

# 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

Performance improvement of RXI solar concentrator  
based on freeform surface design and heat transfer analysis

岡本 和也<sup>1</sup>  
Kazuya OKAMOTO

山田 昇<sup>2</sup>  
Noboru YAMADA

## Abstract

New RXI solar concentrator performing high concentration with large acceptance angle and affordable irradiance uniformity on photovoltaic cell was designed for concentrator photovoltaic (CPV) application. One of the most advanced design methods for freeform non-imaging optics known as Simultaneous Multiple Surface (SMS) method was used to design the complicated freeform surface of the RXI concentrator, where R, X, and I refers to refraction, reflection (reflexión in Spanish), and total internal reflection, respectively. The abbreviation SMS comes from the fact that it enables simultaneous design of multiple optical surfaces. In addition, not only optical design but also thermal design was conducted by 3-D heat transfer analysis based on finite element method (FEM). As a result, the obtained RXI concentrator shows high optical performance and significantly reduces the cell temperature as compared to the conventional RXI design. The low-cost mass production technique, which has been used for LED package production, can be applicable for the production of the present RXI concentrator.

キーワード：集光器，自由曲面設計，伝熱解析，集光型太陽光発電（CPV）

Key Word : Solar concentrator, Freeform surface design, Heat transfer analysis, Concentrator photovoltaic (CPV)

## 1. 緒言

近年，エネルギー環境問題への対応策として太陽エネルギー利用の高効率化・低コスト化が求められている。高効率太陽電池（PV）セルの開発が進められ，セル変換効率が43%超の3接合型化合物セルが出現している。しかし，他のセルに比べて高価であるため，ミラー・レンズ等の集光器（Concentrator）を用いた集光型太陽光発電（CPV）の高効率化・低コスト化が進められている<sup>(1)(2)</sup>。

CPVでは幾何学的集光倍率（Geometric concentration ratio, 以下 $C_g$ ）が大きくなるほどPVセル面積を削減できコストメリットが大きくなる一方，集光器の許容入射角（Acceptance angle）が狭くなり，PVセル面での照度均一性の確保，セル温度の低減が課題となる。したがって，CPV集光系への設計要求として，高い $C_g$ と広い許容入射角，均一な集光面照度分布，セル温度低減がある。これらはトレードオフの関係にあり，最適設計は難しい。ま

た，集光系は省材料，低コストでなければならない。

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，これらの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，さらなる高性能化と低コスト化が求められており，集光系にもブレイ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利用でき，大幅な低コスト化が期待できる。

そこで本研究では，これに適合し得る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<sup>(3)</sup>，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

\*1 長岡技術科学大学院エネルギー・環境工学専攻

\*2 長岡技術科学大学工学部 准教授

(〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

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

E-mail: noboru@nagaokaut.ac.jp

(原稿受付：2013年6月10日)

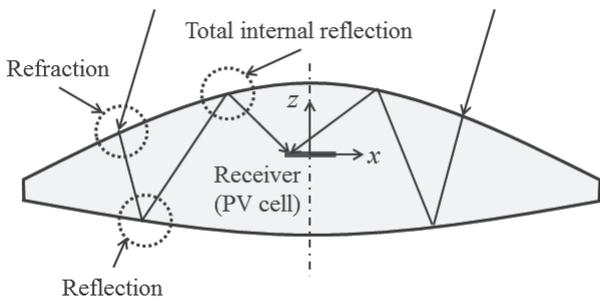


Fig.1 Concept of RXI concentrator  
図1 RXI集光器のコンセプト

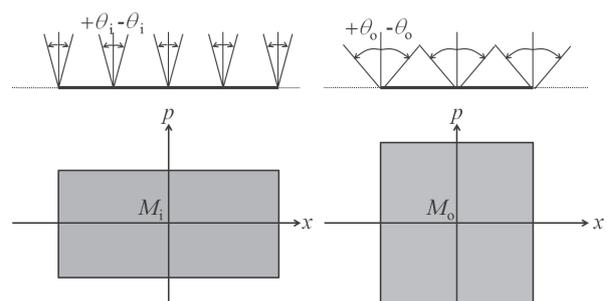


Fig.2 x-p plane (left: aperture, right: PV cell)  
図2 x-p平面(左:受光面, 右:PVセル面)

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。

まず、自由曲面を有する集光系や照明系に対して有効な設計手法である Simultaneous Multiple Surface 法 (以下 SMS 法)<sup>(3)(4)</sup> をコード化し、RXI 集光器の設計に適用した。次いで、設計した集光器形状に対して光学解析を行い、光学的効率、入射角特性、セル面照度分布などを検証した。さらに、伝熱解析によるセル温度の検証を通じて従来 RXI 集光器の課題を解決する新たな形状を探究した結果について述べる。

## 2. RXI 集光器

図 1 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<sup>(5)</sup>。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  $3.0^\circ$  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<sup>(6)</sup>。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<sup>(6)</sup>。

