

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 24 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2022

課題番号：18K13484

研究課題名（和文）多端子ジョセフソン接合の多次元位相空間における動的なトポロジカル物性

研究課題名（英文）Dynamical property of topological physics in multi-dimensional space of superconducting phase at multi-terminal Josephson junction

研究代表者

横山 知大 (Yokoyama, Tomohiro)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・講師

研究者番号：40708525

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：多端子ジョセフソン接合におけるジョセフソン効果の拡張を提案した。超伝導位相が増えることで2端子系とは質的に異なる物性が創発される。

4端子系の場合、トポロジカルに保護されたワイル特異点が現れる。本研究では、電氣的に接合を制御することで、ワイル特異点の連続的な移動と対生成・対消滅をとまうトポロジカル相転移を明らかにした。その際、ワイル特異点が閉・開軌道を示し、異なるトポロジカル相転移が動的に現れることを提案した。3端子の結合ジョセフソン接合では、電流位相関係が非対称になり、制御可能なジョセフソンダイオード効果が得られた。本成果はスピン軌道相互作用などに依らずに物性を創発するという学理を開いた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では超伝導体の数を3つ以上に拡張した多端子ジョセフソン接合における創発物性を解明した。多端子化によって、トポロジカル相、異常ジョセフソン効果、ジョセフソンダイオード効果などが創発されている。これらは多端子ジョセフソン接合ではなくとも現れるが、スピン軌道相互作用などの物質パラメータを必要とする。本成果は物質パラメータを必要とせず、純粋にナノ構造化による物性創発であり、さらに自在な制御を可能としている。これらは物質探索では不可能な特性をナノテクノロジーによって到達できることを示唆しており、学術的意義に加えて科学技術的・社会的意義も非常に大きい成果である。

研究成果の概要（英文）：We have proposed extensions of the Josephson effect in multi-terminal Josephson junctions. Owing to the addition of superconducting phases, we have obtained qualitatively different properties from two-terminal junctions.

In the case of four-terminal junctions, topologically protected Weyl singular points are emerged. In this study, by tuning the structure electrically, the Weyl points move continuously. They are pari-created and pari-annihilated accompanying with the topological phase transition. The Weyl points draw open and closed trajectories, which indicates a dynamical classification of topological phase transitions. For three-terminal case, we have obtained an asymmetric current-phase relation, hence a controllable Josephson diode effect is achieved. These results indicates an emergent physics without spin-orbit interaction or particular materials, which open an aspect of artificial quantum physics.

研究分野：メソスコピック物理

キーワード：ジョセフソン効果 多端子系 トポロジカル物性 ワイル特異点 異常ジョセフソン効果 ジョセフソンダイオード効果

### 1. 研究開始当初の背景

ジョセフソン接合は2つの超伝導体で絶縁体や常伝導体をはさんだ構造で、超伝導体の量子位相によって超伝導電流が駆動されるジョセフソン効果が得られる。本研究の舞台である多端子ジョセフソン接合はこの超伝導体の数を2つから3つ以上に増やした系である。多端子接合では、超伝導位相差が端子数に応じて複数個定義され、ジョセフソン効果も拡張される。研究代表者は4端子ジョセフソン接合において、定義される3つの位相差による3次元空間を考え、系のエネルギースペクトルであるアンドレーエフスペクトルにワイル特異点が創発されることを明らかにしていた。

ワイル特異点は、トポロジカル物質であるワイル半金属のエネルギーバンドに現れるバンドの接触点で、トポロジカル電荷と呼ばれる幾何学的空間中の電荷を持つ。この電荷のために突然消えることがなく、異符号のトポロジカル電荷を持つワイル特異点が重なる場合にのみ消滅する。この様なトポロジカル状態の発現には強いスピン軌道相互作用が必要となるが、多端子ジョセフソン接合の場合、その様な条件を必要とせずワイル特異点が発現する。

