

## 解説

マイクロ環境発電デバイスの  
研究動向

鈴木 雄二

キーワード：環境発電，センサネットワーク，MEMS，振動発電

## 1. はじめに

Power MEMS (Micro Electro Mechanical System) という用語は、1996年にマサチューセッツ工科大学 (MIT) の A. Epstein 教授と S. Senturia 教授が "Microsystems which generate power or pump heat" と定義した<sup>(1)</sup>ものであり、マイクロマシン分野の中で Optical MEMS, RF MEMS,  $\mu$ TAS などと比べても比較的新しいカテゴリである。1994年頃からMITで進められたMEMS ガスタービンを皮切りに、米国で様々な基盤技術開発<sup>(2)</sup>が行われた。これらは、燃料の持つ化学エネルギー密度がリチウムイオン電池 (LIB) などの高性能2次電池に比べて数10倍大きいことを利用するものであり、ノートPC用直接メタノール型燃料電池 (DMFC)<sup>(3)</sup>等と同様、数W～数10W程度の出力を持ち、LIBの代替となる携帯・可搬電源の開発を目指している。

一方、近年、PowerMEMSの中でさらに出力の小さな電源として、環境に薄く広く存在するエネルギーから電力を取り出し、小電力の電子デバイスの駆動に利用する、環境発電 (Energy Harvesting) が注目されている。エネルギー源としては、表1に示すように様々なものが考えられている<sup>(4)</sup>。このうち、太陽光は最も一般的に利用され、太陽電池が小型電卓、腕時計などに広く用いられている。しかし、直射日光下では $0.1\text{W}/\text{cm}^2$ のエネルギー密度がある一方で、室内では $10^{-4}\text{W}/\text{cm}^2$ 以下に減少するため、用途によっては利用が難しい。他のエネルギー源としては、電磁波、熱、振動などが考えられ、エネルギー密度は、 $10^3\sim 10^6\text{W}/\text{cm}^2$  オーダーとなる。

本稿では、まず、環境発電の意義と応用分野、様々な運動エネルギーからの発電について述べ、次に環境に存在する振動からの発電器モデル、内外の研究動向を概説し、最後に著者らの試みを解説する。

**すずき・ゆうじ** 1993年東京大学大学院工学系研究科機械情報工学専攻博士課程修了。同年東京大学助手。名古屋工業大学講師、東京大学講師を経て、1999年から東京大学大学院工学系研究科・機械工学専攻助教授 (2006年より職名変更による准教授)。現在、主として、エレクトレット発電器等のマイクロエネルギー、およびマイクロ熱流体システムに関する研究に従事。

## 2. 環境発電の意義と応用分野

環境発電の意義は、系統電源から分離した小電力デバイスを長期間保守なしに使用可能とする付加価値の高いエネルギー源を提供するところにある。上述のように、環境発電で得られる電力は一般に小さく、総量として省エネ・CO<sub>2</sub>削減に貢献するほど多くない。一方、我が国において、コイン型の酸化銀電池、リチウム電池は年間10億個以上<sup>(5)</sup>が生産されているが、ほとんどがリサイクルされることなく廃棄されている。従って、環境発電によって電池が不要となれば重金属や電解質液による環境汚染の危険性をなくすことができ、その意味では環境負荷低減に貢献できる可能性がある。

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。乗用車でもハーネス (配線) は3km程度あるが、システムが複雑化するほど配線は長大化し、ヘリコプターでは20km、大型旅客機では100kmを超える。そこで、センサ、コンピュータと通信する無線チップ、そして環境から発電するマイクロデバイスを一体化したシステムを用いれば、配線が不要となり、配線の重量軽減、コストの低減、設計上の自由度増大などのメリットが生まれる。

特に、米国では TREAD 法 (Transportation Recall Enhancement Accountability and Document Act) の成立によって、2007年9月以降に販売される乗用車にタイヤ空気圧モニタシステム (TPMS, Tire Pressure Monitoring System) の装着が義務づけられている。新車の販売台数が世界で7000万台程度であることを考えると、タイヤ内の振動から発電する超小型振動発電器が開発できれば、大きなアプリケーションになりうる。

また、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など、環境発電は極めて有効な電力供給方法と考えられている。例えば、ZigBeeなどの短距離無線通信に必要なエネ

