

# 発電電力が低下したPVモジュールのI-V特性に及ぼすPVセルの逆バイアス特性の影響

Effect of the Reverse Bias Characteristics of a PV Cells on I-V Characteristics of PV Module with a Cell Lowered the Generating Power

山中三四郎<sup>\*1</sup>  
Sanshiro YAMANAKA

三品徳久<sup>\*2</sup>  
Tokuhisa MISHINA

河村一<sup>\*3</sup>  
Hajime KAWAMURA

河村英昭<sup>\*4</sup>  
Hideaki KAWAMURA

大野英之<sup>\*5</sup>  
Hideyuki OHNO

内藤克彦<sup>\*5</sup>  
Katsuhiko NAITO

## Abstract

The authors are studying the diagnostic method for a Photovoltaic system. Until now, it has been clarified that the shape of I-V curve of PV module with a cell lowered the generating power is different from the shape of I-V curve of normal PV module. In this paper, the I-V curve of PV cell in the reverse bias characteristics was investigated by utilizing the I-V curve of PV module with the cell lowered the generating power. The each I-V curve of the multicrystal PV cell and single crystal PV cell in the reverse bias characteristics were compared. And the shunt resistance of each PV cell was calculated from the I-V curve of PV module by the curve fitting method.

As the results, it is clear that the I-V curve of multicrystal PV cell in reverse bias region has the variation, while the I-V curve of single crystal PV cell is almost similarity.

キーワード：太陽電池モジュール、I-V特性、逆バイアス特性、シャント抵抗、シミュレーション  
Key Words: Photovoltaic Module, I-V Characteristic, Reverse Bias Characteristic, Shunt resistance, Simulation

## 1. はじめに

20世紀の人類は太陽エネルギーの蓄積である化石燃料をふんだんに使用し、科学技術や経済の著しい発展を遂げてきた。しかし、化石燃料の大量消費に伴い、地球温暖化問題やエネルギー資源枯渇問題を引き起こした。地球温暖化問題に関しては、2100年には平均気温が約2°C上昇すると予想されており、このままでは海面の上昇は避けられない。現在、世界中でこれらの環境問題の解決に向けて国際的な取組みがなされている<sup>①</sup>。その一つとして、クリーンで無尽蔵である太陽エネルギーを利用した太陽光発電システム(PVシステム)の導入が進められている。日本においても、太陽電池の生産量ならびに太陽電池を設置した住

宅が年々増加しており<sup>②</sup>、今後さらに大規模な太陽光発電システムも導入されることが予想される。太陽電池の出力は、自然環境の変化に伴い絶えず変動するため、その状況下で周囲建造物による影<sup>③</sup>、経年劣化に伴う剥離・白濁<sup>④⑤</sup>、PVモジュール表面に付着した汚れ<sup>⑥</sup>、断線などの様々な損失因子による発電電力の低下との区別が難しく、これらの損失因子を早期に発見することは困難である。また、PVシステムの規模が拡大するにつれ、定期的に保守・点検することも困難となる。そのためPVシステムの発電性能を評価する診断技術が、システムの普及と共に重要な役割を果す。

筆者らはI-V特性を利用して、PVアレイの発電電力低下を診断する方法について検討している。診断法の構築にあたり、様々な状態におけるPVアレイのI-V特性を計測して検討することも必要であるが、PVアレイは直並列接続された数枚のPVモジュールから構成されているため、PVアレイを用いて診断方法を検討した場合、様々な損失因子が影響してしまい、診断法を構築するという本質を見失う可能性がある。従って、まずPVアレイを最もシンプルにした状態である、バイパスダイオードを接続した一枚のPVモジュールを用いて検討を行っている。これまでの

\*1 会員 名城大学理工学部電気電子工学科 助教授  
(〒468-8502 愛知県名古屋市天白区塩釜口一丁目501番地)

e-mail : yamanaka@ccmfs.meijo-u.ac.jp

\*2 学生員 名城大学大学院理工学研究科 院生

\*3 会員 名城大学理工学部電気電子工学科 講師

\*4 会員 名城大学理工学部電気電子工学科 教授

\*5 非会員 名城大学理工学部電気電子工学科 教授

(原稿受付：2002年9月5日)

研究において、PVモジュールを構成している一部分のセルの発電電力が低下した場合、I-V特性の形状が変化することを明らかにし<sup>3,7)</sup>、この形状変化を利用した太陽電池の発電電力低下を診断する方法について検討してきた<sup>8,9)</sup>。しかしI-V特性の形状は、発電電力が低下しているセルの枚数や状況によって複雑に変化する<sup>10)</sup>ため、発電電力が低下したセルがPVモジュールのI-V特性に及ぼす影響について詳細に検討する必要がある。

本論文では、損失因子の一つである影に着目し、影によって発電電力の低下したセルがPVモジュールのI-V特性に及ぼす影響について検討している。即ち、発電電力の低下したセルを含むPVモジュールのI-V特性は、そのセルの逆バイアス特性が影響している<sup>3)</sup>。そこで、セル一枚の発電電力を低下させたPVモジュールのI-V特性について、発電電力を低下させるセルを変化させた場合のPVモジュールのI-V特性を比較し、各セルの逆バイアス方向のI-V特性について検討した。また、種類の違いによるセルのI-V特性を比較するため、多結晶太陽電池モジュールと単結晶太陽電池モジュールについて、各セルがPVモジュールに及ぼす影響を比較した。さらにセルの逆バイアス方向におけるI-V特性の傾きは、セルのシャント抵抗に依存していることから、PVモジュールのI-V特性の形状より発電電力が低下したセルのシャント抵抗の推定を行った。

