

配線路探索器を用いた結晶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

A Feasibility Study on Detecting Fault and Failure in Crystalline-Si PV Module with Wired Route Tracing Device

加藤 和彦 *

Kazuhiko KATO

Abstract

In this paper the availability to detect faults/failures of crystalline-silicon PV modules with wired route tracing device (WRTD) is discussed. The WRTD is inexpensive and popular in the field of electrical engineering, but no one has an interest in its potential for faults/failure detection of PV module in the field. Preliminary experiments applying it to one PV module and one PV module string showed promising results that it could trace circuits inside the PV module and that both irradiance and partial shade on the PV module had no influence on its measurement. For actual PV systems in operation, the WRTD measurement suggested possibility of the existence of dead lines in several PV modules, and both I-V characteristic curve measurement and infrared camera observation strongly supported the WRTD measurement results.

キーワード : 太陽光発電システム, 不具合, 配線路探索器, 故障診断

Key Words : PV system, Fault and Failure, Wired route tracing device, Diagnostics

1. 緒言

現在, 電力系統に連系された住宅用太陽光発電システム(以下「PV システム」と略記)のほとんどは, 低圧連系でかつ出力 20kW 未満であることから, 電気事業法においては一般用電気工作物に該当し, 最低限の保安確保の責任は設置者にある。日本電機工業会(JEMA)が整備した保守・点検ガイドライン⁽¹⁾によれば, 設置者自身が毎月一回程度の頻度で太陽電池アレイ(以下「PV アレイ」と略記)や接続箱, パワーコンディショナの異常や不具合を目視で確認することが定められている。しかし, 実際の住宅用 PV システムの殆どは PV アレイが視野外にあり, また, 日射強度などの環境条件によって発電電力が時々刻々と変動するため, 設置者自身が PV アレイの異常を把握することは現実的には困難である。さらに, 接続箱に関しては設置者がその存在自体を知らない場合も珍しくない。

また, 上述した保守・点検ガイドラインでは, 専門の技術者による定期点検を 4 年に一回以上実施することが定められているが, PV アレイの発電性能に関わる点検項目は接続箱での各回路の開放電圧(Voc)の測定のみであり, 日射強度に応じて電流値が変化する PV アレイの発電性能を把握するには極めて不十分

な内容である。ましてや, その定期点検すら実施されていない事例も存在している⁽²⁾。

このような保守・点検にかかわる仕組みの不備は, 現状において未だ PV アレイの発電性能を現場で把握する有効な手段を見出し得ていないことの裏返しであるのかも知れない。

現在までのところ, 現場での PV アレイの性能評価に利用されている主な方法は, ①テスタによる各太陽電池モジュール(以下「PV モジュール」と略記)ストリングの Voc 測定, ②各 PV モジュールストリングの電流-電圧特性の測定, ③赤外線カメラを用いた PV モジュール表面温度分布の観察, の三つに大別されるであろう。

①は前記した保守・点検ガイドラインにある方法である。測定機器が安価であり, 天候に左右されず PV アレイへの接近が不要であることから点検は容易である。しかし, 得られる情報は断線の有無と Voc のばらつきに顕在した場合の PV モジュールの不具合といった程度であり, 不具合個所の特定はできない。

②は上よりも多くの情報を得ることができる, しかし, 測定機器が高価であること, 変動する日射や低日射のもとでの測定では有効な情報を得られない場合があること, 測定結果の解釈には一定の専門知識が必要なこと, などの短所がある。また①と同様に PV モジュールストリング単位の測定となるため, やはり不具合個所の特定はできない。

③は PV モジュールの表面温度分布の状況から不具合の有

* 独立行政法人 産業技術総合研究所 主任研究員

(〒305-8568 つくば市梅園1-1-1 中央第2)

e-Mail: kazuhiko.kato@aist.go.jp

(原稿受付: 2008年9月24日)

無を把握する方法であり、原理的には異常個所の特定が可能である。しかし、赤外線カメラが非常に高価であること、温度分布画像の解釈には相応の経験と専門知識が求められること、そして、PV モジュールに接近しての作業が不可避であること、などの問題がある。

このように、現在用いられている方法は、広く一般に普及させるにはそれぞれ一長一短がある。

本研究は、これらに代わりうる方法として、配線路探索器 (Wired Route Tracing Device, WRTD) の適用可能性を探るものである。配線路探索器は電気設備工事分野で利用されている汎用機器であり、価格も比較的安価である。これを PV アレイの不具合検査に応用することについては、一部の測定機器メーカーでそのアイデアは出されているが、その適用可能性についての定量評価はまだ実施されていない。

そこで、本稿では、PV アレイの不具合検査に配線路探索器を応用する場合の基本的な挙動の評価と、実際の PV アレイに適用した試行例について報告する。

2. 配線路探索器の基本的挙動の評価

2.1 PV モジュール一枚に適用した場合

配線路探索器は、直流・交流のさまざまな電力配線路において、配線が正しく行われているか、あるいは断線・漏電などの不具合がないかなどを探索する機器である。一般に、信号の送信器 (transmitter) と受信器 (receiver) のセットで構成され、対象とする配線路に接続した送信器から送出される微小信号電流が配線路に発生させる誘導磁界を受信器で感知することにより、配線の状態を把握する。本研究では PV アレイへの適用可否を判断するため、まず1枚の PV モジュールを被験体とした場合における配線路探索器の挙動を評価する実験を

