

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 13 日現在

機関番号：15401
 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22740233
 研究課題名（和文）偏光依存角度分解光電子分光によるマルチバンド強相関物質の微細電子構造の解明
 研究課題名（英文）Elucidation of fine electronic structures in strongly correlated multiband materials by means of polarization-dependent ARPES
 研究代表者
 岩澤 英明（IWASAWA HIDEAKI）
 広島大学・放射光科学研究センター・助教
 研究者番号：90514068

研究成果の概要（和文）：

放射光のエネルギーの可変性と直線偏光特性を活用した高分解能角度分解光電子分光（ARPES）により、代表的なマルチバンド強相関物質である Sr_2RuO_4 の微細電子構造を明らかにした。複数のバンドを選択的に観測することで、詳細な自己エネルギー解析を行い、電子・格子相互作用、スピン・軌道相互作用、電子相関の働きを明らかにした。さらに、各多体相互作用の寄与を別々に定量評価できる手法を確立した。

研究成果の概要（英文）：

By means of high-resolution angle-resolved photoemission spectroscopy (ARPES) utilizing the tunable photon-energy and the linear polarization properties of synchrotron radiation, we clarified fine electronic structures of a representative strongly correlated multiband material, Sr_2RuO_4 . The multi-electronic states of Sr_2RuO_4 can be disentangled, allowing us to analyze the self-energy in detail. We revealed how electron-phonon interaction, spin-orbit interaction, and electron correlation are corporately involved in renormalization effects in Sr_2RuO_4 . We also established a new evaluation method which gives each coupling strength of above many-body interactions quantitatively.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011 年度	800,000	240,000	1,040,000
2012 年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性Ⅱ

キーワード：強相関系、角度分解光電子分光（ARPES）

1. 研究開始当初の背景

強相関遷移金属酸化物は、電荷・スピン・格子・軌道間の自由度の競合により、高温超伝導、巨大磁気抵抗、電荷秩序・スピン秩序・軌道秩序などの興味深い性質を示す。これら巨視的物性の解明には、固体中の電子構造を

直接観測出来る「角度分解光電子分光（ARPES）」による微細電子構造の解明が必要不可欠である。実際に、銅酸化物高温超伝導体を始めとした様々な強相関遷移金属酸化物において、国内外で数多くの ARPES 研究がなされ、フェルミ準位近傍の「電子バンドの

折れ曲がり（キंक構造）」が観測され、微細電子構造が明らかにされつつある。さらに、キंक構造の自己エネルギー解析を通して、電子・格子相互作用などの多体効果に関する情報の取得も可能となってきた。

しかし、詳細な自己エネルギーの解析は、銅酸化物高温超伝導体のように、バンド構造が比較的単純であるものに限られており、バンドが複数混在するマルチバンド系においては困難であった。そのため、マルチバンド系において多体効果に関する知見を得るためには、マルチバンド系の複数バンドを選択的に観測することが必要不可欠であった。

2. 研究の目的

放射光の「偏光特性」・「励起光の変性」を利用した角度分解光電子分光により、これまでの研究では困難であった「マルチバンド系強相関層状遷移金属酸化物における微細電子構造の解明」を目的とする。マルチバンド系の典型例であるスピン三重項超伝導体 Sr_2RuO_4 を主な研究対象とし、各バンドの多体相互作用（電子・格子相互作用など）を定量的に評価する。

3. 研究の方法

本研究では、マルチバンド系の複数バンドを選択的に観測するために「放射光の直線偏光特性」の活用に着目した。近年、我々のグループでは、偏光特性が活用できる回転型の高分解能角度分解光電子分光装置を広島大学放射光科学研究センターのリニアアンジ

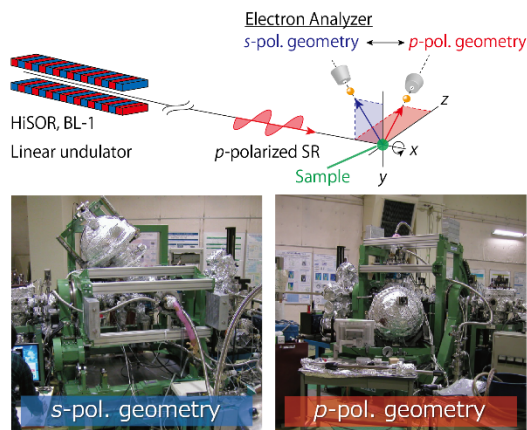


図 1. 回転型の偏光依存 ARPES 装置 (HiSOR, BL-1).

