生 物 コ ー ナ ー

サツマイモの大害虫イモゾウムシの根絶をめざして 根絶防除事業と原虫病

現在、地球上にはおよそ160万種の生物が生息するとされている。昆虫はその60～70%を占め、80～100万種が記載されているが、未記載のものも含めると、1,000万種をゆうに超えるのではないかとされている。一方、日本で記載されている昆虫は約3万種である。そのような昆虫のうち、「人間生活に害や不快感を与える小動物の総称」として“害虫”が存在する。全世界の害虫の種数は8,000～10,000種（昆虫全体の1%以下）と推定され、私たちの国では約2,600種の昆虫が農林業害虫としてリストアップされている。また、外国から侵入し、新しい土地に住み着いた昆虫を帰化昆虫と呼ぶが、それらが害虫だった場合は“侵入害虫”となる。日本において侵入害虫が問題となってきたのは、明治維新以降である。開国して、江戸時代の鎖国政策から開放政策に転じ、諸外国と人・物資の交流が盛んに行われた結果、人や農作物、苗木に付着して侵入害虫がやってきた。多くの場合、そのような害虫は、本来の生息地との環境の違いや餌不足から死んでしまうのだが、なかにはうまく新しい環境に適応して残存し、また、新天地には天敵となる生物種がいらないために爆発的に増殖することとなる。たとえば、日本在来種であるマメコガネは、1910年頃に日本から輸出された植物の球根に付いて北アメリカへ渡ったと言われていたが、天敵の少ない新天地で一気に分布域を拡大して、300種もの植物の根

や葉を食害する大害虫となった。そのため、Japanese beetleというあまりうれしくない名で呼ばれている。このように、海外からの輸入または国内での移動により、ある種の害虫が農産物などに付着して未発生 of 国土または地域に入るのを防止するために、港湾や空港では植物検疫が行われている。しかしながら、これから国際的な交流がますます盛んになるとともに、地球温暖化も伴って、害虫の侵入機会は検疫の目をかいくぐりながらさらに増大していくだろう。

イモゾウムシ West Indian sweet-potato weevil (*Euscepes postfasciatus* (Fairmaire)) は体長約4 mmのゾウムシ科甲虫で（図1上）、西インド諸島が原産とされている。これは、カナダを除く北米、中南米、ニュージーランド、ハワイ諸島、中国、および日本などに分布するサツマイモ (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) の重要害虫である。日本でイモゾウムシの侵入が初めて確認されたのは、1947年、沖縄本島中部の勝連半島においてであったが、今では、奄美大島以南の南西諸島

交尾するイモゾウムシ
（左：雌、右：雄）

図1 ■ イモゾウムシ成虫と被害を受けたサツマイモ

および小笠原諸島に発生が認められている。最初の発生地が、当時米軍の物資集積所であったことや、終戦に伴う太平洋の島々からの引き揚げ者の一時的逗留場所であったことから、イモゾウムシは米軍の軍事物資にまぎれ込むか、あるいは引き揚げ者の食料として持ち込まれたサツマイモとともに侵入した可能性が考えられている⁽¹⁾。その後、イモゾウムシは周辺の離島へ、種イモの配布によりその分布を拡大していったようだ。イモゾウムシは主にサツマイモに寄生するが、同じ *Ipomoea* 属のノアサガオ (*I. indica*) やグンバイヒルガオ (*I. pes-caprae*) への寄生も確認されている⁽²⁾。現在、イモゾウムシは植物防疫法による輸入禁止対象病害虫に指定されており、その寄主植物とともに海外からの持ち込みが禁止されている。それだけでなく、その分布拡大を防ぐため、国内においても植物検疫によってイモゾウムシ発生地域から未発生地域への寄主植物の移動が規制されている。イモゾウムシによる被害はもちろんのこと、この害虫の発生によるサツマイモの移動規制は、南西諸島におけるサツマイモ生産振興の大きな足かせとなっている。

イモゾウムシ成虫は、主にサツマイモの茎や塊根を食害する。そして、雌成虫は、サツマイモ地際部の茎や塊根の表皮下に産卵する。卵から孵化した幼虫は、内部へと喰い進みながら成長するため、食痕は黒変し、塊根はスポンジ状となる (図1下)。被害塊根は、

