

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

Development of Simple Pyranometer using PV Array for Solar Irradiance Measurement in Greenhouse

桶 真一郎^{*1} 杉山智美^{*2} 須田善行^{*3} 滝川浩史^{*4} 川嶋和子^{*5}
Shinichiro OKE Satomi SUGIYAMA Yoshiyuki SUDA Hirofumi TAKIKAWA Kazuko KAWASHIMA

Abstract

Solar irradiance measurement in greenhouse is important for automatic control of the greenhouse condition. However, in the greenhouse, partial shadow is caused due to structures of the greenhouse. If a partial shadow was on a conventional thermopile-type pyranometer (TP pyranometer), an actual change of irradiance could not be measured. We proposed to apply PV array for pyranometer, since short circuit current of PV array consists of series PV cells and bypass diodes was not changed by partial shadow. A prototype of PV-array-type simple pyranometer (PV array pyranometer) was produced, and its measurement characteristics were evaluated by field test with the TP pyranometer in outdoors and greenhouse. Output voltage of the PV array pyranometer varied linearly with irradiance measured by the TP pyranometer. In case of the partial shadow on the PV array pyranometer and the TP pyranometer; output of the TP pyranometer was changed by the shadow, output of the PV array pyranometer was not changed by the shadow.

キーワード：全天日射計，太陽電池アレイ，日射強度， I - V 特性曲線，温室，農業

Key Words: Pyranometer, PV array, Solar irradiance, I - V characteristic curve, Greenhouse, Agriculture

1. はじめに

今日、主流となっている日射計は、受光板の温度差を用いて日射を測定する熱電堆型日射計である^{1,2)}。熱電堆型日射計は、計測精度が高いが非常に高価であり、気象科学分野以外には普及しているとはいえない。近年、センサに安価な半導体素子を用いた日射計^{3,4)}や、太陽電池をセンサとして用いた日射計^{5,6)}などが提案され、日射計の低価格化が試みられている。低価格な日射計が求められる背景には、日射計測の重要性が、気象科学分野のみならず、太陽エネルギーの有効利用や省エネルギーの観点からも高まってきていることなどがある。例えば、新型太陽光発電システム

の研究開発⁷⁻⁹⁾においては、その出力特性ならびに発電効率を求めるために、入射エネルギーである日射量の計測が必要である。また、日射量予測^{10,11)}や、それに基づく太陽エネルギー利用システムの運転制御¹²⁾、日射と建物熱負荷との関係を利用したエネルギー供給システムの運転制御¹³⁻¹⁵⁾のためには、過去および予測時点の日射データの蓄積・計測が重要である。また、農業従事者の減少および高齢化に対応するための、温室内環境の自動制御システムの普及が求められており、温室内日射計測の重要性が特に高まっている。

温室内日射計測において問題となるのが、影の影響である。一例として、愛知県農業総合試験場にある温室の内部の様子を図1に示す。このように、温室には非常に多くの支柱や梁などが使われており、温室には常にそれらの影が発生している。従来の日射計は、そのセンサに影がかかると得られる日射計測値が低下するので、建材・資材などによって発生する影がセンサ部にかかった場合、その近傍および温室全体の実際の日射と、出力する日射計測値とが大きく異なってしまう恐れがある。このような理由から、

^{*1} 津山工業高等専門学校電子制御工学科講師
(〒708-8509 岡山県津山市沼624-1)

e-mail: oke@tsuyama-ct.ac.jp

^{*2} 豊橋技術科学大学大学院電気・電子工学専攻学生

^{*3} 豊橋技術科学大学電気・電子工学系准教授

^{*4} 豊橋技術科学大学電気・電子工学系教授

^{*5} 愛知県農業総合試験場園芸研究部主任研究員

(原稿受付：2009年6月25日)



Fig.1 Inside of typical greenhouse consists of various kinds of structures which cause many partly shadows.

