

資 料

色素増感太陽電池の屋外実証試験 (第2報) - 制御方式の相違による発電量の検討 -

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¹⁾以来、多くの研究が進められており、島根県産業技術センターにおいても2003年より、その実用化に向けた研究^{2),3)}を進めてきた。近年ではその意匠性、低照度での優れた発電特性が注目され、エネルギ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。

我々は2012年度から、国立研究開発法人新エネルギー・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、DSC応用製品の開発を進める日本写真印刷株式会社と共同で、実使用環境下での発電量・耐久性等の評価を行ってきた。その結果、独立電源型広告表示板を実証形態とした評価では、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、最大電力点における動作電圧(V_{pm})のモジュール温度依存性を見出した⁴⁾。

また、太陽電池は日照条件の変動に伴って最大電力点(P_{max})が変動することから、その利用目的や、発電特性に応じた制御系の評価が必要となる。前報の独立電源型広告表示板を実証形態とした評価では、方式の異なる複数の制御方式とDSC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を確認し、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⁴⁾。

本報では前報⁴⁾に引き続き、設置から2年間の発電量、性能安定性に加え、方式の異なる複数の制御系とDSCとの組み合わせに関する評価結果について報告する。

2. 方 法

2.1 実証形態

前報⁴⁾と同様に、独立電源型広告表示板を実証形態とした評価を行った。図1に島根県松江市のくにびきメッセ内(島根県松江市学園南)実証試験サイトの外観を示す。表
*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

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。

2.2 モジュール構成

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、単色(赤))、赤緑混色(以下、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

前報⁴⁾と同様に、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(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方式を使用した。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 P_{max} の算出を行い、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、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



図1 独立電源型広告表示板

計測は実証試験開始日(2013/6/30)から終了日(2015/7/31)までの2年間連続して実施し、1日の計測時間は4:00から23:45までとした。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、外気温計により外気温を、T型熱電対にてモジュール温度を測定するとともに、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(図1右端のポール参照)、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。

3. 結果

3.1 実証試験における積算発電量

図2に1日積算日射量の推移を示す。水平面(水平0°)は季節間の積算日射量の振れ幅が大きく、夏至をピークとして日射量が推移し、冬至にかけて日射量の減少がみられた。これは太陽の南中高度の影響を受けたもので、直達光の当たらないパネル裏面(北90°)においても、日射量は低いものの同様の推移がみられた。それに対し、パネル面(南90°)は冬季の天候不順のため冬至におけるピークはみられず、その振れ幅は水平面日射量(水平0°)よりも小さいことが確認された。

図3にIVカーブトレーサから得られたPmaxより算出した1日積算発電量の推移、図4に1日積算発電量を月別で積算した月積算発電量の推移を示す。1日積算発電量(図3)は、単色(赤)、混色モジュールともに、冬季に高い発電量を示すことが確認された。天候不順の影響から、冬季におけるバラツキは大きくみえるが、月積算発電量(図4)に換算すると、年間を通して月60Wh程度の比較的安定した発電量が得られていることがわかる。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き日射強度が増加するのに対し、同時に冬季の天候不順により日照時間が減少するため、結果として通年での発電量の変動が抑えられたためである。

太陽電池の設置角度を検討する際、このように通年での積算発電量の変動の少ない垂直設置は、一定量の電力を確保すべき独立電源に適した設置角度といえる。加えて、南北からの光を十分に受光できる構造であれば、安定したパネル裏面日射量(北90°)も有効利用できるため、両面受光で得られる発電量は安定したものになると推測される。

3.2 実証試験における環境影響

図5に外気温計により得られた外気温、図6にT型熱電対により得られたモジュール温度の日中最高温度と最低温度の推移を示す。外気温は最高温度で37.5℃、最低温度で-1.4℃を示し、年間を通して日中の温度差は平均で

6.8℃と小さい。それに対し、モジュール温度の最高温度は68.3℃、最低温度-4.8℃を示し、日中の温度差は最大で63.6℃と非常に大きいことが確認された。

モジュール温度の最低温度の推移は、外気温の推移と同様であるが、最高温度を示す時期は夏至と冬至の間であり、外気温のピーク時期とも異なることがわかる。これは太陽光の入射によりパネルが直接暖められた結果であり、日中の温度差が最大となるのがパネル面に対して入射角が垂直に最も近づき日射強度が増加する冬至付近であることから裏付けられる。

