Research Paper 研究論文 

# **Degradation Analysis of Photovoltaic Modules** with Outdoor I-V Curve Data by means of Linear Interpolation Method and Translation Formula with Series Resistance

Yoshiro IZUMI<sup>\*1‡</sup>

Yuzuru UEDA<sup>\*2</sup>

# 線形補間法と直列抵抗を用いた変換式による 屋外 I-V カーブデータを用いた太陽電池モジュールの劣化解析

泉 洋志郎 \*1 \*

植田 譲<sup>\*2</sup>

## Abstract

Degradation analysis methods of PV modules using many outdoor Current-Voltage (I-V) curve data are proposed in this paper. The I-V curve data measured under various outdoor conditions are translated to the Standard Test Conditions (STC) by two kinds of translation procedures. Procedure.1 directly translates to the STC by linear interpolation method (LIM) with many reference I-V curves, which are created by I-V curve fittings. Procedure.2 is a combination of procedure1 and translation formula. Characteristic values such as maximum power, short circuit current, open circuit voltage, fill factor, series resistance and shunt resistance are quantitatively evaluated with both methods. Degradation rates of mono crystalline Si and polycrystalline Si modules were analyzed and accuracies were verified by comparing with indoor measurement results. Although open circuit voltage between the two proposed methods were different, the almost same annual degradation rates were obtained.

> Keywords: PV module, Degradation analysis, Linear interpolation method, I-V curve キーワード: PV モジュール,劣化解析,線形補間法, I-V カーブ

# 1. はじめに

太陽光発電(PV)システムの運用において発電機会の損 失や、PV モジュールの交換費用などの経済的な影響を評 価するために,太陽電池の劣化解析技術が研究されている. PV モジュールの劣化解析手法として、これまで電流電圧 特性(I-V カーブ)データを用いた解析手法が多く提案され てきた. 例えば日射強度や温度係数を用いて I-V カーブ中

の最大出力を正規化したものを性能指数とする手法の PR(Performance Ratio)<sup>(1)</sup>や PVUSA<sup>(2)</sup>などがあげられる. Sandia  $\mathcal{O}$  Array performance model<sup>(3)</sup>  $\stackrel{>}{\sim}$  NREL  $\mathcal{O}$  Rd tool<sup>(4)</sup>  $\stackrel{+}{\sim}$ どのアプリケーションによってこれらの性能指数を数年 から数十年にかけて算出し,統計分析手法として線形回帰 や季節性を考慮した YOY 法(5)によって年劣化率を評価す ることも行われている.加えて、最大出力だけでなく短絡 電流や開放電圧などの電気的パラメータを含めたより詳

(原稿受付:2020年1月5日,受理日:2020年4月1日)

<sup>\*1</sup> Graduate School of Engineering, Tokyo University of Science,

Niijuku, Katsushika, Tokyo, 125-8585, Japan

<sup>‡</sup> e-mail: 4318503@alumni.tus.ac.jp

<sup>\*2</sup> Associate professor, Tokyo University of Science

Received: 5 January 2020, Accepted: 1 April 2020

<sup>\*1</sup> 東京理科大学大学院 工学研究科 (〒125-8585 東京都葛 飾区新宿 6-3-1,

<sup>‡</sup> e-mail : 4318503@alumni.tus.ac.jp)

<sup>\*2</sup> 東京理科大学 工学部 准教授

細な劣化解析手法も提案されている.例えば,標準試験条件(STC:日射強度が 1.0[kW/m<sup>2</sup>],モジュール温度が 25[°C], 分光放射照度分布が AM1.5G)における I-V カーブの屋内 測定結果の経年比較や,屋外で測定された I-V カーブデー タに対して温度係数等を用いて STC 換算<sup>(0)</sup>して比較する 手法,あるいはほとんど同じ日射・モジュール温度条件の 屋外計測 I-V の単純比較<sup>(7)</sup>を行うこともある.しかし,屋 内測定による解析の場合は,標準試験条件 (STC)では確 認されない PV の不具合事例が報告<sup>(8)</sup>されており,実発電 環境における発電性能を正しく評価できていない可能性 があることや,屋外 I-V カーブデータを STC 換算する手 法は,温度補正に用いる係数など,銘板値に記載されてい ない情報が必要な場合があるといった問題があった.

そこで本論文では実発電環境において計測された多く の屋外 I-V カーブデータを活用した劣化解析手法を 2 種 類提案する.両手法共に毎月の屋外 I-V カーブデータの日 射・温度分布に基づき複数の基準点を設定し、 それぞれの 基準点における基準 I-V カーブを I-V カーブフィッティン グを用いて作成する. つぎに, これらを用いて複数の基準 I-V カーブの組合せを選択し、線形補間法(9)や変換式(10)を 用いて STC に換算した I-V カーブを複数本算出する. こ こで、1 つ目の提案手法では線形補間法により STC に直 接換算することで、毎月算出される I-V カーブの変化から 劣化解析を行うが、2つ目の提案手法では、基準点群の重 心点に換算を行った後, 菱川らの提案した one-diode model に基づく I-V カーブの日射・温度変換式を用いて STC に 換算する. この日射・温度変換式は結晶系 Si に対して有 効性が確認されており,解析精度向上が見込まれる.両提 案手法共に STC 換算した I-V カーブから短絡電流等の特 性値に加えて I-V カーブフィッティングより直列抵抗, 並 列抵抗の経年変化を解析可能である.本論文はまず,2つ の手法を特徴付ける線形補間法と菱川らの提案した I-V カーブの日射・温度変換式を2章において説明し、次に、 3章において解析手法の全体について述べる。その後、4 章において解析に用いたデータを、5章において解析結果 及び年劣化率・精度検証結果を示す.

