実用的 I-Vカーブ作成法を使った太陽電池日射計

正 員 伊 賀 淳 (四国総研)

Solar Irradiance Meter using Practical I-V Curve Construction Method

Atsushi Iga, Member (Shikoku Research Institute)

The increasing household installation of photovoltaic generation system is creating a strong demand for equipment that enables accurate measurement and evaluation of the electric output of solar module(array). In order to fabricate such equipment, it is necessary to develop an inexpensive and highly accurate solar irradiance meter as well as excellent evaluation and diagnostic software.

I constructed a solar irradiance meter on the basis of the above requirements by applying the widely accepted principle of the Practical I-V Curve Construction Method which I developed.

The results of my study indicate that a simple, general purpose and highly accurate solar irradiance meter can be developed.

キーワード：太陽光発電システム，I-Vカーブ，日射計，日射強度，放射照度

1. まえがき

太陽光発電システムの住宅への普及とともに、実際に設置した太陽電池の出力・発電量を簡単かつ正確に測定・評価できる機器の開発が強く望まれている。そのため著者は「実用的 I-Vカーブ作成法」を活用した太陽電池出力・発電量を診断する装置（ここでは「太陽電池出力評価装置⁽⁵⁾」という）の開発を既に実施している。この装置では、低い日射強度まで精度よく測定できる簡便な日射計の開発が不可欠である。日射計として汎用的に使用されている全天日射計（英弘精機㈱のネオ日射計 MS-42, MS801 など）では、価格・簡易性の面などでここでは十分でない。また太陽電池の短絡電流と日射強度を直線関係とみなし、単にこのことを利用した従来の概念の太陽電池日射計では、適用できる日射強度の範囲、使用する太陽電池の種類などによる影響、測定精度などの面でまだ課題が多い（付録 1, 2 参照）。

一方、著者は既に「実用的 I-Vカーブ作成法」を開発^{(1),(2),(3),(4)}し、「太陽光発電シミュレーション計算プログラム」などに広く活用している。「実用的 I-Vカーブ作成法」の中でも基準状態（日射強度 1 kW/m^2 、モジュール温度 25°C ）の I-Vカーブを各種の日射強度・モジュール温度条件の I-Vカーブに変換する方法（ここでは「実用的 I-Vカーブ変換式」という）は活用範囲が広く、有効な方法であることが一連の研究の中でますます明らかとなっている。そして「実用的 I-Vカーブ作成法」を活用した太陽電池の日射計（以下「太陽電池日射計」という…太陽電池を使って全天日射量が測定できる日射計（付録 1 参照））

の開発を実施した結果、実用化の見通しを得た。本報告では「実用的 I-Vカーブ作成法」を使った太陽電池日射計の原理、測定精度の検討結果とその実証試験結果について述べ、太陽電池日射計の実用化について触れる。付録では、全天日射計と太陽電池日射計の測定値の関係、全天日射強度と太陽電池短絡電流・出力の関係、および「実用的 I-Vカーブ変換式」と「JIS補正式」の差異などについて著者の考えを中心に述べる。

2. 実用的 I-Vカーブ作成法と太陽電池日射計開発への活用

前記全天日射計で測定した日射強度の値は汎用的・一般的な値として広く使われるため、著者の太陽電池日射計でもこの日射強度（ここでは「全天日射計」という）を測定できるものの開発を目指した（付録 1, 2 参照）。なお、ここで使用する太陽電池は、JIS C 8911 の二次基準結晶系太陽電池セル相当のものである。

本章では「実用的 I-Vカーブ作成法」を示し、次に「実用的 I-Vカーブ変換式」を使った太陽電池日射計の原理などについて述べる。

〈2・1〉 実用的 I-Vカーブ作成法とその実証

「実用的 I-Vカーブ作成法」は、太陽電池の基本特性値から各種の日射強度・モジュール温度条件の I-Vカーブを作成する方法で、次の 2つの部分から構成されている。

- ①太陽電池の基本特性値（ I_{sc} , I_{op} , V_{op} , V_{oc} ）から、基準状態（日射強度 1 kW/m^2 、モジュール温度 25°C ）の I-Vカーブを作成する。

②上記基準状態の I-Vカーブから「実用的 I-Vカーブ変換式」((1),(2)式)を使い、各種日射強度・モジュール温度条件の I-Vカーブを作成する。

①は太陽電池の基準状態の基本特性値である短絡電流 (I_{sc})、最大出力動作電圧 (最適電圧: V_{op})、最大出力動作電流 (最適電流: I_{op})、開放電圧 (V_{oc}) の値から基準状態の I-Vカーブを作成する方法であるが、その内容の説明については他の文献 ((1),(2)) に譲り、ここでは②「実用的 I-Vカーブ変換式」について述べる。

基準状態における I-Vカーブから任意の日射強度・モジュール温度の I-Vカーブへの変換に、IEEEで発表された式⁽⁶⁾に基づき、著者は次式 ((1),(2)式) を既に開発し適用している。^{(1),(2),(3),(4)}

$$I_1 = I_2 + I_{sc} \left[\frac{E_1}{E_2} - 1 \right] + \alpha (T_1 - T_2) \quad \dots (1)$$

$$V_1 = V_2 + \beta (T_1 - T_2) - R_s (I_1 - I_2) - K \cdot I_1 \cdot (T_1 - T_2) \quad \dots (2)$$

ここに基準状態での電圧値、電流値、日射強度、モジュール温度をそれぞれ V_2, I_2, E_2, T_2 とし、また測定時の電圧値、電流値、日射強度、モジュール温度をそれぞれ V_1, I_1, E_1, T_1 としている。

