

チョウ目害虫の超音波を介したコミュニケーションと防除技術

中野 亮（農業・食品産業技術総合研究機構 果樹茶業研究部門）

rnakano@affrc.go.jp

チョウ目昆虫（蛾類）の中には、超音波をコミュニケーションに利用する種が多数いることを突き止めた。オス成虫は、受信者の行動を抑制する作用を持つ超音波を交尾時に発し、メスとの交尾機会の増加や他のオスとの競争に利用していた。このようなコミュニケーション様式の進化的起源は、捕食者であるコウモリから身を護るため、コウモリの発する超音波を検知した際に不動化することにあると推察された。超音波に対して忌避的に振る舞う行動習性に着目し、蛾類の飛来を合成超音波で阻害できることを圃場で実証するなど、超音波を用いた害虫防除技術の開発を産学官連携でおこなっている。

蛾とコウモリ

夜行性の昆虫の主要な天敵と考えられる食虫コウモリは、エコーロケーション（反響定位）により餌となる昆虫類に定位したのち捕食する。その際にパルス状に発せられる超音波（ヒトには聞こえない、周波数がおおよそ 20 kHz 以上の高い音）は、昆虫類にとってコウモリの存在や接近を知らせる合図にもなりうる。チョウ目昆虫のうち、主たる農業害虫を含むヤガ類、トモエガ類（ヒトリガ、ドクガなど）、メイガ類、ツトガ類、シャクガ類などは、鼓膜器官からなる耳を持ち、コウモリからの捕食を回避するようになった¹⁾。チョウ目昆虫の祖先が現在の上科に分かれて以降の 5,500 万～6,500 万年前に超音波を発する食虫コウモリが地球上に誕生したと推測されている。チョウ目昆虫は 7,800～9200 万年前に耳を独立に進化させ、その位置・形態を上科ごとに異にする場合があるが、基本的な機能と役割は収斂している²⁾。すなわち、コウモリの超音波を聞くと、音源から遠くの方へ逃げる、螺旋状に飛ぶ、飛翔を停止して地面へ落下・ダイブするなどの忌避行動を示す³⁾。このような行動反応は合成超音波によって再現可能であり、チョウ目昆虫で農業害虫となる種が農業生産現場などに飛来・侵入することを未然に防ぐ技術への応用が期待されている。

超音波を発する蛾

農業害虫を多く包含するチョウ目昆虫では、匂い（例えば、交尾に関連する性フェロモン）を用いた化学コミュニケーションの研究が多くなされてきた。これと比べると、音響コミュニケーションの研究事例はきわめて少なく、重要性についての理解も非常に乏しい。チョウ目害虫の求愛行動を録音・解析したところ、ヤガ類、シャクガ類、メイガ類、ツトガ類など多くの種において、メスの性フェロモンに誘引されたオスがメスに対し超音波による求愛メッセージを発すること、およびそれが交尾の成立に重要な役割を果たしていることを明らかにした^{4,5)}。さらに、これら求愛超音波の発音メカニズムと交尾成立に至るまでの過程を精査することにより、同一科内においても発音器官と機能が異なることも解明した。

例えば、トウモロコシの主要害虫であるツトガ科のアワノメイガ類では、オスが前翅と胸部にある特殊な鱗粉を擦り合わせ、メスの近傍で微弱な超音波パルスを発する^{6,7)}（図 1）。メスはこの

時、捕食者であるコウモリの超音波とオスの超音波とを聞き分けていなかった。オスの超音波はコウモリを回避するための静止と同じ反応をメスに引き起こし、その場に留まらせることでオスは交尾の機会を増やしていた。多様な農作物を加害するヤガ科のハスモンヨトウにおいても、同様のコミュニケーション様式を確認している⁸⁾。

また、モモやクリ果実の害虫であるツトガ科のモモノゴマダラノメイガでは、オスが胸部にある振動膜を用い、メスの周囲でホバリングしながら長短2種類の超音波パルスの高い音圧で発する⁹⁾。長いパルスはメスに交尾の受入れ姿勢を誘起し、交尾の成立に必須であった。一方、短いパルスは捕食者であるキクガシラコウモリ類の超音波とパルスの長さが類似しており、メスを巡るライバルオスの接近を阻害する機能を有していた。

チョウ目昆虫の音響コミュニケーションの進化プロセスは、以下の三段階が考えられる。第一に、外部環境の音を検知するために獲得した耳を、捕食者であるコウモリの発する超音波を検出するために特化させた¹⁰⁾。次に、コウモリからの捕食を回避するため、超音波に対して忌避的に振る舞う行動が進化した¹⁾。そして第三段階で、オスが求愛時にコウモリと同様の超音波を発するようになった。すなわち、メスに不動化などを引き起こすことでコミュニケーションが成立したと推察される¹¹⁾。このような対捕食者戦略として発達した感覚器官と行動反応に基づくコミュニケーションの進化は、生物が新規のコミュニケーションを進化させるプロセスを解明する上で一つのモデル研究となる。