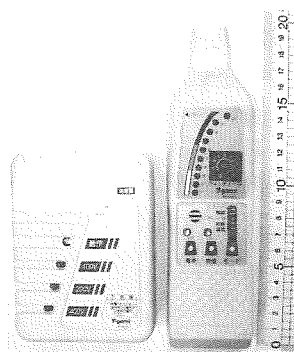


Fig.1 Wired Route Tracing Device (WRTD) used in this study (left: transmitter, right: receiver)

Table 1 Major specification of the wired route tracing device used in this study (Togami Electric Mfg. Co. Ltd., TLC-C)

Transmitter	TLC-C-T
Working voltage range	12-528V, AC50/60Hz and DC
Signal frequency	5kHz
Signal current	200mA
Signal cycle	500msec
Receiver	TLC-C-R
Method	Magnetic flux detection by signal current
Detection frequency	5kHz
Output	10-step indication by LEDs, intermittent sound of buzzer

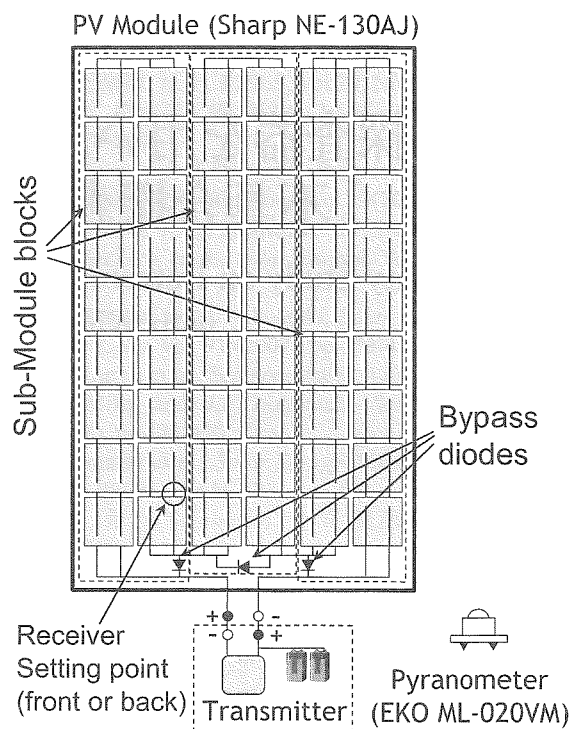


Fig.2 Experimental set-up for applying WRTD to one PV module

実施した。

なお、本実験で用いた配線路探索器は、図1および表1に示した戸上電機製作所製低圧配線路探索器 TLC-C 形(商品名:「スーパーラインチェッカ」、税込標準価格:94,290 円)である。受信器の判定用 LED は1~10の10段階に区分され、信号感度が高いほど判定用 LED は大きな数字を表示する。一方、死線の場合には判定用 LED は反応しない。

図2は実験の様子を図示したものである。被験体である PV モジュール(シャープ製多結晶 Si 太陽電池モジュール NE-130AJ、公称出力:130W)を屋外にて水平に固定し、その出力ケーブルに送信器を順方向に接続する。同時に日射センサ(英弘精機製 ML-020VM)により水平面全天日射強度も観測する。一方、受信器は、探索モード:「電線」、感度:「L(低)」に設定し、同図中に示したセル間のインターコネクタ部分(以下「測定点」という)の裏面あるいは受光面に近接させ、その判定用 LED の表示を観測す

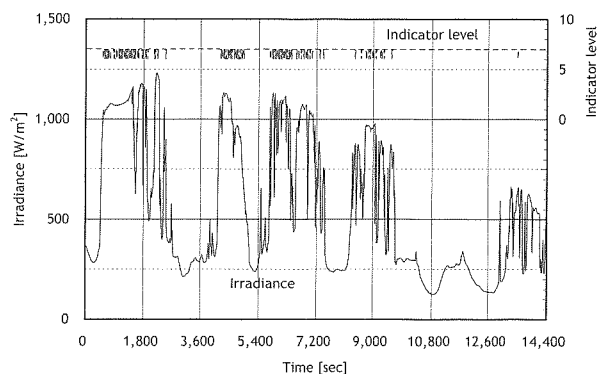


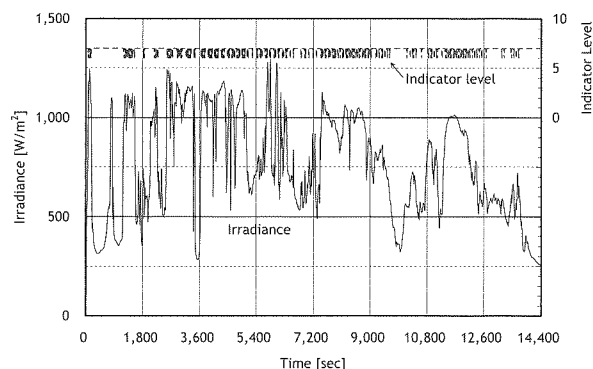
Fig.3 Time trends in irradiance and WRTD indicator level (condition: one PV module, receiver set below back side, no shade)

る。なお、送信器は接続する回路の電圧により動作する電流消費型送信器であるが、1枚のPVモジュールでは電圧が不十分のため、付属コードを用いて9V乾電池二個を取り付けている。