今回、独立電源型広告表示板内にDSCを配置したが、DSCは筐体内で外気とは遮断される構造となっており、その構造がモジュール温度を高める副要因となっている可能性も考えられる。前報にてモジュール温度が上昇するとVpmの低下が示唆された⁴⁾ことから、耐久性だけでなく制御の面からも、モジュール温度が上昇しにくい構造をとる

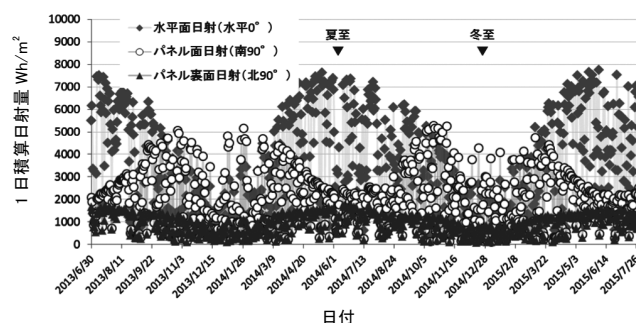


図2 1日積算日射量の推移

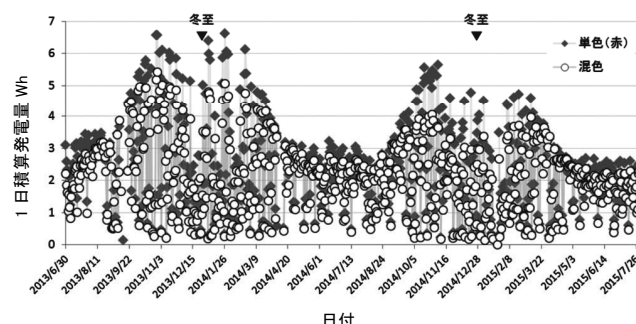


図3 1日積算発電量の推移

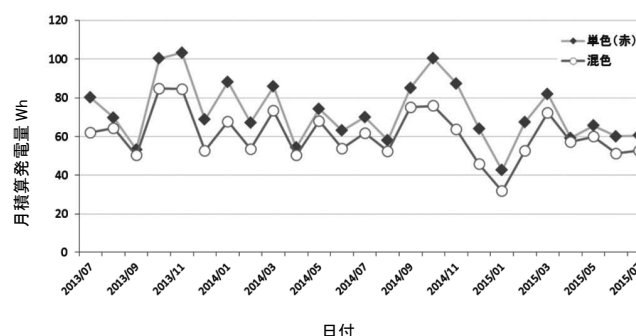


図4 月積算発電量の推移

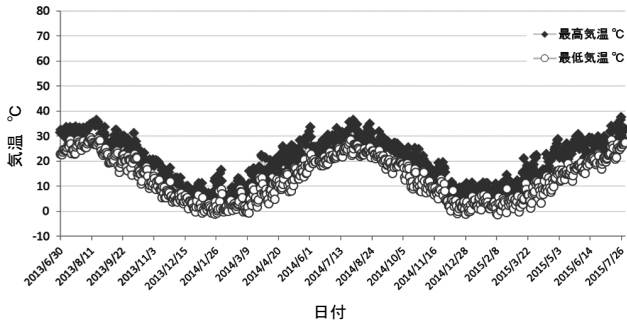


図5 外気温の推移

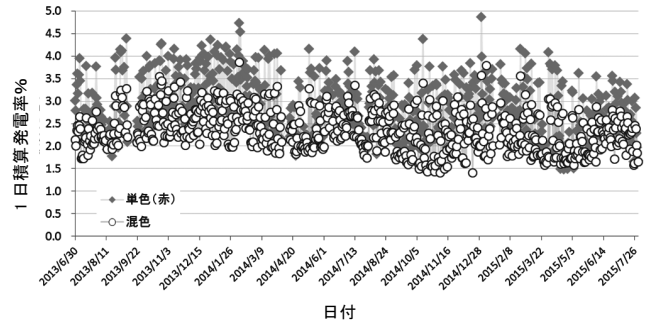


図7 1日積算発電率の推移

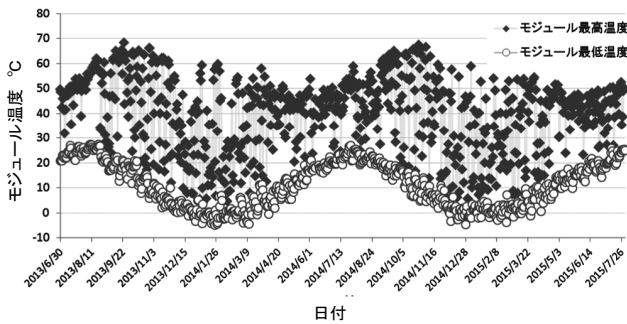


図6 モジュール温度の推移

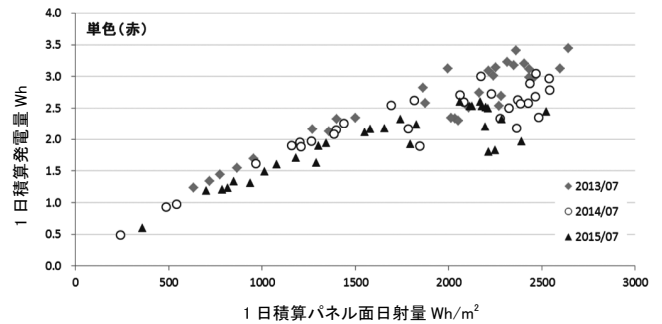


図8 積算発電量の日射量依存性 (単色 (赤))

ことは重要であるといえる。

3.3 DSC モジュールの性能変化

モジュール性能のひとつの指標として、IV カーブトレーサから得られた Pmax より算出した 1 日積算発電率の推移を図 7 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。

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

