環境発電に用いる MEMS エレクトレット振動発電器の開発*

三木大吾^{*1}, 本泉真人^{*1}, 鈴木雄二^{*2}

Development of Vibration-Driven MEMS Electret Power Generator for Energy Harvesting Application

Daigo MIKI, Makoto HONZUMI and Yuji SUZUKI^{*3}^{*3} Department of Mechanical Engineering, The University of Tokyo,
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan

A vibration-driven electret generator has been developed. By using parylene as the spring material, a high-aspect-ratio spring with low-resonant-frequency is realized. Large in-plane amplitude of 0.5 mm at the resonant frequency as low as 63 Hz has been achieved. A prototype generator with a seismic mass of $11.6 \times 10.2 \text{ mm}^2$ is fabricated through MEMS technologies. Fluorinated amorphous polymer CYTOP is used as high-performance polymer electret material. With the present early prototype, we have obtained output power of $1 \mu\text{W}$ at the resonant frequency of 63 Hz.

Key Words: Energy Harvesting, Vibration-Driven Generator, Electret, Parylene Spring, MEMS

1. 緒言

エナジー・ハーベスティング(環境発電)とは、「環境に存在する希薄なエネルギーを電力に変換すること」である。ただし、太陽光発電や風力発電のように大電力を得て直接的に地球規模の環境負荷を低減させるものではなく、「気づかぬうちに」小電力を得ることによって、付加価値の高いエネルギーを超長期に渡って提供することが目的である。例えば、系統電源から分離したセンサネットワークノードへの応用が考えられる。外界の情報を取り込むセンサ、ネットワークと通信する無線チップを一体化したこのようなデバイスにおいて、エネルギーも環境から取り入れることができれば、半永久的な動作が可能となる⁽¹⁾。

エネルギー源としては、室内光、電磁波、体温や排熱などの熱、機器の振動などが考えられ、特に自動車などの輸送機器用センサ用電源では振動が最も有望と考えられている。なかでも、エレクトレットを用いた静電誘導発電は、低周波数振動からの発電に適すると考えられている⁽²⁾⁽⁴⁾。これまで、著者らは、アモルファスフッ素樹脂 CYTOP をもとに新しい高電荷密度エレクトレット膜を開発し、20 Hz、 1.2 mm_{pp} の振動から 0.7 mW の高い発電出力を得た⁽⁵⁾。また、電気回路、機械振動を含めた発電器の計算モデルを構築し、実験データによる検証を行った⁽⁶⁾。本研究では、低共振周波数・大振幅振動構造を持つ、MEMS エレクトレット発電器(図1)のプロトタイプの開発を目的と

した。

2. MEMS エレクトレット発電器の試作

本研究では、4GPa 程度の小さなヤング率と 3% の大きな降伏歪みを持つ Parylene-C を用いた樹脂ばね構造⁽⁷⁾を採用して、MEMS エレクトレット発電器を試作した。製作プロセスを図2に示す。まず、400 μm 厚の Si ウェハに DRIE により幅 20 μm 、深さ 350 μm の深溝をエッチングし、ばね構造の鋳型、および振動子とフレームの境界を形成する。次に、裏面にリソグラフィにより金電極を形成し、電極上にエレクトレット膜となる 15 μm 厚の CYTOP (CTL-M) を成膜する。その後、20 μm 厚の Parylene-C を表側に蒸着し、メタルマスクを形成後、酸素プラズマによりパタニングする。最後に XeF₂ ガスにより、鋳型となっていた Si を除去し、Parylene-C の樹脂ばねで支持された Si 振動子を形成する。下部ガラス基板は、上部基板と同様の手法で金電極とエレクトレットをパタニングすることにより製作する。最後に、両基板のエレクトレットをコロナ荷電した後、上下基板をマイクロビーズで間隔を保って位置決め・接合することにより完成する。

発電器の設計には、エレクトレット発電器の静電場モデル⁽⁸⁾を用いた。一般に、エレクトレット発電器では、振動子に一方方向の大きな静電気力が加わるが、Miki ら⁽⁶⁾は、1つの振動子に2つの 180° 位相の異なる発電回路を配置することによって、静電ダンピング力の一部を相殺し、速度比例のダンピング力となることを示した。本研究でも、同様の電極配置により速度比例減衰力の実現を試みた。

* 原稿受付 2010年2月19日。

^{*1} 東京大学大学院工学系研究科(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)。^{*2} 正員、東京大学大学院工学系研究科。

E-mail: ysuzuki@mesl.t.u-tokyo.ac.jp

Fig. 1 Schematic of electret generator.

Fig. 2 Fabrication process of MEMS electret generator.

Fig. 3. MEMS electret generator prototype.

Fig. 4. Backside of the top Si structure, a) Overview, b) Parylene high-aspect-ratio spring, c) SEM image of the parylene spring.

Fig. 5 Frequency response of the generator.

図3, 4に, それぞれ, 試作した発電器, 上部振動子基板の概観を示す. Si 振動子の大きさは $11.6 \times 10.2 \text{ mm}^2$, その質量 0.1 g である. 振動子の最大振幅を 2 mm_{pp} であり, エレクトレット幅および上下の極板間隔は, それぞれ $480 \mu\text{m}$, $70 \mu\text{m}$ とした. 発電器モデル⁽⁶⁾から見積もられる発電出力は, エレクトレットの表面電位が -600 V のとき, 共振周波数 63 Hz , 振動子振幅 2 mm_{pp} において $17 \mu\text{W}$ である.

