

環境因子の変化に対する 太陽電池モジュールの出力特性

The characteristics of PV modules output considered the environmental factors

小林 誠*¹
Makoto KOBAYASHI

谷 辰 夫*²
Tatsuo TANI

Abstract

For evaluating the electrical production of photovoltaic modules (PV modules), solar radiation, conversion efficiency of solar cell and cell temperature are very important factors.

In order to clarify the relationship between the environmental conditions, that is, solar radiation, the spectral distribution of solar radiation, wind velocity, ambient temperature and the output of PV modules, the various environmental data and the output of two kinds of PV modules, amorphous and poly-crystalline have been measured in our Kagurazaka Campus, Tokyo, from March in 1991 to February in 1992.

Then it was found that the influence of wind velocity on cell temperature was effective from 0 to 3% and the output of amorphous silicon PV module was related with the spectral distribution of solar radiation clearly.

Key Words: Photovoltaic module, Environmental factors, Spectral distribution, Spectral response

1. はじめに

太陽光発電システムの最適設計を行うには、システムの発電量を予め算出する必要があり、その際、設置点における日射特性、太陽電池の変換効率、太陽電池動作時のセル温度が重要な要素となる。従来、太陽電池アレイの発電量の算出は、セル温度25℃の下での標準日射照射時の変換効率と外気温度に30℃程度の温度を加算したセル温度から見積もるのが一般的であった¹⁾。しかし、太陽電池の変換効率は季節、天候、時刻によって変化する太陽光のスペクトル分布などによっても変化する。また、セル温度は日射強度、外気温度のみならず風速にも大きく依存する²⁾³⁾⁴⁾。最適な太陽光発電システムの設計に当たっては、設置地点の日射強度、外気温度はもとより風速、太陽光スペクトル分布などの環境因子を十分考慮して太陽電池アレイの発電量を算出することが肝要である。

筆者らは、太陽光発電システムの最適設計法の確立を目的として、都心部のビル屋上に太陽電池モジュール

ル、気象観測装置を設置し、日射強度、外気温度、風速、太陽光スペクトルなどの環境因子と太陽電池モジュール出力の測定を行っている。

本論文ではまず、太陽電池モジュールをモデル化して上記環境因子と太陽電池モジュール出力の関係を解析し、測定データによりこの解析が妥当であることを示した。次いで、この解析結果をもとに太陽電池モジュールの年間発電量を算出し、測定データと比較した。さらに、太陽光スペクトル分布の変化に対する太陽電池モジュールの出力関係を定量的に求め考察してある。

原稿受付 平成4年12月21日

*1 東京理科大学工学部 大学院生

Faculty of Engineering, Science University
of Tokyo, Master of Engineering

*2 東京理科大学工学部 教授

Faculty of Engineering, Science University
of Tokyo, Professor

2. 測定装置と測定方法

筆者らは、東京理科大学9号館屋上（地上高約40m）に2種類の太陽電池モジュール（774777Si、多結晶Si）と気象観測装置を方位真南、傾斜角35.5度に設置し、各種データの測定を行っている。表1に実験で用いた太陽電池モジュールの仕様を、図1に太陽電池モジュール評価システムの概略を示す。太陽電池モジュールと同一傾斜面上に、全天日射計（英弘精機 MS-801、以下英弘と略記）と分光日射計（英弘 MS-B1WP）を設置し、モジュールに入射する太陽光の日射特性を測定している。分光日射計は全天日射計により測定される全天日射強度（波長域305~2800nm）を6波長帯に分割し、測定するための装置で、波長帯は表2のように区分されている。モジュール近傍には風速計（英弘 MA-070S）と熱電対が設置されており、風速と外気温度の測定を行っている。また、太陽電池モジュールの表裏面にアルミテープで熱電対を接着し、モジュールの表面温度、裏面温度を測定している（本論文ではこの裏面温度を太陽電池のセル温度とした）。以上の測定データは、データロガー（英弘 MP-090）とI-Vカーブトレーサー（英弘 MP-123P）の2台の測定装置により予め決められた測定間隔で自動的に取り込まれる。データロガーでは10秒間隔でデータを取り込み、30分平均した値をFDライターに転送し、フロッピーディスクに記録している。一方、I-Vカーブトレーサーでは5分間隔で全天日射強度、裏面温度、電流、電圧を測定し、同