イポメアマロンなどの有毒なフラノテルペノイドの産生によって独特の苦味と臭気を伴い、私たちの食料としてはもちろんのこと、家畜の飼料としても利用できなくなってしまう。その後、イモゾウムシ幼虫はサナギを経て、成虫となって植物体外へと脱出する。卵から成虫になるまでの一連の生活史には約45日を要す。また、イモゾウムシ成虫の寿命は半年～10カ月で、雌成虫はその一世代で約300～1,500個ほどの卵を産む。

イモゾウムシは、その生活史のうちの卵から成虫に至るまでのほとんどをサツマイモ茎または塊根内で過ごしている。また、成虫は立派な翅をもちながらも飛翔することはない、性フェロモンの存在も確認されていない。そのようなイモゾウムシの生態が原因となって、具体的なイモゾウムシ防除法としては、株元への化学殺虫剤施用や、畑に放棄されたサツマイモの除去、寄主植物の抜根と焼却処理などの地道な方法しかない。そこで沖縄県では、久米島と津堅島を防除対象地域に指定して、不妊虫放飼法を軸としたイモゾウムシの根絶防除事業が展開されている^(3,4)。不妊虫放飼法とは、対象害虫を施設内で人工的に飼育して大量増殖させ、得られた成虫を放射線照射によって不妊化した (雄成虫の精子に優性致死突然変異を誘引) 後、ヘリコプターなどで野外へ大量に放す方法である。適度な線量で不妊化された雄成虫は正常な交尾能力をもつものの、野

外の雌成虫との交尾により生じた受精卵には孵化能力がない。大量の不妊虫が放飼されることで不妊雄成虫と野生雌成虫の交尾確率が上がり、次世代の個体数が減少する。これを繰り返すことにより野生虫同士の交尾機会は少なくなっていく、最終的には根絶に至ることとなる。この方法はかつて、東南アジア原産で南西諸島へ侵入し重要な農業害虫となったウリミバエやミカンコミバエの根絶にも用いられ、成功を収めている。また、イモゾウムシと同じくサツマイモの大害虫であるアリモドキゾウムシでも、1994年から、不妊虫放飼法と合成性フェロモンを用いたオス除去法の組み合わせによる根絶防除事業が展開されており、防除対象地域の一つである久米島での根絶が2013年4月に達成される見込みである。この不妊虫放飼法による甲虫類の広域的な根絶成功は、世界初の快挙となる。

一方、イモゾウムシの根絶防除事業では、1994年から対象害虫の大量増殖が開始され、不妊虫放飼法による防除が進められている。沖縄県病害虫防除技術センター (前・沖縄県ミバエ対策事業所) では、週当たり300万頭以上の不妊虫生産を目指してイモゾウムシを大量増殖し、2004年8月初旬までは安定した生産数を確保して継続的に不妊虫放飼を行ってきた (図2)。この間、野外でのイモゾウムシ個体数には減少傾向が見られ、不妊虫放飼法は効果的であると考えられた。ところ

図2 ■ 沖縄県病害虫防除技術センターにおけるイモゾウムシ生産数の推移
出典：沖縄県特殊病害虫防除事業報告（改変）

図3 ■ イモゾウムシ死亡虫の磨砕液の位相差顕微鏡写真

が、2004年9月以降、不妊虫生産数が急激に低下し、週当たり150万頭前後となってしまった。同時に、大量増殖したイモゾウムシ成虫の短命化と雌の産卵数の減少が認められたため、病気の蔓延が疑われた。そこで、死亡したイモゾウムシ成虫を滅菌水中で磨砕し、その磨砕液を検鏡したところ、レモン型をした大量の原虫オーシスト (oocyst) やそれらが膜に包まれた状態のガメトシスト (gametocyst) と呼ばれる原虫細胞 (図3) が多数観察された。

