

色素増感太陽電池の屋外発電特性

環境・エネルギー研究所 岡田 顕¹・松井 浩志²・田辺 信夫³

Outdoor Performances of Dye-sensitized Solar Cell

K. Okada, H. Matsui, 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。当社ではこれまでその実用化を目指し、開発した高耐久性 DSC モジュールを屋外で実際に動作させたときの長期耐久性や発電量の測定を行ってきた。その結果、DSC は JIS 規格に定められる標準条件で測定した発電効率よりも屋外設置環境での実発電効率の方が高く、同じ出力のモジュールを比較した場合には、従来のシリコン太陽電池よりも年間総発電量が大きくなることがわかった。

Dye-sensitized solar cells are expected to be the next-generation solar cells that are lower-cost and more environmentally friendly than the conventional solar cells. Long-term durability and electric output of modules developed in Fujikura were measured in outdoor conditions to evaluate the performance of actual solar energy conversion. It was found that energy conversion efficiency of dye-sensitized solar cells measured in outdoor conditions was larger than the conversion efficiency measured under standard JIS conditions, and annual energy production of dye-sensitized solar cell is larger than the production of Si solar cell of the same rating output.

1. ま え が き

近年、CO₂ 排出による地球温暖化の防止やエネルギー安全保障の観点から、世界的に化石エネルギーから再生可能エネルギーへの積極的な転換が進められている。中でも太陽電池を用いた太陽光発電は設置場所の制約の少なさや設備メンテナンスの容易さなどの特徴や、FiT のような各国の政策支援の効果から、他の再生可能エネルギーと比較して早いペースで導入が進んできており、IEA では現在 20 GW の世界の累積導入量が 2030 年には 872 GW に達する¹⁾と予想している。太陽電池にはバルクシリコン型、薄膜シリコン型、各種化合物半導体型など様々な方式があるが、今後も生産量、設置量が大幅に伸びていくことから、資源の制約が少なく、低コストで環境に優しい新しい太陽電池が強く求められている。その中で当社では次世代太陽電池として期待されている DSC²⁾ に注目し、大型化・高耐久化といった実用化を目指す研究を早い時期から行ってきた³⁾⁻⁸⁾。図 1 に DSC の断面構造を、図 2 に従来の太陽電池と DSC の発電機構の違いを示す。半導体 pn 接合を用いた従来の太陽電池は図 2 (a) に示すように、光から電荷への変換と、

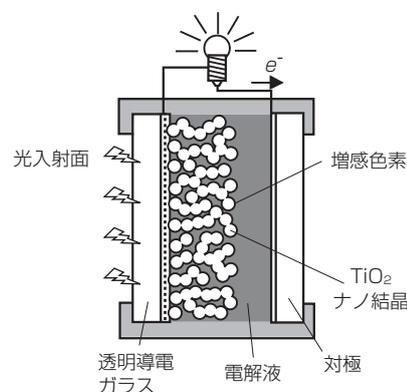


図 1 DSC の断面構造

Fig. 1. Cross-section structure of DSC.

発生した電荷の輸送の両方を半導体層で行うのに対し、DSC は図 2 (b) のように半導体と電解液が電荷輸送を行い、増感色素が光から電荷への変換をおこなう。このように発電機構や材料が従来の太陽電池と異なるため、性能や耐久性などの DSC の各種特性を評価する際は、従来太陽電池を対象とした JIS、IEC 規格に従った評価とあわせて、実使用環境での検証試験を行う必要がある⁹⁾⁻¹¹⁾。そのため当社では開発した DSC を屋外で実際に使用しながら、従来の太陽電池と比較した各種特性の評価を行ってきた。本報では屋外での耐久性評価結果に関

1 太陽光発電研究室

2 太陽光発電研究室長

3 環境・エネルギー研究所所長 (博士 (工学))

