

プリズムアレイシートを組み合わせた プリズム集光器の集光特性

Optical Characteristics of Prism Concentrator Coupled with Micro Prismatic Array Sheet

山田 昇^{*1}

Noboru YAMADA

中村 慎吾^{*2}

Shingo NAKAMURA

佐藤 裕也^{*2}

Hiroya SATOH

Abstract

This paper describes optical characteristics of a prism concentrator which will be used for low-concentrating photovoltaic applications. Micro prismatic array with 0.1-mm pitch was coupled on the aperture of the prism concentrator in order to flexibly adjust an incident angle dependency of the concentrator. First, ray-tracing simulations for several configurations within approximately 3 of flux concentration ratio were carried out. Fundamental performance tests with crystalline Silicon photovoltaic cell were then conducted to verify the simulation results. These results show that the combination with the micro prismatic array is an effective technique to adjust and control the incident angle dependency of prism concentrator. This unique technique achieves appropriate incident angle dependency for various installation tilt angles with lower height of concentrator than that of compound parabolic concentrator.

キーワード: 太陽光集光器, プリズム集光器, 集光型太陽電池, 光線追跡

Key Words: Solar concentrator, Prism concentrator, Concentrating photovoltaic, Ray-tracing

1. 緒言

近年, エネルギー・環境問題の緩和方策の1つとして太陽エネルギーの有効利用が世界的な喫緊の課題となっている。太陽エネルギー利用の一つである太陽光発電は, 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, 携帯電子機器, 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式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, 集光倍率2倍未満の非追尾式モジュールも研究開発されている⁽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, 薄型で構造が簡単なプリズム集光器(Prism concentrator)に着目する。プリズム集光器は非結像集光系であり, そのコンセプトは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比べて, プリズム集光器の集光倍率は5倍未満と低いため, 太陽電池セル面積の低減効果は小さいが, 大掛かりで高精度の追尾装置が要らない固定設置集光, もしくは簡易的な追尾による集光が可能である。Uematsu⁽¹⁰⁾らは集光倍率2.6の非追尾式プリズム集光器について, 光学解析とモジュール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いない。

そこで本研究では, プリズム集光器の受光面に液晶ディスプレイのバックライト機構などに用いられている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提案し, 2次元および3次元モデルによる光学解析と擬似太陽光照射下における基礎実験を行った結果について報告する。

*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@vos.nagaokaut.ac.jp
(原稿受付: 2008年9月21日)

2. プリズム集光器

図1にプリズム集光器の断面図を示す。集光器の受光面ABから入射角度 θ_{in} で入射した光線(1)は、BC面に貼付した反射面によって反射し(2)、表面ABで全反射した後(3)、集光面AC(太陽電池セル)に入射する(4)。ここで、反射面BCの傾斜角度を θ 、集光面ACの傾斜角度を θ_{sc} とする。

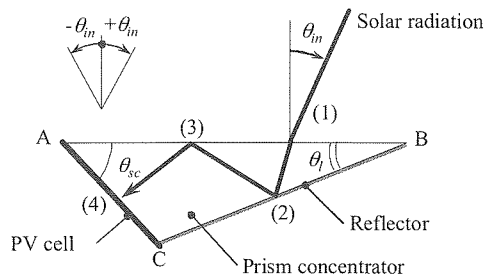


図1 プリズム集光器の断面(2次元モデル)
Fig.1 Cross section of prism concentrator

図2にプリズムアレイシートの有無による集光特性の変化を示す。プリズムアレイシートの表面には、太陽光が回折しない程度の周期でプリズム形状が刻まれており、このプリズムの角度(以下、ブレース角 θ_p)によって入射角度特性を制御できる。例えば、プリズム集光器単体で集光を行う場合、光閉じ込めが起らない入射角度で光線が入射すると、光線は図2(a)のように反射面で反射され、集光面に到達しない。一方、プリズムアレイシートを組み合わせると、同じ入射角度の光線は図2(b)のようにプリズムアレイシートのブレース面で屈折したのち、プリズム集光器へ入射する。このようにプリズムアレイシートのブレース角を変更すれば、同形状のプリズム集光器でも入射角度特性が変化する。

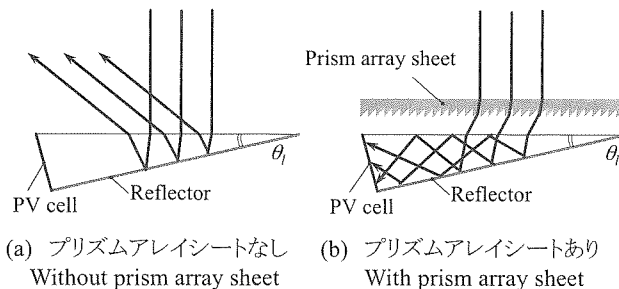


図2 プリズムアレイシートの有無による集光特性の変化
Fig.2 Effect of prism array sheet on incident angle dependency of prism concentrator

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において透過率が高い材料を用いる必要がある。本論文では、透明アクリル樹脂(PMMA)を採用した。プリズム集光太陽電池(図2(b))の構成要素は、携帯電話などに多く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。

