

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 24 年 6 月 1 日現在

機関番号：13601  
 研究種目：基盤研究(C)  
 研究期間：2009～2011  
 課題番号：21540357  
 研究課題名（和文） 低温弱磁場超伝導状態におけるマイクロ及び多段フラックスジャンプ  
 発現機構の解明  
 研究課題名（英文） Study on the superconducting micro-flux-jumps which successively  
 appear around zero-field at low temperatures  
 研究代表者  
 天谷 健一（TENYA KENICHI）  
 信州大学・教育学部・教授  
 研究者番号：70261279

研究成果の概要（和文）：スピン三重項超伝導体  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  や  $\text{UPt}_3$  の純良試料に磁場を[001]方向に印加し磁化測定を行なうと、極低温下ゼロ磁場近傍においてヒステリシス磁化に微小の「とび」（マイクロフラックスジャンプ）が数多く観測され、スピン一重項超伝導体の純良試料の場合と異なる振る舞いを見せる。本研究では、対称性の異なる超伝導体で発生するフラックスジャンプの類似点・相違点等を詳細に調べ、マイクロフラックスジャンプが、超伝導秩序変数の内部自由度から生じる超伝導ドメイン構造に起因している可能性を指摘した。

研究成果の概要（英文）： For the “superclean” single crystals of  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  and  $\text{UPt}_3$  with spin-triplet superconductivity, tiny flux-jumps successively appear in the hysteretic magnetization around zero-field at low temperatures, unlike to the case of “superclean” single crystals in spin singlet superconductors. This suggests that the tiny flux-jumps, which successively appear in the hysteretic magnetization around zero-field, are characteristic of the spin-triplet superconductors with mobile  $d$ -domain which is related to the internal degree of freedom in the order parameter in the spin-triplet superconductors.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：超伝導・磁性

科研費の分科・細目：物理学，物性Ⅱ

キーワード：強相関電子系，低温物性，物性実験，超伝導材料・素子

1. 研究開始当初の背景

$\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  や  $\text{UPt}_3$  はクーパー対が平行スピン対で形成されているスピン三重項超伝導が実現していると考えられている代表的な異方的超伝導体（超伝導転移温度はそれぞれ 1.5 K および 0.55 K）である。したがって、これらの超伝導体のオーダーパ

ラメータは2重に縮退していると考えられており、磁場を[001]方向に印加した場合、それぞれのオーダーパラメータをもつ超伝導相のドメイン構造が磁場とともに変化することが予想されている。純良単結晶試料の実験からも、微小ホール素子による数～数十マイクロメートルスケールの表

面局所磁化測定において、ゼロ磁場近傍にヒステリシス磁化にディップがあることが為ヶ井ら（東大）やE. Shungら（スイス）によって報告されており、この現象は上記のオーダーパラメータのドメイン構造の磁場変化に起因すると考えられているが、詳細については未だ明らかではない。

我々は $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ や $\text{UPt}_3$ の純良単結晶試料に磁場を[001]方向に印加し磁化測定を行なった結果、0.2 K以下の温度においてゼロ磁場近傍でヒステリシス磁化に多段の微小なフラックスジャンプ（マイクロフラックスジャンプ）が起こることを発見した。この現象は、前述の表面局所磁化のディップ構造がバルク全体の磁化では多段のマイクロフラックスジャンプとして出現したものであり、超伝導の対称性に深く関連していると考えられる。一方、このような不連続な磁化のとびは強磁性体においても低温下で観測されており、バルクハウゼン・ジャンプと呼ばれている。スピン三重項超伝導体における量子ドメイン現象に起因すると思われる「マイクロフラックスジャンプ」と強磁性体の磁区ドメインにおける不連続磁化の変化を比較することにより、超伝導対称性について新しい知見が得られるであろう。

