

温室内向け4センサ太陽電池アレイ日射計の試作と温度補正の検討

PV-Array Pyranometer with 4 sensors in greenhouse and
Study on Temperature Correction

杉山 智美^{*1} Mohd Arif Farizul^{*2} 田上 英人^{*3} 須田 善行^{*4}
Satomi SUGIYAMA Hideto TANOUYE Yoshiyuki SUDA
滝川 浩史^{*5} 桶 真一郎^{*6} 川嶋 和子^{*7}
Hirofumi TAKIKAWA Shinichiro OKE Kazuko KAWASHIMA

Abstract

A low-cost measurement system of solar irradiance in greenhouse without influence of artificial shadow caused by structures of the greenhouse is required. For such system, we have been proposed the photovoltaic-array-type pyranometer (PV-array pyranometer). The previously-made prototype of PV-array pyranometer had 3 PV-strings sensors arranged in C shape on an A4 board (3PV-array pyranometer). This time, 4 smaller-size PV-cells were employed as sensors and arranged at 4 corners on the board (4PV-array pyranometer). First, these two types of PV-array pyranometers were examined in greenhouse and it was found that the 4PV-array pyranometer had better performance at the viewpoint of canceling function of partial shadow. Second, the temperature effect of 4PV-array pyranometer was investigated with a field test data and by using solar simulator. Both results indicated that the temperature effect on irradiance measurement was negligible.

キーワード：太陽電池アレイ日射計、4コーナーセンサ型、温室、温度補正

Key Words : PV-array pyranometer, 4-corner sensors type, Greenhouse, Temperature correction

1. はじめに

大型温室農業においては、健全で安定した作物の育成を促進し、省労力化・省エネルギー化を図って生産コストを削減するため、温室内の様々な環境や育成状況をモニタし、その計測値をフィードバックして環境を自動制御するシステムの開発や試験が進められている。温室内環境の重要なモニタパラメータの一つに日射強度がある。特に、ガラスやビニー

ル、調光カーテンなどを通して得られる実質的な日射強度を温室内で計測することが望まれている。日射強度を測定する日射計としては熱電堆型日射計 (Thermopile-type pyranometer: 以後、TP日射計) が主流である。一方、大型温室では非常に多くの支柱や梁などが使われているために、温室内では常にそれらの建材に起因した影が発生している。そのため、温室内にTP日射計を設置した場合、支柱等の建材に起因した人工的な影がTP日射計のセンサ部にかかると、日射強度が過小計測されてしまうという問題がある。つまり、日射計設置場所以外のほとんどの場所には影のない日射が降り注いでいるのであるからして、日射計の指示値は環境の日射強度としては正しい値ではない、ということである。

以上のような背景から、筆者らは、建材等の人工的な影に影響されない太陽電池アレイ型簡易型日射計 (太陽電池アレイ日射計: 以後、PV日射計) の開発を進めている¹⁾。その構成としては、太陽電池

*¹ 豊橋技術科学大学大学院電気・電子工学専攻学生

*² 豊橋技術科学大学大学電気・電子工学部学生

*³ 豊橋技術科学大学大学院電気・電子情報工学系助教

*⁴ 豊橋技術科学大学大学院電気・電子情報工学系准教授

*⁵ 豊橋技術科学大学大学院電気・電子情報工学系教授

(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

e-mail: takikawa@arc.ee.tut.ac.jp

*⁶ 津山工業高等専門学校電子制御工学科講師

*⁷ 愛知県農業総合試験場園芸研究部主任研究員

(原稿受付: 2011年2月16日)

をセンサとして用い、複数の太陽電池を分散配置し、電気回路的に直列に接続したものである。個々の太陽電池にはバイパスダイオードを並列接続している。このような配置および回路とすることで、影がかかって出力の低下した太陽電池はバイパスダイオードで自動的に短絡されるため、1個でも影のかかっていない太陽電池があれば、正しい日射強度を計測することができるようになる。また、太陽電池を用いるため、出力電圧を従来のTP日射計よりも大きくとれ、汎用的な計測器を用いることができるという利点もある。

