

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540381

研究課題名(和文) ユーロピウム化合物が示す温度誘起価数転移機構の内殻励起による解明

研究課題名(英文) Core-Level Photoemission Study on Temperature-Induced Valence Transition of Eu Compounds

研究代表者

三村 功次郎(MIMURA, Kojiro)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40305652

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：Eu化合物が示す温度誘起価数転移を解明するため、Ge濃度xにより価数転移を制御できるEuNi₂(Si_{1-x}Ge_x)₂に対して硬X線光電子分光実験を行った。Eu 3dスペクトルは、2価・3価成分比ならびに3価スペクトル構造の価数転移に伴う明瞭な変化を示した。このEu 3dスペクトルの変化は、熱励起の効果を考慮した不純物アンダーソンモデルにより再現できた。つまり、この系の温度誘起価数転移を理解する上で、多体相互作用の扱いが本質的に重要であることを示唆している。同時に、本解析によりEu 4f電子と伝導電子間の混成相互作用の大きさが、価数転移を特徴づけるパラメータのひとつであることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Electronic structures of EuNi₂(Si_{1-x}Ge_x)₂ have been investigated by hard x-ray photoemission spectroscopy (HAXPES), in order to understand the temperature-induced valence transition of this system. The temperature-dependent HAXPES spectra clearly showed the valence transition with abrupt changes in the divalent and trivalent Eu 3d components. The Eu 3d spectral shape, especially the drastic change in trivalent Eu 3d feature with temperature, could not be reproduced by the atomic calculation. Therefore, we have done calculations based on the Anderson model in which the hybridization of the trivalent Eu 4f electrons with the conduction electrons V_{cf} and the charge transfer energy are taken into account. This result suggests that many-body effect between Eu 4f and conduction electrons is essential to understand the temperature-induced valence transition of this system. Our spectral analyses revealed, furthermore, that V_{cf} is one of the key parameters to govern the valence transition.

研究分野：固体光物性

キーワード：強相関電子系 価数転移 物性実験 物性理論 光物性

1. 研究開始当初の背景

Eu 化合物の価数揺動は、非磁性的な 3 価 (Eu^{3+} , 全角運動量 $J=0$) と $7\mu_B$ の局在モーメントをもつ 2 価 (Eu^{2+} , $J=7/2$) の間でおこり、その平均価数は温度、磁場、圧力などのパラメータに対して敏感に変化する。この現象を価数転移という。これまで、Eu 化合物が示す価数転移を電子状態の立場から理解するため光電子分光実験が行われてきたが、強く表面に局在した Eu^{2+} 成分がバルクの電子構造に重なって観測されるため、本質的な価数転移の議論が困難であった。

近年、光電子の脱出深度を大幅に向上させた硬 X 線光電子分光 (HAXPES) の発展により、Eu 化合物に対するバルク電子状態の精密な観測が可能になった。そこで我々は、160 K を境界として 100 K での 2.8 価から 230 K での 2.2 価へと急峻な価数転移を示す EuPd_2Si_2 に対して HAXPES 実験を行い、バルク Eu 3d 内殻電子状態から Eu 平均価数を正確に評価できるだけでなく、価数転移に伴って Eu 3d 多重項構造の形状が明瞭に変化することを突き止めた。この変化は、Eu 化合物の光電子スペクトル解析に多用されてきたアトムックモデルでは説明できず、Eu 4f 電子と伝導電子間の混成相互作用 V_{cf} および電荷移動エネルギー Δ を考慮した不純物アンダーソンモデルにより説明できる。このことは、Eu 化合物が示す温度誘起価数転移を理解する上で、多体相互作用の取り扱いが本質的に重要になることを示唆している。

上述してきたように、我々は EuPd_2Si_2 の温度誘起価数転移を現象論的に解釈するに至った。しかしながら Eu 化合物が示す温度誘起価数転移の起源を議論する上で、「非現象論的、すなわち現実の温度変化に伴う価数転移の説明には至っていない」、「温度誘起価数転移の本質を理解する上で、急峻な価数転移を示す Eu 化合物のみならず、一次転移を示す Eu 化合物や、2 価あるいは 3 価で安定する Eu 化合物の温度依存性データを広く蓄積し、価数転移を特徴付ける物理パラメータを決定付ける必要がある」といった課題を克服しなければならなかった。

