

計画研究 A01

時間反転対称性を破る超伝導体の新奇界面現象

前野 悦輝 / 京都大学 大学院理学研究科 教授

A01 班では、クーパー対の軌道角運動量が整列する「カイラル超伝導体」や強磁性体を含む超伝導接合などにおける、時間反転対称性の破れた超伝導状態を中心に、トポジカルに特徴づけられる新奇現象の研究を進めている。ニュースレター前号ではルテニウム酸化物超伝導体の SIN 接合でのカイラルエッジ状態密度の観測、トポジカル超伝導接合素子の提案と実証、磁化による半整数フラクソイド状態の観測など、多彩なトポジカル量子現象についてご紹介した。今回はその後の研究成果を中心にご紹介する。

まず、ルテニウム酸化物 Sr_2RuO_4 超伝導のスピンの 3 重項カイラル超伝導状態を吟味するレビュー論文 [1] を出版し、特に核磁気共鳴実験などによるスピンの 3 重項超伝導の証拠の確実性についても吟味を深めた。微結晶を用いた Sr_2RuO_4 の研究が多角的に進行中で、トポジカル超伝導の研究が世界的に加速する中、ルテニウム酸化物への注目度は増している。また強磁性体と超伝導体の接合実験もゼロエネルギーでのコンダクタンスピークの出現を磁性半導体の接合で初めて実証できた。このように、微結晶や超伝導接合の実験技術が大いに向上したので、現在はトポジカル超伝導の起源となる超伝導内部位相を直接観察するための研究を重点的に推進している。以下に最近のトピックスをまとめた。

1. Sr_2RuO_4 の磁場中超伝導転移

米澤 (A01 連携研究者)、前野 (A0 代表者) らは、熱磁効果測定から、磁場を RuO_2 面に平行に印加した場合の超伝導転移が、通常の超伝導体と異なり一次相転移になっていることを初めて示した (図 1) [2]。この結果は Sr_2RuO_4 のスピンの 3 重項超伝導がこれまでに知られていないメカニズムで磁場と相互作用していることを示唆しており、 Sr_2RuO_4 の超伝導対称性とトポジカル量子現象を理解する上で非常に重要な成果である。

2. Sr_2RuO_4 の共晶超伝導接合を用いたトポジカル超伝導状態の研究

ミクロンサイズの s 波超伝導体の周りを Sr_2RuO_4 が取り囲む構造で、超伝導位相の巻き付き数の違いによる臨界電流の変化等を検出する「トポジカル超伝導接合」を提唱した [3]。最近 Sr_2RuO_4 と Ru の共晶結晶に析出した 1 個のミクロンサイズの Ru 金属片に近接効果で s 波超伝導を導入する近接効果素子での

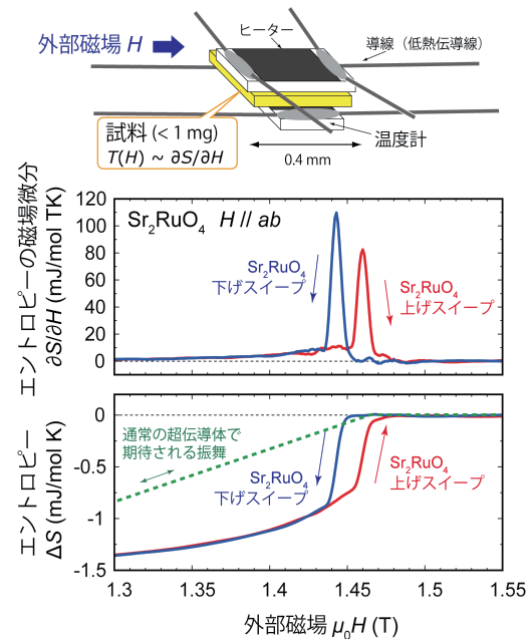


図 1 : Sr_2RuO_4 の熱磁効果測定結果。低温では上部臨界磁場近傍で超伝導 - 常伝導転移が不可逆になっていることとエントロピーが不連続変化することを明らかにした。これらは一次相転移の特徴である。

研究を進めている。共晶を利用した接合では石黒 (東京理科大) らとの共同研究で、超伝導量子干渉素子 (SQUID) も安定に製作できるようになった [4]。

3. Sr_2RuO_4 と s 波超伝導体との直接接合素子でのジョセフソン効果

共晶を用いた接合ではトポジカル超伝導特有の配置も可能になる反面、界面での超伝導転移温度の増大や素子構造の複雑さが避けられない。これに対して、 Sr_2RuO_4 と s 波超伝導体との直接の接合作製は、 Sr_2RuO_4 表面の電子状態の変質のために困難な問題であり、より単純な素子構造で本質的な超伝導特性を引き出す研究を阻んできた。産総研の齋藤 (A01 博士研究員)、柏谷 (A01 分担者) らの努力で、最近遂に Sr_2RuO_4 に直接電極を取り付ける素子の接合特性が大幅に向上し、この超伝導体ならではの特異な振る舞いを再現した (図 2) [5]。

