

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 13 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24654080

研究課題名(和文) 質量勾配をもつ非一様系での偏在的原子振動モードであるグレーダンの検証

研究課題名(英文) Verification of gradon as a localized atomic vibrations in inhomogeneous materials with mass gradient

研究代表者

岩佐 和晃 (Iwasa, Kazuaki)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00275009

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：物質の結晶構造は空間配列した原子とそれらの振動からなる。原子振動の集団現象はフォノン(格子振動)と呼ばれ、古くから一様な密度を持つ物質に対して調べられてきた。本研究では、質量勾配がある非一様物質や、環境により結晶構造が変化する物質でのフォノンに焦点を当てた。特に後者について希土類六硼化物GdB₆、TbB₆、DyB₆を取り上げ、それらのフォノンが非常にゆっくりした原子振動であり、かつ低い温度で出現するとされていた結晶構造がかなり高温でもわずかながら存在するという非一様性を見出した。これは物質の電気伝導や熱伝導に影響を及ぼす可能性があると考えている。

研究成果の概要(英文)：Materials are characterized by crystal structures represented in terms of atomic spatial arrangement and vibrations. Cooperative vibration of atomic groups is called phonon (lattice vibration), and it has been investigated for homogeneous systems in detail. In the present research, phonon modes in materials with mass gradient and in materials exhibiting structural transformations are investigated. As one topic of the latter issue, anomalously low-frequency phonon modes are discovered in the rare-earth hexaboride GdB₆, TbB₆, and DyB₆. In particular, these exhibit inhomogeneous state in which micro domains of the low-temperature structure survive at much higher temperature than reported previously. This inhomogeneous structural fluctuation is expected to influence on electrical and thermal conductivity.

研究分野：固体物理学

キーワード：フォノン 質量勾配物質 中性子散乱 X線回折

1. 研究開始当初の背景

ナノ構造やハイブリッドマテリアルなど、異なる物質を組み合わせた非一様系で発現する新物性が、応用的側面とも相まって積極的に開拓されている。また自然界でも密度や構造がマクロに非一様な物体が一般的であり、理想的な周期系での物理現象に加え、非一様系の性質の実験的解明が課題である。

本研究では、質量密度や原子間結合力がマクロな勾配をもつ非一様系に固有の格子振動に着目した。結晶格子を構成する原子質量が一方向に変化する系に対する振動解の数値計算が示された (J. J. Xiao, K. Yakubo and K. W. Yu: Phys. Rev. B **73** (2006) 054201, 224201)。周期系の固有振動解は系の両端間を伝播するが、質量勾配系では振動数に応じて原子サイト数で 100 ~ 1000 程度の領域に偏在する新しい振動状態が指摘された。これはいわゆる不純物原子の局在振動モードとも明確に区別される。質量密度や原子間結合力の勾配系におけるこの偏在モードは「グレードン (gradon)」と名付けられた。

2. 研究の目的

上記の新しいダイナミクス「グレードン」を、後述する多様な物質を対象として実験的に検証することを本研究の目的とした。

一方向に質量勾配をもつ物質が、Si-Ge 混晶系、浮遊帯域法合成による元素置換遷移金属酸化物、高電圧により原子拡散したイオン伝導物質などで可能であると考えた。これらの質量勾配系では反転対称性の破れにより格子振動の進行波異方性や偏在が期待できる。物質内部まで到達してフォノン励起を観測できる中性子散乱により、グレードン振動状態を見いだせるかを検証する。さらに勾配磁気系のスピンドダイナミクスにおけるグレードンに発展させることを着想した。

3. 研究の方法

非一様勾配物質での格子振動のエネルギースペクトルを中性子非弾性散乱によって測定し、グレードンバンドや勾配方向にユニークな振動状態を検討した。申請者が管理運営している東北大学理学部中性子分光器 (日本原子力研究開発機構研究用原子炉 JRR-3 に設置) にて主な実験を行うことを計画した。