表1 環境発電のエネルギー密度<sup>(4)</sup>

エネルギー源	エネルギー密度
環境光 (直射日光)	$10^{-1}\text{W}/\text{cm}^2$
環境光 (室内)	$10^{-1}\text{W}/\text{cm}^2$
電磁波	$< 10^{-6}\text{W}/\text{cm}^2$
熱	$10^{-5}\text{W}/\text{cm}^2$
振動	$10^{-3}\text{W}/\text{cm}^3$

ルギーは60mW程度であるが、データを間欠的に送受信すれば、適切な蓄電池と組み合わせれば発電容量はずっと小さくて良い。さらに、心臓ペースメーカー、人工内耳、インシュリンポンプなど、配線が難しい体内埋め込み医療デバイスなどでも一次電池が使用されているが、環境発電による自立電源が組み込めれば電池交換が不要となり、医療技術としての発展に貢献できる。

### 3. 様々な運動エネルギーからの電力変換の試み

運動エネルギーの源としては、人体の運動、機械等の振動、その他に分類できる。人体の運動からの発電としては、腕時計用の振動発電が既に実用化されているが、最も大きな出力が期待できるのは歩行際の運動エネルギーである。体重68kgに対して理想的には67Wが取り出せるとされている。MITのグループでは、中敷きにPZTを組み込んだ靴により、8.3mWの出力を得ており<sup>6)</sup>、SRIのグループでは、電歪ポリマーを用いて800mWの出力を得ている<sup>7)</sup>。また、38kgのバックパックの振動から5.6Wが得られるという見積り<sup>8)</sup>や、ひざに取り付けることによって5Wを発電する装置の開発<sup>9)</sup>が報告されている。しかし、これらのデバイスは比較的大きいため低コスト化は難しく、実用化されたとしても、かなり特殊な用途のみに用いられると考えられる。

産業界でもベンチャーを中心に運動エネルギーを使った環境発電の取り組みがなされている。独シーメンスからのスピンオフで設立されたEnOcean社では、ホームオートメーション用の環境発電デバイスを開発している<sup>10)</sup>。壁の電灯スイッチと同じ形状のデバイス内部に電磁誘導発電器を組み込み、スイッチ動作によって得られる電力で無線回路を動作させて、照明などをワイヤレスで点灯させるもので、建築時の電気配線を減らし、スイッチを任意の位置に設置できるという利点がある。英Perpetuum<sup>11)</sup>は、サザンプトン大学のアイデアを基に電磁誘導による振動発電器を市販している。100Hz、0.025gの振動から、1mW程度を出力できるが、直径、高さともに55mmの円柱状であり、質量も約650gと重い。

また、研究レベルでは、キーボードのタイピング動作から圧電素子により発電するデバイス<sup>12)</sup>、雨粒の衝撃から発電するデバイス<sup>13)</sup>なども提案されている。

以下では、より一般的な、機械等の振動からの発電に絞って話を進める。

### 3. 振動発電器のモデル

図1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、発電機構によって振動子に加わる反力  $F$  は、振動子の位置  $z(t)$ 、速度  $\dot{z}(t)$  の関数である。一般に、電磁誘導の場合、反力  $F$  は速度にほぼ比例し、静電誘導では反力  $F$  は位置、速度によらずほぼ一定と考えられる<sup>14,15)</sup>。

以下では、簡単のため、発電機構はダンピング係数  $c_p$  を持つ速度比例のダンパーとしてモデル化されると仮定する。なお、静電

誘導の場合にも、一方向に働く静電反力を打ち消すように作用電極を2相配置することにより、反力の絶対値が減少し、速度にほぼ比例することが示されている<sup>16)</sup>。

振動系内部の機械損失のダンピング係数を  $c_d$  とすると、運動方程式は、

$$m\ddot{z} + (c_p + c_d)\dot{z} + kz + F(t) = -m\ddot{y} \quad (1)$$

で与えられる。外部振動  $y(t)$  を単一周波数の正弦波と仮定し、その振動の角振動数を  $\omega$ 、振幅を  $y_0$  とすると、振動子の振幅  $z_0$  は、

$$z_0 = \frac{\omega_c^2}{\sqrt{(1-\omega^2)^2 + \{2(\zeta_p + \zeta_d)\omega\}^2}} y_0 \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 $\omega_c$  は  $\omega/\omega_n$  ( $\omega_n$  は共振角振動数  $\sqrt{k/m}$ )、 $\zeta_p$ 、 $\zeta_d$  は、それぞれ機械損失、発電器に相当する減衰係数

$$\zeta_p = \frac{c_p}{2m\omega_c}, \quad \zeta_d = \frac{c_d}{2m\omega_c} \quad (3)$$

