

令和 2 年 6 月 23 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H04014

研究課題名(和文) 高エネルギー電子分光偏光二色性による実・波数空間強相関微細電子構造の解明

研究課題名(英文) Revealing detailed strongly correlated electronic structures in real and reciprocal spaces by dichroism in high-energy electron spectroscopy

研究代表者

関山 明 (Sekiyama, Akira)

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：40294160

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：結晶固体中で局在的な性質を有する4f強相関軌道に部分的に電子が占有された化合物では非従来型超伝導や磁気・電気四極子秩序などの機能的な物性を示すが、そこに4f軌道対称性が重要な役割を果たす。にもかかわらず、この軌道対称性を直接的に観測することは従来困難であった。本研究課題では、研究代表者が発見した内殻光電子線二色性を適用することで強相関軌道対称性を決定できることを、高輝度放射光X線をを用いた偏光制御硬X線光電子分光によって実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的には、それまで「埋もれていた」光学過程における現象を発見し発展させ新たな電子分光研究手法として確立し、日本初の世界的な成果として展開できた点で真に独創的な研究を固体電子物性分野で確立できたことにある。また、応用が期待できる機能性物質においても軌道対称性が重要な役割を果たすことが多々ありうるが、今後の物質開発においても新たな微視的電子構造解明手法として今後も進展させることで日本が世界を先導する形での物質科学の発展に大きく寄与することが今後も期待できる。

研究成果の概要(英文)：Strongly correlated 4f-orbital symmetry has important roles to such functional properties as unconventional superconductivity and magnetic/quadrupole orderings of the crystalline solids with partially filled 4f subshell. However, it has been difficult to uniquely determine the 4f-orbital symmetry of the realistic rare-earth-based compounds. In this study, we have successfully proved that the 4f-orbital symmetry can be probed by the linear dichroism in core-level hard x-ray photoemission spectroscopy.

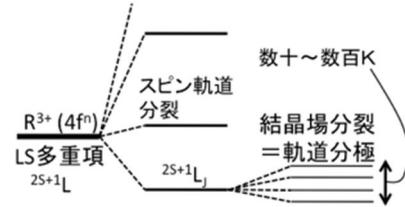
研究分野：電子分光

キーワード：軌道対称性 光電子分光 強相関電子系 直線偏光 放射光X線

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

電子間クーロン相互作用が無視できない強相関 d 電子系や f 電子系においては、これら軌道が並進対称性によりバンド的な性質を有しても実空間における軌道対称性が電子物性に重要な役割を果たすことがある。軌道対称性 = 強相関電荷分布の球対称からのずれは結晶場分裂で決定されるが、希土類 4f 電子系では右図のように結晶場分裂幅が数十~数百 K であることが多く、かつ基底状態軌道対称性の確立が実験的に困難という例が大変多い。例えば、過去には CeB₆ における Γ_7 , Γ_8 基底状態の有名な議論があり、比較的最近でも量子臨界現象を示す YbRh₂Si₂ において $|J_z| = 1/2$ 主体の Γ_6 が $|J_z| = 3/2$ 主体の Γ_7 かは未解決だった。これは非弾性中性子散乱と帯磁率異方性の解析といった従来の間接的な方法には限界があることに起因する。軌道分極を直接的に検証するのはそう容易ではなく、より直接的かつ決定的な手法があれば精密構造解析等と相補的な手法になる。理論的には動的平均場理論を取り入れた試み等にみられるように現実の系を想定した計算から現象論的モデルの検証も視野に入りつつあるなか、強相関基底 / 励起状態軌道対称性の直接決定は特に希土類 4f 電子系で「基底状態は * * が有力である」という必ずしも確実といえない前提を元に出発している現状から脱却するためにも重要な課題として残っていた。



