

環境発電用色素増感太陽電池モジュール

環境・エネルギー研究所 岡田 顕一¹・下平 幸輝²・遠藤 克佳¹
山田 直³・田辺 信夫⁴

Dye-sensitized Solar Cells for Energy Harvesting Devices.

K. Okada, K. Shimohira, K. Endo, N. Yamada, and N. Tanabe

色素増感太陽電池はこれまでの太陽電池と比べて、低コストで環境に優しいといった特徴から次世代型太陽電池として期待されている。この太陽電池は拡散光下や低照度環境で高い発電効率が得られる性質を持っており、室内でも効率よく発電することが出来るため、周囲の環境エネルギーから得た電力で動作する環境発電デバイスの用途に適している。今回フジクラでは独自の材料技術により、低照度環境でさらに発電特性を向上したセルを作製し、5 cm 角サイズ、200 lx 照射下で 210 μ W、1000 lx 照射で 1100 μ W の出力を実現した。

Dye-sensitized solar cell (DSC) is expected to be the next-generation solar cells that are lower-cost, more environmentally friendly than the conventional solar cells. As DSC provide higher conversion efficiency in lower intensity and scattered illuminating conditions, they can make more electric power in indoor applications. Therefore, DSC is suitable for energy-harvesting devices which generate electric power from environmental energy. In this study, we developed higher performance cells for low illuminating conditions by modifying materials. A 5 cm \times 5 cm cell provides 210 micro-W under 200 lx and 1100 micro-W under 1000 lx conditions.

1. ま え が き

近年、電子回路や無線技術の低消費電力化により、これまで使用されてこなかった微少なエネルギー源から電力を得ることで、配線や電池交換無しで動作する環境発電（エネルギーハーベスティング）デバイス¹⁾が実現できるようになってきている。これらの技術は2010年代に応用範囲を大きく拡大すると期待されており、センサの出力を無線で送信するデバイスや、リモコンスイッチなどの用途で実用化が進められている。環境から電力を得る主な方法としては、現在表1に示すように振動、廃熱、低照度光、放送の電波などを利

表1 主な環境発電用電源の技術と出力特性²⁾

Table 1. Technologies of energy harvester devices and output.

エネルギー源	出力	主要技術
光	$\sim 100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$	a-Si 太陽電池 DSC
振動	$\sim 100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$	電磁誘導 ピエゾ素子 エレクトレット
熱	$\sim 10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$	ゼーベック素子
電磁波	$\sim 1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$	レクテナ

1 太陽光発電研究室

2 先進技術研究室

3 環境・エネルギー研究所

4 環境・エネルギー研究所所長（博士 工学）

用する方法が提案されており、それぞれ数 μ W～数 mW レベルの電力を得ることが出来ると言われている²⁾。このうち、低照度光を用いる環境発電電源には、これまで a-Si 太陽電池が使われてきた。これは蛍光灯などの屋内光源に多く含まれる青～緑の可視光で効率よく発電する点や、暗所でも発電効率が低下しにくいといった a-Si 太陽電池の特性が屋内での利用に向いているためである。DSC も前報告³⁾で示したように低照度光下で高い発電効率が得られる特徴を持っているが、さらに拡散光や斜めからの光に対して高い発電効率が得られる点や、青～緑色光に加えて赤色光も発電に有効利用できる点から、屋内環境でより高い発電効率が得られると期待される。今回、低照度での発電特性に注目して性能向上を図った環境発電用 DSC モジュールを開発したので報告する。

2. 環境発電用 DSC モジュールに必要な技術課題

2.1 発電電流の向上

環境発電用の電源は出来るだけ多くの場所で使えることが望ましい。図1に照度 (lx 値) と明るさの目安の関係を示す。通常のオフィスの照明の照度はおおよそ 200～1000 lx で、屋外の太陽光と比べると 1/100

略語・専門用語リスト

略語・専門用語	正式表記	説明
DSC	Dye-sensitized solar cell	色素増感太陽電池
a-Si	amorphous silicon (solar cell)	アモルファスシリコン (太陽電池)
AM-1.5	Air Mass 1.5	日本付近の大気の影響を加味した太陽光スペクトル
V _{pm}	Maximum Power Voltage	最大出力動作電圧, 太陽電池が最も効率よく動作する電圧

