

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23340099

研究課題名(和文) Yb化合物における新奇量子凝縮状態の研究

研究課題名(英文) Study of novel quantum states in Yb-based compounds

研究代表者

井澤 公一 (Izawa, Koichi)

東京工業大学・理工学研究科・教授

研究者番号：90302637

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,300,000円

研究成果の概要(和文)：量子臨界点近傍にある物質における量子臨界性および異常な電子状態を理解すること目的とし、Yb系強相関化合物を中心に、極低温、磁場、圧力といった多重極限下における比熱、ゼーベック係数、ネルンスト係数、熱伝導率などの物理量を調べた。その結果、YbCo<sub>2</sub>Zn<sub>20</sub>、YbRh<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>、-YbAlB<sub>4</sub>において、量子臨界点近傍でもウィーデマン・フランツ則が成り立つことを示した。またメタ磁性転移近傍における輸送特性を明らかにした。加えて、比熱とゼーベック定数の比などの新しい手法により、量子臨界点近傍での電子状態を理解するための重要な知見を得た。

研究成果の概要(英文)：In order to understand quantum criticality and anomalous electronic states near a quantum critical point (QCP) in quantum critical materials, we studied the specific heat, Seebeck coefficient, Nernst coefficient, and thermal conductivity of Yb-based strongly correlated electron systems under multi-extreme condition, such as low temperature, high field, and high pressure. Based on these results, we demonstrated the validity of Wiedemann-Franz law even around QCP and also clarified transport properties near metamagnetic transition in YbCo<sub>2</sub>Zn<sub>20</sub>, YbRh<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>, -YbAlB<sub>4</sub>. In addition, by means of the new analysis such as the ratio of the Seebeck coefficient to the specific heat, we succeeded to get crucial information for understanding the electronic states near QCP.

研究分野：低温物理学

キーワード：物性実験 低温物性 量子臨界点 非フェルミ液体 Yb化合物 メタ磁性 強相関電子系

### 1. 研究開始当初の背景

絶対零度において圧力や磁場等のパラメータを変化させることにより引き起こされる相転移、いわゆる量子相転移の近傍では、電子の振る舞いが従来よく知られているものとは異なることが知られている。通常、金属における電子状態は、ランダウのフェルミ液体論で記述されるが、量子相転移点近傍ではそれとは大きく異なる、いわゆる非フェルミ液体と呼ばれる異常な金属状態が実現している。さらに興味深いことは、このような異常金属状態から非従来型超伝導と呼ばれる超伝導状態がしばしば発現しているということである。この非従来型超伝導は、従来のフォノンを媒介とした超伝導とは異なった機構により発現していると考えられており、その機構は未だ理解されていない部分が多い、しかし、この超伝導発現には量子相転移点近傍の異常金属状態が密接に関係していることが示唆されており、その理解が超伝導発現機構を考える上で極めて重要な鍵を握っている。それゆえこれまで Ce 化合物を中心に数多くの研究がなされてきた。

それに対し、本研究で注目している Yb 化合物については、純良な試料を得ることが難しいことから、Ce 化合物に比べそれほど多くの研究はなされてこなかった。4f ホールを 1 つもつ Yb 化合物が、4f 電子を 1 つもつ Ce 化合物と電子-ホール対称の関係にあることを考えると、その基底状態、量子臨界性などについて、両者の対応関係に非常に興味をもたれる。特に(非従来型)超伝導については、これまで多くの Ce 化合物で見つかったのに対し、Yb 化合物ではほとんど見つかってはおらず、その違いの原因は深い謎として未解決のままである。この違いを理解する上で、重要な鍵を握っているものの 1 つが量子臨界性である。この量子臨界性は、これまでスピンゆらぎの理論(SCR 理論)をもとに、実験で得られた物理量の温度依存性から議論されてきた。ところが最近、いくつかの Yb 化合物で SCR 理論では単純に説明できない振る舞いが発見され、それに対して新奇な量子臨界性や新奇量子凝縮相の可能性など興味深い議論がされている。このように Yb 化合物の量子相転移近傍の特異な電子状態は、個々の Yb 化合物における興味深い問題であるだけでなく Ce 化合物をはじめとした他の関連物質における電子状態の統一的理解につながる重要な鍵を含んでいると考えられ、その理解は極めて重要である。

