

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H03422

研究課題名(和文) 弾性異方性の大きい鉄合金における微小複合ひずみの解明

研究課題名(英文) Characterization of microscopic multiple strain in iron based alloys with large elastic anisotropy

研究代表者

鈴木 茂 (Suzuki, Shigeru)

東北大学・マイクロシステム融合研究開発センター・教授

研究者番号：40143028

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：強磁性性鉄基合金の磁気弾性効果等の発現の要因を明らかにするために、Fe-Ga合金単結晶を用いて磁歪、逆磁歪、弾性等を調べた。外部の磁場や応力の印加による磁歪と逆磁歪の異方性に着目し、磁区観察などで磁歪と逆磁歪の微視的過程と磁化過程の関係を検討した。合金単結晶への外場印加による特徴的磁壁運動は、振動発電特性と関係していた。外場による磁壁運動は合金による磁束変化と対応しており、磁歪や逆磁歪だけでなく電磁誘導にも関係した。Fe-Ga合金単結晶は振動発電用の磁心材料としても機能することを示し、フレームに取り付けた磁心周囲のコイルと磁場の相対運動で起こる電磁誘導の寄与が大きいことを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁歪合金や軟磁性合金は振動発電に用いる材料として注目されているが、その発電機構については不明な点が多かった。本研究では、その発電機構の基礎となる外部の磁場や応力による磁区構造の変化、それらと磁歪や逆磁歪との対応などに関して検討し、振動発電分野等に必要となる基礎的知見を得た。例えば異なる種類の磁壁の外場による応答性の特徴を解明し、磁壁運動は磁束変化、磁歪や逆磁歪の発生に対応することを示した。これらの成果は特定方位の大型Fe-Ga合金単結晶を振動発電に用いる上での重要な情報であり、磁場と合金との相対運動による電磁誘導の発電への寄与も明らかにできたので、環境発電技術等への貢献度は大きい。

研究成果の概要(英文)：In order to clarify the factors that cause magneto-elastic effects and other phenomena in ferromagnetic iron-based alloys, magnetostriction, reverse magnetostriction, elasticity, etc. were investigated using Fe-Ga alloy single crystals. Focusing on the anisotropy of magnetostriction and reverse magnetostriction due to the application of external magnetic field and stress, the relationship between the microscopic processes of magnetostriction and reverse magnetostriction and the magnetization process was investigated by magnetic domain observation and other methods. The characteristic magnetic domain wall motion induced by an external field on alloy single-crystals is related to the vibrational energy harvesting characteristics. The domain wall motion due to the external field corresponded to the magnetic flux change by the alloy, and was related not only to magnetostriction and inverse magnetostriction but also to electromagnetic induction.

研究分野：材料工学

キーワード：磁気弾性効果 弾性異方性 機能性鉄合金

1. 研究開始当初の背景

磁性材料などの機能性材料をデバイスに応用するときには、それらの弾性率の結晶方位依存性等が課題となることが多い。特に強磁性の体心立方型鉄合金においては弾性率の異方性が大きく、振動発電等の研究分野においてそれら特性評価等が求められている。それに関連し、磁気ひずみ(磁歪)の大きい鉄合金として Fe-Ga 合金があり、その弾性率は結晶方位に大きく依存し、 $\langle 100 \rangle$ 方位で Young 率が最も低くなる。この合金では、力学的振動を利用して逆磁歪効果による磁束変化を利用して、交流の電気エネルギーに変換することができる[1, 2]。しかし、それらの微小ひずみの発現機構などについては不明な点が多く、課題となっていた[3, 4]。このような背景から、磁歪や逆磁歪の発生機構(結晶方位の特性への影響等)について明らかにするとともに、振動発電等における合金の役割などを検討することが求められていた。

2. 研究の目的

室温付近で強磁性を示す体心立方構造の鉄合金には、優れた軟磁性を示す機能性材料もある。それらの鉄合金の磁気弾性効果等は結晶方位に大きく依存するため、それらを精密材料に利用するときには微小な複合ひずみが課題となっていた。本研究では、外部からの磁場や応力の印加によるそれらのひずみ、弾性率、磁区構造の変化等を多面的に評価することにより、弾性ひずみや磁気ひずみ(磁歪)からなる微小複合ひずみの実態を明らかにすることを目的とした。実際の合金内部の微小ひずみは、外場条件下でのひずみの測定、磁区観察による磁歪の観察結果をもとに評価した。それらの結果は、磁性材料の電磁誘導に関する有限要素解析とも対比して、合金単結晶における電磁誘導についても検討した。その他、加工した合金単結晶の表面層における残留応力変化などの磁気特性への影響を明らかにすることを試みた。

