

令和 4 年 5 月 17 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01819

研究課題名(和文)空間反転対称性の破れた結晶における非相反電荷輸送現象

研究課題名(英文)Nonreciprocal charge transport in noncentrosymmetric crystals

研究代表者

井手上 敏也 (Ideue, Toshiya)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・助教

研究者番号：90757014

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、様々な空間反転対称性の破れた結晶において、対称性の破れを反映した整流特性である非相反伝導現象の研究を行い、本現象の普遍性の実証や微視的機構の解明を通して、固体中非線形電流応答の学理構築に取り組んだ。特に、極性構造を持つ電解誘起超伝導や3回回転対称性を持つ超伝導において磁場印加条件下で巨大な非相反伝導現象が生じることや、異なる超伝導整流性の機構が存在することを見出した。また、物質固有の整流現象を磁場や磁性が存在しないような場合に拡張し、そのような時間反転対称条件下でも2次の非線形伝導が生じることを発見し、電荷や超伝導ボルテックスの非対称散乱との関係性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で発見した様々な種類の非相反伝導は、散乱現象や波動関数の幾何学的性質、超伝導の対称性やボルテックスの運動等と密接に関係しており、固体中の特徴的電子状態や電荷ダイナミクスを理解する上で非相反伝導現象が強力な手法になり得ることが強く示唆された。また、非相反伝導は物質固有の整流性であり、従来の接合構造を必要としないため、固体中の様々な相に適応可能であるという特徴を持っている。特に、電流の正負によってゼロ抵抗と有限抵抗が切り替わるような超伝導ダイオード効果への展開が開けた点は有意義であり、今後、さらなる新奇整流現象の発見や散逸が極めて小さなデバイス構築への知見を得られることが期待される。

研究成果の概要(英文)：We studied the nonreciprocal charge transport (intrinsic rectification effect reflecting the symmetry breaking) in various noncentrosymmetric crystals and clarified their microscopic origins. Especially, we successfully observed the crossover of the nonreciprocal superconducting magneto-transport with different mechanisms and found that nonreciprocal charge transport can be a powerful probe of parity symmetry, superconducting fluctuation effect, and vortex dynamics. We also discovered the intrinsic rectification effect under time reversal symmetry in a trigonal superconductor, which offers a new principle of bulk rectification effect and superconducting diode effect. The present results pave the way for investigating new properties and functionalities in noncentrosymmetric crystals

研究分野：物性物理学

キーワード：非相反電荷輸送現象 非線形伝導 二次元物質 超伝導 非線形ホール効果 整流性

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 電流の2次の非線形効果である非相反電荷輸送現象は、電気伝導が電流の正負の方向によって異なる現象であり、半導体接合構造を必要としない、空間反転対称性の破れた物質が固有に持つ整流性と言える。

(2) 最近では、非相反輸送と時間反転対称性の役割や散乱、電子相関、波動関数の幾何学、対称の自発的破れ等との関連性も指摘・議論されており、物理学の重要な概念の多くに関係したトピックの一つである。

(3) しかしながら、まだ報告例も限られており、現象の普遍性や応答の詳細な振る舞い、微視的機構の種類等、不明な点も多かった。

2. 研究の目的

以上を踏まえて、本研究では、様々な空間反転対称性の破れた結晶において、電流の2次の非線形応答である、非相反電荷輸送現象の研究を行い、本現象の普遍性の実証や微視的機構の解明を通して、固体中非線形電流応答の学理構築を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

(1) イオンミリング処理や劈開法を用いて SrTiO₃ や MoS₂、PbTaSe₂ の微小試料やデバイスを準備し、必要に応じてイオン液体を用いたゲート印加手法等を組み合わせることにより、空間反転対称性の破れた超伝導体のデバイスを作製した。

(2) 作製した空間反転対称性の破れた超伝導体のデバイスにおいて、対称性の破れを反映した非相反輸送現象が生じるか否かを、入力交流電流の倍周波成分の電圧 $V^{2\omega}$ (およびそれを電流で割った2次の非線形抵抗 $R^{2\omega}$) を測定することにより検証し、その電流方位依存性や電流値依存性、磁場依存性等の詳細な振る舞いを調べた。

(3) 観測された非相反伝導の結果から、その微視的機構や電子状態、超伝導揺らぎに関する知見を深めた。

4. 研究成果

(1) イオン液体を用いたゲート印加手法によって物質の表面に多量のキャリアを集積させることで実現された SrTiO₃ 表面の2次元電子系(図1(a)、イオン液体との界面に極性構造を有する)や、3重回転対称性を有する超伝導体である MoS₂ 表面電界誘起超伝導および PbTaSe₂ (図1(b)) において、それぞれの空間反転対称性の破れを反映した磁場下整流現象を測定し、非相反伝導現象が空間反転対称性の破れた超伝導体に普遍的な現象であることを明らかにした。

