシとアリモドキゾウムシが発生 一発見は農家からの通報による. *九州植物防疫* 555: 2.
- Maeto, K. and T. Uesato 2007. A new species of Bracon (Hymenoptera: Braconidae) parasitic on alien sweetpotato weevils in the south-west islands of Japan. *Entomol. Sci.* 10: 55-63.
- 舞木紀玲・小濱継雄・松山隆志・河野伸二 2007. アリモドキゾウムシへのタンパク質マーキングの試み. *九病虫* 53: 50-55.
- Mannion, C. M. and R. K. Jansson 1992a. Comparison of ten entomopathogenic nematodes for control of sweetpotato weevil (Coleoptera: Apionidae). *J. Econ. Entomol.* 85: 1642-1650.
- Mannion, C. M. and R. K. Jansson 1992b. Movement and postinfection emergence of entomopathogenic nematodes from sweetpotato weevil, *Cylas formicarius* (F.) (Coleoptera: Apionidae). *Biol. Control* 2: 297-305.
- Mannion, C. M. and R. K. Jansson 1993a. Infectivity of five entomopathogenic nematodes to the sweetpotato weevil, *Cylas formicarius* (F.), (Coleoptera: Apionidae) in three experiments. *J. Invertebrate Pathol.* 62: 29-36.
- Mannion, C. M. and R. K. Jansson 1993b. Within-root mortality of *Cylas formicarius* (Coleoptera: Apionidae) by entomopathogenic nematodes. *J. Econ. Entomol.* 86: 722-729.
- 正木征樹・桃原 健・小林貴芳・米田雅典・金田昌士 2002a. 沖縄本島におけるアリモドキゾウムシとイモゾウムシの野生寄主植物上での発生活長. *植防研報* 38: 33-38.
- 正木征樹・水野孝彦・桃原 健・佐々木幹了・小林貴芳・金田昌士 2002b. 沖縄本島と石垣島の山岳部におけるアリモドキゾウムシとイモゾウムシの標高別発生調査. *植防研報* 38: 39-43.
- Mason, L. J. 1996. [守屋成一 訳] サツマイモ 一総合的有害生物管理の可能性を探る一. *沖縄農業* 31: 97-105.
- Mason, L. J., R. K. Jansson and R. R. Heath 1990. Sampling range of male sweetpotato weevils (*Cylas formicarius elegantulus*) (Summers) (Coleoptera: Curculionidae) to pheromone traps: influence of pheromone dosage and lure age. *J. Chem. Ecol.* 16: 2493-2502.
- 宮路克彦・田中丈雄 1998. 奄美群島におけるアリモドキゾウムシおよびイモゾウムシの発生拡大. *九病虫研会報* 44: 88-92.
- 宮路克彦・西原 悟・原 洋一・徳永太蔵・鳩野哲也・上門隆洋・伊藤俊介・岩元順二・荒巻弥弘・金城邦夫・祖慶良尚 2000. 不妊虫放飼法によるゾウムシ類の根絶 (6) アリモドキゾウムシの大量増殖・不妊化・マーキング・輸送・放飼. *植物防疫* 54: 472-475.
- 宮田誠志・小濱継雄・杉山巳次 1999. 甘藷塊根によるアリモドキゾウムシ大量増殖技術の確立 (2). 合成性フェロモンを利用した成虫の性別法. 平成10年度九州農業試験研究成績・計画概要集 (病害虫). pp. 256.
- 宮竹貴久 2002. 大量増殖されたウリミバエの遺伝的虫質管理. *岡山大学農学部学術報告* 91: 61-69.
- Miyatake, T., K. Kawasaki, T. Kohama, S. Moriya and Y. Shimoji 1995. Dispersal of Sweetpotato weevil (Coleoptera: Curculionidae) in field with or without sweet potato plants. *Population Ecology* 24: 1167-1174.
- Miyatake, T., S. Moriya, T. Kohama and Y. Shimoji 1997. Dispersal potential of Male *Cylas formicarius* (Coleoptera: Brentidae) over land and water. *Population Ecology* 26: 272-276.
- Miyatake, T., T. Kohama, Y. Shimoji, K. Kawasaki, S. Moriya,