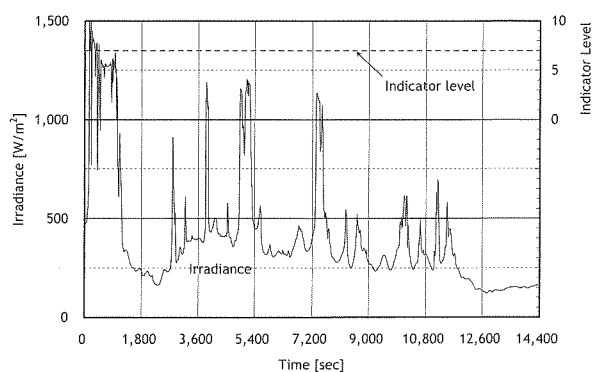
図3は、屋外設置した被験体に陰を及ぼさないよう測定点裏面から約3mm離れた位置に受信器を固定し、日中約4時間にわたって判定用LEDを日射強度とともに観測した結果である。この日の日射強度は $125\sim 1,230\text{W/m}^2$ と大きく変動したが、判定用LEDの表示は6~7の狭い範囲にあり、6となるのは日射強度が強い場合であった。このことから送信信号が日射強度の変化から受ける影響は軽微と考えられる。

しかし、実際のPVアレイの多くは屋根に密接して設置されており、裏面側に十分な空間が確保できることは稀である。したがって、現実に配線路探査器をPVアレイに適用する場合には、PVモジュールの受光面側に受信器を近接させざるを得ず、必然的に受信器自身がPVモジュールに局所的な部分陰を作ることになる。

そこで、PVモジュールへの部分陰が配線路探査器の挙動に与える影響の有無を見きわめるため、測定点付近の受光面側をセル1~2枚分ゴムシートで遮光した状態で、図3と同様の裏面からの観測を行った。その結果を図4に示す。観測日が異なるため日射強度の推移も異なるが、どの場合も陰のない図3の場合と同様にLEDは6~7の狭い範囲で変化した。よって、受信器をPVモジュール受光面側から近接させて測定する場合であっ

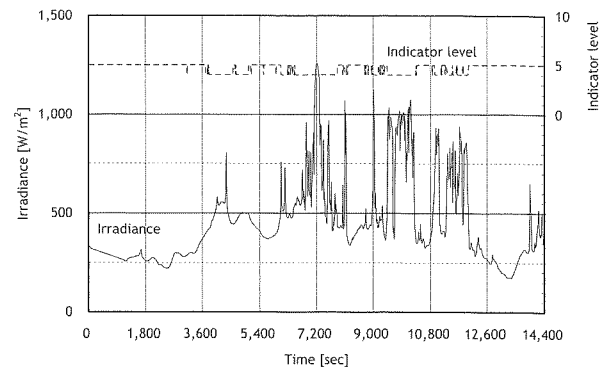


(a) partial shade on one PV cell

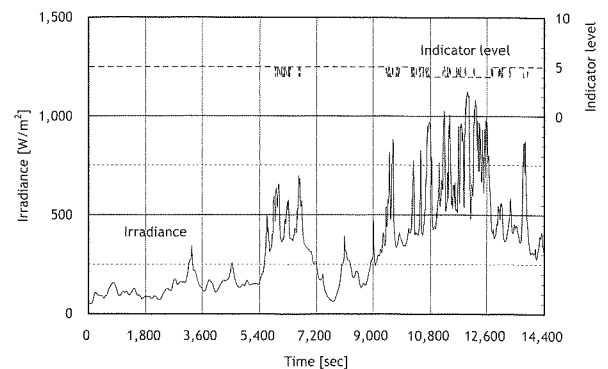


(b) partial shade on two PV cells

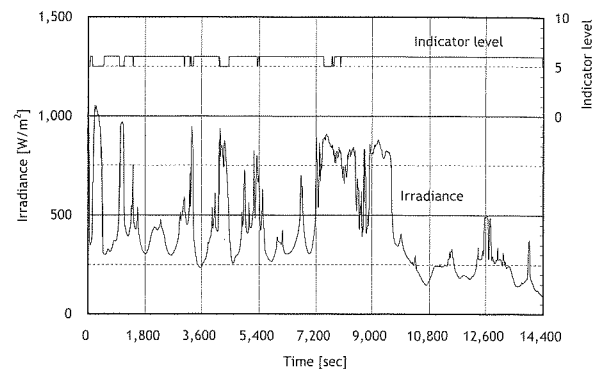
Fig.4 Time trends in irradiance and WRTD indicator level
(condition: one PV module, receiver set below back side, with shade)



(a) no shade



(b) partial shade on one PV cell



(c) partial shade on two PV cells

Fig.5 Time trends in irradiance and WRTD indicator level
(condition: one PV module, receiver set on front side, with shade)

ても、日射変動や部分陰の影響を重大視する必要はないと考えられる。なお、ゴムシートによる遮光面積をセル4枚分以上とした場合には判定用LEDは反応しなかった。これは、陰面積の増大によりバイパス・ダイオード(以下「BD」と略記)が機能して、当該サブモジュールブロックが一種の「死線」となったためである。

この結果をうけ、今度は実際に受信器を測定点受光面側に密接して設置し、「陰なし」・「セル1枚遮光」・「セル2枚遮光」の三つの条件で日射強度と判定用LEDの変化を観測した。図5がその結果を示したものである。判定用LEDの表示は「セル2枚に陰」の場合で5~6の範囲、他の2つの条件で4~5の範囲とやや異なる結果となり、また、裏面からの測定とは逆に日射強度が

