

## 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

## Study on L-Shaped Energy Harvester Using Magnetostrictive Material

坂本 龍介<sup>\*1</sup>, 上野 敏幸<sup>\*2</sup> (正員), 山田 外史<sup>\*2</sup> (正員)

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

We investigate a L-shaped vibrational energy harvesting device using magnetostrictive material (Galfenol) for high output generation and efficiency. Galfenol is ductile magnetostrictive material with large inverse magnetostrictive effect. The device features higher output and efficiency compared with our conventional type. The device is a pair of L-shaped parallel beams consisting of Galfenol plate wound coil and stainless yoke and bias magnet. When a bending force is applied at the tip of the beam, bending moment is exerted on the Galfenol plate which yields uniform axial stress inside plate. Due to the inverse magnetostrictive effect, this stress causes flux change which time variation generates voltage on the wound coils. Prototype was verified maximum instantaneous power of 11.4W and maximum power of 0.1 J at a free vibration of frequency of 60 Hz. The output energy was increased from 20 to 30% compared with conventional type. The energy conversion efficiency more than 30 % was observed.

**Keywords:** energy harvester using ambient vibration, magnetostrictive material, iron-gallium alloy, inverse magnetostrictive effect, L-shaped frame.

## 1 緒言

近年, 振動を利用した発電が注目されている[1, 2]。振動発電により, 身近な人の動きや機械の振動から電気エネルギーを生み出すことができる。また定常的な振動源は, 半永久的に利用できる安定な電源になる。さらに, 密閉空間内や複雑な構造物内などの電気設備の電源を発電デバイスに置き換えることで, これまで困難であった電池交換や配線が不要になるというメリットがある。応用として, デバイスを橋や工場設備などの振動する構造物に取り付けることで, 照明やワイヤレスセンサシステムの電源としての利用が考えられる。また発電には, 振動を減衰させる効果が伴うことから, ダンパとしての応用も期待できる。従来技術に圧電材料を利用したものがあり, 靴に内蔵して歩行運動で発電した例[3]や床に敷いたマットから数 100 mW を得た例[4]があるが, 未だ実用化されていない。

我々は, 磁歪材料 (鉄ガリウム合金, Galfenol[5, 6]) を用いた振動発電デバイスを提案し, その実用化を目指している[7]。鉄ガリウム合金は鉄系の磁歪材料で, 延性材料であるため引張りや曲げ, 衝動などの外力に強く, 機械加工が可能, また逆磁歪効果 (応力により内部の磁束が変化) により 1.5 T 以上の大きな磁束密

度変化を発生するという発電デバイスに適した特徴を有する。これまでに片持ち平行梁構造のデバイスを製作し, 最大で 3.6 W の電力, 30%以上のエネルギー変換効率を実証した[8]。また直線状フレームが平行梁とヨークを兼ねることでシンプルな構造を実現した[9]。しかし構造上, 耐久性や効率が制限されると推測された。本研究では, 耐久性, 効率, 出力を向上すべく, 均一な応力を磁歪素子に付加できる L 字フレームのデバイスを提案する。本稿では, その検証のために行った応力分布, 磁束密度変化および発生電圧, エネルギー変換効率の直線状フレームと比較した測定結果について報告する。

## 2 構造と発電原理

提案するデバイスの構成を Fig. 1 に示す。デバイスは L 字型のヨークとコイルを巻いた鉄ガリウム合金の板を平行梁構造とした発電体 2 個を平行に並べた構造である。その間にバイアス磁界を付加する 2 個の永久磁石が配置される。ヨークは平行梁を構成する中央の板と固定部, 90°折れ曲がった可動部を一体で形成した L 字型である。また磁石の起磁力により磁石, ヨーク, 磁歪板で構成される閉磁路内を適度なバイアス磁束が環流する。ここで Fig. 2 (上) のように可動部先端の軸方向に垂直に力 (矢印) を作用させると曲げモーメントにより磁歪板に引張り力が加わる。同時に逆磁歪効果で磁歪板の磁束が増加する。同様に逆方向に力を

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> 北陸電力, <sup>\*2</sup> 金沢大学

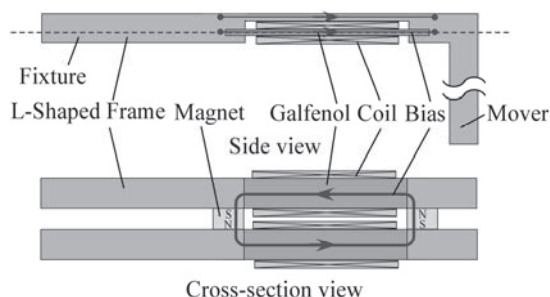


Fig. 1 Configuration.

