Research Paper 研究論文

# Study on judgment method for open failure of bypass diode of solar cell module using thermal image -Method for temperature control of shaded cells-

Koki UEDA\*1‡Sanshiro YAMANAKA\*2Yasuhiro AOYAMA\*3Yuki NISHIDO\*3Hiroshi KOBAYASHI\*3

熱画像を利用した太陽電池モジュールの バイパスダイオード開放故障判定方法に関する研究 - 遮光セルの発熱温度調節方法 -

 上田 紘巨<sup>'1‡</sup>
 山中 三四郎<sup>'2</sup>

 青山 泰宏<sup>'3</sup>
 西戸 雄輝<sup>'3</sup>
 小林 浩<sup>'3</sup>

## Abstract

An open failure of the bypass diode (BPD) of a photovoltaic module can damage the cell. With existing inspection methods, it is difficult to find an open failure of a BPD. A method for finding open failure of BPDs using thermal imaging was investigated. The following points were clarified in this study. In a partially shaded cell, the unshaded portion of the cell generates heat. There are two types of heating: surface heating and point heating. They occur simultaneously. Point heating causes the back sheet to burn. However, if the shaded area is 10%, the cell does not burn as a result of point heating for a long time. Surface heating can cause the heat generation temperature of the cell surface to become high. The heat generation temperature can be adjusted by setting the number of shaded cells so that multiple cells are shaded. The heat generation temperature of a partially shaded cell differs depending on whether the BPD is open.

*Keywords*: Photovoltaic cell, Thermal image, Bypass diode, Open failure, Shaded キーワード:太陽電池,熱画像,バイパスダイオード,開放故障,遮光

## 1. はじめに

太陽光発電システム(以下, PVS)が実用化された当初, PVS はメンテナンスフリーと言われていた<sup>(1)</sup>.しかし, PVS の普及が進むにつれ,様々な不具合が報告され,保守 点検の重要性が認識されるようになってきた<sup>(2)</sup>.太陽電池

‡ e-mail: kohki306@gmail.com

Received: 20th April 2020, Accepted: 21st August 2020

モジュール(以下,モジュール)に関する不具合の一つと して「バイパスダイオード(以下,BPD)の開放故障」が 報告されている<sup>(3)</sup>.この不具合が発生した状態で,太陽電 池セル(以下,セル)に影がかかると,局所的な発熱<sup>(4)</sup>が 発生し,セルを損傷させる恐れがある.また,消費者安全 調査委員会の住宅用 PVSの火災事故原因報告書では,モジ ュールの発火に至る過程の中に BPD 開放故障があると述べ

(原稿受付:2020年4月20日,受理日:2020年8月21日)

<sup>\*1</sup> Graduate student, Graduate School of Meijo University, 1-501 Shiogamaguchi, Tempaku-ku, Nagoya –shi, Aichi, 468-8502, Japan

<sup>\*2</sup> Professor, Faculty of Science and Technology, Meijo University \*3 Toenec Corporation

<sup>\*1</sup> 名城大学大学院 理工学研究科 大学院生 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501)

<sup>‡</sup>E-mail: kohki306@gmail.com

<sup>\*2</sup> 名城大学理工学部 教授

<sup>\*3</sup> 株式会社トーエネック

られている<sup>(5)</sup>. そのため, BPD の開放故障箇所を早期に発 見し,対処することが保守点検上重要である.現在までに 開放故障箇所を特定する方法として,配線路探査機器<sup>(6)</sup>, 端子箱の発熱を利用した方法<sup>(7)</sup>などが提案されている.し かし,これらの方法は BPD1 個ずつ検査を行う必要があり, 作業に手間がかかり簡便に故障箇所を特定することは難し い<sup>(8)</sup>.また,これまで筆者らの一部が提案してきたI-V 特性 を用いた故障判定方法では,開放故障の存在は比較的容易 に検知可能であるが,故障箇所の特定に手間がかかるとい う問題があった<sup>(9)</sup>.

