The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

| | |
|---|---|
| Title | 圧電型振動発電デバイスの開発 |
| Author(s) | 村上, 修一; 吉村, 武; 佐藤, 和郎 他 |
| Citation | 電気材料技術雑誌. 2022, 31(1), p. 20-25 |
| Version Type | VoR |
| URL | https://doi.org/10.18910/89735 |
| rights | |
| Note | |

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

電気材料技術雑誌　第31巻第１号
J. Soc. Elect. Mat. Eng.　Vol.31,　No.1　２０２２

# 圧電型振動発電デバイスの開発

村上　修一[1]、吉村　武[2]、佐藤　和郎[1]、金岡　祐介[1]、津田　和城[1]

[1] 地方独立行政法人大阪産業技術研究所
〒594-1157 大阪府和泉市あゆみ野 2-7-1
[2] 大阪公立大学　大学院工学研究科　電子物理系専攻
〒599-8531 大阪府堺市中区学園町 1-1

# Development of piezoelectric vibration energy harvester

Shuichi MURAKAMI[1], Takeshi YOSHIMURA[2], Kazuo SATOH[1],
Yusuke KANAOKA[1], Kazuki TSUDA[1]

[1]Osaka Research Institute of Industrial Science and Technology
2-7-1 Ayumino, Izumi, Osaka 594-1157, JAPAN
[2]Department of Physics and Electronics, Graduate School of Engineering
Osaka Metropolitan University
1-1 Gakuen-cho, Naka-ku, Sakai, Osaka 599-8531, JAPAN

Recently considerable attention has been directed toward the vibration energy harvesters (VEHs) for application of power sources for wireless sensors. We have been developing piezoelectric VEHs, which have features of simple structure, directly convert mechanical energy into electrical energy, and can be integrated into monolithic MEMS-scale systems. We prepared the lead-free $BiFeO_3$ (BFO) piezoelectric films, where $LaNiO_3$ film was used as the bottom electrode in order to obtain the (100)-oriented BFO films. The BFO films showed the high figure of merit for energy conversion. The typical cantilever-type piezoelectric MEMS VEHs using the BFO films were fabricated by the MEMS technologies, which shows the power generation performance as high as VEHs using $Pb(Zr,Ti)O_3$ films. This implies that the BFO VEHs are expected as self-supporting power sources. Furthermore, we have been developing the AC magnetic field VEHs as a new application of piezoelectric VEH, which was shown to be promising as a power source for wireless sensors.

キーワード：圧電、非鉛、振動発電、磁界振動発電、環境発電、エネルギーハーベスティング

## １．はじめに

近年、IoT（Internet of Things、モノのインターネット）社会到来に向けて、環境発電（Energy harvesting、エネルギーハーベスティング）が注目を集めている [1)]。環境発電とは、身近な環境に薄く存在しているエネルギーを電気エネルギーに変換する技術である。あらゆる場所へセンサモジュールを設置して無線センサネットワークを構築するなかで、ボタン電池等に代替する自立型電源として期待されている。原子力発電や火力発電の代替を目指すものではなく、人が近づき難いような危険な場所にあるセンサモジュールの電池交換を不要とし、また環境負荷の高い電池を不要とするなど、センサモジュールの他、リモコンスイッチ、

ビーコン等の高機能化を実現するものである[2)]。

環境発電のエネルギー源としては、光、温度差、振動、電磁波など多種多様あるが、本稿では振動を扱う。身近な環境に存在する微弱な振動としては、工場の配管・電動機、建物・橋梁、車両、人の動きなどが挙げられる。また、振動発電には方式として、圧電型、静電誘導（エレクトレット）型、電磁誘導型、磁歪型等、多種多様あり、対象とする振動の振動数、出力電圧、形状・大きさの自由度、出力インピーダンス、機械的品質係数などの観点から比較・検討することが可能である。絶対的に優れた方式があるわけではなく、一長一短あるので設置場所により適切な方式を選択することが重要である。

