

# 福岡工業大学 機関リポジトリ

## FITREPO

Title	太陽光の光ファイバ結合のための大口径フレネルレンズの評価
Author(s)	杉野祥雅, 松尾敬二
Citation	福岡工業大学研究論集 第46巻2号(通巻71号) P63-P68
Issue Date	2014-2
URI	<a href="http://hdl.handle.net/11478/1268">http://hdl.handle.net/11478/1268</a>
Right	
Type	Departmental Bulletin Paper
Textversion	Publisher

**Fukuoka Institute of Technology**

# 太陽光の光ファイバ結合のための大口径フレネルレンズの評価

杉 野 祥 雅 (大学院電気工学専攻)  
松 尾 敬 二 (工学部電気工学科)

## Experimental Evaluation of a Large Aperture Fresnel Lens for the Optical Fiber Coupling with Solar-concentrated Light

Yoshimasa SUGINO (Graduate School of Electrical Engineering)  
Keiji MATSUO (Department of Electrical Engineering)

### Abstract

The collection efficiency of the plastic Fresnel lens to an optical fiber was evaluated in the experiment and calculation as a key component for a device that can be used with a high efficiency of direct sunlight. As a result, we found that the chromatic aberration of the lens does not cause a large decrease in the efficiency, and the unique groove structure of the Fresnel lens must be evaluated fully in the selection process.

Key words: *plastic Fresnel lens, optical fiber, sunlight, chromatic aberration*

### 1. はじめに

太陽エネルギーは半永久的なエネルギー源として期待され、温水器や太陽電池と組み合わせて実用化されてきた。電気エネルギーに変換すれば多様なエネルギー形態に容易に変換できる長所があるが、市販の太陽電池の変換効率は15%程度と高くない。従って実際に利用するエネルギー形態によっては、変換せずに直接利用の方がコストも効率も大幅に性能向上できる可能性がある。そこで著者らは、太陽光を直接照明として高効率で利用できる装置の開発を行うこととした。本論文では、その中核として用いるフレネルレンズの集光システム用としての評価を行った。

実用化されている太陽光を用いた照明システムは、いくつかのタイプに分類できる。その中で最も汎用性が高いシステムとしてレンズ・光ファイバ方式がある。レンズを太陽方向に向け、追尾を行わせることで安定した光量を得ることができ、かつ光ファイバで伝送することで設置場所の制約が大きく緩和される。しかし、従来そこで用いられてきた集光用レンズは石英レンズであり、大口径にして多くの光を集めることにはコストや重量面の点で限界がある。また、大口径ではコストや重量も問題になってくる。

本研究では、大口径集光系を構築することを目指し、石

英レンズではなくプラスチック製のフレネルレンズを検討した。フレネルレンズは、大口径短焦点の場合もきわめて薄く軽量である。またコストも低い。一方、太陽光集光用レンズとしてみたときの評価は十分なされているとは言えない。

### 2. フレネルレンズの評価

#### 2.1 フレネルレンズの構造と光学特性

フレネルレンズとは通常のレンズを同心円状の領域に分割し、レンズとしての曲面を残しつつ、光線の方に影響を与えないコア部分を同心円単位で削除したものである。通常のレンズとフレネルレンズの断面図を図1に示す。形状が複雑であるため、研磨では製作せず金型によってプラスチックを成型して製作される。

