

プリズムアレイシートを組み合わせた プリズム集光太陽電池モジュールの発電性能評価

Evaluation of Electricity Generation Performance of Prism Concentrating Photovoltaic Module Coupled with Micro Prismatic Array Sheet

山田 昇^{*1}
Noboru YAMADA

西川太朗^{*2}
Taro NISHIKAWA

南 貴裕^{*2}
Takahiro MINAMI

Abstract

This paper describes actual performance of a prism concentrator coupled with a micro prism array sheet with 0.1mm pitch and 0.3mm thickness. The prism array sheet flexibly adjusts an incident angle dependency of the prism concentrator. Two types of optical geometry; static prism and one-axis tracking prism concentrating PV(CPV) modules with geometrical concentration of 2.5 and 4.13, respectively, were tested under actual solar irradiation as compared with the conventional PV module. Electricity generation of the static prism CPV was approximately 1.3 times higher than that of the conventional module, and the one-axis tracking prism CPV was approximately 2.5 times higher than the conventional one with tracking error within $\pm 6^\circ$. Maximum backside temperature of PV cell was 12°C higher than the conventional PV.

キーワード: 太陽光集光器, プリズム集光器, プリズムアレイシート, 集光型太陽電池

Key Words: Solar concentrator, Prism concentrator, Micro prismatic array sheet, Concentrating photovoltaic

1. 緒言

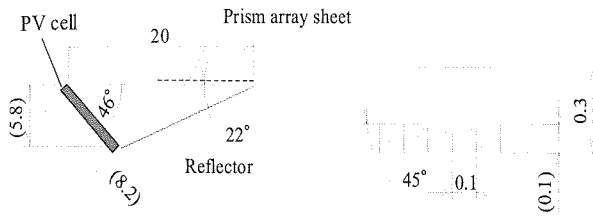
近年, エネルギー・環境問題の緩和方策として太陽エネルギーの有効利用が喫緊の課題となっている。太陽光発電は, 研究開発と導入が積極的に進められているが, 一般家庭をはじめ, 携帯電子端末, 自動車などの移動体等への広範な普及促進のためには更なる多様化・高効率化・低コスト化が必要である。その一手段として, 集光装置を用いて太陽光を微小面積の高効率太陽電池セルに集光する集光型太陽電池がある。集光倍率600倍以上のフレネルレンズを用いた追尾システムが開発されており高い成果を挙げている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。また, 低集光倍率の非追尾モジュールもBIPV(Building Integrated Photovoltaic)などへの実用化に向けて開発されている⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾。今後, 各種太陽電池セルの発電効率および製造コストなどの変化に応じて, 多様なアプリケーションに対して最良のコストパフォーマンスが得られる太陽光集光器(Solar concentrator)の探求を行うことは有意義である。

本研究では, 薄型で構造が簡易なプリズム集光器(Prism concentrator)に着目する。プリズム集光器は非結像集光系であり, コンセプトはMills and Giutronich⁽⁹⁾によって提案されている。フレネルレンズ等を用いた高集光倍率の集光器に対して, プリズム集光器の集光倍率は5倍程度と低いため, 太陽電池セル(PVセル)面積の低減効果は小さいが, 固定設置集光もしくは低精度な追尾による集光が可能であるため, 高精度の大型追尾装置を必要としない。Uematsu⁽¹⁰⁾らは集光倍率2.6のプリズム集光器について, 光学解析と擬似太陽光照射下における試作試験により有効性を示すとともに, 反射面にV字溝を付与することで入射角度特性(Incident angle dependency)を調節できることを報告している。しかし, プリズム集光器の集光倍率と入射角度特性を制御する低コストかつ効果的な手法は十分に確立されておらず, 実際の日射条件下での試験結果の報告もなされていない。

筆者らは既報⁽¹¹⁾において光学解析および擬似太陽光照射下における基礎試験により, プリズムアレイシートを組み合わせたプリズム集光器の入射角度特性を明らかにした。本報では既報⁽¹¹⁾で試作したプリズム集光太陽電池モジュールの実際の日射条件下における発電性能を集光器の無い通常の太陽電池と比較試験した結果を報告する。

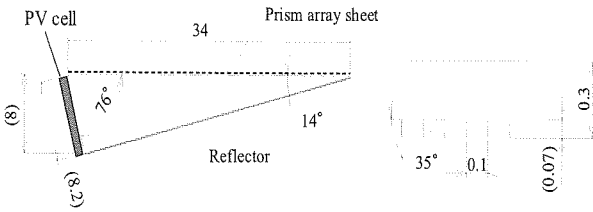
*1 長岡技術科学大学 准教授

*2 長岡技術科学大学大学院機械創造工学専攻
(〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)
Tel & Fax: +81-258-47-9762
E-mail: noboru@nagaokaut.ac.jp
(原稿受付: 2009年3月3日)