日射計は、温室内に調光カーテンがある場合には、それよりも下方で、かつ、カーテン機構の邪魔にならない位置に設置する必要がある。このような温室内の取り付け位置の制限や、設置工事の容易性・取り回し性を考慮して、PV日射計をA4ボード上に構築することにした。前回は16セルのストリング型太陽電池2個を1セットとし、3セットを「コの字」状に分散配置したもの（以後、3PV日射計）を用いた¹⁾が、今回はボードの4角に単セル型太陽電池を分散配置したもの（以後、4PV日射計）を試作した。本論文では、まず、フィールド試験を通して、この両者の性能を比較した。一方、PV日射計は、太陽電池を日射センサとして用いるため、温度の影響を把握しておく必要がある。そこで、4PV日射計に関し、フィールド試験を通して温度特性を把握するとともに、使用した太陽電池の温度特性をソーラシミュレータを用いて計測し、PVアレイ日射計を利用する際に外気温を考慮する必要があるかどうかを検討した。

2. 太陽電池アレイ日射計のフィールド試験

2.1 PV日射計

3PV日射計と4PV日射計の概略を図1に示す。使用した太陽電池や仕様を表1に示す。3PV日射計のコの字配置は、格子状の影を想定したためである。しかし、温室内での測定の結果、すべてのセンサに同時に人口影がかかる場合があることがわかつた²⁾。そこで、4PV日射計では、小面積のPVセルを用い、全てのPVセルに同時に影がかからないように、A4サイズのボードの4角に分散配置した。

2.2 温室内フィールド試験

建材影の影響がある環境として、愛知県農業総合試験場（愛知県長久手町）の温室でフィールド試験を行った。TP日射計とPV日射計とを並べて設置

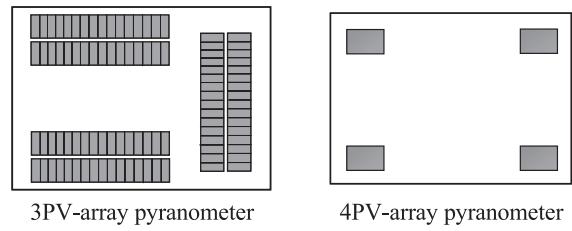


Fig.1 Arrangements of PV-array pyranometers.

Table.1 Specification of PV-array pyranometers.

	3PV-array pyranometer	4PV-array pyranometer
PV type	SPM55-8	AM8705
Maker	Unknown	SANYO
Number of cell	16	1
Maximum output current*	60 mA	25.9 mA
Open circuit voltage*	8 V	6 V
Circuit structure	3 series with 2 parallels	4 series
Total PV area / 1 sensor	76.6 cm ²	17.3 cm ²
Shunt resistance	10.5 Ω	50.2 Ω
Output voltage*	1.3 V	1.3 V

*At irradiance 1.0 kW/m²

し、3PV日射計で2009年2月から2010年2月まで、4PV日射計で2010年2月から同年6月まで計測した。なお、計測サンプリングを1sとしたが、データ処理・解析の際にはその1min平均値を用いた。また、日の出から日の入りまでの時間帯（以下、日中と表記）のデータのみを扱うこととした。なお、同試験場温室の建材梁の太さは、太いもので約50mmである。

計測結果のうち、各年の3月の結果を図2に示す。TP日射計の出力である日射強度とPV日射計の電圧出力との関係を示している。TP日射強度1.0 kW/m²とPV出力1.3 Vとを結ぶ線を実線で示した。これは表1に示したように設計上の関係である。ま

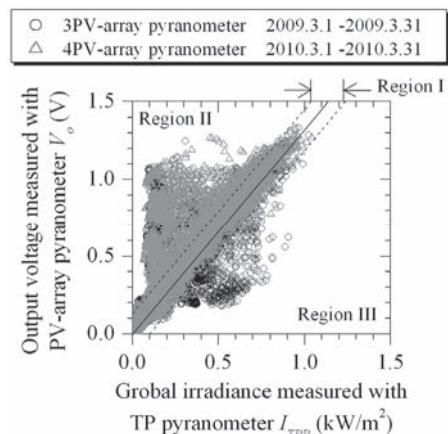


Fig.2 Relation between outputs of TP pyranometer and PV-array pyranometers, measured in greenhouse.

