

## 電磁波を散乱なく伝送する「トポロジカルLC回路」の発見

～蜂の巣構造が鍵、携帯電話などマイクロ電磁波を伝送するデバイスの小型化に新しい道～

配布日時：平成30年11月19日14時

国立研究開発法人 物質・材料研究機構

### 概要

1. NIMS は、直角や鋭角の経路でも電磁波が散乱を受けずに伝送される「蜂の巣状トポロジカル LC 回路<sup>1)</sup>」の作製に成功しました。エレクトロニクスに幅広く使われている高周波電磁導波路に応用することで、コンパクトな設計が実現し、携帯電話など様々な電子デバイスの小型化・高集積化に貢献できると期待されます。

2. ものの形状が変化しても、その変化に影響されない「トポロジカルな性質<sup>2)</sup>」を持つ物質の研究が盛んに行われています。もともと電子系で発見されたトポロジカルな性質ですが、近年、光や電磁波にも拡張できることが明らかとなり、散乱に強い光・電磁導波路の開発に役立つと期待されています。しかし、光や電磁波でトポロジカルな性質を実現するには、ジャイロ物質<sup>3)</sup>と呼ばれる特殊な物質に磁場を印加したり、複雑な構造が必要とされており、既存のエレクトロニクスやフォトニクスの技術と融合するために、単純な物質と構造でトポロジカルな性質を実現することが求められていました。

3. 本研究グループは、2015年にシリコン等誘電体の円柱を蜂の巣格子に組むことによって、光・電磁波のトポロジカルな性質を実現できることを示しました。今回、高周波の電磁波を伝送するマイクロストリップ<sup>4)</sup>とよばれる平坦な回路において、線状金属箔が蜂の巣構造を持つように設計し、六員環をつくる金属箔と六員環同士を繋げる金属箔の線幅を異なるようにすれば、伝送される電磁波がトポロジカルな性質を持つことを理論的に見いだしました。さらに、実際にマイクロストリップを作製し、表面の電場を測定することで、マイクロストリップ内部で決まった方向の電磁エネルギー渦巻きを作りながら伝搬するという、トポロジカル電磁波の様子を詳細に観測することに成功しました。

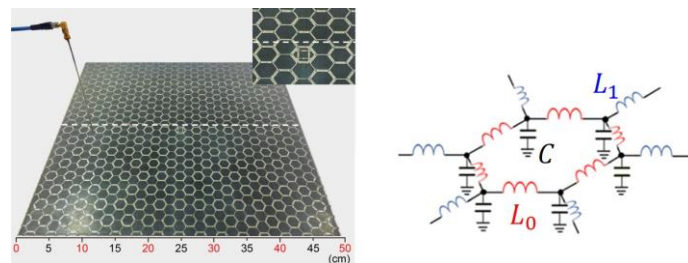


図1：実験に使われたマイクロストリップの写真（左）と有効LC回路（右）

4. 今回の研究によって、簡単な加工でトポロジカルな性質を持つ電磁波の伝送を実現できることが実証されました。トポロジカル電磁伝送は鋭角や直角の経路からも散乱を受けないため、コンパクトな電磁回路の設計が可能となり、デバイスの小型化・高集積化が期待できます。また、トポロジカル電磁モードが持つ渦巻きの方向と巻き数は、情報の担い手として高密度な情報伝達に利用できます。これらの特性はいずれも、IoT や車の自動運転等に代表される高度情報化社会の実現に寄与するものです。

5. 本研究は、物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトゥクス研究拠点 (WPI-MANA) の古月暁 MANA 主任研究者、荻宿俊風 研究員と、中国 Tongji 大学 Hong CHEN 教授のグループからなる研究チームによって行われました。また本研究は、日本学術振興会科学研究費助成事業基盤研究 (B)「実空間操作によるトポロジカル状態発現の摂理探索と新規機能の創成」の一環として行われました。

6. 本研究成果は、Nature Communications 誌にて2018年11月2日にオンラインで掲載されました。

## 研究の背景

物質結晶にある電子がトポロジカル特性を持ち、サンプルのエッジに無抵抗な電流を作り出せることを理論的に解明した研究業績によって、Thouless 博士と Haldane 博士が 2016 年にノーベル物理学賞に輝きました。また、トポロジカル絶縁体と呼ばれる、量子化されたエッジ電気伝導を示す一群の新しい物質の発見のきっかけを作った Kane 博士と Mele 博士が本年度の Breakthrough 大賞を受賞しました。トポロジーに守られたエッジ電子状態が、サンプルの形状や欠陥の存在に影響されない強靭さを持っているため、様々な新機能の開発やナノデバイスへの応用が期待され、その研究探索は世界規模で大きな隆盛を見せ、物性物理と物質科学の新しいフロンティアになっています。