である。発電器の理論出力  $P$  は、

$$P = \frac{1}{T} \int F\dot{z} dt = \frac{1}{T} \int_0^T c_p \dot{z}^2 dt = \frac{m\zeta_p y_0^2 \omega_c^3 \omega^3}{(1-\omega^2)^2 + \{2(\zeta_p + \zeta_d)\omega\}^2} \quad (4)$$

となる。従って、出力が最大となる  $\zeta_p$  は、 $dP/d\zeta_p=0$  を解いて、

$$\zeta_{p, \text{opt}} = \sqrt{\zeta_d^2 + \frac{(1-\omega^2)^2}{4\omega_c^2}} \quad (5)$$

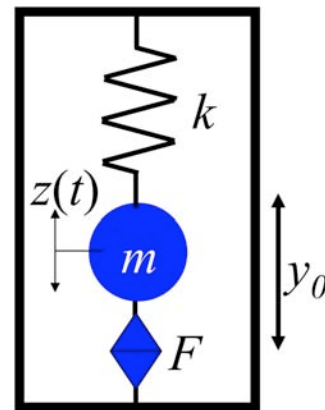


図1 振動発電器モデル

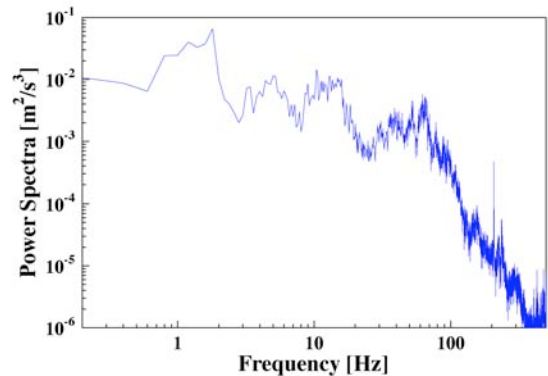


図2 走行する自動車室内での加速度スペクトルの測定データ

より、ダンピング係数を最適に選んだ場合の出力  $P_{opt}$  が

$$P_{opt} = \frac{m \sqrt{\zeta_d^2 + \frac{(1-\omega_c^2)^2}{4\omega_c^2}} y_0 \omega_c^3}{(1-\omega_c^2)^2 + \left\{ 2 \left( \sqrt{\zeta_d^2 + \frac{(1-\omega_c^2)^2}{4\omega_c^2}} + \zeta_d \right) \omega_c \right\}^2} \quad (6)$$

と得られる。さらに、外部振動によって振動子が共振状態 ( $\omega_c=1$ ) になったときに理論出力は最大となり

$$P_{max} = \frac{m y_0^2 \omega_c^3}{16 \zeta_d} \quad (7)$$

となる。このとき、(5)式から  $\zeta_p = \zeta_d$  となるので、運動エネルギーからの理論発電効率は50%となる。

一方、MEMS デバイスでは、振動子の振幅に制約があるので、最大許容振幅を  $z_1$  とすると、(2)式から、

$$\zeta_{opt} = \frac{1}{2\omega_c} \sqrt{\omega_c^4 \left( \frac{y_0}{z_1} \right)^2 - (1-\omega_c^2)^2 - \zeta_d} \quad (8)$$

が得られ、これを(4)式に代入して  $\omega_c=1$  とすると、理論最大出力は、

$$P_{max} = \frac{1}{2} m y_0^2 \omega_c^3 \frac{y_0 - \zeta_d}{\left( \frac{y_0}{z_1} \right)^2} \quad (9)$$

のように書ける。

式(9)により、2つのことが判る。まず、アプリケーション、すなわち、設置場所を決めたとき、 $\omega_h$  および  $y_0$  は予め与えられる量であるので、設計パラメータとしては振動子の質量  $m$  と最大振幅  $z_1$  のみである。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こと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  $\omega_h$  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。図2に、走行する自動車の室内で加速度センサによって計測した、加速度のパワースペクトルの例を示す。高周波の振動はサスペンションによって吸収されるため、100Hz 以上の振動はほとんどない。一方、TPMS で発電器を設置するタイヤ内部では、400-500Hz 程度の振動も存在し<sup>(17)</sup>、小型化にはより有利であることが判る。

