

# 第1章

環境発電 / エネルギーハーベスティング技術と  
市場の変遷

## 2. 環境発電のニーズ・位置づけ

環境中のエネルギーを収穫して電気エネルギーに変換する技術は、大変有用な電源技術である。その場に存在するエネルギーを活用するため、一次電池・二次電池・燃料電池やディーゼル発電機などを電源に利用する際には必要となる充電や取り換え、燃料補給などの作業が必要なく、電源配線もいらず、長期間にわたってエネルギー供給が可能である。装置の劣化・故障や環境中のエネルギーの枯渇がなければ、半永久的に供給を続けられる電源ともなりうる。

このような技術(いわば広義の環境発電技術)には、大きく分けて、4つのニーズ(市場)がある。発電規模を横軸に、発電コスト縦軸にとって、4つのニーズを配置した図を、図1に示す。

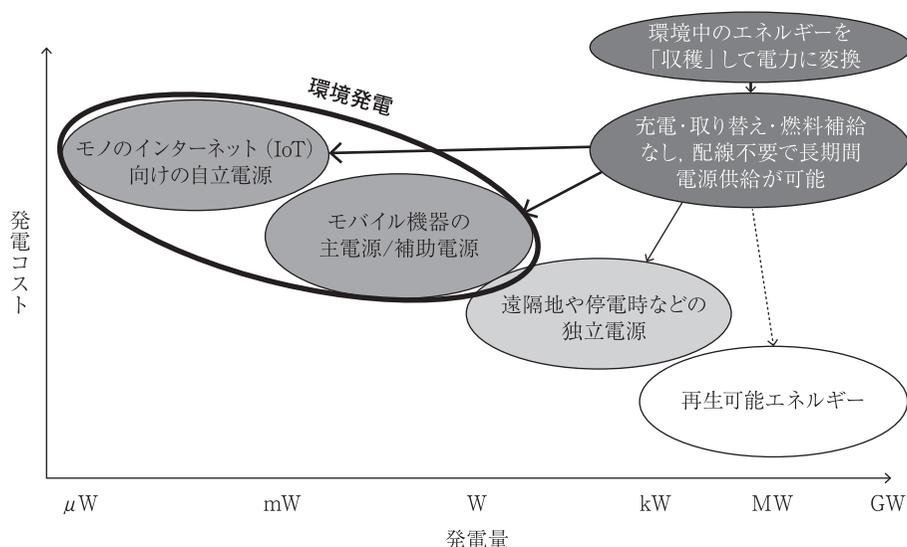


図1 環境エネルギーからの発電技術のニーズ

この4つのニーズの市場特性はそれぞれ異なる。これは、環境発電技術を開発して市場展開を図る企業にとっては重要な視点である。市場の特性を考慮すると、開発した技術が、あるニーズに技術的に適用可能かということ、ビジネスとして成立するかということとは別問題であることがわかる。このことを明確化するため、以下では、まず各ニーズの特徴と市場の特性を示し、それらの中での環境発電の位置づけを明らかにする。

### 2.1 再生可能エネルギー

図1の右下隅に配置されているのは、「再生可能エネルギー」である。再生可能エネルギー設

計は、基本機能だけであれば、消費電力が $1\mu\text{W}$ 程度である。また、IoT機器の1つである監視カメラは、消費電力が $1\text{W}$ 程度である。「モバイル機器の主電源/補助電源」と、「IoT向けの自立電源」とは、細かく見れば要求仕様の違い(形状や重量の制約、稼働温度範囲、振動特性など)は多いが、小型電子機器の電源と括れば、大まかなニーズは共通であり、利用可能な技術の共通性も高いので、「環境発電」とひとくくりにして扱ってもそう不都合はない。

## 2.5 IoT向けの電源の選択肢と環境発電の位置づけ

環境発電技術は、IoT社会を実現するためには必須の技術であるが、必ずしもすべての電源が環境発電に置き換わるわけではない。IoT機器に対する電源技術選択の考え方を図7に示す。

