

機関番号：82626

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20540392

研究課題名（和文） p波超伝導体における半整数磁束量子状態の観察

研究課題名（英文） Observation of half flux quanta in chiral p-wave superconductors

研究代表者

柏谷 聡 (KASHIWAYA SATOSHI)

独立行政法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス研究部門・研究グループ長

研究者番号：40356770

研究成果の概要（和文）：カイラル p 波対称性を持つことが強く示唆されている  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  などの新奇超伝導体を用いて、半整数磁束量子の存在を確認するために、微小単結晶からの素子作成プロセスの構築と、作成されたマイクロデバイスの輸送特性の評価を行った。素子プロセスに関しては研磨プロセス、FIB 加工を用いることにより、 $1\mu\text{m}$  程度の素子の作成に成功した。作成された SRO の弱結合型接合の輸送特性は、異常なヒステリシス構造を有するスイッチング特性を示し、この起源は印加電流とカイラルドメイン構造、エッジチャンネルとの相互作用の存在を示唆しているものと解釈された。さらに弱結合を2個含む超伝導ループ構造を作成し、SQUID としての動作の検証を行った。SQUID の臨界電流値はヒステリシスの無い I-V 特性を示したが、外部印加電流に対して周期的な臨界電流の変調構造は観測されず、外部印加電圧に応答していないという結果になった。これは弱結合における臨界電流値が磁束の量子化条件に対応しておらず、エッジ状態やカイラルドメインの影響を含めた解釈が必要で有ることが示唆される。

研究成果の概要（英文）：We develop a fabrication process of  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  (SRO)-based microdevices searching for the possible existence of half flux quanta in chiral p-wave superconductors. The single crystals of SRO were sliced into pellets of 10-20  $\mu\text{m}$  thickness and then patterned using focused ion beam (FIB). We have succeeded in fabricating weak link Josephson junctions and superconducting quantum interference devices (SQUID) using the FIB process. The transport properties of the SQUID measured below 1.5K show the presence of a superconducting current in weak link bridges, but the switching of the weak link to the finite voltage states against the increment of the bias current is unstable. Expected modulation of the critical current to the applied magnetic field has not been detected. This is possibly due to the effects of the edge current and the chiral domains inevitably existing in the electrodes of SRO.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
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、原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：量子エレクトロニクス、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ 、カイラル p 波、半整数磁束量子、トポロジカル量子計算

## 1. 研究開始当初の背景

近年の研究において、主に超伝導や半導体を用いた系において量子ビットの実現が試みられてきているが、よく知られているように重ね合わせの状態は環境との相互作用により、容易にデコヒーレンスを起し情報を失ってしまうことが問題として挙げられている。一方物理系のトポロジカルな性質を量子情報として用いるいわゆるトポロジカル量子コンピュータ (QC) が提案され、エラーレートを大幅に改善した量子ビットの実現が可能であることが理論的に指摘されている。トポロジカル QC では非アーベル統計に従う複数のエニオンを用い、エニオンの絡み合いを制御することにより情報処理がなされる。しかしこのような統計性を持つエニオンの存在は、現在のところ検証が進められてはいるが、はっきりと確認されたものはない。

現在、エニオン統計性を持つ粒子の有力な候補と考えられているのは、カイラル p 波対称性を持つ超伝導体に侵入する半整数磁束量子であり、この磁束量子には通常の磁束量子に対して、半分の磁束量が含まれる状態である。ここで議論する半整数磁束量子は、過去銅酸化物超伝導体において d 波超伝導体の検証に用いられた半整数磁束量子とは異なり、カイラル p 波などの内部自由度を有している超伝導体に特有の磁束状態で、具体的にはトリプレット超伝導性のアップスピンとダウンスピンが担う磁束に差が生じ、超伝導に侵入した磁束が半整数磁束量子として存在することを意味する。反整数磁束量子の様な特異な磁束量子の存在、あるいは磁束量子の持つ統計性を検証する舞台としては、長年の研究によりカイラル p 波対称性を有していることが各種実験にて強く指摘されてきた  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  (SRO) が最も適している。しかし、SRO を用いて本研究を進めるためにはいくつかの問題が存在する。①SRO がカイラル p 波対称性を有することも、またカイラルドメイン存在の有無なども完全には確定していない。②SRO は薄膜化が極めて難しく、また界面表面が不安定であり、接合系の実験がほとんど存在しない。③SRO 中の磁束量子の理解が不十分である。反整数磁束量子のみならず、カイラル自由度が磁束量子状態へ与える影響なども未解明であった。

