

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2014～2016

課題番号：26287078

研究課題名（和文）スピン三重項超伝導と磁場の新奇相互作用

研究課題名（英文）Unconventional interaction between spin-triplet superconductivity and magnetic fields

研究代表者

米澤 進吾（Yonezawa, Shingo）

京都大学・理学（系）研究科（研究院）・助教

研究者番号：30523584

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究を通し、ルテニウム酸化物 Sr_2RuO_4 がスピン三重項超伝導体であることを支持する新たな実験結果を得ることができた。また、この物質の上部臨界磁場での新奇な一次相転移についても重要な知見が得られた。一方、スピン三重項超伝導体と考えられる新たな物質（ $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ）において、ネマティック超伝導というこれまでに知られていない超伝導状態を発見し、強磁性超伝導体 UCoGe においては超伝導の引力に関係している磁気励起を同定することができた。このように、幅広いスピン三重項超伝導体について研究を展開し、スピン三重項超伝導やそれに関係するトポロジカル超伝導に関する重要な知見を得ることができた。

研究成果の概要（英文）：Through this research program, we obtained firm evidence for spin-triplet superconductivity of Sr_2RuO_4 . We also obtained important information on the unusual first-order superconducting transition recently found in this oxide. Moreover, in the new spin-triplet superconductor candidate $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$, we found a novel superconducting state, namely the "nematic superconductivity", where the rotational symmetry is spontaneously broken in the superconducting gap amplitude. We also determined magnetic excitation that is related to the superconducting pairing glue in the ferromagnetic superconductor UCoGe . Overall, we performed comprehensive research on various spin-triplet superconductors and obtained important bases toward further investigation of the spin-triplet superconductivity, as well as of topological superconductivity, which is closely related to the spin-triplet superconductivity.

研究分野：低温物性実験

キーワード：スピン三重項超伝導 ルテニウム酸化物 ネマティック超伝導 強磁性超伝導 比熱 核磁気共鳴 NMR

1. 研究開始当初の背景

超伝導の発見から 100 年が経過したが、超伝導現象の奥深さは今なお広がりを見せている。その中でも、伝導電子が合成スピン $S=1$ の対を作るスピン三重項超伝導は、通常のスピン一重項超伝導と違い、スピンの自由度も持った新奇な超伝導状態であるため非常に興味深い。また、最近では、超伝導波動関数が非自明なトポロジーをもつ（すなわち「ねじれて」いる）というトポロジカル超伝導が注目を集めているが、スピン三重項超伝導状態はトポロジカル超伝導が実現しやすい舞台としても重要である。

スピン三重項超伝導は UPt_3 や UCoGe などのウラン系超伝導体やルテニウム酸化物超伝導体 Sr_2RuO_4 において実現していると報告されている。これらの候補物質の中でも Sr_2RuO_4 は、常圧で超伝導が起こり比較的高い転移温度 T_c を持つ、非常に良質な単結晶が得られる、常伝導状態の電子状態がよく理解されているなどの理由から、スピン三重項超伝導の本質を理解するのに最適の物質である。

代表者らは、 Sr_2RuO_4 の超伝導-常伝導相転移が強磁場中では一次相転移になることを、磁気熱量効果の実験から 2013 年に発見した。このことは、研究開始当初のスピン三重項超伝導のシナリオでは理解できず、スピン三重項超伝導と磁場の間の未知の相互作用の存在が示唆された。

2. 研究の目的

本研究では、スピン三重項超伝導と磁場の新奇な相互作用に着目し、スピン三重項超伝導体 Sr_2RuO_4 の一次相転移の起源を、マクロおよびミクロな手法から調べることを目的とした。また、他のスピン三重項超伝導物質についても同様の手法で研究を行い、特に磁場中においてスピン三重項超伝導特有の新奇な性質を見出すことを目指した。

3. 研究の方法

本研究では、比熱・磁化率・伝導特性といったマクロ測定と核磁気共鳴法を用いたミクロ測定の二つの観点から、スピン三重項超伝導体を調べ、特に新奇な磁場との相互作用やその起源を明らかにすることを目指した。研究は、 Sr_2RuO_4 を対象の軸としたが、他にもウラン系スピン三重項超伝導物質や、研究期間中にスピン三重項超伝導の実現が報告された $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ にも対象を広げてスピン三重項超伝導が示す新奇現象を探索した。

