

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24340087

研究課題名(和文) 極低温共鳴X線回折と完全偏光解析による磁場誘起多極子秩序の研究

研究課題名(英文) Magnetic field induced multipole orderings studied by resonant x-ray diffraction at very low temperatures with full polarization analysis

研究代表者

松村 武 (Matsumura, Takeshi)

広島大学・先端物質科学研究科・准教授

研究者番号：00312546

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：f電子系化合物で発生する多彩な電子秩序相を共鳴X線回折を使って研究するため、極低温と磁場という環境に加えて、入射X線偏光制御システムを構築し、完全偏光解析をも同時に行う環境を整えた。このシステムをフル活用することで、Ce_{0.7}La_{0.3}B₆における磁気八極子秩序相や、PrPd₃S₄、DyPd₃S₄、CePd₃S₄といった物質での多極子秩序状態が磁場によってどのように変化するかをミクロに調べ、微細なメカニズムを明らかにした。また、長年の謎であったSmRu₄P₁₂の中間秩序相の実態が、磁場誘起電荷秩序状態であることを突きとめることに成功した。

研究成果の概要(英文)：We have constructed an experimental system for resonant x-ray diffraction at very low temperatures with full polarization analysis, which is utilized for studies of various kinds of multipole ordered states of f-electron compounds. By fully utilizing this system, we have clarified microscopic mechanisms of octupole ordered phase in Ce_{0.7}La_{0.3}B₆ and quadrupole ordered states of PrPd₃S₄, DyPd₃S₄ and CePd₃S₄. In addition, we successfully found that the unknown ordered state in SmRu₄P₁₂ is an field induced charge ordered state, as has recently been theoretically predicted.

研究分野：磁性

キーワード：共鳴X線回折 多極子秩序 磁場誘起相転移

1. 研究開始当初の背景

電子が持つスピンと軌道の自由度が物質の磁性と伝導に強く影響を及ぼすことは古くからよく知られた概念である。例えば d 電子系では、立方晶 KCuF₃ において軌道秩序のために 1 次元磁性が出現するといった顕著な例があり、様々な物質の本質的理解のため、現在でもスピンと軌道の関わりに焦点を当てた研究が精力的に行われている。f 電子系では、スピンと軌道は強い相互作用によって複合化し、それが新たな多極子自由度を作り出すことで、実に多彩でエキゾチックな秩序現象を引き起こす。さらには、伝導電子との混成を通じて起こる重い電子状態や、新奇な超伝導現象においても重要な役割を担っていると考えられている。しかし、隠れたパラメータであるため、その本質は未解明の部分が多い。

このテーマに取り組むため、我々は、本研究に先立つ科学研究費補助金（基盤研究 A, H21-23 年度, No. 21244056）（特定領域研究, H21-22 年度, No. 21102515）の支援を受け、SPring-8 の JAEA ビームライン BL22XU に極低温・磁場中での共鳴 X 線回折を目的とした実験システムを構築した。KEK-PF 式 8T 超伝導マグネットに自作の 3He ガス循環式冷凍機を組み込むことで、最低温度 0.6 K、磁場 8 T の環境を実現し、これまで手が届かなかった多くの f 電子系物質に対して共鳴 X 線回折による研究が可能になった。さらに、入射 X 線の偏光方向を制御する移相子システムを用いた完全偏光解析を組み合わせることで、フルスペックでの研究が可能となっており、今や世界に類を見ない強力な手法が本格的な実用段階に入ったと言える。

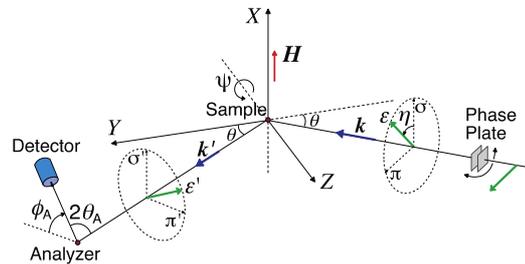
2. 研究の目的

本研究の目的は、スピンと軌道の自由度が絡み合って生じた電気四極子や磁気八極子、さらには電気十六極子などの高次多極子自由度を共鳴 X 線回折で直接観測し、特に f 電子系物質において、多極子相互作用が極低温および磁場下で引き起こす多彩な秩序現象のミクロな機構を解明することである。マクロ物性はもちろん、中性子散乱でも観測困難なこれらの自由度は隠れた秩序変数と呼ばれる。これを最近我々が立ち上げた極低温磁場中共鳴 X 線回折システムおよび入射 X 線偏光制御システムを駆使して観

