

550 倍軸外しミラー集光型太陽光発電 モジュールの光学解析および試験

Optical analysis and experiment of 550 × off-axis XR concentrator photovoltaic module

山田 昇 ^{*1}	岡本和也 ^{*2}	居城俊和 ^{*2}	鈴木隆男 ^{*3}
Noboru YAMADA	Kazuya OKAMOTO	Toshikazu IJIRO	Takao SUZUKI
前村敏彦 ^{*3}	川口 隆 ^{*3}	高橋 弘 ^{*4}	佐藤 孝 ^{*5}
Toshihiko MAEMURA	Takashi KAWAGUCHI	Hiroshi TAKAHASHI	Takashi SATO

Abstract

This paper describes optical analysis, indoor and field experiment of off-axis mirror concentrator photovoltaic module with geometrical concentration ratio of 550×. By means of ray-tracing computation, optical efficiency of 83% and acceptance angle of $\pm 1.4^\circ$ were obtained. In the field experiment, the prototype mini-module mounted on a carousel-type tracker achieved average module efficiency of 28.1% under the average direct normal solar irradiation of 765W/m². The estimated peak cell temperature was 71.9°C which was 40°C higher than ambient air temperature. Incident angle dependency in indoor and field experiment well agreed with that in optical analysis. In addition, shading effect occurring in the carousel-type tracker was examined and the result indicated that the generated electricity decreased in proportion to the ratio of shading area to module aperture area. Furthermore, the field experimental result clearly showed that a secondary optical element in the present concentrator system contributed irradiance uniformity at the cell active area and improved the module efficiency.

キーワード：集光型太陽光発電，軸外しミラー集光器，光線追跡法，光学設計

Key Word : Concentrator photovoltaic (CPV), Off-axis mirror concentrator, Ray-tracing, Optical design

1. 緒言

次世代太陽光発電の 1 つとして，集光型太陽光発電 (Concentrator Photovoltaic: CPV) が注目されている。CPV に用いる高効率太陽電池 (PV) セルの開発が進められ，セル変換効率 43.5% の 3 接合型化合物 PV セルが出現しており⁽¹⁾，低コストな集光器 (Concentrator) と組み合わせた CPV モジュールが開発されている⁽²⁾⁽³⁾。幾何学的集光倍率 (Geometric concentration ratio, 以下 C_g) が 100 倍 (以下, 100× のように表記) を超える CPV (HCPV と呼ばれる) では，集光器の許容入射角をできるだけ大きくし，設置誤差や追尾誤差による効率低下のリスクを軽減するとともに，集光器の更なる軽量・コンパクト化が求められている。また，システムコストの約 20% を

占める追尾装置の低コスト化も要求されている。

追尾装置に関しては，発電規模の大きいプラント (Utility scale) 用途では，フットプリントが小さく，大面積モジュールの搭載に有利なペDESTAL 方式 (Pedestal tracker, 図 1(a)) が主流だが，最近では，電気自動車向けの駐車場の屋根やスーパーマーケット屋上などの屋根面 (Roof-top) での小規模発電への適用事例も現れており⁽⁴⁾⁽⁵⁾，装置全高を低く抑えられるカーセル方式 (Carousel tracker, 図 1(b)) に類似の方式が用いられる傾向がある。

一方，集光器に関しては，フレネルレンズ (Fresnel lens) やカセグレンミラー (Cassegrain mirror) など，一次集光器の光学的中心軸上に PV セルが位置する軸上 (On-axis) 集光方式がこれまでの主流だが，最近，Miñano らによって，軸外し (Off-Axis) 集光方式の反射 (X, スペイン語の refleXión) - 屈折 (R, Refraction) 集光器 (Off-Axis XR concentrator) が提案され，500× 以上において従来の On-axis フレネルレンズあるいはカセグレンミラーに対して 2~3 倍の広い許容入射角を実現でき，加えて集光系の全高 (モジュール筐体の厚さ) をこれらより薄くできる優位性が報告されている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

*1 長岡技術科学大学工学部 准教授

*2 長岡技術科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)

*3 三井造船株式会社

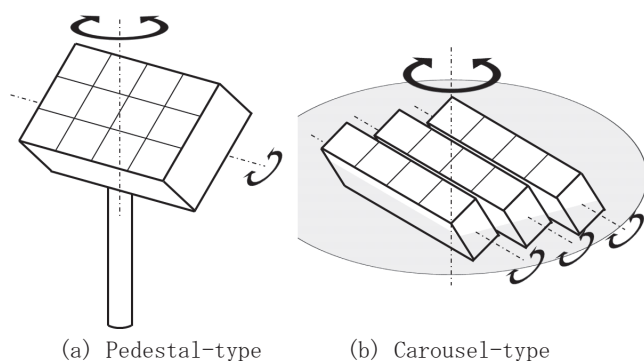
*4 岡本硝子株式会社

*5 スタンレー電気株式会社

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

E-mail: noboru@nagaokaut.ac.jp

(原稿受付: 2013 年 1 月 30 日)



(a) Pedestal-type (b) Carousel-type

Fig.1 Types of sun tracking system

図1 太陽追尾装置

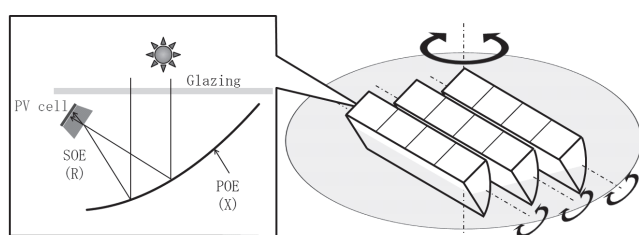


Fig.2 Outline of CPV system with off-axis XR concentrator on carousel-type tracker