## 2. 太陽電池モジュールと計測システム

名城大学2号館屋上に、多結晶太陽電池モジュール(セル36枚直列接続)と単結晶太陽電池モジュール(セル44枚直列接続)を方位角:南、仰角:35°の条件で設置した。PVモジュールのI-V特性等は、KEITHLEY製Switch System(Model 7002)によりPVモジュールを定期的に切り替えながら、英弘精機製I-Vカーブトレーサー(MP123B)を使用し、午前4時から午後8時まで約10分間隔で自動計測を行っている。また、日射強度はPVモジュールと同条件で設置した英弘精機製全天日射計(MS-601)を使用し、PVモジュールの裏面温度は、各PVモジュールの裏面中央付近に貼り付けた熱電対を用いて、I-V特性と同時に自動計測を行っている。

影がかかったPVモジュールのI-V特性を検討するために、PVモジュールの前に障害物を設置した。Fig.1はPVモジュールに影をかけるための障害物とPVモジュールの配置を示す。障害物はPVモジュールの南側300mm離れた地点に、縦:1000mm、横:200mm、厚さ:10mmの木の板を地面に対し垂直に設置し、時間によって変化する影を模擬した。また木の板は、PVモジュールの西側の端に設置し、正午過ぎからPVモジュールに影がかかるようにした。

Fig.2は設置したPVモジュールの概略図を示す。一般にPVアレイはバイパスダイオードが接続されているため、セルが36枚直列接続されたPVモジュールを2ブロックに

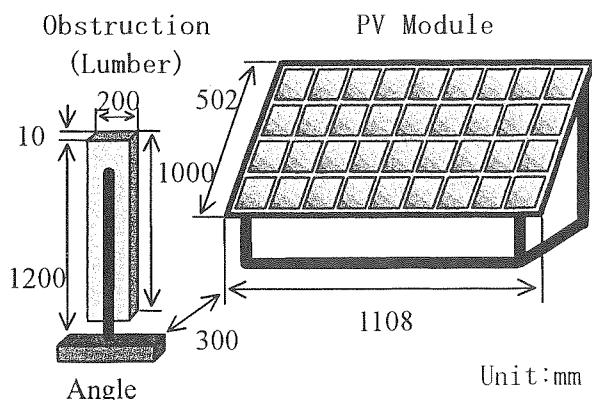


Fig.1 Schematic diagram of PV module and Obstruction

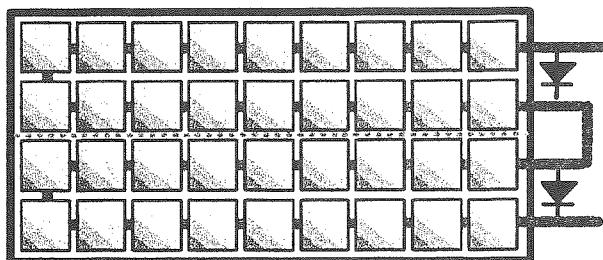


Fig.2 The PV module connected a bypass diode to 18cells in parallel

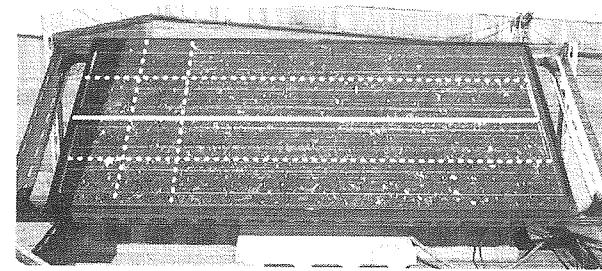
分離するように、直列接続されたセル18枚につきバイパスダイオードを並列に接続して、最も簡単なPVアレイを模擬している。つまり、このPVモジュールはセル18枚から構成され、バイパスダイオードが接続されたPVモジュールを2枚直列接続したサブアレイとして考えることができる。

## 3. 実験結果及び検討

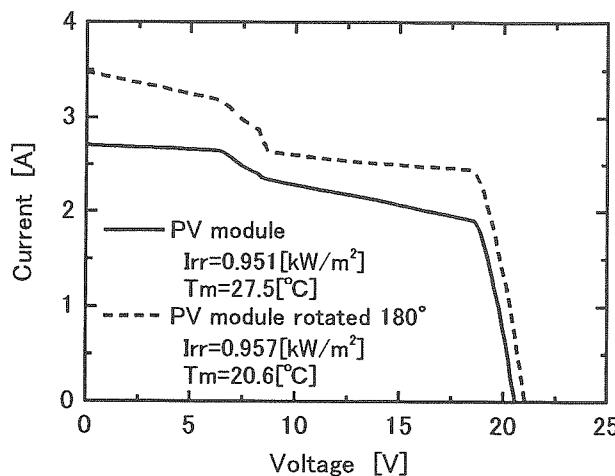
### 3.1 複数のセルが影で覆われたPVモジュールのI-V特性

Fig.3(a)とFig.3(b)の実線はそれぞれ2002年1月6日12時28分( $Irr=0.951\text{[kW/m}^2\text{]}, Tm=27.5\text{[}^\circ\text{C}]$ )における多結晶太陽電池モジュールの影の様子と、このとき測定されたI-V特性を示す。Fig.3(a)で明らかなように障害物の影が複数のセルにかかっており、しかも各セルにかかっている影の面積が僅かに異なっている。このため、I-V特性的形状が複雑に変化している。一般に設置されているPVアレイは、セル1枚のみに影がかかる場合は少なく、複数のセルに影がかかり発電電力を低下させる場合が多いと思われる。そのため、そのI-V特性は複雑な形状となることがこの結果より類推できる。