## 3. SMS 法による設計フロー

SMS 法 (2D-SMS 法) による集光系の設計では、まず太陽光が入射する受光面と集光する PV セル面に対して  $x-p$  平面と呼ばれる仮想平面を定義する。図 2 に RXI 集光器の  $x-p$  平面を示す。 $x-p$  平面は光線の入射位置  $x$  における入射角範囲を表すものであり、 $p$  は次式で定義される。

$$p = n \sin \theta \tag{1}$$

ここで、 $n$  は光線が通過している媒体の屈折率、 $\theta$  は境界面への設計入射角 (受光面:  $\theta_i$ , PV セル面:  $\theta_o$ ) である。受光面 (Aperture) の  $x-p$  平面:  $M_i$  と PV セル面の  $x-p$  平面:  $M_o$  には次式の光学的保存関係がある。

$$\int_{M_i} dx dp = \int_{M_o} dx dp \tag{2}$$

以上の式から所望の許容入射角 ( $\theta_i$ ,  $\theta_o$ ) と PV セル面の長さに対する受光面の長さが決定できる。

設計のフローチャートを図 3 に示す。また、チャート中の各手順の解説図を図 4 に示す。以下に各手順について説明する。なお、手順は文献(2)(6)を参考にした。

### 手順①: 点 R ( $x_R, z_R$ ), I ( $x_i, z_i$ ), A, および B の決定

対象とする RXI 集光系は  $z$  軸に対して軸対称である。RXI 集光器の周囲を空気 (屈折率 1.0),  $\theta_o = 90.0^\circ$  と指定すると、式(1)および式(2)より  $x_R$  が次式により求まる。

$$x_R = \frac{n \cdot [A, B]}{2 \sin \theta_i} \tag{3}$$

ここで、 $[A, B]$  は点 AB 間の距離である。 $\theta_o = 90.0^\circ$  であることから  $z_i = 0.0$  となる (つまり、PV セル部の水平真横)。点 A および点 B は想定する PV セル形状に基づいて指定する。ここでは、PV セルは平板状であるとし、点 A および点 B を PV セル面の両端とした。線分 AB は  $x$  軸に平行である。 $z_R$  および  $x_i$  は  $z_R < z_i$  および  $x_R < x_i < 0$  を満たす任意の初期値を与えれば後述の反復計算により収束する。

### 手順②: 点 F, P および曲線 Curve1 の決定

文献(2)(6)に従い任意の点 F と原点 O を焦点とする楕円が点 I を通るように曲線 IP を決める。曲線 RI および曲線 PQ は三次多項式により形状を決定する。点 Q は中心軸上 (一点鎖線) であればよい。これらの曲線を繋いだものを曲線 Curve1 とする。初期段階では楕円と三次多項式との接続条件は特に与えないが、後述の反復計算により最終的には滑らかな曲線に収束する。

### 手順③: 点 X の決定

Curve1 上の点 R に光線  $m_i$  を  $\theta_i$  (図 2 の負の入射角)

で入射し、屈折した光線のベクトル  $r_1$  を算出する。一方、セル面端部の点 A から  $x$  軸に平行 ( $\theta_0 = 90.0^\circ$  の方向) に進む光線  $m_{0-}$  を Curve1 に入射させ、全反射し得る光線のベクトル  $r_2$  を算出する。 $r_1$  と  $r_2$  の交点が点 X となる。

#### 手順④：光線 $m_{i-}$ の光路長計算

$m_{i-}$  の入射角と光路 RXIA は既知であるから、光源面  $w_1$  の 1 つの光源点  $W_1$  の  $z$  座標を適当に決め、光路  $W_1RXIA$  の光路長 (つまり光線  $m_{i-}$  が光源からセル面に到達するまでの光路長) を求める。光路長とは、光線の移動距離  $ds$  とその時透過する媒体の屈折率  $n$  の積  $nds$  を光路で積分した値であり、光路  $W_1RXIA$  の光路長  $S$  は以下の式となる。

$$S = \int_{W_1RXIA} nds \quad (4)$$

#### 手順⑤：曲線 Curve2 の決定

入射点を右側にずらしていき、各入射点についてベクトル  $r_1$  を求める。一方、点 A から射出する光線ベクトルの角度を変えながら、Curve 1 で全反射する光線ベクトルを求め、光路長の保存則に従って手順④で求めた光路長  $W_1RXIA$  と同一になる  $r_1$  との交点を求める。これにより曲線 Curve 2 (ミラー面) を構成する点群の座標が決定する。決定した Curve2 の形状が著しく不連続である場合は、新たに Curve1 を決定し直して手順③に戻る。

