

太陽電池の出力特性に関する研究

Study Concerning Output Characteristic of Solar Cell

逸 見 次 郎*
Jiro ITSUMI

Abstract

Solar generation system is expected to become one of the future major energy resources. Positive approach toward the research and development is currently in progress, both in and out of Japan, to apply the system to practical use. One is the research made in the design of the system which is applicable to weather condition. Another is the establishment of system composition and appropriate control method. This subject discusses about the most appropriate method of system design which can effectively extract the solar cell output under the weather condition where the system is installed.

First, if the solar cell is installed with appropriate inclination, generation output would increase by a yearly average of approximately 17.5% to that generated from the horizontal surface. When one part of the cells is shadowed by cloud, building, or tree, generation output would decrease by nearly 40%.

Also, as a result of the research made on the direction toward which the solar cell faces, it is found that the solar cell facing toward north, which has less sunshine, generates only 1/3 or generation power of what being generated by the cell facing south.

Finally, as a result of using the V-I characteristic of measurement which can evaluate the output property of the solar cell in brief time, clear V-I and V-P curves were obtained.

Key words : Solar cell, inclination angle, shadowed, azimuth, V-I characteristics of measurement.

1. 緒言

太陽光発電システムは、将来のエネルギー源の一つとして期待がよせられており、現在、本格的な実用化に向けて国内外で積極的な研究開発が進められている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。その一つに、気象条件に適したシステム設計の研究がある。これは設置点の日射量、日照時間、緯度、温度および方位や影などの不均一な条件を十分調査して、太陽電池が本来もっている能力を有効に利用するための運転条件を検討するものである。他の一つは、システム構成とその最適な

制御方法を確立することであるが、これに関する基礎的な考察については先に報告してきた⁽⁵⁾。

本論は、設置場所における気象条件の下で、太陽電池から有効に出力が抽出できる最適なシステム設計法について検討したものである。当大学屋上に単結晶およびアモルファス太陽電池を設置して開放電圧、短絡電流、温度および水平面日射量を測定し、各測定値を基に諸特性について述べる。まず太陽電池は傾斜角により発電出力に大きな差異が見られることから、屋上に設置した太陽電池から有効に出力が抽出できる傾斜角について推定計算により求めた結果、総日射量が最も多く得られる傾斜角は約 20° 付近にあることを示す。次にこの結果を基に、日

原稿受付 平成2年2月22日

* 会員 横浜国立大学工学部 (〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台156)

照時間の短い秋から冬期の太陽光をも有効に捉えることを考慮して 33° の傾斜角を設けて設置して、年間発電出力を水平面と比較した結果、平均約17.5%も多く発電できる事実について述べる⁽⁶⁾。

さらに方位と傾斜角の関係について調査した結果、設置されたアレイの一部が方位によって入射光量にバラツキを生じると、入射光量の少ないアレイには約4倍強の逆電圧が印加される。また、モジュールの一部（セル）が影で遮光されることにより、全体の発電出力を約40%近く失うことについて3章で述べる⁽⁷⁾。

最後に、気象条件あるいは運搬や据え付け工事中に生じるモジュール特性の不整合や損傷状態を、現地で評価できるV-I特性測定装置を試作し測定に用いた結果、開放から短絡までのV-I特性を瞬時に測定することができたので4章に述べる⁽⁸⁾。

2. 測定方法

図1に示す測定装置により下記の点を考慮して測定を行った。

- (1) 長期に亘る計測を必要とすることから、データの取込みから処理までのプロセスを全てコンピュータで行った。
- (2) 日射量は変化が速くまた、取得するデータ数も多いことから、データの取込み時間が速くかつ多チャンネルを持ったマルチチャンネルセレクタを用いた。
- (3) 屋外の装置は高温、高湿などの自然条件にできるだけ耐えるもので構成した。

測定に用いた太陽電池は、表1に示す試料No.1、2である。マルチチャンネルセレクタは太陽電池の開放電圧、短絡電流、温度、日射量の各データを取り込み、その出力をGPIBを通してコンピュータに転送する。開放電圧は太陽電池の出力端子間で、短絡電流は出力端子間に低抵抗（0.1あるいは0.05 $[\Omega]$ ）を挿入してその両端の電位差を測定した。温度は太陽電池の裏面に熱電対（銅-コンスタンタン）を取り付けて、マルチチャンネルセレクタの温度測定用端子でまた、日射量は全天日射計（MS-801 英弘精機製）で水平面日射量をそれぞれ測定している。コンピュータは日射量の増減を判別し、日の出から日没までの日照時間帯を3分間隔で自動計測