## 2. 研究の目的

以上の点を考慮して、①SRO 等の新超伝導体のバルク結晶を用いた弱結合型ジョセフソン接合や超伝導量子干渉素子 (SQUID) などのマイクロデバイスの作成プロセス確立、②作成されたマイクロデバイスの輸送特性、地場応答などの評価、③SRO の侵入した磁束量子の性質に関する理論的な解析、という 3 点を本研究の目的とした。

## 3. 研究の方法

SRO を用いたマイクロデバイスの作成は、京都大学、前野研究室にてフローティングゾーン法にて作成された結晶を提供していただき、①単結晶を 10-20mm 程度の厚みのフラグメントに研磨、②基板上への固定、③蒸着プロセスによる電極付け、④収束イオンビーム (FIB) 加工によるパターンニングというプロセスを用いた。このプロセスにより薄膜試料ではなく、バルク試料からのマイクロデバイスの作成プロセスを確立し、SRO のみではなく、各種単結晶サンプルに対応可能なプロセスの構築を行う。また作成されたデバイスの輸送特性の精密測定を 1.5K 以下の低温で行い、ジョセフソン効果や SQUID の磁場応答に現れる磁束量子の状態に関する情報を抽出する。

一方理論的にはカイラル p 波対称性を有する超伝導体に侵入した磁束量子の準粒子状態を理論的に計算し、カイラリティの準粒子状態に与える影響を、ボゴリューボフ・ドジャン方程式を解くことにより解析した。

## 4. 研究成果

### (1) 弱結合型接合

本プロセスによって作成された弱結合型ジョセフソン接合の輸送特性の温度依存性を図 1 に示す。結晶内には Ru インクルージョンという超伝導ネットワークが形成されており、これにより局所的に超伝導が発現し、それに対応するディップ構造が観測される。注目すべきことは、 $I-dV/dI$  特性には明確なヒステリシスが観測され、しかもその特徴は通常のジョセフソンスイッチと異なり、スイッチによって臨界電流  $I_c$  が増加するという、きわめて特異な構造が観測される。これはスイッチングが、通常の超伝導体を用いたジョセフソン型スイッチではなく、カイラリティやエッジ状態の影響を受けながらのスイッチを起していることを示唆しており、カイ

ラル p 波に特有な現象と考えられる。

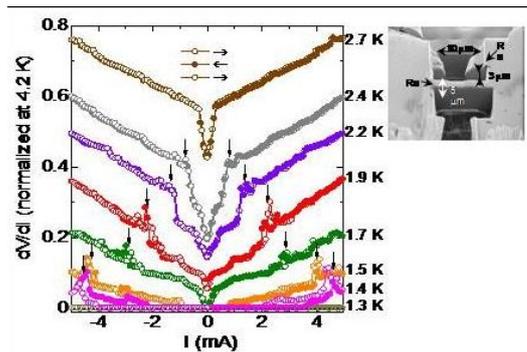


図1 Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> の弱結合型接合の I-dV/dI 特性の温度依存性。マークした部分に特異なヒステリシス構造が現れる。右図は接合の走査イオン顕微鏡像

## (2) SQUID の輸送特性

同様のプロセスを用いて、超伝導ループ内に 2 個の弱結合型接合を含む DC-SQUID の作成を行った。作成された素子の走査イオン顕微鏡像を図 2 に示す。弱結合部のサイズはおよそ 0-5-1 $\mu$ m 程度であり、ループ系は 2 $\mu$ m 程度である。

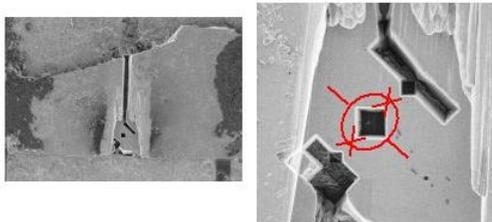


図2 FIB プロセスによって作成された Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> 単体による SQUID の走査イオン顕微鏡像。左図では結晶全体 (およそ 100 $\mu$ m 程度のサイズ) が見える。右図は SQUID 周辺の拡大図であり、SQUID として機能する部分が赤でマークされている。

本素子の I-V 測定は、SQUID が外部磁場に対して通常の応答をする場合には、0.7 Gauss の周期の  $I_c$  の変調特性を示すことが期待される。この周期はもし半整数磁束量子が安定に存在するならば、0.35 Gauss 周期に変化することが観測されるはずである。図 3 は、本素子で測定された I-dV/dI の磁場応答をカラープロットにて表したものである。電流の増加に伴い、色が変わる部分が  $I_c$  に対応するが、 $I_c$  は外部磁場に対して緩い変化は示すが、