#### 手順⑥：曲線 New Curve1 の決定

Curve1 および Curve2 は手順⑤までで決定しているため、次いで異なる光源面  $w_2$  の各光源点  $W_2$  から光線  $m_{i+}$  を  $\theta_i$  (図 2 の正の入射角) で Curve1 に入射させ、Curve2 と交差する位置および反射ベクトルを求める。これによって手順⑤と同様に New Curve1 を決定する。ここでも光路長の保存則に従う。

#### 手順⑦：Curve1 と New Curve1 の比較と更新

あらかじめ定めた収束判定条件により、Curve1 と New Curve1 が同形状と判定されれば手順⑧に、異形状と判定されれば New Curve1 を Curve1 に置き換えて手順③に戻る。つまり手順①②で与えた初期の曲線は完全に更新される。これを反復する。

#### 手順⑧：ミラー面の付与

収束した形状において全反射しない領域を確認し、その部分にはミラー面 (以降、入射面ミラー) を適用する。最後に、得られた形状を中心軸まわりに回転させ、3 次元形状にする (手順⑨)。

以上のように SMS 法では反復計算が実行されるが、収束性は良く、通常のデスクトップ PC での計算でも短時間 (数分) で解が得られる。

## 4. 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 (Ray-tracing) を用いた。光線追跡法は、光源からエネルギーを持った光線を射出し、光線と物体の面要素の交点、屈折・反射方向を順次計算して集光面に到達するまで光線を追跡し、最終的に集光面に収束するエネルギーを求める解析手法であり、著者らの既報<sup>(8)</sup>にある基礎式を用いた。物体との境界面に光線が到達した場合の屈折角を Snell の法則、反射率および透過率を Fresnel の公式を用いて計算した。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。

評価指標には光学的効率を用いた。これは集光系の受光面積 (投影面積) に入射するエネルギーのうちセル面に収束するエネルギーの比である。追尾誤差の無い理想状態での光学的効率  $\eta$  を 100% とし、 $\theta_i$  を増していき、 $\eta$  が 90% に低下する  $\theta_i$  を許容入射角  $\theta_{90\%}$  として定義した<sup>(9)</sup>。また、PV セル面照度分布の均一性の評価には Herrero ら<sup>(10)</sup>によって提案された PAR (Peak to average ratio) を用いた。PAR はセル面上の局所照度のピーク値をセル面全体の平均照度で除した値である。PAR にほぼ比例して PV セルの FF (フィルファクター) 値が低下することが実験的に確認されている。

## 5. 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  $\kappa = 59.9 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$  を与えた<sup>(11)</sup>。また、入射するエネルギーは受光面において  $1000 \text{ W/m}^2$  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  $25.0^\circ\text{C}$ 、熱伝達率  $10.0 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$  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 (後述の図 12 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  $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$ 、比熱  $c = 900 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 、熱伝導率  $\kappa = 200 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$  とした。

