

Study on Evaluation Method of Shunt Resistance Reduction of Photovoltaic Cell Using Thermal Images

熱画像を利用した PV セルの
 R_{sh} 低下判定方法に関する研究Hiroki SATO
佐藤 弘輝^{*1 ‡}Yasuhiro AOYAMA
青山 泰宏^{*3}Yuki NISHIDO
西戸 雄輝^{*3}Sanshiro YAMANAKA
山中 三二郎^{*2}Hiroshi KOBAYASHI
小林 浩^{*3}

Abstract

In recent years, photovoltaics system (PVS) have been widely used, but the change in characteristics with long-term operation is still not sufficiently clarified yet. We would like to clarify the relationship between the long-term operation and the shunt resistance (R_{sh}) reduction of cell, which is one of causes of hot spots. In order to clarify these relationships, a method for efficiently evaluation of R_{sh} reduction is necessary. In this paper, we propose a new method to evaluate R_{sh} reduction using thermal images. We examined a method to evaluate R_{sh} reduction efficiently on a string scale by the difference in the heat generation temperature of the shaded cells. As a result, it became clear that the R_{sh} reduction of cell can be roughly evaluated by the proposed method.

Keywords: Photovoltaic cell, Shunt resistance (R_{sh}), Thermal image, Heat generation, Shade, Long-term operation

キーワード： PV セル, ショント抵抗 (R_{sh}), 熱画像, 発熱, 遮光, 長期運用

1. はじめに

近年, 太陽光発電システム (以下, PVS) の普及が進むにつれて, 長期に渡り運用し続けられる信頼性が求められるようになってきた^(1, 2). この長期信頼性を阻害する要因として, 紫外光によるバックシート・封止材の着色⁽³⁾, PV モジュール (以下, モジュール) における剥離劣化⁽⁴⁾, EVA の加水分解に起因する直列抵抗の増加⁽⁵⁾が報告されている. また, PV セル (以下,

セル) のショント抵抗 (以下, R_{sh}) が低下する可能性⁽⁶⁾も報告されている. しかしながら, R_{sh} の経年変化については十分に検討されていない. R_{sh} は, セルの局所的な欠陥によって生じる漏れ電流を表す指標である. この R_{sh} が極端に低下した場合, バイパスダイオード (以下, BPD) が正常に機能していてもホットスポット⁽⁷⁾を引き起こす可能性が考えられる. また, R_{sh} の低下はセルの出力低下にも影響を及ぼす⁽⁸⁾. したがって, 長期に渡る太陽電池の屋外運用と R_{sh} 低下の関係について明らかにすることは, PVS の長期信頼性を確保する上で極めて重要である.

非破壊で R_{sh} を評価する方法として, セル 1 枚を遮光した際のモジュールの I-V 特性を利用する方法がある⁽⁹⁾. 筆者らはこれまでに, この I-V 特性を利用する方法で長期運用中のモジュールを調査し, R_{sh} の低下したセルが複数存在することを確認している⁽¹⁰⁾. しかし, モジュール設置当初にセルごとの初期特性を測定していなかったため, 純粋な経年による低下と

*1 名城大学大学院 理工学研究科 大学院生
(〒468-8502 名古屋市中白区塩釜口 1-501)
‡ E-mail: 173427012@ccalumni.meijo-u.ac.jp

*2 名城大学理工学部 教授

*3 株式会社トーエネック

(原稿受付: 2018年8月2日, 受理日: 2018年10月9日)

は断言できていない。

筆者らは、 R_{sh} の経年変化について明らかにするために、実際に長期に渡り屋外運用される複数のアレイについて、セルの R_{sh} を初期状態から継続的に調査したいと考えている。そのためには、非破壊で簡便な R_{sh} の評価方法が必要である。従来のI-V特性を利用する評価方法は、モジュール単位で測定器の配線を接続し直す必要があり、運用中のアレイについて調査するためには手間がかかる。そこで、本研究では R_{sh} の経年変化を調査するための方法として、新たに「熱画像によるセルの R_{sh} 低下判定方法」を提案する。本手法は、接続箱でストリングを短絡させればよいので、I-V特性を利用する従来の方法に比べて効率よく調査できる。ただし、本手法は R_{sh} を数値として定量的に評価するのではなく、セルを意図的に発熱させた際の温度から R_{sh} が低下したセルを判別する手法である。筆者らは、本手法で複数のアレイについて R_{sh} が低下したセルの分布を継続的に調べることで、長期運用と R_{sh} の関係を明らかにできると考えている。

本論文では、 R_{sh} の経年変化を調査するために、熱画像から R_{sh} が低下したセルを判定する方法を新たに提案し、その有効性を検証する。さらに、提案手法を用いて実際に長期運用アレイ内すべてのセルの R_{sh} を調査した結果について報告する。

2. セルの部分的な遮光と発熱

本論文で提案する「熱画像によるセルの R_{sh} 低下判定方法」とは、セルの一部を遮光してストリング（もしくはモジュール）を短絡させることで対象となるセルを意図的に発熱させて、赤外線カメラを用いて観測した発熱温度から R_{sh} の低下を判定する方法である。この判定方法について検討する前に、まずはセル1枚の発熱現象について把握する必要がある。本章では、対象となるセルの一部をゴムシートを用いて完全に遮光してモジュールを短絡させた場合に、そのセルの非遮光部分が均一に発熱する現象について考える。