測し、温度-磁場相図中での秩序変数の移り変わりを詳しく調べる。理論との比較も合わせて、f 電子系における高次多極子自由度が創出する様々な秩序相の本質を明らかにする。

3. 研究の方法

Ce_xLa_{1-x}B₆ 系、充填スクッテルダイト化合物、希土類クラスレート Ce₃Pd₂₀Si₆ など、様々な典型物質の磁場誘起秩序相で共鳴 X 線回折を行う。実験では、完全偏光解析と磁場反転法を組み合わせることで、中性子散乱では観測できない多極子秩序変数を各相で決定していく。同時に、その磁場変化や温度変化の様子も詳しく調べ、秩序変数が移り変わる様子を明らかにし、理論モデルを基にした具体的な波動関数とリンクさせた理解を目指す。

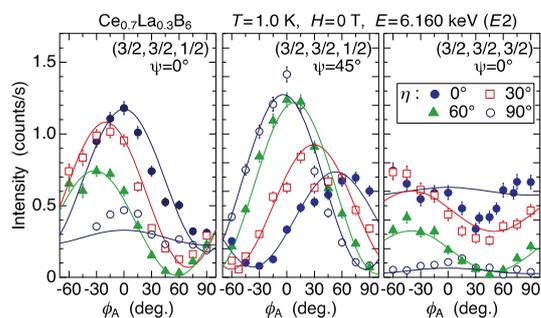


〔完全偏光解析〕従来、共鳴 X 線回折により軌道自由度などの秩序変数を同定する場合、ある一つの回折ピークについて散乱ベクトルまわりで試料を回転させ、その散乱因子テンソルの異方性に応じた強度変化、いわゆるアジマス角依存性を測定し、その結果を再現する秩序モデルを立てるという手法をとっていた。小型冷凍機を使った無磁場での実験ならこれが可能であるが、超伝導マグネットによる磁場中に試料がある場合、試料の回転は磁場方向の変化、従って秩序変数の変化を意味する（磁場も一緒に回転させることはできない）。そこで本研究では、試料ではなく入射 X 線の偏光方向を回転させる手法をとる。放射光リングからのビームは水平方向の直線偏光である。ここにダイヤモンド完全結晶を用いた移相子 (1/2 波長板) を入れ、光軸まわりに回転させることで、偏光方向を回転させ、角度 ψ を自由に制御する。さらに偏光解析装置を用いて、いくつかの入射偏光角度 ϕ_A について回折強度の A 依存性 (または逆にいくつかの A についての ϕ_A 依存性) を測定することで、回折 X 線の偏光状態を調べる。これが完全偏光解析であり、従来のように単に水平と垂直だけ

の偏光変化(- と - , または - と -)を調べる方法に比べて, 秩序変数決定の信頼度が上昇し, アジマス角依存性の測定が意味をなさない磁場中において, 強力な手法となる.

4. 研究成果

〔移相子システム〕SPring-8のBL22XUビームラインにおいて, 入射X線偏光制御システムを構築した. 本システムでは, 2枚のダイヤモンド完全結晶を配置することで, 色収差を補正し, 偏光ビーム時において96%を超える高い偏光度を実現した(論文7). このシステムは, $Ce_{x}La_{1-x}B_6$ や $PrPd_3S_4$, $CePd_3S_4$, $DyPd_3S_4$, $SmRu_4P_{12}$ など, 様々な実験に適用されている. 下図は $Ce_{0.7}La_{0.3}B_6$ の磁気八極子秩序相における完全偏光解析である. と ϕ_A の両方を変え, 強度変化を測定することが可能になった.



〔 $Ce_{0.7}La_{0.3}B_6$ 〕 CeB_6 は反強四極子秩序(II相, 5g-AFQ)と反強磁性秩序(III相, AFM)を起こす物質で, CeをLaで希釈すると, さらにIV相と呼ばれる奇妙な相が出現する. 上図の結果からも, この相は5u(T)型の磁気八極子秩序相(AF0)であることがほぼ確定的となった. ただし, AFQ相互作用が消えたわけではなく, ゼロ磁場では5u-AF0が5g-AFQより優勢になったということである. これら多彩な秩序状態の移り変わりをどう理解するかは未解決の問題であり, IV相転移での帯磁率のカスプ異常や, 磁気相図の特徴を分子場モデルで再現することには成功していない.