従来の日射計を用いて温室内日射を正確に計測することは困難である。また、経営規模が小さい農家にとって、高価な日射計を使用することは現実的でない。

本研究では、このような問題を解決するために、バイパスダイオードを備えた太陽電池アレイを日射センサとして用いることで、部分的に発生する影の影響を受けにくい太陽電池アレイ型簡易日射計（PV-array-type simple pyranometer; PVアレイ日射計）を試作した。また、フィールド試験により、試作PVアレイ日射計の計測特性を評価した。

2. PVアレイ日射計

2.1 PVアレイの電流－電圧特性

図2に、太陽光発電システムに使われているPVアレイの構成例を示す。PVアレイを構成するPVストリングに並列接続されたバイパスダイオードの役割は、故障、影、および汚れなどによって一部のPVセルあるいはPVストリングの出力電流が低下した場合、その影響が他のPVアレイ全体に及ばないように、出力が低下したPVストリングをバイパスすることである¹⁶⁻¹⁸⁾。

図3に、2個のPVストリングを直列に接続し、それぞれに並列にバイパスダイオードを接続したPVアレイの I - V 特性曲線を示す。同図中の記号はそれぞれ、(a) 日射強度： 0.73 kW/m^2 、遮光なし、(b) 同： 0.73 kW/m^2 、一方のPVストリングを遮光、(c) 同： 0.67 kW/m^2 、遮光なし、(d) 同： 0.67 kW/m^2 、一方のPVストリングを遮光、の場合を示す。(a) および (c) から、日射強度が 0.73 kW/m^2 のときの短絡電流は 3.2 A 、日射強度が 0.67 kW/m^2 のときの短絡電流は 2.5 A と、日射強度によってPVストリングの短絡電流が変化することがわかる。また、(b) および (d) のように、一方のPVストリングを遮光した場合、 I - V 特性曲線に段差が生じたことがわかる。しかしながら、短絡電流は遮光の有無によって変化しなかった。

2.2 PVアレイ日射計の試作

筆者らは、バイパスダイオードを備えたPVアレイの I - V

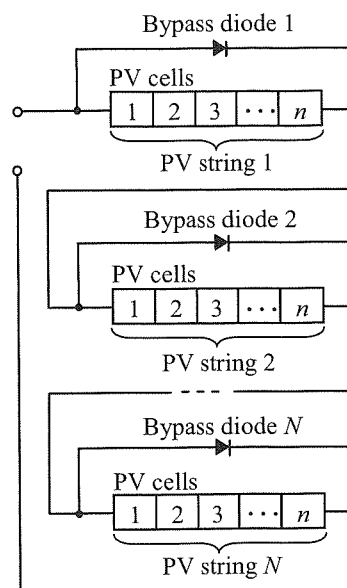


Fig.2 Structure of PV array.

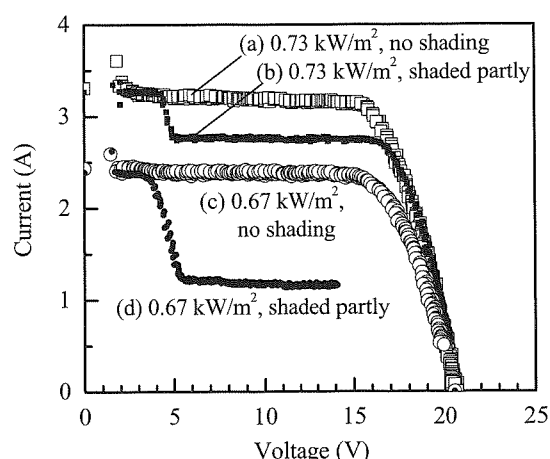


Fig.3 I - V characteristic curves of the PV array consist of two series PV strings which each have a bypass diode.

特性に注目し、センサの一部に影が生じて、計測値にはその影響が及ばないPVアレイ日射計を発想した。PVアレイ日射計は、直列接続した複数のPVストリング、およびそれぞれに並列接続したバイパスダイオードを備えており、その短絡電流によって日射強度を計測する。もし、一部のPVストリング上に影が生じ、その出力電流が低下しても、バイパスダイオードの作用により、PVアレイ日射計全体の短絡電流は変化しない。したがって、影の有無にかかわらず、日射計近傍の日射強度を計測することが可能である。

試作したPVアレイ日射計の回路図を図4に示す。同図に示すように、本試作モデルでは、複数のPVセルから成るPVストリングとバイパスダイオードとを並列接続したものを3組用意し、それらを直列接続してPVアレイを構成した。1個のPVストリングは、32枚の単結晶シリコンPVセル（16直列、2並列）から成り、その定格電圧は 8 V 、

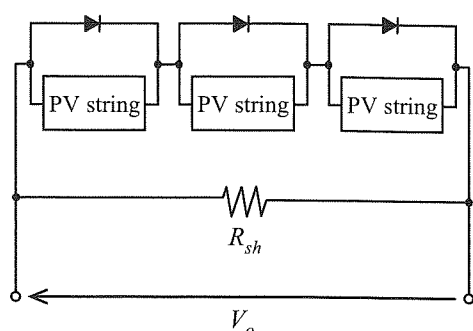


Fig.4 Prototype circuit of PV array pyranometer.