Table.2 Comparison of measurement results of PV pyranometers through field test in greenhouse.

Period	Number (percentage) of plots in Fig. 2			Irradiation (MJ/m ² /month) (percentage)			
	Total	Region II	Region III	Total	TP Pyranometer	3PV-array pyranometer	4PV-array pyranometer
2009.3.1～3.31	22,321 (100%)	1,563 (7.0%)	514 (2.3%)	367 (100%)	26 (7.1%)	7 (2.0%)	—
2010.3.1～3.31	22,304 (100%)	1,537 (6.9%)	84 (0.4%)	317 (100%)	23 (7.3%)	—	0.8 (0.3%)

た、その直線に対し、 $\pm 0.1 \text{ kW/m}^2$ の直線を破線で示した。3PV 日射計および4PV 日射計とも、ほとんどのプロットは二つの破線間（領域 I）に分布していることがわかる。図中の上破線よりも上側の領域（領域 II）のプロットは、建材影の影響で TP 日射計の出力が低下したものの、PV 日射計は建材影の影響を受けず、日射を正しく計測できた意味している。逆に、下破線よりも下側の領域（領域 III）のプロットは、PV 日射計が影の影響を受けたものの、TP 日射計は影響を受けなかった意味している。PV 日射計は影の影響を受けないように設計したものであるからして、領域 III のプロット数が少ないほうが多い。二つの PV 日射計を比較すると、3PV 日射計に比べ、4PV 日射計のほうが領域 III のプロット数が少ないことがわかる。これを数値的に評価したところ、表 2 に示すように、3PV 日射計と 4PV 日射計とで、それぞれ、全プロット数 22,321 および 22,304 に対し、514 および 84 であり、4PV 日射計の方が影の影響を受けないことがわかった。

また、領域 II および III のプロットは、それぞれ、TP 日射計および PV 日射計における計測日射強度の過小計測を意味している。そこで、各領域における TP 日射計と PV 日射計の計測値の大きいほうを真値とみなし、過小計測量を概算してみた。PV 日射計の出力電圧から日射強度への変換は設計に従うとした。なお、日射量を概算するにあたり、領域 I のデータも同様に扱った。その結果も表 2 に示す。同表から以下のことがわかる。TP 日射計は、総日射量に対し、約 7% 過小計測した。PV 日射計の過小評価量はこれより小さい。3PV 日射計の過小評価量約 2% と較べると、4PV 日射計のそれは 0.3% と、大幅に改善できた。

以上から、4PV 日射計の有効性が明確となった。以降、本論文では、4PV 日射計について言述する。

2.3 屋上フィールド試験

豊橋技術科学大学自然エネルギー実験棟屋上（愛知県豊橋市）において、建材などの人口影の影響を

受けない場所に 4PV 日射計と TP 日射計とを並べて設置し、2009 年 10 月からフィールド試験を行った。設置の様子を図 3 に示す。なお、計測サンプリングを 1 s としたが、データ処理・解析の際にはその 1 min 平均値を用いた。また、日中のデータのみを扱うこととした。

図 4 に、TP 日射計と 4PV 日射計の出力の時系列の一例を示す。このように、時系列において、両出力は相似的に変化しており、4PV 日射計は雲や曇りの状態を忠実に計測できていることを確認した。屋上でのフィールド試験では建材影がないため、以後、TP 日射計の出力 I_{TPP} を真の日射強度として扱うこととする。TP 日射計の日射強度 I_{TPP} と 4PV 日射計の出力 V_o との関係を図 5 に示す。同図(a)は、2009 年 11 月～3 月および 2010 年 7 月～9 月において計測した結果をすべてプロットしたものである。同図から、両者の関係はほぼ直線的であること

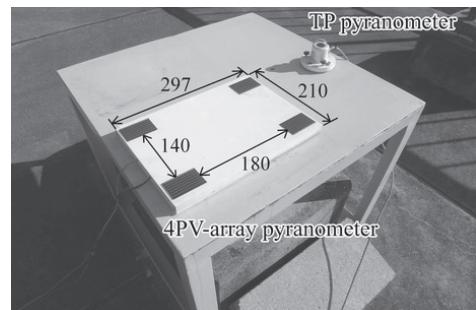


Fig.3 4PV-array pyranometer and TP pyranometer located at a roof in Toyohashi University of Technology for field test without artificial shadow.

