

# 進化的アルゴリズムによる均一集光 非結像フレネルレンズ設計

Design of Uniform Concentration Non-imaging Fresnel Lens  
by Using Evolutionary Algorithm

山田 昇 \*<sup>1</sup>  
Noboru YAMADA

西川 太朗 \*<sup>2</sup>  
Taro NISHIKAWA

## Abstract

This paper describes the result of optical design of a non-imaging Fresnel lens for concentrating photovoltaic. An Evolutionary algorithm(EA), which has been originally developed to obtain optimal solution for complex systems, was employed to design the optical geometry of a unique Fresnel-type lens which yields the uniform concentration flux onto photovoltaic cell. The design procedure which incorporates ray tracing in the EA was used with combination of genetic algorithm and immunity algorithm. The results show that the evolutionary algorithm automatically created optical geometry of Fresnel-type lens which achieves better uniform concentration flux onto the photovoltaic cell than the conventional non-imaging Fresnel lens. The results also show that the EA makes it possible to design a wavelength-selective uniform concentration Fresnel-type lens.

キーワード: 進化的アルゴリズム, 集光器, 非結像フレネルレンズ, 均一集光度

Key Words: Evolutionary algorithm, Concentrator, Non-imaging Fresnel lens, Uniform concentration

## 1. 緒言

近年, エネルギー環境問題への対応策の1つとして太陽エネルギーの有効利用が注目され, 太陽光発電の普及が求められている。多様な太陽電池が開発されるなか, 発電効率が40%を超える高効率太陽電池(多接合セル)は未だ高価であるため, ミラーやレンズなどの集光器を用いた高効率化, 低コスト化の試みが行われている<sup>(1~9)</sup>。この集光型太陽光発電(Concentrating Photovoltaic; CPV)に適する集光器として非結像フレネルレンズが開発されている<sup>(4~7)</sup>。非結像フレネルレンズは, 安価な樹脂等で薄く製造でき, 且つ光学的効率も高く優れた集光器の一つである。しかし, レンズ材料の波長分散に起因する集光面での集光強度不均一性が発電効率低下の一因になっている<sup>(8)</sup>。この不均一性を改善するために均一化作用のある2次集光系をセル面上に付与するなどの対策が講じられているが<sup>(9)</sup>, コスト削減の観点ではフレネル

レンズ単体で均一な集光を達成することが望ましい。

そこで本研究では, 既報<sup>(10)</sup>で提案した進化的アルゴリズム(Evolutionary algorithm; EA)による集光器の最適設計手法を非結像フレネルレンズに適用し, 高い光学的効率と均一集光を達成できる光学形状を設計した結果について報告する。

## 2. 進化的アルゴリズムによるレンズ形状の設計

本研究で用いた進化的アルゴリズムによる集光器の設計手法は既報<sup>(10)</sup>と同様であるため, 以下に要点のみを述べる。本研究で言う進化的アルゴリズムとは遺伝的アルゴリズム(Genetic algorithm; GA)<sup>(10,11)</sup>と免疫アルゴリズム(Immunity algorithm; IA)<sup>(10,12)</sup>とを組み合わせたものである。GAでは以下の手順に従ってレンズ形状の最適化に適用した。手順の番号は図1に対応している。

- ① 複数の適当なレンズ形状を解の候補としてランダム生成する。
- ② 生成した各形状に光線追跡を行い, あらかじめ定義した評価指標(本研究では均一集光度 $E$ )で集光性能を評価する。

\*<sup>1</sup> 長岡技術科学大学工学部 准教授

\*<sup>2</sup> 長岡技術科学大学大学院機械創造工学専攻  
(〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)  
Tel & Fax: +81-258-47-9762  
E-mail: noboru@nagaokaut.ac.jp  
(原稿受付: 2009年12月19日)

