

平成 26 年度 長岡技術科学大学

大学院工学研究科 博士論文

集光型太陽光発電システムの
包括的設計解析および試験検証

専攻 エネルギー・環境工学専攻

学籍番号 08302088

氏名 岡本 和也

指導教員 山田 昇 准教授

目 次

1. 緒論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	7
1.3 本論文の構成	8
2. 散乱光活用型 CPV(CPV+)システムの包括的設計解析	10
2.1 はじめに	10
2.2 CPV+コンセプトとポテンシャル	10
2.3 セルモジュールレベル設計解析	14
2.3.1 光学設計解析	14
2.3.2 熱解析	18
2.3.3 電気解析	21
2.4 システムレベル設計解析	22
2.4.1 追尾誤差解析	22
2.4.2 影ロス解析	22
2.4.1 発電量解析	28
2.4.2 固定非集光型 PV システムとの比較	28
2.5 まとめ	30
3. CPV+システムの試験検証	31
3.1 はじめに	31
3.2 Fresnel lens type CPV+の試験検証	31
3.3 Air gapless lens type CPV+の試験検証	38
3.4 両面受光 Air gapless lens type CPV+の試験検証	43
3.5 まとめ	48
4. 各種 CPV システムの設計解析および試験検証	51
4.1 はじめに	51
4.2 負の屈折率層を有する非結像フレネルレンズの光学設計	51
4.3 軸外し反射集光型 CPV モジュールの光学設計および試験検証	59
4.4 自由曲面設計および伝熱解析による RXI 集光系の性能改善	74
4.5 まとめ	83
5 結論	84

参考文献

謝辞

1. 緒論

1.1 研究背景

近年、地球温暖化、埋蔵資源の枯渇、環境問題の対応策の1つとして太陽熱利用、太陽光発電などの太陽エネルギー利用技術の普及促進が喫緊の課題となっており⁽¹⁾、世界各国で研究開発と導入が進められている。わが国においても公共施設・産業用などに導入する例が増えてきており、2008年に発表された”低炭素社会づくり行動計画”では太陽光発電の規模に対して2020年に10倍、2030年に40倍にする目標⁽²⁾や、また、2020年までの温室効果ガス排出削減の中期目標を90年比25%削減という高い目標を掲げている⁽³⁾。

Fig. 1-1は世界の太陽光発電の導入量の累積を2000年から2013年まで示した図である⁽⁴⁾。世界の導入量は増加し続けているが特に2012年から2013年にかけて導入量が約100.5 TWから約138.9 TWと大幅に増加している。このことから今後更に太陽光発電・太陽熱発電などの太陽エネルギー利用技術の開発および導入が進められることが予想されている。

太陽光発電の導入が進むにつれ、市場もまた年々増加している。Fig. 1-2は2014年から2018年までの太陽電池市場の規模を予測したものである⁽⁴⁾。EPIAの予測によると、オレンジ色の政策予測では太陽電池市場は2014年以降も右肩上がりに成長を続けることが予測されている。また、黄色のやや緩やかな成長予測であっても2014以降も市場は拡大するとされている。そのため、太陽電池や太陽エネルギー利用技術は環境問題やエネルギー問題などの対応策のみならず、新たな市場として見ることができる。

Fig. 1-3に太陽電池セル(PVセル)の変換効率の推移を示す⁽⁵⁾。PVセルの変換効率は年々向上しており、現時点で最も効率が高い実用PVセルは多接合PVセルである。これはFig. 1-4に一例を示すようにInGaP, InGaAs, Geなどの利用波長域が異なる半導体材料を積層したPVセルである。複数の材料を積層することで、シリコン単接合PVセルに比べ発電可能な波長領域が広くなり、変換効率が向上する。シリコン単接合の理論変換効率(非集光時)が29%に対して、3接合PVセルでは45%となっており、現在の最高変換効率は37.9%である⁽⁶⁾。また、Fig. 1-5に示すように多接合PVセルは

集光型太陽光発電システムの包括的設計解析および試験検証
第1章 緒論

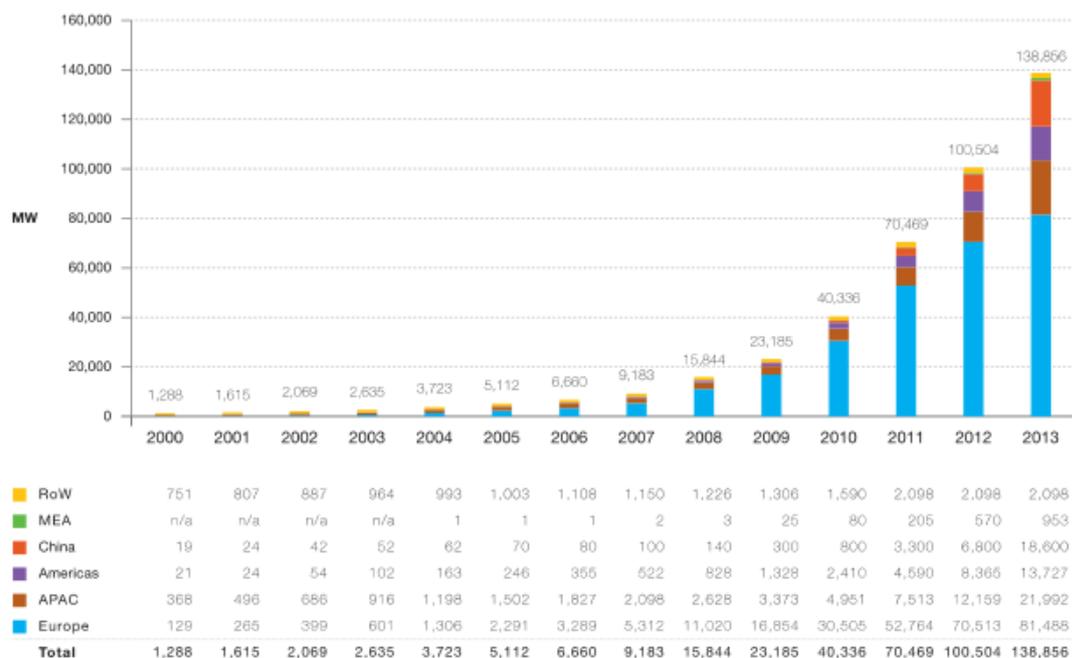


Fig. 1-1 世界における太陽光発電の導入量の推移⁽⁴⁾

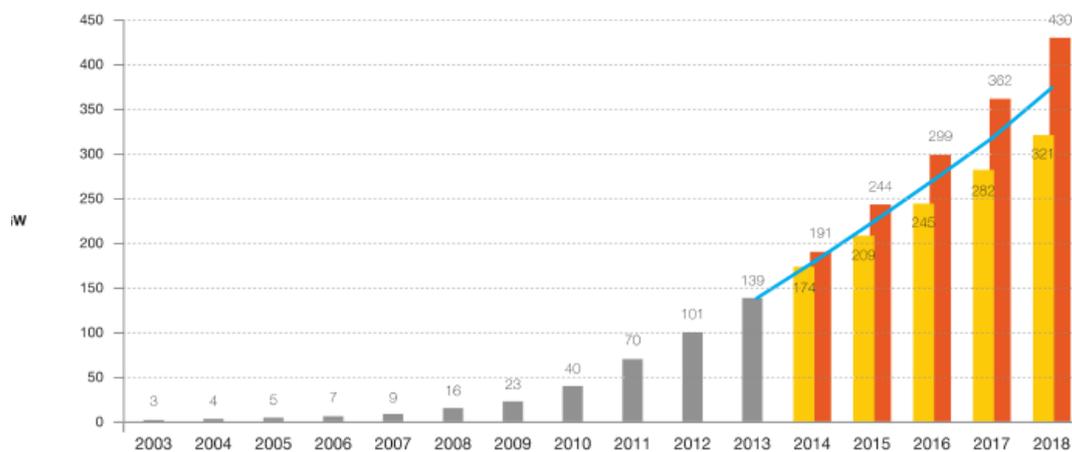


Fig. 1-2 世界における太陽電池市場の予測⁽⁴⁾

集光型太陽光発電システムの包括的設計解析および試験検証
第1章 緒論

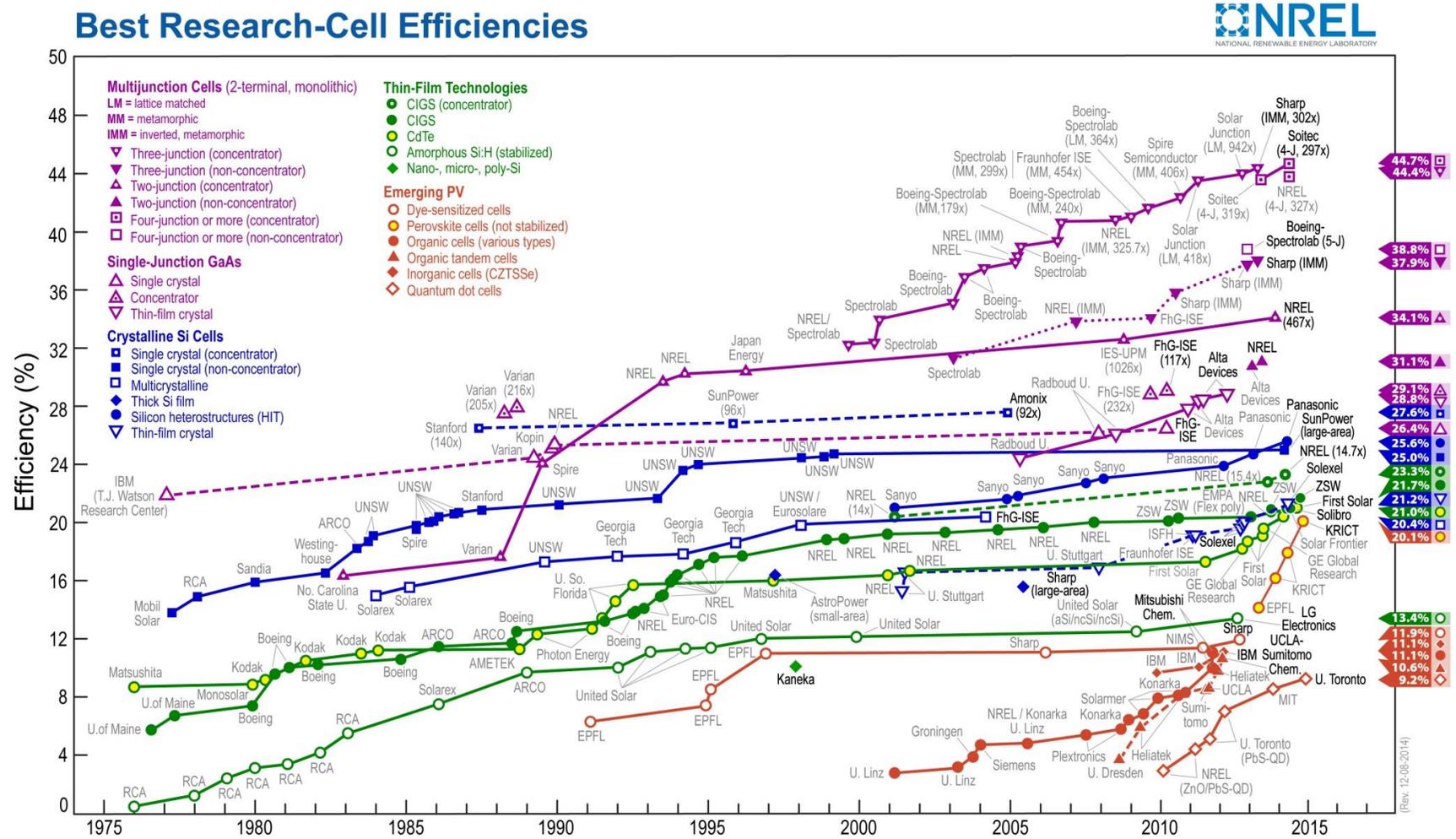


Fig. 1-3 PV セル変換効率年次推移⁽⁵⁾

集光型太陽光発電システムの包括的設計解析および試験検証
第1章 緒論

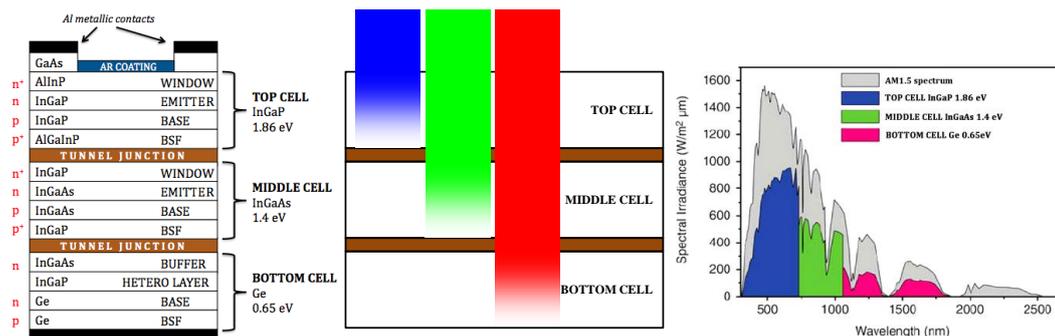


Fig. 1-4 多接合セルの概要

(左から 3 接合構造, 各接合の変換イメージ, 太陽光スペクトルと各接合の発電への寄与)

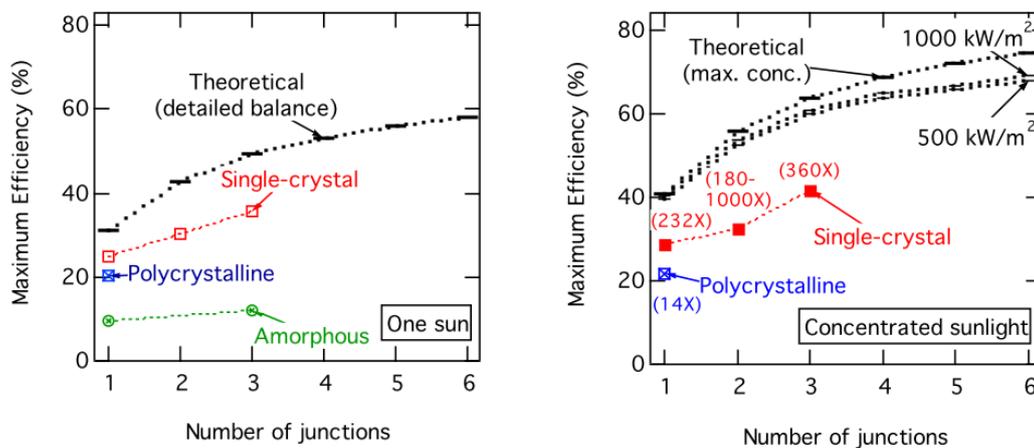


Fig. 1-5 集光による変換効率の向上⁽⁷⁾

集光を行うことで単位面積当たりに入射する光子数が増加することで電子および正孔の擬フェルミ準位の差が広がることから太陽電池の起電力が増加し、変換効率が向上する特性があり⁽⁷⁾、集光時の理論変換効率は3接合の500倍集光時で57.3%、多接合の集光限界では約75%であり、現在の最高変換効率は44.7%となっている⁽⁸⁾。つまり、集光型太陽光発電システムは発電効率向上の手段として将来性が高い技術であると考えられる。しかし、高効率な多接合PVセルの生産にはセルの材料に高価な材料を使い、コストのかかる結晶成長技術を必要とするために高価であることから、通常の太陽電池モジュールのように大面積化することが困難である。Table 1-1に各セルの単位面積当たりの価格の一例を示す（実際の購入価格から算出）。このように多接合PVセルは現在最も普及しているSiセルに比べ約177倍の価格であることがわかる。そこで、ミラーやレンズなどの比較的安価な材料を用いて製作した集光器(Concentrator)を用いることで、太陽光を集光し、且つPVセル面積を減らし、高効率化・低コスト化が進められている。Table 1-2に各発電モジュール形態において使用するPVセルのコスト比較を示す。このように集光型太陽光発電(Concentrating Photovoltaics または Concentrator Photovoltaics: CPV)では、変換効率を維持しつつPVセルに掛かるコストを大幅に軽減することが可能である。

これまで主に集光倍率が500倍前後の集光器を有する高集光倍率の集光型太陽光発電(Concentrating Photovoltaics あるいは Concentrator Photovoltaics: CPV)システムの開発が進められてきた(Fig. 1-6)⁽⁹⁾。しかし、高倍率の集光器を用いたCPVシステムはその性質上、高精度の太陽追尾架台が必要となり、高コストになる傾向がある。また、複数の架台を設置する場合にはモジュール同士の影の影響を抑えてシステム利用率を高くするために架台間の間隔をあける必要であり、通常のPVシステムより土地利用率が低くなる傾向がある。また、CPVシステムに限らず太陽光発電は設置場所・設置条件の変化により発電量が大きく異なるが、CPVシステムにおけるこれらの関係は明確ではなく、そのため、設計段階で架台の設置間隔と、単位モジュール面積当たりの発電量、単位敷地面積当たりの発電量などとの関係を定量的に把握することは有意義である。

他方、CPVシステムは年間日射量に占める散乱光の割合が大きい非サン

Table 1-1 各セルの単位面積当たりの値段

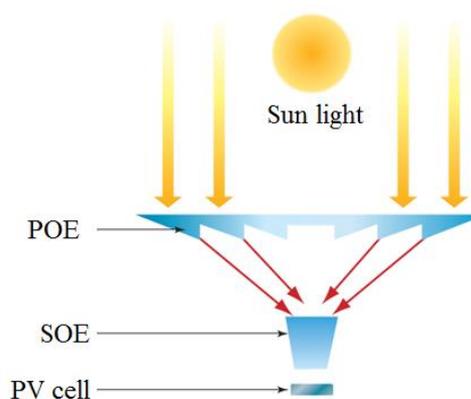
	セル効率	サイズ	円/枚	円/m ²
片面受光Siセル	17%	156 × 156 mm ²	1,500	61,637
両面受光Siセル	17%	156 × 156 mm ²	2,000	82,183
3Jセル	35%	40 × 80 mm ²	35,000	10,937,500

Table 1-2 各発電形態において使用する PV セルのコスト

	モジュール効率	円/m ²
Siモジュール	17%	61,637
CPVモジュール(400×)	30%	27,344



(a) CPV システム⁽⁹⁾



(b) 集光器模式図

Fig. 1-6 CPV システム

ベルト地域での優位性は低く、普及していない。その原因は、高倍率になるほど集光器の許容角が狭くなり、散乱光を PV セルに集光できないことにある。もし、散乱光からも発電する CPV システムがあれば、今後、日本のような非サンベルト地域において発電量を最大化できる CPV システムとなり得る。これは我が国のエネルギーセキュリティの観点からも重要である。

上記の点に加えて、従来 CPV システムの問題点をまとめると以下のような点が挙げられる。

- ① フレネルレンズなどの古典的な構造と設計手法の光学系は、集光性能などにおいて頭打ちになっている。CPV システムの更なる高性能化のためには、光学系のブレークスルーが必要である。
- ② これまでの CPV は集光器としてレンズを用い、架台には一本脚方式（ペDESTAL方式）の追尾架台を用いるタイプがほとんどだが、CPV の適用箇所を拡大するためには、CPV システムの多様化が求められている。
- ③ 集光系を含むモジュールの生産性向上による低コスト化の検討が必要である。
- ④ 高倍率の CPV では、散乱光から全く発電できないことから年間日射量に占める散乱光の割合が大きい日本のような非サンベルト地域において優位性が低い。
- ⑤ 複数の架台を設置する場合、モジュール同士の影を低減するために架台の設置間隔を広めに設定するため、土地利用率が低くなる。これは設置場所、気象条件等を考慮した設計段階での発電量予想がなされていないためである。

1.2 研究目的

本研究では上記の①～⑤の技術課題の解決を目的として、多角的な検討を行った。

まず、技術課題①～③に対して、以下のような研究を実施した。

- ① 新規機能性材料である負の屈折率材料を CPV の集光系に導入することで、どのような集光性能への寄与があるかを光学解析により明らかにした（4章2節）。

- ② 平坦な屋上面などに設置しやすいロープロファイルの CPV システムとして、Off-Axis ミラー集光器とカルーセル方式の追尾架台を組み合わせた新規 CPV システムの試験検証を行った（4章3節）。
- ③ すでに大量生産技術として確立している LED パッケージング技術を適用でき、且つ高性能な集光系を設計し、自由曲面を持つ集光器の設計解析と試験検証を行った（4章4節）。

さらに、技術課題④、⑤に対して、以下のような研究を実施した。

- ④ 散乱光を低コストの PV セルで捕集する散乱光活用型 CPV のコンセプト（以下、CPV+と表現する）を新たに提案し、試作モジュールによる試験検証を行った（2章、3章）。
- ⑤ さらに、この CPV+システムについてセル・モジュール設計の段階からプラントレベルの発電量予想まで行う包括的な設計を行った（2章）。

特筆すべき点は、CPV システムについて、セル・モジュール設計の段階からプラントレベルの発電量予想まで行う包括的な設計プロセスの確立を目指した点である。また、この設計手法を新規のアイデアである CPV+システムに適用し、複数の実証用モジュールを試作して優位性の検証を行った点である。技術課題①～③に対する取り組みを通じて、CPV の特性を最大限に活かすためのブレークスルーは散乱光の活用にあるとの着眼点に至った。

1.3 本論文の構成

本論文は以下のような構成となっている。

第1章「緒論」では、本論文の背景および目的を述べる。

第2章「CPV+システムの包括的設計解析」では、CPV+のコンセプトおよび包括的設計解析手法について述べる。

第3章「CPV+システムの試験検証」では、第2章の包括的設計解析手法を用いて CPV+システムを設計し、各種解析および試作モジュールによる実証試験を行った結果について述べる。

集光型太陽光発電システムの包括的設計解析および試験検証

第1章 緒論

第4章「各種 CPV システムの設計解析および試験検証」では、技術課題①～③の解決に向けて各種の設計解析および試験検証を行った結果について述べる。

第5章は本論文の結論である。

2. 散乱光活用型 CPV(CPV+)システムの包括的設計解析

2.1 はじめに

CPV は低コスト且つ高効率なシステムとして注目されているが、年間に占める散乱比が大きい地域では散乱光から発電することが困難であり優位性が発揮されない。集光した直達光からの高効率発電に加えて散乱光からも発電することができれば、散乱比が大きい地域でも最大限の発電が可能となる。そこで本研究では散乱光からも発電を行う CPV+コンセプトを提案する。ここで散乱比とは太陽追尾面における全天日射量(Global normal irradiation : GNI)に占める散乱日射量(Diffuse solar radiation) の割合である。Fig. 2-1 に示すように散乱日射量とは太陽からの輻射エネルギーである直達光が雲やエアロゾル(大気中に拡散浮遊する固体・液体の微粒子) により散乱することで全方位から入射する光のことである。全天日射量は太陽から直進してくる光線である直達日射量(Direct normal irradiation : DNI)と散乱日射量の和である。

一方、CPV システムに限らず太陽光発電は設置場所や設置条件等の違いにより発電量が大きく変化する。このため、光学系や追尾方式、設置条件および気象条件を考慮することで、システムレベルでの発電量を事前に定量把握することが重要となる。また、その前段階として、集光効率、温度特性、電気特性を考慮したセル-モジュールレベルの設計解析が必要となる。本章では、これらの設計解析を CPV+に対して適用し、包括的な設計を行った。

2.2 CPV+コンセプトとポテンシャル

Fig. 2-2 に CPV+の概念図を示す。2 つの代表的な集光形態として、(a) Fresnel lens type および(b) Air gapless lens type を示した。受光面に入射する日射のうち平行度の高い DNI は変換効率の高い多接合セルに集光して発電を行い、散乱光は多接合セルの周辺に必要最小限の面積で設置された低コストセルで捕集して発電を行う。なお、低コストセルは集光に対して邪魔をしないように設置する。この形態では、原理的には、従来 CPV の発電電力に低コストセルで発電した電力を加えた出力が得られる。つまり、CPV+は散乱光を低コストセルで発電する分だけ従来 CPV に比べて発電量が増加する。

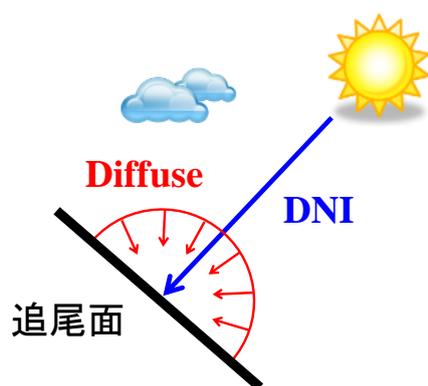
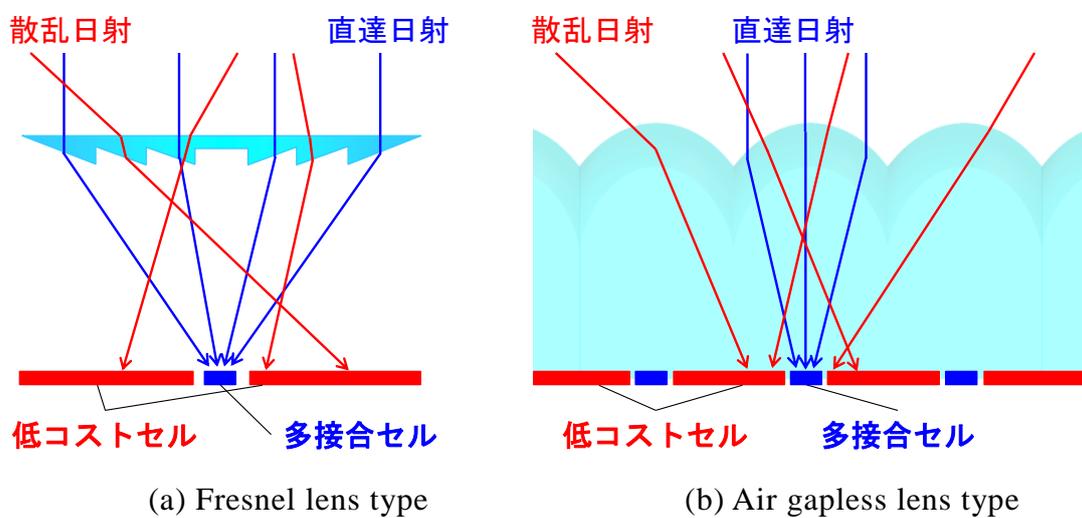


Fig. 2-1 散乱光と直達光の違い



(a) Fresnel lens type

(b) Air gapless lens type

Fig. 2-2 CPV+コンセプト図

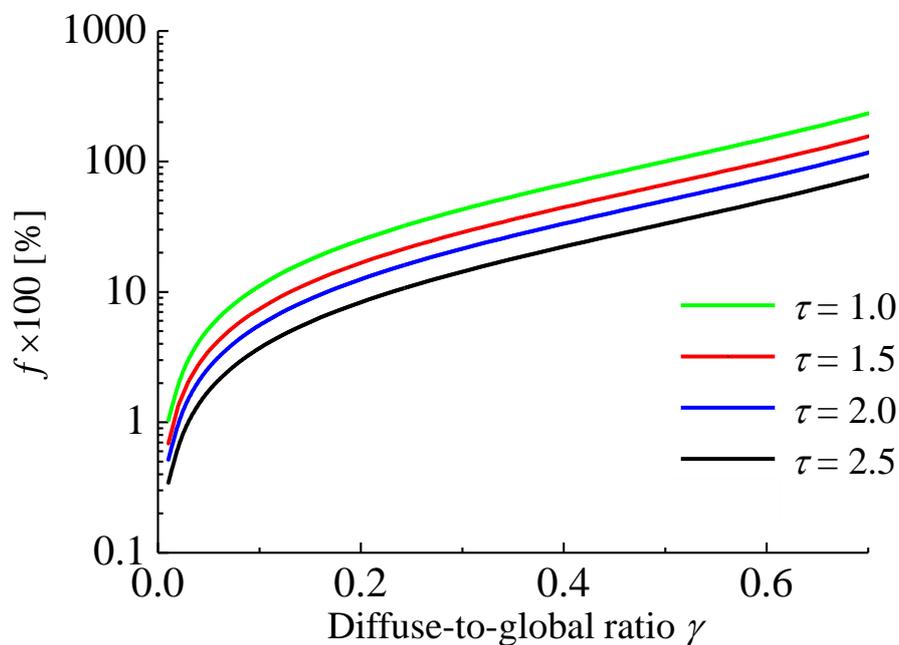


Fig. 2-3 従来 CPV に対する発電量増加割合 f vs. 散乱比

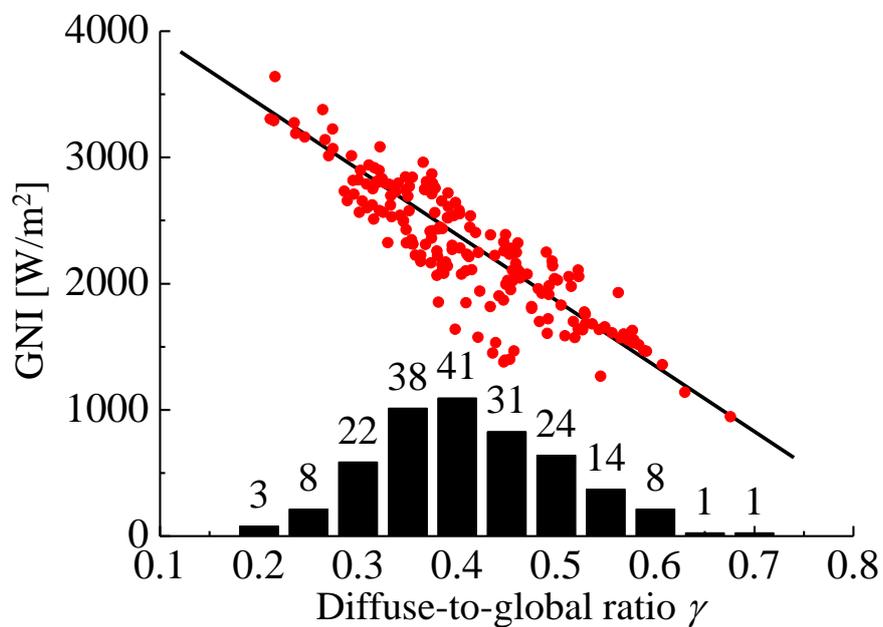


Fig. 2-4 世界の都市における散乱比 vs. 年間積算 GNI

また、PVセルの理論最大変換効率は集光することで得られることが知られている⁽¹⁰⁾。つまり、DNIは集光することで高効率に発電し、集光が困難な散乱光は広い面積で捕集して発電するという技術は、太陽光発電システムの総合変換効率および発電量の最大化という意味で将来性が高い技術である。

なお、Fig. 2-2(a)の Fresnel lens type は集光倍率がおおよそ 200 倍以上の高倍率集光に向くが、入射光線は空気-レンズ材料の界面を最低 2 回通過するためフレネル損失が大きいという特徴がある。一方、Fig. 2-2(b)の Air gapless lens type は集光倍率がおおよそ 200 倍未満に向き、上記の界面を 1 回のみ通過するため、光学的効率高いという特性があり、最終的にはセルのコストや集光器のコストなど考慮した総合的なコストパフォーマンスを評価して、選択されるべきである。

CPV+のポテンシャル評価のために発電量増加割合 f ⁽¹¹⁾ を理論的に算出した。CPV+モジュールの GNI 基準での変換効率は次式で求められる。

$$\eta_{\text{CPV}+} = \frac{\eta_{\text{opt_CPV}}\eta_{\text{cell_CPV}}\text{DNI} + \eta_{\text{opt_PV}}\eta_{\text{cell_PV}}(\text{GNI} - \text{DNI})}{\text{GNI}} \quad \dots (1)$$

ここで、 $\eta_{\text{opt_CPV}}$ および $\eta_{\text{cell_CPV}}$ は多接合セルの DNI 基準での光学的効率およびセル変換効率であり、 $\eta_{\text{opt_PV}}$ および $\eta_{\text{cell_PV}}$ は低コストセルの散乱光基準での光学的効率およびセル変換効率である。同様に CPV モジュールの GNI 基準での変換効率は以下の数式となる。

$$\eta_{\text{CPV}} = \frac{\eta_{\text{opt_CPV}}\eta_{\text{cell_CPV}}\text{DNI}}{\text{GNI}} \quad \dots (2)$$

以上より発電量増加割合 f は以下の式とする。

$$f = \frac{\eta_{\text{CPV}+} - \eta_{\text{CPV}}}{\eta_{\text{CPV}}} = \frac{\eta_{\text{opt_PV}}\eta_{\text{cell_PV}}}{\eta_{\text{opt_CPV}}\eta_{\text{cell_CPV}}} \frac{\text{GNI} - \text{DNI}}{\text{DNI}} \quad \dots (3)$$

ここで

$$\tau = \frac{\eta_{\text{opt_CPV}}\eta_{\text{cell_CPV}}}{\eta_{\text{opt_PV}}\eta_{\text{cell_PV}}} \quad \dots (4)$$

$$\gamma = \frac{\text{GNI} - \text{DNI}}{\text{DNI}} \quad \dots (5)$$

として書き直すと,

$$f = \frac{\gamma}{\tau(1-\gamma)}. \quad \dots(6)$$

となる. つまり発電量増加割合 f は多接合セルと低コストセルのシステム変換効率の比 τ と散乱比 γ の関数として表すことができる. Fig. 2-3 に $\tau=1.0, 1.5, 2.0, 2.5$ として場合の発電量増加割合 f の計算結果を示す. これより, f は散乱比が増加するに従い指数関数的に増加することがわかる.

