

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「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」
研究課題「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」

研究終了報告書

研究期間 2015年 11月～2019年 3月

研究代表者：上野 敏幸
(金沢大学 理工研究域、准教授)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

本研究の目標はIoTの電源の問題を解決することにある。現状、そのモジュールの電源はボタン電池または乾電池を利用しており、この寿命の管理、交換、廃棄の手間がその普及を阻害している。振動発電は、様々な機械の振動、人・モノの動き、波、流れなどから発電を行う極めて汎用性の高い技術である。これが電池を代替するためには、そのデバイスは電池以上の電力、寿命、小型、低コストの特徴を持つ必要がある。また実際の機械は振動しないように設計されており、デバイスは極めて微小な振動から発電を行わなければならない。以上を考慮し、デバイスの性能目標として、振動周波数 30Hz、加速度 0.1G の振動で発生電力 1mW、半永久の寿命、体積 10cc 以下を設定した。この目標を達成すべく Fe-Ga 合金単結晶の製造からデバイス、電力変換回路、加えて振動発電の実用性や汎用性を拡大する広帯域化、波力、流力発電技術も含めたチーム体制で研究開発を実施した。

金沢大学では、デバイス、回路、応用を担当し、当初予定していた平行梁構造から、数多くの試作改良の末、積層ユニモルフ構造を発明したことで、ほぼ目標を達成した。代表結果として $4 \times 0.5 \times 16$ mm の Fe-Ga 合金板を用いたデバイス(質量 4g、長さ 40mm、体積 0.5cc: 錘を除く)において、28.4Hz、0.075G の振動で電力 1mWpk、0.4mWrms を達成した。また 8G、400Hz の繰り返し振動試験を行い、1 億回の振動で電圧の劣化ゼロを実証した。これらの特徴は Fe-Ga 合金の優れたエネルギー変換特性と力学特性、これを効果的に利用する革新的な構造によるもので、これを裏付ける材料の評価からデバイスの設計理論、解析技術も開発した。また寸法を等寸で 2 倍、4 倍と増加させたデバイスなど様々な形状や構造のデバイスを試作し、発電量は体積に比例する寸法効果や、発生電圧の周波数依存性、先端の錘の関係などデバイスの設計、利用法に関する指針を確立した。また構造においては、自由端と固定端を近い U 字型において、固定端損失が低減し、感度が向上することを解析と実験で示した。また構造と磁気を組み合わせた磁場解析を行うことで、逆磁歪効果の原理に加え、ギャップ変動による磁気抵抗の変化や、追加磁気回路で性能が向上する可能性も明らかにした。またデバイスの機械-電気連成等価回路を構築し、整流・蓄電回路、その後段に負荷が付く統合的な回路設計、シミュレーション技術も確立した。その結果、倍電圧回路の広帯域効果や、力率改善コンデンサで蓄電量が 10%程度向上すること、またこのコンデンサの容量で共振周波数が 5%程度制御できることなどをシミュレーションと実験で示した。応用においては、一度の振動で無線送信する電池不要リモコン、前述のデバイスの出力で 920MHz LPWA 無線モジュールを駆動し、振動周波数や温度を送信するデモシステムなどを開発した。また電力変換回路においては、効率よく負荷で電力を取り出すための電源回路を提案し、デバイスの出力電圧 1.0V の場合で電力効率 75%を達成した。またエネルギー利用効率を高めるデバイスと整流回路、DC-DC コンバータのマッチングの方法を明らかにした。

動作周波数の広帯域化においては、永久磁石の磁気力を利用した非線形現象や 2 自由度系の効果を検証した。2 自由度系においては DE 最適化アルゴリズムを用い、評価関数(発電量の周波数積分)を最大化する錘の比率を示し、その効果を実験で実証した。

また流力振動発電においては、コンピューターによる流体-構造連成解析と水槽実験を実施し、様々な断面形状の振動特性を検証、Filleted 三角柱の振幅が最も大きくなることを見いだした。またその理由として振動発生時に三角柱背面の上下部領域に明確な交互渦が発生しないためであることがわかった。

