

平成 22 年 4 月 28 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2009

課題番号：19540355

研究課題名 (和文) p-f 混成効果に基づく f 電子系の動的 Jahn-Teller 効果

研究課題名 (英文) Dynamical Jahn-Teller Effect due to The p-f Hybridization Effect in f-Electron Systems

研究代表者

岩佐 和晃 (Iwasa Kazuaki)

東北大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：00275009

研究成果の概要 (和文)：物質の性質・新機能を明らかにする基礎科学分野において、温度などの環境の変化に伴う物質の状態変化である相転移の研究が必要である。磁性や電気伝導性の相転移に伴い物質の原子配列 (結晶) 構造をも変化する現象が見られる。本研究では、希土類元素と隣接原子から供給される電子が互いに強く混ざり合う化合物における電子相転移と結晶構造変化の物理的機構について、構造的なダイナミクスの観測から明らかにすることを試みた。

研究成果の概要 (英文)：In the basic science field revealing new properties and functions of materials, it is necessary to investigate phase transitions on environmental change like temperature variation. Phase transitions of magnetic state and electrical conductivity accompany often transformations of crystal structures or atomic arrangements. In present study on dynamical behaviors of the material structures, the physical mechanisms of electronic and structural phase transitions was investigated for the compounds with strongly hybridized electrons between rare-earth elements and neighboring atoms.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2008 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：電子-格子相互作用、p-f 混成、フォノン、中性子散乱、X 線散乱

## 1. 研究開始当初の背景

物質における相転移では磁気状態・電気伝導性などの電子状態変化が生じる。さらに物質中の原子配列の変化を伴うことがしばしば見られる。例えば、電荷密度波状態での伝導電子バンドギャップの形成による金属-絶

縁体転移では、電子状態に新たな周期ポテンシャルを与える結晶格子の長周期構造が表れる。近年、実験的にも存在が実証されつつある不対電子軌道の秩序化相転移においても、軌道配列の相関をもたらす相互作用が電子間のクーロン相互作用のみでなく、原子変

位による Jahn-Teller 歪みを媒介とする可能性は指摘されてきた。例えば、 $\text{LaMnO}_3$  などのような遷移金属を含むペロブスカイト型酸化物や、希土類  $f$  電子を含む金属化合物などがあげられる。このような結晶格子の歪みは、相転移によってもたらされる静的な場合に限らず、格子振動（フォノン）と電子状態の結合による新しい動的状態も期待でき、相転移への前駆現象として観測される。

## 2. 研究の目的

希土類化合物の物性を担う  $f$  電子軌道の状態は強く結晶格子と結合し、電子-格子相互作用による素励起状態が存在する。特に、隣接した希土類イオンとプニクトゲンイオンの間に働く  $p$ - $f$  混成など顕著な相互作用が働く場合での電子系と格子の動的構造を明らかにすることを本研究は目指した。これらの研究テーマに関連して、 $p$ - $f$  混成効果がもたらす  $f$  電子の磁気状態、金属-非金属転移での構造変化にも着目した。

## 3. 研究の方法

希土類充填スクッテルダイト、希土類へキサボライド、Ce モノプニクタイトの単結晶試料を用い、中性子非弾性散乱あるいは X 線非弾性散乱により、主としてフォノン励起や希土類  $f$  電子の磁気励起（結晶場分裂準位間の遷移）の温度依存性を観測した。適宜、X 線回折による静的構造の観測や磁化率など基礎物性測定も実施した。

希土類充填スクッテルダイトを東北大学でのフラックス法で合成し、一部は首都大学東京や徳島大学から提供を受けた。希土類へキサボライドの試料は、東北大学と広島大学から、Ce モノプニクタイトは物質材料研究機構から提供を受けた。

中性子非弾性散乱実験は、日本原子力研究開発機構原子力科学研究所（茨城県東海村）の研究用原子炉 JRR-3 に設置した東北大学理学部三軸型中性子分光器で実施した。この実験では東京大学物性研究所が主管する全国大学共同利用による支援を受けた。X 線非弾性散乱実験は、大型放射光施設 SPring-8 の BL35XU において実施し、高輝度光科学研究センターによる共同利用プログラムに則った。