しかし、逆に、開放故障したモジュールに局部的な発熱 が発生するのであれば、熱画像による発熱状態の把握によ り開放故障した BPD を見つけることも可能なはずである. 筆者らは「熱画像を利用した太陽電池モジュールの BPD 開 放故障判定方法」について検討している. 我々が検討して いる方法はモジュール内のクラスタ(セル群とそれに並列接 続された BPD から成り立つ回路)ごとにセルの一部を遮光 し、意図的に遮光セルを発熱させる方法である. BPD が開 放故障していると、そのクラスタ内の遮光セルの発熱温度 は正常時より高くなる.この時の遮光セルの発熱温度の違 いから開放故障箇所を特定する.また,この方法はモジュ ールのクラスタごとに遮光を行うため、複数のクラスタを 同時に遮光すれば、熱画像から複数の BPD について同時に 検査可能な方法となり得る.しかし,この方法は意図的に 遮光したセルを発熱させるため、最初に遮光セルの発熱温 度を調節する工夫が必要である.

本論文では、「熱画像を利用した太陽電池モジュールの BPD 開放故障判定方法」を実用化するための第一段階とし て、開放故障クラスタ内の遮光セルの発熱温度を調節する 方法と BPD 正常時と開放故障時の遮光セルの発熱温度差を 確保するための基礎的な検討を行ったので、その結果を報 告する.

### 2. 遮光セルの発熱

#### 2.1 BPDと発熱

筆者らが検討している「熱画像を利用した BPD 開放故障 判定方法」は BPD 正常時と開放故障時における部分的に遮 光したセルの発熱温度の違いを利用する方法である.そこ で,最初に正常な BPD と開放故障した BPD で温度差が発 生することを確認する必要がある.本節では最初に I-V 特 性の図を用いて BPD の正常時と開放故障時で部分的に遮光 したセルの非遮光部分の発熱温度に差が発生する可能性を 検討する.

JIS C 8990<sup>(10)</sup>にあるように、モジュール内のセルの一部を ゴムシートで遮光し、短絡させると遮光セルの非遮光部分 が発熱する.セル1枚の一部をゴムシートで遮光し、モジ ュール(1クラスタにセル18枚、2クラスタ構成)を短絡 させた場合の図を Fig.1 に示す. Fig.1の下段クラスタのよ うにセルを遮光していない場合、セル群には短絡電流(*I<sub>sc</sub>*)

が流れる<sup>(11)</sup>. 図中上段クラスタのように, BPD が正常に働 いている場合にセル1枚の一部を遮光すると、遮光セルを 含むクラスタは日射量の制限を受けるため、Iscより低下し た電流  $(I_{op})$  が流れる.このとき、 $I_{sc} \ge I_{op}$ の差分の電流 (Isc-Ion)は、遮光セルを含むクラスタ内の BPD に分流 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なる. 非遮光セル 17 枚分の順バイ アス電圧分(Fig.1 破線部分)とほぼ同じ逆バイアス電圧が 遮光セルにかかり電力を消費する. そのため, 遮光セルが 発熱する. Fig.2 は BPD の正常時と開放故障時についてモ ジュール内のセル1枚を部分的に遮光した場合の I-V 特性 を示す. 図の右上にこの時のモジュールの状態を示す. Fig.2 において、第2象限にある太線①が遮光セル1枚の I-V特性を示す.また,第1象限の実線②は非遮光セル17枚 分の順バイアス電圧分を合成した I-V 特性である. 第2象 限の点線③は順バイアス電圧である実線②の鏡像である. 短絡させたモジュール内の遮光セル 1 枚の動作点は①の太 線と③の点線との交点にくる.



Fig.1 Short circuited module with a single shaded cell. 図1 短絡したモジュール内のセル1枚を遮光した状態



Fig.2 BPD normal (circuit diagram and I-V characteristics) 図 2 BPD 正常(回路図と I-V 特性)



Fig.3 BPD open failure (circuit diagram and I-V characteristics) 図 3 BPD 開放故障(回路図とI-V 特性)

ここで遮光セル1枚の動作点は電力を消費する I-V 特性の 第2象限に位置する. 遮光セルは Fig.2 の四角で囲まれた面 積に相当する電力をジュール熱として消費するため,遮光 セルが発熱する.