### 2. 研究の目的

本研究では、Yb 化合物における量子臨界性や新奇量子凝縮相の有無などを明らかにすることを目的とし、極低温、高磁場、高圧といった多重極限下における比熱、ゼーベック係数、ネルンスト係数、熱伝導率などの物理量を精密に調べる。その際、従来の議論はもちろんのこと、それに加え次に述べる新た

な着眼点から異常金属状態の理解に取り組む。これまでの研究では、電気抵抗、比熱、NMR 縦磁気緩和率などの物理量の温度依存性、特に温度のベキをもとにした議論が中心であった。しかし温度のベキは、評価する温度範囲や試料の質などに強く依存するため、本質的な特徴を捉えるのが難しいことがある。そこで本研究では、新しい着眼点に基づく取り組みとしてゼーベック係数と電子比熱の比およびヴィーデマン・フランツ比の振る舞いから電子状態を議論することで、その本質を捉えることを目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究は、多重極限下における輸送係数測定と比熱測定の大きく分けて 2 つのテーマからなる。本計画ではこれら 2 つのテーマに対し、まずそれぞれの議論に必要な精度を得るための測定システムの開発および改良を行った。そして構築したシステムを用いて次のような実験を進めた。まず、極低温における比熱、電気抵抗率、ゼーベック係数、ネルンスト係数、熱伝導率を精密に測定した。その後、実験で得られた個々の結果の詳細を議論はもちろんのこと、新たな着眼点に基づく取り組みとしてゼーベック係数と比熱の比、およびヴィーデマン・フランツ比の振る舞いから Yb 化合物の量子臨界性の詳細や量子凝縮相の有無などの議論した。

### 4. 研究成果

本研究で得られた成果は主に以下の 6 つに分けられる。

#### (1) 多重極限下における輸送係数および比熱の測定システムの開発

まず、極低温熱電係数測定システムの高精度化として、ピコボルトメータを採用するとともにそれにあわせて配線、シールド等、システム全体の構成・セッティングの見直しを行った。これにより、従来に比べ 4-5 倍の精度が得られるようになった。

また、高圧下極低温交流法比熱測定システムを構築し、温度計の磁場による影響、熱源の安定性、外来ノイズの影響等の問題を改善し、最終的に高圧下で 40 mK までの極低温で比熱を測定できることを確認した。

#### (2) YbCo<sub>2</sub>Zn<sub>20</sub> の量子臨界点近傍における電子状態の研究

重い電子系物質 YbCo<sub>2</sub>Zn<sub>20</sub> の量子臨界点近傍での電子状態を調べるため、電子状態の変化に敏感な熱電係数および熱伝導率測定を行った。その結果、YbCo<sub>2</sub>Zn<sub>20</sub> のゼーベック係数が 50 mK の極低温で、銅の 10000 倍にも達することが明らかになった。これはこれまで知られている金属で最も大きな値である。この結果は、この物質の輸送係数に寄与する電子の有効質量が増強されていることを示している。これによりこの物質のもつ巨大な低温電子比熱が、局在電子によるものではなく、重い遍歴電子に由来していることを明らか

にすることができた。さらに、磁場中で起こるメタ磁性転移に伴い、電気伝導率、熱電係数といった輸送係数が劇的に変化すること、また、メタ磁性転移点近傍でそれら輸送係数が非フェルミ液体的挙動を示すことも明らかになった。特にネルンスト係数の結果は、本研究で取り組んだ測定システムの高精度化により初めて得られた結果である。

