

有機系太陽電池の現状と プラスチック色素増感太陽電池の応用展開

Development of plastic-film type dye-sensitized solar cells

池上 和志¹・宮坂 力¹

桐蔭横浜大学大学院工学研究科

(2013 年 3 月 15 日 受理)

1. はじめに

次世代太陽電池の開発の現状には、暗雲が立ち込めているといえるかもしれない。2011 年の太陽電池の世界発電設置量は、27.4GW^[1]に到達したと報告されているが、その大部分は、単結晶シリコン太陽電池、あるいは、多結晶シリコン太陽電池であり、シリコンの使用量を削減できるアモルファスシリコン太陽電池を含む薄膜シリコン太陽電池のシェアは伸びていない。これは、単結晶シリコンならびに多結晶シリコン太陽電池の生産量が中国ならびに台湾を中心に大きく伸びており、生産コストが大幅に下がっていることも影響している。むしろ中国での太陽電池の過剰生産によるシリコン系太陽電池の価格暴落についての懸念が指摘されている。一方で、太陽電池の低コスト化を目的として、薄膜シリコン太陽電池のみならず、シリコンを使わない太陽電池の開発も進められている。化合物半導体である CdTe を使った太陽電池は、化合物の毒性に懸念が指摘されているものの、低コストであるため生産量が伸びており、アメリカのベンチャー企業 First Solar は、2009 年の生産量が 9 位にランクされた^[2]。一方で、

2011 年 8 月には、CIGS 型太陽電池を製造していた Solydra 社の経営破たんが報道され^[3]、化合物半導体を材料とした太陽電池の製造はなかなか軌道にのることができない状況である。有機系太陽電池に目を向けてみると、製品化で先行していたアメリカのベンチャー企業の Konarka 社は、2010 年には、生産量が 1MW に達すると発表をしていたが、2012 年に経営破たんが発表された^[4]。Konarka 社の有機薄膜太陽電池は、その変換効率^[5]は 8% 以上と報告されていた。しかし、量産レベルの製品はエネルギー変換効率が 4% 程度で、寿命も約 5 年といわれていたことから、実際には年間 1MW といった量産レベルの技術は確立していなかったとみられる。有機系太陽電池のうち、ベンチャー企業 G24i 社^[6]が製造する色素増感太陽電池は、Logitech 社（日本では、Logicool ブランド）のキーボードの補助電源としても採用され、おそらく色素増感太陽電池のはじめての商用利用として注目された^[6]。

化合物半導体太陽電池や有機系太陽電池の製造を目指すベンチャー企業のうち、既存のシリコン太陽電池と同様に屋外設置型の大規模発電を目指した企業は、従来型のシリコン

¹ Masashi Ikegami and Tsutomu Miyasaka : Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama, 1614 Kurogane-cho, Aoba-ku, Yokohama, Japan 225-8503

太陽電池の低コスト化のあおりをうけて軒並み苦しい状況が続いている。一方で、色素増感太陽電池を開発する G24i 社などは、屋内の光を利用した補助電源を目指した開発により、新たな市場を開拓する可能性を模索している状況である。日本国内においては、内閣府が主導する最先端研究開発支援プログラム（平成 22 年度～）、経済産業省が主導する次世代太陽光発電システム次世代高性能技術の開発（平成 22 年度～）、さらに有機系太陽電池実用化先導研究開発が平成 24 年度より実証試験のプロジェクトを開始しており、我々の研究室もこれらのプロジェクトにおいて、色素増感太陽電池のプラスチック化技術^[7]や、Science 誌に掲載された新原理に基づく有機無機ハイブリッド太陽電池の研究^[8]で中心的な役割を果たしている。本稿では、これらの研究の成果であるプラスチック色素増感太陽電池モジュールの開発状況について解説する。

