

平成 29 年 5 月 5 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400363

研究課題名(和文) Ce近藤半導体の特異な磁気秩序とリフシツツ転移

研究課題名(英文) Unusual magnetic order and Lifshitz transition in Ce-based Kondo semiconductors

研究代表者

高島 敏郎 (Takabatake, Toshiro)

広島大学・先端物質科学研究科・教授

研究者番号：40171540

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：なぜ近藤半導体CeT<sub>2</sub>Al<sub>10</sub> (T=Ru, Os)は28 Kという異常に高い温度で反強磁性秩序するのかを解明するために、T=Osの系に4f正孔、5d正孔、5d電子をドーブした三種類の試料を作製して、電子状態の変化をバルク測定、トンネル分光、光反射分光、光電子分光、中性子散乱で調べた。その結果、ドーブによる4f電子状態の変化は三者三様であったが、共通点が見出された。即ち、温度低下とともに混成ギャップが形成され、フェルミ準位での電子状態密度の減少する割合が急激になった後に、磁気秩序が起きる事であった。そこで、フェルミ面の一部消失が特異な磁気秩序を誘起するというリフシツツ機構によるモデルを提案した。

研究成果の概要(英文)：Strong hybridization of the 4f states with conduction bands in Ce-based Kondo semiconductors quenches the local magnetic moments and opens a gap in the hybridized band. However, newly found Kondo semiconductors CeT<sub>2</sub>Al<sub>10</sub> (T=Ru, Os) order antiferromagnetically at unexpectedly high temperatures at 28 K. To elucidate this mechanism, we have made Os based samples by doping 4f holes, 5d holes, and 5d electrons, and studied the change in the electronic state by the bulk measurements as well as electron tunneling, optical conductivity, photoemission spectroscopy, and neutron scattering. The effects were found to strongly depend on the three different dopants. However, it is common that the magnetic order occurs after the density of states at the Fermi level decreases significantly on cooling. Thus, we propose that the Lifshitz transition involving the loss of a part of the Fermi surface induces the unusual magnetic order.

研究分野：物性物理学

キーワード：物性物理学 強相関電子系 近藤半導体 セリウム化合物 トンネル分光 光電子分光 磁気秩序 リフシツツ転移

### 1. 研究開始当初の背景

従来の近藤半導体では、4f電子が伝導電子と強く混成して局在磁気モーメントを失うと同時に混成ギャップを形成したので、基底状態は非磁性であった。この常識に反して、 $\text{CeT}_2\text{Al}_{10}$  (T=Ru, Os)は近藤半導体でありながら28 Kという高温で相転移することが2009-2010年に見出された。我々は、この相転移が反強磁気(AF)秩序であることを中性子回折によって明らかにした。しかし、0.3 ボーア磁子という小さな磁気モーメントが、なぜドジャンヌ・スケールで予想される値よりも150倍も高い温度で磁気秩序できるのかは謎であった。我々は、磁化率、中性子非弾性散乱、X線吸収実験を組み合わせ、結晶場スキームを決定し、基底状態のCe磁気モーメントが最大となるのはa軸方向であることを見出していた。この結晶場によるa軸容易軸に反して、秩序モーメントがc軸に向くことも謎であった。我々は、 $\text{CeOs}_2\text{Al}_{10}$ のOsサイトにIrを15%置換すると局在モーメントは復活するにも拘らず、 $T_N$ は7 Kまで低下するが、Reを僅か3%置換すると転移が消失することを確かめ、その結果から、フェルミ面の変化が磁気秩序を誘起するという仮説を立てた。

### 2. 研究の目的

我々のこれまでの研究結果は、近藤半導体 $\text{CeT}_2\text{Al}_{10}$  (T = Ru, Os)の特異な磁気秩序は擬ギャップをもつ状態で発現しており、正孔ドーピングによるフェルミ面のトポロジーの変化が磁気秩序を潰すことを示唆した。この点を実験的に検証するとともに、下記の懸案の問題に答えることを本研究の目的とした。

- (1) 60 K以下で発達する擬ギャップ状態でなぜAF秩序が起こるのか？
- (2) AF秩序モーメントは0.3 ボーア磁子と小さいのに、なぜ28 Kという高温で転移するのか？
- (3) AF秩序はなぜ僅かな正孔ドーピングで潰れるのか？
- (4) 結晶場基底状態の容易軸はa軸方向が安定であるのに、なぜAF秩序モーメントはc軸を向くのか？