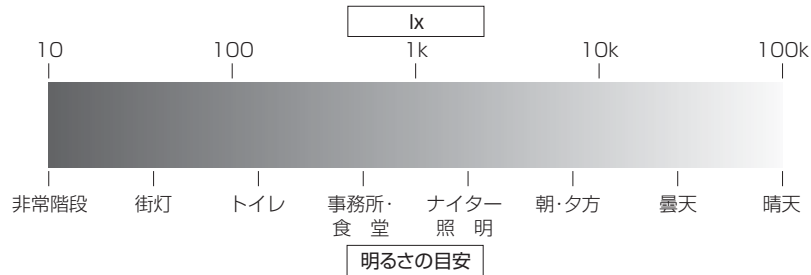


図1 照度の値と対応する明るさの目安

Fig. 1. Relationships between lx unit and luminous intensity.

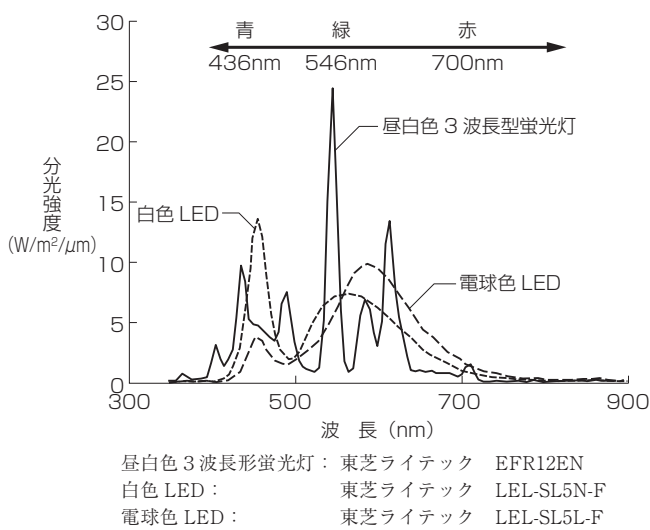


図2 各種 500 lx 光源の分光照射強度

Fig. 2. Spectral energy distributions of various light sources of 500 lx illumination intensity.

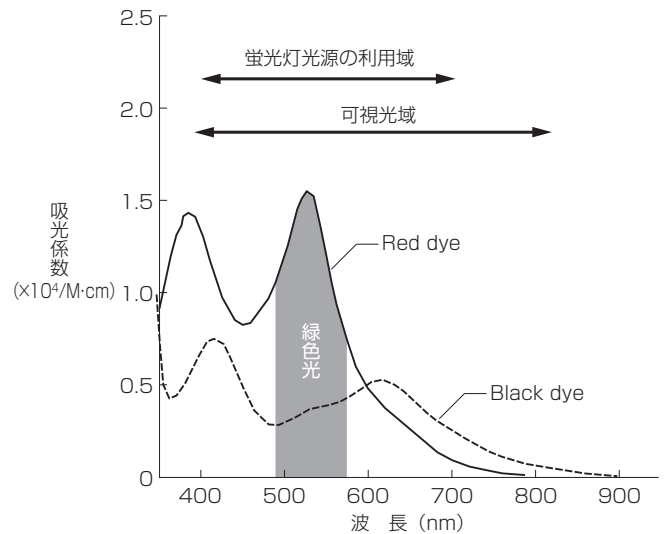


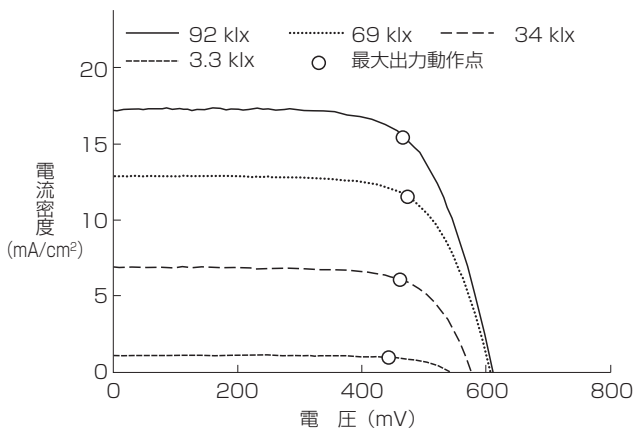
図3 増感色素の種類と吸光係数

Fig. 3. Absorption coefficient of a red and a black sensitizing dyes.

