

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400364

研究課題名(和文) マイクロ磁化測定によるスピン三重項超伝導多重相の安定化機構の解明

研究課題名(英文) Analysis on the multiphase diagram of spin-triplet superconductivity by micromagnetization measurements

研究代表者

天谷 健一 (TENYA, Kenichi)

信州大学・学術研究院教育学系・教授

研究者番号：70261279

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：Sr₂RuO₄は多くの実験結果より、内部自由度を持つスピン三重項2次元超伝導体(転移温度1.5 K)であると考えられている。しかし、一見スピン三重項超伝導と矛盾する結果も得られており、この異常現象の起源は未だ明らかではない。この問題を解決するため、微小試料サイズで高精度の磁化測定を行う目的で、超高精度磁力計の開発・立ち上げを行い、1.5 K以下まで冷却できるように改良した無冷媒冷凍機に取り付け測定を行った。立ち上げた磁力計は、現時点では、ノイズが多いため、精密な磁化を測定できる段階ではない。一方、磁気トルク測定から、Sr₂RuO₄は上部臨界磁場で常伝導状態に1次転移していることがわかった。

研究成果の概要(英文)：From several experimental results, Sr₂RuO₄ is evidenced to be a spin-triplet superconductor (T_c = 1.5 K) with the multiphase structure. The upper critical field, however, seems to be paramagnetically suppressed at low temperatures, somewhat inconsistent with the above pairing scenario. In order to investigate the chiral-superconducting characteristics, we tried to develop a magnetometer which can measure precise magnetization of microscopic samples, and installed it in the refrigerator. In the present stage, we cannot succeed the precise magnetization measurements due to the noise from both electric system and vibration from the refrigerator. From the magnetic torque measurements by capacitive Faraday-force magnetometer, a first-order transition occurs at the upper critical field.

研究分野：低温 磁性 超伝導

キーワード：異方的超伝導 磁化測定

1. 研究開始当初の背景

Sr_2RuO_4 は多くの実験結果より、内部自由度を持つスピン三重項2次元超伝導体(転移温度 1.5 K)であると考えられている。具体的な実験的根拠としては、(a) NMR ナイトシフトが超伝導状態においても不変であること、(b) μSR 測定および光学 Kerr 効果測定によりゼロ磁場において自発磁化が存在し、時間反転対称性が破れていること、(c) 磁場中での磁束格子による磁場分布が1成分の超伝導秩序変数では説明できないこと、(d) カンチレバーを用いた磁気トルク測定により、半磁束量子が観測されていることなどが挙げられる。しかし、磁場を $[001]$ 軸と垂直に印加した場合($H \perp [001]$)の低温領域において、上部臨界磁場直下でもう一段超伝導転移があることや上部臨界磁場が抑制される現象が観測され、一見スピン三重項超伝導と矛盾する結果も得られており、この異常現象の起源は未だ明らかではない。

これまで研究代表者らは、 Sr_2RuO_4 高純度単結晶の超伝導状態での精密磁化測定を行なうことにより、その超伝導対称性を調べてきたが、確定的な結論は得られなかった。これは磁束ピンニングに起因するヒステリシス磁化が熱平衡磁化と同程度存在するために、熱力学量の異常(磁化の折れ)が生データに顕著に現れなかったためである。また、中間磁場での異常が磁化測定以外(例えば超音波弾性定数測定)では見つからなかったためである(後者は弾性定数の異常が小さすぎて観測にかからなかった可能性がある)。したがって、これらの問題を解決するためにはヒステリシス磁化を可能な限り小さく抑え、磁化測定を行う必要があるが、そのためには測定試料サイズを数~数十 μm に抑え、高精度の磁化測定を行わなければならない。

