

環境因子に対する太陽電池モジュール出力の変化

(CdS/CdTe, 二層タンデムアモルファスシリコン太陽電池の出力の変化)
Variation of Photovoltaic Module Output with Environmental Factors
(Variation of Photovoltaic Module Output
for CdS/CdTe and Two-Layer Tandem Amorphous Silicon)

平田 陽一 *¹
Youichi HIRATA

谷 辰夫 *²
Tatsuo TANI

Abstract

In this paper, it was analyzed how the output of photovoltaic modules for CdS/CdTe and two-layer tandem amorphous silicon varies with environmental factors. First, there was a precise examination of spectral solar radiation. Consequently, it was found that the ratio of spectral solar radiation available for solar cell utilization, to global solar radiation changes from season to season. It varied, from 9% for CdS/CdTe cells, to 13% for two-layer tandem amorphous silicon cells, throughout one year. The ratio of natural sunlight to standard sunlight available spectral ratio is 1.05 for both solar cells. Hence solar cell output are effected by spectral solar radiation with season and a year. Next, output of photovoltaic modules were examined. The output was calculated by the conventional output evaluation method using irradiance and cell temperature. This calculated value and the subsequently measured value were accumulated and the two values compared for month and in a year. The output ratio of CdS/CdTe was found to change by 5%, while that of two-layer tandem amorphous silicon varied by 16%. This is because photovoltaic module output are effected by spectral solar radiation and also Staebler-Wronski effect for two-layer tandem amorphous silicon. Then the annual output ratio of CdS/CdTe is obtained by 1.04 and that of two-layer tandem amorphous silicon is calculated by 1.00. Hence the seasonal variation of measured output are averaged for a year, it appears that the measured value does not differ from the conventional method value so much.

The conversion efficiency varies with irradiance. The accumulated output is effected by this factor. The effect is 2% for CdS/CdTe and -6% for two-layer tandem amorphous silicon from January to March in 1994.

Key words : optimum design, evaluation method, photovoltaic modules, spectral solar radiation, maximum output, accumulated output

1. 緒言

太陽光発電システムを設計する際には、太陽電池アレイの年間出力積算量を正確に把握することが重要な要素になる。そこで筆者らは、より正確に太陽電池の出力を評価するため太陽光スペクトル分布を考慮した出力評価法(スペクトル法)を提案し、多結晶シリコン、アモルファスシリコンにおいてスペクトル法が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¹⁾。また、環境因子に対する影響も分離し、各月、年間で評価した²⁾。

そこで本研究では、さらにCdS/CdTe, 二層タンデムアモルファスシリコンについてもスペクトル法が有効であることを確認するための予備考察として、環境因

子に対する太陽電池の出力の分析を行った。本論文ではまず、太陽電池モジュールからみた太陽光スペクトル分布について各月、年間で調べた。次に、従来から行われている日射量とセル温度を用いた太陽電池の出力評価法(従来法)を用いて出力を求め、その値と測定値を各月、年間で比較した。そして、従来法による値と測定値の違いについて考察した。その結果、太陽光スペクトル分布や日射強度の環境因子に対して出力が変化していることを明らかにしている。

原稿受付 平成7年1月6日

*1 東京理科大学(東京都新宿区神楽坂1-3)工学部大学院生

*2 同大学教授

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⁾，CdS/CdTe（M社），二層タンデム型アモルファスシリコン（F社）（以後、CdS/CdTe，二層タンデム型アモルファスシリコン太陽電池モジュールをCdS/CdTe，二層タンデムa-Siと略記）の太陽電池モジュール，熱電対（太陽電池モジュールの裏面に貼付したもので、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。太陽電池モジュールの裏面は大気にさらされている。図1には太陽電池を含む屋外の測定装置を示す。

