

## 太陽光発電システムの不具合事例の分析・評価(2)

－産総研太陽光発電設備における不具合事例－

A Case Study on Faults/Failures in PV systems (2)

－Faults/Failures Occurring in PV Systems Installed at AIST－

加藤和彦\*

Kazuhiko KATO

### Abstract

This paper discusses a demonstrative research for faults/failures in forty grid-connected residential PV systems installed at AIST. A periodic inspection of PV module surface temperature by using an IR camera showed increase in PV modules with distinctive irregular temperature distribution. Both detection of disconnected current path of the PV modules with a wired route tracing device and indoor measurements of I-V characteristic curves for them suggested serious deterioration in the quality of connection between PV cells and interconnectors. These faults/failures of PV modules may not be found according to the existing guidelines of PV system maintenance that PV industries recommend. From a viewpoint of the consumer protection, practical means and institution for PV system maintenance must be provided.

キーワード：太陽光発電システム、不具合、電流-電圧特性、太陽電池モジュール温度、配線路探査器

Key Words : PV system, Fault and failure, I-V characteristics, PV module temperature, Wired route tracing device

### 1. 緒言

筆者は、当所が導入・運用している太陽光発電設備の一部で確認された太陽電池モジュール（以下「PVモジュール」と略記）の不具合について、2007年の本学会誌第4号に報告した<sup>(1)</sup>。その報告で対象とした太陽光発電システム（以下「PVシステム」）およびそれと同一型式のPVシステム群について、その後も継続的な分析と評価を進めているが、不具合とみられるPVモジュールの枚数が増加傾向にあることを確認している。本稿では、その現状の詳細について報告する。

### 2. 対象としたPVモジュールおよびPVシステム群

本稿で対象としたPVシステムは、2004年4月に当所に導入された住宅用PVシステム211台から構成される「つくばセンター太陽光発電設備（通称：メガ・ソーラタウン、総公称出力：869kW<sub>DC</sub>, 844kW<sub>AC</sub>）」の中のうち、第2事業所オープンスペース研究棟(OSL棟)の屋上に設置された40台の同一仕様の住宅用PVシステムである。図1および表1に本システムの仕様と外観を示す。1台のPVシステムは27枚（9直列×3並列）のシャープ製多結晶シリコンPVモジュールND-150AMで構成されており、PVモジュール総枚数は1,080枚である。なお、初期不良など

の理由により、導入から約1.5年後の時点では37枚が型式の異なるND-150ANに交換されているが、その仕様はND-150AMと同じである。

### 3. PVモジュールの不具合の状況とその分析

#### 3.1 PVモジュール表面温度分布の観察

対象としたPVシステム群について、赤外線カメラ（アイ・アー



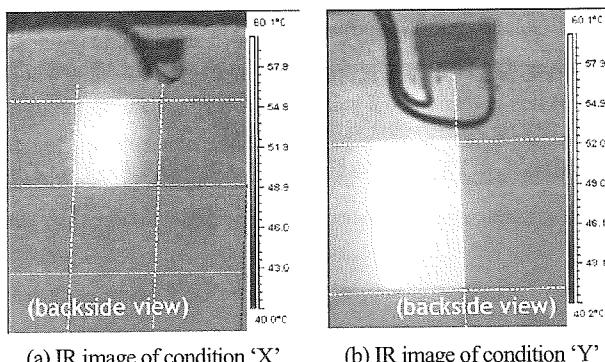
Fig.1: PV systems discussed in this paper  
(installed on rooftop of "Open Space Laboratory" facility, AIST)

\* 独立行政法人 産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター  
主任研究員 (〒305-8568 つくば市梅園1-1-1 中央第2)  
eMail: kazuhiko.kato@aist.go.jp  
(原稿受付: 2009年5月22日)

Table 1: Configuration of the PV System discussed in this paper

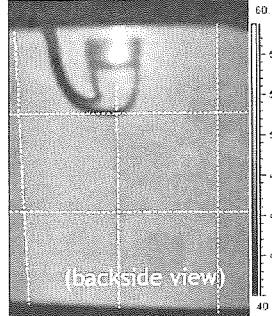
Items	Description
Operation Start	April 2004
PV Module	Sharp ND-150AM (poly-Si)
$P_m$	150W
$V_{Pm}$	20.5V
$I_{Pm}$	7.32A
$V_{OC}$	25.4V
$I_{SC}$	8.09A
PV Array	
Strings	9 series $\times$ 3 parallel (=27modules)
Orientation	25° west from the south
Inclination	15° from the level facing the south
Rated power output	4.05kW
Power Conditioner	Sharp JH-M303 (string PC)
$P_{OUT}$	4.0kW
$V_{IN}$	DC200V
$V_{OUT}$	AC202V

