

害虫における音・振動情報の機能解明と振動を用いた防除法の開発

高梨琢磨（独）森林総合研究所 森林昆虫研究領域）

takanasi@affrc.go.jp

昆虫は、捕食者の検知や、交尾相手の認識のために音や振動を利用することが明らかにされつつある。本研究では、超音波によるガの異性間の交信について、発音のメカニズムと交尾における超音波の機能を明らかにした。また、森林害虫のカミキリムシにおいて、振動によっておこる回避等の行動を明らかにし、さらに振動を検知する受容器を特定した。現在、振動を用いた害虫防除法の開発も進めており、環境低負荷型である新しい害虫防除法の実用化を目指している。

はじめに

多くの昆虫は空気中を伝わる音や固体を伝わる振動に敏感であり、様々な場面でこの能力を利用する種が存在する。例えば、捕食者が接近時に発する音や振動をいち早く検知して捕食者を回避する種¹⁾、逆に音や振動を発することでまわりの同種や捕食者に回避を促す種^{1,2)}、そして配偶者の発する音や振動を手がかりに配偶者を認識する種¹⁾などがある。このように音や振動は、情報として様々な機能を持つことが明らかにされつつあるが、害虫における知見は、未だ十分に蓄積されていない。

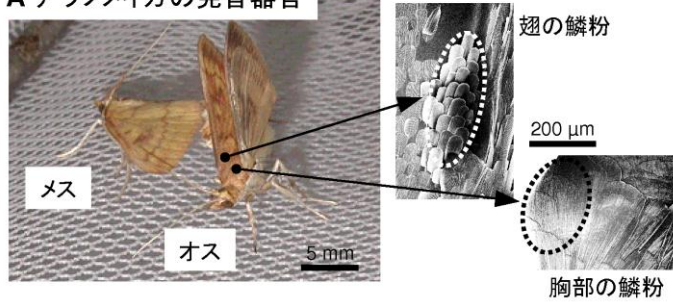
近年、環境保全や健康問題への配慮から、害虫防除のための殺虫剤が使用できなくなる例がある。殺虫剤の代替となる天敵生物やフェロモン剤等を用いた防除法も存在するが、対象害虫種は限られているため、広範囲の害虫に適用できる新しい防除法の開発が望まれている。一方、音や振動を用いた防除法の開発の試みはなされているが、成功例は極めて少ない。そこで、害虫における音・振動情報を用いた行動や交信について、基礎と応用の両側面から研究を行った。

求愛超音波の機能と普遍性

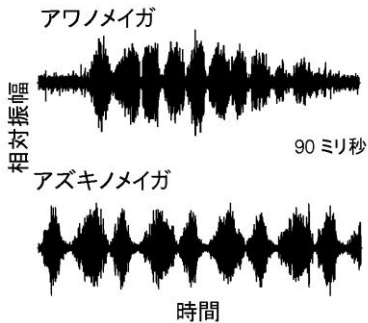
アワノメイガ（トウモロコシの害虫）は音圧（音量）の小さい超音波を異性間の交信に用いる^{3,4)}。オスは、メスが放出する性フェロモンに誘引されてメスに近づくと⁵⁾、翅を垂直に立てて細かくはばたかせる³⁾。この時、オスは微弱な超音波の求愛歌（計測距離 1 cm で 46 dB SPL）を発する⁴⁾（図 1）。超高速カメラを用いた発音行動と超音波の解析などから、オスは前翅と胸部にある特殊化した鱗粉を摩擦させ、超音波を発生させていることが明らかになった⁴⁾（図 1A）。この超音波は種特異的であり、近縁種のアズキノメイガ（豆類の害虫）やヨーロッパアワノメイガ（トウモロコシの重要害虫）の発する超音波とは、周波数・時間構造の特性が大きく異なっている（図 1B）⁶⁾。メスの鼓膜器官はオスが発する超音波（ピーク周波数 40 kHz）を検知するが、超音波の音圧が小さいために雌雄間の距離が 3 cm を超えると聞き取ることができない⁴⁾（図 1C）。

