

非エルミート性に由来する新たな端状態を提案
—新たなトポロジカル物質の設計原理へ向けて—

1. 発表者：

曾根 和樹（東京大学 大学院工学系研究科物理工学専攻 修士課程2年）

蘆田 祐人（当時：東京大学 大学院工学系研究科物理工学専攻 助教／

現在：東京大学 大学院理学系研究科附属知の物理学研究センター/物理学専攻
准教授）

沙川 貴大（東京大学 大学院工学系研究科物理工学専攻/附属量子相エレクトロニクス研究
センター 教授）

2. 発表のポイント：

- ◆非エルミート性（注1）を利用した機構により保護される、トポロジカル物質（注2）の新しい端状態（注3）の存在を理論的に提案した。
- ◆この端状態は試料内部のトポロジー（注4）に依存しないという特徴があり、非エルミート系においてバルク・エッジ対応（注5）が破れうることを示唆している。
- ◆散乱の無い流れなどを利用した物質やデバイスの新たな設計原理を与えると期待される。

3. 発表概要：

近年、物質のトポロジーに関する研究が活発に行われ、光や音波を制御するメタマテリアル（注6）などへも波及しています。メタマテリアルにおいてはエネルギーの流入や散逸が起り得ますが、そのような非保存系（非エルミート系）のトポロジカル端状態には未解明な点が多く残されています。

東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻の曾根大学院生、蘆田助教（現東京大学大学院理学系研究科准教授）、沙川教授らは非エルミート性由来の新たな機構により、トポロジカル物質で見られるような端状態が保護できることを理論的に明らかにしました。この保護機構は試料内部（バルク）のトポロジーではなく、表面（エッジ）のトポロジカルな構造を利用しています。これは従来のエルミート系とは大きく異なる性質であり、非エルミート系に特有のバルク・エッジ対応の破れを示唆しています。また、このような端状態がレーザーの増幅に応用できることを指摘しました。本研究は、非エルミート系における端状態の基本原理の理解に資するとともに、低散逸な次世代デバイスなどの設計原理を与えると期待されます。

本研究成果は、11月12日に科学雑誌「*Nature Communications*」オンライン版に掲載されました。

4. 発表内容：

【研究の背景】

「トポロジー」は連続的な変形の下で変化しない図形の性質を調べる数学の分野です。近年、物質において電子状態のトポロジーが重要な役割を果たすことが明らかになってきました。特に、通常とは異なるトポロジーを有した「トポロジカル物質」は、その試料端に特殊な電子状態（端状態）をもち、散乱の無い電流を示します。物質のトポロジーは不純物や小さな外乱が

存在しても変化しないと考えられるため、トポロジカル物質の端に局在した流れも安定性を持ち、省エネルギーデバイスへの応用が期待されています。

より最近になって、トポロジーは物質中の電子状態だけでなく、光や流体などの制御にも応用できる可能性が明らかになっています。実際、光学素子や流体パターンを設計することで、メタマテリアルにおいても端に局在した電磁波や音波の存在が確認されています。一方で、メタマテリアルには比較的容易に外部からエネルギーや粒子を出入りさせることができます。このようなエネルギーや粒子数が保存しない物理系は、量子力学で現れるハミルトニアンを非エルミートにすることで記述できることが知られています。しかし、非エルミートな物質における端状態については多くの点が未解明です。

【研究内容】

本研究グループは、非エルミート系に特有な「例外点」（注7）と呼ばれる構造が、非従来型の機構で端状態を保護することを理論的に明らかにしました。例外点は試料内部（バルク）ではなく端（エッジ）そのもののトポロジーによって特徴づけられます。そのため、本研究は試料内部のトポロジーに注目した従来の研究とは異なり、試料端のトポロジーに立脚した新しい端状態の保護機構を提案するものとなっています。以下に研究内容の詳細を述べます。

