

## 資料

# 色素増感太陽電池の屋外実証試験 －制御方式の相違による発電効率の検討－

金山 真宏\*・岩田 史郎\*・古田 裕子\*・柴川 晋一郎\*・坂本 留美\*・今若 直人\*・  
川島 崇宏\*\*・坂根 正恭\*\*\*・眞田 雄矢\*\*\*・大栢 伸次\*\*\*・古川 雅彦\*\*\*

## 1. 目 的

シリコン太陽電池に代わる次世代太陽電池として、設置場所の制約が少なく製造原価が安いとされる有機系太陽電池の早期実用化が期待されている。色素増感太陽電池(DSC)は有機系太陽電池のひとつとして、1991年のGrätzelらの報告<sup>1)</sup>以来、多くの研究が進められており、近年ではその意匠性、発電特性からエナジーハーベスティング(環境発電)用途への利用も検討され始めている。鳥根県産業技術センターにおいても2003年より、DSCの実用化に向けた研究を行っており、2008年には世界に先駆けて実用サイズの12cm角DSCサブモジュールにてJIS C 8938耐熱性試験(B-1)をクリアすることに成功している<sup>2)</sup>。しかし、太陽電池のように過酷な環境下で長期間使用されるデバイスでは、実使用環境下での発電特性を理解することが特に重要である。

2012年度からは、実使用環境下での発電量・耐久性等を評価することで実用化に向けた課題を抽出するため、国内8ヶ所のサイトで実証試験を開始した。なお、実証にあたってはDSC応用製品の開発に向けた共同研究を行っている日本写真印刷株式会社とともに、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業である「有機系太陽電池実用化先導技術開発」の採択を受けている。この実証試験では複数の実証形態(製品形態)を試作しており、2年間の試験を経てDSCに適したアプリケーションの創出を目的としている。

太陽電池を含むひとつのデバイスとしての利用を想定した場合、気象条件の変動に伴って太陽電池の最大電力点(Pmax)は常に変動することから、その利用目的、太陽電池の発電特性に適した制御系が必要となる。シリコン太陽電池等では一般的にMPPT(Maximum Power Point Tracking)方式と呼ばれる、Pmaxを追従する制御方式を採用しているが、一般に市販されているMPPT制御回路はシリコン太陽電池向けに作製されたものであり、発電特性の異なるDSCに対して必ずしも効果的であるとは限らない。本報では、DSCのメリットである意匠性(多色性、透過性)と設置場所の制約の少なさに加えて、方式の異なる

\*有機フレキシブルエレクトロニクス技術開発プロジェクトチーム、\*\*電子・電気技術科、\*\*\*日本写真印刷株式会社

複数の制御系の評価を進めている鳥根県内のサイトでの実証試験について報告する。

## 2. 方 法

### 2.1 実証形態

本実証試験で試作した「独立電源型広告表示板」を図1に示す。表示板下部にシースルーモジュールを内蔵し、昼間に発電した電力を蓄電、夜間LEDで上部に配した広告を照らす構造とした。表示板は南向きに垂直(南90°:配向表示は「受光面の方位+傾斜角」で略記。「水平0°」と記載の場合は、傾斜角0°の水平面受光とする。以下同じ)設置することとし、表示板筐体をガラス製として、DSCモジュールに対して南北からの光が受光可能な構造とした。鳥根県松江市のくにびきメッセ内(鳥根県松江市学園南)に制御方式の異なる広告表示板を4台、同型のものを鳥根県産業技術センター内(鳥根県松江市北陵町)にも2台設置し、評価を行った。

### 2.2 モジュール構成

意匠性の求められるDSCでは、モジュール配色も重要な要素である。単一色セルのみで構成された単色モジュールでの評価に加え、実製品を想定した複数色のセルで構成される混色モジュールでの特性もあわせて評価する必要がある。モジュールはシースルーサブモジュールを5セル直列接続した構造とし、配色は赤色もしくは緑色の単色系2種類、赤色と緑色のセルが混在した混色系2種類の計4種類とした。本報ではそのうち、赤色単色(以下、①単色(赤))、