しかし、後述するように原子炉施設が稼働せず、上記当初計画を実施することは困難となった。そのため希土類六硼化物を対象物質として、カゴ状物質における新しいフォノン状態と準安定結晶構造相の出現による非一様構造化に関する X 線散乱研究を並行した。さらにスタナイド化合物を合成し、電荷密度波構造と原子変位構造からなる複合構造の位相関係を実験的に探る試みを開始した。

4. 研究成果

(1) Si を傾斜ドーブした Ge 結晶におけるフォノン非対称性

濃度傾斜させて Si をドーブした Ge 単結晶のフォノン測定を試みた。立方晶の結晶軸 [100] 方向の試料長 7 mm において Si 濃度が 0 から 6% まで変化している試料を、東北大学金属材料研究所 (現名古屋大院工)・宇佐美先生より提供いただいた (K. Nakajima et al.: J. Crystal Growth **240** (2002) 373)。この勾配方向の反転対称性が破れるので、[100] 正負への進行波は等価でなくなると予想し、[100] と [-100] 方向それぞれに伝播する音響フォノンを測定した。結果を図 1 に示す。上下の図はそれぞれ伝播ベクトル $(\pm 0.6, 0, 0)$ と $(\pm 0.9, 0, 0)$ の縦波音響フォノンのスペクトルである。わずかながら正負方向の伝播ベクトルのスペクトル重心が一致せず、非一様勾配系の非対称性と考えられる。過去に報告されている母物質 Ge の格子振動の分散関係 (H. Bilz and W. Kress: "Phonon Dispersion Relations in Insulators" (Springer-Verlag, 1979) p. 97-98) と比較したが、本研究における Si ドープ Ge の振動エネルギーは明瞭には異なっていない。またこの系での質量勾配がフォノンモードの偏在性が期待される値より小さく、グレードンの特徴を明瞭に示していない

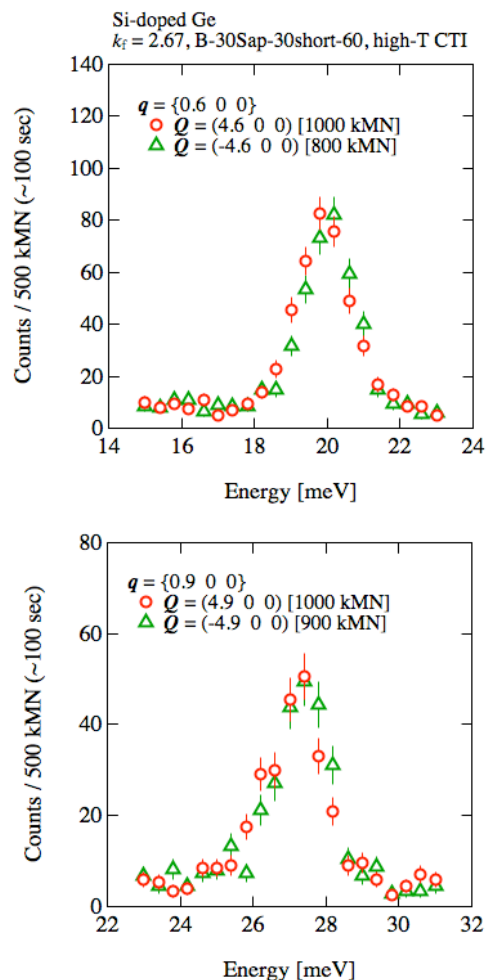


図 1. [100] 方向に勾配をもって Si 置換された Ge 単結晶の [100], [-100] 方向に伝播するフォノンスペクトル。

いと考えられる。今後の課題として、スペクトル幅の高精度測定により空間的な偏在性あるいは寿命を検討することが必要である。

またイオン伝導により Tl と Br の濃度勾配が現れる TlBr 単結晶 (人見ら: 第 69 回応用物理学学会学術講演 (2008 年 9 月)) が質量勾配の大きい系と考えたが、中性子非弾性散乱実験の機会がとれなかった。