3. 研究の方法

(a) 単結晶試料の育成と加工方法

本研究において主に合金単結晶として、Czochralski 法で育成した $[100]$ 方位の Fe-Ga 合金単結晶インゴット [図 1] を用い、そこから幾つかの方法で長さ 32 mm、幅 8 mm 程度の短冊状等の形状の単結晶を切り出し、振動発電等の測定用や観察用の試料とした[4]。これまで、振動発電用のデバイスでは構造が複雑であったため、不均一なひずみが発生することがあった。このため、発電特性に及ぼす磁場の影響などを調べるのが困難であったが、ここでは構造を比較的単純化したデバイスを設計し製作した。特に、デバイスに装着した合金の不均一なひずみを低減するために、合金単結晶の振動フレームへ密着させることを避け、振動の加速度やひずみに対応して、安定した磁束密度が得るようにした。



図 1 Czochralski 法により育成した $[100]$ 方位の大型 Fe-Ga 合金単結晶インゴット(直径 2 インチおよび 4 インチ)の外観(福田結晶技術研究所との共同開発)。

(b) 磁歪の測定方法、磁区構造の観察方法

外部応力や磁場により合金単結晶の弾性的なひずみの測定には、主にひずみゲージ法を用いた。磁場による合金単結晶の弾性的な格子ひずみ変化は、X 線回折法による精密測定でもおおよそ得ることができたが、中性子回折法を利用した測定にはビームタイムの制限等があった。しかし、合金単結晶の方位等を上手く切り出すことで、巨視的ひずみの測定結果は、微視的な格子ひずみの結果と対応づけることができた[4]。

さらに、外部の磁場や応力による磁区構造の変化を明らかにするために、Kerr 顕微鏡法による磁区観察等を行った。これらの結果も、ひずみゲージ法により磁場を印加したときのひずみ測定の結果と対応づけた。それまでの本合金の結果から、図 2 (Cube 方位の例)の予測のもとに、外部応力や外部磁場による磁区構造の変化を観察し、外部の磁場の影響などを考察した。

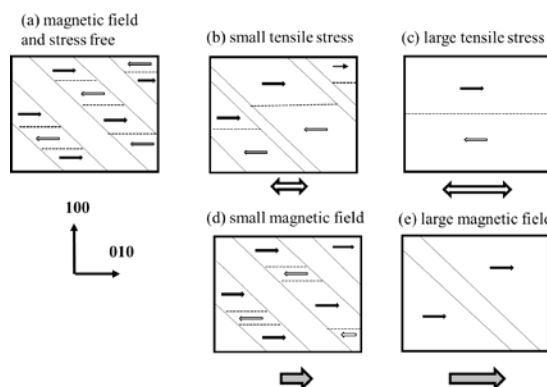


図 2 Fe-Ga 合金単結晶の磁区構造の模式図 ((a) は応力なし、(b)、(c) は $[010]$ 方向に引張応力、(d)、(e) は $[010]$ 方向に磁場印加の状態)。実線は 90° ブロホ磁壁を、破線は 180° 磁壁を示す。

(c) 振動デバイスの特性評価方法

本研究では、永久磁石を取り付けたデバイスフレームにおいて、振動で磁束を評価するために、コイルの起電力 (EMF) の変化を測定した。ここでは、Fe-Ga 合金単結晶を上部フレームに貼り付け、ソレノイドコイルで巻いた。フレーム材は強磁性のステンレス鋼板を用い、装置フレームの端部は振動アクチュエータに固定した。図 3(上)に磁石なし、図(上)に Nd-Fe-B 磁石を下部デバイスに取り付けた側面図を示す。アクチュエータの振動によりコイルに発生する電圧をオシロスコープでモニターし、永久磁石により磁場を印加した。図 3(下)に示すように、振動時の上部デバイスが曲がった形状になり、合金単結晶と磁石の距離が近くなると、磁場が増加することが予想されるので、デバイスに装着する磁石の程度を変えて、振動発電の性能を評価した。

