

高性能エレクトレット「サイトップEGG」を用いた 小型振動発電器のIoTセンサ電源への応用

‘CYTOP EGG’ a High Performance Electret material and its Application for Vibration Energy Harvester, and the Power Source of IoT Sensors

坂根好彦*
Yoshihiko Sakane

近年、環境負荷に対する意識の向上により、省エネ・創エネ等、エネルギー活用に関する取り組みが積極的に行われている。その中で環境中に存在するエネルギーから電力を取り出す「環境発電 (Energy Harvesting)」技術が大きく注目されている。その中の一つである振動エネルギーから発電をする振動発電では、環境中に広く薄く存在する低周波振動から効率よくエネルギーを回収する事が重要で、エレクトレット振動発電器は低周波数の振動で高効率発電が可能である。

我々は高性能エレクトレット「サイトップEGG」を開発し、東京大学、オムロン株式会社にて、サイトップを用いた小型振動発電デバイスの実用検討を進めている。本デバイスを用いた環境複合センサや、電源モジュール等が提案されており、来るべきInternet of Things (IoT) 時代において、ワイヤレスセンサネットワーク用のセンサノードへの自立電源として有望視されている。

In recent years, energy-saving and energy creation, etc., efforts related to energy utilization have been actively carried out, because of the improvement of awareness of environmental impact. It draws power from the energy present in the environment in which "Energy Harvesting" technology is greatly noted. In the vibration power generation, generation efficiently by low-frequency vibration that exists widely and thinly in the environment is the key. Electret vibration generator is capable of high-efficiency power generation by the vibration of a low frequency. "CYTOP EGG" a High Performance Electret material is developed by AGC, and the University of Tokyo, and Omron Corporation are promoting the practical study of a micro vibration power generation device incorporated CYTOP EGG. The Vibration Generator has been proposed for Environment multi sensor using this device and power modules, etc., In the coming Internet of Things (IoT) era, it is promising as maintenance-free power supply to the sensor nodes for wireless sensor networks.

*化学品カンパニー技術統括本部開発部横浜研究所 グループリーダー (Email: yoshihiko-sakane@agc.com)
Group Leader of AGC Chemicals R&D division

1. 緒言

1.1 環境発電とセンサネットワーク

近年、自然環境中に薄く広く存在するエネルギーから電力を取り出し、低消費電力の電子デバイスの駆動電源等に利用する「環境発電 (Energy Harvesting)」技術が大きく注目されている。環境発電のエネルギー源としては太陽光、熱、電磁波、振動等、これまで利用が考えられてこなかったエネルギーを回収して有効利用することが出来、低炭素社会に貢献する非常に有用な技術である⁽¹⁾。

現在、自動車や航空機などの移動・輸送機器用のセンサや、橋梁・高速道路等インフラの監視システム用センサの電源として、また、農畜産業のためのアクティブRF-IDタグや、体内埋め込み式医療デバイスへの応用、さらにはウェアラブルデバイスの補助電源としての利用などが考えられている。

特に、ワイヤレスセンサネットワーク用センサノードなどの電源への適用が期待されており、充電・交換・燃料補給なしで長期間エネルギー供給が可能な「メンテナンスフリー」電源として、「いつでも、どこでも、何にでも、誰とでも」ネットワークにつながる「モノのインターネット (Internet of things : IoT)」の実現に必須の技術と考えられるが、デバイスの小型化が大きな課題となっている。

1.2 振動発電

環境発電の中でも太陽光は太陽電池として、腕時計や電卓等の電池交換が不要の電源として最も一般的に利用されているが、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、室内や曇天下では $10^{-4}\text{W}/\text{cm}^2$ 以下まで減少するため、用途によっては利用が難しい。

一方で、環境に存在する振動、例えば人体の動きや機械・構造物の振動に伴う振動からエネルギーを得る「振動発電」は、得られるエネルギーは微量ながらも安定なエネルギー源として有望である。これらの振動の特徴は、非常に周波数が低いこと (例えば、人体の動きであれば数Hz、機械振動でも100Hz以下)、時間的に周波数が変化することであり、振動発電デバイスに要求される性能としては、低周波数領域で発電が可能である事、および広帯域の振動に対する感度を持つ事である⁽²⁾。振動発電デバイスは共振系で用いられることが殆どで、バネで支えられた振動子が発電デバイスの筐体に対して相対運動をし、その運動エネルギーを電気エネルギーに変換する。

