

令和 2 年 7 月 10 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05507

研究課題名(和文) リング共振器による3次元トポロジカルフォトンクス

研究課題名(英文) Three-dimensional topological photonics by ring resonators

研究代表者

落合 哲行 (OCHIAI, Tetsuyuki)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・主幹研究員

研究者番号：80399386

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はリング共振器やその類似構造をもちいて、光の3次元トポロジカル相を実現することを目的とした。最大の成果はコアシェルピラー構造の3次元直方結晶配列において、ギャップレスな表面(ドメイン壁)状態を構成するレシビを与え、新たに開発した計算手法によってDirac型の表面状態の出現を計算機実証したことである。またリング共振器の周期配列を記述するネットワーク模型において、様々なフロケトポロジカル相の性質を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究はこれまで萌芽的であった光の3次元トポロジカル相を開拓したことに意義がある。発熱性や量子効果によってムーアの法則の限界が予見される現状にあって、光集積回路が注目を集めて久しい。究極的な光制御のためには3次元構造が不可欠であるが、そこにトポロジカルな効果を埋め込むことで更なる新機能(構造のラフネスに対する頑強性、省エネ、光スピン操作など)が期待できる。本研究はこの方向に向けた着実な一歩といえる。

研究成果の概要(英文)：One of the goals in this project is to realize theoretically three-dimensional topological phases of photons using ring resonators or related objects. We have demonstrated theoretically that a three-dimensional tetragonal arrangement of core-shell pillars exhibits gapless surface (domain-wall) states of the Dirac or quadratic type, irrespective of surface orientations. We have also investigated the network models that describe light scattering among periodic arrangements of optical ring resonators, and have shown the emergence of Floquet end/corner states.

研究分野：ナノフォトンクス

キーワード：トポロジカルフォトンクス リング共振器 DBR pillar

1. 研究開始当初の背景

近年、電子系のトポロジカルな物理を光の系に移植し、光の新たな輸送特性や、フォトン多体系の新たな物理を目指した研究が盛んになっている。この流れはトポロジカルフォトニクスとよばれ、近年急速に進展している。相関するフォトン多体系の物理という基礎物理学のフロンティアであることに加え、構造の乱れに強い光導波路などへの応用も期待できるからである。

トポロジカルフォトニクスは Haldane らによる光の一方通行導波路の提案 (Haldane & Raghunathan, PRL 2008) から始まった。彼らは 2 次元の 3 角格子フォトニック結晶がもつ Dirac 点に着目し、磁気光学効果によるギャップを導入すれば、光のカイラルエッジ状態ができることを示した。しかし磁気光学効果は一般には非常に小さい。そこで、これ以外の方法が強く望まれてきた。いくつかある提案のなかで、optical delay line に伴う phase を使ってリング共振器の 2 次元周期系に人工的にゲージ場を導入する方法 (Mittal et al, PRL 2014) は大変有望である。磁気光学効果といった物質的な制約から離れて光カイラルエッジ状態が実現できるからである。また研究代表者を含めた他の研究者も、様々な方法で 2 次元の光カイラルエッジ状態や光ヘリカルエッジ状態が実現できることを示してきた (Rechtsman et al, Nature 2013; Khanikaev et al, Nature Mat. 2013; Ochiai, JPSJ 2015)。これらの結果により、光の 2 次元のトポロジカル相は我々の手中にあるとよい。しかし、3 次元の光のトポロジカル相はこれまでいくつかの提案があるものの、まだまだ萌芽的であり、研究のフロンティアであった。

2. 研究の目的

以上の背景をふまえて、3 次元の光の様々なトポロジカル相を理論的に実現することを目的とする。鍵となるのは、2 次元の場合と同様、リング共振器やそれと類似の構造と考えている。研究代表者は近年、リング共振器を 3 次元的に並べた系における光のトポロジカル相について研究をおこない、その成果を 3 報の論文にまとめた (Ochiai, JPCM 2016, 2017 および arXiv:1510.04033)。具体的にはシリコン細線で作るフォトニック構造を想定した。類似の 3 次元構造はメタマテリアルで考えられており、その作成技術が応用できる。このような系の物理を記述するため、研究代表者は 3 次元に拡張した Chalker-Coddington(CC) ネットワークモデルを導入し、この系がワイル半金属や弱トポロジカル絶縁体的なトポロジカル相を持つことを明らかにした。しかし、これらの相にはボソンの系であることを反映し、いくつかの制約がある。また、それ以外のトポロジカル相(特に結晶対称性によって保護されたトポロジカル相)の存在についても未解明であった。

