

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01176

研究課題名（和文）凝縮系における奇周波数クーパー対の理論 不均一性が生み出す新奇量子現象

研究課題名（英文）Odd-frequency pairing in condensed matter systems

研究代表者

田中 由喜夫（Tanaka, Yukio）

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：40212039

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：奇周波数クーパー対は表面アンドレーエフ束縛状態（SABS）が存在する場合に表面（界面）近傍で誘起され、SABSはバルクのハミルトニアンを持つトポロジカル不変量により理解できるというバルク・エッジ対応が存在することが知られていた。本研究は、これを拡張し、バルクのグリーン関数から定義される複素数が、表面近傍で誘起される奇周波数ペアの総和で表わされるスペクトラルバルクエッジ対応が存在することを示し、トポロジカル相転移近傍における奇周波数クーパー対の臨界的性質を解明した。また、奇周波数クーパー対検出に有効な異常近接効果の理解が深まり、バルクの系に現れる奇周波数クーパー対の性質の理解も進んだ。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スピン1重項奇パリティ、スピン3重項偶パリティといった従来の分類に従わない奇周波数クーパー対は、接合系などの不均一系において存在し、エッジ状態が存在するときに顕在化することが知られていた。本研究により、奇周波数クーパー対のペア関数には、トポロジカル不変量起源の項とそれ以外の項から構成されることが明確になりトポロジカル量子相転移近傍で奇周波数クーパー対の示す新奇なふるまいが明確になった。この結果は超伝導量子デバイスなどへの応用が期待でき、表面の動的物理量をバルク量から求めることを意味する。

研究成果の概要（英文）：It is known that odd-frequency pairing is induced near the surface (interface) in the presence of surface Andreev bound states (SABS). On the other hand, SABS is protected by topological invariant. But there is no direct relation between odd-frequency pairing and topological invariant. It has been revealed that in the presence of chiral symmetry, the total sum of the induced odd-frequency pairing near the surface (interface) is explained by the complex number defined using bulk Green's function. Then, the critical behavior of the odd-frequency pairing near the topological quantum critical point has been clarified.

研究分野：凝縮系物理学の理論

キーワード：奇周波数クーパー対 電子対対称性 近接効果 トポロジカル超伝導 マイスナー効果 多軌道近藤効果 トンネル効果

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

超伝導状態は2つの電子から作られるクーパー対とよばれる電子対によって特徴付けられることが知られている。スピン1重項超伝導の場合、軌道は偶パリティ(s波、d波など)、スピン3重項超伝導の場合、軌道は奇パリティ(p波など)になることが暗黙の常識となっている。しかし電子対を形成する際に時間差という自由度を考慮すると、スピン1重項奇パリティ、スピン3重項偶パリティの奇周波数電子対も可能となる。バルクの超伝導状態における奇周波数電子対実現の研究は、Berezinskiiの1974年の提案以来、量子多体問題の基礎的問題として続いてきた。一方、代表者は並進対称性の破れにより、バルクの超伝導対称性が従来型の偶周波数ペアであっても、普遍的に奇周波数電子対(ペア振幅)が誘起されることを解明し[Phys. Rev. Lett. **99**, 037005 (2007)]、トポロジカル超伝導体のエッジ状態は奇周波数電子対として理解されるようになった[J.Phys.Soc.Jpn.**81**, 011103 (2012)]。

バルクにおける奇周波数超伝導についても、空間的な不均一性と密接に関わっていることが明らかになってきた。通常の超伝導体に用いられる平均場理論を素朴に(一様な)奇周波数超伝導に対して適用すると、熱力学的に不安定になるという結論が導かれてしまう。ところが空間的に激しく変調するペア(大きな重心運動量を持つペア、ペアリング)を考えると、この問題が生じないことがColemanら(1993)によって提案された。バルクにおける奇周波数超伝導の具体例については最近、分担者による数値解析によって強相関電子系の一つの典型的なモデルにおいて確立された[Phys. Rev. Lett. **112**, 167204 (2014)]。さらに、わかりやすい平均場理論も構築され、熱力学的安定性の背後には空間変調した奇周波数ペアの存在が示された。これまで重心運動量を持つペアと奇周波数超伝導の研究は独立に発展してきたが、いま両者は表裏一体の関係にあることが浮かび上がってきている。このように、我々の研究の進展によって、界面だけでなくバルクにおいても奇周波数超伝導と空間不均一性との相関が明らかになりつつあり、いま両者を包含した研究が求められている。

