



アモルファスリボンと樹脂による複合材料を用いた振動発電

Vibration energy harvesting using composite materials of amorphous ribbon and resin

上倉拓郎^{a,b)}, 後藤太一^{b)}, 石山和志^{b)†}

^{a)}東北大学大学院 工学研究科, 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6 (〒980-8579)

^{b)}東北大学 電気通信研究所, 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1 (〒980-8577)

Takuo Kamikura^{a,b)}, Taichi Goto^{b)} and Kazushi Ishiyama^{b)†}

^{a)}Graduate School of Engineering, Tohoku Univ., 6-6 Aramaki Aza Aoba, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579, Japan

^{b)}RIEC Tohoku Univ., 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8577, Japan

We propose a novel system for generating vibration power using composite amorphous ribbons as an alternative to cantilevers. While the cantilever is effective for narrowband vibration, the structure of this system is effective for broadband vibration. To prove the effectiveness of this structure, we measured the change in magnetic properties of the composite amorphous ribbon with and without compressive stress applied and the power generation properties under vibration with a low amplitude and arbitrary frequency. In the measurement of the magnetic properties, the change in magnetic flux density tended to increase as the strain increased. In the measurement of the power generation characteristics, a power generation of 19.2 μ W was obtained even at a vibration frequency of 700 Hz and an amplitude of 450 nm, which is not the resonance frequency. The theoretical and experimental values from the two experiments were consistent, confirming that the inverse magnetostriction effect was responsible for the power generation. Therefore, we conclude that the novel structure for generating vibration power using composite amorphous ribbons is effective for low-amplitude broadband vibration.

Key words: energy harvesting, vibration power generation, composite material, soft magnetic materials, broadband vibration

1. はじめに

近年, IoT デバイスの動力源である電池の交換や廃棄に関する諸問題がネットワーク社会に対する大きな課題とされている¹⁾. そこで, 環境に存在する希薄なエネルギーを収穫して電力に変換する, 環境発電技術²⁾を利用した発電デバイスが開発されている. 光³⁾, 熱⁴⁾, 振動⁵⁾, 電磁波⁶⁾等がエネルギー源として挙げられているが, 中でも振動は低消費電力機器への電力供給源として注目されている⁶⁾. 振動を用いた発電方式は大きく分けて電磁誘導方式¹⁾, 静電誘導方式⁷⁾, 圧電効果⁸⁾を用いた方式と3つある. 本研究では特に, 磁歪材料であるアモルファスリボンが持つ逆磁歪効果を利用した電磁誘導方式の振動発電に注目してきた⁹⁾. また, これまで同種の研究で行われてきた片持ち梁構造に代えて発電可能な周波数帯域が広く, バイアス磁界の均一性にも優れた筒状にアモルファスリボンを成形した構造を提案した¹⁰⁾. 本報告では, 酸化防止や耐久性の向上を目的として紫外線硬化樹脂を用いて筒状アモルファスリボンを複合材料化し, 圧縮応力印加時の BH 曲線の測定・発電実験を行った.

2. 新しい振動発電機構の提案

片持ち梁構造に代わる振動発電機構として Fig. 1 のような構造を提案する. シンプルな構造の筒状に巻いた磁歪材料の周りを樹脂でコーティングした試料である. また, 中心部に磁石を挿入しており, 逆磁歪式振動発電に必須となるバイアス磁界を均一に与えている. 発電する際は試料の周囲にコイルを巻き, 軸方向に応力の印加と除荷を振動によって繰り返し与えて発電する. 軸方向

に圧縮応力を印加すると, 円周方向に引っ張り応力が発生する. その結果, 逆磁歪効果により円周方向に磁化容易軸が誘導され, 熱処理によって軸方向を向いていた磁気モーメントが円周方向に変化する. よって, コイル内の磁束密度が時間変化し, フェラデーの電磁誘導の法則から電圧に変換される.