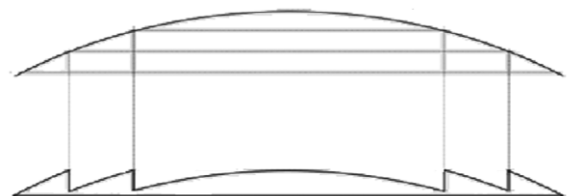


図1：通常レンズとフレネルレンズの断面

フレネルレンズは分割により同心円状のステップが生

じ、このステップの密度や形状によって分類される。ステップの集光性能に与える影響は後に述べる。

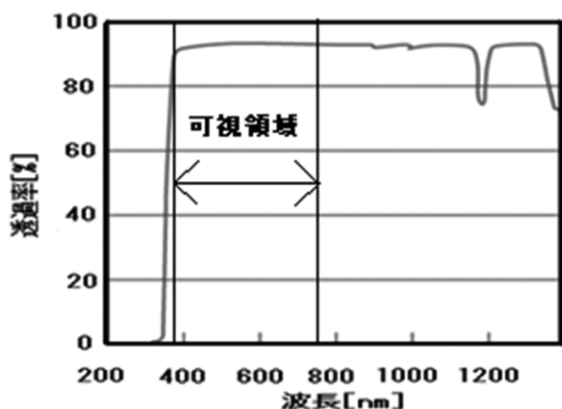


図2：フレネルレンズ透過率の波長特性

光学的な特性として透過率の波長依存性を図2に示す。

フレネルレンズの透過率は照明として用いる可視領域でほぼ一定であり、その値も90%程度と高く、集光用レンズとして必要な透過率を有している。

## 2.2 フレネルレンズの形状パラメータと集光性能

太陽光集光用としてフレネルレンズ採用することを考えれば、現在実用化されている石英レンズよりは十分に大口径でなければならない。また、短焦点であることが好ましい。ただし焦点距離は、伝送に用いるファイバのNAも考慮して決める必要がある。石英ファイバのNAは大きくても0.2程度であるが、プラスチックファイバの場合は0.6程度までである。従って、これらのファイバNAとレンズのNAを考慮して具体的なレンズの仕様を決める必要がある。ここでは、入手可能な市販されているレンズの口径とNAから、本システムに用いる候補を選定した。それらを表1に示す。表中の(非)は非球面を表す。レンズ3のみが長焦点でありNAとしては石英ファイバにも対応できる。

表1：評価対象レンズ

	口径 [mm]	焦点距離 [mm]	NA	溝密度 [本/mm]
レンズ 1 (非)	254	300	0.39	2
レンズ 2 (非)	254	170	0.60	6
レンズ 3 (非)	300	1200	0.12	9

集光性能を評価する場合、通常のレンズと同じ問題とフレネルレンズ特有の問題とがある。ここでは、まず2.2.1において通常のレンズでも問題になる色収差について検討す

る。球面収差については、非球面レンズであることから検討する必要がないと考えた。次に2.2.2においてフレネルレンズ特有の問題として、ステップが集光性能に与える影響について検討する。

### 2.2.1 色収差の影響

色収差は、屈折率に波長依存があるため波長に応じて焦点距離が異なってしまうために生じる。レンズは両面の屈折率依存を考慮しなければならないが、フレネルレンズは数ミリと薄いため平面側の影響は非常に小さい。表1のレンズ1では両面で屈折した光線と曲面側のみ屈折した光線の焦点距離に0.01mmから0.1mm弱の差しか与えないため、曲面側のみ屈折した光線で評価する。光ファイバへの結合を考えると、色収差による波長異依存によって光ファイバに入射できるレンズ半径に限界が存在する。図3にフレネルレンズと光ファイバおよびいくつかの入射光線を示す。レンズ半径を $R$ 、レンズの焦点距離を $f_0$ 、レンズから光ファイバの端面位置までの距離を $z_f$ とする。

