

エネルギーハーベスティング技術への応用が期待される 色素増感太陽電池

環境・エネルギー研究所 田 辺 信 夫¹

Dye-sensitized Solar Cell for Energy Harvesting Applications

N. Tanabe

色素増感太陽電池（DSC）は光が斜めに入射しても発電効率が低下しにくい、入射光の強度が低下しても発電効率は低下せず、むしろ増加するというユニークな特徴をもっています。当社はこの特徴に注目し、近年大きな発展が始まっているエネルギーハーベスティング分野への応用を目指して開発を行っています。屋外では、例えば太陽光が直達しない北壁に設置すると、同じ定格出力の多結晶Si太陽電池の約 1.4 倍の発電量を見込めることが分かりました。また屋内光向けに開発したDSCは、アモルファスSi太陽電池の約 2 倍もの優れた発電性能を示しました。本稿ではこれらの技術を紹介いたします。

A Dye-sensitized Solar Cell (DSC) has unique properties that the cell performance does not decrease so much as Si solar cell under higher incident angle of light and does not decrease or rather increases under dark condition. Fujikura is developing new applications of DSC by taking advantages of these properties for a field of "Energy Harvesting" where rapid and large growth of market has started recently. Results of our outdoor operation test showed that DSC generates 1.4 times larger power than polycrystalline Si solar cell that has the same rated output, when the solar cells are placed on a north wall where the sun light does not arrive directly. The DSC specially developed for indoor light has 2 times larger generation performance than amorphous Si solar cells. In this paper we will introduce these technologies of DSC.

1. ま え が き

低炭素社会を担う発電技術として、太陽電池への期待は益々大きくなっています。Siウェハを用いたバルク結晶Si太陽電池、アモルファスSi、微結晶Siなどの薄膜Si太陽電池、CulnGaSe₂ (CIGS)、CdTeなどの化合物太陽電池といった既に実用化されている太陽電池に加えて、種々の新しい太陽電池も提案・開発されています。色素増感太陽電池（DSC）は、ローザンヌ連邦工科大学のGrätzelらによる 1991 年の報告¹⁾以来、より安価で環境に優しい次世代太陽電池の有力候補の一つとして期待され、活発に研究開発が進められています。この太陽電池は、スクリーン印刷などの印刷技術をベースとした、シンプルで膨大なエネルギー消費を必要としない製造プロセス、有毒な原料を用いない材料構成といった点で、より環境に優しいクリーンなエネルギーソースになり得ます。いわゆる太陽光発電用途に向けた開発努力は勿論ですが、従来の太陽電池とは異なる素子構造や発電メカニズムに由来するユニークな特性も見出されており、今後大きな市場成長が期待されているエネルギーハーベス

ティング分野など、これまで太陽電池の活躍の場ではなかった新たなフィールドへの適用も提案されています。

2. 色素増感太陽電池とは

DSCの一般的な構造を図 1 に示します。光が照射されると、TiO₂ ナノ粒子表面に吸着した増感色素がこれを吸収して励起状態となります。そして、励起された電子はTiO₂ の伝導帯に注入されて外部回路へと運ばれます。酸化状態となった色素は、電解液中のレドックスキャリアにより還元されますが、ここには多くの場合、ヨウ化物とヨウ素とを混合して形成されるレドックス対（典型的にはI⁻/I₃⁻) が用いられます。さらに、励起色素に電子を渡して酸化状態となったレドックスキャリアは、対極表面で電子を受け取って還元状態に戻り、こうして電荷のサイクルが成立することでセルが機能します。

DSCの変換効率（公的機関による認証値）は、2011 年に数年ぶりに更新された 11.4 %²⁾ がチャンピオンデータです（約 5 mm角のミニセルによるデータ）。増感色素の高性能化や新たな電解質の開発など、さらなる高効率化に向けた基礎研究³⁾が進む一方で、長期信頼性の検証⁴⁾や大面積モジュールの製造技術開発なども活発化しつつ