従来の逆磁歪式振動発電手法の片持ち梁と比較すると, 振動周波数とバイアス磁界の均一性に特徴がある.

まず, 使える周波数帯域が片持ち梁では共振周波数付近に限定され狭く, 新構造では環境周波数¹¹⁾全体に対応しており広いことである. 片持ち梁構造では, 共振周波数でのみ大きな振動が得られることから, 発電に活用できる周波数の帯域は狭くなる. それに対して新構造では, 共振を利用しないことから環境に存在する数十 Hz~数 kHz の帯域すべてにおいて電圧を発生させることができ, 使える周波数帯域が広い. この性質により複数の周波数を持つ振動源のエネルギーを有効に活用ことができ, 複数の周波数を持つ実際の環境下では, 新構造の方が取り出せる電力量の総量は大きくなる.

加えて, バイアス磁界の均一性は新構造に優位性がある. 逆磁歪効果による磁束密度変化量はバイアス磁界量によって変動し, 最も変化が大きくなるバイアス磁界を印加し続けることが発電量を取り出す上で最も効率が良くなる. しかし, 片持ち梁構造や U 字型デバイス¹²⁾ は梁を大きく揺らすことで発電するため, 磁気回路内の空隙が変動し, 逆磁歪式振動発電に必要な直流バイアスの量が振動とともに最適値から外れ, 発電量が想定よりも小さくなる. したがって, 片持ち梁構造は狭帯域の振動に有効なのに対して, 新構造は広帯域の振動に対して有効であると言える. これらを含む比較表を Table 1 に示す.

Corresponding author: K. Ishiyama

(e-mail: kazushi.ishiyama.d8@tohoku.ac.jp).

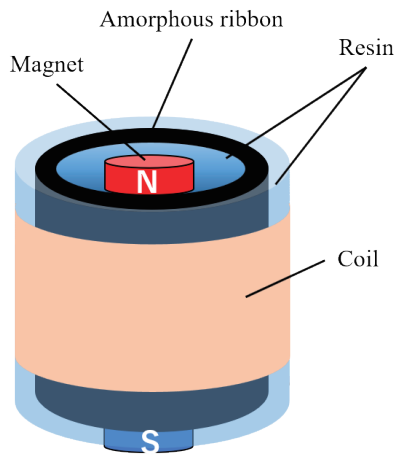


Fig. 1 Schematic diagram of structure for vibration power generation.

Table 1 Comparison of new structure and cantilever.

Points	New structure	Cantilever
Available frequency bands	Broad	Narrow
Uniformity of bias magnetic field	○	△
Device strength	○	△
Ease of installation	△	○
Power generation by bias magnetic field	—	○

○: Good, △: Bad, —: Not at all

3. 実験方法

3.1 試料の作成方法

2605HB1Mのアモルファスリボン(プロテリアル製, ヤング率: 120 GPa)を20 mm × 100 mmに切り出して, 直径8 mm × 高さ20 mmになるように筒状に丸める. さらに, 磁界中で熱処理を行い, 軸方向に磁気異方性の誘導・加工時の歪取りを行った. また, 酸化防止や耐久性の向上を目的として筒状のアモルファスリボンを紫外線硬化樹脂(ヤング率: 1.67 GPa¹³⁾)に埋め込み複合化を行う. 出来上がったアモルファスリボンと紫外線硬化樹脂を複合化させた試料(以下「複合アモルファスリボン」という)の中心に磁石を挿入するため直径2 mmの穴をあけた.

また発電実験では, 試料周囲におよそ12 mmの幅で線径60 μmのコイルを3840ターン巻いた. また, アモルファスリボンにBH曲線から求まる最適なバイアス磁界8.3 kA/mがかかるように表面磁束密度275 mT, 直径2 mm × 高さ2mmのサマリウムコバルト磁石を9つ直列に並べて試料中心に挿入した.