### 3. 研究の方法

擬ギャップ形成と特異な磁気秩序との関係を明らかにするために、以下の実験手法を組み合わせた。

- (1) 5d電子ドーピングの $\text{Ce}(\text{Os}_{1-x}\text{Ir}_x)_2\text{Al}_{10}$ 、5d正孔ドーピングの $\text{Ce}(\text{Os}_{1-y}\text{Re}_y)_2\text{Al}_{10}$ 及び4f正孔ドーピングの $\text{Ce}_{1-z}\text{La}_z\text{Os}_2\text{Al}_{10}$ の単結晶を育成し、その電気伝導と磁性、及び電荷ギャップと磁気励起ギャップのドーピング依存性を調べた。単結晶育成とバルク物性測定は高畠と梅尾が大学院生4名と実施した。
- (2) フェルミ準位近傍の電子状態、特に電荷ギャップのドーピング依存性及び温度変化を、木村のテラヘルツ分光、横谷の光電子分光、浴野のトンネル分光という相補的な分光法で調べた。
- (3) 磁気励起ギャップを観測する中性子散乱と、弱い磁性に敏感なミュエスアール測定は英国

ISISのD.T. Adrojaが担当した。同氏を平成28年度の学振外国人招聘研究者として広島大に2ヶ月間招聘し、試料作製、実験結果の整理と議論、論文作成を行った。

(4) 本研究チーム内での情報交換と研究計画の見直しの為に、競合チームと理論家も交えた研究会を開催した。

### 4. 研究成果

上記の計画した研究から下記の成果を得た。

(1) 高畠は大学院生とともに $\text{CeOs}_2\text{Al}_{10}$ に5d正孔と5d電子をドーピングした単結晶を育成し、その熱電能と電気抵抗を測定した。母体の熱電能( $\Delta T/b$ 軸)は100 K付近で大きな極大を示し40 K以下で急減するが、この挙動は正孔・電子ドーピングによって消失した(図1)。この結果は、母体では $T_N$ よりも僅かに高い温度からフェルミ面の一部が消失し始めていることを示唆した。そこで、AF秩序に先立ってb軸方向の伝導に参与するフェルミ面の再構築が起きていると指摘した。

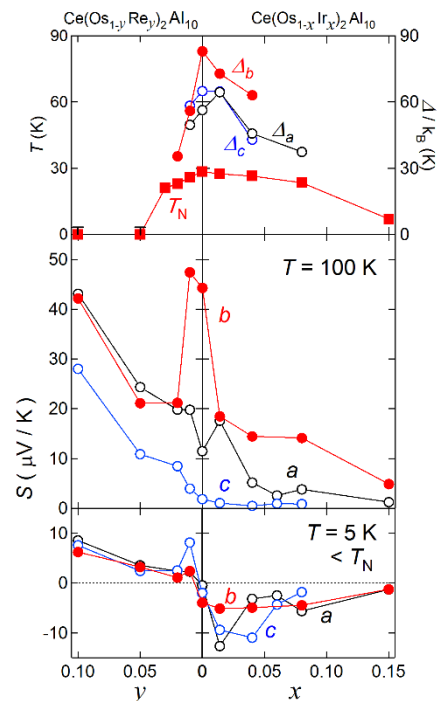


図1.  $\text{CeOs}_2\text{Al}_{10}$ の電子・正孔ドーピング系の転移温度 $T_N$ 、混成ギャップ $\Delta/k_B$ と熱電能 $S$ の温度100 Kと5 Kでの値。

(2) 浴野(連携研究者)は大学院生とともに破断接合トンネル分光実験を実施し、ドーピングによってギャップ内状態が発達するに連れて、混成ギャップと反強磁性ギャップが潰れることを明らかにした。特に、混成ギャップが残っている状態のみAF秩序は起こり、しかも、 $T_N$ よりも数K-10Kも高温 $T^*$ からフェルミ準位における準粒子状態密度が減少する事を見出した(図2)。この結果から、AF秩序に先立って、フェルミ面の一部が消失することが分かった。

