

二次元複合楕円レンズ付き太陽電池セルの 出力特性に与える集光分布の影響

Effect of Concentration Distribution on Output Characteristics of Solar
Celles with a Two-Dimensional Compound Elliptic Lens

吉 岡 一 也
Kazuya YOSHIOKA

胡 間 修 二
Shuji GOMA

齊 藤 忠
Tadashi SAITOH

Abstract

This paper presents the effect of concentration distribution of solar cells with a static concentrator. The study was carried out for solar cells with a low concentrator lens proposed by the authors for cost reduction of PV modules. Firstly, the concentration distribution was calculated at various light incidence angles by computer simulation using the ray-tracing method and measured after attaching a photodiode array to the lens. Good agreement was obtained between the simulated and measured results. Based on these results, fill factors (FF) of two kinds of solar cells with different series resistance (R_s) were calculated at various light incidence angles by dividing these cells into equivalent circuits of 20 segments. Cell 1 has a series resistance of $0.239 \Omega \cdot \text{cm}^2$ and cell 2 of $0.857 \Omega \cdot \text{cm}^2$. I-V curves were measured for these two cells to calculate the FF. Good agreement was also obtained between calculated and measured FF results. The FF of the cell 2 decreased with light incidence angle to the half-acceptance angle. This is due to the non-uniform concentration distribution. On the other hand, the FF of the cell 1 was not affected by non-uniform concentration distribution due to low R_s value.

Key words : Concentration Distribution, Static Concentrator, Series Resistance, Fill Factor

1. 緒言

21世紀に向けて太陽光発電の民間住宅への本格的普及導入政策が始まり、その動きと相まって太陽電池の年間生産量は着実に増加の一途をたどっている。

現在の太陽電池市場は高効率、高信頼性、安全性などの点から圧倒的に結晶Si系によって占められており、更に一層の効率向上とコスト低減が望まれているが⁽¹⁾、結晶Si系太陽電池の需要の拡大とともに近い将来Si原料の供給に問題が生ずる可能性がある。このような背景もあって最近では建材一体型モジュールの研究開発も始められ、コスト低減のための研究開発が活発となりつつある。

著者らは数年前モジュールコスト低減のため日本の気象条件に見合った非追尾型の低集光レンズ方式の集光モジュールを提案した⁽²⁾。集光することで従来の平板モジュールよりも少ない太陽電池素子でモジュールを製造することができ、その結果として、低コスト化への可能性が期待できる。また、この方式は太陽を追尾しない固定設置で使うことができるため、将来は建材一体型モジュールとしての応用も充分期待できる。

これまで、太陽電池の短絡電流が光入射密度にほぼ比例するという考えから光学的集光比をあげることに重点をおいて研究開発を行ってきた^{(3)~(5)}。しかし、太陽電池の最大出力電力は短絡電流のみならず曲線因子(FF)にも依存する。低集光方式では、固定設置で使われるのが一般的であるから、光入射角度も時々刻々変わり、それ故に太陽電池上にそれぞれ違った集光分布が生ずる。近年、数件の低集光型太陽電池の研究例があるが^{(6),(7)}いずれも集光分布およびそれがモジュール出力に与える影響については触れていない。しかしなが

ら、モジュールの最適な設計を行うためには集光分布の影響について評価を行い、使用する太陽電池セルについても設計を行う必要がある。

本報告では、最初に低集光方式用の二次元複合楕円レンズの集光分布についてレイトレーシング法⁽⁸⁾を用いて計算するとともに、フォトダイオードアレイを実際の試作レンズの下に置いてソーラーシミュレータ下で行われた実験結果について述べる。

次に、1枚の太陽電池セルを20個に分割した等価回路を考え、先に計算した各光入射角度毎の集光分布に基づいてI-V特性を計算し、FFを求める。また、実際のレンズに太陽電池セルを貼り付け、ソーラーシミュレータ下でのI-V特性を測定してFFを求め、計算値と比較し検討する。