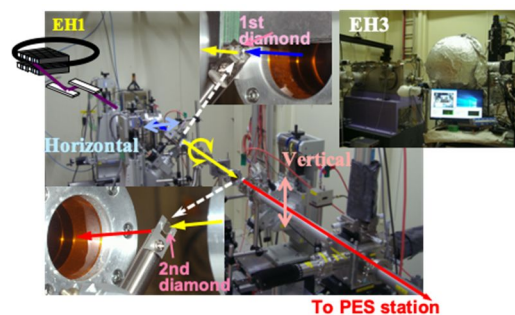
2. 研究の目的

本研究開始前に、我々は単結晶希土類 Yb 化合物において Yb 3d 内殻光電子スペクトル形状が有為な(結晶軸に対する)放出角度および偏光依存性を示し、それがサイト内電子間クーロン・交換相互作用の異方性を介して 4f 不完全殻の球対称からずれた異方的な 4f 電荷分布を反映していることを世界で初めて発見した。そしてこの実験データを解析することで実際に上記の正方晶 YbRh₂Si₂ で基底状態がほぼ $|J_z| = 3/2$ の純状態にある Γ_7 であることを解明した。さらに、この角度依存性・線二色性はより対称性の高い立方晶でもみられ、右図のように立方晶 YbB₁₂ では $\langle 100 \rangle$ 方向と $\langle 111 \rangle$ 方向で線二色性が異方的電荷分布に由来して反転し、基底状態において電荷分布が $\langle 110 \rangle$ 方向に伸びた Γ_8 状態であることの直接決定に成功し、大きな反響を呼んだ。この現象は偶然 Yb 化合物で初めて発見したが、本質的には Yb 系に限定される理由はどこにもみあたらない。そこで本研究の第一の目的は、我々が発見した内殻角度分解光電子線二色性を強相関 4f 電子系に適用して基底 / 励起状態における軌道対称性決定の全く新たな実験手法として確立し、実際に様々な希土類化合物の基底 / 励起 4f 状態軌道対称性を解明していくことであった。

上記の内殻光電子過程は強相関電子系における局在的な性質を引き出しているとも言え、逆に言えば強相関軌道が混成により伝導に影響して生じる有効質量増大を直接観測することが困難である。この点で我々は並行して従来よりもバルク感性が高く、面直波数成分 (k_z) も分解した 3 次元軟 X 線 ARPES (慣例に従い、波数分解を目的とした価電子帯角度分解光電子分光を ARPES と記す) も進めてきた。この両者の結果を矛盾なく説明できる物理が構築されればこの系の電子構造は完全解明されたとも言える。このように本研究課題では内殻電子分光線二色性および 3 次元 ARPES を並行して進めることで実空間 (局在)・波数空間 (遍歴) 両面での微細電子構造観測を通じた電子物性の完全解明を進めることが第二の目的であった。

3. 研究の方法

本研究課題では、実空間微細電子構造を解明するために主として偏光制御硬 X 線励起「角度分解」内殻光電子分光 5~300 K の範囲で SPring-8 にて行った。これは、この数年来研究代表者の関山が中心になって開発の結果、世界的にも独走している偏光制御技術を組み合わせた硬 X 線光電子分光である。右図のように光電子分析器及び X 線光学系を我々自身の手で導入し、研究期間を通して他で実現していない実験環境を理研ビームライン BL19LXU で構築して実験を行ってきた。さらに低温下 2 軸試料回転機構および試料位置決定用顕微鏡カメラも導入し、1mm 角未満の小さい試料でも正確に位置決定及び同一試料において

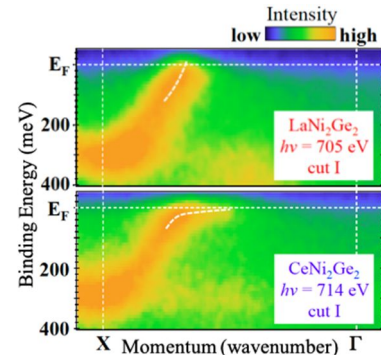
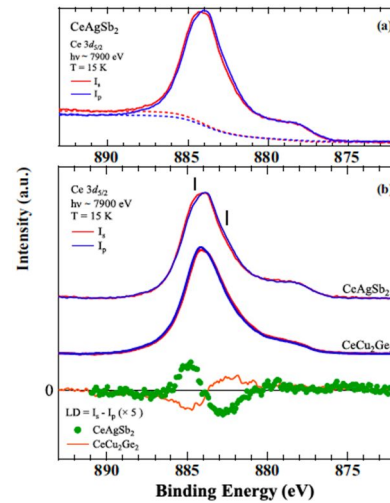
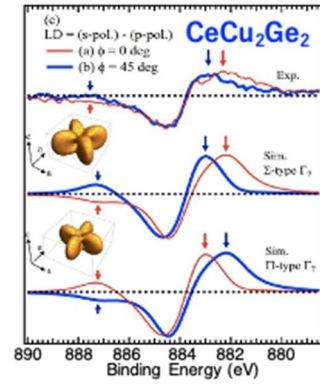