4. 研究成果

研究期間に得られた成果として以下のものが挙げられる。

(1) Sr_2RuO_4 の超伝導一次相転移

超伝導一次相転移が起こる領域での比熱や磁化測定を行い、一次相転移に特徴的な比熱の発散・磁化の不連続転移・物理量の履歴

現象（ヒステリシス）が生じることを明らかにした（論文⑫⑬；図 1）。このことから、一次相転移が起こっていることが複数の手法で明らかになった。また、圧力中での一次相転移性の変化を調べるための国際共同研究を進めている。

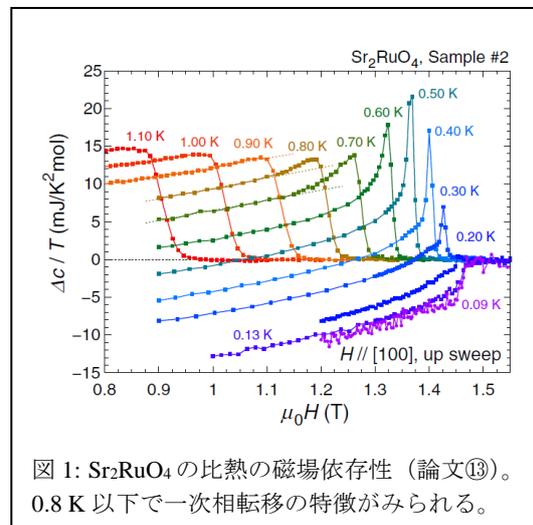


図 1: Sr_2RuO_4 の比熱の磁場依存性（論文⑬）。0.8 K 以下で一次相転移の特徴がみられる。

(2) Sr_2RuO_4 のスピン磁化率の増強

Sr_2RuO_4 の $\text{Sr}\cdot\text{Ru}\cdot\text{O}$ 核の核磁気共鳴 (NMR) 実験を行い、超伝導クーパ対の磁化率を反映するナイトシフトが超伝導相内で減少しないだけでなく、むしろ超伝導相内ではわずかに増加するという非常に興味深い傾向があることを明らかにした（論文②⑦；図 2）。これは、スピン三重項超伝導のクーパ対のスピンがわずかに偏極する傾向にあるという 1970 年代に超流動ヘリウム 3 について提唱された現象が、 Sr_2RuO_4 においてより増強される形で観測されたものと理解できる。

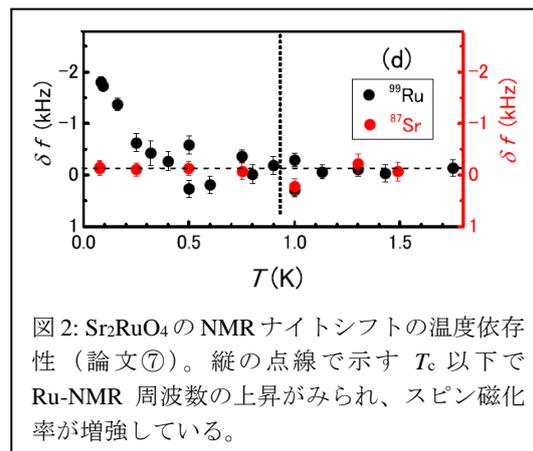


図 2: Sr_2RuO_4 の NMR ナイトシフトの温度依存性（論文⑦）。縦の点線で示す T_c 以下で Ru-NMR 周波数の上昇がみられ、スピン磁化率が増強している。

(3) Sr_2RuO_4 の超伝導相での異常な磁気揺らぎ

さらに NMR 手法を用いてこの物質のスピン-スピン緩和時間 (T_2) 測定実験を行い、 c 軸方向のスピン揺らぎが超伝導相内で増強していることを明らかにした（論文④；図 3）。これはスピン三重項クーパ対のスピン自由度 (d ベクトル) が揺らいでいることを示唆している。