- M. Kishita and K. Yamamura 2000. Dispersal of released male sweetpotato weevil, *Cylas formicarius* (Coleoptera: Brentidae) in different seasons. *Appl. Entomol. Zool.* 35: 441-449.
- 宮崎 勲・岩田雅顕・正木征樹・金田昌士 2001. アリモドキゾウムシ及びイモゾウムシの寄主植物調査. 植防研報 37: 75-79.
- 森本 桂 1984. ミツギリゾウムシ科. 原色日本甲虫図鑑 IV (林 匡夫・森本 桂・木元新作 編著). 保育社, 東大阪, pp. 260-265.
- 森本 桂 1999. サツマイモを加害するゾウムシ類の見分け方. 高知県農業改良普及協会「くらしと農業」 13 (3): 39-42.
- 守屋成一 1994. 光電スイッチによるアリモドキゾウムシ・イモゾウムシ活動量の計測 (予報). 九病虫研会報 40: 111-112.
- Moriya, S. 1995a. The possibility of eradicating two sweet potato pests, *Cylas formicarius* and *Euscepes postfasciatus*, in Japan. *FFTC Ext. Bull.* 403: 1-7.
- Moriya, S. 1995b. A preliminary study on the flight ability of the sweetpotato weevil, *Cylas formicarius* (Fabricius)(Coleoptera: Apionidae) using a flight mill. *Appl. Entomol. Zool.* 30: 244-246.
- 守屋成一 1995. イモゾウムシ, アリモドキゾウムシの根絶は可能か ―根絶防除計画の現状―. 沖縄農業 30: 65-71.
- Moriya, S. 1997. It is possible to eradicate the two weevil pests of sweet potato, *Cylas formicarius* and *Euscepes postfasciatus* from Japan? *Bull. Okinawa Agric. Exp. Sta.* 18: 19-27.
- 守屋成一 1997. イモゾウムシ・アリモドキゾウムシ 成虫の歩行・飛翔能力の計測. 今月の農業 41: 60-65.
- Moriya, S. and S. Hiroyoshi 1998. Flight and locomotion activity of the sweetpotato weevil (Coleoptera: Brentidae) in relation to adult age, mating status, and starvation. *J. Econ. Entomol.* 91: 439-443.
- 守屋成一・宮竹貴久 2000. 不妊虫放飼法によるゾウムシ類の根絶 (2) 移動分散. 植物防疫 54: 459-462.
- Moriya, S. and T. Miyatake 2001. Eradication programs of two sweetpotato pests, *Cylas formicarius* and *Euscepes postfasciatus*, in Japan with special reference to their dispersal ability. *JARQ* 35: 227-234.
- Mullen, M. A. 1981. Sweetpotato weevil *Cylas formicarius elegantulus* (Summers): development, fecundity, and longevity. *Ann. Entomol. Soc. Am.* 74: 478-481.
- 中須和俊 1978. 植物防疫法施行規則の一部改正 ―口永良部島をアリモドキゾウムシの発生地域から解除―. 九州植物防疫 417: 1.
- 永井久雄 1965. アリモドキゾウムシ本土に侵入. 九州植物防疫 260: 1-2.
- 永浜伴紀 1993. 原料用甘藷の用途適正と品質. 日本醸造協会誌 88: 830-838.
- 永浜伴紀・北原兼文・菅沼俊彦 1993. 甘藷品質に及ぼすアリモドキゾウムシ被害の影響 (予報). 鹿児島県科学研究所研究報告 4: 49-55.
- 永山才朗 1993. アリモドキゾウムシの発育に及ぼす温度の影響. 九州植物防疫 526: 2-3.
- 仲盛広明 1988. ウリミバエの大量増殖における性的競争力に関する行動学的・生態学的研究. 沖縄県農業試験場特別研究報告 2: 1-64.
- Nakamori, H. and H. Soemori 1981. Comparison of dispersal ability and longevity for wild and mass-reared melon flies, *Dacus cucurbitae* Coquillett (Diptera: Tephritidae), under field conditions. *Appl. Entomol. Zool.* 16: 321-327.
- 仲盛広明・志賀正和・金城邦夫 1993. 沖縄本島南部のウリミバエ不妊虫放飼下におけるホット・スポット出現地域の特徴. 応動昆 37: 123-128.
- 中根猛彦 1970. 小笠原の昆虫類. 小笠原の自然 - 小笠原諸島の学術・天然記念物調査報告書. 文部省大学学術局・文化庁文化財保護部, 東京, pp. 15-32.
- 名和梅吉 1903. 蟻形象鼻蟲に就いて. 昆虫世界 7: 327-330.
- 日本いも類研究会 2002. さつまいも Mini 白書 Ver.2.2 いも類振興会, つくば. 81 pp.
- 西岡稔彦・川崎修二・平岡俊三・上福元彰・桑原浩和・井手敏和・住吉澄隆・伊藤俊介 2000. 近年におけるゾウムシ類の緊急防除 (1) 鹿児島県各地. 植物防疫 54: 448-452.
- Noblet, R., M. Shepard and P. E. Hunter 1968. Reproduction and flight in the secondary screwworm *Cochliomyia macellaria* Fabr., following gamma radiation of the pupae (Diptera: Calliphoridae). *Can. Ent.* 3: 173-180.
- Nottingham, S. F., K. C. Son, D. D. Wilson, R. F. Severson and S. J. Kays 1989. Feeding and oviposition preferences of sweet potato weevil, *Cylas formicarius elegantulus* (SUMMRES), on storage roots of sweet potato cultivars with differing surface chemistries. *J. Chem. Ecol.* 15: 895-903.
- Novy, J. E. 1991. Screwworm control and eradication in the southern United States of America. *World Animal Review*. Special issue: 18-27.

