

招待論文 | Invited Article

景観に適合する有機太陽電池

Organic Solar Cells Compatible with Landscape

松尾 豊 (東京大学大学院工学系研究科・特任教授)

Matsuo Yutaka, Ph.D. *Project Professor, School of Engineering, The University of Tokyo*

摘 要

有機半導体の色を変えることで、色を変えられる有機薄膜太陽電池は、軽い、曲げられる、半透明にできるといった特長によってのみならず、景観適合性でも着目される。美しい深い緑色や青色、赤色などの太陽電池を実現でき、景観に合わせて様々な色の太陽電池を設置できることになる。本稿では、有機薄膜太陽電池の開発の現状を紹介するとともに、有機薄膜太陽電池に用いられる材料や発電メカニズムについて説明し、景観に適合する有機薄膜太陽電池の未来について議論する。

I 有機薄膜太陽電池とは何か

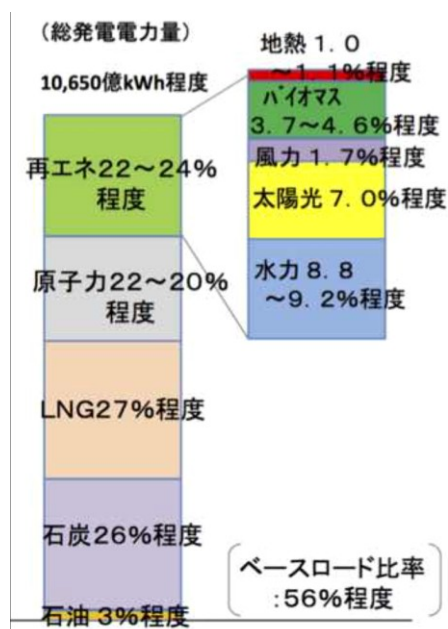


図 1 2030 年の電源構成案

(エネルギー白書 2016 より引用)

エネルギー問題の解決は人類の喫緊した課題である。石油、石炭の採掘可能年数はそれぞれ約 50 年、約 110 年といわれている。3.11 の原発事故以降、日本の 1 次エネルギーにおける海外からの化

石燃料依存率は 92% となり、国富の流出、供給不安が拡大している。また、COP21 において日本の温室効果ガス削減目標は、2013 年度比 26% 減としており、そのために電力供給における再生可能エネルギーの割合を、22 から 24% にするという見積がなされている (図 1) ¹⁾。

再生可能エネルギーの利用の研究は、化石資源の枯渇が深刻になるにせよ遠のくにせよ、人類が今後続けなければいけない重要な研究課題である。再生可能エネルギーは、ほとんど太陽光を直接的または間接的に利用しているものといってよい。太陽光発電、太陽熱発電は、直接的に太陽のエネルギーを利用している。水力、風力、波力、潮力発電、バイオマスは太陽光のエネルギーを間接的に利用するものである。地熱発電は地球内部の熱を利用するものであり、これは太陽のエネルギーというより地球のエネルギーを利用するものといえる。

今世紀に入り、太陽電池の年間生産量は指数関数的に伸びている。2014 年のデータでは、全世界の太陽電池の生産量は、4,597 万 kW であり、シェアは 1 位が中国で 66%、2 位が日本で 8%、3 位は韓国であり 7% である (図 2 左)。世界の累積太陽光発電設備容量は、世界計で 17,700 万 kW であり、これまでに

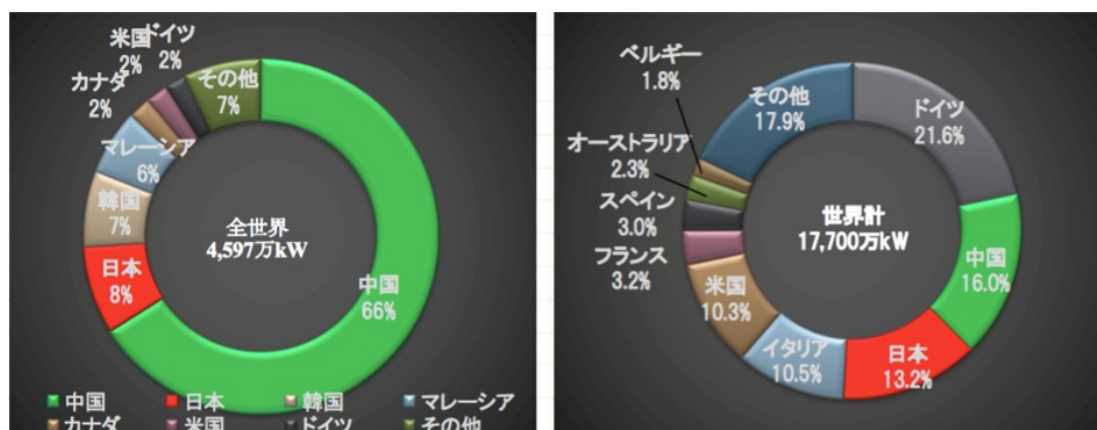


図 2 左：世界の太陽電池生産量（2014年） 右：世界の累積太陽光発電設備容量（2014年）

最も太陽電池が設置された国はドイツで 21.6%，2 位が中国で 16.0%，3 位は日本であり 13.2%である（図 2 右）。中国で生産され、世界に輸出されている構図が見て取れる。