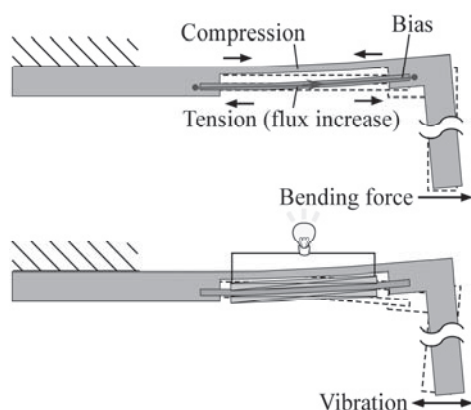


Fig. 2 Principle of energy harvesting (top: forces applied to Galfenol plates by bending force, bottom: electric energy generation by vibration).

作用させれば、圧縮力により磁束が減少する。Fig. 2 (下)のように可動部を振動させると応力と磁束が周期的に増減し、その時間変化によってコイルに起電力が発生する。

L 字フレームは、磁歪板内の応力が軸方向に均一に分布することに特徴がある。一般的に梁に外力が作用すると、内部にせん断力と曲げモーメントが作用する。従来のフレームは Fig. 3 のような直線状の片持ち梁構造であり、可動部先端の軸方向に垂直に力(矢印)を作用させる。この場合、磁歪板の応力は上方向の力では引張り、下方向では圧縮になる。ここで磁歪板にはせん断力と曲げモーメントの両方が重畳して作用する。つまり磁歪板にはずれ変形と曲げ変形が同時に生じ、また接合部付近では応力集中が発生する。そのため板全体で磁束変化を発生させるには必要以上の応力を加えなければならず、デバイスの出力や耐久性が応力集中部の許容限界にて制限される。

一方、L 字の片持ち梁においては、せん断力は磁歪板に作用せず、曲げモーメントのみが作用し、磁歪板には応力が軸方向に均一に分布する。例として Fig. 4 に軸方向の圧縮応力の平均値が同じになるよう、L 字

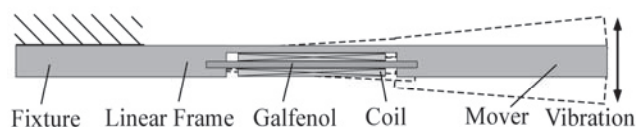


Fig. 3 Configuration of linear frame type.

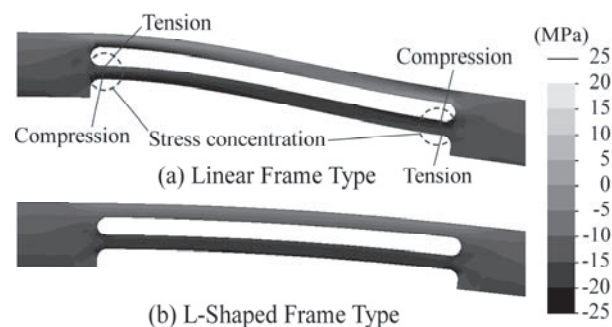


Fig. 4 Stress distribution calculated by FEM.