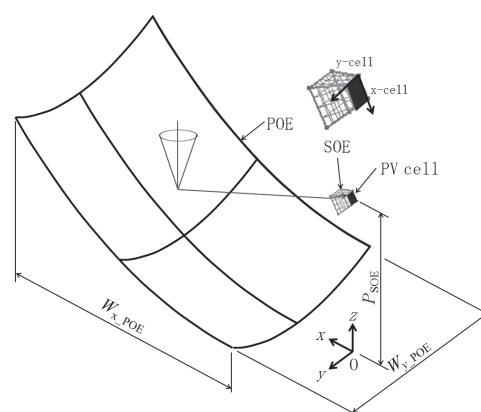
図2 カルーセル方式追尾装置に Off-axis XR 集光器を搭載した CPV システムの概略

そこで本研究では、これまでに報告例のないカルーセル方式と Off-Axis XR 集光器を組み合わせたロープロファイルの CPV システムの構築と実現可能性検証を目指し、その第 1 ステップとして、集光系の光学解析設計と 550 × の試作ミニモジュールによる屋内外での基礎試験検証を行った結果について報告する。

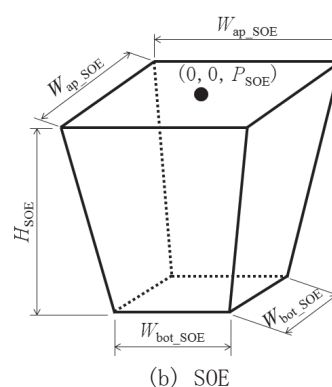
2. カルーセル方式 Off-Axis XR CPV システム

図1にペダスタル方式とカルーセル方式追尾装置の概略を示す。さらに図2に提案システムの概要を示す。提案システムでは、集光器と PV セルの一対を最小構成として (図2左)、これを一列に密に直列配置したものがモジュールとなる。そして、複数のモジュールが前後に一定の間隔をおいて追尾架台にマウントされた形態となる (図2右)。太陽高度方向に対する追尾動作は各モジュールをリンク機構を介して同期回転することで行い、方位角方向に対する追尾動作は装置全体をメリーゴーランド (カルーセル) のように水平面回転することで行う。

モジュールに入射した太陽光はカバーガラス (Glazing) を透過し、一次集光器 (Primary Optical Element : POE) であるミラーで反射した後、二次集光器 (Secondary Optical Element : SOE) に入射し、SOE で屈折・通過して PV セル面に集光する。慣例に従えば、反射を X, 屈折を R と略記でき、このタイプを XR 集光器



(a) Off-axis XR concentrator



(b) SOE

Fig.3 Analytical model

図3 解析モデル

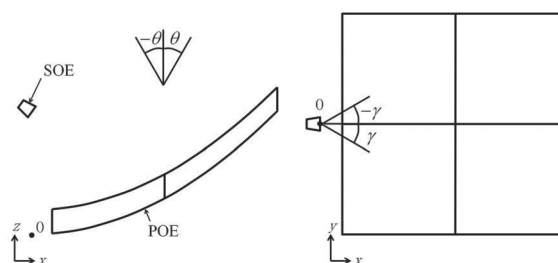


Fig.4 Definition of deviation angle

図4 追尾誤差角の定義

と呼ぶ。C_gは550×とし、POEには回転放物面ミラー、SOEにはロッドレンズ (Homogenizer, Kaleidoscopeとも呼ばれる) を用いた。SOEの主な役割は、PVセル面での放射照度均一性を高めること、許容入射角を広げること、PVセル面を保護することである。

3. 光学解析設計

3.1. 解析モデルおよび解析手法

試作ミニモジュールのPOEおよびSOEの形状を決めるために、光線追跡解析を実行した。図3に解析モデルを示す。POEの回転放物面ミラー形状は、図3(a)に示すx方向およびy方向の焦点距離をそれぞれ f_x および f_y とすると、座標(x, y)に対する高さzが次式で求められる。

Table 1 Dimensions of 550× Off-axis XR concentrator
表 1 550× Off-axis XR 集光器の主な寸法

Aperture Area	A_{ap}	170×165	mm ²
PV cell active area	A_{sc}	7×7	mm ²
Geometrical concentration ratio	C_g	550×	
SOE installation position	P_{SOE}	92.5	mm
POE x-axis width	$W_{x,POE}$	170	mm
POE y-axis width	$W_{y,POE}$	165	mm
POE x-axis focal length	f_x	92.5	mm
POE y-axis focal length	f_y	92.5	mm
SOE bottom width	$W_{bot,SOE}$	7.0	mm
SOE aperture width	$W_{ap,SOE}$	12.4	mm
SOE height	H_{SOE}	10.0	mm

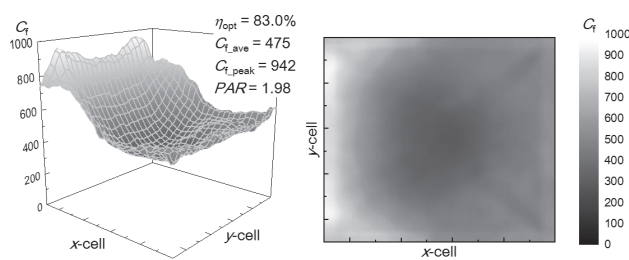


Fig. 5 Distribution of local flux concentration at PV cell surface and other performance indices

