



## 5 トポロジカルフォトンクス

# 光のトポロジカル特異点の生成手法を発見 ～新しい光制御技術の可能性～

NTT物性科学基礎研究所（以下、物性研）では、フォトニック結晶を変形させることにより、光のトポロジカルな特異点を自在に生成・制御できる手法を世界で初めて理論的に明らかにした。この成果は、レーザの偏光状態や出射方向の制御に利用可能で、光のトポロジカルな性質を利用した新しい光制御の可能性を示すものとして期待されている。

### トポロジカルフォトンクスについてートポロジーとは物体に開いた穴の数？

初めにトポロジカルフォトンクスという研究分野について説明したい。トポロジーとは、物体に開いた穴の数のように、連続的な変形に対して不変の強固な性質を扱う概念である。この性質は構造が持つトポロジカル数と呼ばれる数で規定される。例えば穴の数はその一例である。また、ベクトルが何回回転したかという回転数もトポロジカル数の一種である。

トポロジーの概念を固体中のバンド構造を組む電子に適用し、波数空間における電子の波動関数のトポロジーがさまざまな新しい物理現象を導くことを示した業績が2016年ノーベル物理学賞の一つとなっている。近

年ではトポロジカル絶縁体やワイル半金属などの電子の新しい物質相や新奇的な物理現象が発見されている。

このトポロジカル物性は固体中の電子だけでなく、フォトニック結晶と呼ばれる誘電体周期構造中の光においても発現することが知られている。2016年ノーベル物理学賞受賞者のうちの1人であるハルデー氏が、2008年にフォトニック結晶に適用することを提案し、それ以降光トポロジカル絶縁体を始めとした光のトポロジカルな物性が次々に見つかっている。この研究分野はトポロジカルフォトンクスと呼ばれ、現在世界的に活発に研究されている。

フォトニック結晶中の光のトポロジカルな現象は、光トポロジカル絶縁体など様々なものが存在するが、その1つとして光トポロジカル特異点と呼ばれ



NTT物性科学基礎研究所  
フロンティア機能物性研究部  
(ナノフォトンクスセンタ)  
研究員 養田 大騎氏

に対応する。このトポロジカル数は一般に半整数となるが、特にトポロジカル数が整数の時にはBound state in the continuum (BIC) と呼ばれる特殊な状態が実現する。BICのトポロジカル数の例を図1に示す。紫色の点がBIC、緑色の矢印が電場の振動方向を表しており、BICの周りを反時計周りに回ったときに、電場ベクトルが何回自転したかによってBICの持つトポロジカル数が決まる。

### Bound state in the continuum (BIC) について

一般に波動は、周波数の大きさによって、空間の一部に閉じ込められるか、空間外へと漏れ出るとのどちらかの形態をとることが分かっている

るものがある。これはフォトニック結晶から出てくる光の偏光状態が決めるトポロジカル数によって発現する状態であり、このトポロジカル数は光の電場が何回回転したかを表す回転数

トポロジカル数：電場ベクトルが特異点の周りを何回回ったかを表す数

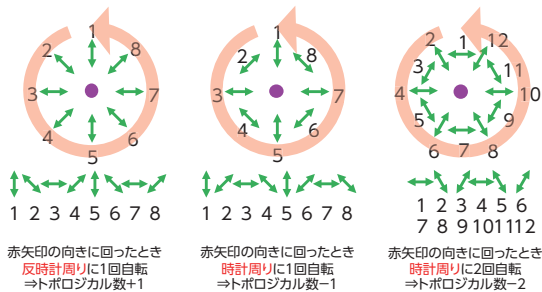


図1 トポロジカル数

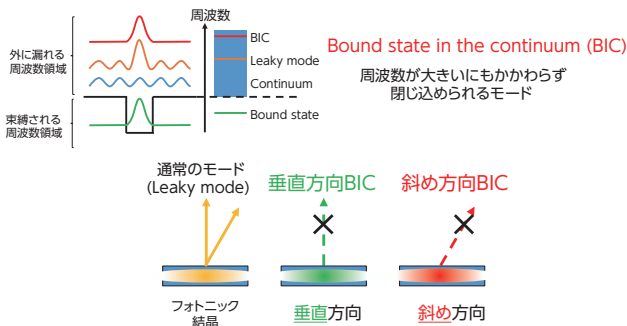


図2 Bound state in the continuum (BIC)

