氏　　名	大野 修平
学　位　の 種　類	博 士 (　理学)
学　位　記　番　号	博 甲 第　8457　号
学 位 授 与 年 月 日	平成 30年 3月 23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	

Topological edge modes in photonic crystals
(フォトニック結晶におけるトポロジカルなエッジモード)

主　　査	筑波大学教授	工学博士	初貝 安弘
副　　査	筑波大学教授	博士(学術)	都倉 康弘
副　　査	筑波大学准教授	博士(工学)	小野 倫也
副　　査	筑波大学講師	博士(理学)	久保 敦

論　文　の　要　旨

本論文は"Topological edge modes in photonic crystals (フォトニック結晶におけるトポロジカルエッジモード)"と題し、全八章からなる。本論文はフォトニックバンド構造に対するトポロジカル不変量の数値評価法を確立し、バルク・エッジ対応関係によるフォトニック結晶での界面モードの存在の意義を明らかにしたものである。

第一章は全体の導入であり研究背景、研究目的および論文全体の構成が述べられている。

第二章ではフォトニック結晶に関する基本的事項が述べられている。

第三章ではトポロジカルに非自明なバンド構造におけるバルク・エッジ対応関係とフォトニック結晶におけるその応用について述べられている。

バルクのトポロジカル不変量が非自明なとき、界面が存在すれば、非自明なバルク状態を反映する局在モード(エッジモード)が現れる。これがバルク・エッジ対応とよばれるエッジとバルクの相互関係であり、今日ではトポロジカル相一般が広く普遍的に持つ性質と考えられている。2008 年に Raghu と Haldane および MIT の Soljacic グループは、それまでは量子系において使われていたこのバルク・エッジ対応を Maxwell 方程式によって支配されるフォトニック結晶という古典的な系に適用し、バルク・エッジ対応という概念は量子系に特有なものではなくより広く普遍的に成立する原理であることを示唆した。これをひとつの契機として古典系におけるバ

ルク・エッジ対応の研究がひろく行われるようになり、光学現象に関するものは今日トポロジカルフォトニクスと呼ばれている。

第四章では本論文でフォトニックバンド構造の解析に用いた局在ガウシアン型基底による展開法が述べられている。空間的に局在した基底を用いることにより、固有値方程式は有限個の基底を用いて展開された後も波数に関する周期性が保証されたものとなり、福井−初貝−鈴木によって与えられたトポロジカル不変量の計算法が行列の固有ベクトルを用いて直接適用可能となる。

第五章では一軸異方的なカイラルな空間構造を持つ誘電体フォトニック結晶を対象とし、その界面に現れる伝搬モードの数値的解析がフォトニックバンド構造のトポロジカル不変量とエッジ状態との相互関係に主点を於いて議論されている。波数3成分の内一つを固定して得られる2次元断面（セクション）でのバンド構造に対するセクションチャーン数を評価し、界面に局在した伝搬モードとの関係をバルク・エッジ対応の視点から議論した。この非自明なセクションチャーン数はカイラルな空間構造に伴って現れるワイル点の存在と深く関係しており、これに関しても議論している。

またにマイクロメートルスケールでの作成実績のあるカイラルウッドパイル構造におけるエッジモードも解析されていて、そのトポロジカルな特性が議論されている。

第六章ではフォトニック結晶における周期的な時間変化の効果が解析されている。系に加わる外力が時間的に周期的である場合を フロッケモードとして解析した。この系に関してもガウシアン基底を用いた数値的な解析がバルク・エッジ対応の視点から議論されている。

第七章ではウッドパイル構造に関する周期的な構造変形の自由度を波数と共に系の独立なパラメータとして扱い、仮想的に次元を追加した系でのトポロジカル不変量が考察されている。このような1つの波数と構造変形のパラメータとをチャーン数を定義する二次元のパラメータ空間とみたとき、この波数に対応する方向での境界を持つ系のエッジ状態を考えることで、バルク・エッジ対応関係が議論されている。

第八章は論文全体の総括と今後の展望についての記述である。

審　査　の　要　旨

〔批評〕

量子ホール効果に起源をもつバルクエッジ対応が支配するトポロジカルに保護されたエッジ状態の普遍性は，近年量子系以外でも広く適用可能な概念であることが明らかとなった．その歴史においてフォトニック結晶におけるトポロジカル相の存在ならびに局在した電磁場としてのエッジ状態意義は大きい。特にフォトニック結晶においてはバルクのトポロジカル量は観測量ではなく、バルクエッジ対応としてエッジ状態のみが観測量である。その一方フォトニック結晶におけるエッジ状態は種々の潜在的な応用の可能性を持ち、その意義は必ずしも純理論的なものにとどまらない。本論文はこのフォトニック結晶におけるエッジ状態に関する物理学的観点からの数値的、理論的研究である。

特に実空間で局在した非直交の基底関数を用いて電磁場を展開する本論文で開発した手法はトポロジカル数の計算に関して極めて有効であることが本論文により示され、今後の広範囲な分野での展開を期待させるものである。また具体的なフォトニック結晶であるカイラルウッドパイル構造に関する本論文の提案はその実験的意義も大きい。また、周期的な構造変形を仮想次元としてこの仮想次元を用いたトポロジカル数を考察することにより実際に観測可能なエッジ状態をバルクエッジ対応による特徴づける試みはその理論的独創性を高く評価する。更に本論文ではその理論的なアイデアを提案するのみならず、仮想次元を用いたバルクエッジ対応の具体的な有効性も数値計算により明示的に示されている。

以上の諸点に基づき本論文はその新規性、独創性ならびにその物理的な有効性の観点から筑波大学数理物質科学研究科物理学専攻の博士論文として十分な意義をもつと評価される。

〔最終試験結果〕

平成 30 年 2 月 14 日、数理物質科学研究科学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士（理学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。