さらに、本研究で見出した  $\text{YbCo}_2\text{Zn}_{20}$  の巨大ゼーベック係数の起源、メタ磁性及びその周辺で見られる輸送係数の非フェルミ液体的挙動をさらに詳しく調べた。その結果、低温・零磁場でのゼーベック係数の増大は、比熱のそれと比べ顕著であること、そしてそれら比熱とゼーベック係数の比  $q$  が、単純金属から強相関系までの幅広い物質で見られる、温度にほぼ依存しない振る舞いとは異なることがわかった。さらに、そのような有効質量の大きな電子状態は、0.3 K 程度の非常に小さなエネルギースケールをもち、磁場の印加により急激に抑制されることから、低磁場におけるゼーベック係数の異常な増大は、この小さなエネルギースケールを持つ電子状態と関係があることがわかった。また、メタ磁性が見られる磁場に達すると、ゼーベック係数の異常な増大は抑えられると同時に比  $q$  は温度と磁場にはほぼ依存しない通常の強相関金属でみられる振る舞いに転じることがわかった。これらの結果は、バンドに依存した電子相関の存在を示唆しており、メタ磁性や非フェルミ液体的挙動との関係に興味をもたれる。

### (3) $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$ の量子臨界性と量子臨界点近傍での電子状態

量子臨界物質  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  の量子臨界点近傍の電子状態を調べるため、輸送係数の精密測定を行った。それまで  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  において量子臨界点近傍でヴィーデマン・フランツ則の破れが報告されていたが、本研究結果から、量子臨界点近傍においてもヴィーデマン・フランツ則は破れてはおらず、同則は成り立っている可能性が高いという事がわかった。これは同物質で提案されていた Kondo break down シナリオで期待される結果とは異なり、同シナリオも含め量子臨界点近傍の電子状態の理解に重大な修正の必要性を示すものである。

### (4) $-\text{YbAlB}_4$ の量子臨界性と量子臨界点近傍での電子状態

量子臨界物質  $-\text{YbAlB}_4$  の量子臨界点近傍でのヴィーデマン・フランツ則の検証を行った。その結果、上述の  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  と同様、 $-\text{YbAlB}_4$  の量子臨界点近傍においてもヴィーデマン・フランツ則が成り立っている事が明らかになった。これまで量子臨界点近傍における異常金属状態としてヴィーデマン・フランツ則が破れた電子状態が理論的に幾つか提案され、その奇抜さゆえ注目を集めていたが、本成果は、そのような可能性を支持しない。この事は、今後量子臨界点近傍の異常金

属状態を考える上での重要な指針となると期待される。

### (5) $\text{Ce}(\text{Ru}_{0.92}\text{Rh}_{0.08})_2\text{Si}_2$ のメタ磁性転移

本研究で対象としている Yb 化合物は 1 つの 4f ホールを持つのに対し、Ce 化合物は 1 つの 4f 電子を持つため、しばしばその対応関係から両者を比較する事でそれらの電子状態の理解がなされてきた。本研究対象の 1 つである Yb 化合物でのメタ磁性を理解するため、参照物質として磁場中で 2 つのメタ磁性転移を示す  $\text{Ce}(\text{Ru}_{0.92}\text{Rh}_{0.08})_2\text{Si}_2$  の熱電係数を調べた。その結果、比熱で観測される互いに似た 2 つのメタ磁性異常は、ゼーベック係数では全く逆の符号を持つ異常として現れる事がわかった。このことは、それぞれのメタ磁性転移の起源が全く異なる可能性が高いことを示しており、Yb 系でのメタ磁性転移の理解のための重要な情報を与えている。

### (6) 1-2-20 系関連物質における熱電係数と電子状態

$\text{YbCo}_2\text{Zn}_{20}$  の発展的取り組みとして、関連物質である  $\text{PrIr}_2\text{Zn}_{20}$  および  $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$  の輸送係数を測定した。両物質はともに低温で多極子秩序およびその秩序相内で超伝導を示す物質として注目されている。その結果  $\text{PrIr}_2\text{Zn}_{20}$  では、 $\text{YbCo}_2\text{Zn}_{20}$  と同様に通常金属の約 10000 倍もの巨大な電子比熱係数が見られるのにも関わらず、ゼーベック係数は通常金属程度であることがわかった。これは一見似た様に見える両物質の遍歴電子状態が全く異なる事を示している。さらに磁場を印加すると通常金属程度であったゼーベック係数が四極子秩序の抑制が起こる臨界点近傍で 2 桁も大きくなっている事が明らかとなった。このようなゼーベック係数の増大は四極子揺らぎに由来している可能性が考えられる。これまで量子臨界性の研究は、磁気双極子に関するものがほとんどであったが、この結果は、それを多極子に拡張するものであり、多極子自由度に由来した電子状態の理解に向けて重要な貢献ができると考えている。