PVモジュールを構成しているセルにかかる影の状態が



(a) The condition of the PV module at 12:30



(b) The I-V curves of PV module

Fig.3 The I-V curves of PV module with shaded cells and the visual observation

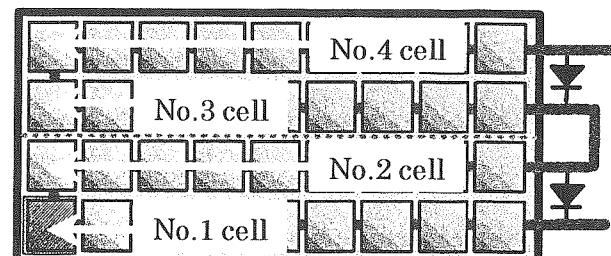
等しければ、どのセルに影がかかっても I-V 特性の形状が等しくなると思われる。そこで障害物は移動せず、PV モジュールのみを 180 度回転させて設置し、影のかかるセルを変えて実験を行った。Fig. 3(b)の破線は 2002 年 1 月 8 日 12 時 27 分 ( $Irr=0.957 \text{ [kW/m}^2\text{]}$ ,  $T_m=20.6 \text{ [°C]}$ ) に測定した I-V 特性を示す。2 日後のほぼ同時刻であるため、影のかかり方は等しいと考えることができる。180 度回転させた PV モジュールの I-V 特性は、日射強度、裏面温度、大気の状態などが僅かに異なることを考慮しても、回転前の状態で測定された I-V 特性と比較すると、その傾きは明らかに異なっていることが分かる。

一般に多結晶太陽電池セルの I-V 特性にはばらつきがあることが知られており<sup>11)</sup>、発電電力の低下したセルが存在する PV モジュールは、そのセルの特性が PV モジュールの I-V 特性に影響するので、影のかかったセルの特性によって PV モジュールの I-V 特性の形状が異なってくる。そのため Fig. 3 で示すように、PV モジュールにかかる影の状態が等しくても、影のかかるセルによって PV モジュールの I-V 特性が異なったと考えることができる。

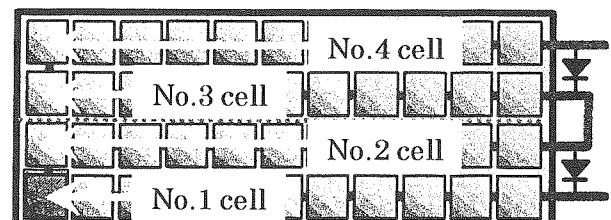
### 3.2 発電電力の低下した多結晶太陽電池セルと単結晶太陽電池セルが PV モジュールの I-V 特性に及ぼす影響

PV モジュールを構成しているセルの中の一枚について発電電力を強制的に低下させた場合の PV モジュールの I-V 特性を求め、発電電力を低下させたセルが PV モジュールに及ぼす影響を調べた。また、結晶構造の異なるセルが PV モジュールに及ぼす影響を比較するために、多結晶太陽電池モジュールと単結晶太陽電池モジュールについて検討を行った。Fig. 4(a)はセル一枚の発電電力を低下させた多結晶太陽電池モジュール、Fig. 4(b)は単結晶太陽電池モジュールの概略図である。また、発電電力を低下させたセルに図に示すような番号を決めた。セル一枚の発電電力を低下させるために、セルと等しい大きさに切り取った透過率 35% の遮光フィルムを一枚のセルに貼り付け、セルに到達する日射強度を強制的に低下させている。

Fig. 5(a)から(d)は Fig. 4(a)で示す多結晶太陽電池モジュール中の No. 1 から No. 4 のそれぞれのセルの発電電力を低下させた場合の I-V 特性を示したものである。この PV モジュールはバイパスダイオードが接続されているため、電圧 10 [V] 前後に折れ曲がり点が存在し、発電電力が低下したセルを含むブロックの I-V 特性は、折れ曲がり点より大きい高電圧側の特性に現れる<sup>12)</sup>。以上を考慮し Fig. 5 の I-V 特性を比較すると、裏面温度の僅かな差によって開放電圧が変化していると思われるものの、ほぼ同一条件で計測されていると考えることができる。しかし、PV モジュールの高電圧側の I-V 特性の傾きは、発電電力が低下したセルの位置によって明らかに異なっていることが



(a) The multicrystal PV module



(b) The single crystal PV module

Fig.4 Schematic diagram of PV module and the position of the cell lowered the generating power

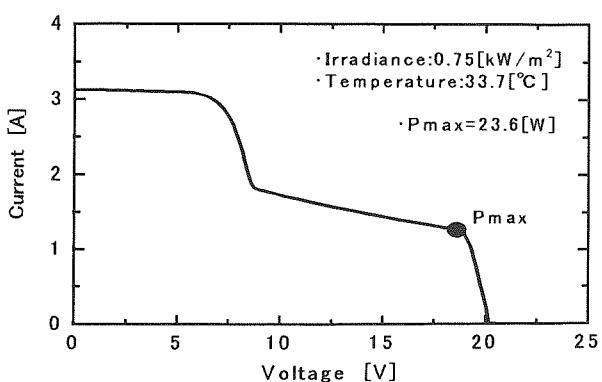
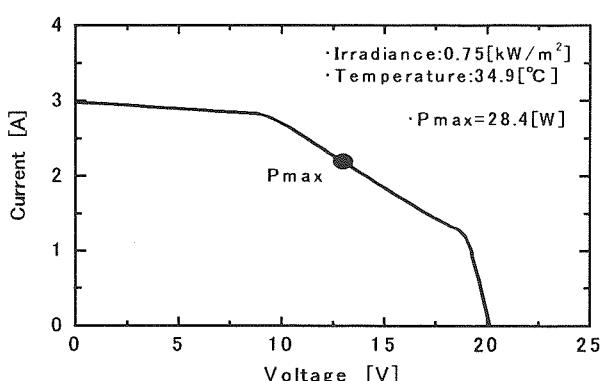
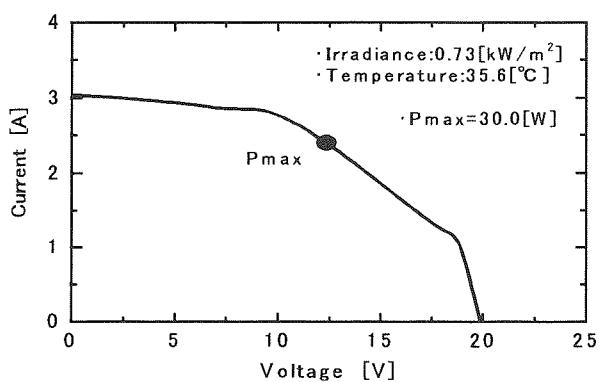
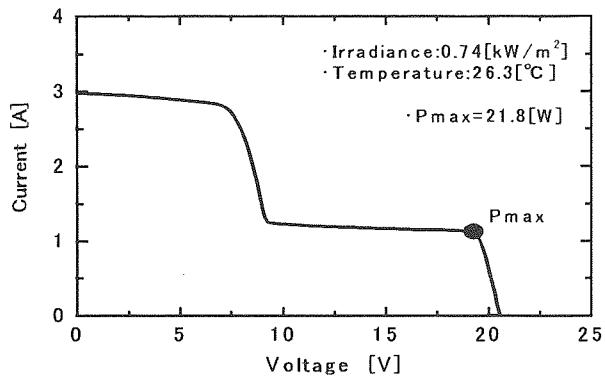