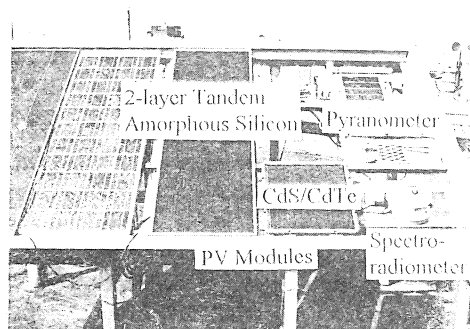


図1 太陽電池を含む屋外の測定装置

2.2 測定方法

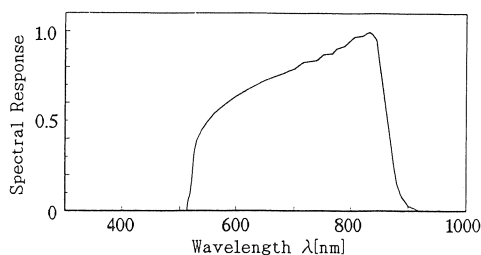
まず、全天日射強度および各々の太陽電池モジュールの裏面温度（本論文ではこれをセル温度とした），短絡電流，開放電圧，最大出力，曲線因子などの各種データの瞬時値が、パソコン制御のI Vカーブトレーサ（英弘精機，I Vカーブトレーサ，MP-123B）より5分ごとに出力され、これらのデータを30分ごとに平均した値をデータ処理に用いている。また同時に、全天日射強度，表1に示すように6分割された波長帯別の日射強度，各モジュールのセル温度のデータが、30分ごとに30分間の平均値がデータロガーに自動記録されている。測定時間はI Vカーブトレーサ，データロガーともに4時00分から19時30分で、これが毎日連続して行われる。図2(a)，(b)には、本研究に用いた太陽電池モジュールの分光感度特性を示す³⁾⁴⁾。

本研究で分析に使用した実測データのうちの1993年の日射積算量は1190kWh/m²・yearで、東京HASP用標準気象データ（1971年～1980年，傾斜角30°）の傾斜面全天日射量は1310kWh/m²・year⁵⁾である。この差は主

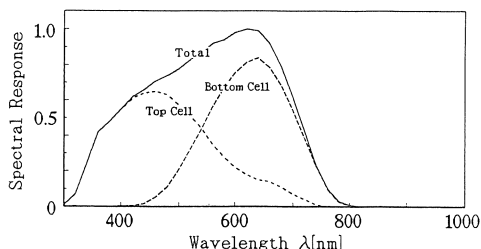
に、ビルなどの日影、測定器の停止により計測されなかったものである。

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



(a) CdS/CdTe



(b) 二層タンデムa-Si

図2 太陽電池モジュールの分光感度特性

2.3 太陽電池モジュールの温度係数

太陽電池モジュールの出力分析には温度係数が必要のため、CdS/CdTe，二層タンデムa-Siの温度係数を測定データより求めた。その選択範囲は、1994年1～3月の日射強度が850W/m²以上で、有効スペクトル比¹⁾がCdS/CdTeでは0.519～0.524，二層タンデムa-Siでは0.588～0.592である。有効スペクトル比とは全天日射量に対する太陽電池の分光感度帯に入射する日射量の比率である。有効スペクトル比とその算出方法については、後に3.1節で詳しく述べる。本研究では、この範囲の測定データにおける太陽光スペクトル分布の平均値を標準光と名付けた。これらの測定データは、光源が安定したほぼ同じ太陽光スペクトル分布で、二層タンデムa-Siではさらにステプラーロンスキー効果によ

る変換効率の変化が少ない値であると考えられる。計算の結果、温度係数はCdS/CdTeでは $-0.24\%/^{\circ}\text{C}$ 、二層タンデムa-Siでは $-0.17\%/^{\circ}\text{C}$ となった。

2・4 太陽電池モジュールの出力

2・3節と同じ範囲の測定データを用いて、標準光、日射強度 1.0 kW/m^2 、セル温度 25°C における太陽電池モジュールの出力と変換効率を求めた。その結果を表2に示す。ただし、変換効率比、面積比は二層タンデムa-Siの値に対する比率を表している。本研究では、太陽電池モジュールの実使用条件下における出力の評価をするため、太陽電池モジュールの表面洗浄は行っていない。そのため、表2の値は汚れによる出力低下を含んでいる。本学屋上で計測した、ガラス表面に付着した汚れの影響による太陽電池の出力低下率は $6\sim 7\%^{6)}$ である。

