

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289073

研究課題名(和文) 磁歪式振動発電の高効率・広周波数帯域化による電池フリー無線センサシステムの実用化

研究課題名(英文) Practical application of battery-free wireless sensor system with high efficiency and wide frequency band of magnetostrictive vibrational power generation

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) 12,200,000円

研究成果の概要(和文)：磁歪式振動発電はFe-Ga合金を利用した高出力と高耐久性を特徴とする発電技術である。本研究では、永久磁石の非線形な磁気力の利用や共振周波数の電氣的な制御、デバイスを振動源に直接貼り付けなどの工夫によりデバイスの動作周波数の広帯域化を行った。その結果、振動発電で自立的に動作する無線センサシステムの実用性を高めることができた。

研究成果の概要(英文)：Magnetostrictive vibration power generation is a power generation technology characterized by high power and high durability using Fe - Ga alloy. In this study, we widened the operating frequency of the device by devising measures such as utilizing nonlinear magnetic force of the permanent magnet, electrical control of the resonance frequency, and direct attachment of the device to the vibration source. As a result, the practicality of a wireless sensor system that autonomously operates by vibration power generation can be improved.

研究分野：振動発電

キーワード：振動発電 磁歪材料 広帯域化

### 1. 研究開始当初の背景

近年、環境振動から電力を生み出す振動発電が注目されている。この技術が実用化できれば橋や工場設備などの構造物の振動で、ワイヤレスセンサシステムが自立的に動作する。ワイヤレスセンサシステムとは構造物の状態をセンサで計測し、その情報を無線送信するもので、インフラ構造物の保守管理に利用できる。振動発電でこのシステムが自立的に動作することで、電池交換の手間やコストを大幅に削減することができる。一般に振動発電は、共振では大きく振動するが、これを外れるとほとんど振動が発生せず、発電量が著しく低下する問題がある。一方で構造物などの振動は、様々な周波数成分を含み、これらに変化する場合もあるため、発電デバイスの動作周波数の広帯域化が求められる。

### 2. 研究の目的

金沢大学の上野が発明した磁歪式振動発電技術は高出力、低インピーダンス、高耐久性などの優れた特徴を有する。この発電デバイスの動作周波数の広帯域化においては以下の技術が利用できる。

1. 非線形ばねの利用
2. 共振周波数の電氣的な制御
3. 多共振現象の利用
4. 振動体貼り付け型

今回、この中でも特に効果があった1と4に関してデバイスの試作評価、およびこれを電源に動作する無線センサシステムの動作検証を行ったので報告する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 非線形ばねの利用

デバイスの構成を図1上に示す。デバイスはフレームヨークとコイルを巻いたFe-Ga合金から成る平行梁を基本とする。平行梁によりデバイス先端にかかる小さな曲げ力が、素子の長手方向にかかる大きな軸力に変換される。またヨークは連結板が付くC字型となっており、Cの間に永久磁石を配置することで、素子に適度なバイアス磁束を通してている。また連結板先端には永久磁石を取り付けデバイスに非線形の磁気力を作用させる。例えば磁石のN極とS極を対向させて配置し、引力を付加する。また、振動板を適度に長くすることで、デバイスのバネ定数を低下させ、相対的に磁力の影響を増加させる。

発電原理を説明する。図1下のようにデバイスは振動源に固定され、先端が上下に変位し湾曲すると、素子にかかる応力が交番状に変化する。この応力変化から逆磁歪効果により素子内部の磁束密度が変化し、コイルに起電力が生じる仕組みである。本研究では磁石に更にヨークも取り付ける。その効果について、磁石面と、外周のヨークとの間に磁力線が集中するため、ヨークがない場合に比べて吸引力が大きくなる。この効果により、バネの復元力に対する磁力の影響が増加する。

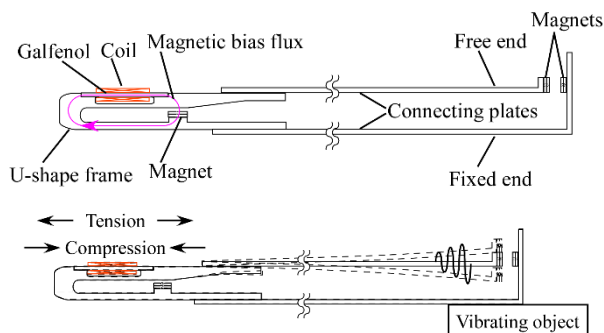


図1 デバイスの構造(上)と発電原理(下)