3. 集光特性の光学解析

3.1 解析手法および基礎式

プリズム集光器の集光特性を解析するために光線追跡法(Ray-tracing)を用いた。光線追跡法は、光源からエネルギーを持った光線を射出し、その光線と物体の面要素との交点、屈折・反射方向を順次計算して集光面に到達するまで光線を追跡し、集光面に集束するエネルギーを積分して求める解析手法である⁽¹¹⁾。解析の基礎式を以下に示す。

座標 $Q(Q_x, Q_y, Q_z)$ から方向ベクトル $V=(V_x, V_y, V_z)$ で射出され、座標 $P(P_x, P_y, P_z)$ へ到達する光線は、

$$P = Q + tV \quad (1)$$

で表される。ここで t は Q から P までの直線距離である。まず、式(1)の光線と物体を構成する面要素との最短の交点を求める。本解析では解析対象となる集光器およびプリズムアレイシートの形状を構成する面を、頂点座標 (P_{1i}, P_{2i}, P_{3i}) の三角形要素に分割した(2次元解析の場合は線分に分割)。この三角形要素を含む平面の法線は次式となる。

$$N_i = (P_{2i} - P_{1i}) \times (P_{3i} - P_{1i}) \quad (2)$$

ここで、 i は対象とする三角形要素の番号である。この平面と式(1)の光線が P で交差する場合、平面の方程式は

$$N_i \cdot P - N_i \cdot P_{1i} = 0 \quad (3)$$

となる。式(1)および式(3)より、 Q から P までの距離 t は次式で求められる。

$$t = -\frac{N_i \cdot Q - N_i \cdot P_{1i}}{N_i \cdot V} \quad (4)$$

式(4)より、光線の射出座標 Q と射出方向 V 、対象とする要素 i の法線 N_i がわかれば t が求められ、これを式(1)へ代入することで要素平面との交点座標 P が決定できる。 P の前後で屈折率 n が変化する場合、光線は屈折および反射する。屈折および反射の方向 V は、光線と三角形要素の法線を含む平面内において以下の法則によって決定される。

$$\text{屈折: } n_{in} \sin \theta_{in} = n_{out} \sin \theta_{out} \quad (5)$$

$$\text{反射: } \theta_{in} = -\theta_{out} \quad (6)$$

式(5)はSnellの法則である。式(6)において、添え字の in は入射光線側を、 out は射出光線側を表す。入射光線が屈折する場合は式(5)により、反射または全反射する場合は式(6)により θ_{out} を求め、光線の進む方向 V を随時更新していく。光線が透過媒質に入射すると、光線のエネルギーは式(5)に従う透過光と、式(6)に従う反射光に分割される。このときの反射率 R と透過率 T は、 p 偏光成分と s 偏光成分を平均加算したFresnelの公式より次式で求められる。

$$R = \frac{1}{2} \left[\frac{\tan^2(\theta_{in} - \theta_{out})}{\tan^2(\theta_{in} + \theta_{out})} + \frac{\sin^2(\theta_{in} - \theta_{out})}{\sin^2(\theta_{in} + \theta_{out})} \right] \quad (7)$$

$$T = 1 - R \quad (8)$$

また、光の吸収作用を持つ物体中を光線が通過するとき、光線エネルギーの一部は物体に吸収されて減衰する。この減衰率 k は Beer-Lambert-Bouguer の法則 (あるいは Lambert-Beer の法則, Beer の法則) ⁽¹²⁾ によって次式で求められる。

$$k = \exp(-\alpha d) \quad (9)$$

式(9)において、 α は物体の吸収係数、 d は光線の物体中の透過距離である。光源からエネルギー I の光線が m 本射出され、すべてが集光器の受光面に入射する場合、受光面における単位面積当たりの入射エネルギー I_{ap} は次式となる。

$$I_{ap} = I \cdot m / A_{ap} \quad (10)$$

ここで、 A_{ap} は受光面面積である。また、受光面を通過した光線が、反射・屈折を経て集光面に集光するとき、集光面における単位面積あたりの入射エネルギー I_{sc} は次式となる。

$$I_{sc} = \sum_{i=0}^m I' / A_{sc} \quad (11)$$

ここで、 A_{sc} は集光面 (太陽電池セル) 面積である。 I' は集光面上に到達した光線が保有するエネルギーである。 I' は 反射率 R 、透過率 T 、減衰率 k の影響を考慮して次式で求められる。

$$I' = I \cdot \langle R, T \rangle \cdot k \quad (12)$$

ここで、 $\langle \rangle$ は光線が屈折する場合は T を、反射する場合は R を選択することを示す記号である。同一の光線が屈折・反射を複数回行う場合は、屈折・反射のたびに式(12)で得た I' を I に更新しながら光線追跡を続ける。

集光比は、集光光学系の特性を評価するパラメータであり、次の二種類の定義がある。

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

$$C_g = \frac{A_{ap}}{A_{sc}} \quad (13)$$

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

$$C_f = \frac{I_{sc}}{I_{ap}} \quad (14)$$

単位集光面 (太陽電池セル) 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。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て、入射角度特性の評価パラメータとする。

