

# エネルギーハーベスティング技術

株式会社 NTT データ経営研究所 竹 内 敬 治\*

## 1. はじめに

環境中に存在する未利用のエネルギーを電力に変換するエネルギーハーベスティング技術が注目されている。太陽光、風力、波力、地熱などの大規模な再生可能エネルギーとは異なる位置づけで、今後の発展が期待されている技術である<sup>1)</sup>。

本稿では、エネルギーハーベスティング技術の現状および将来動向を紹介し、併せてスマートグリッドへの活用の可能性を示す。

## 2. エネルギーハーベスティングとは

熱、振動、光、電波など、周りの環境に様々な形態で存在するエネルギーを「収穫」(ハーベスト)して、電力に変換する技術が、エネルギーハーベスティング技術である。環境発電技術とも呼ばれる。

エネルギーハーベスティングの概念を広くとらえると、太陽光発電、風力発電、地熱発電、波力発電などの、いわゆる再生可能エネルギーも含まれることになる。しかしながら、エネルギーハーベスティング技術として、最近注目が高まっているのは、小型の電子機器向けの独立型電源となりうる、 $\mu\text{W} \sim \text{W}$  程度の出力のエネルギー変換技術である。

発電量的にも、また発電コスト的にも、原子力発電による電力を代替するような可能性はないが、グリッドに依存しない自立的な電源としての意味は大きい。エネルギーハーベスティング技術は、周囲の環境にエネルギーが存在する限り、電力を供給し続けられるため、電源配線や、電池の取換、充電、燃料補給なしに、長期間にわたって自立電源として利用できる。いままで電源の制約で実現しなかったような、様々なアプリケーションを生み出す可能性のある技術である。

エネルギーハーベスティング技術に対する注目が

\* たけうち けいじ 社会・環境戦略コンサルティング本部  
シニアスペシャリスト  
(エネルギーハーベスティングコンソーシアム事務局)

高まってきた理由は幾つかある。発電技術が向上するだけでなく、発電した電力を有効に利用するための蓄電技術など周辺技術の進歩、センサや無線技術など電力を利用する技術の低消費電力化が進み、自立電源としての適用領域が拡大してきていることが大きい。「創エネ」「蓄エネ」「省エネ」の複合的な進歩によって、今までは有効活用できなかった小さなエネルギーの利用可能性が広がりつつあるのだ。

## 3. 技術の概要

ひとくちにエネルギーハーベスティングと言っても、エネルギー源は様々であり、それぞれに対応した数多くの技術が開発されている。具体的には、表1に挙げたような技術が主に各種研究開発の対象となっている。

各技術の概要を表1に示す。

### 3.1 電磁波利用技術

環境中に存在する主な電磁波源としては、太陽や室内照明などから発せられる可視光と、テレビ、ラジオ、携帯電話などの電波が挙げられる。

可視光を利用したエネルギーハーベスティング技術として注目されているのは、室内照明をエネルギー源とする発電技術である。室内には、蛍光灯、白色LED、有機ELなど様々な光源が存在する。これらの室内光をエネルギー源として発電する場合、屋

表1 主なエネルギーハーベスティング技術

エネルギー源	発電技術
電磁波 (可視光、電波など)	太陽電池、レクテナ、その他
力学的エネルギー (振動など)	磁石+コイル(電磁誘導)、圧電素子(圧電効果)、エレクトレット・誘電エラストマーなど(静電誘導)、磁歪材料(逆磁歪効果)
熱エネルギー (温度差)	熱電発電、熱磁気発電、熱電子発電、熱音響発電、熱機関、その他
その他のエネルギー	生体エネルギー発電、浸透圧発電、その他

外向けに広く普及している単結晶シリコンやCIGS太陽電池よりも、アモルファスシリコンの太陽電池や色素増感太陽電池の方が、発電効率が高くなる。

これらの太陽電池は、単結晶シリコン太陽電池よりも発電効率が劣ると言われているが、それは、太陽電池の変換効率の評価方法が、太陽光のスペクトルと光量を前提としているためである。室内光向けには、蛍光灯や白色LEDなどを想定した効率評価指標が必要であろう。