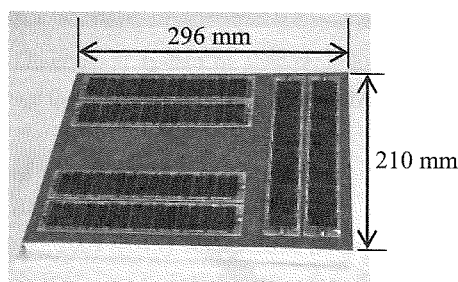


Fig.5 Prototype of PV array pyranometer.

定格電流は 120 mA である。バイパスダイオードには 1N5401 (General Semiconductor) を使用した。また、日射強度によって変化する短絡電流は、抵抗 R_{sh} を用いて電圧 V_o として検出することとした。今回は、 R_{sh} を 10Ω とした。試作した PV アレイ日射計の外観を図 5 に示す。A4 サイズ (296 mm × 210 mm) のプラスチック製プレート上に 3 個の PV スtring を配置した。なお、温室内にこのような寸法の日射計を設置した場合、農作業への影響はほとんどないことを農業関係者に確認した。バイパスダイオード、モジュール間配線、および抵抗は、プレートの下側に配置し、屋外への設置を想定して防水加工を施した。

3. フィールド試験による PV アレイ日射計の特性評価

3.1 フィールド試験の概要

豊橋技術科学大学 (愛知県豊橋市) および愛知県農業総合試験場 (愛知県長久手市) においてフィールド試験を実施し、PV アレイ日射計の特性を評価した。それぞれの地点における計測環境は、前者では屋外、後者では温室内とした。本フィールド試験においては、従来の熱電堆型日射計 (Thermopile-type pyranometer; TP 日射計) MS-601 (英弘精機) を PV アレイ日射計と同一の場所に設置し、それぞれの計測値を比較した。表 1 に、それぞれの日射計の仕様を示す。PV アレイ日射計は市販 PV セルをセンサとして用いているため、安価であり応答速度が約 $3 \mu s$ と非常に高速だが、TP 日射計は高価であり、かつ応答速度 (95%) が約 17 s と遅い。センサ部の面積は、PV アレイ日射計が合計約 620 cm^2 であるのに対して、TP 日射計は約 3 cm^2 と小さい。

Table 1

Characteristics of PV array and TP pyranometers

	PV array	TP
Sensor	PV cells	Thermopile
Response time	$3 \mu s$	17 s (95%)
Area of sensor	620 cm^2	3 cm^2
Price	¥10,000 or less	¥80,000 or more

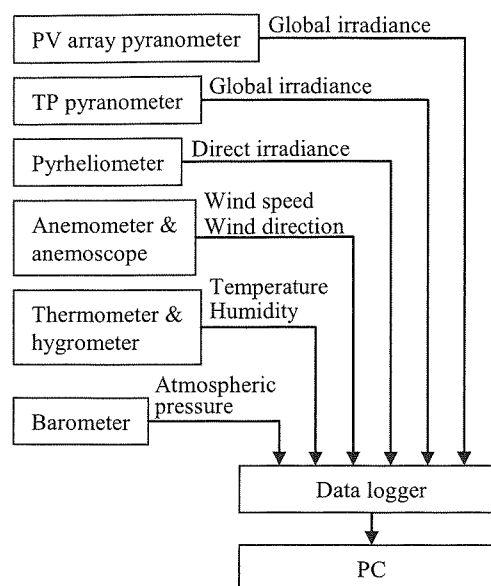


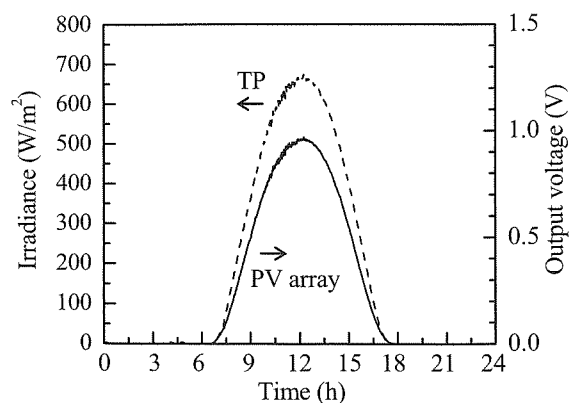
Fig.6 General weather measurement system in Toyohashi University of Technology.

