

# 非従来型超伝導への挑戦

前野悦輝\*

## Challenging Unconventional Superconductivity

Yoshiteru MAENO\*



\*前野悦輝 フェロー

Recent research achievements as well as the achievements of four years of activities at the Toyota Riken-Kyoto University Research Center (TRiKUC) are reported. Identifying unconventional pairing states in superconductors — prototypical quantum materials — remains a central challenge in contemporary condensed-matter physics. Thirty years after the discovery of unconventional superconductivity in the layered ruthenate  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ , intensive international efforts continue to clarify the nature of its superconducting state. Using muon spin rotation ( $\mu\text{SR}$ ) to probe the spin state of Cooper pairs, we identified limitations in conventional measurement methods and, by introducing a new protocol, verified spin-singlet-like behavior. In parallel, while previous experiments reported conflicting responses of the superconducting transition temperature to crystal strain, our newly developed shear-strain measurements more directly constrain the dimensionality of the superconducting order parameter. We further investigated ruthenium dioxide  $\text{RuO}_2$ , recently proposed as a candidate altermagnet — a third class of magnetic material distinct from ferro- and antiferromagnets. By synthesizing exceptionally high-quality single crystals, we conclusively demonstrate the absence of any magnetic transition, thereby resolving the ongoing controversy.

豊田理研—京都大学連携拠点 (TRiKUC) での最近の研究成果を中心に、豊田理研フェローとしての4年間の活動成果を報告する。量子物質の典型例である超伝導体の中で、電子対が非従来型とされる状態を完全に特定することは、現代の基礎研究でも容易ではなく、挑戦的課題といえる。層状ルテニウム酸化物  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の超伝導発見から30年が経過し、国際的な研究活動からその非従来型超伝導状態を解明する努力が継続している。超伝導電子対のスピン状態をミュオンスピン共鳴 ( $\mu\text{SR}$ ) で調べた結果、従来の測定方法の問題点を明らかにするとともに、新たなプロトコルを導入することで、スピン三重項的な振る舞いを検証した。また、様々な結晶ひずみに対する超伝導転移温度の応答について、異なる実験手法での結果の間には矛盾点があった。これに対して、新たな「せん断ひずみ」印加の研究から超伝導秩序変数の次元性をより直接的に絞り込んだ。次に、強磁性体・反強磁性体に対する第3の磁性体として最近注目が集まっている「アルター磁性体」の候補物質としてのルテニウム酸化物  $\text{RuO}_2$  について、極めて純良な結晶合成に成功し、磁気転移を示さないことを決定付けて最近の論争に終止符を打った。

### 1. 量子物質と非従来型超伝導

本稿では、ルテニウム酸化物の非従来型超伝導状態の解明に向けた最新の進捗成果を中心に、豊田理研フェローとしての豊田理研—京大連携拠点 (TRiKUC) での4年間の成果<sup>1-32)</sup>についてまとめる<sup>31)</sup>。フェロー制度の目的である集大成として「非従来型超伝導」の教科書的役割も意識したレビュー論文を日本物理学会の論文誌に発表した<sup>3)</sup>。昨年度にデータの始めたいくつかのテーマに関して、最終年度には成果をまとめて論文出版にこぎつけることもできた<sup>1,2,18)</sup>。また、第17回豊田理研

国際ワークショップ“ルテニウム酸化物と創発量子物質 (Ruthenates and Emerging Quantum Materials, REQM 2025)”を京都大学本部キャンパスの国際イノベーション棟 HORIBA シンポジウムホールで、9か国から110名以上の参加者を集めて開催した<sup>32)</sup>。

量子物質とは、日常的なスケールでの性質が量子力学効果から創発する物質で、超伝導体はその最たる例である。その中でも銅酸化物高温超伝導体など、標準的な理論の枠では説明できない「非従来型超伝導体」が、現代の基礎研究の中心対象となっている。ルテニウム酸化物で約30年前に発見された超伝導<sup>33)</sup>も非従来型の典型例で、長年、スピン三重項超伝導という画期的な状態が実現していると考えられてきた。スピン三重項の場合、電子ペアのスピンが活性で、その量子情報を電気抵抗ゼロで運べる、ところが2019年になって、核磁気共鳴 (NMR)

2026年2月16日 受理

\*豊田理化学研究所フェロー

京都大学名誉教授, Ph.D

京都大学高等研究院豊田理研—京大連携拠点 (TRiKUC),

連携拠点教授

専門分野: 量子物質, 超伝導, 低温物理学

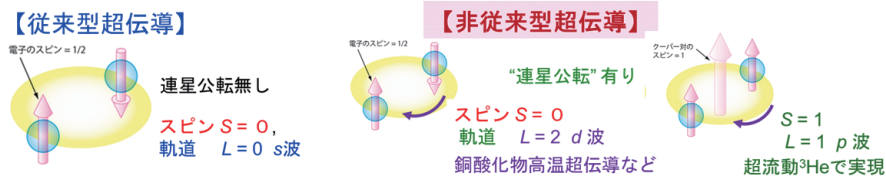


Fig. 1 Electron pairs in conventional and unconventional superconductivity.