図 5 セル面照度分布および性能指標

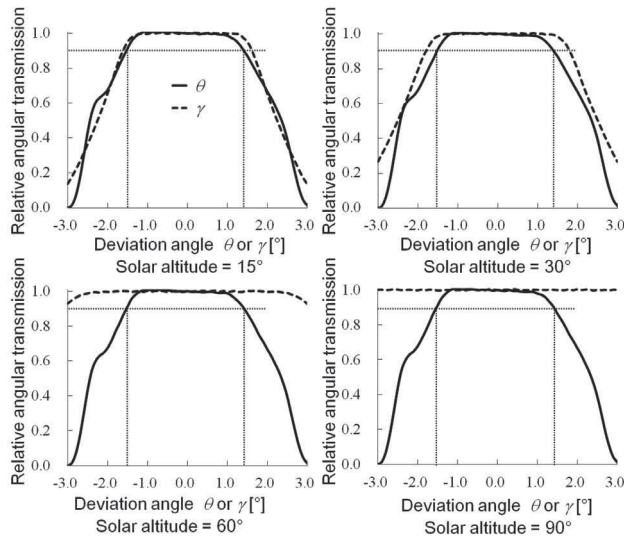


Fig. 6 Acceptance angle characteristic for different solar altitude 15°, 30°, 60°, 90°

図 6 各太陽高度における入射角特性

$$z = \frac{1}{4} \left(\frac{x^2}{f_x^2} + \frac{y^2}{f_y^2} \right) \quad (1)$$

SOE は開口面中心がミラー上端と同じ高さ z になるように配置した。また、SOE および PV セルの影が POE に入らないようにするために、ミラーはセル位置 $x = 0$ に対して $x = 15.0\text{mm}$ からとした。

一方、SOE のロッドレンズ形状を図 3(b) に示す。底部

の $W_{bot,SOE}$ は PV セルの有効発電面寸法と同じ 7mm 角とし、高さ H_{SOE} 、開口幅 $W_{ap,SOE}$ を設計パラメータとした。

POE ミラーの反射率はアルミ削り出し面に銀蒸着したものを想定し、同じ工程による平面サンプルの太陽光反射率の測定結果 94.1% (5° 入射, 5° 検出) を用いた。銀蒸着面は太陽光スペクトル全域で高い反射率を有するため、反射率の波長依存性、入射角依存性はないものとした。一方、SOE およびカバーガラスの屈折率はガラス (BK7) の波長 852nm の値を参考に 1.510 とした。ガラスの場合、厳密には波長依存性、材料中での吸収を考慮する必要があるが、カバーガラス (Glazing) の厚さは数 mm であり、SOE 表面から PV セルまでの平均光路長は約 15mm と短いことからこれらの影響は無視した。なお、カバーガラスについては反射防止膜が無いものとした。

上記の解析モデルおよび手法を用いて、3つの性能指標：光学的効率、PV セル面照度均一性、および許容入射角のバランスが最良となる形状を探索した。具体的には、セル面の中心に焦点を結ぶ 550× の POE 仕様と SOE 位置を前述の要領で決めた後、SOE の設計パラメータ $W_{ap,SOE}$ 、 H_{SOE} について、SOE が現実的な大きさになる寸法範囲において、自動計算プログラムにより光線追跡解析を行い、後述の PAR が 2 以下、許容入射角 $\alpha_{90\%}$ が $\pm 1^\circ$ 以上を満たし、かつ光学的効率 η_{opt} が最大となる SOE 形状を決定した。ここで、光学的効率 η_{opt} は受光面に入射した光線エネルギーのうち PV セル面に到達するものの割合として定義した。また、PV セル面照度分布の均一性の評価については、Ota ら⁽⁸⁾⁽⁹⁾によるセル電気特性を考慮した手法に関する詳細な報告があるが、ここでは Herrero ら⁽¹⁰⁾によって提案された PAR (Peak to average ratio) を用いた。 PAR はセル面上の局所照度のピーク値をセル面全体の平均照度で除した値である。 PAR にほぼ比例して PV セルの FF (フィルファクター) 値が低下することが実験的に確認されている。さらに、許容入射角を評価するために定義した追尾誤差角を図 4 に示す。太陽高度方向および方位角方向に対する追尾誤差角をそれぞれ θ および γ とし、追尾誤差の無い理想入射状態 $(\theta, \gamma) = (0, 0)$ における光学的効率 η_{opt} を 100% とし、 θ および γ を徐々に増減していき、 η_{opt} が 90% に低下する θ および γ のうち、絶対値が小さい方を許容入射角 $\alpha_{90\%}$ とした⁽¹¹⁾。なお、一般的には集光器受光面の法線に対する入射光線の角度を基準として同様の許容入射角を定義するが、ここではカルーセル方式の2つの追尾軸の回転角度に許される回転角誤差を明らかにするため上述の定義とした。

3.2. 解析結果

表 1 に決定した集光器の主要寸法を示す。集光器の全高を受光面面積の平方根で除した値は 0.66 となり、 C_g がほぼ等しいフレネルレンズではこの値が約 1.5 になることから⁽¹²⁾⁽¹³⁾、本集光器は比較的薄型であると言える。