そこで既存のトポロジカル相の分類表を参考に、様々な結晶対称性のフォトニック結晶を仮定し、光の第一原理計算やネットワークモデルによって、探索的に光のトポロジカル相を実現する。結晶の対称性は、ブリルアンゾーンの中で対称性の高い点において、固有モードの規約表現による分類を可能にする。また $k \cdot p$ 摂動でその点付近でのバンド分散のふるまいを予言できる。また対称性の高い点での縮退によってバンドギャップが閉じている場合に、対称性を崩すことでトポロジカルなギャップを開けることができる。対称性に基づく議論は汎用性が高いので、特定の系に限定されないという強みがある。このような結晶対称性を軸にトポロジカル相を探索する。

また、近年の非エルミート系の物理の一般論の発展をふまえて、光の系という具体例でその一般論がどういう形で現実の物理として出現するかを調べる。光はそのエネルギーが常に正なので、真空準位より高い。これは例えばフォトニック結晶でフォトニックバンドが形成されても、その固有モードは結晶の表面からもれてしまうことを意味する。すなわち光の系は開放系といえる。開放系は実効的な非エルミート系とみなせるため、有限サイズのフォトニック結晶は非エルミート系の物理を調べる舞台としてふさわしい。特にこの系のバルクがトポロジカル相にあるときに、いわゆるバルクエッジ対応がどうなるのか、トポロジカル相の予言するギャップレスの表面状態が非エルミート性によってどう変化するかを、フォトニック結晶の例で考察する。

更に、リング共振器系に量子ドットなどの人工原子を導入し、真空ラビ分裂がおこると、フォトンブローケードにより、フォトンにとっての実効的なクーロン相互作用が生じる。また媒質に Kerr 非線形性がある場合も非自明なフォトン間相互作用になる。したがって、リング共振器周期系で、フォトン多体系の物理を開拓できる。その道筋をつけたい。

以上は純粋な理論研究であるが、フォトニクス系のもつスケラブルな性質を活かし、マイクロ波帯でこれらの物理を実装する系のデザインもおこなう。

3. 研究の方法

実際の研究方法は以下の通りである。

- (1) リング共振器からなるフォトニック結晶の光学特性を解析するコードを作成する。リング共振器は回転対称性をもち、その共振器モードは角運動量で特徴づけられる。よって回転

対称性を最大限考慮した数値計算手法がリング共振器をベースとしてフォトニック結晶における高精度シミュレーションにおいて不可欠である。既存の計算手法はリング共振器を扱ううえで必ずしも最適化されていない。

(2) そのコードにより、バルクモードとエッジモードの特性を解析する。フォトニック結晶のバルクと表面の性質は、表面に平行にスライスした低次元のフォトニック結晶構造から導くことができる。例えばバルクのバンド構造や、表面での反射率などは低次元構造の転送行列から求まる。その転送行列を多重散乱法の枠組みによって数値的に求め、バルクとエッジ（表面）の性質を調べる。

(3) 数値計算結果の特徴を抽出する簡単なモデルを構築し、おこっている現象を理解する。リング共振器をベースとしたフォトニック結晶構造においては、単純な強束縛模型では記述できない物理があらわれる。そのため、電子系のアンダーソン局在でよく用いられるネットワーク模型を用いて、リング共振器系に特有の現象が記述できる。この模型は外場の周期的ドライブによるフロケ系に等価であり、フロケ系に特徴的なトポロジカル相が得られる。この模型によりリング共振器周期系におこっている現象を理解する。

(4) そのモデルを拡張し、非線形相互作用やフォトン間相互作用をもつ系について検討する。強束縛模型で記述できる系の場合、Kerr 型の相互作用やフォトン間の相互作用は coupling に光子数依存性をもたせたり、ハバード型の相互作用によって導入できる。しかしネットワーク模型の場合、そのような拡張は簡単ではない。この点について検討する。

