

令和元年6月18日現在

機関番号：32708

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K04700

研究課題名(和文) 特殊なブレード形状を持つ太陽光集光フレネルレンズ

研究課題名(英文) Fresnel lens having a special blazed shape for collecting sun light

研究代表者

渋谷 真人 (Shibuya, Masato)

東京工芸大学・工学部・名誉教授

研究者番号：10339799

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：地球温暖化の解決に向けて、自然エネルギーの利用が望まれ、太陽光をガラスロッドなどの光伝送路に効率良く導く光学系が要求されている。しかし従来用いられている集光光学系は十分ではない。太陽が斜めに入射した時にも効率が良くなるフレネルレンズの持つべき基本原理を見出していた。この原理の正当性を理論的検討および数値設計で詳細に確認した。さらに一般的な両側ブレードフレネルレンズの基本設計原理を導いた。また、片側ブレード型フレネルレンズのもつ避けることが出来ない収差発生機構を明確にし、定量的にも定式化した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来に比べて太陽光が斜めに入射しても効率よくガラスロッドなどの光伝送路に集光できるため、自然エネルギー利用効率を上げることができ、地球温暖化の解決への一助となる。
また、一般的なブレード型フレネルレンズの収差発生機構を明確にしたことは、フレネルレンズやDOE (Diffractive Optical Element)の設計に有用である。特に、高精細な光学系にDOEを用いるときの適用限界を導いたことは、このような光学系開発に有用な指針を与える。

研究成果の概要(英文)： In order to solve global warming, utilization of natural energy is desired, and an optical system for efficiently guiding sunlight to a light transmission path such as a glass rod is required. However, conventionally used focusing optics are not sufficient. We have found the basic principle that a Fresnel lens should have to be efficient even when the sun is incident obliquely.

We confirm the correctness of this principle in detail by theoretical study and numerical design. Furthermore, we derive the basic design principle of the both-side blazed Fresnel lens for general case. We also clarified the unavoidable aberration generation mechanism of one-sided blazed Fresnel lens and formulated it quantitatively.

研究分野：光学設計開発

キーワード：太陽光集光 フレネルレンズ DOE 正弦条件 両側ブレード 片側ブレード

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化問題を解決するために、太陽光などの自然エネルギーの利用が強く望まれている。太陽光をファイバーやガラスロッドなどの光伝送路に効率良く導く光学系が要求されている。この集光光学系の一つとしてフレネルレンズが用いられている。しかしながら、従来の集光光学系は必ずしも十分なものではなく、太陽が光軸中心からずれたとき(傾いたとき)にはコマ収差を発生することで、集光効率が必ずしも十分でなくなるという不備があった。

これはフレネルレンズの基本的な設計理論が十分に確立していなかったためであり、我々はこの根本的な問題点を世界で初めて公の場に示し、太陽光が軸からずれた時にもより効率良く集光できるように、幾何光学の重要な法則である正弦条件を満足する“特殊なブレード形状を持つ太陽光集光フレネルレンズ”の基本原理を見出した。従来は高屈折率法で設計された理想形状から実形状に変換する際に、軸上像点での位相関数(光路長差)を再現することだけに着目していた。そのために軸上像点からわずかにずれてもコマ収差が発生していた。われわれはこの問題を解決するために、「適切な形状の両面ブレードにすることで、高屈折率法で得られた理想性能が、ある特定像点だけでなく、その近傍でも成り立つように出来る」という原理を見つけたのである。

さらに、フレネルレンズだけでなくブレード型 DOE (Diffractive Optical Element) は多くの光学系、それも高精細な光学系にも使われるようになってきていたが、その収差特性は十分に解明されているとは言えなかった。

2. 研究の目的

両面ブレードによって理想性能を再現するという基本原理を見出していたが、その正当性を綿密に吟味すること、さらにその物理学的意味の本質を明確にすることが、太陽光集光フレネルレンズだけでなくフレネルレンズあるいはブレード型 DOE の開発や応用を進める上で非常に重要である。

(1) 基本原理の正当性を、実際の詳細な光学設計によって確認する。また、実際のフレネルレンズの集光状況を観察することで確認する。

(2) 当初見出していた基本原理は、球面型フレネルレンズに特化した特殊な場合のものであったが、より一般の原理として理論的に確立する。

(3) 両側ブレードが片側ブレードに対して優れているという基本原理の、より本質的な意味を理論的に明確にする。

(4) ブレード型 DOE は高精細な光学系にも使われるようになってきているが、高精細の場合には実用的には片側ブレードであり、DOE の明るさ(Fナンバー)には適用限界があると考えられる。片側ブレードを用いたときの DOE の適用限界を定式化することで、高精細光学系に DOE を用いるときの設計指針を与える。