ルシステム製 MobIR-M4)を用いて、2006年夏から定期的なPVモジュールの表面温度観察を行っているが、これまでに図2に示すような三種類の特徴ある表面温度分布が確認されている。「状態 X」「状態 Y」は、ともに図示したPVモジュール裏面からみて端子箱の左斜め下のセルに高温部がみられる状態であるが、前者は端子箱から遠い側の半分が高温になっているのに対し、後者は端子箱に近い側の半分が高温になっている。さらに高温部分を詳細にみると、セルの中央に近い部分が特に温度が高くなっている。また、「状態 Z」は、中央2列のサブモジュー

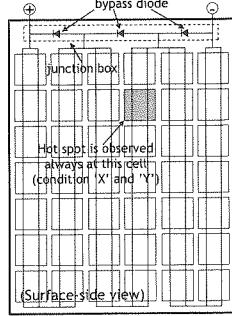


(a) IR image of condition 'X'

(b) IR image of condition 'Y'



(c) IR image of Condition 'Z'



(d) Position of hot spot cell

Table 2: Transitions of surface temperature condition for 34 PV modules

		'06		'07		'08	
	Summer	Spring	Winter	Spring	Summer	Fall	Spring
#01	X	X	X	X	X	X	X
#02	X	X	X	X	X	X	X
#03	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
#04	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
#05	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
#06	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
#07	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
#08	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
#09	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
#10	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
#11	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
#12	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
#13	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
#14	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
#15	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
#16	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
#17	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Z
#18	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Z
#19	Y	Y	Y	Y	Y	Z	Z
#20	Y	Y	Z	Z	Z	Z	Z
#21	Y	Z	Z	Z	Z	Z	Z
#22	Y	Z	Z	Z	Z	Z	Z
#23	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
#24	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
#25	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
#26	-	X	Y	Y	Y	Z	Z
#27	-	Y	Y	Y	Y	Y	Y
#28	-	-	Y	Y	Y	Y	Y
#29	-	-	-	Y	Y	Y	Y
#30	-	-	-	-	X	X	X
#31	-	-	-	-	-	Y	Y
#32	-	-	-	-	-	Y	Y
#33	-	-	-	-	-	-	Y
#34	-	-	-	-	-	-	Y
Total	25	27	29	30	32	33	34
X	2	3	2	3	3	3	3
Y	20	19	21	21	23	22	21
Z	3	5	6	6	8	10	

ルブロックが他に対してやや高温になっているとともに、端子箱の一部が高温になっている状態であり、高温になっているセルの上部インターネクタ近傍に「焦げ」のような外観上の変化があつた。なお、この状態は2007年に本学会誌に報告した事例<sup>(1)</sup>と同じで、インターネクタセル間の接続不良により中央のサ

Fig.2: IR images of PV module surface temperature

ブモジュールブロックが発電機能障害を起こした状態である。

表2は、対象とした40台のシステム、1,080枚のPVモジュールに関し、定期的な赤外線カメラ観察で上記X、Y、Zのいずれかの状態の表面温度分布が観察されたPVモジュールの状態推移を整理したものである。2006年夏の観察時にはX・Y・Zいずれかの表面温度分布が観察されたのは1,080枚中25枚であり、徐々に増加して2009春の時点では34枚に達している。特に部分的な発電機能障害となっている状態Zは、観察開始時には3枚であったものが約2.5年の間に10枚へと増加している。また、この間に特異な表面温度分布が出現した9枚のうち、最初に状態Xが確認されたのは2枚(#26, #30)で、残りの7枚(#27, #28, #29, #31, #32, #33, #34)は状態Yから確認されている。

なかでも、#26のPVモジュールは、2007年春に状態Xが初めて確認されたのち、同年冬には状態Yに移行し、2008年秋にはさらに状態Zと段階的な変化が確認されている。