さらにこれら二物質でみられる電気抵抗率の非フェルミ液体的挙動について詳細に調べたところ、 $\text{YbCo}_2\text{Zn}_{20}$  とは異なり、いずれもある単一のパラメータで電気抵抗率がスケールすることを見出した。これはこの系における非フェルミ液体的挙動の背景に単一の物理が存在することを示唆している。さらにそのスケール関数が最近提案されている四極子近藤模型でよく説明できることを見出した。

一方、 $\text{YbCo}_2\text{Zn}_{20}$  の関連物質のもつカゴを Zn ではなく、Al に置き換えた 1-2-20 系である  $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ ,  $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ ,  $\text{PrTa}_2\text{Al}_{20}$  の熱電係数を系統的に測定することで、Al 系と Zn 系の違いを調べた。その結果、Al 系は Zn 系と比べ、伝導電子と f 電子の混成が大きく、それに伴い零磁場においても大きな有効質量を持った遍歴電子が存在するなど、Al 系と Zn 系の違いが強く電子基底状態の違いに起因して

いることがわかった。また,  $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$  ではゼーベック係数の量子振動の測定に成功し, 四極子が絡んだ多体状態が低温で実現している可能性が明らかとなった。

#### 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 13 件)

1. Y.Machida, T.Yoshida, T.Ikeura, K.Izawa, A.Nakama, R.Higashinaka, Y.Aoki, H.Sato, A.Sakai, S.Nakatsuji, N.Nagasawa, K.Matsumoto, T.Onimaru, T.Takabatake, Anomalous Enhancement of Seebeck Coefficient in Pr-Based 1-2-20 System with Non-Kramers Doublet Ground States, *Journal of Physics: Conference Series*, **592**, 012025/1-9 (2015). DOI: 10.1088/1742-6596/592/1/012025, 査読有
2. Y.Kitamura, T.Matsubara, Y.Machida, Y.Onuki, B.Salce, J.Flouquet, K.Izawa, Development of Field Angle Resolved Specific Heat Measurement System for Unconventional Superconductors, *Journal of Physics: Conference Series*, **592**, 012148/1-6 (2015). DOI: 10.1088/1742-6596/592/1/012148, 査読有
3. K.Izawa, Y.Machida, A.Itoh, Y.So, Y.Haga, E.Yamamoto, N.Kimura, Y.Onuki, Y.Tsutsumi, K.Machida, Pairing Symmetry of  $\text{UPt}_3$  Probed by Thermal Transport Tensors, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **83**, 061013/1-8 (2014). DOI: 10.7566/JPSJ.83.061013, 査読有
4. T.Ikeura, T.Matsubara, Y.Machida, K.Izawa, N.Nagasawa, K.T.Matsumoto, T.Onimaru, T.Takabatake, Anomalous Enhancement of Seebeck Coefficient in  $\text{PrIr}_2\text{Zn}_{20}$ , *JPS Conf. Proc.* **3**, 011091/1-5 (2014). DOI: 10.7566/JSPSC.3.011091, 査読有
5. T.Isono, D.Iguchi, T.Matsubara, Y.Machida, B.Salce, J.Flouquet, H.Ogusu, J.Yamaura, Z.Hiroi, and K.Izawa, Understanding of the Temperature-Pressure Phase Diagram of  $\pi$ -Pyrochlore Oxides: A Role of Anharmonicity on Superconductivity, *J. Phys. Soc. Jpn.* **82**, 114708/1-9 (2013). DOI: 10.7566/JPSJ.82.114708, 査読有
6. Y.Machida, K.Tomokuni, K.Izawa, G.Lapertot, G.Knebel, J.-P.Brisson, and J.Flouquet, Verification of the Wiedemann-Franz Law in  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  at a Quantum Critical Point, *Phys. Rev. Lett.* **110**, 236402/1-5 (2013). DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.236402, 査読有
7. Y.Machida, K.Izawa, D.Aoki, G.Knebel, A.Pourret, and J.Flouquet, Magnetic Field Driven Electronic Singularities through Metamagnetic Phenomena: Case of the Heavy