(2) 研究環境について

上述した当初計画では、日本原子力研究開発機構研究用原子炉 JRR-3 に設置された東北大学理学部中性子分光器を用いた質量勾配系の振動状態の観測を主たる目標と定めた。グレードンは物質内部の偏在振動が鍵となるため、物質内部への侵入長が長い中性子散乱による測定が最も有効である。(1)で述べた Si-doped Ge 単結晶の試行実験はこの装置で行った。しかし、2011 年 3 月 11 日の東日本大震災の発生後、今日まで JRR-3 は停止状態にあるため、萌芽的な本研究は思うように進捗しなかった。特に、試料の最適化を含めた試行錯誤を伴う実験を申請者が管理する本装置で行えず、その他の施設への課題申請によるマシンタイム取得を試みたが、十分ではなかった。そこで、格子振動と非一様構造に関する以下の関連テーマを追究した。

一方、J-PARC 物質・生命科学実験施設の加速器中性子源は稼働している。本研究のテーマとした物質の構造ダイナミクスをターゲットとする非弾性散乱装置の新規建設に参画した(東北大学と高エネルギー加速器研究機構の共同事業で建設中)。

(3) RB_6 ($R = \text{Gd, Tb, Dy}$) における非調和原子振動と準安定構造の形成

カゴ状格子中の空隙に充填された原子振動は非調和性が顕著になりうる。その大振幅振動による電荷揺らぎは、重い電子形成や熱伝導への影響など、新奇物性の起源として期待されている。本研究では、 RB_6 におけるホウ素のネットワーク構造に充填された希土類イオンの非調和振動を研究した。本研究の開始に先だって GdB_6 を報告した (K. Iwasa et al., Phys. Rev. B **84** (2011) 214308)。この物質の相転移 ($T_N = 16 \text{ K}$, $T^* = 10 \text{ K}$) では反強磁気秩序と結晶構造変化が同時に生じる (M. Amara et al.: Phys. Rev. B **72** (2005) 064447)。相転移温度以下で、Gd の磁気モーメント間の交換相互作用エネルギー利得をもたらすように Gd イオンが変位することによる長周期結晶構造とされている。同様の現象は TbB_6 ($T_N = 22 \text{ K}$) (S. E. Luca et al.: Physica B **350** (2004) e39, M. Amara et al.: Phys. Rev. B **82** (2010) 224411) および DyB_6 ($T_N = 23 \text{ K}$ および四極子転移 $T_0 = 31 \text{ K}$) (S. Kunii et al.: J. Solid State Chem. **154** (2000) 275, K. Takahashi et al.: J. Magn. Magn. Mater. **177-181** (1998) 1097) においても指摘されている。これらの一次相

転移に向かうフォノンの不安定性を明らかにするため、放射光 X 線非弾性散乱実験 (SPring-8 BL35XU) を実施した。

これに並行して DyB_6 の結晶構造相転移を、高エネルギー加速器研究機構放射光施設 (PF BL-4C) で調べた (K. Iwasa et al., JPS Conf. Proc. **3** (2014) 016026)。過去に四極子転移による立方晶-菱面体晶相転移のみが報告されていた (S. A. Granovsky et al.: J. Magn. Magn. Mater. **258-259** (2003) 529, K. Takahashi et al.: J. Magn. Magn. Mater. **177-181** (1998) 1097)。しかし本研究により、 $T_N = 23 \text{ K}$ 以下での反強磁気秩序化とともに長周期結晶構造が現れることを明らかにした。その構造は GdB_6 や TbB_6 とほぼ同様であり、三種類の RB_6 が明らかに共通の構造不安定性をもつことを意味している。