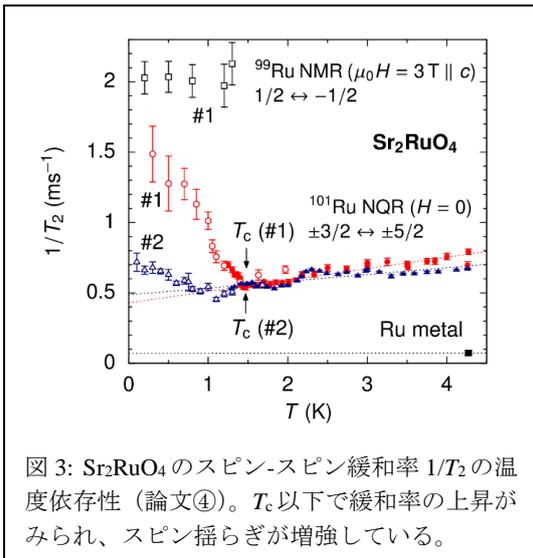


図 3: Sr_2RuO_4 のスピン-スピン緩和率 $1/T_2$ の温度依存性 (論文④)。 T_c 以下で緩和率の上昇がみられ、スピン揺らぎが増強している。

(4) Sr_2RuO_4 と強磁性体 SrRuO_3 ハイブリッド接合の伝導特性

Sr_2RuO_4 に磁場を印加する代わりに、強磁性体 SrRuO_3 の薄膜を Sr_2RuO_4 上に作製することを試み、世界で初めて成功した (論文⑨)。また、この構造を用いたデバイス (図 4) を作製し、その伝導特性を研究した (論文③)。その結果、強磁性体の中にスピン三重項超伝導電子対が直接しみこんでいることを明らかにした。この現象は、 Sr_2RuO_4 の超伝導状態がスピン三重項超伝導でないという説明が難しい。また、この成果は超伝導のスピン自由度を利用したデバイス作成の可能性も切り拓くものである。

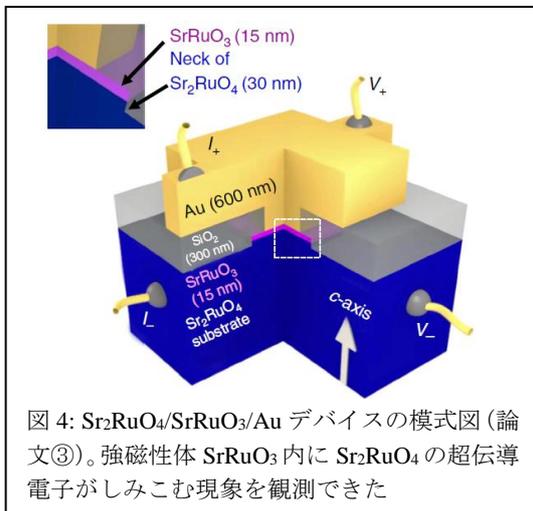


図 4: $\text{Sr}_2\text{RuO}_4/\text{SrRuO}_3/\text{Au}$ デバイスの模式図 (論文③)。強磁性体 SrRuO_3 内に Sr_2RuO_4 の超伝導電子がしみこむ現象を観測できた

(5) Sr_2RuO_4 の磁気渦糸相図

Sr_2RuO_4 の交流磁化率を、様々な温度・磁場過程の下で詳細に調べ、 Sr_2RuO_4 の渦糸相図を明らかにした (論文⑩)。特に、通常とは逆に、低磁場において渦糸が動きやすくなるという相があることを見出し、これが超伝導の強い異方性に起因する新しい渦糸液体状態として理解できることを議論した。

(6) 結晶評価のための磁化率測定装置の開発
汎用物性測定装置 (Quantum Design 社 PPMS) の断熱消磁冷凍機 (ADR) オプションに搭載可能な小型の磁化率測定装置を開発した (論文⑧; 図 5)。従来の方法に比べて評価にかかる時間が激減 (1~2 日 → 6 時間程度) し、研究に不可欠な純良単結晶の育成方法の改良や、研究に使用する結晶の選別などに大きな威力を発揮した。



図 5: 開発した交流磁化率測定装置 (論文⑧) の写真。5 分程度の準備時間で実験が開始でき、100 分程度で 0.1 K に到達できる。

(7) $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ のネマティック超伝導状態の発見

最近、Cu をドーピングした Bi_2Se_3 がスピン三重項超伝導を示すことが明らかになった。我々はこの物質の単結晶試料の比熱を測定し、比熱の磁場方向依存性が 180 度の周期性を示すことを明らかにした (論文①; 図 6)。この物質の結晶構造は 120 度の周期性をもつ三方晶であるため、発見された比熱の振舞いは、結晶の持つ回転対称性を自発的に破っていることになる。比熱の磁場方向依存性は超伝導ギャップ振幅と密接に関係しているため、この結果は超伝導ギャップ振幅が回転対称性を破っていることを意味している。