(a) 固定プリズム集光PVモジュール ($C_g = 2.5$)

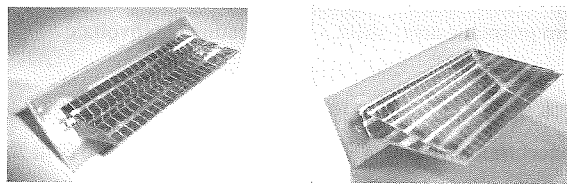
(a) Static prism CPV module



(b) 追尾プリズム集光PVモジュール ($C_g = 4.13$)

(b) One axis-tracking prism CPV module

図1 試作プリズム集光PVモジュールの断面図⁽¹¹⁾
(プリズムアレイシートの拡大断面を右側に示す)
Fig.1 Cross section of fabricated prism concentrating photovoltaic (CPV) modules with prism array sheet



(a) 固定プリズム集光PV (b) 追尾プリズム集光PV
(a) Static prism CPV (b) One-axis tracking prism CPV

図2 試作プリズム集光PVの概観⁽¹¹⁾

Fig.2 Photo of fabricated prism CPV modules

2. プリズム集光PVモジュール

既報⁽¹¹⁾において、プリズム集光器の受光面に微細プリズムアレイ構造を有する光機能性シート(以下、プリズムアレイシート)を設置することで入射角度特性を制御する手法を示した。図1(a)および(b)に本研究に用いた固定(非追尾)および一軸追尾用のプリズム集光器と受光面に設置するプリズムアレイシートの断面形状を示す。集光器の集光部にPVセルを設置したモジュールとなる。以降、これらの形態をそれぞれ固定プリズム集光PVおよび追尾プリズム集光PVと呼ぶ。図2に試作集光PVの概観を示す。固定プリズム集光PVでは、プリズム集光器の受光面の半分を厚さ0.3mmのプリズムアレイシートで覆い、追尾プリズム集光PVでは、プリズム集光

表1 プリズム集光PVに使用したPVセルの仕様

Table.1 Specifications of PV cell used in prism CPV modules

Condition of specification	25°C AM1.5 1000W/m ²
Solar cell element	Single crystal silicone
Maximum power output [W]	0.36
Short-circuit current I_{sc} [A]	0.13
Open-circuit voltage V_{oc} [V]	2.8
Optimal point current I_{op} [A]	0.14
Optimal point voltage V_{op} [V]	3.5
Conversion efficiency [%]	10
Cell area [mm ²]	439×8.2

器の受光面全体をプリズムアレイシートで覆っている。これらは既報⁽¹¹⁾において、光学解析および擬似太陽光照射下の実験により良好な入射角度特性が得られた形態である。

プリズム集光器およびプリズムアレイシートの材料には、組み合わせる太陽電池の発電感度波長帯において透過率が高い材料を用いる必要がある。本試作では、透明アクリル樹脂(PMMA)を採用した。表1にプリズム集光PVに用いたPVセルの仕様を示す。プリズム集光器とPVセルは光学接着剤(屈折率1.59)を用いて接着し、反射面に高反射アルミ板(反射率95%、板厚0.3mm)を接着した。このように、本プリズム集光PVの構成要素は、携帯電話などに採用されている液晶ディスプレイバックライトの構成要素と基本的に同じものであり、実用化の際には既存の生産技術を利用できる。

集光光学系の集光倍率を表す集光比には、以下の2種類の定義がある。

- 幾何学的集光比 (Geometrical concentration ratio)

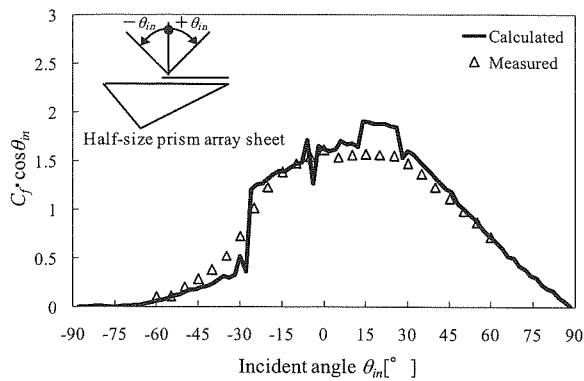
$$C_g = \frac{A_{ap}}{A_{sc}} \quad (1)$$