図 5 には追尾誤差の無い状態 $(\theta, \gamma) = (0, 0)$ における光

学的効率 η_{opt} とPVセル面での実質集光倍率 C_f の分布を示す。光学的効率は $\eta_{\text{opt}} = 83.0\%$ となった。損失要因はPOEでの反射損失5%、カバーガラスおよびSOEの透過損失12%である。 C_f は受光面における入射光の照度に対するPVセル面上の各位置での照度の比であり、図中の C_{f_ave} および C_{f_max} はそれぞれPVセル面全体の平均値および局所ピーク値を表す。このとき、 $PAR = C_{f_max} / C_{f_ave} = 1.98$ であり、セル端部では C_f が局所的に大きい領域があるが、Herreroらの実験報告によれば、 $PAR < 2$ であればFF値の低下量は無視できる程度であることから、全体としてセル面均一性は比較的に良好である。

図6には入射角特性を示す。太陽高度 $15^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ において追尾誤差 θ, γ を与えた際の光学的効率を $(\theta, \gamma) = (0, 0)$ 時の値で規格化した値をプロットした。いずれの太陽高度においても許容入射角として $\alpha_{90\%} = \pm 1.4^\circ$ が得られた。また、いずれの太陽高度においても許容入射角は太陽高度方向の追尾誤差角 θ によって律速されている。 $\theta = 0^\circ$ を中心として左右のグラフ形状が対象ではないのは、図4左に示すように、 θ の正負方向において集光器形状が非対称であるためである。一方、太陽方位角方向の追尾誤差角 γ に対しては、太陽高度が高くなるに従い、許容入射角が大きくなる傾向がある。これはカルーセル方式（経緯儀式）では太陽高度が高い場合ほど、 γ が生じても集光器受光面の法線に対する入射光線の角度が大きくなりにくいからである。CPV用集光系の性能指標の1つとして用いられるCAP(Concentration Acceptance Product)は C_g の平方根に $\sin \alpha_{90\%}$ を乗じた値として定義されるが⁽¹¹⁾、本集光器のCAPは0.57となり、典型的なフレネルレンズ系で報告されている値0.2~0.3⁽¹⁴⁾よりも大きい。

4. 試作ミニモジュールによる試験検証

4.1. 試験装置

解析の妥当性を検証するためにミニモジュールを試作し、屋外試験を行った。図7に示すように試作ミニモジュールをカルーセル方式追尾装置に搭載した。ミニモジュールは表1の仕様に従って製作し、2対のセル集光器で構成される。セルには3接合型化合物セルを用い、放熱グリースを用いて銅製プレートにセルレシーバ（基板+PVセル+SOE）を密着させた。放熱フィンを使用していない。POEミラーは銀蒸着したアルミ削り出し面である。SOEはガラス材から削り出し、表面を研磨したもので、SOEとPVセル面との接合部には透明シリコンを充填して光学的接着性を高めた。追尾装置の追尾角度精度は、GPSによる装置位置と時刻から計算される太陽方向に対して $\pm 0.11^\circ$ 以内であることを事前試験によって確認した。

電流-電圧曲線、直達日射量、システム近傍の気温、風速の経時変化の計測には、いずれも英弘精機製のIVカーブトレーサMP-180、小型追尾装置STR-22(仕様追

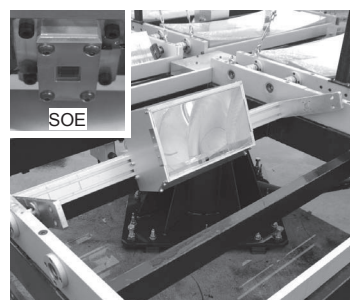


Fig.7 Photo of outdoor experimental system
図7 屋外試験装置の外観（岡山県玉野市）

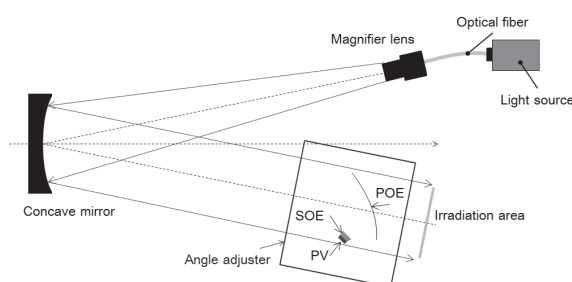


Fig.8 Outline of indoor experimental system using highly-collimated/low-irradiance solar simulator⁽¹⁵⁾

図8 室内試験装置の概略⁽¹⁵⁾

尾精度 0.1° 以内)、直達日射計MS-720(全角 5°)、および全天日射計MS-402を用いた。サンプリング間隔は10secとした。

モジュール変換効率 η_{module} は集光器開口部（面積 A_{ap} ）に入射したエネルギー量のうち直流電力に変換された割合であり、次式により求めた。

$$\eta_{\text{module}} = \frac{P_{\text{max}}}{A_{\text{ap}} \times DNI} \quad (2)$$

ここで DNI は直達日射量、 P_{max} は最大効率点での発電電力(最大発電電力)である。

上記の屋外試験に加えて、室内において、著者らが構築した低照度/高平行度シミュレータ⁽¹⁵⁾を用いて入射角特性を測定した。この室内試験装置の概要を図8に示す。本シミュレータは、キセノン光源からの光束を凹面鏡で平行化したもので、太陽視半径に近い約 $\pm 0.2^\circ$ の高い平行度を有する。また、200mm角の評価面において平均放射照度0.01sun、JIS C 8912 等級Bの照度均一性を有している。図8のように角度調整ステージ上に試作モジュールを設置し、ハーモニックドライブモータにより入射角を 0.1° 刻みで変化させた際のセル短絡電流の変化を測定した。

