

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K04715

研究課題名(和文)ルテニウム酸化物超伝導の試料高品質化がもたらす真の磁場-温度相図の確立

研究課題名(英文)Field-temperature phase-diagram of a high quality ruthenate superconductor

研究代表者

菊川 直樹(KIKUGAWA, Naoki)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・エネルギー・環境材料研究拠点・主幹研究員

研究者番号：00442731

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：Sr₂RuO₄における異方的超伝導状態の本質的な理解を深めるため、当初は磁場-温度相図に着目した研究をおこなった。まず、育成方法の改善によりSr₂RuO₄の高品質かつ大型単結晶育成に成功した。これらを用いた研究により、Sr₂RuO₄の超伝導は、従来提唱されていたスピン三重項対ではなくスピン一重項対であることが決定的となり、四半世紀ぶりの転換をもたらすこととなった。一軸圧力下での研究と有機的に組み合わせることで、2成分からなる超伝導秩序変数や磁気秩序の発見に結びついた。磁場-温度相図については「新しい相」の解釈に強い制限を与えることができ、超伝導秩序変数決定に向けさらなる研究へつながった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Sr₂RuO₄は常伝導状態がフェルミ液体的挙動を示し、擬2次元的な多バンドの電子構造(フェルミ面)も詳細にわかっていることから、数ある強相関電子系物質の中でも典型的な物質の一つと考えられている。一方で、このような電子状態が舞台となって発現する超伝導については、数多くの研究がなされ四半世紀が経過するものの、まだ系統的な理解には達していないのが現状である。超伝導転移温度は1.5ケルビンと低いものの、Sr₂RuO₄における異方的超伝導について矛盾なく理解することは、電子間の相互作用が強いことが本質である物質系で発現する異方的超伝導の普遍的枠組み構築に向けて貢献できる。

研究成果の概要(英文)：To deepen the understanding of the anisotropic superconducting state in Sr₂RuO₄, we initially focused on the magnetic field-temperature phase diagram. First, we succeeded in growing high-quality and large-size single crystals of Sr₂RuO₄ by improving the growth conditions. Next, using the grown crystals, research on this material has reached a turning point in the past quarter of a century because the superconductivity of Sr₂RuO₄ is found to be an even parity rather than an odd parity. Combined with research under uniaxial pressure, for instance, we found a two-component superconducting order parameter and induced magnetic order by muon spin rotation experiments. In addition, for the magnetic field-temperature phase diagram, we were able to give a strong constraint on the "new phase" of the field-temperature phase diagram. These results should proceed to further research on this material.

研究分野：固体物理

キーワード：Sr₂RuO₄ 超伝導 単結晶育成

1. 研究開始当初の背景

Sr_2RuO_4 は、銅酸化物高温超伝導体と同じ層状ペロフスカイト構造を有し、温度 1.5 ケルビンで超伝導を示す。 Sr_2RuO_4 の超伝導は、銅酸化物や鉄系化合物、希土類化合物、有機導体などの「強相関電子系物質」で見られる超伝導と同様、電子間の強い相互作用を反映した異方的な超伝導秩序変数の形成が確実視されている。異方的超伝導を示すこれらの物質のうちほとんどは、クーパー対がスピン一重項対であるのとは対照的に、 Sr_2RuO_4 は当初、ほとんど例のないスピン三重項対の形成が有力視されていた。また、超伝導状態で観測された内部磁場により、内部自由度の存在するスピン三重項超伝導状態が提案されていた。そのため 1994 年に Sr_2RuO_4 の超伝導が報告されて以来、超伝導転移温度は低いにもかかわらず、常伝導状態ではフェルミ流体的挙動と、その起因となる詳細にわたって明らかになった擬 2 次元的な多バンドをもつ電子構造のもとでのような超伝導状態が発現しているのか興味もたれてきた。

Sr_2RuO_4 の超伝導は典型的なクリーンリミットであり、キャリアの平均自由行程が超伝導コヒーレンス長(~66 nm)程度になる不純物によりすぐに抑制され、0.15%程度の不純物量でその超伝導性は完全に消失する。また、本質的な超伝導物性を観測するには不純物量を 50 ppm 以下(超伝導転移温度は 1.45 ケルビン以上に相当)にする必要があることもわかってきた。本研究の契機となったのは、不純物濃度が 10 ppm に相当する超伝導転移温度が 1.49 ケルビンの試料にて、高感度磁気トルク法により、「新たな超伝導相」の兆候として微少なながらも高磁場領域で反磁性成分を検出したことである。この「相」は不純物量 60 ppm の試料(超伝導転移温度が 1.44 ケルビン)では見えていない。この磁気トルク法では当時の試料均質性を考慮して小さな試料(0.20 mm × 0.25 mm × 0.03 mm)程度の試料を用いたが、「新しい相」の詳細を明らかにするには、磁気トルク以外にも多様な実験をおこなう必要がある。そのため、高品質化および大型の単結晶試料を育成することも Sr_2RuO_4 の研究では不可欠であることが認識されていた。