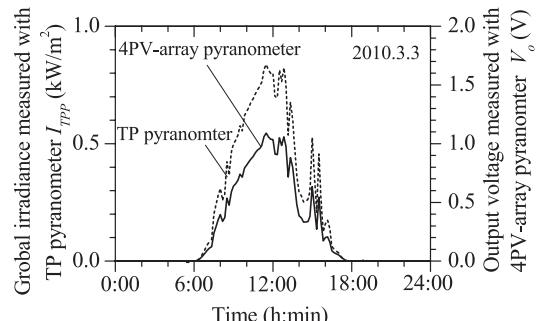


Fig.4 Time series outputs of TP and 4PV-array pyranometers measured at building top without artificial shadow.

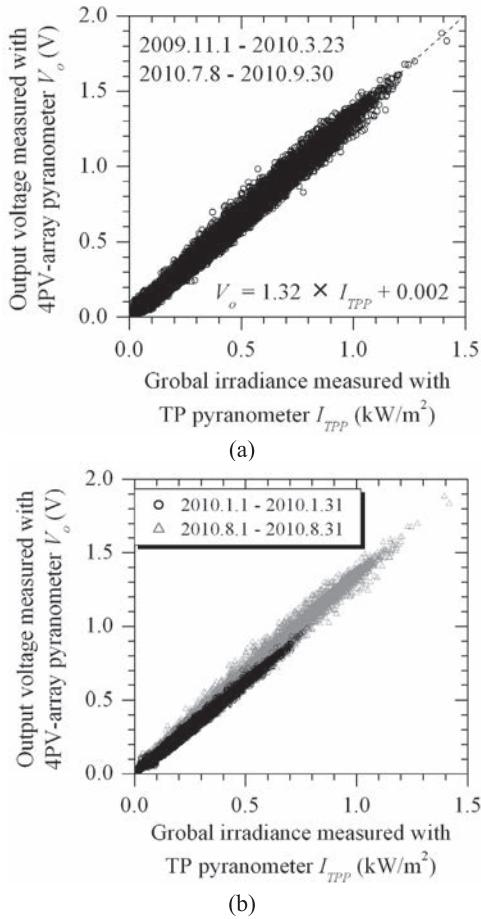


Fig.5 Relations between I_{TPP} and V_o measured at building top for different periods.

がわかる。この結果から、4PV日射計の出力 V_o と日射強度 I_{TPP} との関係を一次関数として求めたところ、次式を得た。

$$V_o = f(I_{TPP}) = 1.32 I_{TPP} + 0.002 \quad (\text{V}) \quad \dots(1)$$

傾きはほぼ設計値どおりであった。この式を変形すれば、次式を得る。

$$\begin{aligned} I_{TPP} &= f(V_o) = 0.76 \times V_o - 0.001 \quad (\text{kW/m}^2) \\ &= I_{PVAP} \quad (\text{kW/m}^2) \end{aligned} \quad \dots(2)$$

ここで、この式の I_{TPP} を、4PV日射計の出力 V_o から求められる日射強度 I_{PVAP} と定義できる。

ところで、図5 (b) に、冬および夏の代表月として、2010年1月および2010年8月の結果を抜き出したものを示す。同図において、月によって直線的関係の傾きがやや異なっているように見える。ちなみに、それぞれの月の日中平均気温は、6°C および 29°C であった。この結果を鑑み、太陽電池を用いた4PV日射計においては、実用性の観点から、温度の影響を把握しておく必要があると判断した。