の実験から以前の結論をくつがえす結果<sup>34,35)</sup>が明らかになったため、NMR以外の相補的実験手法で検証することが重要となっていた<sup>3,4)</sup>。

非従来型超伝導とは端的には、超伝導を担う「2電子分子」としての電子対の相対軌道角運動量子数 $L$ がゼロではない状態を指す。Figure 1に示すように、合成スピン $S=0$ のスピン一重項の $d$ 波( $L=2$ )や、スピン三重項( $S=1$ )の $p$ 波( $L=1$ )などがある。銅酸化物高温超伝導体は $d$ 波であることが確定している。超流動<sup>3</sup>Heの原子対はスピン三重項 $p$ 波であることが確立している。その一方で、スピン三重項の超伝導体の候補としては、重い電子系物質の $\text{UPt}_3$ や $\text{UTe}_2$ が有力であるものの、それらの超伝導秩序変数についてはまだコンセンサスは得られていない。

## 2. $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ の超伝導

ルテニウム酸化物 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ は銅酸化物高温超伝導体と同じ層状結晶構造で、銅元素がルテニウム元素に置き換わったものである(Fig. 2)。その超伝導は1994年に前野らによって発見され<sup>33)</sup>、量子物質に典型的な非従来型の超伝導を示す。超伝導臨界温度 $T_c$ は1.5~3.5ケルビンと低いものの、電子同士の強い相互作用や多バンド電子構造など、現代の「機能性量子物質」に求められる特徴を兼ね備えた非従来型超伝導体である。常伝導状態の性質は実験的にも理論的にも詳細にわたり理解できており、化学的に安定で極めて純良な試料結晶も作れることから、超伝導基礎研究の重要な対象となってきた。しかし、超伝導状態の対称性は依然として未解明であり、研究者の間で長年議論が続いている。スピン一重項的な状態が有力であることを踏まえた、最近の新しい視点での

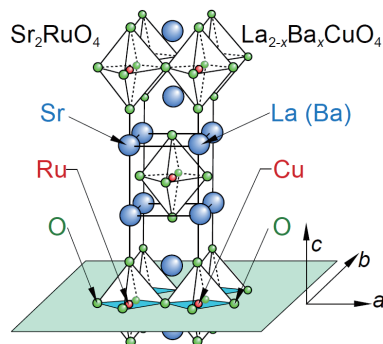


Fig. 2 Crystal structure common to  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  and high- $T_c$  copper oxide.

様々な研究成果にもかかわらず、基本的な超伝導状態、つまり超伝導秩序変数の対称性はいまだに明らかになっていない。

この超伝導状態解明に必要な課題として以下が鮮明になっている<sup>4)</sup>：(1) 過去に電磁パルスによる発熱が問題となったNMRと相補的な方法でスピン状態の確認ができるか、(2) 超伝導状態で内部磁場が発生する時間反転対称性の破れは超伝導電子対の磁気的性質によるものなのか、(3)  $T_c$ での超音波の音速変化とひずみ印加での $T_c$ の変化の間での矛盾点はいかに理解できるのか。

### 2.1. 矛盾点の鮮明化とその解明に向けて

最近5年間余りの研究の新展開を踏まえ、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ の超伝導状態の有力候補とされているのはFig. 3に示した4つの秩序変数である<sup>4)</sup>。

#### ①スピン一重項的な振る舞い (NMR 2019~)

まず、右下端にある通常のスピン三重項状態は、2019年以降のNMRナイトシフトの結果、棄却された<sup>34,35)</sup>。この修正をめぐり、NMRでは高周波パルスによる試料過熱が起こりやすいという技術的問題点も明らかになったため、相補的な実験方法でスピン磁化率の減少を検証することが重要な課題となっていた。

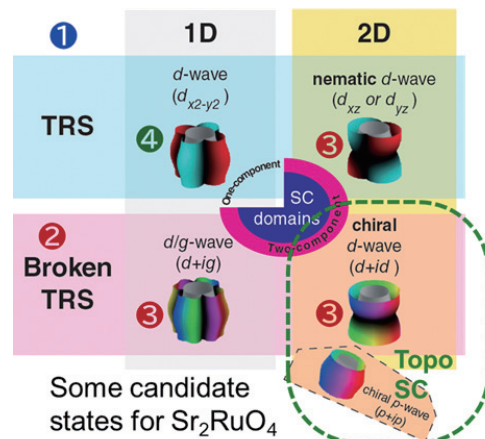


Fig. 3 Some of the proposed superconducting symmetries of  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ . Left, 1D irreducible representation states:  $d$ -wave (top) and accidentally degenerate  $d+ig$ -wave (bottom) states. Right, 2D irreducible-representation states: nematic  $d$ -wave (top) and chiral  $d+id$ -wave (middle) states. Previously proposed spin-triplet, chiral  $p$ -wave state (bottom right) is not consistent with the recent NMR results. The time-reversal symmetry (TRS) is preserved for only the top two states; superconducting domains may form in the three states, except for the  $d$ -wave state on the top left<sup>5</sup>. The colors depict the superconducting gap amplitude.

②時間反転対称性を破る ( $\mu$ SR 1998, 2021~)

自発的な内部磁場発生を伴う超伝導状態は、時間反転対称性の破れた (TRSB) 超伝導として知られている。UPT<sub>3</sub>やSr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>はこの概念の構築に寄与した先駆的な例である。TRSB超伝導は大きく2種類に分けられる: Fig. 3の②に対応する2種の異なる対称性の秩序変数が偶然同じ $T_c$ を持つ場合と、2次元秩序変数の縮退した2成分からなるカイラル超伝導状態である。一軸性ひずみの下で $T_c$ は3.6 Kまで上昇するものの、TRSBを示す2段目の転移温度はほぼ1.4 Kにとどまることがゼロ磁場中でのミュオンスピン共鳴 ( $\mu$ SR) の実験から明らかになった<sup>36)</sup>。これはFig. 3の下段の秩序変数で、1成分だけの超伝導状態の $T_c$ が上昇し、低温で2成分のTRSB状態に転移する描像と符合する。

