

集光系簡易評価のための高平行 / 低照度 ソーラーシミュレータの試作試験

Test of prototype highly-collimated/low-irradiance solar simulator
for brief optical evaluation of solar concentrator system

山田 昇¹
Noboru YAMADA
居城 俊和³
Toshikazu IJIRO

桐生 貢²
Mitsugu KIRYU
岡本 和也³
Kazuya OKAMOTO

吉田 貴則²
Takanori YOSHIDA

Abstract

For research and development of solar concentrator system such as concentrated photovoltaic (CPV) system, highly-collimated stable artificial light with wide irradiated area helps brief evaluation of optical performance. In this study, a prototype highly-collimated/low-irradiance solar simulator was built and tested. The simulator consists of 400mm diameter concave mirror, magnifier lens, and Xenon light source. The simulator achieved collimation within $\pm 0.2^\circ$ which is slightly smaller than view angle of the sun $\pm 0.27^\circ$. The uniformity at irradiated area of 150 mm and 300 mm square satisfied JIS C 8912 class A and C standard, respectively. Normalized spectrum was in allowable range although irradiance was low as 1/1000 of AM1.5D standard spectrum. Optical efficiency and acceptance angle characteristic of a sample Fresnel lens CPV mini-module evaluated by the present simulator well agreed with that evaluated by outdoor experiment.

キーワード：ソーラーシミュレータ，集光器，光学設計，光学評価，集光型太陽光発電（CPV）

Key Words：Solar simulator, Concentrator, Optical design, Optical evaluation, Concentrated photovoltaic (CPV)

1. 緒言

近年，エネルギー環境問題への対応策として太陽エネルギー利用の高効率化・低コスト化が求められている。高効率太陽電池（PV）セルの開発が進められ，発電効率が40%を超えるPVセルが出現している。しかし，高価であるため，ミラー・レンズ等の集光器（Concentrator）を用いた集光型太陽光発電（Concentrated Photovoltaic：CPV）の開発が行われ

ている^{1) - 4)}。また，太陽光から高温を得るために集光器を用いた集熱システムの開発が行われている⁵⁾。これらの集光器は直達光の利用を前提としているため，擬似光源を用いて集光特性の試験評価を行う際には直達光と同等以上の高平行光線を入射させる必要がある。加えて，例えばCPVでは集光器（レンズ・セル対のミニモジュールから実用モジュールを含む）の受光面積は10cm前後から1mオーダーと大きい。しかし，直達光並の高平行度で照射面積が広い汎用ソーラーシミュレータはほとんど製品化していない。高平行度を得るための光学系が複雑かつ大型になること，AM1.5Dの放射照度を実現する高出力安定電源が必要であること，これまでニーズがあまり無かったことなどが理由として挙げられる。最近になって，CPVの性能評価の観点から，高平行ソーラーシミュレータの開発が進んでいる。海外ではフ

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

³ 長岡技術科学大学大学院エネルギー環境工学専攻

(〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

Tel & Fax : + 81-258-46-6000

E-mail : noboru@nagaokaut.ac.jp

(原稿受付：2012年3月29日)

ラッシュキセノンランプと大型凹面鏡を用いたCPV高平行シミュレータが開発され、1m角の大照射面積にAM1.5D相当の擬似直達光をフラッシュさせ、その瞬間の諸特性を評価している⁶⁾。国内でもAM1.5D相当、高平行、照射面積150mm角を満たすシミュレータが開発されており⁷⁾、今後の評価方法の規格化などにおいて活躍することが期待される。しかし、いずれも特殊仕様で通常のソーラーシミュレータよりも高価であり、入手は困難である。

一方、集光系の研究開発の初期段階においては、太陽光に近い放射照度は必ずしも必須ではなく、平行度が高く、相対的なスペクトル合致性と照度分布均一性が一定以上の水準にあれば、光学解析の妥当性検証といった集光系の簡易評価には使用できる。そこで本研究では、放射照度は低いながらも定常点灯できる高平行ソーラーシミュレータの製作を試みた。凹面鏡とファイバ型汎用小型ソーラーシミュレータを組み合わせた比較的簡易、且つ低コストな構成で照射面積300mm角のシミュレータを構築し、その諸特性を検証した結果について報告する。

2. 実験装置

図1に試作した高平行/低放射照度ソーラーシミュレータの光学構成および設置条件を示す。本シミュレータの光源にはファイバ型汎用小型擬似太陽光源装置（朝日分光HAL-320）を用いた。装置内部のキセノンランプ光が光ファイバにより導光さ

