

太陽電池モジュールの出力分析

(太陽光スペクトル分布とステブラーロンスキー効果などによる出力の季節変化)

Output Analysis of Photovoltaic Modules

(Seasonal change of output affected by spectral solar radiation and Staebler-Wronski effect)

平田 陽一 *¹

Youichi HIRATA

谷 辰夫 *²

Tatsuo TANI

Abstract

The authors proposed output evaluation method "the spectral method" with allowance for spectral solar radiation to evaluate photovoltaic array output more precisely, and proved that the spectral method is available to evaluate annual cumulative output. The output of photovoltaic modules proved to change monthly affected by spectral solar radiation which varies with time, weather and season.

This study examined how spectral solar radiation and output of photovoltaic modules change with season when irradiance is fixed in the irradiance of 800W/m^2 . The measured output of photovoltaic module changes by 7% for polycrystalline silicon and by 27% for amorphous silicon in comparison with the conventional method value. The available spectral ratio changes by 3% for polycrystalline silicon solar cell and by 10% for amorphous silicon solar cell. Next, the output of photovoltaic module affected by the environmental factors; cell temperature, spectral solar radiation and Staebler - Wronski effect; were evaluated separately. As a result, the output of polycrystalline silicon photovoltaic module changes with cell temperature and spectral solar radiation by 17% and 7%. The output of amorphous silicon photovoltaic module change with cell temperature, spectral solar radiation and Staebler - Wronski effect by 6%, 22% and 7%. The seasonal output change by spectral solar radiation should be allowed to design photovoltaic power systems optimally.

Key Words; optimum design, photovoltaic modules, maximum output, cell temperature, spectral solar radiation, Staebler - Wronski effect

1. 緒言

太陽光発電システムの設計を行うには、太陽電池アレイの年間出力積算量を把握することが重要な要素となる。従来より、太陽電池の出力は変換効率を基に求められている。しかし、時間、天候、季節により太陽の位置や大気の状態が異なるため太陽光スペクトル分布が変化し、変換効率は必ずしも一定ではない。そこで筆者らは、より正確な出力評価を行うため太陽光スペクトルを考慮した出力評価法「スペクトル法」を提案し、スペクトル法が太陽電池アレイの年間の出力積算量の評価に有効であることを明らかにした。

本研究では特に季節に対して、日射強度をある値に固定した時に太陽光スペクトル分布と太陽電池モジュールの出力がどのように変化するかを調べた。そして、セル温度、太陽光スペクトル、ステブラーロンスキー効果の環境因子が太陽電池の出力に与える影響をそれ

ぞれ分離して評価した。

2. 測定装置と測定方法

2・1 測定装置

筆者らは本学屋上に、全天日射計（英弘精機、精密全天日射計 MS-801）、分光日射計（英弘精機、波長別全天日射計 MS-131WP）¹⁾、多結晶シリコン（K社、LA441J59）、アモルファスシリコン（S社、30F3）の太陽電池モジュール（以下、多結晶シリコン太陽電池モジュール、アモルファスシリコン太陽電池モジュールを多結晶Si、アモルファスSiと略記）、熱電対（太陽電池モジュールの裏面温度測定用）を 35.5° に傾斜させ真南に設置し、各種のデータを計測している。