## ③2次元秩序変数 (横波超音波2021~)

さらに超音波実験が②の解釈を強めた。通常の超伝導体では縦波音波 (圧縮波) の音速だけが $T_c$ で飛びを示すが、SROでは横波 (せん断波)  $c_{66}$ の音速も飛びを示す<sup>37, 38)</sup>。これらの振る舞いから、Ginzburg-Landau (GL) 理論の自由エネルギーに含まれる超伝導の秩序変数と超音波モードに対応するひずみ $\epsilon_{ij}$ との結合項が、自由エネルギーと同じA1g対称性を持つ条件によって、ひずみと結合すべき超伝導秩序変数の対称性が決まる。観測された $c_{66}$  (B2g対称性) のひずみの一次に比例して結合する秩序変数は2成分からなる必要があり、③の3つの状態が有力視される。

## ④一軸圧力と弾性熱量効果の実験は②・③に矛盾 (2021~)

②と③からは、Fig. 3の2段目の列の $d(B1g) + ig(A2g)$ と $d(Eg) + id(Eg)$ が有力となった。ところが、一軸性ひずみの下での比熱測定や弾性熱量効果の実験からは、 $\mu$ SRで観測された2段転移の兆候は観測されなかった<sup>39, 40)</sup>。「せん断ひずみ」に対する $T_c$ の変化は、2成分の秩序変数の場合はV字型のキックを示すはずである。ところが静水圧実験と2種の一軸ひずみ実験との結果を組み合わせることで予想した結果、そのようなキックは無いことが明らかになった<sup>41)</sup>。これらからFig. 3の左上の時間反転対称性を破らない一次元秩序変数の $d$ 波 $d_{x^2-y^2}$  (B1g) が支持される。これら矛盾する実験結果をどう解釈するのが超伝導状態の解明にとって重要なカギとなっている。

これらに対して、最近の我々の研究から以下が明らかになった:

①に対して: ミュー粒子の磁気共鳴 ( $\mu$ SR) でNMRと相補的にスピン一重項的振る舞いを確認した (2.2節)。

③と④の矛盾に対して: 新しい「せん断ひずみ」実験で直接的に④を支持する結果を得た (2.3節)。

2.2. ミュオンスピン共鳴 ( $\mu$ SR) による超伝導電子対のスピン状態

本研究では、正の電荷をもつミュー粒子 (ミューオン、ミュオン)  $\mu^+$ を超伝導体中に打ち込んでの磁気共鳴 ( $\mu$ SR) によって、超伝導電子ペアのスピン状態を決定することに成功した<sup>1)</sup>。京都大学で育成したルテニウム酸化物Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>の純良単結晶を使い、スイスの大型加速器施設PSIで2022年から稼働を始めた新型 $\mu$ SR装置で、超伝導体の内部に生じるごくわずかな磁場の変化を調べた。この変化は「ミュオン・ナイトシフト」と呼ばれ、物質の中で電子がどのようにペアを作って超伝導状態になるのかを知る重要な手がかりになる。以下に述べるように、これまで問題視されていなかった盲点を回避し、さらに超伝導量子干渉素子 (SQUID) での測定結果と合わせる新しいプロトコルを導入することで、超伝導状態に入るとナイトシフトが減少することが明確になった。この結果により、ルテニウム酸化物Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>の超伝導がスピン一重項で矛盾なく説明できることを確認した。

新型 $\mu$ SR装置では、磁場の精密測定に用いる銀の標準試料と超伝導体試料の信号を独立に測定できるようになり、試料内の磁場変化の検出精度が格段と向上した。その結果、これまでしばしば使われてきた「小さな結晶を複数並べて信号強度を増す方法」に深刻な落とし穴があることが明らかになった (Fig. 4)。隣接する結晶の超伝導マイスナー効果による漏れ磁場が印加磁場と同じ方向に加わり、実際には存在しない正の信号として測定結果に現れてしまうのである (Fig. 5)。そこで本研究では、単一の結晶だけを用いて測定を行い、さらに同じ試料に対して通常のマクロ測定による直流磁化率を組み合わせることで、ミュー粒子と電子のスピン同士の相互作用によるマイクロな信号だけを抽出することができた (Fig. 6)。これらにより、最近のNMRによる結果と合致する結果を様々な磁場の下で高い精度で明らかにした (Fig. 7)。

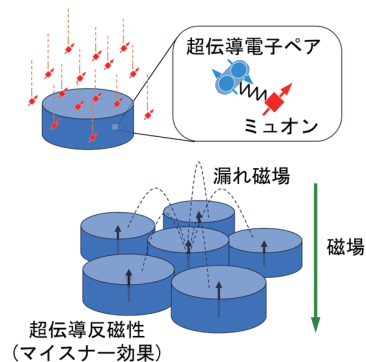
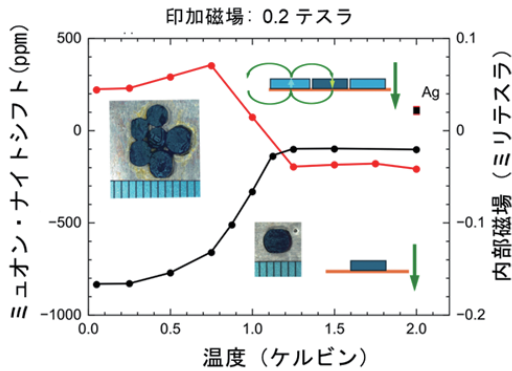
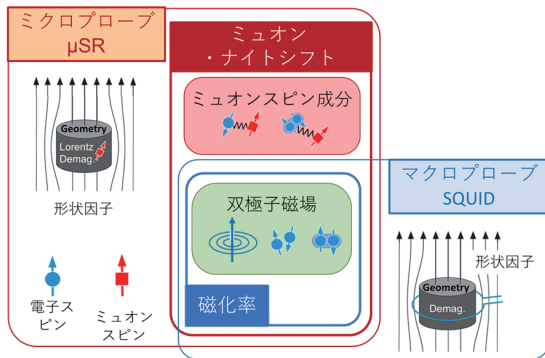


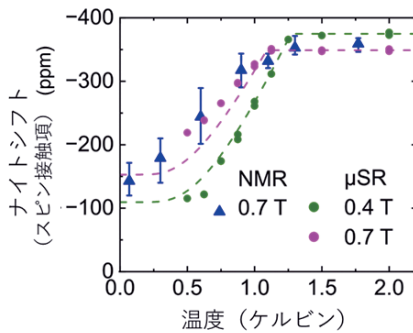
Fig. 4 Principle of probing the state of electron pairs using muons implanted into a superconductor. Arranging multiple samples side by side can cause problems due to stray magnetic fields.