フレームの先端に 100 N (Fig. 2 矢印左方向)、直線状フレームの先端に 120 N (Fig. 3 矢印下方向) の力を作用したときの有限要素法で応力分布を計算した結果を示す。ここで解析ソフトとして Solid Works 2008SP 5.0 を用い、L 字フレームは要素数 9261、節点数 15692、直線フレームは要素数 8215、節点数 14341 にてモデル化し、固定端の変位を零とした境界条件にて解析を行った。直線状フレーム(a)では磁歪板が S 字に変形し、両端の接合部付近には圧縮と引張りの両方の応力集中(引張りと圧縮を図に記載する)が発生しているのに対し、L 字フレーム(b)では一様に湾曲し、応力が全体に均一に作用している。平均値は-10 MPa で最大値は直線状フレームで-30 MPa、L 字フレームで-20 MPa であった。以上、L 字フレームでは応力集中のない均一な応力分布により、許容できる力を大きくでき、また磁歪板全体で効率よくエネルギー変換が行えると考えられる。

### 3 試作と測定結果

以上のメリットを実験で検証した。Fig. 5 に製作したデバイスの写真を、Fig. 6 に寸法を示す。発電体は巻数 1190 turn、抵抗  $6.5 \Omega$  の発電用コイルを巻いた鉄ガリウム合金の板( $100 \times 15 \times 3 \text{ mm}^3$ )を L 字フレーム(SUS430)にエポキシ系接着剤で接合し組み上げた。磁歪板の両端 10 mm は接合部で、残りの 80 mm が発電に寄与する。平行に並べた 2 個の発電体の間にネオジム磁石(Nd-Fe-B,  $25 \times 15 \times 10 \text{ mm}^3$ , 2 個)を磁歪板と閉磁路を構成するように挟み、それぞれの固定部と可動部を板(SUS304)で連結した。このデバイスおよび直線

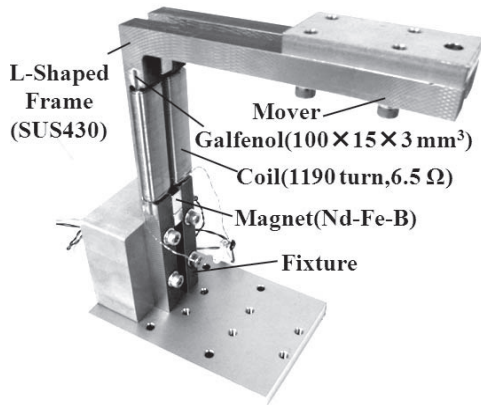


Fig. 5 Fabricated device.

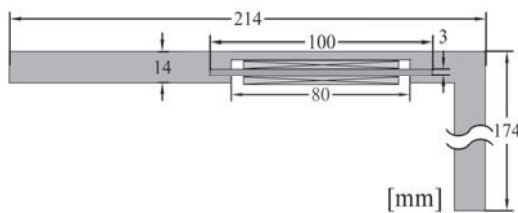


Fig. 6 Dimensions.

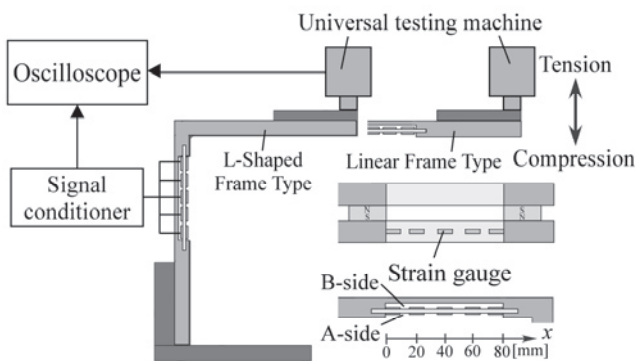


Fig. 7 Measurement setup of stress distribution using strain gauge.

状フレームを用いたデバイスの応力分布、磁束密度変化および発生電圧、エネルギー変換効率の測定を行った。

### 3.1 磁歪板内の応力分布の測定

評価結果の考察のため、本研究では別途、可動部に力を付加したときの磁歪板の応力分布を測定した。測定系を Fig. 7 に示す。ここでは、磁歪板を鉄ガリウム合金と同程度のヤング率 70 GPa を持つアルミ板 (A5052P) に置き換えた。万能試験機 (5965, INSTRON 製) により可動部先端に変位を与え、弾性域での歪を歪ゲージ (KFG-6-120-C1, KYOWA 製) およびシグナルコンディショナ (CDV-700A, KYOWA 製) にて