SPring-8 での放射光 X 線非弾性散乱実験で、三種類の RB_6 それぞれの T_N 以下で出現する長周期構造にあたる波数ベクトルにおけるフォノンのエネルギーが極めて低いことを見出した (K. Iwasa et al., J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) 113601, *ibid.* **83** (2014) 094604)。図 2 に示した立方晶の [100] 軸方向に伝播する縦波フォノン分散関係において、横軸 $\xi = 0.5$ が長周期構造の波数ベクトル (0.5, 0, 0) である。この位置でいずれの物質もフォノンエネルギーが極小をとる。一方、対照的に、 LaB_6 , CeB_6 , YbB_6 など同型物質では ξ が 0.5 に向かって増加するにしたがって単調にフォノンエネルギーも増加する (S. Kunii et al.: J. Phys. Soc. Jpn. **66** (1997) 1029, J. Solid State Chem. **154** (2000) 275, etc.)。さらに、 GdB_6 , TbB_6 , DyB_6 のいずれのフォノンモードも温度低下に伴ってソフトニングを示す。図 2 示した TbB_6 の 25 K の分散関係のように $\xi > 0.25$ の領域において、分散曲線が室温に比べて低エネルギー側に移動している。三物質の $\xi = 0.5$ におけるエネルギーの温度依存性を図 3 にまとめた。 GdB_6 , TbB_6 および DyB_6 各物質での室温から T_N までのエネルギー低下率はそれぞれ 13, 24, 29% であった。

これらの結果は 1 次相転移におけるランダウ自由エネルギー展開形式を用いて統一的に説明できる (J. A. Krumhansl and R. J. Gooding, Phys. Rev. B **39** (1989) 3047)。まず、ソフト化が顕著なフォノンのエネルギー $E(T)$ の温度依存性は $E^2(T) = C(T + T_0)$ と表される。原子変位量 $|\Psi|$ に対する自由エネルギー形式は $F = (a/2)|\Psi|^2 - (b/4)|\Psi|^4 + (c/6)|\Psi|^6$ であり、係数 a が $E^2(T)$ に比例する。実験により決定したフォノンエネルギーの温度依存性や相転移温度 (T_N) を用いて係数比 a/c , b/c を定めた結果、自由エネルギー曲線 F/c が得られた。図 4 に 40 K と 300 K での結果を示す。300 K では $|\Psi| = 0$ の高温相のみに自由エネルギー極小が見られる。一方の 40 K では、いずれの物質の自由エネルギーにも $|\Psi| = 0.25$ 近傍に準安定状態が見られる。

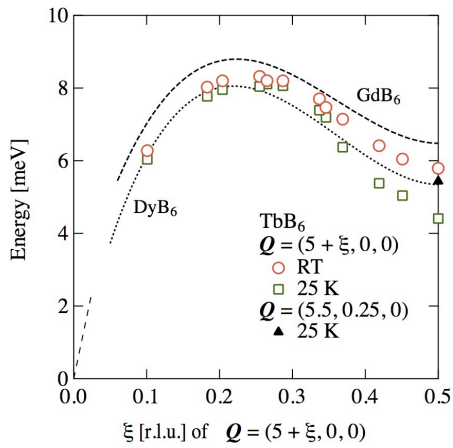


図 2. GdB₆, TbB₆ および DyB₆ 単結晶の室温における [100] 方向に伝播する縦波フォノン分散関係。TbB₆ の 25 K における結果も表示した。