4.2. 試験結果

2012年7~8月に岡山県玉野市において、計6日間の屋外試験を実施した。表2に各実験日の条件をまとめて示す。なお、表中の#Measurementはデータサンプリング数である。

図9に2012年7月26日10:28~15:54における計測

Table 2 Date and conditions for field experiment at Tamano-city in Okayama-prefecture
表 2 岡山県玉野市で行った屋外試験の日時および条件

Date	Start of measurement time (Solar altitude)	End of measurement time (Solar altitude)	Culmination altitude ($^{\circ}$)	Average DNI (W/m^2)	Measurement time	# Measurement	Average ambient temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Average wind velocity (m/s)
2012/07/19	9:20:17 (50.37 $^{\circ}$)	14:42:01 (53.88 $^{\circ}$)	76.31	362	5:21:44	188	31.0	1.43
2012/07/25	11:24:31 (71.92 $^{\circ}$)	14:30:51 (55.68 $^{\circ}$)	75.11	481	3:06:50	738	31.3	1.56
2012/07/26	10:28:21 (62.73 $^{\circ}$)	15:54:11 (38.64 $^{\circ}$)	74.89	769	5:25:50	1693	32.1	1.53
2012/08/28	9:41:44 (48.86 $^{\circ}$)	15:38:21 (35.44 $^{\circ}$)	65.12	646	5:53:40	617	31.4	2.33
2012/08/30	13:42:31 (55.93 $^{\circ}$)	16:46:22 (21.05 $^{\circ}$)	64.52	720	3:03:51	878	32.5	1.39
2012/08/31	7:21:41 (20.76 $^{\circ}$)	14:15:21 (50.29 $^{\circ}$)	64.05	372	6:53:40	865	29.6	1.39

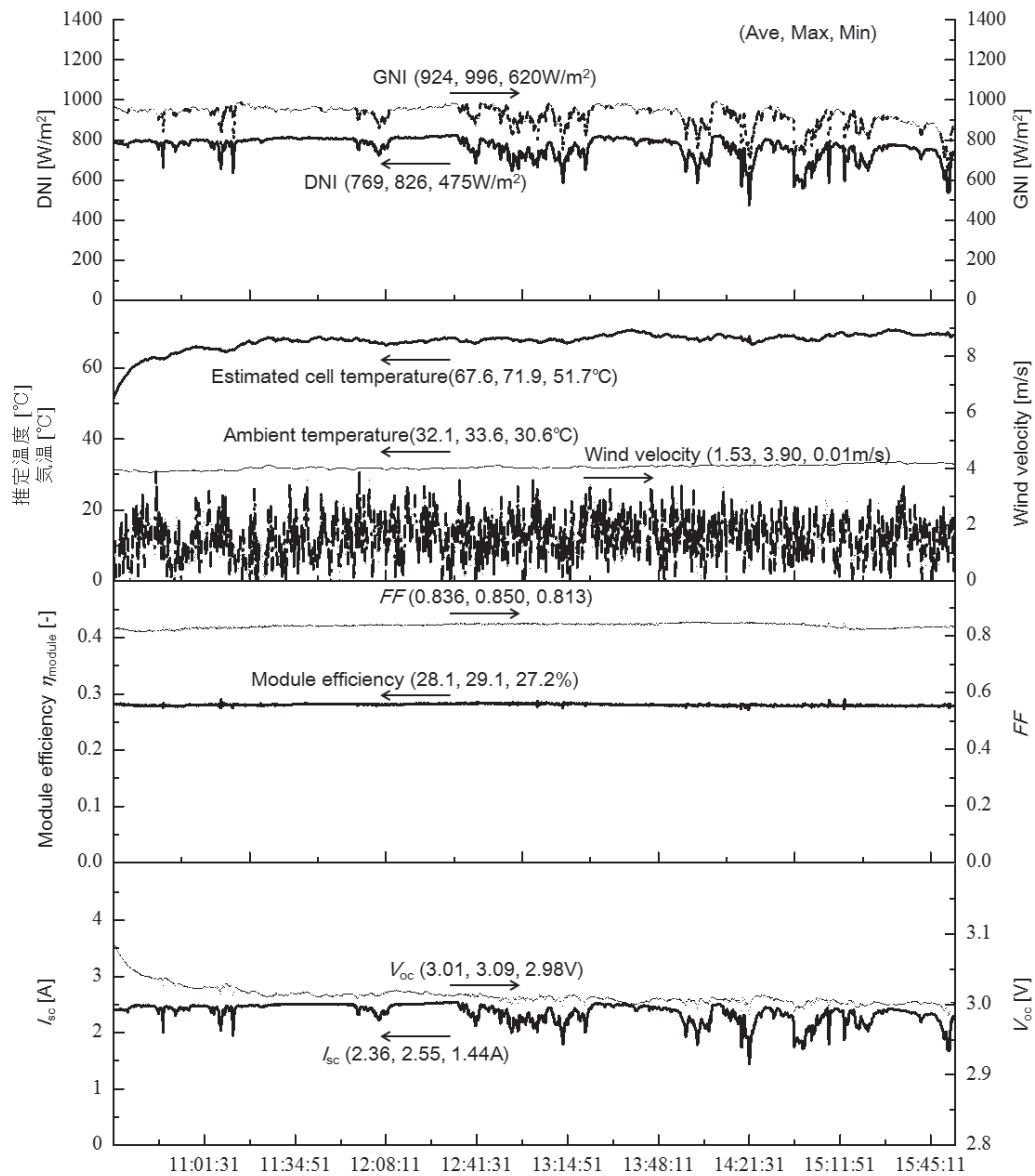


Fig. 9 Daily variation under clear sky condition on July 26, 2012 at Tamano-city in Okayama prefecture