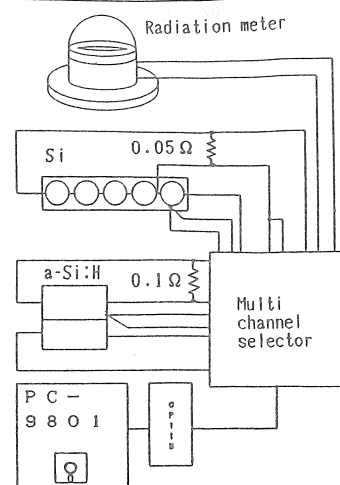


図1 測定回路

表1 太陽電池の種類

Sample No	Voltage Voc[V]	Current I sc[A]	Power P max[W]	Efficiency η [%]	Cell type
1	5.1	0.095	0.43	6.4	a-Si:H
2	0.56	1.0	0.45	9.0	c-Si
3	20.0	0.28	4.2	11.9	"
4	5.6	1.0	3.6	9.0	"
5	5.0	1.0	4.0	14.0	"
6	2.5	0.8	2.1	10.0	"

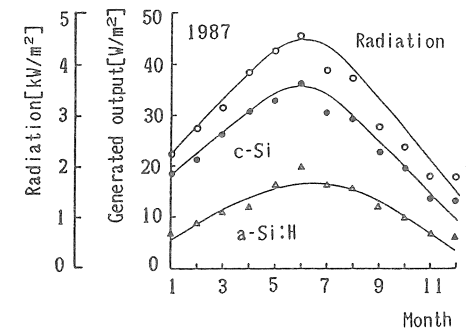
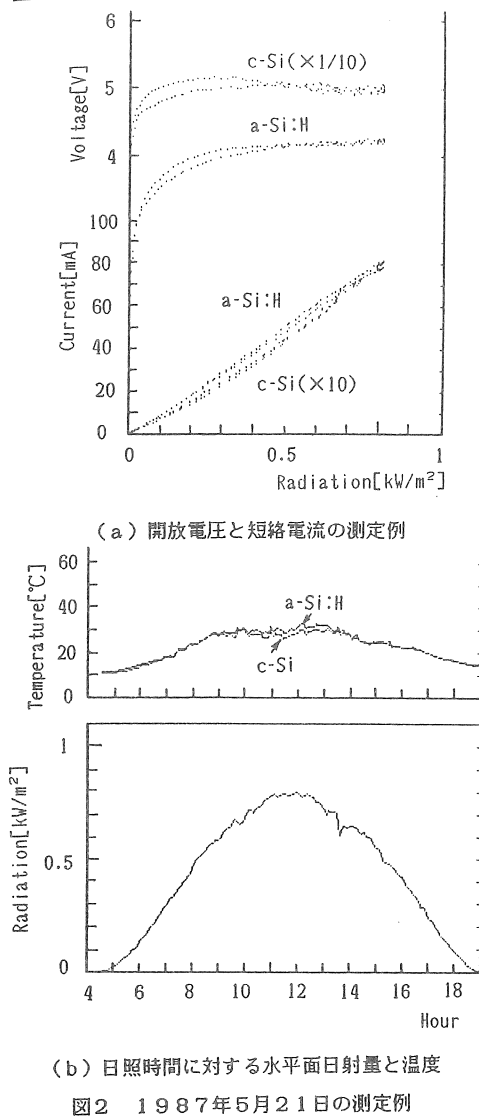
している。開放電圧、短絡電流、温度、日射量は月毎に平均化し、発電出力は（1）式より算出してメモリに保存した。

測定例として、1987年5月の晴天日における単結晶（c-Si）およびアモルファス（a-Si:H）太陽電池の短絡電流および開放電圧と日射量の関係を図2（a）に示す。（b）は日照時間に対する両太陽電池の裏面温度と水平面日射量である。短絡電流は、日射量に対してc-Siで900 $[\text{mA}/\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}]$ 、a-Si:Hで100 $[\text{mA}/\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}]$ の比例関係を持つ。開放電圧は、日射量が0.5 $[\text{kW}/\text{m}^2]$ 附近からそれぞれ0.5 $[\text{V}]$ 、4.2 $[\text{V}]$ の定電圧に落ち着く。また太陽電池の出力Pは、受光面積をS $[\text{m}^2]$ 、開放電圧をVoc $[\text{V}]$ 、短絡電流をIsc $[\text{A}]$ 、曲線因子をFF(c-Si、0.7~0.8、a-Si:H、0.5~0.7)とすれば（1）式で与えられる。

