

拡散光受光板を有する高倍率集光系の光学解析

Optical Analysis of High Concentrating Optical Geometry Coupled with Diffuse Solar Radiation Absorber

山田 昇^{*1}
Noboru YAMADA

本田 佳之^{*2}
Yoshiyuki HONDA

Abstract

This paper describes the result of ray tracing analysis of four high concentrating optical geometries which are proposed to utilize not only a direct solar radiation but also a diffuse solar radiation. Effective use of diffuse solar radiation is one of the key factors for concentrating PV systems and solar thermal systems to expand their installations to the place where the ratio of diffuse solar radiation to global radiation is more than 0.5 such as in Japan. Four types of fundamental optical geometries based on Fresnel lens, cylindrical lens, water cylindrical lens, and parabolic mirror are examined by ray-tracing simulation. The results show that the proposed geometries have a possibility to utilize diffuse solar radiation without aggravating the concentration performance for direct solar radiation.

キーワード: 集光, 拡散日射, フレネルレンズ, 円柱レンズ, 放物ミラー, 光線追跡, 光学解析, 拡散光受光板

Key Words: Concentrating optics, Diffuse solar radiation, Fresnel lens, Cylindrical lens, Parabolic mirror, Ray tracing, Optical analysis, Diffuse solar radiation absorber

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技術の普及促進が喫緊の課題となっている。太陽光発電および太陽熱発電などでは, システムコスト低減や高温集熱を達成する方策として太陽光の集光・集熱が重要な要素技術の1つとなっている。すでに, 集光型太陽光発電(CPV)および太陽熱発電(CSP)システムが開発され, 追尾型高倍率集光・集熱系(以下, 単に集光系と呼ぶ)は主にサンベルト地帯への導入が進んでいる。しかし, 従来の高倍率集光系は, 追尾によって光線平行度の高い直達光の利用を前提に設計されているため, 年間平均の散乱比(全天日射量に占める拡散日射量の割合)が約5割⁽¹⁾と大きいサンベルト地帯から外れた地域では, 日射利用率を高めることができず, 大きなメリットが得られない傾向にある。

そこで本研究では, 高倍率集光系において直達光だけではなく拡散光をも最大限に有効利用できる集光系の探求を目標とし, 筆者らが考案した拡散光受光板(Diffuse Solar radiation absorber, 以降英文では Absorber A と表記)を設置した4つの集光系に対して, 2次元モデルによるレイ

トレーシング(光線追跡)解析を行い, 直達光利用率と拡散光利用率への効果を調べた結果について報告する。

2. 解析モデルおよび解析手法

2.1 解析モデル

図1(a)~(d)にフレネルレンズ⁽³⁾⁽⁴⁾, 円柱レンズ, 水円柱レンズおよび放物ミラー⁽⁵⁾をベースとする2次元解析モデルをそれぞれ示す。各集光系の中心軸C上には拡散光を捕集するために, 長さLの拡散光受光板(Absorber A)が中心軸に平行に挿入してある。さらに, 直達光が集光する集光面Bが中心軸に対して垂直に設置してある。本解析では拡散光受光板Aの厚さは理想的にゼロとし, また, 太陽追尾は完全に太陽位置と正対するように行われるものとする。つまり, 直達光は中心軸Cに平行に入射する。これらの解析モデルでは, 直達光は, 拡散光受光板の無い従来の集光系と同様に集光面Bに収束し, 入射角が大きい拡散光の一部は拡散光受光板Aの両面に入射することが見込まれる。図1(a)および(b)はCPVへの適用を想定しており, 例えば, 拡散光受光板Aの位置には両面受光太陽電池(例として低価格化が期待されている色素増感型など)を配置し, 集光面Bには高効率多接合セルなどを配置する。一方, 図1(c)および(d)はCSP, 或い

*1 長岡技術科学大学工学部 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12月19日)