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
PV	Photovoltaic	光電変換
IEA	International Energy Agency	国際エネルギー機関
FiT	Feed-in Tariff	発電電力の固定価格買い取り制度
V.B.	Valence Band	価電子帯. 半導体で少数キャリアとしてホールが伝導するバンド
C.B.	Conduction Band	伝導帯. 半導体で少数キャリアとして電子が伝導するバンド
HOMO	Highest Occupied Molecular Orbital	最高被占軌道. 半導体の価電子帯に相当する分子軌道
LUMO	Lowest Unoccupied Molecular Orbital	最低空軌道. 半導体の伝導帯に相当する分子軌道
ϵ_f	Fermi level	フェルミ準位
AM-1.5	Air Mass 1.5	中緯度地域の大気の影響を加味した太陽光スペクトル
Isc (Jsc)	Short Circuit Current (density)	短絡電流 (密度). 太陽電池を短絡したときに流れる電流 (密度)
Voc	Open Circuit Voltage	開放電圧. 太陽電池を回路から切り離れたときの端子間電圧
FF	Fill Factor	形状因子. IV 曲線の形を代表する値. 最大出力 ÷ (Voc × Isc)
Vpm	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

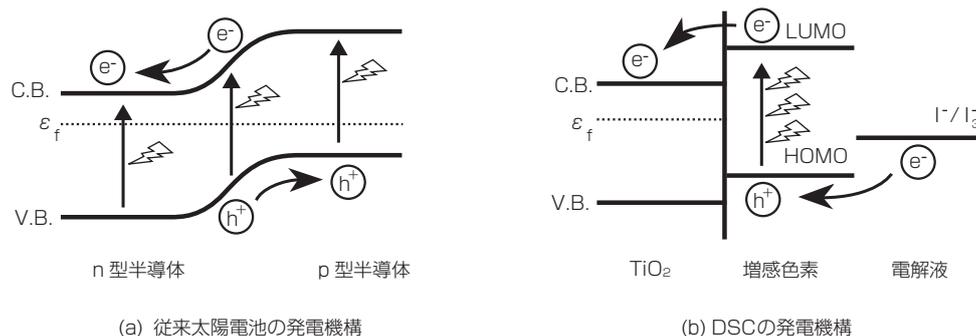


図2 DSCと従来太陽電池の発電機構の違い

Fig. 2. Difference of working mechanism between ordinary solar cells and DSC.

する前報⁷⁾に引き続き、発電特性に関する評価結果を報告する。

2. 発電特性の計測方法

2.1 屋外での発電特性計測

屋外測定で用いた計測システムの概要を図3に、外観

を図4に示す。設置場所は千葉県佐倉市（北緯 35.7 度、東経 140.2 度）、架台の設置条件は磁南方位で設置角 35 度とし、架台の傾斜面日射量（以後日射量）はサーモパイルを用いた全天日射計（英弘精機 MS-802, ISO9060 Secondary standard）で測定した。評価用の高耐久性 DSC⁶⁾と市販多結晶シリコン太陽電池（以後、シリコン太陽電池）をこのシステムに設置し、それぞれの IV 特

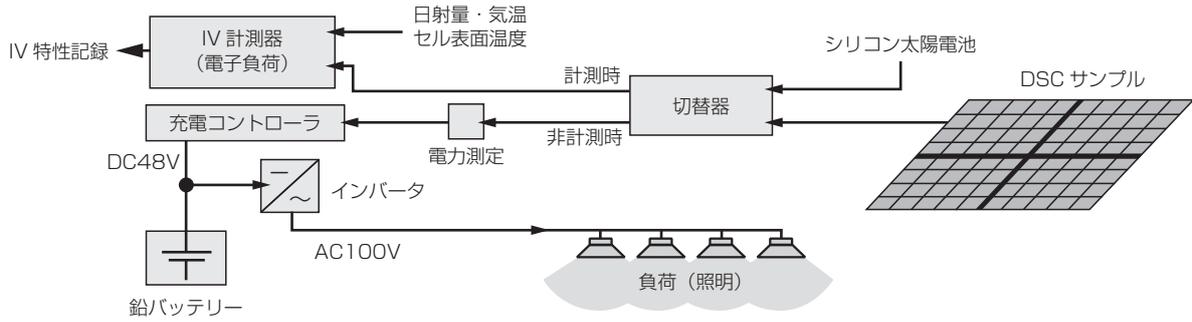


図3 屋外測定システムの概要

Fig. 3. Design overview of measurement system for outdoor PV performance.



