

太陽電池モジュールのエネルギー的評価

OUTPUT EVALUATION OF PHOTOVOLTAIC MODULES

古屋 耕一^{*1} 谷辰夫^{*2}
Koichi FURUYA Tatsuo TANI

Abstract

The three kinds of silicon photovoltaic modules, amorphous, single crystalline and poly crystalline, differ in response at each wavelength of solar radiation. Therefore, it is necessary to evaluate the spectral solar radiation in the area where the photovoltaic modules are used in order to optimize a photovoltaic power system.

For this purpose, we have set up the three kinds of photovoltaic modules in our campus in downtown Tokyo and have been measuring the spectral solar radiation and the output from the three photovoltaic modules since December of 1988.

This paper reports the changes of the spectral solar radiation in time and the seasons, the effects of these changes on the output from the three modules and the method of optimizing a photovoltaic power system.

Key Words : Photovoltaic Power System, Spectral Solar Radiation, Photovoltaic Modules, Optimization

1. 緒言

太陽エネルギーは、現在主に使用されている化石燃料や原子力等のエネルギーと比べ、量的に豊富であり、かつ安全性の高いクリーンなエネルギーとして、ここ数年来その利用方法の研究開発が進められている。その中でも、太陽光を直接電気に変換するという、システム化への有利性を持った太陽電池は多くの注目を浴びている。

これまでの研究から、小容量、分散型の都市型システムが、有効な太陽エネルギーの利用法の一つであると考えられる。また、太陽エネルギー利用システムは日射量や太陽放射のスペクトル分布に大きな依存性をもつことも知られており、実際の使用を考えた場合、そこで日の日射特性を十分に考慮したシステム設計をする必要がある⁽¹⁾。しかし、現在までに太陽電池を二つのデバイスとしてとらえた出力の評価方法は進歩してきているが、ひとつの太陽光発電システムとしての実用段階での最適設計の手法は確立されていないのが実状である⁽²⁾⁽³⁾。

本論文は、太陽光発電システムの最適化を図るためのエネルギー的評価について論述している。すなわち、時刻、季節、日射量をパラメータとした出力算出方法について考察し、かつ、太陽光発電システムの出力特性の変化の原因を究明するために、その大きな要因と考えられる太陽放射のスペクトル分布の変化を年間を通して測定して、出力特性への影響を検討している。

また、ここでいうエネルギー的評価とは、太陽光発電システムをひとつのエネルギー供給システムとしてとらえ、その出力量を瞬時値および積算量の両面から評価することである。

原稿受付 平成3年4月17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. 地上に到達する太陽光

本論文では、太陽放射のスペクトル分布と太陽光発電システムの出力特性との相関性を、その第一の主眼としている。そこでまず、太陽放射がどのような要因でどのように変化するかを考える。

太陽光は、大気圏に入射すると、大気中の様々な分子やその他の微粒子によって散乱・吸収され減衰していく。その様子は、ブーケの法則より一般に次式のような日射の波長の関数として表される⁽⁴⁾。

$$E(\lambda) = E_0(\lambda) \cdot e^{-K(\lambda) \cdot m} \quad (1)$$

$$K(\lambda) = K_R(\lambda) + W \cdot K_W(\lambda) + K_a(\lambda) \quad (2)$$

λ : 日射の波長

$E(\lambda)$: 地表の日射強度

E_0 : 大気外の日射強度

m : エアマス

$K(\lambda)$: 消散係数

$K_R(\lambda)$: 純粋大気の消散係数

$K_W(\lambda)$: 水蒸気による消散係数

$K_a(\lambda)$: エーロゾルによる消散係数

W : 可降水量

$K_R(\lambda)$ は、空気分子による散乱に基づくもので、式(3)で表される。

$$K_R(\lambda) = 0.00879 \lambda \quad (3)$$

$K_R(\lambda)$ による日射の消散は、主として紫外域と可視域で生ずる。

$K_W(\lambda)$ は水蒸気の吸収による消散係数で、波長との関係が分かっている。この吸収は、主として近赤外域で生ずる。

エーロゾルによる日射の消散係数 $K_a(\lambda)$ は、エーロゾルの粒径度分布がJunge分布に従うという仮定から、

$$K_a(\lambda) = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (4)$$

と表される。 β は、エアマス=1、 $\lambda = 1(\mu\text{m})$ の場合にエーロゾルによって減衰する日射の割合を示す。また、 α はエーロゾルの粒径を表しており、実際の大気では $\alpha = 0.5 \sim 3.0$ の範囲にあることが知られており、平均値として $\alpha = 1.3$ が用いられている。