単細胞性真核生物である原生生物を、寄生虫学では原虫 protozoa と総称する。原虫の多くはその生活環中で、不良環境に耐える、または宿主から宿主への伝播手段となる被囊したシスト (cyst) やオーシスト (oocyst)、胞子 (spore) と呼ばれる休止状態の耐久型ステージをもっている。オーシストは、原虫のなかでもアピコンプレックス門 (Apicomplexa) に属する球虫類 (coccidia) や簇虫類 (gregarina) に見られる。イモゾウムシから見つかった原虫は、オーシストやその他のステージにある原虫細胞の形態学的特徴などから、アピコンプレックス門、裂殖簇虫目 (Neogregarinorida), *Farinocystis* 属の1種と推定された。原虫オーシストをイモゾウムシに摂食させると、成虫生存率の有意な低下と産卵数の減少が見られたことから、この原虫がイモゾウムシに病気を引き起こすことによって不妊虫の減産

図4 ■ PCRを用いた原虫感染の簡易検出法

原虫に特異的なプライマーペア (P) とイモゾウムシに特異的なプライマーペア (E) を設計し、PCRを用いた原虫感染簡易検出法を開発した。イモゾウムシ磨砕液の顕微鏡観察により、非感染と判断した個体 (上段左) と感染と判断した個体 (上段右) からゲノムDNAを抽出し、本PCR法に供試すると、中段に示したように、検鏡により非感染と判断した個体ではイモゾウムシに特異的な増幅産物 (618 bp) のみが、検鏡により感染と判断した個体ではイモゾウムシに特異的な増幅と原虫に特異的な増幅 (410 bp) の両方が認められる。ところが、検鏡で非感染と判断したにもかかわらず、PCRにより原虫特異的な増幅が見られた個体も認められる (下段)。やはり、検鏡のみでは、原虫感染を見逃してしまっているようだ。

が起きていることは明らかであった⁽⁵⁾。このような病原性原虫がイモゾウムシから分離された報告はこれまでにない。

では、イモゾウムシ根絶防除事業におけるこの予期せぬ減産を食い止めるためには、どうすればよいのか？ まず、大量増殖施設内のイモゾウムシ個体群において、現状でどの程度の原虫感染が起きているのかを調査した。イモゾウムシを滅菌水中で磨砕して原虫オーシストを検鏡する方法では、ほかのステージにある原虫細胞を見逃してしまう可能性が高い。そのため、PCRを用いた原虫感染の簡易検出法を開発し、DNAレベルで原虫の有無を確認できる方法を確立した (図4)。この方法を用いて、大量増殖施設内のイモゾウムシ個体群の感染率を調査したところ、供試した900頭のイモゾウムシ死亡虫の実に84%が原虫感染しており、原虫による飼育環境の汚染は明らかであった。この原虫を駆除するためには、大量増殖施設での飼育環境の全消毒・滅菌が必要である。イモゾウムシの大量増殖では、生のサツマイモを餌として与えているが、このサツマイモも病原体フリーでなければならない。しかし、これらの消毒・滅菌は、大量増殖施設の規模や実際の作業を考えると、到底不可能である。そこで、沖縄県病害虫防除技術センターでは、以前から進められていたイモゾウムシ用人工飼料の開発とともに⁽⁶⁾、効率的な採卵法と卵表面殺菌法、卵接種

法が検討され^(7~10)、現在ではほぼ無菌的な人工飼料育によって、週当たり33万頭まで大量生産できるようになっている。

また、イモゾウムシから分離された原虫が、どこからやってきたのかを特定して、その発生源を絶つことも重要である。大量増殖された昆虫に病気を引き起こす原虫としては、トノサマバッタに感染する微孢子虫（現在では、その分子系統学的知見から、菌類に分類されている）の *Antonospora locustae* やサシチョウバエに感染する簇虫 *Psychodiella sergentii* などが知られており、宿主の発育遅延や生存率の低下、産卵数の低下が報告されている^(11, 12)。それら原虫は、宿主の野生個体群において維持されているが、ひとたび、大量増殖環境という野外ではありえないほどの宿主高密度条件下におかれて、急激に感染を広め増殖した結果、宿主に対して高い病原力を発揮できたのである。しかしながら、本原虫は野生イモゾウムシからは発見されておらず、本来の宿主および大量増殖施設への侵入経路は不明である。私たちはこれまで、さまざまな鞘翅目昆虫に本原虫オーシストを摂食させ、原虫感染が起こるか否かを調査してきたが、イモゾウムシと同様に原虫の感染と増殖が確認される昆虫をいまだ発見できていない。