表1 太陽電池モジュールの諸特性

PV module	A-Si	P-Si
P _{max} [W]	24.9	59.3
V _{pmax} [V]	28.7	20.3
I _{pmax} [A]	0.87	2.92
V _{oc} [V]	38.7	25.8
I _{sc} [A]	1.09	3.10
Area [m ²]	0.494	0.544

（測定条件 100mW/cm², AM=1.5, 25℃）

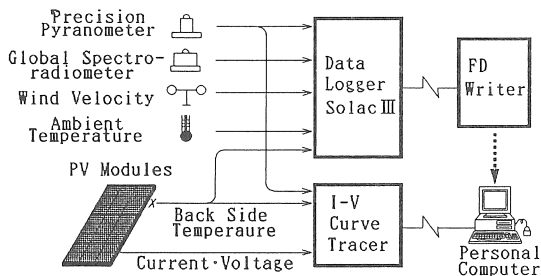


図1 太陽電池モジュール評価システム

表2 分光日射計の測定波長帯

channel	wavelength [nm]
CH1	305~ 395
CH2	395~ 495
CH3	495~ 590
CH4	590~ 695
CH5	695~ 850
CH6	850~2800

時にその時の最大出力（P_{max}）、短絡電流（I_{sc}）、開放電圧（V_{oc}）、最適電流（I_{pmax}）、最適電圧（V_{pmax}）、曲線因子（FF）等を算出し、ハードディスクに記録している。

3. 環境因子に対する太陽電池モジュールの温度解析

太陽電池モジュールを構成するセルの温度は、日射強度、風速、外気温度に複雑に関係し、その出力に影響を与える。本論文では、これらの関係を定量的に把握するために太陽電池モジュールをモデル化し、解析した。図2は解析に用いた太陽電池モジュールのモデル図であり、このモデルの定常状態におけるエネルギー収支は次式で表される。

$$\tau \cdot \beta \cdot S \cdot \Phi - U_r \cdot S \cdot (T_c - T_a) - P = 0 \dots \dots \textcircled{1}$$

ここで、

τ : 前面ガラスの透過率

β : 太陽電池モジュールの吸収率

S : 太陽電池モジュールの面積 [m²]

Φ : 日射強度 [W/m²]

T_c : セル温度 [℃]

T_a : 外気温度 [℃]

U_r : 熱損失係数 [W/m²℃]

P : 太陽電池の出力 [W]

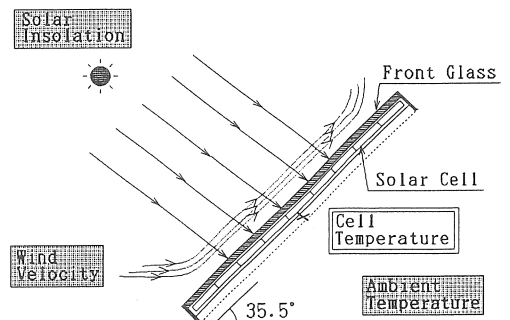


図2 太陽電池モジュールのモデル図（断面）

式①の第1項は太陽電池モジュールに入射する太陽エネルギー、第2項はモジュールから外部への損失エネルギー、第3項は太陽電池により変換される電気エネルギーを表している。なお U_r 、 P についてはさらに次式が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} U_r &= 2 \{ h w + \sigma (T_c + T_a) (T_c^2 + T_a^2) / g \} \\ g &= \{ \epsilon_p + 0.0425 N (1 - \epsilon_p)^{-1} \} \\ &\quad + \{ (2N + f - 1) / \epsilon_g \} - N \quad \dots \textcircled{2} \\ f &= 1.0 - 0.04 h w + 5.0 \times 10^{-4} h w^2 \\ h w &= 5.7 + 3.8 W \end{aligned} \right\}$$

$$P = \eta \cdot S \cdot \Phi \{ 1 + \alpha (T_c - 25) \} \dots \textcircled{3}$$

ここで、

- σ : スティファン・ボルツマン定数
- ϵ_p : プレートの放射率
- ϵ_g : ガラスの放射率
- α : 温度変化係数 [$1/^\circ\text{C}$]
- N : ガラスカバーの数
- $h w$: 風速による熱損失係数 [$\text{W}/\text{m}^2\text{C}$]
- W : 風速 [m/s]
- η : 太陽電池の変換効率