続いて, BPD が開放故障している場合を考える. Fig.3 に BPD が1箇所開放故障している場合の I-V 特性を示す.同 図は BPD が開放故障しているクラスタ内のセル1枚の一部 を遮光した状態を示している. BPD 開放故障は BPD が機能 しなくなり断線状態となるため、セルの一部に影をかけて も BPD に電流が分流されず,正常時のように1クラスタ分 で短絡されない、そのため、モジュール全体で短絡状態と なる. したがって, BPD 開放故障時の遮光セル1枚にかか る逆バイアス電圧は非遮光セル17枚分(上段クラスタ)の 順バイアス電圧に正常なクラスタ(下段クラスタ)の開放 電圧が加わるため、遮光セル1枚に非遮光セル35枚分の順 バイアス電圧分(Fig.3 右上図破線部分)が逆バイアス電圧 としてかかる. Fig.3 の I-V 特性を見ると, Fig.2 の正常時の I-V 特性と比較して、非遮光セルの枚数が増え、第1象限の 実線②は順バイアス電圧が増加する方向に拡大している. そのため、第2象限の点線③も逆バイアス電圧が増加する 方向に拡大し,四角で囲まれた消費電力も大きくなる.以 上より,正常時と開放故障時では部分遮光したセル1枚で の消費電力が異なるので部分遮光したセルの発熱温度に違 いが発生すると思われる.

## 2.2 開放故障時の遮光セルの発熱

前節では BPD の正常時と開放故障時における部分遮光し たセルの温度差について理論的に検討した.しかし,一般 的に BPD の開放故障時のセルの発熱温度は高く,セルに非 可逆的な損傷をもたらす可能性が高い<sup>(4,8)</sup>.そこで,前節の BPD 正常時と開放故障時のセルの温度差を実験的に確認す る前に,BPD が開放故障したときのセルの影のかかり方と 発熱状態の関係を調べる.

実験はFig.4右下図のように1クラスタにセル18枚,2ク ラスタ構成のモジュールを2枚直列に接続し,BPDを1箇 所開放故障させた回路で行った.さらに開放故障クラスタ 内のセル1枚を遮光する.セルの遮光する面積は100%, 50%,10%の3種類とした.ここで,モジュールを2直列 にしている理由は,遮光セル1枚の降伏点電圧以上の逆バ イアス電圧(約25V)<sup>(12)</sup>を確実にかけるためである(逆バイ アス電圧が降伏点電圧以下になると発熱温度が低くなるこ とがある.).降伏点電圧はセルの欠陥(構造欠陥,結晶粒 界,セル端部等)<sup>(13)</sup>によって決まるので,同種のセルでも 降伏点電圧はばらつくことが多い.

Fig.4 に開放故障時の遮光セルの熱画像を示す. (a) は セル面積の100%を遮光, (b) はセル面積の50%を遮光,

(c) はセル面積の 10%を遮光した時の熱画像である. (a) を見ると,310℃の局所的に高温な発熱が発生していることが確認できる.本論文では局所的な発熱を「点発熱」と呼称する.一般的に点発熱は 300~500℃と高温になり<sup>(14)</sup>セル裏面のバックシートに焼損を発生させセルを損傷させる.

続いて、(b)を見ると点発熱に加え非遮光部分のセル平 面に発熱が同セル内で同時に発生していることが確認でき る.本論文ではセルの非遮光部分の平面全体にわたる発熱 を「面発熱」と呼称する.(b)のように面発熱は点発熱 ほど高温にはならない.しかし、100℃以上となりセルを 損傷させる恐れもある.最後に(c)を見ると、面発熱のみ が発生していることが確認できる.また、温度は150℃と 高温になっている. Fig.4 の3 枚の熱画像から、遮光セル の発熱には2 種類あることが分かった.また遮光面積の割 合を変更することで2 種類の発熱の関係は変化することが 確認できた.