4. 研究成果

(1) 偶然縮退と対称性の破れによる光の 3 次元ギャップレス表面状態の構成

ある種の対称性をもつ 3 次元フォトニック結晶にギャップを開け、そのバルクギャップにギャップレスの表面状態を作る簡便な方法を提案した。この方法は結晶の点群対称性とその規約表現の性質が本質的であり、構造の詳細によらないユニバーサルな方法であることに大きな特徴がある。

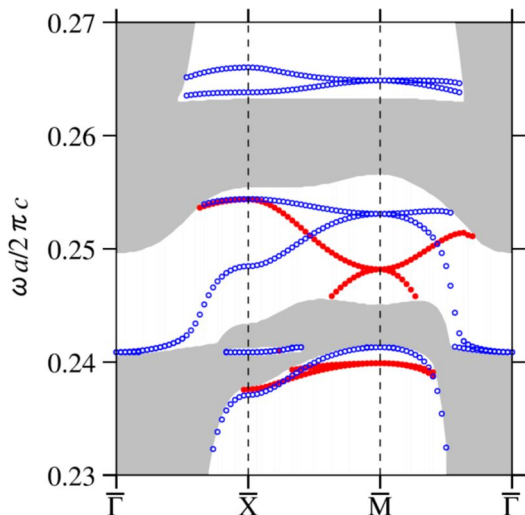


図 1: 2 種類のドメイン壁に対応したギャップレスの表面状態。対称性から M 点で quadratic な分散関係が得られる。

具体的には点群 $D_{4h}(=C_{4v} \otimes C_1)$ をもつフォトニック結晶を仮定し、ブリルアンゾーンの対称性の高い点で 2 重縮退する 2 つの規約表現 (E_u, E_g) を持ったモードについて、パラメータを調整しながら偶然縮退させる。そのことを後、結晶の C_1 対称性 (パリティ対称性) を破ると 2 つの規約表現は同じ規約表現 (E) に落ちる。同じ規約表現をもった状態はエネルギー的に反発するので、ギャップが生じる。今、 C_1 対称性を破ったフォトニック結晶と、それを反転させた結晶を張り合わせると、その界面にギャップレスの表面状態が生じる。以上のシナリオを有効八ミルトニアン的手法を用いて解析的に示した。

また、この方法を用いて、有限高さの高屈折率ピラーの 3 次元周期配列からなるフォトニック結晶を具体例として数値シミュレーションをおこない、予言どおりのギャップレス表面状態が得られることを示した。また表面の面方位を変えても 2 つの Dirac 点をもつ表面状態が生じ、表面状態のギャップレス性は保たれることを数値計算によって示した。

(2) リング共振器周期系を扱える新たな高精度数値計算手法の開発

A で表面状態の面方位依存性を調べるために、既存の手法 (RCWA 法) では特定の面方位しか調べられない。他の面方位でどうなるか調べるためには新たな計算手法を構築する必要があった。そのため、平面波展開と円筒波展開を hybridize した新しい計算手法を開発した。この手法では典型的にリング共振器が縦方向に積層した構造 [一種の Distributed Bragg Reflector (DBR) ピラ

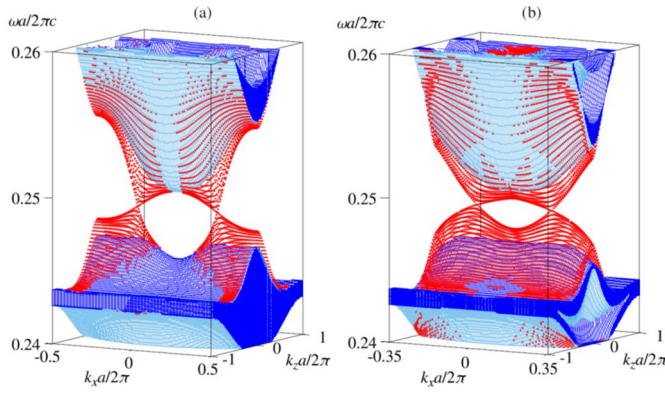


図 2: 新しい計算手法による、図 1 とは異なる面方位での表面状態の分散関係。2 つの Dirac cone が得られている。

一]における光散乱を高精度に調べることができる。また DBR ピラーの 1 次元周期構造(ある種の 2 次元フォトニック結晶)、2 次元周期構造(ある種の 3 次元フォトニック結晶)の光学特性も調べることができる。