- エネルギー密度集光比 (Flux concentration ratio)

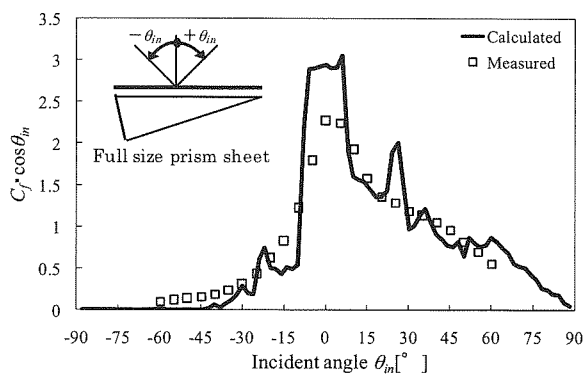
$$C_f = \frac{I_{sc}}{I_{ap}} \quad (2)$$

ここで、 A_{ap} は受光面面積、 A_{sc} は集光面(PVセル)面積、 I_{ap} は受光面における単位面積あたりの入射エネルギー、 I_{sc} は集光面における単位面積あたりの入射エネルギーである。なお、固定プリズム集光PVの受光面は、図1に示す20mmすべてを受光面と定義する。単位集光面(PVセル)面積あたりの受光面面積は C_g によって評価できる。つまり、 C_g が大きいほど同じ受光面面積に対して太陽電池セル面積が小さくなる。図1(a)固定プリズム集光PVは $C_g = 2.5$ 、図1(b)追尾プリズム集光PVは $C_g = 4.13$ である。

一方、集光器の入射角度特性は、入射角度 θ_m に対するエネルギー密度集光比 C_f の変化によって評価できる。 $C_f > 1$ の場合に集光効果が得られていることを示す。ただし、受光面の法線に対して角度 θ_m で入射する光線のエネルギー



(a) 固定プリズム集光PV ($C_g = 2.5$)
(a) Static prism CPV



(b) 追尾プリズム集光PV ($C_g = 4.13$)
(b) One-axis tracking prism CPV

図3 固定および追尾プリズム集光PVの入射角度特性
試験結果および解析結果⁽¹¹⁾

Fig.3 Test and ray-tracing result of incident angle
dependency of prism CPV shown in Fig.1

は余弦則に従って投影面積が減少するため、実効的な集光の度合いはエネルギー密度集光比 C_f に $\cos\theta_m$ を乗じたものとなる。したがって本論文では、 $C_f \cdot \cos\theta_m$ を実効集光比と定義し、入射角度特性の検証に用いる。

図3(a)および(b)に固定および追尾プリズム集光器の入射角度特性を示す。光線追跡解析結果と0.5SUNの擬似太陽光照射下における実験結果をプロットした。ただし、集光器長手方向の入射角度はゼロである。図3(a)より、固定プリズム集光PVは入射光線が $\theta_m = -15^\circ \sim 30^\circ$ の間で $C_f \cdot \cos\theta_m$ が約1.5となり、約 45° の許容入射角度範囲を持つ。太陽高度は夏至の -23.44° から冬至の 23.44° ⁽¹³⁾まで年変化するが、ほぼ許容入射角度範囲に収まるため、年間を通して固定集光が可能である。一方、図3(b)の追尾プリズム集光PVでは、垂直入射時 ($\theta_m = 0^\circ$) には $C_f \cdot \cos\theta_m$ が約2.4~3.0となり、 $\pm 6^\circ$ 程度の