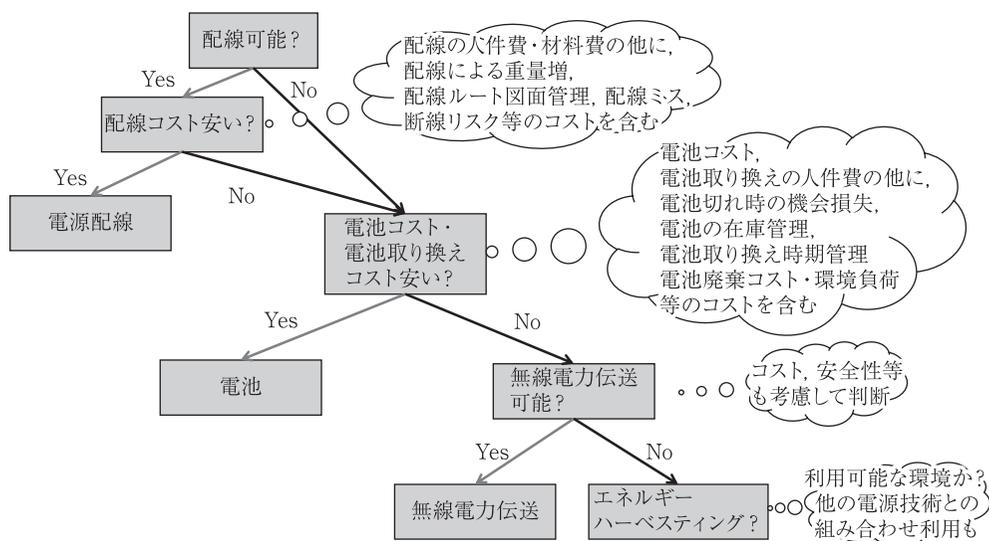


図7 IoT機器に対する電源選択の考え方

IoT機器の電源供給技術には、大きく分けて4つの選択肢がある。電源配線、電池(一次電池、二次電池)、無線給電、そして環境発電である。

もし、IoT機器までの電源配線が可能で、そのコストが安価であれば、電源配線が第一候補となる。このときのコストには、配線のための人件費・材料費だけでなく、例えば、配線ルートの図面管理のコストも入る。海外で現地の工具が作業する場合などの配線ミスのリスクや、断線のリスク、銅線の盗難のリスク、商用電源が停電になったときに、給電が停止するリスクなども電源配線のコストとなる。飛行機や自動車などの移動体の場合には、重量増による燃費の低下を考慮する必要がある。そのような、諸々のコストを考慮したうえでなお、電源配線が低コストであるなら、電源配線を選ぶべきである。

## 第2章

各種環境発電技術の仕組みと特徴

## はじめに

本章では、各種の環境発電技術について、その仕組みと特徴を述べる。学術的な解説は他書に譲り、本章では応用面を重視して解説する。具体的には、なぜ環境発電デバイスを実際に活用することが難しいのか、実用化のためにはどのような事項を考慮する必要があり、今後どのような研究開発が必要とされるのか、などの論点に着目して解説する。

## 1. 環境発電技術の利用が難しい本質的理由

第1章で述べたように、環境発電を利用することがユーザにとって難しいために、環境発電がなかなか普及していかない。では、なぜ環境発電の利用が難しいのか。その本質的な理由は2つある。環境発電技術の各論に入る前に、まず、それらを説明する。

環境発電デバイスとは何か。ごく単純なイメージで描くと、図1のようになる。環境発電デバイスは、外部環境からエネルギーを取り込み、電気エネルギーに変換して出力するデバイスである。その性能は、エネルギー変換効率で評価できる。

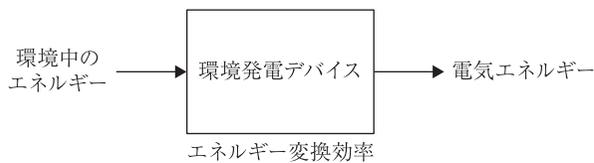


図1 環境発電デバイスの単純なイメージ

学術的な研究であれば、このような単純化によって論点を明確にでき、研究の焦点を絞ることができる。例えば、熱電材料の性能指数ZTを向上させることを目標とした研究はよく行われる。