## 4. 研究成果

(1) 充填スクッテルダイトにおける非調和フォノン：充填スクッテルダイト  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ 、 $\text{PrRu}_4\text{Sb}_{12}$ 、 $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$  および  $\text{CeRu}_4\text{Sb}_{12}$  は、Sb のカゴ状格子中の比較的大きな空隙に位置する希土類イオンが、極めて低エネルギー（3 ~ 5 meV）の光学フォノンモードをもたらすことを中性子散乱実験により見出した。図 1 に  $\text{PrRu}_4\text{Sb}_{12}$  において散乱ベクトル  $\mathbf{Q} = (6, -0.4, -0.4)$  で測定した横波モードのスペク

トルを示す。300 K で 4 meV に見えるピークは Pr イオンの振動が主要なフォノンモードを意味する。その温度依存性を見ると（図 2 に  $\text{PrRu}_4\text{Sb}_{12}$  の結果を示す）、通常物質とは異なり、低温でフォノンの励起エネルギーが低下することがみいだされた。Sb カゴ格子を有する物質ではほぼ共通してこのようなエネルギー低下（ソフトニング）が見出された。すなわち、Sb カゴ格子中の希土類イオンは強い非調和性をもつ束縛ポテンシャルの中にあると考えられ、低温で希土類イオンが小さな振幅で振動するとき、非調和ポテンシャルによってフォノン素励起エネルギーが実効的に小さくなることを示している。この起源としてフォノン-電子間あるいはフォノン-フォノン間相互作用が考えられ、最近着目されているカゴ状構造における充填原子変位自由度の物性への効果の研究例として位置づけられる。

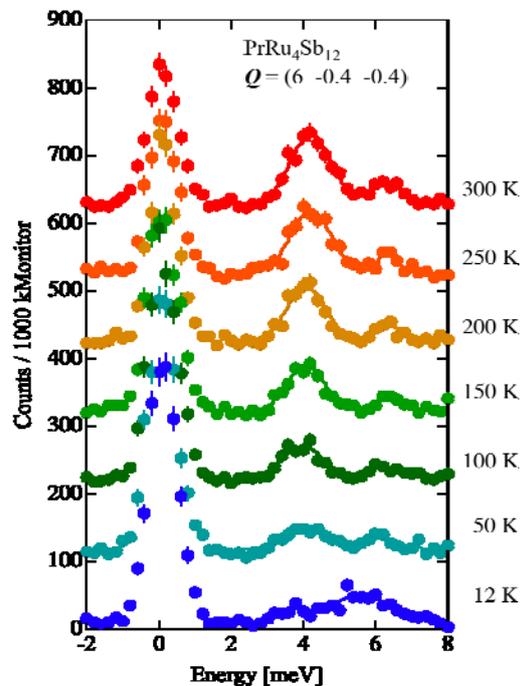


図 1  $\text{PrRu}_4\text{Sb}_{12}$  における、散乱ベクトル  $\mathbf{Q} = (6, -0.4, -0.4)$  での横波光学フォノンスペクトルの温度依存性。

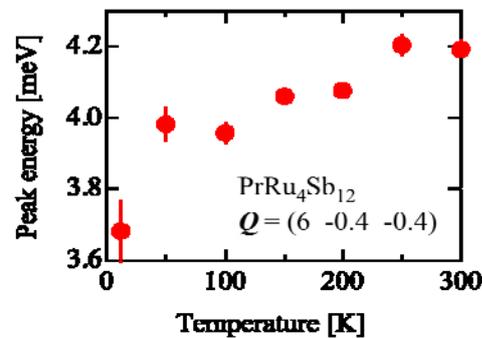


図 2  $\text{PrRu}_4\text{Sb}_{12}$  における、散乱ベクトル  $\mathbf{Q} = (6, -0.4, -0.4)$  での光学フォノンエネルギーの温度依存性。

(2) Pr充填スクッテルダイトの結晶場分裂準位間遷移スペクトルに対する $p$ - $f$ 混成効果： $p$ - $f$ 混成とは、希土類イオンの $f$ 電子とその周囲に配置するプニクトゲン (P, As, Sb Bi) の $p$ 電子の軌道が重なった軌道の形成であり、新奇な電子状態もたらしることが知られてきた。一般に $f$ 電子は希土類イオンへの局在傾向が強いが、化合物において混成がはたらくと、伝導電子に寄与する $p$ 電子軌道の性質と相まって遍歴的な傾向を持ちうる。

