

エレクトレットを利用した振動発電

たなか ゆみ
東京理科大学 工学部 工業化学科 准教授 田中 優実

はじめに

エレクトレット (electrets) という材料のことをご存知でしょうか。マグネットが周囲に磁場を提供する材料であるのに対して、エレクトレットとは、静電気を長期間にわたって安定に保持することで周囲に電界を提供する材料です。エレクトレットの知名度はマグネットに比べるとはるかに低いですが、携帯電話やICレコーダなどに組み込まれている小型マイクの主流がエレクトレット素子を利用した「エレクトレット・コンデンサ・マイクロホン (electret condenser microphone, ECM)」であることを考えると、実は案外、生活に根ざした材料なのです。

ところで、マイクというのは音を電気信号に変換するデバイスですが、これを拡大解釈すれば、振動を電気に変換するデバイス、つまりは振動発電機ということになります。実は今、このようなコンセプト、つまりECMの作動原理にもとづいて、人や乗物の移動、あるいは機械の駆動時などに発生する「環境振動」を動力源とする「静電式振動発電機」を実用化しようとする動きが活発化しています。

本稿では、この動きの背景について触れたのちに、静電式振動発電機の仕組みと課題、さらに我々が現在取り組んでいるセラミックエレクトレットの開発・研究について紹介したいと思います。

なぜ今、振動発電機なのか？

～無線センサネットワーク時代の幕開け～

米国のJanusz Bryzek氏が2013年に提唱した「Trillion Sensors Universe = 世界で年間1兆個のセンサを利用する社会」を2023年までに実現しようとする考え方が、最近、欧米はもちろん、日本国内でも広まってきています。1兆個/年といってもピンとこないかもしれませんが。世界の人口が約73億人として、国籍年齢問わず、地球上に生きるすべての人が、1人あたり年間約140個のセンサを使うのだと考えれば、少し分かりやすいでしょうか。ともあれ、現状の数字が約100億個/年程度ですので、あと数年のうちに、世界におけるセンサの利用を約100倍まで増やそうというわけです。

では、これほどの数のセンサをいったい何に使うのかということ、その答えは、これまた最近よく耳にするようになった「モノのインターネット化 = IoT (Internet of Things)」を進めるため、ということになります。

IoTとはその名のとおり、あらゆるモノをネットワークでつなげましょう、という考え方ですが、つなげたモノを単に人間がコントロールするというわけではありません。IoTの真髄は、モノに取り付けた多種多様なセンサからもたらされる膨大な情報 (ビッグデータ) をもとに、モノが自ら考え、モノ同士あるいはモノと人間が相互に情報をやり取りし

ながら、人間→モノの一方通行では成し得なかった新たな価値を創造してゆくことにあるのです。

ここでいうモノには、物理的あるいはコスト的に配線を張り巡らせることが困難なモノも当然含まれます。例えば、平成26年6月24日に閣議決定された世界最先端IT国家創造宣言（平成27年6月30日変更）の3（4）②には、「2020年度までに国内の重要インフラ・老朽化インフラの20%についてセンサ等の活用による点検・補修を行う」と記されていますが、重要インフラ・老朽化インフラの随所に、センサやデータ送受信システムのための配線を張り巡らせるとすれば多大なコストと手間がかかるでしょう。無線で対応できればこれに越したことはないわけです。IoTのコア技術として、無線センサ端末（ノード）を無線ネットワーク通信でつなげる「無線センサネットワーク（wireless sensor networks, WSN）システム」が明示されているのはこのためです。

さてここで1つ問題があります。それは、ノードの駆動電源をどうするのか、ということです。ノードが無線端末である以上、駆動電源も自立型である必要があります。電池を使えばよいのでは？ それはそうかもしれませんが。ですが前述のとおり、今後1兆個／年を超えるようなセンサを使う時代になることを考えれば、これほど膨大な数のセンサの電池の減り具合を気にしつつ、その都度、充電や取替えを繰り返すというのはあまり現実的ではありません。

そこでキーとなってくるのが、エネルギーハーベスティング（energy harvesting = 環境発電）です。エネルギーハーベスティングとは、環境中の微小な未利用エネルギーを収穫（harvest）して μW ～ mW オーダーの電力に変換するための技術のことです。WSNにおけるセンサノードの消費電力の多くは数百 μW ～数十 mW のオーダーにおさまるものと目さ