式②は平板型集熱器に適用される関係式を基本にし、太陽電池モジュールに適用した⁵⁾。なお、式③の太陽

電池モジュールの変換効率 η は太陽電池モジュールの種類によってことなり、しかも季節によっても変化するため図3に示すような季節別特性、すなわち各季節の日射積算量と出力積算量から算出した値を使用した。図3はアモルファス太陽電池モジュールの測定データであり、図中の各データは式③によりセル温度 25°C 時の値に温度補正されている。

4. 太陽光スペクトルの分布特性

太陽光のスペクトル分布は緯度、季節、時刻等により異なることが知られている。ここでは1991年3月から1992年2月の1年間について季節による太陽光スペクトルの分布特性を取得した。(以後、季節を春期(3~5月)、夏期(6~8月)、秋期(9~11月)、冬期(12~2月)のように区分する。)

各月の全天日射積算量を図4に、その分光比を図5に示す。ここで分光比とは各月の全天日射積算量を基準としたときに、各チャンネルの日射積算量が占める比率を意味している。図5よりCH2~4(395~695nm)の比率は夏期に増加し冬期に減少することがわかる。一方、CH5~6(695~2800nm)は夏期に減少し冬期に増加する傾向にある。全体に占める比率が常に5%以下のCH1を除外するとCH3の変化が最も著しく、年間を通じて約36%の変動が認められた。その他のチャンネルについてはCH2が32%、CH4、CH5、CH6がそれぞれ13%、12%、

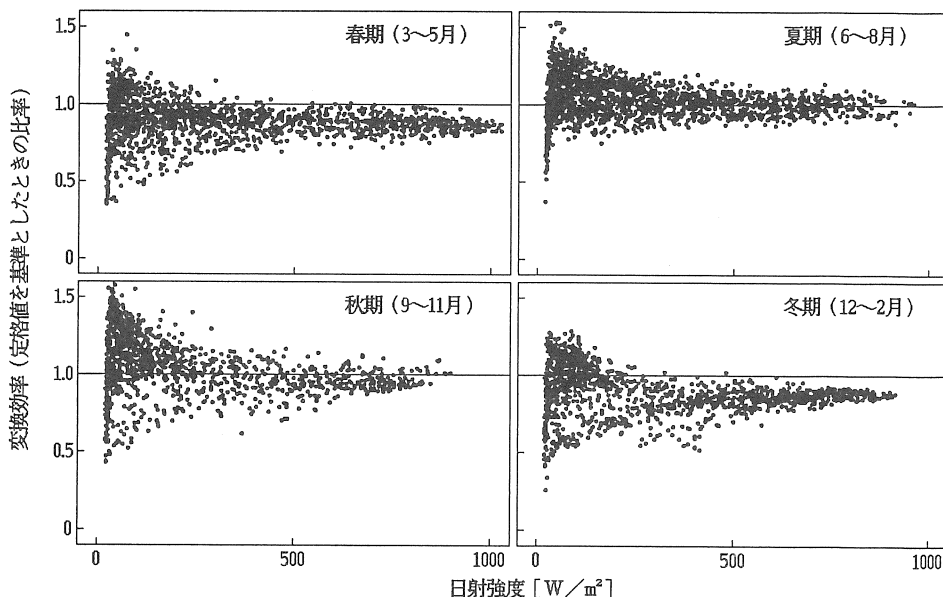


図3 アモルファス太陽電池モジュールの変換効率(1991年3月~1992年2月)
(各データは式③によりセル温度 25°C の値に温度補正されている)

30%程度であった。以上の結果からわかるように太陽光のスペクトル分布は夏期には短波長成分(395~695nm)の比率が増加し、冬期には長波長成分(695~2800nm)の比率が増加する傾向にある。これは大気による太陽光と吸収・散乱とエアマスや大気中の水蒸気量の季節変化からほぼ説明できる。すなわち、大気中の空気分子や浮遊塵埃による吸収・散乱に伴う減衰は短波長域(紫外、可視域)ほど一般に大きく影響し、エアマスは季節的には夏期に減少し冬期に増大する。また、水蒸気による吸収・散乱に伴う減衰は主に長波長域(赤外域)で生じ、大気中の水蒸気量は夏期に増加、冬期に減少する傾向にあるからである。その他にもCO₂、O₂、O₃などによりある波長域の光が吸収・散乱され減衰するが、上述の要因と比較するとその影響は十分小さいものと思われる。

