

結晶の対称性を反映した新しい原理の超伝導整流現象を発見  
—エネルギー損失の極めて小さい電子回路の実現に向けた新たな可能性—

1. 発表者：

板橋 勇輝（東京大学 大学院工学系研究科物理工学専攻 博士課程3年）

井手上 敏也（東京大学 大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター 助教  
／JST さきがけ研究者）

星野 晋太郎（埼玉大学 大学院理工学研究科 助教）

後藤 千裕（研究当時：東京大学 工学部物理工学科）

並木 宏允（研究当時：東京工業大学 科学技術創成研究院フロンティア材料研究所 博士  
研究員（JST-CREST））

笹川 崇男（東京工業大学 科学技術創成研究院フロンティア材料研究所 准教授）

岩佐 義宏（東京大学 大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター／  
物理工学専攻 教授／理化学研究所 創発物性科学研究センター 創発デバイ  
ス研究チーム チームリーダー）

2. 発表のポイント：

- ◆ 空間反転対称性（注 1）の破れた超伝導体において、磁場や磁性を必要としない新しい原理の整流特性（注 2）を発見。
- ◆ 整流特性が結晶構造を反映していることを実証するとともに、微視的機構を提案。
- ◆ 本研究成果が、空間反転対称性の破れた超伝導体における新機能を開拓すると同時に、エネルギー損失の極めて小さい電子回路の実現へ向けた新たな知見となることに期待。

3. 発表概要：

東京大学大学院工学系研究科の板橋勇輝大学院生、同研究科物理工学専攻の井手上敏也助教、岩佐義宏教授（理化学研究所 創発物性科学研究センター創発デバイス研究チーム チームリーダー兼任）らの研究グループは、埼玉大学や東京工業大学のグループと共同で、空間反転対称性の破れた3重回転対称性（注 3）を有する層状超伝導体  $\text{PbTaSe}_2$ （鉛（Pb）、タンタル（Ta）、セレン（Se）から構成される単結晶）が、外部磁場や磁気秩序が存在しない条件下でも巨大な整流特性を示すことを発見した。

空間反転対称性の破れた結晶において実現する物質固有の整流特性は、一つの均質な物質中で生じるという点で、従来の半導体 p-n 接合における整流現象とは本質的に異なる。また、超伝導をはじめとする特徴的な状態を示す物質へも応用が可能であるため、超伝導ダイオード効果（注 4）等のユニークな機能を実現するための有力な原理となり得る。しかしながら、そのような物質固有の整流特性は、これまで外部磁場や磁気秩序が存在する時間反転対称性（注 5）の破れた条件下で報告がなされており、時間反転対称性を持つ超伝導体における整流現象は未開拓であった。

本研究では、 $\text{PbTaSe}_2$  の常伝導状態（超伝導を示さない状態）及び超伝導状態の両方において外部磁場を必要としない整流特性を初めて観測し、整流特性が結晶対称性を反映していることや超伝導状態において整流効果が常伝導状態と比べて大きく増大することを発見した。さらに、

3 回回転対称性を持った超伝導体中での超伝導ボルテックス-アンチボルテックス（注 6）の運動を定式化することで、時間反転対称条件下での超伝導整流特性の新原理を提案した。

本研究成果は、空間反転対称性の破れた超伝導体における新規輸送現象の開拓を推進すると同時に、外部磁場を必要としない整流特性という新たな機能性実現への有用な知見になると期待される。

本研究成果は、3 月 29 日（英国夏時間）に英国科学雑誌『*Nature Communications*』にオンライン掲載された。

本研究は、科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業 さきがけ研究領域「トポロジカル材料科学と革新的機能創出（課題番号：JPMJPR19L1）」、CREST 研究領域「二次元機能性原子・分子薄膜の創製と利用に資する基盤技術の創出（課題番号：JPMJCR16F2）」、科研費「基盤研究 S（課題番号：JP19H05602）」、「基盤研究 B（課題番号：JP19H01819）」、公益財団法人矢崎科学技術振興記念財団奨励研究助成の支援により実施された。

#### 4. 発表内容：

##### ①背景

一般に空間反転対称性の破れた物質では、電流の正負によって電気抵抗が異なる整流特性が期待される。このような物質に固有の整流特性は、従来の半導体 p-n 接合におけるダイオード特性とは違い一つの均質な物質中で生じる現象であるため、固体が示すさまざまな特徴的状态においても実現可能である。特に最近、超伝導相で物質に固有の整流特性が実現されることがいくつかの空間反転対称性の破れた超伝導体で発見され、超伝導ダイオードへの応用や微視的機構に注目が集まっている。しかしながら、これまで超伝導の整流現象は、外部磁場や磁気秩序等が共存するような時間反転対称性の破れた物質でのみ報告されており、時間反転対称性を有する超伝導体における整流現象は原理的には実現可能であると期待されるものの報告例はなかった。