$$P = \sum FF \cdot \frac{V_{oc} \cdot I_{sc}}{S} \times 1000$$

$$[\text{kW}/\text{m}^2] \quad (1)$$

水平面に設置した単結晶およびアモルファス太陽電



池が、87年度に発電した月別発電出力を(1)式より算出して図3に示した。4月から9月にかけて多くの入射光量が太陽電池に吸収されることから発

電出力も高くなるが、10月から3月にかけては入射光量が減少することから出力も低下する。このような面をカバーするために太陽光発電システムでは、蓄電池や他の自然エネルギーとの併用あるいは、系統との連系を行うことによって、安定した発電出力の供給を計っている(3)(5)(9)。

3. 傾斜角と方位および影による影響

3.1 傾斜角

太陽電池は入射光量を有効に吸収するために、通常は太陽光に向けて傾斜角を設けて設置されることから、傾斜面には直達日射成分の他に散乱日射成分が同時に入射することになる。水平面に対して β° の傾斜角を設けた傾斜面全日射量 I_P は、傾斜面が受ける直達日射量 I_{PD} 、散乱日射量 I_S および反射して傾斜面に入射する日射量を I_T とすれば(2)式で与えられる。

$$I_P = I_{PD} + I_S + I_T \quad (2)$$

さらに、図4に示す太陽電池パネル面への日射量に関する各種角度および地表面の反射係数 ρ を用いて、傾斜面全体が受ける全日射量 I_P を求めると次式で示される(10)。

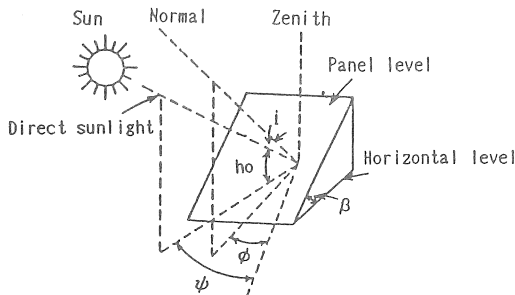
$$I_P = I_{HD} \cdot \{ \cos \beta + \sin \beta \cdot \cosh \phi \cdot \cos(\psi - \phi) \} + I_{HS} \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho I_{HT} \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (3)$$

I_{HD} は水平面直達日射成分、 I_{HS} は水平面散乱日射成分および I_{HT} は水平面全日射成分である。また、太陽方位角 ψ は次式で与えられる。

$$\cos \psi = \{ (\sinh \phi \cdot \sin \alpha - \sin \delta) / \cosh \phi \cdot \cos \alpha \} \quad (4)$$

ただし、 α : 緯度 δ : 太陽赤緯

前節で求めた月平均の水平面全日射量(図3)を(3)式に代入して、傾斜面における推定日射量を求めると表2となる。計算に用いた水平面の各種日射成分はHAPS気象データの散乱光比を用いて算出し表3に示した。また $\rho = 0.15$ 、 $\phi = 0$ 、緯度 $35^\circ 26'$ さらに δ は、各月を代表する日の太陽赤緯(北緯 35° を基準)(11)を用いた。図5は表2の計算例をグラフで示したものである。図より、傾斜角を大きくとるに従って日射量の季節変動幅が小さくなり、年間を通して安定に発電出力を供給できるが年間の発電損失は大きい。図6は、当大学屋



ho:Altitude ϕ :Panel azimuth angle
 ψ :azimuth angle β :Panel inclination
 i :Incidence angle of panel normal level

図4 太陽電池パネル面への日射に関する各種角度

表2 傾斜面日射量の計算例

β°	I _P of Month												Total	Ratio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
0	222	273	310	383	427	456	380	369	277	236	158	157	3648	1
5	231	282	317	389	431	458	382	373	282	242	163	163	3713	1.018
10	239	289	323	392	433	458	383	376	285	246	168	169	3760	1.031
15	245	295	327	394	432	455	382	377	286	249	171	173	3787	1.038
20	250	300	330	394	429	451	379	375	287	251	174	177	3795	1.04
25	253	302	330	391	423	444	374	372	286	252	175	179	3783	1.037
30	255	300	329	387	417	436	367	367	283	251	176	180	3752	1.029
35	256	302	326	381	407	425	359	360	230	249	176	181	3702	1.015
40	256	300	321	377	396	413	349	351	275	246	175	180	3633	0.996
45	252	296	315	363	383	399	337	341	268	242	172	178	3546	0.972
50	248	290	307	351	368	383	324	329	261	236	169	176	3441	0.943
60	236	274	286	322	333	349	294	300	242	222	161	167	3183	0.873

