

連携記事

磁歪クラッド材と農業技術への挑戦・貢献 Application of Magnetostrictive Clad Materials for Agricultural Technology

東北特殊鋼(株)
技術統括部
材料開発チーム
渡辺将仁
Masahito Watanabe

東北特殊鋼(株)
技術統括部
機器開発チーム
阿部翔太
Syota Abe

1 はじめに

一般に、磁性体の中でも大きな磁歪量を示すものは磁歪材料と呼ばれ、外部磁場を活用した変形や変形に伴う磁化変化を利用したアクチュエータ・発電技術に応用されている。こうした特性を生かした開発が進む中、当社では異なる飽和磁歪を持つ磁歪材料同士を接合した複合材料「磁歪クラッド材」を開発した。この磁歪クラッド材は、磁歪を利用した振動発生装置への応用が期待されており、農業分野における害虫対策の振動技術として商品化を進めている。本稿では、磁歪クラッド材の特長およびその社会実装の可能性について紹介する。

2 磁歪材料の特長・応用例

「磁歪」とは、Fe, Ni, Coに代表される強磁性体に対して外部磁場を印加すると磁性体の外形が変化する現象である(ジュール効果)¹⁾。磁性体の内部は磁区と呼ばれる領域に分かれており、1つの磁区の内部では、結晶が自発磁化の方向を主軸としてひずんでいる。図1に示すように、外部磁場の作

用により磁化の方向をそろえると、各磁区内でのひずみは磁化の回転に伴ってその向きを変えるため、全体としての外形が変化する。逆に、磁性体に外力(ひずみ)を与えると磁性体内部の磁化が変化する逆磁歪(ビラリ効果)と呼ばれる現象が起きる。それぞれのイメージ図を図2に示した。磁歪材料とは、これら2つの効果を顕著に示す材料のことを指し、電気(磁気)エネルギーと機械的エネルギーを相互に変換できる特性を有している。代表的な磁歪材料としては、Ni, Fe-Al合金(Alfer, Alfenol), Fe-Co合金、Fe-Ga合金(Galfenol)等が知られており、その飽和磁歪は～数100ppmである^{2,4)}。また、1970年代には飽和磁歪が1000ppmを超えるTb-Dy-Fe系合金(Terfenol-D)が開発されており、超磁歪材料と称されている⁵⁾。表1にそれぞれの合金の代表的な飽和磁歪を示した。この他、アモルファス合金(FeSiB)やスピネル型フェライト、最近では磁性を持つ形状記憶合金として強磁性ホイスラー合金⁶⁾が磁歪材料として挙げられる。これらの磁歪材料は、磁歪を利用した、ソナーや超音波発生器の振動子への応用、逆磁歪を利用した、振動からエネルギーを回収する環境発電デバイス(以下、振動発電デバイス)⁷⁾や力センサへの応用など、幅広い応用が期待される材料である。

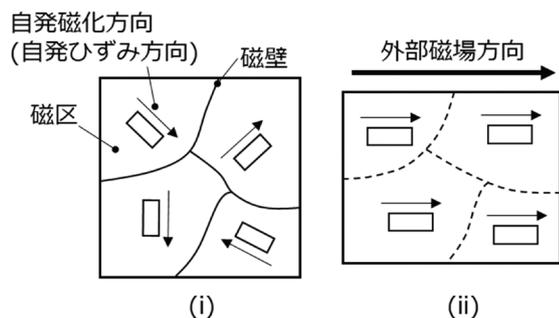


図1 磁化による各磁区内の自発ひずみの変化 (i) 消磁状態、(ii) 飽和状態

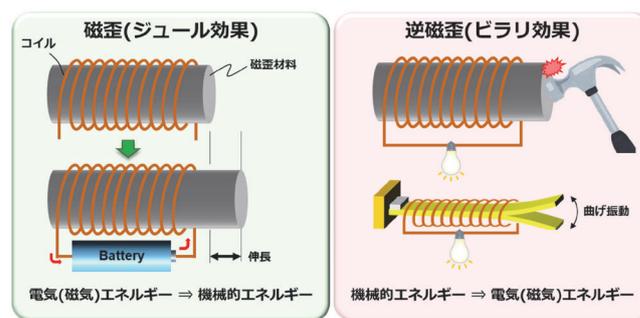


図2 磁歪(ジュール効果)、逆磁歪(ビラリ効果)イメージ図 (Online version in color.)