#### (2) 貼り付け型

発電デバイスの構造を図2上に示す。振動により変形する非磁性の部材の上に、板状の磁歪素子が接着剤等で強固に接合されている。その両端にはヨークが配置され、ヨーク側面には素子に適切な磁気バイアスを与えるように永久磁石を取り付ける。さらにヨークの上を橋渡しするように、コイルを巻いたもう1枚の磁歪素子(先と同形状)が片端のみ固定されている。発電原理を説明する。図2下に示すように、部材が振動により湾曲すると梁上の素子には長手方向に引張または圧縮の応力が交互に作用し、逆磁歪効果で磁束が変化する。磁束はもう一方の素子とヨークによる磁気回路を通してコイルへ鎖交し、この鎖交磁束の時間変化により起電力が発生する。

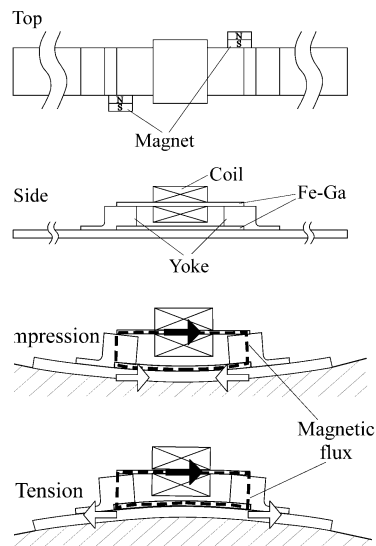


図2 デバイスの構造(上)と発電原理(下)

### 4. 研究成果

#### (1) 非線形ばねの利用

デバイスにおいて磁歪素子は  $6 \times 0.5 \times 12\text{mm}^3$  の鉄ガリウム合金を使用し、コイルは巻き数 1899、 $283\Omega$  を用いた。同じ  $6 \times 3 \times 1\text{mm}^3$  のネオジウム磁石を、バイアス磁束を与えるためと、デバイスに非線形要素を付加するために用いた。このデバイスを加振機に固

定し、正弦波で励振し、発生電圧、振動源の加速度、デバイスの先端変位を測定した。電力の測定にはデバイスのコイルの整合条件となる  $300\Omega$  の抵抗を接続し測定した。加振周波数を  $20\sim 100\text{Hz}$  まで上げた場合と下げた場合で行った。発生電圧と電力の周波数特性をそれぞれ図 3 と 4 に示す。磁石を付加することで、共振のピークが低周波側に傾くことがわかる。具体的には、周波数を下スイープ時に、 $0.5\text{G}$  において、ピークが  $84\text{Hz}$  まで傾き、 $1\text{G}$  では  $67\text{Hz}$  まで傾いた。一方、 $0.5\text{G}$  において磁石がない場合の電圧が、ある場合よりも大きい。これは磁力によりデバイスのバネ定数が増加し、変位が小さくなるためである。電力と半値幅で比較をすると、磁石がない場合の最大電力は  $115\mu\text{W}$  となり、半値幅は  $2.3\text{Hz}$  となった。ある場合は、 $0.5\text{G}$  励振時において電力は  $20\mu\text{W}$  となり、半値幅  $2.8\text{Hz}$  となった。 $1\text{G}$  励振時では、電力は  $96\mu\text{W}$  となり、半値幅は  $11.3\text{Hz}$  となった。これは変位が大きく取れるためである。つまり加速度が大きいと、広帯域効果も大きくなる。