- O'Brien, P. J. 1972. The sweet potato; Its. origin and dispersal. *American. Anthropologist* 74: 343-365.
- 沖縄県農林水産部 1994. 沖縄県ミバエ根絶記念誌. 沖縄県, 那覇. 349 pp.
- 大原謙二・三島重治・坂本利貞・加来健治 2000. 奄美大島におけるアリモドキゾウムシ及びイモゾウムシの分布. 植防研報 36: 67-70.
- 大林隆司・稲葉 慎・鈴木 創・加藤 真 2003. 小笠原諸島産昆虫目録 (2002 年版). 小笠原研究 29: 17-74.
- 大形 浩・横山秀樹 2002. アリモドキゾウムシ根絶—高知県室戸市—. 神戸植物防疫情報 951: 2.
- 大村克己 2000. ゾウムシ類の根絶の意義, 事業の展開. 植物防疫 54: 443.
- Pencoe, N. L. and J. R. Phillips 1987. The cotton boll weevil: legend, myth, reality. *J. Entomol. Sci. Supplement* : 30-51.
- Proshold, F. I., J. L. Gonzalez, C. Asencio and R. R. Heath 1986. A trap for monitoring the sweetpotato weevil (Coleoptera: Curculionidae) using pheromone or live females as bait. *J. Econ. Entomol.* 79: 641-647.
- Rajamma, P. 1980. On some natural enemies of sweet potato weevil *Cylas formicarius* Fab. (Curculionidae: Coleoptera). *J. Root Crops* 6: 59-60.
- Rajamma, P. 1983. Biology and bionomics of sweet potato weevil *Cylas formicarius* FABR. *Proc.Sym.Insect Ecol. & Resource Manage.* Sanatan Dharm College, Muzaffarnagar, pp. 87-92.
- Rajamma, P and T. Premkumar, 1984. Sweet potato weevil. *Indian Farming.* 33: 62-63.
- Ram, G. M., B. K. Rao, S. S. Thakur, P. Jodson and N. S. Raj 1980. Sexing the pupae of sweet potato weevil, *Cylas Formicarius* F., (Coleoptera: Curculionidae) *J. Anim. Morphol. Physiol.* 27: 312-314.
- Reinhard, H. J. 1923. The sweet potato weevil. *Tex. Agric. Exp. Stn. Bull.* 308: 1-90.
- 栄 政文 1962. さつまいものアリモドキゾウムシの生態ならびに防除に関する研究. 農林省振興局植物防疫課・鹿児島県農業試験場, 24 pp.
- 栄 政文 1968. 奄美群島に発生する特殊病害虫: アリモドキゾウムシ. 鹿児島県農業試験場大島支場 65 周年記念誌 pp. 27-48.
- 栄 政文 1988. 奄美群島の病害虫—私と病害虫のかかわりあい—. 互助印刷, 鹿児島. 248 pp.
- 坂井健吉 1989. 野菜園芸大百科 13 ジャガイモ・サツマイモ・サトイモ・ナガイモ・レンコン. 農山漁村文化協会, 東京, 161-168 pp.
- 桜井宏紀 2000. 不妊虫放飼法によるゾウムシ類の根絶 (4) 不妊虫の生殖生理. 植物防疫 54: 466-468.
- 桜井宏紀・渡辺博幸・杉本 毅・櫻谷保之・瀬戸口脩 川添幸治 1994. アリモドキゾウムシの配偶子形成に及ぼすガンマ線照射の影響. 岐阜大学農学部研究報告 59: 11-20.
- 桜井宏紀・高橋絵里・浅野貴博・井上敦夫 1998a. 土壌より分離された糸状菌のアルファルファタコゾウムシに対する生物的防除効果. 岐阜大学農学部研究報告 63: 25-30.
- 桜井宏紀・土山康彦・和泉勝一・山口卓宏 1998b. ガンマ線照射によるアリモドキゾウムシ雄の放射線不妊化機構の超微形態学的観察. 岐阜大学農学部研究報告 63: 31-36.
- Sakuratani, Y., T. Sugimoto, O. Setokuchi, T. Kamikado, K. Kiritani and T. Okada 1994. Diurnal changes in micro-habitat usage and behavior of *Cylas formicarius* (Fabricius) (Coleoptera: Curculionidae) adults. *Appl. Entomol. Zool.* 29: 307-315.
- Sakuratani, Y., K. Nakao, N. Aoki, and T. Sugimoto 2001. Effect of population density of *Cylas formicarius* (Fabricius)(Coleoptera: Brentidae) on the progeny populations. *Appl. Entomol. Zool.* 36: 19-23.
- 桜谷保之・杉本 毅・小濱継雄 2000. 不妊虫放飼法によるゾウムシ類の根絶 (1) 生活システム. 植物防疫 54: 455-458.
- 佐々木幹了・安達浩之・我謝徳光 2002. 石垣島及び宮古島におけるアリモドキゾウムシとイモゾウムシの野生寄主上の発生生態. 植防研報 38: 81-85.
- SAS Institute Japan Inc. 2002. JMP R 統計およびグラフ機能ガイド バージョン 5 日本語版. SAS Institute Japan Inc., 東京. 304 pp.
- Sato, K., I. Uritani, T. Saito and H. Honda 1977. Isolation of the sweet potato weevil factor causing terpene induction in sweet potato roots. *Agric. Biol. Chem.* 41: 1419-1423.
- Sato, K., I. Uritani and T. Saito 1981. Characterization of the terpene-inducing factor isolated from the larvae of the sweet potato weevil, *Cylas formicarius* Fabricius (Coleoptera: Brentidae). *Appl. Entomol. Zool.* 16: 103-112.
- Sato, K., I. Uritani and T. Saito 1982. Properties of Terpene-Inducing Factor Extracted form Adults of the Sweet Potato Weevil, *Cylas formicarius* Fabricius (Coleoptera: Brentidae). *Appl. Entomol. Zool.* 17: 368-374.
- 沢 四郎 1960. アリモドキゾウムシ種子島及び馬毛島に侵入. 九州植物防疫 193: 3-4.

