

磁性と弾性の相互作用を利用した振動発電エネルギーハーベスティング



技術解説

藤 枝 俊*

Coupling between magnetism and elasticity and its application to vibration power generation

Key Words : Inverse magnetostrictive effect, Energy conversion, Vibration power generation

はじめに

磁性材料は、我々が日常的に利用しているエネルギー変換技術のキーマテリアルである。例えば、モーターや発電機では永久磁石が用いられ、変圧器には軟磁性材料が用いられている。エネルギー変換効率の向上に向けて、それら磁性材料の高性能化が精力的に取り組まれている。一方、磁性は様々な物性と相互作用する。この特徴を利用した新しいエネルギー変換技術および磁性材料の研究開発が活発化している。

著者らは、磁性と弾性の相互作用を利用した振動発電エネルギーハーベスティングの研究を進めてきた^{1,2)}。図1に、その振動発電デバイスのデモンストレーションの様子を示す。全長40 mm程度の親指サイズの発電デバイスを指で弾いて振動させることで、複数のLEDの点灯に成功している。従来、磁性材料を用いた振動発電は、コイルの中で永久磁石を振動で移動させる方式が主であったが、磁性と弾性の相互作用を利用すれば磁性材料の移動なしで発電が可能となる。従来方式と比較して、本方式は小型で高性能であり、耐久性にも優れている^{3,4)}。そのため、IoT (Internet of Things) デバイス用のメンテナンスフリーの小型電源を中心として多岐にわたる応用範囲での活用が期待されている^{5,6)}。本稿では、磁性と弾性の相互作用の基礎を概説し、それ

を利用した振動発電デバイスの動作原理および振動発電用の磁性材料について解説する。

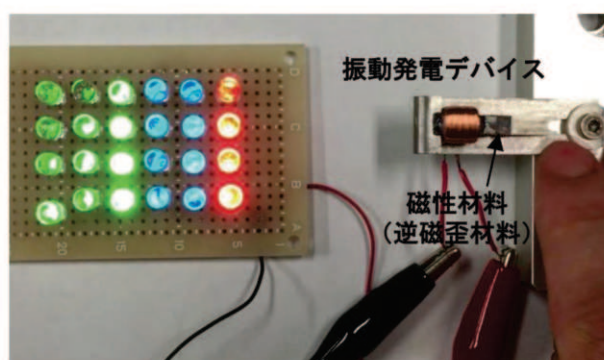


図1 磁性と弾性の相互作用を利用した振動発電デバイスのデモンストレーション

磁性と弾性の相互作用と振動発電への応用

代表的な強磁性体であるbcc構造の鉄と磁石の間には引力が働く。一方、鉄同士には引力は働かない。これは、強磁性体において隣り合う原子の磁気モーメントは同じ方向を向いているが、無磁場中では磁区と呼ばれる磁化方向が揃った複数の領域を作り、外に漏れる磁束を低減した磁区構造を形成することに起因する(図2参照)。磁区を隔てる壁は磁壁と呼ばれる。また、各磁区の内部では電子スピンと軌道の相互作用(スピン軌道相互作用)に起因して、磁歪と呼ばれる磁化方向に依存した結晶格子歪みが生じる。そのため、図2に示すように、磁場印加により磁区構造が変化すると、体積は不変であるが外形が歪む。この効果は1842年に熱力学で著名なJouleにより発見され、磁歪効果と呼ばれる。例えば、bcc構造の鉄において、磁歪の大きさを表す指標である磁歪定数は、磁化容易軸方向である<100>方向で20 ppm程度ある。このことは、<100>方向を磁化方向とする磁区では結晶格子が磁化方向と平行に20 ppm程度伸びていることを意味する。一方、



* Shun FUJIEDA

1976年4月生まれ
東北大学 大学院工学研究科 材料物性
学専攻 博士課程後期(2004年)
現在、大阪大学大学院工学研究科 環境
エネルギー工学専攻 准教授 工学博士
専門/磁性材料
TEL: 06-6879-7906
E-mail: fujieda@see.eng.osaka-u.ac.jp

