

Failure Evaluation Method of PV Array using I-V Characteristics
- Evaluation Method using FF -

I-V 特性を用いた太陽電池アレイの不具合判定に関する研究 - FF を用いた判定方法 -

Yuga ISHITOYA
石戸谷 有我^{*1‡}

Sanshiro YAMANAKA
山中 三四郎^{*2}

Yasuhiro AOYAMA
青山 泰宏^{*3}

Yuki NISHIDO
西戸 雄輝^{*3}

Hiroshi KOBAYASHI
小林 浩^{*3}

Abstract

I-V characteristics are one of maintenance methods of photovoltaics system. We can evaluate failure by the shape change of I-V characteristics. However, it is difficult to identify a little failure, because the I-V characteristics are visually evaluated. Therefore, it is necessary to evaluate the shape change of the I-V characteristics by numerical value. In this paper, we have investigated numerical indices and evaluation method on the failure using I-V characteristics. As a result, it is possible to evaluate a little failure by using Fill Factor (FF) and interval estimation method.

Keywords : PV systems, Failure evaluation, I-V characteristics, Fill Factor (FF), Interval estimation

キーワード : PV システム, 不具合判定, I-V 特性, 曲線因子(FF), 区間推定

1. はじめに

近年, 太陽光発電システム (以下, PVS) の導入が進むとともに, 安全性や経済性の理由から PVS の異常を診断する方

法が切望されるようになってきた^(1,2). 業界では「太陽光発電システム保守点検ガイドライン」が施工され, 早期に異常を発見するために多様な異常診断方法が提案されている^(3,4). この保守点検作業のひとつに I-V 特性による診断方法がある. この方法は, PV アレイ (ストリング) の I-V 特性を計測し, 得られたパラメータや曲線の形状変化から不具合を確認する方法である. しかし, 一般的には I-V 特性の形状変化による評価は, 想定された曲線から大きな逸脱がないことを目視で確認しているため, その評価は現場作業者に委ねられているのが現状である⁽⁵⁾. また, I-V 特性を目視によって評価するため, I-V 特性の形状変化が僅かである場合は不具合の特定が

*1 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)
‡ E-mail : 120433008@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 : 2017 年 10 月 4 日, 受理日 : 2017 年 12 月 22 日)

難しい。そこで、我々は I-V 特性の形状変化を数値によって評価する必要があると考えている。本研究の最終的な狙いは、PV アレイに生じた異常を I-V 特性の形状変化から簡便かつ高精度で診断するところにある。そのためには、①適切な指標と判定基準（閾値）の設定により、目視では判定が難しい僅かな異常を評価可能にすること、②判定の対象となる PVS の正常時におけるデータを収集する必要なく評価が可能であることが望ましい。

本論文では、I-V 特性の形状変化による不具合判定方法を確立する初期段階として、指標と判定方法について検討を行う。すなわち、I-V 特性の形状変化の指標として曲線因子(Fill Factor, FF)を用いることを提案する。さらに、判定方法として区間推定法を用いることを提案する。

2. 曲線因子(FF)の特性

2.1 曲線因子(FF)の定義

FF はI-V 特性の最大出力を開放電圧と短絡電流の積で除した値である。これは太陽電池の特性を表すパラメータの一つとして扱われ、主に太陽電池の直列抵抗、並列抵抗、ダイオード因子によって決まるとされている⁽⁶⁾。 FF の算出式を式(1)に示す。

$$FF = \frac{V_{pm} \cdot I_{pm}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (1)$$

ここで、 V_{oc} ：開放電圧、 I_{sc} ：短絡電流、 V_{pm} ：最大出力動作電圧、 I_{pm} ：最大出力動作電流である。 FF はJISにより定められており、I-V 特性を評価する際に用いられるが、定量的な評価基準はまだ確立されていない⁽⁷⁾。ここでは FF の特性について調査し、I-V 特性の形状変化による不具合判定に用いるための指標として有用性を確認する。