2. 研究の目的

本研究「層状ルテニウム酸化物の試料純良化がもたらす超伝導多重相」の目的は、 Sr_2RuO_4 超伝導の基礎物性といえる磁場-温度相図をもとに、超伝導秩序変数の決定に結びつけることである。その際、研究の根幹となる大型高品質の単結晶を育成することも本研究の目的である。なお、本研究の期間中、 Sr_2RuO_4 の超伝導研究について四半世紀ぶりの大転換をもたらすこととなったが、これは我々の高品質単結晶を用いたことでもたらされたものである。幅広い共同研究もおこなうことで、磁場-温度相図について特異な状態が実現している可能性を示した。

3. 研究の方法

Sr_2RuO_4 の単結晶は、これまで浮遊帯域法にて育成してきた。本研究では、これまでの育成過程を見直し、不純物の偶発的混入をより抑制し、本質的物性を示す 1.45 ケルビン以上の結晶を再現よく育成することを試みた。育成した結晶に対しバルク物性を反映する比熱測定を中心に評価した。

育成過程の見直しに加え、育成環境の改善にも取り組んだ。浮遊帯域法での Sr_2RuO_4 の育成時は熔融帯の温度が約 2000 °C に達し、かつ熔融帯の粘性は低いため、一般に育成中の熔融帯を安定に保つことが困難になる。熔融帯を安定に保つことは浮遊帯域法による育成で最重要項目の一つであり、 Sr_2RuO_4 について育成環境の改善として、ハロゲンランプの改良をキャノンマシンナリーと共同で取り組んだ。これらの得られた単結晶を用いた共同研究も活発に展開し、多様な実験手法を駆使して磁場-温度相図はもちろんのこと、 Sr_2RuO_4 の超伝導について本質的物性を明らかにした。

なお、研究期間中はコロナ禍の影響も受けたが、最大限の対策をとりつつ 2023 年 3 月まで研究を遂行することができた。その際、 Sr_2RuO_4 超伝導の包括的な理解に向け、磁場のみならず、一軸圧力も有効な外部制御パラメータとした研究や、姉妹物質への研究の展開など、強相関電子系物質において、より深い理解に向けての研究をおこなった。

4. 研究成果

(1) 単結晶育成

- ① 育成過程の見直しについて、従来は原料である RuO_2 と SrCO_3 を混ぜ合わせ、ペレットを作成して何回か焼成した後、原料棒を成形・再焼成していた。これを浮遊帯域炉にセットし、育成をおこなっていた。この方法では、いくつかの過程を必要とし、それらの過程の中で予期せず不純物の混入を招く恐れがあった。

本研究では、もともと RuO_2 が育成中に蒸発しやすいことも踏まえ、 RuO_2 を過剰に加えた($\text{Ru}/\text{Sr} = 1.15/2$)原料棒を用いていたため、 RuO_2 を「自己フラックス」ととらえることもできる。本研究では原料合成時のペレット作成をあえて省略し、 RuO_2 と SrCO_3 を混ぜ合わせたのち、直ちに原料棒を作成・焼成したものを浮遊帯域炉にセットした。原

料棒作成過程を簡略化したことで、不純物の偶発的混入の抑制を狙った。これにより得た原料棒で単結晶を 23 本育成したところ、13 本の単結晶(57%)において、本質的な超伝導性を示す目安となる 1.45 K 以上の超伝導転移温度を示した。下の図 1 に、育成した結晶の一例(a)、結晶のラウエ写真(b)、および比熱測定による超伝導転移のトビ(c)を示す。この育成方法の改善について、我々とは独立に京都大学でも原料棒の作成方法の改善により高品質な単結晶を得ることができ、両者の成果を合わせて論文発表にまとめた [Condens. Matter 4, 6 (2019)].

