

# 太陽電池モジュールの屋外出力推定法 及びそれを用いた耐久性評価

Methods for predicting outdoor performance of PV modules  
and evaluating durability

筒井 淳<sup>\*1</sup>  
Jun TSUTSUI

上 迫 浩 一<sup>\*2</sup>  
Koichi KAMISAKO

黒川 浩 助<sup>\*3</sup>  
Kosuke KUROKAWA

## Abstract

This paper discusses methods for predicting outdoor performance of various photovoltaic (PV) modules and evaluating durability. The content of this method is to compare the measured value using the IV curve tracer (MP-160) and the predictive value, which is  $P_{max}$ ,  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ , using the linear interpolation method or another method. It is known that the linear interpolation method has high calculation accuracy, compensating the cell temperature or the solar irradiance in indoor test. As a result of making use of this characterization, the behavior that the degradation progresses on some PV modules has been confirmed by the difference between the predictive value and the measured value.

キーワード：屋外性能, 直線補間法, 耐久性

Key Words: Outdoor performance, Linear interpolation method, durability

## 1. はじめに

太陽電池の出力性能は、基準状態 (Standard Test Condition) の下で行うことが IEC 及び JIS 規格で定められている。しかし屋外の動作環境は、日射強度が絶えず変化し  $1\text{kW/m}^2$  になることは快晴日でかつ南中時のときのみである。一方で、太陽電池の温度は夏場で約  $70\sim 80^\circ\text{C}$  に達し、屋内測定時の温度である  $25^\circ\text{C}$  とは約  $50^\circ\text{C}$  の差がある。また分光放射スペクトルにおいても、AM1.5 は年間の特定の時間帯でしか満たすことはない。そのため、STC 時の性能と屋外性能の間には大きなギャップがあることから、屋外性能を正確に予測する技術が求められている。そこで本論文は、屋外性能を予測するための手法として、直線補間法を用いた。本手法は、産総研の菱川・津野らが提唱<sup>(1)</sup>する手法で、屋内測定の推定精度が高く、数種類の太陽電

池に適用可能であることを実証している。本手法は、予め用意した4つの条件のリファレンス IV カーブ (①高日射・高温度、②高日射・低温度、③低日射・高温度、④低日射・低温度) と、日射強度 (或いは実測した被測定太陽電池の短絡電流) と太陽電池動作温度を用いて算出可能である。筆者らは本手法を用い、設置して間もない屋外出力結果を基に推定を行った結果、出力推定誤差の標準偏差が  $0.5\%$  以内であることを示した<sup>(2)</sup>。筆者らは、それから4年が経過した太陽電池モジュールに対して同様の手法で推定を行い、推定値と実測値の差が推定精度より大きいとき、太陽電池の劣化が進行していると判断できると考えて解析を進めた。

## 2. 実験方法

屋外性能を推定するにあたり、本実験では東京農工大学小金井キャンパス 3 号館屋上に設置された単枚評価システムの実験データを実測値として使用した。本実験サイトは複数の太陽電池が傾斜角度  $30^\circ$ 、方位真南  $0^\circ$  に並べられており、2004 年 10 月 1 日から 2009 年 3 月 31 日までの間、継続して IV カーブを計測している。なお計測は 5 時から 18 時まで 1 分間隔で行っている。そのため 1 日のデータ数は 1 モジュールあたり 780 個で、年間にと

<sup>\*1</sup> PV システム研究会 会員  
(〒338-0836 さいたま市桜区町谷 1-11-11)  
E-mail: jun125@kb3.so-net.ne.jp

<sup>\*2</sup> 東京農工大学 工学府 准教授

<sup>\*3</sup> 東京工業大学 総合研究院 特任教授  
(原稿受付: 2009 年 8 月 19 日)

