

## 磁歪材料を用いた小型振動発動素子の特性評価

著者	上野 敏幸, 山田 外史
著者別表示	Ueno Toshiyuki, Yamada Sotoshi
雑誌名	日本AEM学会誌
巻	20
号	1
ページ	168-173
発行年	2012
URL	<a href="http://doi.org/10.24517/00049215">http://doi.org/10.24517/00049215</a>



## 磁歪材料を用いた小型振動発電素子の特性評価

## Characteristics of Miniature Energy Harvester using Magnetostrictive Material

上野 敏幸<sup>\*1</sup> (正員), 山田 外史<sup>\*1</sup> (正員)

Toshiyuki UENO (Mem.), Sotoshi YAMADA (Mem.)

We propose energy-harvesting device using an iron-gallium alloy (Galfenol), which is capable of generating electrical energy from ambient vibrations. The device consists of two beams of Galfenol combined with iron yokes, coils, and a bias magnet. A bending force applied at the tip of the cantilever yields a flux increase due to tensile stress in one beam, and a flux decreases in the other due to compression. The time variations of the flux generate a voltage on the wound coils. This energy harvesting technology has advantages over conventional types, such as those using piezoelectric materials, with respect to size, and efficiency, and it is extremely robust and has low electrical impedance. In addition, the structure using two beams only needs low mechanical force to provide sufficient stress to change the magnetization. A miniature prototype using 1.0 mm x 0.5 mm by 10 mm beams of stress-annealed Galfenol with a 312-turn coil was fabricated, and we tested and verified that a maximum power of 2.0 mW at a forced vibration of frequency of 395 Hz was achieved. The energy conversion efficiency measured by free vibration was observed at more than 15 %.

**Keywords:** Energy harvester using ambient vibration, Iron-gallium alloy, Inverse magnetostrictive effect.

## 1 緒言

身近な振動で発電を行う技術が注目を浴びている。振動発電でセンサと無線通信に必要な電力がまかなえると、電源の要らないワイヤレスセンサシステムが実現できる[1]。このシステムにおいて電池や有線による電力供給が不要になるメリットは大きく、配線や電池交換にかかる手間やコストが大きく低減し、その応用は自動車のタイヤ空気圧モニタシステムや電池の要らないリモコン、橋梁や道路などインフラ設備の監視システムなど多岐にわたる。以上の背景から、振動発電を実用化すべくこれまで様々な研究開発が行われてきた。従来の振動発電の原理は、圧電素子[2, 3], エレクトレット (静電気) [4], 可動磁石 (電磁誘導) [5, 6] に大別される。しかし、現在まで実用化に至る決め手がないのが実情である。圧電素子は脆性材料で曲げや衝撃に弱く、発生する電圧は高いが、容量性負荷のため低周波数で内部抵抗が大きく、負荷で取り出せる電力が小さくなる欠点がある。磁石を振らせるタイプにおいては、0.3 T程度の鎖交磁束の変化が磁石の近傍のコイルで発生するのみで、発電量の増加には大振幅かつ高周波数で移動子 (磁石) を振らせる必要がある。

我々は、磁歪材料を用いた振動発電技術を提案し、その実用化を目指している。中でも鉄ガリウム合金 (Galfenol)[7]は米国海軍研究所で開発された鉄系の磁歪材料で、その大きな特徴は“延性材料”であること、つまり外力に対して非常に強く、良好な加工性を有する[8, 9]。筆者は、この材料のもつ大きな逆磁歪効果に着目している。逆磁歪効果とは応力により磁化が変化する効果で、Galfenol においては最大 1 T 以上も磁束密度が変化する[10]。逆磁歪効果を利用した発電としては超磁歪材料 (Tb-Dy-Fe 合金) に軸力を加えるタイプ [11]があるが、提案する発電素子は、シンプルな構造で格段に小さく、より小さい力の微小振動で発電を行うことができる。本稿では、発電の基本原則から従来の技術に対する優位性、その検証のため行った発生電圧や発生電力、エネルギー変換効率など測定結果に関して報告する。

