

次世代有機太陽電池の開発

住友化学(株) 大西フェロー研究室
三宅 邦 仁
上谷 保 則
清 家 崇 広
加藤 岳 仁
大 家 健一郎
筑波研究所
吉 村 研
フェロー
大 西 敏 博

Development of Next Generation Organic Solar Cell

Sumitomo Chemical Co., Ltd.
Ohnishi Fellow Laboratory
Kunihito MIYAKE
Yasunori UETANI
Takahiro SEIKE
Takehito KATO
Kenichiro OYA
Tsukuba Research Laboratory
Ken YOSHIMURA
Fellow
Toshihiro OHNISHI

Organic photovoltaic, OPV, cells have been attracted much attention for next generation solar cells. OPV is based on the same technology as polymer light-emitting diodes, PLED, which has been developed intensively for TV application at Sumitomo Chemical Co., Ltd. Many PLED-related materials and device fabrication processes can accelerate the development of OPV technology. Although very high efficiency of 6.5% has already been achieved, the efficiency of more than 10% is necessary for the commercialization of OPV. In order to achieve this goal, a new class of low band gap polymer has successfully been prepared together with morphology controlling methods of an active layer of OPV. In this paper, we report the present status of OPV research at Sumitomo Chemical Co., Ltd. as well as worldwide research.

はじめに

昨今の地球温暖化対策や資源枯渇の問題への関心の高まりと共に、太陽電池がその課題解決の切り札として世界的に注目されている。今後の世界市場は2020年には10兆円を越える一大産業になると予想されているが、その普及シナリオには、太陽電池による発電コストを、商用電力コストよりも安価にすることが求められている。しかしながら、現在の太陽電池による発電コストは商業電力より高く、政府からの補助金の下に普及が図られているのが現状である。現在、太陽電池の主流は、シリコン系などの無機系太陽電池であるが、高温や真空工程により製造

され、関連部材も多いことから、コストの低減のスピードは遅い。さらにモジュールはかなりの重量を有していることから、住宅向けでは設置コストや設置できる家屋の制限などもあり、普及を遅らせている。

このような無機系太陽電池の短所を克服すべく、次世代型太陽電池として有機薄膜太陽電池（以下、OPVと略する）が期待されている。Fig. 1に示すようにOPVは当社が開発に力を入れている高分子有機EL (PLED) と材料面、素子構造が類似であり、動作が逆方向である点の特徴である。PLEDは電気から光を発生するが、OPVは光を照射して電気を取り出すデバイスである。これらのデバイスは共役系高分子が主要な材料であり、高温製造プロセスを用いないこ

とから、プラスチック基板を利用でき、フレキシブル化が容易であるなどの共通点を有している。さらに、塗布印刷で製造できる特徴を生かせば、製造方法としてはRoll to Roll手法が採用でき、連続製造による大幅なコスト低減も可能である。加えてフレキシブルOPVは軽量であることから、家屋への設置も容易で、低価格での提供も可能と期待されている。OPVに使われる共役系高分子の製造には高度な分子設計技術、合成技術が必要であり、当社のような素材メーカーがその強みを発揮しやすい。さらに、PLEDの材料設計技術、素子製造技術で世界を先導している当社にとってはこれまでの技術知見を生かしやすい分野である。実際、単素子としては、世界で最初に6%の効率を越えることに成功しており¹⁾、トップクラスの開発レベルと自負している。

しかしながら、OPVの実用化の観点で見れば、現在主流のシリコン系太陽電池に比べればまだまだ研究開発レベルであり、効率や耐久性について一層の改良が必要である。当社のみならず、世界的にも実用化に向けたこれらの改良検討が活発化してきている。本稿では、①OPVの特徴、②世界的な開発動向、③当社の現在のOPV開発状況について報告する。

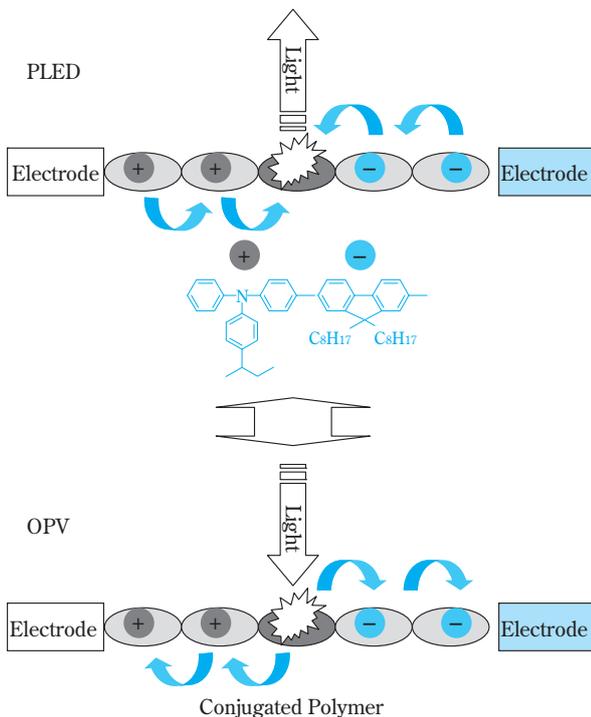


Fig. 1 Similarity in device structures and materials

太陽光発電を取り巻く現状

1. 環境問題解決の切り札として期待される太陽光発電

地球温暖化による異常気象や海面上昇等の問題が

顕在化してきており、地球温暖化問題が社会問題として大きく取りあげられている。地球温暖化問題の原因の一つと言われているのが、CO₂などの温室効果ガスである。このCO₂の削減に向けた取り組みが世界的に始まっており、最近では、COP15での国際的な温室効果ガス削減目標の取り決めや、ポスト京都議定書として、世界全体の温室効果ガス排出量を2050年までに半減するいわゆるクールアース50が提唱されている。さらに、日本政府も各国が合意することが前提ではあるが2020年までに1990年対比、25%の温室効果ガス削減を目標として掲げるなど、CO₂の削減が、非常に重要な課題となってきている。このような状況下、太陽光発電は、太陽光を直接電気エネルギーに変換し、CO₂を出さないクリーンなエネルギー源であり、CO₂削減の切り札として、最も注目される技術の一つとなっている。地球に到達する太陽光エネルギーは、176兆kJ/秒²⁾と莫大で、わずか1hr分の太陽光エネルギーで、世界の年間全消費エネルギー（2007年 111.0億トン（石油換算））をまかなうことができる。

