

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 26 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K21088

研究課題名（和文）逆磁歪効果を利用した振動発電の超大出力化

研究課題名（英文）Higher output of vibration power generation using inverse magnetostriction effect

研究代表者

藤枝 俊（Fujieda, Shun）

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：60551893

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：逆磁歪効果を利用した振動発電は、身の回りの振動から電気エネルギーを得るエネルギーハーベスティング技術である。IoTデバイス用小型電源への応用が期待されているが、さらなる用途拡大に向けて、発電電力の飛躍的な向上が熱望されている。本研究では、結晶配向制御されたFe-Si合金多結晶である方向性電磁鋼板に着目し、大型振動発電デバイスへの応用研究に取り組んだ。その結果、ユニモルフU字型デバイスの寸法を等アスペクト比で4倍にすることで、平均電力は約131倍となることが明らかになった。つまり、デバイスの大型化は発電特性の向上に効果的であり、方向性電磁鋼板は高出力の大型デバイスへの応用が期待できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義
カーボンニュートラルの社会的要請が高まり、エネルギーハーベスティング技術の重要性が高まっている。本研究により、逆磁歪効果を利用した振動発電の発電電力はデバイスサイズに強く依存することが明らかになった。例えば、小型デバイスを8個用いるより、小型デバイスを等アスペクト比で2倍にした大型デバイスを用いた方が、振動発電用材料の体積は同じであるが、高い出力が得られる。逆磁歪効果を用いた振動発電は、主にIoTデバイス用のメンテナンスフリー電源としての応用が期待されているが、用途拡大を促進する重要な成果を得た。

研究成果の概要（英文）：Vibration power generation using the inverse magnetostriction effect is an energy harvesting technology that can generate electrical power from ambient vibration. Though its application to maintenance-free compact power supplies for IoT devices is expected, higher output power is eagerly desired for further expansion of application. In this study, we focused on a grain-oriented electromagnetic steel sheet, which is an Fe-Si alloy polycrystal with controlling crystal orientation, and it was applied to large vibration power generation devices. As a result, it was found that the average power of the unimorph U-shaped device was increased about 131 times when the device size is enlarged by 4 times with the same aspect ratio. Therefore, larger devices are effective in improving power generation characteristics, and grain-oriented electromagnetic steel sheets are expected to be applied to large devices with high output power.

研究分野：磁性材料

キーワード：磁性・電子・情報材料 逆磁歪効果 振動発電

1. 研究開始当初の背景

磁性体に一定磁場中で応力を印可すると磁区構造の変化に起因して磁束が変化する現象は磁歪の逆効果（逆磁歪効果）と呼ばれ、それを利用した振動発電は身の回りの振動から高効率に発電できる革新的なエネルギーハーベスティング技術として注目を集めている^{1,2)}。逆磁歪効果を利用した振動発電では、コイルの中に磁性材料を配置し、永久磁石でバイアス磁場を印加する。磁性材料が振動により圧縮されたり引張られたりすると、逆磁歪効果に起因してコイルを貫く磁束が変化するため電磁誘導により誘導起電力が得られる³⁻⁵⁾。この時発生する電圧は、Faradayの法則に従いコイルを貫く磁束の時間変化に比例する。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て電磁誘導により誘導起電力を得る方式が主であったが、逆磁歪効果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⁶⁾。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への応用が期待されているが、さらなる用途拡大に向けて、発電電力の飛躍的な向上が熱望されている²⁾。デバイスのサイズを大きくすると発電電力は飛躍的に増大すると原理的に予測されている²⁾。磁歪の大きな Fe-Ga 合金単結晶は振動発電用の材料として有望であるが^{3,7)}、大型製造技術は研究開発の段階である。大型化に対応可能な振動発電用材料が求められる。

2. 研究の目的

本研究では、Fe-Ga 合金単結晶と比較して磁歪は小さいが、透磁率が極めて大きく、大型製造技術が確立されている組織制御された Fe-Si 合金多結晶である電磁鋼板に着目し、高出力の大型振動発電デバイスへの応用研究に取り組んだ。