図1 独立電源型広告表示板(左:昼間,右:夜間)

赤緑混色（以下、②混色）の2モジュールの評価結果について記載する。

### 2.3 制御方式

制御方式は、シリコン太陽電池向け市販MPPT制御回路（STMicroelectronics製SPV1040、以下、市販MPPT）、および、その応答速度を遅らせるよう変更を施したものの（以下、改造MPPT）、動作電圧を一定値に固定して制御を行う固定電圧制御回路（LINER TECHNOLOGY製LTC3105、以下、固定電圧）の3方式とした。モジュール、制御回路の設置は図2に示す通りとし、1台の表示板内にモジュールを4個並列に配置し、試験用に設置した外部制御ボックスへ独立して結線することで、個々の制御・計測を実施した。また陽性対照として、IVカーブトレーサ（英弘精機（株）製MP160）にて制御方式の影響を受けないPmaxの算出を行い（以下、IVカーブトレーサ）、各制御方式で得られる発電量、および動作電圧との比較を行った。固定電圧制御方式による制御電圧は2V設定とし、試験の特性上、各制御方式は同一仕様のモジュール間での比較とした。

### 2.4 計測方法

計測は実証試験開始時(2013/6/30)から連続して実施し、1日の計測時間は4:00から23:45までとした。なお、計測は現在(2014/9)も継続しているが、ここでは実証試験開始から約14ヵ月後(2014/8/19)までの結果について報告する。計測項目として、IVカーブトレーサは15分間に1回、その他は1分間に1回の間隔で太陽電池の電流・動作電圧を取得し、発電量を算出した。同時に環境因子として、T型熱電対にてモジュール温度を、水平面、パネル面入射方向、パネル裏面入射方向にそれぞれ精密全天日射計（英弘精機（株）製MS-802F）を設置し、水平面日射強度（水平0°）、パネル面日射強度（南90°）、パネル裏面日射強度（北90°）を取得した。計測間隔はともに1分間に1回とし、日射強度については1日積算したものを1日積算日射量とした。天気、雲量等の気象データは、気象庁ホームページ（<http://www.jma.go.jp/>）から、観測地点（島根県松江市）の観測値を引用し、天気は天気概況（昼6:00-18:00）を、雲量は6:00から18:00までの平均値を用いた。