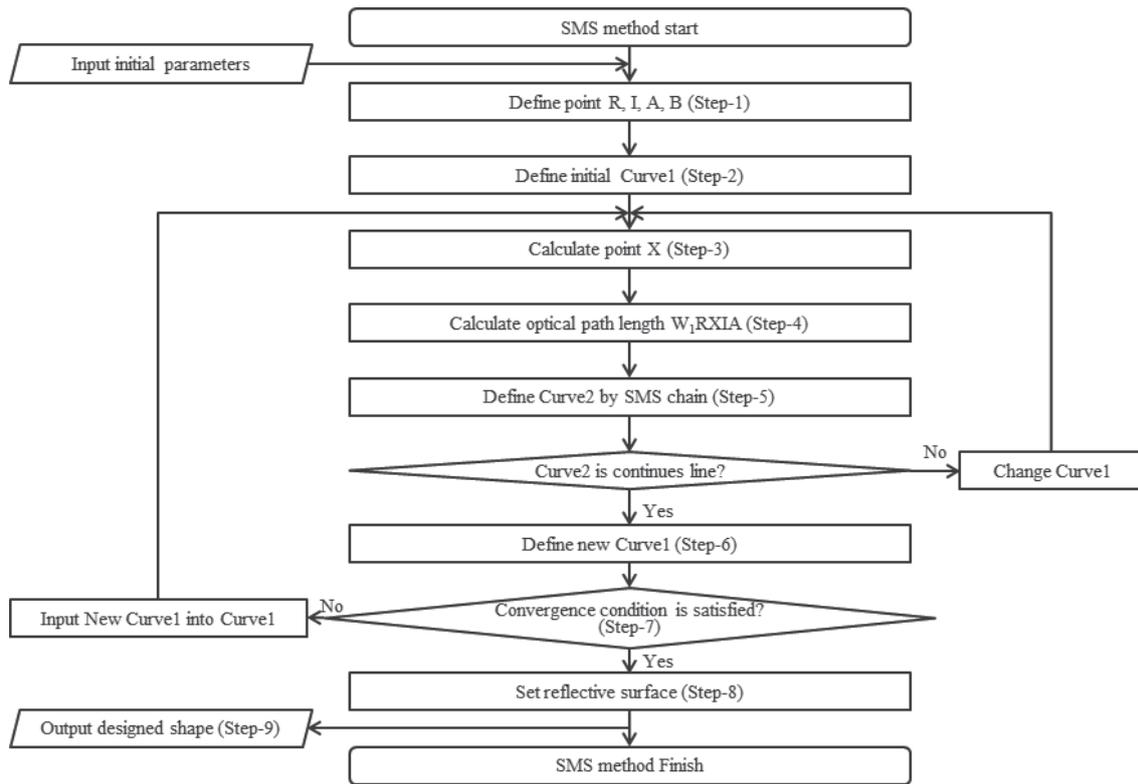


Fig.3 Flow chart of SMS method  
 図3 SMS 法のフローチャート

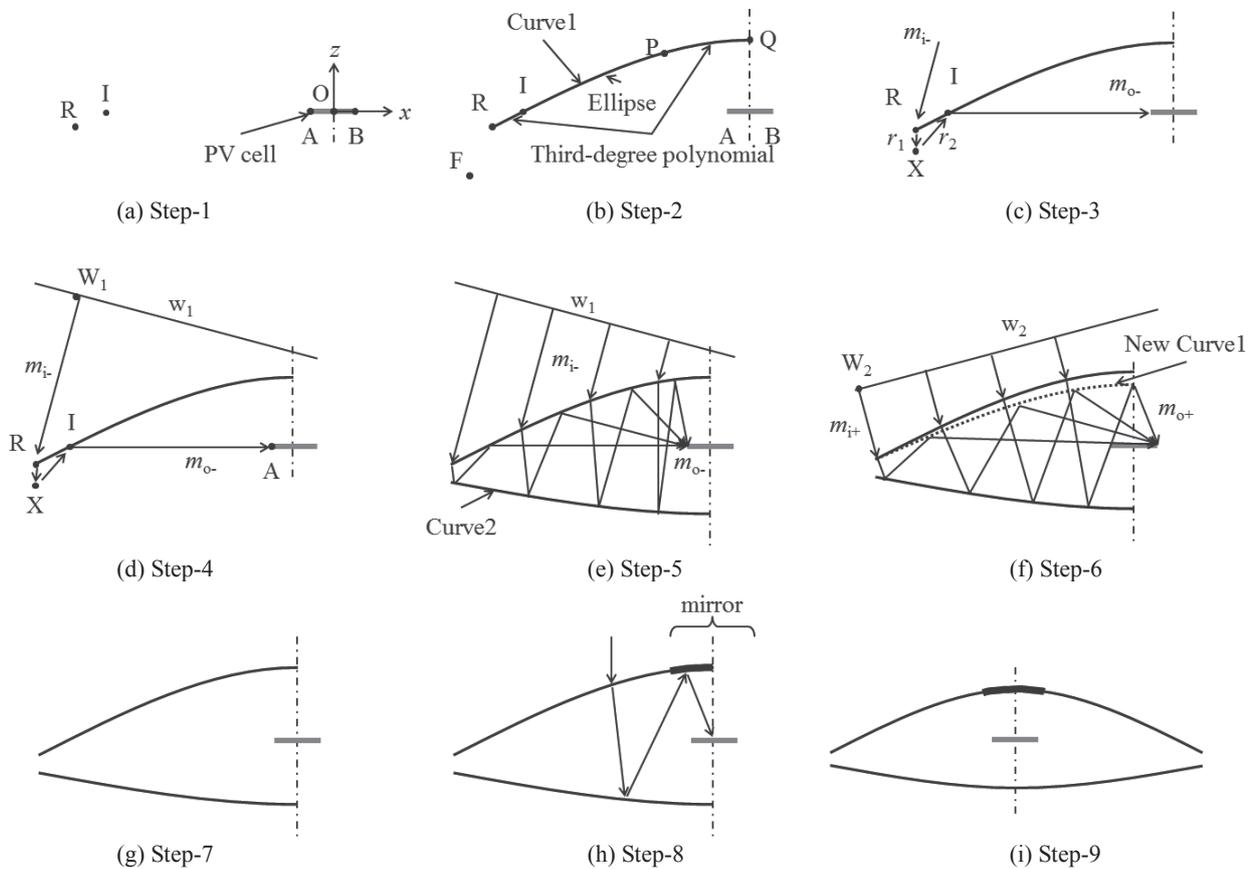
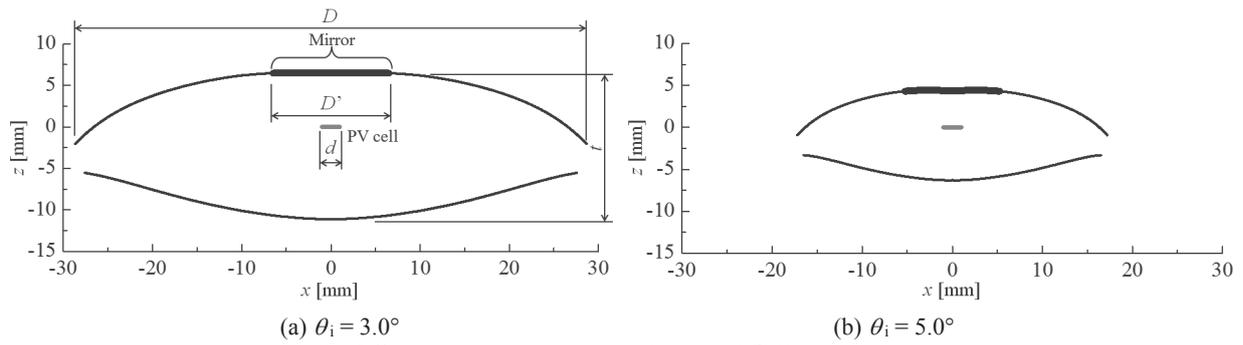
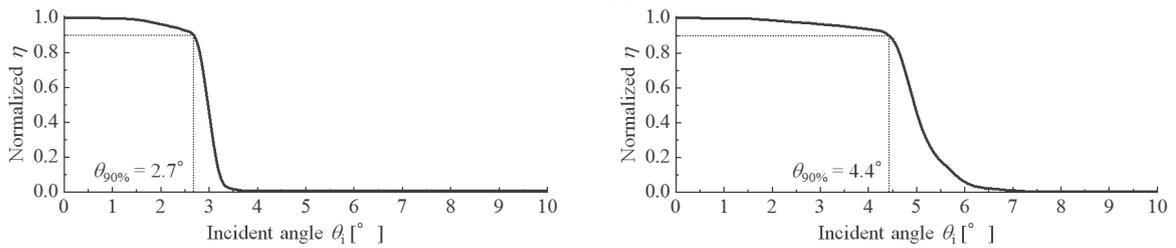