端状態の存在は、物質中の電子の分散関係を表したバンド構造（注8）から確認することができます。エルミート系の端状態を表す分散が交差する点では、時間反転対称性（注9）などが無い限り外乱や不純物によってその交差が解け、端状態は消滅してしまいます。一方で、非エルミート系では、例外点と呼ばれる構造が交差点付近で対になって現れます。エネルギーの実部に注目すると、例外点付近の端状態に対応する2つの曲線がまるで糊でくっつけたように重なります。この重なりは2つの例外点衝突するまで解消することができないため、端状態が外乱や不純物に対して安定に存在できることとなります（図1）。本研究グループはこのような端状態の存在と安定性を数値計算によっても確認しました。

また、ここで解析した端状態が示すダイナミクスが、レーザーなどに応用できる可能性を指摘しました（図2）。このような端状態を応用したレーザーは、増幅した光波を試料端で少ない散逸で伝搬させることができるため、レーザー技術の発展に寄与すると期待されています。特に今回提案した機構は、これまでの研究と異なり、端に偏在したエネルギー流入を必要としないため、応用の幅を広げることが期待できます。光学系他に、バクテリアなどの自ら動き回る個体の集団（アクティブマター）（注10）においても、本研究で存在を明らかにした端状態が現れうることを示しました（図3）。

【研究の意義、今後の展望】

本研究の結果は、エルミート系で成り立つバルク・エッジ対応が、非エルミート系では一般的な機構で破れうることを示唆します。一方で、本研究で解明した端状態のトポロジーは、非エルミート系の端状態の基本原則を理解する上で大きな一歩となると考えられます。さらにこれは、近年注目されつつあるトポロジーに立脚したアクティブマター[参考文献1]やメタマテリアルの新しい設計原理を与えるものと期待されます。特に、本研究で提案したレーザーのような、非エルミート性とトポロジーを組み合わせることで初めて実現するデバイス設計の指針としても有用となると考えられます。

【謝辞】

本研究は、科学研究費補助金新学術領域（研究領域提案型）「情報物理学でひもとく生命の秩序と設計原理」の計画研究班「情報熱力学による生体情報処理の理論研究」（科研費番号 19H05796）、科学研究費補助金基盤研究（A）「孤立量子多体系における熱力学第二法則」（科研費番号 JP16H02211）、科学研究費補助金研究活動スタート支援「単一原子観測/制御下の量子多体ダイナミクス解明に向けた非摂動手法構築」（科研費番号 19K23424）、および東京大学 Beyond AI 研究推進機構の助成を受けて行われました。

[参考文献1] “Anomalous Topological Active Matter,”
Kazuki Sone and Yuto Ashida
Physical Review Letters 123, 205502 (2019)
<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.123.205502>

5. 発表雑誌：

雑誌名：「*Nature Communications*」 11月12日
論文タイトル：Exceptional non-Hermitian topological edge mode and its application to active matter
著者：Kazuki Sone*, Yuto Ashida, Takahiro Sagawa
DOI 番号：10.1038/s41467-020-19488-0

6. 問い合わせ先：

東京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻
教授 沙川 貴大（さがわ たかひろ）

7. 用語解説：

（注1）非エルミート性

電子などミクロな世界の振る舞いは量子力学に従います。量子力学のダイナミクスを司るハミルトニアンは、転置と複素共役を同時にとっても不変であるというエルミート性を持ち、それによってエネルギーが保存して実数であることを保証しています。一方、エネルギーや粒子の流入が存在する非保存系では、ハミルトニアンが実効的にエルミート性を破ることがあります。そのようなエルミート性を持たないハミルトニアンで記述される物理系を非エルミート系と呼びます。

（注2）トポロジカル物質

通常の絶縁体と連続的に移り変わらない物質群のことを指します。最初の発見例である量子整数ホール系から始まり、現在では様々な種類のトポロジカル物質が発見、研究されています。典型的なトポロジカル物質であるトポロジカル絶縁体などは、特殊な電子状態（端状態）を持ち、散逸が無いなどの特異な性質から新奇デバイスへの応用が期待されています。