284,700 個にも昇る。しかしそれらのデータの中には、前方の建物のビル影や、晴天日で日射強度は十分確保されているが、前日の雪でモジュールに雪が覆い、全く発電していなかったデータも含まれる。よって、そのようなノイズの原因となるデータは予め除去した。今回、予測に用いた太陽電池モジュールは、単結晶 Si と多結晶 Si、化合物型とヘテロ接合型である。また、計測に用いた IV カーブトレーサは英弘精機社製の MP-160 を使用し、チャンネル切替機を用いて、各モジュールをほぼ同時に計測している。

### 3. 推定手法

#### 3.1 最大出力 ( $P_{max}$ ) の推定

最大出力 ( $P_{max}$ ) の推定は直線補間法を用いた。本手法の作業手順を簡単に説明する。Fig.1～3 内に記載している①～④はリファレンス IV カーブである。Fig.1 と 2 は各々同じ日射強度で、測定時の温度が異なる IV カーブを並べた図である。最初に①と②の IV カーブから温度補間を行い、高日射で任意の温度のときの IV カーブを算出し、これを⑤とする (Fig.1)。次に③と④の IV カーブから低日射で任意の温度のときの IV カーブを先程と同様に温度補間して、これを⑥とする (Fig.2)。⑤と⑥は各々日射強度が異なるが、同一温度のときの IV カーブである。よって最後に、この 2 つの IV カーブを任意の日射強度へ照度補間することで、任意の日射強度でかつ任意の温度のときの IV カーブが完成する (Fig.3)。 $P_{max}$  はこのとき完成した IV カーブを PV カーブへ変換したときの極大値とする。

温度補間および照度補間の式は(3.1)、(3.2)式で表わされる。なお、照度補間式中の照度  $E$  は太陽電池の短絡電流に置き換えて使用することもある。

#### ■ 温度補間式

$$V_{T_3}(I) = V_{T_1}(I) + \frac{T_3 - T_1}{T_2 - T_1} \cdot (V_{T_2}(I) - V_{T_1}(I)) \quad (3.1)$$

#### ■ 照度補間式

$$I_{E_3}(V) = I_{E_1}(V) + \frac{E_3 - E_1}{E_2 - E_1} \cdot (I_{E_2}(V) - I_{E_1}(V)) \quad (3.2)$$

$V_T(I)$ : 温度 ( $T$ ) における V-I カーブ点

$I_E(V)$ : 照度 ( $E$ ) における I-V カーブ点

$T_1$ : 低温度  $E_1$ : 低日射強度

$T_2$ : 高温度  $E_2$ : 高日射強度

$T_3$ : 任意温度  $E_3$ : 任意日射強度

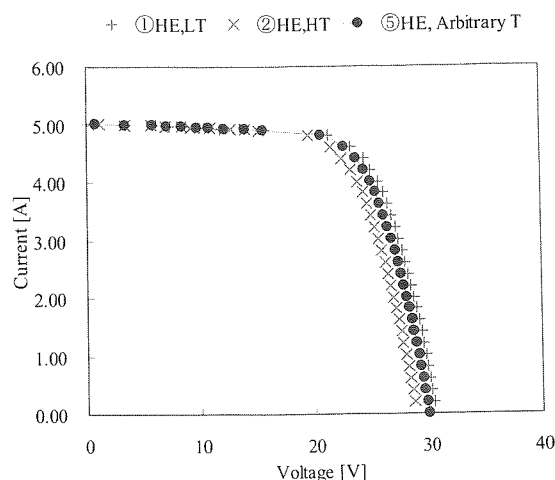


Fig. 1 Linear interpolation to compensate for the temperature on the High irradiance

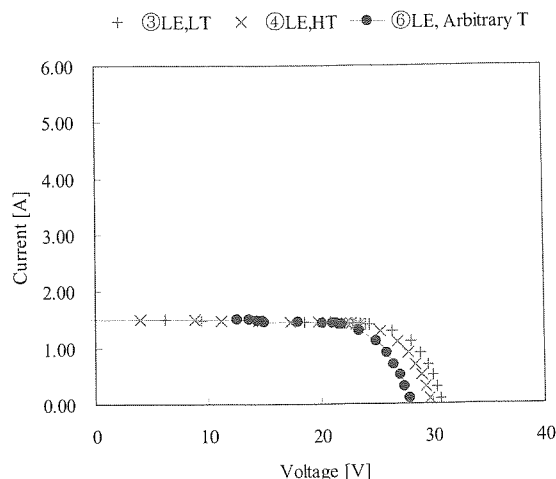


Fig. 2 Linear interpolation to compensate for the temperature on the Low irradiance