ュレータービームライン (BL-1) に建設し、整備を進めてきた (図 1)。

4. 研究成果

- (1) Sr_2RuO_4 における電子・格子相互作用、スピン・軌道相互作用

放射光の直線偏光特性を活用することで、フェルミ準位近傍に混在する Sr_2RuO_4 の 3 つ

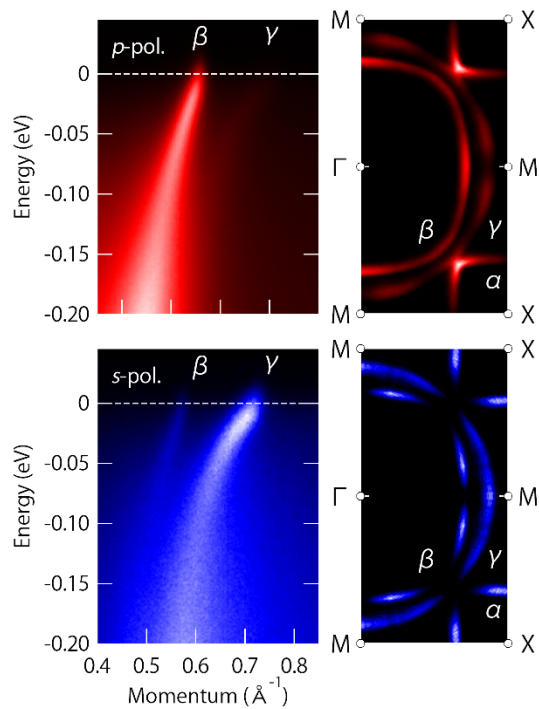


図 2. p 偏光 (上段) および s 偏光 (下段) で測定した Sr_2RuO_4 の ARPES イメージ (左) とフェルミ面 (右)。

dxy , dyz , dxz バンドが選択的に観測できること (図 1 左)、また、フェルミ面全体にわたり直線偏光特性が顕著に現れることを示した (図 1 右)。これにより、マルチバンド系においても詳細な電子構造解析を行うことが可能となり、超伝導を担う電子が特定の格子の振動モードと強く結合し、超伝導の発生に有利に働いていることを明らかにした。さらに kz 分散の結果から、スピン・軌道相互作用が働いた結果、電子構造の高い 2 次元性が Sr_2RuO_4 において実現していることがわかった (Iwasawa et al. Phys. Rev. Lett. 2010; 新聞報道 5 誌: 日経産業新聞、日刊工業新聞、中国新聞、化学工業日報、鉄鋼新聞)。

(2) Sr_2RuO_4 における電子相関

(1) で見出した低エネルギー領域における相互作用の働きに加えて、よりエネルギースケールの大きい電子相関の効果を調べるために、広域的かつ高分解能の偏光依存 ARPES 測定を行った (図 3 左: 上下)。その結果、バンド幅の狭い dxz バンドでは一様なバンド幅の減少のみが観測されたのに対して (図 3 左上)、バンド幅の広い dxy バンドでは銅酸化物高温超伝導体で広く観測されていた高結合エネルギー側のバンド分散における異常が観測された (図 3 左下)。詳細な自己エネルギー解析から、実験的に自己エネルギーの実部、虚部を導出し (図 3 右: 上下)、さ