2. 研究の目的

よって本研究では、Ge 濃度 x をコントロールすることで 300 K 以下において一次転移、連続転移さらには 2 価、3 価の安定状態を制御できる $\text{EuNi}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$ を測定試料として、Eu 化合物が示す温度誘起価数転移を実験的・理論的に解明することを目的とした。HAXPES により Eu 3d 内殻準位の温度依存性と x 依存性を詳細に調べ、転移における Eu の電子状態変化を明らかにする。さらに熱励起の効果を取り入れた不純物アンダーソンモデルによる解析から、転移に寄与する基礎的物理パラメータを掌握し、Eu 化合物が示す温度誘起価数転移の本質を理解することを目指した。

3. 研究の方法

試料は、 $\text{EuNi}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$ ($x = 0, 0.70, 0.79, 0.82, 1$) および EuNi_2P_2 である。 EuNi_2Ge_2 ($x = 0$) および EuNi_2P_2 単結晶試料は、フラスコ法により育成された。他の多結晶試料は、Ar 雰囲気中でアーク溶解させた後、800 °C で 1 週間のアニーリングをすることによって得た。各試料の結晶性は粉末 X 線回折により確認し、転移温度は帯磁率を観測することで評価した。表 1 に、本研究で使用した試料の価数転移の特徴 (type) および転移温度 (T_v) を示した。

表 1. 本研究で測定に用いた試料の転移様式 (type) と帯磁率から評価した転移温度 (T_v)

material	type	T_v (K)
EuNi_2Si_2 ($x = 0$)	almost Eu^{3+}	—
$\text{EuNi}_2(\text{Si}_{0.30}\text{Ge}_{0.70})_2$	continuous	150
$\text{EuNi}_2(\text{Si}_{0.21}\text{Ge}_{0.79})_2$	1st order	84
$\text{EuNi}_2(\text{Si}_{0.18}\text{Ge}_{0.82})_2$	1st order	49
EuNi_2Ge_2 ($x = 1$)	almost Eu^{2+}	—
EuNi_2P_2	intermediate	—

HAXPES 実験は、SPRING-8 の物材機構ビームライン BL15XU において行った。直線偏光アンジュレータより発生したシンクロトロン放射光を Si (111) 二結晶分光器および Si (333) チャンネルカット分光器により 5.95 keV に分光し、これを励起光として用いた。また、静電半球型電子エネルギー分析器を用いて光電子を検出した。この時の全エネルギー分解能は 230 meV であった。各試料の清浄試料表面は、 1×10^{-7} Pa 以下の真空中で破断することによって得た。結合エネルギーは試料マニピュレータ上にセットした Au 板のフェルミ端を測定して補正した。

4. 研究成果

図 1 に $\text{EuNi}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$ ($x = 0.70, 0.79$) の Eu 3d 内殻 HAXPES スペクトルの温度依存性を示す。図の横軸はフェルミ準位を基準とした結合エネルギー (E_B)、縦軸は光電子放出強度を示す。また、各 x の一連のスペクトルは、面積強度で規格化している。各 Eu 3d スペクトルは、スピン軌道分裂により $E_B = 1120 \sim 1145$ eV の $3d_{5/2}$ と $1150 \sim 1175$ eV の $3d_{3/2}$ 成分に分離される。さらに $3d_{5/2}$, $3d_{3/2}$ の各成分は、化学シフトの影響を受けて Eu^{2+} , Eu^{3+} 成分に分離する。