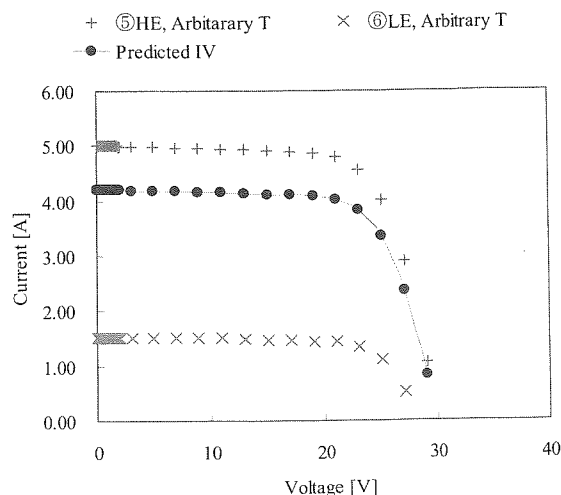


Fig. 3 Linear interpolation to compensate for the irradiance

### 3.2 最大出力 ( $P_{max}$ ) 以外の推定

今回、耐久性を評価するにあたって  $P_{max}$  以外の  $V_{oc}$  や  $I_{sc}$ 、 $FF$  に着目する必要がある。ここで  $V_{oc}$  の推定を直線補間法で行う場合、リファレンスとする低照度の IV カーブがダイオードの順方向領域まで掃引していないと  $V_{oc}$  の推定は困難である。Fig.4 にその一例を示す。Case A の低照度時の IV (Ref. IV-2) は 27V 以上を掃引していないため、それ以上の照度補間をすることはできない。一方、Case B は順方向電流まで掃引しているため、Case A とは異なり 27V 以上の照度補間が可能となる。今回、屋外測定結果を推定するために用いるリファレンス IV カーブは設置初期に測定した IV カーブであるが、使用した IV カーブトレースが順方向領域まで掃引する方式ではないため、 $V_{oc}$  を推定できない。よって  $V_{oc}$  の推定は新たに (3.3) 式を用いた。なお、(3.3) 式の  $\beta$  は  $1^\circ\text{C}$  変化したときの絶対変化量  $\text{V}/^\circ\text{C}$  ではなく、 $25^\circ\text{C}$  から  $1^\circ\text{C}$  変化したときの相対変化率  $\%/^\circ\text{C}$  で表している。

$$V_{oc} = V_{oc(0)} \left[ 1 + \beta(T - T_0) \right] \left[ 1 + \delta \ln \left( \frac{E}{E_0} \right) \right] \quad (3.3)$$

$V_{oc(0)}$  : STC 時の  $V_{oc}$  [V]

$E$  : 日射強度 [ $\text{kW}/\text{m}^2$ ]  $E_0$  :  $1.0 [\text{kW}/\text{m}^2]$

$T$  : モジュール温度 [ $^\circ\text{C}$ ]  $T_0$  :  $25 [^\circ\text{C}]$

$\beta$  : 温度係数 [ $\%/^\circ\text{C}$ ]  $\delta$  : 照度係数 [%]

次に  $I_{sc}$  の推定は (3.4) 式を用いた。

本式中の  $\alpha$  は  $\beta$  と同様、相対変化率で表している。

$$I_{sc} = \frac{E}{E_0} \cdot I_{sc(0)} \cdot \{ 1 + \alpha(T - T_0) \} \quad (3.4)$$

$I_{sc(0)}$  : STC 時の  $I_{sc}$  [A]  $\alpha$  : 温度係数 [ $\%/^\circ\text{C}$ ]