これまでの Pr を含む充填スクッテルダイト研究において、 $f$  電子の軌道角運動量に起因する異方的電荷分布である多極子の秩序相転移を見出していた。例えば PrRu<sub>4</sub>P<sub>12</sub>, PrOs<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub>などを対象として、この多極子相転移の起源を探るために Pr 4 $f$ 電子の結晶場分裂準位を決定する中性子非弾性散乱実験を行った。その測定の結果、準位によって遷移エネルギースペクトルの幅が大きく異なることを見出した。この原因をさぐるため、相転移が存在せずに低温まで Pr 4 $f$ 電子状態の温度依存性を連続的に追える PrOs<sub>4</sub>P<sub>12</sub>を対象として中性子非弾性散乱測定を行い、結晶場準位のエネルギー位置と幅の温度依存性を得た。図3にスペクトルの温度依存性を示した。約 4 meV と 12 meV に観測されたピークが、4 $f$ 電子結晶場分裂準位の基底状態 $\Gamma_1$  (一

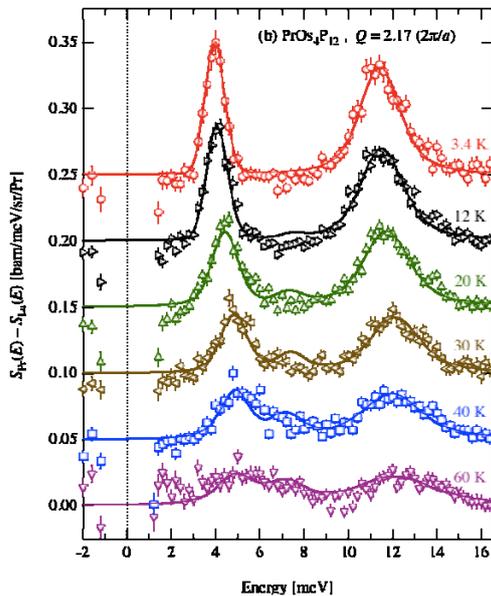


図3 PrOs<sub>4</sub>P<sub>12</sub>の結晶場分裂準位間遷移スペクトルの温度依存性。

重項) からそれぞれ三重項 $\Gamma_4^{(2)}$ ,  $\Gamma_4^{(1)}$ への励起に相当する。特に、これらのピーク位置が 30 K 程度以下で 1 meV 程度のシフトすること、基底状態から二つの三重項励起した場合にスペクトル幅が異なることが大きな特徴である。当初、これらの特徴は Pr イオンの振動状態によると予想したが、局在  $f$  電子と伝導電子間の混成効果を論じた理論の枠組み

の中で定量的に理解できることを指摘した。図4に実験的に決めたスペクトル幅 (●■) と理論計算結果 (実線) を示したように、低温では両者の一致が見られる。励起準位によって混成効果が異なるために現れる  $f$  電子の遍歴性がとらえられた。この成果発表は 2009 年 7 月の磁性国際会議 ICM2009 (ドイツ・カールスルーエ) での口頭発表に選抜され、強相関電子系における話題として注目された。

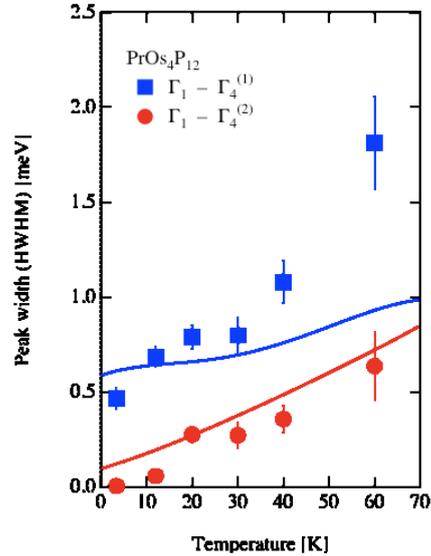


図4 PrOs<sub>4</sub>P<sub>12</sub>の結晶場分裂準位間遷移スペクトル幅の温度依存性。実線は K. W. Becker *et al.*: Z. Physik B 28 (1977) 9 による理論計算結果。

(3) GdB<sub>6</sub>における非調和振動に見られる一次相転移への前駆現象：ホウ素のネットワーク構造と充填希土類イオンからなるGdB<sub>6</sub>における相転移 ( $T_N = 16$  K,  $T^* = 10$  K) では、磁気秩序と結晶構造相転移が同時に生じる。相転移温度以下での結晶格子の長周期構造から、Gd自身の持つ磁気モーメント間にはたらく交換相互作用エネルギーの利得をもたらすようにGdイオンが変位することが指摘されている。この一次相転移に向かって動的性質であるフォノンがいかにか不安定化するかを明らかにするため、放射光X線非弾性散乱実験を実施した。

