

2025 年 5 月 14 日



分野：自然科学系

キーワード：鉄系超伝導体、ダイオード効果、ボルテックス、スピン軌道相互作用

鉄系超伝導体を用いて 強磁場下で超伝導ダイオード効果を観測 —ボルテックスに由来する整流効果の仕組みを解明—

【研究成果のポイント】

- ◆ 超伝導状態を比較的維持しやすい鉄系超伝導体であるセレン化・テルル化鉄を用いることで、強い磁場の中において、超伝導ダイオード効果(超伝導状態と常伝導状態が電流の向きで切り替わる現象)の観測に成功
- ◆ これにより、ダイオード特性の磁場・温度依存性を広い範囲で調べることが可能となり、本物質における超伝導ダイオード効果の物理的起源を解明
- ◆ 超伝導体の基礎物性の理解につながるだけでなく、磁場や温度揺らぎに強い超伝導素子開発への展開に期待

❖ 概要

大阪大学大学院理学研究科の小林友祐さん(当時博士前期課程 2 年)、塩貝純一准教授、松野丈夫教授、東北大学金属材料研究所の野島勉准教授らの共同研究グループは、鉄系超伝導体のひとつであるセレン化・テルル化鉄 $\text{Fe}(\text{Se}, \text{Te})$ を用いることで、数～十数テスラの強磁場において、超伝導ダイオード効果^{※1}を示す超伝導素子を実現しました。

$\text{Fe}(\text{Se}, \text{Te})$ は、母物質である FeSe と比較して高い超伝導臨界パラメータ^{※2}と強いスピン軌道相互作用^{※3}を示すことが知られていますが、これまで本物質のこれらの特徴を活かした超伝導ダイオード効果の報告例はありませんでした。本素子の実現によって、ダイオード特性の広範囲な磁場・温度依存性を明らかにするとともに、この超伝導ダイオード効果の起源が、スピン軌道相互作用によって非対称化されたボルテックス(超伝導量子化渦)のピン止め効果^{※4}によることを突き止めました。

これらの研究成果によって、これまで様々な超伝導物質で報告されている超伝導ダイオード効果についての理解が進むだけでなく、磁場や温度揺らぎに強い超伝導素子の開発への展開が期待されます。

本研究成果は、英国科学誌「Communications Physics」に、5 月 12 日(月)(日本時間)に公開されました。

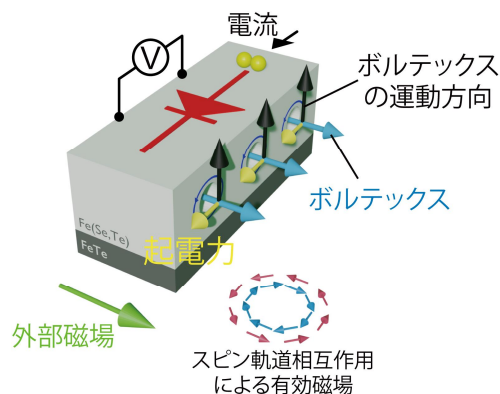


図1:スピン軌道相互作用とボルテックスの結合による整流効果の概念図

❖ 研究の背景

一般に、超伝導体に臨界電流以上の大きな電流を流すと、超伝導状態(電気抵抗 = ゼロ)が破壊され、常伝導状態(電気抵抗 $\neq$ ゼロ)になります。空間反転対称性が破れた超伝導体では、磁場中など特殊な環境において、臨界電流が電流や磁場の方向に依存する「超伝導ダイオード効果」が観測されます。電流を流す方向によって、超伝導状態と常伝導状態の切り替えが可能であることから、超伝導の基礎物性としての興味だけではなく、優れた整流素子として将来の超伝導回路への応用の観点からも注目されています。