この多端子ジョセフソン接合におけるワイル特異点に関する研究は研究代表者が世界で初めて報告したが、その発現条件などはまだ理解が不十分である。

### 2. 研究の目的

本研究では、多端子ジョセフソン接合に創発するワイル特異点の発現条件の探索と、3次元のトポロジカル物質では不可能なトポロジカル相の連続的な制御に着目した。多端子ジョセフソン接合の常伝導領域にいくつかの量子ポイントコンタクト(QPC)構造などのナノ構造を導入し、その電氣的制御によって接合中の電子伝導特性を連続的に変調する。この変調によって、3次元位相差空間中のアンドレーエフスペクトルに創発するワイル特異点の位置が移動する。4端子系や5端子系において、制御可能なパラメータであるQPC構造のゲート電圧や位相差を変調することで、特異点の移動に伴う物理を明らかにする。このパラメータ制御による動的トポロジカル物性の解明が1つ目の目的である。

さらに、多端子系で得られる異常ジョセフソン効果、ジョセフソンダイオード効果を明らかにした。通常、ジョセフソン効果における超伝導電流と位相差の関係は奇関数の振る舞いとなっている。従って、位相差がない場合、超伝導電流はゼロである。しかし、スピン軌道相互作用と磁場、または強磁性体による交換相互作用がある場合、電流位相関係は奇関数からずれ、位相差がゼロであるにも関わらず超伝導電流が有限となる場合がある。これを異常ジョセフソン効果と呼ぶ。また、このずれによってジョセフソン電流の最大値が向きによって異なるダイオード効果が得られる。これらの発現にはスピン軌道相互作用が必要である。しかし、多端子ジョセフソン接合では、接合自体の空間構造と超伝導位相そのものによる時間反転対称性の破れによって、スピン軌道相互作用などの物質パラメータを必要とせず異常ジョセフソン効果・ジョセフソンダイオード効果の発現が期待される。本研究では、多端子接合によるそれらの定量的評価と実験測定との比較を目的として、研究を進めた。その他にも、ワイル特異点とは別のゼロエネルギー状態の有無などを議論した。

以上の研究を達成することで、ジョセフソン接合の多端子化が単なる拡張ではない、質的に新しい物理現象を創発可能な舞台であることを提示することが本研究の目的である。

### 3. 研究の方法

計算手法としては、散乱行列によって系を記述するモデルに基づく手法と系の空間構造を考慮する tight-binding 模型による手法を使い分けて研究を進めた。

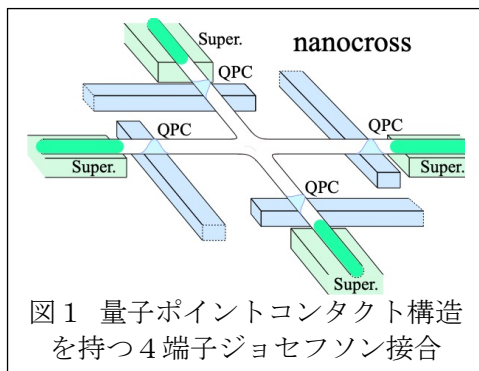
ワイル特異点の制御と動的トポロジカル物性に関する研究では散乱行列に基づいた計算手法を用いた。複数の散乱行列を結合することで、多次元の散乱行列に制御パラメータを導入した。

多端子構造における異常ジョセフソン効果やダイオード効果の発現に関しては、アンドレーエフ束縛状態の空間的な重なりが重要となる。そのために系の空間構造を考慮する必要があり、tight-binding 模型に基づいて研究を進めた。

### 4. 研究成果

多端子ジョセフソン接合のアンドレーエフスペクトルに創発するワイル特異点について、その電氣的制御を議論した。図1のように、QPC構造によるポテンシャル障壁によって電子の伝導特性が制御可能なジョセフソン接合を考え、ワイル特異点が創発される場合に、ポテンシャル障壁の電氣的によって特異点が位相差空間を移動することを明らかにした。