これらのことから、上述した三つの状態はそれぞれ独立な現象ではなく、密接に関連した現象と推測される。

### 3.2 配線路探査器によるモジュール内回路の通電状態の確認

次に、配線路探査器(Wired Route Tracing Device)を用いて表2に示したPVモジュールの内部回路の通電状態を確認した。この検査は、PVシステムの運転を停止した状態で、検査対象モジュールを含むストリングに送信器を接続して微小信号電流を送り、モジュール表面のインターフェクタ部分に近接させた受信器で送信信号の受信状態をみるとことによって、モジュール内回路の通電・断線状態を探査するものである。本方法の詳細については筆者の別の論文<sup>(2)</sup>を参照されたい。なお、本探査に使用した配線路探査器は戸上製作所製 TLC-C型(商品名:Super ラインチッカ)である。

図3は、表面温度分布状態の異なる#01(状態X)、#10(状態Y)および#26(状態Z)の3枚のPVモジュールに関する探査結果を、例として図示したものである。図中に「○」印で示した部分は受信器が送信信号を受信した、つまり通電状態である箇所を示しており、特に受信感度が突出して大きかった箇所を「◎」印

で示している。逆に、「×」印で示したのは送信信号が受信されなかった、つまり断線がある場合は非常に電流が流れにくい状態である箇所であることを意味している。

PVモジュール#01および#10の状態XとYでは、左右の違いはあるが、どちらも高温になっているセル半分に接続されたインターフェクタでの受信感度が顕著に高く、逆に、残り半分に接続されたインターフェクタでは送信信号が受信されなかった。これはつまり、受信されなかつの方のインターフェクタが、何らかの原因により電流を流しにくい状態にあることを意味している。そして、本来この部分を流れるべき送信信号が反対側に迂回するために、その部分に通常より大きい信号が流れていると考えられる。図2に見られた状態Xや状態Yでのセルの部分的な発熱は、このようなセルの不均一な電流分布が熱として顕在化しているものと推測される。

また、PVモジュール#26では、中央サブモジュールブロックの全ての箇所で信号が受信できない状態であり、当該ブロックが発電に寄与できない断線部分となっていることを示している。このような状態がすべて状態Yからの移行であり、かつ、状態Xから状態Yに移行した事例が観察されたことなどを考慮すると、状態Zでの断線箇所は状態XやYで受信感度に異常がみられたインターフェクタの付近と想像される。

### 3.3 三枚のPVモジュールの電流-電圧特性の測定

これら3枚のPVモジュールの状態をさらに詳しく把握するため、これらを架台から取り外し、屋内で標準試験条件下での電流-電圧特性を測定した。使用したソーラーシミュレータはSpire製SPI-SUN Simulator 1116Nである。

#### (1) PVモジュール#01(状態X)

このPVモジュールの電流-電圧特性測定結果を図4および表3に示す。実線で示した通常の測定では、最大出力動作電圧( $V_{pm}$ )付近で曲線の傾きが緩く、曲線因子(FF)も0.61程度といい値であった。一方、破線で示したのは、断線が懸念されるインターフェクタ付近を裏側から圧迫した状態で測定した電流-電圧

