

## 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 31 日現在

機関番号：24506

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23740276

研究課題名（和文）イッテルビウム化合物における新規 4f 電子物性の研究

研究課題名（英文）Physical Properties of Novel 4f electrons in ytterbium-based compounds

研究代表者

小山 岳秀 (KOYAMA TAKEHIDE)

兵庫県立大学・大学院物質理学研究科・助教

研究者番号：30397666

研究成果の概要（和文）：大きな低温電子比熱係数をもつ Yb 化合物の 4f 電子状態を YbPtSb を対象として NMR 実験により研究した。高温領域で 4f 電子は局在している。しかし、10 K で動的な物理量が明確な異常を示し、それ以下の温度では高温領域とは大きく異なる温度変化を示すことを見出した。しかし、静的な物理量では 10 K での異常な観測されなかった。また、異常を示す温度に磁場依存性はない。YbPtSb では 0.4 K 以下で磁気秩序するがそのときの磁気モーメントの大きさは非常に小さいことが報告されている。本研究で見出した、10 K 以下の状態がこの小さな磁気モーメントの形成と関係しているかどうかは今後解明されるべき課題である。

研究成果の概要（英文）：In order to investigate an electronic state in Yb-based compounds with large low-temperature specific heat, we performed NMR measurement in the half-Heusler compound YbPtSb. The characteristics of localized 4f spins were observed at high temperatures. We found that the dynamical electronic properties change at around 10 K, which were observed as anomalies in the nuclear spin-lattice relaxation rate and the nuclear spin-spin relaxation rate. However, any anomalies were detected in static properties such as Knight shift and a specific heat. This unusual low-temperature state may be associated with the formation of the small magnetic moment which observed in the magnetically ordered state below 0.4 K.

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 | 3,200,000 | 960,000 | 4,160,000 |

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物性 II

キーワード：イッテルビウム化合物、重い電子系、NMR

## 1. 研究開始当初の背景

強相関 4f 電子系化合物研究の分野では 4f 電子を一つもつセリウム (Ce) 化合物の研究が古くから盛んであった。しかし近年、複数の 4f 電子を持つイッテルビウム (Yb) 化合物

においても重い電子系超伝導体、価数揺動、量子臨界点近傍などの多彩な物性が見つかり注目を集めている。

## 2. 研究の目的

Yb 化合物の新規物性のひとつとして Ce 化合物よりも 10 倍程度大きな低温電子比熱係数をもつ物質が発見されていることがある。この物性について結晶学的自由度、近藤効果の観点から明らかにすることを目的とする。

### 3. 研究の方法

大きな低温電子比熱係数をもつ YbPtSb を対象物質とし核磁気共鳴(NMR)実験により Yb イオンがもつ 4f 電子の静的、動的な状態を調べる。また、同じような大きな低温電子比熱係数をもつ YbCo<sub>2</sub>Zn<sub>20</sub> の研究結果と比較し、系統的な理解を図る。

### 4. 研究成果

#### (1) YbPtSb の電子状態

YbPtSb の NMR 実験により 10K 付近で 4f 電子の動的な状態が大きく変化することを見出した。高温側では Yb の 4f 電子は局在し、それぞれの間の相互作用が弱い状態で独立に揺らいでいる。しかし、通常は温度変化しない物理量である核スピン-スピン緩和率  $1/T_2$  が 10K で大きなピークをとり、それと同様に核スピン-格子緩和率  $1/T_1$  も 10K 以下では高温領域とは明らかに異なった振舞いをする事が分かった。測定周波数、磁場を変化させても  $1/T_2$  がピークをとる温度はほとんど変化しない。興味深いことに、この変化は磁化率やナイトシフトという静的な物理量には現れず、 $1/T_1$ 、 $1/T_2$ 、 $\mu$ SR のような動的な物理量のみにも現れる異常な状態である。10K 以下の詳細な測定を試みたが、YbPtSb 特有の結晶構造により、Pt 核や Sb 核は Yb イオンの 4f 電子の影響を強く受けるため低温でのこれらの核の NMR 信号強度が弱くなり、この状態の解明には至らなかった。YbPtSb は 0.4K 以下で磁気秩序するがそのときの磁気モーメントの大きさは非常に小さいことが  $\mu$ SR 実験から報告されている。今回見出した、10K 以下の状態がこの小さな磁気モーメントの形成機構と関係しているかどうかは今後解明されるべき課題である。

同じような大きな低温電子比熱係数をもつ YbCo<sub>2</sub>Zn<sub>20</sub> はその電子状態が磁場によって変化することが同時に進めている研究からわかった。しかし YbPtSb での状態は磁場によって明確な変化は見られず、YbCo<sub>2</sub>Zn<sub>20</sub> の大きな電子比熱形成機構とは異なっていると考えられる。