過去に検証した際、スペクトルミスマッチ係数を導入していない (3.4) 式は、推定誤差の標準偏差が約 1.0% であった。一方、ミスマッチ係数を代入し、同時に近接する太陽電池の短絡電流から日射強度  $E$  を計算することで算出した  $I_{sc}$  は、推定精度を (3.4) 式の半分に抑えることができた<sup>(3)</sup>。しかし今回、近接する太陽電池自身が長期間の屋外暴露によって劣化している可能性が有るため、今回は推定精度が低下するが、(3.4) 式を用いて  $I_{sc}$  の推定を行った。最後に曲線因子  $FF$  は直線補間法で算出した  $P_{max}$  と (3.3) 式と (3.4) 式の  $V_{oc}$ 、 $I_{sc}$  から逆算した。

## 4. 実験結果

### 4.1 データ抽出条件

今回、評価対象のデータは、下記 4 条件を満たしたものを使用する。

- 条件① : 日射強度  $0.8 [\text{kW}/\text{m}^2]$  以上
- 条件② : 太陽高度 15 度以上  
但し 1, 2, 11, 12 月の午前中は 25 度以上
- 条件③ : 日射変動  $\pm 5 [\%]$  以内
- 条件④ : 温度変動  $\pm 5$  度以内

条件①を設定した理由は、高日射である方が、長期間の屋外暴露によってモジュールの直列抵抗が増大した場合に出力低下を判断し易いと考えたためである。条件②は、本実験サイトの東西に木々や、南東に高い建物が在ることから、日影の発生しない太陽高度が 15 度以上のデータを有効とした (冬は 25 度以上に設定)。条件③は、日射計の応答性を考慮したもので、本サイトの日射計の応答速度が約 17 秒で有るため、急激な日射変動が起きた場合に即座に追従することが困難である。そのため、ある時間帯のデータの前後 5 分で計測した日射強度が  $\pm 5 \%$  以上である場

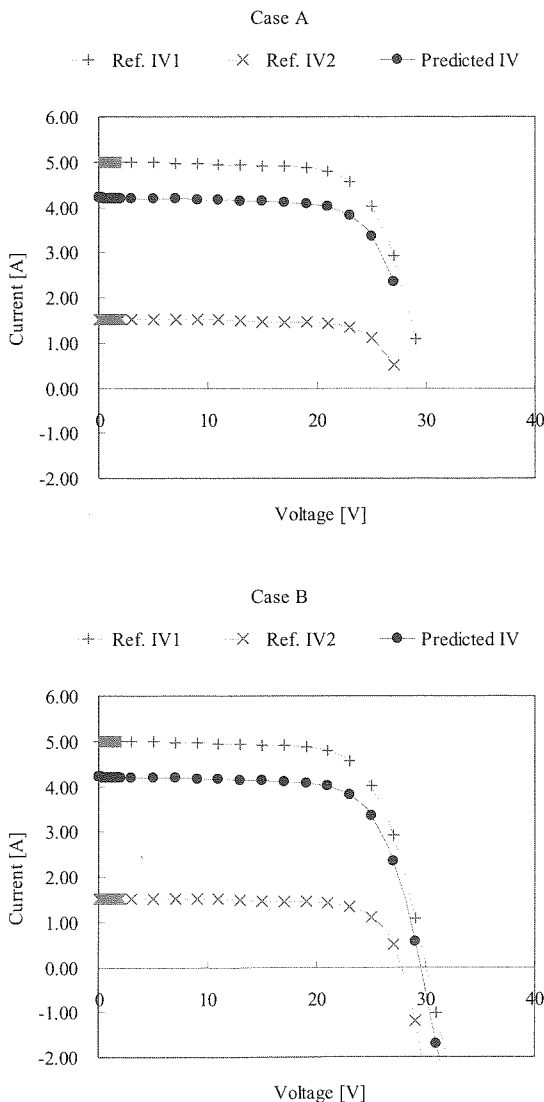


Fig. 4 Issue to predict  $V_{oc}$  using the linear interpolation method

合、その時間帯のデータを省いた。条件④は、条件③と同様の考えに基づいて設定した。特に 2007 年 7 月以降に、裏面温度を測定している熱電対からの信号が時折不安定となったため、そのようなデータを排除するために設定した。条件①-④の内、②-④は日影や計測機の測定精度を考慮して設定したもので、本サイトのような評価サイトにおいて、ノイズの可能性のあるデータの排除は必要不可欠である。