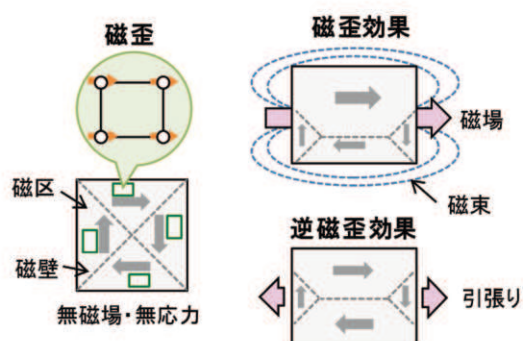


図2 磁区構造および磁歪効果と逆磁歪効果の概念図

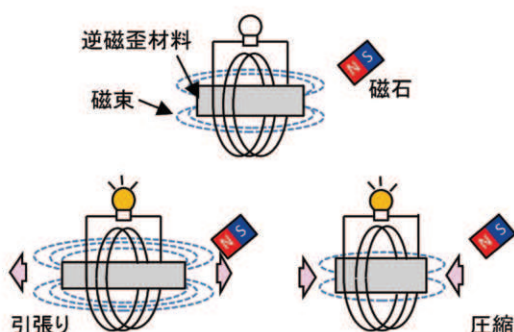
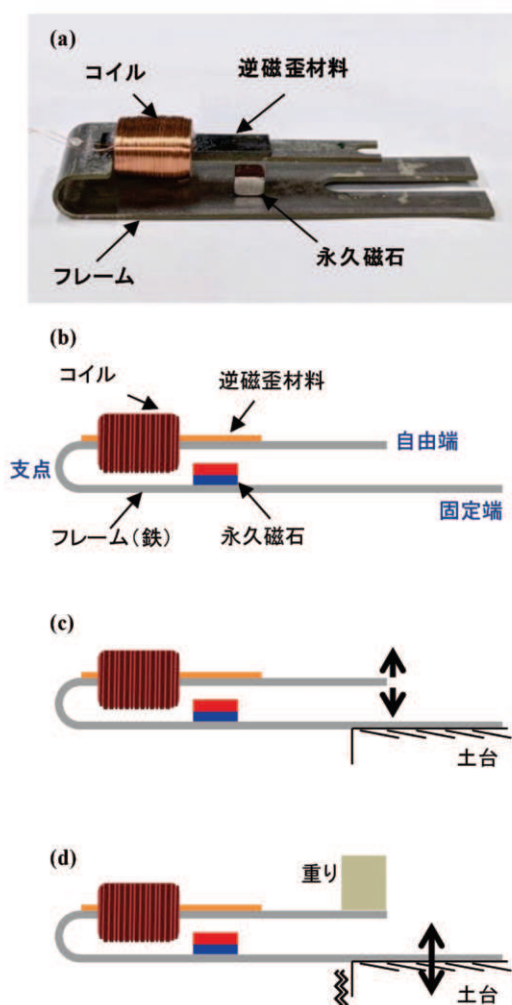


図3 逆磁歪効果を利用した振動発電の基本原理

強磁性体へ応力を印加すると磁区構造が変化し、磁気的性質に変化が生じる。この効果は、逆磁歪効果と呼ばれる（図2参照）。

逆磁歪効果を利用した振動発電の基本的な発電原理を図3に示す。逆磁歪効果を利用して発電するには、まず、コイルの中に磁性と弾性の相互作用が顕著な振動発電用材料である逆磁歪材料を設置し、永久磁石でバイアス磁場を印加して磁化させる。この状態で逆磁歪材料が振動により引張られると、磁歪定数が正の値の場合は、逆磁歪効果によりコイルを貫く磁束が増加する。逆に、振動により逆磁歪材料が圧縮されると、コイルを貫く磁束は減少する。Faradayの法則より、コイルを貫く磁束が変化すると電磁誘導により誘導起電力が生じる。すなわち、振動から電力が得られる。

最新の振動発電デバイスであるユニモルフU字型デバイスの外観および模式図を図4(a)および(b)に示す^{2,3)}。このデバイスでは、U字型の強磁性の鉄製フレームに逆磁歪材料を貼り付けたユニモルフに、空芯コイルを取り付け、U字型の開口部に設