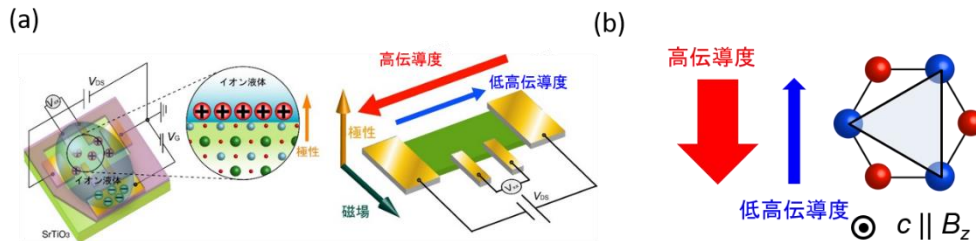


図1. 空間反転対称性の破れた超伝導体と磁場下非相反伝導現象の模式図。

(a) SrTiO₃ 表面2次元電子系。イオン液体界面に極性構造を有する。

(b) MoS₂ 表面電界誘起超伝導および PbTaSe₂。

正三角形の対称性の空間反転対称性の破れた構造を持つ。

(2) SrTiO₃ 表面2次元電子系においては、常伝導相(図2(a))と超伝導相(図2(b))の両方において、極性構造に特有の(電流と面内磁場が垂直な時にのみ生じる)非相反伝導の観測に成功した。また、非相反伝導が超伝導のゆらぎ領域で常伝導相に比べて大きく増大することを見出した(図2(b)のピーク構造および図2(c)低温領域)。さらに、超伝導のゆらぎ領域における非相反

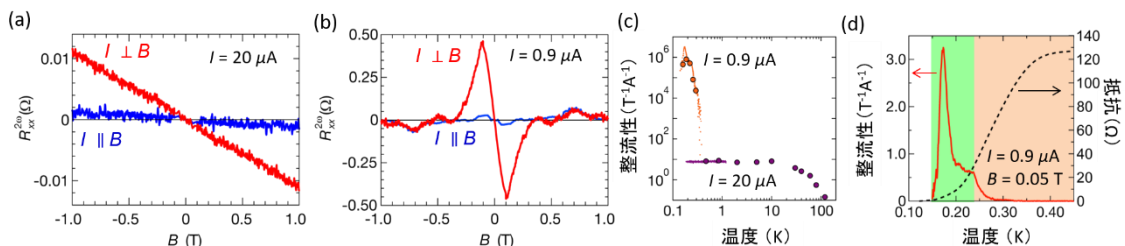


図2. SrTiO₃ 表面2次元電子系における非相反伝導。(a) 常伝導相および(b) 超伝導相における非相反伝導の磁場依存性と(c, d) 温度依存性

伝導にも温度依存性の振る舞いが異なる2つの機構が存在することを発見し(図2(d)の緑領域と橙領域)、超伝導の秩序変数の振幅揺らぎに由来するパラ伝導度と位相揺らぎに起因するボルテックスの運動によって説明できることを明らかにした。

(3) MoS₂ 電界誘起超伝導相や PbTaSe₂ の超伝導相では、面直磁場を印加した場合に、電流がジグザグ方向の時には電流と平行な方向に(図3(a))、電流がアームチェア方向の時には電流と垂直な方向に(図3(b))現れるような、3回回転対称性を持つ結晶に特有の非相反伝導を観測した。非相反伝導の大きさは、SrTiO₃ の場合と同様に、超伝導のゆらぎ領域で大きく増大し(図3のピーク構造)、面直磁場によって超伝導体中で生じているボルテックスの非対称運動(図4(b)挿入図)に起因することが分かった。