許容入射角度範囲を有する。このため、追尾装置には $\pm 6^\circ$ 未満の追尾誤差が許される。

3. 試験方法および条件

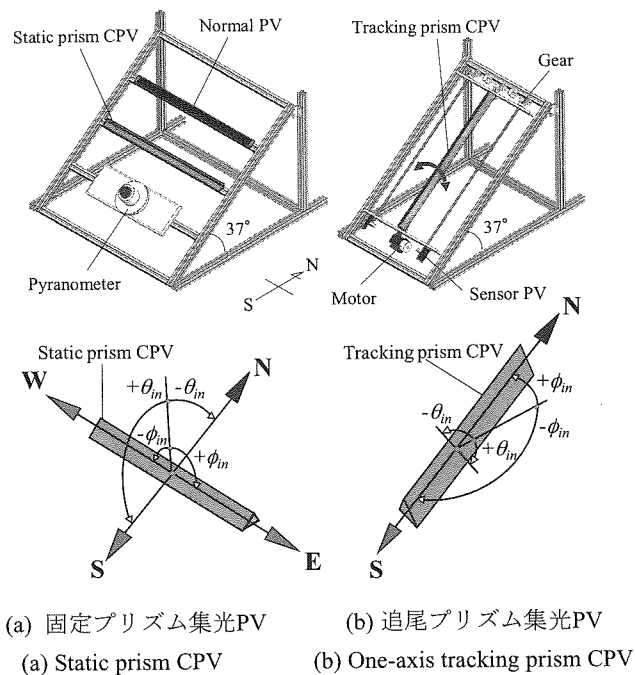
3.1 試験方法

プリズム集光PVの実際の日射条件下での発電性能を検証するために、屋外での性能試験を行った。図4(a)および(b)に固定プリズム集光PVおよび追尾プリズム集光PVの試験装置の概略と受光面を基準とする入射角度の座標系をそれぞれ示す。図4(a)および(b)ともに設置角は 37° 、方位角は 0° (真南向き)とした。このとき固定プリズム集光PVはモジュール長手方向が東西方向となるように横置きし、一方、追尾プリズム集光PVはモジュール長手方向が南北方向となるように縦置きした。なお、本試験で使用したPVセルはすべて同タイプ・同ロット・同面積であり、発電効率の差異は $\pm 0.3\%$ 以下であることを事前に確認している。

追尾プリズム集光PVの追尾動作には、図4(c)に示すような一軸簡易追尾機構を用いた。図4(c)のように2枚の小面積PVセルを一定の角度で左右対称にお互いが背中合わせになるように傾斜配置したものを追尾用PVとし、この追尾用PVセルの回転軸上に追尾プリズム集光PVを取り付ける。このとき追尾用PVの対称軸が追尾プリズム集光PVの受光面法線と一致するように配置する。回路図のように追尾用PVの2枚のPVセル間の発電電力差によって追尾モーターが駆動する仕組みになっている。この方法を用いると、2枚のPVセルの発電電力が等しくなるまで、日射の強い方向に追尾用PVと受光面が回転する。太陽と正対するほどモーターへの供給電力が少なくなる単純な比例制御となる。日沈後には受光面は日没の方向を向いているが、日出後に一定の日射が得られると、追尾を自動的に再開する。山田らは既報⁽¹²⁾において本追尾機構を採用したPVモジュールを試作し、 $\pm 12.5^\circ$ 程度の追尾精度が可能であることを確認している。また、同様の追尾機構が文献⁽¹⁴⁾に紹介されている。この方式を用いると、少ない電子部品と簡便な回路によって外部電源を必要とせずに追尾できる利点がある。なお、実際の装置では図4(b)に示すように2枚の追尾用セルは別々の軸に取り付けられているが、各軸はギアによってリンクされておりプリズム集光PVの受光面の回転と同期する。

3.2 試験条件

性能試験は長岡科学技術大学機械棟の8階屋上(北緯 37° 、東経 137°)で実施した。固定プリズム集光PVの



(c) 一軸追尾機構の動作原理および回路図
(c) One-axis tracking mechanism and circuit diagram

図4 性能試験装置の概略図
Fig.4 Schematic of experimental apparatus

試験は2008年9月18日、24日、30日の3日間で行い、追尾プリズム集光PVの試験は2008年10月30日、11月12日、12月2日の3日間で行った。比較のため、いずれの試験においても集光器の無いPVセル(以下、ノーマルPV)を同じ傾斜角・方位角に設置し、同時測定を行った。表2に試験日の時刻9:00~15:00における気温、平均風速の平均値を示す。

ソースメータ (Keithley 2400) を用いて、1分間隔で各PVセルの電流-電圧特性(I-Vカーブ)を取得し、最大動作点における発電電力を測定した。同時に、全天日射計(PREDE PCM-03A)により傾斜面全天日射量、銅-コン

スタンタン熱電対によりPVセル背面温度を測定した。さらに追尾プリズム集光PVについては、レーザー変位計(Keyence LB-080)により追尾角を測定した。

表2 実験日における気象条件

Table. 2 Weather conditions during performance tests

Date	Temperature [°C]	Wind velocity [m/s]
Static prism CPV		
Sep.18	28.8	2.7
Sep.24	20.9	3.9
Sep.30	19.9	1.6
Auto tracking prism CPV		
Oct.30	12.1	2.0
Nov.12	13.6	1.1
Dec.2	11.4	1.4