れ、ファイバ端に取り付けた光線拡大レンズ（HAL-320 オプション）を介して外部へ照射される。本来の製品仕様では照射面積60mm角においてJIS C 8912 等級Aのスペクトル合致性、放射照度、および時間変動率を有する。本シミュレータでは、光線拡大レンズを専用設計のものに換装し、光線拡大レンズから射出する光束を凹面鏡へ照射した。凹面鏡は外径400mm、焦点距離 $f = 3000\text{mm}$ 、正反射率87～89%（アルミ蒸着）の球面鏡（曲率半径6000mm、溝尻光学7217）であり、光線拡大レンズから照射された光束をコリメート（平行化）し、直径約350mmの照射面（評価面）を形成する。なお、幾何光学的には放物面鏡が点光源に対する理想コリメータであり、球面鏡ではなく放物面鏡を用いるのが望ましい。しかし、外径400mmにおいて、焦点距離3000mmの放物面と曲率6000mmの球面の形状には最大で $0.924\mu\text{m}$ の誤差しかなく、最大誤差点において放物面鏡で得られる平行光に対して最大で 0.0021° 傾くだけであり、球面鏡を代用しても問題ないと判断した。この光学系において設置角度 $\theta = 0^\circ$ の場合を考えると、図2(a)に示すように、平行度 α （全角）は光線拡大レンズから射出する光束直径 d と焦点距離 f により決まり、平行度の半角は $\alpha/2 = \arctan(d/2f)$ となる。 $\theta \neq 0^\circ$ の場合には、図2(b)に示すように α は不変だが、光束軸に微小の傾き（ $\Delta\theta$ ）が生じる。本設置条件では評価面において $\Delta\theta$ は約 0.01° 以内でバラツキが生じる。図3

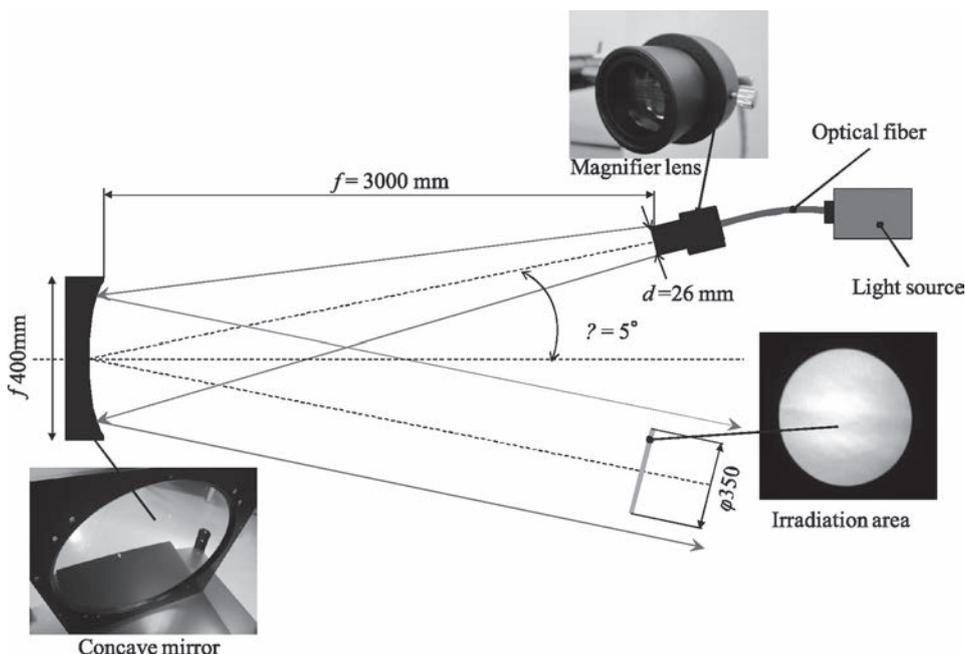


Fig.1 Optical components and configuration of the prototype solar simulator
 図1 試作シミュレータの光学構成

