

振動による昆虫の行動制御に基づく害虫防除技術

高梨 琢磨^{†a)} 向井 裕美^{††} 平栗 健史^{†††}

Technologies for Insect Pest Management Based on Behavioral Control Using Vibrations

Takuma TAKANASHI^{†a)}, Hiromi MUKAI^{††}, and Takefumi HIRAGURI^{†††}

あらまし 本論文は、スマート農林水産業として、作物の保護や栽培管理に関する農林分野で応用できる振動技術を中心に、筆者らがこれまで取り組んできた生物学的/工学的アプローチの研究を紹介する。近年、作物の生育過程における病害虫からの保護において、化学農薬に依存しない様々な防除技術を利用した IPM (総合的害虫管理: Integrated Pest Management) が推進されている。この分野において基礎から応用までの幅広い研究を現在進めており、昆虫が特定の音や振動を避けることや、コミュニケーションの手段として振動を利用することがわかりつつある。この基礎的知見を応用して、特定の周波数による振動を与えることで害虫の被害を低減する害虫防除の技術の開発を、精力的に進めている。これらの振動による害虫防除は、従来の農業技術の開発とは異なり、特定の周波数及び加速度の解析から生物学的、工学的な解析によるものである。本論文では、このような振動を用いた技術に焦点を当てて、害虫防除の最新技術と農林産物の栽培における新しい可能性について議論する。

キーワード 振動, 害虫防除, スマート農業, きのこと

1. ま え が き

作物の栽培に係る研究では、従来の栽培経験に基づく改善手法や総合科学である農学のアプローチによって課題を解決し、より最適な栽培手法などを議論してきた。しかし、近年では、スマート農林水産業と呼ばれる工学的な電子情報通信技術としての ICT (Information and Communications Technology), IoT (Internet of Things) や、機械学習・AI (Artificial Intelligence) をはじめとするビックデータなどを用いた情報処理技術が、最適な栽培管理、高品質な作物の生育方法や効率的な生産のために積極的に取り入れられている。すなわち、スマート農林水産業は、農林水産業の省力化や

高品質生産を目指すものである [1]。またスマート農林水産業の推進については、大学や企業、国立研究開発法人や公設の研究機関など多数の機関が関与し、国内の各省庁により産学官による研究/実証プロジェクトとして進められている [1], [2]。例えば、情報工学系のアプローチとして、植物の栽培過程をデータ化して、温湿度をはじめ日照時間、土壌の成分などのデータを適宜取得し、栽培管理に役立てる方法などが挙げられる。また、近年では、機械学習を用いて植物の成長を解析するために、機械的及び生理学的植物成長モデル (MPMs: mechanistic and physiological plant growth models) などが提案されている [2]。MPMs は、水や栄養素、光量などの情報をもとに、そこから得られる結果として成長率や収穫量、栄養素などの関係を機械的に出力する手法である。しかし、栽培の条件は変動しやすく、また対象とする植物種も多岐にわたるため、明確な解析手法は現在も研究が進められている。

一方、作物の生育過程における病害虫からの保護について、化学農薬が引き起こす問題を解決するために、化学農薬に依存しない複数の防除技術からなる IPM (総合的害虫管理: Integrated Pest Management) が推進されている [3]。特に害虫防除については、化学農薬に依存しない新しい防除技術の一つとして、特定の

[†] 国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所東北支所、盛岡市

Tohoku Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute, Morioka-shi, 020-0123 Japan

^{††} 国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所森林昆虫研究領域、つくば市

Department of Forest Entomology, Forestry and Forest Products Research Institute, Tsukuba-shi, 305-8687 Japan

^{†††} 日本工業大学基幹工学部、埼玉県

Faculty of Fundamental Engineering, Nippon Institute of Technology, 4-1 Miyasiro-cho, Minamisaitama-gun, Saitama, 345-8501 Japan

a) E-mail: takanasi@affrc.go.jp

DOI:10.14923/transcomj.2021MJ10004

周波数による振動を植物に与えることで、害虫の被害を低減することが報告されている。例えば、カミキリムシなどによる被害は、食害や病気によって樹木を弱らせ、枯死させてしまうなど、重大な被害が生じている。こういった被害への対策として、振動を樹木に与えることで害虫の行動を阻害し、害虫防除の効果を示しつつある [4]~[6]。また害虫防除だけでなく、昆虫などの生物においては、特定の振動を避けることや、コミュニケーション手段として振動を利用するなどの基礎的な研究も精力的に進められている [4], [7]~[9]。これらの振動による効果は、従来の農業技術の開発とは異なり、特定の周波数及び加速度の解析から生物学的、工学的に解明するものである。また、振動による効果は、害虫防除だけにとどまらず、トマトの花の受粉促進など、栽培にも効果が得られることを報告している [10], [11]。シイタケの生育促進では、雷音とそれにより発生する振動の効果なども注目されている [12], [13]。

本論文では、このような振動技術にフォーカスし、昆虫が利用する振動と害虫防除について、最初に概説する。そして振動を用いた害虫防除の最新技術と栽培における可能性について解説する。筆者らは、電気通信大学が代表となる振動農業技術コンソーシアムの 10 機関（琉球大学、森林総合研究所、農研機構植物防疫研究部門、兵庫県立農林水産技術総合センター、宮城県農業・園芸総合研究所、神奈川県農業技術センター、静岡県農林技術研究所、日本工業大学、農研機構野菜花き研究部門、東北特殊鋼株式会社）及び協力機関とともに、野菜・キノコ・果樹の害虫と作物を対象として生研支援センター・イノベーション創出強化推進事業の研究課題「害虫防除と受粉のダブル効果！スマート農業に貢献する振動技術の開発」を進めている。本事業では、昆虫と作物に備わる生物学的特性を活用した振動技術によって、「スマート農林業」の実現を目指している。本事業の対象である、シイタケとその害虫を中心に、振動による害虫防除の効果及び農林産物の栽培における有用性を本論文において紹介する。

