

進化的アルゴリズムによる集光P V用 プリズムアレイシートの最適設計

Optimization of Optical Geometry of Prism Array Sheet for Concentrating Photovoltaic by Using Evolutionary Algorithm

山田 昇^{*1}
Noboru YAMADA

小川 敬久^{*2}
Takahisa OGAWA

Abstract

This paper describes an optimization method of solar concentrating optics by using an evolutionary algorithm which has been developed in order to obtain an exact or approximate optimal solution in a complex system. The optimization procedure which incorporates ray tracing in the evolutionary algorithm was newly developed with combination of genetic algorithm and immunity algorithm. The method was demonstrated for optimization of optical geometry of two-dimensional solar concentrator which consists of prism concentrator and prism array sheet. The results show that the optical geometry of the prism array sheet was automatically generated and concentrating performance was improved in generations toward optimal solution. Furthermore, a unique selective concentration, in which incident rays selectively concentrates to designated section of PV cell surface, was achieved by using the present method.

キーワード: 進化的アルゴリズム, 遺伝的アルゴリズム, 免疫アルゴリズム, 最適設計, プリズムアレイシート, 光線追跡, 集光型太陽電池, 光学形状

Key Words: Evolutionary algorithm, Genetic algorithm, Immunity algorithm, Optimized design, Prism array sheet, Ray tracing, Concentrating photovoltaic, Optical geometry

1. 緒言

近年, 地球環境問題の対応策の1つとして太陽エネルギーの有効利用が課題となっており, 太陽光発電, ソーラーコレクタの普及が求められている. 高効率太陽電池は高価であり, 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. しかし, 多様な集光条件や設置条件に適した集光系の光学設計には, 試行錯誤に時間と労力を要する. 一例として, 山田ら⁽¹⁾が提案している微細構造を有するプリズム集光器は光学幾何形状の自由度が高く, 従来の光学設計手法では最適化が容易ではない.

そこで本研究では, 進化的アルゴリズム(Evolutionary algorithm; EA)を用いた集光系の最適設計手法の開発を目標とする. EAは多峰性問題における最適解の探索手法の1つで, 自由度の高い複合系において, モデリングと解析を反復する従来の探索手法よりも短時間で, ほぼ自動的に最適解あるいは最適解により近い解を得ることができる. 本報では2次元プリズム集光系を対象として, 光線追跡にEAを組み合わせた最適設計手法とこれを用いた最適解の探索結果について報告する.

2. 進化的アルゴリズム

EAは, 交叉, 突然変異, 淘汰などの生物の進化過程を用いたヒューリスティクスな最適化アルゴリズムの総称である. 本報では遺伝的アルゴリズムおよび免疫アルゴリズム, さらに両者を組み合わせたアルゴリズムを全てEAと呼ぶことにする. 以下, 図1の設計フローチャートに従ってEAを集光系の最適設計に適用する手法について述べる.

2.1 遺伝的アルゴリズム

遺伝的アルゴリズム(Genetic algorithm; GA)^(2~5)はJ. Hollandにより提案された手法で, 生物の進化過程を模した最適解探索手法である. 多くの派生手法が存在するが, ここでは以下の手順に従ってGA操作を行う.

- (1) あらかじめ M 個の個体が入る集合を 2 つ用意し, それぞれを「現世代」「次世代」と呼ぶ. 現世代に M 個の個体(解の候補)をランダムに生成する.
- (2) あらかじめ定義した評価指標により, 現世代の各個体の適応度をそれぞれ計算する.
- (3) ある確率で次の 3 つの動作のいずれかを行い, その結果を次世代に保存する. 個体を 2 つ選択して交叉を行う. 個体を 1 つ選択して突然変異を行う. 個体を 1 つ選択してそのまま複製する.
- (4) 次世代の個体数が M 個になるまで(3)を繰り返す.
- (5) 次世代の個体数が M 個になったとき, 次世代の各

^{*1} 長岡技術科学大学 准教授

^{*2} 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@vos.nagaokaut.ac.jp
(原稿受付: 2009年1月15日)

個体の情報を全て現世代に更新する（世代交代）。

- (6) 以上の動作をあらかじめ設定した最大世代数まで繰り返し、最終的に最も適応度（評価指標値）の高い個体を「解」として出力する。

以上の進化過程が機能すれば、世代数が増すごとに個体の評価が向上し、最適解に近づく。図1のフローチャートにおいてGA操作は①～④および⑧である。まず、集光系を構成するミラーやレンズなどの幾何形状情報を一個体と見做し、①適当な光学形状を解の候補としてランダム生成する。②生成した各形状について光線追跡を行い、あらかじめ定義した評価指標で集光性能を評価する。③2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ることで新形状を生成する（突然変異）。④良い評価の形状を残す（生存選択）。⑧あらかじめ設定した世代数に到達するまで②～④を繰り返す。以上のGA操作により最適解探索を行なうことができるが、本報ではGAの弱点を補うため、次に述べる免疫アルゴリズムをGAに組み合わせる。