しかし、環境発電を実用化しようとしたときには、このような単純なモデルは通用しない。ZTが大きな熱電材料が開発できても、それだけで実用化が進むわけではない。モジュール化の必要や熱設計など、個別の課題はいろいろと挙げることができるが、問題の本質は、それらの課題が独立していないということにある。

環境発電をIoT端末の電源として利用しようとしたとき、実際に考える必要があるプロセス

を、模式的に図2に示した。環境発電デバイスは、エネルギー変換を一度だけ行うデバイスではない。環境中からエネルギーを取り込み、デバイス内部で何度もエネルギーを変換し、蓄積し、伝達し、最終的に電気エネルギーを直流定格出力することで、はじめて電子回路の電源となることができる。これらの中で、エネルギーの蓄積プロセスは明示的に扱われないこともあるが、例えばバネの力学的ポテンシャルエネルギーに一時的にエネルギーを蓄積したり、電源回路内のキャパシタに一時的にエネルギーを蓄積したりする場合は該当する。より明示的な例としては、充放電制御回路を通じて二次電池の化学エネルギーとして蓄積する場合は挙げられる。

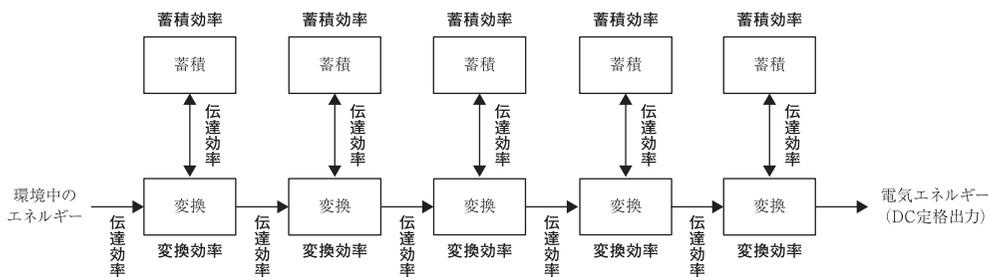


図2 環境発電利用の実際

図2に示した機能全体を1つの「電源デバイス」として実装することもできるし、「発電デバイス」「蓄電デバイス」「電源回路」に分割して、これらを組み合わせることで図2の機能を達成することもできる。いずれにしても、環境発電技術を利用する場合は、エネルギーの変換、蓄積、伝達を何度も繰り返して、最終的に電気出力に至る。

このプロセス全体の効率は、図2に書かれているすべての効率の積算である。すべてのプロセスで効率が高くなければ、全体としての効率は高くない。特に、あるプロセスの効率がゼロになってしまう場合は、他のプロセスの効率がどんなに高くとも、最終的な電気出力はゼロとなる。例えば、共振タイプの振動発電デバイスで、環境振動の周波数とデバイスの共振周波数が離れていれば、出力はゼロである。熱電発電デバイスで、ヒートシンクの性能が低くて熱電素子の電極間に温度差がつかなければ、出力はゼロである。熱電モジュールで多数の熱電対を直列接続するための配線が1か所外れてしまえば、出力はゼロである。

環境発電を実用化するためには、図2のプロセス全体の効率を高める必要があるが、問題を難しくしているのは、それぞれのプロセスの効率が、独立には決まらないということにある。例えば、電気機械結合定数大きい(性能が高い)振動発電デバイスでは、負荷となる電気抵抗(インピーダンス)の値が変わることで、物理的な挙動(メカニカルな共振周波数)が変化する。各プロセスの効率を高めれば高めるほど、各物理現象間の相互作用が強くなっていく。

トータルの性能として効率が高い環境発電デバイスを実現するためには、非常に複雑な最適化問題を解く必要がある。そして、数多くのプロセスのうちの1か所でも効率が低いところがあると、全体の効率はゼロに近づき、実用性を失う。これが、環境発電の利用が難しい本質的な理由の1つ目である。

環境発電の利用が難しい本質的な理由の2つ目は、外部環境がコントロールできないことにある。環境にどれだけエネルギーがあるのかは、環境発電デバイスを作っているときにはわからない。環境中のエネルギーがわからない、コントロールできないということは、境界条件が決められないということである。境界条件が定まらない最適化問題は、原理的に解くことが不可能である。