3.2 応力印加時のBH曲線の測定

複合アモルファスリボンの磁気特性は, 応力印加下で行った.

Fig. 2に示すようなBHループトレーサ¹⁴⁾を構築し, 試料の軸方向に圧縮応力を印加した状態で測定できるようにした. 圧縮応力の印加はバネを利用しており, 印加応力はバネの寸法変化とバネ定数から算出した. ソレノイドコイルにより0.1 Hzの正弦波交流磁界を試料の軸方向に印加し, 900ターンの検出コイルからの出力をNI社製のDAQデバイスで読み取り, PC上でLabVIEWにより制御してBH曲線を得た. このとき印加した応力により試料は最大で1314 ppm圧縮変形した. この歪量は, 試料を構成するアモルファスリボンと紫外線硬化樹脂のヤング率と断面積, 印加した応力から算出した.

3.3 発電実験

発電実験ではFig. 3の装置構成を用いて, 抑え治具と加振機の上に複合アモルファスリボンを挟み, 軸方向に圧縮応力がかかるように700 Hzの振動を加えた. 700 Hzは電車橋で測定された周波数¹⁵⁾及びその高調波成分として定めた. 試料中心の磁石によりBH曲線から求めた最適なバイアス磁界8.3 kA/mを印加した状態で振動による応力が加わると, 試料の周りに巻かれたコイル内で逆磁歪効果により試料内部の磁束が時間変化し, 電圧が発生する. 発生電圧を積分し, 磁束密度に変換した.

発電実験では同時に, レーザードップラー変位計(LDV)を用いた変位量測定を行った. 測定した変位量から試料の圧縮歪量を算出した. 発電実験で算出された磁束密度変化量と圧縮歪量がBH曲線から求まる理論値と比較し, 実験の整合性を確認した.

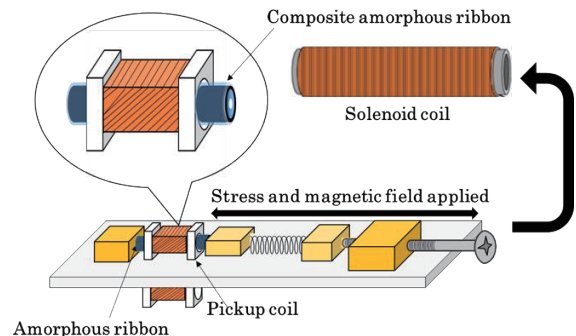


Fig. 2 System for measuring B-H curves.

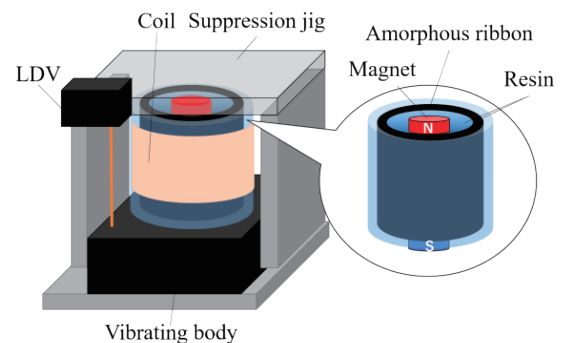


Fig. 3 Schematic diagram of the constructed setup for harvesting.

