

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03686

研究課題名(和文) 奇周波数電子対の物理 理論と実証

研究課題名(英文) Physics of Odd-frequency pairings Theory and Experiment

研究代表者

田仲 由喜夫 (Tanaka, Yukio)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：40212039

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：奇周波数電子対とは2電子の持つ時間の自由度を入れ替えることで符号変化をする電子対である。理論研究としては、(1)不純物散乱がある異方的超伝導体・常伝導金属接合における輸送現象(2)2重量子ドットと非局所コンダクタンス(3)トポロジカル超伝導体におけるエッジ状態を奇周波数電子対の観点から調べた。またバルクで奇周波数ギャップ関数が実現されうる2チャンネル近藤格子のトンネル効果・ジョセフソン効果の計算を行った。実験的には、スピン3重項超伝導体Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>接合における表面インピーダンスの測定を行い新奇的な温度依存性を見出した。また奇周波数ペアの特性を用いた冷凍機設計に関する研究も行った。

研究成果の概要(英文)：Odd-frequency pairing is an exotic pairing which has a sign change of the exchange of time of electrons forming Cooper pair. From the theoretical side, we have studied (1)Influence of the impurity scattering in unconventional superconductor / normal metal junctions on the charge transport profile including charge conductance and shot noise (2)Non-local conductance in the superconductor double quantum dot hybrid system (3)Double semiconductor nano-wires on the superconductor from the view point of odd-frequency pairings. Also, we have studied two channel Kondo lattice where bulk odd-frequency gap function is realized. We have calculated tunneling conductance and Josephson current in this model. Experimentally, we have measured a surface impedance of Au/ Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> junctions. We have found anomalous temperature dependence as compared to conventional superconductor Al. We have also developed a suspended normal metal type tunneling junction refrigerator.

研究分野：凝縮系物理学の理論

キーワード：超伝導対称性 超伝導近接効果 マヨラナフェルミオン 2重量子ドット スピン3重項超伝導体

## 1. 研究開始当初の背景

超伝導状態は2つの電子から作られるクーパー対とよばれる電子対によって特徴付けられることが知られている。スピン1重項超伝導の場合、軌道は偶パリティ (s波、d波など)、スピン3重項超伝導の場合、軌道は奇パリティ (p波など) になることが暗黙の常識となっている。しかし電子対を形成する際に**時間差**があるという自由度を考慮すると、**周波数の依存性**(松原周波数の依存性)が現れる。電子対関数 (**ペア振幅**) が松原周波数の偶関数になっている場合は、これまでの常識どおりスピン1重項偶パリティ、スピン3重項奇パリティの電子対 (**偶周波数電子対**) が実現されるが、ペア振幅が松原周波数の奇関数になっている場合は、スピン1重項奇パリティ、スピン3重項偶パリティの**奇周波数電子対**が実現される。一方、代表者田仲は不均一超伝導系において、並進対称性の破れにより普遍的に奇周波数電子対 (ペア振幅) が存在することを解明し (Phys. Rev. Lett. 99, 037005, 2007)、奇周波数電子対の存在は広く知られるようになった。その結果、不均一な超伝導体で広く期待されるアンドレーエフ束縛状態が、奇周波数電子対という概念で統一的に理解できることが解明された。また、分担者柏谷は常伝導金属 (拡散伝導領域) と異方的超伝導体接合の近接効果を研究して、スピン3重項奇パリティ超伝導体 (p波) 接合系では、常伝導領域にゼロエネルギーピークを持つ状態密度を作る特異な近接効果が存在することを予言し、その起源は奇周波数電子対であることを明確にした (Phys. Rev. B 70 012507 2004; Phys. Rev. Lett. 98, 037003, 2007)。さらに銅酸化物超伝導体やスピン3重項超伝導体 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ の表面(エッジ)に現れるアンドレーエフ束縛状態は、奇周波数電子対であると同時にバルクのハミルトニアンを持つトポロジカル不変量と明確な相関を持つことが明らか

となり凝縮系物理学としての価値が高まった。また長年困難と考えられてきた $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ のトンネル分光測定が可能となり、この系のアンドレーエフ束縛状態の存在が確かなものとなった。したがって奇周波数クーパー対の研究を推進するバックグラウンドは整った。

