

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23540380

研究課題名(和文)電子系とのアナロジーによるトポロジカルな光輸送現象の開拓

研究課題名(英文) Investigation of topological light-transport phenomena by the analogy to electronic systems

研究代表者

落合 哲行(Ochiai, Tetsuyuki)

独立行政法人物質・材料研究機構・先端フォトニクス材料ユニット・主任研究員

研究者番号：80399386

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円

研究成果の概要(和文)：電子系における量子ホール系やトポロジカル絶縁体における特異な輸送特性を光の系に移植し、これまでない光輸送特性を実現するのが本研究の目的である。そのため、磁気光学効果や電気磁気光学効果をもつ物質からなるフォトニック結晶をターゲットとし、電磁場の第一原理計算などにより、系のもつトポロジカルな構造を明らかにした。その結果、様々な特性をもった、光カイラルエッジ状態や光ヘリカルエッジ状態を理論的に実現した。また、なぜそのような結果が得られるのかを系のもつ対称性や自由度の解析と、有効ハミルトニアンを用いて明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The goal of the present study is to realize novel transport properties of light, by the analogy to electronic systems such as quantum Hall systems and topological insulators. We have studied photonic crystals made of magneto-optical or magnetoelectric media by the first-principles calculations of the radiation field. Various systems having nontrivial topology in momentum spaces can be realized. As a result, photonic chiral edge states and photonic helical edge states are demonstrated in such systems. In addition, we explain their properties by the symmetries, spin degrees of freedom, and effective hamiltonians.

研究分野：ナノフォトニクス

キーワード：光トポロジカル絶縁体 トポロジカルフォトニクス ヘリカルエッジ状態 カイラルエッジ状態 電気磁気光学効果

1. 研究開始当初の背景

スピンホール効果や量子ホール効果の研究に端を発したトポロジカル絶縁体の発見はゆらぎに対して強く、ギャップレスのエッジ状態を導き、トポロジカル絶縁体による様々な新しい物理の可能性を開いた。また同時期に発見されたグラフェンの特異な電子輸送特性と、これに続く一連のグラフェンの研究は、原子一層でつくる2次元電子系として、豊富な物理を開拓した。これら2つの系に共通なのは、フェルミエネルギー付近での線形の分散関係と、運動量空間のトポロジーが重要な働きをする点にある。

そのような流れのなか、2008年、Haldaneらはギャップレスのカイラルエッジ状態が光でも実現できることを示した。彼らは誘電率が周期的に変化する2次元フォトニック結晶を考えた。なかでも3角格子のフォトニック結晶はブリルアンゾーンのK点付近でDirac型の分散関係を示す。そこに時間反転対称性の破れによるギャップができればDirac電子のパリティ異常と同様の機構で、バルクはいわば量子ホール状態になる。さらにバルクエッジ対応により、エッジにはギャップレスのカイラルエッジ状態が生じることが予言される。光のカイラルエッジ状態は光の一方通行導波路を意味する。フォトニック結晶を使うと、従来型の一方通行導波路に比べて、バンド幅、周波数帯、頑強性、デザインの自由度などにおいて格段にすぐれた一方通行導波路が実現する。

この論文は大きな反響をよび、磁気光学効果による時間反転対称性の破れた系で、様々な一方通行導波路のデザインやマイクロ波帯での実験結果が報告された。これは量子ホール効果の光版とみなすことができる。しかし、これに対して、量子スピンホール効果の光版、すなわち時間反転対称性を破らない系でのヘリカルエッジ状態の実現はそれまで提案されていなかった。2次元フォトニック結晶の場合、構造の異方性が強く、あたかもスピンに関してゼーマン分裂したような状況になる。そのため、スピン軌道相互作用がなくなる。スピン軌道相互作用は量子スピンホール効果の鍵となる要素であるため、この点が大きな困難だったと考えられる。また3次元系においては、光が自然にもつスピン軌道相互作用はあるが、ギャップを開けるフォトニック結晶構造がそもそも限られている。そのため、3次元トポロジカル絶縁体の光版も難しいという事情があった。

2. 研究の目的

そこで、光が自然にもっているスピン軌道相互作用ではなく、第2のスピン軌道相互作用

というべきカイラリティ(電気磁気光学効果)を導入し、2次元、3次元フォトニック結晶において、光トポロジカル絶縁体を実現しようというのが本研究の目的である。カイラリティと一口にいっても、その中身は豊富である。分類として、時間反転対称性を保つ場合(Pasteur型)と保たない場合(Tellegen型)に分けることができ、それぞれの型でスカラーか、テンソルかでも分けられる。さらにテンソルの場合、どのような形かという点も空間対称性という点から重要である。これらを網羅的に調べるのは難しいので、ここでは散乱体に回転対称性を課した場合について調べることにした。その場合、散乱体による光の散乱がMie散乱公式の一般化により、解析的に求まる場合があり、以下の数値的取扱いが極めて高精度になる。