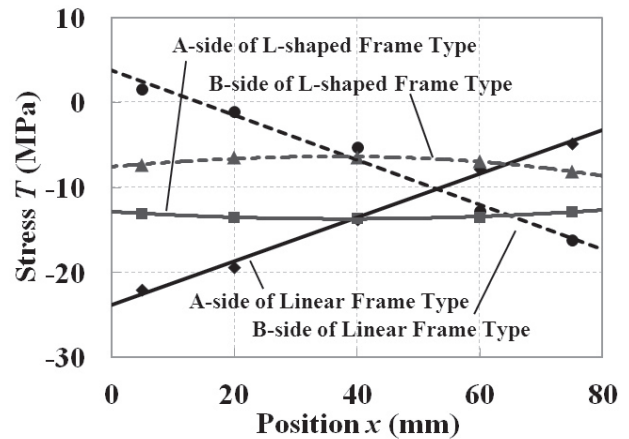


Fig. 8 Stress distribution.

測定し、ヤング率を乗じることで応力を算出した。測定箇所は板の表側を A 面、裏側を B 面とし、板の固定部側の端部 0 から  $x = 5, 20, 40, 60, 75$  mm の位置、計 10 箇所とした。また先の解析と比較するために平均応力が -10 MPa となるよう L 字フレームには 100 N、直線状フレームには 125 N の力（下方向）を与えた。Fig. 8 は結果である。分布は解析とほぼ一致した。直線状フレームでは 5 mm にて最大 -23 MPa の圧縮（A 面）と 3 MPa の引張り応力（B 面）をとり、 $x$  の増加につれ比例的に増加または減少する分布であった。一方、L 字フレームでは、両面でほぼ一定の圧縮応力にて、最大でも A 面の -13 MPa と平均値の -10 MPa から 3 MPa 程度の差であった。応力集中も小さいと推測される。可動部に逆方向の力を与えた場合、同様な傾向にて、逆の応力分布であった。以上より、L 字フレームでは板全体に様な応力が作用し、応力集中が小さいことが確認できた。これより磁歪板（置き換えた場合）では大きな磁束密度変化が得られると予測される。

### 3.2 磁束密度分布の検証

一般に磁歪材料の磁束密度  $B$  は線形領域では次式で表される。

$$B = dT + \mu H \quad (1)$$

$d$  は磁歪定数、 $T$  は応力、 $H$  は磁界、 $\mu$  は透磁率である。右辺の磁束密度の第 1 項は応力による変化、第 2 項は磁石によるバイアスである。磁束は式(1)の断面積での積分になるが、直線状フレームの引張りと圧縮応力が同時に作用する端部では、磁束密度の変化が逆になり、結果、合計の磁束の変化小さくなると考えられる。

この検証のため磁歪板に応力を付加したときの平



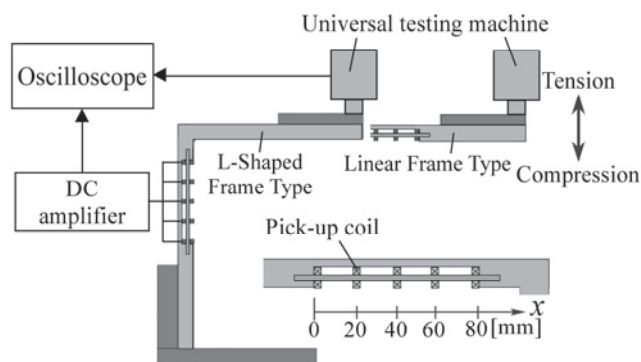


Fig. 9 Measurement setup of magnetic flux density distribution using pick-up coil.