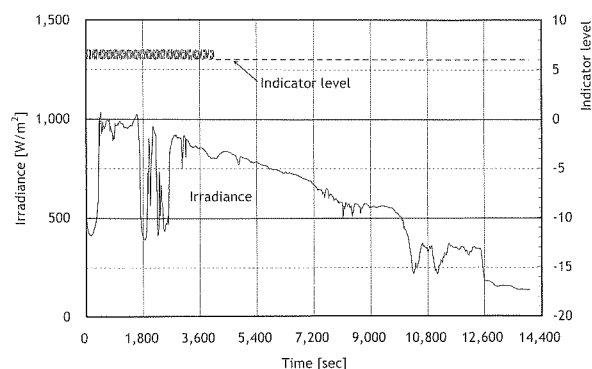


Fig.6 Time trends in irradiance and WRTD indicator level
(condition: PV module string, receiver set on front side, no shade)

強い場合に判定用 LED の表示値が低下する傾向であったが、いずれも日射変動に対しては鈍感であるといえる。また、セル 4 枚以上を遮光した場合にはやはり判定用 LED は反応しなかった。

以上のことから、PV モジュール 1 枚に配線路探索器を適用した場合は、局所的な陰が不可避な受光面側からの測定であっても、日射強度の変動が送信信号に及ぼす影響は軽微であること、および、PV モジュール内回路における死線箇所の探索が可能であることが確認された。

2.2 PV アレイに適用した場合

さらに、実際の PV アレイについても PV モジュール 1 枚の場合と同様な挙動となるかを確認するため、システムの運転を停止した状態で、9 枚の PV モジュールが直列に接続された PV モジュールストリングに送信器を接続し、そのストリング内の 1 枚の PV モジュールのセル間インターコネクタの受光面側に受信器を密着固定して、受光面全天日射強度とともに判定用 LED を観測した。なお、この場合にはストリングに十分な回路電圧があることから送信器には乾電池を取り付けず、PV モジュールストリングに直接接続した。また、被験体とした PV モジュールはシャープ製多結晶 Si 太陽電池モジュール ND-150AM(公称出力: 150W)、日射センサは 2.1 節と同じである。

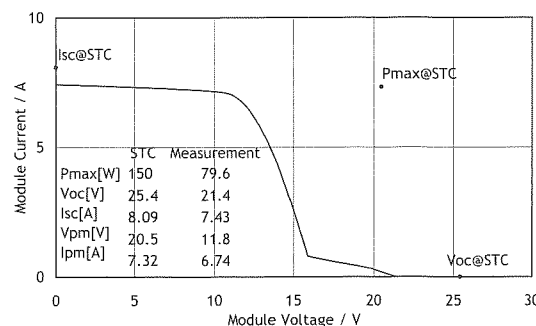
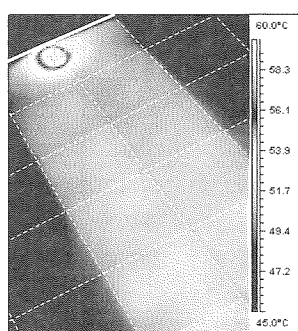
図 6 は、判定用 LED と受光面日射強度の時系列推移を示したものである。この図から配線路探索器を PV アレイ受光面側に適用した場合でも、送信信号は日射強度の影響を殆ど受けていないことがわかる。また、この場合においても、同一サブモジュールブロックのセルを 4 枚以上遮光した場合には判定用 LED は反応しなかった。

以上のことから、配線路探索器をストリング単位に適用して PV モジュール受光面での探索を行うことにより、各モジュールの活線回路の追跡および死線部分の探索が可能であり、その送受信信号は日射の変動や小さな陰の影響をほとんど受けないことが確認された。

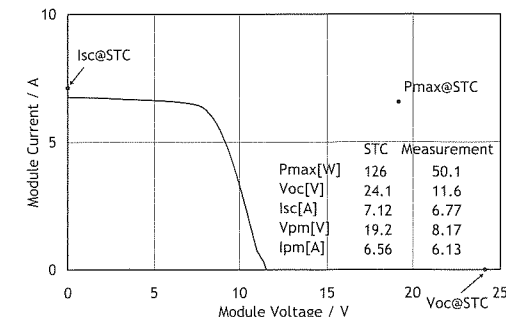
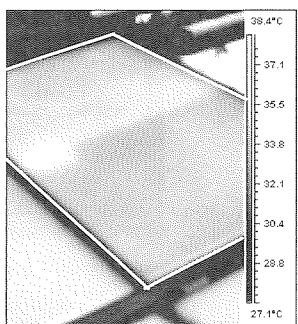
3. 配線路探索器による不具合 PV モジュール探索の試行

2 章に述べた基本的挙動の評価の結果を踏まえ、実際の PV システムのいくつかを対象に配線路探索器を用いた不具合 PV モジュールの探索を試行した。

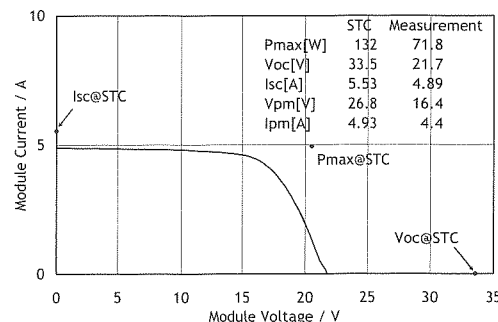
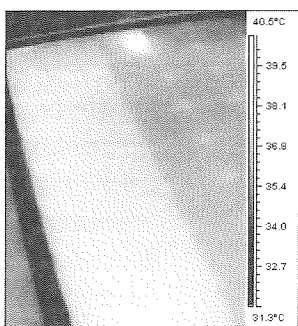
ただし、その探索は受信器判定用 LED の反応の有無による活線・死線状態の判別に限定しており、LED 表示値の大小については言及していない。これは、LED 表示値が受信器と探索部位との位置関係(距離や方向)に敏感であること、および、現状で