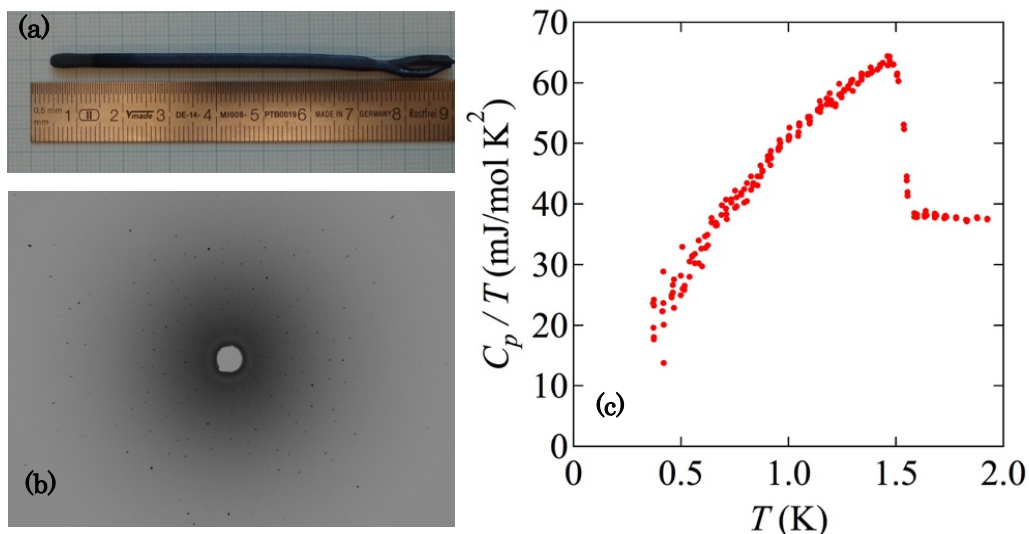


図 1: (a) 育成した Sr_2RuO_4 結晶, (b) ラウエ写真, (c) 比熱測定.

- ② 上記 1. は育成過程の見直しであるが、さらに、育成環境の改善にも取り組んだ。浮遊帯域法において熔融帯を安定に保つことが重要であるが、 Sr_2RuO_4 の育成時は熔融帯の温度が約 2000°C に達し、かつ熔融帯の粘性は低いため、これまで育成中に熔融帯の形成が不安定になり、それが結果として大型結晶を得ることの困難になっていた。これは、育成温度に必要な約 2000°C に達するため、ハロゲンランプのフィラメント構造が従来では 2 層構造のものを用いていたため、熔融帯自身が長くなり温度勾配も結果として緩やかになったため、育成中の熔融帯の安定が損なわれたと考えられる。

本研究では、従来の 2 層構造を単層構造にしたフィラメント構造のハロゲンランプを開発した(図 2)。ここで重要なことは、2 層構造から単層構造にしたものの、フィラメントの素材を最適化することで Sr_2RuO_4 の育成に必要な約 2000°C を集光点にて実現できたことである。これにより、単層構造というコンパクト化と高温の到達との両方を満たすハロゲンランプを開発できた。この開発した新ハロゲンランプを用い Sr_2RuO_4 を育成したところ、これまで 2 層構造のハロゲンランプでは熔融帯の長さが 8 mm (図 3(a))から、単層構造では 5 mm (図



図 2: (上) 従来の 2 層構造のフィラメント, (下) 新

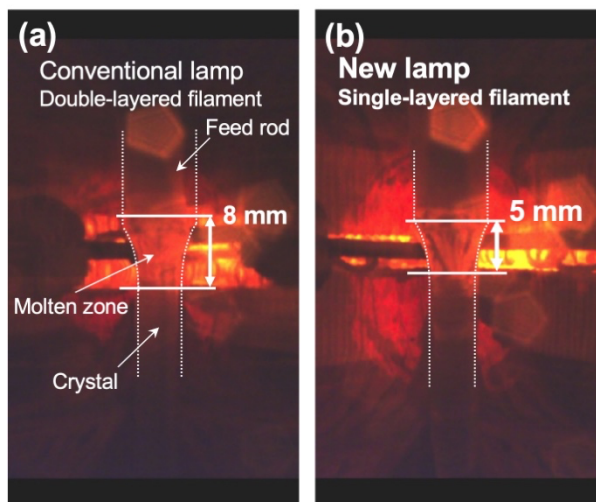


図 3: (上) 従来 2 層構造, (下) 新しい単層構造フィラメントのハロゲンランプでの Sr_2RuO_4 結晶育成.

