

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：35302

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K03724

研究課題名（和文）時間反転対称性を破るカイラル超伝導体の輸送現象および端状態の研究

研究課題名（英文）Study on transport properties and edge states of chiral superconductor with broken time-reversal symmetry

研究代表者

今井 剛樹 (Imai, Yoshiki)

岡山理科大学・理学部・准教授

研究者番号：10396666

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：トポロジカル超伝導の有力候補の一つである、時間反転対称性を破る新奇超伝導の探索・物性評価について、理論的立場からの解析を遂行した。特に、八面体型の結晶構造をもつPt化合物超伝導体は、その構成元素の違いにより、異なる超伝導状態の実現が示唆されている。これらの系に対し、第一原理計算手法ならびに多体電子論的手法を活用して、定量的にその電子状態および各種のゆらぎの効果を評価した。その結果、低エネルギー領域の電子構造の特徴が、超伝導対波動関数に強く寄与することを示した。得られた結果は時間反転対称性を破る超伝導状態の出現に対する、微視的機構の理解に寄与するものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

次世代デバイスの素材の候補として、省電力性に優れるトポロジカル物質は関心が寄せられている。時間反転対称性を破る超伝導はその有力候補として、現在勢力的に探索が行われており、理論側からのミクロな観点からのアプローチによる実験とのクロスチェックは重要な課題である。本研究ではその低エネルギー領域での電子構造が超伝導状態の出現に大きな寄与を及ぼすことを示しており、今後の新奇物質探索や微視的理解に貢献するものである。

研究成果の概要（英文）：The theoretical study on novel superconductivity with time-reversal symmetry breaking was investigated microscopically. In particular, for Pt-based compound superconductors with a honeycomb-type crystal structure, it has been suggested that different superconducting states can be realized depending on the constituent elements. For these systems, we quantitatively evaluated their electronic states and various fluctuation effects using first-principles calculation methods and many-body theories of the electronic structure. As a result, we demonstrated that the superconducting pairing wave function strongly depends on the characteristics of the electronic structure in the low-energy region. The obtained results contribute to the understanding of the microscopic mechanisms behind the emergence of superconducting states with time-reversal symmetry breaking.

研究分野：物性II

キーワード：時間反転対称性を破る超伝導 トポロジカル物質

1. 研究開始当初の背景

時間反転対称性を破る超伝導はトポロジカル超伝導の有力候補であり、活発な探索が遂行されている。遷移金属酸化物超伝導体 Sr_2RuO_4 、および 2011 年に報告された八ニカム型結晶構造をもつ SrPtAs では時間反転対称性を破るカイラル超伝導状態の実現が示唆されている。さらに 2018 年に同一の結晶群に属する SrPtSb 型 BaPtSb および BaPtAs が超伝導状態を示し(引用文献)、特に BaPtSb に対する μSR を用いた予備実験では、時間反転対称性を破る超伝導状態の出現の可能性が報告されていた(引用文献)。本研究では上記の新奇超伝導体の報告から着想を得ている。研究代表者は本研究開始以前には遷移金属酸化物超伝導体 Sr_2RuO_4 などに対する端状態やトポロジカルな性質と観測量との対応関係などを議論してきた。これらの知見に基づき、さらに八ニカム構造をもつ複数の超伝導体の解析を進めた。

2. 研究の目的

本研究では時間反転対称性を破る超伝導の候補であるカイラル超伝導に着目し、微視的な観点からのその出現に対するトリガーとなりうる電子構造の解明、および分類を目指すことを目的とした。

3. 研究の方法

本研究は、上記の超伝導体に対し第一原理計算手法と多体電子論的解析手法を用いて定量的かつ系統的な解析を実行する。主として第一原理計算手法を用いて各物質の電子状態を評価し、微視的解析に用いる低エネルギー有効モデルを構築する。さらにその有効モデルを多体電子論的手法で解析し、各種のゆらぎの評価ならびに物性に寄与する主要な電子構造を同定し、出現しうる超伝導状態の対波動関数を議論する。

具体的には第一原理計算手法には Quantum Espresso ならびに WIEN2k パッケージを用い、有効モデルの構築には Slater-Koster の方法および Wannier90 パッケージなどを利用している。構築した有効モデルに対して、平均場近似や乱雑位相近似(RPA)を適用している。常伝導相における各種の相関関数からゆらぎを評価した。また線形化されたエリアシュベルク方程式を解き、出現しうる超伝導対波動関数の有力な候補を同定した。