(a) Sharp ND-150AM

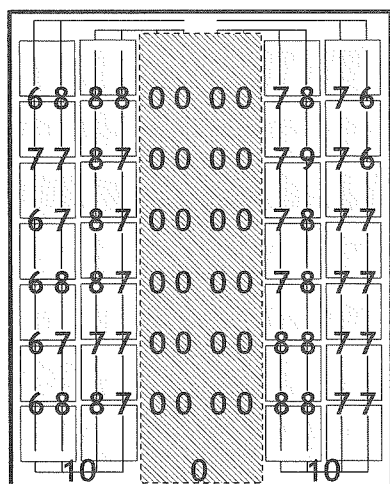


(b) Mitsubishi Electric PV-MG126CF

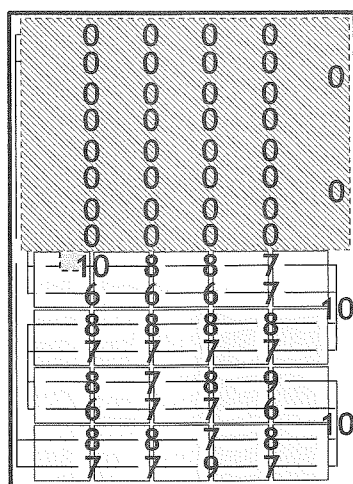


(c) Sharp NT-132BJ

Fig.7 Observed IR camera images (left) and measured I-V curve characteristic curves (right) of three PV modules with failure installed on AIST



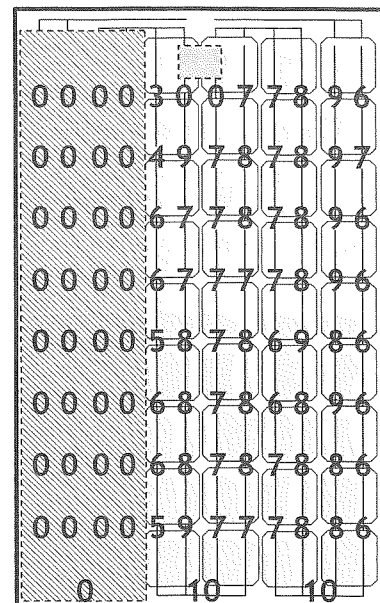
(a) Sharp ND-150AM



(b) Mitsubishi Electric PV-MG126CF

Fig. 8 Distribution maps of observed WRTD indicator level

For the three PV modules with failure



(c) Sharp NT-132BJ

は表示値の大小から探査部位の状況を分析する適切な方法がないこと、などの理由のためである。

3.1 産総研つくばセンター太陽光発電設備での試行例

2004年4月に当所に導入された211台の住宅用PVシステム(PVモジュール枚数:約5,600枚。詳細は文献⁽³⁾を参照)からなる太陽光発電設備の一部には、すでに不具合を確認しているPVモジュールが何枚か存在している⁽⁴⁾。まず、これらの不具合PVモジュールのうちの3枚について、それぞれが接続されているPVモジュールストリングに送信器を接続し、当該PVモジュールのセル間インターコネクタ受光面側に配置した受信器の判定用LEDを観測した。

図7は、対象とした3枚の不具合PVモジュールの運転中の表面温度分布と標準試験条件で屋内測定(使用機器:Spire製SPI-SUN Simulator 1116N)した電流-電圧特性を示したものである。電流-電圧特性はいずれのPVモジュールも最大出力が公称値の半分程度以下に低下していることを示している。また、PV

モジュールの表面温度分布からは、BDで区切られたサブモジュールブロックの一つが他に対してやや高温になっており、端子箱内のBDも高温になっていることがわかる。一方、図8に示すこれらPVモジュールのセル間インターコネクタ部分の判定用LED測定結果は、どのモジュールにも判定用LEDの反応がない(図中には「0」と表示)、つまり「死線」であることを示すサブモジュールブロック(図中に斜線で囲った部分)が存在していた。そして、それらのサブモジュールブロックは図7に示した表面温度が相対的に高温になっている部分と完全に一致した。これらの結果から、配線路探査器で「死線」と判定されたサブモジュールブロックは何らかの要因で断線という不具合状態にあり、システム動作中に当該サブモジュールブロックが発電しないために受光した太陽エネルギーが全て熱に変わってしまうため、不具合のないサブモジュールブロックより高温となっているものと推測される。

また、図9は上記とは別のPVモジュールで測定された配線

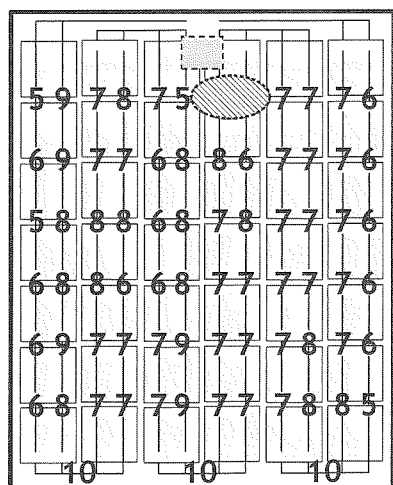


Fig. 9 Distribution map of observed WRTD indicator level for the other Sharp ND-150AM