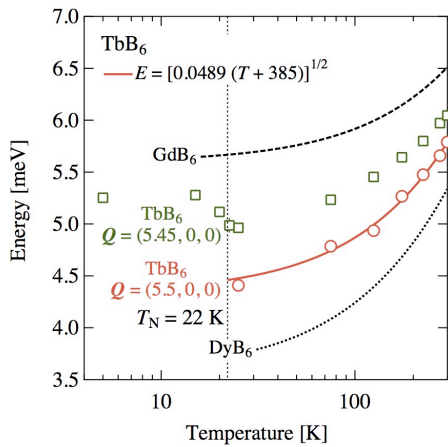


図 3. GdB₆, TbB₆ および DyB₆ における [100] 方向に伝播する縦波フォノンエネルギーの温度依存性。

高温相温度領域における準安定構造 ($|\Psi| \neq 0$) の実在を検証する X 線回折実験を行った。図 5(a) に TbB₆ の低温相構造がもたらす超格子反射位置での X 線回折プロファイルを高温相温度領域で測定した結果を示す。一方、図 5(b) に低温相温度領域での結果を示したが、このわずか 1% 程度の積分強度であるものの高温相でも超格子反射が残存している。またピーク幅は低温相温度領域よりも高温相温度領域で大きく、低温相構造が短距離秩序状に相転移温度よりも一桁程度高温でも存在している。すなわち先述の準安定構造を明らかにした。同様の準安定構造は GdB₆ でも確認され、希土類イオンの非調和振動による共通した性質であると考えられる。しかし DyB₆ では高温での準安定構造は観測されなかった。図 4 に示した 40 K での自由エネルギー曲線において、DyB₆ では $|\Psi| = 0.15$ 付近のエネルギー障壁が他の物質に比べて低い。また準安定相が出現する温度領域は、GdB₆ や TbB₆ に比べて相転移温度近傍に限られる。こ

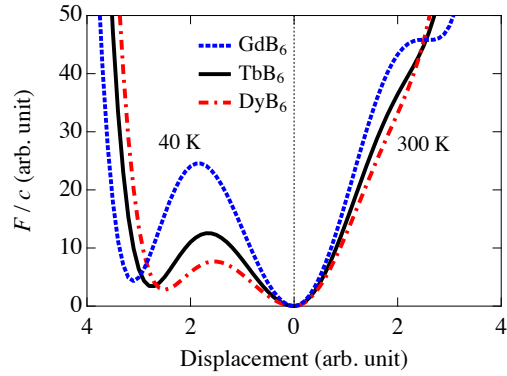


図 4. GdB₆, TbB₆ および DyB₆ におけるランダウ自由エネルギー曲線。

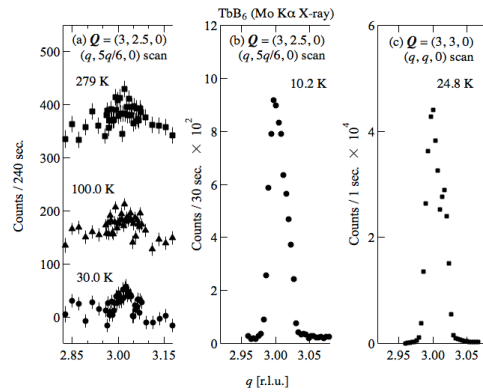


図 5. TbB₆ における X 線回折結果。(a) 高温相温度領域における超格子反射ピーク。(b) 10.2 K での超格子反射。(c) 24.8 K での基本反射。

れらのことから、DyB₆ では短寿命かつ相関距離が抑えられた準安定相が考えられる。そのため本研究での X 線回折実験の検出限界以下になったものと予想される。換言すると、強い非調和性による準安定相は RB₆ に共通しており、個別の構造に関する自由エネルギーに応じて現象の現れ方が異なる。

この成果は 2015 年 7 月に開催される国際会議 PHONONS2015 (英ノッティンガム大学) での口頭発表に選ばれた。

(4) 電荷密度波における複合構造の位相決定

電荷密度波を形成する相転移では、原子変位による長周期結晶構造と、伝導電子の局在化による電荷周期構造の二つが複合している。しかし二つの構造の相対位相が必ずしも実験的に明らかにされていないと思われる。そのブレイクスルーとして、共鳴 X 線散乱により特定の電子密度波からの散乱波と原子変位構造からの散乱波との干渉効果により相対位相を定める方法が提案されている (P. Abbamonte, Phys. Rev. B **74** (2006) 195113)。

