

Fundamental Study on Open Fault Detection Technology of
Bypass Circuit of PV Module太陽電池モジュールのバイパス回路の
開放故障検出技術に関する基礎検討Ryoichi KASE Shogo NISHIKAWA
加瀬 亮一¹ 西川 省吾²

Abstract

When bypass circuit of the PV module is opened and some solar cells are covered by a partial shadow, it is possible that a reverse voltage applies the cells and they become hot spot. The purpose of this study is to establish an easy technology of detection of bypass circuit open fault. So far we have reported that we developed the technology for detecting an open fault position of bypass circuit in a string, by observing the surface temperature change of the solar cell using DC power supply and infrared camera. And we make a binary format image by setting a threshold after quantifying the thermal image taken with an infrared camera and calculating the temperature rise from the start of the reverse voltage application. Detection by binary format image is easier than detection by thermal image. In this report, we describe the results of fundamental study on this detection technology.

Keywords : Photovoltaic generation, Bypass circuit, Open fault, DC power supply, IR camera, Binarization

キーワード : 太陽光発電, バイパス回路, 開放故障, 直流電源, 赤外線カメラ, 二値化

1. はじめに

太陽光発電はメンテナンスフリーで安全な発電システムと言われ、近年急激に普及が進んできた。しかし、太陽光発電システムには様々な故障要因があり、接続不良による出力低下や、太陽電池セル・モジュールに故障が発生した際に発熱・発火が起きる場合がある。現状では全ての異常を検出する技術が確立されていないため、太陽光発電システムの安定した発電のために、故障検出技術の確立が重要となる。

太陽電池モジュールには保護素子としてバイパスダイ

オード（以下 Db）が複数のセル群と並列に接続されており、その Db が接続された回路を「バイパス回路」と呼ぶ。このバイパス回路が開放故障の状態の部分影や劣化等により一部のセルの出力特性が低下するとホットスポットが発生する恐れがあり、既述のとおり発熱・発火が起こる。また、バイパス回路が組み込まれているジャンクションボックスからも発熱し、周辺の可燃物に延焼する危険性を伴う可能性がある⁽¹⁾。モジュール内の不具合がいつ発生するかが分からないという点から、バイパス回路の開放故障検出は最重要の検査項目であると言われている⁽²⁾。一方、現在、最も行われている検査技術の一つとして赤外線カメラを使用する方法があるが、日射強度が 500W/m² 以上でないと正確な検出が困難である⁽³⁾。また、実際の現場での作業を考えると、ある程度安定して 500W/m² 以上になる日が必要だが、雲の多い我が国の気象条件では、条件を満た

*1 日本大学大学院 理工学研究科

*2 日本大学 理工学部 教授 (〒101-8308 東京都千代田区神田 駿河台 1-8-14)
nishikawa.shougo@nihon-u.ac.jp

(原稿受付: 2017年1月18日, 受理日: 2017年4月14日)

す日数がかなり限られる。その他の検出技術についても、一枚ずつモジュールを測定するため時間がかかる⁽⁴⁾、またはモジュールストリング内の異常モジュールの特定ができない⁽⁵⁾などの課題がある。

本研究ではバイパス回路が開放故障している太陽電池モジュールを日射条件によらず簡易かつ短時間で検出する技術の確立を目的としている。筆者らは今までに、外部電源と赤外線カメラを用いた太陽電池表面の温度変化の観察による簡易にバイパス回路が開放故障している異常モジュールを特定できる検出方法を提案している⁽⁶⁾。この方法では外部から直流電圧を印可し、バイパス回路の開放故障部分のみを温度上昇させ、赤外線カメラにより、故障位置を把握することができる。ただし、この方法では、熱画像で正確に判断するためには、ある程度大きな電圧を印可し、温度上昇を大きくする必要がある。しかし、微小な温度変化を赤外線カメラで測定した熱画像のみで判断するには限界があり、故障箇所が存在する場合でも見逃してしまう危険性がある。そこで熱画像のデジタル情報をもとに、温度上昇の変化を二値化することで、より簡易に故障位置を特定できる検出方法を新たに提案した⁽⁷⁾。本稿では、基礎検討として、故障箇所が1箇所のみの場合を想定し、提案した検出技術について検出時の日射強度や逆電圧の大きさの影響を実験により調査したので報告する。

2. 検出原理

太陽電池モジュール内の複数の直列接続された太陽電池セルにバイパス回路を並列に組み合わせた並列回路をここでは「クラスタ」と呼ぶ。検出方法は Fig. 1 のように、直流電源を用いて太陽電池モジュールの両端にバイパスダイオード(Db)が動作するように逆電圧を印加する。これにより、Fig.2 の I-V 曲線の第 2 象限のように、正常なクラスタでは Db が動作するためクラスタにかかる逆電圧 V_1 は小さくなる。しかし、Db が開放状態の異常クラスタでは Db が動作しないためクラスタに大きい逆電圧 V_2 がかかる。そのため、太陽電池セルにおける消費電力は異常クラスタの方が大きくなり、セルの温度が上昇するので、太陽電池表面の温度変化を赤外線カメラにより観察することで異常クラスタを検出することができる。

