

Experimental evaluation of a large aperture Fresnel lens system
for the plastic optical fiber coupling with solar-concentrated light

大口径フレネルレンズとプラスチック光ファイバを用いた太陽光採光装置の実験的評価

Keiji MATSUO
松尾 敬二¹

Abstract

An optical fiber lighting system using a Fresnel lens and plastic optical fiber was investigated for sunlight condensation. The coupling efficiency of the Fresnel lens to the optical fiber was evaluated in experiments and calculations. As a result, it has been found that the chromatic aberration of the lens does not cause a significant reduction in the efficiency and the unique groove structure of the Fresnel lens requires though evaluation in the selection process. A coupling efficiency of about 50% was obtained by using a large diameter Fresnel lens of ϕ 300 mm.

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

キーワード: プラスチックフレネルレンズ, 光ファイバ, 太陽光, 色収差, 採光

1. はじめに

太陽光の採光システムは、採光方法や追尾の方法等によりいくつかのタイプに分類できる。その中で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集光し、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、かつ追尾を行わせることで安定した光量を得ることができる。そのため小口径レンズと石英ファイバを用いてすでに実用化されている例もある⁽¹⁾。一方、大口径のレンズを用いようとする集光性能や重量、コストが問題となり、また伝送用光ファイバには、コストのかかる石英のバンドルファイバが用いられている。そこでプラスチック製の大口径フレネルレンズを用いようとする研究も行われているが、第2の集光光学系を必要とする点や石英のバンドルファイバが用いられている⁽²⁻⁴⁾点で装置が複雑になっている。

本研究では、大口径集光光学系を構築することを目指し、

*1 福岡工業大学工学部電気工学科教授(〒811-0295 福岡市東区和白東 3-30-1)k-matsuo@fit.ac.jp

(原稿受付:2018年2月7日,受理日 2018年5月11日)

石英レンズではなくプラスチック製のフレネルレンズシステムを検討した。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。しかし、太陽光集光用レンズとして単一レンズで組み込んだときの評価は十分なされていない⁽⁵⁾。ここではフレネルレンズと単一のプラスチックファイバを用いた大口径集光システムについて光線追跡によって評価を行った後、同システムを製作し、その実験的評価を行った。

2. フレネルレンズ及びプラスチックファイバの評価

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、光線の方向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。

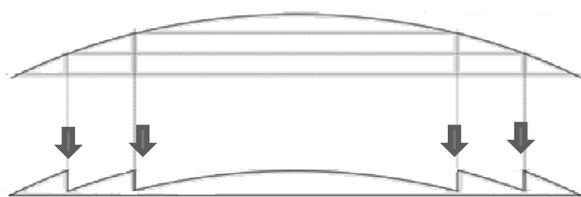


Fig.1 : Cross sections of a normal and Fresnel lens.

フレネルレンズは、矢印のように分割により同心円状のステップが生じる。その密度や形状によって性能が変化する。ここでは太陽光集光レンズとして、このステップおよびレンズ一般にみられる収差が集光性能に与える影響について検討する。

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φ100mm程度の採光装置のレンズよりは十分に大口径でなければならない。また、装置の小型化の点で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、これらのファイバの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から口径とNAを考慮して、本システムに用いる候補を選定した。口径としては250・300mmを選定した。それらを表1に①~③で示す。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。表中の△は、後に述べるステップの形状を表す。

Table1 : Lenses to be evaluated

	Dia. [mm]	Focal Length [mm]	NA	Shape of Step	Density of Step [/mm]
Lens①	254	300	0.39	△	2
Lens②	254	170	0.60	△	4
Lens③	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に分類できる。ここでは、まず通常のレンズでも問題になる透過率と球面収差及び色収差について検討した。フレネルレンズに用いられるプラスチックの透過率は90%超が得られているので実用上大きな問題とならない。球面収差については、非球面のフレネルレンズであるため問題はない。ただし、入射方向はレンズの凸面側からとなる。一方、色収差は、屈折率に波長依存があるために生じるもので一般に焦点距離が長いレンズ程