2.1. セルの発熱原理

JIS C 8990⁽¹¹⁾にあるように、セルの一部を遮光してモジュールを短絡させると、遮光したセルの非遮光部分が発熱する。Fig.1に、モジュール（1クラスタにセル18枚、2クラスタ構成）内のセル1枚の一部をゴムシートを用いて完全に遮光して、短絡させた状態を示す。ここで、「クラスタ」とは、セル群とそれに並列接続されたBPDから成る回路のことである。例えば、Fig.1の下部クラスタのように、セルを遮光していない場合には、セル群を通して短絡電流(I_{sc})が流れる⁽¹²⁾。ところが、セル1枚を部分的に遮光すると、遮光セルを含むクラスタ内のセル群には、遮光セルによる制限を受けて I_{sc} よりも低下した電流(I_{op})が流れる。このとき、 I_{sc} （実際には、Fig.1の下部クラスタに0.6V程度の電圧がかかるが、クラスタの開放電圧約10Vに比べて十分に小さいため、流れる電流を I_{sc} として考える）と I_{op} の差分の電流は、遮光セルを含むクラスタ内のBPDへ流入する。BPDが導通状態となるため、遮光セルを含むクラスタは、ほぼ短絡した状態と見なせる（実際には、BPDに-0.6V程度の電圧がかかる）。これは、同クラスタ内の17枚の非遮光セルの順バイアス電圧とほぼ同じ大きさの逆バイアス電圧が、遮光セル1枚にかかることを意味する。Fig.2に、モジュール内のセル1枚をわずかに遮光した場合における、遮光セル1枚のI-V特性①、遮光セルと同じクラスタ内の17枚の非遮光セルの合成I-V特性②を示す。Fig.2では、 R_{sh} が十分に大きい正常なセルを遮光した場合について考えている。Fig.2より、短絡モジュール内の遮光セル1枚の動作点は、遮光セルと同じクラスタ内の17枚の非遮光セルの合成I-V特性②について、電流軸を線対象に鏡像をとったカーブと、遮光セル1枚のカーブ①との交点として考えることができる。ここで、遮光セル1枚の動作点は電力の消費を意味するI-V特性の第2象限に位置し、Fig.2の破線で囲まれた面積(A+B)に相当する電力を消費する。この消費電力の内、遮光セルの短絡電流 I_{sc}' と逆バイアス電圧の積にあたる面積(A)は、セル平面の均一な発熱に消費される電力である。例として、Fig.3にセル平面が均一に発熱した状態の熱画像を示す。Fig.3は、セルの一部をゴムシートで遮光し、モジュールを短絡させて撮影した熱画像である。一方、遮光セルを含むクラスタの動作電流 I_{op} と遮光セルの短絡電流 I_{sc}' の差分の電流と、逆バイアス電圧の積にあたる面積(B)は、遮光セル内の R_{sh}

ルを含むクラスタは、ほぼ短絡した状態と見なせる（実際には、BPDに-0.6V程度の電圧がかかる）。これは、同クラスタ内の17枚の非遮光セルの順バイアス電圧とほぼ同じ大きさの逆バイアス電圧が、遮光セル1枚にかかることを意味する。Fig.2に、モジュール内のセル1枚をわずかに遮光した場合における、遮光セル1枚のI-V特性①、遮光セルと同じクラスタ内の17枚の非遮光セルの合成I-V特性②を示す。Fig.2では、 R_{sh} が十分に大きい正常なセルを遮光した場合について考えている。Fig.2より、短絡モジュール内の遮光セル1枚の動作点は、遮光セルと同じクラスタ内の17枚の非遮光セルの合成I-V特性②について、電流軸を線対象に鏡像をとったカーブと、遮光セル1枚のカーブ①との交点として考えることができる。ここで、遮光セル1枚の動作点は電力の消費を意味するI-V特性の第2象限に位置し、Fig.2の破線で囲まれた面積(A+B)に相当する電力を消費する。この消費電力の内、遮光セルの短絡電流 I_{sc}' と逆バイアス電圧の積にあたる面積(A)は、セル平面の均一な発熱に消費される電力である。例として、Fig.3にセル平面が均一に発熱した状態の熱画像を示す。Fig.3は、セルの一部をゴムシートで遮光し、モジュールを短絡させて撮影した熱画像である。一方、遮光セルを含むクラスタの動作電流 I_{op} と遮光セルの短絡電流 I_{sc}' の差分の電流と、逆バイアス電圧の積にあたる面積(B)は、遮光セル内の R_{sh}

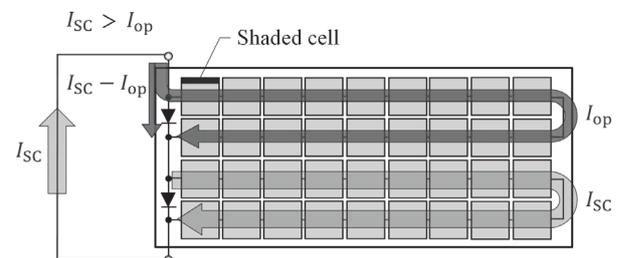


Fig.1 Short circuited module with a single shaded cell.