しかし太陽光発電は、発電コストが高いというデメリットがある。太陽光発電の発電コストはおおよそ 40 円/kWh くらいであるから、電力会社の料金（約 20 円/kWh）より高い。天然ガス火力、石炭火力などでは発電コストが約 10 円/kWh 弱と試算されていた。このように、太陽光発電の最大のネックはコストである。太陽電池の発電コストを低下させるねらいもあって、有機系太陽電池^{2) 3)}の研究が行われている。

シリコン太陽電池や化合物半導体太陽電池などの無機系太陽電池は、住宅や工場などの建物の屋根の上やメガソーラー発電所などにおいて設置が進んでいる。有機系太陽電池のひとつである有機薄膜太陽電池（図 3）は、現在、研究開発段階にあるが、その特徴を活かしてシリコン太陽電池を補う新しい太陽電池として期待されている。有機薄膜太陽電池は、塗布による製造が可能、重量が軽い、曲げられる、様々な色の透過型モジュールが作製可能で、意匠性が高いという特徴をもち、研究が進めば将来的には、安価に製造されることが期待されている。有機薄膜太陽電池の課題としては、エネルギー変換効率と安

定性（寿命）の問題が挙げられる。現在、有機薄膜太陽電池の最高の変換効率は、12%（2014 年、ドイツ Heliatek 社）ないし 11.7%（2012 年、三菱化学）