図4 屋外測定システムの外観

Fig. 4. Measurement system for outdoor PV performance.

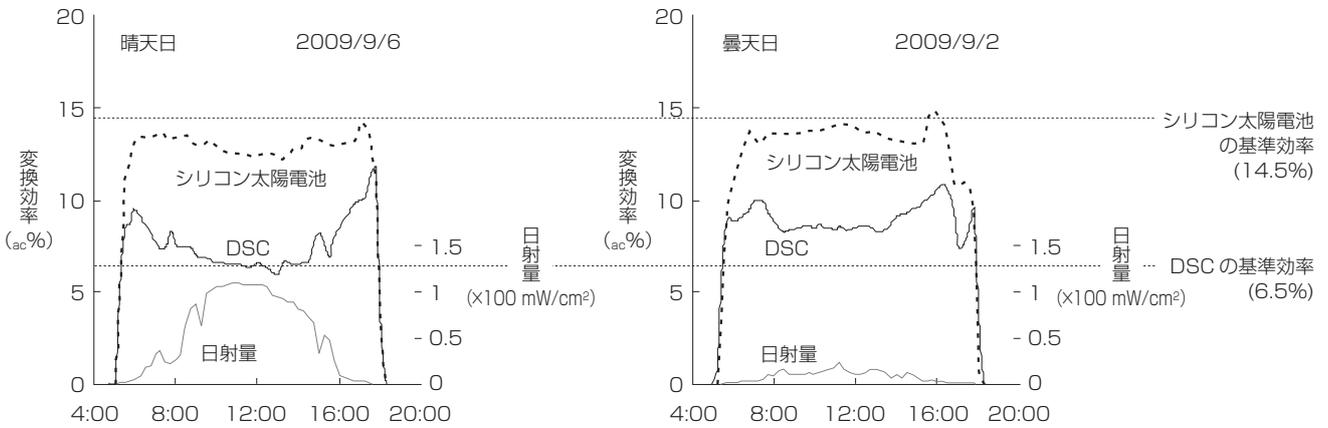


図5 DSCとシリコン太陽電池の一日の実効率推移

Fig. 5. Diurnal change of conversion efficiency of Si solar cell and DSC.

性を電子負荷（英弘精機，MP-160）を用いて5分ごとに記録した。なお設置場所の周囲環境から，3～10月の晴天日には16時頃にシステムに影が差し日射計の出力と太陽電池の発電量に食い違いが生じるため，実動作状態でのエネルギー変換効率（以後，実効率）を算出する際にはその時間帯をデータから除外した。

2.2 屋内での発電特性計測

セルの基準エネルギー変換効率（以後，基準効率）はソーラーシミュレータを用いてJIS規格に定められる標準状態（AM-1.5，100 mW/cm² 疑似太陽光，表面温度25℃，光入射方向はセルに直交）で測定した。また変

換効率の入射光強度依存性，入射角度依存性，セル表面温度依存性はNDフィルタや恒温プレートつき試料台を用いて，標準状態からそれぞれに対応する条件のみを変更して測定した。

3. DSCの屋外発電特性

基準効率6.5%のDSCを屋外に設置し，代表的な晴天日（一日の累積日射量6.2 kWh/day）と曇天日（同，1.1 kWh/day）の一日の実効率推移を測定した結果を図5に示す。この図で示す実効率はその時間の太陽電池の発