1 研究所長、理事（工学博士）

略語・専門用語リスト		説明
略語・専門用語	正式表記	
変換効率	Energy conversion efficiency	入射した光エネルギーを電気エネルギーに変換した際の変換割合. 変換効率 (%) = (太陽電池の発電エネルギー ÷ 入射した光エネルギー) × 100
センサノード	Sensor node	センサ, 通信ユニット, 電源ユニットなどから構成されるデバイス・端末.
METPV	Meteorological Test Data for Photovoltaic System	太陽光発電用標準気象データの1つ. 日本気象協会がNEDOの委託研究により開発した全国150地点の気象データベース.
定格出力	Rated output	JIS規格で性能表示に使用する, 表面温度25℃, 1 sun (基準状態) 下で測定した発電出力.
N 719, N 749	同左	DSCの増感色素として用いられる代表的なルテニウム錯体. N 719は濃赤色, N 749は濃緑色(黒に近い色合い)であるため, それぞれRed dye, Black dyeとも呼ばれる.
リーク電流	Leak current	光吸収した増感色素からTiO ₂ に注入された電子が, 外部回路に達する前に電解質層などに漏れ出してしまう(再結合)現象. DSCの発電効率低下の一因となる.

あり, DSCの開発はいよいよ実用化に向けたステージに入ろうとしています. 2012年からは, NEDOの新たなプロジェクト「有機系太陽電池実用化先導技術開発」が開始され, DSC, 有機薄膜太陽電池を対象とした国主導による初のフィールド試験プロジェクトとして注目されています.

当社はこのプロジェクトに参加するとともに, これまでに明らかになったDSCの特徴を活かして, まずはDSCならではの適用フィールドからの実用化を念頭に開発を進めています. 特に, 新たなエネルギー利用分野として注目されているエネルギーハーベスティングの領域にて,

屋内外におけるセンサノードや独立電源などへの応用に注目して, 本稿では, 屋外, 屋内それぞれの使用環境に合わせて開発中のDSCモジュールについて紹介します.

3. 技術紹介

3.1 屋外向け色素増感太陽電池

屋外でのDSC運用における課題の一つとして, 太陽光下という過酷な使用環境における長期耐久性の確保が挙げられます. 耐久性を左右するファクターは複数ありますが, ヨウ素を含む電解液構成材料の揮発・飛散を抑えるとともに, 水分の浸入を防ぐことが極めて重要です. 我々は, この課題をクリアすべく独自の封止技術を開発し, DSCサブモジュールに適用しました. IEC-61646 準拠の複数の耐久試験を実施し, DSCが 85℃・85%RH x 1000 h 湿熱試験のような厳しい耐久試験にも耐えられることを世界で初めて実証しました⁵⁾.

また, DSCには光照射条件の影響を比較的受けにくいという特徴があります. 図2, 3は, それぞれ入射光強度および光入射角度と変換効率との関係を示します. DSCは, 光強度が弱くなると変換効率がむしろ向上するのに加え, 入射角度が大きくなっても変換効率が安定しています. この特性は, 朝夕や壁面設置時の様に太陽光に正対できない場合や, 曇・雨天の様に光強度が弱い条件下での発電に強い可能性を示唆しています. 実際, 屋外で実施したDSCモジュールの動作試験(図4)においてこれを裏付けるデータを獲得できました. この屋外発電データをもとに, 日射量データベース(METPV)を用いて年間発

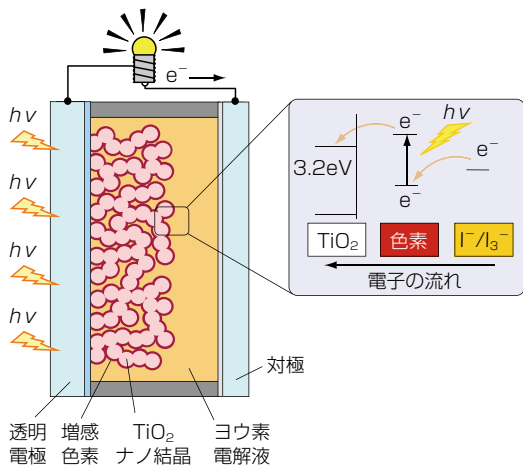


図1 典型的なDSCの構造

Fig. 1. Typical structure of a dye-sensitized solar cell.