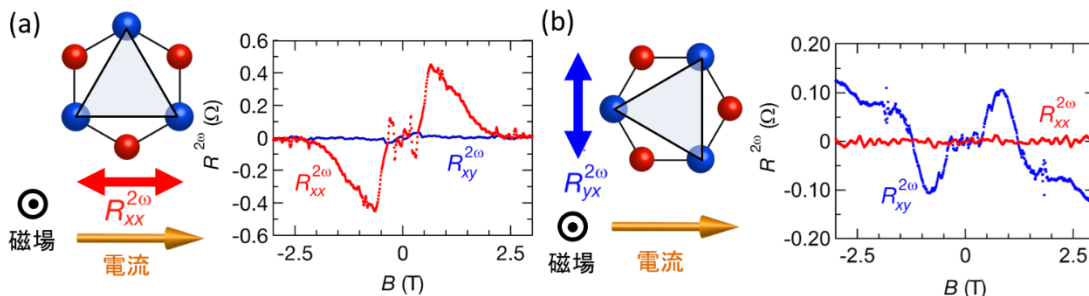


図3. MoS₂ 電界誘起超伝導相における非相反伝導の電流方位依存性。電流を(a)ジグザグ方向と(b)アームチェア方向へ流した場合の非相反伝導の磁場依存性。

(4) 特に MoS₂ 電界誘起超伝導相における非相反伝導に関して、抵抗が有限でも非相反伝導が生じていない領域がある(図4(a)低磁場領域)ことを見出した。これは、低温低磁場の量子的な揺らぎが支配的な領域ではボルテックスの運動は生じているが、大きな非相反伝導を生じさせるような古典的な非対称運動は抑えられていることを示唆しており、非相反伝導測定がボルテックスのダイナミクスを調べる極めて強力な手法になり得る(図4(b)ボルテックス相図)ことを示している。

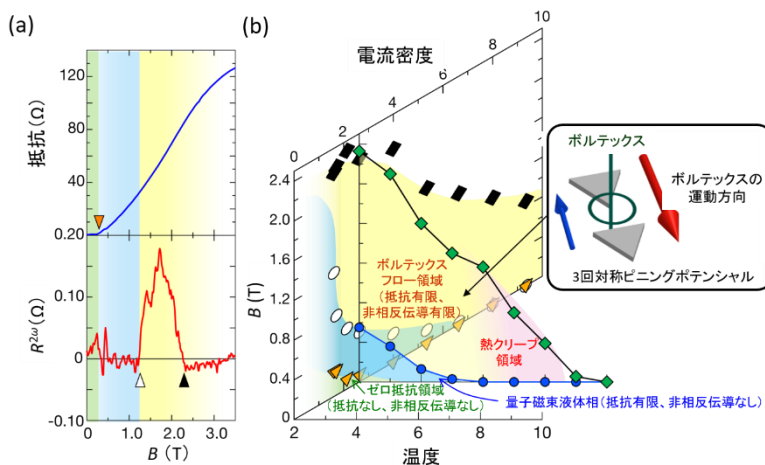


図4. (a) MoS₂ 超伝導相の抵抗(上)と非相反伝導(下)の磁場依存性。(b) 非相反伝導から得られた MoS₂ のボルテックス相図。

(5) さらに、PbTaSe₂ において磁場を印加しないような時間反転対称条件下でも整流性や非線形ホール効果が生じることを発見した。無磁場下では、電流がジグザグ方向あるいはアームチェア方向の場合に整流性はアームチェア方向へ生じ(図5.(a))、その大きさは超伝導相近傍で大きく増大する様子が観測された(図5.(b))。これまで物質固有の整流性は、磁場印加下や磁気秩序を有するような時間反転が破れた条件で報告されてきたが、本研究で初めて時間反転対称条件下でも生じること、また整流性の振る舞いがボルテックスとアンチボルテックスの運動の非対称運動によって理解できることが明らかになった。