これらの散乱・吸収を受けずに、地表に直接到達する太陽放射は直達光と呼ばれ、快晴、または快晴に近い晴れの日には図1に示すようなスペクトル分布となる。

図の添字は散乱・吸収の要因を示している。また、散乱による多重反射を繰り返して地上に到達する太陽光は散乱光と呼ばれ、雲の厚い曇天日や雨天日にはこの割合が大きく変化する。この散乱光と直達光を合わせた地表に到達する太陽光の合計が全天光と呼ばれている。さらに、全天光、直達光、散乱光の標準を図2⁽⁵⁾に示す。図は快晴日についてであるが、曇天日や雨天日には当然全天光の絶対量は小さくなり、散乱光の割合が高くなる。

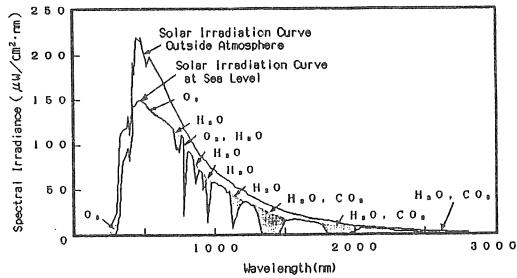


図1 直達光の分光放射照度

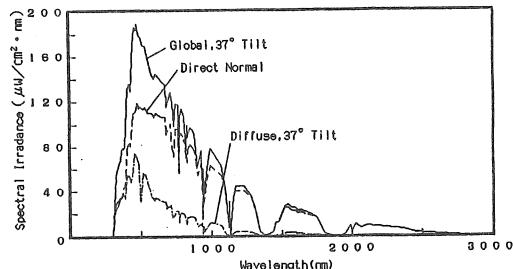


図2 IECの標準太陽光(AM1.5 全天光)の分光放射照度

3. 太陽電池の諸特性

現在、一般的に市販されている普及型の太陽電池モジュールは、主として単結晶Si、多結晶Si、アモルファスSi太陽電池モジュールの3種類である。このことを考慮して、本論文では小容量、分散型の一般普及型のシステムの設計、最適化の手法の構築を目指し、この3種類の太陽電池モジュールを取り上げた。実験に用いられたモジュールは、表1に示されるような、一般的な特性の太陽電池モジュールである。

また、ここでは日射特性と太陽電池モジュールの出力特性との関係を主題としているが、この二つを結び付ける表現として図3に示すような太陽電池モジュールの相対感度特性に注目した。これは、太陽電池モジュールが太陽光の各波長に対してどのような感度を示す

かを表したものであり、太陽光の各波長の強度 $E(\lambda)$ と相対感度 $S(\lambda)$ を掛け合わせ積分し、モジュールごとに決まった係数 A を掛けることによって、太陽電池モジュールの短絡電流 I_{sc} を求めることができる。すなわち、式(5)のような関係が成り立つ。

$$I_{sc} = A \int E(\lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

このように、太陽電池モジュールの相対感度特性は、太陽光のスペクトル分布と太陽電池の出力特性とを直接結び付ける重要な太陽電池モジュールの特性の一つである。

表1 太陽電池モジュールの諸特性

Modules	Area(m^2)	Maximum Output(W)	Efficiency(%)
Single Crystalline	0.359	42.6	11.86
Poly Crystalline	0.544	59.3	10.91
Amorphous	0.494	24.9	5.04

(1kW/ m^2 , AM1.5, 気温25°C)