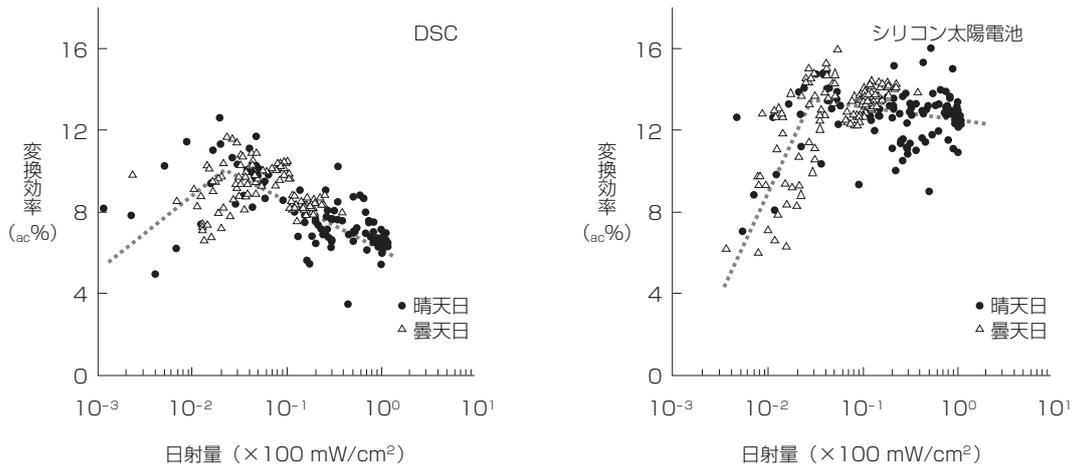


図6 DSCとシリコン太陽電池の実効率と日射量の関係
Fig. 6. Relationship between effective conversion efficiency and incident solar energy.

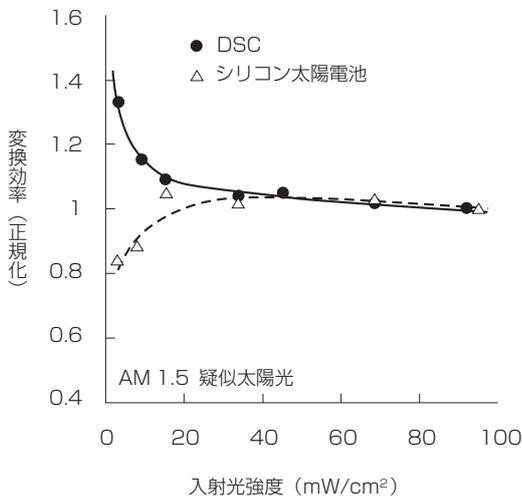


図7 セル変換効率の入射光強度依存性
Fig. 7. Relationship between incident light intensity and conversion efficiency.

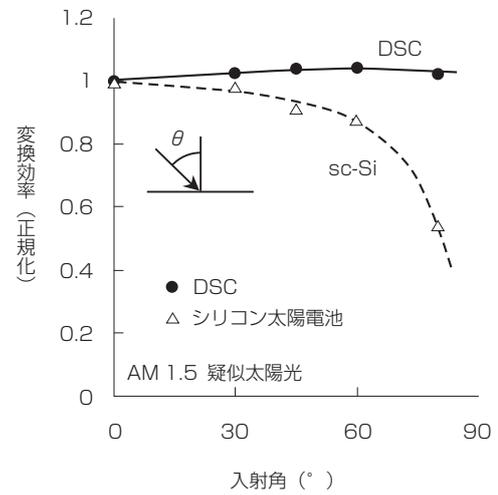
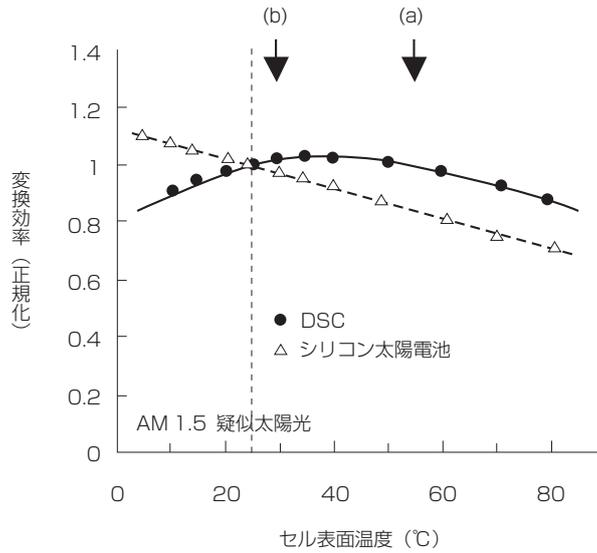


