

機関番号：11401

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2007 ~ 2010

課題番号：19740220

研究課題名 (和文) 異方的超伝導ナノ構造接合系のジョセフソン効果に関する理論的研究

研究課題名 (英文) Theoretical study on Josephson effect of nanostructure systems in anisotropic superconductors

研究代表者

田沼 慶忠 (TANUMA YASUNARI)

秋田大学・工学資源学研究所・准教授

研究者番号：90360213

研究成果の概要 (和文)：

異方的超伝導体を用いたナノ構造接合系における超伝導電子対の対称性を実験的に検証する方法の理論的構築を行った。トンネル接合やジョセフソン接合系では、超伝導電子対のペアポテンシャルの位相が重要な役割を果たす。カイラル p 波超伝導体の磁束量子渦状態で誘起される奇周波数ペアの不純物効果を調べ、明確に超伝導対称性を区別する渦芯トンネル分光という検証法を提案した。

研究成果の概要 (英文)：

I have theoretically studied and investigated in order to determine superconducting pairing symmetries of nanostructure systems in anisotropic superconductors. The internal phase of pair potentials in the tunneling and Josephson junctions cause the formation of the Andreev resonant bound states, where the quasiparticles feel a sign change of the pair potential. We have suggested how to discriminate the pairing symmetries of a chiral p-wave superconductor from the vortex-core tunneling spectroscopy via odd-frequency pairing amplitudes.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	500,000	0	500,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
総計	2,000,000	450,000	2,450,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性Ⅱ

キーワード：異方的超伝導、ジョセフソン効果、共鳴束縛状態、奇周波数ペア

## 1. 研究開始当初の背景

超伝導体に挟まれた薄い絶縁体において、両側の超伝導体を持つペアポテンシャルの位相差によりゼロ電圧でも電流が流れる現象をジョセフソン効果といい、超伝導体を持つペアポテンシャルの位相が極めて重要な役割を果たす。銅酸化物高温超伝導体のよう

な強相関電子系物質は、電子間に働く強い斥力相互作用を避けて超伝導電子対を形成するため、異方的超伝導体となる。異方的超伝導体は金属系超伝導体における等方的な超伝導電子対の対称性とは異なり、異方的な対称性となっている。異方的な対称性のペアポテンシャルの内的位相の符号変化が、異方的

超伝導トンネル接合及びジョセフソン接合の輸送現象に顕著に影響を及ぼす。それらの主たる要因は接合面でアンドレーエフ反射された準粒子が、ペアポテンシャルの符号変化を感じることで形成する共鳴束縛状態である。走査型トンネル分光におけるトンネルコンダクタンスにおいて、異方的超伝導体接合面で形成されるアンドレーエフ共鳴束縛状態はゼロバイアスピークとしてされるため、超伝導電子対の対称性を検証する有効な方法であり、超伝導発現機構への解明と繋がる。

異方的超伝導体における走査型トンネル分光による超伝導電子対の対称性を検証する強力な方法の1つとして、表面束縛状態を介したトンネル分光がある。このトンネル分光はトンネルスペクトルで測定される超伝導ギャップの形状だけでなく、ペアポテンシャルの内的位相を示すゼロバイアスピークを観測し、電子対の異方的対称性決定に極めて強力な方法である。研究代表者はこれまでも多大にこの表面束縛状態を介したトンネル分光の研究に携わってきた。他方、第2種超伝導体に磁場を印加すると磁束量子渦が形成されるが、その量子渦周りでも共鳴束縛状態が形成され、ゼロバイアスピークを観測する。一見異なる物理現象であるようだが、これらのような表面・界面あるいは磁束量子渦といった並進対称性の破れた不均一系超伝導体において、いずれもアンドレーエフ反射による共鳴束縛状態が形成される。この共鳴束縛状態形成は準粒子の運動とペアポテンシャルの符号変化によるものであるが、近年、奇周波数を持つ超伝導電子対の存在が深く関わっていることが分かってきた。