- ③ 2つの形状を組み合わせる(交叉). または, 部分的にランダムな変化を与えて新形状を生成する(突然変異).
  - ④ 評価指標の高い形状を次世代に残す(生存選択).
  - ⑧ ①~④を設定世代数に到達するまで繰り返す.
- 以上の進化過程により, 基本的には, 繰り返し数(世代数)が増すごとにレンズ形状の評価値が向上して最適解(レンズ形状)に近づく. しかし, GA操作のみでは必ずしも最適ではない局所解への収束が生じやすいため, IA操作を適用する. IAは生物の持つ自己防衛機構である免疫システムをモデル化したアルゴリズムであり, 解くべき問題を抗原, 抗原を防御できる抗体を解として生成する過程を模している. 様々な抗原に対して抗体の多様性を確保することがIAの特徴である. ここでは以下の手順でIA操作を適用した. 手順の番号は図1に対応している.
- ⑤ 2形状を形成する各頂点間距離の総和を計算し, その値が閾値より低ければ両者は類似形状と見なし, 評価指標の低い形状に類似度を加算する. これを全通りの組み合わせに対して計算する(類似度計算).
  - ⑥ 1つの類似形状群の中で評価指標の最も高い形状だけを残し, 他の類似形状を削除する(生存選択).
  - ⑦ 削除した形状数だけ新形状をランダム生成する.
- 以上の操作により, 集合内の個体が類似の局所解に収束するのを防ぎ, 幅広く最適解探索を行うことができる.

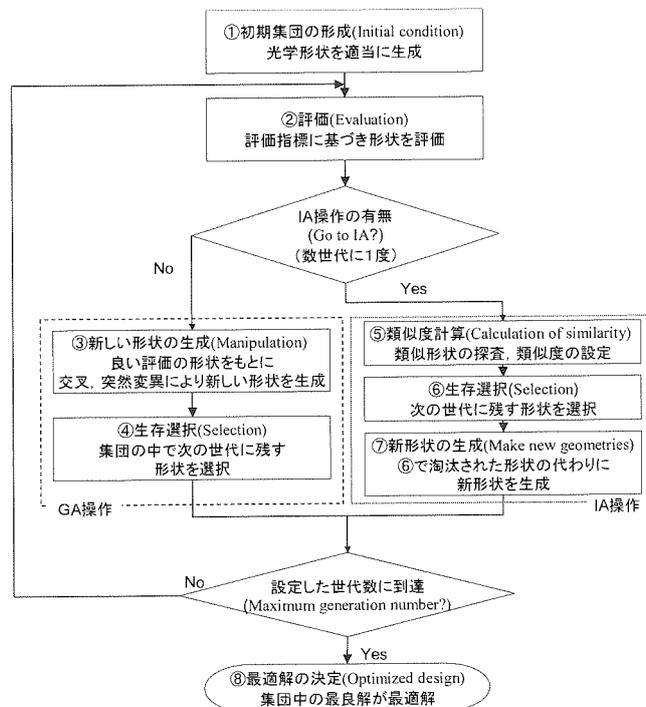


図1 EAによる集光器の最適化フローチャート<sup>(10)</sup>  
Fig.1 Optimization flow of evolutionary algorithm for optical geometry design of solar concentrator<sup>(10)</sup>

### 3. EAIによる非結像フレネルレンズの設計

#### 3.1 解析手法

EAで生成される個々のレンズ形状の性能を解析するために光線追跡法(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, その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, 集光面に収束するエネルギーを積分して求める解析手法であり, 山田らの既報<sup>(13)</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の公式に従って計算した. ただし, 光線がレンズ中を通過する際の吸収損失は考慮していない.