4. 研究成果

(1) 遷移金属酸化物超伝導体 Sr_2RuO_4 に対する伸張圧縮効果の研究

時間反転対称性を破る超伝導体 Sr_2RuO_4 を念頭に置いた、カイラル超伝導のトポロジカルな性質に対する伸張圧縮効果を遂行した。まず、第一原理計算手法により低エネルギー電子状態を評価し、そこから有効モデルを構築して、超伝導状態における一軸方向の圧力効果とトポロジカルな性質との関連性を議論した。複数のフェルミ面のうち、2 次元的なバンドは圧力効果に特に敏感であり、圧力に応じてフェルミ面のトポロジーが変化し、その結果、超伝導状態のトポロジカルな性質に強く影響する。

カイラル超伝導に対する観測量である熱ホール伝導度の温度依存性は低温領域ではチャーン数 N_c 、超伝導ギャップ Δ としたとき、

$$\kappa_{xy} \approx \frac{\pi N_c}{12} T + \beta e \frac{\Delta}{T}$$

と表され(引用文献)、絶対零度付近ではチャーン数 N_c と温度 T に比例し、温度上昇とともに上式右辺第 2 項の寄与により温度の一次関数からのずれが生じる。超伝導対の対形成に応じてトポロジカルな性質を反映するチャーン数および超伝導ギャップの構造は変化するため、熱ホール伝導度の温度依存性を観測・評価することにより、対形成のふるまいを同定できることを示した。その詳細を学術論文として報告している。

(2) 八ニカム型結晶構造をもつ Pt 超伝導体の常伝導相におけるゆらぎの評価

超伝導体 SrPtSb 型 BaPtSb (空間群 187) は Pt と Ba が 2 次元的な八ニカム構造ネットワークを構成しており、大域的に空間反転対称性が破れた結晶構造となっている。1.6K 付近で超伝導転移が見られ、 μSR の準備実験では時間反転対称性を破る可能性が報告されている。同一の結晶構造をもつ BaPtAs も 2.8K 付近で超伝導転移が報告されている。As の一部を Sb に置換した混晶系に対する研究では、格子パラメータは置換の比率に応じて単調に変化する一方で、超伝導転移温度は非単調な変化を示し、これらは両者で異なる超伝導状態が実現していることを示唆している(引用文献)。したがって、両物質に対する系

統的な解析は、時間反転対称性を破る超伝導体の理解に大きく寄与するものである。この

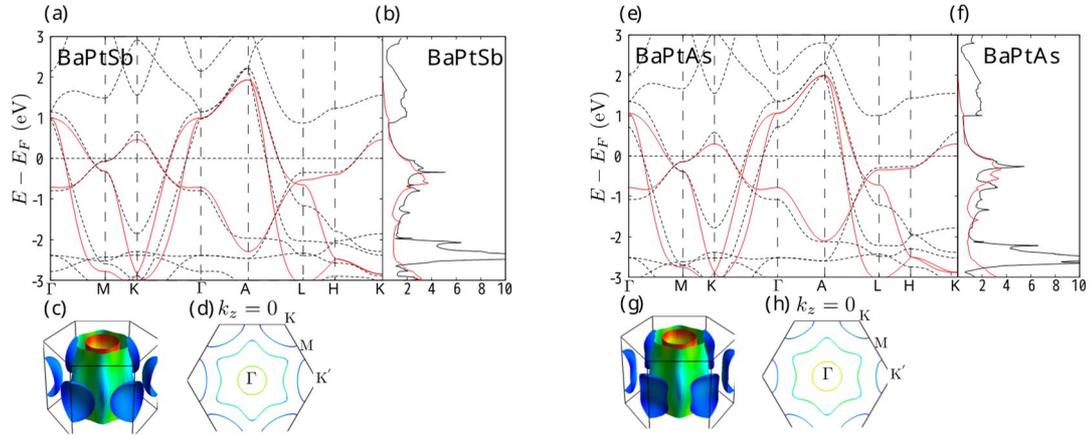


図 1 バンド構造，状態密度，フェルミ面と $k_z = 0$ の断面図。(BaPtSb：左図，BaPtAs：右図) 図(a)，(e)の赤線は有効模型のバンド構造 [雑誌論文]