また、 α : 温度が 1℃ 変化したときの I_{sc} の変動値 (A/℃) (基準状態)

β : 温度が 1℃ 変化したときの V_{oc} の変動値 (V/℃) (基準状態)

R_s : モジュールの直列抵抗 (Ω) (基準状態)

K : 曲線補正因子 ($\Omega/^\circ\text{C}$)

I_{sc} : 短絡電流 (基準状態) である。

なお、これらの式では、日射強度は全天日射計などで測定した全天日射強度とする。(1),(2)式においては、 I_{sc} 、 α 、 β 、 R_s などは特性値としてあたえられている基準状態の値を使うため、後述のように式が容易に適用できる。また、この式が日射強度・モジュール温度で汎用的で精度よく適用できることは、多くの実証試験により確認している。^{(1),(2)}

②.2「実用的 I-Vカーブ変換式」を使った太陽電池

日射計の原理

(1)太陽電池日射計の基本式

(1),(2)式を変形すると各種の日射・モジュール温度条件の I-Vカーブの値から基準状態の日射・モジュール温度の I-Vカーブの値を求める次の(3),(4)式が導かれる。

なお、(3),(4)式は、JIS C 8913, 8914, 8919などに記載されている補正式とは一見似ているようにも見えるが、式の形、記号の定義、適用条件だけでなく適用の用途、目的に大きな差異があると同時に、種々の優れた特長を持っている (付録 3, 付表 1)

$$I_2 = I_1 + I_{sc} \left[\frac{E_2 - E_1}{E_2} \right] + \alpha (T_2 - T_1) \quad \dots (3)$$

$$V_2 = V_1 + \beta (T_2 - T_1) - R_s (I_2 - I_1) - K \cdot I_1 \cdot (T_2 - T_1) \quad \dots (4)$$

ここで(3)式を E_1 について整理すると次式になる。

$$E_1 = \left(1 - \frac{I_2}{I_{sc}} + \alpha \frac{(T_2 - T_1)}{I_{sc}} + \frac{I_1}{I_{sc}} \right) \times E_2 \quad \dots (5)$$

① ② ③

(5)式の右辺に太陽電池基本特性値、電流・温度の測定値などを代入することにより全天日射強度 (E_1) が求ま

る。

ここで(5)式を見ると、測定時の日射強度は3つの部分より構成されていることがわかる。すなわち③の部分は、主として短絡電流の大きさにより日射強度が決まることを示しており、②の部分は日射強度をモジュール温度により補正されることを示している。なおこの補正部分 (②の部分) の補正方法は後述の JIS 8919の温度補正部分((付 2)式)の方法とは低日射時において差異がある。そして①は「実用的 I-Vカーブ変換式」を適用することによる精度向上に相当する部分である。

なお、本報告では太陽電池は太陽電池モジュールレベルで扱っている部分もあるが、太陽電池セルでも全く同じ扱いができる。

(2)基本式による日射強度の算出方法

ここでは、開発した太陽電池日射計の基本式 ((5)式) を使った日射強度の求め方を具体的に説明する。また図 2 にその算出フロー図を示す。基本的には(5)式に次の各値を入力して測定時の日射強度 (E_1) を求める。

$$E_2 = 1000 \text{ (W/m}^2\text{)}, T_2 = 25 \text{ (}^\circ\text{C)},$$

α, β ... 太陽電池の基準状態での特性値 (A/℃, V/℃)

I_{sc} 各太陽電池の基準状態での短絡電流 (A)

I_1, T_1 ... 測定時の短絡電流、太陽電池モジュール温度
次に I_2 の値について述べる。 I_2 は測定時の短絡電流 I_1 を(3),(4)式を使い基準状態にもどしたときの電流値である (図 1 参照)。この値は(4)式を満足するとともに基準状態の I-Vカーブ上にある。そのため基準状態の I-Vカーブ上の短絡電流の点に近い3点の I-V値の組を使い2次曲線を描き、この2次式と(4)式の連立方程式から I_2 を求める方式とした。ただ実際の適用にあたっては、上記2次曲線の係数はその太陽電池に個々の値であるため、あらかじめ計算により求めたその太陽電池の係数を入力しておくこととした (図 2)。

図 1. 短絡電流の基準状態への変換

Fig.1. Conversion of short circuit current to standard condition.

図2. 基本式による全天日射強度の算出フロー図

Fig.2. Flow chart showing the data processing calculations of the solar irradiance meter using the Practical I-V Curve Construction Method.

3. 「実用的 I-V カーブ作成法」を使った太陽電池日射計の測定精度と実用化

本章では著者の太陽電池日射計の測定精度をシミュレーション計算により定量的に評価するとともにその効果の実証試験結果を示す。そして実用化について述べる。

3.1) 実用的 I-V カーブ変換式を使った太陽電池日射計の精度

ここでは(5)式を適用することによる太陽電池日射計の測定精度の向上効果について、シミュレーション計算で検討した結果について述べる。なお太陽電池日射計の太陽電池は一般に1セル程度の大きさであるが、検討の結果は比率で示すため、太陽電池モジュールで検討してもセルの場合と全く同じ結果が得られる。したがって、ここではモジュールを念頭において検討した結果を示す。前述のように(5)式において I_2 の値は測定時の I-V カーブの短絡電流 (I_1) を、(3), (4) 式などを使って基準状態にもどした点の電流値であり、 I_{sc} (基準状態の短絡電流) と I_2 は通常一致しない。この値の差がここで述べる「実用的 I-V カーブ変換式」適用による精度の向上効果としてあらわれる。そこで実際の太陽電池モジュール (単結晶太陽電池<昭和シェル石油製 GL136 >) について、日射強度を $50 \sim 1000 \text{ W/m}^2$ に、またモジュール温度を 25°C , 55°C および日射強度対応温度 (日射強度 100 W/m^2 で