- 沢 四郎・水流照男 1959. アリモドキゾウムシ九州本土へ侵入の危険たかまる. 九州植物防疫 184: 1-2.
- 瀬戸口脩 1990. 奄美群島におけるアリモドキゾウムシの発生生態と防除対策. 植物防疫 44: 111-114.
- 瀬戸口脩 2002. 奄美の農業害虫. トップコピー, 鹿児島. 152 pp.
- 瀬戸口脩 2005. 鹿児島県の特有害虫アリモドキゾウムシの防除技術確立 - 第 60 回農業技術功労者表彰受賞記 -. 農業技術 60: 99-102.
- 瀬戸口脩・中村洋一・久保義昭 1991. 合成性フェロモンと殺虫剤を混用したアリモドキゾウムシの誘殺板. 応動昆 35: 251-253.
- Setokuchi, O., K. Kawasoe and T. Sugimoto 1996. Invasion of the sweet potato weevil, *Cylas formicarius* (Fabricius), into Southern Islands in Japan and strategies for its eradication. In *Proc. Int. Workshop on the Pest Management Strategies in Asian Monsoon Agroecosystems* (N. Hokyo and G. Norton eds.). KNAES, Kumamoto, pp. 197-207.
- 瀬戸口脩・安田慶次 2000. 不妊虫放飼法によるゾウムシ類の根絶 (3) 個体群のモニタリング. 植物防疫 54: 463-465.
- Setokuchi, O., T. Sugimoto, T. Yamaguchi, S. Izumi, T. Tokunaga, K. Kawasoe, T. Tanaka, N. Makino and Y. Sakuratani 2001. Efficiency of the sterile insect release method as an eradication measure for the sweet potato weevil, *Cylas formicarius* (Fabricius) (Coleoptera: Brentidae) in the field. *Appl. Entomol. Zool.* 36: 161-167.
- Sharp, J. L. and D. L. Chambers 1976. Gamma irradiation effect on the flight mill performance of *Dacus dorsalis* and *Ceratitis capitata*. *Proc. Hawaii Entomol. Soc.* 12: 335-344.
- Shepard, M., R. Noblet and P. E. Hunter 1968. The effect of gamma radiation upon the flight activity of the fall armyworm, (Spodoptera: Noctuidae). *J. Georgia Entomol. Soc.* 3: 57-61.
- Sherman, M. and M. Tamashiro 1954. The sweetpotato weevil on Hawaii, their biology and control. *Hawaii Agric. Exp. Stn. Tech. Bull.* 23: 1-36.
- Shiga, M. 1986. Analysis of spatial distribution in fruit fly eradication. NATO ASI Series, Vol. G11, Pest control: Operations and systems analysis in fruit fly management. (M. Mangel et al. eds.), Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 387-398.
- Shimizu, T. and S. Moriya 1996a. Flight time and flight age in the sweet potato weevil, *Cylas formicarius* (Fabricius) (Coleoptera: Brentidae). *Appl. Entomol. Zool.* 31: 575-580.
- Shimizu, T. and S. Moriya 1996b. Daily locomotor activity in the Indian sweet potato weevil, *Euscepes postfasciatus* (Fairmaire) (Coleoptera: Curculionidae) and sweet potato weevil, *Cylas formicarius* (Fabricius) (Coleoptera: Brentidae) monitored by an actograph system. *Appl. Entomol. Zool.* 31: 626-628.
- Shimizu, Y., N. Haruno and M. Yamagishi 2007. Rearing the sweet potato weevil, *Cylas formicarius* (Fabricius) (Coleoptera: Brentidae) on an artificial diet developed for the West Indian sweet potato weevil, *Euscepes postfasciatus* (Fairmaire) (Coleoptera: Curculionidae). *Appl. Entomol. Zool.* 42: 525-531.
- 下地幸夫 2004. サツマイモの害虫イモゾウムシの人工飼育法. 沖縄県特殊病害虫特別防除事業特別研究報告 3: 1-73.
- Shimoji, Y. and T. Kohama 1996. An artificial larval diet for the West Indian sweet potato weevil, *Euscepes postfasciatus* (FAIRMAIRE) (Coleoptera: Curculionidae). *Appl. Entomol. Zool.* 31: 152-154.
- Shimoji, Y., M. Sugiyama and T. Kohama 1999. Marking of the West Indian sweet potato weevil *Euscepes postfasciatus* (Fairmaire) (Coleoptera: Curculionidae) with Calco Oil Red dye. I. Effect of dye added to the artificial larval diet on development of the weevils, yield of adults and long lasting internal coloration in the adult. *Appl. Entomol. Zool.* 34: 231-234.
- Singh, P. 1977. Artificial diets for insects, mites and spiders. IFI/Plenum. New York. 594pp.
- Singh, P. and R. F. Moore 1985a. Handbook of insect rearing Vol.1. Elsevier. Amsterdam.
- Singh, P. and R. F. Moore 1985b. Handbook of insect rearing Vol.2. Elsevier. Amsterdam.
- Smit, N. E. J. M. 1997. Integrated pest management for sweetpotato in Eastern Africa. *M.Sc Thesis*, Agricultural University Wageningen. 151 pp.
- Smits, P. H. 1996. Post-application persistence of entomopathogenic nematodes. *Biocontrol Science and Technology* 6: 379-387.
- Steiner, L. F., E. J. Harris, W. C. Mitchell, M. S. Fujimoto and L. D. Christenson 1965. Melon fly eradication by overflooding with sterile flies. *J. Econ. Entomol.* 58: 519-522.
- Stock, S. P., H. Y. Choo and H. K. Kaya 1997. First record of