図1 短絡モジュール内のセル1枚を遮光した状態

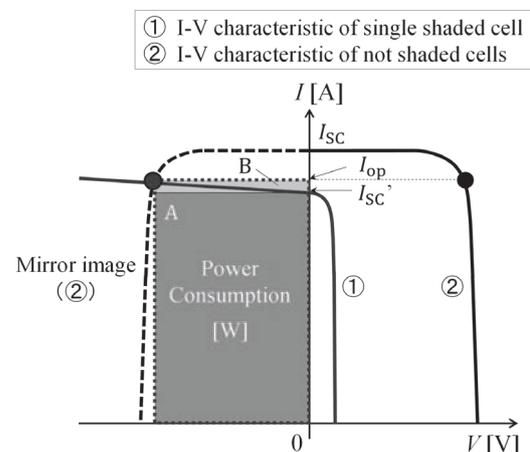


Fig.2 I-V characteristics of single shaded cell and not shaded cells.

図2 遮光セル1枚と非遮光セルのI-V特性

を介した局所的な発熱すなわち、ホットスポットとして消費される電力である。ただし、土井氏らの報告⁽¹³⁾にある逆バイアス特性から推察すると、セルの欠陥部分に流れ込む電流が約2Aよりも十分に小さく、この面積(B)が小さい場合には、短時間でホットスポットによる損傷には至らないと考えられる。本論文の提案手法では、ホットスポットではなく、セル平面の均一な発熱を利用して R_{sh} が低下したセルを判定する。

2.2. 遮光セルの R_{sh} と発熱の関係

前節では、 R_{sh} が十分に大きい正常なセルを例に、セルの一部を完全に遮光してモジュールを短絡させた場合における遮光セルの発熱原理について示した。本節では、遮光セルの R_{sh} の大きさと発熱の関係について考える。

Fig.4に、Fig.2と同様にセル1枚をわずかに遮光した状態のI-V特性を示す。ここで、Fig.4①は、遮光セルの R_{sh} が十分に大きい場合と、低下した場合のI-V特性を同一図面上に示している。遮光セルの R_{sh} が低下しているほど(第2象限にあるFig.4①のI-V特性の傾きが急になるほど)、遮光セルの動作点は I_{sc} 近傍へと移動する。仮に、セル個々のももとの短絡電流にばらつきがなく一定とすると、遮光セルの R_{sh} の大きさに応じて、遮光セルにかかる逆バイアス電圧が変化するため、セル平面の均一な発熱に寄与する消費電力に差が生じる(Fig.4のaとbの差)。すなわち、 R_{sh} が低下すれば発熱温度も低下する。したがって、Fig.4に示すように、同一の割合でセルをわずかに遮光すれば、遮光セルの発熱温度から R_{sh} が低下したセルを判定することができる。ただし、これはBPDが正常に動作することが前提である。

2.3. 適切なセル1枚の遮光面積

実際に、遮光セルの発熱温度から R_{sh} が低下したセルを判定するためには、適切なセルの遮光面積を決定する必要がある。適切なセルの遮光面積とは、 R_{sh} が十分に大きいセルと小さいセルの発熱温度の差が最大となる時の遮光面積と考える。そこで、本節では R_{sh} が十分に大きいセル($R_{sh} : 61.7 \Omega$)と R_{sh} が小さいセル($R_{sh} : 8.0 \Omega$)を対象に、それぞれセルの面積に対するゴムシートの遮光面積を変化させた場合の対象セルの発熱温度について検討する。ただし、 R_{sh} が小さいセルで

は、過度に遮光面積を大きくすると、ホットスポットを誘発する恐れがあるため、モジュール短絡直後から発熱温度が上昇していく経過を赤外線カメラで観察し続けて、安全に注意して実験を行った。

Fig.5に、セルの遮光面積と発熱温度の関係を示す。ここで、遮光セルの発熱温度は、測定環境の変化による影響を軽減するために、非遮光セルに対する遮光セルの「温度増加」で評価しており、Fig.5の温度増加はモジュール裏面から赤外線カメラを用いて撮影した熱画像より算出している。Fig.5を見ると、セル面積に対してゴムシートを10%~20%の大ききで貼り付けた場合に、 R_{sh} の違いによる温度増加の差が顕著に表れている(30℃弱)。これは、Fig.4に示すように、セルをわずかに遮光した場合に、遮光セルの R_{sh} の大きさに応じてかかる逆バイアス電圧に差が生じることを表している。したがって、熱画像から R_{sh} が低下したセルを判定する際の遮光面積は、より短絡電流の低下量が小さい10%が適切であると考えられる。

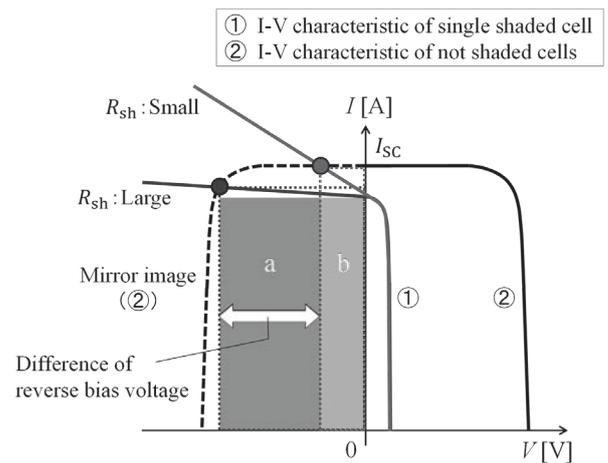


Fig.4 R_{sh} of single shaded cell and power consumption.