Fig.5 The comparison of I-V curves of multicrystalline PV module

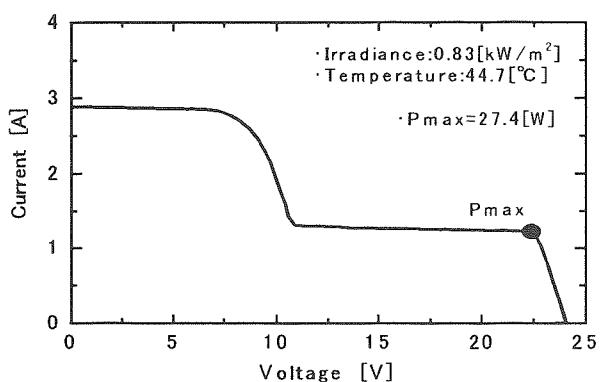
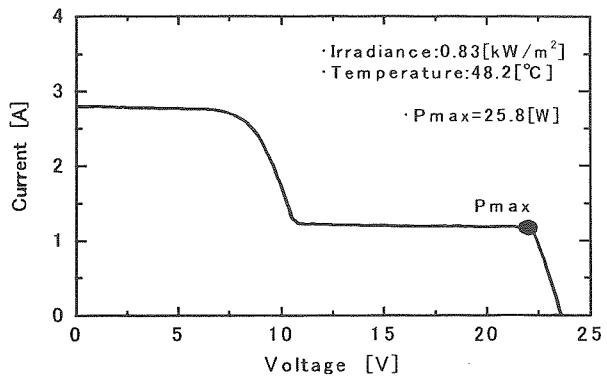


Fig.6 The comparison of I-V curves of single crystal PV module

分かる。このことは、セルの発電電力を低下させる実験条件が同じであることから、各セルのI-V特性の違いが示唆される。また、図中●印で示すように、発電電力を低下したセルの配置によって、PVモジュールの発電電力も大きく異なることを示している。

Fig.6はFig.4(b)で示す単結晶太陽電池モジュール中のNo.1とNo.2のセルの発電電力を低下させた場合のI-V特性を示す。このPVモジュールについてもバイパスダイオードが接続されているため、発電電力を低下したセルを含むブロックのI-V特性は、折れ曲がり点より大きい高電圧側の特性に現れている。Fig.6のI-V特性を比較すると、発電電力を低下させたセルに関係なく、PVモジュールのI-V特性の形状が等しくなっている。そのため最適動作電圧も等しく、発電電力を低下したセルに依存せず、PVモジュールの発電電力はほぼ等しくなっている。また、No.3とNo.4セルの発電電力を低下させた場合も、PVモジュールのI-V特性はFig.6で示すI-V特性の形状とほぼ同じであった。故に、各セルのI-V特性がほぼ等しいということが示唆される。

本実験では各結晶PVモジュールとも1社について実験結果を示したが、その他多結晶は2社、単結晶は1社につ

いても同様の傾向があることを確認している。多結晶太陽電池モジュールは発電電力が低下するセルによってPVモジュールのI-V特性の形状は異なり、単結晶太陽電池モジュールでは発電電力が低下したセルに依存せず、PVモジュールのI-V特性の形状はほぼ等しくなる傾向があることが分かった。

### 3.3 発電電力が低下したセルのI-V特性がPVモジュールのI-V特性に及ぼす影響に関する検討

多結晶太陽電池モジュールは、発電電力が低下したセルの位置によってPVモジュールのI-V特性の形状が大きく異なり、この結果セルのI-V特性が異なることが示唆される。そこで本節では、発電電力の低下したセルの位置によってPVモジュールのI-V特性の形状が変化するのは、セルの逆バイアス特性の違いによるものと考え、シミュレーションによって検討する。尚、バイパスダイオードが接続されているPVモジュールのI-V特性は、高電圧側と低電圧側の特性に分離して考えることが可能であり、発電電力が低下したセルを含むブロックのI-V特性は高電圧側の特性に現れる<sup>12)</sup>。そこで高電圧側の特性について、発電電力が低下したセルのI-V特性がPVモジュールのI-V特性に及ぼす影響のみを詳細に検討するためにバイパスダイオードを外し、セル36枚が直列接続されているPVモジュールのI-V特性についてシミュレーションを行う。

今、日射強度0.85[kW/m<sup>2</sup>]において、発電電力を35%に低下させた一枚のセルを含むPVモジュールのI-V特性をシミュレーションによって求めてみる。式(1)は正常に動作しているセルの逆バイアス特性を考慮したI-V特性式、式(2)は発電電力が低下したセルのI-V特性式を示す。

$$I_1 = I_{ph1} - I_o \left[ \text{Exp} \left( q \frac{\frac{V_1}{m_1} + R_s I_1}{nkT} - 1 \right) \right] \quad \dots (1)$$

$$- \frac{\frac{V_1}{m_1} + R_s I_1}{R_{sh}} - a \left( \frac{V_1}{m_1} + R_s I_1 \right) \left( 1 - \frac{\frac{V_1}{m_1} + R_s I_1}{V_{br}} \right)^{nn}$$

$$I_2 = I_{ph2} - I_o \left[ \text{Exp} \left( q \frac{\frac{V_2}{m_2} + R_s I_2}{nkT} - 1 \right) \right] \quad \dots (2)$$

$$- \frac{\frac{V_2}{m_2} + R_s I_2}{R_{sh}} - a \left( \frac{V_2}{m_2} + R_s I_2 \right) \left( 1 - \frac{\frac{V_2}{m_2} + R_s I_2}{V_{br}} \right)^{nn}$$