テレビ、ラジオ、携帯電話などの電波を収穫して電力再生するためには、レクテナ（整流器つきアンテナ）と呼ばれるデバイスを使用する。電波をアンテナで受けると高周波の交流電流になるため、電子機器用の直流電源とするために整流器と組合せる。環境電波で温度センサの測定値を無線で送信する実験が東京大学などで行われているが、環境電波のエネルギー密度は、一般には電源にできるほど強くないため、実用化には時間がかかると

みられている。電波による無線電力伝送（ワイヤレス給電）の方が、電波ハーベスティングよりも実用化は近いが、両技術で使用される受電デバイス（レクテナ）は共通のため、補完的に使われて両者とも普及するという可能性もある。

### 3.2 力学的エネルギー利用技術

力学的エネルギーを電力に変換する原理としては、「電磁誘導」、「圧電効果」、「静電誘導」、「逆磁歪」の4種がある（図1）。「電磁誘導」は、コイルと磁石の相対運動により、誘導電流を発生させる。「圧電効果」は、圧電材料を歪ませて表面電荷を発生させる。「静電誘導」では、電荷を打込んで帯電させたエレクトレットをコンデンサの一方の電極とし、対向電極を移動させるなどの方法で静電容量を変化させるなどして発電する。「逆磁歪」では、磁場をかけると変形する磁歪材料を歪ませて周りの磁場を変化させ、コイルに誘導電流を発生させる。

発電デバイスが大きい場合には、4つの発電原理のうち、電磁誘導が最も発電効率がが高いが、小型の

	磁場の時間変化を利用 (インピーダンス低い)	電場の時間変化を利用 (インピーダンス高い)
メカニカルな構造を利用 (材料選択と装置設計の自由度が高い)	電磁誘導 	静電誘導 
材料の特性を利用 (構造が単純)	逆磁歪効果 	圧電効果 

図1 力学的エネルギーを利用した発電原理

	振動発電	相対運動発電	流体発電
発電方法	周囲の振動に内部の錘を共振させ、錘の運動エネルギーを電気に変換する	発電機自身が変形し、環境中の運動エネルギーを直接電気に変換する	周囲に存在する流体の運動エネルギーを装置の可動部に取込み、可動部の運動エネルギーを電気に変換する
発電量の制約	・錘の振幅と質量 ・発電材料	・発電材料	・可動部の大きさ ・発電材料

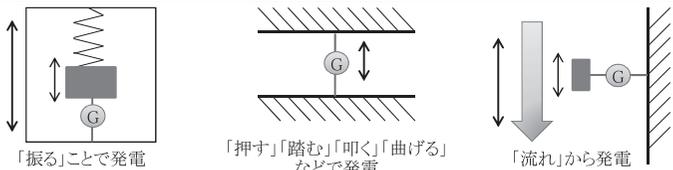


図2 力学的エネルギーを利用した主な発電方式

発電デバイスになると、条件によっては、他の発電原理の方が有利になる場合もある。

一方、力学的エネルギーから発電する方式として主なものに、振動発電、相対運動発電、流体発電がある（図2）。振動発電は、外から見ると剛体の発電機の中に、錘とばねと発電機構が入っており、環境振動と発電機内部の錘とを共振させて発電を行う方式である。相対運動発電は、押す、踏む、曲げるなど力が加わったときに、発電機自体が変形して発電を行う方式である。また、流体発電は、羽根等の可動部を流体で振動させて発電を行う方式である。

これらの「発電原理」と「発電方式」の組合せで、様々なバリエーションの発電技術が開発されている。

### 3.3 熱エネルギー利用技術

熱（温度差）を利用した発電方式では、現在、熱機関（ランキンサイクルなど）が広く普及しており、発電効率も高い。しかし、エネルギーハーベスティング用途の小型発電では熱機関の効率が低下し、小型化しても効率が低下しない熱電発電デバイスの方