原稿受付 平成6年9月12日

¹⁾東京理科大学工学部（東京都新宿区神楽坂1-3）大学院生、²⁾教授

図1には太陽電池出力評価システムを、図2には太陽電池を含む屋外の測定装置を示す。

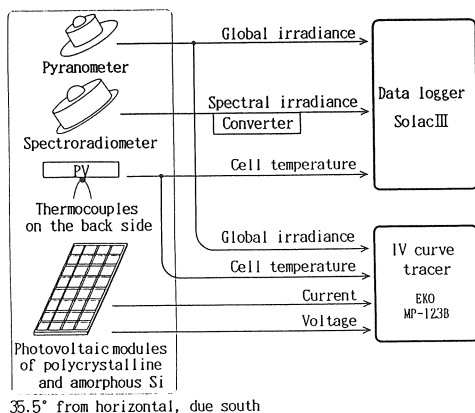


図1 太陽電池出力評価システム

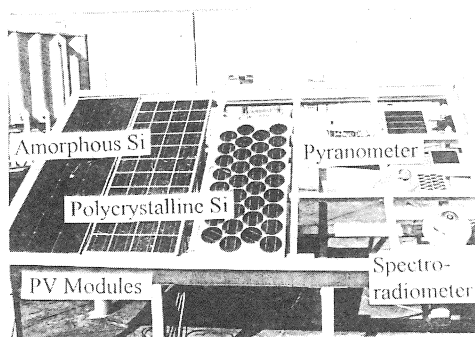


図2 太陽電池を含む屋外の測定装置

2・2 測定方法

まず、全天日射強度および各々の太陽電池モジュールの裏面温度（本論文ではこれをセル温度とした）、短絡電流、開放電圧、曲線因子、最大出力などの各種データの瞬時値が、パソコン制御のIVカーブトレーサ（英弘精機、IVカーブトレーサ、MP-123B）¹⁾より5分ごとに出力され、これらのデータを30分ごとに平均した値をデータ処理に用いている。また同時に、全天日射強度、表1に示すように6分割された波長帯別の日射強度、各モジュールのセル温度のデータが、30分ごとに30分間の平均値がデータロガーに自動記録されている。測定時間はIVカーブトレーサ、データロガーともに4時から19時30分で、これが毎日連続して行われる。

表2には測定中の2種類の太陽電池モジュールの定格を、図3には分光感度特性を示す。ただし、表2の

表1 分光日射計の測定波長帯

Channel	Wavelength band [nm]
1	305～ 395
2	395～ 495
3	495～ 590
4	590～ 695
5	695～ 850
6	850～2,800

表2 太陽電池モジュールの定格

太陽電池の種類	最大出力 P _{max} [W]	面積比率	変換効率比率
多結晶Si	57.9	1.00	1.00
アモルファスSi	21.0	0.91	0.40

日射強度 1.0 kW/m², AM 1.5, 素子温度25℃

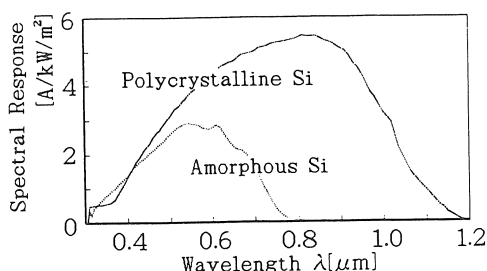


図3 太陽電池モジュールの分光感度特性²⁾

面積、変換効率は多結晶Siの面積、変換効率の値を1とした時の比率である。なお表2の値は1990年7月に、図3の値は1988年12月にソーラシミュレータを用いて取得した値である²⁾。ソーラシミュレータは（財）日本品質保証機構（long pulse型）の装置を使用した。

測定に用いている太陽電池は、都心部での実際の使用条件下における出力を正確に評価するため、表面ガラスの洗浄は行っていない。また日射計は、日射強度を正確に測定するため、ガラスドーム部の洗浄を継続して行っている。