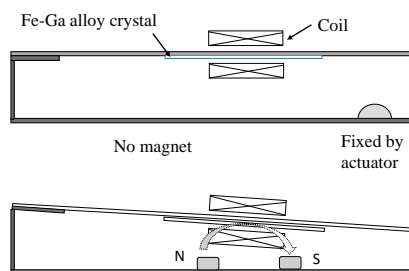


図 3 永久磁石がない状態 (上) と磁石が 2 つあり振動した状態 (下) のデバイスフレームの模式図。振動による起電力測定のために振動中に曲げたデバイスフレーム。

また、振動デバイスのフレームが複雑な形状になると、振動時に磁歪材料に発生する歪みが一様でないことが示されてきた。このためここでは、合金単結晶を接着剤で一様に取り付けて、結晶のひずみが比較的均一で、磁束密度の変化を効率的に検出できるようにした。ひずみの振幅と単振動モードでの加速度は線形関係にあるため、コイルで測定される電圧は理想的には結晶内のひずみ振幅に比例すると考えられる。ここでは、主に加速度 0.2G での振動中の電圧変化を測定し、永久磁石によって発生する磁場による電磁誘導、それらと合金単結晶の逆磁歪との関係等に就いて検討した。さらに、連続的な振動を利用した振動発電により、低消費電力の充電デバイスの製作も試みた。すなわち、Fe-Ga 合金単結晶を装着した振動デバイスで発生する電力を、USB (ユニバーサルシリアルバス) ケーブルを通して約 5V の電池に充電した。

(d) その他の評価法

本研究で取り上げた Fe-Ga 合金では耐久性などで、表面状態が重要となるため、幾つかの焼鈍処理等を施した合金について、X 線吸収分光法、X 線光電子分光法等により表面状態を評価した。その結果、低酸素分圧焼鈍で Ga が濃化した保護性皮膜が形成し、耐久性が維持されることなどを示唆された [6]。

4. 研究成果

(a) Fe-Ga 合金単結晶の磁化特性と磁歪特性

主に (001) 面をもつ Fe-Ga 合金単結晶に [010] 方向に磁場をかけたときの磁化と磁歪の特性などを調べた。図 3 は、Fe-Ga 合金単結晶の磁場印加に伴う磁化と磁歪の変化を示している。磁化は磁場の増大とともにほぼ直線的に増加するのに対し、磁歪は磁場印加により非線形的に大きくなる結果が得られた。磁場による磁歪は非線形的な変化は、還流磁区の中の磁区成分の応答性が異なることが主な原因として考えた。具体的には、合金に磁場を印加し始めると、はじめに 180 度磁壁が動き、さらに磁場をかけると 90 度磁壁が動き、その後者の過程で大きな磁歪を発生することを示した。一方、Young 率の低い方位の単結晶に外部応力を加えると、90 度磁壁の方から移動しはじめ、その後 180 度磁壁が移動することなどを示した [4]。さらに、ひずみゲージ法等を用いて、合金単結晶における三次元的な磁歪を調べ、これまでの単純な理論的予測と異なる結果を得た。

(c) 振動デバイスの特性評価結果

振動デバイスの特性の評価においては、図 3 に示すようなデバイスで、合金の周囲に巻いたコイルで測定される周波数や電圧をモニターした。それらの電圧は、下部フレームに取り付けた永久磁石による磁場の影響を受けるので、その磁石の条件 (磁石の個数などによる磁場) も変化させた実験も行った。

図 5 は、磁石を装着していないデバイスに取り付けた合金単結晶の周りのコイルで測定される、周波数が約 60Hz (大凡の共振周波数) での加速度に対する電圧の振幅の変化を示している。この場合、意図的な外部磁場を印加していないため、発生する電圧は、ファラデーの法則に従っ

