

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 27 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420925

研究課題名(和文) 磁歪材料を用いた低周波振動対応型環境発電における設計指針の標準化

研究課題名(英文) Establishment of Design Methodology of a Low-frequency Energy Harvesting System Using Magnetostriction Material

研究代表者

山本 佳男 (YAMAMOTO, YOSHIO)

東海大学・工学部・教授

研究者番号：20272114

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：今回の研究において、超磁歪材料に付加する最適な予荷重は8MPaであることがわかった。さらに、アルミコイルの採用は軽量化の効果が大きく発電性能も銅コイルと比較して20～30%減にとどまることが判明したため、用途次第ではアルミコイルの導入も利点が見込まれることがわかった。ただし製造コストの点では検討を要する。なお、閉磁路と開磁路の差異については、明確な有意差は認められなかった。当初は、閉磁路の方が磁力線を閉じ込める効果により、開磁路よりも発電に貢献すると予想していたが、実験結果を見る限り明確な差はない、この点については、更なる実験により検証を行う予定である。

研究成果の概要(英文)：In this research, it was verified that the optimal prestress for giant magnetostrictive material is 8MPa. It also was found that a use of aluminum coil is quite effective from the viewpoint of weight saving though it decreases a produced electric power by 20-30%. We also made comparisons in terms of a magnetic circuit, namely comparisons between a closed circuit and open circuit. We expected that a generator with the former circuit should result in a better performance than that with the latter due to a better magnetic containment effect of the former configuration. However, we did not get a clear evidence endorsing the expectation. It will require further investigation in future.

研究分野：ロボット工学

キーワード：磁歪材料 環境発電 振動発電 エナジーハーベスト

1. 研究開始当初の背景

近年、環境発電や再生エネルギーという用語が頻出するが、発電量やエネルギーの規模に応じてシステム規模や用途が大きく異なる。大規模なところでは、太陽光、風力、地熱、バイオマス発電などがあり、小規模な事例としては、圧電式、静電式、電磁誘導式、磁歪式発電がある。エネルギー源については、大規模発電の場合は発電方法の名称がそのままエネルギー源を表すが、小規模発電では多くの場合、機械的な振動エネルギーを直接または間接的に電気エネルギーに変換する方式を用いている。古くは電磁誘導式が有名であり、コイルの中を鉄芯が移動することで誘導電流を簡単に選られるが極めて効率が悪く実用には適さない。他の開発事例として圧電方式があり、スポーツスタジアムや駅の改札に埋設された発電床の上で、観戦客や通勤客が床を踏み力を利用して発電するシステムが報告されている。主なメリットは簡便性とコンパクト性にあるが、発電式には2つの不可避的な問題点が存在する。ひとつは低いエネルギー密度(≒発電効率)、もうひとつは耐久性である。材料のエネルギー密度が低い上に、インピーダンスが高くほとんど電流が流れないため蓄電が難しく、また使用開始直後から材料の劣化が始まり、時間と共に発電性能が単調的に低下していく。

一方で磁歪式発電も原理的には古くから知られているが、通常の磁歪材料では変換効率が低く実用的な発電は難しいとされてきた。1980年代に入って超磁歪材料(Terfenol-d)と呼ばれ、条件を整えば常温で2000ppmもの磁歪を示す材料が登場し、正磁歪現象を利用したアクチュエータの開発が多数試みられた。その一方で、逆磁歪現象(Villari効果)の応用は、材料の使用条件や対費用効果的な観点より一部のセンサや発電装置に限られている。これまで、正磁歪の用途開発が先行しながら逆磁歪の利用が遅れた理由としては、エネルギー密度の高さを効果的に利用するための使用条件(バイアス磁界、予荷重、磁気回路構成)が経験と勘に頼る部分が多く、誰もが利用できるレベルまで知見が整理されていない点が挙げられる。さらには環境発電や再生利用エネルギーに対する認知度やニーズの低さも一因と考えられる。