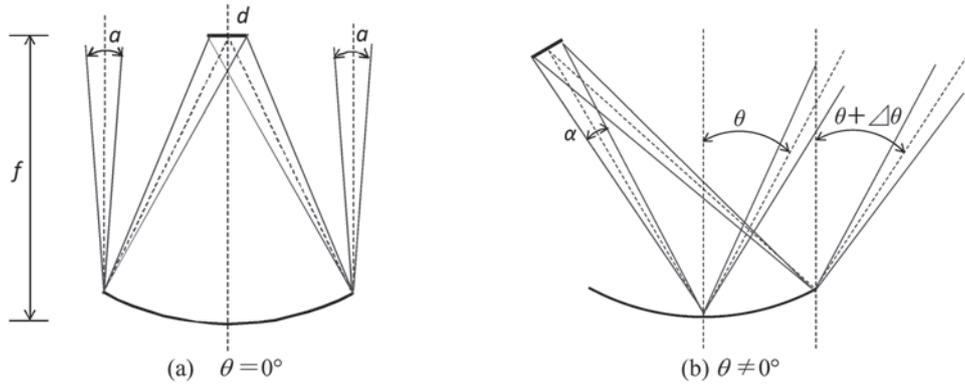


Fig.2 Optical geometry of the prototype solar simulator
 図2 試作シミュレータの幾何光学

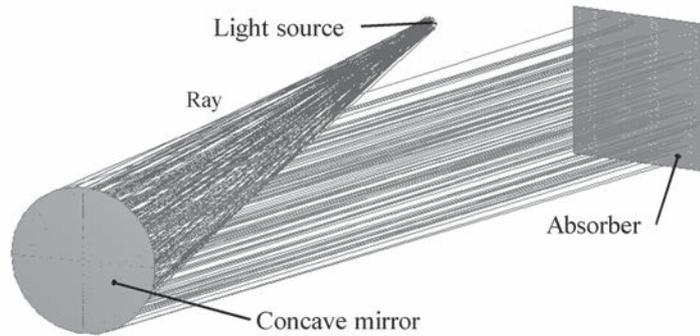


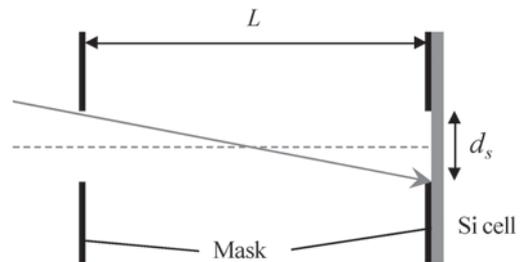
Fig.3 Ray-tracing analysis model of the prototype solar simulator
 図3 試作ソーラーシミュレータの光線追跡解析モデル

には光線追跡解析モデルを示す。本シミュレータの光学構成を再現しており、後述する平行度の推定や、凹面鏡の設置誤差の影響評価に用いた。

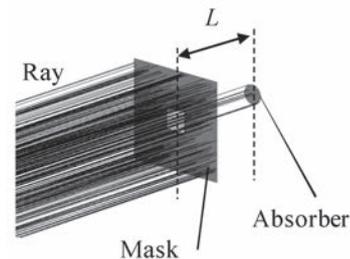
3. 実験方法

3.1 光束平行度の測定

図4に平行度の測定原理を示す。直径 $d_s = 6\text{mm}$ の円孔マスクを施した結晶シリコン太陽電池セル (Siセル) から距離 L の地点に同じ円孔を有するマスク置き、本シミュレータの光束に正対させた。 L を変化させることでSiセルに入射する光束の放射照度に変化し、 L が長くなるにつれ平行度の低い光束ほどSiセルに入射しなくなる。セル短絡電流がセル面での放射照度に比例することから、ソースメータ (Keithley2400) により I-V カーブを取得し、セル短絡電流を求めた。この実験装置と同じモデルを光線追跡解析で再現し、平行度 $\alpha/2 = 0.1, 0.15, 0.2, 0.27^\circ$ の光束を入射させ、距離 L による放射照度変化を解析した。この両者の比較から、本シミュレータの光束平行度を推定した。なお、実際の直達光は太陽視半径により $\alpha/2 = 0.27^\circ$ 程度の平行度を有し



(a) Measurement apparatus
 (a) 実測方法



(b) Ray-tracing model corresponding to measurement apparatus
 (b) 実測方法に対応する光線追跡モデル

Fig.4 Measurement method of parallelism
 図4 光束平行度の計測方法

ている^{8), 9)}。

3.2 放射照度および放射照度分布の測定

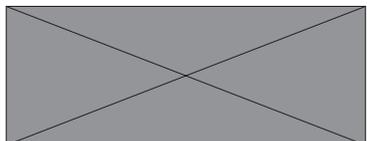
放射照度（以下、照度）の測定には、3 接合型化合物セル（有効セル面積 5.5 × 5.5mm）を用いた、直径約 350mm の照射面のうち縦 300 × 横 300mm の正方形領域を評価面とし、評価面内の縦 5 × 横 5 点（計 25 点）に上記セルを設置して短絡電流を取得した。これを AM1.5D, 1kW/m² (= 1 sun) 照射下での同セルの短絡電流で除した値により 1 sun に対する相対照度 E を算出した。また、評価面内 25 点での E から照度均一性(放射照度場所むら ΔE) を次式により評価した (JIS C 8912)。

$$\Delta E = \pm \frac{E_{MAX} - E_{MIN}}{E_{MAX} + E_{MIN}} \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

なお、いずれの測定においてもセル裏面（厳密にはセルレーザ裏面）の温度は室温程度 (20℃ ± 5℃) であり、温度による短絡電流値への影響は無いものとみなした。さらに、分布評価の参考のため、評価面に拡散板（板厚 3mm の乳白色樹脂板）を置き、拡散板の真後ろに 1m 離れた地点から輝度計(コニカミノルタ CA-2000)で拡散板上の輝度分布を計測した。なお輝度計は可視光域のみに測定感度を有する。

3.3 相対スペクトル合致度の測定

本シミュレータは低照度であるため、スペクトル（分光放射照度スペクトル）の絶対値による評価ではなく、規格化したスペクトルによる相対的な合致度を評価した。照度測定と同じ各点のスペクトルを測定し、規格化した値を JIS C 8912 が定める式に代入し、次式のように相対スペクトル合致度を算出した。



$$\dots \dots \dots (2)$$

ここで $M_{\lambda_i - \lambda_j}$ は波長範囲 λ_i から λ_j における相対スペクトル合致度、 $E_{AM1.5D, normalized}$ は基準太陽光 (ASTM G-173-03, AM1.5D + circumsolar) の分光放射照度を規格化した値、 $E_{s, normalized}$ は本シミュレータの実測分光放射照度を規格化した値である。スペクトル測定には、分光放射計（英弘精機 LS-100）を用いた。

