

1. 氏名	井手上敏也
2. 所属機関	東京大学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
3. 研究題目	新奇空間反転対称性の破れた超伝導体における整流効果
4. 研究の目的:	<p>本研究では、近年新しく発見された空間反転対称性の破れた超伝導体である、2次元 SrTiO<sub>3</sub> 界面電界誘起超伝導と3次元3回対称超伝導体 PbTaSe<sub>2</sub> に着目し、それらにおける結晶対称性の破れを反映した超伝導整流現象の研究を行い、微視的機構の解明や応答巨大化への指針を得ることを目的とする。</p> <p>従来の半導体接合構造を必要としない、空間反転対称性が破れた物質が固有に持つ整流性（電流が順方向には電流が流れやすく、逆方向には流れにくい性質）である非相反電荷輸送現象は、最近発見された新規輸送現象であるため、微視的機構や応答の詳細な振る舞い、物質の電子状態や格子状態との関連性等、不明な点も多く、学術的知見から興味を持たれる。特に超伝導状態における整流性は、古くから研究されてきた空間反転対称性の破れた超伝導体におけるクーパ対の性質や超伝導ボルテックスのダイナミクスとの関係だけでなく、近年発展してきた低次元超伝導における特異な電子状態にも関連する重要なトピックである。加えて、超伝導電流は散逸が極めて小さいため、整流性を一つの物質で行えることは、超伝導流の新奇制御技術の構築という側面を持っており、省エネルギーエレクトロニクスに向けた重要な技術として、研究の推進が強く望まれる。</p> <p>本研究では、上述した新奇超伝導体における非線形応答を研究することにより、対称性の破れに起因した超伝導整流現象の普遍性の検証や機構解明を行うと同時に、応答の巨大化に関する指針を得て、本現象の有望性を実証することを目指す。</p>
5. 研究の内容(手法、経過、評価など。書ききれない場合には、同一様式のページを追加してください。):	<p>一般に空間反転対称性の破れた系では、電気抵抗が電流値に依存することが知られており、これが、本研究で対象としている物質固有の整流性（電流が順方向には電流が流れやすく、逆方向には流れにくい性質）と呼んでいる輸送現象である。この時、観測する電圧は電流の二乗に比例するため、一種の非線形効果と捉えることができ、特定の周波数（例えば 13Hz）の電流を印加した場合に、その倍の周波数（26Hz）の周波数を持つ電圧シグナルを観測することで、この整流特性を精密に測定することができる。</p> <p>実験では、近年新しく発見された空間反転対称性の破れた超伝導体である、2次元 SrTiO<sub>3</sub> 界面電界誘起超伝導と3次元3回対称超伝導体 PbTaSe<sub>2</sub> において、この交流電気伝導測定における倍波検出技術を用いた整流性観測を行い、その詳細な温度依存性や磁場依存性、電流方位依存性等を調べた。</p> <p>2次元 SrTiO<sub>3</sub> 界面電界誘起超伝導における整流特性研究では、従来の電界効果トランジスタにおける固体ゲート絶縁膜をイオン液体に置き換えることによって、界面に強大な電場とそれに付随する多量のキャリアを誘起できるゲート手法を用いて、先行研究で報告されている2次元界面電界誘起超伝導を実現し、界面の巨大な電場を反映した極性構造に起因する超伝導の整流特性の観測を行った。超伝導相だけでなく、常伝導相でも整流特性を観測し、それぞれの大きさや温度・磁場依存性の振る舞いを比較した。</p> <p>3次元3回対称超伝導体 PbTaSe<sub>2</sub> における整流特性研究では、層状化合物である PbTaSe<sub>2</sub> を、スコッチテープを用いた劈開手法を用いて剥片化することで、結晶ドメインが単一であると期待できる、幅数マイクロメートル、厚さ 100 ナノメートル程度のデバイスを作製して、3回対称に起因する整流特性を測定した。超伝導整流特性の大きさや温度・磁場依存性の振る舞いをだけでなく、詳細な電流値依存性も調べ、微視的機構の考察を行うと同時に、2次元3回対称超伝導体 MoS<sub>2</sub> における整流特性との比較を行い、3回対称超伝導体における整流特性の包括的理解を試みた。</p>

6. 研究の成果と結論、今後の課題:

