

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

Optical Analysis of Nonimaging Fresnel Lens with Negative Index Layer

山田 昇^{*1}
Noboru YAMADA

岡本 和也^{*2}
Kazuya OKAMOTO

Abstract

The conventional high concentration nonimaging Fresnel lens tends to require a long lens height over absorber level and allows small deviation angle, i.e., tracking error. Therefore, exploring a new lens which breaks through the limit of the conventional Fresnel lens is an important issue. In this study, optical performance of nonimaging Fresnel lens with an ideal negative index layer was analyzed by ray-tracing for geometric concentration ratio of 500, 1000 and 2500. The result shows that the lens height of the negative index Fresnel lens can be a half of the conventional one, and that the acceptance deviation angle which retains optical efficiency with 80% of that without deviation angle can be approximately two times wider than that of the conventional one.

キーワード：集光器，負の屈折率層，光線追跡法，光学設計

Key Words：Concentrator, Negative index layer, Ray-tracing, Optical design

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，発電効率が40%を超えるPVセルが出現している。しかし，高価であるため，ミラー・レンズ等の集光器（Concentrator）を用いた高効率化・低コスト化が進められている^{(1) (2)}。これら集光型太陽光発電（Concentrating Photovoltaic：CPV）に適した集光器の1つとして非結像フレネルレンズが利用されている。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^{(3) ~ (7)}。し

かし，高集光倍率であるほど，レンズ－受光部間距離（以降レンズ高さと呼ぶ）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，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^{(8) (9)}。なお，非結像フレネルレンズはCPVだけではなく，比較的小規模の集光太陽熱発電（Concentrating Solar Power：CSP）にも適用されており⁽¹⁰⁾，太陽光の集光／集熱において重要な要素技術であると言える。

一方，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／フォトニ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^{(11) (12)}。原理的には物質内の透磁率，および誘電率を人為的

^{*1} 長岡技術科学大学 准教授

^{*2} 長岡技術科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: +81-258-46-6000
E-mail: noboru@nagaokaut.ac.jp
（原稿受付：2011年2月14日）

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ニ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^{(13) (14) (15)}。例えば Valentine らによって、波長範囲 1600 ~ 1750nm において $-0.5 \sim -1.5$ の負の屈折率が実験的に報告されている⁽¹³⁾。また、Rajput らは解析により可視光域で $0 \sim -1.5$ 程度の負の屈折率が得られることを報告している⁽¹⁴⁾。こういった最先端の光学技術を太陽光集光に適用することによって、どのような効果が得られるのかを検証しておくことは有意義であると考えられる。

そこで本報では、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検証した結果について報告する。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。

2. 負の屈折と非結像集光

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、図 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⁽¹²⁾。つまり、以下の Snell の法則が適用される。

$$\frac{\sin \theta_A}{\sin \theta_B} = \frac{n_B}{n_A} \quad (1)$$

したがって、光線追跡法 (Ray-tracing) による解析を行うことができる。

2.2 非結像集光

カメラなどの一般的な光学機器に求められる性能は焦点での結像性である。一方、太陽エネルギー利用では結像性は重要ではなく、CPV, CSP におい

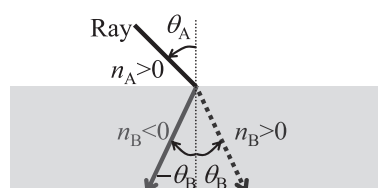


図 1 負の屈折率層における屈折
Fig.1 Refraction in negative index layer

とともに求められる性能は高い光学的効率 η である (CPV では集光面でのエネルギー分布の均一性も求められる)。ここで、光学的効率 η は受光面への入射エネルギーが集光面に収束される割合として定義される。このような集光系の設計には非結像光学が用いられる。非結像光学では許容入射角を考慮した幾何光学設計により、要求される許容入射角に対して最大限に光学的効率を高める光学形状の設計が行える。上述のように負の屈折に対しても幾何光学が適用できるため、本研究では非結像フレネルレンズの設計理論として適用事例の多い Edge Ray Principle を用いた⁽⁹⁾。

3. 解析モデルおよび手法

図 2 に負の屈折率層を導入した非結像フレネルレンズ (Negative Index Fresnel Lens: 以下 NIFL), および従来の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。図 2 (a) および (b) 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、図 2 (c) に示すように受光面および集光面 (図中では集光面を太陽電池セルと仮定し、PV cell と記載した) 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。設計条件を表 1 に示す。NIFL および PIFL ともに幾何学的集光比 $C_g (= A/B) = 500, 1000, 2500$ 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% の集光はしない。