図 7 より、1 日積算発電率はその値に ± 1 ポイント程度のデータの振れがあるものの、前報⁴⁾の結果から大きな経年の経年変化はなく、2 年間の実証試験において顕著な発電率の低下はみられていない。但し、この積算発電率には季節間の変動がみられており、これは特に単色 (赤) モジュール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。

そこで季節間変動の影響を考慮し、太陽高度の近い同月 (2013 年 7 月、2014 年 7 月、2015 年 7 月) の 1 日あたりの積算発電量の日射量依存性から、2 年間における傾向の変化をさらに検証した (図 8, 9)。モジュール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。単色 (赤) モジュール (図 8) では、設置後 1 年経過後の 2014 年 7 月では差異はみられないが、2 年経過後の 2015 年 7 月ではわずかに低下傾向が確認された。混色モジュール (図 9) では、高日

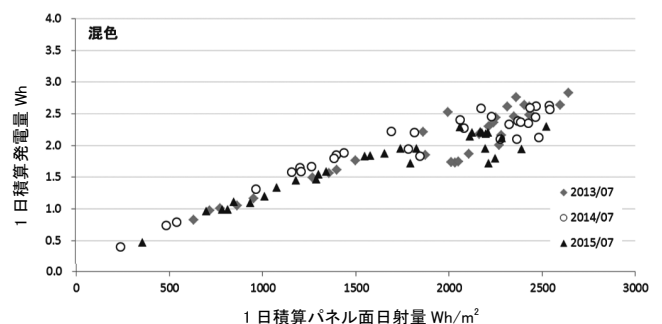


図9 積算発電量の日射量依存性 (混色)

射量域でばらつきが確認されるものの、設置後 2 年経過後であっても 1500Wh/m² 以下の傾きに差異はみられておらず、その日射量依存性に顕著な低下は確認されなかった。

また、線形近似を用いて概算の効率を求めた結果から、2013 年 7 月に対する 2015 年 7 月の単色 (赤) モジュールにおける出力保持率は 86%、混色モジュールにおける出力保持率は 97% となった。これより、5 セル直列構造というセル間の性能バラツキの影響を受けやすい構造でありながらも、本実証試験で使用したモジュールは十分な性能安定性を有していることが確認された。

