

太陽電池の新展開

— 自然保護とエネルギー自給を両立する —

東京理科大学 創域理工学部 電気電子情報工学科 教授 すぎやま むつみ 杉山 睦

はじめに：広がる太陽光発電，その光と影 —太陽電池は本当に「環境に優しい」？—

太陽電池は半導体を用いて作られるデバイスです。半導体は、コンピュータやスマートフォンをはじめとする情報機器に広く用いられており、現代社会を支える素子として不可欠な存在となっています。このような半導体材料・製造技術を用いて、吸収した光エネルギーを直接電力へと変換する太陽電池は、エネルギー分野においても重要な役割を担うようになってきました。情報を処理する半導体が社会を支えてきたのと同様に、エネルギーを生み出す半導体としての太陽電池が新たな社会を支える基盤技術となりつつあります。日本においては、約20年前から太陽光発電の導入を促進する政策が進められてきましたが、2011年の東日本大震災以降、原子力発電所の停止を契機として、その導入量は再生可能エネルギーの中核として急速に拡大してきました。この背景には、日本の企業が太陽光パネルを製造していたことや、導入時の補助金制度や固定価格買取制度による電力の高額買取といった政策的支援が大きく関与していました。2026年現在までの累積で、約80GW＝8,000万kWを発電可能な太陽光パネルが日本国内に導入されており、年間100TWh程度発電しています。この発電量は、年間発電稼働率の高い大型原子力発電所10機程度の出力と同程度で、火力発電などを含めた国全体の発電電力量の約10%を占めるまでになっています。

しかしながら、このような急速な普及の過程において、いくつかの問題も顕在化してきました。例えば太陽光発電設備の設置を優先するあまり、山林の伐採や土地開発が進み、結果として自然環境を損なう事例が各地で報告されています。本来、環境負荷の低減を目的として導入されるべき太陽光発電が、逆に環境破壊

を伴う形で普及しているという構造的な矛盾が生じているのも事実です。これは、科学技術そのものではなく「使い方」や「導入の仕方」に課題があることを示しています。加えて、太陽光発電は気象条件に強く依存するため発電量の変動が大きく、安定した電源として単独で利用するには課題があります。実際には、晴天時には発電量が過剰となり、電力系統側の制約からせっかく発電した電力の出力抑制や買取停止が行われるケースも生じています。このような状況は、単に発電量を増やすだけでは解決できない、エネルギー供給システム全体としての課題を示しています。さらに近年では、補助金の縮小や買取価格の引き下げが進められており、太陽光発電を取り巻く制度環境は大きな転換点を迎えています。すなわち、これまでの政策主導による導入拡大の段階から、持続可能性や社会受容性、さらにはエネルギーの使い方そのものを含めた本質的な価値が問われる段階へと移行しつつあります。

このような背景のもと、これからの太陽電池には、単なる発電効率の向上やコストダウンにとどまらず、自然環境との調和を図りつつ、地域におけるエネルギー自給を支える新たな在り方が求められています。本稿では、「自然保護とエネルギー自給の両立」という観点から、太陽電池の新たな展開について紹介します。

発想の転換：太陽電池を「システム」として捉える —太陽電池は「作る」から「使い方を設計する」へ—

これまで太陽電池・太陽光発電は、「光を電気に変換する半導体素子・装置」として理解されてきました。この認識は本質を捉えたものである一方で、発展の方向性をデバイス単体の高効率化や低コスト化に限定してしまい、その延長線上では限界があることも次第に明らかになってきました。「良い太陽電池を作ること」

そのものが目的化してしまい、「どのように使うか」という視点が十分に考慮されてこなかった側面があります。実際、数十年前には日本は世界有数の太陽電池生産国でしたが、比較的シンプルな半導体素子構成であるがゆえに技術の模倣が進み、現在では世界生産の約7割を中国が担うに至っています。同時に、日本の大手メーカーの多くは太陽電池の生産から撤退しており、製品単体の性能競争だけでは持続的な優位性を維持できない現実が浮き彫りとなっています。