図8 セル変換効率の角度依存性
Fig. 8. Relationship between incident light angle and conversion efficiency.

電量 (mW) を太陽電池面積 (cm²) と日射量 (mW/cm²) で除したものであり、グラフには比較として基準効率が14.5%のシリコン太陽電池のデータを併せて示した。DSCはシリコン太陽電池と異なり晴天日の昼にはほぼ基準効率通りの、朝夕にはそれより高い実効率を示す傾向が見られ、また曇りの日には終日基準効率に対して高い実効率を示した。このように晴天日の正午付近を除き、ほとんどの時間帯でDSCの実効率は基準効率よりも高くなるため、年間の累積発電量は基準効率から予想される値よりも高くなると期待される。これはシリコン系の太陽電池において年間総発電量が基準効率から予想する値より低くなるといわれている¹²⁾のと対照的である。図6はDSCとシリコン太陽電池の実効率を日射量との関係で示したもので、図5の曇天日と晴天日の両

測定データをプロットしている。100 mW/cm² から2 mW/cm² までの範囲では日射量が小さくなるにつれてDSCの実効率は向上していくが、シリコン太陽電池の実効率はほとんど変化しない。また、2 mW/cm² 以下の範囲ではどちらの太陽電池も実効率が低下するが、その割合はDSCの方が小さい。このような差が現れる原因を探るためDSCとシリコン太陽電池の単セルサンプルを用いて入射光強度、光入射角度、セル表面温度がそれぞれのセルの変換効率に与える影響を調べた。図7に入射光強度と変換効率の関係を、図8に光入射角度と変換効率の関係を示す。DSCはシリコン太陽電池と異なり入射光強度が小さくなると変換効率が向上するのに加え、光入射角度が大きくなって影響を受けにくいため、朝夕のように光が斜めに入射する場合や、曇天時の



モジュール表面温度の目安
 (a) 夏期 2009/8/13 12:00 54°C(気温 31°C)
 (b) 冬期 2009/2/05 12:00 29°C(気温 8°C)

図9 セル変換効率の表面温度依存性

Fig. 9. Relationship between surface temperature of cell and conversion efficiency.