3. 研究の方法

振動発電デバイスとして最新型のユニモルフ U 字型デバイスを用いた⁶⁾。全長約 40 mm の小型ユニモルフ U 字型デバイスの写真を図 1(a)に示す⁸⁾。このデバイスでは、U 字型の強磁性の鉄製フレームに振動発電用材料の板状試料を貼り付けたユニモルフコアに巻き数 3638 ターンの空芯コイルを取り付け、U 字型の開口部に設置した永久磁石でバイアス磁場を印加する。本研究では、自由端を大きく振動させるために錘を付けた。また、電磁鋼板として、圧延後の熱処理により、 $\langle 100 \rangle$ 磁化容易軸を圧延方向に配向させた Fe-Si 合金多結晶である方向性電磁鋼板 (JFE スチール株式会社製 35JG135) を用いた。

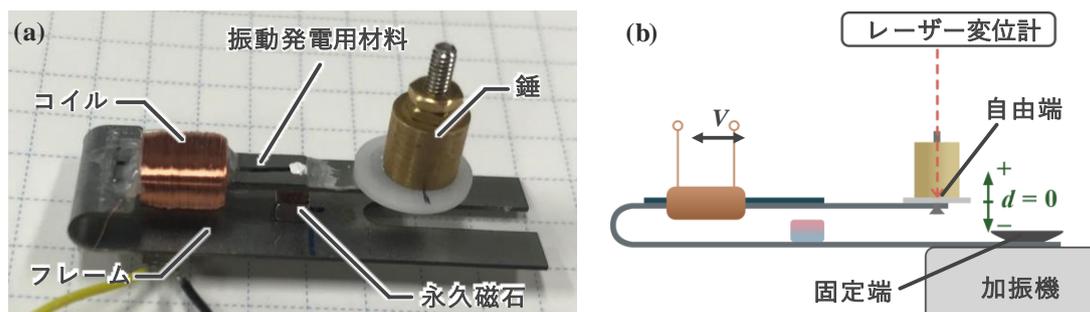


図 1 (a)小型ユニモルフ U 字型デバイスの写真と(b)それを用いた振動発電試験の模式図⁸⁾

4. 研究成果

(1) 方向性電磁鋼板を搭載した小型ユニモルフ U 字型デバイスの振動発電特性

電磁鋼板の大型デバイスへの応用に取り組むための予備実験として、図 1(a)に示した小型ユニモルフ U 字型デバイスを用いて方向性電磁鋼板の振動発電特性を調べた。具体的には、まず、方向性電磁鋼板を長さ 16 mm × 幅 4 mm × 厚さ 0.35 mm の板状に切り出した。この際、圧延方向と試料の長手方向が平行 (RD) および垂直 (TD) になるようにした。これをフレームに貼り付けてユニモルフコアとし、振動発電試験を行った。振動発電試験は、図 1(b)に示すように、デバイスの固定端を加振機で強制振動させて行った。その際の自由端変位をレーザー変位計で測定した。TD ユニモルフデバイスを機械共振周波数である 108 Hz で強制振動させた場合の(a)自由端変位 d および (b)コイルの開放電圧 V の時間 t 変化を図 2 に示す⁸⁾。この際、表面磁束 3.9 μWb の永久磁石を用いてバイアス磁場を印加した。 $d-t$ 曲線は加振機と同じ 108 Hz で振動する。また、 $V-t$ 曲線もほぼ同じ周波数で振動する。つまり、振動に起因した開放電圧の発生が確認された。