影響が大きくなる。

表1のレンズのファイバへの結合効率として、焦点面にファイバ(φ2mm)を設置したときのレンズ入射パワーとファイバへの入射パワーを、収差とファイバの直径を考慮し評価した。太陽光を模擬して平行光の入射を仮定し光線追跡を行った。ここで検討したレンズでは、回折限界は設定したファイバ直径よりも十分小さく波動光学的限界は問題とならない。また可視域では、太陽光パワーの波長依存性は弱いのでフラットと仮定した。照明として用いる可視光の波長範囲(380nm-780nm)でファイバと結合できるパワーを計算した結果を表2に示す。表2から短焦点の方が

Table2 : Coupling efficiency of lenses to be evaluated

	Position of Fiber z_f [mm]	Coupling Rate[%]
Lens①	299	99
Lens②	169	100
Lens③	1200	26

結合効率が高い。対照的にレンズ③の長焦点レンズは、色収差の影響が非常に大きくφ2mmの光ファイバとの結合に適していないことがわかった。従って、レンズ③であっても石英ファイバの使用には適さない。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φ2mmのファイバとの結合が期待できる。短焦点レンズであるので、装置のコンパクト化にもつながる。大きなNAのレンズ・ファイバで構成できればこの点でも有用である。

他方、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成分の存在がある。光が分岐して見えることから以下「光分岐」と記述した。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の図2(a)及び頂点の角を

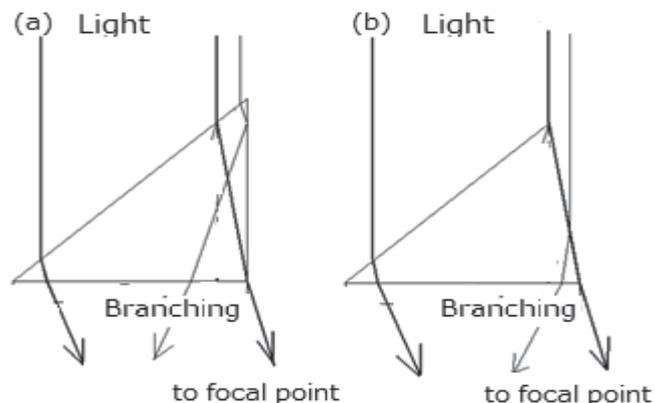


Fig.2 : Optical branching by the steps
(a) Optical branching in the theoretical step and (b) the branching in the product step

直角より小さくした形状の図 2(b)がある。収差の影響を考慮し、図 2 では上方から太陽光が入射して右下方で集光される。図 2(a)で右端寄りの一部の光線は側壁で反射され光分岐が生じる。図 2(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。両者を比較すると、図 2(b)の方がレンズの厚みを薄くでき、また金型からの離型性が高く実用的である。そこでここでは、図 2(b)の製品形状のステップ(表 2 では△で示した)で検討した。

表 1 のレンズの光分岐による損失は、それぞれのレンズにおいて上記側壁のレンズ面上の占有面積の総和から評価し、表 3 のような結合効率を得た。光分岐の影響は焦点距

Table 3 : Optical branching and coupling efficiency

	Number of Step	Coupling Rate[%]
Lens①	254	86
Lens②	508	37
Lens③	1350	99

離が短い程、レンズ半径が大きい程大きい。レンズ①~③では焦点距離が短いレンズ②の損失が大きく、レンズ①では大幅に改善している。また、最も焦点距離が長いレンズ③の結合効率は極めて高い。これらの具体的な検討については、参考文献 5 にまとめている。

以上の結果から集光用のレンズとしては、色収差については短焦点の方が、光分岐損失については、長焦点レンズが好ましいことがわかった。そこで、双方とも小さいレンズ①を用いることとした。これらの結合効率の評価から、ファイバへの入射を含めた伝送効率 77%が得られ太陽光を電気変換し照明に利用するよりも高効率での伝送ができる可能性があることがわかった。

2.3. プラスチック光ファイバ

本研究で用いたプラスチック光ファイバの性能を石英ファイバと比較して表 4 に示す。プラスチックファイバの損失は、石英ファイバに比べ大きいですが、市販されている他のプラスチック光ファイバでは、0.1dB/m 程度まで改善された製品もある。石英ファイバに比べプラスチックファイバは NA が大きく、コストは大幅に低い。また、結合効率に

