

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2013～2017

課題番号：25220710

研究課題名(和文)重い電子の人工制御

研究課題名(英文)Fabrication of Heavy Fermion Superlattices

研究代表者

松田 祐司 (Matsuda, Yuji)

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号：50199816

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 191,300,000円

研究成果の概要(和文)：重い電子系化合物の人工制御、特に重い電子系化合物CeCoIn5、CeRhIn5を含む様々な人工超格子を作製し、量子臨界点の研究や新奇な超伝導状態の研究を行った。特にd波超伝導体CeCoIn5を含むトリコロール超格子により、空間反転対称性の破れを人工的に制御することに成功し。さらにCeCoIn5とスピン密度波化合物CeRhIn5を原子層単位で、積層成長させた人工超格子を作製し、圧力をかけることにより、界面を通して磁気揺らぎを超伝導状態に注入することに成功した。また超高真空中でエピタキシャル成長し清浄表面を持つ、CeCoIn5とCeRhIn5薄膜のトンネル顕微鏡による分光にも成功した。

研究成果の概要(英文)：By fabricating various artificial superlattices made of heavy fermion compounds, we studied the quantum criticality and novel superconducting states in strongly correlated electron systems. In hybrid superlattices consisting of alternating atomic layers of d-wave superconductor CeCoIn5 and antiferromagnetic metal CeRhIn5, we demonstrated that superconducting pairing can be tuned nontrivially by magnetic fluctuations injected through the interface. In tricolor Kondo superlattices, where CeCoIn5 sandwiched by two different nonmagnetic metals, we found that the Rashba spin-orbit interaction induced global inversion symmetry breaking leads to profound changes in the superconducting properties of CeCoIn5. We also succeeded the in-situ STM observation of electronic structure of CeCoIn5 and CeRhIn5 thin films. We found that the films have very wide atomically flat terraces, demonstrating that the Kondo lattices grown MBE provide a new playground for exploring exotic superconducting states.

研究分野：低温物理学

キーワード：重い電子 非従来型超伝導 量子臨界点 界面 スピン密度波 量子スピン液体 鉄系超伝導 ボース  
・アインシュタイン凝縮

## 1. 研究開始当初の背景

重い電子系化合物、銅酸化物高温超伝導体、鉄系高温超伝導体に代表されるいわゆる強相関物質は、新奇超伝導、非フェルミ液体状態や量子臨界現象などの未解明の興味ある量子状態の宝庫である。

f 電子系で実現される重い電子状態では、近藤効果により、究極に強い電子相関を持った金属状態が実現される。これまでの重い電子系化合物はすべて3次元的な電子構造を持っていた。さらに、重い電子系だけでなく上述の強相関電子系化合物では、磁気量子臨界点近傍で超伝導が起こることが多く、そのため磁気揺らぎを媒介とした、非s波の超伝導対称性を持つ非従来型の超伝導状態が実現されると長い間考えられてきた。また、カイラル超伝導などの特異な状態が、重い電子系超伝導体で実現されていることが指摘されていたが、ほとんど理解されていなかった。

鉄系高温超伝導体における超伝導状態に関しては、膨大な研究にもかかわらず未解決の問題であった。例えば、BCS-BEC クロスオーバー領域のような状態は、冷却原子でのみ実現されていたが、鉄系超伝導体で、この状態が実現しているのかどうか、非常に興味を持たれていた。

銅酸化物高温超伝導体における最大の問題は、アンダードープ領域における擬ギャップ形成のメカニズムであった。これに対して膨大な研究があるにもかかわらず、そもそも擬ギャップ形成がクロスオーバーなのか相転移なのかさえはっきりしていなかった。