しかしながら、太陽光は紫外線から赤外線にわたる広いスペクトルを有しており、電気への変換できる波長に制限があることや、エネルギー密度は中緯度で1kW/m²と低いこと、昼夜および天候によって発電量が変動するなど、普及を妨げる要因がある。たとえば、家庭の標準的な使用電力である2~3kWhを発電するには、変換効率を10%とすると20~30m²の面積が必要となる。太陽電池の普及には効率が高く、しかも低コストであることが鍵となる。

2. 太陽電池の種類と特徴

Fig. 2に現在市販あるいは開発中の太陽電池の種類を示す。このように、現在の太陽電池は百花撩乱状態であるが、その中で、現在、最も主流なのは、シリコン系の太陽電池である。シリコン系太陽電池には、薄膜系と結晶系があり、結晶系にも単結晶と多結晶がある。結晶系では、高純度のシリコンを原料として使用する必要があり、その原料やインゴットの製造過程で高温プロセスが必要となる。薄膜系は、シランガスを用いたプラズマCVD法等で製造されている。薄膜系で必要な膜厚は数μmと結晶系の数十分の一の薄さであるが、結晶系と比べて低効率である。これらの欠点を無くすために、銅・インジウム・ガリウム・セレン（CIGS）やCdTeなどの化合物半導体を用いた薄膜系の太陽電池も実用化されている。しかしながら、これらの無機系太陽電池は、高温高真空プロセスを使用するためコスト低減がなかなか進まないことや資源的な制約のある材料を使用するものもある。

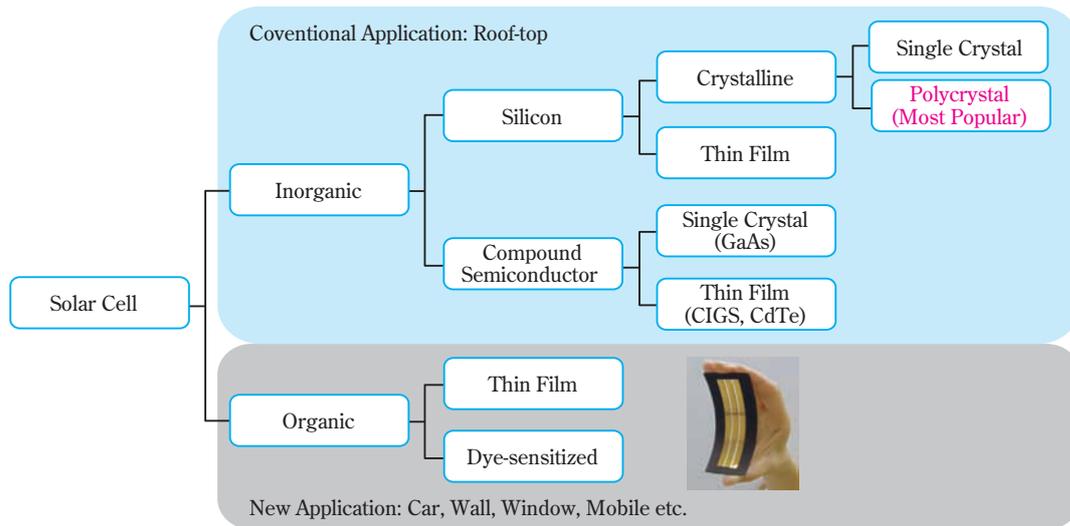


Fig. 2 The classification of materials for solar cells

一方、有機系太陽電池では色素増感型と有機薄膜型が開発されている。色素増感型は多孔質の酸化チタンに色素を吸着させ、色素が吸収した光エネルギーを電気エネルギーに変換する素子であり、10%を超える効率が報告されている³⁾。しかしながら、ヨウ素溶液を使用することから液漏れなどの問題があり、なかなか実用化に至っていない。有機薄膜型は、用いられるp型材料の種類から、低分子系と高分子系に大別される。両者ともp型材料とn型材料が使用され、混合や積層されることで光を電気に変換している。これまでの傾向として、低分子系よりも高分子系の材料開発が活発に行われており、高分子系での効率改良が先行している。また、高分子系ではn型材料であるフルーレン誘導体 (PCBM) を溶液で混合し、塗布印刷で太陽電池が製造できる特徴を有している。高温プロセスも不要で、プラスチック基板を用いたフレキシブル化も容易であり、Roll to Rollプロセスによる低コスト化も可能なことから、次世代太陽電池に一番近いものとし

て注目されている。軽量、フレキシブルといった従来の太陽電池にはない特徴を生かした、モバイル機器、車載等への用途展開も検討されている。

3. 太陽電池の普及シナリオと市場

太陽光発電を大量普及させるための鍵となるのが、その発電コストの低減である。(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) にてPV2030+という普及シナリオが策定されている (Fig. 3)⁴⁾。このシナリオは、太陽光発電による発電コストを、家庭用電力料金、業務用電力料金、汎用電力料金なみに低下させることで、大量普及を実現するという内容である。このコスト低減を実現するための次世代型太陽電池として、有機系太陽電池が期待されている。

このような状況の中で、太陽光発電の潜在ニーズは高く、Fig. 4に示すように2020年には、市場規模として80GW、10兆円を越える飛躍的な成長が予測されている⁵⁾。

