

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔令和4（2022）年度 中間評価用〕

令和4年3月31日現在

研究期間：2020年度～2024年度
課題番号：20H05641
研究課題名：動的再構成可能なトポロジカルナノフォトニクスの研究

研究代表者氏名（ローマ字）：納富 雅也（NOTOMI Masaya）
所属研究機関・部局・職：東京工業大学・理学院・教授
研究者番号：50393799

研究の概要：

本研究では、チューナブルなナノ材料によるナノフォトニクス構造修飾法と、屈折率虚部により大幅に特性が変化する非エルミート光学系を用いて、動的に再構成可能な光トポロジー技術を開発することを目指す。さらに、同技術を用いて制御可能な様々なトポロジカル物性を探索し、それによって導かれる新しい光制御技術を提案することを目指す。

研究分野：物理学、光学、ナノフォトニクス

キーワード：トポロジカルフォトニクス、非エルミート光学、フォトニック結晶

1. 研究開始当初の背景

固体中の電子の波動関数が波数空間で持つ特殊なトポロジーによって、様々な新奇な性質が発現することが判り、その端緒となった成果は2016年のノーベル賞が授与され、トポロジカル物性と総称される活発な研究分野となっている。近年、この概念が屈折率の周期系であるフォトニック結晶に適用され、光トポロジカル絶縁体等の興味深いトポロジカルな光学的性質が次々と発見されており、この分野はトポロジカルフォトニクスと呼ばれ研究が活発化している。

また、これと並行して、非エルミート光学系と呼ばれる分野が近年盛んになっている。空間反転(P)と時間反転(T)を施すと元に戻るPT対称な非エルミート系が、例外点と呼ばれる特異な状態を挟んで実固有値状態に転移することが理論的に指摘されていたが、近年、光学系で屈折率虚部（利得と吸収）の操作で容易にPT対称系を実現できることがわかり、例外点付近で光学の常識を打ち破る性質が数多く実証されている。さらに非エルミート系独自の様々なトポロジカルな現象が次々と発見されている。

これらの技術はいずれもナノフォトニクス技術を駆使することで作製できるが、これら光学系におけるトポロジカルな性質は基本的に構造により定まっており、構造を作製したあとに変化させることができなかった。

2. 研究の目的

本研究では、構造を作製したあとに自由にトポロジカルな性質を動的に変化できる再構成可能なトポロジカルフォトニクス技術の実現をめざす。既にトポロジカルフォトニクスでは様々な新しい現象や性質が発見されているが、これらが可変になればさらに新しい現象の開拓が期待できるとともに、トポロジカルな性質を新たな自由度として用いる新しい光制御技術の実現も期待できる。特に本研究では、屈折率の実部（すなわち吸収と利得）を用いて制御可能な非エルミート系の性質を利用して、トポロジカルな性質の制御を狙い、トポロジカルフォトニクスと非エルミート光学の両方にまたがる学問領域の開拓を目指す。

3. 研究の方法

再構成可能なトポロジカルフォトニクスを実現するために、大きく三つのアプローチをとる。

- （1）相変化材料や2次元物質などの機能材料をナノフォトニクス構造の上に選択装荷することによって、機能材料の変化により光トポロジーの形成・制御を狙う。そのために機能材料のサブ波長スケールでのパターンニング技術を開発する。
- （2）屈折率虚部に周期性を持たせた非エルミート型周期構造におけるトポロジカルな性質を探索し、電流注入等で高速制御が可能な屈折率虚部の制御により、光トポロジーの形成・制御を狙う。
- （3）制御対象のトポロジカルな性質の候補を広く探索する。特にトポロジカル特異点および例外点といった特異点に着目し、特異点によって発現する現象の制御を狙う。

これらの技術に関して並行して研究を進めながら、これらが絡み合う現象も探索し、最終的に動的に制御可能なトポロジカルな性質を利用した光素子・回路・情報処理の可能性を明らかにする。

