

謎多き超伝導体の「隠れた対称性」を絞り込む ルテニウム酸化物の超伝導の本質に迫る

概要

物体に力を加えて歪ませることで、電気的性質を大きく変化させることができます。最近、ピエゾ素子を用いた装置で、ピエゾ素子に加える電圧によって試料のひずみを制御する技術が格段に進歩しました。特に一方向の歪では、物質の対称性を変化できるので、性質の大きな変化も生み出せます。その典型例として、量子物質の非従来型の超伝導体であるルテニウム酸化物 Sr_2RuO_4 では、一方向のひずみで超伝導が起こる温度が倍増することが知られています。

京都大学・高等研究院の豊田理研・京大連携拠点(TRiKUC)のジョルダノ・マッティニ特定助教、トーマス・ジョンソン博士研究員、前野悦輝連携拠点教授（豊田理化学研究所フェロー）らの研究グループは、「せん断ひずみ」を超伝導体に加える新たなアプローチで、長年の謎である Sr_2RuO_4 の超伝導状態の本質に関する新たな進展をもたらしました。ルテニウム酸化物の超伝導転移温度は、均質ひずみや一方向のひずみに対して、それぞれ大きな変化を示すことがわかっていました。本研究によって、せん断ひずみが超伝導転移にほとんど影響を与えないことが明らかになり、二成分超伝導という特異な超伝導状態では説明できないことがわかりました。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ます。本研究成果は 2025 年 12 月 16 日に国際学術誌 Nature Communications にオンライン掲載されました。

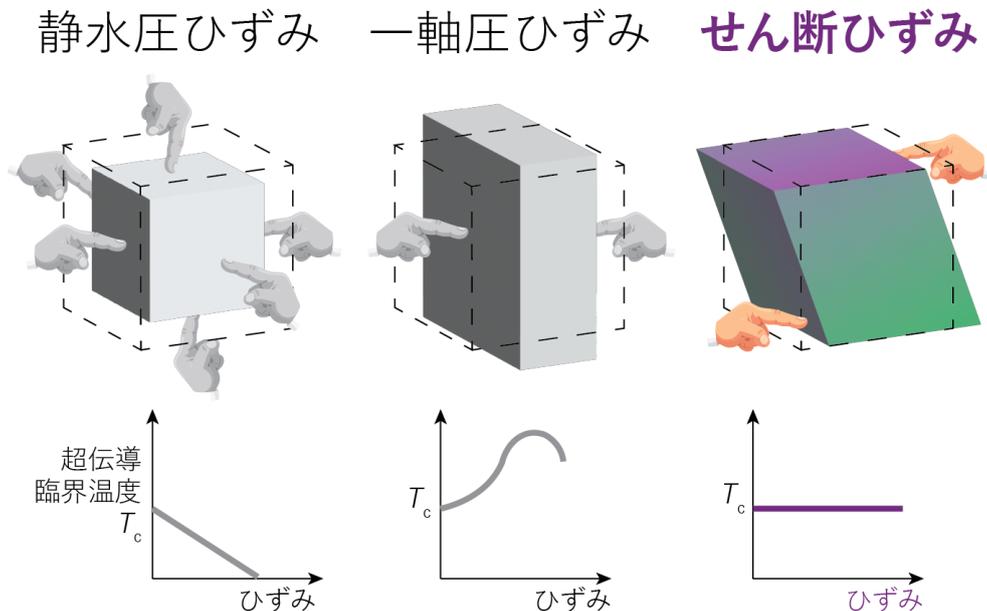


図 1：せん断ひずみでは変化しない Sr_2RuO_4 の T_c 。 Sr_2RuO_4 では、静水圧は超伝導転移温度 T_c を低下させ、逆に一軸圧は T_c を上昇させることが知られている。本研究では、せん断ひずみは T_c を変化させないという、超伝導機構の理解に重要で興味深い結果が得られた。画像クレジット：Giordano Mattoni

1. 背景

ルテニウム酸化物 Sr_2RuO_4 の超伝導は 1994 年に前野（現在、豊田理研-京大連携拠点 連携拠点教授）らによって発見され、量子物質に典型的な非従来型の超伝導を示すことから、物性物理学の重要な研究対象となりました。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ます。特に、ミュオンや超音波の実験から二成分の秩序変数からなる特異な超伝導状態の可能性が指摘されています。一方、比熱や一方向にひずみを加えた実験からは一成分の超伝導状態が示唆され、その間で論争が続いてきました。したがって、この問題の核心に直接迫る実験が待たれていました。

2. 研究手法・成果

本研究グループは、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、静水圧ひずみと一方向ひずみのいくつかの実験結果の組み合わせではなく、超伝導の二成分秩序変数と結合する「せん断ひずみ」を直接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ました。

極薄の Sr_2RuO_4 結晶に対して、異なる種類のせん断ひずみを精密に加えて超伝導の応答を比較する新技術を開発しました。測定の結果、超伝導転移温度は、せん断ひずみに対してほとんど変化しないことが明らかになりました。これは二成分超伝導の場合の理論的予測とは一致せず、 Sr_2RuO_4 が一成分の超伝導状態を持つことを示しており、超伝導性の完全理解に向けて、今後の理論研究と実験研究に新たな方向性を与えます。