Fig.4 Design process of SMS method for RXI concentrator  
 図4 SMS 法を用いた RXI 集光器の設計手順



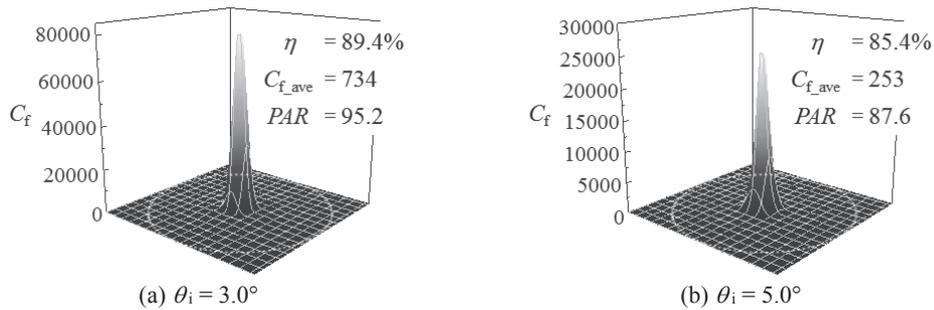
(a)  $\theta_i = 3.0^\circ$  (b)  $\theta_i = 5.0^\circ$   
 Fig.5 Cross-section of the designed shape of RXI concentrator

図5 設計した RXI 集光器の断面図



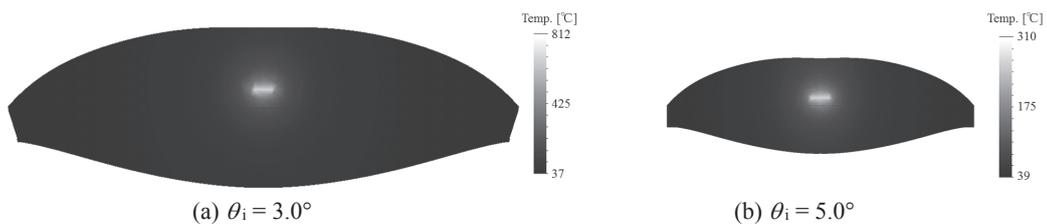
(a)  $\theta_i = 3.0^\circ$  (b)  $\theta_i = 5.0^\circ$   
 Fig.6 Acceptance angle dependency of the designed RXI concentrator

図6 許容入射角特性



(a)  $\theta_i = 3.0^\circ$  (b)  $\theta_i = 5.0^\circ$   
 Fig.7 Energy distribution (distribution of local flux concentration ratio at PV cell)

図7 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)



(a)  $\theta_i = 3.0^\circ$  (b)  $\theta_i = 5.0^\circ$   
 Fig.8 Internal temperature distribution of concentrator