$\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$, $\langle 111 \rangle$ 方向の 3 方向について角度分解測定が可能にした。立方晶の場合基底状態にもよるが線二色性がスペクトル強度と比べて小さいこともあり、artifact な効果を排除して確実な線二色性を観測するには $\langle 100 \rangle$, $\langle 111 \rangle$ の 2 方向で測定して線二色性反転を確かめる必要がある。一方、後述するように正方晶では自由度が増えるため、やはり 2 方向以上での測定が必須であるが、本研究課題を通してその効率的な測定手法を確立できた。測定試料の単結晶、特に ThCr₂Si₂ 型結晶構造をとる RT₂X₂ (R = Ce, Yb; T = Ni, Cu, Rh; X = Si, Ge) については研究分担者の海老原が精力的に合成を進め、純良単結晶を得て測定を進めた。また、Pr 化合物については広島大鬼丸グループや北大網塚グループより純良単結晶の提供をうけ、測定した。得られた線二色性については、研究分担者の田中の指導のもと田中が開発した XTLS コードを用いてイオン内多重項を完全に取り入れ、さらに光電子過程も電気双極子遷移の範囲内で正確に取り入れた「角度分解」内殻光電子スペクトルの偏光依存性を計算し、実験と比較することで軌道対称性の決定および確認を行った。また、これと相補的な手段である価電子帯の角度分解光電子分光を実験室レーザー光源および SPring-8 BL17SU, BL23SU で並行して進めた。

4. 研究成果

(1) 正方晶 Ce 化合物の内殻光電子線二色性による軌道対称性

圧力下で超伝導となる CeCu_2Ge_2 に対して Ce 3d 内殻光電子線二色性測定を行ったところ、線二色性については右図のような結果を得た。この両者の差は試料を c 軸面内に回転させて得られたものである。この結果と理論計算を比較すると、Ce 4f 軌道が Ge サイトに向けた Σ -type Γ_7 対称性があり、かつ 4f 電子の全角運動量 $J_z = \pm 3/2$ 成分と $J_z = \pm 5/2$ 成分がほぼ同程度からなることが判明した。さらにこれと同じ ThCr_2Si_2 結晶構造を取るものの超伝導にはならず常磁性重い電子系物質として知られる CeRu_2Si_2 についても同様な実験を行なったところ、やはり Σ -type Γ_7 対称性であるが $J_z = \pm 5/2$ 成分が CeCu_2Ge_2 と比べて有意に多いことが判明した。また、 $J_z = \pm 5/2$ 成分が多く含まれる Ce 4f 軌道の対称性を決定するためには、LD-HAXPES において光電子観測をより斜出射の配置で行う必要のあることが判明した。また、これらの結果および後述する CeNi_2Ge_2 を比較すると、 J_z 成分の違いが必ずしもマクロ物性の系統性とは対応せず、それよりはいずれも重い電子系を形成しうる Ce 化合物の占有 4f 状態が Σ -type Γ_7 対称性にあるという共通した性質を有すると解釈する方が妥当と言える結果となった。また、これとは別の結晶構造をもち低温で強磁性を示す CeAgSb_2 の Ce 3d 内殻光電子線二色性は右図に示すように CeCu_2Ge_2 のそれとほぼ完全に符号が反転している結果であり、理論計算を行うと、 Γ_7 対称性とは完全に異なり 4f 電荷分布が c 軸方向に細長く伸びた $J_z = \pm 1/2$ 成分による Γ_6 対称性でよく説明できることが分かった。これにより正方晶 Ce 化合物における典型的な軌道対称性をかなりの程度実験的に網羅し、かつ今後の研究の指標となるだけの成果を得ることができたと言える。