4. 実験結果及び考察

4.1 応力印加時の磁気特性の変化

Fig. 4(a)に複合アモルファスリボンのBH曲線を示す。0～16 kA/mに注目して拡大したものをFig. 4(b)に示す。また、最も磁束密度変化量が大きくなった磁界増加過程での印加磁界8.3 kA/mに点線を引いている。0 ppmから圧縮歪量が増えていくにつれてBH曲線が傾きが緩やかになっていく様子がわかる。これは円筒状の複合アモルファスリボンに対して軸方向に圧縮応力を印加すると、円周方向に引張応力が発生しその結果、正磁歪材料であるアモルファスリボンの磁気特性が変化したためである。特に、1314 ppmの圧縮歪量を加えた際の変化が一番大きく、印加磁界8.3 kA/mで最大の磁束密度変化量534 mTを記録した。また、8.3 kA/mを最適なバイアス磁界としてBH曲線から圧縮歪量と磁束密度変化量の関係図を示したものがFig. 5(a)である。さらに、0～60 ppmに注目して拡大したものをFig. 5(b)に示す。Fig. 5中の点線は、線形近似した際、45 ppmの圧縮歪量を加えると19.7 mTの磁束密度変化が起こることを示している。Fig. 4同様にFig. 5からも圧縮歪量が増えるにつ

れて磁束密度変化量が増えていく様子がわかる。また、磁束密度変化量は飽和しておらず、更なる圧縮歪量を加えた検討が必要であると考えられる。

4.2 発電特性

測定結果をFig. 6に示す。260 mVrmsの電圧が出力されており、ファラデーの電磁誘導の法則から積分すると18 mTの磁束密度変化量と算出された。最大電力供給の法則からコイルと同抵抗の素子をコイルに繋いだ場合、取り出せる電力は19.2 μ Wと算出された。この値は、センサーなどのデバイスを運用するのに十分な電力量である¹⁶⁾。また、レーザードップラー変位計の計測結果をFig. 7に示す。測定結果から発電実験中、試料は900 nm_{pp}変位しており試料長さが20 mmということを考慮すると45 ppmの圧縮歪量を加えられていた。つまり、700 Hzかつ450 nmの低振幅振動下でもセンサーを運用するのに十分な発電能力を発揮したことから新しい振動発電機構を用いた振動発電は広帯域低振幅振動を対象とした発電に適していると考えられる。

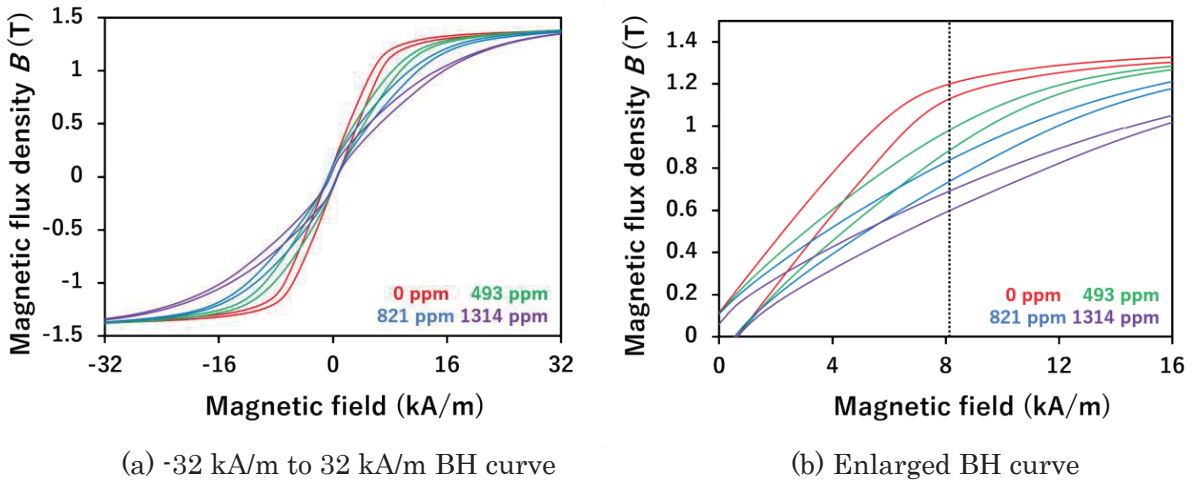


Fig. 4 Change in BH curve under compressive stress.