図4 ユニモルフU字型デバイスの(a)外観および(b)模式図^{2,3)}。(c)(d)振動から発電するための方法の概念図。

置した永久磁石でバイアス磁場を印加する。このデバイスを用いて振動から発電する方法は、大きく二通りに分けられる。

その一つは、図4(c)に示すように、デバイスの固定端を安定した土台に固定し、開口部が縮まるもしくはは広がるように自由端に直接変位を加えた後、それを開放する方法である³⁾。自由端の自由減衰振動に伴い逆磁歪材料には圧縮応力と引張り応力が交互に生じ、逆磁歪効果による磁束密度の変化に起因して電力を得る。自由端の振動は次第に減衰するので、それに伴い発電量も減少する。つまり、単発的な発電であるが、後述するもう一つの方法で必須となる振動数の調整なしに、容易に電力を得ることが出来る。図1で示したデモンストレーションでは、この方法で発電を行っている。

もう一つは、図4(d)に示すように、デバイスの

固定端を振動している土台に固定し、土台の振動で間接的に自由端を振動させる方法である³⁾。この場合には、土台の振動に合わせて自由端を大きく振動させるために、自由端に重りを取り付け、デバイスの機械共振周波数を土台の振動数と同程度に調整しなければならないが、土台の振動が続く限り連続して発電を行うことが出来る。

有望材料 Fe-Ga 合金単結晶の発電原理

現在、逆磁歪材料として実用化が最も有望視されているのは Fe-Ga 合金単結晶である⁷⁻⁹⁾。Fe-Ga 合金単結晶を搭載したユニモルフ U 字型デバイスは、約 89 Hz の 0.6 G の振動で、4 V 程度の開回路電圧および 2 mW 程度の有効電力を示し、優れた振動発電特性を示すことが報告されている⁴⁾。

Fe-Ga 合金単結晶の優れた振動発電特性は磁区構造の特徴的变化と関係する。図 5 に、Kerr 効果顕微鏡観察により得た Fe-Ga 合金単結晶の (001) 面の初期磁区構造（無印加磁場および無印加応力）を示す¹⁰⁾。図 5 において、コントラストが異なる平行四辺形状の領域が観察される。このコントラストの違いは、各領域で磁化方向が異なることを意味する。すなわち、Fe-Ga 合金単結晶の (001) 面の初期磁区構造は、主に面内の 4 つの $\langle 100 \rangle$ 磁化容易軸方向を磁化方向とする磁区で構成され、それらは直線的な 90° 磁壁と階段状の 180° 磁壁で隔てられる。また、磁場を印加すると階段状の 180° 磁壁は移動・消失し、直線的な 90° 磁壁で構成された縞磁区が形成される¹⁰⁾。一方、引張り応力を印加すると、それを緩和するように 90° 磁壁は移動・消失し、引張り応力の方向と平行な直線的 180° 磁壁で構成された縞磁区が形成される¹¹⁾。

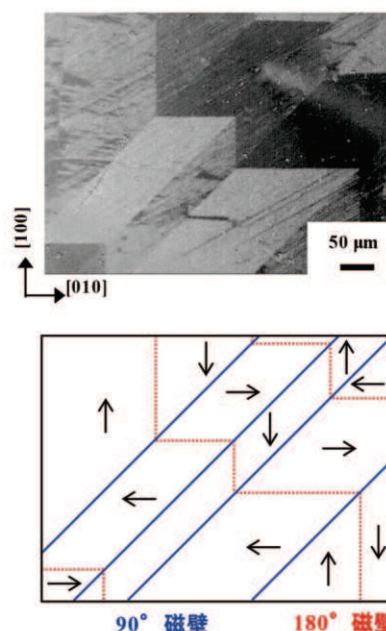


図 5 Fe-Ga 合金単結晶の (001) 面の磁区観察結果 (上) と模式図 (下)¹⁰⁾

磁区観察から予想されるユニモルフ U 字型デバイスに搭載した Fe-Ga 合金単結晶の振動発電機構の模式図を図 6 に示す¹⁾。まず、振動がない無印加応力状態では、Fe-Ga 合金単結晶は、永久磁石から適切な強さのバイアス磁場を受け、直線的な 90° 磁壁で構成された縞状磁区となる。この状態でデバイスを振動させて Fe-Ga 合金単結晶に引張り応力および圧縮応力が生じると、それを緩和するように 90° 磁壁は移動・消滅し、引張り応力および圧縮応力の方向と平行および垂直な磁化方向の単磁区に近い状態が生じる。このような磁区構造の変化により、大きな磁束密度変化が生じ、優れた振動発電特性を示すと説明される。