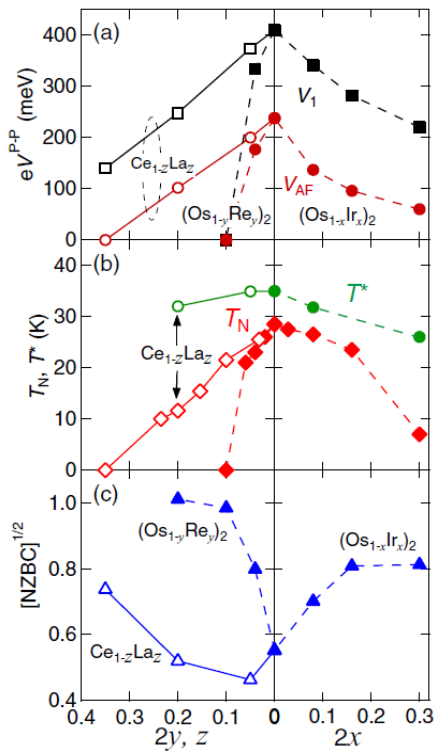


図 2. CeOs<sub>2</sub>Al<sub>10</sub> の電子・正孔ドーパ系の反強磁性転移温度  $T_N$  と破断接合トンネル分光で観測した混成ギャップ幅  $V_1$ , AFM ギャップ幅  $V_{AF}$ , 規格化したゼロバイアス・コンダクタンス(NZBC)の平方根, 及びそれが温度低下とともに急減する温度  $T^*$  のドーパ量依存性。

(3) 木村 (連携研究者) は, CeOs<sub>2</sub>Al<sub>10</sub> の 5d 電子・正孔ドーパ系の偏光反射分光の解析から, AF 秩序は E//b での電荷励起ギャップの有無と相関していることを確立した。この電荷励起ギャップが  $T_N$  よりも高温で開くことはトンネル分光で観測された準粒子状態密度の減少と対応している。しかし, 混成ギャップは AF 秩序にとって必要条件ではないという結果は, トンネル分光の結果と矛盾している。

(4) 横谷 (連携研究者) は, CeT<sub>2</sub>Al<sub>10</sub> (T = Fe, Os, Ru) の高分解能光電子分光で単結晶試料のフェルミ準位近傍の状態密度の温度変化を測定し, 2段ギャップ構造とその温度変化を明らかにした。CeOs<sub>2</sub>Al<sub>10</sub> の軟 X 線角度分解光電子分光実験によって, フェルミ面の温度変化を始めて観測した。

(5) 梅尾 (連携研究者) は, 磁場と平行と垂直方向に一軸圧力を印加できるセルを SQUID 磁束計用に開発し, 大学院生と Fe 系, Ru 系, Os 系の磁化率と比熱を測定した(図3)。一軸圧下での歪み測定結果との比較から, Ru 系と Os 系の  $T_N$  は b 軸長でスケールできることを見出した。

(6) 研究協力者の D.T. Adroja は中性子回折・散乱の実験から, CeOs<sub>2</sub>Al<sub>10</sub> 磁気モーメントは,

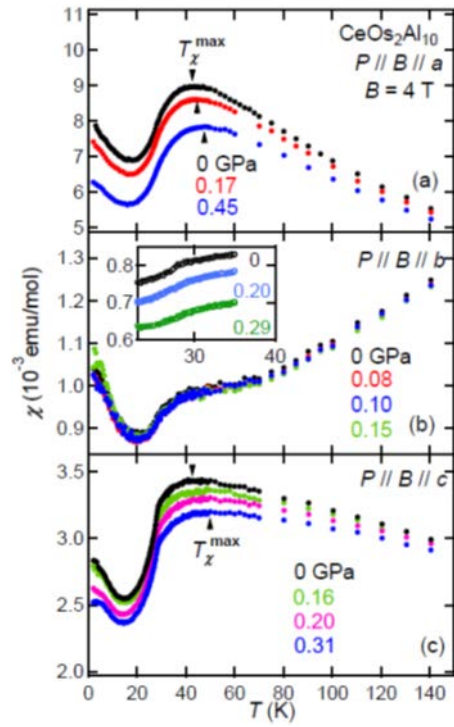


図 3. CeOs<sub>2</sub>Al<sub>10</sub> の各主軸方向に加圧したときの磁化率の変化。b 軸方向に加圧した場合のみ  $T_N$  は僅かに上昇する。