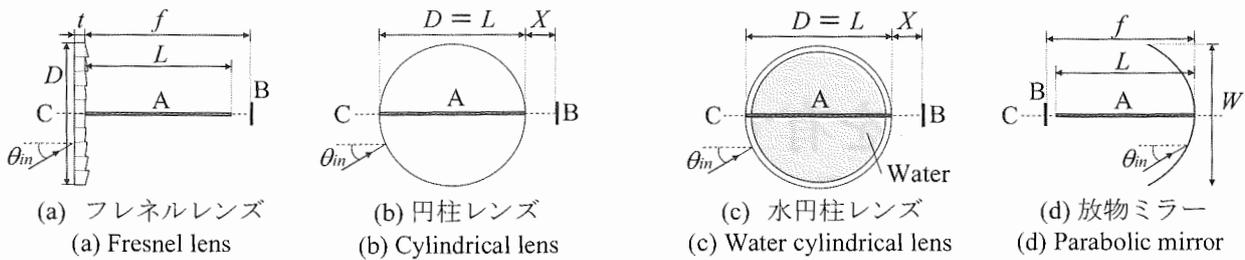


図1 解析モデル

Fig. 1 Simulation models

は中高温向けのソーラーコレクタへの適用を想定している。例えば、拡散光受光板Aの位置には平板型コレクタ、集光面Bには真空管コレクタなどが配置される。熱媒体は平板型コレクタにおいて予熱された後に真空管コレクタへと流れ、高温集熱となる構想である。

図1(a)および(b)のレンズ材料はアクリル樹脂(PMMA)とし、PMMAの波長分散(波長別の屈折率変化)と吸収スペクトルを考慮した。図1(c)の円筒部は厚さ5mmのガラス(BK7)管、円筒内部は水が充填されているものとし、BK7および水の波長分散と吸収スペクトルを考慮した。図1(d)のミラー面は全ての波長に対して反射率0.95の鏡面反射面とした。表1に各モデルの寸法、用いたレンズ材料の物性値⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾を示す。各モデルに対して集光面Bの幅は10mm、幾何学的集光比は20とした。

表1 解析モデルの仕様

Table.1 Specifications of the simulation models

Model	Parameters	Value
Fresnel lens	Lens height, D [mm]	200
	Lens thickness, t [mm]	5
	Focal length, f [mm]	250
	Length of absorber A, L [mm]	200
	Acceptance half angle, $\pm\theta$ [deg]	0.5
	Prism width [mm]	2
	Refractive index of PMMA	1.483~1.504
	Absorption coefficient of PMMA [mm^{-1}]	$0.27\sim 5.1\times 10^{-5}$
Cylindrical lens	Lens diameter, D [mm]	200
	Length of lens-absorber, X [mm]	30
Water cylindrical lens	Lens diameter, D [mm]	200
	Length of lens-absorber, X [mm]	73
	Refractive index of Water	1.327~1.339
	Refractive index of BK7	1.507~1.530
	Absorption coefficient of water [mm^{-1}]	0.0058~0.27
Parabolic mirror	Absorption coefficient of BK7 [mm^{-1}]	$2.0\sim 4.0\times 10^{-4}$
	Aperture width, W [mm]	200
	Focal length, f [mm]	250
	Length of absorber A, L [mm]	200

2.2 評価指標

図1の各モデルについて、入射角 θ_{in} を $0^\circ \leq \theta_{in} \leq 85^\circ$ の範囲で変え、平行光線を入射させる。直達光は太陽視野角を考慮し $0^\circ \leq \theta_{in} \leq 0.25^\circ$ の範囲とし、拡散光は $0.25^\circ < \theta_{in} \leq 85^\circ$ とする。ある角度で入射する拡散光入射前エネルギーを Q_D 、拡散光受光板Aの両面への到達エネルギーを Q_{D_in} とした場合、拡散光利用率 η_D として式(1)で定義する。これらは波長の関数となる。入射する光線のエネルギーは、入射角の余弦に比例するため、 $\cos\theta$ の重みを掛けている。

$$\eta_D(\lambda) = \frac{\int (Q_{D_in}(\lambda)/Q_D(\lambda)) \cdot \cos\theta \, d\theta}{\int \cos\theta \, d\theta} \quad (1)$$

続いて、直達光入射前エネルギーを Q_B 、集光面Bへの到達エネルギーを Q_{B_in} とした場合、直達光利用率 η_B として次式で定義する。

$$\eta_B(\lambda) = \frac{\int (Q_{B_in}(\lambda)/Q_B(\lambda)) \cdot \cos\theta \, d\theta}{\int \cos\theta \, d\theta} \quad (2)$$