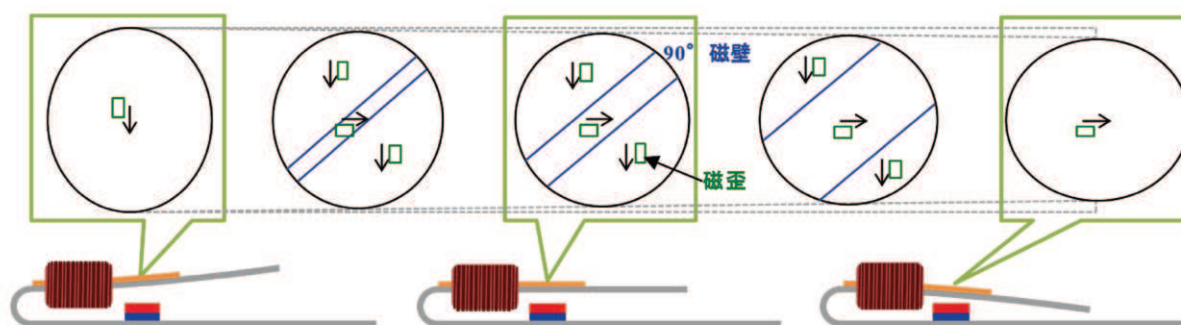


図 6 磁区観察から予想されるユニモルフ U 字型デバイスに搭載した Fe-Ga 合金単結晶の振動発電機構の模式図。矢印は磁区の磁化方向を表す。また、磁歪による結晶格子歪みを長方形で示す¹⁾。

用途拡大に向けた材料開発

振動発電デバイスには多様な用途が予想される。Fe-Ga 合金単結晶は有望材料であるが、デバイスの使用状況に合わせて逆磁歪材料を選択すれば、より優れた特性が得られる可能性がある。その例として、Fe-Co-V 合金多結晶および Fe-Si 合金多結晶の研究成果を紹介する。

(a) Fe-Co-V 合金多結晶の振動発電への応用

逆磁歪効果により得られる磁束密度変化の上限値は、磁気モーメントの向きが全て一方向に揃った磁化飽和状態の磁束密度（飽和磁束密度）が消失した時に得られる。つまり、逆磁歪効果による磁束密度の変化は自由端の変位が大きくなれば増加するが、材料固有の飽和磁束密度がその上限値となる。したがって、自由端の変位が大きい場合には、飽和磁束密度の大きな逆磁歪材料が有望である。そこで、Fe-Ga 合金よりも磁歪定数は小さいが、飽和磁束密度が遥かに大きい Permendur と呼ばれる多結晶の Fe-48 at%Co-2 at% V 合金 (Fe-Co-V 合金) に着目した。

Fe-Co-V 合金多結晶を搭載したユニモルフU字型デバイスの振動発電試験の結果を図7に示す¹²⁾。この試験では、図4(c)に示したように、U字フレームの固定端を安定した土台に固定し、開口部が縮

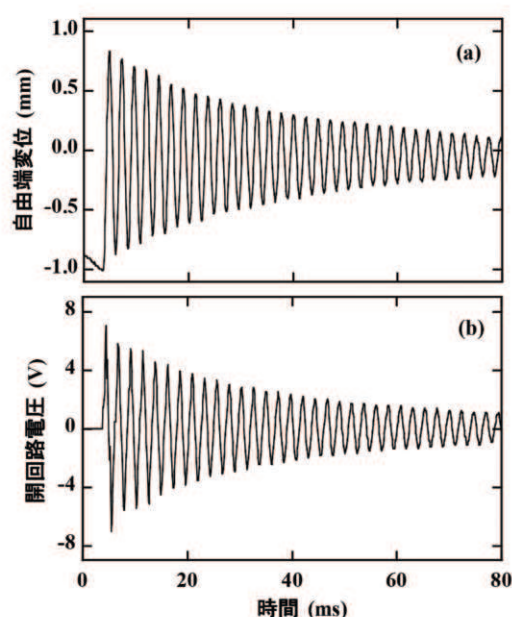


図7 Fe-Co-V 合金多結晶の振動発電結果。(a) デバイスの自由端の変位および (b) 開回路電圧¹²⁾。

まるように自由端に -1.0 mm 変位を加えた後、それを開放した。図7(a)に示すように、自由端は開放すると約 420 Hz で振動し、次第に減衰する。開回路電圧は自由端変位とほぼ同じ周期で変化する。また、自由端変位が小さくなると、開回路電圧も小さくなる。つまり、デバイスの振動に起因して電圧が生じることが確認される。