$T_N$ 以下で出現する長周期構造に対応するフォノンが、他の RB<sub>6</sub>に比べて極めて低いエネルギーをとることを見出した。図5に示したフォノン分散関係において、横軸 $\zeta = 0.5$ が長周期構造モードの波数を表す。この位置でエネルギーは極小となっており、さらに温度低下に伴ってソフトニングを示す。GdB<sub>6</sub>とは対照的に、中性子非弾性散乱実験により決定した YbB<sub>6</sub>の同じ分散曲線では、 $\zeta$ の増加に伴って単調にフォノンエネルギーが増加する。YbB<sub>6</sub>では磁気モーメントが消失していると報告されており、GdB<sub>6</sub>では前述した磁気交換相互作用と Gd イオン振動が相転移温度以上でも結合することによる格子不安定性が損衰史、観測されたフォノン異常は相転移への前

駆現象と考えられる。この成果が 2010 年 4 月の国際会議 PHONONS2010 (台湾) での口頭発表に選ばれ、X 線と中性子の非弾性散乱実験による希土類金属磁性体での電子-格子相互作用の新しい研究成果として注目された。

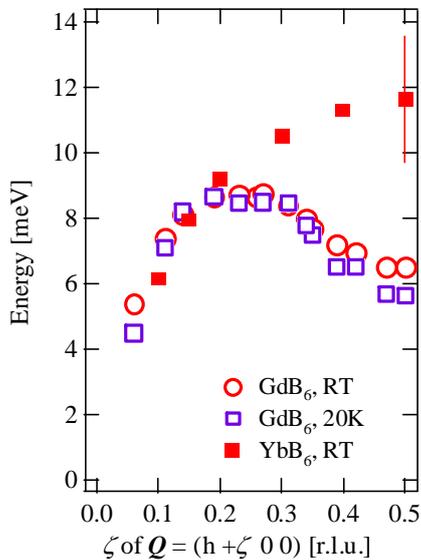


図5 GdB<sub>6</sub>とYbB<sub>6</sub>における[100]方向に伝播する縦波音響フォノンの分散関係。

(4) Pr(Ru<sub>1-x</sub>Rh<sub>x</sub>)<sub>4</sub>P<sub>12</sub>における金属-非金属転移：上述した充填スクテルダイトの低エネルギーフォノンに加えて、充填スクテルダイトPr(Ru<sub>1-x</sub>Rh<sub>x</sub>)<sub>4</sub>P<sub>12</sub>の金属-非金属転移に伴う構造相転移の研究を進めた。

PrRu<sub>4</sub>P<sub>12</sub>では63 K 以下で金属-非金属相転移が生じ、低温での電気抵抗の増大が観測される(図6上段)。一方、Rh置換系では金属的電気伝導が低温で復活する。また図6中段に示すように、非金属相の低温では磁化率が增大する。つまりPr 4f電子は磁氣的基底状態をとるが、Rh置換系では低温でむしろ非磁性的に変化する。さらに、図6下段に示すX線回折強度に見られるように、PrRu<sub>4</sub>P<sub>12</sub>の非金属相では結晶構造変調が見出されていた。これまでに、Pr 4f電子が担う電荷分布の異なる高次多極子の反動的に秩序することによる現象として解釈が与えられていた。

Rh置換系における構造をX線回折実験により調べた結果、Rh濃度の増加によって構造変調は抑制される(図6下段)。さらにKEK PFでの放射光X線散乱により、結晶構造変調と4f電子多極子の異方的な軌道電荷分布を示す散乱シグナルが同じ温度依存性を示すことを確認した。特に、Rh 3%, 5%の系では、10 K 以下で急速に構造変調が緩和されるというリエントラント的な振る舞いが見られた。中性子散乱によるPr 4f電子の結晶場分裂の観測から、Rh置換系では多極子を担うf電子基

底状態は全てのPrで同等であり、電荷分布の異なる高次多極子が反動的に配列することができずに非金属相は最低温度で不安定化することを結論した。この結果から、特殊な対称性にある高次多極子は4f電子の励起状態を含んで反動的に配列して非金属状態をもたらすことが可能であり、有限温度でのみ不安定化できるという新しい視点をもたらしていると言える。以上の成果を2009年7月の磁性国際会議ICM2009 (ドイツ・カールスルーエ)にて発表した。