電量を見積もったところ、同じ定格出力の多結晶Si太陽電池と比較すると南面 30°設置で約 20%，北壁面設置の場合には約 40%発電電力が多くなる試算結果となりました⁶⁾。良好な日射環境下における同面積での発電量はまだバルク結晶系Si太陽電池に及んでいませんが、上記のように極めて日射強度の弱い環境や、壁面など太陽に直向しない特殊な設置環境でも間違いなく動作できる点は、

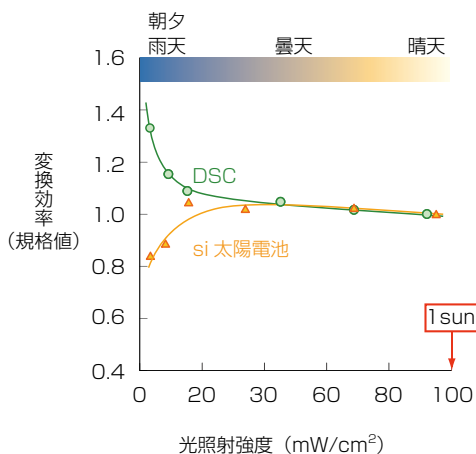


図 2 入射光強度と変換効率との関係

Fig. 2. Relationship between incident light intensity and energy conversion efficiency.

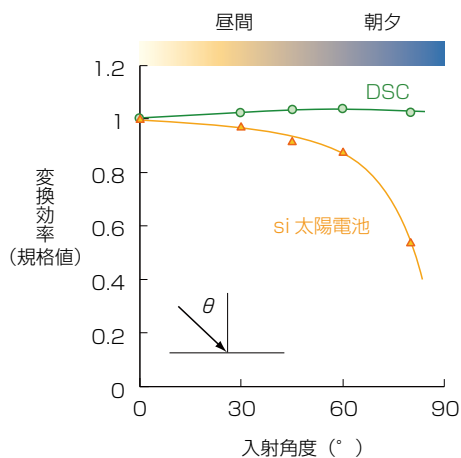


図 3 光入射角度と変換効率との関係

Fig. 3. Relationship between incident light angle and energy conversion efficiency.



図 4 DSC パネルを用いた屋外試験の様子

Fig. 4. Outdoor operation test of DSC module panels.

DSCならではのユニークな特徴であり、まずは日射条件の整わない環境への設置も求められるような独立電源などの用途において、DSCの強みを活かしていけると考えています。

3. 2 屋内向け色素増感太陽電池

太陽光の場合、そのエネルギーの約半分が赤外光域に分布します。つまり、太陽光により効率良く発電するためには、可視光域のみならず、赤外域の光まで有効に活用することが望まれます。結晶Si太陽電池やCIGS太陽電池の光吸収波長域が 1000 nm を超える領域まで達しているのに対して、DSCに用いられる代表的色素では、N719 (Red dye) の吸収末端が約 775 nm、より吸収波長域の広いN749 (Black dye) で約 900 nmです。そのため、更なる高効率化に向けて、長波長の光まで光電変換するための新規色素や、新たな素子構造の開発が精力的に行われています⁷⁾。

一方で、屋内照明に用いられる光源（蛍光灯やLEDなど）の多くは、可視光域にスペクトル分布が集中しているため、N 719 の様なDSC用色素の受光感度が大変良くマッチします。さらに、前述の通り低照度条件下でより高い効率で発電できることを考えますと、DSCは屋内発電用素子としても有効です。太陽光と比べますと、屋内光から得られるエネルギーは非常に小さいですが、後述するエネルギーハーベスティング用途など、室内の限られたエネルギーを効率良く利用するための最有力技術の1つとして期待できます。当社では、屋外用DSCと並行して、屋内光により高効率で発電できる低照度向けDSCの開発を行いました（図 5）。光源とのマッチングを図った



図 5 屋内用4直列DSCモジュール

Fig. 5. A DSC module of series connected 4 cells for indoor use.