長期的な傾向の変化について、混色化による悪影響は確認されておらず、逆に単色 (赤) に比べ、混色モジュールで出力保持率が高くなる傾向が確認された。これはエージング効果によりモジュール内に含まれる緑色セルの出力が、設置後に向上したためと考えられる。これより、意匠性の求められる DSC において、単色、混色問わず、長期

的にも安定な利用が可能であるといえる。

3.4 制御方式が発電量に与える影響

図10に実証試験初期(期間:2013/6/30~12/31)におけるIVカーブトレサから得られるV_{pm}の日射強度依存性(12:00時点のデータ抜粋),図11,12,13に実証試験初期(期間:2013/6/30~12/31)における各制御方式での動作電圧の日射強度依存性(12:00時点のデータ抜粋)を示す。図10より,最大出力を得る最適な動作電圧は2V付近を示し,高日射域ではモジュール電圧の温度依存性により,V_{pm}の低下がみられる。各制御方式における動作電圧は図11,12,13に示すとおりであり,バラツキはあるものの,最適動作電圧である2V付近に達するまでの制御で,方式毎に異なる日射強度依存性がみられる。改造MPPT,市販MPPTともに低日射域で動作電圧が最適値から外れる要因としては,その動作自体に電力が必要であること,およびその動作性の影響があるためであり,一定の日射強度以上の領域で適切なMPPT動作モードに入ると,各制御方式特有の制御曲線に沿う形でMPPT制御を行っていることが確認される。特に改造MPPTでは市販MPPTに比べ,200~600W/m²の日射強度領域における動作電圧の改善が確認されている。一方,固定電圧に関しては,その動作電圧は設定値通りとなるため,低日射域でも最適動作電圧である2V付近の動作を示す。

図14に各制御方式におけるモジュール発電量の積算値を示す。前報⁴⁾では,設置から6ヶ月間(期間:2013/6/30~12/31)において,その低日射域での優位性により,固定電圧制御が比較的高い積算値を示すことを確認した。その後継続して積算値を取得したところ,IVカーブトレサから得られる最大出力では6ヶ月毎の積算値に変動がなく一定した出力を示したのに対し,改造MPPT,市販MPPTでは設置後6ヶ月以降に徐々に積算値の低下がみられた(固定電圧制御はモジュールのエラーに伴う出力低下)。ここで,積算値の低下要因としてモジュールの出力低下が疑われるが,試験終了後に改造MPPT,市販MPPTに接続されたモジュールを取外して性能測定した結果では,混色モジュールにおいて90%以上の性能保持率を示すなど,積算値の低下分に相当する出力低下は確認されていない。加えて同様の測定結果では,単色(赤)モジュールよりも混色

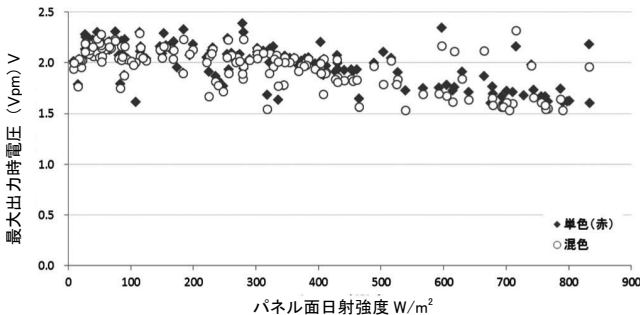


図10 V_{pm}の日射強度依存性(2013/6/30~12/31)

モジュールのほうが保持率が高い結果であったため,この積算値の低下現象は制御方式の影響によるものであると考えられる。

図15,16に実証試験末期(期間:2015/1/1~7/31)に

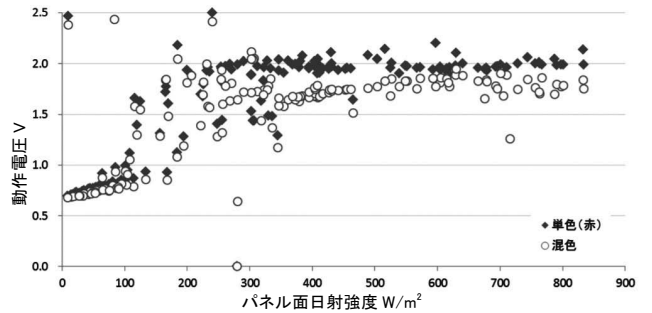


図11 動作電圧の日射強度依存性(改造MPPT)