2.2 FF の日射・温度特性

2.2.1 重回帰分析による解析 FF を指標として利用するためには、まず FF の特性について把握する必要がある。そのため、ここでは重回帰分析によって統計的に FF の調査を行う。はじめに、日射強度とモジュール温度を対象に式(2)の重回帰式を提案し、正常なシステムの FF について分析を行う。

$$FF_{est} = aIrr + bTemp + c \quad (2)$$

ここで、 FF_{est} ：正常なシステムの FF の推定値、 Irr ：日射強度、 $Temp$ ：モジュール温度、 a ：日射係数、 b ：温度係数、 c ：定数項である。ここでは例として、多結晶シリコンモジュールで構成されたPVアレイの FF の重回帰分析を行う。

2.2.2 評価対象のシステム 評価対象のシステムはモジュールを12直列4並列に結線した3kWのPVアレイを用いる。設置方位は真南、傾斜角は水平面から7.6°であり、モジュールはセル36枚、2クラスターで構成された多結晶シリコンモジュールである。Table 1に当該アレイおよび、アレイを構

成するモジュール1枚の公称出力を示す。

また、回帰式の算出には、屋外で自動計測した1年間のI-V特性、日射強度、モジュール温度を用いる。日射強度には、アレイ中央付近に設置した熱電式日射計により測定した傾斜面日射強度を用いる。モジュール温度には、モジュール裏面に貼り付けた熱電対の測定値を用いる。なお、モジュール温度はアレイ全体で一律として扱う。標本とするデータは周囲の影の影響を受けない11時~13時の時間帯に限定し、5分間隔で計測を行った。また、極度に日射強度が低い場合のI-V特性を除外して検討を行うために、暫定的に閾値を設け、日射強度0.05 kW/m²に満たないデータを除外した。

2.2.3 FF の回帰式 式(3)に算出した、PVアレイの FF の回帰式を示す。

$$FF_{est} = -0.035Irr - 0.0011Temp + 0.746 \quad (3)$$

この回帰式を評価するために、縦軸に実測したI-V特性から式(1)により算出した FF を、横軸に日射強度とモジュール温度を式(3)に代入して推定した FF_{est} をとったグラフをFig. 1(a)に示す。 FF の変動が式(3)によって正しく推定できていれば、 $FF = FF_{est}$ となり、傾き45°の直線状にデータが分布するはずである。Fig. 1(a)を見ると FF_{est} 0.70付近(図中点線部)で、実際に測定した FF の値と大きく外れている部分が確認された。この部分のデータを抽出すると、日射強度が低い場合に、 FF の推定に大きな誤差があることが確認された。

Table 1 Nominal value of target system

表1 対象システムの公称値

	P_{max} [W]	V_{oc} [V]	I_{sc} [A]	V_{pm} [V]	I_{pm} [A]	FF [-]
Module	62	21.3	4.0	17.5	3.66	0.75
Array	2976	255.6	16.0	210.0	14.64	

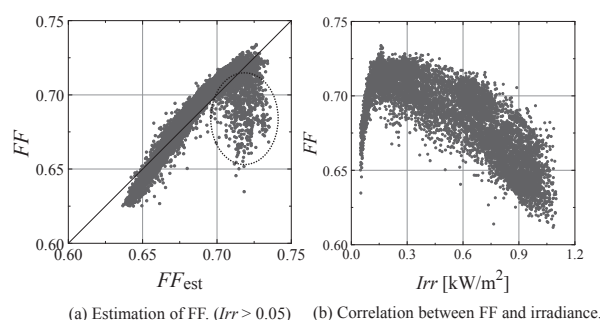


Fig. 1 Estimation of FF and irradiance characteristic.