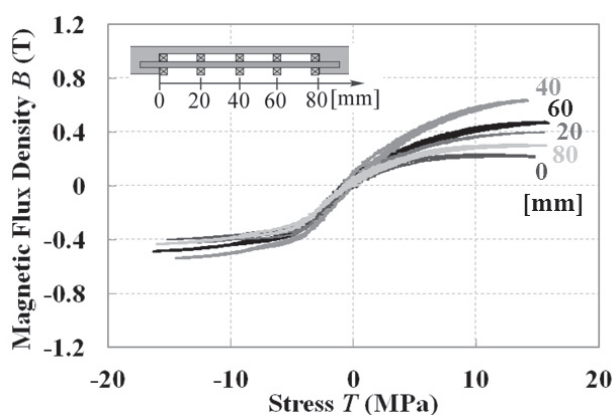


Fig. 10 Relationship between stress and magnetic flux density of linear frame type.

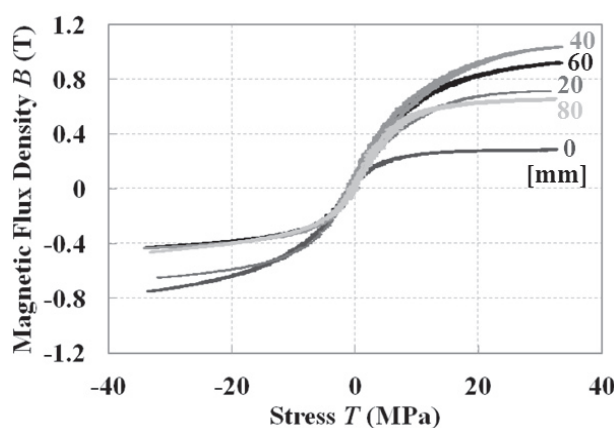


Fig. 11 Relationship between stress and magnetic flux density of L-shaped frame type.

均磁束密度変化の測定を行った。測定系を Fig. 9 に示す。万能試験機により可動部先端に変位を与え、応力による磁束密度変化を 5 ターンのピックアップコイルを巻き、DC アンプ (6L01, NEC 製) で増幅した誘導電圧を積分することにより計測した。測定箇所は磁歪

板の発電部の固定部側から 0, 20, 40, 60, 80 mm の位置である。応力は 3.1 と同様にひずみゲージを用いて、それぞれの位置での平均応力として算出した。Fig. 10 は直線状フレーム, Fig. 11 は L 字フレームの測定結果である。直線状フレームにおいて磁束密度変化幅および線形領域  $\pm 3$  MPa での傾きは 0, 80 mm では 0.7 T,  $0.03 \times 10^{-6}$  T/Pa, 20, 60 mm では 0.85 T,  $0.04 \times 10^{-6}$  T/Pa, 40 mm では 1.1 T,  $0.06 \times 10^{-6}$  T/Pa と中央部から端部にいくほど減少した。これは磁歪板の端部で引張りと圧縮応力が同時には作用することが原因であると考えられる。一方で L 字フレームの場合, 線形領域  $\pm 10$  MPa の範囲で傾きは全て等しく  $0.06 \times 10^{-6}$  T/Pa であった。式(1)右辺第 1 項の  $d$  を一定と仮定し逆算すると, これは応力の変化が全ての位置で同じであることを意味する。これは Fig. 8 の応力分布の結果でも裏付けられる。磁束密度の変化幅は中央部で 1.4 T 程度, 端部で 1.1 T 程度であり, 約 20 MPa で飽和に達した。鉄ガリウム合金の飽和磁束密度は 1.5 T 程度で, つまり磁歪板全体で大きな磁束密度変化が得られることがわかる。起電力は各位置における磁束の時間変化に比例し発生する。したがって L 字フレームでは直線状フレームに比べ磁歪板全体で大きな起電力が得られるものと考えられる。なおバイアスは飽和磁束密度の半分の 0.75 T が望ましく, 双方の応力での変化幅が同じになる。実験での変化幅は, 引張りで平均 0.5 T, 圧縮で平均 0.7 T で, バイアスはおよそ適度であるが, 位置によって飽和に達する応力にばらつきがある。これは漏洩磁束によりバイアスに若干の差があるからである。双方の変化幅から, 今回のバイアスは 20, 80 mm は妥当で, 40, 60 mm では小さく, 0 mm では大きい。