I_P [10×kcal/m²·day]

表3 水平面日射成分および各種角度

Month	I _{HS}	I _{HD}	I _{HT}	Scattered ratio	Altitude h _e	Azimuth angle ψ	Declination δ
1	888	1332	2220	0.4	32.9	12.37	-20.9
2	1228.5	1501.5	2730	0.45	41.2	9.81	-12.95
3	1488	1612	3100	0.48	51.2	19.9	-2.04
4	2029.9	1800	3830	0.53	62.8	23.1	9.48
5	2220.4	2049.6	4270	0.52	72.2	28.4	18.67
6	2918.4	1641.6	4560	0.64	76.8	27.1	22.96
7	2242	1558	3800	0.59	74.8	18.2	21.35
8	1918.8	1771.2	3690	0.52	67.3	25	13.67
9	1662	1108	2770	0.6	57	10.6	2.96
10	1321.6	1038.4	2360	0.56	45.3	12.68	-8.59
11	758.4	821.6	1580	0.48	35.8	11.5	-18.3
12	643.7	926.3	1570	0.41	31	14.06	-22.93

I_{HS}、I_{HD}、I_{HT} [Kcal/m²·day] h_e、 ψ 、 δ [°]

上で測定された1987年度の総日射量と傾斜角の関係で、総日射量が最も多く得られる傾斜角は約20°付近にある。しかし、年間を通じて春分・秋分を中心に太陽高度は±23°30′変化することから、表2の各月別の値を見ると必ずしも20°が最大の値になるとは限らない。それゆえ、秋から冬にかけては傾斜面を高く(54°2′)、春先から夏にかけては低く(14°12′)設置することにより、年間を通して平均的に太陽光を有効に捉えることができ

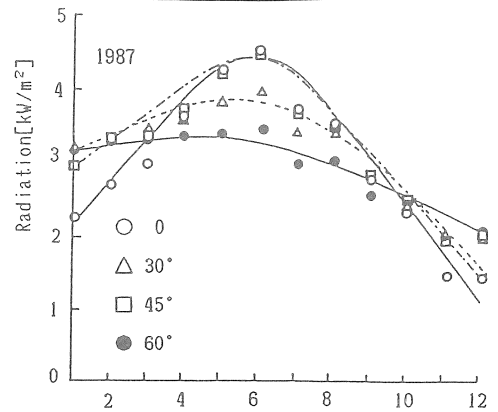


図5 傾斜角変化に対する日射量

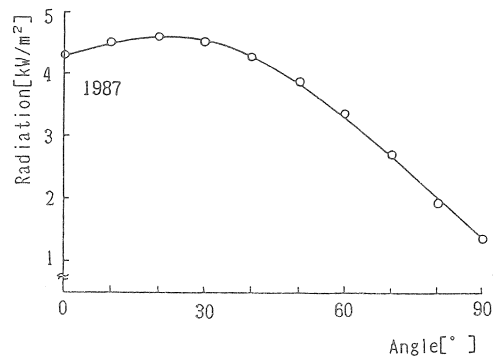


図6 傾斜角の最適値

る⁽¹²⁾。従来は、傾斜面を緯度に等しい角度としていたが、散乱日射量成分の多い我が国では、各設置点の緯度から、11°45′引いた角度が各設置点における傾斜角の最適値と考えられている⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。以上の考察を基に、日照時間の短い秋から冬期の太陽光を有効に捉えることを考慮して表2より、傾斜角を求めると30°～35°付近が最良と考えられる。当大学屋上に約33°の傾斜角を設けてアモルファス太陽電池を設置し、1988・9月より測定を開始した。図7に33°の傾斜角を設けた太陽電池が、一日に発電した開放電圧と短絡電流の測定例を日射量との関係で示した。日射量が0.5[kW/m²]時における33°と水平面との電圧・電流を比較するとそれぞれ、0.8[V] (16.1%)、9.7[mA] (10.42%)増加している。また(1)式より算出した年間発電出力について見ると(図8)、水平面に比べて少ない月で約15.3%、多い月では約19.8%の増加が見られ、年間を通じて平均約17.5%も多く発電できることを示している。さらに発電出力の測定例を、日射量の多い季節(4月～9月)と