3. フィールド試験データを用いたPV日射計の温度補正

3.1 フィールド試験データを用いた温度特性解析

4PV日射計の温度特性を、フィールド試験データを解析することによって把握することにした。つまり、日射強度の関数として、外気温 T_A に対する出力 V_o の変化を求め、温度特性を判断することにした、ということである。以下、手順を示す。まず、フィールド試験で計測したTP日射計出力、4PV日射計出力、および外気温の1min平均値を求め、1min毎データセットとした。次に、TP日射計の1min平均出力 I_{TPP} のデータを $0.1 \pm 0.01 \text{ kW/m}^2$ 毎に区分し、その区分に連動する4PV日射計出力および外気温のデータを抽出した。つまり、TP日射計出力の区分を I_{TPPn} と表すことになると、

$$\begin{aligned} n - 0.01 &\leq I_{TPPn} \leq n + 0.01 \quad (\text{kW/m}^2) \\ n &= [0.1, 0.2, 0.3, \dots] \end{aligned} \quad \dots(3)$$

の区分範囲に該当する I_{TPP} が存在した場合、データセット中から $I_{TPP}(t_i)$ 、 $V_o(t_i)$ 、および $T_A(t_i)$ を抽出した。ここで、 t_i は1min平均値の計測時刻である。この操作によって、各日射強度区分における V_o と T_A との関係が解析可能となる。

抽出した T_A と V_o との関係を図6に示す。同図から、 I_{TPPn} 区分毎で両者の関係が区別されていることがわかる。外気温 T_A が大きくなると、4PV日射計の出力 V_o が大きくなる傾向にある。また、 I_{TPPn} 区分毎のプロットは、概ね、それぞれ直線状に分布していることもわかる。そこで、区分毎に、両者の関係を一次関数で近似した。その結果、各 I_{TPPn} 区分において、近似式の傾きと切片が異なった。そこで、傾きおよび切片を、 I_{TPPn} の関数とし、それぞれ、 $a(I_{TPPn})$ および $b(I_{TPPn})$ とすると、外気温 T_A と4PV日射計出力 V_o との関係は次式で表せる。

$$V_o = f(T_A) = a(I_{TPPn}) \times T_A + b(I_{TPPn}) \quad (\text{V}) \quad \dots(4)$$

図7に、 I_{TPPn} に対する $a(I_{TPPn})$ および $b(I_{TPPn})$ の関係を示す。同図から、 $a(I_{TPPn})$ および $b(I_{TPPn})$ は、 I_{TPPn} に対して直線関係にあることがわかる。そこで、 I_{TPPn} に対し、 $a(I_{TPPn})$ および $b(I_{TPPn})$ をそれぞれ直線近似し、次式を得た。

$$a(I_{TPPn}) = (0.53 I_{TPPn} + 0.16) \times 10^{-2} \quad (\text{°C/V}) \quad \dots(5)$$

$$b(I_{TPPn}) = 1.23 I_{TPPn} + 0.001 \quad (\text{V}) \quad \dots(6)$$

これらを式(4)に代入すると次式となる。

$$\begin{aligned} V_o &= (0.0070 I_{TPPn} + 0.00067) \times T_A \\ &+ (1.23 I_{TPPn} + 0.001) \quad (\text{V}) \end{aligned} \quad \dots(7)$$

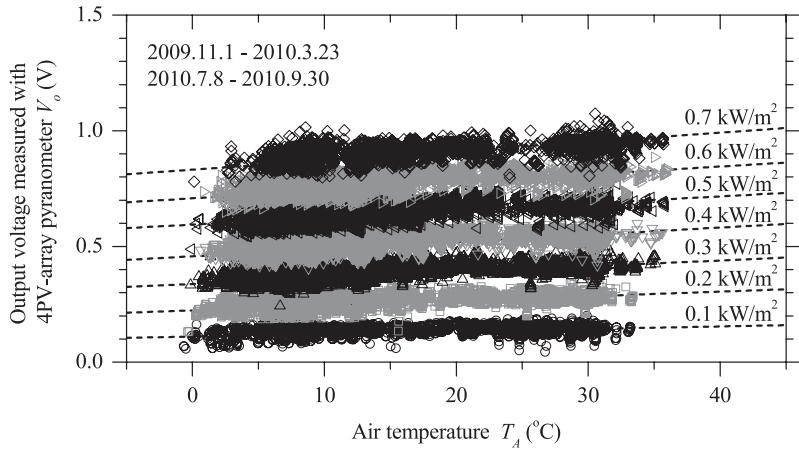


Fig.6 Output of 4PV-array pyranometer V_o as a function of air temperature T_A for classified I_{TPP_n} .