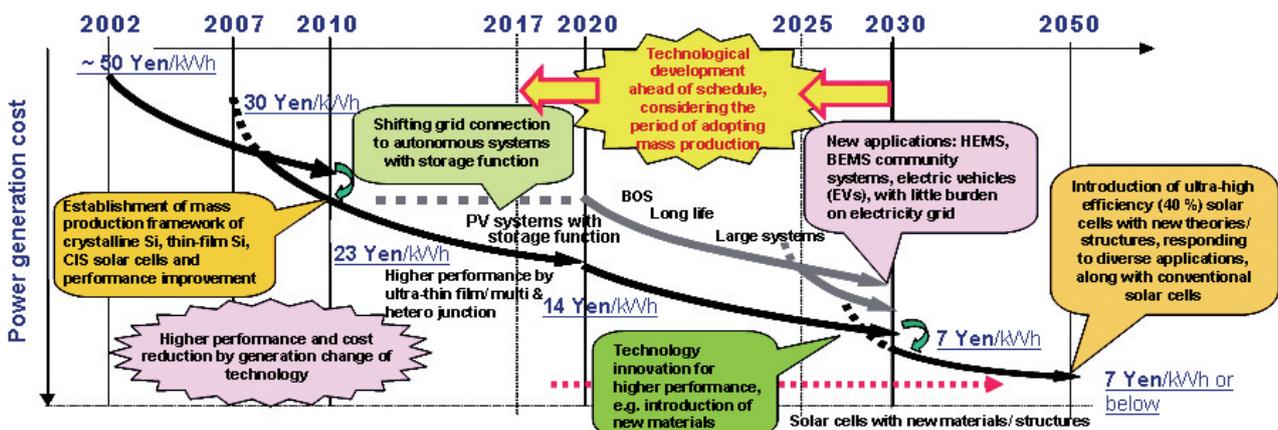


Fig. 3 PV2030+ scenario for future growth of PV power generation⁴⁾

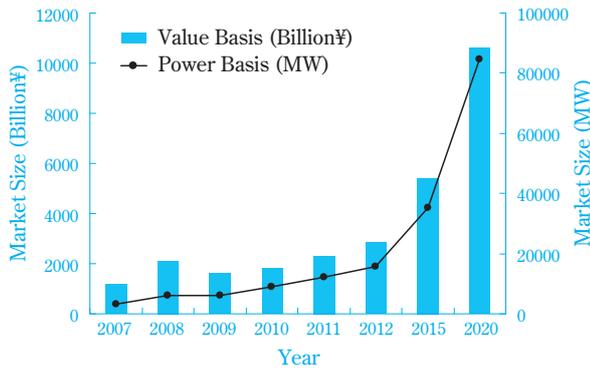


Fig. 4 Market size of solar cells [Data from reference 5)]

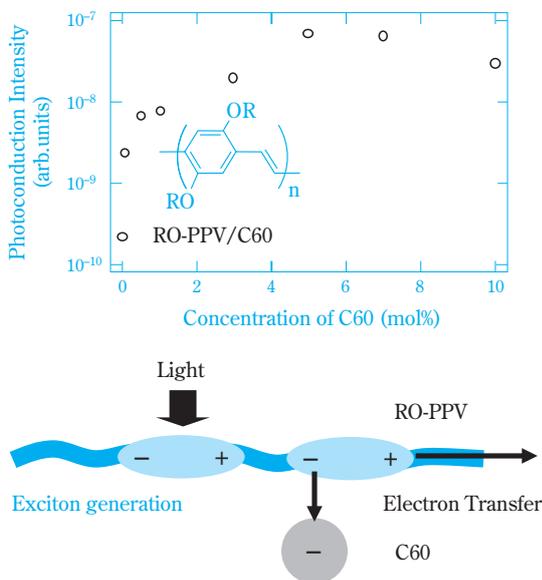


Fig. 5 Photoconduction in the blend of PPV and C60 and schematic illustration of the mechanism of generation of photocurrent

有機薄膜太陽電池の開発動向

1. 歴史

Mg ポルフィリン等の有機材料に光を照射すると電流が生ずることは Calvin らによって 1958 年に見出されている。これを太陽電池に応用する試みが営々となされていたが、効率の高いものは見出されていなかった。1986 年、Kodak の Tang は有機 EL の開発に先んじて、有機層を積層した太陽電池で 1% 程度の当時としては高い効率を報告し、有機 EL とともに世界的に有機材料を用いた太陽電池への関心を高めた⁶⁾。

一方、1992 年、大阪大学の吉野らは導電性高分子として知られているポリチオフェンやポリフェニレンビニレン (当社と共同) とフラレーン (C60) を混合すると非常に効率よく、光電流が得られることを見出した⁷⁾。Fig. 5 に示すように、この現象は共役系高分子が光照射により励起されたあと、電子が C60 に移動し、正孔 (プラス電荷) は高分子鎖を伝って、電子は C60 を伝って効率よく光電荷分離すると説明されている。この発見を契機に共役系高分子を用いた太陽電池の開発が始まった⁸⁾。1995 年、溶媒に可溶なフラレーン誘導体の開発とあいまって、効率は大きく向上し、3% 程度に到達した⁹⁾。

2. 有機薄膜太陽電池とは

共役系高分子は π 電子系を有しており、一般的には p 型の材料である。そのバンドギャップ (光吸収領域) は可視域にある。Fig. 6 に示すように、高分子の近くに C60 のような n 型材料が存在すると、上述のように光照射により励起された後、n 型材料に電子が移