れていますので、エネルギーハーベスティングは、ノード用の自立型電力供給技術としてまさにぴったりなのです。未利用エネルギーの種類としては、振動、光、熱、流体、電波などがありますが、例えば自動車のタイヤや道路構造物のように、常に振動が発生しているモノに取り付けるノード用の電源としては、振動発電機が有利であるのは言うまでもありません。

振動発電機の種類

振動を電力に変換する方式には、電磁誘導式、圧電式、逆磁歪式および静電式の4方式が知られています。以下に、それぞれの発電原理とエネルギーハーベスティングへの適用状況を簡単に比較してみましょう。

《電磁誘導式》

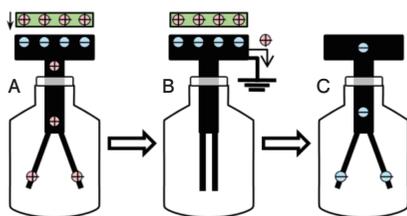
振動によりコイルと磁石の相対位置を変化させ、電磁誘導（磁束の変動に応じて電圧が生じる現象）を誘起することで発電する方式です。

→ 大規模発電所で広く採用されているものの、環境振動からの効率良い電力回収は困難であるとされ、現状、環境振動発電への適用はほとんど考えられていません。

《圧電式》

振動により圧電材料を変形させ、圧電効果（応力に応じて電圧が生じる現象）を誘起することで発電する方式です。

→ 発生する電圧が高い反面、電気抵抗が大きく電流が取り出しにくいことから、出力を確保するために素子の集積や、振動を応力として効果的に素子に伝えるための工夫が必要となります。また、一般的に、圧電素子として脆性破壊しやすいセラミック材料を利用するため、過剰な応力の印加を防ぐための工夫も必要です。すなわち比較的小型化が難しいタイプですので、センサノードへの応用よりも、大型電源としての応用に向けた研究が先行しています（駅雑踏を利用することで、平板



- A. 箔検電器に帯電物を近づけると静電誘導により電極内の電荷が分離して箔が開く
 B. 箔検電器を接地すると帯電物で束縛されていない電荷がアースに逃げる（電極が帯電）
 C. 帯電物を離すと帯電物によって束縛されていた電荷が解放されて再び箔が開く

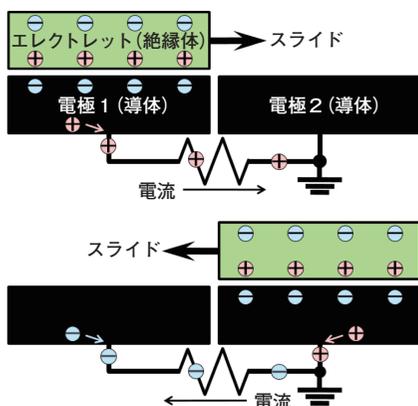


図1 箔検電器の原理（上）と静電式振動発電機概念図（下）

型装置90 m²あたり最大約800 kWの電力回収に成功した実績もあります）。

《逆磁歪式》

振動によりコイルに内包した逆磁歪材料を変形させて逆磁歪効果（応力に応じて磁束密度が変化する現象）を発現させ、電磁誘導を誘起することで発電する方式です。

→ 素子を変形させるという点では圧電式と似ていますが、加工性に優れ、疲労強度の高い合金材料（主に鉄—ガリウム系）を素子に用いるため、圧電式よりもデバイス設計の自由度が高いのが特徴です。ノード用電源のような小型のものから風や波浪を動力源とするような大型のものまで広く応用が考えられています。ただし、実用レベルの出力を確保するために、比較的加速度が大きく、周波数の高い振動（10 m/s²～、10²～10³ Hz）を必要とすることが、環境振動（～10 m/s²、10～10²

Hz）を動力源とするエネルギーハーベスティングへの応用に向けた課題となっています。

《静電式》

振動によりエレクトレットと電極の相対位置を変化させ、逐次、静電誘導（帯電物近傍の導体内に電気的分極が生じる現象）を誘起することで発電する方式です。箔検電器を思い浮かべてもらえると分かりやすいでしょう（図1）。