特に、周りの環境に収穫すべきエネルギーがない状況では、環境発電は無力である。このような状況は必ず発生するため、実用化のためにはアプリケーション側での対処も必須となる。

## 2. 環境発電を実用化するために重要なポイント

上記のことから、環境発電を実用化するために重要なポイントは、以下の2つであることがわかる。

まず、1つ目は、図2の各プロセスの効率を、できるだけ満遍なく上げていくことである。高性能材料が開発できても、それで即トータルの実用性が高まるわけではない。ポイントは、効率がゼロになる可能性があるプロセスを徹底的につぶしていくことである。これが1つでも残っていると実用性は乏しくなる。

耐久性は、必ず押さえなくてはならない非常に重要な要素である。これには2つ理由がある。1つは、環境発電デバイスには長寿命が期待されること、もう1つは、エネルギーが豊富で発電に適した環境ほど、デバイスの設置環境としては厳しくなるということである。「振動発電は振動に弱い」という笑い話のような話があるが、振動が激しくて発電しやすい環境ほど、デバイスは壊れやすい。そして、短期間に壊れてしまったら、電池の方がまし、とユーザに判断される。

環境発電を実用化するために重要なポイントの2つ目は、できる限り境界条件を定める、つまり、環境発電デバイスが設置される環境に、どのようなエネルギーがどれだけあるかを、一定の範囲に限定するということである。アプリケーションの動作条件も含めて、境界条件を絞り込めれば、絞り込めるほど、環境発電デバイスの設計、最適化が簡単になる。

例えば、指で押される(〇~〇Nの力で〇cm/秒程度の速さで押し込まれる)ときだけ動作すればよい(〇 $\mu$ J発電すればよい)という問題設定であれば、発電機構を考えるのは、比較的

# 第3章

---

国内の発電デバイスおよび  
応用研究・開発の動向

## 1.1 エネルギーハーベスティングの価値とユースケース

エネルギーハーベスティングの価値は、バッテリーレス、メンテナンスレス、ワイヤレスであるが、ビジネス化への課題は一次/二次電池の交換/充電で十分である場合が多いことである。エネルギーハーベスティングが普及するための条件を整理したところ、以下の3点のユースケースに大別できる。

- ✓ 電池交換(充電)作業が困難
  - ・ 地下, 高低温環境下, 海中, 宇宙
- ✓ センサー数が多く, 電池交換コストが増大
- ✓ 配線コスト削減・軽量化の必要性

## 1.2 水インフラの顧客ニーズとエネルギーハーベスティングの必要性

ビジネス化のために必要なことは、技術課題の解決は当然であるが、顧客は誰で何を売るかを明確にすることが最も重要である。そこで、顧客ニーズを明確にするために、上下水道インフラメーカーへのヒアリングを実施した。その結果は以下のようにまとめられる。

- ・ 全国に30年以上経過した上下水マンホールが数百万個存在(耐用年数 歩道30年, 車道15年)
- ・ マンホールの設置場所マップが不完全
- ・ 清掃確認, およびオリンピックテロ対策として, 下水道の蓋を開けたかどうかを知りたい
- ・ 硫化水素発生による環境の影響によりマンホール毎の老朽化度合が異なる
- ・ マンホール遠隔監視を実現したい(水位, 流量, pH, 硫化水素など)
- ・ 下水道の点検のために, 平均して2年に1回マンホールの蓋を開ける

このような水インフラメーカーのニーズでは「電池交換(充電)作業が困難な地下環境であること」「センサー数が多く, 電池交換コストが増大する」という課題があり, エネルギーハーベスティングの価値を生かすことができるユースケースであると考えられるため, エネルギーハーベスティング(熱電変換)を電源に用いて下水道の水位をリアルタイムでセンシングするシステムを構築することを目標とした。

## 2. 下水道水位リアルタイムセンシングシステムとその要素技術

### 2.1 下水道水位リアルタイムセンシングシステムの概要・機能と提供価値

マンホールの裏側にエネルギーハーベスティング電源を搭載したセンサーモジュールを設置し, リアルタイムで下水道内部の水位をセンシングするシステムを2013年10月に企画し, 福