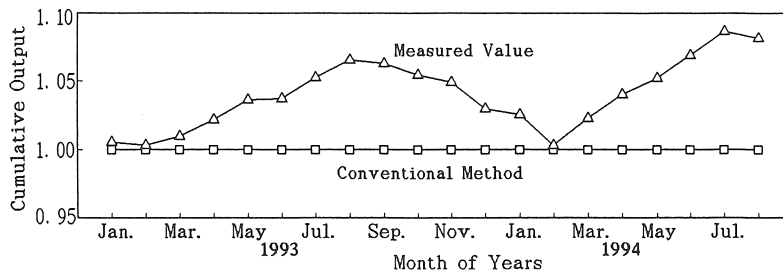
3. 従来までの評価法と測定値

3・1 従来法¹⁾

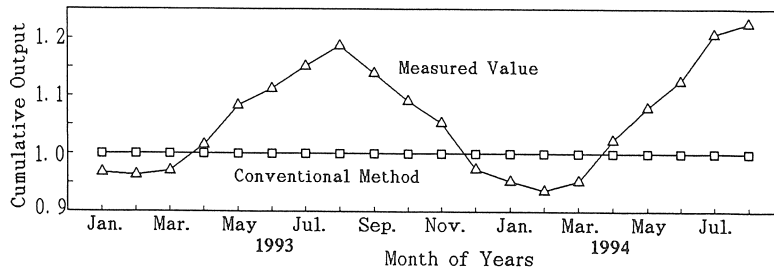
従来より太陽電池の出力は、日射強度に変換効率をかけた値をセル温度により補正して求められている。本研究では、この値に汚れによる出力の減少を考慮し、その評価法を従来法と名付けた。この評価法による計算方法を(1)、(2)式に示す。

$$P_{max} = P_{25} [1 + \alpha (t - 25)] \quad (1)$$

$$P_{25} = E * A * \eta * D \quad (2)$$



(a)多結晶Si



(b)アモルファスSi

図4 各月の従来法と測定値の出力積算量

ここで、 P_{25} : 25℃の最大出力[W], α : 最大出力の温度補正係数 [$1/^\circ\text{C}$], t : セル温度 [$^\circ\text{C}$] である。ただし α の値は、結晶系では $-0.5\% / ^\circ\text{C}$ 、アモルファスSiでは $-0.2\% / ^\circ\text{C}$ とされている³⁾。また、 E : 日射強度 [W/m^2], A : モジュール面積 [m^2], η : 変換効率 [%], D : 汚れによる出力の減少率である。 D の値は、多結晶Siで0.94, アモルファスSiで0.93とした⁴⁾。

3・2 各月の出力積算量

1993年1月～1994年8月の本学屋上の多結晶Si, アモルファスSi太陽電池出力の測定データのうち、日射強度が $750 \sim 850 \text{ W}/\text{m}^2$ のものを (今後 $750 \sim 850 \text{ W}/\text{m}^2$ を $800 \text{ W}/\text{m}^2$ と略記) 用いて、(1)(2)式の従来法により出力を求めた。そして、従来法の計算値と測定値の各月の出力積算量を求め、両者を比較した。図4には従来法の値を基準とした時の、両者の値の季節変化が示してある。図が示すように、日射強度とセル温度を考慮した従来法に対し、測定値は両太陽電池モジュールともに冬に最小で夏に最大となる季節変化を繰り返している。その季節変化の平均値は、冬の最小値を基準として多結晶Siでは7%, アモルファスSiでは27%である。

4. 太陽光スペクトル分布の季節変化

ここでは、1993年1月～1994年8月の本学屋上の太陽光スペクトル分布の測定データを分析し、季節に対して太陽光スペクトル分布がどのように変化するかを調べた。

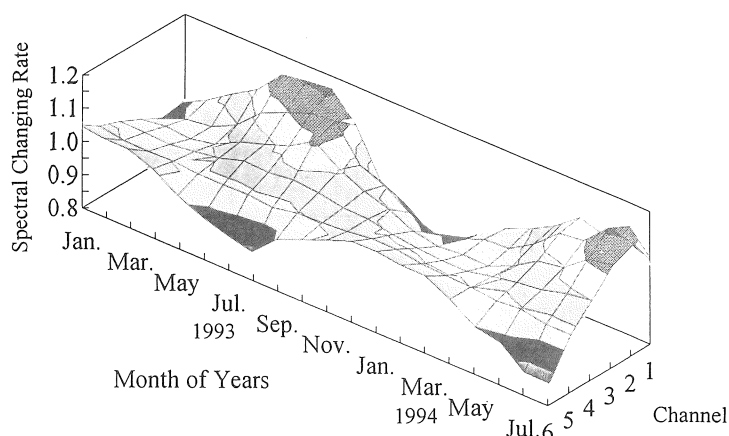
4・1 太陽光スペクトル分布の変化

太陽光スペクトル分布の季節変化を調べるため、分光変化率を求めた。分光変化率 χ_n ($n=1 \sim 6$) は、(3)式より求められる。分光変化率とは、各月のある日射強度の範囲の分光比率を年間の分光比率で割ったものである。

