

機関番号：13601

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21740276

研究課題名 (和文) スピン 3 重項超伝導の新奇量子輸送現象

研究課題名 (英文) Novel transport phenomena in spin-triplet superconductor

研究代表者

神原 浩 (KAMBARA HIROSHI)

信州大学・教育学部・助教

研究者番号：00313198

研究成果の概要 (和文)：本研究では、超伝導電子対の対称性がスピン 3 重項・p 波と考えられているルテニウム酸化物 (Sr_2RuO_4) に対して、集束イオンビームを用いた微細加工により試料を削り出し、微細な試料の電流-電圧特性を測定することで、スピン 3 重項超伝導に特有の内部自由度を反映した新奇な量子輸送現象の検出を目的として行った。その結果、異常なヒステリシスや試料の微細化に伴う臨界電流密度の上昇、カイラル p 波超伝導を支持するトンネルスペクトルなどを観測した。

研究成果の概要 (英文)：Using micro fabrication techniques, we investigated local transport characteristics of spin-triplet p-wave superconductor Sr_2RuO_4 (SRO). We observed novel phenomena such as, (i) an unconventional hysteresis in voltage-current characteristics in a few μm -width weak junction, and (ii) a large enhancement of superconducting critical current density with reducing cross section below $100 \mu\text{m}^2$. These phenomena imply that edge states are formed in a microfabricated SRO device. We also studied tunnel spectra of an SRO break junction formed by microfabrication. The tunnel spectra showed broad zero-bias conductance peaks, which supports the chiral p-wave state in SRO.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2010 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：強相関系・スピン 3 重項超伝導・ルテニウム酸化物

1. 研究開始当初の背景

ルテニウム酸化物 Sr_2RuO_4 (以下 SRO と略す) は超伝導転移温度 $T_c = 1.5 \text{ K}$ の超伝導体であるが、超伝導電子対が従来型のスピン 1 重項 s 波、また銅酸化物超伝導で実現していると考えられているスピン 1 重項 d 波超伝導とも異なり、スピン 3 重項 p 波の対称性をもち

つことが、理論的また様々な実験結果から有力視されている物質である。スピン 3 重項 p 波超伝導が実現していれば、超伝導対はスピンおよび軌道の自由度に基づく豊富な内部自由度を有することになり、スピン 1 重項超伝導には見られない、特異な現象の存在が理論的に予言される。例えば、常伝導体との接

合系での異常な近接効果や半整数の磁束量子の存在等が挙げられる。これらの新奇な量子輸送現象が観測されれば、SRO がスピン3重項超伝導体であることの決定的な確証が得られるだけでなく、従来のスピン1重項超伝導の既存概念を超えた、超伝導に対する概念が広く深化することが期待される。我々は、これまでに SRO と析出 Ru の共晶系試料（以後、SRO-Ru 共晶系と表す。）を用いて研究を行ってきた。SRO-Ru 共晶系では、低温への冷却の過程で、まず析出 Ru の周りに超伝導転移温度 $T_c = 3 \text{ K}$ の界面超伝導相（3-K 相）のオンセットが現れ、その後、 $T_c = 1.5 \text{ K}$ でバルク超伝導相（1.5-K 相）が現れてくる。この SRO-Ru 共晶系試料に集束イオンビーム（FIB）による微細加工を施し、数 μm 程度の幅に削り出した微細素子の電流-電圧特性を測定した。SRO における、このような FIB による微細デバイス作製は世界に先駆けて行われたものであった。微細素子の測定によって初めて、3-K 相の島と島をつなぐ超伝導のネットワークが温度降下とともに成長していく姿を明らかにできた。また、その際に、電流-電圧特性に通常の超伝導接合では見られない異常なヒステリシス現象が現れることを観測した。この起源として、SRO のクーパー対の軌道の内部自由度（カイラリティ）を仮定することで、異常なヒステリシス現象を概略的に説明することは可能であったが、積極的にそのシナリオを支持する結果が得られていないなど、ヒステリシスの起源についての問題点は残っていた。実験的には、析出 Ru の存在が異常ヒステリシスに及ぼす影響は分かっていた。なかった。