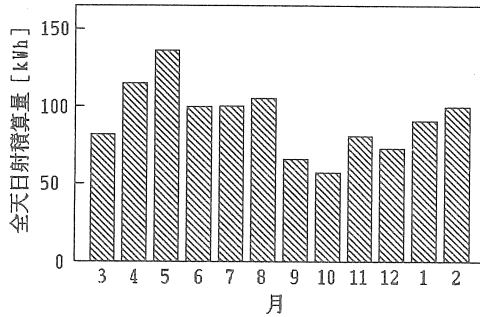


図4 月別全天日射積算量
(1991年3月~1992年2月)

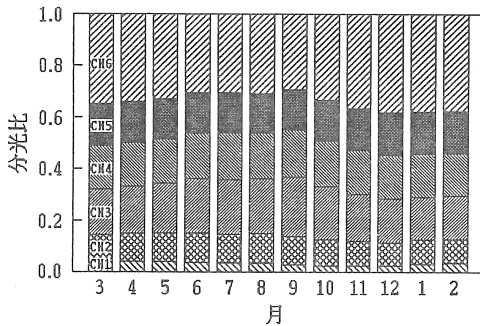


図5 月別分光比
(1991年3月~1992年2月)

5. 環境因子に対する太陽電池モジュールの特性

5-1. 環境因子に対するセル温度の特性

図6に、風速を一定としたときの日射強度に対するセル温度の特性を示す。図の横軸は日射強度、縦軸は外気温度(Ta)に対するセル温度(Tc)の温度上昇値(ΔT)に対応している。図中の実線は式①~③によ

る計算結果、各プロットはアモルファスSiの測定データである。この例では風速1m/s、2m/s、4m/sについて図示してある。図より、セル温度は日射強度の増加に伴い直線的に上昇する傾向にあり、風速が大きいほど日射強度に対する勾配は小さくなるのがわかる。外気温度に対する温度上昇値は日射強度が800W/m²の場合、風速1m/sの時18℃、2m/s、4m/sの時それぞれ13℃、10℃程度となった。次に日射強度を一定としたときの風速に対するセル温度の特性を図7に示す。この例では日射強度300W/m²、500W/m²、800W/m²について図示してある。図より、風速が小さいほど温度勾配が大きく、風速3m/s程度で十分な冷却効果が得られることがわかる。日射強度が800W/m²の場合、風速が1m/sから3m/sに変化したときの温度低下は6℃、3m/sから5m/sに変化したときのそれは3℃程度となった。なお、温度上昇値の計算結果に比べ測定データにかなりのばらつきが認められるが、これは主に風向の違いに起因するものと思われる。以上の結果から、温度上昇値、日射強度、風速の関係を図示すると図8のようになる。

