

フォーカス 26 <第 8 回> : 成果事例クローズアップ (超微細リソグラフィー・ナノ計測拠点)

環境発電アプリケーションのための低共振周波数マイクロエレクトレット発電器

東京大学大学院工学系研究科・機械工学専攻 鈴木雄二, 三木大吾, 本泉真人,
旭硝子株式会社 森澤義富, 横塚俊亮, 柏木王明, 岡野邦子, 坂根好彦,
オムロン株式会社 土居仁, 積知範, 櫻井顕治, 正木達章, 生田雅代, 鍋藤実里
東京大学 超微細リソグラフィー・ナノ計測拠点 三田吉郎



東京大学大学院工学系研究科・機械工学専攻
(左から) 本泉真人, 三木大吾, 鈴木雄二



旭硝子株式会社
(左から) 森澤義富, 柏木王明, 岡野邦子, 坂根好彦, 横塚俊亮



オムロン株式会社
(左から) 生田雅代, 鍋藤実里, 櫻井顕治, 土居仁, 正木達章, 積知範



東京大学 超微細リソグラフィー・ナノ計測拠点
三田吉郎

1. はじめに

マイクロマシン技術 (MEMS) で製作されるデバイスの中で, エネルギー変換に関わるものは PowerMEMS と呼ばれる. MIT で研究が行われた 500 円玉大のガスタービンに端を発し, 持ち運び可能な高付加価値の超小型電源 [1] がその代表だが, ごく最近, Power MEMS 分野のなかでエナジー・ハーベスティング (Energy Harvesting, 環境発電) にも注目が集まっている.

エナジー・ハーベスティング (環境発電) とは, 「環境に存在する薄いエネルギーを電力に変換すること」であ

る [2][3][4][5]. 図 1 に示すように, 体温や人体の運動, 移動体・構造体の振動や排熱, 電波や環境光がエネルギー源となる. 例えば, 一般にはシリコン系太陽電池は室内の低い照度での変換効率は低く, 単位面積あたりの発電量は数 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 程度とされ, 色素増感太陽電池の方が優れると考えられている. 体温からは熱電素子を用いることで電力を取り出すことができ, 気温が 22°C の時は, 腕時計形のデバイスで $30\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 程度が得られるとの研究結果もある. また, エネルギー密度は小さいが, 携帯電話, テレビなど都市環境に飛び交う無線電波から発電することも可能である.

環境発電は, 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

*問い合わせ:
超微細リソグラフィー・ナノ計測拠点
〒113-0032 東京都文京区弥生 2-11-16
東京大学 武田先端知ビル
電話: 03-5841-7776
E-mail: nanotech@sogo.t.u-tokyo.ac.jp