モジュール温度を 25°C 、日射強度 1000 W/m^2 でモジュール 55°C として直線補間で各日射強度のときのモジュール温度を求めた値) にして I_2 の値を(4)式などから正確に求め、次に(5)式に代入して①, ②, ③の部分の値を求めた。そして①, ②, ③の合計値に対する①, ②の部分の比率を計算しグラフで示したのが図3, 4, 5である。これらの図から次のことがわかる。

図3. 日射強度別の影響 (モジュール温度 25°C)Fig.3. Effect of various factors on measurements at different levels of solar irradiance (module temperature: 25°C).

図4 日射強度別の影響 (モジュール温度55℃)

Fig.4. Effect of various factors on measurements at different levels of solar irradiance(module temperature:55℃).

図5 日射強度別の影響
(モジュール温度が日射強度対応)

Fig.5. Effect of various factors on measurements at different levels of solar irradiance(module temperature is related to solar irradiance).

- ・図3より、太陽電池モジュール温度が25℃では当然、太陽電池モジュール温度による影響((5)式に②に相当)は零である。また「実用的I-Vカーブ変換式」を使うことによる日射強度測定精度の向上効果は、日射強度が大きいときにはほとんどあらわれないが、日射強度が小さくなるにしたがい大きくなることわかる。例えば50 W/m²では7%程度とかなり大きくなっている。
- ・図4より、太陽電池モジュール温度が55℃ではモジュール温度による影響はかなり大きく、太陽電池温度による補正が必要ながわかる。また「実用的I-Vカーブ変換式」を使うことによる日射強度測定精度の向上効果は、図3と同様に、日射強度が小さくなるにしたがい大きくなる傾向がある。
- ・図5より、太陽電池モジュール温度が日射強度に対応したケースでは、日射強度にかかわらず温度による補正が必要であるとともに、日射強度が小さくなると「実用的I-Vカーブ変換式」を使った補正が特に必要である。

以上のとおり日射強度の測定精度を向上させるためには太陽電池モジュール温度による補正だけでなく、低日射時には「実用的I-Vカーブ変換式」を使った補正が特に必要であることがわかった。

3.2) 太陽電池日射計の測定精度の実証結果

表1に示す太陽電池の諸特性値、短絡電流・太陽電池温度の測定値などを(5)式に代入して求めた日射強度 E_1 と実際に全天日射計(英弘精機機)製の精密全天日射計を3台使用(表1)で測定した日射強度を比較・評価した。なお、実験に使用した太陽電池はJISで定められた二次基準結晶系太陽電池セル相当品で、一次基準結晶系太陽電池セルで校正されている。

表1 実証実験に使用した太陽電池セルと全天日射計

Table.1. Typical specification	
	仕様
太陽電池	短絡電流: 900 (mA/KW/m²) ...基準状態(25℃, 1 KW/m², 基準スペクトル)での値 短絡電流の温度係数(α): 0.00054 (A/℃)
全天日射計 (N01, N02, N03)	精密全天日射計MS801 (英弘精機機) 感度: 7.0 (mV/KW/m²) 応答速度: 2.5秒 精度: 1.5%以内

(1) 両日射強度の直線関係と信頼区間

全天日射計(No.1)と上記太陽電池により得られた日射強度の関係を図6に示す。なお図6は種々の天気の数日分のデータによる測定結果である。図6より日射強度の大きさにかかわらず両方の日射強度は直線関係が極めて大きいことがわかる。なおNo.1の日射量以外にNo.2, No.3の全天日射計を使った試験でも同様の結果が得られている。

図6 全天日射計と太陽電池日射計による測定結果の関係

Fig.6. Measured value of solar irradiance.

次にNo.1の全天日射計により測定した日射強度の各値に対して上記太陽電池による日射強度 (E_1) の99%, 95%信頼区間を計算した結果を表2に示す。表2より次のことがわかる。

- ①太陽電池を使用した日射計の99%信頼区間の幅は、
- ・日射強度が特に小さいとき (100 W/m^2 程度以下) には、 $\pm 10\text{ W/m}^2$ 以下である。
 - ・日射強度が 400 W/m^2 程度で最も小さくなっており、 $\pm 4\text{ W/m}^2$ 程度で、日射強度の $\pm 1\%$ 以下である。
 - ・日射強度が特に大きいとき (1000 W/m^2 程度) には $\pm 10\text{ W/m}^2$ 程度で、ここでも日射強度の $\pm 1\%$ 程度である。
- ②太陽電池を使用した日射計の95%信頼区間の幅は、
- ・日射強度が特に小さいとき (100 W/m^2 程度以下) には、 $\pm 6\sim 7\text{ W/m}^2$ 程度である。
 - ・日射強度が 400 W/m^2 程度で最も小さくなっており、 $\pm 3\text{ W/m}^2$ 程度で、日射強度の $\pm 1\%$ 弱である。
 - ・日射強度が特に大きいとき (1000 W/m^2 程度) には $\pm 10\text{ W/m}^2$ 程度で、ここでも日射強度の $\pm 1\%$ 程度である。

表2 太陽電池日射計による測定値の信頼区間
Table.2. Confidence interval of measured value.