5d 正孔ドーパと 4f 正孔ドーパでは c 軸方向を向いたまま縮むが, 5d 電子ドーパでは c 軸から a 軸方向にフリップして伸びるとともに, スピンギャップが消失することを見出した。CeOs<sub>2</sub>Al<sub>10</sub> と CeFe<sub>2</sub>Al<sub>10</sub> のスピン励起の分散とその温度変化を観測した(図 4)。

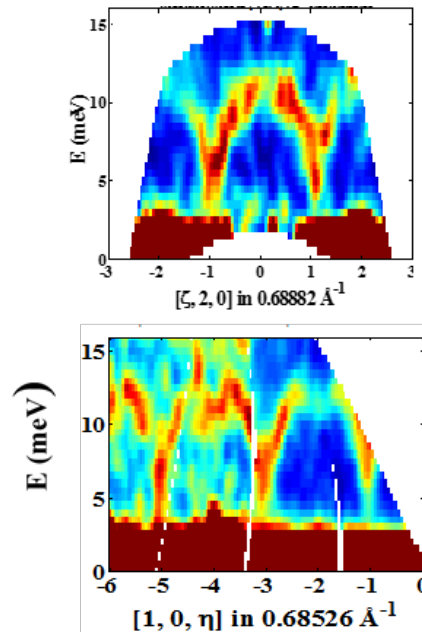


図 4. CeOs<sub>2</sub>Al<sub>10</sub> の中性子非弾性散乱で観測した 5 K におけるスピン励起の分散関係

## 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 29 件)

1. J. Kawabata, T. Ekino, Y. Yamada, Y. Okada, A. Sugimoto, Y. Muro, T. Takabatake, Doping effects on the hybridization gap and antiferromagnetic order in the Kondo semiconductor  $\text{CeOs}_2\text{Al}_{10}$  studied by break-junction experiments, *Phys. Rev. B* 95, 035144/1-9, 2017 査読有, doi: 10.1103/PhysRevB.95.035144
2. J. Kawabata, T. Ekino, Y. Yamada, A. Sugimoto, Y. Muro, T. Takabatake, Interplay between hybridization gap and antiferromagnetic gap in the hole-doped Kondo semiconductor  $\text{Ce}(\text{Os}_{1-y}\text{Re}_y)_2\text{Al}_{10}$ , *J. Phys.: Conf. Ser.* 807, 012008-1-6, 2017 査読有, DOI: 10.1088/1742-6596/807/1/12008
3. K. Hayashi, K. Umeo, Y. Yamada, J. Kawabata, Y. Muro, T. Takabatake, Uniaxial pressure effects on the unusual antiferromagnetic transition in the Kondo semiconductor  $\text{CeOs}_2\text{Al}_{10}$ , *J. Phys.: Conf. Ser.* 807, 02202-1-6, 2017 査読有, DOI: 10.1088/1742-6596/807/2/02202
4. Y. Okada, J. Kawabata, Y. Yamada, Y. Muro, T. Takabatake, Dilution effects on the antiferromagnetic Kondo semiconductor  $\text{CeOs}_2\text{Al}_{10}$ , *J. Phys.: Conf. Ser.* 807, 02203-1-5, 2017 査読有, DOI: 10.1088/1742-6596/807/2/02203
5. C. L. Yang, K. Umeo, T. Takabatake, Evolution of a magnetic order in the quasi-kagome lattice system  $\text{CeRh}_{1-x}\text{Pd}_x\text{Sn}$  ( $x < 0.75$ ), *J. Phys.: Conf. Ser.* 807, 042001-1-6, 2017 査読有, DOI: 10.1088/1742-6596/807/4/042001
6. D.T. Adroja, Y. Muro, T. Takabatake, M.D. Le, H.C. Walker, K.A. McEwen, A.T. Boothroyd, Inelastic neutron scattering investigations of an anisotropic hybridization gap in the Kondo insulators:  $\text{CeT}_2\text{Al}_{10}$  ( $T = \text{Fe, Ru and Os}$ ), *Solid State Phenomena* 257, 11-25, 2016 査読有, doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.257.111
7. U. Stoker, P. Sun, N. Oeschler, F. Steglich, T. Takabatake, P. Coleman, S. Paschen, Giant isotropic Nernst effect in an anisotropic Kondo semimetal, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 216401/1-5, 2016 査読有, doi: 10.1103/PhysRevLett.117.216401
8. S. Kimura, H. Takao, J. Kawabata, Y. Yamada, T. Takabatake, Doping effects on the electronic structure of an antiferromagnetic Kondo semiconductor  $\text{CeOs}_2\text{Al}_{10}$ : An optical study with Re and Ir substitution, *J. Phys. Soc. Jpn.* 85, 123705/1-4, 2016 査読有, doi: 10.7566/JPSJ.85.123705