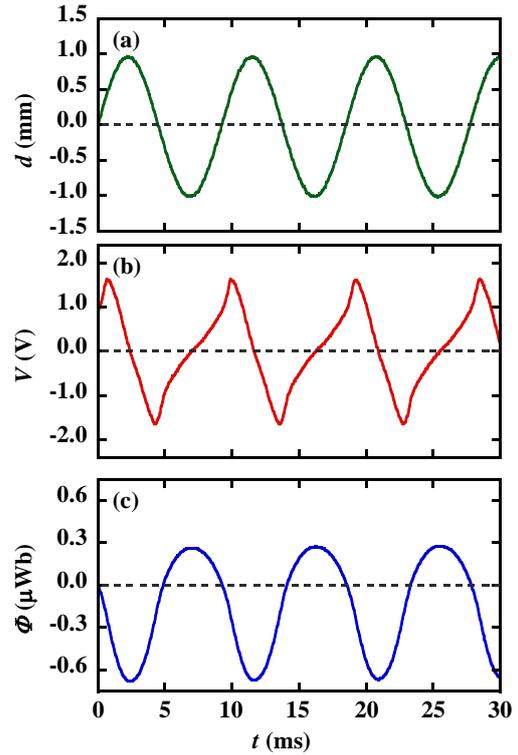


図 2 RD ユニモルフデバイスを機械共振周波数 108 Hz で強制振動させた際の(a)自由端変位 d 、(b)コイルの開放電圧 V および (c)コイルを貫く磁束 Φ の時間 t 変化⁸⁾

ユニモルフ U 字型デバイスの振動発電特性はバイアス磁場の影響を強く受ける⁹⁾。適切なバイアス磁場を明らかにするために、異なる表面磁束 (バイアス磁束) の永久磁石を用いて振動発電試験を行った。この際、図 2(a)に示した $d-t$ 曲線の振幅 Δd が 2.0 mm となるように機械共振周波数 108 Hz で強制振動させた。RD ユニモルフデバイスおよび TD ユニモルフデバイスの電圧の実効値 V_{eff} のバイアス磁場依存性を図 3 に示す⁸⁾。 V_{eff} は下式から求めた。

$$V_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2 dt} \quad (\text{式 1})$$

ここで、 T は $v-t$ 曲線の周期を表す。RD ユニモルフデバイスの V_{eff} はバイアス磁束の増加に伴い増大し、ピークを示す。この値は、最適なバイアス磁場における TD ユニモルフデバイスの V_{eff} よりも大きい。

デバイスのコイルに負荷抵抗を取り付け、発電電力を評価した。具体的には、最適場バイアス磁場において Δd が 2.0 mm となるように 108 Hz で強制振動させた際の負荷抵抗にかかる電圧 V_L を測定した。RD ユニモルフおよび TD ユニモルフデバイスの平均電力 P_{ave} の負荷抵抗依存性を図 4 に示す⁸⁾。 P_{ave} は下式から求めた。

$$P_{\text{ave}} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{V_L}{R} dt \quad (\text{式 2})$$

ここで、 R は抵抗値を表す。RD ユニモルフデバイスの P_{ave} は 600 Ω で $P_{\text{ave}} = 300 \mu\text{W}$ のピークを示す。この値は、TD ユニモルフデバイスの P_{ave} の最大値よりも大きい。つまり、RD ユニモルフデバイスにおいて TD ユニモルフデバイスよりも優れた発電特性が得られた。

