

「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

H28 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
  - ・発電デバイスの高感度化、量産構造の提案
  - ・発電デバイスの磁界解析による設計指針の検討
  - ・発電デバイスの組み上げと耐久性の評価
  - ・無線ネットワーク応用を想定した電源回路の開発
  - ・2自由度系で構成した磁歪式振動発電デバイスの発電効率化に関する検討
  - ・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
  - ・衝撃碎波力による振動発電の検討

### (2)「鈴木」グループ

- ① 研究代表者: 鈴木 茂 (東北大学多元物質科学研究所、教授)
- ② 研究項目
  - ・Fe-Ga-X 合金の特性評価と新成分設計

### (3)「福田」グループ

- ① 主たる共同研究者: 福田 承生 (福田結晶技術研究所、社長)
- ② 研究項目
  - ・Fe-Ga 基磁歪合金の単結晶試作実験

(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 基磁歪合金の単結晶試作実験

## § 2. 研究実施の概要

発電デバイスにおいては、感度向上と量産に適する構造を考案した。これは磁歪材料と磁性体の積層を基本に、磁性体のフレームを板材の塑性加工で製作、また積層部にコイルを巻くことで低コストと高感度化を図る。積層部のフレームを磁気飽和させることがポイントで、振動時、積層部が湾曲し、磁歪素子に様な応力が付加、逆磁歪効果で磁束が変化し、コイルに起電力が発生する。今回、この原理また従来構造に対する差別化を実験的に実証した。また  $4 \times 0.5 \times 13 \text{mm}^3$  の Fe-Ga 合金、線径 0.05mm、3500 巻 (500  $\Omega$ ) のコイルで構成される発電デバイス (図 1 左) を試作し、先端を指で弾いた自由振動において 25V のピーク電圧、また 37Hz, 0.1G の定常振動で 1.2V の電圧 (図 1 右) を確認した。前者においては一度の振動、後者においては 10 秒程度の振動で、無線モジュールが動作し、信号送信ができた。

またデバイスの磁気回路の設計指針を得るため、Fe-Ga 合金とフレーム材料の磁気特性を測定し、そのデータを用いて磁界解析を行い、実験結果との整合性を評価した。その結果、両者は良い一致を示した。これより、フレームの磁気飽和する磁界の強さと飽和磁束密度の大きさがデバイス特性に影響することがわかり、デバイスの磁気回路の設計指針が得られた。また積層型デバイスの溶接条件を調査し、初期の耐久試験により溶接強度は十分であることを確認した。

無線ネットワーク応用を想定した電源回路の開発では、各種方式の整流回路と DC-DC コンバータの組み合わせについて試作評価を行った。デバイスの出力を、3 ステージ倍電圧整流回路、Buck 型 DC-DC コンバータを通して、直流 3.3V に変換した場合に、最大 93.4% の高い電力変換効率を達成した。この電源回路を用いて、無線センサデバイス (IEEE 802.15.4) を 0.5 秒毎に間欠動作させ、192Byte/s の温度、照度、加速度を安定して計測できることを確認した。

流れを利用した発電では、ギャロッピング振動における流入角度の影響が少ない形状が D 形であることが特定でき、模型長手方向に振動させた場合に迎え角が  $\pm 45^\circ$  の広い範囲まで振動することを明らかにし、最大 26mW の電力を得た。また、振動柱は、スパン長さ/柱断面高さが 5 倍以上必要であることを示した。さらに、数値流体解析により、スパン長さ/振動振幅と物体周りの流れ構造の変化との関係を明らかにした。

磁歪材料においては、Czochralski (CZ) 法を用いて、磁歪特性の良い直径 50mm の Fe-Ga 基合金単結晶が得られたことから、それらの組成や温度勾配等のプロセス条件を参考に、直径 100mm の大口径化結晶育成に取り組んだ。大口径化結晶の評価結果として、直径 4 インチ (約 100mm) の育成が可能であることを示した (図 2)。また、三元系の Fe-Ga-X (X=Cu, Si および Al) 合金単結晶の製造も試みた。一方、種結晶を用いない一方向凝固法により作製した直径 30mm 程度の Fe-Ga 合金単結晶では、凝固初期の部位を除いて概ね結晶方位が揃っており、磁歪量は 200~250ppm に達することを示した。また、デバイスに組み込んだ時の出力電圧特性は加速度 1G で 2V 程度の良好な結果が得られた。CZ 法で育成した大型の Fe-Ga 合金単結晶について元素濃度分布や結晶方位分布の測定を行い、最適な育成条件について検討した [1]。Fe-Ga 合金単結晶試料の  $\langle 100 \rangle$  方向等への磁場および応力印加時における磁区構造変化を、Kerr 効果顕微鏡により観察した (図 3)。その結果、結晶の飽和磁場の半分ぐらいの磁気バイアスで、 $180^\circ$  磁壁がほぼ消失し、それ以上の磁場で  $90^\circ$  磁壁が動き出し大きな磁歪が発生すること