（注3）端状態

トポロジカル物質は、試料端に局在した特殊な電子状態を持ちます。そのような端状態は不純物や外乱の存在に対し頑強で、安定に残りやすいという性質を持ちます。また、散乱することなく端を伝わる波や流れを示すという特徴をもちます。

(注4) トポロジー (位相幾何学)

粘土を曲げるようにして連続的に図形を変形させたときに、不変に保たれる性質を調べる数学の分野です。これにより、連続変形によって互いに移り変わることでない図形があることが示されます。たとえば、立体の穴の数は連続変形の下で不変であることが知られているため、穴が0個の球と穴が1個のドーナツは互いに連続変形で移り変わりません。トポロジーの概念を用いることで、物質の電子状態なども連続変形で移り変わらない、いくつかのグループに分類することができることが明らかになってきました。

(注5) バルク・エッジ対応

試料の内部構造 (バルク) のトポロジーと試料端 (エッジ) に局在する端状態の存在が1対1に対応するという原理を、バルク・エッジ対応と呼びます。これによって、散乱することなくトポロジカル物質の端を伝わる流れなどの特異な性質が保証されます。

(注6) メタマテリアル

メタマテリアルとは、光学素子の配置や空間構造を設計することで、光や流体のダイナミクスを制御するデバイスの総称です。

(注7) バンド構造

物質中の電子の波数に対し、それに対応する電子状態のエネルギー分散関係を表します。ここから、物質の伝導度などの物理量を計算できるため、物性物理の分野において重要な役割を果たします。メタマテリアルなどでは、媒質中の波の波数と固有周波数の分散関係に対応します。

(注8) 例外点

物質中の電子の振る舞いを記述するハミルトニアンに対し、対角化という計算を行うことで電子状態 (固有状態) と対応するエネルギーを求めることができます。一方で、非エルミート系のハミルトニアンでは対角化不可能な場合があり、そのような点のことを例外点と呼びます。例外点では図1のようにバンド構造が接合し、対応する固有状態も縮退します。このような例外点はその付近の分岐点構造のトポロジーによって保護されることが知られています。

(注9) 時間反転対称性

時間の進む向きを (実効的に) 逆向きにするような操作に対してダイナミクスが不変であるとき、その系は時間反転対称性をもつと言います。トポロジカル物質の中には、そのような対称性が破れない限りにおいてトポロジーと端状態が安定に保たれるものがあります。

(注10) アクティブマター

生物やロボットのように自ら動く能力をもった個体、およびそれらの集団のことをアクティブマターと呼びます。アクティブマターの物理は、たとえば鳥や魚の群れの形成メカニズムなどに関係し、注目を集めています。

9. 添付資料:

