

令和 3 年 5 月 29 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K05542

研究課題名(和文) 磁場中物性に着目したスピン軌道相互作用が重要な超伝導体の機構解明の理論研究

研究課題名(英文) Theoretical study of vortex states to clarify the mechanism of superconductors having significant spin-orbit coupling

研究代表者

市岡 優典 (Ichioka, Masanori)

岡山大学・異分野基礎科学研究所・教授

研究者番号：90304295

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：非従来型超伝導でのスピン軌道相互作用に関係した磁場中の物性の解明する研究を実施した。スピン三重項超伝導カイラルp波超伝導と考えられてきたSr₂RuO₄を主な対象とし、第一原理電子状態計算で得られるフェルミ面上でのスピンと軌道角運動量の自由度を考慮した多軌道電子状態における常磁性効果による超伝導抑制効果や磁場中物性を解明した。また、スピン三重項カイラルp波超伝導の渦糸状態でのNMRの局所核磁気緩和率については緩和方向とdベクトルの関係も解明した。渦糸状態での低温比熱や局所電子状態などの研究では、磁場方位依存性や非磁性不純物効果など、様々な超伝導対称性の場合について磁場中物性を理論評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年注目されている非従来型超伝導体の超伝導機構を解明するためには、これら多軌道電子系におけるスピン自由だけでなく軌道自由度も考慮した研究が必要となってきた。その解明の手段として印加磁場の方向を回転して超伝導状態の変化を詳細に調べることが有効と考えられるが、その解析のためには、第一原理計算に基づく現実的なフェルミ面とスピン軌道相互作用を出発点とした研究、また、渦糸状態の空間構造を正確に決定した上で、磁場中の物性を定量的理論評価の研究を進め、実験研究の指針となる結果を示すことが必要であり、そのための理論アプローチの方法を開拓することで新たな物性研究の展開を目指している。

研究成果の概要(英文)：We studied physical properties related to spin-orbit interaction in unconventional superconductors under magnetic fields, focusing Sr₂RuO₄, which was supposed to be a spin-triplet chiral p-wave superconductor. We evaluated paramagnetic effect of the superconductivity, considering the degree of freedom of spin and orbital on the Fermi surface from the first-principles electronic state calculations. We also elucidated the relation between the relaxation direction and the d vector orientation in the local nuclear magnetic relaxation of NMR in the vortex state of spin triplet chiral p-wave superconductivity. In the study of low temperature specific heat and local electronic state in the vortex state, physical properties under magnetic fields, such as magnetic field orientation dependence and non-magnetic impurity effect, were theoretically evaluated for some superconducting pairing symmetries.

研究分野：物性理論物理学

キーワード：物性理論 超伝導 計算物理 強相関電子系 低温物理 磁束・渦糸状態 スピン軌道相互作用 磁場中物性

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。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) d 電子系など多軌道系では、スピン軌道相互作用によりフェルミ面上の電子のスピン \mathbf{S} と軌道角運動量 \mathbf{L} の向きが固定され、物性にも重要な影響を与えると考えられる。これらの系の超伝導状態は、擬スピン $\mathbf{J}(\mathbf{L}+\mathbf{S})$ のクラマース 2 重項の間でクーパー対を組むため、自由スピン \mathbf{S} のクーパー対による超伝導と何かしら違いがあるはずである。しかし、この特徴は実際の実験ではまだ捉えられておらず、新たな研究のアイデアが必要である。そのアイデアの一つが、磁場方向を回転させ物理量の変化の様子を調べることである。特にエネルギースケールの点から、超伝導と結合した物理量を測定することで、その感度が良くなることが期待される。しかし、この実験データを解析するには、その物質に即した定量的に正しい理論計算を実行する必要がある。また、カイラル p 波スピン三重項超伝導では、マヨラナ状態、奇周波数クーパー対など特異な性質が現れるので、その特性の解明が求められている。研究開始当初は、スピン三重項カイラル p 波超伝導体とされる Sr_2RuO_4 の \mathbf{d} ベクトル構造(超伝導秩序変数のスピン成分)の決定が課題となっていた。しかし、実験で観測される物性には単純なカイラル p 波超伝導の理論で説明できない現象が多く残されていた。例えば、 ab 面内に磁場をかけた時の高磁場での超伝導の抑制と一次転移などの機構は未解明であった。この系の正しい理解を完成させるためには、スピン軌道相互作用を正しく考慮して \mathbf{d} ベクトルを決め、物理量の磁場(大きさ)依存性など、物性の正しい理論評価をすることが不可欠な状況にあった。

(2) 第 2 種超伝導体では比熱や熱伝導率などの磁場 (大きさ) 依存性など、磁場中の超伝導物性を詳細に調べることから、超伝導ギャップの異方性や多バンド超伝導の特徴を実験的に確認しようという研究が進められている。この実験結果からこれらの特徴を断定するためにも、対応した渦糸状態での定量的な理論計算が求められており、これまで考慮できていなかった効果を考慮して定量的理論評価の研究を進める必要があった。

2. 研究の目的

(1) 非従来型超伝導でのスピン軌道相互作用に密接に関係した機構が反映した磁場中の物性を定量的に正しく計算する手法を開発する。これにより、スピン軌道相互作用によりフェルミ面に固定されたスピンと軌道角運動量の効果を、磁場方向を変えた実験で捉えるための指針となる理論研究を確立する。本研究ではスピン三重項カイラル p 波超伝導と考えられてきた Sr_2RuO_4 を主な対象とし、第一原理電子状態計算の情報を用い、スピンと軌道角運動量の自由度を考慮した多軌道電子状態における常磁性超伝導破壊効果や磁場中物性を解明する。

(2) 第 2 種超伝導体の渦糸格子状態の空間構造を正確に計算し物理量の磁場依存性を定量的に数値計算できる手法により、スピン三重項カイラル p 波超伝導の軌道自由度と \mathbf{d} ベクトルのスピンの自由度を考慮して、NMR の核磁気緩和の緩和方向依存性など \mathbf{d} ベクトルの構造を反映した物理量の振舞いを解明する。また、渦糸状態での低温比熱や局所電子状態などの計算では、非磁性不純物効果などを考慮し、印加する磁場方向依存性や様々な超伝導対称性の場合において磁場中物性の定量的解析を行い、その重要な性質を見つけ出す研究を進める。

3. 研究の方法

(1) スピン軌道相互作用によりフェルミ面に固定されたスピンと軌道角運動量の効果を考慮して、多軌道非従来型超伝導体の磁場中物性を理論評価するため以下の手順で理論計算を進める。

- ・第一原理電子状態計算によるフェルミ面構造にスピン軌道相互作用を導入。
- ・擬スピンの基底でクーパー対を、スピン三重項成分も含めて考える。
- ・スピンと軌道角運動量のゼーマン効果も考慮する。
- ・この多軌道電子状態で超伝導転移温度や、超伝導秩序変数・内部磁場の構造などを決定する。
- ・以上の計算で得られた情報から磁場中の物性を評価し、磁場方向依存性など解明する。

(2) 第 2 種超伝導体の磁場中物性を定量的評価する渦糸状態での Eilenberger 理論計算において、様々な磁場方向や不純物散乱の場合について、超伝導異方性やフェルミ面形状の効果を考慮して、超伝導秩序変数や局所電子状態などの空間構造を理論計算する。これにより、低温比熱、STM で観測される局所電子状態、NMR 実験でのスペクトルや核磁気緩和率などの物理量の磁場(大きさ)依存性を理論評価する。

4. 研究成果

(1) 第一原理電子状態計算の情報をもとに多軌道系電子状態のモデルを構成し、スピン軌道相互作用を導入して、クーパー対を形成する擬スピンの基底でフェルミ面上の軌道角運動量とスピン角運動量の情報を得る手法を開発した。超伝導体 Sr_2RuO_4 に注目した研究では、

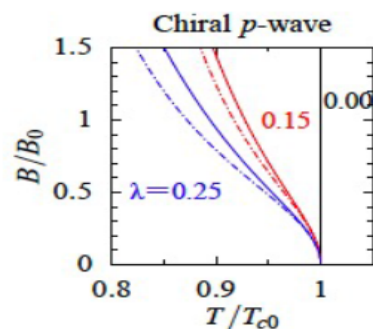


図 1. 常磁性効果による超伝導臨界磁場 B の抑制におけるスピン軌道相互作用 λ の効果。横軸は温度 T 。

超伝導臨界磁場の常磁性対破壊効果による抑制効果の理論評価を行った。この系はカイラル p 波 スピン三重項超伝導が実現し、クーパ対のスピ成分を示す \mathbf{d} ベクトルが c 軸方向を向いていると考えられていた。一方、実験事実として ab 方向の磁場下では高磁場領域で超伝導が強く抑制され常磁性対破壊効果に似た現象が観測されている。従来の理論研究では、 \mathbf{d} ベクトルが c 軸方向を向く場合には常磁性対破壊が起きないため、この超伝導抑制効果は説明できていなかった。本研究では、 Sr_2RuO_4 を想定した多軌道電子系モデルにおいて、常磁性対破壊効果による超伝導臨界磁場を理論計算した。その結果、結晶の c 方向への電子の飛び移りによる軌道自由度の混成の効果とスピン軌道相互作用の両方が働く場合には、 \mathbf{d} ベクトルが c 軸方向の場合においても ab 方向の磁場下で常磁性対破壊効果による超伝導の抑制が起こり得ることを明らかにした (図 1)。また、この効果において ab 面内での磁場方向依存性についても理論評価した[1]。比較のため、スピン一重項超伝導の場合も理論評価している。ついで、臨界温度以下の温度での超伝導状態におけるスピンや軌道の分極などを評価し、超伝導状態における自発的な軌道角運動量の発現と超伝導対称性の関係を解明している。2019 年になって Sr_2RuO_4 の超伝導対称性がスピン一重項である可能性が高いとの実験結果が発表されたため、カイラル p 波に加えカイラル d 波超伝導の場合も対比的に考察している。

(2)第 2 種超伝導体の渦糸格子状態での Eilenberger 理論計算で磁場中物性を理論評価する計算手法を、スピン三重項カイラル p 超伝導に適用し、渦糸近傍の局所的 NMR 核磁気緩和率を理論評価した。本研究では、超伝導秩序変数の軌道自由度だけでなく \mathbf{d} ベクトルと呼ばれるクーパ対のスピ自由度も自在に扱う計算まで可能とした。そして縦緩和と横緩和の緩和率 T_1^{-1} と T_2^{-1} の両方を計算し比較した[2]。この結果、緩和方向と \mathbf{d} ベクトルが平行な成分がある場合にのみ渦糸芯領域での緩和率増大が抑制される異常が起きることを明らかとした (図 2)。また、この現象はカイラル p 波超伝導の渦糸芯領域で出現する Majorana 状態とも関係する奇周波数 s 波スピン三重項クーパ対のスピ構造と関係していることも解明した。

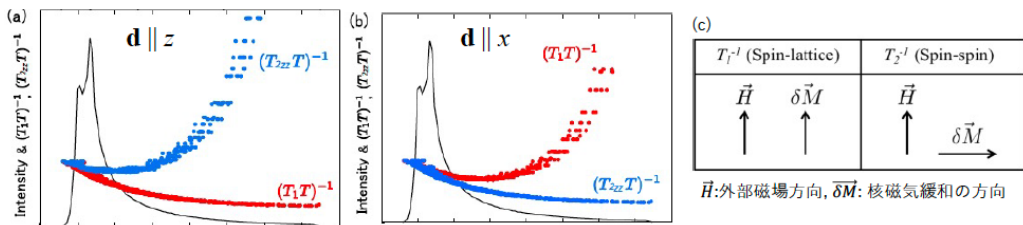


図 2. カイラル p 波超伝導の渦糸状態での NMR 共鳴線(黒線)の振動数(横軸)における $(T_1T)^{-1}$ と $(T_2T)^{-1}$ 。外部磁場 \mathbf{H} は z 方向。 \mathbf{d} ベクトルの方向は (a)が z 方向、(b)が x 方向。