る。BICとは、本来閉じ込められない周波数領域にある波動が空間的に束縛されて閉じ込められる状態のことで、1929年に電子のBICの存在が予言されていた。このような状態はフォトニック結晶中の光にも現れ、光のBICは、通常フォトニック結晶の外に光が漏れ出してしまうはずの周波数領域で、フォトニック結晶中に閉じ込められたモードである。光のBICの存在はフォトニック結晶の研究初期から知られていたが、さらに光のBICはフォトニック結晶中の光トポロジカル特異点に対応するということが2013年に明らかになった。

フォトニック結晶において、面に垂直方向に光が出てこれない自明なBIC（垂直方向BIC）が存在することは以前より知られていた。垂直方向BICはフォトニック結晶中の光の空間分布とその対称性によって生じる。一方で2013年に斜め方向に光が出てこれない従来とは異なる非自明なBIC（斜め方向BIC）が存在することが判明した。どちらのBICもトポロジカル数を持つ特異点であるが、斜め方向BICの発生メカニズムは垂直方向BICと異なり、光の複雑な干渉の結果として生じる。この斜め方向BICは新奇な光閉じ込め方法としても注目されている（図2）。

レーザー発振可能で、かつ発振する角度を変更可能であると考えられており、その実現が期待されている。この現象は、新たなレーザー技術開発や角度制御できるビームステアリング技術への応用も考えられる。

また、斜め方向BICは垂直方向BICと異なりフォトニック結晶面内を伝搬することができる。このように斜め方向BICはいくつかの新奇な性質を持っており、広く興味を持たれて活発な研究が行われている。

ところが、これまで発見された斜め方向BICは、ある構造条件で偶然発現するものしか知られておらず、確実に生成できる手法は注目されつつも知られていなかった。

つまり、実際に数値計算を行ってみないと斜め方向BICが存在するかどうか分からず、またフォトニック結晶の穴の大きさ・厚さ・屈折率などの構造パラメータをどのように調節すれば斜め方向BICが生成できるか明らかにされておらず、斜め方向BICを実現する決定論的な手法が存在しなかった。

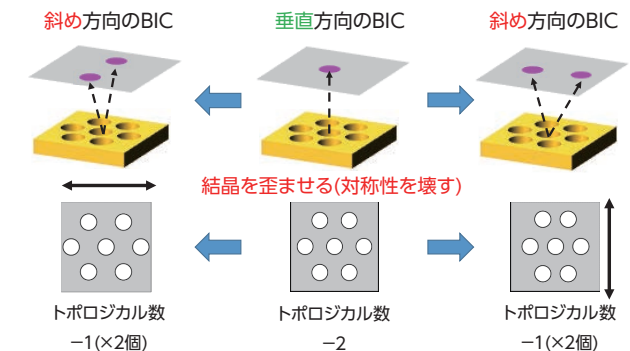
このBICモードに外部から利得を与えるとレーザー発振が可能であり、これまでに垂直方向BICを用いたレーザー発振はすでに実現されている。同様に斜め方向BICでは斜め方向に

**非自明な斜め方向のBICを必ず生成できる手法を世界初で提案**

フォトニック結晶を変形して対称性を変化させるという非常に簡単な方法で、斜め方向BICを必ず生成できる方法を世界で初めて理論的に見出した。本成果では誘電体薄膜に丸い穴が三角格子状に周期的に開けられたフォトニック結晶を用いた。この構造はトポロジカル数が-2の垂直方向BICを持つことが知られている。この構造を図3のように横方向または縦方向に引き伸ばすことによって、トポロジカル数が-2の垂直方向BICが2つに分裂して、トポロジカル数が-1の斜め方向BICが対で生成されることを理論的に示した（図3左右）。

さらに詳細な説明のために、準備したのが図4である。この図は、フォトニック結晶の垂直面から見たときの様子であり、電場を真上方向から見た図である。左側が垂直方向BICであり、トポロジカル数は-2である。右側の図は、横方向と縦方向に変形させたときの様子を示し、対称性の低下によりBICが分裂した様子を示す。