## 2. 研究の目的

我々は希土類原子を原子1層単位で制御した人工超格子や超薄膜を作製する分子線エピタキシー(MBE)技術を世界で初めて確立した。この独自の技術を用いて、自然界には存在しない強相関電子状態を創製する。これにより新奇な電子状態を創出できるようになるだけでなく、これまで理論的には予測されていたが実現されたことのない新しい超伝導状態を実現できるようになる。さらにバルクの結晶では実現困難であった原子レベルで平坦かつ清浄な表面を実現し、走査トンネル顕微鏡(STM)でその電子状態を「その場観察」する。このように、究極に強い電子相関をもつ人工2次元電子系において種々の異常な電子状態やエキゾチック超伝導状態を実現し、その解明を行う。

CeCu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> は最も古い重い電子系超伝導体であり、初めての非従来型の超伝導発現機構を持つ物質であると考えられてきた。この系は、電子の有効質量が自由電子よりも一千倍近く重くなった電子が超伝導に転移する。CeCu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> は、磁気秩序相からわずかにずれたところに位置しており、臨界的な磁気揺らぎを反映して、様々な物理量の温度依存性が、従来の金属とは大きく異なる振る舞いを示

し、超伝導発現機構は磁気揺らぎによる非従来型のものであり、ギャップ関数にノードを持つと考えられてきた。本研究では、この系の超伝導ギャップ関数を同定し、本当にこの系で非従来型超伝導ギャップ関数が実現されているかを詳細に調べる。

URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> は、これまでカイラルd波超伝導体の可能性が示唆され、トポロジカルな励起により超伝導状態において様々な異常な現象が予想されてきた。本研究では、超伝導揺らぎの効果に、トポロジカル励起に起因した異常が現れるかどうかを解明する。

鉄系超伝導体の超伝導状態の異常性を研究するためにFeSe系化合物に注目する。FeSeでは、電子系が2回対称に歪んだいわゆるネマティック電子状態が実現していることがわかってきた。このネマティック揺らぎと超伝導の関係を解明する。さらに、FeSe系の超伝導状態がどのようにユニークなものであるか、BCS-BEC クロスオーバーの観点から解明する。

銅酸化物高温超伝導体の擬ギャップ形成により、何らかの対称性の破れた状態が出現するかどうかを解明する。特に、回転対称性が破れた状態が実現している可能性が指摘されており、これを熱力学量である磁気トルクの超高感度測定により解明する。

## 3. 研究の方法

まず、MBE装置により重い電子系化合物を一層一層成長させ、異なる重い電子系化合物を積層成長させることにより、様々な人工超格子を作製する。用いた化合物はCeCoIn<sub>5</sub>, CeRhIn<sub>5</sub>, YbCoIn<sub>5</sub>などのいわゆる115系と呼ばれる化合物である。作製した人工超格子は、希釈冷凍機温度までの電気抵抗測定を行い、さらに圧力を印可することにより超伝導性と量子臨界性の制御を行う。

超高真空中でエピタキシャル成長させた重い電子系薄膜はバルクの劈開面よりも広い範囲の原子レベルで平坦な面を持つ。さらに精密に制御された量の不純物も同時に、MBEにより添加できる。本研究において、MBEとSTMを結合させた装置を用いて、超高真空中で結晶成長させた薄膜をSTMにより「その場観察」を行う。特にd波超伝導体CeCoIn<sub>5</sub>に非磁性不純物を入れた薄膜のSTMによる測定を行う。さらにスピン密度波(SDW)化合物CeRhIn<sub>5</sub>において重い電子がどのように形成されるかをSTMにより直接観測する。

CeCu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>の超純良単結晶に対して、比熱、熱伝導、磁場侵入長の測定を極低温まで行うとともに、電子線照射により不純物効果を詳細に調べる。

URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>の超純良単結晶に対して、超伝導転移温度以上で熱電効果、特にネルンスト係数の測定を行う。ネルンスト効果はカイラル超伝導体では、平均場理論よりも遙かに大きな値を示すことが予想されている。