3. MEMS エレクトレット発電器の性能評価

振動子の振動特性を図5に示す. 振動子基板を電磁加振器 (APS-113, APS Dynamics) に固定し, 高速カメラ (Phantom v5, Vision Research) で撮影した画像から振幅を算出した. 共振周波数は 63 Hz であり, 設計値と一致した. Q 値は 8.6 であり, 減衰係数がやや大きい, 0.9 mm_{pp} 以上の振幅を実現しており, 環境振動発電に適した低共振振動数・大振幅の振動伝達構造を実現できた.

図6に, 発電実験系の概要を示す. 組み立てた発電器を電磁加振器に固定し, 単一周波数の正弦波で水平方向に振動させた. 加振器の振幅は, レーザ変位計 (LC-2430, キーエンス) により計測した. 振動条件は, 周波数 63 Hz , 片振幅 0.12 mm であり, 振動加速度 $2G$ に相当する. 図7に, 発電出力と外部負荷の関係を示す. 振動子上に形成された, 中心部および端部の2つの発電器回路において, $20 \sim 80 \text{ M}\Omega$ の外部負荷で発電出力が最大となり, それぞれ, $0.56 \mu\text{W}$, $0.48 \mu\text{W}$, 合計 $1.04 \mu\text{W}$ が得られた.

図7中に, エレクトレットの表面電位を -180 V と仮定した発電器モデル⁽⁶⁾による計算結果を示す. 外部負荷の小さな領域で実験データと一致し, 実際に荷電したエレクトレットでは表面電位が低下していたことが窺える. また, 発電出力が最大となる付近

で、実験値はほぼ一定の値をとっており、計算結果と異なる。この相違の原因として、インピーダンスが整合する付近で静電ダンピング力が過大となり振幅が小さくなること、振動子上のエレクトレットと対向電極との間隔が変化していること、などが考えられる。

図 8 に、 $20\text{M}\Omega$ の外部負荷に対する出力電圧波形を示す。低い振動周波数にも関わらず、 $11.2\text{ V}_{\text{pp}}$ の高い出力電圧が得られており、エレクトレット発電器の優れた特性が示される。また、電圧波形の計算結果は実験値と良く一致している。

なお、本研究の条件において、表面電位が -600 V と仮定すると、発電出力は $10\text{ }\mu\text{W}$ となり、設計値 $17\text{ }\mu\text{W}$ に近い値が得られることが判る。

Fig. 6 Set-up for power generation experiment.

Fig. 7 Power output versus external load at an input acceleration of 2 G with 63 Hz.

Fig. 8. Time trace of output voltage at $20\text{ M}\Omega$.

4. 結言

環境振動をエネルギー源とする、MEMS エレクトレット発電器の開発を行い、以下の知見を得た。

- 1) Parylene ばねを持つ発電器プロトタイプを試作し、低共振周波数・大振幅振動を実現した。
- 2) 振動数 63 Hz、2G の低周波数振動から $1\text{ }\mu\text{W}$ の出力を得た。

本研究は、NEDO ナノテク・先端部材実用化研究開発の支援を得た。記して感謝の意を表する。

参考文献

- (1) Beeby, S. P., Tudor, M. J., and White, N. M., Energy harvesting vibration sources for micro systems applications *Measurement Science Technology*, Vol. 17, (2006), pp. R175-R195.
- (2) Lo, H.-W., and Tai, Y.-C., Parylene-based electret power generators, *Journal of Micromechanics Microengineering*, Vol. 18, 104006, (2008), 8pp.
- (3) Edamoto, M., Suzuki, Y., and Kasagi, N., Electret-based energy harvesting device with parylene flexible springs, *4th Asia-Pacific Conference on Transducers and Micro-Nano Technology (APCOT 2008)*, Tainan, 2B3-1, (2008), 4pp.
- (4) Naruse, Y., Matsubara, N., Mabuchi, K., Izumi, M., and Suzuki, S., Electrostatic micro power generator from low frequency vibration such as human motion, *Journal of Micromechanics Microengineering*, Vol. 19, 094002, (2009), 5pp.
- (5) Sakane, Y., Suzuki, Y., and Kasagi, N., Development of high-performance perfluorinated polymer electret film and its application to micro power generation, *Journal of Micromechanics Microengineering*, Vol. 18, 104011, (2008), 6pp.
- (6) Miki, D., Suzuki, Y., and Kasagi, N., Effect of nonlinear external circuit on electrostatic damping force of micro electret generator, *Proc. 15th Int. Conf. Solid-state Sensors, Actuators, and Microsystems (Transducers '09)*, Denver, (2009), pp. 636-639.
- (7) Suzuki, Y., and Tai, Y.-C., Micromachined high-aspect-ratio parylene spring and its application to low-frequency accelerometers, *Journal Micro-mechanical Sysms.*, Vol. 15, (2006), pp. 1364-1370.
- (8) Micheson, P. D., Green, T. C., Yeatman, E. M., and Holmes, A. S., Architectures for vibration-driven micropower generators, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 13, (2004), pp. 429-440.