$$\chi_n = \frac{\sum_{i=1}^M Q_n / \sum_{i=1}^M E}{\sum_{i=1}^Y Q_n / \sum_{i=1}^Y E} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 χ_n は表1に示す波長帯の n チャネルの分光変化率、 Q_n は n チャネルの日射強度、 M , Y は分析に用いたある日射強度の範囲にある各月、年間の測定データ数である。

図5には、日射強度が $800 \text{ W}/\text{m}^2$ のときの各波長帯の分光変化率の季節変化を示す。ここで分光変化率の計算に用いた年間の分光比率は、1993年の1年間の測定データを用いている。図5が示すように、各波長帯

図5 各月に対する各波長帯の分光変化率(800 W/m^2)

の分光変化率は季節に対し様々に変化しており、夏期に短波長側の、冬期に長波長側の増加が確認される。

4・2 有効スペクトル比¹⁾の変化

ここでは、太陽電池からみた太陽光スペクトル分布の季節変化を調べるため、有効スペクトル比を求めた。有効スペクトルとは太陽電池の分光感度の波長帯に入射する日射量で、有効スペクトル比とは全天日射量に対する有効スペクトルの比率である。太陽電池モジュールの有効スペクトル Asr (Available Spectral Radiation)¹⁾ は、多結晶 Si 、アモルファス Si それぞれ(4a), (4b)式で求めることができる。

$$\begin{cases} Asr = \sum_{n=1}^5 Q_n + 0.561 Q_6 & \text{.....(4a)} \\ Asr = \sum_{n=1}^4 Q_n + 0.849 Q_5 & \text{.....(4b)} \end{cases}$$

また、ある日射強度の各月の有効スペクトル比 AE は、次式で求められる。

$$AE = \frac{\sum_{i=1}^M Asr}{\sum_{i=1}^M E} \text{..... (5)}$$

これより、日射強度が 800 W/m^2 , 400 W/m^2 (日射強度が $350 \sim 450 \text{ W/m}^2$ の測定データのことで、 400 W/m^2 と略記した。以後も 400 W/m^2 と略記)の各月の有効スペクトル比を計算した。その分析結果を図6に示す。図6が示すように、多結晶 Si 、アモルファス Si の年間を通した各月の有効スペクトル比は、冬に最小で夏に最大となる季節変化を繰り返している。 800 W/m^2 のとき、季節変化の平均値は冬の最小値を基準として、多結晶 Si で3%, アモルファス Si で10%である。また、 400 W/m^2 では 800 W/m^2 とほぼ同様に季節に対して変化しており、有効スペクトル比の季節変化の平均値は多結晶 Si 、アモルファス Si で4%, 13%である。これより、アモルファス Si は日射強度が 800 W/m^2 から 400 W/m^2 に減少するにつれ、有効スペクトル比の季節変化がさらに3%増加している。