図1 FF の推定と日射特性

そこで、 FF と日射強度の関係を詳しく調べた。その結果を Fig. 1(b) に示す。Fig. 1(b) を見ると FF は、低日射領域 (0.2 kW/m^2 以下) と高日射領域で日射強度との相関性が大きく異なっている。Fig. 1(a) の点線部分が Fig. 1(b) の低日射領域に対応している。すなわち、低日射領域と高日射領域で相関が異なっているため、日射強度の全範囲において FF を利用して一律に不具合を判定することは難しい。そこで本論文では FF と日射強度が負の相関を持つ 0.3 kW/m^2 以上の場合についてのみ検討することにする。そこで、日射強度を 0.3 kW/m^2 以上限定し、回帰式を改めて算出した。算出した回帰式を式(4)に、同様のグラフを Fig. 2 に示す。

$$FF_{\text{est}} = -0.062I_{rr} - 0.0012Temp + 0.773 \quad (4)$$

このとき、決定係数は 0.975 である。Fig. 2 を見ると、 FF_{est} 0.70 付近で確認された推定誤差の部分が取り除かれていることが分かる。また、Fig. 1(a) に比べ、より $FF = FF_{\text{est}}$ の直線に近い形でデータが分布するようになった。しかしながら、 $FF_{\text{est}} < 0.60$ や $0.70 < FF_{\text{est}}$ の領域(図中点線部)では $FF = FF_{\text{est}}$ の直線から外れている傾向がある。これは、式(2)の 1 次重回帰式では FF の変動を正確に推定できていないことを示している。そこで、次に日射強度とモジュール温度の 2 乗の項を含めた、2 次重回帰式を提案し、 FF の推定を試みた。算出した回帰式を式(5)に、グラフを Fig. 3 に示す。

$$FF_{\text{est}} = -0.013I_{rr} - 0.037I_{rr}^2 - 5.75 \times 10^{-4}Temp - 7.30 \times 10^{-6}Temp^2 + 0.746 \quad (5)$$

このとき、決定係数は 0.981 である。1 次の重回帰分析を行った場合に比べ、 $FF = FF_{\text{est}}$ の直線に近い形でデータが分布しており、Fig. 2 の点線部の推定精度が改善した。また、決定係数も上昇している。よって、 FF の変動を統計的に予測する際には、日射強度とモジュール温度の 2 次重回帰分析を用いることで、より正確に推定することができる。ただし、前述の理由により 0.3 kW/m^2 以下の低日射領域を除外して検討を行う。

3. 区間推定法による判定

3.1 判定方法

FF を用いて、実際に形状変化が発生した I-V 特性の判定を行う。判定方法として、統計的な手法である区間推定法を用いる⁽⁸⁾。はじめに、2.2 節に示した手順で日射強度とモジュール温度を対象に FF の 2 次重回帰式を算出する。次に、重回帰式から予測された正常なシステムの $FF(FF_{\text{est}})$ から信頼区間を算出する。式(6)に信頼区間の算出式を示す。

$$FF_{\text{est}} \pm t \cdot \hat{\sigma} \quad (6)$$

このとき、 t : t 分布の % 点、 $\hat{\sigma}$: 残差の普遍偏差である。 $\hat{\sigma}$ は式(7)~(9)により算出される。

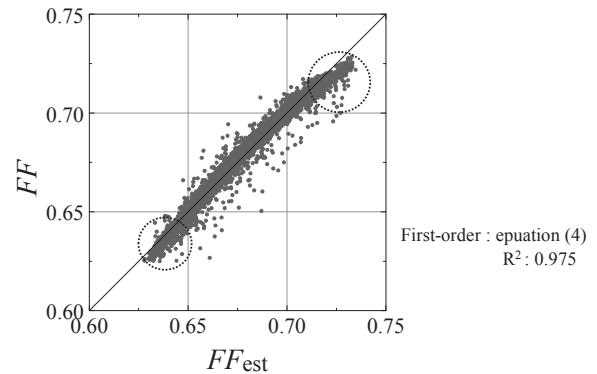


Fig. 2 Estimation of FF by multiple regression analysis. (First-order)

図2 1次重回帰分析による FF の推定

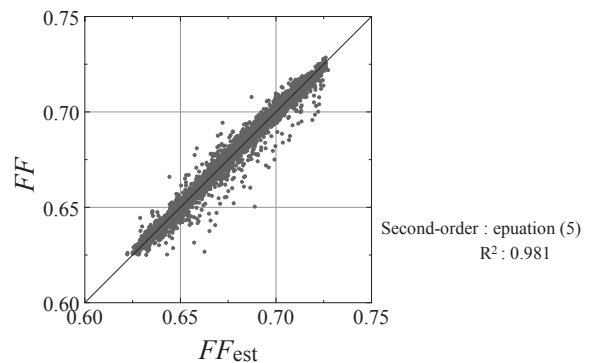


Fig. 3 Estimation of FF by multiple regression analysis. (Second-order).