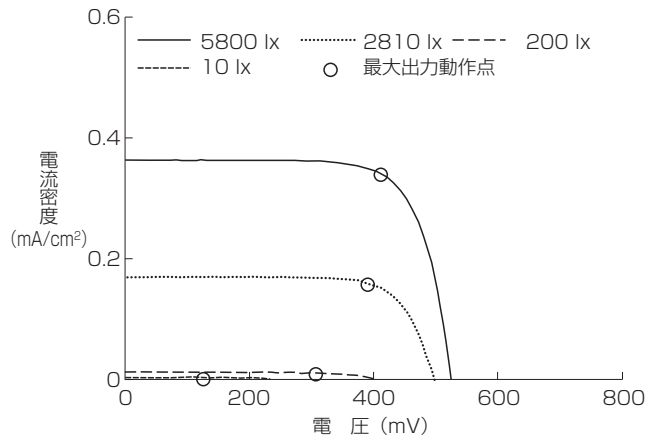
～1/500 と非常に小さいが、倉庫などの環境ではさらに暗く、10～100 lx 程度（屋外太陽光の1/1000～1/10000 程度）の照度となっている環境も多い。このような低い照度範囲でも効率よく発電出来れば、電源として用途が広がる。

暗い場所で大きな発電量を得るためには入射光を効率よく発電に利用する必要がある。図2に屋内照明として現在良く使われている蛍光灯と、LED 照明について分光照射強度を測定した結果を示す。赤外線を多く含む屋外太陽光や白熱電球と異なり、これらの光源は

可視光域だけに照射強度分布が集中しており、さらにもその中でも人の目に明るく感じる緑色光の成分を多く含んでいる。これまでの報告⁴⁾で屋外用 DSC には青と赤の光を良く吸収する RuL(NCS)₃·3TBA (L=4, 4', 4'' - tetra - carboxy - 2, 2', 2''-terpyridine, TBA= Tetrabutyl ammonium) に代表される Black dye⁵⁾ を用いてきたが、図3に示すように、RuL₂(NCS)₂·2TBA (L=2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylic acid) のような Red dye⁶⁾ のほうが緑色の光に対しては吸光度が高く、屋内照明下で使用したときに効率よく入射光を



(a) AM-1.5 疑似太陽光源下



(b) 蛍光灯光源下

図4 屋外用DSCの照度とIV特性の関係

Fig. 4. Relationships between illuminating intensity and IV characteristics.

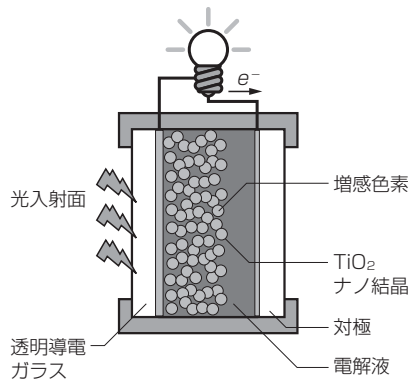


図5 DSCの断面構造⁸⁾

Fig. 5. Cross-section structure of DSC.

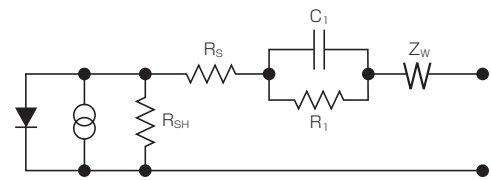


図6 DSCに提案されている等価回路の例⁹⁾

Fig. 6. An equivalent circuit suggested for DSC.