を明らかにした[2]。これらの知見は、発電デバイスの性能に大きく影響する磁気バイアスや予荷重の条件、また単結晶の方位設計を行うのに生かすことができる。Fe-Ga 合金単結晶試料から、発電デバイス動作時における応力付加方向に対して<100>、<101>および<111>方向を平行な試験片を切り出し、振動発電試験を行った。振動発電における逆磁歪素子の応力付加方向と結晶方位の関係は発生電圧に大きな影響を及ぼすことがわかり、最も大きな発生電圧および磁化の変化は磁化容易方向である<100>を応力付加方向に平行にした試料で観察された。

[1] 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: あたりあ 56 (2017) 27-29.

[2] S. Asano, S. Fujieda, S. Hashi, K. Ishiyama, T. Fukuda and S. Suzuki, IEEE Magnetics Letters, 8 (2017) 6101004.

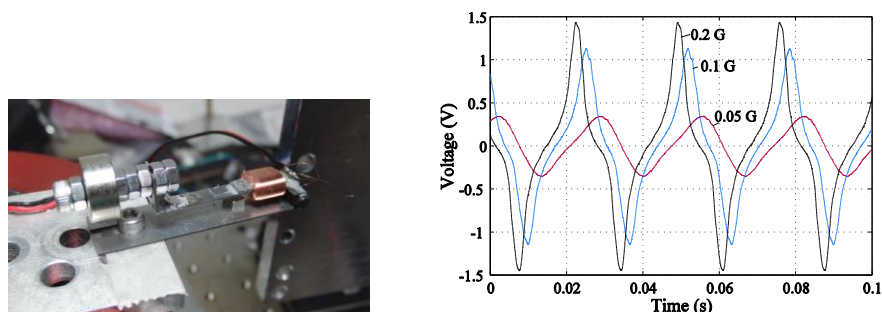


図1 試作した積層型デバイス (左) と 37Hz で加振時の発生電圧 (右)

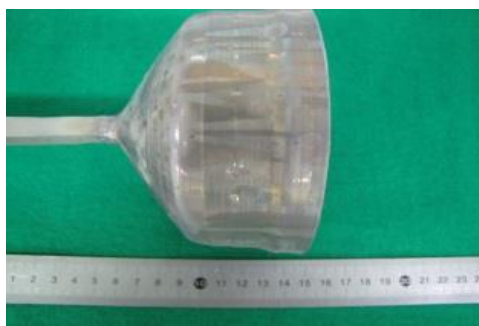


図2 直径4インチ(約100mm)のFe-Ga合金の育成結果

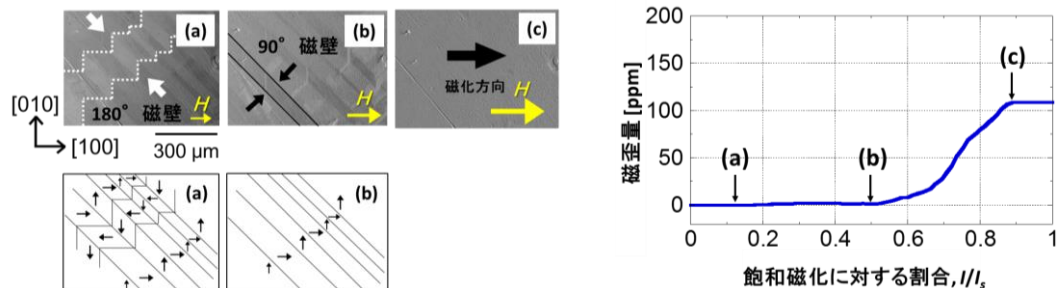


図3 磁場印加に伴うFe-Ga合金単結晶の磁歪変化(左上), Kerr顕微鏡を用いた(001)面の磁区構造観察図(左下)および磁区構造(矢印は磁気モーメントの方向)の模式図(右)