2. 二次元複合楕円レンズ

(1) 設計原理

図1は二次元レンズを設計する際の概念図である。このレンズは非結像集光器を設計する際によく用いられているEdge Ray Principle⁽⁹⁾という原理を利用して設計された。図1に示すように許容入射半角 $\theta_{\max}$ で入射

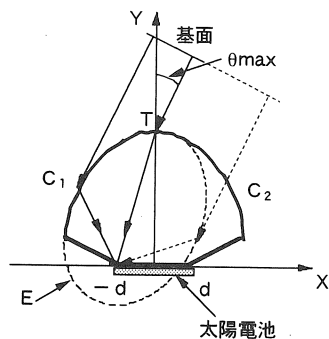


図1 二次元複合楕円レンズの設計概念図

する平行光線が屈折率 n であるレンズ材料を通り集光部の端部 $-d$ で結像するように、すべての光線に対して基面から $-d$ までの光路長が一定となるようにすれば、Eで示される楕円が得られる。実際のレンズはこの楕円の一部 C_1 を用い、更にそれを右側に折り返した形状 C_2 を組み合わせるものとする。それ故に、このレンズを二次元複合楕円レンズと称した。屈折面のターミネーション位置は屈折面上での接線の傾きがY軸と平行となる位置とした。

(2) 二次元複合楕円レンズの特徴

このレンズは図1を断面としたカマボコのような形状になる。したがって、屈折断面方向の成分についてのみ集光を行う。二次元と言われる所以はこのような

理由からである。通常、二次元の太陽電池用集光器は秋分時の南中時における太陽の高度から夏至および冬至までの高度差を考慮し、それに基づいて許容入射半角が決定される。したがって、本レンズを用いた太陽電池モジュールはレンズ断面が東西方向を向きレンズ頭頂部が天の赤道方向を向く設置を想定したものとなっている。

非結像光学の理論⁽¹⁰⁾によると、二次元集光器の開口部に対して垂直（真上）入射する際の開口部幅と集光部幅の比として定義される幾何学的集光比 C_g は許容入射半角に依存し、

$$C_g = \frac{n}{\sin(\theta_{\max})} \quad (1)$$

となる。この式からも分かるように幾何学的集光比は許容入射半角の正弦値に反比例し、また太陽も天球上の限られた範囲内で常に移動するため、許容入射半角の最適化は非常に大事である。このレンズに対してシミュレーションによって許容入射半角と光学特性の関係について調べたところ、許容入射半角 26° において年間の光学的集光比の平均値が1.75と最も高い値が得られた⁽¹¹⁾。しかしながら、集光分布がモジュール出力特性について与える影響についての検討は行っていない。

3. レンズの集光分布特性

3.1 シミュレーションによる集光分布

文献(11)のシミュレーション結果を検証するため、許容入射半角が 20° 、 25° 、 30° と3種類の異なるレンズを既に試作してある。そこで、この3種類のレンズをモデルとして計算を行った。本レンズは二次元集光器であるため、集光部を断面上で20等分のセグメントに分割しそれぞれのセグメント上に集光される光強度を計算した。

シミュレーションモデルは図2の(a)、(b)に示した2種類の光学モデルについて考える。(a)は実際の集光セルに近いモデルであり平らなSi上に TiO_2 の反射防止膜が施された単結晶Si太陽電池を想定している。実際のセルでは表面がテクスチャ構造となっている点異なるが、テクスチャ構造内での光線追跡が困難であることを理由としてこのようなモデルとした。

一方、(b)のモデルについては後節で述べるように、フォトダイオードアレイを使った集光分布の測定モデルに合わせた光学モデルとなっている。レンズは実験に用いられるもの（いずれも集光部幅2cm、長さが20cmの亚克力製）を仮定する。