#### 4. 内外の研究動向

第7回 PowerMEMS 国際ワークショップが2007年11月にドイツ・フライブルグ市にて開催された。ここ5年間の傾向を見てみると、2002年にはマイクロエンジン、燃料電池がそれぞれ30%程度を占めていたが、2007年の会議でも数は頭打ちで、割合としては15%程度に半減している。逆に、環境発電が増加し、40%以上を占めるまでになった。これは、ボタン電池代替電源として、アプリケーション側からの要求が強まっていると同時に、シーズ側

の研究が進んで来たことが要因と考えられる。また、環境発電では発電器の出力の特性が負荷側の電気的特性と合わないことが多く、整流・平滑化、昇・減圧、充電などのための電子回路に関する研究も多く発表されるようになってきた。

独ブラウンホーファー研究所では、"Power To Go"を合言葉に超小型電源に関する横断的組織<sup>(18)</sup>で活発な活動を行なわれ、またフライブルグ大学 IMTEK でも環境発電を含むセンサーネットワークノード構築を目的とした大型プロジェクトが進行中である。我が国では組織だった活動は行われていなかったが、平成20年3月に、日本機械学会マイクロナノ工学専門会議<sup>(19)</sup>のもとマイクロエネルギー研究会が設立され、活発な情報交換が始まっている。

運動エネルギーからの変換方式は、上述のように、電磁誘導、静電誘導、圧電に分類される。結論から言うと、現時点では環境発電に最も適しているかは明確でなく、研究者によって意見の別れるところである。すなわち、電磁誘導は微小化が難しく、出力電圧が低い。単純な静電誘導は外部電源が必要であり、エレクトレットを用いる静電誘導では外部電源は不要であるが、エレクトレット膜中の電荷の熱的安定性が課題となる。また、圧電は比較的簡単に出力が得られるが、電気機械結合係数が高いPZTは鉛を含み、PZT以外の圧電素子は性能が低い。今後、デバイスのモデル化によって発電器の特性をおさえた最適設計を行うとともに、新規性の高い材料・加工技術の開発が必要になると考えられる。なお、個別の研究成果については紙面の都合で触れないが、最近のレビュー等の文献<sup>(20,25)</sup>を参考にされたい。

#### 5. エレクトレット発電器

ここでは、著者らが現在取り組んでいる、エレクトレットを用いた静電誘導型発電器について解説したい。エレクトレットは、誘電体に電荷を打ち込んだものであり、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<sup>(26)</sup>。エレクトレット発電器は1970年代に提案されている<sup>(27,28)</sup>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<sup>(29,33)</sup>。

図3a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。

図3bに、MEMS技術により試作した振動型マイクロ発電器のプロトタイプ<sup>(34)</sup>を示す。発電器は、くし形コパ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。大きな発電出力のためには、共振周波数が低く、かつ大振幅振動

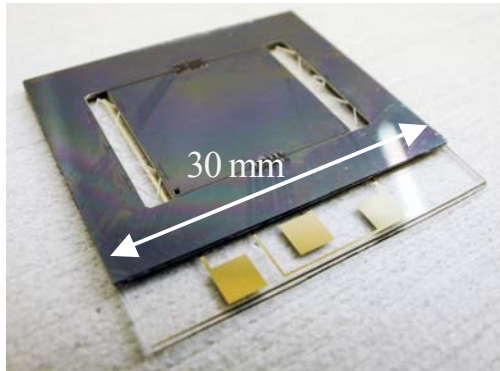
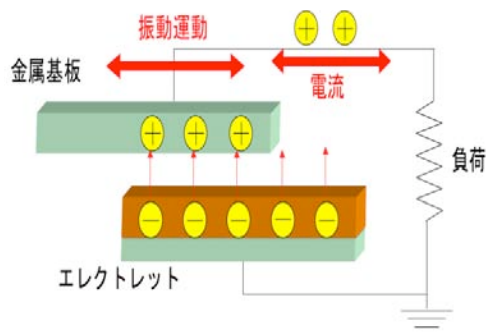


図3:a)エレクトレット発電の原理, b)発電器プロトタイプ<sup>(26)</sup>.