#### 4.2 出力推定評価

本節では、(3.1)式から(3.4)式までの推定精度を検証した。検証期間は、本実験サイトを立ち上げた直後の 2004 年 10 月 1 日から 2005 年 9 月 30 日までの 1 年間のデータである。(4.1)式は、推定精度を検証するための式で、推定値と実測値の差を実測値で割った、つまりは相対誤差を示している。

$$\text{相対誤差} = (\text{推定値} - \text{実測値}) / \text{実測値} \quad (4.1)$$

(4.1)式の相対誤差を Fig. 5-8 に纏めた。ヒストグラムの横軸は相対誤差を表し、右にいけば過大評価（推定値 > 実測値）、左にいくと過小評価（推定値 < 実測値）を表す。どのヒストグラムをみても、ヒストグラムの中心が ±1% 以内にある。推定誤差の平均値と標準偏差を纏めた Table.1 をみると、 $P_{max}$  の誤差平均は 4 種類のモジュール全てが ±1% 内に収まり、また標準偏差 ( $\sigma$ ) は最大で 1.5% であった。また曲線因子  $FF$  や最大出力動作電圧  $V_{pm}$ 、最大出力動作電流  $I_{pm}$  についても同様の結果であった。よって、直線補間法と(3.3)式と(3.4)式を組み合わせれば、c-Si や poly-Si といった従来型の太陽電池から、化合物型やヘテロ接合型の太陽電池に至るまで、屋外測定でも屋内測定と同様、 $\sigma = 1.5\%$  以下の高精度な推定が可能であることを示せた。