4. これまでの成果

[1] 相変化材料装荷フォトニック結晶による光トポロジカル相転移

我々は、相変化材料である GST を Si フォトニック結晶上にパターン化して装荷することにより、GST の結晶・アモルファス相転移によって、フォトニック結晶の光トポロジカル相転移が可能であることを理論解析により見出し、このサブ波長スケールでパターン化された GST を装荷した Si フォトニック結晶の作製に成功した。光学測定によって、この構造は GST が結晶相のときには、通常のフォトニックバンドギャップを持つが、アモルファス相の時にはトポロジカルなバンドギャップを持つことが確認され、物質の構造相転移により光トポロジカル相転移が実現できたことが実証された。

[2] 偏光を用いたトポロジーの制御

トポロジカルな性質を制御する新たな方法として、ジグザグ型に配列された金属ディスクアレイに直線偏光を照射する手法を提案し、実験的に実証した。この方法では偏光方向によって、ディスク間の結合が変化し、トポロジカルな結合と非トポロジカルな結合をスイッチできる。その結果として、トポロジカルエッジモードの形成を偏光により自由にスイッチできることを実証した (*Nanophotonics* に発表)

[3] トポロジカル特異点の制御

トポロジカルフォトンクスはもともと固体物理における電子のトポロジカルな性質のアナロジーとしてスタートしたが、光は電子と異なりベクトル量であるため電子とは異なるトポロジカルな性質が可能である。我々は、このようなベクトル的な光トポロジーに興味を持って研究を行っているが、**Bound States in the Continuum (BIC)**と呼ばれる非自明なトポロジカル特異点を決定論的に生成する方法を考案し (Yoda and Notomi, *Phys. Rev. Lett.* 125, 053902 (2020) に理論を発表)、この手法を用いて非自明な BIC を生成する実験に成功した。

[4] 非エルミート系における例外点の観測

非エルミート系の多くの重要な性質は例外点と呼ばれる特異点の付近で起こり、例外点そのものもトポロジカルな性質を持っているが、例外点直上の現象の観測は殆どなかった。我々は例外点の観測を阻んでいる原因を解明し (*Physical Review A* に発表)、またその要因を取り除く方法も明らかにした。さらに、実験的に結合ナノ共振器構造の例外点直上からの発光を観測し、例外点特有の異常性が現れていること確認した (*Optica* に発表)。また、ナノ共振器アレイで構成される非エルミート非線形結合系で、蔵本モデルで記述される同期現象を起こせることを理論的に示し、同現象が例外点に関連していることを見出した (*Scientific Reports* に掲載)。

5. 今後の計画

今後は、[1]の手法を発展させて、機能材料の選択装荷によってさまざまなトポロジカルな現象の発現および制御を狙う。また、特に[1]の技術を利用して、[2]のトポロジカル特異点と[3]の例外点の制御技術を開発し、これら特異点が互いに相関する領域を開拓する。また、本研究で開発するトポロジーの制御技術を用いた新しい光デバイス・回路・情報処理の可能性を検討する。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

“Imaginary couplings in non-Hermitian coupled-mode theory: Effects on exceptional points of optical resonators”, Kenta Takata, Nathan Roberts, Akihiko Shinya, and Masaya Notomi, *Physical Review A* (査読あり) 105, 013523 (2022).

“Far-field optical imaging of topological edge states in zigzag plasmonic chains”, Yuto Moritake, Masaaki Ono, and Masaya Notomi, *Nanophotonics* (査読あり) (2022) <https://doi.org/10.1515/nanoph-2021-0648>

“Emulating the local Kuramoto model with an injection-locked photonic crystal laser array”, Naotomo Takemura, Kenta Takata, Masato Takiguchi, and Masaya Notomi, *Scientific Reports* (査読あり) 11, 8587 (2021).

“Observing exceptional point degeneracy of radiation with electrically pumped photonic crystal coupled-nanocavity lasers”, Kenta Takata, Kengo Nozaki, Eiichi Kuramochi, Shinji Matsuo, Koji Takeda, Takuro Fujii, Shota Kita, Akihiko Shinya, and Masaya Notomi, *Optica* (査読あり) 8, 184-192 (2021).

7. ホームページ等

<http://notomi-lab.phys.titech.ac.jp>