鉄系高温超伝導体FeSeの純良単結晶を化

学気相成長法により作製し、どのような新奇超伝導状態が実現しているのかを、比熱、熱伝導、準粒子干渉、量子振動、磁場侵入長、熱電効果等により詳細に調べる。さらに構造相転移を S 置換により抑制した系において、ネマティック揺らぎと超伝導の関係を明らかにする。さらに強磁場をかけ新奇超伝導相が存在するかどうかを解明する。

銅酸化物高温超伝導体の、アンダードープ領域で形成される擬ギャップが、結晶の 4 回対称性を破る相転移であるかどうかを、超高度磁気トルク測定により解明する。特に、ベクトル超伝導磁石とメカニカルローターを用いて試料の 2 次元面内で精密に磁場を回転させて実験を行う。

## 4. 研究成果

本プロジェクトにより重い電子系化合物、鉄ヒ素系高温超伝導体、銅酸化物高温超伝導体の強相関電子系を代表する 3 つの系において以下の成果をあげることができた。

### A. 重い電子系化合物の研究

#### A-1 人工超格子（近藤超格子）の作製

##### a) ハイブリッド人工超格子

d 波超伝導体 CeCoIn<sub>5</sub> と SDW 金属 CeRhIn<sub>5</sub> を交互に積層成長させた、自然界には存在しないハイブリッド超格子を作製した。これにより磁気量子臨界揺らぎを d 波超伝導に界面を通じて注入することに成功した。界面を通じた d 波超伝導体の対形成の制御はこれが世界で初めての例である。

5 層の厚みをもつ CeCoIn<sub>5</sub> と CeRhIn<sub>5</sub> の超格子を作製し、この系では超伝導とスピン密度波が交互に共存していることを明らかにした。この超格子に静水圧を印可することにより CeRhIn<sub>5</sub> 層のスピン密度波転移を抑制し、量子臨界点に持って行くことが可能である。本研究では、CeRhIn<sub>5</sub> の量子臨界点近傍での量子ゆらぎにより、CeCoIn<sub>5</sub> の超伝導状態が大きく影響を受けることを発見した。特に、超強結合の超伝導状態を創り出すことができることを示した。

##### b) トリコロール人工超格子

CeCoIn<sub>5</sub> を 2 種類の異なる化合物 YbCoIn<sub>5</sub> と YbRhIn<sub>5</sub> で挟んで積層成長させた、トリコロール超格子を作製し、特異な超伝導状態を作り出せることを示した。

このような超格子では、空間反転対称性がグローバルに破れており、また Ce 原子は強いスピン-軌道相互作用を持つことから、フェルミ面にラシュバ分裂が現れる。上下に挟む原子の枚数を変えることにより破れによるラシュバ分裂の大きさが人工的に制御できる。本研究では、このラシュバ分裂により、磁場を超格子に平行にかけたときに上部臨界磁場近傍でヘリカル超伝導状態が生じている可能性を示した。

##### c) 量子臨界人工超格子

スピン密度波化合物で擬 2 次元的な電子構造を持つ CeRhIn<sub>5</sub> を原子層まで薄くした CeRhIn<sub>5</sub>/YbRhIn<sub>5</sub> 超格子を作製し、精密な量子臨界性の制御を行えることを示した。

2 次元化により磁気秩序転移温度を抑制し、さらに磁場をかけることにより精密に量子臨界点を制御できることを示した。これにより次元と磁場で制御した非フェルミ液体状態を実現した。

#### A-2 STM による電子状態のその場観察

MBE により、超高真空中で結晶成長した CeCoIn<sub>5</sub> と CeRhIn<sub>5</sub> 薄膜の電子状態を STM によるその場観察することに成功した。MBE により成長した薄膜の表面は、単結晶を劈開したものよりも遙かに広範囲で、原子レベルで平坦な面を持つことがわかった。