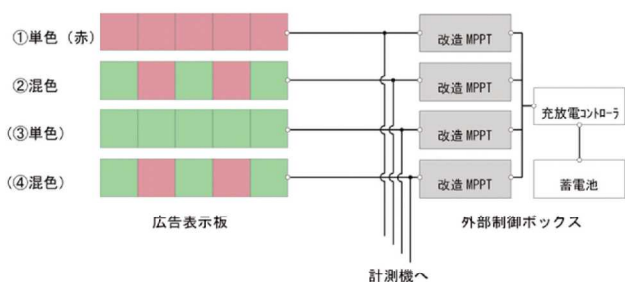


図2 広告表示板制御構成（例：改造MPPT）

## 3. 結 果

### 3.1 垂直設置の日射特性

図3に1日積算日射量の推移を示す。冬季の天候不順のため明瞭には示されていないが、離散的な好天時のデータより、パネル面日射量（南90°）において、秋季から冬季にかけて日射量が増加し、冬季から春季にかけて減少しており、冬至（2013/12/21）をピークとした日射量の推移が得られることが確認された。これは太陽の南中高度の最も低くなる冬至で入射角がパネル面に対して垂直に近づくためである。それに対し水平面日射量（水平0°）は、季節間の積算日射量の振れ幅が大きく、夏至（2013/6/21）をピークとして日射量が推移し、冬至にかけて日射量が減少することが確認された。これより、太陽電池の設置角度を検討する際、独立電源として一定量の夜間点灯電力を確保すべき設計においては、点灯時間の長くなる冬季に入射量が減少する水平設置よりも、年間通しての積算日射量は劣るものの、季節間の振れが少なく、冬季にかけて日射量が増加することが見込まれる垂直設置のほうが適した設置角度といえる。但し実際には、冬季は天候不順の影響が大きく日射量が減少するため、設置環境と必要電力量から判断する必要がある。パネル裏面日射量（北90°）は年間を通して一定の低い値を示しており、設置環境の影響もあるが、散乱光の影響がほぼ一定量であることがうかがえる。南北からの光を十分に受光できる構造であれば、年間を通して垂直設置の両面受光で得られる日射量は比較的安定になると推測される。

### 3.2 DSCモジュールの電圧特性

図4に天気の異なる3日間のDSCモジュール(①単色(赤))の電圧特性を示す。IVカーブトレーサにより取得されたPmaxにおける動作電圧（Vpm：最大出力電圧）の変化を見ると、日射強度の低い早朝6時頃から立ち上がり、日射強度や天気の影響を受けず、2V付近で比較的安定な推移を示すことが確認された。最大電力を得るためには常にVpmで制御できることが望ましく、Vpmから動作電圧が外れた場合にはロスを生じ、得られる発電量が低下する。このことから、DSCはVpmが天気の影響を受けにくいいため、制御しやすい太陽電池といえる。但し、晴れた日の日射

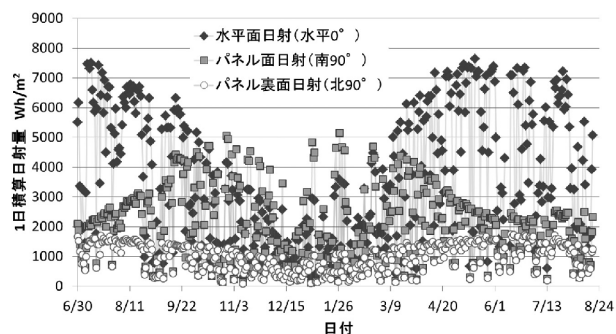


図3 1日積算日射量の推移

強度がピークを示す時間帯では（図4：2013/8/14快晴）、 $V_{pm}$ がわずかに低下傾向を示すことが確認された。

図5に快晴日におけるモジュール温度と $V_{pm}$ の関係を示す（2013/10/14, 日射強度 $100\text{W}/\text{m}^2$ 以上抜粋）。 $V_{pm}$ の低下傾向はモジュール温度と逆相関の関係にあることから、モジュール温度が上昇する高日射強度時に $V_{pm}$ が低下することが示唆される。 $V_{pm}$ 低下の要因としては、電解液中の酸化還元イオン種の拡散の促進、酸化還元反応の活性化等による影響<sup>3)</sup>が挙げられ、DSC特有の発電機構に起因するものと考えられる。

### 3.3 制御方式が発電量に与える影響

IVカーブトレサ、および各制御方式におけるモジュール（①単色（赤））の1日積算パネル面日射量と1日積算発電量との関係を図6、7に示す。図はモジュール設置後から6ヶ月間（2013/6/31~12/31）の測定値をプロットしたものであり、ばらつきを多く含むものの、日射量の増加に伴い発電量も増加し、概ね比例関係を示す。このばらつきは、日射強度やモジュール温度の変動による影響を受けたと考

えられる。 $P_{max}$ から算出した発電量（IVカーブトレサ）に対し、改造MPPTと市販MPPTでは、全日射量域で同様な比例傾向を示すものの、その値は低く、特に $3000\text{Wh}/\text{m}^2$ 以下で市販MPPTが低い値を示し易いことが確認された（図6）。また固定電圧（設定電圧 $2\text{V}$ ）では、低日射量側では $P_{max}$ 算出の発電量に近い値を示すものの、高日射量側では大きく離れた値を示すことが確認された（図7）。