表2 太陽電池モジュールの出力

太陽電池	CdS/CdTe	二層タンデムa-Si
最大出力	4.71	32.0
変換効率比	0.53	1.00
面積比	0.28	1.00

(標準光、日射強度 1.0 kW/m^2 、セル温度 25°C)

3. 太陽光スペクトル分布

ここでは1993年1月～1994年12月の太陽光スペクトル分布の測定データを用いて、太陽電池からみた太陽光スペクトル分布の季節変化について調べた。

3・1 有効スペクトル比

ここでは、各太陽電池から見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¹⁾を用いた。有効スペクトルとは太陽電池の分光感度帯に入射する日射量で、有効スペクトル比とは全日射量

に対する有効スペクトルの比率であるとした。

CdS/CdTe、二層タンデムa-Si太陽電池の有効スペクトル $E_{\lambda}[\text{kW/m}^2]$ は、それぞれ(1a)、(1b)式で求められる。

$$E_{\lambda}=0.792 \cdot E_g + \sum_{n=4}^5 E_n + 0.176 \cdot E_6 \cdots \cdots (1a)$$

$$E_{\lambda}=\sum_{n=1}^4 E_n + 0.733 \cdot E_g \cdots \cdots (1b)$$

ただし、 $E_n(n=1\sim 6)$ は表1に示すCHnの各波長帯別の日射強度 $[\text{kW/m}^2]$ である。また、(1a)式の E_g と E_6 、(1b)式の E_g にかかる係数はこのように求めた。太陽電池の分光感度帯は、CdS/CdTeではCH3の途中からCH6の途中まで、二層タンデムa-SiではCH1からCH5の途中までにあたるので、CdS/CdTeでは E_g と E_6 、二層タンデムa-Siでは E_g に占める有効スペクトルの割合を基準光スペクトル分布を用いて計算し、それぞれの係数とした。

また、各月、年間の有効スペクトル比 R_{λ} は(2)式で求められる。

$$R_{\lambda}=\int_0^{\tau} E_{\lambda} dt / \int_0^{\tau} E dt \cdots \cdots (2)$$

ただし、各月の R_{λ} を求めるとき $\tau=\tau_m$ 、年間の R_{λ} を求めるとき $\tau=\tau_y$ で、 τ_m は各月の、 τ_y は年間の日照時間[h]である。

3・2 各月、年間の有効スペクトル比

測定データより、各月の太陽光の有効スペクトル比を求めた。その結果を図3に示す。同図には、標準光の有効スペクトル比も示してある。図3より、両太陽電池の有効スペクトル比は冬期に最小、夏期に最大となる季節変化を繰り返している。最小値を基準としてCdS/CdTeは9%、二層タンデムa-Siは13%である。

また、1993年10月～1994年9月の1年間の太陽光の有効スペクトル比を求め、標準光の有効スペクトル比と比較した。その結果を表3に示す。両太陽電池とも標準光の有効スペクトル比より太陽光の有効スペクトル比が大きく、その比率はともに1.05である。これは

