

量子物質と非従来型超伝導

前野悦輝*

Unconventional Superconductivity and Quantum Materials

Yoshiteru MAENO*



*前野悦輝 フェロー

Conventional superconductivity is carried by spin-singlet s -wave electron pairs. In contrast, the superconductivity of the ruthenium oxide Sr_2RuO_4 is a typical example of “unconventional superconductivity”. Despite extensive research efforts using ultra-pure single crystalline samples, the full picture of its superconducting state has not been elucidated. In 2019, there was an important development that shook the research results over the previous 25 years, and since then, new research results have begun to appear one after another. The main purpose of this research is to continue supplying high-quality single crystals suitable for worldwide collaborative research on ruthenium oxide superconductivity, and to provide decisive results from our own group to clarify its superconductivity. Solving this problem will surely bring new techniques and perspectives to general understanding of unconventional superconductivity. Furthermore, using the uniaxial-pressure device developed in this research, we will conduct research on inducing and controlling new electronic functions in quantum materials.

従来型の超伝導はスピン一重項 s 波の電子対がなう。ルテニウム酸化物 Sr_2RuO_4 は「非従来型」の超伝導体の典型であるが、純良な単結晶試料を用いた様々な実験手法を駆使しての研究にもかかわらず、いまだにその超伝導状態の全容は解明されていない。2019年にそれまで25年間の認識を揺るがす重要な展開があり、その後、新たな研究成果が次々に始まっている。我々はルテニウム酸化物超伝導の世界的な研究推進に適した純良単結晶の供給を続けるとともに、超伝導解明に決定的な事実を見出して最終的な決着に貢献することを目指している。この問題の解決は、一般の非従来型超伝導の理解にも新たな手法や視点をもたらすに違いない。また、この研究で開発した一軸圧力装置を用いて、他の量子物質の新電子機能を誘起・制御する研究も進めている。

1. はじめに

近年、先端機能性材料になう物質群として「量子物質」という言葉がしばしば用いられる。これは量子力学特有の効果が顕在化した物質群をさし、超伝導体、強相関電子系、スピン・軌道相互作用の顕著な系、トポロジカル物質など広範にわたる。本研究では量子物質の典型例である超伝導体の中で、電子同士のクーロン斥力の効果が顕著な強相関電子系でうまれる「非従来型」である層状ルテニウム酸化物 Sr_2RuO_4 の超伝導状態の解明を軸とした活動を進めた。

量子物質の電子状態を制御するパラメータとして、温度、磁場、等方的な静水圧などが、元素置換やゲート電圧などと共に用いられてきた。一軸性の圧力およびそれに伴う歪については、最近、ピエゾ素子を用いた画期的な一軸圧力装置が考案されて新たな研究展開を生んでいる。図1に示す Sr_2RuO_4 では一軸性の圧力印加に

よって、バンド構造が質的に変化するリフシッツ転移 (Lifshitz transition) が起こり、超伝導性も大きく変化する。我々はこの性質に着目して、 Sr_2RuO_4 の超伝導が、これまでの分類での「非従来型」をも超える枠組みの「異なる原子軌道間の電子対形成」による可能性の判定・検証を目指している。それと同時に、量子物質の中で、近年注目されているトポロジカル物質の示す超伝導についても、物質開発と一軸圧力効果を駆使した研究を行う。今年度は、新しい研究室の立ち上げを集中的に行うとともに、これらの研究に着手した。

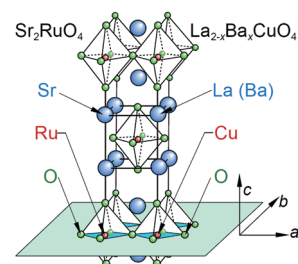


図1 銅酸化物高温超伝導体 $(\text{La}, \text{Ba})_2\text{CuO}_4$ とルテニウム酸化物超伝導体 Sr_2RuO_4 に共通の結晶構造。

2023年2月13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

豊田理研-京大連携拠点連携拠点教授

層状ルテニウム酸化物 Sr_2RuO_4 (図1) の超伝導は1994年の発見¹⁾以来、電子相関の強い典型的な非従来型の超伝導体として25年間以上にわたって継続して活発な研究が行われてきた²⁻⁴⁾。銅酸化物や鉄系の非従来型超伝導体では高温での常伝導状態も特異な性質を示すが、それらと対照的に、 Sr_2RuO_4 の常伝導状態は典型的なフェルミ液体金属で、図2に示すように3つの d 電子軌道に由来する3つのフェルミ面(バンド)の実験・理論は緻密なレベルで一致する⁶⁾。しかしながら、純良単結晶試料による実験データの集積にも関わらず、超伝導状態は長年未解決である⁴⁾。最近までは電子対(クーパー対)のスピンの $S=1$ で時間反転対称性を破る(Time Reversal Symmetry Breaking, TRSB)、スピン三重項カイラル p 波状態が有力な候補であった。ところが2019年にスピン三重項電子対の根拠であった核磁気共鳴(NMR)の実験に技術的問題が判明し、根本的な見直しが必要となった^{7,8)}。また一軸圧力の印加で超伝導転移温度が倍増し(図3)⁹⁻¹¹⁾、超伝導転移温度 T_c と時間反転対称性破れの転移温度 T_{TRSB} とが分裂することも明らかになった(図4)¹²⁾。