このように物質が超伝導になることによって自発的に回転対称性が破れるという現象は、液晶のネマティック相との類推から「ネマティック超伝導」と呼ばれるが、この測定結果はその実現をあらゆる超伝導体の中で初めて実証したことになる。

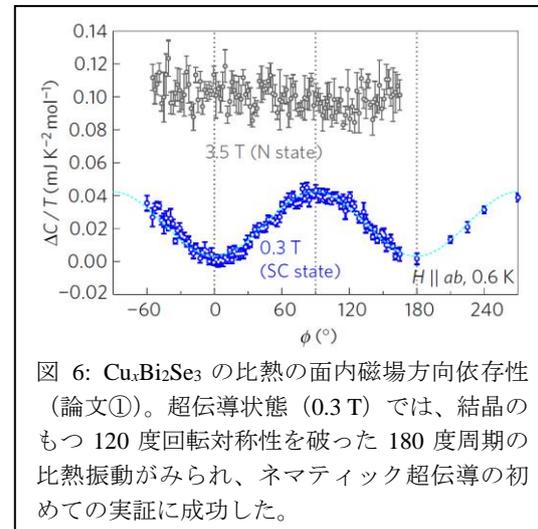


図 6: $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ の比熱の面内磁場方向依存性 (論文①)。超伝導状態 (0.3 T) では、結晶のもつ 120 度回転対称性を破った 180 度周期の比熱振動がみられ、ネマティック超伝導の初めての実証に成功した。

(8) ウラン系物質における強磁性と共存するスピン三重項超伝導

ウラン系物質 UCoGe 、 UGe_2 などでは、強磁性と共存するスピン三重項超伝導状態が実現していると考えられている。 UCoGe の物質の強磁場下での NMR 実験から、磁場によって増強された c 軸方向に一軸異方性を持つ強磁性揺らぎがスピン三重項超伝導を引き起こしていることを明らかにした (論文⑭; 図 7)。

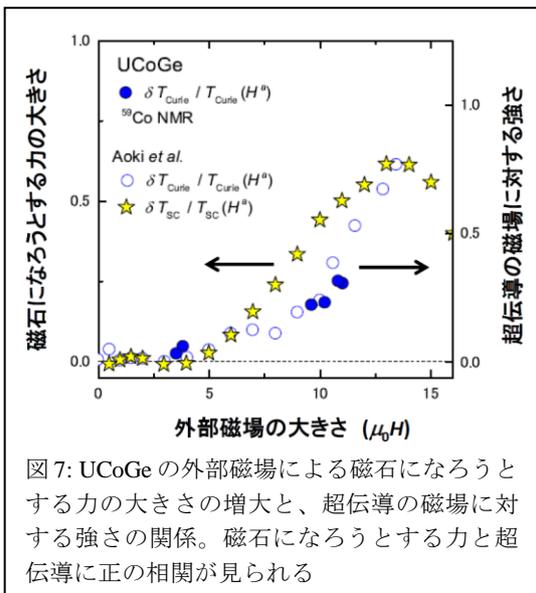


図 7: UCoGe の外部磁場による磁石になろうとする力の大きさの増大と、超伝導の磁場に対する強さの関係。磁石になろうとする力と超伝導に正の相関が見られる

(9) 解説記事等の執筆

スピン三重項超伝導と関係の深いトポロジカル超伝導に関するレビュー記事 (論文⑤)、ウラン系物質におけるスピン三重項超伝導の解説記事 (論文⑪) やレビュー論文 (論文⑬)、またスピン一重項超伝導であるが超伝導一次相転移などの起源を考えるうえで参考になる有機超伝導体に関するレビュー論文 (論文⑥) などを執筆した。

(10) まとめ

これらの研究を通し、 Sr_2RuO_4 がスピン三重項超伝導体であることを強く支持する新たな結果 (論文②・③・④・⑦) を得ることができた。上部臨界磁場近傍にみられる超伝導の抑制と一次相転移についても重要な知見が得られた (論文⑫、⑬) ただし、今回の研究期間中に、この現象の機構を明らかにすることはできなかった。この点については今後の課題である。

