

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 30 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540421

研究課題名(和文) f 電子-核超微細結合多重項の新奇物性

研究課題名(英文) Unconventional physical properties of 4f-electron-nuclear hyperfine-coupled multiplets

研究代表者

青木 勇二 (Aoki, Yuji)

首都大学東京・理工学研究科・教授

研究者番号：20231772

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000 円、(間接経費) 1,200,000 円

研究成果の概要(和文)：化合物PrRu4P12において、Prイオンの f 電子と核スピンの超微細相互作用により結合し、多重項状態(超微細結合多重項)を形成していることを我々は初めて観測することに成功した。この多重項が、秩序化することなく、結晶固体中で格子を形成している状態は稀有であり、他に類を見ない。本系の極低温物性をさらに調べ、この多重項が超低密度の伝導キャリアと相互作用することにより、従来のものとは異なる新しいタイプの強相関電子状態を形成していることを示唆する異常を観測した。また、Pr以外の希土類イオンを含む化合物を探索し、類似物性を示す幾つかの候補物質を見つけた。

研究成果の概要(英文)：In PrRu4P12, we have found the formation of "4f-electron-nuclear hyperfine-coupled multiplets" (formed by the hyperfine interaction between the 4f electron magnetic moment and the nuclear spin in each of Pr ions). The multiplets form a lattice in the crystal without showing any magnetic orderings at least down to 20mK. In this research work, we have investigated low-temperature transport properties and have found anomalies, which indicate that the multiplets are strongly coupled with extremely-low-density conduction electrons to form an unconventional type of strongly correlated electron states. After an intensive search in rare-earth-based intermetallic compounds, we have found some candidate materials appropriate for the investigation of the physics of "4f-electron-nuclear hyperfine-coupled multiplets".

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：超微細結合多重項 超微細相互作用 核比熱 核スピン 多極子 スクッテルダイト かご状物質

## 1. 研究開始当初の背景

充填スクッテルダイト  $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$  は 63 K で電荷秩序転移する[1]。低温の電荷秩序相では、 $\text{Pr}^{3+}$  イオンが結晶学的に異なる 2 つのサイトに分裂し、4f 電子の結晶場基底状態が 1 重項となる Pr1 サイトと、3 重項となる Pr2 サイトが現れる[2]。この 3 重項は、磁気モーメントおよび四極子モーメントを持つので、低温で磁気秩序または四極子秩序を起こすことが推測されるが、この予想に反して、極低温の比熱は、相転移を起こすことなくそのエントロピーを放出する異常な振る舞いを示した。この振る舞いは、各 Pr2 サイトにおいて、縮退した基底状態を持つ 4f 電子と原子核スピンの超微細結合することにより新奇な多重項状態 (以下、超微細結合多重項と呼ぶ) を形成していることを示唆する。もしこの解釈が正しければ、結晶固体中における超微細結合多重項の熱力学的物理量測定による初めての観測となる。

通常の電子物性研究において、核からの比熱への寄与は余計なものとして差引き取り除かれる (邪魔者扱いされる) 場合が多かった。これまで私は、超微細相互作用を積極的に利用し、核比熱をプローブとした 4f 電子状態の研究手法を開発してきた (核比熱が、秩序化した磁気双極子の大きさを精密に測定する手段になりうることを示した[3-5])。この状況に対して、上述の超微細結合多重項は、4f 電子が核スピンと結合した新たな量子力学的状態であり、これとは状況が全く異なる。[1] C. Sekine et al.: Phys. Rev. Lett. 79 (1997) 3218. [2] K. Iwasa et al.: Phys. Rev. B 72 (2005) 024414. [3] Y. Aoki et al.: Phys. Rev. B 62 (2000) 8935. [4] Y. Aoki et al.: Phys. Rev. B 65 (2002) 064446. [5] Y. Aoki et al.: J. Phys. Soc. Jpn. 71 (2002) 2098.