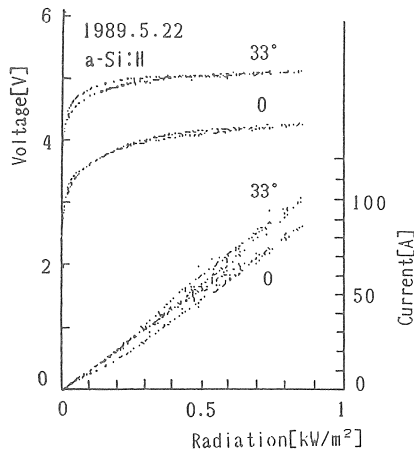


図7 水平面と33°の傾斜角を設けた場合の
開放電圧と短絡電流の測定例

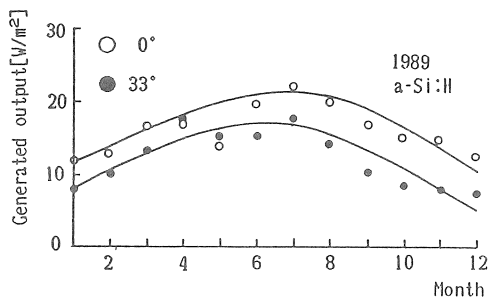
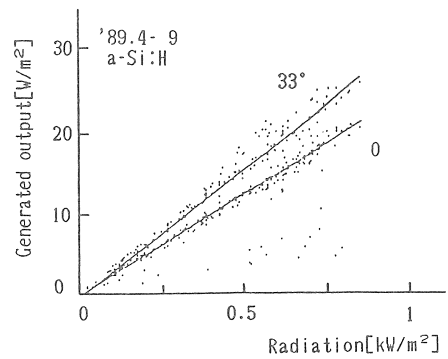


図8 水平面と傾斜面(33°)における
発電出力の比較

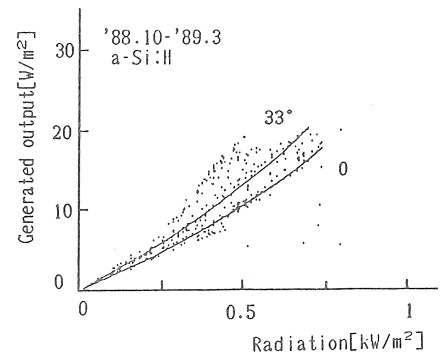
少ない季節(10月~3月)とについて見た場合(図9)、それぞれ約19.5%および22%と季節変動面から見ても増加するなど、太陽電池を設置する際は適切な傾斜角が必要なことを示した。

3・2 方位と傾斜角の関係

設置された太陽電池を直列または並列に接続して出力調整を行う場合、太陽電池の方位あるいは接続方法によって、入射光の当りにくい部分のモジュールや悪い特性を持ったセルの両端には他の発電電圧が逆方向に加わり、発電出力を低下させると同時にセルあるいはモジュールを劣化させる原因ともなる。ここでは、方位や接続法によって変化する出力特性を調査するため、東西南北に配置(図10)した太陽電池を直・並列接続してV-I特性を測定した。傾斜角は0、30、60°、太陽電池は表1の試料No.1を各方向に3枚ずつ配置して行った。



(a) 日射量の多い季節



(b) 日射量の少ない季節

図9 季節変動面から見た発電出力

図11(a)(b)は、傾斜角を60°とした場合の各方位におけるV-I特性測定例である。直・並列接続とも南向きの出力が最も高く西、東向の順に低下し一番低い北向きの出力は、表4より南向きに対して約1/3弱しか得られないが、両接続の合計出力の差は小さい。しかし、方位によって発電出力にバラツキが生じると直列接続(a)では、電流が入射光量の最も少ない北向きの電流値で抑えられることになる。その結果、出力電圧が13.2[V]の北向きに配置された太陽電池には、約55[V]の逆電圧が印加されることになる。印加された逆電圧がセル耐圧を越える時にはセルを損傷することもある。並列接続(b)では、電圧が入射光量の最も少ない北向きの電圧値で抑えられるが、太陽電池に加わる責務は小さい。図12は、4方向の合計出力を直・並列接続して傾斜角を変えた場合の特性例である。水平面のPmax点で比較した場合、直列接続では30°で1.11倍、60°では0.45倍と1/2以下に低下する。また並列接続ではそれぞれ1.16倍、0.56倍と設置角を付けすぎると