- Fermion Antiferromagnet  $\text{Ce}(\text{Ru}_{0.92}\text{Rh}_{0.08})_2\text{Si}_2$ , *J. Phys. Soc. Jpn.* **82**, 054704/1-6 (2013). DOI: 10.7566/JPSJ.82.054704, 査読有
8. Y.Machida, K.Tomokuni, C.Ogura, K.Izawa, K.Kuga, S.Nakatsuji, G.Lapertot, G.Knebel, J.-P.Brisson, and J.Flouquet, Thermoelectric response near a quantum critical point of  $\pi$ - $\text{YbAlB}_4$  and  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$ : A comparative study, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 156405/1-5 (2012). DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.156405, 査読有
  9. Y.Machida, A.Itoh, Y.So, K.Izawa, Y.Haga, E.Yamamoto, N.Kimura, Y.Onuki, Y.Tsutsumi, K.Machida, Twofold spontaneous symmetry breaking in a heavy fermion superconductor  $\text{UPt}_3$ , *Phys. Rev. Lett.* **108**, 157002/1-5 (2012). DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.157002, 査読有
  10. D.Iguchi, T.Isono, Y.Machida, K.Izawa, B.Salce, J.Flouquet, H.Ogusu, J.Yamaura, Z.Hiroi, Pressure dependence of upper critical field in  $\pi$ -pyrochlore oxides, *J. Phys. Soc. Jpn.* **80**, SA040/1-3 (2011). DOI: 10.1143/JPSJS.80SA.SA040, 査読有
  11. T.Isono, Y.Hara, D.Iguchi, Y.Machida, K.Izawa, S.Tsutsui, T.Matsuoka, Y.Ohishi, B.Salce, J.Flouquet, H.Ogusu, J.-I.Yamaura, Z.Hiroi, Crystal structure and superconductivity of  $\pi$ -pyrochlore oxides under high pressure, *J. Phys. Soc. Jpn.* **80**, SA41/1-3 (2011). DOI: 10.1143/JPSJS.80SA.SA041, 査読有
  12. Y.Machida, C.Ogura, K.Izawa, K.Kuga, S.Nakatsuji, Thermoelectric coefficients of the quantum critical  $\pi$ - $\text{YbAlB}_4$ , *J. Phys. Soc. Jpn.*, **80**, SA088/1-3 (2011). DOI: 10.1143/JPSJS.80SA.SA088, 査読有
  13. Y.Machida, C.Ogura, K.Izawa, K.Kuga, S.Nakatsuji, Thermal transport properties and quantum criticality of heavy fermion  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$ , *J. Phys. Soc. Jpn.* **80**, SA096/1-3 (2011). DOI: 10.1143/JPSJS.80SA.SA096, 査読有

[学会発表](計 38 件)

1. K.Izawa, Phase Diagram in  $\text{PrTr}_2\text{X}_{20}$  System with Non-Kramers Doublet Ground State, Workshop on Recent Developments in the Kondo Problem, 2015年1月9日-10日, 東京大学物性研究所(千葉県), 招待講演
2. K.Izawa, Peculiar Transport Coefficients in Non-Kramers Doublet Compounds  $\text{PrTr}_2\text{X}_{20}$ , 13<sup>th</sup> Bilateral German-Japanese Symposium Interplay of Spin and Orbital Degrees of Freedom in Strongly Correlated Electron Systems, 2014年7月13日-16日, Ringberg Castle (Germany), 招待講演
3. K.Izawa, Wiedemann-Franz Law in

Yb-based Quantum Critical Materials, The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2014), 2014年7月7日-11日, Grenoble (France), 招待講演