振動発電には、永久磁石とコイルを用いた電磁誘導方式、歪を電荷に変換する圧電方式、および電荷の静電誘導による静電誘導方式の3つの方式が考えられている。

電磁誘導方式は、誘導電圧力がコイルと永久磁石の相対速度 (周波数) f とコイル面積 A の積に比例し、発電出力はそれらの2乗に比例するため、比較的大き

なサイズでかつ高周波での発電出力に優れている。一方で静電誘導方式は、発電出力は面積 A と振動周波数 f の積に比例するため、小さなサイズでかつ低周波数の領域で高い発電出力が得られる。環境発電では振動は数Hzのごく低い周波数に限られるため、電磁誘導型に比べると静電誘導型が圧倒的に発電出力が高い (Fig.1)。

圧電方式は静電誘導方式と同様に周波数に比例した発電出力が得られるため、小型・低周波数帯で有利だが、材料の変形の際に発生する電位差を電力として回収するため、小型デバイスでは一般に低周波数帯への適応が難しく、材料そのものの変形による機械的耐久性の不安があり、また材料が環境に与える負荷の懸念も指摘されている。

環境発電においては低い周波数の振動が主なエネルギー源となるため、振動発電としては静電誘導方式の優位性が高いと言える。

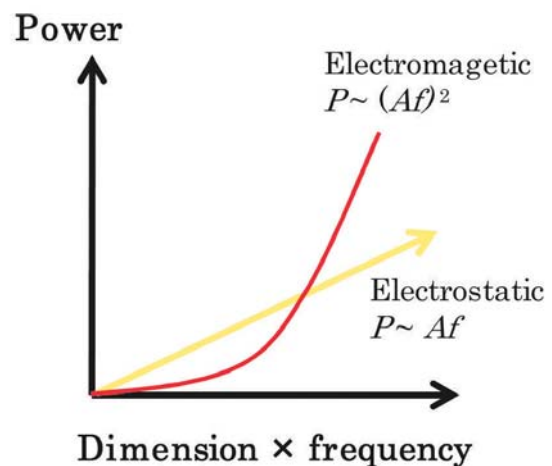


Fig.1 Output power comparison of Electrostatic induction generator with Electromagnetic generator.

2. エレクトレットを用いた振動発電デバイス

2.1 エレクトレット

エレクトレットとは、永久電気分極を保持する物質の事を差し、永久磁石 (マグネット) に対応して作られた造語である。エレクトレットに関する研究は数多く、その研究成果は書籍・ハンドブック等に纏められている⁽³⁾。エレクトレットは身の回りにある様々なものに应用されており、例えば、マイクやスピーカーの振動子として、また、高性能集塵フィルターとして空気清浄機等にも用いられる。

エレクトレット材料としては樹脂、無機材料に分類されるが、特に成形加工性の良さから樹脂エレクトレットが注目されている。樹脂エレクトレットにはポリプロピレン (PP)、ポリエチレンテレフタレート (PET) などの汎用樹脂、およびポリテトラフルオロエチレン (PTFE)、ポリフッ化ビニリデン (PVdF)、テトラフルオロエチレン-ヘキサフルオロプロピレン共重合体 (FEP) などのフッ素樹脂が一般的に用い

られる。特にフッ素樹脂は低吸水性、高絶縁性のため、汎用樹脂に比べて非常に高い電気保持性能を有する。

無機エレクトレットとしては、チタン酸マグネシウム、酸化ケイ素 (SiO₂)、窒化ケイ素 (Si₃N₄) などが知られている。特にSiO₂は表面電荷密度が高く熱安定性に優れるため、多くの研究例があるが、電荷の経時的な安定性に乏しいと言われており、これを補うためにSi₃N₄などとの積層膜が検討されている。

2.2 エレクトレットを用いた静電誘導型発電デバイス

エレクトレットの持つ永久電荷を利用した静電誘導型発電デバイスについては1970年代に提案されており⁽⁴⁾、その後、東京大学の鈴木らにより積極的に研究されている⁽⁵⁻⁸⁾。