が有利となる。

熱電発電は、温度差を与えると起電力を生じる熱電材料を利用した発電方式である。構造が単純で可動部がないというメリットがあるが、熱伝導（格子振動）で失われるエネルギーが多いため、発電効率が低い。熱した電極から熱電子を放出させることで発電する熱電子発電など、より発電効率の高い各種の発電方式が研究されている。従来型の熱電子発電は、電極を非常に高温にする必要があったが、トンネル効果を利用して数十度の温度差でも発電できる熱電子発電デバイスが考案されている。

熱エネルギーを利用した発電方式としては、これら以外にも熱磁気発電、熱光発電、熱音響発電など様々な技術の開発が進められている。これらの技術に共通しているのは、発電デバイスの電極間の温度差を維持するための熱設計や材料選択が重要ということである。

### 3.4 その他のエネルギー利用技術

以上挙げた電磁波エネルギー、力学的エネルギー、熱エネルギー以外にも、様々な発電技術の開発が進んでいる。生体のエネルギーを利用する技術、生体内に普遍的に存在するグルコースなどの物質を利用する技術、胃酸や尿などを電解質として利用する技術、淡水と海水の浸透圧差を利用する技術、温度の時間変化を利用する技術、送電線の周りの電磁場を利用する技術などである。

さらに、複数の発電技術を組合せたハイブリッド発電方式についても、様々な試みがなされている。

これらの技術を活用することで、様々な環境条件下での自立電源の実現が期待される。

### 3.5 関連技術

エネルギーハーベスティング技術で得られる電気エネルギーは、電圧も電流も様々で、変動も大きい。そのため、電子機器の電源に適する安定した定圧直流電源に変換するための回路技術と組合せることが不可欠である。電源回路技術の低消費電力化・高効率化が、エネルギーハーベスティング技術実用化の鍵になっている。

また、発電した電力を蓄積し、間欠的に利用するアプリケーション（無線センサネットなど）を想定した場合には、蓄電技術との組合せが必須となり、蓄電技術の効率や寿命がシステム全体のボトルネックとなる可能性もある。エネルギーハーベスティン

グ技術と組合せる蓄電技術としては、全固体薄膜リチウムイオン電池、電気二重層キャパシタ、リチウムイオンキャパシタが有力であり、数万回の充放電が可能な製品が出てきている。低電圧のデジタル回路技術が進展すれば、リチウム以外のより安定した金属を電極とする蓄電デバイスの利用可能性も広がる。

その他、低消費電力の（特にスリープ時の消費電力が小さい）MCU、低消費電力の無線技術なども必要となる。実用的な自立電源システムを作るためには、エネルギーハーベスティング技術だけでは不十分で、多くの低消費電力技術と組合せることが必要である。

## 4. エネルギーハーベスティング技術の用途

前章で紹介したような、微小な発電量のエネルギーハーベスティング技術は、何に使えるのだろうか。

20世紀初頭にラジオ放送が開始された当時、受信機は電波のエネルギーで作動する鉱石ラジオが主体であった。1936年、英国のSturmev-Archer社は、自転車のランプを点灯させるためのダイナモDymohubを発売した。1970年代には、半導体のCMOS化による消費電力低下に伴い、太陽電池駆動の電卓や腕時計が登場した。これらは、エネルギーハーベスティング技術を利用した先駆的な製品と言える。

これらの既存製品以外では、無線センサネットなど、ユビキタスネット（あるいは後述の「モノのインターネット」）向けの自立電源としての活用が期待されている。エネルギーハーベスティング技術と無線センサネットとを組合せることで、電源配線と信号配線のための工事を省略することができ、さらに電池交換等の作業も不要とすることで、有線のセンサネットと比較して、大幅なコスト削減が期待できる。

また、モバイル機器の補助電源、プライマリ電源としての用途も有望である。電池の廃棄量削減につながるとともに、モバイル機器の使い勝手が向上できる。単に充電の手間を省くだけでなく、電池切れによる機会損失の削減効果もある。発展途上国等、グリッドへのアクセスが困難な地域でのニーズも大きい。