直達光が拡散光受光板Aに、拡散光が集光面Bに到達することがあるが、そのエネルギーは微量のため考慮しないこととした。また、散乱比 κ が波長によらず一定であると仮定し、日射利用率 η を次式で定義する。

$$\eta(\lambda) = \kappa\eta_D(\lambda) + (1-\kappa)\eta_B(\lambda) \quad (3)$$

さらに、式(4)に対して、AM1.5Gの標準太陽光スペクトルをピークスペクトル強度(波長495 nm)で規格化した無次元日射スペクトル $\bar{I} = I_{AM1.5G}(\lambda) / I_{AM1.5G_peak}(\lambda = 495 \text{ nm})$ を乗じて全スペクトル範囲で積分した値を用いた総合日射利用率 η_{SUN} を次式で定義する。

$$\eta_{SUN} = \frac{\int_{SUN} \bar{I}(\lambda)\eta(\lambda) \, d\lambda}{\int_{SUN} \bar{I}(\lambda) \, d\lambda} \quad (4)$$

以上の基礎式を用いて、光線追跡により各モデルの拡散光利用率、直達光利用率を求め、散乱比をパラメータとした日射利用率、総合日射利用率を解析する。さらに拡散光受光板A上での到達エネルギー分布についても明らかにする。

2.3 解析手法および基礎式

図1(a)~(d)の集光系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する解析手法である。光線追跡には山田ら⁹⁾の基礎式を用い、レンズ材料中における吸収損失も考慮した。

3. 解析結果

3.1 代表波長における解析結果

図2(a)~(d)、図3(a)~(d)にフレネルレンズ、円柱レンズ、水円柱レンズおよび放物ミラーにおける光線入射角 $\theta_{in}=0^\circ, 30^\circ$ の光線追跡結果並びに拡散光受光板A、および集光面Bでのエネルギー強度分布を示す。ここでは光線の振る舞いの概略を見るため単一波長のみ(以下、代表波長)の結果を示した。代表波長 $\lambda = 589.3\text{nm}$ とした。図2、3より、コンセプト通りに、直達光成分(図2)は集光面Bに集光し、拡散光成分(図3)は拡散光受光板Aに入射していることがわかる。また、円柱レンズ、水円柱レンズでは拡散光受光板Aおよび集光面Bでのエネルギー強度分布の均一性が比較的良く、一方、フレネルレンズ、放物ミラーでは拡散光受光板Aおよび集光面Bでのエネルギー強度分布が局所で大きなピークを示す不均一性を示している。なお、図2(a)において一部の光線が拡散光受光板に入射しているのは、屈折率の変わる境界面で起こるフレネル反射によって生じた光線によるものである。フレネル反射によって生じた光線のエネルギーは反射前の光線よりも低下するが、図では光線のエネルギーの大小は区別せず描画している。

図4(a)~(d)に4つのモデルの拡散光利用率 η_D 、直達光利用率 η_B の各入射角に対する解析結果を示す。図4より、放物ミラーでは最大8割程度の拡散光を捕集しており、レンズ系では η_D の最大値が約4~5割となった。レンズ系では放物ミラーに比べて入射角が小さいときに η_D が不連続気味に増加し最大値を呈する傾向が見られる。これは入射角が各集光系に特有の許容入射角を超えた付近で急に直達光利用率 η_B が低下し、集光面を外れた光線が拡散光受光面に入射するためである。一方、放物ミラーではレンズ系とは特性が異なり、 28° で最大値を示している

が、この角度は、拡散光受光板の端(図1(a)での左端)から放物ミラーの端までを結ぶ線と中心線との角度である 27.7° とほぼ一致しており、この角度に近い入射角の光線が拡散光受光板に到達しやすい特性を有するためである。

また直達光利用率 η_B は、フレネルレンズおよび放物ミラーでは9割程度と大きく、直達光の集光に優れることが示されている。一方、円柱レンズ、水円柱レンズの直達光利用率 η_B は6割台と低い傾向がある。これは、円柱レンズの端部近傍に入射する直達光はレンズと空気境界面への入射角が大きくなるため表面反射により約2割のエネルギーが外部に反射されることに加え、レンズ内に入射した光線がレンズ、水での吸収損失によってさらに約2割のエネルギー減衰が生じるためである。吸収損失が極めて低い材料を用いれば η_B を8割程度まで改善できる。