## 2. 研究の目的

本研究では $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ を始めとするスピン3重項超伝導体接合系の近接効果の理論的研究を系統的に行い実験との比較を通して、奇周波数電子対の存在を確定する。また理論的に、自発的対称性の破れによって誘起される超伝導体にバルクに現れる奇周波数電子対の物性を解明して、並進対称性の破れにより形成される電子対との性質の違いを明確にする。奇周波数クーパー対が実現される様々な系を広く研究する。

## 3. 研究の方法

理論研究としては以下の問題を研究する。

- (1) 超伝導接合系における不純物効果と奇周波数ペアの関係を調べる。微分コンダクタンス、ショットノイズを計算する。
  - (2) バルクで実現される奇周波数ギャップ関数の性質を2チャンネル近藤格子で調べる。
  - (3) 2重量子ドットと超伝導の接合におけるドット間で作られる奇周波数クーパー対の性質を明らかにする。
  - (4) マヨラナフェルミオンが存在するトポロジカル超伝導体における奇周波数ペアの特徴を計算して明らかにする。
  - (5) スピン3重項超伝導体接合における多軌道効果とスピン軌道効果を取り入れてジョセフソン電流の計算をする。
- といった問題を目的とする。

実験的研究としては

- (1) スピン3重項超伝導体接合の作成および表面インピーダンスの測定
- (2) 奇周波数クーパー対の特性を生かした冷凍機に関する研究

を実施する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 不純物散乱と奇周波数ペア [1]

p波 d波 f波の超伝導体・常伝導体接合において、超伝導体側に不純物散乱が存在する際のペア振幅の計算をEilenberger方程式を解いて求めた。不純物散乱はボルン極限からユニタリ極限まで調べた。p<sub>x</sub>波の場合は、零エネルギーアンドレーエフ束縛状態がスピン3重項s波の奇周波数ペアとして表されるため、不純物散乱によらず共鳴は強く残り、零電圧コンダクタンスピークの高さは、Born極限、Unitary極限によらず常に抑制されないことを示した。このようにスピン3重項p波超伝導体には特別な性質があることがあきらかになった。これは、零エネルギー表面アンドレーエフ束縛状態に起因したスピン3重項s波の特徴である。

##### (2) 2重量子ドットにおける奇周波数クーパー対[2]

2重量子ドットを用いて奇周波数クーパー対を制御する方法を提案した。従来型s波超伝導体と結合した2重量子ドットにおいては、共鳴準位を制御することでクーパー対が2つに分かれた状況を設定できる。さらにドットと超伝導体あるいはドットと常伝導金属との結合の強さを制御することで、奇周波数スピン1重項s波ドット1重項ペアを作り出せることを提案した。この状態は非局所コンダクタンスの測定をした際に電圧依存性に現れることを示した。

##### (3) 2チャンネル近藤格子におけるジョセフソン効果の理論[3]

2チャンネル近藤格子においてはバルクの状態として奇周波数クーパー対が存在することが星野晋太郎氏(理化学研究所)により示されていた。星野氏との共同研究で、エッジに形成される奇周波数クーパー対と近藤格子のクーパー対との間のジョセフソン効果、トンネル効果の研究を行った。この奇周波数

ギャップ関数は重心運動量を持つために、奇周波数ペア振幅だけでなく偶周波数ペア振幅をバルクの状態でさえ持つという特徴がある。常伝導金属と超伝導2チャンネル近藤格子のトンネル効果の計算においては、ギャップレス状態の特徴を反映して、フルギャップのコンダクタンスは現れなかった。またスピン3重項p波超伝導体とのジョセフソン接合でジョセフソン電流の計算を行った。ジョセフソン電流に虚数は現れず従来提案された空間的に一様な奇周波数ギャップ関数の研究で問題になっていた困難は回避されることが示された。

##### (4) スピン3重項超伝導体 Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> におけるジョセフソン効果の理論[4]

Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> は多軌道超伝導体である。この効果をとりにいれてs波超伝導体とのジョセフソン電流の計算を行った。コーナージョセフソン接合、コーナーSQUID に対して磁場依存性を調べた。カイラル状態では、磁場の関数として原点(零磁場)を中心に非対称であるのに対してヘリカル状態では対称であることが明らかになった。またスピン軌道相互作用、バンド間の混成効果を理解するに際して、奇周波数クーパー対の概念は非常に有用であった。

##### (4) トポロジカル超伝導体における奇周波数クーパー対[5-7]

2本の半導体ナノワイヤーを超伝導体に積層した系におけるトポロジカル超伝導の計算を行った。考えているクーパー対が波数依存性を持たないs波であっても、ワイヤー間のペアポテンシャルがワイヤー内のペアポテンシャルよりも大きければ、トポロジカル超伝導になることがKlinovaja氏(Basel大学)によって提案されていた。Klinovaja氏との共同研究で、トポロジカル相で特に奇周波数クーパー対が顕著に現れることが明らかになった。マヨラナフェルミオンが存在する時には、エッジ状態に必ず奇周波数ペアが存在

することはこのモデルにおいても確かめられた[5]。

またトポロジカル超伝導における奇周波数ペアが関連したマヨラナ Flat バンド（零エネルギーアンドレーエフ束縛状態）の安定性についても議論を行った[6]。この研究とは独立に強磁性体・超伝導体接合で交換磁場による逆近接効果が奇周波数ペアに与える影響を調べた[7]。

#### （５）異方的超伝導体接合における輸送現象と奇周波数クーパー対[8]

超伝導体に弱い不純物散乱が存在する時の接合系のコンダクタンス、電流揺らぎ（ノイズ）が超伝導体の対称性によってどのように異なるふるまいを示すのかを理論的に調べた。特にショットノイズと電流の比である Fano 因子に着目した。d 波超伝導体では、零エネルギーアンドレーエフ束縛状態が存在する場合は、零電圧コンダクタンスピークの高さは不純物散乱が強くなると低くなり、また Fano 因子の値は零からずれる。これに対してスピン 3 重項 p 波超伝導体の零エネルギーアンドレーエフ束縛状態が存在する場合は、零電圧コンダクタンスピークは不純物散乱の強さに依存せず、また Fano 因子の値は零のままである。この結果は、スピン 3 重項超伝導体固有の異常近接効果の性質を示したもので、その起源はスピン 3 重項 s 波であることも明らかになった。

#### （６）半導体 Rashba ナノワイヤー・超伝導系の近接効果の理論[9]

Rashba ナノワイヤー系の近接効果の計算を行った。この系ではマヨラナフェルミオンがエッジ状態として現れるのが特徴である。ここではナノワイヤーに常伝導体と超伝導体の 2 つの領域がある場合を考えて、異常近接効果について研究した。超伝導体側にある不純物散乱が、零電圧コンダクタンスピークに与える影響を調べたが、不純物散乱の強さによらず零電圧コンダクタンスピークの高

さが一定であることを明らかになった。

#### （７）異常近接効果の実験

奇周波電子対の存在を確立するために、スピン 3 重項超伝導体の可能性が非常に高い  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4/\text{Au}$  接合系を用いて近接効果に関する研究を進めた。近接効果として Au 中に染み出したペアポテンシャルの電磁応答は通常の  $\text{Re} < \text{Im}$  ではなく  $\text{Im} < \text{Re}$  になることが浅野らの計算により既に示されている。この応答が実際に観測されるかをロシアの Institute of Solid State Physics と共同研究によりマイクロ波応答の実験を進めた。測定には真空中でへき開した  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  表面に、その場蒸着法により Au 層を形成し、現状で考えられるベストな接合系を作成した。金属超伝導体 Al の結果と比較して、期待された  $\text{Im} < \text{Re}$  の関係は観測されなかったが、コヒーレンスピークが抑制され、低温に向けて Im 成分が徐々に増加するという、Al とは明らかに異なる温度依存性を観測した。（論文準備中）

#### （８）奇周波数クーパー対の特性を用いたデバイスの基礎研究[10]

奇周波数クーパー対の効果を実デバイスに応用するための基本実験を、トンネル接合を用いた固体冷凍器を用いて進めた。NIS 型トンネル接合では、N 側から超伝導側に電流を流すことにより、N 中の比較的高エネルギー電子を選択的に引き出すことができる。これは電流により N 部分の電子温度を冷却するという機能に対応するため、これを用いた固体冷凍機の作成が試みられている。効率の良い NIS 型冷凍機を作成することの一つのネックになっているのは、S 側に引き出された高エネルギー準粒子の緩和による熱をどうやって排熱するかであり、超伝導状態にはエネルギーギャップが存在するため、有効な熱輸送が難しい。一方奇周波数電子対は超伝導状態でもフェルミ面上に準粒子が存在するため、エントロピー輸送が可能であり、奇周波電子対を有効に利用することにより、抵抗を

発生せずにエントロピー輸送が可能になると期待できる。この効果を実際に観測するために、NIS 型冷凍機の S 側に磁性体および超伝導体を積層させ、その界面に誘起される奇周波電子対を熱輸送に用いる基礎実験を行った。超伝導としては Nb、磁性体としては Cr を用いた接合作成を実際に行ったが、Nb の Tc 低下の影響が大きく、現在までに作成された素子はすべて固体冷凍機としてうまく機能しない結果が得られている。そのため作成条件に関する検討を進め、デバイスデザインを再考する必要があるという結果になっている。

#### [参考文献]

- [1]Bo Lu, P. Buset, Y.Tanuma, A. A. Golubov, Y. Asano, and Y. Tanaka, Phys. Rev. B 94, 014504 (2016)
- [2]P. Buset, Bo Lu, H. Ebisu, Y. Asano, and Y. Tanaka, Phys. Rev. B 93, 201402(R) (2016).
- [3]S. Hoshino, K. Yada, and Y. Tanaka, Phys. Rev. B 93, 224511 (2016).
- [4]K. Kawai, K. Yada, Y. Tanaka, Y. Asano, A. A. Golubov, and S. Kashiwaya Phys. Rev. B 95, 174518 (2017).
- [5]H. Ebisu, Bo Lu, J. Klinovaja, and Y. Tanaka, Prog. Theor. Exp. Phys. (2016) 083I01
- [6]S. Kobayashi, Y. Tanaka, and M. Sato, Phys. Rev. B 92, 214514 (2015).
- [7]H. Ebisu, Bo Lu, K. Taguchi, A. A. Golubov, and Y. Tanaka, Phys. Rev. B 93, 024509 (2016).
- [8]P. Buset, Bo Lu, S. Tamura, and Y. Tanaka, Phys. Rev. B 95, 224502 (2017)
- [9]Y. Tanaka and S. Tamura, J. Low Temp. Phys. 191, 61 (2018).
- [10]S. Kashiwaya, H. Kashiwaya, M. Koyanagi and Y. Tanaka, Jap. J. Appl. Phys. 55, 093101 (2016)

#### 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 11 件 ) ( すべて査読あり )

- (1)Surface Andreev Bound States and Odd-Frequency Pairing in Topological Superconductor Junctions, Yukio Tanaka and Shun Tamura, J. Low Temp. Phys. 191, 61 (2018) (<https://doi.org/10.1007/s10909-018-1849-8>)
- (2)Josephson effect in a multiorbital model for Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> Kohei Kawai, Keiji Yada, Yukio Tanaka, Yasuhiro Asano, Alexander A. Golubov, and Satoshi Kashiwaya Phys. Rev. B 95, 174518

(2017)

(<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.95.174518>)

(3)Current fluctuations in unconventional superconductor junctions with impurity scattering Pablo Buset, Bo Lu, Shun Tamura, and Yukio Tanaka, Phys. Rev. B 95, 224502 (2017)

(<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.95.224502>)

(4)Development of suspended normal- metal-type tunneling junction refrigerator, Satoshi Kashiwaya, Hiromi Kashiwaya, Masao Koyanagi and Yukio Tanaka, Japanese Journal of Applied Physics 55, 093101 (2016),

(<http://iopscience.iop.org/article/10.7567/JJAP.55.093101/meta>).

(5)Theory of time-reversal topological superconductivity in double Rashba wires: symmetries of Cooper pairs and Andreev bound states, Hiromi Ebisu, Bo Lu, Jelena Klinovaja, and Yukio Tanaka, Prog. Theor. Exp. Phys. (2016) 083I01(10.1093/ptep/ptw094)

(6)Influence of the impurity scattering on charge transport in unconventional superconductor junctions, Bo Lu, Pablo Buset, Yasunari Tanuma, Alexander A. Golubov, Yasuhiro Asano, and Yukio Tanaka, Phys. Rev. B 94, 014504 (2016)

(<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.94.014504>)

(7)Tunneling and Josephson effects in odd-frequency superconductor junctions: A study on multichannel Kondo chain, Shintaro Hoshino, Keiji Yada, and Yukio Tanaka, Phys. Rev. B 93, 224511 (2016)

