

氏名(本籍)	み うら まさ ひろ 三 浦 雅 博 (茨城県)		
学位の種類	博 士 (工 学)		
学位記番号	博 甲 第 4923 号		
学位授与年月日	平成 21 年 3 月 25 日		
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当		
審査研究科	数理物質科学研究科		
学位論文題目	Imaging Polarimetry of Human Eye (人眼の偏光画像解析)		
主 査	筑波大学教授	工学博士	伊 藤 雅 英
副 査	筑波大学教授	理学博士	青 木 貞 雄
副 査	筑波大学教授	理学博士	巨 瀬 勝 美
副 査	東京医科大学教授	医学博士	岩 崎 琢 也

### 論 文 の 内 容 の 要 旨

地球の光学画像診断は眼科臨床において極めて重要な位置をしめており、多くの種類の器械が開発され、臨床現場で用いられている。これらの眼科用光学器械は波面光学に基づくものが一般的である。波面光学の中で偏光測定については多くの研究が行われている。地球の偏光計測では、網膜神経線維の複屈折性を検出することによって緑内障診断をする装置が既に実用化されている。しかし、網膜神経線維以外の地球組織の偏光特性については未知の部分が多く、特に病的組織における偏光特性の変化については、ほとんど研究が進んでない。生体人眼の各正常組織は固有の偏光特性を持つことが予想される。また病的状態の進行によって偏光特性が変化する可能性がある。このことから偏光計測によって、通常の偏光非感受型画像測定装置では計測できない、組織構造の判別や微小組織構造の変化の計測が期待される。本研究では生体人眼および生体材料に対する偏光計測を行い、地球組織の偏光特性を検討することを目的とする。

生体人眼の網膜偏光計測において、入射光および反射光は角膜、水晶体、眼内レンズといった中間透光体を透過する必要がある。そこで網膜偏光計測を行うためには、中間透光体における偏光変化を考慮に入れる必要がある。中間透光体のうち、角膜と水晶体に関する偏光特性については、既に報告されているが、眼内レンズについては報告が無かった。眼内レンズは眼科手術で広く用いられている生体材料である。眼内レンズは様々な合成樹脂を材料に作成され、摘出した水晶体の代用品として眼内に移植される生体材料である。本研究では眼内レンズの偏光特性を調べ、地球偏光計測への影響を調べた。計測には市販の偏光計測装置(LC-PolScope Pro Imaging System)を用い、複屈折性を計測した。その結果、圧延法によって製造された眼内レンズには最大 27deg (single pass) 複屈折性がある事を報告し、それ以外の眼内レンズでは複屈折を殆ど認めないことが判った。この事から、圧延法で作成された眼内レンズのみが地球の偏光計測に影響を与えることが判った。

生体人眼の前眼部の偏光計測を行った。計測には Polarization sensitive swept source optical coherence tomography (PS-SS-OCT) を用いた。OCT は生体からの後方散乱光強度を干渉計で計測することにより、生体断層画像を得る装置である。PS-SS-OCT では入射光の偏光状態を連続的に変調させ、変調された OCT 信

号を2チャンネルの偏光検出器で計測することにより、通常の散乱光画像に偏光情報を付加する。計測に用いたPS-SS-OCTは中心波長1.3 $\mu$ mの光源を用いており、生体前眼部の偏光計測に適した波長となっている。本装置を用いて、正常人眼の前眼部を計測したところ、通常の散乱光画像では困難だった、強膜境界部の判別が可能となった。これは強膜がコラーゲン線維による微少管状構造から形成されていることにより、強い複屈折性 (retardation value 230 deg) を持つためである。この複屈折性は、病的状態により強膜の線維構造が破壊されることにより、減少することも示された (retardation value 110 deg)。

生体人眼網膜の偏光計測を行った。偏光計測は市販されている polarization-sensitive scanning laser ophthalmoscope (PS-SLO) を用いた。本装置は近赤外レーザー (780 nm) を光源とするエリプソメーターで、得られたデータを新規開発したプログラムを用いて解析した。偏光計測は次の偏光画像を算出して行った。1) Phase retardation map, 2) Depolarized light image (偏光解消画像), 3) Parallel polarized light image (偏光保存画像), 4) Average reflectance image (偏光非感受型の通常の共焦点画像)。

まず病的状態として中心性漿液性脈絡網膜症を解析した。その結果、原因病巣 (蛍光漏出点) では多重散乱光によって偏光解消性を生じることを利用し、depolarized light image によって原因病巣の同定が可能な事が判った。続いて網膜色素上皮における多重散乱を背景コントラストとして用いることにより、網膜表面に異常膜状組織 (黄斑前膜) が存在する場合でも、depolarized light image を用いることにより、明瞭な網膜血管画像が得られることを報告した。

これらの研究は生体人眼の偏光計測が、新しい眼科画像診断に結びつく可能性を示したものである。しかしPS-SLOを用いた偏光画像解析では、網膜組織における偏光変化の積算しか検討することができず、網膜各層における偏光変化を検討することはできない。そのため、異常組織における偏光変化の検討には限界があった。

そこでPS-OCTの計測結果を、PS-SLOによる計測結果と組み合わせることにより、包括的な偏光計測を行った。計測に用いたPS-OCTはpolarization-sensitive spectral-domain OCT (PS-SD-OCT) である。このPS-OCTは3偏光2状態検出型の偏光計測器で、3種類の入射偏光のそれぞれを2チャンネルの偏光検出器で測定する装置である。中心波長は840nmで網膜偏光計測に適したものとなっている。本研究では加齢黄斑変性を対象として、PS-SD-OCTとPS-SLOを用いて偏光計測を行い、病巣における偏光変化を比較検討した。その結果、PS-SLOで認めた異常複屈折領域に一致して、PS-OCTでも異常複屈折を認めた。またPS-OCTの断層画像の結果から、異常複屈折が網膜深部の異常線維組織 (瘢痕組織) に由来することが確認された。

生体人眼を構成する組織は多彩な偏光特性を保有することがわかった。また偏光計測が生体組織の微少組織構造の検討に有用であることが判った。

## 審査の結果の要旨

臨床現場でこれまで用いられてきた眼科用光学器械は波面光学に基づくものが一般的であった。偏光を用い網膜神経線維の複屈折性を検出することによって緑内障診断をする装置が既に実用化されている。しかし、網膜神経線維以外の眼球組織の偏光特性については未知の部分が多く、特に病的組織における偏光特性の変化については、これまで研究がなかった。本論文は生体人眼の各正常組織および病的状態の進行による偏光特性の変化を偏光感受型コヒーレンストモグラフィーおよび走査型レーザー検眼鏡による偏光画像を比較解析することで、これまでの偏光非感受型画像測定装置では計測できない、組織構造の判別や微小組織構造の変化の計測をおこない偏光計測の医学への新しい応用を示した。

よって、著者は博士 (工学) の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。