これらから $S=0$ のスピン一重項カイラル d 波状態が有力となる。しかしその場合、層状物質なのに同じ面内で運動する電子同士の対ができないことになり、深刻な矛盾も生じる。最終的解決に向けて、現在、新たに激動的な研究展開が始まっている。この問題の最終的解決に向け、一軸圧力下での超伝導状態の特性を上部臨界磁場や核磁気共鳴などの測定からつぶさに明らかにすることから本質的な情報を引き出すべく研究を進めている。

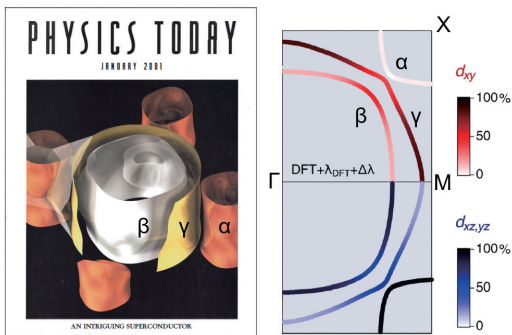


図2 (左) Sr_2RuO_4 の3つの擬2次元フェルミ面(α, β, γ)の実験結果⁵⁾と、(右)最新の理論結果⁶⁾。同じバンド(例えば γ 面)でも d_{xy} 軌道成分(赤)以外に、(d_{xz}, d_{yz})軌道成分(青)が対角(Γ -X)方向には約50%、水平(Γ -M)方向でも約15%も含まれる。

2. ルテニウム酸化物の超伝導状態： 「非従来型」を超えるのか

2.1. 現在の未解明課題：非従来型を超える超伝導とは

これまでの伝統的枠組みでは、超伝導状態はスピン一重項 s 波の「従来型」、スピン一重項 d 波やスピン三重項 p 波・ f 波などの「非従来型」に分類されてきた。(スピ

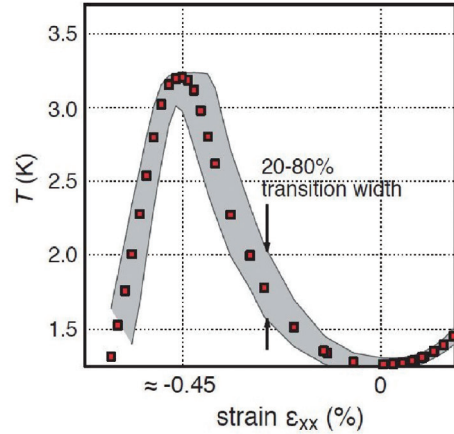
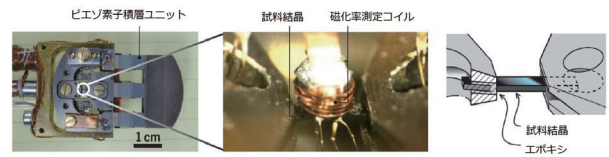


図3 (上)「Hicks型」の Piezoelectric 一軸圧力装置と、交流磁化率コイル、試料の取付概念図。(下) 超伝導転移温度は、一軸性歪によって倍増し、更なる圧縮歪で低下する⁹⁻¹¹⁾。

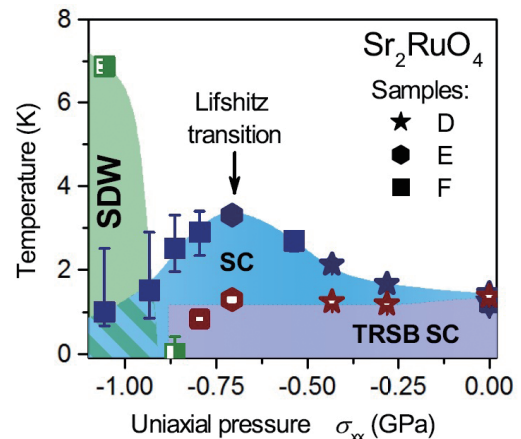


図4 一軸圧印加で Sr_2RuO_4 の超伝導転移温度が倍増するだけでなく、二つの超伝導相に分裂する¹²⁾。

ン・軌道相互作用を踏まえて、空間部分は d 波や p 波などよりも、偶パリティ・奇パリティの分類がより正確である。) また、「エキゾチック超伝導状態」として、「軌道強磁性」に対応する軌道カイラル状態、「スピン強磁性」に対応するノンユニタリー状態、空間変調を伴う FFLO 状態(2.2で述べる)、強磁性体近接効果などで重要となる奇周波数状態などをこの枠組みのなかで拡張的に組み込んで理解されてきた。

Sr_2RuO_4 の超伝導は、擬スピン一重項カイラル状態との解釈が現在有力で、秩序変数となる超伝導エネルギーギャップの波数 k 依存性が $\Delta(k) = \Delta_0 k_z (k_x + ik_y)$ のカイラル d 波状態が有力候補である。しかしこの状態では $k_z=0$ のとき秩序変数が0になり、層状物質なのに面内で運動する電子(フェルミ速度 $v_{Fz}=0$)同士の対ができない不

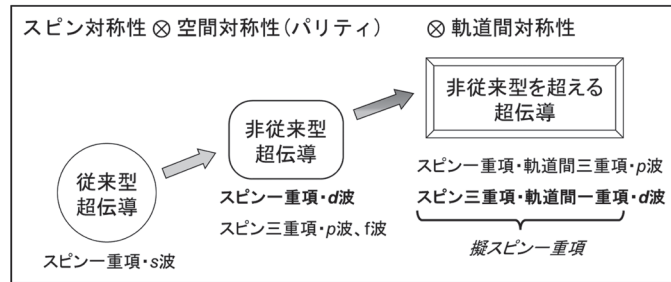


図5 「非従来型を超える超伝導状態」の位置づけ. スピン対称性・空間対称性に加えて、複数の電子軌道から電子対が構成される場合は軌道対称性も重要な要素となる.