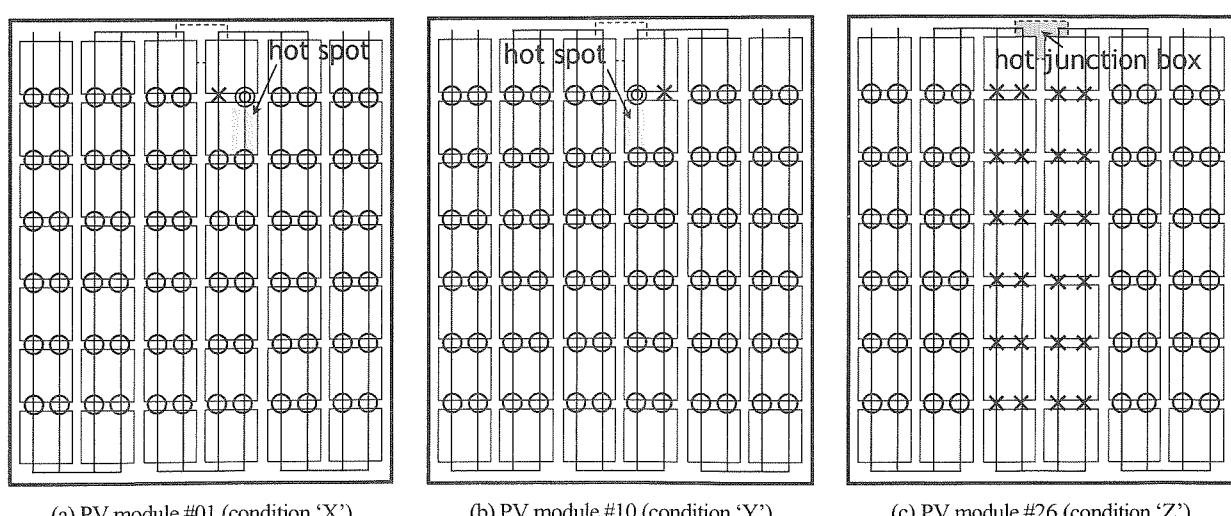


Fig.3: Detection results for the three PV modules with the Wired Route Tracing Device (frontside view)

(○: signal detected, ◎: signal detected strongly, ×: no signal detected)

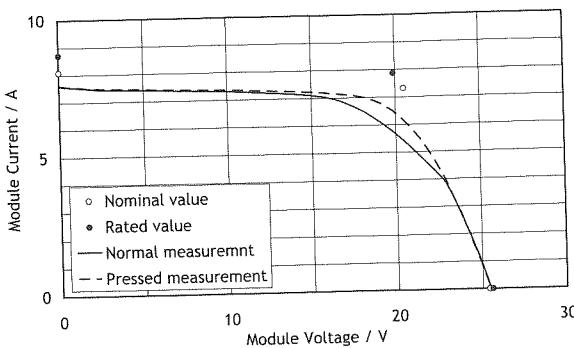


Fig.4: Measured I-V characteristic curves for PV module #01

Table 3: Measured characteristic parameters for PV module #01

	P <sub>m</sub> [W]	V <sub>OC</sub> [V]	I <sub>SC</sub> [A]	V <sub>Pm</sub> [V]	I <sub>Pm</sub> [A]	FF
Nominal	150	25.4	8.09	20.5	7.32	0.73
Rated	156.54	25.59	8.71	19.89	7.87	0.70
Measurement						
Normal	117.51	25.51	7.61	18.14	6.48	0.61
Pressed	129.54	25.49	7.60	19.29	6.71	0.67

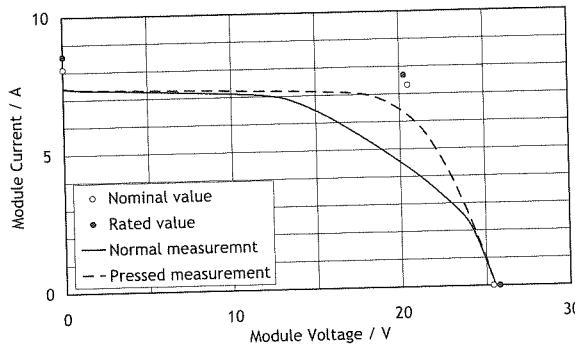


Fig.5: Measured I-V characteristic curves for PV module #10

Table 4: Measured characteristic parameters for PV module #10

	P <sub>m</sub> [W]	V <sub>OC</sub> [V]	I <sub>SC</sub> [A]	V <sub>Pm</sub> [V]	I <sub>Pm</sub> [A]	FF
Nominal	150	25.4	8.09	20.5	7.32	0.73
Rated	155.52	25.77	8.56	20.26	7.68	0.71
Measurement						
Normal	98.21	25.54	7.40	16.35	6.01	0.52
Pressed	129.36	25.53	7.41	19.46	6.65	0.68

特性である。この曲線と通常測定の曲線とを比較すると、V<sub>Pm</sub>付近での曲線の傾きが回復し、また、FFも0.67に増加している。なお、短絡電流(I<sub>SC</sub>)は圧迫の有無によらずおよそ7.6Aと、本PVモジュールの定格値である8.71Aより10%以上少ない値であった。そして、最大出力(P<sub>m</sub>)は圧迫しない場合で約118W(対公称比78%)、圧迫した場合で約130W(同86%)であった。

## (2) PV モジュール#10(状態 Y)

このPVモジュールの電流-電圧特性測定結果を図5および表4に示す。何もしない状態(実線)では、さきのPVモジュール#01以上にV<sub>Pm</sub>付近で曲線の傾きが緩くなってしまっており、FFは0.52まで