### 3.3 自由振動による発生電力の測定

高効率化の効果を検証するためにデバイスの発電特性を自由振動にて測定した。可動部先端に錘  $m$ (kg) を糸で吊るし切断することでデバイスに自由振動を発生させ, この時の発生電圧, 電力の測定を行った。測定系を Fig. 12 に示す。可動部先端の変位はレーザ変位計 (LK-G35H, KEYENCE 製), 電力は発電用コイルと整合条件に近い抵抗負荷 120  $\Omega$  の両端の電圧, 電流で評価した。電流は電流プローブ (TM502A, Tektronix 製) にて確認した。Fig. 13 に L 字フレームの可動部先端に付加した力  $F(=mg)$  が 235 N(23.5 kgf) のときの電圧, 電流, 変位の時間応答を示す。電圧は変位に伴って発生し, 瞬間最大電力として 11.4 W, 出力エネルギー

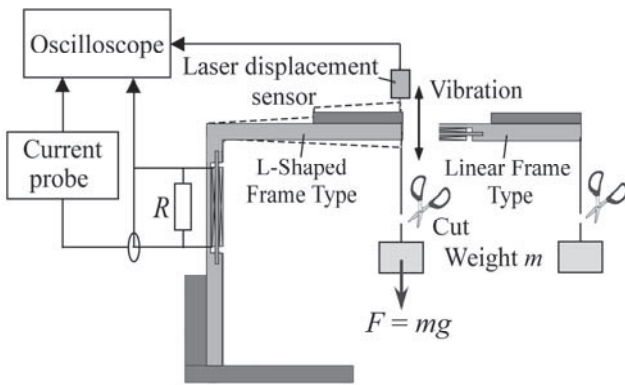


Fig. 12 Measurement setup of free vibration.

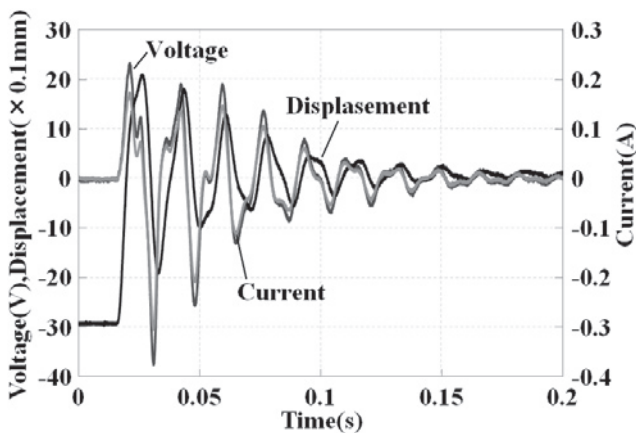


Fig. 13 Time response of displacement, voltage and current at free vibration triggered by 235 N (23.5 kgf).

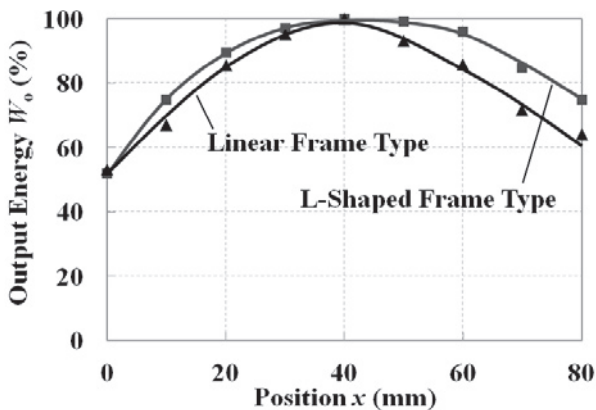


Fig. 14 Distribution of the output energy.

