

## ハニカム構造のフォトニック結晶が起こす光渦の不思議な反転現象

2023年6月2日

国立研究開発法人物質・材料研究機構 (NIMS)

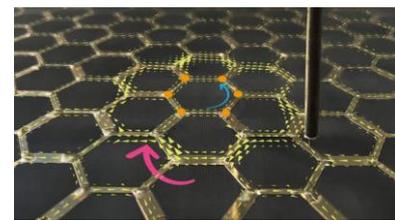
国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST)

### 概要

1. NIMS は、鏡映対称性と時間反転対称性を有するハニカム構造のフォトニック結晶の中で、光渦光源に誘起された多数の小さな光渦が干渉し合い、その結果光源の周りに逆向きの大きな光渦を形成する不思議な光渦伝搬様式を発見しました。この新奇現象が、フォトニック結晶のトポロジカル特性と深く関連することが明らかになったので、今後の革新的な光機能材料開発に寄与することが期待されます。

2. 近年物質のトポロジーが盛んに研究され、新規量子特性探索の重要なプラットフォームになっています。特に、小さい光渦を作りながらフォトニック結晶の縁に沿って流れ、鋭角をなす経路や欠陥からの散乱を受けない光伝搬が発見され、光集積回路技術の革新が期待されています。中でもシリコン等の誘電体を微細に加工して造形したハニカム構造のフォトニック結晶にトポロジカル光特性を発現させるアプローチは、既存の半導体フォトニクス技術との親和性にも優れ、注目を集めています。一方、トポロジカル特性がフォトニック結晶内部での光伝搬にどのような影響を与えるかは解明されていませんでした。

3. 今回、研究チームは、鏡映対称性と時間反転対称性を有するハニカム構造のトポロジカルフォトニック結晶において、光渦光源が最近接の単位胞に同じ向きに光渦を誘起し、それらが逐次遠方の単位胞へ伝搬しながら干渉し合い、その結果光源の周りに逆向きの大きな光渦が形成される、新奇光渦伝搬様式を発見しました。渦流の反転は、構造による鏡映対称性の破れか、磁化による時間反転対称性の破れで発生することが知られていますが、研究チームは今回発見された現象が、ハニカム構造のトポロジカルフォトニック結晶のディラック周波数分散関係に由来することを突き止めました。



ハニカム構造のトポロジカルフォトニック結晶における特異な光渦伝搬様式。円柱は測定用アンテナ型プローブ。

4. 今回の研究はミリ波で実験を行いました。類似の現象は光通信帯域や可視光域でも期待され、キラルな物質の検出を目的とした顕微円二色性分散計やセンサーとフィルター、多重特異点光渦を利用した高精度広域顕微技術に応用できます。また、面発光レーザーの発光制御に利用すれば、光ピンセットや光スパナ等先端的なナノレーザー技術の発展への寄与も期待されます。

5. 本研究では、NIMS ナノアーキテクトニクス材料研究センター (MANA) 胡曉グループリーダー、王星翔 NIMS ジュニア研究員が理論を担当し、中国同済大学 Hong CHEN 教授の研究チームが実験を担当しました。本研究は、科学技術振興機構 (JST) 戦略的創造研究推進事業 CREST 「トポロジカル材料科学に基づく革新的機能を有する材料・デバイスの創出」研究領域 (研究総括: 上田正仁) 研究課題「人工グラフェンに基づくトポロジカル状態創成と新規特性開発」(研究代表者: 胡曉; 課題番号 JPMJCR18T4) の一環として行われました。