#### 3.2 解析モデル

フレネルレンズは凸型レンズを多数のセグメントに分割して余分な厚みを取り除いて薄平板状としたものである. 特に, 非結像フレネルレンズは許容入射半角を持たせることができるため, CPVシステムに多く採用されている<sup>(4-7)</sup>. 一般に太陽電池(PV)セルはセル表面への入射エネルギー分布が不均一になると発電効率が低下する. そのため, 集光器には高い光学的効率だけではなく, 発電に寄与する波長域全域におけるセル表面での入射エネルギー分布の均一性が求められる. そこで, 本報では非結像フレネルレンズを対象として, 均一集光を評価指標とするEAによる設計を試みた. 図2に解析モデルを示す. 解析はレンズの2次元断面のみを対象とした. また, 計算時間短縮のため, 光学系の対称性を考慮して半形状のみ解析を行った. 表1にフレネルレンズ仕様を示す. レンズ寸法はFLATCON<sup>(7)</sup>の寸法を参考に決定した. 比較対象とする通常非結像フレネルレンズ形状設計にはLeutz<sup>(8)</sup>ならびに秋澤ら<sup>(6)</sup>の既報を参考にした. なお, 太陽視直径は考慮していない.

#### 3.3 GA+IA操作と評価指標

一般にフレネルレンズは中心部から端部に向かってプリズム形状が変化する. 本報ではフレネルレンズを表1のプリズム幅 $w$ によって分割し, 分割部に対してEA(GA+IA操作)を適用した. 表1の設計条件に示すように分割数は50とした. 図3にフレネルレンズ形状に対するGA操作(交叉, 突然変異)の概略を示す. (a)交叉では2形状の頂点座標が一定割合で交換される. (b)突然変異では一定割合で頂点座標がランダムに変化して新形状が生成される.

また, 本報では, PVセル表面における入射エネルギー分布の均一性と光学的効率を両立するレンズ形状を探索する必要がある. そこで, 集光面における入射エネルギー

ギーの総和 $I_t$ と入射エネルギーの均一度を考慮した評価指標を均一集光度 $E$ として次式で定義する。

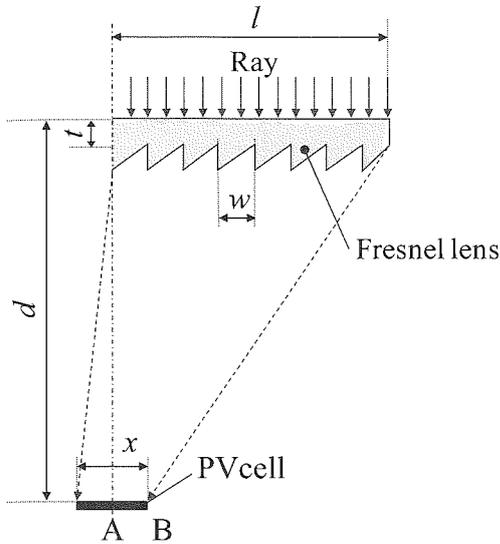


図2 二次元非結像フレネルレンズモデル  
Fig.2 2-D model of non-imaging Fresnel lens

表1 フレネルレンズ設計仕様

Table.1 Specification of non-imaging Fresnel lens

Geometrical concentration ratio	$C_g$	20
Lens length [mm]	$l$	20
Lens thickness [mm]	$t$	1
PV cell length [mm]	$x$	2
Prism width [mm]	$w$	0.4
Distance from lens to PV cell [mm]	$d$	80

辺第2項は平均入射エネルギーと $i$ 番目の集光面に入射したエネルギーとの差の総和に重み係数 $F$ を乗じたもので、入射エネルギーの不均一度を示している。 $F$ が大きいほど不均一度による $E$ の低下割合が大きくなる。

一方、IA操作では類似度の計算と類似判定値の設定が行われる。類似度 $S$ はある2形状が類似する度合いを示すもので、次式により定義する。

$$S = C - \sum_{i=1}^M \sqrt{(x_{1i} - x_{2i})^2 + (y_{1i} - y_{2i})^2} \quad (2)$$

ここで、 $C$ は類似定数 (Similarity index)、 $M$ は形状の頂点数、 $x_{1i}, y_{1i}, x_{2i}, y_{2i}$ は比較する2形状の頂点座標である。添え字 $i$ は頂点番号である。右辺第2項は2形状を形成する各頂点間距離の総和であり、低いほど類似していることを示す。この値が類似定数 $C$ を超えないとき (つまり $S > 0$ のとき)、2形状は類似していると判断し、2形状のうち評価の低い形状の類似判定値として類似度 $S$ を加算する。 $C$ を大きく設定すれば類似形状が多くなり、淘汰される形状が多くなるため、局所解への収束を抑制できる。その反面、評価の高い形状も類似形状として淘汰される可能性があるため、進化速度が遅くなる傾向がある。以降のプロセスは2章で述べたフローに従う。