また、TP 日射計はセンサを一つしか持たないため、影がセンサ上に発生した場合、その計測値は影の影響を受けて変化してしまう。

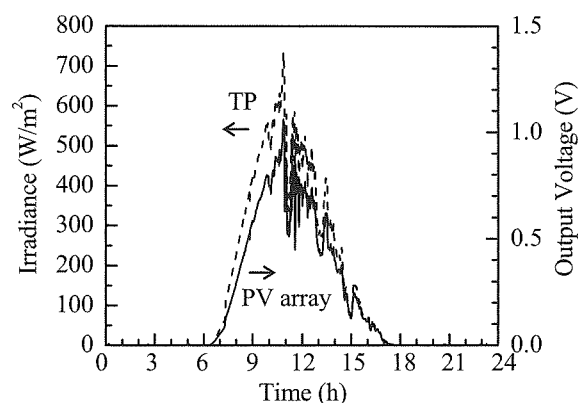
豊橋技術科学大学では、図 6 に示す総合気象観測システムを構築し、各種日射強度、外気温湿度、風向風速、気圧、および太陽光発電システムの諸特性などを常時計測している。本フィールド試験では、PV アレイ日射計および TP 日射計を総合気象観測システムに組み込み、他のデータと同様に 1 秒毎の計測値を連続的に取得した。本フィールド試験は 2009 年 2 月に開始し、2009 年 7 月現在も継続中である。本論文では、2009 年 2 月～4 月の期間に得られた計測結果に基づき、PV アレイ日射計の諸特性を検討した。

3.2 日射強度－出力電圧特性

図 7 に、豊橋技術科学大学において計測した TP 日射計および PV アレイ日射計の日射強度および出力電圧の時系列を示す。同図 (a) は 2009 年 2 月 10 日の、同図 (b) は同年 2 月 22 日の計測結果である。同図 (a) に示すように、2 月 10 日は、両方の曲線が滑らかな曲線を描いていることから、当日は天候の安定した快晴日であったことがわかる。この日の日射強度および出力電圧は、ともに 12 時 13 分に、



(a) Clear day (10 Feb. 2009)

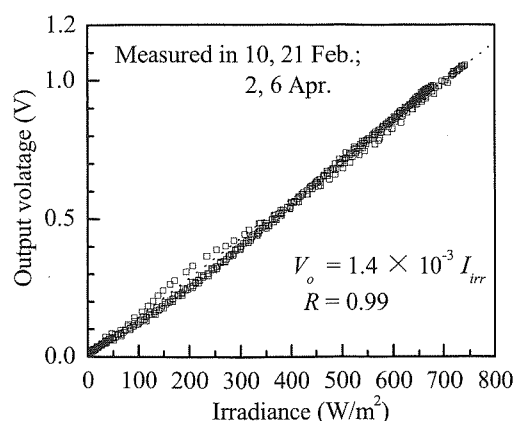


(b) Cloudy after fine day (22 Feb. 2009)

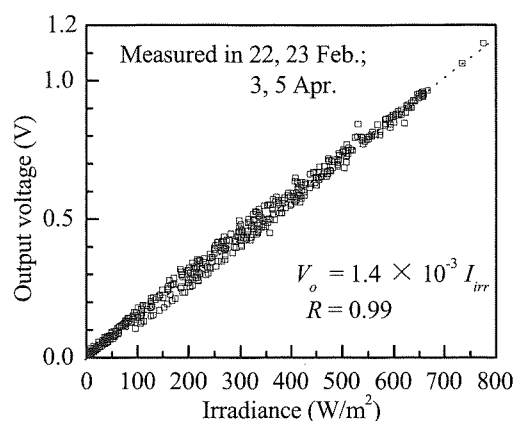
Fig.7 Time series irradiance and output voltage measured with the TP and the PV array pyranometers, respectively.