3.4 CPV ミニモジュールの評価

本シミュレータを用いて CPV ミニモジュールを評価し、実際の直達光下における屋外評価との差異

を検証した。図 5 に本シミュレータ照射面に設置したミニモジュールの概観を示す。さらに図 6 に同一のミニモジュールを太陽追尾架台に搭載した屋外評価装置の概観を示す。

このミニモジュールは受光面積 200 × 188mm の樹脂製フレネルレンズと 3 接合型化合物セルレーザ（有効セル面積 5.5 × 5.5mm）の一对から構成される。I-V カーブ測定および太陽追尾装置には英弘精機 MP-160 および STR-22(仕様追尾精度 0.1° 以内)を用いた。直達および全天日射計には英弘精機 MS-720 (全角 5°) および MS-402 を用いた。レンズ受光面を正方形の穴が空いたマスクで覆い、穴のサイズを調整することで幾何学的集光比 $C_g = 100, 300, 500, 1000, 1200$ に設定し、各 C_g のセル短絡電流 I_{sc} を計測した。レンズを取り外した際の際の非集光状態におけるセル短絡電流 $I_{sc, ref}$ も計測し（屋外評価でのレンズ脱着は 1 分程度で行い、その間の直達日射量は 836W/m² ± 15W/m² であった）、次式によりエネルギー密度集光比 C_f と光学的効率 η を算出した。

$$C_f = \frac{I_{sc}}{I_{sc, ref}} = \eta C_g \dots \dots \dots (3)$$

評価に際して、まず、シミュレータ下で $C_g = 1200$

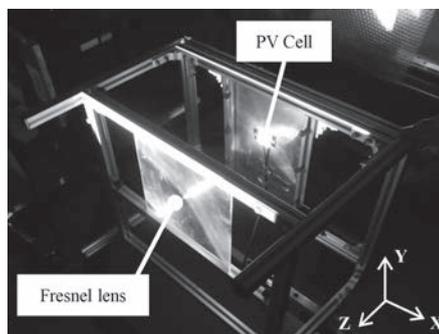


Fig5 Photo of the CPV mini-module tested in the prototype solar simulator

図 5 本シミュレータ照射下の CPV ミニモジュール

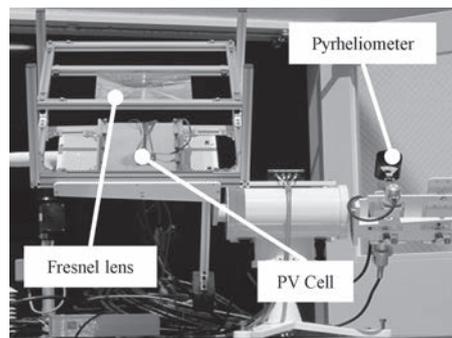


Fig6 Photo of CPV mini-module tested in the outdoor experiment system

図 6 屋外評価装置と CPV ミニモジュールの概観

において集光スポットがセル中心に形成され、且つ光学的効率が最も高くなるフレネルレンズとセルレシーバとの距離を、減光フィルタを介して肉眼で集光の様子を観察しながら決定した。この距離を変えずに、受光面の正方形マスクを順次取り替えて C_g を変えていった（屋外試験でも同じ距離を維持した）。次いで、 C_g を固定し、ミニモジュールの入射角特性を評価するため、シミュレータ照射面に設置したミニモジュールへの光束の入射角 θ_z を図7のように ZX 平面で角度を変更してセル短絡電流の変化を計測した。このときミニモジュールはターンテーブルに載せ、レーザーポインタ付き角度計測器で回転角を測りながら入射角 θ_z を 0.1° 刻みで変更した。同じ条件を光線追跡解析モデルで再現し、セル面の照度変化を解析した。なお、光線追跡解析では、実際に用いたフレネルレンズの設計形状を入力し、レンズ材料である PMMA の 635nm での屈折率 $n = 1.49$ を用いた単波長解析、ならびに PMMA の波長分散を考慮した複数波長での解析を行った。