図3 2次重回帰分析による FF の推定

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\left(1 + \frac{1}{n} + \frac{D_0^2}{n-1}\right) \times V_\varepsilon} \quad (7)$$

$$D_0^2 = \frac{s_u^2(x-\bar{x})^2 - 2s_{xu}(x-\bar{x})(u-\bar{u}) + s_x^2(u-\bar{u})^2}{s_x^2 s_u^2 - s_{xu}^2} \quad (8)$$

$$V_\varepsilon = \frac{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \dots + \varepsilon_n^2}{n-p-1} \quad (9)$$

ここで、 D_0^2 : マハラノビスの距離、 V_ε : 残差分散、 n : サンプル数、 p : 説明変数の数、 ε : 推定値と実測値の残差、 $\bar{x}, \bar{u}$: 変数 x, u の平均であり、 s_x^2, s_u^2 と s_{xu} はその分散と共分散である。

本検討では区間幅の信頼係数を 90% に設定し、 $t=1.645$ とする。この信頼区間を判定基準とし、I-V 特性から算出した FF が信頼区間の範囲内であれば正常値、範囲外であれば異常値として判定を行う。

3.2 判定対象のシステム

判定対象とするシステムは 2.2.2 項と同様の 3 kW の PV アレイを用いた。信頼区間の算出には、判定対象である PV アレイの正常に動作している時のデータが必要となる。こちらも 2.2.2 項と同様に、屋外で自動計測された当該アレイの I-V 特性、日射強度、モジュール温度を用いる。ただし、先に述べたように、低日射領域では FF と日射強度の相関が崩れるため、日射強度が 0.3 kW/m^2 に満たないデータを除外した。

また、判定対象とする I-V 特性は実際に長期稼動しているシステムに意図的に形状変化(歪み)を発生させて収集した。今回は、PV アレイの一部分を遮光フィルムで遮光した場合と、ストリングの一部に直列抵抗を挿入した場合の、I-V 特性の歪み方が異なると思われる 2 つのパターンで歪みを発生させ、検討を行った。判定対象とするシステムは 2.2.2 項と同様の 3 kW の PV アレイを用いた。

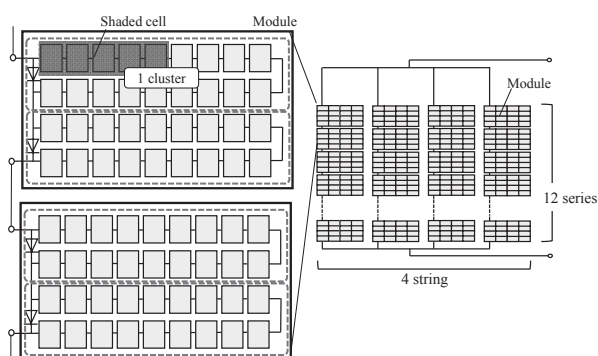


Fig. 4 Schematic diagram of shaded array (1 cluster).

図 4 遮光されたアレイの模式図 (1 クラスタ遮光)

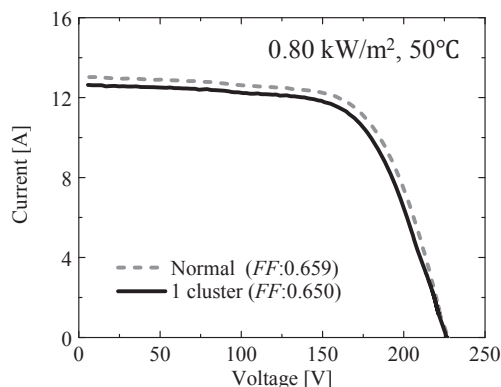


Fig. 5 I-V characteristics with shaded array.