集光分布の計算に先だって、これらのレンズにある入射角度の光線が照射していると、レンズ集光部ま

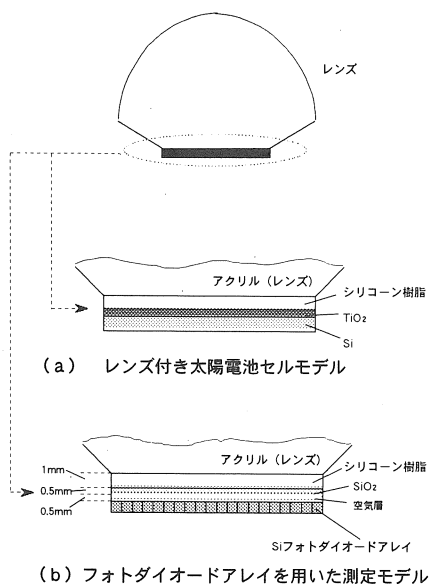
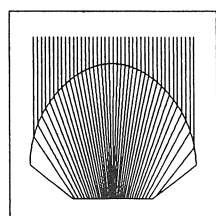
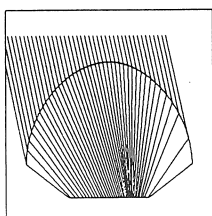


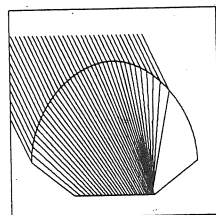
図2 レンズの集光分布シミュレーションモデル



(a) 0° 入射時



(b) 12.5° 入射時



(c) 25° 入射時

図3 許容入射半角25°のレンズに対するレイトレーシング図

での光の軌跡をレイトレーシング法を用いて調べた。このシミュレーションで取り上げる光入射角度はレンズ断面に平行な平面内のみ入射角度を変えてゆき、断面に垂直な方向には角度0°一定とする。計算方法は簡単で、ある入射角度を持った平行光の基面を定め、その基面に沿って等間隔の光線がレンズに入射してゆき、それぞれがスネルの屈折法則に従って集光部のどの位置に到達するかを計算すればよい。

例として、許容入射半角25°のレンズに対して0、12.5、25°の平行光が入射した場合のレイトレーシング図を図3の(a)～(c)に示す。これらの図を見れば、0°入射の時は中央付近が最も光強度が強く、光入射角度の増加とともに光強度のピークをとる場所が集光部の端の方向に移動し、そして許容入射半角では集光部の端が光強度のピークとなる様子が分かる。

先に示したレイトレーシングの考え方を用いれば、空気中での平行入射光の光線密度に対するレンズ集光部の各セグメントでの光線密度が分かる。しかしながら、各光線は、空気→レンズ(アクリル)→シリコン→セルあるいはフォトダイオード、という具合に屈折率の異なる媒体間を通る度に光学ロスを生ずるため、集光部に達するまでの光学効率を各光線に乗じて集光部での光強度分布を計算する。光学効率についてはフレネルの式を使うことで計算できる。

以上を基にして、許容入射半角20、25、30°のそれぞれのレンズに対していくつかの光入射角度における集光分布を計算した。図2の(a)モデルについて計算した結果を図4～図6に示す。図2の(b)モデルについて計算した結果については便宜上、次節の実測値と対比して説明することとする。

図4、図5、図6いずれも0°入射においては中央に集光強度のピークが存在することが分かる。光入射角度の増大とともに集光強度のピークが光が入射してくる方向とは逆方向に移動してゆき、また、そのピークも徐々に高くなってゆき、許容入射半角と等しくなったとき集光部の端に強く集光されることが分かる。集光分布の不均一性も0°から許容入射半角に近づくにつれて増加しているのは明らかである。