Fig. 2-4 に世界都市人口ランキング 200 位⁽¹²⁾ までの都市における年平均散乱比と年積算 GNI の関係を示す. 日射データは METEONOME ver. 6.1 を使用し, 1996 年~2005 年の平均気象データを参考にした. これより, 世界の主な都市における日射条件は散乱比 0.30~0.60 に多く分布していることがわかる. つまり, CPV+は都市近郊で太陽光発電に使用できる土地面積に限りがある場合において, 最小限の土地面積で最大限の発電量を得るという点で従来 PV に対しての優位性がある.

以下の節では, 包括的設計解析について述べるが, 本研究における包括的設計解析は, Fig. 2-5 に示すように大きく分けてセルモジュールレベル設計解析とシステムレベル設計解析の 2 段階の設計手法とする. セルモジュールレベル設計では光学設計解析, 熱解析および電気解析を行うことでモジュールレベルでの設計を行う. さらに, システムレベル設計では追尾誤差解析, 影ロス解析および発電量解析を行うことでプラント全体での設計および発電量の推定を行う. なお, ここでは本設計手法を Air gapless lens type に対して適用した結果を述べる.

2.3 セルモジュールレベル設計解析

2.3.1 光学設計解析

光学解析では光学的効率 η_{opt} , 集光倍率 C_f および PV セル面上の照度分布を求める. 光学的効率 η_{opt} は受光面に入射する光線エネルギーのうち, 集光面に到達するエネルギー量の割合を表す. 集光倍率 C_f は集光系が集光面に集光する光線強度と受光面に入射する光線強度の比で表される. また, PV セルは PV セル面上のエネルギーが不均一に分布していることでフィルファクター(FF)が低下する特性があり, 後述(2.3.3 項)の PAR (Peak-to-average

ratio)を用いて電気特性を評価するために PV セル面上の照度分布の解析を行う。

光学解析手法として”Edge ray principle”⁽¹³⁾ や” Simultaneous Multiple Surface (SMS) method”⁽¹⁴⁾ などの幾何光学に基づく解析プログラムを自己開発した。Edge ray principle は主にフレネルレンズなどの設計に適応され、比較的簡単な解析アルゴリズムだが 2 面以上の平面要素を有する光学系の同時設計が困難である。一方、SMS method は複数の自由曲面を連鎖的にほぼ同時に設計することが可能だが、解析アルゴリズムが複雑である。また、その他の最適化手法として”進化的アルゴリズム”⁽¹⁵⁾ がある。進化的アルゴリズムは生物の進化を模擬し交差と突然変異を繰り返すことで最終的に最も優れた形状を設計する。

本研究では、これらの光学解析手法を任意に選択できる 3 次元光線追跡プログラムを自主開発した。3 次元光線追跡プログラムは、作成した任意の集光系の幾何形状データを入力し、シーケンシャル光線追跡を行うプログラムであり、集光特性解析、集光面での照度分布解析等が可能である。入力した任意形状の物体に対して、屈折率、反射率等の光学物性を任意に設定でき、部分的に反射面を設定することも可能である。光線追跡結果はスポットダイアグラム等により可視化できる。

Fig. 2-6 に Air gapless lens type CPV+モジュールの解析モデルを示す。Air gapless lens type は凸レンズ、多接合セル(すでに入手が可能な 3 接合セル、以下 3J セルを仮定)および低コストセル(もっとも一般的な結晶シリコン系セル、以下 Si セルを仮定)から構成される。光学設計パラメータとして、レンズ、3Jセルおよび Siセルのサイズをそれぞれ $15.81 \times 15.81\text{mm}$, $2.5 \times 2.5\text{mm}$, $9.8 \times 9.8\text{mm}$ とし、幾何学的集光倍率は 40 とした。レンズの材質はシリコンを想定し、レンズ表面の形状はコーニック面とし、形状は次式から算出される。

$$z = \frac{c(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2(x^2 + y^2)}} \quad \dots\dots(7)$$

ここで、コーニック定数 $k = 0.125$ 、曲率 $c = -0.511$ とした。またレンズ内部による吸収およびレンズ表面での反射を考慮して最適設計を行った結果、レンズ高さは 26.7mm となった。

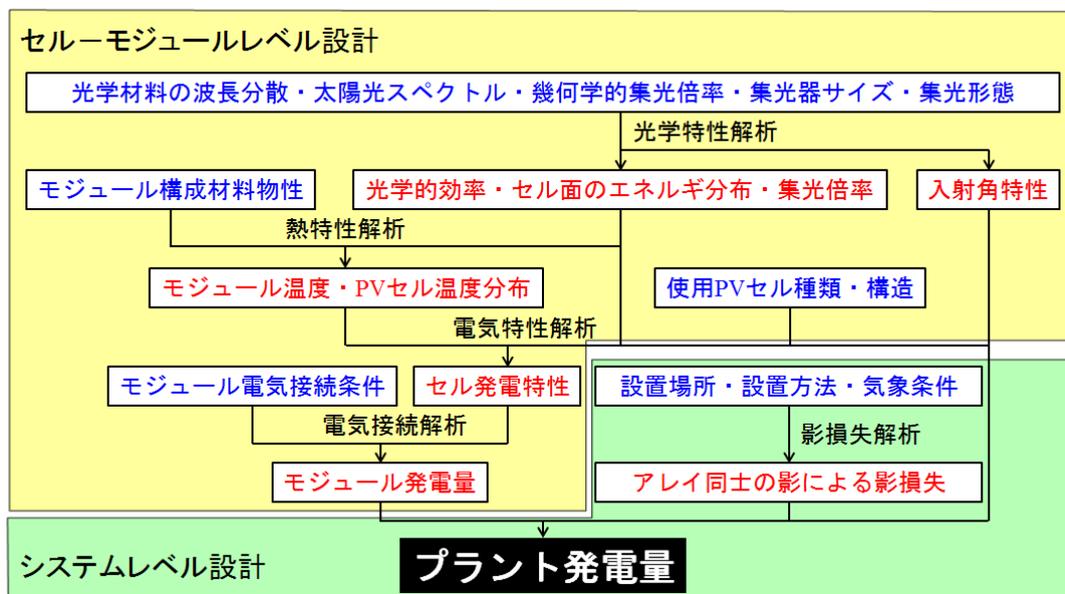


Fig. 2-5 包括設計手法ダイアグラム

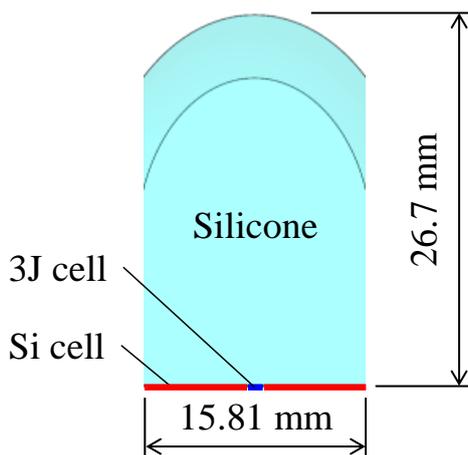


Fig. 2-6 Air gapless lens CPV+モジュール解析モデル

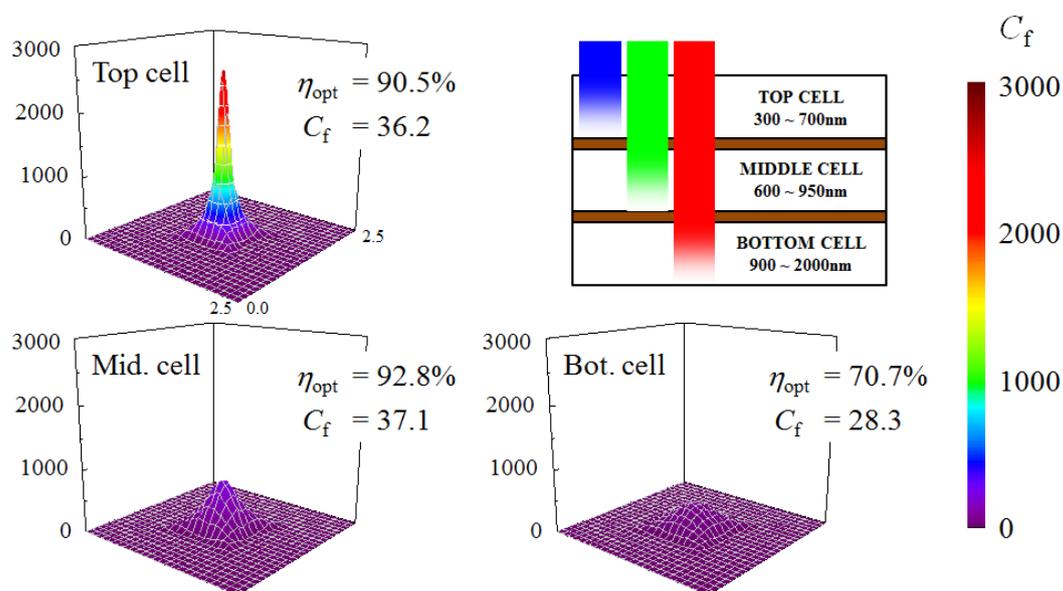


Fig. 2-7 PV セル面上でのエネルギー分布

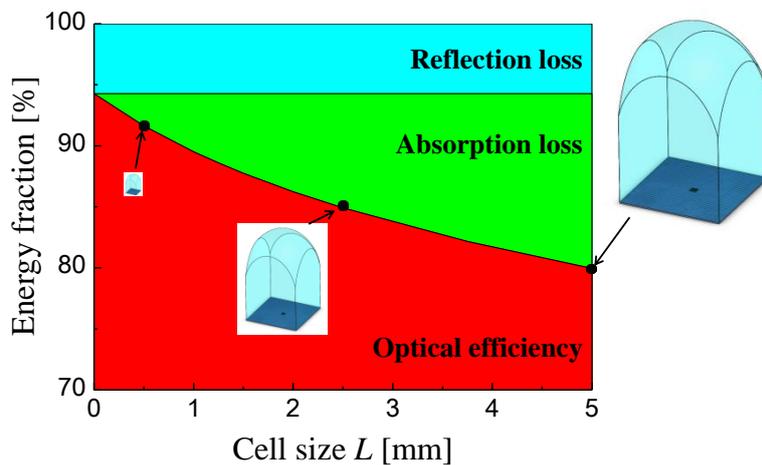


Fig. 2-8 セルサイズによる光学的効率およびエネルギーロス内訳

Fig. 2-7 にこのときの 3J セルの Top セル, Middle セル, Bottom セルのそれぞれの感度波長帯に対する光学的効率およびエネルギー分布を示す. 全波長域の光学的効率は 86.8% となった. Bot.セルの光学的効率が 70.7% と Top セルおよび Mid.セルに比べ相対的に低い. しかし, Bot.セルは他のセルに比べバンドギャップが小さく, 同じ光学的効率で光が入射した際の発電電流が約 1.8 倍大きいという特徴がある. ことから電流整合で Bot.セルに律速しないと考えられる. また, PV セル面上でのエネルギー分布から局所集光倍率 $C_{f_max} = 1538$, 平均集光倍率 $C_{f_ave} = 33.9$ となった.

Fig. 2-8 には 3J セルのサイズを変化させた場合の光学的効率および損失の内訳を示す. 光学的効率はセルサイズが小さくなるにつれて大きくなり, 損失内訳のうち吸収損失が低下していく. これは光路長が短くなることでレンズ媒体内部での光吸収が減少するためである. また, 表面でのフレネルロス はセルサイズに依存せず一定である.

2.3.2 熱解析

PV セルはセル温度が上昇することでセル変換効率が 3J セルで約 $0.16\%/^{\circ}\text{C}$, Si セルで約 $0.46\%/^{\circ}\text{C}$ 低下することが報告されている. そこで熱解析では集光時のセル温度の評価するために有限要素法(Finite element method: FEM)による 3 次元伝熱解析を行った. PV セルについては Ge の熱物性値を与えた⁽¹⁶⁾. Ge とした理由は, 想定している 3J セルの 3 層構造のうち Ge 層が他の 2 層に比べ十分に厚いためである. また, 入射するエネルギーは受光面において $1000 \text{ W/m}^2 (= 1 \text{ SUN})$ とし, これに受光面積と光線追跡解析によって得られた光学的効率を乗じたエネルギーがセルに入射するものと仮定した. さらに 3J セルのセル変換効率は 40% とし, セルに入射したエネルギーの 60% が熱になるものと仮定した. レンズ上面および集光器背面は表面と周囲空気との対流による熱伝達を想定し(第 3 種境界条件), 周囲空気温度 25.0°C , 熱伝達率 $h = 10.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ を一定とし, 側面は周期境界条件を模擬するため断熱条件とした. ただし, 物体間は理想的に接着しているものとし, 接触熱抵抗は考慮していない.

Air gapless lens type の断面モデルおよび材質を Fig. 2-9 に示す. 前述の通

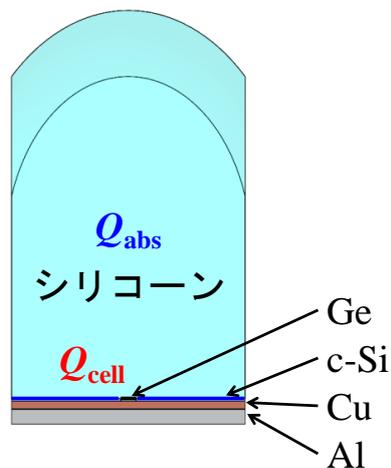


Fig. 2-9 Air gapless lens 断面形状および材質

Table 2-1 各物性値

	熱伝導率 [W/(m·K)]	比熱 [J/(kg·K)]	密度 [kg/m ³]
シリコーン	0.2	4120	1070
CPVセル	59.9	323	5324
c-Si	0.75	835	2458
アルミニウム	200	900	2700
銅	390	390	8900

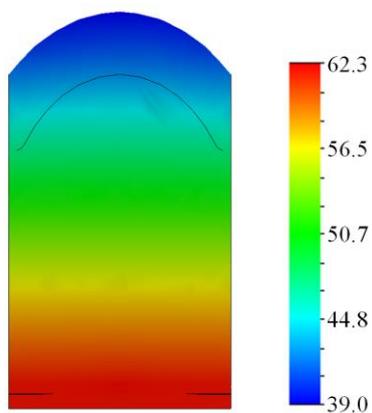


Fig. 2-10 Air gapless lens 内部温度分布

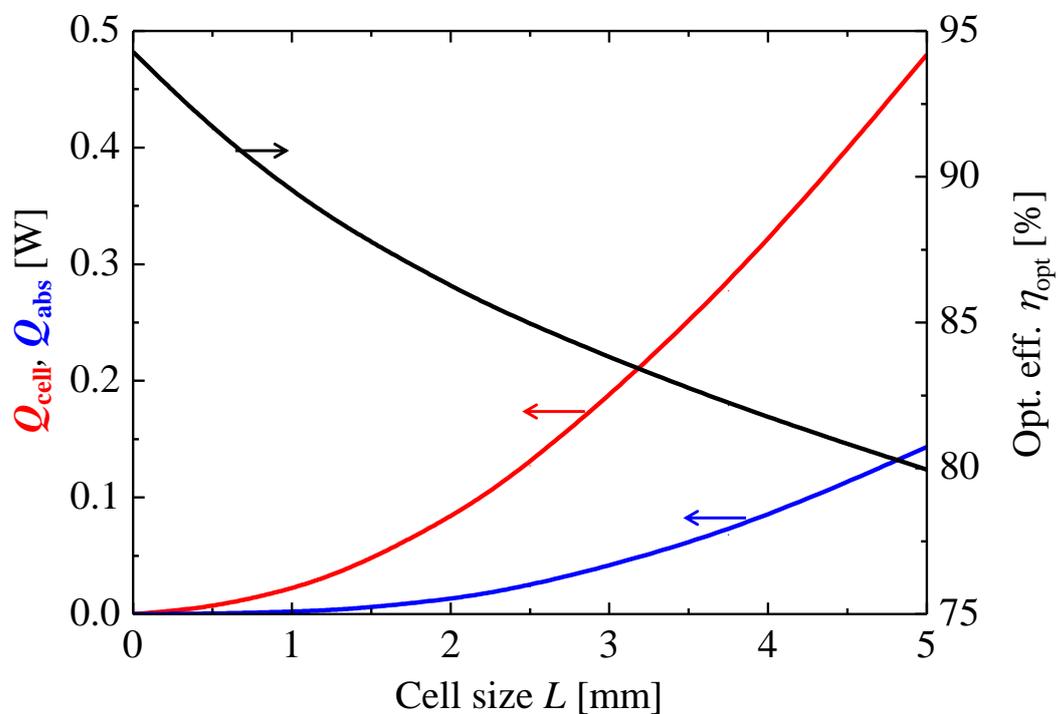


Fig. 2-11 セルサイズ vs. 各発熱量

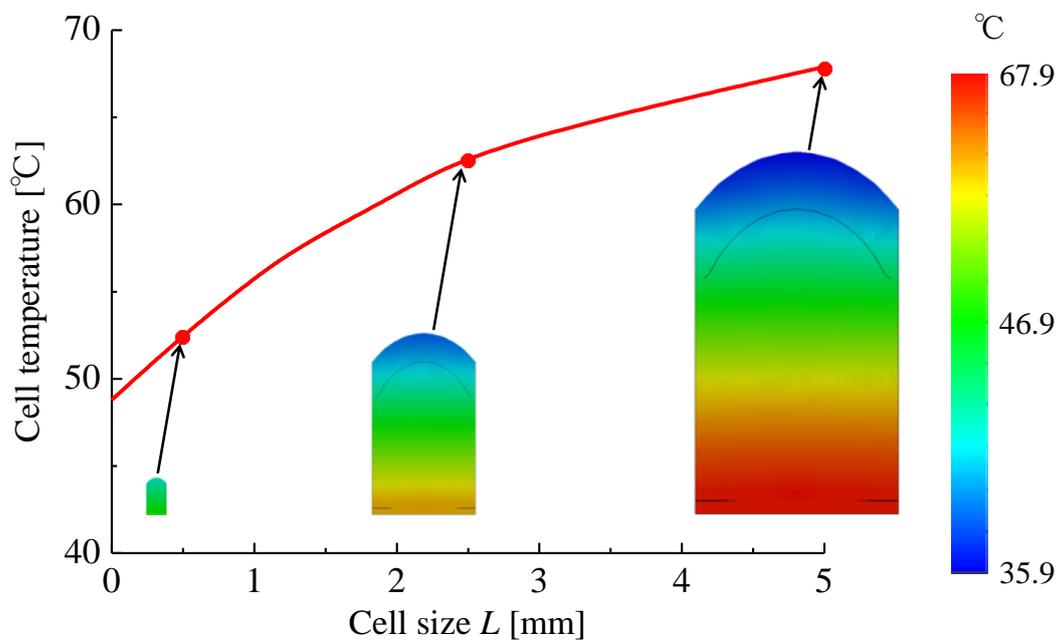


Fig. 2-12 セルサイズ vs. PV セル温度

り透明材料はシリコンを想定した。Air gapless lens を構成する材料の熱物性値を Table 2-1 に示す。

Fig. 2-10 に定常状態における集光器温度分布を示す。この時のセル発熱量 Q_{cell} と内部吸収によるレンズ発熱量 Q_{abs} はそれぞれ 127 mW, 23 mW である。3J セルおよび Si セルは同程度の温度となり、各 PV セル温度は 62.3°C となり、PV セルで発熱したエネルギーは下面のアルミニウムから放熱していることがわかる。

Fig. 2-11 にセルサイズによるセル発熱量およびレンズ発熱量を示す。セルサイズが大きくなるに従い各発熱量は指数関数的に増加していることがわかる。Fig. 2-12 にセルサイズによる PV セル温度の変化を示す。セルサイズが小さくなるにつれて PV 温度が低下し、集光器全体の温度が均一になることがわかる。

以上より、セルサイズは 1mm 以下が理想的であり、1mm の場合の 3J セルおよび Si セルの温度は 55.8°C となる。

2.3.3 電気解析

電気特性は入射エネルギー量および PV セル面上におけるエネルギー分布により決まる。前述の通り、PV セルは PV セル面上のエネルギーが不均一に分布することでフィルファクター(FF)が低下する特性がある。PV セル面照度分布の均一性の評価には Herrero ら⁽¹⁷⁾によって提案された PAR を用いた。PAR はセル面上の局所照度のピーク値 (C_{f_max})をセル面全体の平均照度 (C_{f_ave})で除した値である。Fig. 2-13 に PAR と FF の関係を示す。PAR の増加に比例して 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。Fig. 2-7 に示した光学解析結果から Air gapless lens の 3J セルにおける PAR は 45.4 であることから、セル変換効率の向上のためにはより均一性の高い集光器設計が必要である。ただし、均一性と次節で述べる許容角との間にはトレードオフの関係があるためバランスを考慮した仕様決定が必要となる。

2.4 システムレベル設計解析

2.4.1 追尾誤差解析

追尾誤差解析ではトラッカーが追尾誤差を起こした場合に光学特性がどのように変化するかを解析する。解析手法は光学解析と同様に3次元光線追跡プログラムを用い、Fig. 2-14のように任意の入射角度 θ を光線に与えることで追尾誤差を模擬し、そのときの光学的効率を評価する。

Fig. 2-15に追尾誤差による光学的効率の低下の関係を示す。縦軸は垂直入射($\theta=0^\circ$ 、つまり追尾誤差ゼロ)の場合の光学的効率で正規化した光学的効率である。これより、追尾誤差の増加に伴い光学的効率が低下していき、 $\theta=4.0^\circ$ 付近で急激に低下していることがわかる。慣例として、垂直入射時の光学的効率を100%とした時、90%の光学的効率となる角度を許容角といい $\theta_{90\%}$ と表す⁽¹⁸⁾。解析結果から許容角 $\theta_{90\%}=5.0^\circ$ であることがわかる。2次集光系を用いない形状としては許容角 $\theta_{90\%}=5.0^\circ$ は追尾誤差に対して十分にロバスト性のある集光系だといえる。

2.4.2 影ロス解析

複数の2軸追尾架台から成る発電プラントの場合、前方もしくは隣のモジュールの影が掛かってしまうことで発電量が低下する。そこで、まずモジュールに掛かる影割合を算出することでモジュールに入射する年積算日射量を推定する。

Fig. 2-16に架台設置のモデル図を示す。東西方向および南北方向の設置間隔を p_{EW} 、 p_{SN} とし、設置台数は $N \times N$ 台、モジュールの縦横比は1.0:1.0とした。また、各追尾架台のモジュール面に入射する年積算日射量を求め、これを単位敷地面積(Fig. 2-17)当たりのエネルギー量に換算した。日射データにはMETEONOME ver. 6.1を使用し、東京における1996年～2005年の平均気象データを参考にした。また、データの間隔は1時間毎とした。

Fig. 2-18(a)に2軸追尾におけるモジュールに入射する年積算日射量を示す。ここで、破線は現在最も普及している固定非集光型PVシステムの推定値であり、解析手法および設置パラメータは2.4.4項に記載する。解析結果より各方向のピッチは短い程、単位敷地面積当たりの発電量が大きいことがわかる。しかし、ピッチを短くすることは各モジュールの開口面積当たりの