## 2. 研究の目的

本研究では奇周波数超伝導に対する不均一性に広く注目し、その効果を明らかにすることを目指す。バルクの問題に対しては、「CN Yangによって提案されたペアリングと奇周波数ペアはどのような関係か?」、「乱れの効果は奇周波数ペアの安定化に寄与するのか」、他方エッジ・界面の問題に対しては、奇周波数クーパー対とバルクで定義された物理量・輸送係数のつながりを解明することが目的である。

## 3. 研究の方法

奇周波数超伝導電子対(奇周波数電子対)に対する理解の深化を通し、新たな超伝導分野を開拓し、不均一性が作り出す新奇量子現象を预言する。具体的には、端を持つ超伝導体、スピン軌道相互作用をもつ超伝導体と拡散伝導領域の金属との接合、重心運動量がゼロでないクーパー対、ボゴリウボフ・フェルミ面を持つ系、クーロン相互作用のあるバルク電子系などにおいて、系を特徴づけるクーパー対に関する物理量を計算し、その背後にある物理法則を研究する。

## 4. 研究成果

### (1) 奇周波数クーパー対のスペクトラル・バルクエッジ対応 [1-3]

奇周波数クーパー対は表面アンドレーエフ束縛状態が存在している場合に顕著になることが、申請者の 2007 年の研究成果より知られていた。一方で、表面アンドレーエフ束縛状態に関しては、バルクのハミルトニアンを持つトポロジカル不変量により理解できるというバルク・エッジ対応が存在することも知られていた。しかしその奇周波数クーパー対に関するバルク・エッジ対応の理論は存在しなかった。我々はハミルトニアンにカイラル対称性が存在する場合、バルクのグリーン関数から定義される量が、表面近傍で誘起される奇周波数ペアの総和で表わされることが明らかにした[1]。本研究で得られたバルクエッジ対応は従来のバルクエッジ対応を有限の周波数に拡張したもので、スペクトラルバルクエッジ対応と呼ばれる。またこの関係式を用いることで、奇周波数ペアの総和は周波数を  $z$  としたとき  $1/z$  に比例する特異的な項と  $z$  の多項式で書かれる正則な項から成り立つことがわかり、特異的な項の係数は整数となることも分かった。特に  $z$  に比例する項の大きさは、トポロジカル量子臨界点で発散的に大きくなることが明らかになり、トポロジカル相と非トポロジカル相の違いを特徴づける。また、トポロジカル量子相転移周辺において、新たな臨界性を持つ状態が現れることを明らかになった。

また、この対応関係は(1)乱れを伴う場合、(2)カイラル対称性を持たない場合、(3)非超伝導の場合に拡張され、スペクトラルバルク・エッジ対応の概念がより深化した[2]。以上の成果は解説記事[3]にも詳述されている。

### (2) 異常近接効果の理論 [4-5]

近接効果とはクーパー対が超伝導体に隣接する金属に浸入する現象であり、特に拡散伝導領域の金属の電子状態、輸送現象に大きな影響を与えることが知られていた。拡散伝導領域の金属 / スピン 1 重項 s 波超伝導体接合においては、拡散伝導領域の金属状態密度が零エネルギーでギャップを持つことが知られていた。一方で拡散伝導領域の金属・スピン 3 重項超伝導体接合においては、金属中の準粒子状態密度が零エネルギーでピークを持つ異常近接効果が存在することが知られている。しかしバルクでのスピン 3 重項超伝導の実現は容易ではなく、d 波のようなスピン 1 重項超伝導でこの現象が実現することが望まれていた。本研究は、接合系においてスピン軌道相互作用を導入することで、拡散伝導領域の金属/d 波超伝導体の境界でスピン 3 重項 s 波のペアを作り出して、その結果として異常近接効果が生じることを明らかにした。この計算は格子 Green 関数に基づくものである[4]。

一方で、準古典近似を用いた理論研究として、近接効果による位相干渉効果と奇周波数ペアの理論の研究を行った。常伝導金属に 2 つの超伝導電極を付けた系における近接効果の計算を、Usadel 方程式に基づいて数値的に解くことで、浸入したクーパー対の干渉効果が局所状態密度に与える影響を明らかにした。従来型のスピン 1 重項 s 波超伝導体接合の近接効果では、2 つの超伝導体の位相差が  $\pi$  の時に準粒子状態密度が極大になるのに対して、スピン 3 重項超伝導体接合では奇周波数 s 波クーパー対が浸入して、位相差が  $0$  の時に準粒子状態密度が極小になることが明らかになった[5]。

### (3) Kitaev 鎖モデルにおける奇周波数クーパー対の理論 [6-7]

スピン 3 重項超伝導体の基本的モデルでありかつ 1 次元トポロジカル超伝導の典型的モデルである Kitaev 鎖モデルのグリーン関数を研究し、エッジ近傍に不純物散乱が存在する場合のマヨラナフェルミオンに与える影響と奇周波数クーパー対の関係を明確にした。特にトポロジカル相転移近傍における奇周波数クーパー対ペア振幅の挙動を調べた [6]。トポロジカル相におい

ではエッジに奇周波数スピン 3 重項 s 波が誘起されるが、非トポロジカル相においては奇周波数ペアほとんど誘起されないことが明らかになった。また非トポロジカル相においては、奇周波数ペアは近接効果をほとんど示さない。さらに臨界点においては奇周波数ペアがキタエフ鎖モデルのエッジから十分に離れた位置まで侵入することが明らかになった[7]。

#### (4) 強磁性体・異方的超伝導体接合における輸送現象と奇周波数クーパー対の理論 [8-9]

強磁性体・超伝導体接合において温度差によって生じる熱電効果を研究し、奇周波数クーパー対により従来とは異なる符号のゼーベック係数が現れる新奇な熱電効果が存在することが明らかになった[8]。

さらに超伝導体・強磁性体接合において、超伝導体に浸入する交換磁場の効果を研究した。界面に存在するトポロジカル起源の零エネルギーアンドレーエフ束縛状態によって、従来とは符号の異なる磁化の浸入と奇周波数クーパー対の関係を明らかにした[9]。

#### (5) 従来型超伝導体ハイブリッド接合による異常近接効果の理論提案 [10]

スピン 3 重項超伝導体接合においては奇周波数クーパー対による異常近接効果が知られているが、スピン 3 重項超伝導体は希少であるため、従来型超伝導体（スピン 1 重項 s 波超伝導体）を用いた実験が望まれる。一方で、従来型超伝導体と半導体ナノワイヤーから構成されるハイブリッド系では、外部磁場下でケミカルポテンシャルを調節すると、マヨラナフェルミオンを有するトポロジカル超伝導状態が実現される。このマヨラナフェルミオンが奇周波数スピン 3 重項 s 波ペアとみなせることも知られていたが、実験的に実現するのは容易ではない。一方プラナー型ジョセフソン接合では、超伝導体の位相を制御することによりより容易にマヨラナフェルミオンを実現させることが可能となる理論提案が行われた[F. Pientka, et al, Phys. Rev. X 7, 021032 (2017)]。本研究では、この系に拡散伝導領域の金属を接合することで、奇周波数電子対による異常近接効果が実現できることを提案した[10]。

#### (6) 擬 1 次元超伝導体におけるペア密度波の理論 [11]

擬 1 次元ハバードモデルでは奇周波数ペアの不安定性があることが知られている。重心運動量が有限のペア(pair density wave)を考慮すると、1 次元性が強い領域においてスピン一重項のペア密度波が支配的になることが分かった[11]。

#### (7) d 波超伝導体表面に誘起される奇周波数電子対 [12]

d 波超伝導体表面でゼロエネルギーアンドレーエフ束縛状態が形成されるとき、様々な表面に誘起される秩序が予言されてきた。実空間 R P A の方法を用いて、表面で奇周波数スピン 3 重項ペアが誘起されることが分かった[12]。この状態は、表面の近傍において磁場に対して常磁性的な応答を示す。

#### (8) 拡張マルチチャンネル近藤格子における奇周波数クーパー対 [13,14]

軌道自由度をもつマルチチャンネル近藤格子では、重心運動量をもつ奇周波数ペアが実現することが知られている。通常は縮退した伝導電子バンドが仮定されるが、Be のような補償金属の電子面とホール面をもつ近藤格子考えることによって、重心運動量がゼロである超伝導状態が実現することを明らかにした[13]。さらにその超伝導状態において渦状態を考え、それをタイトバインディングモデルおよび準古典理論により解析することにより、通常の超伝導とは異なる

る特異なコア状態が現れることがわかった[14]。

#### (9) ボゴリウボフ・フェルミ面を持つバルク超伝導系における奇周波数クーバー対 [15]

通常、超伝導状態においてフェルミ面は消失するが、時間反転対称性の破れた多軌道自由度をもつ超伝導体では、転移温度以下でもフェルミ面を持つことがある。これをボゴリウボフ・フェルミ面と呼び、1粒子励起エネルギーがギャップレスになる領域が波数空間中に面として存在する状態を表す。ここでフェルミ面を構成するのは超伝導状態特有のボゴリウボフ準粒子であり、通常の電子フェルミ面とは異なる。特に低エネルギー領域に注目すると、ボゴリウボフ準粒子の性質が色濃く反映され、バルクにおいて純粋な奇周波数クーバー対が形成されることが明らかとなった[15]。このペア形成は通常の電子系とは異なる機構であり、ボゴリウボフ準粒子のもつ新奇的な性質を捉えている。

#### < 引用文献 >

- [1] S. Tamura, S. Hoshino, Y. Tanaka, Phys. Rev. B **99**, 184512 (2019).
- [2] S. Tamura, S. Hoshino, Y. Tanaka, Phys. Rev. B **104**, 165125 (2021).
- [3] 田村駿、池谷聡、田仲由喜夫、固体物理 **57**, 307 (2022).
- [4] S. Tamura and Y. Tanaka, Phys. Rev. B **99**, 184501 (2019).
- [5] S.-I. Suzuki, A.A. Golubov, Y. Asano, Y. Tanaka, Phys. Rev. B **100**, 024511 (2019).
- [6] D. Takagi, S. Tamura, Y. Tanaka, Phys. Rev. B **101**, 024509 (2020).
- [7] S. Mishra, S. Tamura, A. Kobayashi, Y. Tanaka, Phys. Rev. B **103**, 024501 (2021).
- [8] T. Savander, S. Tamura, C. Flindt, Y. Tanaka, and P. Bursset, Phys. Rev. Res. **2**, 043388 (2020).
- [9] S.-I. Suzuki, T. Hirai, M. Eschrig, Y. Tanaka, Phys. Rev. Res. **3**, 043148 (2021).
- [10] S. Ikegaya, S. Tamura, D. Manske, and Y. Tanaka, Phys. Rev. B **102**, 140505 (2020).
- [11] S. Yoshida, K. Yada, Y. Tanaka, Phys. Rev. B **104**, 094506 (2021).
- [12] S. Matsubara, Y. Tanaka, and H. Kontani, Phys. Rev. B **103**, 245138 (2021).
- [13] S. Imura, M. Hirayama, S. Hoshino, Phys. Rev. B **100**, 094532 (2019).
- [14] S. Imura, M. Hirayama, S. Hoshino, Phys. Rev. B **102**, 064505 (2020).
- [15] T. Miki, S.-T. Tamura, S. Imura, S. Hoshino, Phys. Rev. B **104**, 094518 (2021).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計27件（うち査読付論文 27件 / うち国際共著 8件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Tamura Shun, Nakosai Sho, Black-Schaffer Annica M., Tanaka Yukio, Cayao Jorge	4. 巻 101
2. 論文標題 Bulk odd-frequency pairing in the superconducting Su-Schrieffer-Heeger model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 214507_1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.214507	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 Fukaya Yuri, Yada Keiji, Tanaka Yukio, Gentile Paola, Cuoco Mario	4. 巻 102
2. 論文標題 Orbital tunable 0 transitions in Josephson junctions with noncentrosymmetric topological superconductors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 144512_1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.144512	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 Ikegaya S., Tamura S., Manske D., Tanaka Y.	4. 巻 102
2. 論文標題 Anomalous proximity effect of planar topological Josephson junctions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 140505_1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.140505	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 Savander Tony, Tamura Shun, Flindt Christian, Tanaka Yukio, Buset Pablo	4. 巻 2
2. 論文標題 Thermoelectric detection of Andreev states in unconventional superconductors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 043388_1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.043388	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 該当する