## 2. 研究の目的

縮退した 4f 電子基底状態を持つイオンが金属結晶中にある場合、伝導電子との混成を通じて、4f 電子内部自由度に起因する様々なタイプ (フェルミ液体的または非フェルミ液体的) の強相関電子状態が低温で形成されることがこれまでの物性研究から確立されてきている。しかし、核スピンの関与はこれまでの強相関電子研究で無視されてきた。上述の超微細結合多重項では、核スピンの量子力学的に 4f 電子と結合しているため、これまでに全く研究されていない「4f 電子+伝導電子+核」の 3 者による新しいタイプの強相関電子状態の形成が低温で期待できる。

本研究では、 $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$  における超微細結合多重項の検証、伝導電子との混成により発現

するであろう新奇な強相関電子状態の探索、 $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$  以外の超微細結合多重項形成の候補物質の探索を行う。

## 3. 研究の方法

Pr イオンが周期的格子を形成し、結晶場 3 重項基底状態を持ちながら極低温領域まで長距離秩序を示さない金属間化合物は、これまでに  $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$  以外に知られていない。よって、超微細結合多重項の格子系の研究対象は、 $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$  をおいて他に無い。この系の比熱の磁場、温度依存を調べ、Pr 核スピンの関与をエントロピーの観点から確認する。また、超微細結合多重項の検証において重要となる Pr イオンの超微細結合定数 A を高い精度で確認する。

$\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$  の単結晶試料を用いて電子輸送効果の磁場-温度依存を極低温領域で測定し、「4f 電子+伝導電子+核」の 3 者による新しいタイプの強相関電子状態の形成の手がかりを得る。

Pr イオン以外の希土類イオンを含む化合物においても、超微細結合多重項の形成が期待できる。例えば、Tm 核スピンは  $I=1/2$  であり (天然存在比 100%)、比較的大きな超微細結合定数を持つため、超微細結合多重項の探索において Tm 化合物は重要なターゲットとなる。4f 電子の縮退した結晶場基底状態が期待できるカゴ状化合物に着目して物性探索を行う。

## 4. 研究成果

### (1) $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ における超微細結合多重項形成の検証とその特性の究明

[雑誌論文⑦,⑧ : 国際会議発表⑦]

$\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$  における超微細結合多重項形成を熱力学的に確認するため、多重項形成を反映する 0.3K にピークを持つ Schottky 型比熱異常のエントロピーを調べた。その結果、この温度領域で放出されるエントロピーが、Pr

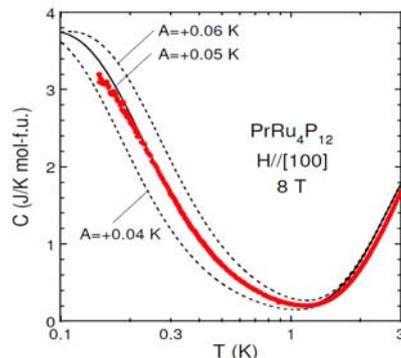


図 1  $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$  の磁場中低温比熱を理論的モデル曲線と比較し、超微細結合多重項の検証において重要となる、Pr イオンの超微細結合定数  $A=+0.05\text{K}$  を実験的に確認した[雑誌論文⑦]。

イオンの結晶場 3 重項基底状態を持つ  $Rln_3$  を超えていることがわかった。このことは、この Schottky 型比熱ピークに Pr 核スピンの自由度が関与していることを示しており、超微細結合多重項形成を裏付ける結果である。

磁場中の  $PrRu_4P_{12}$  の比熱の温度依存から、Pr イオンの超微細結合定数  $A=+0.05K$  を実験的に高い精度で確認した (図 1)。これは、超微細結合多重項の検証において重要となる定数である。これまでに調べてきた Pr 化合物の実験結果と比較することにより、この定数は Pr イオンの不変定数と考えてよく、実験精度内で化合物に依存しないことを確認できた。