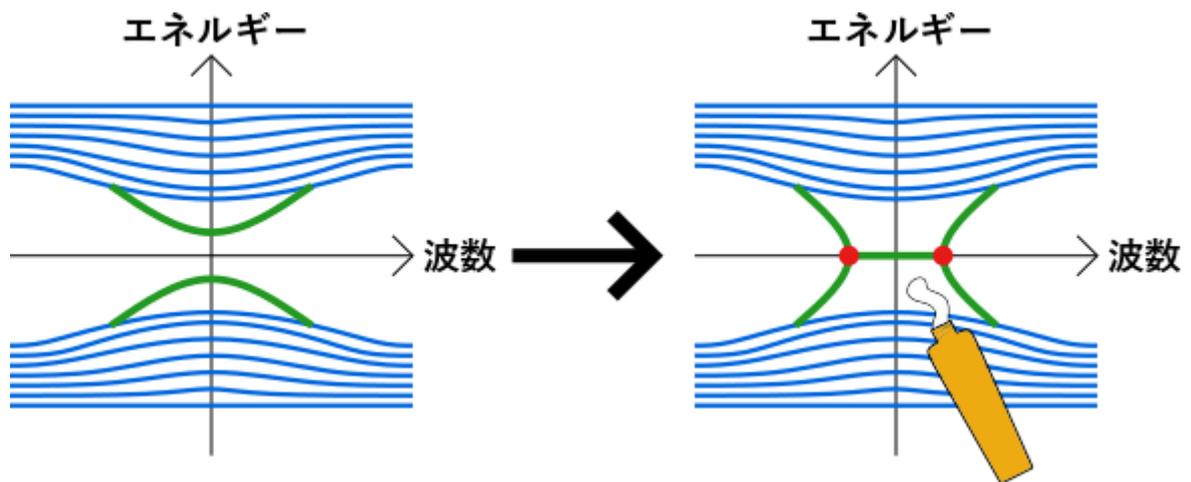


図1：非エルミート性を利用することで、試料内部（バルク）のバンド（青色の曲線の集まり）を結ぶ端状態のバンド（緑色の曲線）が現れます。例外点（赤色の点）の間の部分が糊付けされたように接着され、外乱や不純物によっては簡単には引きはがせなくなるため、端状態がそれらに対して頑強になります。

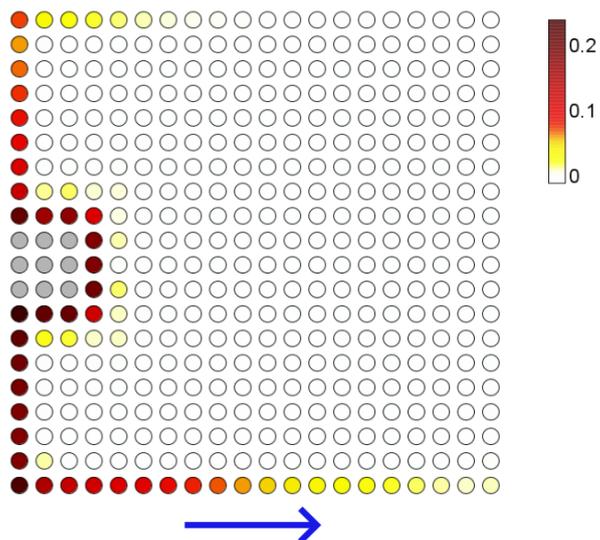


図2：実空間においては、端状態は図のような端に局在した波として現れます。図中の色は波の振幅に対応しています。このような波は一方向（矢印の向き）にのみ試料端を伝搬します。また左側の灰色で示した部分は試料の欠陥を表していますが、このような欠陥がある場合にも端状態の波は散乱されることなく端を伝搬します。さらに本研究で提案した端状態は、その振幅を増幅しながら伝搬することができます。

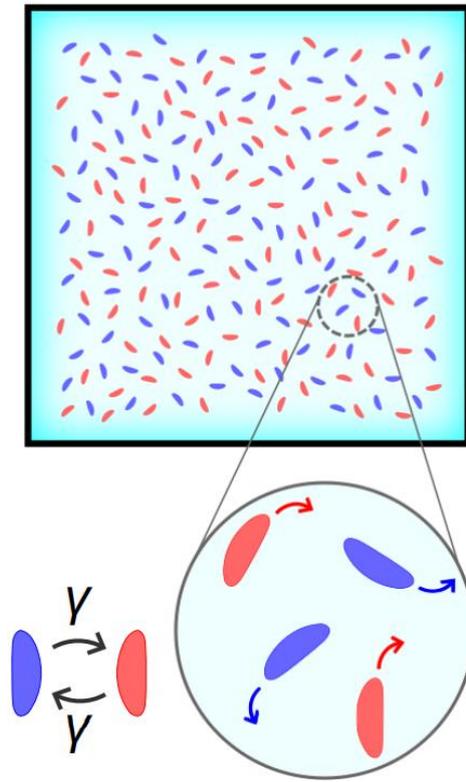


図3： バクテリアなどの自ら動き回る粒子の集団を用いて、本研究で提案した端状態が実現できる可能性があります。本研究では左回り、右回りに回転するような粒子を混ぜた状況を解析しました。