ここで、 Eu^{2+} 3d と Eu^{3+} 3d スペクトル強度比 ($\text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$ 比) の温度依存性に着目する。300 K では $x = 0.70, 0.79$ ともに Eu^{2+} 成分が支配的な $\text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$ 比を示すが、温度を下げていくと、 $x = 0.70$ の $\text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$ 比は緩やかに Eu^{3+} 成分が増加する。一方で、 $x = 0.79$ では 90 K から 70 K に掛けて $\text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$ 比が急激に反転する傾向を示す。これは、 $x = 0.70$ が連続的な価数転移、 $x = 0.79$ が一次の価数転移を示したことを直接観測したものに他ならない。次に Eu^{3+} 3d スペクトル形状の温度依存性

に着目する。 $x = 0.70, 0.79$ ともに、300 K では主ピークが潰れたブロードな形状を示すが、温度を下げていくにつれてシャープなピークが立ってくるのが分かる。特に、 T_v よりも低温側において、 $\text{Eu}^{3+} 3d$ は非常にシャープなスペクトル形状を示すようになる。

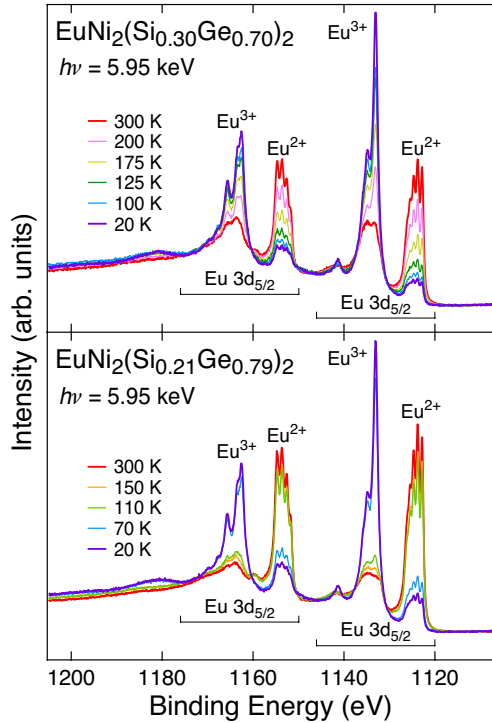


図 1. $\text{EuNi}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$ ($x = 0.70, 0.79$) の $\text{Eu} 3d$ 内殻 HAXPES スペクトルの温度依存性。

同様に、他の試料についても、表 1 に示した各試料の転移の特徴の様子を良く捉えた $\text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$ 比の温度変化、ならびに $\text{Eu}^{3+} 3d$ スペクトル形状の温度依存性を観測した。

以上のように $\text{EuNi}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$ の $\text{Eu} 3d$ スペクトルに対して「温度誘起価数転移に対応した $\text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$ 比の温度変化」や「 $\text{Eu}^{3+} 3d$ スペクトル形状には温度依存性が現れる」といった興味深い 2 つの特徴が観測された。以降では、これらを (1)、(2) と項目分けし、それぞれに対して考察を与えていく。

(1) $\text{Eu} 3d$ 内殻 HAXPES スペクトルから算出した $\text{EuNi}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$ の Eu 平均価数

Eu 平均価数は、 $\text{Eu} 3d$ スペクトルからバックグラウンドを差し引いた後、 $\text{Eu}^{2+} 3d_{5/2}$ 、 $\text{Eu}^{3+} 3d_{5/2}$ 成分の面積強度比から算出した。図 2 に $x = 0.70, 0.79, 0.82$ の Eu 平均価数の温度依存性を示す。各試料の Eu 平均価数は、 $x = 0.70$ では 300 K での 2.37 価から 20 K では 2.88 価に、 $x = 0.79$ では 2.19 価 (300 K) から 2.83 価 (20 K) に、 $x = 0.82$ では 2.20 価 (300 K) から 2.75 価 (20 K) へと変化する。これらの値は、先行研究において $\text{Eu} L_{III}$ 端吸収分光から算出された値と良く対応している。

