

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360120

研究課題名(和文) 磁歪式マイクロ振動発電素子を用いた自動車用自律センシングシステムの開発

研究課題名(英文) Development of self-powered wireless sensor system for automobile using magnetostrictive micro vibrational power generator

研究代表者

上野 敏幸 (Ueno, Toshiyuki)

金沢大学・電子情報学系・准教授

研究者番号：30338256

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円、(間接経費) 4,050,000円

研究成果の概要(和文)：振動発電は身近な振動や動きから発電を行う極めて汎用性の高い技術で、その応用は多岐にわたる。本研究では、提案する磁歪式振動発電技術において、実用的なデバイスの構造を確立、この効果を試作により検証、当初の目標を大きく越える高い発電出力と効率を達成した。また発電量が体積に比例するスケール効果を実証し、大型化によりワットオーダーの発電デバイスの開発に成功した。また周波数アップコンバータや多共振機構をデバイスに組み合わせることで動作周波数の広帯域化を達成した。そしてデバイスと整流、蓄電回路、無線モジュールを組み合わせた無線センサシステムやリモコンを試作、その動作にて、電池を不要にできる可能性を実証した。

研究成果の概要(英文)：We invents novel vibrational power generator using Fe-Ga alloy, iron-based magnetostrictive material, with large inverse magnetostrictive effect, good machinability and high ductility. The generator is based on parallel beam structure consisting of Fe-Ga plate wound with coil and yoke accompanied with bias magnet. In this research project, we established device configuration for practical applications and verified its high power generation of 10 mW, high energy conversion efficiency of 30 %, and high ductility by prototype of small size. In addition, large size device of watt order power generation was developed to verify its scale effect. Frequency-up converter and multi resonant mechanism was investigated to widen frequency bandwidth. The wireless sensor system and remote controller powered by the device were fabricated to verify their battery free operation.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：振動発電 磁歪材料

### 1. 研究開始当初の背景

省エネ思考の高まりと、CO<sub>2</sub> 排出削減の必要性から、身近な振動から発電を行う研究が注目を浴びている。例えば、自動車はエンジンや走行に伴う外乱で常に振動しており、振動発電のアイデアが有効に活用できる。実用レベルの振動発電が実現できるとその恩恵は計り知れない。例えば、自動車には、温度や圧力、加速度や排ガスなどを検知する数多くのセンサが使われており、その電源やワイヤレスによる信号送信に振動発電が利用できるとバッテリーから電力供給、それに伴う煩雑な配線が不要になり、大幅な軽量化と低燃費化が図れる。また昨今、懸念される老朽化した橋梁においては、その状態監視を行うワイヤレスセンサデバイスの電源を振動発電にて賄うことで、維持・管理にかかるコストを大幅に削減できる。民生レベルでも振動発電の貢献は大きい。人の動き、例えば、歩行運動の一部を電力に変換できれば、携帯音楽プレーヤなどの携帯電子機器への電力供給が不要になる。またボタンを押す動きを振動を介し、エネルギーに変換できれば電池のいらぬリモコンが実現できる。

以上の背景のもと、振動発電を実用化すべく熾烈な研究開発が行われている。その原理は、主に圧電素子、エレクトレット、可動磁石に大別される。しかし、現在まで実用化された例がほとんどないのが実情である。これは低い効率や出力、インピーダンスが高い、耐久性が低い等の理由による。

### 2. 研究の目的

我々は、米国海軍研究所との共同研究のもと鉄系磁歪材料 (Fe-Ga 合金) を用いた革新的なマイクロアクチュエータの開発を行ってきた。その経緯のなか、画期的な振動発電デバイスの構造、原理を発明、その成果を世界に先駆けて発表した。本研究は、考案した発電デバイスの性能を実用レベルまで向上させ、任意周波数の振動を効率よく電力に変換する機械および電気的なインターフェースを開発、民生レベルでの振動発電の実用化を目指すものである。

### 3. 研究の方法

#### 発電原理の確立と解析、設計

デバイスは、平行梁構造により、小さい曲げ力で、Fe-Ga 合金の磁歪板に効率的に一樣な圧縮、引張り応力を付加する。そして大きな逆磁歪効果にて、1T 以上も磁束密度が変化しコイルに起電力を発生させる。デバイスでは磁歪板、先端の連結部の構造および曲げ力の位置で、板の変形ひいては内部応力の分布が大きく変化する。つまり素子の構造および負荷の加え方が重要なポイントになる。本研究では、まず有限要素法による構造解析で、発電原理が成立する構造、負荷の位置を把握し、その必要条件を確立する。同時に磁場解析により磁歪板内の磁束密度の分布を計算