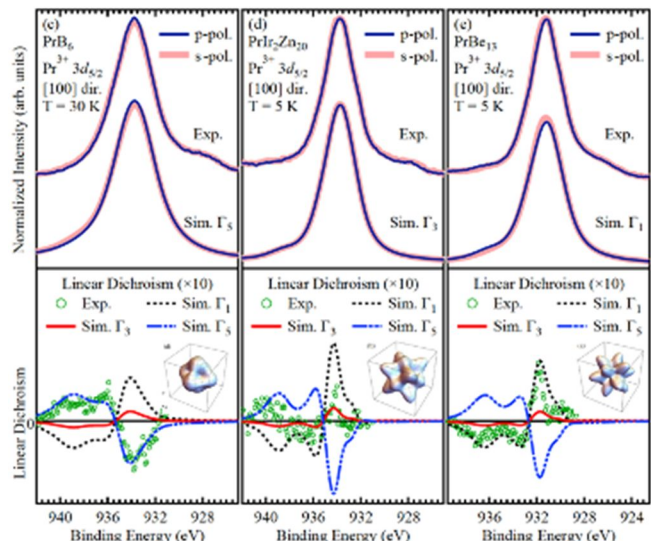


(2) 重い電子系 CeNi_2Ge_2 の ARPES による波数依存した重い電子状態の観測と超伝導

CeNi_2Ge_2 について波数分解した電子構造を観測する軟 X 線 3 次元角度分解光電子分光を、4f 電子を持たない参照系である LaNi_2Ge_2 と合わせて行ったところ、右図のように X- Γ 方向で顕著な差異を見出した。より詳細な解析を行ったところ CeNi_2Ge_2 においてこの方向では有効質量が 66 倍増大していることが分かった。より興味深いのは、この重い電子状態は、このバンドに関しては X- Γ 方向でのみ観測され、例えば X-Z 方向ではこままでの重い状態は見られなかった。これは、重い電子状態が波数空間で一様に実現しているのではなく特定の波数地点でのみ生じている直接的な証拠である。さらに、重くなる波数地点を結ぶベクトルが磁気励起を観測する中性子散乱で観測されたベクトルとよく対応することがわかり、重い = 状態密度の増大によりこの波数地点での電子が超伝導に寄与する、つまり磁気的なスピン揺らぎ機構による超伝導であることを指示する結果であることが判明した。さらにこの物質について(1)の内殻光電子線二色性を測定すると、解析の結果、基底状態はやはり Ce 4f 軌道が Ge サイトに向けた Σ -type Γ_7 対称性にあるが、相対的に $J_z = \pm 3/2$ 成分が上述の CeCu_2Ge_2 のそれよりも多い状態にあることも解明できた。

(3) 立方晶 Pr 化合物の内殻光電子線二色性の観測

上述の希土類内殻光電子線二色性は光電子過程を考えれば Ce, Yb イオンに限定される理由は原理的にはどこにもない。この考えのもと、内殻光電子線二色性という現象が一部の限られた元素でのみ見られるのではなく局在的な不完全殻軌道を有する強相関化合物であれば広く一般的に見られるであろう(実際に我々の事前の理論計算ではそのような結果が得られていた)と考え、立方晶 Pr 化合物についても Pr 3d 内殻光電子線二色性測定を進め、右図のような系統的な結果を得た。基本的に立方対称下では Pr 4f 軌道対称性は Γ_1 (非磁性一重項), Γ_3 (非磁性だが電気四極子活性), Γ_5 (磁性かつ電気四極子活性)対称性の



何かをとり、基底状態はこの対称性に左右される。結果、3種類の異なる結晶場基底状態をとる PrBe_{13} (Γ_1), $\text{PrIr}_2\text{Zn}_{20}$ (Γ_3), PrB_6 (Γ_5) は対称性を反映した異なる線二色性を示し、これらがいずれも理論計算でよく再現できることが分かった。さらには Pr 3d 内殻軌道励起のみならず Pr 4d 内殻軌道励起によっても線二色性が観測されることを PrB_6 の測定を通じて実証した。これらのことから、内殻光電子線二色性は Pr 化合物でも有効であることがわかり、現在さらに異なる基底状態と隠れた秩序状態をとるとされている充填スクッテルダイト Pr 化合物についても研究を進めつつある。