2. プラスチック基板による半透明の太陽電池 ～太陽電池の新形態～

色素増感太陽電池（Dye-sensitized solar cells ; DSSC）は、シリコンを用いない次世代太陽電池として注目されており、実用化を目指した研究開発が進められている。DSSC の電極基板にプラスチックフィルム等のフレキシブル基板を用いることができれば、常温・常圧下でのロール・ツー・ロール方式で低コストに製造できる期待もある。DSSC の想定されるアプリケーションは、屋根に設置するような大型の太陽電池パネルとしての利用だけでなく、微弱な室内光を利用するエネルギーハーベスティング分野での利用なども最近注目されている。一方、弱い室内光のもとでは発電量も小さいため、DSSC 製造プロセスの低コスト化は、より一層重要になってくると考えられる。

「プラスチック基板による半透明の太陽電池」という、これまでにない太陽電池の形態

は、現在の技術では、事実上、色素増感太陽電池のみでしか実現できない。しかしながら、プラスチック基板を用いて太陽電池を製造するためには、すべてのプロセスをプラスチック基板の耐熱温度以下で行わなくてはならないという点で、様々な課題がある。筆者らの研究室では DSSC の基板としてプラスチックフィルムを適用する目的で、酸化チタン多孔膜ならびに対極触媒の低温成膜法の開発に取り組み、その研究開発で先行してきた^[7, 9-12]。本学で研究された成果が、プラスチック基板を用いた DSSC の製造方法としては、事実上唯一の方法であり^[13]、これらの技術に基づいて、現在、実用化を目指した研究開発を進めている^[14-16]。開発中の電極基板は一定の光透過性を維持することができるので、そのメリットを生かすための両面受光型 DSSC のモジュール構造についても研究を進め、試作と性能評価を行ってきた。現在は、これまでの研究成果である両面受光型プラスチック DSSC を、高速の印刷方式による製造へ展開するための材料開発およびプロセス開発を進めている。

3. 色素増感太陽電池の発電原理と低温成膜法

色素増感太陽電池（DSSC）の発電原理は、酸化チタン上に単分子吸着した色素による色素増感（分光増感）にもとづいている。酸化チタンは、紫外線しか吸収することができないが、酸化チタン上に吸着した増感色素が光を吸収することで、増感色素の吸収波長範囲の光を光電変換に利用することができるようになる。原理的には、増感色素の色を選択することで装飾性の高いカラフルな光発電パネルを作製することもできる。DSSC の電極基板には、一般的には導電性ガラス基板が用いられる。それに対し、我々はプラスチックフィルム基板を用いた軽量・薄型の DSSC の開発を進めてきた。プラスチックフィルム基板を用いた DSSC を作製するためには、酸化チタ

表1 開発中のプラスチック色素増感太陽電池の特長

薄型・軽量	A4サイズで約50g以下、素子の厚みは0.5mm以下
シースルー	光透過性の光電極・対向電極。電解液も低着色
デザイン性	印刷技術による製法で、電極デザイン（形・サイズの変更）が容易
低照度で高電圧	低照度環境での高電圧出力を実現。照度変化による電圧変動が少ない
可視光領域で高感度	可視光（波長400nm～800nm）に対して高感度。蛍光灯、白色LEDの波長に対しても高感度
低環境負荷を実現した製造工程	低温成膜技術により、高温・高真空を利用しなくとも製造可能

ン電極と対極触媒層の低温成膜法が、特徴的な技術となる。これらの開発を進めることで、表1に示すようなユニークな特長を持つ色素増感太陽電池を作製することが可能となった。

DSSCの発電原理は、人工光合成モデルとして説明されることも多い。光合成においては、光合成色素の光吸収により水の電気分解

に必要な電圧を発生して、水を分解することで酸素を生成する。このとき、発生する電子を外部に取り出すことができれば、太陽電池を作製することができる。この点で、太陽電池は人工の葉ということもできる。プラスチックフィルムで作製した色素増感太陽電池は、この「人工の葉」のイメージにもっとも近いといえると思われるが、実際、人工光合成についてまとめられた書籍の表紙には、我々の研究室にて作製したプラスチックDSSCの写真が採用されている（図1）^[17]。また、このプラスチック色素増感太陽電池は、2005年の日本国際博覧会（愛知万博）においては、壁面緑化壁であるバイオラングに屋外設置し、一般公開も行った。

