

バレーフォトニック結晶とその光導波路への応用

東京大学 先端科学技術研究センター/生産技術研究所
岩本 敏

1. はじめに

光の場に現れる特異点や渦状構造は、光が持つトポロジカルな特徴と密接に関係しており、様々な興味深い現象を引き起こす。よく知られている光渦は、その位相特異点周りの位相巻き付き数（トポロジカルチャージ）に対応する光の軌道角運動量を運ぶ。周期的な光学構造中の光では、その分散関係（バンド構造）に関する特異点や渦状構造、光トポロジカル状態が現れる。周期的な光学構造で現れる光のトポロジカルな性質の探求と活用を目指す分野が、トポロジカルフォトンクス¹⁻³⁾と呼ばれる研究領域である。

ある種の周期的光学構造では、そのバンド構造がもつトポロジカルな性質を反映し、構造の周囲に特殊な状態が現れる。この状態は、2次元電子系に強磁場を印加することで実現される量子ホール相やトポロジカル絶縁体で現れるトポロジカルエッジ状態の光版であり、光トポロジカルエッジ状態と呼ばれる。光トポロジカルエッジ状態は、電子系のトポロジカルエッジ状態と同様に構造ゆらぎに強く、後方散乱が抑制されるという性質をもつ。この特性を応用することで急激な曲げや作製時に不可避免的に生じる構造欠陥などがあっても効率よく光を伝送できる導波路が実現できる可能性がある⁴⁾。また、近年では、光トポロジカルエッジ状態が光子間の量子もつれを保護し得ることも見出されており^{5,6)}、量子情報技術への展開も期待されている。

本稿では、周期的光学構造として2次元フォトニック結晶（photonic crystal, PhC）構造を取り上げる。2次元 PhC を用いて様々な光トポロジカル状態を実現できるが、光導波路として利用可能なものとして、カイラルエッジ状態、ヘリカルエッジ状態、バレーキンク状態と呼ばれる3つがある⁷⁾。カイラルエッジ状態は、量子ホール系で現れる電子のカイラルエッジ状態と同様に一方向性伝搬特性と欠陥などに対する強固な堅牢性を有する。しかし、その実現には系の時間反転対称性を破る必要がある。光領域で十分な効果を実現するのは現時点では困難である。一方、トポロジカル絶縁体のエッジ状態に対応するヘリカルエッジ状態（本号の雨宮先生の記事も参照）とバレーフォトニック結晶（valley PhC, VPhC）⁸⁾と呼ばれる構造で実現できるバレーキンク状態は、時間反転を破ることなく得ることができる光トポロジカルエッジ状態であり、半導体からなる PhC 構造を用いて実現可能である。以下では、特に VPhC 構造を用いた半導体トポロジカル光導波路について、詳しく紹介する。

2. バレーフォトニック結晶 (VPhC)

2-1 構造およびバンド構造とその特徴

以下では、半導体中に空気孔が周期的に形成された PhC 構造について、面内の電場成分が主となる TE モードのみを対象に議論する。VPhC 構造について理解するため、まず図 1(a) に示す単位セルで構成されたハニカム PhC 構造を考える。灰色部分は半導体であり、六角形の単位セルの頂点には同じ大きさの三角形の空気孔が配置されている。この構造に対するフォトニックバンド図を図 1(b) に示す。ブリルアンゾーンの高対称点である K 点、K' 点において、バンドが線形的に交差している様子がわ