2. 研究の目的

本研究課題においては、カンチレバーを用いた超高精度磁力計(マイクロ磁化測定装置)の開発・立ち上げを行い、得られた Sr_2RuO_4 微小試料のマイクロ磁化と電気抵抗率や他の熱力学量の結果と比較し、 $H \perp [001]$ における超伝導多重相の詳細な構造を明らかにする。さらに、 Sr_2RuO_4 の関連物質のRuを他の元素に置換した化合物、他の強相関電子系超伝導体についてもその物性を調べ、 Sr_2RuO_4 微の超伝導特性を明らかにする。

3. 研究の方法

まず、研究代表者所有の無冷媒冷凍システムを1.4 Kまで冷却可能にできるように改良し、微小試料用超高精度カンチレバー式ファラデー磁力計(マイクロ磁化測定装置)の開発・立ち上げを行う。次に、 Sr_2RuO_4 超伝導転移温度直下での精密磁化測定を行い、 $H \perp [001]$ の低温領域の上部臨界磁場直下で起こる超伝導二段転移や中間磁場での磁化異常を詳細に調べるとともに、電気抵抗率や他

の物理量の結果と比較する。さらに、 Sr_2RuO_4 の関連物質の置換系、他の強相関電子系超伝導体についても同様の測定を行う。

4. 研究成果

(1) 無冷媒冷凍システムの改造

研究代表者所有の無冷媒冷凍システム(到達最低温度 3 K)を電磁石に設置できるように改造し、測定試料交換を容易に行うことができるようにトップローディング型に変更した。また、ヘリウムガスを試料空間に導入後液化させ、それを真空ポンプで引くことにより、無冷媒冷凍システムの到達最低温度を Sr_2RuO_4 の超伝導転移温度の1.5 K以下になるようにした。最低到達温度を維持できる時間は15分程度であった。

(2) カンチレバーを用いた磁力計の立ち上げ

交流磁場勾配中の測定試料に作用する力によって、試料を取り付けたカンチレバーが変位(振動)し、その変位による電気抵抗の変化をロックインアンプで読み取ることににより、試料に作用する力、したがって磁化が求まる。電磁石で発生させる磁場と平行に磁場勾配を発生させるように設計されたコイルを電磁石のポールピースに取り付け(Fig. 1)、そのコイルを発振器に接続し、交流磁場勾配(10 Hz ~ 1000 Hz)を発生させた。交流磁場勾配によって測定試料に働いた力のために、 piezo抵抗が内蔵されたカンチレバーがたわむと、その力をロックインアンプで交流磁場勾配と同じ振動数の piezo抵抗の変化として検出することができ、この変化から測定試料の磁化を見積もることができる。カンチレバーはトップローディング式の試料台に取り付け、測定感度を上げるために、室温部で可変抵抗を用いた Wheatstone bridge回路に接続した。ポールピースに交流磁場勾配用のコイルを取り付けたため、電磁石で発生させることができる磁場は最大 1 kOe 程度になったが、 Sr_2RuO_4 の $[001]$ 軸方向の上部臨界磁場は 0.7 kOe 以下であるので問題ない。