3(b))と明確に短くすることができた。それにより熔融帯と結晶面境界における温度勾配を急峻にできたと考えられる。それにより育成中においても熔融帯を安定に保つことができた。結果として、これまで2層構造では典型的には7 cm (図 1(a))から、単層フィラメントでは12 cm に及ぶ単結晶が得られた(図 4)。また、超伝導転移温度は1.5 K を示し、高品質と大型を両立した結晶を得ることができた。さらに、 Sr_2RuO_4 のみならず、 $\text{Ca}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ の結晶大型化にも成功した。これらの成果を特許申請および論文にまとめた [Crystals **11**, 392 (2021), 特開 2022073173]。

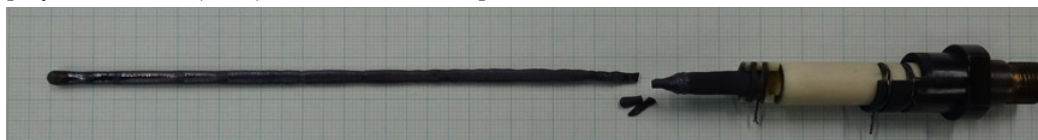


図 4: 新しい単層型フィラメントのハロゲンランプを用いて育成した Sr_2RuO_4 単結晶。

(2) 高品質単結晶を用いた物性

- ① 本研究中に Sr_2RuO_4 について大きな転換点を迎えた。(1)で育成した高品質単結晶を用いた共同研究により NMR ナイトシフトを測定したところ、超伝導転移温度以下で明確にスピン磁化率が低下した(図 5)。これは、従来の解釈である超伝導クーパー対がスピン三重項対ではなく、むしろスピン一重項対であることを示している。この結果は Sr_2RuO_4 の超伝導について四半世紀ぶりの研究の転換を促した[Nature **574**, 72 (2019)]。スピン磁化率の減少は、別グループからも再現された。この結果から、超伝導の磁場-温度相図の解釈について、「臨界磁場の抑制」についてはスピン一重項対であれば矛盾なく説明できること、さらに高磁場下での「新しい相」についても、(i) 試料の品質に極めて敏感であること (ii) 伝導面である RuO_2 面への並行磁場でのみ観測されることから、空間変調した超伝導秩序状態、いわゆる FFLO 状態の可能性もより高くなったと言える。FFLO 状態については他の実験もおこなったものの、もともとのシグナルが小さいため、注意深い検証が必要である。一方で、FFLO の示唆は京都大学から核磁気共鳴にて報告されている。我々のこれまでの結果との整合性については他の実験も含め今後の展開が必要である。

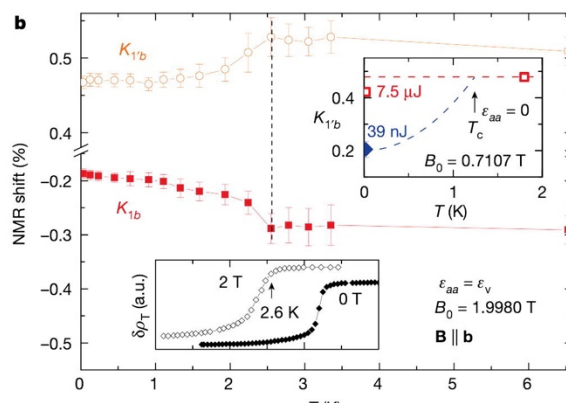


図 5: Sr_2RuO_4 のナイトシフト。超伝導転移温度以下でスピン磁化率が減少した。

- ② 我々の育成した単結晶を用い、ミュオンスピン回転(緩和)実験をおこなった。超伝導転移温度以下で自発磁化を観測した。これは初期の報告を再現するものである。このことから、 Sr_2RuO_4 の超伝導状態は時間反転対称性の破れていることを改めて示しており、超伝導秩序変数が2成分からなることを示唆している。これは、最近の共同研究である弾性率測定の結果とも一致する。さらに、結晶軸方向の[100]方向に、最近開発されたピエゾ素子で制御する一軸圧力を印加すると、超伝導転移温度と時間反転対称性を破る温度が分離することを観測した。この転移温度の分離は、静水圧力下、また、Sr を La で置換し、あえて超伝導転移温度を下げた試料においては実験の精度からは見えていない。この結果は、 Sr_2RuO_4 の超伝導秩序パラメータの決定に向けてより強い制限を与えるものである。さらに予想外の結果として、[100]方向への一軸圧力をさらに印加していくと、超伝導相に隣接するように磁気秩序の発現を見出した(図 6)。本研究では、一つの