Table 4: Examples of plastic and quartz fibers

	Plastic Fiber	Quartz Fiber
Maximum Core Diameter	~φ 3mm	~φ 1mm
NA	~0.6	~0.22
Operating Temperature	-55~85°C	-40~100°C
Attenuation	~0.19dB/m	<0.01dB/m
Bending radius	~75mm	~220mm

大きく影響するコア径についてはφ3mm と大口径の製品もある。本研究ではケーブルとしての柔軟性からφ2mm のファイバを用いた。

3. 集光装置の設計と追尾実験

レンズ①φ254mm(f=300mm)の非球面フレネルレンズを用いて設計した集光光学システムを図 3 に示す。太陽を追尾するために仰角と方位角方向にフォトダイオードセンサと直流モータを設置し、太陽位置に対応して独立に追尾させる。一对のセンサを表裏にして設置したことで 0.1° 以内の追尾精度が得られる設計とした。集光面には、φ2mm のプラスチックファイバ(損失 0.19dB/m)とその 3 軸微動機構を設置した。集光された光によるファイバの温度上昇を抑えるためにアルミ製ホルダーと放熱板(100mm×100mm×10mm)を用いている。プラスチックファイバの場合耐熱温度(85°C)が低いためのその対策が一層重要である。ファイバの先端は、3 軸の微動が行えるよう芯出し式レンズホルダーと 1 軸ステージを組み合わせて用いている。

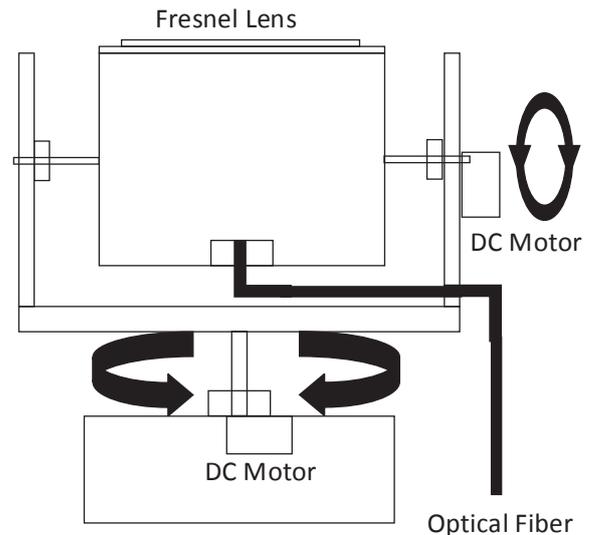


Fig.3 Condenser system for sunlight

図 4(a),(b)に製作した集光装置及びファイバへの採光部を示す。接続したファイバ長は性能評価のために 3m とした。このファイバの透過率は 90%程度である。

効率の測定では、太陽光の照度とファイバ出力光を照度計(Yokogawa デジタル照度計 51001)を用いた。出力光は、ファイバ端を暗箱に導き、照射面積がレンズの径と同じになる距離に照度計を設置し測定した。ここで用いたプラスチックファイバはマルチモードであるため照射強度の分布はフラットとし、照射面の中央で計測している。

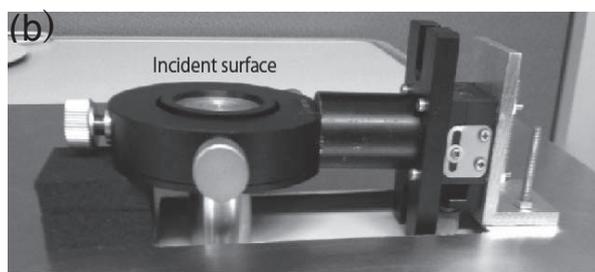
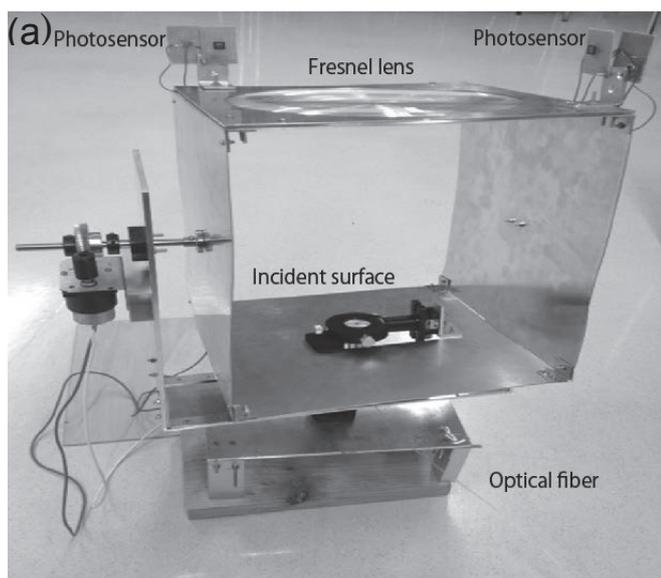


