

## 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、トポロ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、磁場を RuO<sub>2</sub> 面に平行に印加した場合の Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> の超伝導転移が一次転移になること、Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>-Ru 共晶を利用した「トポロジカル超伝導接合」、Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> と s 波超伝導体との直接接合素子でのジョゼフソン効果、強磁性体を含む超伝導接合系での奇周波数超伝導状態などの進捗を紹介した。今回はその後の研究成果を中心に紹介する。なお、ルテニウム酸化物 Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> のスピン三重項カイラル超伝導状態を吟味するレビュー論文 [1] はこの 2 年間で既に 50 回程度引用されている。

### 1. Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> の磁場中超伝導転移

米澤 (A01 連携)、前野 (A01 代表) らは、磁場掃引に対する温度変化 (熱磁効果) から、RuO<sub>2</sub> 平面に平行な磁場の場合、低温では上部臨界磁場近傍で超伝導-常伝導転移が一次相転移になることを明らかにした [2]。さらに熱磁効果に加えて比熱測定を含めて、特に磁場の面内方位依存性についてのデータ集積を行っている。

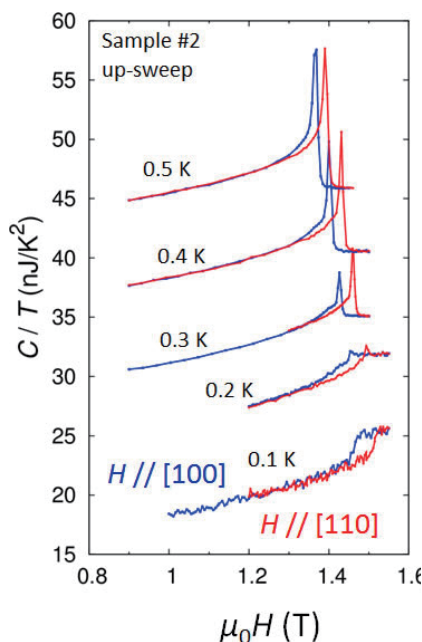


図 1: Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> の面平行上部臨界磁場付近の比熱の面内異方性。

このような面平行磁場中での超伝導スピン状態については、石田 (A01 連携) らが Ru と Sr の両方の核の NMR を巧みに併用することにより新たな精密実験を行ったところ、スピン三重項性のさらなる確証を得た。また前野らは国際共同研究での中性子小角散乱による磁束格子の研究から、面平行磁場でのコヒーレンス長の異方性が大きいことなどを明らかにした [3]。

### 2. Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> の共晶超伝導接合を用いたトポロ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<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> 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を検出・制御する「トポロジカル超伝導接合」の実証をさらに進めている。Anwar (A01 博士研究員)、米澤、石黒 (A01 公募研究)、前野らは、Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> に共晶析出した 1 個のミクロンサイズの Ru 金属片に Nb からの近接効果で s 波超伝導を導入した素子で、臨界電流の特異なスイッチング現象を観測し、その振る舞いをカイラルドメインの介在とその運動により説明した [4]。石黒らは共晶を利用した Nb/Ru/Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> 接合で超伝導量子干渉素子 (SQUID) を製作し、Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> の位相反転を裏付けるパイ接合の応答も得ている。

### 3. トポロジカル超伝導体の接合素子のエッジ状態

産総研の齋藤 (A01 博士研究員)、柏谷 (A01 分担者) らの努力で、Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> と常伝導金属や s 波超伝導体との直接の接合作製技術が大幅に向上してカイラルエッジ状態に伴う状態密度が観測されるようになった。様々な観測トンネルスペクトルに対するマルチバンドの効果を取り入れた理論解析も進んだ [5]。浅野 (A01 分担者) らは、様々なトポロジカル超伝導体を含むジョゼフソン接合素子の界面でのアンドレーエフ

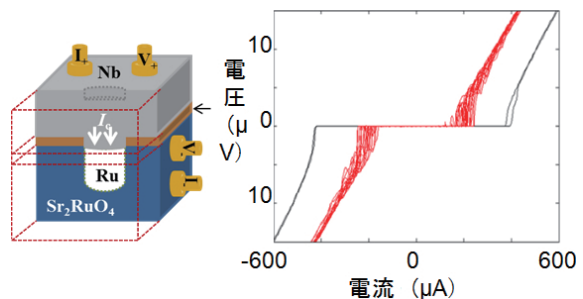


図 2: 自然の共晶析出を利用した Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> と Nb の「トポロジカル超伝導接合」と臨界電流の特異なふるまい [4]。

束縛状態や臨界電流とトポロジカル普遍数との関係を系統的に理論解析した成果を発表した [6]。

#### 4. 強磁性体 - 超伝導接合系での奇周波数超伝導状態

浅野らは超伝導体と強磁性体との接合における奇周波数スピン三重項超伝導状態やスピン中などの理論的考察を進めた [7,8]。また浅野は田仲 (D01 代表者) と共同研究でトポロジカル超伝導体と金属ナノ細線の接合系で出現するマヨラナ粒子と奇周波数超伝導状態の密接な関係を導いた [9]。C01 班に関連するテーマについて、浅野はトポロジカル絶縁体の表面や接合界面でのエネルギーギャップを導いている [10,11]。