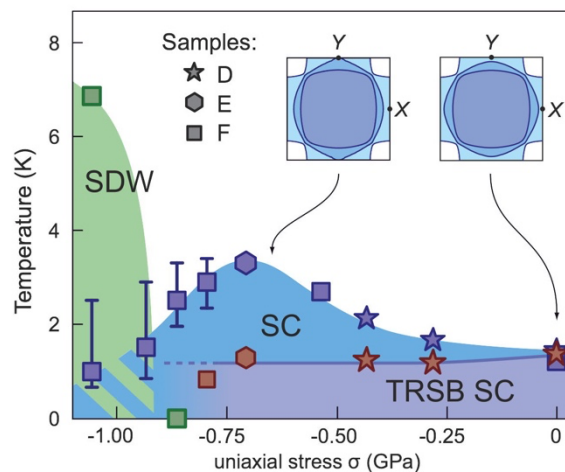


図 6: ミュオンスピン回転(緩和)実験で得られた一軸圧力下の Sr_2RuO_4 の相図。

軸圧力下のみでの結果であるが、磁気秩序相は、銅酸化物、鉄系化合物、有機化合物、希土類化合物においても超伝導に隣接して発現する。今後、 Sr_2RuO_4 で出現した磁気秩序相の詳細について相図の作成をはじめ、磁気構造についても研究を進めていく予定である [Nat. Phys. **17**, 748 (2021), Nat. Comm. **12**, 3920 (2021), Nat. Phys. **17**, 199 (2021)].

- ③ 上記 2. のミュオンスピン回転(緩和)実験による、超伝導転移温度と時間反転対称性を破る温度が一軸圧力とともに分離していく結果について、熱力学測定において明らかにするため比熱測定をおこなった。超伝導転移温度に対応する比熱の跳びについては、これまで交流磁化率の結果を再現するが、時間反転対称性を破る温度については、実験精度内では見られなかった [PNAS **118**, e2020492118 (2021)]. この結果についても今後のさらなる研究を進めている。

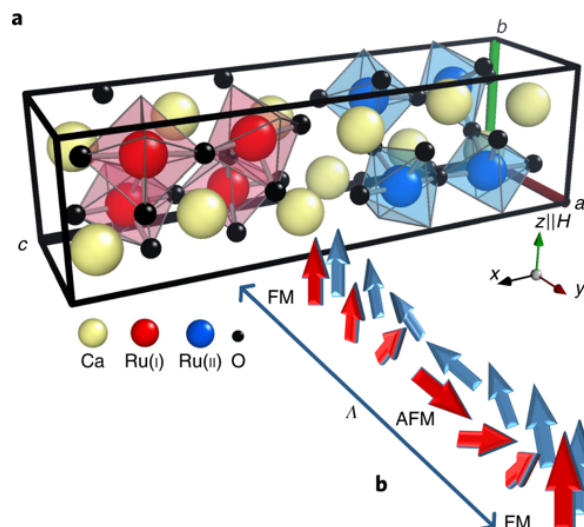


図 7: 中性子小角散乱実験から明らかになった $\text{Ca}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ におけるメタ磁性転移近傍の磁気テクスチャー。

- ④ 磁気熱量効果は、相転移に伴うエントロピー変化を定量的に捉えられ、さらに磁性物質の磁場印加にともなうエントロピー変化のみならず、磁場-温度相図を得る上で強力な熱力学的測定手法である。 Sr_2RuO_4 の姉妹物質である $\text{Ca}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ では、近年、結晶構造の空間反転対称性が破れていることから、極性金属との理解が進んでいる。それを反映して、我々は、メタ磁性にともなう「磁気テクスチャー」を中性子小角散乱実験から発見した(図 7)。この磁気状態は、限られた磁場-温度範囲にて見られる [Nat. Phys. **15**, 671 (2019)]. さらに、磁化測定からの磁気熱量効果から、この磁気状態の境界で明確なエントロピー変化が見られることから、「磁気テクスチャー」はクロスオーバーではなく熱力学的平衡状態であることを示した [J. Phys. Soc. Jpn. **90**, 103704 (2021)] (図 8)。また、この磁気熱量効果を強磁性近似結晶にも適応し、磁気エントロピー変化をはじめて報告した [J. Alloys Compod. **882**, 160669 (2021)].