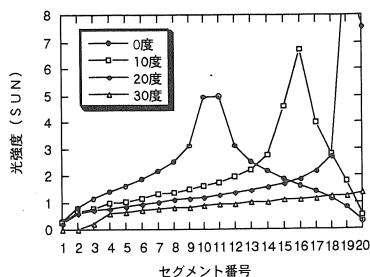


図4 1(sun)の平行光が許容入射半角20°のレンズに入射することを仮定して図2の(a)モデルで計算した集光部での光強度分布

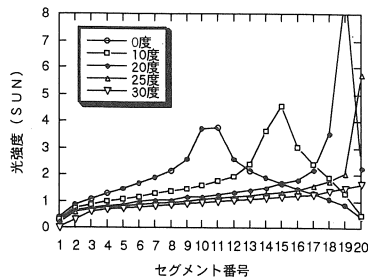


図5 1(sun)の平行光が許容入射半角 25° のレンズに入射することを仮定して図2の(a)モデルで計算した集光部での光強度分布

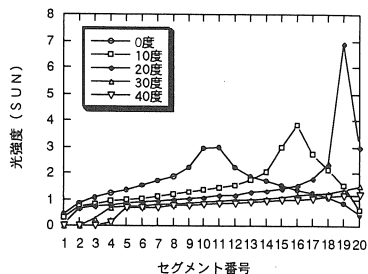


図6 1(sun)の平行光が許容入射半角 30° のレンズに入射することを仮定して図2の(a)モデルで計算した集光部での光強度分布

3.2 集光分布の測定

Siフォトダイオードアレイを用いて二次元レンズの集光分布の測定を行った。実験で用いたレンズはいずれもアクリル製で集光部幅を2cmとして製作した。一方、測定に用いたSiフォトダイオードアレイは1mm幅のダイオードが隙間なく35個並んでいるものであった。

測定モデルは前節の図2(b)に示した通りで、なるべく(a)に近い形のモデルとしたため、集光部とフォトダイオードアレイの空隙をシリコン樹脂で充填した。しかし、実際にはフォトダイオードアレイは石英ガラス(SiO_2)からなる受光窓があり、その下部にはわずかな空気層が存在するため、図2(a)のモデルとは多少異なってしまった。フォトダイオードは1mmピッチであったため集光部をちょうど20分割できることとなる。フォトダイオードの短絡電流が光強度に比例することを確認するため、集光分布の測定に用いる20個のフォトダイオードについて光強度と短絡電流の関係とを測定した。測定の結果、20個のフォトダイオードには特性上のばらつきがほとんどなかったため、その平均値をとったものを図7に示した。確かに光強度と短絡電流とが直線関係となっているのが分かる。この図からわかるように、入射光強度 $90\text{mW}/\text{cm}^2$ 以内で直線性が保たれることから最も集光されるセグメントにおいても $90\text{mW}/\text{cm}^2$ を越えないように入射光強度を $5\text{mW}/\text{cm}^2$ とした。

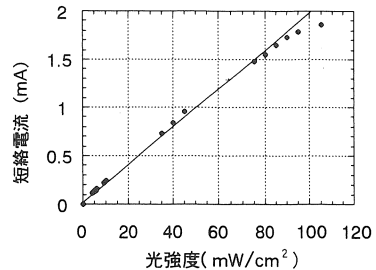
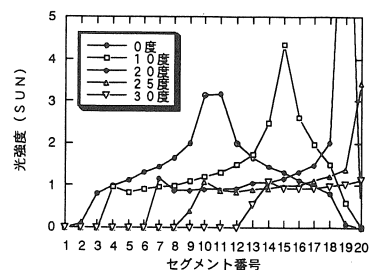


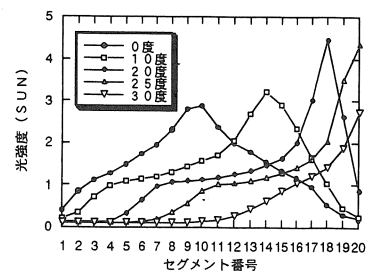
図7 測定に用いたフォトダイオードの光強度-短絡電流特性

測定結果および測定モデルに合わせたシミュレーション結果とを図8に示した。ここでは許容入射半角 25° のレンズに対する結果だけを挙げた。

光入射角度は前節でも述べたようにレンズ断面に平行な面内での入射角度とし、垂直な面に対しては 0° 一定とする。図からわかるように、計算結果、測定結果ともに前節の図2(a)のモデルに基づいて計算されたものとはほぼ同じ傾向が見られる。