自然さがある. では、これまでの「非従来型」超伝導の枠を超えた、異なる原子軌道間での電子対による超伝導ならどうだろうか？ 同じバンド（フェルミ面）上でも軌道 $\{d_{xz}, d_{yz}, d_{xy}\}$ の異なる電子間のクーパー対が形成される場合、そのような状態が安定となる可能性はある. 実際のフェルミ面に基づく理論からは、そのようなスピン三重項・偶パリティ・軌道間一重項状態が有望である (図5)¹³⁾. この可能性を実験的にどのように検証できるのが課題となる. その判定・検証を行うことは、一般の超伝導の理解にも新たな視点を与える点で学術的に大いに意義があるだけでなく、超伝導全体の枠組みに重要な変革をもたらす可能性がある.

本研究でターゲットとする新奇な超伝導状態の基本概念を模式的に図6で説明する. それぞれの八角形は図2に示した Sr_2RuO_4 の γ バンド (γ フェルミ面) 上に形成したクーパー対の波数 $(k, -k)$, スピン (\uparrow, \downarrow) , そしてこのバンドに含まれる軌道成分 (② = d_{yz} , ③ = d_{xy}) の電子対を表す4種類の基底 A ~ D からなる. (A, B) (C, D) に着目すると $|S=1, S_z=0\rangle = \hat{z}$ の d ベクトルをもつスピン三重項で, (A, C) (B, D) に着目すると $|2, 3\rangle - |3, 2\rangle$ の軌道一重項である. 理論的には、すべての波数 k を考慮したバンド基底ではこの様な状態は偶パリティ擬スピン一重項超伝導として振舞い、最近の NMR ナイトシフトの結果も説明できる¹⁴⁾. なお、引力メカニズムは電子相関 (クーロン斥力 U) とそれに起因する磁氣的相互作用である.

2.2. 電子対スピンの状態

核磁気共鳴 (NMR) の高周波パルスによる過熱の問題が明らかになり^{7,8)}, 十分低エネルギーのパルスを用いての再測定を進めた結果, Sr_2RuO_4 では空間変調のない外部磁場のもとで、電子スピンの分布が空間変調する特異な超伝導状態が生じることを観測した¹⁵⁾.

通常の超伝導状態をになう電子対の合成運動量はゼロとなる. 一方、1964年に Fulde と Ferrell, 1965年に Larkin と Ovchinnikov が独立して、電子対の合成運動量がゼロでなく、その結果として秩序変数が空間変調する超伝導状態が磁場中で安定化することを予言した. この FFLO 状態と呼ばれる超伝導状態は、実現に必要な磁場が高いことや極めて高純度な結晶が必要とされることから、長年の研究にもかかわらず未解明な部分も多かった. 特に、空間変調している証拠をとらえることは困難であった. 我々は核磁気共鳴法の大きな利点のひとつである、原子核位置ごとの磁化率を検出する手法を用いて、 Sr_2RuO_4 の超伝導状態に1次元的な空間変調が起きていることを明らかにした (図7). この超伝導状態では、流体のまま電子スピンに濃い部分と薄い部分が発現することから、液晶の分野でいうスメクティック状態が超伝導スピンにおいて実現しているといえる.

この状態が実現しているのは図8の磁場-温度相図に示す通り、磁場を RuO_2 面 (ab 面) に正確に平行にかけた場合の上部臨界磁場付近の領域である. 今後は、NMR ナイトシフトの温度変化の異方性から、スピン三

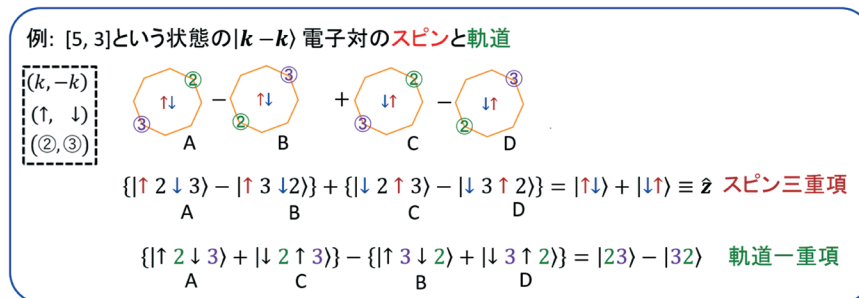


図6 スピン対称性とパリティ (空間反転対称性)に加えて、軌道間電子対の対称性 (②, ③) を導入した電子対の模式的表現. 図ではスピン三重項・軌道一重項の偶パリティ状態の例を表す. ここで例示した $[5, 3]$ と $[6, 3]$ との組み合わせ $[5, 3] + i[6, 3]$ でカイラル状態となる¹³⁾.