→ 環境振動のような加速度の小さい低周波振動から効率よく電力が取り出せることに加えて、エレクトレット素子と電極が接触しないため、圧電式と比して素子破壊の懸念が少ないことが特徴です。また、小型化が容易で集積回路内への組み込みも可能ですので、試作段階ながら、この方式による自己発電型万歩計や腕時計がすでに開発されています。ただし発電量が小さいために応用範囲が限定されているのが現状です。

このように見てみると、環境振動を動力源とするエネルギーハーベスティングに焦点を当てた場合、現状として最も有利なのは静電式であるといえます。我々が研究対象としているのも、この静電式振動発電機です。

エレクトレットとは？

上述のように、本格的なIoTの普及に向けて静電式振動発電機の担う役割は大きいと考えられます。しかし、現在試作されている発電機の出力は、例えば振動加速度10 m/s²、周波数20 Hz程度の強制振動下で数十～数百μW/cm²程度ですので、あらゆるセンサに対応するノード用電源となるためには、現状より1～3桁高いレベルまでの出力向上を目指さなければなりません。

静電式振動発電機における最大出力 P_{max} は、デバイス構成にもよりますが、図2で示したような式で表現することができます。この式によれば、発電機内の幾何学的素子配置と利用する振動が同一であれば、 P_{max} はエレ

クトレットの表面電荷密度 σ の二乗に比例して増加することになります。すなわち、材料学的観点から P_{max} を向上させるためには、エレクトレットの表面電荷密度を増大させることがまずは重要なのです。

ここで、冒頭で紹介したエレクトレットについてももう少し詳しくご説明しましょう。

エレクトレットの歴史は古く、1730年代（日本では徳川吉宗の時代）にはすでに、ワックスや松脂、硫黄などの誘電体を鉄容器中で溶融したのちに冷却・固化させた場合に、これらが帯電することがあるという事が見出されていました（これは、接触帯電という現象です）。その後1892年に、英国の電気工学者であり物理学者でもある Oliver Heaviside によって、このような帯電体にエレクトレットという名前がつけられたのですが、これが人工的に作られるようになったのは、1920年代に入ってからです。世界で初めて人工エレクトレットの製造に成功したのはなんと日本人、当時海軍大学の教官であった江口元太郎博士でした。ここでは、加熱・溶融した樹脂に直流電界を印加して分極状態を誘起したのち、電界を維持したまま冷却・固化するという手法（熱エレクトレット化法）が用いられています。

ところで、このように比較的長い歴史を持つエレクトレットですが、その研究は主にポリマー基材を対象として進められており、無機化合物、特に、実用材料として重要なセラミックを基材とするエレクトレットの研究はほとんど見かけません。実際、現在試作されている静電式振動発電機に利用されている素子も、コロナ放電処理によって電荷が付与されたフッ素樹脂系のポリマーエレクトレットです。

ここで、図2で示した式の各ファクターに、フッ素樹脂系エレクトレット素子の代表値を当てはめてみることにしましょう。高度に精密化された素子配置を想定した場合（ σ

$$P_{max} = \frac{\sigma^2 A n \omega}{(\epsilon_s \epsilon_r / d) \times (1 + \epsilon_r g / d)}$$

| | |
|----------|-------------------------------------|
| 材料 因子 | σ : エレクトレットの表面電荷密度 |
| | ϵ_r : エレクトレットの比誘電率 |
| | d : エレクトレットの厚さ |
| 配置 因子 | A : 電極の総面積 |
| | n : エレクトレットの配置数 |
| | ϵ_s : エレクトレット / 電極間の空間の誘電率 |
| 動力 因子 | g : エレクトレット / 電極間ギャップの幅 |
| | ω : $(=2\pi f)$ 印加振動の角振動数 |
| | f : 印加振動の周波数 |

図2 静電式発電の出力を決める因子

$= 1 \text{ mC/m}^2$, $\epsilon_r = 2$, $d = 20 \text{ }\mu\text{m}$, $A = 2 \text{ cm}^2$, $n = 67$ 個, $\epsilon_s = 8 \times 10^{-12} \text{ F/m}$, $g = 40 \text{ }\mu\text{m}$), $f = 20 \text{ Hz}$ の振動に対する最大出力 P_{max} は理論上、約4mWと算出できます。辛くも、mWオーダーに乗せることは可能（ただし、実験値としては、約一桁低い値）ということになりますが、できればさらに高いレベルを目指したいところです。このための最も有効な手段は、前述のように、エレクトレットの表面電荷密度 σ を向上させることですが、ポリマー基材の場合、帯電処理に対する耐性の観点から、 σ の値を飛躍的に向上させるというのは実のところかなり難しいことなのです。