2. 研究の目的

これまでの様々な研究で、SRO ではスピン3重項カイラル p 波という対称性が実現していると考えられている。先に述べた、(1) 微細素子における電流-電圧特性の異常ヒステリシスの起源が、クーパー対の内部自由度に起因するものかどうかの問題について、さらに実験を進め、考察を深めることを目的の1つとした。また、その研究と並行して、(2) クーパー対の内部自由度を用いることで実現が期待される、半整数磁束量子の検出実験も行うこととした。通常、超伝導体は、その巨視的波動関数の一価性から、超伝導体内部の磁場は $h/2e$ (h : プランク定数, e : 電気素量) を単位とする磁束量子 (Φ_0) に量子化されることが知られている。しかし、もし SRO がカイラル p 波の対称性をもっているとすると、軌道自由度もしくはスピン自由度を使って、半整数磁束量子の存在が理論的に可能となる。スピン自由度を使った場合には磁場侵入長の数倍程度以下の微小空間となると、半整数磁束量子の方が安定となることが理論

的に予測されている。従って、微細素子での検証を試みることにした。

3. 研究の方法

SRO の超伝導は、不純物に弱く、これまでのところ薄膜化したもので超伝導を示す例は報告されていない。従って、SRO の微細デバイス加工にあたっては、蒸着して加工という通常の微細加工の手順がとれない。我々は、SRO の純良単結晶から劈開によって小片を削り出し、それを FIB 加工で所望の試料に削り出すという方法をとった。こうすることで、加工に時間はかかるものの、数 μm 程度の大きさのデバイス試料作製が可能となった。FIB によるビーム照射で局所的に試料は劣化するが、その劣化層の幅は、高々 $1 \mu\text{m}$ 程度であることが分かり、数 μm 程度の幅の試料であれば、超伝導相は大きな影響を受けず、FIB 加工が有効であることが分かった。この方法により、(1) 伝導面内および伝導面間に弱接合部分を作製し、その電流-電圧特性を異なるパッチ試料および様々な大きさの接合試料で測定することとした。(2) 半整数磁束量子の検出においては、SRO を微細加工し、弱接合素子を2つ用意して SQUID (超伝導量子干渉素子) ループを作ることで、臨界電流密度の磁場変調に半整数磁束量子成分が検出されるかどうかを検証することとした。なお、電極の4端子は、金を試料素子へ蒸着することにより作製するが、SRO 試料の劈開 ab 面上へ蒸着したのでは、電気的コンタクトがうまくとれないため、試料は SRO-Ru 共晶系を用いることとした。こうすれば、析出金属 Ru と金との電気的コンタクトが確実に得られる。ピュアな SRO の特性を調べる際には、電圧降下が支配的となる弱接合部分に析出 Ru が含まれていなければよいと考えられるため、表面上に Ru が析出していない部分を選び、削り出した後、一連の輸送特性測定を行い、その後、素子の内部を FIB で削りながら、走査型イオン顕微鏡により析出 Ru の存在有無を確認していくこととした。

4. 研究成果

(1) 微細素子における電流-電圧特性の異常ヒステリシス

電流-電圧特性の異常ヒステリシスについて、更なる実験的検証を進めた。これまで SRO-Ru 共晶系を用いて輸送特性測定を行ってきたため、析出 Ru フリーの素子を上記のような方法で作製し、異常ヒステリシスの有無を調べた。その結果、析出 Ru が弱接合部に存在しなくても、異常ヒステリシスが観測され、異常ヒステリシスは析出 Ru の存在有無とは無関係であることが分かった。また、これまでに蓄積した微細素子の抵抗の温度変化 ($R-T$)、および超伝導の臨界電流密度

の断面積依存性のデータから、素子を微細化すればするほど、析出 Ru の存在とは無関係に、(i) $R-T$ においては $T = 3 \text{ K}$ での抵抗の減少率が大きくなることや、(ii) 臨界電流密度が断面積に逆比例してバルクの値よりも2ケタも大きくなる ($\sim 10^5 \text{ A/cm}^2$) ことを見出した。つまり、析出 Ru が存在しなくても、試料を数 μm 程度までに微細化すると、“3-K 相的”な振る舞いが現れてくると言い換えることもできる。従って、これらの特異な特性(異常ヒステリシス、および $T = 3 \text{ K}$ での抵抗の減少、臨界電流密度の増大)は本質的に SRO の性質を反映したものであると考えられる。もし、微細化することで、並進対称性が破れた“端”で疑似的に 3-K 相的な p_x (もしくは p_y) の対称性をもつクーパー対が形成されていると考えるならば、カイラル p 波 ($p_x + ip_y$) と普通の p 波 (p_x) の共存が、異常なヒステリシスの起源となっているというシナリオが考えられる。