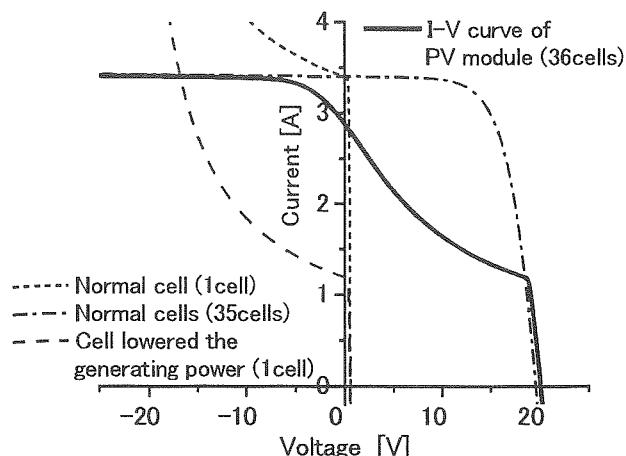
ここで、 $I_1$ は正常に動作しているセルの電流[A]、 $I_{ph1}$ は正常に動作しているセルの光電流[A]、 $I_o$ はセルの暗電流[A] ( $=3.86 \times 10^{-5}$ )、 $q$ は素電荷量[C] ( $=1.60 \times 10^{-19}$ )、 $V_1$ は正常に動作しているセルの電圧[V]、 $m_1$ は正常に動作しているセルの枚数[枚] ( $=35$ )、 $n$ はダイオード因子 ( $=1.97$ )、 $k$ はボルツマン定数[J/K] ( $=1.38 \times 10^{-23}$ )、 $T$ は絶対温度[K] ( $=25+273.15$ )、 $R_s$ は直列抵抗[Ω] ( $=0.001$ )、 $R_{sh}$ はシャント抵抗[Ω] ( $=300.0$ )、 $V_{br}$ はセルの破壊電圧[V] ( $=-21.29$ )、 $a$ は定数 ( $=3.5 \times 10^{-2}$ )、 $nn$ は定数 ( $=1.0$ )、そして $I_2$ は発電電力の低下したセルの電流[A]、 $I_{ph2}$ は発電電力の低下したセルの光電流[A]、 $V_2$ は発電電力の低下したセルの電圧[V]、 $m_2$ は発電電力の低下したセルの枚数[枚] ( $=1$ )である。尚、今回のシミュレーションには( )内の数値を用いた<sup>13)</sup>。

式中の $I_{ph}$ は日射強度と比例関係にあり、しかも発電電力の低下したセルの $I_{ph2}$ は、セルに到達する日射強度が低下したものと考えることができる。従って、発電電力が低下したセルの $I_{ph}$ は式(3)で与えることができる<sup>14)</sup>。

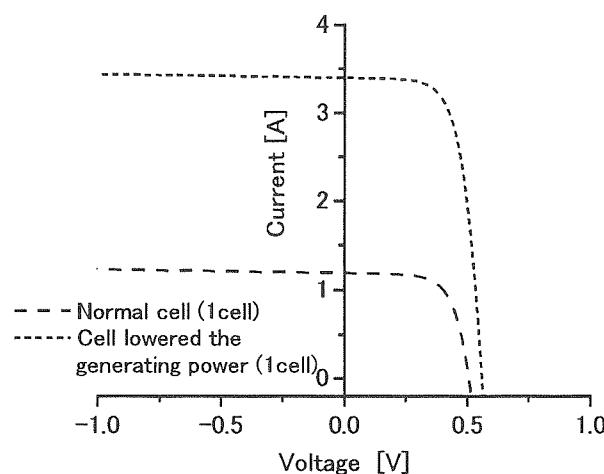
$$I_{ph} = I_{phn} \times Irr \times \frac{\beta}{100} \quad \dots (3)$$

ここで、 $I_{phn}$ は標準状態の光電流[A] ( $=4.0$ )、 $Irr$ は日射強度[kW/m<sup>2</sup>]、 $\beta$ は遮光フィルムの透過率[%]である。故に、正常に動作しているセルの $I_{ph1}$ は、透過率 $\beta=100$ 、日射強度 $Irr=0.85$ [kW/m<sup>2</sup>]の条件より、 $I_{ph1}=3.40$ [A]が得られる。また、発電電力が低下したセルの $I_{ph2}$ は、透過率 $\beta=35$ 、日射強度 $Irr=0.85$ [kW/m<sup>2</sup>]の条件より、 $I_{ph2}=1.19$ [A]が得られる。

発電電力が低下したセルを含むPVモジュールの等価回路は、正常に動作しているセルと発電電力が低下しているセルの直列接続として考えることができることから<sup>15)</sup>、PVモジュールのI-V特性は正常動作しているセルのI-V特性と発電電力が低下しているセルのI-V特性の重ね合わせ法により求めることができる<sup>16)</sup>。Fig.7(a)は日射強度0.85[kW/m<sup>2</sup>]において、発電電力を35%に低下させた一枚のセルを含むPVモジュールのI-V特性をシミュレーションによって求めた結果、Fig.7(b)はFig.7(a)に示した発電電力を低下させたセルと正常動作しているセルのI-V特性について、電圧0[V]付近を拡大した結果である。Fig.7(a)で示す1点鎖線のI-V特性は、正常に動作している1枚のセル(点線)を35枚合成した結果である。この場合、PVモジュールの破壊電圧はセル35枚を合成するため第二象限の負電圧方向に大きく移行し、この図中には現れていない。一方、Fig.7(b)の破線で示すように、発電電力の低下したセルの短絡電流は正常動作しているセルに比べ低下し、またFig.7(a)で示すようにセルの逆バイアス方向のI-V特性は破壊電圧付近で急増する。従って、発電電力の低下したセル(1枚)を含むPVモジュールのI-V特性は、発電電力の低下したセルのI-V特性と正常動作して