3.2 解析結果

3.2.1 2次元モデルの集光特性

本節では、図1に示したプリズム集光器の2次元モデルについて光線追跡を行い、2次元断面における基本的な集光特性を明らかにする。図3に幾何学的集光比 C_g を2から5まで変化させた際の入射角度特性を示す。ここでは、図3中に示すように傾斜角度 $\theta_{sc} = 90^\circ$ とし、集光面面積 A_{sc} を変化させて幾何学的集光比 C_g を変化させた。集光器の材料である PMMA の屈折率 $n=1.49$ (代表波長 $0.53 \mu\text{m}$) とした。なお、ここでは材料の吸収によるエネルギー減衰は考慮していない。また、反射面の反射率 $R=1$ とした。図3より、 C_g が大きい集光器ほど、 $C_f \cdot \cos \theta_m$ のピーク値は高くなり、ピークの入射角度は大きくなっていくが、集光効果が得られる入射角度範囲は狭くなる。つまり、 C_g を小さく設定すると実効集光比が1以上となる入射角範囲は広くなるが、実効集光比の最大値は低下する。

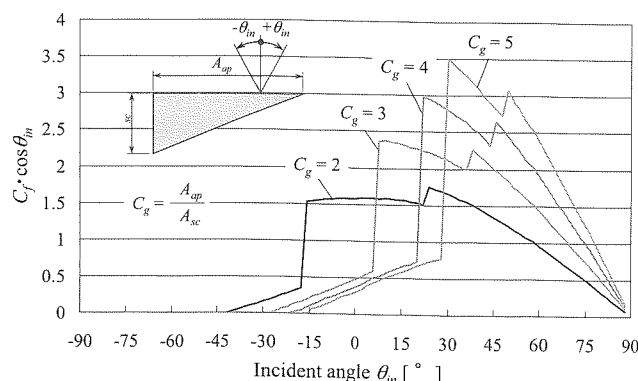


図3 プリズム集光器の入射角度特性
($\theta_{sc} = 90^\circ$ とし、 $C_g = 2, 3, 4, 5$ と変化させた場合)
Fig.3 Incident angle dependency of prism concentrator
with $\theta_{sc} = 90^\circ$ for $C_g = 2, 3, 4, 5$

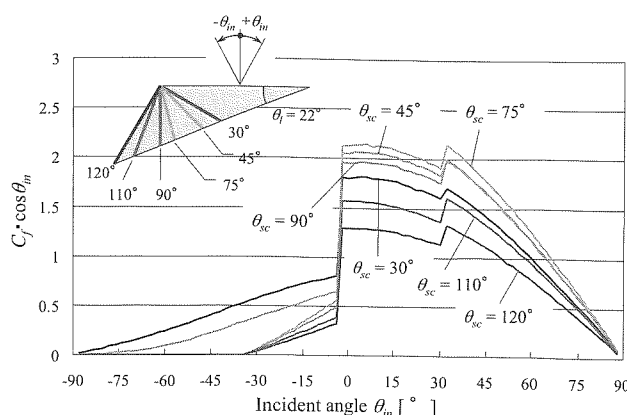


図4 プリズム集光器の入射角度特性
($\theta_i = 22^\circ$ とし、 θ_{sc} を変化させた場合)
Fig.4 Incident angle dependency of prism concentrator
with $\theta_i = 22^\circ$ for various θ_{sc}

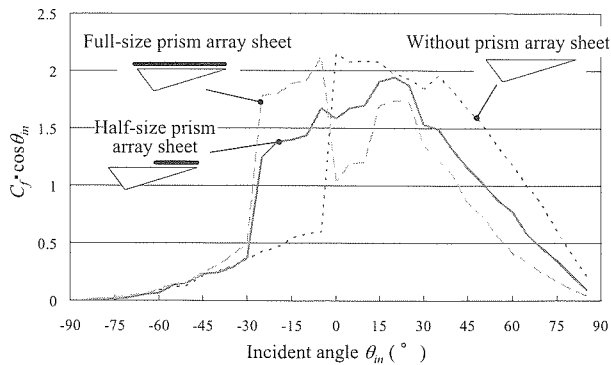


図5 プリズムアレイシートによる入射角度特性の変化
Fig.5 Effect of micro prismatic array sheet on incident angle dependency of prism concentrator

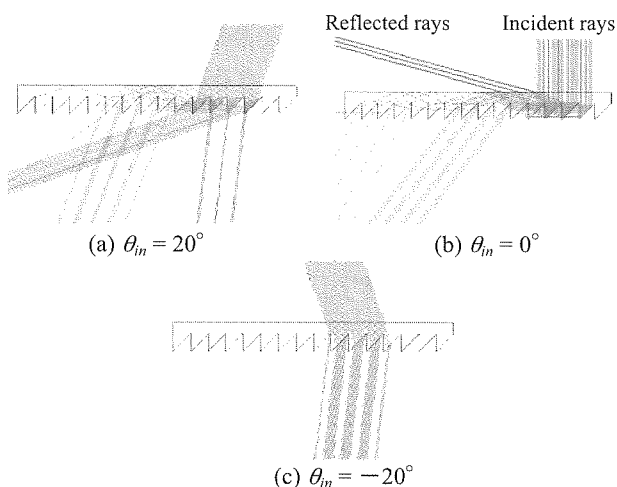


図6 プリズムアレイシート単体の光線追跡結果
Fig.6 Ray-tracing results of prism array sheet

この傾向は2次元集光系に見られる傾向と合致する。図3の $\theta_{sc} = 90^\circ$ のプリズム集光器において入射光線を反射面での反射とプリズム内部での全反射を経て集光面に集光するためには、