#### (2) 価数揺動物質 Yb<sub>2</sub>Ni<sub>12</sub>P<sub>7</sub> の電子状態

4f 電子の遍歴性の強い系として価数揺動物質である Yb<sub>2</sub>Ni<sub>12</sub>P<sub>7</sub> の研究も行った。単結晶と粉末試料の両方を用いた測定により、小さな単結晶では分からなかった、磁化、揺らぎの異方性を明らかにした。今後、これらの研究を複数の 4f 電子をもつ系に拡張して、新奇

な 4f 電子状態について調べていく。

### 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 11 件)

(1) T. Koyama, Y. Ozaki, K. Ueda, T. Mito, T. Kohara, T. Waki, Y. Tabata, C. Michioka, Y. Yoshimura, M.-T. Suzuki, and H. Nakamura,

“Observation of the partial Fermi Surface Quenching in the Noncentrosymmetric Superconductor Mo<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>C”

Journal of Physical Society of Japan, 査読有、Vol. 81 Suppl. B, 2012, SB008 1-5, DOI: 10.1143/JPSJS.81SB.SB008

(2) T. Koyama, Y. Ozaki, K. Ueda, T. Mito, T. Kohara, T. Waki, Y. Tabata, and H. Nakamura,

“Phase transition in the normal state of the non-centrosymmetric superconductor Mo<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>C”、Journal of Physics:Conference Series, 査読有、Vol. 391, 2012, 012097 1-4,

DOI: 10.1088/1742-6596/391/1/012097

(3) T. Mito, T. Koyama, K. Nakagawara, T. Ishida, K. Ueda, T. Kohara, K. Matsubayashi, Y. Saiga, K. Munakata, Y. Uwatoko, M. Mizumaki, N. Kawamura, B. Idzikowski, and M. Reiffers,

” Mechanism of Field Induced Fermi Liquid State in Yb-Based Heavy-Fermion Compound: X-ray Absorption Spectroscopy and Nuclear

Magnetic Resonance Studies of YbCo<sub>2</sub>Zn<sub>20</sub>”、Journal of Physical Society of Japan, 査読有、Vol. 81, 2012, 033706 1-4,

DOI: 10.1143/JPSJ.81.033706

(4) T. Ishida, T. Mito, K. Nakagawara, T.

Koyama, K. Ueda, T. Kohara, K. Matsubayashi, Y. Saiga, K. Munakata, and Y. Uwatoko, "NMR Studies of Yb-Based Heavy Fermion Compound  $\text{YbCo}_2\text{Zn}_{20}$ " Journal of Physical Society of Japan、査読有、Vol. 81 Suppl. B、2012、SB061 1-4、  
DOI ; 10.1143/JPSJS.81SB.SB061

(5) T. Mito, M. Hattori, G. Motoyama, Y. Sakai, T. Koyama, K. Ueda, T. Kohara, M. Yokoyama and H. Amitsuka, " NMR and NQR investigations of local symmetry in the hidden order phase of  $\text{URu}_2\text{Si}_2$ "、Journal of Physics: Conference Series、査読有、Vol. 391、2012、012044 1-4、  
DOI: 10.1088/1742-6596/391/1/012044

(6) K. Nishiyama, T. Mito, Y. Kujirai, T. Koyama, K. Ueda, T. Kohara, K. Takeuchi, H. Akutsu, J. Yamada, A. Kornilov, V. M. Pudalov and J. S. Qualls, "  $^{77}\text{Se}$ -NMR study of quasi-one dimensional organic conductor  $(\text{TMTSF})_2\text{X}$ "、Journal of Physics:Conference Series、査読有、Vol. 344、2012、012026 1-4、  
DOI: 10.1088/1742-6596/344/1/012026

(7) T. Koyama, Y. Ozaki, K. Ueda, T. Mito, T. Kohara, T. Waki, Y. Tabata, C. Michioka, K. Yoshimura, M.-T. Suzuki, and H. Nakamura, " Partial gap opening on the Fermi surface of the noncentrosymmetric superconductor  $\text{Mo}_3\text{Al}_2\text{C}$ "、Physical Review B、査読有、Vol. 84、2011、212501 1-4、  
DOI: 10.1103/PhysRevB.84.212501

(8) T. Koyama, M. Abe, T. Mito, K. Ueda, T. Kohara, and H. S. Suzuki, " NMR Studies of Half-Heusler Type Compounds  $\text{YbPtSb}$  and

$\text{LuPtSb}$ " Journal of the Physical Society of Japan、査読有、Vol. Suppl. A、2011、SA097 1-3、  
DOI: 10.1143/JPSJS.80SA.SA097