一方、スピン一重項超伝導体の場合にもゼロ磁場近傍で多段のフラックスジャンプが観測されている。このようなフラックスジャンプは酸化物高温伝導体などの $d$ 波超伝導体と考えられている系のみならず、 $s$ 波超伝導体においても観測されている。しかし、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ や $\text{UPt}_3$ の場合と比較して、スピン一重項超伝導体の純良単結晶ではそのフラックスジャンプの大きさが格段に大きいという特徴を持つ（スピン一重項超伝導体の多結晶試料の場合、多段のマイクロフラックスジャンプが観測されている例はあるが、純良試料では観測されていない）。さらに、このようなゼロ磁場近傍での多段のフラックスジャンプは、従来の臨界状態モデルを用いた解析では説明できない。

## 2. 研究の目的

スピン三重項超伝導体 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ や $\text{UPt}_3$ の純良単結晶試料に磁場を[001]方向に印加し磁化測定を行なった結果、0.2 K以下の温度においてゼロ磁場近傍でヒステリシス磁化に多段のマイクロフラックスジャンプが起こることがわかった。この現象は、超伝導ドメイン構造に深く関連していると考えられる。一方、スピン一重項超伝導体の純良単結晶試料の場合にもゼロ磁場近傍で多段のフラックスジャンプが観測されてい

るが、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ や $\text{UPt}_3$ の場合と比較して、そのフラックスジャンプの大きさが格段に大きいという特徴を持つ。

対称性の異なる超伝導体で発生するフラックスジャンプの類似点・相違点等を詳細に調べることにより、フラックスジャンプを切り口に超伝導対称性を考慮した新しい磁束系物理を構築する。

## 3. 研究の方法

$f$ 電子系超伝導体（ $\text{UPt}_3$ ,  $\text{UPd}_2\text{Al}_3$ ,  $\text{URu}_2\text{Si}_2$ ,  $\text{CeRu}_2$ ）、Ru酸化物超伝導体（ $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ ）の純良単結晶について極低温領域から超伝導転移温度までの温度範囲でゼロ磁場近傍の精密磁化測定を行なう。測定は、連携研究者の北海道大学大学院理学研究院 網塚浩教授の研究室で $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ 希釈冷凍機内に搭載されたキャパシタンス式ファラデー法磁力計を用いて行なう。この測定方法は測定時に試料の感じる磁場が変化しないため、前述のように、極低温化で超伝導体の真のバルクヒステリシス磁化を測定することを可能とする唯一の方法である。通常フラックスジャンプは熱的不安定性と深い関係があることが知られているので、磁場掃印速度、磁場勾配の関連性を変化させて測定を行なう。特に1 K以下の極低温領域における磁化測定を中心に行なう。

精密磁化測定と並行して、1 K以上の比較的高温領域での弱磁場磁化測定用に、既存の交流磁化およびカンチレバー式磁気トルク測定装置を申請の電磁石対応に改造する。

## 4. 研究成果

スピン一重項超伝導体（ $\text{UPd}_2\text{Al}_3$ ,  $\text{CeRu}_2$ ）、およびスピン三重項超伝導体（ $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ ,  $\text{UPt}_3$ ）の純良単結晶試料につ

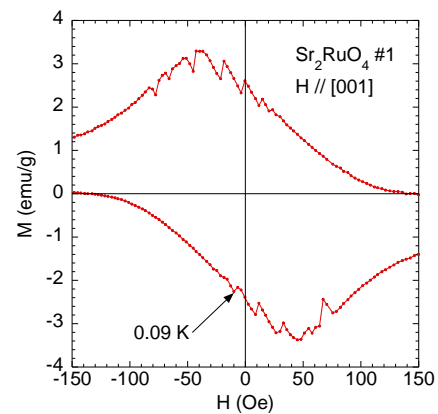


Fig. 1  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  単結晶試料のマイクロフラックスジャンプ

いての磁化測定結果を行った。スピン三重項超伝導体  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  や  $\text{UPt}_3$  に磁場を  $[001]$  方向に印加し磁化測定を行なうと、極低温下においてゼロ磁場近傍でヒステリシス磁化に多段のマイクロフラックスジャンプが起こるが (Figs. 1, 2), この現象は、スピン三重項超伝導体中の超伝導ドメイン構造に深く関連していると考えられる。