1. 著者名 Mishra Sparsh, Tamura Shun, Kobayashi Akito, Tanaka Yukio	4. 巻 103
2. 論文標題 Impact of impurity scattering on odd-frequency spin-triplet pairing near the edge of the Kitaev chain	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 024501_1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.024501	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 Nakai Ryota, Nomura Kentaro, Tanaka Yukio	4. 巻 103
2. 論文標題 Edge-induced pairing states in a Josephson junction through a spin-polarized quantum anomalous Hall insulator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 184509_1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.184509	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 Takabatake Yuhi, Suzuki Shu-Ichiro, Tanaka Yukio	4. 巻 103
2. 論文標題 Tunneling conductance of the (d+ip)-wave superconductor	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 184515_1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.184515	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 Matsubara Shun, Tanaka Yukio, Kontani Hiroshi	4. 巻 103
2. 論文標題 Generation of odd-frequency surface superconductivity with spontaneous spin current due to the zero-energy Andreev bound state	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 245138_1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.245138	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 Yoshida Soma, Yada Keiji, Tanaka Yukio	4. 巻 104
2. 論文標題 Theory of a pair density wave on a quasi-one-dimensional lattice in the Hubbard model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 094506_1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.094506	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 Tamura Shun, Hoshino Shintaro, Tanaka Yukio	4. 巻 104
2. 論文標題 Generalization of spectral bulk-boundary correspondence	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 165125_1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.165125	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 Suzuki Shu-Ichiro, Hirai Takashi, Eschrig Matthias, Tanaka Yukio	4. 巻 3
2. 論文標題 Anomalous inverse proximity effect in unconventional superconductor junctions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 0431481-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.043148	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 該当する

1. 著者名 Fukaya Yuri, Hashimoto Tatsuki, Sato Masatoshi, Tanaka Yukio, Yada Keiji	4. 巻 4
2. 論文標題 Spin susceptibility for orbital-singlet Cooper pair in the three-dimensional Sr <sub>2</sub> RuO <sub>4</sub> superconductor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 13135
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.4.013135	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 該当する

1. 著者名 Tamura Shun-Ta, Imura Shoma, Hoshino Shintaro	4. 巻 102
2. 論文標題 Electronic multipoles and multiplet pairs induced by Pomeranchuk and Cooper instabilities of Bogoliubov Fermi surfaces	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 024505_1-1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.024505	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 星野晋太郎	4. 巻 56
2. 論文標題 ボゴリウボフ・フェルミ面の不安定性	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 固体物理	6. 最初と最後の頁 201-208
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 -

1. 著者名 Imura Shoma, Hirayama Motoaki, Hoshino Shintaro	4. 巻 102
2. 論文標題 Vortex bound state of a Kondo lattice coupled to a compensated metal	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 064505_1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.064505	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 Miki Tatsuya, Tamura Shun-Ta, Imura Shoma, Hoshino Shintaro	4. 巻 104
2. 論文標題 Odd-frequency pairing inherent in a Bogoliubov Fermi liquid	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 094518_1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.094518	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 Tamura Shun, Hoshino Shintaro, Tanaka Yukio	4. 巻 99
2. 論文標題 Odd-frequency pairs in chiral symmetric systems: Spectral bulk-boundary correspondence and topological criticality	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 184512 (1-17)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.184512	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 Suzuki Shu-Ichiro, Golubov Alexander A., Asano Yasuhiro, Tanaka Yukio	4. 巻 100
2. 論文標題 Effects of phase coherence on local density of states in superconducting proximity structures	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 024511 (1-11)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.024511	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 Toki Tsubasa, Nakosai Sho, Tanaka Yukio, Kawaguchi Yuki	4. 巻 100
2. 論文標題 Theory of the Josephson current on a magnetically doped topological insulator	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 104518 (1-11)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.104518	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 Takagi Daijiro, Tamura Shun, Tanaka Yukio	4. 巻 101
2. 論文標題 Odd-frequency pairing and proximity effect in Kitaev chain systems including a topological critical point	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 024509 (1-15)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.024509	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 Iimura Shoma, Hirayama Motoaki, Hoshino Shintaro	4. 巻 30
2. 論文標題 Magnetic Field Induced Phase Transition in Superconducting State of Non-Kramers Doublet Kondo Lattice Systems with Semi-Metallic Conduction Bands	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc. 30	6. 最初と最後の頁 011048 (1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.30.011048	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 Iimura Shoma, Hirayama Motoaki, Hoshino Shintaro	4. 巻 29
2. 論文標題 Fermi-surface Anisotropy Effects on Full-gap Superconductivity in Non-Kramers Doublets Coupled to Compensated Metals	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc. 30	6. 最初と最後の頁 011003 (1-7)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.29.011003	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 Iwazaki Ryuta, Hoshino Shintaro	4. 巻 29
2. 論文標題 Multi-component Time-dependent Ginzburg-Landau Study of Photo-excitation Effects on Superconducting Fluctuation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 011005 (1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.29.011005	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 Iimura Shoma, Hirayama Motoaki, Hoshino Shintaro	4. 巻 100
2. 論文標題 Unconventional full-gap superconductivity in Kondo lattice with semimetallic conduction bands	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 094532 (1-10)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.094532	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 Sho Nakosai, Yukio Tanaka, Tai Kai Ng, and Naoto Nagaosa	4. 巻 87
2. 論文標題 Spontaneous Modulation of Superconducting Phase in Kitaev Ladder	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 083702_1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.083702	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 L. A. B. Olde Olthof, S.-I. Suzuki, A. A. Golubov, M. Kunieda, S. Yonezawa, Y. Maeno, and Y. Tanaka	4. 巻 98
2. 論文標題 Theory of tunneling spectroscopy of normal metal/ferromagnet/spin-triplet superconductor junctions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 014508_1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.014508	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 S. Tamura and Y. Tanaka	4. 巻 99
2. 論文標題 Theory of the proximity effect in two-dimensional unconventional	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 184501_1-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.184501	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 -

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 S.-I. Suzuki, A. A. Golubov, Y. Asano, and Y. Tanaka
2. 発表標題 Effects of the phase coherence on the local density of states in superconducting proximity structures
3. 学会等名 Oxide Superspin Workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田村駿, 星野晋太郎, 田仲由喜夫
2. 発表標題 カイラル対称性のある系における奇周波数超伝導クーパー対の研究2
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 田村駿, 田仲由喜夫
2. 発表標題 トポロジカル超伝導体における異常近接効果の研究
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 鈴木修, A.A. Golubov, 浅野泰寛, 田仲由喜夫
2. 発表標題 スピン三重項接合における位相干渉と局所状態密度
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 Yukio Tanaka
2. 発表標題 Odd-Frequency Pairing in Topological superconductor
3. 学会等名 3rd EPiQS-TMS alliance workshop on Topological Phenomena in Quantum Materials (TPQM2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shintaro Hoshino
2. 発表標題 Unconventional full-gap superconductivity in Kondo lattice with semi-metallic conduction bands
3. 学会等名 J-Physics 国際会議 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shintaro Hoshino
2. 発表標題 Spectral bulk-boundary correspondence in chiral-symmetric superconductors
3. 学会等名 Swiss-Japan bilateral workshop Trends in Theory of Correlated Materials 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木修 川口由紀 田仲由喜夫
2. 発表標題 2次元トポロジカル超伝導体における外部磁場で制御されるマヨラナフェルミオンの理論
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋季分科会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田仲由喜夫, 田村駿
2. 発表標題 1次元p波超伝導モデルのGreen関数と奇周波数クーパー対の理論
3. 学会等名 日本物理学会74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田仲由喜夫
2. 発表標題 Odd-frequency pairings in topological superconductors
3. 学会等名 日本物理学会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〕

-

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
研究分担者	星野 晋太郎  (Hosshino Shintaro)  (90748394)	埼玉大学・理工学研究科・助教    (12401)	

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
---------	---------