ような背景のもと，両者の電子構造を定量的に見積もり，常伝導相における各種のゆらぎの発達の仕方について評価している。

図 1 は第一原理計算手法で求めた BaPtSb および BaPtAs の電子構造を表している。両者は極めてよく似た構造を示す。ともに van Hove 特異点である M 点周りでは低エネルギー付近に平坦なバンドが出現するが，BaPtAs に比べ BaPtSb は平坦なバンドがフェルミレベル付近に近づいていることがわかる。その結果， $k_z = 0$ でのフェルミ面に対し，ブリルアンゾーン端の K 点 (K' 点) を囲む BaPtSb のフェルミ面は BaPtAs と比較して K 点から離れている特徴をもつ。

両者に対し，スレーター・コスターの方法を用いて低エネルギー有効格子模型を構築して，RPA を適用した。RPA では各種の相関関数は既約感受率の構造を強く反映するため，主として既約感受率に注目して解析を行う。

BaPtSb および BaPtAs の既約感受率の最大固有値の波数依存性を図 2 に示す。BaPtSb は $q \sim (0, 0.7 \sim 0.8\pi, 0)$ (およびその 6 回対称点) で最大値をもち， q_z 方向には $|q_z| \sim \pi/2$ 付近まで発達している。一方で BaPtAs は $q \sim (0, 0, \pi)$ で最大値をもつことを示している。この結果は，BaPtSb はゆらぎが発達は 2 次元面内で支配的である一方で，BaPtAs は面間方向にゆらぎが発達しやすい傾向を示唆している。さらに，両物質とも感受率の最大固有値へは，ブリルアンゾーン端の K 点周りのフェルミ面および電子状態の寄与が支配的であることも

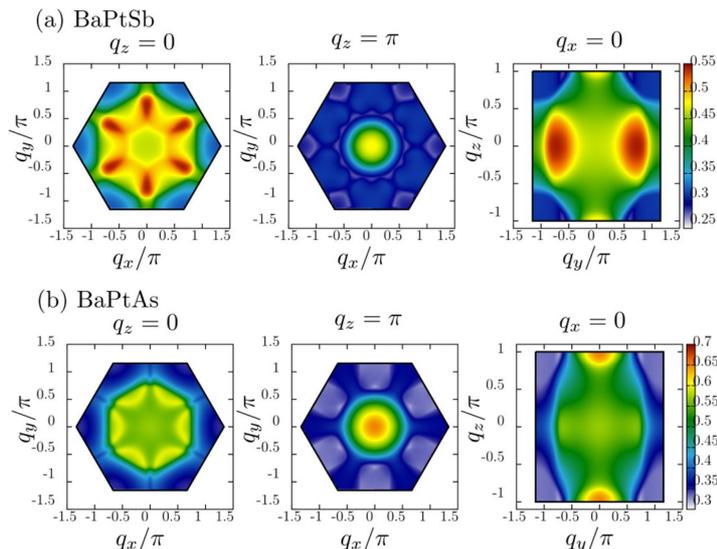


図 2 (a) BaPtSb および (b) BaPtAs の既約感受率の最大固有値の波数依存性。温度 $k_B T = 0.01$ eV. [雑誌論文]

確認している。図 3 はフェルミ面のネスティングの様子を示したものである。BaPtSb は BaPtAs と比較して K 点周りのフェルミ面のネスティングが良く，それが感受率に強く反映されているものと考えられる。一方， k_z 軸方向にもフェルミ面の重なりが見られ，これが $q \sim (0, 0, \pi)$ における感受率の増大に結びついている。既約感受率で現れるゆらぎは各種の

秩序に強く反映されるが、BaPtSb の感受率の結果は三角格子などの結果と類似しており、出現しうる超伝導状態としてはカイラル超伝導が有力候補となりうることを示している。