### 3.4 EA実行条件

図2の解析モデルに対して均一集光度 $E$ によるEAを実行した。その際、光線入射角度を $\theta_{in} = 0^\circ$ と固定して解析を行った。また、波長分散の影響を比較・考察するため、レンズ材料をプラスチック材料であるPMMAと想定し、その屈折率を1.47898 ( $\lambda = 1.20\mu\text{m}$ ), 1.48350 ( $\lambda = 0.80\mu\text{m}$ ), 1.5095 ( $\lambda = 0.40\mu\text{m}$ )と3通りの波長に対応させて変化させ、各屈折率における $I_t$ および $I'_i$ の平均値を式(1)に代入して評価指標 $E$ を求め、EAを実行した。

式(1)の重み係数 $F$ を0.5, 集光面分割数 $N$ を100とし、IA操作はGA操作を5世代計算する毎に1度行うように設定した。そのほかのEA実行条件を表2に示す。

さらに本報では、1つのプリズムを形成する頂点数を5点および3点とする2通りのモデルを用いて比較を行った。図4にプリズム頂点数が5点の場合と3点の場合の概略を示す。

表2 EA実行条件

Table.2 Condition for EA calculation

Total number of optical geometries	200
Maximum generation limit	100
Crossover rate	0.5
Mutation rate	0.3
Total incident energy	$I_t$ 2500
Similarity index	$C$ 0.2

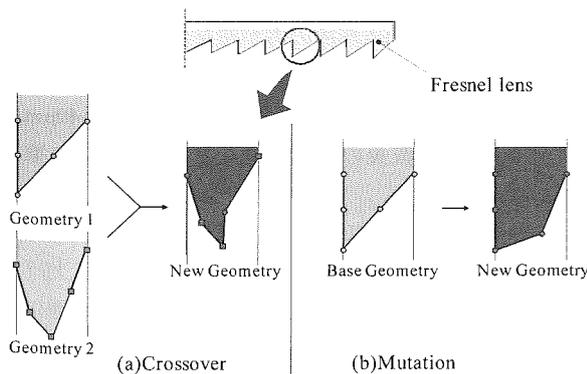
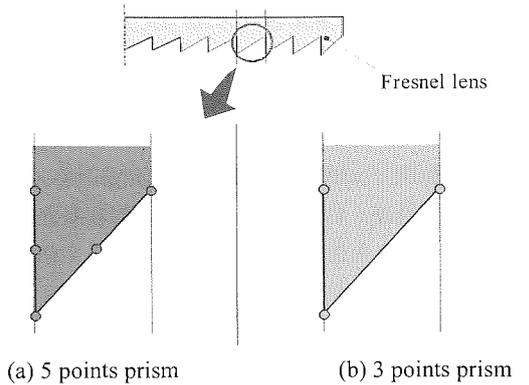


図3 フレネルレンズにおけるGA操作

Fig.3 Genetic operation for 2-D geometry of Fresnel lens

$$E = I_t - F \cdot \sum_{i=1}^N \left| \frac{I_t}{N} - I'_i \right| \quad (1)$$

ここで、 $F$ は重み係数、 $N$ は集光面の分割数、 $I'_i$ は $i$ 番目の分割集光面に入射したエネルギーである。式(1)の右



(a) 5 points prism (b) 3 points prism  
 図4 レンズ中の一つのプリズムを形成する頂点数  
 Fig.4 Vertex number of one prism of the Fresnel lens