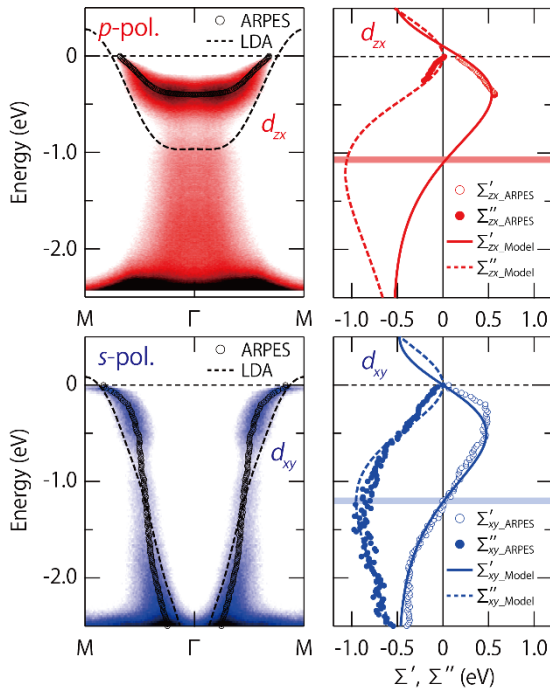


図3. p偏光（上段）およびs偏光（下段）で測定した Sr_2RuO_4 のARPESイメージ（左）と自己エネルギーの実部と虚部（右）。

らにフェルミ液体論に基づく簡単なモデルを用いることで、自己エネルギーの振る舞い（図3右：点線・実線）やスペクトル関数が再現できることが分かった。これにより、一見異なるどちらのバンドの繰り込みも電子相関により説明できること、また、電子相関の強さを定量的に評価できることを見出した（Iwasawa et al. Phys. Rev. Lett. 2012；新聞報道4誌：日刊工業新聞、中国新聞、化学工業日報、鉄鋼新聞）。

(3) Sr_2RuO_4 における多体相互作用の定量評価

Sr_2RuO_4 の3つのバンドの内、最も大きな有効質量の増大を示す d_{xy} バンドの低エネルギー領域において働く電子・ボゾン相互作用を定量的に評価するため、さらに高分解能でのARPES測定を行った。(2)で見出した電子・電子相互作用の評価方法を用いて、電子・電子相互作用の強さ(λ_{EEI})を決定し、さらに電子・ボゾン相互作用に由来する自己エネルギーの強さ(λ_{EBI})の定量評価を行った。その結果、従来広く導出されていた電子・ボゾン相互作用に由来する自己エネルギー(Σ'_{EBI})は、“真”の値($\tilde{\Sigma}'_{\text{EBI}}$)と比較して $(1+\lambda_{\text{EEI}})$ だけ過小評価されていたことが明らかとなった(図4)。新しい評価方法により得られた“真”の電子・ボゾン相互作用の強さは $\lambda_{\text{EBI}} \sim 1.2$ である。一方、従来の評価方法から“実効的”に得られる電子・ボゾン相互作用の強さは $\lambda_{\text{EBI}} \sim 0.4$ である。この結果は、理論の

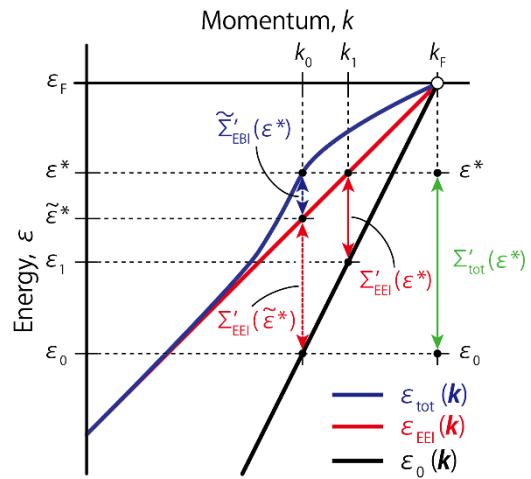


図4. 電子相関と電子・格子相互作用によるバンド分散の繰り込みの模式図。

取扱いを左右する大きな違いであるため、今後、特に銅酸化物高温超伝導体をはじめとした強相関電子系物質において、ARPESを用いた結合定数の評価を見直す必要があると考えられる。（Iwasawa et al. Sci. Rep. 2013；新聞報道1誌：中国新聞）。

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21件）

1. H. Iwasawa, Y. Yoshida, I. Hase, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, Y. Aiura, ‘True’ bosonic coupling strength in strongly correlated superconductors, Sci. Rep. **3**, 1930 (2013). (査読有)

2. T. J. Reber, N. C. Plumb, Y. Cao, Z. Sun, Q. Wang, K. McElroy, H. Iwasawa, M. Arita, J. S. Wen, Z. J. Xu, G. Gu, Y. Yoshida, H. Eisaki, Y. Aiura, D. S. Dessau, Preparing and the “filling” gap in the cuprates from the tomographic density of states, Phys. Rev. B **87**, 060506(R) (2013). (査読有)

3. H. Hayashi, K. Shimada, J. Jiang, H. Iwasawa, Y. Aiura, T. Oguchi, H. Namatame, M. Taniguchi, High-resolution angle-resolved photoemission study of electronic structure and electron self-energy in palladium, Phys. Rev. B **87**, 035140 (2013). (査読有)

4. Y. Nakashima, A. Ino, S. Nagato, H. Anzai, H. Iwasawa, Y. Utsumi, H. Sato, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, T. Oguchi, Y. Aiura, I. Hase, K. Kihou, C. H.