図4 遮光セルの R_{sh} と消費する電力

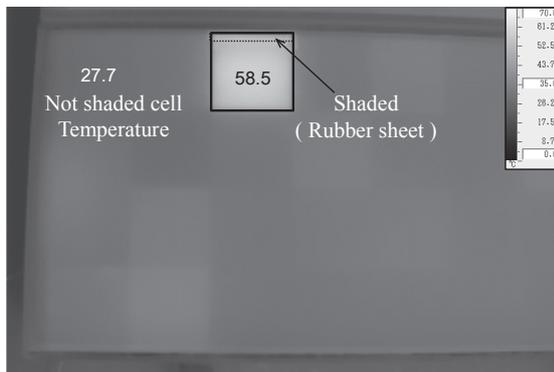


Fig.3 Thermal image of partially shaded cell.

図3 セルの一部分を遮光した際の熱画像

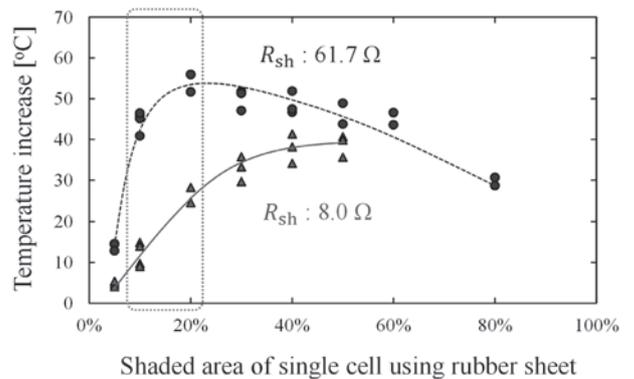


Fig.5 Relation of shaded area and temperature increase

($R_{sh} : 61.7 \Omega$ and 8.0Ω).

図5 遮光面積と温度増加の関係 ($R_{sh} : 61.7 \Omega$ と 8.0Ω)

3. 複数モジュールでの判定

前章では、熱画像によるセルの R_{sh} 低下判定方法の基礎となる発熱原理を示し、実際に判定を行うためのセルの遮光面積を決定した。本章では、複数のモジュールを検討対象として、判定方法の有効性を検証する。

Table 1 に、検討対象のモジュール 4 種類（長期運用品：A～C、新品：D）の仕様を示す。ここで、長期運用モジュール A～C はすべて多結晶シリコンモジュールであり、前章で例に挙げた Fig.1 のモジュールと同じ構成である（1 クラスタにセル 18 枚、2 クラスタ構成）。また、新品モジュール D は単結晶シリコンモジュールであり、セル 10 枚を 1 クラスタとする計 2 クラスタから構成される。これらのモジュール内のセルを 1 枚ずつ順番にゴムシートで 10% だけ遮光していき、その都度モジュールを短絡させて熱画像を撮影した。さらに、従来の I-V 特性を利用する方法により、モジュール内すべてのセルについて、セル個々の R_{sh} 値を算出した。熱画像から得た温度増加と I-V 特性から得た R_{sh} 値の関係について検討する。

Fig.6 に、検討対象モジュール 4 種類それぞれにおけるセル個々の R_{sh} 値と温度増加の関係を示す。Fig.6 より、長期運用モジュール A～C 内には、 R_{sh} が 20 Ω よりも低いセルが複数存在し、 R_{sh} が低いほど温度増加も低下する傾向が確認できる。一方、新品モジュール D 内には、そもそも R_{sh} が 20 Ω 未満のセルが存在していない。そのため、温度増加が極端に低い（10 $^{\circ}\text{C}$ 未満の）セルは見られず、いずれのセルも温度増加はほぼ一定（30 $^{\circ}\text{C}$ 程度）となっている。

以上より、検討対象とした 4 種類のモジュールで、 R_{sh} が 20 Ω 未満のセルがモジュール内にあれば、そのセルの温度増加が低下することを実験的に確認できた。したがって、前章に示した通りモジュール単位であれば熱画像を用いて R_{sh} が低下したセルを判定することができる。

4. スtring単位での判定

前章では、複数のモジュールを検討対象として、モジュール単位であれば、熱画像によるセルの R_{sh} 低下判定が可能であることを示した。しかし、実際に運用するアレイ規模でセル

の R_{sh} 低下判定を行う場合、前章の方法ではモジュール単位で短絡させる必要があるため手間がかかる。そこで、より効率よく R_{sh} が低下したセルを判定するために、本章では前章の方法を応用し、接続箱にて String 単位で短絡させて複数のセルの R_{sh} 低下を同時に判定する方法を検討する。

4.1. 判定方法

Fig.7 に、各モジュールのセル 1 枚をゴムシートで 10% 遮光して、String を短絡させた状態を示す。Fig.7 は、本章で検討対象とする多結晶シリコンモジュール（1 クラスタにセル 18 枚、2 クラスタ構成）12 枚から構成される 1 String を模式的に表している。2 章の発熱原理より、String 内の各モジュールの BPD が正常であれば、Fig.7 に示すようにモジュールごとにセル 1 枚を遮光すると、各遮光セルを含むクラスタ内の BPD が導通する。String 単位で短絡させた場合、各遮光セルには同クラスタ内の非遮光セル群の順バイアス電圧とほぼ同じ大きさの逆バイアス電圧がかかる。これは、接続箱にて String 単位で短絡させても、遮光したセルの R_{sh} の大きさに応じて、発熱温度が違うことを意味する。したがって、String 単位で短絡させた場合でも、前章と同様に熱画像から R_{sh} が低下したセルを判定できる。この方法であれば、モジュール単位で短絡しなくとも、接続箱にて String 単位で短絡させればよいと、労力を削減できる。さらに、同時に複数のセルの R_{sh} 低下を判定することができるため、同