$$\theta_m \geq \sin^{-1}[n \sin(\theta_{cr} - 2\theta_l)] \quad (15)$$

を満たす必要がある⁽⁸⁾。反射面で反射せず、集光面に直接到達する光線もあるが、その割合は小さい。ここで、 θ_{cr} は臨界角であり、プリズム材料の屈折率 n から次式で求められる。

$$\theta_{cr} = \sin^{-1}\left(\frac{1}{n}\right) \quad (16)$$

$n=1.49$ の場合、臨界角 $\theta_{cr} = 42.155^\circ$ となる。式(15)より、プリズム集光器の受光面に垂直に入射する光線($\theta_m = 0^\circ$)を集光面に集光させるためには、 $\theta_l \geq 21.08^\circ$ とする必要がある。図3では $C_g=2$ の場合のみ、この条件を満たしている。次に、反射面傾斜角度 $\theta_l = 22^\circ$ を固定し、集光面傾斜角度 θ_{sc} を変化させた場合の入射角度特性を図4に示す。この場合、式(15)より $\theta_m \geq -2.74^\circ$ の光線が集光する。この角度は θ_l と n によって決まるため、角度 θ_{sc} によらず一定で

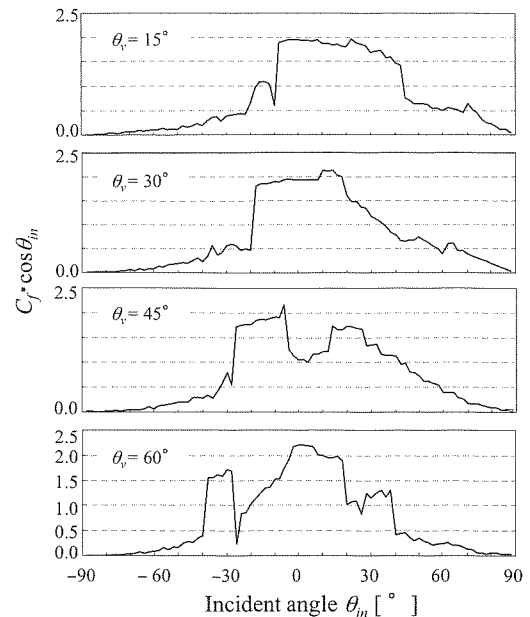


図7 プレーズ角による入射角度特性の変化
(図11の解析モデルにおいて全シートの場合)
Fig.7 Incident angle dependency for various braze angle of micro prismatic array sheet (Full size sheet shown in Fig.11)

ある。図4にもこの傾向が現れている。ただし、実際には $\theta_m < -2.74^\circ$ で入射する光線が反射面を経由せずに、直接、集光面に入射するため $C_f \cdot \cos \theta_m$ はゼロとならない。 $\theta_{sc} = 75^\circ$ 程度のときに $C_f \cdot \cos \theta_m$ が最も高く、約2倍の実効的集光が得られ、且つ、高い幾何学的集光比 C_g が得られる。

プリズム集光器にプリズムアレイシートを組み合わせた際の解析結果を図5に示す。プリズム集光器およびプリズムアレイシートの寸法は次節の図11と同じである。プリズム集光器とシートの隙間は0.1mmとした。ここでは、(a) プリズム集光器単体の場合（以下、シートなし）、(b) プリズム集光器の受光面の全面にプリズムアレイシートを設置した場合（以下、全シート）、(c) プリズム集光器の受光面の半分の面にプリズムアレイシートを設置した場合（以下、半シート）の3通りの結果を示した。また、PMMAの光学定数より吸収係数 $\alpha = 2.98 \times 10^{-4} \text{ mm}^{-1}$ 、反射面の反射率 $R = 0.95$ と仮定し、エネルギー減衰を考慮した。全シートの場合、 $-30^\circ < \theta_m < 0^\circ$ において高い集光が得られるが、 $0^\circ \leq \theta_m \leq 13^\circ$ において $C_f \cdot \cos \theta_m$ は1.2未満に低下し、 $\theta_m = 0^\circ$ で極小となる。これは、図6(b)に示すように、 $\theta_m = 0^\circ$ 近傍において、シートに入射した光線の一部が集光器に入射することなく外部に逃げる損失のためであり、この損失は $\theta_m = 0^\circ$ において極大となる。なお、図6(a)および図6(c)には $\theta_m = 20^\circ$ および $\theta_m = -20^\circ$ の場合の光線追跡結果も示す。半シートの場合、プリズム集光器単体の場合と全シート