アワノメイガの超音波を再現して交尾行動を観察したところ、オスの求愛超音波はメスの逃避を防ぐことが分かった⁴⁾。オスは、発音によってメスを留まらせ、繰り返し交尾を試み

A アワノメイガの発音器官



B 求愛超音波



C 求愛超音波と聴覚

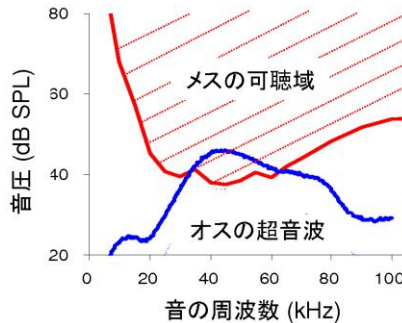


図1)アワノメイガにおけるオスの超音波の発音とメスの聴覚

メイガ・ハスモンヨトウ)、普遍的であると考えられる⁶⁻⁸⁾。微弱な求愛超音波は捕食者や競争相手による盗聴を避けることが可能である^{4,8)}。交尾相手のメスだけにささやくラブソングは、コウモリとの攻防戦の結果生じたガ類の巧みな戦略と言える。

振動情報の機能と害虫防除への応用

マツノマダラカミキリは、マツ材線虫病⁹⁾(マツノザイセンチュウによるマツ集団枯損)を媒介し、我が国のマツに壊滅的な被害を与えている重要森林害虫である。このマツノマダラカミキリが、低周波の振動刺激に対してフリーズ反応(行動の停止)や発音・驚愕反応等の回避行動を示すことを明らかにした^{10,11)}(図2A)。これは、振動が捕食者の情報として認識され、回避行動を誘発することを意味する。一方、交尾行動時において、視覚刺激に対して長い触角を大きく動かす反応は、振動刺激により強化される¹²⁾。この振動は視覚による認識を補完し、配偶者の情報として作用する。このようにマツノマダラカミキリは、情報の発信者が捕食者であるのか配偶者であるのかを振動の特性から識別し、前者であれば回避行動を示し、後者であれば触角を動かして配偶者を探索すると考えられる。

また、マツノマダラカミキリは脚の内部にある振動受容器(腿節内弦音器官)で振動を検知することを、コウチュウ目昆虫で初めて発見した¹⁰⁾。この振動受容器は、感覚細胞群が細長い弦(内突起)に付着する構造をとっており、脚の接地面(マツ他)から振動を受容する(図2B)。これは、振動受容器を外科的手術により切除すると、回避行動を示さなくなることから証明された¹⁰⁾。

マツノマダラカミキリは、マツノザイセンチュウに感染して衰弱したマツ(クロマツ、アカマツ等)を、産卵等のために利用する。マツが衰弱する過程において、マツ自体が特異的な振動(以下、自発振動)を発することを発見した。このマツの自発振動は低周波成分からなり、マツの衰弱過程での水分生理状態の時間的変化に連動していた。次に、マツの自発振

る結果、交尾の成功率を上げる。鼓膜器官をもつガは、コウモリの超音波を検知してフリーズ反応(飛翔・歩行の停止)を行い、コウモリの捕食を回避する⁷⁾。本来、捕食者によって誘発されるこのフリーズ反応を、アワノメイガは交尾のために利用していると考えられる⁴⁾。

音圧の低い求愛超音波は、ごく近距離でのみ有効である⁴⁾。一方、誘引と防衛に用いられる超音波の音圧は大きく、有効範囲は広い。ガの求愛超音波による近距離交信は、複数の分類群において広く存在するため(例:アワノメイガ・アズキノ

