

トポロジカルフォトンクスにおける デザインインフォマティクス

東京工業大学 工学院電気電子系
雨宮智宏, 岡田 祥, 坂本 樹, 西山伸彦

物質材料研究機構 ナノアーキテクトニクス材料研究センター
胡 暁

1. はじめに

トポロジカル絶縁体やワイル半金属などにおける電子系のトポロジをフォトンの系にトレースする試みは、「トポロジカルフォトンクス」と呼ばれ、近年急速に進展している。トポロジカルフォトンクスでは、ナノ周期構造における単位胞内と単位胞間の相互作用を同時に制御することで、トポロジの異なるフォニック結晶を実現できる点が特徴となる。これを利用することで、光渦や円偏光などの光のトポロジに起因した情報を体系的に扱うことができるようになる。特に、 C_{6v} 対称性を有する誘電体を蜂の巣格子状に配列した構造に代表される空間的対称性をベースとしたトポロジカルフォニック結晶は、従来の半導体ナノプロセス技術との整合性に優れていることから、応用へ向けて各周波数帯域において様々な研究が行われている¹⁻⁹⁾。

トポロジカルフォトンクスにおいてもっとも良く知られた現象の一つは、トポロジの異なる二つのフォニック結晶の界面に生じるトポロジカルエッジ状態であり、これは特定の内部自由度をもった光の伝搬を許容する¹⁰⁻¹⁴⁾。これにより、急峻な曲げに耐性のある低損失な光渦伝搬、偏光に依存した一方向性伝搬など、光回路上においてこれまでにない新しい光機能を実現可能となる^{15,16)}。

本稿では、トポロジカルフォトンクスの性質を簡単に説明した後、そのデザインインフォマティクスについての詳細を述べる。

2. トポロジカルフォトンクス

トポロジ (topology) とは数学の一分野である位相幾何学のことである。位相幾何学は言うなればゴムのように柔らかい図形を扱う学問体系である。これを以ってすると、図 1(a)のように球とトーラスは連続変形で一方から一方へ移行可能なことから同一と見なすことができる。ここで、球とトーラスの性質を決めているのは“穴の数”であり、それが異なる図形は違うものであると見なされる。これを数学的に「トポロジが異なる」と表現する。

トポロジカルフォトンクスは上記の概念を光分野にもってきたものであるが、それだけだと漠然とし過ぎるため、ここでは簡単な例を交えてその概念に触れる。図 1(b)には、二つのフォニック結晶が示されており、これらは互いに極めて近い光学特性を有する。互いの光学特性が近いのであるから、これら二つを隣接させたとしても、その光学特性には大きな変化は現れないはずである。しかし、両者のトポロジが異なる場合はその限りではない。先ほど述べたように、位相幾何学において“球”から“トーラス”には連続変形で移ることができないのと同様に、トポロジが異なるフォニック結晶同士も、何らかの特殊な物理状態を介さなければ、連続的に移ることができない。その特殊な物理状態が、隣接界面に生じる「トポロジカルエッジ状態」である。上記の理論的な詳細は筆者の別の解説記事を参照されたい¹⁷⁾。

トポロジカルエッジ状態によって伝搬される光は、内部自由度である軌道角運動量とスピン（すなわち、光渦と偏光）に対して、以下に示すような特徴的な性質が現れる。