- Steinernema glaseri* Steiner, 1929 (Nematoda: Steinernematidae) in Asia, with notes on intraspecific variation. *Nematologica*. 43: 377-381.
- Subramanian, T. R. 1959. Observations on the biology of *Cylas formicarius* F. at Coimbatore. *Madras Agric. J.* 146: 293-297.
- Suenaga, H., A. Tanaka, H. Kamiwada, T. Kamikado and N. Chishaki 2000. Long-term changes in age-specific egg production of two *Bactrocera cucurbitae* (Diptera: Tephritidae) strains mass-reared under different selection regimes, with different egg collection methods. *Appl. entomol. zool.* 35: 13-20.
- 末永 博・藤川和博 2003. 不妊虫放飼によるアリモドキゾウムシの根絶. 放射線と産業 98: 4-9.
- 末永利夫・瀬戸口脩・栄 清一 1987. 奄美群島におけるアリモドキゾウムシおよびイモゾウムシの発生分布. 九病虫研会報 33: 116-118.
- 末吉澄隆 1998a. 鹿児島市のアリモドキゾウムシ根絶. 九州植物防疫 558: 1.
- 末吉澄隆 1998b. 下甕島（鹿児島県）にアリモドキゾウムシ発生. 九州植物防疫 559: 5.
- 末吉澄隆 1999. 種子島からアリモドキゾウムシ根絶さるー植物防疫法施行規則の一部改正ー. 九州植物防疫 561: 1.
- 杉本 毅 1990. アリモドキゾウムシの生物学. 植物防疫 44: 107-110.
- 杉本 毅 2000. 2種のゾウムシ類の起源, 分散, 我が国への侵入. 植物防疫 54: 444-447.
- 杉本 毅 2006. 特殊害虫アリモドキゾウムシの根絶ー外来生物問題に関連して. 環動昆 17(3): 117-122.
- 杉本 毅・桜谷保之 1992. 不妊虫の性的競争力. アリモドキゾウムシの根絶に向けて(アリモドキゾウムシ研究会 編). 鹿児島県農業試験場大島支場, 名瀬市, pp. 181-184.
- Sugimoto, T., Y. Sakuratani, O. Setokuchi, K. Kawazoe, K. Kiritani and T. Okada 1994a. Estimation of male adult population of sweet potato weevils, *Cylas formicarius* (FABRICIUS)(Coleoptera, Curculionidae) on Kikai Island in Japan. *Appl. Entomol. Zool.* 29: 359-367.
- Sugimoto, T., Y. Sakuratani, O. Setokuchi, T. Kamikado, K. Kiritani and T. Okada 1994b. Estimations of attractive area of pheromone traps and dispersal distance, of male adults of sweet potato weevil, *Cylas formicarius* (FABRICIUS) (Coleoptera: Curculionidae). *Appl. Entomol. Zool.* 29: 349-358.
- Sugimoto, T., Y. Sakuratani, H. Fukui, K. Kiritani and T. Okada 1996. Estimating the reproductive properties of the sweetpotato weevil, *Cylas formicarius* (Fabricius) (Coleoptera: Curculionidae). *Appl. Entomol. Zool.* 31: 357-367.
- 杉本 毅・川村清久・香取郁夫 2007. アリモドキゾウムシの世界的拡散と我が国における定着可能地域の推定. 植物防疫 61: 565-570.
- Sugiyama, M., Y. Shimoji and T. Kohama 1998. Marking of the West Indian sweet potato weevil *Euscepes postfasciatus* (Fairmaire)(Coleoptera: Curculionidae) with Calco Oil Red dye. II. Effect of the dye on fecundity, longevity and sexual maturity. *Appl. Entomol. Zool.* 33: 375-378.
- Sutherland, J. A. 1986. A review of the biology and control of the sweetpotato weevil *Cylas formicarius* (Fab.). *Tropical Pest Management* 32: 304-315.
- Suzuki, Y. and J. Koyama 1980. Temporal Aspects of Mating Behavior of the Melon Fly, *Dacus cucurbitae* COQUILLET (Diptera: Tephritidae): A Comparison between Laboratory and Wild Strains. *Appl. entomol. zool.* 15: 215-224.
- 鈴木芳人・宮井俊一 1997. 不妊虫雄放飼による害虫根絶法の理論的考察: 不完全不妊虫の放飼条件. 九農研 59: 78.
- 鈴木芳人・宮井俊一 2000. 不妊虫放飼法によるゾウムシ類の根絶(5) 不完全不妊虫の利用ー理論的アプローチ. 植物防疫 54: 469-471.
- 高曽根勉 1999. 室戸市における特殊害虫アリモドキゾウムシの根絶対策. 高知県農業改良普及協会「くらしと農業」 13(3): 31-34.
- Talekar, N. S. 1982. Effect of a sweetpotato weevil (Coleoptera: Curculionidae) infestation on sweet potato root yields. *J. Econ. Entomol.* 75: 1042-1044.
- Talekar, N. S. 1987. Studies on the sex pheromone of sweetpotato weevil. *Prog. Report Asian Veg. Res. Dev. Cent.*: 12-19.
- Talekar, N. S. and S. T. Lee 1987. Studies on the utilization of a female sex pheromone for the management of sweetpotato weevil, *Cylas formicarius* (F.) (Coleoptera: Curculionidae). *Bull. Inst. Zool. Acad. Sin.* 28: 281-288.
- 照屋 匡・西田喜美子・田尾政博・久場洋之 1985. ウリミバエ *Dacus cucurbitae* Coquillett (Diptera: Tephritidae)の精巢による不妊虫と野生虫の判別. 沖縄農業: 20: 31-37.
- 鳥越博明・和泉勝一・山口卓宏 2000. 天敵糸状菌