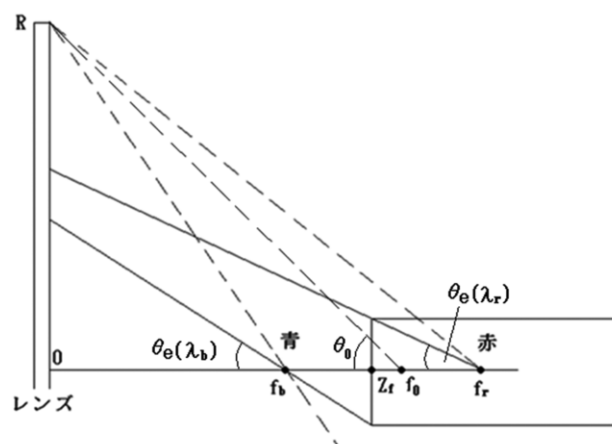


図3：有効レンズ半径の波長依存

図3の点線は、半径 $R$ の位置から出射された可視光域の短波長側の境界となる青の光線および長波長側の境界となる赤の光線を表している。いずれも焦点位置 $f_0$ を通過しておらず、色収差による広がりがあることがわかる。光ファイバへの入射を考えると位置 $R$ から出射された青色及び赤色の光は結合できず、結合させるためには実線で示すように半径位置を小さくせざるを得ない。ここでは、この位置を“有効レンズ半径 $R_e(\lambda)$ ”と定義する。 $R_e$ は色収差に基づくので波長依存性が存在する。この $R_e$ を可視光域でそれぞれの波長において光線追跡法によって求め全半径に対する有効半径からそれぞれの波長における集光効率を評価する。光ファイバの位置 $z_f$ により有効レンズ半径も異なってくるため $z_f$ を変数とした。 $z_f$ を変化させ集光効率が最大となるファイバ位置を求める。得られる有効レンズ半径 $R_e$ の波長依存性の模式図を図4に示す。

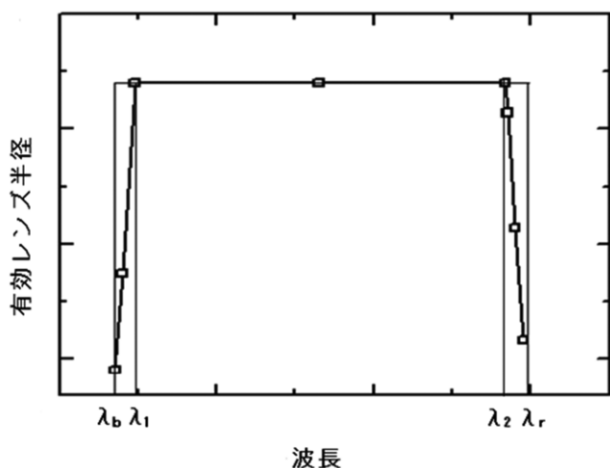


図4：有効レンズ半径の波長依存性模式図

中心波長近傍では有効レンズ半径  $R_e$  はレンズ半径  $R$  に等しいが、青側及び赤側では小さくなる可能性がある。また、青側と赤側にそれぞれ有効レンズ半径  $R_e$  が  $R$  より小さくなり始める波長  $\lambda$  が存在する。これを  $\lambda_1$  及び  $\lambda_2$  とする。 $\lambda$  の計算範囲は可視光域の限界波長  $\lambda_b$  (青：410nm)，と  $\lambda_r$  (赤：700) ( $\lambda_b \leq \lambda \leq \lambda_r$ ) とする。ここで、波長依存性のある屈折率を  $n(\lambda)$ ，焦点距離を  $f(\lambda)$ ，中心線と光線がなす角度を  $\theta(\lambda)$ ，また焦点距離  $f_0$  の設計屈折率を  $n_0$ ，波長を  $\lambda_0$ ，レンズ半径  $R$  から出射される光線と中心線がなす角を  $\theta_0$  とすると、

$$\begin{aligned} \sin\theta_0 &= R/\sqrt{f_0^2 + R^2} \\ \sin\theta(\lambda) &= n(\lambda)/n_0 \times \sin\theta_0 \quad (1) \\ f(\lambda) &= R/\tan\theta(\lambda) \end{aligned}$$

と  $\lambda$  での焦点距離  $f$  が求められる。有効レンズ半径  $R_e$  は焦点距離  $f(\lambda)$  から次式で求められる。 $R_e$  は図3で示すように中心波長から青側と赤側では扱いが異なるので、それぞれ定式化した。有効レンズ半径から出射される限界波長の範囲を  $\theta_e(\lambda_b)$ ， $\theta_e(\lambda_r)$ ，焦点距離を  $f(\lambda_b)$ ， $f(\lambda_r)$  とすると限界波長の有効レンズ半径は、青側・赤側でそれぞれ次式のようになる。

$$\begin{aligned} \sin\theta_e(\lambda_b) &= r/\sqrt{(z_f - f(\lambda_b))^2 + r^2} \\ \theta_e(\lambda_b) &= \sin^{-1}(\sin\theta_e(\lambda_b)) \\ R_e(\lambda_b) &= f(\lambda_b)\tan\theta_e(\lambda_b) \\ \sin\theta_e(\lambda_r) &= r/\sqrt{(f(\lambda_r) - z_f)^2 + r^2} \\ \theta_e(\lambda_r) &= \sin^{-1}(\sin\theta_e(\lambda_r)) \\ R_e(\lambda_r) &= f(\lambda_r)\tan\theta_e(\lambda_r) \end{aligned}$$

