

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 荒木 敬介

近年の光学素子の作成加工技術の進歩により、屈折面や反射面に非球面形状が日常的に使われるようになってきた。その一つの効果として、自由曲面を用いる回転対称性を破る光学系が出現し、ヘッドマウントプロジェクターなどへ応用されはじめている。ところがこれまでは、直交する2方向で形状が異なる共軸アナモルフィック光学系や、偏芯光学系に対する扱いがあるのみで、このように全く回転対称性がなく、光軸が折れ曲がった光学系に対する結像理論は確立されていない。本論文の著者は、このような光学系を Off-Axial 光学系と名付け、共軸系の光軸に対応する基準軸を導入し、光線を記述する合理的な表現法を求めた。新しい概念に基づいて、Off-Axial 光学系の近軸理論、収差論を共軸光学系の理論の一つの拡張として体系化し、実際の光学設計に役立てた。

本論文は9章から構成される。

第1章は序であり、本論文の位置付けと構成が述べられている。

第2章は「Off-Axial 光学系概念とその表現方法」と題し、Off-Axial 光学系の基本的な考え方が論じられる。はじめに、共軸光学系の光軸に当たる基準軸を導入する。この決定には任意性が残されるが、例えば、物体面と絞りの中央を通過する光線を基準軸と決める。物体面や像面、瞳面は基準軸に垂直にとる。一方、反射屈折面は基準軸に対し垂直ではないから、反射や屈折によって基準軸は折れ曲がる。従って、基準軸に沿って局所座標を導入すると、面前後における局所座標の変換に、基準軸の偏向角と、基準軸に直交する座標軸の回転の角度（ひねり角）が必要になる。これは共軸光学系にはないパラメータである。これに、面形状、面間隔、屈折率のデータを加え、Off-Axial 光学系のレンズデータを構成する。面形状は、基準軸が面と交わる点を原点にとり、面法線を一つの座標軸とする座標系を導入し、べき級数展開で表す。この級数展開には1次の項は含めないという制限を付ける。こう制限すると展開パラメータを変えても面法線は変化せず、従って、基準軸は不変に保たれる。こうして、設計段階において面形状を変える度に基準軸を変える煩わしさから逃れることができる。ただし、面間隔や屈折率を変えると基準軸が動いてしまうのは避けられない。

第3章は「4元ベクトルを使ったテンソル解析の導入」と題し、Off-Axial 光学系における光線の表現法の考察に充てられる。ここで著者は異なる光線表現法を導入し、それらの間の関係を論じる。第1の表現法は、2つの独立な面（物体空間では物体面と入射瞳面、像空間では像面と射出瞳面）を光線が通過する点の座標値を並記する方法で、これを著者は光線通過点4元ベクトルと呼ぶ。第2は、像面および射出瞳面における収差（理想像点からのずれ）で表す方法で、これを収差4元ベクトルと呼ぶ。著者はさらに第3の表現として、基準軸に対する角度および原点（基準軸と反射屈折面の交点）における高さで光線を表す光線基本4元ベクトル

を導入する。これらのベクトルは互いに線形変換で結ばれる。

光線追跡とは物体側の入射光線が与えられたときに像側の射出光線を求めるアルゴリズムであるから、光学系の特性は入射光線4元ベクトルと射出光線4元ベクトルの関数関係で表すことができる。この関数をべき級数に展開するのが収差論である。著者は、第3章の後半で、テンソル算法を援用し、収差論の形式的な理論を展開する。

第4章「折れ曲がった基準軸に沿った近軸展開」では、光線追跡の基本要素である、反射または屈折による光線の変換について論じられる。すなわち、光線の反射、屈折の法則を、光線基本4元ベクトルの変換関係として表現する。この変換を入射光線基本ベクトルの成分で展開したときの、1次近似が近軸光線追跡を与える。

第5章「光学要素による光線基本4元ベクトルの変換の具体形」では、これまでの結果を整理し、反射屈折、転送、ひねり（基準軸に直交する座標軸の回転）の3つの光学要素について光線基本4元ベクトルの近軸変換行列の具体的な形が提示される。光学系全体の特性は、要素変換行列の積で与えられる。

第6章「Off-Axial 光学系の近軸理論についての解析」では、共軸回転対称光学系における共役関係や焦点距離などの考え方を、Off-Axial 光学系に拡張し、近軸理論の体系化が試みられる。回転対称光学系では物体が与えられれば像は一意的に決まるが、非対称な光学系では、アナモルフィックな光学系を考えれば分かる通り、光線を基準軸の回りに回転すると像の位置が変化するため、一意的に決めることができない。共役関係がアジマス（基準軸の回りの角度）に依存してくるのである。そこで著者は、ある特定のアジマスを選びそこで共役関係を論ずる方法と、アジマスについて適当な平均化をする第2の方法について論じている。これらの方法により、Off-Axial 光学系の振る舞いを、従来の回転対称光学系で近似的に捉えることが可能となる。また、この近似は収差係数の計算にも必要になる。

第7章「実際の Off-Axial 光学系の設計への適用」では、光学設計の実例を挙げ、本理論の有用性を実証している。

第8章「回転非対称な結像についての考察」では、アナモルフィック光学系、および物体面や像面が基準軸に対し傾いた光学系に本理論を適応する場合に留意すべき点を論じている。特に物体面や像面の傾きは、収差として扱えることを指摘している。

第9章は本論文のまとめである。

以上を要すると、本論文は、回転対称性を有しない光学系に対する近軸理論および収差論を初めて体系化したものであり、光学設計の自由度を飛躍的に拡大することに成功した画期的な成果である。本論文の成果はすでに光学設計の現場で活用され、製品開発に寄与すると同時に、Off-Axial 光学系を合理的に扱う新しい概念の導入は、幾何光学の学問的な発展に貢献するところも少なくない。よって本論文は物理工学に対し寄与するところ大であり、博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。