一方で、太陽光発電や風力発電のような、自然エネルギー発電としての直接のCO<sub>2</sub>削減効果は期待できない。 $\mu\text{W} \sim \text{W}$ 程度の出力のエネルギー変換デバイスでは、発電量が小さく、ペイバックも難しい

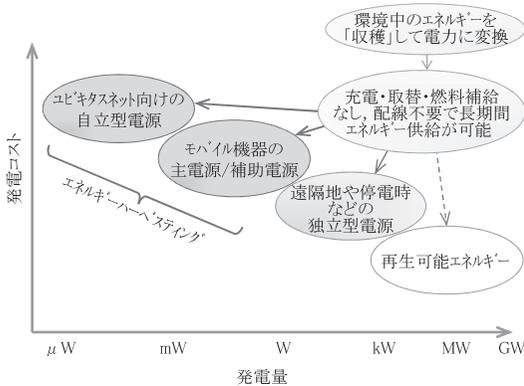


図3 エネルギーハーベスティング技術の利用用途

ためである。(図3)

### 5. エネルギーハーベスティング技術事業化の現状と今後の展開

日本では、まだエネルギーハーベスティング技術事業化の動きは鈍いが、欧米では、既に10年以上前にコンシューマ製品への導入が実現している。2001年には、スイスのスポーツ用品メーカ大手のHEAD社が、圧電素子とICチップを内蔵したテニスラケットを発売している。このラケットは、テニスボールの打撃時の振動で圧電素子により発電し、その電力でICチップを作動させて、さらに圧電素子をアクチュエータとして用い逆位相の振動を発生させることで、テニスラケットの振動を抑制し、テニス肘を防止する。

また、欧州では、1997年、ドイツのSiemensがエネルギーハーベスティング技術に関する基本特許を出願し、翌1998年には日本へも国際出願してきている。2001年には、SiemensからのスピンオフでEnOcean社が設立された。

EnOcean社や、米国NASAからのスピンオフであるPulseSwitch社は、押す動作で発電して無線でON/OFF信号を送信する無電源ワイヤレススイッチを開発した。配線のための人件費・材料費の削減効果、レイアウト変更の容易さが評価されて、徐々に普及が進んでいる。フランスのSchneider Electric社、Arveni社、スイスのAlgra社なども、無電源ワイヤレススイッチ市場へ参入しつつある。

その他、振動発電では英国のPerpetuum社、米国のMide社、熱電発電ではドイツのMicropelt社など、欧米にはエネルギーハーベスティング技術の事業化に成功した会社が多数存在する。海外には完成度の

高い市販製品があることに加えて、最近では企業間の連携や国際標準化の動きも顕著となってきており、日本企業の出遅れ感は強い。

現状ではエネルギーハーベスティング市場は限定されたものであるが、今後、発電技術や関連技術のさらなる進歩、半導体の低消費電力化の進展によって、エネルギーハーベスティング技術の適用可能領域は拡大を続け、市場のグローバルな拡大が予想されている。

特に、新規市場として期待されているのが、「モノのインターネット」である。あらゆるモノがインターネットにつながる「モノのインターネット」社会が実現するためには、あらゆる場所に電源が必要であり、エネルギーハーベスティング技術を活用した自立電源が、電源の選択肢のひとつとなる。

中国や欧州では、モノのインターネットの普及に向けた政策を推進しており、広く普及が進むことが予想されている。中国の2013年におけるモノのインターネット市場は4,896億人民元(約6兆円)と予測されている<sup>2)</sup>。

また、米国の調査会社Park Research社は、2015年のワールドワイドでのエネルギーハーベスティング市場を95億ドル(約7,400億円)と予測しており<sup>3)</sup>、今後の市場拡大が期待されているところである。

### 6. スマートグリッドへのエネルギーハーベスティング技術の応用

電力がふんだんにあるスマートグリッドにおいても、エネルギーハーベスティング技術を活用した自立電源のニーズはある。

たとえば、風力発電機のブレードのボンディング部分のモニタリングなど、電源がとりづらい箇所でのセンサの電源には、エネルギーハーベスティング技術が適用可能である<sup>4)</sup>。波力発電や水力発電、地熱発電などのメカニカルな部分のセンシングにも、エネルギーハーベスティング技術が活用可能であろう。