4. 携帯型モジュールの例

太陽電池の基板としてプラスチックフィルムを用いると、軽量であることから携帯性が高まるので、持ち運びができる範囲で様々な光環境下で利用されることが想定される。我々は、太陽光下から屋内の照明下まで様々な明るさの環境のもとで生活をしており、屋外と屋内ではその明るさは100倍以上も異なる（図2）。太陽電池の出力電流・電圧は、光の強度に大きく依存するので、使用環境を想定したモジュール設計が必要となる。一方、モジュール設計の自由度の高さは、印刷方式で製造可能なDSSCの特長の一つといえる。図3には、神奈川県ロゴをあしらった



図1 人工光合成と有機系太陽電池（日本化学会編、化学同人）の表紙に採用された当研究室の色素増感太陽電池

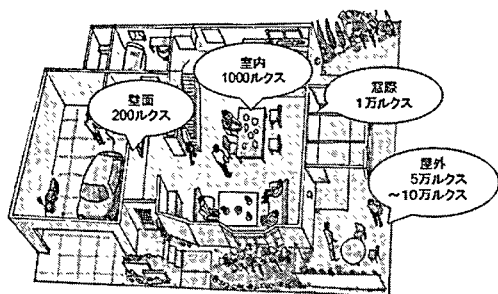


図2 生活環境と明るさ



図3 黒岩神奈川県知事と筆者（池上）。黒岩知事がもつ色素増感太陽電池は神奈川県のごをあしらい作製した

太陽電池の試作例を示した。神奈川県黒岩知事が持つ太陽電池は、我々の研究室の技術で作製されたものである。このように太陽電池にデザイン性を付与することは、既存の太陽電池ではきわめて難しかった。プラスチック

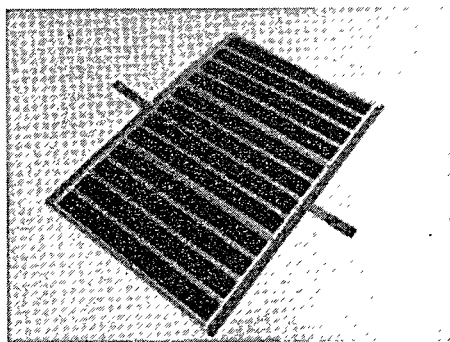
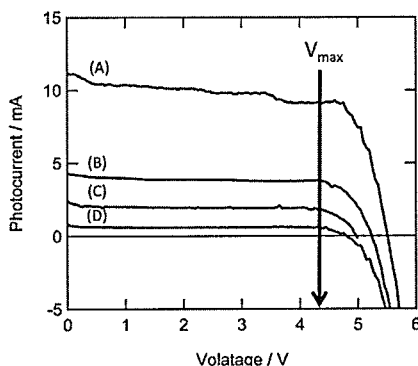


図4 プラスチック色素増感太陽電池のI-V特性の照度依存性の例。(A) 蛍光灯下 10 klux; (B) 室内窓際における 2500 lux; (C) 蛍光灯下の 1500 lux; (D) 蛍光灯下の 400 lux;

ク DSSC の期待されるアプリケーションの一つはモバイルデバイスの充電器である。これはユーザーが実際にファッションとして持ち運ぶことが想定されるので、太陽電池として DSSC が採用されれば、デザイン性の要求にもこたえることができる。

図4には、携帯用デバイスの充電等を目的としたプラスチックモジュールのI-V特性の照度依存性を示した。このI-V特性は、写真の4直列3並列サブモジュールを直列に二つ接続したものである。測定は、蛍光灯直下、外光のはいる窓際、屋内において行った。図4に示すとおり、このモジュールの最大出力をあたえる電圧値 (V_{max}) は、照度によってほとんど変化しないことがわかる。DSSC の出力の電圧値は、特に低照度のもとでは、光電極から電解質への逆電子移動反応のために低下することがある。そこで、我々は、低照度のもとでの出力電圧値の低下を最小限にとどめるための電解質組成について検討を行い、屋外の強い太陽光下から屋内の弱い光の元まで出力電圧値の変動が少なくなるような設計を行った。現在、このようにして作製したモジュールにおいて、モバイル機器への充電等の検討を進めている。