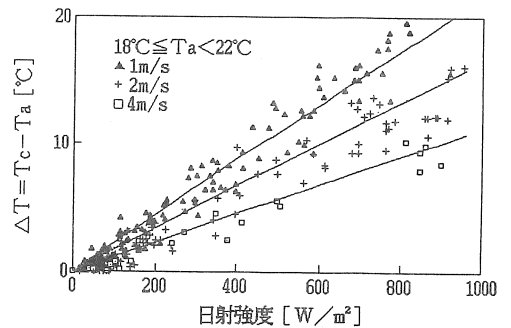


図6 日射強度に対するセル温度の特性

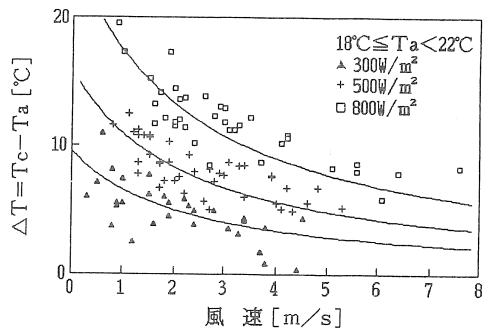


図7 風速に対するセル温度の特性

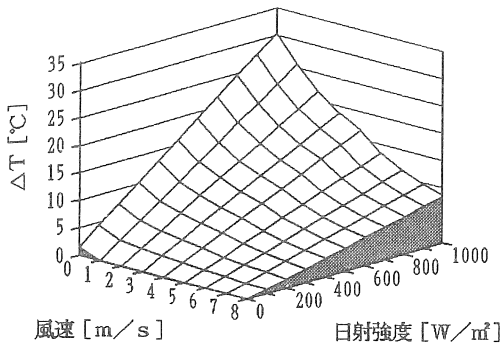


図8 ΔT, 日射強度, 風速の関係

5-2. セル温度に対する出力特性

アモルファスSiおよび多結晶Siの出力とセル温度の関係を図9、図10に示す。両図のデータは日射強度800W/m²時の値であり、ここでは1991年3月、5月、7月の測定データをプロットしてある。図9より、アモルファスSiの出力は夏期に近づくに従い増加する傾向にあることがわかる。一方、月毎の特性に注目すると、3月と7月において出力はセル温度の上昇に伴い減少する傾向が見られる。式③より3月、5月、7月の温度変化係数α [°C⁻¹]を計算するとそれぞれ-0.001、0.001、-0.004となった。次に図10の多結晶Siを見ると、3月から7月にかけて出力は減少する傾向にあり、各月のデータはほぼ同一直線上に分布していることがわかる。また、アモルファス太陽電池に比べ温度勾配が大きく、式③より3月、5月、7月のαを求めるとそれぞれ-0.006、-0.005、-0.005となった。なお、これらは3月、5月、7月のデータであるが秋期、冬期のデータについてもその傾向は変わらなかった。

次に式③により、1991年3月から1992年2月の各月のαを求め比較した結果を図11に示す。ここでは日射強度700、800、900、1000W/m²についてαを算出した。なお、日射強度700W/m²未満についてはスペクトル分布の影響が無視できないと考え、除外した。また、データ数が30個以下の場合についても除外してある。図11より、多結晶Siでは若干のばらつきは認められるがαは季節によらずほぼ一定値をとることがわかる。αの平均値と標準偏差σを計算するとα=-0.005/°C、σ=0.001となった。一方、アモルファスSiを見るとαにかなりのばらつきが認められる。これは、図12に示すようにアモルファスSiの分光感度波長域が狭いために、時刻の違いによるスペクトル分布の相違や1ヶ月間に生じるスペクトル分布の変動が出力に影響するためではないかと考えられる。αの平均値と標準偏差σを計算すると、α=-0.001/°C、σ=0.002となった。

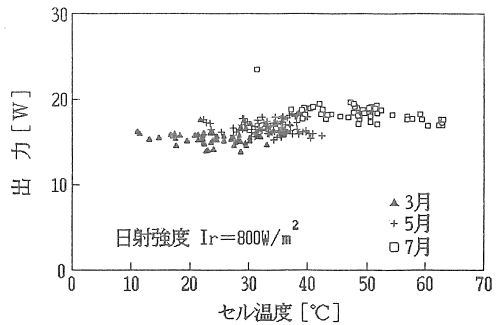


図9 セル温度と出力の関係 (アモルファスSi)

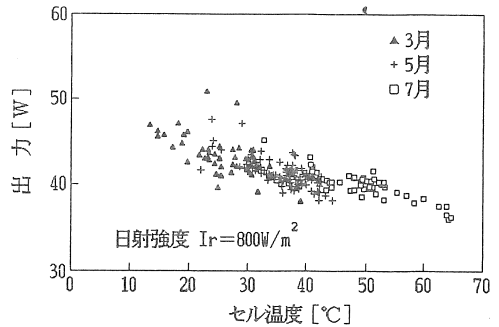


図10 セル温度と出力の関係 (多結晶Si)

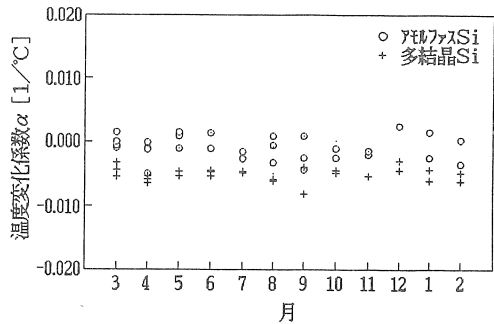


図11 太陽電池の温度変化係数

5-3. 太陽光のスペクトル分布に対する出力特性

太陽光のスペクトル分布が太陽電池モジュールの出力に影響を与えることが報告されている⁶⁾。筆者らは太陽光のスペクトル分布に対する出力特性を取得するため、次式を導入した。

$$K \equiv \frac{\int_{\lambda_2}^{\lambda_3} s(\lambda) c(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_4} s(\lambda) d\lambda} \times a \dots \dots \dots \textcircled{4}$$