6. 本研究成果は、2023年6月2日 (日本時間) に、Nature Communications 誌にてオンライン出版されます。

\* 物質・材料研究機構は、その略称を NIMS (National Institute for Materials Science) に統一しております。

## 研究の背景

近年、物質のトポロジー<sup>1)</sup>に関する研究が盛んに行われ、優れた量子機能開発の新しいプラットフォームになっています。特に小さい光渦を作りながらフォトニック結晶<sup>2)</sup>の縁に沿って流れ、鋭角をなす経路や欠陥からの散乱を受けないトポジカル光伝搬は室温で実現操作が可能で、高度光集積回路構築への応用が期待されています。その中で、シリコン等の誘電体のナノ加工によってハニカム構造フォトニック結晶を造形してトポジカル光特性を発生させるアプローチは、マイクロ波から光通信帯域、可視光に至るまで応用可能で、既存の半導体フォトニクス技術ともよい親和性を持つため、大きく注目を集めています。一方、トポジカル特性がフォトニック結晶内部での光伝搬にどのような影響を与えるかは今まで解明されていませんでした。多くの重要な光機能はフォトニック結晶全体からの寄与が重要であるため、トポロジーによるフォトニック結晶全体のユニークな光特性の発現に向けた探索が望まれていました。

## 研究内容と成果

[ハニカム構造トポジカルフォトニック結晶<sup>3)</sup>] 今回研究チームは、導体箔基盤・誘電体中間層・表面線状導体箔の三層構造を持つマイクロストリップ<sup>4)</sup>に着目しました。その特徴として、表面線状導体箔が蜂の巣模様を持っています。導体線六角形の線幅 ( $w_1$ ) と導体線六角形同士をつなぐ導体線の線幅 ( $w_2$ ) を調整することで (図 1 a, b)、周波数分散関係が制御されトポジカル光特性を創出できます。 $w_1 = w_2$  の場合、 $\Gamma$  点で二重に縮退したディラックコーンが現れます (図 1 d)。これは、グラフェンの電子バンド構造に対応しています。 $w_1 > w_2$  の場合、固有波動関数として  $p$  モードの周波数が  $d$  モードより低いため、ディラック質量が正 ( $M_D > 0$ ) となり、この結晶はトポジカル特性を示しません (図 1 a, c)。これに対して、 $w_1 < w_2$  の場合、固有モードの周波数が反転し、負のディラック質量 ( $M_D < 0$ ) を持つトポジカルフォトニック結晶になります (図 1 b, e)。明らかにいずれの構造も、導体線六角形の中心を通る回転軸に関する 6 回回転対称性及び回転軸を含む鏡映面に関する鏡映対称性を持っています。マイクロストリップは、理論的に有効な LC 回路で明瞭的に記述でき、また構造が平坦で電磁場の強度のみならず位相情報も高い精度で測定可能なため、今回の新奇なトポジカル光伝搬様式の全容解明に有利なプラットフォームと言えます。

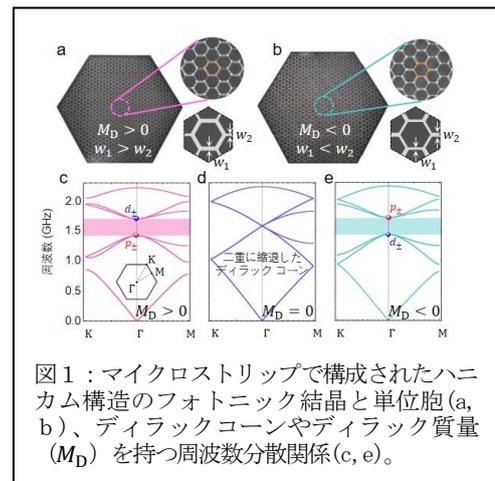


図 1 : マイクロストリップで構成されたハニカム構造のフォトニック結晶と単位胞 (a, b)、ディラックコーンやディラック質量 ( $M_D$ ) を持つ周波数分散関係 (c, e)。