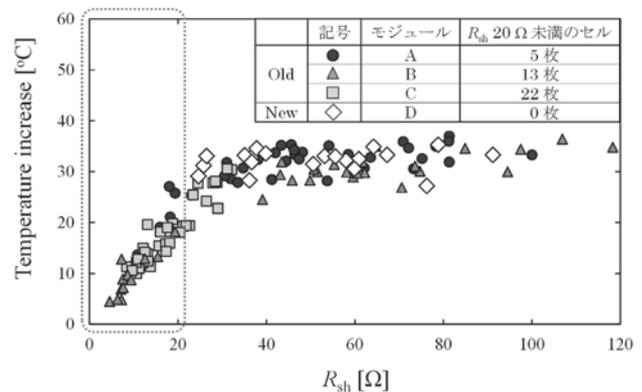


Fig.6 Relation of R_{sh} and temperature increase of all cells in modules.

図 6 複数モジュール内の全セルの R_{sh} 値と温度増加の関係

Table 1 Specification of target modules (I_{sc} and V_{oc} are nominal value).

表 1 検討対象モジュールの仕様 (I_{sc} , V_{oc} は公称値)

	モジュール	稼働期間	I_{sc} [A]	V_{oc} [V]	セルの面積 [cm^2]	1 クラスタのセル枚数	クラスタ構成
Old	A	約 15 年	3.73	21.5	7.8×15.7	18	2 クラスタ
	B	約 20 年	4.00	21.5	11.5×11.5		
	C	約 10 年	4.87	20.4	12.5×12.5		
New	D	1 年未満	9.79	13.1	15.6×15.6	10	

時に複数のストリングを短絡させることで、従来の I-V 特性を利用する方法よりも効率よくアレイ内すべてのセルを調査することができる。ただし、日射強度の低下に伴い遮光セルの発熱温度も低下するため、 R_{sh} が低下したセルを判別することが難しくなる。したがって、本手法で判定を行う場合は日射強度が十分に高く安定していることが望ましい。

4.2. 判定方法の検証

本節では、20年弱運用しているPVSの1ストリング内すべてのセルを検討対象として、前節で提案したストリング単位での判定方法の有効性を検証する。

検討対象のストリング内には、計432枚(12モジュール×36セル)のセルがある。Fig.7に示すように、各モジュールのセル1枚をゴムシートで10%遮光し、ストリングを短絡させて熱画像を撮影することで、1回の測定からストリング内のモジュール数分すなわち、12枚の遮光セルの発熱温度を同時に得られる。この方法を用いて、遮光するセルを順番に変更していき、その都度熱画像を撮影することで、計36回の測定からストリング内すべてのセルの温度増加を得た。さらに確認のため、従来のI-V特性を利用する方法を用いて、セルを1枚ずつ順番に遮光した際のモジュールのI-V特性を計432回測定し、ストリング内すべてのセルの R_{sh} 値を算出した。

例として、撮影した熱画像の一部をFig.8(a),(b)に示す。ここで、太線で囲われたセルは遮光セルである。Fig.8(a)より、① 54.3℃の遮光セルは、基準とする非遮光セルの温度② 49.1℃に対して温度増加5.2℃と発熱温度が低いセルであることがわかる。ここで、その他の遮光セルはいずれも温度増加14℃以上である。また、Fig.8(b)より、① 50.9℃の遮光セルは、非遮光セルの温度② 46.6℃に対して温度増加4.3℃と発熱温度が低く、その他の遮光セルはいずれも温度増加21℃以上である。これらのセルについて、従来法⁹⁾より R_{sh} 値

を算出したところ、(a)の①は7.2Ω、(b)の①は6.1Ωと R_{sh} が極端に低いセルであった。ここで、遮光セル以外にも発熱しているセルがあるが、これらのセルはももとの短絡電流が他よりもわずかに低下したセルと考えられる。

Fig.9に、1ストリング内すべてのセルについて、熱画像から算出した温度増加と、I-V特性から算出した R_{sh} 値の関係を示す。Fig.9は、日射強度0.7kW/m²以上の条件下で、測定時の天候の都合から5日に分けて測定した結果である。Fig.9より、温度増加にばらつきが見られるが、 R_{sh} 20Ω以下の範囲では遮光セルの R_{sh} が低いほど温度増加も低下する傾向が明瞭に確認できる。ここで、温度増加のばらつきは、5日に分けて測定したこと起因する日射強度・風速^{14, 15)}等の測定環境の変化による影響と考えられる。Fig.9に示した温度増加のばらつきより、ストリング単位で R_{sh} が低下したセルを判定する場合には、熱画像から算出する温度増加から厳密な R_{sh} 値を求めることは困難である。筆者らの目的は、実際に運用する複数のアレイを継続的に調査していき、屋外での長期運用と R_{sh} 低下の関係を明らかにすることである。したがって、 R_{sh} 値を正確に算出できなくとも、 R_{sh} が低下したセルを判定できればよい。