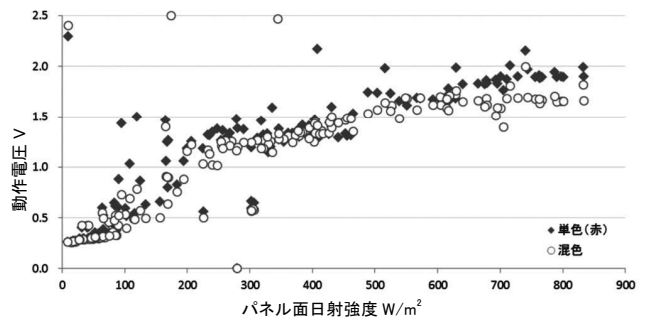


図12 動作電圧の日射強度依存性(市販MPPT)

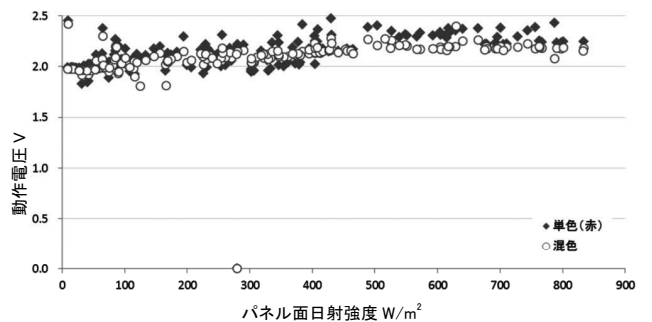


図13 動作電圧の日射強度依存性(固定電圧)

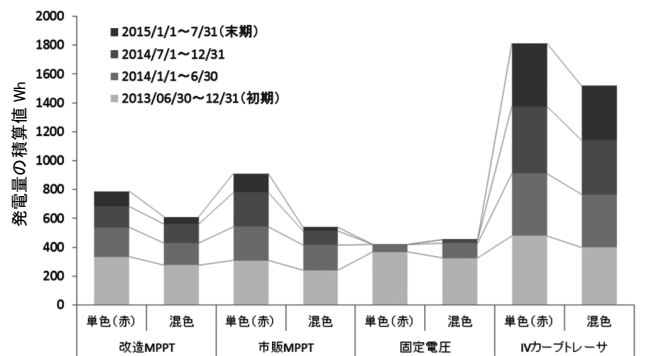


図14 モジュール発電量の積算値

おける、改造 MPPT、市販 MPPT の動作電圧の日射強度依存性 (12:00 時点のデータ抜粋) を示す。ともに、低日射域で動作電圧が最適値から外れていることは実証試験初期の傾向と同様であるが、実証試験末期では高日射域においても最適動作電圧に達しておらず、特に市販 MPPT では開放電圧 (2.5V) 付近を示し動作エラーとなる頻度が高くなっていることが確認される。また、各制御方式特有の制御曲線を示していないことから、実証試験末期では適切な MPPT 動作モードでの制御が行われなかった可能性が示唆される。

応答性を遅らせるよう変更を施した改造 MPPT では開放電圧付近を示す動作エラーの頻度が少なく、また、単色 (赤) モジュールに比べ出力の低い混色モジュールでより最適動作電圧から外れる傾向がみられる。この動作不安定は、系全体の出力低下に伴い独立電源用の蓄電池への充電電圧が不足し制御が不安定になった、または、セル自体の応答性の変化、出力低下に伴い最大電力点の追従が困難に

なったことにより生じた可能性が高いと考えられる。

図 14 に示すように、設置後 6 ヶ月以降の積算値の比較については制御の不安定性によるバラツキの影響が大きくなり、改造 MPPT、市販 MPPT に有意な差はみられない。しかし、その応答性を変更した改造 MPPT にて動作電圧の日射強度依存性に改善がみられていることから、さらに適切な改造を行うことにより長期的な応答性の変化にも対応できる可能性がある。DSC に MPPT 制御を適用する際には、その応答性を考慮した使用が望まれる。他方、充電電圧の不足については DSC の実質的な問題とは異なり、モジュールの出力を上げる、接続する蓄電池の電圧を下げる等の対応により回避可能である。

