

第6回 晝馬輝夫 光科学賞 受賞講演

トポロジカル・フォトンクス における人工次元等の 理論的提唱とその実証

.....

国立大学法人東北大学材料科学高等研究所 准教授
国立研究開発法人理化学研究所 客員研究員

Ph.D. in Physics

小澤 知己

おざわ ともき

概要

物質の状態の数学的形狀(トポロジー)の影響が物質の表面や端を通じて現れるトポロジカル絶縁体という物質が半導体中の電子の研究を通じて見つかりました。その後、周期的な構造中の光子・電磁波もトポロジカル絶縁体と似た性質を示すことがあることが分かりました。そこから生まれたのがトポロジカル・フォトンクスという研究分野です。背後にトポロジーという共通の数学的構造があるとはいえ、電子系と光子系ではさまざまな違いも存在します。私は、電子系には見られないフォトンクス特有のトポロジカルな現象の研究を行ってきました。特に、内部自由度を次元のように用いてトポロジカルなフォトンクス・バンド構造を制御する人工次元フォトンクスの提案や、散逸・変調下でのトポロジカル・フォトンクスなどの研究を通じ、トポロジカル・フォトンクスを独立した一つの研究分野として発展させることに尽力してきました。

1. トポロジカルフォトンクスとは何か

トポロジカル・フォトンクスが何かを説明するには、まずは半導体の研究を通じて見つかったトポロジカル絶縁体

という物質の説明から始めなくてはなりません。トポロジカル絶縁体の研究は整数量子ホール効果の発見に端を発します。整数量子ホール効果は、2次元電子系において強い磁場をかけた時にホール伝導度(一方向に電流を流した時にそれと直交する方向に発生する電圧との比)が e^2/h という電子の電荷 e とプランク定数 h という基本的な定数の組み合わせの整数倍になる(量子化される)という現象で、1980年に発見されました。それから数年後には、ホール伝導度に現れる整数が、「波動関数が波数空間で何回ねじれているのか」という波動関数の形(トポロジー)と関係していることが判明しました。「波動関数が波数空間で何回ねじれているのか」というのは非常に抽象的な概念ですが、この「ねじれの回数」に対応する数だけ試料の端を流れる電流のチャンネルが存在することが分かりました。整数量子ホール効果で観測されている電流は実はこの試料端を流れる電流であり、この電流がどれだけ流れやすいかがホール伝導度であるため、ホール伝導度に出てくる整数と「ねじれの回数」が一致するのです。これ以降、波動関数の形(トポロジー)が試料端の性質に反映されるという「バルク・エッジ対応」が他の多くの物質でも成り立つことが分かり、それらを総称してトポロジカル絶縁体などと呼ばれるようになりました(図1)。

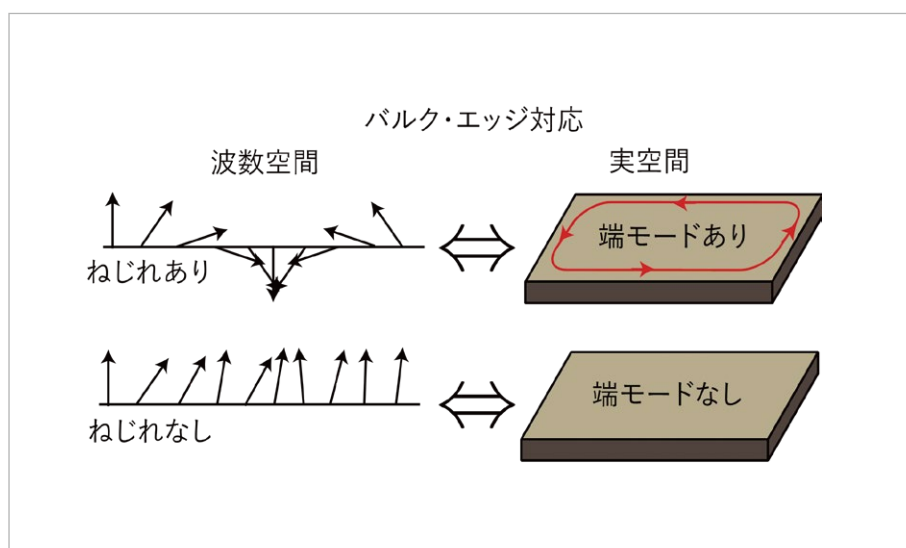


図1: バルク・エッジ対応の模式図。波数空間の量子状態(矢印)のねじれの回数と、実空間の試料端に存在するモードの数が一致するというのがバルク・エッジ対応。波数空間も実空間と同様本来は2次元で描かなければいけません、模式的に1次元で表しています。