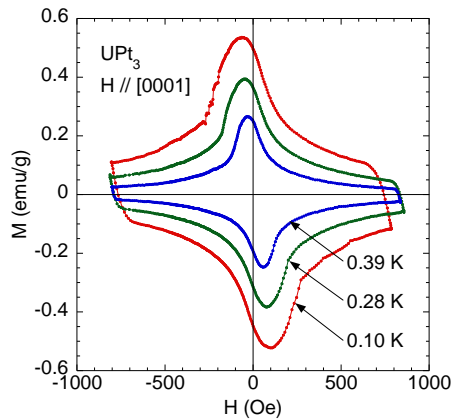


Fig. 2  $\text{UPt}_3$  単結晶試料のマイクロフラックスジャンプ

一方、スピン一重項超伝導体の純良単結晶試料の場合にもゼロ磁場近傍で多段のフラックスジャンプが観測されているが (Fig. 3),  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  や  $\text{UPt}_3$  の場合と比較して、そのフラックスジャンプの大きさが格段に大きいという特徴を持ち、上記のスピン三重項超伝導体のフラックスジャンプと明らかに異なっている。

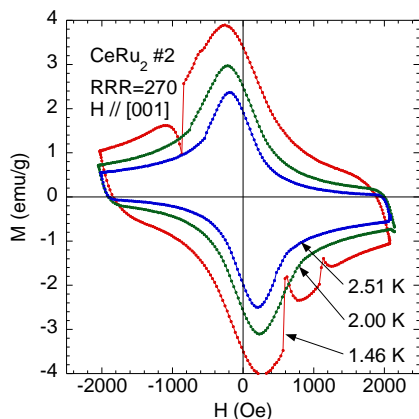


Fig. 3 スピン一重項超伝導体  $\text{CeRu}_2$  単結晶試料のフラックスジャンプ

スピン三重項超伝導体純良単結晶においてマイクロフラックスジャンプが発生する機構について、考えられるシナリオとしては、スピン三重項超伝導体の秩序変数は 2 つの自由度があり、純良単結晶でも試料中に超伝導ドメインが数多く形成されていると考えられるので、フラッ

クスジャンプが発生した場合でも、その伝播はドメイン内に制限され、マイクロフラックスジャンプにとどまるという可能性が考えられる。これは、不均一性のために数多くのドメイン構造をもつ、スピン一重項超伝導体の多結晶試料の場合に、マイクロフラックスジャンプが発生することと矛盾しない。

一方、スピン三重項超伝導体  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  および  $\text{UPt}_3$  において、磁場勾配に関して異なる振る舞いを見ることがわかった。 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の場合、弱磁場でヒステリシス磁化は磁場勾配の大きく影響されるのに対して、 $\text{UPt}_3$  の場合、磁場勾配の大きさには磁化は影響を受けない。 $d$ ベクトルの異方性などが関与している可能性も考えられる。

次に、磁化測定と同時に比較的高温領域での弱磁場磁化測定用を行えるように、申請した電磁石や既存の GM 冷凍機を用いて交流磁化測定装置および磁気抵抗測定装置の立ち上げを行った。抵抗測定装置はほぼシステムが立ち上がったが、熱流入の問題やノイズの問題があり、さらに改良の必要がある。さらに、測定温度範囲を広げるために、最低到達温度を 2 K 以下になるように GM 冷凍機の改良を現在行ない、無負荷の状態でも最低到達温度を 1.8 K まで下げられるようにした。さらに、昨年度申請した電磁石を用いて交流磁化測定装置および磁化測定装置の立ち上げを行ったが、現在熱流入の問題があり、試料を 2 K 以下に保った状態で測定を行なっていない。また、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  や  $\text{UPt}_3$  のマイクロフラックスジャンプ測定と平行して、スピン三重項超伝導体の参照物質として酸化物高温超伝導体  $\text{YBa}_2\text{CuO}_{7-\delta}$  を作製し、その電気抵抗および磁化測定を行った。電気抵抗測定より、90 K で超伝導転移していることは確認できたが、超伝導特性があまり良くなかったため、この物質におけるフラックスジャンプを観測することができなかった。