(a) The I-V curve of PV module synthesized I-V curves of each cell



(b) The I-V curves of PV cell (macrograph)

Fig. 7 The I-V curve of PV module considering the reverse bias characteristics

いるセル(35枚)のI-V特性の合成したものとなり、Fig. 7(a)の実線で示すようにその形状は著しく変化していることが分かる。

この結果、PVモジュールを構成しているセルの中で発電電力が低下したセルの逆バイアス方向のI-V特性が、形状変化したPVモジュールのI-V特性に現れていることが明らかとなった。従って、Fig. 5のI-V特性は、発電電力が低下したNo. 1セルからNo. 4セルの逆バイアス特性であることを示している。以上のように、多結晶太陽電池モジュールを構成しているセルそれぞれの逆バイアス特性は、ばらつきが大きく、互いに異なっていることも明らかとなった。一方、Fig. 6で示すように単結晶太陽電池モジュールのI-V特性は、どのセルの発電電力を低下させてもほぼ等しいことより、それぞれのセルの逆バイアス特性は、ばらつきが少なく、ほぼ同じ特性であることが明らかとなつた。

### 3.4 セルのシャント抵抗がPVモジュールのI-V特性に及ぼす影響に関する検討

発電電力が低下した一枚のセルを含むPVモジュールのI-V特性は、発電電力の低下したセルの逆バイアス方向におけるI-V特性の形状が現れていることが分かった。故に、PVモジュールのI-V特性を利用して、セルの逆バイアス特性を評価することが可能と思われる。

発電電力が低下したセルを含むPVモジュールのI-V特性は、正常に動作しているセルと発電電力が低下したセルのI-V特性を合成することで求まるので、発電電力が低下したセルのI-V特性式(2)を用いてカーブフィッティング法により評価することができる。しかし式(2)から明らかのように、セルの特性を決定するパラメータの数が多く、複雑に関与しているため、計測されたPVモジュールの第一象限のI-V特性と一致するようカーブフィッティングを行うことは困難である。そこで簡易的に検討するため、以後破壊電圧を無視して考察することにする。

Fig. 8は発電電力を35%に低下させたセルを含むPVモジュールのI-V特性を示す。図中の実線で示すように、発電電力が低下したセルの逆バイアス方向のI-V特性は、破壊電圧付近(②領域)で電流が急増しているが、①で示す領域では電流の増加はほぼ一定であることが分かる。つまり、PVセルの逆バイアス方向のI-V特性は、線形領域(①)と破壊電圧付近の非線形領域(②)に分離して考えることができる。従って、定的な線形領域のI-V特性を考える場合は、式(2)右辺中の非線形領域を表す第4項目を無視することができる。その結果、式(4)は破壊電圧を無視したセルのI-V特性式であり、図中の破線で示すI-V特性となる。故に、セルの逆バイアス方向のI-V特性(線形領域)の傾きはシャント抵抗によって決まると考えることができる。

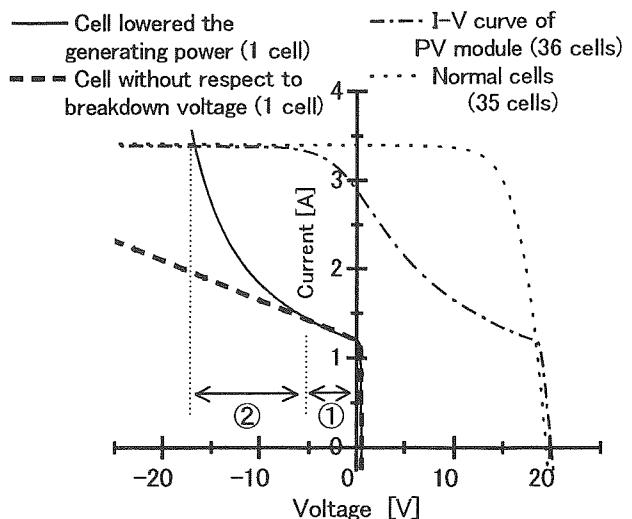


Fig. 8 The Separation of I-V curve in the reverse bias region

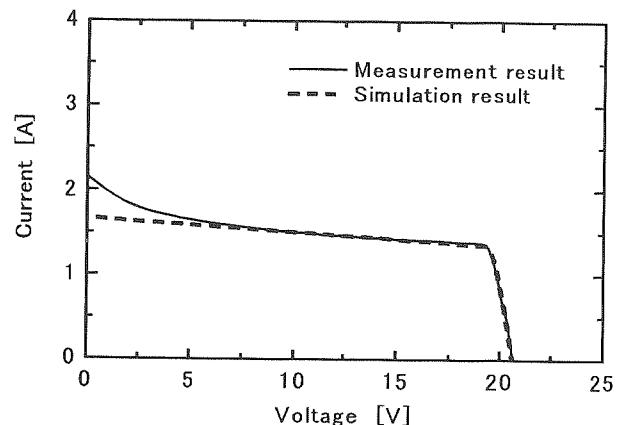
$$I_2 = I_{ph2} - I_0 \left[ \exp \left( q \frac{\frac{V_2}{m_2} + R_s I_2}{n k T} - 1 \right) \right] - \frac{\frac{V_2}{m_2} + R_s I_2}{R_{sh}} \quad \dots (4)$$