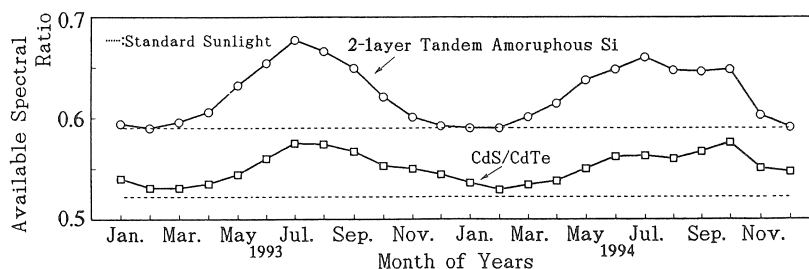


図3 各月の有効スペクトル比

2・3節で述べたように、年間の測定値で有効スペクトル比の小さい方の1994年1～3月の測定データをもとに、標準光が定められているからである。

このように、両太陽電池は季節変化、年間において太陽光スペクトル分布の影響を受けることが分かる。

表3 年間の有効スペクトル比

有効スペクトル比	CdS/CdTe	二層タンデムa-Si
太陽光	0.548	0.621
標準光	0.522	0.590
太陽光/標準光	1.05	1.05

3・3 分光変化率

ここでは、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。分光変化率とは、各月の分光比率を年間の分光比率で割ったものである。分光変化率 C_n は次式より求められる。

$$R_m = \int_0^{\tau_m} E_n dt / \int_0^{\tau_m} E dt \dots\dots\dots (3a)$$

$$R_y = \int_0^{\tau_y} E_n dt / \int_0^{\tau_y} E dt \dots\dots\dots (3b)$$

$$C_n = R_m / R_y \dots\dots\dots (3c)$$

ただし、 R_m は各月の分光比率、 R_y は年間の分光比率、 $C_n(n=1\sim6)$ はチャンネルnの各月、各波長帯の分光変化率である。

図4には、各波長帯に対する分光変化率の季節変化を示す。図4が示すように各波長帯の分光変化率は季節に対し様々に変化し、春期に短波長側の、夏期に3ch(495～590nm)の波長帯の、冬期に長波長側の増加が確認できる。また、図2(b)が示すように、二層

タンデムa-Siではおよそ590～650nmの波長に分光感度のピークが存在するため、夏期に太陽光スペクトル分布との整合性が比較的良好と考えられる。

4. 太陽電池モジュールのセル温度に対する出力特性

ここでは、1993年10月～1994年9月の770～830W/m²の範囲(以後、800W/m²と略記)の測定データを用いて、CdS/CdTe、二層タンデムa-Siのセル温度に対する最大出力、短絡電流を調べた。この様子を図5(a),(b)に示す。図中には回帰分析より求めた近似直線も示してある。図中に示す最大出力の温度係数は、両太陽電池モジュールともに2・3節で求めた値よりも大きく、二層タンデムa-Siでは正の値を示している。

これは、セル温度以外の環境因子、つまり太陽光スペクトル分布と二層タンデムa-Siではステプラー・ロンスキー効果(以降、太陽光スペクトル分布などと略記)が影響しているためと考えられる。つまり、このセル温度特性は測定データであるため、セル温度の上昇により出力が減少するという特性の他に、季節に対する太陽光スペクトル分布などの変化が出力に与える影響も含まれている。二層タンデムa-Siでは、太陽光スペクトル分布などの影響がセル温度の影響よりも強く出ていると推測される。