鳥取県山形市での実証実験(2015年7月～2016年11月)を実施しながら、2016年8月に製品発表した。図1に全体のシステム構成とデータの流れを示す。技術的な特徴は、熱電変換に関しては、独自技術を搭載し、電源交換なしで5年以上のセンサー駆動を実現することができた。下水道の点検のため、平均2年に1回はマンホールを開けるため、5年以上を保証できることは大きな価値がある。このシステムにより、これまで不可能であった下水道氾濫の兆候を検知し、浸水被害軽減対策の支援が可能となる。さらに、下水道管路の更新計画策定、現場作業員の支援、浸水危険エリアの予測と通知を可能とすることができる。

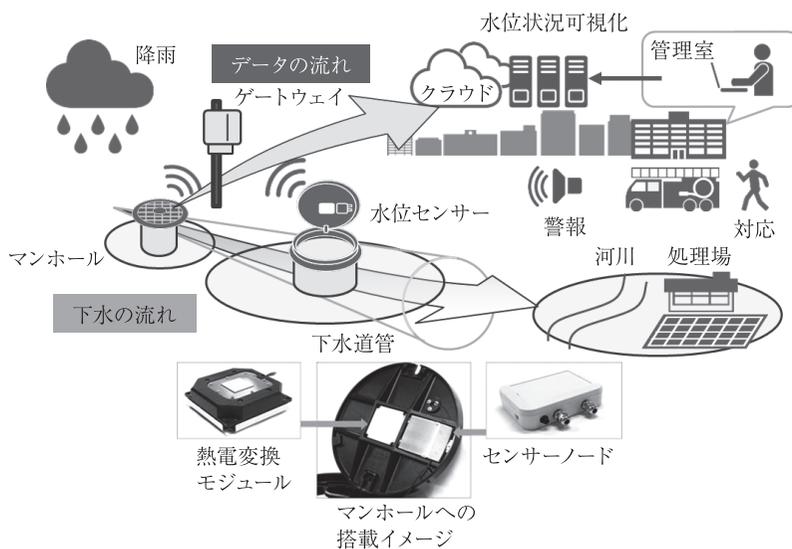


図1 下水道水位 リアルタイムセンシングシステム

## 2.2 水位センシングの技術課題と、その対策技術

下水道管センサーモジュールとゲートウェイとの関係を図2に示す。下水道の水位計測は、最も信頼性が高く、実績のある水位センサーを用いている。水位計測の課題としては、通信インフラの構築、電源の確保、メンテナンスの負担軽減(バッテリー交換など)があり、低消費電力な無線センシング技術が必要である。対策としては、920 MHz 特定小電力無線を採用、マンホール周辺にゲートウェイを設置し、センサーの無線送信電力を低減した。また、熱電変換モジュールは、マンホール鉄蓋の熱を電力に変換し、センサーを駆動する電力の一部を自己発電で賄う。さらに、センサーの測定間隔やゲートウェイへの無線送信頻度を最適化し、センサーの消費電力を低減するアダプティブセンシングを開発した。

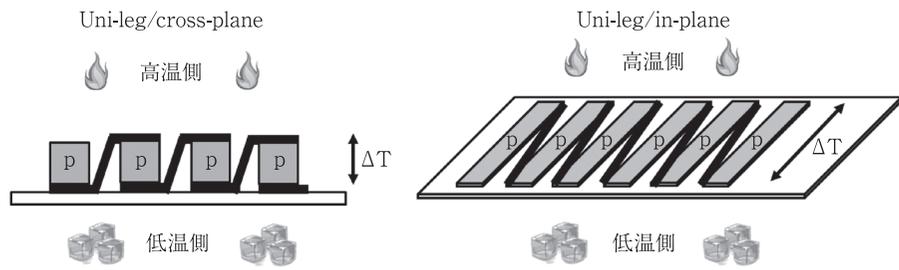


図5 熱電変換素子の構造(Uni-leg 構造)

### 1.3 CNTを使った熱電変換素子

筆者らは、CNTを用いた熱電変換素子を使った開発を行っている。CNTを熱電変換素子に用いる試みは、1998年ごろから報告されており<sup>2,3)</sup>、熱電変換素子の中では新しい材料系である。