さらに熱画像に加え保存した数値データを利用し、Fig. 3 のとおり電圧印加開始時の温度と任意の時点の温度を比較し、閾値を定め温度上昇値の二値化画像を作成することにより、容易に異常クラスタを検出できる。なお、撮影した熱画像には雑音が含まれているため、二値化画像を作成する際に閾値よりも大きい値が混じり、検出に影響が生じてしまう可能性がある。そのため、温度上昇値を算出した後、Fig. 4 のように温度座標を定義し、 ΔT_i を $\Delta \bar{T}$ として(1)式を用いて移動平均を算出し平滑化することで雑音

を取り除いた^(8,9)。

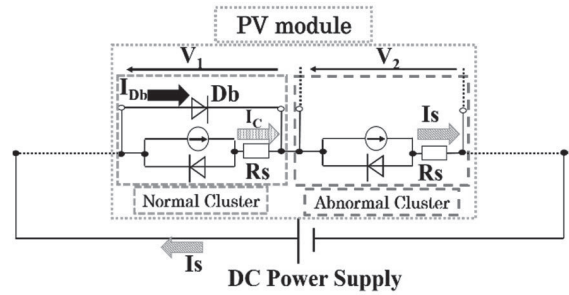


Fig. 1 Detection principle

図 1 検出原理

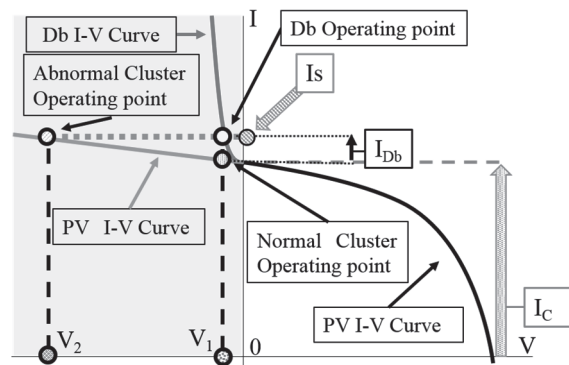


Fig. 2 I-V curve of PV and Db

図 2 太陽電池と Db の I-V カーブ

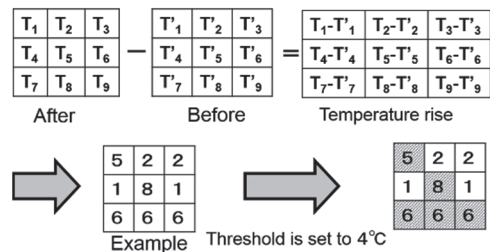
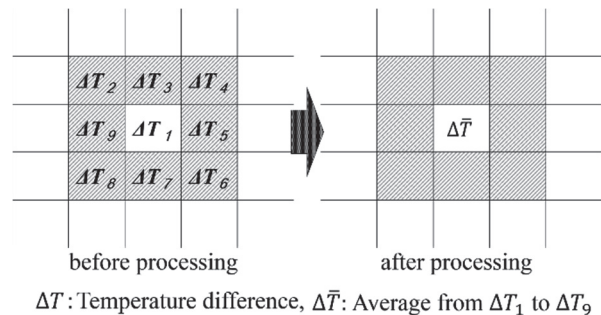


Fig. 3 Steps to Create Binary Format Image

図 3 二値化の作成手順



ΔT : Temperature difference, $\Delta \bar{T}$: Average from ΔT_1 to ΔT_9

Fig. 4 Noise reduction processing

図 4 雑音処理

$$\Delta\bar{T} = \frac{1}{m} \sum_{n=1}^m \Delta T_n \quad (1)$$

但し、ここで n : データ番号,

m : データ個数(Fig.4 では 9)

なお、すべてのバイパス回路が正常な場合は、電圧を印加すると同時に大きな電流が流れるので開放故障が無いことが分かる。この際、Db が破壊しないよう直流電源には適切な電流リミットを設定しておく必要がある。

3. 試験内容

試験に使用した太陽電池モジュールと赤外線カメラの仕様を Table 1,2 に示す。

Table 1 Specification of PV module

表 1 太陽電池モジュールの仕様

Type	Poly-Si
Pm	70.0W
Voc	22.1V
Isc	4.30A
Vpm	17.9V
Bypass Diode	2
The number of cells	36
The number of clusters	2

Table 2 Specification of IR Camera

表 2 赤外線カメラの仕様

Manufacturer	testo
Model	Testo-881
View angle	32° × 23°
Measuring range	Range1: -20~100°C Range2: 0~350°C
Number of pixels	160×120