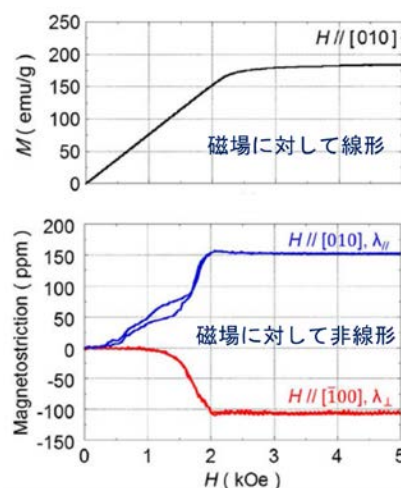


図 4 Fe-Ga 合金単結晶の磁場印加に伴う磁化と磁歪の変化。磁場による応答が磁化と磁歪で異なり、磁歪は非線形的な変化を示す。この非線形性が非ジュール効果 (体積非保存) 発生の主因となっている。

て磁心（磁歪）材料で発生する起電力に相当し、コイル巻数や磁束変化とともに変化する。振動でコイルに発生する電圧は、0.2G までの加速度に対しては、ほぼ線形に増大すること示された[5]。なお、これらの振動には、アクチュエータによる強制振動、上下のフレーム等も含めたデバイスの減衰の影響も入っており、それらをさらに改善することで発電が向上することも期待される。また、永久磁石は、振動発電に効果的な磁場（磁場の極性を考慮）を印加するためのものであるが、磁石を取り付けた場合にはデバイスの質量にも影響を及ぼし共振周波数が影響されることも考えられる。したがって、効率的な振動デバイスを設計する際には、それらにも配慮する必要があると思われる。

永久磁石により発生する磁場の振動発電特性への影響を調べるために、図 6 に示すように、磁石なし、小型磁石 1 個、小型磁石 2 個の場合に発生する電圧を測定した。振動加速度は約 0.2G であり、図 6 には、振動周波数に対して発生電圧をプロットしてある。これらの結果から、共振周波数は僅かに低周波側にシフトしているものの（磁石の質量によると考えられる）、小型磁石によって発生する外部磁場によって、発生電力が増加していることが分かった。磁石（磁場）なしのときの結果は、合金単結晶の固有の逆磁歪効果による物と考えられる。これと同様に、磁石なし、大型磁石 1 個、大型磁石 2 個のときのデバイスの振動数に応じた発生電圧を調べたところ、大型磁石 2 個のときの発生電圧は、さらに大きくなっていった。これらの結果は、図 2 に示した大きな磁場の変動による磁区構造の変化に関するモデルを支持していると考えられる。

このように、効率的な振動発電デバイスにおいては、振動時の一様な弾性ひずみ、磁石と磁歪（磁心）材料の相対的な運動を考慮することが重要であり、今回は、Fe-Ga 合金単結晶はコイルの磁心材料としても機能していると考えられる。

次に、磁心材料において振動による磁場の変動の影響（電磁誘導の効果）を理解するために、その挙動をシミュレーションにより調べた。図 7 は磁心材料（Fe-Ga 合金単結晶の特性をもつ材料）を取り付けた上部フレームと磁石を設置した下部フレームの相対的振動による磁束変化を見積もるための図を示している。3 次元的な磁場のシミュレーションの結果の例でもあり、各位置の矢印はそこでの磁束の向きを示している。このようなシミュレーションを用いて、磁場や磁心材料のパラメータを変えて磁束の変化を見積もった。これらの結果から、合金板に磁場が近づくと、磁束が増大することが示された。

以上のような結果から、磁心（磁歪）材料やフレームの材料の弾性変形、永久磁石による磁場の均一性を考慮した振動デバイスを設計することにより、振動発電デバイスの性能を向上することが分かった。さらに、環境の振動に合わせて、振動体の共振周波数も調整することにより、特性が向上すると考えられる。

最後に、ここで試作したデバイスでは、Fe-Ga 合金単結晶を用いて発光ダイオードを点灯させるのに十分な 15V（ピーク-ピーク電圧）を得られることが分かったので、周期的な振動によって発生する交流電力を、直流電力に変換することを試みた。直流電圧は、二次電池を充電することが可能な電圧である。