図2にエレクトレットを用いた静電誘導型発電デバイスの原理を示す。エレクトレットにより形成される静電場により対向電極上に誘導電荷を生じさせ、電極が水平方向に振動する事によって、エレクトレットと対向電極の重なり面積が変化しこれにより外部回路に交流電流を発生させる。

エレクトレットを用いた静電誘導方式の発電デバイスの理論発電量は P_{max} は (eq.1) で表わされる。ここで σ : エレクトレット膜の表面電荷密度、 d : 厚さ、 ϵ : 誘電率、 g : エレクトレットと対向電極の間隔、 A : 電極面積、 f : 振動周波数である。 P_{max} はエレクトレットの表面電荷密度の2乗に、また、面積 A 、振動周波数 f に比例するため、エレクトレット発電器を高出力化するためには、エレクトレットとしては表面電荷密度の高い材料、すなわちより多く電荷を保持できるエレクトレット膜が望まれる。

$$P_{max} = \frac{\sigma^2 \cdot nAf}{4 \frac{\epsilon\epsilon_0}{d} \left(\frac{\epsilon g}{d} + 1 \right)} \quad (\text{eq. 1})$$

静電誘導型発電器の構成としては、このほかに、マイクロホンと同様に対向電極を振動させてエレクトレットの距離を変化させる方式、対向電極とエレクトレットを固定してその間に高誘電材料を抜き差しする方式が考えられている⁽²⁾。

2.3 高性能エレクトレット材料「サイトップEGG」

電荷の保持性能が高い高性能な樹脂エレクトレット

としてはPTFEやFEPなどのフッ素樹脂が挙げられるが、溶媒に溶けず薄膜の形成が困難であるため、小型の発電デバイスの作成に用いられるMEMSプロセスとの適合性が悪い。一方で、アモルファスフッ素樹脂であるDuPontのテフロンAFはPTFE同様の優れた物性を有しながら特殊なフッ素系溶媒に溶解する特性を有するため、電極上にマイクロオーダーの薄膜形成が可能であり、BolandらによりMEMS型発電デバイスの検討がなされている⁽⁹⁾。しかし、その表面電荷密度は0.5mC/cm²とそれほど高くない。

Suzukiらは、旭硝子株式会社が開発したアモルファスフッ素樹脂「サイトップ」がテフロンAFのおよそ3倍以上という非常に高い表面電荷密度を保持できる事を明らかにした⁽⁵⁾。Fig.3にテフロンAFおよびサイトップの構造、Fig.4にエレクトレット化した両者の表面電荷密度の経時変化を示す。

サイトップはテフロンAFと同様に特殊なフッ素系溶媒に可溶なため、スピコート等による薄膜形成ができ、かつ、フォトリソグラフィやナノインプリントプロセスで微細加工が可能であるため、MEMS構造体の形成に適している。

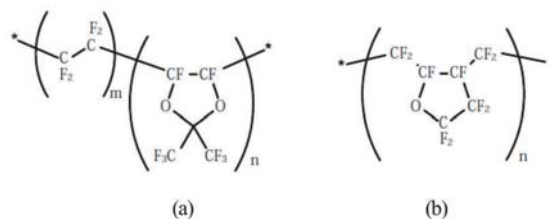


Fig.3 Chemical structure of Teflon[®]AF (a) and CYTOP[™] (b)

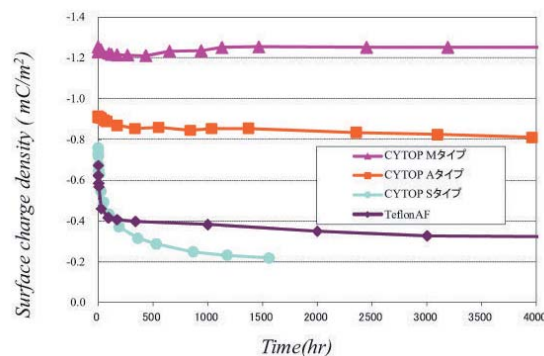


Fig.4 Time trace of the surface charge density of the electrets with CYTOP[™] and Teflon[®]AF.