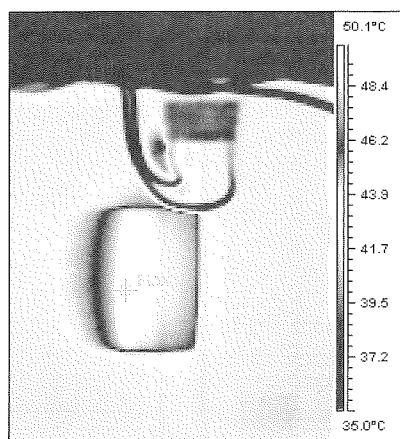


Fig. 10 Observed IR camera image of the other Sharp ND-150AM (back side near junction box)

路探査器の判定用LED表示分布である。ほとんどの箇所は5~9の範囲にあったが、図中の斜線で囲ったインターコネクタペアのみ「反応なし」と10(最大値)という極端な差を示した。そこで、システム動作中における本部分の温度分布を裏面から観測したところ図10のような画像が得られた。この図をみると問題としたインターコネクタペアのすぐ下側のセルの(裏から見て)右半分が高温になっており、それは判定用LEDが10を示した箇所に対応する。これら二つの観測結果から推測されるのは、何らかに起因して受信器の反応のない部分が断線状態となり、本来複線であった通電回路が単線にな

ったためにそこに電流が集中し、それが残されたインターコネクタ部分の高い LED 表示とそれに接続されているセル部分の発熱として顕在しているのではないかと、ということである。PV モジュールの不具合についての明確な整理・分類がない現段階においては、この状態を不具合と断じることの是非には議論の余地があるが、少なくとも「健全な状態ではない」といえる。なお、当所に導入されている同型式の PV モジュール 1,080 枚のうち 27 枚にこれと同様な現象が現れていることを付記しておく。

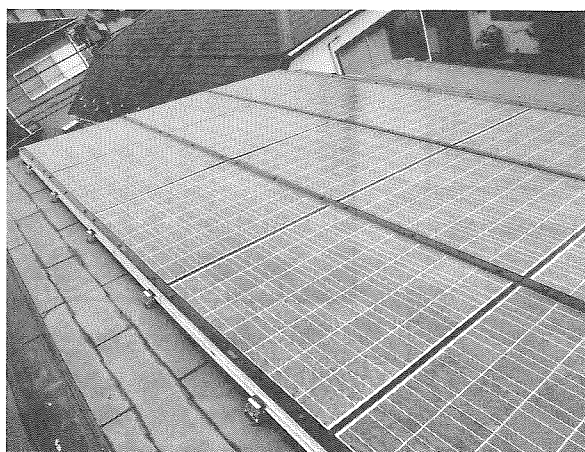
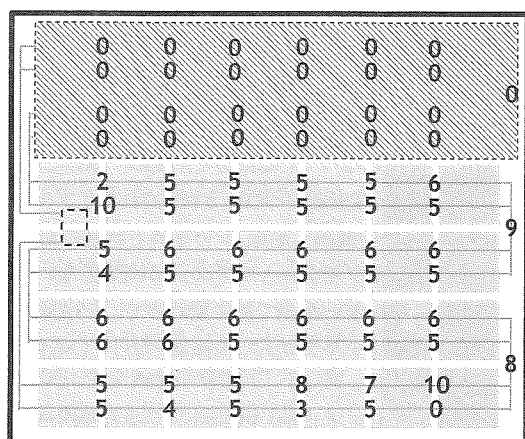
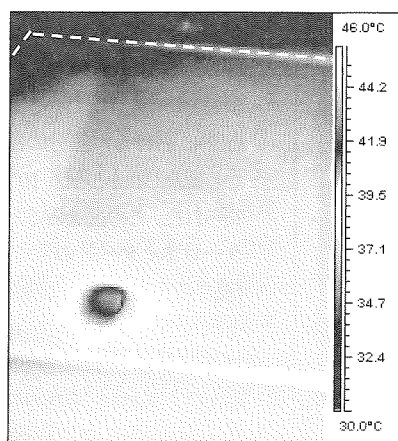


Fig.11 An overview of a residential PV system located in Sayama-city, Saitama-prefecture



(a) Distribution map of observed WRID indicator level



(b) Observed IR-camera image

Fig.12 Some observed facts of a PV module installed in Sayama-city

3.2 一般の PV システムでの試行例

前節での当所内での試行を踏まえ、一般の PV システムを対象に配線路探査器での不具合モジュールの探査を試行した。

(1) 住宅用 PV システムへの試行例

図 11 は埼玉県狭山市にある住宅用 PV システムの外観を示したものである。三菱電機製多結晶 Si 太陽電池モジュール PV-MR003(公称出力:145W)による 10 直列×2 並列(合計 20 枚)の PV アレイ構成であり、運転開始は 1998 年 12 月である。この PV アレイに配線路探査を試行したところ、3 枚の PV モジュールにおいてサブモジュールブロックの断線を示唆する測定結果が得られた。そのうちの 1 枚について、測定した LED 表示分布と赤外線カメラによる温度分布を示したものが図 12 である。

(a)図から上側のサブモジュールブロックに配線路探査器の反応がなく、また(b)図からは端子箱内が高温になっていることが確認された。これは上側サブモジュールブロックが断線状態にあ