4. 実験結果および考察

4.1 光束平行度の計測結果

図8に平行度に関する測定結果および解析結果を示す。グラフは、放射照度（解析）、セル短絡電流（実

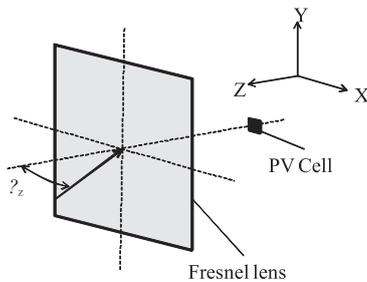


Fig.7 Coordinate system of incident angle dependency test

図7 入射角特性評価のための座標系（図5に対応）

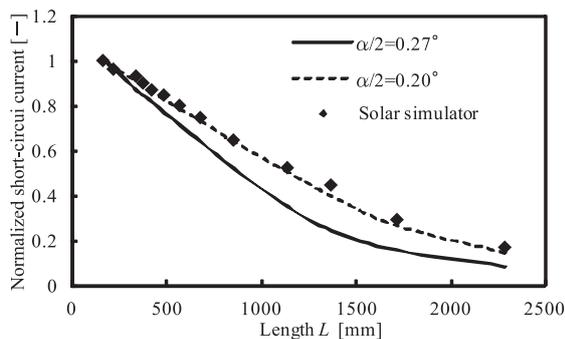


Fig.8 Comparison of measurement and analysis on parallelism of the prototype solar simulator

図8 光束平行度の測定結果および解析結果の比較

測) を $L = 200\text{mm}$ の値でそれぞれ正規化したものである。実験値は $\alpha/2 = 0.2^\circ$ の解析値（実線）とよく一致しており、本シミュレータは $\alpha/2 = 0.2^\circ$ に近い平行度を有していると推定できる。なお、測定と解析は放射照度測定と同じように評価面の複数点で行ったが、中心部と周辺部との違いは無かった。光線拡大レンズ、凹面鏡、照射面の位置関係を可能な限り変更してみたが、本装置では、直達光の平行度を $\alpha/2 = 0.27^\circ$ （破線）に近づけることはできなかった。光線追跡解析によれば、 $\alpha/2 = 0.27^\circ$ を得るためには光線拡大レンズの光束直径 d は 26mm とする必要があるが、実際の光線拡大レンズが照射した光束の有効直径 d は 21mm となり、想定よりも小さかったことが原因である。平行度を $\alpha/2 = 0.27^\circ$ とするには光線拡大レンズの仕様変更が必要となる。

一方、本シミュレータでは、構成機器の相対的な角度が重要となるため、平行度に対する設置誤差の影響を光線追跡によって検証した。図9に理想的な凹面鏡設置角度からの誤差 $\Delta\theta_{\text{mirror}}$ と平行度の変化量の関係を示す。 $\Delta\theta_{\text{mirror}} > 0.1^\circ$ では平行度の変化量が約 0.04 以上となり、影響が大きくなることがわかる。設置は水準器やレーザーポインタ付き角度計測器を使って行った。レーザーポインタの向きが 0.1° 変化するときポインタからの距離 3000mm の地点で生じる変位は約 5mm と大きいため、この変位が 5mm 未満となるように角度調整を行うことができた。これより 0.1° 未満の配置が達成できたとみている。

4.2 照度および照度分布の計測結果

図10に評価面 300mm 角における照度分布および輝度分布を示す。輝度分布では評価面全体の平均値からの誤差を%表示している。いずれも中心部の

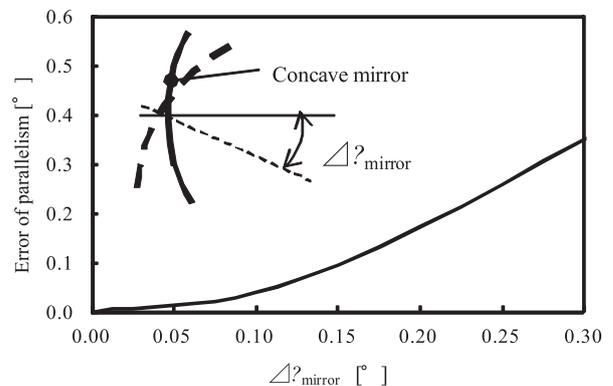


Fig.9 Effect of alignment error to parallelism of the present solar simulator (analytical result)

図9 凹面鏡の設置角誤差による光束平行度への影響（解析結果）

方が周辺よりも若干大きい傾向がある。これは光線拡大レンズから射出する光束の配光特性に起因する。レンズ中心付近から射出する光線のエネルギーが周辺よりも大きい場合に同様の傾向が出ることを光線追跡により確認した。Siセル短絡電流より算出した照度の平均値は 1.29×10^{-3} sun, 最大・最小値は各々 1.32×10^{-3} sun, 1.22×10^{-3} sun となり, $\Delta E = 4.23\%$ で JIS C 8912 等級 C を満たす照度均一性が得られた。また, 評価面をより狭い範囲の 150mm 角 (破線内) でさらに 25 点の測定点を設けて測定した場合には $\Delta E = 1.38\%$ となり, 等級 A を満たした。