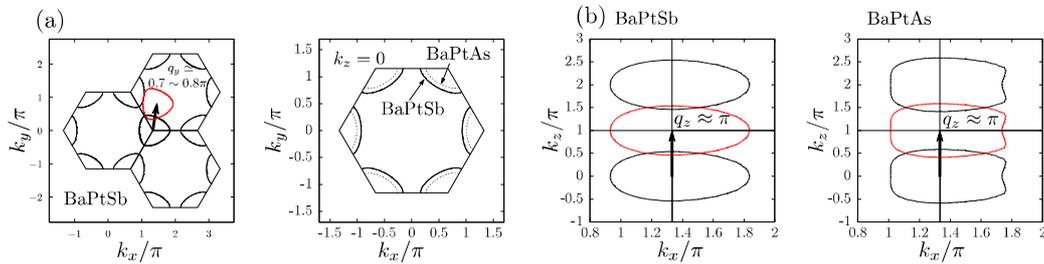


図3 フェルミ面のネスティング (a) 面内, (b) 面間方向。K点周りのフェルミ面のみ表示。

[雑誌論文]

このように BaPtSb と BaPtAs は同一の結晶構造をもち、電子構造も全体的に極めて類似しているが、低エネルギー領域の微妙な違いが感受率に強く反映されることを示した。その結果、両者の出現しうる超伝導状態が異なる可能性について議論した。本研究については学術論文、国際会議プロシーディングス、国際学会および日本物理学会などで報告している。

(3) ハニカム型結晶構造をもつ Pt 超伝導体の超伝導対波動関数の評価

前述の(2)では Pt 超伝導体の常伝導状態では、既約感受率の最大固有値へは K 点周りのフェルミ面および電子状態が大きな寄与を占めていることを示した。その結果を受けて、そのフェルミ面およびバンド構造を再現する 1 バンドモデルを新たに構築し、超伝導対波動関数を解析した。具体的には RPA の範囲で線形化されたエリアシュベルク方程式を数値的に解き、出現が有力視される対波動関数について分類・評価を行っている。

van Hove 特異点である M 点周りの低エネルギー領域に出現する平坦なバンドに起因して、スピンシングレット ($S = 0$) の解では $d_{x^2-y^2}$ ならび d_{xy} 的な構造が最安定状態に縮退して現れる (図 4(a,b))。これはカイラル d 波 ($d_{x^2-y^2} \pm id_{xy}$) の出現を示唆している。一方、スピントリプレット ($S = 1$) の解は f 波が現れた (図 4(c))。温度を下げるにつれて、スピンシングレット、トリプレットともに最大固有値は発達するが、用いたパラメータの範囲ではス

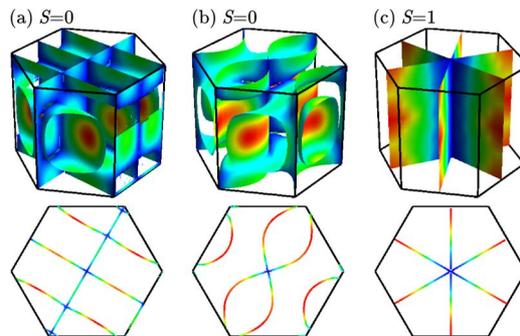


図4 安定な対波動関数の波数依存性。(a,b) スピンシングレット, (c) ス

ピントリプレットの解。下図は $k_z = 0$ での断面図。実線はノード。

ピントリプレットの解が、ややスピンシングレットよりも安定する傾向を示した。

系はガンマ点まわりにも 2 次元的構造をもつシリンダー状のフェルミ面が存在するため、3 バンド構造を考慮すると、 f 波の解は不安定になる一方で、カイラル d 波は影響を受けにくいことを議論した。本研究については、日本物理学会ならびに国内研究会で報告している。

(4) ハニカム型結晶構造をもつ YPtAs 型 BaPtAs (空間群 194) の常伝導相におけるゆらぎの評価

ハニカム型結晶構造をもつ YPtAs 型 BaPtAs (空間群 194) は c 軸方向に PtAs 2 層が交互に積層した 4 層周期の構造を取り、その結果空間反転対称性をもつ (図 5)。温度 2.1 - 3 K で超伝導転移が報告されている。

第一原理計算手法で得られた電子構造は空間群 187 の SrPtSb 型 BaPtSb および BaPtAs とよく似たものとなるが、極めて 2 次元性が強く、フェルミ面はシリンダー状構造をとる。さらにブリルアンゾーン近傍に六角形状のフェルミ面が現れる。