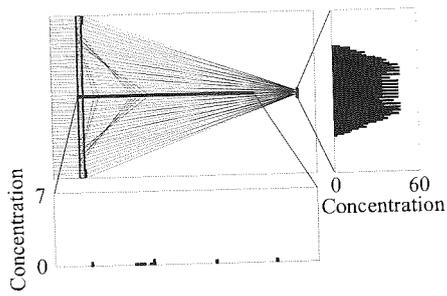
3.2 波長分散を考慮した解析結果

図5(a)~(c)に404.7~1014 nmの波長域での4つのモデルの拡散光利用率 η_D 、直達光利用率 η_B 、散乱比 $\kappa = 0.5$ における日射利用率 η の解析結果を示す。ここでは、放物ミラー反射面の波長依存性は考慮していない。700 nm以下では、 η_B 、 η_D の大小については代表波長における結果とほぼ同様の傾向を示す。一方、円柱レンズと水円柱レンズの η_B 、 η_D は、700 nmを超える辺りから、PMMAおよび水による吸収損失が大きくなるため低下する傾向がみられる。フレネルレンズと放物ミラーは他のモデルよりも波長依存性が低い。また、 η が最も大きいモデルは放物ミラーであり、この解析条件下では放物ミラーに拡散光受光板を挿入した集光系が各波長の直達光および拡散光を最も有効に収束・捕集できる可能性が示された。

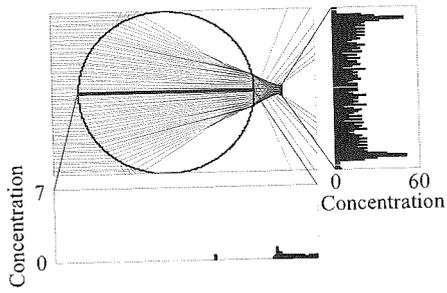
3.3 散乱比の影響解析

図5(a)(b)の結果を用いて、式(4)により、散乱比を $\kappa = 0.2 \sim 0.8$ まで0.1ずつ変化させた場合の総合日射利用率 η_{SUN} の算出結果を図6に示す。 κ の全範囲で放物ミラーの η_{SUN} が最大となった。円柱レンズ、水円柱レンズ η_D が η_B よりもわずかに大きいため κ の増加につれて η_{SUN} が線形的に増加する傾向を示した。逆にフレネルレンズ、放物ミラーは η_B に対して相対的に η_D が小さいために κ の増加につれて η_{SUN} は減少した。

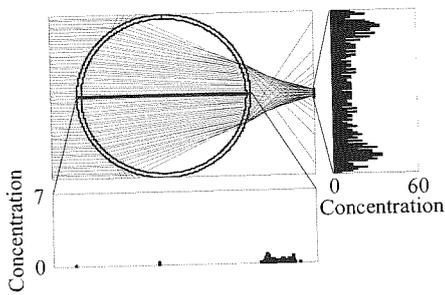
図7(a)~(d)に拡散光受光板の有無による4つのモデルの総合日射利用率 η_{SUN} の比較結果を示す。拡散光受光板Aが無い場合とは、式(4)において $\eta_D = 0$ とした場合に相当する。これより、拡散光受光面Aを設置することで、総合日射利用率 η_{SUN} は約1~6割向上することがわかる。また、散乱比 κ が大きい条件において、 η_{SUN} の向上度合いは大きくなる。