電子系で発見されたトポロジカル特性を光・電磁波に拡張すれば、新奇な電磁特性や、強靭な光・電磁伝送を実現できることが今までの研究で明らかになりました。しかし、トポロジカル電磁特性を幅広く応用するためにはいくつかの挑戦的な問題点を解決しなければなりません。例えば、ファラデー効果を示すジャイロ物質を使うアプローチでは、外部磁場の印加が必要であり、しかも赤外より高い周波数ではファラデー効果が弱まります。また、らせん構造や結合共鳴波動導波管を用いてトポロジカルオプティック状態を作り出す方法では、構造が複雑で、高度な制作技術が求められます。このため、これらのトポロジカル光・電磁系は、既存のエレクトロニクスやフォトニクスとの融合において問題点を抱えており、これらの問題を克服する新しい研究探索が待たれています。

## 研究内容と成果

研究チームはトランスマッションラインの 1 種であるマイクロストリップに着目しました。マイクロストリップは、基盤になる導体箔、誘電体中間層、表面線状導体箔の三層構造を持ち、典型的な高周波電磁導波路としてよく知られています。

本研究で作成したマイクロストリップの特徴は、表面線状導体箔が蜂の巣模様を持っていることです。蜂の巣模様を六員環のネットワークと見なし、六員環をつくる導体箔の幅は  $w_{in}$ 、六員環同士を繋ぐ導体箔の幅は  $w_{out}$  に取り、交点では表面線状金属箔と金属基盤の間にキャパシタを挿入しておきます。マイクロ導波管理論によれば、このマイクロストリップは、蜂の巣格子の辺に線幅に逆比例するインダクタンス (L)、交点に様なキャパシタンス (C) を持つ LC 回路と等価です。

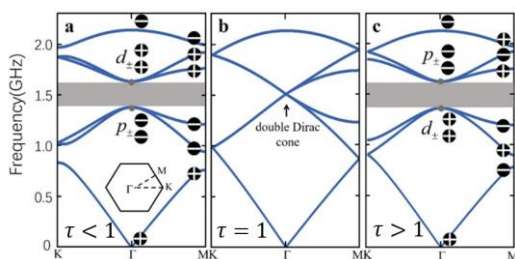


図 2 : 蜂の巣状金属箔の線幅の比  $\tau \equiv w_{out}/w_{in}$  の異なる値に対応する電磁波分散関係。a と c :  $\tau < 1$  と  $\tau > 1$  の場合、分散関係に周波数バンドギャップが現れる。b :  $\tau = 1$  の場合、バンドギャップが閉じ、線形分散関係に変わる。グラフェンの電子分散関係の類似から、b に対応するマイクロストリップは人工グラフェンとみなせる。

図 2 に示されているように、線状金属箔の線幅が一樣でなければ ( $\tau \equiv w_{out}/w_{in} \neq 1$ )、マイクロストリップの分散関係は周波数バンドギャップを示し、電磁波がバルクを通過できない周波数領域 (図 2a と c の灰色部分) が現れます。今回実験に用いられたマイクロストリップ系の上半部と下半部では、それぞれ  $\tau > 1$  と  $\tau < 1$  になるように設計されており、白い点線は境界を表しています (図 1 左図参照)。上、下部分のバンドギャップが同じ周波数になるように、線状金属箔の幅とキャパシタンス (C) を調整しました。

境界の中間点に置かれたアンテナ (図 1 左図挿図) から、バンドギャップに対応する周波数を持ち、線偏光した電磁波がシステムに注入された場合、図 3 に示されるように、境界に沿った電磁伝播が観測されました。詳しくみると、光源の左側と右側では、電磁波が六員環の中でそれぞれ時計回りと反時計回りの渦巻きを作りながら伝播する様子が分かります。

マイクロストリップに複雑な加工を施すこともなく、左巻きと右巻きを持つ電磁モードが綺麗に分流されることが今回の研究によって得られた重要な成果です。この現象を司っているのは電磁モードのトポロジカル特性であることが研究チームの理論解析で明らかになっています。線状金属箔が蜂の巣模様を持つことから、 $\tau > 1$  (図 2c) と  $\tau < 1$  (図 2a) を満たす上半部と下半部のマイクロストリップでは、トポロジカル特性が異なり、その境界に特異なトポロジカル電磁モードを作り出しています。