従って、全波長での有効レンズ半径から求められる集光効率  $\eta$  は、

$$\eta_f = \left[ \left( \int_{\lambda_b}^{\lambda_1} R_e^2(\lambda) df \right) + \left( \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_e^2(\lambda) df \right) + \left( \int_{\lambda_2}^{\lambda_r} R_e^2(\lambda) df \right) \right] / [R^2(\lambda_r - \lambda_b)] \quad (2)$$

となる。ただし、 $\lambda_1, \lambda_2 (f(\lambda_1) < z_f < f(\lambda_2))$  は次式と式(1)を組

み合わせて求められる。ここで、 $\theta(\lambda_1)$  と  $\theta(\lambda_2)$  はレンズ端から出射されたそれぞれの波長の光線と中心線がなす角度である。

$$\begin{aligned} \sin\theta(\lambda_1) &= (R+r)/\sqrt{(R+r)^2 + z_f^2} \\ \sin\theta(\lambda_2) &= (R-r)/\sqrt{(R-r)^2 + z_f^2} \end{aligned}$$

計算したレンズ1の有効レンズ半径の波長依存性を図5に示す。表1のレンズの有効レンズ半径から式(2)によって集光効率を求めると表2のようになる。ただし、ファイバ径と最小曲げ半径が実用的なファイバ半径  $r=1$  ( $\phi 2$  mm) を代入し、 $z_f$  は299.1mmとした。実測値との比較検討は3.2で示す。

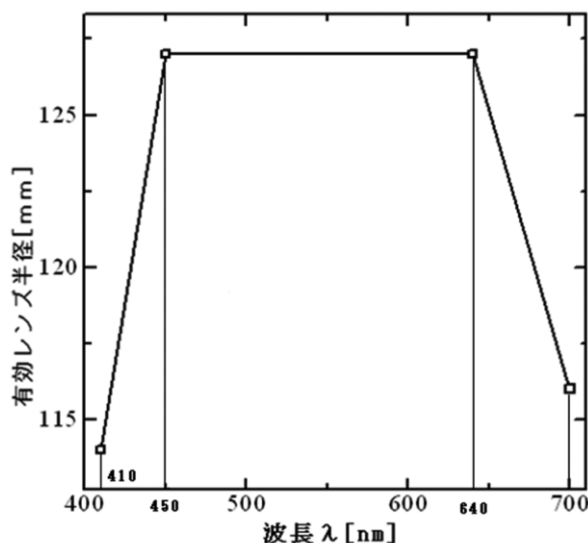


図5：有効レンズ半径の波長依存性 (レンズ1)

表2：評価対象レンズの結合効率の最大値 (ファイバ径を2 mmとした)

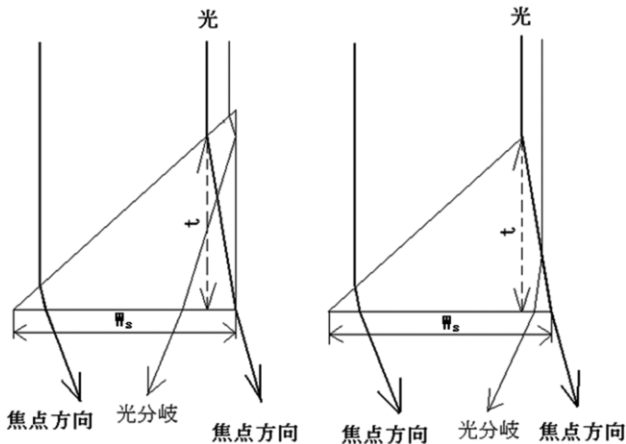
	ファイバ位置 $z_f$ [mm]	集光効率 $\eta_f$ [%]
レンズ1	299.1	88.37
レンズ2	170	100
レンズ3	1198	36.25

表2から短焦点の方が効率が高いことがわかる。レンズ3の長焦点レンズは、色収差の影響が非常に大きく石英ファイバとの結合に適していない。従って石英ファイバの適用には適さない。レンズ1及び2は、色収差の影響が少なく非常に高効率でプラスチックファイバとの結合の期待ができる。