[光渦伝搬の実験] 実際にマイクロストリップ系において上記  $M_D > 0$  と  $M_D < 0$  の二種類のハニカム構造のフォトニック結晶を設計制作しました。真ん中の金属線六角形の頂点における電磁場の位相を制御して光渦光源を作り、光源の周波数をバンドギャップより僅かに低い値に設定します。マイクロストリップの平坦性を利用して系全体に亘る電磁波の強度と位相を高い精度で測定しました。電磁波の強度は光源のある中心部で一番強く、外側に向けて伝搬していくのに従って強度が次第に小さくなっています (図 2 a, c)。一方、位相分布に関しては、全て単位胞が光源のある真ん中の単位胞と同じパターンになっているのが見て取れます (図 2 b, d)。すなわち、光渦光源によって最近接の単位胞に同じ向きの光渦が誘起され、それが逐次遠方の単位胞へ伝搬する様子が確認されました。単位胞ごとの電磁エネルギー流を表すポインティングベクトルの分布を図 2 a, c の電磁波強度図に白矢印で重ねて表示すると、 $M_D > 0$  の場合光源の周りに同じ向き大きな光渦が形成されているのに対して、 $M_D < 0$  でトポジカル

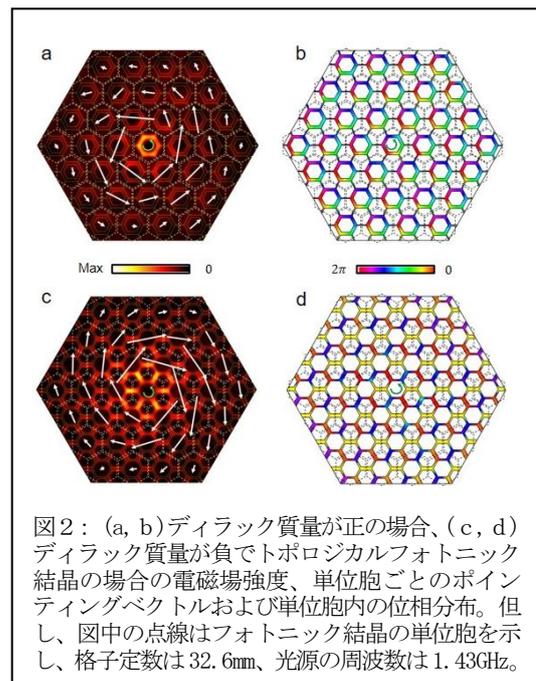


図 2 : (a, b) ディラック質量が正の場合、(c, d) ディラック質量が負でトポジカルフォトニック結晶の場合の電磁場強度、単位胞ごとのポインティングベクトルおよび単位胞内の位相分布。但し、図中の点線はフォトニック結晶の単位胞を示し、格子定数は 32.6nm、光源の周波数は 1.43GHz。

フォトニック結晶の場合、大きな光渦は光源とは逆方向で、極めてユニークな光伝搬様式になっています。研究チームは、図2a, cに示される反時計回りの光渦光源を時計回りのものに置き換えて実験を行い、同じ結論を得ました。このため、実験に使われているマイクロストリップが時間反転対称性を有し、今回発見された現象が時間反転対称性の破れと関係ないことが言えます。

[光渦伝搬の理論] 図1 c, e に示されるようにバンドギャップ近傍では、ハニカム構造のフォトニック結晶の個々の単位胞内の電磁波分布はpモードの光渦(図3a)とdモードの光渦(図3b)の重ね合わせによって与えられます。今回研究チームはその線形結合係数の方位角及び符号付きディラック質量への依存性を解明しました。それによると、 $M_D > 0$ の場合、個々の単位胞内で光源から遠い側でモード間が強め合い(図3の赤楕円)、光源に近い側でモード間が弱め合います(図3c)。 $M_D < 0$ でトポロジカルフォトニック結晶の場合、モード間が強めたり弱めたりするパターンは逆になります(図3d)。この結果、 $M_D > 0$ の場合、個々の単位胞内の光渦も、光源の周りを流れる大きな光渦(ピンク矢印)も、光源の光渦(青矢印)と同じ方向になります(図3c)。これに対して、 $M_D < 0$ の場合、個々の単位胞内の光渦が光源の光渦と同じ方向になっているにも関わらず、光源の周りを流れる大きな光渦は光源の光渦と反対方向になっています(図3d)。すなわち、トポロジカルフォトニック結晶の負のディラック質量がユニークな光渦伝搬現象の起源になっています。