これより、穴の大きさや形状・厚



どんな構造パラメータ(穴の形状・大きさ・厚さ・屈折率)の値でも生じる

図3 斜め方向のBICを必ず生成できる方法を世界で初めて提案

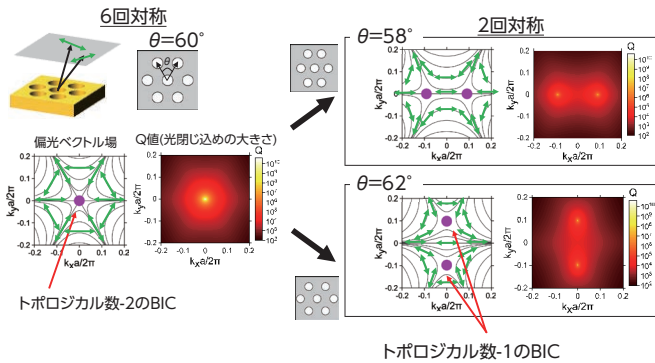


図4 対称性の低下によるBICの生成

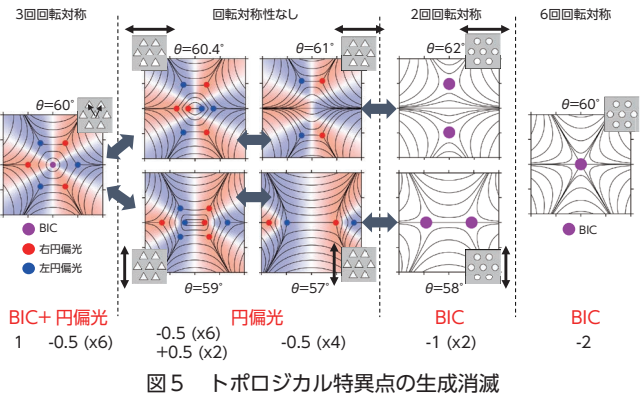


図5 トポロジカル特異点の生成消滅

さ・屈折率などの構造パラメータによらず斜め方向のBICを生成可能な様子が分かる。つまり、非自明な斜め方向のBICを自由に生成できる手法を発見できた。また、対称性の操作によるBICの角度依存性も評価したが、斜め方向BICを利用して、光ビームの出射方向が変形の度合いで可変でありレーザーの発振方向を制御できる可能性がある。

従来の手法では、非自明な斜め方向BICは、フォトニック結晶を構成する材料の屈折率に応じて構造パラメータが特定の領域にある場合のみしか存在せず、フォトニック結晶の構造を調節する必要があった。それに対し、今回の手法では材料の屈折率や構造パラメータの値によらず、6回回転対称性を持つ構造に変形を加えることで必ず斜め方向BICが生成可能となるため、幅広い材料に対して自在に斜め方向BICを実現することが可能となる。

またこれらトポロジカル特異点をレーザーなどの光デバイスに応用した場合、光出力の方向は変形の度合いによって可変となる。つまり構造の対称性の簡単な操作により、その方向や偏光の特性を制御できることを示している。

### さまざまな偏光状態を持つ光ビームの生成 (円偏光モード)

トポロジカル特異点のもう一つの例として円偏光がある。円偏光は半整数のトポロジカル数を持つことが知られている。BICだけでなく円偏光モードを導入することでさらに多彩なトポロジカル特異点の変化が現れる。例えばフォトニック結晶の穴の形と位置を制御することで、円偏光モードの生成・消滅が実現できる(図5)。

本成果では、フォトニック結晶の穴の形状を丸から三角形に変形することによって、トポロジカル数が半整数の特異点である円偏光モードが生じることを発見した。これらの操作は、もともと6回回転対称性を持っていた三角格子フォトニック結晶の対称性を壊すことに相当し、2回回転対称性のある構造では斜め方向BICが、2回回転対称性のない構造では円偏光モードが発現する。2回回転対称性のない構造へ変化させることによって、トポロジカル数が-1のBICが2つの円偏光モードへ分裂する。また、穴の位置を変化させていくことによって2つの円偏光モードを対消滅させることもできる。さらにこれらの特異点の生成・消滅を通してトポロジカル数の総和は変化しないことがわかる。

### 今後の展開に向けて

非自明な斜め方向BICを自在に生成・制御する手法を世界で初めて理論的に示した。特に、化合物半導体などの光利得を持った材料に対して本手法を適用することにより、出射角度やトポロジカルな性質に起因する特殊な偏光状態を自在に制御できるレーザーなどの発光デバイスが実現できると考えられる。また、フォトニック結晶のトポロジカルな性質を反映した光出力を自在に制御できる新しい光制御デバイスの可能性も期待できる。

養田研究員は次のように語っている。「今回の成果は理論予測ですが、今後は実際にフォトニック結晶を製作し、本成果の実験的な実証に取り組んでいく予定です。トポロジカルフォトンクス分野はまだ理論的に分からないことが多く存在し、かつそれらの応用に関してはまだまだ提案されていません。抽象的で取っ付きにくい分野だと思いますが、基礎的な理論研究から光デバイスへの応用など幅広く研究を行い、新たなアイデアを提案することでこの分野の発展に貢献できれば幸いです。」

※本成果は米国時間2020年7月30日に米国科学雑誌「Physical Review Letters」にNTTと国立大学法人東京工業大学共同で報道発表した。