本研究では、伝導バンドのギャップ形成を伴う構造相転移と極低温での重い電子状態を示す強相関電子系とされる Ce₃T₄Sn₁₃ ($T = \text{Co, Rh}$) (C. S. Lue et al., Phys. Rev. B **85**

(2012) 205120, A. L. Cornelius et al., *Physica B* **378-380** (2006) 113, A. Ślebarski et al., *Phys. Rev. B* **86** (2012) 205113, E. L. Thomas et al., *J. Solid State Chem.* **179** (2006) 1642) の複合構造を見出す試験研究を開始した。最近この物質群での相転移や低温電子状態が活発に報告されているが、必ずしも統一した見解が得られていない。そこで本研究にて Sn フラックス法で育成をした単結晶で物性の本質を把握することも目的とした。その結果、構造相転移の明瞭な観測に成功し、試料合成法による物性発現の差異を指摘した(大友ほか, 日本物理学会 2014 年秋季大会)。高エネルギー加速器研究機構における S 型放射光実験課題 (2012S-005、代表: 中尾裕則氏(KEK PF)) に参加して倍周期構造化を確定した。さらに共鳴 X 線散乱実験を進め、特に伝導電子を供給していると考えられる Sn の M_1 吸収端などでの軟 X 線領域での観測にも成功しており、目指す位相構造の決定への足がかりを得た。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件)

① K. Iwasa, F. Iga, A. Yonemoto, Y. Otomo, S. Tsutsui, and A. Q. R. Baron: "Universality of Anharmonic Motion of Heavy Rare-Earth Atoms in Hexaborides", *J. Phys. Soc. Jpn.* **83** DOI: (2014) 094604-1-6, 査読有, 10.7566/JPSJ.83.094604.

② K. Iwasa, M. Amano, H. Nakao, Y. Murakami: "Structural Modulation of the Cage Lattice System DyB_6 ", *JPS Conf. Proc.* **3** (2014) 016026-1-6, 査読有, DOI:10.7566/JPSJ.3.016026.

③ K. Iwasa, H. Kobayashi, K. Saito, K. Tomiyasu, S. Zhang, Y. Isikawa, J.-M. Mignot, G. André, D. Kawana, A. I. Kolesnikov, A. T. Savici, G. E. Granroth: "Neutron scattering study on f -electron states in $PrCu_4Au$ ", *JPS Conf. Proc.* **3** (2014) 011075-1-6, 査読有, DOI:10.7566/JPSJ.3.011075.

④ K. Saito, C. Laulhé, T. Sato, L. Hao, J.-M. Mignot, and K. Iwasa: "Emergence of reentrant metal-nonmetal transition in $Pr_{0.85}Ce_{0.15}Ru_4P_{12}$ and $Pr(Ru_{0.95}Rh_{0.05})_4P_{12}$ ", *Phys. Rev. B* **89** (2014) 075131-1-8, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevB.89.075131.

⑤ K. Ohoyama, T. Yokoo, S. Itoh, J. Suzuki, K. Iwasa, T. J. Sato, H. Kira, Y. Sakaguchi, T. Ino, T. Oku, K. Tomiyasu, M. Matsuura, H. Hiraka, M. Fujita, H. Kimura, T. Sato, J. Suzuki, H. M. Shimizu, T. Arima, M.

Takeda, K. Kaneko, M. Hino, S. Muto, H. Nojiri, C. H. Lee, J. G. Park, S. Choi: "Basic Concepts of Polarisation Analysis for Neutron Chopper Spectrometer POLANO at J-PARC", *J. Phys. Soc. Jpn.* **82** (2013) Supplement A SA036 (6 pages), 査読有, DOI: 10.1143/JPSJS.82SA.SA036.