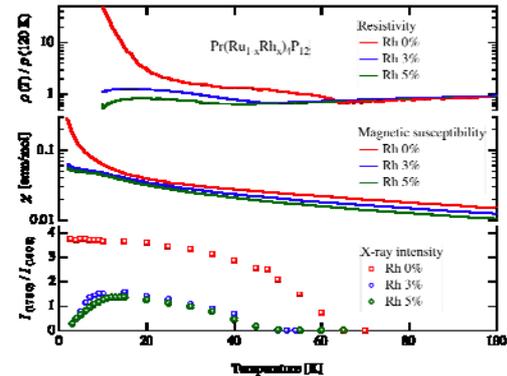


図6 Pr(Ru<sub>1-x</sub>Rh<sub>x</sub>)<sub>4</sub>P<sub>12</sub>における電気抵抗、磁化率、長周期結晶構造からのX線回折強度の温度依存性。

(5) Ceモノプニクタイトにおける動的Jahn-Teller効果の考察：CeSbとCeBiにおけるp-f混成は、f電子軌道秩序と格子変調が同時に生じる秩序相をもたらすことが知られている。この秩序相でのみ観測されたフォノン励起の起源を考察した。隣接したCeとSb, Bi間での延伸振動モード(x<sup>2</sup>-y<sup>2</sup>対称性)が、f電子の全角運動量を2だけ遷移させる電子状態変化と結合していることを着想し、フォノンと磁気励起の束縛モードとする理論的なモデルを得た。これは、CeAl<sub>2</sub>で観測されていた結晶場準位縮退の破れにおけるフォノンモードの動的Jahn-Teller効果(P. Thalmeier and P. Fulde: PRL 21 (1982) 1588)と類似した現象であり、4f電子系におけるフォノンの電子状態への寄与の例を新たに見出したと言える。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 21 件)

1. K. Iwasa, K. Saito, Y. Murakami and H. Sugawara: "Temperature evolution of crystal field splitting in Pr-filled skutterudite", J. Phys.: Conf. Ser. **200** (2010) 012071 (4pp) (査読有) .
2. K. Kuwahara, K. Tanaka, T. Saito, S. Tatsuoka, K. Iwasa, M. Watanabe, Y. Aoki, H. Sato, M. Kohgi, K. Iwasa, H.

