

平成22年 2月 9日現在

研究種目： 若手研究(A)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18684015
 研究課題名（和文） 高エネルギー光電子を用いた固体3次元バルクフェルミ面・準粒子の観測
 研究課題名（英文） Probing three-dimensional bulk Fermi surfaces and quasi-particles in solids by high-energy photoemission
 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

研究成果の概要：これまでのバルク敏感角度分解光電子分光に $h\nu$ 制御測定も加えた軟 X 線角度分解光電子分光による3次元バルク電子構造／フェルミ面観測手法確立に成功した。この手法を CeRu_2Si_2 に適用したところ、3次元的な電子構造とフェルミ面を観測し、それらが量子振動測定の結果と良く合うことが判明した。また、この測定と相補的な硬 X 線光電子分光も進め、ほぼバルク電子状態のみを反映した Ce 3d 内殻光電子スペクトルの測定に成功した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	11,600,000	3,480,000	15,080,000
2007年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2008年度	2,900,000	870,000	3,770,000
年度			
年度			
総計	18,400,000	5,520,000	23,920,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 I

キーワード：光物性、光電子分光

1. 研究開始当初の背景

電気伝導性や光に対する応答といった固体の性質の多くは、固体中の電子状態に強く左右される。それ故に固体結晶のバルク電子状態、特にフェルミ準位近傍の準粒子とフェルミ面の理解は、その物質の示す物性・機能の解明に欠かせない。可視光よりも光子エネルギーの高い ($h\nu > 3$ eV) の短い光を固体に照射し、外部光電効果によって真空中に飛び出す光電子を観測する角度分解光電子分光 (ARPES) は、バンド・準粒子分散を直接観測する手法として従来低エネルギー励起光 (<

～100 eV) で行われ、酸化物高温超伝導体等擬2次元物質のフェルミオロジー及び電子状態解明に威力を発揮してきた。しかし光電子の脱出深さは低エネルギー励起の場合数 Å と短く表面第一層からの寄与が大きい為、表面再構成を起こす層状物質 (例えば Sr_2RuO_4) や3次元物質ではバルクと異なる表面電子状態のスペクトルへの寄与が大きいという問題がある。短い脱出深さは同時に前述の表面に垂直な方向の運動量分解能 (\sim (脱出深さ) $^{-1}$) の悪さも意味する。

バルクフェルミ面を観測する他の実験と

してはドハース・ファンアルフェン(dHvA)効果等を利用した量子振動測定があり、有機导体や希土類化合物で威力を発揮している。この手法は高压測定が可能という利点がある一方で測定試料の純度が厳しい(ドーパされた酸化物では困難)・低温でのみ測定可能・準粒子分散は観測できないといった欠点もあった。また、フェルミ準位に位置する電子のみを観測にかけられるため、価電子帯全体の電子構造を知るには不向きな手法でもある。以上の観点から、本研究開始前は電子構造の議論は低エネルギーARPESの表面敏感性に目をつぶりつつ議論せざるをえなかった。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、これまで研究代表者が世界的にも先駆的に行ってきた高分解能高エネルギー軟X線($h\nu$: 500-900 eV)角度分解光電子分光(SX-ARPES)をさらに発展させ、励起エネルギー $h\nu$ を少しずつ変化させて測定する $h\nu$ 依存SX-ARPES及びその温度変化測定を多くの興味ある3次元物質に対して行い、バルク3次元フェルミ面及び準粒子を直接観測する。そしてこれらの実験を通じて物質のバルク物性及び電子状態解明を行う事、及びその過程を通じてSX-ARPESを光物性・固体電子物性分野において新たな、より汎用性の高い3次元フェルミ面探索手法として確立する事を目的として研究を行った。