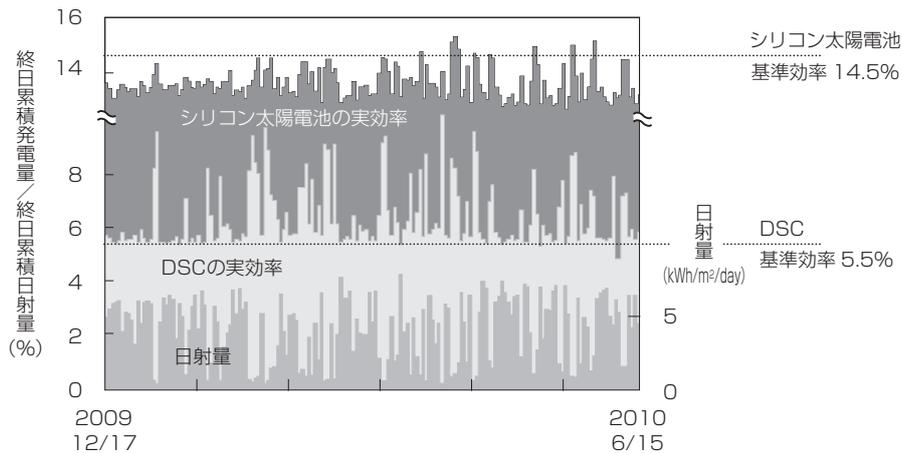


図10 DSCとシリコン太陽電池の半年間の発電量推移
 Fig. 10. Output of Si solar cell and DSC for 6 months.

ように日射の散乱が強い場合に有利であることがこれらの結果からわかる。また図9に示すセルの表面温度と変換効率の関係からは、シリコン太陽電池は表面温度が上がるにつれて直線的に変換効率が低下するのに対し、DSCは25～55°Cの範囲で標準状態よりも高い効率を得られることがわかる。晴天日の日中のセル表面温度は夏に55°C、冬に30°C程度であり、このような条件ではDSCの効率は基準効率より高くなる。屋外測定で得られた実効率にはこれら3つの特性が組み合わさっているものと考えられる。

4. 年間の発電量予測

4.1 屋外発電量の実連続測定

図10は基準効率5.5%のDSCと14.5%のシリコン太陽電池を実際に屋外で半年間動作させて、その間の発電量を一日ごとの実効率としてプロットしたものである。計測開始時点と半年経過後でDSCの実効率に変化はなく、計測期間内にセル劣化は起こっていない。またシリコン太陽電池が半年間のほぼ全期間を通して基準効率よりも低めの実効率を示しているのに対し、DSCは晴天日ではほぼ基準効率程度、曇天や雨天日ではそれより高い値を示していることがわかる。この期間の累積発電量はシリ