図 5 遮光されたアレイの I-V 特性

3.2.1 部分遮光された PV アレイ PV アレイの一部分のセルの短絡電流が低下している状態を想定し、PV アレイに遮光率 80% の遮光フィルムを貼り付けた。このときの I-V 特性、日射強度、モジュール温度を計測する。遮光フィルムはクラスタあたりセル 5 枚単位で、同じストリング上の複数のクラスタに貼り付けた。例として Fig. 4 に 1 クラスタを遮光した場合の模式図を示す。また、1 クラスタを遮光したアレイの I-V 特性を Fig. 5 に示す。1 クラスタを遮光したアレイの場合、I-V 特性の形状変化は極めて小さく、目視で異常判別することが難しいことが分かる。

3.2.2 直列抵抗が挿入された PV アレイ アレイを構成するストリングの一部に直列抵抗を挿入することで I-V 特性を僅かに歪ませた。Fig. 6 に抵抗の挿入位置を、Fig. 7 にこのときの I-V 特性を示す。I-V 特性を見ると、正常な I-V 特性と並べて比較を行った場合であっても、目視では形状変化を確認することができない。このように、アレイの場合では、システムの一部分に不具合が発生した場合でも、全体の I-V 特性からその異常を把握することは容易では

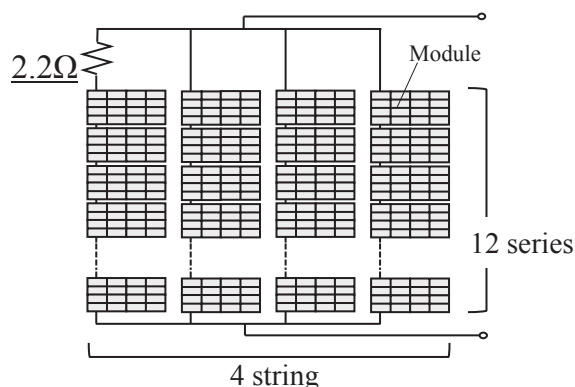


Fig. 6 Schematic diagram of array with series resistance.

図 6 抵抗挿入されたアレイの模式図

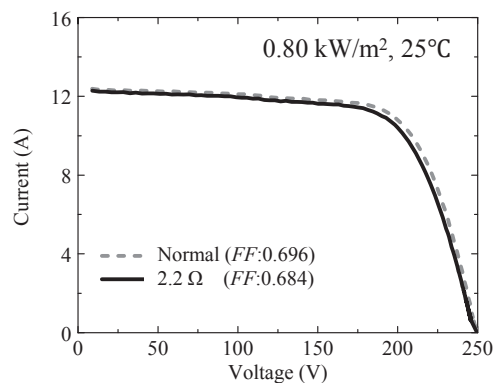


Fig. 7 I-V characteristics of array with series resistance.

図 7 抵抗挿入されたアレイの I-V 特性

ないことが分かる。本検討では I-V 特性を目視で確認しただけでは判別できないような僅かな形状変化を FF によって判定することを目指す。

3.3 判定結果

3.3.1 正常なアレイの評価 区間推定法により、正常なアレイの評価を行った結果を Fig. 8 に示す。本来であれば、2 変量の区間推定であるため信頼区間は Irr , $Temp$, FF の 3 次元の曲面で表記されるが、ここでは、比較を容易にするために、2 次元のグラフとして表記する。このとき、縦軸は式(1)により算出した FF を、横軸

は式(5)から日射強度、モジュール温度を用いて推定した FF_{est} を表している。また、グラフ中央に式(6)により算出した信頼区間を示す。本検討で信頼区間の算出に用いた標本データの数 5000 を越える非常に大きなデータである。そのため、式(7)で算出される $\hat{\sigma}$ はほぼ一定の値となり、信頼区間の幅は計測された日射強度、モジュールの範囲ではほぼ一定で $FF_{est} \pm 0.006$ となった。この信頼区間は、正常な FF のおよそ 90% が信頼区間の内側に分布するように算出されている。このとき、推定した FF_{est} との差が ± 0.006 未満であれば正常、それ以上の場合を不具合として判定を行う。

