

「微小エネルギーを利用した革新的な環境発電技術の創出」
平成 27 年度採択研究代表者

H29 年度
実績報告書

上野 敏幸

金沢大学理工研究域電子情報学系
准教授

磁歪式振動発電の実用化に向けた革新的メカニズム・材料の創成

§ 1. 研究実施体制

(1)「上野」グループ

① 研究代表者: 上野 敏幸 (金沢大学理工研究域電子情報学系 准教授)

② 研究項目

- ・発電デバイスの特性評価と応用
- ・磁界解析による設計指針および出力向上構造の検討
- ・無線ネットワーク応用のための電源回路の高効率化の検討
- ・2 自由度型デバイスの発電量を最大化する系パラメータ探索
- ・弾性支持された片持ち柱状物体の水槽実験と数値流体解析

(2)「鈴木」グループ

① 主たる共同研究者: 鈴木 茂 (東北大学多元物質科学研究所 教授)

② 研究項目

- ・引張り応力印加状態での磁区観察
- ・Fe-Ga-Cu 合金単結晶の評価

(3)「福田」グループ

① 主たる共同研究者: 福田 承生 ((株)福田結晶技術研究所 社長)

② 研究項目

- ・CZ 法による 2 インチ単結晶の長尺化
- ・CZ 法による 4 インチ大口径結晶の作製
- ・ μ -PD 法による板状結晶の作製

(4)「今井」グループ

① 主たる共同研究者:今井 克哉 (日本高周波鋼業(株)技術開発本部 商品開発部長)

② 研究項目

・Fe-Ga 合金の単結晶試作実験

・Fe-Ga 合金の単結晶の低コスト・量産設備の仕様検討

§2. 研究実施の概要

振動発電デバイスにおいては、Fe-Ga 合金と磁性体の U 字フレームの積層(ユニモルフ)を基本にした構造を提案し、これを試作評価した(図 1)。その結果、 $4 \times 0.5 \times 16 \text{ mm}$ の合金を利用した場合で、先端に取り付ける錘が約 $1.7 \text{ g} \sim 10.2 \text{ g}$ の範囲で共振周波数を約 $30 \sim 90 \text{ Hz}$ の間で調整でき、 28.4 Hz の場合においては、加速度 0.05 G (0.49 m/s^2) で 1 V の開放電圧を発生し、 0.075 G で 1 mWpk , 0.4 mWrms の電力を発生した(図 2)。また 88.7 Hz では、加速度 0.6 G で電圧 4 V , 電力 5 mWpk , 2 mWrms を発生した。また繰り返し疲労試験を実施し、 400 Hz , 8 G で、1 億回後も共振周波数と電圧の劣化がなかった。以上より磁歪式の高感度、高出力、高耐久性を実証した。デバイスの設計では、アシスト効果を考慮した解析方法を提案し、荷重一定での合金とフレーム厚さをパラメータとした磁界解析を行い、実験とよい一致を示した。これにより入力条件が荷重一定と曲角一定では異なる設計が必要ながわかった。また電源回路の高効率化では、デバイスを安定した電池と同じように使用できるような電源回路を考案した。振動エネルギーの有効利用には、この回路の性能を高め、電気エネルギーの損失を最小限に抑えることが重要で、デバイスの電気的な特性に応じ電源回路の性能を高める回路設計手法を明らかにした。

動作周波数の広帯域化については、デバイスに主系(錘とばね)を追加して 2 自由度系を構成し、デバイス単体(1 自由度)の場合と比較して発電量を最大化する主系の質量及びばね定数の 2 つのパラメータの組み合わせを、大域的近似最適化手法の **Differential Evolution** を用いて探索し、その効果を実証した。流れを利用した発電では、ギャロッピング振動が生じる断面形状として頂点に丸みがある **Filleted** 三角柱が最も低速域から振動することを見出した。更に 2 本の D 形柱を流れに対して並列配置した干渉効果を狙った結果、隙間間隔 $s/D=0.5$ で配置すると単独の場合に比べて振動開始流速が低下し、流速 $Vr=2.1$ で約 1 mW の電力が得られた。空気流では V 形柱を用いたデバイスで、無線センサを動作するに十分な 3.8 V の電圧を得た。

材料においては、発電のメカニズムを明らかにするために、逆磁歪効果の発現に関わる外部応力による磁区構造の変化を、磁区観察用顕微鏡等により調べた。 $[010]$ 方向と平行に引張り応力を印加すると階段状の 180° 磁壁と直線的な 90° 磁壁が移動することを示した。すなわち、引張り方向と垂直な磁化方向の磁区が消失した後に、引張り方向と平行な直線的な 180° 磁壁で構成された縞状磁区が形成することなどを明らかにした(図 3)。それとともに、このような磁区構造の変化によりヤング率が大幅に低下することを見出した(図 4)。