(4) 内殻光電子線二色性の定式化の完成

本研究課題で主な実験手法である内殻光電子線二色性は、発見したのが研究代表者の関山であることから従来明確な形で定式化されていなかった。そこで本研究課題において理論的な裏付けとなる定式化を行い、合わせて立方対称下で局在電荷分布および軌道対称性を反映した線二色性を得るには p 軌道内殻ではなく d 軌道内殻の測定が必須であることを明らかにした。ここで主量子数やスピン軌道相互作用の役割は定量的にはともかく定性的に線二色性を得るには必須ではないことも明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Sekiyama Akira, Kanai Yuina, Tanaka Arata, Imada Shin	4. 巻 88
2. 論文標題 Optical Process of Linear Dichroism in Angle-Resolved Core-Level Photoemission Reflecting Strongly Correlated Anisotropic Orbital Symmetry	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 013706 ~ 013706
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.013706	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Aratani H., Nakatani Y., Fujiwara H., Kawada M., Kanai Y., Yamagami K., Fujioka S., Hamamoto S., Kuga K., Kiss T., Yamasaki A., Higashiya A., Kadono T., Imada S., Tanaka A., Tamasaku K., Yabashi M., Ishikawa T., Yasui A., Saitoh Y., Narumi Y., Kindo K., Ebihara T., Sekiyama A.	4. 巻 98
2. 論文標題 Revising the 4f symmetry in CeCu ₂ Ge ₂ : Soft x-ray absorption and hard x-ray photoemission spectroscopy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 121113(R)-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.121113	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yamagami Kohei, Kanai Yuina, Naimen Sho, Fujiwara Hidenori, Kiss Takayuki, Tanaka Arata, Higashiya Atsushi, Imada Shin, Kadono Toshiharu, Tamasaku Kenji, Muro Takayuki, Yabashi Makina, Ishikawa Tetsuya, Eisaki Hiroshi, Miyasaka Shigeki, Tajima Setsuko, Sekiyama Akira	4. 巻 536
2. 論文標題 Polarization-dependent X-ray photoemission spectroscopy for High-Tc cuprate superconductors	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physica B: Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 843 ~ 846
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physb.2017.09.024	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 S. Hamamoto et al.	4. 巻 86
2. 論文標題 Linear Dichroism in Angle-Resolved Core-Level Photoemission Spectra Reflecting 4f Ground-State Symmetry of Strongly Correlated Cubic Pr Compounds	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 123703 ~ 123703
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.7566/JPSJ.86.123703	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nagai K., Fujiwara H., Aratani H., Fujioka S., Yomosa H., Nakatani Y., Kiss T., Sekiyama A., Kuroda F., Fujii H., Oguchi T., Tanaka A., Miyawaki J., Harada Y., Takeda Y., Saitoh Y., Suga S., Umetsu R. Y.	4. 巻 97
2. 論文標題 Electronic structure and magnetic properties of the half-metallic ferrimagnet Mn ₂ VAl probed by soft x-ray spectroscopies	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 35143
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.97.035143	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Saitoh Y., Yasui A., Fuchimoto H., Nakatani Y., Fujiwara H., Imada S., Narumi Y., Kindo K., Takahashi M., Ebihara T., Sekiyama A.	4. 巻 96
2. 論文標題 Experimental observation of temperature and magnetic-field evolution of the 4f states in CeFe ₂ revealed by soft x-ray magnetic circular dichroism	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 35151
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.96.035151	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Abozeed Amina A., Kadono Toshiharu, Sekiyama Akira, Fujiwara Hidenori, Higashiya Atsushi, Yamasaki Atsushi, Kanai Yuina, Yamagami Kohei, Tamasaku Kenji, Yabashi Makina, Ishikawa Tetsuya, Andreev Alexander V., Wada Hirofumi, Imada Shin	4. 巻 87
2. 論文標題 Rare-Earth Fourth-Order Multipole Moment in Cubic ErCo ₂ Probed by Linear Dichroism in Core-Level Photoemission	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 033710 ~ 033710
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.7566/JPSJ.87.033710	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakatani Y., Aratani H., Fujiwara H., Mori T., Tsuruta A., Tachibana S., Yamaguchi T., Kiss T., Yamasaki A., Yasui A., Yamagami H., Miyawaki J., Ebihara T., Saitoh Y., Sekiyama A.	4. 巻 97