制御方式ごとの日射強度と $P_{max}$ の挙動の差異について、1日の日射強度と $V_{pm}$ 、および各制御方式における動作電圧の関係を図8、9に示す。IVカーブトレサから算出したモジュール（①単色（赤））の $V_{pm}$ と比較して、最大日射強度時の動作電圧は、改造MPPTで $1.96\text{V}$ 、市販MPPTでは $1.86\text{V}$ と $V_{pm}$ （ $1.65\text{V}$ ）に近づくものの、低日射側での動作電圧は大きく外れることが確認された。一方、固定電圧（設定電圧 $2\text{V}$ ）では低日射でも設定値付近の高い動作電圧を示し $V_{pm}$ と近い値を示すが、高日射側に移るにつれ $V_{pm}$ から外れる（最大日射強度時動作電圧： $2.21\text{V}$ ）ことが確認された。改造MPPT、市販MPPTともに低日射側で動作電圧が外れる要因として、MPPT動作自体に電力が必要であることと、その動作性の影響が挙げられる。日射強度が低くモジュールの出力が低い状態では十分に $V_{pm}$ の追従を行うことができず、結果として低い動作電圧を示したと考えられ、動作性を変更した改造MPPTでは、市販MPPTに対し動作電圧の改善が表れている。他方、固定電圧に関しては、その動作電圧は設定値通りとな