4端子系の場合に、1つのQPC構造を徐々に閉じていき、実効的に3端子系に近づける場合を考える。



3端子系では、位相の自由度が足りないためにワイル特異点は発現しない。従って、QPC 構造によって結合が切断されている(透過率が  $T_3 = 0$ ) 場合、必ずトリビアル相となる。透過率を  $T_3 = 0$  から大きくしていくと、4端子系としてワイル特異点が生じ、トポロジカル相に相転移する(図2)。さらに透過率  $T_3$  を大きくするとワイル特異点は移動し、あるところで再度重なって対消滅する。この対生成・対消滅の過程は4つの特異点で閉じた軌道をとる場合と(図2左)と開いた軌道(図2右)に分類される。これは

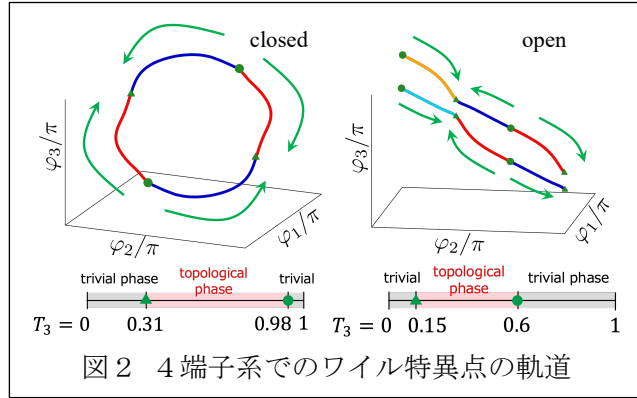


図2 4端子系でのワイル特異点の軌道

はワイル特異点を持つトポロジカル電荷によって生成されるベリー曲率場、およびその積分であるチャーン数の変化を追跡することで異なる状態であることが分かる。つまり、パラメータを固定した状況でのトポロジカル相・トリビアル相の分類に加え、パラメータを掃引した際の相転移の動的な振る舞いを分類できることを示している。

5端子系の場合に、追加された4つ目の位相差  $\phi_4$  を制御パラメータとして、ワイル特異点の移動と対生成・対消滅を調べる。図5は  $\phi_4$  を掃引した場合の特異点の軌道とトポロジカル相転移である。透過率の制御とは異なり位相差は周期的なパラメータであるため、単調増加に対して周期的なトポロジカル相転移が得られる。位相差の単調増加は端子間のバイアス電圧による交流ジョセフソン効果によって実行可能である。従って、定電圧による周期的トポロジカル相転移が得られる。

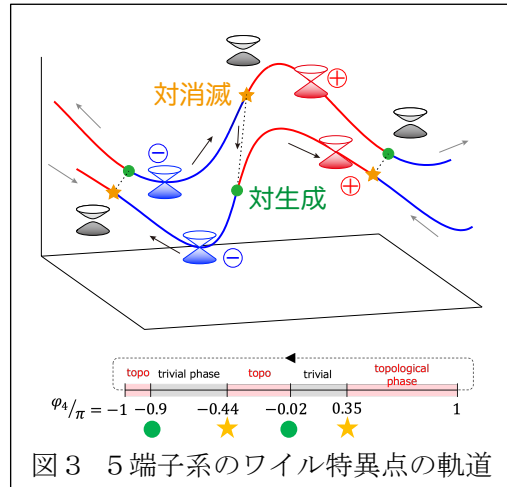


図3 5端子系でのワイル特異点の軌道

以上の成果を現在、投稿論文として執筆中である。

超伝導領域を共有した2つのジョセフソン接合を考える(図4)。このような系を結合ジョセフソン接合と呼ぶ。結合ジョセフソン接合は3端子系に含まれる。結合ジョセフソン接合が3端子系としてはたらくためには、共有する超伝導領域におけるアンドレーエフ束縛状態の波動関数のしみ出しが他方の束縛状態にまで届き、波動関数の結合が得られる必要がある。従って、共有する超伝導領域の長さがコヒーレンス長よりも十分に長い場合、3端子系としてはたらない。コヒーレンス長と同程度かそれ以下の場合、例えば図4のJJUにおけるジョセフソン効果にJJLの位相差が非局所的に影響する。この非局所位相  $\phi_2 \neq 0$  は系の時間反転対称性を破る。また、系の形状によって空間反転対称性が破れている。この2つの対称性の破れのためにJJUの電流位相関係は奇関数からずれ、異常ジョセフソン効果  $I(-\phi_1, \phi_2) \neq -I(\phi_1, \phi_2)$  が発現する(図5)。さらに、その際の臨界電流、ジョセフソン電流の最大値は電流方向に依存するジョセフソンダイオード効果を示す(図6)。多くの先行研究では、異常ジョセフソン効果とダイオード効果はスピン軌道相互作用を必要とし、その発現には材料選択が必要となる。しかし、結合ジョセフソン接合における異常ジョセ

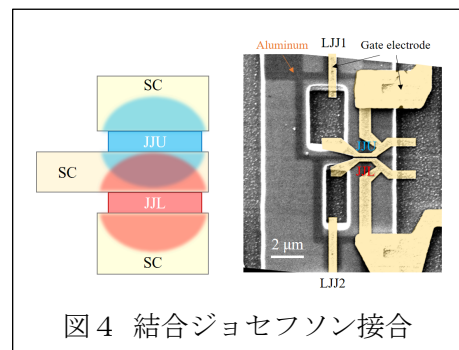


図4 結合ジョセフソン接合

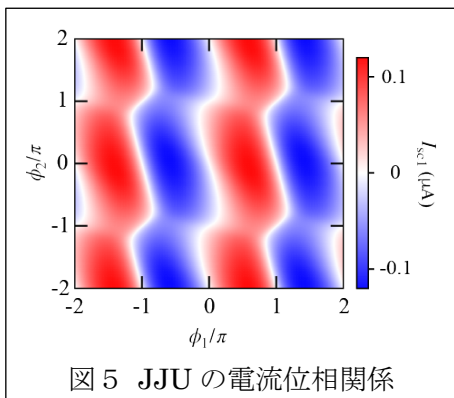


図5 JJUの電流位相関係

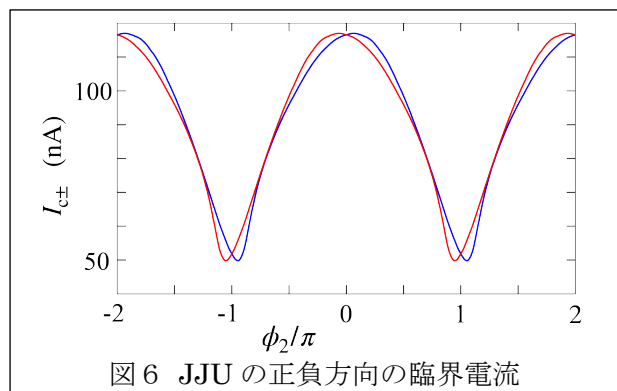


図6 JJUの正負方向の臨界電流

フゾン効果とダイオード効果はスピン軌道相互作用を必要としない。つまり、多端子化によって物性が発現している。この様な「多端子化による物性創発」は4端子系において発現するトポロジカルに保護されたワイル特異点でも得られており、多端子構造が多様な可能性を持っていることを示唆している。

結合ジョセフソン接合では、2つの常伝道領域におけるアンドレーエフ束縛状態が結合し、アンドレーエフ分子を形成する。結合ジョセフソン接合は3端子系であり、ゼロ磁場下のアンドレーエフ分子もゼロエネルギー点を持たない。しかし、強いスピン軌道相互作用がはたらく場合、非局所位相によって時間反転対称性が破れるため、スピン軌道相互作用が有効磁場としてはたらく。その結果、アンドレーエフ分子のゼロエネルギー点を得られる。InAsを用いた実験においてもこのゼロエネルギー点を得られており、強いスピン軌道相互作用の効果が確認される。

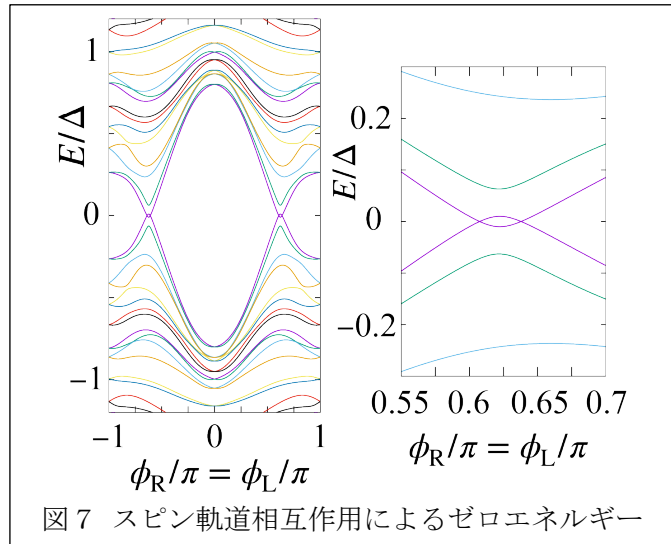


図7 スピン軌道相互作用によるゼロエネルギー

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Tomohiro Yokoyama, Masayuki Iio, Takashi Kinoshita, Takeshi Inaoka, and Hajime Ishihara	4. 巻 105
2. 論文標題 Comprehensive microscopic theory for coupling of individual and collective excitations via longitudinal and transverse fields	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 165408
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.105.165408	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 Kenta Kato, Tomohiro Yokoyama, and Hajime Ishihara	4. 巻 19
2. 論文標題 Functionalized High-Speed Magnon Polaritons Resulting from Magnonic Antenna Effect	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 34035
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevApplied.19.034035	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 Yukihiko Tao, Tomohiro Yokoyama, and Hajime Ishihara	4. 巻 31
2. 論文標題 Rotational dynamics of indirect optical bound particle assembly under a single tightly focused laser	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 3804-3820
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.479643	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 Yen-En Liu, Xu Shi, Tomohiro Yokoyama, Soshun Inoue, Yuji Sunaba, Tomoya Oshikiri, Quan Sun, Mamoru Tamura, Hajime Ishihara, Keiji Sasaki, and Hiroaki Misawa	4. 巻 17
2. 論文標題 Quantum-Coherence-Enhanced Hot-Electron Injection under Modal Strong Coupling	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 8315-8323
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acsnano.2c12670	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 Sadashige Matsuo, Takaya Imoto, Tomohiro Yokoyama, Yosuke Sato, Tyler Lindemann, Sergei Gronin, Geoffrey C. Gardner, Sho Nakosai, Yukio Tanaka, Michael J. Manfra, Seigo Tarucha	4. 巻 2303
2. 論文標題 Phase-dependent Andreev molecules and superconducting gap closing in coherently coupled Josephson junctions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 10540
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48550/arXiv.2303.10540	査読の有無 無
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 該当する

1. 著者名 Sadashige Matsuo, Takaya Imoto, Tomohiro Yokoyama, Yosuke Sato, Tyler Lindemann, Sergei Gronin, Geoffrey C. Gardner, Michael J. Manfra, Seigo Tarucha	4. 巻 2305
2. 論文標題 Engineering of anomalous Josephson effect in coherently coupled Josephson junctions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 6596
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48550/arXiv.2305.06596	査読の有無 無
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 該当する

1. 著者名 Sadashige Matsuo, Takaya Imoto, Tomohiro Yokoyama, Yosuke Sato, Tyler Lindemann, Sergei Gronin, Geoffrey C. Gardner, Michael J. Manfra, Seigo Tarucha	4. 巻 XX
2. 論文標題 Josephson diode effect derived from short-range coherent coupling	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Physics	6. 最初と最後の頁 accepted
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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