このような状況に対する一つの解決策として、「太陽電池を使い方込みで提案する」という発想が重要となります。すなわち、単なる発電装置としてだけではなく、それがどのような環境で、どのように使われ、どのような価値を生み出すのかまでを含めて設計するという視点です。この考え方は、かつての携帯電話の発展にも通じるものがあります。2000年代、日本は高スペック・高性能な携帯電話の開発に注力していましたが、世界的には「通信機能を有するハコ」、すなわちスマートフォンというプラットフォームの提供へとシフトが進みました。その結果、日本独自の高性能端末はガラパゴス化し、いわゆるガラケーと揶揄され、国際競争力を失うに至ったのです。これは、製品のスペック・性能ではなく「使い方の提案」が価値を決めた典型例であるといえます。同様に、太陽電池においても、デバイスそのものの性能向上のみに固執するのではなく、太陽電池を一つのハコと捉え、その中にどのようなハードウェアやソフトウェアを組み合わせ、システムとしてどのような価値を提案できるかが問われています。このような視点への転換こそが、太陽電池の新たな展開を切り拓く鍵となります。

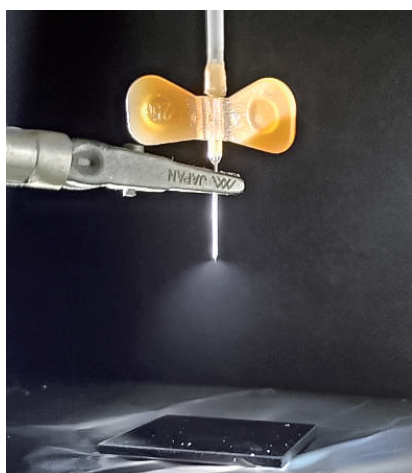
どこでも発電：広がるエネルギーの地産地消 —電気は「遠くで作るもの」から「使う場所で生み出すもの」へ—

このような「使い方まで含めた再定義」を具体化する方向性の一つが、従来の設置形態からの脱却です。これまで太陽電池は、パネル型として建物の屋上や広大な平地に設置するものが主流でした。しかし今後求められるのは、こうした設置場所に制約された在り方ではなく、建材や各種機器の一部として組み込まれるなど、使用用途・設置箇所にとらわれない太陽電池で

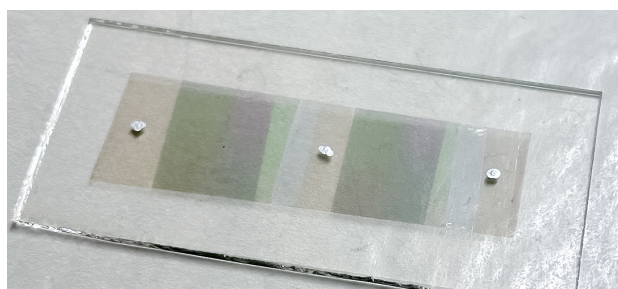
す。すなわち、「発電所としての太陽電池」から「あらゆる場所に存在するエネルギー源」への転換となります。

この潮流を象徴するのが、現在、日本が世界的に研究開発をリードしているペロブスカイト系太陽電池です。この太陽電池は、従来の半導体デバイスとは異なり、軽量・安価なフレキシブル基板上に作製可能で、曲げたり折ったりできる柔軟性を有します。また、原料が溶液であることから、スプレーや印刷といった簡便な低温プロセスで製造できるなど、従来の「硬く・重く・高温プロセスを要する半導体」という常識を覆す特徴を持っています。このような特性により、太陽電池は単に発電機能を持つ装置から、設置場所や形状を自由に設計できる「エネルギー創出機能を有する材料・構造体」へと進化しつつあります。建物やビルの壁面、街灯を備えた電柱、さらには自転車や自動車といったモビリティに至るまで、電力を消費するあらゆる場所に直接組み込むことが可能となります。これにより、発電と消費を同一空間で完結させるエネルギーの地産地消、いわゆるエネルギーハーベスティングの実現が現実味を帯びてきているのです。