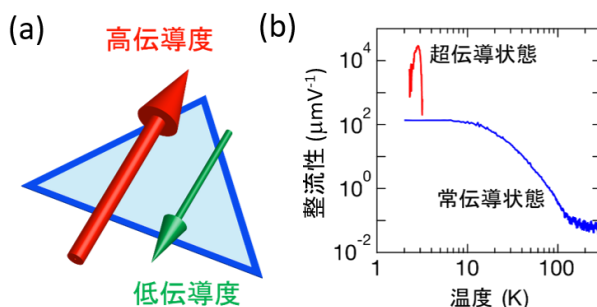


図5. (a) PbTaSe₂ の時間反転対称下整流性の模式図 (b) 時間反転対称下整流性の温度依存性

(6) 以上の結果は、非相反伝導が空間反転対称性の破れた伝導体において普遍的な現象であると同時に、散乱現象、超伝導の対称性や揺らぎ、ボルテックスの運動等と密接に関係しており、固体中の特徴的電子状態や電荷ダイナミクスを理解する上で非相反伝導測定が強力な手法になることを示している。今後さらに多彩な非相反伝導現象の発見と理解の進展が期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Yuki M. Itahashi, Toshiya Ideue, Shintaro Hoshino, Chihiro Goto, Hiromasa Namiki, Takao Sasagawa, and Yoshihiro Iwasa	4. 巻 13
2. 論文標題 Giant second harmonic transport under time-reversal symmetry in a trigonal superconductor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1659
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-022-29314-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Y. M. Itahashi, Y. Saito, T. Ideue, T. Nojima, and Y. Iwasa	4. 巻 2
2. 論文標題 Quantum and classical ratchet motions of vortices in a two-dimensional trigonal superconductor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 23127
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.2.023127	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 M. Onga, Y. Sugita, T. Ideue, Y. Nakagawa, R. Suzuki, Y. Motome, and Y. Iwasa	4. 巻 20
2. 論文標題 Antiferromagnet-Semiconductor Van Der Waals Heterostructures: Interlayer Interplay of Exciton with Magnetic Ordering	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 4625-4630
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acs.nanolett.0c01493	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 T. Ideue, S. Koshikawa, H. Namiki, T. Sasagawa, and Y. Iwasa	4. 巻 2
2. 論文標題 Giant nonreciprocal magnetotransport in bulk trigonal superconductor PbTaSe2	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 042046(R)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.2.042046	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 T. Akamatsu, T. Ideue, L. Zhou, Y. Dong, S. Kitamura, M. Yoshii, D. Yang, M. Onga, Y. Nakagawa, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. Laurienzo, J. Huang, Z. Ye, T. Morimoto, H. Yuan, and Y. Iwasa	4. 巻 372
2. 論文標題 A van der Waals interface that creates in-plane polarization and a spontaneous photovoltaic effect	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 68-72
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.aaz9146	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 T. Ideue, and Y. Iwasa	4. 巻 12
2. 論文標題 Symmetry Breaking and Nonlinear Electric Transport in van der Waals Nanostructures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Annual Review of Condensed Matter Physics	6. 最初と最後の頁 201-223
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1146/annurev-conmatphys-060220-100347	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. J. Zhang, T. Ideue, M. Onga, F. Qin, R. Suzuki, A. Zak, R. Tenne, J. H. Smet, and Y. Iwasa	4. 巻 570
2. 論文標題 Enhanced intrinsic photovoltaic effect in tungsten disulfide nanotubes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 349-353
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-019-1303-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Toshiya Ideue, Motoaki Hirayama, Hiroaki Taiko, Takanari Takahashi, Masayuki Murase, Takashi Miyake, Shuichi Murakami, Takao Sasagawa, Yoshihiro Iwasa	4. 巻 116
2. 論文標題 Pressure-induced topological phase transition in noncentrosymmetric elemental tellurium	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America	6. 最初と最後の頁 25530-25534
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.1905524116	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuki M. Itahashi, Toshiya Ideue, Yu Saito, Sunao Shimizu, Takumi Ouchi, Tsutomu Nojima, Yoshihiro Iwasa	4. 巻 6
2. 論文標題 Nonreciprocal transport in gate-induced polar superconductor SrTiO ₃	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eaay9120
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.aay9120	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計28件(うち招待講演 21件/うち国際学会 15件)