試験回路はモジュールを Fig. 5 に示すように 2 枚直列接続してストリングを構成した。そして、1つのクラスタの Db を取り外すことにより、バイパス回路の開放故障を模擬した。この試験回路のストリングの可視画像を Fig. 6 に示す。赤外線カメラは三脚により固定し、定点観測で測定を行った。この時の温度の計測には赤外線カメラの他に確認用として、Fig. 6 に示すように各クラスタ中央付近のセルの裏面 3 箇所を熱電対で計測し、電流値はシャント抵抗を用いて計測した。また、風による太陽電池モジュール表面の温度変化を考慮するため、室外試験においては風速計を使用して風速も計測した。ただし、本稿での試験は小型ストリングでの試験のため、風向の違いが温度分布に与える影響は小さいと考え風向は考慮していない。電圧、電流、

日射強度、クラスタ温度はデータロガーにより記録した。計測間隔は赤外線カメラでの観察が 10 秒、その他の項目はすべて 1 秒である。また計測時間は逆電圧印加後 8 分間行い、ストリングに印加する逆電圧はアバランシェ電圧を超えない範囲 (-14.3V/セル 以下) ⁽¹⁰⁾で一定の値で印加した。風速計は KANOMAX 製の ANEMOMASTER 6036、直流電源は菊水電子工業製の PWR400L(印加電圧が Voc × 3.0 以下の場合)と PWR800H(印加電圧が Voc × 4.0 の場合)を使用した。

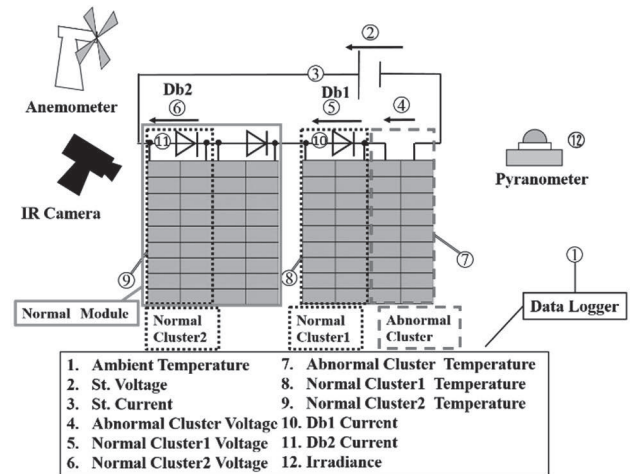


Fig. 5 Test Circuit

図 5 試験回路

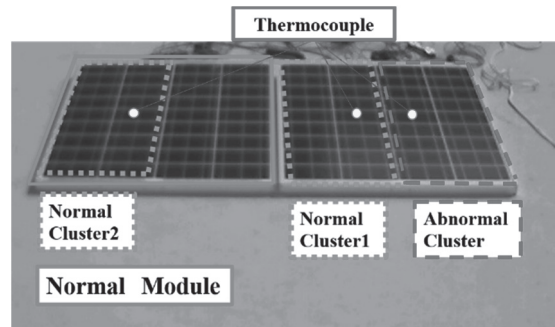


Fig. 6 Visible image of test string

図 6 試験ストリングの可視画像

本稿においては、電圧の印加開始時からの任意の時間までの温度上昇値の二値化画像において、異常クラスタ内の温度上昇分布が 60%以上かつ 3つの正常クラスタ内の温度上昇分布がすべて 30%以下となった時、ここでは仮に「異常クラスタを検出した」と定義した。

試験では、日射強度と印加電圧が検出時間に与える影響について調査した。

日射強度の影響における試験の日射パターンは高日射(High)、中日射(Middle)、低日射(Low)、日射無し(No)の 4種類とした。表 3 にパターンごとの日射強度の範囲と印加

電圧値を示す。ただし、この時の印加電圧とは Fig.5 のストリングに印加する電圧②を示す。

印加電圧による影響の試験条件を表 4 に示す。印加電圧がモジュール Voc×1.0 における異常クラスタにかかる逆電圧は「22.1V(Voc) - 0.7V(Db の順方向電圧)×3(クラスタ)=20.0V」となり、セル 1 枚あたりは「20.0V÷18(セル)≒1.1V」である。

Table 3 Test Condition for Influence by Irradiance

表 3 日射強度による影響の試験条件

Applied Voltage	Voc×1.0	
	Irradiance Condition	High
	Middle	500~750W/m ²
	Low	Less than 200W/m ²
	No	0W/m ²

Table 4 Test Condition for Influence by Applied Voltage

表 4 印加電圧による影響の試験条件

Irradiance	Applied Voltage
High	Voc×0.5, 1.0, 2.0
No	Voc×1.0, 2.0, 3.0, 4.0

4. 試験結果

4.1 日射強度の影響

各試験時の周囲温度および風速を Table 5 に示す。

Table 5 Ambient Temperature and Wind Velocity

表 5 周囲温度および風速

	Ambient Temperature	Wind Velocity
High	25.9~32.8°C	0.04~3.47m/s
Middle	33.5~37.1°C	0.14~3.82m/s
Low	20.0~21.6°C	0.04~2.27m/s
No	15.0~14.7°C	—