一般に高分子膜中に空孔や添加剤を導入して不均一構造を形成し、そこに強電界をかけて分極させることで電荷保持性能が向上するという事が知られている。

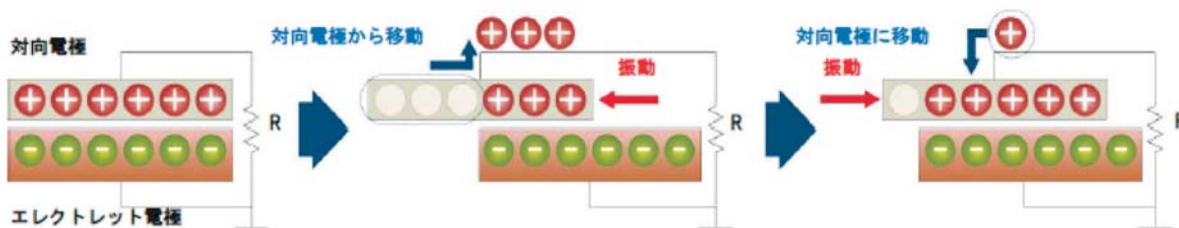


Fig.2 Principle of micro power generation using electret-based electrostatic induction.

膜を延伸して多孔質化したり、添加剤を加えて共押し出しにより不均一構造を導入する方法が報告されているが、膜中の不均一構造の量のコントロールは非常に難しい。

一方で、サイトップの電荷保持性能には極性官能基の存在が大きく影響する事が分かっているが^(10,11)、Kashiwagiらは、サイトップの場合は、溶液への添加剤の導入量で不均一構造の含有量をコントロールすることが可能であると考え、極性官能基として効果の高いアミドシリル基をより多く導入するために、アミノシランを添加剤としてサイトップに加える方法を見出した。アミノシランはそれ自身が極性官能基を有すると同時に、アルコキシシラン部位が縮合してナノサイズの凝集体（ナノクラスタ）を形成する事から、不均一構造の導入には非常に適している。ナノクラスタの形成は小角 X 線散乱（SAXS）、原子間力顕微鏡（AFM）などの測定により示された⁽⁸⁾。

本技術を応用して、サイトップ中にシラン化合物をナノクラスタとして導入したエレクトレット専用グレード「サイトップEGG」グレードが開発された。サイトップEGGグレードは、高い表面電荷密度と同時に、高い熱安定性も兼ね備えた材料である⁽¹²⁾ (Fig.5)。

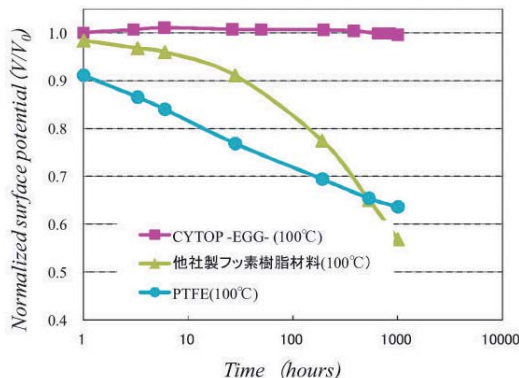


Fig.5 Thermal stability of the electret with CYTOP™ EGG

3. マイクロ振動発電デバイスの開発

サイトップEGGを用いたマイクロ発電デバイスの開発については、東京大学、オムロン（株）、旭硝子の共同開発により進められている。Masakiらは、サイトップをエレクトレットとして用いてMEMSプロセスおよび精密加工による振動発電デバイスを試作した⁽¹³⁻¹⁵⁾。Fig.6にその構成図を示す。発電効率を高めるため、電極およびエレクトレットはMEMSプロセスにより櫛歯状にパターン化されている (Fig.6 (a))。エレクトレット基板は金属バネで筐体に固定されて振動子として作用し、集電電極より交流出力を得ることができる。デバイスの寸法は20mm×20mm×4mmで、重量は約3.7gである。このデバイスは共振周波数30Hz、振動加速度0.15Gにおいて100μWの出力を得ることができ、現在オムロンにて量産化の検討が進められている。

東京大学では鈴木らがMEMSバネ型の振動発電デ

バイスを検討しており、金属バネの代わりに、高アスペクト比パリエン樹脂を用い、かつ主バネと二次バネを組み合わせた非線形バネを用いることにより、より広帯域（16~38Hz）での振動周波数に適應したデバイスを開発している⁽²⁾ (Fig.7)。