3. 研究の方法

(1) 基本原理の正当性を確認するために、汎用の光学設計プログラム CODE-V にマクロコマンドを組み込み、複数輪帯において評価する。また、片側ブレードの場合には、ブレード面を球面で近似すると軸上の再現もよくない。そこでマクロコマンドに非球面を入れることで、軸上そのものではほぼ完全に高屈折率法を再現できるようにし、軸外での高屈折率法と片側ブレードとの比較をより精度良く行う。実際に作成した光学系に平行光を集光してコマ収差の発生状況を確認する。

(2) 純粋に理論的な考察によって、球面型フレネルレンズに限らないより一般化された基本原理を導出する。

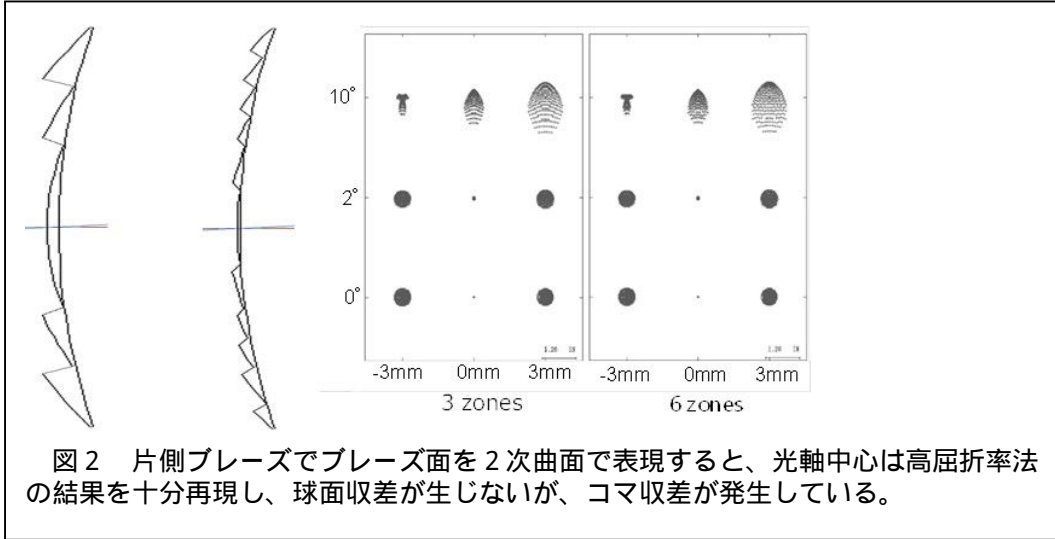
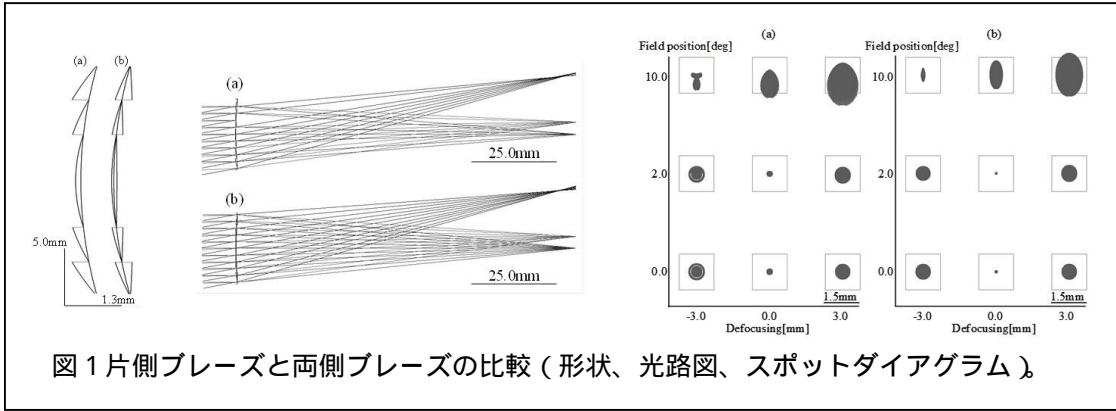
(3) 光学系の収差特性を表す正弦条件に着目して、両側ブレードと片側ブレードの比較を理論的に解明する。