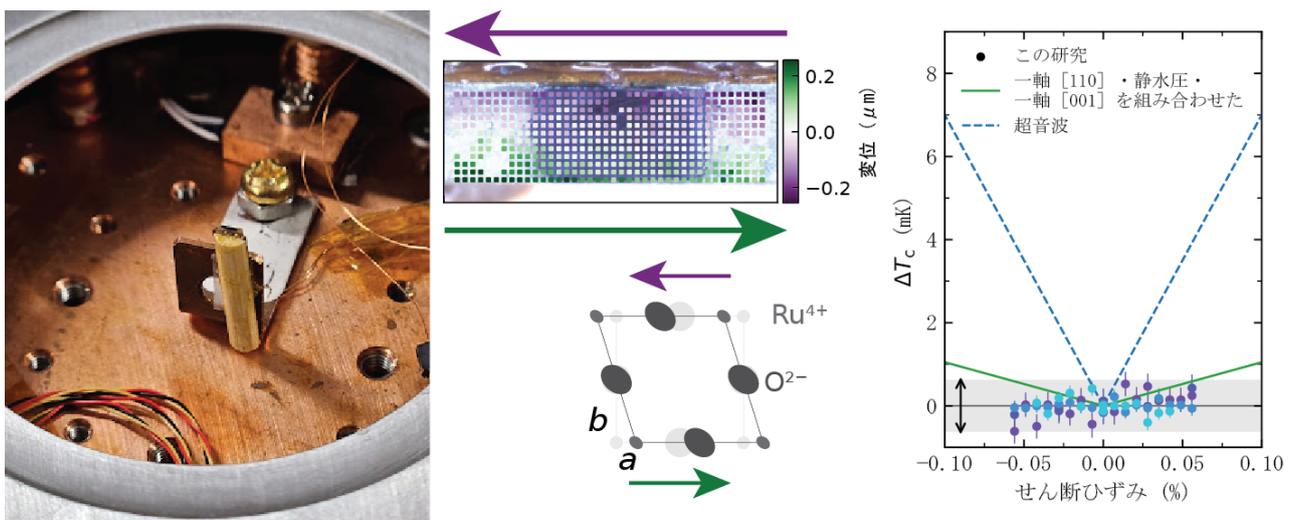


図 2: せん断ひずみを“見る”装置。 Sr_2RuO_4 結晶に加えたせん断変位の光学イメージ測定結果と、格子がどのようにずれるかを示す模式図。右パネルでは、本研究で測定されたせん断ひずみに対して変化しない T_c を、[110] 方向・静水圧・[001] 方向の圧力を組み合わせて得られたこれまでの結果（緑線）や、超音波測定からの予測（青破線）と比較して示している。画像クレジット：Giordano Mattoni

3. 波及効果、今後の予定

今回開発したせん断ひずみ制御技術は、 Sr_2RuO_4 だけでなく、 UPt_3 の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す。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ます。さらに、ミュオンや超音波の結果との食い違いがどのように生じるのかという点は今後の重要な課題であり、追加の実験と理論解析が求められます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究プロジェクトは、以下の資金の支援を受けて実施されました。

- 日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究 (KAKENHI) Nos. 22H01168, 23K22439, JP24H01659, JP24K17011, 25K17346
- G.M. は、京都大学財団およびトヨタ・理研スカラーの支援を受けました。
- T.J. は、日本学術振興会国際研究フェロー (PE24047) として支援を受けました。
- S.P. および Y.M. は、JST さくらサイエンス交流プログラムの支援を受けました。

<用語解説>

- 超伝導転移温度 (T_c) : 物質が抵抗ゼロの超伝導状態に移行する温度。
- せん断ひずみ: 結晶が一部で横方向にずれるように変形すること。

<研究者のコメント>

ルテニウム酸化物 Sr_2RuO_4 の「隠れた対称性」をせん断ひずみで探る実験は、極めて薄い結晶に精密なひずみを加える必要があり、大変な試行錯誤の連続でした。初めて超伝導転移温度がほとんど変化しないことを確認できたとき、長年の論争に一石を投げられる手応えを感じました。この手法は今後、他の量子物質研究にも応用可能で、物性物理学の理解を深める新たな道を切り拓けると期待しています。(ジョルダノ・マッティニ)

<論文タイトルと著者>

タイトル:

Direct evidence for the absence of coupling between shear strain and superconductivity in Sr_2RuO_4
(Sr_2RuO_4 におけるせん断ひずみと超伝導の結びつきがないことの直接的証拠)

著者: Giordano Mattoni, Thomas Johnson, Atsutoshi Ikeda, Shubhankar Paul, Jake Bobowski, Manfred Sigrist, Yoshiteru Maeno

掲載誌: Nature Communications DOI: 10.1038/s41467-025-67307-1