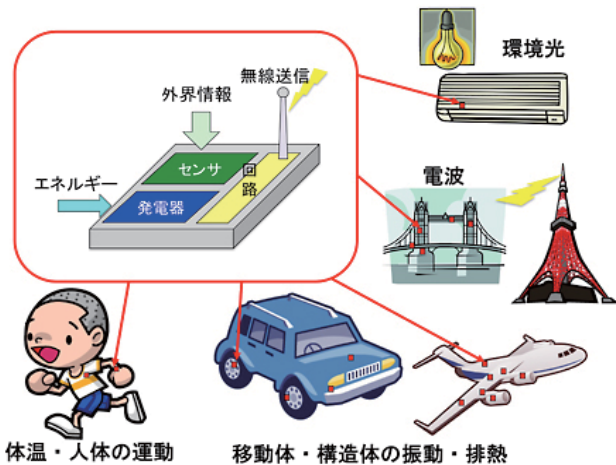


図1 エナジー・ハーベスティングの概念

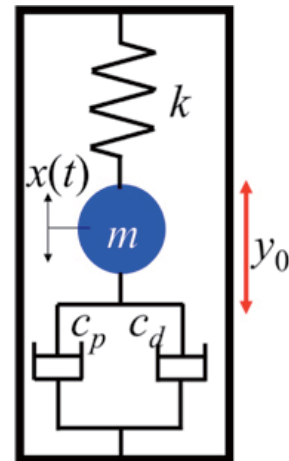


図2 振動発電器のモデル

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。

応用分野としては、自動車をはじめとする輸送機器用センサは1つの大きな市場である。特に、米国ではTREAD法の成立によって、乗用車にタイヤ空気圧モニタシステム (TPMS) の装着が義務づけられている。現在のシステムは電池駆動であり、1分間に1回のデータ転送に消費する電力は現在でも僅かに20μWとされる[6]。従って、タイヤあるいはホイールの振動から発電し、TPMSを駆動するシステムの研究開発が盛んに行われている。また、航空機では、機体のメンテナンスコストを削減するために、構造ヘルスマニタリングシステムの導入が検討されており、熱や振動からの発電によって多数のセンサ群を駆動することが検討されている。さらに、建築物やビルなどの管理システム、農畜産業のためのアクティブRFID、体内埋め込み医療デバイスなどにおいても、エナジー・ハーベスティングは極めて有効なクリーンな電力供給方法と考えられている。

これらの中で、著者らは、比較的应用範囲が広いと考えられている環境振動からの発電に取り組んでいる。

2. 振動発電器のモデル

図2に、単純化した振動発電器のモデルを示す。振動子の質量、バネ定数を m , k とし、ここでは単純のため、発電機構によって振動子に加わる反力 F が速度に比例すると仮定する。振動系内部の機械損失の減衰係数を ζ_d 、振動子の最大許容振幅を z_l とすると、発電器の理論出力 P は、

$$P_{\max} = \frac{1}{2} m y_0^2 \omega_n^3 \frac{z_l}{\left(\frac{y_0}{z_l}\right)^2} \zeta_d \quad (1)$$

のように書ける [7][8]。

上式より、まず、アプリケーション、すなわち、発電器の設置場所を決めたとき、振動周波数 (かつ振動系の共振周波数) ω_n 、および外部振動の振幅 y_0 は予め与えられる量であるので、出力を増大させるための設計パラメータは振動子の質量 m と最大振幅 z_l のみであることが判る (当然、機械損失 ζ_d は小さければ小さいほど良い)。本稿で対象とするようなマイクロ発電器においては軽いが要求されるので、質量をあまり大きくすることはできず、許容される発電器の大きさの中でのなるべく大きな振幅が得られる構造が望ましい。次に、 P_{\max} が ω_n の3乗に比例することから、周波数の高いアプリケーションでは、より大きな発電量が期待される。人体の歩行では数 Hz の振動しか存在しないが、自動車や空調機器などでの構造振動では、数 10Hz ~ 100Hz の振動エネルギーが大きい。これらの周波数領域は、通常 MEMS センサやアクチュエータの設計で想定される値よりもずっと小さく、効率良い発電には新しい構造が必要となる。

3. エレクトレット発電器

東京大学、旭硝子株式会社、オムロン株式会社では、NEDO ナノテク・先端部材実用化開発研究のもと、エレクトレットを用いた静電誘導型振動発電器の開発に取り組んでいる。エレクトレットは、誘電体に電荷を打ち込

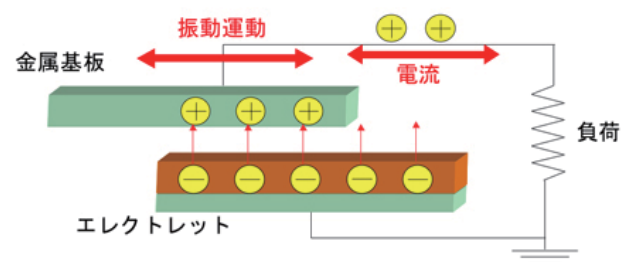


図3 エレクトレット発電器の原理

んだものであり、その寿命は数十年以上と長く、半永久的に静電場を発生させることができる [9].

図 3 に、エレクトレット発電器の原理を示す。エレクトレットにより形成される静電場によって対向電極に誘導電荷が生じ、エレクトレットと対向電極の重なり面積を変化させることによって、外部回路に交流電流を発生させることができる。エレクトレットを用いた静電誘導発電では、発電出力は周波数、すなわち振動子の移動速度に比例する。そのため、環境振動のように周波数が低く、しかも小型であることを特徴とする発電器では有利な発電方式である。エレクトレット発電器は 1970 年代に提案されている [10][11] が、環境発電への要求と MEMS 技術の発達によって、エレクトレット材料、およびマイクロ発電器の研究開発が再び活発になってきた [12][13][14][15].