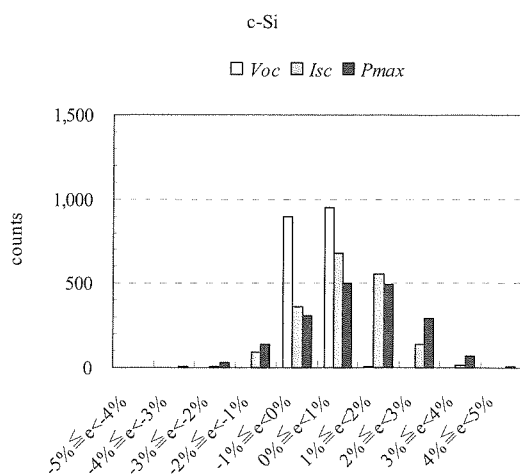


Fig. 5 Investigation of the linear interpolation method on c-Si module

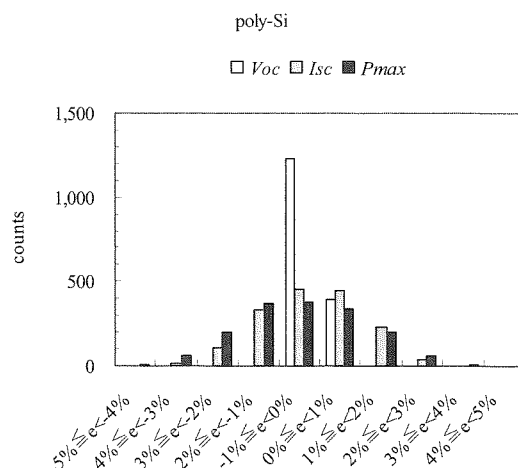


Fig. 6 Investigation of the linear interpolation method on poly-Si module

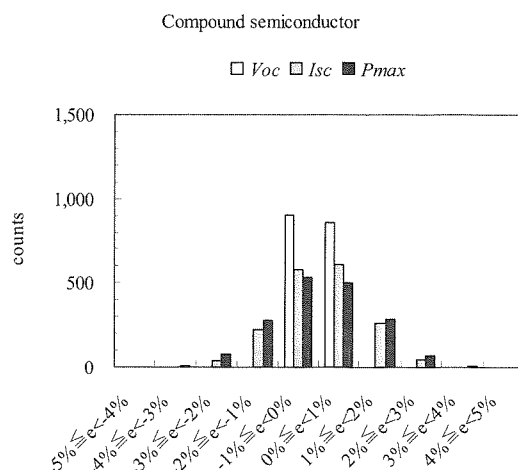


Fig. 7 Investigation of the linear interpolation method on compound semiconductor solar module

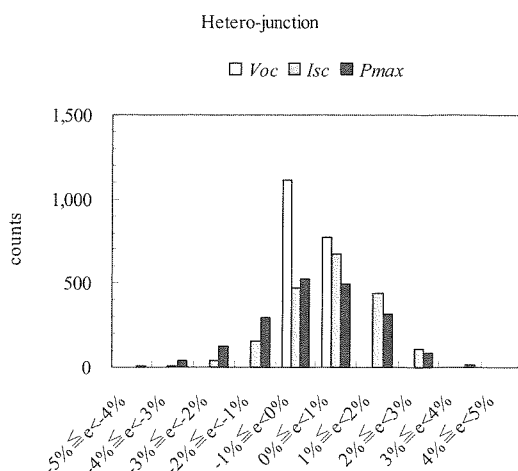


Fig. 8 Investigation of the linear interpolation method on hetero-junction solar module

Table.1 Investigation of the calculation accuracy at 4 kinds of modules

| Module                 | Ave. / Std. | $V_{oc}$ | $I_{sc}$ | $P_{max}$ | $V_{pm}$ | $I_{pm}$ | FF    |
|------------------------|-------------|----------|----------|-----------|----------|----------|-------|
| c-Si                   | Ave.        | 0.0%     | 0.7%     | 0.8%      | 0.5%     | 0.3%     | 0.2%  |
|                        | Std.        | 0.4%     | 1.0%     | 1.3%      | 0.8%     | 1.3%     | 0.5%  |
| poly-Si                | Ave.        | -0.2%    | -0.2%    | -0.5%     | -0.1%    | -0.4%    | -0.1% |
|                        | Std.        | 0.3%     | 1.2%     | 1.5%      | 1.2%     | 1.4%     | 0.6%  |
| Compound semiconductor | Ave.        | 0.0%     | 0.0%     | 0.0%      | 0.2%     | -0.2%    | -0.1% |
|                        | Std.        | 0.3%     | 1.0%     | 1.2%      | 0.9%     | 1.3%     | 0.4%  |
| Hetero-junction        | Ave.        | 0.0%     | 0.4%     | -0.1%     | -0.2%    | 0.1%     | -0.5% |
|                        | Std.        | 0.2%     | 1.1%     | 1.3%      | 0.6%     | 1.2%     | 0.4%  |

#### 4.3 耐久性評価<sup>(4)</sup>

前節では、設置後1年以内の屋外性能を、モジュールの種類に依らず、高精度に予測できる事を確認した。本節では、設置し測定を始めた2004年10月から2年置きに、2006年10月、2008年10月のデータを用いて同様の推定を行った。評価モジュールは前節と同様、4種類で、Fig.9-12に各モジュールの年度毎の相対誤差平均を示す。Fig.9に示すc-Siは、各年とも±1%程度に収まる。これはTable.1に示した標準偏差がモジュールの種類によらず1.5%以内で有ったことを考慮すると、その変動は推定誤差の範疇と言える。よって4年間の屋外暴露において、c-Siは性能劣化をしていないと考えられる。一方、Fig.10のpoly-Siは2008年のFFの誤差が2.6%と大きく、劣化初期の可能性がある。またFig.11に示す化合物型は2006、2008年と誤差が年々拡大する傾向が顕著である。また2008年におけるFFの誤差が3.4%で有ることから、poly-Siより性能劣化が進行していると考えられる。Fig.12に示すヘテロ接合型においては、 $I_{sc}$ の誤差が1.6%と大きく、2004年ときの0.2%と比べると相対誤差が拡大していることから、直列抵抗の増大などが考えられる。ここで、相対誤差の増大が、実際のIVカーブにどのような変化を及ぼしているのかを調査するため、2004年と2008年の化合物型のIVカーブの比較を行った。IVカーブは(4.2)式の等価回路で表現できることが知られている。ここで $I_{ph}$ は電流源、 $I_d$ はダイオード順方向電流、 $R_s$ は直列抵抗、 $R_{sh}$ は並列抵抗である。