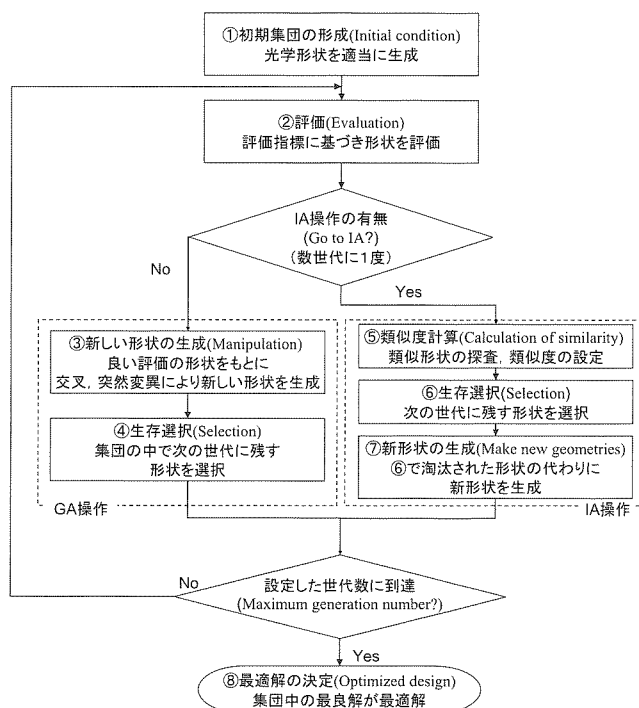


図1 EAによる集光系の最適化フローチャート

Fig.1 Optimization flow of evolutionary algorithm for optical geometry design of solar concentrator

2.2 免疫アルゴリズム

免疫アルゴリズム (Immunity algorithm; IA)^(6,7)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と考え、抗原を防御できる抗体を解として生成する過程を模擬している。様々な抗原に対して抗体の多様性を確保することが

IAの特徴の一つであり、集合内の解が十分に最適ではない局所解に収束することを緩和する仕組みを持つ。本報ではIAをGAと組み合わせることにより、局所解への収束を緩和する。具体的には以下の手順でIA操作を行う。

- (1) 2個体間の類似度(後述)を計算する。
- (2) 類似度が設定した閾値(後述)以上のとき、図1の②の結果、適応度の低い(評価指標値の低い)個体に対して、類似度を類似判定値として加算する。
- (3) (1), (2)により、全個体間の類似判定値を求める。
- (4) 類似判定値を用いて生存選択を行う。このとき、類似判定値が高い個体が淘汰される。
- (5) 淘汰された個体の代わりに新たに個体をランダムに生成し、集合内の個体数Mを保つ。

以上の操作により、集合内の個体が類似の局所解に近づくのを防ぎ、幅広く最適解探索を行なうことができる。図1のフローチャートにおいてIA操作は⑤～⑦である。⑤数世代に1度の頻度で類似度を計算し、⑥類似判定値に応じて1種類の類似形状の中で評価の高い形状を1つだけ残し、他の類似形状を削除する。⑦削除した形状数を補うため新形状をランダム生成する。以上のIA操作によりGAが陥りやすい局所解への収束の緩和を図る。

3. EAIによる集光系の最適設計

EAは集光型太陽電池やソーラーコレクタなどの多様な集光系の光学設計に対応できると考えられるが、本報では一例として、形状が複雑で従来手法による最適化が困難なプリズム集光器とプリズムアレイシートから成る集光型太陽電池の2次元集光系⁽¹⁾⁽⁸⁾を設計対象とする。

3.1 解析手法および基礎式

EAにおいて生成される個々の光学幾何形状における集光特性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る。既報⁽¹⁾と同様の基礎式を用いて、物体との境界面に光線が到達した際の屈折角をSnellの法則、反射率および透過率をFresnelの法則に従って計算した。ただし、光線が物体中を通過する際の吸収によるエネルギー減衰については考慮していない。

3.2 プリズム集光系の解析モデル

プリズム集光器は、プリズムの光学形状や受光面への光線入射角度（以下、入射角）によって集光特性が変化する。山田ら⁽⁸⁾は、プリズム集光器の受光面に微細プリズムアレイ構造を有する光機能性シート(以下、プリズムアレイシート)を設置することで、入射角依存性の制御が可能であることを報告している。

図2にプリズムアレイシートを設置したプリズム集光器の解析モデルを示す。プリズムアレイシートに入射角 θ_{in} で入射した光線は屈折し、受光面ABに入射する。次いでBC面に設置した反射面で反射し、さらに一部の光線は表面ABで全反射した後、集光面AC (PVセル面) に入射する。 $\angle ABC$ を θ_i 、 $\angle BAC$ を θ_{sc} とする。本報では、プリズム集光器形状と入射角を固定し、プリズムアレイシートのみに対してEAによる最適設計手法を適用する。