それぞれの日最大値である 674 W/m^2 および 0.97 V を記録した。一方、同図 (b) に示すように、2月22日の場合は、午後には雲が次々と太陽にかかり日射強度が不安定であった。この日の日射強度および出力電圧は、ともに10時51分に、それぞれの日最大値である 734 W/m^2 および 1.06 V を記録した。

2月10日およびその日と同様に天候の安定した快晴日であり、日射強度が安定であった2月21日、4月2日、および4月6日における日射強度-出力電圧特性を図8(a)に、2月22日およびその日と同様に天候が変化し、日射強度が不安定であった2月23日、4月3日、および4月5日における日射強度-出力電圧特性を図8(b)に示す。なお、両図のプロットは1秒毎の計測値から求めた1分平均値である。図8(a)から、快晴日においては、PVアレイ日射計の出力電圧はTP日射計で計測した日射強度に対して比例関係にあることがわかる。日射強度 $I_{irr} (\text{W/m}^2)$ と出力電圧 $V_o (\text{V})$ との関係式を同図中に示す。それらの相関係数 R は0.99と非常に強い相関性を有していることがわかる。同図(b)から、日射強度が不安定であった日においても、PVアレイ日射計の出力電圧はTP日射計で計測した日射強度に対して比例関係にあることがわかる。それらの相関係数



(a) Clear days



(b) Cloudy days and cloudy after fine days

Fig.8 Relation between irradiance measured with the TP pyranometer and output voltage of the PV array pyranometer.

R は0.99と非常に強い相関性を有している。図8(a)および(b)中に示す日射強度 $I_{irr} (\text{W/m}^2)$ と出力電圧 $V_o (\text{V})$ との関係式における係数は、いずれも $1.4 \times 10^{-3} \text{ V}/(\text{W/m}^2)$ であり、快晴日とそれ以外の日との間に違いはない。日射強度と太陽電池の短絡電流との間にはほぼ線形の関係があることは、文献(3, 19)などで示されており、今回の計測結果はそれらと矛盾しない。なお、日射強度が不安定であった日ばかりを集めた図8(b)のプロットが、日射が安定した日ばかりを集めた図8(a)のそれよりややばらついているのは、PVアレイ日射計およびTP日射計のセンサであるPVセルおよび熱電堆の応答速度が互いに異なることが主な原因である。

3.3 影の影響

図9に示す装置を用いて、PVアレイ日射計およびTP日射計のセンサ面に影が生じた場合におけるそれぞれの日射計の計測値を比較した。PVアレイ日射計およびTP日射計を水平面に設置し、その南東側に直径30mmφの棒を配置した。太陽の移動に伴って棒の影が移動し、それぞれの日射計のセンサ面の一部を遮光する仕組みである。それぞれ

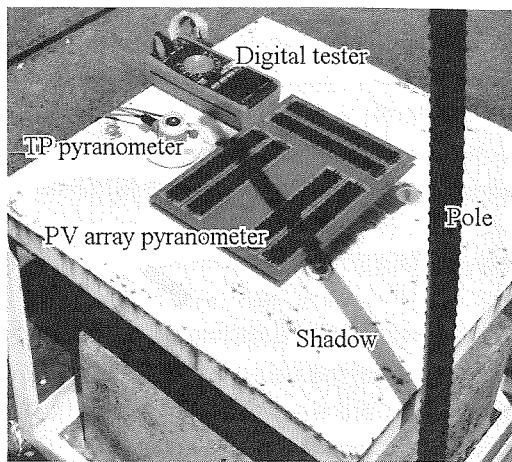


Fig.9 Observation system of shadow influence on the PV array and the TP pyranometers.