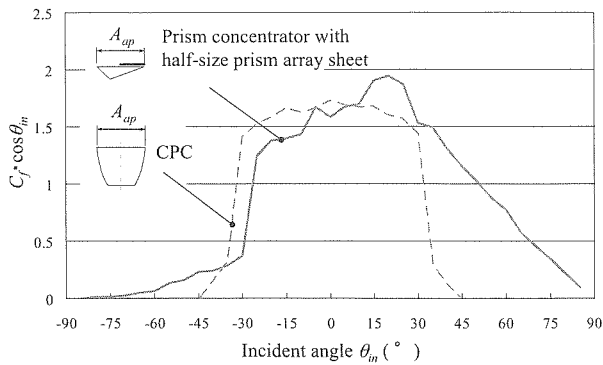


図8 プリズム集光器とCPCの比較

Fig.8 Comparison of incident angle dependency between prism concentrator and CPC

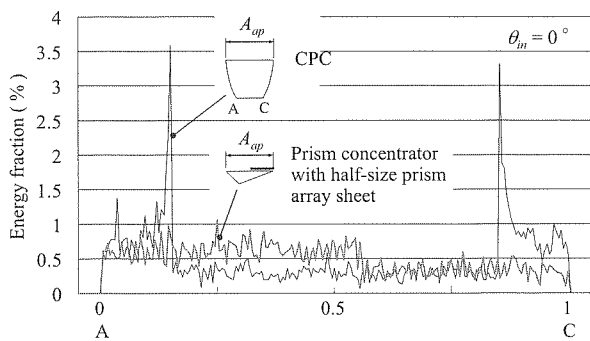


図9 プリズム集光器およびCPCにおける集光面（太陽電池セル面）上の入射エネルギー強度分布

Fig.9 Incident energy distribution on concentration area (PV cell surface) of prism concentrator and CPC

の場合の中間的な入射角度特性が得られ、 $-30^\circ < \theta_m < 30^\circ$ において $C_f \cdot \cos \theta_m$ は約1.5から2となる。 $C_f \cdot \cos \theta_m$ のピーク値は他の仕様よりも低下するが、垂直入射を基準にして正負の許容入射角度範囲がほぼ対称に近づく。

図7に、プリズムアレイシートのブレイズ角のみを変化させた際の入射角度特性の変化を示す。解析モデルは次節の図11に示すプリズム集光器を全シート仕様にしたものである。ブレイズ角 θ_b が 15° から 30° に変わると許容入射範囲が約 -10° スライドしている。また、 $\theta_b = 45^\circ$ および 60° では、複数のピークが表れている。このように、ブレイズ角の変更によってプリズム集光器の入射角度特性を制御できる。本研究では、プリズムアレイシート全面においてブレイズ角を一定としたが、ブレイズ角に分布を与えることで、より自由度の高い設計が可能になるものと考えられる。

図8には、図5の半シート仕様のプリズム集光器と許容入射半角 32° 、トランケーション率0.62、反射率0.9の2次元複合放物面集光器（Compound parabolic concentrator、以下、CPC）の場合との入射角度特性の比較を示す。なお、非追尾固定設置の場合 $\pm 32^\circ$ 程度の許容入射角が最適であることが年間エクセルギー解析により報告されている⁽¹³⁾。図8より半シート仕様の特性は

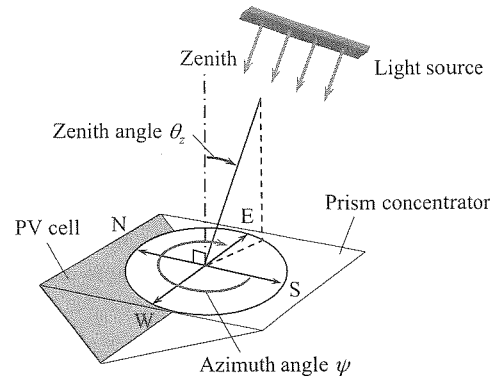


図10 3次元モデルの光線追跡における座標系

Fig.10 Coordinate system of three-dimensional ray-tracing

CPCに近い特性を示す。このプリズム集光器とCPCの全高を比較すると、同じ受光面面積に対する全高はプリズム集光器がCPCの36.4%となる。また、集光面（太陽電池セル）面積はプリズム集光器がCPCの72.0%となる。

図9に $\theta_m = 0^\circ$ におけるプリズム集光器およびCPCの集光面上における入射エネルギー分布を示す。プリズム集光器の方が分布の不均一度が小さい。通常、太陽電池セルはセル表面の入射エネルギーの不均一度が高くなると発電効率が低下する。以上のように、この半シート仕様のプリズム集光器では、集光面での入射エネルギー分布が比較的均一で、且つ、理想集光系の一つであるCPCに近い入射角度特性をCPCよりも薄型に実現できる。

3.2.2 3次元モデルの集光特性

前節では、2次元モデルの光線追跡によって、基本的な入射角度特性を把握した。しかし、実際には太陽光線は受光面に対して3次元的に全方向から入射する。本節では、3次元モデルについて光線解析を行い、全天入射に対する集光特性を明らかにする。図10に解析の座標系を示す。光線の入射方向は天頂角 θ_z と方位角 ψ によって表される。図のように、便宜上、方位をN, S, E, Wで示した。