(4) 正弦条件はあくまで幾何光学的な理論であり、高精細な光学系では波動光学的な評価が必要である。そこで、正弦条件から予測される波面収差を大雑把に見積もり、近似理論により片側ブレード型 DOE に許される明るさ(Fナンバー)の適用限界を導く。あくまで大まかな指針を得るためなので、このような手法で十分意義はあると考える。

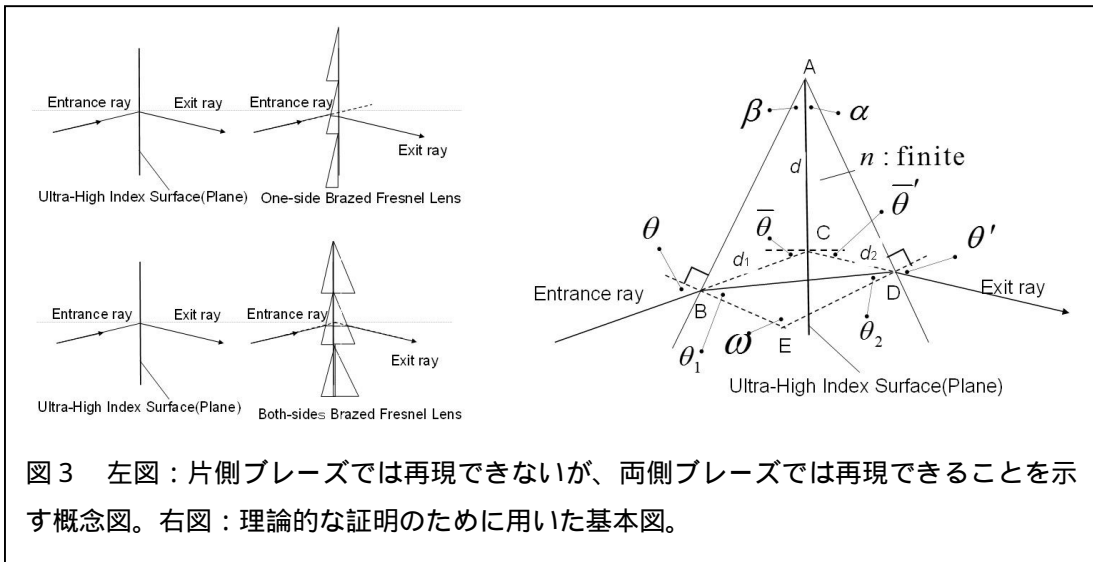
4. 研究成果

(1) 片側ブレード光学系に対して、両側ブレード光学系では、高屈折率法の結果を十分良く再現できるので、コマ収差が発生しないことを、CODE-V にマクロコマンドを用いて、3輪帯の場合であるが、数値的に確認した(図1、光学45巻5号,193-200(2016))。

片側ブレードにおいてブレード面を非球面(2次曲面)で表現することで、中心部では球面収差は発生しておらず、すなわち高屈折率法の結果を確実に再現できている(図2、SPIE 10528-16(2018)、光学(投稿中))。それゆえ、軸外での片側ブレードでのコマ収差発生の原因が、片側ブレードそのものに因ることが、より明確に示された。



(2) 両側ブレードによって高屈折率法が再現できることの一般化理論を導いた。考える上での基本的な図を示す(図3、SPIE 9947-4 (2016), SPIE 10528-16(2018)、光学(投稿中))。図3左上図は片側ブレードでは高屈折率法の結果が再現できないことを、図3左下図は両側ブレードであれば再現できることを示す概念図。図3右図は理論解析をするための基本図である。概念図からは、片側ブレードでは完全な再現が出来ないことは直感的に明らかにも関わらず、従来は公の場では全く議論されていなかったと思われる。われわれが初めて公にこの問題を指摘して、基本原理を示したことを、改めて記載しておく。



(3) 正弦条件の微分形と積分形の二つの概念を導入して、両側ブレードと片側ブレードでの収差発生機構の違いを理論的に明らかにした。通常正弦条件はここで述べる積分形に相当する。正弦条件の微分形はヘルムホルツラグランジの不变式そのものであるが、このように命名し改めて導入することで、片側ブレード型 DOE の収差発生機構が良く理解できるようになった。それらの比較のための概念図を示す(図4、SPIE 10528-16(2018)、光学(投稿中))。またブレード角そのもので決まるので、輪帯をいくら細かくしても正弦条件の微分形は補正できないこともシミュレーションで確認し(既出の図2)コマ発生の原因・機構が明確に示された。