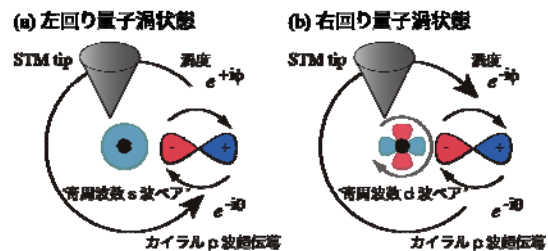
奇周波数を持つ超伝導電子対は、松原周波数の入れ替えに対し奇関数であり、フェルミ-ディラック統計に従い、松原周波数の入れ替えにより符号変化する。そのしわ寄せがペア振幅の軌道角運動量や磁束量子渦のトポロジーにもたらされ、対応した全角運動量の奇周波数電子対が誘起される。アンドレーエフ共鳴束縛状態はペアポテンシャルの空間構造がコヒーレンス長程度あるいはナノスケールの空間構造で変化し、ペアポテンシャルが抑制されている表面や界面、あるいは磁束量子渦芯周りで、共鳴束縛状態の形成と同時に、奇周波数を持った電子対が誘起されるということである。

これまでの異方的超伝導体における超伝導電子対検証法に、奇周波数電子対がいかなる効果をもたらしどんな役割を果たすのか？という新たな疑問や課題へと展開することになる。

## 2. 研究の目的

本研究課題の目的は異方的超伝導トンネ

ル接合及びジョセフソン接合系で、いかにして超伝導電子対の対称性を実験的に検証できるかという理論的方法を構築することにある。具体的には、カイラルp波超伝導体のような異方的超伝導体の磁束量子渦芯周りのトンネル分光により、ペアポテンシャルの対称性決定と量子渦芯周りで誘起される奇周波数ペア対称性の判別する方法を確立する。本研究成果により、銅酸化物高温超伝導体接合系における超伝導電子対と奇周波数ペア対称性検証法により、超伝導発現機構への解明と、銅酸化物高温超伝導体を用いたデバイス作製への有益な指針を与えることを目標としている。