- Metarhizium anisopliae* のアリモドキゾウムシに対する殺虫活性とサツマイモほ場における防除効果. 九病虫研会報 46: 101-106.
- 東京府小笠原島廳 1914. 昆虫. 小笠原島ノ概況及森林 (東京府小笠原島廳 編). 東京府小笠原島廳, 東京, pp. 110-127.
- 瓜谷育三 2001. サツマイモの病傷害に伴うフィトアレキシンの生成・変換. ストレスの植物生化学・分子生物学: 熱帯性イモ類とその周辺 (瓜谷育三 編). 学会出版センター, 東京, pp. 87-122.
- Villacarlos, L. T. and M. F. U. Granados-Polo 1989. Potential of *Metarhizium anisopliae* for control of the sweet potato weevil, *Cylas formicarius* (F.) (Curculionidae: Coleoptera). *Philippine J. Crop Sci.* 14: 109-114.
- Walker, J. R. 1966. Reproductive potential of the sweetpotato weevil after exposure to ionizing radiations. *J. Econ. Entomol.* 59: 1206-1208.
- West, S. A. 1977. Studies on the biology and ecology of the sweet potato stem borer *Megastes grandalis* Guen. in Trinidad. M.S. Thesis. University of the West Indies, Trinidad.
- Wolfe, G. W. 1991. The origin and dispersal of the pest species of *Cylas* with a key to the pest species groups of the world. In *Sweet Potato Pest Management: A Global Perspective* (R. K. Jansson and K. V. Raman eds.), Westview Press, Boulder, Colorado, pp. 13-43.
- 山岸正明・下地幸夫 2000. 不妊虫放飼法によるゾウムシ類の根絶 (7) イモゾウムシの大量増殖・不妊化・マーキング・輸送・放飼. 植物防疫 54: 476-478.
- Yamamura, K., S. Wakamura and S. Kozai 1992. A method for population estimation from a single release experiment. *Appl. Entomol. Zool.* 27: 9-17.
- 山中 聡 2001. 昆虫病原性線虫スタイナーネマの基礎から応用. 関東東山病虫研報 48: 1-5.
- Yamanaka, S., H. Tanabe and K. Takeuchi 1995. Vertical dispersal and infectivity of *Steinernema glaseri*, *S. anomali* and *S. kushidai* (Nematoda: Steinernematidae). *Jpn. J. Nematol.* 25: 24-32.
- 山崎 昭 1972. 種子島地域のアリモドキゾウムシ完全撲滅. 九州植物防疫 340: 1.
- 安田慶次 1993. 沖縄県におけるアリモドキゾウムシ, イモゾウムシのサツマイモ畑での発生消長. 九病虫研会報 39: 88-90.
- 安田慶次 1998. イモゾウムシ・アリモドキゾウムシの総合的管理に関する研究. 沖縄県農業試験場研究報告 21: 1-80.
- Yasuda, K. 1999. Auto-Infection System for the Sweet Potato Weevil, *Cylas formicarius* (Fabricius) (Coleoptera: Curculionidae) with Entomopathogenic Fungi, *Beauveria bassiana* Using a Modified Sex Pheromone Trap in the Field. *Appl. Entomol. Zool.* 34: 501-505.
- 安田慶次・杉江 元 1990. アリモドキゾウムシの合成性フェロモンの野外での誘引性. 植物防疫 44: 121-123.
- 安田慶次・杉江元・Heath, R. R. 1992. アリモドキゾウムシの合成性フェロモンの野外条件下における誘引性. 応動昆 36: 81-87.
- 安田慶次・小濱継雄 1990. 沖縄県におけるイモゾウムシとアリモドキゾウムシの分布. 九病虫研会報 36: 123-125.
- 安田慶次・高江洲和子・上原勝江 1997. 天敵糸状菌 *Beauveria bassiana* のアリモドキゾウムシ成虫に対する感染性に及ぼす温度, 湿度, 分生子密度の影響. 応動昆 41: 55-58.
- 安田慶次・豊里哲也・高江洲和子 2000. アリモドキゾウムシ成虫に対する天敵糸状菌 *Beauveria bassiana* のオイル混入による殺虫率の増大. 応動昆 44: 241-243.
- 安田慶次・本郷智明・江藤菜穂子 2004. 視覚刺激を付加した新しいタイプのアリモドキゾウムシ防除用フェロモン剤. 応動昆 48: 87-93.
- Yen, D. E. 1982. Sweet potato in historical perspective. In *Sweet potato, Proceedings of the 1st international symposium* (R. L. Villareal and T. D. Giriggs eds.), AVRDC, Publ. No. 82-172, Taiwan. pp. 17-30.
- 吉田 隆 1982. トカラ列島及び奄美群島におけるアリモドキゾウムシ発生調査. 九州植物防疫 458: 1.
- 吉村仁志・米田雅典・加来健治・伊藤 登 1999. アリモドキゾウムシの野生寄主植物, ノアサガオ及びグンバイヒルガオにおける野外の寄生実態調査. 植防研報 35: 27-33.
- 吉澤 治 1993. わが国において根絶に成功したミバエ類の根絶防除事業の概要. 植物防疫 47: 527-533.
- Yoshizawa, O. 1997. Successful eradication programs on fruit flies in Japan. *Res. Bull. Pl. Prot. Japan* 33: 1-10.
- 湯田達也・中村孝久・和田朋彦・田中丈雄・木村浩司・牧野伸洋・山口卓宏・和泉勝一・川添幸治 2000. 不妊虫放飼法によるゾウムシ類の根絶 (8) 喜界島における根絶実証事業. 植物防疫 54: 479-482.
- 湯島 健 1962. 昆虫の人工食餌による飼育の現状と将来 (1). 農業技術 14: 172-175.

Studies of Ecology and Improvement of Eradication Technique of the Sweet Potato Weevil, *Cylas formicarius* (Fabricius) (Coleoptera: Curculionidae) in the Amami Islands

Takuhiro Yamaguchi

Summary

The sweet potato weevil, *Cylas formicarius* (Fabricius), is one of the most destructive insect pests of the sweet potato, *Ipomoea batatas* (L.) Lam., throughout the tropical and subtropical regions of the world. In Japan, this weevil is distributed and established in the Southwestern Islands (Nansei Shoto) south of 30° north latitude and in the Ogasawara (Bonin) Islands. The transportation of *C. formicarius* and its host plants, including sweet potato tuberous roots, from infested to uninfested regions is strictly controlled by the Plant Protection Law of Japan to prevent the weevil from expanding its distribution. Thus, eradication of this weevil is the prerequisite for free transportation of sweet potatoes from such islands to the mainland markets in Japan. Two preliminary projects to eradicate *C. formicarius* mainly with a sterile insect technique (SIT) have been carried out by the Kagoshima prefectural government since 1988 and the Okinawa prefectural government since 1990 with financial support from the Japanese government. From 1988 to 2001, a series of experiments were conducted to establish 1) a technique for rearing large numbers of weevils on the sweet potato, 2) their sterilization with gamma irradiation, 3) the development of methods for suppressing the wild weevil population and 4) monitoring traps using a synthetic sex pheromone. These were followed by a pilot experimental project of eradicating the weevils with SIT on Amami-Oshima Island and Kikai Island in the Amami Islands, Kagoshima Prefecture. Based on these results, a large-scale eradication project using SIT was initiated in 2001 on Kikai Island. This paper reports on the biology of the weevil in the Amami Islands and improvement since 1988 in the eradication techniques that are essential to SIT.

1. Biology of *C. formicarius* in Kikai Island

(1) Distribution of the adults

Male weevils were captured in most parts of Kikai Island by traps baited with synthetic sex pheromone (hereafter, pheromone trap). In the residential area where the houses were densely built, the numbers of males captured by pheromone traps were fewer than other areas. These results may be explained by the fact that the residential areas offered a smaller area for the growth of the wild host plants. The numbers of male weevils captured by pheromone traps in the *Ipomoea pes-caprae* tended to be larger than those caught in the *Ipomoea indica* colony. This tendency was clearly observed from March until August.

(2) Annual occurrence

The annual size of the weevil population in Kikai Island was estimated by the number of males captured by the pheromone traps. The number of those captured increased beginning in July or August and reached its peak in late September to October. Subsequently, it decreased rapidly and remained low from December until the next June. These results showed that the weevil population size on Kikai Island was small during winter, began to increase gradually in spring, and was the largest in September or October, reaching a peak population density in the period of one year.