4. 試験結果

4.1 固定プリズム集光PVモジュールの試験結果

固定プリズム集光PVに関する試験結果を図5(a)~図7(a)に示す。

図5(a)は発電電力と傾斜面全天日射量の時間変化であり、2008年9月30日の結果である。測定時間全体で平均して比較すると、固定プリズム集光PVはノーマルPVと比べて同PVセル面積基準で1.3倍の発電電力(最低1.2倍、最高1.4倍)となり、図3(a)で示した0.5 SUNの擬似太陽光照射下で得られた $C_f \cdot \cos\theta_m = 1.5$ ($\theta_m = 0^\circ$ 時)をやや下回った。

図6(a)にPVセル背面温度と発電効率の関係を示す。図5(a)と同様に2008年9月30日の結果である。受光面面積基準の発電効率は、発電電力/(傾斜面全天日射量×受光面面積)により求めた。固定プリズム集光PVのセル背面温度はノーマルPVよりも最大で約4℃高いが、温度上昇による発電効率の低下は見られない。しかし、固定プリズム集光PVの受光面面積基準での平均発電効率はノーマルPVの発電効率11.5%の約半分しかない。これは本プリズム集光器の幾何学的集光比 C_g が2.5であるのに対して、エネルギー密度集光比 C_f が1.3しかないことに起因する。言い換えると、本集光器の集光効率が $C_f / C_g = 1.3 / 2.5 = 0.52$ であることに起因する。つまり、受光面面積基準でノーマルPVと同等の発電電力を得るには、より高い集光効率の仕様を探求する必要がある。

図7(a)は傾斜面全天日射量と発電電力の関係であり、試験日3日間の計測値をプロットした。図7(a)では日射量と発電電力に比例傾向があり、最小二乗近似直線の傾きは固定プリズム集光PVの方がノーマルPVよりも1.5倍大きく、集光による発電電力の増加が得られている。

図8(a)は集光器受光面への入射角度とノーマルPVに対

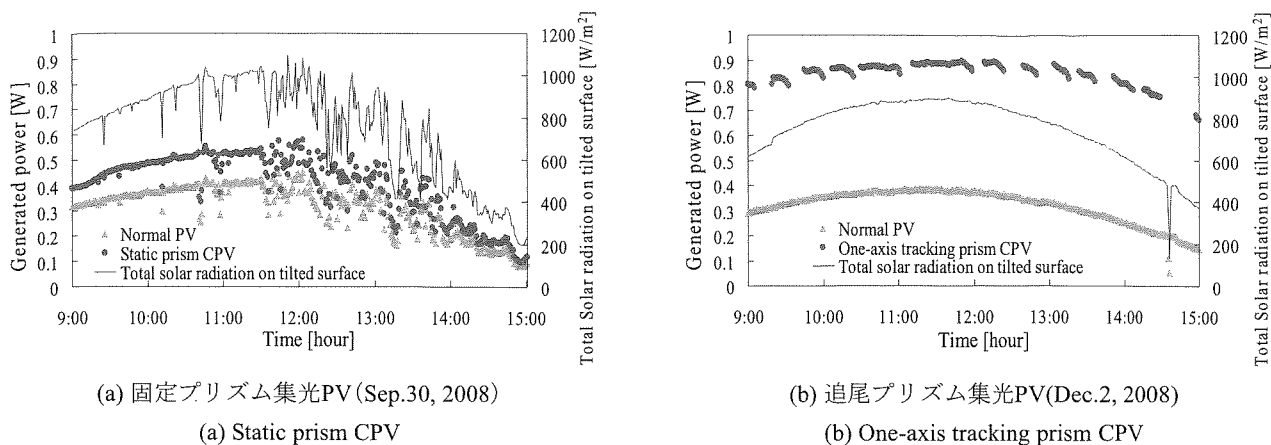


図5 各プリズム集光PVおよびノーマルPVの発電電力と傾斜面全天日射量の時間変化

Fig.5 Time variation of generated power of each prism CPV compared with normal PV and total tilted-surface solar radiation.