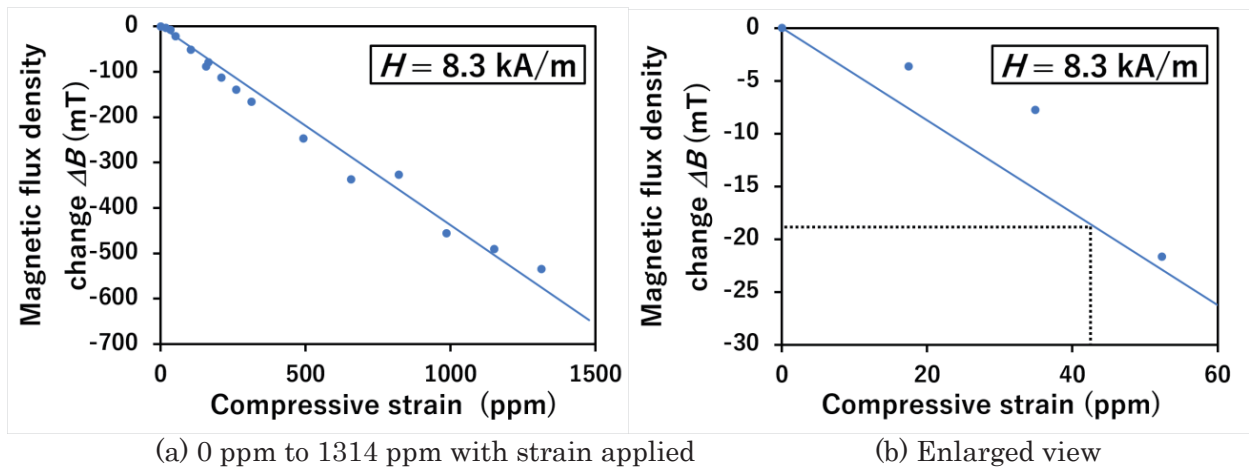


Fig. 5 Relationship between strain and flux density change at 8.3 kA/m

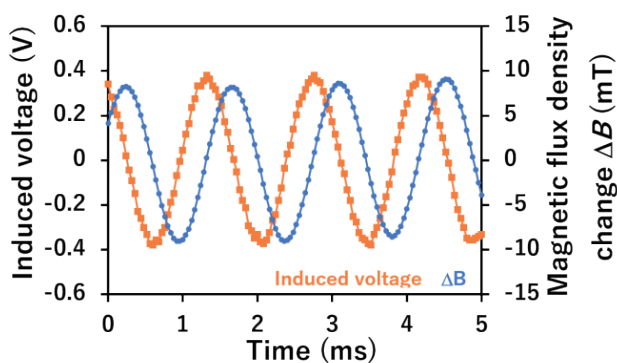


Fig. 6 Generated voltage and flux density change during power generation experiment.

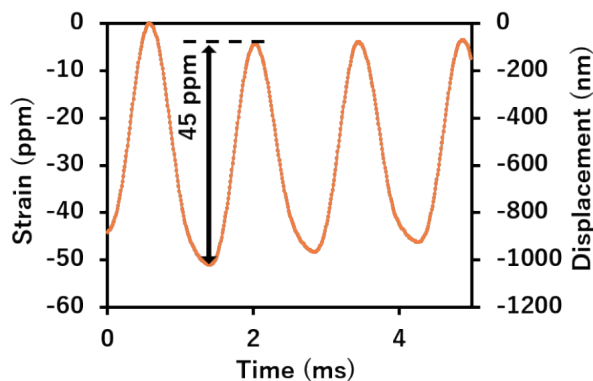


Fig. 7 Strain and displacement during power generation experiment.