この手法により、DBR ピラー構造において、いわゆる BIC モードが得られることを理論的に明らかにした。また(1)のフォトニック結晶構造において、2 つの Dirac point をもつ、ギャップレスの表面状態が得られることを数値計算によって明らかにした。

(3) 1 次元リング共振器配列における SSH 型トポロジカル相とマイクロ波での実装可能性

一般に光のトポロジカル相は波の干渉が本質的であり、光の量子性は必須ではない。そのためマイクロ波のような(光子としてのエネルギーが小さいゆえに)全く古典的な電磁波においてもトポロジカル相は起こりうる。

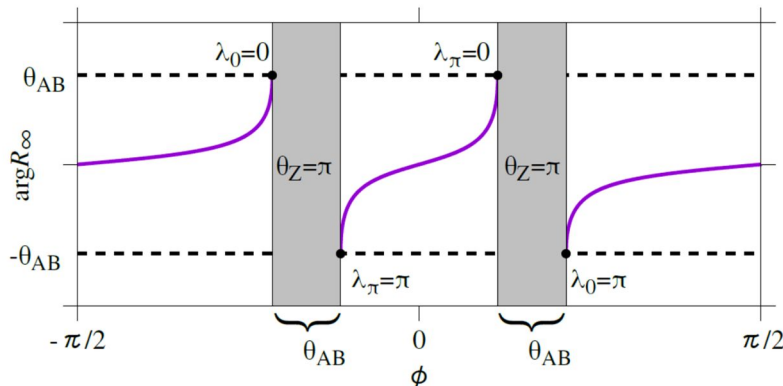


図 3: Zak 位相と半無限系での端面における反射係数の位相との関係。この関係から端状態の個数が決まる。

で得られる特徴的なエッジ状態は Zak 位相で特徴づけられる 2 つの相で明白な違いがある。自明な相では境界条件を変えるとエッジ状態は 0 個か 2 個であるが、トポロジカルな相では必ず 1 個でギャップアウトできない。この 2 つの相の違いは端面から入射するマイクロ波の複素反射係数から実験的にモニターできる。

以上の成果をふまえて、マイクロ波用の同軸ケーブルと 2 種類の方向性結合器で実装する、検証可能なトポロジカルマイクロ波回路を提案した。

この性質を demonstrate するために、マイクロ波回路で容易に実現できる 1 次元リング共振器配列を考え、そこで生じるトポロジカル相とその実験での検証可能性を調べた。その結果、リング間に 2 種類のカップリングを導入することにより、Su-Schrieffer-Heeger (SSH) 型のフロケットトポロジカル相が得られることを明らかにした。ここ

(4) 2 次元リング共振器周期系におけるフロケ・コーナー状態

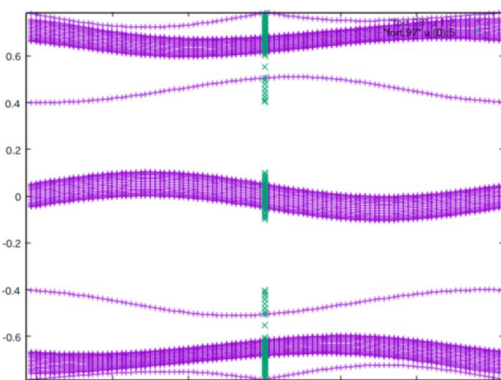


図 4: Lieb 格子のネットワークモデルのスラブ系のスペクトル(紫)と有限系のスペクトル(緑)。有限系のスペクトルでエネルギー的に孤立した点がコーナー状態に対応する。

高次トポロジカル絶縁体では コーナー状態やヒンジ状態といった特徴的な局在状態が生じる。これらをリングネットワークモデルで実現すべく、様々な結晶構造を用いて探索的にその可能性について調べた。ネットワークモデルはフロケ系に等価なので、これが実現すると、数少ない高次フロケットトポロジカル相の例になる。いくつかの結晶構造で明白なコーナー状態の出現を得たが、ネットワークモデルの場合、境界条件のとりかたに大きな連続自由度があり、境界条件を連続的に変えていくとギャップアウトしてしまう。ここで得られるフロケ・コーナー状態は何らかの fragile なトポロジカル相と関連していると思われる。