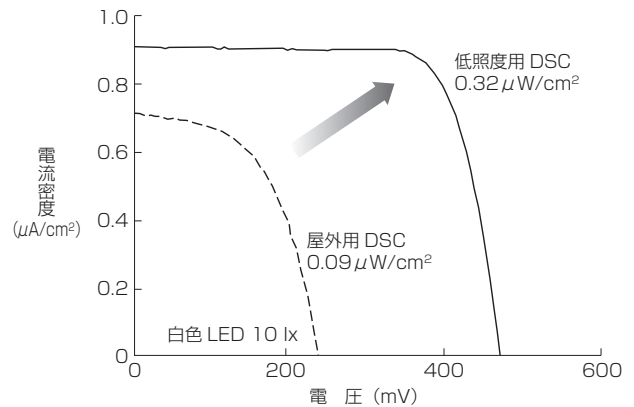


図7 超低照度での屋外用DSCと低照度用DSCのIV特性比較

Fig. 7. IV characteristics of DSCs for solar illumination and indoor illumination.

発電に利用することが出来る。

2. 2 発電電圧の向上

図4は屋外用DSC(増感色素 Black dye, エネルギー変換効率7.8%, 5 cm角)を用いて, 照度とIV特性の関係を評価した結果である。JIS規格で定められている太陽電池の標準測定方法⁷⁾では照度約100 klx(≡100mW/cm²)のAM-1.5疑似太陽光源下でIV特性を評価すると定められているが, これを3.3 klxまで徐々に減らしていくと, DSCの最大出力動作点電圧(=V_{pm})が徐々に低下していく。さらに光源を蛍光灯に変え, 360 lxまで照度を下げると, 当初500 mV程度だったV_{pm}は, 約300 mV程度まで低下してしまう。この電圧低下はDSCの内部で起こる逆電子移動が原因と考えられる。図5にDSCの断面構造⁸⁾, 図6にDSCに提案されている等価回路の例⁹⁾を示す。通常DSCが光を受けて動作している時, 電子は対極, 電解液, 増感色素, TiO₂ナノ結晶, 透明導電ガラス, 外部負荷といった経路で移動するが, この電子のうち一部はTiO₂ナノ結晶や透明導電ガラスの表面から電解液へ逆移動するため, 図6の等価回路ではこれを並列抵抗R_{SH}として示している。照度が低くなり発電電流量

が低下すると, 相対的にR_{SH}を介して失われる電流の割合が増え, その結果, 発電電圧低下などの効率低下を引き起こす。これに対して環境発電に用いる屋内低照度用DSCの場合, 低照度使用時の発電電圧は高くなければならない。

3. 屋内低照度用DSCの発電特性と用途例

フジクラ独自の方法で低照度での電圧を改善した5cm角サイズ屋内低照度用DSCと一般的な屋外用DSCの低照度下でのIV特性を図7に示す。このよう

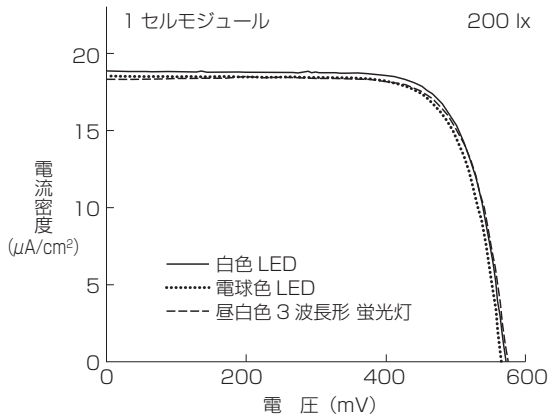


図8 各種屋内光源に対する IV 特性の変化

Fig. 8. IV characteristics change under various indoor light condition.