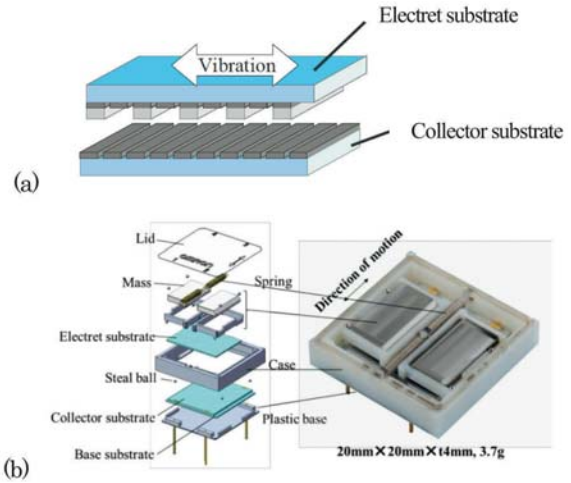


Fig.6 Photo and schematic of Electret vibration power generator using CYTOP™
 (a) Comb-like patterned electrode with electret
 (b) Structure of vibration power generating device

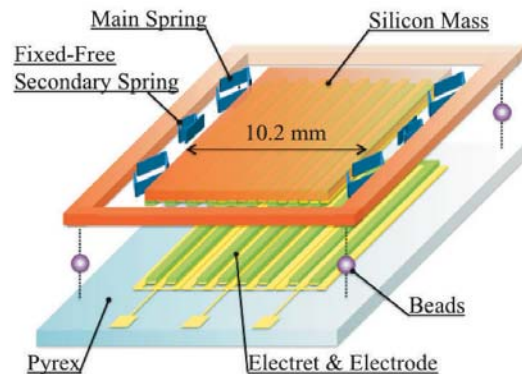


Fig.7 Schematic of MEMS electret generator with parylene high- aspect-ratio spring.

4. エレクトレット振動発電デバイスの実用検討

環境振動発電デバイスは不規則な振動から、高電圧（±70V以上）、かつ微弱な交流電流を発生するため (Fig.8)、実用化にあたっては効率のよいAC/DC変換および降圧（70V→1.2~3.5V）、すなわち発電機の制御回路の設計が非常に重要となる⁽¹⁴⁾。サイトップを用いたエレクトレット振動発電デバイスの実用検討例を以下に紹介する。

4.1 無線センサノードプロトタイプモジュール⁽²⁾

振動発電デバイスに電源管理回路、CPUと無線回路ICを接続し、サーミスタで温度を測定して無線送信する、無線センサノードのプロトタイプが提案されている。発電機の出力はブリッジダイオードにより整流されてコンデンサに蓄電され、閾値に達すると充

放電制御回路が作動してCPU、RFICに電源電圧が供給され、サーミスタの電圧（温度）を測定してデータとして無線により送信が可能であることが示されている。5.1 μ Wの交流出力に対して、80.6秒おきのデータ送信を行ったが、発電器の出力のうち利用できたのは2割程度であり、より効率的な電源回路の設計が不可欠である。

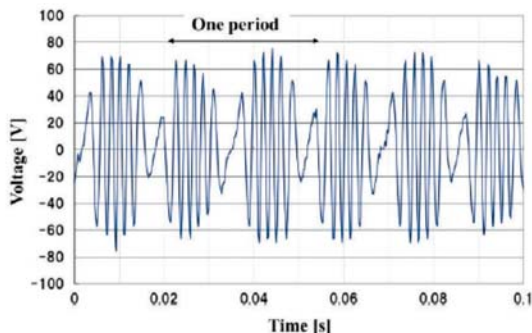


Fig.8 Time trace of the output voltage of electret generator at 30Hz and 0.15G.

4.2 電源モジュールパッケージ⁽¹⁶⁾

オムロン（株）のデバイスを用いて、Hattoriはバッテリーパックタイプの電源モジュールパッケージを設計・提案している。発電デバイス2個を組合せて、発電量の向上およびデバイスの性能バラツキの平準化を図っている。Fig.9に電源モジュールパッケージ内部、および外観を示す。振動発電器電源モジュールの直流化回路はキャパシタおよびダイオードにより構成され、キャパシタに蓄積された電力はDC/DC変換回路により約5Vの出力に変換され、100 μ Wの電力をmicro USBコネクタにより出力として得ることができる。

振動発電デバイス2個を搭載したBP-02、および6個搭載したBP-06が試作され、それぞれのスペックはTable 1のとおりである。

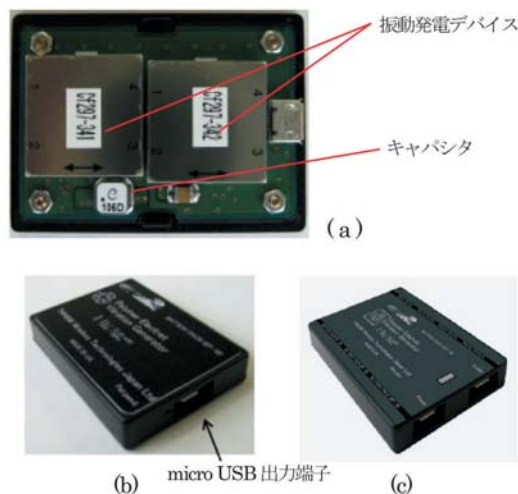


Fig.9 Pictures of Battery Pack module (BP-02, BP-06) with electret generator.
(a)Inside of BP-02, Appearance of (b)BP-02, (c)BP-06

Table 1 Specification of Battery Pack module with electret generator

	MODEL : BP-02	MODEL : BP-06
電圧/出力	5.2V/100 μ W	5.2V/300 μ W
共振周波数(加速度)	30Hz(0.15G)	30Hz(0.15G)
サイズ	38×54×10mm, 20g	55×70×10mm, 35g

4.3 ワイドバンド対応型振動発電モジュール⁽¹⁴⁾

Masakiらは、共振周波数が異なる4つの発電デバイス（共振周波数EH1：27.6Hz、EH2：28.4Hz、EH3：29.7Hz、EH4：30.6Hz）を組み合わせることにより、より広い振動周波数帯での発電が可能である事を示し（Fig.10）、3軸の加速度センサと温度センサを搭載して無線トランスミッタによりデータを送信できるマルチセンサモジュールを提案している（Fig.11）。

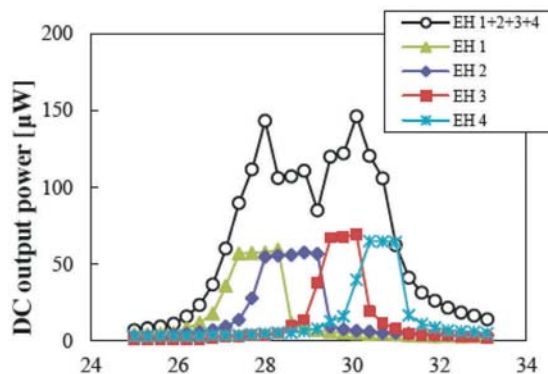


Fig.10 DC power outputs of four electret generators tuned to the different frequency and combined module.

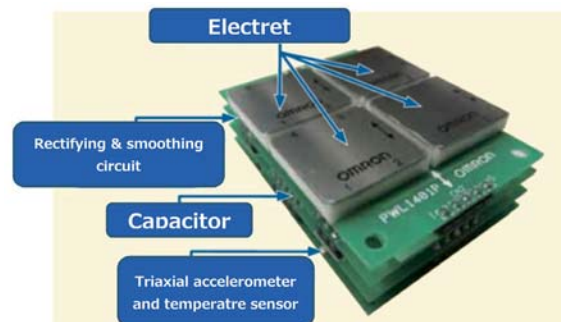


Fig.11 Photo of wireless multi sensor module with wide-band vibration frequency type generator

4.4 環境複合センサ電源

オムロン（株）はTECHNO-FRONTIER 2015にて、様々な環境情報を、多点でかつ長期的に計測・収集できる「環境複合センサ」の提案をしている（Fig.12）。「環境複合センサ」は、温湿度センサ、絶対圧センサ、照度センサ、マイクロフォン、加速度センサを一つのパッケージにしており、920MHz帯での無線モジュールを搭載して3分間に1回の割合で収集したデータを送信することができる。電源に振動発電モジュールBP-02を用いることで、配線を必要とせず、メンテナンスフリーでの駆動が可能となり、設置場所を選ばないといった利点がある。

気象情報、地震情報、光環境情報や音情報などを複合的に収集できるため、これまで結ばれる事がなかった情報との組合せから新たなビックデータを創出し、様々な用途への展開が期待される。例えば、工場設備・インフラ等に設置する事で、異常振動、異音、異常発熱などの常時モニタをし、設備の予防保全への応用が考えられる。



Fig.12 Picture of surrounding environment information sensor powered with vibration electret generator module.