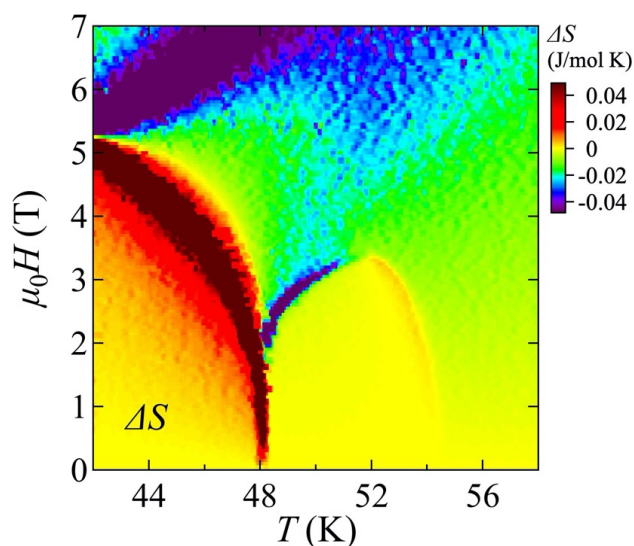


図 8: 磁気熱量効果から得られた $\text{Ca}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ におけるメタ磁性転移近傍の磁場-温度相図。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計23件（うち査読付論文 23件 / うち国際共著 21件 / うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Li You-Sheng, Garst Markus, Schmalian Jorg, Ghosh Sayak, Kikugawa Naoki, Sokolov Dmitry A., Hicks Clifford W., Jerzembeck Fabian, Ikeda Matthias S., Hu Zhenhai, Ramshaw B. J., Rost Andreas W., Nicklas Michael, Mackenzie Andrew P.	4. 巻 607
2. 論文標題 Elastocaloric determination of the phase diagram of Sr ₂ RuO ₄	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 276 ~ 280
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-022-04820-z	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 Jerzembeck Fabian, Roising Henrik S., Steppke Alexander, Rosner Helge, Sokolov Dmitry A., Kikugawa Naoki, Scaffidi Thomas, Simon Steven H., Mackenzie Andrew P., Hicks Clifford W.	4. 巻 13
2. 論文標題 The superconductivity of Sr ₂ RuO ₄ under c-axis uniaxial stress	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 4596-1~13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-022-32177-4	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 Chronister A., Zingl M., Pustogow A., Luo Yongkang, Sokolov D. A., Jerzembeck F., Kikugawa N., Hicks C. W., Mravlje J., Bauer E. D., Thompson J. D., Mackenzie A. P., Georges A., Brown S. E.	4. 巻 7
2. 論文標題 Tuning the Fermi liquid crossover in Sr ₂ RuO ₄ with uniaxial stress	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 npj Quantum Materials	6. 最初と最後の頁 113-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41535-022-00519-6	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 Ghosh Sayak, Kiely Thomas G., Shekhter Arkady, Jerzembeck F., Kikugawa N., Sokolov Dmitry A., Mackenzie A. P., Ramshaw B. J.	4. 巻 106
2. 論文標題 Strong increase in ultrasound attenuation below T _c in Sr ₂ RuO ₄ : Possible evidence for domains	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 024520-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.106.024520	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 Krupfer Martin, Jerzembeck Fabian, Kikugawa Naoki, Roth Friedrich, Fink Jorg	4. 巻 106
2. 論文標題 Propagating charge carrier plasmons in Sr2RuO4	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L24110-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.106.L241103	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 Kikugawa Naoki, Terashima Taichi, Kato Takashi, Hayashi Momoko, Yamaguchi Hitoshi, Uji Shinya	4. 巻 11
2. 論文標題 Bulk Physical Properties of a Magnetic Weyl Semimetal Candidate NdAlGe Grown by a Laser Floating-Zone Method	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Inorganics	6. 最初と最後の頁 20 ~ 20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/inorganics11010020	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 Kikugawa Naoki, Sokolov Dmitry A., Nagasawa Tohru, Mackenzie Andrew P.	4. 巻 11
2. 論文標題 Single-Crystal Growth of Sr2RuO4 by the Floating-Zone Method Using an Infrared Image Furnace with Improved Halogen Lamps	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Crystals	6. 最初と最後の頁 392-1 ~ 392-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/cryst11040392	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 Grinenko Vadim, Das Debarchan, Gupta Ritu, Zinkl Bastian, Kikugawa Naoki, Maeno Yoshiteru, Hicks Clifford W., Klauss Hans-Henning, Sigrist Manfred, Khasanov Rustem	4. 巻 12
2. 論文標題 Unsplit superconducting and time reversal symmetry breaking transitions in Sr2RuO4 under hydrostatic pressure and disorder	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 3920-1 ~ 3920-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-021-24176-8	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 Kikugawa Naoki, Hiroto Takanobu, Ishikawa Asuka, Suzuki Shintaro, Sakurai Hiroya, Tamura Ryuji	4. 巻 882
2. 論文標題 Magnetocaloric effect in ferromagnetic 1/1 quasicrystal approximants Au ₆₄ Al ₂₂ R ₁₄ (R = Gd, Tb, and Dy)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Alloys and Compounds	6. 最初と最後の頁 160669-1~-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jallcom.2021.160669	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 Chronister Aaron, Pustogow Andrej, Kikugawa Naoki, Sokolov Dmitry A., Jerzembeck Fabian, Hicks Clifford W., Mackenzie Andrew P., Bauer Eric D., Brown Stuart E.	4. 巻 118
2. 論文標題 Evidence for even parity unconventional superconductivity in Sr ₂ RuO ₄	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 e2025313118-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.2025313118	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 Grinenko Vadim, Ghosh Shreenanda, Sarkar Rajib, Orain Jean-Christophe, Nikitin Artem, Elender Matthias, Das Debarchan, Guguchia Zurab, Bruckner Felix, Barber Mark E., Park Joonbum, Kikugawa Naoki, Sokolov Dmitry A., et al.	4. 巻 17
2. 論文標題 Split superconducting and time-reversal symmetry-breaking transitions in Sr ₂ RuO ₄ under stress	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Physics	6. 最初と最後の頁 748 ~ 754
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41567-021-01182-7	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 Li You-Sheng, Kikugawa Naoki, Sokolov Dmitry A., Jerzembeck Fabian, Gibbs Alexandra S., Maeno Yoshiteru, Hicks Clifford W., Schmalian Jorg, Nicklas Michael, Mackenzie Andrew P.	4. 巻 118