図11および図13に、それぞれ $C_g = 2.5$ および4.13のプリズム集光器とプリズムアレイシートの解析モデルを示す。本研究では、 θ_{sc} 、 θ_b 、および θ_v をそれぞれ考えられ得る範囲で変化させて解析を行ったが、ここでは、後述するように実際の固定設置および簡易追尾に適する結果が得られた上記の2形態に関する結果を示す。 $C_g = 2.5$ のプリズム集光器にはブレイズ角 45° のプリズムアレイシートを、一方、 $C_g = 4.13$ のプリズム集光器にはブレイズ角 35° のプリズムアレイシートを組み合わせた。両プリズム集光器について、プリズムアレイシートを(a)シートなし、(b)全シート、(c)半シートの3通りにした際の解析を行った。 $C_g = 2.5$ の解析結果を図12(a),(b),(c)に、 $C_g = 4.13$ の解析結果を図14(a),(b),(c)にそれぞれ示す。ここでは、受光面表面での反射損失、プリズム集光器媒質による吸収損失、反射面の反射率による損失

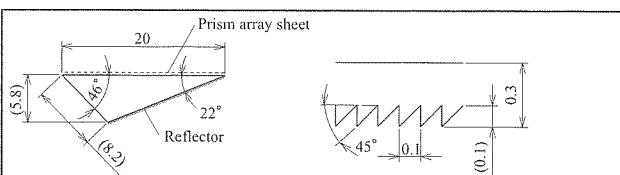
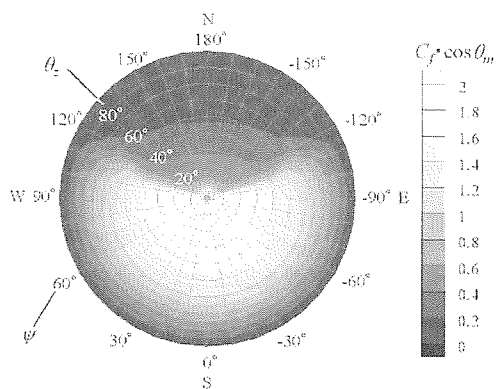


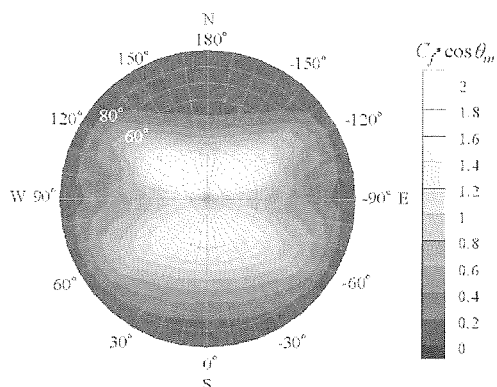
図11 解析モデル ($C_g = 2.5$)

Fig.11 Simulation model



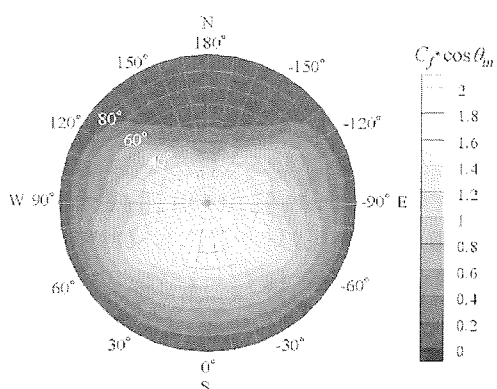
(a) シートなし

Without prism array sheet



(b) 全シート

With full-size prism array sheet



(c) 半シート

With half-size prism array sheet

図12 プリズム集光器 ($C_g = 2.5$) の全天入射角度特性
Fig.12 Hemispherical incident angle dependency of prism concentrator with $C_g = 2.5$

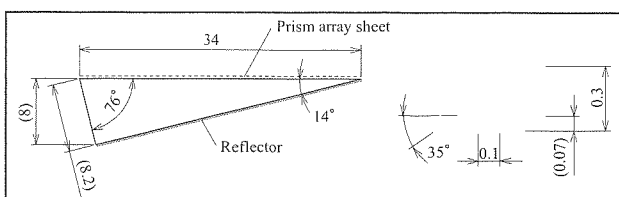
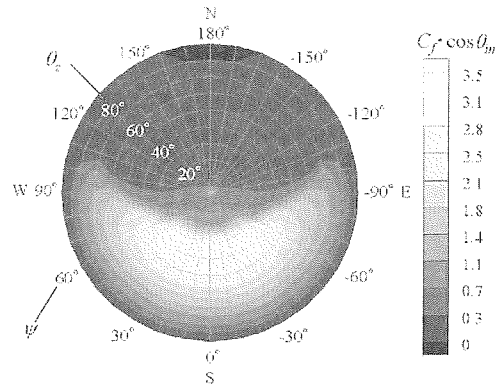


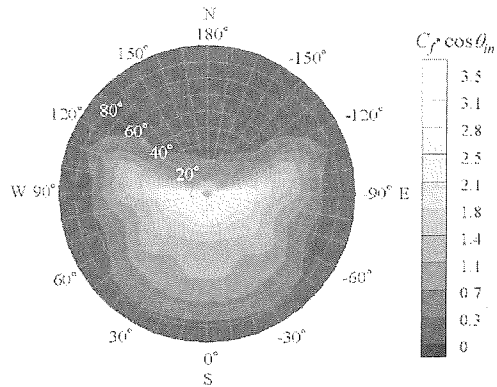
図13 解析モデル ($C_g = 4.13$)

