

研究終了報告書

「メタ原子鎖による新奇な光トポロジカル状態の開拓」

研究期間：2018年10月～2022年3月

研究者：森竹 勇斗

1. 研究のねらい

近年、光系におけるトポロジエを利用した「トポロジカルフォトンクス」と呼ばれる研究分野が活発になっている。トポロジカルフォトンクスは、電子系のトポロジカル絶縁体のアイデアを援用することにより、従来系では得られない特性を実現する新しい光制御技術として大きな注目を集めている。

【ねらい1】光トポロジカル状態の変調・制御技術の開発

これまでのトポロジカルフォトンクスでは、光のトポロジカル状態をどのように実現、観測するか、という点に主眼が置かれてきた。本研究のねらいは、光トポロジエをもつことがわかっている系に対し、その構成要素や配列を工夫することによって、新奇なトポロジカルエッジ状態の実現やその変調・制御技術を開拓することである。

本研究で着目するジグザグ鎖では、特定の波長・偏光をもつ光を入射することで、ジグザグ鎖の端のみに光エッジ状態が発現する。本研究では、新規なエッジ状態の発現・制御を目指すため、研究項目として「①メタ原子鎖の導入による構成要素の対称性制御」を設定した。また、配列による変調を目指す「②準周期配列の導入による拡張」、さらに、発光制御へ応用を目指す「③エッジ状態を利用した発光制御技術の開発」を設定した。

【ねらい2】トポロジカルプラズモニクス基盤の確立

半導体系では多くの実験的研究がある一方、金属ナノ構造を用いたプラズモニクナトポロジカル系については、ほとんど報告例がない。プラズモニク系は、金属損失の大きさから、導波路のような応用には困難があるが、電子の共鳴を用いるため、同じく特異な電子状態が特徴の二次元物質などとの結合によって今後新奇な機能をもったデバイスを創出できる可能性がある。このような展開を目指すため、本研究では、トポロジカルプラズモニクスの基盤構築を行う。

【ねらい3】非エルミート系への展開

非エルミート系では、例外点 (EP) と呼ばれる特異点をまたいだ PT 相転移と呼ばれる現象が起こる。それらを活用し、質的に新しい光学現象を実現する研究は非エルミート光学と呼ばれ、盛んに研究されている。非エルミート系はトポロジカル系との関わりも深く、現在ではこれらの領域は境目なく研究開発が行われている。本研究で開発した測定技術が、非エルミート系の観測に適用できることに着目し、非エルミート光系における新奇な特性の観測へ展開した。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、【本研究のねらい】に対して、以下の研究項目を実施し成果を得た。

■金属ジグザグ鎖における光エッジ状態イメージング【ねらい1】(代表的な論文[1])

これまで、報告例がない、金属ジグザグ鎖における光トポロジカルエッジ状態の遠方場観測に成功した。これは、プラズモニク系における光エッジ状態を観測するための基礎技術

である。

■光トポロジカル相転移の動的制御【ねらい1】

相変化材料を選択的に装荷したトポロジカルフォトニック結晶において、動的な光トポロジカル相転移の観測に成功した。このような動的な光トポロジーのスイッチングを光学領域で行った例はこれまでなく、トポロジカルフォトニックデバイス応用に向けた重要な成果である。また、成果のために、近赤外域でフォトニックバンドを取得できる測定系の開発を行った。この装置は、作製において有利な近赤外域において高い SN 比を実現し、損失のあるフォトニック結晶のバンド構造を明瞭に観測することができる。

■バレープラズモニック結晶における CL 分光【ねらい2】(代表的な論文[2])

金属ナノ構造で構成されるバレープラズモニック結晶において、電子線を用いた手法により、ナノメートルの分解能で光トポロジカルエッジ状態の観測に成功した。このような微細な構造において、これほど高い分解能で観測した例はなく、トポロジカルプラズモニック結晶の基礎的な原理検証において重要な成果である。