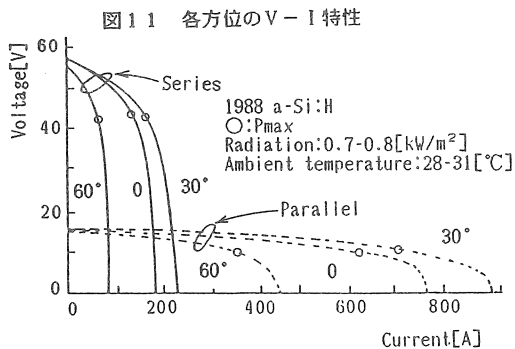
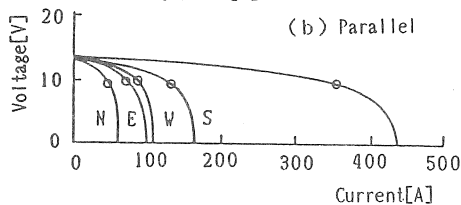
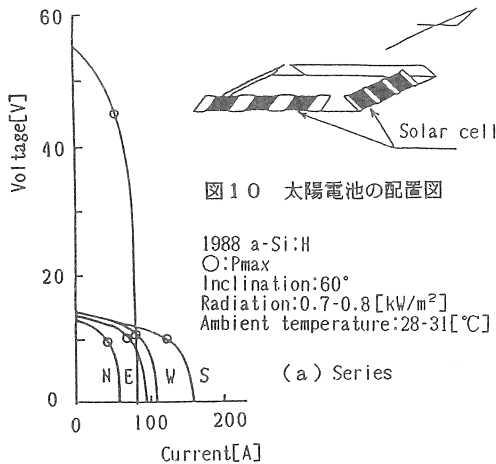


図12 4方向の出力を合計して傾斜角を変えた場合のV-I特性

表4 各点の最大出力

azimuth	P max[W]		inclination	P max[W]	
	series	parallel		series	parallel
east	0.82	0.853	0°	8.14	6.1
west	0.981	0.981	30°	9.03	7.08
north	1.35	1.35	60°	3.65	3.4
south	0.475	0.5			
Total	3.65	3.4			

発電損失が高くなることを示している。このように、方位や傾斜角によって出力にバラツキが予想される場合、直列接続は極力避けてある程度の出力低下を許しても並列接続を行う。それが困難な場合は、個々のモジュールを並列接続してから直列接続を行えば直列接続の欠点を補うことができる。また、太陽電池を北向きに配置することはさけ、南向きか南西向きに配置することが望ましい。

3・3 影による影響

モジュールの一部分（セル）が影に覆われた場合、全体の出力にどのような影響を与えるかを調査するため、表1に示す試料No. 3、4のモジュール内の一部分のセルを完全に遮光して測定を行なった。図13は、影によってV-IおよびV-P特性が大きく変化している様子をオシロスコープにより観測したものである。また（a）の試料はセルが直列に、（b）は並列に接続されている。影により発電が停止したモジュール全体の発電出力をPmax点（表5）で比較した場合、（a）（b）の両試料とも約40%近く低下する。さらに、発電が停止したセルの両

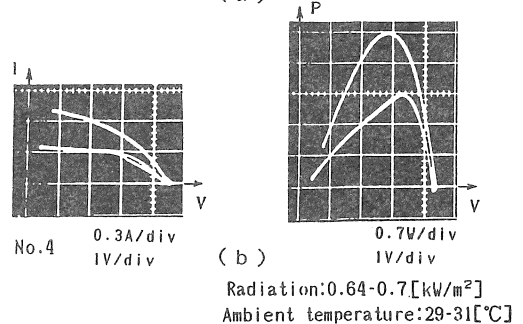
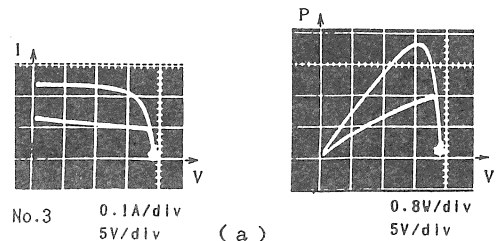


図13 影による影響

表5 影の有・無による最大出力

Sample	P max[W]	
	N0	Few
No.3	3.15	1.8
No.4	3.5	2.1

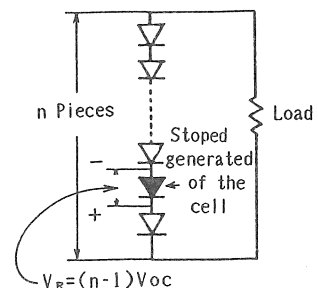


図14 影になったセルに加わる電圧

端には各セルの開放電圧 (V_{oc}) が等しいとすれば、図 14 に示すように $V_R = (n-1) V_{oc}$ の逆電圧が印加されることになる。この逆電圧により発電が停止したセルには、大きな電流が集中 (Hotspot) して流れセル温度を急上昇させることから、時にはセルを損傷に導くこともある⁽²⁾⁽¹⁵⁾。このような原因からセルを保護するには、セル毎に並列にバイパスダイオードを接続するか、あるいはモジュール毎に 1 個のバイパスダイオードを接続するなどの方法が報告されている⁽²⁾。