CNTはフラーレンやグラファイトと同じ、炭素からのみ構成されるナノ構造体であり、チューブ状の構造をとっている。CNTはチューブが単層である単層カーボンナノチューブ(Single Wall Carbon NanoTube : SWCNT)と同心円状の複数のチューブからなる多層カーボンナノチューブ(Multi Wall Carbon NanoTube : MWCNT)がある。SWCNTはチューブの巻き方で半導体性を有する。一般に作製されるSWCNTは1/3が金属性、2/3が半導体性であり、MWCNTは多層であればあるほど金属性チューブの比率が大きくなるため半導体性を持たなくなる。そのため、熱電変換素子に用いられるCNTはSWCNTであり、逆にいうと、熱電変換素子はSWCNTの特徴を生かした応用商品である。

CNTは合成された時点ではn型の特性を持つが、空气中に暴露されるとp型で安定する。またドーピングによりn型材料を作ることができる<sup>4)</sup>ため、p型とn型の熱電変換素子を交互に並べて作製することが可能である。

CNTは粉体であるので、デバイス化するには溶媒に分散し、分散液から製膜された薄膜を用いる。薄膜は塗布でも作製できるが、CNT独自の構造として「シート」がある(図6)。CNTのナノ構造のネットワークが形成され、非常に安定な「紙」状の膜がバインダーフリーで作製できるため、CNTの特性をダイレクトに引き出すことができ、膜厚は150 $\mu$ m程度まで厚膜化が可能である。熱電変換モジュール

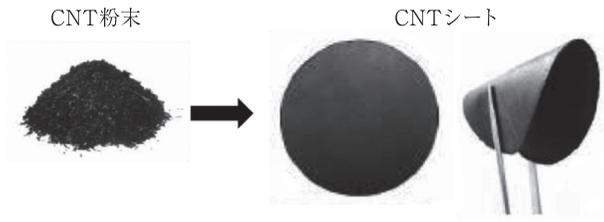


図6 CNTシート

ル構造としては、導電性高分子と同じIn-plane構造をとる。

当社では、2015年より独自の製法でSWCNTを量産している。従来の製法に比べて低コストであり、長尺で純度が高く、表面積が大きい(BET面積が大きい)点の特徴である<sup>5)</sup>。熱電変換素子としての特徴は、他のCNTに比べてゼーベック係数が大きい、ドーピングによる特性向上が容易(導電性など)といった点が挙げられ、熱電変換素子用材料として有望である。

## 2. 熱電変換素子を使った無線センシングシステム

### 2.1 システムの概要

IoT無線センシングシステムの構成は、電源(発電素子)とセンシングシステムからなる。センシングシステムは、制御回路、センサ、通信機器(発信機器)と受信部(図示せず)などから構成される(図7)。

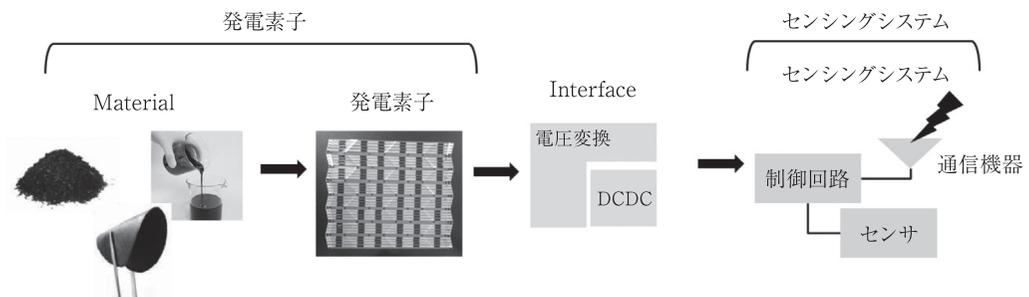


図7 システムの概要

制御回路は、システムの動きを統率するもので、センサや通信機器の動作タイミングを制御している。受信部はデータを受信しデータ解析を行い、センサで得られた結果を表示するモニターなどからなる。