4. Y.Machida, T.Ikeura, A.Nakama, R.Higashinaka, Y.Aoki, H.Sato, A.Sakai, S.Nakatsuji, N.Nagasawa, K.T.Matsumoto, T.Onimaru, T.Takabatake, K.Izawa, Anomalous Enhancement of Seebeck Coefficient in Pr-based 1-2-20 System with Non-Kramers Doublet Ground States, The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2014), 2014年7月7日-11日, Grenoble (France), 招待講演

5. K.Izawa, T.Yoshida, T.Ikeura, Y.Machida, T.Onimaru, K.T.Matsumoto, T.Takabatake, Unusual Transport in Pr 1-2-20 System with Non-Kramers Doublet Ground State, New Horizon of Strongly Correlated Physics (NHSCP2014), 2014年6月25日-27日, 東京大学物性研究所(千葉県), 招待講演

6. 吉田太地, 町田洋, 井澤公一, 島田祐樹, 長澤直裕, 鬼丸孝博, 高島俊郎, PrRh<sub>2</sub>Zn<sub>20</sub>の輸送係数の資料依存性, 日本物理学会第70回年次大会, 2015年3月21日-24日, 早稲田大学(東京都)

7. 町田洋, 井澤公一, Woun Kang, Xiao Lin, Kamran Behnia, 有機導体(TMTSF)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub>の極低温ゼーベック係数, 日本物理学会第70回年次大会, 2015年3月21日-24日, 早稲田大学(東京都)

8. 吉田太地, 町田洋, 井澤公一, 島田祐樹, 長澤直裕, 鬼丸孝博, 高島俊郎, 四極子自由度を持つPrRh<sub>2</sub>Zn<sub>20</sub>の特異な輸送特性, 日本物理学会2014年秋季大会, 2014年9月7日-10日, 中部大学(愛知県)

9. 町田洋, 吉田太地, 井澤公一, 島田祐樹, 長澤直裕, 鬼丸孝博, 高島俊郎, PrIr<sub>2</sub>Zn<sub>20</sub>における非フェルミ液体的挙動と温度・磁場相図, 日本物理学会2014年秋季大会, 2014年9月7日-10日, 中部大学(愛知県)

10. K.Izawa, Identifying the Node Position in the Gap Function of UPt<sub>3</sub> in the Brillouin Zone, The International Workshop for Young Researchers on Topological Quantum Phenomena in Condensed Matter with Broken Symmetries 2013, 2013年10月22日-26日, カルチャーリゾートフェストーネ(沖縄), 招待講演

11. K.Izawa, Pairing Symmetry of UPt<sub>3</sub> Probed by Thermal Transport Tensors, The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES 2013), 2013年8月5日-9日, 東京大学(東京都), 招待講演

12. T.Ikeura, T.Matsubara, Y.Machida, K.Izawa, N.Nagasawa, K.Matsumoto,

T.Onimaru, and T.Takabatake, Anomalous Enhancement of Seebeck coefficient in PrIr<sub>2</sub>Zn<sub>20</sub>, The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES 2013), 2013年8月5日-9日, 東京大学(東京都)

13. Y.Machida, K.Izawa, D.Aoki, G.Knebel, A.Pourret, and J.Flouquet, Thermoelectric Study of Metamagnetic Phenomena in Ce(Ru<sub>0.92</sub>Rh<sub>0.08</sub>)<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>, The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES 2013), 2013年8月5日-9日, 東京大学(東京都)

14. K.Izawa, Anomalous Enhancement of Thermoelectric Coefficients in Pr 1-2-20 system, The IMR-ASRC 4th REIMEI International Workshop, いばらき量子ビーム研究センター(茨城), 招待講演

15. 町田洋, 池浦徹, 井澤公一, 長澤直裕, 松本圭介, 鬼丸孝博, 高島敏郎, 電気抵抗率測定から探る PrIr<sub>2</sub>Zn<sub>20</sub> の電子状態, 日本物理学会第69回年次大会, 2014年3月27日-30日, 東海大学(神奈川県)