4.3 相対スペクトル合致度の計測結果

図 11 に相対スペクトル合致度の測定結果を示す。照度と同様の 25 点における平均値をプロットした。エラーバーは最小・最大値である。400 ~ 800nm の波長領域では JIS C 8912 等級 A に相当する合致度が得られたが, 300 ~ 400nm では 0.40, 800 ~ 900nm では 1.37, 900 ~ 1000nm では 2.18, 1000 ~ 1100nm では 1.30 となった。結晶シリコン太陽電池向けのソーラーシミュレータに内蔵されるエアマスマスフィルタは 1100nm 以上の波長帯をほぼカットする傾向があるが, 本シミュレータでは 3 接合型化合物セルのボトムフィルタは 1100nm 以上の波長帯をほぼカットする傾向がムセルの感度に対応させるため, 赤外域の透過率を上げたエアマスマスフィルタに変更している。結果として短波長側の透過率が若干低下した。この測定スペクトルを用いて各短絡電流を波長積分し, 比を求めたところ, 1 : 1 : 0.8 となった (ただし, ボトムセルでは ~ 1100nm までを積分)。

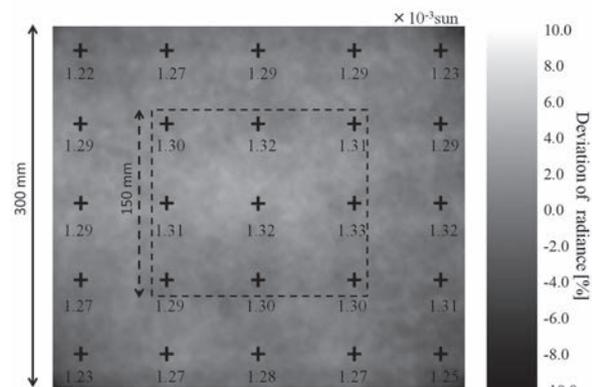


Fig.10 Irradiance and radiance distribution at the irradiated area (values : irradiance, gray-scale map : radiance)

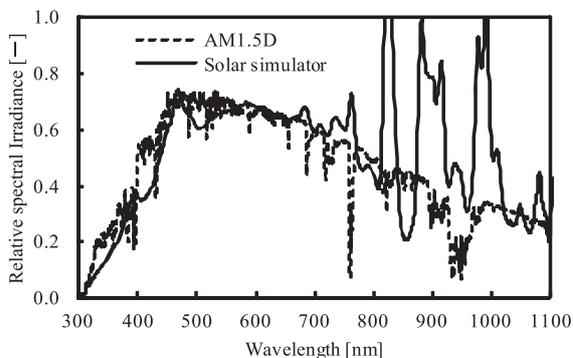
図 10 輝度分布および照度分布 (値 : 照度, 濃淡マップ : 輝度)

分光放射計の測定レンジの制限により, 1100nm より長波長側のスペクトルは計測できなかったが, 1100nm までの波長積分でも, ボトムセルの短絡電流がトップ, ミドルに比べて 80% となり, 極端に低くは無い。1100nm よりも長波長側に存在する光の寄与も含めると, ボトムセル電流のミスマッチによるトータルのセル短絡電流に及ぼす影響は大きいものともみられる。本来, 多接合セル用シミュレータには, すべての要素セルの出力電流が基準太陽光の下での値と同じになるように分光放射照度を調整する必要がある^{10), 11)}, 低照度の場合でも出力電流の比率が基準太陽光下と同じになれば理想である。

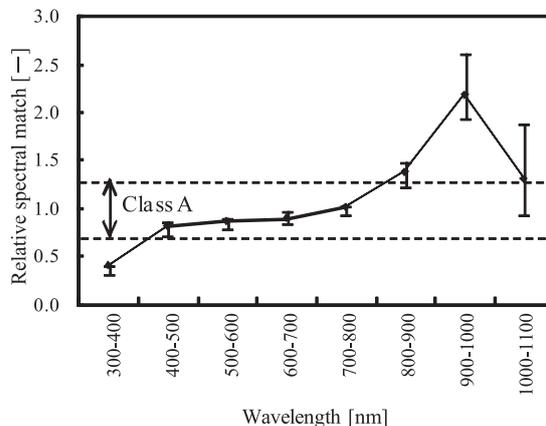
4.4 CPV ユニットの評価結果

図 12 に本 CPV ユニットの幾何学的集光比 C_g と光学的効率 η の関係を示す。図には本シミュレータ照射下での結果と屋外評価装置による実太陽光下での評価結果をプロットした。なお, グラフ縦軸は, $C_g = 100$ の光学的効率を基準に規格化している。光学的効率は C_g に反比例しており, その低下の度合いはシミュレータと屋外評価とではほぼ一致している。