(2) 上記目的と相補的な役割をなす実験として、よりバルク敏感な硬X線光電子分光(HAXPES)があげられる。硬X線光電子分光ではARPES測定は一部の重い元素を除いては極めて困難な一方で、軟X線励起よりもよりバルク敏感であり、軟X線励起では測定が難しい深い内殻準位のバルク光電子スペクトルが得られ、バルク電子状態についての知見が得られる。このHAXPESとSX-ARPESを組み合わせることで相互のデータと矛盾のない電子状態完全解明をいくつかの物質で行い、それによって「複合光電子分光による固体電子構造解明」手法を新たに立ち上げることも目的として研究を進めた。

3. 研究の方法

(1) 軟X線(SX-)ARPESには $h\nu$: 500-900 eVのエネルギー可変軟X線が不可欠である上、低エネルギーARPESに比べ光イオン化断面積が一桁以上小さい為高輝度軟X線を必要とする。その為測定は高輝度放射光施設SPring-8 BL25SUで行った。このビームラインは研究代表者も立上げから積極的に参加しているが、その性能は1999年以降本研究終了時点まで世界のトップを走り続けており極めて高性能である。それ故にSPring-8の中でも最も競争率の高いビームラインと

して有名である。確実に本研究を推進するために、本研究経費を元に「優先利用課題」としての実験を行った。

(2) HAXPESには $h\nu \sim 8$ keVと、SX-ARPESよりも約1桁エネルギーの高い高輝度硬X線を用いた。測定は、SPring-8長尺アンジュレータビームラインBL19LXUに我々が高電圧対応高分解能光電子分光装置を持ち込み、光軸出しやチャンネルカットを用いたSi(444)反射やSi(551)反射を利用した光の高分解能化、そして集光まで我々の手で行い、最高分解能約60 meVでの測定を可能にした。

4. 研究成果

(1) ここでは典型的な重い電子系化合物 CeRu_2Si_2 の実験結果を紹介し、本研究の目的の1つSX-ARPESによるバルク電子構造を3次元的な観測が成功したことを示す。図1はこの物質のSX-ARPESスペクトルの $h\nu$ 依存性を示したもののだが、 $h\nu$ が745, 760, 790 eVと変わるにつれて同じ観測角度でもスペクトル形状が変化し、 $h\nu$ を選ぶことで電子運動量の表面に垂直な方向の成分(面直成分)を特定していることが分かる。これにより従来の $h\nu$ 一定条件での2次元的なARPESに加えて $h\nu$ を新たなパラメータとした測定を行うことでバルク価電子帯電子構造ひいてはフェルミ面が3次元的に解明できる。これは光電子の平均自由行程が軟X線領域では従来の低エネルギー光電子分光のそれと比較して長い為、面直成分の運動量分解能が向上していることにも助けられている。

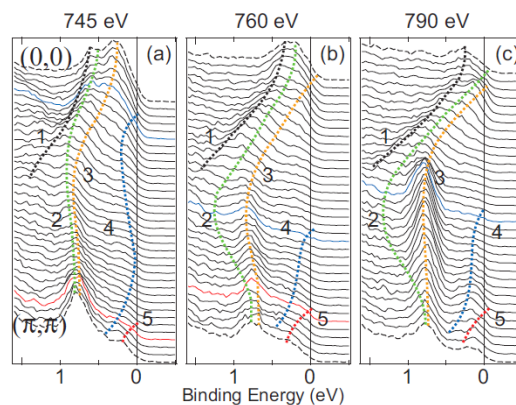


図1 : CeRu_2Si_2 の軟X線ARPESスペクトル

実際にフェルミ面を3次元的に調べた結果を図2に示す。我々は単に光電子強度の濃淡を見るだけでなく、各々の測定で得られた多くのSX-ARPESスペクトル[エネルギー分布(EDC)や運動量分布(MDC)]を詳細に解析し、逆格子空間におけるフェルミ面上の点、つまりフェルミ波数を実験的に決定(図2中の白点)してフェルミ面形状について議論した。その結果 CeRu_2Si_2 では近藤温度とほぼ同程度

