

## Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> のトポロジカル超伝導性とトンネル効果

柏谷 聡 / 産業技術総合研究所 電子光技術部門 首席研究員

### 1. トポロジカル超伝導

近年トポロジカル超伝導体が実在するかどうかに関心が高まっている。トポロジカル絶縁体はバンド構造に依存してトポロジが定義されるのに対して、トポロジカル超伝導体では超伝導ギャップ構造に依存してトポロジが定義されるため、トポロジカル超伝導性の同定は超伝導ペア対称性の決定にほぼ等価である。しかし銅酸化物超伝導体の例に見られるとおり、現実の新奇超伝導体において超伝導ペア対称性を確定させることは多くの場合極めて難しい。実際、 $p$ 波超流動性が理論的にも確定している <sup>3</sup>He を除いて、トポロジカル超伝導の確定に向けて多くの実験的努力が続けられている途上である。現在候補になっているのは、Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>、1次元ナノワイヤー、Cu-doped Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>、中心対称性の破れた超伝導体などである。トンネル効果では超伝導体 / 絶縁体 / 正常金属 (N/I/S) 接合と超伝導体 / 絶縁体 / 超伝導体 (S/I/S、ジョセフソン) 接合を舞台として研究が進められているが、両手法ともトポロジカル超伝導性の確定に極めて重要な役割を果たす。本稿では Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> を念頭に、2次元的な電子状態を有する超伝導体において、トポロジカル超伝導性の検証手法を説明し、実験の現状、及び今後の課題について簡単にまとめる。

### 2. トンネル分光とバルク・エッジ対応

トポロジカル超伝導に付随する重要な特性のひとつは、バルク・エッジ対応と呼ばれ、バルク内のトポロジカル不変量に対応するエッジ状態が、界面のギャップレス状態として現れる性質である [1]。これを2次元超伝導体に適用するならば、バルク内では超伝導ギャップの開いた状態であるが、一方で2次元面に垂直な界面であるエッジにはギャップの閉じたエッジ状態が存在することになる。このギャップの閉じた状態の起源は、異方的超伝導体に特有なアンドレーエフ束縛状態 (ABS) と呼ばれる表面状態であり、銅酸化物の  $d$  波検証実験以来、広く研究がなされてきた。この ABS は N/I/S 接合を用いたトンネル分光法によって実験的に観察可能であるため、異方的超伝導体では各種方位を有する N/I/S 接合が研究されてきた [2]。ABS の分散関係は、トポロジカル超伝導性と強い相関がある。これが視覚的にわかるように、各種超伝導対称性に対して、トンネルコンダクタンスの入射角依存性をまとめたものを図 1 に示す [3]。トンネルコンダクタンスは単純な1バンドモデルを用いて、Blonder-Tinkham-Klapwijk (BTK) 表式を拡張することにより計算した。ギャップ内に赤色で示された領域は ABS の形成による

コンダクタンスピークに対応し、ABS がフェルミレベルを横切る場合にトポロジカル超伝導となる。またそれぞれに対応するトンネルコンダクタンス (入射角に関する積分を行った結果) を図 2 に示した。注意すべきことは、 $d_{xy}+is$  波のように、ギャップ内に ABS が存在してもトポロジカル超伝導でない場合も存在する。またカイラル  $d$  波のように、トポロジカル超伝導であれば必ずゼロバイアスコンダクタンスピークになるとは限らないことである。特に Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> のように複雑なフェルミ面を有する場合には、バンドが複数存在し、方位や界面状態に依存して、多様なスペクトルの出現が期待される。矢田らはこの多バンド状態のコンダクタンスを詳細に解析する手法を開発し、トンネルスペクトルから超伝導発現をドミナントに担うペアの情報が得られることを明らかにしている [4]。