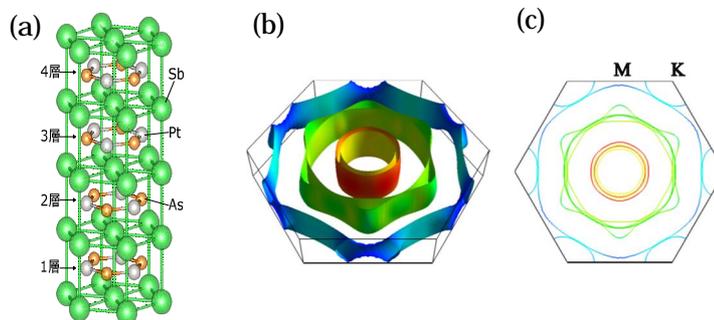


図 5 (a) YPtAs 型 BaPtAs (空間群 194) の結晶構造

(b) フェルミ面 (c) $k_z = 0$ のフェルミ面

有効格子模型を構築するパッケージである Wannier90 を用いて飛び移り積分の値を見積もった。 c 軸方向の主要な As - As 間ホッピングは 1 - 2 層間および 3 - 4 層間は 0.11 eV 程度に対し、2 - 3 層間は 0.05 eV 以下となっており、面間方向の飛び移りが強く抑制されていることを示している。

既約感受率の波数依存性 (図 6) は、BaPtSb の $q_z \sim 0$ の結果と似た構造をもつが、BaPtSb に比べて c 軸方向 (q_z 方向) の依存性がさらに抑制され、2 次元性が強く表れていることを示した。これらの結果より、時間反転対称を破る超伝導の出現にはより有利な電子構造をもち得ることを示唆している。

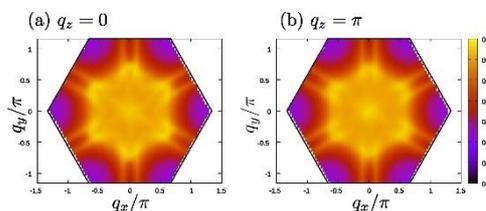


図 6 既約感受率の波数依存性

本研究については、日本物理学会ならびに国内研究会で報告している。

(5) まとめと今後

時間反転対称性を破る超伝導体の複数の候補物質に対し、第一原理計算手法および多体電子論的手法を活用して微視的観点からの理論的解析を遂行した。特に超伝導体 SrPtSb 型 BaPtSb ならびに BaPtAs では、両者の低エネルギー領域の電子構造の違いを反映して、異なるゆらぎのモードが発達することを報告し、出現する超伝導状態が異なる可能性を議論した。その後、超伝導状態の対波動関数の有力候補を絞り込み、カイラル超伝導が有力候補になることを示した。さらに YPtAs 型超伝導体 BaPtAs について、面内方向での強い伝導性を反映して、2 次元的なゆらぎのモードが発達することを示した。これらの系統的な研究を引き続き遂行しており、時間反転対称性を破る超伝導体に対するトポロジカルな性質についての詳細な説明は、今後の重要な研究トピックと考えられる。

<引用文献>

- K. Kudo, T. Takeuchi, H. Ota, Y. Saito, S. Ayukawa, K. Fujimura, and M. Nohara, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 073708 (2018)
- K. Kudo, Y. Saito, T. Takeuchi, S. Ayukawa, T. Kawamata, S. Nakamura, Y. Koike, and M. Nohara, Phys. Soc. Jpn. **87** 063702 (2018)
- T. Adachi *et al.* KEK-MSL REPORT 2017 54 (2018)
- Y. Imai, K. Wakabayashi, and M. Sgrist, Phys. Rev. B **93**, 024510 (2016)
- T. Ogawa, K. Manabe, T. Takeuchi, T. Kida, H. Kuroe, M. Hagiwara, J. Goryo, T. Adachi, and K. Kudo, J. Phys. Soc. Jpn. **91**, 123702 (2022)