次いで、カイラリティをもった散乱体からなる人工周期系(フォトニック結晶)を考える。この場合、光のバンド構造が生じる。また結晶構造や、散乱体のサイズ、誘電率などをうまく選ぶと、ブリルアン域の対称性の高い点で周波数的に孤立した縮退点が生じる。そのような系にカイラリティを導入すると、スピン軌道相互作用によるギャップが生じる。得られたギャップとバンドはトポロジカルな性質をもつ可能性があり、ヘリカルエッジ状態の実現が期待できる。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するため、研究代表者がこれまで開発してきた、フォトニックKKR法(ベクトルKKR法)を拡張し、カイラリティをもつ球や円柱からなるフォトニック結晶に適用する。そのため、空間的に孤立した、カイラリティをもつ球や円柱による光の散乱問題を厳密に解く。ここでは回転対称性をもつ場合に限定しているので、散乱波はargumentやorderを工夫したベッセル関数で書くことができる。次いで、その解を用いて、多重散乱法の枠組にのせる。バルクの系に対しては、bulk KKR法により扱い、スラブの系に対してはlayer KKR法を適用する。前者の方法で、固有値、固有関数が求まるので、バルクのモードのトポロジーがわかる。後者の方法ではスラブの表面に局在した状態(エッジ状態)が扱える。バルクのトポロジーは、フォトニック結晶が時間反転対称性と空間反転対称性をもつ場合には、Time-reversal-invariant momentumでのパリティ固有値の積で系を特徴づけられる。空間反転対称性が破れる場合でも、固有ベクトルからつくる行列のPfaffianを直接計算すればよい。このバルクのトポロジーと、得られた表面状態の偏光特性、分散関係などから、計算結果の正当性がわかる。

また、非自明なトポロジーは典型的に、ブリルアンゾーンにおける対称性の高い点での縮退が解ける場合におこる。よって、縮退点付近での摂動、いわゆる $k \cdot p$ 摂動による有効ハミルトニアンからトポロジーが推定できる。この有効ハミルトニアンの導出も合わせておこなうことで、KKR 法による第一原理計算の正当性をチェックできる。

4. 研究成果

1) アクシオン電磁気学の散乱問題

カイラリティをもつ誘電体スラブや円柱、球による光の散乱問題を厳密に解いた。このうち、Drude-Born-Fedorov 型(Pasteur 型でかつスカラー)のカイラリティは過去の研究において既に解かれているので、ここは Axion 型(Tellegen 型でかつスカラー)の場合を解析した。Axion 型のカイラリティは時間反転と空間反転対称性、パリティを破る。それゆえ、対称性の破れによる様々な効果が生じる。具体例として、スラブの積層構造によるファラデー回転の増強、円柱によるパリティの破れた光散乱、球内におかれた双極子からの発光効率の強い摂動(図1)を見出した[論文]。

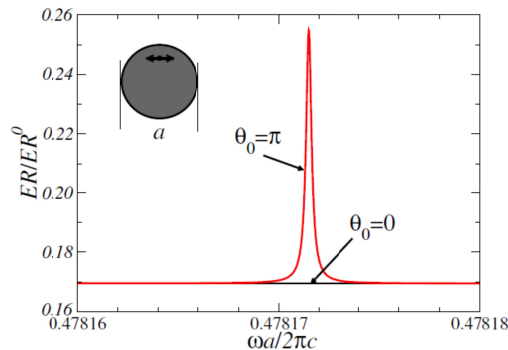


図1 chirality のあるなしでの extinction rate の比較

2) 光版グラフェンの有効ハミルトニアン

以前に数値的に求めた光版グラフェンのトポジカルな相図を、有効ハミルトニアンの立場から導出した。電子系では磁場などにより時間反転対称性を破ると、磁気並進が非可換になるために、Bloch 波数がその意味を失う。これに対して、光は neutral なのでそのような問題はなく、 $k \cdot p$ 摂動のハミルトニアンに時間反転対称性の破れを容易に導入できる。その結果、Dirac 点の縮退モード付近でのバンド構造を記述する有効ハミルトニアンを導出し、相図を再現した(図2)。