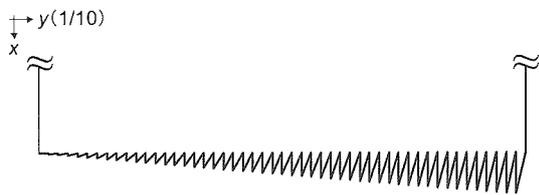


図5 従来フレネルレンズ形状  
 Fig.5 Conventional non-imaging Fresnel lens

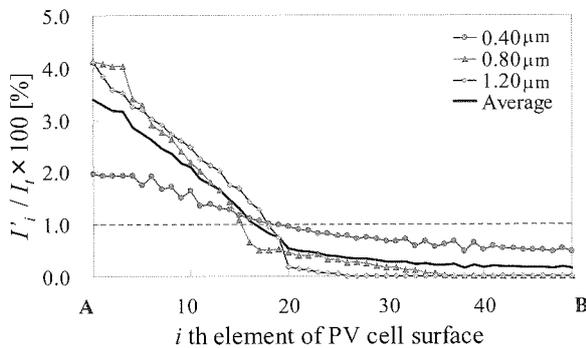


図6 従来フレネルレンズにおける集光面の  
 入射エネルギー強度分布  
 Fig.6 Conventional Fresnel lens Energy distribution  
 on PV cell surface

4. 結果と考察

4.1 従来フレネルレンズの集光面入射エネルギー分布

図5に比較対象となる従来の非結像フレネルレンズ（以下、従来フレネル）を示す。このレンズ形状をEA実行時の初期形状とする。また、図6に従来フレネルの集光面入射エネルギー強度分布を示す。各波長の強度分布と、さらに3つの波長の平均値もプロットした。これより従来フレネルでは集光面中心A付近で入射エネルギー強度が高く、端部Bに近づくにつれて入射エネルギー強度が低下していく不均一性が見られる。また3つの波

長の分布傾向には差があり、収差の影響が見られる。これらの特徴は他の報告例<sup>(7)</sup>とほぼ一致している。なお、3波長における光学的効率 $\eta$ は88.1%、均一集光度 $E$ は1156となった。均一集光度 $E$ は表2から右辺第二項が0の理想状態の時に理想値2500となることから、従来フレネルレンズでは理想値の半分以下となる。

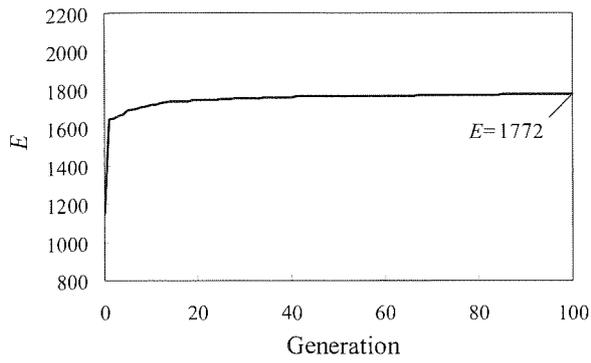
4.2 EA実行結果

図7～図9にEAを実行した結果を示す。各図の(a)がフレネルレンズを構成する一つのプリズム頂点数が5点（以下、5点形成）、(b)が3点の場合（以下、3点形成）の実行結果である。

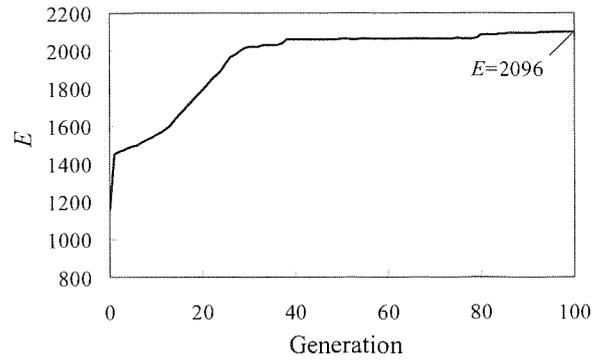
図7は評価指標の均一集光度 $E$ と世代数の関係である。評価指標 $E$ は世代交代にともなって向上しており、図7(a)の5点形成では約50世代目で進化が収束しているが、図7(b)の3点形成では約80世代目でも進化が行われている。100世代目における5点形成および3点形成の $E$ 値はそれぞれ1772および2096となり、これらは前述した従来フレネルの $E$ 値1156よりも高い。結果的には、3点形成の方が100世代目の均一集光性が優れている。3点形成の方がより均一性が高く、形状の自由度が低いために評価指標の向上が早く進んだと考えられる。