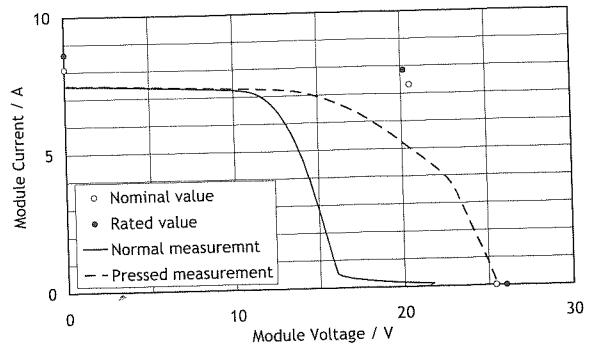


Fig.6: Measured I-V characteristic curves for PV module #26

Table 5: Measured characteristic parameters for PV module #26

	P <sub>m</sub> [W]	V <sub>OC</sub> [V]	I <sub>SC</sub> [A]	V <sub>Pm</sub> [V]	I <sub>Pm</sub> [A]	FF
Nominal	150	25.4	8.09	20.5	7.32	0.73
Rated	158.17	26.01	8.62	20.15	7.85	0.71
Measurement						
Normal	82.06	21.42	7.48	12.09	6.79	0.51
Pressed	109.87	25.50	7.49	17.51	6.28	0.57

大きく低下していた。また、P<sub>m</sub>は約98Wと公称値の2/3になっていた。

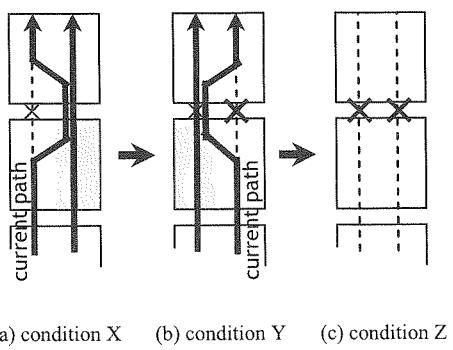
このPVモジュールもPVモジュール#01と同様に、断線が疑われるインターフェクタ部分を圧迫して状態(破線)で測定したところ、やはり、V<sub>Pm</sub>付近で曲線の傾きが大きく回復し、FFも0.68まで改善した。その結果、P<sub>m</sub>も129Wとなり、PVモジュール#01を圧迫した場合とほぼ同じ値となった。なお、このPVモジュールの場合も、圧迫の前後でI<sub>SC</sub>に変化はみられなかった。

## (3) PV モジュール#26(状態 Z)

このPVモジュールの電流-電圧特性測定結果を図6および表5に示す。何もしない状態(実線)では、16V前後以上の電圧領域で電流がほとんど流れなくなっていることがわかる。そして、P<sub>m</sub>は約82Wと公称値のほぼ半分しか得られなかつた。16Vというのは、PVモジュールのV<sub>OC</sub>の約2/3に相当する値であり、16V以下の領域では健常なPVモジュールの電流-電圧特性の形状が得られていることから、この電流-電圧特性は、断線している中央サブモジュールブロックを除いた左右二つのサブモジュールブロックのものであると考えられる。

図6の破線は、やはり問題視した部分を圧迫した状態で測定した電流-電圧特性である。V<sub>OC</sub>が大きく回復し、16V以上の電圧領域でも電流が流れているが、V<sub>Pm</sub>付近の曲線の傾きは、PVモジュール#10を圧迫していない場合のそれと同等に緩く、FFは依然として0.57と低いままであった。そして、P<sub>m</sub>は約110Wまでにしか改善されなかつた。

これらの測定結果から、やはり、状態XおよびYでは、赤外線カメラ観察や配線路探査器による探査から異常と考えたインターフェクタ部分が断線しているか、あるいは極めて電流を通しにくい状態にあると推定される。V<sub>Pm</sub>付近の曲線の傾きがPVモジュールの直列抵抗に密接に関係していることを考慮すると、本モ