2. 振動を用いた昆虫のコミュニケーション

2.1 振動や音によるコミュニケーションと行動

昆虫は、光やにおい、音などの様々な情報を用いてコミュニケーションを行っている [13]、例えば、ホタルの光やガのフェロモン、セミの音などがあげられる。セミやコオロギなどの「鳴く虫」が用いる音は、減衰

しにくい音圧（空気の粗密が変化する波の圧力）の特長を生かして、遠距離でのコミュニケーションに用いられる [14]。一方、植物や土壌などの基質を伝わる波である振動は、音よりも広く昆虫のコミュニケーションに用いられており、振動を利用する昆虫の種数は 19 万 5 千種以上と推定されている [4], [14]。

振動は同種内でのコミュニケーションに加えて、捕食者からの回避など、生存に必須な行動にも用いられている。振動を用いたコミュニケーションや行動として、1) 異性や同性の間でおこるもの、2) 食うもの（捕食者）と食われるもの（被食者）の間でおこるもの、3) 親子や兄弟などの社会関係にあるものの間でおこるもの、があげられる [4]。1) の例では、水稻の害虫であるウンカ類（セミヤカメムシの分類群）による振動コミュニケーションを取り上げる。体長 4mm ほどのヒメトビウカ雌が腹部を動かして振動を発生すると、その振動は雌がいるイネの植物体や、接触している別の植物体に伝わる [15]。そして植物体上で雄がその振動を信号として検知して雌を探索し、雄と雌が交尾に至る。なおこの研究は、昆虫による振動コミュニケーションの世界に先駆けた検証例である。次に、2) 捕食者である寄生バチと、被食者であるガの幼虫の行動の例をあげる [16]。ヒメコバチ類の寄生バチが、葉の内部に生息するホソガ類の幼虫を探索する際、幼虫の発する振動を情報として探索する。一方、寄生バチは幼虫に産卵するため産卵管である針を葉に突き刺すので、幼虫がその振動を検知して、回避する行動をおこす。そして 3) の例では、カメムシ類の振動によって一斉におこる、ふ化がある [17]。クサギカメムシという果樹の害虫は、多数の卵からなる塊（卵塊）が植物体上に産み付けられる。この卵塊から幼虫がふ化する際、最初の卵が割れる振動によってふ化が促進されるので、幼虫は同じタイミングでふ化がおこる。これにより、幼虫によるふ化する前の卵の共食いが避けられる。以下、1) について、他の感覚情報も含んだ、著者らのグループによる最新の研究例 [8] を紹介する。

ナナホシキンカメムシは、メタリックグリーンの美しいカメムシである。図 1 に示すように、植物体上において雌雄のペアがダンスともいえる特徴的な求愛行動を示す [8]。最初に、雄が腹部を振動させながら、雌の周囲を歩き回る（図 1A）。このとき、雌は雄の方を向いて腹部を振動させ、交互に振動を交わす様子が観察された。続いて、雄と雌が触れ合う行動をとる。そして、雄が雌に近づきながら脚で葉を叩く行動がみら

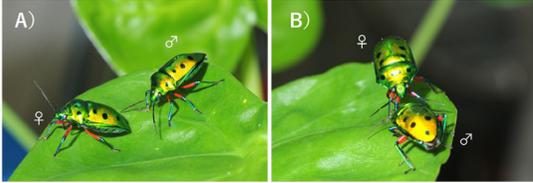


図1 ナナホシキンカメムシの求愛行動。A) 雄が雌の周囲を歩き回りながら葉を振動させている様子。B) 雄が雌に近づきながら脚で葉を叩き、雌が尾部先端を上げて受け入れ体勢を示している

Fig. 1 Courtship behavior of Jewel bug.

れ、雌が雄を受け入れて交尾に至る(図1B)。レーザードップラ振動計を用いて振動を測定したところ、この求愛行動のなかで、雄と雌がそれぞれ特徴的な振動を発生させていた。また、雄が雌の周囲を動き回ることや、雄自身の背中や触角を雌に接触させることから、振動の情報だけでなく、視覚、化学感覚、触覚による多種感覚の情報を使ってコミュニケーションをしている珍しい事例と考えられた[8]。

2.2 振動に対する感覚

昆虫はどのように振動をセンシングするのだろうか。振動のパラメータは、周波数や振幅であり、それらを検知できるセンサーを昆虫はもっている[4],[7],[18]。弦音器官と呼ばれる、昆虫に特異的な振動や音に対する感覚器であり、その感度は極めて高く、ナノオーダー未満の変化量(変位)を検知している例が知られている。振動を受容する弦音器官は脚に内在しているものが多く、カメムシでは、ヒトの腿に相当する腿節と、脛に相当する脛節に、腿節内弦音器官と膝下器官という異なる弦音器官をもつ[18]。図2に示すように、果樹の害虫であるチャバネアオカメムシの場合、24個の感覚細胞からなる腿節内弦音器官をもつ。振動受容器としての機能に加えて、腿節内弦音器官は、関節の動きや歩行などを検知する自己受容器としての機能ももつ。一方、膝下器官は振動受容器に特化しており、多数の附着細胞が気管(空気を体内に運ぶための管)につながっている構造をもつ。また、チャバネアオカメムシの膝下器官の感覚細胞は少数であり、腿節内弦音器官とは大きく異なる。一般的に、これらの弦音器官は数Hzから5kHzまでの振動を受容する[4]。図3に示すように、チャバネアオカメムシの脚の弦音器官では、500Hz以下の振動に対して感受性をもつことが、電気生理学的応答から示された[19]。

マツの害虫であるマツノマダラカミキリでは、膝下

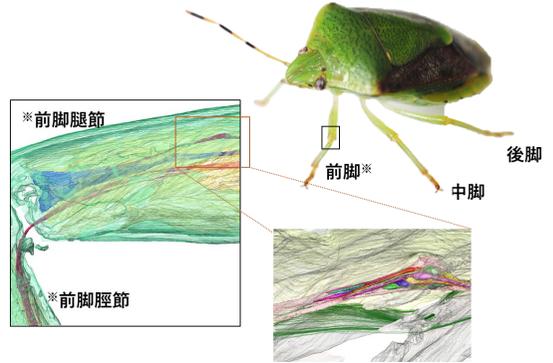


図2 チャバネアオカメムシの腿節内弦音器官と位置。腿節内弦音器官は、前脚、中脚、後脚全ての腿節に一つずつ存在する。黒色枠、及び赤色枠は、それぞれの拡大部を示す[18]

Fig. 2 Femoral chordotonal organ of Brown-winged green bug.