本研究では、d 波超伝導状態に非磁性不純物 Zn を入れその周りでの電子状態の観測に成功した。重い電子系超伝導体における不純物周りの電子状態を直接観測した初めての例となる。CeCoIn<sub>5</sub> では、非磁性不純物の周りに反強磁性的にオーダーしたドロレットが生じると考えられてきた。我々は、Zn 周りのスペクトラムを測定し、反強磁性のドロレットは存在していないという従来の考え方を覆す結果を得た。これは、重い電子系 d 波超伝導体の非磁性不純物周りの電子状態が、銅酸化物高温超伝導体のものとは大きく異なっていることを示している。

さらに、CeRhIn<sub>5</sub> 薄膜の STM によるその場観測にも成功した。SDW 状態の重い電子系化合物の STM 観測は初めての例となる。重い電子系物質においては、これまで磁気秩序とともに重い電子形成が起こらなく近藤ブレークダウンと重い電子と磁気秩序が共存する 2 つのシナリオが提唱され大きな論争となっていた。本研究により、重い電子形成に伴う混成ギャップとスピン密度波形成に伴うギャップが共存していることが示され、後者のシナリオを指示する最も直接的な証拠が得られた。

#### A-3 従来型の s 波対称性を持つ重い電子系超伝導体の発見

CeCu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> の超伝導ギャップ構造は長い間、ノードを持つと考えられ超伝導発現機構は、磁気揺らぎによる非従来型のものであるとされてきた。本研究で我々は、比熱、熱伝導度、磁場侵入長、電子線照射の実験を行い、多角的にこの物質の超伝導状態を研究した結果、超伝導ギャップ関数はフェルミ面のどの位置にもノードを持たないだけでなく、符号反転も伴わない従来型のものであることを明らかにした。

このことは電子間の強いクーロン斥力にも関わらず、オンサイト引力により超伝導が生じることが可能であることを意味しており、「磁気揺らぎを媒介とした非従来型超伝導」という長い間信じられてきた常識に再

考を促すものである。

#### A-4 カイラル超伝導体 URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> の巨大ネルンスト効果

URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> の超純良試料を用いて、超伝導ゆらぎに起因した熱磁気効果を精密に測定した。その結果、ネルンスト効果の大きさは、従来の超伝導ゆらぎの理論により予想される値の 100 万倍に達することを発見した。カイラル超伝導では、超伝導の泡の表面を流れるペア電子によって、伝導電子が散乱されることが理論的に考えられ、観測された巨大な熱磁気効果は、この散乱過程に基づいた新しい理論によって定量的に説明できた。

### B. 鉄系高温超伝導体 FeSe の新奇超伝導状態

#### B-1 BCS-BEC クロスオーバーの発見

FeSe に対し STM による準粒子干渉、量子振動、磁場侵入長、熱電係数の測定を行い、超伝導ギャップの大きさが、電子面でもホール面でもフェルミエネルギーと同じオーダーになっていることを発見し、BCS-BEC クロスオーバー領域にある初めての超伝導体であることを示した。

引き続き、高感度の磁気トルク測定、熱電係数、核磁気共鳴測定を行ない、超伝導転移温度の 2 倍以上高温から通常のガウス型揺らぎを大きく超える"巨大超伝導揺らぎ"が現れることを発見した。BCS-BEC クロスオーバー領域での超伝導は、これまでの物質にない量子凝縮状態であり超伝導凝縮状態についての新しい知見を与えるものと考えられる。

#### B-2 スピン偏極がもたらす新奇超伝導相と時間反転対称性の破れ

BCS-BEC クロスオーバー領域にある超伝導状態では、磁場を印加することで、従来の超伝導では実現しえない大きなスピン偏極を伴った超伝導状態が実現し、非自明な超伝導状態が磁場中で実現することが期待される。本研究では、最大 20 T までの熱伝導および熱ホール効果測定を行い、低温高磁場においてギャップ変調などを伴った何らかの新奇超伝導状態が実現していること明らかにした。この状態は、従来にない大きなスピン偏極に起因する新奇凝縮状態と考えられる。