また、Gamma 点付近の 2 次縮退するモードから出発した有効ハミルトニアンについて詳細に分析し、staggered な磁場がかかって

いる場合でも、カイラルエッジ状態が生じることがわかった。この予言は数値シミュレーションによって確認した[論文]。

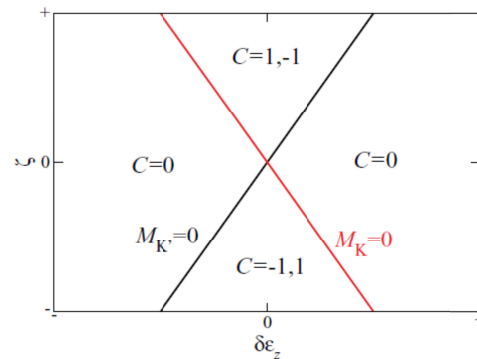


図2 有効ハミルトニアンから求まる相図

3) 2次縮退する場合のドメイン壁局在モード

直線的な分散曲線が交差する点(Dirac 点)に質量ギャップを導入し、その符号を反対にしたドメイン壁を考える。その場合、ギャップ中を線形の分散曲線をもつドメイン壁局在モードが生じることが知られている。これを 2 次の分散曲線が k 空間の一点で接する場合に拡張した。そのような点は正方格子の点や M 点に現れる。ここに時間反転対称性の破れを導入するとギャップが開く。そのギャップにもドメイン壁局在モードがでる。この場合、局在モードは 2 つ出て、1 つは下のバンド端に漸近し、上のバンドにまざる。もう一つは上のバンドに漸近し、下のバンドとまざる(図3)。またそれらの偏光特性も予言し、第一原理計算との一致を確認した[論文]。

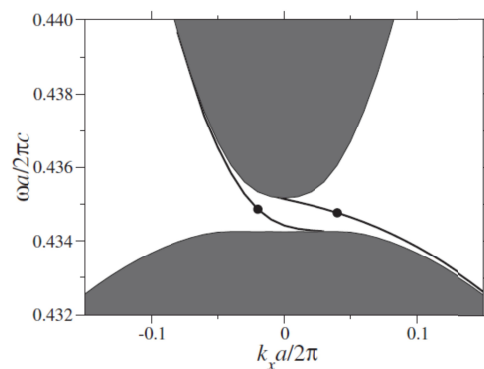


図3 2次縮退系でのドメイン壁局在モード

4) ドメイン壁局在モードの変調

蜂の巣格子フォトニック結晶はブリルアンゾーンの角で Dirac cone をもちうるが、このとき mass gap を制御できる。蜂の巣格子は A と B の副格子からなり、空間反転で移り変わる。そのため A と B の副格子間で誘電率やロッドの半径に差をつけると、空間反転対称性の破れを制御できる。さらに磁気光学効果を用いると、時間反転対称性の破れも

制御できる。この2つの対称性の破れの度合いは mass gap に線形で現れるが、質的に異なる gap を生む。この性質を利用して、様々なドメイン壁局在モードのパターンが得られることを明らかにした(図4) [論文]。

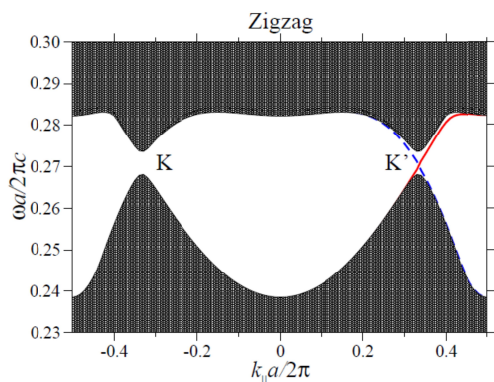


図4 K点だけに現れるドメイン壁局在モード

5) 表面マグノンポラリトン伝導の一方通行バンド幅の拡大

磁場中の強磁性体はスピンの歳差運動によって強磁性共鳴をおこす。これは GHz 帯にあり、この領域での透磁率に特徴的なスペクトルを与える。この共鳴を利用すると、表面マグノンポラリトンというモードが強磁性体と誘電体との界面に立つ。このモードは磁場による時間反転対称性の破れと、界面による空間反転対称性の破れによって、nonreciprocal であり、一方通行のバンド帯をもつ。しかし、その帯域は非常に狭い。この帯域を拡大するために、強磁性体側で周期的に空孔をあげ、磁性フォトニック結晶にすることでフォトニック結晶由来のギャップを開け、ポラリトンギャップ以外の帯域にも帯域を拡大できることを示した(図5) [論文]。