## 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 6 件)

- ① Y. Shimizu, Y. Ikeda, T. Wakabayashi, Y. Haga, K. Tenya, H. Hidaka, T. Yanagisawa, H. Amitsuka; "Maki Parameter and Upper Critical Field of the Heavy-Fermion Superconductor  $\text{UBe}_{13}$ ", J. Phys. Soc. Jpn., 80, 093701-1-093701-4, 2011, 査読有.  
DOI: 10.1143/JPSJ.80.093701

- ② H. Nobukane, K. Inagaki, K. Ichimura, K. Yamaya, S. Takayanagi, I. Kawasaki, K. Tenya, H. Amitsuka, K. Konno, Y. Asano, S. Tanda; “Parity-violating current-voltage curves in a single domain of  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  superconductors”, *Physica B*, 405, 277-278, 2010, 査読有.  
DOI: 10.1016/j.physb.2009.11.101
- ③ H. Nobukane, K. Inagaki, S. Tsuchiya, Y. Asano, K. Ichimura, K. Yamaya, S. Takayanagi, I. Kawasaki, K. Tenya, H. Amitsuka, S. Tanda; “Transport Properties in a Single Domain of Microscale  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  Single Crystals”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 49, 020209-1-020209-3, 2010, 査読有.  
DOI: 10.1143/JJAP.49.020209
- ④ I. Kawasaki, D. Nishikawa, H. Hidaka, T. Yanagisawa, K. Tenya, M. Yokoyama, H. Amitsuka; “Magnetic properties around quantum critical point of  $\text{CePt}_{1-x}\text{Rh}_x$ ”, *Physica B*, 404, 2908-2911, 2009, 査読有.  
DOI: 10.1016/j.physb.2009.07.139
- ⑤ M. Yokoyama, I. Kawasaki, S. Oinuma, N. Oyama, K. Tenya, H. Amitsuka; “Effects of Co doping on antiferromagnetic structure in  $\text{CeRhIn}_5$ ”, *Physica B*, 404, 2539-2542, 2009, 査読有.  
DOI: 10.1016/j.physb.2009.06.014
- ⑥ H. Nobukane, K. Inagaki, K. Ichimura, K. Yamaya, S. Takayanagi, I. Kawasaki, K. Tenya, H. Amitsuka, K. Konno, Y. Asano, S. Tanda; “Parity violation in a single domain of spin-triplet  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  superconductors”, *Solid State Commun.*, 149, 1212-1215, 2009, 査読有.  
DOI: 10.1016/j.ssc.2009.04.022

[学会発表] (計 11 件)

- ① 清水悠晴, 池田陽一, 天谷健一, 芳賀芳範, 日高宏之, 柳澤達也, 網塚浩; 「重い電子系超伝導体  $\text{UBe}_{13}$  における Ginzburg-Landau パラメーター」, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010. 9. 25, 大阪府立大学.
- ② 中田崇寛, 横山淳, 山路明由美, 天谷健一, 大山研司, 佐藤卓, 吉沢英樹 「 $\text{SrRu}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$  の反強磁性絶縁体相における中性子散乱」, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010. 9. 24, 大阪府立大学.
- ③ K. Tenya, M. Yokoyama, H. Amitsuka, K. Deguchi, Y. Maeno; “Field-direction

dependence of novel high-field phase in  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ ”, International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2010), 2010. 7. 1, Santa Fe (U.S.A.).