2. 論文標題 Evidence for momentum-dependent heavy-fermionic electronic structures: Soft x-ray ARPES for the superconductor CeNi ₂ Ge ₂ in the normal state	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 115160
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.97.115160	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Miyake Atsushi, Sato Yoshiaki, Tokunaga Masashi, Jatmika Jumaeda, Ebihara Takao	4. 巻 96
2. 論文標題 Different metamagnetism between paramagnetic Ce and Yb isomorphs	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 85127
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.96.085127	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakatani Y., Fujiwara H., Aratani H., Mori T., Tachibana S., Yamaguchi T., Kiss T., Yamasaki A., Yasui A., Yamagami H., Tsuruta A., Miyawaki J., Ebihara T., Saitoh Y., Sekiyama A.	4. 巻 220
2. 論文標題 Circular dichroism in resonant angle-resolved photoemission spectra of LaNi ₂ Ge ₂	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena	6. 最初と最後の頁 50 ~ 53
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://doi.org/10.1016/j.elspec.2017.01.008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kanai Y., Mori T., Naimen S., Yamagami K., Kitayama S., Fujiwara H., Higashiya A., Kadono T., Imada S., Kiss T., Tanaka A., Muro T., Tamasaku K., Yabashi M., Ishikawa T., Iga F., Ebihara T., Honda F., Onuki Y., Sekiyama A.	4. 巻 220
2. 論文標題 Linear dichroism in 3d core-level and 4f valence-band photoemission spectra of strongly correlated rare-earth compounds	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena	6. 最初と最後の頁 61 ~ 65
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://doi.org/10.1016/j.elspec.2016.12.012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Saitoh Yuji, Fujiwara Hidenori, Yamaguchi Takashi, Nakatani Yasuhiro, Mori Takeo, Fuchimoto Hiroto, Kiss Takayuki, Yasui Akira, Miyawaki Jun, Imada Shin, Yamagami Hiroshi, Ebihara Takao, Sekiyama Akira	4. 巻 85
2. 論文標題 Electronic Structures of Ferromagnetic CeAgSb ₂ : Soft X-ray Absorption, Magnetic Circular Dichroism, and Angle-Resolved Photoemission Spectroscopies	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 114713 ~ 114713
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.85.114713	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ebihara T., Tsuchiya M., Saitoh Y., Jatmika J., Tsujimoto M., Shimura Y., Matsumoto Y., Nakatsuji S.	4. 巻 807
2. 論文標題 Specific heat and electrical resistivity at magnetic fields in antiferromagnetic heavy fermion CeAl ₂	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012011 ~ 012011
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/807/1/012011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hamamoto S., Kanai Y., Fujioka S., Nakatani Y., Fujiwara H., Kuga K., Kiss T., Higashiya A., Yamasaki A., Imada S., Tanaka A., Tamasaku K., Yabashi M., Ishikawa T., Hidaka H., Yanagisawa T., Amitsuka H., Matsumoto K.T., Onimaru T., Takabatake T., Sekiyama A.	4. 巻 238
2. 論文標題 Observation of the 4f ground-state symmetry in strongly correlated cubic Pr compounds probed by linearly polarized 3d core-level photoemission spectroscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena	6. 最初と最後の頁 146885 ~ 146885
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.elspec.2019.07.006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hamamoto Satoru, Kanai-Nakata Yuina, Fujiwara Hidenori, Kuga Kentaro, Kiss Takayuki, Higashiya Atsushi, Yamasaki Atsushi, Imada Shin, Tanaka Arata, Tamasaku Kenji, Yabashi Makina, Ishikawa Tetsuya, Hidaka Hiroyuki, Yanagisawa Tatsuya, Amitsuka Hiroshi, Sekiyama Akira	4. 巻 29
2. 論文標題 Linearly Polarized Hard X-Ray Photoemission Spectroscopy of PrBe ₁₃	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 12010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.29.012010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Fujiwara H., Kondo Y., Hamamoto S., Kanai-Nakata Y., Kuga K., Yamasaki A., Higashiya A., Kadono T., Imada S., Kiss T., Tanaka A., Tamasaku K., Yabashi M., Ishikawa T., Ebihara T., Sekiyama A.	4. 巻 30