一方で、その特性向上に重要な物理的な機構については、物質中のスピン軌道相互作用による内因性機構や、試料構造、試料形状、及び試料中の欠陥形状の非対称性による外因性機構が提案されていますが、統一的な理解に至っていません。これまで様々な超伝導物質や薄膜素子において、超伝導ダイオード効果が観測されているものの、臨界電流を評価できる温度・磁場範囲が限定されており、物理的機構の理解に必要なダイオード特性の詳細な温度・磁場依存性が顕わに示されていませんでした。

❖ 研究の内容

研究グループは、超伝導臨界パラメータが比較的大きく、かつスピン軌道相互作用が強い超伝導体として知られる Fe(Se,Te)を用いた薄膜素子を作製し、広い温度・磁場範囲で臨界電流の研究を行いました(図 2(a))。その結果、1~15 テスラもの強い磁場中において、「超伝導ダイオード効果」の観測に成功しました(図 2(b))。また、別の実験において、スピン軌道相互作用の大きさの指標となる2次高調波抵抗の磁場・温度依存性を評価し、これらを超伝導ダイオード効果の結果と比較することで、ダイオード効率^{※5}と2次高調波抵抗の間に磁場や温度に依らないスケーリング則(比例関係)が成り立つことを発見しました。このことは、超伝導ダイオード効果の発現機構がスピン軌道相互作用に由来するボルテックスの非対称なピン止め効果であることを示唆する結果であり、本研究で初めて明らかになった知見です。

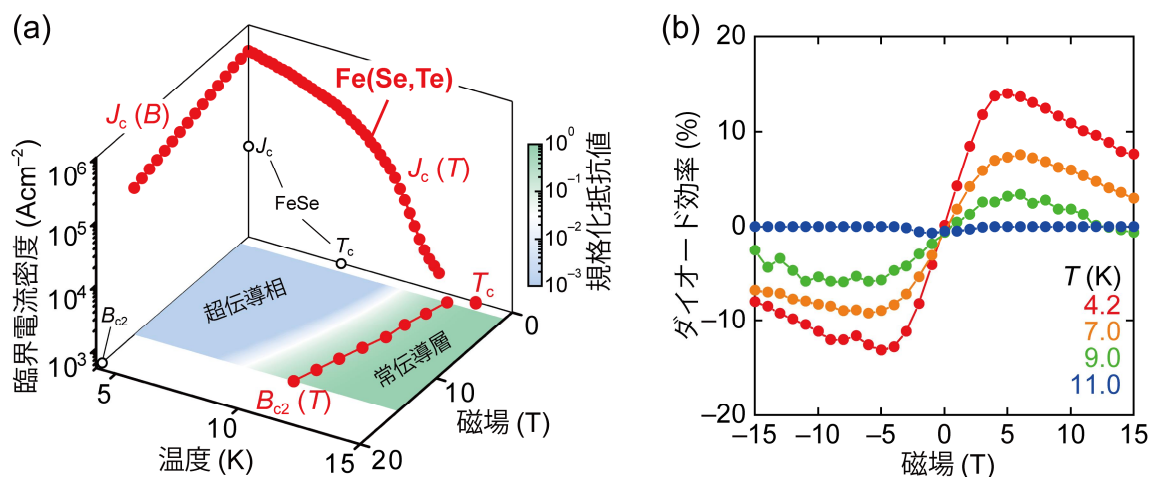


図 2(a) Fe(Se,Te)薄膜素子における超伝導転移温度 T_c 、臨界電流密度 J_c の磁場 B 及び温度 T 依存性、臨界磁場 B_{c2} の温度依存性。(b) ダイオード効率の磁場・温度依存性。4.2~9.0K(−268.95 ~ −264.15℃)の各温度(T)において、15 T までの大きな磁場まで超伝導ダイオード効果を示すことがわかった。

❖ 本研究成果が社会に与える影響(本研究成果の意義)

これまで様々な超伝導物質で観測されている超伝導ダイオード効果ですが、本研究成果により、超伝導ダイオード効果についての物理的な理解が進み、外部磁場や温度揺らぎに強い超伝導を使った整流素子開発への展開が期待されます。