4. 太陽電池出力の簡易測定法

太陽電池モジュールは通常、出荷時に屋内において人工太陽光下でモジュール特性を測定し出荷される。しかし、運搬時や据えつけ工事中に生じる特性変化や損傷状態あるいは、モジュール特性の不整合などによる出力低下を現地に据え付けた状態で直接評価できれば、生産者と発注者間に生じるトラブルや建設工事の長期化などの原因が解消される。このような観点からこれまでに、①基準状態とオンサイト条件の違いを、レファレンスモジュールを用いて対比データとして測定し、アレイ出力測定値 ($V-I$ 特性) を換算・補正するレファレンスモジュール方式⁽¹⁶⁾、②コンデンサーを負荷として太陽電池の出力電圧を充電させ、開放電圧になった時点で測定を終え、測定されたデータをコンピュータで処理するコンデンサー充電方式⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。などが提案されている。①項では日射量、温度などの変動に影響され易く、②項は日射量などの変動に影響されず短時間に測定できることから最適であるが、データの解析にコンピュータを必要とする。

本装置の特徴は、トランジスタを活性領域で動作させることによって負荷特性がリニアに変化することを利用している。太陽電池の $V-I$ 特性上 (図 15) に沿って、ベース電流を連続に変化させることによって、瞬時にオシロスコープ上に $V-I$ 特性を描かすことができる。装置は図 16 に示すように、可変抵抗 R_L (トランジスタ) と制御回路 IC_1 および電力演算回路 IC_2 で構成される。 $V-I$ 、 $V-P$ の測定時間は約 30 [sec]、精度は約 3% (オシロスコープの読取りに対して)、測定範囲は負荷となるトランジスタの定格により決り、動作温度は

-40 ~ 120℃である。 $V-I$ 特性を測定する場合は、 R_L の端子電圧とモジュール電圧 V_s で、また $V-P$ 特性は IC_2 の出力電圧 V_o (R_L の端子電圧と V_s の積) と V_s をオシロスコープで観測すれば得られる。得られた波形をストレージ・スコープに取込み G P - I B を介してコンピュータで処理すれば、

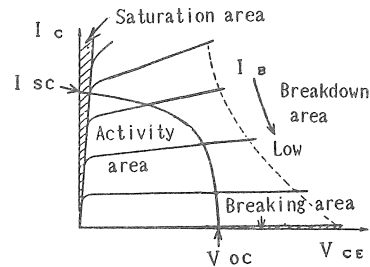


図 15 トランジスタおよび太陽電池の静特性

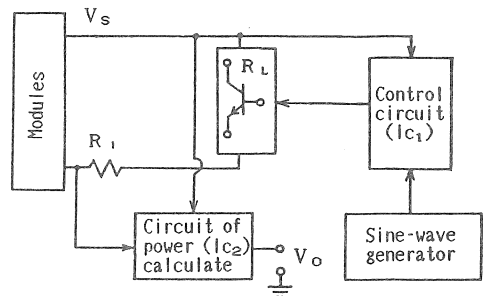
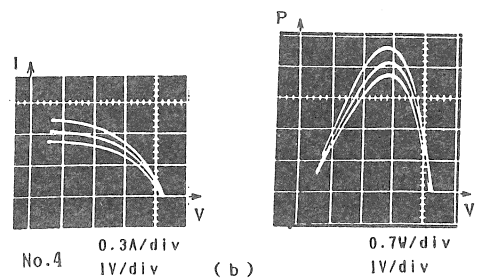
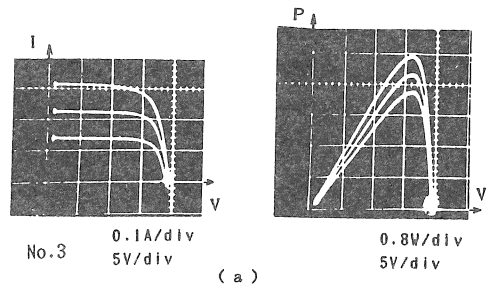


図 16 装置の回路構成



Ambient temperature: 31-33[℃]