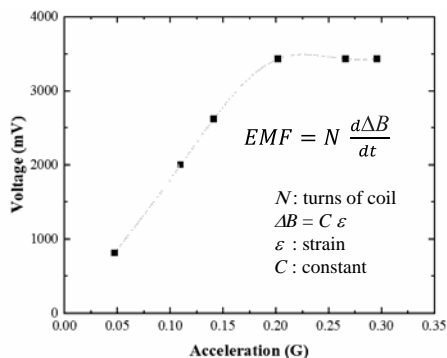


図 5 振動デバイスの上部フレームを取り付けたコイルで、周波数 60Hz で測定したときの振動の加速度に対応した発生電圧（磁石を使用しない状態）。

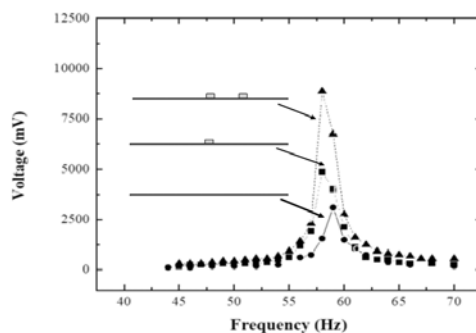


図 6 振動の加速度 0.2G において、磁石なしのフレーム、磁石 1 個または磁石 2 個を下部フレームに取り付けたデバイスで発生した電圧。

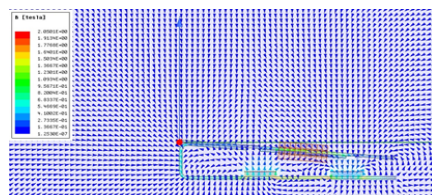


図 7 磁心材料(Fe-Ga 合金の特性をもつ材料)を取り付けた上部フレームと磁石を設置した下部フレームの相対的振動による磁束変化を見積もるための 3 次元的シミュレーションの例。矢印は各位置での磁束の向きを示している。

本デバイスで発生する交流電力を、直流電力に変換し、二次電池を充電する電気回路の模式図を図8に示す。振幅15Vの交流電圧を5Vの直流電圧に変換し、USBのための二次電池の充電する設計にした。振動デバイスで発生した交流電圧は、十分なレベルの交流電圧に変換し、ダイオードブリッジに入力して直流電圧を得た。直流電力はコンデンサーを充電することで得たが、充電回路で充電レベルを制御し、直流出力1で電圧のレベルをモニターした。図8の挿入図に示すように、DC-DCコンバータから直流出力を得て、オシロスコープでモニターした。このとき、出力1では充電電圧、出力2ではUSBデバイス(Liイオン二次電池など)への出力電圧をモニターした。これらの結果から、今後は、Fe-Ga合金単結晶を用いた振動発電デバイスの発電電力は、二次電池(Liイオン二次電池)の充電には十分であり、発電効率をさらに高めるためには、今後は振動デバイスでの磁気回路の改良や電気回路の改善の余地があると考えられる。

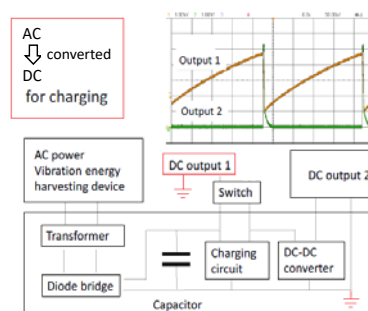


図8 振動エネルギーによる環境発電(ハーベスティング)デバイスにおいて発生した交流電力を、二次電池用の直流電力に変換し、充電する電気回路の模式図。

以上の結果などから、本研究の概要は以下のようなになる。

- 1) 大型 Fe-Ga 合金単結晶から切り出した試料の磁区観察の結果から、磁区構造の特徴的な知見から、振動エネルギーに関する環境発電のための単純化したデバイスを設計し、製作した。
- 2) 振動の環境発電に重要な役割を果たす永久磁石による磁場と磁心材料を配置した振動デバイスの構造を上手く設計することで、発生電圧を向上させることができた。
- 3) 磁歪材料の Fe-Ga 合金単結晶は電磁誘導の磁心材料としても働き、交流電力を直流電力に変換し、二次電池に充電できることを明らかにした。
- 4) 三次元的な磁場のシミュレーションから、弾性異方性の大きい磁歪合金でも軟磁性特性に優れているときには、電磁誘導の効果が振動発電の主な要因となっていると考えられる。
- 5) 振動の環境発電の高効率化のための磁気回路を最適化することも重要であり、今後は永久磁石が発生する磁場の特徴を精緻に評価し設計することが望まれる。