### 2. I-V カーブの日射・温度変換法

#### 2.1 線形補間法

線形補間法とは日射強度 G 及びモジュール温度 T が既 知の複数の I-V カーブ(基準 I-V カーブ)を用いて任意の日 射・温度条件下の I-V カーブを算出する方法である.図1 に概略図を示す.各基準 I-V カーブの重みづけ係数 x1, x2, x3を式(1),(2),(3)より導出し,式(4),(5)に代入する.*I*A, *I*B, *I*c, *V*A, *V*B, *V*cは *G*-*T* 平面上の基準点 A, B, C の基 準 I-V カーブの電流[A]・電圧[V]であり,基準 I-V カーブ の短絡電流 *I*sc[A]を考慮して *I*scA - *I*scB = *I*A - *I*B および *I*scB -*I*scC = *I*B - *I*C を満足する組合せを選出する.

$$x_1 G_{\rm A} + x_2 G_{\rm B} + x_3 G_{\rm C} = G_{\rm K} \tag{1}$$

$$x_1 T_A + x_2 T_B + x_3 T_C = T_K$$
(2)

$$x_1 + x_2 + x_3 = 1 \tag{3}$$

$$x_1 I_{\rm A} + x_2 I_{\rm B} + x_3 I_{\rm C} = I_{\rm K} \tag{4}$$

 $x_1 V_{\rm A} + x_2 V_{\rm B} + x_3 V_{\rm C} = V_{\rm K} \tag{5}$ 





#### 2.2 日射・温度変換式による変換

文献(10)の提案した I-V カーブの変換法では、まず変換 前の I-V カーブの開放電圧付近の電流・電圧値より電圧の 日射変換用の直列抵抗  $R_{s,tr}$ を計算する.その後式(6),(7)よ り STC に換算された I-V カーブ上の電流値及び電圧値 ( $I_{STC}$ ,  $V_{STC}$ )を算出する.I(V), V(I)は変換前の I-V カーブの 各測定点,  $I_{scR}$ [A],  $G_{R}$ [kW/m<sup>2</sup>],  $T_{R}$ [K]は変換前の I-V カー ブの短絡電流,日射,モジュール温度で, $G_{STC}$ =1.0[kW/m<sup>2</sup>],  $T_{STC}$ =25+273.15[K],  $N_{s}$ はセル数,  $a_{rel}$ は  $I_{sc}$ の温度係数で, 0.05[%/K]である.なお,式(7)中の 1.232 という数値はシリ コンのバンドギャップエネルギーに基づいている.

$$I_{\text{STC}}(V) = I(V) + I_{\text{scR}} \left[ \frac{G_{\text{STC}}}{G_{\text{R}}} \{ 1 + \alpha_{\text{rel}}(T_{\text{STC}} - T_{\text{R}}) \} - 1 \right]$$
(6)

$$V_{\text{STC}}(I) = V(I) - R_{\text{s,tr}} I_{\text{scR}} \left( \frac{G_{\text{STC}}}{G_{\text{R}}} - 1 \right) + \frac{T_{\text{STC}} - T_{\text{R}}}{T_{\text{R}}} \cdot \left\{ V(I) - R_{\text{s,tr}} I_{\text{scR}} \left( \frac{G_{\text{STC}}}{G_{\text{R}}} - 1 \right) - 1.232 N_{\text{s}} \right\}$$
(7)

式(6),(7)は CIGS や III-V 族の PV モジュールなどでも One-diode model で I-V カーブ特性が表せる際は適用可能 であると予想されているが,結晶系 Si の PV モジュール 種とのバンドギャップの違いをどのように考慮するか等 の課題がある.

#### 3. 解析手法

本論文で提案する 2 種類の解析手法共に,はじめに太 陽電池表面の日射の反射や太陽電池の分光感度特性を考 慮するために日射計を用いて計測された傾斜面全天日射 に対して各種補正を行い,有効日射強度 Geff を算出する (3.1 項). そして屋外 I-V カーブデータに対して測定不良 データを除外するためにフィルタリング(3.2 項)を行って から,線形補間法を実行するための基準 I-V カーブを月単 位で作成する(3.3 項). 基準 I-V カーブは多数の屋外デー タを活用するために Geff-T 平面上のデータ分布に沿って 複数作成する. そして提案手法 1(proc.1)では複数の基準 I-V カーブの組合せを 3.4.1 項の手法を用いて選択し, これ らを用いて STC へ直接線形補間(2.1 項)する. 一方で,提 案手法 2(proc.2)では 3.4.2 項の手法を用いて選択し, Geff-T 平面上の全基準点(Geff, T)の重心へ線形補間(2.1 項)した 後, 2.2 項および 3.5 項で述べた手法で STC へ I-V カーブ を換算する.