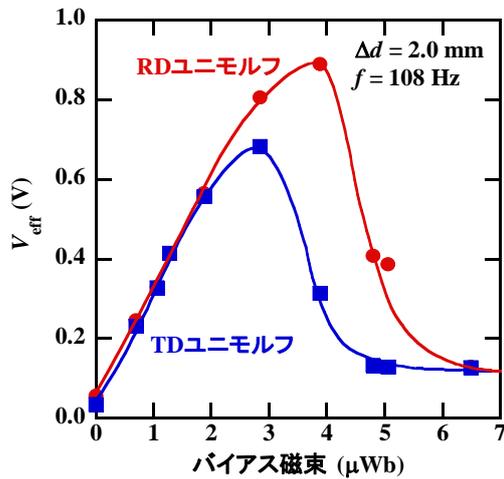


図3 RD ユニモルフデバイスおよび TD ユニモルフデバイスの電圧の実効値 V_{eff} のバイアス磁束依存性⁸⁾

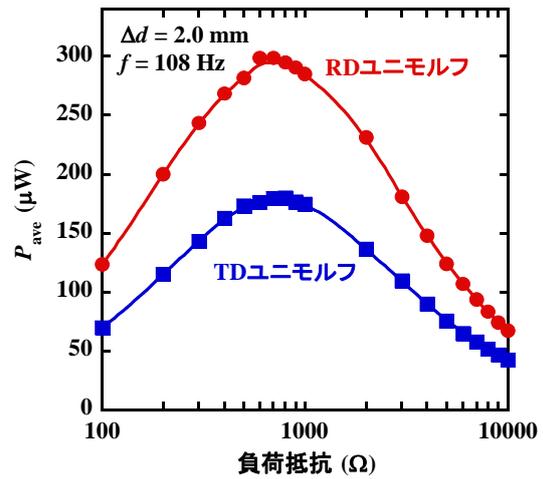


図4 RD ユニモルフデバイスおよび TD ユニモルフデバイスの平均電力 P_{ave} の負荷抵抗依存性⁸⁾

RD ユニモルフデバイスにおける優れた振動発電特性の原因を検討するために、次次に示す Faraday の法則を用いてユニモルフコアの磁束 Φ を求めた。

$$V = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{式 3})$$

例として、図 2(b)の $V-t$ 曲線から求めた $\Phi-t$ 曲線を図 2(c)に示す。ユニモルフ U 字型デバイスでは、ユニモルフコアにコイルを巻き付ける。したがって、このような $\Phi-t$ 曲線の変化にはフレームの影響が含まれている。そこで試料を貼り付けていないフレームのみのデバイスの振動発電試験も行った。RD ユニモルフコア、TD ユニモルフコアおよびフレームコアの $\Phi-t$ 曲線の振幅 $\Delta\Phi$ のバイアス磁場依存性を図 5(a)に示す⁸⁾。最適バイアス磁場において、RD ユニモルフコアは TD ユニモルフコアよりも大きな $\Delta\Phi$ を示す。また、それらよりは低バイアス磁場で値も小さいが、フレームコアの $\Delta\Phi$ もピークを示す。そこで、下式で示すように、試料を貼り付けたデバイスの磁束変化から試料なしのデバイスの値を差し引いて、RD コアおよび TD コアの磁束密度変化 ΔB を見積もった。

$$\Delta B = \frac{\Delta\Phi_{\text{unimorph}} - \Delta\Phi_{\text{frame}}}{S} \quad (\text{式 4})$$

ここで、 S は試料の断面積であり、 $\Delta\Phi_{\text{unimorph}}$ および $\Delta\Phi_{\text{frame}}$ はそれぞれ試料ありおよび試料なしのデバイスの $\Delta\Phi$ である。 ΔB のバイアス磁場依存性を図 5(b)に示す⁸⁾。RD コアの ΔB は最大で 0.65 T となった。この値は TD コアよりも大きい。したがって、RD ユニモルフデバイスの優れた発電特性は RD コアの大きな ΔB に起因する。