Fig. 8 を見ると、正常なアレイの FF は FF_{est} とほぼ等しくなり、多くのデータが信頼区間の内側に分布していることが分かる。このとき、信頼区間の外側には 5.6% のデータが分布しており、94.4% の割合で正常と判定された。この値は、信頼係数：90% に近いものである。よって、信頼区間は統計的に正しく算出されている。

3.3.2 部分遮光された PV アレイの判定 部分遮光されたアレイの判定結果を Fig. 9 に示す。判定結果を見ると、推定された FF_{est} に対して、I-V 特性から得られた FF が低下しており、ほぼすべてのデータが信頼区間の外側に分布していることが分かる。また、1 クラスタ遮光の場合に比べて、より形状変化が大きい 2 クラスタを遮光した場合で FF が大きく低下していることが確認できる。このとき、不具合と判定されたデータの割合は 1 クラスタ：99.4%、2 クラスタ：100% である。これらは目視では判定できないほど僅かな I-V 特性の形状変化であることから、 FF を用いることで非常に高い精度で I-V 特性の形状変化を確認することができる。

3.3.3 直列抵抗が挿入された PV アレイの判定 直列抵抗が増加したアレイの判定結果を Fig. 10 に示す。こちらは、いくらかのデータが信頼区間の内側に分布しており、不具合判定率は 83.1% である。これらの I-V 特性は Fig. 7 で例示したように正常な I-V 特性と比べて、僅かに FF が低下しているのみで、目視による形状変化は確認できない。しかしながら、区間推定法を用いることで半数以上の場合で異常と判定されていることから、 FF を指標とすることで、セルの短絡電流低下による I-V 特性の歪みだけでなく、抵抗成分による歪みに対しても高い精度で評価が可能である。

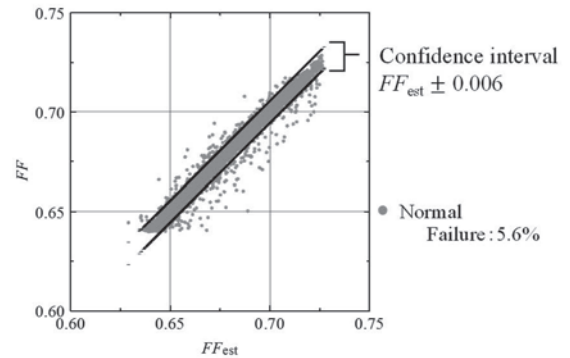


Fig. 8 Evaluation result of normal array.

図 8 正常なアレイの判定結果

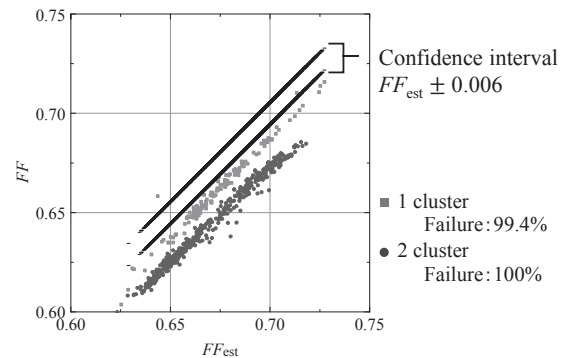


Fig. 9 Evaluation result of shaded array.

図 9 遮光されたアレイの判定結果

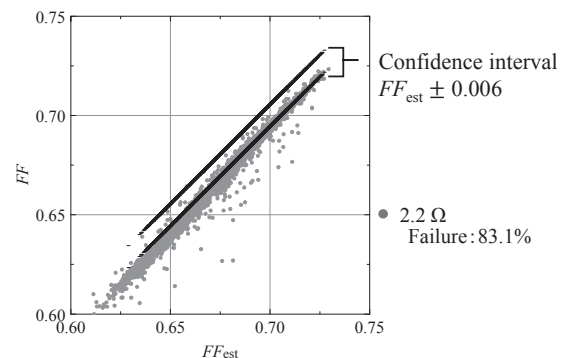


Fig. 10 Evaluation result of array with series resistance.