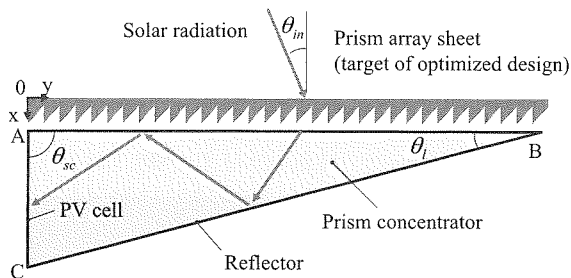


図2 プリズムアレイシート付プリズム集光器の2次元解析モデル

Fig.2 Two-dimensional model of prism concentrator combined with prism array sheet

3.3 GAの適用

コード化は光学形状をGAの解の候補として数値化する作業であり、進化過程は交叉・突然変異によって新形状を生成する過程である。図3にプリズムアレイシート形状のコード化と進化過程を示す。

さらに、GAでは2.1で述べたように評価指標をあらかじめ定義しなければならない。本報では集光器の集光性能の評価指標として3つの指標を次のように定義した。

エネルギー密度集光比 C_f は、受光面における単位面積当たりの入射エネルギー I_{ap} と集光面における単位面積当たりの入射エネルギー I_{sc} の比で、次式より定義できる。

$$C_f = I_{sc} / I_{ap} \quad (1)$$

ただし、入射角 θ_{in} の光線に対して余弦則に従って受光面投影面積が減少するため、 $C_f \cos \theta_{in}$ を実効集光比として定義し、第1の評価指標とする。

一方、PVセルは通常、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。そこで集光面への入射エネルギーの総和 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 として次式で定義し、第2の評価指標とする。

$$E = I_t - F \cdot \sum_{i=1}^N \left| \frac{I_i}{N} - I'_i \right| \quad (2)$$

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(2)の右辺第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。

また、ある種のPVセルの表面には電極などの発電に寄与しない部分があり、これらへ入射する光線は損失となる。とくに高倍率集光に使用される高効率PVセルは表面上に電極の占める割合が高い⁽¹⁰⁾。もし、光線を電極などを避けて部分選択的に集光できれば効率向上に繋がる。そこで、EAを用いて選択集光が可能な光学形状を探索するため、集光面の一部に非集光部を設定し、非集光部への入射エネルギーが大きいほど値が小さくなる第3の評価指標を選択集光度 P として次式に定義する。

$$P = I_t - G \cdot I'_p \quad (3)$$

ここで、 G は重み係数、 I'_p は非集光部への入射エネルギーであり、 $G I'_p$ 値が高いときには評価値 P が低くなる。

3.4 IAの適用

IA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。

$$S = C - \sum_{i=1}^M \sqrt{(x_{1i} - x_{2i})^2 + (y_{1i} - y_{2i})^2} \quad (4)$$

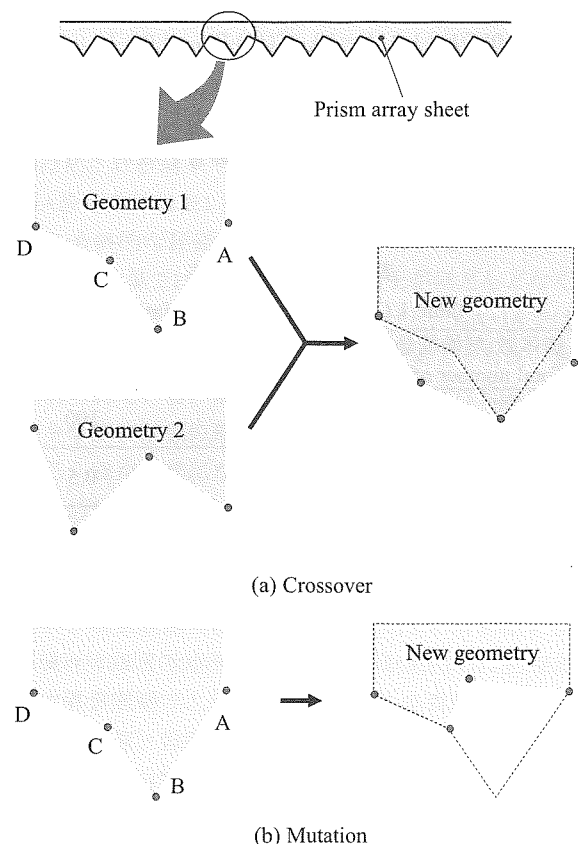


図3 プリズムアレイシートのコード化および進化過程
Fig.3 Coding and manipulation processes of two-dimensional optical geometry of prism array sheet

ここで、 C は類似定数、 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、この値が右辺第1項の類似定数 C を超えないとき、つまり類似度 S が正のときに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。本研究では類似定数 C を $C=W/8.0$ とした。ここで W はプリズムアレイシートの1周期の幅(図4中のUnit geometryの横幅)である。 C を小さく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。以降のフローは2.2で述べた。