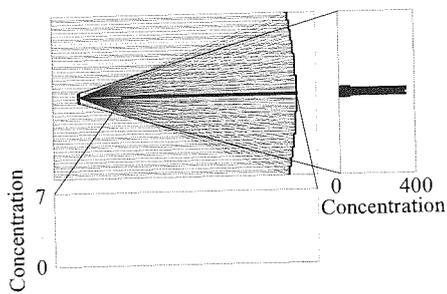
(a) フレネルレンズ
(a) Fresnel lens



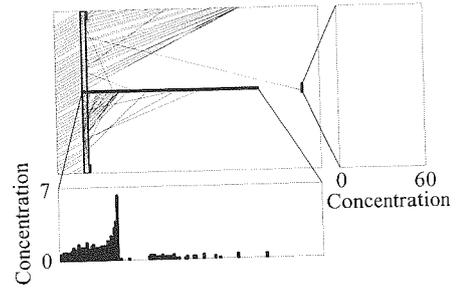
(b) 円柱レンズ
(b) Cylindrical lens



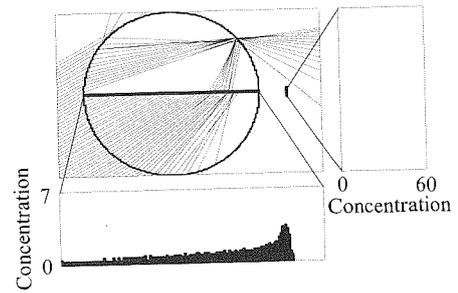
(c) 水円柱レンズ
(c) Water cylindrical lens



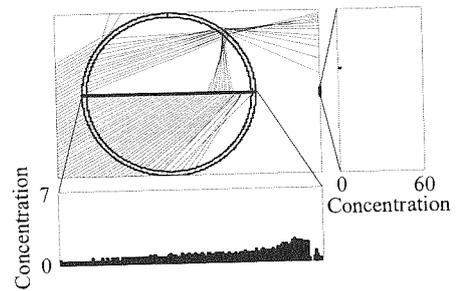
(d) 放物ミラー
(d) Parabolic mirror



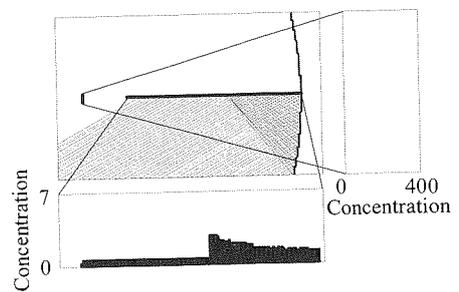
(a) フレネルレンズ
(a) Fresnel lens



(b) 円柱レンズ
(b) Cylindrical lens



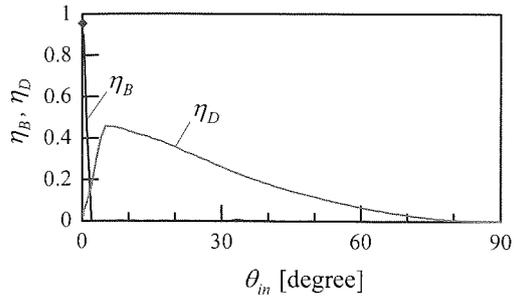
(c) 水円柱レンズ
(c) Water cylindrical lens



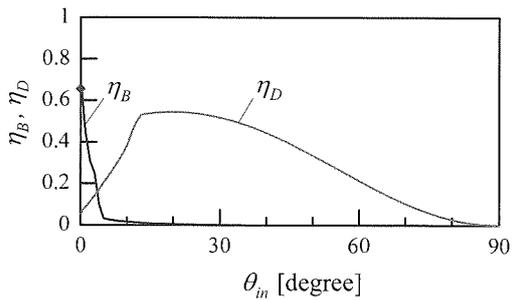
(d) 放物ミラー
(d) Parabolic mirror

図2 光線追跡と拡散光受光板Aおよび集光面Bのエネルギー強度分布($\theta_m = 0^\circ$)
Fig. 2 Results of ray-tracing: energy distribution on absorber A and B ($\theta_m = 0^\circ$)

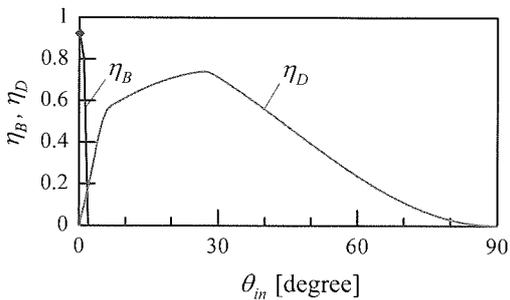
図3 光線追跡と拡散光受光板Aおよび集光面Bのエネルギー強度分布($\theta_m = 30^\circ$)
Fig. 3 Results of ray-tracing: energy distribution on absorber A and B ($\theta_m = 30^\circ$)