0.1 J が得られた。なお電圧の応答に 1 次の共振周波数 60 Hz 以外の成分があるが、これは先端の変位では測定できない 2 次の共振周波数、またはねじり振動などの高周波の成分であると考えられる。直線状フレームでは高周波成分は励振されなかった。

ここで、別に出力エネルギーの位置による変化を測

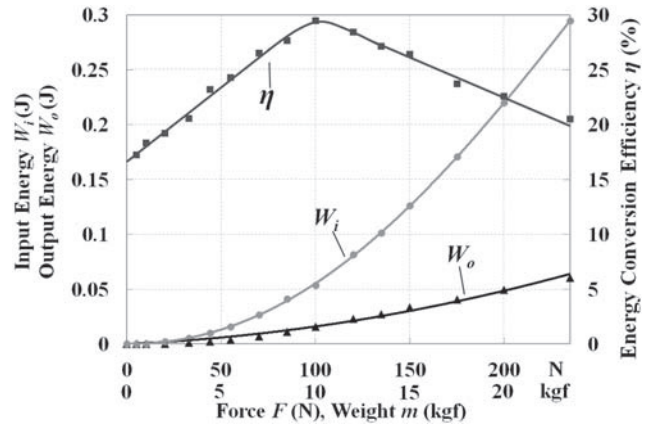


Fig. 15 Relationship between force and input energy, output energy and energy conversion efficiency of linear frame type.

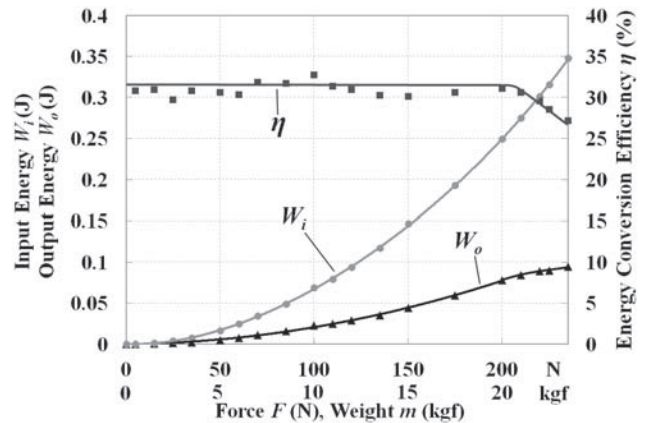


Fig. 16 Relationship between force and input energy, output energy and energy conversion efficiency of L-shaped frame type.

定した結果を Fig. 14 に示す。力  $F$  を 100 N (10 kgf) とし、発電用コイルの替わりに 5 ターンのピックアップコイルを 20 mm 間隔で巻いた。40 mm の位置での出力エネルギーを基準(100%)とした。概して、L 字フレームは直線状フレームに比べ、全ての位置において、中央部と同様な高いエネルギー変換が行われている。双方にて、40 mm が最大で、端部に行くにつれ単調に減少する傾向であるが、直線フレームの場合、これは Fig. 10 のよう端部ほど磁束変化の幅が小さいためと考えられる。また L 字フレームの場合、Fig. 11 のように端部において、バイアスが過度に加わり、飽和にて磁束の変化が制限されたためと考えられる。

再度、発電特性について、Fig. 15 は直線状フレーム、Fig. 16 は L 字フレームの力  $F$  と入力エネルギー  $W_i$ 、出

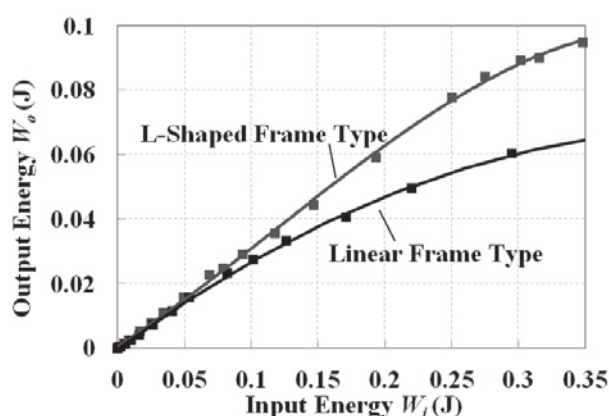


Fig. 17 Relationship between input energy and output energy.