16. 井澤公一, 軌道の揺らぎとその混成効果: 4f<sup>2</sup>系における特異な輸送現象, 日本物理学会2013年秋季大会, 2013年9月27日-28日, 徳島大学(徳島県)

17. 池浦徹, 松原毅, 町田洋, 井澤公一, 酒井明人, 辻本真規, 中辻知, 中間章浩, 東中隆二, 青木勇二, 佐藤英行, 極低温熱電測定からみる PrT<sub>2</sub>Al<sub>20</sub> (T=Ti, V, Ta) の電子状態, 日本物理学会2013年秋季大会2013年9月27日-28日, 徳島大学(徳島県)

18. 北村康裕, 松原毅, 町田洋, 井澤公一, 大貫惇睦, 空間反転対称性の破れた超伝導体 CeIrSi<sub>3</sub>における圧力比熱の磁場方向依存性, 日本物理学会2013年秋季大会, 2013年9月27日-28日, 徳島大学(徳島県)

19. 多田勝哉, 伊藤淳史, 町田洋, 井澤公一, 芳賀芳範, 山本悦嗣, 木村憲彰, 大貫惇睦, 多重超伝導相をもつ UPt<sub>3</sub>における熱伝導率のスケーリング則と超伝導ギャップ構造, 日本物理学会2013年秋季大会, 2013年9月27日-28日, 徳島大学(徳島県)

20. Y.Machida, A.Itoh, Y.So, K.Izawa, Y.Haga, E.Yamamoto, N.Kimura, Y.Onuki, Low-energy quasiparticle excitation in the multiple superconducting phases of UPt<sub>3</sub>, The IMR-ASRC 3rd REIMEI workshop, 2013年2月18日-19日, 東北大学東京オフィス(東京都), 招待講演

21. Y.Machida, A.Itoh, Y.So, K.Izawa, Y.Haga, E.Yamamoto, N.Kimura, Y.Onuki, Quasi-particle transport in multiple superconducting phases of UPt<sub>3</sub>, Japan-French Workshop on Correlated Electronic Systems, 2012年9月3日-5日, Grenoble (France)

22. K.Izawa, Y.Haga, E.Yamamoto, Y.Machida, A.Itoh, Y.So, N.Kimura,

Y.Onuki, Twofold symmetry breaking in the gap function of  $UPT_3$  probed by the angle-resolved thermal conductivity, M2S 2012-Materials & Mechanisms of Superconductivity Conference, 2012年7月29日-8月3日, Washington (USA)

23. T.Matsubara, T.Isono, D.Iguchi, Y.Machida, K.Izawa, B.Salce, J.Flouquet, H.Ogusu, J.Yamura, Z.Hiroi, Pressure evolution of superconductivity in -pyrochlore oxides, The 19th International Conference on Magnetism with SCES, 2012年8月13日-21日, Busan (Korea)

24. Y.Machida, T.Ikeura, K.Izawa, S.Yoshiuchi, F.Honda, R.Settai, Y.Onuki, Thermoelectric study of the metamagnetic behavior in  $YbCo_2Zn_{20}$ , The 19th International Conference on Magnetism with SCES, 2012年8月13日-21日, Busan (Korea)

25. K.Izawa, Twofold spontaneous symmetry breaking in superconducting  $UPT_3$ , 12<sup>th</sup> Japanese-German Symposium, 2012年7月14日-17日, ラフォーレ修善寺(静岡県), 招待講演

26. K.Izawa, Twofold symmetry breaking in the gap function of  $UPT_3$  probed by thermal conductivity, International conference on topological quantum phenomena, 2012年5月16日-20日, 名古屋大学(愛知県), 招待講演

27. 町田洋, 伊藤淳史, 井澤公一, 芳賀芳範, 山本悦嗣, 木村憲彰, 大貫惇睦, 多重超伝導相をもつ  $UPT_3$  の極低温熱ホール伝導率, 日本物理学会第68回年次大会, 2013年3月26日-29日, 広島大学(広島県)