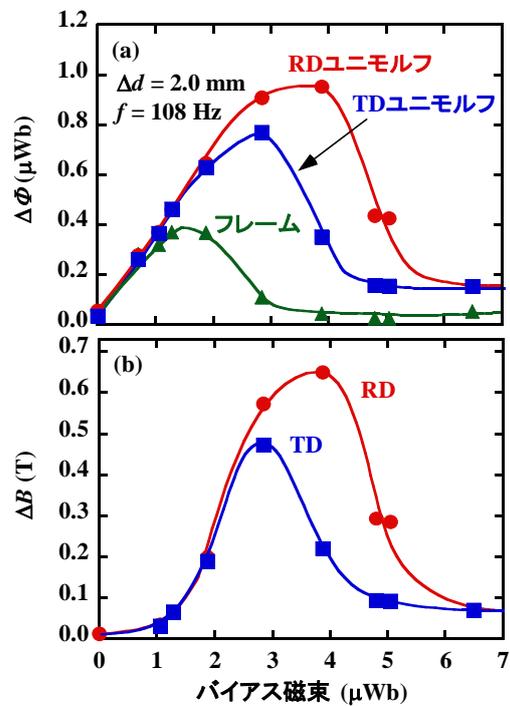


図5 (a) RD ユニモルフコア、TD ユニモルフコアおよびフレームコアの磁束変化 $\Delta\Phi$ および(b) RD コアおよび TD コアの磁束密度変化 ΔB のバイアス磁束依存性⁸⁾

(2) 方向性電磁鋼板を用いた振動発電デバイスの大型化と発電特性

方向性電磁鋼板を用いて図 2(a)に示した小型デバイスを等アスペクト比で大型化した振動発電デバイスを試作し、それらの発電特性を調べた。具体的には、図 6(a)に示すように、方向性電磁鋼板の 16 mm × 4 mm × 0.35 mm の試料、32 mm × 8 mm × 0.35 mm の試料 2 枚重ね、および 64 mm × 16 mm × 0.35 mm の試料 4 枚重ねを用い、全長 40 mm の小型 (1 倍) デバイス、全長 80 mm の中型 (2 倍) デバイスおよび全長 160 mm の大型 (4 倍) デバイスを作製した。この際、(a)で述べた研究成果に基づき、方向性電磁鋼板の圧延方向と試料の長手方向が平行 (RD) になるように切り出した。

異なるサイズのデバイスを 100 Hz で強制振動させて発電特性を調べた。この際、デバイスの大型化に合わせて Δd も大きくした。すなわち、小型 (1 倍)、中型 (2 倍) および大型 (4 倍) デバイスにおいて、 Δd はそれぞれ 2.0 mm、4.0 mm および 8.0 mm に調整した。接続した負荷抵抗にかかる電圧から求めた平均電力 P_{ave} を図 6(b)に示す¹⁰⁾。小型デバイスは、最適な負荷抵抗において $P_{ave} = 0.28$ mW を示す。デバイスの大型化に伴い P_{ave} は増加し、4 倍デバイスの P_{ave} は 36.7 mW の最大値を示した。つまり、デバイスの寸法を等アスペクト比で 4 倍 (体積は 64 倍) にすることで、 P_{ave} は約 131 倍となった。したがって、デバイスの大型化は発電特性の向上に効果的であり、方向性電磁鋼板は高出力の大型デバイスへの応用が期待できる。

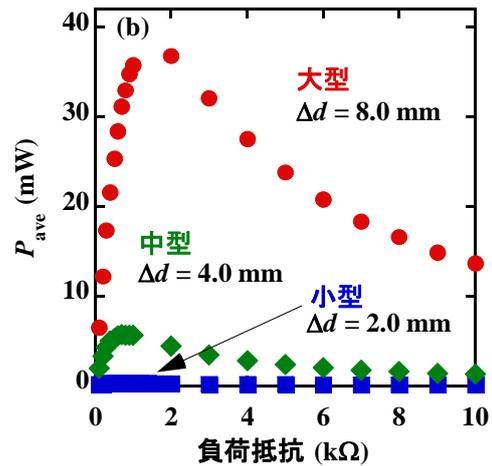
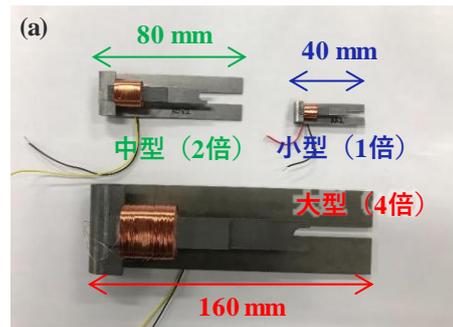