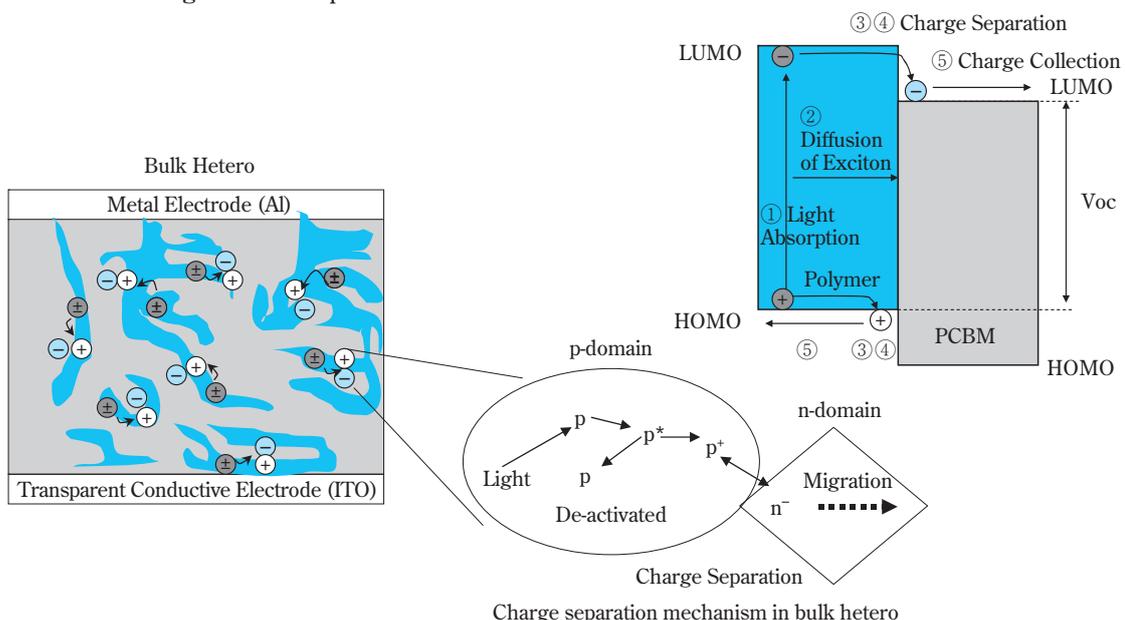


Fig. 6 Device structure and working mechanism of bulk hetero type OPV

動する。通常では移動した電子と残った正孔は再結合して、電気として取り出すことはできないが、膜内に電界が形成されている場合や電子や正孔の移動が早い場合には、電子と正孔は分離して外部に電流として取り出すことができる。さらに、有機材料の励起子は固体膜中では10nm程度しか移動できないといわれており¹⁰⁾、n型材料に接している箇所に到達することができない場合には蛍光あるいは無輻射過程を経て、基底状態に戻り、光電流には変換されない。無機材料と有機材料の大きな違いは励起子の移動距離である。シリコンなどは大きな移動距離（ μm オーダー）を有しており、p/n接合の界面に励起子が移動することで効率よく光電荷分離が起こる。有機材料ではp型材料とn型材料を積層した場合に、界面に到達できる励起子は少なく、低効率にとどまっていた。高分子にn型材料を混合したOPVはバルクヘテロ型と呼ばれているが、これはFig. 6に示すようにp型の高分子のドメインとn型のフラーレンのドメインがマイクロ相分離構造を取っている。すなわちp/n接合界面が数多く形成されていることになり、励起子が効率よくp/n接合界面に到達することができ、光電荷分離を効率よく起こすことができる。

このバルクヘテロ型の光電変換層は、通常、高分子とn型材料を溶解させた溶液をスピコート等の方法で塗布して形成される。

太陽電池の出力特性をFig. 7に示した。暗時にはダイオードの整流作用を示す。これに光を照射すると暗電流に光電流が上乘せされる。最大の発電量は光照射時の電流と電圧の特性曲線に内接する四角形の面積が最大のときである。電圧0のときの電流を短絡電流（ J_{sc} ）、電流0のときの電圧を開放電圧（ V_{oc} ）、内接する四角形を与える電流と電圧の積と J_{sc} と V_{oc} の積の比を曲線因子（ ff ）で表すと、発電効率は、

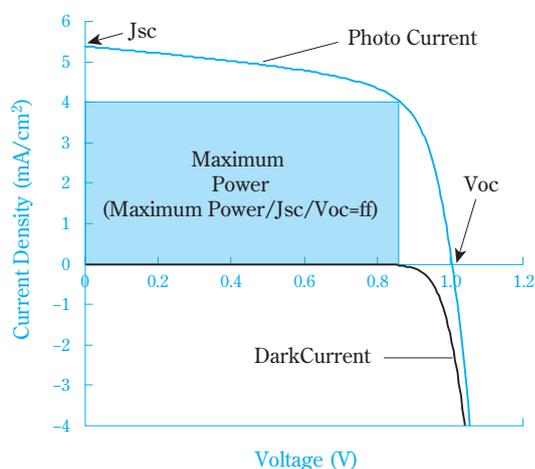


Fig. 7 The I-V curve in dark and under illumination and the parameters of solar cell

$$\eta (\text{発電効率}) = J_{sc} (\text{短絡電流密度}) \times V_{oc} (\text{開放電圧}) \times ff (\text{曲線因子}) / \text{入射光エネルギー} \quad (\text{Eq.1})$$

で表される。一般的には照射する光として $100\text{mW}/\text{cm}^2$ の強度で太陽光スペクトルに類似した光源を用いて照射する。

なお、 J_{sc} は単純に光を電子に変換する効率を表し、 V_{oc} はp型材料とn型材料のエネルギー差に関連しているため、材料面から特性向上を考えた場合のパラメータとして有用である。

3. 有機薄膜太陽電池の現状と課題

Fig. 6に示したOPVの光電荷分離過程をより詳しく説明すると、以下のようになる。

- ① 光電変換層中の有機分子が光吸収し励起子が発生
- ② 励起子がp/n接合界面に拡散
- ③ p/n接合界面に到達した励起子がイオンペアに分かれる
- ④ フリーなキャリア（電子、正孔）に電荷分離
- ⑤ 電荷分離後のフリーなキャリアの電極への移動¹¹⁾

このようなOPVの発電機構を考えれば、さらなる高効率化には、Eq. 1を基に指針を得ることが出来る。 J_{sc} を向上させるには、

- i 光吸収量の増加
- ii 光電荷分離の効率向上
- iii 分離した電荷の再結合の防止

が考えられる。iのためには、吸収領域の拡大、ii、iiiのためには、相分離構造の最適化、電荷の高移動度化を図ることが重要である。

まず、iの現状と開発動向について説明する。Fig. 8に示すように、これまでよく検討されてきた代表的な高分子であるポリ3-ヘキシルチオフェン（P3HT）等の吸収波長末端は、650nm程度であるが、太陽光ス