2. 論文標題 Ground State Local 4f Symmetry of CeAgSb ₂ Probed by Linearly Polarized Hard X-ray Photoemission	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 11101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.30.011101	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 関山明, 藤原秀紀, 中田惟奈, 濱本諭, 今田真	4. 巻 33
2. 論文標題 内殻光電子線二色性による強相関局在軌道対称性の決定	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 放射光	6. 最初と最後の頁 177-195
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計39件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 A. Sekiyama et al.
2. 発表標題 Probing localized 4f-orbital symmetry of strongly correlated electron systems by linear dichroism in angle-resolved core-level HAXPES
3. 学会等名 International Conference on Electron Spectroscopy and Structure (ICES-14) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Kanai et al.
2. 発表標題 Ground-state 4f orbital symmetry probed by linear dichroism in x-ray core-level photoemission/absorption spectra of strongly correlated Sm compounds
3. 学会等名 International Conference on Electron Spectroscopy and Structure (ICES-14) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Hamamoto et al.
2. 発表標題 Linear dichroism in hard X-ray photoemission spectroscopy of cubic Pr compounds reflecting the 4f ground state symmetry
3. 学会等名 International Conference on Electron Spectroscopy and Structure (ICES-14) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 金井惟奈ほか
2. 発表標題 内殻光電子スペクトル線二色性による立方晶CeAl ₂ における4f基底 - 励起状態対称性の観測
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 濱本諭ほか
2. 発表標題 立方晶PrB ₆ における磁場中硬X線内殻光電子線二色性によるPr 4f電子状態の観測
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川田萌樹ほか
2. 発表標題 X線内殻光電子線二色性による重い電子系CeRu ₂ Si ₂ の4f基底状態軌道対称性の決定
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 近藤広康ほか
2. 発表標題 紫外レーザー角度分解光電子分光によるCeRu ₂ Si ₂ の重い電子状態の観測
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 濱本諭ほか
2. 発表標題 磁場印加下における直線偏光依存硬X線内殻光電子分光を用いたPrB6非整合反強磁性相Pr 4f電子状態の観測
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 濱本諭ほか
2. 発表標題 立方晶PrB6におけるPr 4f電子状態を反映した磁場中硬X線内殻光電子線二色性の観測
3. 学会等名 第32回日本放射光学会・放射光科学合同シンポジウム (JSR2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 近藤佑宥ほか
2. 発表標題 硬X線光電子分光を用いた希土類化合物CeAgSb2の基底状態における電子状態の解明
3. 学会等名 第32回日本放射光学会・放射光科学合同シンポジウム (JSR2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹内裕加里ほか
2. 発表標題 紫外レーザー角度分解光電子分光を用いた銅酸化物高温超伝導体の電子状態観測
3. 学会等名 第32回日本放射光学会・放射光科学合同シンポジウム (JSR2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akira SEKIYAMA et al.
2. 発表標題 Bulk-sensitive hard x-ray photoemission study of YbT ₂ Zn ₂₀ (T = Co, Rh, Ir)
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Satoru HAMAMOTO et al.
2. 発表標題 Linear dichroism in angle-resolved core level photoemission reflecting 4f ground state symmetry of strongly correlated cubic Pr compounds
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hidenori Fujiwara et al.
2. 発表標題 Switching of 3d Orbital Symmetry across Metal-Insulator Transition in Perovskite Manganites probed by linearly polarized Hard-X-ray Photoemission
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yuina KANAI et al.
2. 発表標題 Spectroscopic observation of crystal-field-split ground-state symmetry in cubic Ce compounds by high-energy photoemission
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Akira Sekiyama
2. 発表標題 Linear dichroism in angle-resolved core-level photoemission spectra ! reflecting ground-state outer orbital symmetry ! of strongly correlated electron systems
3. 学会等名 7th International Conference on Hard X-Ray Photoelectron Spectroscopy (HAXPES2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 関山明
2. 発表標題 光電子線二色性による強相関軌道対称性の研究：もう一つの角度分解光電子分光
3. 学会等名 第31回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中谷泰博ほか
2. 発表標題 軟X線角度分解光電子分光で観測したCeNi ₂ Ge ₂ の波数依存重い準粒子状態と磁気相関との関係
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 川田萌樹ほか
2. 発表標題 X線電子分光線二色性による圧力誘起超伝導体CeCu ₂ Ge ₂ の4f基底状態軌道対称性の決定
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 藤原秀紀ほか
2. 発表標題 磁場中軟X線共鳴発光分光によるハーフメタル型ホイスラー合金Mn ₂ VAlの電子構造研究
3. 学会等名 第31回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山神光平ほか