これとは別にトンネル顕微鏡の測定から、FeSe では結晶の双晶近傍で時間反転対称性が破れている可能性を指摘した。

#### B-3 ネマティック量子臨界点と超伝導

FeSe は約 90 K において Fe-3d 軌道の偏極を伴った正方晶から直方晶への構造相転移をおこし、ab 面内での大きな異方性を生じる「電子ネマティック秩序」を示す。Se サイトを S で置換した FeSe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub> の純良単結晶を作成することに成功し、ネマティック秩序を完全に抑制することによって、この系で非磁性のネマティック量子臨界点が実現されることをネマティック感受率測定により明らか

にした。このネマティック量子臨界点で超伝導ギャップ関数が大きく変化し、ネマティック揺らぎが超伝導と深く関わっていることを明らかにした。

### C. 銅酸化物高温超伝導体の擬ギャップ

超高感度の磁気トルクの面内異方性を測定する装置を開発し、YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-d</sub> と HgBa<sub>2</sub>Cu<sub>0.4</sub>O<sub>4+d</sub> の様々なドーパ量を持つ単結晶試料において測定を行った。その結果擬ギャップ温度 T\*以下で、2 次元 CuO<sub>2</sub> 面内に磁気異方性が出現し、電子が格子の 4 回対称性を破る電子ネマティック状態が実現していることを明らかにした。このことは擬ギャップ形成が相転移現象であることの熱力学的証拠となる。

さらに、YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-d</sub> ではネマティシティの方向が CuO<sub>2</sub> 面の辺方向 (bond nematicity) であるのに対し、HgBa<sub>2</sub>Cu<sub>0.4</sub>O<sub>4+d</sub> では 45 度傾いた対角線方向 (diagonal nematicity) であることを発見した。また後者では電荷密度波転移によりネマティシティが大きく抑制されることがわかり、電荷密度波とネマティシティが競合する秩序であることを明らかにした。

**5. 主な発表論文等** (研究代表者と分担者のグループが筆頭著者のものだけを記す。なお以下の 25 報の論文で、5 報が Highly cited paper (Top1%の引用数, Web of Science) に、4 報が Editors' suggestion に選出された。

[雑誌論文] (計 25 件)

- [1] "Majorana quantization and half-integer thermal quantum Hall effect in a Kitaev spin liquid" Y. Kasahara, T. Ohnishi, Y. Mizumaki, O. Tanaka, Sixiao Ma, K. Sugii, N. Kurita, H. Tanaka, J. Nasu, Y. Motome, T. Shibauchi, and Y. Matsuda *Nature* (to be published).
- [2] "Two distinct superconducting pairing states divided by the nematic end point in FeSe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub>" T. Hanaguri, K. Iwaya, Y. Kohsaka, T. Machida, T. Watashige, S. Kasahara, T. Shibauchi, and Y. Matsuda *Science Advances* (to be published).
- [3] "Tuning the Pairing Interaction in a d-Wave Superconductor by Paramagnons Injected through Interfaces" M. Naritsuka, P. F. S. Rosa, Yongkang Luo, Y. Kasahara, Y. Tokiwa, T. Terashima, T. Shibauchi, F. Ronning, J. D. Thompson, and Y. Matsuda *Phys. Rev. Lett.* **120**, 187002 (2018).
- [4] "In Situ STM Observation of Nonmagnetic Impurity Effect in MBE-grown CeCoIn<sub>5</sub> Films" M. Haze, Y. Torii, S. Kasahara, Y. Kasahara, T. Shibauchi, T. Terashima, and Y. Matsuda *J. Phys. Soc. Jpn.* **87**, 034702 (2018).