実験的には Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> のトンネル分光では、すでに過去報告を行っているように、ドーム型のピークの他にも、サンプルに依存していくつかの特徴的なピーク構造が得られることがわかっている [5]。いずれの形状もブロードなギャップ内状態の存在を示唆しており、そこから現状で得られる結論は、Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> はカイラル  $p$  波またはヘリカル  $p$  波超伝導体であるということである。しかし現在までにピーク形状のサンプル依存性の起源に関しては、十分には解明されていない。今後さらにトンネル分光実験を重ねていくことにより、ピーク形状に関する系統的な実験を行い、上記理論との対応を明確にしていく必要がある。また実験で観察されるトンネルコンダクタンスは波数に関する積分量であるため、ABS の分散関係を明らかにできないことは、銅酸化物超伝導体以来の長年の課題である。そのため光電子分光のような波数分解能を有する分光手法による ABS の同定は、きわめて重要であると考えられる。

### 3. ジョセフソン効果とカイラルドメイン

トンネル分光が ABS の形成を通して内的な位相の検出を行うのに対して、ジョセフソン効果は電流が直接位相差の関数になっており、より曖昧さの少ない超伝導位相の検出が可能と言える。スピン3重項 / 絶縁体 / 1重項  $s$  波ジョセフソン接合を例に考えるならば、ジョセフソン電流の1次の成分の有無から、スピン3重項超伝導状態を記述する  $d$  ベクトルの向きの検出が可能であることが理論的には知られている [6]。またコーナー接合と呼ばれる異なる方位にまたがって形成されたジョセフソン接合を用いることにより、内的な位相の干渉効果を臨界電流 ( $I_c$ ) の外部磁場 ( $H$ ) 変調特性

として捉えることができる [7]。コーナー接合は、銅酸化物超伝導体のペア対称性の決定にもきわめて重要な役割を果たしたことは周知のとおりである [8]。しかし  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  に関しては、過去の実験においてジョセフソン効果の実験は困難に直面している。上記の銅酸化物超伝導体でみごとな干渉特性を観察したイリノイ大学のグループの報告では、ジョセフソン接合の  $I_c$  が時間とともに急激に変化する、いわゆるテレグラフノイズ的なふるまいや、外部磁場変化に対して特異なヒステリシス特性を示している [9]。また  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の弱結合の実験においても、臨界電流とリトラップ電流の大小関係の逆転という、特異なジョセフソン接合性質が観測されている [10]。これらの結果は印加磁場、電流、あるいは熱揺らぎによっても、カイラルドメインが容易に動いてしまうことに起因すると考えられる [11]。そのため実験的には、「真のジョセフソン特性」をできる条件を見出すことが重要課題であった。

我々はトンネル分光にて開発した接合作成技術に大幅な改善を行い、ジョセフソン接合に適用することにより、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4/\text{Nb}$  接合の作成に成功した [12]。当初得られた特性は、イリノイ大学と類似した不安定な  $I_c$  特性であり、「真のジョセフソン特性」の測定は困難であった。しかし、界面の品質の向上を進め、超伝導電流が均一に流れる条件を探索し、さらに系統的に接合サイズを変化させることにより、接合特性が顕著に変化することがわかってきた [13]。図 3 には同一の接合を用いて、接合サイズを徐々に小さくしていった場合の  $I_c$ - $H$  特性を示している。接合幅が  $55\ \mu\text{m}$  の場合には、 $I_c$ - $H$  はきわめてランダムな特性を示しているのに対して、 $10\ \mu\text{m}$  ではイリノイ大の報告と類似したヒステリシス型が現れる。さらに  $5.8\ \mu\text{m}$  まで微小化すると、 $I_c$ - $H$  はむしろ従来のジョセフソン接合で知られているような conventional な振る舞いへ収束していく様子が観察できた。この傾向は再現性があり、異なるバッチで作成した接合においても数  $\mu\text{m}$  程度の接合において、極めてきれいな  $I_c$ - $H$  特性（フラウンフォーファーパターン）が観察できている。これらの結果は、カイラルドメインがおおよそ数  $\mu\text{m}$  程度のサイズを有し、そのサイズの接合では単一ドメインのジョセフソン接合となり、「真のジョセフソン特性」が観測できていることを示唆する。カイラルドメインサイズとして数  $\mu\text{m}$  程度という値は、過去の他の実験とおおよそ合致する結果である。