色素選定や、リーク電流を大幅に抑制する電極構造や電解質組成など、独自の技術を盛り込むことにより、屋内の様々な照度条件下にて、比較に用いた各種太陽電池を上回る出力が得られ、例えば 500 luxの照度下で 18 %という高い変換効率を実現しました（屋内用として一般的なアモルファスSi太陽電池の同条件下での発電効率は 11 %～12 %）。オフィスなど通常の屋内環境に加えて、薄暗い倉庫のような従来の太陽電池では安定動作が難しかった環境でも優れた発電性能を発揮できます。

3. 3 エネルギーハーベスティング技術への応用

近年、無線通信用ICや各種センサの消費電力が大幅に下がったことにより、従来活用されてこなかった環境中のエネルギーを有効に集めて電力変換し、配線や電池交換無しで各種センサやリモコンスイッチを動作させようとするエネルギーハーベスティング（環境発電）技術が注目されています⁸⁾。エネルギー源として光、熱、振動、電磁波など種々提案されていますが、その中でも光は他と比べて比較的エネルギー密度が高く利用できる環境も多様です。DSCは、前述のように弱い光でも安定した動作が可能であること、設置角度の影響を受けにくいなどの特徴を有することから、図 6 に示すようにエネルギーハーベスティング分野において広く利用できると考えています。アプリケーションの一例として、種々のセンサの動作電源を挙げることができます。今後、より多くの情報をセンシングし、管理していくことが求められる中で、多数のセンサノードを電池交換や配線作業の手間から解放することは重要な技術課題の 1 つです。屋内であればスマートハウスや倉庫といった様々な場面での情報管理など、また屋外であれば、特に東日本大震災後に要望が高まってきた多地点でのデータ計測など（放射線モニタや気象データ観測、道路・橋梁、堤防・斜面の監視など）は、まさにエネルギーハーベスティング技術のフィールドと言えます。図 7, 8 に屋外、屋内それぞれの



図 6 エネルギーハーベスティングへの DSC 利用イメージ

Fig. 6. Applications of DSC for energy harvesting fields.

運用を想定して、各種センサの動作に要する消費電力と必要となる DSC サイズとの関係を一例として示します。ここから分かりますように、光照射強度の限られた条件下におきましても、屋内外それぞれの環境にて多様なセンサデバイスの運用が可能であり、今後さらに要望が高まってくると予想されます。快適、且つ、環境に優しい生活スタイルに、DSC が大きく貢献できるものと期待しています。

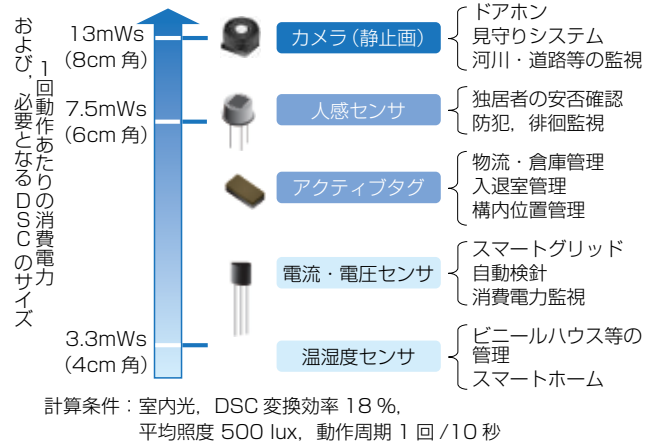


図 7 各種センサーデバイスの消費電力と、間欠動作に必要な DSC 発電面積の目安 (屋内向け DSC)

Fig. 7. Relations between power consumptions of various sensor devices and required area of indoor use type DSC for their device operations.