Fig.7 は高日射時の熱画像である。点線で囲まれた部分が異常クラスタである。正常クラスタの温度変化が微小であるのに対し、時間経過とともに異常クラスタの温度上昇が確認できる。しかし、熱画像の場合、Fig.7 のようにセルの電気特性にバラツキがあり、元々温度が異なるセルが存在する場合や、異常クラスタの温度上昇が小さい場合、温度上昇の確認が難しい。

Fig. 8 は高日射時に測定した熱画像を時間ごとに二値化した画像である。モジュールを実線で囲み、異常クラスタ部分を点線で囲っている。二値化することで温度変化が簡易に表されるため、熱画像よりも温度変化の確認が容易になる。また、30 秒経過で異常クラスタを検出することが

可能となった。また、閾値によっても見え方が異なり、120 秒経過の測定データに対しては閾値が 0.5°C よりも 1.0°C に設定した方が簡易に検出できる。

Fig. 9 は中日射時の熱画像である。僅かであるが、120 秒経過で異常クラスタの温度が上昇していることが確認できる。

Fig. 10 は中日射時の二値化画像である。高日射よりも 20 秒遅い 50 秒で検出が可能となった。しかしながら、時間経過とともに正常クラスタのセルも温度上昇してしまっているため、180 秒経過時では閾値が 0.5°C よりも 1.0°C に設定した方が検出が容易である。なお、中日射における正常クラスタの温度上昇は、日射により暖められたことによる温度上昇と考えられる。このことは Fig.10 から分かるようにモジュール周囲の床面も温度上昇していることから推定できる。

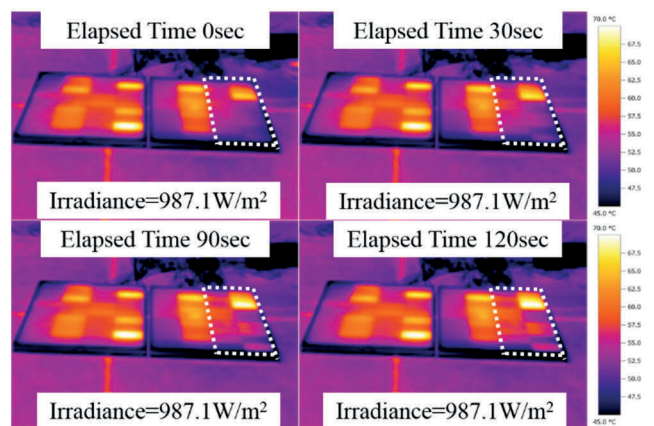


Fig. 7 Thermal Image (High Irradiance)

図 7 熱画像 (高日射)

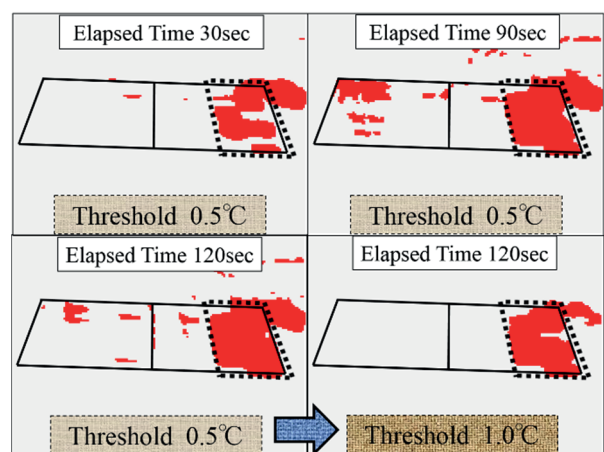


Fig. 8 Binary Format Image (High Irradiance)

図 8 二値化画像 (高日射)

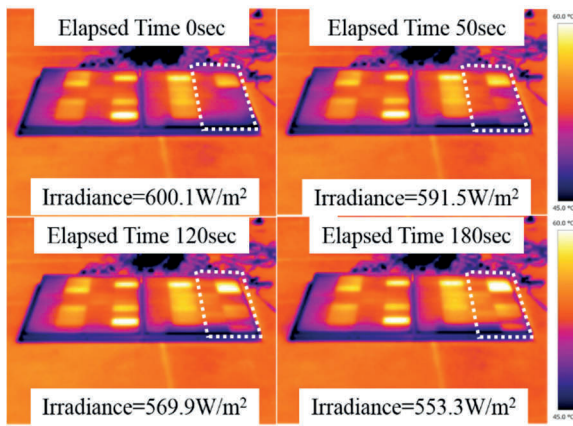


Fig. 9 Thermal Image (Middle Irradiance)
図 9 熱画像 (中日射)

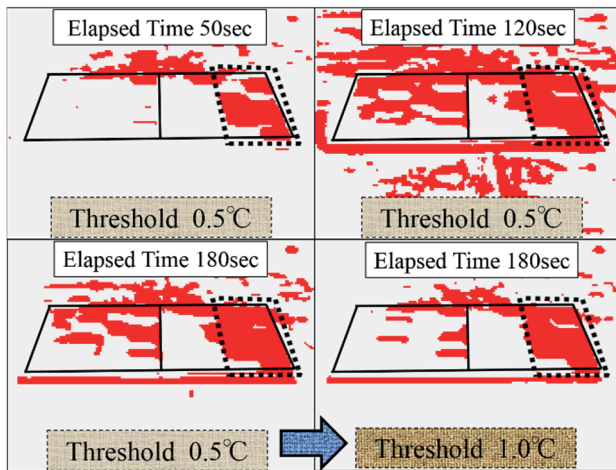


Fig. 10 Binary Format Image (Middle Irradiance)
図 10 二値化画像 (中日射)