9. K. Hayashi, Y. Muro, T. Fukuhara, J. Kawabata, T. Kuwai, T. Takabatake, Effect of Si substitution on the antiferromagnetic ordering in the Kondo semiconductor  $\text{CeRu}_2\text{Al}_{10}$ , *J. Phys. Soc. Jpn.* 85, 034714/1-4, 2016 査読有, DOI: 10.7566/JPSJ.85.034714
10. W. Paschinger, K. Yubuta, Y. Saiga, T. Takabatake, G. Giester, P. Rogl, The crystal structures of  $m$ ,  $o$ - $\text{Ce}_3\text{Pt}_4\text{Sn}_6$  and  $\text{Ce}_{1-x}\text{Pt}_6\text{Al}_{13+2x}$ , *Solid State Sciences* 55, 48-57, 2016 査読有, DOI: 10.1016/j.solidstatesciences.2016.02.005
11. M. Sundermann, F. Strigari, T. Willers, J. Weinen, Y.F. Liao, K.-D. Tsuei, N. Hiraoka, H. Ishii, H. Yamaoka, J. Mizuki, Y. Zekko, E.D. Bauer, J.L. Sarrao, J.D. Thompson, P. Lejay, Y. Muro, K. Yutani, T. Takabatake, A. Tanaka, N. Hollmann, L.H. Tjeng, A. Severing, Quantitative study of the  $f$  occupation in  $\text{CeMIn}_5$  and other cerium compounds with hard X-rays, *J. Electron Spectr. Related Phenom.* 209, 1-8, 2016 査読有, DOI: 10.1016/j.elspec.2016.02.002
12. D. T. Adroja, A. D. Hiller, C. Ritter, A. Bhattacharyya, D. D. Khalyavin, A. M. Strydom, P. Peratheepan, B. Fak, M. M. Koza, J. Kawabata, Y. Yamada, Y. Okada, Y. Muro, T. Takabatake, J. W. Taylor, Contrasting effect of La substitution on the magnetic moment direction in the Kondo semiconductor  $\text{CeT}_2\text{Al}_{10}$  ( $T = \text{Ru, Os}$ ), *Phys. Rev. B* 92, 094425/1-10, 2015, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevB.92.094425
13. M. Okawa, Y. Ishida, M. Takahashi, T. Shimada, F. Iga, T. Takabatake, T. Saitoh, S. Shin, Hybridization gap formation in the Kondo insulator  $\text{YbB}_{12}$  observed using time-resolved photoemission spectroscopy, *Phys. Rev. B* 92, 161108 (R) /1-5, 2015 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevB.92.161108
14. J. Kawabata, T. Ekino, Y. Yamada, Y. Sakai, A. Sugimoto, Y. Muro, T. Takabatake, Observation of hybridization gaps and antiferromagnetic gap in Kondo semiconductors  $\text{CeT}_2\text{Al}_{10}$  ( $T = \text{Fe and Os}$ ) by break-junction tunneling spectroscopy, *Phys. Rev. B* 92, 201113 (R) /1-5, 2015, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevB.92.201113
15. K. Hayashi, Y. Muro, T. Fukuhara, T. Kuwai, J. Kawabata, T. Takabatake, M. Hagihala, K. Motoya, Anisotropic chemical pressure effect on the antiferromagnetic Kondo semiconductor  $\text{Ce}(\text{Ru}_{1-x}\text{Fe}_x)_2\text{Al}_{10}$ , *Phys. Procedia*, 75, 121-126, 2015 査読有, DOI: 10.1016/j.phpro.2015.12.017
16. S. Kimura, H. Tanida, M. Sera, Y. Muro, T. Takabatake, T. Nishioka, M. Matsumura, R. Kobayashi, Relation between  $c$ - $f$  hybridization and magnetic ordering in  $\text{CeRu}_2\text{Al}_{10}$ : An optical conductivity study of  $\text{Ce}(\text{Ru}_{1-x}\text{Rh}_x)_2\text{Al}_{10}$  ( $x \leq 0.05$ ), *Phys. Rev. B* 91, 241120(R)/1-5, 2015, 査読有,