([doi.org/10.1103/PhysRevB.93.224511](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.93.224511))

(8)All-electrical generation and control of odd-frequency s-wave Cooper pairs in double quantum dots, Pablo Buset, Bo Lu, Hiromi Ebisu, Yasuhiro Asano, and Yukio Tanaka, Phys. Rev. B 93, 201402(R) (2016)

(<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.93.201402>)

(9)Josephson current in a normal-metal nanowire coupled to a superconductor /ferromagnet/ superconductor junction, Hiromi Ebisu, Bo Lu, Katsuhisa Taguchi, Alexander A. Golubov, and Yukio Tanaka, Phys. Rev. B 93, 024509 (2016)

(<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.93.024509>)

(10)Fragile surface zero-energy flat bands in three-dimensional chiral superconductors, Shingo Kobayashi, Yukio Tanaka, and Masatoshi Sato, Phys. Rev. B 92, 214514 (2015)

(<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.92.214514>)

(11)Theory of tunneling conductance of anomalous Rashba metal/superconductor junctions, Toshiyuki Fukumoto, Katsuhisa Taguchi, Shingo Kobayashi, and Yukio Tanaka, Phys. Rev. B 92, 144514 (2015)

(<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.92.144514>)

[ 学会発表 ] ( 計 11 件 )

- (1) "Josephson effects and edge states of Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>", S. Kashiwaya, Oxide Superspin 2017 (OSS2017), (Kyoto Univ., Kyoto, Japan,

2017/Oct/25-29), October 28 2017.

(2)"Surface Andreev bound states and odd-frequency pairing in topological superconductor junctions", Y. Tanaka, Topological matter & flat bands conference (Leibzig ,Germany, 2017/Aug-17-20), August 17 2017.

(3)"Recent topics of surface Andreev bound states", Y. Tanaka, Moscow International Symposium on Magnetism (MISM2017) (Moskow State University, Russia, 2017/Jul/1-5) July 3 2017.

(4)"Physics of Andreev Bound states", Y. Tanaka, Novel frontiers in superconducting electronics: from fundamental concepts and advanced materials towards future applications (Pozzuoli, Italy, 2016/Dec/12-16) December 12 and 13 2016

(5)"Control of odd-frequency s-wave Cooper pairs in double quantum dots", Y. Tanaka, International workshop on nano-spin conversion science & quantum spin dynamics (Univ. of Tokyo, Tokyo, Japan, 2016/Oct/12-15) October 15 2016.

(6)"Influence of the impurity scattering on charge transport in unconventional superconductor junctions", Y. Tanaka, Physics of bulk-edge correspondence and its universality: From solid state physics to cold atoms, (Kyoto Japan, 2016/ Sep 27-30), September 30 2016.

(7)"Influence of the impurity scattering on charge transport in unconventional superconductor junctions", Y. Tanaka, Superconducting hybrid nanostructures: physics and applications (Moskow, Russia, 2016/ Sep/19-26) September 23 2016.

(8)"Tunneling effects and edge states of topological superconductor  $Sr_2RuO_4$ " S.Kashiwaya, Superconducting hybrid nanostructures: physics and application (Moscow, Russia, 2016/Sept/19-22), September 20 2016.

(9)"アンドレーエフ束縛状態の物理" Y. Tanaka 日本物理学会年会 領域 6, 4, 8 合同招待講演 (Kansai Univ, Osaka, Japan, 2015/Sep/16-19) September 18 (2015).

(10)"Recent Topic in Odd-frequency pairing: Consequences of Bulk Odd - frequency Superconducting States" Y. Tanaka, Interaction of Superconductivity and Magnetism in Nanosystems (Moscow, Russia, 2015/Sep/2-4) September 4 (2015).

(11)"Odd-Frequency pairing and Andreev bound states" Y. Tanaka, 11th international conference on Materials and Mechanism of Superconductivity (M2S) 2015 (Geneva, Switzerland, 2015 / Aug /23-28) August 24 (2015).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等  
<http://www.rover.nuap.nagoya-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

田仲由喜夫 (Tanaka Yukio)

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 (Kashiwaya Satoshi)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・電子光技術部門・首席研究員

研究者番号：40356770

(3)連携研究者

( )

研究者番号：

(4)研究協力者

( )