4.3 BH 曲線と発電実験の整合性の確認

発電実験では、試料に 45 ppm の圧縮歪量が加えられ、その結果 18 mT の磁束密度変化量が推定された。BH 曲線からは、45 ppm の圧縮歪量を加えると 19.7 mT の磁束密度変化が起こることが分かった。2 つの実験の結果はおおよそ一致しており、このことから逆磁歪効果により 19.2 μ W の電力が発電できたと結論付けた。また、今後は BH 曲線を基に実際の発電量を推察できるようになったこともわかる。

5. まとめ

片持ち梁に代わる新しい振動発電機構の提案を行い、その有効性を示すために複合アモルファスリボンの磁気特性と発電特性の測定を行った。結果として、圧縮応力を加えたときに磁束密度の減少が見られ、圧縮歪量との関係性が示された。また、発電実験では、45 ppm の圧縮歪量を加えられ 19.2 μ W の電力を得た。2 つの実験から BH 曲線より求まる理論値と発電実験の結果が一致したことから逆磁歪効果により発電されたと結論付け、今後は BH 曲線から発電量を考察できるようになったといえる。

700 Hz \cdot 450 nm 程度の低振幅の振動下においても 19.2 μ W とセンサーを運用するのに十分な発電能力¹⁶⁾を発揮したことから複合アモルファスリボンを用いた新しい振動発電機構は広帯域低振幅振動に適している。また、複数の周波数を持つ振動源で運用すると、周波数ごとの電力量が合算され更に大きな発生電力量が見込める。

さらに、1000 ppm を超える歪振幅を印加できれば数十 mW と無線通信の動力源としても期待できる量の発電

が期待できることを明らかにした。

今後は大振幅振動での発電能力の評価とそれに伴う耐久性の確認を行い、実際の運用に向けた検討を行う。

References

- 1) T. Ueno: *J. Appl. Phys.*, **89**, 82 (2020).
- 2) K. Takeuchi: *J. Surf. Finish. Soc. Jpn.*, **67**, 334 (2016).
- 3) M. Kameda: *J. IEIE. Jpn.*, **36**, 363 (2016).
- 4) R. J. M. Vullers, R. van Schaijk, H. J. Visser, J. Penders, and C. Van Hoof: *IEEE Solid-State Circuits Magn.*, **4**, 18 (2005).
- 5) Y. Kawahara: *J. JSAEM*, **22**, 380 (2014).
- 6) I. Kanno: *J. Surf. Finish. Soc. Jpn.*, **67**, 348 (2016).
- 7) Y. Suzuki: *J. JSAEM*, **22**, 361 (2014).
- 8) M. Renaud, K. Karakaya, T. Sterken, P. Fiorini, C. Van Hoof, and R. Puers: *Sens. Actuators A*, **145**, 380 (2008).
- 9) F. Osanai, S. Hashi, and K. Ishiyama: "Study on energy harvesting with amorphous ribbons", *Annual Meeting Record I.E.E. Jpn.*, 146 (2019).
- 10) T. Kamikura, T. Goto, and K. Ishiyama: "Basic study of vibration power generation using tubular amorphous ribbon", *Annual Meeting Record I.E.E. Jpn.*, 119 (2023).
- 11) K. A. Cook-Chennault, N. Thambi, and A. M. Sastry: *Smart Mater. Struct.*, **17**, 043001 (2008).
- 12) T. Minamitani and T. Ueno: *IEEJ Trans. Fundam. Mater.*, **139**, 285 (2019).
- 13) H. Takase, I. Watanabe, and T. Ukaji: *J. Network Polymer*, **17**, 127 (1996).
- 14) K. Ozawa, S. Hashi, and K. Ishiyama: *T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues)*, **6**, 15 (2022).
- 15) T. Inoue and Y. Kobayashi: *J. Struct. Eng. A*, **67A**, 555 (2021).
- 16) T. Higashino, A. Uchiyama, S. Saruwatari, H. Yamaguchi, and T. Watanabe: *Proc. 39th IEEE Int. Conf. on Distributed Computing Systems (ICDCS 2019)*, 1787 (2019).

2023年10月12日受理, 2023年12月7日再受理, 2023年12月18日採録