### 2.2.2 ステップによる光分岐

フレネルレンズ特有の問題にステップによって、焦点方向と全く異なる方向に進む光が生じてしまうことがある。光が分岐して見えることから以下“光分岐”と記述する。

フレネルレンズは同心円状に溝状のステップを作って製作される。ステップの形状は直角三角形(a)からさらに頂点の角を直角より小さくしたもの(b)までである。ステップの形状を図6に示す。ただし  $w_s$  はステップ幅、 $t$  はステップの高さである。



(a)理論形状の光分岐 (b)製品形状の光分岐  
図6：ステップの形状

図6では上方から太陽光が入射し、右下方で集光される。図6(a)は直角三角形のステップの場合である。右端寄りの一部の光線は側壁で反射され図のように光分岐が生じる。図6(b)の場合側壁での反射は回避できるが、側壁での屈折によりやはり光分岐となる。どちらの形状も分岐を生じるが斜面に入射する光量が同じため、結合効率の点では同じになる。一方、図6(b)の方が厚みを薄くできるため実用性は高い。そこでここでは、図6(b)の製品形状のステップで検討する。光分岐に関わる光量を計算するために用いた角度の定義を図7に示す。ただし、実際の斜面は非球面であるがステップ幅が小さいことから直線に近似して示した。

図の  $x_1$  が集光に有効な領域、 $x_2$  が分岐して集光できない領域を表す。この比率が、結合する場合の損失割合となる。 $x_2$  の範囲は上方から入射した光が底辺の端を通過する位置で決定される。ここでは、標準の波長となる緑( $\lambda=540$  nm)で計算を進めた。ステップはレンズ半径のステップ位置で異なるので、対象とするステップ位置はレンズ端を  $m=1$  とし  $m$  数で定め  $\theta_0$ 、 $\theta_3$  及び  $x_1$ 、 $x_2$  を求める。順に内側に向け  $m$  を増やしていく。レンズ中心(最大)の  $m$  数を  $m_{max}$  で表す。集光するため  $\theta_1$  は焦点距離  $f$  と着目しているレンズ半径方向位置  $(R-mw_s)$  より次式で求められる。

$$\theta_1 = \sin^{-1}\{(R-mw_s)/\sqrt{f^2+(R-mw_s)^2}\}$$

$\theta_2$  はレンズの屈折率を用いて次式となる。

$$\theta_2 = \sin^{-1}(\sin \theta_1/n)$$

$\theta_3$  は  $\theta_3=90-\theta_2$  である。 $\theta_0$  は屈折率と  $\theta_4$  より

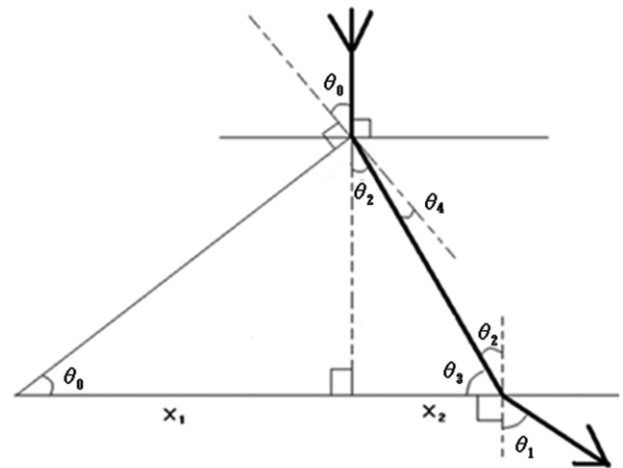


図7：光分岐評価図

$\theta_0 = \sin^{-1}(n \sin \theta_4)$  の関係が成り立つ。 $\theta_4$  は  $\theta_4 = \theta_0 - \theta_2$  であるため、

$$\theta_0 = \tan^{-1}\{n \cos \theta_2 \tan \theta_2 / (n \cos \theta_2 - 1)\}$$