⑥ K. Iwasa, H. Kobayashi, T. Onimaru, K. T. Matsumoto, N. Nagasawa, T. Takabatake, S. Ohira-Kawamura, T. Kikuchi, Y. Inamura and K. Nakajima: "Well-Defined Crystal Field Splitting Schemes and Non-Kramers Doublet Ground States of f Electrons in PrT_2Zn_{20} ($T = Ir, Rh, \text{ and } Ru$)", *J. Phys. Soc. Jpn.* **82** (2013) 043707 (5 pages), 査読有, DOI: 10.7566/JPSJ.82.043707.

⑦ 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: "Neutron scattering study on magnetic ordering in a partially rare-earth filled skutterudite $Pr_xFe_4Sb_{12}$ ", *Journal of Physics: Conference Series* **391** (2012) 012025 (4 pages), 査読有, DOI: 10.1088/1742-6596/391/1/012025.

⑧ K. Iwasa, L. Hao, M. Kohgi, K. Kuwahara, J.-M. Mignot, H. Sugawara, Y. Aoki, T. D. Matsuda, and H. Sato: "Magnetic Excitation in Totally Symmetric Staggered Ordered Phase of $PrFe_4P_{12}$ ", *J. Phys. Soc. Jpn.* **81** (2012) 094711 (9 pages), 査読有, DOI: 10.1143/JPSJ.81.094711.

⑨ K. Iwasa, K. Kuwahara, Y. Utsumi, K. Saito, H. Kobayashi, T. Sato, M. Amano, T. Hasegawa, N. Ogita, M. Udagawa, S. Tsutsui, and A. Q. R. Baron: "Renormalized Motion of Dysprosium Atoms Filling Boron Cages of DyB_6 ", *J. Phys. Soc. Jpn.* **81** (2012) 113601 (4 pages), 査読有, DOI: 10.1143/JPSJ.81.113601.

[学会発表] (計 15 件)

① 岩佐和晃, 米本在, 高木滋, 伊藤晋一, 横尾哲也, 井深壮史, 関根ちひろ, 菅原仁: 「 $PrRu_4P_{12}$ の f 電子多極子秩序への Nd イオン置換効果」、日本物理学会第 70 回年次大会、早稲田大学早稲田キャンパス、東京都新宿区、2015 年 3 月 21 日-24 日

② 岩佐和晃、大友優香、河村聖子、中島健次、鬼丸孝博、松本圭介、脇舎和平、高島敏郎: 「f 電子四極子系 PrT_2Zn_{20} における磁気励起の極低温測定」、日本中性子科学会第 14 回年会 (JSNS2014)、北海道立道民活動センター「かでの 2・7」、北海道札幌市、2014 年

12月11日～12日

③ 岩佐和晃, 齊藤耕太郎, 佐藤貴宏, 米本在, Lijie Hao, Claire Laulhé, J.-M. Mignot, 中尾裕則, 村上洋一, 伊藤晋一, 横尾哲也, 川名大地: 「PrRu₄P₁₂ の金属-非金属転移に対する元素置換効果の中性子・X線散乱による研究」、東京大学物性研究所短期研究会「スクッテルダイト化合物及び関連物質を舞台とした強相関電子系物理の新展開」、東京大学物性研究所、千葉県柏市、2014年10月10日-12日

④ 岩佐和晃, 齊藤耕太郎, 佐藤貴宏, Lijie Hao, C. Laulhé, J.-M. Mignot, 中尾裕則, 村上洋一, 伊藤晋一, 横尾哲也, 川名大地: 「リエンタラント金属-非金属転移を示すPrRu₄P₁₂ 元素置換系の量子ビーム散乱研究」、首都大学東京研究環「特異な結晶構造に創出する新奇量子相の解明」第2回研究会。首都大学東京南大沢キャンパス、東京都八王子市、2014年9月26日

⑤ 岩佐和晃, 大友優香, 河村聖子, 中島健次, 鬼丸孝博, 松本圭介, 脇舎和平, 高島敏郎: 「PrT₂Zn₂₀ (T = Os, Ir)における磁気励起スペクトル」、日本物理学会2014年秋季大会、中部大学 春日井キャンパス、愛知県春日井市、2014年9月7日-10日