<引用文献>

- [1] T. Ueno and S. Yamada: IEEE Trans. Magn. **47** (2011) 2407-2409.
- [2] T. Ueno: J. Apply. Phys. **117** (2015) 17A740.
- [3] H. D. Chopra and M. Wutting: Nature **521** (2015) 340.
- [4] S. Suzuki, T. Kawamata, R. Simura, S. Asano, S. Fujieda, R. Y. Umetsu, M. Fujita, M. Imafuku, T. Fukuda: Materials Transactions **60** (2019) 2235-2244.
- [5] S. Suzuki, O. Taguchi, T. Kawamata, K. Sugiyama, J. Ono, T. Kumagai, T. Fukuda: Journal of Crystal Growth **570** (2021) 126227.
- [6] T. Kawamata, K. Shinoda, K. Sugiyama, S. Suzuki: Surface Interface Analysis **52** (2020) 1098-1103.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計19件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 11件）

1. 著者名 Suzuki Shigeru, Mizusawa Kazuhiro, Kawamata Toru, Umetsu Rie Yamauchi, Kumagai Tsuyoshi, Fukuda Tsuguo, Sato Shigeo	4. 巻 62
2. 論文標題 Characteristic Twin Formation in Body-centered Cubic Fe ₇ Ga Alloy Single Crystals with Different Orientations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ISIJ International	6. 最初と最後の頁 957 ~ 962
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2021-345	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 Chiba Masaki, Tanno Takenori, Abe Maho, Hashi Shuichiro, Ishiyama Kazushi, Kawamata Toru, Umetsu Rie Y., Sugiyama Kazumasa, Sato Shigeo, Mochizuki Yosuke, Yatsushiro Koji, Kumagai Tsuyoshi, Fukuda Tsuguo, Tanaka Shun-Ichiro, Suzuki Shigeru	4. 巻 63
2. 論文標題 Magnetic Properties and Substructure of Iron-Gallium Alloy Single Crystals Processed from Ingot to Wafers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS	6. 最初と最後の頁 502 ~ 507
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MT-M2021217	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 Inoue S., Okada T., Fujieda S., Osanai F., Hashi S., Ishiyama K., Suzuki S., Seino S., Nakagawa T., Yamamoto T. A.	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 Fujieda Shun, Gorai Naoki, Kawamata Toru, Simura Rayko, Fukuda Tsuguo, Suzuki Shigeru	4. 巻 1016
2. 論文標題 Performance of Vibration Power Generators Using Single Crystal and Polycrystal Magnetic Cores of Fe-Ga Alloys	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Science Forum	6. 最初と最後の頁 453 ~ 457
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4028/www.scientific.net/MSF.1016.453	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Gorai Naoki, Kawamata Toru, Kumagai Tsuyoshi, Fukuda Tsuguo, Suzuki Shigeru	4. 巻 59
2. 論文標題 Designing vibration energy harvesting devices using magnetostrictive iron gallium alloys	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 098003 ~ 098003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abb0c4	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 Kawamata Toru, Shinoda Kozo, Sugiyama Kazumasa, Suzuki Shigeru	4. 巻 52
2. 論文標題 Surface characterization of functional iron?gallium alloys annealed under different conditions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Surface and Interface Analysis	6. 最初と最後の頁 1098 ~ 1103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/sia.6841	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 Furuta Masahiro, Simura Rayko, Kawamata Toru, Suzuki Shigeru	4. 巻 106
2. 論文標題 Characterization of Vibrational Energy Harvesting Property and Microstructure of FeCo-2V Alloys	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Tetsu-to-Hagane	6. 最初と最後の頁 672 ~ 678
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/tetsutohagane.tetsu-2019-132	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 Furuta Masahiro, Simura Rayko, Kawamata Toru, Suzuki Shigeru	4. 巻 106
2. 論文標題 Characterization of Vibrational Energy Harvesting Property and Microstructure of FeCo-2V Alloys	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Tetsu-to-Hagane	6. 最初と最後の頁 672 ~ 678