となる。これらの角度とステップ長より

$$x_1 = t / \tan \theta_0$$

$$x_2 = t / \tan \theta_3$$

と求まる。ただし、ステップの高さ  $t$  は、 $x_1$ 、 $x_2$  で共通であり、損失割合の式から省くことができるため具体的には求めていない。上式から、焦点距離  $f$  が小さい程・レンズ半径  $R$  が大きい程  $x_2$  が大きくなり光分岐の割合が大きくなる。また  $m$  が小さい程、すなわちレンズ端程前述同様  $x_2$  が大きくなる。 $x_1$ 、 $x_2$  の割合から1ステップの光分岐による損失割合  $\eta_m$  は、

$$\eta_m = x_2 / (x_1 + x_2) = \tan \theta_3 / (\tan \theta_0 + \tan \theta_3)$$

で求まる。同心円状の1ステップで損失となる光パワー  $P_m$  は次式で求まる。

$$P_m = P \times \pi \{ [R - (m-1)w_s]^2 - (R - mw_s)^2 \} \times \eta_m$$

従って、レンズ全体で損失するパワーの割合  $\eta$  は、

$$\eta = [\sum_{1}^{m_{max}} P_m] / [P \times \pi R^2] \quad (3)$$

で求まる。ただし、 $P$  はパワー密度とする。表1のレンズを式(2)により評価すると、表3のような光分岐による損失が得られた。実測値との比較検討は3.1で示す。

表3：光分岐による損失

	半径ステップ数 $m$	損失 [%]
レンズ 1	254	13.55
レンズ 2	600	30.80
レンズ 3	1350	1.04

表3からレンズ2の短焦点レンズは、光分岐の影響が非常に大きく光ファイバとの結合に適していないことがわかる。レンズ1及び3は、ステップによる効率の劣化は小さいことがわかる。



### 3. フレネルレンズの実験による性能評価

これまでの評価からフレネルレンズの透過率と色収差による集光割合・光分岐による効率の劣化の評価方法を示し、市販のレンズで具体的な評価を行った。ここでは、表1の評価対象レンズの集光径を実測し、2章の結果と比較検討を行う。実験で太陽光は使用しにくいため、疑似太陽光としてスペクトルの近い白熱電球 (40W) を採用した。

#### 3.1 フレネルレンズの光分岐

光分岐は、He-Ne レーザー (632.8nm) を水平方向に移動させレンズ通過後の焦点位置による集光パワーと分岐された光パワーを測定することにより実施した。測定装置の配置図を図8に示す。

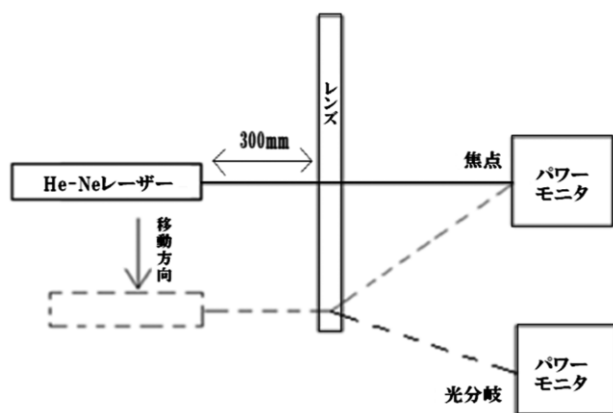


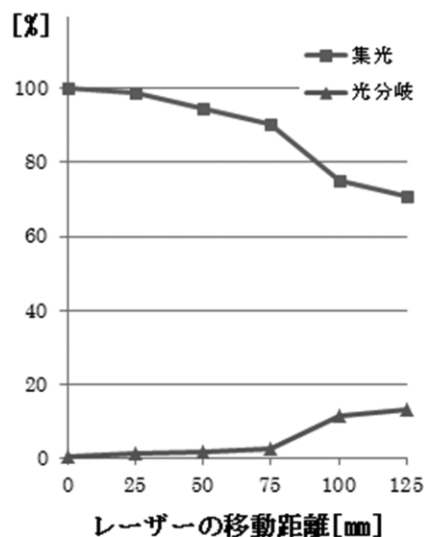
図8：効率の劣化測定装置の配置図

測定結果を図9に示す。図9からレンズ1とレンズ2の光分岐による集光効率は、レンズ全面での値として求めるとそれぞれ80.43%と64.65%である。レンズによる反射や吸収が反映されていないことやレーザー光の直径がステップ幅より大きいため誤差が含まれるが、評価式で示されている次の特徴と一致している。第一に、レンズ端程集光割合は減少し損失割合が増加している。第二に、短焦点レンズ程集光割合が小さく、損失割合が大きい。