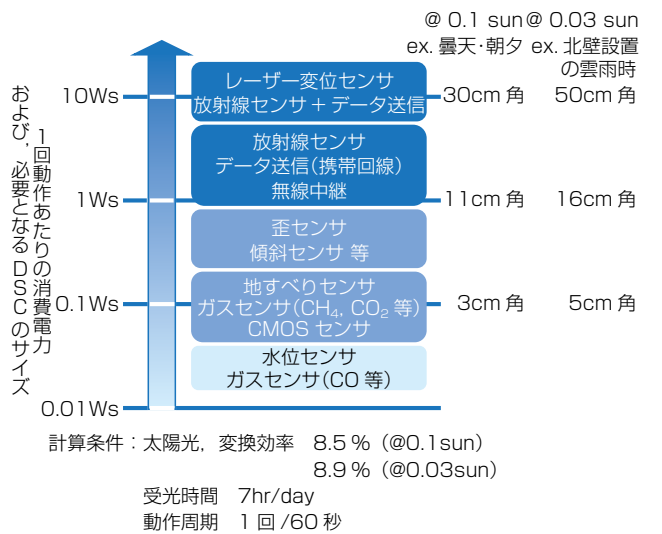


図 8 各種センサーデバイスの消費電力と、間欠動作に必要な DSC 発電面積の目安 (屋外向け DSC)

Fig. 8. Relations between power consumptions of various sensor devices and required area of outdoor use type DSC for their device operations.

4. む す び

以上述べてきたように、DSCは入射光強度や角度の制約があって、既存の太陽電池では十分に性能を引き出せない環境においても、高いパフォーマンスを発揮できます。このような特徴を有するDSCは、エネルギーハーベスティング分野における有望な電源として、様々な使い方ができると期待しています。当社では、快適さを犠牲にせず、同時に環境への配慮も強く求められるこれからのライフスタイルに貢献すべく、DSCの早期実用化を目指します。

本報で述べた内容の一部は、独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託により実施した研究開発の成果です。

参 考 文 献

- 1) B. O' Regan and M. Grätzel: "A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films," Nature, Vol.353, pp.737-740, 1991
- 2) a) 韓 礼元:「色素増感型太陽電池の展望：次世代太陽電池のブレークスルーを目指して」, PV EXPO 2012 専門技術セミナー PV-4, 2012年3月, b) M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta and E. D. Dunlop: "Solar cell efficiency tables (version 40)," Prog. Photovolt.: Res. Appl., Vol.20, pp.12-20, 2012
- 3) 例えば、a) M. Wang, N. Chamberland, L. Breau, J.-E Moser, R. Humphry-Baker, B. Marsan, S. M. Zakeeruddin and M. Grätzel: "A novel organic redox electrolyte rivals triiodide/iodide in dye-sensitized solar cells," Nature Chemistry, Vol.2, pp.385-389, 2010, b) A. Yella, H.-W. Lee, H. N. Tsao, C. Yi, A. K. Chandiran, M. K. Nazeeruddin, E. W.-G. Diao, C.-Y. Yeh, S. M. Zakeeruddin and M. Grätzel: "Porphyrin-Sensitized Solar Cells with Cobalt (II/III)-Based Redox Electrolyte Exceed 12 Percent Efficiency," Science, Vol.334, pp.629-634, 2011
- 4) 例えば、a) 豊田竜生, 樋口和夫:「実用化に向けた色素増感太陽電池の開発」, PV EXPO 2012 専門技術セミナー PV-4, 2012年3月, b) 臼井弘紀, 岡田顕一, 土井克浩, 松井浩志:「色素増感太陽電池モジュールの屋外暴露試験」, フジクラ技報, 第117号, pp.38-42, 2009
- 5) H. Matsui, K. Okada, T. Kitamura, N. Tanabe: "Thermal stability of dye-sensitized solar cells with current collecting grid," Sol. Energy Mater. Sol. Cells, Vol.93, pp.1110-1115, 2009
- 6) 岡田顕一, 松井浩志, 田辺信夫:「色素増感太陽電池の屋外発電特性」, フジクラ技報, 第120号, pp.42-48, 2011
- 7) 例えば、木下卓巳, Joanne Ting Dy, 藤沢潤一, 中崎城太郎, 内田 聡, 久保貴哉, 瀬川浩司:「電子スピンマネジメントによる広帯域・高効率色素増感太陽電池の設計」, 2011年電気化学秋季大会, 2N08, 2011年9月
- 8) 「エネルギー・ハーベスティングで「ローパワー」から「ノーパワー」へ“電池不要”の世界が動き出す」, 日経エレクトロニクス, 日経BP社, pp.67-75, 2010年9月6日号