さらに図 13 には入射角特性の評価結果を示す。



(a) Relative spectral irradiance



(b) Relative spectral match

Fig.11 Spectral characteristic at the irradiated area
図 11 評価面での相対スペクトルおよび合致度

グラフ縦軸は入射角 $\theta_z = 0^\circ$ のセル短絡電流を基準とする規格化短絡電流である。屋外評価では追尾装置の追尾動作を停止させた時点の時刻、時間、および太陽位置の関係からレンズ受光面法線に対する入射角を逆算してプロットした。シミュレータ下の結果は屋外の結果と良く一致した。ここで、集光系の許容半角 (Acceptance half angle) を入射角 0° 時の90%に低下する角度と定義すると、被評価ミニモジュールの許容半角は $\pm 0.3^\circ$ と評価できた。図13には比較のために光線追跡解析 (単波長解析) による結果もプロットした。シミュレータと同じ $\alpha/2 = 0.2^\circ$ の平行度の光線を入射させた際の解析結果を実線で、実太陽光の平行度と同じ $\alpha/2 = 0.27^\circ$ の場合の解析結果を破線で示したが、両者の差異は小さく、 $\theta_z = 0.5^\circ$ よりも小さい入射角では解析とシミュレータ下および屋外の結果はほぼ一致した。0.5°よりも大きな入射角においてもシミュレータ下と屋外の結果はほぼ一致したが、解析値よりも低い傾向が見られた。この要因を考察するために、PMMAの波長

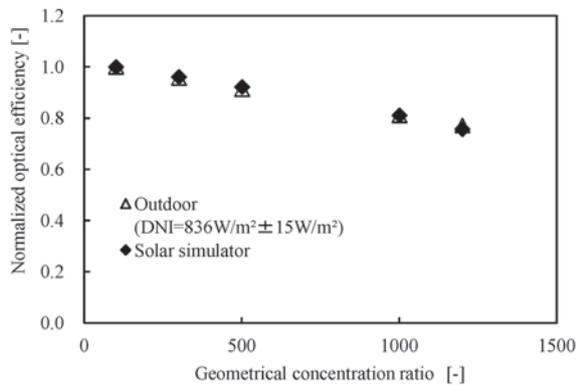


Fig.12 Test result of optical efficiency of CPV mini-module

図12 CPV ミニモジュールの光学的効率の評価結果

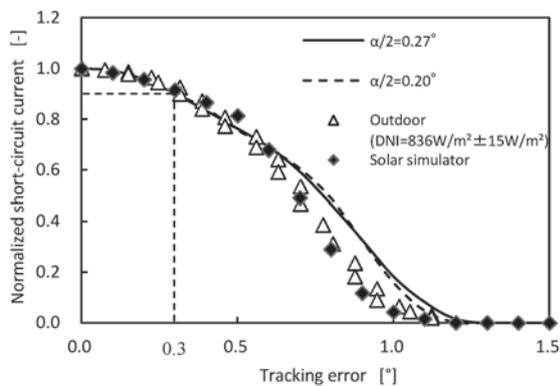


Fig.13 Test result of incident angle dependency of CPV mini-module in comparison with monochromatic analysis ($\lambda = 635\text{nm}$)

図13 CPV ミニモジュールの入射角特性の評価結果 (単波長解析: $\lambda = 635\text{nm}$)

分散を考慮した複数の波長での解析結果を図14に示す。図14にはPVセル上での3つの波長の局所エネルギー密度集光比 (C_f 値) 分布も示した。 $\theta_z = 0.5^\circ$ よりも大きい入射角の実験値は、短波長 ($\lambda = 400 \sim 550\text{nm}$) の解析結果の傾向とほぼ一致している。この波長域は実験で用いた3接合セルのトップセルの発電感度域である。 C_f 値の分布をみると短波長 ($\lambda = 400\text{nm}$) の光は長波長のものより

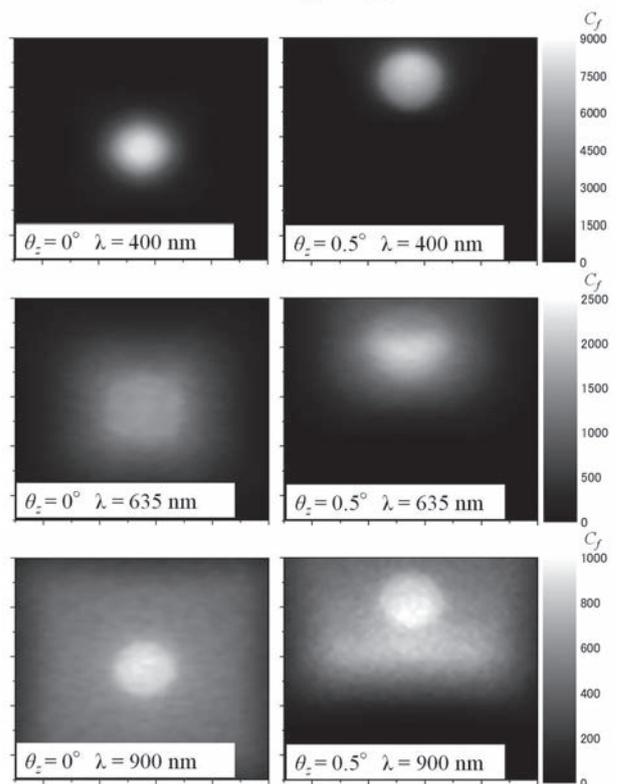
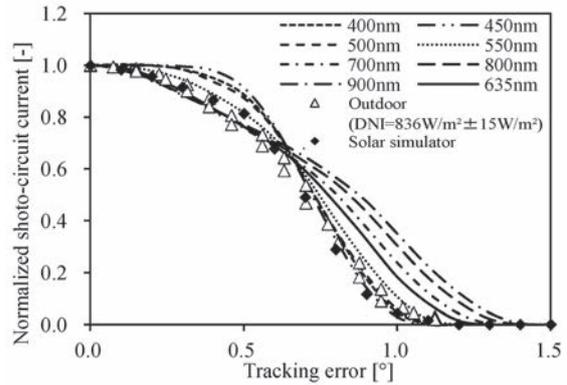


