

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年5月30日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23740263

研究課題名（和文） 熱電係数を用いた重い電子系における量子臨界現象の研究

研究課題名（英文） Thermoelectric study of quantum criticality in heavy-fermion metals

研究代表者

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

研究成果の概要（和文）：

熱輸送係数を用いた重い電子系における量子臨界現象の解明を目的として研究を行った。その結果、Yb元素を含む2つの代表的な量子臨界物質 $\beta$ -YbAlB<sub>4</sub>とYbRh<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>の量子臨界点近傍において、極低温下におけるゼーベック係数に非常に対照的な振る舞いを見出した。またYbRh<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>に対する熱伝導率測定から、通常フェルミ液体に期待されるヴィーデマン・フランツ則が量子臨界点において成立していることを明らかにした。これらの結果は、1) 2物質の量子臨界性を同一の起源による統一的な枠組みで理解しようとする理論的な試みに反し、異なる起源によって引き起こされている可能性を指摘した点、2) YbRh<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>の量子臨界点においてヴィーデマン・フランツ則の破れを予測するエキゾチックな理論的提案とは相容れないことを示した点において意義深い。これらの成果は、Physical Review Letters誌に掲載された。

研究成果の概要（英文）：

Quantum critical phenomena of the heavy-fermion materials have been studied by the low-temperature thermoelectric coefficient measurements. As a result, distinct nature of quantum criticality between two representative Yb-based quantum critical materials  $\beta$ -YbAlB<sub>4</sub> and YbRh<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> has been revealed by contrasting behaviors of the Seebeck coefficient near their quantum critical points (QCP). Moreover, a satisfactory of the Wiedemann-Franz law has been verified in YbRh<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> at the QCP. These results place strong constraint on models for the quantum criticality of these materials.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性II

キーワード：強相関系

## 1. 研究開始当初の背景

磁気秩序が磁場や圧力などの外部パラメータによって抑制された結果創出される、絶対零度における2次の相転移点いわゆる量子臨界点(Quantum Critical Point; QCP)近傍では、通常とは異なる金属状態や異方的超伝導などの興味深い物理現象が、近年数多く見出されている。これらの現象には、QCP近傍での臨界的な強い磁気揺らぎが深く関わっていると考えられているが、全容は明らかになっていない。

い。その1つの要因に、量子臨界現象が現れる極低温かつ磁場下あるいは圧力下の極限環境下での精密な物理量の測定が困難であるために、得られる情報が限られていた点にある。また、電子の状態密度についての情報を与える比熱に関しては、極低温では電子の寄与以外が支配的になる場合があり、正確な評価を困難にする点も別の要因として挙げられる。したがって比熱と相補的かつ極限環境下においても精密な測定が可能な物理量に基づいた

量子臨界現象の研究が求められる。

## 2. 研究の目的

このような状況を鑑み、本研究では遍歴した電子の低エネルギー励起の良いプローブとなり得る熱電係数、中でも特にゼーベック係数とそれに加え熱伝導率に着目し、重い電子系における量子臨界現象の解明を目指し研究を行った。

## 3. 研究の方法

研究対象とした物質は、Yb元素を含む重い電子系量子臨界物質の代表例である $\beta\text{-YbAlB}_4$ と $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$ である。 $\beta\text{-YbAlB}_4$ は外部パラメータによるチューニングなしにゼロ磁場、常圧下において量子臨界点のごく近傍に位置していると考えられている。 $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$ はゼロ磁場で反強磁性秩序を示すが、転移温度 $T_N$ が70 mKと低いため、弱い磁場で磁気秩序が抑制され量子臨界点(QCP)に到達する。そのため両物質共に常圧下において、QCP近傍における電子状態の詳細な研究が可能である。これまでの研究からQCP近傍での比熱、電気抵抗率、磁化率の温度依存性が、両物質ともに通常のスピン揺らぎの理論では説明できないことから非従来型の量子臨界物質であると考えられている。上記の物理量の温度依存性のべきが共通しているために、同一の機構によって量子臨界現象が発現していると考え、両物質の量子臨界現象を統一的に理解しようとする理論的な試みがある。また、 $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$ に限ったモデルとしては、近藤ブレークダウンモデルがある。このモデルでは、量子相転移の本質は反強磁性ではなく、近藤効果の臨界的な崩壊にあると考えられており、現在のところ最も有力視されている。この理論に基づいた重要な予測に、QCPにおけるヴィーデマン・フランツ則の破れがあり、その実証がこのモデルの有効性を語る極めて決定的な実験となる。ここで、ヴィーデマン・フランツ則とは熱伝導率 $\kappa$ と電気伝導率 $\sigma$ の比が定数になることを示した法則である。

このような状況を踏まえ、本研究では $\beta\text{-YbAlB}_4$ と $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$ の純良単結晶試料を用いて、極低温下でのゼーベック係数測定からQCP近傍での熱電応答を調べ、両物質の量子