4. フッ素ポリマーを用いた高性能エレクトレット材料

エレクトレット発電器を実用化するために最も重要な要素の 1 つは、当然のことながら電荷を保持させるためのエレクトレット膜である。理論発電量は表面電荷密度の 2 乗に比例するため、なるべく多くの電荷を保持できるエレクトレット材料が望ましく、また、実用的には電荷の熱的安定性が重要となる。Si 酸化膜はこれらの点で優れているが、デバイス製作の自由度を保つためにはポリマー材料によるエレクトレット膜が望ましく、マイクロマシン技術と整合性のあるものとしては Teflon®AF が用いられてきた [12].

著者らは、旭硝子（株）製のアモルファスフッ素樹脂 CYTOP®CTL-M が Teflon AF の 3 倍以上の極めて高い表面電荷密度を実現可能であることを見出し [13], エレク

トレットに特化した材料の開発を行っている。そして、既存の多数のフッ素系材料について電荷保持性能を調べたところ、環状構造を持つ CYTOP が高い基本的特性を持っていることが判った。また、興味深いことに、接着基として導入している末端基の存在によって電荷保持性能が劇的に向上することが判った。図 4 は、末端基のない CYTOP である CTL-S, カルボン酸, アミノシランを末端基に持つ CTL-A, CTL-M, そして Teflon AF の表面電荷密度の比較データである。CYTOP が Teflon AF よりも高い表面電荷密度を持つと同時に、CTL-S, CTL-A, CTL-M の順で表面電荷密度が増大することが判る。そこで、ポリマー中のアミノシラン濃度をさらに増大させるため、3wt% のアミノシランを混合したところ、さらに表面電荷密度が増大し、また、同時に熱的特性も向上することが明らかになった [15].

そして、新たに開発したポリマーエレクトレット材料を用いて、 $20 \times 20\text{mm}^2$ の基板上に $150\mu\text{m}$ 幅の櫛歯状にエレクトレット膜をパタニングし、発電実験を行った。周波数 20Hz, 振幅 $1.2\text{mm}_{\text{p-p}}$ の振動条件下で 0.7mW を得て、環境に存在しうる低周波数の振動においても高い出力が得られるエレクトレット発電器の特性を確認した。

上述の例では、 $20 \times 20\text{mm}^2$ の面積から 1mW 弱の電力が得られたが、近年の LSI の低電力化、無線技術の進歩によって、さらに小さな電力で駆動できるアプリケーションも多く、より小型の発電デバイスによる評価が期待される。

5. MEMS エレクトレット振動発電器

発電器は、くし形にパタニングされたエレクトレット膜および対向電極、振動子、バネ構造などからなる。また、エレクトレットの材料としては、従来材料の 3 倍以上の

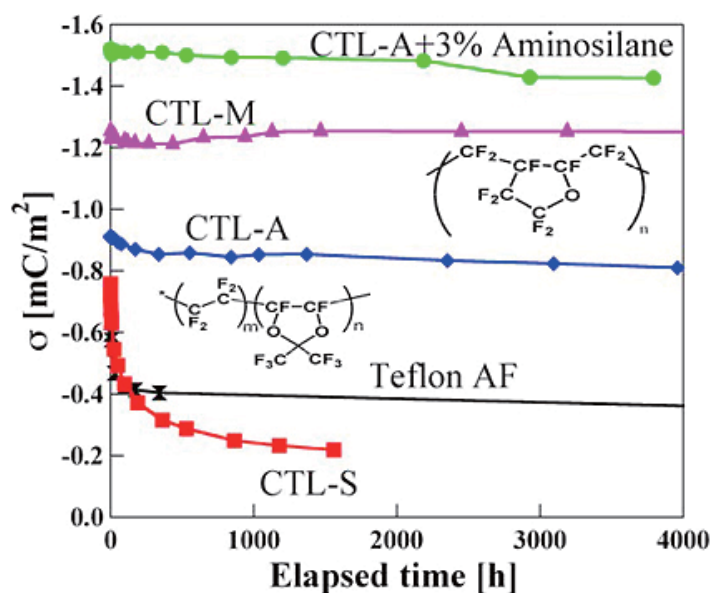


図 4 ポリマーエレクトレットの荷電性能比較 [15]