Fig.4 Photographs of the condenser system
 (a) Overall view of the apparatus (b) Fine adjustable mechanism installed at the focal position

測定結果を図 5 に示す。いったんファイバにカップリングを行った後の時間経過を示した。ファイバから出力される照度の時間変化は大きくなく、追尾が正常に機能していることがわかる。照度計を用いたことで光のパワーではなく、人間の目の分光感度で補正した結果となっている。効率は 50%程度となり実用化できる結果が得られた。2 章での評価は光パワーで行っており、視感度を考慮した本章の照度の実験結果とは直接比較できないが、視感度では可視域中心に重みがかかるので色収差に対しては好条件となる。しかし 2 章での評価結果に比べ、逆に損失が増加している。この原因については、主に結合部分でのカップリングの状態によるものと考えられる。

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光線追跡と実験

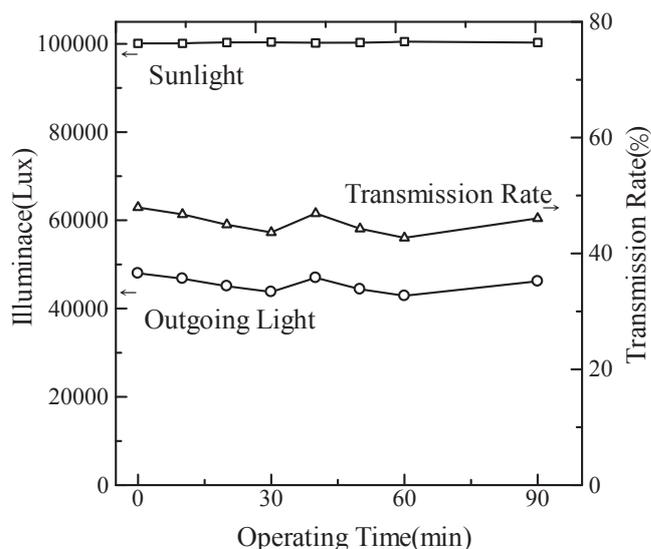


Fig.5 Illuminance of sunlight(□) and transmission rate(△) of outgoing light(○) from the fiber

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。

最近では、フラット面から入射するタイプのフレネル集光レンズが製品化されていることから、このレンズを用いればさらに、結合効率が改善されることが期待される。

5. 参考文献

- 1) 太陽光追尾採光システム例 (Apr. 2018), <http://www.himawari-net.co.jp/>
- 2) Y.Kim, H.Jeong, W.Kim, W.Chun, H.Han, S.Lim, A comparative performance analysis on daylighting for two different types of solar concentrator:Dish vs. Fresnel lens, *Energy*,**137**,449-456(2017).
- 3) I.Ullah, H.Lv, A.Whang, Y.Su, Analysis of a novel design of uniformly for Fresnel lens-based optical fiber daylighting system, *Energy and Buildings*,**154**, 19-29 (2017).
- 4) R.Gorthala, M.Tidd, S.Lawless, Design and development of a faceted secondary concentrator for a fiber-optic hybrid solar lighting system, *Solar Energy*,**157**,629-640 (2017).
- 5) 杉野,松尾,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,福岡工業大学研究論集 *Res.Bull.Fukuoka Inst.Tech.*,**46** (2), 63-68 (2013) .