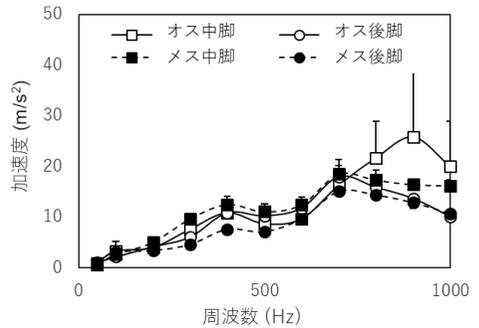


図3 チャバネアオカメムシの弦音器官による振動に対する電気生理応答のしきい値(加速度)[19]。しきい値が低いほど感受性が高いことを意味する

Fig. 3 Electrophysiological thresholds of chordotonal organs in Brown-winged green bug.

器官がなく、図4Aに示すように、腿節内弦音器官のみが存在している[7]。この弦音器官には、約70個の感覚細胞が、キチン質を主成分とするクチクラ(角皮)によって硬化した構造物(内突起)に、附着細胞を介して連結している。この内突起は、脛節の関節の回転軸につながっており、基質からの振動を脚から内突起を通じて受容できる仕組みになっている。なお内突起はコオロギなどでも存在するが、カメムシにはなく、代わりに附着細胞が関節の回転軸につながっている[18]。腿節内弦音器官の感覚細胞が興奮すると、電気信号に変換された情報は一次中枢である胸部の神経節に伝わり、更に高次の中枢である脳へと情報が伝わる[18]。脳において統合・処理された情報により、振動に対する様々な昆虫の行動が発現することになる。

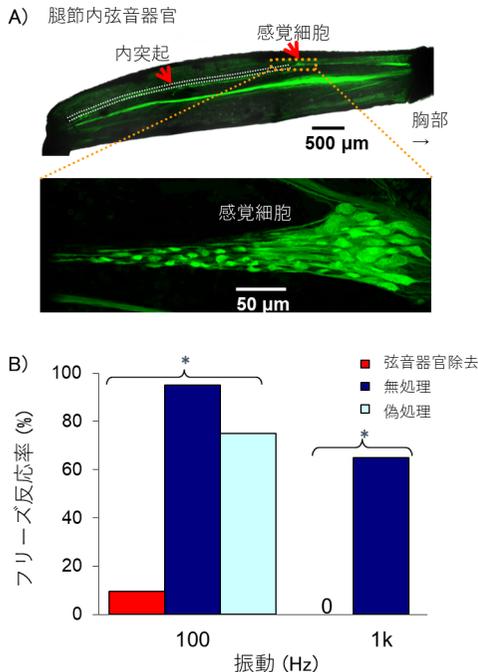


図4 マツノマダラカミキリの腿節内弦音器官 (A) と、腿節内弦音器官を除去した個体、無処理及び偽処理 (除去せずの外科手術のみ) の個体における振動に対するフリーズ反応 (B) [7]. **: $p < 0.05$ (ライアン検定による統計的有意差あり)

Fig. 4 Femoral chordotonal organs (A) and behavioral response to vibrations (B) in Japanese pine sawyer beetle.

著者らのグループでは、図4Aに示したマツノマダラカミキリの腿節内弦音器官が振動受容器であることを証明するために、一連の行動実験を行った[7]。マツノマダラカミキリは振動コミュニケーションを行わないが、振動に対して様々な行動反応を示す。静止中の成虫に振動を与えると、触角や脚などを瞬時に動かす「驚愕反応」を示した。この反応は、1kHz以下の振動に対して感度よくおこる。また、歩行中の成虫に100Hzの振動を与えると、歩行を停止して不動化する「フリーズ反応」をおこした。図4Bに示すように、成虫の腿節内弦音器官を除去する外科手術を行ったところ、成虫は歩行できるが振動に対するフリーズ反応がほとんどおこらなくなった[7]。この実験により、腿節の弦音器官が、マツノマダラカミキリのフリーズ反応をおこす振動受容器であることが示された。

3. 害虫防除

3.1 様々な害虫防除

害虫防除とは、害虫に対する予防と、害虫の駆除の両方を意味する。作物の保護、生産量の減少を防ぐために、害虫防除は極めて重要である[20]。害虫防除は、1) 物理的防除、2) 化学的防除、3) 生物的防除、4) 耕種的防除、に主に分類される[20],[21]。1) 物理的防除とは、人手による捕殺などの単純なものや、化学農薬を用いない資材や装置による防除技術であり、振動を用いた防除技術がこれに該当する。物理的防除の日本における歴史は古く、水稲害虫のウンカを払い落として、鯨油により窒息させる防除を江戸時代には行っていた[20]。2) 化学的防除は殺虫剤等の化学農薬を用いるものであり、3) 生物的防除は天敵を用いるもの、4) 耕種的防除は混作(異なる作物を植えること)や害虫に対する抵抗性品種の作物を用いるものである。1), 3) について、具体例をあげて後述する。

ここで、物理的防除と生物的防除の長所と短所を、化学的防除と比較して紹介する[21]。まず法規制による登録について、物理的防除は不要であるが、他の防除は必要なことが多い。防除効果の持続性(残効性)は、物理的防除において低いが、化学的防除と生物的防除では高い。農業生産性における防除の費用対効果は、化学的防除が高く、物理的防除と生物的防除は低いものから高いものまで様々である。エネルギー(電気等)の必要性について、化学的防除は化学合成の製造工程から高いが、物理的防除は様々である。農業従事者による作業の必要性は、物理的防除と生物的防除で高いものの、化学的防除では低い。環境負荷は、物理的防除では低いが、化学的防除では高い。生物的防除については様々である。昨今、化学農薬に関する使用規制が強まっている傾向から、物理的防除のニーズが今後増大すると考えられる。