## 2 構成と発電原理

発電素子の構成を Fig. 1 上に示す。素子はコイルを巻いた 2 枚の磁歪板 (Galfenol,  $\text{Fe}_{81.6}\text{Ga}_{18.4}$ , 長手方向に磁化容易軸) を平行にならべ、その両端をヨークに強固に接合した平行梁に、バイアス磁界を付加する永久磁石 (バックヨークあり) が付いたものである。ヨークの一方は固定子、他方は振動する移動子になる。また磁石と 2 枚の磁歪板は閉磁路を構成しており、磁

連絡先: 上野 敏幸, 〒920-1192 石川県金沢市角間町, 金沢大学理工研究域電子情報学系,  
e-mail: ueno@ec.t.kanazawa-u.ac.jp

<sup>\*1</sup> 金沢大学

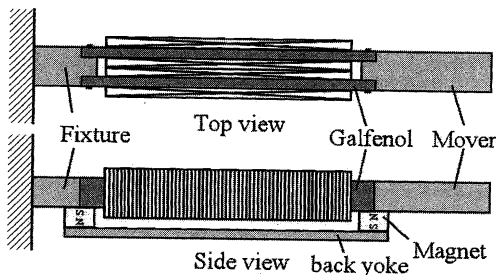


Fig. 1 Configuration of device.

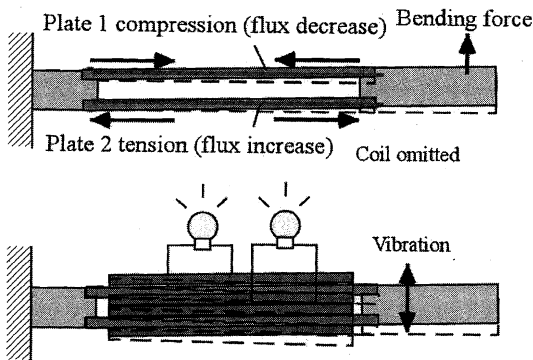


Fig. 2 Principle (top: forces applied to Galfenol plates by bending force, bottom: energy generation by vibration).

石の起磁力で、磁歪板には、同一方向に適度なバイアス磁束が通っている。ここで、例えば Fig. 2 上のように一端を固定し、他端の移動子に上方向に力を作用すると、磁歪板で構成される平行梁は曲げ変形を生じ、長手方向に、一方の磁歪板(Plate 1)には圧縮力、他方の板(Plate 2)には引張り力が作用する。逆磁歪効果を考慮すると、この引張りと圧縮力で板内部の長手方向の磁束は板 1 で減少し、板 2 で増加する。Fig. 2 下のように移動子を上下に振動させ、作用する力を交番状に変化させると、板内部の応力、ひいては磁束が周期的に増減し、この時間変化によりコイルに誘導電圧が発生する。

発生電圧の簡単な定式化について述べる。一般に磁歪材料の磁束密度  $B_m$  は次式で与えられる。

$$B_m = \mu_T H_m + d_H T_m \quad (1)$$

$H_m$ ,  $\mu_T$ ,  $d_H$ ,  $T_m$  は磁界, 透磁率 (一定応力下), 磁歪定数 (一定磁界下), 応力である。(1)式から板内部の磁束  $\Phi_m$  は次式のようにになる。

$$\Phi_m = \mu_T A_m / L_m [H_m L_m + d_H A_m T_m] = P_m U_m + d_H A_m T_m \quad (2)$$

$A_m$  と  $L_m$  は磁歪板の断面積と長さ,  $P_m$ ,  $U_m$  はパーミアンス, 作用する起磁力である。つまり磁束  $\Phi_m$  は右辺第1