$PrRu_4P_{12}$  単結晶試料を用いて、電気抵抗とホール抵抗の磁場-温度依存性を系統的に測定した。その結果、磁場印加により超微細結合多重項がゼーマン分裂する領域で、60%もの異常な負の磁気抵抗が現れること、この振る舞いが激しい温度依存を伴うこと、低温でコヒーレントな領域が存在することを見出した。この振る舞いは、「4f 電子+伝導電子+核」の 3 者による新しいタイプの強相関電子状態の形成を反映している可能性がある。

## (2) $PrFe_4P_{12}$ の磁場 $H//[111]$ における磁気相図

$PrFe_4P_{12}$  の 6.5K 以下に現れる秩序相 A の秩序変数は、発見当初、磁気モーメントと考えられたが、中性子散乱や我々の核比熱による Pr 磁気秩序モーメントの大きさの測定 (上限値は  $0.03\mu_B$  以下) により、非磁性であることがわかった。その後、反強四極子秩序であると考えられた時期があったが、NMR や中性子散乱 [雑誌論文⑨] により、スカラー型高次多極子秩序 (十六極子) との整合性が示された。2 つの Pr サイトの基底状態はどちらも単重項であるが、その内の一つは近藤効果による単重項である可能性がある。また、その高磁場領域に秩序相 B が磁場  $H//[111]$  において見出されていたが、その秩序変数は未解明のままである。

この系の 4f 電子状態への核スピンの関与を調べるため、純良単結晶試料を用いて、 $H//[111]$  の高磁場極低温領域を調べた。その結果、17T 以上の高磁場領域に新たな秩序相 C が存在することを発見した [雑誌論文⑩]。B 相との相境界にはヒステリシスが観測されることから、B 相とは異なる秩序変数を持つことが明らかとなった。この系の A~C 相における超微細結合多重項の関与は未解明であり、今後調べていく必要がある。

## (3) Tm 化合物における超微細結合多重項の探索

Tm イオンを含み、4f 電子の縮退した結晶場基底状態が期待できるカゴ状化合物に着目して物性探索を行った。Tm  $T_2Al_{20}$  系を含む幾つかの化合物系を調べたが、ここではそれらの中から、ピーナッツ型カゴ構造の内

部に 2 個の Tm イオンを有する  $Tm_6Cr_4Al_{43}$  (六方晶) を取り上げ述べておきたい。カゴ状構造の内部に 2 個の希土類イオンを内包する化合物は、私の知る限り、本系が初めてである。二量体の形成の可能性など、他の物理現象の関与も期待できる重要な物質系である。

$Tm_6Cr_4Al_{43}$  の基礎物性測定により、結晶場基底状態は擬 2 重項となっていること (磁気エントロピーから励起状態が 50K 以上にあることがわかる)、この擬 2 重項が有する磁気モーメントは c 面内を向いていること、1.4 K で反強的な磁気秩序をすること、磁場-温度の磁気相図は非常に異方的であること (磁場印加により転移温度が上昇する異常が見られ、多極子の関与が示唆される)、などを明らかにした。秩序相内の低温で、核比熱が見られており、その定量的解析を今後行っていく必要がある。

## (4) $SmT_2Al_{20}$ 系の強相関電子状態と核比熱

$SmT_2Al_{20}$  系における物性探索から、磁場の影響を受けない異常な各種物性を見出した [雑誌論文⑬⑭]。

$T=Ta$  は、5~30K の広い温度領域で、電気抵抗が近藤効果を示唆する  $\log T$  的溫度依存を示す。Ce 化合物で見られる抵抗の  $\log T$  依存は磁氣的近藤効果により発現する振る舞いであるため、通常、磁場により抑制される。 $SmTa_2Al_{20}$  で見られる  $\log T$  依存は、10T 以下の磁場領域で抑制が全く見られない点が異常である。2 K 以下の秩序相内では、比熱  $C/T$  が降温とともに増大し、 $3.5 J/K^2mol$  の非常に増強した値に飽和する ( $Sm$  化合物中では最も大きな値)。この振る舞いは、秩序相内で重い準粒子が形成されていることを示唆する。この温度領域で  $Sm$  核スピンの関与した核比熱が観測される。単純にこの核比熱から求まる秩序化した磁気モーメントは  $0.22 \mu_B/Sm$  以下の小さな値となることから、 $Sm$  イオンの四重項基底状態を持つ八極子が、この秩序に関わっている可能性がある。