図8には100世代目のレンズ形状によるPVセル表面における入射エネルギー強度分布を示す。図中には各波長の強度分布と、さらに各波長の平均値もプロットした。これより、EAによって生成された非結像フレネルレンズ（以下、EAフレネル）では、図6に示した従来フレネルと比較して、波長平均のPVセル表面の強度分布の均一性が極めて高い。不均一性の度合いを示す式(1)の右辺第2項の値と比較すると、従来フレネルが1054に対して、5点形成が164、3点形成が58となった。EAフレネルでは5点形成よりも3点形成の方が波長平均の均一性が高い結果となった。しかしながら、波長毎の均一性については十分とは言えないことがわかる。特に、0.40 $\mu$ mの強度分布は他の2波長の分布と異なり、セル中心A寄りの部分で強度が低く、セル端部で強度が高くなっている。これは他の2波長では集光しにくいセル端部B付近の入射エネルギー強度を0.40 $\mu$ mの光束によって上げることで、波長平均値の均一性を向上させるように進化が行われたためと考えられる。

図9に100世代目におけるレンズ形状を示す。ただし、y軸方向は1/10に縮小して示した。形状の自由度が高い5点形成の図9(a)では3点形成の図9(b)に比べ全体として不規則なレンズ形状となっている。図9(b)ではレンズ中央部が曲面を描くような形状となるなど、5点形成の場合よりも緩やかな角度の形状となっている。これらの形状における3波長平均の光学的効率 $\eta$ は従来フレネルレンズが $\eta=88.1\%$ に対して、EAフレネルの5点形成が