力エネルギー  $W_o$ , エネルギー変換効率  $\eta$  の関係である。直線状フレームでは力  $F$  が 235 N (23.5 kgf) のときに出力エネルギー 0.06 J が得られた。効率は、力の増加と共に増加し 10 kgf のときに 30% で最大、その後、減少した。これは、はじめは応力が端部に集中し、引張り圧縮が同時に作用することで磁束の変化が減少するが、力の増加に伴い、端部の磁束変化は飽和し、磁束の打ち消し合いがない中央部で応力が作用、磁束が変化するためであると考えられる。また端部側から磁束密度変化が飽和し、10 kgf のときに全体が飽和したものと考えられる。Fig. 10 のよう 10 kgf (磁歪板の応力 7 MPa) 以上で、磁束密度の変化が飽和しはじめています。つまり 10 kgf 以上の力では、変化の飽和にて、変換されない入力機械エネルギー（力）が存在し、これが力と共に増加することで、エネルギー変換効率が低下すると考えられる。

一方、L 字フレームでは力  $F$  が 20 kgf までの出力エネルギーは 2 次関数的に増加し、エネルギー変換効率は約 31% で一定であり、20 kgf 以上で減少した。20 kgf のときの磁歪板の付加応力は 20 MPa 程度で、Fig. 11 から磁束密度の変化が飽和しはじめる応力である。Fig. 17 は入力機械エネルギーと出力電気エネルギーの関係である。L 字フレームは直線フレームに比べ出力が 20% から 30% 向上した。以上より、L 字フレームの高効率化の効果が確認できた。

#### 4 結言

本研究では、鉄ガリウム合金を用いた L 字フレームの発電デバイスを提案し、実験にて、その高効率化の効果を検証した。自由振動による発電特性では、L 字

フレームは、エネルギー変換効率が 31 %、最大出力エネルギーとして 0.1 J が得られ、従来の直線に比べ出力が 20% から 30% 向上した。これは磁歪板の均一な応力分布および、その結果生じる大きな磁束変化に起因していることが、実験や解析にて裏付けられた。また L 字フレームでは応力集中が生じにくく、結果、より大きな力を許容でき、ひいては、より大きな出力を取り出すことができる。今後は、出力の上限や周波数特性など、更なるデバイスの評価を行い、その改善にて、早期の実用化を目指す予定である。

#### 謝辞

本研究は平成 24 年度文部科学省科学研究費補助金 基盤 B の研究助成を受けて行われた。

(2012 年 10 月 6 日受付, 2013 年 3 月 22 日再受付)

#### 参考文献

- [1] 安達, 振動エネルギー回生, *Energy Regeneration から Energy Harvesting へ*, 診断に関するシンポジウム講演論文集, pp. 96-101, 2009.
- [2] 鈴木, エナジー・ハーベスティングの現状と展望, *マイクロ・ナノ工学シンポジウム*, pp. 13-14, 2009.
- [3] Kymisis, J., Kendall, C., Paradiso, J. and Gershenfeld, N., *Parasitic Power Harvesting in Shoes*, *Proc. of the Second IEEE International Conference on Wearable Computing, (ISWC)*, IEEE Computer Society Press, pp. 132-139, 1998.
- [4] 株式会社音力発電, 発電床<sup>TM</sup>, 2009, <http://www.doundpower.co.jp/>.
- [5] A.E. Clark, M. Wun-Fogle, J.B. Restorff, *Magnetostrictive Properties of Body-Centered Cubic Fe-Ga and Fe-Ga-Al Alloy*, *IEEE, Trans. Mag.*, Vol. 37, pp. 3238-3240, 2000.
- [6] A.E. Clark, M. Wun-Fogle, J.B. Restorff, *Magnetostrictive property of Galfenol alloys under compressive stress*, *Materials Transaction*, Vol. 43, pp. 881-886, 2002.
- [7] 上野, 山田, 磁歪材料を用いた小型振動発電素子の特性評価, *電磁力関連のダイナミクスシンポジウム講演論文集*, pp. 375-380, 2011.
- [8] 坂本, 上野, 山田, 磁歪材料を用いた振動発電素子の高効率化のためのバイアス付加方法の検証, *電気関係学会北陸支部連合大会講演論文集, ROMBUNNO.A-80*, 2011.
- [9] 河出, 上野, 山田, ユニモルフ型磁歪式発電素子の特性評価, *電気関係学会北陸支部連合大会講演論文集, ROMBUNNO.A-72*, 2011.