- Sugawara, C. Stock and D. T. Adroja: “Crystal field excitations in  $\text{PrFe}_4\text{Sb}_{12}$  synthesized under high pressure”, *J. Phys. : Conf. Ser.* **200** (2010) 012101 (4pp) (査読有) .
3. C. Laulhé, K. Saito, K. Iwasa, H. Nakao and Y. Murakami: “Structural modulation and multipolar ordering in the metal-nonmetal compounds  $\text{Pr}(\text{Ru}_{1-x}\text{Rh}_x)_4\text{P}_{12}$ ”, *J. Phys. : Conf. Ser.* **200** (2010) 012102 (4pp) (査読有) .
  4. Kotaro Saito, Claire Laulhé, Kazuaki Iwasa and Youichi Murakami: “Rh-substitution effect on  $4f$ -electron states in multipole ordered phase of  $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ ”, *J. Phys. : Conf. Ser.* **200** (2010) 012170 (4pp) (査読有) .
  5. S. Raymond, K. Kuwahara, K. Kaneko, K. Iwasa, M. Kohgi, A. Hiess, J. Flouquet, N. Metoki, H. Sugawara, Y. Aoki and H. Sato: “Excitation spectrum of  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  under a magnetic field”, *J. Phys. : Condens. Matter* **21** (2009) 215702 (5pp) (査読有) .
  6. Kazuaki Iwasa, Kotaro Saito, Youichi Murakami, and Hitoshi Sugawara: “Electronic hybridization effect on  $4f$  electron crystal field states of  $\text{PrOs}_4\text{P}_{12}$ ”, *Phys. Rev. B* **79** (2009) 235113-1-6 (査読有) .
  7. K. Kuwahara, K. Iwasa, M. Kohgi, N. Aso, M. Sera, F. Iga, M. Matsuura, K. Hirota: “Magnetic octupole ordering in  $\text{Ce}_{0.7}\text{La}_{0.3}\text{B}_6$ : A polarized neutron diffraction study”, *Physica B* **404** (2009) 2527-2528 (査読有) .
  8. K. Kuwahara, M. Takagi, K. Iwasa, S. Itobe, D. Kikuchi, Y. Aoki, M. Kohgi, H. Sato and H. Sugawara: “Crystal field excitations in the filled skutterudite  $\text{NdOs}_4\text{Sb}_{12}$ ”, *Physica B: Condensed Matter* **403** (2008) **903-905** (査読有) .
  9. J.-G. Park, D. T. Adroja, K. A. McEwen, M. Kohgi, and K. Iwasa: “Inelastic neutron scattering from  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$  at low temperatures and under high magnetic fields”, *Phys. Rev. B* **77** (2008) 085102-1-6 (査読有) .
  10. Daisuke Okuyama, Takeshi Matsumura, Takuya Mouri, Naoko Ishikawa, Kenji Ohoyama, Haruhiro Hiraka, Hironori Nakao, Kazuaki Iwasa, Youichi Murakami: “Competition of Magnetic and Quadrupolar Order Parameters in  $\text{HoB}_4$ ”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **77** (2008) 044709-1-4 (査読有) .
  11. Hideyuki Sato, Daisuke Kikuchi, Kenya Tanaka, Makoto Ueda, Hidekazu Aoki, Tsuyoshi Ikeno, Sho Tatsuoka, Keitaro Kuwahara, Yuji Aoki, Masafumi Kohgi, Hitoshi Sugawara, Kazuaki Iwasa, and Hisatomo Harima: “Novel Features Realized in the Filled Skutterudite Structure”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **77** (2008) Supplement A, 1-6 (査読有) .
  12. S. Raymond, K. Kuwahara, K. Kaneko, K. Iwasa, M. Kohgi, A. Hiess, M.-A. Méasson, J. Flouquet, N. Metoki, H. Sugawara, Y. Aoki, and H. Sato: “Inelastic Neutron Scattering Study of the Heavy Fermion Superconductor  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ ”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **77** (2008) Supplement A, 25-30 (査読有) .
  13. Kazuaki Iwasa, Lijie Hao, Youichi Murakami, Masahumi Kohgi, Keitaro Kuwahara, Hitoshi Sugawara, Tatsuma D. Matsuda, Yuji Aoki, Hideyuki Sato, Jean-Michel Mignot, and Arsen Gukasov: “Field Induced Magnetic Moment Distribution in the Ordered Phase of  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ ”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **77** (2008) Supplement A, 67-71 (査読有) .
  14. Kazuaki Iwasa, Shouhei Itobe, Changping Yang, Youichi Murakami, Masahumi Kohgi, Keitaro Kuwahara, Hitoshi Sugawara, Hideyuki Sato, Naofumi Aso, Takashi Tayama, and Toshiro Sakakibara: “Magnetic Correlation in the Ordered Phase of  $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$ ”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **77** (2008) Supplement A, 318-320 (査読有) .
  15. Yoshiaki Kato, Masashi Kosaka, Hiromi Nowatari, Yuta Saiga, Atsushi Yamada, Takuya Kobiyama, Susumu Katano, Kenji Ohoyama, Hiroyuki S. Suzuki, Naofumi Aso, and Kazuaki Iwasa: “Spin-Singlet Ground State in the Two-Dimensional Frustrated Triangular Lattice:  $\text{YbAl}_3\text{C}_3$ ”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **77** (No. 5) (2008) 053701 (査読有) .
  16. Kazuaki Iwasa, Lijie Hao, Tomoo Hasegawa, Kenji Horiuchi, Youichi