図 10 抵抗挿入したアレイの判定結果

4. モジュールの FF から判定

4.1 概要

区間推定法は統計的な手法である。そのため、判定基準である信頼区間の算出のために、判定対象システムの正常な状態における FF 、日射強度、モジュール温度のデータが必要となる。しかし、判定する度に、そのシステムのデータを用意することは難しく、実際に運用することを考えると実用的な診断方法とはいえない。しかし、異なるシステムにおいても同じ判定基準を用いることができれば、前もって基準とする信頼区間をひとつ用意することで、比較的容易に判定が可能になると言える。

ここでは、「同じ型番のモジュールであれば、アレイとモジュールで同じ判定基準を用いることができる」と仮説を立て、モジュール 1 枚のデータから求めた信頼区間を用いて、同型モジュールによって構成されるアレイの不具合を判定可能であるかを検討した。

4.2 モジュールとアレイの FF

判定を行う前に、モジュールとアレイの FF 特性の比較を行う。対象とするシステムは 2.2.2 項 Table 1 に示す、3 kW のアレイと同じ型番のモジュールである。当該モジュールは、アレイを構成している中のものではなく、別の地点に設置された特定の 1 枚のモジュールである。データの収集についても、アレイ、モジュール共に 2.2.2 項と同様に行う。ただし、日射強度: 0.3 kW/m^2 に満たないデータは除外して検討を行う。算出したモジュールの回帰式を式(10)に示す。

$$FF_{\text{est1}} = -0.027 \text{ Irr} - 0.023 \text{ Irr}^2 - 0.001 \text{ Temp} - 1.60 \times 10^{-6} \text{ Temp}^2 + 0.761 \quad (10)$$

ここで、式(5)に示したアレイの回帰式と比較する。このとき、回帰式の決定係数はモジュール: 0.908、アレイ: 0.981 である。日射係数を比較するため、式(5),(10)に $\text{Temp} = 25^\circ\text{C}$ を代入して求めた日射特性のグラフを Fig. 11(a)に示す。また、温度係数を比較するため、同様に $\text{Irr} = 1.0 \text{ kW/m}^2$ を代入して求めた温度係数のグラフを Fig. 11(b)に示す。この図からアレイとモジュールの回帰式が完全に同じになるわけではないことがわかる。この差について、不具合判定に影響を及ぼす程度であるか、次節の結果を踏まえて判断をする。

4.3 モジュール回帰式による判定結果

Fig. 12 にモジュールから算出した信頼区間 (± 0.011) を用いて正常なモジュールとアレイの判定を行った結果を示す。判定結果を比較すると、モジュールの FF は 6.9% が信頼区間外に分布し、信頼係数に従って 90% 以上のデータが区間内に収まっている。アレイの FF はモジュールに比べると、僅かに小さい値をとっているため、信頼区間の下側に集中して分布しているが、こちらも 7.9% のデータが信頼区間外にあり、90% 以上のデータが信頼区間内に収まっている。この結果が

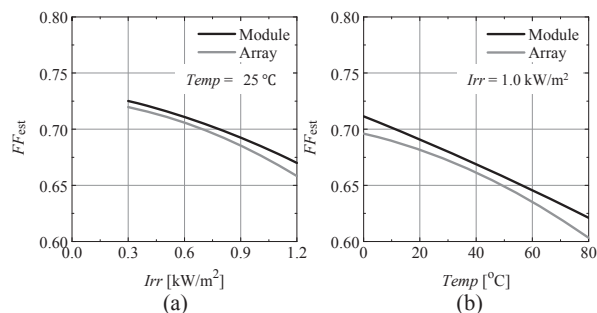


Fig. 11 Irradiance and temperature dependency of FF .

図 11 FF の日射・温度特性

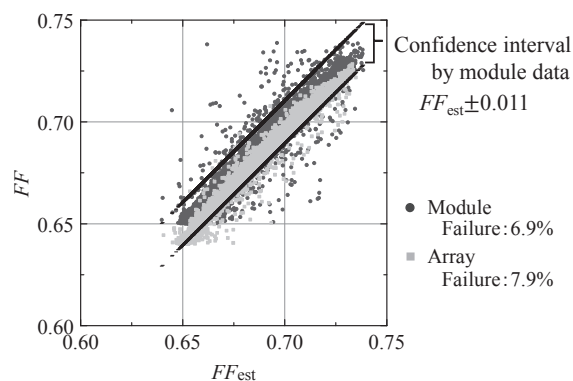


Fig. 12 Evaluation result of module and array without failure.