図 9 2012 年 7 月 26 日岡山県玉野市における晴天時の各データの時間変化
() の数字は (平均値, 最大値, 最小値)

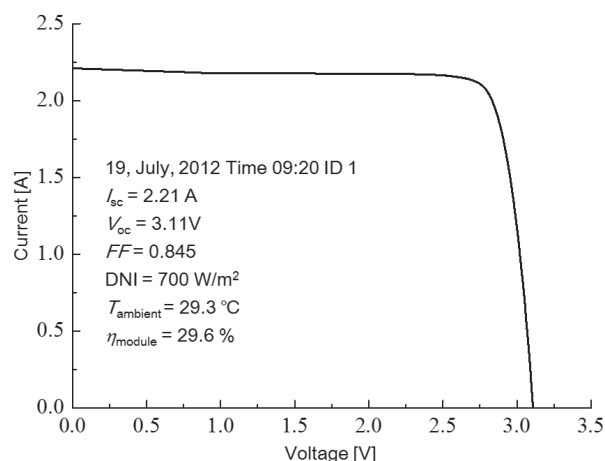


Fig. 10 Best I-V curve during outdoor experiment
図 10 屋外試験で得られた最良 I-V 曲線

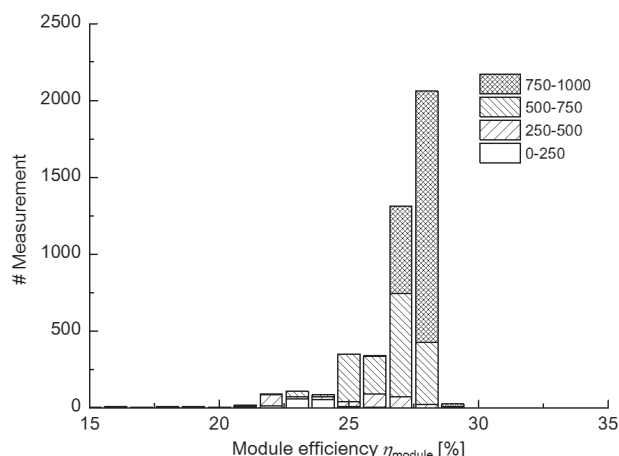


Fig. 11 Distribution of the measured module efficiencies
図 11 モジュール効率の度数分布

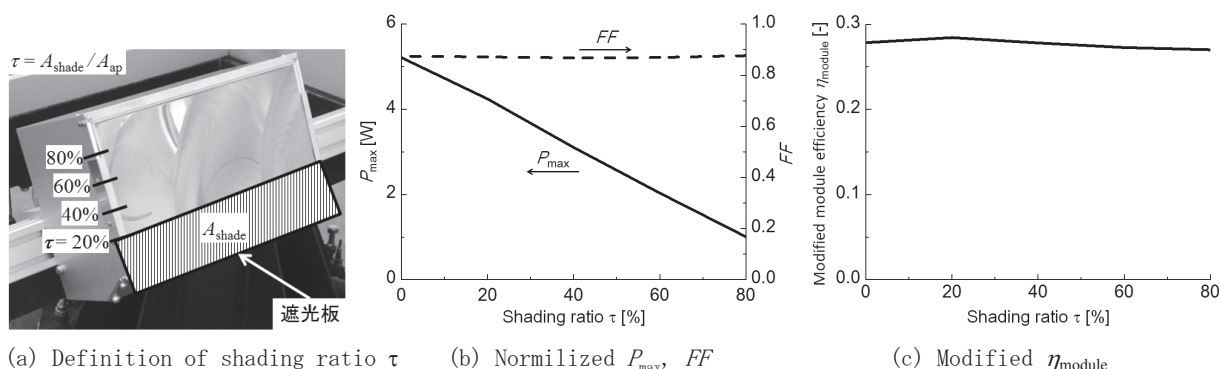


Fig. 12 Definition and effect of shading ratio on module performance

図 12 影面積割合 τ の定義およびモジュール性能への影響

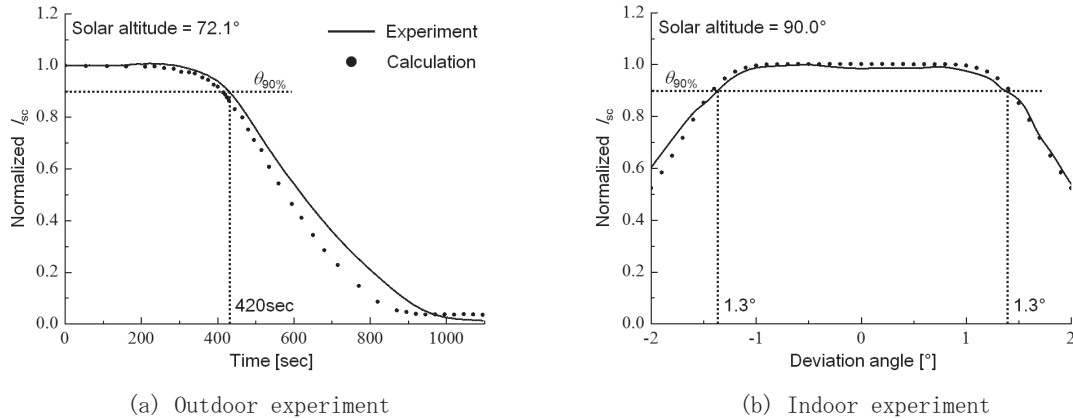
結果を示す。この時間帯の天候は晴天であり、散発的に雲が太陽光を横切ったが全体として安定した日射条件であった。モジュール変換効率、 FF は全時間を通してほぼ一定であり、平均モジュール変換効率 η_{module} は28.1%となり、平均 FF は0.836となった。このとき、 DNI 、システム近傍の気温および風速の平均値はそれぞれ765W/m²、32.1℃および1.53m/sであった。図9にはセルメーカーが提供するセル開放電圧 V_{oc} の温度依存特性から推定したセル温度もプロットした。セル推定温度は測定開始から少しずつ上昇し、13:32には外気温+40℃の71.9℃まで上昇した。平均値は67.6℃となった。