集光型太陽光発電システムの包括的設計解析および試験検証
 第2章 散乱光活用型 CPV(CPV+)システムの包括的設計解析

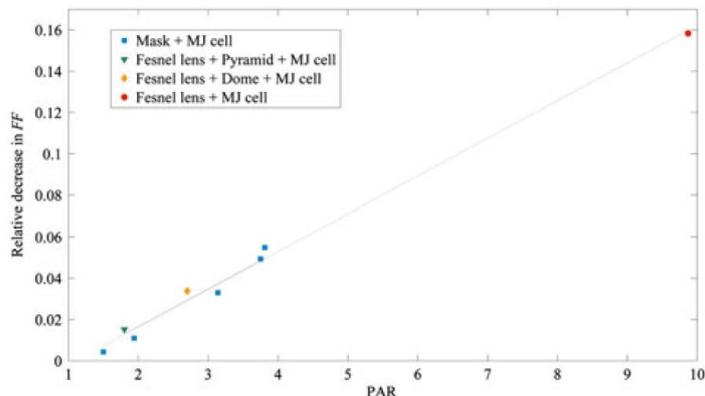


Fig. 2-13 PAR による FF の低下割合⁽¹⁴⁾



Fig. 2-14 入射角度

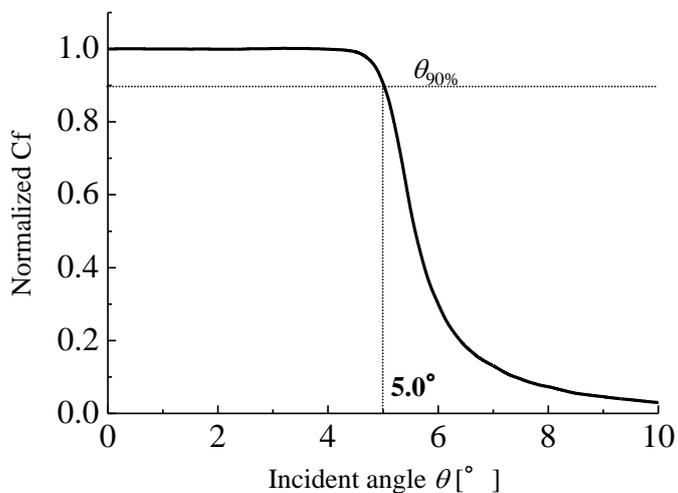


Fig. 2-15 入射角特性

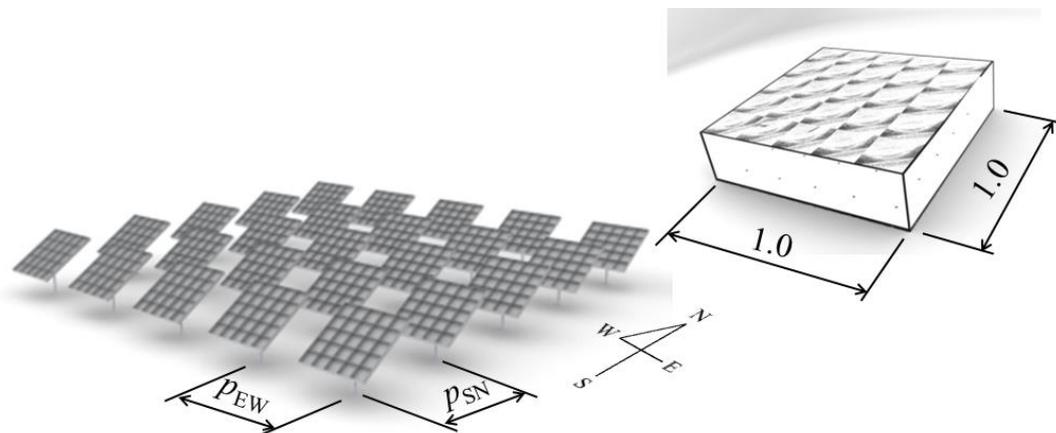


Fig. 2-16 影解析モデル図

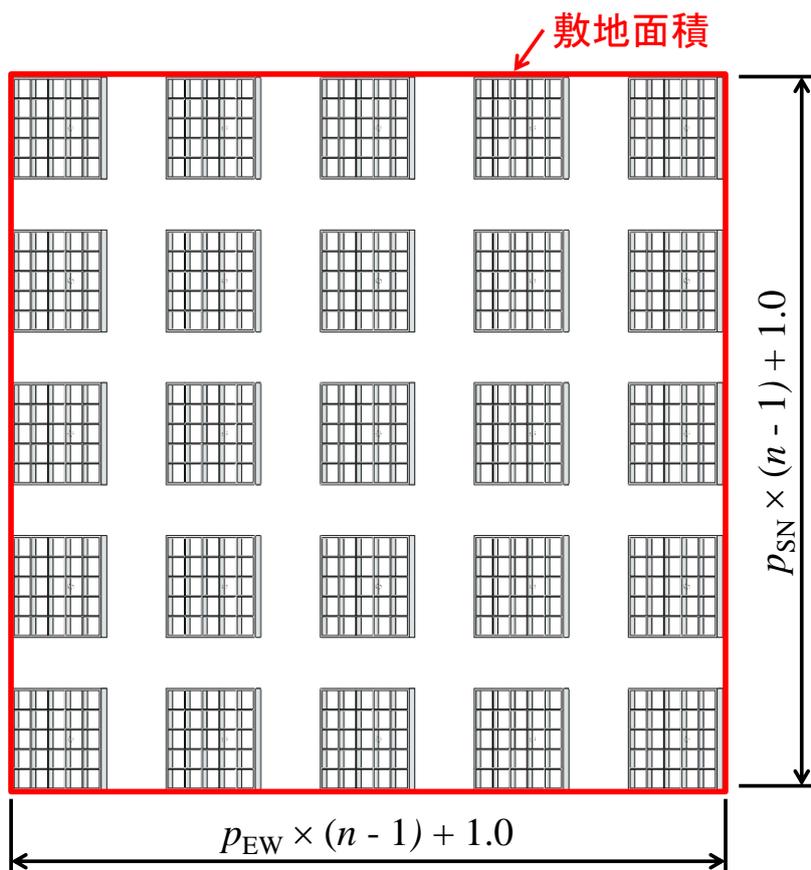
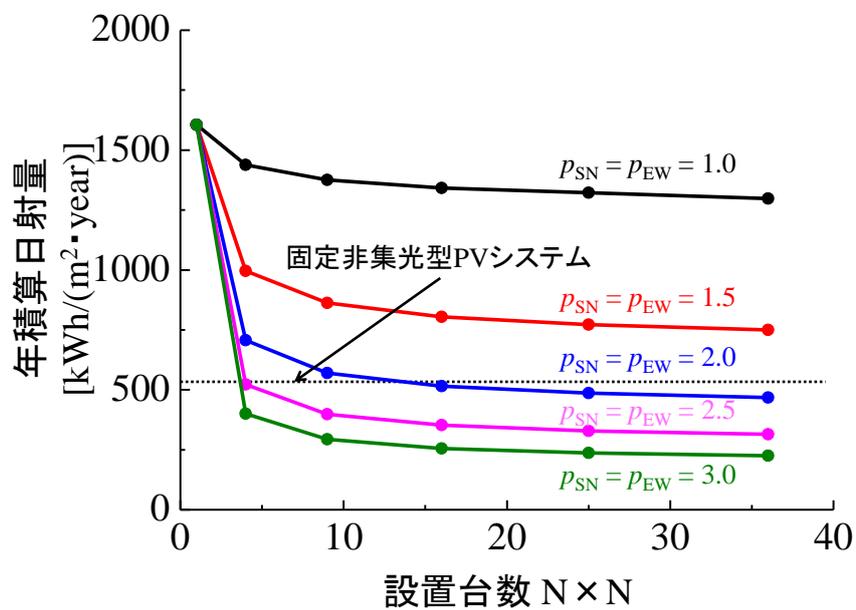
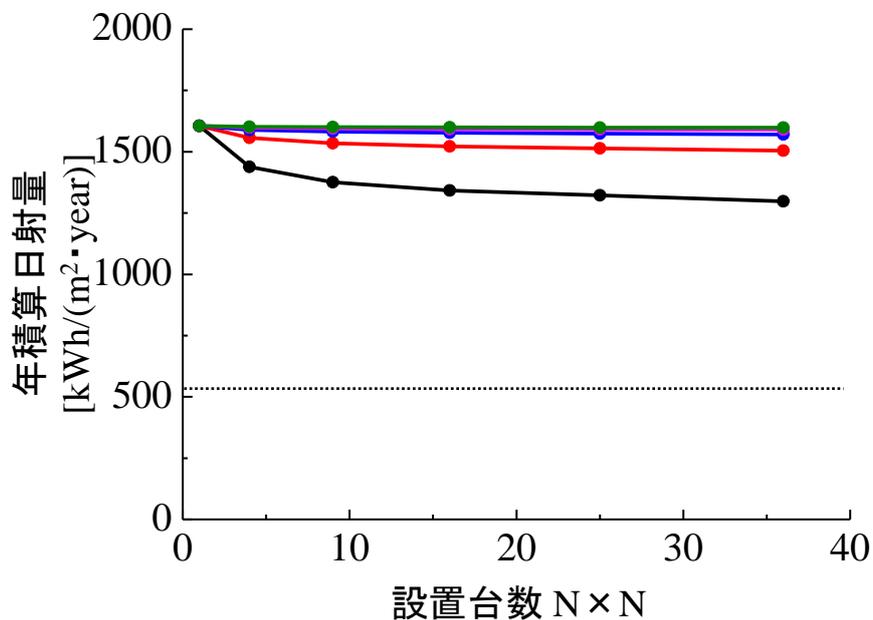


Fig. 2-17 敷地面積定義

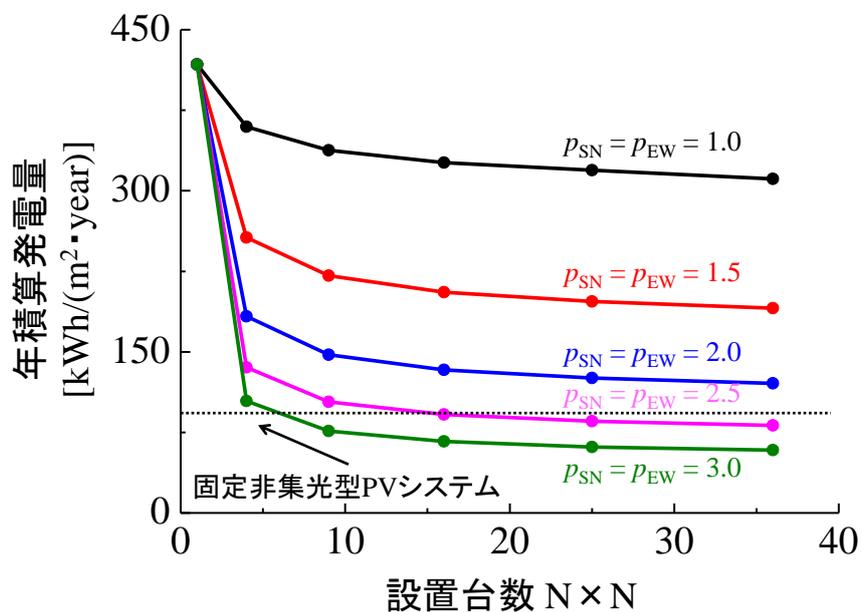


(a) 単位敷地面積

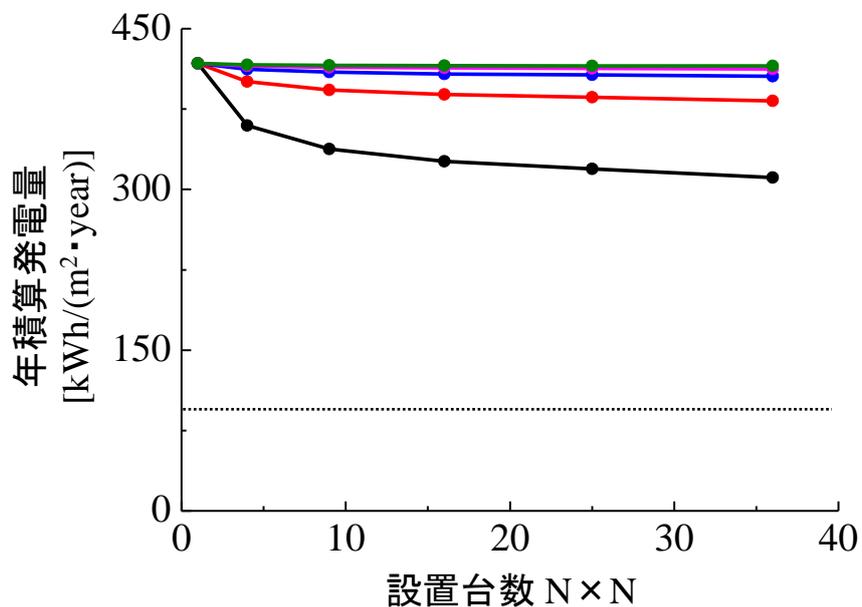


(b) 単位モジュール面積

Fig. 2-18 2 軸追尾架台のモジュール面に入射する年積算日射量

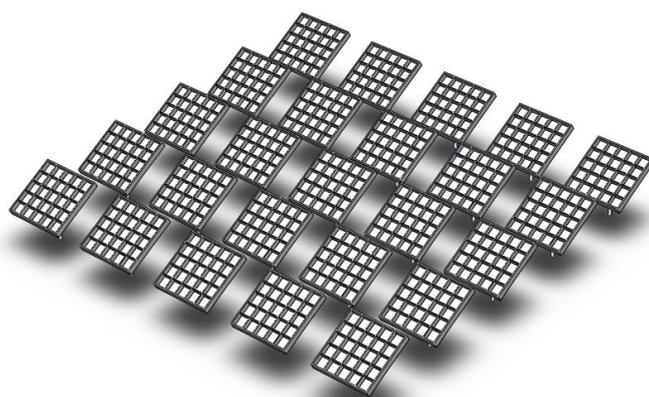


(a) 単位敷地面積

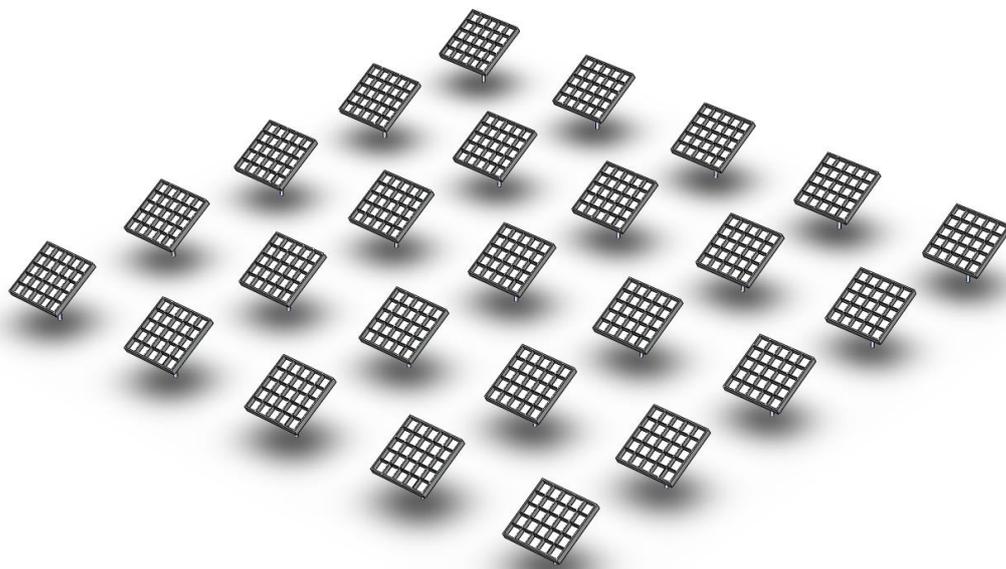


(b) 単位モジュール面積

Fig. 2-19 2 軸追尾架台 CPV+システムの年積算発電量



(a) $p_{SN} = p_{EW} = 1.5$



(b) $p_{SN} = p_{EW} = 2.5$

Fig. 2-20 $p_{SN} = p_{EW} = 1.5$ および 2.5 のシステム概要図

発電量低下やモジュール設置台数の増加によるコスト増加が考えられる。Fig. 2-18(b)に単位モジュール面積に入射する年積算日射量を示す。ピッチを大きくするほど単位モジュール面積に入射する日射量が増加することがわかる。以上の結果から使用できる土地の面積やモジュール1台のコストなどを考慮してモジュール設置間隔を設定する必要がある。

2.4.1 発電量解析

CPV+システムの発電量解析では、前述の影ロス解析から得られたモジュール面に入射する年積算日射量および電気解析から得られたセル変換効率から年間の発電量を算出する。

Fig. 2-19に2軸追尾CPV+システムの発電量と架台設置間隔との関係を示す。DNIのシステム変換効率を34.7%(光学的効率86.8%,セル変換効率40%),散乱光のシステム変換効率を17%と仮定した。また、値は単位敷地面積当たりの発電量である。黒い線は固定非集光型PVシステムの推定値であり、解析手法および設置パラメータは2.4.4項に記載する。2軸追尾および集光による発電量の増加は南北および東西方向の追尾架台間隔が1.5の場合に2.1倍多く発電する可能性を示している。

2.4.2 固定非集光型PVシステムとの比較

固定非集光型PVシステムの発電量は”STEP-PV Simulator ver1.0”を用いた⁽¹⁹⁾。STEP-PV Simulator ver1.0は独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)が公開している標準気象・日射量データベースであり、任意の方位角および傾斜角における日射量を自動算出するソフトウェアである。斜面日射量は以下の式を用いて算出する。

$$I_{\beta\lambda} = I_{b\beta\lambda} + I_{s\beta\lambda} + I_{r\beta\lambda} \quad \dots\dots(8)$$

ここで、 $I_{\beta\gamma}$ は斜面日射量、 $I_{b\beta\gamma}$ は斜面日射量の直達成分、 $I_{s\beta\gamma}$ は斜面日射量の散乱成分、 $I_{r\beta\gamma}$ は斜面日射量の地面反射成分である。ここで地面のアルベドは積雪が無い場合0.2、積雪がある場合で0.7である。

Fig. 2-21に固定非集光型PVシステムの単位敷地面積当たりおよび単位モジュール面積当たりの年積算日射量を示す。この時、東西方向の設置間隔は隙間なく設置したものとし、南北方向のアレイ間隔 p を変化させることで

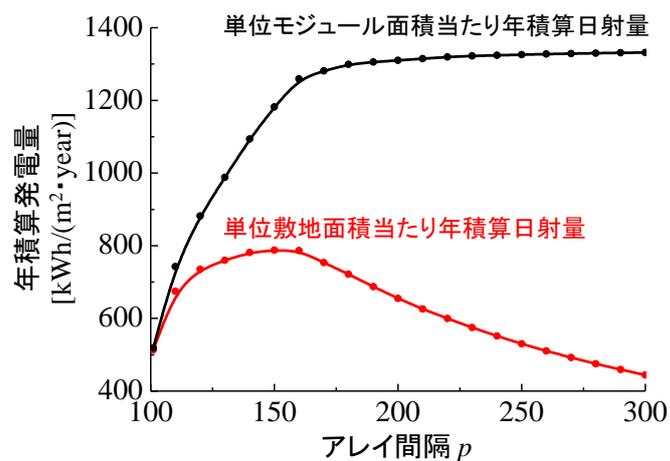


Fig. 2-21 固定非集光型 PV システムの年積算日射量

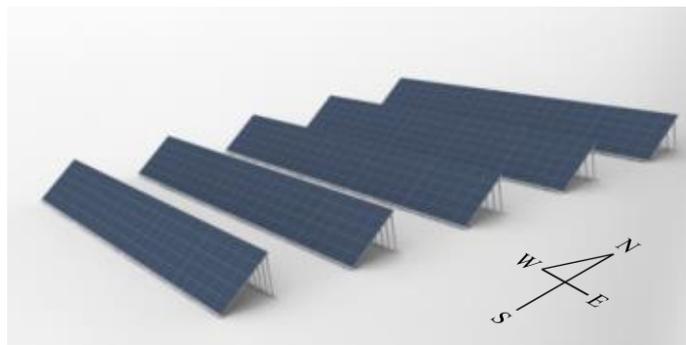


Fig. 2-22 設置間隔 250%, アレイ設置角度 20° のシステム概要

年間日射量を推定する。また、アレイ設置角度は 20° とした。アレイ間隔 p は PV アレイ長さに比べた PV パネルの設置間隔を表す。100%で PV パネル長さと同じ長さとなる。アレイ間隔が広がるにつれて入射日射量が増加し、全ての PV パネルが最前列の PV パネルの 95%の日射量を得るためにはアレイ間隔が 200%以上必要であることがわかる。ここで、設置間隔 250%、アレイ設置角度 20° とした時(Fig. 2-22)、年間日射量は 530.3 W/m^2 となる。年間発電量は固定パネル発電効率 17%と仮定すると年間発電量は $90.2\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{year})$ である。

2.5 まとめ

本章では CPV+コンセプトの提案とポテンシャルとして理論的な発電量増加割合 f を求めた。一方、世界の都市における散乱比の割合は散乱比 $\gamma = 0.30 \sim 0.60$ に多く分布していることがわかる。

包括的設計手法の一例として Air gapless lens CPV+モジュールに適用し、光学設計解析、熱解析、電気解析を組み合わせることでセルモジュールレベルの設計を行った。また、光学設計解析および熱特性解析から集光系全体を相似形状のまま縮小することで光学的効率向上および PV セル温度の上昇を抑制できる可能性を示した。

セルモジュールレベル設計と追尾誤差解析および影ロス解析を組み合わせることでシステム全体の発電量推定を行った。追尾架台間隔を東西および南北方向にピッチ 1.5(モジュールサイズ 1.0×1.0 と仮定)で配置することで固定非集光型 PV システムに比べ 2.1 倍の発電量が得られる可能性を示した。

3. CPV+システムの試験検証

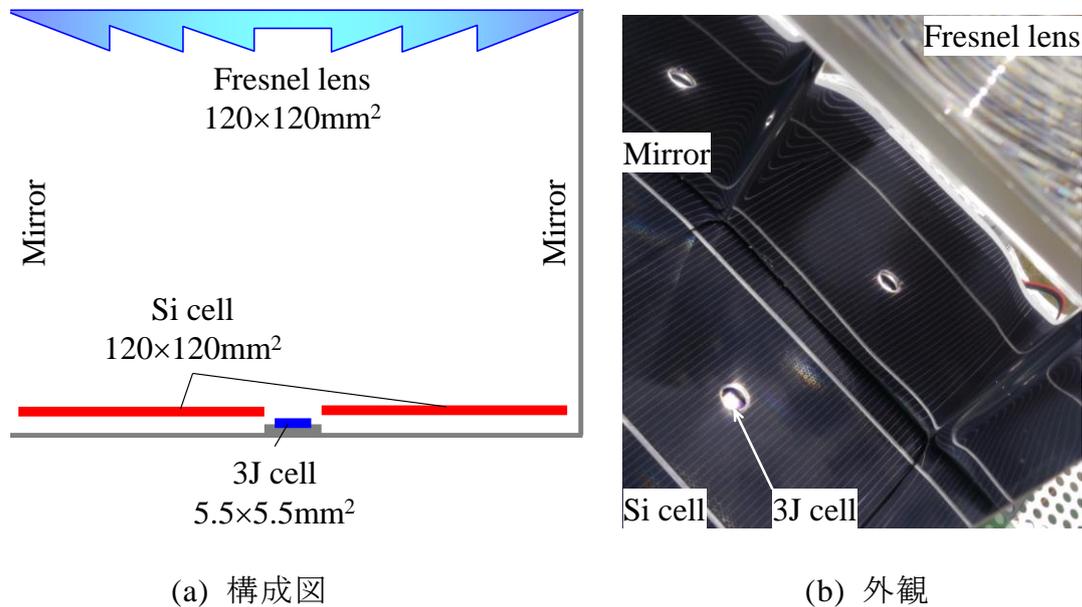
3.1 はじめに

2章では CPV+コンセプトの提案と可能性を示し、Air gapless lens type CPV+を例に設計手法および解析結果を示した。本章では Fresnel lens type CPV+ および Air gapless lens type CPV+ の試作モジュールによる試験検証を行った結果を述べる。

3.2 Fresnel lens type CPV+の試験検証

Fig. 3-1 に試作モジュールの構成および外観を示す。フレネルレンズはアクリル樹脂(PMMA)製とし、焦点位置に化合物 3 接合セル(3J セル)を設置、その上に直径 10 mm の円孔を開けた結晶シリコンセル(Si セル)を配置した。フレネルレンズで集光した直達光は Si セルに開けられた円孔を通り 3J セルに入射する。また、実際のモジュールは多数のレンズで構成される。そこで図のようにフレネルレンズ側面をミラー(正反射率 85%)で囲うことで周期境界条件を模擬した。フレネルレンズ受光面積と 3J セル面積はそれぞれ 120 × 120 mm, 5.5 × 5.5 mm であり、幾何学的集光倍率は 476 倍とした。この実験では、散乱光活用型の最大限の発電能力を確認するために、Si セルの受光面積はレンズ受光面積と同じ 120 × 120 mm とした。この試作モジュールを太陽追尾架台に搭載し、3J セルおよび Si セルを独立して I-V カーブトレーサーに接続、計測を行った。また、追尾面の GNI および DNI を同時計測している。また、比較用として Si セルをミニモジュールの受光面の横に並べて設置した。ここで Fig. 3-2 に今回使用したアクリル樹脂の屈折率および厚さ 1mm における内部吸収率を示す。ブロードバンドな太陽光の波長域において内部吸収は少ないことがわかる。

2013 年 8 月～9 月に新潟県長岡市(長岡技科大キャンパス)において計 6 日間の屋外試験を実施した。Fig. 3-3 に晴天(2013 年 9 月 18 日 9:30~15:00)および曇天時(2013 年 9 月 10 日 10:30~16:30)における 3J セルおよび Si セルの最大効率点電力 P_{\max} の計測結果を示す。Table 3-1 に各実験日の条件をまとめて示す。なお、事前実験により、Si セルの有無によって 3J セルの発電量に変化が無いことを確認した。したがって、以降の考察では、散乱光を活用し



(a) 構成図 (b) 外観
 Fig. 3-1 Fresnel lens type CPV+モジュール概要図および外観

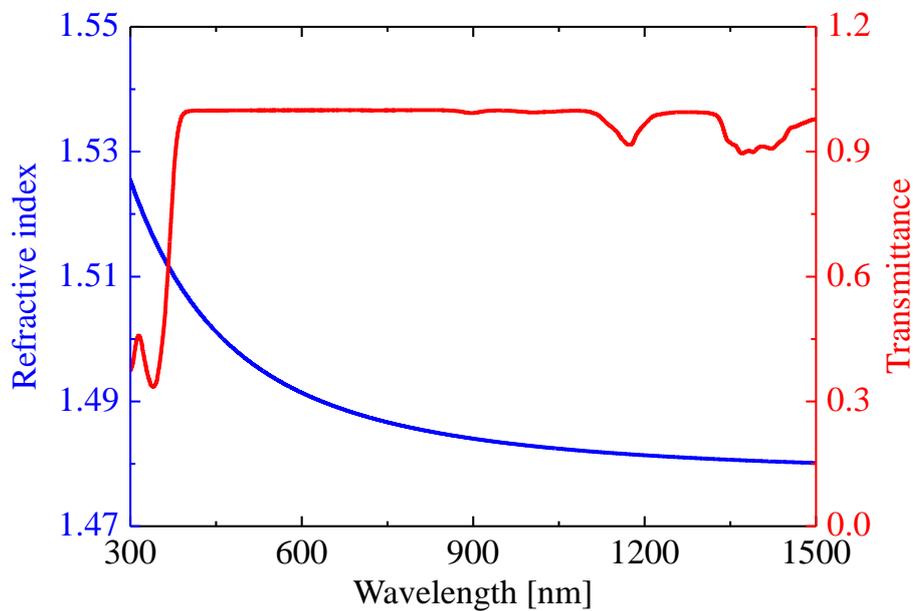
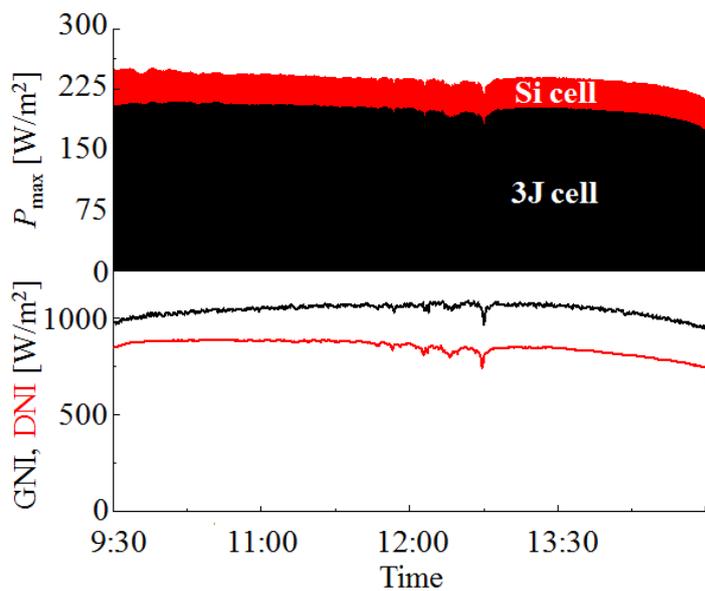


Fig. 3-2 アクリル樹脂の屈折率および内部吸収(厚さ 1mm)

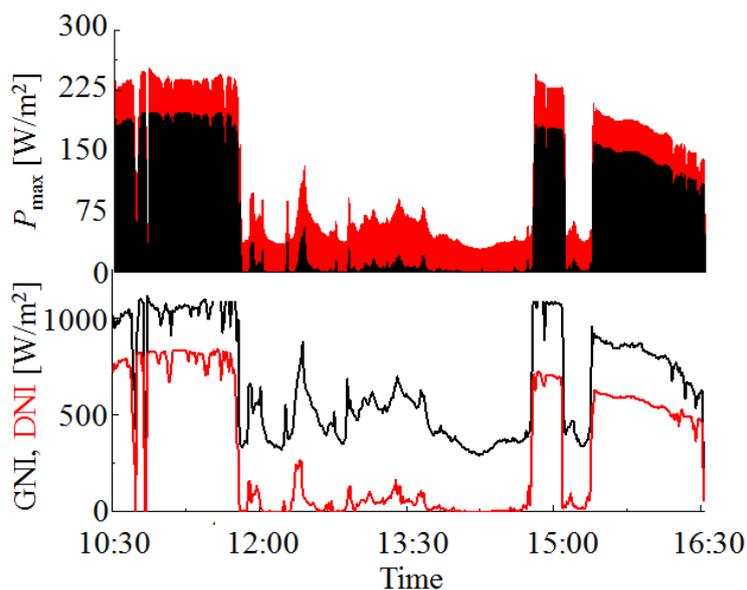
ない従来 CPV の発電量は 3J セルの発電量と等しいものと仮定する。また、本試験では Si セルと 3J セルとの電気的な結合は行っていないが、ポテンシャルの評価を行うという意味において両セルの発電量の合算が CPV+ の発電量になるものと仮定する。