2. 論文標題 High-sensitivity heat-capacity measurements on Sr ₂ RuO ₄ under uniaxial pressure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 e2020492118-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.2020492118	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 Kikugawa Naoki, Sokolov Dmitry A., Sow Chanchal, Maeno Yoshiteru, Mackenzie Andrew Peter	4. 巻 90
2. 論文標題 Magneoentropic Signatures of the Textured Metamagnetic Phase of an Antiferromagnetic Polar Metal: Ca3Ru207	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 103704-1 ~ -6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.103704	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 Ghosh Sayak, Shekhter Arkady, Jerzembeck F., Kikugawa N., Sokolov Dmitry A., Brando Manuel, Mackenzie A. P., Hicks Clifford W., Ramshaw B. J.	4. 巻 17
2. 論文標題 Thermodynamic evidence for a two-component superconducting order parameter in Sr2Ru04	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Physics	6. 最初と最後の頁 199 ~ 204
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41567-020-1032-4	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 Markovic Igor, Watson Matthew D., Clark Oliver J., Mazzola Federico, Abarca Morales Edgar, Hooley Chris A., Rosner Helge, Polley Craig M., Balasubramanian Thiagarajan, Mukherjee Saumya, Kikugawa Naoki, Sokolov Dmitry A., Mackenzie Andrew P., King Phil D. C.	4. 巻 117
2. 論文標題 Electronically driven spin-reorientation transition of the correlated polar metal Ca3Ru207	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 15524 ~ 15529
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.2003671117	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 Arnold F., Naumann M., Rosner H., Kikugawa N., Graf D., Balicas L., Terashima T., Uji S., Takatsu H., Khim S., Mackenzie A. P., Hassinger E.	4. 巻 101
2. 論文標題 Fermi surface of PtCo2 from quantum oscillations and electronic structure calculations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 195101-1 ~ -9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.195101	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 Pustogow A., Luo Yongkang, Chronister A., Su Y.-S., Sokolov D. A., Jerzembeck F., Mackenzie A. P., Hicks C. W., Kikugawa N., Raghu S., Bauer E. D., Brown S. E.	4. 巻 574
2. 論文標題 Constraints on the superconducting order parameter in Sr2RuO4 from oxygen-17 nuclear magnetic resonance	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 72~75
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-019-1596-2	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 Luo Yongkang, Pustogow A., Guzman P., Dioguardi A.P., Thomas S.M., Ronning F., Kikugawa N., Sokolov D.A., Jerzembeck F., Mackenzie A.P., Hicks C.W., Bauer E.D., Mazin I.I., Brown S.E.	4. 巻 9
2. 論文標題 Normal State O17 NMR Studies of Sr2RuO4 under Uniaxial Stress	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review X	6. 最初と最後の頁 021044-1~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevx.9.021044	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 Sunko Veronika, Abarca Morales Edgar, Markovic Igor, Barber Mark E., Milosavljevic Dijana, Mazzola Federico, Sokolov Dmitry A., Kikugawa Naoki, Cacho Cepheise, Dudin Pavel, Rosner Helge, Hicks Clifford W., King Philip D. C., Mackenzie Andrew P.	4. 巻 4
2. 論文標題 Direct observation of a uniaxial stress-driven Lifshitz transition in Sr2RuO4	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 npj Quantum Materials	6. 最初と最後の頁 46-1~7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41535-019-0185-9	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 Barber Mark E., Lechermann Frank, Streltsov Sergey V., Skornyakov Sergey L., Ghosh Sayak, Ramshaw B. J., Kikugawa Naoki, Sokolov Dmitry A., Mackenzie Andrew P., Hicks Clifford W., Mazin I. I.	4. 巻 100
2. 論文標題 Role of correlations in determining the Van Hove strain in Sr2RuO4	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 245139-1~7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevb.100.245139	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 Sokolov D. A., Kikugawa N., Helm T., Borrmann H., Burkhardt U., Cubitt R., White J. S., Ressouche E., Bleuel M., Kummer K., Mackenzie A. P., Roessler U. K.	4. 巻 15
2. 論文標題 Metamagnetic texture in a polar antiferromagnet	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Physics	6. 最初と最後の頁 671 ~ 677
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41567-019-0501-0	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 Bobowski Jake, Kikugawa Naoki, Miyoshi Takuto, Suwa Haruki, Xu Han-shu, Yonezawa Shingo, Sokolov Dmitry, Mackenzie Andrew, Maeno Yoshiteru	4. 巻 4
2. 論文標題 Improved Single-Crystal Growth of Sr2RuO4	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 6-1 ~ 6-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/condmat4010006	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 Kittaka Shunichiro, Nakamura Shota, Sakakibara Toshiro, Kikugawa Naoki, Terashima Taichi, Uji Shinya, Sokolov Dmitry A., Mackenzie Andrew P., Irie Koki, Tsutsumi Yasumasa, Suzuki Katsuhiko, Machida Kazushige	4. 巻 87
2. 論文標題 Searching for Gap Zeros in Sr2RuO4 via Field-Angle-Dependent Specific-Heat Measurement	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 093703-1 ~ -5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.093703	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