❖ 特記事項

本研究成果は、2025 年 5 月 12 日(月)(日本時間)に英国科学誌「Communications Physics」(オンライン)に掲載されました。

タイトル: “A scaling relation of vortex-induced rectification effects in a superconducting thin-film heterostructure”

著者名: Yusuke Kobayashi, Junichi Shiogai, Tsutomu Nojima, and Jobu Matsuno

DOI: <https://doi.org/10.1038/s42005-025-02118-w>

なお、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(JPMJPR21A8) の一環として行われました。

❖ 用語説明

※1 超伝導ダイオード効果

超伝導状態から常伝導状態に変化する臨界電流が、電流方向に依存する効果。これまで、空間反転対称性が破れた超伝導物質や薄膜素子で観測されています。抵抗が電流方向に依存する半導体のダイオード効果とのアナロジーから、超伝導ダイオード効果と呼ばれています。交流の電力を直流に変換する整流素子への応用が期待されています。

※2 超伝導臨界パラメータ

超伝導体(抵抗がゼロになる物質)では、超伝導転移温度以下で十分に大きな磁場や電流を印加すると、常伝導状態(有限の抵抗を示す状態)になります。このような常伝導へ転移するのに必要な臨界磁場や臨界電流密度の総称を超伝導臨界パラメータと呼びます。

※3 スピン軌道相互作用

相対論的な効果によって、電子が運動方向に依存した有効磁場を感じる効果。

※4 ボルテックスのピン止め効果

第二種超伝導体と呼ばれる超伝導体では、ある一定以上の磁場を印加すると、超伝導体内部に渦電流を伴う量子化された磁束が侵入します。これをボルテックス(超伝導量子化渦)と呼びます。通常、超伝導体に電流を流すと、ボルテックスが電流から力を受け(ローレンツ力)、運動を始めます。この運動に伴って、電流方向に電圧が生じ、超伝導状態が破壊されます。一方、試料内部に欠陥がある場合、ピン止め効果(欠陥位置に止まろうとする性質)によって、ボルテックスの運動が止められ、超伝導状態が維持されます。このピン止め効果が空間的に非対称な場合は、電流方向(つまりボルテックスの運動方向)に依存した電圧が生じることになり、これが超伝導ダイオード効果として観測されます。

※5 ダイオード効率

超伝導ダイオード効果のダイオード効率は、正方向の臨界電流 I_c^+ と負方向の臨界電流 I_c^- の差 ($I_c^+ - I_c^-$) を両者の和 ($I_c^+ + I_c^-$) で割った値として定義されます。

❖ **参考 URL**

塩貝 純一 准教授 研究者総覧

URL <https://rd.iai.osaka-u.ac.jp/ja/f071bbb2dbdf4724.html>

❖ **本件に関する問い合わせ先**

<研究に関するお問い合わせ>

大阪大学 大学院理学研究科 准教授 塩貝 純一(しおがい じゅんいち)

TEL: 06-6850-5374 FAX: 06-6850-5376

E-mail: junichi.shiogai.sci[at]osaka-u.ac.jp

<広報に関するお問い合わせ>

大阪大学 理学研究科 庶務係

TEL: 06-6850-5280 FAX: 06-6850-5288

E-mail: ri-syomu[at]office.osaka-u.ac.jp

東北大学 金属材料研究所 情報企画室広報班

TEL: 022-215-2144 FAX: 022-215-2482

E-mail: press.imr[at]grp.tohoku.ac.jp

科学技術振興機構 広報課

TEL: 03-5214-8404 FAX: 03-5214-8432

E-mail: jstkoho[at]jst.go.jp

<JST 事業に関するお問い合わせ>

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)

TEL: 03-3512-3526 FAX: 03-3222-2066

E-mail: presto[at]jst.go.jp