

内21-17

早稲田大学審査学位論文(博士)の要旨

3282

早稲田大学大学院理工学研究科

# 博士論文概要

## 論文題目

屈折率分布型水晶体に関する研究  
Study of refractive index  
distribution of crystalline lens

申請者

劉 龍輝

Longhui Liu

物理学及応用物理学      応用光学

2001年10月



理 2653 (3282)

従来から良く知られているグルストランド等の人間の模型眼は近軸幾何光学的な結像を知る上では有効であるが、結像の質を議論できるものではない。このほか、水晶体の屈折率分布を考慮した模型眼は白柳、Pomerantzeffなどによるものがある。

水晶体の調節により、外界の物体を網膜上で結像し、視細胞により電気信号に変換され、神経回路を経由し、大脳中枢の視覚領まで伝達される。視覚情報処理の最初段階である眼光学系は、通常の光学機器のように球面、共軸、均質光学系で示されることは古くから知られている。その中で、最も興味深いのは、水晶体の屈折率分布が均一ではないということである。水晶体は、両凸レンズの形になっており、中心部に行く程、屈折率が増加し、屈折率分布型レンズである。調節を行うとき、前、後面の曲率及び光軸方向に水晶体の厚みを変えることにより、水晶体内部の屈折率分布形状が変化し、水晶体の屈折力が変えられ、異なる距離の物体を網膜上に結像できるのである。測定法に制限があるため、調節に伴う、水晶体の屈折率分布についてはまだ不明であることから、水晶体の屈折率分布を考慮し、しかも調節可能なヒト眼に近い模型眼の設計は困難である。

本研究は、新たな眼内状態水晶体屈折率分布の非接触、非破壊の測定法を提案した上、生体眼へ応用の可能性について検討を行った。さらに、SPR (Surface Plasmon Resonance) を用いた補助測定法を提案し、理論解析を行った。また、現在の眼内レンズ(IOL: Intra Ocular Lens)の変わりに、屈折率分布型レンズを用いることによって光学特性の改良について検討を行った。最後に水晶体の屈折率分布を考慮した調節可能な精密模型眼を設計したものである。

全体の構成は 6 章からなっている。以下にその概要を示す。

第 1 章では、本研究の背景、目的、論文の構成を述べた。

第 2 章では、レーザービームを用いた水晶体屈折率分布の新たな非接触、非破壊な測定法の提案から出発し、光学系を構築することによって、動物(豚眼、牛眼)の摘出水晶体を用いて実験を行い、方法の可能性を確認した。さらに、眼内状態水晶体に対して、“あおり”原理 (Sheimpflug 法) を用いて、レーザービーム軌跡を記録し、前眼部断面写真に対する解析を行うことにより、眞の軌跡を求める方法の有効性を確認した。上記光学系を現有スリットランプマイクロスコープ(slit lamp microscope) に組み込むことにより、前眼部の形状のみならず、水晶体の屈折率分布も測定できることから、レーザー光源とスリット光源両方を持つ新しい前眼部測定装置としてのスリットランプマイクロスコープを提案した。動物実験により、その有効性を示した。

従来使われている水晶体屈折率分布の測定はほとんど *in vitro* で、しかも水晶体に破壊性を与える方法である。本章では、水晶体に平行な細い、弱いレーザービームを光軸方向に多本数入射させ、レーザービームの軌跡を解析し、水晶体モデルの光線追跡結果と比較することにより、水晶体屈折率分布を求める方法を提

案した。摘出水晶体に対して撮影光学系の光軸が水晶体の光軸に垂直となすことができるが、眼内状態また *in vivo* において、水晶体中レーザービーム軌跡の撮影に、カメラの光軸は目の光軸と垂直させることはできないため、“あおり”の原理を用いて、物体面、レンズの主平面、CCD の撮影面を一つ線に交わらせ、鮮明な写真の撮影が可能にした。この撮影方法により得られたレーザービーム軌跡の写真には、あおり角による歪みを含まれている他、前房水、角膜の前、後面の屈折による歪みも含まれている。これらを修正し、水晶体を透過するレーザービームの軌跡を求め、モデルの光線追跡の結果と比較することにより、水晶体屈折率分布を求めた。

スリットランプマイクロスコープは、生体眼前眼部の観察、または形状測定に使われているが、スリットビームに上記光学系と組み合わせることにより、水晶体屈折率分布によって曲げられたレーザービームの軌跡も前眼部のスリット断面写真に記録でき、これを解析することによって、水晶体の屈折率分布が水晶体の形状と同時に *in vivo* で求めることが可能になった。

第 3 章では、上記測定法の補助法として、金属回折格子表面プラズモン共鳴 (SPR: Surface Plasmon Resonance) を用いた水晶体屈折率の測定法を提案し、その理論解析を行った。