Fig.13 Simulation model



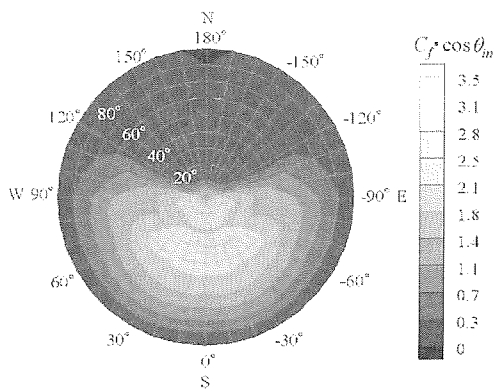
(a) シートなし

Without prism array sheet



(b) 全シート

With full-size prism array sheet



(c) 半シート

With half-size prism array sheet

図14 プリズム集光器 ($C_g = 4.13$) の全天入射角度特性
Fig.14 Hemispherical incident angle dependency of prism concentrator with $C_g = 4.13$

をすべて考慮している。図12および図14では、白黒の濃淡で $C_f \cdot \cos \theta_m$ の大きさを表現しており、白いほど値が大きい。

図12より、 $C_g = 2.5$ のプリズム集光器では、シートなしの場合、 $+90^\circ \leq \psi \leq -90^\circ$ 、 $\theta_2 \leq 35^\circ$ のS側からの入射光線に対して $C_f \cdot \cos \theta_m \approx 2$ となるが、全シートおよび半シート仕様ではN側からの入射に対して集光効果が得られている。実効集光比 $C_f \cdot \cos \theta_m \geq 1$ の領域について立体角積分を行い、(a)シートなしの積分値が1になるように(b)および(c)の積分値を規格化した結果(a) : (b) : (c) = 1 : 0.6 : 0.8となった。また、各ケースで得られる $C_f \cdot \cos \theta_m$ の最大値はそれぞれ(a) 2.3, (b) 2.2, (c) 2.0となった。実際に集光され得る総年間日射量を推定するためには、設置面に対する日射量の全天分布の詳細なデータが必要となるため、一概にいずれのケースが最適とは現時点では判断できないが、プリズムアレイシートによる入射角度特性の調節機能を利用すれば、設置角度に応じて、許容入射角度範囲内に年間の太陽経路の大部分を収めることができると考えられる。つまり、設置傾斜角度に応じた入射角度特性の最適設計が行える可能性が高い。本解析結果からは、 $C_g = 2.5$ 程度の場合には非追尾固定設置モジュールへの適用が可能であると予想される。とくに、緯度と同じ真南向き傾斜面に受光面が平行になるように設置する場合には、図12(c)の半シート仕様が適する。

一方、図14より、 $C_g = 4.13$ のプリズム集光器では、 $C_g = 2.5$ のものに較べて、(a)~(c)のいずれの仕様においても $C_f \cdot \cos \theta_m \approx 3$ がピークとなり、許容入射角度範囲は $-6^\circ \leq \theta_m \leq +6^\circ$ と狭くなる。このため、比較的粗い追尾動作との組み合わせが必要となる。その際、太陽に対して受光面を正対させた場合に高い集光効果が得られる図14(b)の全シート仕様が適する。なお、図12の場合と同様に $C_f \cdot \cos \theta_m \geq 1$ の領域について立体角積分を行って比較した結果、(a) : (b) : (c) = 1 : 0.9 : 0.8となった。また、 $C_f \cdot \cos \theta_m$ の最大値はそれぞれ(a) 2.9, (b) 3.5, (c) 2.5となった。このように、プリズムアレイシートを用いることで、プリズム集光器の形状を変えることなく、プリズム集光器の入射角度特性を制御できることが示された。

4. プリズム集光太陽電池の性能試験

前章で解析した集光特性を検証するため、プリズム集光太陽電池を試作し、擬似太陽光照射下における性能試験を行った(本論文ではプリズム集光器と太陽電池セルを一体化した形態をプリズム集光太陽電池と呼ぶ)。図11および図13と同じ仕様のプリズム集光器およびプリズムアレイシートをPMMAで試作し、光学接着剤を用いて、集光面に結晶シリコン太陽電池セルを接着し、反射面に高反射アルミ材を接着した。試作プリズム集光太陽電池の写真を図15に示す。光源にはスペクトル合致度90%、0.5SUNのキセノンランプを