本研究でIV相での散乱強度の磁場依存性を測定したところ, 磁場中で誘起された多極子による干渉効果が観測された. 偏光解析の結果, II相III相の秩序変数である5g-AFQ(0yz, 0zx, 0xy)が強く誘起されていることがわかった. しかし, 分子場モデルでは, 5u-AF0相での主要な誘起モーメントは

3g-AFQ(020, 022)であるはずであり, 実験結果を説明できない. このことは, IV相内においても5g-AFQ相への強い不安定性をかかえていることを示している(論文5).

〔 $SmRu_4P_{12}$ 〕 $SmRu_4P_{12}$ はTMI=16.5Kで金属絶縁体転移を起こすと同時に磁気的な秩序状態に転移する. 奇妙なのは, その秩序相内に別の転移($T^* \approx 14K$)が存在し, 磁場の印加と共に比熱などの異常が増強されていく点である. 中性子回折をはじめ, NMRや μ SRなどから, TMI以下は反強磁性秩序相であることが強く示唆されているが, 中間相については磁気八極子秩序などの可能性も指摘されており, 理解は進んでいない. そこで, SPring-8のBL22XUで共鳴X線回折実験を行ったところ, 最近, 椎名によって提案されたp-f混成を起源とするCDW不安定性に基づく解釈と整合する結果が得られた(論文3).

まず, 300禁制反射点において, 16.5K以下で生じる共鳴信号を観測した. 反強磁性秩序を反映したものと考えられる. 注目すべきは, $T^* < T < TMI$ の中間相で電荷による非共鳴散乱が磁場で誘起される点である. これはまさに, 理論で提案されている磁場誘起電荷秩序(CDW, 16極子秩序)に伴って生じた何らかの原子変位を反映したものと推測される. また, 磁気散乱による共鳴との干渉効果から, 磁気構造にも7と8の結晶場交替型秩序を反映した変化が生じていると考えている. つまり, $PrRu_4P_{12}$ や $PrFe_4P_{12}$ と同様な機構による全対称型秩序が $SmRu_4P_{12}$ では磁場で誘起されているということになる.

〔超高分解能格子定数測定システム〕 $2\theta = 180^\circ$ の背面反射配置で, 10^{-5} オーダーの精度で格子定数の変化を測定するシステムを構築した. これを用いて, $Ce_{0.7}La_{0.3}B_6$ の磁気八極子秩序に伴って生じる格子歪みの観測に成功した(論文2). これにより, 共鳴X線回折実験とあわせて, これまで理論的な予測でしかなかった磁気八極子秩序が, 実験的にも確定的となり, より定量的な議論が可能になった.

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12件)

1. "Appearance of antiferromagnetic dipole order in $Ce_{0.5}La_{0.5}B_6$ with Pr ion doping",

T. Matsumura, K. Kunimori, A. Kondo, K. Soejima, H. Tanida, J.-M. Mignot, F. Iga, and M. Sera, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 094724-1-5 (2014). 査読有 . DOI: 10.7566/JPSJ.83.094724

2. "Large ferroquadrupole moment induced in the octupole-ordered Ce_{0.7}La_{0.3}B₆ revealed by high-resolution x-ray diffraction", T. Inami, S. Michimura, Y. Hayashi, T. Matsumura, M. Sera, and F. Iga, Phys. Rev. B **90**, 041108(R)-1-5 (2014). 査読有 . DOI: 10.1103/PhysRevB.90.041108

3. "Magnetic-field-induced charge order in the filled skutterudite SmRu₄P₁₂: Evidence from resonant and nonresonant x-ray diffraction", T. Matsumura, S. Michimura, T. Inami, Y. Hayashi, K. Fushiya, T. D. Matsuda, R. Higashinaka, Y. Aoki, and H. Sugawara, Phys. Rev. B **89**, 161116(R)-1-5 (2014). 査読有 . DOI: 10.1103/PhysRevB.89.161116

4. "Evidence for hidden quadrupolar fluctuations behind the octupole order in Ce_{0.7}La_{0.3}B₆ from resonant x-ray diffraction in magnetic fields", T. Matsumura, S. Michimura, T. Inami, T. Otsubo, H. Tanida, F. Iga, and M. Sera, Phys. Rev. B **89**, 014422-1-13 (2014). 査読有 . DOI: 10.1103/PhysRevB.89.014422