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/tetsutohagane.tetsu-2019-132	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 Kawamata Toru, Shinoda Kozo, Sugiyama Kazumasa, Suzuki Shigeru	4. 巻 52
2. 論文標題 Surface characterization of functional iron?gallium alloys annealed under different conditions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Surface and Interface Analysis	6. 最初と最後の頁 1098 ~ 1103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/sia.6841	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 Gorai Naoki, Kawamata Toru, Kumagai Tsuyoshi, Fukuda Tsuguo, Suzuki Shigeru	4. 巻 59
2. 論文標題 Designing vibration energy harvesting devices using magnetostrictive iron gallium alloys	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 098003 ~ 098003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abb0c4	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 Fujieda Shun, Gorai Naoki, Kawamata Toru, Simura Rayko, Fukuda Tsuguo, Suzuki Shigeru	4. 巻 1016
2. 論文標題 Performance of Vibration Power Generators Using Single Crystal and Polycrystal Magnetic Cores of Fe?Ga Alloys	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Science Forum	6. 最初と最後の頁 453 ~ 457
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4028/www.scientific.net/msf.1016.453	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Suzuki Shigeru, Taguchi Osamu, Kawamata Toru, Sugiyama Kazumasa, Ono Jin, Kumagai Tsuyoshi, Fukuda Tsuguo	4. 巻 570
2. 論文標題 Characterization and performance of large-sized Fe?Ga alloy single crystals grown using the Czochralski method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Crystal Growth	6. 最初と最後の頁 126227 ~ 126227
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcrysgro.2021.126227	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Chiba Masaki, Tanno Takenori, Abe Maho, Hashi Shuichiro, Ishiyama Kazushi, Kawamata Toru, Umestu Rie Y., Sugiyama Kazumasa, Sato Shigeo, Mochizuki Yosuke, Yatsushiro Koji, Kumagai Tsuyoshi, Fukuda Tsuguo, Tanaka Shun-Ichiro, Suzuki Shigeru	4. 巻 63
2. 論文標題 Magnetic Properties and Substructure of Iron?Gallium Alloy Single Crystals Processed from Ingot to Wafers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS	6. 最初と最後の頁 502 ~ 507
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MT-M2021217	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Suzuki Shigeru, Kawamata Toru, Simura Rayko, Asano Shimpei, Fujieda Shun, Umetsu Rie Y., Fujita Masaki, Imafuku Muneyuki, Kumagai Tsuyoshi, Fukuda Tsuguo	4. 巻 60
2. 論文標題 Anisotropy of Magnetostriction of Functional BCC Iron-Based Alloys	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS	6. 最初と最後の頁 2235 ~ 2244
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MT-M2019146	査読の有無 無
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 T. Takahashi, R. Simura, S. Fujieda, T. Kawamata, S. Suzuki, T. Fukuda	4. 巻 58
2. 論文標題 Investigation of power generation mechanism and anisotropy of FeGa magnetostrictive alloy single crystal based on magnetic domain observations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Jpn. J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 106508
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab3e60	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 鈴木茂、志村玲子、川又透、福田承生	4. 巻 46
2. 論文標題 機能性鉄合金の結晶成長と異常粒成長	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本結晶成長学会誌	6. 最初と最後の頁 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shun Fujieda*, Shimpei Asano, Shunichiro Hashi, Kazushi Ishiyama, Tsuguo Fukuda, Shigeru Suzuki	4. 巻 941
2. 論文標題 Magnetostrictive Property and Magnetic Domain Structure of Fe-Ga Alloy Single Crystal under Tensile Strain	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Materials Science Forum	6. 最初と最後の頁 914_918