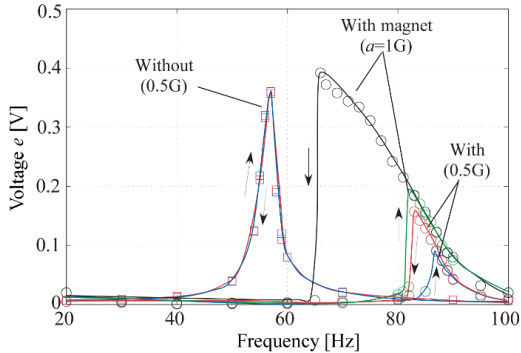


図 3 発生電圧の周波数特性

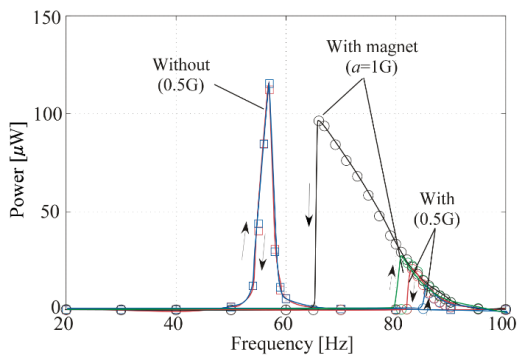


図 4 発生電力の周波数特性

## (2) 貼り付け型

図 5 に示すデバイスを実際に試作した。試作したデバイスの写真を図に示す。鉄ガリウム合金 ( $6.0 \times 16 \times 0.5\text{mm}^3$ )、コイル (線径  $0.08\text{mm}$ ,  $4432$  巻,  $735\Omega$ )、ヨーク (SUS430) からなる発電部をステンレス梁 (SUS304,  $6.0 \times 100 \times 1.0\text{mm}^3$ ) 上に構成した。梁の片端を加振機に固定し、もう一端を地面に強固に設置した治具に固定した状態で、梁を共振させず強制的に変形させた。このとき歪みゲージで磁歪素子の下にあたる部分の梁の歪みを観測しながら、その最大値が  $120\text{ppm}$  で一定

となるような正弦波振動を与えた場合における振動周波数とコイル両端の開放電圧の関係を図 6 に示す。この結果から出力電圧は周波数に比例し、梁の変形に応じて発生することがわかる。また、デバイスに周波数  $118\text{Hz}$  の正弦波振動を与えて歪みの最大値を  $240\text{ppm}$  で一定とし、コイル両端に負荷抵抗を接続して抵抗値と瞬時電力の関係を測定した結果を図 7 に示す。結果より、整合抵抗  $677\Omega$  で最大約  $760\mu\text{W}$  の瞬時電力が得られることが確認できた。

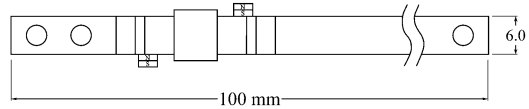


図 5 試作したデバイス

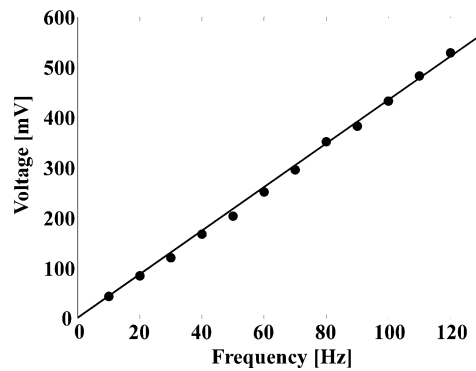


図 6 周波数と発生電圧の関係

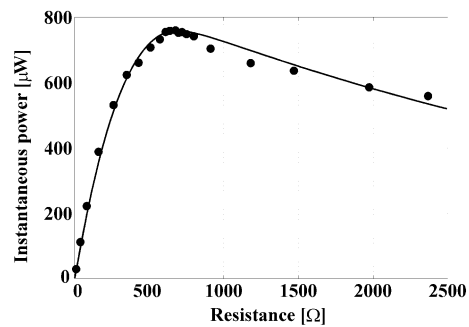


図 7 抵抗と発生電力

デバイスの発生電力を電源に動作する無線センサシステムを試作した。図 8 がその構成で、デバイスの出力電圧を倍電圧整流・蓄電回路と DC-DC コンバータを用いて  $3.3\text{V}$  の直流電圧とし、温度センサの情報を無線モジュールで送信するものである。デバイスの梁に正弦波の振動を与えて  $360\text{ppm}$ ,  $118\text{Hz}$  で変形させたときの出力をシステムに入力した結果、一度のシステム起動で 4 回の無線送信が行えた。図 9 にその際の蓄電電圧と無線モジュールに流れる電流を示す。以上、デバイスの発生電力でシステムが自動的に動作した。