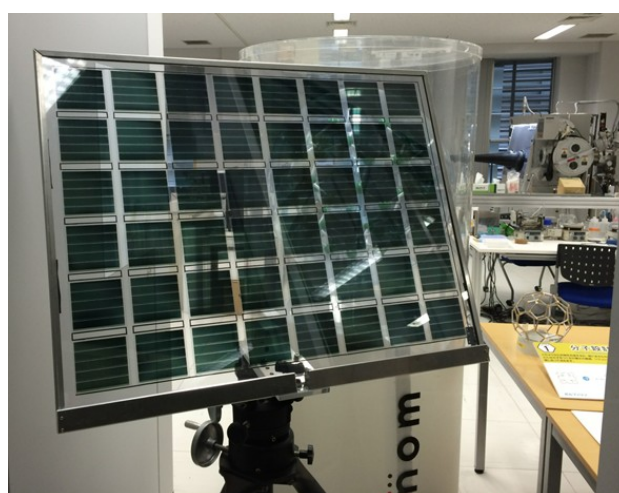


図 3 有機薄膜太陽電池モジュール
（日本科学未来館研究棟 3 階）

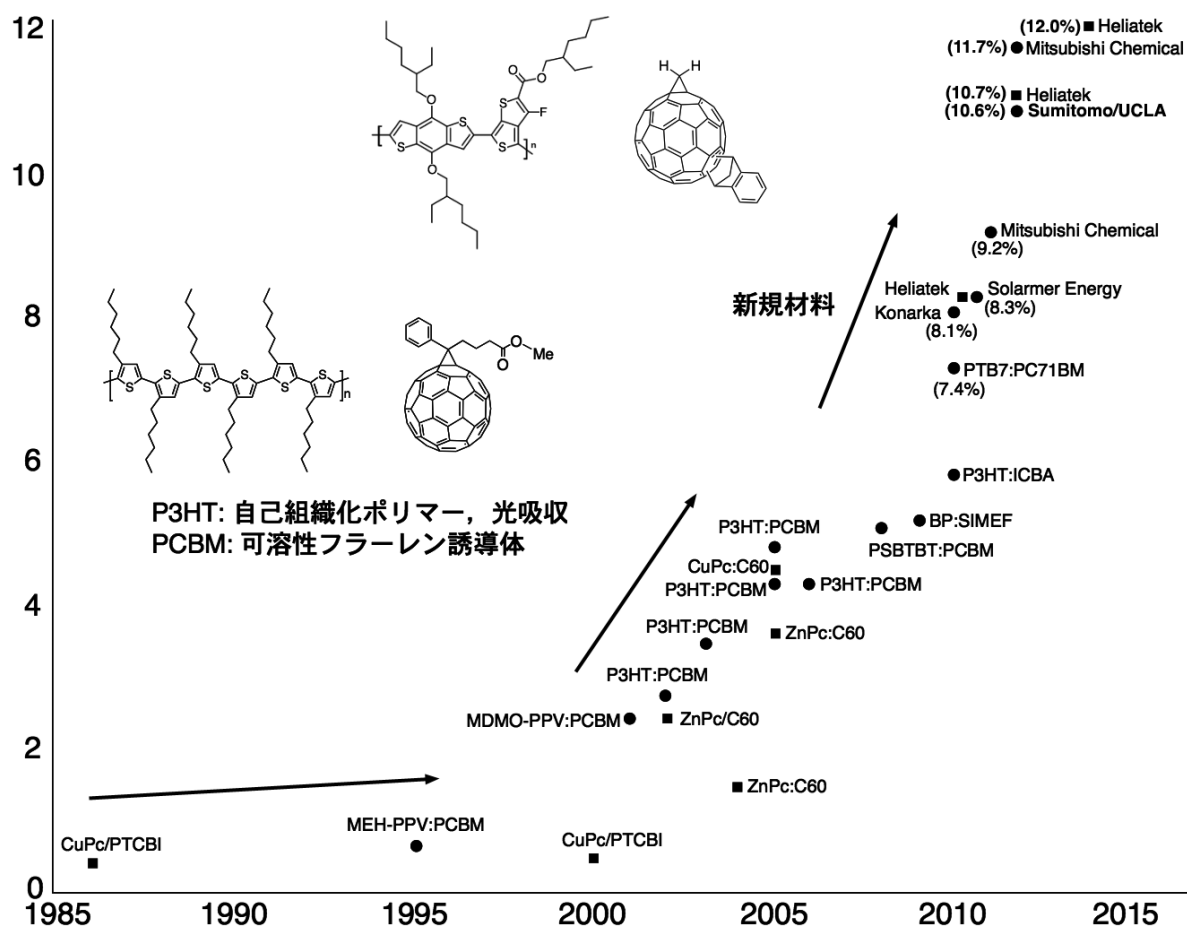


図4 エネルギー変換効率の伸び

であり (図4), 単結晶および多結晶シリコン太陽電池の変換効率には及んでいない。しかしながら, 将来, シリコン太陽電池と同等なコストで製造できるようになれば, シリコン太陽電池を取り付けできない場所への設置や, シリコン太陽電池では実現不可能な用途開発が可能になると期待される。例えば, 軽いという特徴を活かして壁面や窓ガラスなどの垂直面への設置, 自動車やトラックなど動く構造物への設置, また, 曲面でもどこにでも塗って製造が可能になれば, 現場での塗装による施工が可能, といった未来も描かれる。現状では, 有機薄膜太陽電池はコスト的にシリコン太陽電池とまだ競合できないため, 実証試験という形で試験的に用いられている段階であるが, 今後研究が進めば普及も期待できる。また, シリコン太陽電池のメガソーラーは無機的な外観で, 風光明媚な景勝地などへ設置は向かないが,

有機薄膜太陽電池であれば, 濃い緑色の太陽電池も可能であり, 景観への適合性は高いと思われる。ここでは, 新型太陽電池のひとつとして期待される有機薄膜太陽電池について, 基礎的な発電原理等を解説するとともに, 開発動向から展望まで紹介する。

II 有機薄膜太陽電池の実証試験

まず, 現在までに行われた有機薄膜太陽電池の実証試験について述べたい。JR 東日本旅客鉄道株式会社は, ジェイアール東日本コンサルタンツ株式会社, 仙台の研究開発企業の株式会社イデアルスター, 透明電極ガラス基板などを製造する倉元製作所と共同で, 2012年1月から1年間, JR日光線鶴田駅において, 国内初の有機薄膜太陽電池のフィールド試験を行った⁴⁾。20 cm角の有機薄膜太

陽電池を48枚並べ、蓄電池に接続し、夜間に人感センサー付きのLED照明(18W)を点灯させた。フィールド試験を終えたモジュールは東京・お台場にある日本科学未来館の研究棟に展示されている。同研究開発チームはその後、JR東北新幹線 くりこま高原駅前バスターミナル(2012年2月)、JR気仙沼線 バス高速輸送システム(BRT) 志津川駅(2012年12月~2014年1月)、JR山手線 目白駅(2013年11月~2014年2月)においてさらなる野外実証試験を行った。日本科学未来館の一般の展示棟(3階)にも20cm角の有機薄膜太陽電池が1枚展示されており、蛍光灯を点灯してファンが回るようになっている。

三菱化学株式会社は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業において、本格的に実証試験を実施した⁵⁾。同社は有機薄膜太陽電池の窓材や建材一体型、車載型といった利用形態を想定し、シースルー性のある有機薄膜太陽電池をサンシェードとして使用した屋内実証実験をスリーエム仙台市科学館において行っている⁶⁾。また、同社は大成建設株式会社と共同で、発電する有機薄膜太陽電池の建物外壁ユニットを用いたゼロエネルギービル(省エネルギー技術と創エネルギー技術を組み合わせた、外部からのエネルギー流入を限りなくゼロにするビル)の実現を目指している。このビルは大成建設技術センター(横浜市戸塚区)内に建設され、実証実験が行われる。

III 他の有機系太陽電池との比較

有機系太陽電池には主として、有機薄膜太陽電池、色素増感太陽電池、有機金属ペロブスカイトを用いたハイブリッド太陽電池がある。これら3種類の有機系太陽電池において、それぞれに長所、短所がある。有機薄膜太陽電池は変換効率(12%)では他の2つに比べて劣るが、連続塗布成膜プロセスによるコスト面での優位性と安定性の利点がある。

ある。色素増感太陽電池とハイブリッド太陽電池はともに変換効率(15-16%)に利点をもつが、それぞれ、電解質溶液の乾燥、有機金属ペロブスカイトの水和に由来する安定性の面での欠点がある。その他の比較を表1にまとめた。有機薄膜太陽電池の色に関する意匠性の高さは特筆すべき点である。

表1 有機薄膜太陽電池の有機系太陽電池の中の位置づけ

	有機薄膜太陽電池	色素増感太陽電池	有機金属ペロブスカイトハイブリッド太陽電池
変換効率	12%	15%	16%
安定性	全固体なので比較的安定	電解質溶液の乾燥による劣化が問題	鉛ペロブスカイトの水和による劣化
環境負荷	主に有機物を使用最も低環境負荷	比較的到低環境負荷	鉛を使用改善の余地あり
成膜プロセス	ロールツーロール連続スロットダイ塗布	セル毎に連続生産可能	水が存在すると効率低下、乾燥条件必要
封止の厳密性	酸素に対する高ガスバリア性が望ましい	乾燥防止のため、厳密な封止が必要	水に対する厳密なバリア性が必要
意匠性	カラフルな有機半導体意匠性が高い	酸化チタンスクリーン印刷により描画可能	今後の開発課題
コスト	連続製造が可能になれば低コスト	高性能の色素が安価に製造されれば低コスト	今後明らかに