## 3.1 有効日射強度の導出

太陽電池の出力に寄与する  $G_{eff}[kW/m^2]$ を,傾斜面全天日射にスペクトルミスマッチ補正係数  $K_{sf}^{(11)}$ と入射角損失補正係数  $K_{inc}^{(12)}$ を乗じることで算出する.なお, $G_{mes}[kW/m^2]$ は傾斜面全天日射である.

$$G_{\rm eff} = K_{\rm sf} \times K_{\rm inc} \times G_{\rm mes} \tag{8}$$

3.2 解析データの抽出

屋外計測された I-V カーブデータの中から劣化解析に 適したデータを抽出するために Geff や入射角 AOI 等のパ ラメータを用いて表 1 に示すフィルタリングを行う. な お,日射変動 Gnuc は 1 分値の傾斜面全天日射の変動を, 下付き字の"n"は銘板値を意味する.

Table 1 List of filtering conditions 表1 フィルタリング条件

Filtering target	Formula
Incient angle AOI [deg]	AOI > 50
Ratio of $G_{\rm eff}$ and $I_{\rm sc}$	$0.9I_{\rm sc,n} > I_{\rm sc}/G_{\rm eff}$ $1.1I_{\rm sc,n} < I_{\rm sc}/G_{\rm eff}$
$G_{\rm fluc}[kW \cdot m^{-2} \cdot \min^{-1}]$	$G_{\rm fluc} > 0.1$

## 3.3 基準点の設定と基準 I-V カーブの作成

フィルタリング後, Gen-T平面上のデータ分布に沿って 複数の基準点を設定する. 基準点周辺領域の定義を Gen 方向に 0.025[kW/m<sup>2</sup>], T方向に 2.5[℃]の長さの辺を持つ長 方形で囲まれた領域と定め, 基準候補点を Gen 方向に 0.5~1.1 [kW/m<sup>2</sup>]の範囲で 0.025[kW/m<sup>2</sup>]間隔, T 方向に 0~80[℃]の範囲で 2.5[℃]間隔に格子点状に設定する. そし て各基準候補点の周辺領域内にデータが 3 つ以上存在す るものを基準点とする.

そして,各基準点周辺の I-V カーブデータに対して I-V カーブフィッティングを行う.式(8)に示す one-diode model の 5 つのパラメータであるダイオード理想因子 *n*, 直列抵抗 *R*<sub>s</sub>,並列抵抗 *R*<sub>sh</sub>,光誘起電流 *I*<sub>ph</sub>,逆方向飽和電 流 *l*<sub>0</sub>を差分進化アルゴリズム(DE)<sup>(13)</sup>にて算出する.

$$I = I_{\rm ph} - I_0 \left( \exp \frac{V + R_{\rm s}I}{nV_{\rm t}} - 1 \right) - \frac{V + R_{\rm s}I}{R_{\rm sh}} \tag{8}$$

ここで、 $V_1 = N_s k T / q$ であり、kはボルツマン定数、Tはモジュール温度[K]、qは電荷素量、V、Iは PV モジュールの 電圧・電流である.また、DE の目的関数 Fは(9)式である. 算出した 5 パラメータと実測 I-V カーブの電圧値を式(10) に代入し、実測値との電流の差分を計算する<sup>(14)</sup>.なお、式 (9)の N は 1 つの I-V カーブデータの計測点数であり、式 (10)の W は Lambert 関数である.

$$F = \mininize \ \frac{\sum_{i=1}^{N} f_i}{I_{sc}}$$
(9)

$$f_{i} = \left| I_{i} - \frac{R_{sh}}{R_{sh} + R_{s}} \left( I_{ph} + I_{0} \right) + \frac{V_{i}}{R_{sh} + R_{s}} + \frac{nV_{t}}{R_{s}} W(\theta) \right|$$
(10)

$$\theta = \frac{R_{\rm s}I_0}{nV_{\rm t}} \frac{R_{\rm sh}}{R_{\rm sh} + R_{\rm s}} \exp\left(\frac{R_{\rm sh}}{R_{\rm sh} + R_{\rm s}} \frac{R_{\rm s}(I_{\rm ph} + I_0) + V_{\rm i}}{nV_{\rm t}}\right)$$
(11)

DE は世代数 100, 集団個体数を 20 とし, 最終的に目的 関数 F が最も小さくなる 5 パラメータを抽出する. なお, 線形補間法による I-V カーブを開放電圧まで確実に算出 するために, 基準 I-V カーブの第 4 象限まで電流・電圧値 が必要となる. そこでフィッティング後の I-V カーブの電 圧値を 0[V]から銘板値の開放電圧 Voc の 1.3 倍の値まで 0.1[V]刻みと設定し, DE より算出した 5 パラメータを用 いて, (10), (11)式より電流値を計算する. 図 2 は実際の I-V カーブフィッティングの結果の例である.