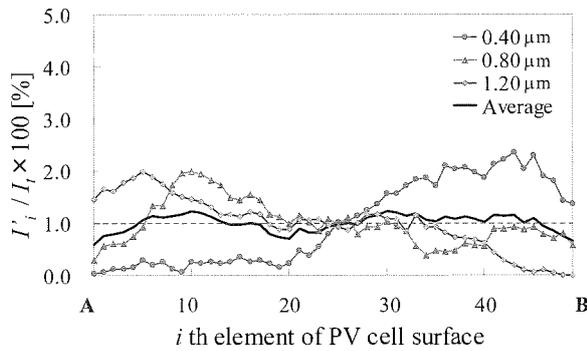
(a) 5点形成  
(a) 5points prism



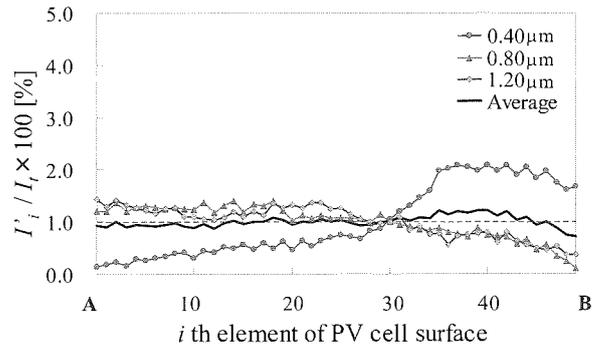
(b) 3点形成  
(b) 3points prism

図7 EA実行結果：均一集光度 $E$ と世代数の関係

Fig.7 Results of EA calculation: Relationship between index  $E$  and generation



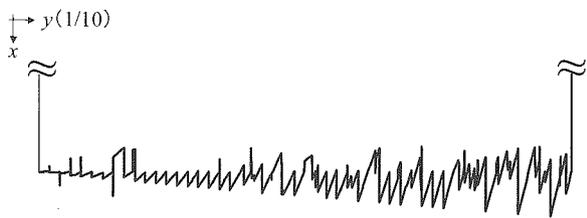
(a) 5点形成  
(a) 5points prism



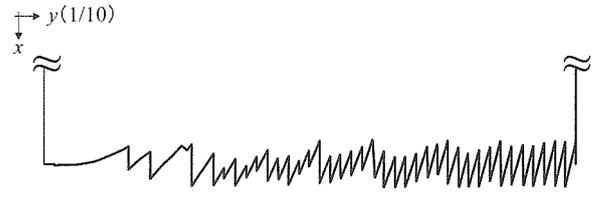
(b) 3点形成  
(b) 3points prism

図8 EA実行結果：100世代目のEAフレネルによるPVセル表面の入射エネルギー強度分布

Fig.8 Results of EA calculation: Energy distribution on PV cell



(a) 5点形成  
(a) 5points prism



(b) 3点形成  
(b) 3points prism

図9 EA実行結果：100世代目のEAフレネルのレンズ形状

Fig.9 Results of EA calculation: Optical geometry of EA Fresnel lens at 100th generation

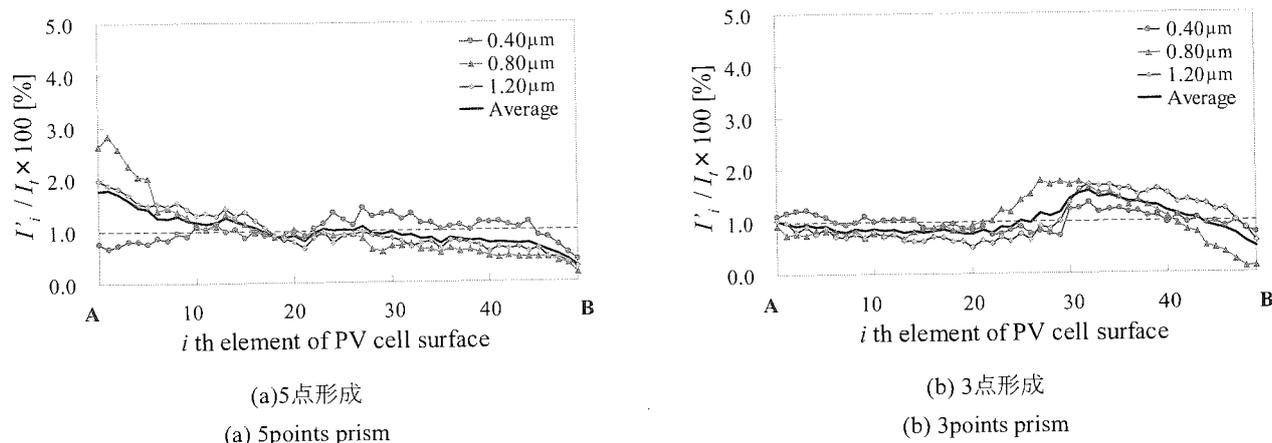


図10 EA実行結果：式(3)による評価指標Eを適用した際の100世代目EAフレネルによる入射エネルギー強度分布  
Fig.10 Results of EA calculation: Energy distribution on PV cell when index E defined by Eq.(3) was used

$\eta=77.4\%(-12.1\%)$ , 3点形成が $\eta=86.1\%(-2.27\%)$ となった。PVセル表面の入射エネルギー強度の均一性は向上したが、光学的効率は低下した。

### 4.3 選択波長におけるEAの実行結果

図8では、波長 $0.40\mu\text{m}$ の入射エネルギー強度分布が他の2つの波長に比べて不均一となったが、使用する太陽電池の波長感度特性や将来の集光型太陽光利用デバイスの用途によっては、特定波長帯での均一集光が要求される場合も想定される。そこで、図8では良好な均一集光性が得られなかった波長 $0.40\mu\text{m}$ の均一集光を最優先したEA設計を実行した。

前述のEA実行では、式(1)の $I_t$ および $I'_i$ に対して3波長平均の値を代入してEを決定していたが、これを次式のように変更した。

$$E = I_t - F \cdot \sum_{i=1}^N \left| \frac{I_t}{N} - I'_{mi} \right| \quad (3)$$