#### 5. その他

重い電子系超伝導体  $UPt_3$  は、 $Sr_2RuO_4$  と同様にスピン三重項超伝導体と考えられている。その超伝導発見は 1984 年であるが、井澤 (A01 公募研究) らの熱伝導率の実験からこれまで「定説」の超伝導対称性を見直す提案がなされた [12]。住山 (A01 公募研究) らは素子作製方法の改善により  $s$  波超伝導体と  $UPt_3$  の間のジョセフソン効果にフラウンホーファー回折パターンのある良質の接合素子を得ることに成功した [13]。新たに提案されている超伝導対称性と比較すると、 $UPt_3$  ではカイラルではない超伝導状態の実現を示唆している。

他の計画班との共同研究もますます盛んになってきた。トポロジカル超伝導状態の出現も期待できる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、前野らは鄭 (C01 代表者)、稲田 (C01 分担者) らと共同研究を進め、

$Li_2(Pd_{1-x}Pt_x)_3B$  の比熱の成果を発表した [14]。

また  $SrTiO_3$  の電場誘起表面超伝導に関して米澤、前野は、上野 (C01 分担者)、野島 (C01 分担者) らとの共同研究で、超伝導が理想的ともいえる 2 次元性を示すことと超伝導層の厚みが誘起キャリアー数に依存しない不思議なふるまいを明らかにした [15]。

#### 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, Phys. Rev. Lett. **110**, 077003 (2013).  
[3] "Anisotropy of the Superconducting State in  $Sr_2RuO_4$ ", C. Rastovski, C. D. Dewhurst, W. J. Gannon, D. C. Peets, H. Takatsu, Y. Maeno, M. Ichioka, K. Machida, M. R. Eskildsen, Phys. Rev. Lett. **111**, 087003-1-5 (2013).

[4] "Anomalous switching in Nb/Ru/ $Sr_2RuO_4$  topological junctions by chiral domain wall motion", M. S. Anwar, T. Nakamura, S. Yonezawa, M. Yakabe, R. Ishiguro, H. Takayanagi, and Y. Maeno, Sci. Rep. **3**, 2480-1-6 (2013).

[5] "Microscopic theory of tunneling spectroscopy in  $Sr_2RuO_4$ ", K. Yada, Y. Tanaka, A. Golubov, and S. Kahiswaya, arXiv:1311.4682 (2013).

[6] "Bulk-boundary correspondence in Josephson junctions", J-Y. Yoo, T. Habe, Y. Asano, Physica E **55**, 48-54 (2014).

[7] "Robustness of Spin-Triplet Pairing and Singlet-Triplet Pairing Crossover in Superconductor/Ferromagnet Hybrids", Shiro Kawabata, Y. Asano, Y. Tanaka, A. A. Golubov, J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 124702 (2013).

[8] "Charge and spin supercurrents in triplet superconductor-ferromagnet-singlet superconductor Josephson junctions", P. M. R. Brydon, W. Chen, Y. Asano, D. Manske, Phys. Rev. B **88**, 054509 (2013).

[9] "Majorana fermions and odd-frequency Cooper pairs in a normal-metal nanowire proximity-coupled to a topological superconductor", Y. Asano, Y. Tanaka, Phys. Rev. B **87**, 104513 (2013).

[10] "Gapped Energy Spectra around the Dirac Node at the Surface of a Three-Dimensional Topological Insulator in the Presence of the Time-Reversal Symmetry", T. Habe, Y. Asano, J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 064704 (2013).

[11] "Robustness of gapless interface states in a junction of two topological insulators", T. Habe, Y. Asano, Phys. Rev. B **88**, 155442 (2013).

[12] "Twofold Spontaneous Symmetry Breaking in the Heavy-Fermion Superconductor  $UPt_3$ ", Y. Machida, A. Itoh, Y. So, K. Izawa, Y. Haga, E. Yamamoto, N. Kimura, Y. Onuki, Y. Tsutsumi, and K. Machida, Phys. Rev. Lett. **108**, 157002 (2012).

[13] "Measurement of the Josephson Effect of Heavy-Fermion Superconductor  $UPt_3$  as a Test of the Odd-Parity Order Parameter", J. Gouchi, A. Sumiyama, G. Motoyama, N. Kimura, E. Yamamoto, Y. Haga, and Y. Onuki, J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 113701 (2012).

[14] "Phonon anomaly and anisotropic superconducting gap in non-centrosymmetric  $Li_2(Pd_{1-x}Pt_x)_3B$ ", G. Eguchi, D. C. Peets, M. Kriener, S. Yonezawa, G. Bao, S. Harada, Y. Inada, G.-q. Zheng, Y. Maeno, Phys. Rev. B **87**, 161203-1-4 (2013).

[15] "Effective thickness of two-dimensional superconductivity in a tunable triangular quantum well of  $SrTiO_3$ ", K. Ueno, T. Nojima, S. Yonezawa, M. Kawasaki, Y. Iwasa, and Y. Maeno, Phys. Rev. B **89**, 020508(R) (2014).