著者らは、太陽電池を「どこでどのように使うか」という観点を重視し、従来とは異なるアプローチによるデバイス開発に取り組んでいます。具体的には、ペロブスカイト太陽電池にも用いられている酸化物半導体に着目し、**【図1】**に示すようなスプレーによって任意の場所に形成可能な透明太陽電池の開発を進めています¹⁾。ここで用いている手法は、原料の溶液を帯電させて微細な霧状にし、基板上に均一に堆積させる静電噴霧堆積 (Electrostatic Spray Deposition: ESD) と呼ばれる技術です。スプレーのように吹き付けるだけで成膜できる簡便さに加え、スプレーが噴射されるノズルと基板の間に電場を発生させることで、薄膜の厚さや組成を精密に制御できる点に特徴があり、大面積や曲面にも対応可能です。さらに、高温処理や真空装置を必要としないため、低コストかつ多様な基材への適用が可能であり、「どこでも作れる・どこにでも作れる太陽電池」を実現する基盤技術となっています。この太陽電池自体は透明であるため、建物やモビリティ、各種機器の外観や意匠性を損なうことなく、既存の構造物に後付けで導入することが可能です。また、



【図1】 透明太陽電池を作製するための、スプレー（ESD: Electrostatic Spray Deposition）装置¹⁾。



【図2】 製造段階で直列接続された NiO/ZnO/ITO 透明太陽電池²⁾。

発電と電力消費の場を一致させることができるため、従来必要であった配線や電力供給インフラを大幅に簡略化できるという利点をもちます。この特性は、特に多数のデバイスが分散配置される環境において有効であり、例えばIoT社会を支える各種センサやモニタリング機器の電源として適しています。すなわち、低消費電力で広範囲に展開されるデバイス群に対し、エネルギーをその場で供給するエネルギーハーベスティング技術としての応用が期待されます。【図2】に、製造の段階で直列接続された NiO/ZnO/ITO 太陽電池を示します。可視光の透過率は 80-95% の間で任意に調整できるため、設置する箇所に適した電圧・透明度を有する太陽電池を提供することが可能です²⁾。これは単なる新材料の提案ではなく、「エネルギー供給の在り方そのもの」を変える試みです。低消費電力で広範囲に展開される IoT デバイス群に対し、それぞれの素子に適した電圧・電流だけをその場で供給するエネルギーハーベスティング技術としての応用が期待されます。

太陽電池+ α ：機能統合が生む新しい価値 —太陽電池は単なる「発電装置」ではなく他の機能と組み合わせて更なる真価を発揮—

太陽電池は電力を生み出す半導体デバイスですが、それ単独で価値を持つものではなく、必ずその電力を消費するデバイスと一体となって初めて機能します。したがって、太陽電池を単体の発電素子として個別に高度化するのではなく、「何に電気を供給するのか」という視点から出発し、それに最適化されたデバイス全体を設計する方が、より合理的で効率が良いのは明らかです。このように異なる機能を組み合わせて新たな価値を創出するアプローチは、これまで日本の電気・電子分野が得意としてきた方向性でもあります。

その具体例の一つが、水素エネルギーとの統合です。太陽電池はあくまで電力を生み出す素子であり、それ自体にエネルギーを蓄える機能は持ちません。一般にはバッテリーに蓄電する方法が用いられますが、変換や充放電の過程で損失が生じ、効率の面で課題が残ります。これに対し、電気エネルギーを水素として化学的に貯蔵することで、より高効率かつ長期的なエネルギー利用が可能となります。更に、水素は燃焼しても水になるだけで二酸化炭素を排出せず、水の電気分解によって得ることができるため、クリーンエネルギーの代表として注目されています。しかし現状では、水を電気分解して水素を製造するために用いる電力の多くが化石燃料由来であり、必ずしも完全にクリーンなエネルギー体系とは言いきれません。この課題に対し、太陽光発電を利用した水素生成が広く検討されています。ここで重要となるのが「光電極」と呼ばれる半導体デバイスです。光電極は、水中に配置しわずかな電力を加えつつ光を照射することで、水から酸素と水素を生成したり二酸化炭素を分解するなどの酸化還元反応を発生させる機能を有しており、次世代の水素製造技術として期待されています。この光電極に供給するわずかな電力を太陽電池で賄えば、理想的には完全にクリーンな水素生成が実現できます。さらに一步進めて、太陽電池と光電極を別々のデバイスとして作製してから配線・接続するのではなく、最初から一体化して設計・作製するという発想が「モノリシック光電極」です。これは、「発電」と「エネルギー変換」を