図8 集光器内部温度分布

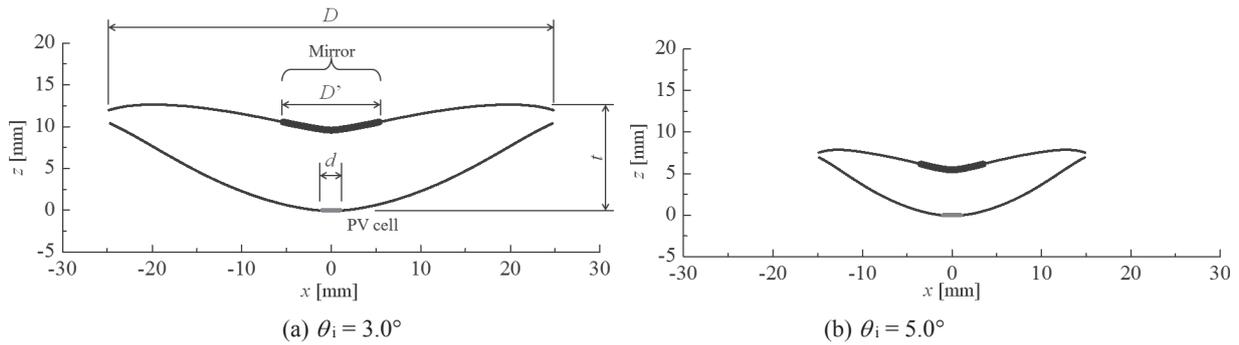
Table1 Designed parameters  
 表1 設計パラメータ

Acceptance angle	$\theta_i$	°	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

## 6. 結果および考察

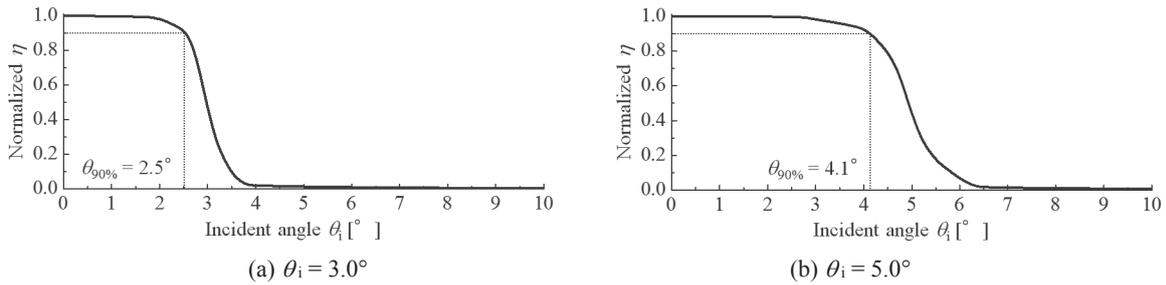
設計結果の一例として、受光面入射角を  $\theta_i = 3.0^\circ$ ,  $\theta_i = 5.0^\circ$  に対する RXI 集光器の断面形状を図 5(a)(b)に示す。このときの各部寸法を表 1 に示す (単位は mm, ただし、こ

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。ここで  $C_g$  は入射面ミラー面積を含む受光面面積を PV セル面積で除した値である。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。入射角特性を図 6(a)(b)に示す。受光面入射角  $\theta_i = 3.0^\circ, \theta_i = 5.0^\circ$  とし



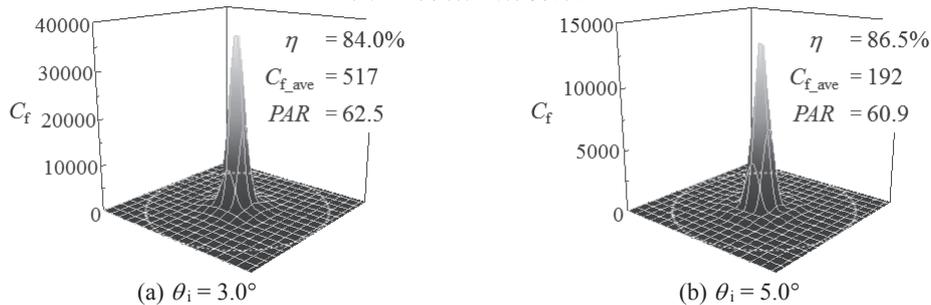
(a)  $\theta_i = 3.0^\circ$  (b)  $\theta_i = 5.0^\circ$   
 Fig.9 Cross-section of the designed shape of RXI concentrator