4. 解析および設計条件

図2の解析モデルに対して前述の3指標によるEAを適用して最適解探索を実行した。ここではプリズム集光器の幾何学的集光比を10, $\theta_{sc}=90^\circ$, 入射角 $\theta_m=0^\circ$ と固定した。また、集光器およびプリズムアレイシートの材料にはPMMAを想定し、屈折率を1.49(代表波長0.53 μm)とした。本報ではEAによる集光系の最適設計手法の有効性の検証を主目的とするため、計算時間の増大につながるPMMA内部の吸収によるエネルギー減衰と波長分散は考慮せず、反射面の反射率は1とする簡略化を行った。また、式(10)の $F=1.0$, $N=10$, 式(11)の $G=5.0$ とし、IA操作を組み合わせる場合には、GA操作を5世代計算する毎に1度の頻度でIA操作を行うように設定した。以降、これをGA+IAと表記してGA操作のみの場合と区別する。そのほかのEAの条件は表1にまとめる。

表1 EAの設定条件

Table.1 Condition for EA calculation

個体数(解候補数)	500
Total number of optical geometries	
世代数	100
Maximum generation limit	
交叉率	0.5
Crossover rate	
突然変異率	0.3
Mutation rate	

EAでは自由度の高い複雑な光学形状の形成が可能であるが、加工技術などに起因する製造上の制限を課すことによって計算時間が短縮され、且つ製造可能な範囲で最適な形状を探索できる。したがって本報においても、プリズムアレイシートの形状形成にある程度の制限を課した。以下に本報で採用した2種類の形状形成法である周期形状形成と逐次形状形成について述べる。

4.1 周期形状形成

図4に周期形状形成の概略を示す。まず、1周期4頂点から成る周期形状のベース形状をランダム形成する。次に、このベース形状を100周期分並べていく。このときベース形状同士を繋ぐ2頂点が著しく離れないように制限することでプリズムアレイシート形状を形成する。全体形状の形成後に光線を入射してEAを実行する。また、本報ではEAによる設計の柔軟性を確認するため、最適化のプロセスの中で周期形状の任意の線分に反射面が設置され得る自由度を与え、自由度を与えなかった場合と比較した。

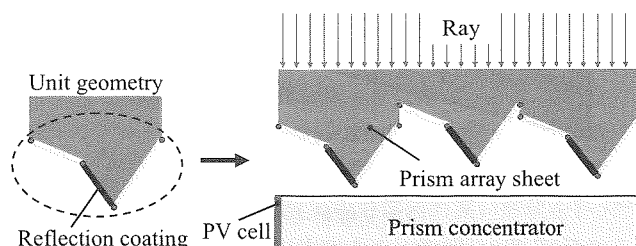


図4 プリズムアレイシートの周期形状形成
Fig.4 Periodic formation of prism array sheet

4.2 逐次形状形成

図5に逐次形状形成の概略を示す。まず、プリズムアレイシート全体を等分割し、1つの分割部当たりの頂点数を決める。次に、集光面に最も近い分割部(図5のSection 1)に光線を入射させてEAを実行し、Section 1の最適解探索を完了する。最適化されたSection 1の形状を記憶した後に、隣接の分割部(図5のSection 2)に移り、同様に最適解探索を行う。この操作を繰り返すことにより、逐次的に形状形成していく。本報では分割数を100、分割部の形成頂点数を4とした。また、ここでも任意の線分に反射面が設置され得る自由度を与えた(以降、自由度を与えた場合を反射面設置、与えない場合を反射面非設置と呼ぶ)。なお、本報では評価指標 P による選択集光形状の最適解探索にのみ逐次形状形成を採用した。

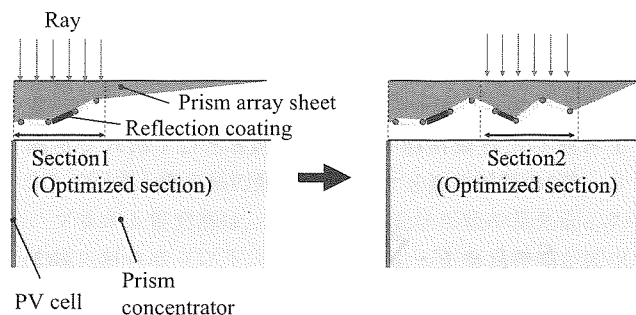


図5 プリズムアレイシートの逐次形状形成
Fig.5 Sequential formation of prism array sheet

5. EAIによる最適解の探索結果

図6に周期形状形成によるGA+IAの実行結果を示す。各図には $C_f \cos \theta_m$ および E を適応度の評価に用いたケースのGA+IA実行結果をプロットした。両ケースについて反射面設置および非設置の結果もプロットした。図6(a)には各世代における $C_f \cos \theta_m$ の変化を、図6(b)には E の変化を示す。(a)を見ると、 $C_f \cos \theta_m$ を適応度の評価に用いた実行結果(以降、これを“ $C_f \cos \theta_m$ による結果”のように表記する)は世代交代が進むにつれて $C_f \cos \theta_m$ が向上している。一方、 E による結果の $C_f \cos \theta_m$ はこれよりもやや低く、進化途中で一旦減少しているケースもある(反射面非設置時)。同様に、(b)では、 E による結果は世代交代が進むにつれて E が向上しているが、 $C_f \cos \theta_m$ による結果はこれよりも低く、進化途中で減少しているケースもある(反射面非設置時)。これより、適応度の評価に用いた評価指標値が世代交代を経て向上するようにEAが機能していることがわかる。