図 17 に実証試験末期 (期間: 2015/1/1 ~ 7/31) における IV カーブトレーサから得られる V_{pm} の日射強度依存性 (12:00 時点のデータ抜粋) を示す。図 10 と比較して、2 年間の屋外実証試験により特に低日射域での V_{pm} 低下がみられる。固定電圧制御を使用する場合、その動作電圧は設定値通りとなるため、長期的に固定された値となる。DSC の V_{pm} および開放電圧 (V_{oc}) が経時的に低下すると、ある時点で開放電圧が設定値を下回る可能性が考えられる。設置から 6 ヶ月間において、固定電圧制御は比較的高い積算値を示したが、直列接続されたセルの一部のエラーの影響によりモジュールとしての電圧および電流が低下し、実証試験末期では出力の低下がみられた。固定電圧制御を使用する場合は、経時的、およびエラー等による電圧低下分を十分に考慮して設定値を決定するか、都度、最適動作電圧に合わせて設定値を変更することで長期的に出力を得ることが可能になると考えられる。

3.5 設置環境と制御方式

水平面日射強度、およびパネル面日射強度とその日射時間の頻出ヒストグラム、および出力占有率の試算結果を、図 18、19 に示す。なお、日射時間率は式 (2)、出力占有率は式 (3) に示す値として定義し、推定出力は各日射強度に比例した定数を用いた。

$$\text{日射時間率 [\%]} = \frac{\text{ある日射強度域の発生時間 [h]}}{\text{全測定時間 [h]}} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{出力占有率 [\%]} = \frac{\text{ある日射強度域の発生時間 [h]} \times \text{推定出力 [W]}}{\text{全測定時間分の推定出力の和 [Wh]}} \times 100 \quad (3)$$

鳥根県松江市の実証試験期間における $10 \sim 1200 \text{ W/m}^2$ の日射強度域での日射時間率頻度ヒストグラムから、水平面日射強度では 900 W/m^2 まで幅広く分布しているのに対し、パネル面日射強度では低日射強度で高い値を示し、 800 W/m^2 にかけて緩やかな低下がみられる。太陽電池は日射強度が強いほど出力は大きくなるが、積算発電量は出力と時間との積によって決定されるため、日射時間の頻度分布についても考慮する必要がある。水平面設置では、日射時間の分布から得られる出力占有率の最大が日射強度 800

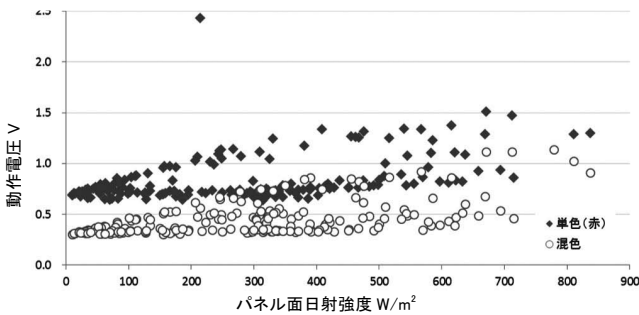


図 15 動作電圧の日射強度依存性 (改造 MPPT)

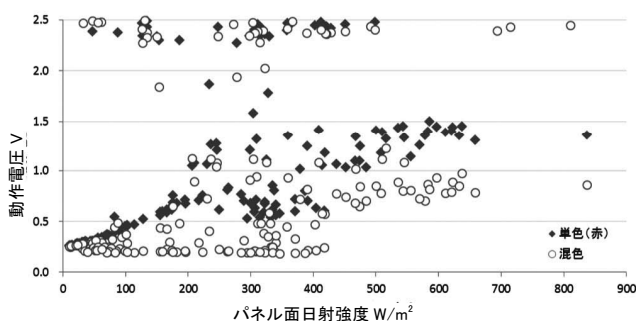


図 16 動作電圧の日射強度依存性 (市販 MPPT)