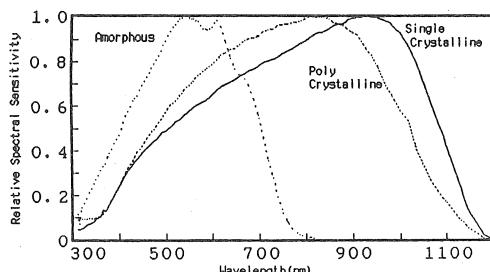


図3 太陽電池モジュールの相対感度特性

4. 太陽電池モジュール評価装置

本研究では、太陽光のスペクトル分布と太陽電池モジュールの出力特性を測定するために、図4のブロック図に示されるような太陽電池モジュール評価装置を用いた。筆者らは、本学の屋上に単結晶Si、多結晶Si、アモルファスSiの3種類の太陽電池モジュール、および全天日射計（英弘精機製、MS-801）、全天日射を表2に示されるような6チャンネルに分けて計測する分光日射計（英弘精機製、MS-131WP）を35.5°の傾斜面（本学

の緯度と同じ角度の傾斜面）に設置している。また、出力側にはそれぞれのモジュールが基準日射において、最適動作するよう一定負荷（単結晶Si: 6.0Ω、多結晶Si: 7.0Ω、アモルファスSi: 33.0Ω）を接続して電流、電圧を測定し、全天日射、分光日射とともに、30分毎の平均値をデータロガー（英弘精機製、MP-090）、FDライター（英弘精機製、MP-100）を介してフロッピーディスクに記録している。

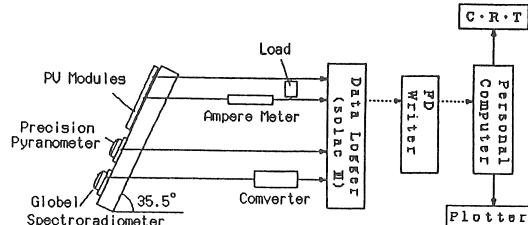


図4 太陽電池モジュール評価装置

表2 分光日射計の測定波長域

Channel	Wavelength (nm)
CH-1	305 ~ 395
CH-2	395 ~ 495
CH-3	495 ~ 590
CH-4	590 ~ 695
CH-5	695 ~ 850
CH-6	850 ~ 2800

5. 都心部における日射特性および太陽電池モジュールの出力特性

5-1. 日射の変化

太陽電池の出力特性に大きな影響を与える要因として、ここではとくに、日射のスペクトル分布の変化に注目した。

大気中の水蒸気(H_2O)分子の量が、その吸収波長域ゆえに、日射スペクトル分布の長波長成分に、エアマスの変化が日射のスペクトル分布の短波長成分に大きな影響を与えることは前述の通りである。すなわち、水蒸気量が多いほど日射の長波長成分は減少し、エアマ

スが大きいほど日射の短波長成分の割合が低くなるといえる。

以上の論述が、実際の日射にどのように反映されているかを考える。まず、月別分光日射量比率の時刻変化を図5に示す。この月別分光日射量比率とは、時間別全天日射量の月別積算量を基準値1.0としたときの、各波長域の時間別分光日射量の月別積算量の値である。この図を見ると、朝夕の時間帯にCH-1,2,5の割合は増加、CH-3,4,6の割合は減少するように変化しているのが分かる。とくに、CH-3,6は日の出直後、日の入り直前には、まったく地上に到達せず、CH-4でも0.04と、日中にCH-3,4,6がそれぞれ0.18,0.19,0.25であるのに対して、極端な減少を見せており。これは、朝夕の時間帯にはエアマスの値が大きく、それに伴い太陽光の光路上に存在する水蒸気の量も増加するために、エアマスの増加によってCH-3,4の割合が、光路上の水蒸気量の増加によってCH-6の割合が減少するために起こる変化であると説明される。

