

論文の内容の要旨

専攻名 システム創成工学

氏名 森 健太郎

1812年、W. H. Wollastonは、結像性能を考慮に入れて構成された最初の結像光学系であるPeriscopeを発明した。この発明は、光学設計の基盤となる「近軸論」と「収差論」の必要性を認識させた。1840年、K. F. Gaussが近軸光線追跡に基づく近軸論を、1856年、L. Seidelが3次の収差論を、1939年、M. Herzbergerが5次の収差論、1959年、Y. Matsuiが収差係数の正規化により実用性の高い3次と5次の収差係数の計算式をまとめた。

近年、電子計算機による光線追跡の大幅な高速化と最適化技術の発展により、イメージング用途拡大を受けて、結像光学系に求められる仕様は多様化した。その好例として、薄型化を優先させた光学系や、動作波長の広帯域化を狙った反射光学系が挙げられる。これらの結像光学系には、回転非対称な反射面や屈折面や変曲点を有する非球面の屈折面を有する系が存在し、従来の回転対称性を前提に構築された近軸論と収差論の適用が難しい。

この課題に対して、2002年、荒木は基準軸の周りに回転対称性のない光学系を「Off-Axial光学系」と定義し、共軸回転対称光学系の拡張系としてその表現方法を提示した。そして、光線の表現形式として光線通過点4元ベクトルと光線基本4元ベクトルを導入し、これら2種類のベクトルにテンソル解析を適用することで、Off-Axial光学系に対しても簡潔な表現で近軸論と収差論を構築できることを指摘した。2016年、若園らはOff-Axial光学系が発生させる物体結像の収差の性質を1次、2次、3次収差について示し、収差係数は与えられたものとして収差曲線を示した。これらの先行研究により、Off-Axial光学系の収差解析の基盤ができた。

本論文は、これまでのOff-Axial光学系に対する収差論の解析体系を整備するとともに、収差解析を収差発生要因の把握しやすい形式に拡張し、具体的な光学系に対して収差係数を計算できる収差係数計算式を提示する。そこでは、その収差発生要因を光学系の光線変換特性を表す光学系固有量としての収差と、物体位置と入射瞳位置を表す近軸追跡の入射条件に分離され、光線基本4元ベクトルの展開係数に着目した。光線基本4元ベクトルの展開係数は、収差発生の原因となる光学系の光線変換特性を表す光学系固有量と直結しているため、光学系の光線変換特性に基づく収差論とした。

本論文は、以下の3つの課題への取り組みを記述する。それらは、共軸回転対称光学系の3次収差解析式を光学系の光線変換特性に基づく収差論により再構築すること、Off-Axial光学系の1次、2次、3次収差係数及び色収差係数の具体的な収差係数計算法を光学系の光線変換特性に基づく収差論を含めた形式で示すこと、および本解析手法で得られた収差係数を用いて、実際の光学系の収差特性を解析できることを示すことである。

共軸回転対称光学系の物体結像の3次収差係数は、ザイデル収差係数としてよく知られており、

実際の設計でも頻繁に用いられる。光学系の光線変換特性に基づく収差論の観点でこの解析体系の拡張を試みた。その結果、光学系の光線変換特性の収差を表す「光線基本収差」は、共役関係を決定する理想的な「光線高さ」と「光線傾角」からの収差として導入すると、物体および瞳結像の収差との対応関係を明確にした定式化が可能となった。さらに、近軸追跡値で構成した行列と光線基本収差係数で構成したベクトルの積でザイデル収差係数を算出できた。これにより、ザイデル収差係数の発生要因を、光線基本収差と近軸追跡値に分離した収差解析が可能となった。

次に、光線基本収差係数を用いた収差解析の適用範囲をOff-Axial光学系に拡張した。その結果、Off-Axial光学系の1次、2次、3次および色収差の解析方法を、具体的な収差係数計算式とともに示した。これまで主に議論されてきた物体結像の収差だけでなく、瞳結像の収差に対しても収差展開式と収差係数への変換式を明示的に示した。また、光線基本収差を構成する、光線高さと光線傾角に対しても収差展開式と収差係数への変換式を示した。収差係数の記法はこれまで統一的なものが無かったが、収差係数のアジムス依存性がわかる表記を提案した。このように表記した収差係数を使って光線基本収差係数の線形変換形式を構成することで、光学系の持つ対称性と発生する収差係数の分類を容易にした。

最後に、本論文で導出した収差係数計算式と光線基本収差係数の線形変換形式を用いて、実際の光学系の収差係数を算出した。従来の収差係数計算式でザイデル収差係数を計算できる共軸回転対称光学系と、基準軸の取り方によって最も基本的なOff-Axial光学系と捉えることができる等倍2枚球面鏡系に対して収差係数を算出した。共軸回転対称光学系の収差係数計算では、光線基本収差係数の線形変換形式によって計算したザイデル収差係数が、従来の収差係数計算式での計算値と一致することを確認した。これは、本論文で示した収差係数計算式が正しく導出できたことを示す。