- DOI: 10.1103/PhysRevB.91.241120
17. Y. Yamada, J. Kawabata, T. Onimaru, T. Takabatake, Anisotropic thermopower of the antiferromagnetic Kondo semiconductor  $\text{CeOs}_2\text{Al}_{10}$  doped with 5d electrons and holes, *J. Phys. Soc. Jpn.* **84**, 084705/1-5, 2015 査読有, DOI: 10.7566/JPSJ.84.084705
  18. F. Strigari, M. Sundermann, Y. Muro, K. Yutani, T. Takabatake, K.-D. Tsuei, Y.F. Liao, A. Tanaka, P. Thalmeier, M.W. Haverkort, L.H. Tjeng, A. Severing, Quantitative study of valence and configuration interaction parameters of the Kondo semiconductors  $\text{CeM}_2\text{Al}_{10}$  ( $M = \text{Ru, Os and Fe}$ ) by means of bulk-sensitive hard X-ray photoelectron spectroscopy, *J. Electr. Spectr. Rel. Phenom.* **199**, 56-63, 2015 査読有, DOI: 10.1016/j.elspec.2015.01.004
  19. Y. Tokiwa, C. Stingl, M. S. Kim, T. Takabatake, P. Gegenwart, Characteristic signatures of quantum criticality driven by geometrical frustration, *Sci. Adv.* **1**, e1500001/1-6, 2015 査読有, DOI: 10.1126/sciadv.1500001
  20. K.T. Matsumoto, Y. Saiga, Y.F. Inoue, T. Takabatake, Formation of a superlattice structure and suppression of the magnetic order in  $\text{Ce}_{1-x}\text{Pb}_x\text{Pt}_2$  ( $x < 0.5$ ), *J. Alloys and Compd.* **633**, 329-332, 2015 査読有, DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.02.051
  21. K. Orita, K. Uenishi, M. Tsubota, Y. Shimada, T. Onimaru, T. Takabatake, J. Kitagawa, Synthesis and physical properties of a new caged compound  $\text{Ce}_3\text{Pd}_{20}\text{As}_6$  of the  $\text{C}_6\text{Cr}_{23}$ -type structure, *J. Alloys and Compd.* **622**, 676-680, 2015 査読有, DOI: 10.1016/j.jallcom.2014.10.144
  22. Y. Ishida, T. Otsu, T. Shimada, M. Okawa, Y. Kobayashi, F. Iga, T. Takabatake, S. Shin, Emergent photovoltage on  $\text{SmB}_6$  surface upon bulk-gap evolution revealed by pump-and-probe photoemission spectroscopy, *Scientific Reports* **5**, 8160/1-6, 2015 査読有, DOI: 10.1038/srep08160
  23. A. Bhattacharyya, D. T. Adroja, A. M. Strydom, J. Kawabata, T. Takabatake, A. D. Hiller, V. G. Sakai, J. W. Taylor, R. I. Smith, Contrasting carrier doping effects in the Kondo insulator  $\text{CeOs}_2\text{Al}_{10}$ : The influential role of  $c$ - $f$  hybridization in spin-gap formation, *Phys. Rev. B* **90**, 174422/1-9, 2014 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevB.90.174422
  24. A. Bhattacharyya, D. D. Khalyavin, D. T. Adroja, A. M. Strydom, A. D. Hiller, P. Manuel, T. Takabatake, J. W. Taylor, C. Ritter, Anomalous change of the magnetic moment direction by hole doping in  $\text{CeRu}_2\text{Al}_{10}$ , *Phys. Rev. B* **90**, 174412/1-9, 2014, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevB.90.174412