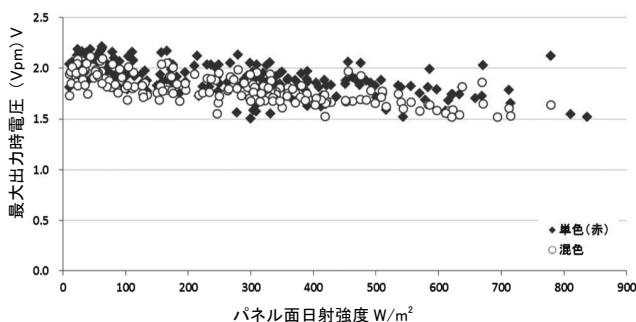


図 17 V_{pm} の日射強度依存性 (2015/1/1 ~ 7/31)

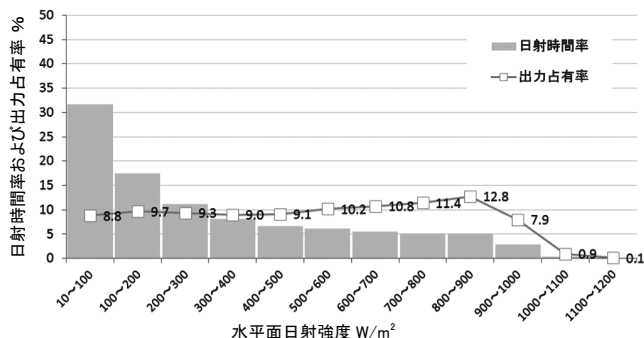


図18 水平面日射強度と日照時間率および出力占有率

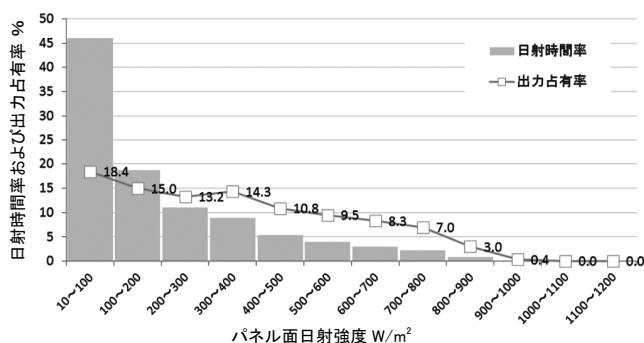


図19 パネル面日射強度と日照時間率および出力占有率

～900W/m²の範囲にあり、その出力の50%以上が500W/m²以上の日射強度域で得られる計算となる。それに対し、垂直設置（パネル面日射）では、その出力占有率の最大は日射強度100W/m²以下の低日射域であり、500W/m²以上の日射強度域での出力は全体の30%未滿しかなく、出力の70%以上が500W/m²以下の低日射域で得られる計算となる。これより、パネル設置角度により出力が得られやすい日射強度域が異なることが示唆され、一般に使用される高日射強度向けの太陽電池制御システムをそのまま多方面に適用することは必ずしも適当ではないといえる。特に今回のような垂直設置のパネルに適する制御方式としては、より低日射域で優位な動作特性を有するものが望ましいと考えられる。

3.6 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い、本実証試験で使用したモジュールは十分な性能安定性を有していることを確認した。使用した制御機器とDSCの組み合わせにおいては、方式毎に異なる日射強度依存性がみられた。低日射域では固定電圧制御が優位であり、より高日射域では改造MPPT、さらに高日射域では市販MPPTが優位であった。6ヶ月程度の短期的な積算値では固定電圧制御が優位であり、今回の設置環境では低日射域での優位性が影響を与える結果となった。これは出力占有率からも裏付けられ、垂直設置パネルではより低日射域で優位な動作特性を有するものが望ましい結果となった。制御機器の長期的な動作に関しては、制御方式毎に異なる課題が確認され、それぞれモジュールの性能変化の影響を受けるものであった。

謝 辞

本報告は、国立研究開発法人新エネルギー・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端技術開発 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 TiO₂ 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. 08/09, p. 35-40.
- 4) 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, 大箱 伸次, 古川雅彦. 色素増感太陽電池の屋外実証試験. 島根県産業技術センター研究報告. 2015, no. 51, p. 17-21.