$T=Ti$  は、6.5K で磁気相転移を示すが、この転移温度は 10T 以下の磁場領域でほとんど磁場に依存しない。秩序相内の電子比熱係数は  $C/T=150 mJ/K^2mol$  であり、準粒子の質量増強を示唆している。秩序相内で核比熱から求まる秩序化した磁気モーメントは  $\sim 0.5 \mu_B/Sm$  であり、本系も  $Sm$  イオンの四重項基底状態を持つ八極子がこの秩序に関与している可能性がある。

## 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 20 件) 全て査読有り。

以下に主な論文のみ記す。

① "Electronic State of  $CeFe_4As_{12}$

Investigated by Using Single Crystals Grown under High Pressure of 4 GPa" Y. Ogawa, H. Sato, M. Watanabe, T. Namiki, S. Tatsuoka, R. Higashinaka, Y. Aoki, K. Kuwahara, J. Yamaura, and Z. Hiroi: *J. Phys. Soc. Jpn.* **83** (2014) 034710 (7 Pages). DOI: 10.7566/JPSJ.83.034710

② "The effect of Au and Ni doping on the heavy fermion state of the Kondo lattice antiferromagnet CePtZn" S. K. Dhar, Y. Aoki, B. Suemitsu, R. Miyazaki, A. Provino, and P. Manfrinetti: *J. Appl. Phys.* **115** (2014) 17E113 (3 pages). <http://dx.doi.org/10.1063/1.4862378>

③ "Anomalously field-insensitive correlated electron behaviors in SmTa<sub>2</sub>Al<sub>20</sub>" A. Yamada, R. Higashinaka, R. Miyazaki, K. Fushiya, T.D. Matsuda, Y. Aoki, W. Fujita, H. Harima, H. Sato: *J. Phys. Soc. Jpn.* **82** (2013) 123710 (5 pages). DOI: 10.7566/JPSJ.82.123710

④ "Anomalous Low-Lying Thermal Excitations Deep Inside the Ferromagnetic State in Filled Skutterudite NdFe<sub>4</sub>As<sub>12</sub>" R. Higashinaka, K. Takeda, T. Namiki, Y. Aoki, H. Sato: *J. Phys. Soc. Jpn.* **82** (2013) 114710 (6 pages). DOI: 10.7566/JPSJ.82.114710

⑤ "Ru substitution effect on the peak effect in superconducting PrOs<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub>" R. Miyazaki, R. Higashinaka, Y. Aoki, H. Sugawara and H. Sato: *J. Phys.: Conf. Ser.* **391** (2012) 012046 (5pp). doi:10.1088/1742-6596/391/1/012046

⑥ "Neutron scattering study on magnetic ordering in a partially rare-earth filled skutterudite Pr<sub>x</sub>Fe<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub>" K. Iwasa, T. Orihara, K. Saito, K. Tomiyasu, Y. Murakami, H. Sugawara, K. Kuwahara, H. Kimura, R. Kiyonagi, Y. Ishikawa, Y. Noda, Y. Aoki, H. Sato and M. Kohgi: *J. Phys.: Conf. Ser.* **391** (2012) 012025 (4pp). doi:10.1088/1742-6596/391/1/012025

⑦ "Thermodynamic properties of the f-electron-nuclear hyperfine-coupled composite multiplets of Pr ions in filled-skutterudite PrRu<sub>4</sub>P<sub>12</sub>" Y. Aoki, T. Namiki, S.R. Saha, H. Sugawara and H. Sato: *J. Phys.: Conf. Ser.* **391** (2012) 012003 (4pp). doi:10.1088/1742-6596/391/1/012003

⑧ "Heavy quasiparticles formed in the ferromagnetic Yb layers in the Kondo helical magnet YbNi<sub>3</sub>Al<sub>9</sub> as revealed by

specific-heat measurements" R. Miyazaki, Y. Aoki, R. Higashinaka, H. Sato, T. Yamashita and S. Ohara: *Phys. Rev. B* **86**, 155106 (2012) [6 pages]. DOI: 10.1103/PhysRevB.86.155106

⑨ "Magnetic Excitation in Totally Symmetric Staggered Ordered Phase of PrFe<sub>4</sub>P<sub>12</sub>" K. Iwasa, L. Hao, M. Kohgi, K. Kuwahara, J.-M. Mignot, H. Sugawara, Y. Aoki, T.D. Matsuda, and H. Sato: *J. Phys. Soc. Jpn.* **81** (2012) 094711 (9 pages). DOI: 10.1143/JPSJ.81.094711

⑩ "Characterization of the Mysterious High Field Ordered Phase around H//[111] and Finding of a New Phase Boundary in PrFe<sub>4</sub>P<sub>12</sub>" H. Aoki, H. Sato, D. Kikuchi, H. Sugawara, A. Pourret, K. Behnia, S. Uji, T. Terashima, R. Higashinaka, and Y. Aoki: *J. Phys. Soc. Jpn.* **81** (2012) 084703 (11 pages). DOI: 10.1143/JPSJ.81.084703

⑪ "Transport, Thermal, and Magnetic Properties of YbNi<sub>3</sub>X<sub>9</sub> (X = Al, Ga): A Newly Synthesized Yb-Based Kondo Lattice System" T. Yamashita, R. Miyazaki, Y. Aoki, and S. Ohara: *J. Phys. Soc. Jpn.* **81** (2012) 034705 (8 pages). DOI: 10.1143/JPSJ.81.034705

⑫ "Magnetic and transport properties of YbT<sub>2</sub>Al<sub>20</sub> (T = Ti, V and Cr)" R. Higashinaka, A. Nakama, M. Ando, M. Watanabe, Y. Aoki and H. Sato: *J. Phys.: Conf. Ser.* **273** (2011) 012033 (4pp). doi:10.1088/1742-6596/273/1/012033

⑬ "Unusual Field-Insensitive Phase Transition and Kondo Behavior in SmTi<sub>2</sub>Al<sub>20</sub>" R. Higashinaka, T. Maruyama, A. Nakama, R. Miyazaki, Y. Aoki and H. Sato: *J. Phys. Soc. Jpn.* **80** (2011) 093703 (4 pages). DOI: 10.1143/JPSJ.80.093703

⑭ "Single crystal growth and low temperature properties of PrNb<sub>2</sub>Al<sub>20</sub>" R. Higashinaka, A. Nakama, M. Ando, M. Watanabe, Y. Aoki and H. Sato: *J. Phys. Soc. Jpn.* **80** (2011) Supplement A, SA048(3 pages). DOI: 10.1143/JPSJS.80SA.SA048

⑮ "Temperature-dependent development of the magnetic-field-insensitive heavy fermion state in SmOs<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub>" Y. Aoki, S. Sanada, D. Kikuchi, H. Sugawara, and H. Sato: *J. Phys. Soc. Jpn.* **80** (2011)

Supplement A, SA013(3 pages).  
DOI: 10.1143/JPSJS.80SA.SA013

⑩" Strong Effect of Yb Filling Fraction on the Magnetic Ground State of the Filled Skutterudite  $\text{YbFe}_4\text{Sb}_{12}$ " T.Saito, H. Sato, K. Tanaka, S. Tatsuoka, M. Ueda, R. Higashinaka, T. Namiki, Y. Aoki, Y. Utsumi, K. Kuwahara and T. Hosoya: J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) 063708 (4 pages).  
DOI: 10.1143/JPSJ.80.063708