2. 研究の目的

本研究は環境発電のひとつである振動発電に着目し、振動源の種類に応じた発電システムの設計指針の標準化を行うことを目的とする。振動エネルギーの変換媒体としてエネルギー密度および耐久性の両方において圧電等の従来材料に優る超磁歪材料を使用する。具体的には、振動源の性質(周波数、振幅、波形、パワー)を設計パラメータとして、高いエネルギー変換効率の実現に必要な駆動条件(バイアス磁界、予荷重および磁気回路構成)

を探索し、異なる振動源に対し最適な振動発電システムを構築するための設計指針を導くことを目的とする。研究期間中に典型的な数種類の異なる振動源(公共交通機関、高層ビル、人間の日常動作)を想定した発電システムの試作開発・実験・評価を通じて目的を達成する

本研究の主たる学術的貢献は、これまで顕著な特性は知られながらもピンポイント的な開発に留まっていた超磁歪材料(特にTerfenol-D)について、低周波周波数帯の振動発電にターゲットを絞り、異なる振動の種類に適用可能な最適設計条件を体系づける点にある。これにより材料を取り巻く周辺要素(コイル、バイアス磁石、磁気回路、予荷重機構等)の設計過程を簡略化することができ、世の中の様々な振動源(都市交通、橋梁、高層ビル、エンジン、潮流、動態運動等)を利用した振動発電の用途開発に拍車がかかることが期待される。

3. 研究の方法

本研究で用いる超磁歪材料(Terfenol-D)の主な仕様をTable 1に示す。発電機として組み立てた状態の外観をFig. 1に、内部構造を表す断面模式図をFig. 2に示す。

Table.1 Terfenol-Dの主な材料特性

	Terfenol-D
Magnetostriction	1200-2000ppm
Young's Modulus	25-35GPa
Curie Temperature	380°C
Tensile Stress	28MPa
Energy density	14~25kJ/m <sup>3</sup>

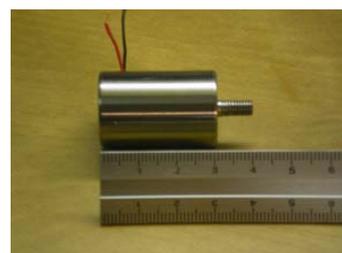


Fig.1. 磁歪発電機の外観

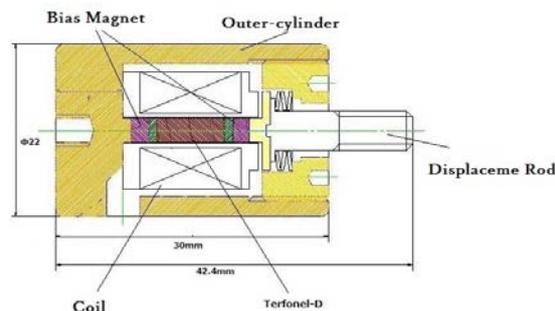


Fig.2 磁歪発電機の断面模式図

Fig. 1 に示す発電機はこれまでの研究で用いた従来タイプであり、本研究ではこの従来型発電機を用いて重要な駆動条件のひとつである予荷重に関する考察を与えると共に、より軽量かつコンパクトな新型の発電機を設計し、ソレノイドコイルや磁気回路の最適化を目指して評価検討を行う。

新型の発電機として考案するのは、ランニングシューズに内蔵する横置き型の発電機 (Fig. 3) で、踏圧によって発電し同じくシューズに内装する GPS に必要な電力を供給することを想定している。

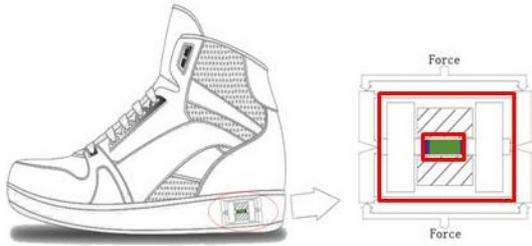


Fig. 3 シューズ内蔵型発電機

前述 (Fig. 1) の発電機と異なり横置きにすることから、片軸構造ではなく両軸構造として両端部より均等な押圧力を磁歪材料が受けることが望ましい。両軸タイプのコアユニットの外観を Fig. 4 に示す。さらに発電機の磁気回路が発電性能に及ぼす影響を調べるため、開磁路構造 (Fig. 4) および閉磁路構造 (Fig. 5(a)) の2種類を比較する。