- [5] "Abrupt change of the superconducting gap structure at the nematic critical point in  $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$ " Y. Sato, S. Kasahara, T. Taniguchi, X.Z. Xing, Y. Kasahara, Y. Tokiwa, Y. Yamakawa, H. Kontani, T. Shibauchi, and Y. Matsuda, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **115**, 1227-1231 (2018).
- [6] "Emergent Exotic Superconductivity in Artificially Engineered Tricolor Kondo Superlattices" M. Naritsuka, Y. Tokiwa, R. Toda, M. Shimozawa, T. Terashima, T. Shibauchi, Y. Matsuda, and Y. Kasahara, *Phys. Rev. B* **96**, 174512 (2017).
- [7] "Maximizing  $T_c$  by Tuning Nematicity and Magnetism in  $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$  Superconductors" K. Matsuura, Y. Mizukami, Y. Arai, Y. Sugimura, N. Maejima, A. Machida, T. Watanuki, T. Fukuda, T. Yajima, Z. Hiroi, K. Y. Yip, Q. Niu, S. Hosoi, K. Ishida, K. Mukasa, S. Kasahara, S. K. Goh, Y. Matsuda, Y. Uwatoko, and T. Shibauchi, *Nature Commun.* **8**, 1143 (2017).
- [8] "Magnetic and Superconducting Properties of the Heavy-Fermion  $\text{CeCoIn}_5$  Epitaxial Thin Film Probed by Nuclear Quadrupole Resonance" T. Yamanaka, M. Shimozawa, H. Shishido, S. Kitagawa, H. Ikeda, T. Shibauchi, T. Terashima, Y. Matsuda, and K. Ishida, *Phys. Rev. B* **96**, 060507 (2017).
- [9] "Full-Gap Superconductivity Robust against Disorder in Heavy-Fermion  $\text{CeCu}_2\text{Si}_2$ " T. Takenaka, Y. Mizukami, J. A. Wilcox, M. Konczykowski, S. Seiro, C. Geibel, Y. Tokiwa, Y. Kasahara, C. Putzke, Y. Matsuda, A. Carrington, and T. Shibauchi, *Phys. Rev. Lett.* **119**, 077001 (2017).
- [10] "Thermodynamic evidence for a nematic phase transition at the onset of the pseudogap in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ " Y. Sato, S. Kasahara, H. Murayama, Y. Kasahara, E.-G. Moon, T. Nishizaki, T. Loew, B. Keimer, T. Shibauchi and Y. Matsuda, *Nature Phys.* **13**, 1074-1078 (2017).
- [11] "Fully gapped superconductivity with no sign change in the prototypical heavy-fermion  $\text{CeCu}_2\text{Si}_2$ " T. Yamashita, T. Takenaka, Y. Tokiwa, J. A. Wilcox, Y. Mizukami, D. Terazawa, Y. Kasahara, S. Kittaka, T. Sakakibara, M. Konczykowski, S. Seiro, H. S. Jeevan, C. Geibel, C. Putzke, T. Onishi, H. Ikeda, A. Carrington, T. Shibauchi, and Y. Matsuda, *Science Advances* **3**, e1601667 (2017).
- [12] "Quasiparticle Excitations in the Superconducting State of  $\text{FeSe}$  Probed by Thermal Hall Conductivity in the Vicinity of the BCS-BEC Crossover" T. Watashige, S. Arsenijević, T. Yamashita, D. Terazawa, T. Onishi, L. Opherden, S. Kasahara, Y. Tokiwa, Y. Kasahara, T. Shibauchi, H. v. Löhneysen, J. Wosnitza, and Y. Matsuda, *J. Phys. Soc. Jpn.* **86**, 014707 (2017).