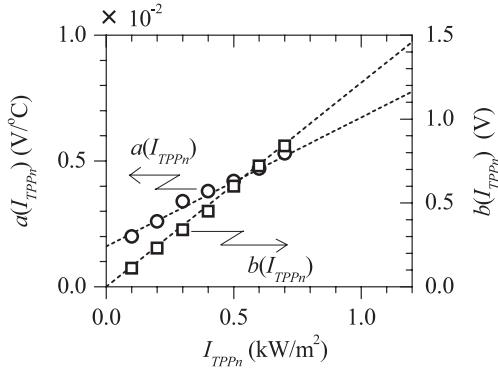


Fig.7 Slope a (I_{TPP_n}) and intercept b (I_{TPP_n}) of linear relation between V_o and T_A , as a function of I_{TPP_n} , obtained from Fig.6.

この式を I_{TPP_n} について整理すると次式を得る。

$$\begin{aligned} I_{TPP_n} &= f(V_o, T_A) \\ &= \frac{1}{(0.0053T_A + 1.23)} \\ &\quad \times [V_o - (0.00016T_A + 0.001)] \text{ (kW/m}^2\text{)} \\ &= I_{PVAP}^* \text{ (kW/m}^2\text{)} \end{aligned} \quad \dots (8)$$

ここで、この式の I_{TPP_n} を、PV 日射計の出力 V_o から外気温 T_A を考慮して求められる日射強度 I_{PVAP}^* と定義できる。

なお、以上の解析には、2009年11月～3月および2010年7月～9月の計測データを用いた。

3.2 温度補正の検証

式(2)および(8)を用いて、4PV 日射計の出力から、温度補正を考慮していない日射強度 I_{PVAP} と、温度補正を考慮した日射強度 I_{PVAP}^* とを求められる。そこで、式(2)および(8)を導出する際に使用しなかった2010年10月データに対し、 I_{PVAP} および I_{PVAP}^* を求め、温度補正の検証を行った。 I_{PVAP} および I_{PVAP}^* と TP 日射計の出力 I_{TPP} との関

係を図8に示す。 I_{PVAP} と I_{PVAP}^* はほぼ同様の傾向を示した。温度補正の効果を定量的に判断するため、 I_{TPP} を真値として、 I_{TPP} に対する I_{PVAP} および I_{PVAP}^* の平均絶対誤差 E_{IPVAP} および E_{I^*PVAP} を次式に従って求めた。ここで、 n_d はデータ数である。

$$E_{IPVAP} = \frac{1}{n_d} \sum_{i=1}^{n_d} |I_{TPP} - I_{PVAP}| \quad \dots (9)$$

$$E_{I^*PVAP} = \frac{1}{n_d} \sum_{i=1}^{n_d} |I_{TPP} - I_{PVAP}^*| \quad \dots (10)$$

その結果、 E_{IPVAP} は 0.02 kW/m^2 、一方、 E_{I^*PVAP} は 0.01 kW/m^2 と、温度補正を行っても誤差の削減はわずかであることがわかった。この誤差の大きさを検討するため、2009年11月から2010年9月の計測データを用い、4PV 日射計出力 V_o の 0.1 V 幅毎に、TP 日射計出力 I_{TPP} の標準偏差 σ_{ITPP} を算出した。図9に、4PV 日射計出力 V_o に対する σ_{ITPP} の変化を示す。前述の E_{IPVAP} および E_{I^*PVAP} も示した。同図から、平均絶対誤差は、TP 日射計の出力のばらつきより小さいことがわかる。従って、温度補正を施しても、計測ばらつきの範囲内でしかないと言

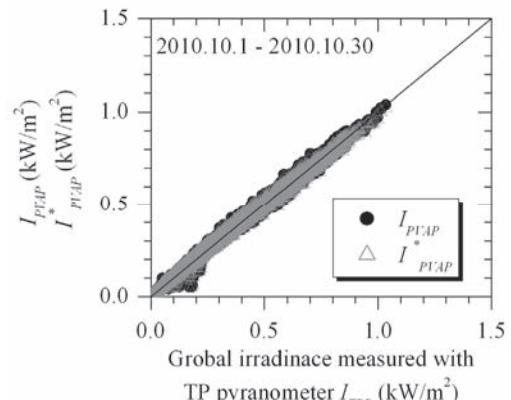


Fig.8 I_{PVAP} and I_{PVAP}^* as a function of I_{TPP} .