$C_f \cos \theta_m$ による結果では100世代分の計算が終わった時点で、反射面設置時の $C_f \cos \theta_m$ が5.72、非設置時の $C_f \cos \theta_m$ が3.82となった。集光系の幾何学的集光比が10であることから進化途中の可能性があり、より評価の高い解を得るためには、世代数の増加とプリズム集光器本体も含めた最適化が必要と考えられる。一方、 E による結果では100世代分の計算が終わった時点で反射面設置時の E が213.1、非設置時の E が154.2となった。一方、プリズムアレイシート非設置の場合と、既報⁽¹⁾で報告した典型的なプリズムアレイシート(プリズム頂点のブレイズ角が 45° で均一)を設置した場合の評価指標値を表2に示す。これと上述の図6の結果を比較すると、本手法による評価指標値の方が反射面設置時で約5倍、非設置時で約3倍高く、本手法の有効性がわかる。

表2 プリズムアレイシート非設置時およびブレイズ角 45° 均一のプリズムアレイシート設置時の評価指標値
Table.2 and evaluated in case without prism array sheet and in case with 45° uniform prism array sheet on the present prism concentrator

	$C_f \cos \theta_m$	E
プリズムアレイシート非設置 Result without prism array sheet	1.11	27.9
ブレイズ角 45° 均一の プリズムアレイシート設置 Result with 45° uniform prism array sheet	1.27	15.8

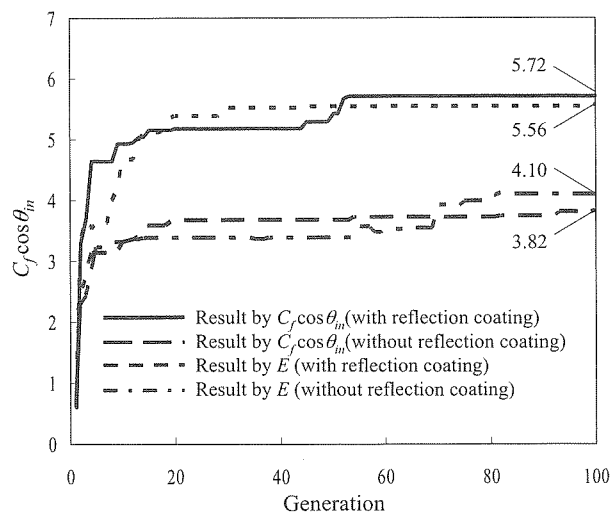
図7(a)~(d)に図6の100世代目のプリズムアレイシート形状の全体図とその一部分の拡大図を示す。全体図はy方向を1/10に短縮している。(a)、(c)は反射面設置、(b)、(d)は非設置の結果である。(a)、(b)の拡大図を比較すると、ど

ちらも大小の山状の周期構造となっており類似している。また、反射面設置の(a)と(c)では集光面(PVセル面)方向と反対側の斜面線分に反射面が形成されている。反射面設置によって集光性能が高められる傾向がある。これらの結果は本手法による柔軟な集光系への適用可能性を示している。ただし、このような部分選択的な反射コーティングの製作上の可否については今後の調査研究が必要である。

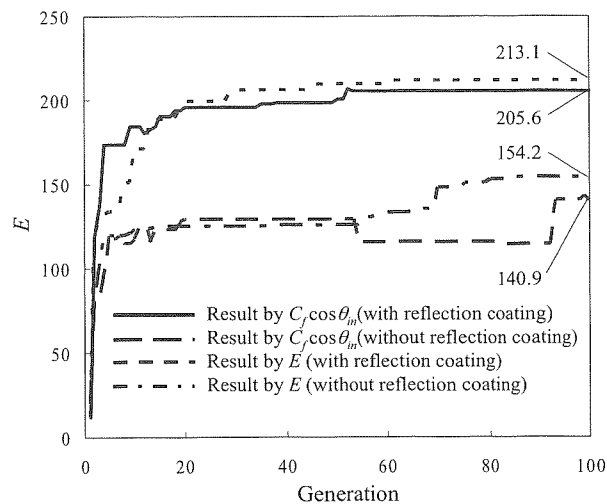
図8に100世代目のプリズムアレイシートを適用した際の集光面(PVセル面)ACにおける入射エネルギー分布を示す。縦軸は集光面ACへの全入射エネルギーの総和 I_t に対する i 番目の分割集光面に入射したエネルギー I'_i の比であり、横軸は分割集光面の番号 i である。図8(a)は反射面設置、図8(b)は非設置の結果である。(a)では、 $C_f \cos \theta_m$ による結果よりも均一性を加味した E による結果の方が集光面でのエネルギー分布の均一性が高い。式(2)の右辺第2項の不均一度を比較すると $C_f \cos \theta_m$ による結果が23.3であるのに対し、 E による結果は9.3となり、 E の値を高めるようにEAが機能したことがわかる。