2次元 SrTiO<sub>3</sub> 界面電界誘起超伝導における整流特性研究では、イオン液体を用いて SrTiO<sub>3</sub> 界面に電気二重層構造 (EDLT) (図 1(a)) を作り、極性構造を持つ 2 次元電界誘起金属・超伝導状態を実現した (図 2(a))。この手法では、イオンの半径程度という界面の非常に小さい領域に高電圧がかかるため、通常の電界効果トランジスタと比べて 10 倍以上の高キャリアを界面に誘起することが可能である。

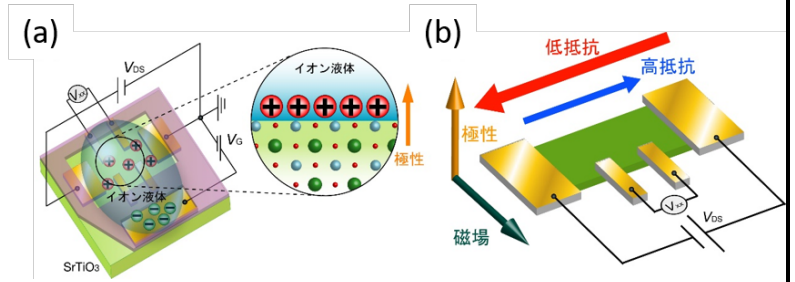


図 1. SrTiO<sub>3</sub>-EDLT(a) 及び整流特性の模式図 (b)

得られた極性 2 次元電子系の常伝導状態および超伝導状態の両方において、極性構造に起因する整流特性 (図 1(b)) を測定することに成功し、超伝導状態における整流特性の大きさが常伝導状態のときと比べて 1,000,000 倍に巨大化されることを発見した (図 2(b))。

加えて、整流特性の温度依存性を詳細に調べることにより、電荷揺らぎと超伝導ボルテックスの運動という 2 種類の異なる発現機構による整流特性が存在しており、それらが温度に応じて移り変わることを明らかにした (図 2(b))。

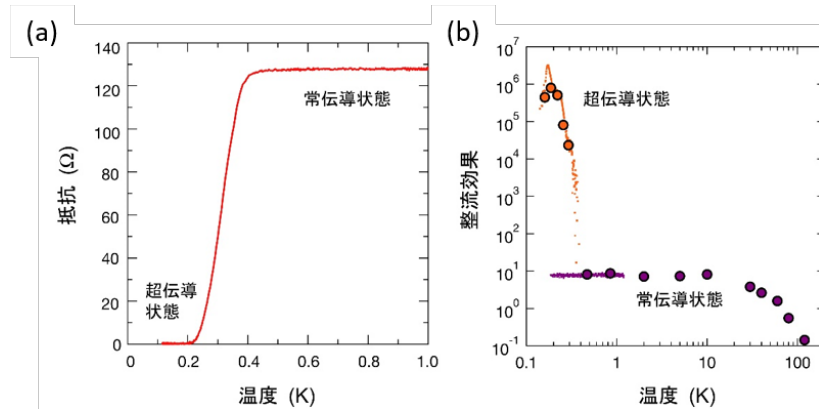


図 2. SrTiO<sub>3</sub>-EDLT の超伝導転移 (a) 及び超伝導相と常伝導相における整流特性 (b)

3 次元 3 回対称超伝導体 PbTaSe<sub>2</sub> における整流特性研究では、3 回対称性に起因した超伝導の整流性を観測し、空間反転対称性の破れた超伝導体特有のボルテックスのラチェット効果によって説明できることを明らかにした。類似の超伝導整流効果は 2 次元 3 回対称超伝導体 MoS<sub>2</sub> においても観測することができたが、超伝導の次元性を反映したボルテックスのダイナミクスやピンニングポテンシャルの大きさが整流性の大きさや振る舞いに大きく影響を与えることを見出した。さらに、非相反伝導の符号が電流の大きさや磁場によって符号変化することを見出し、超伝導ボルテックス間の相互作用や多体効果が非相反伝導に本質的であることを明らかにした。

以上の成果は、超伝導の新たな機能性の開拓を推進するだけでなく、物質固有の整流特性が、空間反転対称性の破れた超伝導体の特徴的電子・磁気的狀態を理解する上で極めて有用なプローブであることを示した点で意義があると考えられる。