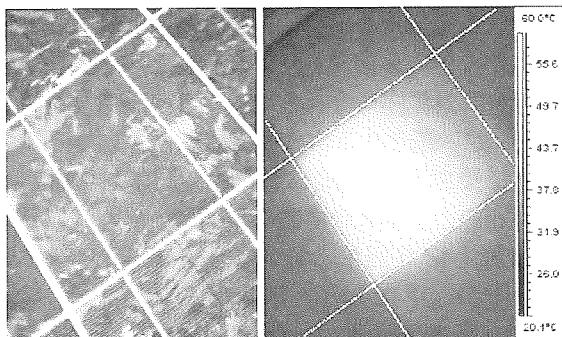


(a) condition X    (b) condition Y    (c) condition Z

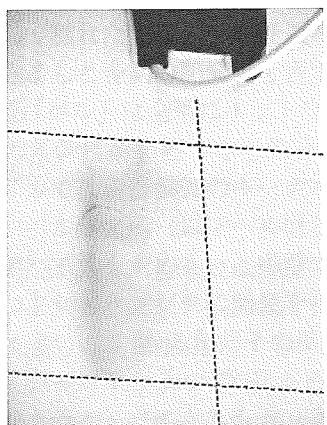
Fig.7: Assumed deterioration steps

of the PV modules discussed in this paper (front side view)

ジュールの不具合進行に関して図7のような仮説が想定できる。この図は問題視している箇所を表側からみた様子である。最初に何らかの原因による左インターフィンガーネクタ付近の通電不良により、本来ここを流れる電流が行き場を失い、右半分に集中して流れようになる。そして、その部分の過剰な電流の一部が熱として失われ発熱する。この際、このPVセルのフィンガー電極(セル受光面側に形成された針状の電極)の左右が離れた構造になっており、左半分から流入する電流は、特に対峙する右半分のフィンガー電極先端に集中するため、この部分の発熱が顕著となる。これが状態Xである(図7(a))。この状態が継続する結果、



(a) front-side (left: photo image, right: IR image)



(b) backside (photo image)

Fig.8: Photo and IR images of a PV module installed on a residential PV system in Shizuoka prefecture

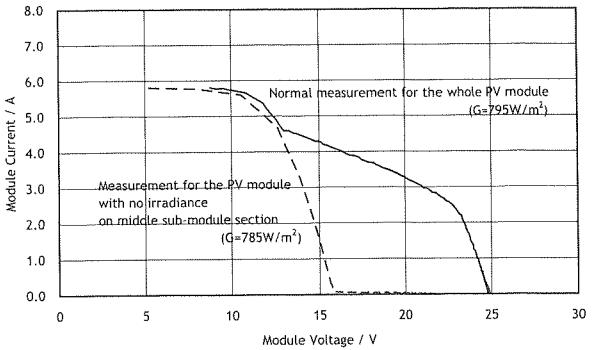


Fig.9: Outdoor measurement results of the PV module

右インターフィンガーネクタ付近が受ける電気的・熱的ストレスにより、この部分の直列抵抗も大きく増加して、断線あるいはそれに近い状態になる。その結果、今度は左半分に電流が集中して流れようになり、過剰な電流の熱損失の現れである発熱も左側に移動する。セル中央に近い部分が特に高温になるのは、状態Xの場合と同様、左右に分離したフィンガー電極構造によるものである。これが状態Yである(図7(b))。そして、この左半分が受ける電気的・熱的ストレスにより、この部分も断線かそれに近い状態となり、最終的に双方のインターフィンガーネクタに電流がほとんど流れない状態Z(図7(c))に至るのではないだろうか。

### 3.4 所外のPVシステムで確認された類似の事例

これまでに、当所のメガ・ソーラタウンにおいて確認されたシャープ製PVモジュールND-150AMの不具合事例について言及してきたが、同型式を搭載した一般の住宅用PVシステムについても、同様な不具合を想起させる事例を確認した。

図8は、静岡県に設置されている35枚の同社製ND-150AMからなる住宅用PVシステム(公称システム出力:5.25kW、運転開始:2004年2月)の1枚のPVモジュールの表面および裏面写真と赤外線カメラ画像を示したものである。(a)図の赤外線カメラ画像から、セルの向かって左半分が局的に高温になっていることがわかる。(b)図はそのセル部分を裏面からみた写真であるが、当該セルの右半分部分の裏面シートに「焦げた」ような褐色変があり、その変色はセルの中央部分および上部インターフィンガーネクタ部分に顕著であった。また、セル中央部分はバックシートの一部が剥離して膨張していた。そして、この変色・変質は、これまでに言及した当所のPVモジュールと同様、図2(d)の位置のセルであり、発熱の様子から状態Yにあると考えられる。