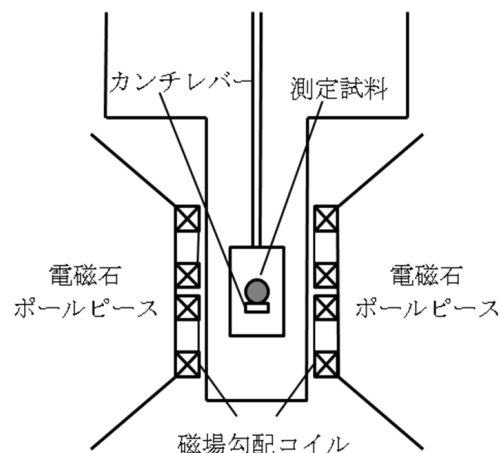


Fig. 1 磁場勾配コイルの配置

(3) カンチレバーを用いた磁力計による測定
立ち上げた装置の感度を調べるために、 ~ 1 mg の鉛の磁化測定を行ったところ、ノイズが大きく、現段階では高精度の磁化測定は行っていない。電気的なノイズを減少させなければならない。また、原理的には交流磁場勾配コイルで発生させた振動数のピエゾ抵抗の変化を検出するので、その他の原因による試料の振動の影響は排除できるはずではあるが、実際は冷凍機による振動の影響が完全には排除できていないことがわかった。現在、冷凍機本体からの振動を減少させるよう、装置の設計を修正している。一方、装置がうまく立ち上がらなかった場合のために、共同研究で行った、キャパシタンス式ファラデー磁力計による磁気トルク測定からは、 Sr_2RuO_4 は上部臨界磁場で常伝導状態に1次転移することが明らかになった。

(4) 関連物質の測定

Sr_2RuO_4 の Ru を他の元素で一部置換した化合物、 Sr_2RuO_4 の関連物質である SrRuO_3 およびその Ru を他の元素で一部置換した化合物 (多結晶) を作製し、その電気抵抗率の温度変化などの測定を行った。

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 5 件)

S. Kittaka, A. Kasahara, T. Sakakibara, D. Shibata, S. Yonezawa, Y. Maeno, K. Tenya, K. Machida, First-order superconducting transition of Sr_2RuO_4 investigated by magnetization and magnetic torque, JOURNAL OF MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS, 査読有, vol.400, 2016, 81-83
DOI: 10.1016/j.jmmm.2015.07.004

M. Yokoyama, H. Mashiko, R. Otaka, Y. Sakon, K. Fujimura, K. Tenya, A. Kondo, K. Kindo, Y. Ikeda, H. Yoshizawa, Y. Shimizu, Y. Kono and T. Sakakibara, Pauli-limited superconductivity and antiferromagnetism in the heavy-fermion compound $\text{CeCo}(\text{In}_{1-x}\text{Zn}_x)_5$, Physical Review B, 査読有, vol.92, 2015, 184509-1-9
DOI: 10.1103/PhysRevB.92.184509

S. Kittaka, A. Kasahara, T. Sakakibara, D. Shibata, S. Yonezawa, Y. Maeno, K. Tenya, K. Machida, Sharp magnetization jump at the first-order superconducting transition in Sr_2RuO_4 , Physical Review B, 査読有, vol.90, 2014, 220502-1-5
DOI: 10.1103/PhysRevB.90.220502

K. Kawasaki, M. Yokoyama, S. Nakano, K. Fujimura, N. Netsu, H. Kawanaka, K. Tenya, Ferromagnetic Cluster-Glass State in Itinerant Electron System $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{RuO}_3$, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, vol.83, 2014, 064712-1-4

DOI: 10.7566/JPSJ.83.064712

M. Yokoyama, K. Fujimura, S. Ishikawa, M. Kimura, T. Hasegawa, I. Kawasaki, K. Tenya, Y. Kono, T. Sakakibara, Possible Evolution of Antiferromagnetism in Zn-Doped Heavy-Fermion Superconductor CeCoIn_5 , Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, vol.83, 2014, 033706-1-4
DOI: 10.7566/JPSJ.83.033706

[学会発表](計 14 件)

大高凌, 横山淳, 益子寛明, 天谷健一, 河野洋平, 清水悠晴, 池田陽一, 吉澤英樹, 榊原俊郎, 重い電子系超伝導体 $\text{Ce}(\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x)\text{In}_5$ の低温物性, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 20 日, 東北学院大学(仙台)

大日方優輝, 神原浩, 天谷健一, 辻井宏之, SrRuO_3 プレーク接合における電気伝導特性, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月 19 日, 関西大学(吹田)

大高凌, 横山淳, 左近優美, 天谷健一, 池田陽一, 吉澤英樹, 河野洋平, 清水悠晴, 榊原俊郎, CeCoIn_5 の Zn 置換系における磁場誘起非フェルミ液体異常, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月 17 日, 関西大学(吹田)