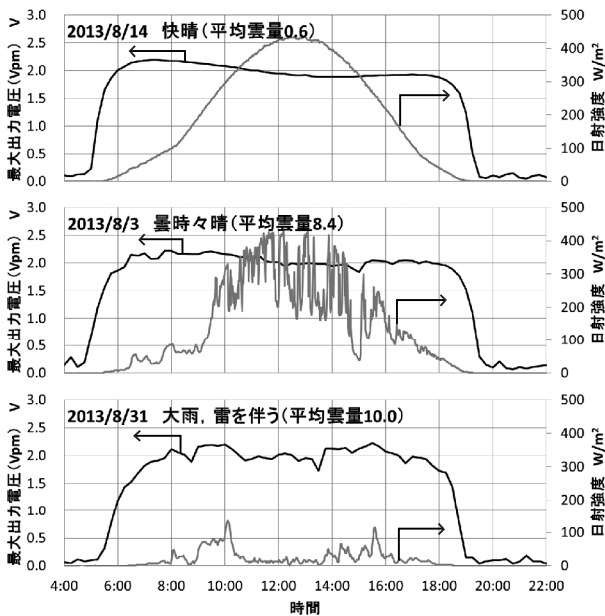


図4 モジュール（①単色（赤））の電圧特性

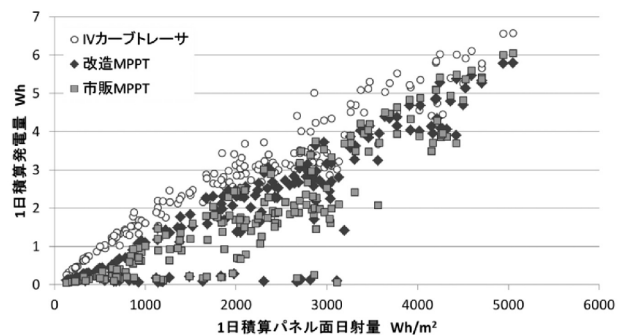


図6 積算発電量の日射量依存性（改造、市販MPPT）

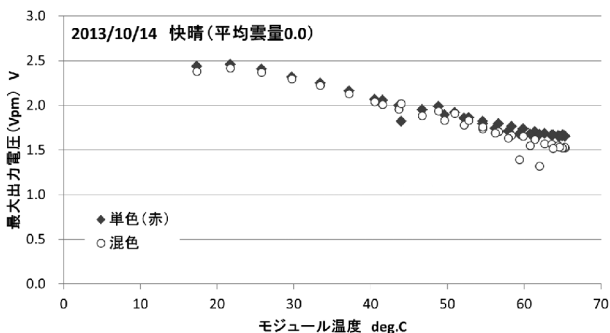


図5 最大出力電圧（ $V_{pm}$ ）のモジュール温度依存性

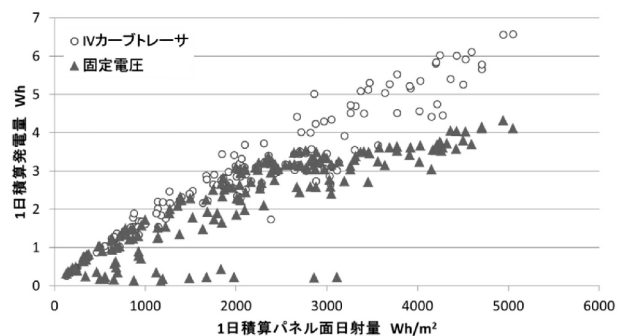


図7 積算発電量の日射量依存性（固定電圧）

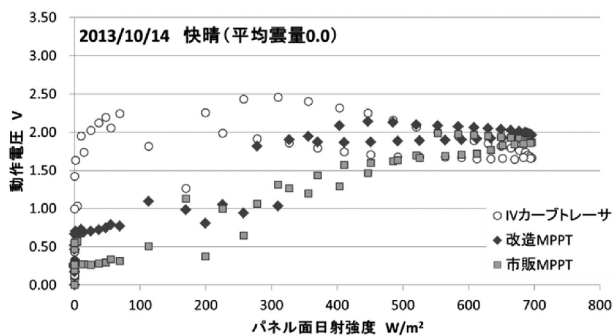


図8 動作電圧の日射強度依存性(改造, 市販MPPT)

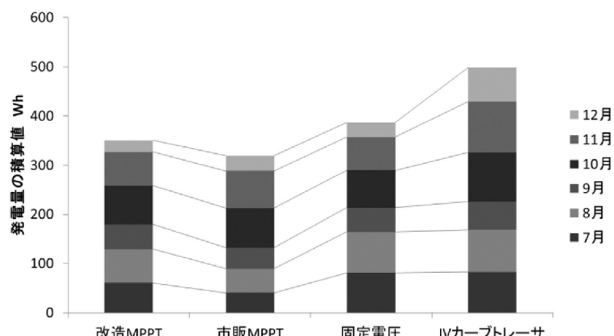


図10 6カ月間のモジュール発電量積算値

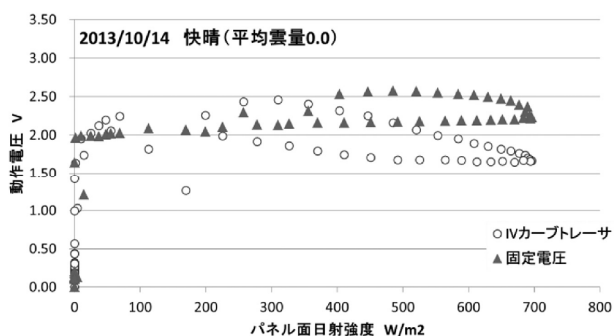


図9 動作電圧の日射強度依存性(固定電圧)

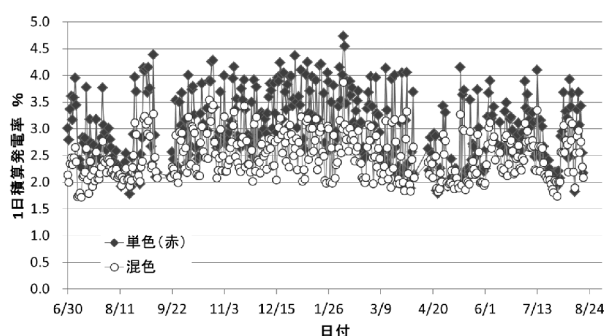


図11 1日積算発電率の推移

るため、先に述べたモジュール温度の上昇に伴うV<sub>pm</sub>自体の低下が表れる高日射強度側で、動作電圧とV<sub>pm</sub>との間に差が生じたと考えられる。加えて、高日射強度側での動作電圧が設定値以上の値を示しており、これがさらなるV<sub>pm</sub>との差を生じている。この原因は今のところ不明であり、今後検証を行う必要がある。