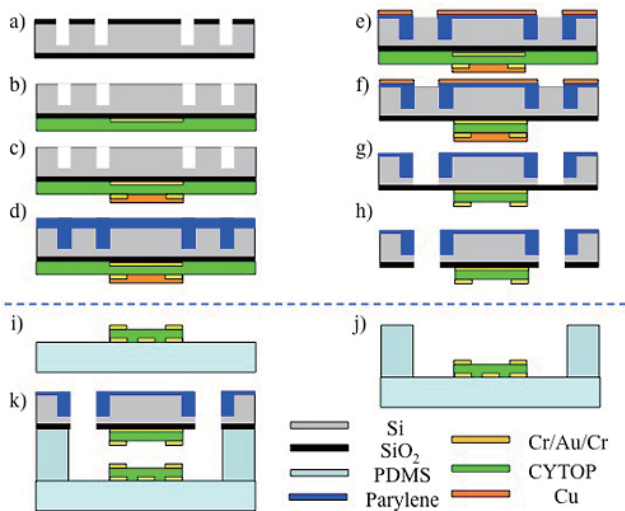


図5 MEMS エレクトレット発電器の製作プロセス [16][18]

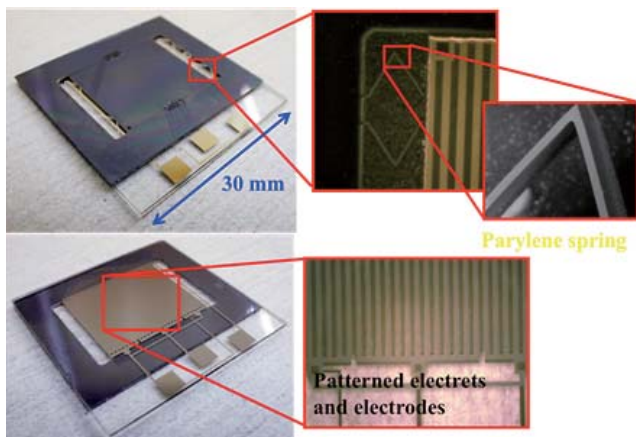


図6 MEMS エレクトレット発電器の初期プロトタイプ [16][18]

極めて高い表面電荷密度を実現可能なアモルファスフッ素樹脂 CYTOP[15] が用いられている。また、環境に存在する振動周波数は概ね 100Hz 以下と小さいため、振動エネルギーを吸収するためには共振周波数の低い振動構造が必要である。著者らは、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 [17] を採用して、MEMS エレクトレット発電器を試作した [16][18]。このばね構造は、ばねの幅 20 μm 、アスペクト比約 20 のポリパラキシリレン (Parylene-C) 製であり、ヤング率が単結晶シリコンよりも 40 倍小さく、脆性破壊しない特徴を活かして、20Hz 程度の極めて低い共振周波数、1mm 以上の大きな振幅を達成できる。

製作プロセスを図 5 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

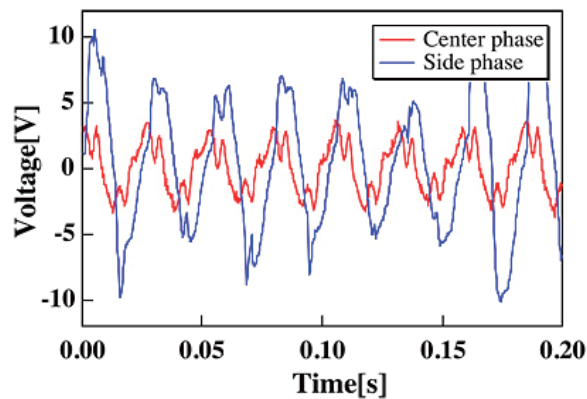


図7 エレクトレット発電器初期プロトタイプの実験結果 [16][18]

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。図 6 に初期プロトタイプを示す。

振動子の面積が 16mm × 14.6mm である初期プロトタイプに対して、共振周波数である 37Hz の振動を与えた場合の、出力電圧波形を図 7 に示す。100M Ω の外部負荷に対して、0.28 μW の出力が得られている。現在、さらに小さな MEMS 発電器を試作しており、11.6mm × 10.2mm の振動子面積、40Hz、1G の加速度において 4 μW の出力が得られている [19]。

なお、これらのプロセスにおいて用いたガラスマスクは、超微細リソグラフィ・ナノ計測拠点 (武田先端知クリーンルーム) の可変整形ビーム電子線描画装置 (アドバンテスト F5112 改造機) により作製した。