現在、上記実験により抽出された条件を有するジョセフソン接合やコーナー接合を詳細に解析することにより、真の  $I_c$ - $H$  特性やシャピロステップが明らかになりつつあり、そこから  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  のトポロジカル超伝導性に関する同定が、近日中に行えるものと期待している。

#### 4. 展望と今後の課題

本新学術領域研究の課題のひとつである  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  のトポロジカル超伝導性の同定に向けた、トンネル効果

を用いた研究の現状と課題を簡単にまとめた。上記に加えて  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の接合系には多くの課題が残されている。それらは、近接効果に伴う奇周波数電子対の検出、トポロジカルエッジカレントの検出、半整数を含めた磁束状態の解明、エッジまたは半整数磁束量子中に存在するマヨラナフェルミオンおよびその非可換性の検出などである。これらの新奇現象はいずれも本質的にはトポロジカル超伝導性とリンクしており、トポロジカル量子現象として位置づけられる。特にマヨラナフェルミオンはトポロジカル量子ビット実現のための必須要素であり、その検証は世界中で精力的に進められている。これらの解明を通して、凝縮系の新たな概念が開拓され、さらに新概念に基づくデバイス開発や、計測応用へと発展させていくことが最終的な目標である。

#### 謝辞

本研究は、前野悦輝氏（京大）、田仲由喜夫氏（名大）、浅野泰寛氏（北大）、高柳英明氏（東理大）、石黒亮輔氏（理研）、永合祐輔氏（東理大）、柏谷裕美氏（産総研）、齋藤広大氏（産総研）、小柳正男氏（産総研）、馬渡康則氏（産総研）、川畑史郎氏（産総研）との共同研究および議論に基づいております。ここに御礼申し上げます。

#### 参考文献

- [1] 例 えば、Y. Tanaka, M. Sato, N. Nagaosa, Journal of the Physical Society of Japan **81**, 011013 (2012).
- [2] S. Kashiwaya and Y. Tanaka, Rep. Prog. Phys. **63**, 1641 (2000).
- [3] S. Kashiwaya, H. Kashiwaya, K. Saitoh, and Y. Tanaka, Physica E, **55**, 25(2014).
- [4] K. Yada, A. A. Golubov, Y. Tanaka, S. Kashiwaya, arXiv:1311.4682.
- [5] S. Kashiwaya, H. Kashiwaya, H. Kambara, T. Furuta, H. Yaguchi, Y. Tanaka, and Y. Maeno, Phys. Rev. Lett. **107**, 077003 (2011).
- [6] Y. Asano, Y. Tanaka, M. Sigrist, and S. Kashiwaya, Phys. Rev. B **71**, 214501 (2005).
- [7] V. B. Geshkenbein, A. I. Larkin, A. Barone, Phys. Rev. B **36**, 235 (1987).
- [8] D. A. Wollman, D. J. Van Harlingen, W. C. Lee, D. M. Ginsberg, A. J. Leggett, Phys. Rev. Lett. **71**, 2134 (1993).
- [9] F. Kidwingira, J. D. Strand, D. J. Van Harlingen, and Y. Maeno, Science **314**, 1267 (2006).
- [10] H. Kambara, T. Matsumoto, H. Kashiwaya, S. Kashiwaya, H. Yaguchi, Y. Asano, Y. Tanaka, and Y. Maeno, J. Phys. Soc. Jpn. **79**, 074708 (2010).
- [11] M. S. Anwar, T. Nakamura, S. Yonezawa, M. Yakabe, R. Ishiguro, H. Takayanagi, and Y. Maeno, Sci. Rep. **3**, 2480 (2013).
- [12] K. Saitoh, S. Kashiwaya, H. Kashiwaya, M. Koyanagi, Y. Mawatari, Y. Tanaka, and Y. Maeno, Appl. Phys. Express **5**, 113101 (2012).
- [13] K. Saitoh, S. Kashiwaya, H. Kashiwaya, Y. Mawatari, Y. Tanaka, Y. Maeno, in preparation.