- [13] "Giant superconducting fluctuations in the compensated semimetal  $\text{FeSe}$  at the BCS-BEC crossover" S. Kasahara, T. Yamashita, A. Shi, R. Kobayashi, Y. Shimoyama, T. Watashige, K. Ishida, T. Terashima, T. Wolf, F. Hardy, C. Meingast, H. v. Löhneysen, A. Levchenko, T. Shibauchi, and Y. Matsuda, *Nature Commun.* **7**, 12843 (2016).
- [14] "Emergence of Nontrivial Magnetic Excitations in a Spin Liquid State of Kagome Volborthite" D. Watanabe, K. Sugii, M. Shimozawa, Y. Suzuki, T. Yajima, H. Ishikawa, Z. Hiroi, T. Shibauchi, Y. Matsuda, and M. Yamashita, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **113**, 8653 (2016).
- [15] "Dome-shaped magnetic order competing with high-temperature superconductivity at high pressures in  $\text{FeSe}$ " J. P. Sun, K. Matsuura, G. Z. Ye, Y. Mizukami, M. Shimozawa, K. Matsubayashi, M. Yamashita, T. Watashige, S. Kasahara, Y. Matsuda, J.-Q. Yan, B. C. Sales, Y. Uwatoko, J.-G. Cheng, and T. Shibauchi, *Nature Commun.* **7**, 12146 (2016).
- [16] "Nematic Quantum Critical Point without Magnetism in  $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$  Superconductors" S. Hosoi, K. Matsuura, K. Ishida, H. Wang, Y. Mizukami, T. Watashige, S. Kasahara, Y. Matsuda, and T. Shibauchi, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **113**, 8139 (2016).
- [17] **(Review article)** "From Kondo Lattices to Kondo Superlattices" M. Shimozawa, S.K. Goh, T. Shibauchi, Y. Matsuda, *Rep. Prog. Phys.* **79**, 074503 (2016).
- [18] "Tuning of magnetic quantum criticality in artificial Kondo superlattice  $\text{CeRhIn}_5/\text{YbRhIn}_5$ " T. Ishii, R. Toda, Y. Hanaoka, M. Shimozawa, Y. Kasahara, R. Endo, T. Terashima, A. H. Nevidomskyy, T. Shibauchi, and Y. Matsuda, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 206401 (2016).
- [19] "Possible observation of highly itinerant quantum magnetic monopoles in the frustrated pyrochlore  $\text{Yb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ " Y. Tokiwa, T. Yamashita, M. Udagawa, S. Kittaka, T. Sakakibara, D. Terazawa, Y. Shimoyama, T. Terashima, Y. Yasui, T. Shibauchi, Y. Matsuda, *Nature Commun.* **7**, 10807 (2016).
- [20] "Evidence for Time-Reversal Symmetry Breaking of the Superconducting State near Twin-Boundary Interfaces in  $\text{FeSe}$  Revealed by Scanning Tunneling Spectroscopy" T. Watashige, Y. Tsutsumi, T. Hanaguri, Y. Kohsaka, S. Kasahara, A. Furusaki, M. Sigrist, C. Meingast, H. v. Löhneysen, T. Shibauchi, and Y. Matsuda, *Phys. Rev. X* **5**, 031022 (2015).
- [21] "Colossal Thermomagnetic Response in the Exotic Superconductor  $\text{URu}_2\text{Si}_2$ " T. Yamashita, Y. Shimoyama, Y. Haga, T. D. Matsuda, E.