Fig.14 Test result of incident angle dependency of CPV mini-module in comparison with spectral analysis ($\lambda = 400 \sim 900\text{nm}$, $\alpha/2 = 0.27^\circ$)

Bottom figures (b) ~ (d) show concentrated energy distribution (C_f map) on PV cell surface area at $\theta_z = 0^\circ$ and 0.5°

図14 CPV ミニモジュールの入射角特性の評価結果 (複数波長解析: $\lambda = 400 \sim 900\text{nm}$, $\alpha/2 = 0.27^\circ$)
下図 (b) ~ (d) は $\theta_z = 0^\circ$ および 0.5° における PV セル上での各波長の局所エネルギー密度集光比 (C_f 値) 分布である。

も集光スポットが小さく、ちょうど $\theta_z = 0.5^\circ$ 付近でPVセル面の端部にずれ、セル面から外れる。つまり、トップセルの光電流が減衰し、セル短絡電流を律速していることが原因で $\theta_z = 0.5^\circ$ よりも大きな入射角では実験値が解析値よりも低かったことが推察される。

なお、解析ではレンズ形状として設計値を用いており、実際の形状とは差異があり得る点、追尾装置に搭載した際のレンズセル間のアライメント誤差などの不確実な要素も考えられるため、入射角依存性の解析と実験との比較については今後より慎重な検証の必要性がある。

以上のように、試作シミュレータは実太陽光の平行度よりも 0.07° 高い平行度となったが、本シミュレータによる評価結果は光学解析結果および屋外評価結果とほぼ整合した。集光系の研究開発の初期段階においては、集光倍率や入射角等の条件を変えた際の光学的効率（セル短絡電流）の相対的な比較や光学解析との比較検証ができれば十分なケースも多く、そのような場合において本シミュレータは有用であると考えられる。

5. 結言

集光系の簡易評価に用いることを目的として、定常点灯できる高平行/低放射照度ソーラーシミュレータを試作評価した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 凹面鏡とファイバ型汎用小型ソーラーシミュレータを組み合わせた比較的簡易、且つ低コストな構成で照射面積300mm角のシミュレータが構築できた。
- (2) 解析結果との比較により、照射面における光束平行度は約 $\pm 0.2^\circ$ であると推定された。また、照射面での放射照度は約0.001 sunで、照度均一性は照射面150mm角および300mm角で各々JIS C 8912 等級A およびC 相当が得られた。スペクトル成分を相対スペクトル合致度として評価したところ、300～1100nmにおいて0.40～2.18の合致度が得られた。
- (3) 一對のフレネルレンズと3接合型化合物セルのから構成されるミニモジュールの光学的効率と

入射角特性を幾何学的倍率に対して相対的に評価した場合、シミュレータ下での評価結果は解析結果および屋外評価結果とほぼ一致した。

謝辞

本研究の一部はNEDO新エネルギー技術研究開発（太陽光発電システム次世代高性能技術の開発）に関連して行われた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) G. Peharz, F. Dimroth, Progress in Photovoltaics : Research and Applications, Vol.13 (2005), pp.627-634.
- 2) A. Mohr, T. Roth, S.W. Glunz, Progress in Photovoltaics : Research and Applications, Vol.14 (2006), pp.663-674.
- 3) K. Araki, P. Zamora, P. Benítez, J.C. Miñano, G.Sala, Proc. PVSEC-21 (2011), 4B-40-06.
- 4) Y. Ota, K. Nishioka, PVSEC-21 (2011), 4B-40-03.
- 5) 塩見, M. Umair, 宮崎, 植田, 秋澤, JSES/JWEA 講演論文集 (2010), pp.399-402.
- 6) C. Domínguez, I. Antón, G. Sala, Optics Express, Vol.19 (2008), pp. 14894-14901.
- 7) 橋本, 西, 上田, 大谷, 菱川, NEDO 革新的太陽光発電カンファレンス 2011 (2011), CD-ROM.
- 8) R. Leutz, A. Suzuki, Nonimaging Fresnel Lenses Design and Performance of Solar Concentrators, Springer-Verlag Heidelberg, 2001, pp.185-187.
- 9) J. Jaus, A.W. Bett, H. Reinecke, E.R. Weber, Progress in Photovoltaics : Research and Applications, Vol.19 (2011), pp.580-590.
- 10) 菱川, 太陽エネルギー, Vol.32, No.5 (2006), pp.29-32.
- 11) 菱川, 太陽エネルギー, Vol.33, No.2 (2007), pp.39-43.