Fig. 11 は低日射時の熱画像である。日射が小さい分異常クラスタの消費電力も小さくなり、先の二種類の日射条件より温度上昇の確認が難しい。

次に低日射時の二値化画像を Fig. 12 に示す。Fig. 11 では温度上昇の確認ができなかった 80 秒でも、閾値を 0.3°C に設定することで異常クラスタを検出できる。しかし、温度上昇は小さいため、180 秒経過を閾値 1.0°C に設定してしまうと検出が困難になる。日射が小さい場合、日射による正常クラスタの温度上昇が小さくなるため、高日射および中日射時の試験結果よりも小さい閾値を設定しても検出が可能となる。しかしながらフィールドではモジュール数が非常に多く、かつ、正常クラスタと異常クラスタの区別がつかないことから条件に合わせて閾値を適切な値に設定することは不可能に近い。このため、適切な閾値の検証が重要である。

Fig. 13 は夜間を想定した室内試験の熱画像である。試験終了時間の 480 秒経過時でもストリング内の温度変化が確認で

きない。Fig. 14 は室内試験における 480 秒経過時の二値化画像であるが、閾値を 0.0°C および 0.1°C と非常に小さい数値に設定しても異常クラスタの温度上昇を区別できないため、 $V_{oc} \times 1.0$ 印加時の室内(日射無し)での検出はできないといえる。

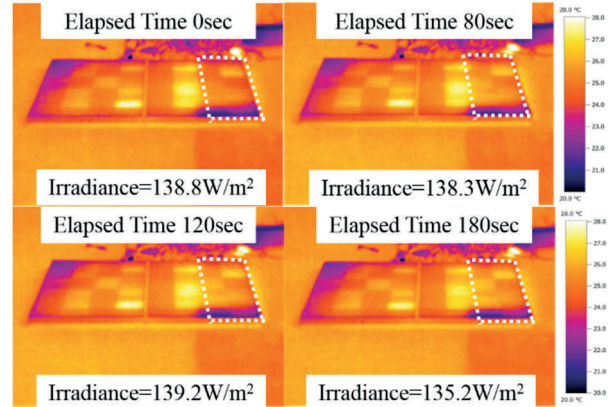


Fig. 11 Thermal Image (Low Irradiance)
図 11 熱画像 (低日射)

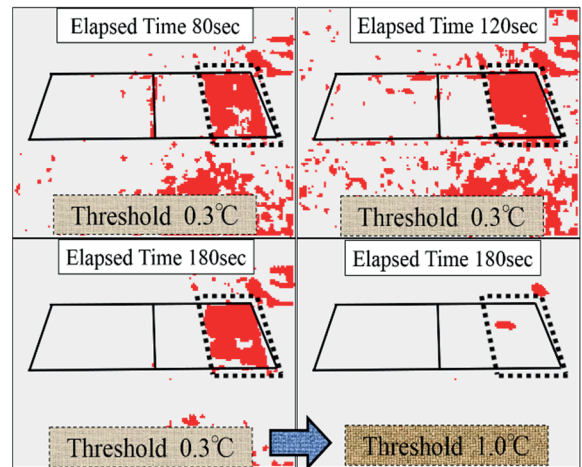


Fig. 12 Binary Format Image (Low Irradiance)
図 12 二値化画像 (低日射)

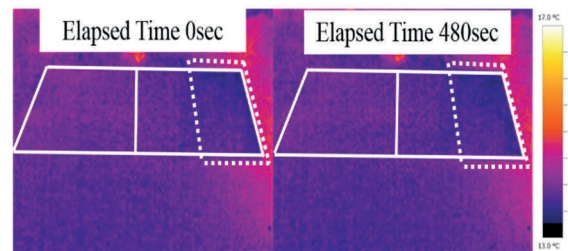


Fig. 13 Thermal Image (No Irradiance)
図 13 熱画像 (日射無し)

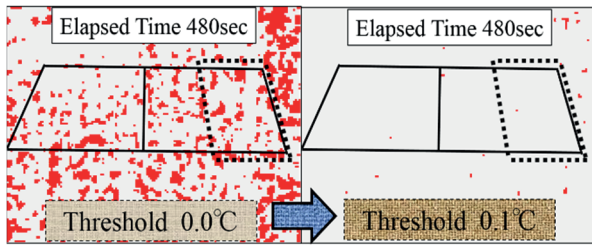


Fig. 14 Binary Format Image (No Irradiance)
図 14 二値化画像 (日射無し)