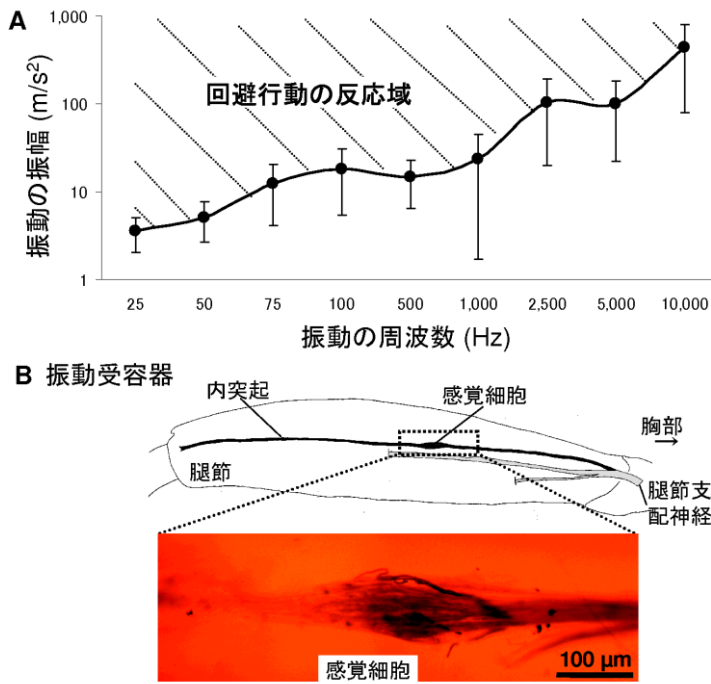


図2) マツノマダラカミキリにおける回避行動と脚の振動受容器

る。一方、振動を発生させる装置としては、周波数可変域が広い超磁歪素子（コイルや磁石などで磁界をかけることにより変形する素子）が有用と考える¹¹⁾。難防除害虫であるマツノマダラカミキリにおいて、このような環境低負荷型の防除技術へのニーズは非常に高い。さらに、この手法は、農林害虫のカミキリムシ類だけでなく、振動に敏感である他の害虫種にも広く適用可能であるため、汎用性のある、画期的な技術として大いに期待できる。

おわりに

本研究では、農林害虫であるガとカミキリムシにおいて、音・振動情報の機能を明らかにした。現在は、振動情報の機能を活用した害虫防除法の実用化に向けてさらなる研究を進めている。超音波を用いることにより、ガの交尾の阻害などによる防除技術の開発も可能であろう。今後、害虫における音・振動情報に関する知見が蓄積し、音・振動を用いた防除技術が様々な害虫種に適用されることで、農林産業への貢献が期待される。

謝辞

本研究の遂行にあたって、東京大学大学院農学生命科学研究科応用昆虫学研究室の石川幸男先生と田付貞洋先生に懇切なるご指導とご鞭撻を賜りました。生物音響については南デンマーク大学の Niels Skals 先生と Annemarie Surlykke 先生から、昆虫の感覚生理については北海道大学の西野浩史先生から、振動工学については電気通信大学の小池卓二先生から、多大なるご指導とご協力を戴きました。ガの超音波交信については果樹研究所の中野亮博士（当時東京大学）と、カミキリムシの振動反応性については東京大学の深谷緑博士との共同研究による成果の賜物です。また、牧野俊一研究コーディネータをはじめとする森林総合研究所の皆様と土原和子博士をはじめ多くの皆様にもご支援戴きました。さらに、本農学進歩賞について、日本応用動物昆虫学会と森林総合研究所の諸先生方にご推薦戴きました。ここに心から感謝申し上げます。

動を再現してマツノマダラカミキリに与えたところ、産卵時間や定着率に変化が見られた。このことから、マツノマダラカミキリはマツの自発振動を寄主木の情報として認識すると示唆された。

以上のような昆虫における振動情報の機能を利用すれば、害虫の行動制御による新たな防除技術を開発できよう。すでに、微弱な振動を樹木等の媒体に発生させて害虫の行動を制御し、防除するための手法を考案、国際特許を出願した¹¹⁾。なお、この手法の有効性は、特定周波数の振動によりマツノマダラカミキリの産卵と摂食が阻害されたことから証明されている。