##### ②研究内容

本研究では、3 回回転対称性を持つ層状超伝導体である  $\text{PbTaSe}_2$ （図 1A、図 2A）において、外部磁場を必要としない物質固有の整流特性を測定した（図 1B）。その結果、常伝導状態（超伝導を示さない状態）及び超伝導状態の両方において結晶対称性を反映した特徴的整流現象を観測すると同時に、超伝導状態においてその大きさが常伝導状態よりも大きく増大することを発見した（図 2B）。さらに、観測された超伝導整流現象を解釈するために、3 回回転対称性を持った超伝導体中でのボルテックス-アンチボルテックスの運動を定式化し、その運動の非対称性が超伝導整流特性を生み出すという超伝導ダイオードの新原理を提案した。これにより、整流現象が超伝導ボルテックスの詳細なダイナミクスを反映した輸送現象であり、空間反転対称性の破れた超伝導体の励起状態やボルテックスダイナミクスを理解する重要な手法になり得ることが示唆された。

##### ③今後の展望

本研究では空間反転対称性の破れた超伝導体である  $\text{PbTaSe}_2$  において、外部磁場を必要としない整流特性を観測し、巨大な超伝導整流特性を発見するとともに、その微視的な機構を明らかにした。このような整流特性は、空間反転対称性が破れた超伝導体に普遍的な現象であり、

今後さまざまな空間反転対称性の破れた超伝導体における整流現象の観測や機構の解明が期待される。また本研究成果は、エネルギー損失の極めて小さい電子回路の実現に向けた新しい知見と可能性を提示するだけでなく、空間反転対称性の破れた超伝導体における新奇超伝導物性や機能性の開拓を推進するものと期待される。

## 5. 発表雑誌：

雑誌名：「*Nature Communications*」（オンライン版：3月29日）

論文タイトル：Giant second harmonic transport under time-reversal symmetry in a trigonal superconductor

著者：Y. M. Itahashi, T. Ideue\*, S. Hoshino, C. Goto, H. Namiki, T. Sasagawa, Y. Iwasa

DOI 番号：10.1038/s41467-022-29314-4

## 6. 問い合わせ先：

<研究に関すること>

東京大学 大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター  
助教 井手上 敏也（いでうえ としや）

東京大学 大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター  
教授 岩佐 義宏（いわさ よしひろ）

（理化学研究所創発物性科学研究センター創発デバイス研究チーム チームリーダー）

東京工業大学 科学技術創成研究院フロンティア材料研究所  
准教授 笹川 崇男（ささがわ たかお）

<JST 事業に関すること>

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  
嶋林 ゆう子（しまばやし ゆうこ）

<報道に関すること>

東京大学 大学院工学系研究科 広報室

科学技術振興機構 広報課

理化学研究所 広報室 報道担当

東京工業大学 総務部 広報課

埼玉大学 広報渉外室 広報係

## 7. 用語解説：

注1：空間反転対称性

空間座標の符号を反転するような操作（原点に関して点対称な点に移すような操作）のことを空間反転操作と呼ぶが、そのような操作を行っても状態が不変であるときは空間反転対称性が

あると呼ばれる。整流特性の発現には空間反転対称性が破れている（対称ではなくなる）ことが必要である。

注2： 整流特性

電流をある方向に流す場合とそれとは逆方向へ流す場合で電気伝導特性が異なる現象。p 型半導体と n 型半導体を接合したダイオード素子で実現することがよく知られている。近年そのような半導体 p-n 接合が無くても、空間反転対称性の破れた結晶において物質に固有な整流特性が生じ得ることが明らかとなり、さまざまな物質での実証や機構の解明が進展している。

注3： 回転対称性

ある軸の周りに特定の角度だけ回したときに、変化しないような状態を持つ性質。3 回回転対称性はある軸の周りに 120 度回しても変わらない、正三角形が持つような対称性である。