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 3件）

1. 著者名 Naoya Furutani, Yoshiki Imai, Tsuyoshi Imazu, 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 094708 (7ページ)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.92.094708	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, Shuhei O. Singu, Jun Goryo, Yoshiki Imai	4. 巻 73
2. 論文標題 Pairing Symmetry in the Ordered Honeycomb Network Superconductor BaPtSb	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) 10.3938/NPSM.73.1110	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 Naoya Furutani, Yoshiki Imai, Tsuyoshi Imazu, Jun Goryo	4. 巻 38
2. 論文標題 Electronic structure for BaPtSb with Ordered Honeycomb Network under hydrostatic pressure	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 11063
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) 10.1088/1742-6596/2164/1/012011	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 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) 10.1088/1742-6596/2164/1/012015	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 1.S. Michimura, M. Kosaka, A. Machida, R. Numakura, R. Iizuka, S. Katano, Y. Imai, N. Shirakawa, Y. Yamasaki, H. Nakao, H. Sato, S. Ueda, and K. Mimura	4. 巻 90
2. 論文標題 Charge-Ordered State and Low-Dimensional Magnetic Fluctuations in Yb5Ge4 Single Crystal	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn. 90, 044703	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.044703	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 Imai Yoshiki, Sigrist Manfred	4. 巻 89
2. 論文標題 Topological Features in a Chiral p-wave Superconductor under Uniaxial Strain	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 014702 ~ 014702
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.014702	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 Ueki Hikaru, Inagaki Shoma, Tamura Ryota, Goryo Jun, Imai Yoshiki, Rui W. B., Schnyder Andreas P., Sigrist Manfred	4. 巻 30
2. 論文標題 Phenomenology of the Chiral d-Wave State in the Hexagonal Pnictide Superconductor SrPtAs	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceeding	6. 最初と最後の頁 11044
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.30.011044	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 Hanayama Chisa, Imura Shoma, Imai Yoshiki	4. 巻 30
2. 論文標題 Lattice-Parameter Dependence of Magnetic Structure in Orthorhombic YMnO ₃	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceeding	6. 最初と最後の頁 11187
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.30.011187	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 0件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 古谷 直也、今井 剛樹、今津 毅志、御領 潤
2. 発表標題 八ニカム構造超伝導体 BaPtSb および BaPtAs に対する有効模型を用いた感受率の解析
3. 学会等名 2022年応用物理・物理系学会中国四国支部合同学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naoya Furutani, Yoshiki Imai, Tsuyoshi Imazu, Jun Goryo
2. 発表標題 Electronic structure for BaPtSb with Ordered Honeycomb Network under hydrostatic pressure
3. 学会等名 29th International Conference on Low Temperature Physics (LT29) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 今津 毅志、工藤 成史、新宮 翔平、御領 潤、今井 剛樹
2. 発表標題 蜂の巣ネットワーク超伝導体 BaPtSb のペアリング対称性
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 古谷 直也、今井 剛樹、今津 毅志、御領 潤
2. 発表標題 八二カム構造超伝導体 BaPtSb, BaPtAs の感受率の解析
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023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 The International Conference in Strongly Correlated Electrons systems 2020/21 (Brazil) (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 The International Conference in Strongly Correlated Electrons systems 2020/21 (Brazil) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古谷直也, 今井剛樹, 今津毅士, 御領潤
2. 発表標題 八二カム構造をもつ超伝導物質BaPtSbおよびBaPtAsの有効モデルの構築
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会(2022年)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古谷直也, 今井剛樹, 飯村翔馬
2. 発表標題 八ニカム型ナノリボンにおける熱電特性の解析
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会 (
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ueki Hikaru, Inagaki Shoma, Tamura Ryota, Goryo Jun, Imai Yoshiki, Rui W. B., Schnyder Andreas P., Sigrist Manfred
2. 発表標題 Phenomenology of the Chiral d-Wave State in the Hexagonal Pnictide Superconductor SrPtAs
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2019 (SCES '19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hanayama Chisa, Iimura Shoma, Imai Yoshiki
2. 発表標題 Lattice-Parameter Dependence of Magnetic Structure in Orthorhombic YMnO3
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2019 (SCES '19) (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
研究協力者	御領 潤 (Goryo Jun)	弘前大学大学院・理工学研究科・教授	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	シグリスト マンフレッド (Sigrist Manfred)	スイス連邦工科大学チューリッヒ校・理論物理学研究所・教授	

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			
スイス	スイス連邦工科大			