- Murakami, Junya Otsuki, Yoshio Kuramoto, Masahumi Kohgi, Keitaro Kuwahara, Hitoshi Sugawara, Yuji Aoki, and Hideyuki Sato: “Magnetic Excitations in Heavy Electron State of Filled Skutterudite  $\text{Pr}_x\text{La}_{1-x}\text{Fe}_4\text{P}_{12}$  ( $x = 1.00$  and  $0.85$ )”, J. Phys. Soc. Jpn. **77** (2008) 063706-1-4 (査読有) .
17. 岩佐和晃, 桑原慶太郎, 神木正史: 「Pr 充填スクッテルダイトにおける  $4f$  電子多極子秩序と励起」、固体物理 **43** (2008) 207-220 (4月号、通巻506号) (査読有) .
  18. Yuji Aoki, Takashi Tayama, Toshiro Sakakibara, Keitaro Kuwahara, Kazuaki Iwasa, Masahumi Kohgi, Wataru Higemoto, Douglas E. MacLaughlin, Hitoshi Sugawara, Hideyuki Sato: “The Unconventional Superconductivity of Skutterudite  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ : Time-Reversal Symmetry Breaking and Adjacent Field-Induced Quadrupole Ordering”, J. Phys. Soc. Jpn. **76** (2007) 051006-1 - 13 (査読有) .
  19. Keitaro Kuwahara, Kazuaki Iwasa, Masahumi Kohgi, Naofumi Aso, Masafumi Sera, and Fumitoshi Iga: “Detection of Neutron Scattering from Phase IV of  $\text{Ce}_{0.7}\text{La}_{0.3}\text{B}_6$ : A Confirmation of the Octupole Order”, J. Phys. Soc. Jpn. **76** (2007) 093702-1 - 4 (査読有) .
  20. H. Nakao, K. Kiyoto, K. Nakatsuka, D. Bizen, T. Murata, S. Kodama, T. Matsumura, K. Iwasa, Y. Murakami, A. Ochiai: “Valence state in  $R_4\text{As}_3$  ( $R = \text{Yb}$  and  $\text{Eu}$ ) studied by resonant and non-resonant X-ray scattering”, J. Phys. Chem. Solids **68** (2007) 2064-2067 (査読有) .
  21. K. Iwasa, Y. Mori, L. Hao, Y. Murakami, M. Kohgi, H. Sugawara and H. Sato: “Softening phonon and relaxation mode in the filled skutterudite  $\text{PrT}_4\text{Sb}_{12}$  ( $T = \text{Ru}$  and  $\text{Os}$ )”, J. Phys.: Conf. Ser. **92** (2007) 012122-1-4 (査読有) .
  2. 岩佐和晃ほか、「Pr 充填スクッテルダイトの結晶場励起スペクトルに見られる混成効果」、日本物理学会第64回年次大会、立教大学池袋キャンパス、2009年3月29日
  3. 岩佐和晃ほか、「Pr 充填スクッテルダイトの結晶場励起における  $p-f$  混成効果」、日本中性子科学会第8回年会、名古屋大学豊田講堂、2008年12月1日
  4. 岩佐和晃ほか、「希土類化合物におけるフォノン異常と電子格子相互作用」、日本物理学会2008年秋季大会、岩手大学上田キャンパス、2008年9月20日
  5. 岩佐和晃ほか、「Ceモノプニクタイトにおける  $p-f$  混成に基づく動的Jahn-Teller効果」、日本物理学会2008年第63回年次大会、近畿大学本部、2008年3月23日
  6. 岩佐和晃ほか、「 $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$  における  $4f$  電子の反強制的スカラータイプ秩序」、日本中性子科学会第7回年会、福岡(九州大学)、2007年11月27日
  7. Kazuaki Iwasa et al., “Magnetic Correlation in the Ordered Phase of  $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$ ”, International Conference on “New Quantum Phenomena in Skutterudite and Related Systems” (poster), Kobe Univ., 29 Sep. 2007.
  8. K. Iwasa et al., “Field induced magnetic moment distribution in the ordered phase of  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ ”, International Conference on “New Quantum Phenomena in Skutterudite and Related Systems”, Kobe Univ., 28 Sep. 2007.
  9. 岩佐和晃ほか、「 $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$  における低エネルギーソフトフォノン」、日本物理学会2007年第62回年次大会、北海道大学、2007年9月21日
  10. K. Iwasa et al., “Softening Phonon and Relaxation Mode in the Filled Skutterudite  $\text{PrT}_4\text{Sb}_{12}$  ( $T = \text{Ru}$  and  $\text{Os}$ )”, 12th International Conference on Phonon Scattering in Condensed Matter (PHONONS2007), Paris, 16 July 2007.

[その他]

ホームページ

<http://sheat.phys.tohoku.ac.jp/~iwasa/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岩佐 和晃 (IWASA Kazuaki)

東北大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号: 00275009

[学会発表] (計 39 件)

1. Kazuaki Iwasa et al., “Temperature evolution of crystal field splitting in  $\text{PrOs}_4\text{P}_{12}$ ” (Oral Contribution), The International Conference on Magnetism 2009, Karlsruhe, Germany, July 31, 2009.