(a) 計算値



(b) 実験値

図8 許容入射半角 25° のレンズに対して図2(b)モデルでの集光部での光強度分布、計算値と実験値

4. 集光分布とセル特性の関係

4.1 シミュレーション方法

アナログ回路シミュレータPspice⁽¹²⁾を使って集光セルのI-V特性を理論解析する。そのために、以下の方法でシミュレーション用等価回路モデルを設定した。

(1) セルのモデリング

太陽電池は、図9のようにダイオード、直列抵抗(R_s)、並列抵抗(R_{sh})、光電流源(I_{ph})を用いた等価回路で表すことができ、その電圧電流特性(I-V特性)は式(2)で表される。

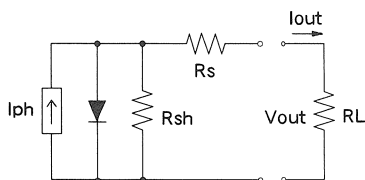


図9 太陽電池の等価回路

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left\{ \frac{q(V + R_s I)}{D_f k T} \right\} - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (2)$$

I_{ph} : 光電流、 I_0 : ダイオード逆飽和電流、 q : 単位電荷
 D_f : ダイオード因子、 k : ボルツマン因子、 T : 絶対温度

(2) I-V特性計算のための回路モデル

前章で述べたように集光セルではセグメント間で集光分布が不均一である。そこで、図10に示すように、太陽電池は前章にならって、図9に示した等価回路が20個並列接続されたモデルとして仮定する。各定電流源における電流値は集光セルの測定済みのI-V特性より得られる短絡電流を前章で計算済みの各セグメントの集光分布強度に応じて比例配分した。直列抵抗

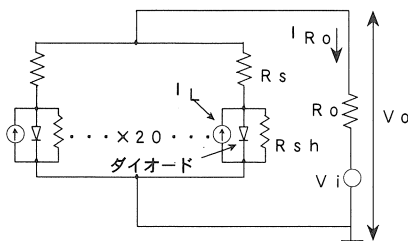


図10 シミュレーションに用いられた集光セル等価回路モデル

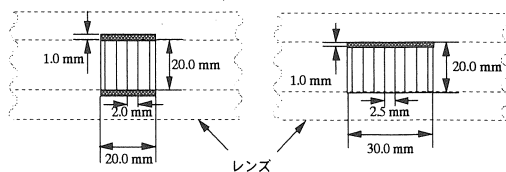
R_s 、並列抵抗 R_{sh} については図9に示される単一のセルモデルの場合に比べて20倍、ダイオードの逆方向飽和電流 I_0 は1/20とする必要がある。確認のため、太陽電池に光強度が均一である光が照射している条件で、同

一セルに対して1個のモデルと20個の並列接続モデルを使って計算したところ、両者は完全に一致した。このため、等価回路を20分割して計算しても一般性は失われない。

以上述べたセルモデルに適当な負荷 R_0 と電圧源 V_i を直列につなぎ V_i の電圧を順次変えてゆけばI-V特性を得ることができる。

シミュレーションを行う際には先ず、評価すべき太陽電池の R_s 、 R_{sh} 、 D_f および I_0 が必要なので、予め評価しようとする太陽電池セルのI-V特性を測定し、理論式(2)を用いた計算によるものとフィッティングさせることで D_f 、 R_s 、 R_{sh} を決定する。 I_0 はこの3者が決まれば計算できる。