項のバイアスと第2項の応力で変化する磁束の和と考えられる。漏れ磁束を無視すると発電素子の等価回路は Fig. 3 のようになり、回路中の2枚の磁歪板を通る磁束  $\Phi_{m1}$ ,  $\Phi_{m2}$  は、永久磁石の起磁力  $U_p$  により同方向に流れるバイアス磁束と、互いに逆方向で、応力  $T_m$  と  $-T_m$  で変化する磁束源の和として Fig. 3 のようにモデル化される。コイルの巻き数を  $N$  とすると、移動子が振動することで  $T_m$  の時間変化が生じ、電圧  $V$  が生じることから、

$$V = -N \frac{d\Phi_m}{dt} = -d_H A_m N \frac{dT_m}{dt} \quad (3)$$

となる。2 個のコイルで発生する電圧は、大きさが同じで、向きが逆である。

提案する平行梁構造では応力の加え方に特徴がある。ここで本方式の優位性について、従来の磁歪材料を用いた振動発電と比較して述べる。Fig. 4 は、超磁歪材料(Tb-Dy-Fe 合金)の逆磁歪効果を用いた一般的な発電デバイス[11, 12]の構造で、磁歪ロッドに長手方向の軸力に加え、その応力による磁化の時間変化でコイルに電圧を発生させる。この方式では、大きな軸力 ( $A_m T_m$ ) の付加が必要で、それを均一に加えるための機構が複雑で大がかりになる。また効率よく発電が行われる一次の縦共振周波数が kHz オーダと一般的に高く、環境振動を利用するには使いづらい欠点がある。

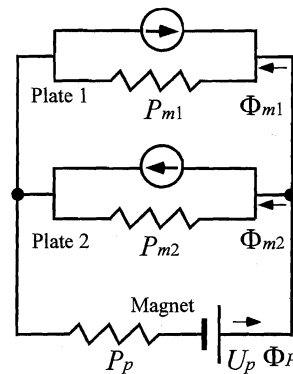


Fig. 3 Equivalent magnetic circuit.

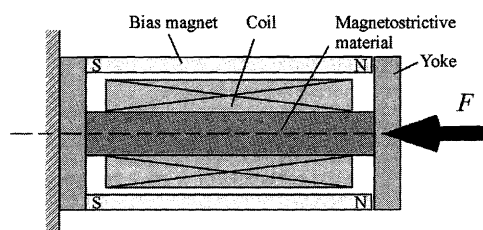


Fig. 4 Conventional magnetostrictive energy harvester.

一方、提案する平行梁では、小さな力で2枚の磁歪板に大きな軸力を加えることが出来る。例えば、Fig. 5 は、後述する素子の寸法において移動子先端に 1N の曲げ力を加えた場合の変位(X)と軸方向(Y)の応力の分布を有限要素法で計算した結果である。板内部の軸方向の応力分布は、中央部においてほぼ一様で、板全体で平均 25.8 MPa の圧縮(上)と引張り応力(下)が作用する。Fig. 6 は筆者が以前に測定した Galfenol のバイアス磁界をパラメータとした圧縮応力による磁束密度の変化(逆磁歪効果) [10]で、このデータを参考にし、線形域で磁束密度が変化すると仮定すると、おおよそ 0.35 T の変化が発生することになる。(Fig. 6 の曲線の傾きが磁歪定数  $d_H$  である。) 一方、Fig. 4 の方式において同程度の応力を与えようとする、26 N( $=2A_m T_m$ )もの軸力が必要になる。つまり平行梁構造で機械インピーダンスを変換することで、軸力の 1/20 以下の力で同程度の内部応力の変化を発生させることができる。ここで梁構造にすることで、変位が増幅し効率よく発電を行う曲げ一次共振周波数も、環境振動の周波数範囲の数十~数百 Hz の間に適当な値に設定できる。共振現象や持続的に素子を利用する場合の耐久性や疲労強度において、Galfenol が 400 MPa 以上[14]の高い引張り強度を有していること、また磁石可動やエレクトレット方式のように摺動部がないことから、十分高いと思われる。

電気的な性質に関して、圧電材料やエレクトレットの等価電気回路(機械系との連成を考慮しない)は Fig. 7 左のように、キャパシタ成分により低周波数で内部インピーダンスが高くなり、低インピーダンス負荷  $R$  との整合が取りにくい。つまり発生電圧  $E$  が高くても、その大部分は内部抵抗で取られ、負荷  $R$  の端子電圧が低くなる欠点がある。一方、本方式では、Fig. 7 右のように低周波数でコイルのインダクタンス成分が無視できる。素子の内部抵抗はコイルの純抵抗  $R_i$  のみで、低インピーダンス  $R$  の電気的負荷との整合性がよい。つまり発生した電力を、効率よく負荷で消費したり蓄えたりできる。