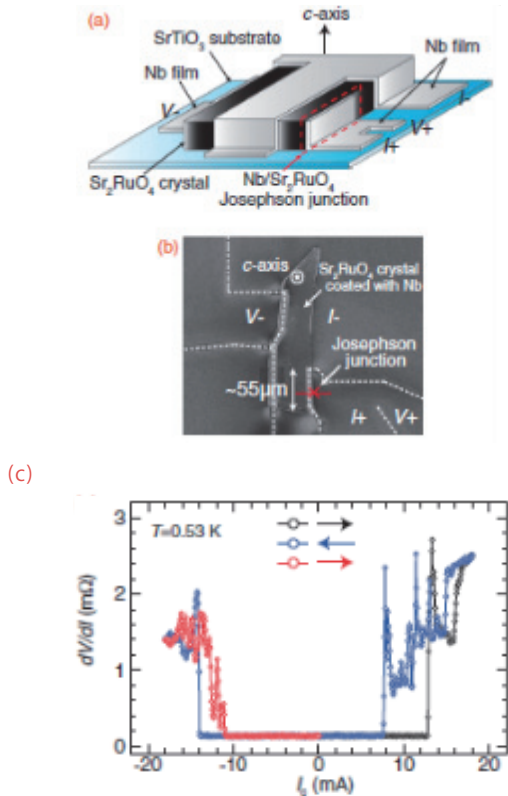


図2: Sr_2RuO_4 と Nb とのジョセフソン接合素子の模式図 (a) と実例 (b) [5]。磁場中量子干渉パターンも観測できているが、バイアス電流の増減に伴う履歴ループ (c) は通常の振る舞いを示し、また時間反転対称性を破る非対称性が現れる。

4. 強磁性体を含む超伝導接合系での奇周波数超伝導状態

赤崎 (A01 分担者) らは制御性の高い強磁性が得られる強磁性半導体 p-InMnAs と s 波超伝導体 Nb の強磁性 / 超伝導 (F/S) 接合で、強磁性体内に誘起される奇周波数スピン 3 重項状態の研究を進めた。従来のスピン 1 重項偶周波数クーパ対が近接効果により F 中に侵入した場合には、微分コンダクタンス-バイアス電圧特性には、ミニギャップ構造が現れる。ところがこの接合では逆にゼロバイアス近傍にピーク構造が現れ、その磁場依存性を含めて、スピン 3 重項 s 波の奇周波数クーパ対が F 中に侵入した場合に予想される局所状態密度のピークと定性的に一致した。詳しくは本号に赤崎氏による解説がある。

奇周波数ペアリング状態では「負のマイスナー効果」というパラドックスがあった。浅野 (A01 分担者) らは、接合系ではこの効果が、空間的に局在した奇周波数ペアによる異常な電磁応答となって現れることを理論的に示した [6]。また浅野らは C01 班にも関連するテーマとして、強磁性絶縁体とトポロジカル絶縁体との接合界面に現れる金属状態について、磁化方向に対する依存性を理論的に導いた [7]。

5. その他

トポロジカル超伝導状態の出現も期待できる空間反転対称性の破れた超伝導体は、計画研究 C01 の主要テーマの一つであるが、前野 (A01 代表者) らは鄭 (C01 代表者)、稲田 (C01 分担者) らと $\text{Li}_2(\text{Pd}_{1-x}\text{Pt}_x)_3\text{B}$ に関する共同研究を進めている。それに加えて、 CaIrSi_3 については単結晶育成や比熱、磁化率からの相図を含めてその超伝導対称性の研究を進めた [8, 9]。また、副産物として新超伝導体発見の報告も行った [10]。

参考文献

- [1] "Evaluation of Spin-Triplet Superconductivity in Sr_2RuO_4 ", Y. Maeno, S. Kittaka, T. Nomura, S. Yonezawa, K. Ishida, J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 011009-1-29 (2012).
- [2] "First Order Superconducting Transition of Sr_2RuO_4 ", S. Yonezawa, T. Kajikawa, and Y. Maeno, to appear in Phys. Rev. Lett. (2013).
- [3] "Essential Configuration of Pb/Ru/ Sr_2RuO_4 Junctions Exhibiting Anomalous Superconducting Interference", T. Nakamura, T. Sumi, S. Yonezawa, T. Terashima, M. Sigrist, H. Kaneyasu, Y. Maeno, J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 064708-1-6 (2012).
- [4] "Fabrication of SQUIDs with Nb/Ru/ Sr_2RuO_4 junctions", R. Ishiguro, M. Yakabe, T. Nakamura, E. Watanabe, D. Tsuya, H. Oosato, Y. Maeno, and H. Takayanagi, J. Phys. Conf. Ser. **400**, 022035 (2012).
- [5] "High-Supercurrent-Density Contacts and Josephson Effect of Strontium Ruthenate", K. Saitoh, S. Kashiwaya, H. Kashiwaya, M. Koyanagi, Y. Mawatari, Y. Tanaka, Y. Maeno, App. Phys. Express **5**, 113101-1-3 (2012).
- [6] "Anomalous surface impedance in a normal-metal/superconductor junction with a spin-active interface", Y. Asano, M. Ozaki, T. Habe, A.A. Golubov, Y. Tanaka, Phys. Rev. B **86**, 024510-1-8 (2012).
- [7] "Interface metallic states between a topological insulator and a ferromagnetic insulator", T. Habe, Y. Asano, Phys. Rev. B **85**, 95325-1-8 (2012).
- [8] "Pressure Study of the Noncentrosymmetric $5d$ -Electron Superconductors CaM_3Si_3 ($M = \text{Ir, Pt}$)", G. Eguchi, F. Kneidinger, L. Salamakha, S. Yonezawa, Y. Maeno, E. Bauer, J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 074711-1-4 (2012).
- [9] "Large spin-orbit splitting and weakly anisotropic superconductivity revealed with single-crystalline noncentrosymmetric CaIrSi_3 ", G. Eguchi, H. Wadati, T. Sugiyama, E. Ikenaga, S. Yonezawa, Y. Maeno, Phys. Rev. B **86**, 184510-1-7 (2012).
- [10] "Superconductivity in La_3Pt_4 ", Y. Kawashima, G. Eguchi, S. Yonezawa, Y. Maeno, J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 125001-1-2 (2012).