図10には屋外試験においてモジュール変換効率が最大となった際の電流-電圧特性および各測定値を示す。7月19日9:20、 $DNI = 700\text{W/m}^2$ 時に最大値29.6%が得られた。このときの FF 値は0.845、セル推定温度は51.7℃であった。

図11に全測定結果におけるモジュール変換効率の度数分布を示す。なお、日射変動が大きく、サンプリングの間に日射量が急変する場合には、無視できない計測誤差が生じるため、このような場合は除外してある。棒グラフでは DNI の範囲に応じて模様を変えて積み重ねている。

全カウント数(13.9時間分に相当)のうちの82.2%においてモジュール変換効率が $\eta_{\text{module}} \geq 25\%$ であり、 DNI が高いときにモジュール変換効率が高い傾向がある。一方、 $\eta_{\text{module}} < 25\%$ となる計測データの約8割が $DNI < 400\text{W/m}^2$ の条件で得られた。

以上に加えて、実際のシステムで想定されるモジュール同士の日陰(Shading)の影響を模擬した試験を行った。カルーセル方式では図1(b)あるいは図2に示したように、モジュールを前後に一定間隔で配置するため、先頭のモジュール以外のモジュールでは、太陽高度がある閾値よりも低くなると、前に位置するモジュールの影が受光面に生じる。これを模擬するために、図12(a)に示すようにミニモジュール受光面に遮光板を設置し、実際のシステムと同じように影がモジュール受光面の下方から上方に増えていくようにした。モジュール受光面に対する影面積割合 τ (Shading ratio)を $\tau = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ に変更して発電特性を計測した。模擬試験は $DNI = 610 \pm 10\text{W/m}^2$ で安定している時間内に行った。図12(b)にこのときの影面積割合 τ の変化に対する最大発電電力 P_{max} 、 FF 値の変化をプロットした。 P_{max} は影面積割合 τ にほぼ比例して低下している。一方、 FF 値は影の影響を受けず、ほ

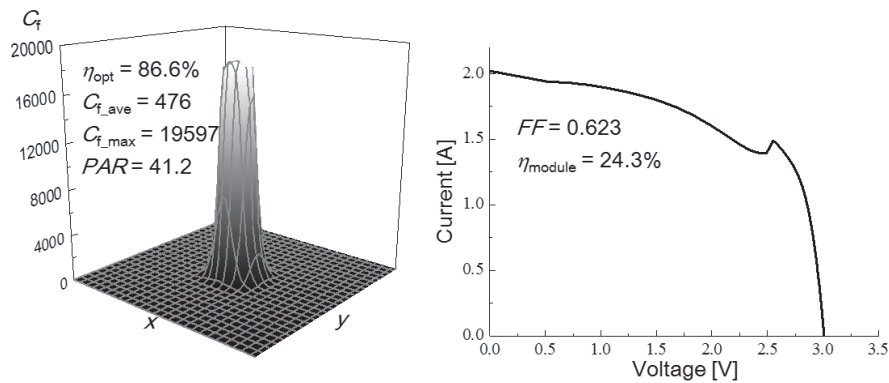


(a) Outdoor experiment

(b) Indoor experiment

Fig.13 Effect of tracking error (incident angle dependency)

図 13 追尾誤差角に対する影響 (入射角特性)



(a) Local flux concentration (analytical result) (b) IV curve, FF and module efficiency(experimental result)

Fig.14 Module performance without SOE

図 14 SOE が無い場合のモジュール性能

ば一定となった。図 12(c)はモジュール変換効率 (2)式)において集光器開口部面積 A_{ap} を $A_{ap} (1 - \tau)$ に置き換えた修正モジュール変換効率の変化を示しており、影面積割合 τ に依らずほぼ一定 ($27.7\% \pm 0.7\%$) となっている。このことは、影無し時のモジュール変換効率に $(1 - \tau)$ を乗じるだけで DNI から影有り時の発電量を推定できることを意味している。

カルーセル方式では、追尾装置を複数台設置する場合、追尾装置同士の影の影響は考慮する必要がないため、モジュール同士の影の影響のみを上述のように取り扱えばよく、モジュール間隔および追尾装置間隔の設計がペデスタル方式より容易となる。

図 13(a)に屋外試験において、 DNI 安定時 ($618 \pm 10 \text{ W/m}^2$, 太陽高度 72.1°) に追尾装置を停止させ、意図的に追尾誤差角を与えた際のセル短絡電流の推移を示す。ただし、グラフ縦軸は追尾停止直前のセル短絡電流 I_{sc} で規格化している。 I_{sc} はセルが受光した光エネルギーに比例するため、これを規格化した値は光学的効率を同様に規格化した値と理論上一致する。追尾停止から 420s 後に 90% となり、この時の追尾誤差角は高度方向に $\theta = 0.8^\circ$ 、方位角方向に $\gamma = 5.0^\circ$ であった。その後徐々に低下し、900s 後