の測定温度 20 K において、フェルミ面が Ce 4f 電子を遍歴的に扱ったバンド計算によってよく再現できると結論づけることができた。一方で Z 点付近に存在が予言されていた小さなホールポケットの 1 つは実際には観測されない。これは実験精度の問題ではなく、図 1 (c) 一番上の Z 点における ARPES スペクトルでフェルミ準位より約 0.2 eV 下にピークが観測されていることから、予言された 1 つのホール面が本質的に存在しないことを意味する。この結果は従来から報告されている同じ物質の dHvA 測定と無矛盾である。このようにして $h\nu$ 依存軟 X 線 ARPES を新たなフェルミオロジー研究手法として確立することが本研究によって成功した。

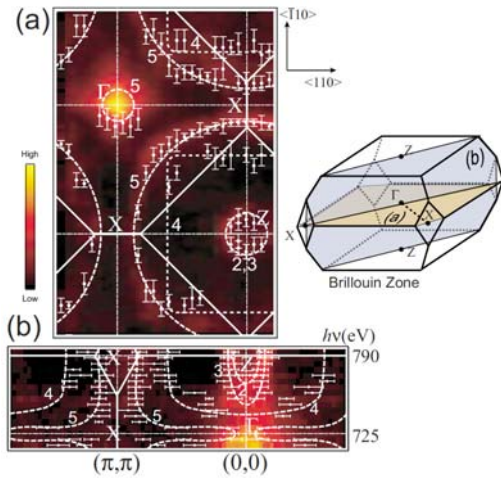


図 2 : CeRu₂Si₂ のフェルミ準位近傍における軟 X 線 ARPES 強度分布とフェルミ波数。(a) $h\nu$ 一定の測定で得た試料表面に平行な断面の結果。(b) 方位角一定の測定で得た試料表面と直交した面での結果。

(2) 遷移金属あるいは希土類化合物の強相関電子状態を知るためには、価電子帯光電子分光もさることながら内殻光電子分光も重要である。しかし希土類 3d 内殻準位は 880–1600 eV と深いため、軟 X 線励起スペクトルが測定できても、得られたスペクトルがバルク電子状態を反映しているとはいえない可能性が非常に高い。一方で $h\nu \sim 8$ keV 程度の硬 X 線を用いて光電子分光を行うと内殻光電子の運動エネルギーも数 keV のオーダーになるため、十分にバルクからの信号を見ている。我々は CeRu₂Si₂ 及び 4f 電子が局在的に振る舞うとされる CeRu₂Ge₂ に対して硬 X 線光電子分光を行った。図 3 に Ce 3d 内殻光電子スペクトルと Ce 3d 内殻軟 X 線吸収スペクトルとを合わせて示す。内殻吸収は全電子収量法で測定しているため検出深さは硬 X 線光電子分光のそれと同程度かやや深い数十–100 オングストロームである。

実験的には図中赤破線で囲んだ部分に両物質で顕著な違いが見られた。この部分に

CeRu₂Si₂ のスペクトルでは弱いピーク構造が観測されるが、これは硬 X 線光電子スペクトルでは 3d⁹4f⁰ 終状態、軟 X 線吸収スペクトルでは 3d⁹4f¹ 終状態に対応し、いずれも始状態における 4f⁰ 成分を反映している。4f 電子が局在モーメントとして振る舞う場合基本的には 4f¹ (Ce³⁺) 状態で記述できるが、価数揺動的になれば 4f⁰ 成分が増大することは古くから知られている。4f⁰ 始状態を反映した成分は CeRu₂Ge₂ では硬 X 線光電子及び軟 X 線吸収スペクトルいずれでも殆ど観測されず、4f 電子が局在的であることを裏付けている。

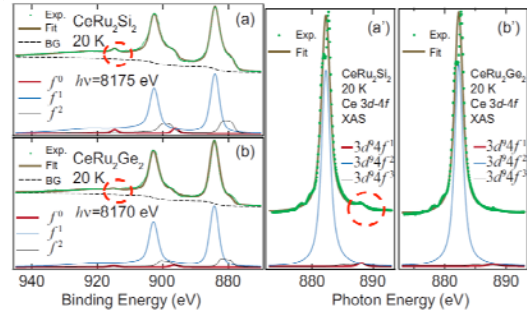


図 3 : CeRu₂Si₂ と CeRu₂Ge₂ の Ce 3d 内殻硬 X 線光電子スペクトル (a, b) と内殻吸収スペクトル (a', b'), 及びその解析結果 (各パネル下段)。(a), (a') は CeRu₂Si₂ のスペクトル、(b), (b') は CeRu₂Ge₂ のスペクトルにそれぞれ対応する。