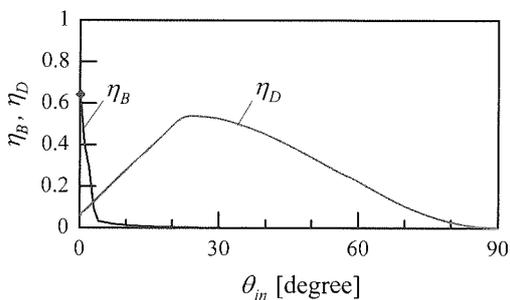
(a) フレネルレンズ
(a) Fresnel lens



(b) 円柱レンズ
(b) Cylindrical lens

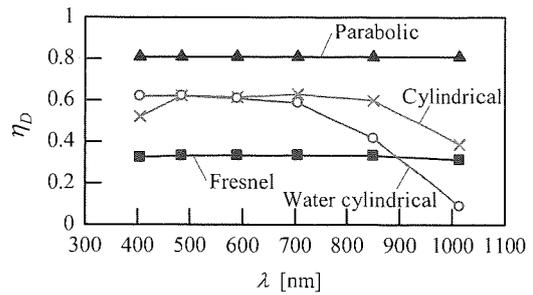


(c) 水円柱レンズ
(c) Water cylindrical lens

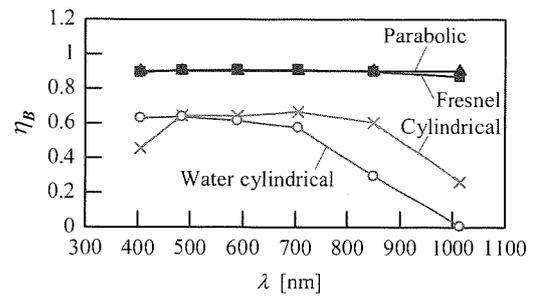


(d) 放物ミラー
(d) Parabolic mirror

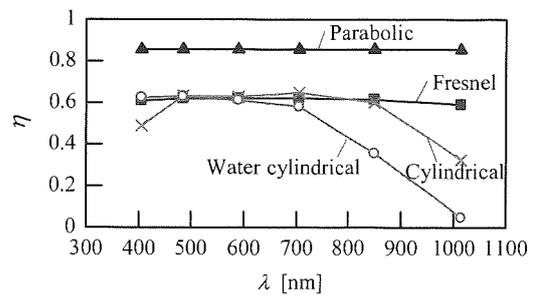
図4 各解析モデルの入射角度依存性
Fig. 4 Incident angle dependency



(a) 拡散光利用率
(a) Diffuse solar energy availability



(b) 直達光利用率
(b) Direct solar radiation availability



(c) 日射利用率
(c) Solar radiation availability

図5 各解析モデルの波長依存性
Fig. 5 Wavelength dependency

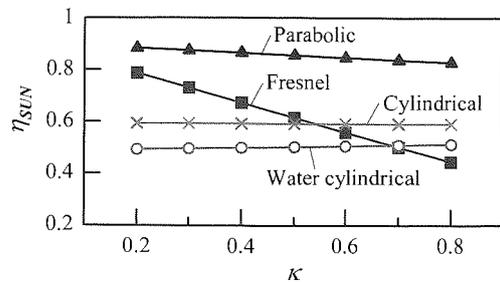
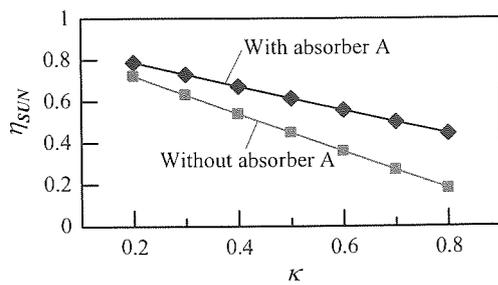
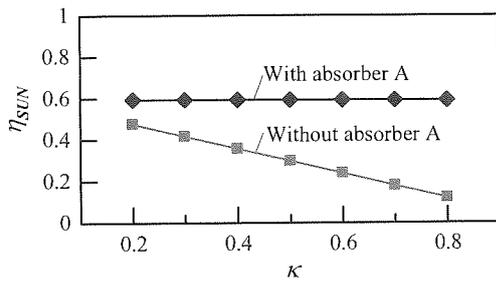