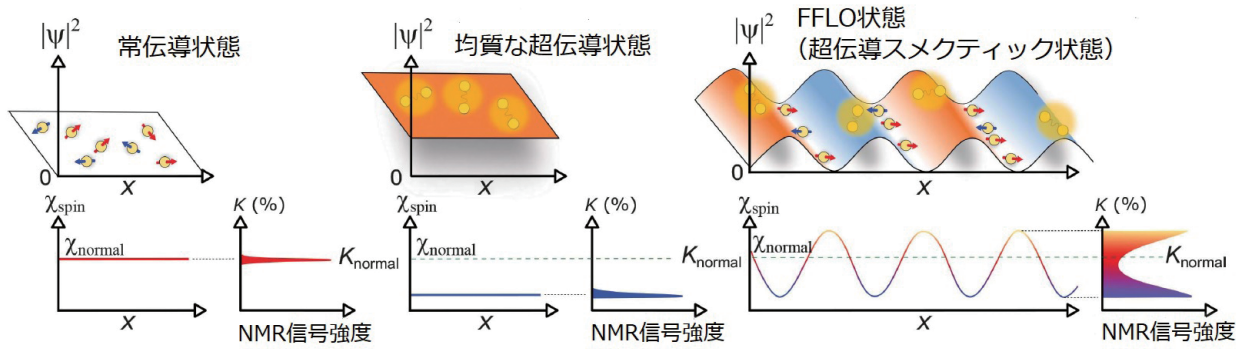


図7 FFLO状態の簡単なイメージ図と予想されるNMRスペクトル¹⁵⁾。

(左) 常伝導状態での電子と電子スピンのイメージ図。(中央) 一般的な超伝導状態でのイメージ図。超伝導状態では磁化率が減少し、それに伴いNMRスペクトルの位置が変化する。(右) FFLO状態における電子と電子スピンのイメージ図。スピン濃度が空間的に振動し、結果としてNMRスペクトルが「2本角」形状を示す。Sr₂RuO₄ではこの特徴を持つピーク分裂を観測した。

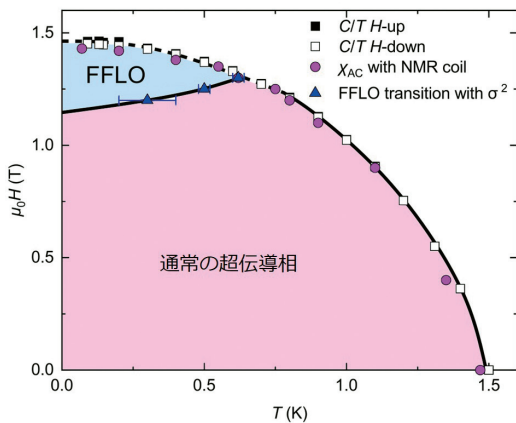


図8 層状酸化物超伝導体Sr₂RuO₄の磁場・温度相図¹⁵⁾。

面に平行な磁場のもと、秩序変数が空間変調するFFLO状態の出現領域を示す。

重項・軌道間一重項の「擬スピン一重項状態」(図5)と従来の「スピン一重項」との実験的判別ができないのか、スピン磁化率に対する理論¹⁴⁾とも比較して検討する。

2.3. 「Hicks型」の一軸圧力印加装置

ここで、本研究を進めるうえでの重要なツールとなる「Hicks型」の圧電素子一軸圧力装置(図3)の特徴について少し詳しく述べる。測定試料に圧力・歪を加える方法として、オイルや粉末など圧力媒体中の試料に等方的な圧力を印加する静水圧装置が広く用いられている。一方、一軸性の圧力・歪を加える方法としては、板バネ-ピストン型や、圧電素子の表面に薄い試料を接着する方法などが用いられるものの、試料面に均質に圧力をかける困難さや、大きな歪が得られない等の技術的問題から、広くは用いられてこなかった。ところが最近、共同研究者のHicks博士らがSr₂RuO₄の研究を進める目的で画期的な一軸圧力装置を考案した¹⁰⁾。この装置では圧電素子積層ユニットをピストンにして試料に大きな歪を発生させる(図3上)。

この新しい「Hicks型」の一軸圧力装置の技術的、科学的特徴をあげる。

1. 大きな格子変形、および低温での*in-situ*圧力印加と制御が可能：長い圧電素子積層ユニットの変位を試料結晶に伝達するため、非常に大きな歪が可能となる。試料結晶の典型的な大きさは露出部分の長さ1~2 mm、断面が0.2×0.4 mm²である。Sr₂RuO₄単結晶では、歪~1% (一軸圧力~1 GPaに相当) まで試料破壊なく測定が行える。また、印加電圧を変えるだけで低温でも*in-situ*の圧力制御ができ、圧縮だけでなく伸長歪も加えられる。
2. 試料が露出した状態での測定が可能：圧力容器中に試料を入れる静水圧装置と異なり、試料が露出しているため、角度分解型光電子分光、ラマン分光、磁気光学カー効果などの光学実験や、走査型トンネル顕微鏡などのプローブにも適用できる。
3. 薄片結晶や接合素子、薄膜試料にも適用できる：壊れやすい結晶や超伝導接合素子に一軸圧を印加するには、薄片・薄膜試料を接着した基板ごと圧縮することが有効である。我々は主にこの方法を採用している。
4. 結晶構造および電子状態の対称性を変化できる：一軸圧印加の最も重要な特徴は、結晶構造とそれに付随する電子状態の「対称性」の変化を狙い撃ちできることである。Sr₂RuO₄の超伝導転移温度の倍増現象を伴うフェルミ面の次元変化はその典型例といえる。一軸圧力で結晶構造・電子状態の対称性が変わると、液晶のような電子ネマティック状態の誘起や、トポロジカル状態のオン/オフ制御など、物質の新たな性質を引き出すこともできる。我々は秩序変数が液晶のような方向性を持つネマティック超伝導状態の3方向の超伝導ドメインを一方向に揃えることにも成功した^{16,17)}。このように僅かな一軸性変形でも元の対称性と大きく異なる状態が発現する可能性がある。