3.2 物理的防除

物理的防除の実例[21]を幾つか紹介する。防除効果の持続性(残効性)が高い技術として、被覆資材(例:防虫ネット)や害虫を窒息死させる気門封鎖剤などがあげられる。光や色を用いた技術の例として、特定の波長を用いたLED(発光ダイオード)や色彩のトラップは、害虫の誘引や忌避をおこす[20]。昨今普及された有用技術として、侵入防止効果の高い赤色防虫ネットがあげられる[22]。その他、農産物の防除のために、電磁波や熱水・低温、高濃度の二酸化炭素の利用もあ

る。そして、物理的刺激に対する昆虫の生物学的特性に、工学的技術を活用した、振動や音を用いた防除技術も物理的防除の例となる [4]。最近、イチゴの害虫であるハスモンヨトウというガが、天敵であるコウモリの超音波を避ける習性を活用した防除技術の実証が進んでおり、高い防除効果を示している [21]。振動による防除については、キノコ害虫における研究成果を次節にて詳述する。

3.3 生物的防除

生物的防除とは、加害する病害虫の天敵を使って、病害虫密度を低減する防除法を言う。生物的防除は、対象となる虫以外への作用が少なく、天敵者自身が対象を探索して防除をするため、省力的で持続可能な防除方法となる可能性を秘めている。一方で、限定的で変動的な効果や、天敵類の生産コスト等十分に解決されていない問題も多く、更なる研究が求められている [23]。

生物的防除の試みは歴史が古く、最も古い記録は、古代中国でカンキツ園に捕食性のアリを導入したものである [24]。以降、様々な種を対象として研究が構築され、現在の農業分野では、コウチュウ類、ハチ類、カメムシ類、ダニ類、線虫類、細菌、ウイルス等、多様な生物が害虫を捕食や寄生する天敵として利用されている [25]~[27]。例えば、昆虫病原性線虫は、多くの農業害虫に有効であることが知られ、線虫自身もつ共生細菌の殺虫活性により宿主を死に至らしめる。こうした生物間相互作用を応用した害虫管理は、化学農薬に依存しない IPM の確立の観点からも不可欠な要素であり、近年改めて注目が集まっている [28]。

3.4 総合的害虫管理 (IPM)

化学農薬の多用によって、生態系への影響やヒトへの健康被害、害虫の薬剤抵抗性の出現などの課題がでてきている。その解決策として、化学農薬のみに依存せず、様々な防除技術を合理的に組み合わせて病害虫・雑草などの有害生物による被害に取り組む IPM (総合的有害生物管理あるいは総合的害虫管理) が推進されている [3]。農林水産省の IPM 実践指針 [29] では、IPM を「利用可能な全ての防除技術を経済性を考慮しつつ慎重に検討し、病害虫・雑草の発生増加を抑えるための適切な手段を総合的に講じるものであり、これを通じ、人の健康に対するリスクと環境への負荷を軽減、あるいは最小の水準にとどめるものである。また、農業を取り巻く生態系の攪乱を可能な限り抑制することにより、生態系が有する病害虫及び雑草抑制機能を

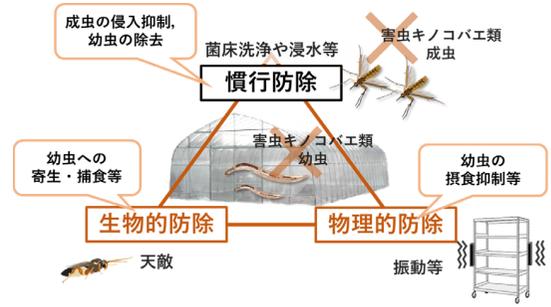


図5 キノコ栽培を目指す IPM の模式図。慣行防除に、生物的防除、物理的防除を組み込むことで、持続可能な栽培及び害虫管理法を構築することを目標とする
Fig. 5 Models of IPM in mushroom cultivation.

可能な限り活用し、安全で消費者に信頼される農作物の安定生産に資するものである。」と定義している。そして、1) 病害虫・雑草の発生しにくい環境の整備 (予防的措置)、2) 防除の要否及びそのタイミングの判断 (判断)、3) 多様な手法による防除 (防除)、の実践手順を示している。振動技術などの物理的防除技術は、IPM において、3) における化学的防除技術以外の重要選択肢となる [3]。

欧州のツクリタケ (マッシュルーム) 栽培では、古くからクロバネキノコバエ類による被害が深刻であり、化学農薬を使った防除法が多用されてきた [30]。しかし近年、農薬の過剰使用による環境汚染及び害虫の薬剤抵抗性の獲得が問題となり、天敵微生物を利用した IPM へのシフトが精力的に進められている [31]。Jess & Schweizer [31] は、光を用いたトラップによる物理的防除、天敵微生物 (ダニ類と線虫類) による生物的防除、化学農薬による化学的防除の総合的防除によるキノコバエ類への効果を検証し、天敵微生物が害虫密度の低減に効果をもつことを実証した。天敵微生物を利用したキノコ害虫防除については、近年日本でも着目されており、前述した昆虫病原性線虫や昆虫病原性細菌を使った天敵微生物製剤が最近、適用拡大のため登録されている [32]。更に、キノコ害虫に寄生するハエヒメバチ類の発見も後押しとなり [33]~[35]、図 5 に示すように、キノコ栽培施設での IPM における生物的防除の期待は高まっている。