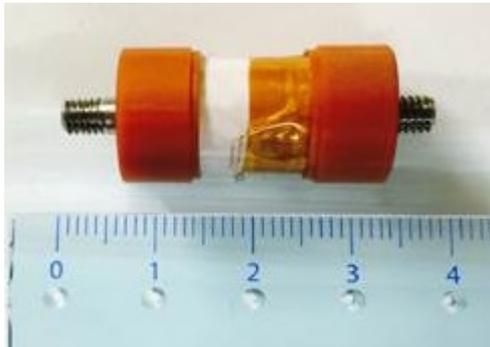


Fig. 4 両軸型発電機 (開磁路タイプ)



Fig. 5 両軸型発電機 (閉磁路タイプ)

ユニットの発電性能と併せて重要な点がユニットの軽量化である。ソレノイドコイルは通常銅線を用いるが、アルミ線を用いるとコイル重量が約3分の1になるため、そのコイル寸法および巻数が同じものを銅、アルミの2種類について比較する。コイル巻数ともに1064巻、コイル重量は銅が45.0g、アルミが13.6gである。

#### 4. 研究成果

5.45gの鋼球を50mmの高さから発電機の頭頂部に自由落下させたときの電圧および電流の出力波形を Fig. 6 に示す。同図より瞬間最大電圧および電流はそれぞれ26.8Vと58mAである。

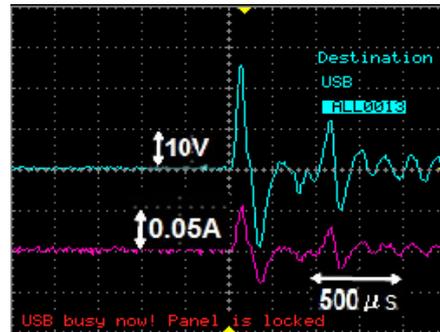


Fig. 6 鋼球衝突による発電波形の例

次に超磁歪材料に与える予荷重と発電量の関係を Fig. 7 に示す。Fig. 7 より予荷重8MPaにおいて発電量が最大値となっていることが確認された。

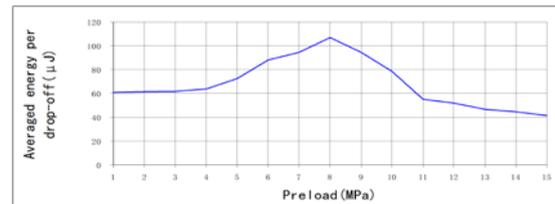


Fig. 7 予荷重と瞬間最大発電量の関係

開磁路タイプ、銅コイルの組み合わせにおける鋼球の落下高さおよび回路抵抗値を2通りに変化させた場合の瞬間最大電圧と電流を Table 1 に、そしてそのときの計測波形を Fig. 8 に示す。

Table 1 発生電圧・電流 (開磁路, 銅コイル)

	最大電圧[V]	最大電流[A]	瞬間最大電力[W]
h=100[mm](150Ω)	19.0	0.125	2.375
h=200[mm](150Ω)	22.0	0.175	3.850
h=100[mm](450Ω)	38.0	0.098	3.724
h=200[mm](450Ω)	48.0	0.122	5.856

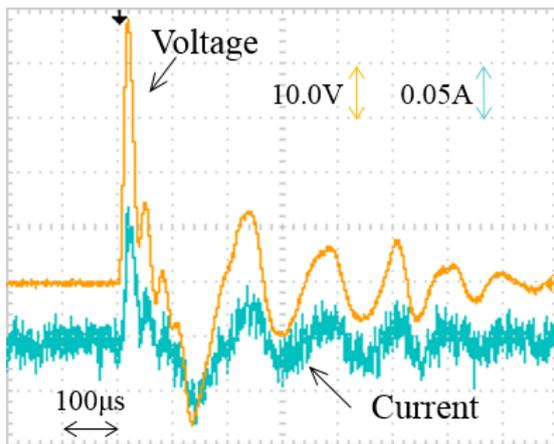


Fig. 8 計測波形例 (開磁路, 銅コイル)