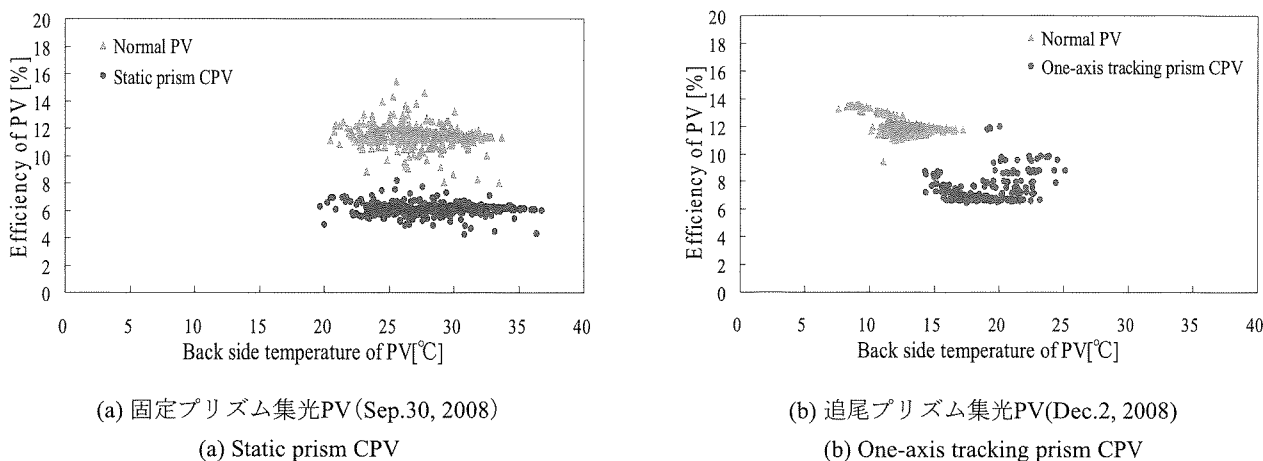


図6 各プリズム集光PVおよびノーマルPVのPV背面温度と発電効率の関係

Fig.6 Relation between PV cell backside temperature and efficiency of each prism CPV compared with normal PV.

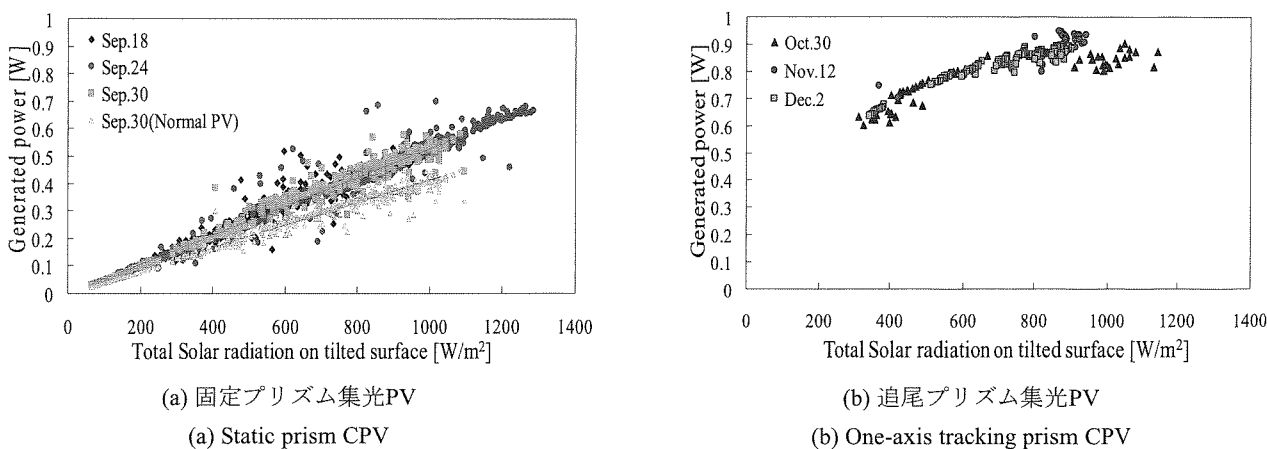


図7 各プリズム集光PVとノーマルPVの傾斜面全天日射量と発電電力の関係

Fig.7 Relation between generated power of each prism CPV compared with normal PV and total tilted-surface solar radiation for 3 experiment days

する発電電力の比の時間変化を示したものである。入射角度は図4(a)で定義した角度 θ_m , ϕ_m であり、試験日である2008年9月30日の太陽高度と方位から求めた。これより固定プリズム集光PVの縦断方向入射角度 θ_m は $-3 \sim -25^\circ$ まで変化しているが、これは図3(a)で示した入射角度特性において1.2~1.5倍の集光が得られている範囲に収まっており、このため前述のようにノーマルPVに対する発電電力の比が1.5倍をやや下回る1.3倍になったものと考えられる。このとき、横断方向入射角度 ϕ_m は $-60 \sim 50^\circ$ まで変化しているが、ノーマルPVとの発電電力の比への影響は見られなかった。