また、同期間(2013/6/31~12/31)のモジュール発電量の積算値(①単色(赤))を図10に示す。P<sub>max</sub>算出の発電量(IVカーブトレーサ)に対し、改造MPPTでは70%、市販MPPTでは64%の積算発電量を示し、固定電圧では77%と両MPPTのそれよりも高い値を示すことが確認された。これは、パネル面日射量の少ない7、8月においてMPPT制御によるV<sub>pm</sub>追従が十分でなかった影響と推測され、動作電圧の改善が表れた改造MPPTでは、市販MPPTに比べ若干高い積算値となっている。また、パネル面日射量の多くなる10、11月においては両MPPTのほうが固定電圧よりも発電量が高くなることが確認されており、上述の制御方式の影響による、発電量の日射強度依存性を表した結果となっている。これより、今回使用した制御機器とDSCの組み合わせにおいては、低日射強度から安定した制御が可能な固定電圧制御のほうが、この積算期間内においては、MPPT制御よりも優位であったといえる。但し、高日射強度側ではMPPT制御の発電量が多くなることが確認されているため、より高日射強度、モジュール温度上昇を含む設

置環境、または長期的なモジュールの性能変動を伴う条件下での組み合わせについてはさらに検証が必要であり、設置条件によっては適した制御方式が異なることも考えられる。また固定電圧においては、特にその設定値によって得られる発電量に差が生じるため、最適な設定値を検討する必要がある。本実証試験においても、制御回路の影響を引き続き評価する予定である。

### 3.4 モジュールの性能変化

モジュールの性能のひとつの指標として、モジュール(①単色(赤)、②混色)の1日積算発電率の推移を図11に示す。なお、1日積算発電率は式(1)に示す値として定義する。

$$\text{1日積算発電率} [\%] = \frac{(\text{1日積算面積換算発電量} [\text{Wh/m}^2])}{(\text{1日積算パネル面日射量} [\text{Wh/m}^2])} \times 100 \quad (1)$$

図11より、1日積算発電率は季節間の変動が大きいことが確認される。これは、特に①単色(赤)において、太陽の南中高度の高い時期に広告表示板内のフレームの影の影響を受けた可能性が考えられる。また、その値には±1ポイント程度のデータの振れがあり、変動はあるものの一定の推移を示しているように見え、発電率自体に有意な低下傾向は確認されていない。データの振れ、変動については、パネル面日射量のばらつき、設置環境やモジュール温度、もしくはガラス表面の反射の影響を受けたものと推測される。

そこで季節間変動の影響を考慮し、太陽高度の等しい同時期（2013年7月および2014年7月）の積算発電量の日射量依存性から、その1年間の傾向の変化をさらに検証した（図12, 13）。通常、モジュールの性能が低下する場合にはその日射量依存性において、傾きが低下するなどの変化が表れると考えられる。基準光、環境温度が一定ではないため詳細な効率は差し控えるが、高日射量側ではばらつきが確認されるものの、1500Wh/m<sup>2</sup>以下の傾きに差異はみられておらず、①単色（赤）、②混色ともに1年間の実環境下においてその日射量依存性に顕著な低下は確認されなかった。但し、7月のパネル面日射量の最大値は3000Wh/m<sup>2</sup>以下であり、この日射量域では日照条件やモジュール温度の影響を受けている可能性があるため、より詳しくは測定環境を一定とした状態での確認が必要といえる。加えて、組み合わせられる制御方式と性能変化の関係性についても検証する必要がある。これについては引き続き評価を行う予定である。