**Fig. 5** A pitfall of a conventional experimental method. When multiple crystals are arranged side by side (red), a signal opposite to the intrinsic one is generated. Using one crystal (black) yields the correct signal.



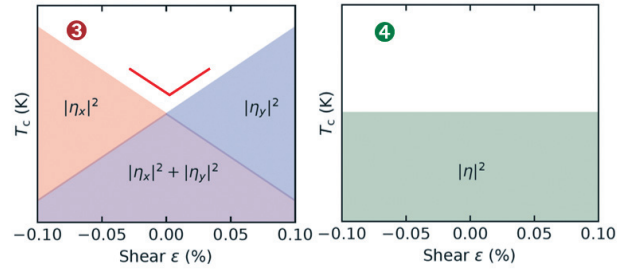
**Fig. 6** The combination of muon spin rotation ( $\mu$ SR) experiments and superconducting quantum interference device (SQUID) measurements provides microscopic insights into the behavior of superconducting electrons.



**Fig. 7** Muon spin rotation ( $\mu$ SR) confirmed the spin-singlet-like pairing with improved precision compared with widely used nuclear magnetic resonance (NMR) techniques.

### 2.3. せん断ひずみの印加による超伝導秩序変数の対称性

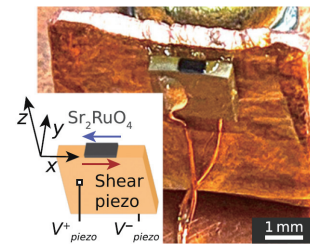
2.1で述べたように、 $T_c$ のせん断ひずみ依存性について、横波超音波の音速の飛びから熱力学的に導かれる結果と、様々な静的圧縮ひずみ印加実験結果を組み合わせ導かれる結果の間で大きな食い違いがある。前者は二成分、後者は一成分の秩序変数からなる超伝導状態を支持する (Fig. 8).



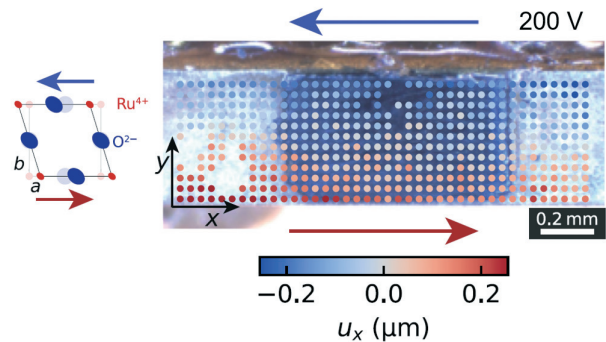
**Fig. 8** Expected response of  $T_c$  with a shear strain. (Left) A kink behavior for two component or two-dimensional order parameter. (Right) No variation for a one-component order parameter.

我々は、超伝導秩序変数が一成分か二成分かの論争を決着させるために、静水圧ひずみと2種類の一軸性圧縮ひずみの実験結果を組み合わせるのではなく、秩序変数と結合する「せん断ひずみ」を直接試料に加える新手法を開発して、超伝導転移温度の変化を精密測定することに成功した<sup>2)</sup>。

Figure 9に示すように、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ 結晶薄片 (典型的には  $1.0 \times 0.4 \times 0.030 \text{ mm}^3$ ) をせん断ひずみピエゾ素子に直接貼り付け、ピエゾ素子への印加電圧によってひずみの大きさを変化させて  $T_c$  を測定した。低温で試料に生じるせん断ひずみの大きさは、低温光学クライオスタット中の30 Kまでの顕微イメージングによって定量的に評価した (Fig. 10)。この新技術による結果は Fig. 11に示すように、超伝導転移温度  $T_c$  がせん断ひずみに対して測定精度の範囲で全く変化しないことが明らかになった。これは二成分超伝導の場合の理論的予測とは一致せ

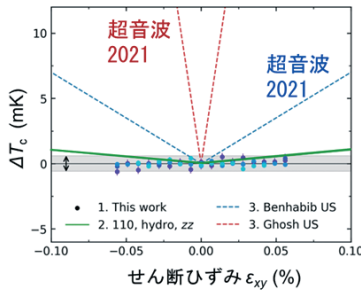


**Fig. 9** Thin piece of  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  glued to the surface of a shear piezo device.



**Fig. 10** Optical microscope imaging to quantify the magnitude shear strain applied to the sample crystal.

ず、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ が一成分の超伝導状態を持つことを強く示している。しかしながら、なぜ横波超音波の音速の飛びをもとにEhrenfestの式を用いて、熱力学的に算出した $T_c$ の変化（Fig. 11破線）と、実際のひずみによる $T_c$ の変化が一致しないのかは未解決のままである。この成果から、超音波音速の $T_c$ での変化の解釈に新たな視点が必要であることをも考えられる。



**Fig. 11** Variations of  $T_c$  with shear strain in  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ . Ultrasound results shown with dotted lines suggest a strong variation with a kink, whereas combination of three pressure-stress experiments suggests little change as shown with a green line. New results with a direct application of shear strain establishes that  $T_c$  varies little.