ここで我々は、ポリマーにはよらない、新たなエレクトレット基材を検討してはどうかと考えました。目をつけたのは、さきほど「研究はほとんど見かけません」と説明したセラミック、しかも誘電体として分類するには少々異質な存在であるイオン伝導性セラミックというものです。

イオン伝導性セラミックエレクトレットの可能性

イオン伝導性セラミックとは、その名の通り、「焼きもの」でありながら、電界下でイオンが移動することによって「電気が流れる材料」です。エレクトレットの基材は、静電気（分極状態）を安定に保持するもの、すなわち誘電体でなければいけませんので、皆さ

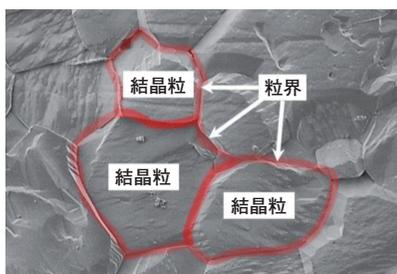


図3 HAセラミックの結晶粒と粒界
(走査型電子顕微鏡像)

んからすれば、「電気が流れる材料を基材にするなんておかしいじゃないか」と思われるでしょう。でも、そうではありません。イオン伝導性セラミックを電界下においた場合に電流が流れ続けるためには、電極界面で酸化還元反応が定常的に進行しなければいけません。言い換えるなら、電極反応をブロックすることさえできれば、イオン伝導体は、極めて長距離にわたってイオンが変位することのできる優れた誘電体とみなすことができます。このような考え方のもと、我々は「水酸アパタイトセラミック」に着目しました。

水酸アパタイト ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, 以降HAと表記します) は、骨や歯の無機主成分として知られている生体材料であると同時に、直流電界を印加すると固体内でプロトン (H^+ イオン) が移動する「プロトン伝導体」でもあります。セラミックは、結晶粒と呼ばれる粒が集まって構成されている(図3)のですが、HAセラミックの結晶粒内における導電率(動けるイオンの数と動きやすさの指標)は、例えば固体高分子形燃料電池に最もよく使われている電解質膜(ナフィオン[®])の代表値と比較すると、室温で100万分の1程度とごく小さな値です。また、イオンが移動するためには、ナフィオンの2~3倍に相当する活性化エネルギーを超えなければなりません。つまり、HAセラミック内でプロトンを動かすためには、高いエネルギー(温度および電界)を印加する必要があるのです。

ただしこれは、一度イオンを移動させてし

まえば、おいそれとは元の状態に戻れないことも意味していますので、エレクトレット基材としては逆に有利な物性ということになります。しかも、結晶粒と結晶粒の境目である粒界にいたっては、導電率は結晶粒のさらに3桁以上小さな値であり、活性化エネルギーは2倍程度大きな値です。つまり、温度および電界をうまく制御すれば、プロトンを電極まで移動させることなく、結晶粒内に留める(結晶粒単位で双極子を発生させる)ことができるわけです。

そこで我々は、1.9~11 μm の範囲で粒径の異なるHAセラミック(直径10 mm, 厚さ0.7 mm)を4種類用意し、400 $^{\circ}\text{C}$ で60分、5 kVcm^{-1} の直流電界を印加する条件でエレクトレット化処理を試みました。得られた試料について、まずは、さまざまな手法を駆使して、HAの結晶構造に変化がないかどうかを詳細に調べてみたのですが、エレクトレット化処理の前と比較して、いずれも誤差範囲の違いしかありませんでした。つまり、今回の処理条件において、例えば、酸化還元反応の進行などによって結晶が変化してしまうようなことはなかったわけです。