Geff=0.6, Geff=1.0 付近の条件で測定されたそれぞれの I-V カーブデータに対し,破線がフィッティング後に算出した I-V カーブである. 図 2 から,フィッティングによる I-V カーブと実測値の I-V カーブとよく一致していることが わかる. 一方で,段付き I-V カーブデータ等はフィッティ ングがうまくいかず,目的関数 Fの値が大きくなる.そこ で,Fが 0.75 以上のフィッティング結果となる場合は解 析に使用しない.これは段付き I-V カーブデータ等を除外 する二重のフィルタリング効果を兼ねている.しかし,解 析するモジュール種によっては計測される I-V カーブに 定常的に段がある場合もあるため,その時は目的関数 Fの 閾値を 2.0 に緩和する.

次に、各基準点の周辺領域内のフィッティング後の I-V

カーブの同電圧値に対する電流値の平均を取ることで各 基準 I-V カーブを作成する.また,基準点は平均に使用さ れた I-V カーブの日射・温度条件の重心に移動させるた め,図3のように少し乱れた格子状の分布となる.



#### 3.4 線形補間法のための3つの基準 I-Vの選択法

データ分布に沿った複数の基準点に対して基準 I-V カ ーブを作成した後,3つの基準 I-V カーブを選択して線形 補間法を複数回実行する.proc.1 では線形補間先を STC へ, proc.2 では基準点の重心に設定するが、両提案手法共に3 つの基準 I-V カーブの選択基準は同じであり, ①全ての基 準 I-V カーブを 1 回以上使用すること. ②全ての基準 I-V カーブの使用回数を最大限均等化すること. そして③最 小の計算回数で①②両条件を満足することである.3 つの 条件の設定目的は,様々な条件で測定された屋外データを 活用することと,各基準点の使用回数に偏りが生じること で一部の測定条件のデータが結果に対して重みを持つこ とがないようにすることである. そこで, はじめに3つの 基準 I-V カーブの組合せを選択する前に, 大幅に結果が外 れると予測される基準 I-V カーブの組合せを予め除外す るフィルタリングを実行する. proc.1 と proc.2 ではフィル タリング条件が異なるため,別途記述する.次に線形補間 を実行する基準 I-V カーブの組合せを選出する. 選出法は フィルタリング後の各基準点の使用可能回数が少ない順 に各基準点の希少度をランク付けし、より希少な基準点を 含む線形補間パターンを優先して採用するアルゴリズム となっている(15).

#### 3.4.1 STC への外挿時の選択法 (proc.1)

proc.1 において,線形補間を行う3つの基準 I-V カーブの組合せを選択する際,STC 周辺に実測 I-V カーブデータはほとんど存在しないため,proc.1 では多くの場合,外挿となる.そこで,外挿後の I-V カーブが銘板値に対して大きく異なるような結果にならないように,予め表 2 に示す条件より3本の基準 I-V カーブの選び方のフィルタリングを行う.

まず,STC への外挿の際,連立方程式(1),(2),(3)より 導かれる重みづけ係数 x1, x2, x3 が外挿の度合いを示す指 標となるので,表 2(a)の条件式に示す上下限値をそれぞれ 設ける.また,実質 2 点間の線形補間にならないように表 2(b)に示すように  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  のそれぞれの絶対値に下限を 設ける.最後に,式(4),(5)より線形補間に用いられる各基 準点の  $I_{sc}$ を代入すると線形補間後の STC 換算された I-V カーブの  $I_{sc}$ も予測できるので銘板値との割合  $DR_{SC}$ \_LIM[%] を算出する.このとき,各基準点の  $G_{eff}$ より STC 換算した 各基準 I-V カーブの  $I_{sc}$ と銘板値との割合をそれぞれ算出 し,その平均値を $\overline{DR_{SC}}$ [%]とする.そして,表 2(c)のよう に  $DR_{SC}$ \_LIM との誤差に上下限値を設けることで,線形補 間によって STC 換算された I-V カーブの  $I_{sc}$ の銘板値に対 する低下率が,基準 I-V カーブの  $I_{sc}$ の低下率を概ね正確 に表せているか確認する.

そして, 選出された複数の線形補間パターンを利用して, 2.1 項で述べた手法より STC 換算した I-V カーブを複数本 算出する.

Table 2 Filtering conditions in the case of proc.1 表 2 proc 1 の線形補間パターン選出条件

		/ 花田/代日
	Filtering target	Formula
(a)	Degree of extrapolation	$\min x_i < -4 \ (i = 1 \sim 3)$ $\max x_i > 5 \ (i = 1 \sim 3)$
(b)	Extrapolation by 2 points	$\min x_i  < 0.5 \ (i = 1 \sim 3)$
(c)	<i>I</i> <sub>sc</sub> value	$\overline{DR_{SC}} - 2 > DR_{SC\_LIM}$ $\overline{DR_{SC}} + 2 < DR_{SC\_LIM}$

#### 3.4.2 基準点の重心への内挿時の選択法 (proc. 2)

**proc.2**では *G*<sub>eff</sub>-*T* 平面上の全基準点の重心が線形補間先 になるので, **proc.1**と異なり内挿であればよい. ゆえに *x*<sub>1</sub>, *x*<sub>2</sub>, *x*<sub>3</sub>がそれぞれ 0 以上 1 以下であればよい.