一方、(b)を見ると、反射面非設置の場合は両指標による結果の差異は小さく、式(10)の右辺第2項の不均一度を比較すると $C_f \cos \theta_m$ による結果が11.9であるのに対し、 E による結果は9.8となっている。これより、本設計条件下では反射面設置の自由度を与えることが均一性の達成に重要な条件であることがわかる。

図9に図6のGA+IAの実行結果とGAのみの実行結果⁽¹¹⁾との比較を示す。図9(a)は $C_f \cos \theta_m$ による結果であり、図9(b)は E による結果である。いずれも反射面設置である。EA設定条件は表1と同様である。(a)、(b)ともにIA操作により最終的な評価値が向上している。とくに(b)ではGAのみの結果では10世代目以降の向上がほとんどなく局所解への収束状態が続いているのに対し、GA+IAでは断続的に評価が向上し、最終的にGAの結果よりも高い評価値が得られている。局所解への収束状態では集合内の多くの光学形状が類似形状になり進化が停滞する確率が高くなる。収束状態になると、交叉によって生成される形状も類似形状となり、収束状態から脱却することが困難になる。突然変異では全く異なる形状を生成する可能性があるため、交叉よりも収束状態から脱却する可能性が高いが、収束状態では局所解とほぼ同等の評価値を持つ類似形状が多く存在するため、突然変異により生成された形状の評価値がこれらの評価値よりも高くなければ生存選択されず、収束状態から脱却する確率は低くなる。このため図9のGAのみの結果では収束状態とみられる進化の停滞がある。一方、IA操作では定期的に類似形状が削除され、局所解と同等の評価値を持つ形状数がGAのみに比べて少なくなるため、類似形状を淘汰した分

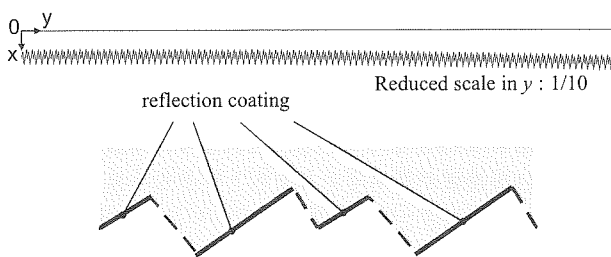


(a) 各設計条件による $C_f \cos \theta_m$ の進化過程
(a) Relationship between $C_f \cos \theta_m$ and generation



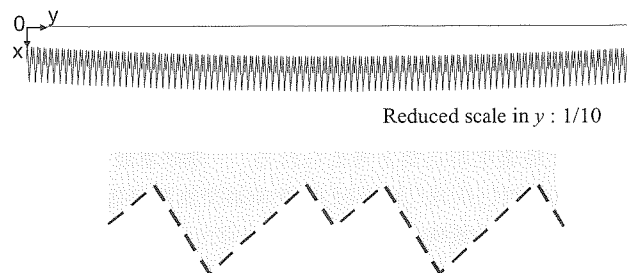
(b) 各設計条件による E の進化過程
(b) Relationship between E and generation

図6 各設計条件によるGA+IA実行結果
Fig.6 Result of GA+IA calculation for various conditions



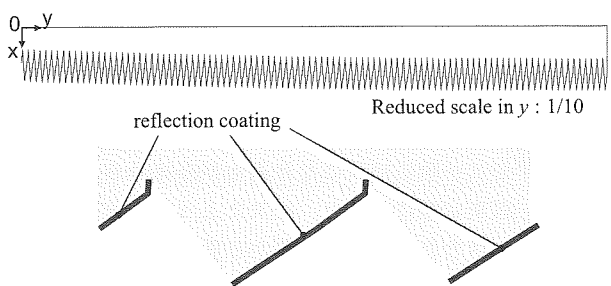
(a) $C_f \cos \theta_m$ を適応度の評価指標に用いた場合
(反射面設置)

(a) Generated geometry by $C_f \cos \theta_m$ with reflection coating



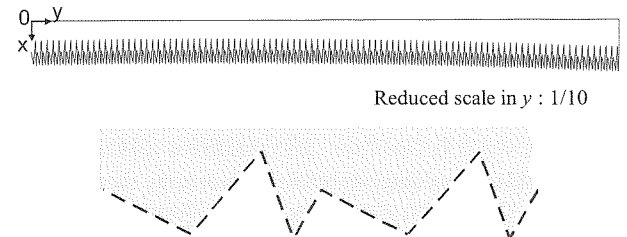
(b) $C_f \cos \theta_m$ を適応度の評価指標に用いた場合
(反射面非設置)

(b) Generated geometry by $C_f \cos \theta_m$ without reflection coating



(c) E を適応度の評価指標に用いた場合
(反射面設置)