全天日射計 の日射強度 (W/m^2)	上下限の信頼区間 (W/m^2)		全天日射計 の日射強度 (W/m^2)	上下限の信頼区間 (W/m^2)	
	信頼区間 99%	信頼区間 95%		信頼区間 99%	信頼区間 95%
0	± 9.6	± 7.3	550	± 5.5	± 4.1
50	± 8.7	± 6.6	600	± 6.1	± 4.6
100	± 7.8	± 5.9	650	± 6.9	± 5.2
150	± 7.0	± 5.3	700	± 7.7	± 5.9
200	± 6.2	± 4.7	750	± 8.7	± 6.6
250	± 5.5	± 4.1	800	± 9.6	± 7.3
300	± 4.9	± 3.7	850	± 10.6	± 8.0
350	± 4.6	± 3.4	900	± 11.6	± 8.7
400	± 4.4	± 3.3	950	± 12.6	± 9.5
450	± 4.5	± 3.4	1000	± 13.6	± 10.2
500	± 4.9	± 3.7			

以上の結果から著者の太陽電池日射計は、日射強度の大きにかかわらず、 $\pm 10\text{ W/m}^2$ 程度以内の誤差で全天日射計による日射強度が得られる。また日射強度が 400 W/m^2 程度以上では、全天日射計の $\pm 1\%$ 程度以内の誤差で測定値が得られることがわかった。そして、精密全天日射計の精度(仕様値)が1.5%程度であることを考え合

せると、総合的に「太陽電池日射計により、精密全天日射計による日射強度の値を精度よく得ることができる。また低い日射強度の時には、高い日射強度に比べ測定精度の比率は少し落ちるものの、全天日射計による日射強度に近い値が得られる」ことがわかった。

(2)日射強度が小さい場合の試験と結果

〈3.1〉で述べたように、日射強度が小さいときには(5)式の①の部分の影響を無視することができない。そこで低日射強度時の①の部分による影響を確認するために実施した実証試験方法とその試験結果について述べる。

(5)式における②、③の部分に対して①の部分の影響は一般的に小さく明確にあらわれにくいため、実証試験で確認するにはかなりの工夫がいる。そのため実証試験は、日射強度が小さい条件 (100 W/m^2 程度以下) のもとに太陽電池セル温度を大きく変化させた。すなわち太陽電池セルをあらかじめヒーターで温度を上昇させたり、ヒートポンプで温度を下げた後、日射強度が小さくしかも変化が少ない条件のもとで、太陽電池温度の変化を見ながらデータを得るという実証試験を実施した。

表3に試験結果を示す。表3の太枠の値が示すように「実用的I-Vカーブ変換式」の適用による影響、すなわち(5)式の①の部分による影響(※5)の欄参照)は96%~101%となっている。すなわち(5)式の①の部分により、ここでは4%程度までの精度向上が図れることをあらわしている。これらの数値は、各試験ケースの温度差(※2)の欄)を考慮すればシミュレーション計算により求めた図3、4における「実用的I-Vカーブ変換式」による影響ともかなり合っている。すなわち(5)式の①の部分の効果についても実証試験により確認することができた。

〈3.3〉太陽電池日射計の実用化

JISには、二次基準結晶系太陽電池セル、ソーラシミュレータ、結晶系太陽電池セル・モジュールの測定方法などに関する規格が定められている。すなわち、

- ・一次基準結晶系太陽電池セルの校正方法
- ・一次基準結晶系太陽電池セル、ソーラシミュレータを使って二次基準結晶系太陽電池セルを校正する方法
- ・結晶系太陽電池セル・モジュール測定用ソーラシミュレータ
- ・二次基準結晶系太陽電池セル・モジュールおよび、ソーラシミュレータを使った結晶系太陽電池セル・モジュールの出力測定方法
- ・結晶系太陽電池セル・モジュールの屋外測定方法
- ・太陽電池アレイ出力のオンサイト測定方法

これらの規格は主に、太陽電池セル・モジュールの基本特性値の測定方法などを定めるものであり、付表1の(3)′、(4)′式をベースにしている。

表3 「実用的 I-Vカーブ変換式」の適用による影響の実証結果
Table.3. Verification of influence of "Practical I-V Curve Conversion Equation"

ケース (試験月/日)	試験時刻	太陽電池セル温度 (℃)	太陽電池による日射強度*1 (W/m ²)	全天日射計による日射強度 (W/m ²)	太陽電池による日射強度の上段測定条件への換算値				太陽電池温度の変化方法
					全天日射計 (W/m ²)	太陽電池による日射強度*3 (W/m ²)	同左温度補正後*4 (W/m ²)	同左上段に対する比率 (%) *5	
1 (H8/7/16)	10:11	37.5(0)*2)	81.4	83.6	(83.6)	81.4	81.4	100.0	ヒーターで昇温
	10:26	52.0(14.5)	90.7	86.1	(83.6)	88.1	79.4	97.5	
2 (H8/7/16)	10:38	45.0(0)	76.9	76.4	(76.4)	76.9	76.9	100.0	ヒーターで昇温
	10:45	61.0(16.0)	93.4	82.3	(76.4)	86.7	77.1	100.3	
3 (H8/7/23)	9:15	21.5(0)	46.6	41.1	(41.1)	46.5	46.5	100.0	ヒートポンプで冷却
	9:27	28.0(6.5)	50.2	42.4	(41.1)	48.7	44.8	96.3	
4 (H8/8/5)	14:32	22.0(0)	79.6	82.3	(82.3)	79.4	79.4	100.0	ヒートポンプで冷却
	14:50	39.0(17.0)	87.7	82.3	(82.3)	87.7	77.5	97.6	