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 ($\eta_{\max}$) となるレンズ形状を決定した。その際、表 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

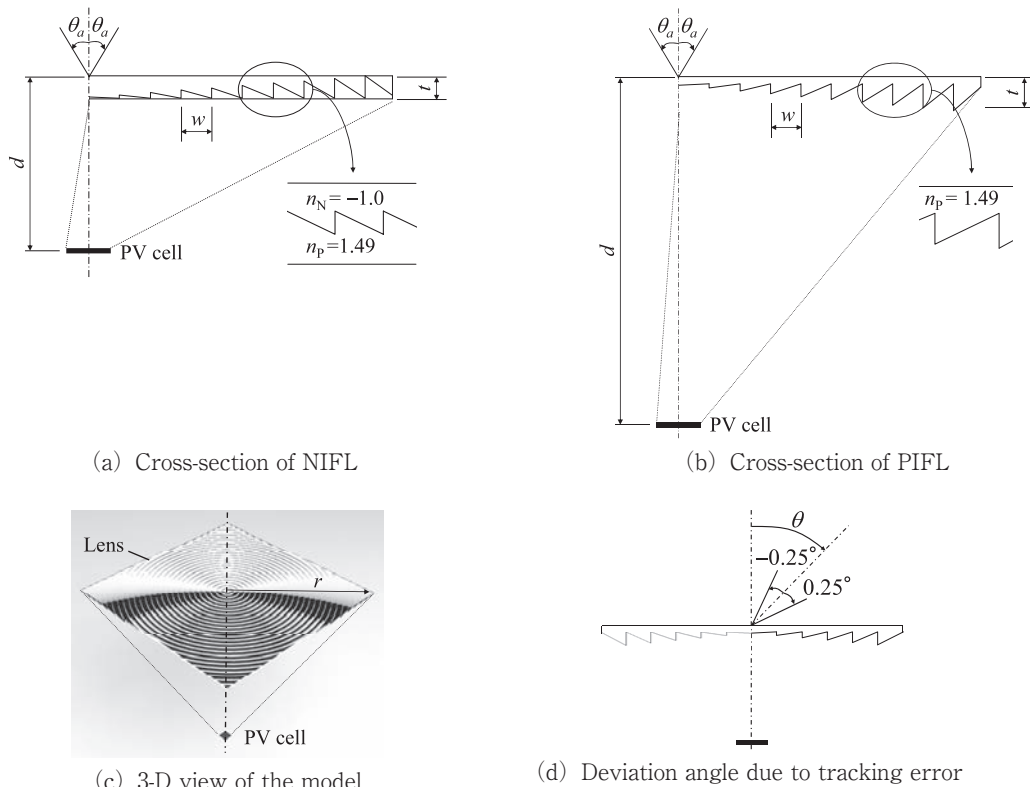


図2 非結像フレネルレンズの解析モデル
(図中の θ は追尾誤差角, ± 0.25 は太陽視半径に相当する角度範囲を示す)
Fig.2 Simulation model of nonimaging Fresnel lens

表1 フレネルレンズの設計パラメータ
Table 1 Design parameters of the simulated Fresnel lens

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

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, 図2 (d) 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, NIFL の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・評価するために光線追跡法を用いた. 光線追跡法は, 光源からエネルギーを持った光線を多数射出し, 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, 筆者らの既報⁽¹⁶⁾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, 本解析では光線がレンズ中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り, レンズの大小による解析結果への差は生じない. したがって, 本論文においてこれら寸

法値の単位は無次元とする。

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、追尾装置との組み合わせが必須となる。一般に、追尾装置の追尾精度を低くできるほど良い。つまり、追尾誤差角 θ が大きくなってで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⁽¹⁷⁾。

4. 解析結果および考察

図3上段にNIFLおよびPIFLのレンズ高さ d と光学的効率 $\eta_{\max}$ 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度範囲 $\pm 0.25^\circ$ の光束を入射した場合の結果である。 $C_g = 500$ お