2 種類の関係を Fig.5 の I-V 特性を用いて説明する. Fig.5(a) の I-V 特性は遮光面積が小さい場合の I-V 特性である. Fig.5(a)において、四角で囲まれた面積(A+B)が消費電力 を表している.この消費電力の内,遮光セルの短絡電流と 動作電圧の積に当たる面積 A は面発熱の消費電力を表し, 動作電流と遮光セルの短絡電流の差分の電流と動作電圧の 積に当たる面積 B は点発熱の消費電力を表している. 遮光 面積が比較的小さい場合には点発熱の消費電力 B に比べて, 面発熱の消費電力 A が大きいことが分かる. 続いて, Fig.5(b)の I-V 特性は遮光面積が大きい場合の I-V 特性であ る. 遮光面積を大きくすることで遮光セルに流れる電流が より制限され、遮光セルの短絡電流は小さくなる. したが って, 面発熱による消費電力 A は小さくなり点発熱による 消費電力 B は大きくなる. ただし, 面発熱の消費電力は非 遮光部分の面積に比例するので,非遮光面積が違っても非遮 光部分の単位面積当たりの消費電力は同じになる. すなわ ち,端部による放熱効果を無視すれば非遮光面積が違って もセル表面部の発熱面の温度は同じとなる.以上より, Fig.4 から開放故障時の遮光セルの発熱には点発熱と面発熱 の2種類あり、高温に発熱することが確認できた.また、 Fig.5 から遮光面積の割合を小さくすると点発熱がみられな くなることが分かった.筆者らはこの点発熱に寄与する電 流はセルの欠陥(構造欠陥,結晶粒界,セル端部等)<sup>(13)</sup>に沿 って両電極間に導電性パスを形成して流れる電流だと考え ている.この導電性パスに電流が流れることによってジュ ール熱が発生する.一方,太陽電池セルの動作点が I-V 特 性の第1象限にあるとそのセルは電力を発生する. ところ がセルの動作点が第2象限に来る(モジュールの一部に影が かかると影のかかったセルの動作点は第2象限に移動する) とそのセルは電力を消費するようになる. この電力はセル の面発熱として消費されるので非遮光面全体にわたる発熱 が発生すると考えられる.

「熱画像を利用した太陽電池モジュールの BPD 開放故障 判定方法」を実用化するためには、本節で示した開放故障 時の遮光セルの発熱温度(Fig.4)をセルに損傷を及ぼさな い適切な温度に調節する必要がある.

#### 点発熱と遮光面積

前章で明らかなように開放故障時の遮光セルの発熱温度 は高温となる.特に点発熱は 300~500℃となり,セル裏面 のバックシートに焼損を発生させる.遮光セルの発熱温度 を利用して開放故障の判定するためには,点発熱によるバ ックシートの焼損を発生させないように工夫する必要があ る.前章の結果から遮光面積の割合を小さくすると点発熱 が発生しなくなることが分かった.本章では,点発熱によ る焼損を長時間発生させない適切な遮光面積を探る.その ため,公称値の異なる 2 種類のモジュール A (公称短絡電 流値: 4.3A,公称開放電圧 22.1V),B (公称短絡電流値: 9.98A,公称開放電圧 13.3V)を用いて,遮光面積の割合と

点発熱による焼損が発生するまでの時間の関係を調べる. Fig.6 に測定回路の略図を示す. (a) はモジュール A を 2 直列, (b) はモジュールBを4直列につないだ回路を実験 で使用した.モジュール B は公称開放電圧が小さく,モジ ュール A と同じ 2 枚にすると遮光セルに降伏点電圧以上の 逆バイアス電圧をかけることができなくなる恐れがある. そこで、今回の実験ではモジュール B に確実に降伏点電圧 より大きい逆バイアス電圧をかけるため 4 直列にした. セ ル1枚を部分的に遮光し、遮光したクラスタ内の BPD を取 り除き開放故障を模擬する.この回路を短絡させてから点 発熱による焼損が発生するまでの時間を目視で測定する. さらにゴムシートで遮光する面積の割合を変え、遮光面積 の割合と点発熱による焼損が発生するまでの時間の関係を 調べる.ただし、バックシートに焼損を確認した時点で実 験を終了する.実験条件として、日射は900W/m<sup>2</sup>以上の高 日射で検討を行った.また太陽電池は設置角度を 30°とし 南向きに設置した.

Fig.7 にセルの遮光面積の割合と点発熱による焼損発生時間の関係を示す. Fig.7 より遮光面積 100%~50%ではモジュール A, B ともに 5 分以内で点発熱による焼損が発生した. しかし,遮光面積の割合が 30%の場合,





モジュールAでは 110日間, 点発熱による焼損は発生しな かった(110日目で点発熱による焼損が発生).一方, モ ジュールBでは3分10秒で点発熱による焼損が発生した. またモジュールBにおいて, 遮光面積の割合を20%にする と7日間(7日目で面発熱による焼損を確認したため,実験 を終了),10%では120日以上放置しても点発熱による焼 損は発生しなかった.すなわち,モジュールの公称値の大 きさによってセルを損傷させない適切な遮光面積の割合が 異なることが判明した.