### 3.5 STC への I-V カーブ換算 (proc. 2)

基準点の重心に線形補間された I-V カーブを 2.2 項で述 べた手法である式(6),(7)より STC 換算する.なお,冬の 期間を除くと温度を低くする方向に補正する場合が多い ため,電圧の正方向に I-V カーブがシフトして短絡電流付 近の I-V カーブデータがなくなる場合がある.この場合は STC 換算した I-V カーブの電圧が最も低い順のデータ 10 点を用いて最小二乗法より傾きを算出し,最も電圧が低い 点の電流値を通る直線の方程式を求めて短絡電流まで I-V カーブを延長する.

## 4. 使用データ

本論文では山梨県北杜メガソーラのモジュール評価ス ペースの単結晶 Siを1種(Mono.1),多結晶 Siを2種(Poly.1, Poly.2)解析した.データの測定条件を表3に,銘板値及び セル数を表4にまとめる.データ期間は2008年10月から 2019年1月までの約10年間である.測定期間中,2012年 2月から10月の間は分光放射計の測定不良が確認された ため解析期間から除外している.

Table 3 List of measured data

圭 3	手測に	データ	
<b>)</b>		/ ./.	

	/-
Measurement target	Data interval [min]
Tilted global irradiance	1
Directed irradiance	1
Module temperature	5
Spectrum data	1
I-V curve	5

Table. 4 Datashe	eet	values	of three	kinds	of	PV	modules

表	:4 解析対象モ	・ジュールの銘材	<b>汝</b> 値
	Mono.1	Poly.1	Poly.2
$P_{\rm m}[{ m W}]$	84.0	167.0	178.6
$I_{\rm sc}[A]$	5.40	7.37	8.15
$V_{ m oc}\left[{ m V} ight]$	22.0	30.5	29.4
FF [%]	70.824	74.267	74.595
$I_{\rm pm}[A]$	4.83	6.87	7.51
$V_{\rm pm}$ [V]	17.42	24.30	23.80
$N_{ m s}$	36	50	48

また,屋内測定を3度実施しており(2010年12月,2015年12月,2015年12月,2019年1月),計測前にモジュールの清掃を行っている.なお,2012年の除外された解析期間内において I-Vカーブトレーサの修理を行っている.

# 5. 解析結果及び考察

## 5.1 両提案手法の1ヶ月分の解析結果

proc.1, proc.2 の両提案手法で実際に STC 換算した I-V カーブのサンプルとして,図4に Poly.2の2014年12月のI-Vカーブ算出結果を示す.

I-V カーブが複数ある理由は多数の基準点から様々な3 つの基準 I-V カーブの組合せを選び算出したためである。 両提案手法とも1ヶ月で数100~1000 個程度のデータから



Fig. 4 Results of I-V curve calculation under the STC 図 4 両提案手法で算出された STC 換算 I-V カーブ

数 10~100 個の基準 I-V カーブが作られ,結果的に算出される STC 換算の I-V カーブはその 3 分の 1 の 20~30 本程度になる. 図 4 の実線の I-V カーブが proc.1,破線の I-V カーブが proc.2 であり,四角点が銘板値である.結果として proc.1 と proc.2 の  $I_{sc}$ 付近は概ね一致している一方で,開放電圧  $V_{oc}$ は proc.2 の方が大きく,最大出力  $P_{m}$ は proc.2 の方が銘板値に近い.また, proc.1 では STC への外挿に基づく電圧のばらつきの影響で動作点付近の I-V カーブに幅があり, proc.2 より結果にばらつきが生じていることを示している.

## 5.2 全データ測定期間における解析結果

図4のI-Vカーブより,各特性値の分布を図5,6,7の ように箱ひげ図にまとめることで経年変化を示すことが 可能となる.なお, RsとRshはSTC 換算されたI-Vカーブ のそれぞれの結果に対して 3.3 項で述べたフィッティン グを再度かけることにより算出している.図5,6,7がそ れぞれ Mono.1, Poly.1,そして Poly.2 の解析結果であり1 段目の左から Pm, Isc, Rs, 2 段目の左から FF, Voc, Rshの



図 5 Mono.1 の各特性値の解析結果



図 7 Poly.2 の各特性値の解析結果

順で並べた. 背面の箱が proc.1, 前面の箱が proc.2 である. 箱の定義は算出結果の上位 75%から下位 25%の範囲であ り, ひげは省略している. また, 銘板値を黒破線で示して いる. 縦軸の範囲は  $P_m$ ,  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ , FF の 4 つの特性値にお いて銘板値の 85%から 110%までの範囲に設定し,  $R_s \ge R_{sh}$ の縦軸は適宜スケーリングした. なお, Poly.1 の I-V カー ブデータは恒常的に段があるため, 式(9)に示す基準 I-V 作 成の際の目的関数の閾値の条件を緩和している.