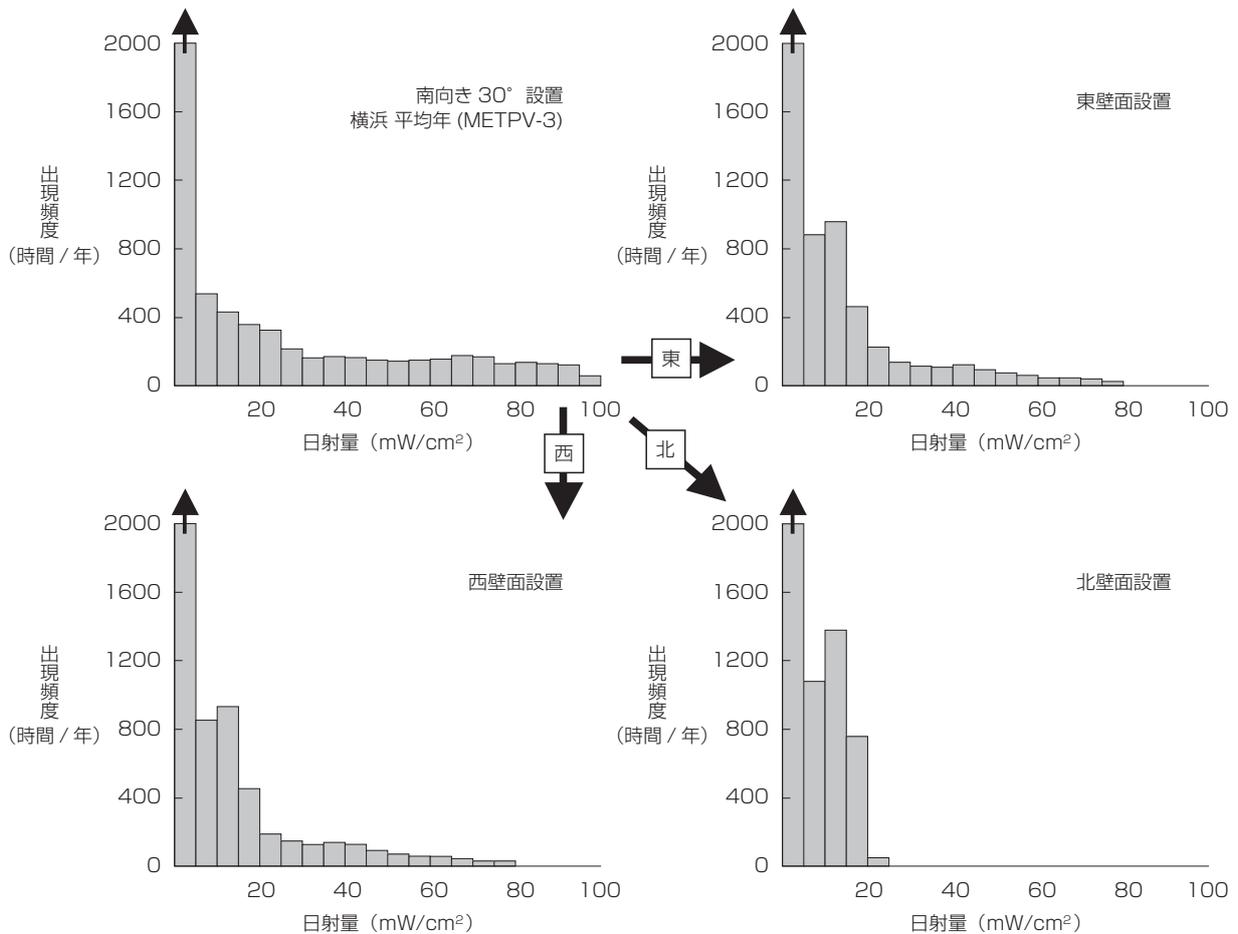


図 11 太陽電池モジュール設置方位に対する年間の日射量出現頻度

Fig. 11. Relationship between install direction of PV modules and appearance frequency of incident solar energy.

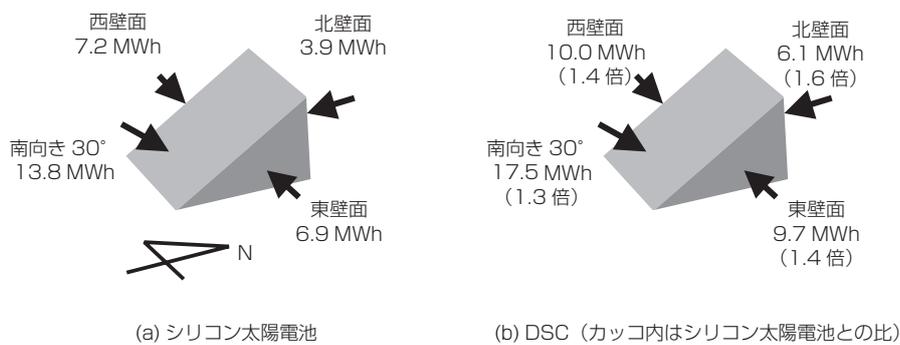


図 12 10 kW システム設置方位に対する年間発電量計算値

Fig. 12. Relationship between install direction and calculated annual output of 10 kW Si solar array.

コン太陽電池で 94.0 kWh/m^2 、DSC では 41.1 kWh/m^2 であり、基準効率を比較した場合よりも性能差は小さかった。

4. 2 屋外発電量の計算による予測

日本各地での様々な方位の年間日射量は NEDO の委託研究において日本気象協会が調査したデータベース (METPV) が公開されている¹³⁾。このデータと図 6 に

点線で示した日射量と実効率の関係を利用することでそれぞれの太陽電池を種々の条件で設置したときのおよその発電量を予想することができる。横浜で南向き 30° の傾斜面と東西北方向の壁面に太陽電池を設置した場合の年間日射量出現頻度を図 11 に示す。太陽電池の基準効率評価に用いる 100 mW/cm^2 という日射条件は実際にはほとんど出現せず、低日射条件の時間の割合が非常に多い。さらに南斜面への設置と比べると東西北壁面への