  25. Y. Muro, K. Hida, T. Fukuhara, J. Kawabata, K. Yutani, T. Takabatake, Effects of Ga and Si substitutions for Al in  $\text{CeRu}_2\text{Al}_{10}$  on the unusual antiferromagnetic order in the Kondo semiconducting state, *Jpn. Phys. Soc. Conf. Proc.* **3**, 012017/1-7, 2014 査読有, DOI: 10.7566/JPSCP.3.012017
  26. J. Kawabata, K. Yutani, K. Umeo, T. Takabatake, Y. Muro, Transition from a Kondo semiconducting antiferromagnet to a heavy-fermion antiferromagnet in  $\text{Ce}(\text{Os}_{1-x}\text{Ir}_x)_2\text{Al}_{10}$ , *Jpn. Phys. Soc. Conf. Proc.* **3**, 012023/1-6, 2014 査読有, DOI: 10.7566/JPSCP.3.012023
  27. K. Hayashi, K. Ishii, F. Iga, T. Noguchi, T. Takabatake, A. Kondo, K. Kindo, Substitution effect on non-magnetic rare-earth ion R ( $R = \text{Lu, Sc, Y and Zr}$ ) on Kondo semiconductor  $\text{YbB}_{12}$ , *Jpn. Phys. Soc. Conf. Proc.* **3**, 011050/1-6, 2014 査読有, DOI: 10.7566/JPSCP.3.011050
  28. T. Ishiga, T. Wakita, R. Yoshida, H. Okazaki, K. Tsubota, M. Sunagawa, K. Uenaka, K. Okada, H. Kumigashira, M. Oshima, K. Yutani, Y. Muro, T. Takabatake, Y. Muraoka, T. Yokoya, Electron structures of  $\text{CeM}_2\text{Al}_{10}$  ( $M = \text{Fe, Ru, and Os}$ ) studied by soft x-ray resonant and high-resolution photoemission spectroscopies, *J. Phys. Soc. Jpn.* **83**, 094717/1-6, 2014 査読有, DOI: 10.7566/JPSJ.83.094717
  29. T. Abe, K. Uenishi, K. Orita, M. Tsubota, Y. Shimada, T. Onimaru, T. Takabatake, J. Kitagawa, Physical properties of new cerium palladium phosphide with  $\text{C}_6\text{Cr}_{23}$ -type structure, *Results in Phys.* **4**, 137-141, 2014 査読有, DOI: 10.1016/j.rinp.2014.08.005
- [学会発表] (計 49 件)
1. T. Takabatake, Antiferromagnetic Kondo semiconductor  $\text{CeOs}_2\text{Al}_{10}$  (Invited), 14<sup>th</sup> Bilateral Japanese-German Symposium on Effects of Parity Mixing in Correlated Electron Systems, Sept. 28, 2016, Chateraise Gateaux Kingdom Sapporo, Kitaku, Sapporo, Hokkaido
  2. T. Takabatake, Y. Okada, J. Kawabata, Y. Yamada, K. Hayashi, T. Ekino, Y. Muro, Dilution and doping effects on the antiferromagnetic Kondo semiconductor  $\text{CeOs}_2\text{Al}_{10}$  (Oral), Intern. Conf. on Strongly Correlated Electron Systems, May 13, 2016, Hangzhou, China
  3. J. Kawabata, T. Ekino, Y. Yamada, A. Sugimoto, Y. Muro, T. Takabatake, Development of in-gap states in the antiferromagnetic Kondo semiconductor  $\text{CeOs}_2\text{Al}_{10}$  by doping of 5d electrons and holes (poster), Intern. Conf. on Strongly Correlated Electron Systems, May 10, 2016, Hangzhou, China