その一方で、これまでのイモゾウムシ減産を引き起こす原虫であるなら、この原虫を利用してイモゾウムシを防

除できるのではないかと。このような病原微生物（天敵微生物）を利用して病害虫を防除しようとする方法を“微生物的防除法”という。天敵微生物は微生物農薬（殺虫剤）として、実際に日本においても登録され利用されている。たとえば、食葉性害虫のコナガや食根性土壌害虫のコガネムシ類に対する細菌 *Bacillus thuringiensis*、施設栽培の害虫であるアブラムシやコナジラミ類、森林・果樹害虫のカミキリムシ類に対する *Lecanicillium* 属および *Beauveria* 属糸状菌、また、茶やリンゴの害虫であるハマキガや畑作物などの大害虫であるハスモンヨトウに対する核多角体病ウイルスおよび顆粒病ウイルスが有名である。しかしながら、昆虫病原性原虫の害虫防除への利用は、世界を見渡しても例が少なく、微生物殺虫剤としての利用はアメリカ合衆国において牧草害虫のバッタ類の防除のために開発された前出の *A. locustae* の1種のみである。原虫感染の伝播は、通常、感染宿主個体の糞などに混じって排泄されるシストやオーシスト、胞子といった感染型に汚染された食餌などを、別の健全個体が経口的に摂取することにより生じる水平伝播（個体から個体、個体群から個体群への伝播）である。交尾などの際に接触してそれら感染型に汚染される場合や、産卵管等の汚染により産下される卵表面も汚染されてしまい、その結果、孵化幼虫が感染する場合もある。また、ある種の原虫では、雌成虫の卵

巣組織が感染して新生卵内の胚子まで及ぶ、経卵巣感染と呼ばれる垂直伝播（親から子への感染伝播）も認められる。この場合、親世代の感染は自然に、かつ、確実に次世代へと伝播するため、微生物農薬としてはたいへん有効な性質である。しかし、一般に昆虫病原性原虫は宿主に対して慢性感染を引き起こし、しだいに宿主を弱らせていくものが多い。また、宿主に高病原性を示す原虫は偏性細胞内寄生性（宿主の細胞内でのみ増殖可能）であるため、大量増殖するには生きた宿主個体もしくは宿主細胞を必要とし、微生物農薬としての開発には不向きであり、製剤としての安定性・保存性にも難がある。害虫防除に有望なものも多い原虫ではあるが、このような性質から、微生物農薬としての利用はいまだ発展途上にあるようだ。

イモゾウムシから新たに分離された原虫は、宿主の高密度条件のおかげでその勢いを増し、大量増殖施設でのイモゾウムシ個体数を減少に導いたと考えられるが、一方で、現行の不妊虫放飼法に加えて、原虫感染不妊虫を放飼することで野外のイモゾウムシへの感染拡大を促すことができるのではないかと。そして、放飼した不妊虫との交尾による正常孵化卵の減少と原虫感染による短命化・産卵数の減少のダブルパンチで、イモゾウムシをより速やかに根絶することも可能なのかもしれない。そのためには、野外における本原虫の詳細な感染伝播機構などを解明す

る必要があるだろう。しかしながら、本原虫が宿主を弱らせる力はあまりにも大きく、イモゾウムシ不妊雄成虫の繁殖能力を極度に低下させてしまう現状からは、不妊虫放飼法での原虫感染不妊虫の利用は防除効果を低減させるほうへと働くものと考えられ、両者の並立は困難であるとの見解が強い。現段階では、イモゾウムシの大量増殖において負の作用をもたらしている原虫の管理を徹底することで、健全なイモゾウムシの大量生産を達成することが、イモゾウムシを着実に根絶するための最重要課題のようだ。近い将来、イモゾウムシの根絶防除が成功して、サツマイモの生産量増加や移動制限の