Fig.8 は標準日射強度における I-V 特性を示す. 遮光セル の動作電流から遮光セルの公称短絡電流を引いた電流値 (IEC61215-2<sup>(4)</sup>では動作電流から短絡電流を引いた値を点発 熱に起因する電流としている)に着目する.しかし,図中の 動作電流の値は実際には簡単に調べることができないこと, また動作電流と公称短絡電流値は僅差であることから,今 回はモジュールの動作電流を公称短絡電流値で代用する. そのため, Fig.8 の X の値に着目する. 図中 X の値は次式 で求めることができる.

> $X[A] = I_{scr} \times S$  (1)  $I_{scr}$ : 非遮光セルの公称短絡電流 S: 遮光面積の割合

(1) 式より, Xの値は遮光面積を変更することでXの制御 が可能である.実験中(動作電流一短絡電流)は日射強度に より変動するが本章では上記の X [A] をパラメータとして 整理を行う.

Table 1 にモジュール A, BのXと点発熱による焼損が発 生するまでの時間の関係を示す. Table 1 を見ると,モジ ュール A ではX が 2.15A で,点発熱による焼損が 2 分半で 発生している.しかし,X が 1.94A になると 2 日間,点発 熱による焼損は発生しないことが確認できた(3 日目で点 発熱による焼損が発生).同様にモジュール B でも,X が 2.99A で,3 分 10 秒後に点発熱による焼損が発生している が,X を 2.00A にすれば7 日間,点発熱による焼損は確認 されなかった.したがって,X = 2A 付近が点発熱による焼 損を長時間発生させない電流値であることが分かる.そこ で,点発熱による焼損が短時間で発生するのを防ぐために はX は約 2A から余裕をもたせ, 1A 以下とすれば十分であ る.そのため,遮光面積の割合をモジュール A では約 23%, モジュール B では約 10%にすれば,X は約 1A となり,点 発熱による焼損が短時間で発生することはなくなる.

# 4. 面発熱の温度調整

筆者らは面発熱を利用してセルを損傷させることなく BPD 開放故障の判定を行うことを考えている.そのために は、点発熱より発熱温度が低温になる面発熱を利用するほ うが容易である.しかし、面発熱には非遮光部分(面発熱 の発熱部分)の周辺部が放熱の働きをするという特性があ る<sup>(14)</sup>.非遮光部分の割合が小さいと放熱により発熱温度が 低くなり、判定が困難になる恐れがある.また、面発熱の 場合,非遮光面積が違っても単位面積当たりの消費電力は 同じとなることから遮光セルの非遮光部分を大きくとるほ うが有利である.以上より,本章では短絡電流の小さいモ ジュールAについても短絡電流の大きなモジュールBの適 切な遮光面積の割合 10%にあわせて,遮光面積の割合は 10%と設定する.



Fig.8 BPD open failure (I-V characteristics under standard solar radiation intensity)

図8 開放故障(標準日射強度下における I-V 特性)

Table1 Relation between current X and time 素1 雪流 X と占発執にとろ佐捐発生時間の関係

X1 电加ACM/2%/2%/2/11/10/2/8/					
	Shaded area	Current X	Point heating generation time		
А	50%	2.15A	2min 30sec		
	45%	1.94A	2 days		
	30%	1.29A	110 days		
В	30%	2.99A	3min 10sec		
	20%	2.00A	7 days		
	10%	0.998A	120 days over		



(a) Module A
(b) Module B
Fig.9 Thermal image of modules with a shaded area 10%
(a) モジュール A
(b) モジュール B
図 9 遮光面積 10%の熱画像

遮光面積 10% (X の電流値が 1A 以下) に設定し, Fig.6 に示すように開放故障を模擬した回路を用いて,回路を短 絡させ遮光セルを発熱させた. その結果を Fig.9 に示す.

Fig.9(a) はモジュール A, (b) はモジュール B の熱画 像である. Fig.9 をみると, 点発熱は発生していないことが 確認できる. しかし, 面発熱の発熱温度がモジュール A で は約 110℃, B では約 140℃と高温になっている. セルの発 熱温度が 100℃以上となると, 封止材である EVA の酢酸ビ ニル系の分解が始まり<sup>(15)</sup>, Fig.10 のようにバックシートの 変色や破れが発生する恐れがある(Fig.10 は筆者らの実験 の過程で発生した損傷の一例である). 筆者らは面発熱を 利用することを考えているため, 面発熱の発熱温度を下げ ることが必須である.