素子の温度特性について、Galfenol が 700°C の高いキュリー温度を持ち、摂氏-196 度の極低温から 200 度においてその磁歪特性がほとんど変化しないことを実験により確認している。加えて、素子は熱膨張係数のほぼ同程度の鉄系の材料で構成されているから、温度変化に伴う熱応力の影響も受けにくい。以上のことから、素子は-100°C~150°C の広範囲の温度において、ほとんど性能が劣化せずに使用できるものと思われる。

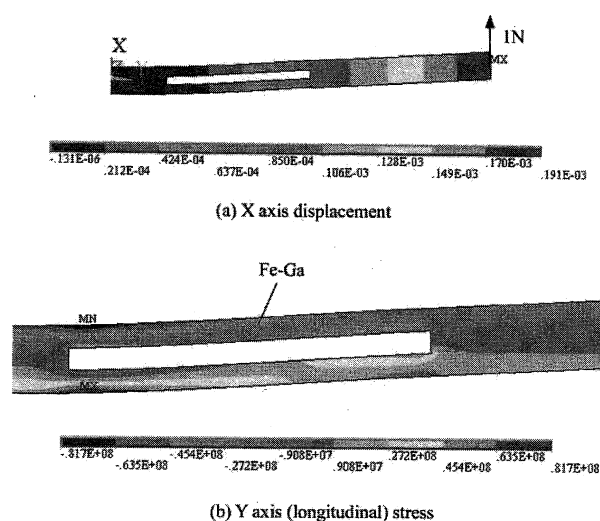


Fig. 5 Deformation of device with bending force of 1N exerted on the mover, results of FEM: X axis displacement (a) and Y axis (longitudinal) stress distribution (b).

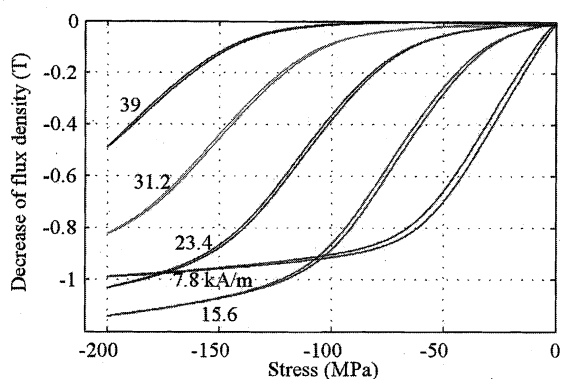


Fig. 6 Decrease in flux density due to compressive stress with parameter of constant magnetic field.

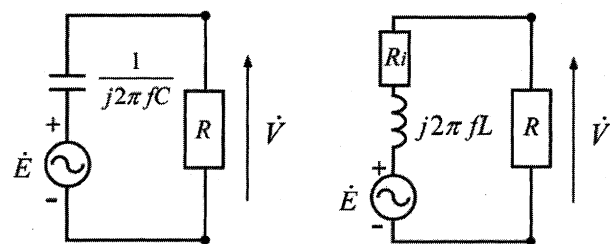


Fig. 7 Equivalent electrical circuit (left : piezoelectric material and electret, and right : magnetostrictive).

### 3 実験

本研究では試作により発電の原理と特徴を検証した。使用したGalfenol( $Fe_{81.6}Ga_{18.4}$ )は、エトリーマ社においてフリースタンドゾーンメルト法[15]で作製されたロッド(直径1/4inch)に、焼きなまし処理を施したものである[16]。この熱処理で材料内に適度な圧縮応力が残