3 飽和磁歪の符号の異なる異種金属を接合した磁歪クラッド材

当社では、表1に挙げた磁歪材料のうち、希土類金属を含有せず比較的高い飽和磁歪を示すCo過剰型Fe-Co合金(以下、Fe-Co合金)の量産化に取り組み、棒材・線材・板材・箔材など多様な形状へ加工する製造方法を確立している⁸⁾。また、磁歪を利用した振動子への適用や、逆磁歪を利用した振動発電デバイス及びセンサとして、それぞれ実用可能な発電特性・センサ特性を発現することを確認している^{9,10)}。さらに、飽和磁歪の符号の異なる異種金属を貼り合わせる「クラッド化」により、さらに機能特性が向上した複合材料を開発した。これは板圧延で製造したFe-Co合金板とNi板を、当社保有の拡散接合技術^{11,12)}を用いてクラッド化したものであり、新しい機能性複合材料として「磁歪クラッド材」と呼称している。磁歪クラッド材を構成するFe-Co合金とNiは、表1に示すようにそれぞれ正・負の符号の異なる飽和磁歪を有している。すなわち、外部磁場を印加した際にFe-Co合金は伸び、Niは縮むが、図3に示すようにこれらを接合した磁歪クラッド材の場合は、接合界面で互いの変形を拘束すること

表1 各種磁歪材料の代表的な飽和磁歪

材質	飽和磁歪(ppm)
Ni	ca. -40
Fe-Al (Alfer, Alfenol)	ca. 40
Fe-Co (Permendur)	ca. 70
Fe-Co (Co 過剰型, Co>60wt%)	ca. 90
Fe-Ga (Galfenol)	ca. 200
Tb-Dy-Fe (Terfenol-D)	ca. 2000

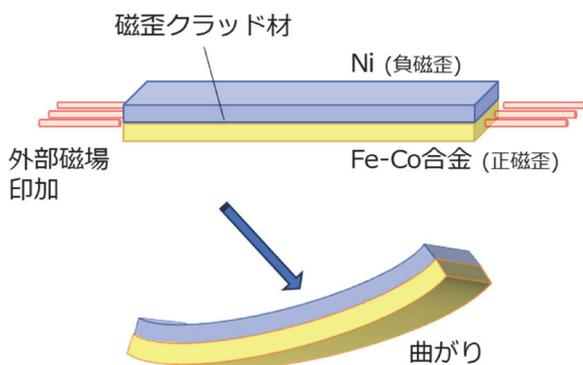


図3 外部磁場印加による磁歪クラッド材の形状変化
(Online version in color.)

になって曲がりが生じる。クラッド化は、逆磁歪を利用した振動発電特性および磁歪を利用したアクチュエータ特性の両者の向上に寄与しており、結果の一例を以下に示す。

図4に示した片持ち梁式の共振型振動発電デバイスを用い、Fe-Co合金単体・磁歪クラッド材を発電素子として用いた場合の発電試験結果を図5に示す。長さ70mm×幅5mm×厚さ1mmの各材料を発電素子として組み込み、発電素子先端に重錘を付与してデバイスの固有振動数を50Hzに調整の上、加振機を用いて加速度0.13G・周波数50Hzの正弦波振動を与えて、負荷抵抗10MΩのオープン回路構成にて発生電圧を測定した。共振周波数の50Hzにおいて、発電素子がFe-Co合金、磁歪クラッド材それぞれの場合約4.7V、30Vの発生電圧を示し、クラッド化によってFe-Co合金単体対比で約6.5倍の電圧が得られた。加えて、クラッド化によって共振ピークの半値幅が増加し、共振周波数の広帯域化の効果も得られることがわかった¹³⁾。一般に、共振型の振動発電デバイスに