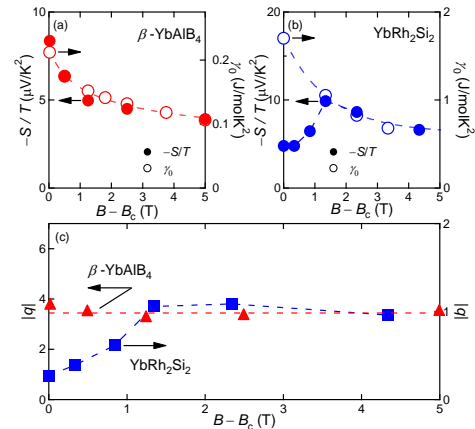


図1: (a)  $\beta\text{-YbAlB}_4$  と (b)  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  のゼーベック係数  $-S/T$  (左軸) と電子比熱係数  $\gamma$  (右軸) の磁場依存性。 (c)  $|q|$  の磁場依存性。

臨界現象が統一的に理解できるか検証した。また $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$ に対して極低温下での熱伝導率および電気抵抗率測定を行い、QCPでのヴィーデマン・フランツ則を検証した。

## 4. 研究成果

### (1) $\beta\text{-YbAlB}_4$ と $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$ の QCP 近傍での熱電応答について

図1に(a)  $\beta\text{-YbAlB}_4$  と (b)  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  のゼーベック係数  $-S/T$  (左軸) と電子比熱係数  $\gamma$  (右軸) の磁場依存性を示す。ここで  $B_c$  は臨界磁場を表し、 $\beta\text{-YbAlB}_4$  では  $B_c = 0$  T、 $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  では  $B_c = 0.66$  T である。図から  $\gamma$  が臨界磁場に向かって急激に増大する量子臨界現象に特徴的な振る舞いが見て取れる。おおざっぱな近似のもとでは、ゼーベック係数も比熱と同様に電子の状態密度に比例する場合があります、従ってその近似のもとでは比熱とゼーベック係数の間に比例関係が期待されることになる。実際、いくつかの系ではこの比例関係が成立していることが示されている。 $\beta\text{-YbAlB}_4$  の  $-S/T$  の振る舞いは  $\gamma$  にきれいにスケールしており、 $B_c$  に向かって急激な増大を示す。これに対して  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  では、 $-S/T$  は高磁場のフェルミ液体では  $\gamma$  にスケールしているものの、QCP近傍では急激に抑制される。このような  $\gamma$  と  $-S/T$  の関係はそれらの比  $|q| \sim |(-S/T)/\gamma|$  をとるとより明確であり、図1(c)に示すように  $\beta\text{-YbAlB}_4$  では  $|q|$  はフェルミ液体状態からQCP近傍まで

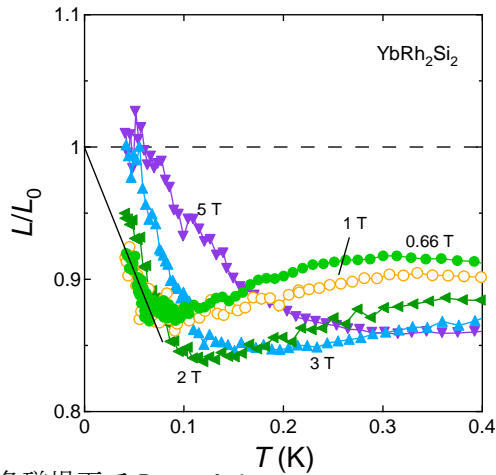


図 2: YbRh<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> の各磁場下でのローレンツ比  $L/L_0$  の温度依存性。

系の状態の変化に関わらずほぼ一定の値をとっているのに対して、YbRh<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>ではフェルミ液体状態ではおよそ一定値であったのがQCP近傍のみ急激に抑制されていることが分かる。つまり、上記の比熱とゼーベック係数の間の比例関係がフェルミ液体状態では両物質ともに成立していたのが、QCP近傍ではYbRh<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>についてのみこの関係が成り立たなくなっている。QCP近傍でのみこのような違いが現れたことは、両者が異なる量子臨界性をもつことを端的に示していると考えられる。実際QCPでの臨界揺らぎの違いによって、比熱とゼーベック係数の比 $q$ の振る舞いに明確な違いが現れるという理論的な指摘もある。本成果は極低温下での精密なゼーベック係数測定から、これまで同一の量子臨界クラスに分類されていた $\beta$ -YbAlB<sub>4</sub>とYbRh<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>が異なるタイプの臨界揺らぎによって支配されている可能性を始めて示した点において意義深い。

(2) YbRh<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>のQCPでのヴィーデマン・フランツ則について

図 2 にYbRh<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>のローレンツ比 $L/L_0 = (\kappa/T) * (\rho/L_0)$ の温度依存性を示す。図から広い温度範囲にわたって $L/L_0$ が1より小さいことが分かる。これは強い非弾性散乱の影響により熱伝導が抑えられていることを示している。しかしながら低温では $L/L_0$ は上昇を始める。興味深いことにこのような振る舞いはフェルミ液体状態の1 T以上だけではなく、反強磁性秩序が完全に抑制された量子臨界点直上の