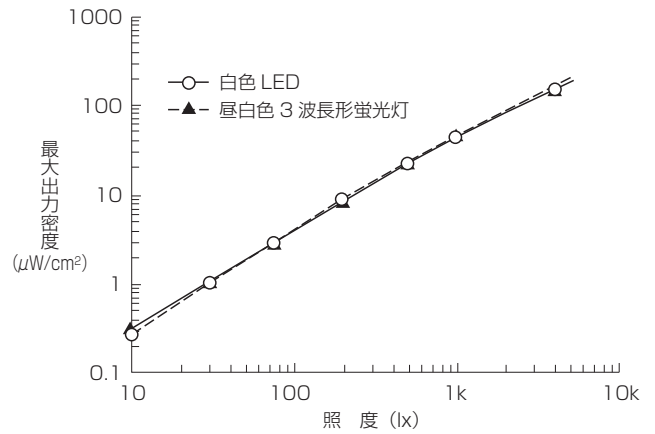


図9 低照度用 DSC の出力と照度の関係

Fig. 9. Relationships between illuminating intensity and power output of DSC for indoor illumination.

表2 白色 LED 照明下での環境発電用 DSC モジュールの出力特性

Table 2. Output performances of DSC energy harvester modules under a white LED illumination.

項目	1セルモジュール	4直列モジュール
受光面積	25 cm ²	56 cm ² (うち発電部 51 cm ²)
200 lx 照射時		
最大出力動作電圧	0.49 V	2.0 V
最大出力動作電流	0.43 mA	0.22 mA
最大出力	0.21 mW	0.45 mW
1000 lx 照射時		
最大出力動作電圧	0.54 V	2.0 V
最大出力動作電流	2.1 mA	1.2 mA
最大出力	1.1 mW	2.5 mW

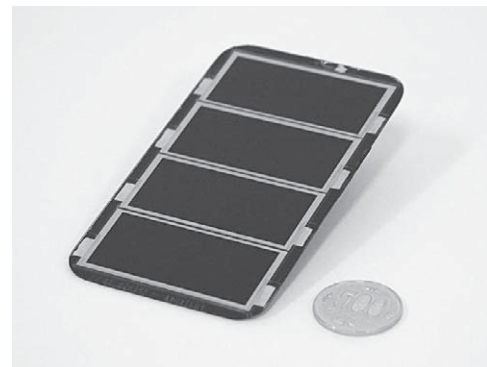


図10 環境発電用4直列 DSC モジュール

Fig. 10. View of a 4-series connected DSC energy harvester module.

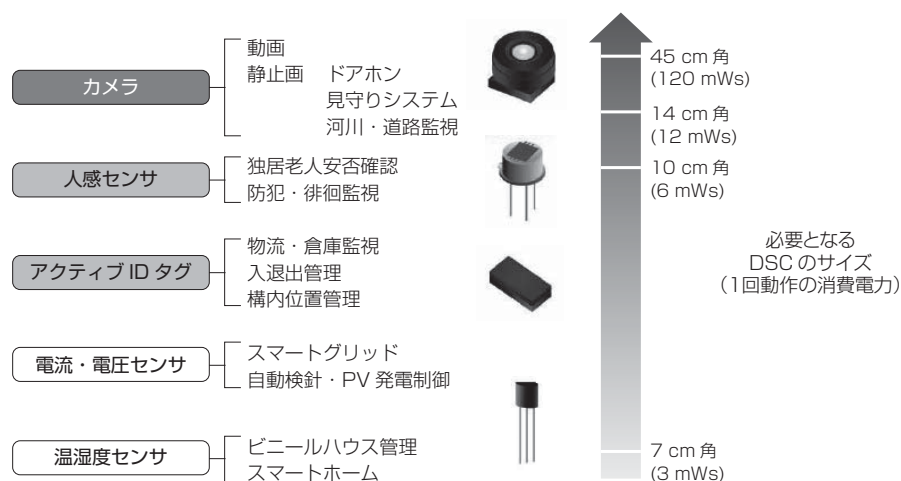
に 10 lx といった非常に暗い環境でも屋内低照度用 DSC は高い電圧を維持しており、屋外用 DSC と比べて大きな出力が得られる。図8はこの屋内低照度 DSC に各種光源を 200 lx となるように当てたときの IV 特性変化である。近年、電球にかわって良く使われている蛍光灯、LED 照明といった種類の照明では、同じ照度であれば発電特性に大きな違いは見られない。さらにこの中から白色 LED と昼白色蛍光灯の2種類について照度と出力の関係を評価すると図9のような関係になり、10 lx から 5000 lx の範囲で照度に応じた出力が得られている。図10にこの屋内低照度用 DSC を4直列構造とした環境発電用 DSC モジュール試作品を、表2にこの4直列モジュールおよび単セルの代表的な出力特性値を示す。DSC 単セルの動作電圧は 0.5 V 前後であり電子デバイスを駆動するにはやや低いが、4直列モジュールでは一般的な屋内照明で約 2 V の動作電圧と、0.2 ~ 1.2 mA 程度の動作電流が得られるため、動作電力の小さい IC であればそのまま利用できる。図11にこの4直列モジュールを使って試作したワイヤレス温度センサの例を示す。このセンサは DSC の