IV シリコン太陽電池との比較

本有機系太陽電池は、シリコン太陽電池が苦手とする低照度の光でも電気に変換する特徴をもつ。変換効率の測定においては太陽光スペクトルをシミュレートした100 mW/cm²の照度の光を通常用いるが、これは真夏の炎天下の太陽のごとく眩しい光であり、有機系・無機系太陽電池の効率の比較において、有機系太陽電池の変換効率の評価にとっては有利な入射光エネルギーではない。入射光エネルギーが低い測定条件下では、有機系太陽電池の変換効率はシリコン太陽電池のそれに匹敵あるいは凌駕する事例も報告されている。有機系太陽電池の変換効率は、室内照明下では、太陽光下の1.6倍程度になることが知られている。中・高緯度地域での使用や、室内での使用においては、有機系太陽電池が向く場合も想定されている。



これらのデバイスには**有機半導体**が用いられている

p型有機半導体：正孔を輸送
(電子供与体)

n型有機半導体：電子を輸送
(電子受容体)

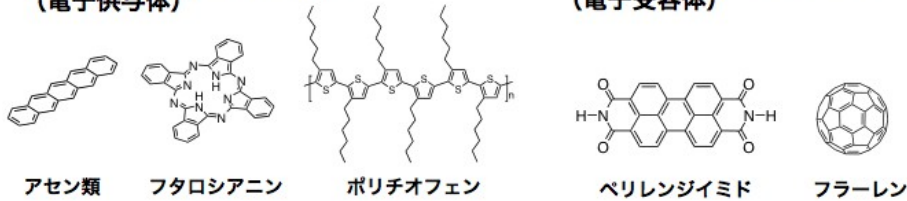


図5 有機半導体と有機エレクトロニクスデバイス

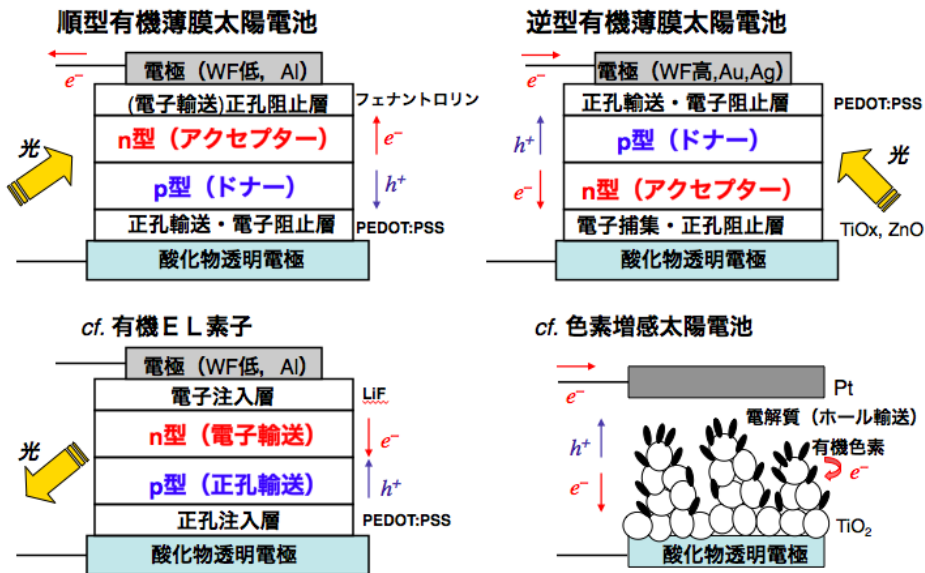


図6 有機薄膜太陽電池の構造。順型構造と逆型構造。
有機EL素子と色素増感太陽電池の構造との関係

V 有機半導体と有機エレクトロニクスデバイス

有機薄膜太陽電池は、有機EL素子、有機薄膜トランジスタと共に有機エレクトロニクスデバイスのひとつである(図5)。これらのデバイスでは、有機半導体が主要な材料として用いられている。 π 電子は π 結合を司る電子として結合する2つの原子の垂直方向に存在する。結合する2原子間に

存在し、 σ 結合をとりもつ σ 電子に比べ、 π 電子は動きやすい性質を有する。有機半導体には2種類ある。ひとつはp型有機半導体で、電子を供与する性質をもつ。電子を他の分子に供与すると、自身はホール(正孔)をもつことと同等となり、正孔を輸送する性質をもつ。平面型の π 電子共役系は多くの π 電子をもち、これが光照射下で分子が励起されるなどすると、他の分子に電子が移動