一方、スピン三重項超伝導体と考えられる新たな物質 ($\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$) において、ネマティック超伝導というこれまでに知られていない新しい超伝導状態を発見 (論文①) したり、強磁性超伝導体 UCoGe においては超伝導の引力に関係している磁気励起を同定 (論文⑭) したりすることができた。

このように、 Sr_2RuO_4 の研究にとどまらず、幅広いスピン三重項超伝導体についての研

究を展開し、スピン三重項超伝導やそれに関係するトポロジカル超伝導に関する重要な知見を得ることができたと考えている。

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 18 件)

論文は特に明記されているもの以外はすべて【査読あり】

- ① S. Yonezawa, K. Tajiri, S. Nakata, Y. Nagai, Z. Wang, K. Segawa, Y. Ando, Y. Maeno
“Thermodynamic evidence for nematic superconductivity in $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ”
Nature Phys. **13**, 123 (Feb. 2017).
[DOI: 10.1038/nphys3907]
★Nature Phys. 誌の注目論文を紹介する“News and Views”で取り上げられた。
- ② M. Manago, K. Ishida, Z. Mao, Y. Maeno
“Absence of the ^{17}O Knight-shift changes across the first-order phase transition line in Sr_2RuO_4 ”
Phys. Rev. B **94**, 180507(R) (Nov. 2016).
[DOI: 10.1103/PhysRevB.94.180507]
- ③ M. S. Anwar, S. R. Lee, R. Ishiguro, Y. Sugimoto, Y. Tano, S. Kang, Y. Shin, S. Yonezawa, D. Manske, H. Takayanagi, T. W. Noh, Y. Maeno
“Direct penetration of spin-triplet superconductivity into a ferromagnet in $\text{Au/SrRuO}_3/\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ junctions”
Nature Comm. **7**, 13220 (Oct. 2016).
[DOI: 10.1038/ncomms13220]
- ④ M. Manago, T. Yamanaka, K. Ishida, Z. Mao, Y. Maeno
“Anomalous magnetic fluctuations in superconducting Sr_2RuO_4 revealed by ^{101}Ru nuclear spin-spin relaxation”
Phys. Rev. B **94**, 144511 (Oct. 2016).
[DOI: 10.1103/PhysRevB.94.144511]
- ⑤ 【査読無し】 S. Yonezawa
“Bulk Topological Superconductors”
AAPPS Bulletin **26**, 3 (Jun. 2016).
[<http://aappsbulletin.org/myboard/read.php?id=171&Page=1&Board=featurearticles&FindIt=&FindText=>]
- ⑥ D. Jerome, S. Yonezawa
“Novel superconducting phenomena in quasi-one-dimensional Bechgaard salts”
Comptes Rendus Physique **17**, 357 (Dec. 2015).
[DOI: 10.1016/j.crhy.2015.12.003]
- ⑦ K. Ishida, M. Manago, H. Fukazawa, Z.Q. Mao, Y. Maeno, K. Miyake
“Spin polarization enhanced by spin-triplet pairing in Sr_2RuO_4 probed by NMR”
Phys. Rev. B **92**, 100502 (Sep. 2015).
[DOI: 10.1103/PhysRevB.92.100502]
★Editors’ Suggestion に選ばれた。