留し、発電に適する引張りと圧縮の応力で磁化が増加および減少する性質が得られる。Fig. 8に素子の写真、Fig. 9に寸法と実験の概要を示す。磁歪板の寸法は $1 \times 0.5 \times 10 \text{ mm}^3$  (0.04g)で、これらを0.5 mm幅を空けてヨーク (鉄) に接合した。ロッドから板への形状加工はワイヤ放電と切削加工により行った[17]。また接合の強度を確保するため、磁歪板とヨークの接合は0.5 mm径の鉄ロッドによるピン留めと、エポキシ接着剤による化学接合を併用した。またヨークには真鍮の固定子と、アルミの移動子(0.64 g)を接合した。磁歪板には線径0.05 mm, 312ターン, 12  $\Omega$ の発電用コイルを巻いた。バイアス用の磁石 (図面では省略) は、直径2 mm長さ2 mmのNd-Fe-B磁石 (残留磁束密度1.2 T, リコイル透磁率1) を用いた。測定は、Fig. 9左下に示すように素子を加振機により共振周波数で加振した場合と、Fig. 9右下のように片端固定し、移動子に過渡的な力を与え自由振動させた場合について行った。移動子の変位 (端部から1 mmの位置) はレーザ変位計、また発生電圧は1M $\Omega$ のプロープにて計測した。

Fig. 10は一次の曲げ共振周波数の393 Hzで、素子を

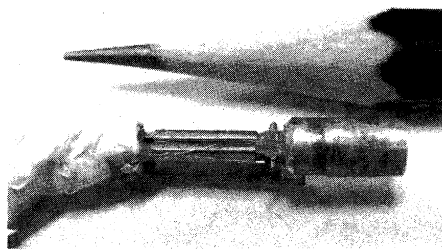


Fig. 8 Fabricated device.

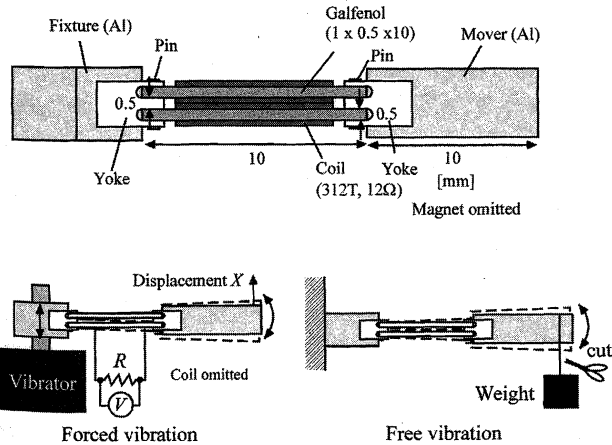


Fig. 9 Dimensions (top) and experimental setup (bottom).

強制振動させたときの移動子の変位、発生電圧、磁束密度の変化の時間応答である。ここでは、負荷をつなげない (開放) と30  $\Omega$ の抵抗をつなげた場合の比較を行った。結果から、変位の正・負で磁歪板が湾曲すると同時に、内部の磁束密度が正負に変化し、その磁束の時間微分に比例して電圧が発生しているがわかる。磁束密度はおおよそ $\pm 0.5 \text{ T}$ で変化し、この時、正負で1.5 V (開放) の最大電圧が発生した。30  $\Omega$ の負荷をつなげた場合、最大電圧は0.6 Vになり、瞬時電力として最大12 mWを確認した。開放の場合に比べ移動体の振幅が減少しており、つまり機械エネルギーの一部が電気エネルギーに変換されていることがわかる。我々は、論文[18]において、磁歪板の各部分における移動子の変位に対する磁束密度の変化をFig. 11のように測定している。板全体で、一方向の様な磁束の変化が発生しており、つまり板には一様な引張りもしくは圧縮の応力が付加されているものと推測される。

ここで、式(3)から単純に周波数393 Hzで磁束密度が $\pm 0.5 \text{ T}$ の正弦波で変化したと仮定すると発生電圧は

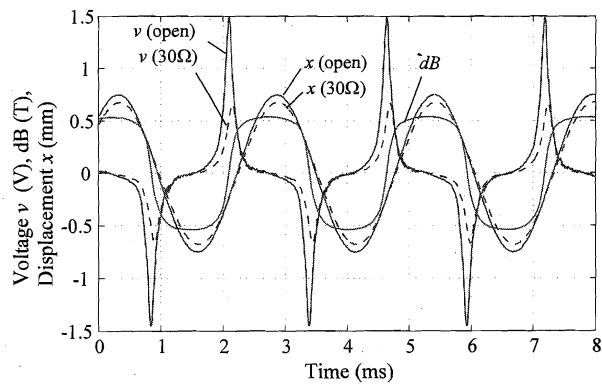


Fig. 10 Time response at forced vibration (frequency of 395 Hz), comparison of open circuit and 30  $\Omega$  connected.