我々はさらに詳細にバルク 4f 電子状態を知るために、これらのスペクトルを Anderson 不純物モデルに基づく Gunnarsson-Schönhammer (GS) モデル計算を、研究代表者自らが作成した計算プログラムによって行い定量的なスペクトルの再現を行った。その結果も図 3 に示しており、このモデルでスペクトルを良く再現できる事が分かるが、その結果 CeRu₂Si₂ では始状態における 4f¹ 成分は 90%弱で残り 10%強は 4f⁰, 4f² 状態にある事が分かった。この 4f¹ 成分は、より強く価数揺動する CeT₂ (T=Fe, Rh, Ni) と比較すると多いものの 1 より小さい。それ故にこの物質はゼロ磁場下や圧力下では 4f 電子が低温で秩序化せず価電子帯との混成による重い準粒子バンドを形成するが、強い磁場をかけるとこの 90%分が局在的にふるまいメタ磁性を示すと考えられる。一方で CeRu₂Ge₂ において 4f¹ 成分は始状態で 94%以上であり、4f 電子の局在性を裏付ける結果になった。なお、この GS モデル計算で用いた混成強度等のパラメータは、過去に Ce 3d-4f 共鳴光電子スペクトルを NCA 近似に基づく不純物模型による計算で再現するとき用いたものと同程度のものであり、計算そのものの妥当性も担保されている。

(3) 我々は他にも層状酸化物 Ca_{1.5}Sr_{0.5}RuO₄ の $h\nu$ 依存 SX-ARPES も行った。銅酸化物高温超

伝導体に代表される層状遷移金属酸化物は結晶構造や電気伝性の異方性から電子状態が高い2次元性を持ち、よって表面敏感は低エネルギーARPESでも一部の例外を除いてはバルク電子構造を反映したスペクトルと同等のデータが得られると信じられてきた。しかし $h\nu = 600\text{--}750\text{ eV}$ の範囲で励起エネルギーを変えながら SX-ARPES を行った結果、円筒型のフェルミ面は純粹に円筒形ではなく、電気伝導面に垂直な方向にはうねりあるいはくびれを持つことが分かり、フェルミ面については電子構造に有為な3次元性のあることが判明した。これは、おそらくは RuO_6 八面体の面内回転によって d_{xy} 軌道と $0\text{ }2p$ 軌道との間に有限の σ 結合が生じ、 $0\text{ }2p$ 軌道を介した $d_{xy}\text{--}d_{3z^2-r^2}$ 軌道間の混成が起きたためではないかと推測している。いずれにしてもこの結果は、層状酸化物といえどもバルク電子構造・フェルミ面を知るためには伝導面に垂直な運動量方向まで分解して測定できる $h\nu$ 依存 SX-ARPES が必要である事を示している。

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 20 件)