電圧の発生は、逆磁歪材料の磁束密度変化を意味する。ユニモルフデバイスでは逆磁歪材料とフレームにコイルを巻き付けているので、材料を貼り付けたデバイスの磁束変化から材料無しのデバイスの値を差し引いて、Fe-Co-V 合金の磁束密度変化を評価した。図8に Fe-Co-V 合金の磁束密度変化とバイアス磁束の関係を示す¹²⁾。バイアス磁束の増加に伴い磁束密度変化は増大し、極大値を示す。最適なバイアス磁束での磁束密度変化は 1.1 T 程度であり、Fe-Ga 合金単結晶を用いた従来研究の値 (1.3 T) と同程度である⁴⁾。また、著者らは最近の研究で、自由端に与える変位を大きくすると、磁束密度変化はさらに増大することを明らかにした。したがって、自由端の変位が大きい場合には、Fe-Co-V 合金多結晶は逆磁歪材料として有望である。

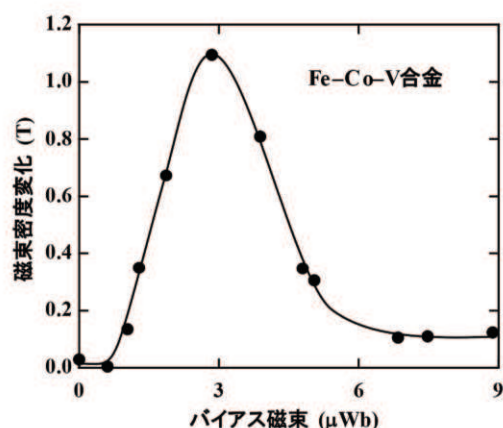


図8 振動発電デバイスに搭載した Fe-Co-V 合金多結晶の磁束密度変化のバイアス磁束依存性¹²⁾

(b) Fe-Si 合金多結晶の振動発電への応用

振動発電デバイスのサイズを大きくすると発電量は飛躍的に増大する^{5,6)}。したがって、デバイスの設置スペースが比較的広い場合には、大型のデバイスを用いることが有効である。大型デバイスには、大型の逆磁歪材料が必要となるが、Fe-Ga 合金単結晶の大型化は研究開発の段階である。そこで、大

型製造技術が確立されている方向性電磁鋼板と呼ばれる圧延方向に<100>配向したFe-Si合金多結晶の振動発電への応用に取り組んだ。

方向性電磁鋼板を搭載したユニモルフU字型デバイスの振動発電試験の結果を図9に示す¹³⁾。この試験では、長さ16 mm×幅4 mm×厚さ0.35 mmの方向性電磁鋼板を用い、図1に示した親指サイズ(全長約40 mm)のデバイスに搭載した。また、図4(d)に示したようにデバイスの固定端を加振機に固定し、自由端の振幅が±1 mmとなるよう重りを付けて機械共振周波数近傍の108 Hzで強制的に振動させた。デバイスを負荷抵抗に接続し、有効電力を評価した。負荷抵抗の増加に伴い、有効電力は増加し、極大を示した。デバイスを振動させた際に応力が生じる長さ方向と圧延方向を平行に切り出した試料(RD)では最大で300 μ Wの有効電力が得られ、圧延方向を垂直に切り出した試料(TD)よりも優れた振動発電特性が得られた。また、ごく最近の研究で、著者らはRD試料を搭載したデバイスをアスペクト比を保持して2倍に大きくすると100 Hzで5.7 mWの有効電力が得られることを明らかにしている¹⁴⁾。従って、方向性電磁鋼板の大型デバイスへの応用が期待される。

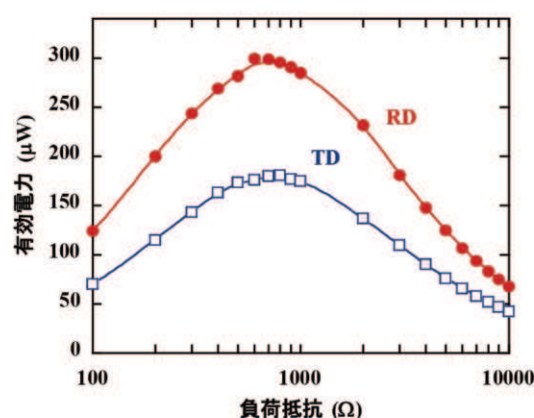


図9 方向性電磁鋼板を搭載した振動発電デバイスの有効電力の負荷抵抗依存性。RDおよびTDは、長さ方向と圧延方向が平行および垂直であることを表す¹³⁾。

おわりに

磁性と弾性の相互作用である逆磁歪効果を利用した振動発電デバイスは多様な用途が予想され、それぞれの状況で適した逆磁歪材料を用いることが重要であることを述べた。現在、振動発電デバイスの社

会実装試験が精力的に試みられており、実用化に近づきつつある。逆磁歪材料の研究開発により、振動発電デバイスのポテンシャルを最大限に引き出し、実用化の加速・促進に貢献していきたい。

謝辞

本研究は、東北大学の鈴木 茂 教授、石山和志 教授、梅津理恵 教授、志村玲子 准教授、川又 透 助教、東北学院大学の栢修一郎 教授、大阪大学の山本孝夫 教授、中川 貴 教授、清野智史 准教授、金沢大学 上野敏幸 教授、福田技術研究所 福田承生 社長との共同研究によって行われた。また、科研費基盤研究(B) (20H02424)、科研費挑戦的研究(萌芽) (20K21088)、東電記念財団および関西エネルギー・リサイクル科学研究振興財団の助成を受けた。

参考文献

- 1) 藤枝 俊, 栢 修一郎, 川又 透, 志村玲子, 石山和志, 福田承生, 鈴木 茂: 日本金属学会会報 までりあ, **59** (2020) 10.
- 2) 藤枝 俊, 鈴木 茂: 「環境発電ハンドブック第2版」第3編 第1章 (2021) pp. 141-149.
- 3) 上野敏幸: 日本 AEM 学会誌, **26** (2018) 185.
- 4) T. Ueno: AIP Adv., **9** (2019) 035018.
- 5) 上野敏幸: 日本金属学会会報 までりあ, **59** (2020) 6.
- 6) 上野敏幸: 応用物理学会機関誌 応用物理, **89** (2020) 82.
- 7) S. Fujieda, S. Suzuki, A. Minato, T. Fukuda and T. Ueno: IEEE Trans. Magn., **50** (2014) 2505204.
- 8) 南都十輝, 安藤宏孝, 渡邊清和, 高橋和也, 福田承生, 上野敏幸, 川又 透, 藤枝 俊, 鈴木 茂 日本金属学会会報 までりあ, **56** (2017) 27.
- 9) S. Suzuki, T. Kawamata, R. Simura, S. Asano, S. Fujieda, R. Y. Umetsu, M. Fujita, M. Imafuku, T. Kumagai and T. Fukuda: Mater. Trans., **60** (2019) 2235.
- 10) S. Asano, S. Fujieda, S. Hashi, K. Ishiyama, T. Fukuda and S. Suzuki: IEEE Magn. Lett., **8** (2017) 6101004.
- 11) S. Fujieda, S. Asano, S. Hashi, K. Ishiyama, T. Fukuda and S. Suzuki: J. Appl. Phys., **124**

- (2018) 233901.
- 12) S. Inoue, T. Okada, S. Fujieda, F. Osanai, S. Hashi, K. Ishiyama, S. Suzuki, S. Seino, T. Nakagawa and T. A. Yamamoto, AIP Adv., **II** (2021) 035021.
- 13) T. Okada, S. Fujieda, S. Hashi, K. Ishiyama, S. Suzuki, S. Seino, T. Nakagawa and T. A. Yamamoto, Mater. Trans., **62** (2021) 1798.
- 14) 岡田 拓, 藤枝 俊, 鈴木 茂, 清野智史, 中川 貴: 日本金属学会 2022 年春期講演大会 講演概要, 278.