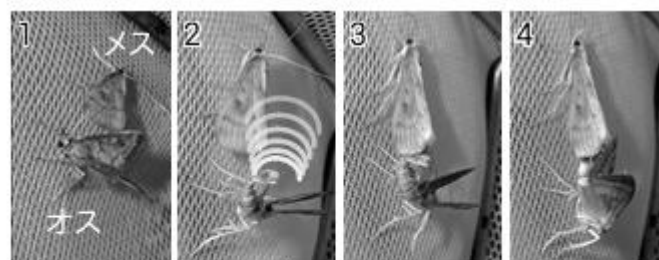


図1. オスは超音波でメスの動きを止めている際に交尾する(アワノメイガの例)

害虫防除への応用

このような基礎科学的な知見に加え、チョウ目害虫が超音波に対して忌避的な行動反応を示すことをヒントに、合成超音波を用いた防蛾技術の開発も進めている¹²⁾。現在、特にハスモンヨトウ、オオタバコガ、ヨトウガ等の重要な農業害虫であるヤガ類が、高い割合で忌避する超音波パルスを照射する装置の製品化を目前に控えている。この装置をイチゴ栽培施設に設置した場合、無処理区と比べてハスモンヨトウの卵塊数を95%以上減らすことができた¹³⁾ (図2)。

過去60年で、タバコガ類とウワバ類(ヤガ科)、エグリバ類(トモエガ科(旧ヤガ科))、ノシメダラメイガ(メイガ科)、アワノメイガ類(ツトガ科)を防除対象として、合成超音波を利用した行動制御技術の開発がなされてきた¹⁴⁾。その中で、長期的かつ農業生産現場で合成超音波を用いて防除効果を検証した小池(2008)による研究がある¹⁵⁾。中山間地帯では、吸汁性害虫であるヒメエグリバ、アカエグリバ、アケビコノハ等の成虫が、モモなどの果実に鋸歯状の口吻を刺入することで果実に腐敗をもたらす被害が多くある。そこで、小池らは、これらチョウ目害虫と同所的に生息し、主な捕食者と考えられた食虫性のヤマコウモリが昆虫類の探索と定位の際に発する超音波パルスを模倣した。この合成超音波を発するスピーカをモモ果樹園の周囲に並べ、夜

間に高い音圧で超音波パルスを照射することで、被害果率を無設置区比で最大 1/30 に低減させることに成功している。複数台のスピーカを約 5 m の間隔で設置した条件下での試験成績であるが、初期投資費用等のさらなる軽減が進めば、防除技術として普及する可能性がある。これに対し、われわれはおよそ 50m × 50m (25a) の生産圃場で 4~8 台の超音波スピーカを配置し、蛾類の飛来および産卵を抑制することで、薬剤散布回数の 50%以上の削減を目指している。近年、西日本におけるネギ栽培で被害の著しいシロイチモジヨトウを対象とした圃場試験では、これを達成可能な良好な結果を得ている。

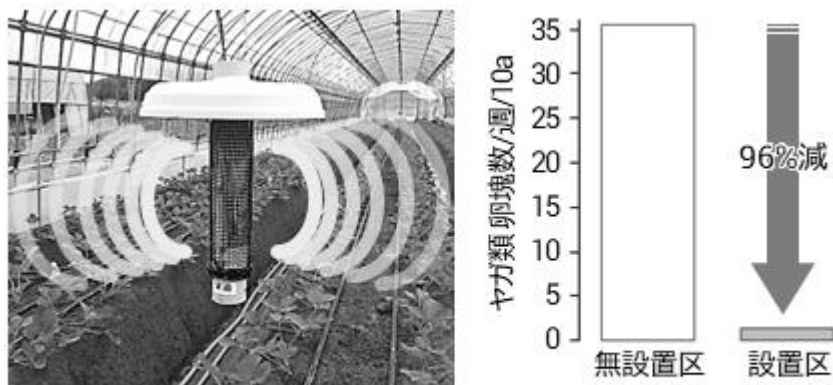


図2. 超音波防蛾装置(試作機)とイチゴ栽培施設での防除効果

おわりに

蛾類と超音波にまつわるトピックは、コウモリとの軍拡競争、そこから派生して蛾類が進化させた種内での超音波コミュニケーション、そして蛾類の超音波に対する忌避行動を利活用した害虫防除技術の開発など、多岐におよぶ。基礎から応用まで、農学を地盤に多角的に研究を進めることができた。近縁種間で超音波コミュニケーションを発達させた種とそうでない種がいることも分かってきた。これらの種では、コウモリの発する超音波に対する忌避行動パターンや飛翔高度が異なることを明らかにしつつある。また、オスの発する求愛超音波には、音圧と持続時間にトレードオフが見られ、捕食者や寄生者、メスを巡る同種の競合相手からの盗聴を回避することが示唆されている^{15,6)}。現在、耳よりもずっと後になって進化したことが推測される超音波コミュニケーションの獲得要因を、捕食者回避行動と飛翔特性の観点から解析しているところである。