図11 4直列 DSC モジュールを用いたワイヤレス温度センサ

Fig. 11. Wireless temperature sensor made with the 4-series connected DSC module.

発電電力を用いて気温測定とそのデータの無線送信をするように試作したもので、空調のコントロールなどに使うことを想定している。温度センサ以外のワイヤレスセンサモジュールを作る場合、消費電力と接続しなければならぬ DSC のサイズは図12に示すようにセンサの種類によって変わるが、室内光 200 lx の照度



計算条件：室内光、DSC 変換効率：13%、平均照度：200 lux、動作周期：1 回 / 10 秒

図 12 各種センサデバイスの消費電力と間欠駆動に必要な DSC 面積の目安

Fig. 12. Examples of power consumptions of various sensor devices and required DSC area to drive these devices.

でも 10 cm 角程度のサイズの DSC を使えば様々な種類のセンサをワイヤレスモジュール化することが可能である。

4. む す び

今回開発した屋内低照度用 DSC は 5cm 角サイズ、200 lx 照射下で $210 \mu\text{W}$ 、1000 lx 照射で $1100 \mu\text{W}$ と、現在市販されている屋内用 a-Si 太陽電池と比較しても高い出力値が得られており、また人が活動している領域の多くをカバーできる低照度動作特性をもっていることから、高出力で設置場所の制約を受けにくい環境発電用電源として使用できる。またスクリーン印刷で作製する太陽電池であることから、デザインが比較的自由に設計できる点も小型電子機器用途にはメリットになると考えている。これらの特長から、今回開発した環境発電用 DSC モジュールは多くの用途で従来がない使いやすい電源になると考えている。

本開発の一部には、独立行政法人新エネルギー・産業技術開発機構（NEDO 技術開発機構）からの委託研究にて開発した技術を応用した。

参 考 文 献

- 1) 日経エレクトロニクス 2010 年 9 月 6 日号「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」日経 BP 社、2010
- 2) Roundy, S, et al.: "A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes", Computer Communications 26, Issue 11, pp. 1131-1144, 2003
- 3) 桑野博喜ほか：「エネルギーハーベスティング技術の最新動向」, シーエムシー出版, 2010
- 4) 白井弘紀ほか：「色素増感太陽電池の屋外暴露試験」, フジクラ技報, 第 117 号, pp.38-42, 2009
- 5) M. K. Nazeeruddin, et al.: "Efficient panchromatic sensitization of nanocrystalline TiO_2 films by a black dye based on a trithiocyanato-ruthenium complex", Chem. Commun., pp. 1705-1706, 1997
- 6) M. K. Nazeeruddin, et al.: "Acid-Base Equilibria of (2,2'-Bipyridyl-4,4'-dicarboxylic acid)ruthenium(II) Complexes and the Effect of Protonation on Charge-Transfer Sensitization of Nanocrystalline Titania", Inorg. Chem., 38, pp. 6298-6305, 1999
- 7) 日本工業規格 JIS C8913 「結晶系太陽電池セル出力測定方法」
- 8) 岡田顕一ほか：「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
- 9) Liyuan Han, et al.: "Modeling of an equivalent circuit for dye-sensitized solar cells" Applied Physics Letters, Vol. 84, No. 13, pp. 2433-2435, 2004