(2) 半整数磁束量子の検出実験

SRO-Ru 共晶系試料 (厚さ $7 \mu\text{m}$) に、 $6 \mu\text{m} \times 6 \mu\text{m}$ 程度の穴をあけ、SRO 自身で DC-SQUID を形成するように微細加工を施した素子で、臨界電流の磁場変調効果を調べた。もし、素子が SQUID として正常に機能していれば、 $1\Phi_0$ (この場合、 0.6 G) 周期の磁場変調が観測され、さらに半整数磁束量子が検出されるとしたら、 $1/2\Phi_0$ (この場合、 0.3 G) 周期の磁場変調が期待される。しかし、実験では c 軸に平行にかけた磁場 $0 \sim 3 \text{ G}$ および $50 \sim 53 \text{ G}$ の範囲で $1\Phi_0$ の磁場変調も観測されなかった。対照実験として、Nb の薄膜を FIB 加工で作製した DC-SQUID では同じ測定系で磁場変調が観測されたので、SRO 自身で構成した SQUID において、何らかの理由により、素子が DC-SQUID として機能していなかったものと考えられる。(1) で述べたように、素子の微細化を進めるにつれ、断面積に逆比例して臨界電流密度は大きくなるので、SRO では試料内に一様に電流が流れていない可能性が高い。微細化した試料では特に、試料の端を実効的に流れていると考えられる。本研究において、SRO 自身で作製した DC-SQUID では、端を流れる電流が、通常の超伝導体のように弱接合における干渉効果を起こしにくいのではないかと考えられる。SQUID における半整数磁束量子の検出は SQUID のデザインも含め、今後の課題である。

(3) ブレークジャンクションにおけるトンネルスペクトル

これまでは微細素子の弱接合における電流-電圧特性の研究結果を報告してきたが、弱接合領域部分に熱的および電氣的なショックを加えることで破壊し、ブレークジャン

クションによるトンネル接合を形成することにも成功した。トンネルスペクトルは超伝導の内部位相に非常に敏感な応答を示すことが知られているが、過去に行われた他グループのトンネル接合の実験は、SRO と他の金属間に形成された接合の研究のみであった。今回、我々が作製に成功したものは、SRO と SRO のトンネル接合であり、初めての研究となる。これは微細加工技術を適用することで初めて可能になったとも考えられる。SRO のブレークジャンクションにおける電流-電圧特性測定を行った結果、 T_c 以下で温度の低下とともに増大するブロードなゼロエネルギーピークを明瞭に観測した。また、エネルギーギャップに相当するバイアス電圧で特徴的なディップも明瞭に観測された。このスペクトルは、これまでに知られている s 波や d 波超伝導体のトンネルスペクトルの形状とは異なる。そこで、SRO の超伝導対称性として最も有力と考えられているスピン 3 重項カイラル p 波を仮定し、カイラル p 波/絶縁体/常伝導金属 (S/I/N)、およびカイラル p 波/絶縁体/カイラル p 波 (S/I/S) 接合でトンネルスペクトルの理論計算を行った結果、S/I/N 接合モデルで非常によく実験結果を再現できることが判明した (図 1)。このトンネルスペクトルの実験結果は、SRO がカイラル p 波対称性をもつことを支持するもの

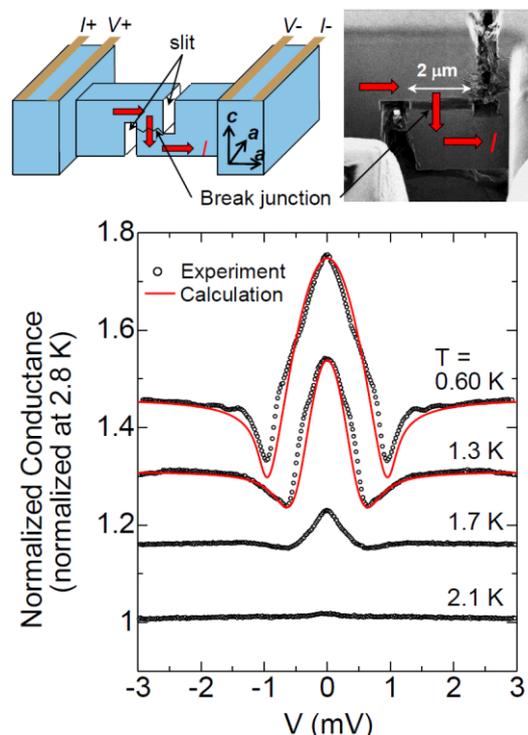


図 1: FIB 加工により作製した SRO のブレークジャンクション (上) とそのトンネルスペクトルの温度変化 (下)。実線はカイラル p 波における S/I/N 接合の計算結果。トンネルスペクトルは見やすいように 0.15 単位ずつ縦軸方向にシフトしている。