図 12 正常なモジュールとアレイの判定結果

Table 2 Ratio of failure evaluation.

表 2 不具合と判定されたデータの割合

Module	Array			
Normal	Normal	1 cluster	2 cluster	2.2 Ω
6.9%	7.9%	98.8%	100.0%	84.3%

ら、不具合を模擬していない正常なアレイは、モジュールの信頼区間を用いて判定した場合であっても、問題なく正常と判定されていることが分かる。

次に、Table 2 に不具合を発生させたアレイの判定結果を示す。部分遮光されたアレイの判定結果を見ると、1 クラス、2 クラス共に、ほぼ全ての場合で不具合と判定された。また、直列抵抗が挿入されたアレイ (2.2 Ω) の場合では、80% 以上が不具合と判定されており、アレイのデータから算出した信頼区間で判定した場合と殆ど差がないことが分かる。したがって、同じ型番のモジュールであれば、アレイとモジュールで FF の特性はおおよそ等しくなり、モジュールのデータから算出した信頼区間を用いた場合であっても、アレイの不具合判定が可能であると言える。

5. まとめ

本研究ではI-V 特性を用いた PVS の不具合判定方法について検討を行い、以下の結果を得た。

- (1) 曲線因子 FF は日射強度とモジュール温度の2次重回帰分析によって、統計的に変動を予測することができる。ただし、低日射領域(0.2kW/m^2 付近)から FF と日射強度の相関性が異なってくる。そのため、日射強度 0.3kW/m^2 以上のデータを対象とすることで、評価の精度が向上する。
- (2) システム正常時の FF を2次重回帰分析によって推定し、その後、信頼係数 90%の区間推定による判定を行うことで、目視では確認できない僅かな I-V 特性の形状変化を評価することが可能である。
- (3) FF は同じ型の製品であればモジュールとアレイで特性がおおよそ等しくなる。そのため、アレイの不具合判定を行う際にモジュールの FF のデータから算出した回帰式を用いて判定が可能である。

本研究の目標は、PV アレイに生じた異常を I-V 特性の形状変化から簡便かつ高精度で診断するところにある。そのためには、①適切な指標と判定基準（閾値）の設定により、目視では判定が難しい僅かな異常を評価可能にすること。②判定の対象となる PVS の正常時におけるデータを収集する必要なく評価が可能であることの2つの課題を冒頭で示した。今後は、今回提案した判定方法について、判定対象のデータの収集が必要ない方法を目指し検討を進めていく予定である。

6. 参考文献

- (1) 清水拓也, 太陽光発電システムの故障と事故の現状, 電気設備学会誌, **37** (6), 10 (2010) .
- (2) 大内雅之, 太陽電池モジュールの検査方法と不具合事例, 電気設備学会誌, **37** (6), 6-9 (2010) .
- (3) JPEA, 太陽光発電システム保守点検ガイドライン , 45-65 (Dec. 2017), http://www.jpea.gr.jp/pdf/161228_pv_maintenance.pdf
- (4) 伊坪輝雄, 太陽光発電の保守点検ガイドラインについて, 電気設備学会誌, **37** (6), 14-17 (2010) .
- (5) 加藤和彦, 太陽光発電システムの不具合事例ファイル, 36-37, (2010), 日刊工業新聞社, 東京.
- (6) JIS ハンドブック 75 省・新エネルギー, 91 (2012), 日本規格協会, 東京.
- (7) JPEA, 太陽光発電システム保守点検ガイドライン , 55 (Dec. 2017), http://www.jpea.gr.jp/pdf/161228_pv_maintenance.pdf
- (8) 桶井良幸 涌井貞美, 図解で分かる回帰分析, 168-174 (2012), 日本実業出版社, 東京.