4. 振動による害虫防除

4.1 シイタケの害虫による被害

キノコ類は、日本において広範囲を占める中山間地域の重要な農林産物である。その市場規模は年間 2,170

億円であり、シイタケがその3割を占めている [36]。シイタケは、工場生産に不適であり、中・小規模の生産者に依存している。シイタケ栽培は、培地として原木を用いることが以前は多かったが、近年は、おが粉と栄養剤を混ぜた培地にシイタケ菌を培養した菌床が最も利用されている。省力化や高温耐性品種による周年の収穫等の新技術によって、シイタケは安定的な生産が可能となった。しかし、これら技術の普及に伴い、害虫の被害が深刻化している。なかでも、ナガマドキノコバエ類（以下、キノコバエ）は、短期間で発生して甚大な被害をもたらす。菌床シイタケの主要な害虫である [32], [33]。キノコバエは、幼虫が子実体（いわゆるキノコ）や菌床を食害することに加え、流通の過程で商品に異物として混入して問題となる。シイタケ栽培では、消費者の安心・安全を求めるニーズが高く、化学農薬がほとんど使用できないため、化学農薬に頼らない害虫防除技術や栽培管理法の開発が求められている。図5に示すように、これまでキノコバエの防除は、菌床の洗浄や黄色粘着板や乳酸発酵液を誘引剤としたトラップ等による物理・化学的防除が中心であった [32]。しかし、栽培施設内で急激に増殖するキノコバエを抑制することは難しく、新たな物理的防除技術の開発が強く望まれている。

4.2 振動によるキノコバエの行動制御

キノコバエの成虫・幼虫の行動が振動により制御されることを明らかにするため、終齢幼虫及び成虫に対して振動を与えて行動を観察した [37]。実験室内において市販ボイスコイル式の加振機を使用して、幼虫または成虫1頭に対して、25–1500Hzの単一周波数ごとに持続時間1秒の振動刺激を断続的に与えた。その結果、幼虫は、様々な周波数の振動に対して後退、収縮による驚愕反応、行動を停止するフリーズ反応を示し、特に1kHzへ高感度な反応を示した。一方、成虫は飛翔や驚愕反応を行った。図6に、成虫における振動に対する行動反応のしきい値を示す。ここでは、ある周波数の振動における行動反応をおこす最小の振幅である加速度がしきい値となり、しきい値が低いほどその周波数の振動に対して高感度であることを意味する。キノコバエの成虫は、100Hz以下と1000Hzの振動に対して高感度であり、他の周波数に対して高感度ではないことが示された (図6) [37]。

続いて、室内実験において、キノコバエの終齢幼虫20頭を菌床に乗せ、市販ボイスコイル式の加振機により上記と同様の条件で加振し、幼虫に与える影響を調

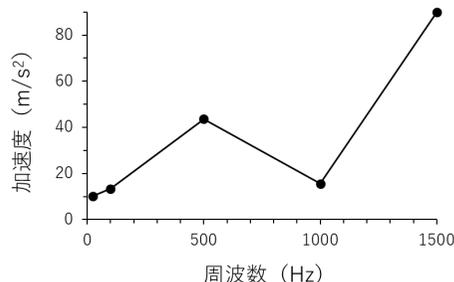


図6 キノコバエの成虫における振動に対する行動反応のしきい値 (加速度)。しきい値が低いほど高感度な反応であることを意味する

Fig.6 Behavioral thresholds of adults of fungus gnats.

べた [37]。幼虫は、実験開始時に菌床の上面に導入されたが、加振後菌床の側面に移動し定着する傾向が見られた。加振処理区では上面に滞在する期間が無処理区と比較してやや長い傾向が見られた [37]。また、加振処理区と無処理区では、幼虫の成長段階や死亡率に差がみられなかったものの、加振処理区で羽化した個体は、無処理区で羽化した個体に比べて、雌成虫の卵巣の発達程度が遅れる傾向が見られ、繁殖機能が低下した可能性が示唆された [37]。振動による繁殖機能の低下は、害虫で初めて確認された現象であり、振動による新たな害虫防除技術に繋がると考えられた。

4.3 振動によるキノコバエの防除

以上の結果を踏まえ、模擬栽培施設において、害虫が定着している菌床に振動を与え、害虫の行動や成長への影響を明らかにした [37]。キノコバエの終齢幼虫10頭を菌床上にのせ、模擬栽培施設内の栽培棚に並べた。市販のボイスコイル式の加振機、及び磁歪クラッド材（磁場の変化により伸縮する鉄とコバルト等の合金の組み合わせ）による振動発生装置（東北特殊鋼株式会社製）（以下、磁歪式振動装置）を栽培棚に取り付け、それぞれ一定の周波数、特定の加速度の範囲内において加振した。これらの振動による効果を実験開始から2ヶ月間、検証した。

その結果、加振処理区では、無処理区に比べて幼虫の蛹化（蛹になること）が顕著に遅れる傾向が見られた [37]。これに伴い、成虫の発生も遅延し、最適時期に羽化できなかったとみられる幼虫が多く死亡する様子が見られた。図7に示すように、蛹化したキノコバエの幼虫数 (図7A)、及び最終的に成虫となる羽化数は加振処理区で減少する傾向がみとめられ、成虫の発生率がおよそ35%抑制された (図7B) [38]。これら

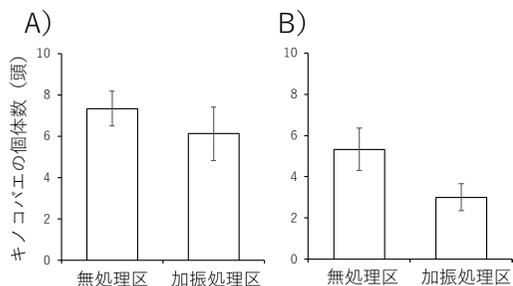


図7 振動による模擬栽培施設での防除効果。A) 蛹化したキノコバエの数、B) 羽化したキノコバエの数、をそれぞれ示す[38]。いずれも $p > 0.05$ (統計的有意差なし)

Fig. 7 Effect of vibrational pest management in mushroom house.