同様に開磁路タイプ, アルミコイルを組み合わせた場合の瞬間最大電圧と電流を Table 2 に, 閉磁路・銅コイルの結果を Table 3, 閉磁路・アルミコイルの結果を Table 4 に示す.

Table 2. 発生電圧・電流 (開磁路, アルミ)

	最大電圧[V]	最大電流[A]	瞬間最大電力[W]
h=100[mm](150Ω)	16.0	0.121	1.936
h=200[mm](150Ω)	18.5	0.154	2.849
h=100[mm](450Ω)	32.1	0.096	3.082
h=200[mm](450Ω)	45.8	0.120	5.496

Table 3. 発生電圧・電流 (閉磁路, 銅)

	最大電圧[V]	最大電流[A]	瞬間最大電力[W]
h=100[mm](150Ω)	14.0	0.100	1.400
h=200[mm](150Ω)	18.0	0.121	2.178
h=100[mm](450Ω)	34.0	0.091	3.094
h=200[mm](450Ω)	42.0	0.110	4.020

Table 4. 発生電圧・電流 (閉磁路, アルミ)

	最大電圧[V]	最大電流[A]	瞬間最大電力[W]
h=100[mm](150Ω)	11.0	0.090	0.990
h=200[mm](150Ω)	18.0	0.151	2.718
h=100[mm](450Ω)	30.0	0.082	2.460
h=200[mm](450Ω)	40.0	0.100	4.000

今回の実験により, アルミコイルの採用は軽量化の効果が大きく発電性能も銅コイルと比較して 20~30%減にとどまることが判明したため, 用途次第ではアルミコイルの導入も利点が見込まれることがわかった. ただし製造コストの点では検討を要する. なお, 閉磁路と開磁路の差異については, 明確な有意差は認められなかった. 当初は, 閉磁路の方が磁力線を閉じ込める効果により, 開磁路よりも発電に貢献すると予想していたが, 実験結果を見る限り明確な差はない, この点については, 更なる実験により検証を行う予定である.

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① A.I. Cahyadi, Y.Yamamoto, A Robust Feedback Gains for Linear Systems with Multiple Delay Components, *Proceeding of IEEE 2013 International Conference on Computer, Control, Informatics and Its Applications*, 2013.
- ② Xiaotian Ni, Y.Yamamoto, Harvesting Electric Power from Kinetic Energy, *Proceedings of MJIT-JUC Joint International Symposium*, 285-288, 2013.
- ③ Xiaotian Ni, Tianyu Fan, Y. Yamamoto, Magnetostriction Energy Harvester Using Mechanical Vibrations, *Proceedings of 2014 MJIT-JUC Joint International Symposium*, 2A3-3, 2014.
- ④ Tianyu Fan, Y. Yamamoto, Vibration-induced Energy Harvesting System Using Terfenol-D, *Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 2319-2324, 2015.
- ⑤ T. Saimaru, Tianyu Fan, Y. Yamamoto, Vibration Energy Harvester Based on Inverse Magnetostrictive Transduction *Proceedings of 2015 Malaysia-Japan Joint International Conference*, 2015.

[学会発表] (計 2 件),

- ① 倪, 晝間, 山本, 振動エネルギーを用いた磁歪発電システムに関する研究, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 in Tsukuba, 2013.
- ② 加藤, 鈴木, 田口, 加藤, 山本, 超小型電気自動車における超磁歪アクチュエータを使用した能動遮音の基礎研究, 日本機械学会関東支部第 21 期総会講演会, 2015.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山本 佳男 (YAMAMOTO YOSHIO)

東海大学・工学部・教授

研究者番号: 20272114