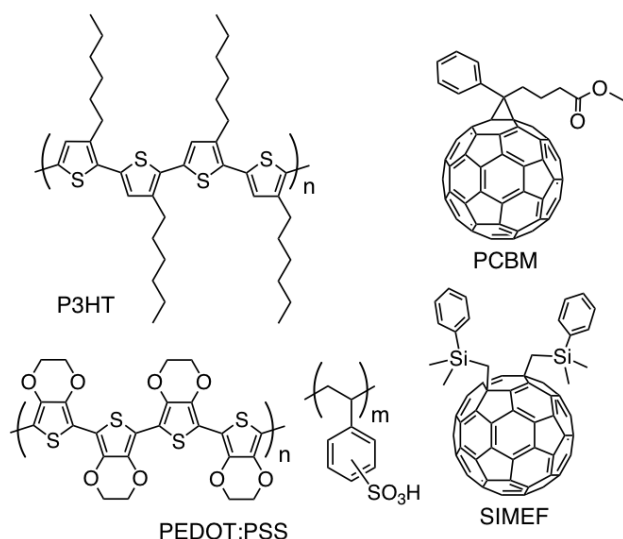


図7 有機薄膜太陽電池に用いられる有機半導体

する。もうひとつの有機半導体はn型有機半導体で、電子を受容する性質をもつ。もともと π 電子共役系化合物はリッチな π 電子をもつが、 π 共役系が曲がるなどすると、電子を受け取る性質も強くなる。フラレンは曲がった π 電子共役系をもち、球になって閉じているので、最も優れた電子アクセプターのひとつである。その他、電子求引基を取り付けて電子受容性を付与して得るペリレンジイミド等のn型半導体分子もある。

VI 有機薄膜太陽電池の構成と発電原理

有機薄膜太陽電池は、無機酸化物を用いた透明電極と金属の裏面電極の2枚の電極の間に、有機半導体を用いた有機発電層が挟まれた構造をもつ(図6)。有機発電層には2種類の有機半導体を用いられる。電子を渡す性質がある電子ドナーと電子を受け取る性質をもつ電子アクセプターである。これらはそれぞれ、正孔、電子を輸送する特性も併せ持つ、p型有機半導体、n型有機半導体でもある。電子ドナーにはポリチオフェンなどの導電性高分子(図7, P3HT)や、ポルフィリンやフタロシアニンなどの有機色素が、電子アクセプターにはフラレンやその誘導体(図7, PCBM, SIMEF)が用いられる。

有機薄膜太陽電池が光を受けると主に電子ドナーが光を吸収し、有機半導体の励起状態ともいえ、物理的には正電荷と負電荷のペアとみなされる励起子が生成する(図8)。有機半導体の励起子は10ないし20 nm程度拡散することができ、電子ドナーと電子アクセプターの界面に到達すると、電子ドナーから電子アクセプターへと電子移動が起こり、正電荷をもつ電子ドナーと負電荷をもつ電子アクセプターからなる電荷分離状態へと至る。