き、式(4)を用いて求めたI-V特性のシミュレーション結果をPVモジュールのI-V特性(線形領域)にカーブフィッティングさせることによって、発電電力を低下させたセルのシャント抵抗を推定することができる。

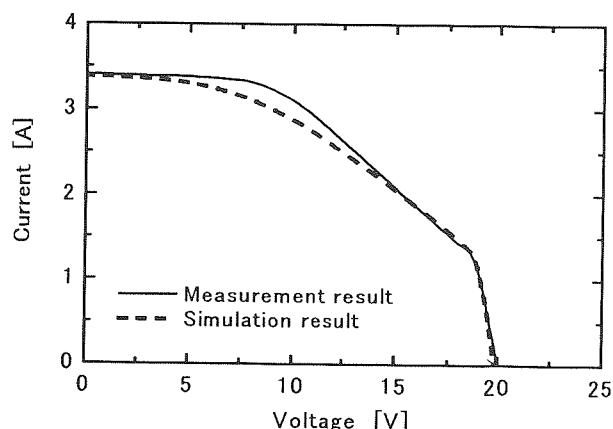
そこで、多結晶太陽電池モジュールを構成している各セルのシャント抵抗をカーブフィッティングによって求めてみることにする。但し、バイパスダイオードを接続したPVモジュールは、Fig. 5及びFig. 6で示すように発電電力を低下させたセルの逆バイアス特性がPVモジュールの高電圧側、つまり約10[V]から20[V]の領域に現れる。一方、バイパスダイオードを外したPVモジュールは、Fig. 7(a)に示すように発電電力を低下させたセルの逆バイアス特性がPVモジュールの第一象限全域に現れるため、逆バイアス特性の現れる範囲が広くなる。従って、発電電力を低下させたセルの逆バイアス特性をより詳細に検討するために、並列に接続していたバイパスダイオードを外し、セル36枚直列に接続された状態で計測を行うこととする。

Fig. 9(a)は多結晶太陽電池モジュールを構成しているNo.1セルの発電電力を35%に低下させたPVモジュールのI-V特性の測定結果(実線)と、式(4)を用いて計算したシミュレーション結果(破線)である。シミュレーションによって求めたセルのI-V特性は、破壊電圧を考慮せずに求めた結果であるため直線となる。この結果、PVモジュールの第一象限に現れる線形領域のI-V特性とカーブフィッティングすることにより、No.1セルのシャント抵抗を80.0[Ω]と評価することができた。またこのセルの線形領域と非線形領域との境界は約8[V]と明確となっている。

同様にNo.2セルのシャント抵抗をカーブフィッティングによって求めてみる。Fig. 9(b)はNo.2セルの発電電力を低下させたPVモジュールのI-V特性の測定結果(実線)とNo.2セルのシャント抵抗を4.0[Ω]としてシミュレーションを行った結果(破線)を比較したものである。図に示すように、セルの逆バイアス特性が現れる約17[V]から19[V]の領域では、I-V特性の傾きが一致しているように見られるが、Fig. 9(b)に示す計測したI-V特性はNo.1セルの場合とは異なり線形領域と非線形領域との境界が不明確となっている。つまり、No.2セルの破壊電圧が小さ



(a) The I-V curve of PV module lowered the generating power of No.1 cell



(b) The I-V curve of PV module lowered the generating power of No.2 cell

Fig.9 The comparison of measurement result and simulation result

いため、Fig. 8の実線で示すI-V特性の非線形領域(②)が線形領域(①)に重畳していることが示唆される。従って、線形領域のみを利用して求めるこの方法では、No.2セルのシャント抵抗を求めるることは不可能である。以上のように、逆バイアス方向のI-V特性の線形領域を利用してセルのシャント抵抗を求める今回の方法では、破壊電圧が小さく、セルの逆バイアス領域のI-V特性において線形領域と非線形領域の境界が明確でないセルについては、カーブフィッティングによってシャント抵抗を求ることは不可能であることも示唆された。

Table 1 The shunt resistance of cells calculated from the I-V curve

Number of cells	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10	No.11	No.12
Shunt resistance Rsh [Ω]	80.0	—	—	22.0	58.0	9.0	—	11.0	67.0	—	—	21.0

Table 1 は以上のように PV モジュールを構成しているセル 12 枚のシャント抵抗をシミュレーションによって求めた結果である。PV モジュール中の No. 5 セルの位置は No. 1 セルの隣、No. 8 セルは No. 4 セルの隣のセルである。表中の空白は、セルの破壊電圧が小さく逆バイアス方向の I-V 特性において線形領域と非線形領域の境界が不明確であるため、シャント抵抗を求めることができないセルを示す。表から明らかなように、多結晶太陽電池モジュールを構成しているセルのシャント抵抗は、かなりのばらつきがあることが分かった。

次に、シャント抵抗のばらつきが PV モジュールの I-V 特性に与える影響について検討を加えてみる。Fig. 10 は日射強度  $0.85 [\text{kW}/\text{m}^2]$ において、PV モジュールを構成している全てのセルのシャント抵抗が  $9.0 [\Omega]$ （実線）と  $\infty [\Omega]$ （破線）である場合の I-V 特性をシミュレーションによって求めた結果である。これらは全てのセルが正常に動作している PV モジュールの I-V 特性であり、発電電力が低下したセルは含まれていない。Fig. 10 に示すように全てのセルが正常動作している PV モジュールは、ある程度の日射強度の高い領域ではシャント抵抗が大きく異なっても第一象限の I-V 特性には大きな差はないことが分かる。

以上の結果、多結晶太陽電池モジュールを構成しているセルのシャント抵抗はばらつきが大きいが、日射強度が高い領域では PV モジュールの第一象限に現れる I-V 特性には大きな影響を及ぼすことがなく、セルの逆バイアス特性に影響することが分かった。