する。磁歪材料では応力と磁化の関係は磁歪定数で比例すると考えられるから、構造と磁場の解析結果を合わせる、具体的には内部応力を積分し、磁歪定数を乗じた磁束の変化を算出することで曲げ力に対する発生電圧を算出できる。この解析と共に、梁の材料力学による理論式と磁気回路を組み合わせた理論モデルを構築、比較し、周波数に依存した発生電圧の様子を把握する。ここで得た知見をもとに、周波数 ~ 200Hz 程度、3mm<sup>2</sup> 角 20mm 長以内で 4mW 程度 (20mW/cm<sup>3</sup>) の電力を発生する素子 (試作の 2 倍以上、実用レベル) の開発を行う。

#### 機械・電気インターフェースの開発

発生電圧はファラデーの法則により周波数に比例する。実際の環境振動は低周波数 (~ 数 10Hz) にて、そのままではデバイスの高い共振周波数の振動 (数 100Hz) は励振されない。これを克服するために、先端部に磁力の吸着と離脱を利用し自由振動を発生させるスイッチ構造をベースに共振周波数でデバイスを励振する機構を考案する。また、これに合わせ、発生した任意の周波数の交流電圧をダイオードブリッジや半導体スイッチ、トランスを用い、低損失および高効率で所望の直流電圧に変換するコンバータ回路を考案し作成する。以上を用いたワイヤレスセンサシステムのプロトタイプを開発する。

### 4. 研究成果

発電デバイスにおいては、小型のものを基本に試行錯誤的な改良を行った。その結果、2014 年 4 月現在において、実用に近い構造を確立した。改良と設計のポイントとして

- (1) 磁歪板の長さを適度に小さくすることで、漏洩磁束の低減とコストの削減を図る。
- (2) 長さの減少分においては、平行梁の磁歪板とヨークの間隔の拡大にて、コイルの巻き数を増加し、発生電力を維持する。
- (3) 平行梁とバックヨークを一体化することで、効率よい閉磁路バイアス回路を構成し、永久磁石の使用量を低減する。
- (4) 磁歪板とヨークの接合をステンレス用のハンダにて行うことで、耐久性を確保する。
- (5) 先端をテーパ状にすることで、共振周波数の増加及び変換効率の向上を図る。

以上の改良にて、磁歪板 2×0.5×11mm を利用する小型のデバイスにおいて、共振周波数 200 ~ 300Hz、加速度 5G において 10mW 以上の発生電力を実現させた。エネルギー変換効率 (出力電気エネルギー / 入力機械エネルギー) においては 30% 以上にて、これは当初の目標を大きく超えるものである。

またデバイスの大型化の可能性を検証すべく、複数のサイズのデバイスの試作を行った。その結果、発生電力は体積に比例するスケール効果を実証し、ワットオーダの電力を発生する発電デバイスの開発に成功した。また磁歪板に効果的な応力を付加する構造や振動を持続させる構造として、前者は L 字型

フレーム, 後者は音叉フレームを考案, 試作や解析にてその効果を実証した。

また幅広い周波数の成分を持つ振動源に対応する工夫として, 片持ち梁(低周波数で共振)と磁石の吸脱着を利用する周波数アップコンバータとデバイスの複合を考案し, 低周波数の振動にて, 高周波のデバイスの自由振動が励振され, 高い効率で発電が行えることを試作にて実証した。また複数の質点を利用した多共振機構との組み合わせにおいては, 共振周波数の低域化と2,3,4次の高次モードの共振が発電に利用できることを実証した。実際に, 自動車の模擬振動下でのデバイスの評価を行い, デバイスにおいては, 広帯域の振動に対応する必要性が確認された。これに上記のアップコンバータや多自由度共振の技術を適用する予定である。

また電池のいらないリモコンを実現すべくボタンを押す動きを自由振動に変換する片持ち板(磁石付き)とデバイスを組み合わせた発電スイッチを試作し, その発電特性を評価した。整流・蓄電回路, DC-DCコンバータ, 無線送信モジュールを組み合わせたシステムにおいて, 2回の押しボタンで信号が送信できることを実証した。この発電スイッチにおいては, 大型化により浮力をトリガとする応用も可能であり, 波力発電への応用も展開できる。

デバイスの性能向上に寄与する設計においては, 構造や磁気回路に依存する力係数の理論値を導出し, この妥当性を実験により実証した。

以上に関しては, 多数の学会にて研究成果の発表を行っており, 重要な構造, 原理においては特許を申請している。デバイスの基本構造については特許となり, 現在5社の企業と特許実施許諾契約を締結, 実用化に向けた研究開発が進行している。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