Fig.15 はモジュール Voc×1.0 印加時における各検出可能時間と検出までの異常クラスタの消費電力量を示す。日射強度が大きくなるほど検出可能時間は短縮されている。また、中日射の消費電力量が最も大きくなっている。これは中日射の時の異常クラスタの消費電力は約 60W 一定であり、本稿での赤外線カメラでの計測は 10 秒毎であるため、検出時間も 10 秒単位である。そして、10 秒検出時間が違うだけで 600J の変化があるが、Fig.15 の中日射と高日射の消費電力量の違いは 300J しかない。そのため、検出時間が 10 秒より短ければ中日射における消費電力量は小さくなると考えられる。消費電力量は低日射時が一番小さく、1000 J で検出が可能であった。これは日射強度が大きい場合、日射により暖められた影響で正常クラスタの温度上昇も大きくなるため、閾値を小さく設定すると、正常クラスタの温度上昇も検出し、異常クラスタが検出しづらくなると考えられる。今回は 1°C以下の小さな閾値に設定してしまったが、実際のフィールドでは、逆電圧が印加されない通常状態でも 1°C以上の温度上昇があることが予想される。そのため実際のフィールドでは本試験よりも異常クラスタの発熱を大きくできるように印加電圧を大きくし、閾値の値も大きくして、日射強度や風の影響による温度上昇を明確に区別できる適切な値を明らかにする必要がある。

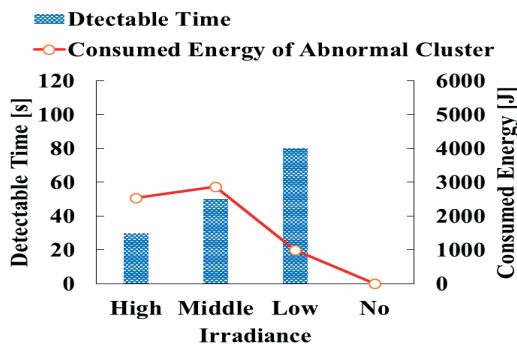


Fig. 15 Influence of Irradiance on Detectable Time and Consumed Energy (Module Voc×1.0)
図 15 日射強度の検出可能時間と消費電力量への影響 (モジュール Voc×1.0)

4.2 印加電圧の大きさの影響

4.2.1 高日射強度の場合

各試験時における周囲温度および風速を Table 6 および Table 7 に示す。

Table 6 Ambient Temperature and Wind Velocity (High Irradiance)

	Ambient Temperature	Wind Velocity
Voc×0.5	26.0~30.8°C	0.08~3.41m/s
Voc×2.0	24.5~29.1°C	0.03~3.05m/s

Table 7 Ambient Temperature (No Irradiance)

	Ambient Temperature
Voc×2.0	18.6~19.0°C
Voc×3.0	18.8~19.1°C
Voc×4.0	18.6~18.9°C

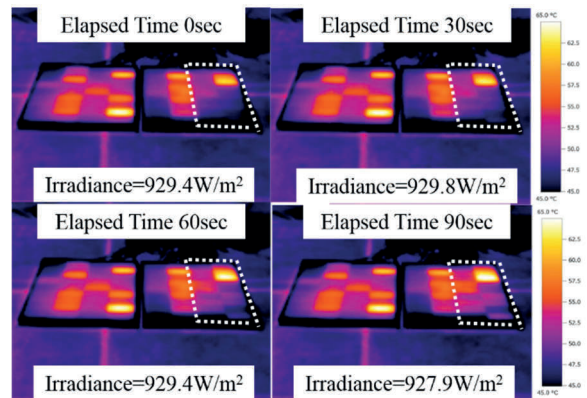


Fig. 16 Thermal Image (High Irradiance: Voc×2.0)
図 16 熱画像 (高日射: Voc×2.0)

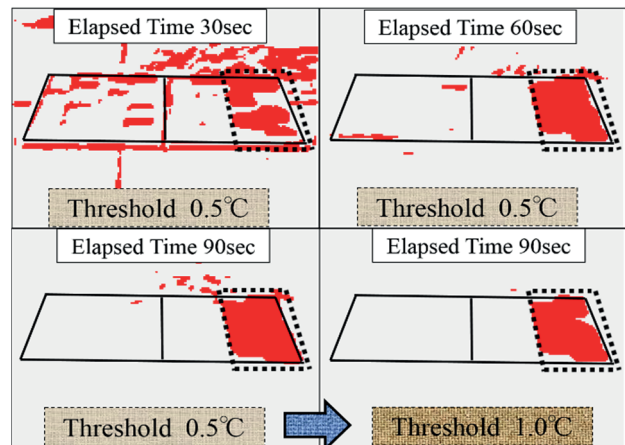


Fig. 17 Binary Format Image (High Irradiance: Voc×2.0)
図 17 二値化画像 (高日射: Voc×2.0)