(9) T. Mito, M. Hattori, G. Motoyama, H. Sakai, T. Koyama, K. Ueda, T. Kohara, M. Yokoyama, and H. Amitsuka, "  $^{73}\text{Ge}$ -NMR Investigation of the Hidden Order in  $\text{URu}_2\text{Si}_2$ "、Journal of the Physical Society of Japan、査読有、Vol. Suppl. A、2011、SA097 1-3、  
DOI:10.1143/JPSJS.80SA.SA016

(10) H. Nakamura, S. Terazawa, T. Waki, Y. Tabata, T. Koyama, and T. Kohara, " Geometric Frustration in Itinerant Electron Magnets"、AIP Conference Proceedings、査読有、Vol. 1347、2011、238-243、  
DOI:10.1063/1.3601826

(11) T. Koyama, K. Sugiura, K. Ueda, T. Mito, T. Kohara, R. Satoh, K. Tsuchiya, T. Nakano, and N. Takeda, " Intermediate Valence Behavior of  $\text{Yb}_2\text{Ni}_{12}\text{P}_7$  Studied by Using  $^{31}\text{P}$  NMR"、Journal of Korean Physical Society、査読有、掲載決定

〔学会発表〕(計 24 件)

(1) 出口拓也, 松林和幸, 上床美也, 小山岳秀, 小原孝夫, 中村裕之, 小山佳一、" 狭バンドギャップ半導体 $\text{FeSb}_2$ の高圧下磁化測定"、日本物理学会第68回年次大会、2013年03月26日、広島大学

(2) 川崎祐, 岸本豊, 出田勇亀一, 西山功兵, 小山岳秀, 水戸毅, 八島光晴, 椋田秀和, 北

岡良雄, 大村公美子, 藤田崇仁, 木村尚次郎, 萩原政幸, ” BaCo<sub>2</sub>V<sub>2</sub>O<sub>8</sub>における磁場誘起インコメンシユレート相のNMRによる研究”、日本物理学会第68回年次大会、2013年03月26日、広島大学

(3) 水戸毅, 西谷孝二, 牟田寛弥, 小山岳秀, 上田光一, 小原孝夫, 光田暁弘, 杉島正樹, 和田裕文, ” 価数転移物質EuPtPのf電子状態に関するNMR研究”、日本物理学会第68回年次大会、2013年03月26日、広島大学

(4) 西山功兵, 水戸毅, G. Pristas, 小山岳秀, 上田光一, 小原孝夫, S. Gabani, M. Reiffers, 小牧泰大, 富沢裕樹, 深澤英人, 小堀洋, 竹下直, N. Shitsevalov” SmB<sub>6</sub>における半導体ギャップ構造の圧力依存性”、日本物理学会第68回年次大会、2013年03月26日、広島大学

(5) 原宏樹, 水戸毅, 小山岳秀, 上田光一, 小原孝夫, 石田憲二, 松林和幸, 斎賀裕太, 上床美也, ” 重い電子化合物YbCo<sub>2</sub>Zn<sub>20</sub>の低温磁性II”、日本物理学会第68回年次大会、2013年03月27日、広島大学

(6) 前田佳俊, 小山岳秀, 水戸毅, 上田光一, 小原孝夫, 菅原仁, 佐藤英行, ” 充填スクッテルダイト化合物NdRu<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub>のNQRによる物性研究”、日本物理学会第68回年次大会、2013年03月27日、広島大学

(7) 上田光一, 前田佳俊, 小山岳秀, 水戸毅, 小原孝夫, ” 層状超伝導体の電子状態のNMRによる研究II”、日本物理学会第68回年次大会、2013年03月27日、広島大学

(8) 小山岳秀, 前田佳俊, 山崎智陽, 上田光

一, 水戸毅, 小原孝夫, 和氣剛, 田畑吉計, 常深浩, ” 空間反転対称性のない超伝導体Mo<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Cの物性研究”、日本物理学会2012秋季大会、2012年09月19日、横浜国立大学

(9) 小山岳秀, 杉浦恭平, 上田光一, 水戸毅, 小原孝夫, 中野智仁, 土屋勝彦, 佐藤亮平, 武田直也, ” 六方晶Yb<sub>2</sub>Ni<sub>12</sub>P<sub>7</sub>の<sup>31</sup>P-NMR”、日本物理学会2012秋季大会、2012年09月20日、横浜国立大学

(10) 上田光一, 小山岳秀, 水戸毅, 小原孝夫, ” 新超伝導体LaCo<sub>2</sub>B<sub>2</sub>系のNMRによる研究”、日本物理学会2012秋季大会、2012年09月20日、横浜国立大学

(11) 上田光一, 前田佳俊, 小山岳秀, 水戸毅, 小原孝夫, ” 層状超伝導体の電子状態のNMRによる研究”、日本物理学会2012秋季大会、2012年09月20日、横浜国立大学

(12) 西山功兵, 水戸毅, Gabriel Pristas, 小山岳秀, 上田光一, 小原孝夫, Slavo Gabani, Marian, Reiffers, 小牧泰大, 富沢裕樹, 深澤英人, 小堀洋, 竹下直, Natalia Shitsevalova, ” 圧力下におけるSmB<sub>6</sub>の<sup>11</sup>B-NMRによる研究II”、日本物理学会2012秋季大会、2012年09月20日、横浜国立大学

(13) 原宏樹, 水戸毅, 石田卓磨, 小山岳秀, 上田光一, 小原孝夫, 松林和幸, 才賀裕太, 上床美也, ” 重い電子化合物YbCo<sub>2</sub>Zn<sub>20</sub>の低温磁性”、日本物理学会2012秋季大会、2012年09月20日、横浜国立大学

(14) T. Koyama, K. Sugiura, K. Ueda, T. Mito, K. Kohara, T. Nakano, R. Satoh, K. Tsuchiya, and N. Takeda, ” Heavy Fermion Behavior of

Yb<sub>2</sub>Ni<sub>12</sub>P<sub>7</sub> Studied by <sup>31</sup>P NMR”、The 19 th International Conference on Magnetism、The 19 th International Conference on Magnetism、2012年07月24日、釜山（韓国）

(15) 原宏樹、小山岳秀、上田光一、水戸毅、小原孝夫、Andrzej Slebarski、”近藤絶縁体 CeRhSbにおけるRh-Pd置換効果の研究 Sb-NQR”、日本物理学会第67回年次大会、2012年3月24日、関西学院大学

(16) 服部翠、水戸毅、本山岳、酒井佳央、小山岳秀、上田光一、小原孝夫、横山淳、”NMR/NQR測定で得られるURu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>の微視的情報”、日本物理学会第67回年次大会、2012年3月24日、関西学院大学

(17) 阿部真依子、小山岳秀、水戸毅、上田光一、小原孝夫、鈴木博之、”YbPtSbにおける緩和率の磁場依存性”、日本物理学会第67回年次大会、2012年3月24日、関西学院大学

(18) 西谷孝二、水戸毅、小山岳秀、上田光一、小原孝夫、光田暁弘、杉島正樹、和田裕文、”価数転移を示すEuPtPの<sup>31</sup>P-NMR”、日本物理学会第67回年次大会、2012年3月25日、関西学院大学

(19) T. Koyama, Y. Ozaki, K. Ueda, T. Mito, T. Kohara, T. Waki, Y. Tabata, C. Michioka, K. Yoshimura, M.-T. Suzuki, and H. Nakamura、”The Observation of the partial Fermi Surface Quenching in the Noncentrosymmetric Superconductor Mo<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>C”、International workshop on heavy fermions, TOKIMEKI 2011、2011年11月26日、大阪大学

(20) 小山岳秀、尾崎穰、上田光一、水戸毅、小原孝夫、和気剛、田畑吉計、道岡千城、”空間反転対称性のない超伝導体Mo<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Cの常伝導状態の相転移”、日本物理学会2011秋季大会、2011年9月24日、富山大学

(21) 阿部真依子、小山岳秀、水戸毅、上田光一、小原孝夫、鈴木博之、”YbPtSbのNMRスペクトルと緩和率”、日本物理学会2011秋季大会、2011年9月23日、富山大学

(22) 服部翠、水戸毅、井上耕也、本山岳、境秀樹、小山岳秀、上田光一、小原孝夫、横山淳、網塚浩、”URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>隠れた秩序相における対称性低下検出の試み-NMR/NQR測定-”、日本物理学会2011秋季大会、2011年9月23日、富山大学

(23) T. Koyama, Y. Ozaki, K. Ueda, T. Mito, K. Kohara, T. Waki, H. Nakamura、”Phase Transition in the normal State of the Non-centrosymmetric Superconductor Mo<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>C”、International Conference on Strongly Correlated Electron Systems、2011年8月31日、ケンブリッジ（イギリス）

(24) T. Mito, M. Hattori, G. Motoyama, Y. Sakai, T. Koyama, K. Ueda, T. Kohara, M. Yokoyama, H. Amitsuka、”NMR and NQR Investigation of Local Symmetries in Hidden Order Phase of URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>”、International Conference on Strongly Correlated Electron Systems、2011年8月31日、ケンブリッジ（イギリス）

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小山 岳秀 (KOYAMA TAKEHIDE)

兵庫県立大学・大学院物質理学研究科・助

教

研究者番号：30397666