図9 設計したRXI集光器の断面図

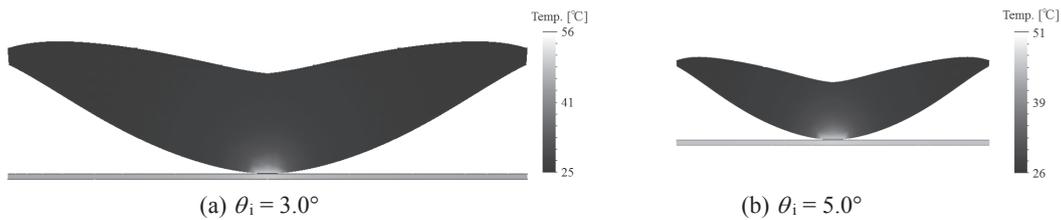


(a)  $\theta_i = 3.0^\circ$  (b)  $\theta_i = 5.0^\circ$   
 Fig.10 Acceptance angle dependency of the designed RXI concentrator

図10 許容入射角特性



(a)  $\theta_i = 3.0^\circ$  (b)  $\theta_i = 5.0^\circ$   
 Fig.11 Energy distribution (distribution of local flux concentration ratio at PV cell)  
 図11 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)



(a)  $\theta_i = 3.0^\circ$  (b)  $\theta_i = 5.0^\circ$   
 Fig.12 Internal temperature distribution of concentrator

図12 集光器内部温度分布

Table2 Designed parameters  
 表2 設計パラメータ

Acceptance angle	$\theta_i$	°	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

て設計したRXI集光器の許容入射角は各々 $\theta_{90\%} = 2.7^\circ$ ,  $4.4^\circ$ 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。図7(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図8(a)(b)に示す。PVセルおよびその近傍の温度が局所的に高く、 $\theta_i = 3.0^\circ$ ,  $\theta_i = 5.0^\circ$ の最高温度は各々 $812^\circ\text{C}$ ,  $310^\circ\text{C}$ 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。

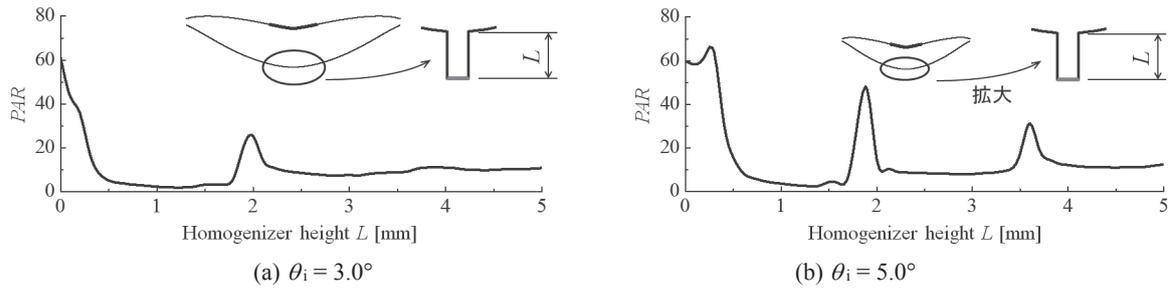


Fig.13 Relations of homogenizer height and PAR  
 図 13 ホモジナイザの高さ  $L$  と  $PAR$  の関係

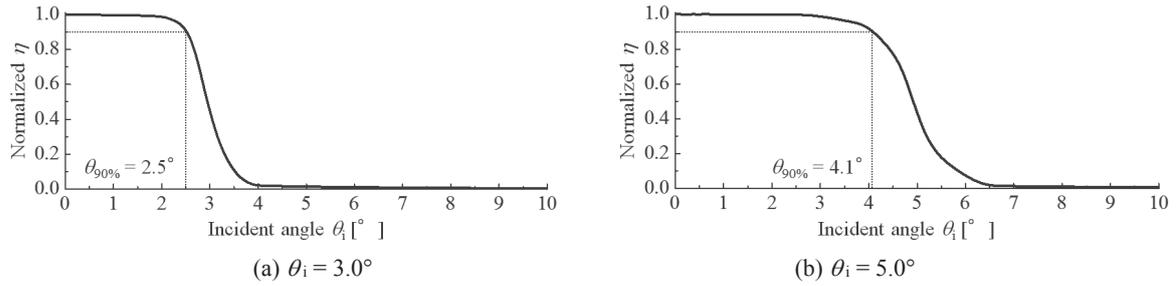


Fig.14 Acceptance angle dependency of the designed RXI concentrator  
 図 14 許容入射角特性

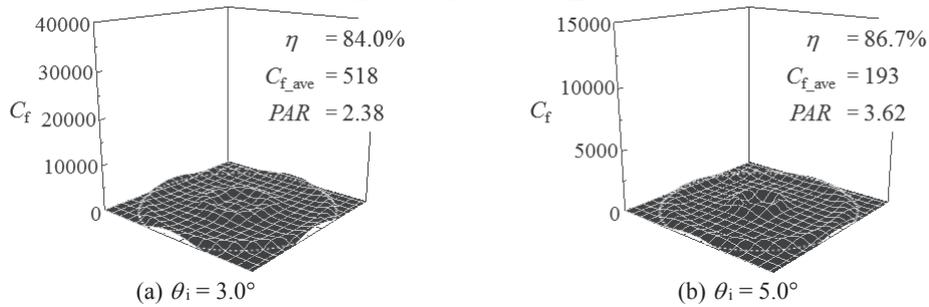


Fig.15 Energy distribution (distribution of local flux concentration ratio at PV cell)  
 図 15 エネルギー分布 (PV セル面上でのエネルギー密度集光比  $C_f$  の分布)