今後、空間反転対称性の破れた超伝導体における磁場下整流特性の研究をさらに推進し、他の空間反転対称性の破れた超伝導体における整流現象の普遍性の実証や新規メカニズムを持つ整流特性の探索と機構解明に取り組むと同時に、本研究で取り組んだような磁場を必要とする整流特性だけでなく、時間反転対称性が保たれた条件でも発現する無磁場下整流特性といった新現象の開拓にも挑戦していく予定である。

## 7. 成果の価値

### 7.1\_学術的価値:

固体中の空間反転対称性の破れに起因する整流特性は、最近発見された現象であるため、いくつかの限られた系で限定的に報告されているだけであり、特に、超伝導の整流特性は、その微視的機構や詳細な振る舞い等不明な点が多かった。本研究では、極性構造や3回対称性という比較的シンプルな空間反転対称性の破れた超伝導体において整流特性が普遍的に生じることを実証できた。さらに、超伝導の整流特性が、超伝導ボルテックスのダイナミクスやクーパー対の対称性、超伝導の電子状態と深く関連しており、これらを調べる非常に有用なプローブになり得ることを明らかにした。本研究の成果（新規超伝導体における整流性の観測と機構解明）は、固体中の非線形伝導研究を飛躍的に進展させると同時に、空間反転対称性の破れた超伝導や低次元超伝導研究の重要な知見になると期待される。

### 7.2\_社会的価値:

固体中の電流の大きさや方向の制御は、エレクトロニクスにおける様々な機能性を実現する上で要となる技術である。一般的に、電流の方向制御や整流性を実現するためには、半導体接合構造やマイクロ構造等、人工的な構造の作製が必須であったが、本研究で対象とした物質が固有に持つ整流特性を用いると、これまでに固体中で人工構造を作ることによって実現されていた機能を一つの物質だけで極めて簡便に行える可能性がある。特に、超伝導流は散逸が極めて小さいため、その巨大な整流性の発見と電流の大きさや磁場方位による指向性のスイッチングの実現という本研究結果は、超伝導流の新たな制御技術の構築という側面を持ち、将来の省エネルギーエレクトロニクスの確立と技術革新に向けた重要な成果になり得ると考えられる。

### 7.3\_研究成果:

#### ・「研究論文」

1. Y. M. Itahashi, T. Ideue, Y. Saito, S. Shimizu, T. Ouchi, T. Nojima, and Y. Iwasa  
Nonreciprocal transport in gate-induced polar superconductor SrTiO<sub>3</sub>  
*Science Advances*, **6**, eaay9120 (2020).
2. Y. M. Itahashi, Y. Saito, T. Ideue, T. Nojima, and Y. Iwasa  
Quantum and classical ratchet motions of vortices in a 2D trigonal superconductor  
*Physical Review Research*, in press.

#### ・「国際会議発表」

1. Toshiya Ideue, “Nonlinear electric and optical responses in van der Waals nanostructures”, Superstripes 2019, 2019/6/24 (招待講演)
2. Toshiya Ideue, “Nonlinear transport as a probe of electronic states and vortex dynamics in two-dimensional superconductors”, Lorentz center workshop “The Challenge of 2-Dimensional Superconductivity”, 2019/7/10 (招待講演)
3. Toshiya Ideue, Yoshihiro Iwasa, “Nonlinear current responses in van der Waals nanomaterials”, RECENT PROGRESS IN GRAPHENE & 2D MATERIALS RESEARCH 2019, 2019/10/7
4. Toshiya Ideue, Anomalous photovoltaic effect in noncentrosymmetric van der Waals nanostructures, Max Planck-UBC-UTokyo Centre for Quantum Materials 2019 Workshop, 2019/12/9 (招待講演)

#### ・「受賞」

1. 井手上敏也、第18回船井研究奨励賞、公益財団法人船井情報科学振興財団、2019年4月
2. 井手上敏也、第14回日本物理学会若手奨励賞、日本物理学会、2020年3月

#### ・「マスコミ報道」

東大・理研・東北大など、極性超伝導体における巨大整流特性を発見 2020/3/28

[https://www.nikkei.com/article/DGXLRSF531761\\_W0A320C2000000/](https://www.nikkei.com/article/DGXLRSF531761_W0A320C2000000/)