引用文献 (*: 責任著者)

1. 高梨琢磨*, 中野亮 (2011) ガ類の多様な超音波発音機構とその機能 「次世代バイオミメティクス研究の最前線」(下村政嗣監修) シーエムシー出版 pp 133-137.
2. Kojima, W, Takanashi, T.*, Ishikawa, Y. (2012) Vibratory communication in the soil: pupal signals deter larval intrusion in a group-living beetle *Trypoxylus dichotoma*. **Behavioral Ecology and Sociobiology** (in press)
3. Nakano, R., Ishikawa, Y., Tatsuki, S., Surlykke, A., Skals, N., Takanashi, T.* (2006) Ultrasonic courtship song in the Asian corn borer moth, *Ostrinia furnacalis*. **Naturwissenschaften** 93: 292-296.
4. Nakano, R., Skals, N., Takanashi, T.*, Surlykke, A., Koike, T., Yoshida, K., Maruyama, H., Tatsuki, S., Ishikawa, Y. (2008) Moths produce extremely quiet ultrasonic courtship songs by rubbing specialized scales. **Proceedings of National Academy of Sciences USA** 105: 11812-11817. (evaluated by Faculty of 1000)
5. Takanashi, T.*, Ishikawa, Y., Anderson, P., Huang, Y., Löfstedt, C., Tatsuki, S., Hansson, B. S. (2006) Unusual response characteristics of pheromone-specific olfactory receptor neurons in the Asian corn borer moth *Ostrinia furnacalis*. **Journal of Experimental Biology** 209: 4946-4956.
6. Takanashi, T.*, Nakano, R., Surlykke, A., Tatsuta, H., Tabata, J., Ishikawa, Y., Skals, N. (2010) Variation in courtship ultrasounds of three *Ostrinia* moths with different sex pheromones. **PLoS One** 5: e13144.
7. Nakano, R., Takanashi, T., Skals, N., Surlykke, A., Ishikawa, Y. (2010) To females of a noctuid moth, male courtship songs are nothing more than bat echolocation calls. **Biology Letters** 6: 582-584.
8. Nakano, R., Takanashi, T., Fujii, T., Skals, N., Surlykke, A., Ishikawa, Y. (2009) Moths are not silent, but whisper ultrasonic courtship songs. **Journal of Experimental Biology** 212: 4072-4078.
9. Kikuchi, T., Cotton, J., Dalzell, J. J., Hasegawa, K., Kanzaki, N., McVeigh, P., Takanashi, T., Tsai, I. J., Assefa, S. A., Cook, P. J. A., Otto, T. D., Hunt, M., Reid, A. J., Sanchez-Flores, A., Tsuchihara, K., Yokoi, T., Larsson, M. C., Miwa, J., Maule, A. G., Sahashi, N., Jones, J. T., Berriman, M. (2011) Genomic insights into the origin of parasitism in the emerging plant pathogen *Bursaphelenchus xylophilus*. **PLoS Pathogens** 7: e1002219. (evaluated by Faculty of 1000)
10. 高梨琢磨*, 深谷緑 (2011) カミキリムシは振動を感知し、回避行動や配偶行動を行う 「環境 Eco 選書 5・昆虫の発音によるコミュニケーション」(宮武頼夫編) 北隆館、東京 pp 52-64.(印刷中)
11. 高梨琢磨、大村和香子、大谷英児、久保島吉貴、森輝夫、小池卓二、西野浩史 「振動により害虫を防除する方法」 国際出願番号 PCT/JP2010/65398 (特許)
12. 深谷緑、高梨琢磨 (2010) カミキリムシの多種感覚情報利用システムー振動という「曖昧」情報の重要性 日本音響学会聴覚研究会資料 40: 297-302.

**Functional studies of sound and vibration signals in pest insects
and development of pest control using vibrations**

Takuma Takanashi (Forestry and Forest Products Research Institute)

takanasi@affrc.go.jp