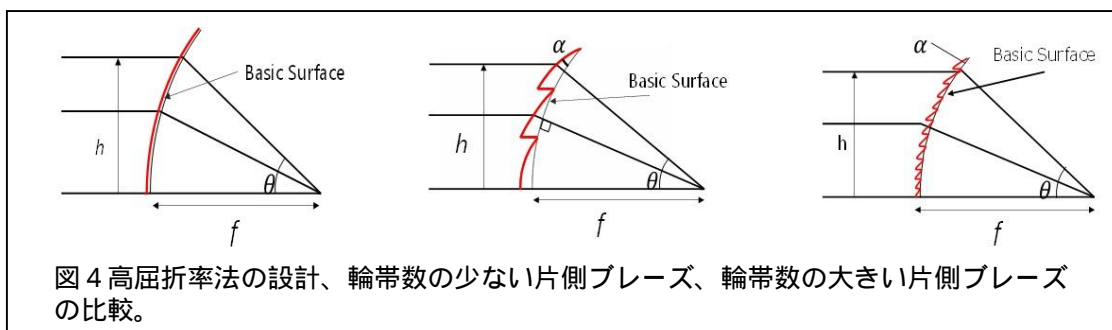


図4 高屈折率法の設計、輪帯数の少ない片側ブレード、輪帯数の大きい片側ブレードの比較。

(4) 正弦条件から予測される波面収差を図5(光学(投稿中))に示すような考え方から大雑把に見積もり、近似理論により DOE に許される明るさの適用限界を導いた。大まかな指針を得ることができ、DOE を用いた高精細光学系の開発に有効な結果を得られた。

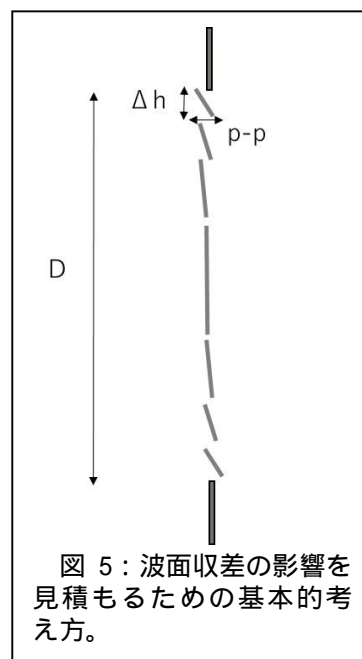


図5: 波面収差の影響を見積もるための基本的考え方。

以上(1)から(4)の成果を得られた。DOE ISO/TC172 Optics & Photonics/ SC1Fundamental Optics でも盛んな議論が始まっており、これからの光学産業でますます重要になる。本研究は、太陽光集光フレネルレンズだけでなく、フレネルレンズやブレード型 DOE を用いた光学系開発全般に貢献できると考える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

平松崇、渋谷真人、藤井純輝、荒木敬介、中楯末三;「正弦条件を満足するフレネルレンズ・・・高屈折率法から最適実形状を導く新しい手法」, 光学、査読有、45 巻,(2016)193-200

〔学会発表〕(計5件)

渋谷真人;「フレネルレンズや DOE の理論的仮題と CODE V での評価」, Code-V 特別セミナー(招待講演)(2018)

Hidenori KASAMATSU, Masato SHIBUYA, Takashi HIRAMATSU, Keisuke ARAKI, Suezou NAKADATE ;“ Criteria of limit of applying DOE to precise optics ”, SPIE Vol.10528, Photonic West, Optical Components and Materials XV (2018)

笠松秀徳、平松崇、渋谷真人、中楯末三;「フレネルレンズの高精細光学系へ適用限界」, OPJ2018(Optics & Photonics Japan)(2017)

平松崇、渋谷真人;「正弦条件を満足する太陽光集光フレネルレンズ-高屈折率法から最適実形状を導く新しい設計手法」, 光設計研究グループ第63回研究会(招待講演)(2017)

Takashi HIRAMATSU, Masato SHIBUYA, Takao TANABE, Keisuke ARAKI, Suezou NAKADATE ; " A new method to decide the practical feature of Fresnel lens from the result of high-refractive index method ", SPIE Optical Engineering + Applications(2016)

6 . 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名 :

ローマ字氏名 :

所属研究機関名 :

部局名 :

職名 :

研究者番号 (8 桁) :

(2) 研究協力者

研究協力者氏名 : 中楯 末三

ローマ字氏名 : (NAKADATE, suezou)

研究協力者氏名 : 平松 崇

ローマ字氏名 : (HIRAMATSU, takashi)

研究協力者氏名 : 笠松 秀徳

ローマ字氏名 : (KASAMATSU, hidenori)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。