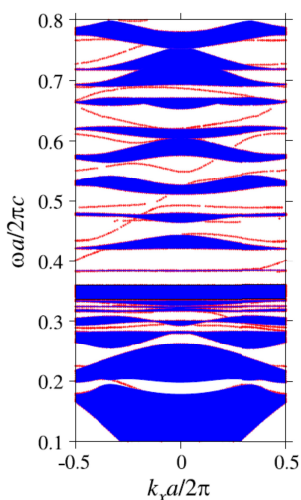


図5 磁性フォトニック結晶の表面マグノンポラリトン

6) 光スピン軌道相互作用による光トポロジカル絶縁相

Tellegen 型のカイラリティをもつ、明白に時間反転対称性を破った系においても、光トポロジカル絶縁体が生じることを示した。この背後には、Bosonic と Fermionic という2つの時間反転操作がある。通常フォトンの系で考えられる時間反転操作は Bosonic であり、クラマース縮退をもたない。Tellegen 型のカイラリティでは この時間反転対称性を破っている。しかし、通常のとポロジカル絶縁体で本質的なのは Fermionic な時間反転対称性である。この時間反転対称性はある条件下ではフォトンの系でも現れることがわかった。それが電磁双対性をもつ場合である。この場合、2次元フォトニック結晶の2つの偏光成分は完全に縮退し、カイラリティがギャップを生む。このとき光ヘリカルエッジ状態(図6)をもつ光トポロジカル絶縁体を実現することを第一原理計算と有効ハミルトニアンの方法で示した。また電磁双対性が破れても、ドメイン壁ではギャップレスの局在モードが残る。これは ブリルアンゾーンK点付近の有効ハミルトニアンに擬似的な Fermionic 時間反転対称性が残るためである [論文]。

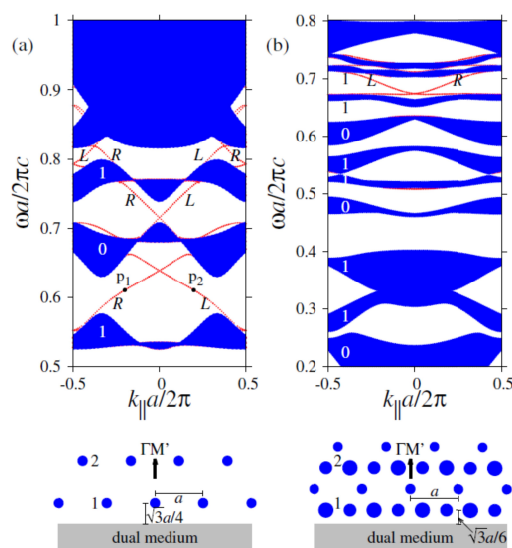


図6 光ヘリカルエッジ状態の分散関係

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 6 件)

T. Ochiai, "Non-reciprocity and topology in optics: one-way road for light via surface magnon polariton,"

Sci. Tech. Adv. Mat. 16 (2015) 014401. 査読有,
DOI:10.1088/1468-6996/16/1/014401
T. Ochiai, "Time-Reversal-Violating Photonic Topological Insulators with Helical Edge States," J. Phys. Soc. Jpn. 84 (2015) 054401, 査読有,
DOI:10.7566/JPSJ.84.054401
T. Ochiai, "Chiral Domain-Wall States in a Quadratic Hamiltonian," J. Phys. Soc. Jpn. 82 (2013) 124005, 査読有, DOI:10.7566/JPSJ.82.124005
T. Ochiai, "Broken Symmetry and Topology in Photonic Analog of Graphene," Int. J. Mod. Phys. B 28 (2013) 1441004, 査読有,
DOI:10.1142/S0217979214410045
T. Ochiai, "Photonic realization of the (2+1)-dimensional parity anomaly," Phys. Rev. B 86 (2012) 075152, 査読有,
DOI:10.1103/PhysRevB.86.075152
T. Ochiai "Theory of Light Scattering in Axion Electrodynamics," J. Phys. Soc. Jpn. 81 (2012) 09440. 査読有, DOI:10.1143/JPSJ.81.094401

〔学会発表〕(計 5 件)

落合哲行, "時間反転対称性を破る光トポロジカル絶縁体," 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 21 日, 早稲田大学(東京都新宿区)
T. Ochiai, "Photonic analog of graphene: novel functions inspired by condensed matter physics," SPIE Optics + Photonics, 2014 年 8 月 21 日, San Diego (USA).
T. Ochiai, "Photonic realization of the parity anomaly," Workshop of Nanophotonics, 2012 年 12 月 9 日, Trieste (Italy)
落合哲行, "光学におけるパリティ異常," 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 9 月 18 日, 横浜国立大学(神奈川県横浜市)
落合哲行, "アクシオン電気力学における光散乱," 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 24 日, 関西学院大学(兵庫県西宮市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:

番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等
<http://samurai.nims.go.jp/OCHIAI.Tetsuyuki-j.html>

6. 研究組織

(1) 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 先端フォトンクス材料ユニット・主任研究員
研究者番号: 80399386

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: