

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010 ~ 2012

課題番号：22340096

研究課題名（和文）

不均一超伝導体系における奇周波数電子対の研究

研究課題名（英文） Odd-frequency pairing in non-uniform superconducting systems

研究代表者

田仲 由喜夫 (Yukio Tanaka)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：40212039

研究成果の概要（和文）：

奇周波数電子対（クーパー対）とは2電子の時間の入れ替えに対してペア関数の符号が変わるクーパー対で、既存の超伝導の理論ではほとんど考えられていなかった。理論研究では、スピン3重項超伝導体接合の表面異常インピーダンス、強磁性体接合の異常マイスナー効果の予言、マヨラナフェルミオンと奇周波数クーパー対が密接な関係があることが明らかになったことが主要な成果である。実験的には、 Sr_2RuO_4 接合における接合系作成で進展があり、これまで困難とされてきた低温における接合系の実験が数多くなされるようになった。特にカイラルp波超伝導体に固有なアンドレーエフ束縛状態が観測され理論的に解析されたことが大きな成果である。また近接効果の実験が可能なT字型接合が作成された。

研究成果の概要（英文）：

Odd-frequency pairing is a exotic state where Cooper pair changes its sign with the exchange of times of two electrons. We have clarified anomalous surface impedance of spin-triplet superconductor junctions, anomalous Meissner effect in ferromagnet / superconductor junctions and relevance of anomalous Majorana fermion and odd-frequency pairing. In the experimental works, spin-triplet superconductor junctions have been made. Tunneling spectroscopy has been performed on junctions made from spin-triplet superconductor Sr_2RuO_4 searching for the edge states peculiar to topological superconductivity. By comparing the experiments with predictions for unconventional superconductivity, these varieties are shown to originate from multiband chiral p-wave symmetry with weak anisotropy of pair amplitude. The broad hump in the conductance spectrum is a direct manifestation of the edge state due to chiral p-wave superconductivity. Also, T shaped proximity coupled superconductor has been made from Sr_2RuO_4 .

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	7,200,000	2,160,000	9,360,000
2011年度	6,400,000	1,920,000	8,320,000
2012年度	1,200,000	360,000	1,560,000
総計	14,800,000	4,440,000	19,240,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 物性 II 2

キーワード：近接効果、超伝導接合、奇周波数クーパー対、アンドレーエフ束縛状態、対称性、トポロジカル量子現象、トンネル効果、強相関電子系

1. 研究開始当初の背景

奇周波数クーパー対(電子対)とは2電子の時間の入れ替えに対してペア関数の符号が変わるクーパー対で、既存の超伝導の理論ではほとんど考えられていなかったもので、超伝導における新しい概念の1つである。従来のクーパー対は、スピン1重項偶パリティ、スピン3重項奇パリティに分類されるが奇周波数クーパー対は、スピン1重項奇パリティ、スピン3重項偶パリティに分類される。奇周波数クーパー対は40年以上も前にBerezinskiiによって予言されてきたが、その存在は長らく未解明のままであった。しかし、並進対称性の破れにより、不均一な超伝導体においては奇周波数クーパー対が偶周波数クーパー対に混在して、普遍的に存在することを、代表者は2007年に明らかにした。また常伝導体/スピン3重項奇パリティ超伝導体接合でみられる異常な近接効果の起源が、奇周波数スピン3重項クーパー対であることを明らかにした。このような理論予想を実験で確認して、さらに奇周波数クーパー対がもつ量子現象を解明することが急務となってきた。

2. 研究の目的

この研究の目的は、新奇な対称性を持つクーパー対(奇周波数クーパー対)を理論実験両面から研究して、超伝導接合のような不均一系において存在することを確立することにある。奇周波数クーパー対の対関数(ペア振幅)は並進対称性の破れにより、バルクの対称性がこれまで知られている偶周波数超伝導体であっても界面/接合系において存在することを代表者らは理論的に予言した。この研究をさらに進めて、様々な系において新奇な量子効果を解明する。また実験的に奇周波数ペアの特徴を確かめることを目指す。そのためにスピン3重項対称性が有力視されている Sr_2RuO_4 の接合系におけるトンネル効果、近接効果の実験を行う。また奇周波数偶周波数ペアポテンシャル(エネルギーギャップ関数)がどのような系でバルクな状態として現れるのかを理論的に解明する。

3. 研究の方法

研究には理論研究だけでなくそれを検証する実験研究も含まれることに特徴がある。理論計算で予言されている奇周波数クーパー対(ペア関数)に由来する特異な近接効果を

確認するために、実験ではスピン3重項超伝導体が期待される Sr_2RuO_4 の接合系におけるトンネル効果、近接効果、ジョセフソン効果の研究を行う。こうした超伝導体を含む接合系を作成して、電流・電圧特性の詳細測定を行って理論と比較を行う。理論研究では、実験との比較検討だけでなく、不均一系で実現される奇周波数クーパー対の新しい測定方法の提案を行う。またトポロジカル超伝導の表面状態、多バンド超伝導の研究を行う。さらに、奇周波数クーパー(電子)対が電子間相互作用の多体効果のために形成されることを明らかにするために、様々な強相関超伝導体に対して行う。

4. 研究成果

この研究では、1) 接合系などの不均一な系における奇周波数クーパー対の性質の解明、2) トポロジカル量子現象としての奇周波数クーパー対の研究、3) バルクに存在する奇周波数クーパー対の理論、4) 多バンド超伝導体のトンネル効果の理論、5) スピン3重項超伝導体のトンネル効果の実験、6) スピン3重項超伝導体における近接効果の実験から構成される。

1) 接合系などの不均一な系における奇周波数クーパー対の理論

常伝導体・従来型s波超伝導体接合において界面に磁性不純物などが存在してスピン反転散乱を引き起こす際には、常伝導領域に従来型のs波のクーパー対に加えて、奇周波数クーパー対が誘起される。奇周波数クーパー対が支配的な場合は、状態密度に零エネルギーピークが現れ、またマイスナー効果はパラマグネティック(常磁性的)になりえる。常伝導体(拡散伝導領域)・スピン3重項接合においては、拡散伝導領域において奇周波数クーパー対が支配的になることは2004年から知られていた。この系において、表面インピーダンスの計算を行った。表面インピーダンスは、通常、虚数部分が実数部分よりも低エネルギーでは支配的になるが、この場合は逆に実数部分が虚数部分よりも支配的になる。奇周波数クーパー対特有の電磁応答といえる。また磁束芯における奇周波数クーパー対の性質も調べ、ペアポテンシャルがフェルミエネルギーに比べて十分に小さい領域のみならず大きい領域においても磁束芯に奇周波数ペアが存在することが明らかになった。

2) トポロジカル量子現象としての奇周波数クーパー対の理論

近年、バルクの波動関数の持つトポロジカルな性質により保護されたトポロジカル超伝導という概念が重要になっている。まず奇周波数クーパー対の存在が確立している、スピン1重項d波超伝導、スピン3重項p波超伝導体におけるトポロジカル不変量の計算を行った。バルクの波動関数、ハミルトニアンに対して、カイラル型演算子というハミルトニアンと反交換関係を持つ演算子が存在し、トポロジカル量子数としての巻き付き数が定義されることが明らかになった。そして、トポロジカル量子数と奇周波数ペアの関係も調べられた。トポロジカル超伝導体では、エッジにマヨラナフェルミオンという励起が形成されることが知られている。超伝導体に量子細線を載せた系では、量子細線のスピン軌道相互作用とゼーマン磁場の効果により、量子細線のエッジにマヨラナ型準粒子励起が形成されることが理論的に指摘されている。この系を詳細に調べることにより、マヨラナ型準粒子励起が存在するときは必ず奇周波数クーパー対が存在することを明らかにした。

3) バルクに存在する奇周波数クーパー対の理論

奇周波数クーパー対は、強相関電子系で可能性のあることを様々なモデルから検討した。擬1次元系は、d波超伝導体が起こりにくく代わりに奇周波数スピン1重項p波あるいは長距離クーロン相互作用により奇周波数スピン3重項s波が形成されることが明らかになった。また反強磁性と超伝導の共存している系においても奇周波数超伝導が実現されることが示された。

4) 多バンド超伝導体のトンネル効果の理論

タイトバインディングモデルの方法を用いて定式化を行った。従来型の超伝導体のトンネル分光の理論を拡張して、鉄系超伝導や Sr_2RuO_4 (SRO) のような多バンド超伝導体のトンネル効果の定式化が可能となった。現在スピン軌道相互作用の効果や、フェルミ面の効果などを取りいれて実験との詳細な比較を行っている。

5) スピン3重項超伝導体のトンネル効果の実験

Sr_2RuO_4 (SRO) のトンネル効果の実験は、界面の制御が非常に困難であったためにこれまでなされてこなかった。奇周波数ペアの近接効果は、p波超伝導体と正常金属の接合系において顕著に表れると考えられるため、SROとAuの界面状態の制御を試みた。真空中

での蒸着プロセスを用いてSRO/Au接合を作成した結果、SROの超伝導に起因するコンダクタンスの変化を観測し、そのスペクトルの変化はカイラルp波によるものと良い一致を示した。この結果は、SROのトポロジカル超伝導性に付随するギャップレスエッジ状態の観察を行っているものと理解され、SROがトポロジカル超伝導体であることが強く示唆された。

6) スピン3重項超伝導体における近接効果の実験

奇周波数クーパー対の近接効果は、p波超伝導体と正常金属の接合系において顕著に表れると考えられるため、 Sr_2RuO_4 (SRO) とAuの界面状態の制御を試みた。T字型の接合を作るために様々な工夫を行った。まず極めて脆弱な界面を有するSROを真空中でへきかいし、その場蒸着により対抗電極を形成し、SROとAuの考えられる限り理想的なコンタクトを形成した。このサンプルを基板上に固定し、3次元加工を行うことにより実際にT型素子を作成した(図1)。さらにAu側の形状を $0.3\mu\text{m}$ 程度まで加工することにより、実際に近接効果の観察の可能な領域のサンプル作成プロセスを完成させた。また測定においては残留磁場が0.1ミリガウス程度まで下げ、磁場により近接効果の破壊が起こらない測定環境を構築した。この状態で0.5Kまでの輸送測定を行った結果は、図2に示すように、期待されたゼロバイアスピークではなく、ゼロバイアスディップが観測された。この構造は印加磁場に比較的ロバストであるため、近接効果ではなくNS界面の特性を観察しているものと推察される。今後さらに良いコンタクトの形成と、低い残留磁場、低い温度での測定を行うことにより、近接効果が観測できるかをさらに検証する必要がある。

また奇周波数クーパー対とトポロジカル超伝導に関する総説を、2012年にJPSJ特集号に発表した。

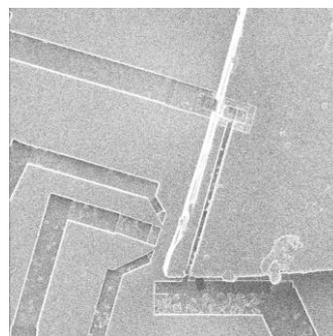


図1 実際に作成されたT型素子、右側がSRO結晶、左側がAuコンタクトで、Au側はT型を形成するようにFIB加工されている。

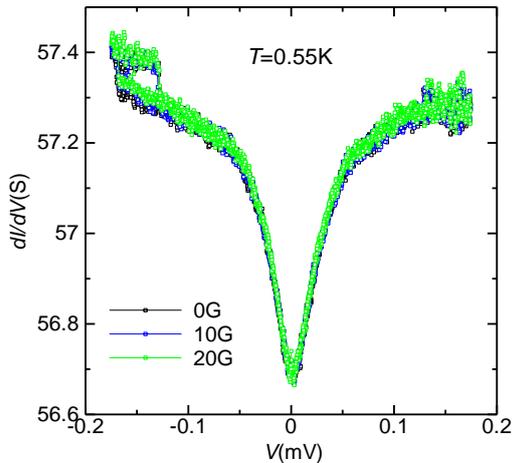


図 2

T 型素子の 0.55K におけるコンダクタンス特性と磁場応答、コンダクタンスディップ形状と磁場に対してロバストなため、近接効果を観測できていないことが示唆される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 14 件) (すべて査読あり)

[1]Majorana fermions and odd-frequency Cooper pairs in a normal-metal nanowire proximity-coupled to a topological superconductor, *Physical Review B*, Vol. 87, 104513_1-10, 2013, Y. Asano and Y. Tanaka.

[2]Theory of tunneling spectroscopy of multi-band superconductors, *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol. 82, 034716_1-14, 2013, A. V. Burmistrova, I. A. Devyatov, A. A. Golubov, K. Yada and Y. Tanaka.

[3]High-Supercurrent-Density Contacts and Josephson Effect of Strontium Ruthenate, *Applied Physics Express*, Vol. 5, 11301_1- 3, 2012, K. Saitoh, S. Kashiwaya, H. Kashiwaya, M. Koyanagi, Y. Mawatari, Y. Tanaka, and Y. Maeno.

[4]Odd-Frequency Cooper pair amplitude around a vortex core in a chiral p-wave superconductor in the quantum limit, *Physical Review B*, Vol. 86, 064512_1-6, 2012, T. Daino, M. Ichioka, T. Mizushima, and Y. Tanaka.

[5]Symmetry of superconducting pairing state in a staggered field, *Physical Review B*, Vol. 85, 224509_1- 13, 2012, K. Shigeta, S. Onari and Y. Tanaka.

[6]Theory of proximity effect in ferromagnet / superconductor heterostructures in the presence of spin dependent interfacial phase shift, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 51, 010108_1-9, 2012, D. Yoshizaki, A. A. Golubov, Y. Tanaka and Y. Asano.

[7]Symmetry of superconducting pairing state in a staggered field, *Physical Review B*, Vol. 85, 224509_1- 13, 2012, K. Shigeta, S. Onari and Y. Tanaka.

[8]Anomalous Meissner Effect in a Normal-Metal-Superconductor Junction with a Spin-Active Interface, *Physical Review Letters*, Vol. 106, No. 24, 246601_1-4, 2011, T. Yokoyama, Y. Tanaka and N. Nagaosa.

[9]Unconventional Surface Impedance of a Normal-Metal Film Covering a Spin-Triplet Superconductor Due to Odd-Frequency Cooper Pairs, *Physical Review Letters*, Vol. 107, 087001_1-4, 2011, Y. Asano, A. A. Golubov, Y. V. Fominov and Y. Tanaka.

[10]Surface density of states and topological edge states in noncentrosymmetric superconductors, *Physical Review B*, Vol. 83, No. 6, 064505_1-9, 2011, K. Yada, M. Sato, Y. Tanaka, and T. Yokoyama.

[11]Topology of Andreev bound states with flat dispersion, *Physical Review B*, Vol. 83, No. 22, 224511_1-22, 2011, M. Sato, Y. Tanaka, K. Yada and T. Yokoyama.

[12]Competition of pairing symmetries and a mechanism for Berezinskii's pairing in quasi-one-dimensional systems, *Physical Review B*, (Rapid Communications), Vol. 83, No. 14, 140509_1-4, 2011, K. Shigeta, Y. Tanaka, K. Kuroki, S. Onari and H. Aizawa.

[13]Edge states of Sr_2RuO_4 detected by in-plane tunneling spectroscopy, *Physical Review Letters*, Vol. 107, 077003_1-4, 2011, S. Kashiwaya, H. Kashiwaya, H. Kambara, H. Yaguchi, Y. Tanaka, and Y. Maeno.

[14] DC Current Driven Critical Current Variation in Sr_2RuO_4 -Ru Junction Proved by Local Transport Measurements, Journal of the Physical Society of Japan Vol.79 p.74708-1-5, 2010, S. Kashiwaya, H. Kambara, H. Kashiwaya, T. Furuta, H. Yaguchi, Y. Asano, Y. Tanaka, Y. Maeno

〔学会発表〕(計 11 件)

[1] スピン 3 重項超伝導体のトンネル効果の理論 日本物理学会 広島大学 3/26-3/29 3/27 2013 田仲由喜夫

[2] $\text{Sr}_2\text{RuO}_4/\text{Nb}$ 面内接合と磁場応答 日本物理学会 広島大学 3/26-3/29 3/29 2013 柏谷聡

[3] HKUST Institute for Advanced Study, Symposium on Frontiers in Condensed Matter Physics, Topological Materials and Related Topics, December 17-18 2012, Hong Kong (China), Odd-frequency Pairing and Majorana Fermion in Nanowire Proximity Systems, (December 18 2012), Y. Tanaka.

[4] "Topological superconductivity in Sr_2RuO_4 ", WPI workshop on Topology in Physics and Material Science、つくば、2012/8/29, S. Kashiwaya

[5] "Topological superconductivity and chiral edge states of Sr_2RuO_4 ", The 10th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity (M2S-X), Washington, (USA) 2012/8/2, S. Kashiwaya

[6] "Chiral edge states of Sr_2RuO_4 ", S. Kashiwaya, Topological Quantum Phenomena 2012 (TQP2012), 名古屋大学, 2012/5/17, S. Kashiwaya

[7] 「スピン 3 重項超伝導体接合における奇周波クーパー対」、物理学会シンポジウム、関西学院大学、柏谷聡、2012/3/25

[8] QS2C Theory Forum, International Symposium on Strongly Correlated Quantum Science, January 26-29, 2013, University of Tokyo (Japan), Odd-frequency Pairing and Majorana Fermion in Nanowire Proximity Systems, (January 27 2012), Y. Tanaka.

[9] "Chiral edge states of Sr_2RuO_4 ", NANO-2011, Moldova, 2011/10/08, S. Kashiwaya.

[10] "Detection of chiral edge states in Sr_2RuO_4 by tunneling spectroscopy", 17th-Strong correlation Workshop, つくば, 2010/11/8, S. Kashiwaya.

[11] "C-axis transport of various 2-D superconductor", The 7th International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and Plasma Oscillations in High-Tc Superconductors (PLASMA 2010), 弘前, 2010/5/1, S. Kashiwaya.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田仲 由喜夫 (Yukio Tanaka)
名古屋大学・工学研究科・教授
研究者番号: 40212039

(2) 研究分担者

柏谷聡 (Satoshi Kashiwaya)
独立行政法人産業技術総合研究所・電子光
技術部門・上級主任研究員
研究者番号: 40356770

(3) 連携研究者 なし