以上の仮定に基づくと、計測結果より、従来 CPV に対して CPV+ では Si セルによる発電量分だけ発電量が多くなることがわかる。また、DNI がほぼ 0 の場合において、従来 CPV では発電量が得られないが、CPV+ では散乱光から Si セルによる発電量が得られていることがわかる。発電量の増加率をそれぞれの実験結果から求めると、晴天日では、日平均散乱比 $\gamma = (\text{GNI} - \text{DNI}) / \text{GNI} = 0.18$ 、日平均 DNI 848 W/m^2 において発電量は 1.19 倍、曇天日では日平均 $\gamma = 0.56$ 、日平均 DNI 361 W/m^2 において 1.60 倍となった。

Fig. 3-4 には DNI と $I_{\text{SC_built-in}} / \{(I_{\text{SC_ref}}) \times \gamma\}$ の関係をプロットした。ここで $I_{\text{SC_built-in}}$ と $I_{\text{SC_ref}}$ はモジュール内部に設置した Si セルの短絡電流とモジュールの外部に比較用に並列設置したリファレンスセルの短絡電流である。また、リファレンスセルはモジュール内部に設置した Si セルと同種類のセルである。分母の $I_{\text{SC_ref}}$ には散乱比 γ を乗じて散乱光のみによって得られる短絡電流に補正してある。PV セルの短絡電流は入射する光の放射照度に比例する特性がある。つまり、縦軸の $I_{\text{SC_built-in}} / \{(I_{\text{SC_ref}}) \times \gamma\}$ はモジュール受光面に入射する散乱光の照度に対してモジュール内部の Si セルに入射した光の照度の比である。DNI が 0 の時、照度の比が 0.88 であることからモジュール受光面での散乱光がモジュール内部の Si セルに届く過程で 12% の光学的損失があることがわかる。損失の要因はフレネルレンズを透過する際の空気-アクリル樹脂境界面におけるフレネル損失だが、モジュール側面のミラーの鏡面反射率が約 85% であることも損失に寄与しているものと予想される。しかし、DNI が高くなるに従い、この比は増加していき、 800 W/m^2 付近では 1.5 前後となっている。この原因はレンズによって 3J セルに集光しきれずに迷光した直達光が 3J セルの周囲にある Si セルに入射しているためであると考えられる。このことは今回試作したモジュールの直達光に対する集光性能が高 DNI 時において幾分不十分であることを意味している。試作モジュールでは幾何学的集光倍率が 500 倍に近い高倍率集光にも関わらず 2 次集光系 (ホモジナイザー) を搭載していないことが主な原因と考えら



(a) 快晴日



(b) 曇天日

Fig. 3-3 晴天日および曇天日の発電量 P_{max} の推移

Table 3-1 各実験の条件

	GNI [W/m ²]	DNI [W/m ²]	γ	P_{max} [W/m ²]		Module eff. based on GNI [%]	
				CPV (3J cell)	CPV+ (3J cell + Si cell)	CPV (3J cell)	CPV+ (3J cell+Si cell)
Clear sky	1041	848	0.19	200	238	18.4	22.9
Partially cloudy sky	704	361	0.56	86	133	10.0	17.3

れる。2次集光系が無い場合は直達光に対する許容入射角が狭くなり、色収差の影響も大きくなる。

CPV+の概念では、集光用セルの近傍に低コストセルを設置するため、集光系のアライメント誤差、追尾架台搭載時の設置誤差、追尾誤差などの各種の誤差によって集光スポットが低コストセルに入射してしまうことが懸念される。低コストセルは非集光を前提に製造されているため、強い集光を受けると著しく変換効率が低下し、さらに溶解、燃焼の恐れがある。そこで基本的な集光特性を理解するために、試作モジュールと同様の解析モデルによる光学解析を行った。本解析では、直達光の入射角範囲を $\theta \leq \pm 5.0^\circ$ とし、この範囲において Neumann ら⁽²⁰⁾の実測結果を用いて、太陽光球周辺光 (Circumsolar brightness) の入射角依存を与えた。Neumann らは、光球周辺光も含む直達日射照度に対する光球周辺光の照度の比を Circumsolar ratio (CSR) と定義し、各 CSR における直達光エネルギー強度の入射角分布を実測結果に基づいて整理している。ここでは CSR = 5%, 20%, 40% の3つのケースについて解析した。各入射角分布を Fig. 3-5 に示す。縦軸のエネルギー強度は入射角 $\theta = 0.0^\circ$ のエネルギー強度で正規化した値である。さらに、追尾誤差の影響を見るため、正確な追尾に対して $\theta_{\text{error}} = 1.0^\circ$ の誤差を与えた解析も行った。ここで θ_{error} は正確な追尾状態における受光面の法線方向からの傾斜角である。

Fig. 3-6 に解析結果を示す。グラフ縦軸は各セル面における局所的な集光倍率 C_f であり、この集光倍率はレンズ受光面における直達光の照度に対する比である。一方、グラフ横軸は、各セル面の位置を示しており、0 mm はモジュール中心を意味する。Fig. 3-6(a) は追尾誤差が無い場合の結果であり、この場合でも低コストセルの集光セル側の端部では CSR が 20% 以上になると 10 倍前後の集光された光が入射する。また、Fig. 3-6(b) に示すように追尾誤差が 1° ある場合には、CSR の大小に関係なく、高倍率の集光された光が低コストセルに入射することがわかる。このことから追尾誤差が与える影響は大きく、アライメント誤差、設置誤差の影響も大きいことが予想される。したがって、CPV+においても、従来 CPV と同様に直達光に対して十分に広い許容入射角を確保し、低コストセルに対する高倍率集光を防止するロバストな集光系が必要である。その上で、散乱光をできるだけ最小面積の低コス

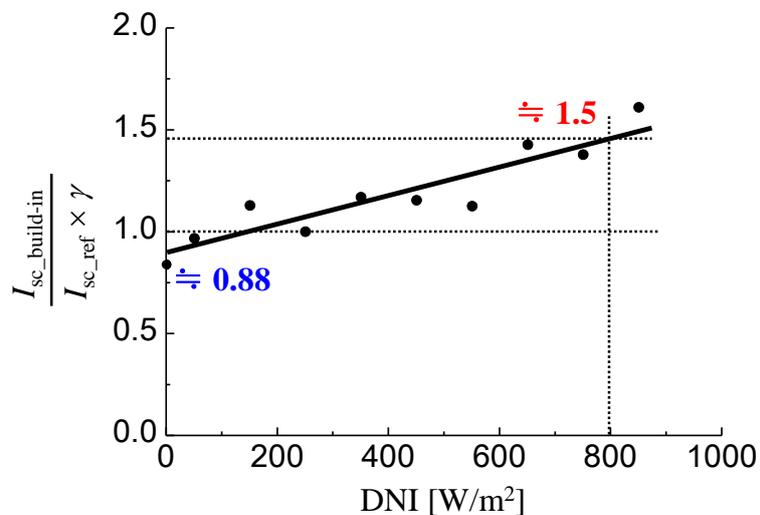


Fig. 3-4 散乱光に対する Si セルの光学的効率

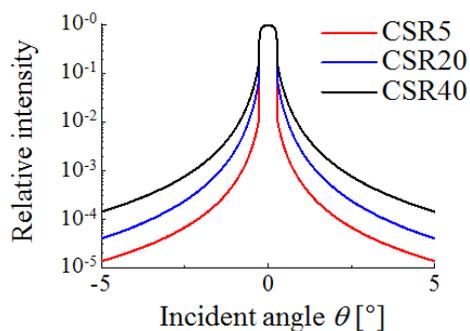
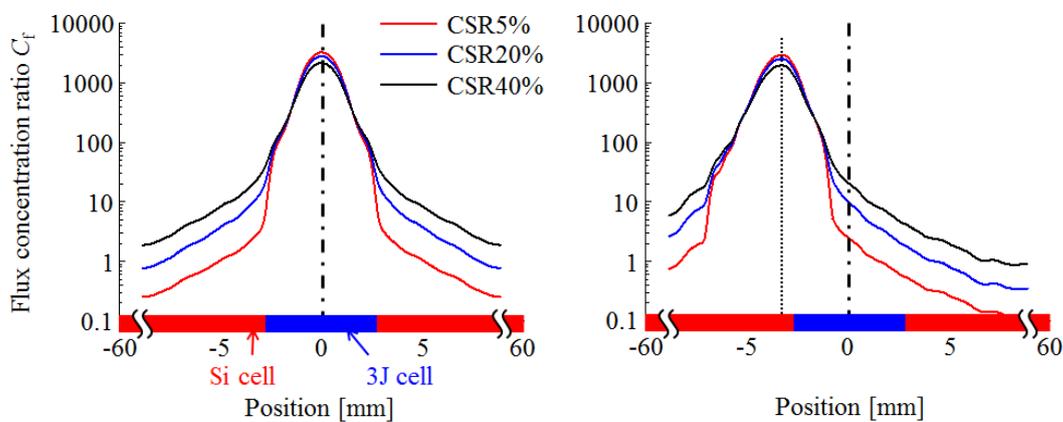


Fig. 3-5 各 CSR における入射角分布



(a) $\theta_{\text{error}} = 0.0^\circ$

(b) $\theta_{\text{error}} = 1.0^\circ$

Fig. 3-6 CSR を考慮した追尾誤差によるエネルギー分布

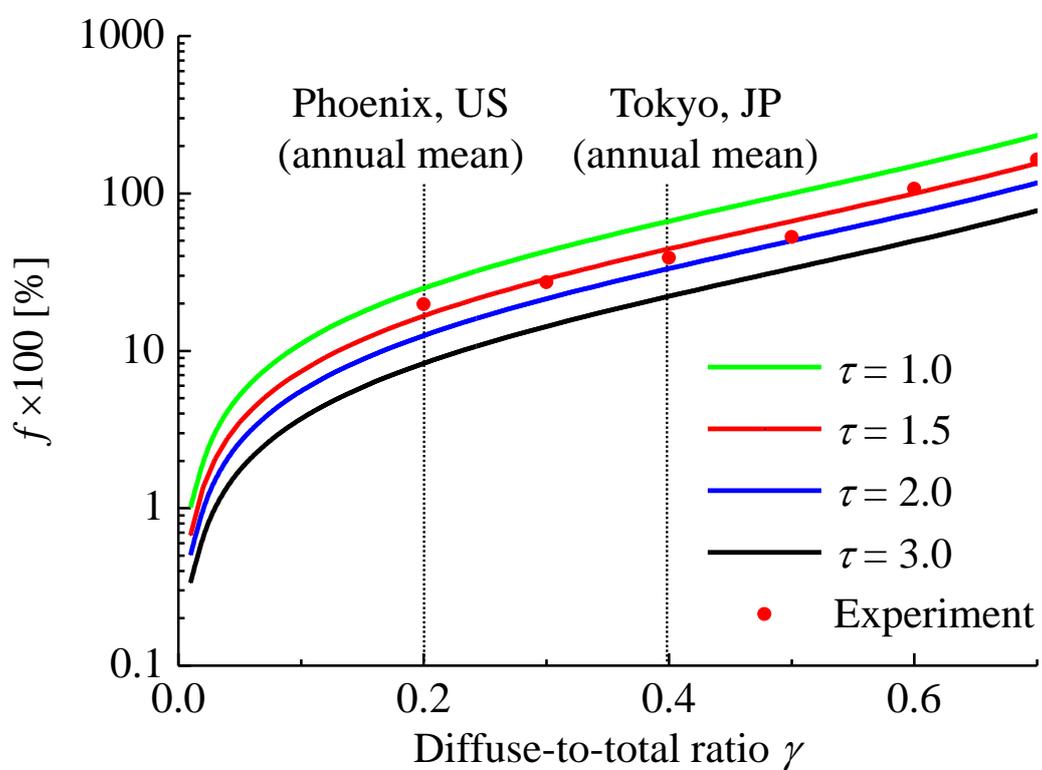


Fig. 3-7 Fresnel lens type CPV+モジュールの発電量増加割合 f vs. 散乱比

トセルに低倍率集光する集光系の探究が必要である。

Fig. 3-7に各散乱比における発電量増加割合 f を示す。実験結果より $\tau = 1.5$ の曲線によく一致することがわかる。 $\tau = 1.5$, $\gamma = 0.47$ (Tokyo, JP) において $f = 59\%$, $\gamma = 0.2$ (Phoenix, US) において 17% である。

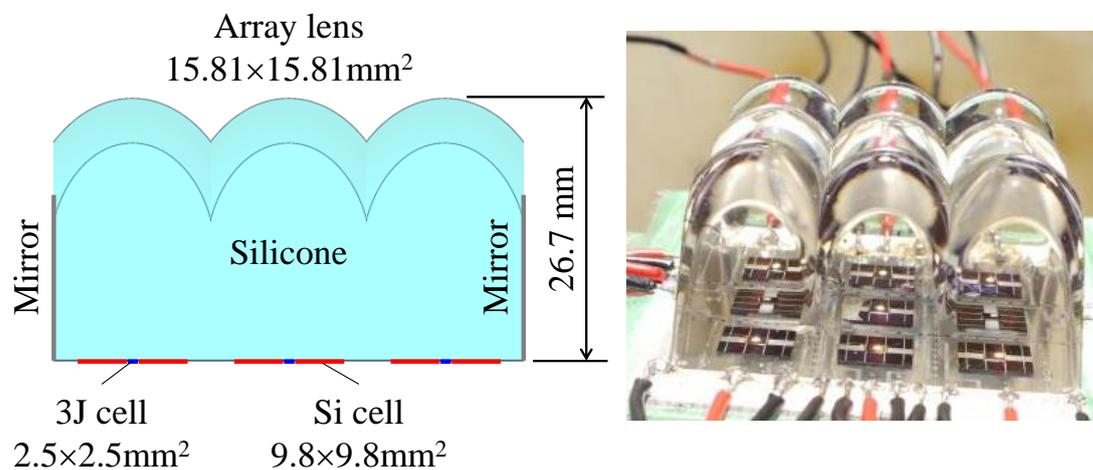
3.3 Air gapless lens type CPV+の試験検証

Fig. 3-8に Air gapless lens CPV+の構成および外観を示す。レンズ材料にはシリコーンを使用し、焦点位置に3JセルおよびSiセルを配置した。レンズ側面には図のようにミラー（正反射率 85%）で囲うことで周期境界条件を模擬した。Air gapless lens 受光面積と3Jセル面積, Siセル面積は 15.81×15.81 mm, 2.5×2.5 mm, 9.8×9.8 mm であり、幾何学的集光倍率は40とした。この試作ミニモジュールを太陽追尾架台に搭載し、3JセルおよびSiセルを独立してI-Vカーブトレーサーに接続し、計測を行った。また、追尾面のGNIおよびDNIを同時計測している。ここでFig. 3-9に今回使用したシリコーンの屈折率および厚さ1mmにおける内部吸収率を示す。ブロードバンドな太陽光の波長域において内部吸収は少ないことがわかる。

2014年10月～11月に新潟県長岡市(長岡技科大キャンパス)において計4日間の屋外試験を実施した。Fig. 3-10に晴天時(2014年10月19日11:08~15:25)および曇天時(2014年10月31日10:57~15:01)における3JセルおよびSiセルの P_{\max} の計測結果を示す。ここでピンクのスタックはSiセルサイズをレンズサイズと同じサイズと仮定した際の推定値である。Table 3-2に各実験日の条件をまとめて示す。また、本試験ではSiセルと3Jセルとの電気的な結合は行っていない。発電量の増加率をそれぞれの実験結果から求めると、晴天日では、日平均散乱比 $\gamma = (GNI - DNI) / GNI = 0.12$, 日平均DNI 864 W/m^2 において増加率は1.12倍, 曇天日では日平均 $\gamma = 0.68$, 日平均DNI 147 W/m^2 において1.87倍となった。散乱比ごとに整理すると散乱比が低いとき発電量は1.1倍, 散乱比が大きいときに19.1倍となることがわかる。

Fig. 3-11に各散乱比における発電量 P_{\max} と発電電力増加量 $\Delta P_{\max}(= P_{\max_Si})$ を示す。 ΔP_{\max} を見ると $\gamma = 0.5$ 付近で最大となることがわかる。

Fig. 3-12に各散乱比における発電量増加割合 f を示す。実験結果をプロッ



(a) 構成図

(b) 外観

Fig. 3-8 Air gapless lens CPV+モジュール構成図および外観

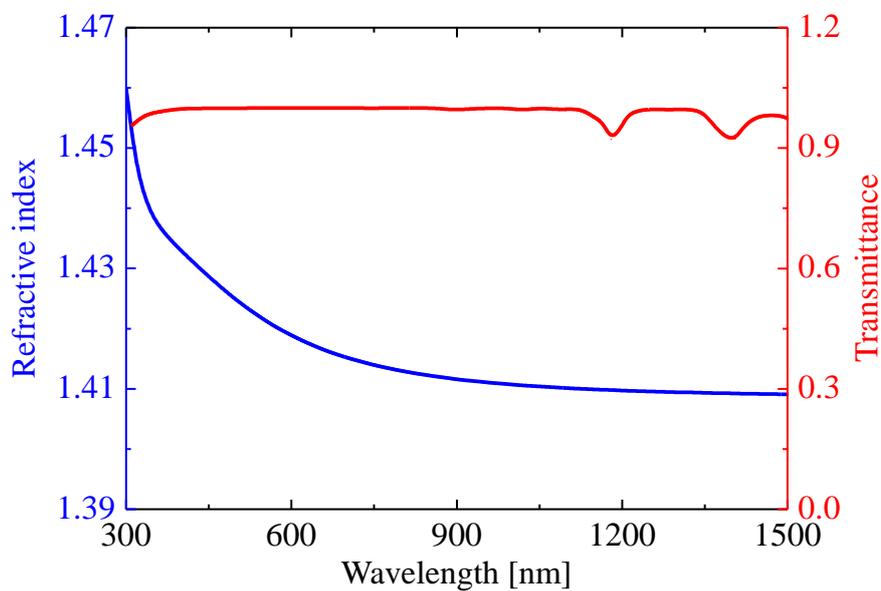
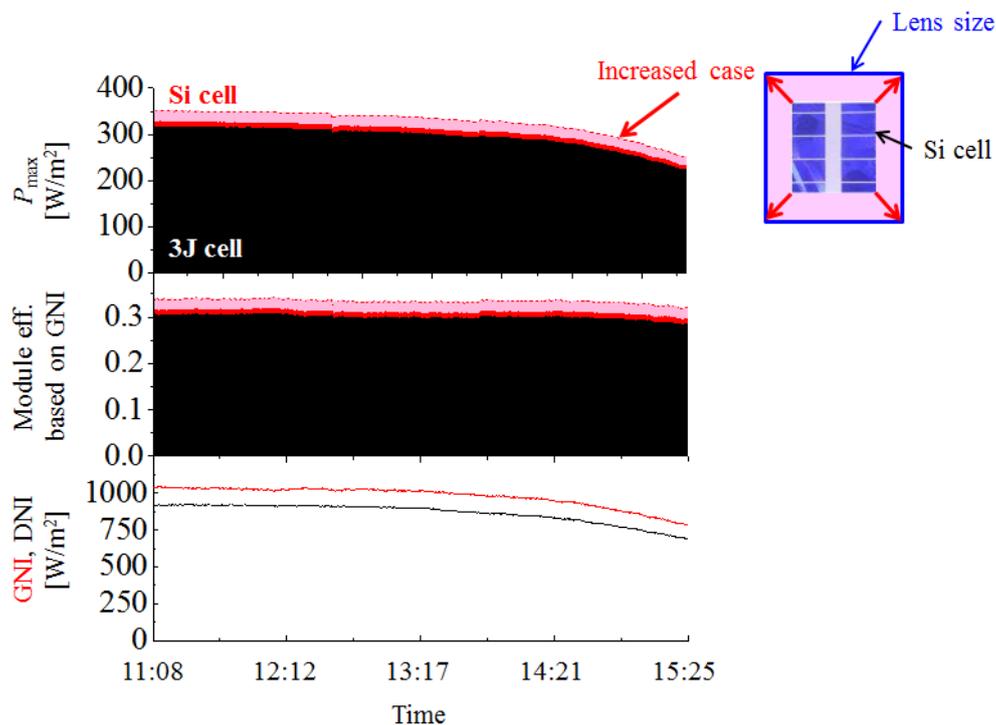
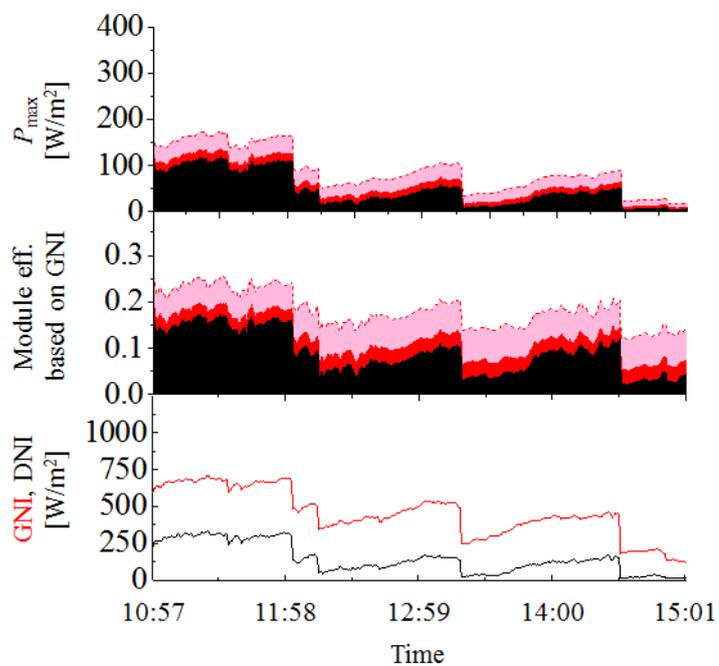


Fig. 3-9 シリコンの屈折率および内部吸収(厚さ 1mm)

集光型太陽光発電システムの包括的設計解析および試験検証
 第3章 CPV+システムの試験検証



(b) 快晴時



(b) 曇天時

Fig. 3-10 晴天日および曇天日の発電量 P_{max} の推移

Table 3-2 各実験の条件

	GNI [W/m ²]	DNI [W/m ²]	γ	P_{\max} [W/m ²]		Module eff. based on GNI [%]	
				CPV (3J cell)	CPV+ (3J cell + Si cell)	CPV (3J cell)	CPV+ (3J cell+Si cell)
				Clear sky	978	864	0.12
Partially cloudy sky	453	147	0.68	47	88	10.4	19.4

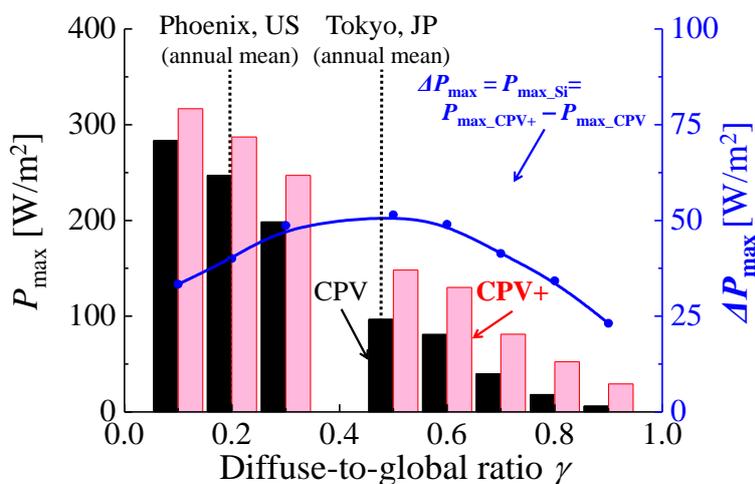


Fig. 3-11 発電量 P_{\max} および発電電力増加量 ΔP_{\max} vs. 散乱比

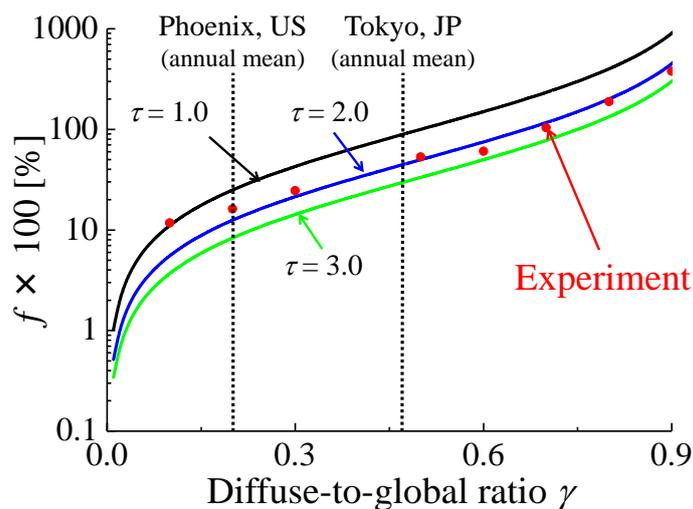


Fig. 3-12 Air gapless lens CPV+モジュールの発電量増加割合 f vs. 散乱比

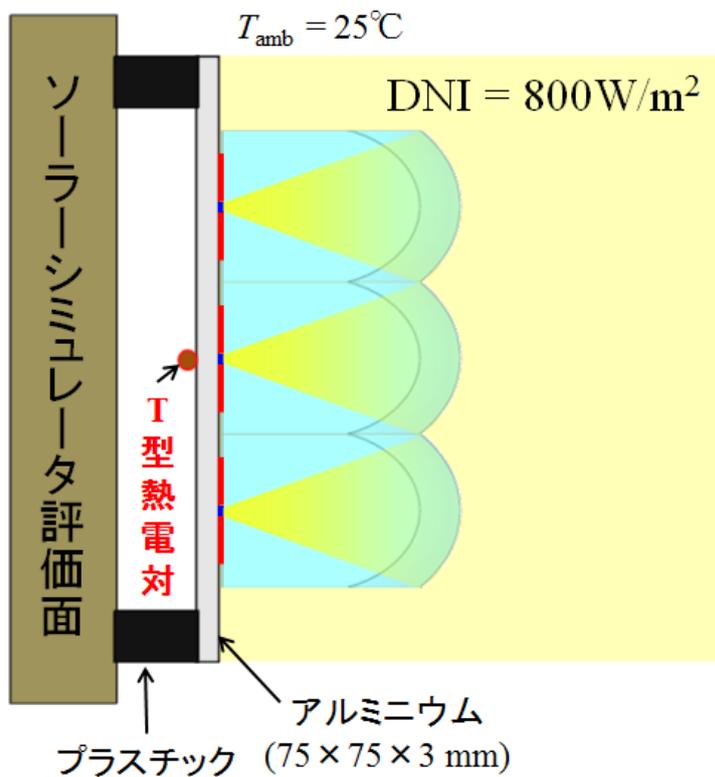


Fig. 3-13 温度上昇実験の実験装置模式図

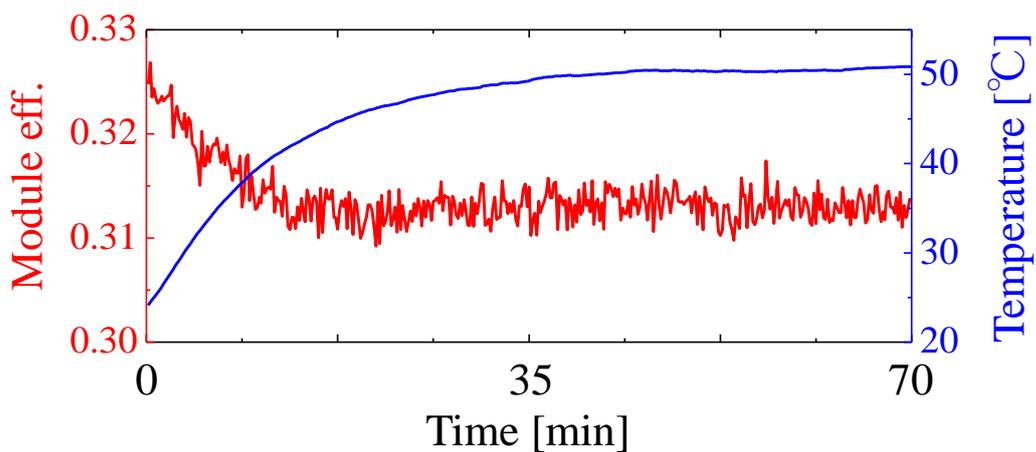


Fig. 3-14 $\text{DNI} = 800\text{W}/\text{m}^2$ 条件下における温度上昇特性

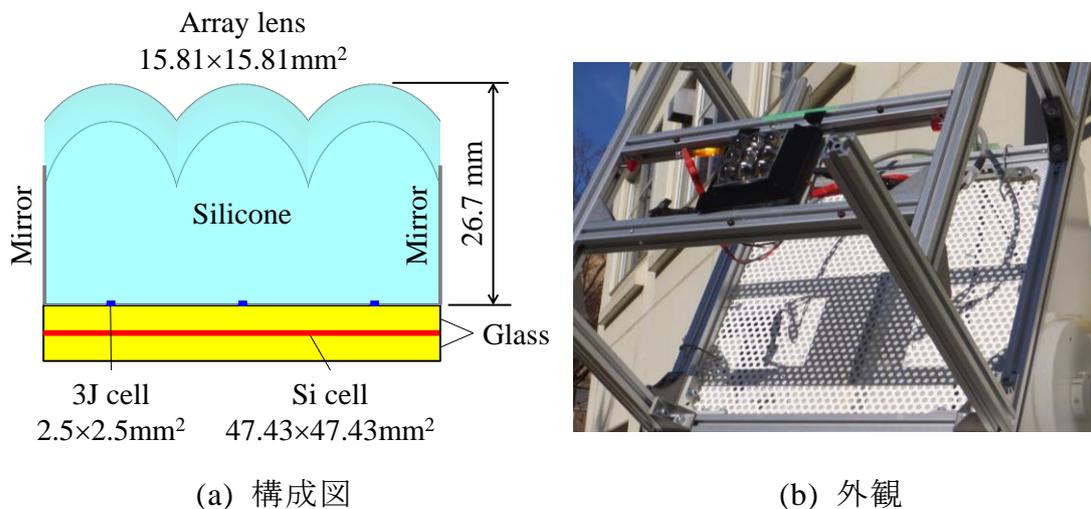
トすると $\tau=2.0$ の曲線に乗ることがわかる。 $\tau=2.0$ は $\gamma=0.47$ (Tokyo, JP) において $f=44\%$, $\gamma=0.2$ (Phoenix, US) において 12.5%である。

屋外実験によるセル温度の評価は外乱の影響により困難である。そこで本モジュールを産業技術総合研究所太陽光発電研究センターにある $\text{DNI} = 800\text{W/m}^2$ を常時点灯可能な高平行ソーラーシミュレータ **highly parallel continuous solar simulator (HPCSS)**を用いて時間によるセル温度の変化を調べた。Fig. 3-13 に実験装置の模式図を示す。ソーラーシミュレータに取り付ける関係上、モジュール下面に厚さ 3mm, 大きさ $75\times 75\text{mm}$ のアルミ板を配置した。また、アルミ板からソーラーシミュレータへの熱伝導を防ぐためプラスチック製のねじおよびナットで空隙を設けた。温度測定は T 型熱電対を用い、測定点は PV セル裏面アルミ板とした。Fig. 3-14 にセル温度の変化を示す。セル温度は周囲温度の 24°C から約 40 分で 50°C まで上昇した。また、温度上昇により変換効率は 32.5% から 31.5% まで低下した。解析では 62.3°C であったが、 12.3°C 低い 50°C で定常状態となった。これは解析ではサンベルト地帯などにおける入射エネルギーを想定し、 $\text{DNI} = 1000\text{W/m}^2$ であったのに対し、実験では非サンベルト地帯などにおいても観測される $\text{DNI} = 800\text{W/m}^2$ で実験を行ったことに起因していると考えられる。

3.4 両面受光 Air gapless lens type CPV+の試験検証

3.2 節および 3.3 節において CPV+の優位性を示した。しかし、裏面に入射している散乱光を捕集できていなかった。そこで **Air gapless lens type** に裏面受光を適用し、レンズ面から入射する散乱光に加えて裏面に入射する散乱光からも発電を行う両面受光 **Air gapless lens** の試験検証を行った。Fig. 3-15 に両面受光 CPV+の構成および外観を示す。このモジュールに使用する Si セルは両面受光 Si セルを用いることで裏面から散乱日射などで入射する光からも発電を行う。また、3J セルは銅のパターニングを施したガラス基板ボンディングされている。つまり表面からの入射する散乱光はレンズを透過し、ガラス基板を通過して両面受光 Si セルに入射する。一方、裏面から入射する散乱光は両面受光 Si セルラミネート時のガラス基板を透過して両面受光 Si セルに入射する。レンズは **Air gapless lens type** と同様の物を使用し、焦点位置に 3J セルおよび両面受光 Si セルを配置した。レンズ側面も同様に

集光型太陽光発電システムの包括的設計解析および試験検証
 第3章 CPV+システムの試験検証



(a) 構成図 (b) 外観
 Fig. 3-15 両面受光 CPV+モジュール構成図および外観

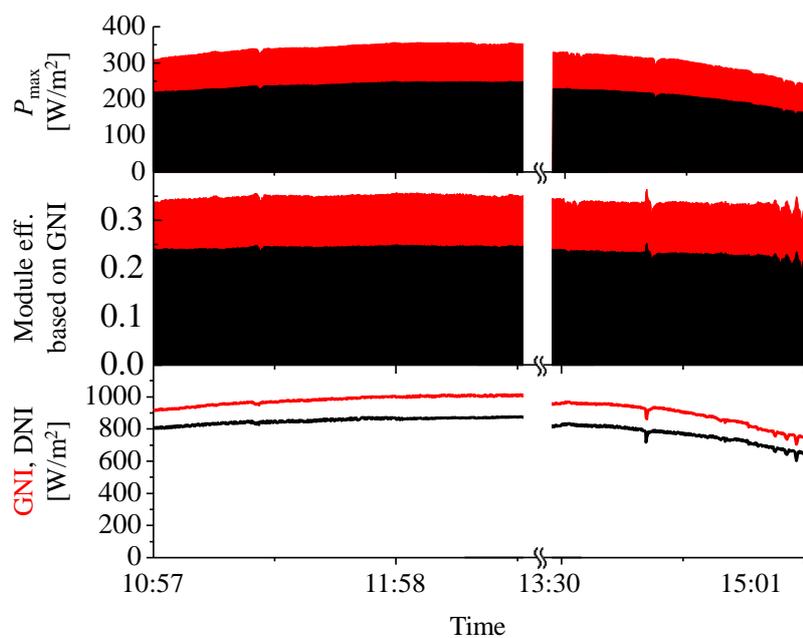


Fig. 3-16 晴天日の発電量 P_{max} の推移

図のようにミラー(正反射率 85%)で囲うことで周期境界条件を模擬している。Air gapless lens 受光面積と 3J セル面積, 両面受光 Si セル面積は 15.81 × 15.81 mm, 1.0 × 1.0 mm, 15.81 × 15.81 mm であり, 幾何学的集光倍率は 250 とした。また, 事前に両面受光 Si セルは表面 18.0%, 裏面 17.8%の変換効率を有していることを確認した。この試作ミニモジュールを図のように太陽追尾架台の追尾面から 200mm 空間をあけて搭載し, 3J セルおよび Si セルを独立して I-V カーブトレーサーに接続し, 計測を行った。また, 追尾面の GNI および DNI を同時計測している。

2014年11月に新潟県長岡市(長岡技科大キャンパス)において計2日間の屋外試験を実施した。Fig. 3-16に晴天時(2014年11月21日9:00~15:00)における3Jセルおよび両面受光Siセルの P_{max} の計測結果を示す。11:15~13:20の時間帯は太陽が木に隠れてしまい正確な測定ができなかったことからデータを省略している。また, 本試験ではSiセルと3Jセルとの電気的な結合は行っていない。発電量の増加率をそれぞれの実験結果から求めると, 日平均散乱比 $\gamma = (GNI - DNI) / GNI = 0.13$, 日平均 DNI 815 W/m^2 において増加率は 1.44 倍となった。

Fig. 3-17に各散乱比における発電量増加割合 f を示す。実験結果をプロットするとこれまでと異なり式(1)~(6)の理論曲線に乗らないことがわかる。これは理論曲線の式にPVセル裏面入射の項が無いことに起因している。そこで地面反射による裏面入射を考慮した数式に拡張する。Fig. 3-18に地面反射による散乱反射の模式図を示す。地面などにより散乱光が等方的であると仮定すると追尾面裏面に入射する日射量 $I_{r\beta\gamma}$ は以下の式より算出できる。

$$I_{r\beta\gamma} = I\rho \quad \dots(9)$$

ここで I は水平面全天日射量(Global horizontal irradiation : GHI), ρ は地面等のアルベドである。また, GHI は以下の数式で表すことができる。

$$GHI = DHI - \text{Diffuse_h} \quad \dots(10)$$

ここで, DHI は水平面における直達日射量, Diffuse_h は水平面における散乱日射量である。これらはそれぞれ以下のように表すことができる。

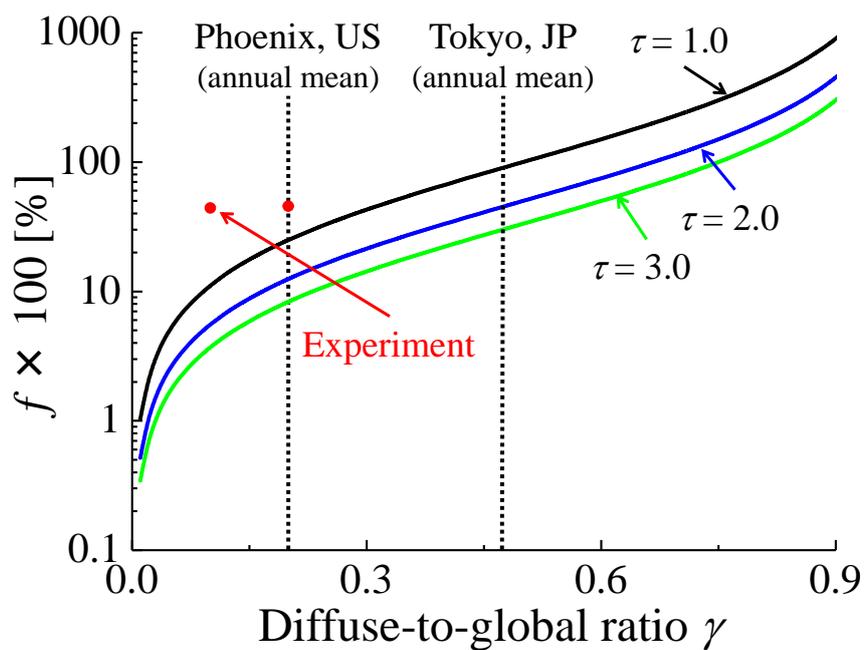


Fig. 3-17 発電量増加割合 f vs. 散乱比

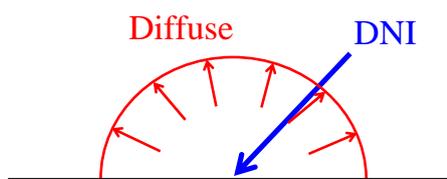


Fig. 3-18 地面反射による等方性散乱反射模式図

$$\text{DHI} = \text{DNI} \sin \beta \quad \dots (11)$$

$$\text{Diffuse_h} = \text{Diffuse} \frac{2}{1 + \sin \beta} \quad \dots (12)$$

ここで、 β は設置角度である。以上の数(10)～(12)より GHI は以下のようになる。

$$\text{GHI} = \text{GNI} \left\{ \frac{2\gamma}{1 + \sin \beta} + (1 - \gamma) \sin \beta \right\} \quad \dots (13)$$

裏面入射を考慮し、式(1)を修正すると以下のようになる。

$$\eta_{\text{CPV}+} = \frac{\eta_{\text{opt_CPV}} \eta_{\text{cell_CPV}} \text{DNI} + \eta_{\text{opt_PV}} \eta_{\text{cell_PV}} (\text{GNI} - \text{DNI}) + \eta_{\text{opt_PV}} \eta_{\text{cell_PV}} F I_{\tau\beta\gamma}}{\text{GNI}} \quad \dots (1')$$

ここで F は追尾面と地面との形態係数である。上式を式(3)に代入し、整理することで裏面入射日射量を踏まえて裏面での発電も加味した f の修正理論曲線 f' は以下のようになる。

$$f' = \frac{\gamma}{\tau(1-\gamma)} + F\rho \frac{\frac{2\gamma}{1+\sin\beta} + (1-\gamma)\sin\beta}{\tau(1-\gamma)} \quad \dots (11)$$

Fig. 3-19 および Fig. 3-20 に散乱比と修正前後の発電量増加割合 f および f' の関係を示す。設置角度 β は実験時の値を参考に 60° とし、Fig. 3-19 の f' は $F\rho = 1.0$ 、Fig. 3-20 は $F\rho = 0.5$ とした。この計算条件より f' の曲線は理論的に取り得る最大の値である。つまり、両面受光による発電量増加割合は曲線 f から f' までの値となると考えられる。Fig. 3-21 に散乱比と f' の関係および実験結果をプロットした。ここで、実験時の条件から、 $F\rho = 0.5$ 、 $\beta = 60^\circ$ とした場合、 $\tau = 1.5$ において理論と実験結果がよく一致していることがわかる。

Fig. 3-22 に試験検証を行ったモジュールの各散乱比における発電電力増加量 $\Delta P_{\text{max}} (= P_{\text{max_Si}})$ を示す。Fresnel lens ミニモジュールと Air gapless lens CPV+ はほぼ一致し、 $\gamma = 0.5$ 程度で最大の値となった。両面受光 CPV+ はデ

一タ点数が少ない為傾向を判断することはできない。しかし、両面受光 CPV+の ΔP_{\max} は約 $100\text{W}/\text{m}^2$ と非常に大きいことがわかる。また、両面受光 Si セルの発電量は片面受光 Si セルに比べ+135%~198%の発電量が得られた。

3.5 まとめ

CPV+の優位性を検証するため Fresnel lens type および Air gapless lens CPV+ を試作し、試験検証を行った。理論的に求めた発電量増加割合 f と各モジュールの実験結果はよく一致した。Air gapless lens 両面受光タイプの発電量の増加割合は、モジュール裏面から入射する日射を考慮した修正理論曲線 f' とよく一致した。地面や壁面等の下方からの反射日射が大きい条件下 ($F\rho=0.5$ 以上) では、Si セルの発電量は片面受光タイプと比較して、+134~198%の発電量増加が見込める。

また、発電量増加量 ΔP_{\max} は散乱比 $\gamma=0.30$ から 0.60 付近で最大となることがわかった。この散乱比は世界の大多数の都市部における日射条件に適合している。したがって、CPV+は直達光だけでなく散乱光をも有効活用できる集光形態であり、日本などの非サンベルト地帯において最大の発電量が得られる太陽光発電システムである。

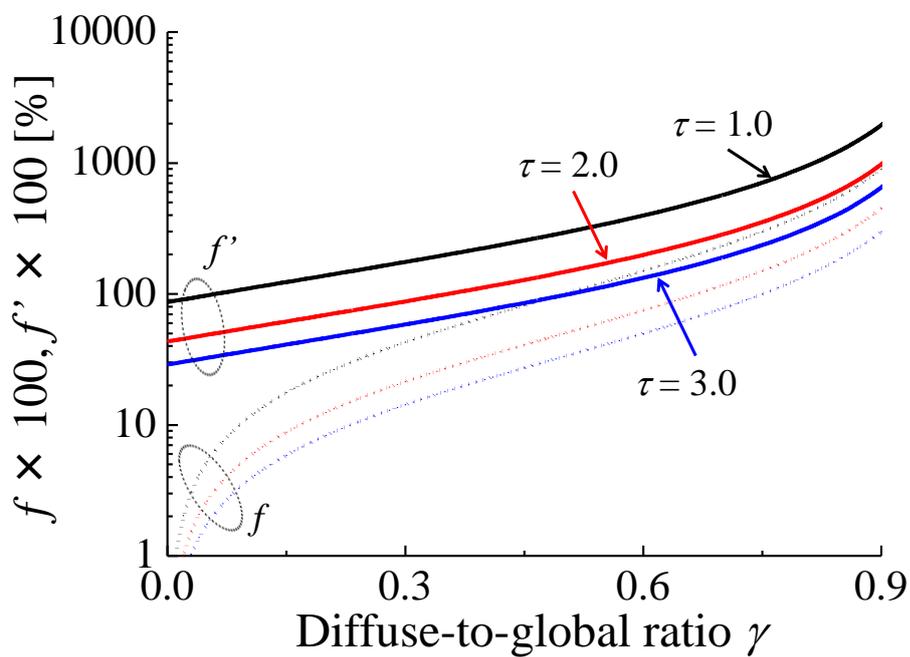


Fig. 3-19 発電量増加割合 f および修正発電量増加割合 f' ($F_p = 1.0$) vs. 散乱比

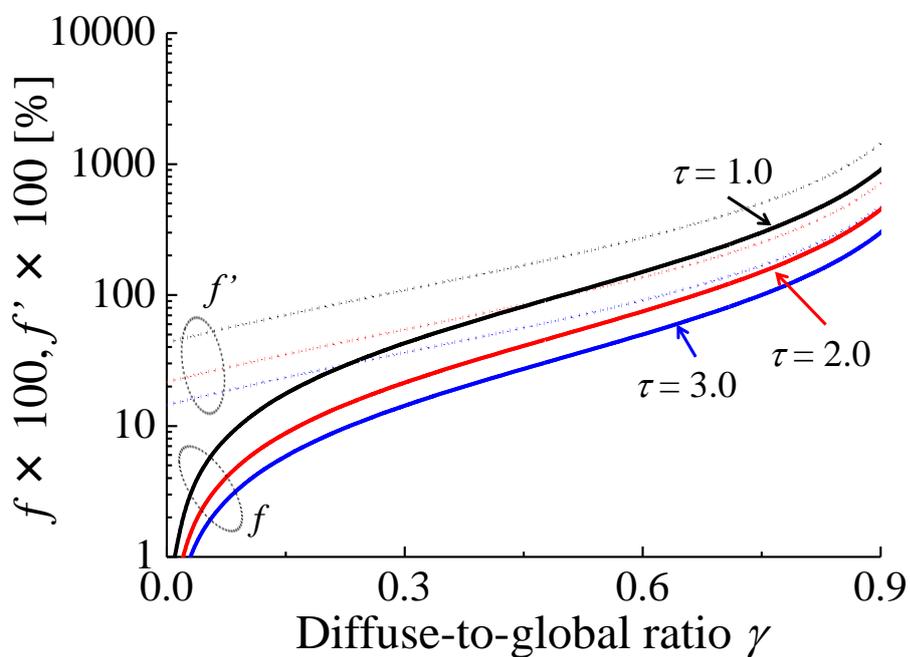


Fig. 3-20 発電量増加割合 f および修正発電量増加割合 f' ($F_p = 0.5$) vs. 散乱比

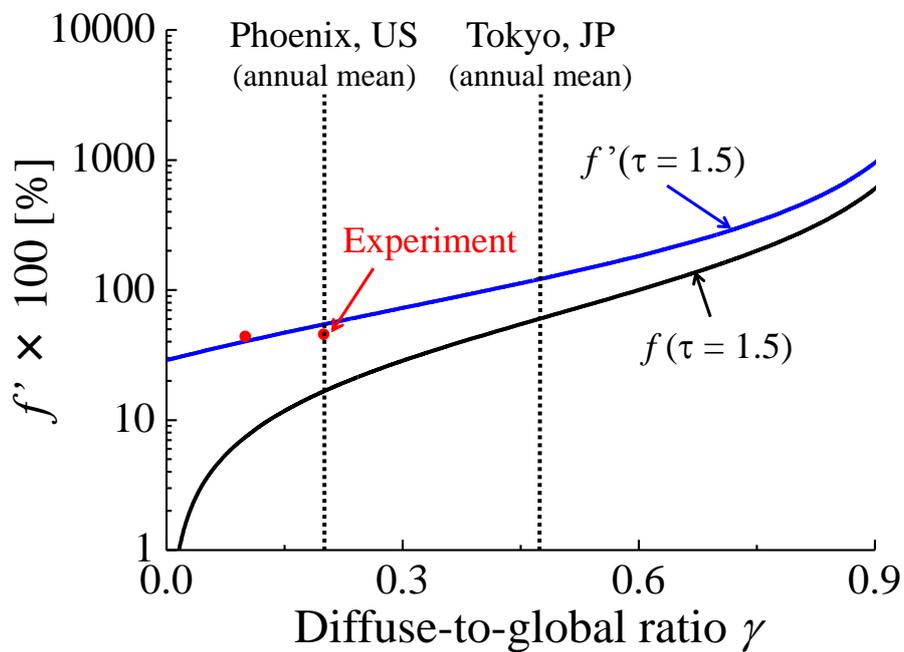


Fig. 3-21 修正発電量増加割合 f' vs. 散乱比

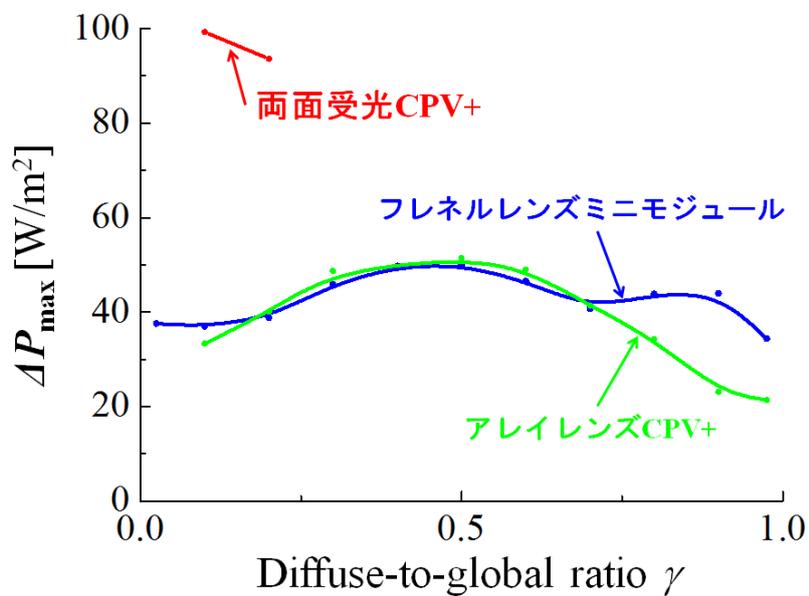


Fig. 3-22 全試作モジュール発電電力増加量 ΔP_{\max} vs. 散乱比

4. 各種 CPV システムの設計解析および試験検証

4.1 はじめに

2章および3章を通して、第1章で述べた技術課題④および⑤の改善を目指した。本章では、技術課題①～③に対する改善を試みた結果を示す。なお、これらは CPV+の研究に先立って取り組んだものである。

まず、技術課題①の光学的性能の向上に対しては、現在 CPV に最も採用されている集光器であるフレネルレンズに新規機能性材料の導入することで集光性能のブレークスルーを目指した (4.2 節)。

次に、技術課題②の CPV システムの多様化に対しては、新規 CPV システム形態を考案することで多様化を目指した。(4.3 節)

さらに、技術課題③の生産性向上に対しては、既存の大量生産技術を導入することによるブレークスルーを目指した。(4.4 節)

4.2 負の屈折率層を有する非結像フレネルレンズの光学設計

非結像フレネルレンズは、安価な樹脂を材料とし、薄く製作することができ、且つ光学的効率も高い優れた集光器の一つである。しかし、高集光倍率であるほど焦点距離が長くなり、集光モジュールが厚くなるため、重量、輸送コスト、風に対する抵抗が増大する。また同時に、許容入射角度が小さくなりことから、より高精度に太陽を追尾しなければならない。さらには、集光面でのエネルギー強度の不均一性や材料の波長分散性(屈折率の波長依存性)による色収差などの問題点がある。

近年、光学の先端分野では種々の光学機器に用いられるナノマイクロ光学機能構造・材料の研究開発に重点がおかれ、自然界に存在しない負の屈折率を有するメタマテリアル/フォトリック構造などの開発が進められている。すでに負の屈折率を実現するいくつかの構造が実験検証されている⁽²¹⁾⁽²²⁾。原理的には物質内の透磁率、および誘電率を人為的に負に操作することで負の屈折率が得られる。また、正の屈折率を有する材料をフォトリック構造化することによって、あたかも負の屈折率を有するような光学物性を発現できることが報告されている⁽²³⁾⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾。

そこで理想的な負の屈折率層を平板タイプの非結像フレネルレンズに導

入した場合について、1つの形態例を提案し、従来のものに比べて、どのような効果・優位性が得られるかを光学解析により明らかにする。とくに、従来のフレネルレンズでブレイクスルーが求められている幾何学的集光比が500, 1000, 2500といった高集光倍率における光学的効率の入射角特性、およびレンズ高さなどを検証した。

4.2.1 負の屈折率

光線が負の屈折率材料 $n_B < 0$ の層に入射すると、Fig. 4-1 に示すように正の屈折率の場合 ($n_B > 0$) とは異なる方向 ($-\theta_B$ 側) への屈折が生じる。この場合においても入射角、透過角、反射角との関係には従来の幾何光学が適用できる。

4.2.2 解析モデルおよび手法

Fig. 4-2 に負の屈折率層をのみで構成された非結像フレネルレンズ (Negative Index Fresnel Lens : 以下 NIFL), 正および負の屈折率層から構成される非結像フレネルレンズ (Negative Positive Index Fresnel lens : 以下 NPIFL), および正の屈折率層のみから構成される非結像フレネルレンズ (Positive Index Fresnel Lens : 以下 PIFL) の解析モデルを示す。Fig. 4-2(a) から (c) は各レンズの断面形状を示している。レンズはこの断面を回転対称とするサーキュラーフレネルレンズであり、Fig. 4-2(d) に示すように受光面および PV cell が正方形になるようにレンズを切り出している。Edge Ray Principle では、レンズを構成する個々のプリズム集光面の中央部に予め設定した許容入射半角 θ_a の入射光線を入射させ、この光線が集光面に到達し得るプリズム斜面の角度を決めていく。設計条件を Table 4-1 に示す。NIFL, NPIFL および PIFL とともに幾何学的集光比 $C_g = 500, 1000, 2500$ の3パターンを作成した。各レンズに共通の設計条件として、レンズ厚さ $t = 0.5$, プリズム幅 $w = 0.5$, 集光面は 2×2 とした。

設計時の許容入射半角 θ_a は太陽視半径に近い 0.25° とした。しかし、 $C_g = 2500$ の PIFL では $\theta_a = 0.25^\circ$ を満たす形状を作成できなかったことから $\theta_a = 0.05^\circ$ として形状を設計した。なお、ここで与えた θ_a はあくまでも Edge Ray Principle を適用する際の設計パラメータであり、実際に決定されたレンズ

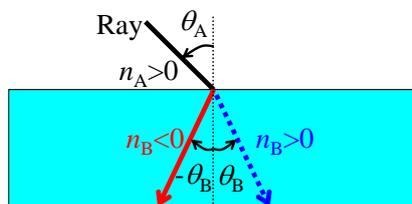
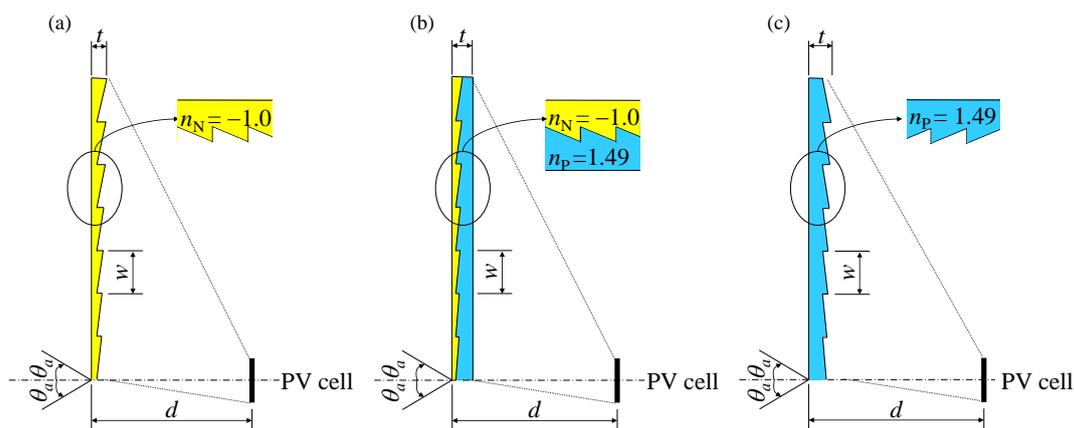


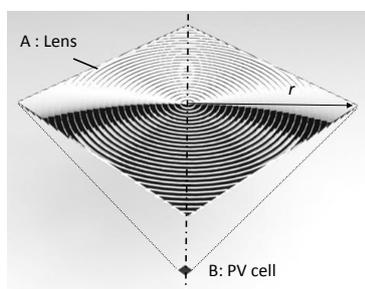
Fig. 4-1 負の屈折率層における屈折



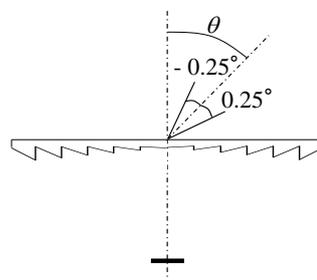
(a) NIFL 断面形状

(b) PIFL 断面形状

(c) PIFL 断面形状



(d) 3D モデル



(e) 追尾誤差

Fig. 4-2 非結像フレネルレンズの解析モデル

(図中の θ は追尾誤差角, ± 0.25 は太陽視半径に相当する角度範囲を示す)

Table 4-1 フレネルレンズの設計パラメータ

Lens radius	r	32	45	71
Lens aperture area	A	45×45	63×63	100×100
PV cell area	B	2×2	2×2	2×2
Design acceptance half angle	θ_a	0.25	0.25	0.05
Prism width	w	0.5	0.5	0.5
Prism number		64	90	142
Thickness	t	0.5	0.5	0.5

形状では、 θ_a 以内の入射光線に対してもフレネル反射による損失などにより 100%の集光は得られない。

以上の設計条件に基づいて、まず、各レンズ高さ d において光学的効率 η が最大(η_{\max})となるレンズ形状を決定した。その際、Table 4-1 に示す設計パラメータを与え、レンズ全体の光線追跡による光学的効率が最大になる形状を Edge Ray Principle に基づく反復計算により求めた。このとき d の範囲は Edge ray principle によるレンズ作成限界距離(短い側)から光学的効率がおおむね低下する距離(長い側)まで変化させた。次いで、各レンズ高さ d における決定形状について、追尾誤差の影響を明らかにするために、Fig. 4-2(e)に示すように、入射光束の光束軸とレンズ受光面法線との角度 θ を 0.125° 刻みで徐々に傾けていった際の光学的効率 η の低下割合を解析した。この θ を追尾誤差角と呼ぶこととし、 $\eta = 0.8\eta_{\max}$ まで低下するときの追尾誤差角を $\theta_{80\%}$ と定義した。なお、負の屈折率層の屈折率はレンズ表面でのフレネル反射損失が生じない理想値 $n_N = -1.0$ とした。また、正の屈折率層および PIFL の屈折率はアクリルやガラス材料の代表的な値である $n_P = 1.49$ とした。