- Lee, A. Iyo, H. Eisaki, Fermi-surface reconstruction involving two van Hove singularities across the antiferromagnetic transition in BaFe_2As_2 , *Solid State Commun.* **157**, 16 (2013). (査読有)
5. H. Iwasawa, Y. Yoshida, I. Hase, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, Y. Aiura, High-Energy Anomaly in the Band Dispersion of the Ruthenate Superconductor, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 066404 (2012). (査読有)
6. T. J. Reber, N. C. Plumb, Z. Sun, Y. Cao, Q. Wang, K. McElroy, H. Iwasawa, M. Arita, J. S. Wen, Z. J. Xu, G. Gu, Y. Yoshida, H. Eisaki, Y. Aiura, D. S. Dessau, The origin and non-quasiparticle nature of Fermi arcs in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$, *Nature Phys.* **8**, 606 (2012). (査読有)
7. K. Fukutani, H. Hayashi, I. N. Yakovkin, T. Habuchi, D. Hirayama, J. Jiang, H. Iwasawa, K. Shimada, Y. B. Losovyj, P. A. Dowben, Enhanced electron-phonon coupling at the Au/Mo(112) surface, *Phys. Rev. B* **86**, 205432 (2012). (査読有)
8. K. Miyamoto, A. Kimura, T. Okuda, K. Shimada, H. Iwasawa, H. Hayashi, H. Namatame, M. Taniguchi, M. Donath, Massless or heavy due to two-fold symmetry: Surface-state electrons at W(110), *Phys. Rev. B* **86**, 161411(R) (2012). (査読有)
9. K. Fukutani, H. Hayashi, I. N. Yakovkin, T. R. Paudel, T. Habuchi, D. Hirayama, J. Jiang, H. Iwasawa, K. Shimada, N. Wu, E. Y. Tsybal, Y. B. Losovyj, P. A. Dowben, New view of the occupied band structure of Mo(112), *Phys. Rev. B* **85**, 155435 (2012). (査読有)
10. I. N. Yakovkin, K. Fukutani, H. Hayashi, J. Jiang, T. Horike, Y. Nagata, T. Habuchi, D. Hirayama, H. Iwasawa, K. Shimada, Y. B. Losovyj, P. A. Dowben, Fermi surface of Mo(112) and indirect interaction between adsorbed atoms, *Phys. Rev. B* **86**, 125401 (2012). (査読有)
11. H. Schwab, M. Mulazzi, J. Jiang, H. Hayashi, T. Habuchi, D. Hirayama, H. Iwasawa, K. Shimada, F. Reinert, Character of valence-band states in the Kondo surface alloys $\text{CeAg}_x/\text{Ag}(111)$ and $\text{CePt}_5/\text{Pt}(111)$, *Phys. Rev. B* **85**, 125130 (2012). (査読有)
12. H. Yamaoka, P. Thunström, N. Tsujii, I. Jarrige, K. Shimada, M. Arita, H. Iwasawa, H. Hayashi, J. Jiang, H. Namatame, M. Taniguchi, N. Hiraoka, H. Ishii, K.-D. Tsuei, M. Giovannini, E. Bauer, Electronic structure and the valence state of $\text{Yb}_2\text{Pd}_2\text{Sn}$ and YbPd_2Sn studied by photoelectron and resonant x-ray emission spectroscopies, *Phys. Rev. B* **86**, 085137 (2012). (査読有)
13. H. Yamaoka, P. Thunström, I. Jarrige, K. Shimada, N. Tsujii, M. Arita, H. Iwasawa, H. Hayashi, J. Jiang, T. Habuchi, D. Hirayama, H. Namatame, M. Taniguchi, U. Muraio, S. Hosoya, A. Tamaki, H. Kitazawa, High-resolution photoelectron spectroscopy study of Kondo metals: SmSn_3 and $\text{Sm}_{0.9}\text{La}_{0.1}\text{Sn}_3$, *Phys. Rev. B* **85**, 115120 (2012). (査読有)
14. J. Jiang, K. Shimada, H. Hayashi, H. Iwasawa, Y. Aiura, H. Namatame, M. Taniguchi, Coupling parameters of many-body interactions for the Al(100) surface state: A high-resolution angle-resolved photoemission spectroscopy study, *Phys. Rev. B* **84**, 155124 (2011). (査読有)
15. Y. Zhang, F. Chen, C. He, B. Zhou, B. Xie, C. Fang, W. Tsai, X. Chen, H. Hayashi, J. Jiang, H. Iwasawa, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, J. Hu, D. Feng, Orbital characters of bands in the iron-based superconductor $\text{BaFe}_{1.85}\text{Co}_{0.15}\text{As}_2$, *Phys. Rev. B* **83**, 054510 (2011). (査読有)
16. T. Saitoh, H. Iwasawa, K. Kurahashi, Y. Nakano, T. Katsufuji, I. Hase, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, Spin-doping effect on the electronic structure of $\text{Sr}_{1-(x+y)}\text{La}_{x+y}\text{Ti}_{1-x}\text{Cr}_x\text{O}_3$, *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* **184**, 232 (2011). (査読有)
17. H. Iwasawa, Y. Yoshida, I. Hase, S. Koikegami, H. Hayashi, J. Jiang, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, Y. Aiura, Interplay among Coulomb Interaction, Spin-Orbit Interaction, and Multiple Electron-Boson Interactions in Sr_2RuO_4 , *Phys. Rev. Lett.* **105**, 226406 (2010). (査読有)
18. H. Iwasawa, J. F. Douglas, K. Sato, T. Masui, Y. Yoshida, Z. Sun, H. Eisaki, H. Bando, A. Ino, M. Arita, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, S. Tajima, S.