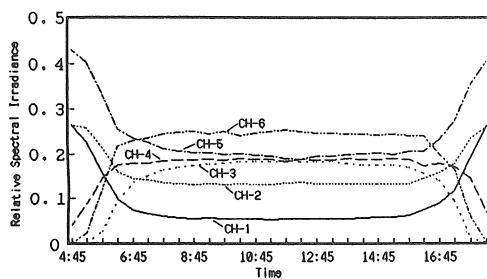


図5 月別分光日射量比率の時刻変化(1989年4月)

次に、月別分光日射量比率、エアマス、水蒸気量の季節変化を図6(a)～(c)に示す。この図では、水蒸気量は相対湿度⁽⁶⁾、エアマスは南中時のエアマスをそれぞれの指標としている。また、日射のデータは測定器の故障のため、1988年12月から1989年5月までの半年間のデータを用いている。図によれば、湿度は7月に最大、1月に最小になるように変化し、エアマスは夏至の日に最小、冬至の日に最大となるように変化する。これに対し、分光日射量は水蒸気量が少なく、エアマスが大きい12月から、水蒸気量が増加しエアマスが減少する5月にかけて、CH-1,2の短波長成分は、CH-1が0.042から0.068、CH-2は0.113から0.150へと増加し、CH-6の長波長成分は0.268から0.206に減少している。これは、式(1)～(4)によく一致した結果となっており、これらから、分光日射量は1年を通して、短波長成分であるCH-1,2の割合は夏季に最大、冬季に最小となるように変化し、長波長成分であるCH-6の割合は冬季に最大、

夏季に最小となるように変化するといえる。

以上から、水蒸気量、エアマスと日射のスペクトル分布の相關性の概略が確認されたといえる。

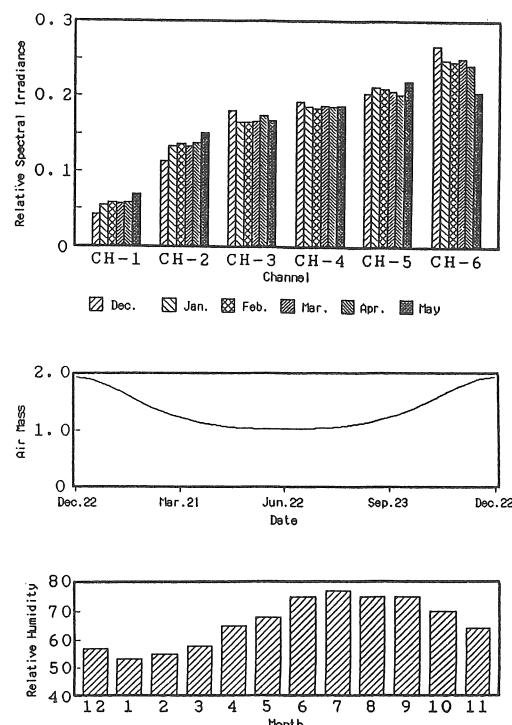


図6 上から(a)月別分光日射量比率の季節変化

(b)エアマスの季節変化

(c)水蒸気量の季節変化

5-2. 太陽電池モジュールの出力特性の変化

太陽電池モジュールの出力は、おおよそ日射量に依存するが、5-1で述べた日射のスペクトル分布にも少なからず影響を受ける。特に、アモルファスSi太陽電池の場合、図3に見られるように、その感度特性が短波長側の狭い波長域に分布しているので、スペクトル分布の影響を受けやすいといえる。

図7に単結晶Siモジュールの月別出力積算量と多結晶Si、アモルファスSiモジュールの月別出力積算量の比の時刻変化を示す。図を見ると、太陽光の短波長成分が比較的多い朝夕の時間帯において、アモルファスSiモジュールが割合的に良好に動作していることが分かる。これは、5-1で述べたように、朝夕の時間帯には、アモルファスSiモジュールに有利なCH-1,2の短波長成