※1)太陽電池の短絡電流の大きさに比例した日射強度の算出値

※2)()内の数値は各試験ケースの上段の温度を基準とした場合の温度差

※3)全天日射計による日射強度の比率により下段の太陽電池による日射強度を換算

※4)※3)欄の日射強度に相当する短絡電流を温度補正した後、日射強度に換算した値

※5)左欄の上段の日射強度を100%とした場合の下段の日射強度の比率

一方著者の目的は(3)、(4)式(すなわち(1)、(2)式)をベースにして、太陽電池の基本特性値、短絡電流・モジュール温度などから(5)式により、全天日射強度を測定するものである。したがって適用する式が異なるだけでなく適用の目的が異なるため、これらの規格に抵触することなく実用化・商品化に結びつけることができる。

4. まとめ

太陽光発電システムの普及とともに、実際に設置した太陽電池の出力・発電量を簡単かつ正確に測定・評価できる機器の開発が強く望まれている。この装置の開発では安価・簡便で精度の高い日射計の開発が不可欠である。そこで著者は、既に開発している「実用的 I-Vカーブ作成法」を応用した太陽電池の日射計の開発を実施し、実用化の見通しを得た。本報告で述べている事項を要約すると、次のようである。

(1)著者の太陽電池日射計は、太陽電池を使い低日射強度から高日射強度までの全天日射量(英弘精機㈱のネオ日射計などの全天日射計により測定する日射量)が高精度かつ簡便に測定できるものである。基本的には太陽電池の短絡電流を太陽電池の温度などで補正して全天日射量を求めるものであり、この補正には、著者の開発した「実用的 I-Vカーブ変換式」(次式)を

用いている。

$$E_1 = \left(1 - \frac{I_2}{I_{sc}} + \alpha \frac{(T_2 - T_1)}{I_{sc}} + \frac{I_1}{I_{sc}} \right) * E_2 \dots (5)$$

(全天日射強度) ① ② ③

上式で③の部分は全天日射強度が主に測定した短絡電流(I_1)の値で決まることを、②の部分は太陽電池温度で補正することを、また①の部分は「実用的 I-Vカーブ変換式」を適用することにより測定精度が向上することを表している。すなわち(5)式に短絡電流・太陽電池温度の測定値、太陽電池基本特性値などを入力して全天日射強度を求めるのが太陽電池日射計の原理である。

- (2)著者の太陽電池日射計の測定精度をシミュレーション計算により検討した結果、次のことが明らかとなった。
- ・太陽電池短絡電流のみから求めた日射強度に太陽電池温度の補正を加えることにより、日射強度が大きい(700W/m²程度以上)場合には2~4%程度の精度向上効果が期待できる。また太陽電池温度が同一であればその効果は、日射強度が小さくなるにつれ大きくなる。
 - ・日射強度がかなり小さい(100W/m²程度以下)場合でも、著者の太陽電池日射計では「実用的 I-Vカーブ変換式」を使った補正が加わるため、精度向上がはかれる。

付 録

(3)上記(2)のシミュレーション計算による効果を実証するため、JISで定められた二次基準結晶系太陽電池セル相当の太陽電池を使った試験を実施した結果、次のことが明らかになった。

- ・著者の太陽電池日射計と精密全天日射計（英弘精機㈱ MS801）により測定した日射強度は天候、環境条件に関わらず低日射強度から高日射強度までよく一致している。また統計的な評価（信頼区間の評価）でも高い精度であることが確認できた。
- ・低日射強度において「実用的 I-Vカーブ変換式」を適用する効果も、シミュレーション計算で予想した効果がほぼ確認できた。

(4)著者の太陽電池日射計では、使用した太陽電池の種類・特性などの差異にかかわらず、汎用的に全天日射強度の値が正確に得られる。したがって、開発中の太陽電池出力評価装置に用いることができるだけでなく、広い活用が期待できる。なおこの太陽電池日射計はJIS、IECなどの規格とは適用する式が異なるだけでなく適用の目的が異なるため、これらの規格にも抵触することもない。

今後は早期の実用化・商品化に結びつけるとともに、前記「太陽電池出力・発電量の評価装置」の一部などとして活用したいと考えている。

（平成8年7月1日受付、平成9年2月7日再受付）

文 献

- (1) H.Yamamoto, A.Iga, H.Suzuki, K.Ishihara, Y.Mita: "Development of Simulation Program of Electric Power Generated by PV System Using New I-V Curve Construction Method", 1994 JIASC Japan Industry Application Society Conference, 13/PE, (1994)
- (2) 山本, 伊賀, 石原, 三田, 鈴木: 「I-Vカーブ作成法を用いた太陽光発電量シミュレーション計算プログラムの開発」, 電学論D, 115巻6号, (1995)
- (3) 山本, 伊賀, 石原, 三田, 鈴木: 「太陽光発電量シミュレーション計算結果の評価とプログラムの活用」, 電学論D, 115巻7号, (1995)
- (4) 山本, 伊賀, 石原, 三田, 鈴木: 「実用的 I-Vカーブ作成法を使った太陽光発電出力・発電量の活用」, 太陽エネルギー, VOL.22 No.1, (1996)
- (5) 伊賀: 「太陽電池出力評価装置の開発」, 電学論D, (予定)
- (6) J.D.Sandstrom: "A Method for Predicting Solar Cell Current-Voltage Curve Characteristics as a Function of Incident Solar Intensity and Cell Temperature", IEEE, VOL II 199, (1967)
- (7) JIS C8911, C8912, C8913, C8914, C8916, C8918, C8919, C8931, C8932, C8933, C8934, C8935, C8936, C8953, IEC 891, 1829 ISO 9060 など