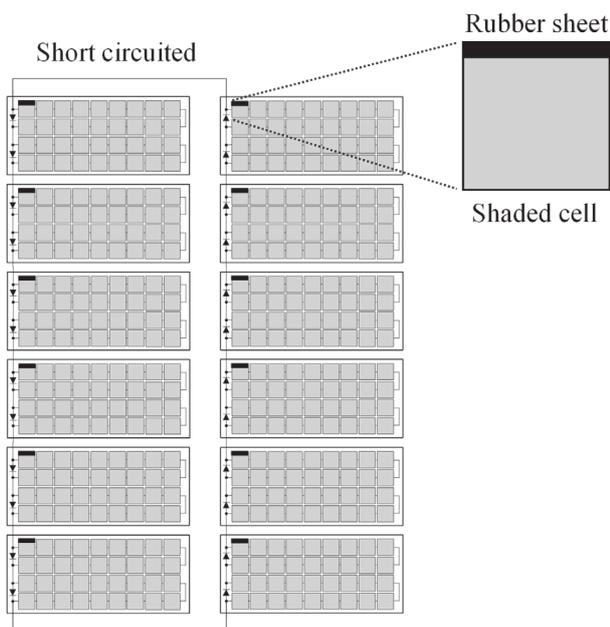
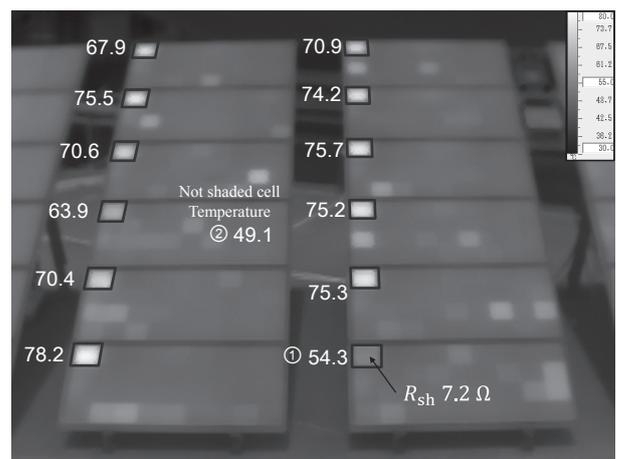
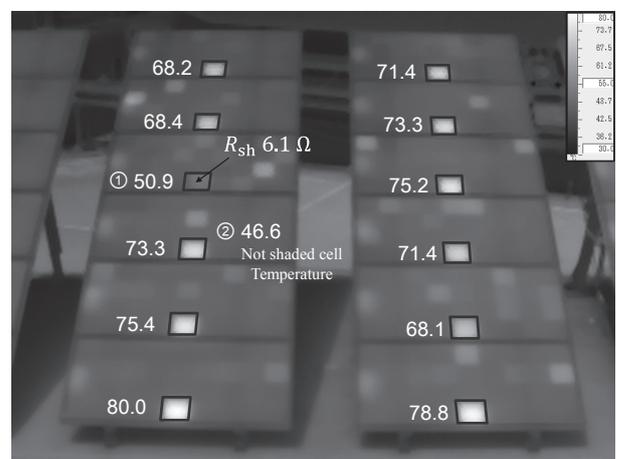


Fig.7 Short circuited string with a single shaded cell per module.

図7 モジュールごとにセル1枚を遮光した短絡ストリング



(a) date : 2017/08/03



(b) date : 2017/08/09

Fig.8 Thermal image in evaluation.

図8 判定時の熱画像

ここで、 R_{sh} が10 Ω未満のセルを「 R_{sh} が低下したセル」と考える。ストリング単位での R_{sh} 低下判定方法の有効性を検証するために、Fig.9の R_{sh} 値を4つ ($R_{sh} < 10, 10 \leq R_{sh} < 20, 20 \leq R_{sh} < 30, 30 \leq R_{sh}$) に、温度増加 T_{cell} を10 °C間隔で4つ ($T_{cell} < 10, 10 \leq T_{cell} < 20, 20 \leq T_{cell} < 30, 30 \leq T_{cell}$) に大別して、各温度増加帯における R_{sh} 別のセル枚数を検討する。Fig.10に、各温度増加帯に分類した R_{sh} 別のセル枚数を示す。Fig.10より、全セル432枚中28枚が温度増加10 °C未満のセルであり、その内20枚(71%程度)が R_{sh} 10 Ω未満にまで低下したセルであった。一方、温度増加20 °C以上のセルは288枚あり、その内221枚(77%程度)が R_{sh} 30 Ω以上のセルであった。

以上より、ストリング内のモジュールごとにセル1枚を遮光し、ストリングを短絡させて熱画像を撮影することで、複数のセルの R_{sh} 低下をおおむね判定することができる。

5. 長期運用アレイの調査結果

前章では、4ストリングで構成されるアレイ内の1ストリング(モジュール12枚から構成、1モジュール内にセル36枚)を対象に、熱画像による R_{sh} 低下判定方法の有効性を検証した。本章では、提案手法を用いて、前章で対象としたストリング

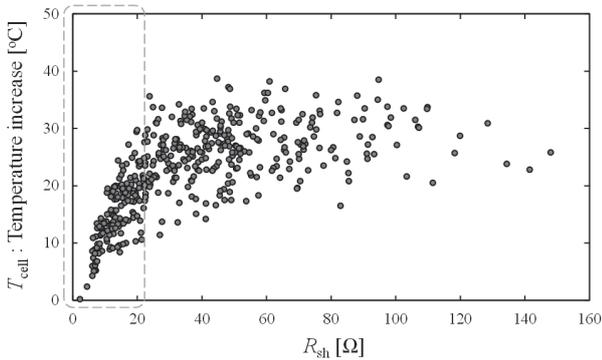


Fig.9 Relation of R_{sh} and temperature increase of all cells in single string.