の計測値は総合気象観測システムに取り込むとともに、デジタルテストを用いて目視観察した。

図 10 に、2009 年 4 月 3 日の 10 時 30 分～11 時 15 分の計測結果を示す。なお、比較のため、それぞれの計測値を 11 時 7 分に記録した当日の最大値 (TP 日射計: 881 W/m^2 , PV アレイ日射計: 1.1 V) で規格化した。同図中に示す時間帯 A (10 時 30 分～42 分) には、どちらの日射計にも影がかかっていなかった。このとき、両方の日射計の計測値の変化はほぼ等しかった。時間帯 B (10 時 42 分～47 分) には、同図中の写真に示すように、PV アレイ日射計にのみ影がかかった。このとき、計測値には影の影響は現れなかった。時間帯 C (10 時 47 分～11 時 0 分) には、両方の日射計に影がかかった。このとき、TP 日射計の計測値は一

旦急激に低下した後、回復した。これは、センサ面が影により一時的に遮光されたためである。一方で、PV アレイ日射計の計測値には影の影響とみられる変動は現れなかった。その後、時間帯 D (11 時 0 分～15 分) には再び、PV アレイ日射計にのみ影がかかった。このとき、やや日射が変動したが、それぞれの日射計の計測値は、ほとんど同じ変化を呈した。

この実験により、PV アレイ日射計は、そのセンサ面の一部に影が生じた場合でも、影がない場合と同様の日射計測値が得られることがわかった。なお、今回提案した PV アレイ日射計の場合は、3 個の PV スtring のうち 2 個を完全に遮光しても、残る 1 個に影がかからない限り、影が全くない場合と同様の計測値を得ることができる。

4. まとめ

温室のように常に影が発生する環境においても、気象変動に起因する日射変動を計測することのできる PV アレイ日射計を試作した。PV アレイ日射計は、A4 サイズの基板上に日射センサとしてバイパスダイオードを備えた PV アレイを配し、その短絡電流を抵抗の両端の電圧として検出することで、日射変動を計測する。フィールド試験の結果、PV アレイ日射計の出力は、TP 日射計で計測した日射強度に対して線形性を有していることを確認した。また、PV アレイ日射計および TP 日射計のセンサ部に影が発生した場合のそれぞれの計測値を比較した。その結果、TP 日射計では、影の影響により実際の日射変動とは異なる計測値が得られたが、PV アレイ日射計では、影の影響を受けずに実際の日射変動を計測することができた。以上のことから、

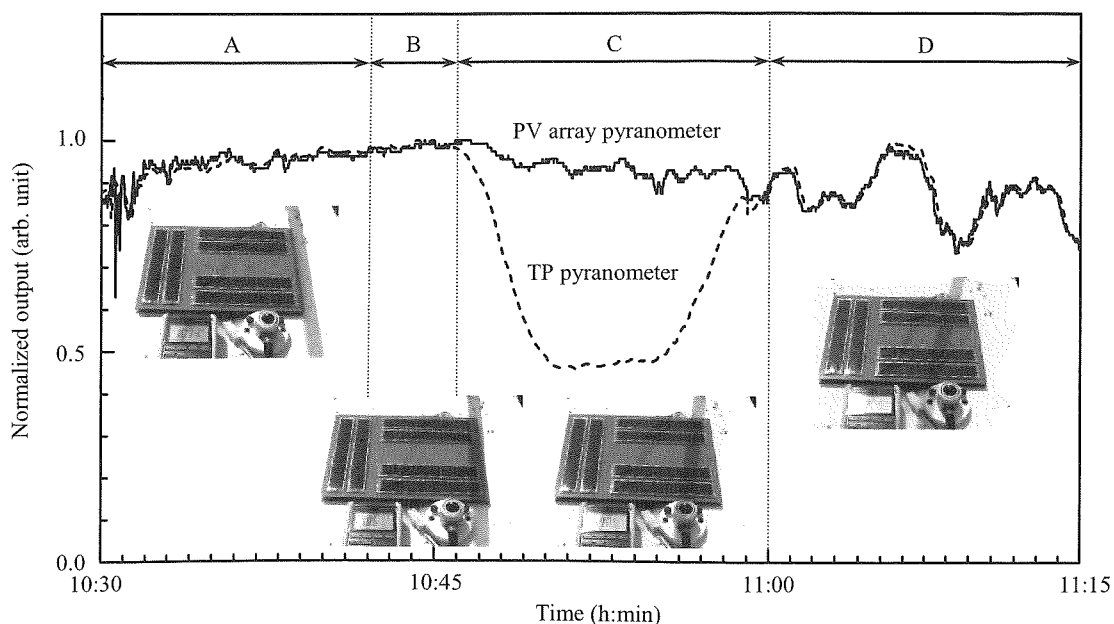


Fig.10 Change of outputs of the PV array and the TP pyranometers when they were shaded.