1. 発表者名 Toshiya Ideue
2. 発表標題 Emergent polarization and intrinsic photovoltaic effect in symmetry-engineered van der Waals interface
3. 学会等名 Japan-Italy joint workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井手上敏也
2. 発表標題 ファンデルワールスナノ物質の対称性と整流現象
3. 学会等名 分子性固体オンラインセミナー (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Ideue, T. Akamatsu, L. Zhou, Y. Dong, S. Kitamura, M. Yoshii, D. Yang, M. Onga, Y. Nakagawa, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. Larienzo, J. Huang, Z. Ye, T. Morimoto, H. Yuan, and Y. Iwasa
2. 発表標題 Bulk photovoltaic effect in WSe ₂ /Black Phosphorus interfaces
3. 学会等名 第82回 応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井手上敏也
2. 発表標題 ナノ物質の対称性制御とトポロジカル輸送
3. 学会等名 2021年度 CREST/さきがけ「トポロジー」領域 連携公開シンポジウム “トポロジカル科学の現在と未来” (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toshiya Ideue
2. 発表標題 Intrinsic photovoltaic response in symmetry-engineered van der Waals heterointerfaces
3. 学会等名 5th EU-Japan Workshop on Graphene and Related 2D Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toshiya Ideue
2. 発表標題 Nonlinear superconducting transport and vortex dynamics in noncentrosymmetric nanomaterials
3. 学会等名 7th International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toshiya Ideue
2. 発表標題 Symmetry-engineered van der Waals interface with in-plane polarization and bulk photovoltaic effect
3. 学会等名 EP2DS-24/MSS-20 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Ideue, T. Akamatsu, L. Zhou, Y. Dong, S. Kitamura, M. Yoshii, D. Yang, M. Onga, Y. Nakagawa, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. Larienzo, J. Huang, Z. Ye, T. Morimoto, H. Yuan, and Y. Iwasa
2. 発表標題 Bulk photovoltaic effect in van der Waals hypermaterials
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toshiya Ideue
2. 発表標題 Emergent transport properties in superconducting tungsten disulfide nanotubes
3. 学会等名 Electronic Materials and Applications 2022 (EMA2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toshiya Ideue
2. 発表標題 Emergent polarization and spontaneous photovoltaic effect at transition metal dichalcogenide/Black Phosphorus interface
3. 学会等名 9th International Workshop on 2D Materials (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toshiya Ideue
2. 発表標題 Enhanced photovoltaic effect in symmetry-engineered van der Waals nanostructures
3. 学会等名 APS March Meeting 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toshiya Ideue
2. 発表標題 Anomalous thermal transport in insulators
3. 学会等名 International Conference on Thermodynamics and Thermal Metamaterials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井手上敏也
2. 発表標題 固体中の反転対称性の破れと非線形量子輸送現象
3. 学会等名 ISSPワークショップ「量子物質研究の最近の進展と今後の展望」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toshiya Ideue
2. 発表標題 Bulk photovoltaic effect in van der Waals heterointerfaces
3. 学会等名 International Meeting on Thin Film Interfaces and Composite Crystals (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井手上敏也
2. 発表標題 ファンデルワールス結晶界面における対称性制御と物性開拓
3. 学会等名 新世代研究所 2020年度第1回スピントロニクス科学研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井手上敏也
2. 発表標題 ファンデルワールスハイパーマテリアルの対称性と物性
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toshiya Ideue, Takatoshi Akamatsu, Ling Zhou, Sota Kitamura, Masaru Onga, Yuji Nakagawa, Joseph Laurienzo, Junwei Huang, Takahiro Morimoto, Hontao Yuan, Yoshihiro Iwasa
2. 発表標題 Anomalous photocurrent response in van der Waals heterointerface
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井手上敏也, 赤松孝俊, Zhou Ling, 北村想太, 恩河大, 中川裕治, Joseph Laurienzo, Junwei Huang, 森本高裕, Hongtao Yuan, 岩佐義宏
2. 発表標題 ファンデルワールスヘテロ界面におけるバルク光起電力効果の積層角度依存性
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井手上敏也, 赤松孝俊, Zhou Ling, Yu Dong, 北村想太, 吉井真央, Dongyang Yang, 恩河大, 中川裕治, 渡邊賢司, 谷口尚, Joseph Laurienzo, Junwei Huang, Ziliang Ye, 森本高裕, Hongtao Yuan, 岩佐義宏
2. 発表標題 ファンデルワールスヘテロ界面におけるバルク光起電力効果
3. 学会等名 第68回 応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toshiya Ideue
2. 発表標題 Nonlinear electric and optical responses in van der Waals nanostructures
3. 学会等名 Superstripes 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshiya Ideue
2. 発表標題 Nonlinear transport as a probe of electronic states and vortex dynamics in two-dimensional superconductors
3. 学会等名 Lorentz center workshop "The Challenge of 2-Dimensional Superconductivity" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井手上敏也
2. 発表標題 ファンデルワールストポロジカル半金属における非線形伝導
3. 学会等名 第11回トポロジー連携研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井手上敏也
2. 発表標題 原子層物質における非相反伝導
3. 学会等名 第80回 応用物理学会秋季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井手上敏也
2. 発表標題 2次元物質におけるバレー・スピン物性
3. 学会等名 2019年日本表面真空学会学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshiya Ideue
2. 発表標題 Anomalous photovoltaic effect in noncentrosymmetric van der Waals nanostructures
3. 学会等名 Max Planck-UBC-UTokyo Centre for Quantum Materials 2019 Workshop（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井手上敏也
2. 発表標題 空間反転対称性の破れたファンデルワールス結晶における非相反伝導
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井手上敏也
2. 発表標題 極性半導体および超伝導ナノチューブにおける非相反磁気輸送
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toshiya Ideue, Yoshihiro Iwasa
2. 発表標題 Nonlinear current responses in van der Waals nanomaterials
3. 学会等名 RECENT PROGRESS IN GRAPHENE & 2D MATERIALS RESEARCH 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
中国	南京大学			
カナダ	ブリティッシュコロンビア大学			
ドイツ	マックスプランク研究所			
イスラエル	ホロン工科学院研究所	ワイツマン科学研究所		