$$I = I_{ph} - I_d - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (4.2)$$

また $I_d$ は(4.3)式で表される。 $I_0$ は逆方向飽和電流である。

$$I_d = I_0 \left[ \exp \left\{ \frac{q(V + R_s I)}{nkT} \right\} - 1 \right] \quad (4.3)$$

端子間電圧 $V=0$ のときの電流は短絡電流 $I_{sc}$ であるため(4.2)式は以下の式となる。

$$I_{ph} = I_{sc} + I_0 \left\{ \exp \left( \frac{qR_s I_{sc}}{nkT} \right) - 1 \right\} - \frac{R_s I_{sc}}{R_{sh}}$$

a 項
b 項
c 項

ここでa項は、それ以外のb項とc項に対して十分に大きい値のため、 $I_{ph}$ は $I_{sc}$ と等価になる。(4.2)式に $I_{ph}$ を代入すると、(4.4)式になる。

$$I_{sc} - I = I_0 \left[ \exp \left\{ \frac{q(V + R_s I)}{nkT} \right\} - 1 \right] + \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (4.4)$$

(4.4)式を縦軸にして2004年10月17日と2008年10月2日のIVカーブを示したのがFig.13である。両者の測定時の日射強度(0.98kW/m<sup>2</sup>)と裏面温度(55.6℃)は同一である。これらのIV-カーブは暗状態におけるDark-IVを模擬している。一般的に、対数関数の30-40V付近の傾きは、ダイオード因子 $n$ を表し、またその直線の切片は逆方向飽和電流 $I_0$ を表す<sup>(5)</sup>。Table.2は2004年と2008年の各特性値の変化率を示しているが、 $P_{max}$ の次に低下しているのがFFである。よって、FFの低下は指数関数の立ち上がり電圧(拡散電位)が小さくなったことが原因で、それは(4.4)式の指数関数を構成している逆方向飽和電流 $I_0$ 、或いは直列抵抗 $R_s$ の増大と推定される。

Table.2 Percentage change of each parameter

| $V_{oc}$ | $I_{sc}$ | $P_{max}$ | FF    | $V_{pm}$ | $I_{pm}$ |
|----------|----------|-----------|-------|----------|----------|
| -0.9%    | -0.2%    | -5.0%     | -4.0% | -3.6%    | -1.5%    |