本論文で提案した PV アレイ日射計は、温室での日射計測において相当の実用性を有していると結論づけた。なお、PV アレイ日射計のセンサには、光入力に対して定電流特性を有している素子であれば、PV セル以外にフォトダイオードやフォトトランジスタなどを用いることも可能である。

今後は、本論文で試作した PV アレイ日射計のフィールド試験を継続し、温度特性、劣化特性、および日射スペクトル分布の影響などについて検討する。また、PV アレイの構成や配置の改良を進めるとともに、PV セル以外の素子をセンサとして用いた同原理の簡易日射計を設計・試作する予定である。

謝辞

本研究の一部は、豊橋技術科学大学未来技術流動リサーチセンター若手教員プロジェクト、同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 GOE 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」、愛知県農工連携研究促進事業、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) 三宅：「日射計の歴史・第1回」，*太陽エネルギー*，Vol.35，No.2，pp.61-72 (2009)
- (2) 英弘精機株式会社：<http://www.eko.co.jp/eko/a/a02-fr.html> (2009/5/1)
- (3) 桶 他：「Si フォトダイオード型直達日射計の試作とその特性評価」，*太陽エネルギー*，Vol.32，No.3，pp.49-55 (2006)
- (4) K. Hirata, *et al.*: "Spectral error analysis of pyranometers composed of multiple photodiodes", *Renewable Energy 2006 Proceedings*, pp.151-154 (2006)
- (5) 横河電子機器株式会社 (H-205 日射計感部)：
<http://www.yokogawa.com/jp-ydk/ie/env/meteo/products/ydkie-en-solar-h-205-ja.htm> (2009/5/1)
- (6) 光進電気工業株式会社 (日射計 SR-016)：
<http://www.koshindenki.com/productdetail.aspx?id=160> (2009/5/1)
- (7) K. Araki, *et al.*: "Influence of spectrum change to 3-junction concentrator cells", *Solar Energy Materials & Solar cells*, Vol.75, pp.707-714 (2003)
- (8) K. Araki, *et al.*: "Sunset environment and spectrum analysis for concentrator PV systems in Japan", *Solar Energy Materials & Solar cells*, Vol.75, pp.715-721 (2003)
- (9) 見目 他：「集光型太陽光発電システムのフィールドテスト」，*太陽エネルギー*，Vol.29，No.5，pp.20-25 (2003)
- (10) 桶 他：「全国各地の日日射量曲線予測のための気候区代表モデル法」，*電気学会論文誌B*，Vol.128，No.1，pp.151-156 (2008)
- (11) 桶 他：「日日射量曲線の予測に基づいた予測日積算日射量の誤差低減」，*太陽エネルギー*，Vol.33，No.2，pp.53-58 (2007)
- (12) 見目 他：「数日先までの日射量を予測した太陽熱・電力ハイブリッド給湯システムの運用法」，*電気学会論文誌B*，Vol.120，No.6，pp.831-837 (2000)
- (13) 桶 他：「太陽光・熱/コージェネシステムの CO₂ 排出量に与えるシステム運転法の影響」，*電気学会論文誌B*，Vol.125，No.10，pp.930-938 (2005)
- (14) 松下：「水蓄熱式空調システム最適運転のための負荷予測精度の検証と改善」，*空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集*，Vol.2007，No.2，pp.1119-1122 (2007)
- (15) T. Hong, *et al.*: "A design day for building load and energy estimation", *Building and Environment*, Vol.34, No.4, pp.469-477 (1999)
- (16) M.C. Alonso-Garcia, *et al.*: "Computer simulation of shading effects in photovoltaic arrays", *Renewable Energy*, Vol.31, pp.1986-1993 (2006)
- (17) 河村 他：「太陽電池モジュールの I-V 特性に及ぼす影の影響」，*太陽エネルギー*，Vol.27，No.6，pp.41-49 (2001)
- (18) E. Karatepe, *et al.*: "Development of a suitable model for characterizing photovoltaic arrays with shaded solar cells", *Solar Energy*, Vol.81, pp.977-992 (2007)
- (19) J. Tsutsui, *et al.*: "Investigation to estimate the short", *Progress in Photovoltaics*, Vol.16, No.3, pp.205-211 (2008)