材料開発においては、高性能な Fe-Ga 単結晶を安価に製造する技術およびその特性評価、現象解明に取り組んだ。福田結晶技術研究所では、CZ 法により直径 50mm 長さ 145mm の Fe-Ga 合金単結晶インゴットの引き上げ技術も確立するとともに、直径 25mm 長さ 75mm の Fe-Ga-Si 合金等の三元系単結晶を育成した。また、それらの合金単結晶の磁歪特性は基本的に Ga 量に依存していることを示した。また直径 50mm 長さ 230mm、直径 100mm 長さ 50mm の Fe-Ga 合金単結晶引き上げ技術も確立し、合わせてデバイスに利用する板材を安価に製造

する技術も開発した。

また日本高周波鋼業では、一方向凝固プロセスによる大型単結晶製造実験炉を設計・製作し、合金溶湯内の温度勾配と凝固開始時の結晶成長方位を適切に制御することにより、直径50mm 長さ120mm程度のFe-Ga合金粗大結晶の作製に成功した。また製造した単結晶は十分な磁歪特性と発電特性を示すことを確認した。以上の、単結晶育成技術により、デバイスの普及に必須な安価で実用的なFe-Ga合金が製造可能であることを実証した。

東北大学では、単結晶の評価を行い、逆磁歪特性の発現機構等について検証した。このため磁場や応力付加状態で合金の磁区観察を実施した。その結果、磁場や引張り応力付加前で、合金の{100}面は、面内の4つの<100>方向を磁化方向とする磁区および階段状の180°磁壁と直線的な90°磁壁で構成されることを示した。この状態で、<100>方向に磁場を印加すると、階段状の180°磁壁のみが移動し、さらに磁場を印加すると180°磁壁は消失し、主に90°磁壁の縞状磁区となった後、90°磁壁が移動や消失により単磁区状態となる。一方、引張りまたは圧縮応力を付加するとそれに応じて磁壁が移動し、直線的な180°磁壁で構成された縞状磁区が形成される。結果、磁場印加により形成された90°磁壁で構成された縞状磁区に磁場印加方向と平行に引張り応力を印加するとほぼ単磁区状態となった。これによりデバイスの発電特性と密接に関わる大きな磁束変化が応力付加により生じる機構を明らかにした。

以上、振動発電技術の実用化を大きく推進するデバイス構造とその設計、解析技術、高効率電力変換回路と電池フリー無線センサ、実用性を高める広帯域化技術や流力振動発電など一連の基礎および応用技術を確立した。また材料においても高品質で大口径かつ長尺なFe-Ga単結晶を作製する安価に製造する基礎技術、また逆磁歪効果を向上する材料設計やこれを検証する磁区観察の手法を確立した。

(2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1. Fe-Ga合金単結晶の磁区構造とヤング率の関係

概要:従来、Fe-Ga合金において磁区構造がヤング率に影響を及ぼすことが予測されていたが、その詳細は明確でなかった。このような状況で、本研究では応力印加状態でのFe-Ga合金単結晶の磁区観察に成功した。その結果、逆磁歪効果に起因して90°磁壁が移動・消失するとヤング率が大きく減少することを明らかにした。Fe-Ga合金単結晶が振動発電に有望であることを示すと共に、種々の磁性材料の磁区構造とヤング率の理解が深まった。

2. 応力印加による大きな磁束変化の発生機構の解明

概要:Fe-Ga合金単結晶を利用した発電デバイスは優れた特性を示すが、その発電特性と密接に関わる大きな磁束変化の発生機構は明らかでなかった。本研究では、Fe-Ga合金単結晶の磁区構造に及ぼす磁場および応力の影響を明らかにし、磁場印加により形成された90°磁壁の縞状磁区に応力を印加すると大きな磁束変化が生じることを実証した。磁歪式振動発電の研究は当グループが世界の最先端を走り、その発電機構を先駆けて明らかにした。