■BIC 導波路と BIC の実験的観測

波数空間における偏光のトポロジカル特異点である BIC を用いた導波路を提案し、またバンド測定装置を用いて決定論的 BIC の観測に成功した。

■EP における円偏光固有状態とバンド観測(非エルミート系)【ねらい3】

グラフェンを選択装荷したフォトニック結晶において、フォトニックバンドの PT 相転と例外点における特異な光学現象の観測に成功した。また、相変化材料を導入したプラズモニック系において、PT 相転移に伴う特異な偏光状態の変化を動的にスイッチングする技術を提案した。

■EP における単一方向放射(非エルミート系)【ねらい3】

EP における特異な固有状態を用いることで、プラズモニック結合系においてホイヘンスダイポールが形成され、方向可変な一方向放射が得られることを提案した。

(2) 詳細

■金属ジグザグ鎖における光エッジ状態イメージング【ねらい1】(代表的な論文[1])

本項目では、まず金属ジグザグ鎖における光エッジ状態を観察することを目指した。特にこれまで報告のない、金属系における遠方場イメージングを実現するために、長い鎖を用いることを考案したが、単純に長い鎖を用いるだけでは観察できないことがわかり、結果として繋がったジグザグ鎖を用いることで、遠方場イメージングに成功した。本手法によって、特徴的な偏光依存エッジ状態の観測に成功した。遠方場イメージングの確立によって、この手法を他の構造に適用するといった研究展開が生まれるだけでなく、発光変調等の応用も期待される。

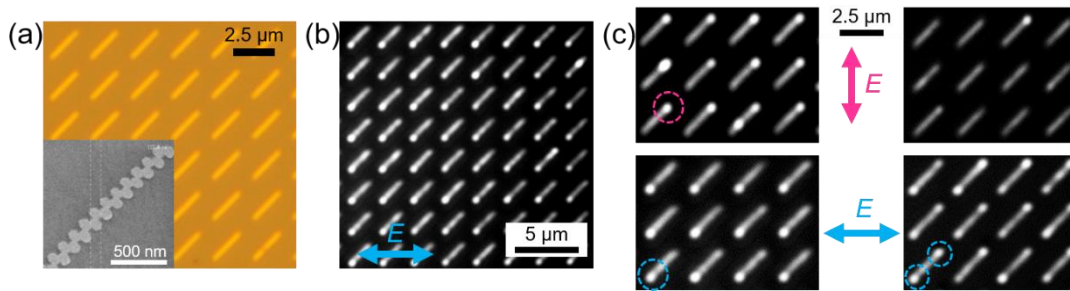


図1 繋がった金属ジグザグ鎖における光トポロジカルエッジ状態の遠方場観測

■光トポロジカル相転移の動的制御【ねらい1】

光トポロジカル構造は、通常、立てつけられた構造によってそのトポロジーが規定され、一度作製してしまうと、その性質を動的に変化させることはできない。一方で、特殊な材料を用いることでその性質を動的に変化させる理論的提案がいくつか報告されている。本研究では、相変化材料である GST の相転移に伴う屈折率変化を利用した動的制御手法を提案し、実験的観測による実証に成功した。GST を nm スケールで加工することによって特定の位置のみに配置し、GST 相変化によって、フォトニックバンドがバンド反転するようにしている。このバンド反転を、直接観測するために、近赤外域で高い SN 比をもつフーリエ分光測定系を開発した。本測定手法自体は多くの報告例があるが、もっともフォトニック構造が作製しやすい近赤外域において測定が可能な測定装置はほとんどなく、我々が構築した系では、(以降のいくつかの研究で示すように) 損失がある系からの比較的弱い信号でも明瞭なバンド構造を測定することが可能である。本装置による測定から、トポロジカルなギャップとトリビアルなギャップ間の動的な変化を直接観測することに成功した。これは光トポロジカル相の動的制御を実験的に示した初めての例であり、トポロジカルフォトニクスを用いた動的デバイスへの応用に向けた重要な技術と考えられる。