5. "Multipole order and fluctuation in Ce_{0.7}La_{0.3}B₆ studied by resonant x-ray diffraction", T. Matsumura, S. Michimura, T. Inami, T. Otsubo, H. Tanida, F. Iga, and M. Sera, JPS Conf. Proc. **3**, 014008-1-6 (2014). 査読有 . 10.7566/JPSCP.3.014008

6. "Pressure-induced quadrupole order and Kondo effect in CeTe", Y. Hayashi, H. Takaguchi, T. Matsumura, M. Sera, and A. Ochiai, JPS Conf. Proc. **3**, 011035-1-5 (2014). 査読有 . 10.7566/JPSCP.3.011035

7. "Double phase-plate setup for chromatic aberration compensation for resonant x-ray diffraction experiments", T. Inami, S. Michimura, and T. Matsumura, J. Phys: Conf. Ser. **425**, 132011-1-5 (2013). 10.1088/1742-6596/425/13/132011

8. "Unified understanding of the valence transition in the rare-earth monochalcogenides under pressure", I.

Jarrige, H. Yamaoka, J.-P. Rueff, J.-F. Lin, M. Taguchi, N. Hiraoka, H. Ishii, K. D. Tsuei, K. Imura, T. Matsumura, A. Ochiai, H. S. Suzuki, and A. Kotani, Phys. Rev. B **87**, 115107-1-5 (2013). 査読有 . DOI: 10.1103/PhysRevB.87.115107

9. "Resonant x-ray scattering experiments on the ordering of electronic degrees of freedom", T. Matsumura, H. Nakao, and Y. Murakami, J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 021007-1-18 (2013). 査読有 . DOI: 10.7566/JPSJ.82.021007

10. "New type of the domain-redistribution at low magnetid fields in phase II of CeB₆", K. Kunimori, M. Sera, H. Tanida, T. Matsumura, and F. Iga, J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 104706-1-6 (2012). 査読有 . DOI: 10.1143/JPSJ.81.104706

11. "Antiferroquadrupole order and magnetic field induced octupole in CeB₆", T. Matsumura, T. Yonemura, K. Kunimori, M. Sera, F. Iga, T. Nagao, and J. I. Igarashi, Phys. Rev. B **85**, 174417-1-10 (2012). 査読有 . DOI: 10.1103/PhysRevB.85.174417

12. "Resonant X-ray diffraction study of multipole ordering in the ferromagnetic compound CePd₃Si₄", S. Michimura, T. Inami, E. Matsuoka, M. Watahiki, K. Tanigaki, and H. Onodera, J. Phys. Soc. Jpn., **81**, 04711-1-5 (2012). 査読有 . DOI: 10.1143/JPSJ.81.044711

[学会発表](計 28 件)

1. 宗重瑞稀, 高井駿, 中村至央, 谷田博司, 松村武, 世良正文, 「希土類斜方晶 R-Al-Ge 化合物の磁性 III」, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 21-24 日, 早稲田大学・早稲田キャンパス .
2. 中川史也, 野原大貴, 谷田博司, 松村武, 世良正文, 西岡孝, 松村政博, 「反強磁性近藤半導体 Ce(Ru_{0.95}Rh_{0.05})₂Al₁₀ における Ce サイトの La 置換効果」, 日本物理学会第 70 回年次大会 2015 年 3 月 21-24 日, 早稲田大学・早稲田キャンパス .
3. 高井駿, 中村至央, 松村武, 谷田博司, 世良正文, 西岡孝, 松村政博, 「近藤半導体 CeRu₂Al₁₀ の電子状態に与える Sm 置換効果(II)」, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 21-24 日, 早稲田大学・早稲田キャンパス .
4. 松村武, 林佑弥, 世良正文, 落合明, 「CeX(X=S, Se, Te)における結晶場状態と c-f 混成効果」, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 21-24 日, 早稲田大学・