解除をもたらし、地域の経済的發展に寄与できることを期待している。

- 1) 小濱 継雄：植物防疫，**44**，115 (1990)。
- 2) 大野 豪，原口 大，浦崎貴美子，小濱 継雄：昆虫と自然，**41**，25 (2006)。
- 3) 山岸正明，下地幸夫：植物防疫，**54**，476 (2000)。
- 4) 久場洋之，照屋 匡，榊原充隆：植物防疫，**54**，483 (2000)。
- 5) N. Kumano, N. Iwata, T. Kuriwada, K. Shiromoto, D. Haraguchi, C. Yasunaga-Aoki & T. Kohama: *J. Invertebr. Pathol.*, **105**, 298 (2010)。
- 6) 浦崎貴美子，大野 豪，原口 大，小濱 継雄：応動昆，**53**，1 (2009)。
- 7) 榊原充隆：応動昆，**47**，67 (2003)。
- 8) 大野 豪，佐々木智基，佐藤幸恵，浦崎貴美子，原口 大，小濱 継

雄：昆虫 ニューシリーズ，**11**，169 (2008)。

- 9) 中村隆文，大野 豪，浦崎貴美子，原口 大，小濱 継雄：応動昆，**55**，1 (2011)。
- 10) 栗和田 隆，熊野了州，城本智子，原口 大：応動昆，**55**，22 (2011)。
- 11) W. M. Brooks: "Handbook of Natural Pesticides Volume V, Microbial Insecticides Part A, Entomogenous Protozoa and Fungi," CRC Press, 1988, p. 109.
- 12) L. Lantová, M. Svobodova & P. Volf: *J. Med. Entomol.*, **48**，985 (2011)。

(青木智佐^{*1}，新見はるか^{*1}，松山隆志^{*2}，金城邦夫^{*2}，熊野了州^{*2,3}，^{*1}九州大学，^{*2}沖縄県病害虫防除技術センター，^{*3}琉球大学)

プロフィール

青木 智佐 (Chisa YASUNAGA-AOKI)
 <略歴>1990年九州大学農学部農学科卒業／1992年同大学大学院農学研究科修士課程修了／1994年同大学農学部助手／1995年博士(農学) (同大学)／2000年同大学農学部助教授 (現在, 大学院農学研究院准教授), 現在に至る<研究テーマと抱負>イモゾウムシ病原性原虫をはじめとする昆虫病原性原虫の*in vivo*および*in vitro*における生物学的諸性状の解明<趣味>ウサギの世話, 美酒 (最近は特に赤ワイン)

新見はるか (Haruka NIIMI)
 <略歴>2011年九州大学農学部生物資源生産科学コース (農学分野) 卒業／同年同大学大学院生物資源環境科学府進学, 現在に至る<研究テーマと抱負>さらに分子生物学と語学をきっちり勉強したい<趣味>散歩

松山 隆志 (Takashi MATSUYAMA)
 <略歴>1994年琉球大学農学部農学科卒業／1995年沖縄県北部農業改良普及センター／2000年沖縄県農業試験場／2006年沖縄県農業研究センター／2011年博士(学術) (岡山大学大学院環境学研究科)／同年沖縄県病害虫防除技術センター, 現在に至る<研究テーマと抱負>久米島におけるイモゾウムシの根絶防除<趣味>バイクいじり

金城 邦夫 (Kunio KINJO)
 <略歴>1986年九州東海大学農学部農学科卒業／同年沖縄県農林水産部, 現在に至る<研究テーマと抱負>沖縄県津堅島におけるイモゾウムシ根絶事業, イモゾウムシモニタリング<趣味>犬と遊ぶこと

熊野 了州 (Norikuni KUMANO)
 <略歴>1995年新潟大学教育学部卒業／1997年同大学大学院教育学研究科修士課程修了／2001年九州大学大学院理学研究科博士課程修了, 博士(理学)／2002年日本学術振興会特別研究員 (北海道大学農学研究科)／2005年沖縄県病害虫防除技術センター博士研究員／2011年琉球大学農学部協力研究員 (併任), 現在に至る<研究テーマと抱負>イモゾウムシとアリモドキゾウムシの配偶行動を中心とした生態の解明<趣味>写真撮影