続いて、この手法によって本当にHAセラミックがエレクトレットになったのかを確認するために、表面電荷密度 σ の測定を行いました。ここで用いたのは、「TSDC (thermally stimulated depolarization current: 熱刺激脱分極電流)法」と呼ばれる手法です。表面電荷密度が σ であるエレクトレットに電極を配して短絡させた場合、電極内には静電誘導によって $-\sigma$ の電荷が誘起されます。この状態でエレクトレットを加熱してゆくと、分極の熱緩和とともに誘導電荷が解放され、外部回路に電流(TSDC)が流れることとなります(図4)。つまり、TSDCを時間積分してやれば、 σ を求めることができるわけです。今回作製した各試料のTSDC曲線は図5に示したとおりですが、すべての試料でTSDCが観測

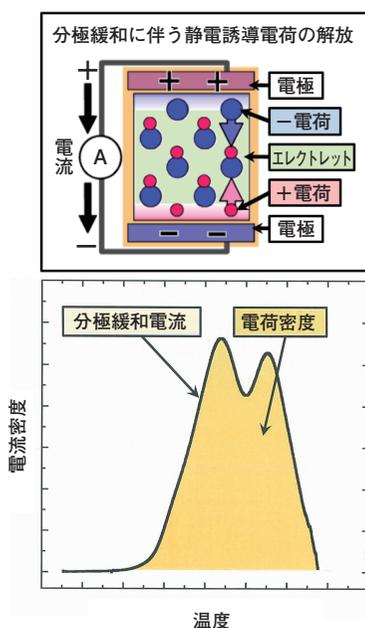


図4 TSDC測定のご概念図

できていることがわかります。つまり、HAセラミックエレクトレットの作製に成功したことが示されたわけです。

図6には、各試料における表面電荷密度 σ がHAセラミックの粒径に対してどのように変化するかを示しました。粒径の増大に伴ってほぼ線形的に σ が増加してゆくことがわかります。これは、結晶粒単位で双極子が発生している場合に特徴的な挙動です。つまり、今回作製した試料においては、プロトンの移動を「中途半端」に食い止めるための壁として、粒界をうまく利用することができたわけです。ちなみに、粒径11 μm の試料の表面電荷密度(約60 μCcm^{-2})は、ポリマーエレクトレットにおける限界電荷密度とされている1 μm^{-2} と比較して約60倍も大きな値です。

なお、HAセラミックに限らず、「直流電界下でのイオン分極の誘起とその固定」というコンセプトにもとづいてこれまでに作製したイオン伝導性セラミックエレクトレットはいずれも、イオン分極に由来する表面電荷が誘起されている一方で、表面電位(最高値は

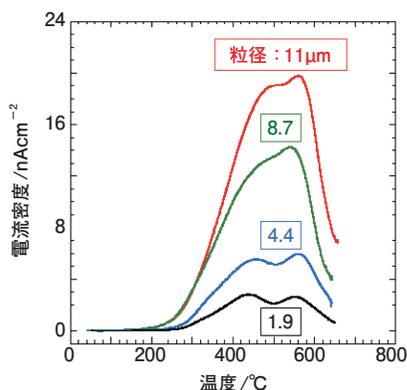


図5 粒径の異なるHAセラミックエレクトレットのTSDC曲線

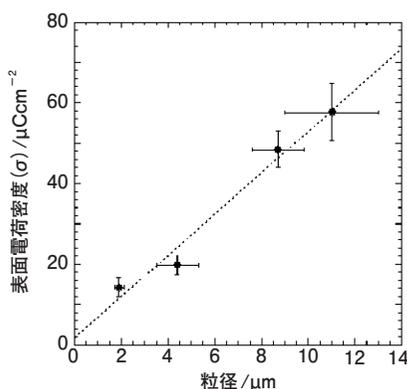


図6 HAセラミックエレクトレットのイオン分極由来の表面電荷密度と粒径との関係

約4,000 V)の極性がイオン分極の極性と逆転しているという不思議な現象を示しています。実はこの原因がまだ解明できていません。イオン伝導性セラミックエレクトレットを搭載した静電式振動発電機を世に送り出すためにも、この現象の起源をきちんと解き明かすことが、我々の当面の目標です。

おわりに

IoTの本格普及に向けた動きとあいまって、静電式振動発電機が脚光を浴びつつあります。その心臓部たるエレクトレットはいわば古くて新しい材料です。静電式振動発電機用の素子としてのエレクトレットの研究は始まったばかりなのです。この興味深い材料のこれからに、ぜひ注目していきましょう。