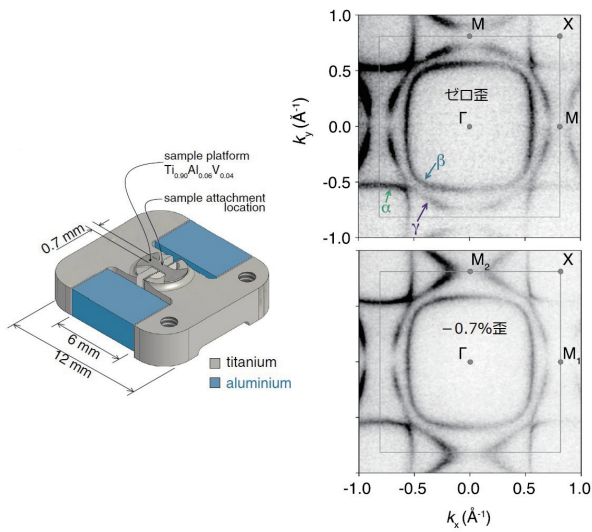


図9 角度分解光電子分光で明らかになった、一軸圧印加での Sr_2RuO_4 のフェルミ面の再構築（リフシツ転移）¹⁸⁾。薄片結晶を接着した基板が熱収縮率の違いで圧縮する。

2.4. 一軸性歪による超伝導転移温度の増大とリフシツ転移

Sr_2RuO_4 のバンド構造の M 点には、フェルミ単位より 6 meV 程度高いエネルギーに、 γ バンド上端に伴う電子状態密度のピークがある。静水圧ではこの基本構造は変化しないが、一軸圧力ではその 2 点（図 9 の M_2 点）だけがフェルミ単位をよぎる「リフシツ転移」が誘起される¹⁸⁾。超伝導転移温度 T_c が 1.5 K から 3.5 K にまで増大する現象は、この電子状態密度の発散的上昇に呼応し

ている¹¹⁾。転移温度の倍増現象はすでに 1998 年に Ru 金属が共晶析出した Sr_2RuO_4 で観測されていたが¹⁹⁾、そのメカニズムも同様の歪によると考えられる。また、ミュオンスピン回転の実験からは、一軸圧印加で T_c と時間反転対称性の破れる T_{TRSB} が分裂することも明らかになった（図 4）^{12, 20)}。ところが一軸圧下での比熱には低温側での転移に伴う異常は検出されていない²¹⁾。転移の分裂はカイラル d 波状態を決定づける証拠となるため、ミュオン以外の方法での実験的検証が必要な段階である。

これらの研究遂行に必須となる純良単結晶は赤外線加熱のイメージ炉を用いて育成する²²⁾。多くの実験では結晶試料に直接一軸圧を印加するが、その用途に単結晶棒の長軸が必要な結晶主軸に揃った単結晶を育成するノウハウも得ている。

2.5. 一軸圧力印加の手法開発と実験

一軸圧で超伝導転移温度が倍増する現象には、 piezo 素子一軸圧力装置の開発を含めて当初から我々も直接寄与してきた⁹⁾。本研究では新しい手法として、角度分解光電子分光によるリフシツ転移の検証（図 9）での手法を参考にして、 Sr_2RuO_4 の結晶薄片を基板に接着剤で張り付けて結晶の破壊を防ぎ、低温では 0.6% 以上の収縮歪を達成した（図 10）。 Sr_2RuO_4 の表面の大きさが $(0.5 \times 0.5) \text{ mm}^2$ 以下の薄片試料の結晶方位もラウエ回折写真から正確に決定できる。一軸圧力印加での状態変化を超伝導特性の面内異方性から明らかにする実験を遂行

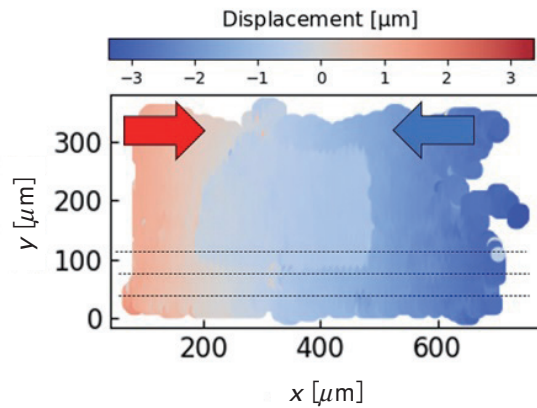
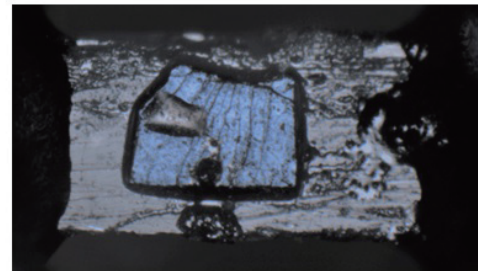
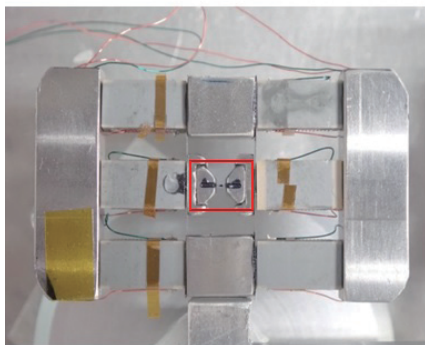