図 2 中の実線は、 T_v の高温側および低温側

にそれぞれスロープを持たせた階段関数を用いて本研究で算出した Eu 平均価数をフィットした結果である。生スペクトルにも見られたように、 $x = 0.70$ が連続的な価数転移、一方、 $x = 0.79, 0.82$ が一次の価数転移を示していることが明確に読み取れる。さらに、フィットした階段関数から各試料の転移温度 T_v を評価したところ、 $x = 0.70$ で 175 K、 $x = 0.79$ で 84 K、 $x = 0.82$ で 47 K となった。これらの値は、表 1 に示した帯磁率から求めた T_v と大まかに対応する。以上のことから、HAXPES が希土類金属間化合物の価数評価に適した測定法であること、特に価数転移を示す物質に対して詳細な温度依存性を観測することで、 T_v も十分に議論できるレベルにあることが改めて確認できた。

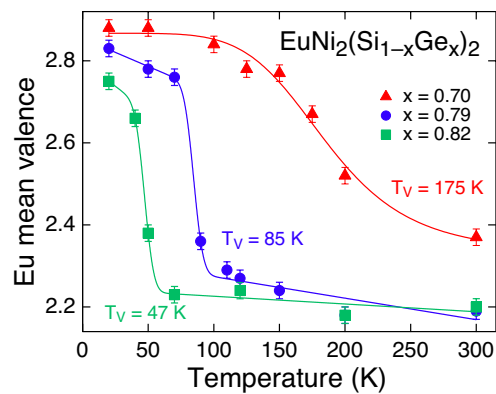


図 2. $\text{Eu} 3d$ 内殻 HAXPES から算出した $\text{EuNi}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$ ($x = 0.70, 0.79, 0.82$) の Eu 平均価数の温度依存性。

(2) $\text{Eu} 3d$ 内殻 HAXPES スペクトルの不純物アンダーソンモデルに基づいた理論解析

上述してきたように、 $\text{Eu} 3d$ 内殻 HAXPES スペクトルから Eu 平均価数が正確に評価できるわけだが、HAXPES の最大の特徴は、価数転移に伴って $\text{Eu}^{3+} 3d$ スペクトルの形状が極めて明瞭な温度依存性を示すことである。この点を理論的に解析することで、価数転移の起源に迫れるだろう。よって本研究では、「背景」でも示した不純物アンダーソンモデルに基づいた理論解析を行うことで、 $\text{Eu} 3d$ スペクトルを再現し、転移に寄与する物理パラメータの抽出を行った。

不純物アンダーソンモデルの解析においては、 $\text{Eu}^{3+} 4f$ 電子と伝導電子間の混成強度 V_{cf} および電荷移動エネルギー Δ をフィッティングパラメータとした。そして本解析の最大の特徴は、 $4f$ 電子の熱励起の効果を取り込んだ点である。図 3 に $\text{Eu}^{3+} 4f$ 多重項分布の模式図を示す。 $\text{Eu}^{3+} 4f$ 電子と伝導電子間の混成相互作用を考慮しない原子描像 (atomic) の場合、 $\text{Eu}^{3+} 4f$ 準位は $J = 0$ 状態が基底状態となり、励起状態は $J = 1, 2, 3, \dots$ となる。この時、 $J = 0, 1$ 間のエネルギー差は 41 meV (480 K) となるため、室温以下において $4f$ 電子は $J = 0$ のみに占有される。ところが、 V_{cf} や Δ の効果が加わると、その状況は一変する。図 3 の

模式図では $\text{EuNi}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$ ($x = 0.79$) における 300, 20 K のパラメータと J 多重項の変化を示しているが、それぞれの温度における V_{cf} と Δ の組み合わせに応じて、 $J = 0, 1$ 間のエネルギー差が大きく変化している。特に、300 K には $J = 0$ から 3 のエネルギー差までもが 24 meV にまで収縮する。つまり、300 K (26 meV) において Eu 4f 電子は $J = 3$ まで占有されている。一方で、20 K (2 meV) において $J = 0$ と 1 のエネルギー差は 26 meV であるため、Eu 4f 電子は基底状態の $J = 0$ のみしか占有できない。よって HAXPES スペクトルを観測する際、 $J = 0$ のみの励起スペクトルを観測することになるため、20 K の Eu^{3+} 3d スペクトルの形状はアトミック計算から算出されたスペクトル形状に近くなる。このような Δ の違いに依存した Eu^{3+} の J 多重項分布の変化と、それに伴う J 多重項間の 4f 電子の占有率の変化が、 Eu^{3+} 3d スペクトルの形状変化に大きな影響を与えていることが明らかになった。