図 6(a) 小型 (1 倍) デバイス、中型 (2 倍) デバイスおよび大型 (4 倍) デバイスの写真と (b) それらの平均電力 P_{ave} の負荷抵抗依存性¹⁰⁾

<引用文献>

- 1) Z. Deng and M. J. Dapino, Smart Mater. Struct., **26** (2017) 103001.
- 2) 上野敏幸, 日本金属学会会報 あたりあ, **59** (2020) 6.
- 3) 藤枝 俊, 栢修一郎, 川又 徹, 志村玲子, 石山和志, 福田承生, 鈴木 茂, 日本金属学会誌 あたりあ, **59** (2020) 10.
- 4) 藤枝 俊, 鈴木 茂, 鈴木雄二 監修, エヌ・ティー・エヌ (株) 「環境発電ハンドブック 第 2 版」, 第 3 編, 第 1 章 (2021) pp. 141-149.
- 5) 藤枝 俊, 生産と技術, **74** (2022) 11.
- 6) T. Ueno, AIP Adv., **9** (2019) 035018.
- 7) S. Fujieda, S. Suzuki, A. Minato, T. Fukuda and T. Ueno, IEEE Trans. Magn., **50** (2014) 2505204.
- 8) T. Okada, S. Fujieda, S. Hashi, K. Ishiyama, S. Suzuki, S. Seino, T. Nakagawa and T. A. Yamamoto, Mater. Trans., **62** (2021) 1798.
- 9) S. Inoue, T. Okada, S. Fujieda, F. Osanai, S. Hashi, K. Ishiyama, S. Suzuki, S. Seino, T. Nakagawa and T. A. Yamamoto, AIP Adv., **11** (2021) 035021.
- 10) 岡田 拓, 藤枝 俊, 鈴木 茂, 清野智史, 中川 貴, 日本磁気学会概要集 (2022) 38.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Okada Taku, Fujieda Shun, Hashi Shuichiro, Ishiyama Kazushi, Suzuki Shigeru, Seino Satoshi, Nakagawa Takashi, Yamamoto Takao A.	4. 巻 62
2. 論文標題 Vibration Power Generation Property of U-Shaped Unimorph Device Using Grain-Oriented Electrical Steel	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS	6. 最初と最後の頁 1798 ~ 1801
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MT-M2021079	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 S. Inoue, T. Okada, S. Fujieda, F. Osanai, S. Hashi, K. Ishiyama, S. Suzuki, S. Seino, T. Nakagawa, T. A. Yamamoto	4. 巻 11
2. 論文標題 High-performance vibration power generation using polycrystalline Fe-Co-based alloy due to large inverse magnetostrictive effect	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 035021 ~ 035021
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0038903	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 柏木 春穂、藤枝 俊、清野 智史、中川 貴	4. 巻 6
2. 論文標題 固相反応法で作製したCoFe ₂ -xMnxO ₄ の結晶構造と磁気特性に及ぼすヤーン・テラー効果の影響	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本磁気学会論文特集号	6. 最初と最後の頁 20 ~ 22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20819/msj.tmsj.22TR508	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計19件（うち招待講演 4件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 藤枝 俊、久松美佑、小杉静花、清野智史、中川 貴
2. 発表標題 CuxCo _{1-x} Fe ₂ O ₄ の磁歪特性と結晶構造の関係
3. 学会等名 日本磁気学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡田 拓、藤枝 俊、鈴木 茂、清野智史、中川 貴
2. 発表標題 方向性電磁鋼板の振動発電特性に及ぼす大型化の効果
3. 学会等名 日本磁気学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤枝 俊、門田優哉、清野智史、中川 貴
2. 発表標題 Fe _{0.3} Co _{0.7} 合金の逆磁歪効果による磁束密度変化に及ぼす熱処理の影響