(5) 開放系としての光トポロジカル表面状態

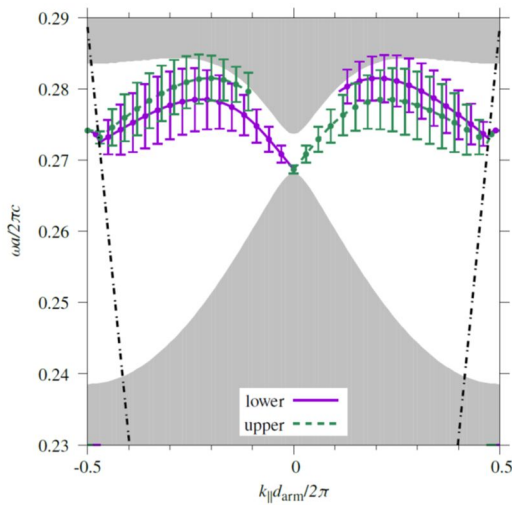


図 5: バルクのバンドギャップと leaky な表面状態の分散関係。バンドギャップ中に状態密度の Lorentz peak があり、その中心エネルギーが幅を変えながらギャップを横切っていく様子がみえる。

ギャップレスになっており、バルクエッジ対応がみだされることが示された。

光は常にエネルギーが正なので、真空準位よりエネルギーが高い。このことは、フォトニック結晶のような構造で光のバンド構造ができたとしても、表面を通じてそのモードは外にもれる（外部の連続スペクトルをもった放射モードとまざる）よって光の系は基本的に開放系といえる。その場合に、いわゆるバルクエッジ対応はどうなるのか？ この問いに答えるために以前に数値的に示した光のトポロジカルエッジ状態の性質を再考した。光のもれにより、エッジ状態はその固有周波数に虚部をもつ。その虚部は状態密度において周波数領域でのローレンツ型ピークの幅として見積もることができる。バルクのギャップ中に得られる状態密度のローレンツピークを表面ブリルアンゾーンをスキャンしながらみると、ローレンツピークはギャップを周波数領域でトラバースしていき、バルクのバンド端でバルクモードの状態密度と混ざる。このピーク位置を表面ブリルアンゾーン波数の関数としてみると、エッジ状態がギャップレスになっているかがわかる。バルクが nonzero のチャーン数をもっていると、確かにエッジ状態は

(6) 試行錯誤に終わった点

ネットワークモデルに非線型相互作用を導入した系の解析を試みた。ナイーブに導入すると擬エネルギーに対応する伝搬位相が 2 の周期性を破るため、フロケ系としてコンシステントにならない。エッジ状態の存在についても興味深いスペクトルが得られたが、結果の解釈に疑問が残り、期待した成果が得られなかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 T. Ochiai	4. 巻 35
2. 論文標題 Hybrid method of plane-wave and cylindrical-wave expansions for distributed Bragg-reflector pillars: formalism and its application to topological photonics	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Opt. Soc. Am. B	6. 最初と最後の頁 2642-2653
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1364/JOSAB.35.002642	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Ochiai	4. 巻 96
2. 論文標題 Gapless surface states originating from accidentally degenerate quadratic band touching in a three-dimensional tetragonal photon crystal	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Phys. Rev. A	6. 最初と最後の頁 043842/1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/physreva.96.043842	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. T. Miyazaki, T. Mano, T. Kasaya, H. Osato, K. Watanabe, Y. Sugimoto, T. Kawazu, Y. Arai, A. Shigetou, T. Ochiai, Y. Jimba, H. Miyazaki.	4. 巻 11
2. 論文標題 Synchronously wired infrared antennas for resonant single-quantum-well photodetection up to room temperature	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 565/1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-020-14426-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 落合哲行
2. 発表標題 電気磁気光学効果がある場合の first-order formalism による光輸送特性
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Ochiai
2. 発表標題 Gapless Domain-Wall States Originated from Accidentally Degenerate Quadratic Band Touching in a Three-Dimensional Photonic Crystal
3. 学会等名 METANANO-2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 落合哲行
2. 発表標題 偶然縮退と対称性の破れによるギャップレス表面状態
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Ochiai
2. 発表標題 Bound States in Continuum and Gapless Surface States by Distributed-Bragg-Reflector Pillars
3. 学会等名 Frontiers in Optics / Laser Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Ochiai
2. 発表標題 Bulk-edge correspondence in open photonic systems
3. 学会等名 NH2019TD. (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----