【図3】 水に沈めるだけで水素が生成する，CIGS モノリシック光電極³⁾。

分離せず統合するという新しい設計思想です。

著者らは，【図3】に示すような，太陽電池と光電極を一体化した「モノリシック光電極」の開発に，高効率薄膜太陽電池材料である Cu(In,Ga)Se_2 (CIGS) を光電極としても機能させ，一度の製造プロセスで発電と水素生成を同時に行うデバイスを開発しています³⁾。このように太陽電池を他の機能材料・デバイスと統合し，一体的に作製することで，製造コストの低減や適用範囲の拡大が期待できます。太陽電池は単独の発電素子ではなく，複合機能を持つエネルギー変換基盤へと進化しつつあるのです。また，現在は研究段階であるため素子サイズは小さいですが，そもそも太陽電池は一片が1 m～数十 cm サイズの大きなものを作製する技術が既に確立されているだけでなく，CIGS はフレキシブル基板の上に作製できる材料である特徴を持ちます。このことから，将来的にはレジューシートのようなフレキシブルモノリシック光電極を水に沈めて，太陽光が当たれば各家庭で水素自動車の水素燃料を製造できるような，家庭内でエネルギーハーベスティングができるような社会インフラを構築することも可能となります。一方，このような大規模インフラ応用とは対極として，太陽電池で発電したわずかな電力を利用する，超小電力 IoT デバイスの開発も進めています。例えば【図4】は，前章で紹介した透明太陽電池で発電した電力によって駆動する，透明二酸化炭素センサです⁴⁾。ガスセンサと太陽電池を積層構造として一体化したモノリシックデバイスとなっており，発電からガス検知動作までを一つの素子内で完結できる特徴を持っています。透明であるため



【図4】 透明太陽電池と透明二酸化炭素センサを積層したモノリシック透明IoT デバイス⁴⁾。

どこにでも設置可能であり，景観や意匠を損なうことなく環境モニタリングを行うことができます。必要なエネルギーをその場で発電し，その場で消費することで，従来必要であった煩雑な配線や外部電源を不要とできるため，ガスセンサ設置の自由度を大幅に高めることが可能となります。このように，太陽電池の設計・開発・製造を「使い方」から逆算して行うという視点は，これからの時代において極めて重要になってくるでしょう。

おわりに：太陽電池はどこまで進化するか

以上のように，太陽電池は単なる発電素子にとどまるものではなく，さまざまな機能と融合したエネルギー創出基盤として再定義されつつあります。今後は，発電効率の追求だけでなく，利用環境や用途と一体となった形での設計・実装が，より一層重要となっていくことが予想されます。また，太陽電池には未だ多くの可能性が残されています。半導体としての特性を最大限に活用することで，自然環境と調和しつつクリーンなエネルギーを創出するデバイスとして，その役割はさらに拡張していくと考えられます。

参考文献

- 1) Keito Okubo and Mutsumi Sugiyama, Jpn. J. Appl. Phys., 63 (2024) 111006.
- 2) Yuna Koide and Mutsumi Sugiyama, Jpn. J. Appl. Phys., 65 (2026) 061002.
- 3) Kana Ueda and Mutsumi Sugiyama, Jpn. J. Appl. Phys., 63 (2024) 011005.
- 4) Ryo Tanuma and Mutsumi Sugiyama, Phys. Status Solidi, A, 216 (2019) 1800749.