本章では遮光セルの枚数を複数枚にして面発熱の温度を 調整する方法について検討する. Fig.11 (a) はモジュー ルAを2直列, (b) はモジュールBを4直列に接続し,1 箇所の BPD を取り除き開放故障状態を模擬した回路である. また「熱画像を利用した太陽電池モジュールの BPD 開放故 障判定方法」は複数の BPD について同時に判定することを 考えているため,Fig.11 のようにモジュールごとに遮光を 行う.遮光面積の割合 10% (セル1枚) のゴムシートを用 いて複数枚のセルを同時に遮光する.遮光枚数 1 枚の場合 には,開放故障時にストリング全体の順バイアス電圧が 1 枚の遮光セルに逆バイアス電圧としてかかり,面発熱の温 度が Fig.9 のように高温となる. 遮光枚数を複数枚にし

(Fig.11 の略図),開放故障時の発熱温度を調べる.実験 方法として,Fig.11の回路を短絡させ,遮光セルの枚数を1 ~5枚と順番に増やし,開放故障時の発熱の様子を熱画像 で確認する.遮光枚数を増やす際には十分に放熱させてか ら,遮光枚数を増やす.セルを遮光する順番は Fig.11 の① から順番に遮光する.実験条件として,日射は900W/m<sup>2</sup>以 上の高日射で検討を行った.また太陽電池は設置角度を 30°とし南向きに設置した.

Fig.12 に遮光枚数 1~5 枚時の開放故障時の遮光セルの最高温度を表した図を示す.開放故障時の最高温度は○がモジュール A,●がモジュール B である. Fig.12 を見ると, A, B 共に遮光枚数 1 枚,2 枚時には最高温度が約 100℃以上あるが,遮光枚数 3 枚以上にすると 100℃未満となる.すなわち,遮光するセルの枚数を複数枚にする方法は面発熱の温度調整をする方法として有効であることがわかる.



Fig.10 Back sheet burnt 図 10 バックシートの焼損の可視画像



(a) BP	D normal	(b) B	PD Open failure				
Fig.14 Thermal images of Module B with 3 shaded cells							
(a) BP	D正常	(b)	BPD 開放故障				
図 14	遮光枚数3枚時の=	モジュー	-ルBの熱画像				

遮光枚数を複数枚にすると, 逆バイアス電圧が複数の遮 光セルで分担されるため, 遮光セル 1 枚当たりの消費電力 が低下し, 発熱温度の低下が起こると思われる.

# 5. ストリング中での開放故障箇所の特定

前章までの検討では開放故障クラスタ内の遮光セルの発 熱温度を調節する方法を検討した。本章では、前章の検討 に加え,正常時の発熱の様子を調べることで,開放故障の 有無による遮光セルの発熱温度の違いを確認する.実験方 法は前章と同様である. Fig.13 (モジュール A) と Fig.14 (モジュール B) に遮光枚数 3 枚時の熱画像を示す. (a) が正常時, (b) が開放故障時である. Fig.13,14を見ると, 開放故障モジュールは遮光セル3枚に発熱が分担されてお り発熱温度も 100℃未満となる. しかも,正常時と比較し て明らかな発熱温度の違いがみられる. また, Fig.13 と Fig.14, それぞれの熱画像でセルごとに発熱のばらつきが 見られる. この発熱のばらつきの原因はセルの I-V 特性の わずかな違いに起因していると思われる. Fig.15 にはモジ ュール A, B の遮光枚数 1~5 枚時の正常時と開放故障時の 最高温度を表した図を示す. 開放故障時の最高温度は○が モジュール A, ●がモジュール B で,正常時の最高温度は △がモジュール A, ▲がモジュール B である. この図は Fig.12 の図に正常時のプロット(▲, △) を加えたもので ある. Fig.15 から遮光枚数 3~5 枚にすると、A、B 共に開 放故障モジュールの最高温度が 100℃未満となり、正常時 と比較しても発熱温度の違いが明確にわかる.

# 6. まとめ

本論文は「熱画像を利用した太陽電池モジュールの BPD 開放故障判定方法」を実用化するための第一段階として, 開放故障クラスタ内の遮光セルの発熱温度を調節する方法 と BPD 正常時と開放故障時の遮光セルの発熱温度差を確保 するための基礎的な検討を行った.以下に得られた結果を まとめる.