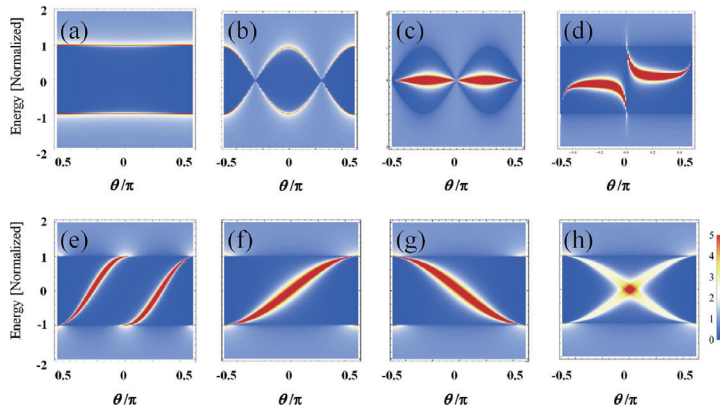


図1：各種ペア対称性を有する超伝導体のトンネルコンダクタンスの入射角度依存性。横軸は準粒子の入射角度、縦軸はエネルギー、色は正規化されたコンダクタンスを表す。ギャップ内の赤の領域がアンドレーエフ束縛状態に対応する。

(a)  $s$  波、(b)  $d_{x^2-y^2}$  波、(c)  $d_{xy}$  波、(d)  $d_{xy} + is$  波、(e) カイラル  $d$  波、(f) カイラル  $p$  波 ( $L_z=1$ )、(g) カイラル  $p$  波 ( $L_z=-1$ )、(h) ヘリカル  $p$  波。

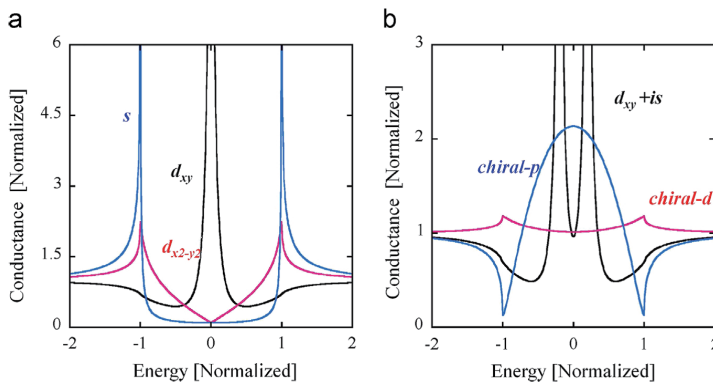


図2：各種ペア対称性に関して計算された N/I/S 接合のトンネルコンダクタンス。カイラル  $p$  波とヘリカル  $p$  波はまったく同じコンダクタンスとなるが、磁場応答では差が生じる。 $d_{xy} + is$  波はギャップ内にピークが現れ、アンドレーエフ束縛状態は存在するが、トポロジカル超伝導体ではない。

WEB 非公開

図3： $Sr_2RuO_4/Nb$  接合のサイズ依存性、(a)  $55 \mu m$ 、(b)  $10 \mu m$ 、(c)  $5.8 \mu m$ 、サイズが微小化するにつれて、カイラル  $p$  波 /  $s$  波ジョセフソン接合に期待される反転対称性（図中の矢印に対応する折り返し）が回復し、カイラルドメイン運動の影響がなくなったことがわかる。

著者紹介



かしまや・さとし

1962 年生まれ 東京都出身。  
1988 年東京大学工学系大学院修了、1988 年電子技術総合研究所入所、2001 年独立行政法人、産業技術総合研究所、2013 年、現職。低温物理、超伝導、トンネル効果の分野で研究を行っています。