4.2 追尾プリズム集光PVモジュールの試験結果

追尾プリズム集光PVに関する試験結果を図5(b)~図7(b)に示す。

図5(b)は発電電力と傾斜面全天日射量の時間変化であり、2008年12月2日における結果である。図3(b)に示したように本追尾プリズム集光PVでは、 θ_m が $\pm 6^\circ$ より大きくなると発電電力が極端に低下する。本試験で用いた追尾機構では θ_m が $2^\circ \sim -12^\circ$ となったため、図5(b)では θ_m が $\pm 6^\circ$ 以内の点のみをプロットしている。以降は、この $\pm 6^\circ$ 以内に収まった測定データのみに対する考察である。測定時間全体で平均して比較すると、PVセル面積基準でノーマルPVと比べて平均2.5倍の発電電力(最低2.2倍, 最高4.5倍)となり、図3(b)の擬似太陽光照射下で得られた $C_f \cdot \cos \theta_m = 2.4$ ($\theta_m = 0^\circ$)と同程度の結果が得られた。

図6(b)はPVセル背面温度と発電効率の関係であり、図5(b)と同様に2008年12月2日における結果である。受光面積基準の発電効率は固定プリズム集光PVと同じく、発電電力/(傾斜面全天日射量×受光面積)により求めた。追尾プリズム集光PVの場合は、追尾による受光面への日射量の増加分が効率に反映される“見かけ”の発電効率となる。図6(b)よりセル背面温度はノーマルPVよりも最大で約 12°C 高いが、温度上昇による発電効率の減少は見られない。発電効率がばらつくのはセル背面温度が同じ場合(セル面への到達エネルギーが同じ場合)でも、実効集光比と日射量が異なる際には発電効率が増減するからである。受光面積基準の発電効率は、ノーマルPVの11.5%に対して8%となった。また、追尾プリズム集光PVの集光効率は固定プリズム集光PVよりも高く、 $C_f/C_g = 2.5/4.13 = 0.61$ となった。

図7(b)は追尾プリズム集光PVの傾斜面全天日射量と発電電力の関係であり、試験日3日間の結果である。日射量が $300 \sim 600\text{W/m}^2$ の範囲においては比例傾向が見られるが、 600W/m^2 以上では日射量の増加に対する発電電力の増加率が低下する傾向がみられる。 600W/m^2 付近では固定プリズム集光PVよりも発電電力が約2倍大きい。

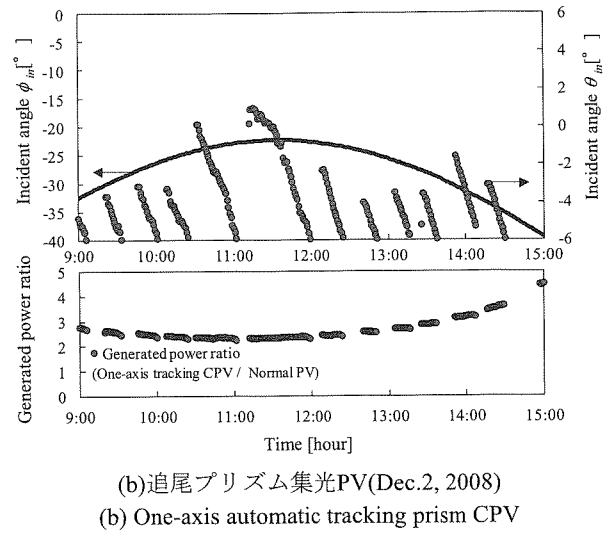
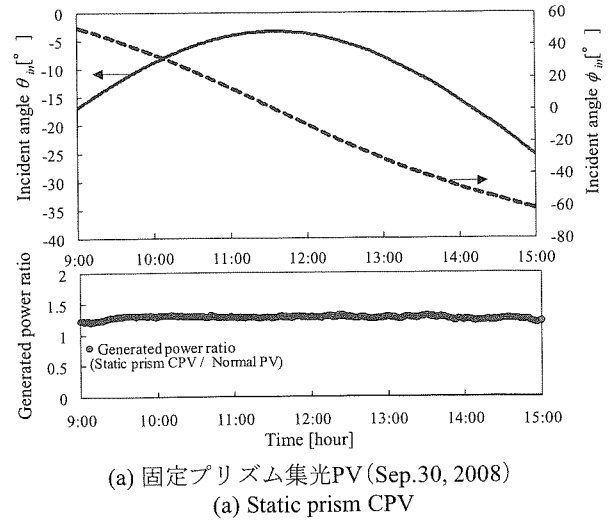


