様式第４-２号

論文審査要旨（課程博士）

報告番号	＊甲第 54 号	論文提出者氏名	田邉　貴大

	職　名	氏　名	
審査員主査	教授	渋谷　眞人	印
審 査 委 員	教授	中楯　末三	印
審 査 委 員	教授	久米　祐一郎	印
審 査 委 員	教授	陳　軍	印
審 査 委 員	東京大学生産技術研究所教授	志村　努	印
審 査 委 員			印
審 査 委 員			印

＊教務課で記入

論文審査要旨（２０００字程度）

近年、非球面創成技術と光学設計技術の発達により、従来とは異なる非球面表現や複雑な形状の自由曲面と呼ばれる光学面を用いた光学系が一般化している。その中で奇数次非球面は動径座標の奇数次を含む回転対称な非球面であるため、偶数次非球面の自然な一般化になって分かりやすいが、その理論的基礎や有効性の議論は十分にはなされていない。奇数次非球面の数学的基礎の確立、収差特性を明らかにすることが要求されている。

第１章では、本研究の背景、目的及び概要が述べられている。

第２章では、奇数次非球面の数学的基礎の研究成果が述べられている。従来研究では、奇数次非球面が偶数次の冪級数で Taylor 展開できないので、奇数次非球面は光学設計に有効であるとされていた。しかし、従来の考察は Zernike 多項式の完全性と一見矛盾する。回転対称な Zernike 多項式（偶数次非球面）の有限和で十分収束したならば、並べ替えることで、奇数次非球面形状は偶数次非球面で表現できることになる。さらに Zernike 多項式の有限和で傾きも十分に近似できるならば、奇数次非球面は偶数次非球面で傾きも含めて表現できることになる。

奇数次非球面と Zernike 多項式の内積を直接計算することにより、奇数次非球面の Zernike 展開の明確な式を初めて導出した。展開係数がガンマ関数で表現可能であることが示され、これを用いて奇数次非球面の Zernike 展開は一様収束であることを導いた。一様収束とは、考えている範囲内での近似誤差の最大値が 0 に近づくということで、非常に強い収束であることが言える。さらに微分の Zernike 展開を計算することにより、この展開は微分(傾き)の近似にもなっており、さらに特殊な場合を除き微係数も一様収束することを示した。よって、奇数次非球面は回転対称な Zernike 多項式の有限和により、傾きも含めて完全に近似できることを理論的に証明した。回転対称な Zernike 多項式が偶数次多項式に他ならないため、奇数次非球面は偶数次非球面で表現できるということになる。さらに、この理論的結論が妥当であることを Schmidt Surface の光学設計

様式第４-２号

論文提出者氏名	田邉　貴大

論文審査要旨（続き）

を用いて実証した。

第３章では、奇数次非球面の収差特性を明らかにし、その積極的な有効性を実証することを試みた。奇数次非球面は偶数次の有限和で表現可能であるが、有限和といっても実用的な項数とは限らず、奇数次が実用上有効である可能性がある。非球面による付加的な波面収差は、非球面によって生じる一般光線の光路長と主光線の光路長との差によって生じる。このことを用い、一般非球面の収差係数を関数の高次導関数と関連付けて導出した。奇数次非球面にこの式を適用し、波面収差を従来から一般に用いられる Zernike 多項式で分解すると、奇数次非球面の収差係数は Seidel に対応する低次の収差であっても、高次アスや Tetrafoil といった高次収差成分を含むことが導出される。それゆえ奇数次非球面は収差補正に有効であることが理論的に推論できる。

Extreme Ultraviolet Lithography (EUVL)投影光学系を従来の偶数次非球面で設計すると、残存収差として高次アスや Tetrafoil が支配的であり、ここで導いた推論によると奇数次非球面が有効であると予想される。実際に奇数次非球面を用いて光学設計をして、これらの収差が補正可能であることを示した。また、これらの奇数次を実用的な項数の偶数次非球面で近似しても透過波面収差が再現しないことが確認できた。このように非常に精密な光学系では、奇数次非球面が高次収差を補正する上で実用上有効であり、Schmidt Surface の場合とは異なり、実用的な項数の偶数次非球面では代替できないことが理論的にまた実設計で示された。

第４章では、奇数次非球面の製造面への応用を検討した。超精密切削や磁性流体研磨等の点加工方式により、高精度面の創成が可能になったが、それに伴いレンズ中央部に鋭く局在する回転対称な形状誤差へそ(Center artifact)の問題が顕在化している。へそ形状は高い空間周波数を持っているため Zernike 多項式で表現することが困難である。正規分布関数が釣鐘状の形状を持っていることから、直感的にへそ形状の表現に利用できると考えられ、十分近似できることを数値的に確認した。しかし、一般の光学設計ソフトでは、正規分布関数を扱うことができないため、それを多項式面として取り扱うことを検討した。正規分布関数を Zernike 展開しても収束性が良くないことが数値的に示され、また正規分布関数の偶数次冪級数展開が良い近似を与えないことが知られている。そこで、奇数次非球面を用いて正規分布関数を表現することを試み、実際に１次から６次ないし７次までの多項式を用いることにより、十分に良い近似を得ることを示した。この結果を用いて、実際に製作したへその形状誤差を含む非球面の形状を表現し、光学性能の劣化の試算が行えることが分かった。これまで十分に解析されてこなかったへその影響を定量的に解析することが可能となり、光学系の製造・評価に大きな寄与をすると考える。

第５章では、本研究の成果をまとめている。

以上のように、奇数次非球面の数学的な基礎を確立し、収差補正における特有の性質を理論的に導いた。さらに実際の光学設計でこれらが正しいことを確認しており、奇数次非球面を用いる光学設計に対して理論的支柱を与えるものである。また、非球面加工に現れる特有な形状誤差を表すのに奇数次非球面が有効であることを見つけたことは、光学系の製造評価に大きな貢献をするものである。よって、本論文は、博士（工学）の学位論文として、十分な価値があると認められる。