益子寛明, 横山淳, 左近優美, 天谷健一, 近藤晃弘, 金道浩一, 河野洋平, 清水悠晴, 榊原俊郎, 重い電子系超伝導体 $\text{CeCo}(\text{In}_{1-x}\text{Zn}_x)_5$ の温度 磁場相図, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月 17 日, 関西大学(吹田)

藤村健司, 近藤晃弘, 金道浩一, 池田陽一, 吉澤英樹, 川中浩史, 天谷健一, 横山淳, $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{RuO}_3$ のクラスター状態における磁場中電気抵抗, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 24 日, 早稲田大学(東京)

益子寛明, 大高凌, 藤村健司, 左近優美, 池田陽一, 吉澤英樹, 近藤晃弘, 金道浩一, 天谷健一, 横山淳, 重い電子系超伝導体 $\text{CeCo}(\text{In},\text{Zn})_5$ の磁場中比熱および電気抵抗, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 22 日, 早稲田大学(東京)

横山淳, 藤村健司, 川崎郁斗, 天谷健一, 河野洋平, 榊原俊郎, 池田陽一, 吉澤英樹, 近藤晃弘, 金道浩一, 重い電子系超伝導体 $\text{CeCo}(\text{In}_{1-x}\text{Zn}_x)_5$ の上部臨界磁場, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 21 日, 早稲田大学(東京)

笠原聡, 橘高俊一郎, 榊原俊郎, 柴田大輔, 米澤進吾, 前野悦輝, 天谷健一, 町田一成, 超伝導体 SrRuO_4 の磁場方向を精密制御した極低温磁化測定及び磁気トルク測定, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 年 9 月 10 日, 中部大学(春日井)

皆川由貴, 野中麻美, 藤村健司, 川中浩史, 川崎郁斗, 天谷健一, 横山淳, $\text{Sr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{RuO}_3$ における強磁性クラスター

ラス状態，日本物理学会 2014 年秋季大会，
2014 年 9 月 9 日，中部大学（春日井）

藤村健司，川崎郁斗，天谷健一，横山淳，
遍歴電子系 $Sr_{1-x}La_xRuO_3$ の強磁性クラスター
状態における磁気緩和，日本物理学会
2014 年秋季大会，2014 年 9 月 9 日，中部大
学（春日井）

横山淳，藤村健司，川崎郁斗，天谷健一，
河野洋平，榊原俊郎，池田陽一，吉澤英樹，
重い電子系 $CeCoIn_5$ の Zn 置換系における超
伝導と磁性，日本物理学会 2014 年秋季大会，
2014 年 9 月 7 日，中部大学（春日井）

藤村健司，横山淳，根津正謙，竹内伸吾，
皆川由貴，川崎郁斗，川中浩史，天谷健一，
 $Sr_{1-x}La_xRuO_3$ の不均一強磁性クラスターの
性質および輸送特性，日本物理学会第 69 回
年次大会，2014 年 3 月 28 日，東海大学（平
塚）

笠原聡，橘高俊一郎，榊原俊郎，柴田大
輔，米澤進吾，前野悦輝，天谷健一，超伝
導体 Sr_2RuO_4 の磁場方向を精密制御した低
温磁化測定，日本物理学会第 69 回年次大会，
2014 年 3 月 28 日，東海大学（平塚）

竹内伸吾，横山淳，皆川由貴，藤村健司，
川中浩史，川崎郁斗，天谷健一， $SrRuO_3$ の
Mn 置換系における金属絶縁体転移と熱輸
送特性，日本物理学会 2013 年秋季大会，
2013 年 9 月 26 日，徳島大学（徳島）

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.shinshu-u.ac.jp/faculty/educeduca/course/science/labo/physics/01.htht>

6．研究組織

(1)研究代表者

天谷 健一 (TENYA, Kenichi)
信州大学・学術研究院教育学系・教授
研究者番号：70261279

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

横山 淳 (YOKOYAMA, Makoto)
茨城大学・理学部理学科・准教授
研究者番号：70361285