このことを確かめるために、研究チームは鋭角や直角コーナーが含まれる境界を用意し、これらによって電磁波が散乱されないことを確認しました。これは、通常の電磁波伝播と異なり、トポロジカル保護があって初めて可能になる電磁特性です。

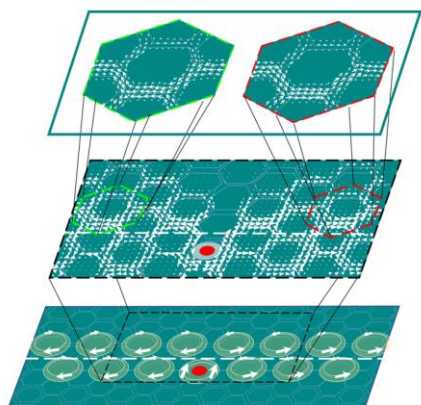


図3：トポロジカル電磁伝送の模式図（下段）、計算機シミュレーション結果（中段）及び実験測定結果（上段）。赤いドットは線偏光点光源を表す。矢印は局所ポインティングベクトルを表し、長さはその絶対値に対応する。緑と赤の点線で囲まれる六員環（中段と上段）では、電磁エネルギー流がそれぞれ時計回りと反時計回りの渦巻きを作っていることが見て取れる。

## 今後の展開

今回の研究によって、蜂の巣構造の幾何学特性から、単純なLC回路に、現在物性物理と物質科学の最もホットトピックスの一つであるトポロジカル物理現象が現れることが判明しました。今回の研究で解明された新しいトポロジカル特性の発現摂理は、トポロジカル現象の普遍性を示し、その理解を深めるのに役立ちます。また、簡単な加工方法でトポロジカル電磁特性が実現可能であることを実証したことも重要です。トポロジカルな特性を示す電磁波は、鋭角や直角経路にも散乱されないため、コンパクトな電磁回路の設計に有利で、エレクトロニクス・オプティクスデバイスの小型化・高集積化に利用できます。トポロジカル電磁モードが持つ渦巻きの方向と巻き数は、情報の担い手として高密度な情報伝達に利用できます。これらの特性はいずれも、IoTや車の自動運転等に代表される高度情報化社会の実現に寄与できます。今回発見された設計原理と優れたトポロジカル特性は、最先端の量子情報処理に用いられる回路にも拡張でき、革新的なデバイスの開発に繋がると期待されます。

## 掲載論文

題目：Topological LC-circuits based on microstrips and observation of electromagnetic modes with orbital angular momentum

著者：Yuan Li, Yong Sun, Weiwei Zhu, Zhiwei Guo, Jun Jiang, Toshikaze Kariyado, Hong Chen and Xiao Hu

雑誌：Nature Communications

掲載日時：2018年11月2日

DOI：https://doi.org/10.1038/s41467-018-07084-2

## 用語解説

### (1) 蜂の巣状トポロジカルLC回路

LC回路は基本的な電気回路の一つで、インダクターとキャパシターからなっている。電気抵抗が無視できるほど小さい場合、電流がLC回路の中で振動を続け、その特徴的な周波数はインダクタンスLとキャパシタンスCから $\omega = 1/\sqrt{LC}$ で与えられる。本研究で使われたLC回路は蜂の巣模様を示し、辺にインダクター、交点にキャパシターが置かれ、回路全体はキャパシターを通じて接地されている。

### (2) トポロジカルな性質、トポロジカル特性

電子や電磁波の波動関数をもつ特異な位相幾何学的（＝トポロジカル）位相によって、サンプルの内部では電流や電磁波が通過できないが、表面や縁に量子化されたチャンネルが現れ、強靱な電流や電磁波伝

送が可能になる性質。現在、様々なトポロジカル物質や電磁システムが提案され、新規量子機能や革新的なデバイス開発に役立つことが期待されている。

(3) ジャイロ物質

電磁波の偏光面が媒体に進行しているうちに回転する現象がファラデー効果と呼ばれ、外部磁場の下でファラデー効果を示す物質のことをジャイロ物質と称する。

(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つ。その電磁伝播特性は等価LC回路で記述できる。

**本件に関するお問い合わせ先**

(研究内容に関すること)

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクニクス研究拠点 (WPI-MANA) ナノシステム物性理論グループ MANA 主任研究者 古月暁 (ふるつきぎょう)

E-mail: Hu.Xiao@nims.go.jp

TEL: 029-860-4897

URL: <http://www.nims.go.jp/mana/lab/theorphys/>

(報道・広報に関すること)

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 経営企画部門 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@ml.nims.go.jp](mailto:pressrelease@ml.nims.go.jp)