Fig.15 Relation maximum temperature and the number of shaded cells

図15 最高温度と遮光枚数の関係

(1) モジュールを短絡させ, セル1枚を部分的に遮光する 面積を大きくするほど, 点発熱が占める消費電力が大きく なるため, 点発熱によるバックシートの焼損が短時間で発 生しやすくなる. 遮光面積の割合を 10%にすることで, 短 絡電流が大きなモジュールでも点発熱による焼損は長時間 発生しなくなる.

(2) 遮光面積の割合 10%, 遮光枚数 1 枚で, モジュール 2 直列(もしくは 4 直列)を短絡させると, 遮光セルの非遮 光部分の面発熱の発熱温度が 100℃以上の高温になる. 遮 光枚数を複数枚にすると, 複数枚のセルに逆バイアス電圧 が分担されるため表面温度は低下する.

(3) 2 種類のモジュール A, B ともに遮光枚数 3~5 枚にす ればセルを損傷させることなく,正常時と開放故障時で明 確な温度差がみられる.

本論文では多くても1ストリング4モジュールでの検討 にとどまっている. BPD はクラスタ単位でセル群に並列接 続されている. クラスタの一部に影がかかった場合, その クラスタは BPD(正常であれば)によって短絡状態になる. 短絡状態になったクラスタはそのストリング回路から切り 離された状態となる.したがって、実用サイズのストリン グであっても発熱状態は本論文の結果と同じになるはずで ある.一方,BPD が開放故障しているとストリング全体の 影響を受ける. しかし, 開放故障した BPD に影がかかった 場合、面発熱温度が本論文で得られた結果より高くなるこ とはあっても低くなることはない. したがって,実用サイ ズのストリングでも本論文で検討した内容は有効であると 思われる. ただし, 開放故障した BPD で構成されたセルの 発熱温度が高くなりすぎないようにする工夫が必要になる かもしれない. それに関しては今後実用的なサイズのスト リングについて検討を進めていく予定である.

# 参考文献

- 黒川浩助,若松清司,太陽光発電システム設計ガイドブック, 1-6 (1995),オーム社,東京.
- 加藤和彦,太陽光発電システムの不具合事例ファイル -PVRessQ!からの現地調査報告 - , 35-141 (2010),日刊工業新聞 社,東京.
- 3)太陽光発電システム監視・点検技術に関する調査検討会,太陽 光発電システムの定期点検及び不具合調査に関するガイドライ ンについての報告書,2(2016),日本太陽エネルギー学会,東京.
- 4) IEC 61215-2, INTERNATIONAL STANDARD, Edition 1.0, 16-17 (2016).
- 5) 消費者安全調査委員会,消費者安全法第23条第1項の規定に基づく事故等原因調査報告書-住宅用太陽光発電システムから発生した火災事故等,38-50 (2019). (accessed Apr. 11th 2020) https://www.caa.go.jp/policies/council/csic/report/report\_012/
- T. Ikeda, Technical Guide of "Solamente", Journal of Japan Solar Energy Society, 44(3), 59-62(2018).

- K. Ikeda, Prevention of Electrical Failure in Photovoltaic Array-I (Bypass Route Inspection in Photovoltaic Modules), The Journal of The Institute of Electrical Engineers of Japan, 10(134), 683-687(2014).
- 8) 産業技術総合研究所,太陽光発電の直流電気安全のための手引 きと技術情報(第2版),127-134 (2019). (accessed Apr. 12st 2020)

https://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/service/PV\_Electrical\_Safety/Technical\_I nformation on PV Electrical Safety2(AIST2019).pdf

- 9) T. Sato S. Yamanaka, Study on Detection Method of Open Failure BPDs Using I-V Characteristics, Journal of Japan Solar Energy Society, 43(3), 51-58(2017).
- 10) JIS C 8990, ホットスポット耐久試験.
- 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.
- 12) T Doi, Forward current pyretic test and reverse biased breakdown test of c-Si PV cells. Proceedings of JSES conference (Oct.2007), 445-447, Aomori, Japan.
- 13) 浜川圭弘,桑野幸徳,アドバンスト エレクトロニクス I-3 太
   陽エネルギー工学,104-105 (1994),培風館,東京.
- 14) T. Yamamoto, The Coupled Model for Prediction of the Temperature Distribution in a PV Cell with a Hot Spot Induced by Partial Shading, Journal of Japan Solar Energy Society, 45(3), 99-104(2019).
- 15) R. Kato, Array configuration and analysis of temperature rise in a degraded PV cell. Proceedings of JSES conference (Oct.2019), 168-171, Aomori, Japan.