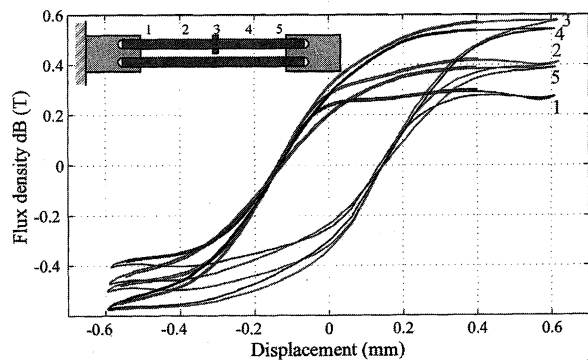


Fig. 11 Relationship between displacement of mover and flux density variation with parameter of pick-up location.

0.39 Vになる。実験で1.5 Vとこれより大きな電圧が発生している理由は、Fig. 11に示すよう磁束はおおよそ±0.3 mmの範囲で線形に変化し、それ以上の変位では飽和すること、つまり正弦波と仮定した場合に比べ磁束密度の時間変化が大きくなっていると考えられる。また0.3 mmは、Fig. 5のFEM解析とFig. 6の物性値から概算した0.5 Tの磁束密度を発生させるために必要な

先端の変位0.27 mmに近い値であり、つまり式(3)の発生電圧の定式化がほぼ妥当であることがわかる。

次に負荷抵抗Rをパラメータとし、平均発生電力Pを測定したのがFig. 12である。ここでPはRの瞬時電圧vを測定し、次式により算出した。

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{v^2}{R} dt \quad (4)$$

Tは振動の周期である。おおよそコイルの抵抗と同程度のRをつなげた整合条件において2.0 mWの最大電力が取り出せることが確認できた。この場合の発生電力の体積密度（コイルやヨークも含めた体積で算出）は10 mW/cm<sup>3</sup>以上で、動作周波数が異なるために単純な比較は出来ないが、これは圧電素子(1mW/cm<sup>3</sup>)[19]や、エレクトレットの10倍以上の値である。

次に自由振動にて、エネルギー変換効率ηを評価した。ηは入力機械エネルギーをW<sub>i</sub>、出力電気エネルギーをW<sub>o</sub>として実験から次式で算出した。

$$\eta = W_o/W_i = \int \frac{v^2}{R} dt / \frac{1}{2} F_0 X_0 \quad (5)$$

W<sub>i</sub>は、励振のために与えた初期の弾性エネルギーで、初期変位X<sub>0</sub>と力F<sub>0</sub>から求まる。W<sub>o</sub>は、抵抗Rのジュール損の時間積分である。Fig. 13は移動子に50 gの錘を糸でつるし、糸を切り自由振動を発生させた時の変位と発生電圧の応答である。電圧は、振動開始時の0.5 Vをピークに、変位と同様に減衰（減衰係数0.081）した。W<sub>o</sub>は1.2×10<sup>-5</sup> J、W<sub>i</sub>は8.9×10<sup>-5</sup> Jで、ηは0.14(14%)となった。またピーク電力は8.3 mW、平均電力は0.12 mW(1.2×10<sup>-5</sup> J/0.1 s)であった。Fig. 14は錘の質量により励振条件を変えW<sub>i</sub>とW<sub>o</sub>の関係を測定した結果である。入出力のエネルギーの関係はほぼ線形で、エネルギー変換効率ηは15%と算出される。実際には、コイルの抵抗でも同時に同程度のジュール損失が発生しており、これも考慮すると変換効率は2倍の30%程度と推測される。