図8 各プリズム集光PV受光面への入射角度、およびノーマルPVとの発電電力の比の時間変化
Fig.8 Time variation of incident angles to aperture and generated power ratio of each prism CPV to normal PV

図8(b)は集光器受光面への入射角度とノーマルPVの発電電力に対する比の時間変化を示したものである。 θ_m 方向については追尾動作を行っており、 θ_m が $\pm 6^\circ$ 以内に収まった $\theta_m = 2^\circ \sim -6^\circ$ の範囲のデータをプロットしている。9:00付近と13:00付近ではノーマルPVに対して約3倍の発電電力が得られ、15:00には4.5倍が得られた。このとき ϕ_m は $-22^\circ \sim -32^\circ$ の範囲で変化している。この結果から南北方向の入射角 ϕ_m の影響のみを抽出することはできないが、既報⁽¹¹⁾の同プリズム集光器の3次元レイトレーシング解析結果では $\phi_m = -22^\circ \sim -32^\circ$ におけるセル面への集光量の変化がほとんどないことから、図8(b)におけるノーマルPVとの発電電力比の変化は、主に東西方向の追尾動作(入射角 θ_m)による受光面への日射量増加分に同期しているものと考えられる。

4.3 まとめ

以上のように、本プリズム集光PVモジュールでは、ノーマルPVに対して、PVセル面積基準においては固定プリズム集光PVで約1.3倍、追尾プリズム集光PVで約2.5倍の発電出力が得られたが、このときの受光面面積はノーマルPVの2.5倍、4.13倍となるため、受光面面積当たりの発電効率の比較ではノーマルPVに対してそれぞれ約半分、0.63倍となった。この結果から、受光面面積当たりの発電効率が重要視される用途に本モジュールを実用するためには集光効率において一層の改善が必要であることが示された。

なお、本試験は10月～12月の3日間において行われたものであり、気温、太陽高度、日射スペクトルなどの季節変化による影響等については今後より詳細な試験検証が必要である。

5. 結言

本研究では、プリズムアレイシートを組み合わせたプリズム集光太陽電池モジュールの発電電力を実際の日射条件下で測定し、以下の知見を得た。

- (1) 固定および追尾プリズム集光PVモジュールのPVセル面積当たりの発電電力は、それぞれ通常太陽電池の約1.3倍、約2.5倍となった。これらは前報において擬似太陽光照射下の実験により検証されたそれぞれの実効集光比とほぼ一致する。
- (2) 固定および追尾プリズム集光PVモジュールの受光面面積当たりの発電効率は、それぞれ通常太陽電池の約半分、0.63倍となった。これは本プリズム集光器の集光効率が低いためであり、集光効率の改善の必要性が示された。
- (3) 気温6～30℃においては、PVセル背面温度は通常太陽電池に比べて、固定プリズム集光PVで最大約4℃、追尾プリズム集光PVで最大12℃高くなったが、温度上昇に起因する発電効率の顕著な低下は見られなかった。今後、夏期を含めた年間の気象条件下における試験検証が必要である。

参考文献

- (1) 安沢, 十楚, KEC技報, No.201(2007), pp.17-21.
- (2) 見目, 榊原, 江上, J.JSES, Vol.29, No.5(2003), pp.20-25.
- (3) 秋澤, 柏木, JSES/JWEA 講演論文集(2003), pp.277-280.
- (4) G.Peharz and F.Dimroth, Progress in Photovoltaic: Research and Applications, Vol.13(2004), pp.627-634.
- (5) 土屋, 吉岡, 齊藤, J.JSES, Vol.27, No.1(2001), pp.77-80.
- (6) T.K.Mallack et al., Solar Energy, Vol.77(2004), pp.319-327.
- (7) C.S.Sangani and C.S.Solanki, Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol. 91 (2007), pp.453-459.
- (8) M.J.Currie et al., Science, Vol.321(2008), pp.226-228.
- (9) D.R.Mills and J.E.Giutronich, Solar Energy, Vol.21(1978), pp.423-430.
- (10) T.Uematsu et al., Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol.67(2001), p.415-423.
- (11) 山田, 中村, 佐藤, J.JSES, Vol.35, No.1(2009), pp.57-64.
- (12) 山田, 木村, 小川, 菅野, JSES/JWEA 講演論文集(2006), pp.333-336.
- (13) 日本太陽エネルギー学会, 新太陽エネルギーハンドブック, 2000, pp.4-5.
- (14) R.Leutz and A.Suzuki, Nonimaging Fresnel Lenses, 2001, pp.175-178.