にはほぼゼロに漸近した。グラフには試験時と同様の追尾誤差角を与えた解析結果もプロットしたが、両者はほぼ一致している。さらに図 13(b)には屋内試験において擬似平行光のモジュールへの入射角を制御して高度方向の追尾誤差角 θ を与えた際の規格化セル短絡電流の変化を示す (太陽高度 90°)。これより $\alpha_{90\%} = \pm 1.3^\circ$ となり、解析における $\alpha_{90\%} = \pm 1.4^\circ$ に近い結果が得られた。

最後に、本モジュールにおいて SOE を採用することの優位性を検証するため、SOE を取り外した場合について光学解析と屋外試験を行った結果を図 14 に示す。図 14(a)は SOE なしの場合のセル面での実質集光倍率分布の解析結果であり、SOE がある場合の図 5 と対比できる。一方、図 14(b)は $DNI = 530 \text{ W/m}^2$ 時の電流-電圧曲線の実験結果である。解析結果からは、SOE が無い場合にはピンスポット的にセル中心部に集光されており、不均一性を表す指標 PAR は、 $PAR = C_{f_max} / C_{f_ave} = 41.2$ と SOE がある場合の 20.8 倍に大きくなった。実験結果では、電流-電圧特性が著しく乱れており、 FF 値が 0.623 に低下し、モジュール変換効率も 24.3% まで低下した。これより、SOE がセル面照度の均一化とモジュール変換効率の向上に寄与していることが確認された。

5. 結言

本研究では、カルーセル方式追尾装置への搭載を前提とした幾何学的集光倍率 550 倍の軸外しミラー集光器を用いた集光型太陽光発電モジュールについての光学解析と試作試験を行い、以下の知見が得られた。

- (1) 光学解析設計により、幾何学的集光倍率が同程度のフレネルレンズに較べて、薄型で許容入射角の大きい集光器が得られた。集光器全高を受光面面積の平方根で除した値は 0.66 となり、解析上の許容入射角は $\pm 1.4^\circ$ となった。
- (2) 解析設計結果に基づいてミニモジュールを試作し、屋外試験を行った結果、平均直達日射量が $723\text{W}/\text{m}^2$ の条件下において、モジュール変換効率の平均値として 28.1%、瞬間最大値として 29.6%を得た。また、入射角特性は解析と屋内および屋外試験により検証され、許容入射角は $\pm 1.3^\circ$ となった。
- (3) カルーセル方式追尾装置で生じるモジュール受光面への影を模擬した屋外試験を行い、発電電力が開口部における影面積割合に反比例する結果が得られた。これより、モジュール同士の設置間隔の設計が比較的容易であることが示された。
- (4) 設計した集光系において、2次集光系を無くした場合、太陽電池セル面での照度分布が著しく不均一になり、フィルファクターとモジュール変換効率が大幅に低下することを光学解析と屋外試験により確認した。

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) Solar Junction HP (www.sj-solar.com)
- (2) K. Araki, et al., 30 kW Concentrator photovoltaic system using dome-shaped Fresnel lenses, Optics Express, Vol.18, No.S1(2010), pp.A53-A63
- (3) A. Gombert, et al., From a 32 m^2 system with 90 CPV modules to a 105 m^2 system with 12 CPV modules – Soitec's new CPV system CX-S530, CPV-8, (2012), Spain
- (4) P. Gleckman, A high concentration rooftop photovoltaic system, Proc. of SPIE, Vol.6649(2007)
- (5) S. Rosenthal, D. Earl, Benefits of a water-borne CPV system, CPV-8, (2012), Spain
- (6) R. Winston, J. C. Miñano, P. Benitez, NONIMAGING OPTICS, 2005, pp.181-218, ELSEVIER
- (7) J. C. Miñano, J. C. Gonzalez, New method of design of nonimaging concentrators, Applied Optics, Vol.31, No.16(1992), pp.3051-3060
- (8) 山口真史, ほか, 高効率太陽電池の開発と応用, 2009, pp.82-97, シーエムシー出版
- (9) Y. Ota, K. Nishioka, Three-dimensional simulating of concentrator photovoltaic modules using ray trace and equivalent circuit simulators, Solar Energy, Vol.86, Issue 1(2012), pp.476-481
- (10) R. Herrero, et al., Concentration photovoltaic optical system irradiance distribution measurements and its effect on multi-junction solar cells, Prog. Photovolt: Res. Appl., Vol.20(2012), pp.423-430
- (11) A. Marti, A. Luque, NEXT GENERATION PHOTOVOLTAICS High Efficiency through Full Spectrum Utilization, 2004, pp.117, Taylor & Francis
- (12) W. Gerhard, High concentration photovoltaics - State-of-the-art and novel concepts, Proc. of WCPEC-3, 2003, pp.2841-2844, Osaka
- (13) J. Jaus, et al., Reflective secondary optical elements for Fresnel lens based concentrator modules, Prog. Photovolt: Res. Appl. Vol.19(2011), pp.580-590
- (14) M. Victoria, et al., Comparative analysis of different secondary optical elements for aspheric primary lenses, Optics Express, Vol.17(2009), pp.6487-6492
- (15) 山田, 桐生, 吉田, 居城, 岡本, 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, J.JSES, Vol.38, No.4(2012), pp.39-46