

せん断ひずみで量子物質の電子特性を解明

ジョルダノー マットニ*

Clarifying the Electronic Properties of Quantum Materials by Shear Strain

Giordano MATTONI*

非従来型超伝導体 Sr_2RuO_4 は、発見から30年以上にわたり研究されてきましたが、その超伝導状態の対称性については、いまだに議論が続いています。中心的な問題は、超伝導秩序変数が1成分であるのか、それとも2成分であるのかという点です。本研究では、圧電素子と光学的ひずみイメージングを組み合わせることで、せん断ひずみを直接かつ連続的に制御する新しい手法を開発しました。0.3 Kまでの高精度測定の結果、超伝導転移温度 T_c はせん断ひずみの下でも変化しないことが明らかになりました。この結果は理論モデルに対して強い実験的制約を与え、1成分の超伝導状態を支持するものです。主な成果はNature Communications²⁾に掲載されました。さらに、本研究期間中の共同研究により、 Sr_2RuO_4 におけるミュオン・ナイトシフト測定³⁾および RuO_2 単結晶の育成⁴⁾に関する成果も発表されました。

1. 背景と目的

1994年の発見以来、層状酸化物 Sr_2RuO_4 は非従来型超伝導を研究するモデル系として広く用いられてきました。その超伝導転移温度 T_c は約1.5 Kです。多くの研究が行われてきましたが、その超伝導波動関数の正確な形は依然として明らかになっていません¹⁾。中心的な議論は、超伝導状態が1成分の秩序変数で記述できるのか、それとも2成分の秩序変数が必要なのかという点です。超音波やミュオン測定などの実験結果は、2成分の存在を示す証拠として解釈されることがあります。一方で、熱力学測定や一軸ひずみ実験の結果は、1成分の状態を支持しています。一軸圧力は T_c を大きく上昇させますが、等方圧（静水圧）は T_c を低下させます（図1）。しかし、純粋なせん断ひずみの影響はこれまで直接的に検証されていませんでした。本プロジェクトの主な目的は、せん断ひずみを制御可能な形で材料に加え、 T_c がどのように変化するかを明らかにすることです。

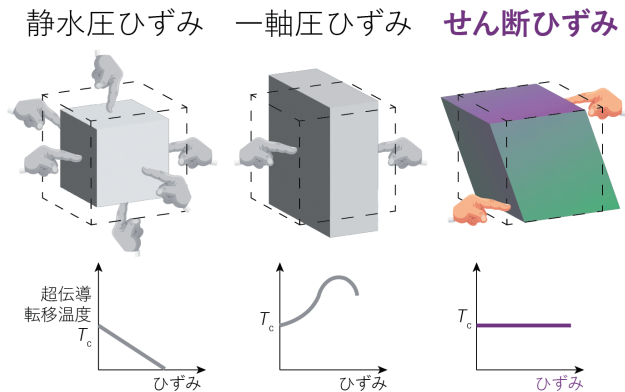


図1 Sr_2RuO_4 では、等方圧（静水圧）が超伝導転移温度 T_c を低下させることが知られています。一方、一軸圧力は T_c を上昇させます。本研究で得られた重要かつ興味深い結果は、せん断ひずみによって T_c が変化しないことです。

2. 方法

Sr_2RuO_4 単結晶に連続かつ制御可能なせん断ひずみを加えるために、コンパクトな圧電素子を設計しました。ひずみの大きさは外部電圧により調整可能です。加えられたひずみを測定するために、光学顕微鏡で撮影した動画をもとにした相互相関解析に基づく光学イメージング手法を用いました。これにより、結晶の変位を直接可視化でき、分解能は0.01 マイクロメートル以下に達しました。変位は、熱収縮や機械的影響を考慮して広い温度範囲で校正しました。超伝導転移は、ヘリウム3冷凍機内でコイルを用いた交流磁化率測定法により、0.3 Kまで測定しました。

3. 結果

本プロジェクトの中心的な成果は、 Sr_2RuO_4 の超伝導転移温度 T_c が、加えたせん断ひずみの下でも変化しないことであり、図1に模式的に示しています。この結果は超伝導メカニズムを理解する上で非常に重要です。もし超伝導状態が2成分であれば、理論的にはせん断ひずみにより T_c が変化することが予想されます。測定可能な変化が全く見られな