28. 池浦徹, 町田洋, 井澤公一, 酒井明人, 中辻知, 極低温における  $PrTi_2Al_{20}$  の熱輸送特性, 日本物理学会第68回年次大会, 2013年3月26日-29日, 広島大学(広島県)

29. 町田洋, 井澤公一, 青木大, A.Pourret, J.Flouquet, K.Behnia, 重い電子系  $Ce(Ru_{1-x}Rh_x)_2Si_2$  の極低温熱電応答, 日本物理学会2012年秋季大会, 2012年9月18日-21日, 横浜国立大学(神奈川県)

30. 池浦徹, 松原毅, 町田洋, 井澤公一, 長澤直裕, 松本圭介, 鬼丸孝博, 高島敏郎,  $PrIr_2Zn_{20}$  の極低温における熱輸送特性と磁場-温度相図, 日本物理学会2012年秋季大会, 2012年9月18日-21日, 横浜国立大学(神奈川県)

31. 町田洋, 池浦徹, 井澤公一, 吉内伸吾, 本多史憲, 摺待力生, 大貫惇睦, 重い電子系化合物  $YbCo_2Zn_{20}$  の低温熱電係数, 日本物理学会第67回年次大会, 2012年3月27日, 関西学院大学(兵庫県)

32. 町田洋, 伊藤淳史, 宗義尚, 井澤公一, 芳賀芳範, 山本悦嗣, 木村憲彰, 大貫惇睦, 熱伝導率で見た  $UPT_3$  における超伝導対称性

の変化, 日本物理学会 2011年 秋季大会, 2011年9月24日, 富山大学(富山県)

33. 伊藤淳史, 町田洋, 宗義尚, 井澤公一, 芳賀芳範, 山本悦嗣, 木村憲彰, 大貫惇睦, 磁場中熱伝導率測定による  $UPT_3$  の低エネルギー励起構造の観測, 日本物理学会 2011年秋季大会, 2011年9月24日, 富山大学(富山県)

34. 磯野貴之, 井口大輔, 松原毅, 町田洋, 井澤公一, B.Salce, J.Flouquet, 小楠寛貴, 山浦淳一, 廣井善二, 型パイロクロア酸化物の高圧下における強結合超伝導状態と非調和性の増大, 日本物理学会 2011年秋季大会, 2011年9月24日, 富山大学(富山県)

35. 松原毅, 井口大輔, 磯野貴之, 町田洋, 井澤公一, B.Salce, J.Flouquet, 小楠寛貴, 山浦淳一, 廣井善二, 型パイロクロア酸化物超伝導体の混晶物質  $K_{0.8}Rb_{0.2}Os_2O_6$  における圧力効果, 日本物理学会 2011年秋季大会, 2011年9月24日, 富山大学(富山県)

36. Y.Machida, K.Tomokuni, C.Ogura, K.Izawa, K.Kuga, S.Nakatsuji, S.G.Lapertot, G.Knebel, J.-P.Brisson, J.Flouquet, Comparative study on quantum criticality of  $-YbAlB_4$  and  $YbRh_2Si_2$  via thermal transport measurements, International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2011, 2011年9月2日, Cambridge (UK)

37. Y.Machida, A.Itoh, Y.So, K.Izawa, Y.Haga, E.Yamamoto, N.Kimura, Y.Onuki, Probing the gap symmetry in multiple superconducting phases of  $UPT_3$  by angle-resolved thermal conductivity measurements, International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2011, 2011年9月2日, Cambridge (UK)

38. Y.Morosawa, M.Onizawa, R.Takeda, C.Moriyoshi, Y.Kuroiwa, Y.Machida, K.Izawa, S.Ohara, T.Watanabe, Y.Takano, K.Takase, Heavy fermion like behavior of rare earth oxyarsenide  $(CeO)MnAs$ , International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2011, 2011年9月2日, Cambridge (UK)

〔その他〕

ホームページ等

<http://izawa.ap.titech.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

井澤 公一 (IZAWA KOICHI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：90302637

### (2) 研究分担者

町田 洋 (MACHIDA YO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：40514740