期待された周期的な変調特性は観測されない。

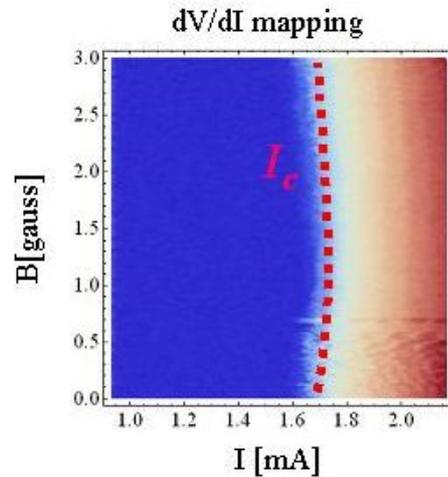


図3 Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> の SQUID で観測された I-dV/dI 特性の磁場応答をカラーで表した。 $I_c$  に対応する色の変化を点線で表しているが、磁場に対する周期的な応答は観察されて異なる事がわかる。

現在この原因として考えられるのは、エッジカレントやカイラルドメインの影響の他に、SQUID の設計パラメータの問題などが考えられ、より強い変調が観測されるデザインへの変更などを予定している。

## (3) 理論解析

ボゴリューボフ・ドジャン方程式を用いた計算により、カイラル p 波に侵入した磁束量子の状態を計算した。カイラリティと渦ベクトルの相対的な方位により、準粒子状態が変化する結果を見いだした。

まとめ

半整数磁束量子の観測を目指して、SRO 単結晶からのマイクロデバイスの作成プロセスを構築し、弱結合型ジョセフソン素子、および DC-SQUID の作成を行った。ジョセフソン素子においては、特異なヒステリシス構造が観測され、カイラルドメインの輸送特性に与える影響が示唆された。一方 SQUID では、期待された周期的な  $I_c$  の変調が観測されず、半整数磁束量子の観測に至らなかった。今後さらに SQUID の設計パラメータの変更などにより、変調特性の観測を目指して研究を進める。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計6件)

① S. Kashiwaya, H. Kambara, H. Kashiwaya, T. Furuta, H. Yaguchi, Y. Asano, Y. Tanaka, Y. Maeno,  
"Fabrication and transport properties of Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> microdivices"  
Physica C、査読有り  
Vol. 470, P.736-737 (2010).

② H. Kashiwaya, K. Shirai, T. Matsumoto, H. Shibata, H. Kambara, M. Ishikado, H. Eisaki, A. Iyo, S. Shamoto, I. Kurosawa, S. Kashiwaya  
"C-axis critical current of a PrFeAsO<sub>0.7</sub> single crystal"  
Applied Physics. Letters, 査読有り  
Vol. 96, p.202504-1-3 (2010)

③ Y. Tanuma, N. Hayashi, Y. Tanaka, and A. A. Golubov,  
"Model for Vortex-Core Tunneling Spectroscopy of Chiral p-Wave Superconductors via Odd-Frequency Pairing States",  
Physical Review Letters, 査読有り  
Vol. 102, 117003-1-4 (2009).

④ H. Kambara, S. Kashiwaya, H. Yaguchi, Y. Asano, Y. Tanaka, and Y. Maeno,  
"Anomalous transport through the p-wave superconducting channel in the 3-K phase of Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>"、  
Physical Review Letters, 査読有り  
Vol. 101, 2008, p267003-1-4 (2008).

[学会発表] (計11件)

① 柏谷聡、他 DETECTION OF EDGE STATES OF 1.5K PHASE Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> BY TUNNELING SPECTROSCOPY  
23rd International Symposium on Superconductivity  
2010年11月3日 つくば国際会議場

② 柏谷聡、柏谷裕美、神原浩、田仲由喜夫、前野  
「時間反転対称性を破る超伝導体 Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> の接合特性」  
新学術領域”トポロジカル量子現象” 第1回 総括班会議・研究会  
2010年9月22日 大阪市立大学

③ 柏谷聡、柏谷裕美、神原浩、田仲由喜夫  
"C-axis transport of various 2-D superconductors"  
7th International Symposium on Intrinsic

Josephson Effect and Plasma Oscillations in High-Tc

2010年5月2日 弘前大学

[その他]

ホームページ等

<http://staff.aist.go.jp/s.kashiwaya/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

柏谷 聡 (KASHIWAYA SATOSHI)

独立行政法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス研究部門・研究グループ長

研究者番号：40356770

### (2) 研究分担者

田沼 慶忠 (TANUMA YOSHITADA)

国立大学法人秋田大学・工学資源学部電気電子工学科・准教授

研究者番号：90360213

川畑 史郎 (KAWABATA SHIRO)

独立行政法人産業技術総合研究所・ナノテクノロジー部門・主任研究官

研究者番号：30356852

### (3) 連携研究者

なし