5. 従来までの出力評価法と測定値の比較

5・1 従来法

従来より太陽電池の出力は、日射強度に変換効率を

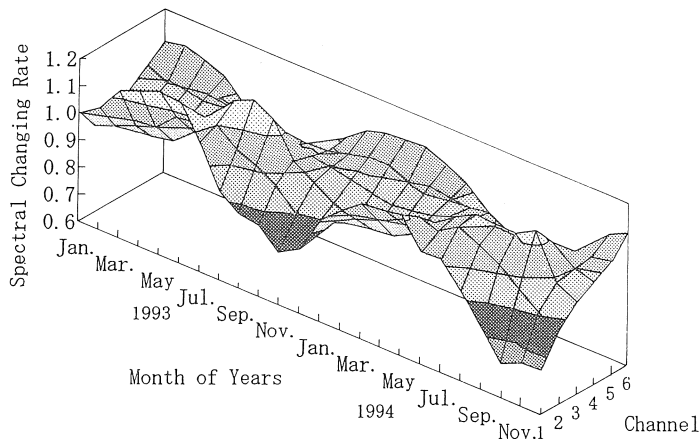


図4 季節、各波長帯に対する分光変化率

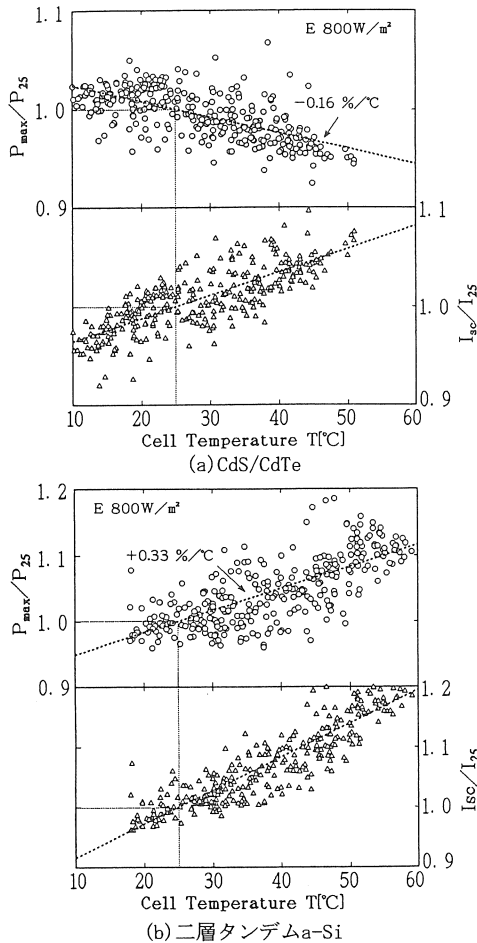


図5 セル温度に対する最大出力，短絡電流

かけた値をセル温度補正して求められている。本研究では、この評価法を従来法¹⁾と名付けた。この評価法による計算方法を(4a)，(4b)式に示す。

$$P_{25} = E \cdot A \cdot \eta \dots \dots \dots (4a)$$

$$P_{max} = P_{25} \cdot [1 + \alpha \cdot (T - 25)] \dots \dots \dots (4b)$$

ただし、 E :日射強度[kW/m²]， A :モジュール面積[m²]， η :100:変換効率[%]， P_{25} :25℃の出力[W]， α :温度補正係数[1/℃]， T :セル温度[℃]， P_{max} : T ℃の出力[W]，である。また、 A ， η は表2に示す値を， α は2・3節で求めた値を用いた。

5.2 各月の出力積算量

ここでは、1993年10月～1994年9月の日射データと太陽電池出力の測定データを用いて、従来法による値と測定値の比較を行った。まず、従来法により出力を求め、従来法の計算値と測定値の出力積算量を各月、年間で求め、両者を比較した。表4には、各月、年間の日射量，二層タンデムa-Siの加重平均セル温度⁷⁾，従来法による出力積算量，その値に対する測定値の積算量の比率を示す。加重平均セル温度は、日射量で重み付けしたセル温度と解釈できる。各月、年間の加重平均セル温度 T_r [℃]は(5a)，(5b)式より求めた。

$$I_g = \int_0^r E \, dt \dots \dots \dots (5a)$$

$$T_r = \frac{\int_0^r T \cdot E \, dt}{I_g} \dots \dots \dots (5b)$$

ただし、 I_g は各月，年間の積算日射量[kWh/m²・month]，[kWh/m²・year]である。

表4 各月，年間の日射量，出力積算量

年月	日射量 [kWh/m ²]	加重平均 セル温度[℃]	CdS/CdTe		二層タンデムa-Si	
			従来法	測定値[比率]	従来法	測定値[比率]
9310	92.0	34.2	3.07	1.052	5.57	1.047
9311	81.0	29.4	2.63	1.049	4.94	0.980
9312	80.1	23.8	2.76	1.040	4.94	0.940
9401	92.1	21.1	3.16	1.016	5.70	0.932
9402	113.5	24.0	3.91	1.013	7.00	0.942
9403	115.3	25.3	3.87	1.015	7.09	0.939
9404	139.0	32.8	4.55	1.025	8.44	0.984
9405	130.3	35.8	4.23	1.030	7.86	1.009
9406	98.8	38.5	3.16	1.053	5.93	1.034
9407	125.4	45.0	3.95	1.046	7.45	1.075
9408	126.8	47.0	4.01	1.047	7.50	1.072
9409	84.8	42.3	2.66	1.065	5.06	1.076
年間	1279.1	33.8	41.97	1.036	77.49	1.003