- Yamamoto, Y. Onuki, H. Sumiyoshi, S. Fujimoto, A. Levchenko, T. Shibauchi, and Y. Matsuda *Nature Physics* **11**, 17–20 (2015);
- [22] "Disorder-Induced Topological Change of the Superconducting Gap Structure in Iron Pnictides" Y. Mizukami, M. Konezykowski, Y. Kawamoto, S. Kurata, S. Kasahara, K. Hashimoto, V. Mishra, A. Kreisel, Y. Wang, P. J. Hirschfeld, Y. Matsuda, and T. Shibauchi *Nature Commun.* **5**, 5657 (2014).
- [23] "Field-Induced Superconducting Phase of FeSe in the BCS-BEC Crossover" S. Kasahara, T. Watashige, T. Hanaguri, Y. Kohsaka, T. Yamashita, Y. Shimoyama, Y. Mizukami, R. Endo, H. Ikeda, T. Terashima, S. Uji, T. Wolf, H. v. Löhneysen, T. Shibauchi, and Y. Matsuda *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **111**, 16309 (2014).
- [24] "Controllable Rashba Spin-Orbit Interaction in Artificially Engineered Superlattices Involving Heavy Fermion Superconductor CeCoIn<sub>5</sub>" M. Shimozawa, S. K. Goh, R. Endo, T. Watashige, Y. Mizukami, H. Ikeda, H. Shishido, Y. Yanase, T. Terashima, T. Shibauchi, Y. Matsuda *Phys. Rev. Lett.* **112**, 156404 (2014).
- [25] **(Review article)** "A Quantum Critical Point Lying Beneath the Superconducting Dome in Iron Pnictides" T. Shibauchi, A. Carrington, and Y. Matsuda *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* **5**, 113 (2014).
- 〔学会発表〕(主要招待講演のみ9件)
- [1] "Thermodynamic evidence for a nematic phase transition at the onset of pseudogap in YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>6+d</sub> and HgBa<sub>2</sub>CuO<sub>4+d</sub>" APS March Meeting (アメリカ物理学会) March 2018, Los Angeles, USA.
- [2] "BCS-BEC crossover and exotic superconducting pairing in FeSe" The 28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28) August 2017, Gothenburg, Sweden
- [3] "Thermodynamic evidence for a nematic phase transition at the onset of pseudogap in YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>6+d</sub> and HgBa<sub>2</sub>CuO<sub>4+d</sub>" Order, Fluctuations, and Strong Correlations: New Platforms and Developments July 2017, Kavli Institute, Univ. of California, Santa Barbara, USA
- [4] "BCS-BEC Crossover and Spin-Polarized Superconducting Phase in FeSe" DPG ドイツ物理学会 March, 2017, Dresden, Germany
- [5] "BCS-BEC crossover and highly spin polarized superconducting phase in FeSe" Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS2016) June 2016, Stuttgart, Germany
- [6] "From Kondo lattice to Kondo superlattices: exploring the interface between heavy fermion and normal electrons." International Conference on Strongly Correlated Systems (SCES2016) May 2016, Hangzhou, China
- [7] "Colossal thermomagnetic response in chiral d-wave superconductor URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>" APS March meeting (アメリカ物理学会) March 2016, Baltimore USA,
- [8] "2D confinement of heavy fermions", Materials and Mechanisms of Superconductivity (M2S2015) July 2015, Geneva, Switzerland.
- [9] "Quantum critical point in iron-pnictides" Gordon Research Conference June 2014, Mount Holyoke College, MA, USA
- 〔その他：夏の学校講師〕
- [1] "Physics of iron pnictides" Boulder School for Condensed Matter July 2014, Boulder, Colorado, USA
- [2] "非従来型超伝導体" 第60回物性若手夏の学校 Aug. 2015, 岐阜県
- 〔その他〕  
ホームページ等  
<http://kotai2.scphys.kyoto-u.ac.jp/>

## 5. 研究組織

- (1) 研究代表者  
松田 祐司 (MATSUDA Yuji)  
京都大学大学院理学研究科・教授  
研究者番号：50199816
- (2) 研究分担者  
芝内 孝禎 (SHIBAUCHI Takasada)  
東京大学大学院新領域創成科学研究科 教授  
研究者番号：00251356
- (3) 研究分担者  
花栗哲朗 (HANAGURI Tetsuro)  
国立研究開発法人理化学研究所・研究員  
研究者番号：10425556
- (4) 研究分担者  
寺嶋孝仁 (TERASHIMA Takahito)  
京都大学大学院理学研究科  
物理学・宇宙物理学専攻 教授  
研究者番号：40251326
- (5) 研究分担者  
笠原 成 (KASAHARA, Shigeru)  
京都大学大学院理学研究科・助教  
研究者番号：10425556