4. K. Hayashi, K. Umeo, Y. Yamada, J. Kawabata, Y. Muro, T. Takabatake, Uniaxial pressure effects on the unusual antiferromagnetic transition in the Kondo semiconductor  $\text{CeOs}_2\text{Al}_{10}$  (poster), Intern. Conf. on Strongly Correlated Electron Systems, May 10, 2016, Hangzhou, China
  5. K. Umeo, D. Watanabe, K. Araki, K. Katoh, T. Takabatake, Uniaxial-pressure effect on the magnetic frustration in the Yb based triangular lattice antiferromagnet  $\text{YbCuGe}$  (poster), Intern. Conf. on Strongly Correlated Electron Systems, May 10, 2016, Hangzhou, China
  6. C. L. Yang, K. Umeo, T. Takabatake, Evolution of a magnetic order in the quasi-kagome lattice system  $\text{CeRh}_{1-x}\text{Pd}_x\text{Sn}$  (poster), Intern. Conf. on Strongly Correlated Electron Systems, May 10, 2016, Hangzhou, China
  7. D.T. Adroja, D. Khalyavin, A. Bhattacharyya, T. Takabatake, Y. Muro, A.M. Strydom, Inelastic neutron scattering investigations of anisotropic hybridization gap in the Kondo insulators:  $\text{CeT}_2\text{Al}_{10}$  (T=Fe, Ru and Os), (Invited), 20<sup>th</sup> Intern. Conference on Solid Compounds of Transition Elements, April 13, 2016, Zaragoza, Spain
  8. T. Takabatake, Y. Yamada, J. Kawabata, T. Onimaru, Y. Muro, Anisotropic thermopower of the antiferromagnetic Kondo semiconductor  $\text{CeOs}_2\text{Al}_{10}$  doped with 5d electrons and holes (Poster), 20th Inter. Conf. on Magnetism, July 9, 2015, Barcelona, Spain
  9. D.T. Adroja, A. Bhattacharyya, C. Ritter, B. Fak, A.D. Hiller, K. Hayashi, Y. Muro, A.M. Strydom, M.M. Koza, T. Takabatake, Investigations of the stability of spin gap formation and the moment direction by electron doping on the Al site in  $\text{CeRu}_2\text{Al}_{10}$  (Oral), 20th Inter. Conf. on Magnetism, July 8, 2015, Barcelona, Spain
  10. P. Dean, P. Hatton, A. Dobrynin, T. Takabatake, Y. Muro, Disentangling the spin and orbital moments in the heavy fermion system  $\text{CeRu}_2\text{Al}_{10}$  using polarized x-ray (Oral), 20th Inter. Conf. on Magnetism, July 9, 2015, Barcelona, Spain
  11. J. Kawabata, Y. Yamada, T. Takabatake, Y. Sakai, A. Sugimoto, T. Ekino, Break-Junction tunneling spectroscopy of Kondo semiconductors  $\text{CeT}_2\text{Al}_{10}$  (T=Fe, Os), (Poster), 20th Inter. Conf. on Magnetism, July 9, 2015, Barcelona, Spain
  12. K. Hayashi, Y. Muro, T. Fukuhara, T. Kuwai, J. Kawabata, T. Takabatake, M. Hagiwara, K. Motoya, Anisotropic chemical pressure effect on the antiferromagnetic Kondo semiconductor  $\text{Ce}(\text{Ru}_{1-x}\text{Fe}_x)_2\text{Al}_{10}$ , (Poster), 20th Inter. Conf. on Magnetism, July 9, 2015, Barcelona, Spain
  13. T. Takabatake, Interplay between hybridization gap and antiferromagnetic order in Ce-based Kondo semiconductors (Invited), Inter. Workshop on Heavy Fermions and Quantum Phase Transitions, April 17, 2015, Zhejiang University, Hangzhou, China
  14. T. Takabatake, Phonon-glass electron-crystal thermoelectric clathrates (Invited), International Conference on Strongly Correlated Electron Systems SCES2014, July 7, 2014 Grenoble, France
  15. J. Kawabata, Y. Yamada, K. Umeo, Y. Muro, T. Takabatake, Suppression of hybridization gap and antiferromagnetic order by electron- and hole-doping in the Kondo semiconductor  $\text{CeOs}_2\text{Al}_{10}$ , (Poster), July 7, 2014, International Conference on Strongly Correlated Electron Systems SCES2014, Grenoble, France
- [その他]  
ホームページ  
<http://home.hiroshima-u.ac.jp/adsmmag/>
- 6. 研究組織**
- (1)研究代表者  
高島 敏郎 (TAKABATAKE Toshiro)  
広島大学・大学院先端物質科学研究科・教授  
研究者番号: 40171540
- (2)連携研究者  
梅尾 和則 (UMEEO Kazunori)  
広島大学・自然科学研究支援開発センター・准教授  
研究者番号: 10223596  
木村 真一 (KIMURA Shin-ichi)  
大阪大学・大学院・生命機能研究科・教授  
研究者番号: 10252800  
横谷 尚睦 (YOKOYA Takayoshi)  
岡山大学・大学院・自然科学研究科・教授  
研究者番号: 90311646  
浴野 稔一 (EKINO Toshikazu)  
広島大学・大学院・総合科学研究科・教授  
研究者番号: 40185103
- (3)研究協力者  
ADROJA Devashibhai  
ラザフォード・アップルトン研究所 ISIS  
施設 (英国)・上級研究員