図9は、このPVモジュールの電流-電圧特性を屋外で測定した結果を示したものである(使用機器:英弘精機MP-170)。実線で示した通常測定(日射強度:795W/m<sup>2</sup>)では13Vの電圧付近に段差をともなった健全でない曲線形状となった。一方、破線は変色・変質した部分を含む中央サブモジュールブロックを遮光した状態で測定した電流-電圧特性である(日射強度:785W/m<sup>2</sup>)。当然のことながら、この場合はPVモジュールの1/3を意図的に隠して機能させていないため、曲線は図6に示した状態Zと同じ形状となる。そして、実線と破線との比較から、通常測定で確認された健全でない電流-電圧特性が中央サブモジュールブロックによるものであることがわかる。

以上のことから、やはり、このPVモジュールも当所のPVモジュールとみられた状態Yの不具合状況にあると考えられる。

#### 4. 結言

本稿では、いくつかの観察・測定手法をもついて、当所に設置されているシャープ製PVモジュールND-150AMにみられる不具合の状況を分析・検討した。

対象としたPVモジュールの分析・評価は設置当初の時点から実施されているものではなく、かつ、用いた手法も限定的なものであることから、本稿で議論したPVモジュールの不具合原因を特定することは困難である。しかし、これらのPVモジュールは特殊な設置環境下にはないことから、設置環境に由来した不具合とは考えにくい。

しかし、これらのPVモジュールの不具合原因を特定することよりも重要な現実的な問題は、まず、運用開始から5年しか経過していない段階で、同一の原因と推測されるPVモジュールの不具合が経時的に増加しているという事実である。2009年春の時点で、X、Y、Zいずれかの状態が確認されたのは1,080枚中34枚と約3%に過ぎないが、このようなPVモジュールが1枚以上存在しているPVシステムは40台中25台であり、これは約2/3という高い割合になる。

もう一つの重要な現実的な問題は、本稿で紹介した事例を含むPVモジュールの不具合を現場において発見する技術的方法が未熟であり、また、そのための社会制度も未整備であることである。たとえば、本稿で示したPVモジュール#26(状態Z)は、PVモジュールの1/3が発電できないという深刻な不具合であり、標準試験条件下で測定した定格出力は公称値のほぼ半分にまで低下していたが、 $V_{oc}$ は公称値に対して4V程度少ない値であった。一方、住宅用PVシステムの定期点検のガイドラインとなっている日本電機工業会の技術資料<sup>(3)</sup>によれば、PVモジュールの性能点検項目はストリング毎の $V_{oc}$ 測定だけであり、ストリング間の $V_{oc}$ のばらつきが1モジュール分以内であれば劣化はない判断してよいと解説されている。この点検にしたがえば、PVモジュール#26の $V_{oc}$ 低下はたかだか4V程度であるため、このPVモジュールを含むストリングは「異常なし」と判定されるだろう。

さらに、PVモジュール#01(状態X)や#10(状態Y)の屋内測定の結果は、 $V_{oc}$ こそ公称値と同等であるものの、定格最大出力はともに公称値の81%以下であった。したがって、昨今のメーカー保証の考え方によればどちらも保証対象となるが、前記したストリングの $V_{oc}$ 測定では、やはり、これらのPVモジュールを発見することはできない。

以上のことから、現場での実態調査を踏まえたより耐久性の高いPVモジュール開発が必要であることはいうまでもないが、現場での不具合モジュール探査技術の開発とそれにもとづく正しい保守点検ガイドラインの整備にもそれと同様かそれ以上の努力を払う必要がある。そして、製品の保証は、保守点検の技術と制度に裏打ちされた実効的なものでなければならないはずである。

#### 参考文献

- (1) 加藤和彦:太陽光発電システムの不具合事例の分析・評価(1), 太陽エネルギー, Vol.33, No.4, pp.69-74 (2007)
- (2) 加藤和彦:配線路探査器を用いた結晶Si太陽電池モジュールの不具合探査に関する基礎的検討, 太陽エネルギー, Vol.35, No.1, pp.65-72 (2009)
- (3) 小出力太陽光発電システムの保守・点検ガイドライン, 日本電機工業会技術資料JEM-TR228, 日本電機工業会 (2003)