これらの太陽電池を用いて、携帯型音楽プレーヤーのソーラー充電器を試作した(図5)。この充電器のデザイナーは、CASIO の G SHOCK のデザイナーである^[18]。このソー



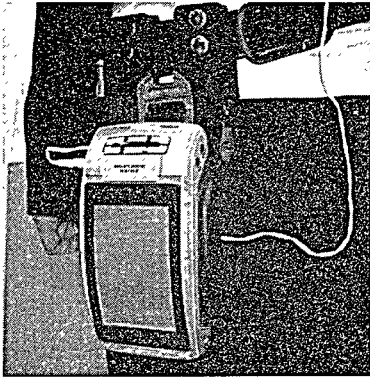


図5 携帯型音楽プレーヤー (iPod) の携帯型ソーラー充電器の試作例

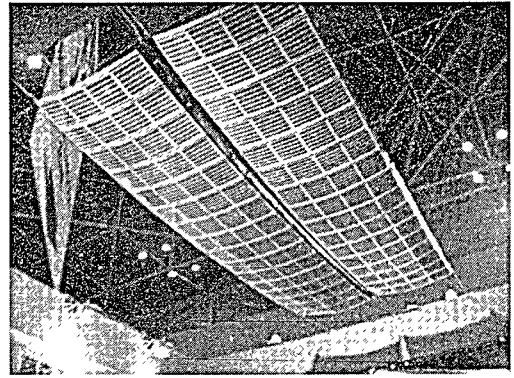


図6 PVEXPO 2008 展に設置した大面積プラスチック DSSC モジュール

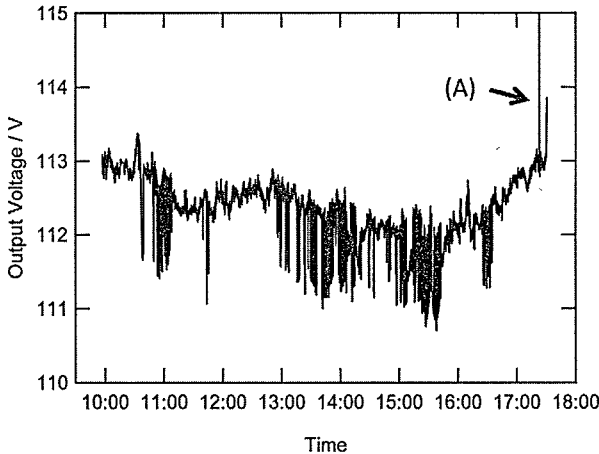
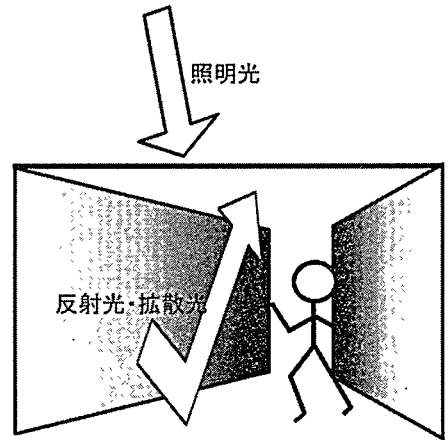


図7 PVEXPO2008 展に設置した DSSC モジュールの出力電圧の経時変化 (A) : 白い布をモジュールの下に広げたとき



ラー充電器のデザイン上のコンセプトは、「湾曲面に太陽電池」を搭載するということであるが、既存のシリコン太陽電池は基本的に曲面に対応させることは難しい。湾曲面に設置するとすれば、太陽電池を細かく切断して貼り付けることになるが、これは工程を考えても極めて難しくなる。その点、フレキシブルなプラスチック基板上に太陽電池を印刷で作ることは、さまざまな電子機器へ太陽電池を搭載する可能性を広げることになる。