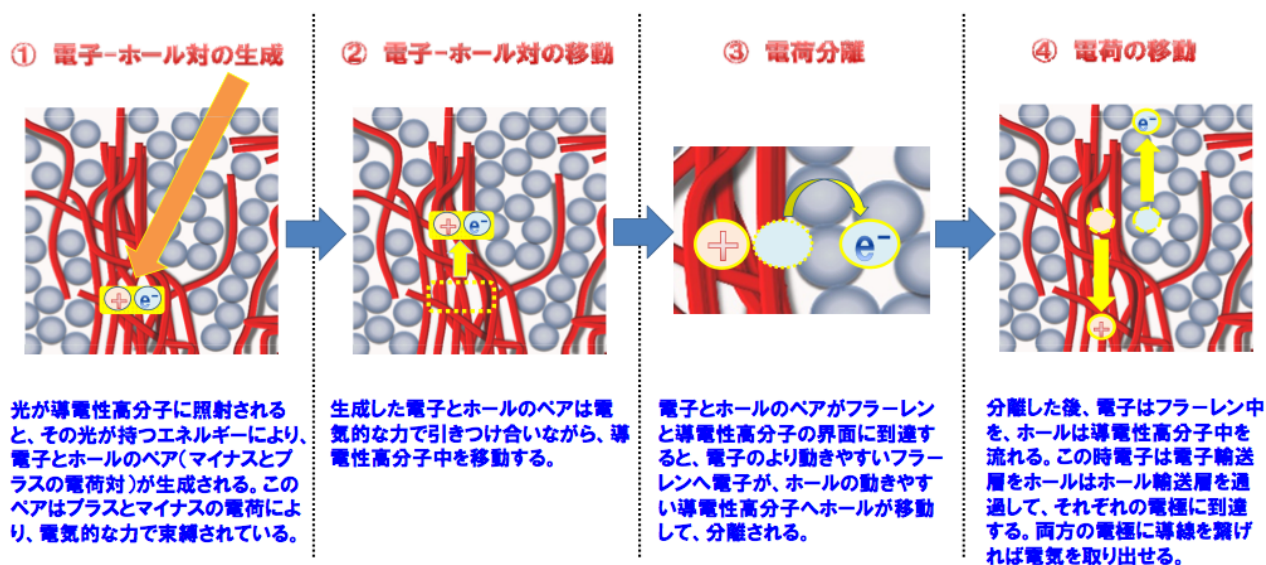


図8 有機薄膜太陽電池の発電原理

生成した正電荷および負電荷は、それぞれ電子ドナー、電子アクセプター材料の中を輸送され、最後に電荷が電極に捕集されることにより、電流が外部回路に流れる。

有機薄膜太陽電池の構造には順型と逆型の2種類がある(図6)。当初、有機EL素子と同じ構造をもつ有機薄膜太陽電池の研究が主として行われ、その後、逆の構造をもつ太陽電池も研究されるようになったため、後から研究されるようになった太陽電池が逆型有機薄膜太陽電池、先に研究されていたものが順型と呼ばれるようになった。順型有機薄膜太陽電池では、透明電極の上に電子ドナー、その上に電子アクセプター、裏面電極に仕事関数の低いアルミニウム電極という構造をもつ。有機発電層の上下には、それぞれ正孔阻止層(電子輸送層)および正孔輸送層(電子素子層)をもつ。電子アクセプターがもつ電子を裏面電極へ、電子ドナーがもつ正孔を透明電極へ運ぶ役割を果たす。正孔輸送材料としては、PEDOT:PSS(図7)がよく用いられる。逆型有機薄膜太陽電池では、透明電極の上に電子アクセプター、そして電子ドナー、最後に仕事関数が高い金や銀などの裏面電極が用いられる。色素増感太陽電池は、酸化チタンなど電子を受け取る性質をもつ無機酸化物半導体に有機色素を吸着させた構造をもっており、有機色素から酸化チタンへの電子の注入を鍵とする太陽電池である。生じた正孔は電解質溶液により輸送され、対極で捕集される。逆型有機薄膜太陽電池の電子捕集層として、酸化チタンや酸化亜鉛が使われるが、これらは有機発電層で生じた負電荷を捕集する役割を果たす。つまり、逆型有機薄膜太陽電池と色素増感太陽電池は、似たような構造を持っており、電子と正孔が流れる向きも同じである。

電子ドナー(p型)と電子アクセプター(n型)を2層に積層したp-nヘテロ接合構造は、蒸着プロセスでの成膜に採用されるが、塗布プロセスでは、電子ドナーと電子アクセプターを混ぜ合わせ

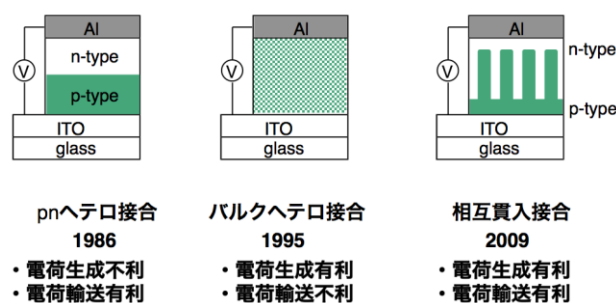


図9 有機発電層の中の構造の種類

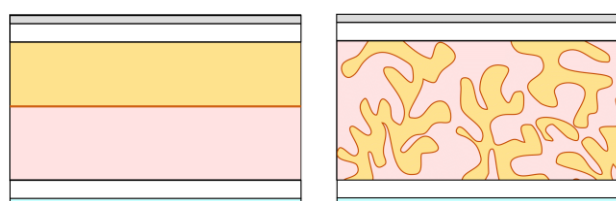


図10 バルクヘテロ接合の模式図(右側)。左側はp-nヘテロ接合。

た溶液を塗布し、電子ドナーと電子アクセプターが混じり合うバルクヘテロ接合が形成される(図9, 10)。バルクヘテロ接合のほうが、電子ドナーと電子アクセプターの界面の面積が大きくなるため、電荷分離の機会が多くなり、電子や正孔といった電荷の生成において有利である。一方、生成した電荷が流れる経路が分断されやすく、電荷の輸送においては不利となる。電子ドナーと電子アクセプターを相互に貫入させた、電荷の生成も輸送も有利になる相互貫入接合は、有機発電層における理想的な構造であり、2009年に初めて構築された⁷⁾。

VII 有機薄膜太陽電池の研究開発動向

国内外の企業において、化学産業を中心とする多くの企業が有機薄膜太陽電池の研究開発を行っている。ここでは全てを紹介できないが、主だった最新の研究開発動向について述べる。三菱化学は有機薄膜太陽電池開発のトップランナーのひとつであり、シングルセルにおいて11.7%の変換効

率を実現し (2012 年 9 月), 先に述べたように実証試験を開始している. 塗布変換可能な低分子電子ドナー材料であるテトラベンゾポルフィリンや新規フラレン誘導体である SIMEF など, 材料レベルから基礎研究を行い, 交互貫入構造の構築などの基礎研究も深く実施し, 実用化・市場投入に向けた取り組みにおいても先導的役割を果たしている. 住友化学は, カリフォルニア大学ロサンゼルス校の Y. Yang 教授と共同研究を実施し, 独自に開発したポリマー電子ドナーを用いて, タンデム素子において 10.6%の変換効率を達成している (2012 年 2 月). そのポリマーは電子求引性サブユニットと電子供与性サブユニットが交互に連なったローバンドギャップポリマーであり, 特にそれらのサブユニットが交差型にならず, できるだけ平面性をもつように設計されている⁸⁾. 東レは 10.6%の変換効率を与えるシングルセルの有機薄膜太陽電池の開発に成功しており (2013 年 9 月), その鍵は電子ドナーとなるポリマーの配向である. ポリマー主鎖の π 電子共役系平面が, 基板平面に対して平行に配向するようにポリマーの主鎖および側鎖構造が工夫されている⁹⁾. 入射光が π 電子共役系平面に垂直に入ることにより光吸収が増大し, 発生した電荷が π 電子共役系平面に垂直に効率良く流れ, 高いエネルギー変換効率を実現している. この新規ポリマー材料の吸収端波長は 780 nm, 吸光係数は約 20 万 cm^{-1} , 電荷移動度は約 $1 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ である. 配向制御されて電荷移動度が高くなったことにより厚膜化も可能となり, 300 nm の厚い膜厚をもつ有機薄膜太陽電池において 21.7 mA/cm^2 という高い短絡電流密度が得られている. また, 東芝においては, 5 cm 角のサブモジュールとして高い変換効率 (7.7%) を実現している (2012 年 9 月)¹⁰⁾. 1 cm^2 角のセルでも 9.2%の変換効率を達成している. 高効率なサブモジュールでの変換効率を実現できた背景には, 膜厚がナノスケールの多層膜を均一かつ高精度にパターン形成する成膜技術がある.