設置では日射量の出現頻度が暗い側にシフトするため、低照度時の実効率が高いDSCにとってはより有利な日射条件となる。これらの年間日射データを用いて各設置方位での発電量を予測計算した結果を図12に示す。同定格出力のシステムを設置した場合、すべての方位でDSCはシリコン太陽電池よりも高い予想発電量となったが、特に北壁面に設置した場合にはシリコン太陽電池に対して60%程度多くの出力が得られる可能性があることがわかった。

5. む す び

当社で開発した高耐久性DSCが実際に屋外でどのような発電特性を示すか、シリコン太陽電池と比較しながら評価を行った。その結果DSCはシリコン太陽電池と異なり、光入射量が小さい場合や、セル表面温度が高い場合に交換効率が向上し、光が斜めから入射しても効率が低下しにくいといった特徴をもつことや、それによりソーラーシミュレータを用いた基準状態の交換効率よりも、屋外の実使用状態のほうが高い効率が得られることがわかった。実効率と日射量の関係から計算すると、同出力のシリコン太陽電池と比べてDSCは設置条件によって30~60%高い出力が得られると予想される。本研究と並行して取り組んでいる交換効率向上を目指した開発により、現在は基準効率でも8_{ap}%以上の高耐久性DSCサブモジュールが製作できるようになってきており、実使用条件の発電量でDSCは商用太陽電池と遜色ないレベルに近づいている。今後実用化に向け、新たなサンプルや設置条件を追加しながら引き続き屋外での詳細な動作特性解析を進めていきたいと考えている。

本開発の一部は、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、「太陽光発電未来技術研究開発 高耐久性色素増感太陽電池モジュールの研究開発」により実施した。

参 考 文 献

- 1) International Energy Agency, "Technology roadmap Solar photovoltaic energy : 2010", 2010
- 2) B. O'Regan, et al. : "A Low-Cost, High-Efficiency Solar Cell Based on Dye-Sensitized Colloidal TiO₂ Films", Nature, No.353, pp.737-740, 1991
- 3) 松井浩志ほか：「色素増感太陽電池」, フジクラ技報, 第104号, pp.37-41, 2003
- 4) 柳田祥三ほか：「ナノコンポジットイオンゲルを用いた色素増感太陽電池」, フジクラ技報, 第107号, pp.73-78, 2004
- 5) 江連哲也ほか：「900 × 1200 mm² 色素増感太陽電池モジュール」, フジクラ技報, 第110号, pp.37-41 2006
- 6) 岡田顕一ほか：「高耐久性色素増感太陽電池」, フジクラ技報, 第114号, pp.48-53, 2008
- 7) 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
- 8) トボン オンゴンほか：「色素増感太陽電池用カーボンナノチューブ電極」, フジクラ技報, 第118号, pp.35-38, 2010
- 9) T. Toyoda, et al. : "Outdoor performance of large scale DSC modules", J. Photochem. Photobiol. A, No. 164, pp.203-207, 2004
- 10) N. Kato, et al. : "Degradation analysis of dye-sensitized solar cell module after long-term stability test under outdoor working condition", Solar Energy Materials & Solar Cells, 93, pp.893-897, 2009
- 11) S. Sai, et al., "The design and outdoor application of dye-sensitized solar cells", Inorganica Chimica Acta, 361, pp.786-791, 2008
- 12) 浜川圭弘ほか：「太陽エネルギー工学 太陽電池」, 培風館, p.260, 1994
- 13) 日本気象協会：平成17年度NEDO委託業務成果報告書「標準日射太陽光発電システム共通基盤技術研究開発 標準日射データの地理的分解能向上に関する調査研究」, 2005