図11は実際の評価に用いられた2種類の単結晶Si太陽電池を示したものである。バルク厚が300 μ m、比抵抗が10 $\Omega \cdot \text{cm}$ そして拡散層のシート抵抗が70 $\Omega/\square$ である点はセル1、セル2に共通である。しかし、サイズについてはセル1が2.3cm $\times$ 2.0cm、セル2が2.0cm $\times$ 3.0cm、フィンガーピッチについてセル1が2.0mm、セル2が2.5mmである。さらに、セル1はバスバーが両側についているのに対して、セル2は片側のみバスバーがついている点も異なる。これらのセルに対して、図11のイメージでレンズを載せた場合、セル1は



(a) セル1

(b) セル2

図11 評価に用いられた2種類のセル

表1 評価に用いた2種類の太陽電池の特性例

	Jsc(mA/cm ²)	Voc(mV)	FF	Eff(%)
セル1	32.8	599	0.721	14.2
セル2	34.5	597	0.714	14.7

両側のバスバーが集光部の外に出てしまうのに対して、セル2はすべて集光部内に入る。参考のため、表1にセル1、セル2に対して、ソーラシミュレータ下でAM1.5、光強度100mW/cm²の条件での測定結果の一例を示す。結果のうち、短絡電流密度と変換効率については若干セル2がセル1を上回っているが、これは両者のセル全体に占める電極占有面積の比率の差という形になって現れたものと解釈できる。これとは逆に、FFについては、セル1がセル2を上回っていることから、セル1はセル2よりも小さい直列抵抗を持つことも予想される。これらを念頭に数枚のセル1、セル2についてI-Vカーブフィッティングを行った。結果の一例を表2に示しているが、前述で予想し

表2 I-Vカーブフィッティングによる
シミュレーションパラメータ抽出の一例

	セル1	セル2
D_f	1.63	1.61
R_s	0.052Ω ($=0.239\Omega\cdot\text{cm}^2$)	0.142Ω ($=0.852\Omega\cdot\text{cm}^2$)
R_{sh}	107Ω	380Ω

ていたとおり、セル1はセル2に比べて直列抵抗が小さくなった。これはセル1がセル2に比べてフィンガー電極のピッチが狭いこと、両側にバスバーを持つことから、フィンガー部でのパワーロスが減るためだと考えられる⁽¹³⁾。

4.2 測定方法

シミュレーションの結果の妥当性を検証するためにレンズにシリコン樹脂を用いてセルを貼り付けた実験モデルを作製し、ソーラシミュレータ下でI-V特性を測定する。ソーラシミュレータの日射強度はAM1.5、 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 一定である。

4.3 結果と考察

集光分布の不均一性が集光セルのFFにどの程度の影響を与えているかについて評価するために、集光分布の影響がない、すなわち集光によってセル上に集められた入射光が均一密度であった場合にどのような特性を示すかをシミュレートしておく必要がある。そこで、先ず実際の集光セルにソーラシミュレータ下で光強度 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 一定の条件で各光入射角度毎のI-V特性から短絡電流を得た。そして、その短絡電流値を図9で示される等価回路の電流源としてI-V特性をシミュレーションし、FFを計算した。一例として許容入射半角 25° のレンズを用いた集光セルについてのシミュレーション結果を図12に示す。このレンズは光入射角度が 0° から許容入射半角 25° まではほぼ一定の