#### 4 結言

鉄系磁歪材料(Galfenol)を用いた振動発電について、従来方式に対する特徴を明らかにするため、小型の発電素子を試作し評価を行った。その結果、磁歪材料の体積0.01 cm<sup>3</sup>の使用で、393 Hzの振動で、平均で2 mWの高い電力を発生すること、これが30 Ω程度の低インピーダンス負荷で効率よく取り出せることを確認した。

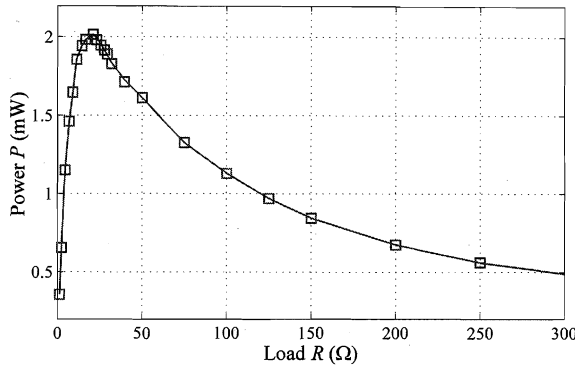


Fig. 12 Relationship between load R and power P.

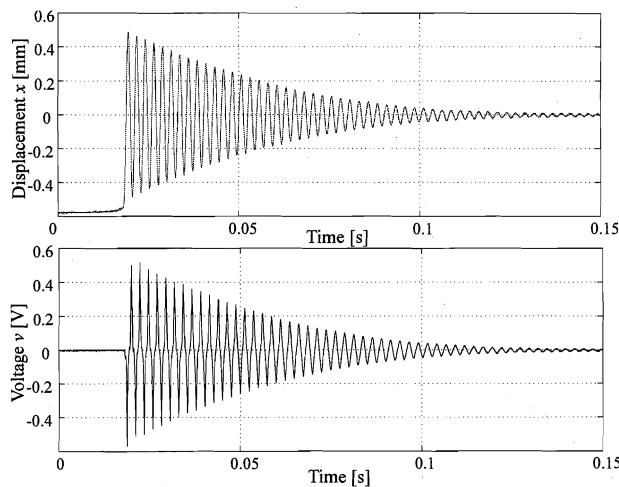


Fig. 13 Time response at free vibration, displacement (top) and voltage (bottom).

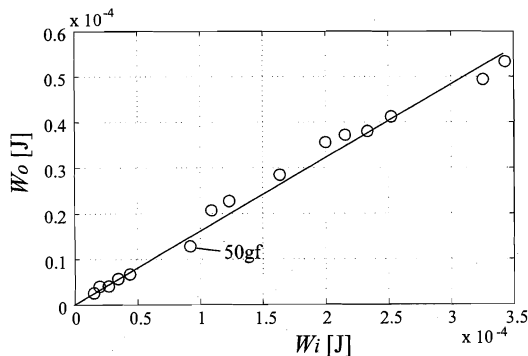


Fig. 14 Relationship between output electrical energy and input work.

また自由振動の測定により、機械から電気エネルギーへの変換効率が15%以上あることを確認した。これらは提案する平行梁構造により、加振力が発電に必要な軸力として磁歪板に効率よく付加される結果であると考えられる。今後は、発生電力の周波数依存性や温度特性、耐久性（疲労強度）など、実使用を想定した評価を行い、その結果をもとに性能の向上を図る。また環境にある20 Hz以下の低周波数振動で発電を行うための機械インターフェース、また発生した交流電力を効率よく利用するための電気・電子回路の開発を行う。また、現在、設計や解析のため汎用有限要素プログラムの利用も検討している。以上の研究成果を応用し、タイヤの空気圧モニタシステムや電池の要らないリモコン、工場設備や橋梁のワイヤレスセンサシステムなどの実現を目指す予定である。

#### 謝辞

本研究は、財団法人村田学術振興財団の研究助成により行われた。またGalfenolのサンプルはエトリーマ社より提供頂いた。

(2011年3月31日受付, 2011年9月18日再受付)