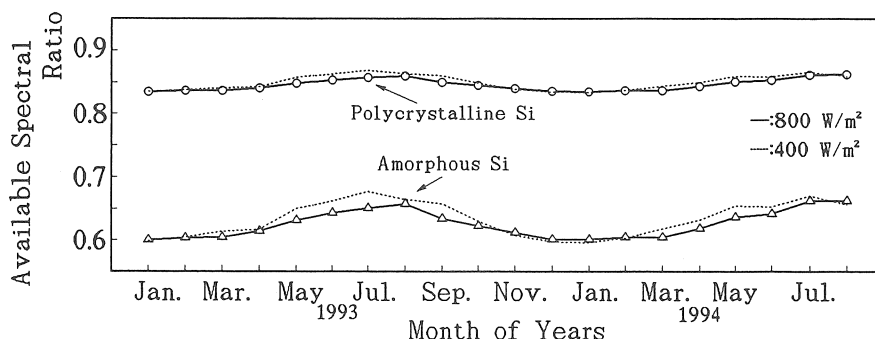


図6 各月の有効スペクトル比

5. 各環境因子に対する 太陽電池モジュール出力の季節変化

ここでは、前に述べた日射強度が800 W/㎡と400 W/㎡の有効スペクトル比の分析結果が、ほぼ同様に季節に対して変化したこと、800 W/㎡に焦点を当てて各環境因子に対する太陽電池モジュール出力の季節変化を調べた。なお分析には、1993年1月～1994年8月の本学屋上の太陽電池モジュールの測定データを用いた。

5・1 環境因子に対する影響量の分離方法（セル温度）

まず、測定値をもとにセル温度の影響によるものとそれ以外の影響によるものに分離し、基準状態（基準光スペクトル、セル温度25℃）とのずれを分析する。セル温度以外の環境因子は、太陽光スペクトル分布、アモルファスSiではこれとステプラー-ロンスキー効果⁵⁾（以後、太陽光スペクトル分布などと略記）の影響が考えられるので、そのように仮定した。(6)式は、各環境因子に対する各月のある日射強度に対する出力積算量をそれぞれ求めたもので、 P_0 、 P_m 、 P_s の式中にある0.5は30分を意味している。 P_0 は汚れによる出力低下を考慮した定格値、 P_m は測定値、 P_s は P_m をセル温度25℃に補正したものである。

$$\begin{aligned} P_0 &= 0.5 \sum_{i=1}^M E_i \eta \cdot D \cdot A \\ P_m &= 0.5 \sum_{i=1}^M p_m \quad \dots\dots\dots (6) \\ P_s &= 0.5 \sum_{i=1}^M p_{25} \end{aligned}$$

ただし、 P_0 、 P_m 、 P_s の単位は〔Wh〕、 p_m は最大出力の測定値、 p_{25} は(1)式に従い p_m をセル温度25℃の値に補正したものである。

これら P_0 、 P_m 、 P_s の関係を、夏期を想定して図7に表す。 P_0 は基準光スペクトル、セル温度25℃のもとでの出力であるから、そのように位置する。 P_m は

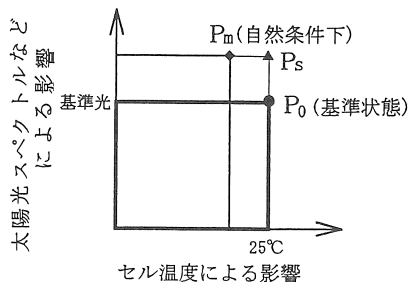


図7 環境因子に対する出力の影響

太陽光スペクトル分布の有効スペクトル比が基準光より大きく、セル温度25℃以上と仮定すると、セル温度の影響により出力は減少し、太陽光スペクトル分布の影響により出力は増加するため図7のように位置する。 P_s は P_m をセル温度25℃に補正したものであるから、図7のように位置する。図7に示す P_0 、 P_m 、 P_s の関係から、測定値、セル温度、太陽光スペクトル分布などの影響による出力の基準状態とのずれ M 、 C 、 S は(7)式で求められる。

$$\begin{aligned} M &= P_m / P_0 \\ C &= P_m / P_s \quad \dots\dots\dots (7) \\ S &= P_s / P_0 \end{aligned}$$

5・2 環境因子に対する影響量の分離方法（分光補正）

また、アモルファスSiでは P_s に含まれる太陽光スペクトル分布とステプラー-ロンスキー効果による影響を、それぞれ次のように分離する。分光日射強度の測定データを用いて、基準光に対する太陽光スペクトル分布の影響による出力への変化の比率を、分光補正係数 μ ⁶⁾として次式のように求める。ここでは、太陽光スペクトル分布による短絡電流の変化が最大出力の変化に比例すると仮定して計算している。

$$\begin{aligned} I_{sc} &= \sum_{n=1}^5 Q_n \cdot R_n \quad \dots\dots\dots (8) \\ \mu &= \frac{I_{sc}}{I_0 \cdot (E/1000)} \end{aligned}$$