〔学会発表〕 計4件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Naoki Kikugawa
2. 発表標題 Magneoentropic Signatures of the Textured Metamagnetic Phase of an Antiferromagnetic Polar Metal: Ca3Ru2O7
3. 学会等名 Oxide Superspin Workshop 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菊川直樹, 廣戸孝信, 石川明日香, 鈴木慎太郎, 櫻井裕也, 田村隆治
2. 発表標題 強磁性秩序を示す1/1近似結晶Au64Al22R14 (R = Gd, Tb, Dy) の磁気熱量効果
3. 学会等名 2021年日本応用物理学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河野洋平, 橘高俊一郎, 榊原俊郎, 菊川直樹, 寺嶋太一, 宇治進也, D.A. Sokolov, 町田一成
2. 発表標題 熱力学量からみたSr2RuO4の上部臨界磁場近傍の超伝導状態
3. 学会等名 日本物理学会(オンライン開催)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菊川直樹
2. 発表標題 二層系層状ペロフスカイト構造を有するCa3Ru2O7の磁気熱量効果
3. 学会等名 日本磁気学会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 ルテニウム酸化物単結晶の製造方法及び製造装置	発明者 菊川直樹, 長澤亨	権利者 物質・材料研究 機構、キヤノン マシナリー株式
産業財産権の種類、番号 特許、特開2022073173号	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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			
ドイツ	Max Plank Institute (Dresden)			
英国	Univ. of St. Andrews			