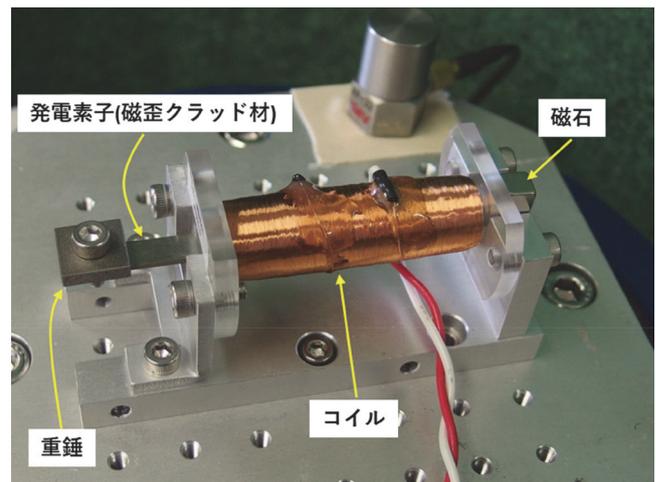


図4 共振型振動発電デバイス外観 (Online version in color.)

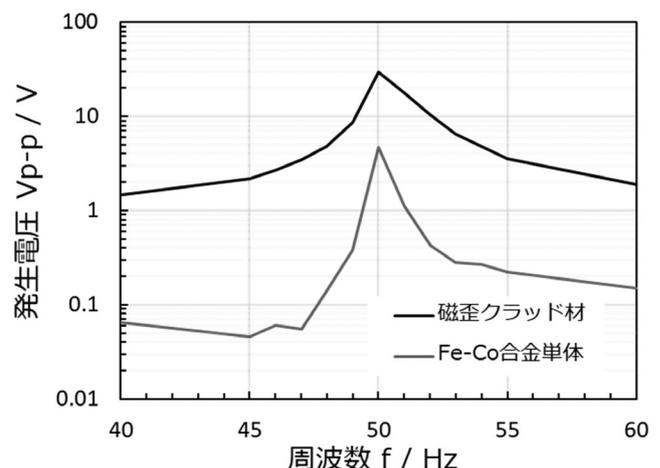


図5 Fe-Co合金と磁歪クラッド材の発電特性（周波数特性）

においては最大発電電力とその帯域幅はトレードオフの関係にあり⁷⁾、両得の効果が得られる点から磁歪クラッド材は振動発電に適した材料であると考えられる。

2018年より当社工場で、磁歪クラッド材を発電素子として用いた振動発電デバイスの実証実験を進めている。モーターの微小な振動をエネルギー源として利用して、外部電源を必要としない、モーター振動のセンシングとその信号をZigBeeで伝送する無線システムを構築している。発電電力は約25 μ Wと微小ながら、蓄電技術を活用することにより効率的な充電が可能となり、5分間隔で通信が可能であることを確認している。今後の工場IoTスマート化に向けて既設のモーターの状態を監視する予知保全システムへの応用が期待される。

続いて、アクチュエータ特性の評価結果の一例を示す。図6に示した実験系において測定した最大変位量と最大発生力を図7に示す。長さ80mm×幅7.5mm×厚さ1~4mmの磁歪クラッド材(以下、素子)を、一端を固定端、他端を自由端とした片持ち梁の形で素子の自由長が75mmとなるように

固定し、素子の周りに配置されたコイルに直流電流を流して110kA/mの磁場を印加した。この時の自由端端部の高さ方向のたわみをレーザードップラー振動計で測定、最大変位量と定義した。最大変位量は板厚に比例して減少し、本実験系においては素子厚さ1mmで約500 μ m、素子厚さ4mmで約120 μ mを示した。同じ試験でFe-Co合金単体の場合の同一素子寸法における磁歪による変位量は約7 μ mであるから、変位の方向は異なるが、クラッド化によって飛躍的に変位量が増大したことがわかる。また、変位量0の状態、たわみ方向に対して磁歪クラッド材が外部に与える力をロードセルで測定し、これを最大発生力と定義した。最大発生力は板厚に比例して増加し、素子厚さ1mmで約0.4N、素子厚さ4mmで約2.8Nを示した。