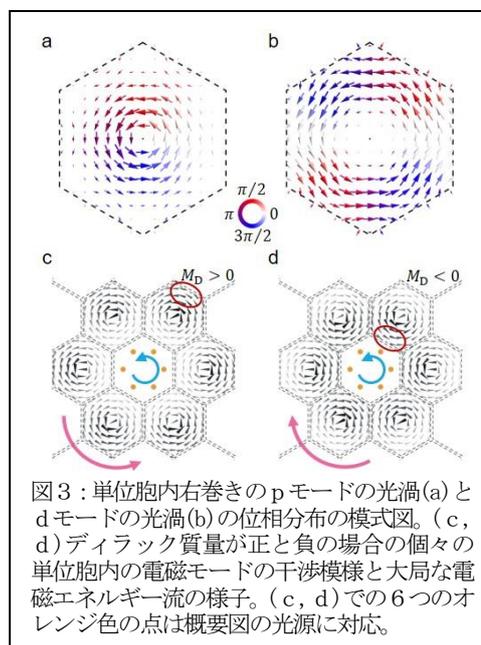


図3：単位胞内右巻きのpモードの光渦(a)とdモードの光渦(b)の位相分布の模式図。(c, d)ディラック質量が正と負の場合の個々の単位胞内の電磁モードの干渉模様と大局な電磁エネルギー流の様子。(c, d)での6つのオレンジ色の点は概要図の光源に対応。

[特異光伝搬の双対現象] 光の特異な伝搬様式として負の屈折現象<sup>5)</sup>が以前から知られています。特にフォトニック結晶が上に凸な周波数分散関係を示す場合、空気から入射する平面波はフォトニック結晶の中で入射光と逆の方向に電磁エネルギー流を誘起します。今回の研究で解明された負のディラック質量をもつトポロジカルフォトニック結晶の特異な光渦伝搬様式は平面波の負の屈折現象と双対をなしているとも言えます。

## 今後の展開

今回の研究はミリ波で実験を行いました。解明されたトポロジカルフォトニック結晶の特異な光渦伝搬様式はスケラブルで光通信帯域や可視光域でも期待され、鏡像非対称性物質の検出用顕微円二色性分散計やセンサーやフィルター、多重特異点光渦を利用した高精度広域顕微技術へ応用可能です。また、この特性を面発光レーザーの励起制御に利用すれば、極小で優れた固体レーザー光源の開発、光ピンセットや光スパン<sup>6)</sup>等の先端的レーザー技術の確立にも寄与できます。さらにトポロジカル特性由来の特異な渦伝搬現象は、電磁波に限らず弾性波を含む多くの波動現象にも拡張できるので、今回の研究成果は幅広い新規機能探索とデバイス開発につながると考えられます。

## 掲載論文

題目：Unique Huygens-Fresnel electromagnetic transportation of chiral Dirac wavelet in topological photonic crystal

著者：Xing-Xiang Wang, Zhiwei Guo, Juan Song, Haitao Jiang, Hong Chen, Xiao Hu

雑誌：Nature Communications

掲載日時：日本時間 2023年6月2日 オンライン掲載：DOI:10.1038/s41467-023-38325-8

## 用語解説

### (1) 物質のトポロジー

トポロジーはもののつながり方を分類する数学概念です。例えば、コーヒークップとドーナッツが共通して一つの空孔を持っているため、見かけ上違っているにもかかわらず、二者はトポロジー的に同類になります。近年、一部の物質結晶中の電子やフォトニック結晶中の電磁固有モードの波動関数が、逆格子空間において特異なトポロジーを示すことが明らかになりました。その結果、サンプルの変形や欠陥からの影響を受けない輸送現象が現れ、トポロジカル特性と呼ばれています。