- ⑧ S. Yonezawa, T. Higuchi, Y. Sugimoto, C. Sow, Y. Maeno
 “Compact AC susceptometer for fast sample characterization down to 0.1 K”
 Rev. Sci. Instrum. **86**, 093903 (Sep. 2015).
 [DOI: 10.1063/1.4929871]
- ⑨ M. S. Anwar, Y. J. Shin, S. R. Lee, S. J. Kang, Y. Sugimoto, S. Yonezawa, T. W. Noh, Y. Maeno
 “Ferromagnetic SrRuO₃ thin-film deposition on a spin-triplet superconductor Sr₂RuO₄ with a highly conducting interface”
 Appl. Phys. Express **8**, 019202 (Jan. 2015).
 [DOI: 10.7567/APEX.8.015502]
- ⑩ D. Shibata, H. Tanaka, S. Yonezawa, T. Nojima, Y. Maeno
 “Quenched metastable vortex state in Sr₂RuO₄”
 Phys. Rev. B **91**, 104514 (Mar. 2015).
 [DOI: 10.1103/PhysRevB.91.104514]
- ⑪ 【査読無し】石田憲二, 服部泰佑, 佐藤憲昭, 出口和彦, 多田靖啓, 藤本聡
 「ウラン系強磁性超伝導体における強磁性ゆらぎが誘起するスピン三重項超伝導」
 固体物理 **50**, 23 (Mar. 2015).
- ⑫ 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 Sr₂RuO₄”
 Phys. Rev. B **90**, 220502(R) (Dec. 2014).
 [DOI: 10.1103/PhysRevB.90.220502]
- ⑬ S. Yonezawa, T. Kajikawa, Y. Maeno
 “Specific-Heat Evidence of the First-Order Superconducting Transition in Sr₂RuO₄”
 J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 083706 (July 2014).
 [DOI: 10.7566/JPSJ.83.083706]
- ⑭ T. Hattori, K. Karube, K. Ishida, K. Deguchi, N. K. Sato, T. Yamamura
 “Relationship between Ferromagnetic Criticality and the Enhancement of Superconductivity Induced by Transverse Magnetic Fields in UCoGe”
 J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 073708 (June 2014).
 [DOI: 10.7566/JPSJ.83.073708]
 ★Editors’ Choice に選ばれた。
- ⑮ T. Hattori, Y. Ihara, K. Karube, D. Sugimoto, K. Ishida, K. Deguchi, N. K. Sato, T. Yamamura
 “Spin-Triplet Superconductivity Induced by Longitudinal Ferromagnetic Fluctuations in UCoGe Probed by ⁵⁹Co NMR Measurement”
 J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 061012 (May 2014).
 [DOI: 10.7566/JPSJ.83.061012]
- through Magnetic-Field-Angle-Resolved Calorimetry”
 North American Calorimetry Conference (CALCON2017)
 2017年7月30日～8月3日(発表日未定), Colorado Springs (USA)
- ② 【招待講演; 発表決定済】 S. Yonezawa
 “Field-angular dependence of the specific heat of Cu_xBi₂Se₃”
 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2017)
 2017年7月19日, (Prague, Czech Republic)
- ③ 【招待講演】 S. Yonezawa
 “Nematic superconducting gap of Cu_xBi₂Se₃ revealed by field-angle resolved calorimetry”
 International Conference on Topological Materials Science (TopoMat2017)
 2017年5月12日, 東工大(東京・目黒区)
- ④ 【招待講演】 S. Yonezawa
 “Nematic superconductivity in Cu_xBi₂Se₃ revealed by field-angle-resolved calorimetry”
 American Physical Society March Meeting 2017
 2017年3月16日, New Orleans (USA)
- ⑤ 【招待講演】 K. Ishida
 “NMR Studies on U-based Ferromagnetic Superconductors”
 APCTP-Quantum Material Symposium 2017
 2017年2月23日, Yongpyong (Korea)
- ⑥ 【招待講演】 K. Ishida
 “NMR Studies on Heavy-Fermion Compounds near Quantum Critical Point”
 Mini Symposium “Progress and New Directions on 4f Electron Materials”
 2016年12月9日, Houston (USA)
- ⑦ 【招待講演】 K. Ishida
 “Superconducting Ruthenate Sr₂RuO₄: NMR/NQR”
 International Symposium on Frontier Superconductivity Research (VI)
 2016年10月28日, Beijing (China)
- ⑧ 【招待講演】 米澤進吾
 「トポロジカル超伝導とネマティック超伝導」
 応用物理学会 超伝導分科会 第53回研究会「新奇超伝導の進展」
 2016年6月13日, 東北大学 東京分室(東京・千代田区)
- ⑨ 【招待講演】 K. Ishida
 “Superconducting Ruthenate Sr₂RuO₄: NMR/NQR”
 The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2016)
 2016年5月12日, Hangzhou (China)
- ⑩ 【招待講演】 S. Yonezawa
 “Calorimetric studies of topological superconductors”
 APW-CEMS Joint Workshop "Highlights of Modern Condensed Matter Physics"
 2016年1月25日, 理研(埼玉・和光市)