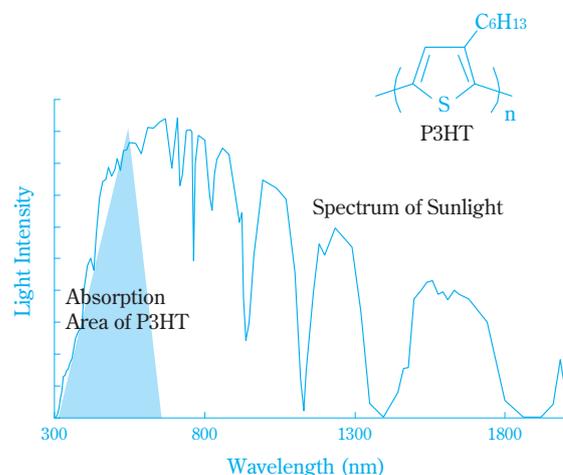


Fig. 8 Spectrum of sunlight and the absorption area of P3HT

ペクトルは、2000nmを越える長波長域にまで広く存在しており、太陽光の大半は吸収されずに捨てられている。最近の動向としては、より多くの太陽光を吸収し、高い効率が期待できる長波長域の光を吸収する高分子材料の開発が活発に行われている。さらに ii については、光電荷分離と電荷分離後のフリーキャリアの移動しやすさとのバランスから最適な相分離構造が存在するため、高分子に応じた塗布溶媒種や添加剤等によるモルフォロジー制御が良く検討されている。また、iiiについては、高分子の正孔移動度を向上させるために、平面性や高分子を構成するユニット間の共役の程度を上げることが検討されている。

さらに、Fig. 6に示すようにVocはp型材料の最高占有軌道 (HOMO) のエネルギー準位とn型材料の最低空軌道 (LUMO) のエネルギー準位の差に依存している。従って、Vocを向上させるには、

iv HOMOの低い高分子の開発

v LUMOの高いフラーレン誘導体の開発

が有効である。ivについては、共役系高分子に電子受容性や電子供与性置換基を導入することでHOMOレベルを調整し、高いVocが実現されている。

ffは、太陽電池の内部抵抗やシャント抵抗に関係している。従って、ffを向上させるためには、

vi 内部抵抗を小さくするような移動度の高い材料の開発

vii 素子の等価回路としての並列抵抗を大きくするように、膜の欠陥を小さくすることや材料純度の向上が有効である。

共役系高分子の自由に分子設計ができるという特徴を生かし、これらの要因をうまく制御することで、最近、効率の飛躍的な向上が実現されてきている。

4. p型共役系高分子の開発例

世界で検討されている最先端の高性能長波長吸収p型共役系高分子の代表例をFig. 9に示す。歴史的には、ポリチオフェン誘導体、ポリフェニレンビニレン誘導体から始まった材料開発であるが、現在では、多様な材料が用いられている。

長波長吸収共役系高分子の分子設計としては、ドナーユニットとアクセプターユニットを交互に重合しているものが多い。これらはバンドギャップ (HOMO-LUMO差) を減少させ、吸収を長波長化することに有効である。さらに、有機トランジスタ材料で用いられるような、高い移動度が期待できるユニットも多く使われており、光電荷分離に有利なように、移動度向上が図られている。これらの共役系高分子の中では900nm付近までの長波長化が報告されている。しかし、チオフェン環をメチレン基で渡環した構造を有する高分子のP1では単に成膜したのみでは2%程度の効率に留まるが、オクタンジチオールやジヨードオクタンなどを数%添加することで、5.5%に到達している¹²⁾。これは相分離構造を適度に成長させることができたためと説明されている。これらの高分子を用いたタンデムセルで、効率6.5%と世界最高レベルの効率が報告されている¹³⁾。この成果がきっかけとなり、P2、P3に示すような渡環型ピチオフェンユニットを有する類似の高分子が次々と提案され、それぞれ5.1%、2.18%の効率が報告されている^{14), 15)}。

これらの材料の中で、P4、P5の移動度、相分離、HOMOの制御を効果的に行うことで、7.4%が報告されるようになった^{16), 17)}。

溶媒可溶化ユニットとして良く用いられるフルオレン系高分子としては、P6のようなチオフェン-ベン

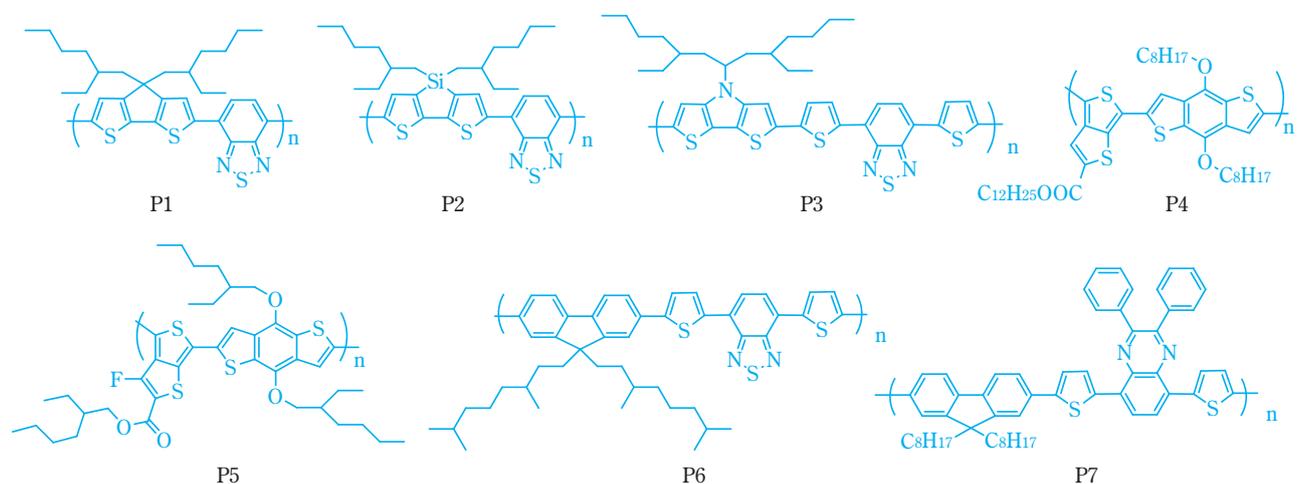


Fig. 9 Examples of highly efficient p-type polymers

ゾチアジアゾール-チオフェンユニット (RBT) を持つもので、吸収末端650nm付近まで長波長化し、効率4.5%が報告されている¹⁸⁾。RBT類似骨格を持つ高分子P7にて、吸収末端640nm付近、効率5.5%が報告されている。この効率は、クロロホルムとクロロベンゼンの混合溶媒比率を変え、相分離構造を最適化することで、達成されている¹⁹⁾。