の結果から、キノコバエの防除において、振動が高い効果をもつことが示された[37]。また、この振動による成長阻害は、振動による摂食等の行動制御が一要因であると考えられた。

4.4 様々な害虫に対する振動による防除

著者らは、振動を用いて樹木の害虫であるカミキリムシ類の防除を目的とした研究を進めている[4]~[6]。マツ材線虫病を媒介するマツノマダラカミキリ(政令指定森林病害虫)による被害は、病原体であるマツノザイセンチュウが日本に侵入して以来、拡大しており、その被害量は年間で約35万立方メートルにのぼる[39]。一方、クビアカツヤカミキリは、サクヤ果樹の害虫であり、近年侵入してその被害が急速に拡大しているため、特定外来生物に指定されている[40]。これらのカミキリムシ類は、実験室内において振動に感度よく驚愕反応やフリーズ反応を示す[4]。100Hzの振動を発生する、磁歪クラッド材などの磁歪材料を用いた振動発生装置を屋外の樹木に設置し、マツノマダラカミキリ及びクビアカツヤカミキリの行動反応を観察したところ、驚愕反応やフリーズ反応が観察された[5],[7]。振動は、設置した主幹から枝まで伝達していることから、振動発生装置による防除の有用性が示された[5]。また、実験室内において、これらのカミキリムシ類の産卵が、同じく100Hzの振動によって阻害されることを示した[6]。マツやサクヤなどの産卵対象木に装置を取り付けて、振動によって次世代の増殖を抑える害虫防除が可能となる[4]。

オンシツコナジラミやタバココナジラミなどのコナジラミ類は、トマトをはじめとする野菜の重要害虫であり、トマトに致命的の被害を与える植物ウイルス病(トマト黄化葉巻病等)を媒介するほか、カビによる病

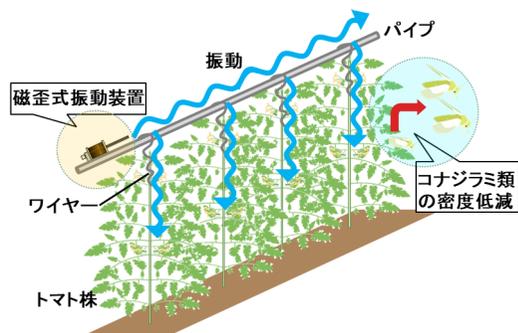


図8 栽培施設内において磁歪式振動装置を設置したトマト株の模式図

Fig. 8 Models of tomato plants installed with magnetostriuctive vibration exciter.

気の原因となる排泄物を出す[41]。更にコナジラミ類は様々な化学農薬に対する抵抗性を獲得していることから[41]、化学農薬に頼らない新たな物理的防除技術が求められている。実験室内において、コナジラミ類は振動に対して驚愕反応を示した[42]。そして、トマト栽培施設において、磁歪式振動装置(東北特殊鋼株式会社製)からの振動(周波数100Hz)が、害虫の密度を大幅に低減する防除効果をもつことを明らかにした[10],[42]。図8に示すように、栽培施設内の上部のパイプに磁歪式振動装置を設置し、このパイプから垂下した金属ワイヤーにトマト植物体をつなげて、振動を伝達させた。また、この振動にはトマトの受粉を促進させる効果もあったため、栽培の促進と害虫防除のダブル効果をもつ可能性も示された[42],[43]。トマト等の野菜の栽培に際して、マルハナバチを用いて、花を振動させることで受粉を促進しており、これに代る効率的に受粉を促す技術になることが期待される。

国外においても、振動を用いた害虫防除の研究は盛んに行われている。ブドウの病気を媒介するイタリア産のヨコバイの害虫は、雌雄が300Hz未満の規則的なパルス構造をもつ振動を相互に発して、交尾相手を探索するコミュニケーションを植物上で行う[44]。更に、雄が不規則なパルス構造をもつ振動を発して、ライバルである別の雄のコミュニケーションを妨害する。この振動を模倣した振動をブドウに装着した装置から与えると、交尾が激減したことから、コミュニケーションの阻害が示された[44]。またブラジル産のカメムシの害虫においては、75~200Hzの範囲で単一周波数の振動によって、雌雄間のコミュニケーションや交尾が阻害された[45]。振動コミュニケーションを示す一部

の害虫に対して、今後この防除技術が適用されると予想される。一方、著者らがキノコバエ、カミキリムシ、コナジラミ、カメムシで示しつつある、行動制御による防除技術は、振動に感受性を示す幅広い害虫種に適用されることから、汎用性が高いといえる [4], [42], [46].

5. む す び

振動を用いた害虫防除技術は、他の物理的防除技術と組み合わせることによって、化学農薬に頼らない IPM へと発展する。振動によって昆虫は行動が制御されるため、様々な農林業害虫に対して本技術の適用が可能である。著者らは、振動農業技術コンソーシアムによる研究活動を通じて、野菜、きのこ、果樹とこれらの害虫を対象に、振動を用いた害虫防除や作物等の栽培技術の実用化に向けた研究を今後も展開する予定である。現在、振動の周波数等の条件の最適化、振動による害虫及び作物への作用のメカニズムの解明、防除及び栽培技術に関する実証試験を進めている。振動による害虫防除技術は、環境を保全しつつ、省力も可能な栽培体系に発展できる。今後は、振動が天敵を含めた他の生物等に及ぼす影響についても注視していく必要がある。振動に関して、周波数や振幅、時間などのパラメータは情報通信で十分に活用できることから、IoT 技術との融合が可能である。特にキノコ栽培において、化学農薬が使用できないため、振動を用いた害虫防除などの新技術のニーズは高い。また、振動を用いた害虫防除技術は、農学分野だけでなく、生物が利用する音や振動に関する研究分野である生物音響学 [14] や、生物の機能や構造を応用するバイオミメティクス [21] という学際分野においても注目されている。昆虫の振動に関する生物学的知見が蓄積されて、振動に関する工学的技術が発達した今こそ、振動を用いた害虫防除技術は、農林産物の効率的、省力化栽培のためのスマート農林業を実現化する契機となる。

謝辞 本研究の一部は、生研支援センター・イノベーション創出強化研究推進事業「害虫防除と受粉のダブル効果！スマート農業に貢献する振動技術の開発」, JSPS 科研費 19KT0040, 20K15562 の支援を受けて行った。