2026年3月4日 受理

* 豊田理研スカラー

京都大学高等研究院／豊田理研・京都大学共同研究拠点（TRiKUC）

かったことは、2成分シナリオを強く否定する証拠となります。図2は実際の実験結果を示し、1次元秩序変数の場合に予想される結果と一致しています。中央パネルは、加えられたせん断変位を光学的に可視化した結果と、格子がどのように変形しているかを示す模式図です。これにより、結晶に制御されたせん断ひずみが確実に加えられていることが確認されます。右パネルは、本研究で測定した T_c を、これまでに報告された異なる結晶方向への圧力を組み合わせた間接的な推定値や超音波実験の予測と比較したものです。緑線は以前の圧力組み合わせによる結果、青破線は理論的予測を示しています。これらの予測とは明確に対照的に、本研究の直接測定では T_c はせん断ひずみ下でも変化しないことが示されました。この結果は理論モデルに対して強い実験的制約を与えます²⁾。

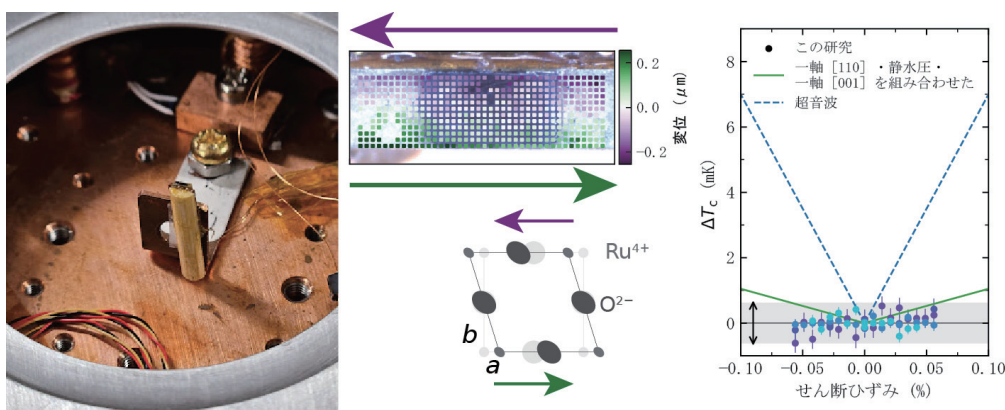


図2 (左) せん断ひずみを「可視化」するための装置。(中央) Sr_2RuO_4 単結晶に加えたせん断変位の光学イメージング結果と、格子がどのように変位するかを示す模式図を示しています。(右) 本研究で測定した T_c (せん断ひずみ下でも変化しない) を、[110]方向の圧力、等方圧 (静水圧)、[001]方向の圧力を組み合わせた以前の結果 (緑線) および超音波測定による予測 (青破線) と比較しています。 Sr_2RuO_4 の T_c はせん断ひずみ下でも変化しないことが示されています。

4. 共同研究および豊田理研スカラー活動

本研究期間中、2件の共同研究が補完的な科学的成果をもたらしました。ミュオンスピン回転実験により、 Sr_2RuO_4 の超伝導状態におけるスピン-重項性に関する新たな証拠が得られました³⁾。さらに、高品質な RuO_2 単結晶の作製と評価にも成功しました⁴⁾。 RuO_2 は近年、アルターマグネティック材料の候補として強い関心を集めており、その独特な磁気特性を研究するためには制御された結晶成長が不可欠です。これらのプロジェクトは、本研究の科学的影響をさらに広げる結果となりました。

同時に、豊田理研スカラープログラムによって、議論や交流の貴重な機会を得ることができました。特に名古屋で開催された豊田理研分野若手交流会では、出版前にせん断ひずみの結果を発表・議論することができました。これらの議論はデータ解釈を洗練させ、結果をより広い視野で理解する上で非常に有益でした。また、研究ネットワークを拡大し、フェーズ1の研究課題に関連した将来の共同研究に向けた新たな接点を構築することもできました。豊田理研スカラープログラムは、学際的な交流や長期的な科学的ネットワーク構築のための優れたプラットフォームとなっています。

5. 結論

本研究では、直接せん断ひずみを制御する新しい手法を開発・実装し、 Sr_2RuO_4 に対して高精度な超伝導測定に応用しました。主要な成果は、 T_c がせん断ひずみ下でも変化しないことです。これは、1成分の超伝導秩序変数を強く支持する結果であり、この重要な量子物質の理解を大きく前進させます。本研究で開発した手法は、量子材料における電子状態を対称性に応じて選択的に制御するための汎用的なツールを提供します。

REFERENCES

- 1) Y. Maeno, A. Ikeda and G. Mattoni, *Nat. Phys.*, **20** (2024) 1712-1718.
- 2) G. Mattoni, T. Johnson, A. Ikeda, S. Paul, J. Bobowski, M. Sigrist and Y. Maeno, *Nat. Commun.*, **17** (2026) 700.
- 3) 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, *Phys. Rev. Lett.*, **136** (2026) 066001.
- 4) S. Paul, G. Mattoni, H. Matsuki, T. Johnson, C. Sow, S. Yonezawa and Y. Maeno, *J. Cryst. Growth*, **673** (2026) 128405.