当社の有機薄膜太陽電池開発状況

1. 当社の有機薄膜太陽電池開発経緯

Fig. 10に当社の共役系高分子材料開発の経緯を示す。OPVは、PLEDと同様に導電性高分子の研究開発に端を発している。1981年から開発を開始した導電性高分子であるが、それまでの共役系高分子が不溶不融であることから、賦形性を重視した開発を行っていた。開発したポリフェニレンビニレンはフィルム状に成型できることから、導電性という観点以外に半導体の性質も興味ある分野であった。フィルムに成型できることから、光電分野への応用も検討を開始した。その中から見出されたのが、有機EL、有機トランジスタ、光電変換素子であった。このような経緯からも、PLEDとOPV材料はほぼ同様の技術基盤を有していると言える。PLED材料は可視光に強い蛍光を示す材料であるが、高分子OPV材料では可視光から近赤外領域に吸収を持つ材料である。そのため、用いるモノマーの構造については異なった分子設計が必要であるが、重合法や素子の製造については共通なところが多い。PLED材料開発で培った機能と分子設計の相関についての知見、有機薄膜を均一に成膜する技術、高純度に高分子材料を合成す

る技術など多くの技術を蓄積してきており、これらも当社の高性能OPV開発の原動力となっている。

当社は、これらの技術を元に、種々改良をすることで、世界で最初に6% (当社測定値, Fig. 11) を超えることに成功した。また、(独)産業技術総合研究所 (AIST) との共同で精密に効率を測定し、ほぼこの効率を確認している。

現在は、実用化の目安となる10%以上の効率を実現するために、材料系を抜本的に見直すとともに、効率に関する J_{sc} 、 V_{oc} 、 ff と材料構造、純度、マイクロ相分離構造との関連を精査している。これらの知見や、機構解析結果を元にした高効率化検討を行っている。さらに、実用化に向けた課題を早期に把握するために、PLEDのデバイス開発に関する知見も活用しながら、製造プロセスについても検討を行っている。

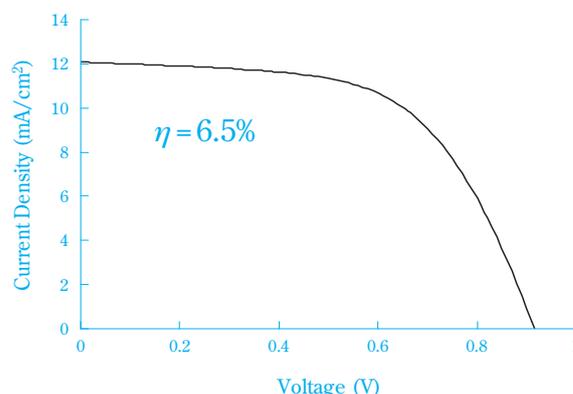


Fig. 11 The result of efficiency of OPV measured at Sumitomo Chemical

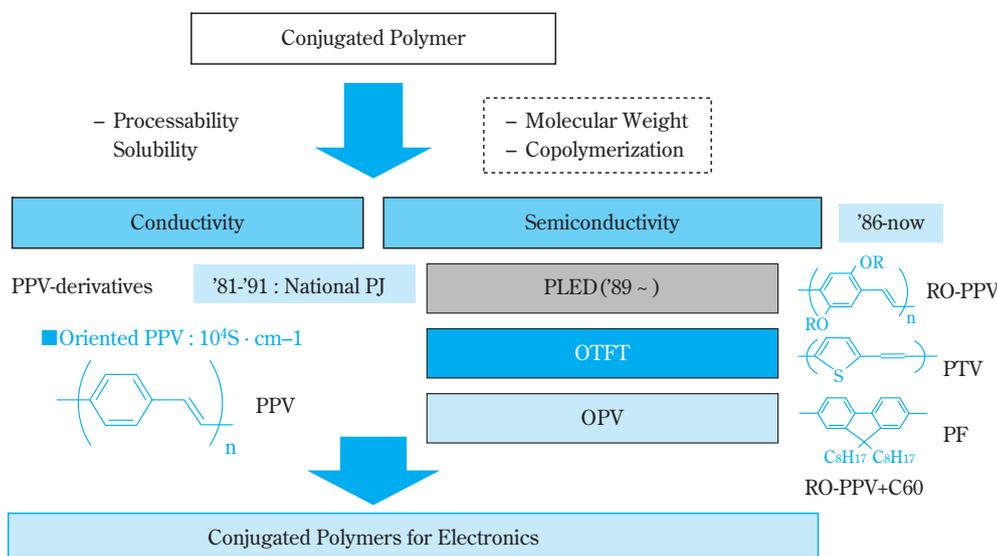


Fig. 10 History of development of conjugated polymer at Sumitomo Chemical

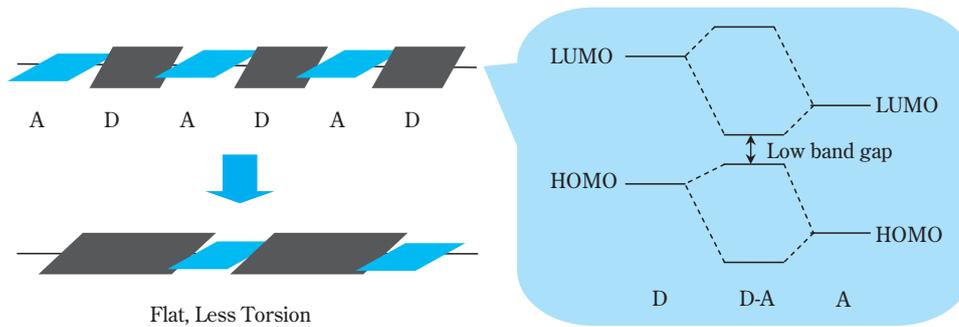


Fig. 12 The schematic illustration of molecular design of low band gap polymers

2. 材料開発状況

Fig. 12に示すように長波長吸収材料の基本的な分子設計として、ドナーユニットとアクセプターユニットとの組み合わせによるバンドギャップの減少、さらに分子鎖のねじれを抑制した平面性の高い設計を行っている。より平面性の高い分子は、分子間の相互作用も強くなり、移動度的にも高くなることが期待できる。