よび $C_g = 1000$ においては、NIFLとPIFLの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。しかし、PIFLではレンズ高さが短くなるとレンズ形状が決定できなくなるのに対して、NIFLではPIFLよりも短い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($C_g = 500$ では $d = 20$ でも $\eta = 80\%$ 、 $C_g = 1000$ では $d = 20$ でも $\eta = 68\%$ が得られている)。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の光学的効率がPIFLに勝り、NIFL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 $\eta_{\text{peak}} = 59\%$ が得られるレンズ高さ $d = 140$ の約70%になっている。また、 $C_g = 500$ において $\eta = 80\%$ 、 $C_g = 1000$ において $\eta = 67\%$ 、 $C_g = 2500$ に

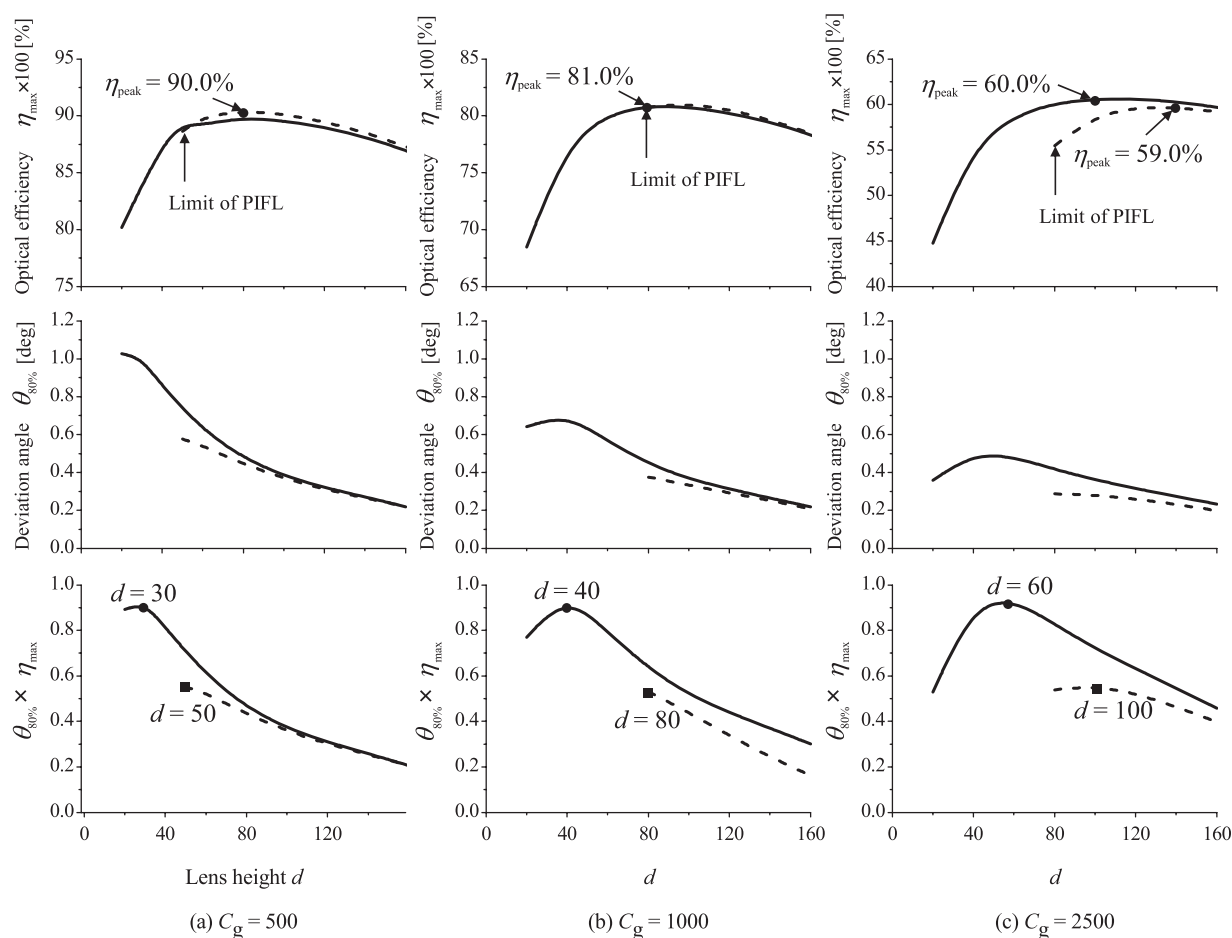


図3 【上段】 追尾誤差が無い場合の光学的効率 $\eta_{\max}$ とレンズ高さ d の関係
【中段】 追尾誤差角 $\theta_{80\%}$ とレンズ高さ d の関係
【下段】 光学的効率 $\eta_{\max}$ と追尾誤差角 $\theta_{80\%}$ の積とレンズ高さ d の関係
実線：NIFL、破線：PIFL