送電線の異常検知や危険箇所への立入検出のためのセンサの電源にも、エネルギーハーベスティング技術の活用が可能である。500kVの送電線からセンサ用に5Vの電圧を取出すことは難しい。

スマートグリッドの末端では、省エネ制御等のために各種センサが使われるが、エネルギーハーベスティング技術を活用すれば、それらのセンサへの配線工事を不要とすることができる。

このように、電力事業においても、エネルギーハ

ーベスティング技術の活用による業務効率化や間接的な省エネの効果は大きい。再生可能エネルギーと並んで、エネルギーハーベスティング技術の有効利用に向けた検討が望まれる。

#### 参考

##### エネルギーハーベスティングコンソーシアムについて<sup>5)</sup>

個別要素技術では高いポテンシャルを有しているものの、製品化では欧米に後れを取っているわが国のエネルギーハーベスティング技術を、国際的に競争力のあるビジネスとするため、2010年5月、エネルギーハーベスティングコンソーシアムが設立された。

2012年9月時点では、コンソーシアムへの参加企業数は60社近くまで増加し、関係企業を中心とした情報共有、共同活動の推進等を行うプラットフォームとしての活動を進めているところである。

##### エネルギーハーベスティングコンソーシアム 参加企業一覧 (2012年9月28日時点)

旭化成株式会社  
旭化成エレクトロニクス株式会社  
アズビル株式会社  
アダマンド工業株式会社  
株式会社アルティマ  
アルプス電気株式会社  
株式会社エヌ・ティ・ティ・データ  
オリンパス株式会社  
株式会社きんでん  
株式会社KDDI 研究所  
株式会社コベルコ科研  
シチズン時計株式会社  
昭和電工株式会社  
新日鐵化学株式会社  
住友ゴム工業株式会社  
ソニー株式会社  
ソフトバンクテレコム株式会社  
田中貴金属工業株式会社  
株式会社タムラ製作所  
TDK 株式会社  
東海ゴム工業株式会社  
東京エレクトロン デバイス株式会社  
株式会社東芝  
東洋インキ SC ホールディングス株式会社  
東洋ゴム工業株式会社

東レ株式会社  
トーヨーカラー株式会社  
トーヨーケム株式会社  
株式会社豊田中央研究所  
ナブテスコ株式会社  
日本ガイシ株式会社  
日本電気株式会社  
日本特殊陶業株式会社  
パナソニック株式会社  
株式会社半導体理工学研究センター  
バンドー化学株式会社  
株式会社日立製作所  
株式会社フジクラ  
富士通 VLSI 株式会社  
株式会社富士通研究所  
富士通セミコンダクター株式会社  
富士通マイクロソリューションズ株式会社  
富士電機株式会社  
富士フイルム株式会社  
ブラザー工業株式会社  
ペクセル・テクノロジーズ株式会社  
株式会社本田技術研究所  
マイクロペルト GmbH  
ミネベア株式会社  
ムネカタ株式会社  
株式会社村田製作所  
ヤマハ株式会社  
ラピスセミコンダクタ株式会社  
リンテック株式会社  
ルネサス エレクトロニクス株式会社  
ローム株式会社

#### 参考文献

- 1) 竹内敬治他, Electric Journal 別冊 2012エネルギーハーベスティング技術, 電子ジャーナル, 2012年4月25日発行
- 2) 中国モノのインターネット市場, 13年は4,900億元規模に, 2012/4/23, Searchina  
[http://news.searchina.ne.jp/disp.cgi?y=2012&d=0424&f=business\\_0424\\_158.shtml](http://news.searchina.ne.jp/disp.cgi?y=2012&d=0424&f=business_0424_158.shtml)
- 3) Energy Harvesting, Pike Research, 4Q2011
- 4) WINTUR プロジェクト  
<http://www.wintur-project.com/>
- 5) エネルギーハーベスティングコンソーシアム  
<http://www.keieiken.co.jp/ehc/index.html>