<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

1. 革新的振動発電デバイス

概要:Fe-Ga合金の板材とU字磁性フレームをベースにしたシンプルで高耐久、高出力、高感度な振動発電デバイスの基本構造を確立し、この優れた特徴を様々な形状、条件で実証した。このデバイスは組み上げも簡単で、低価格、量産に適する構造である。スケール効果も実証し、デバイスの設計、解析方法、等価回路によるシミュレーション技術も確立させた。

2. 高効率電力回路と無線センサシステム

概要: 微小振動条件で効率良く電力を取り出すための電源回路を提案し、デバイスの出力電圧 1.0V において、電力効率 75% を達成した。またエネルギー利用効率を高めるデバイスと整流回路、DC-DC コンバータのマッチングの方法を明らかにした。またデバイスの出力で動作する様々な電池フリー無線センサを試作した。具体的には一度の押す動作や衝撃で発電し、近距離無線通信を行うリモコン、920MHz 帯 LPWA (長距離) 無線モジュールで周波数情報を送信するシステムなどを試作し、その有用性を実証した。

3. 弾性支持された片持ち柱状物体の最適な断面形状

概要: 扁平な断面の角柱において、発散型の流力振動である低速ギャロッピング振動が発生することは知られていたが、さらに振幅や発振流速が低くなる断面形状が明らかになっていなかった。コンピューターによる流体-構造連成解析と水槽実験により、D 形柱、角柱と比較検討した結果、Filleted 三角柱の振幅が最も大きくなる原因は、振動発生時に Filletted 三角柱背面の上下部領域に明確な交互渦が発生しないためであることを明らかとなった。

< 代表的な論文 >

1. 上野敏幸、“電池フリーIoT の実現に向けた磁歪式振動発電デバイスの量産構造の提案”、日本 AEM 学会誌、Vol. 26, No.1 p.185-190 (2018)
2. S. Asano, S. Fujieda, S. Hashi, K. Ishiyama, T. Fukuda and S. Suzuki, Magnetic Domain Structure and Magnetostriction of Fe-Ga Alloy Single Crystal Grown by the Czochralski Method, IEEE Magn. Lett. 8 (2017) 6101004.
3. 南部十輝、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、“チョクラルスキー法による Fe-Ga 基磁歪合金の大型単結晶製造技術の開発”、日本金属学会誌 までりあ 56 (2017) 27-29.

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

① 「上野」グループ

研究代表者: 上野 敏幸(金沢大学理工研究域 准教授)

- ・発電デバイスの高出力化、設計、試作評価
- ・磁界解析手法と出力向上の検討
- ・振動発電用の電源回路の構成と設計最適化
- ・励振メカニズムの検討
- ・発電量向上のためのデバイス最適設計法の検討
- ・流れから発電を行うメカニズムの解明

② 「鈴木」グループ

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)

研究項目

- ・磁場および応力印加状態での合金単結晶の磁区観察
- ・Fe-Ga-X 合金の新成分設計
- ・Fe-Ga-Cu 合金単結晶の評価

③ 「福田」グループ

主たる共同研究者: 福田 承生(㈱福田結晶技術研究所 社長)

研究項目

- ・Fe-Ga 基磁歪合金単結晶作製技術の開発

④ 「今井」グループ

主たる共同研究者: 今井 克哉(日本高周波鋼業(株) 商品開発部長)

研究項目

- ・Fe-Ga 基磁歪合金の量産化技術の開発
- ・Fe-Ga 基磁歪合金の単結晶試作実験
- ・Fe-Ga 基磁歪合金単結晶の低コスト・量産設備の仕様検討

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

技術移転先として、発電デバイスとその応用システムの商品開発を株式会社梶製作所と東京ドロウイング株式会社が実施している。また電力中央研究所が鉄ガリウム合金の評価や社会実装に協力している。北陸電力が実証試験の場を提供している。