Fig.3 Relationship among optical efficiency (top), deviation angles which performs optical efficiency of 80% (middle), $\eta_{\max} \times \theta_{80\%}$ (bottom), respectively, and lens height. Solid line : NIFL, Dashed line : PIFL

において $\eta = 45\%$ までそれぞれ光学的效率の低下を許せる場合には、NIFL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は高集光倍率において、PIFLよりも高い光学的效率を薄いモジュールで得られる優位性がある。なお、NIFLではレンズ高さが短くなると光学的效率が低下する傾向が見られる。この要因は、図4に示すように d が短くなるほどプリズム斜面の角度がきつくなり、斜面で大きく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。

図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の $\theta_{80\%}$ は $C_g = 500$ において1.8倍、 $C_g = 1000$ において約1.9倍、 $C_g = 2500$ において約1.7倍大きい。

図3下段に各レンズ高さにおける $\eta_{\max}$ と $\theta_{80\%}$ とをそれぞれのピーク値で規格化して乗じた値 $\eta_{\max} \times \theta_{80\%}$ を示す。

この評価指標から、高い光学的效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、

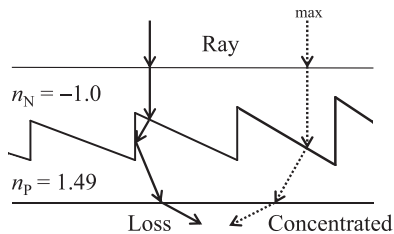


図4 NIFLの光学損失要因 (d が短いとき)

Fig.4 Loss mechanism of NIFL for short lens height

$\eta_{\max} \times \theta_{80\%}$ 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。

図5には $\eta_{\max} \times \theta_{80\%}$ がピークとなるNIFL、およびPIFLのレンズ断面形状比較図を示す(図3下段の●と■でのレンズ断面形状)。また、図6にはこれらの形状における追尾誤差角 $\theta = 0^\circ$ の場合の集光面エネルギー分布を示す。図6のグラフ縦軸は、エネルギー密度集光比 C_t である、レンズ受光面に入射する光線のエネルギー密度に対する集光面の各点におけるエネルギー密度の倍率と定義される。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_t 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。なお、 C_t の局所ピーク値だけを見ると図3の結果と矛盾するように見えるが、集光面全面の平均値では、図3の結果と整合している。

5. 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

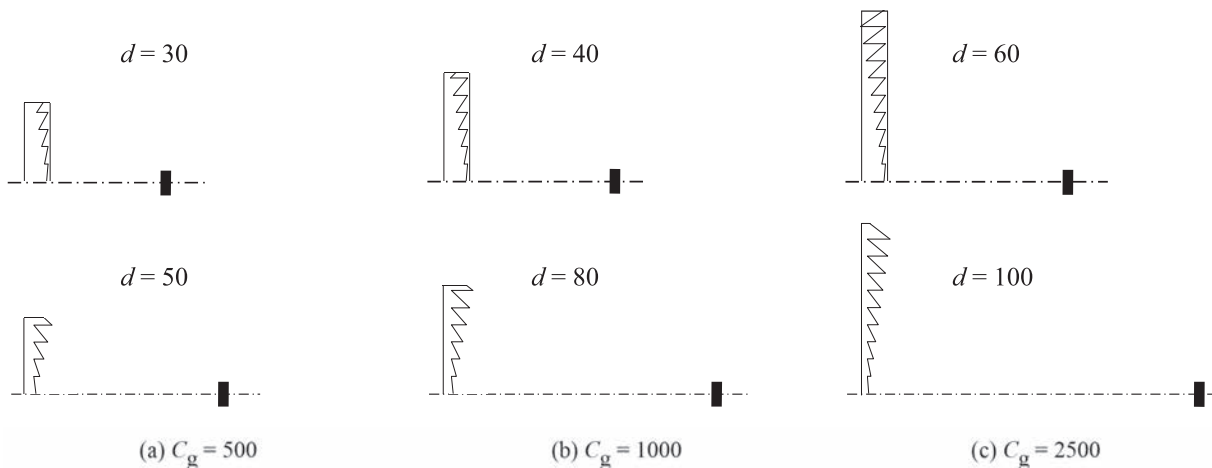


図5 $\eta_{\max} \times \theta_{80\%}$ が最大となる(図3下段の●と■の)レンズ断面形状(上: NIFL, 下: PIFL)