各レンズ形状の光学的効率を解析・評価を行うために光線追跡法を用いた。ただし、本解析では光線がレンズ内部を通過する際に生じる吸収損失、レンズ表面および内部での散乱は考慮していない。レンズ材料による吸収損失を考慮しないため、幾何形状が相似であれば結果も同じであることから、レンズの大小による解析結果への差は生じない。

以上の解析モデルと手法を用いて、レンズの光学的効率の入射角特性を解析した。高倍率集光の集光器は、熱力学的制限により許容入射角が小さくなるため、追尾架台との組み合わせが必須となる。一般に、追尾架台の追尾精度を低くできるほど良い。つまり、追尾誤差角 θ が大きくなってもできるだけ光学的効率 η を高く維持できる集光器が求められる。CPV においては、幾何学的集光比 1000、追尾誤差角 1° において光学的効率 70% 以上を達成する集光器が目標例とされている⁽²⁶⁾。

4.2.3 解析結果および考察

Fig. 4-3 上段に NIFL, NPIFL および PIFL のレンズ高さ d と光学的効率 η_{\max} の関係を示す。これは追尾誤差角 θ をゼロとして太陽視野角に相当する角

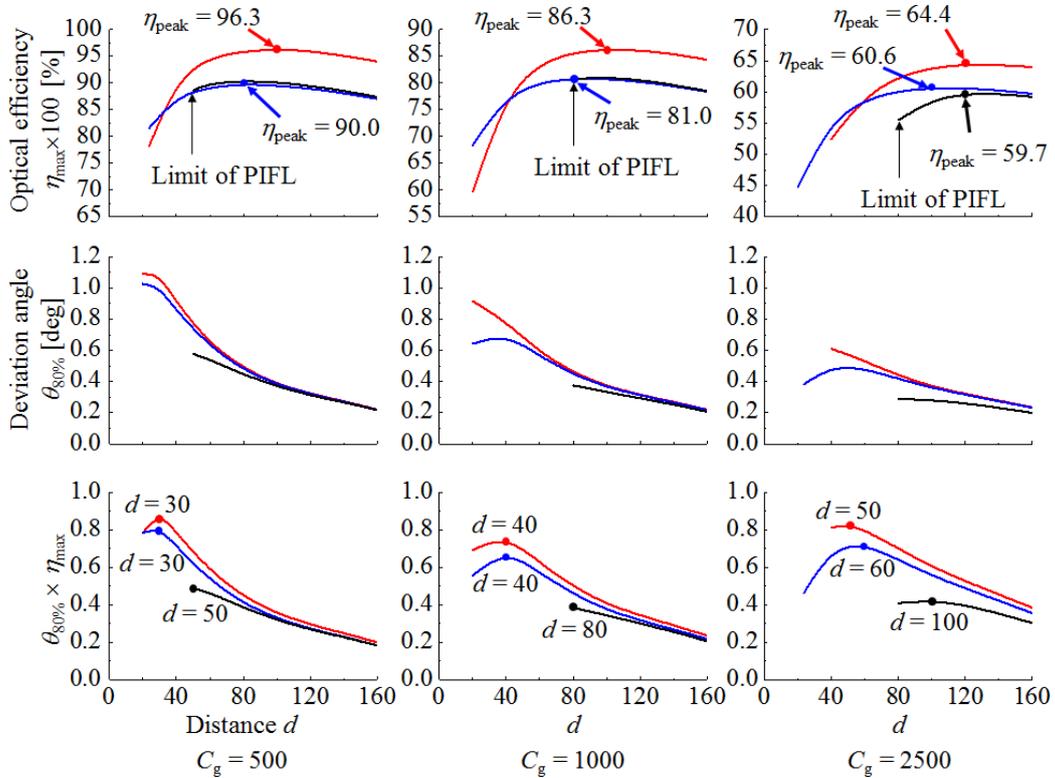


Fig. 4-3 【上段】 追尾誤差が無い場合の光学的効率 η_{\max} とレンズ高さ d の関係

【中段】 追尾誤差角 $\theta_{80\%}$ とレンズ高さ d の関係

【下段】 光学的効率 η_{\max} と追尾誤差角 $\theta_{80\%}$ の積とレンズ高さ d の関係

赤線 : NIFL, 青線 : NPIFL, 黒線 : PIFL

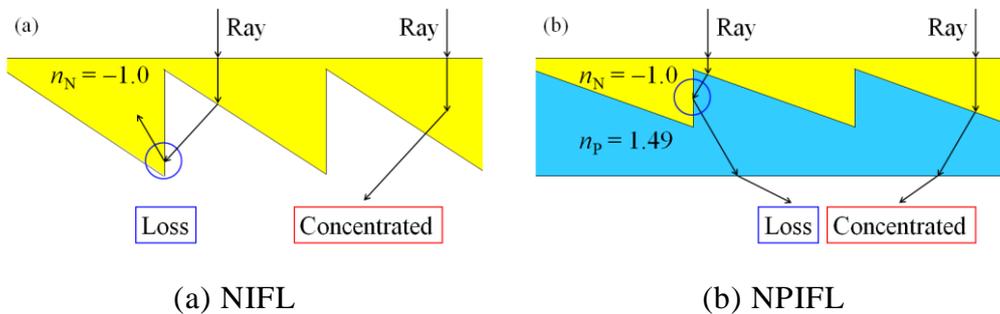


Fig. 4-4 NIFL および NPIFL の光学損失要因(d が短いとき)

度範囲 $\pm 0.25^\circ$ の光束を入射した場合の結果である。NIFL および NPIFL はレンズ高さでもレンズ形状が決定でき、集光が行えることがわかる。また、 η_{peak} は各 C_g とも NIFL が最も高く、 $C_g = 500$ において $\eta_{\text{peak}} = 96.3\%$ 、 $C_g = 1000$ において $\eta_{\text{peak}} = 86.3\%$ 、 $C_g = 2500$ において $\eta_{\text{peak}} = 64.4\%$ となった。これは負の屈折率層を理想的な -1.0 としていることでレンズ表面でのフレネルロスが無いことに起因している。NPIFL と PIFL は $C_g = 500$ および $C_g = 1000$ において光学的効率の最大値 η_{peak} とそのときのレンズ高さ d はほぼ等しく (η_{peak} の相対差は約 1%)、どちらも $C_g = 500$ では、 $d = 80$ において $\eta_{\text{peak}} = 90\%$ 、 $C_g = 1000$ では、 $d = 80$ において $\eta_{\text{peak}} = 81\%$ となった。一方、 $C_g = 2500$ では、解析したすべてのレンズ高さにおいて NIFL および NPIFL の光学的効率が PIFL に勝り、NPIFL において $\eta_{\text{peak}} = 60\%$ が得られるレンズ高さ $d = 100$ は PIFL において $\eta_{\text{peak}} = 59.7\%$ が得られるレンズ高さ $d = 140$ の約 70% になっている。NIFL はレンズ高さは $d = 140$ と PIFL と同値であるが $\eta_{\text{peak}} = 64.4\%$ と 5% 程度高くなることがわかる。また、 $C_g = 500$ において $\eta = 80\%$ 、 $C_g = 1000$ において $\eta = 67\%$ 、 $C_g = 2500$ において $\eta = 45\%$ までそれぞれ光学的効率の低下を許せる場合には、NIFL および NPIFL のレンズ高さは PIFL の作成限界の d の半分未満にすることができる。つまり、NIFL および NPIFL は高集光倍率において、PIFL よりも高い光学的効率を薄いモジュールで得られる優位性がある。なお、NIFL および NPIFL ではレンズ高さが短くなると光学的効率が低下する傾向が見られる。考えられる要因を Fig. 4-4 に示す。 d が短くなるほどプリズム斜面の角度がきつくなり、NIFL はプリズムで屈折した光線が隣接したプリズムに入射し、上方に屈折してしまい集光面とは異なる方向へ伝播し損失となり、NPIFL は屈折した光線が隣接プリズムの垂直面に入射し、そこでの全反射作用により集光面とは異なる方向へ伝播し損失になるためである。

Fig. 4-3 中段には、追尾誤差角 $\theta_{80\%}$ をレンズ高さ毎に解析した結果を示す。これより、NIFL および NPIFL はレンズ高さが短いときに $\theta_{80\%}$ が大きくなる傾向が見られる。PIFL とのピーク値を比較すると、NIFL は 1.9 から 2.4 倍、NPIFL は 1.7 から 1.9 倍大きい。

Fig. 4-3 下段に各レンズ高さにおける η_{max} と $\theta_{80\%}$ とをそれぞれのピーク値で規格化して乗じた値 $\eta_{\text{max}} \times \theta_{80\%}$ を示す。この評価指標から、高い光学的効

率と大きな追尾誤差角を達成するレンズ高さを決定できる。図より、NPIFLの $\eta_{\max} \times \theta_{80\%}$ のピーク値はPIFLに対して1.5倍($C_g = 500$)、約1.7倍($C_g = 1000$)、約1.7倍($C_g = 2500$)と大きく、このときのレンズ高さはPIFLの $3/5(C_g = 500)$ 、 $1/2(C_g = 1000)$ 、 $3/5(C_g = 2500)$ となる。また、追尾誤差角 $\theta_{80\%}$ はPIFLの1.8倍($C_g = 500$)、1.9倍($C_g = 1000$)、1.7倍($C_g = 2500$)となる。つまり、幾何学的集光比が大きい場合に、NIFLはPIFLに対する優位性を有する傾向がある。

Fig. 4-5には $\eta_{\max} \times \theta_{80\%}$ がピークとなるNIFL、NPIFL、およびPIFLのレンズ断面形状比較図を示す。また、Fig. 4-6にはこれらの形状における追尾誤差角を与えた際の集光面エネルギー分布を示す。図中の赤枠はPVセルの範囲を示している。 $\theta = 0.0^\circ$ は幾何学的集光倍率に応じて若干の相違はあるが、両レンズは本質的に同様の集光分布となっており、集光面中央部において局所的に C_f が大きくなる傾向が見られる。つまり本解析モデルのNIFLでは集光面でのエネルギー均一化においては顕著な優位性が見られなかった。追尾誤差角 θ が大きくなるに従いPIFLのスポット位置が大きくなりすぎて行っていることがわかる。

4.2.4 波長分散の影響

前述の解析では、単一の屈折率を仮定したが、実際には負の屈折率を有する材料が波長分散性を有する場合が想定される。よって、 $n_N = -1.0$ として設計されたレンズ形状に対して屈折率を少しずつ変化させ、光学的効率がどのように変化するかを調べた。対象としたレンズ形状は、Fig. 4-5に示した形状である。追尾誤差角 $\theta = 0^\circ$ における結果をFig. 4-7に示す。グラフ横軸の Δn は前節の解析条件として用いていた $n_N = -1.0$ および $n_p = 1.49$ からの変化量を示す。ただし、NPIFLの正の屈折率層は $n_p = 1.49$ で固定とした。負の屈折率層の屈折率が ± 0.1 変化するとNIFL、NPIFL共に光学的効率は $C_g = 500$ では変化前の約47%、 $C_g = 1000$ では約30%、 $C_g = 2500$ では約18%にそれぞれ低下した。一方、PIFLでは、 $C_g = 500$ で約5%、 $C_g = 1000$ で約3%、 $C_g = 2500$ で約1%にまでそれぞれ低下している。これよりNIFLは高集光倍率であるほど波長分散による効率低下が大きくなる点はPIFLと同様だが、PIFLに比べて屈折率変化に対する効率低下割合が少ないことがわかる。つまり、NIFLの方がPIFLよりも波長分散の影響が小さい。

集光型太陽光発電システムの包括的設計解析および試験検証
 第4章 各種 CPV システムの設計解析および試験検証

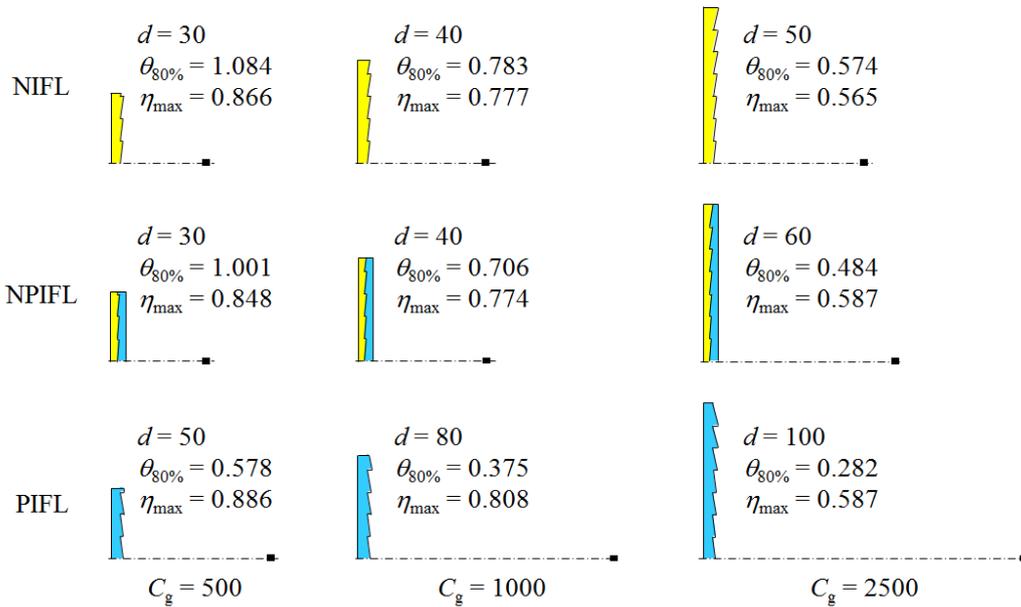


Fig. 4-5 $\eta_{\max} \times \theta_{80\%}$ が最大となるレンズ断面形状
 (上段：NIFL，中段：NPIFL，下段：PIFL)

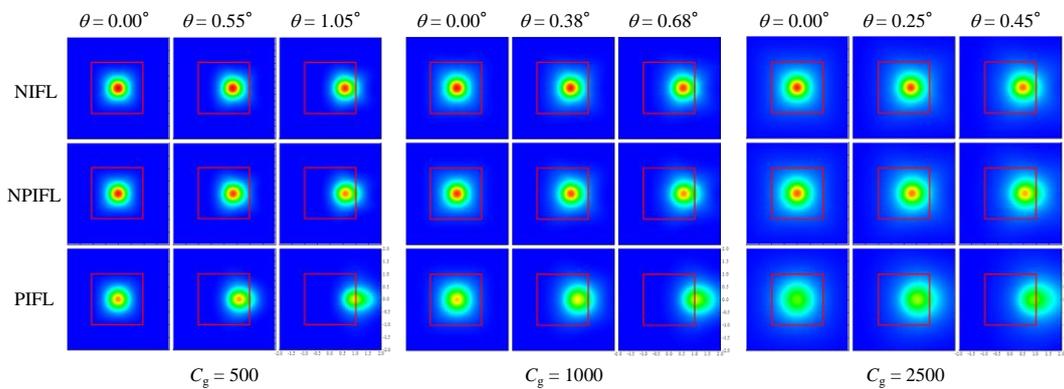


Fig. 4-6 $\eta_{\max} \times \theta_{80\%}$ が最大となるレンズ形状における
 集光面でのエネルギー分布の比較
 (上段：NIFL，中段：NPIFL，下段：PIFL)

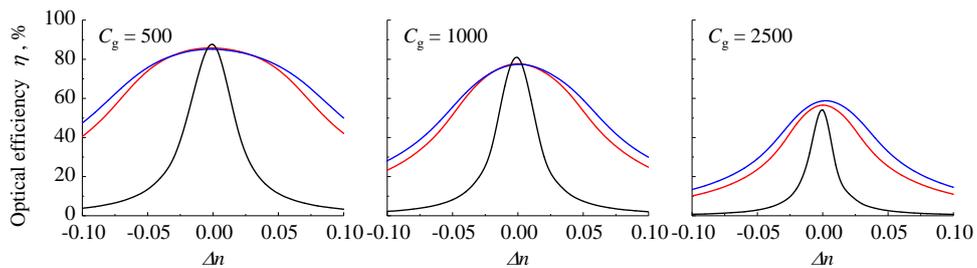


Fig. 4-7 負の屈折率変化における光学的効率への影響

4.2.5 まとめ

本解析により負の屈折率層を有する非結像フレネルレンズの光学解析を行い、以下の知見を得た。

- 1) 理想的な負の屈折率層を幾何学的集光比 500, 1000, 2500 の非結像フレネルレンズの受光面側に導入するとレンズと集光面との距離(非結像フレネルレンズのレンズ高さ)を従来の 1/2~3/5 にできる。
- 2) また、負の屈折率層を導入した場合には、従来の約 1.7 倍~2.4 倍の追尾誤差があっても光学的効率の低下量を 2 割に抑えられる可能性が示された。つまり従来よりも追尾精度が悪くても良い。
- 3) 集光面でのエネルギー強度分布においては、負の屈折率層の導入による均一化への寄与は認められなかった。均一化を重視する場合には従来と同様に 2 次光学系が必要となる。
- 4) 負の屈折率層を導入したレンズは従来レンズよりも波長分散による光学的効率の低下量が小さい傾向が明らかとなった。

負の屈折率材料は、現時点では研究開発段階のものが多く、本研究のような実用レンズに使用できるものはまだ無い。近年の光学材料の発展はめざましく、将来、安価で汎用的なものが実用化された場合には、本研究成果の適用による集光性能の向上が期待できる。

4.3 軸外し反射集光型 CPV モジュールの光学設計および試験検証

CPV システムの追尾架台に関しては、発電規模の大きいプラント用途では、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 (Fig. 4-8(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ルーフトップでの小規模発電への適用事例も現れており、装置全高を低く抑えられるカルーセル方式 (Fig. 4-8(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、フレネルレンズやカセグレンミラーなど、一次集光器の光学的中心軸上に PV セルが位置する On-axis 集光方式がこれまでの主流だが、最近、Miñano らによって、Off-Axis 集光器が提案され、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。

そこで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、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。

4.3.1 カルーセル方式 Off-Axis XR CPV システム

Fig. 4-8 にペDESTAL方式とカルーセル方式追尾架台の概略を示す。さらに Fig. 4-9 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(Fig. 4-9 左)、これを一系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(Fig. 4-9 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 集光器と呼ぶ。C_gは 550×とし、POE には回転放物面ミラー、SOE にはホモジナイザーを用いた。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。

4.3.2 設計解析

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。Fig. 4-10 に解析モデルを示す。POE の回転放物面ミラー形状は、Fig. 4-10(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。

$$z = \frac{1}{4} \left(\frac{x^2}{f_x} + \frac{y^2}{f_y} \right) \quad \dots\dots(11)$$

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。これはセル等を固定する筐体を考慮したためである。

一方、SOE のロッドレンズ形状を Fig. 4-10(b)に示す。底部の $W_{\text{bot_SOE}}$ 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 $W_{\text{ap_SOE}}$ 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 $550\times$ の POE 仕様と SOE の位置を前述の要領で決めた後、SOE の設計パラメータ $W_{\text{ap_SOE}}$ 、 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 $\theta_{90\%}$ が $\pm 1^\circ$ 以上を満たし、且つ光学的効率 η_{opt} が最大となる SOE 形状を決定した。また、PV セル面照度分布の均一性の評価については PAR を用いた。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 Fig. 4-11 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。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。

Table 4-2 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

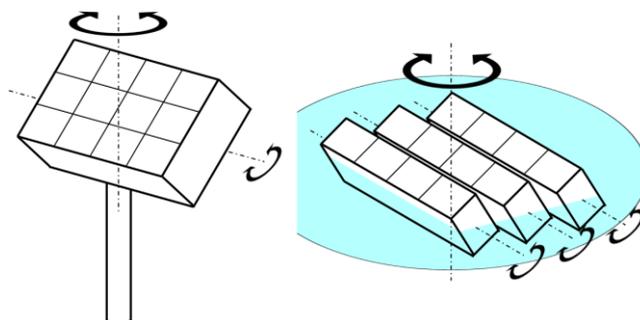


Fig. 4-8 太陽追尾架台

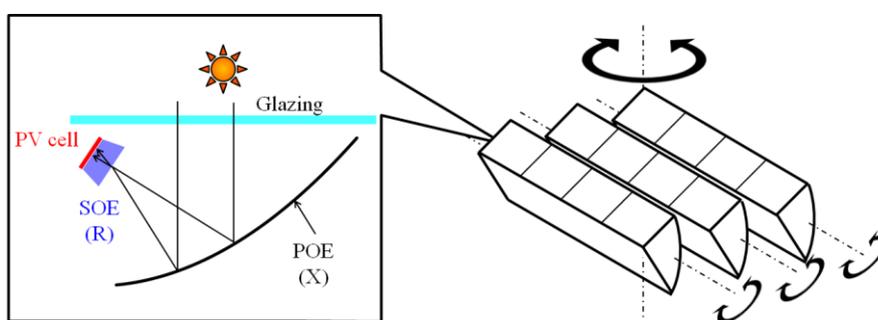
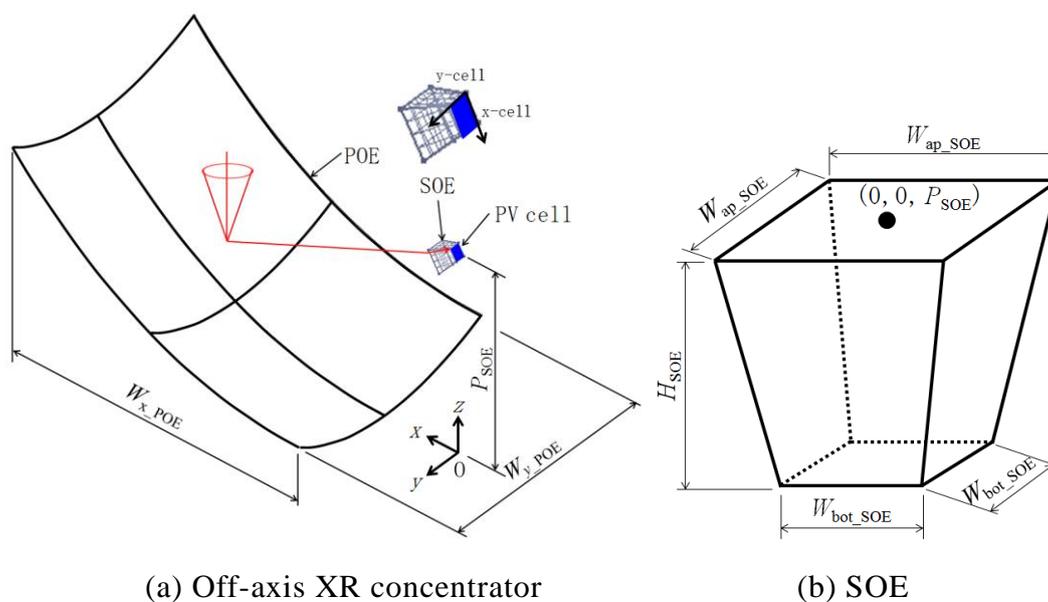


Fig. 4-9 カルーセル方式追尾架台に Off-axis XR 集光器を搭載した CPV システムの概略



(a) Off-axis XR concentrator

(b) SOE

Fig. 4-10 解析モデル

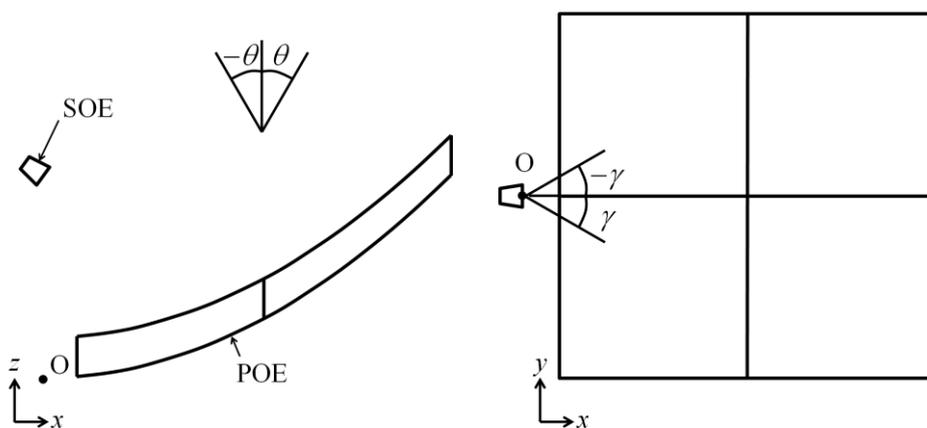


Fig. 4-11 追尾誤差角の定義

Table 4-2 550× 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

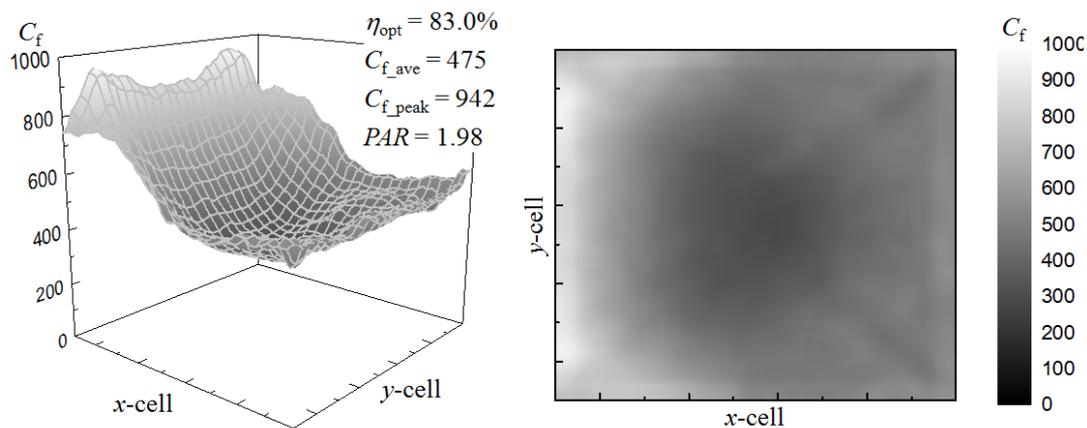


Fig. 4-12 セル面照度分布および性能指標

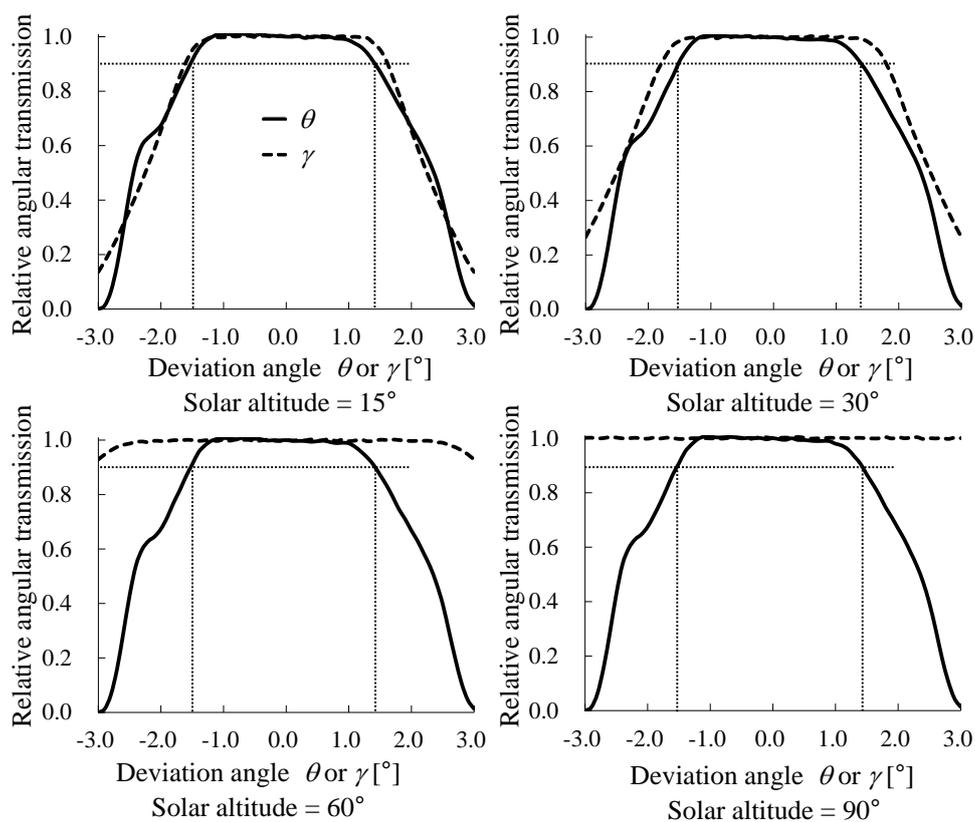


Fig. 4-13 各太陽高度における入射角特性

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⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾、本集光器は比較的薄型であると言える。

Fig. 4-12 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 $\eta_{opt} = 83.0\%$ 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良好である。

Fig. 4-13 には入射角特性を示す。太陽高度 15° 、 30° 、 60° 、 90° 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、Fig. 4-11 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やすいためである。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⁽¹⁰⁾、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⁽²⁹⁾ よりも大きい。