1. 太陽電池日射計と太陽スペクトル

日射強度の値には次の2種類がある。

①全天日射計で測定した日射強度（全天日射強度）

全天日射計（英弘精機㈱のネオ日射計MS-42, MS-808など、主に熱的日射計）で測定した日射強度。一般的・汎用的な日射強度として使われている。

②太陽電池で測定した短絡電流測定値に相当する放射照度（日射強度）

基準太陽光スペクトルで1kW/m²の日射強度における太陽電池の短絡電流をもとに、この短絡電流と日射強度の関係が、日射強度が大きい場合に直線関係にあるとして求めた日射強度。

JISによると、測定時の太陽電池温度が15～35℃、日射強度が1000±50W/m²のときは短絡電流が日射強度と比例関係にあるとし、また自然太陽光のもとでは、太陽電池温度が10～70℃、日射強度が800W/m²以上のときにこのように扱っている（後述（付3）式）。したがって日射強度が800W/m²以上でなければ精度は補償されない。

全天日射強度と短絡電流の関係は付図1のようにあらわされる。

付図1. 日射強度と短絡電流

Appendix Fig.1. Solar irradiance vs short circuit current.

ここで I_{sc} と $I_{sc m}$ の関係は

$$I_{sc \text{ cal}} = I_{sc m} \times \frac{\int \Phi_s(\lambda) \cdot Q(\lambda) d\lambda}{\int \Phi_m(\lambda) \cdot Q(\lambda) d\lambda} \dots (\text{付1})$$

$I_{sc \text{ cal}}$: 短絡電流校正値

$I_{sc m}$: 放射照度1kW/m²のソーラシミュレータ

のもとで測定した被測定太陽電池セルの短絡電流

$Q(\lambda)$: 被測定太陽電池セルの相対分光感度

$\Phi_s(\lambda)$: ソーラシミュレータの絶対分光放射照度 (kW/m²)

$\Phi_m(\lambda)$: 基準太陽光 (AM1.5) の分光放射照度 (kW/m²)

(注) 諸論文・報告でも、結晶系太陽電池の場合の短絡電流（太陽電池出力でない）と日射強度の直線性に関しては多くの報告がある。これらの報告などから、少なくとも日射強度が大きい（800 W/m²程度以上）場合には直線関係があるといえる。しかしその厳密な直線関係の確認のためには、今後さらに多くの太陽電池により、日射スペクトル、セル温度、設置条件などが各種の条件の下に本格的な試験を実施することが必要であると考えられる。

付図1によると、全天日射計で測定した日射強度が同一であってもスペクトル分布の違いによる短絡電流の差は、I_{sc cal}とI_{sc m}の差としてあらわされている。一般に、「全天日射計」による日射強度が同一であっても短絡電流の値は太陽光スペクトル、太陽電池の分光感度、太陽電池セル温度などによってかわってくる。例えば付図2に示すように日射強度が小さい場合でも同様で、全天日射計による日射強度が同一（自然太陽光Ⅰ、Ⅱ）であっても、自然太陽光Ⅰと自然太陽光Ⅱにはスペクトル分布に差異があり、また太陽電池セルの分光感度にも差があるため、短絡電流に差がでる。したがって全天日射計による測定値は太陽光スペクトル差などを折り込めないで、太陽光発電の日射計として適合しにくいという考え方もある。一方、汎用性のある日射強度を測定できる簡便な日射計が望まれていることも事実である。そのため著者の「太陽電池日射計」は太陽電池を使い全天日射計で測定する日射強度をできるだけ正確・簡便に測定できることを目指したものである。

付図2 自然太陽光の分光放射照度
Appendix Fig.2. Solar irradiance.

2. 日射強度と太陽電池短絡電流・出力の関係

「太陽光スペクトル分布などが日射強度と短絡電流および太陽電池出力におよぼす影響」については国内外に多くの研究報告（電気学会論文，電気学会全国大会，電気学会電力・エネルギー部門大会、日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会合同研究発表会、(財)日本品質保証機構資料など）がある。これらの文献でも、日射強度が小さい場合を中心に考えると、まだこれらの関係が十分解明されているとは考えにくい。ただ著者は、次のことがいえると考えている。

- ①結晶系太陽電池の場合、日射強度の大きさと太陽電池短絡電流（I_{sc}）、および太陽電池出力（P_{max}出力）との関係は、一般には区別していない場合も多くみられるが、著者ははっきり区別するべきであると考えられる。
- ②結晶系太陽電池の場合、全天日射計による日射強度と短絡電流の大きさの関係は、太陽電池温度が同一であれば太陽光スペクトル分布などにほとんど影響されず低日射から高日射までほぼ直線関係にある。
- ③結晶系太陽電池の場合、太陽電池温度が同一であれば、太陽電池出力（P_{max}）と全天日射計による日射強度はほぼ直線関係にあるが、日射強度が小さいときにはその直線関係がくずれ、下に凸の傾向を示す。