超音波を用いた害虫防除技術に関しては、露地栽培を含む様々な作目や他のチョウ目害虫種の組み合わせについて、防除効果を圃場試験において精査している。実験室内に限れば、ハスモンヨトウ以外ではオオタバコガやシロイチモジヨトウ、カブラヤガなどのヤガ類に加え、ノシメマダラメイガ(メイガ類)やツトガ類の飛翔を合成超音波で阻害可能であることを確認している。化学殺虫剤や天敵製剤を含む農薬、土着天敵の積極的な利用と圃場内外の植生管理、交信かく乱剤や人工光源などを組み込んだ総合的な害虫管理が重要なのは今や自明であるが、超音波を活用したチョウ目害虫の行動制御技術が害虫防除にかかる生産者の経済・時間・肉体・精神的労力の低減に貢献することを望む。

謝辞

本賞の受賞にあたり、農業・食品産業技術総合研究機構 果樹茶業研究部門および(一社)日本応用動物昆虫学会よりご推薦をいただきました。高梨祐明部門長、中村ゆり企画管理部長、草場新之助領域長、果樹茶業研究部門 虫害ユニットの皆様、そして松村正哉会長と学会関係者の皆

様に、この場をお借りして厚く御礼を申し上げます。

本研究成果の大部分は、石川幸男名誉教授（東京大学）、田付貞洋名誉教授（東京大学）、高梨琢磨博士（森林研究・整備機構 森林総合研究所）、ならびに故 Annemarie Surlykke 教授（南デンマーク大学）らによるご指導の賜物に他なりません。そして、最近の共同研究の成果は、Andrew C. Mason 教授（トロント大学）らのご協力によるものです。共著者・共同研究者をはじめ、本研究の推進にお力添えいただいた皆様に、そして害虫防除への応用に関しては内閣府「戦略的イノベーション創造プログラム（次世代農林水産業創造技術）」「持続可能な農業生産のための新たな総合的植物保護技術の開発」にて協力いただいた皆様に心より感謝申し上げます。

引用文献

- 1) Nakano R., Takanashi T. and Surlykke A.: *Journal of Comparative Physiology A* 201:111-121 (2015).
- 2) Kawahara A. Y., Plotkin D., Espeland M., Meusemann K., Toussaint E. F. A., Donath A., Gimnich F., Frandsen P. B., Zwick A., dos Reis M., Barber J. R., Peters R. S., Liu S., Zhou X., Mayer C., Podsiadlowski L., Storer C., Yack J. E., Misof M. and Breinholt J. W.: *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*: published online (2019).
- 3) Nakano R. and Mason A. C.: *PLOS ONE* 13:e0202679 (2018).
- 4) Nakano R., Takanashi T., Fujii T., Skals N., Surlykke A. and Ishikawa Y.: *The Journal of Experimental Biology* 212:4072-4078 (2009).
- 5) Nakano R. and Nagamine K.: *Frontiers in Ecology and Evolution* 7:244 (2019).
- 6) Nakano R., Skals N., Takanashi T., Surlykke A., Koike T., Yoshida K., Maruyama H., Tatsuki S. and Ishikawa Y.: *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 105:11812-11817 (2008).
- 7) Takanashi T*, Nakano R*, Surlykke A., Tatsuta H., Tabata J., Ishikawa Y. and Skals N.: *PLoS ONE* 5:e13144 (2010) (*equal author contribution)
- 8) Nakano R., Takanashi T., Skals N., Surlykke A. and Ishikawa Y.: *Biology Letters* 6:582-584 (2010).
- 9) Nakano R., Ihara F., Mishiro K., Toyama M. and Toda S.: *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 281:20140840 (2014).
- 10) Nakano R. and Mason A. C.: *Biological Journal of the Linnean Society* 121:174-184 (2017).
- 11) Nakano R., Takanashi T., Surlykke A., Skals N. and Ishikawa Y.: *Scientific Reports* 3:2003 (2013).
- 12) Nakano R., Ihara F., Mishiro K., Toyama M. and Toda S.: *Journal of Insect Physiology* 83:15-21 (2015).
- 13) 中野亮: 植物防疫 in press (2019).
- 14) 中野亮: 植物防疫 66:300-303 (2012).
- 15) 小池明: 植物防疫 62:549-552 (2008).