まず,全体的な傾向を見ると,どの PV モジュールでも 2008 年から 2011 年まで  $I_{sc}$ の低下に起因した  $P_m$ の単調減 少の傾向が見られ,その後は 2013 年から 2019 年まで劣 化の進行が緩やかになっている.一方で  $V_{oc}$ は劣化してい ないが, proc.1 では季節性が見られる. FF は  $P_m$ と異なり 2008 年から 2019 年にかけて緩やかに劣化している. Rs も 同様に徐々に増加している一方で, Rsh は Mono.1, Poly.1 で低下, Poly.2 ではわずかに増加傾向にある. Rsh の値の大 きさは一般的に数 kΩ程度となるが,本論文での結果は数 百Ω程度である.この原因は,フィッティング対象の I-V カーブの Isc に最も近い電流・電圧値から Voc 方向に 20 点 のデータを用いて,線形回帰直線を引いた際の傾きを, I-Vカーブフィッティングする際の Rsh の初期値として設定 しているためである.

また, 箱の大きさより, 1ヶ月間の STC 換算した I-V カ ーブの結果のばらつきを確認すると,線形補間法によって 基準点分布の重心に内挿する proc.2 の方が, 直接 STC に 外挿する proc.1 より小さいばらつきになっている.

### 5.3 両提案手法の開放電圧の差に関する考察

両提案手法の特性値の差をみると、全体的に proc.1 が proc.2 より低く、特に  $V_{oc}$ の差が  $P_m$ の差に影響している ことが確認できる.

図 8 は Poly.2 の 2017 年 1 月および 9 月の解析結果より, 横軸にモジュール温度,縦軸に  $V_{oc}$  を取り,丸点が各月の 基準 I-V カーブの  $V_{oc}$ ,実線が線形回帰直線,三角点が proc.1 の  $V_{oc}$  の算出結果の中央値,菱形点が proc.2 の  $V_{oc}$ の算出結果の中央値,四角点が銘板値の  $V_{oc}$  である.そし て,線形回帰直線の傾きから  $V_{oc}$  の温度係数 TC[V/C]を算 出し結果を "Linear" として,式(7)の温度係数部分を用い て 1 ヶ月分の基準 I-V カーブの温度と開放電圧から TC を 算出した結果の平均値を "proc.2" として図 8 に表記して いる.結果より, proc.1 の  $V_{oc}$  が proc.2 の  $V_{oc}$  より小さくな る原因は 2 つあると考えられる.

1 つ目の原因は温度係数 *TC* の違いである. 実測 I-V カ ーブデータの *V*∞ とモジュール温度から図 8 と同様に毎月





図8 基準 I-V カーブと解析結果の Voc と Tの関係

のTCを算出しても, proc.2 より小さい結果であった.

2 つ目の原因は図 8 に示した "Linear" と proc.2 の TC の 差が温度外挿により拡大されることである.図 8 上側の 1 月では基準 I-V カーブの温度分布は 25[℃]を含んでおり, 内挿となるため "Linear" と proc.2 の TC の違いの影響は 小さい. 一方で図 8 下側の 9 月は基準 I-V カーブの温度分 布は 40~60[℃]であり, 25[℃]に対して外挿となる.この時, proc.1 では回帰直線の TC に基づいて外挿するために, proc.2 との TC の違いが拡大されて 25[℃]付近で  $V_{0c}$  が小 さくなる傾向となる.

#### 5.4 年劣化率の検証

図 5, 6, 7に示した箱ひげ図の特性値と最大出力動作点 電流・電圧の *I*<sub>Pm</sub>, *V*<sub>Pm</sub>を加え, 各月の解析結果の中央値を 結ぶ線形回帰直線を引き, その傾きから表 5 に示す年劣 化率[%/year]を算出した. なお, 特性値は銘板値に対する 割合, *R*<sub>s</sub>, *R*<sub>sh</sub>は 2008 年 10 月の解析結果の中央値に対す る割合として[%]としている. 年劣化率が負符号の場合は 低下していることを意味する. 結果として, 結晶系 Si の PVモジュールでは電流の低下に起因した-0.4[%/year]程度 の *P*<sub>m</sub> の劣化傾向が確認された. 電流の低下要因として, ガラス表面の汚れや封止剤の黄変等による太陽光の透過 率の低下の可能性があげられる.

次に, I-V カーブの形状を表す FF と抵抗成分より, Rs はどのモジュール種でも 2.5[%/year]程度増加する一方で, Rsh は低下,増加のパターンが確認された. Rsh が低下する Mono.1 と Poly.1 では FF は 0.2%程度, Rsh が増加している Poly.2 では FF は 0.1%程度の年劣化率となった.

最後に両提案手法の年劣化率の違いに注目すると,単結 晶・多結晶の両方において両提案手法の年劣化率は表5か ら概ね同じであることがわかった.

## 5.5 屋内測定結果との比較

精度検証のために,屋内測定結果と同時期の解析月の劣 化解析結果の中央値との相対誤差を"Error"として式(12) より算出し,結果を表 6, 7, 8にまとめる."Calculated"が 解析結果,"Indoor"は屋内測定値を意味する.結果が正符 号の場合は過大推定を意味する.

$$Error = \frac{Calculated - Indoor}{Indoor} \times 100 \,[\%]$$
(12)

proc.1 は屋内測定結果に対して過少推定傾向であり, proc.2 は逆に過大推定傾向であることがわかる.特性値別

Ι	able	e. 5	A	Annual	deg	grad	atio	ı rat	es	of	three	kind	s of	f PV	mod	ules

表5 解析した3種のPVモジュールの年劣化率

		$P_{\rm m}$	$I_{\rm sc}$	$V_{\rm oc}$	FF	I <sub>Pm</sub>	$V_{\rm Pm}$	$R_{\rm s}$	$R_{ m sh}$
M	proc.1	-0.27	-0.17	0.08	-0.19	-0.24	-0.03	2.72	-1.84
WOIIO. I	proc.2	-0.38	-0.16	0.01	-0.23	-0.24	-0.15	3.34	-1.58
D 1 1	proc.1	-0.32	-0.12	-0.03	-0.18	-0.18	-0.16	2.38	-3.82
Poly.1	proc.2	-0.39	-0.13	-0.06	-0.19	-0.22	-0.17	2.30	-3.74
Dalar 2	proc.1	-0.48	-0.31	-0.09	-0.11	-0.30	-0.21	2.65	2.16
Poly.2	proc.2	-0.49	-0.32	-0.06	-0.12	-0.32	-0.18	2.92	2.61

衣 0 Mono.1 0 座门锁足 C 同旋来 1 伍 0 旧 利 嵌 座[/0]									
		$P_{\rm m}$	Isc	Voc	FF				
	2010/12	-1.76	-0.08	-0.95	-0.44				
proc.1	2015/12	-0.10	0.75	-0.54	0.21				
	2019/01	-2.64	-1.62	-0.45	-1.55				
	2010/12	1.03	0.16	0.39	0.68				
proc.2	2015/12	2.36	0.51	0.30	1.66				
	2019/01	-0.23	-0.31	0.40	-0.26				

Table. 6 Accuracies of both method in the case of Mono.1 表 6 Mono 1 の屋内測定と両提案手法の相対認差[%]

Table. 7 Accuracies of both method in the case of Poly.1 表 7 Poly.1 の屋内測定と両提案手法の相対誤差[%]

		$P_{\rm m}$	Isc	$V_{\rm oc}$	FF
	2010/12	-4.07	-0.44	-1.44	-2.16
proc.1	2015/12	-1.98	0.46	-0.83	-1.61
-	2019/01	-5.11	-1.89	-0.98	-2.56
	2010/12	-0.19	0.61	-0.22	-0.66
proc.2	2015/12	0.98	1.34	-0.04	-0.20
	2019/01	-3.53	-1.54	-0.40	-1.69

Table. 8 Accuracies of both method in the case of Poly.2 素 8 Poly 2 民内測定 k 声想安毛社の担当部主[1]

衣 o POIY.2 座的侧足 C 阿淀系于伝 O 相对 訣 左 [76]								
		$P_{\rm m}$	Isc	$V_{\rm oc}$	FF			
	2010/12	-3.09	-0.73	-1.54	-0.69			
proc.1	2015/12	-0.88	1.03	-1.22	-0.58			
	2019/01	-4.18	-0.73	-1.37	-2.06			
	2010/12	0.99	0.07	-0.31	1.16			
proc.2	2015/12	2.09	1.58	-0.07	0.57			
	2019/01	-1.66	-0.54	-0.38	-0.79			

に見ると、 $I_{sc}$ および  $V_{oc}$ の相対誤差はどちらの手法でも± 2%程度、FFは-3~2%程度、 $P_{m}$ は proc.1 において-5~2%程 度、proc.2 において-3.5~2.5%程度の誤差となった.特に、 Poly.1 の場合は他の2種と比較してもより過少推定の傾向 にあるが、これは式(9)の閾値を他の2種と比べて緩和し た影響で、段付きの I-V カーブ等を含めて解析を行った結 果 FF が低下し、 $P_{m}$ の過少推定につながったことが原因 と考えられる.

Poly.1 の誤差に関する考察として,図9に2013年,2016年,2019年のほとんど同じ日射・温度条件で測定された実測I-Vカーブデータを示す.破線が2013年,鎖線が2016年,実線が2019年のI-Vカーブデータである.図9より,2013年時点では段付きはほぼないが,2016年になると12[V]付近で小さな段付きが見られる.そして2019年には13[V]付近でより大きな段付きとなっていることが見て取れる.これらの傾向から,I-Vカーブの段は経年で大きくなっていることがわかる.

Poly.1 は 2019 年の屋内測定時においても段付きは確認 されているが, 測定前に清掃が行われているため, 段付き の程度は 2013 年の I-V カーブと概ね同じであった. その ため, 経年で PV モジュール表面に堆積した汚れが原因で, PV モジュールの出力が下がった結果, 屋外解析結果の方 が過少推定し,劣化を大きく算出している可能性がある.



図9段付きが進行した実測 I-V カーブ

I-V カーブの段付きの原因の特定は今後の課題である.

#### 5.6 proc.1, proc.2の総合的な比較

両提案手法の解析結果における違いはばらつきの大き さと、出力の差の2点である.1つ目のばらつきの大きさ は線形補間法の外挿・内挿の影響であり、基準点分布の重 心に内挿できる proc.2の方が小さいばらつきとなった.2 つ目に、両提案手法の出力差は主に電圧起因であり、 proc.1では季節性も大きくなっており、proc.2の方が屋内 測定結果と近い値となった.以上の議論から、結晶系Siの PV モジュール種の解析において、精度向上を見込んで導 入した日射・温度変換式を適用した proc.2 が優れている ことがわかる.一方で、proc.1 はバンドギャップエネルギ ーのように太陽電池の種類に依存する定数を含む変換式 を使用しておらず、線形補間法のみで STC 換算した I-V カーブを複数算出するため、proc.2 よりも計算手順が少な いシンプルな手法であるが、年劣化率については proc.2 と ほぼ同等の結果が得られた.

## 6. まとめ

本論文では、屋外データより多数の基準 I-V カーブを作成し、これらを用いて STC 換算された I-V カーブを多数 作成することにより劣化解析を行う手法を 2 種類提案した. 両提案手法共に算出 I-V カーブから *P*mのみならず *Isc*, *Voc* などの特性値に加えて *Rs*, *Rsh*の推移も解析可能である ことを示した.

両提案手法の違いとして,STC へ直接線形補間する proc.1 は外挿が多くなるためにばらつきが大きく,電圧の 温度外挿により出力を過少推定する傾向にある.一方で 基準点分布の重心へ線形補間してから STC 換算する proc.2 では,結果のばらつきは proc.1 より小さく,出力も 屋内測定結果により近い解析結果となった.また,年劣化 率の算出結果は両提案手法共に大きな違いはなく,Pmの 年劣化率が約-0.4%/year であったのに対して,Rsの増加率 は約 2.5%/year であった.

# 7. 謝辞

本研究の一部は NEDO「高性能・高信頼太陽光発電の発 電コスト低減技術開発」プロジェクトの支援を受けて実施 しており,関係各位に感謝する.

# 8. 参考文献

- D.C. Jordan, C. Deline, S.R. Kurtz, G.M. Kimball and M. Anderson, Robust PV Degradation Methodology and Application, IEEE Journal of Photovoltaics, 8(2), 525-531(2018).
- D. Myers, Evaluation of the performance of the PVUSA rating methodology applied to dual junction PV technology: preprint, American Solar Energy Society Conf (Jul. 2009), 1-8, Buffalo, USA.
- D.L. King, W.E. Boyson, J.A. Kratochvil, Photovoltaic Array Performance Model, Sandia Report: SAND2004-3535, (2004), Sandia National Laboratories, New Mexico.
- Rdtools: An Open Source Python Library for PV Degradation Analysis (accessed Jan. 5th, 2019),

https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/71468.pdf

- E. Hasselbrink et al., Validation of the PVLife Model Using 3 Million Module-Years of Live Site Data, 39th PVSC Conf.(June 2013), 7-12, Tampa, FL, USA.
- Y. Tsuno and Y. Hishikawa, Comparison of Curve Correction Procedures for Current-Voltage Characteristics of Photo-voltaic Devices, J.Appl.Phys, 51, 1-3(2012).
- J.Y. Ye, T. Reindl, A.G. Aberle and T.M. Walth, Performance Degradation of Various PV Module Technologies in Tropical Singapole, IEEE Journal of Photovoltaics, 4(5), 1288-1294(2014).
- T. Takashima, Behavior of Interconnect-Failed PV Modules Under Standard Test Conditions and Actual Operation Conditions, IEEE Journal of Photovoltaics, 8(6), 1761-1766(2018).
- 9) Y. Tsuno, Y. Hishikawa, and K. Kurokawa, Modeling of the I-V curves of the PV modules using linear interpolation / extrapolation, Solar Energy Materials and Solar Cells, **93**(6), 1070-1073(2009).
- 10) Y. Hishikawa, T. Takenouchi, M. Higa, K. Yamagoe, and H. Oshima, Translation of Solar Cell Performance for Irradiance and Temperature From a Single I-V Curve Without Advance Information of Translation Parameters, IEEE Journal of Photovoltaics, 9(5), 1195-1202(2019).
- 11) IEC60904, 2nd edition, Photovoltaic devices -Part2: Requirements for reference solar devices, 8-9(2007), IEC, Switzerland.
- 12) T. Yamada, H. Nakamura, T. Sugiura, and K. Sakuta, Reflection Loss Analysis by Optical Modeling of PV Module, Solar Energy Materials and Solar Cells, 67(1), 405-413(2001).
- 13) R. Stone, K. Price, Differential Evolution A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces, Journal of Global Optimization, 11(4), 341-359(1997).
- 14) Sandia, Parameter Estimation for Single Diode Models of Photovoltaic Modules (accessed Jan. 5th, 2019), https://prodng.sandia.gov/techlib-noauth/access-control.cgi/2015/152065.pdf

15) Y. Izumi, Y. Ueda, Calculation of Degradation Rates of PV Modules Using Outdoor Measured I-V Curves and Multi Reference Linear Interpolation/Extrapolation Method, 46th PVSC Conf. (June 2019), 855-860, Chicago, IL, USA.