6. おわりに

エネルギー問題としては、CO₂ 排出削減に代表される地球規模での環境負荷低減が深刻であるが、マイクロ環境発電は、我々の現代での生活に密着した付加価値の高い「グリーン電源」として位置づけられる。まだ実用化されたデバイスは極めて少ないが、社会的なニーズも極めて高く、様々な分野への波及効果も大きい。今後、日本発の新奇性の高いエレクトレット材料としてさらなる進化を進め、マイクロエレクトレット発電器の実用化へ前進していきたい。

本研究の一部は、文部科学省・先端研究施設共用イノベーション創出事業 ナノテクノロジーネットワークプログラム、および、総務省・戦略的情報通信研究開発推進制度 (SCOPE)、NEDO ナノテク・先端部材実用化研究開発の援助を受けた。記して感謝の意を表す。

参考文献

- [1] Epstein, A. H., and Senturia, S. D., "Macro power from micro machinery," *Science* Vol. 276, Iss. 5316, p.1211, 1997.
- [2] Paradiso, J. A., and Starner, T., "Energy scavenging for mobile and wireless electronics," *IEEE Perv. Comput.*, Vol. 4, pp. 18-27, 2005.
- [3] Beeby, S. P., et al., "Energy harvesting vibration sources for microsystems applications," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 17, R175-R195, 2006.
- [4] Mitcheson, P. D., "Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices," *Proc. IEEE*, Vol. 96, No. 9, pp. 1457-1486, 2008.
- [5] 鈴木 雄二, "エネルギーハーベスティング," *映像情報メディア学会誌*, Vol. 64, No. 2, pp. 198-200 (2010).
- [6] Löhndorf, M., et al., "Evaluation of energy harvesting concepts for tire pressure monitoring systems," 7th Int. Workshop Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS 2007), Freiburg, pp. 331-334, 2007.
- [7] Mitcheson, P. D., et al., "Architectures for vibration-driven micropower generators," *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 13, pp. 429-440, 2004.
- [8] 鈴木 雄二, "マイクロ環境発電デバイスの研究動向," *電気学会誌*, 128 巻, 7 号, pp. 435-438, 2008.
- [9] Sessler, G. M., *Electrets*, 3rd Edition, Laplacian Press, 1998.
- [10] Jefimenko, O. D., "Electrostatic current generator having a disk electret as an active element," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 14, pp. 537-540, 1978.
- [11] Tada, Y., "Experimental characteristics of electret generator using polymer film electrets *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 31, Pt. 1, pp. 846-851, 1992
- [12] Boland, J., Chao, C.-H., Suzuki, Y., and Tai, Y.-C., "Micro electret power generator," 16th IEEE Int. Conf. Micro Electro Mechanical Systems (IEEE MEMS'03), Kyoto, pp. 538-541, 2003.
- [13] Tsutsumino, T., Suzuki, Y., Kasagi, N., Kashiwagi, K., and Morizawa, Y., "Micro seismic electret generator for energy harvesting," 6th Int. Workshop Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS 2006), Berkeley, pp. 279-282, 2006.
- [14] Lo, H.-W., and Tai, Y.-C., "Parylene-based electret power generators," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 18, No. 10, 104006, 8pp, 2008.
- [15] Sakane Y., Suzuki, Y., and Kasagi, N., "Development of high-performance perfluorinated polymer electret and its application to micro power generation," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 18, No. 10, 104011, 6pp, 2008.
- [16] Suzuki, Y., Edamoto, M., Kasagi, N., Kashiwagi, K., Morizawa, Y., Yokoyama, T., Seki, T., and Oba, M., "Micro electret energy harvesting device with analogue impedance conversion circuit," 8th Int. Workshop on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS 2008), Sendai, pp. 7-10, 2008.
- [17] Suzuki, Y., and Tai, Y.-C., "Micromachined high-aspect-ratio parylene spring and its application to low-frequency accelerometers," *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 15, No. 5, pp. 1364-1370, 2006.
- [18] Edamoto, M., Suzuki, Y., and Kasagi, N., "Electret-based Energy Harvesting Device with Parylene Flexible Springs," *Asia-Pacific Conference on Transducers and Micro-Nano Technology 2008 (APCOT 2008)*, Tainan, 2B3-1, 4pp, 2008.
- [19] Miki, D., Honzumi, M., Suzuki, Y., and Kasagi, N., "Large-amplitude MEMS Electret Generator with Nonlinear Spring," 23rd IEEE Int. Conf. Micro Electro Mechanical Systems (IEEE MEMS 2010), Hong Kong, pp. 176-179, 2010.

(東京大学 鈴木雄二)