3. 学会等名 日本金属学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤枝 俊、藤原康太、小杉静花、清野智史、中川 貴
2. 発表標題 立方晶スピネルフェライトZn _x Cu _{0.5-x} Co _{0.5} Fe ₂ O ₄ の磁歪特性
3. 学会等名 日本金属学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岡田 拓、藤枝 俊、清野智史、中川 貴
2. 発表標題 振動発電に向けた一定磁場中での動的応力による磁束密度変化の評価
3. 学会等名 日本金属学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤原 康太、小杉 静花、藤枝 俊、清野 智史、中川 貴
2. 発表標題 Cu _{0.5} Co _{0.5} Fe ₂₀₄ におけるCuのZn部分置換による磁歪特性への影響
3. 学会等名 日本磁気学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小杉静花、久松美佑、藤枝 俊、大石佑治、清野智史、牟田浩明、中川 貴
2. 発表標題 Cu _x Co _{1-x} Fe ₂₀₄ の磁歪特性のCu置換量依存性
3. 学会等名 日本金属学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Fujieda, N. Gorai, T. Kawamata, R. Simura, T. Fukuda and S. Suzuki
2. 発表標題 Vibration power generation using Fe-Ga alloy single crystal
3. 学会等名 Thermec (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤枝 俊、岡田 拓、杓 修一郎、石山和志、鈴木 茂、清野智史、中川 貴、山本孝夫
2. 発表標題 振動発電デバイスに搭載した方向性電磁鋼板の磁束密度変化
3. 学会等名 日本磁気学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤枝 俊
2. 発表標題 磁気と弾性の相互作用を利用した振動発電
3. 学会等名 応用物理学会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡田 拓、藤枝 俊、鈴木 茂、清野 智史、中川 貴
2. 発表標題 方向性電磁鋼板の振動発電特性に及ぼす圧延方向の影響
3. 学会等名 日本金属学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 門田優哉、藤枝 俊、清野智史、中川 貴、山本孝夫
2. 発表標題 Fe-Co合金の応力-ひずみ特性に及ぼす逆磁歪効果の影響
3. 学会等名 日本金属学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤枝 俊、井上森平、岡田 拓、杢 修一郎、石山和志、鈴木 茂、清野 智史、中川 貴、山本孝夫
2. 発表標題 高飽和磁束密度のFe-Co-V合金の振動発電への応用
3. 学会等名 日本金属学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡田 拓、藤枝 俊、鈴木 茂、清野 智史、中川 貴
2. 発表標題 方向性電磁鋼板を用いた振動発電デバイスの大型化と発電特性との関係
3. 学会等名 日本金属学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤枝 俊
2. 発表標題 交差相関効果の制御による磁気機能性材料の開発 逆磁歪効果の振動発電への応用
3. 学会等名 日本金属学会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡田 拓、藤枝 俊、柁修一郎、石山和志、鈴木 茂、清野智史、中川 貴、山本孝夫
2. 発表標題 方向性電磁鋼板のユニモルフU字型振動発電デバイスへの応用
3. 学会等名 日本金属学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤枝 俊、井上森平、岡田 拓、長内史也、柁 修一郎、石山和志、清野智史、中川 貴、山本孝夫
2. 発表標題 Fe-Co基合金を搭載した振動発電デバイスの発電特性におよぼすバイアス磁場の影響
3. 学会等名 日本磁気学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤枝 俊、川又 透、志村玲子、鈴木 茂、杵修一郎、石山和志、熊谷 毅、福田承生、豊木研太郎、小谷佳範、中村哲也
2. 発表標題 振動発電用の逆磁歪材料の開発
3. 学会等名 電気学会 ナノスケール磁性体を用いた機能性材料開発調査専門委員会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井上森平、岡田拓、藤枝 俊、長内史也、杵修一郎、石山和志、清野智史、中川 貴、山本孝夫
2. 発表標題 Fe-Co基合金の磁気特性および磁歪特性に及ぼす引張り応力印加の影響
3. 学会等名 日本金属学会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 藤枝俊、鈴木茂	4. 発行年 2021年
2. 出版社 エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 9
3. 書名 環境発電ハンドブック 第2版	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関