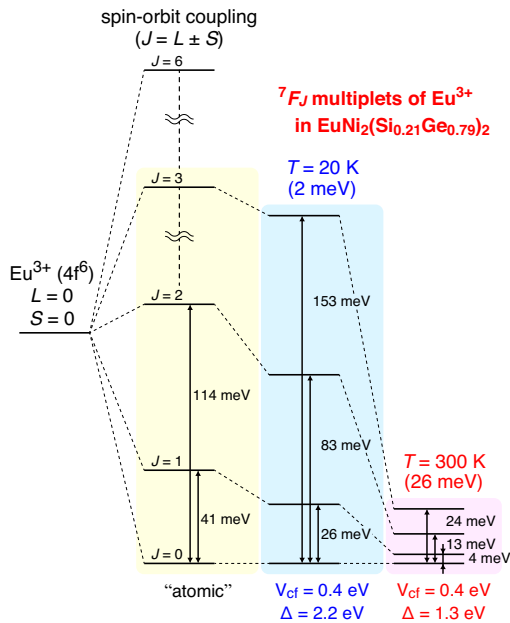


図 3. Eu^{3+} 多重項分布の模式図。図中に示したパラメータ V_{cf} , Δ は、 $x = 0.79$ に対するものである。

上述した解析で再現された $\text{EuNi}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$ ($x = 0.79$) の Eu 3d スペクトルを図 4 に示した。図中の実験スペクトルは、バックグラウンドが差し引かれたものである。計算スペクトルは、300, 20 K の各実験スペクトルにおける強度および形状の詳細を、図中に示した V_{cf} と Δ の組み合わせで非常に良く再現できた。さらに本報告書中に示してはいないが、Eu 5p スペクトルも同じ V_{cf} と Δ の組み合わせで再現することができた。この事実は、本解析で得られた物理パラメータが非常に精度良く決定できたことを意味している。

他の $\text{EuNi}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$ についても、不純物アンダーソンモデルに基づいた解析により Eu 3d, 5p スペクトルを V_{cf} と Δ により再現することができた。このことは、 EuPd_2Si_2 の解析で明らかされたように、 $\text{EuNi}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$ が示

す温度誘起価数転移を説明する上で多体相互作用の扱いが本質的に重要であることを示唆するものである。

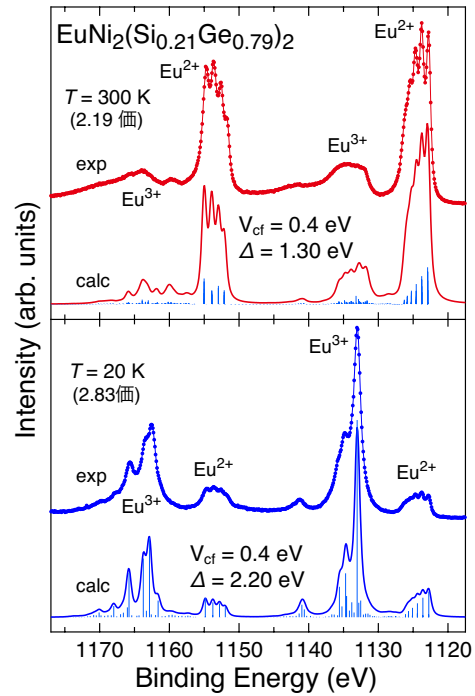


図 4. $\text{EuNi}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$ ($x = 0.79$) に対する Eu 3d 実験スペクトルと、不純物アンダーソンモデルに基づいた計算スペクトルとの比較。計算スペクトルは、縦線で表した離散スペクトルを幅広げることにより得た。