これらの検討により開発中の新材料は、吸収末端は900nm以上に到達しており、より広範囲の太陽光を吸収することが可能となり、期待効率としては20%を超える。今後は、以下で述べるモルフォロジー制御による J_{sc} の向上、骨格修飾を使ったHOMO-LUMO制御による V_{oc} の向上、高移動度化による η の向上検討などにより、10%を超える効率を早期に達成したいと考えている。

3. モルフォロジー制御開発状況

高効率化には光吸収量の増加のみならず、光電荷分離や電荷輸送を効率よく起こすことが重要である。励起子の自由平均移動距離は10nm程度であるので、p/n界面を同程度の大きさで形成する必要がある。このようなマイクロ相分離構造を形成する制御方法を確立するために、透過電子顕微鏡 (TEM) によるモルフォロジー観察を行なった。

相分離構造を定量化する方法として、TEM像を画像処理し、界面長さを数値化する方法を検討した。その結果を、**Fig. 13**に示す。このように界面長さと効率に明確な相関関係が認められ、界面長さには最適点があることがわかった。これは界面長さが小さい場合には界面の形成が不十分で電荷分離効率が悪く、界面長さが大きい場合には界面の形成は十分であるが、連続相の形成不良によりフリーキャリア移動が悪化するためと考えられる。**Fig. 14**に界面長さの最適点付近で観察したTEMトモグラフィ写真を示す。予想どおり、マイクロ相分離した海島の構造が見られ、膜厚方向にそれぞれのドメインの連続相が形

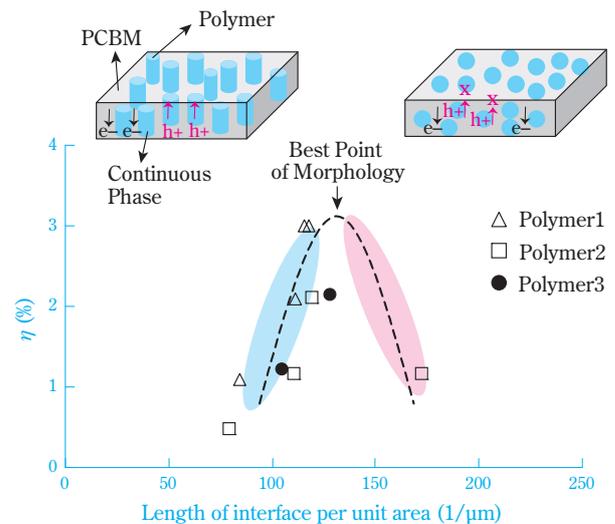


Fig. 13 Relation between morphology and efficiency

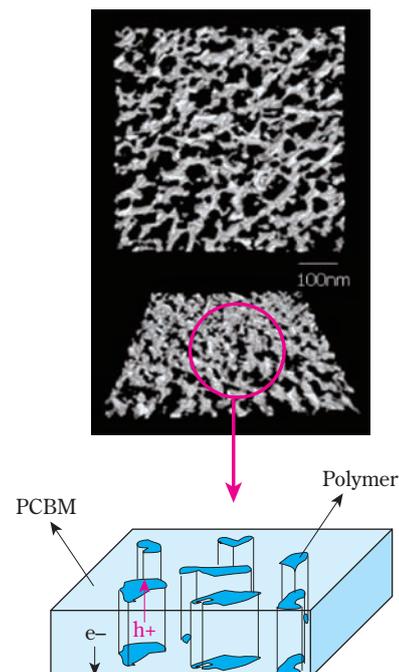


Fig. 14 TEM Tomography of OPV active layer

成され、理想的なモルフォロジーが形成されていることを確認した。このように界面長さはモルフォロジーの指標として適していると考えられる。

ついで、界面長さを用いて、モルフォロジーの制御方法の確立を検討した。マイクロ相分離構造はp型材料である高分子とn型材料（PCBM）と溶媒との溶解性に関係があると思われるので、各種溶解度パラメーター（SP値）を持つ溶媒と界面長さとの関係について検討した。SP値がPCBMに近い溶媒を用いるほど相分離構造は小さくなり、界面長さは長くなることがわかった。これは、p型高分子の溶媒からの析出が主な要因であると推測している。このように各種SP値を持つ溶媒によるモルフォロジー制御の方法を確立することができた。

以上のような長波長化とモルフォロジー制御の検討の結果、 J_{sc} は $16\text{mA}/\text{cm}^2$ 、効率は約7%と、単素子としては世界最高レベルの値を達成した。

4. 信頼性確保

OPVの実用化には変換効率以外に信頼性確保も重要である。その一歩として、屋外曝露およびソーラーシミュレータを用いた室内連続光照射による寿命測定を、代表的なp型高分子とPCBMを用いた系で開始した（Fig. 15）。横軸として積算照射光量としている。効率の低下速度は屋内と若干異なる結果であり、屋外曝露一ヶ月後でも明確な効率低下は認められなかった。一方、室内連続照射試験では、特に J_{sc} の低下による効率低下が認められた。光照射による材料の化学変化を調べるため赤外吸収スペクトルを測定したが、検出できるような変化は見られなかった。従って、劣化の原因としては、相分離構造のずれや電極界面の変化が予想される。検討は始めたばかりであるが、流れる電流値はほぼPLEDと同オーダーであり、励起状態を經由する点でも劣化機構は類似のものが多くと推測されるので、PLEDの知

見を活用すれば、信頼性も早期に改良できるものと考えている。

信頼性確保におけるもう一つの重要な課題としては、寿命予測の手法が確立されていないことが挙げられる。OPVとは用いる材料や発電原理が異なるシリコン系太陽電池の手法がそのまま適用できないと考えられることから、OPV特有の劣化モードを特定し、寿命予測法を新たに確立することが重要である。材料、素子構造など各種の条件下でのデータを蓄積して劣化機構の解明、屋外曝露と室内加速試験における寿命比較による寿命予測法の確立、およびそれらを元に長寿命化を図っていく予定である。