5. 大面積モジュールの例

プラスチック色素増感太陽電池は、軽量であるため、様々な場所への設置がとても容易となる。たとえば、室内の窓や壁、天井等にも比較的簡単に設置することができると考えられる。図6は、展示会にてブースの天井部分にプラスチック色素増感太陽電池モジュールを設置した例である。写真のモジュールは、0.8 x 2.1 m の大きさで、重さは 0.8 kg/m^2 で

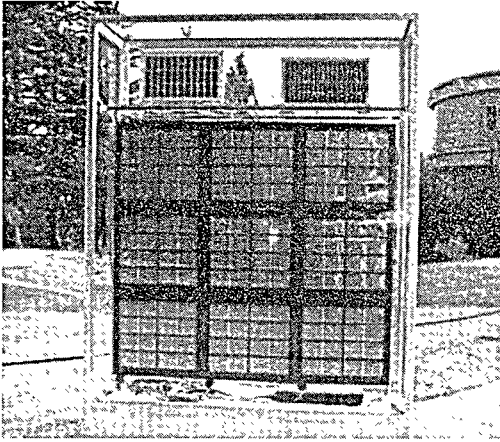


図8 約1m×1mサイズのプラスチック色素増感太陽電池（試作品）本学に庭にて撮影

あり、展示ブースの枠に紐で吊るすことによって設置することができた。展示会中、このモジュールの出力を調べた結果、会場の照明光だけでなく床からの反射光といった拡散光も、効果的に発電に寄与していることがわかった。なお、この太陽電池は、プラスチック基板を用いた両面受光型の太陽電池としては現在でも世界最大の展示サイズである。

図7は、展示ブース天井に設置した直列接続のシースルーモジュールの出力電圧の変化を示したものである。展示会開始の午前10時における出力電圧は113Vであったが、13時から16時にかけては出力電圧の低下がみられた。この出力の低下は、展示ブースのモジュールの下にいる来場者の数に関係しているようであった。つまり、多くの人々がブースに来場すると、床からの反射光の強度が減少し、出力電圧が低下すると考えられた。この反射光の影響を確認する実験も行った。図7の17時30分ころの電圧(A)は、白い布をモジュールの下に広げた状態であり、その時の出力電圧値は、117Vを超えた。この結果は、明らかに床からの反射光が出力に影響を与えることを示していた。このように反射光や拡散光に対する感度の高いDSSCは、屋内の窓や壁面などで有効に利用できることが期待される。そのような観点で、我々は、約

1m×1mのプラスチックDSSCモジュールを新たに試作し、屋内の窓際等に設置して、その出力特性の計測をはじめている(図8)。

6. 教育への貢献

プラスチック基板を用いて色素増感太陽電池を製作できることは、環境教育や理科教育の分野でも注目をされている^[19]。そもそも、太陽電池をゼロから作るということは、普通はできないことである。しかし、我々の研究室の技術を活用することで、特別な道具を使うことなく、太陽電池を作製し、発電の原理を学ぶことができる。この極めて簡便な太陽電池の作製技術については、本学園を出願人として特許を出願し、最近権利化された^[20]。この特許に基づいた色素増感太陽電池組み立てキットは、本学ベンチャーのベクセル・テクノロジー社より一般向けに販売を行っており^[21]、本学園特許の実用化の一例となっている。本キットを用いた実験教室は、夏休みを中心に各地で開催されており、横浜市立サイエンスフロンティア高校での講義の様子はNHK等でも紹介された^[22]。植物の花の色素などの天然素材を用いて光発電の原理を学ぶことは、光と色といった物理現象から、電子移動反応や光合成の原理をまなび、さらにエネルギー問題についても考えるような幅広い教材としての利用方法を提案することができる。高校、大学以上の教材としては、色素増感太陽電池が電気化学セルであることから、生体における電気化学現象、たとえば、心電図の原理や、体のインピーダンス計測の原理を学ぶモデルとしても活用することができる。