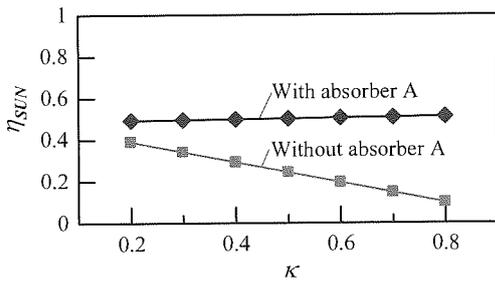
図6 各解析モデルの総合日射利用率
Fig. 6 Total solar radiation availability



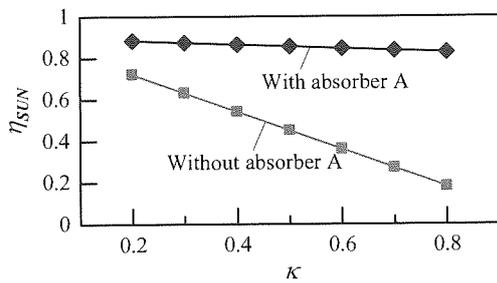
(a) フレネルレンズ
(a) Fresnel lens



(b) 円柱レンズ
(b) Cylindrical lens



(c) 水円柱レンズ
(c) Water cylindrical lens



(d) 放物ミラー
(d) Parabolic mirror

図7 拡散光受光板の有無による総合日射利用率比較
Fig.7 Comparison of total solar radiation availability with/without absorber A

上記の解析では拡散光受光板を集光面に垂直に設置した集光系を対象としたが、同じ寸法の拡散光受光板を集光面の直後に集光面と平行に設置した場合についても解析を行った。その結果、フレネルレンズ、円柱レンズ、水円柱レンズの拡散光利用率 η_D はそれぞれ0.276（垂直設置に比べて-0.057）、0.361（-0.254）、0.313（-0.295）となった。集光面の直後に設置したため、直達光利用率 η_B への影響はない。これより、とくにフレネルレンズでは平行設置の方が、拡散光受光板の厚さの影響が無く、片面太陽電池の適用や集熱板の断熱などの面でメリットが得られる可能性がある。

以上のように、本報では高倍率集光系に挿入された拡散光受光面への入射特性と総合的な日射利用効率に及ぼす影響が明らかとなった。本解析は拡散光受光板の厚さを無視した理想条件下のため、各利用効率の値は上限を示している。どのような条件下で従来の集光型システムに対するコストパフォーマンスの優位性が得られるか否かについては、使用するデバイスの特性（太陽電池の種類・性能、或いは集熱器の性能）や寸法等を考慮したより詳細な解析と検討が必要である。

4. 結 言

本研究により、以下の知見を得た。

- (1) 太陽光の集光系に用いられるフレネルレンズ、円柱レンズ、水円柱レンズ、放物ミラーの中心軸上に、拡散光を捕集する目的で平板状の受光板を挿入することにより、通常の高倍率集光に加えて、通常では収束できない拡散光を受光板に捕集でき、受光板の厚さを無視した理想状態においては、拡散比に応じて、直達光と拡散光のスペクトルを考慮した総合日射利用率を通常よりも約1割～6割高められることが示された。
- (2) なかでも放物ミラーは直達光利用率が約9割、拡散光利用率が約8割と共に大きいため総合日射利用率に優れ、4つの集光系のうち最も日射を有効利用できる集光系であることが示された。

参考文献

- (1) Architectural Institute of Japan, Expanded AMeDAS Weather Data, 日本建築学会(2003).
- (2) (財)日本気象協会, 昭和 55 年度サンシャイン計画委託調査 研究成果報告書-太陽エネルギーシステムの研究(気象調査)(1981)
- (3) 嶋田, 秋澤, 柏木, JSES/JWEA 講演論文集(2004), pp.239-242.
- (4) R.Leutz, A.Suzuki, Nonimaging Fresnel Lenses, Springer(2001).
- (5) JSES, 太陽エネルギーの基礎と応用, オーム社(1978), pp.37-41.
- (6) K.R. McIntosh et al., Progress in Photovoltaics, 17 (2009), pp. 191-197.
- (7) 小檜山, 光学薄膜の基礎理論, オプトロクス社(2003), pp.120-124.
- (8) G. M. Hale, M. R. Querry, Applied Optics, 12(3)(1973), pp.555-563.
- (9) 山田, 中村, 佐藤, 太陽エネルギー, 35(4) (2009), pp.57-64.