式(1)との違いは、 $I'_i$ を選択波長のみによる入射エネルギー $I'_{mi}$ に変更したことである。つまり、式(3)では入射エネルギーの不均一度を計算する際、選択波長のみを考慮することで、選択波長における均一性に特化した進化が期待できる。この場合においても、右辺第1項には3波長平均値を用いることで総入射エネルギーの減少、つまり光学的効率の低下を抑制する効果が期待できる。

図10に式(3)を適用した場合の100世代目のPVセル表面の入射エネルギー強度分布を示す。図10(a)が5点形成、図10(b)が3点形成の結果である。(a)(b)ともに $0.40\mu\text{m}$ における入射エネルギー強度分布は図8の場合よりも均一になっており、選択波長の入射エネルギー強度分布の均一性が向上した。しかし、逆に他波長での不均一性が高くなり、結果として3波長平均の入射エネルギー強度分

布は図8の場合に比べて不均一となった。式(1)の右辺第2項と比較すると5点形成および3点形成は、図8の場合は164および58に対し、図10では411および344となった。

以上のように、基本的には、EAによる均一集光非結像フレネルレンズ設計の有効性が示された。すべての波長に対して均一集光を満たす形状が得られるか否かは現時点では断定できないが、少なくとも特定波長に対して均一集光を得るレンズ設計が可能であることが示された。なお今回得られた形状(図9(a)および(b))は、図9(a)の一部分を除いて樹脂レンズ金型の製造が可能であることをレンズ加工業者より確認している。今後は、本手法を3次元形状の設計に発展させ、試作試験による検証などを行う必要がある。

### 5. 結言

本研究により、以下の知見を得た。

- (1) PVセル表面における入射エネルギー強度分布の均一性を加味した評価指標(均一集光度)を用いて進化的アルゴリズムを実行することにより、均一集光性を有する非結像フレネルレンズ形状が得られることが確認できた。そのレンズ形状の一例を示した。
- (2) 特定の波長に対して考慮した評価指標を用いることで、選択した特定波長の入射エネルギー強度分布の均一集光性を高められる傾向が確認された。進化的アルゴリズムを用いることで波長選択的な設計の可能性はある。

### 謝辞

本研究は、平成21年度JSTシーズ発掘試験(発展型)課題名05-B09「アドバンスド集光型太陽電池の開発」の助成を受けたものである。

参考文献

- (1) A.Antonini et al., Progress in Photovoltaic: Research and Applications, Vol.17(2009), pp.451-459.
- (2) 西村,西守,石原,JSES/JWEA講演論文集(2009),pp.137-140.
- (3) A.Mohr et al, Progress in Photovoltaic: Research and Applications, Vol.14(2006), pp.663-674.
- (4) G.Peharz and F.Dimroth, Progress in Photovoltaic: Research and Applications, Vol.13 (2005), pp.627-634.
- (5) M.Yamaguchi, T.Takamoto, K.Araki, Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol.90(2006), pp.3068-3077.
- (6) 秋澤, 柏木, JSES/JWEA講演論文集(2003), pp.277-280.
- (7) A.W.Bett et al., Proceedings of WCPEC-3, Osaka (2003), pp.634-637.
- (8) R.Leutz, A.Suzki, Nonimaging Fresnel Lenses Design and Performance of Solar Concentrators, Springer Verlag Heidelberg, 2001.
- (9) 田村,荒木,黒田,矢野,大角, JSES/JWEA講演論文集(2009),pp.135-136.
- (10) 山田,小川,J.JSES,Vol.35,No.2(2009),pp.53-60.
- (11) 中島,西村,西守,石原, JSES/JWEA講演論文集(2008),pp.377-380.
- (12) 尾関,吉川,寺井, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.105, No.476 (2005), pp.7-12.
- (13) 山田,中村,佐藤, J.JSES, Vol.35, No.1(2009),pp.57-64.