今後の展開

シリコン系の太陽電池が広く普及しているが、太陽電池で生産される電力エネルギーは世界の消費エネルギーの0.1%以下とわずかである。環境問題への関心の高まりを受けて、更なる太陽電池の普及が期待されているが、現行の発電システムの代替にはブレークスルーが必要である。OPVは、太陽電池分野で大きなブレークスルーを与える可能性があると考えられる。効率向上、信頼性確保に加えて、Roll to Rollプロセス開発が鍵を握っている。これらを達成して早期に市場に投入できるように計画している。

引用文献

- 1) 日刊工業新聞, 2009. 2. 20, 1面.
- 2) 太陽光発電協会 (JPEA) ホームページ, <http://www.jpea.gr.jp/11basic01.html>
- 3) M.K. Nazeeruddin, F.D. Angelis, S. Fantacci, A. Selloni, G. Viscardi, P. Liska, S. Ito, B. Takeru and M. Graetzel, *J. Am. Chem. Soc.*, **127** (48), 16835 (2005).
- 4) “太陽光発電ロードマップ (PV2030+)”, (独)新エネ

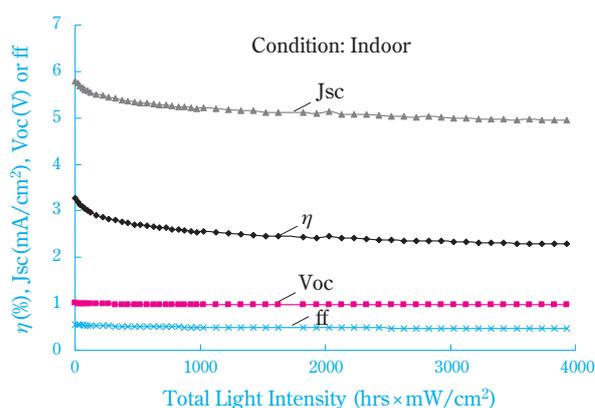
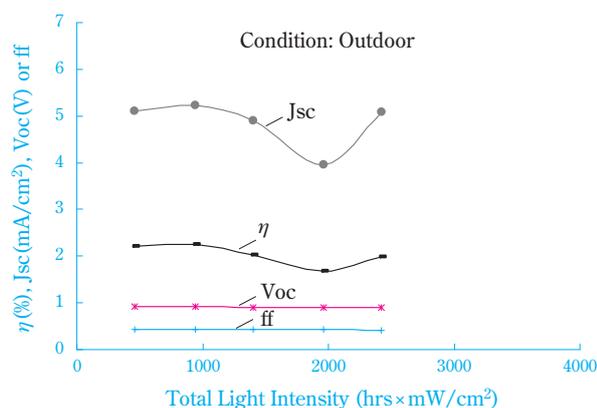


Fig. 15 Comparison of stability under between indoor and outdoor condition

- ルギー・産業技術総合開発機構 新エネルギー技術開発部 (2009), p.14.
- 5) “2009年版 太陽電池関連技術・市場の現状と将来展望”, 富士経済 (2009), p.11.
 - 6) C.W.Tang, *Appl. Phys. Lett.*, **48**, 183 (1986).
 - 7) K. Yoshino, S. Morita, T. Kawai, H. Araki, X. H. Yin and A. A. Zakhidov, *Synthetic Metals*, **56**, 2991 (1993).
 - 8) N. S. Sariciftci, L. Smilowitz, A. J. Heeger and F. Wudl, *Science*, **258**, 1474 (1992).
 - 9) G. Yu, J. Gao, J. C. Hummelen, F. Wudl and A. J. Heeger, *Science*, **270**, 1789 (1995).
 - 10) 上原 赫, 吉川 暹, “有機薄膜太陽電池の最新技術”, CMC出版 (2005), p.75.
 - 11) 上原 赫, 吉川 暹, “有機薄膜太陽電池の最新技術”, CMC出版 (2005), p.88.
 - 12) J. Peet, J. Y. Kim, N. E. Coates, W. L. Ma, D. Moses, A. J. Heeger and G. C. Bazan, *Nat. Mater.*, **6**, 497 (2007).
 - 13) J. Y. Kim, K. Lee, N. E. Coates, D. Moses, T. Nguyen, M. Dante and A. J. Heeger, *Science*, **317**, 222 (2007).
 - 14) J. Hou, H. Chen, S. Zhang, G. Li and Y. Yang, *J. Am. Chem. Soc.*, **130**, 16144 (2008).
 - 15) E. Zhou, M. Nakamura, T. Nishizawa, Y. Zhang, Q. Wei, K. Tajima, C. Yang and K. Hashimoto, *Macromolecules*, **41**, 8302 (2008).
 - 16) L. Yongye, F. Danqin, S. Hae-Jung, Y. Luping, W. Yue, T. Szu-Ting, L. Gang, *J. Am. Chem. Soc.*, **131**, 56 (2009).
 - 17) Y. Liang, Z. Xu, J. Xia, S. Tsai, Y. Wu, G. Li, C. Ray, L. Yu, *Adv. Mater. -Early View*, DOI: 10.1002/adma.200903528 (Published Online: 4 Jan 2010), (cited 9 Apr 2010).
 - 18) M. Chen, J. Hou, Z. Hong, G. Yang, S. Sista, L. Chen and Y. Yang, *Adv. Mater.*, **21**, 4238 (2009).
 - 19) D. Kitazawa, N. Watanabe, S. Yamamoto and J. Tsukamoto, *Appl. Phys. Lett.*, **95**, 053701 (2009).

PROFILE



三宅 邦仁
Kunihito MIYAKE

住友化学株式会社
大西フェロー研究室
主席研究員



大家 健一郎
Kenichiro OYA

住友化学株式会社
大西フェロー研究室
研究員



上谷 保則
Yasunori UETANI

住友化学株式会社
大西フェロー研究室
上席研究員



吉村 研
Ken YOSHIMURA

住友化学株式会社
筑波研究所
主任研究員



清家 崇広
Takahiro SEIKE

住友化学株式会社
大西フェロー研究室
主任研究員 工学博士



大西 敏博
Toshihiro OHNISHI

住友化学株式会社
フェロー
工学博士



加藤 岳仁
Takehito KATO

住友化学株式会社
大西フェロー研究室
研究員 工学博士