本稿にて報告する共振現象を扱う圧電型振動発電について簡単に紹介する。同方式の発電においては、図 1 に示すように、圧力や張力を印加すると両端に電荷 $Q$ あるいは電圧が発生する正圧電効果を利用する。基本的な構造は図 2 に示すように構造が簡単であることが特徴である。先端に錘を付与した片持ち梁上に圧電体を形成したあるいは貼り合わせた事例が多い。周囲の振動により片持ち梁が共振し、圧電体に圧力と張力が交互に印加され正圧電効果により発電する。さらに後述するように、交流電流が流れる電線近傍に形成される交流磁界に磁石を置いて振動エネルギーに変えて電気エネルギーを取り出す磁界振動発電の事例もある。

圧電型振動発電の性能には、素子形状も重要であるが、圧電材料も重要である。圧電材料も多種多様あり、代表的なものとして、無機材料では $Pb(Zr,Ti)O_3$ (PZT)、$(K,Na)NbO_3$ (KNN)、AlN、$BiFeO_3$ (BFO)、ZrO などが挙げられる。有機材料では Poly Vinylidene DiFluoride (PVDF)などが挙げられる[3), 4), 5), 6), 7)]。最も普及しているのは PZT であり、性能・信頼性ともに優れているが、鉛を含むことから現在、非鉛材料の研究開発が活発に行われている。

本研究では、非鉛圧電体薄膜として圧電体薄膜の開発を行い、発電性能指数として PZT と同等以上の性能を確認することができた。また、同圧電体膜を用いた圧電 MEMS 振動発電素子を試作し、PZT 圧電体膜を用いた素子と同等以上の発電性能を示すことができた。さらに、上述した磁界振動発電素子について、圧電体としては PZT を用いているが、60Hz の交流電流 10 $A_{rms}$ の近傍に設置するだけで 1 mW 程度の電力エネルギーを得ている。本稿では、以上について報告する。

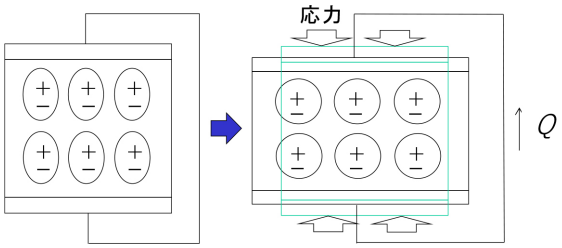


図 1　正圧電効果

Fig. 1 Piezoelectric effect.

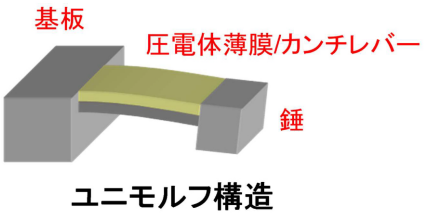


図 2　圧電型振動発電素子の基本構造

Fig. 2 Structure of piezoelectric vibration energy harvester.

## ２．圧電 MEMS 振動発電素子

### ２．１．BFO 圧電体薄膜について

本研究では、非鉛圧電体として BFO に着目した。単純ペロブスカイト構造で、850℃程度の高いキュリー温度を示すので、常温で安定した物性値を示すことが期待できる。また、自発分極は 100 μC/cm$^2$ 程度、圧電定数 $d_{33}$ は 50pm/V 程度と強誘電体としても圧電体としても優れた材料として知られている。また、Sm を添加することにより $d_{33}$ は 110pm/V まで高くなることも報告されており[8)]、今後の高性能化への余地が多分に残されている有望な圧電体材料と言える。

圧電型振動発電素子においては、共振時かつインピーダンスマッチング時の最大発電量は次の式で示すことができる[4)]。

$$P_{max} = \frac{m\omega_0^3 Y_0^2 Q_m}{4} \frac{1}{1+\sqrt{\{1+(K^2 Q_m)^{-2}\}}}$$