4 磁歪クラッド材と振動による害虫防除

当社は、前述した磁歪クラッド材のアクチュエータ特性を活かし、「農業分野の害虫防除技術に寄与する磁歪式振動装置」の研究開発に取り組んでいる。図6の概略図に示した片持ち梁の形を基本構成として、コイルに交流電流を印加することで磁場が周期的に変化、磁歪クラッド材(振動素子)の上下に曲がる動作が連続し、素子が振動する。これが磁歪式振動装置の原理である(図8)。この機構は、歯車やクランクなどの複雑な摺動機構や消耗部品を持たないシンプルな構造でありながら、狙った振動周波数を瞬時に発生させることができるため、害虫の行動を妨げる振動を即座に再現可能で、農業分野での害虫防除技術に応用されている。

近年、環境保全型農業の実現を目指し、化学農薬だけに依

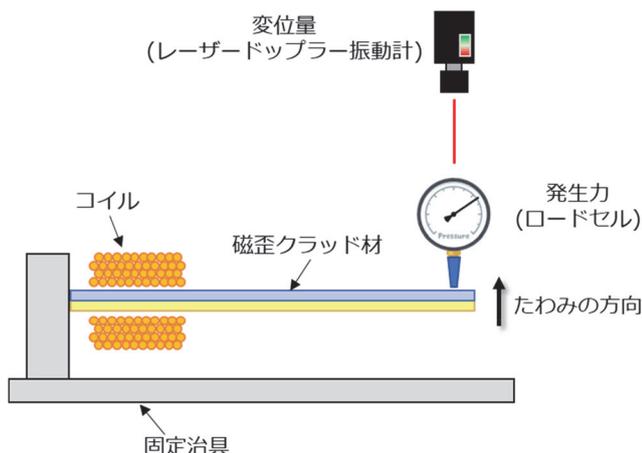


図6 変位量・発生力の測定実験系模式図 (Online version in color.)

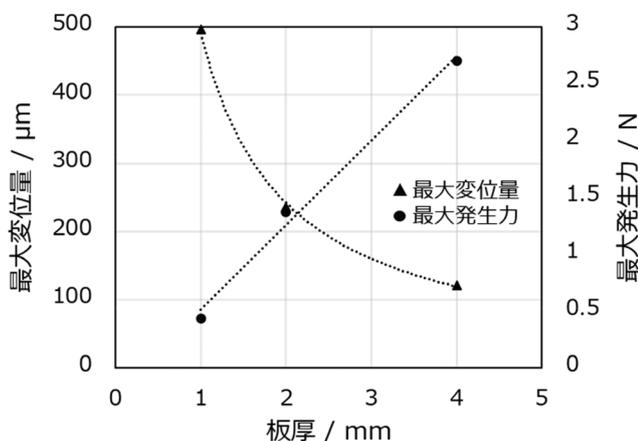


図7 磁歪クラッド材の最大変位量および最大発生力の板厚依存性

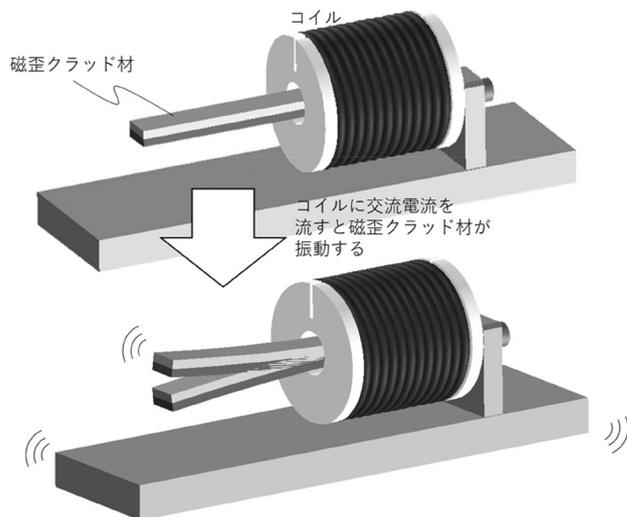


図8 磁歪式振動装置の動作原理モデル

存しない害虫の防除技術が求められており、複数の方法を組み合わせて害虫を防除する方法は総合的病害虫管理 (IPM) と呼ばれている。トマト栽培では、体長1mm程度のコナジラミ類が重要害虫のひとつとなっており、タバココナジラミが媒介するウィルス病によって発病するトマト黄化葉巻病は、トマトの収量が大きく減少するなど深刻な被害をもたらす。また、コナジラミ類は農薬に対する抵抗性を短期間で獲得するため、農薬開発とのイタチごっこになっている。