Uchida, T. Saitoh, D. S. Dessau, Y. Aiura, Oxygen isotope effect in optimally doped $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ studied by low-energy ARPES, *Physica C* **470**, S134 (2010). (査読有)

19. Y. Aiura, I. Hase, Y. Yoshida, S. Koikegami, H. Iwasawa, Enhancement of Hybridization between Two- and One-Dimensional Bands due to Coulomb and Spin-Orbit Interactions in Sr_2RuO_4 , *J. Phys. Soc. Jpn.* **79**, 123702 (2010). (査読有)

20. K. Kuroda, M. Arita, K. Miyamoto, M. Ye, J. Jiang, A. Kimura, E. Krasovskii, E. Chulkov, H. Iwasawa, T. Okuda, K. Shimada, Y. Ueda, H. Namatame, M. Taniguchi, Hexagonally Deformed Fermi Surface of the 3D Topological Insulator Bi_2Se_3 , *Phys. Rev. Lett.* **105**, 076802 (2010). (査読有)

21. H. Usui, H. Iwasawa, M. Hirose, Y. Maeda, T. Saitoh, H. Osada, T. Kyōmen, M. Hanaya, Y. Aiura, Y. Kotani, M. Kubota, K. Ono, Electronic structure of $\text{K}_{0.5}\text{CoO}_2$ studied by angle-resolved photoemission spectroscopy, *Physica C* **470**, S758 (2010). (査読有)

[学会発表] (計 117 件 : 内 100 件省略)

1. H. Iwasawa, Electron correlation effects in Sr_2RuO_4 revealed by angle-resolved photoemission spectroscopy, *Quantum in Complex Matter: Superconductivity, Magnetism and Ferroelectricity: Superstripes13*, Ischia, Italy (May 28, 2013). (Invited)

2. 岩澤英明, 角度分解光電子分光を用いた自己エネルギー導出方法の改善, 日本物理学会 (第 68 回年次大会), 広島大学 (2013 年 3 月 29 日).

3. 岩澤英明, Sr_2RuO_4 における電子相関による電子バンドの繰り込み, 第 26 回日本放射光学会, 名古屋大学 (2013 年 1 月 14 日).

4. H. Iwasawa, Two Distinct Types of Band Renormalization: High-energy Anomaly vs. Band Narrowing, The 12th International Conference on Electronic Spectroscopy and Structure (ICES11), Saint-Malo, France, (Sep. 17, 2012).

5. 岩澤英明, VUV 領域の高分解能角度分解光電子分光の偏光依存性, 日本物理学会 (第 67 回年次大会), 関西学院大学 (2012 年 3 月 25 日). (招待講演)

6. H. Iwasawa, Angle-resolved Photoemission Study on the High-energy Anomaly in the Energy Dispersion of Layered Transition-Metal Oxides, The 16th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation, Hiroshima, Japan (March 1, 2012).

7. 岩澤英明, ルテニウム・銅酸化物超伝導体における高エネルギー領域のバンド分散の異常, 第 25 回日本放射光学会, 鳥栖市民文化会館 (2012 年 1 月 8 日).