を可能とするバネ構造が必要であり、高アスペクト比樹脂バネ構造<sup>(35)</sup>が用いられている。このバネ構造は、バネの幅 $20\mu\text{m}$ 、アスペクト比約 20 のポリパラキシリレン (parlylene-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している。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 (旭硝子製)<sup>(30,32)</sup>が用いられている。

また、 $20 \times 20 \text{ mm}^2$ の基板の上にエレクトレット膜を $150\mu\text{m}$ 幅の櫛歯状にパタニングしたものをを用い、周波数 20 Hz、振幅 $1.2 \text{ mm}_{\text{pp}}$ の振動条件下で $0.7 \text{ mW}$ が得られており<sup>(62)</sup>、低周波数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が確認された。また、このとき、出力電圧は $168\text{V}_{\text{pp}}$ であり、電磁誘導とは異なって低周波数でも高い電圧が得られることが判る。

上述の例では、 $20 \times 20 \text{ mm}^2$ の面積から $1\text{mW}$ 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。

## 6. おわりに

本稿では、最近注目を集めている環境発電を取り上げた。エネルギー問題としては、 $\text{CO}_2$  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、マイクロエネルギー、特に環境発電は、我々の現代での生活に密着した付加価値の高いエネルギーシステム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

効果も大きく、今後の研究開発の進展が期待される。我が国では環境発電に用いられる機能的な材料などに強みがあると考えられるが、この分野の研究者は諸外国に比べて極めて少ない。本稿がこの分野に興味を持って頂くきっかけとなれば幸いである。

5章で紹介した著者らの研究の一部は、総務省・戦略的情報通信研究開発推進制度 (SCOPE)、および、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.: Science 276, 1211, 1977.
- (2) <http://www.darpa.mil/MTO/>
- (3) 例えば, S. K. Kamarudin et al., J. Power Source, 163, 743, 2007.
- (4) Roundy, S., et al., J. Comp. Comm., 26, 1131, 2003.
- (5) (社)電池工業会, <http://www.baj.or.jp>
- (6) Paradiso, J. A., and Stamer, T., IEEE Pervasive Computing, 4, 18, 2005.
- (7) Kombluh, R. D., et al., Proc. SPIE, 4698, 254, 2002.
- (8) Rome, L. C., et al., Science, 309, 1725, 2005.
- (9) Donelan, J. M., et al., Science, 319, 807, 2008.
- (10) <http://www.enocean.com>
- (11) <http://www.perpetuum.co.uk>
- (12) Wacharasindhu, T., et al., PowerMEMS 2007, Freiburg, 45, 2007.
- (13) Guigon, R., et al., Smart Mater. Struct., 17, 015039, 2008.
- (14) Beeby, S. P., et al., Meas. Sci. Technol., 17, R175, 2006.
- (15) Mitcheson, P. D., et al., J. Microelectromech. Syst., 13, 429, 2004.
- (16) Marboutin, C., et al., PowerMEMS 2007, Freiburg, 141, 2007.
- (17) Löhndorf, M., et al., Proc. PowerMEMS 2007, Freiburg, 331, 2007.
- (18) <http://www.energie.fraunhofer.de/english/mikro/home/>
- (19) <http://www.jsme.or.jp/mmm/>
- (20) Beeby, S. P., et al., Meas. Sci. Technol., 17, R175, 2006.
- (21) Anton, S. R., and Sodano, H. A., Smart Mater. Struct., 16, R1, 2007.
- (22) Priya, S., J. Electroceram., 19, 165, 2007.
- (23) Beeby, S. P., et al., J. Micromech. Microeng., 17, 1257, 2007.
- (24) Arnold, D. P., IEEE Trans. Magnetics, 43, 3940, 2007.
- (25) von Büren, T., et al., IEEE Sensors J., 6, 28, 2006.
- (26) Sessler, G. M., *Electrets*, 3<sup>rd</sup> Edition, Laplacian Press, 1998.
- (27) Jefimenko, O. D., IEEE Trans. IA-14, 537, 1978.
- (28) Tada, Y., Jpn. J. Appl. Phys., 31, 846, 1992.
- (29) Boland, J., et al., IEEE Int. Conf. MEMS'03, Kyoto, 538, 2003.
- (30) Tsutsumino, T., et al., IEEE Int. Conf. MEMS'06, Istanbul, 98, 2006.
- (31) Sterken, T., et al., Transducers'07, 129, 2007.
- (32) Sakane Y., et al., Proc. PowerMEMS 2007, Freiburg, 53, 2007.
- (33) Lo, H.-W., and Tai, Y.-C., PowerMEMS 2007, Freiburg, 57, 2007.
- (34) Edamoto, M., et al., APCOT 2008, Tainan, 2008, to be presented.
- (35) Suzuki, Y., and Tai, Y.-C., J. Microelectromech. Syst., 15, 1364, 2006.