2025 年度年次報告書

先端国際共同研究推進事業
【2023 年度採択　次世代のための ASPIRE　量子分野】

【研究課題名】
トポロジカル量子物性を利用した革新的光回路の実現

研究代表者：
雨宮 智宏（東京科学大学 准教授）

主たる共同研究者：
刈宿 俊風（物質材料研究機構 主任研究員）

相手側研究代表者：
Alexander Khanikaev（University of Central Florida; Professor）

1. 研究進捗状況と成果

本研究では、バンドトポロジーに基づく量子物性理論と集積フォトニクス技術を融合することで、光回路内において光子の内部自由度を高度に制御するための新規フォトニクスプラットフォームの構築を推進している。従来のトポロジカルフォトニクス研究は、主として散乱耐性や一方向伝搬といった伝送特性に着目してきたが、光子内部自由度の位相干渉現象に着目した研究はほとんど存在していない。本研究では、この未踏領域に対して理論・デバイス・実証実験を横断的に展開することで、新しいトポロジカル光物性の開拓と、次世代光電融合技術への応用基盤構築を目指している。

具体的には、シリコンフォトニクス基板上にバンドトポロジーの異なるフォトニック結晶構造を高密度集積し、光の内部自由度である軌道角運動量および擬スピン状態を利用した超小型光スイッチや光干渉デバイス群の実現に成功した。特に 2025 年度は、これまでに実証していた 2×2 トポロジカル光スイッチを 3×3 マトリクス構造へと拡張し、将来的な大規模光電融合回路に向けた多ポート光スイッチング技術の基盤構築を進めた。また、トポロジカルフォトニクスデバイスに対する大規模数値解析技術として、2 次元 FDTD データと少量の 3 次元 FDTD データを組み合わせた転移学習型深層学習フレームワークを構築し、従来極めて大きな計算コストを要していた三次元電磁場解析を高効率化することに成功した。

国際循環の観点では、ASPIRE 共同研究機関であるセントラルフロリダ大学（University of Central Florida）との連携を深化させ、2026 年度に短期滞在予定の学生・若手研究者とともに現地訪問を実施した。現地では、CREOL 研究所において Khanikaev 教授グループとの研究打合せを行い、短期滞在中の研究テーマ・実験計画・人材交流方針について具体的な議論を実施した。また、Schoenfeld 副学長との会談を通じて、今後の継続的な研究連携および人的交流の方向性について意見交換を行った。さらに、Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2025)をはじめとする国際会議において研究成果発表を行い、海外研究者との活発な議論を通じて、トポロジカルフォトニクスおよび光電融合技術に関する最新知見の獲得と国際共同研究ネットワークの強化を推進した。

2. 代表的な成果事例

X. Wang et al., “Interference and switching effect of topological interfacial modes with geometric phase,” Phys. Rev. Research **7**, 023067 (2025).

概要：本論文では、トポロジカルフォトニクスにおける界面モードの干渉現象を利用した位相制御型光スイッチを提案し、その理論および実験実証を行った。具体的には、Dirac 分散を有する半導体フォトニック結晶中に形成された 4 端子トポロジカル導波路構造を用い、入力光間の位相差によって出力ポートへの光強度分配を制御可能であることを示した。特に、導波路の屈曲部において発現する幾何学位相（geometric phase）が、トポロジカル界面モード特有のスピン運動量ロッキングと協調することで、高い制御性を有する光スイッチング動作を実現することを明らかにした。さらに、シリコンフォトニクス基板上に実デバイスを作製し、通信波長帯における動作実証にも成功した。本成果は、トポロジカルフォトニクスに基づく低損失・高耐性な光集積回路技術への応用可能性を示すものであり、将来的には光通信、光演算、AI フォトニクス、光電融合システム等への展開が期待される。