8. 岩澤英明, 真空紫外線域の放射光を用いた酸化物超伝導体の微細電子構造の研究, 第 25 回日本放射光学会, 鳥栖市民文化会館 (2012 年 1 月 7 日). (奨励賞受賞記念講演)

9. 岩澤英明, 銅酸化物及びルテニウム酸化物超伝導体における電子バンドの繰り込み, 日本物理学会 (秋季大会), 富山大学 (2011 年 9 月 24 日).

10. H. Iwasawa, Band renormalization in cuprate and ruthenate superconductors, International Workshop on Strong Correlations and Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy (CORPES11), Berkeley, California (July 21, 2011).

11. H. Iwasawa, Electron-boson coupling in cuprate and ruthenate superconductors fingerprinted by high-resolution ARPES, The 15th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation, Hiroshima, Japan (March 4, 2011). (Invited)

12. 岩澤英明, Sr_2RuO_4 の高分解能角度光電子分光: 偏光・励起光依存性, 第 24 回日本放射光学会, つくば国際会議場 (2011 年 1 月 9 日).

13. H. Iwasawa, Electron-phonon coupling in cuprate and ruthenate superconductors, A3 Foresight Program of "Joint Research on Novel Properties of Complex Oxides", Kyoto, Japan (Nov. 10, 2010). (Invited)

14. 岩澤英明, Sr_2RuO_4 の電子状態における偏光・励起光依存性, 日本物理学会 (秋季大会), 大阪府立大学 (2010 年 9 月 25 日).

15. H. Iwasawa, Polarization and k_z -dependent ARPES study of Sr_2RuO_4 , The 37th International conference on Vacuum Ultraviolet and X-ray Physics (VUVX2010),

Vancouver, Canada (July 13, 2010).

16. H. Iwasawa, Polarization-dependent ARPES study of Sr_2RuO_4 : Disentanglement of multiband system, The 14th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation, Hiroshima, Japan (March 3, 2010).

17. 岩澤英明, 偏光依存角度分解光電子分光を用いた Sr_2RuO_4 の軌道選択的電子構造の研究, 第 23 回日本放射光学学会, イーグレ姫路(2010年1月9日).

[図書] (計 3 件)

1. 岩澤英明, 相浦義弘, 日本放射光学学会, 放射光 (Vol.26, No.3), 2013, pp121-125

2. 岩澤英明, 相浦義弘, NTS, 高温超伝導現象と用途開発最前線 (3章2節1項), 2013, pp449-459

3. 岩澤英明, 日本放射光学学会, 放射光 (Vol.25, No.2), 2013, pp121-125

[その他]

ホームページ等

<http://www.hsrc.hiroshima-u.ac.jp/>

受賞 (計 2 件)

1. 第 16 回 日本放射光学学会奨励賞

2. 第 10 回 広島大学学長表彰

新聞報道 (計 10 件)

1. 中国新聞 (27 面:平成 25 年 6 月 10 日)
「広島大などチームが成功「電子の相互作用を数値化」HD の大容量化に道」

2. 中国新聞 (27 面:平成 24 年 7 月 28 日)
「広島大など研究チーム「電子相関」可視化に成功 機器の省電力化期待」

3. 日刊工業新聞 (28 面:平成 24 年 7 月 30 日)
「広島大 産総研 “電子の反発” 観測成功 金属酸化物材料へ応用」

4. 化学工業新聞 (8 面:平成 24 年 7 月 30 日)
「電子相関効果 金属酸化物中に 2 通り 広島大など、可視化に成功」

5. 鉄鋼新聞 (6 面:平成 24 年 7 月 31 日)
「広島大と産総研 金属酸化物の電子相関可視化 新デバイス材料に道」

6. 日経産業新聞 (7 面:平成 22 年 11 月 17 日)
「超電導の引き金 磁石改良物質も同じ 広島大など「格子振動」が関与」

7. 日刊工業新聞 (24 面:平成 22 年 11 月 17 日)
「広島大 産総研 超電導の対、ナゾ解明 ルテニウム酸化物で」

8. 化学工業新聞 (5 面:平成 22 年 11 月 17 日)
「広島大 産総研 Ru 酸化物超電導体 電子の運動を可視化 機構解明へ手がかり」

9. 中国新聞 (31 面:平成 22 年 11 月 17 日)
「酸化物超伝導の原理解明」

10. 鉄鋼新聞 (6 面:平成 22 年 11 月 17 日)
「広島大と産総研 ルテニウム酸化物超電導 発現のメカニズム発見」

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩澤 英明 (IWASAWA HIDEAKI)

広島大学・放射光科学研究センター・助教
研究者番号: 90514068

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし