

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：11101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K03826

研究課題名（和文）異方的超伝導体の特異現象：スピン軌道相互作用とカイラルなペアリングの協奏

研究課題名（英文）Exotic phenomena in unconventional superconductors: The role of the spin-orbit coupling and chirality of the Cooper pair

研究代表者

御領 潤 (Goryo, Jun)

弘前大学・理工学研究科・教授

研究者番号：70365013

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では蜂の巣ネットワーク系超伝導体 SrPtAs に注目し、スピン軌道相互作用の影響で引き起こされる非自明な超伝導現象を探った。特に、SrPtAs の超伝導では時間反転対称性を破るトポロジカルなカイラルd-波ペアリング対称性が実現している可能性を追求し、スピン軌道相互作用とカイラルなペアリングの協奏を詳細に調べ、試料境界で自発磁化が発生し得ることを明らかにした。この現象は普遍的な性質を持ち、SrPtAs に限らずスピンホール金属系のカイラル超伝導状態では必ず生じることを別の一般的な模型を用いて示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超伝導と磁性は元来相反するものと考えられてきた。しかし、強磁性超伝導体など磁性と超伝導が共存する場合も存在し得ることが、強相関電子系の超伝導に関する議論が発展するにつれ明らかになってきた。この問題は、クーバー対のトポロジ的性質とスピン軌道相互作用の協奏により自発磁化が発生するというものであり、磁性の起源として新しいものである。超伝導スピントロニクスに新たな知見を用いることとなり、新たなデバイス開発への足掛かりともなり得る。

研究成果の概要（英文）：In this study, we focus on the honeycomb network superconductors SrPtAs and investigate the non-trivial superconducting phenomena induced by spin-orbit interaction. Specifically, we pursue the possibility that the superconductivity in SrPtAs realizes a topological chiral d-wave pairing symmetry that breaks time-reversal symmetry. We thoroughly examine the interplay between spin-orbit interaction and chiral pairing, revealing that spontaneous magnetization can occur at the sample boundaries. This phenomenon is shown to be a universal property, occurring not only in SrPtAs but also in chiral superconducting states of spin-Hall metals, as demonstrated using another general model.

研究分野：凝縮系物理学理論

キーワード：Superconductivity Topology Spin-orbit interaction

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

多バンド構造やスピン軌道相互作用が存在する金属系で、スピンホール効果など多彩なスピントロニクスが研究されている。そのような金属が超伝導になるとさらに豊富な物理現象が小路、超伝導スピントロニクスやトポロジカル超伝導など興味深い提案が数多くなされている。しかし未だ開拓の余地は大いにあり、今後もますますの発展が期待されている。

### 2. 研究の目的

このような発展の可能性を秘めた系として、本研究では蜂の巣ネットワーク系超伝導体 SrPtAs に注目し、スピン軌道相互作用の影響で引き起こされる非自明な超伝導現象を探った。

### 3. 研究の方法

解析計算・数値計算を織り交ぜた理論的手法を用いた。

### 4. 研究成果

カイラル超伝導体におけるスピントロニクスに関する研究成果について述べる。カイラル超伝導体では、重心周りの相対軌道角運動量が強磁性的に揃ったかたちでクーパー対凝縮が起こっている。そのため時間反転対称性を自発的に破る。さらにこの状態は、チャーン数によって特徴付けられるトポロジカルな超伝導状態であり、試料境界や、量子渦・ドメイン壁など位相欠陥の中心に束縛状態が出現する。この束縛状態と、結晶の空間反転対称性(の局所的破れ)を起因としたスピン軌道相互作用によって生じる、自発スピン分極に関する研究を行った。

超流動ヘリウム3やウラン系超伝導体を皮切りに、銅酸化物超伝導体など強相関フェルミ粒子系の超伝導・超流動状態が続々と発見され、異方的ペアリング状態の研究が大きく進展してきた。異方的状態では、従来型のペアリング状態(s-波状態)では現れない特徴的な現象が生じる。初期の異方的超伝導体の研究では、単一バンド近似を用いた議論がほとんどであった。その後で、MgB<sub>2</sub>や鉄ヒ素系超伝導体など、多バンド(多軌道)構造やスピン軌道相互作用が重要な役割を演じることが明らかにされてきている。

こうした効果の影響により、さらなるパラエティに富んだ超伝導現象が引き起こされる。実際、超伝導スピントロニクスやトポロジカル超伝導体など、大変興味深い提案が数多くなされているが、すべての可能性を議論し尽くしたと言うにはまだ程遠い。このような状況において、多バンド(多軌道)構造やスピン軌道相互作用の効果が重要な役割を果たす具体的な物質系をピックアップし、これらの効果とペアリング対称性が織りなす豊富な超伝導現象を系統的・網羅的に研究することは重要である。そしてベースとなるモデルは個別の物質のみに適用できるものではなく、一般性も十分に兼ね備え、かつ、できるだけ単純で議論を見通しよく展開できるミニマルなモデルであることが大切である。

研究代表者は、そのような個性・一般性を兼ね備えたモデルとして、蜂の巣ネットワーク系超伝導体 SrPtAs の有効強束縛モデルに注目した。そしてこのモデルを用いて、多バンド構造・スピン軌道相互作用・ペアリング対称性と、超伝導状態における種々の物理量の振る舞いの関係を明確にし、さらには新奇現象の理論的提案を行うことを目指した。

図1に SrPtAs のユニット・セルを示す。SrPtAs では Pt の 5d 電子が電気伝導に対して支配的であることがバンド計算から示されているため、この有効強束縛モデルでは Pt サイト間のホッピングのみ考慮

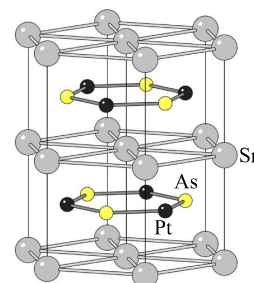


図1 SrPtAs<sub>4</sub>

されている．Pt サイト上の軌道自由度は1としているが，2層系であるためユニット・セル内に2つの Pt サイトが存在し，多バンド構造を持つ．面内最近接ホッピングにスピン依存性を入れたかたちで与えられる内因性スピン軌道相互作用が，トポロジカル絶縁体の模型である Kane-Mele 量子スピンホール系のそれと等価である．よって SrPtAs はスピンホール金属である．

SrPtAs のペアリング対称性に関しては 群論および汎関数くりこみ群による理論的考察から，時間反転対称性を破るトポロジカルなカイラル d-波 ( $d_{x^2-y^2 \pm id_{xy}}$  波) 状態が実現している可能性が高いことが本研究計画開始以前に研究代表者らによって指摘され，現段階ではすべての実験と矛盾しないことが示されている．そこで本研究計画では，SrPtAs でカイラル d-波状態が実現している場合に起こり得る特異現象を集中的に探った．この状態はカイラル表面状態をトポロジカルにサポートする．ところで応募者らは，この系の内因性スピン軌道相互作用によりカイラル表面状態のエネルギー・スペクトルがスピン分裂し，試料表面で自発的にスピン分極が生じることを示した．さらには試料境界の形状によって表面近傍で自発磁化が発生することを示した．本研究課題では，どのような形状において自発磁化が発生するかを明らかにすることに成功した．また，チャーン数の飛びが生じる量子相転移点近傍において，この磁化が増大することを示した．

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Taiki Ogawa <sup>1,2</sup> , Kaoru Manabe <sup>1</sup> , Tetsuya Takeuchi <sup>3</sup> , Takanori Kida <sup>4</sup> , Haruhiko Kuroe <sup>5</sup> , Masayuki Hagiwara <sup>4</sup> , Jun Goryo <sup>6</sup> , Tadashi Adachi <sup>5</sup> , and Kazutaka Kudo <sup>1</sup> ,	4. 巻 91
2. 論文標題 Non-monotonic Variation of Superconducting Transition Temperature in BaPtAs-BaPtSb Solid Solution	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.91.123702	査読の有無 無
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 Yutaka Tobita and Jun Goryo	4. 巻 2164
2. 論文標題 Topological feedback for superconducting states	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12010
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yoshiki Imai, Tsuyoshi Imazu and Jun Goryo	4. 巻 2164
2. 論文標題 Electronic structures and effective models in BaPtSb and BaPtAs with ordered honeycomb structures	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12011
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Masafumi Kudo, Shohei O. Shingu, Tsuyoshi Imazu, Jun Goryo and Yoshiki Imai	4. 巻 2164
2. 論文標題 Possible pairing symmetries in the ordered honeycomb network superconductor BaPtSb	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12015
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Tsuyoshi Imazu and Jun Goryo	4. 巻 2164
2. 論文標題 Spontaneous spin polarization at the edge of the chiral superconducting states in a spin Hall metal	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12016
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tsuyoshi Imazu, Masafumi Kudo, Shohei O. Shingu, Jun Goryo, Yoshiki Imai	4. 巻 73
2. 論文標題 Pairing Symmetry in the Ordered Honeycomb Network Superconductor BaPtAs	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 New Physics: Sae Mulli	6. 最初と最後の頁 1110-1114
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 Naoya Furutani, Yoshiki Imai, Tsuyoshi Imazu, and Jun Goryo	4. 巻 92
2. 論文標題 Study on Susceptibilities of Superconductors BaPtSb and BaPtAs with Honeycomb Structure	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 94708
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 -

[学会発表] 計8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Yutaka Tobita and Jun Goryo
2. 発表標題 Topological feedback for superconducting states
3. 学会等名 Strongly Correlated Electron Systems (SCES) 2020 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshiki Imai, Tsuyoshi Imazu and Jun Goryo
2. 発表標題 Electronic structures and effective models in BaPtSb and BaPtAs with ordered honeycomb structures
3. 学会等名 Strongly Correlated Electron Systems (SCES) 2020 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masafumi Kudo, Shohei O. Shingu, Tsuyoshi Imazu, Jun Goryo and Yoshiki Imai
2. 発表標題 Possible pairing symmetries in the ordered honeycomb network superconductor BaPtSb
3. 学会等名 Strongly Correlated Electron Systems (SCES) 2020 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tsuyoshi Imazu and Jun Goryo
2. 発表標題 Spontaneous spin polarization at the edge of the chiral superconducting states in a spin Hall metal
3. 学会等名 Strongly Correlated Electron Systems (SCES) 2020 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今津毅士, 御領潤
2. 発表標題 BHZ金属におけるカイラルp-波超伝導のエッジ状態
3. 学会等名 日本物理学会大76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 工藤成史, 大場翔平, 御領潤
2. 発表標題 空間反転対称性を破る物質 BaPtSb における超伝導ペアリング対称性
3. 学会等名 日本物理学会大76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大場翔平, 植木輝, 御領潤
2. 発表標題 非共型結晶系におけるバンド縮退とインターバンド・ペアリング状態
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 工藤成史, 大場翔平, 御領潤
2. 発表標題 空間反転対称性を破る超伝導体BaPtSb/BaPsAsのペアリング対称性の分類
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020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	植木 輝  (Ueki Hikaru)  (90828469)	北海道大学・理学研究院・研究院研究員    (10101)	

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