一方で、昆虫類は「振動」を敏感に感じ取って求愛行動や忌避行動などを行うことが知られている¹⁴⁾。こうした本能的習性を利用し、振動を利用して害虫の行動を妨げたり、忌避行動をとらせたりする物理的防除の研究^{15,16)}が始まっている。その中で特定の周波数の振動を瞬時に再現性良く発生させる磁歪クラッド材が注目され、2018年に昆虫と振動との関係性を研究する研究者たちと共に、新しい物理的防除技術として磁歪クラッド材を用いた振動発生装置の研究開発がスタートした。

その後、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の支援を受けて、2020年から3年間、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」に参画し、振動技術の基礎研究を重ねた。さらに、2023年から生研支援センター・オープンイノベーション研究・実用化推進事業として、九州大学の立田晴記教授を代表とする振動農業技術コンソーシアム（九州大学、農研機構野菜花き研究部門、宮城県農業・園芸総合研究所、兵庫県立農林水産技術総合センター、静岡県農林技術研究所、福岡県農林総合試験場、森林総合研究所、電気通信大学、東北特殊鋼

(株) 及び協力機関と共に、研究課題「害虫防除および安定栽培のための振動農業技術の開発と実用化」で振動防除技術の社会実装に向けて研究に取り組んでおり、2025年以降にトマト栽培用の磁歪式振動発生装置「トマタブル[®]」の市販化を目指している (図9)。

5 トマトの害虫に対する振動防除技術

5.1 トマト栽培施設について

トマト栽培施設には、中小規模のものから1ヘクタール規模の大規模ハウスまで様々ある。栽培施設内では、金属棒やビニール紐リールなどの誘引資材を用いて、トマト株を上方に誘引しながら成長させる栽培方法が一般的に採用される。中小規模のビニールハウスではハウスの骨組みとなるパイプや支柱から誘引資材が吊り下げられる。一方、大規模ハウスではハウス上部に金属製のワイヤーなどを張り、そこに誘引資材が吊り下げられる方式が多い。この時、1本のパイプやワイヤーに吊り下げられた複数のトマト株は、誘引資材を通じてすべてが繋がった状態となる。

5.2 振動伝達方法について

前述のパイプやワイヤーなどの構造部を振動伝達経路として、一度に多くのトマト株に振動が伝達するように、次の二点を念頭に置いて開発を進めてきた。一点目は、既存の栽培施設で大規模な工事を行わずに、磁歪式振動装置が使用できるような一般的な農業資材 (例えば直径19mm~25mmのパイプ) に取り付けられる構造にすることである。二点目は、



図9 オープンイノベーション研究・実用化推進事業の研究課題「害虫防除および安定栽培のための振動農業技術の開発と実用化」のロードマップ (Online version in color.)

振動伝達経路が長くなるような大規模ハウスにおいても、磁歪式振動装置から離れた場所に誘引されているトマト株にも害虫防除に有効な振動を伝えることである¹⁷⁾。

5.3 磁歪式振動装置の概要

現在開発中の磁歪式振動装置は、一台あたり幅55mm、長さ230mm、高さ110mmで構成されており、内部には磁歪クラッド材からなる振動素子と交流磁場を発生させるコイルなどが配置されている。コイルは制御機器に接続されて任意の周波数で電流印加されるシステムになっている。設定された振動周波数と振動時間、開始・終了時刻のタイマーに従い、振動を与える時だけコイルに電流が流れるように駆動制御している。