注4： 超伝導ダイオード効果

固体中に電流を流す場合に、ある方向には超伝導状態（電気抵抗がゼロの状態）を示し、逆向きには有限の抵抗を示すような現象。

注5： 時間反転対称性

空間座標の符号を変えずに、時間座標の符号を反転するような操作（時間の流れを逆転させるような操作）を時間反転操作と呼ぶが、そのような操作をしても状態が変化しないとき、時間反転対称性があると呼ばれる。磁場やスピンは円環電流と等価であるため、外部磁場を印加した状態や磁気秩序が存在する物質では時間反転対称性が破れている。

注6： ボルテックス-アンチボルテックス

一般に超伝導体内部では磁束が排斥されるが（マイスナー効果）、第二種超伝導体と呼ばれる超伝導体は外部磁場を増加させていくことで、内部に量子化された磁束の侵入が可能となる。これをボルテックスと呼ぶ。一方、磁場が印加されていない超伝導体においてもボルテックスと、それと逆向きの量子化された磁束であるアンチボルテックスが対生成することが可能である。主に2次元超伝導体で顕著に現れるが、超伝導転移温度近傍や大きな電流を流した条件下では層状物質においてもそのような励起が存在すると考えられる。

8. 添付資料：

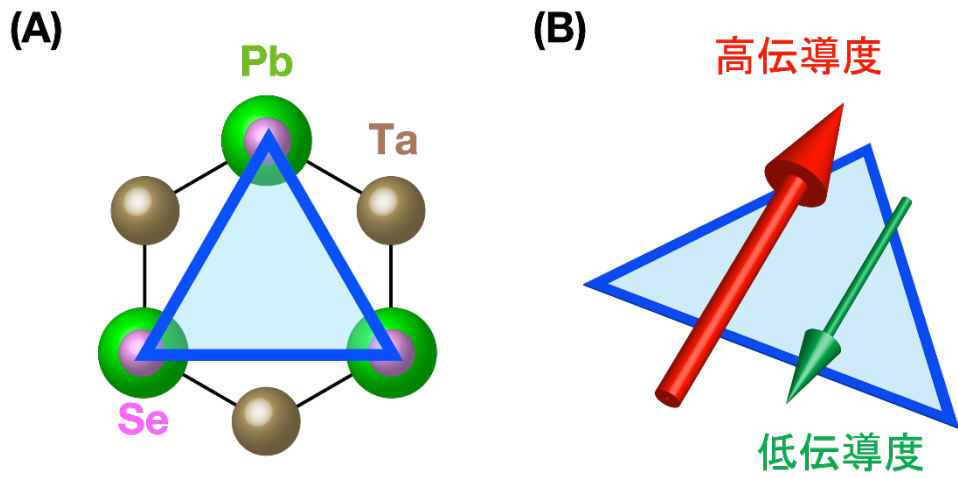


図1. (A)  $\text{PbTaSe}_2$  の結晶構造の模式図（上面図）。3回回転対称性を有する空間反転対称性の破れた構造を持つ。

(B) 3回回転対称性を有する物質での整流現象の模式図。

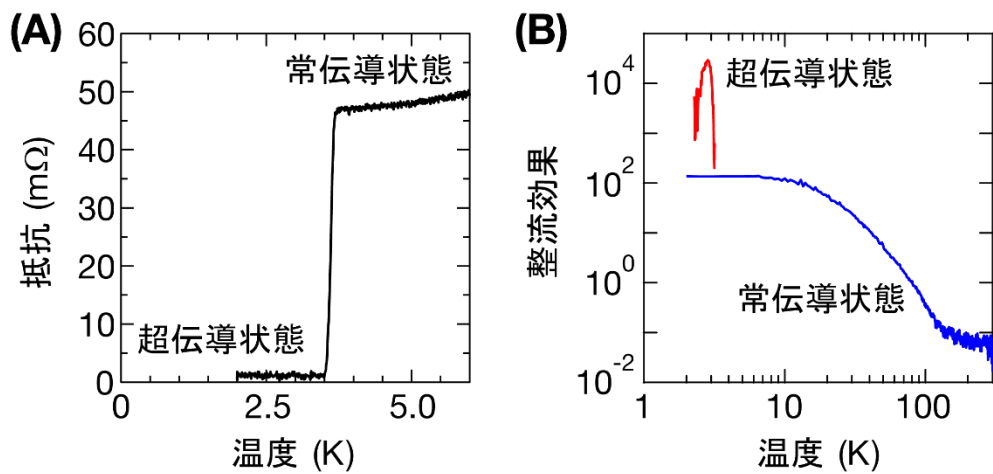


図2.  $\text{PbTaSe}_2$  における超伝導転移 (A) 及び超伝導状態と常伝導状態における整流特性 (B)