Fig.5 Optical geometry achieving the highest $\eta_{\max} \times \theta_{80\%}$ shown as ● & ■ in Fig.3 bottom. (Top: NIFL, Bottom: PIFL)

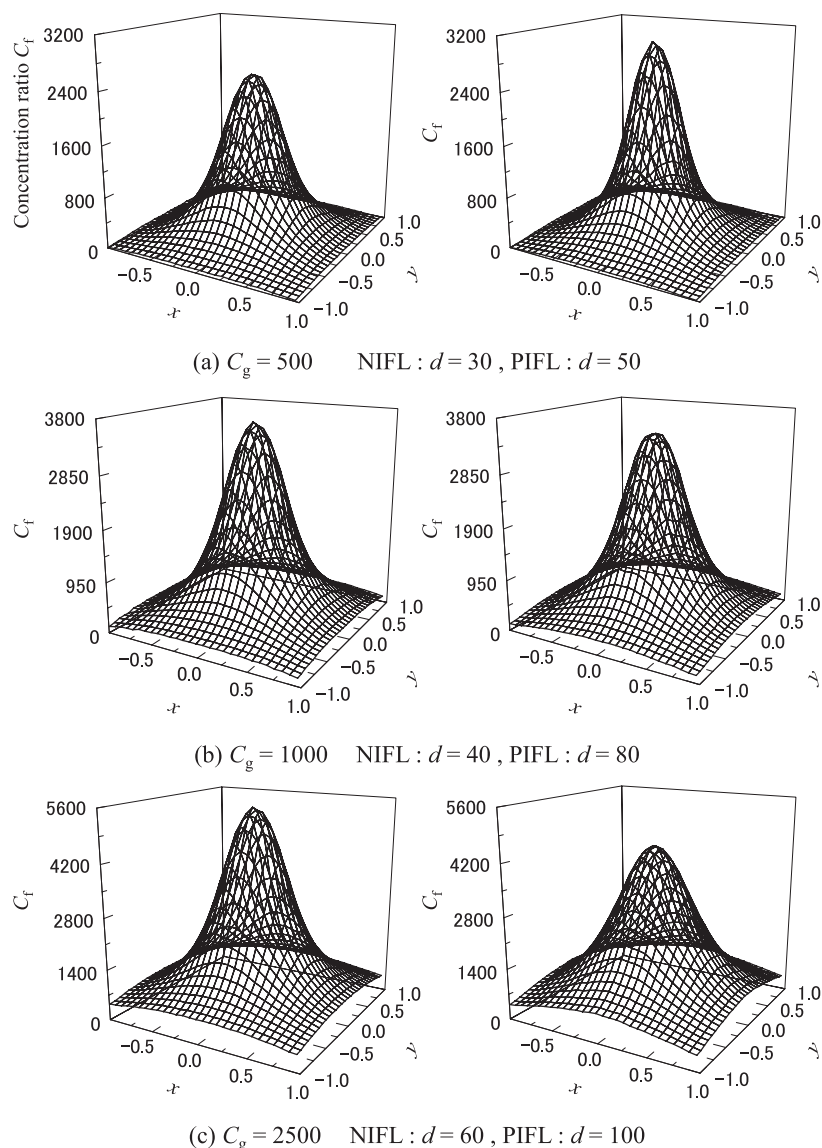


図6 $\eta_{\max} \times \theta_{80\%}$ が最大となる（図3下段の●と■の）レンズ形状における集光面でのエネルギー分布の比較
（追尾誤差角： $\theta = 0^\circ$ ，左：NIFL，右：PIFL）

Fig.6 Energy distribution on PV cell for the lens achieving the highest $\eta_{\max} \times \theta_{80\%}$ shown as ● & ■ in Fig.3 bottom. (Deviation angle : $\theta = 0^\circ$, Left : NIFL, Right : PIFL)

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、図5に示した形状である。追尾誤差角 $\theta = 0^\circ$ における結果を図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、NIFL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 変化すると光学的効率は $C_g = 500$ では変化前の約65%、 $C_g = 1000$ では約40%、 $C_g = 2500$ では約25%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。