②については前述のとおり「JIS C 8911解説」において、日射強度がある程度以上であれば結晶系太陽電池セルでは短絡電流の放射照度（日射強度）に対する非直線性が小さいことを前提とした記述がある。同様に、「JIS 8919（結晶系太陽電池セル・モジュール屋外出力測定法）」でも放射照度の計算式として次式が示されている。ただし放射照度（日射強度）は800 W/m²程度以上としている。

$$E = 1000 \times \frac{I_{ref1}}{I_{ref2} - \alpha_{ref}(25 - T_1)} \quad \cdots (付2)$$

ここに I_{ref1}: 標準状態（測定状態）での二次基準セルの短絡電流 (mA)
I_{ref2}: 基準状態での二次基準セルの短絡電流 (mA)
T₁: 標準状態（測定状態）での二次基準セルの温度 (°C)
α_{ref}: 放射照度1000 W/m²での二次基準セルの短絡電流の温度係数 (mA/°C)

著者の開発した「実用的 I-Vカーブ作成法」によりシミュレーション計算した結果によると、全天日射計による日射強度と短絡電流の関係が付図3のようにあらわされることから、太陽電池モジュール・セル温度一定のもとでは、低日射時も含み直線関係に近いものと考えている。付図3は太陽電池モジュール温度が25℃の場合であるが、モジュール温度が55℃のケースについても、同様のグラフが得られている。

付図3 日射強度-短絡電流の計算結果(25℃)

Appendix Fig.3. Calculation of the relationship between solar irradiance and short circuit current(module temperature:25℃).

付図4 日射強度-太陽電池出力の計算結果(25℃)

Appendix Fig.4. Calculation of the relationship between solar irradiance and solar module output(module temperature:25℃).

次に③で述べている日射強度が低い場合の下に凸の傾向があることについては、一般にいわれている太陽光スペクトル分布による影響とは異なる要因、すなわち太陽電池自体の特性(日射強度の変化とともに解放電圧などの太陽電池電圧が変化すること)によるのではないかと考えている。このことは上記と同様、著者の開発した「実用的I-Vカーブ作成法」によりシミュレーション計算した日射強

度と太陽電池出力(Pmax出力)の関係が付図4のように日射強度が小さいときに下に凸の傾向を示すことから推測される。なお付図4は太陽電池モジュール温度が25℃の場合であるが、55℃の場合にも同様の傾向が得られている。

ここでシミュレーション計算に使用した太陽電池の特性を示すと、単結晶太陽電池モジュール(昭和シェル製GL136)であり、基本特性値は $I_{sc}=3.268(A)$, $I_{op}=3(A)$, $V_{op}=17.45(V)$, $V_{oc}=21.8(V)$, $\alpha=0.0019667$, $\beta=-0.06975$, $R_s=0.4365$, $k=0.00125$ である。

3. 「実用的I-Vカーブ変換式」と「JIS補正式」の差異

著者の開発した(1), (2)式から導かれる(3), (4)式とJIS補正式との比較を付表1に示す。この表からも明らかのように、一見似ているようでも式が大きく異なることとともに、適用の目的も異なる。

伊賀 淳

(正員) 昭和43年3月岡山大学工学部電気工学科卒業、同年4月四国電力㈱入社、配電、計算機システム関係の業務に従事。昭和52年より四国電力㈱、㈱四国総合研究所でビル空調システム、CVケーブル劣化診断装置、太陽光発電システム、省エネ型住宅システムの研究開発に従事、現在に至る。工学博士。

付表1 「実用的 I-Vカーブ変換式」と「JIS補正式」の差異
Appendix Table.1. Difference between Practical I-V Curve Conversion Equation and JIS correction equation.