エバネッセント波の波数が金属表面プラズモン波の波数と一致するとき、表面プラズモン共鳴が励起される。表面プラズモン波の波数は金属及び境界している誘電体の誘電率により決められる。表面プラズモン励起法としては、プリズムを用いた減衰全反射法(ATR: Attenuation Total Reflection)法と回折格子によるカップリング法がある。後者は、金属回折格子に光が入射し、回折光の波数ベクトルの  $x$  成分は入射光の波数ベクトルより大きくなると、この回折光はエバネッセント波になり、エバネッセント波の波数は入射光波数ベクトルの  $x$  成分と回折格子の周期ベクトル整数倍の足し算になるため、回折格子のピッチを変えることにより、エバネッセント波の波数をコントロールでき、サンプルの屈折率測定範囲は幅広くなる。また、微細加工技術の発展に伴い、波長程度またサブ波長周期を持つ回折格子の製作は容易になってきた。本章では、SPR 法を用いた水晶体屈折率分布の測定法を提案した上、RCWA (Rigorous Coupled-Wave Analysis) を用いて、抽出水晶体の屈折率をサンプルとした金属回折格子による SPR の解析を行い、0.01 より小さな屈折率差を計測できることから、SPR による水晶体屈折率分布測定法の有効性を示した。

第 4 章では、現在の屈折型眼内レンズ(IOL)の光学特性の改良について述べた。白内障患者が混濁になった水晶体摘出後、IOL の挿入により、視力の回復が実現されている。現在主流となっている屈折型 IOL はあくまでも、均一レンズであり、前房水および硝子体との屈折率差が大きいため、フレネル反射係数が高く、IOL 挿入後、眩しいと訴える患者が少なくない。微細加工技術の進歩に伴い、射

出成型法を用いて、ピッチが波長程度の PMMA または PC 回折格子の製作が容易になった。IOL 製作時、前、後面とも微細構造を持たせることにより、前房水及び硝子体との屈折率差がグラディエントになり、反射防止効果があると考えられる。本章では、微細構造を持つ眼内レンズを提案し、RCWA (Rigorous Coupled-Wave Theory) を用いて、表面反射のベクトル解析を行い、実験結果との比較を行った。微細構造のピッチが二分の一波長以下になると、0 次以外の高次回折光がエバネッセント波になり、0 次の透過または反射回折光のみとなり、反射防止膜と同等な働きをする。微細構造のアスペクト比は高いほど、良い反射防止効果が得られ、入射角度は 60 度、アスペクト比は 3 : 1 時、10 % 以上の反射率を減らすことができた。さらに、この反射防止効果は入射光波長への依存性が小さいことから、その実用性を検証した。

第 5 章では、GRIN レンズを持つ調節可能な模型眼の設計について述べた。

前章で述べたように、*in vivo* で水晶体の屈折率分布を計測する可能な方法を提案し、動物実験(豚眼、牛眼)を行った。ヒト眼については、Sheimpflug やスリットランプマイクロスコープにより実測したが、まだ充分な結論は得られていない。これまでに、いくつか水晶体の測定方法が提案されているが、屈折率分布の様子もそれぞれ大きく異なる値が報告されている。このようなばらつきの大きな測定値をそのまま模型眼に組み込むのは適当ではない。最近、コンピューター解析を用いたスリットランプマイクロスコープ、オフサルモーメーター(Ophthalmometer)、ORBSCAN などの前眼部計測法により、角膜の前、後面の曲率半径、非球面係数、水晶体の前、後面の曲率半径はより正確に分かるようになった。また、アベロースコープ (Aberroscope) やハルトマンシャック (Hartmann-Shack) などにより生体眼の波面収差を比較的高精度で測定することも可能になった。本章では発表されたヒト眼の光学定数と光学特性から水晶体の屈折率分布を推測する方法を提案し、GRIN レンズを持つ調節機能にも対応できる模型眼を設計した。さらに、水晶体の屈折率分布が眼球光学系の結像及び調節へ、どのような寄与をしているかを調べた。GRIN レンズ模型眼は調節時において、均一レンズ模型眼と比べ、非球面係数を大きく変えることなく、球面収差を軽減することがわかった。また、GRIN レンズが光軸上だけではなく、光軸外の結像特性、特に視軸上での結像特性にも寄与していることがわかった。

第 6 章では、論文のまとめである。本研究で提案した、水晶体屈折率分布の非接触、非破壊な測定方法を用いて、生体眼水晶体屈折率分布の測定に、特に、調節に伴う水晶体の屈折率分布形状変化の測定に可能であることから、白内障の早期診断、調節機構の解明、老眼の予防に一助になることを期待したい。また、本研究で設計した GRIN レンズ模型眼を用いて、非調節時だけではなく、調節時眼光学系の結像評価もできることから、眼病治療手段の評価、また、接眼光学機器の設計に、実生活に則した評価が可能になると思われる。