⑪" Reentrant quantum criticality in  $\text{Yb}_2\text{Pd}_2\text{Sn}$ " T. Muramatsu, T. Kanemasa, T. Kagayama, K. Shimizu, Y. Aoki, H. Sato, M. Giovannini, P. Bonville, V. Zlatic, I. Aviani, R. Khasanov, C. Rusu, A. Amato, K. Mydeen, M. Nicklas, H. Michor, and E. Bauer: Phys. Rev. **B 83**, 180404(R) (2011) [4 pages].  
DOI: 10.1103/PhysRevB.83.180404

⑫" f-Electron-Nuclear Hyperfine-Coupled Multiplets in the Unconventional Charge Order Phase of Filled Skutterudite  $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ " Y. Aoki, T. Namiki, S.R. Saha, T. Tayama, T. Sakakibara, R. Shiina, H. Shiba, H. Sugawara and H. Sato: J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) 054704 (7 pages).  
DOI: 10.1143/JPSJ.80.054704  
Papers of Editors' Choice に選ばれた。

[学会発表] (計 71 件)

以下に主な発表のみ記す。

- ①東中隆二 他 5 名「異方的カゴ状構造を持つ  $\text{RAu}_3\text{Al}_7$  (R= Pr, Tm) の低温物性」日本物理学会第 69 回年次大会 2014 年 3 月 27~30 日 東海大学
- ②今井勇輝 他 4 名「 $\text{LnGa}_6$  の単結晶育成と基礎物性測定」日本物理学会第 69 回年次大会 2014 年 3 月 27~30 日 東海大学
- ③鈴木主翼 他 5 名「 $\text{Yb-Au-In}$  系三元化合物の単結晶育成と物性」日本物理学会第 69 回年次大会 2014 年 3 月 27~30 日 東海大学
- ④松田達磨 他 5 名「層状超伝導化合物  $\text{LnOBiS}_2$  系の単結晶育成と物性」日本物理学会第 69 回年次大会 2014 年 3 月 27~30 日 東海大学
- ⑤青木勇二 他 6 名「充填スクッテルダイト  $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$  の電子輸送特性: 伝導電子と強く結合した Pr 核スピン-4f 電子複合状態」日本物理学会 2013 年秋季大会 2013 年 9 月 25 - 28 日 徳島大学。
- ⑥伏屋健吾 他 5 名「新奇ピーナツ型カゴ状構造を有する  $\text{Tm}_6\text{Cr}_4\text{Al}_{43}$  における特異な秩序状態」日本物理学会 2013 年秋季大会 2013 年 9 月 25 - 28 日 徳島大学。
- ⑦Y. Aoki 他 5 名「Strong coupling of conduction electrons with the

4f-electron-nuclear-spin composite states in filled skutterudite  $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ 」 Strongly Correlated Electron Systems 2013 (SCES 2013) Aug.5-9, 2013, University of Tokyo, Tokyo.

⑧K. Fushiya 他 5 名「Tm-based Kondo effect and possible multipole ordering in peanut-shaped cage structure compound  $\text{Tm}_6\text{Cr}_4\text{Al}_{43}$ 」 Strongly Correlated Electron Systems 2013 (SCES 2013) Aug.5-9, 2013, University of Tokyo, Tokyo.

⑨A. Yamada 他 9 名「Single crystal growth and low-temperature physical properties of cage structure compound  $\text{SmTa}_2\text{Al}_{20}$ 」 Strongly Correlated Electron Systems 2013 (SCES 2013) Aug.5-9, 2013, University of Tokyo, Tokyo.

⑩R. Higashinaka 他 10 名「The valence state and possible parameters of the eld-insensitive magnetic transition in  $\text{SmTr}_2\text{Al}_{20}$ 」 Strongly Correlated Electron Systems 2013 (SCES 2013) Aug.5-9, 2013, University of Tokyo, Tokyo.