Voc×2.0 印加時の熱画像を Fig. 16 に示す。Fig. 7 の Voc×1.0 の時と比べ、異常クラスタの消費電力は大きくなっているため温度上昇も大きくなり、60~90 秒で温度上昇を確認することができる。次に Voc×2.0 の時の二値化画像を Fig. 17 に示す。熱画像では 30 秒経過では異常クラスタの温度上昇を確認できなかったが、二値化を施すことで Fig.8 の Voc×1.0 と同様に 30 秒で検出が可能となった。

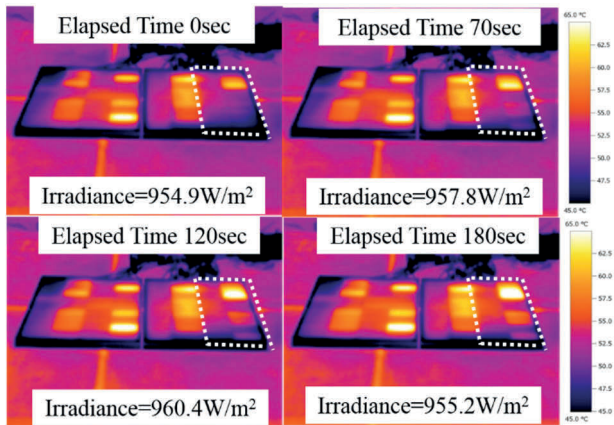


Fig. 18 Thermal Image(High Irradiance: Voc×0.5)
 図 18 熱画像 (高日射 : Voc×0.5)

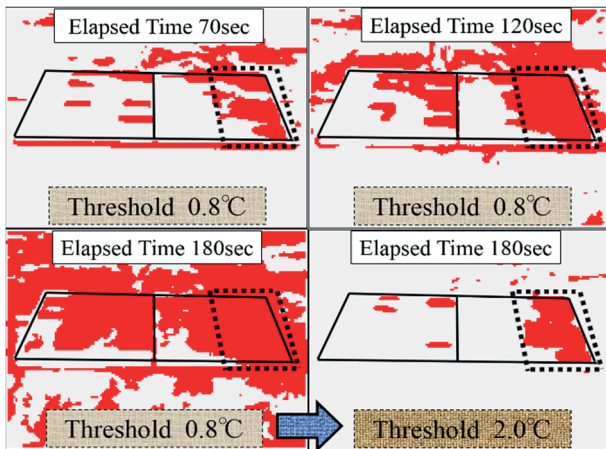


Fig. 19 Binary Format Image (High Irradiance: Voc×0.5)
 図 19 二値化画像 (高日射 : Voc×0.5)

Fig. 18 は Voc×0.5 印加時の熱画像である。印加逆電圧が小さいので、異常クラスタの消費電力も小さくなり、温度上昇が小さくなっている。そのため、温度上昇が確認できるまで 150~180 秒ほど必要となる。

Fig. 19 は Voc×0.5 印加時の二値化画像である。その結果、70 秒で異常クラスタを検出可能となった。

Fig. 20 は高日射における逆電圧ごとの検出可能時間と検出までの異常クラスタの消費電力量の関係である。Voc×1.0 と Voc×2.0 では日射の微小な変化や風の影響もあり、消費電力量が 2300J 近く差が出た。この結果から、高

日射においては Voc×1.0 以上の逆電圧を印加することで 30 秒以内に異常クラスタを検出することが可能である。

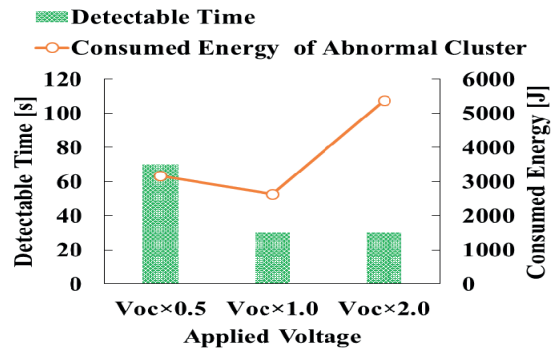


Fig. 20 Influence of Applied Voltage on Detectable Time and Consumed Energy (High Irradiance)

図 20 印加電圧の検出可能時間と消費電力量への影響 (高日射)

4.2.2 日射無しの場合

Fig.21,22 は Voc×4.0 印加時の熱画像と二値化画像である。Voc×4.0 印加した場合でも熱画像では異常クラスタを判別できるほどの温度上昇が確認できないため、検出は困難である。しかし、480 秒経過で閾値を 0.2°C に設定した場合の二値化画像では検出可能となった。

Voc×2.0, 3.0 印加では Voc×1.0 印加と同様に異常クラスタの温度上昇分布が少なく、正常クラスタとの区別がつかないため検出は困難である。

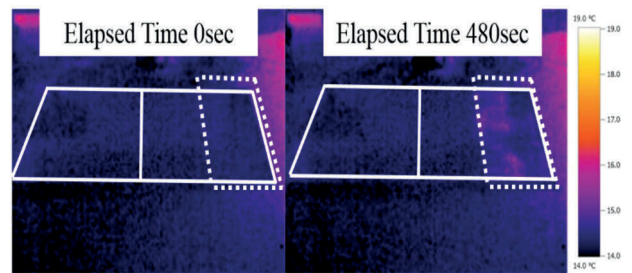


Fig. 21 Thermal Image (No Irradiance: Voc×4.0)
 図 21 熱画像 (日射無し : Voc×4.0)