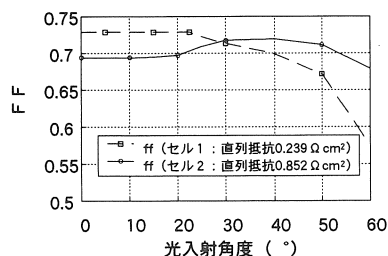
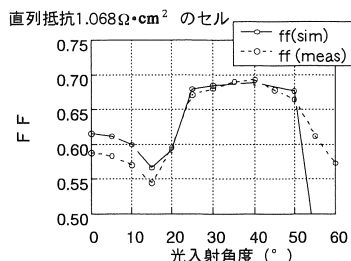
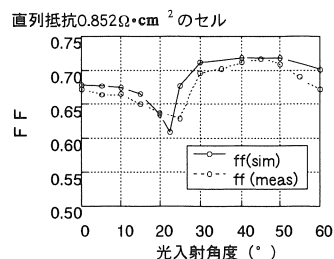
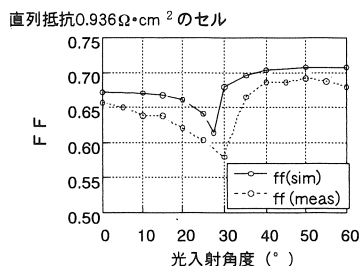


図12 評価に用いられた2種類の集光セルが受光部上で全く均一な集光分布をとると仮定した場合のセルFF光入射角度依存性

光学的集光比 $1.8^{(3)}$ であるため、光強度としては $180\sim 163\text{mW}/\text{cm}^2$ でのFFの値と換言できる。したがってこの範囲においては、セル1、セル2の両者ともそれほどFFの変化は無い。 40° 付近での光学的集光比が1.0、即ち光強度 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ であることからセル2は $100\text{mW}/\text{cm}^2$ にFFの最大値を持つセルであることが分かる。一方、セル1のFFは許容入射半角 25° を越え

たところから減少していることからおよそ $150\text{mW}/\text{cm}^2$ 以上の光強度ではほぼ一定の高いFFをもつことが言える。

図13~15はセル2を用いた許容入射半角 20° 、 25° 、 30° の集光セルに対して、光強度 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 一定で光入射角度を変えていったときのFFの光入射角度依存性について調べた結果である。図15に示される実験値とシ

図13 セル2を用いた許容入射半角 20° の集光セルにおけるFFの光入射角度依存性図14 セル2を用いた許容入射半角 25° の集光セルにおけるFFの光入射角度依存性図15 セル2を用いた許容入射半角 30° の集光セルにおけるFFの光入射角度依存性

ミュレーション値の差違が図13、14のものに比べてやや大きいものの両者はおおむね一致しているといえる。これら3者のグラフから言えることは 0° 入射時に許容入射半角 20° の集光セルのFFが他の2者と比べて小さくなることが見られたことと、図12の結果の推察より、集光比が大きくなる即ち許容入射半角が小さくなるにしたがってFFの低下が顕著になると予想される。3者ともに光入射角度が許容入射半角に近づくにしたがってFFが低下し、許容入射半角に等しくなるところでほぼ最低になることが分かる。このことから

FFは集光分布の不均一性に依存していることが明らかに分かる。許容入射半角を過ぎるとレンズの外に光がもれ、集光部全体に光があまりいきわたらないため、全体的に集光分布の不均一の度合いが小さく結果としてFFが上昇するものと思われる。これは図12の結果と比較しても妥当な結果といえる。

図16はセル1（直列抵抗 $0.239\Omega\cdot\text{cm}^2$ ）を用いた許容入射半角 25° の集光セルに対して光強度 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 一定で光入射角度を変えていったときのFFの光入射角度依存性について調べた結果を示す。シミュレーション

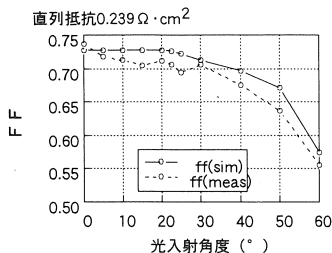


図16 セル1を用いた許容入射半角 25° の集光セルにおけるFFの光入射角度依存性

値と測定値は少々の違いはあるがおおむね一致しているといえる。また、図12と比較して分かるように集光分布の影響を全くといっていいほど受けていない。これらの結果から集光型セルのFFは直列抵抗の大きさの度合いに応じて不均一な集光分布の影響を受けることが明らかとなった。したがって、低集光太陽電池モジュール用に用いるセルについては集光分布の影響を受けない程度の直列抵抗を持つように設計することがモジュールの最適な設計をする際に考慮すべき重要な点の一つである。