4.3.3 試作ミニモジュールによる試験検証

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。Fig. 4-14 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架台に搭載した。ミニモジュールは Table 4-2 の仕様に従って製作し、2 対のセル

ー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。放熱フィンは使用していない。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。追尾架台の追尾角度精度は、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±0.11°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、小型追尾架台STR-22(仕様追尾精度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。

$$\eta_{\text{module}} = \frac{P_{\text{max}}}{A_{\text{ap}} \times \text{DNI}} \quad \dots (12)$$

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⁽³⁰⁾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Fig. 4-15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±0.2°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。

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。Table 4-3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。Fig. 4-16に2012年7月26日10:28～15:54における計測結果を示す。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}

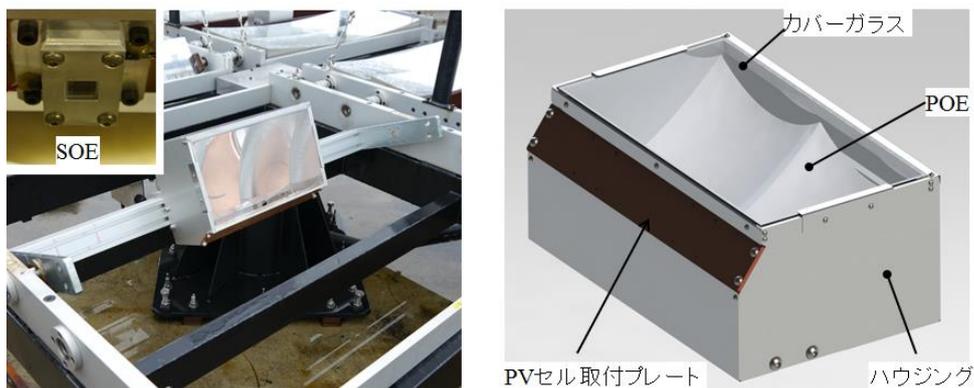


Fig. 4-14 屋外試験装置の外観(岡山県玉野市)

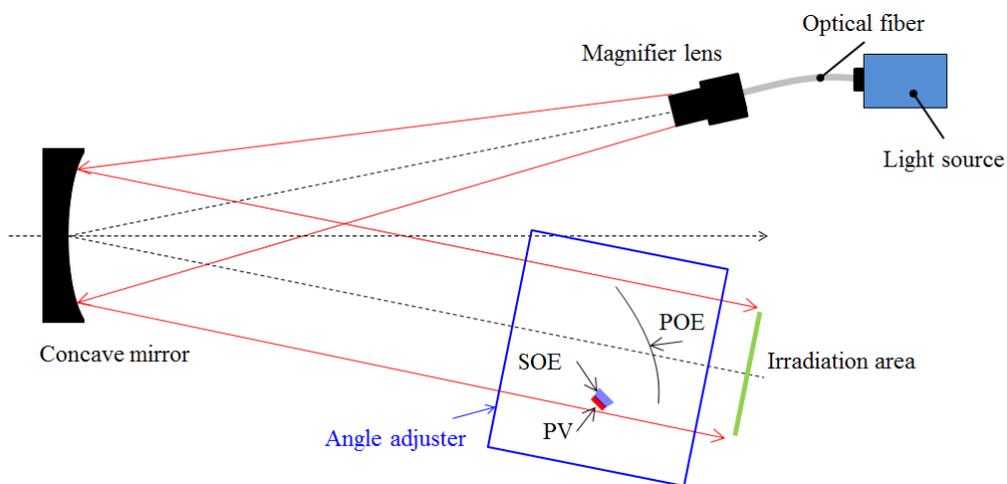


Fig. 4-15 室内試験装置の概略⁽²⁸⁾

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/m^2 、 32.1°C および 1.53m/s であった。Fig. 4-16 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 $+40^\circ\text{C}$ の 71.9°C まで上昇し、平均値は 67.6°C となった。

Fig. 4-17 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、 $\text{DNI} = 700\text{W/m}^2$ 時に変換効率最大値 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°C であった。

Fig. 4-18 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 $\text{DNI} < 400\text{W/m}^2$ 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 Fig. 4-8(b)あるいは Fig. 4-9 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、Fig. 4-19(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 $\text{DNI} = 610 \pm 10\text{W/m}^2$ で安定している時間内に行った。Fig. 4-19(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、ほぼ一定となった。Fig. 4-19(c)はモジュール変換効率を計算する際に

集光型太陽光発電システムの包括的設計解析および試験検証
 第4章 各種 CPV システムの設計解析および試験検証

Table 4-3 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 (°)	Average DNI (W/m ²)	Measurement time	# Measurement	Average ambient temperature (°C)	Average wind velocity (m/s)
2012/07/19	9:20:17 (50.37°)	14:42:01 (53.88°)	76.31	362	5:21:44	188	31.0	1.43
2012/07/25	11:24:31 (71.92°)	14:30:51 (55.68°)	75.11	481	3:06:50	738	31.3	1.56
2012/07/26	10:28:21 (62.73°)	15:54:11 (38.64°)	74.89	769	5:25:50	1693	32.1	1.53
2012/08/28	9:41:44 (48.86°)	15:38:21 (35.44°)	65.12	646	5:53:40	617	31.4	2.33
2012/08/30	13:42:31 (55.93°)	16:46:22 (21.05°)	64.52	720	3:03:51	878	32.5	1.39
2012/08/31	7:21:41 (20.76°)	14:15:21 (50.29°)	64.05	372	6:53:40	865	29.6	1.39

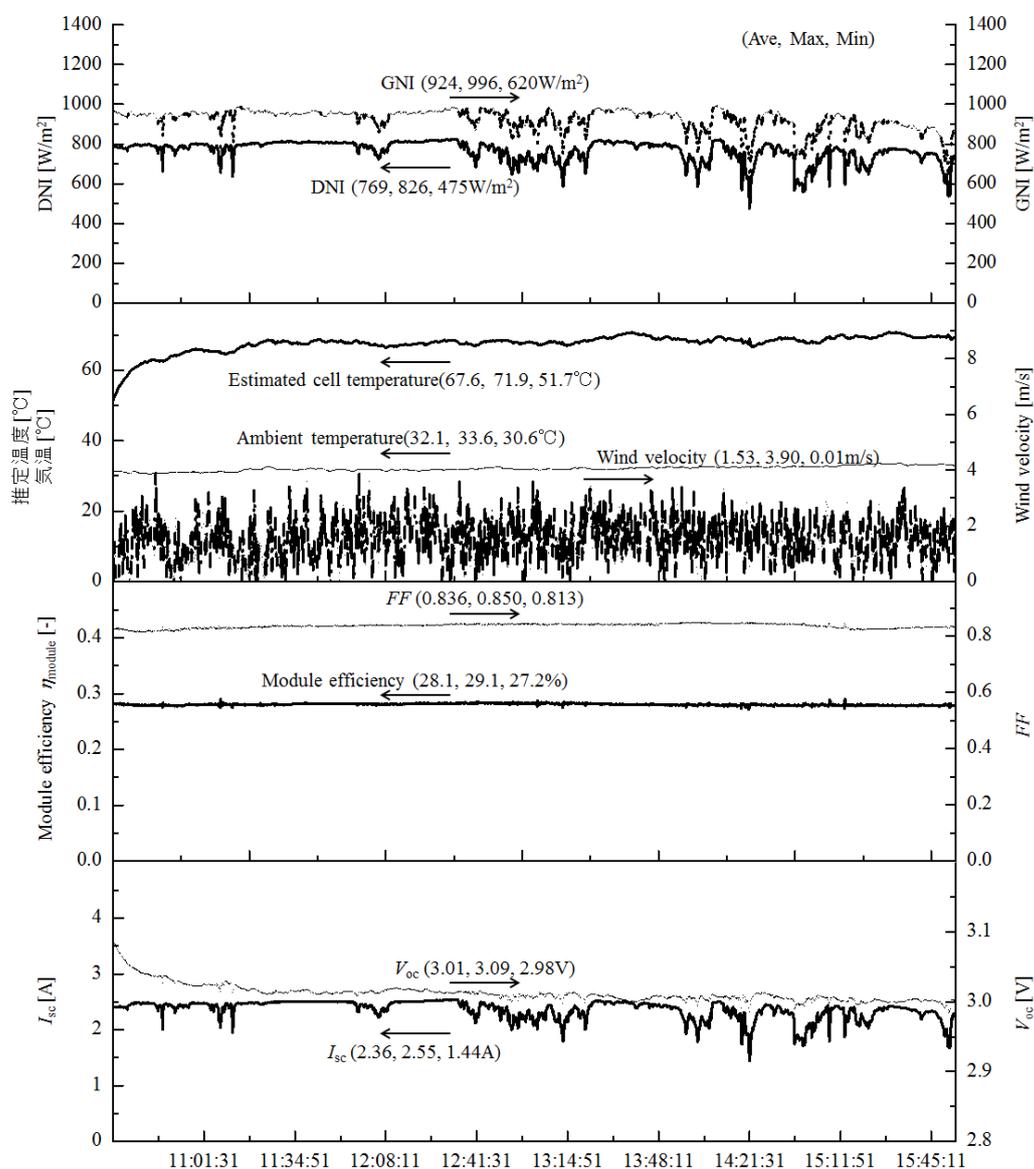


Fig. 4-16 2012年7月26日岡山県玉野市における晴天時の各データの時間変化

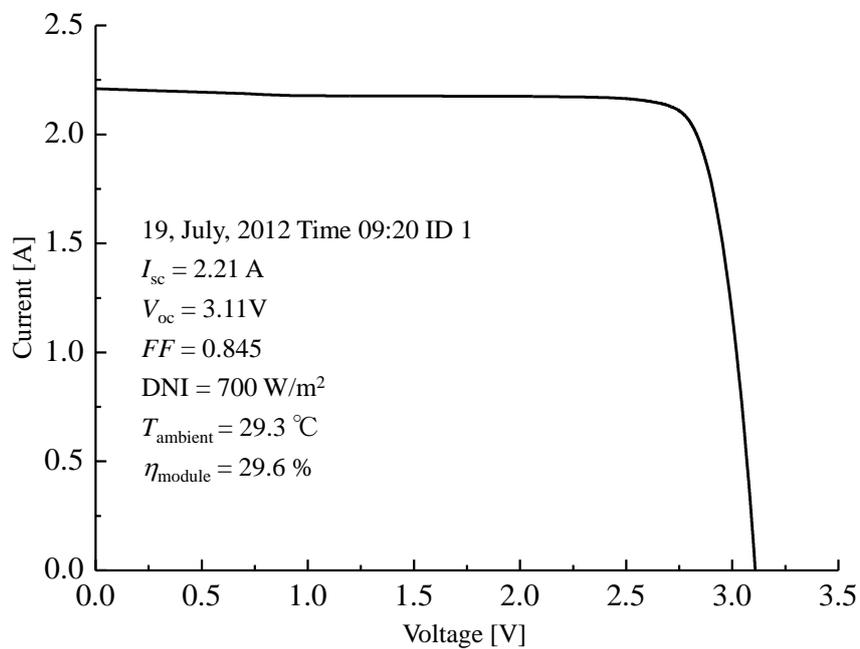


Fig. 4-17 屋外試験で得られた最良 I-V 曲線

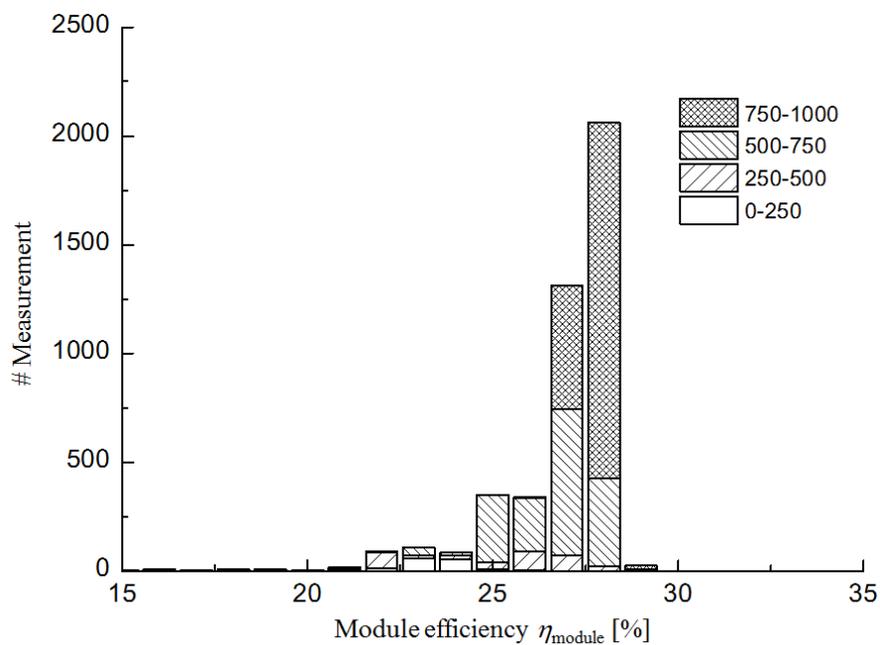
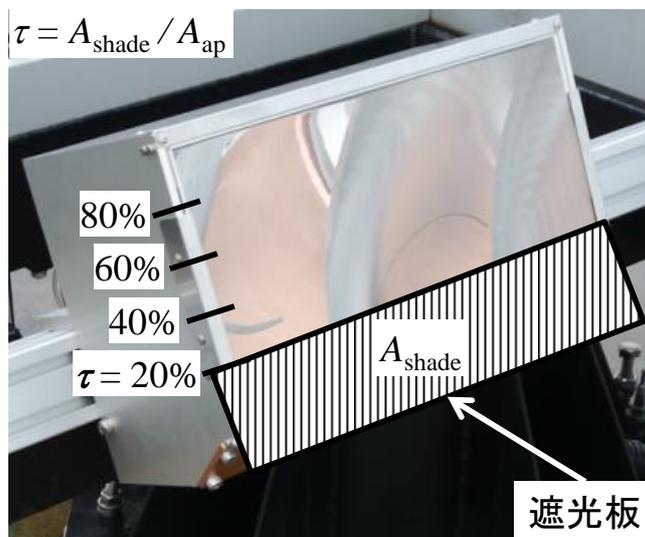
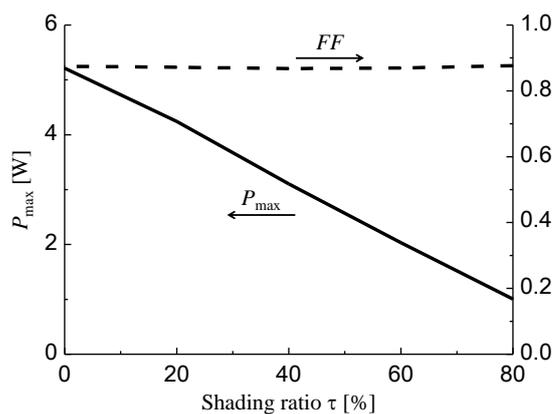


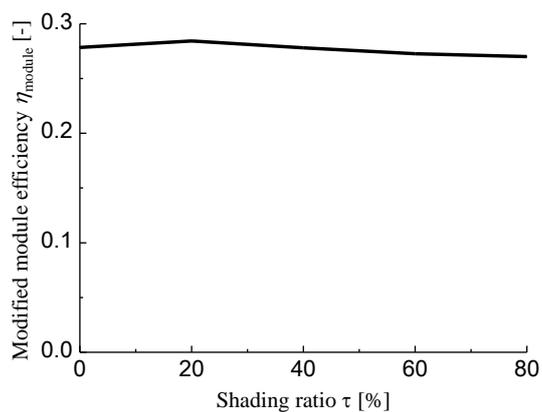
Fig. 4-18 モジュール効率の度数分布



(a) 影面積割合 τ

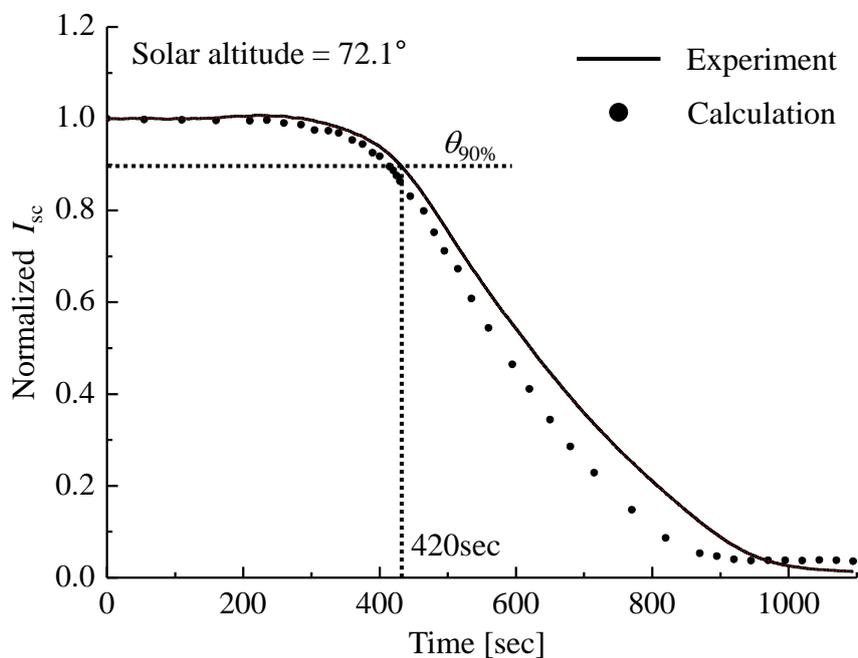


(b) 正規化 P_{max} , FF

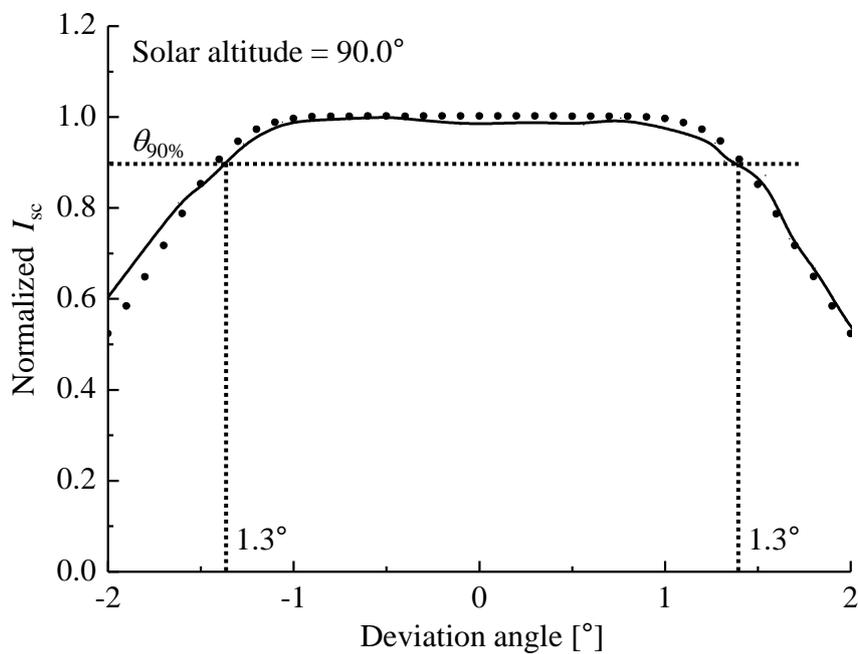


(c) η_{module}

Fig. 4-19 影面積割合 τ の定義およびモジュール性能への影響



(a) 屋外実験



(b) 実内実験

Fig. 4-20 追尾誤差角に対する影響(入射角特性)

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、追尾架台を複数台設置する場合、追尾架台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、追尾架台間隔および追尾架台間隔の設計がペDESTAL方式より容易となる。

Fig. 4-20(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°) に追尾架台を停止させ、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、900sec 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 Fig. 4-20(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。

4.3.4 まとめ

本研究ではカルーセル方式追尾架台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比べて、薄型で許容入射角の大きい集光系が得られた。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 W/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架台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。

以上の成果は、CPV システムの新たな実用形態として本研究で提案・検証したシステムが成り立つ可能性を示している。

4.4 自由曲面設計および伝熱解析による RXI 集光系の性能改善

これまでの CPV で多く採用されているフレネルレンズ集光系はシンプルであり、設計要求に対して現時点において高い実用的性能を有している。しかし、非集光 PV パネルの低価格化に伴い、CPV にもさらなる高性能化と低コスト化が求められており、集光系の生産性（量産性）の向上においてブレークスルーが必要となっている。

上記の要求に対する 1つの解決手段として、最近急速に普及している LED パッケージの大量生産技術を CPV の製造に適用することが考えられる。LED パッケージの製造法として LED チップ基板の上に樹脂レンズを盛りつける方法がある。CPV のセル基板は LED チップ基板と構造が良く似ており、集光系を LED の樹脂レンズに近い形態でセル上に形成できれば LED パッケージの製造技術を流用でき、大幅な低コスト化が期待できる。

そこで高倍率集光が可能で、且つ LED パッケージング技術に適合し得る CPV 集光系の 1つとして RXI 集光系に着目し、新たな形状設計を試みた。RXI 集光系は 1995 年に Miñano らによって提案された集光系であり、高倍率でありながら広い許容入射角を有する集光器として知られているが⁽³¹⁾、PV セルが透明屈折媒体の内部に位置するために実装および放熱が困難であ

ることなどから実用には至っていない。また、自由曲面(Freeform surface)を有するため設計が困難であり、詳細な研究報告が少なく、セル面での照度分布等を明らかにした報告例も著者らの調査範囲において知見しない。

4.4.1 RXI 集光器

Fig. 4-21 のように、設計対象とする RXI 集光器では入射光線が屈折(R)→反射(X)→全反射(I)を経由し、透明媒体中のレシーバ面(ここでは、PV セル面)に収束される⁽³¹⁾。RXI 集光器の形状は自由曲面であり、光線追跡法などにより試行錯誤的に設計することは困難である。SMS 法はマドリッド工科大の Miñano らによって開発された非結像光学系(Non-imaging optics)の設計手法であり、屈折、反射、全反射を組み合わせた自由曲面の設計が可能である。SMS 法を用いた Miñano らによる RXI 集光器の設計例では、 $C_g = 821.5$ に対して許容入射半角 3.0° と高倍率でありながらも大きな許容入射角が得られることが示されている⁽³¹⁾。なお、RXI 集光系は透明媒体の表面に部分的な反射面を有することもこれまで実用化を困難にしてきたが、最近、自動車用 LED 照明分野において類似の光学系が製品化されており、部分的な反射面の付与が技術的に可能になっている⁽¹⁴⁾。

4.4.2 光学解析手法および解析条件

設計した RXI 集光器の光学性能を解析するために 3 次元の光線追跡法を用いた。ただし、透明媒体の屈折率は 1.5 と仮定し、光線が物体中を通過する際に生じる吸収損失、物体表面および内部での拡散は考慮していない。ミラー面の反射率は 1.0(理想反射面)とした。太陽視半径を考慮に入れ、入射角度範囲が $\theta \leq 0.265^\circ$ の光束を受光面に入射させた。

4.4.3 伝熱解析手法および解析条件

光学性能に加え、集光時のセル温度の違いを比較検証するために有限要素法(Finite element method: FEM)による 3 次元伝熱解析を行った。透明材料はアクリル樹脂(PMMA)を想定し、密度 $\rho = 1190 \text{ kg/m}^3$ 、比熱 $c = 1250 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 、熱伝導率 $\kappa = 0.21 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ とした。PV セルについてはゲルマニウムの熱物性値 $\rho = 5324 \text{ kg/m}^3$ 、比熱 $c = 323 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 、熱伝導率 $\kappa = 59.9 \text{ W/(m} \cdot$

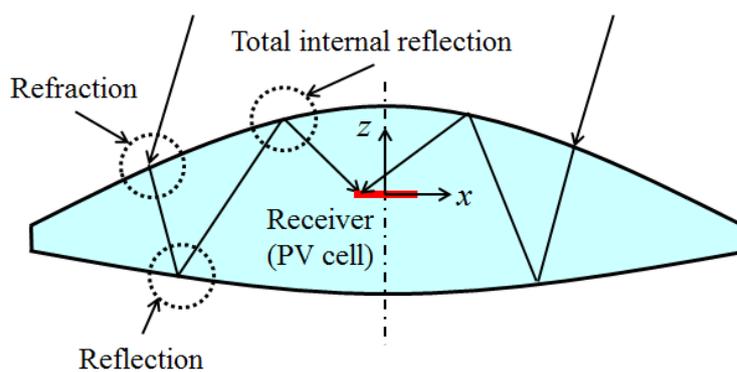


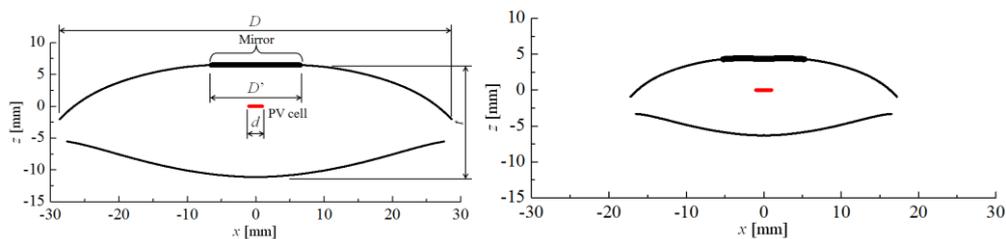
Fig. 4-21 RXI 集光器のコンセプト

K)を与えた。また、入射するエネルギーは受光面において $1000\text{W}/\text{m}^2$ とし、これに受光面積と光線追跡解析によって得られた光学的効率を乗じたエネルギーがセルに入射するものと仮定した。さらにセルの変換効率は 38% とし、セルに入射したエネルギーの 62% が熱になるものとした。集光器表面と周囲空気との対流による熱伝達を想定し(第3種境界条件)、周囲空気温度 25.0°C 、熱伝達率 $10.0\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ を一定として与えた。ただし、セルが集光器端部に位置する場合(後述の Fig. 4-29 の場合)には、セル下面にアルミニウム板が理想的に接着しているものとし、アルミニウム板の空気との境界面には上記と同じ第3種境界条件を与えた。ここで、アルミニウムの物性値は密度 $\rho = 2700\text{ kg}/\text{m}^3$ 、比熱 $c = 900\text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 、熱伝導率 $\kappa = 200\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ とした。

4.4.4 結果および考察

設計結果の一例として、受光面入射角を $\theta_i = 3.0^\circ$ 、 $\theta_i = 5.0^\circ$ に対する RXI 集光器の断面形状を Fig. 4-22(a)(b)に示す。このときの各部寸法を Table 4-4 に示す(単位は mm、ただし、ここでは透明体での内部吸収を考慮していないため、解析結果の寸法依存性は無い)。この断面を中心軸まわりに回転させた 3 次元集光器において PV セルは $d = \phi 2.0$ 、受光面は各々 $D = \phi 57.3$ 、 $\phi 34.4$ の円形である。幾何学的集光倍率は各々 $C_g = 821$ 、 296 である。入射面ミラーは各々 $D' = \phi 13.0$ 、 $\phi 10.5$ の円形となり、受光面面積の 5.1%、9.4% を占める。結果として、光学的効率 $\eta = 89.4\%$ 、 85.4% が得られた。受光面の空気-PMMA 境界面におけるフレネル反射損失と入射面ミラーによる遮蔽損失以外の全ての光線が PV セル面に到達した。入射角特性を Fig. 4-23(a)(b)に示す。受光面入射角 $\theta_i = 3.0^\circ$ 、 $\theta_i = 5.0^\circ$ として設計した RXI 集光器の許容入射角は各々 $\theta_{90\%} = 2.7^\circ$ 、 4.4° となり、設計値の約 0.9 倍となった。設計値よりも低くなる理由は太陽視半径相当の広がりのある光束を入射させているためである。Fig. 4-24(a)(b) に PV セル面上でのエネルギー分布を示す。ここで C_f はエネルギー密度集光比で、受光面における入射光の放射照度に対する PV セル面に入射する光の放射照度の比である。また PV セル面の範囲を点線で示した。PAR が各々 95.2、87.6 となり、エネルギーは PV セル面中央に偏在していることがわかる。定常状態における集光器温度分布を Fig. 4-25(a)(b)に示す。PV セルおよびその近傍の温度が局所

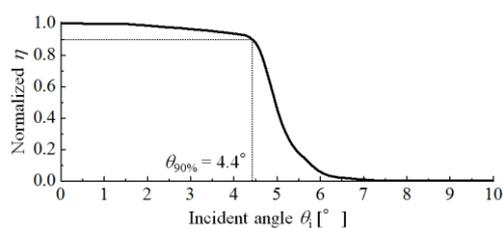
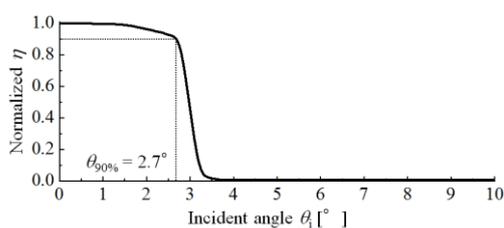
集光型太陽光発電システムの包括的設計解析および試験検証
 第4章 各種 CPV システムの設計解析および試験検証