と考えられる。実験結果が、S/I/S 接合よりも S/I/N 接合モデルでうまくフィットできた理由の1つの可能性としては、ブレークジャンクションが、S/I/N/I/S の構造をとっており、片側の S/I/N 接合が電圧降下に支配的な寄与をもたらしていると仮定した場合であるが、トンネル接合の詳細な構造を明らかにすることやトンネル接合の制御は今後の課題である。

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 3 件)

1. H. Kambara, T. Matsumoto, H. Kashiwaya, S. Kashiwaya, H. Yaguchi, Y. Asano, Y. Tanaka, and Y. Maeno: “DC Current Driven Critical Current Variation in Sr_2RuO_4 -Ru Junction Proved by Local Transport Measurements”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **79**, 074708-1 -5 (2010). 査読有
2. H. Kambara, S. Kashiwaya, H. Yaguchi, Y. Asano, Y. Tanaka, and Y. Maeno: “Unconventional transport characteristics of p-wave superconducting junctions in Sr_2RuO_4 -Ru eutectic system”, *Physica C* **470**, S685-S687 (2010). 査読有
3. H. Kambara, S. Kashiwaya, H. Yaguchi, Y. Asano, Y. Tanaka, and Y. Maeno: “Chiral Superconducting Phase Transition in 3-K Phase of Sr_2RuO_4 ”, *Physica C* **469**, 1030-1033 (2009). 査読有

[学会発表] (計 8 件)

1. H. Kambara, S. Kashiwaya, H. Kashiwaya, Y. Tanaka, and Y. Maeno, “Local Transport Characteristics in Sr_2RuO_4 Microbridges”, 23rd International Symposium on Superconductivity (ISS2010), Epochal Tsukuba, Tsukuba, Japan, 2010.11.3
2. 神原 浩, 柏谷 聡, 田仲由喜夫, 前野悦輝, 「 Sr_2RuO_4 における面間局所輸送特性」, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 大阪府立大学, 2010.9.25
3. 神原 浩, 柏谷 聡, 矢口 宏, 浅野泰寛, 田仲由喜夫, 前野悦輝, 「 Sr_2RuO_4 -Ru 共晶系における局所伝導特性」, 日本物理学会 第 65 回年次大会, 岡山大学, 2010.3.20
4. H. Kambara, S. Kashiwaya, H. Yaguchi, Y. Asano, Y. Tanaka, and Y. Maeno, “Anomalous

Voltage-Current Characteristics in Microfabricated Sr_2RuO_4 -Ru Eutectic Junction”, 22nd International Symposium on Superconductivity (ISS2009), Epochal Tsukuba, Tsukuba, Japan, 2009.11.4

5. 神原 浩, 柏谷 聡, 矢口 宏, 浅野泰寛, 田仲由喜夫, 前野悦輝, 「 Sr_2RuO_4 -Ru 共晶系における磁場中局所伝導測定」, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 熊本大学, 2009.9.25
6. H. Kambara, S. Kashiwaya, H. Yaguchi, Y. Asano, Y. Tanaka, and Y. Maeno, “Anomalous Critical Current Variation in Microfabricated Sr_2RuO_4 -Ru Eutectic Junction”, International Workshop “Novel Spin Pairing 2009 (NSP2009)”, Yukawa Memorial Hall, Kyoto University, Japan, 2009.9.14
7. H. Kambara, S. Kashiwaya, H. Yaguchi, Y. Asano, Y. Tanaka, and Y. Maeno, “Unconventional Transport Characteristics of p-wave Superconducting Junctions in Sr_2RuO_4 -Ru eutectic system”, The 9th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity ($\text{M}^2\text{S-IX}$), Keio Plaza Hotel, Tokyo, 2009.9.8
8. H. Kambara, S. Kashiwaya, H. Yaguchi, Y. Asano, Y. Tanaka, and Y. Maeno, “Anomalous Transport Characteristics of p-wave Superconducting Channel in the 3-K Phase of Sr_2RuO_4 ”, New Directions of Superconducting Nanostructures 2009 (NDSN 2009), Nagoya University, Nagoya, 2009.9.4

6. 研究組織

(1) 研究代表者

神原 浩 (KAMBARA HIROSHI)

信州大学・教育学部・助教

研究者番号 : 00313198