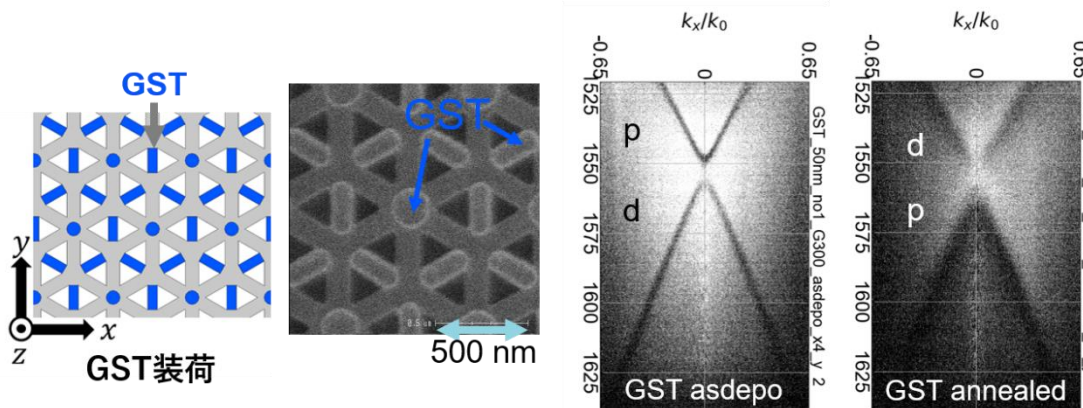


図2 相変化材料(GST)を用いた光トポロジカル相転移の動的制御の観測

■バレープラズモニック結晶(VPIC)における CL 分光【ねらい2】(代表的な論文[2])

本項目は、九州大学の齊藤光准教授と東京工業大学の三宮工准教授との共同研究である。本研究 VPIC は、円形の金属ナノディスクがハニカム格子上に設置されており、A サイト

と B サイトでディスクの直径を変えることで反転対称性を破り、バレー系を実現している。この系に角度分解 CL 分光を行った結果、エッジモードのバンド分散を測定することに成功した。エッジモードに対応するバンドにおける空間的な強度情報をマッピングした結果、二つの極性の異なるVPICの界面付近に電子を当てた時だけ、エッジモードに起因する信号が得られた。これはプラズモニックなトポロジカルエッジの伝搬を直接観測した初めての例であり、トポロジカルなプラズモニック構造研究の基盤となる成果である。

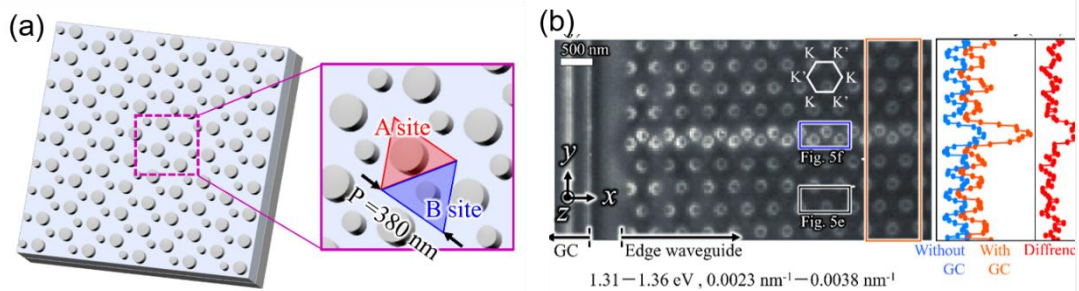


図3 角度分解 CL による VPIC エッジモードの空間分布測定

■BIC 導波路と BIC の実験的観測

トポロジカルフォトニクスでは、波数空間における「固有モード」のトポロジカルな構造に着目することが多い。一方、各固有モードから放射される「放射場の偏光状態」も波数空間においてトポロジカルな構造をもつことが知られている。中でも、BIC (Bound States in the Continuum) と呼ばれるトポロジカル特異点では、ライトラインの上にあるにもかかわらず、構造外部への放射がなくなり、原理的に無限大の Q 値をもつ。BIC は、偏光軸の回転で定義されるトポロジカルチャージが整数になることが知られており、BIC はトポロジカルに保護されている。