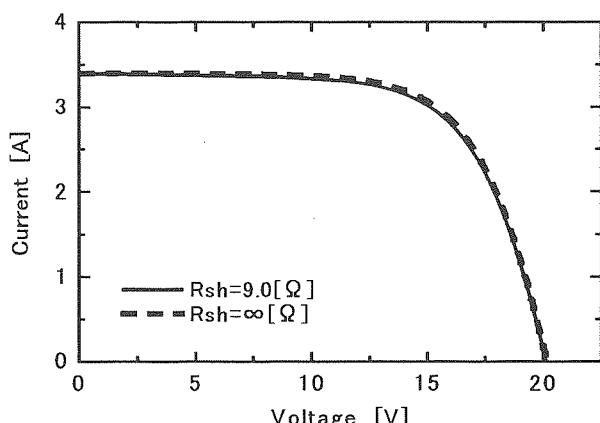


Fig.10 The I-V curves of PV module calculated by simulation as a parameter of shunt resistance

#### 4.まとめ

本研究は、発電電力が低下したセルを含む多結晶太陽電池モジュールと単結晶太陽電池モジュールについて、そのセルの逆バイアス特性を求め、PV モジュールの I-V 特性に及ぼす影響を検討した。以下にその結果を要約する。

① PV モジュールを構成しているセルの一枚の発電電力を強制的に低下させることによって、セルの逆バイアス方向の I-V 特性が形状変化した PV モジュールの I-V 特性に現れる。

② 測定した多結晶太陽電池モジュールは、セルによって逆バイアス方向の I-V 特性の形状は大きく異なることが明らかとなった。つまり、セルに到達する日射強度の低下率が等しくても、低下したセルによって PV モジュールの I-V 特性の形状が異なる。

③ 測定した多結晶太陽電池セルは、逆バイアス方向の I-V 特性のばらつきが大きいが、測定した単結晶太陽電池セルは逆バイアス方向の I-V 特性にばらつきはほとんどない。

④ セル一枚の発電電力が低下した PV モジュールの第一象限の I-V 特性から、そのセルのシャント抵抗を求めることが可能である。但し、破壊電圧が小さくセルの逆バイアス領域の I-V 特性に線形領域と非線形領域の境界が不明確であるセルについてはシャント抵抗を求めることが不可能である。

太陽電池モジュールの一部分の発電電力が低下し形状変化した I-V 特性は、発電電力が低下したセルの逆バイアス特性によって決まることが明らかとなった。本研究では、発電電力を低下させる損失因子として、影に注目し検討を行ったが、これは影に限ったことではなく、他の損失因子によって発電電力が低下した場合も同様に評価することができる。今後は、I-V 特性を利用した発電能力低下診断法の開発、及び発電能力を低下させている損失因子の特定も行えるよう検討していく予定である。

#### 参考文献

- 1) 国連気象変動枠組条約事務局 (UNFCCC), ホームページ; <http://unfccc.int/>
- 2) 財団法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), ホームページ; <http://www.nedo.go.jp>
- 3) 河村, 他;「太陽電池モジュールの I-V 特性に及ぼす影の影響」 太陽エネルギー, Vol. 27, No. 6, pp. 41-pp. 49 (2001)
- 4) 菊川, 他;「太陽電池モジュールの屋外暴露による出力変化」 電気学会 電力・エネルギー部門大会論文集(分冊 A), 231, pp. 663-pp. 664 (2001)
- 5) 北村, 他;「太陽電池モジュールの長期使用による劣化現象」 電気学会 電力・エネルギー部門大会論文集(分冊 A), 229, pp. 659-pp. 660 (2001)
- 6) DIRK GOOSSENS et al. ; "AEOLIAN DUST DEPOSITION ON

- PHOTOVOLTAIC SOLAR CELLS: THE EFFECTS OF WIND VELOCITY AND AIRBORNE DUST CONCENTRATION ON CELL PERFORMANCE” Solar Energy, Vol. 66, No. 4, pp. 277-pp. 289 (1999)
- 7) 渡辺, 他;「部分的な陰を含んだ太陽電池の発電特性に関する検討」 電気学会全国大会講演論文集, 4-910, pp. 203-pp. 204 (1997)
- 8) 三品, 他;「太陽電池モジュールの I-V 特性の自動解析に関する検討」 太陽/風力エネルギー講演論文集, 18, pp. 69-pp. 72 (2001)
- 9) 三品, 他;「I-V 特性による太陽電池アレイにかかる影の定量的な評価方法」 電気学会 電力・エネルギー部門大会論文集(分冊 A), 228, pp. 657-pp. 658 (2001)
- 10) 米倉, 他;「時間的に変化する影が太陽電池の発電特性に及ぼす影響」 太陽/風力エネルギー講演論文集, 24, pp. 89-pp. 92 (2001)
- 11) VOLKER QUASCHNING et al. ; “NUMERICAL SIMULATION OF CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS WITH SHADED SOLAR CELLS” Solar Energy, Vol. 56, No. 6, pp. 513-pp. 520 (1996)
- 12) 米倉, 他;「部分的に影で覆われた太陽電池サブアレイの I-V 特性」 電気学会全国大会講演論文集, 7-147, p. 3036 (2001)
- 13) 中, 他;「部分的に影の付いた太陽電池モジュールの I-V 特性シミュレーション-異なる面積の影がついた場合(II)-」 太陽/風力エネルギー講演論文集, 25, pp. 93-pp. 96 (2001)
- 14) 山下, 他;「環境因子を考慮した太陽電池モジュールの出力計算法」 太陽エネルギー, Vol. 23, No. 3, pp. 54- pp. 61 (1997)
- 15) 中, 他;「部分的に影のかかった太陽電池の I-V 特性シミュレーション-シャント抵抗を考慮した場合-」 電気関係学会東海支部連合大会, 116, p. 58 (2000)
- 16) 松川, 他;「建築設計のための太陽電池アレイシミュレーション手法に関する検討-I-V カーブ合成法の検討と単セル PV モジュールを用いたアレイ実験による日影損失分析-」 太陽/風力エネルギー講演論文集, 16, pp. 57-pp. 60 (1999)