本研究で新たに開発した「せん断ひずみ」で物質の性質の本性を絞り込む手法は、今後、様々な量子物質の研究にも応用される期待が持てる。超伝導分野では $\text{UPt}_3$ や $\text{UTe}_2$ ように多成分超伝導が示唆されている他の物質にも応用可能である。また、超伝導体に限らず、磁性体や誘電体などの研究にも有用であるため、物性物理学の幅広い分野で新しい知見をもたらす手法となることが期待される。

#### 2.4. 最終的決着に向けて

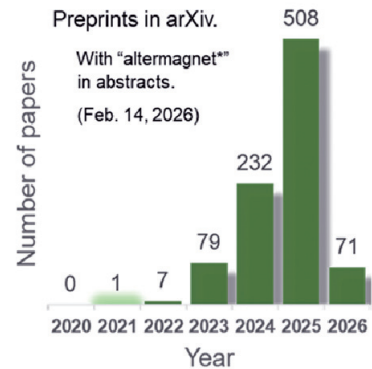
我々の最近の成果から Fig. 3 の候補の中では④のスピナー重項 $d$ 波状態 $d_{x^2-y^2}$ (B1g)が有力候補として残る。これは銅酸化物高温超伝導体と同じ秩序変数である。しかしながら $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ は銅酸化物とは際立って異なる超伝導現象を示す。複数のグループによる超伝導接合実験で共通するのは、同じ接合を用いてもその臨界電流に大きなばらつきや超伝導ダイオード効果がみられる<sup>11,3)</sup>。これは何らかの超伝導ドメインが生じていること、すなわち2成分超伝導を示唆する。また、準粒子励起の磁場方向依存性を調べる比熱実験では、超伝導ギャップのゼロ点（ノード）または極小点が $k_x$ と $k_y$ 方向にあること（B1gではなくB2g対称性）を示す。比熱実験に対する別の解釈では特定の $k_c$ に「水平線ノード」があることになり、その解釈でもB1g対称性の $d$ 波超伝導とは相いれない。

②のTRSBを示す $\mu\text{SR}$ の実験も、多数の異なる研究グループでの結果には互いに高い再現性がある。しかし、これらの測定結果の従来の解釈に問題がないかどうか

という根本的なレベルでの吟味も必要であろう。これも視野に入れた新しい切り口の $\mu\text{SR}$ 実験は進行中である。もし、TRSBの解釈に問題がある場合は、右上のネマチック超伝導のスピナー重項 $d$ 波状態の可能性も残る。さらに、超音波の結果とひずみ印加による $T_c$ の変化の間でなぜ矛盾が生じるのかという点は今後の重要な課題である。

### 3. アルター磁性体と $\text{RuO}_2$

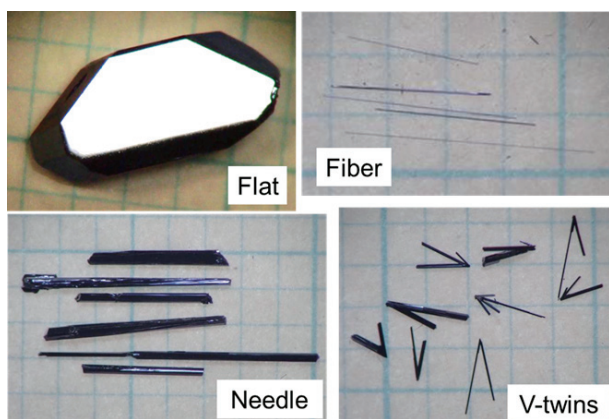
強磁性体・反強磁性体に次ぐ、第3種の磁性体として最近注目されているのが「Altermagnets: アルター磁性体（交替磁性体，交変磁性体）」である（Fig. 12）<sup>42)</sup>。これは従来、反強磁性体として扱われてきたが、結晶格子の変形に伴う対称性のためにパリティと時間反転対称性（TRS）が破れ、波数空間の方向によって強磁性体のような大きな交換エネルギーギャップが生じる磁性体である。超伝導ギャップとのアナロジーでは、強磁性体は $s$ 波超伝導体のような等方的ギャップ、反強磁性体は常伝導金属のようなゼロギャップを持つのに対して、アルター磁性体は $d$ 波超伝導体のような異方的ギャップを持つ。電流誘起のスピナー流やゼロ磁場での異常ホール効果が期待されることから、スピントロニクス分野でも関心が高い。



**Fig. 12** Rapidly increasing number of papers on altermagnetism.

その中で、理論から最大の交換ギャップを持つと期待されるのがルチル型のルテニウム酸化物 $\text{RuO}_2$ である。 $\text{RuO}_2$ は従来常磁性金属と考えられてきたが、2017年になって反強磁性体の性質が報告されている<sup>29)</sup>。ところが磁気転移を示さないという最近の報告もあり、アルター磁性体としての観点から論争が続いていた。

そこで我々は $\text{RuO}_2$ の純良単結晶育成に取り組み、Fig. 13に示すような比較的大型で残留抵抗比（RRR）が1200に達する高純度の結晶を得た<sup>18)</sup>。磁化測定に加えて、共同研究による量子振動<sup>19)</sup>や角度分解型光電子分光（ARPES）<sup>20)</sup>の実験とバンド計算理論との比較から、純粋な単結晶は反強磁性体（altermagnet）ではないことを確認して、最近の議論に終止符を打った。



**Fig. 13** High purity crystals of  $\text{RuO}_2$  in various morphologies. The residual resistivity ratio (RRR) reaches up to 1200.