また、電源として自然エネルギーを用いる場合、発電力が微弱なので、システムの前に電力を安定させるための機構としてInterfaceが必要である。

Interfaceは、システムを稼働させるために必要な電圧(多くの場合は3V以上)に昇圧する昇圧回路などで構成される。これまでは、微弱電力を効率よく昇圧させることが難しく、熱電変換素子の実用化の大きなネックになってきた。この2~3年で熱電変換素子の電力を効率よく変換する回路が開発されたことが、熱電変換素子によるセンシングシステムの構築に実現性をもたらしたといっても過言ではない。

## 第4章

---

海外の発電デバイス及び応用研究・開発の動向

## はじめに

第3章では、国内企業における発電デバイスの応用研究・開発動向が紹介された。本章では、海外企業の動向を紹介する。第1章で述べたように、環境発電分野の取り組みは海外が先行しており、欧米を中心として多くの企業が発電デバイスの研究開発・事業化に取り組んできた。それらの中から、主な成功事例と失敗事例を挙げるとともに、直近の動向を述べる。

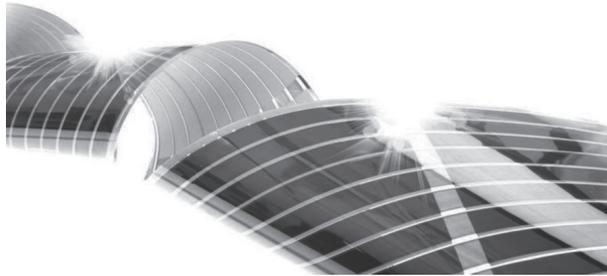
## 1. 光発電

いわゆる太陽電池メーカーは数多くあるが、環境発電のみを事業のターゲットとしている企業はほとんどない。その理由は、太陽電池技術が基本的にはスケラブルであり、大型化によって再生可能エネルギー分野への進出が技術的には可能だからである。例えば、軽量・フレキシブルな太陽電池は、衣服や鞆の表面に取り付けてセンサへの給電やポータブル機器などの充電に利用することもでき、大型化すれば、従来の太陽電池パネルが設置できない建物の壁面やドーム状の屋根を覆うような使い方もできる。このような事業領域の大型化のシナリオは、投資家へのアピールとしても欠かせず、多くの企業がこのような事業拡大のシナリオを描いた。しかしながら、第1章で述べたように、発電規模が大きくなるほどターゲットコストが低下していくため、このような大型化はコストを考慮すると成立しない。逆に、2010年代には、シリコン太陽電池の劇的なコスト低下により、大規模発電を目標に有機薄膜太陽電池や色素増感太陽電池を開発してきたメーカーが、再生可能エネルギー用途への展開をあきらめて、環境発電用途へと事業領域を小型化してきている。

### 1.1 Konarka Technologies 社

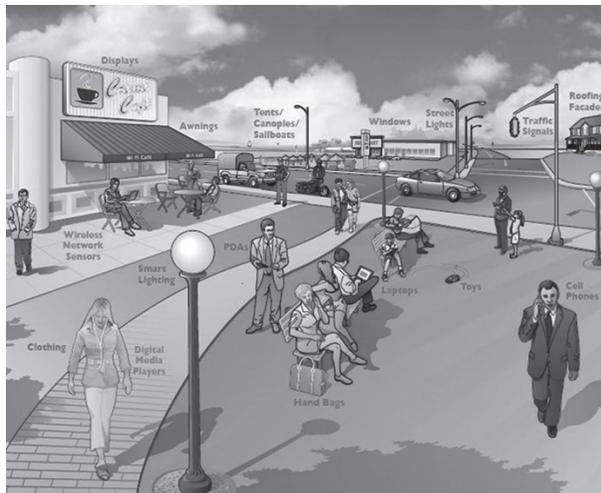
米国の Konarka Technologies (コナルカ・テクノロジーズ) 社は、大型化のシナリオの半ばで倒産した代表的なベンチャー企業である。2001年に設立された同社は、色素増感太陽電池や有機薄膜太陽電池の、ロールツーロールプロセスによる量産を目指した。図1は、同社の開発していたフレキシブルな太陽電池 Power Plastic である。この技術については、変換効率の低さや耐久性の低さなどから、実用化を危ぶむ声も挙がっていた。