ここで、$m$ は片持ち梁先端に付与する錘の質量、$Q_m$ は機械的品質係数、$Y_0$ は振動振幅、$\omega_0$ は振動の角振動数、$K^2$ は圧電体膜の実効電気機械結合係数である。$K^2$ は $e_{31,f}$ 圧電定数と真空中の誘電率($\varepsilon_0$)圧電体の比誘電率($\varepsilon_r$)で表される $e_{31,f}^2/\varepsilon_0\varepsilon_r$ と比例関係にあるため、$e_{31,f}$ 圧電定数が高く、比誘電率が低いほど発電性能が高くなると言える。一般的な PZT 薄膜の比誘電率が 1000 程度で、BFO 薄膜が 50～130 程度であることから [4]、発電性能指数において、BFO 薄膜の方が PZT 薄膜と比較して 10 倍程度有利であることが言える。

そこで、発電性能を高めるためには $e_{31,f}$ 圧電定数をいかに高めるかが重要なポイントとなる。開発初期では Pt 下部電極上に BFO 薄膜を製膜していたが、$e_{31,f}$ 圧電定数は-1.0 C/m$^2$ であった [9]。その後、下部電極材料として $LaNiO_3$ (LNO)に着目した。LNO は BFO と同じペロブスカイト構造を有しており、Si 基板上で(001)優先配向することが知られている。さらに同 LNO 下部電極上に BFO 圧電体膜を製膜すると(001)優先配向することが分かった。LNO 下部電極、BFO 圧電体膜の XRD を

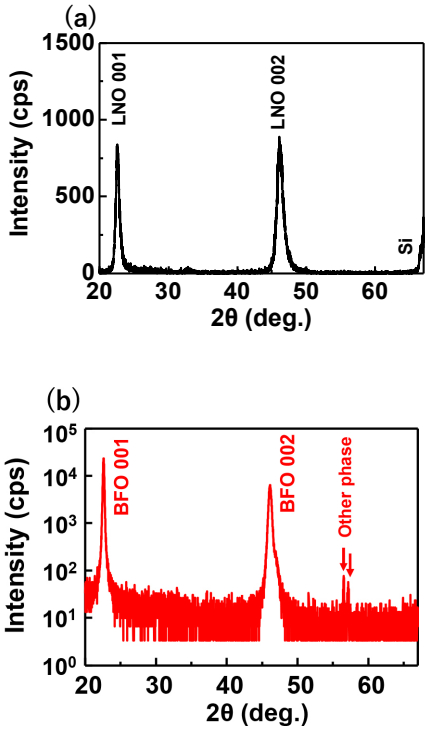


図 3　(a) LNO、(b) BFO/LNO 薄膜の XRD 図
Fig. 3 XRD patterns of (a) LNO and (b) BFO/LNO films, respectively.

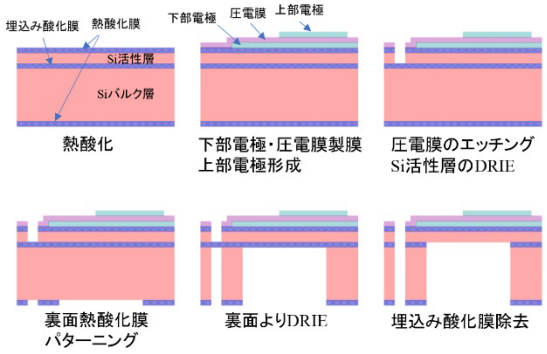


図 4　圧電 MEMS 振動発電素子の試作プロセス
Fig. 4 MEMS process of fabrication of piezoelectric vibration energy harvester.

それぞれ図 3(a)(b)に示す [10]。マグネトロンスパッタ法で製膜した場合、$e_{31,f}$ 圧電定数は-3.6 C/m$^2$ となり、Pt 下部電極上に製膜された BFO 膜と比較して 3.6 倍もの向上を実現することができた。

## ２．２．圧電 MEMS 振動発電素子の試作と評価

SOI（Silicon on Insulator）ウェハからフォトリソグラフィを主とした MEMS 微細加工技術により、圧電 MEMS 振動発電素子を試作した。試作した際の MEMS プロセスを図 4 に示す。Si デバイス層、埋込み酸化膜、Si バルク（支持）層の厚さを 20 μm、1 μm、500 μm とした。各工程は次の通りである。