⑥ 大友優香, 岩佐和晃, 富安啓輔, 河村聖子, 中島健次, 佐賀山遼子, 中尾裕則, 熊井玲児, 村上洋一: 「単結晶 R₃Co₄Sn₁₃ (R=Ce, La) の X 線・中性子線による研究」、日本物理学会2014年秋季大会、中部大学 春日井キャンパス愛知県春日井市、2014年9月7日-10日

⑦ 岩佐和晃, 五十嵐亮介, 天野光英, 伊賀文俊: 「RB₆ (R = Gd, Tb, Dy) の常磁性相における準安定超格子構造」、日本物理学会第69回年次大会、東海大学 湘南キャンパス、神奈川県平塚市、2014年3月27日-30日

⑧ 岩佐和晃, 齊藤耕太郎, 佐藤貴宏, 中尾裕則, 村上洋一, 伊藤晋一, 横尾哲也, 川名大地, J.-M. Mignot: 「Pr_{1-x}Ce_xRu₄P₁₂ におけるリエンタラント金属-非金属転移の量子ビーム散乱による研究」、物構研サイエンスフェスタ2013 第5回MLFシンポジウム(つくば国際会議場(エポカルつくば)、茨城県つくば市、2014年3月18日-19日

⑨ 岩佐和晃, 天野光英, 中尾裕則, 村上洋一: 「DyB₆ における超格子構造の X 線散乱研究」、日本物理学会2013年秋季大会、徳島大学常三島キャンパス、徳島県徳島市、2013年9月25日-28日

⑩ L. Hao, K. Iwasa, H. Kobayashi, K. Nakajima, S. Ohira-Kawamura, T. Kikuchi,

Z. Liu, Y. Liu, D. Chen: “Effects of Co substitution on the magnetic excitation in heavy fermion compound PrFe₄P₁₂”, The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems SCES’13, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, August 5-9 2013.

⑪ H. Kobayashi, K. Iwasa, K. Saito, K. Tomiyasu, D. Kawana, S. Zhang, Y. Isikawa, J.-M. Mignot, G. André, A. I. Kolesnikov, A. T. Savici, and G. E. Granroth: “Neutron scattering study of the magnetic state in PrCu₄Au”, The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems SCES’13, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, August 5-9 2013.

⑫ K. Iwasa, R. Igarashi, and M. Amano: “New Structural Modulations of the Cage Lattice Systems GdB₆ and DyB₆”, The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems SCES’13, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, August 5-9 2013.

⑬ 小林拓希, 岩佐和晃, 富安啓輔, 長澤直裕, 松本圭介, 鬼丸孝博, 高島敏郎: 「PrT₂Zn₂₀ (T = Ru, Rh, Ir) の結晶場準位」、日本物理学会第68回年次大会、広島大学東広島キャンパス、広島県東広島市、2013年3月26日-29日

⑭ 佐藤貴宏, 岩佐和晃, 齊藤耕太郎, 中尾裕則, 村上洋一, 伊藤晋一, 横尾哲也, 川名大地: 「リエンタラント金属非金属転移を示す Pr_{1-x}Ce_xRu₄P₁₂ の超格子構造の研究」、日本物理学会第68回年次大会、広島大学東広島キャンパス、広島県東広島市、2013年3月26日-29日

⑮ H. Kobayashi, K. Iwasa, K. Saito, K. Tomiyasu, D. Kawana, S. Zhang, Y. Isikawa, J.-M. Mignot, G. Andre, A. I. Kolesnikov, A. T. Savici and G. E. Granroth, “Neutron scattering study on f-electron states of PrCu₄Au”, The 19th International Conference on Magnetism, July 8-13 2012, BEXCO, Busan, Korea.

[その他]

ホームページ

<http://calaf.phys.tohoku.ac.jp/>

<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