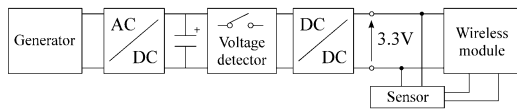


図8 無線センサシステム

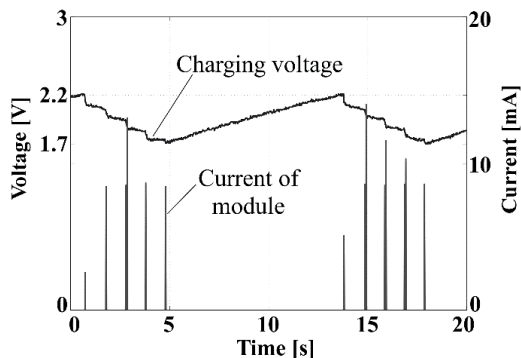


図9 蓄電電圧と無線モジュールの電流

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

1. Toshiyuki Ueno, "Performance of improved magnetostrictive vibrational power generator, simple and high power output for practical applications" J. Appl. Phys. 117, 17A740 (2015)

〔学会発表〕(計11件)

1. 竹中, 上野, "貼り付け型磁歪式振動発電デバイスを利用した電池フリー無線センサシステムの開発", 平成 29 年電気学会全国大会, 2017 年 3 月 15 日, 富山県・富山市
2. 堀田, 上野, "多共振機構を利用した磁歪式振動発電デバイスの広周波数帯域化", 平成 29 年電気学会全国大会, 2017 年 3 月 15 日, 富山県・富山市
3. 古町, 上野, "磁歪式振動発電の永久磁石を利用した非線形振動による広帯域化-磁気力とバネ定数の相対効果の考察-", 平成 28 年度電気関係学会北陸支部連合大会, 2016 年 9 月 13 日, 福井県・福井市
4. 堀田, 上野, 小松崎, "2 自由度系の振動を利用した制振と磁歪式振動発電に関する研究", 平成 28 年度電気関係学会北陸支部連合大会, 2016 年 9 月 13 日, 福井県・福井市
5. 竹中, 上野, "貼り付け方磁歪式振動発電機の実験評価と無線センサシステムへの応用", 平成 28 年度電気関係学会北陸支部連合大会, 2016 年 9 月 13 日, 福井県・福井市
6. 古町, 上野, "磁歪式振動発電における磁力の非線形効果を高める磁極形状とその広帯域効果", 第 28 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, pp.494-497, 2016 年 5 月 20 日, 神奈川県・横浜市

7. T. Ueno, "U-shape magnetostrictive vibration based power generator for universal use, Proc. SPIE 9806, Smart Materials and Nondestructive Evaluation for Energy Systems 2016, 2016 年 3 月 24 日, ラスベガス (米国)
8. S. Furumachi, T. Ueno, "Wide operation frequency band magnetostrictive vibration power generator using nonlinear spring constant by permanent magnet", Proc. SPIE 9806, Smart Materials and Nondestructive Evaluation for Energy Systems 2016, 2016 年 3 月 24 日, ラスベガス (米国)
9. 古町, 上野, 山田, "磁歪式振動発電の永久磁石を利用した非線形振動による広帯域化", 第 27 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, pp.351-354, 2015 年 5 月 15 日, 長崎県・佐世保市
10. 加藤, 上野, 山田, "磁歪式振動発電における共振周波数の電氣的制御のための基礎的検討", 第 27 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, pp.347-350, 2015 年 5 月 15 日, 長崎県・佐世保市
11. 加藤, 上野, 山田, "磁歪式振動発電における共振周波数の電氣的制御の基礎的検証", H27 電気学会全国大会, 2015 年 3 月 26 日, 東京都・世田谷区

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計1件)

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: 2015 年 2 月 25 日  
 国内外の別: 国内

○取得状況 (計0件)

〔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 (Ueno Toshiyuki)

金沢大学・理工研究域電子情報学系・

准教授

研究者番号: 30338256

(2)研究分担者

山田 外史 (Yamada Sotoshi)

金沢大学・環日本海域環境研究センター・連  
携研究員

研究者番号： 80019786

小松崎 俊彦 (Komatsuzaki Toshihiko)  
金沢大学・理工研究域機械工学系・教授  
研究者番号： 80293372