

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 澤田 桂

光は波動であるが、その波長が短い極限で幾何光学によって良く記述され、それが各種の光学器機的设计原理となっている。物質の光学的性質は通常誘電率テンソルで表され、それが分散、複屈折などの結晶特有の現象を記述する。しかし、一方で波動としての性質が顕に現れる場合もあり、光の回折現象はその代表的なものである。沢田氏は、新しい機能—マルチフェロイック—を持つ物質においては、通常の場合とは異なり、光の波数ベクトルの方向に依存した誘電率を持つことに着目し、そこでの光学現象を理論的に調べた。具体的には、(i)マルチフェロイック物質のフォトニック結晶により非相反光学効果が約1000倍増強されること、(ii)マルチフェロイック物質における幾何光学の方程式を導出すると、光に働く「ローレンツ力」が現れること、を見出した。さらに、幾何光学の方程式に対する波動力学的補正を求め、それが実空間と波数空間を合わせた6次元空間におけるベリ一位相曲率で書けることから、歪んだフォトニック結晶中における光線の伝播に、増強されたシフトが生じることを見出した。この結果をX線に適用すると、X線のビームがブラッグ条件近傍で歪みの大きさの10の6乗倍もシフトすることが予言された。

本論文は preface と 5つの Chapter, Appendix A, B からなる。

Preface で論文の全体像を簡潔に述べてある。

Chapter1 は“Introduction”として光学に関する基本的な予備知識をまとめている。Maxwell 方程式による波動光学の説明から始まって、幾何光学近似、そして電子系との類似点を述べた後、フォトニック結晶、X線回折の運動学的理論と動的理論などを解説している。特に、Chapter 4 に関連して、X線の動的理論に関し、Takagi-Taupin 方程式や、加藤範夫によるアイコナル理論を概観している。最後に、Chapter 2, 3 に関連して、多重極展開による結晶の対称性の議論と光学応答の分類を行っている。

Chapter2 は“Multiferroic Photonic Crystals”として、マルチフェロイック物質で作ったフォトニック結晶における光学的電気磁気効果の増強を論じた。層状構造と、グレーティング構造の双方について、反射光の回折方向による強度差を転送行列法・平面波展開法で計算し、フォトニック結晶を作らない場合に比べて1000倍にも及ぶ増強効果が得られることを示した。これに対応する実験結果も紹介されている。

Chapter3 は“Lorentz Force Acting on Light”として光学的電気磁気効果による光のローレンツ力について論じてある。誘電率が光の波数ベクトルの方向に依存する場合に幾何光学の方程式を解くことで、光にあたかも「磁場」が作用するような光線

の軌跡が得られることを示した。応用としてマルチフェロイック物質におけるドメイン壁のイメージングを提案している。

Chapter4は“Berry Phase Theory for Dynamical Diffraction”で、フォトニック結晶中の波束に対する、位置と運動量の半古典的運動方程式を求め、幾何光学の方程式に対する補正を波数に関する最低次のところまで求めた。この補正は実空間と波数空間を合わせた6次元空間におけるベリー位相曲率で書ける。これを、歪んだフォトニック結晶中における光線の伝播に適用し、その軌跡に大きなシフトが生じることを見出した。通常の結晶格子はX線にとってはフォトニック結晶として作用するので、このアイデアはそのまま歪のある結晶に対するX線の動的回折理論へと適用できる。この場合、X線のビームがブラッグ条件近傍で歪みの大きさの10の6乗倍もシフトすることが予言された。

Chapter5は“Summary and Discussion”で、論文全体を総括し、そこからみえる今後の展望について述べられている。

付録としてAppendix AではChapter2でのMaxwell方程式を解くための転送行列法・平面波展開法の詳細について、Appendix BではChapter4におけるBerry位相の計算の詳細について述べている。

以上をまとめると、本論文では新しい物質機能・原理に基づく新しい光学現象とその巨大化を理論的に研究し、新奇な効果の予言・提案を行った。さらにそれが少なくとも部分的には実験的にも検証されている。本論文の研究により、マルチフェロイック物質やフォトニック結晶を用いた光学の基礎・応用に関する理解が進展し、今後の物理工学へ寄与するところが大きい。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。