$\theta_i = 3.0^\circ$

$\theta_i = 5.0^\circ$

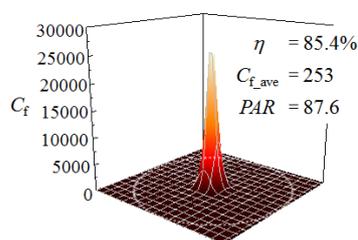
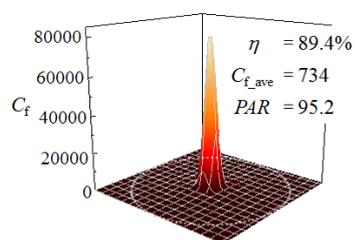
Fig. 4-22 設計した RXI 集光器の断面図



$\theta_i = 3.0^\circ$

$\theta_i = 5.0^\circ$

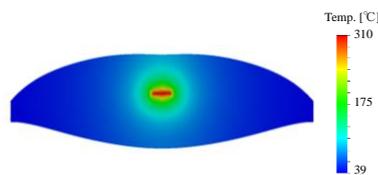
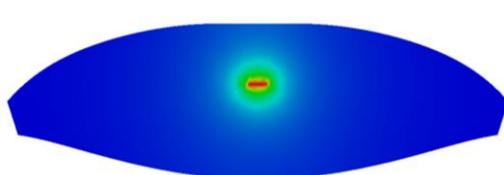
Fig. 4-23 許容入射角特性



$\theta_i = 3.0^\circ$

$\theta_i = 5.0^\circ$

Fig. 4-24 エネルギー分布(PV セル面上でのエネルギー密度集光比 C_f の分布)



$\theta_i = 3.0^\circ$

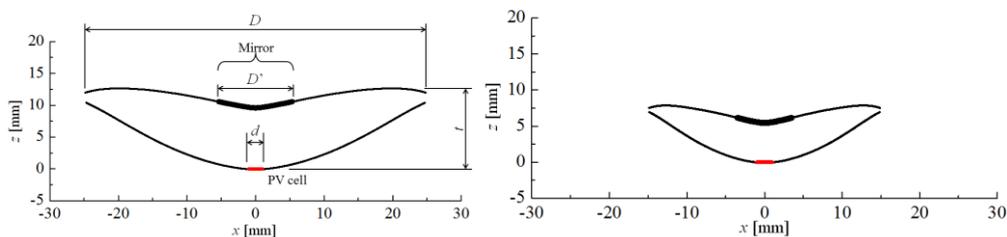
$\theta_i = 5.0^\circ$

Fig. 4-25 集光器内部温度分布

Table 4-4 設計パラメータ

Acceptance angle	θ_i	°	3.0	5.0
PV cell diameter	d	mm	$\phi 2.0$	$\phi 2.0$
Aperture diameter	D	mm	$\phi 57.3$	$\phi 34.4$
Geometrical concentration ratio	C_g		821	296
Mirror diameter	D'	mm	$\phi 13.0$	$\phi 10.5$
Thickness	t	mm	17.6	10.7

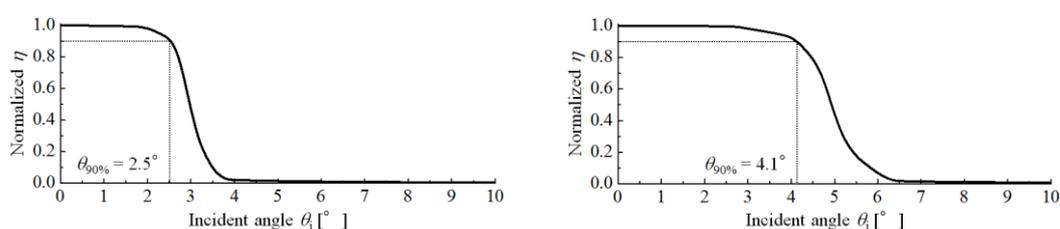
集光型太陽光発電システムの包括的設計解析および試験検証
 第4章 各種 CPV システムの設計解析および試験検証



$\theta_i = 3.0^\circ$

$\theta_i = 5.0^\circ$

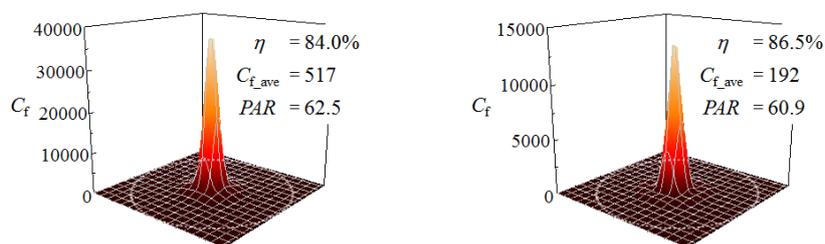
Fig. 4-26 設計した RXI 集光器の断面図



$\theta_i = 3.0^\circ$

$\theta_i = 5.0^\circ$

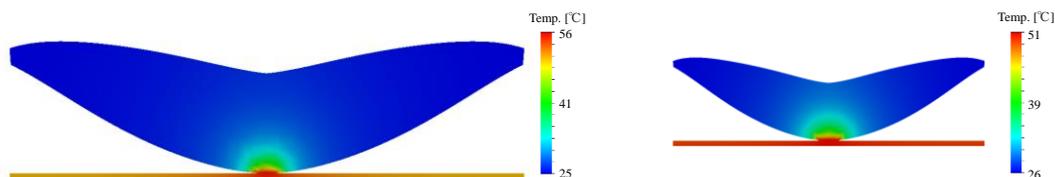
Fig. 4-27 許容入射角特性



$\theta_i = 3.0^\circ$

$\theta_i = 5.0^\circ$

Fig. 4-28 エネルギー分布(PV セル面上でのエネルギー密度集光比 C_f の分布)



$\theta_i = 3.0^\circ$

$\theta_i = 5.0^\circ$

Fig. 4-29 集光器内部温度分布

Table 4-5 設計パラメータ

Acceptance angle	θ_i	°	3.0	5.0
PV cell diameter	d	mm	$\phi 2.0$	$\phi 2.0$
Aperture diameter	D	mm	$\phi 49.6$	$\phi 29.8$
Geometrical concentration ratio	C_g		615	222
Mirror diameter	D'	mm	$\phi 10.7$	$\phi 7.0$
Thickness	t	mm	12.7	7.9

的に高く、 $\theta_i = 3.0^\circ$ 、 $\theta_i = 5.0^\circ$ の最高温度は各々 812°C 、 310°C と非常に高温になった。これは高倍率集光にもかかわらず、PMMAの熱伝導率が低いためにセルから外部に十分な放熱ができないためである。

以上の結果から SMS 法により RXI 集光器が設計できることが確認された。得られた形状は Miñano らが報告している例と類似している。しかし、この形状では集光が局所的で PV セル面照度分布が著しく不均一であり、また、透明媒体内部に PV セルがあるため放熱が困難で、セル温度が高温に達することから実用的ではない。そこで、セル位置を集光器の底端部に変更することを試みた。その方法として手順①で仮定していた $\theta_o = 90.0^\circ$ を $\theta_o = 60.0^\circ$ として再設計を行った。 θ_o を小さくすると PV セル面への入射角範囲が狭くなるように制限され、PV セル位置が集光器に対して相対的に下方に移動しなければこの制限を満足できなくなる(ただし、小さくしすぎると集光器中央部の凹みが大きくなる)。受光面入射角は同じく $\theta_i = 3.0^\circ$ および $\theta_i = 5.0^\circ$ とした。得られた断面形状を Fig. 4-26(a)(b)に示す。このときの各部寸法を Table 4-5 に示す。受光面は各々 $D = \phi 49.6$ 、 $\phi 29.8$ の円形であり、幾何学的集光倍率は $C_g = 615$ 、 222 と前述の設計に比べ約 25%小さくなっている。入射面ミラーは $D' = \phi 10.7$ 、 $\phi 7.0$ となり、受光面面積に対して 4.7%、5.5%を占める。結果として、光学的効率 $\eta = 84.0\%$ 、 86.5% が得られた。入射角特性を Fig. 4-27(a)(b)に示す。 $\theta_i = 3.0^\circ$ 、 $\theta_i = 5.0^\circ$ として設計した RXI 集光器の許容入射角は各々 $\theta_{90\%} = 2.5^\circ$ 、 4.1° となり、設計値の約 0.8 倍となった。Fig. 4-28(a)(b)に PV セル面上でのエネルギー分布を示す。PAR が各々 62.5、60.9 と高く、依然としてエネルギーが PV セル面中央に偏在していることがわかる。定常状態における集光器温度分布を Fig. 4-29(a)(b)に示す。この形状では PV セル面が外部に露出していることから、直径が D と等しい厚さ 0.5mm のアルミニウム板に PV セルを密着させた構成を想定して解析を行った。 $\theta_i = 3.0^\circ$ 、 $\theta_i = 5.0^\circ$ の最高温度を見ると各々 56°C 、 51°C と前述の設計に比べて大幅にセルから集光器外部に放熱できていることがわかる。

放熱の問題は解決できたが、この集光器形状においても依然として PV セル面中央にエネルギーの偏在が生じている。これを解決するため、この形状にホモジナイザーを付与することによりエネルギー分布の均一化を試みた。ホモジナイザー材料は集光器と同じ PMMA、側面はミラー面とし、集光器

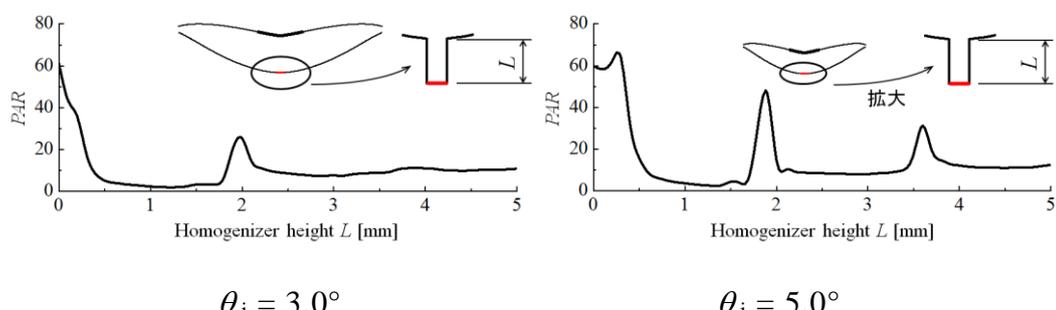


Fig. 4-30 設計した RXI 集光器の断面図

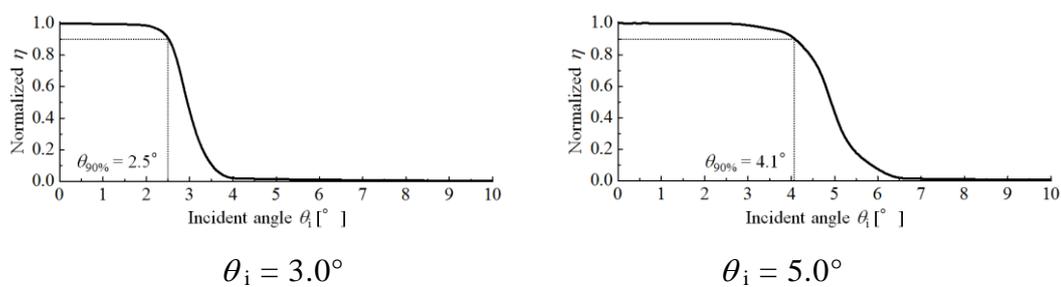


Fig. 4-31 許容入射角特性

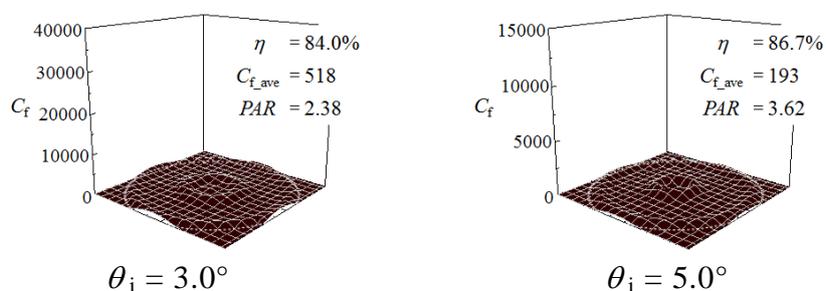


Fig. 4-32 エネルギー分布(PV セル面上でのエネルギー密度集光比 C_f の分布)

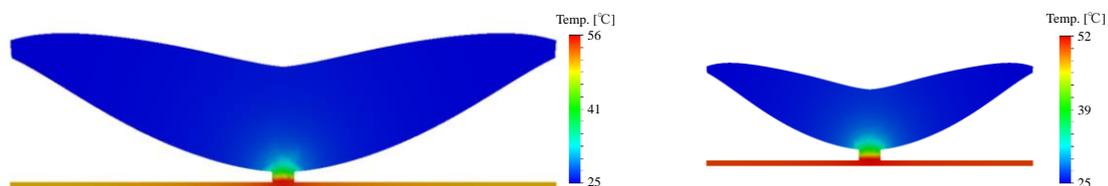


Fig. 4-33 集光器内部温度分布

と PV セルを結合する部分に円柱状に挿入した。Fig. 4-30(a)(b)にホモジナイザの高さと PAR の関係を示す(光線追跡結果)。 $\theta_i = 3.0^\circ$ 、 $\theta_i = 5.0^\circ$ 共にホモジナイザの高さが 1.0 付近で PAR が 2.73~4.16 と最も低く最良であることがわかる。ホモジナイザ高さ 1.0 における入射角特性を Fig. 4-31(a)(b)に、エネルギー分布を Fig. 4-32(a)(b)に、定常状態における集光器温度分布を Fig. 4-33(a)(b)に示す。ホモジナイザにより PAR は 2.38, 3.62 となり(ホモジナイザ無しの約 1/26, 1/17 に低減)、PV セル面上の照度分布が大幅に均一化されたことがわかる。また、許容入射角は各々 $\theta_{90\%} = 2.5^\circ$, 4.1° 、光学的効率 $\eta = 84.0\%$, 86.5% となり、ホモジナイザの有無による変化みられない。さらに、 $\theta_i = 3.0^\circ$ 、 $\theta_i = 5.0^\circ$ の最高温度は各々 56°C 、 52°C となり、温度分布においてもホモジナイザの有無による大きな変化はみられない。

以上の光学解析では PMMA の屈折率の波長分散と内部吸収を無視していたが、ホモジナイザ付きの最終形状に対して、これらを考慮したフルスペクトル解析を行った結果、垂直入射時の光学的効率は $\eta = 71.7\%$ 、 76.8% となり、前述の値に比べ低下した。このとき、セル面照度分布傾向への変化はなかった。光学的効率の低下要因は内部吸収損失であることがわかったため、セル直径を 2mm から 0.2mm に変更し、集光系全体を 1/10 に縮小して同様の解析を行った結果、光学的効率は $\eta = 81.0\%$ 、 84.7% となった。これより、本形状を実用的にするためにはセルサイズを従来よりも小さくする必要がある。LED チップサイズは 1mm 未満が多く、同程度のセルを採用すれば LED パッケージ製造技術の適用可能性も高まると考えられる。ただし、反射面の反射率は十分に高くなければならない。

以上より、最終的に得られた RXI 集光器は比較的高い光学性能を有しつつ、PV セルサイズに対する集光器全高が従来のフレネルレンズ集光系に比べて大幅に薄いため、本集光器を用いた CPV モジュールの製造に LED パッケージ製造技術を適用できる可能性が高い。とくに PV セルサイズを LED チップと同程度に小さくできれば、透過体の内部吸収損失も低下し、実現可能性が高くなる。

4.4.5 まとめ

本研究では、CPV の高性能化と低コスト化を目指し、自由曲面を有する RXI 集光器について設計、光学および伝熱解析を行い、以下の知見を得た。

- 1) SMS 法の自作コードを用いて自由曲面を有する RXI 集光器を設計できることを確認した。RXI 集光器は全高が薄く、セル面上に直接形成できるため、LED パッケージの低コスト製造技術を適用できる可能性が高い。
- 2) 光学解析と伝熱解析の結果より、幾何学的集光倍率が 821 および 296 の従来型 RXI 集光器は、光学的効率が各々 89.4%、85.4%、許容入射角が各々 2.7° 、 4.4° となり、高性能を示した。しかし、放熱が困難な形状であるため、PV セル近傍温度が各々 812°C 、 310°C と非常に高温になることが明らかとなった。また、集光がピンスポットの的であり、セル面照度分布は著しく不均一であることがわかった。
- 3) 上記の放熱対策として PV セルを底端部に移動した RXI 集光器を設計解析した結果、これを満たす新たな集光器形状を設計することができた。PV セル面の下部にアルミニウム板を密着設置した条件で伝熱解析を行ったところ、PV セル近傍温度が 56°C 、 51°C まで低下し、大幅な放熱性能の向上が得られた。このときの幾何学的集光倍率は各々 615、222、光学的効率は各々 84.0%、86.5%、許容入射角は 2.5° 、 4.1° となり、高いレベルを維持できた。しかし、依然としてセル面照度分布は著しく不均一となった。
- 4) 上記のセル面照度分布の均一化を狙い、RXI 集光器とセルとの接合部に円柱状のホモジナイザーを挿入して解析したところ、大幅な均一化が図られた。このとき、光学的効率と許容入射角への悪影響はみられなかった。

以上のように、LED パッケージングテクノロジーの大量生産技術を適用できる CPV システムの集光系を提案・検証し、低コスト化の可能性を示した。

4.5 まとめ

本章では CPV の技術課題に対して多角的なアプローチで解決策を提示したが、いずれの場合においても、日本などの非サンベルト地域における単位敷地面積当たりの発電量は、従来の固定非集光型太陽電池システムと同レベルであり、優位性は大きくない。この問題を抜本的に解決するためには 2～3 章で述べた散乱光活用型コンセプトの導入が必要である。

5 結論

本研究では、次世代の太陽光発電技術として期待されている集光型太陽光発電(CPV)に着目し、複数の技術課題の克服を目的として研究を行った。とくに従来 CPV の技術課題（1章の④～⑤）に対して、セル・モジュール設計の段階からシステムレベルの発電量予想まで行う包括的な設計プロセスの確立を目指した。また、新規のアイデアである散乱光活用型集光型太陽光発電(CPV+)システムに包括的設計手法を適用し、複数の実証用モジュールを試作して優位性の検証を行った。得られた知見を以下に記す。

1. 散乱光活用型 CPV モジュールの概念を新たに提案し、優位性の理論予測と複数の試作モジュールによる実験検証を行った。散乱光を全く活用できない従来 CPV モジュールに対する発電量の増加割合は、試作モジュールで理論予測と良く一致した。
2. 散乱光活用型 CPV モジュールでは、散乱光から得られる発電電力は散乱比が 0.30 ~ 0.60 の条件 でピークが得られた。この散乱比は世界の大多数の都市における日射条件に適合している。したがって、散乱光活用型 CPV は直達光だけでなく散乱光をも有効活用できる集光形態であり、日本などの非サンベルト地域において最大の発電量が得られる太陽光発電システムである。
3. 従来 CPV モジュールに対する Air gapless lens 両面受光タイプの発電量の増加割合は、モジュール裏面から入射する日射を考慮した修正理論曲線 f とよく一致した。地面や壁面等の下方からの反射日射が大きい条件下（太陽光反射率 0.5 以上）では、Siセルの発電量は片面受光タイプと比較して、+134~198%の発電量増加が見込める。
4. 光学設計解析，熱解析，電気解析，追尾誤差解析，影ロス解析を組み合わせることで、セルーモジュールレベルの設計段階からシステム全体の発電量推定を行った。追尾架台間隔を東西および南北方向にピッチ 1.5

(モジュールアレイサイズを1とする)で配置することで固定非集光型PVシステムに比べ2.1倍の発電量が得られると予想された。つまり、散乱光活用型CPVは、将来、限られた設置面積で発電量を最大限確保したい場合に有望な技術である。

上記の散乱光活用型の研究に先立って取り組んだ、従来CPVの技術課題(1章の①～③)に対してブレークスルーを目指し改善を試みた結果、以下の知見を得た。

5. 新規機能性材料である負の屈折率材料をCPVの集光レンズ材料に用いることで、レンズ高さを約半分、許容入射角を約1.8倍にでき、さらに、レンズ材料の屈折率の波長分散による光学的効率の低下を抑制できる。しかし、PVセル面における照度分布は不均一のままであり、照度分布の均一性向上には従来通り2次集光系が必要である。つまり、負の屈折率材料が安価で汎用的な材料として実用化された場合には、本研究成果の適用による集光性能の向上が期待できる。
6. Off-axis ミラー集光系とカルーセル方式追尾架台を組み合わせた新規CPVシステムの試験検証により、集光倍率が同程度のレンズ集光系に較べて、より薄型で、より許容入射角の大きい集光器を実現できた。これより、本新規CPVシステムは平坦な屋上面などに設置しやすいロープロファイルのCPVシステムである。また、カルーセル方式追尾架台で生じるモジュール同士の影の影響を模擬した屋外試験を行い、開口部における影面積の割合に比例して発電量が減少することが明らかとなった。つまり、従来のペDESTAL方式追尾架台よりもモジュール同士の設置間隔の設計が比較的容易であり、CPVシステムの新たな実用形態として本研究で提案・検証したシステムが成り立つ可能性を示した。
7. LED パッケージング技術を適用しやすく、高性能な集光器として、自由曲面を持つRXI集光器の設計解析を行った。PVセルの放熱対策としてPVセルを集光器の底端部に設置し、また、セル面照度分布の均一化を狙い、集光器とセルとの接合部に円柱状のホモジナイザーを挿入する

ことで、光学的効率、許容入射角、放熱性、およびセル面照度分布の均一性の全てが高い高性能集光器の設計ができた。つまり、LED パッケージング技術の大量生産技術を適用できる CPV システムを提案・検証し、低コスト化の可能性を示した。

8. CPV の技術課題に対して多角的なアプローチで解決策を提示したが、いずれの場合においても、日本などの非サンベルト地域における単位敷地面積当たりの発電量は、従来の固定非集光型太陽電池システムと同レベルであり、優位性は大きくない。この問題を抜本的に解決するためには 2～3 章で述べた散乱光活用型コンセプトの導入が必要である。

参考文献

- (1) 斉藤武雄, ヒートアイランド 灼熱化する巨大都市, 講談社(1997), pp.140-178
- (2) 環境省ホームページ, 低炭素社会づくり行動計画
https://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=11912&hou_id=10025
- (3) 環境省ホームページ, 地球温暖化対策基本法案の閣議決定
<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=12257>
- (4) EPIA, Global Market Outlook for Photovoltaics until 2015, (2011), pp.17-42.
- (5) National Renewable Energy Laboratory(NREL) ホームページ, Best Research-Cell Efficiencies.
<http://www.nrel.gov/>
- (6) Martin A. Green, Keith Emery, Yoshihiro Hishikawa, Wilhelm Warta and Ewan D. Dunlop, Solar cell efficiency tables (version 44), Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol. 22, (2014), pp. 701-710
- (7) S. Kurtz, D. Myers, W. E. McMahon, J. Geisz and M. Steiner, “A Comparison of Theoretical Efficiencies of Multi-junction Concentrator Solar Cells”, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol.16(2008), pp.537-546.
- (8) F. Dimroth, M. Grave, P. Beutel, U. Fiedeler, C. Karcher, T. N. D. Tibbits, E. Oliva, G. Siefert, M. Schachtner, A. Wekkeli, A. W. Bett, R. Krause, M. Piccin, N. Blanc, C. Drazek, E. Guiot, B. Ghyselen, T. Salvetat, A. Tauzin, T. Signamarcheix, A. Dobrich, T. Hannappel and K. Schwarzburg, “Wafer bonded four-junction GaInP/GaAs//GaInAsP/GaInAs concentrator solar cells with 44.7% efficiency”, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol.22(2014), pp.277-282.
- (9) Kenji Araki, Taizo Yano and Yoshio Kuroda, 30 kW Concentrator Photovoltaic System Using Dome-shaped Fresnel Lenses, Optics Express, Vol. 18, (2010), A53-A63.
- (10) A. Marti, A. Luque, “Next Generation Photovoltaics: High Efficiency through Full Spectrum Utilization” ,Taylor & Francis (2004), pp.50-63.
- (11) N. Yamada, K. Okamoto, “Experimental measurements of a prototype high

参考文献

- concentration Fresnel lens CPV module for the harvesting of diffuse solar radiation”, *Opt. Express* 22, S1 (2014), pp. A28-34.
- (12) Demographia HP, Demographia world urban areas
<http://www.demographia.com/>
- (13) R. Leutz, A. Suzuki, “Nonimaging Fresnel Lenses: Design and Performance of Solar Concentrators”, Springer (2001), pp.15-33
- (14) J. Chaves, “Introduction to Nonimaging Optics”, Taylor & Francis (2008), pp.271-360
- (15) 玄光男, 林林, ” ネットワークモデルと多目的 GA” , 共立出版 (2008), pp.1-46
- (16) 熱物性ハンドブック編集委員会, “熱物性ハンドブック”, 養賢堂 (2000), pp.23
- (17) R. Herrero, M. Victoria, C. Domínguez, S. Askins, I. Antón and G. Sala, “Concentration photovoltaic optical system irradiance distribution measurements and its effect on multi-junction solar cells”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Vol.20(2012), pp.423-430.
- (18) A. Marti, A. Luque, "Next Generation Photovoltaics: High Efficiency through Full Spectrum Utilization" ,Taylor & Francis (2004), pp.108-139.
- (19) 大規模太陽光発電システム導入の手引書・検討支援ツール, STEP-PV Simulator ver1.0
<http://www.nedo.go.jp/library/mega-solar.html>
- (20) D. Buie, A. G. Monger, C. J. Dey, “Sunshape distributions for terrestrial solar simulations”, *Solar Energy*, 74 (2002), 113-122.
- (21) V.G.Veselago, ” The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ”, *Soviet Physics Uspekhs*, Vol.10(1968), pp.509-514.
- (22) R.W. Ziolkowski, “Pulsed and CW Gaussian beam interactions with double negative metamaterial slabs”, *Optics Express*, Vol.11(2003), pp.662-681.
- (23) J. Valentine, S. Zhang, T. Zentgraf, E. Ulin-Avila, D. A. Genov, G. Bartal and X. Zhang, “Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index”, *Nature*, Vol.455(2008), pp.376-379.
- (24) M.Rajput, R.K.Sinha, “All-angle negative refraction for visible light from

参考文献

- left-handed metallo-dielectric photonic crystal: theoretical and numerical demonstration with nanophotonic device application”, *Applied Physics B*, Vol.98(2010), pp.99-106.
- (25) M.Notomi, “Theory of light propagation in strongly modulated photonic crystals:Refractionlike behavior in the vicinity of the photonic band gap”, *Physical Review B*, Vol.62(2000), pp.10696-10705.
- (26) M.Victoria, C.Domínguez, I.Antón and G.Sala, “Comparative analysis of different secondary optical elements for aspheric primary lenses”, *Optics Express*, Vol.17(2009), pp.6487-6492.
- (27) W. Gerhard, “High concentration photovoltaics - State-of-the-art and novel concepts”, *Proc. of WCPEC-3*, 2003, pp.2841-2844, Osaka
- (28) J. Jaus1, A.W. Bett, H. Reinecke and E.R. Weber, “Reflective secondary optical elements for Fresnel lens based concentrator modules”, *Prog. Photovolt: Res. Appl.* Vol.19(2011), pp.580–590
- (29) M. Victoria, C. Dominguez, I. Antón and G. Sala, “Comparative analysis of different secondary optical elements for aspheric primary lenses”, *Optics Express*, Vol.17(2009), pp.6487-6492
- (30) 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, *太陽エネルギー*, Vol.38, No.4(2012), pp.39-46
- (31) J. C. Miñano, J. C. González and P. Benitez, “A high-gain, compact, nonimaging concentrator- RXI”, *Applied Optics*, Vol.34, No.34 (1995), pp.7850-7856

謝辞

謝辞

本研究を進めるにあたり,お世話になった教職員の方々に感謝申し上げます. 指導教員である山田昇准教授には,終始にわたる懇切丁寧なご指導,ご教授を賜り,心より感謝申し上げます. また,博士論文審査委員を務めて頂いた青木和夫教授,伊藤義郎教授,明田川正人教授,田中久仁彦准教授に心から御礼申し上げます.

また,本研究の一部はJSPS 科研費 26289373 の助成事業,独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託事業(太陽光発電システム次世代高性能技術の開発)として行われました. 共同研究をしていただいた塩原利夫様,深澤博之様,土橋和夫様,後藤渉様,ドアンバンタン様をはじめとした信越化学工業(株)の皆様方,大橋弘隆様,前村敏彦様,川口隆様,鈴木隆男様,太田垣賢志様をはじめとした三井造船(株)の皆様方,高橋弘様,西村啓道様をはじめとした岡本硝子(株)の皆様方に厚くお礼申し上げます.

日々の研究室での学生生活では本研究室博士後期課程年の居城俊和さん,博士後期課程二年アテア ラジさん,修士課程二年の河本修平さん,中西寛弥さん,馬場将亮さん,吉田貴則さん,修士課程一年の平井大貴さん,佐藤大輔さん,多田恭一朗さん,門脇望さん,ならびに学部生に大変お世話になりました. また,光チームとしていろいろな面でサポートして頂いた居城俊和さん,河本修平さん,平井大貴さんにはさらに深く感謝の意を表します.

最後に山田研究室の皆さんと過ごした7年間は大変有意義なものでした. 感謝の意を表し,謝辞とさせていただきます. ありがとうございました.