図 17 試作装置により測定された波形例

出荷時あるいは経年変化時のデータと比較検討することも可能である。IEC規格では、AM1.5において快晴時の光強度が約 $100 \text{ [mW/cm}^2\text{]}$ （温度 25°C ）を標準日射量としている。本試作装置の性能測定もこれに準じて、AM1で快晴時の日射量が全天日射計で $98 \text{ [mW/cm}^2\text{]}$ （水平面において）の状態で行なった。また、測定が短時間で済むことから温度の影響は受けない。また、日射量の変化を模擬するために、太陽電池への入射光量を不透明なビニールで遮って行なったことから、V-I特性の測定結果より日射量を求めると $78, 62 \text{ [mW/cm}^2\text{]}$ となった。以上の条件により測定した試作装置のV-I、V-P特性を図17に示す。（a）の試料はセルが直列（表1, No.3）に、（b）は並列（No.4）に接続された特性である。両特性共きれいなV-I、V-Pカーブを描いていることから、ほぼ満足のいく測定が行なえることを示している。今後は精度面に対して改良を重ねていく予定である。

5. 結論

気象条件に適した太陽光発電システムを設計する際の指針となるいくつかの諸特性について検討してきた。推定計算から横浜における傾斜角の最適値は 20° となるが、年間を通じて発電出力が最も多く取り出せる傾斜角は $30 \sim 35^\circ$ である。大学屋上に 33° の傾斜角設けて水平面との発電出力を比較した結果、年平均で約 17.5% も多く取り出せることが分った。また雲や建物、樹木などの影によってモジュールの一部分が遮光されると、全体の発電出力が 40% 低下すると同時に、影になったセルの両端には他のモジュールの発電電圧が逆方向に加わり、最悪の場合セルを損傷することもあるので注意を要する。

次に太陽電池が配置される方位と接続方法について調査した結果、北向きの太陽電池は南向きに比べて $1/3$ 弱の発電出力しか得られない。さらに直列接続の場合、電流は日射量の最も少ない北向きのモジュールで抑えられ、他の発電電圧が逆電圧として加わり劣化の原因ともなるので、直列接続は極力避けて出力がある程度低下しても並列接続が望ましい。一方、このような太陽電池の諸特性を短時間に評価する簡易測定装置を試作し実験に用いた結果、瞬時

に良好なV-I、V-P曲線をオシロスコープ上に描くことができた。

6. 謝辞

最後に、本研究の遂行にあたり有益な御助言を戴いた鳳紘一郎教授に深謝申し上げます。また本研究に対して御協力戴いた、本学大学院博士課程後期在学生吉富貞幸氏、安田陽氏に感謝の意を表します。

文献

- (1) 内田：特集・太陽電池の開発とその応用 “アモルファス太陽電池” OHM Vol.7 1980 p29-32
- (2) 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 1985
- (3) 熊野、他：離島用太陽光発電システムの運転 電気学会新・省エネルギー研究会 ESC-86-14 p49-58 1986
- (4) 太陽エネルギー利用システムの現状と将来：電気学会技術報告（Ⅱ）第26号 1988
- (5) 逸見、他：自然環境エネルギー発電システムに関する研究 電学論 Vol.107-B 1987
- (6) 逸見、安田：太陽電池の出力特性に関する一考察 第7回エネルギーシステム・経済コンファレンス 6-1 1991
- (7) J. Itsumi: A Study on the Output power Degradation of Solar Battery INREC'90 E-13 1990
- (8) 逸見：太陽電池の出力特性を短時間に評価する測定法に関する考察 太陽エネルギー学会、風力エネルギー協会合同研究会 6 1988
- (9) 山田：太陽光発電システムの技術 ELAN 1988 p10-14
- (10) H. Murozono et al.: Technical Digest of the International PVSEC-1 kobe Japan 1984 p289
- (11) 柴田、内嶋編：太陽エネルギーの分布と測定 日本分光学会測定法シリーズ15 1987
- (12) 日本太陽エネルギー学会編：太陽エネルギーの基礎と応用 丸井社 1980
- (13) 桑野幸徳：太陽電池とその応用 パワー社 1985
- (14) 日本太陽エネルギー学会編：太陽エネルギー読本 丸井社 1985
- (15) 武田：S i 太陽電池の実用化研究 電学大全 S.5-4 1982
- (16) 下川：太陽電池の光電物性と測定・評価法に関する研究 電総研究報告 880号 1987
- (17) 黒川：太陽光発電技術の標準化検討の現状と問題点 電気学会研究会 ESC-88-4 1988
- (18) 長島：太陽電池評価システム 英弘精機（株） 1989