6. 結言

本研究では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～

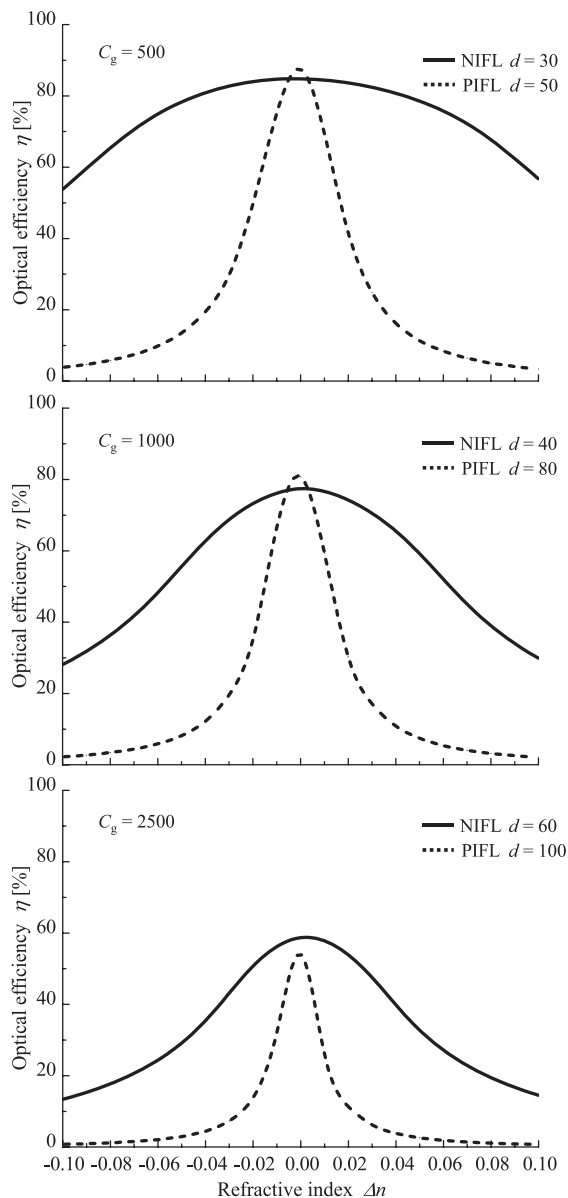


図7 負の屈折率変化における光学的効率への影響
Fig.7 Effect of dispersion (refractive index change) on optical efficiency of NIFL

- 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～1.9 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。

参考文献

- 1) G.Peharz, F.Dimroth, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol.13 (2005), pp.627-634.
- 2) A.Mohr, T.Roth, S.W.Glunz, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol.14 (2006), pp.663-674.
- 3) 佐藤, 秋澤, 平松, JSES/JWEA 講演論文集 (2007), pp.433-436.
- 4) 宮崎, 秋澤, 柏木, 平松, JSES/JWEA 講演論文集 (2006), pp.79-82.
- 5) 秋澤, 柏木, JSES/JWEA 講演論文集 (2003), pp.277-280.
- 6) 市川, 桶, 見目, 滝川, 榊原, 荒木, JSES/JWEA 講演論文集 (2006), pp.257-260.
- 7) 見目, 江上, 宮崎, 平松, 荒木, 榊原, JSES/JWEA 講演論文集 (2004), pp.173-176.
- 8) 嶋田, 秋澤, 柏木, JSES/JWEA 講演論文集 (2004), pp.239-242.
- 9) R.Leutz, A.Suzuki, Nonimaging Fresnel Lenses Design and Performance of solar Concentrator, Springer Verlag Heidelberg, 2001.
- 10) 木皿, 丹治, 新野, JSES/JWEA 講演論文集 (2001), pp.411-414.
- 11) V.G.Veselago, Soviet Physics Uspekhi, Vol.10 (1968), pp.509-514.
- 12) R.W. Ziolkowski, Optics Express, Vol.11 (2003), pp.662-681.
- 13) J.Valentine et al., Nature, Vol.455 (2008), pp.376-379.
- 14) M.Rajput, R.K.Sinha, Applied Physics B, Vol.98 (2010), pp.99-106.
- 15) M.Notomi, Physical Review B, Vol.62 (2000), pp.10696-10705.
- 16) 山田, 中村, 佐藤, J.JSES, Vol.35 (2009), pp.57-64.
- 17) M.Victoria, C.Domínguez, I.Antón and G.Sala, Optics Express, Vol.17 (2009), pp.6487-6492.