1. S. Suga, A. Sekiyama, H. Fujiwara, Y. Nakatsu, T. Miyamachi, S. Imada, P. Baltzer, S. Niitaka, H. Takagi, K. Yoshimura, M. Yabashi, K. Tamasaku, A. Higashiya and T. Ishikawa, "Do all nuclei recoil on photoemission in compounds?", *New J. Phys.* **11**, 073025-1-9 (2009). 査読有
2. T. Muro, Y. Kato, T. Matsuhita, T. Kinoshita, Y. Watanabe, A. Sekiyama, H. Sugiyama, M. Kimura, S. Komori, S. Suga, H. Okazaki and T. Yokoya, "In situ positioning of a few hundred micrometer-sized cleaved surface for soft-x-ray angle-resolved photoemission spectroscopy by use of an optical microscope", *Rev. Sci. Instrum.* **80**, 053901-1-4 (2009). 査読有
3. J. Yamaguchi, A. Sekiyama, S. Imada, H. Fujiwara, M. Yano, T. Miyamachi, G. Funabashi, M. Obara, A. Higashiya, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa, F. Iga, T. Takabatake and S. Suga, "Kondo lattice effects and the collapse of lattice coherence in $\text{Yb}_{1-x}\text{Lu}_x\text{B}_{12}$ studied by hard x-ray photoelectron spectroscopy", *Phys. Rev. B* **79**, 125121-1-8 (2009). 査読有
4. S. Ueda, A. Sekiyama, T. Iwasaki, S. Imada, S. Suga, Y. Saitoh, W. Giriat and S. Takeyama, "Electronic structures and $p\text{--}d$ exchange interaction of Mn-doped diluted magnetic semiconductors", *Phys. Rev. B* **78**, 205206-1-8 (2008). 査読有
5. Y. Okamoto, S. Niitaka, M. Uchida, T. Waki, M. Takigawa, Y. Nakatsu, A. Sekiyama, S. Suga, R. Arita and H. Takagi, "Band Jahn-Teller instability and formation of valence bond solid in a mixed-valent spinel oxide LiRh_2O_4 ", *Phys. Rev. Lett.* **101**, 086404-1-4 (2008). 査読有
6. M. Tsunekawa, A. Sekiyama, S. Kasai, S. Imada, H. Fujiwara, T. Muro, Y. Onose, Y. Tokura and S. Suga, "Bulk electronic structures and strong electron-phonon interactions in an electron-doped high-temperature superconductor", *New J. Phys.* **10**, 073005-1-11 (2008). 査読有
7. A. Yamasaki, S. Imada, A. Sekiyama, H. Fujiwara, M. Yano, J. Yamaguchi, G. Funabashi, H. Sugawara, D. Kikuchi, H. Sato, T. Muro, A. Higashiya, K. Tamasaku, M. Yabashi, H. Kobori, A. Sugimura, T. Ishikawa, H. Harima and S. Suga, "Stability of electronic states across the metal-insulator transition in $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ ", *Phys. Rev. B* **77**, 165125-1-4 (2008). 査読有
8. G. Funabashi, H. Fujiwara, A. Sekiyama, M. Hasumoto, T. Ito, S. Kimura, P. Baltzer and S. Suga, "Ultrahigh-resolution vacuum ultraviolet light source system for extremely low energy photoelectron spectroscopy", *Jpn. J. Appl. Phys.* **47**, 2265-2269 (2008). 査読有
9. M. Yano, A. Sekiyama, H. Fujiwara, Y. Amano, S. Imada, T. Muro, M. Yabashi, K. Tamasaku, A. Higashiya, T. Ishikawa, Y. Onuki and S. Suga, "Electronic structure of CeRu_2X_2 ($\text{X}=\text{Si}, \text{Ge}$) in the paramagnetic phase studied by soft x-ray ARPES and hard x-ray photoelectron spectroscopy", *Phys. Rev. B* **77**, 035118-1-8 (2008). 査読有
10. J. Yamaguchi, A. Sekiyama, S. Imada, A. Yamasaki, M. Tsunekawa, T. Muro, T. Ebihara, Y. Onuki and S. Suga, "Reduction of Kondo lattice effects in $\text{Yb}_{1-x}\text{Lu}_x\text{Al}_3$ observed by soft x-ray photoelectron spectroscopy", *New J. Phys.* **9**, 317-1-9 (2007). 査読有
11. A. Higashiya, S. Imada, A. Yamasaki, A. Irizawa, A. Sekiyama, S. Suga, Y. Taguchi, M. Iwama, K. Ohgushi and Y. Tokura, "Electron correlation and the metal-insulator transition of the pyrochlore molybdates $R_2\text{Mo}_2\text{O}_7$ ($R = \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Gd}, \text{Tb}, \text{Y}$)", *Phys. Rev. B* **75**, 155106-1-7 (2007). 査読有
12. A. Yamasaki, S. Imada, H. Higashimichi, H. Fujiwara, T. Saita, T. Miyamachi, A. Sekiyama, H.