分の割合が高いために起こるといえる。

また、図8に単結晶Siモジュールの月別出力積算量と多結晶Si、アモルファスSiモジュールの月別出力積算量の比の季節変化を示す。図を見ると、単結晶Siと多結晶Siの関係は、約0.9程度で安定しているのに対して、単結晶SiとアモルファスSiでは0.45～0.6の間で、アモルファスSiの割合が夏季に高く、冬季に低くなるように大きく変化していることが分かる。この結果は、5-1で述べた日射のスペクトル分布の変化と、各太陽電池モジュールの波長感度特性の違いに対応している。すなわち、エアマス、水蒸気量の変化に対応して、短波長成分は夏季に最大、冬季に最小、長波長成分は夏季に最小、冬季に最大となるように変化するのに対して、アモルファスSiモジュールの波長感度特性は短波長側に分布しているために、夏季に高く、冬季に低いという結果になっていると説明される。

従って、これらは前述のような日射のスペクトル分布の変化に対する出力特性の依存性を裏付けるデータといえる。

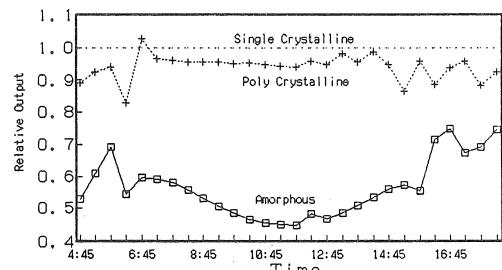


図7 出力の月別積算量比率の時刻変化（1989年4月）

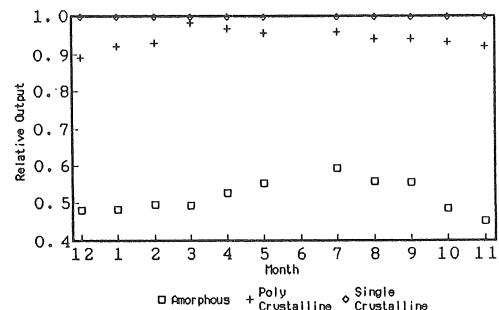


図8 出力の月別積算量比率の季節変化

6. 太陽電池モジュールの出力評価

太陽光発電システムを最適化するにあたって、太陽

電池の出力量を知ることが最も重要な課題であるといえる。ところが、これまで述べてきたように太陽電池の出力特性は、日射量、季節、時刻等により変化することが明らかになった。このことを考慮すると、太陽電池の出力量を求めるとき、日射量、季節、時刻をパラメータとして求めることができ有効な手段と考えられる。ここでは、出力量を日射量、季節、時刻をパラメータとして求める一つの方法として、日射強度-変換効率特性について考える。

図9に単結晶Si、多結晶Si、アモルファスSiの各太陽電池モジュールの日射強度-変換効率特性を示す。図には、各々のデータを一次近似した直線も示した。

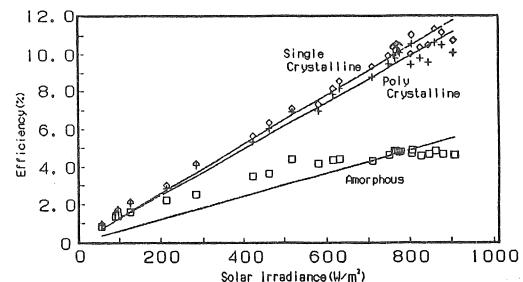


図9 日射強度-変換効率特性（1989年4月、12:45）

筆者らが、日射と出力を直接関係づける日射強度-出力特性ではなく、日射強度-変換効率特性に注目した理由でもあるが、図を見ると、とくに単結晶Si、多結晶Siモジュールについて、測定データが非常によく近似直線にのっていることが分かる。このことは、太陽電池のI-V曲線を用いることによって説明される。結晶系の太陽電池モジュールは、曲線因子FFが0.75～0.77と大きな値なので、図10に表されるように曲線と縦軸(I軸)が交わる点から曲線の曲率が大きくなるまでの領域(およそ図のA領域)においては、横軸(V軸)にほぼ平行な直線とみなすことができる。また、結晶系の太陽電池モジュールは前述のように太陽光にスペクトル分布に対する波長感度帯が広いので、アモルファスSiモジュールに比べるとスペクトル分布の変化の影響を受けにくくなることになる。従って、太陽電池の短絡電流 I_{sc} は $I_{sc} \propto E$ (日射強度)に近い特性を保っている。以上から考えると、今回の測定に用いた装置は4.で述べたように、基準日射(1.0 kW/m^2 、AM1.5、気温 25°C)に合わせた一定負荷を用いているので、負荷直線とI-V曲線の交点がA領域に入っている日射強度Eの範囲では、図の斜線部分のような長方形の面積が太陽電池モジュールの出力となる。従って、出力 W_{out} はほぼ $W_{out} \propto E^2$ の関係にある。すなわち、 $\kappa = W_{out}/E$ なので $\kappa \propto E$ の関