文 献

- [1] 首相官邸, “農林水産業全体にわたる改革とスマート農林水産業の実現,” 首相官邸成長戦略ポータルサイト, <https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/portal/agriculture/index.html>, Jan. 2022.
- [2] A.R. Cohen, G. Chen, E.M. Berger, S. Warriar, G. Lan, E. Grubert, F. Dellaert, and Y. Chen, “Dynamically controlled environment agriculture: integrating machine learning and mechanistic and physiological models for sustainable food cultivation,” *ACS ES&T Engineering*, vol.2, no.1, pp.3–19, 2022.
- [3] 本多健一郎, “IPM の最新動向,” 技術と普及, vol.59, pp.19–21, 2022.
- [4] T. Takanashi, N. Uechi, and H. Tatsuta, “Vibrations in hemipteran and coleopteran insects: behaviors and application in pest management,” *Appl. Entomol. Zool.*, vol.54, pp.21–29, 2019.
- [5] 衣浦晴生, 高梨琢磨, 小野寺隆一, 田山 巖, 金子修治, 山本優一, “サクラ樹上におけるクビアカツヤカミキリ成虫の振動に対する行動反応,” 樹木医学研究, vol.25, pp.57–58, 2021.
- [6] 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,” 特許第 5867813 号, Jan. 2016.
- [7] T. Takanashi, M. Fukaya, K. Nakamura, N. Skals, and H. Nishino, “Substrate vibrations mediate behavioral responses via femoral chordotonal organs in a cerambycid beetle,” *Zool. Lett.*, vol.2, 18, 2016.
- [8] H. Mukai, T. Takanashi, and Yamawo A., “Elaborate mating dances: multimodal courtship displays in jewel bugs,” *Ecology*, doi.org/10.1002/ecy.3632, 2022.
- [9] R. Tsubaki, N. Hosoda, H. Kitajima, and T. Takanashi, “Substrate-borne vibrations induce behavioral responses of a leaf-dwelling cerambycid *Paraglenea fortunei*,” *Zool. Sci.*, vol.31, pp.789–794, 2014.
- [10] 高梨琢磨, 小池卓二, 田山 巖, 小野寺隆一, 小野利文, 阿部翔太, 細川 昭, 関根崇行, 猪苗代翔太, 立田晴記, 柳澤隆平, 大矢武志, 植草秀敏, 八瀬順也, 富原工弥, 振動による害虫防除及び作物受粉の方法, 特許第 6991488 号, Dec. 2021.
- [11] 徳永絢子, 小池卓二, 高梨琢磨, 大矢武志, “トマト株加振による害虫防除・受粉促進のための効率的振動条件の検討,” 日本機械学会第 32 回バイオフィロントニア講演会, IC21, Jan. 2022.
- [12] H. Shimizu, T. Hiraguri, M. Kimoto, K. Ota, T. Shindo, Y. Hoshino, and K. Takaki, “Stimulatory growth effect of lightning strikes applied in the vicinity of shiitake mushroom bed logs,” *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol.53, 204002, 2020.
- [13] 清水博幸, 平栗健志, 木許雅則, 大田健紘, 進藤卓也, 星野祐希, “雷撃刺激がシイタケの発生に及ぼす影響,” 日本きのこ学会誌, vol.28, pp.134–139, 2020.
- [14] 高梨琢磨 (編), “第 8 章 昆虫類ほか,” 生き物の音の事典, (一社) 生物音響学会 (編), pp.294–365, 朝倉書店, 東京, 2019.
- [15] T. Ichikawa and S. Ishii, “Mating signal of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* Stål (Homoptera: Delphacidae): vibration of the substrate,” *Appl. Entomol. Zool.*, vol.9, pp.196–198, 1974.
- [16] I. Djemai, J. Casas, and C. Magal, “Parasitoid foraging decisions mediated by artificial vibrations,” *Anim. Behav.*, vol.67, pp.567–571, 2004.
- [17] J. Endo, T. Takanashi, H. Mukai, and H. Numata, “Egg-cracking vibration as a cue for stink bug siblings to synchronize hatching,”