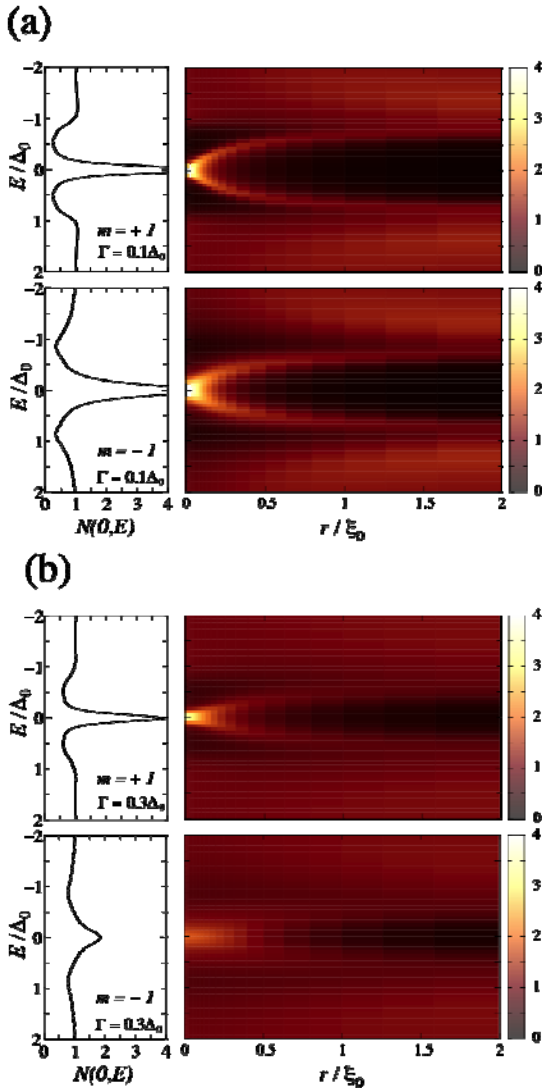


## 3. 研究の方法

本研究は研究代表者が自ら遂行し行うものである。異方的超伝導体接合や磁束量子渦などペアポテンシャルのコヒーレンス長程度で変化する空間構造を自己矛盾なく計算する準古典グリーン関数と呼ばれる方法を用いる[G. Eilenberger, Z. phys. **214**, (1968) 195, N. Schopohl and K. Maki, Phys. Rev. B **52**, (1995) 490]。この計算方法は、コヒーレンス長程度の空間構造を持つ不均一系超伝導体を取り扱うには最適である。原子スケールの空間構造、例えば表面や界面の乱れ効果を考慮する場合には原子スケールで振動するペアポテンシャルを考慮した微視的模型が適切である。本研究では、ペアポテンシャル、ペア振幅と準粒子の不純物散乱における自己エネルギーを自己矛盾なく決定するため、準古典グリーン関数を用いた大規模な数値計算を行う。自己矛盾なく決定された各々の結果を用い、走査型トンネル分光 (STM) に対応するトンネルスペクトルを求める。

カイラルp波超伝導体における2つの(a)左回りと(b)右回り磁束量子渦状態を考える。カイラルp波超伝導体の電子対が持つ軌道角運動量を  $l=-1$  としたとき、左回りの渦度  $w=+1$ 、右回りの渦度  $w=-1$  であるため、各々の全角運動量  $l+w$  に対応する対称性を持った奇周波数の電子対が渦芯周りで誘起される。しかしながら、STM 探針からトンネルスペクトルを観測したとしても、いずれの場合もゼロバイアスピークが得られ、左周り量子渦状態のと

きに奇周波数 s 波ペア、右周りのときに奇周波数 d 波ペアであるかを判別することはできない。



本研究課題において、カイラル p 波超伝導体の磁束量子渦状態における準粒子の不純物効果を考慮し、量子渦芯トンネル分光という超伝導電子対対称性と奇周波数ペア対称性を検証する理論的方法を構築した。

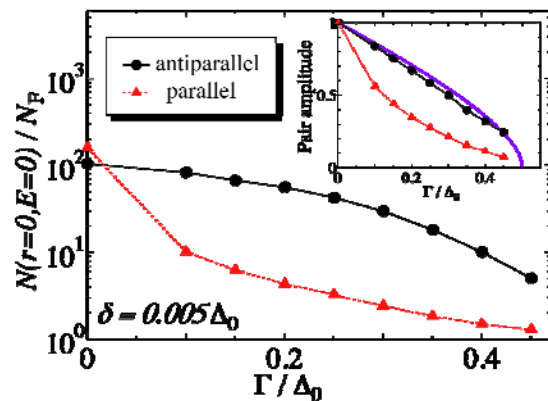
#### 4. 研究成果

カイラル p 波超伝導体の 2 つの磁束量子渦状態に準粒子の不純物効果を取り込むことで、トンネルスペクトルのゼロバイアスピークに顕著な違いが見られる。等方的な s 波対称性を持つ超伝導電子対は不純物の影響を受けない。一方、d 波対称性のような異方的対称性を持つ超伝導電子対は不純物に対し敏感であるため破壊されやすい。従って、左回り量子渦芯周りで誘起される奇周波数 s 波ペアは不純物に対し影響を受けないため、アンドレーエフ反射による共鳴束縛状態が保

たれる。つまり、ゼロバイアスピークは不純物散乱強度に依存しないということである。右回りの量子渦芯周りで誘起される奇周波数 d 波ペアは、不純物によって破壊されやすくペアポテンシャルより形成される共鳴束縛状態も抑制されるため、ゼロバイアスピークの高さが著しく低くなる。

カイラル p 波超伝導体の磁束量子状態における不純物効果により、トンネルスペクトルのゼロバイアスピークの高さに決定的な違いが生じるため、ルテニウム酸化物のようなカイラル p 波超伝導体の超伝導対称性を確定させることができる。渦芯での準粒子の不純物散乱の強度とゼロバイアスピークに対応するゼロエネルギー局所状態密度の関係を下図に示しておく。奇周波数 s 波ペアがアブリゴゾフ・ゴリコフ曲線に従い、奇周波数 d 波ペアが不純物強度の増加につれて急激に減少し振る舞うことを示している。カイラル p 波超伝導のペアポテンシャルは不純物強度に対し不安定であるが、不純物によって奇周波数ペアを生じさせる。これらの結果が示すように、アンドレーエフ共鳴束縛状態の形成は誘起される奇周波数ペアと深く関わっており、量子渦芯トンネル分光により奇周波数ペアの対称性を判別可能にすることができる。