7. まとめ

本稿で述べてきたように、プラスチックフィルムを用いた色素増感太陽電池は、軽量・薄型であり、任意のサイズとデザインで作製することができる。このような太陽電池を低い生産コストで大規模に製造することができ

れば、既存の乾電池等の置き換えや補助電源としての利用も含め、そのアプリケーションは広がると考えられる。その点で、色素増感太陽電池、特に、軽量なプラスチック色素増感太陽電池は、様々な場所での使用を想定した用途開拓を進めていく必要がある。設置型の利用、あるいは携帯型の利用も含め、実証試験も積極的に進めていく必要がある。この研究開発の主要な目的は、IT ベースの社会で消費される電池の代替または補助電源として、環境光を活用したコンシューマ・エレクトロニクスのための軽量・低コストのユビキタス電源を実現することである。その目的に向かい、低環境負荷・リサイクルという概念も含めて、次世代太陽電池の開発を進めていく計画である。

謝辞

本研究開発は、ペクセル・テクノロジー株式会社ならびに関係各社の協力により進められた。ここに、感謝の意を表します。本研究の一部は、内閣府最先端研究開発支援プログラム(平成 22 年度～平成 25 年度)、NEDO 次世代太陽光発電システム次世代高性能技術の開発(平成 22 年度～平成 25 年度)、科学研究費補助金若手 B (21750196)(平成 21 年度～23 年度)の助成によって進められた。また、本研究の一部は財団法人能村膜構造技術振興財団の研究助成を受け実施した。

【参考文献】

1. Marketbuzz 2012 Report
2. First Solar 社ホームページ <http://www.firstsolar.com/>
3. Solyndra 社ホームページ <http://www.solyndra.com/>
4. Konarka 社ホームページ <http://www.konarka.com/>
5. G24i 社ホームページ <http://www.g24i.com/>
6. Logicool Solar Keyboard Folio, <http://www.logicool.co.jp/ja-jp/product/solar-keyboard-folio>
7. T. Miyasaka, Y. Kijitori, and M. Ikegami, *Electrochemistry*, 75, 2-12 (2007) .
8. M. M. Lee, J. Teuscher, T. Miyasaka, T. N. Murakami, and H. J. Snaith, *Science*, 338, 643-647 (2012) .
9. Y. Kijitori, M. Ikegami, and T. Miyasaka, *Chem. Lett.*, 36, 190-191 (2007) .
10. T. Miyasaka, M. Ikegami, and Y. Kijitori, *Electrochem. Soc.*, 154, A455-A461 (2007) .
11. M. Ikegami, J. Suzuki, K. Teshima, M. Kawaraya, and T. Miyasaka, *Solar Ener. Mater. Solar Cells*, 93, 836-839 (2009) .
12. T. Muto, M. Ikegami, and T. Miyasaka, *J. Electrochem. Soc.*, 157, B1195-B1200 (2010) .
13. 特許 4721643 号 発明者 宮坂 力、出願人 学校法人桐蔭学園
14. 内閣府最先端研究開発支援プログラム 平成 22 年度～平成 25 年度
15. NEDO 次世代太陽光発電システム次世代高性能技術の開発 平成 22 年度～平成 25 年度
16. NEDO 有機系太陽電池実用化先導技術研究開発事業 平成 24 年度～平成 26 年度
17. 人工光合成と有機系太陽電池 (CSJ Current Review)、日本化学会編 (2010 年)
18. X style 株式会社 <http://www.x-style.co.jp/index.html>
19. 第 8 回グリーン・サステイナブルケミストリー賞、文部科学大臣賞、宮坂 力、池上和志、手島健次郎、印刷技術による色素増感太陽電池の開発と教育・啓発活動 (2009)
20. 特許 5172166 発明者 宮坂 力、池上和志 出願人 学校法人桐蔭学園、ペクセル・テクノロジー株式会社
21. 色素増感太陽電池実験キット <http://www.peccell.com/products/PEC-TOM02/>
22. NHK 首都圏ネットワーク 2009 年 5 月 22 日 放送 他