係が近似的に成り立っているといえる。

以上のことから、図9の日射強度-変換効率特性には、5-2で述べたような出力の変化が、近似曲線の傾きという形で表されていることが分かる。すなわち、ある季節、ある時刻の変換効率が日射強度とある係数 α を用いて $\eta = \alpha E$ と求められることにより、そのときの出力 W_{out} は、

$$W_{out} = \eta E = \alpha E^2 \quad (6)$$

と表され、太陽電池モジュールの出力特性の変化が、係数 α の変化に置き換えられることになる。

以上のことから、太陽電池モジュールの出力量を評価するにあたって、日射強度-変換効率特性の傾きの時刻や季節による変化が重要になってくる。この係数 α の時刻変化は、図11に示されるように朝夕の時間帯に、とくにアモルファスSiモジュールが大きな値となるように変化しているが、これは、5-2で述べた出力の変化に対応している。季節変化の様子は、データが少ないのでここでは示さないが、時刻変化が5-2に対応していることから考えれば、夏季において、とくにアモルファスSiモジュールが大きな値となるという5-2の出力の変化に対応した結果となることが予想される。

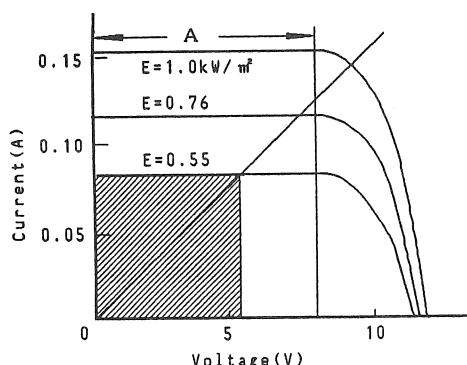


図10 単結晶太陽電池のI-V曲線

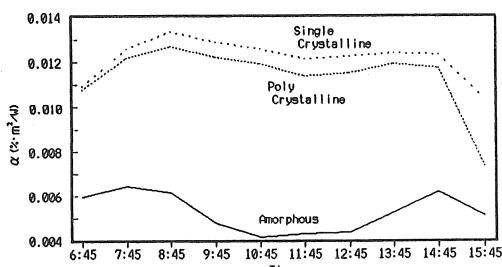


図11 係数 α の時刻変化（1989年4月）

また、問題点として、図9においてアモルファスSiモジュールについては日射量が小さいときに測定データが近似直線よりも大きい値になるような、むしろ曲線状の特性となっていることが挙げられる。このことについて、前述のようにアモルファスSi太陽電池モジュールは太陽光のスペクトル分布に対する波長感度帯が狭い特性となっているためにスペクトル分布の影響を受けやすいことが第一の原因と考えられる。さらに、アモルファスSiモジュールのI-V曲線は、図12に示されるようにFFの小さな曲線となっている。そのため、結晶系のモジュールのような $W_{out} \propto E^2$ の近似が成り立たないことがもう一つの原因として挙げられる。