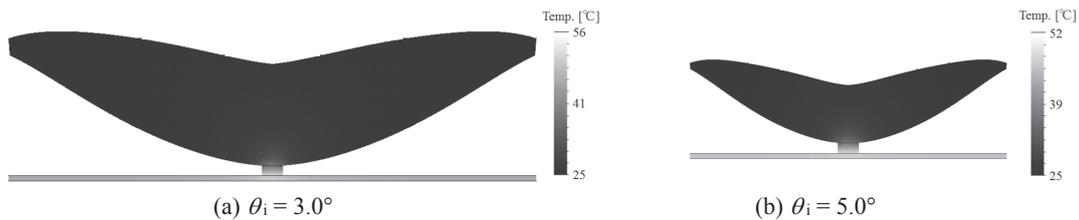


Fig.16 Internal temperature distribution of concentrator  
 図 16 集光器内部温度分布

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。 $\theta_o$  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

を図 9(a)(b) に示す。このときの各部寸法を表 2 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。入射角特性を図 10(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  $\theta_{90\%} = 2.5^\circ, 4.1^\circ$  となり、設計値の約 0.8 倍となった。図 11(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図 12(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  $56^\circ\text{C}$ ,  $51^\circ\text{C}$  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、集光器と PV セルを結合する部分に円柱状に挿入した。図 13(a)(b) にホモジナイザーの高さと PAR の関係を示す (光線追跡結果)。  $\theta_i = 3.0^\circ$ ,  $\theta_i = 5.0^\circ$  共にホモジナイザーの高さが 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。ホモジナイザー高さ 1.0 における入射角特性を図 14(a)(b) に、エネルギー分布を図 15(a)(b) に、定常状態における集光器温度分布を図 16(a)(b) に示す。ホモジナイザーにより PAR は 2.38, 3.62 となり (ホモジナイザー無しの場合の約 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  $\theta_{90\%} = 2.5^\circ$ ,  $4.1^\circ$ 、光学的効率  $\eta = 84.0\%$ ,  $86.5\%$  となり、ホモジナイザー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  $56^\circ\text{C}$ ,  $52^\circ\text{C}$  となり、温度分布においてもホモジナイザー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、ホモジナイザー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。

## 6. 結言

本研究では、集光型太陽光発電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  $2.7^\circ$ ,  $4.4^\circ$  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  $812^\circ\text{C}$ ,  $310^\circ\text{C}$  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  $56^\circ\text{C}$ ,  $51^\circ\text{C}$  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  $2.5^\circ$ ,  $4.1^\circ$  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。

## 参考文献

- (1) A. Akisawa, et al., Design of dome-shaped non-imaging Fresnel lenses taking chromatic aberration into account, *Solar energy*, Vol.86(2012), pp.877-885
- (2) R. Winston, J. C. Miñano, P. Benitez, *NONIMAGING OPTICS*, 2005, pp.181-218, ELSEVIER
- (3) J. C. Miñano, J. C. Gonzalez, New method of design of nonimaging concentrators, *Applied Optics*, Vol.31-No.16(1992), pp.3051-3060
- (4) P. Benitez, et al., Free-form Köhler Nonimaging Optics for Photovoltaics Concentration, *Proc. of SPIE*, Vol.7849 (2011), pp.78490K-1-78490K-14
- (5) J. C. Miñano, et al., A high-gain, compact, nonimaging concentrator- RXI, *Applied Optics*, Vol.34, No.34 (1995), pp.7850-7856
- (6) J. Chaves, *Introduction to Nonimaging Optics*, 2008, pp.271-324, CRC Press
- (7) スタンレー電気株式会社ホームページ, [http://www.stanley.co.jp/newsrelease/pdf/13\\_01\\_08\\_2.pdf](http://www.stanley.co.jp/newsrelease/pdf/13_01_08_2.pdf)
- (8) 山田, 中村, 佐藤, プリズムアレイシートを組み合わせたプリズム集光器の集光特性, *JJSES*, Vol.35, No.1(2009), pp.57-64
- (9) A. Marti, A. Luque, Next Generation photovoltaics high efficiency through full spectrum utilization, 2004, pp.108-139, Taylor & Francis
- (10) R. Herrero, et al., Concentration photovoltaic optical system irradiance distribution measurements and its effect on multi-junction solar cells, *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, Vol.20(2012), pp.423-430
- (11) 熱物性ハンドブック編集委員会, 熱物性ハンドブック, 2000, pp.23, 養賢堂