⑪小野修平 他 3 名「カゴ状化合物単結晶試料の低温熱電能測定」日本物理学会第 68 回年次大会 2013 年 3 月 26-29 日 広島大学

⑫伏屋健吾 他 4 名「新規カゴ状化合物  $\text{Tm}_6\text{Cr}_4\text{Al}_{43}$  の単結晶育成と物性測定」日本物理学会第 68 回年次大会 2013 年 3 月 26-29 日 広島大学

⑬R. Higashinaka 他 4 名「Unusual heavy fermion behavior in  $\text{PrTr}_2\text{Al}_{20}$  (Tr = Nb, Ta) associated with Gamma3 quadrupolar degrees of freedom」 The 19th International conference on Magnetism (ICM 2012), July 8-13, 2012, Busan, Korea.

⑭髭本亘 他 5 名「 $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$  の低温におけるミュオンスピン緩和」日本物理学会秋季大会 2012 年 9 月 18-21 日 横浜国立大学

⑮國利洗貴 他 5 名「 $\text{YbAu}_3\text{Al}_7$  の単結晶育成と物性測定」日本物理学会秋季大会 2012 年 9 月 18-21 日 横浜国立大学

⑯青木英和 他 9 名「 $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$  H//[111] に於ける高磁場秩序相及び新たな高磁場相境界の評価」日本物理学会第 67 回年次大会 2012 年 3 月 24-27 日 関西学院大学

⑰東中隆二 他 4 名「極低温物性測定によるカゴ状物質  $\text{PrNb}_2\text{Al}_{20}$  の基底状態の探索」日本物理学会第 67 回年次大会 2012 年 3 月 24-27 日 関西学院大学

⑱中間章浩 他 4 名「 $\text{PrTa}_2\text{Al}_{20}$  の磁場誘起相転移」日本物理学会第 67 回年次大会 2012 年 3 月 24-27 日 関西学院大学

⑲Y. Aoki 他 8 名「f-Electron-Nuclear Hyperfine-Coupled Multiplets of Pr Ions in Charge-Ordered Filled Skutterudite  $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ 」 International conference on Strongly Correlated Electron Systems 2011 (SCES2011), Aug.29-Sep.3, 2011 Cambridge, England.

②R. Higashinaka 他 7 名「Unusual Heavy Fermion Behavior in  $\text{PrNb}_2\text{Al}_{20}$  with a  $\Gamma_3$  Doublet Ground State」 International conference on Strongly Correlated Electron Systems 2011 (SCES2011), Aug.29-Sep.3, 2011 Cambridge, England.

②中間章浩 他 6 名「カゴ状金属間化合物  $\text{RT}_2\text{Al}_{20}$  の単結晶育成と物性測定」日本物理学会秋季大会 2011 年 9 月 21-24 日富山大学

〔図書〕(計 2 件)

①特集 籠状物質「充填スクッテルダイト  $\text{RT}_4\text{X}_{12}$  (R: 希土類, T: 遷移金属, X: P, As, Sb) —その結晶構造が可能にした多彩な振る舞い—」佐藤英行・青木勇二・菅原仁・播磨尚朝: セラミックス 第 47 巻 5 月号 (2012 年) p340-345. Bulletin of the Ceramic Society of Japan.

<http://www.ceramic.or.jp/i hensyub/>

② "充填スクッテルダイトにおける多極子物性" 特集号「重い電子系の物理の最近の発展」IV.多極子の物理の発展 青木勇二、菅原仁、佐藤英行: 固体物理 (Solid State Physics) Vol. 47, No. 11 (2012) p637-649. <http://www.agne.co.jp/kotaibutsuri/kota1047.htm>

〔その他〕

①「Pr 化合物中に発見された 4f 電子と核の複合準位系」日本物理学会誌 Vol. 66, No. 8, (2011) p623-624.

② 科学新聞 (週刊) 平成 23 年 5 月 20 日第 3340 号 「Pr 化合物中に形成された電子と核の複合状態発見」

③ 首都大学東京ウェブページ:  
ニュース掲載

<http://www.tmu.ac.jp/news/topics/3274.htm>  
[l?d=assets/files/download/news/press\\_110510.pdf](http://www.tmu.ac.jp/news/press_110510.pdf)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

青木 勇二 (AOKI YUJI)

首都大学東京・理工学研究科・教授

研究者番号: 20231772