5.4 振動防除の効果

宮城県農業・園芸総合研究所内のトマト栽培施設内において、オンシツコナジラミに対する振動の防除効果を4週間にわたって調査した。施設内上部のパイプ（以降、振動伝達部）に磁歪式振動装置を取り付け、このパイプから吊り下げた誘引資材にトマト株を固定して、複数のトマト株に同時に振動を伝えた（図10）。振動条件は、オンシツコナジラミの行動制御に有効であることが示されている300Hzの振動を、毎日5時から19時までの間に15分間隔で1分間与えた。この1分の間に振動時間1秒、休止時間9秒を6回繰り返している。

トマト4株からそれぞれ2複葉を選び、トマト葉面に寄生するオンシツコナジラミの幼虫数をカウントしたところ、300Hzを与えた振動区の株では、振動を与えない無処理区よりも幼虫が半減した（図11）¹⁸⁾。装置から発生する振動を、振動伝達部を介してトマト株に伝えることによって、コナジラミ類の防除効果を示す結果となった。最新の検証では、振動条件が100Hzの周波数帯域においても振動防除の効果が認

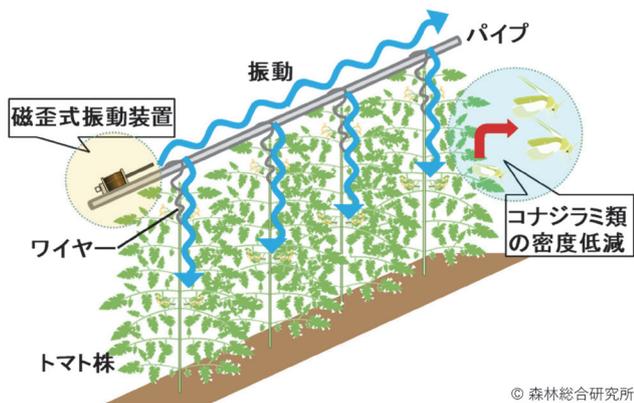


図10 栽培施設内において磁歪式振動装置を設置した模式図（森林総合研究所提供）(Online version in color.)

められている。また、研究施設だけでなく、宮城県内のトマト生産施設においても、磁歪式振動装置を取り付けて害虫防除の効果実証を進めており、今後さらに規模を拡大して害虫防除の効果を確認していく。

6 キノコに対する振動防除技術の適用

キノコ類の栽培においては、農薬を用いないことが一般的であるため、物理的防除技術による害虫防除のニーズが高く、振動を使った害虫防除技術が注目されている。

近年のキノコ栽培ではオガクズや栄養源を固めた「菌床」が用いられ、様々な害虫がキノコに被害をもたらす。例えば菌床シイタケ栽培では、ナガマドキノコバエ類の幼虫による食害や異物混入などが深刻な問題となっている。この害虫は幼虫が蛹化（蛹になること）、羽化（成虫になること）を経て繁殖可能な成虫となるが、幼虫の段階から振動を敏感に感じ取るため、振動を与えた処理区では蛹化及び羽化が遅れたことに加え、幼虫の死亡数の増加が認められた¹⁹⁾。菌床に磁歪式振動装置等の振動を間欠的に与えた振動区と、振動を与えない無処理区に分けて試験を行った結果、試験区の菌床では無処理区と比較して、害虫密度が約35%抑制された（図12）。

7 振動防除技術の社会実装と課題

無機質な材料開発から生まれた磁歪振動が生物の繊細な感覚に影響を与えることは想定外であったが、振動により農作物の害虫の発生抑制効果が認められたこと、化学農薬の低減と安定生産への貢献が期待されることから、2022年には農林水産省の農業技術10大ニュースに選定された。現在、振動農業技術コンソーシアムでは、各地の生産施設を活用して社会実装に向けた実証試験を継続している。今後、振動によって害虫の個体数が減少するメカニズム解明を進める一方で、振