整数量子ホール効果という名前からも分かるように、もともとトポロジカル絶縁体は量子力学の効果が本質的に重要な状況と関連していると考えられていました。しかし、2008年にプリンストン大学のDuncan HaldaneとSrinivas Raghuは、トポロジカル絶縁体の性質の一部は量子力学と全く関係のない古典物理学でも見つかることを発見しました(Haldane & Raghu, Physical Review Letters, 2008)。特に、古典的なMaxwell方程式に従う電磁波においてもトポロジカル絶縁体のアナロジーが存在し、物質中の電磁波の固有モードの「波数空間でのねじれの回数」と、物質表面に局在する電磁波のモードの数が一致するというバルク・エッジ対応が成り立つことが分かったのです(Duncan Haldaneは、この業績とは別のトポロジーに関連した業績で2016年にノーベル物理学賞を受賞しています)。「ねじれの回数」のようなトポロジーに関する性質は物質に多少の不純物・不規則性が入っても変わらない安定な性質で、バルク・エッジ対応や表面モードの存在は表面の詳細には依存せずに現れます。トポロジーに由来する安定な性質を使えばフォトニクスにおいて面白い現象やデバイスへの応用が見られるのではないか、ということでトポロジカル・フォトニクスという研究分野が生まれました。

量子的な電子と古典的な電磁波では背後にトポロジーという構造が共通していても実際にトポロジーがどのような現象につながるのかという点では大きな違いがあります。私は電子系では見られないフォトニクス特有のトポロジカルな現象に興味をもち、2013年頃から研究を続けてきました。トポロジカル・フォトニクスはもともとトポロジカル絶縁体の研究から派生してきたものですが、私の研究はトポロジカル・フォトニクスを固体電子系から独立した研究分野として独り立ちさせることに多少貢献できたのではないかと考えています。

以下で、まずは私の研究の中から特に人工次元を用いたフォトニック・バンド構造の制御について詳しく説明します。その次にフォトニクス特有のトポロジカル現象で私が見つけたその他のものについても簡単に触れたいと思います。

2. 人工次元フォトニクス

私たちは3次元空間に生きています(時間を含めて4次元と言う場合もありますが、ここでは空間次元を考えることにします)。人工次元というのは、空間次元ではない別の自由度(内部自由度、例えば粒子のスピンや角運動量など)を次元のように使ってバンド構造を制御する方法のことです。人工次元はもともと極低温に冷やした原子の集団で原子のスピンを次元として1次元格子にスピン自由度1次元を足して2次元の物理現象を見る方法として2014年に提案されました。次元をコントロールすることが重要になってくるのは、多くの物理現象は考えている次元によって異なる振る舞いを示すことがあるからです。例えば量子ホール効果は1次元と3次元では起こらず、2次元である必要があります。

私はフォトニクスでも人工次元を実現できるということを提案しました。特に、2016年に光の共振器のモードの自由度を次元として使う方法を提案しました(Ozawa et al., Physical Review A, 2016)。共振器とは光を安定的に閉じ込めておく構造ですが、一般に複数の固有モードを持ち、それらは周波数上おおよそ等間隔に並んでいます。共振器の屈折率を固有モード間の周波数間隔と等しい周波数で変調させると、光が一定の確率で一つの固有モードから上下の別の固有モードへと遷移します。この上下のモードへの遷移が、モード方向を次元として光が「動いて」いるように見なせます。この方法を使えば、2次元特有の現象を1次元的な構造を用いて実現できることになります。例えば人工次元を用いれば空間方向1次元+モード方向1次元の人工的な2次元空間で整数量子ホール効果のような状況を実現できます(図2)。私は2016年の論文でこの人工的な2次元空間の端状態を使って光アイソレータを実現する方法を提案しています。

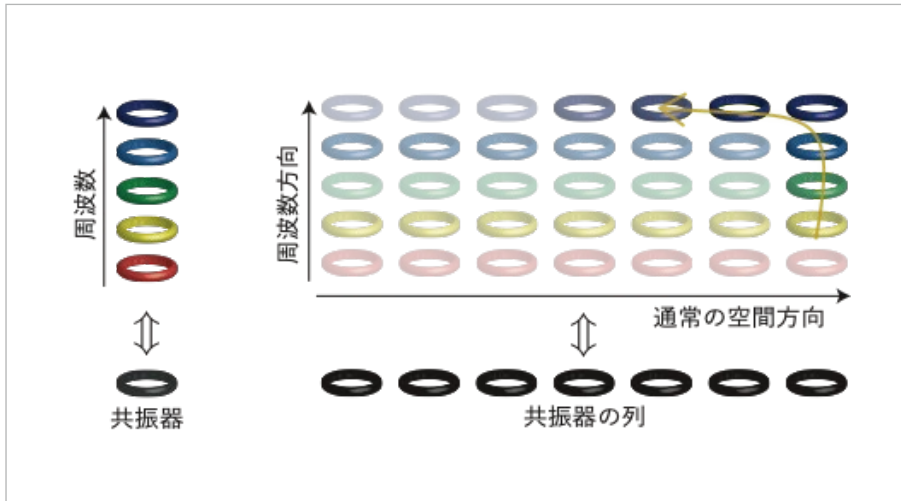


図2: 共振器のモードを用いた人工次元の模式図。(左)共振器一つから1次元の周波数方向の格子を実現できます。(右)共振器を1次元につなげることで通常の空間1次元と人工1次元からなる2次元格子を実現でき、そこでトポロジー由来の端モードを議論することもできます。