		JIS C 8913.8914 (屋内測定) (ソーラシミュレータ)	JIS C 8919 (屋外測定) (自然太陽光)	著者の式 (本文(3),(4)式)
制定(號) 年 月		平成元年11月	平成7年9月	平成5年～*
変換補正式	変換	$I_2 = I_1 + I_{sc} \left[\frac{E_2}{E_1} - 1 \right] + \alpha (T_2 - T_1) \dots (3)'$ $V_2 = V_1 + \beta \cdot (T_2 - T_1) - R_s \cdot (I_2 - I_1) - K \cdot I_2 \cdot (T_2 - T_1) \dots (4)'$ <p>ここに、基準状態での電圧値、電流値、放射照度および被測定太陽電池セル・モジュール温度をそれぞれV_1, I_1, E_1, T_1とし、測定した電圧値、電流値、放射照度、被測定太陽電池セル・モジュール温度及び短絡電流をそれぞれV_2, I_2, E_2, T_2及びI_{sc}とする。</p>	$I_2 = I_1 + I_{sc} \left[\frac{E_2}{E_1} - 1 \right] + \alpha (T_2 - T_1) \dots (3)'$ $V_2 = V_1 + \beta \cdot (T_2 - T_1) - R_s \cdot (I_2 - I_1) - K \cdot I_2 \cdot (T_2 - T_1) \dots (4)'$ <p>ここに、基準状態での電圧値、電流値、放射照度および被測定太陽電池セル・モジュール温度をそれぞれV_1, I_1, E_1, T_1とし、測定した電圧値、電流値、放射照度、被測定太陽電池セル・モジュール温度及び短絡電流をそれぞれV_2, I_2, E_2, T_2及びI_{sc}とする。</p>	$I_2 = I_1 + I_{sc} \left[\frac{E_2 - E_1}{E_2} \right] + \alpha (T_2 - T_1) \dots (3)$ $V_2 = V_1 + \beta \cdot (T_2 - T_1) - R_s \cdot (I_2 - I_1) - K \cdot I_1 \cdot (T_2 - T_1) \dots (4)$ <p>ここに、基準状態での電圧値、電流値、日射強度、モジュール温度をそれぞれV_1, I_1, E_1, T_1とし、また測定時の電圧値、電流値、日射強度、モジュール温度をそれぞれV_2, I_2, E_2, T_2とする。</p>
	補正式	<p>α : 被測定太陽電池セル温度が1℃変動したときのI_{sc}の変動値 (A/℃) 太陽電池モジュールの場合は $\alpha = n_p \cdot \alpha_c$ n_pは並列に接続された太陽電池セル数 α_cはセルの値</p> <p>β : 被測定太陽電池セル温度が1℃変動したときのV_{oc}の変動値 (V/℃) 太陽電池モジュールの場合は $\beta = n_s \cdot \beta_c$ n_sは直列に接続された太陽電池セル数、β_cはセルの値</p> <p>R_s : 被測定セル・モジュールの直列抵抗(Ω) K : 曲線補正因子(Ω/℃)</p>	<p>α : 放射照度1000W/m²での被測定太陽電池セル・モジュール温度が1℃変動したときの短絡電流I_{sc}の変動値 (A/℃)</p> <p>β : 放射照度1000W/m²での被測定太陽電池セル・モジュール温度が1℃変動したときの開放電圧V_{oc}の変動値 (V/℃)</p> <p>R_s : 直列抵抗(Ω) K : 曲線補正因子(Ω/℃)</p>	<p>また、α : 温度が1℃変化したときのI_{sc}の変動値 (A/℃) (基礎状態下)</p> <p>β : 温度が1℃変化したときのV_{oc}の変動値 (V/℃) (基礎状態下)</p> <p>R_s : モジュールの直列抵抗 (Ω) (基礎状態下)</p> <p>K : 曲線補正因子 (Ω) (基礎状態下)</p> <p>I_{sc} : 短絡電流 (基礎状態下) である。</p>
主要差異	式の形	$I_{sc} \left[\frac{E_2}{E_1} - 1 \right]$		$I_{sc} \left[\frac{E_2 - E_1}{E_2} \right]$
		$K \cdot I_2 \cdot (T_2 - T_1)$		$K \cdot I_1 \cdot (T_2 - T_1)$
	I_{sc}	測定した短絡電流値		基準状態の短絡電流値
	E_1, E_2	放射照度 [基準太陽電池セルで測定した短絡電流の日射強度相当のもの]レファレンス太陽電池方式		日射強度 [全天日射計相当で測定した] 日射強度
	パラメータ	<p>α (放射照度1000W/m²における値)</p> <p>β (放射照度1000W/m²における値)</p> <p>R_s</p> <p>K</p>	<p>(放射照度1000W/m²における値)</p> <p>(放射照度1000W/m²における値)</p> <p>.....</p> <p>.....</p>	<p>基準状態(1000W/m², 25℃)における値</p> <p>基準状態(1000W/m², 25℃)における値</p>
適用目的	適用条件	放射照度 : 1000 ± 50W/m ² セル・モジュール温度 : 15 ~ 35℃	放射照度 : 800W/m ² 以上 セル・モジュール温度 : 10 ~ 70℃	日射強度 : 50W/m ² 程度以上 セル・モジュール温度 : 左記温度相当又はそれ以上の範囲
		ソーラシミュレータ、二次基準結晶系太陽電池を用いた地上用結晶系太陽電池セル・モジュールの出力特性の測定方法と基準状態への補正方法。	二次基準結晶系太陽電池を用いた自然太陽光の下で地上用結晶系太陽電池セル・モジュールの出力特性の測定方法と基準状態への補正方法。	・全天日射計または本報告で述べる太陽電池日射計を用い、ソーラシミュレータ又は自然太陽光の下で測定した太陽電池電圧・電流・出力を基準状態など各種日射強度・太陽電池温度の状態に換算し、太陽電池の出力評価など。 ・太陽光発電量計算・評価など(文献(1)~(4))
変換(補正)の特記事項	I-V値変換機能	<p>(1)測定時状態 → 基準状態 上記「主要差異(適用条件)」の日射強度、セル・モジュール温度の範囲において変換可能(変換にあたって短絡電流の測定値も必要)</p> <p>(2)基準状態 → 測定時状態 短絡電流として測定時のI_{sc}の値を使用しているため、(3)', (4)'式を適用することは不可能</p>		<p>(1)測定時状態 → 基準状態 実質上は測定時の日射強度、セル・モジュール温度に制限されず変換が可能</p> <p>(2)基準状態 → 測定時状態 実質上は日射強度、セル・モジュール温度に制限されず変換が可能</p>
	変換精度	(1)測定時状態 → 基準状態の場合、短絡電流の測定精度により変換後の電圧・電流値がかなり左右される(特に低日射時)。		(1)測定時状態 → 基準状態の場合、低日射時でも精度よく電圧・電流値が求まる。

※(3), (4)式は次の(1), (2)式を移項・変形したものであり、(1), (2)式はすでに平成5年以後の電気学会の全国大会・部門大会、太陽エネルギー学会などで著者が発表済。

$$I_1 = I_2 + I_{sc} \left[\frac{E_1}{E_2} - 1 \right] + \alpha (T_1 - T_2) \dots (1)$$

$$V_1 = V_2 + \beta (T_1 - T_2) - R_s (I_1 - I_2) - K \cdot I_1 \cdot (T_1 - T_2) \dots (2)$$