5. 結論

アモルファスフッ素樹脂「サイトップ」は非常に優れた電荷保持性能を有するエレクトレットであり、特に高性能エレクトレットとして設計された「サイトップEGG」を用いた振動発電デバイスは、小型でメンテナンスフリーのワイヤレスセンサネットワークノード向け自立電源として、来るべきInternet of Things (IoT) の時代に必要のデバイスであると確信する。現在、振動発電デバイスの実用化に向けて産学連携での「エレクトレット環境発電アライアンス*」により研究開発、用途探索、啓蒙および普及活動を進めており、今後のエレクトレット振動発電技術の実用化に期待したい。

なお、本報告で紹介したエレクトレット材料検討については、東京大学大学院工学系研究科・鈴木雄二教授の指導のもと、オムロン株式会社との共同研究の成果に基づいており、振動発電デバイスの応用検討については積知範様（オムロン株式会社）、および服部泰様（THINK WIRELESS TECHNOLOGIES JAPAN LTD.）より情報を提供頂いた。ここに、謝意を表す。

*東京大学、旭硝子株式会社、オムロン株式会社、THINK WIRELESS TECHNOLOGIES JAPAN CO.LTD.、テクノデザイン株式会社、小西安株式会社による産学連携活動

—参考文献—

- (1) 鈴木雄二 (監修)環境発電ハンドブック ~電池レスワールドによる豊かな環境低負荷型社会を目指して~, エヌ・ティ・エス, (2012).
- (2) 鈴木雄二, 振動発電技術の原理と将来展望, 日本エネルギー学会誌, 93巻, pp. 227-233, (2014)
- (3) 静電気ハンドブック, 電気学会編, オーム社, pp1108 (2006)
- (4) O.D.Jefimenko et al, Electrostatic current generator having a disk electret as an active element, IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.14, pp537-540 (1978)
- (5) Y.Suzuki et al, A MEMS electret generator with electrostatic levitation for vibration-driven energy-harvesting applications, J. Micromech. Microeng. 20, 104002 (2010)
- (6) 松本ほか, エレクトレット環境振動発電による電池レス無線センサの試作, 電気学会論文誌C, 132巻, 3号, pp. 344-349, (2012)
- (7) Y. Suzuki, Recent progress in MEMS electret generator for energy harvesting, IEEJ Trans. Electr. Electr. Eng., Vol. 6, pp. 101-111 (2011)
- (8) K.Kashiwagi et al, Nano-cluster-enhanced high-performance perfluoro-polymer electrets for energy harvesting, J. Micromech. Microeng. 21, 125016 (2011)
- (9) J.Boland et al., Micro electret power generator, Proc. 16th IEEE Int. Conf. Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'03), pp 538-541 (2003)
- (10) Y.Sakane et.al, Development of high-performance perfluorinated polymer electret film and its application to micro power generation, J. Micromech. Microeng., 18 (2008)
- (11) 森澤義富, 振動型発電器に用いられるフッ素樹脂の特性と今後の展開, Energy Device, 1 (8), 24-28 (2014)
- (12) 柏木王明, 超高性能ポリマー・エレクトレットを用いた振動型発電システム, プラスチックス, 2011.9, pp58-62 (2011)
- (13) T.Masaki et al, Power output enhancement of a vibration-driven electrets generator for wireless sensor applications, J. Micromech. Microeng., Vol 21, 104004 (2011)
- (14) T.Masaki et al, Multi-frequency vibration-driven electrets generator for wireless sensor applications, J. Phys. : Conf. series PowerMEMS2014, 557, 012074 (2014)
- (15) 土居ほか, エレクトレット材料を用いた小型環境振動発電デバイスの開発と応用, 機能材料, 30巻, pp21-28 (2010)
- (16) Y.Hattori, Development of power supply package for electrets vibration generator, J. Physics : Conf. Series 557 (2014)