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4028/www.scientific.net/MSF.941.914	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Fujieda, S. Asano, S. Hashi, K. Ishiyama, T. Fukuda, and S. Suzuki	4. 巻 124
2. 論文標題 Significant reduction in Young's modulus of FeGa alloy single crystal by inverse magnetostrictive effect under tensile stress	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 233101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5063718	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Masaki Fujita, Takehito Ikeuchi, Akihiro Koyama, Muneyuki Imafuku, Shun Fujieda, and Shigeru Suzuki	4. 巻 941
2. 論文標題 Apparent Poisson's Ratio for Fe-Ga Alloy Single Crystal due to Magnetostriction	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Materials Science Forum	6. 最初と最後の頁 879-883
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4028/www.scientific.net/MSF.941.879	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 熊谷毅, 安藤宏孝, 鈴木茂, 福田承生
2. 発表標題 CZ法による磁歪発電用 Fe-Ga 合金単結晶作成の長尺化
3. 学会等名 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木茂、水澤和夫、佐藤成男
2. 発表標題 弾性異方性の大きい鉄合金における変形特性の評価
3. 学会等名 日本鉄鋼協会春季講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤昂平、今福宗行、大坪太郎、川崎虎太郎
2. 発表標題 振動発電の実用化に向けた超磁歪合金の微視-巨視的な磁歪評価
3. 学会等名 第55回X線材料強度に関するシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木茂、川又透、梅津理恵、佐藤成男、田中俊一郎
2. 発表標題 弾性異方性の大きい鉄合金における微小ひずみの評価
3. 学会等名 日本金属学会秋期大会（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shigeru Suzuki, Osamu Taguchi, Toru Kawamata, Kazumasa Sugiyama, Jin Ono, Tsuyoshi Kumagai, and Tsuguo Fukuda
2. 発表標題 Characterization and performance of large-sized Fe-Ga alloy single crystals grown using the Czochralski method
3. 学会等名 CGCT8 - The 8th Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木茂, 水澤和夫, 佐藤成男, 梅津理恵, 熊谷毅, 福田承生
2. 発表標題 鉄合金におけるナノレベルの不均一変形の評価
3. 学会等名 日本鉄鋼協会秋季講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 熊谷毅, 安藤宏孝, 志村玲子, 田口収, 鈴木茂, 福田承生
2. 発表標題 直径 6 インチの磁歪発電用 Fe-Ga 合金単結晶開発と磁歪特性の評価
3. 学会等名 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shun Fujieda, Naoki Gorai, Toru Kawamata, Rayko Simura, Tsuguo Fukuda and Shigeru Suzuki
2. 発表標題 Performance of vibration power generators using single crystal and polycrystal magnetic cores of Fe-Ga alloys
3. 学会等名 THERMEC 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古田将寛, 高橋巧, 志村玲子, 川又透, 篠田弘造, 鈴木茂
2. 発表標題 鉄基合金の微細組織と逆磁歪特性の関係の解析
3. 学会等名 日本鉄鋼協会秋季講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤枝俊、高橋 巧、志村玲子、鈴木 茂、福田承生
2. 発表標題 ユニモルフU字型振動発電デバイスに搭載したFe-Ga合金単結晶の磁区観察
3. 学会等名 日本金属学会春期講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T.Kawamata、K.Shinoda、S.Suzuki
2. 発表標題 Surface characterization of functional iron-gallium alloys annealed under different conditions
3. 学会等名 18th European Conference on Applications of Surface and Interface Analysis (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Kawamata, S.Suzuki
2. 発表標題 XAFS studies of selective oxidation in iron-gallium alloys annealed under different conditions
3. 学会等名 XAFS2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Suzuki
2. 発表標題 Residual Stress analysis of Fe-Mn based alloys with elinvar properties
3. 学会等名 ECRS2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋 巧、志村玲子、藤枝 俊、篠田 弘造、福田承生、南谷保、上野敏幸、鈴木 茂
2. 発表標題 U字型振動発電デバイスにおけるFe-Ga合金単結晶に及ぼす振動の影響
3. 学会等名 日本金属学会秋期大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔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
研究分担者	今福 宗行 (imafuku Muneyuki) (00183012)	東京都市大学・理工学部・教授 (32678)	
研究分担者	佐藤 成男 (Sato Shigeo) (40509056)	茨城大学・理工学研究科(工学野)・教授 (12101)	
研究分担者	小貫 祐介 (Onuki Yusuke) (50746998)	茨城大学・フロンティア応用原子科学研究センター・産学官連携助教 (12101)	
研究分担者	川又 透 (Kawamata Toru) (90638355)	東北大学・金属材料研究所・助教 (11301)	
研究分担者	熊谷 正芳 (Kumagai Masayoshi) (20582498)	東京都市大学・理工学部・准教授 (32678)	

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
---------	---------