(3) Estimate of male adult population size at its low density period

The male adult population at its high density period in September was about five times higher than at its low density period in May, both of which were estimated by Yamamura's method (Yamamura et al., 1992). Based on this calculation and on an estimate of the maximal population size at less than four million on Kikai Island (Sugimoto et al., 1994), the total number of male weevils at their low density period would be considered to be less than 800,000.

(4) Body size of the wild male adults

The average body size of wild male weevils captured by pheromone traps on Kikai Island was about 5.7 mm. No clear seasonal changes were observed in the mean body size and its variance.

2. Ecology of *C. formicarius* during winter

(1) Overwintering stages and their development

Development and emergence from host plants of the weevils were investigated in winter that was important to effective execution of the SIT. Every developmental stage of the weevil (except the egg stage, which was not examined) was found in sweet potato tuberous roots during winter on Amami-Oshima Island. Adults and third instars were dominant. The weevil larvae in the sweet potato roots continued to develop during winter, although their development was delayed due to low temperatures. In addition, adult weevils continued to emerge from the host plants throughout winter. These results showed that the larvae and pupae did not enter diapause or cease the development in winter.

(2) Survival of adult weevils during winter

In winter most adult weevils were found under stones and fallen leaves on the ground surface or within the top 5 cm of the soil in sweet potato fields and did not dispersed much from the host plants. The adult weevils that had been released both in a sweet potato field and a field cage in December survived until the following late March or late April. This result suggests that most of the females that start to oviposit after overwintering came from eggs laid in the previous September and October.

(3) Mating in winter

The percentage of the mated wild females in the sweet potato fields began to decrease in autumn and was its lowest in January. Then it increased after February and reached more than 80% in April. When the unmated females reared under outdoor conditions were released in the fields in December and January, few mated females were found among the recaptured ones until early February. These results suggested that the weevil hardly mated during winter in Amami-Oshima Island. Since the wild males are known to be able to mate even in winter, suppression of mating during winter might be caused by the fact that none of the females released the sex pheromone during winter.

(4) Oviposition in winter

No wild females were found to develop their ovarian follicles or have mature eggs from late November to late January, and wild females began these developments only after late February. However, the proportions of females with mature eggs in late February greatly differed year by year. The number of eggs laid by wild weevils on the sweet potato tuberous root traps gradually decreased after October and remained very low from late December to mid February. These results showed that the wild females hardly laid any eggs in winter but those that emerged during winter would begin to lay eggs after late March.

3. Suppression of the wild weevil population with biological control methods

(1) Infectivity of Steinernematid nematodes under laboratory conditions

The pathogenicity of *Steinernema carpocapsae* ("All" strain), *S. feltiae*, *S. riobrave* and *S. glaseri* ("326", "328", "Mungyeong" and "Dongrae" strains) was checked against the sweet potato weevil under laboratory conditions. *S. carpocapsae* induced the highest mortality in both sexes of the adult sweet potato weevil (>90%). About 30%-60% of weevil pupae and larvae in the tuberous root of sweet potatoes were killed by *S. riobrave*, *S. glaseri* ("Mungyeong" strain) and *S. glaseri* ("Dongrae" strain).

(2) Efficacy of *S. carpocapsae* in the field

The efficacy of *S. carpocapsae* ("All" strain) on the suppression of the weevil population was tested in a sweet potato field. Application of *S. carpocapsae* ("All" strain) successfully reduced the root damage rate and root damage index by approximately 60% and 40%, respectively, compared with those in the control fields. These results suggested that *S. carpocapsae* ("All" strain) would be

an appropriate and effective biocontrol agent for suppressing the weevil population.

4. Improvement of mass production and the use of partially sterilized *C. formicarius*

(1) Mass production of the weevils using inexpensive sweet potato cultivars

Three sweet potato cultivars used mainly for starch and alcohol production (“Shirosatsuma,” “Shiroyutaka” and “Koganesengan”) were compared with another used for cooking (“Tosabeni”) to examine the feasibility of these three cultivars as an inexpensive diet material for the mass production of adult sweet potato weevils that were intended to be sterilized for insect release. The emergence time of new adults from the roots of Shiroyutaka was slightly earlier and that of Koganesengan slightly later, than that from the roots of Tosabeni. The number of adult weevils available for sterile insect release was no more than 2.7% less when weevils were reared on Koganesengan than when reared on Tosabeni. There was no significant difference in the number of adult weevils produced per gram of sweet potato root between the three cultivars and Tosabeni. Importantly, the percentages of males among emerged adults (the sex ratio) were significantly higher in the three cultivars than in Tosabeni. The weevils in the root of Shiroyutaka tended to advance to the stage suitable for irradiation about 1-2 days earlier than those in Tosabeni. Based on these results, it was concluded that the three cultivars “Shirosatsuma”, “Shiroyutaka” and “Koganesengan” were suitable as diet materials for the mass production of weevils.

(2) Sterility and longevity of adult weevils irradiated with gamma rays at variable doses in the pupal stage.

The sterility of both sexes of adults irradiated with gamma rays at 40, 50Gy, 60Gy and 70Gy in their pupal stage and the longevity of the males were examined. At any dose levels, the offspring were produced when irradiated males had been allowed to mate with non-irradiated females. On the other hand, when irradiated females were allowed to mate with non-irradiated males, the next generation was obtained only for the dose levels of 40Gy and 50Gy, and females were completely sterilized when exposed to 60Gy and 70Gy irradiation. Since the females reared with the present mass production system were irradiated at a dose of 50Gy in their pupal stage, it was estimated that about 0.9% of the irradiated females might oviposit fertile eggs, assuming that the number of eggs laid per irradiated female was the same as that per non-irradiated female. However, irradiated females lived shorter and were less fecund than normal ones. The longevity of irradiated males was thought to be shortened with an increase in the irradiation dose since the longevity of 40Gy and 50Gy irradiated males were significantly greater than for 60Gy, 70Gy and 80Gy irradiated males.