本研究では、BIC が波数空間上の対称点でない場所に現れること、つまり有限の群速度をもつことに着目し、BIC を用いた導波を提案した。また、開発したバンド測定装置によって、決定論的な BIC の直接観測に成功した。

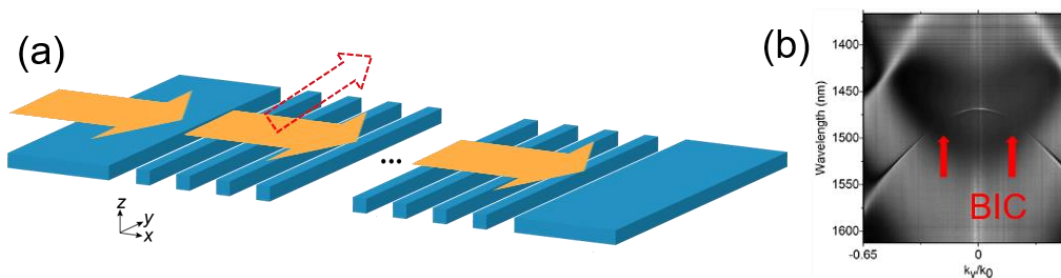


図4 伝搬型 BIC 導波路と決定論的 BIC の観測

■EP における円偏光固有状態とバンド観測(非エルミート系)【ねらい3】

これまで、非エルミート光学では、例外点近傍の現象や PT 相転移の観測に多くの力が注がれている一方、EP 直上における光学現象に関する研究は少ない。本研究では、EP 直上

の特異な固有状態に着目し、それによって生じる円偏光固有状態を用いた系を提案、実証した。まず、GST 相変化によって、系の固有偏光状態を質的に変化させる可変偏光素子の提案を行った。次に、グラフェンを装荷したシリコンフォトニック結晶系において、同様の固有円偏光状態をもつ EP の存在を本研究で開発したバンド測定から実証した。バンド測定と、EP 直上で起こる非対称変換と呼ばれる現象の観測を通して、非エルミートフォトニック系における EP をバンド空間上で観測した初めての例であり、今後、様々な非エルミート系を用いた新奇な光学機能の開拓につながる成果である。