図 10 (上) piezo 素子を用いた一軸圧力装置。赤線で囲った中央部に試料がある。(右上) クォーツ結晶基板に接着した Sr_2RuO_4 結晶薄片 ($0.3 \times 0.2 \text{ mm}^2$)。(右下) piezo 素子に室温で 100 V を印加する前後での結晶の変位。赤・青はそれぞれ右・左方向への変位を表す。

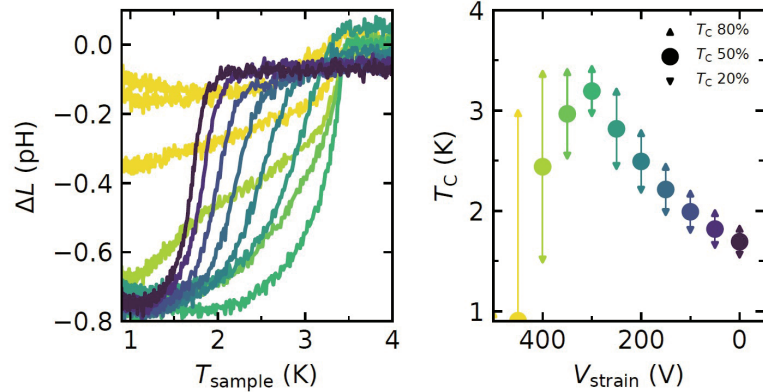
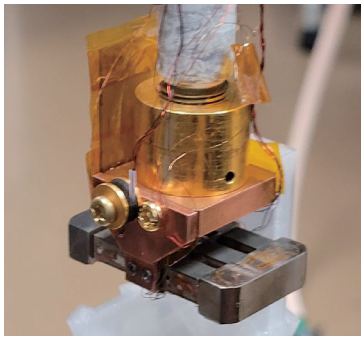


図11 (左) 希釈冷凍機に取り付けた一軸圧装置。ベクトル・マグネットによって正確に方位制御した磁場中での超伝導性を測定する。(中・右) 一軸圧印加による Sr_2RuO_4 の超伝導転移温度 T_c の変化。ヘリウム3冷凍機を用いた予備実験の結果。自己インダクタンス変化 ΔL が示す超伝導転移温度は、ピエゾ素子電圧とともに上昇するが、300 V を境に急激に超伝導性が失われていく。この電圧付近でリフシツ転移が起っていると解釈できる。

中で、新研究室で図11に示すようなリフシツ転移での T_c の極大を示すデータがスタートしている。

3. トポロジカル物質の超伝導

量子物質の代表例であるトポロジカル物質は、電子の波動関数が様々な対称性に基づくトポロジカル不変量を持つ物質である。 Sr_2RuO_4 の超伝導も、電子対の角運動量が時間反転性を破るカイラル状態であれば、トポロジカル超伝導に分類される。我々はトポロジカル絶縁体にキャリアドーピングした超伝導体で、結晶の回転対称性を自発的に破るネマティックなトポロジカル超伝導が現れることを明らかにしており²³⁾、上でも触れたがそのネマティック分域構造を一軸圧印加で制御することにも成功した¹⁶⁾。

最近、我々が超伝導を発見した CaSb_2 は、非共型 (non-symmorphic) の結晶対称性 (この場合、平行移動とその移動軸周りの回転で系が不変となる) によって「ディラック線ノード金属」というトポロジカル状態にある²⁴⁻²⁸⁾。静水圧の印加で超伝導転移温度が上昇したのち減少するという異常なふるまいを示すが、その原因は未解明である (図12)²⁶⁾。この超伝導単結晶試料の様々な結晶軸方向に一軸圧を印加して、トポロジカル性のスイッチングと超伝導性の変化を明らかにする研究にも着手してい

る。この物質の結晶は比較的柔らかく、自立式の一軸圧力の印加には耐えられないので、上で述べた基板に接着した結晶試料に間接的に歪を加える方法で実験を行う。

4. まとめと展望

層状ルテニウム酸化物 Sr_2RuO_4 の超伝導状態の謎を解明するためには、一軸性歪による超伝導性の変化を詳しく調べることが重要で、これまでの「非従来型」超伝導の枠を超える状態である可能性も視野に研究を進めている。時間反転対称性破れ (TRSB) の転移を複数の方法で検証するための共同研究にも取り組んでいる。まず一軸圧下での NMR 磁気緩和率 $1/T_1$ の温度変化から予想されるギャップ構造の変化を敏感に検出できるため、京都大学の石田憲二教授のグループと Ru の核四重極共鳴 (NQR) での研究を進めている。また、TRSB を直接検出する磁気光学カー効果ではカリフォルニア大学アーバイン校 (UCI) の Jing Xia 教授のグループと、さらに準粒子トンネル効果で TRSB に伴って発生するゼロバイアス・コンダクタンス・ピークの観測を名古屋大学の柏谷聡教授のグループと共同で進めている。