#### 参考文献

- [1] 日経エレクトロニクス, 1月10日号, 83-90, 2011.
- [2] J.L. González, A. Rubio and F. Moll, Human powered piezoelectric batteries to supply power to wearable electronic devices, *Int. J. Soc. Mater. Eng. Resour.* Vol. 10, pp. 33-40, 2002.
- [3] M. Ferrari, V. Ferrari, M. Guizzetti, B. Ando, S. Baglio, and C. Trigona, Improved energy harvesting from wideband vibrations by nonlinear piezoelectric converters, *Sen. and Act. A*, Vol. 162, pp. 425-431, 2010.
- [4] Sessler, G. M., Electrets, 3rd Edition, Laplacian Press, 1998.
- [5] T. Buren, and G. Troster, Design and optimization of a linear vibration-driven electromagnetic micro-power generator, *Sen. and Act. A*, Vol. 135, pp. 765-775, 2007.
- [6] C.R. Saha, T. O'Donnell, N. Wang and P. McCloskey, Electromagnetic generator for harvesting energy from human motion, *Sen. and Act. A*, Vol. 147, pp. 248-253, 2008.
- [7] T. Ueno, S. Yamada, Micro energy harvester using iron-gallium alloy, Book of abstract, 55th MMM conference, 2010.
- [8] A. E. Clark, M. Wun-Fogle, and J. B. Restorff, Magnetostrictive Properties of Body-Centered Cubic Fe-Ga and Fe-Ga-Al Alloy, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 37, pp. 3238-3240, 2000.
- [9] A. E. Clark, M. Wun-Fogle, J. B. Restorff, Magnetostrictive property of Galfenol alloys under compressive stress, *Mater. Trans.*, Vol. 43, pp. 881-886, 2002.
- [10] T. Ueno, T. Higuchi, Magnetic Circuit for Stress-Based Magnetic Force Control Using Iron-Gallium Alloy, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 43, pp. 2594-2596, 2007.
- [11] H. Eda, H. Nakamura, Y. Yamamoto, Development of the Giant Magnetostriction Electric Generator Prototype : Application of the Reverse Magnetostriction Effect, *Jpn. Soc. Precision. Eng.* Vol. 63, pp. 706-710, 1997.
- [12] Staley, Mark E., Flatau, Alison B. Characterization of energy harvesting potential of Terfenol-D and Galfenol, *Proceedings of the SPIE*, Vol. 5764, pp. 630-640, 2005.
- [13] Lei Wang and F. G. Yuan, Energy harvesting by magnetostrictive material (MsM) for powering wireless sensors in SHM, *SPIE Smart Structures and Materials & NDE and Health Monitoring*, 14th International Symposium, 2007.
- [14] R. A. Kellogg, A. M. Russell, T. A. Lograsso, A. B. Flatau, A. E. Clark, M. Wun-Fogle, Tensile properties of magnetostrictive iron-gallium alloy, *Acta Materialia*, Vol. 52, pp. 5043-5050, 2004.
- [15] E. Summers, T. A. Lograsso, J. D. Snodgrass, J. Slaughter, Magnetic and mechanical properties of polycrystalline Galfenol, *Proc SPIE Smt. Str. and Mat.*, Vol. 5387 pp. 448-459, 2004.
- [16] M. Wun-Fogle, J. B. Restorff, and A. E. Clark, Magnetomechanical Coupling in Stress-Annealed Fe-Ga and Fe-Al Alloys, *IEEE, Trans. Magn.*, Vol. 42, pp. 3120-3122, 2006.
- [17] T. Ueno, E. Summers, and T. Higuchi, Machining of Iron-Gallium for Microactuator, *Sen. and Act. A*, Vol. 137, pp. 134-140, 2007.
- [18] T. Ueno and S. Yamada, Study on Micro-energy Harvesting Device Using Iron-Gallium Alloy, *J. Magn. Soc. Jpn.*, Vol. 35, pp. 88-91, 2011.
- [19] S. Roundy, et al., *J. Comp. Comm.*, Vol. 26, 1131, 2003.