[学会発表] (計 76 件)

76件のうち19件は招待講演(Keynote含む)。以下では招待講演のうち主なものを挙げる。

- ① 【招待講演; 発表決定済】 S. Yonezawa
 “Discovery of Nematic Superconductivity

- ⑪ 【招待講演】 K. Ishida
 “Ferromagnetic Fluctuations and Superconductivity in UCoGe”
 International Workshop on Itinerant-Electron Magnetism
 2015年9月25日, 京都大学(京都・京都市)
- ⑫ 【Keynote 招待講演】 S. Yonezawa
 “Recent studies on unconventional superconductivity in (TMTSF)₂X”
 International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity (M²S2015)
 2015年8月24日, Geneva (Switzerland)
- ⑬ 【招待講演】 K. Ishida
 “Ferromagnetic Fluctuations and Superconductivity in UCoGe”
 Symposium on Strongly Correlated Physics and Heavy Fermions
 2015年5月9日, 東京大学(東京・文京区)
- ⑭ 【招待講演】 S. Yonezawa
 “Superconducting phase diagram and pair-breaking mechanism in Sr₂RuO₄”
 International Conference on Topological Quantum Phenomena (TQP2014)
 2014年12月18日, 京都大学(京都・京都市)
- ⑮ 【招待講演】 K. Ishida
 “Extra Magnetization in the Superconducting State of Sr₂RuO₄ Probed with ⁸⁷Sr and ⁹⁹Ru-NMR Measurements”
 International Conference on Topological Quantum Phenomena (TQP2014)
 2014年12月18日, 京都大学(京都・京都市)
- ⑯ 【招待講演】 S. Yonezawa, T. Kajikawa, H. Tanaka, D. Shibata, Y. Maeno
 “Superconducting phase diagram and pair-breaking mechanism in Sr₂RuO₄”
 The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2014)
 2014年7月8日, Grenoble (France)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

特になし。

[その他]

(1) プレスリリース

- ① 京都大学プレスリリース「磁石に浸み込む超伝導電子ペアを実現 – スーパー・スピントロニクスへの布石 –」2016年10月28日(論文③)についてのリリース
http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2016/161026_1.html
- ② 京都大学プレスリリース「液晶のような特定の向きに整列する超伝導状態の発見 – 回転対称性の破れを伴った「ネマティック」超伝導 –」2016年10月14日(論文①)についてのリリース)

http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2016/161011_1.html

(2) 報道関連情報

- ① 雑誌記事掲載「液晶のような超伝導状態の発見と展望」月刊 機能材料 2017年2月号(論文①)についての解説記事)
- ② 新聞報道「京大、磁石内に超伝導電子ペア作製 – 「超スピントロニクス」に一步」日刊工業新聞 2016年10月27日朝刊 27面(論文③)に関する報道)
- ③ 新聞報道「京大、特定方向に整列する超伝導状態を発見」日刊工業新聞 2016年10月13日朝刊 21面(論文①)に関する報道)
- ④ 新聞報道「超伝導の新形態、電子のペア結合に強弱 京大グループ発見」京都新聞 2016年10月12日朝刊 27面(論文①)に関する報道)
- ⑤ Web 媒体等: 論文①に関して、マイナビニュース・日経テクノロジーオンライン等で取り上げられた。

(3) アウトリーチ活動

各年度、5件程度(高校生への夏季授業、オープンキャンパスでのデモ実験、京都府の高校生向け科学イベントの運営委員等)。詳細は以下に記載。

<http://www.ss.scphys.kyoto-u.ac.jp/person/yonezawa/contents/outreach/index.html>

(4) ホームページ等

- ① 固体量子物性研究室 HP
<http://www.ss.scphys.kyoto-u.ac.jp/contents/index.html>
- ② 米澤進吾 HP
<http://www.ss.scphys.kyoto-u.ac.jp/person/yonezawa/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

米澤 進吾 (YONEZAWA, Shingo)
 京都大学・大学院理学研究科・助教
 研究者番号: 30523584

(2) 研究分担者

石田 憲二 (ISHIDA, Kenji)
 京都大学・大学院理学研究科・教授
 研究者番号: 90243196

(3) 連携研究者

無し

(4) 研究協力者

前野 悦輝 (MAENO, Yoshiteru)