太陽光発電へのアプリケーションとしてはさまざまな日射条件を考えねばならないので、実際にこの低集光方式に最も適したセルの設計には今後さらに詳しい研究が必要である。

5. 結言

本研究では、二次元複合楕円レンズを用いた集光セルにおける集光分布が太陽電池セル特性に与える影響について調べた。

はじめに、レンズの集光分布について計算と実験を行った結果、両者は良い一致を示した。また、集光分布は光入射角度が許容入射半角に近づくにつれてより不均一になることがわかった。

次に、これらのデータを基に、レンズ付きセルのFFに対する影響をシミュレーションおよび実験より調べた。その結果、セルのFFが集光分布の影響を受ける程度の直列抵抗を有する場合は、集光分布の度合いが

大きいほどFFの低下を伴い、セルの直列抵抗が充分小さければFFが集光分布の影響を受けないことが分かった。

<謝辞>

本研究は通商産業省工業技術院ニューサンシャイン計画の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構から委託され実施されたもので、関係各位に感謝します。また、太陽電池を御提供下さいましたシャープ（株）エネルギー変換研究所の布居徹氏、町田智弘氏に感謝いたします。

参考文献

- (1) T. Saitoh, R. Shimokawa and Y. Hayashi, "Recent Progress in Research and Development of Crystalline Silicon Solar Cells in Japan", *Progress in Photovoltaics*, John Wiley, Vol.1, No.1, 1993, pp.11-23.
- (2) K. Yoshioka, K. Endoh, M. Kobayashi, A. Suzuki and T. Saitoh, "Design and Properties of a Refractive Static Concentrator Module", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Elsevier Science, Vol.34, 1994, pp.125-131.
- (3) K. Yoshioka, M. Kobayashi, A. Suzuki, K. Endoh and T. Saitoh, "An Optimum Design and Properties of a Static Concentrator with a Non-Imaging Lens", *Proc. of 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Hawaii, December, 1994, pp.1119-1122.
- (4) 吉岡一也、遠藤清志、鈴木研夫、大江信之、齊藤 忠「非追尾型集光太陽電池モジュール用三次元レンズに関する研究」、*太陽エネルギー*、Vol.21、No.4、1995、pp.43-50
- (5) K. Yoshioka, K. Endoh, A. Suzuki, N. Ohe and Saitoh, "Performance Simulation of a Three-Dimensional Lens for a Photovoltaic Static Concentrator", *Proc. of the 13th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Nice, 1995, pp.2373-2376.
- (6) S. Bowden, S. R. Wenham and M. A. Green, "Application of Static Concentrators to Photovoltaic Roof Tiles", *Progress in Photovoltaics*, John Wiley, vol.3, pp.413-423, 1995.
- (7) I. Zanescio and E. Lorenzo, "Experimental Performance of the Static Concentrator PEC-44D", *Proc. of the 13th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Nice, 1995, pp.2402-2405.
- (8) W. T. Welford, R. Winton, "High Collection Nonimaging Optics", Academic Press, San Diego, 1989, pp.9-14.
- (9) W. T. Welford, R. Winton, "High Collection Nonimaging Optics", Academic Press, San Diego, 1989, p.54.
- (10) W. T. Welford, R. Winton, "High Collection Nonimaging Optics", Academic Press, San Diego, 1989, pp.22-28.
- (11) 小林雅明、鈴木研夫、小林繁雄「非結像集光レンズ（CEL）の最適設計」、平成5年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会合同研究発表会(1993)。
- (12) ボールW. トゥネンガ、SPICEによる電子回路設計入門、CQ出版社（1990）。
- (13) A. Luque, *Solar Cells and Optics for Photovoltaic Concentration*, Adam Hilger, Bristol and Philadelphia, 1989, Chapter4.