ARPESからは、バルク電子状態にはない、バルクのディラック点に由来するトポロジカル表面状態がフェルミレベル近傍に強く観測された<sup>20)</sup>。 $\text{RuO}_2$ は水の電気分解での酸素発生反応(OER)に最も高活性な触媒としてよく知られているが、その高い表面導電性にこのトポロジカル表面状態が寄与している可能性があり、我々の研究結果は、「トポロジカル触媒」としての新たな視点が必要になる可能性も示唆している。

#### 4. まとめと展望

本稿では今年度の研究成果を中心に、4年間の活動成果についても述べた<sup>1-32)</sup>。2022年4月に豊田理研と京都大学高等研究院との共同研究のために「豊田理研-京大連携拠点 (TRiKUC)」を創設いただき、実験室の建設に取り組んだ。当初からの3つの目標である(1)世界的インパクトのある論文成果の発信、(2)研究の集大成としてモノグラフの出版、(3)若手研究者の育成、を意識した活動を行ってきた。

(1)と(2)に関しては主な成果についてすでに述べたが、4年間に出版した30編の論文には以下の成果も含まれる。ルテニウム酸化物のモット絶縁体 $\text{Ca}_2\text{RuO}_4$ の電流下での金属化について、顕微サーモグラフィーを活用して、特異な非平衡効果ではなく局所過熱による金属相への相転移が起点となっていることを明らかにした。また、トポロジカル物質であるディラック線ノード半金属の超伝導体 $\text{CaSb}_2$ の電子構造と静水圧力や元素置換による超伝導性の変化を明らかにした。さらに、水素系高温超伝導についての公正な研究の推進を要望する、超伝導分野専門家による国際的アピール論文に著者として参加した。銅酸化物高温超伝導の発見者であるAlex Müller博士の追悼論文集には、博士との交流について、特に高温超伝導発見論文の冒頭文「超伝導研究の最前線にあるのは経験則に基づく新物質の開拓である」の由来についてのエピソードを披露した。また、小川正孝が1908年

に発表した幻の元素ニッポニウムが、実は当時未発見のレニウムだったことを明らかにした吉原賢二博士の業績を紹介する追悼記事も米国化学会の化学史雑誌に発表した。

(3)の若手研究者育成に関連して、まず現在の日本の研究環境について概観しておく。論文引用数などを指標とした日本の科学研究の世界的地位は、1983-1993年には世界で第3位であったが、2000年頃以降低下が続き、現在は11~13位になっている<sup>43)</sup>。2023年にはNature誌にも「Japanese research is no longer world class」と題する分析記事が掲載された<sup>44)</sup>。今後、世界の基礎科学における日本ならではの貢献度を高めていくには、単なる復古主義ではなく、現代的な日本型研究の制度設計が必須だろう。その過程において短・中期的には、世界のトップグループ時代の担い手であった「若い日本からきたシニア研究者」と「成熟した日本からきた若手研究者」の協奏的研究環境も有効であろう。この意味においても、シニア研究者が研究に没頭する環境をフェロー制度として提供するの、まさに世界的にもone and onlyの素晴らしい仕組みである。「将来のシニア研究者」の役割を活用する今後の制度設計の観点でも貴重な体験ができたことに感謝したい。

#### 謝 辞

豊田理研フェローとしての活動を可能にしてください、4年間を通じて常時、的確なアドバイスと多大なご支援をいただいた豊田理化学研究所の玉尾皓平前所長をはじめ、天野浩所長、菊池昇常務理事、小池事務局長、豊田理研スタッフの皆様へ深く感謝申し上げます。また、京都大学高等研究院での受入れ側責任者である北川進教授と高等研究院のスタッフの皆様には、理想的で円滑な研究環境を提供いただき、感謝申し上げます。最後に、TRiKUCの研究を一緒に進めてくださったメンバーのG. Mattoni博士、池田敦俊博士、松木久和博士、T. Johnson博士、大学院生のS. Paul氏、スタッフの土橋明美氏、児玉知子氏に深く感謝申し上げます。なお、図に関して米澤進吾、金城克樹、Giordano Mattoni、松木久和、Thomas Johnson、Shubhankar Paulの各氏の支援を受けました。

#### 参 考 文 献

##### $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$

- 1) H. Matsuki, R. Khasanov, J. A. Krieger, T. J. Hicken, K. Yuchi, J. S. Bobowski, G. Mattoni, A. Ikeda, R. Okuma, H. Luetkens and Y. Maeno, *Physical Review Letters*, **136** (2026) 0660001.
- 2) G. Mattoni, T. Johnson, A. Ikeda, S. Paul, J. Bobowski, M. Sigrist and Y. Maeno, *Nature Communications*, **17** (2026) 700.