(1) SOI ウェハを熱酸化（表面の厚さ 0.5 μm）した。

(2) LNO 薄膜からなる下部電極・配線をリフトオフ法により形成した。さらに、BFO 圧電体膜をマグネトロンスパッタにより製膜後、上部電極として Pt を製膜、リフトオフ法によりパターニングした。

(3) BFO 圧電体膜を磁気中性線プラズマ（NLD）ドライエッチング装置によりドライエッチングし、さらに、発電素子の片持ち梁となる領域の周囲の表面側の熱酸化膜、Si 活性層を表面から高速シリコン垂直深掘り装置（DRIE）により除去した。

(4) 表面をレジスト保護した後、裏面の Si 支持層を除去する領域の熱酸化膜をパターニングした。

(5) DRIE により裏面から片持ち梁とその周辺の

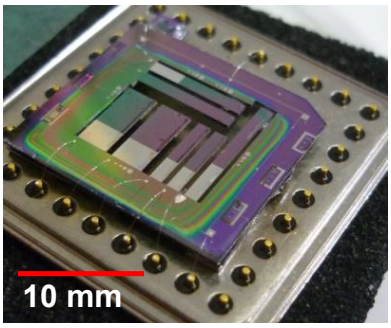


図 5　圧電 MEMS 振動発電素子の外観写真

Fig. 5 Photograph of piezoelectric vibration energy harvester.

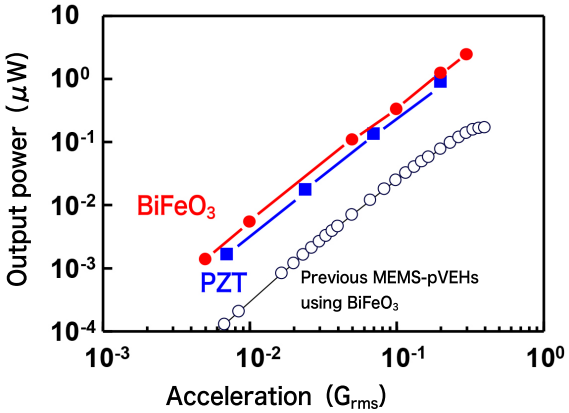


図 6　圧電 MEMS 振動発電素子の発電量の加速度依存性

Fig. 6 Output power as a function of acceleration of piezoelectric vibration energy harvester.

み Si 支持層を除去した。但し、片持ち梁先端の錘部分は残した。

(6) バッファード弗酸により埋込み酸化膜を除去した。

以上の MEMS プロセスにより、図 5 に示すように圧電 MEMS 振動発電素子の試作が完了した。片持ち梁の大きさは、長さ 6 mm～10 mm、幅 1mm～2mm、厚さ 20 μm、錘重量 3.0 mg とした。共振周波数として 151 Hz を示した [10]。

試作した発電素子の共振時における発電量の振動加速度依存性を図 6 に示す。同図において、BFO を用いた発電素子と、PZT 圧電体膜を用いた同じ構造の発電素子の発電量との比較をしており、ほぼ同等の発電性能を示すことが分かった。なお、BFO 圧電体薄膜の下部電極として Pt 電極を用いた発電素子の発電性能も示している。これから、LNO 下部電極を使うことにより(001)優先配向した BFO 膜が 10 倍もの発電性能の向上を示したことになる。先述した $e_{31,f}$ 圧電定数の向上がそのまま反映された結果となった。

現在、BFO エピタキシャル圧電体薄膜の製膜および MEMS 微細加工技術を活用した圧電 MEMS 振動発電素子の試作を試みており、今後の更なる発電性能の向上が期待できる。

## 3．磁界振動発電

圧電型振動発電の応用の一つとして、図 7(a)に示すように、交流電流が流れる電力線近傍に形成される交流磁界に磁石を置いて振動エネルギーを創出し、正圧電効果により電気エネルギーに変換する磁界振動発電の開発を行っている [11]。