さらに、 $x = 0, 0.70, 0.79, 0.82, 1$ および EuNi_2P_2 に対する一連の実験・解析から得られた V_{cf} の値を表 2 にまとめた。表 2 を見ると、温度に対して 2 価あるいは 3 価で安定 → 一次転移 → 連続転移 → 中間価数状態を示す試料の順に V_{cf} が大きくなっていく傾向があることが分かった。以上より、Eu 4f 電子と伝導電子の混成強度 V_{cf} が Eu 化合物の温度誘起価数転移の傾向を制御するパラメータのひとつになっているものと示唆される。

表 2. 不純物アンダーソンモデルの解析から求められた各試料の Eu 4f 電子と伝導電子間の混成強度 (V_{cf})

material	type	V_{cf} (eV)
EuNi_2Si_2 ($x = 0$)	almost Eu^{3+}	0.3
EuNi_2Ge_2 ($x = 1$)	almost Eu^{2+}	0.3
$\text{EuNi}_2(\text{Si}_{0.21}\text{Ge}_{0.79})_2$	1st order	0.4
$\text{EuNi}_2(\text{Si}_{0.18}\text{Ge}_{0.82})_2$	1st order	0.4
$\text{EuNi}_2(\text{Si}_{0.30}\text{Ge}_{0.70})_2$	continuous	0.5
EuNi_2P_2	intermediate	0.6

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 3 件)

- ① K. Mimura, 他 13 名 [T. Uozumi 5 番目, H. Sato 6 番目, A. Mitsuda 9 番目], “Electronic Structure of EuNi_2X_2 ($X = \text{Si}, \text{P}, \text{Ge}$) Studied by Hard X-ray Photoemission Spectroscopy”, Proceedings of the 19 the Hiroshima

International Symposium on Synchrotron Radiation (査読無), (印刷中).

- ② K. Ichiki, K. Mimura, 他 11 名 [T. Uozumi 4 番目, H. Sato 5 番目, A. Mitsuda 8 番目], “Eu 3d and 5p Core-Level Photoemission Study on Temperature-Induced Valence Transition of $\text{EuNi}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$ ”, Proceedings of the 19th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation (査読無), (印刷中).
- ③ H. Sato, 他 10 名 [K. Mimura 6 番目], “Photoemission study on $\text{YbZn}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Cu}_4$ ”, Journal of Physics: Conference Series (査読有), **592**, 012016/1-5 (2015).
- ④ K. Ichiki, K. Mimura, 他 13 名 [T. Uozumi 4 番目, H. Sato 7 番目, A. Mitsuda 10 番目], “Temperature-Induced Valence Transition of $\text{EuNi}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$: Hard X-ray Photoemission Study”, Proceedings of the 18th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation (査読無), 127-128 (2014).
- ⑤ K. Mimura, 他 15 名 [H. Sato 8 番目], “Hard X-ray photoemission study of the covalent-chain antiferromagnets TlFeS_2 and TlFeSe_2 ”, Physica Status Solidi (c) (査読有), **10** (7-8), 989-992 (2013).
- ⑥ Y. Utsumi, H. Sato, 他 12 名 [K. Mimura 5 番目], “Electronic structure of Kondo lattice compounds YbNi_3X_9 ($X = \text{Al}, \text{Ga}$) studied by hard x-ray spectroscopy”, Physical Review B (査読有), **86** (11), 115114/1-9 (2012).

[学会発表] (計 123 件)

- ① K. Ichiki, K. Mimura, 他 11 名 [T. Uozumi 4 番目, H. Sato 5 番目, A. Mitsuda 8 番目], “Electronic Structure of the Temperature-Induced Valence Transition System $\text{EuNi}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$ ”, 6th International Conference on Hard X-ray Photoemission Spectroscopy, 2015 年 3 月 31 日, 新竹 (台湾).
- ② K. Mimura, 他 13 名 [T. Uozumi 5 番目, H. Sato 6 番目, A. Mitsuda 9 番目], “Electronic Structure of EuNi_2X_2 ($X = \text{Si}, \text{P}, \text{Ge}$) Studied by Hard X-ray Photoemission Spectroscopy”, 19th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation, 2015 年 3 月 5 日, 広島大学 (広島県).
- ③ K. Ichiki, K. Mimura, 他 11 名 [T. Uozumi 4 番目, H. Sato 5 番目, A. Mitsuda 8 番目], “Eu 3d and 5p Core-Level Photoemission Study on Temperature-Induced Valence Transition of $\text{EuNi}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$ ”, 19th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation, 2015 年 3 月 5 日, 広島大学 (広島県).
- ④ K. Mimura, 他 13 名 [T. Uozumi 4 番目, H. Sato 6 番目, A. Mitsuda 9 番目], “Hard X-Ray Photoemission Study of EuNi_2X_2 ($X = \text{Si}, \text{P}, \text{Ge}$): Relation between Eu Mean