2. 発表標題 電子ドープ型銅酸化物高温超伝導体Nd ₂ -xCe _x CuO ₄ の内殻/価電子帯光電子線二色性
3. 学会等名 第31回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 服部竜大ほか
2. 発表標題 Mn2p内殻光電子スペクトル線二色性を用いたペロブスカイト型Mn酸化物におけるMn3d軌道対称性の研究
3. 学会等名 第31回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 坪内大樹ほか
2. 発表標題 極低エネルギー光電子分光を用いた低温熱電材料Ge ₂ Sb ₂ Te ₅ の電子状態研究
3. 学会等名 第31回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 関山明
2. 発表標題 角度分解硬X線内殻光電子線二色性による強相関軌道対称性の解明
3. 学会等名 PF研究会「次世代光源で拓かれる光電子分光研究の将来展望」(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Nakatani et al.
2. 発表標題 Momentum dependent heavy fermionic electronic structures in CeNi ₂ Ge ₂ probed by 3D soft X ray ARPES
3. 学会等名 39th International conference on Vacuum Ultraviolet and X-ray Physics (VUVX2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Y. Kanai et al.
2. 発表標題 Linear Dichroism in 3d core level and 4f valence band photoemission spectra of strongly correlated rare earth compounds
3. 学会等名 39th International conference on Vacuum Ultraviolet and X-ray Physics (VUVX2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 A. Sekiyama et al.
2. 発表標題 Linear dichroism in angle resolved core level photoemission probing strongly correlated anisotropic orbital symmetry in crystalline solids
3. 学会等名 39th International conference on Vacuum Ultraviolet and X-ray Physics (VUVX2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 A. Sekiyama
2. 発表標題 Bulk-sensitive high-resolution photoemission and photoemission dichroism studies of the electronic structures of strongly correlated systems
3. 学会等名 39th International conference on Vacuum Ultraviolet and X-ray Physics (VUVX2016) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 T. Ebihara, M. Tsuchiya, Y. Saitoh, J. Jatmika, M. Tsujimoto, Y. Shimura, Y. Matsumoto, S. Nakatsuji
2. 発表標題 Specific heat and electrical resistivity at magnetic fields in antiferromagnetic heavy fermion CeAl ₂
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 関山明、金井惟奈、田中新、今田真
2. 発表標題 異方的4f電荷分布を反映した角度分解内殻光電子線二色性における光学過程
3. 学会等名 日本物理学会2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 金井惟奈ほか
2. 発表標題 強相関希土類化合物の希土類 3dおよび4f光電子スペクトル線二色性による異方的4f電荷分布の観測
3. 学会等名 日本物理学会2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 中谷泰博ほか
2. 発表標題 角度分解価電子帯 / 内殻光電子分光による CeNi ₂ Ge ₂ の異方的重い準粒子状態の研究
3. 学会等名 日本物理学会2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 藤原秀紀ほか
2. 発表標題 高エネルギー光電子分光による強磁性体CeFe ₂ の遍歴4f電子構造の解明
3. 学会等名 日本物理学会2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 中谷泰博ほか
2. 発表標題 偏光依存X線電子分光によるCeNi ₂ Ge ₂ の軌道分解した重い準粒子状態
3. 学会等名 第30回日本放射光学会・放射光科学合同シンポジウム(JSR2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 藤原秀紀ほか
2. 発表標題 高エネルギー光電子分光による強磁性体CeFe ₂ の遍歴4f電子構造の解明
3. 学会等名 第30回日本放射光学会・放射光科学合同シンポジウム(JSR2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 荒谷秀和ほか
2. 発表標題 内殻光吸収及び光電子スペクトルの線二色性を用いた強相関電子系CeRu ₂ Si ₂ , CeCu ₂ Ge ₂ の4f基底状態の研究
3. 学会等名 第30回日本放射光学会・放射光科学合同シンポジウム(JSR2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 永井浩大ほか
2. 発表標題 軟X線磁気円二色性によるハーフメタルホイスラー合金Mn ₂ VAlの電子構造研究
3. 学会等名 第30回日本放射光学会・放射光科学合同シンポジウム(JSR2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 永井浩大ほか
2. 発表標題 軟X線吸収磁気円二色性によるフェリ磁性体Mn ₂ VAl単結晶の磁性・電子構造研究
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山神光平ほか
2. 発表標題 光電子線二色性を用いた銅酸化物高温超伝導体の電子状態観測
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 The Surface Science Society of Japan	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 853
3. 書名 Compendium of Surface and Interface Analysis	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>研究室Webページ： decima.mp.es.osaka-u.ac.jp</p> <p>Youtubeチャンネル「阪大基礎工 物性物理 関山研」： https://www.youtube.com/channel/UCAodH7Re6X61LYgszZY28ig/</p> <p>研究紹介動画：http://www.mp.es.osaka-u.ac.jp/sekiyama/</p> <p>受賞：研究代表者の関山がVUVX2016 Conference Award for Condensed Matter Physics受賞(2016) https://indico.psi.ch/event/3461/page/542-vuvx-awards-and-prizes</p>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	海老原 孝雄 (Ebihara Takao) (20273162)	静岡大学・理学部・准教授 (13801)	
研究分担者	田中 新 (Tanaka Arata) (70253052)	広島大学・先端物質科学研究科・准教授 (15401)	2020年4月より改組により先進理工系科学研究科所属