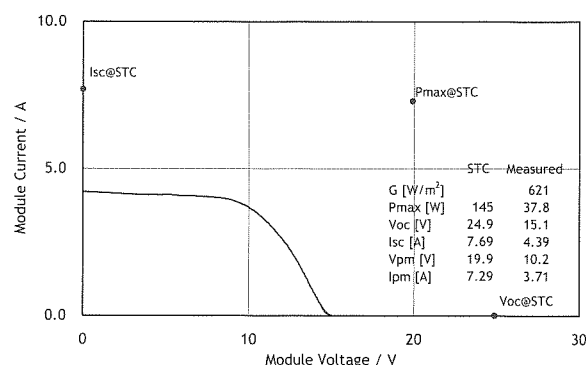
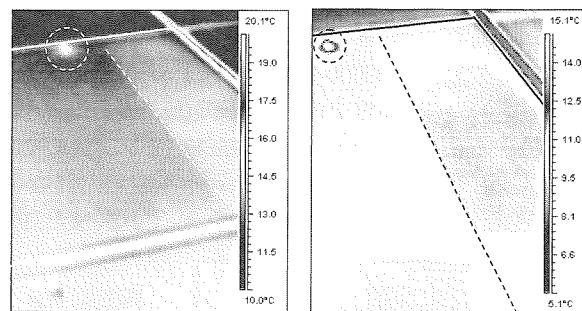
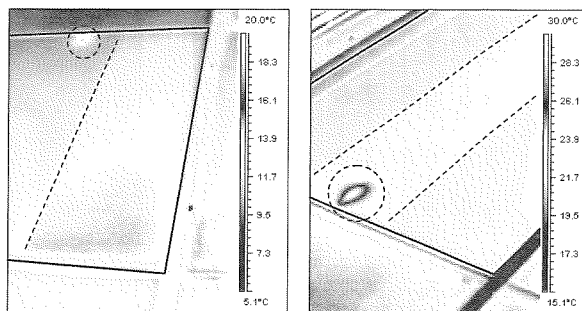


Fig.13 Measured I-V characteristic curve of the PV module



(a) Module A

(b) Module B



(c) Module C

(d) Module D

Fig.14 Observed IR-camera images for four PV modules installed in Aichi prefecture

なお、この狭山市のほかにも 3 件の住宅用 PV システムに本方法を試行する調査を行ったところ、2 件にサブモジュールブロックの断線が疑われる事例が発見され、1 件は無償による PV モジュールの全交換となり、他の 1 件は現在製造メーカーによる点検が予定されている。

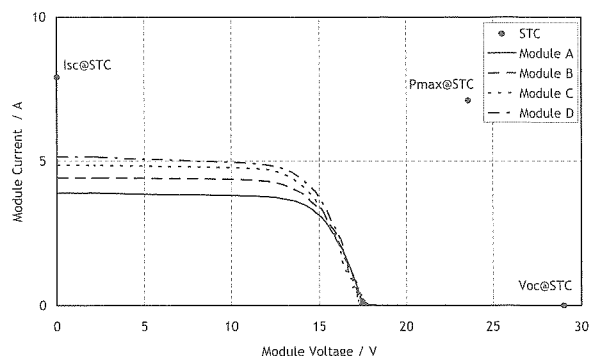
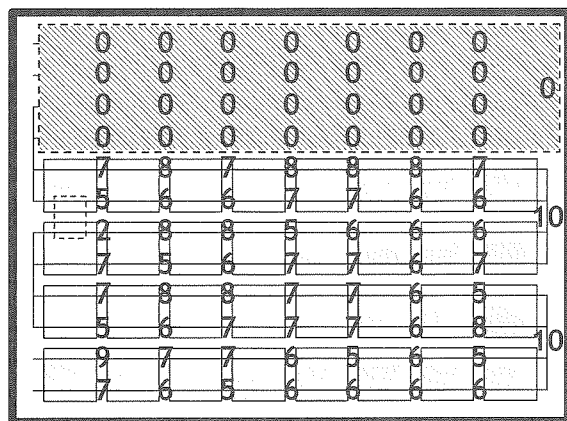


図 14 は, 300 枚の PV モジュールの中の 4 枚で観測された表面温度分布を示したものである. この図からいずれの PV モジ



0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
7	7	7	8	8	7	7	
5	6	6	6	7	6	6	
8	9	8	8	6	6	6	
7	6	6	6	6	6	7	
8	8	8	8	8	7	7	
6	6	6	6	6	6	6	
9	9	9	8	6	5	5	
6	6	6	6	6	6	6	

0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	8	7	8	7	7	7
3	6	5	6	7	7	7	7
4	10	10	9	5	5	6	6
7	7	8	7	8	7	7	7
7	8	6	6	8	7	7	7
6	7	6	5	7	6	6	6
9	9	8	9	7	6	6	6
7	6	5	5	7	7	7	7

A 10x10 grid of numbers from 1 to 10. The grid is divided into four 5x5 quadrants by a dashed horizontal line and a dashed vertical line. The central 4x4 area, bounded by the dashed lines, is shaded with diagonal lines. The numbers are arranged as follows:

5	6	6	6	6	6	6	6	10	
6	6	6	6	8	9	9	9		
8	8	9	9	6	7	7	7		
6	6	7	6	7	7	7	7		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	
7	7	7	7	7	7	7	6		
7	6	6	6	8	9	9			10
9	9	9	9	6	6	6			
6	6	6	6	7	7	7			