Valence and Eu 3d Spectral Shape”, 19th International Conference on Ternary and Multinary Compounds (ICTMC-19), 2014 年 9 月 5 日, 新潟コンベンションセンター (新潟県).

- ⑤ K. Ichiki, K. Mimura, 他 12 名 [T. Uozumi 4 番目, H. Sato 6 番目, A. Mitsuda 9 番目], “Eu 3d and 5p Electronic Structure of $\text{EuNi}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$ Studied by Hard X-Ray Photoemission Spectroscopy”, 19th International Conference on Ternary and Multinary Compounds (ICTMC-19), 2014 年 9 月 3 日, 新潟コンベンションセンター (新潟県).
- ⑥ K. Mimura, 他 13 名 [T. Uozumi 4 番目, H. Sato 6 番目, A. Mitsuda 9 番目], “Bulk electronic structure in EuNi_2X_2 ($X = \text{Si}, \text{P}, \text{Ge}$) investigated by hard X-ray photoemission spectroscopy”, The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES 2014), 2014 年 7 月 10 日, グルノーブル (フランス).
- ⑦ K. Ichiki, K. Mimura, 他 12 名 [T. Uozumi 4 番目, H. Sato 6 番目, A. Mitsuda 9 番目], “Hard X-ray photoemission study of the temperature-induced valence transition system $\text{EuNi}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$ ”, The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES 2014), 2014 年 7 月 10 日, グルノーブル (フランス).
- ⑧ 市木勝也, 三村功次郎, 他 13 名 [魚住孝幸 4 番目, 佐藤 仁 7 番目, 光田暁弘 10 番目], “温度誘起価数転移を示す $\text{EuNi}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$ の電子状態: 硬 X 線光電子分光による研究”, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014 年 3 月 28 日, 東海大学 (神奈川県).
- ⑨ K. Ichiki, K. Mimura, 他 13 名 [T. Uozumi 4 番目, H. Sato 7 番目, A. Mitsuda 10 番目], “Temperature-Induced Valence Transition of $\text{EuNi}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$: Hard X-ray Photoemission Study” [Student Poster Award 受賞], 18th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation, 2014 年 3 月 6 日, 広島大学 (広島県).
- ⑩ 市木勝也, 三村功次郎, 他 13 名 [魚住孝幸 4 番目, 佐藤 仁 7 番目, 光田暁弘 10 番目], “価数転移を示す $\text{EuNi}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$ ($x=0.70, 0.79, 0.82$) の硬 X 線光電子スペクトルの温度依存性”, 第 27 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 2014 年 1 月 13 日, 広島国際会議場 (広島県).
- ⑪ 市木勝也, 三村功次郎, 他 13 名 [魚住孝幸 4 番目, 佐藤 仁 7 番目, 光田暁弘 10 番目], “硬 X 線光電子分光による $\text{EuNi}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$ ($x=0.70, 0.79, 0.82$) の温度誘起価数転移の研究”, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月 25 日, 徳島大学 (徳島県).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三村 功次郎 (MIMURA, Kojiro)
大阪府立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：40305652

(2) 研究分担者

魚住 孝幸 (UOZUMI, Takayuki)
大阪府立大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：80295724

光田 暁弘 (MITSUDA, Akihiro)
九州大学・理学研究院・准教授
研究者番号：20334708

(3) 連携研究者

佐藤 仁 (SATO, Hitoshi)
広島大学・放射光科学研究センター・准教授
研究者番号：90243550