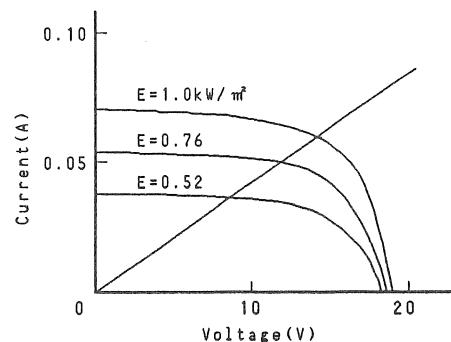


図12 アモルファスSi太陽電池のI-V曲線

7. 結論

本論文では、都心部における太陽光発電システムの最適化を図るための第一段階として、次の諸点を論述した。すなわち、日射については1988年12月から1989年5月、出力については1988年11月までに取得したデータに基づいて、季節、時刻に対する太陽放射スペクトル分布などの日射特性の変化、その日射特性に対する太陽電池モジュールの出力特性への影響を考察した。また、太陽電池モジュールの出力評価を日射強度-太陽電池モジュール変換効率特性の傾きの変化から検討した。

その結果として、次のようなことが明らかになった。
①日射のスペクトル分布は、おもにエアマス、日射の光路上に存在する水蒸気量に依存し、その増減に伴い、時刻的には495~695nm、850~2800nmの波長成分の割合が、朝夕の時間帯にはほぼ地上に到達せずに、日中と比べると極端な減少を見せるよう変化する。また、季節的には冬季から夏季に向かって、305~495nmの波長成分の割合がそれぞれ1.5倍程度に増加し、850~2800

nmの波長成分の割合が8割程度に減少する。

②前述のような日射のスペクトル分布の変化の影響を受け、太陽電池モジュールの出力は、その波長感度特性の違いゆえに、時刻的には、朝夕の時間帯にアモルファスSiモジュールが、他の結晶系モジュールよりも良好に動作する。また、季節的にはアモルファスSiモジュールの出力と単結晶Siモジュールの出力比が冬季に最小で0.46、夏季に最大で0.60となっており、夏季にアモルファスSiモジュールが良好に動作している。
 ③太陽電池モジュールの出力をシミュレートするためには、時刻、季節、日射量をパラメータとしてすることが有効な手段であり、そのとき日射強度－変換効率特性を媒介とすることによって、近似が容易に行える。従って、日射強度－変換効率特性の傾き、季節、時刻を3つの軸にとり、図13に示すような一つのマップを作ることにより、日射量のデータさえあれば太陽電池モジュールの出力特性を精度よく再現することができる。

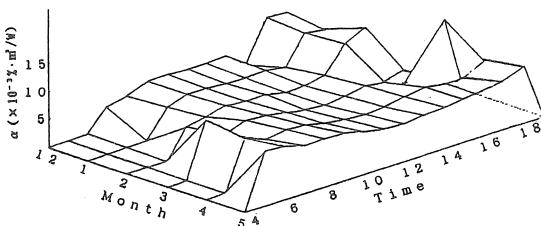


図13 太陽電池モジュール評価マップ

今後の課題としては、次のようなことが挙げられる。

- ①日射のデータを1年間連続して測定し、完全なマップを作り上げること。
- ②モジュール温度等の、太陽電池モジュールに影響を与える他の要因についても、さらに詳細にわたって考慮すること。
- ③アモルファスSiモジュールの日射強度－変換効率特性は曲線状となるので、それに対応した近似方法を検討すること。
- ④最適負荷制御したこととも考え、相対感度、分光日射強度、さらにはエアマス、水蒸気量などをパラメータとして、太陽電池モジュール評価マップを理論的に求める方法を考えること。

文 献

- (1)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（冬季・春季の比較）、1989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（1989.12）、p.33～36

- (2)T.Glatfelter et al., "Outdoor Performance Measurements Comparing Different Types of Multiple-Cell a-Si Alloy Photovoltaic Devices: Dependence on Spectral Content", 19th IEEE PV Spec. Conf., New York, 194-199(1987)
- (3)C.Jennings, "Outdoor Versus Rated Photovoltaic Modules Performance", 19th IEEE PV Spec. Conf., New York, 1257-1260(1987)
- (4)日本太陽エネルギー学会編、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、初版、p12
- (5)下川隆一；太陽電池測定法の標準化、学会誌「太陽エネルギー」、第73号(1986.11)、p31
- (6)国立天文台編；理科年表、丸善(株)、第62冊、(1988)、p.207