〔学会発表〕 計19件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Tomohiro Yokoyama, Sho Tamaki, and Hajime Ishihara
2. 発表標題 Enhanced Inelastic Scattering of Photons in Remote-coupled Optomechanical Systems
3. 学会等名 The International Symposium on Novel maTerials and quantum Technologies 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomohiro Yokoyama, Ryogo Yoshida, Takeo Kato, Hajime Ishihara
2. 発表標題 Emission and Absorption of Single Photon by a Controller Artificial Atom in the Waveguide Quantum Electrodynamics System
3. 学会等名 The International Symposium on Novel maTerials and quantum Technologies 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田龍悟、横山知大、中村由里、加藤岳生、石原一
2. 発表標題 導波路QED系に結合した人工原子の動的制御による光子転送
3. 学会等名 第32回光物性研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 埜 幸宏、横山 知大、石原 一
2. 発表標題 複数の円偏光集光ビーム照射による安定な金属ナノ粒子の配列形成
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 宮崎優成、加藤健太、横山知大、石原一
2. 発表標題 強磁性体球のマグノン-ポラリトンとその電磁波散乱の外部磁場による制御
3. 学会等名 日本物理学会・2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹村建人、横山知大、石原一
2. 発表標題 散乱行列のパラメータ制御による多端子ジョセフソン接合に創発するワイル特異点の操作
3. 学会等名 日本物理学会・2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤 健太、横山 知大、石原 一
2. 発表標題 マグノンの非局所電磁応答理論による例外点の伴わないLevel Attraction
3. 学会等名 日本物理学会・第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 埜 幸宏、横山 知大、石原 一
2. 発表標題 複数ナノ粒子群に対する一般化Optical Bindingとナノ粒子配列への応用
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 玉木 翔、横山 知大、石原 一
2. 発表標題 機械結合オプトメカニクス系における非弾性散乱光の増強
3. 学会等名 第31回光物性研究会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 加藤 健太、横山 知大、石原 一
2. 発表標題 層間磁気双極子相互作用によるマグノン-ポラリトンのスピン流制御
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 玉木 翔、横山 知大、石原 一
2. 発表標題 機械結合した共振器オプトメカニクス系におけるサイドバンド光増強
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 吉田 龍悟、横山 知大、中村 由里、加藤 岳生、石原 一
2. 発表標題 1次元配列されたcircuit-QED系での光子の時間波形における緩和の効果
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 加藤 健太、横山 知大、石原 一
2. 発表標題 層間マグノン-マグノン相互作用を介した薄膜中の高速マグノン-ポラリト
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 玉木 翔、横山 知大、石原 一
2. 発表標題 結合共振器オプトメカニクスにおけるフォノン転送に起因したサイドバンド増強のスイッチング
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加藤 健太、横山 知大、石原 一
2. 発表標題 強磁性体多層構造におけるマグノン間相互作用を介したマグノン-ポラリトンの群速度制御
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuri Nakamura, Tomohiro Yokoyama, Takeo Kato, Hajime Ishihara
2. 発表標題 Theoretical study on an optical response of photon field coupled with multiple artificial
3. 学会等名 The 9th International Multidisciplinary Conference on Optofluidics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村 由里、横山 知大、加藤 岳生、石原 一
2. 発表標題 複数人工原子が結合した光子場における2光子放出の理論
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横山知大、川畑史郎
2. 発表標題 Wavefunction of Andreev bound states with topological Weyl singularity in multi-terminal Josephson junction
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横山知大
2. 発表標題 ナノ構造化によるジョセフソン接合のトポロジカル物性
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

石原研究室ホームページ <a href="http://ishi-lab.mp.es.osaka-u.ac.jp/article.html">http://ishi-lab.mp.es.osaka-u.ac.jp/article.html</a> 石原研究室ホームページ <a href="http://ishi-lab.mp.es.osaka-u.ac.jp/article.html">http://ishi-lab.mp.es.osaka-u.ac.jp/article.html</a> 石原研究室ホームページ：会議・発表 <a href="http://ishi-lab.mp.es.osaka-u.ac.jp/conference.html">http://ishi-lab.mp.es.osaka-u.ac.jp/conference.html</a>
--

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			
米国	Purdue University			