ドイツのドレスデンにある Heliatek 社は, 有機薄膜太陽電池の研究開発で用いる素子としては比較的大きな面積といえる 1.1 cm^2 の受光面積をもつ素子において, 有機薄膜太陽電池としては世界最高の 12.0%の変換効率を得ている (2013 年 1 月)¹¹⁾. Heliatek 社は真空蒸着プロセスに注力しており, 用いられた電子ドナーとなる光吸収材料は, 真空蒸着が可能なオリゴマーである. また, 変換効率 12.0%の素子においては, 2 種類の光吸収材料が用いられていると発表されている. 米国の Solarmer Energy 社と Plextronix 社もよく知られた有機薄膜太陽電池関連のベンチャー企業であり, ポリマー電子ドナーやそれらを溶解させて調整したインクを製造, 販売している.

Ⅷ カーボンナノチューブ透明電極を用いた有機薄膜太陽電池

有機薄膜太陽電池では, 有機半導体を 2 枚の電極で挟む構造をもつ. そして, そのうち 1 枚は, 透明電極である必要がある. 通常, 透明電極としてインジウムスズ酸化物電極が用いられる. カーボンナノチューブを有機薄膜太陽電池の透明電極として用いるための方法論が確立され, レアメタルであるインジウムを用いない有機薄膜太陽電池が開発されている (図 11)¹²⁾. このインジウムフリー太陽電池では, 浮遊触媒化学気相成長・転写法により作製した高純度な単層カーボンナノチュ

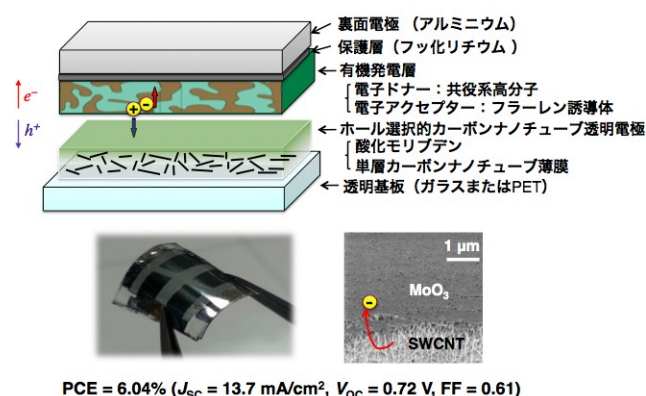


図 11 カーボンナノチューブ有機薄膜太陽電池

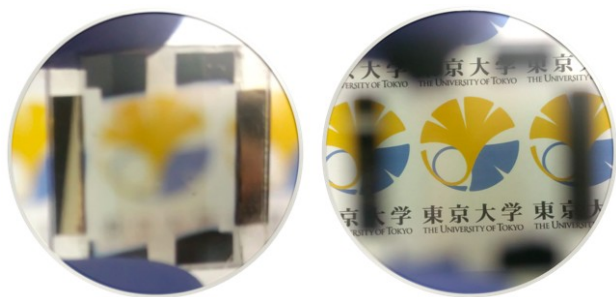


図 12 カーボンナノチューブ透明電極を用いた半透明な有機薄膜太陽電池

ープ薄膜が用いられている。カーボンナノチューブ薄膜上に酸化モリブデンが薄く蒸着され、このことにより、カーボンナノチューブ薄膜中の電子が酸化モリブデンへ電子を移動する。これによりカーボンナノチューブにホール（正孔）がドーパされ、カーボンナノチューブ薄膜にホールを選択的に捕集し高効率に輸送する機能が付与される。カーボンナノチューブ薄膜は曲げにも強く、フレキシブル基板にカーボンナノチューブを転写し、フレキシブルな有機薄膜太陽電池も作製された。また、カーボンナノチューブの疎水性と有機金属ペロブスカイトの疎水性のミスマッチングを克服し、カーボンナノチューブ薄膜を透明電極として用いたペロブスカイト太陽電池も開発されている¹³⁾。また、カーボンナノチューブ透明電極を金属の裏面電極の代わりに用い、上下とも透明な電極（インジウムスズ酸化物透明電極とカーボンナノチューブ透明電極）とした場合、透光性の高い、見た目にも半透明な有機薄膜太陽電池が得られる（図 12）¹⁴⁾。これは窓ガラス等に使用できると想定されている。

IX 有機薄膜太陽電池の研究者からみた太陽電池の景観紛争

無機のシリコンの太陽電池は確かに無機質な印象を与え、人が多く暮らす見える場所に大量の無機太陽電池を設置すると、景観に適合しなくなる

場合もあり得ると考えられる。したがって、大規模なメガソーラーなどは人の目にあまり触れない場所に設置されることが望ましいと考えられる。このことは、風力発電が結局は風切り音の問題を抱え、人が住むところから遠ざけられることと似ている。最近、使われなくなった田畑や山間部、山林にも太陽電池が設置されているが、周囲の景観と無機太陽電池の質感が合っていないケースも見受けられる。