デバイス構造を図 7(b)に示す。PZT 圧電体膜を SUS 基板上に形成して片持ち梁とする。さらに磁石を錘の役割も兼ねて片持ち梁先端に付与する。共振させて正圧電効果により発電する構造にしている。電力線と磁石の位置関係を変えながら磁石に働く力を数値計算し、同時に片持ち梁の形状や大きさの設計の最適化も行った。図 8 に、60 Hz の交流電流を電線に流し、磁界振動発電デバイスをその近傍に設置した際の発電量の電流依存性を示す。同図より、電線の電流 10 A 程度で、1 mW オーダーの電力を得ることができ、センサモジュール向け自立型電源として十分な発電性能を実現することが確認できた。

なお、設置する電線として、単線のみならず単

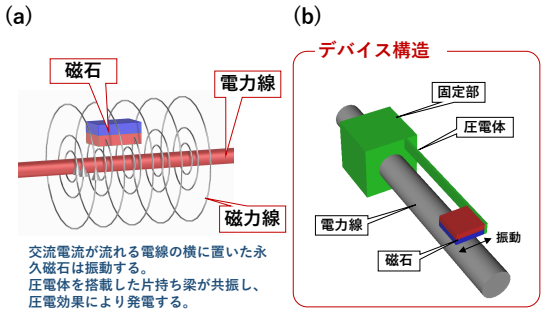


図 7　(a) 電力線周辺の磁力線の模式図、(b) 磁界振動発電の構造

Fig. 7 (a) Schematic diagram of magnetic force lines around power line, (b) Schematic of AC magnetic field energy harvester.

相、3 相ケーブルにおいても、電線と磁石の位置関係から磁石に働く力を数値計算し、発電量が高くなる電線と磁石の位置関係を見出すことができており、実際に発電することを確認している。

以上のように、交流電流が流れる電力線の近くに設置するだけでセンサ向け自立電源として十分な電力を発電する磁界振動発電デバイスを開発した。また、交流磁界から一旦振動エネルギーに変換するのでサージ電圧に強く、さらに発電量が電力線電圧に無関係なので少品種で対応可能などの特長を有している。

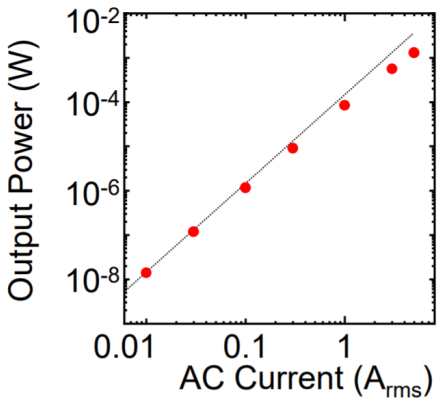


図８　発電量の電力線電流依存性

Fig. 8 Output power as a function of AC current of power line.

## ４．まとめ

IoT 社会到来に向けて、環境発電技術の向上が切望されている。本研究では、非鉛圧電材料として BFO に着目し、下部電極を Pt から LNO に変えたところ、(001)優先配向した多結晶膜となり高い発電性能指数を得ることができた。さらに MEMS 微細加工技術を使って圧電 MEMS 振動発電素子を試作し、その発電性能を評価したところ、PZT 圧電体膜を用いた振動発電素子と同等の性能が得られた。現在、BFO 圧電体膜についてエピタキシャル膜の開発を行っており、今後の更なる高性能化の余地が残されていると言える。

また、圧電型振動発電の応用で磁界振動発電デバイスの開発も進めている。60 Hz、10 $A_{rms}$ の交流電流が流れる電線の近傍に設置し、1 mW 程度の発電性能が確認できている。無線センサネットワークなどに使用されるセンサモジュール向け自立型電源としては十分な発電性能であり、今後の広範囲な応用が期待できる。

## 謝辞

圧電 MEMS 振動発電素子の研究は、NEDO 平成 23 年度先導的産業技術創出技術（若手グラント）と JST CREST (JPMJCR16Q4、 JPMJCR20Q2 ) の助成を受けて実施した。

磁界振動発電デバイスの開発は、大阪公立大学、大阪産業技術研究所が JST・CREST 研究事業などで培った圧電型振動発電に関する設計技術、電力回収技術等を基に、株式会社ダイヘンとの共同開発により実施した。