Sugawara, D. Kikuchi, H. Sato, A. Higashiya, M. Yabashi, K. Tamasaku, D. Miwa, T. Ishikawa and S. Suga, "Coexistence of strongly mixed-valence and heavy-Fermion character in $\text{SmOs}_4\text{Os}_{12}$ studied by soft- and hard-X-ray spectroscopy", *Phys. Rev. Lett.* **98**, 156402-1-4 (2007). 査読有

13. H. Fujiwara, A. Sekiyama, M. Yano, T. Murakawa, T. Miyamachi, M. Tsunekawa, S. Imada, B. Schmid, M. Sing, A. Higashiya, T. Muro, T. Nakamura, K. Noda, H. Kuwahara, S. Miyasaka, Y. Tokura and S. Suga, "Dimensionality of the electronic states in $\text{Nd}_{0.45}\text{Sr}_{0.55}\text{MnO}_3$ studied by soft x-ray photoemission", *J. Magn. Magn. Mater.* **310**, 816-818 (2007). 査読有

14. M. Yano, A. Sekiyama, H. Fujiwara, T. Saita, S. Imada, T. Muro, Y. Onuki and S. Suga, "Bulk 3-D Fermi surfaces of CeRu_2Ge_2 proved by soft x-ray ARPES", *J. Magn. Magn. Mater.* **310**, 437-439 (2007). 査読有

15. M. Yano, A. Sekiyama, H. Fujiwara, T. Saita, S. Imada, T. Muro, Y. Onuki and S. Suga, "Three-dimensional bulk Fermiology of CeRu_2Ge_2 in the paramagnetic phase by soft x-ray hv-dependent (700-860 eV) ARPES", *Phys. Rev. Lett.* **98**, 036405-1-4 (2007). 査読有

16. Z. V. Pchelkina, I. A. Nekrasov, Th. Pruschke, A. Sekiyama, S. Suga, V. I. Anisimov and D. Vollhardt, "Evidence for strong electronic correlations in the spectra of Sr_2RuO_4 ", *Phys. Rev. B* **75**, 035122-1-10(2007). 査読有

17. S.-K. Mo, H.-D. Kim, J. D. Denlinger, J. W. Allen, J.-H. Park, A. Sekiyama, A. Yamasaki, S. Suga, Y. Saitoh, T. Muro and P. Metcalf, "Photoemission study of $(\text{V}_{1-x}\text{M}_x)_2\text{O}_3$ ($M = \text{Cr}, \text{Ti}$)", *Phys. Rev. B* **74**, 165101-1-12 (2006). 査読有

18. A. Irizawa, A. Higashiya, S. Kasai, T. Sasabayashi, A. Shigemoto, A. Sekiyama, S. Imada, S. Suga, H. Sakai, H. Ohno, M. Kato, K. Yoshimura and H. Harima, "Photoemission spectroscopy and x-ray absorption spectroscopy studies of the superconducting Pyrochlore oxide $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$ ", *J. Phys. Soc. Jpn.* **75**, 094701-1-5 (2006). 査読有

19. Feng Wang, S.-K. Mo, J. W. Allen, H.-D. Kim, J. He, R. Jin, D. Mandrus, A. Sekiyama, M. Tsunekawa and S. Suga, "Case for bulk nature of spectroscopic Luttinger liquid signatures observed in angleresolved photoemission spectra of $\text{Li}_{0.9}\text{Mo}_6\text{O}_{17}$ ", *Phys. Rev. B* **74**, 113107-1-4 (2006). 査読有

20. H. Fujiwara, A. Sekiyama, A. Higashiya, K.

Konoike, A. Yamasaki, S. Imada, T. Muro, K. Noda, H. Kuwahara, Y. Tokura and S. Suga, "Diversity of electronic states of $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$ revealed by soft X-ray photoemission", *Physica B* **378-380**, 515-517 (2006). 査読有

[学会発表] (計 10 件)

1. A. Sekiyama, "Three-dimensional soft x-ray ARPES and polarization-dependent hard x-ray photoemission study of strongly correlated electron systems", **Invited talk** on 11th International Conference on Electronic Spectroscopy & Structure (ICESS-11) at Nara, Japan (2009年10月8日).