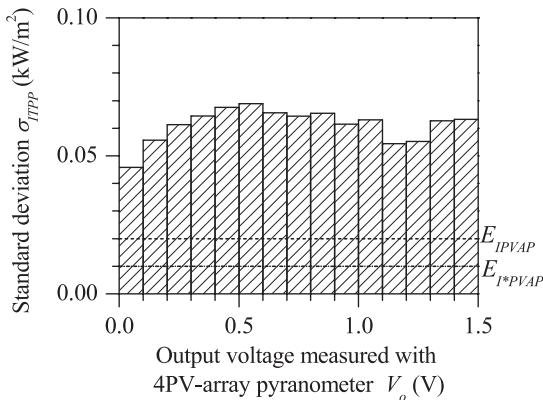


Fig.9 Standard deviation of output of TP pyranometer as a function of output of 4PV-array pyranometer.

える。つまり、フィールド試験の計測データを用いた分析からは、4PV日射計は、温度補正を考慮せずとも、的確な日射強度を得ることができると判断できた。

なお、前後するが、図2の解析において領域を分ける際に設計上の関係式（図2中実線）に対して $\pm 0.1 \text{ kW/m}^2$ の幅（図2中波線）を設けた。図9の結果において約 $\pm 2\sigma_{ITPP} = \pm 0.1 \text{ kW/m}^2$ であり、正規分布を仮定すれば約95%がその範囲に分布するため、その設定が妥当であったこともわかる。

4. ソーラシミュレータを用いた温度特性評価

4.1 温度特性の計測

ソーラシミュレータを用い、4PV日射計のセンサとして利用したPVセル（SANYO、AM-8705）の温度特性を計測した。計測システムの構成を図10に示す。PVセル1個をペルチェ型温度制御テーブル（MISUMI、PELT40；コントローラMISUMI、PLCN）上に配置し、ソーラシミュレータ（三永電機、XES40S）を用いて模擬太陽光を照射した。照射強度は 1 kW/m^2 とした。PVセルの裏面にシート状K型熱電対（坂口電熱、TCSTL）を設置し、温度をモニタした。PVセルの電流-電圧特性を、電圧・電流源（ADC、6242）をパソコンで制御して計測した。PVセル裏面の温度を、温

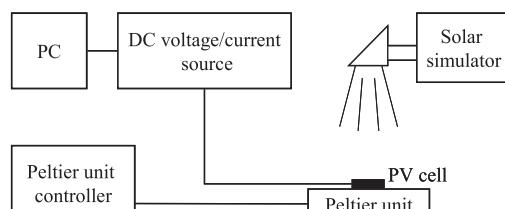


Fig.10 Measurement system of temperature characteristics of PV-cell.

室内実用温度である $20^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ の範囲において 10°C 刻みで変化させた。

4.2 計測結果

電流-電圧特性およびそれを変換した電力-電圧特性を図11(a)に示す。PVセル温度が 20°C および 50°C の場合の結果である。電力は、PVセル温度 20°C のときよりも、 50°C のときの方が小さくなつた。これは、太陽電池の一般的な温度特性として知られている傾向と一致する³⁻⁵⁾。次に、短絡電流を見てみると、セル温度 20°C のときよりも、 50°C のときの方がわずかに大きくなつた。PV日射計は、短絡電流近傍の電流を定抵抗で電圧に変換して出力しているため、短絡電流の温度依存性に注目することにした。

セル温度を変化させた場合の短絡電流の変化を図11(b)に示す。計測範囲内において、PVセルの短絡電流は温度に対して直線的に変化しており、その傾きを温度感度として求めたところ、 $0.04 \text{ mA/}^\circ\text{C}$ であった。4PV日射計で使用した電流-電圧変換用シャント抵抗 50.2Ω を通すと、電圧出力の感度は $0.002 \text{ V/}^\circ\text{C}$ となる。従つて、仮に、温度変化が 30°C であった場合でも出力電圧の変化はたかだか 0.06 V であり、実際の出力と比べて極めて小さい。つまり、