図9 1ストリング内の全セルの R_{sh} 値と温度増加の関係

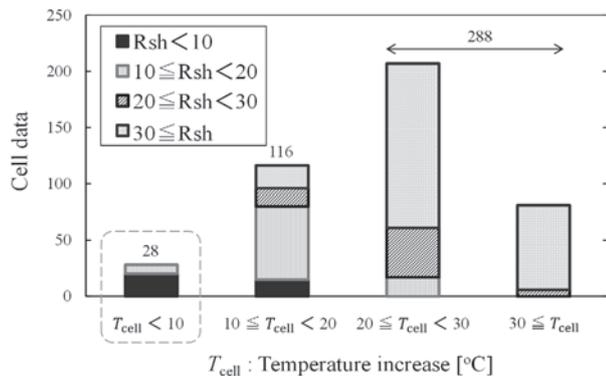


Fig.10 Number of cells in each temperature increase and R_{sh} zones.

図10 各温度増加帯における R_{sh} 別のセル枚数

を含む4ストリングを対象に、 R_{sh} が低下したセルの枚数を調査した結果について報告する。ここで、対象アレイは20年弱PVSの一部として屋外運用されており、アレイ内のセル数は1728枚である。

Table 2に、遮光セルの温度増加 T_{cell} を10 °C間隔で4つ ($T_{cell} < 10, 10 \leq T_{cell} < 20, 20 \leq T_{cell} < 30, 30 \leq T_{cell}$) に大別した各温度増加帯におけるセル枚数を示す。ただし、String 1~String 4の4つのストリングの内、String 2は前章で検討対象としたストリングである。Table 2より、同一アレイ内のストリングであるにも関わらず、ストリングごとに温度増加10 °C未満のセル枚数すなわち、 R_{sh} が低下していると判定したセル枚数に差異があることがわかる。また、今回対象とした長期運用アレイでは、すべてのセル1728枚の内306枚(約17.7%)が温度増加10 °C未満であり、 R_{sh} が低下したセルと判定した。例として、温度増加が20 °C程度と十分に高く非遮光セルに比べて明らかな発熱が観測できたセル(Cell A)と、温度増加が10 °C未満の R_{sh} が低下していると判定したセル(Cell B, Cell C)の計3枚を抜粋し、それぞれを1枚ずつ50%遮光した際のモジュールのI-V特性を測定した。ここで、Cell AはString 2, Cell BはString 4, Cell CはString 1内のセルである。Fig.11に得られたI-V特性を示す。温度増加が20 °C程度のCell Aは、 R_{sh} が十分に大きいため、セルを50%遮光すればモジュールのI-Vカーブに目視でもわかるような段差が表れる。一方、温度増加10 °C未満の R_{sh} が低下していると判定したCell BとCell Cでは、セルを50%遮光しているにも関わらず、I-VカーブにCell Aのような段差は見られない。したがって、Cell BとCell Cは R_{sh} が低下したセルであることが確認できる⁽¹⁰⁾。

本章では、熱画像を利用したストリング単位での R_{sh} 低下判定方法を用いて、長期運用PVS内のアレイを対象に、 R_{sh} が低下したセルの枚数を調査した。その結果、アレイ内すべてのセル1728枚の内306枚(約17.7%)を R_{sh} が低下したセルと判定した。ただし、全セルの R_{sh} の初期状態が不明であるため、純粋な経年による低下とは断言できない。

以上より、ストリング単位で複数のセルの R_{sh} 低下を同時に判定する方法を用いれば、アレイ規模で R_{sh} が低下したセルを調査できる。今回対象としたアレイを例に、従来のI-V特性を利用する方法で R_{sh} が低下したセルを調査する場合、I-V特性

Table 2 Number of cells in each temperature increase zones in the target array.

表2 対象アレイにおける各温度増加帯のセル枚数

T_{cell} [°C]	String 1	String 2	String 3	String 4	Array
$T_{cell} < 10$	81	28	114	83	306
$10 \leq T_{cell} < 20$	128	116	107	131	482
$20 \leq T_{cell} < 30$	127	207	102	104	540
$30 \leq T_{cell}$	96	81	109	114	400

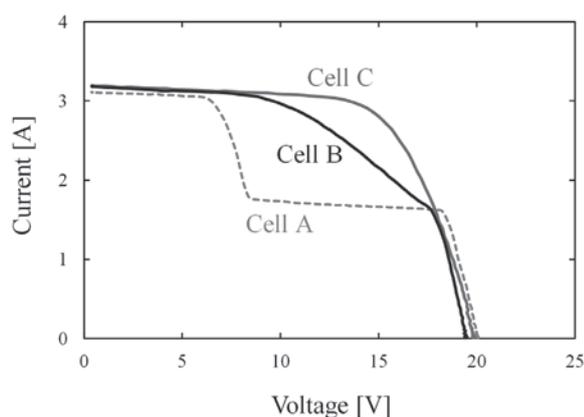


Fig.11 I-V characteristics of module with a 50% shaded single cell.