他方、単色、混色モジュール間の比較においては、異なる2色のシースルーサブモジュールを直列接続した②混色では、①単色（赤）よりも低い傾きを示した（図12, 13）。これは直列接続により全体のPmaxが出力の低いサブモジュールの影響を受けるためと考えられる。しかし、その

長期的な傾向の変化については混色による影響は確認されておらず、単色、混色ともに、発電量の日射量依存性に顕著な低下は確認されていない。これより、意匠性の求められるDSCにおいて、混色による出力低下を予め考慮した製品形態であれば、単色、混色問わず同様な利用が可能であるといえる。

### 3.5 まとめ

独立電源型広告表示板を実証形態とした実用環境における発電特性の評価を行った。本実施形態での垂直設置、両面受光の優位性を確認するとともに、DSC特有の電圧安定性、Vpmのモジュール温度依存性を見出した。このDSC特性との組み合わせにおいて、制御方式の影響による発電量の日射強度依存性があることを検証し、モジュール設置後から6ヶ月間においては、固定電圧制御が比較的優位であることを確認した。より長期的な温度変化、モジュールの性能変動を伴う場合については、本実証試験において引き続き評価を行う予定である。

## 謝 辞

本報告は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）からの助成事業、「有機系太陽電池実用化先導技術開発 色素増感太陽電池実証実験プロジェクト」による研究成果の一部である。

## 文 献

- 1) B. O'Regan; M. Gratzel. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO<sub>2</sub> films. Nature. 1991, vol. 353, p. 737-740.
- 2) S. Noda; K. Nagano; E. Inoue; T. Egi; T. Nakashima; N. Imawaka; M. Kanayama; S. Iwata; K. Toshima; K. Nakada; K. Yoshino. Development of large size dye-sensitized solar cell modules with high temperature durability. Synthetic Metals. 2009, vol. 159, p. 2355-2357.
- 3) 今若直人, 金山真宏, 岩田史郎, 西本尚己, 松林和彦, 中島剛, 長野和秀, 野田修司, 吉野勝美. 実用化が近づく色素増感太陽電池. マテリアルインテグレーション. 2012, vol. 25, no. 8・9, p. 35-40.

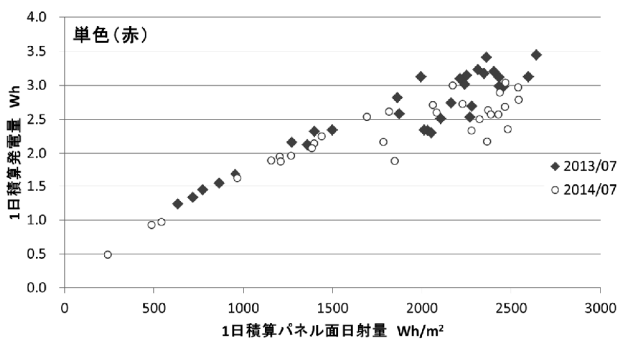


図12 積算発電量の日射量依存性 (①単色 (赤))

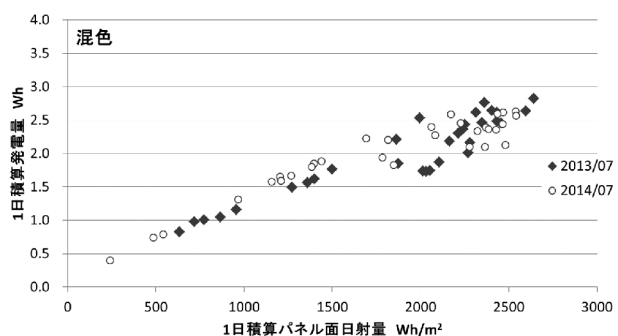


図13 積算発電量の日射量依存性 (②混色)