先ほど量子ホール効果は2次元である必要があると書きましたが、実は偶数次元であれば2次元でなくても起きることが知られていました。ただし、2次元の次の偶数次元は4次元なので直接我々の世界で観測できる現象ではないと考えられていました。しかし、人工次元を使えば4次元量子ホール効果を観測することもできます。最近、人工次元を使って4次元の量子ホール効果を観測したという実験が報告されています。これから4次元・5次元などの高次元でおきる奇妙な現象を実験室で観測できる時代が来るのかもしれませんが、ドラえものの4次元ポケットはいくらでもものをしまっておくことのできる不思議な道具ですが、あれはもしかしたら内部自由度が非常に大きな物質を使って実現しているのかもしれません。

フォトンクスにおける人工次元の研究はその後理論・実験の両面から急速に進展しています(Ozawa & Price, Nature Reviews Physics, 2019)。特に、2019年にスタンフォード大学のShanhui Fanのグループが光の人工次元の最初の実験に成功して以来(Dutt et al., Nature Communications, 2019)、実験的にさまざまな人工次元模型が実現されています。私自身、横浜国立大学・東京大学・慶應大学との共同研究で世界で初めてシリコン・フォトンクスのプラットフォームで人工次元を実現することに成功しています(Balčytis, Ozawa, et al., Science Advances, 2022)。もともと人工次元はトポロジカル・フォトンクスとの関連で提唱したのですが、今後はフォ

トニックバンド構造の制御というより広い観点から研究が進んでいくのではないかと考えています。

3. その他のフォトンクス特有のトポロジカルな現象

人工次元以外にもフォトンクス特有のトポロジカルな現象はいろいろと存在します。特に、電子系とフォトンクスの大きな違いとしてフォトンクスではしばしば散逸による光子のロスが無視できないことが挙げられます。電子系で初めて見つかったトポロジカルな現象は整数量子ホール効果でしたが、ホール伝導度の量子化という現象自体はロスがあるとそのままでは見つけることができません。私は、ロスがある場合でも連続的な励起下での定常状態における応答を見ることでホール伝導度の量子化に対応する現象が観測可能であることを見つけました(Ozawa & Carusotto, Physical Review Letters, 2014)。他にも、変調下における応答を見ることでトポロジーと密接に関係した幾何学的効果を実験的に観測可能だということを示し(Ozawa & Goldman, Physical Review B, 2018)、実験家との共同研究でそれを確認することにも成功しています(Asteria et al., Nature Physics, 2019とYu et al., National Science Review, 2020)。

特に量子計量と呼ばれる幾何学的性質は私たちの実験で初めてその効果が確認されました。

私自身は理論の研究者ですが、上に書いてきたように実験家との共同研究も多数行ってきています。他にも、2017年にはフランスの励起子ポラリトンの実験家との共同研究で、トポロジに由来する表面状態から発振するレーザーであるトポロジカル・レーザーを初めて実現することに成功しています (St-Jean et al., Nature Photonics, 2017)。トポロジカル・レーザーはトポロジカルな性質が安定であることを使って単一モードから安定的に発振できる見込みがあり、世界中で研究が進んでいます。

4. 最後に

トポロジカル・フォトンクスは比較的新しい研究分野ですが、急速に発展しているため、現状を包括的にまとめたレビューがあれば便利だろうということで、2019年にトポロジカル・フォトンクスの研究者総勢11人でレビューを書きました (Ozawa et al., Reviews of Modern Physics, 2019)。私が第一著者を務めており、研究者11人をまとめるのは非常に大変でしたが、出版後これまでに2000回以上引用される大ヒットとなり、苦勞した甲斐があったとうれしく思っています。レビュー発表からもう5年程度たちましたが、その間の研究の進展も目覚ましく、非線形性とトポロジカル・フォトンクスの融合分野や、非エルミート量子力学の進展、高次トポロジカル絶縁体の概念の発展、トポロジカル・レーザー研究の進展など枚挙にいとまがありません。トポロジカル・フォトンクスは基礎的な研究だけでなく、より応用を見据えた研究も活発に進んでいます。今後のトポロジカル・フォトンクスがどのように発展していくのか、非常に楽しみです。