- 早稲田キャンパス。
5. 林佑弥, 高井駿, 松村武, 世良正文, 松林和幸, 上床美也, 落合明, 「圧力下電気抵抗測定によるCeXc(Xc=S, Se, Te)のc-f混成効果の研究 II」, 日本物理学会第70回年次大会, 2015年3月21-24日, 早稲田大学・早稲田キャンパス。
 6. 高井駿, 中村至央, 松村武, 谷田博司, 世良正文, 西岡孝, 松村政博, 「近藤半導体CeRu₂Al₁₀の電子状態に与えるSm置換効果」, 日本物理学会2014年秋季大会, 2014年9月7-10日, 中部大学・春日井キャンパス。
 7. 中川史也, 野原大貴, 谷田博司, 松村武, 世良正文, 西岡孝, 松村政博, 「磁化容易軸aの近藤半導体Ce(Ru_{0.95}Rh_{0.05})₂Al₁₀におけるCeサイトのLa置換効果」, 日本物理学会2014年秋季大会, 2014年9月7-10日, 中部大学・春日井キャンパス。
 8. 宗重瑞稀, 世良正文, 松村武, 谷田博司, 中村至央, 高井駿, 「希土類斜方晶R-Al-Ge化合物の磁性 II」, 日本物理学会2014年秋季大会, 2014年9月7-10日, 中部大学・春日井キャンパス。
 9. 吉田康助, 大久保亮, 谷田博司, 松村武, 世良正文, 西岡孝, 松村政博, 「近藤半導体CeRu₂Al₁₀:CeサイトのPr置換効果」, 日本物理学会2014年秋季大会, 2014年9月7-21日, 中部大学・春日井キャンパス。
 10. 世良正文, 中川史也, 吉田康助, 野原大貴, 谷田博司, 松村武, 西岡孝, 松村政博, 「CeRu₂Al₁₀の異常反強磁性秩序状態に対するCe, Ruサイト置換効果」, 日本物理学会2014年秋季大会, 2014年9月7-10日, 中部大学・春日井キャンパス。
 11. 林佑弥, 高井駿, 松村武, 世良正文, 松林和幸, 上床美也, 落合明, 「圧力下電気抵抗測定によるCeXc(Xc=S, Se, Te)のc-f混成効果の研究」, 日本物理学会2014年秋季大会, 2014年9月7-10日, 中部大学・春日井キャンパス。
 12. 稲見俊哉, 道村真司, 松村武, 世良正文, 芳賀芳範, Z. Fisk, 「高分解能X線回折によるCeB₆のI-II-III相転移の観察」, 日本物理学会2014年秋季大会, 2014年9月7-21日, 中部大学・春日井キャンパス。
 13. 松村武, 道村真司, 稲見俊哉, 林佑弥, 伏屋健吾, 松田達磨, 東中隆二, 青木勇二, 菅原仁, 「磁場中X線回折によるSmRu₄P₁₂の磁場誘起秩序相の研究」, 日本物理学会2014年秋季大会, 2014年9月7-10日, 中部大学・春日井キャンパス。
 14. 松村武, 道村真司, 稲見俊哉, 林佑弥, 伏屋健吾, 松田達磨, 東中隆二, 青木勇二, 菅原仁, 「共鳴X線回折によるSmRu₄P₁₂の磁場誘起秩序相の研究」, 日本物理学会第69回年次大会, 2014年3月27-30日, 東海大学・湘南キャンパス。
 15. 宗重瑞稀, 世良正文, 松村武, 谷田博司, 中村至央, 高井駿, 「希土類斜方晶R-Al-Ge化合物の磁性」, 日本物理学会第69回年次大会, 2014年3月27-30日, 東海大学・湘南キャンパス。
 16. 高井駿, 中村至央, 松村武, 谷田博司, 世良正文, 西岡孝, 松村政博, 「近藤半導体CeRu₂Al₁₀の電子状態に与えるSm置換効果」, 日本物理学会第69回年次大会, 2014年3月27-30日, 東海大学・湘南キャンパス。
 17. 稲見俊哉, 道村真司, 林佑弥, 松村武, 世良正文, 伊賀文俊, 「高分解能X線回折によるCe_{0.7}La_{0.3}B₆のIV相の菱面体歪みの観測」, 日本物理学会第69回年次大会, 2014年3月27-30日, 東海大学・湘南キャンパス。
 18. 林佑弥, 松村武, 道村真司, 稲見俊哉, 世良正文, 落合明, 「共鳴および非共鳴X線回折によるCeTeの磁場誘起反強四極子秩序相の研究」, 日本物理学会第69回年次大会, 2014年3月27-30日, 東海大学・湘南キャンパス。
 19. 松村武, 道村真司, 稲見俊哉, 大坪亨, 谷田博司, 世良正文, 伊賀文俊, 「Ce_xLa_{1-x}B₆における多極子ゆらぎ」, 日本物理学会2013年秋季大会, 2013年9月25-28日, 徳島大学・常三島キャンパス。
 20. 道村真司, 稲見俊哉, 高口裕哲, 林佑弥, 松村武, 谷田博司, 世良正文, 松岡英一, 綿引正倫, 谷垣勝己, 小野寺秀也, 小坂昌史, 片野進, 「多重極子秩序物質RPd₃S₄(R=Ce, Dy)の磁場中共鳴X線回折」, 日本物理学会2013年秋季大会, 2013年9月25-28日, 徳島大学・常三島キャンパス。
 21. 高井駿, 林佑弥, 松村武, 世良正文, 落合明, 「CeSeの磁気秩序と磁気相図-電気抵抗による研究-」, 日本物理学会第68回年次大会, 2013年3月26-29日, 広島大学・東広島キャンパス。
 22. 松村武, 道村真司, 稲見俊哉, 菅原仁, 林佑弥, 高口裕哲, 「CeOs₄Sb₁₂の磁場誘起相における共鳴X線回折」, 日本物理学会第68回年次大会, 2013年3月26-29日, 広島大学・東広島キャンパス。
 23. 道村真司, 稲見俊哉, 高口裕哲, 林佑弥, 松村武, 谷田博司, 世良正文, 松岡英一, 綿引正倫, 谷垣勝己, 小野寺秀也, 小坂昌史, 片野進, 「磁場中共鳴X線回折による希土類硫化物DyPd₃S₄の多極子秩序研究」, 日本物理学会第68回年次大会, 2013年3月26-29日, 広島大学・東広島キャンパス。
 24. 林佑弥, 高口裕哲, 松村武, 世良正文, 落合明, 「電気抵抗測定によるCeTeの圧力誘起秩序相の研究」, 日本物理学会第68回年次大会, 2013年3月26-29日, 広島大学・東広島キャンパス。
 25. 松村武, 道村真司, 稲見俊哉, 松岡英一, 林佑弥, 高口裕哲, 大坪亨, 谷田博司, 世良正文, 「PrPd₃S₄の多極子秩序相における磁場中共鳴X線回折」, 日本物理学会2012年秋季大会, 2012年9月18-21日, 横浜国