X 有機薄膜太陽電池の研究者からの提言

先に有機薄膜太陽電池の技術的な側面を解説してきたが、景観に適合する有機薄膜太陽電池の今後の展望について述べたい。ドイツの Merck 社が開発したポリマーの電子ドナーは、深い緑色の有機薄膜太陽電池を与える（図 3 右）。その他、濃い青色、濃い赤色、など異なる色の電子ドナーを用いれば、様々な色の有機薄膜太陽電池を作製できる（図 13）¹⁵⁾。基本的には濃い色のほうが、エネルギー変換効率は高くなる。また、有機半導体を変えて太陽電池の色を変えるだけでなく、酸化亜鉛からなる電子輸送層に色を混ぜ込むと、有機薄膜太陽電池の多色化が可能になる。このようなカラフルな有機薄膜太陽電池は室内用途に向くと考えられているが、屋外でも使用できるように耐久

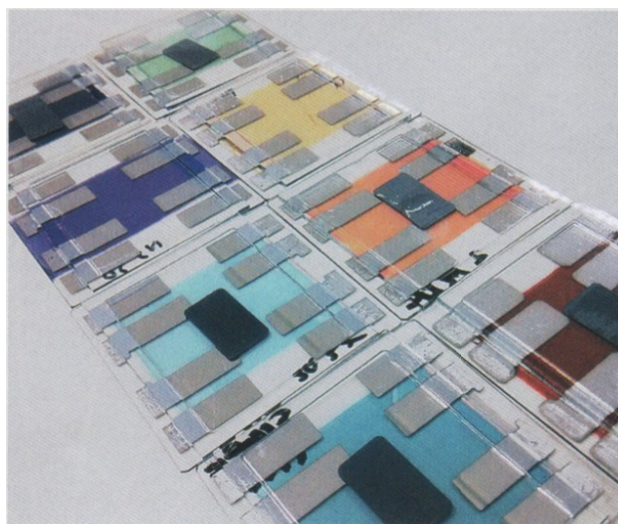


図 13 様々な色の有機薄膜太陽電池

性を高めれば、様々な景観に適合する太陽電池ができると考えられる。例えば緑豊かな山あいの村には緑色の太陽電池を、海辺には青系統の色の太陽電池を、また、秋の季節感を意識して、秋には赤色やオレンジ色の太陽電池を設置するなど、軽量である点を活かし、取り替えて使用することも想定される。

XI おわりに

現在のところ、有機薄膜太陽電池のエネルギー変換効率は無機のシリコン太陽電池に匹敵しておらず、最大 12% である。しかしながら、有機薄膜太陽電池では様々な色の有機半導体が可能であり、有機半導体の種類を変えることで様々な色の太陽電池ができる。変換効率、耐久性、コスト優位性の向上が現在の課題であるが、世界中で有機薄膜太陽電池の研究が行われており、解決へ向けた努力が続けられている。なお、本稿では、有機薄膜太陽電池の仕組みの説明や研究開発動向の箇所などにおいて、電気系の業界紙で既に行った文章¹⁶⁾を改訂、改編したものをを用いた。

注 記

- 1) 総合資源エネルギー調査会、長期エネルギー需給見通し小委員会（第 10 回会合）資料 2
- 2) 有機薄膜太陽電池の科学, 松尾 豊, 化学同人, 2011 年

- 3) 有機薄膜太陽電池の研究最前線, 松尾 豊, シーエムシー出版, 2012 年
- 4) <http://www.jreast.co.jp/press/2011/20120103.pdf>
- 5) http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100212.html
- 6) <http://www.m-kagaku.co.jp/newsreleases/2014/20140324-1.html>
- 7) Y. Matsuo, Y. Sato, T. Niinomi, I. Soga, H. Tanaka, E. Nakamura, *J. Am. Chem. Soc.* 2009, 131, 16048.
- 8) http://www.sumitomo-chem.co.jp/rd/report/theses/docs/20100101_zcb.pdf
- 9) <http://www.toray.co.jp/news/rd/nr130920.html>
- 10) http://www.toshiba.co.jp/rdc/rd/detail_j/1209_03.htm
- 11) http://www.heliatek.com/newscenter/latest_news/
- 12) I. Jeon, K. Cui, T. Chiba, A. Anisimov, A. Nasibulin, E. Kauppinen, S. Maruyama, Y. Matsuo, *J. Am. Chem. Soc.* 2015, 137, 7982.
- 13) I. Jeon, T. Chiba, C. Delacou, Y. Guo, A. Kaskela, O. Reynaud, E. I. Kauppinen, S. Maruyama, Y. Matsuo, *Nano Lett.* 2015, 15, 6665.
- 14) I. Jeon, C. Delacou, A. Kaskela, E. I. Kauppinen, S. Maruyama, Y. Matsuo, *Sci. Rep.* 2016, 6, 31348.
- 15) Newton, 2015 年 1 月号, p13.
- 16) 電気計算, 電気書院, 2014 年 7 月号, p38-44. 「有機薄膜太陽電池の開発動向と展望」, 松尾 豊

(投稿: 2016. 10. 31)

(受理: 2016. 12. 05)