0.66 Tでも見られる。そのため実線で示すように低温部分のデータを絶対零度まで外挿すると、 $L/L_0$ は実験精度の範囲内で1となる。すなわち量子臨界点においてヴィーデマン・フランツ則が成立していることが分かる。この実験事実は、ヴィーデマン・フランツ則の破れを予言する近藤ブレークダウンモデルが不適合であることを示した点で意義深い。加えて、最近ドレスデンのSteglichらによっても同様の実験がなされ低温の $L/L_0$ の上昇をオーバーダンブしたマグノンの寄与であるとして、この部分を除いた絶対零度への外挿によりヴィーデマン・フランツ則の破れを主張しているが、この解釈が誤りであることを指摘した点においても重要である。低温の $L/L_0$ の上昇がオーバーダンブしたマグノンといった非自明な寄与に由来するのではなく純粋に電子によるものであることは、磁場を増加していくとこの上昇がより高温から起こり、やがては $L/L_0$ が1に到達するようになる系統的な変化から見ても明らかである。すなわちこの $L/L_0$ の上昇は、非弾性散乱が低温に向かって減少していくためにもたらされていることが分かる。磁場を下げQCP近傍に近づいて行くと、エネルギースケールが非常に小さくなるため低温まで非弾性散乱が支配的となり、非常に低温から上昇が起こることになる。今後、この実験事実に基づいたYbRh<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>における量子臨界現象の理論的進展が期待される。

## 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5件)

- ① Y. Machida, K. Tomokuni, K. Izawa, G. Lapertot, G. Knebel, J.-P. Brison, and J. Flouquet, "Verification of the Wiedemann-Franz Law in YbRh<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> At a Quantum Critical Point", *Physical Review Letters*誌に掲載決定, 査読有り
- ② 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 Ce(Ru<sub>0.92</sub>Rh<sub>0.08</sub>)<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>", *Journal of the Physical Society of Japan* **82**, 054704 (2013), 査読有り

- ③ Y. Machida, K. Tomokuni, C. Ogura, K. Izawa, K. Kuga, S. Nakatsuji, G. Lapertot, G. Knebel, J.-P. Brison, and J. Flouquet, “Thermoelectric Response Near a Quantum Critical Point of  $\beta$ -YbAlB<sub>4</sub> and YbRh<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>: A Comparative Study”, *Physical Review Letters* **109**, 156405 (2012), 査読有り
- ④ Y. Machida, A. Itoh, Y. So, K. Izawa, Y. Haga, E. Yamamoto, N. Kimura, Y. Onuki, Y. Tsutsumi, and K. Machida, “Twofold Spontaneous Symmetry Breaking in the Heavy-Fermion Superconductor UPt<sub>3</sub>”, *Physical Review Letters* **108**, 157002 (2012), 査読有り
- ⑤ L. Balicas, S. Nakatsuji, Y. Machida, and S. Onoda, “Anisotropic Hysteretic Hall Effect and Magnetic Control of Chiral Domains in the Chiral Spin States of Pr<sub>2</sub>Ir<sub>2</sub>O<sub>7</sub>”, *Physical Review Letters* **106**, 217204 (2011), 査読有り

[学会発表] (計5件)

- ① 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<sub>3</sub>の極低温熱ホール伝導率”, 日本物理学会年次大会、2013年3月29日、広島大学
- ② 町田洋, 井澤公一, 青木大, A. Pourret, J. Flouquet, K. Behnia, “重い電子系Ce(Ru<sub>1-x</sub>Rh<sub>x</sub>)<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>の極低温熱電”, 日本物理学会秋季大会、2012年9月20日、横浜国立大学

- ③ Y. Machida, T. Ikeura, K. Izawa, S. Yoshiuchi, F. Honda, R. Settai, and Y. Onuki, “Thermoelectric study of the metamagnetic behavior in YbCo<sub>2</sub>Zn<sub>20</sub>”, ICM 2012, 2012/07/09, Busan, Korea
- ④ 町田洋, 池浦徹, 井澤公一, 吉内伸吾, 本多史憲, 摂待力生, 大貫惇睦, “重い電子系化合物YbCo<sub>2</sub>Zn<sub>20</sub>の低温熱電係数”, 日本物理学会年次大会、2012年3月27日、関西学院大学
- ⑤ Y. Machida, K. Tomokuni, C. Ogura, K. Izawa, K. Kuga, S. Nakatsuji, G. Lapertot, G. Knebel, J.-P. Brison, and J. Flouquet, “Comparative Study on Quantum Criticality of  $\beta$ -YbAlB<sub>4</sub> and YbRh<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> via Thermal Transport Measurements”, SCES 2011, 2011/09/02, Cambridge, UK

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：