2. 関山明、「重い電子系Ce化合物の3次元ARPESによるフェルミオロジー」日本放射光学学会 企画「光電子分光によるフェルミオロジー」招待講演 (東京大学、2009年1月12日)

3. 関山明、「重い電子系物質の軟X線3次元角度分解光電子分光」PF研究会「高分解能角度分解光電子分光研究と将来展望」招待講演 (高エネルギー加速器研究機構、2008年12月18日)

4. 関山明、「Ce化合物の軟X線3次元角度分解光電子分光で分かるフェルミ面と電子構造」東大物性研短期研究会「重い電子系研究の新展開」招待講演 (東大物性研、2008年7月24日)

5. 関山明、「軟X線角度分解光電子分光による固体結晶の3次元フェルミオロジー」東大物性研短期研究会「高輝度軟X線放射光が拓く物質科学の新たな地平」招待講演 (東大物性研、2007年7月5日)

6. 関山明、「Innovation of bulk-sensitive photoemission spectroscopy applied to strongly correlated materials for probing their electronic states」, 日本物理学会若手奨励賞受賞講演 (北海道大学、2007年9月21日)

7. 関山明、「軟X線角度分解光電子分光による固体結晶の3次元フェルミオロジー」東大物性研短期研究会「高輝度軟X線放射光が拓く物質科学の新たな地平」招待講演 (東大物性研、2007年7月5日)

8. 関山明、「高エネルギー励起光によるバルク敏感角度分解光電子分光」日本表面科学会

第 26 回表面科学講演大会シンポジウム(招待)講演 (大阪大学、2006 年 11 月 7 日)

9. A. Sekiyama, H. Fujiwara, M. Tsunekawa, S. Imada, H. Eisaki, S. I. Uchida, Y. Onuki, T. Kimura, Y. Onose, Y. Tokura, H. Kuwahara, T. Muro and S. Suga, "High-resolution soft x-ray photoemission of strongly correlated Perovskites: Probing their bulk electronic states", International Conference on Magnetism (**ICM2006**) at Kyoto, Japan (2006 年 8 月 24 日).

10. A. Sekiyama, M. Yano, H. Fujiwara, Y. Amano, S. Imada, T. Muro, Y. Onuki and S. Suga, "Bulk-sensitive high-energy angle-resolved photoemission study of strongly correlated electron systems", **Invited talk** on 5th International Conference on Synchrotron Radiation in Materials Science (**SRMS-5**) at Chicago, IL, USA (2006 年 8 月 2 日).

[図書] (計 1 件)

1. A. Sekiyama, S. Imada, A. Yamasaki and S. Suga, "High-resolution high-energy photoemission study of rare-earth heavy Fermion systems" in "Very high-resolution photoelectron spectroscopy" S. Hüfner ed., Lecture Notes in Physics **715**, 351-372 (Springer, Berlin Heidelberg 2007).

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

1.
名称: 原子軌道解析装置およびその解析方法
発明者: 関山明
権利者: 国立大学法人大阪大学
種類: 特許
番号: 特願 2009-038656
出願年月日: 2009 年 2 月 20 日
国内外の別: 国内

2.
名称: 表面原子可視化装置
発明者: 関山明, 菅滋正
権利者: 国立大学法人大阪大学
種類: 特許
番号: 特願 2007-005230、特開 2008-170356
出願年月日: 2007 年 1 月 12 日
国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

[その他]
ホームページ等
<http://decima.mp.es.osaka-u.ac.jp>

6. 研究組織
(1) 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