図 11 セル 1 枚を 50%遮光した際のモジュールの I-V 特性

を得るためにモジュール数分の 48 回測定器を接続し直さなければならぬ。また、セル総数にあたる 1728 回順番にセル遮光時の I-V 特性を測定する必要がある。一方、熱画像を利用してストリング単位で R_{sh} が低下したセルを判定する場合には、熱画像 1 回の撮影で 1 ストリング分のモジュール数にあたる 12 枚のセルを同時に判定することができるため、計 144 回 (4 ストリング×36 セル) 熱画像を撮影すればアレイ内すべてのセルを調査することができる。また、接続変更の手間に関しても、接続箱でストリングごとに回路を短絡させればよいので、労力を削減できる。

6. まとめ

本論文では、長期に渡り屋外運用される複数のアレイについて、 R_{sh} が低下したセルの分布を継続的に調査可能な方法として、熱画像によるセルの R_{sh} 低下判定方法を新たに提案し、その有効性を検証した。さらに、実際に提案手法を用いて、長期運用したアレイ内すべてのセルの R_{sh} を調査した。以下に得られた結果をまとめる。

- (1) セル 1 枚の一部分をゴムシートで完全に遮光してモジュールを短絡させると、遮光したセルの非遮光部分が均一に発熱する。このとき、 R_{sh} が十分に大きいセルに比べて、 R_{sh} が低下したセルでは発熱温度が低くなる。
- (2) セル 1 枚の面積 10% をゴムシートで遮光してモジュールを短絡させると、遮光セルの R_{sh} が 20 Ω 未満の場合には、 R_{sh} が低いほど温度増加 (遮光セルと非遮光セルの発熱温度の差) も低下する。
- (3) モジュールごとにセル 1 枚をゴムシートで 10% 遮光し、接続箱にてストリング単位で短絡させて熱画像を撮影した場合、遮光セルの温度増加が 10 $^{\circ}\text{C}$ 未満であれば、 R_{sh} が 10 Ω 未満にまで低下したセルと判定できる。したがって、1 モジュール内のセル枚数と同じ回数だけ熱画像を撮影すれば、1 ストリング内すべてのセルの R_{sh} の低下判定が可能である。

(4) 本論文で提案する手法を用いて、4 ストリングで構成される長期運用アレイを対象に、熱画像を利用して R_{sh} の低下判定を行ったところ、アレイ内のセル総数 1728 枚中 306 枚 (約 17.7%) のセルが温度増加 10 $^{\circ}\text{C}$ 未満であるため、これらのセルは R_{sh} が低下していると推定できる。

7. 参考文献

- 1) K. Hara, A. Masuda, Improving the long-term durability of photovoltaic modules based on degradation mechanisms, JSAP, **84** (7), 648-649 (2015).
- 2) A. Masuda, N. Igawa, Consortium style study on the development of highly reliable photovoltaic modules and acceleration test methods - Management of the "Consortium Study on Fabrication and Characterization of Solar Cell Modules with Long Life and High Reliability" -, Synthesiology, **9** (1), 39-40 (2016).
- 3) Y. Tachibana, T. Toyoda, K. Shimada, K. Nakano, Evaluation of Age-related Degradation of Solar Power Systems - Aiming for a Long-life Solar Cell Module -, Report of the Industrial Research Institute of Ishikawa, **63**, 9-10 (2012).
- 4) N. Uchiyama, A. Masuda, K. Mitsuhashi, A. Tsutsumida, J. Watanabe, J. Shirataki, K. Matsuda, Study on delamination in photovoltaic modules induced by acceleration test and field exposure, The 61st JSAP Spring Meeting, 76 (2014), Kanagawa.
- 5) K. Hara, A. Masuda, Improving the long-term durability of photovoltaic modules based on degradation mechanisms, JSAP, **84** (7), 649-651 (2015).
- 6) 土井卓也, 新規信頼性試験法の開発, 第 II 期高信頼性太陽電池モジュール開発・評価コンソーシアム最終成果報告書, 221-223 (2013).
- 7) IEC 61215-2, INTERNATIONAL STANDARD, Edition 1.0, 16-17 (2016).
- 8) T. Matsui, S. Yamanaka, H. Ohno, Shunt resistance and output of PV cell, The 2012 Annual meeting of the institute of electrical engineers of japan, 57 (2012).
- 9) S. Yamanaka, T. Mishina, H. Kawamura, H. Kawamura, H. Ohno, K. Naito, Effect of the Reverse Bias Characteristics of a PV Cells on I-V Characteristics of PV Module with a Cell Lowered the Generating Power, JSES, **29** (2), 44-52 (2003).
- 10) K. Hada, H. Sato, S. Yamanaka, Comparison of New and Old Modules Using I-V Characteristics of a Module with a Shaded PV cell, The 2017 Annual meeting of the institute of electrical engineers of japan, 19 (2017).
- 11) JIS C 8990, ホットスポット耐久試験.
- 12) 太陽光発電協会, 太陽光発電システムの設計と施工 改訂 4 版, 15-17 (2012), オーム社, 東京.
- 13) T. Doi, T. Yamada, K. Sakuta, Forward current pyretic test and reverse biased breakdown test of c-Si PV cells, JSES/JSWS Joint Conference, 445-447 (2007).
- 14) 吉田駿, 伝熱学の基礎, 51-72 (1999), 理工学社, 東京.
- 15) M. Yukawa, M. Asaoka, K. Takahara, T. Ohshiro, K. Kurokawa, Estimation of Photovoltaic Module Temperature Rise, IEEJ Transactions on Power and Energy, **116** (9), 1102-1109 (1996).