ただし、 I_{sc} は短絡電流の計算値¹⁾、 I_0 は短絡電流の定格値、 R_n ($n=1 \sim 5$)は図3に示すアモルファスSiの分光感度特性を表1に示す各波長帯ごとに平均した値¹⁾であり、年間を通して同じ値を用いた。

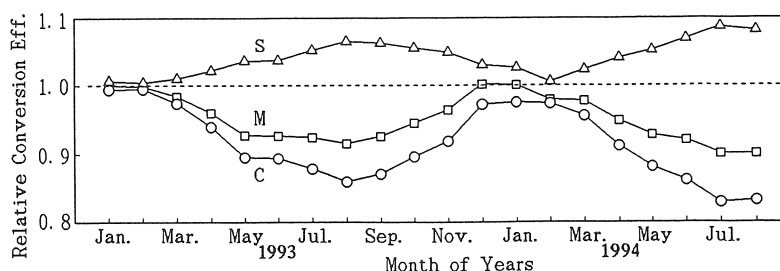
これより、ステプラー-ロンスキー効果の影響量 P_{st} と太陽光スペクトル分布による出力の変化量 ΔP_{sp} は(9)式で求められる。ここでは、 p_{25} を分光補正した P_{st} はステプラー-ロンスキー効果によるもので、 P_s と P_{st} の差は太陽光スペクトル分布による変化量と考えられるので、そのように仮定した。

$$\begin{aligned} P_{st} &= \sum_{i=1}^N (p_{25} / \mu) \cdot 0.5 \quad \dots\dots\dots (9) \\ \Delta P_{sp} &= P_s - P_{st} \end{aligned}$$

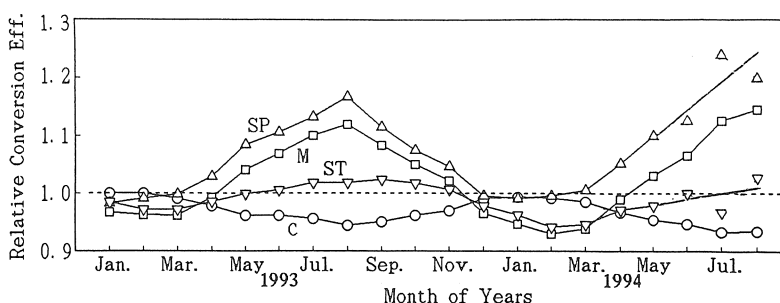
ただし、 P_{st} の単位は〔Wh〕である。

太陽光スペクトル分布の変化による出力とステプラー-ロンスキー効果の変化による出力の基準状態とのずれ SP 、 ST は(10)式より求められる。

$$\begin{aligned} SP &= 1 + \Delta P_{sp} / P_0 \quad \dots\dots\dots (10) \\ ST &= P_{st} / P_0 \end{aligned}$$



(a)多結晶Si (M:測定値, C:セル温度, S:太陽光スペクトル分布)



(b)アモルファスSi (M:測定値, C:セル温度, SP:太陽光スペクトル分布, ST:ステプラーロンスキー効果)