(3) Influence of male weevil density on sexual competitiveness

Influence of male adult density on females was investigated to evaluate sexual competitiveness between males irradiated at doses of 50Gy and normal males. Sexual competitiveness of the irradiated males tended to decrease as the male density (the proportion of irradiated and normal males was fixed at 1:1) increased from two to eight times the female density, while the sexual competitiveness of the irradiated males seemed to be higher than for normal ones when the density of males became 16 times that of females. However, no statistically significant difference was detected in the relationship between irradiated male densities and sexual competitiveness.

(4) Sexual competitiveness of irradiated male adults

Sexual competitiveness of adult male irradiated with gamma rays at a dose of 50Gy in the pupal stage was evaluated in the laboratory. When the proportion of total males (irradiated and wild males) to females was fixed at 2:1 and then the ratio of irradiated males to wild males was changed to 0.5, 1, 2 and 5, respectively, the index of sexual competitiveness (cf') was more than 1 except when the irradiated/wild ratio was 2. Since the mean cf' value was 1.21, under laboratory conditions the males irradiated with 50Gy had an equal or higher sexual competitiveness compared with wild males.

(5) The ability of irradiated males to find virgin females in the field

Using pheromone traps, we compared the ability to find virgin females in the field between males irradiated with 50Gy and wild males. It took within 10, 20 and 60 minutes for the irradiated males who were released to reach the pheromone traps placed at the distance of 5m, 20m and 30m from the releasing point, respectively. On the other hand, it took within 10 minutes for the wild males to

reach the traps placed less than 20m from the releasing point. Two days after release, the ratio of the irradiated males to wild ones ($=IC/WC$ ratio) captured by the traps was less than one, and then the IC/WC ratio gradually approached a value of 1. These results suggested that the ability to search for wild females was apparently lower for 50Gy irradiated males than wild ones. Since it was obvious that the ability of the irradiated males to reach the virgin females was lower than that of the wild males, when the inclusive sexual competitiveness of irradiated males was calculated based on the ratio of 50Gy irradiated males to wild insects ($=M/U$ ratio), both being captured by the pheromone traps, it might be appropriate that the value of M/U ratio should be adjusted to about 1/2-1/3 lower than its actual value.

(6) Dispersal ability of 50Gy irradiated males in winter

The dispersal ability of male adults irradiated with gamma rays at doses of 50Gy in the pupal stage was investigated using pheromone traps in winter. The maximum and average dispersal distances estimated for the males reared successively for two to seven years suggested that the dispersal ability of the those males had not decreased. Furthermore, fluorescent dye for marking the males did not affect their dispersal ability. Although the maximum dispersal distance of 50Gy irradiated males was shorter than that of wild males, no influence of the 50Gy irradiation was detected in the male dispersal ability; the average dispersal distance did not differ between them. When the mean daily temperature exceeded 20 °C, dispersal of the males was activated. The intervals between the points for releasing irradiated males would be recommended as ca. 15m when they were released once a week in winter because the average dispersal distance of 50Gy irradiated males in December was about 7-8m per week.

5. Perspectives

(1) Use of tuberous roots of sweet potato produced in Kikai Island for weevil mass production

In the eradication project on Kikai Island, the island is divided into several areas to allow the project to proceed step by step in these areas. Thus, if the eradication of the weevils is achieved in one of such divided areas, the sweet potato tuberous roots produced in that area can be used for the mass production of the weevils. In this case, when the mass-produced weevils are irradiated in the adult stage after emerging from the tuberous root, no weevils are released in the field without irradiation even if the tuberous roots for rearing weevils were infested by wild weevils. The use of sweet potatoes produced on Kikai Island should be encouraged so as to advance the project smoothly in cooperation with the local residents and farmers as well as to decrease the cost of mass producing the weevils.

(2) Searching for effective biological control agents for the sweet potato weevil

In the Amami Islands, late winter to early spring is the most suitable season to start suppression of the wild weevil populations efficiently before releasing the sterile weevils because the density of the wild adults becomes lowest in that period. In addition, the weevils may be vulnerable to pathogens and entomopathogenic nematodes during winter because they are inactive and dwell at humid sites, i.e., on and under the ground around the host plants. In the future, it will be necessary to search for effective species and strains of those agents that can suppress the weevils even at low temperatures. Investigation of the predators and the parasitoids of the weevil is further required because there are only a few records of them in the Southwestern Islands.

(3) Clarification of diapause of the adult female weevils in winter

No laboratory studies confirm the presence of the diapausing female adults in the field. Since the presence of the female diapause may play an important role in the progress of SIT, the female diapause in winter should be investigated from a practical point of view of SIT as well as from an ecological point of view.

(4) Improvement of the marking method for evaluating the control effect

Discrimination between released sterile and wild males captured by the pheromone traps is one of the biggest problems to be solved in the future. Of special importance is the development of an easy and simple mass-marking method with sufficient durability. Methods for marking with Rubidium or Calco Oil Red N-1700 dye are being investigated; the development of a synthetic diet for the larvae and adults is essential because the intake of marking substances by weevils is possible only when they are reared on artificial diets. However,

it is difficult to observe the internal conditions of captured weevils because they dry too quickly to be dissected. Thus, the pheromone trap should be further improved to keep the captured weevils in fresh condition and to use the labeled marking methods.

(5) Cooperation with local governments and residents

Various technical methods developed in the course of the current weevil eradication project were good results of the cooperative work not only by the project staffs in Kagoshima Prefecture but also by the researchers from universities, other institutions and administrative agencies. Moreover, it was almost impossible to perform the various examinations for SIT and the pilot eradication project in Amami-Oshima and Kikai Islands without the cooperation of the staffs of the local governments and their residents. We believe that the shortest way to achieve the eradication of the weevils is to continue such cooperation with all the parties concerned.

Keywords : *Cylas formicarius*, Eradication, Sterile insect technique, Sweet potato, The Amami Islands