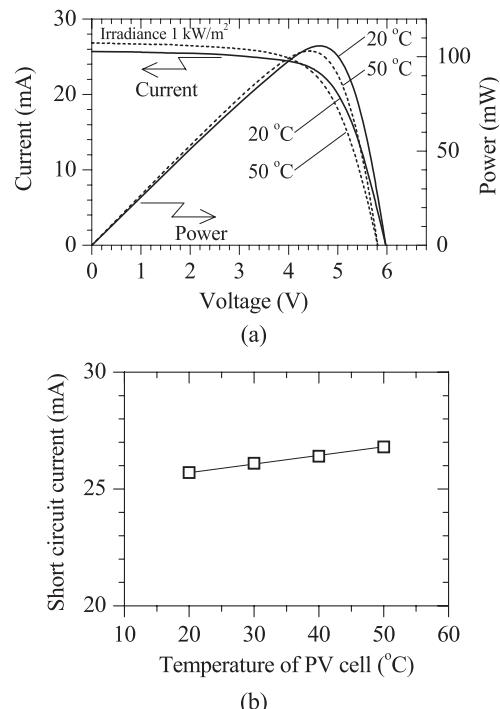


Fig.11 Temperature dependence of PV cell used in 4PV-array pyranometer, measured with solar simulator. (a) Current and power curves against voltage, (b) short circuit current as a function of temperature of PV cell.

ソーラシミュレータを用いたPVセルの温度特性の計測解析からも、PV日射計出力へ及ぼす外気温の影響は極めて小さく、従って、温度補正是必要ないと判断できた。

5. まとめ

温室内のように建材などの人工的な影が発生する環境においても、そのような影の影響なしに、気象変動のみに起因する日射変動を計測することができるPV日射計の開発を進めた。本研究では、小面積PVセルをセンサとして、A4ボード上の4角に分散配置した4PV日射計を試作した。温室内でのフィールド試験を通じ、4PV日射計は、前回試作した3PV日射計よりも建材影の影響を受けづらいことを明らかにした。また、PV日射計は太陽電池をセンサとしていることから、温度補正の必要性を判断するため、フィールド試験の計測値を用いて、温度特性を把握した。その結果、わずかな温度依存性があり、温度補正を行うと誤差がわずか低減できるものの、日射強度のばらつきよりも小さいことがわかった。また、使用したセル自体の温度特性をソーラシミュレータを用いて計測したところ、温度感度は極めて低く、温度補正を施さなくても実用的に利用可能であると判断できることがわかった。

謝辞

本研究の一部は、愛知県農工連携研究促進事業、豊橋技術科学大学外部資金プロジェクト、同VBL

研究プロジェクト、文部科学省グローバルG-COEプログラム「インテリジェントセンシングのフロンティア」、未来ビーカルシティ事業、科学研究費補助金、日本学術振興会拠点大学交流事業、および中部電力基礎技術研究所研究助成の支援を受けて行われた。

参考文献

- 1) 桶 他:「温室内日射計測のための太陽電池アレイ型簡易日射計の開発」、太陽エネルギー、Vol.35, No.5, pp.71-76 (2009)
- 2) 杉山 他:「太陽電池アレイ型簡易日射計の開発とフィールド試験」、太陽／風力エネルギー講演論文集 2009, 52, pp.235-238 (2009)
- 3) G. Makrides, *et al.* : "Temperature behaviour of different photovoltaic systems installed in Cyprus and Germany", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol.93, pp.1095-1099 (2009)
- 4) P. Singh, *et al.* : "Temperature dependence of *I-V* characteristics and performance parameters of silicon solar cell", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol.92, pp.1611-1616 (2008)
- 5) Y. Hoshikawa, *et al.* : "Translation of the *I-V* curves of various solar cells by improved liner interpolation", 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, 4-8 September 2006, pp.2093-2096, Germany