図8 各環境因子に対する出力の季節変化

5・3 各月の影響量の変化

(7), (10)式より、M, C, S (アモルファスSiではさらにSP, ST)の季節変化を、日射強度が 800 W/m^2 の測定データについて調べた結果を図8(a), (b)に示す。図8(a)が示すように、多結晶Siの年間を通じた測定値、セル温度、太陽光スペクトル分布の季節変化の平均値は、それぞれ夏、冬の最小値を基準として10%, 17%, 7%である。これより、セル温度による影響が大きいことが分かる。また図8(b)が示すように、アモルファスSiの年間を通じた測定値、セル温度、太陽光スペクトル分布、ステプラーロンスキー効果の季節変化の平均値は、それぞれ最小値を基準として20%, 6%, 22%, 7%である。これより、太陽光スペクトル分布による影響が大きいことが分かる。また、日射強度が 400 W/m^2 の測定データについてP₀を基準とした測定値Mの季節変化の平均値を調べた結果、25%となった。これは、4.2節で述べたように、 800 W/m^2 に比べ主に太陽光スペクトル分布の影響が増加しているためと考えられる。

6. 結 論

筆者らが提案したスペクトル法から、太陽電池モジュールの出力が太陽光スペクトル分布の影響を受けて各月で変化することが明らかになった。本研究では、特に季節に対して、日射強度をある値に固定したとき太陽光スペクトル分布と太陽電池の出力がどのように変化するかを調べた。そして、セル温度、太陽光スペクトル分布、ステプラーロンスキー効果の環境因子が出力に与える影響をそれぞれ分離して評価した。その結果以下のことがわかった。

- (1)太陽電池出力の測定値は従来法による値を基準とした時、日射強度が 800 W/m^2 では多結晶Si, アモルファスSiとも冬に最小値、夏に最大値をとるように変化している。その季節変化は、多結晶Siで7%, アモルファスSiで27%である。
- (2)同様に 800 W/m^2 で、有効スペクトル比は冬に最小値、夏に最大値となる季節変化をしている。その変化は、多結晶Siで3%, アモルファスSiで10%である。 400 W/m^2 では両太陽電池とも 800 W/m^2 と同様の季節変化を示しているが、アモルファスSiでは季節変化がさらに3%増加している。

(3)日射強度が 800 W/m^2 のとき、各環境因子に対する太陽電池出力の季節変化を調べた結果、多結晶Siでは測定値、セル温度、太陽光スペクトル分布の季節変化が10%、17%、7%である。これより、セル温度による影響が大きいことが分かる。アモルファスSiでは、測定値、セル温度、太陽光スペクトル分布、ステプラーロンスキー効果の季節変化が20%、6%、22%、7%である。これより、太陽光スペクトル分布による影響が大きいことが分かる。また、 400 W/m^2 では測定値の季節変化は25%で、 800 W/m^2 より主に太陽光スペクトル分布の影響が増加しているためと考えられる。

以上のことから、太陽光発電システムの設計を行う際には、太陽光スペクトル分布による太陽電池出力の季節変化を考慮する必要がある。

謝 辞

本研究を行うにあたり、御協力いただいた(株)日本品質保証機構、ならびに(株)三洋電機の関係各位に深謝する次第である。

文 献

- 1) 平田・谷：「太陽光スペクトル分布を考慮した太陽電池モジュールの出力評価」，平成5年度電気学会論文誌D，Vol.113-D，No.9 (1993.9)
- 2) 谷・杉田・原田：「都心部における太陽電池モジュールのエネルギー的評価」，昭和63年度日本太陽エネルギー学会日本風力エネルギー協会合同研究発表会，No.9 (1988.12)
- 3) 辻：「太陽電池電源の設計法」，日本太陽エネルギー学会，太陽エネルギー，P.31～36，Vol.9，No.6 (1983.11)
- 桑野・武岡：「太陽電池ガイドブック」，パワー社，P.27 (1990.9.10 初版)
- 4) 郡・平田・谷・中井：「太陽電池モジュールカバーガラスの透過率（汚れが出力に及ぼす影響）」，平成5年度日本太陽エネルギー学会日本風力エネルギー協会合同研究発表会，(1993.12)
- 5) 電気学会太陽電池調査専門委員会編：「太陽電池ハンドブック」，電気学会，コロナ社，P.326 (1985.7)
- 6) 電気学会太陽電池調査専門委員会編：「太陽電池ハンドブック」，電気学会，コロナ社，P.224 (1985.7)