- 3) Y. Maeno, S. Yonezawa and A. Ramires, *Journal of the Physical Society of Japan*, **93** (2024) 062001-1-45. DOI: 10.7566/JPSJ.93.062001, *JPS Hot Topics*
- 4) Y. Maeno, A. Ikeda and G. Mattoni, *Nature Physics*, **20** (2024) 1712-1718. DOI: 10.1038/s41567-024-02656-0 招待パースペクティブ論文
- 5) A. A. Husain, E. W. Huang, M. Mitrano, M. S. Rak, S. I. Rubeck, X. Guo, H. Yang, C. Sow, Y. Maeno, B. Uchoa, T. C. Chiang, P. E. Batson, P. W. Phillips and P. Abbamonte, *Nature*, **621** (2023) 66-70. DOI: 10.1038/s41586-023-06318-8
- 6) K. Kinjo, M. Manago, S. Kitagawa, Z. Q. Mao, S. Yonezawa, Y. Maeno and K. Ishida, *Science*, **376** (2022) 397-400. DOI: 10.1126/science.abb0332
- 7) J. F. Landaeta, K. Semeniuk, J. Aretz, K. Shirer, D. A. Sokolov, N. Kikugawa, Y. Maeno, I. Bonalde, J. Schmalian, A. P. Mackenzie and E. Hassinger, *Physical Review B*, **110** (2024) L100503. DOI: 10.1103/PhysRevB.110.L100503
- 8) E. Mueller, Y. Iguchi, F. Jerzembeck, J. O. Rodriguez, M. Romanelli, E. Abarca-Morales, A. Markou, N. Kikugawa, D. A. Sokolov, G. Oh, C. W. Hicks, A. P. Mackenzie, Y. Maeno, V. Madhavan and K. A. Moler, *Physical Review B*, **110** (2024) L100502. DOI: 10.1103/PhysRevB.110.L100502
- 9) E. Mueller, Y. Iguchi, C. Watson, C. W. Hicks, Y. Maeno and K. A. Moler, *Physical Review B*, **108** (2023) 144501-1-9. DOI: 10.1103/PhysRevB.108.144501
- 10) R. Khasanov, A. Ramires, V. Grinenko, I. Shipulin, N. Kikugawa, D. A. Sokolov, J. A. Krieger, T. J. Hicken, Y. Maeno, H. Luetkens and Z. Guguchia, *Physical Review Letters*, **131** (2023) 236001-1-8. DOI: 10.1103/PhysRevLett.131.236001
- 11) M. S. Anwar, T. Nakamura, R. Ishiguro, S. Arif, J. W. A. Robinson, S. Yonezawa, M. Sigrist and Y. Maeno, *Communications Physics*, **6** (2023) 290-1-8. DOI: 10.1038/s42005-023-01409-4
- 12) R. Nishinakayama, Y. J. Sato, T. Yamanaka, Y. Maeno, H. Yaguchi, N. Kikugawa and R. Okazaki, *Physical Review Research*, **6** (2024) 023222-1-10. DOI: 10.1103/PhysRevResearch.6.023222
- 13) T. Kondo, M. Ochi, S. Akebi, Y. Dong, H. Taniguchi, Y. Maeno and S. Shin, *Physical Review B*, **109** (2024) L241107-1-7. DOI: 10.1103/PhysRevB.109.L241107
- 14) R. Daou, S. Hébert, G. Grissonnanche, E. Hassinger, L. Taillefer, H. Taniguchi, Y. Maeno, A. S. Gibbs and A. P. Mackenzie, *Physical Review B*, **108** (2023) L121106-1-5. DOI: 10.1103/PhysRevB.108.L121106
- Ca<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>**
- 15) G. Mattoni, K. Fukushima, S. Yonezawa, F. Nakamura and Y. Maeno, *Physical Review Materials*, **8** (2024) 074411-1-7. DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.8.074411
- 16) R. A. Vitalone, A. J. Sternbach, B. A. Foutty, A. S. McLeod, C. Sow, D. Golez, F. Nakamura, Y. Maeno, A. N. Pasupathy, A. Georges, A. J. Millis and D. N. Basov, *Nano Letters*, **22** (2022) 14, 5689-5697. DOI: 10.1021/acs.nanolett.2c000
- 17) D. Ootsuki, A. Hishikawa, T. Ishida, D. Shibata, Y. Takasuka, M. Kitamura, K. Horiba, Y. Takagi, A. Yasui, C. Sow, S. Yonezawa, Y. Maeno and T. Yoshida, *Journal of the Physical Society of Japan*, **91** (2022) 11470-1-6. DOI: <https://doi.org/10.7566/JPSJ.91.114704>
- RuO<sub>2</sub>**
- 18) S. Paul, G. Mattoni, H. Matsuki, T. Johnson, C. Sow, S. Yonezawa and Y. Maeno, *Journal of Crystal Growth*, **673** (2026) 128405-1-8. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2025.128405
- 19) Z. Wu, M. Long, H. Chen, S. Paul, H. Matsuki, O. Zheliuk, U. Zeitler, G. Li, R. Zhou, Z. Zhu, D. Graf, T. I. Weinberger, F. M. Grosche, Y. Maeno and A. G. Eaton, *Physical Review X*, **15** (2025) 031044-1-13. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.15.031044>
- 20) T. Osumi, K. Yamauchi, S. Souma, P. Shubhankar, A. Honma, K. Nakayama, K. Ozawa, M. Kitamura, K. Horiba, H. Kumigashira, C. Bigi, F. Bertran, T. Oguchi, T. Takahashi, Y. Maeno and T. Sato, *Physical Review B*, **113** (2026) 085116. DOI: <https://doi.org/10.1103/wvs6-hqfv> SC in Topological and other materials, etc.
- 21) A. Ikeda, S. Yonezawa and Y. Maeno, *Journal of the Physical Society of Japan*, **93** (2024) 075002-1-2. DOI: 10.7566/JPSJ.93.075002
- 22) A. Ikeda, S. Ranjan, D. Graf, P. Saraf, D. S. Sokratov, Y. Hu, H. Takahashi, S. Yamane, A. Jayaraj, J. Stawińska, M. B. Nardelli, S. Yonezawa, Y. Maeno and J. Paglione, *Physical Review B*, **106** (2022) 075151-1-9. DOI: 10.1103/PhysRevB.106.075151
- 23) C.-W. Chuang, S. Souma, A. Moriya, K. Nakayama, A. Ikeda, M. Kawaguchi, K. Obata, S. R. Saha, H. Takahashi, S. Kitagawa, K. Ishida, K. Tanaka, M. Kitamura, K. Horiba, H. Kumigashira, T. Takahashi, S. Yonezawa, J. Paglione, Y. Maeno and T. Sato, *Physical Review Materials*, **6** (2022) 104203-1-6. DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.6.104203
- 24) H. Takahashi, A. Ikeda, S. Kitagawa, H. Kadobayashi, N. Hirao, K. Ishida, T. Imazu and Y. Maeno, *Journal of the Physical Society of Japan*, **94** (2025) 044605-1-7. DOI: 10.7566/JPSJ.94.044605
- 25) H. Takahashi, S. Kitagawa, K. Ishida, A. Ikeda, S. R. Saha, S. Yonezawa, J. Paglione and Y. Maeno, *Physical Review B*, **109** (2024) L100501. DOI: 10.1103/PhysRevB.109.L100501
- 26) K. Fukushima, K. Obata, S. Yamane, Y. Hu, Y. Li, Y. Yao, Z. Wang, Y. Maeno and S. Yonezawa, *Nature Communications*, **15** (2024) 2888-1-9. DOI: 10.1038/s41467-024-47043-8