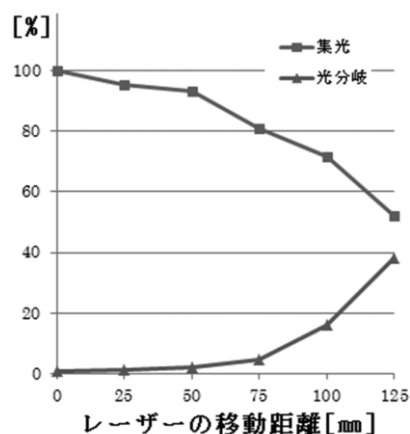
#### 3.2 フレネルレンズの総合結合効率

色収差のみを実測することは困難であるため、実測値は集光した光の分布をから評価する。レンズ3の集光径は明らかにレンズ1及び2の集光径より桁違いに大きいためレンズ1及び2で測定を行った。実験装置の配置図を図10に、集光分布の測定結果を図11に示す。

回折限界から予想される分布幅 $1.06\mu\text{m}$ よりも極めて大きいのが、2mmのプラスチックファイバへの結合を考えると、9割程度と高い評価結果が得られた。2章での検討により色収差の影響は小さいと考えられるので、面精度等の



(a)レンズ1



(b)レンズ2

図9：光分岐の特性

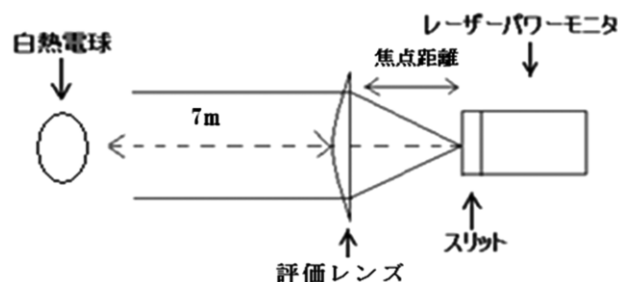
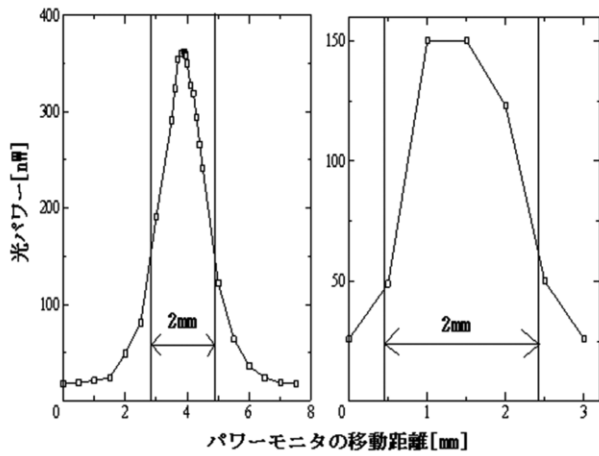


図10：集光分布測定装置の配置

他の要因が影響している可能性がある。

レンズ1の $\phi 2\text{mm}$ プラスチック光ファイバとの結合割合は透過率90%×色収差による結合割合88.37%×光分岐による効率(劣化)(100-13.55)%=68.77%となる。この



(a) レンズ 1

(b) レンズ 2

図11：集光パワーの半径方向分布

値は、太陽光を電気変換し照明に利用するよりも効率は大きく、高効率での伝送が期待できる。

#### 4. まとめ

本研究は、大口径フレネルレンズの集光性能を色収差とフレネルレンズ特有のステップの観点から計算と実験により評価したものである。大口径フレネルレンズはこれまで、光ファイバと結合させて用いられてこなかったが、プラスチック光ファイバと組み合わせれば実用的な高効率で照明用の集光システムが構成できることがわかった。

#### 参考文献

- 1) 石黒浩：基礎物理学選書23. 光学(1995年), 株式会社裳華房, p7, p40
- 2) 閻猛：福岡工業大学研究論集, 第43巻(1号別冊), 2010