(3)様々な磁場方位や超伝導対称性の場合での渦糸状態の物性解明の理論研究も進めた。磁場方向を c 軸から傾けた場合の渦糸電子状態の理論計算では、表面近くでの渦糸線の曲がり方の理論評価が可能なることを示し、走査型トンネル顕微鏡 (STM) で観測される渦糸像の磁場角度依存性を解明した。渦糸状態での非磁性不純物散乱効果の理論評価の研究では、 d 波超伝導体において面内で磁場を回転させた場合での低温比熱の振動現象における不純物散乱効果を評価した[3]。また、2回対称性を持つ超伝導ギャップの場合の不純物散乱効果の研究では、異方的 s 波とスピン三重項 p 波の超伝導対称性の場合で、渦糸まわりの超伝導秩序変数や局所電子状態の空間構造を比べることにより、渦糸状態における不純物散乱効果と超伝導対称性の関係を明らかにした[4]。カイラル超伝導においても、超伝導秩序変数や局所電子状態、奇周波数クーパ対などの空間構造について不純物散乱効果を理論評価しカイラル p 波とカイラル d 波の場合、Born 極限と Unitary 極限の場合の違いを解明した[5]。この他、超伝導体内におけるスピンの研究も進めた。

〈引用文献〉

- [1] K. Oda, K.K. Tanaka, S. Onari, M. Ichioka, Paramagnetic Pair-Breaking in Spin-Triplet Superconductors with Spin-Orbit Coupling: Application to Sr_2RuO_4 , *Journal of the Physical Society of Japan* **88**, 064707 (2019).
- [2] K.K. Tanaka, M. Ichioka, and S. Onari, Local NMR relaxation rates T_1^{-1} and T_2^{-1} depending on the \mathbf{d} -vector symmetry in the vortex state of chiral and helical p-wave superconductors, *Physical Review B* **97**, 134507 (2018).
- [3] Y. Hashitani, K.K. Tanaka, H. Adachi, M. Ichioka, Variation of zero-energy density of states of a d-wave superconductor in a rotating in-plane magnetic field: Effect of nonmagnetic impurities, *Physical Review B* **101**, 060501 (2020).
- [4] Y. Sera, T. Ueda, H. Adachi, M. Ichioka, Relation of Superconducting Pairing Symmetry and Non-Magnetic Impurity Effects in Vortex States, *Symmetry* **12**, 175 (2020).
- [5] T. Ueda, Y. Sera, H. Adachi, and M. Ichioka, Nonmagnetic impurity effect in vortex states of chiral superconductors, *Physical Review B* **103**, 014506 (2021).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Suzuki Kenta M., Machida Kazushige, Tsutsumi Yasumasa, Ichioka Masanori	4. 巻 101
2. 論文標題 Microscopic Eilenberger theory of Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov states in the presence of vortices	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 214516_1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.214516	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 Kogan Vladimir G., Ichioka Masanori	4. 巻 89
2. 論文標題 Vortex Cores in Narrow Thin-Film Strips	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 094711_1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.094711	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 Sera Yasuaki, Adachi Hiroto, Ichioka Masanori	4. 巻 30
2. 論文標題 Twofold Symmetric Electronic Structure of a Vortex in Type II Superconductors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 011040_1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.30.011040	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 Ueda Takahiro, Sera Yasuaki, Adachi Hiroto, Ichioka Masanori	4. 巻 103
2. 論文標題 Nonmagnetic impurity effect in vortex states of chiral superconductors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 014506_1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.014506	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 Taira Takuya, Kato Yusuke, Ichioka Masanori, Adachi Hiroto	4. 巻 103
2. 論文標題 Spin Hall effect generated by fluctuating vortices in type-II superconductors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 134417_1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.134417	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 Oda Koushi, Tanaka Kenta K., Onari Seiichiro, Ichioka Masanori	4. 巻 88
2. 論文標題 Paramagnetic Pair-Breaking in Spin-Triplet Superconductors with Spin-Orbit Coupling: Application to Sr ₂ RuO ₄	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 064707_1~10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.064707	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 Sera Yasuaki, Ueda Takahiro, Adachi Hiroto, Ichioka Masanori	4. 巻 12
2. 論文標題 Relation of Superconducting Pairing Symmetry and Non-Magnetic Impurity Effects in Vortex States	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Symmetry	6. 最初と最後の頁 175_1~19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/sym12010175	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 Hashitani Yuuki, Tanaka Kenta K., Adachi Hiroto, Ichioka Masanori	4. 巻 101
2. 論文標題 Variation of zero-energy density of states of a d-wave superconductor in a rotating in-plane magnetic field: Effect of nonmagnetic impurities	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 060501_1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.060501	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 Taira Takuya, Ichioka Masanori, Takei So, Adachi Hiroto	4. 巻 98
2. 論文標題 Spin diffusion equation in superconductors in the vicinity of T_c	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 214437_1 - 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.214437	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 Kenta K. Tanaka, Masanori Ichioka, and Seiichiro Onari	4. 巻 97
2. 論文標題 Local NMR relaxation rates $T_{1\rho}^{-1}$ and $T_{2\rho}^{-1}$ depending on the d-vector symmetry in the vortex state of chiral and helical p-wave superconductors	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 134507_1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.97.134507	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 K Tanaka, Masanori Ichioka and Seiichiro Onari	4. 巻 969
2. 論文標題 Theoretical analysis for spin-polarized local density of states in the vortex state of helical p-wave superconductors	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012043_1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/969/1/012043	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32件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 小田向志, 市岡優典
2. 発表標題 多軌道超伝導体の磁場中での磁気モーメントの理論研究
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 平拓也, 加藤雄介, 市岡優典, 安立裕人
2. 発表標題 超伝導揺らぎとスピンホール効果
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 世良泰明, 安立裕人, 市岡優典
2. 発表標題 二回対称な渦糸電子状態の不純物散乱の影響
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 平拓也, 加藤雄介, 市岡優典, 安立裕人
2. 発表標題 超伝導渦糸状態におけるスピンホール効果
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 小田向志, 市岡優典
2. 発表標題 多軌道超伝導体の磁場中での磁気モーメントの理論研究2
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 市岡優典, 上田貴裕, 世良泰明, 安立裕人
2. 発表標題 カイラル超伝導体の渦糸状態での不純物散乱効果の理論研究
3. 学会等名 京都大学基礎物理学研究所研究会「高温超伝導・非従来型超伝導研究の最前線：多様性と普遍性」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Ichioka
2. 発表標題 Local electronic states around a vortex near the surface for inclined magnetic fields
3. 学会等名 XVII International Workshop on Vortex Matter in Superconductors (VORTEX 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Ichioka, K.K. Tanaka, and S. Onari
2. 発表標題 Local NMR Relaxation Rates T1-1 and T2-1 in the Vortex State of Chiral and Helical P-Wave Superconductors
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Oda, K.K. Tanaka, S. Onari, and M. Ichioka
2. 発表標題 Pauli paramagnetic effect in Spin-Triplet Superconductors with Spin-Orbit Coupling: Application to Sr ₂ RuO ₄
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Sera, H. Adachi, and M. Ichioka
2. 発表標題 Twofold Symmetric Electronic Structure of Vortex in Type II Superconductors
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 市岡優典
2. 発表標題 傾斜磁場下の表面近くでの渦糸まわりの局所電子状態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 小田向志, 市岡優典
2. 発表標題 超伝導体Sr ₂ RuO ₄ におけるスピン軌道相互作用を考慮したスピン分極
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 世良泰明, 安立裕人, 市岡優典
2. 発表標題 第二種超伝導体における渦糸の二回対称な電子構造
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 市岡優典
2. 発表標題 傾斜磁場での表面近くの超伝導渦糸状態
3. 学会等名 基研研究会「電子相関が生み出す超伝導現象の未解決問題と新しい潮流」(京都大学基礎物理学研究所)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小田向志, 田中健太, 大成誠一郎, 市岡優典
2. 発表標題 超伝導体 Sr ₂ RuO ₄ におけるスピン軌道相互作用を考慮したパウリ対破壊効果
3. 学会等名 基研研究会「電子相関が生み出す超伝導現象の未解決問題と新しい潮流」(京都大学基礎物理学研究所)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 世良泰明, 安立裕人, 市岡優典
2. 発表標題 第二種超伝導体における渦糸の二回対称な電子構造
3. 学会等名 基研研究会「電子相関が生み出す超伝導現象の未解決問題と新しい潮流」(京都大学基礎物理学研究所)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 市岡優典
2. 発表標題 傾斜磁場下の表面近くでの渦糸状態
3. 学会等名 第27回渦糸物理ワークショップ(京都大学理学研究科セミナーハウス)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 世良泰明, 安立裕人, 市岡優典
2. 発表標題 第二種超伝導体における渦糸の2回対称な電子構造
3. 学会等名 第27回渦糸物理ワークショップ(京都大学理学研究科セミナーハウス)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平拓也, 竹井聡, 市岡優典, 安立裕人
2. 発表標題 超伝導体中のスピン拡散方程式: T_c 近傍の解析
3. 学会等名 第27回渦糸物理ワークショップ(京都大学理学研究科セミナーハウス)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Ichioka, K.K. Tanaka, and S. Onari
2. 発表標題 D-vector Dependence of Local NMR Relaxation Rates T_{1-1} and T_{2-1} in the Vortex State of Chiral and Helical P-wave Superconductors
3. 学会等名 12th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity (M2S-HTSC-XII) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小田向志, 田中健太, 大成誠一郎, 市岡優典
2. 発表標題 超伝導体 Sr_2RuO_4 におけるスピン軌道相互作用を考慮したパウリ対破壊効果
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 市岡優典
2. 発表標題 傾斜磁場下の表面近くでの渦糸まわりの局所電子状態
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 平拓也, 市岡優典, 安立裕人
2. 発表標題 超伝導体におけるスピン拡散方程式: T_c 近傍の解析
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 市岡優典, 橋谷侑希, 田中健太
2. 発表標題 面内磁場回転での低温比熱振動における非磁性不純物効果
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 市岡優典, 田中健太, 大成誠一郎
2. 発表標題 カイラルp波超伝導の渦状態における局所核磁気緩和率のdベクトル依存性
3. 学会等名 基研研究会「電子相関が生み出す新規な秩序と超伝導現象: トポロジー、液晶状態、動的現象」(京都大学基礎物理学研究所)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 市岡優典
2. 発表標題 Eilenberger理論による磁場を傾けた場合の渦糸状態
3. 学会等名 超伝導とその周辺：渦糸物理と検出器の新展開（大阪府立大学I-siteなんば）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小田向志，田中健太，大成誠一郎，市岡優典
2. 発表標題 超伝導体Sr ₂ RuO ₄ におけるスピン軌道相互作用を考慮したパウリ対破壊効果の計算
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田中健太，大成誠一郎，市岡優典
2. 発表標題 ヘリカルp波超伝導体のスピン偏極局所状態密度に対する不純物効果
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 市岡優典
2. 発表標題 傾斜磁場下の表面近くの渦糸状態
3. 学会等名 第25回渦糸物理国内会議 -超伝導体における渦糸状態の物理と応用(2017)-
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小田向志, 田中健太, 大成誠一郎, 市岡優典
2. 発表標題 超伝導体Sr ₂ RuO ₄ におけるスピン軌道相互作用を考慮したパウリ対破壊効果
3. 学会等名 第25回渦糸物理国内会議 -超伝導体における渦糸状態の物理と応用(2017)-
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小田向志, 田中健太, 大成誠一郎, 市岡優典
2. 発表標題 超伝導体Sr ₂ RuO ₄ におけるスピン軌道相互作用を考慮したパウリ対破壊効果
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 市岡優典
2. 発表標題 傾斜磁場下の表面近くでの渦糸まわりの局所電子状態
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018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			
米国	Iowa State University			