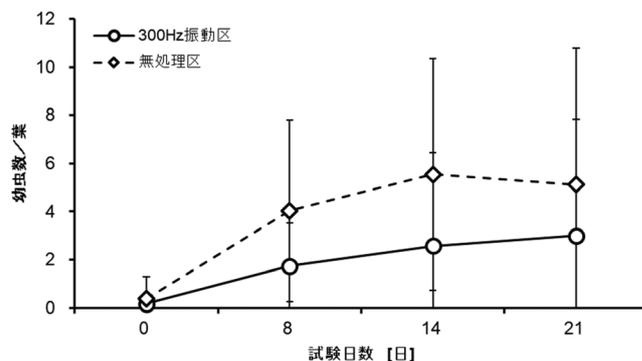


図11 トマト栽培施設内の各振動区、無処理区における複葉あたりのオンシツコナジラミ幼虫数の推移（宮城県農業・園芸総合研究所提供）

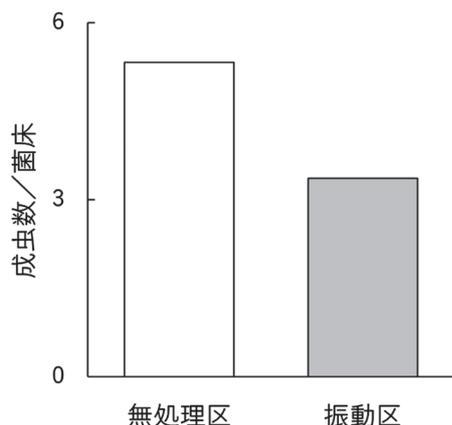


図12 振動の有無による菌床あたりのナガマドキノコバエ成虫の密度 (森林総合研究所提供)

動が天敵や送粉昆虫に与える影響についても精査する必要がある。また、作物そのものへの影響の有無を調査しなければならない。これらの課題に取り組むことで、振動農業技術の実用化と普及を大きく前進させ、持続可能な農業の実現に貢献するとともに、当該技術の実用化を通じて磁歪材料を広く知っていただき、その応用範囲を拡げていきたい。

参考文献

- 1) 近角聡信：強磁性体の物理（下），裳華房，（1984）。
- 2) 荒井賢一，津屋昇：日本金属学会会報，17（1978）12，963。
- 3) 鈴木茂，藤枝俊，福田承生：日本AEM学会誌，24（2016）1，22。
- 4) A. E. Clark, J. B. Restorff, M. Wun-Fogle, T. A. Lograsso and D. L. Schlager：IEEE Trans. Magn., 36（2000）5，3238。
- 5) A. E. Clark and H. S. Belson：Phys. Rev. B, 5（1972），3642。
- 6) 左近拓男，山崎優志，安達義也，野尻浩之，鹿又武：まてりあ，59（2020）1，21。
- 7) 増田新：精密工学会誌，88（2022）11，824。
- 8) S. Yamaura, T. Nakajima, T. Satoh, T. Ebata and Y. Furuya：Mater. Sci. Eng. B, 193（2015），121。
- 9) 成田史生：まてりあ，59（2020）1，16。
- 10) 鈴木涼平，田代晋久，脇若弘之，田山巖，小野寺隆一，渡辺将仁：電気学会マグネティックス/リニアドライブ合同研究会，（2023）MAG-23-031/LD-23-035。
- 11) 千葉大喜，佐々達郎：工業加熱，58（2021）6，42。
- 12) 千葉大喜，佐々達郎：電気製鋼，93（2022）1，51。
- 13) Z. Yang, K. Nakajima, R. Onodera, T. Tayama, D. Chiba and F. Narita：Appl. Phys. Lett., 112（2018）7，073902。
- 14) T. Takanashi, N. Uechi and H. Tatsuta：Appl. Entomol. Zool., 54（2019）1，21。
- 15) 高梨琢磨，関根崇行，大江高穂，小池卓二：信学技報，120（2020）155，45。
- 16) R. Yanagisawa, H. Tatsuta, T. Sekine, T. Oe, H. Mukai, N. Uechi, T. Koike, R. Onodera, R. Suwa and T. Takanashi：Entomol. Exp. Appl., 172（2024）12，1116。
- 17) 小野寺隆一，阿部翔太，伊藤崇裕：作物栽培施設内の作物に振動を与える方法，特許第6940712号，（2021）。
- 18) T. Sekine, T. Takanashi, R. Onodera, T. Oe, Y. Komagata, S. Abe and T. Koike：J. Pest Sci. 96（2023）2，599。
- 19) 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，特許第7233060号，（2023）。

（2024年11月29日受付）