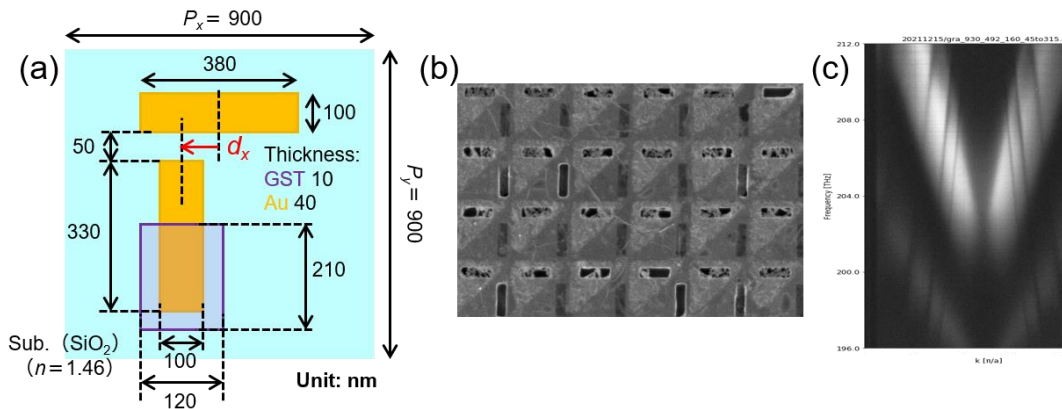


図5 GST プラズモニック系 グラフェンフォトニック結晶系 非エルミートバンドの観測

■EPにおける単一方向放射(非エルミート系)【ねらい3】

本研究では、結合金属共振器系における EP をもちいることで、ホイヘンスダイポールを形成し、一方方向に強く放射する現象が現れることを提案した。C 型の共振器は、共振において電気双極子と磁気双極子の両方の成分をもつ。その回転を変えることで、固有値の虚部にコントラストを生むように設計し、相対距離によって結合を制御することで、図のような固有値のリーマン面構造を発見した。ふたつの EP は、それぞれ結合定数の正負に対応しており、これは固体系のバルクフェルミアークに類似する構造をもっていると考えられる。また各々の EP では、電気双極子と磁気双極子が 0 または π の位相差で重なる、ホイヘンスダイポール状態が形成されており、放射方向が上、または下側のみになるという現象を確認した(図4)。本研究で明らかになった非エルミート性に基づく一方方向放射は、非エルミート光学の応用デバイスの可能性を示したものである。

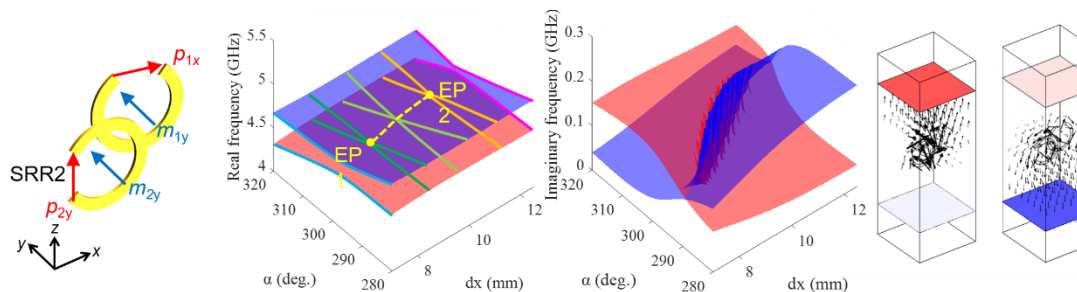


図4 結合プラズモニック共振器におけるEPとホイヘンスダイポールの形成による一方方向放射

■研究の達成度

【ねらい1】光トポロジカル状態の変調・制御技術の確立

研究開始当初に計画していた項目のうち、①については実験的なエッジ状態の観測を達成した。①における新奇なエッジ状態の実現や、②、③については本研究期間内に、ほとんど実施することはできなかった。一方、当初計画になかった、光トポロジカルエッジ状態の動的制御という、トポロジカル光デバイスの実現に向けた重要な実験的成果が得られ、当初の想定よりも大きなインパクトをもつ成果を上げることができた。

【ねらい2】トポロジカルプラズモニクス基盤の確立

共同研究を行うことで、これまで実現されていなかったバレープラズモニック結晶におけるエッジ状態の可視化に成功した。観測したエッジ状態のトポロジカル特性の観測など、まだ達成できていない点もあるが、今後本研究を展開していく基礎となる成果であり、おおむね達成することができた。

【ねらい3】非エルミート系への展開

本項目は、研究の過程で新たに取り組んだ項目であるが、損失媒質を含むような系におけるバンド構造の測定に成功するなど、大きな成果を挙げる事ができた。今後さらに様々な系に展開し、新奇な光学現象の観測を目指す。

3. 今後の展開

■金属ジグザグ鎖における光エッジ状態イメージング

本研究で確立した観測手法を、2次元系へ展開することで、高次のトポロジカルエッジ状態の観測が期待される。それを通して、高次光トポロジカル状態の発光等への応用を行っていきたい。