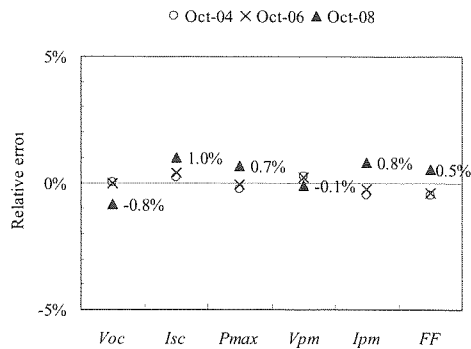


Fig.9 Relative error of each parameter on c-Si module

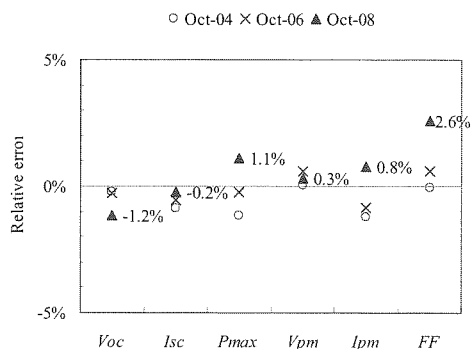


Fig.10 Relative error of each parameter on poly-Si module

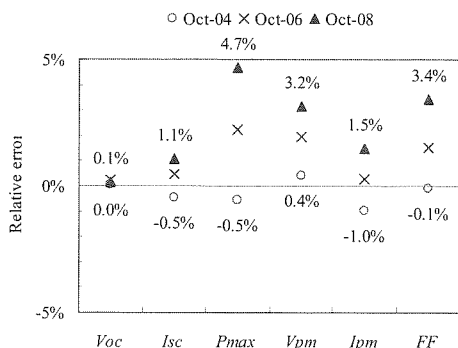


Fig.11 Relative error of each parameter on compound semiconductor solar module

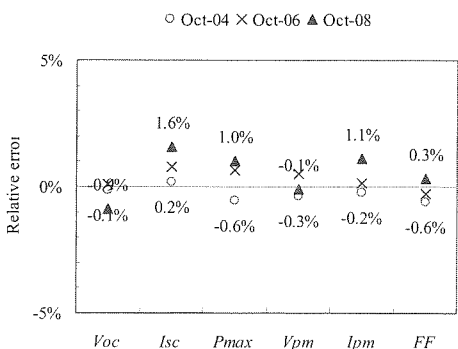


Fig.12 Relative error of each parameter on hetero-junction solar module

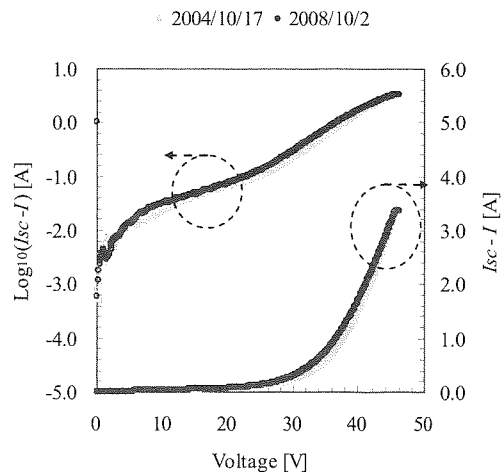


Fig.13 Comparison of IV curve measuring in 2004 and 2008

## 5. まとめ

$P_{max}$ を推定する直線補間法と、 $V_{oc}$ や $I_{sc}$ といったそれ以外の特性パラメータを推定する手法を組み合わせ、屋外性能の推定を行った結果、高い精度で予測できることが確認できた。この特徴を生かして、耐久性評価を行った結果、設置後4年が経過した一部の太陽電池モジュールにおいて性能劣化が確認された。IVカーブの比較を行った結果、 $FF$ の劣化は主に逆方向飽和電流、或いは直列抵抗の増大である可能性があると推定された。この結果から、1.5%を超えるレベルの性能劣化を早期に発見するツールとして本手法は有用であり、今後の性能劣化の早期発見に貢献できると考える。

## 参考文献

- 1) Y. Tsuno, Y. Hishikawa and K. Kurokawa, *Translation equations for temperature and irradiance of the I-V curves of various PV cells and modules*, 4<sup>th</sup> WCPEC (2006), Hawaii
- 2) J. Tsutsui, K. Kurokawa, *Modeling the performance of several photovoltaic modules*, 4<sup>th</sup> WCPEC (2006), Hawaii
- 3) J. Tsutsui, K. Kurokawa, *Investigation to estimate the short circuit current by applying the solar spectrum*, Prog. Photovolt: Res. Appl, 16:205-211 (2007)
- 4) C.R. Osterwald, J. Adelstein, J.A. del Cueto, B. Kroposki, D. Trudell, and T. Moriarty, *Comparison of degradation rates of individual modules held at maximum power*, IEEE (2006)
- 5) 国岡昭夫, 上村喜一, 新版 基礎半導体工学(1996), 朝倉書店