Fe-Ga 合金単結晶作製においては、CZ 法では、原料のチャージ量、温度勾配、育成速度、炉内構成(ホットゾーン)等の調整により、直径 4 インチ直胴 50 mm 程度のインゴットの作製に成功した。また、直径 2 インチ(約 50 mm)直胴 230 mm の長尺化にも目処を付けた。さらに、引下げ法(μ -PD 法)による板状の Fe-Ga 合金も作製した。種結晶を用いない一方向凝固法では、直径約 40 mm の Fe-Ga 合金単結晶が作製でき、 $262 \sim 273 \text{ ppm}$ の磁歪を確認した。Fe-Ga-Cu 三元系合金の直径 30 mm の単結晶も作製でき、 $1.9 \text{ at}\% \text{ Cu}$ 添加した合金の単一のマイクロ組織で Cu 析出物は観察されなかった。

- [1] S. Asano, S. Fujieda, S. Hashi, K. Ishiyama, T. Fukuda, S. Suzuki, "Magnetic Domain Structure and Magnetostriction of Fe-Ga Alloy Single Crystal Grown by the Czochralski Method", *IEEE Magn. Lett.*, No. 8, pp. 6101004, 2017.
- [2] 福田承生, 渡辺清和, 安藤宏孝他, 「CZ 法による Fe-Ga 基磁歪合金の大型単結晶製造技術の開発」 *あたりあ* 56, pp.27-29, 2017.
- [3] T. Ueno, MAGNETOSTRICTIVE LOW-COST HIGH-PERFORMANCE VIBRATION POWER GENERATOR, *Proceedings of Power MEMS2017*, pp.334-337, 2017.

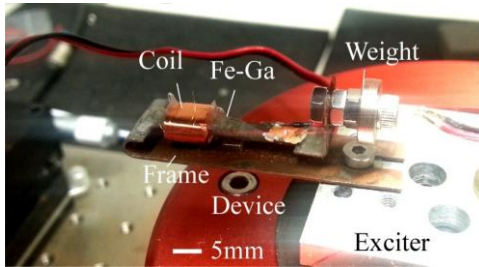


図 1 試作したデバイス

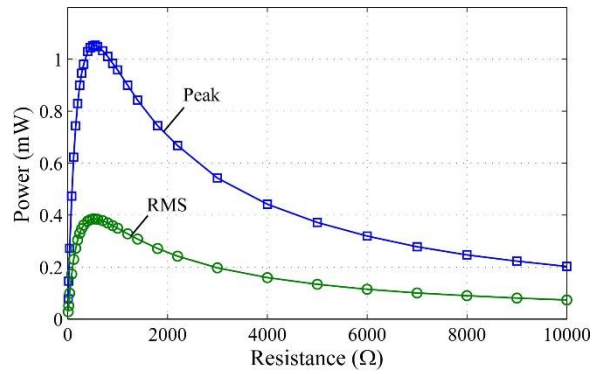


図 2 28.4Hz, 0.075G の条件での発生電力

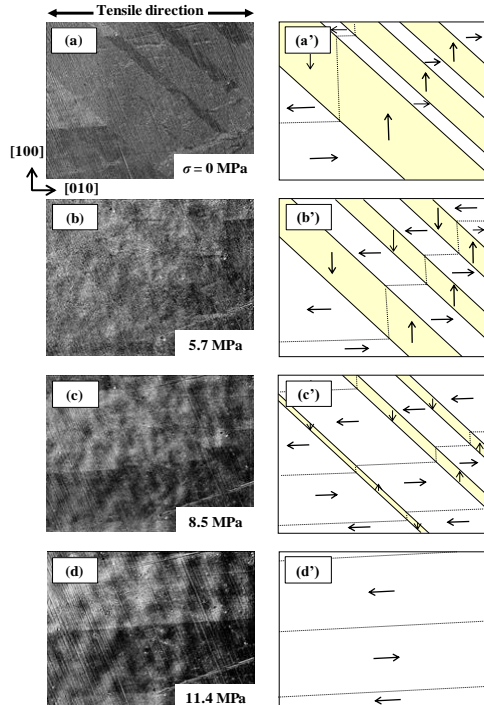


図 3 (a)-(d) 異なる引張り応力 σ を印加した状態の磁区構造および(a')-(d')その模式図

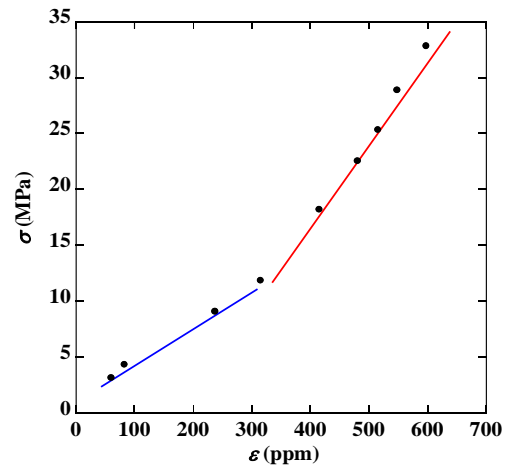


図 4 [001]方向の引張り応力 σ と引張り歪み ε の関係