■光トポロジカル相転移の動的制御

本研究では、光トポロジーの変化の観測に成功したが、それによるエッジ状態の形成はまだ実現できていない。これが実現できれば、プログラマブルな光回路への道が拓かれ、トポロジカル光デバイスの応用展開において大きなインパクトをもつ。実用化への障壁はまだあるが、近年のナノフォトニクス分野は、分野が興ってから20年程度で特定のデバイス応用が実現されることが多い。これは基礎原理の確立におよそ10年、さらに実用化に10年ほどかかっていることによると考えている。本研究の今後の展開により基礎技術が確立されれば、10年後程度をめどに社会実装が行われる可能性がある。

■EPにおける円偏光固有状態とバンド観測（非エルミート系）

本研究では、「点（垂直入射条件）におけるEPの観測に成功したが、非「点におけるEPの観測が今後期待される。非「点でのEPの観測は、EPのトポロジカルな性質を反映しており、学理的な点からも興味深い、EPを活用したデバイス応用の面でも重要である。

4. 自己評価

当初の研究計画に対して、最終的にはほとんどが新項目による成果となった。トポロジカル物理に関する成果が全くない状態で、3年半前に研究を開始したことを考慮すると、これはむしろ非常に自然なことと考えている。3年間で、さきがけを通し、直接・間接的に得られた知的・人的資源があったことにより、これほど様々な新しい項目に取り組むことができ、当初想定していたよりも多くの成果をあげることができた。期間内に論文化できなかったが、本報告書であげた成果はほと

んど論文を準備している段階であり、今後の研究にもつながる研究成果が得られた。

日本は、もともとナノフォトニクス分野そのものは世界的に見ても強いが、トポロジカルフォトニクスにしぼると、研究開始当初はそれほど大きなコミュニティが形成されていなかった。近年、本戦略目標の立案により、いくつかのコミュニティが活発化しているが、本研究で得られた成果は、それらの研究コミュニティではあまり扱われていないプラズモニック系の開拓として、相補的な役割を果たしていくことが期待される。プラズモニック系は二次元電子系などの化学との繋がりも深く、今後トポロジカルフォトニクスと化学を含む別領域との間を橋渡ししていくような研究・活動を行っていきたい。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 2件

1. Y. Moritake, M. Ono, M. Notomi, "Far-field imaging of topological edge states in zigzag plasmonic chain" *Nanophotonics* (accepted) (2022).

本研究では、金属ナノ構造からなるジグザグ鎖において、遠方場によるエッジ状態の観測に成功した。これまで、遠方場でサブ波長の空間に局在するエッジモードを観測することは難しかったが、構造の形状を工夫することにより、遠方場による可視化に成功した。本手法はこれまでの近接場による観測と比べ容易であり、発光体や非線形効果への応用が期待される。

2. H. Saito, D. Yoshimoto, Y. Moritake, T. Matsukata, N. Yamamoto, and T. Sannomiya, "Valley-Polarized Plasmonic Edge Mode Visualized in the Near-Infrared Spectral Range" *Nano Lett.* 21, 6556 (2021).

本研究では、金属ナノ構造から構成されるバレーフォトニック結晶、バレープラズモニック結晶を設計、作製し、電子線を用いた観測手法を用いて、光エッジ状態の可視化に成功した。本成果は、プラズモニック系におけるトポロジカルエッジ状態を可視域で観測した初めての例であり、可視域に相当するバンドギャップをもつ二次元物質との結合系への展開等が期待される。

(2) 特許出願

なし

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

■招待講演

[1] Y. Moritake and M. Notomi

"Optical Waveguide Using Off- Γ Bound States in the Continuum in One Dimensional Grating Structures"

The 11th International Conference of Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics

META' 20, Online, July, 2021.

[2] Y. Moritake

“Photonic topological edge states in a zig-zag chain composed of split ring resonators”

The 10th International Conference of Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics

META' 19, Portugal, July, 2019.

[3] 森竹勇斗

“Photonic topological edge states in a Meta-atom chain”

第9回電磁メタマテリアル講演会、神奈川、2019年3月

■プレスリリース

光を一方方向に進む表面波に変える人工ナノ構造の実証

<https://www.titech.ac.jp/news/2021/061848>