ここで、

- λ : 波長 [nm]
- s(λ) : 太陽光のスペクトル曲線
- c(λ) : 太陽電池の分光感度曲線

$\lambda_1 \sim \lambda_2$: 太陽光の波長領域
 $\lambda_2 \sim \lambda_3$: 分光感度特性の波長領域
 a : 任意定数

測定に使用した太陽電池の分光感度特性を図12に示す。式④の分母は全天日射強度、分子は短絡電流に対応している。式④において任意定数 a の代わりに開放電圧と曲線因子を乗じると K は変換効率となるが、短絡電流に比べるとそれらの日射強度に対する依存性はかなり小さく、日射強度が $50W/m^2$ を上回るとその影響はさらに小さくなる。そこで、ここでは開放電圧と曲線因子が日射強度に対して常に一定であると仮定し、簡易的に任意定数 a を乗じて K を変換効率とみなした。以下の解析では K の相対的な値を用いている。

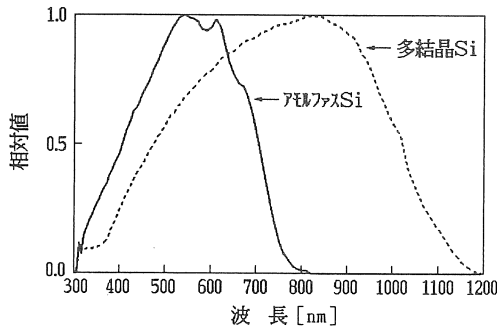


図12 太陽電池の分光感度特性

この K により、出力のスペクトル分布依存性について調べた結果を図13、図14に示す。データには1991年3月から1992年2月の測定データを使用した。両図の縦軸はセル温度の月平均値が約25℃である1991年5月の値を基準としたときの相対値である。また、図中の変換効率(実測値)は各月の全天日射積算量と出力積算量から算出した値、変換効率(補正值)は実測値をセル温度25℃時に換算した値である。温度補正には式③を用い、 α については5-2で求めた結果(各月の α の平均値)を適用した。図13に示すようにアモルファス Si の場合、明らかに K と変換効率(実測値)に季節的な変動が認められる。この変動は夏期に増加し、冬期に減少する傾向にあることがわかる。この例では1年を通じ変換効率に最大25%程度変動が認められた。6~8月の3ヶ月間を除外すると変換効率(実測値)と K の特性はよく一致しており、変換効率の実測値と温度補正值にほとんど差が見られないことから、アモルファス Si では季節によるスペクトル分布の変動が出力に大きく影響していると考えられる。なお、6~8月は K に変化は見られないが変換効率(実測値)は増加の傾向を示している。これは、アモルファス Si に特

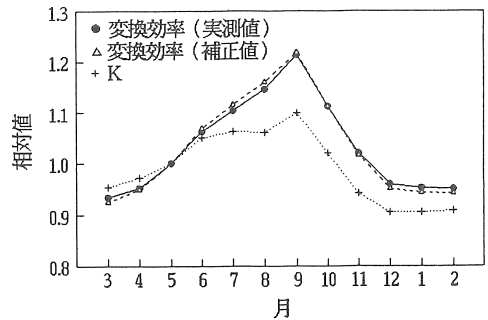


図13 Kと変換効率の季節変化(アモルファスSi)

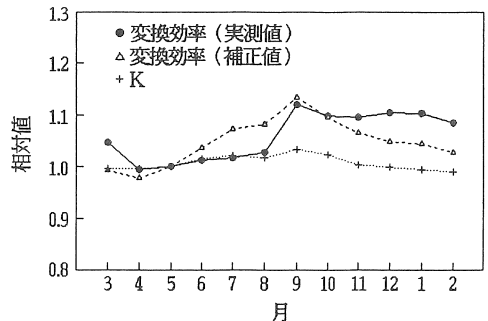


図14 Kと変換効率の季節変化(多結晶Si)

有の性質であるステーパー・ロンスキー効果による劣化の回復⁷⁾に起因するものと思われる。

次に、図14の多結晶 Si について見ると、変換効率(実測値)の季節による変動は認められるが、アモルファス Si の場合とは逆に、夏期に減少し冬期に増加する傾向を示している。この例では、1年を通じ10%程度の変動が認められた。次に変換効率(補正值)と K について見ると、ともに夏期に増加し冬期に減少する傾向が見られる。しかし、変換効率(補正值)が1年に17%程度変動するのに対し K の増減は3%程度とかなり小さな変化にとどまった。この原因としては、

- ①日射強度、温度変化等による太陽電池の分光感度の特性変化
- ②スペクトル分布の季節変動による開放電圧、曲線因子の特性変化

などの理由が考えられる。

6. 太陽電池モジュールの年間出力積算量の比較

アモルファス Si および多結晶 Si の年間出力積算量を式③を用い、次の2通りのセル温度補正法により算出した。なお、使用データ、諸変数については(2)~(4)のように設定した。

(1)セル温度 T_c の補正法

(A)従来法

外気温度に常に一定値を加えることによりセル温度を算出する。ここでは次式を使用する。

$$T_c = T_a + 25 [^{\circ}\text{C}] \dots\dots\dots \textcircled{5}$$

(B)風速、日射強度の影響を考慮した補正法

式①～③を用いセル温度を算出する。

〔以後、補正(A)による出力積算量を従来値、補正(B)による出力積算量を風速考慮値とする。〕

(2)使用データ

日射強度： Φ	→	東京理科大学9号館 屋上における測定値 (1991/3～1992/2)
外気温度： T_a		
風速： W		

(3)変換効率 η

アモルファスSi	4.22% [劣化率14%] 設置から1年半経過した時点の値
多結晶Si	10.90% 定格値

(測定条件：100W/m²，A.M.=1.5，25℃)

(4)温度変化係数 α

アモルファスSi	-0.001/℃
多結晶Si	-0.005/℃

以上の2通りのセル温度補正法により、1991年3月から1992年2月の各月の出力積算量を算出し、実測値と比較した結果を図15、図16に示す。両図の縦軸は従来値を基準としたときの相対値である。図15に示すように、アモルファスSiでは従来値と実測値が季節により著しく異なることがわかる。この例では、5～11月の間は実測値が従来値を上回り、9月に最大28%程度の差が認められた。反対に12～4月は実測値が従来値を下回り、3月に最大4%程度の差が生じた。一方、風速考慮値は1年を通じて常に1～2%従来値を上回ったが、従来値との顕著な違いは見られなかった。これに対し図16の多結晶Siでは、1年間を通して実測値が従来値を上回り、特に夏期、秋期に大きな差が生じていることがわかる。この例では、9月に最大25%程度の差が認められた。一方、風速考慮値は1年を通じて常に8～10%従来値を上回り、実測値により近い値となった。次に、従来値、風速考慮値、実測値の年間積算量を算出し、比較した結果を表3に示す。アモルファスSiでは実測値と従来値との差は約5%、実測値と風速考慮値との差は約4%であった。一方、多結晶Siでは、実測値と従来値との差は11%程度生じたが、実測値と風速考慮値との差は3%程度にとどまった。

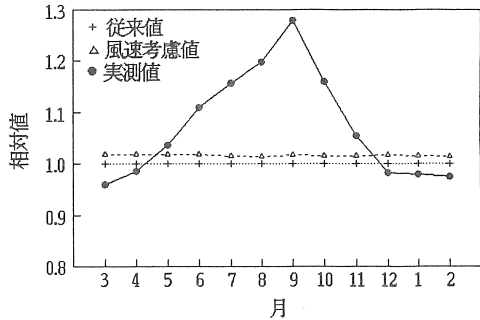


図15 月別出力積算量の比較 (アモルファスSi)

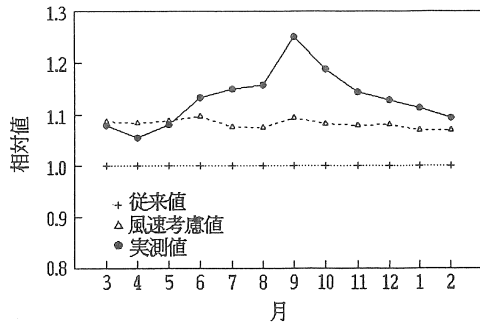


図16 月別出力積算量の比較 (多結晶Si)

表3 太陽電池モジュールの年間出力積算量の比較

	年間出力積算量 [kWh]	
	アモルファスSi	多結晶Si
従来値	20.63 (0.95)	49.93 (0.89)
風速考慮値	20.94 (0.96)	53.97 (0.97)
実測値	21.82	55.86

()内は実測値に対する比率

7. まとめ

太陽光発電システムの最適設計を行うに当たっては、太陽電池アレイの年間の発電量を予め算出する必要がある。本論文は、日射強度、外気温度、風速、太陽光のスペクトル分布など環境因子と太陽電池モジュールの出力関係について論述した。その結果、次のような諸点が明らかになった。

- 1) 太陽電池モジュールをモデル化して解析した結果と実測結果から、太陽電池モジュールの出力に影響を与えるセル温度は日射強度と風速に大きく関係することが確認できた。すなわち、日射強度とセル温度の間には直線関係があり、日射強度の増

- 加に伴いセル温度が上昇する。また、風速に対しては風速が小さいほど温度勾配は大きく、風速3m/s程度で十分な冷却効果が得られる。
- 2) 1年間の太陽光スペクトルの分布では夏期に短波長成分(395~695nm)が増加し、冬期に長波長成分(695~2800nm)が増加することが確認できた。
 - 3) セル温度の変化に伴う太陽電池モジュールの出力の変化に関する温度変化係数 α の値は、筆者らの実測した太陽電池モジュールについて次のようになった。すなわち、アモルファスSiが $-0.001/^{\circ}\text{C}$ 、多結晶Siが $-0.005/^{\circ}\text{C}$ となった。
 - 4) 太陽電池モジュールの変換効率に相当する値Kを定義し、1年分の日射特性と出力データから月毎にK、変換効率(実測値)、変換効率(補正值)を求めた結果、アモルファスSiではKと変換効率(実測値)に同様の季節的変動が認められた。すなわち、アモルファスSiの出力はスペクトル分布に大きく影響を受け、夏期に増加し冬期に減少する傾向にあることがわかった。一方、多結晶Siの変換効率(実測値)は夏期に減少し冬期に増加する傾向を示した。多結晶Siは温度変化係数が比較的大きな値をとることからその出力は外気温、風速に大きく依存すると考えられる。
 - 5) 今回新たに提案した風速、日射強度を考慮したセル温度補正法を用いた出力算出法と従来一般的に行われてきた出力算出法(従来法)により太陽電池モジュールの年間発電量を求め実測値と比較した結果、多結晶Siでは風速、日射強度を考慮したセル温度を適用することにより、従来法に比べ実測値にかなり近い値が得られた。一方、アモルファスSiでは従来法との顕著な違いは見られず、実測値との間に季節的に大きな差が生じた。今回提案した出力算出法は多結晶Siには適用可能であるが、アモルファスSi-iの場合には更にスペクトル分布の変化を考慮する必要があると思われる。
- (1990年11月)
- 4) 小林誠、谷辰夫：環境因子の変化に対する太陽電池モジュールの出力特性 1990年日本太陽エネルギー学会、風力エネルギー協会合同研究発表会 P. 37~40 (1990年12月)
 - 5) J.A.Duffie, W.A.Beckman: 「Solar Energy Thermal Processes」 Wileyinter science p.120~138
 - 6) 黒川浩助：太陽光発電システム運転特性評価のための簡易分光測定に関する数値的考察：「電学論B」111巻 12号 平成3年
 - 7) 家田、高橋、成田、柳原：「電気・電子材料ハンドブック」 朝倉書店 P.381~383 (1987年)

参考文献

- 1) 辻高輝：太陽電池電源の設計法 「太陽エネルギー」 Vol.9 No.6 p.31~36 (1983年11月)
- 2) 古屋耕一、谷辰夫：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 1990年日本太陽エネルギー学会、風力エネルギー協会合同研究発表会 P.81~84 (1990年12月)
- 3) 縄田豊：系統連系型太陽光発電システムの年間発電量の予測 「太陽エネルギー」 Vol.16 No.6