立大学・常盤台キャンパス。

26. 道村真司, 稲見俊哉, 高口裕哲, 松村武, 谷田博司, 世良正文, 松岡英一, 綿引正倫, 谷垣勝己, 小野寺秀也, 小坂昌史, 片野進, 「偏光制御による多極子秩序物質 CePd3S4 の磁場中共鳴 X 線散乱実験」, 日本物理学会 2012 年秋季大会 2012 年 9 月 18-21 日, 横浜国立大学・常盤台キャンパス。
27. 國森敬介, 谷田博司, 松村武, 世良正文, 伊賀文俊, 「CeB6 の III'-II 相転移と II 相低磁場のドメイン再分布」, 日本物理学会 2012 年秋季大会 2012 年 9 月 18-21 日, 横浜国立大学・常盤台キャンパス。
28. 林佑弥, 松村武, 松田沙織, 落合明, 「X 線回折による RAl3C3 (R=Yb, Lu, Er, Dy, Tm) における構造相転移の観測」, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 9 月 18-21 日, 横浜国立大学・常盤台キャンパス。

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://home.hiroshima-u.ac.jp/tmatsu/LTRXS/Welcome.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松村 武 (MATSUMURA TAKESHI)

広島大学・大学院先端物質科学研究科・准教授

研究者番号：00312546

(2) 研究分担者

道村 真司 (MICHIMURA SHINJI)

埼玉大学・研究機構科学分析支援センター・助教

研究者番号：40552310

(3) 連携研究者

稲見 俊哉 (INAMI TOSHIYA)

日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究副主幹

研究者番号：30354989 (H24 は分担者)

松岡 英一 (MATSUOKA EIICHI)

神戸大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：20400228

椎名 亮輔 (SHIINA RYOUSUKE)

新潟大学・大学院自然科学研究科・准教授

研究者番号：30326011

長尾 辰哉 (NAGAO TATSUYA)

群馬大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：00237497

谷田 博司 (TANIDA HIROSHI)

広島大学・大学院先端物質科学研究科・助教

研究者番号：00452615

世良 正文 (SERA MASAFUMI)

広島大学・大学院先端物質科学研究科・教授

研究者番号：40196978

伊賀 文俊 (IGA FUMITOSHI)

茨城大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：60192473