- ④ Y. Shimizu, Y. Ikeda, T. Wakabayashi, K. Tenya, Y. Haga, H. Hidaka, T. Yanagisawa, H. Amitsuka; “Magnetization in the superconducting mixed state of the heavy-fermion compound  $\text{UBe}_{13}$ ”, International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2010), 2010. 7. 1, Santa Fe (U.S.A.).
- ⑤ 清水悠晴, 池田陽一, 若林琢巳, 天谷健一, 芳賀芳範, 日高宏之, 柳澤達也, 網塚浩; 「重い電子系超伝導体  $\text{UBe}_{13}$  における基礎物性測定」, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010. 3. 21, 岡山大学.
- ⑥ K. Tenya, Y. Shimura, T. Sakakibara, M. Yokoyama, H. Amitsuka, K. Deguchi, Y. Maeno; “Magnetization and Magnetocaloric Studies on the Spin-Triplet Superconductivity in  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ ”, International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials, 2010. 3. 10, Hamagin Hall “VIA MARE” (Yokohama).
- ⑦ 清水悠晴, 池田陽一, 天谷健一, 芳賀芳範, 日高宏之, 柳澤達也, 網塚浩; 「重い電子系超伝導体  $\text{UBe}_{13}$  における超伝導熱平衡磁化測定」, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 2009. 9. 27, 熊本大学.
- ⑧ 池田陽一, 西川大地, 田中淳, 倉橋洋祐, 日高宏之, 柳澤達也, 横山淳, 天谷健一, 網塚浩; 「 $\text{URu}_2\text{Si}_2$  の圧力下比熱測定 II」, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 2009. 9. 25, 熊本大学.
- ⑨ 延兼啓純, 稲垣克彦, 市村晃一, 山谷和彦, 高柳滋, 川崎郁斗, 天谷健一, 網塚浩, 金野幸吉, 浅野泰寛, 本間龍也, 丹田聡; 「単一ドメイン  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  におけるパリティ破れの発見」, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 2009. 9. 25, 熊本大学.
- ⑩ 若林琢巳, 日高宏之, 柳澤達也, 横山淳, 天谷健一, 網塚浩; 「立方晶希土類化合物  $\text{R}_3\text{Pd}_{20}\text{Ge}_6$  (R = Ce, Pr) における La 希釈効果」, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 2009. 9. 25, 熊本大学.
- ⑪ K. Tenya; “Magnetization Study on the Spin-Triplet Superconductivity in  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ ”, The International Symposium on Novel Spin

Pairing 2009 (NSP2009), 2009. 9. 16, Kyoto University 【招待講演】 .

〔その他〕

ホームページアドレス

<http://rika.shinshu-u.ac.jp/labo/physics/01.html>

アウトリーチ活動

- ① 「サイエンスキャンプ」講師, 2011. 10. 8 – 9, 長野市旧芋井小学校分校.
- ② 「平成 23 年度長野県免許法認定講習」講師, 2011. 8. 17 – 19, 長野県総合教育センター (長野県塩尻市).
- ③ 『2011「青少年のための科学の祭典」上田大会』ブース展示 (未来の電池, おもしろエコ・エネルギーを体験しよう; ロボットを体験しよう), 2011. 8. 6 – 7, 信州大学繊維学部.
- ④ 「サイエンスキャンプ」講師, 2010. 10. 9 – 10, 長野市旧芋井小学校分校.
- ⑤ 『2010「青少年のための科学の祭典」長野大会』ブース展示 (未来の電池を体験しよう; おもしろいエコ・エネルギーのいろいろ), 2010. 7. 31 – 8. 1, 信州大学工学部.
- ⑥ 「サイエンスキャンプ」講師, 2009. 10. 10 – 11, 長野市旧芋井小学校分校.
- ⑦ 『2009「青少年のための科学の祭典」松本大会』ブース展示 (おもしろいエコ・エネルギーのいろいろ), 2009. 8. 1 – 2, 信州大学松本キャンパス.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

天谷 健一 (TENYA KENICHI)

信州大学・教育学部・教授

研究者番号: 70261279

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

網塚 浩 (AMITSUKA HIROSHI)

北海道大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号: 40212576

横山 淳 (YOKOYAMA MAKOTO)

茨城大学・理学部・准教授

研究者番号: 70361285