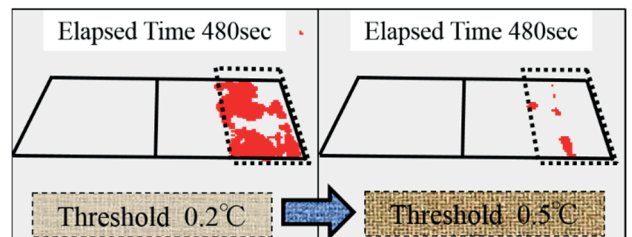


Fig. 22 Binary Format Image (No Irradiance: Voc×4.0)
 図 22 二値化画像 (日射無し : Voc×4.0)

5. おわりに

本研究は太陽電池モジュールのバイパス回路が開放故障しているクラスタを日射条件によらず簡易かつ短時間で検出する技術の確立を目的として、本稿では基本的検討として故障箇所が1箇所の場合を想定し、直流電源と赤外線カメラを用いて異なる日射や逆電圧の違いにおける検出状況について調査した。

日射強度による影響の試験では、日射強度が強いほど検出時間を短縮させることができ、低日射の場合でも80秒以内で異常クラスタを検出することが可能であった。しかし、夜間を想定した室内試験では異常クラスタを検出することが困難である。

印加電圧による影響の試験では、高日射の場合印加する逆電圧が $V_{oc} \times 1.0$ 以上であれば30秒以内での検出が可能であるが、 $V_{oc} \times 0.5$ になると検出に70秒かかる結果となった。室外では日射や風の影響で太陽電池表面の温度変化があり、純粋に消費電力量だけでは検出時間を推定することはできない。室内試験では、 $V_{oc} \times 4.0$ 以上の逆電圧を印加することで検出が可能となった。電流が流れない分異常クラスタの消費電力が小さくなるが、風や日射によるモジュール表面の温度変化がないため、微小な温度上昇であっても異常クラスタを検出することができる。

これらの結果から、提案した技術は日射がある場合、どの日射条件においても有効であり、夜間を想定した室内においても印加する電圧を調整することで異常クラスタの検出が可能といえる。しかし、本稿での異常クラスタの検出の定義は仮のものであり、今後は最適値を明らかにする必要がある。

また、本検出方法では、バイパス回路が開放しているクラスタのセルには逆電圧が印加されセルへの悪影響が懸念されるが、

- ① 試験内容を考えると本検査は精密点検(1年に1回⁽¹¹⁾)の一環として行うのが妥当で実施回数が少ない。
- ② 温度上昇は二値化画像で区別可能なレベルまでにすれば十分で時間も短い。

などの理由から、本検査によるセルへのダメージは極めて低いと考えられる。しかしながら、この点については適切な検出条件の明確化とあわせて今後さらに検討していく予定である。

文 献

- (1) 大関崇,「太陽電池モジュールのバイパス回路における故障要因分析(その1)」, 太陽/風力エネルギー講演論文集, 講演番号9, 45-47 (2014)
- (2) 池田一昭,「太陽光発電システムの直流電気事故対策-1(バイパス回路の点検)」電学誌 134巻 10号(2014),
- (3) 太陽光発電システムの監視・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, 22 (2016), 日本太陽エネルギー学会, 東京
- (4) 片淵健,「探査機による太陽電池モジュールバイパスダイオードの故障調査方法」, 日本太陽エネルギー学会 太陽光発電部門 第10回セミナー, (2014)
- (5) 浅井順, 他,「PV保護バイパスダイオードの故障検知手法の提案」, 太陽/風力エネルギー講演論文集, 講演番号22, 81-84 (2015)
- (6) 加瀬亮一・西川省吾,「太陽電池モジュールのバイパス回路故障検出-開放故障位置の特定-」, 太陽/風力エネルギー講演論文集, 講演番号23, 85-88 (2015)
- (7) 加瀬亮一・西川省吾,「太陽電池モジュールバイパス回路故障検出技術-温度変化の二値化による故障検出法-」, 平成28年電気学会電力・エネルギー部門大会講演論文集, 講演番号135, 17-18 (2016)
- (8) 篠崎哲也 他,「赤外線劣化診断への画像処理技術の応用(熱画像の2値化処理)」, 土木学会第64回年次学術講演会 (2009)
- (9) 尾崎弘・谷口慶治, 画像処理 - その基礎から応用まで, 145-150 (1983), 共立出版, 東京
- (10) 土井卓也・山田隆夫・作田宏一,「結晶系 Si 太陽電池セルへの順・逆方向電圧印加と発熱・破壊試験」, 太陽/風力エネルギー講演論文集, 講演番号106, 445-448 (2007)
- (11) 太陽光発電システム保守点検ガイドライン, 太陽光発電協会, 日本電機工業会, 42 (2016)