27) G. Baker, T. W. Branch, J. S. Bobowski, J. Day, D. Valentini, M. Oudah, P. McGuinness, S. Khim, P. Surówka, Y. Maeno, T. Scaffidi, R. Moessner, J. Schmalian, A. P. Mackenzie and D. A. Bonn, *Physical Review X*, **14** (2024) 011018. DOI: 10.1103/PhysRevX.14.011018

#### Other topics

28) G. S. Boebinger, A. V. Chubukov, I. R. Fisher, F. M. Grosche, P. J. Hirschfeld, S. R. Julian, B. Keimer, S. A. Kivelson, A. P. Mackenzie, Y. Maeno, J. Orenstein, B. J. Ramshaw, S. Sachdev, J. Schmalian and M. Vojta, *Nature Reviews Physics*, **7** (2025) 2-3. DOI: 10.1038/s42254-024-00794-1

29) Y. Maeno, *Physica C: Superconductivity and its Applications*, **613** (2023) 1354341-1-4. DOI: 10.1016/j.physc.2023.1354341

30) Y. Maeno, Y. Hisamatsu and K. Egashira, *Bulletin for the History of Chemistry*, **48** (2023) 236-241.

31) Toyota Riken–Kyoto Univ. Research Center (TRiKUC), <http://trikuc.jp/>

32) The 17<sup>th</sup> Toyota Riken International Workshop “Ruthenates and Emerging Quantum Materials (REQM2025)”, <https://sites.google.com/kyoto-u.ac.jp/reqm2025/>

#### General references

33) Y. Maeno, H. Hashimoto, K. Yoshida, S. Nishizaki, T. Fujita, J. G. Bednorz and F. Lichtenberg, *Nature*, **372** (1994) 532.

34) A. Pustogow, Y. Luo, A. Chronister, Y.-S. Su, D. A. Sokolov, F. Jerzembeck, A. P. Mackenzie, C. W. Hicks, N. Kikugawa, S. Raghu, E. D. Bauer and S. E. Brown, *Nature*, **574** (2019) 72.

35) K. Ishida, M. Manago, K. Kinjo and Y. Maeno, *Journal of the Physical Society of Japan*, **89** (2020) 034712.

36) V. Grinenko, S. Ghosh, R. Sarkar, J.-C. Orain, A. Nikitin, M. Elender, D. Das, Z. Guguchia, F. Bruckner, M. E. Barber, J. Park, N. Kikugawa, D. A. Sokolov, J. S. Bobowski, T. Miyoshi, Y. Maeno, A. P. Mackenzie, H. Luetkens, C. W. Hicks and H.-H. Klauss, *Nature Physics*, **17** (2021) 748.

37) S. Benhabib, C. Lupien, I. Paul, L. Berges, M. Dion, M. Nardone, A. Zitouni, Z. Q. Mao, Y. Maeno, A. Georges, L. Taillefer and C. Proust, *Nature Physics*, **17** (2021) 194.

38) S. Ghosh, A. Shekhter, F. Jerzembeck, N. Kikugawa, D. A. Sokolov, M. Brando, A. P. Mackenzie, C. W. Hicks and B. J. Ramshaw, *Nature Physics*, **17** (2021) 199.

39) Y.-S. Li, N. Kikugawa, D. A. Sokolov, F. Jerzembeck, A. S. Gibbs, Y. Maeno, C. W. Hicks, J. Schmalian, M. Nicklas and A. P. Mackenzie, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **118** (2021) 226504.

40) Y.-S. Li, M. Garst, J. Schmalian, S. Ghosh, N. Kikugawa, D. A. Sokolov, C. W. Hicks, F. Jerzembeck, M. S. Ikeda, Z. Hu, B. J. Ramshaw, A. W. Rost, M. Nicklas and A. P. Mackenzie, *Nature*, **607** (2022) 276.

41) F. Jerzembeck, Y.-S. Li, G. Palle, Z. Hu, M. Biderang, N. Kikugawa, D. A. Sokolov, S. Ghosh, B. J. Ramshaw, T. Scaffidi, M. Nicklas, J. Schmalian, A. P. Mackenzie and C. W. Hicks, *Physical Review B*, **110** (2024) 064514.

42) L. Šmejkal, J. Sinova and T. Jungwirth, *Physical Review X*, **12** (2022) 040501.

43) “Benchmarking of Scientific Research 2025”, *National Institute of Science and Technology Policy* (NISTEP ナイス テップ), <https://nistep.repo.nii.ac.jp/records/2000231>

44) A. Ikarashi, *Nature*, **623** (2023) 15.