### (2) フォトニック結晶

フォトニック結晶は誘電率や透磁率の異なる材料が周期的に並んでできた光の人工媒体のことです。材料の特性、構造の形状や周期配列の対称性等、様々なパラメータの制御が可能であり、新規光機能の開発に利用されています。

### (3) ハニカム構造トポロジカルフォトニック結晶

フォトニック結晶の中で特にトポロジカル光特性を示す一群のものは、トポロジカルフォトニック結晶と呼ばれます。その実現方法として、磁場中で磁気光学特性を示すジャイロ物質を利用するものや、誘電体でできたフォトニック結晶の対称性を利用するものが知られています。その一例として、シリコン等の誘電体でできたハニカム構造フォトニック結晶に $C_{6v}$ 対称性(=6回回転・鏡映対称性)を保つように僅かな変形を加えれば、もとの線形的なディラック型周波数分散関係(=ディラックコーン)にバンドギャップが開き、ディラック質量が有限になります。固有波動関数としてpモード(双極子)の周波数がdモード(四重極)より低い場合ディラック質量は正、バンド反転してpモードの周波数がより高い場合ディラック質量は負になり、後者の場合トポロジカル光特性が発現します。この二種類のフォトニック結晶の界面に、鋭角をなす経路や欠陥からの散乱を受けないトポロジカル光伝搬が現れます。

### (4) マイクロストリップ

高周波電磁回路に用いられるトランスミッションラインの1種で、導体基盤、誘電体中間層、表面線状導体箔の三層構造を持ちます。本研究で使われマイクロストリップの表面線状導体箔はハニカム構造を示し、導体線の幅の調整によって、トポロジカルフォトニック結晶とトポロジカル特性のないフォトニック結晶が作り分けられます。その電磁伝播特性は、ハニカム格子の個々の辺にインダクター、交点にキャパシターが置かれる等価LC回路で記述できます。

### (5) 光の負の屈折現象

光が空気から水に入射された場合、光伝搬の方向が少し折れ曲がることを光の屈折現象といいます。この場合、入射光線と屈折光線が界面の法線の両側にあり、光の正の屈折と呼ばれます。空気から特殊な物質に入射され、屈折光線が入射光線の方向に折れ曲がり、屈折光線と入射光線が法線の同じ側にある場合、光の負の屈折現象と呼ばれます。光の負の屈折現象は負の誘電率と負の透磁率によって起きますが、自然界にある物質では前例がなく、人工的に特殊な構造を作り込んだメタマテリアルで観測されています。

### (6) 光ピンセット、光スパナ

集光されたレーザー光の輻射圧を利用することで、細胞などの小さな物体を捕獲(トラップ)し動かすことができる技法を光ピンセットと言います。さらに光の軌道角運動量(=トルク)をもつレーザー光によって、対象物を回転させたり、ひねったりすることができる技法を光スパナと言います。いずれもDNA操作による医療やナノ加工による材料開発等最先端の分野への応用が期待される革新的なレーザー技術です。

本件に関するお問い合わせ先

(研究内容に関すること)

NIMS ナノアーキテククス材料研究センター (MANA) トポロジカル量子物性理論グループ  
グループリーダー 古月 暁 (ふるつき ぎょう)  
TEL: 029-860-4897, FAX: 029-860-4706  
E-mail: Hu.Xiao[at]nims.go.jp

(報道・広報に関すること)

NIMS 国際・広報部門 広報室  
〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1  
TEL: 029-859-2026, FAX: 029-859-2017  
E-mail: pressrelease[at]ml.nims.go.jp

科学技術振興機構 広報課

〒102-8666 東京都千代田区四番町 5 番地 3  
TEL: 03-5214-8404, FAX: 03-5214-8432  
E-mail: jstkoho[at]jst.go.jp

(JST 事業に関する問い合わせ先)

科学技術振興機構 戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ  
安藤 裕輔 (あんどう ゆうすけ)  
〒102-0076 東京都千代田区五番町 7 K's 五番町  
TEL: 03-3512-3531, FAX: 03-3222-2066  
E-mail: crest[at]jst.go.jp