ルテニウム酸化物超伝導体の研究から生まれたピエゾ素子一軸圧力装置は、等方的な静水圧印加と異なり、一

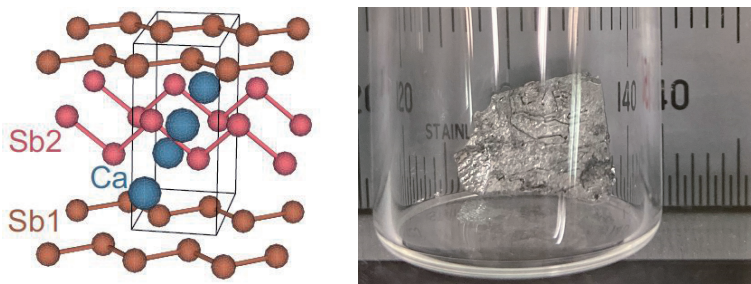
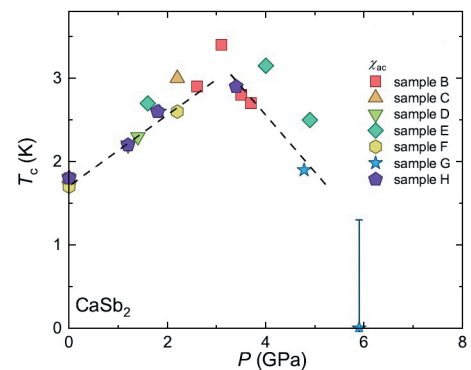


図12 (左) CaSb_2 の結晶構造²⁴⁾、(中央) フラックス法で育成した結晶試料、(右) 静水圧印加による超伝導転移温度の変化²⁶⁾。



方向への歪で結晶の対称性をその場で変化できるため、質的に新しい電子状態も創り出せる。この装置を用いた研究は、超伝導、磁気転移、強誘電転移、金属-絶縁体転移、トポロジカル転移の誘起やスイッチングなど、電圧で量子物質の機能を制御する新しいアプローチとなる期待が持てる。

謝 辞

本稿の内容は多くの方々との共同研究の成果である。なかでも、米澤進吾、石田憲二、Giordano Mattoni、池田敦俊、松原匠矢、金城克樹、北川俊作、Clifford Hicks、Vadim Grinenko、Andy Mackenzieの各氏に感謝したい。また、TRiKUCの設立にあたりお世話いただいた玉尾皓平所長をはじめとする豊田理化学研究所の関係各位、北川進副院長をはじめとする京都大学高等研究院の関係各位に感謝したい。