(c) Generated geometry by E with reflection coating

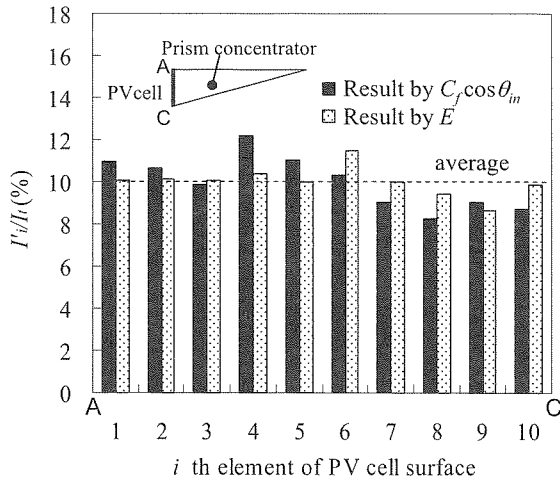


(d) E を適応度の評価指標に用いた場合
(反射面非設置)

(d) Generated geometry by E without reflection coating

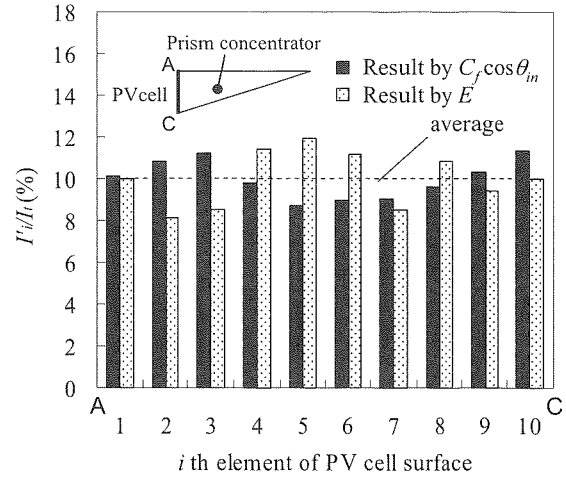
図7 GA+IAによって生成された100世代目のプリズムアレイシート形状
(上：全体図 (y方向のみ1/10に短縮)，下：一部拡大図)

Fig.7 Generated geometry of prism array sheet by GA+IA at 100th generation (upper: whole sheet, lower: a part of the sheet)



(a) 反射面設置

(a) With reflection coating

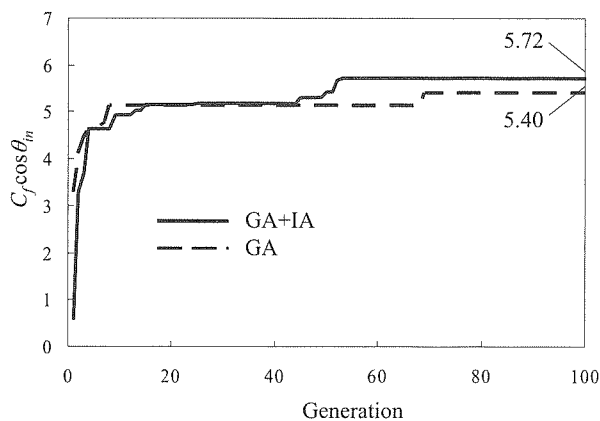


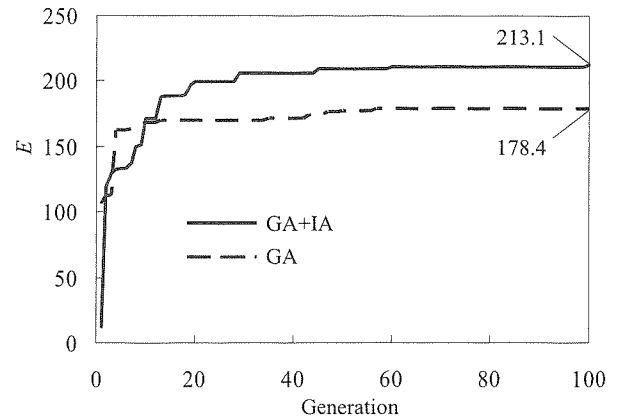
(b) 反射面非設置

(b) Without reflection coating

図8 GA+IAによって生成された100世代目のプリズムアレイシート形状を用いた際の集光面(PVセル面)上の入射エネルギー強度分布

Fig. 8 Energy distribution on PV cell surface when using 100th generation's prism array sheet


 (a) $C_f \cos \theta_{in}$ の進化過程

 (a) Relationship between $C_f \cos \theta_{in}$ and generation

 (b) E の進化過程

 (b) Relationship between E and generation

図9 GA+IA実行結果とGA実行結果の比較 (反射面設置)

Fig.9 Comparison between result of GA+IA calculation and GA calculation with reflection coating

だけ新たに生成した形状や突然変異により生成された形状が生存する確率が高くなる。以上の理由により、GA+IAではGAのみの場合よりも局所解への収束状態から脱却し易くなる傾向が確認された。

図10には、選択集光を目的とする評価指標 P と逐次形状形成を用いたGA+IAで得られたプリズムアレイシートを適用した際の集光面(PVセル面)ACへの入射エネルギー分布を示す。ただし、図10は反射面設置時の結果である。縦軸は集光面ACへの全入射エネルギーの総和 I_t に対する i 番目の分割集光面に入射したエネルギー I_i の比であり、横軸は各分割集光面の番号 i である。あらかじめ非