- Curr. Biol., vol.29, pp.143–148, 2019.
- [18] H. Nishino, H. Mukai, and T. Takanashi, “Chordotonal organs in hemipteran insects: unique peripheral structures but conserved central organization revealed by comparative neuroanatomy,” *Cell Tissue Res.*, vol.366, pp.549–572, 2016.
- [19] 向井裕美, N. Skals, 高梨琢磨, “チャバネアオカメムシ(カメムシ目:カメムシ科)の基質振動に対する神経応答の電気生理学的解析,” *応動昆.* vol.64, pp.1–4, 2020.
- [20] 石川幸男, 野村昌史, 応用昆虫学, 朝倉書店, 東京, 2020.
- [21] 森 直樹, 高梨琢磨, 中野 亮, 農業とバイオミメティクス バイオミメティクス・エコミメティクス—持続可能な循環型社会へ導く技術革新のヒント—, 下村政嗣監修, シーエムシー出版, 東京, pp.40–46, 2021.
- [22] 大矢武志, “防虫ネットによる微小害虫の上手な防除技術,” *技術と普及*, vol.55, pp.42–43, 2018.
- [23] 仲井まどか, 大野和朗, 田中利治, *バイオロジカル・コントロール—害虫管理と天敵の生物学—*, 朝倉書店, 東京, 2009.
- [24] 後藤哲雄, 上遠野富士夫, 応用昆虫学の基礎, 農文協, 東京, 2019.
- [25] S.T. Jaronski, “Ecological factors in the inundative use of fungal entomopathogens,” *BioControl*, vol.55, pp.159–185, 2010.
- [26] L.A. Lacey, D. Grzywacz, D.I. Shapiro-Ilan, R. Frutos, M. Brownbridge, and M.S. Goettel, “Insect pathogens as biological control agents: Back to the future,” *J. Invertebr. Pathol.*, vol.132, pp.1–41, 2015.
- [27] D.J. Greathead and A.H. Greathead, “Biological control of insect pests by insect parasitoids and predators: The BIOCAT database,” *Biocontrol News Inf.*, vol.13, pp.61N–68N, 1992.
- [28] J. Eilenberg, A. Hajek, and C. Lomer, “Suggestions for unifying the terminology in biological control,” *BioControl*, vol.46, pp.387–400, 2001.
- [29] 農林水産省, “総合的病害虫・雑草管理(IPM)実践指針,” 農林水産省消費・安全局植物防疫課国内防除第2班. https://www.maff.go.jp/j/syouan/syokubo/gaicyu/g_ipm/, Jan. 2022.
- [30] G.R. Bartlett and C.B.O. Keil, “Identification and characterization of a permethrin resistance mechanism in populations of the fungus gnat *Lycoriella mali* (Fitch) (Diptera: Sciaridae),” *Pestic. Biochem. Phys.*, vol.58, pp.173–181, 1997.
- [31] S. Jess and H. Schweizer, “Biological control of *Lycoriella ingenua* (Diptera: Sciaridae) in commercial mushroom (*Agaricus bisporus*) cultivation: a comparison between *Hypoaspis miles* and *Steinernema feltiae*,” *Pest Manag. Sci.*, vol.65, pp.1195–1200, 2009.
- [32] 森林総合研究所, *しいたけ害虫の総合防除*. 改訂第二版, 森林総合研究所森林昆虫研究領域, つくば市, 2020.
- [33] H. Mukai and H. Kitajima, “Parasitoid wasps regulate population growth of fungus gnats genus *Neoempheria* Osten Sacken (Diptera: Mycetophilidae) in shiitake mushroom cultivation,” *Biol. Control*, vol.134, pp.15–22, 2019.
- [34] H. Mukai and H. Kitajima, “Laboratory evaluation of *Orthocentrus brachycerus* (Hymenoptera: Ichneumonidae), as a potential biological control agent in mushroom cultivation,” *J. Appl. Entomol.*, vol.145, pp.348–357, 2021.
- [35] K. Watanabe, H. Mukai, H. Kitajima, and M. Sueyoshi, “The ichneumonid parasitoids of the fungus gnats genus *Neoempheria* Osten Sacken (Diptera: Mycetophilidae) infesting edible fungi in the sawdust-based cultivation houses,” *Jpn. J. Systematic Entomol.*, vol.26, pp.53–61, 2020.
- [36] 農林水産省, “令和元年林業算出額,” 農林水産省大臣官房統計部, https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/ringyou_sansyutu/attach/pdf/index-2.pdf, Jan. 2022.
- [37] 向井裕美, 高梨琢磨, 小野寺隆一, 阿部翔太, 小野利文, “振動を用いた害虫の行動及び成長の制御によりキノコ類を保護する方法,” 特願 2021-116885, July 2021.
- [38] 向井裕美, 高梨琢磨, 北島 博, “キノコ害虫防除研究の最新線—キノコ栽培における天敵生物や振動を用いた新規害虫防除の試み—,” 電子情報通信学会通信ソサエティ革新的無線通信技術に関する横断型研究会(MIKA), Oct. 2021.
- [39] 林野庁, “平成30年度森林病害虫被害量について,” 林野庁森林整備部研究指導課森林保護対策室, <https://www.rinya.maff.go.jp/j/press/hogo/191018.html>, Jan. 2022.
- [40] 加賀谷悦子, “ウメ・モモ・サクラを害する外来種クビアカツヤカミキリの生態と防除,” 関東東山病害虫研究会報, vol.66, pp.1–3, 2019.
- [41] 本多健一郎, “トマト黄化葉巻病と媒介コナジラミ, 防除法を巡る研究情勢と問題点,” 野菜茶業研究集報, vol.3, pp.115–122, 2006.
- [42] 高梨琢磨, 関根崇行, 大江高穂, 小池卓二, “振動農業技術—振動を用いた害虫防除技術と栽培技術の開発に向けて—,” 信学技報, CQ2020-42, 2020.
- [43] R. Yanagisawa, R. Suwa, T. Takanashi, and H. Tatsuta, “Substrate-borne vibrations reduced the density of tobacco whitefly *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) infestations on tomato, *Solanum lycopersicum*: an experimental assessment,” *Appl. Entomol. Zool.*, vol.56, pp.157–163, 2021.
- [44] A. Eriksson, G. Anfora, A. Lucchi, F. Lanzo, M. Virant-Doberlet, and V. Mazzoni, “Exploitation of insect vibrational signals reveals a new method of pest management,” *Plos One*, vol.7, no.e32954, 2012.
- [45] R.A. Laumann, D.H.B. Maccagnan, A. Čokl, M.C. Blassioli-Moraes, and M. Borges, “Substrate-borne vibrations disrupt the mating behaviors of the neotropical brown stink bug, *Euschistus heros*: implications for pest management,” *J. Pest Sci.*, vol.91, pp.995–1004, 2018.
- [46] 上地奈美, 高梨琢磨, “振動によるチャバネアオカメムシ(カメムシ目:カメムシ科)の行動制御と害虫防除への応用,” *応動昆.* vol.65, pp.13–20, 2021.

(2022年1月21日受付, 3月8日再受付, 6月8日早期公開)



高梨 琢磨

2001 東京大学大学院農学生命科学研究科博士課程了, 博士(農学), 2021 森林総合研究所東北支所チーム長. 昆虫の振動と音, それらの感覚に関する基礎及び応用研究, 特に振動を用いた害虫防除技術の開発に従事. 生物音響学会理事, 日本応用動物

昆虫学会代議員, 日本動物学会会員.



向井 裕美

2014 鹿児島大学大学院連合農学研究科博士課程了, 博士(農学), 2020 から森林総合研究所森林昆虫研究領域の主任研究員. 昆虫や植物, 菌類を対象として, 情報受容と処理及びコミュニケーションに関する研究に従事している.



平栗 健史 (正員: シニア会員)

1999 筑波大学理工学研究科了, 2008 同大学, 博士(情報学)取得, 1999 日本電信電話株式会社 NTT アクセスサービスシステム研究所研究員, 2010 から日本工業大学工学部所属, 現在, 日本工業大学基幹工学部教授. 無線通信の高速化及び通信品質に

関する研究開発に従事. 近年ではスマート農業に関するドローンの制御及び通信方式の研究に従事. IEEE, 園芸学会, 日本きのこ学会各会員.