文 献

- 1) Y. Maeno, H. Hashimoto, K. Yoshida, S. Nishizaki, T. Fujita, J. G. Bednorz and F. Lichtenberg, *Nature*, **372** (1994) 532. DOI: 10.1038/372532a0
- 2) A. P. Mackenzie and Y. Maeno, *Rev. Mod. Phys.*, **75** (2003) 657. DOI: 10.1103/RevModPhys.75.657
- 3) Y. Maeno, S. Kittaka, K. Ishida, Nomura, S. Yonezawa and K. Ishida, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **81** (2012) 011009. DOI: 10.1143/JPSJ.81.011009
- 4) A. P. Mackenzie, T. Scaffidi, C. W. Hicks and Y. Maeno, *npj Quantum Materials*, **2** (2017) 40. DOI: 10.1038/s41535-017-0045-4
- 5) Y. Maeno, M. Rice and M. Sgrist, *Physics Today*, **54** (2001) 42. DOI: 10.1063/1.1349611
- 6) A. Tamai, M. Zingl, E. Rozbicki, E. Cappelli, S. Riccò, A. de la Torre, S. McKeown Walker, F. Y. Bruno, P. D. C. King, W. Meevasana, M. Shi, M. Radović, N. C. Plumb, A. S. Gibbs, A. P. Mackenzie, C. Berthod, H. U. R. Strand, M. Kim, A. Georges and F. Baumberger, *Phys. Rev. X*, **9** (2019) 021048. DOI: 10.1103/PhysRevX.9.021048
- 7) 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. DOI: 10.1038/s41586-019-1596-2
- 8) K. Ishida, M. Manago, K. Kinjo and Y. Maeno, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **89** (2020) 034712. DOI: 10.7566/JPSJ.89.034712
- 9) C. W. Hicks, D. O. Brodsky, E. A. Yelland, A. S. Gibbs, J. A. N. Bruin, M. E. Barber, S. D. Edkins, K. Nishimura, S. Yonezawa, Y. Maeno and A. P. Mackenzie, *Science*, **344** (2014) 283. DOI: 10.1126/science.1248292
- 10) C. W. Hicks, M. E. Barber, S. D. Edkins, D. O. Brodsky and A. P. Mackenzie, *Rev. Sci. Instrum.*, **85** (2014) 065003. DOI: 10.1063/1.4881611
- 11) A. Steppke, L. Zhao, M. E. Barber, T. Scaffidi, F. Jerzembeck, H. Rosner, A. S. Gibbs, Y. Maeno, S. Simon, A. P. Mackenzie and C. W. Hicks, *Science*, **355** (2017) eaaf9398. DOI: 10.1126/science.aaf9398
- 12) V. Grinenko, S. Ghosh, R. Sarkar, J.-C. Orain, A. Nikitin, M. Elender, D. Das, Z. Guguchia, F. Brückner, M. E. Barber, J. Park, N. Kikugawa, D. A. Sokolov, J. Bobowski, T. Miyoshi, Y. Maeno, A. P. Mackenzie, H. Luetkens, C. Hicks and H.-H. Klauss, *Nature Physics*, **17** (2021) 748. DOI: 10.1038/s41567-021-01182-7
- 13) H. G. Suh, H. Menke, P. M. R. Brydon, C. Timm, A. Ramires and D. Agterberg, *Phys. Rev. Res.*, **2** (2020) 032023(R). DOI: 10.1103/PhysRevResearch.2.032023
- 14) Y. Fukaya, T. Hashimoto, M. Sato, Y. Tanaka and K. Yada, *Phys. Rev. Res.*, **4** (2022) 013135. DOI: 10.1103/PhysRevResearch.4.013135
- 15) K. Kinjo, M. Manago, S. Kitagawa, Z. Q. Mao, S. Yonezawa, Y. Maeno and K. Ishida, *Science*, **376** (2022) 397. DOI: 10.1126/science.abb0332
- 16) I. Kostylev, S. Yonezawa, Z. Wang, Y. Ando and Y. Maeno, *Nature Commun.*, **11** (2020) 4152. DOI: 10.1038/s41467-020-17913-y
- 17) I. Kostylev, S. Yonezawa and Y. Maeno, *J. Appl. Phys.*, **125** (2019) 082535. DOI: 10.1063/1.5063729
- 18) V. Sunko, E. A. Morales, I. Marković, M. E. Barber, D. Milosavljević, F. Mazzola, D. A. Sokolov, N. Kikugawa, C. Cacho, P. Dudin, H. Rosner, C. W. Hicks, P. D. C. King and A. P. Mackenzie, *npj Quantum Materials*, **4** (2019) 46. DOI: 10.1038/s41535-019-0185-9
- 19) Y. Maeno, T. Ando, Y. Mori, E. Ohmichi, S. Ikeda, S. Nishizaki and S. Nakatsujii, *Phys. Rev. Lett.*, **81** (1998) 3765. DOI: 10.1103/PhysRevLett.81.3765
- 20) V. Grinenko, D. Das, R. Gupta, B. Zinkl, N. Kikugawa, Y. Maeno, C. W. Hicks, H.-H. Klauss, M. Sgrist and R. Khasanov, *Nature Commun.*, **12** (2021) 3920. DOI: 10.1038/s41467-021-24176-8
- 21) Y.-S. Li, N. Kikugawa, D. A. Sokolov, F. Jerzembeck, A. S. Gibbs, C. W. Hicks, Y. Maeno, J. Schmalian, M. Nicklas and A. P. Mackenzie, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, **118** (2021) e2020492118. DOI: 10.1073/pnas.2020492118
- 22) J. S. Bobowski, N. Kikugawa, T. Miyoshi, H. Suwa, H.-S. Xu, S. Yonezawa, D. Sokolov, A. P. Mackenzie and Y. Maeno, *Cond. Matter*, **4** (2019) 4010006. DOI: 10.3390/condmat4010006
- 23) S. Yonezawa, K. Tajiri, S. Nakata, Y. Nagai, Z. Wang, K. Segawa, Y. Ando and Y. Maeno, *Nature Phys.*, **13** (2017) 123. DOI: 10.1038/NPHYS3907
- 24) A. Ikeda, M. Kawaguchi, S. Koibuchi, T. Hashimoto, T. Kawakami, S. Yonezawa, M. Sato and Y. Maeno, *Phys. Rev. Materials*, **4** (2020) 041801(R). DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.4.041801

- 25) H. Takahashi, S. Kitagawa, K. Ishida, M. Kawaguchi, A. Ikeda, S. Yonezawa and Y. Maeno, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **90** (2021) 073702. DOI: 10.7566/JPSJ.90.073702
- 26) S. Kitagawa, K. Ishida, A. Ikeda, M. Kawaguchi, S. Yonezawa and Y. Maeno, *Phys. Rev. B*, **104** (2021) L060504. DOI: 10.1103/PhysRevB.104.L060504
- 27) A. Ikeda, S. R. Saha, D. Graf, P. Saraf, D. S. Sokratov, Y. Hu, H. Takahashi, S. Yamane, A. Jayaraj, J. Sławińska, M. B. Nardelli, S. Yonezawa, Y. Maeno and J. Paglione, *Phys. Rev. B*, **106** (2022) 075151. DOI: 10.1103/PhysRevB.106.075151
- 28) 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, *Phys. Rev. Materials*, **6** (2022) 104203. DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.6.104203

付章. 豊田理研—京大連携拠点の立ち上げ

豊田理研フェローの新規制度のテストケースとして、京都大学高等研究院との連携研究拠点（豊田理研・京大連携拠点, Toyota Riken—Kyoto Univ. Research Center : TRiKUC）の研究施設を立ち上げて、最先端研究を行う環境を構築した（図13）。連携拠点TRiKUCに必要な単結晶育成装置、分析装置、低温実験装置等に移設・導入して研究室を整備した。また、特定助教として若手研究者を2名雇用し、目的の研究を遂行する体制を築きつつある。



図13 豊田理研—京大連携拠点（TRiKUC）の新しい実験室。
左端からヘリウム3冷凍機と測定システム、精密磁化測定システム（QD社, MPMS）、粉末X線回折装置、ラウエ装置、各種電気炉、右端は2台の単結晶育成用フローティングゾーン炉（FZ炉）。