(日射量，従来法の単位は、各月で[kWh/m²・month]，年間で[kWh/m²・year])

以後、従来法による出力積算量に対する従来法による出力積算量の比率を従来法の出力積算量比率、また従来法による出力積算量に対する測定値の積算量の比率を測定値の出力積算量比率と表記する。

表4より、図6には各月の日射量、加重平均セル温度を、図7(a)、(b)には両太陽電池モジュールにおける各月の従来法、測定値の出力積算量比率を示す。また、図7(a)には年間の測定値の出力積算量比率も点線で示してある。図7(b)は、年間の測定値の出力積算量比率が従来法の出力積算量比率にほぼ一致したため、点線を示していない。

各月の測定値の出力積算量比率は、図7(a)、(b)が示すように最小値に対して測定値はCdS/CdTeで5%、二層タンデムa-Siで16%の季節変化がある。これは、太陽光スペクトル分布と、二層タンデムa-Siではステプラー・ロンスキー効果⁸⁾の季節に対する変化が影響していると考えられる。

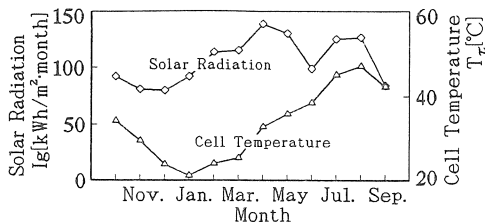
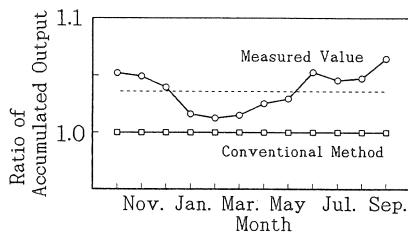
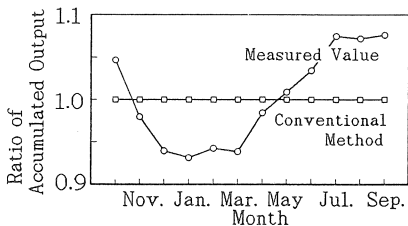


図6 各月の日射量と加重平均セル温度



(a) CdS/CdTe



(b) 二層タンデムa-Si

図7 各月の出力積算量比率

5.3 年間の出力積算量

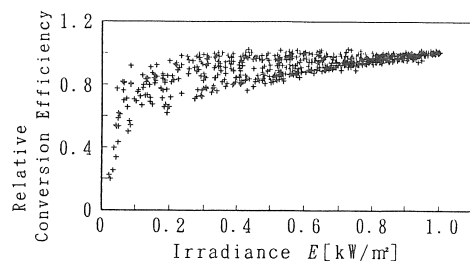
表4に示す年間の測定値の出力積算量比率は、CdS/CdTeで1.04、二層タンデムa-Siで1.00である。各月の測定値の出力積算量比率が冬期に最小、夏期に最大となる変化をしていても、年間でその変化は平均化されるため、従来法による値と測定値の差はあまり大きくならないと考えられる。

6. 考察

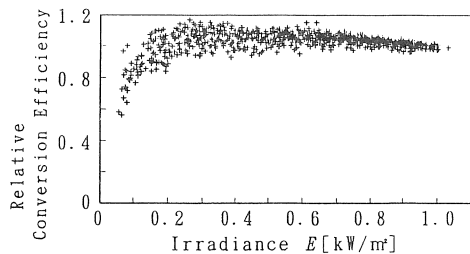
ここでは、1994年1~3月において従来法による値と測定値が異なる原因について考察してみる。