## 参考文献

1) S. Sudevalaym and P. Kulami: IEEE Commun. Surveys Tutorials, 13 (2011) 443.
2) 例えば、桑野博喜、竹内敬治監修 :「エネルギーハーベスティングの設計と応用展開」、シーエムシー出版、(2015).
3) S. -G. Kim, S. Priya and I. Kanno: MRS Bull., 37 (2012) 1039.
4) M. Aramaki, T. Yoshimura, S. Murakami, K. Satoh and N. Fujimura: Sensors and Actuators A, 291 (2019) 167.
5) L. V. Minh, M. Hara and H. Kuwano: Jpn. J. Appl. Phys., 52 (2013) 07HD08.
6) S. Murakami, T. Yoshimura, Y. Kanaoka, K. Tsuda, K. Satoh, K. Kanda and N. Fujimura: Jpn. J. Appl. Phys., 57 (2018) 11UD10.
7) T. Shiraishi, N. Kaneko, M. Kurosawa, H. Uchida, Y. Suzuki, T. Kobayashi and H. Funakubo: Jpn. J. Appl. Phys., 54 (2015) 10ND06.
8) S. B. Emery, C. -J. Cheng, D. Kan, F. J. Rueckert, S. P. Alpay, V. Nagarajan, I. Takeuchi and B.O. Well: Appl. Phys. Lett., 97 (2010) 152902.
9) T. Yoshimura, H. Sakiyama, T. Oshio, A. Ashida and N. Fujimura: Jpn. J. Appl. Phys., 49 (2010) 021501.

10) M. Aramaki, T. Yoshimura, S. Murakami, K. Satoh and N. Fujimura: Sensors and Actuators A, 291 (2019) 167.
11) T. Yoshimura, K. Izumi, Y. Ueno, T. Minami, S. Murakami and N. Fujimura: Jpn. J. Appl. Phys., 58 (2019) SLLD10.

（2022 年 7 月 1 日　受理）

## 著者略歴

**村上　修一**

1997 年 3 月大阪府立大学大学院工学研究科博士後期課程修了。1997 年 4 月より倉敷紡績㈱勤務を経て、2000 年 4 月より、大阪府立産業技術総合研究所（現大阪産業技術研究所）にて MEMS デバイス、有機エレクトロニクス、高機能性薄膜材料の研究開発に従事。現在、同所電子デバイス研究室長。応用物理学会、電気学会、センシング技術応用研究会会員。博士（工学）。

**吉村　武**

1999 年 9 月大阪府立大学大学院工学研究科博士後期課程修了。米国ペンシルベニア州立大学、大阪府立大学、日本学術振興会の博士研究員を経て、2005 年より大阪府立大学大学院助教、2010 年 4 月より同准教授。大学統合により 2022 年 4 月より大阪公立大学大学院准教授。強誘電体薄膜、半導体デバイス、MEMS デバイスの研究開発に従事。応用物理学会、日本誘電体学会、日本セラミックス協会、日本表面真空学会、センシング技術応用研究会会員。博士（工学）。

**佐藤　和郎**

1994 年 3 月大阪市立大学理学部物理学科卒業。1999 年 3 月大阪大学大学院理学研究科物理学専攻後期博士課程修了。九州工業大学助手を経て、2000 年 4 月より、大阪府立産業技術総合研究所（現大阪産業技術研究所）にて、薄膜作製や微細加工に従事。博士（理学）。

**金岡　祐介**

2006 年 3 月近畿大学生物理工学部電子システム情報工学科卒、同年 4 月より、大阪府立産業技術総合研究所（現大阪産業技術研究所）にてアレイセンサ信号処理、有機デバイスの作製、評価に関する研究開発に従事。現在、同所知能機械研究室主任研究員。日本光学会会員。

**津田　和城**

2002 年 3 月神戸大学大学院自然科学研究科博士前期課程修了。2002 年 4 月より、大阪府立産業技術総合研究所（現大阪産業技術研究所）にて輸送包装技術全般に従事。2010 年 3 月神戸大学大学院自然科学研究科博士後期課程修了。現在、生活科学・輸送包装研究室長。日本包装学会、日本機械学会会員。博士（工学）。