(d) Module D

太陽エネルギー

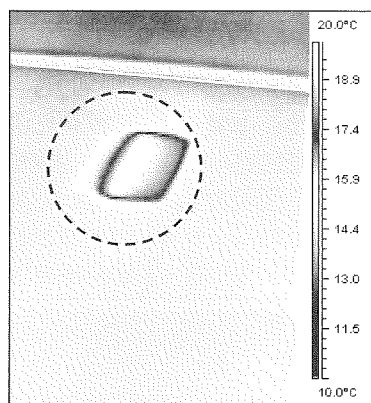


Fig. 18 Observed IR-camera image for Module E

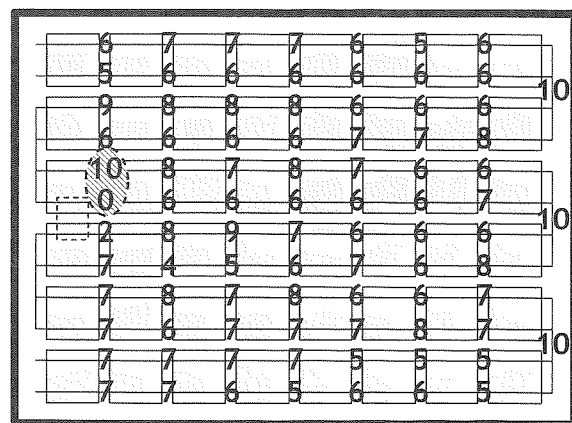
ールも、端子箱部分と一部のサブモジュールブロックの温度がやや高くなっていることがわかる。また、Module A～C には外観上の異常はみられなかったが、Module D では中央部のサブモジュールブロックのセル端部に図 15 に示したような「焦げ」が確認された。さらに、これらの PV モジュールの電流-電圧特性を屋外で測定したところ、図 16 に示したように、どの PV モジュールの V_{oc} も公称値の 2/3 程度であった。これらのことから、この 4 枚はいずれも三つのサブモジュールブロックのうちの 하나가断線状態にある可能性が高い。そこで、配線路探索器を用いてこれらの PV モジュールの回路状態を探索した。その結果を図 17 に示す。判定用 LED が反応しなかった斜線部分が断線状態と判断されるが、それは図 14 に示した表面温度分布からの推測と完全に一致した。

さらに、これらの PV モジュールのほかにも、図 18 のようにセルの片側だけ温度が高くなっている PV モジュール(Module E) が一枚確認された。高温となっていたセルは 3.1 節の図 9 や図 10 で論じた事例と同じ配置にあるものであり、念のため、配線路探索器による探索を実施したところ、図 19 に示したように当該箇所での探索器の反応がやはり極端な差を示した。したがって、この PV モジュールは図 9 や図 10 に示したものと同様な状態になっているものと考えられる。

4. 結言

本稿では、これまでの方法に代わる PV アレイの不具合探索方法として、配線路探索器を利用する方法の適用可能性を検討した。配線路探索器の観測値は日射強度の変化や、PV モジュールの局所的な陰の影響を受けることなく PV モジュール内回路の活線・断線状態を把握することが可能であることが確認され、また、実際の PV アレイに発生している断線部分の検出に関して、良好な結果を得ることができた。

無論、PV モジュールに発生しうる不具合は、本稿で示したような事例ばかりではないであろうが、少なくとも発電機能消失という致命的な不具合をサブモジュールブロック単位で発見することには有用な手段といえる。また、本稿では配線路探索器の反応を PV モジュール全体にわたって観測したが、実用的には PV モジュール周縁部に沿った数箇所の配線部分を探索するだけで十分であり、探索には多くの時間を必要としない。そして、本方

Fig. 19 Distribution map of WRTD indicator level
observed for Module E (instrument: Togami SLC-C)

法は PV モジュールに接近することさえできれば、安価な測定機器で天候に左右されずに実施することが可能という利点もある。さらに、本方法を利用すれば PV アレイにおける PV モジュールの直並列接続構成も極めて容易に判別することができる。これはこのような情報が保管されていないことが多い住宅用 PV システムの保守点検の際に大いに役立つものであり、筆者も PVResQ! 活動⁽²⁾⁽⁵⁾で実際に多用している。

なお、本方法はバイパスダイオードがなく、またインターコネクタによるセル相互接続構造ではない薄膜太陽電池モジュールへは適用できない。次世代型として期待されているこれらの太陽電池モジュールに対する不具合探索や保守については、また別の検討が必要となる。

最後に、本研究を進めるにあたり、さまざまな助言をいただいた同僚や友人、研究寄付金をお寄せいただいた皆様、実際の調査の機会をご提供いただいた PV システム設置者の皆様に心より感謝申し上げます。

参考文献

- (1) 日本電気工業会：小出力太陽光発電システムの保守・点検ガイドライン，日本電気工業会技術資料 JEM-TR228，2003 年 12 月 26 日制定
- (2) 加藤和彦：PVResQ! Annual Report FY2007，2008 年 3 月
- (3) 加藤和彦：産総研太陽光発電設備の運用状況と住宅用太陽光発電システムの実性能調査，産業と環境，pp.65-68，2008 年 3 月
- (4) 加藤和彦，羽倉瑞季，岡島敬一：端子箱温度に着目した簡易的な結晶系 Si 太陽電池の不具合検出方法，太陽/風力エネルギー講演論文集 2007，pp.137-140，2007 年 10 月
- (5) 加藤和彦：住宅用太陽光発電システムの実運用性能調査に関する取り組み，太陽/風力エネルギー講演論文集 2007，pp.133-136，2007 年 10 月