本研究では、太陽電池の変換効率は2.4節で求めたように1994年1~3月、850W/m²以上、標準光の測定データを基準にして決められている。しかし、両太陽電池モジュールともに1~3月において、測定値の出力積算量比率は従来法の出力積算量比率に対して異なっている。平均して、CdS/CdTeで2%、二層タンデムa-Siで-6%である。

そこで、この原因を調べるため、1994年1~3月の測定データにおける日射強度に対するセル温度25℃の変換効率を図8(a)、(b)に示す。測定値のセル温度25℃への補正は(4b)式に従った。また、相対変換効率は表2の値に対する比率を示している。この図が示すように、変換効率は日射強度に対して一定ではなく、低い



(a) CdS/CdTe



(b) 二層タンデムa-Si

図8 日射強度に対する変換効率

日射強度で減少している⁹⁾。CdS/CdTeでは、 $1.0\text{ kW}/\text{m}^2$ の値に対し $0.3\text{ kW}/\text{m}^2$ 付近では増加している。また、二層タンデムa-Siでは $0.3\text{ kW}/\text{m}^2$ 付近で減少している。この変換効率の日射強度に対する依存性が、従来法による値と測定値が異なる主な原因と考えられる。

7. 結論

本研究では、これまで分析を行ってきた多結晶Si、アモルファスSiと同様に、CdS/CdTe、二層タンデムa-Siについて環境因子に対する出力の変化を調べるため、太陽光スペクトル分布の季節変化、太陽電池の出力特性の分析を行った。また、太陽電池モジュールの出力を従来法により求め、その値を測定値と各月、年間で比較し、考察を行った。その結果以下のことがわかった。

(1) 両太陽電池モジュールの有効スペクトル比は冬期に最小、夏期に最大となる変化を繰り返しており、その季節変化は最小値を基準としてCdS/CdTeで9%、二層タンデムa-Siで13%である。また、年間の標準光の有効スペクトル比に対する太陽光の有効スペクトル比は、両太陽電池モジュールとも1.05である。このように、太陽電池の出力は季節変化および年間において太陽光スペクトル分布の影響を受ける。

(2) 各月の測定値の出力積算量比率は、最小値に対してCdS/CdTeで5%、二層タンデムa-Siで16%季節に対して変化している。これは、太陽光スペクトル分布と、二層タンデムa-Siではステプラー・ロンスキー効果の季節に対する変化が影響していると考えられる。

(3) 年間の測定値の出力積算量比率は、CdS/CdTeで1.04、二層タンデムa-Siで1.00である。各月の測定値の出力積算量比率が両太陽電池モジュールとも冬期に最小、夏期に最大となる変化をしていても、年間でその変化は平均化されるため、従来法による値と測定値の差はあまり大きくならないと考えられる。

(4) 日射強度に対し変換効率は一定ではなく変化しており、出力積算量はこの影響を受ける。その影響量は、1994年1～3月のCdS/CdTeで2%、二層タンデムa-Siで-6%である。

謝辞

本研究を行うにあたり、御協力頂いた㈱富士電機総合研究所ならびに㈱松下電池工業の関係各位に深謝する次第である。

参考文献

- 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) 平田・谷：「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プラー・ロンスキー効果などによる出力の季節変化）」、太陽エネルギー, Vol. 21, No. 2 (1995. 3)
- 3) 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. 146 (1985. 7)
- 4) 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. 103 (1985. 7)
- 5) 太陽エネルギー利用ハンドブック編集委員会編：「太陽エネルギー利用ハンドブック」、日本太陽エネルギー学会、P. 39 (1985. 3)
- 6) 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. 22, P. 85 (1993. 12)
- 7) 横内・湯川・黒川：「太陽光発電システムの代表温度と温度補正係数」、平成6年電気学会全国大会講演論文集[12], No. 1679, P. 12-216 (1994. 3)
- 8) 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)
- 9) 浜川・桑野：「太陽エネルギー工学」、倍風館、P. 233 (1994. 5)