同社は、民間企業から1億7,000万ドル以上、政府の助成金を2,000万ドル以上調達し、量産工場を建設したが、2012年6月に倒産した。同社が示したエネルギーハーベスティングのビジョン(図2)は、今でも通用するものである。ビジョンはあっても、技術力や外部環境が伴わなければ事業化に成功することは難しい。



[https://web.archive.org/web/20120516081151/http://konarka.com/media/pdf/konarka\\_brochure.pdf](https://web.archive.org/web/20120516081151/http://konarka.com/media/pdf/konarka_brochure.pdf)

図1 コナルカ・テクノロジーズ社のPower Plastic

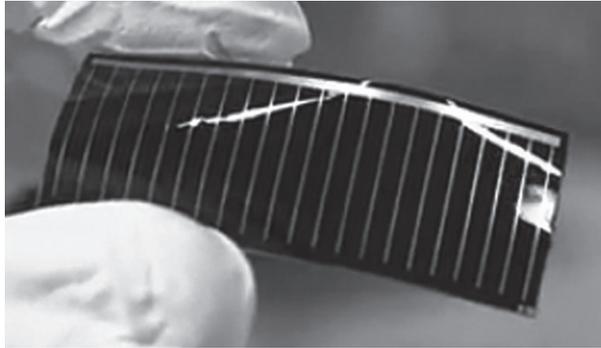


GreenUnivers, "Konarka, l'atout solaire «mobile» de Total, sort au grand jour" (2009.1.13), <https://www.greenunivers.com/2009/01/konarka-latout-solaire-mobile-de-total-sort-au-grand-jour-1045/>

図2 コナルカ・テクノロジーズ社のユビキタスエネルギーハーベスティングのビジョン

## 1.2 Alta Devices 社

米国の Alta Devices 社は、2007年に設立されたベンチャー企業である。1億2,000万ドル以上の資金を調達したが、2013年に中国の Hanergy 社に買収された。薄膜 GaAs 太陽電池の量産に成功し、製造販売を行った。同社の製品(図3)は、軽量・フレキシブルで、変換効率が非常



<https://web.archive.org/web/20190904045833/http://www.altadevices.com:80/technology/>

図3 Alta Devices社の薄膜GaAs太陽電池

に高い(太陽光, 室内光の両環境で, 理論的上限に近い)ことが特徴である。

Alta Devices社の太陽電池は, 希少な原料を利用して化学気相成長プロセスで製造されるため, 高価であり, 軍用の無人飛行機の電源やNASAの人工衛星の電源などのニッチな用途に使いみちが限られていた。Sensors Expo and Conference 2013などの展示会会場で, 価格について問われたときには, 「3年間で価格を10分の1にする」とっていたものの, 低コスト化は実現しなかった。それでも年間売上は1,000~1,500万ドル程度あったが, 支出は年間4,500万ドルで赤字が続き, 2019年12月に従業員250人をレイオフし, 事業をクローズした<sup>1)</sup>。

2017年8月には, アウディ社がAlta Devices社の太陽電池を自動車車体に搭載する計画を発表した<sup>2)</sup>が, このような大型化を実現するためには大幅な低コスト化が必須であり, Alta Devices社には難しい取り組みであった。2019年8月には, Alta Devices社は, 小型衛星の需要の高まりで市場が拡大するとして, 事業拡大を発表した<sup>3)</sup>。この取り組みの方がAlta Device社の事業としては可能性があったが, 事業存続には至らなかった。当時の会社の状況を勘案すると, 実際に事業拡大しようとしたのではなく, 新たな投資家を呼び込むための話題作りであったと推察される。

### 1.3 PowerFilm社

米国のPowerFilm社は, 3M社からのスピンオフで1988年に設立された。フレキシブルなアモルファスシリコン太陽電池を製造販売している。アウトドア用の充電器(図4)などの製品を販売する他, 様々な形状のカスタム品(図5)も販売している。

2018年の年次報告書<sup>4)</sup>によると, PowerFilm社の2018年1~12月の売り上げは350万ドル, 税引き後純損失は240万ドルであった。2016年には軍事市場と石油探査市場の売り上げが60%を占めていたが, 2018年にはこれらの売り上げが20%を切った。売り上げの急速な減少を補