集光部として設定した $i = 9 \sim 11$ の分割集光面では、他の分割集光面よりも顕著に入射エネルギーが低く、所期の目的のとおり非集光部への集光を避けた集光効果が得られていることがわかる。このようにEAでは要求する集光性能に適切な評価指標を適応度として用いることで従来よりも多彩な集光系の最適設計ができる可能性が示された。図11に図10の結果を得た選択集光プリズムアレイシート形状の全体図とその一部分の拡大図を示す。本研究で設計した形状は製造が困難であるが、加工製造上の制約をEAの形状形成プロセスに課すことで加工精度にみあった最適形状の設計を行うことができると考えている。

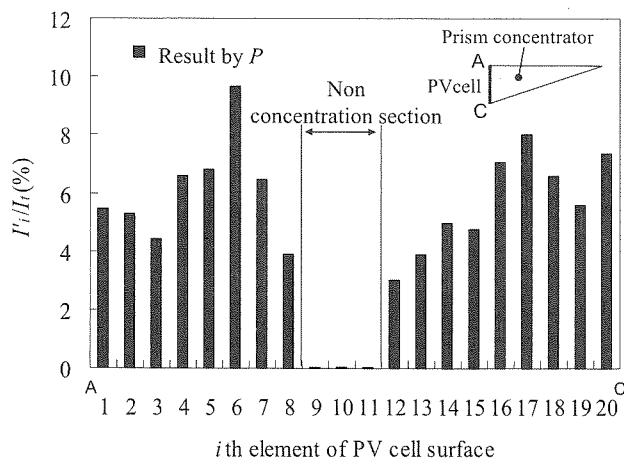


図10 評価指標 P によって生成された選択集光プリズムアレイシートを用いた場合の集光面(PVセル面)上の入射エネルギー強度分布(反射面設置)

Fig. 10 Energy distribution on PV cell surface when applying the geometry generated by using P as evaluation index with reflection coating

6. 結 言

本研究では、2次元プリズム集光系を対象として、光線追跡に進化的アルゴリズムを組み合わせた設計手法を用いて最適解探索を行い、以下の知見を得た。

- (1) 実効集光比、入射エネルギー分布の均一性を加味した評価指標、および選択集光性を加味した評価指標をそれぞれ適応度の評価に用いた進化的アルゴリズムを実行することにより、世代交代につれて各評価指標が高くなるプリズムアレイシートの光学形状が生成される傾向が示された。
- (2) プリズムアレイシート形状の形成において部分選択的な反射面が設置され得る自由度を与えることにより、集光性能を高める効果や従来の集光系では達成困難な部分選択的な集光を可能とする集光系の探求を可能にするなどの進化的アルゴリズムによる設計の有効性が示された。
- (3) 進化的アルゴリズムとして遺伝的アルゴリズムと免疫アルゴリズムに着目し、両者を組み合わせることで局所解への収束状態を回避して、より広範な最適解の探求ができることが示された。

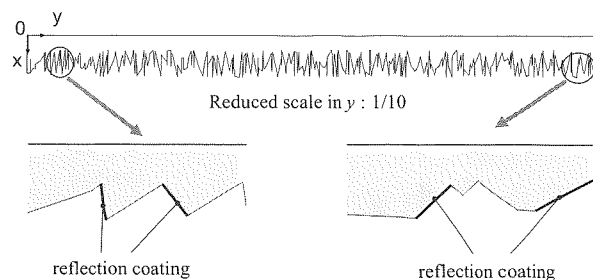


図11 評価指標 P によって生成された選択集光プリズムアレイシート形状
(上：全体図(y 方向のみ1/10に短縮)，下：一部拡大図)
Fig.11 Geometry of prism array sheet obtained by using P as evaluation index with reflection coating
(upper: whole sheet, lower: two parts of the sheet)

参考文献

- (1) 山田,中村,佐藤, JJSSES, Vol.35, No.1 (2009), pp.57-64.
- (2) L.Davis, 遺伝的アルゴリズムハンドブック, 森北出版(1992).
- (3) 小野,小林,吉田, 光学, Vol.28, No.12(1999), pp.650-656.
- (4) 小野,小林,吉田, *Opt. Des.*, No.20(2000), pp.16-25.
- (5) 池田, 京都大学学術情報メディアセンターシンポジウム報告集, No.3(2005), pp.37-40.
- (6) 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.
- (7) 野瑞,本間, 計算工学講演会論文集, Vol.9(2004), pp.419-422.
- (8) 中村,山田,内田, JSSES/JWEA 講演論文集 (2006), pp.337-340.
- (9) 牛山,草川, シミュレーション光学, 東海大学出版会(2003), pp.29-51.
- (10) O.Korech, J.M.Gordon, E.A.Katz, D.Feuermann, N. Nisenberg, *Optics Letters*, Vol.32, No.19(2007), pp.2789-2791.
- (11) 小川,山田, JSSES/JWEA 講演論文集(2008), pp.373-376.