##### [雑誌論文](計6件)

1. 坂本龍介, 上野敏幸, 山田外史, "L字フレームを用いた磁歪式振動発電デバイスの特性評価", 日本AEM学会誌, Vol. 21, 2, pp. 222-227, (2013)  
<http://dx.doi.org/10.14243/jsaem.21.222>
2. B. Rezaeealam, T. Ueno, S. Yamada, "Quasi-Static Finite Element Analysis of Magnetostrictive Vibration Energy Harvester", 日本磁気学会誌, Vol. 36, pp. 155-160, (2012).  
<http://dx.doi.org/10.3379/msjmag.1205R003>
3. B. Rezaeealam, T. Ueno, S. Yamada, "Behavior Analysis of Galfenol Beam Vibration Energy Harvester", 日本AEM

学会誌, Vol. 20, 1, pp. 138-143, (2012).  
<http://ci.nii.ac.jp/naid/110009437769>

4. 上野敏幸, 山田外史, "磁歪材料を用いた小型振動発電素子の特性評価", 日本AEM学会誌, Vol. 20, 1, pp. 168-173, (2012).  
<http://ci.nii.ac.jp/naid/110009437774>
5. T. Ueno, S. Yamada, "Performance of Energy Harvester Using Iron Gallium Alloy in Free Vibration", IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol. 47, 10, pp. 2407 - 2409, (2011).  
10.1109/TMAG.2011.2158303
6. 上野敏幸, 山田外史, "Fe-Ga合金を用いた振動発電素子の基礎的検討", 日本磁気学会誌, Vol. 33, 2, pp. 88-91, (2011)  
10.3379/msjmag.1101R004

##### [学会発表](計53件)

1. 八田茂之, 上野敏幸, 山田外史, "電池フリーリモコンの実用化に向けた磁歪式振動発電スイッチの電力変換回路の回路シミュレータによる最適設計", 電気学会マグネティクス研究会, MAG13-169, pp.79-85 (2013/12, 金沢)
2. 北翔太, 上野敏幸, 山田外史, "磁歪式振動発電の電気・機械結合係数および発電効率の向上", 電気学会マグネティクス研究会 MAG-13-094, pp 51-56(2013/10, 金沢)
3. 上野敏幸, 河出卓也, 山田外史, "磁歪式振動発電の周波数アップコンバータによる広周波数帯域化", Dynamics and Design Conference 2013, (2013.8.27/福岡)
4. 坂本龍介, 上野敏幸, 山田外史, "L字フレームを用いた磁歪式振動発電デバイスの特性評価", 第21回MAGDAコンファレンス in 仙台講演論文集, pp.451-456, (2012/仙台)

##### [図書](計0件)

##### [産業財産権]

出願状況(計5件)

名称: 発電スイッチ  
発明者: 上野敏幸, 池畑芳雄, 山田外史  
権利者: 金沢大学  
種類: 特許  
番号: 特願 2011-109928  
出願年月日: 平成 23 年 5 月 16 日  
国内外の別: 国内

名称: 発電素子, 及び発電装置  
発明者: 上野敏幸  
権利者: 金沢大学  
種類: 特許  
番号: 特願 2011-203797  
出願年月日: 平成 23 年 9 月 16 日

国内外の別： 国内

名称：発電装置  
発明者：上野敏幸  
権利者：金沢大学  
種類：特許  
番号：特願 2011-265034  
出願年月日：平成 23 年 12 月 2 日  
国内外の別： 国内

名称：発電装置  
発明者：上野敏幸  
権利者：金沢大学  
種類：特許  
番号：特願 2012-155041  
出願年月日：平成 24 年 7 月 10 日  
国内外の別： 国内

名称：発電素子及びこの発電素子の構造を利用するアクチュエータ  
発明者：上野敏幸  
権利者：金沢大学  
種類：特許  
番号：特願 2014 - 53551  
出願年月日：平成 26 年 3 月 16 日  
国内外の別： 国内

取得状況（計 1 件）

名称：発電素子および発電素子を備えた電子  
発明者：上野敏幸，池畑芳雄，山田外史  
権利者：金沢大学  
種類：特許  
番号：特許 4905820  
取得年月日：平成 24 年 1 月 20 日  
国内外の別： 国内

〔その他〕  
ホームページ等

<http://vibpower.w3.kanazawa-u.ac.jp/index.html>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

上野 敏幸（金沢大学・電子情報学系・准教授）

研究者番号：30338256

### (2)研究分担者

山田 外史（金沢大学・環日本海域環境研究センター・教授）

研究者番号：80019786