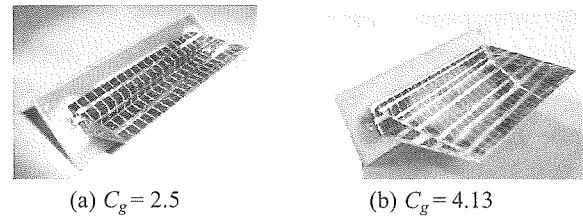


図15 試作プリズム集光太陽電池の概観
Fig.15 Photo of fabricated prism concentrating PV module

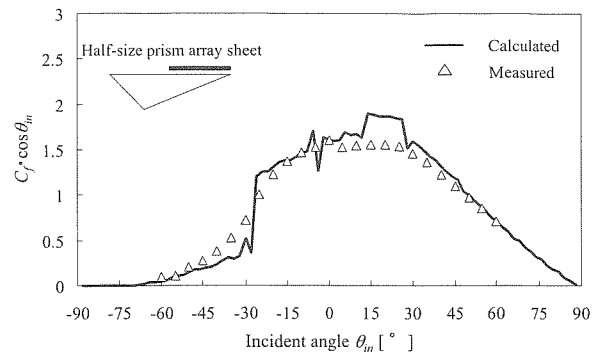


図16 プリズム集光太陽電池 ($C_g = 2.5$, 半シート) の試験結果と解析結果との比較

Fig.16 Test result of prism concentrating PV module compared with ray-tracing result ($C_g = 2.5$, Half size sheet)

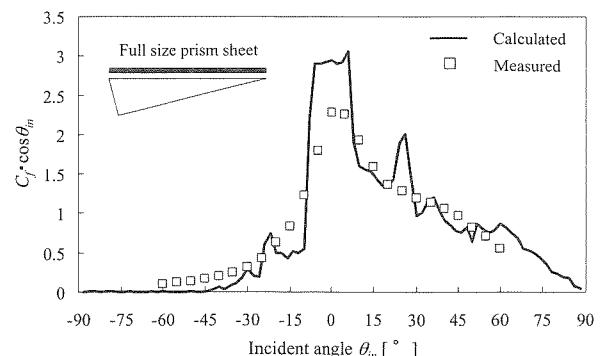


図17 プリズム集光太陽電池 ($C_g = 4.13$, 全シート) の試験結果と解析結果との比較

Fig.17 Test result of prism concentrating PV module compared with ray-tracing result ($C_g = 4.13$, Full size sheet)

使用し、集光器の受光面に対する光線入射角度が図1の θ_m に対応するように、 $-60^\circ \leq \theta_m \leq +60^\circ$ の範囲でプリズム集光太陽電池を傾斜させることができる傾斜台を用意し、入射角度を手動で調節した。ソースメータを用いて電流-電圧特性を測定し、そこから最大動作点を決定して太陽電池セルの発電電力を求めた。 $C_f \cdot \cos \theta_m$ は、予め太陽電池セル単体に擬似太陽光線が垂直入射した際の発電電力を測定しておき、次いで、プリズム集光太陽電池の最大電力を同様に測定し、両者の比から求めることができる。図16および図17に、 $C_g = 2.5$ の半シート仕様および $C_g = 4.13$ の全シート仕様のプリズム集光太陽電池の性能試験結果と解析結果との比較を

示す。図中の実線は解析結果、マーカー(△および□)は試験結果である。試作プリズム太陽電池の入射角度特性は、解析結果とおおむね一致するが、図16の $\theta_m = 15^\circ$ 付近や図17の $-6^\circ \leq \theta_m \leq +6^\circ$ においては、解析結果とは異なる試験結果が得られた。試作した集光器と解析モデルとの形状の差、擬似太陽光が完全な平行光線のみではないこと、また、解析が単波長(0.53 μm)での光学定数を用いた単波長解析であったこと、太陽電池セルの感度波長の影響、セル温度の影響などが、解析結果と試験結果に違いを生じた原因と考えられ、今後より詳細な検証が必要である。

5. 結 言

本研究では、プリズム集光器の受光面に微細プリズム構造を有する光機能性シート(プリズムアレイシート)を設置した際の集光特性を明らかにするため、2次元および3次元の光学解析および試作試験を行い、以下の知見を得た。

- (1) プリズムアレイシートをプリズム集光器の受光面に設置することにより、プリズム集光器の入射角度特性を制御できることが光学解析結果により示された。とくに、2次元理想集光系の一つである複合放物面集光器(CPC)と同等の入射角度特性を、CPCよりも薄く(集光器の全高がCPCの36.4%)、且つ、小さい太陽電池セル面積(CPCの72.0%)で実現できる形態が明らかとなった。
- (2) 幾何学的集光比が2.5および4.13のプリズム集光太陽電池を試作し、それぞれにブレード角が 45° および 35° のプリズムアレイシートを組み合わせることで擬似太陽光照射下において性能試験を行った結果、解析結果とほぼ一致する結果が得られた。
- (3) プリズムアレイシートを設置した幾何学的集光比が2.5のプリズム集光器では、固定設置の際に設置傾斜角度に応じた入射角度特性の最適設計が行える可能性が示された。また、幾何学的集光比が4.13のプリズム集光器では、簡易的な太陽追尾動作を行う場合に適する特性が示された。

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, 太陽/風力エネルギー講演論文集(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) 牛山, 草川, シミュレーション光学, 東海大学出版会(2003), p29-51.
- (12) J.D.J.Ingle and S.R.Crouch, Spectrochemical Analysis, Prentice Hall, New Jersey (1988)
- (13) A.Suzuki, and S.Kobayashi, Solar Energy, Vol.54, No.5 (1995), pp.327-331.