以上の研究成果の内容は、Physical Review Letters等の国際的評価のある論文誌に、国際会議等に発表を行った。



#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

- ① 田沼慶忠、カイラル p 波超伝導体の渦糸芯-トンネル分光と奇周波数ペア、秋田大学総合情報処理センター広報、査読無、14 巻、2011、pp. 2-8
- ② Y. Tanuma, N. Hayashi, Y. Tanaka, A. A. Golubov, Model for vortex-core tunneling spectroscopy of chiral p-wave superconductors via odd-

- frequency pairing states, Physical Review Letters、査読有、Vol.102、2009、117003
- ③ Y. Tanaka, A. A. Golubov, Y. Tanuma、Odd-frequency pairing state in superconducting junctions, Journal of Physical Chemistry of Solids、査読有、Vol. 69、2008、pp. 3244-3266
- ④ Y. Tanuma、Y. Tanaka, K. Kusakabe、Josephson current through a nanoscale quantum dot contacted by conventional superconductors, Physica E、査読有、Vol. 40、2007、pp. 257-260
- ⑤ Y. Tanaka, Y. Tanuma、A. A. Golubov、Odd-frequency pairing in normal-metal/superconductor junctions、Physical Review B、査読有、Vol. 76、2007、054522(13 pages)

[学会発表] (計10件)

- ① 田沼慶忠、林伸彦、田仲由喜夫、A. A. Golubov、カイラル p 波超伝導体渦芯周りの奇周波数ペアと不純物散乱 II、日本物理学会、2010. 3. 23、岡山大学
- ② Y. Tanuma、N. Hayashi、Y. Tanaka、A. A. Golubov、Theoretical study on tunneling spectroscopy of chiral p-wave superconductors with odd-frequency pair amplitudes induced around a vortex core、9<sup>th</sup> International Conference on Materials and Mechanisms (M2S-IX)、2009. 9. 9、京王プラザホテル
- ③ 田沼慶忠、林伸彦、田仲由喜夫、A. A. Golubov、カイラル p 波超伝導体渦芯周りの奇周波数ペアと不純物散乱、日本物理学会、2009. 9. 27、熊本大学
- ④ Y. Tanuma、N. Hayashi、Y. Tanaka、A. A. Golubov、How to determine pairing symmetries of chiral p-wave superconductors from vortex-core tunneling spectroscopy via odd-frequency pairings、New directions of superconducting nanostructures 2009 (NDSN 2009)、2009. 9. 4、Nagoya University
- ⑤ 田沼慶忠、田仲由喜夫、A. A. Golubov、有限サイズの常伝導・異方的超伝導トンネル接合における奇周波数ペアと不純物効果、日本物理学会、2008. 9. 22、岩手大学
- ⑥ 田沼慶忠、不純物のあるカイラル p 波超伝導ボルテックスと奇周波数ペア検証法、京大基研研究会「不均一超伝導超流動状態と量子物理」、2008. 8. 1、京都大学基礎物理学研究所
- ⑦ 田沼慶忠、林伸彦、田仲由喜夫、A. A. Golubov、異方的超伝導磁束量子状態における奇周波数ペアと不純物効果、日本物理学会、2008. 3. 23、近畿大学

- ⑧ 田沼慶忠、林伸彦、田仲由喜夫、A. A. Golubov、Odd-frequency pairing states near a superconducting vortex core with the winding number、第2回若手研究者のための超伝導ナノサイエンスと応用に関する秋季国際セミナー、2007. 12. 1、ホテルエピナール那須
- ⑨ Y. Tanuma、Y. Tanaka、A. A. Golubov、Hidden odd-frequency pairing states in non-uniform superconductors, Workshop 'Physics of Nanoscale Superconducting Heterostructures'、2007. 6. 23、Lorentz Center (Leiden University, Netherlands)
- ⑩ Y. Tanuma、Y. Tanaka、K. Kusakabe、Josephson effect of d-wave superconductors through a nanoscale quantum dot, Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS 2007)、2007. 8. 20、仙台国際センター

## 6. 研究組織

研究代表者

田沼 慶忠 (Tanuma Yasunari)

秋田大学・工学資源学研究所・准教授

研究者番号：90360213