

令和 3 年 5 月 21 日現在

機関番号：63903

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H02911

研究課題名(和文) 軌道磁気量子数計測法の確立と低次元電子物性研究への応用

研究課題名(英文) Development of Orbital Magnetic Quantum Number Measurement Method and Application to the Investigation of Low-dimensional Electronic Properties

研究代表者

松井 文彦 (Matsui, Fumihiko)

分子科学研究所・極端紫外光研究施設・主任研究員

研究者番号：60324977

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,700,000円

研究成果の概要(和文)：光電子回折における前方収束ピークから元素・原子サイト選択的に電子構造の情報が得られる。円偏光励起による円二色性から軌道磁気量子数を計測する手法・装置開発を行った。内殻吸収端における共鳴オージェ電子回折にも円二色性が現れることを発見した。3d金属では特にCu～Feの後期遷移金属でこの効果(2正孔生成)が顕著に現れる。逆にTi化合物など前期遷移金属では1正孔生成の共鳴光電子放出が支配的となり、元素選択的に特定のバンド分散が強調されて観測できることを示した。さらに軽元素のK殻吸収端での共鳴過程を研究し、グラファイトで通常の光電子とは異なる2電子の総運動量が保存される共鳴オージェ遷移過程を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

軌道磁気量子数は局所的な電子運動の対称性と結びつき、様々な電子物性の発現と密接な関係にあるが、こうした軌道磁気量子数を直接計測する手段がこれまでなかった。本研究では当初想定した銅や鉄などの共鳴オージェ電子回折に加え、前期遷移元素や軽元素に対象を広げ、光励起過程の基礎を明らかにし、一連の研究を盛り込んだ教科書「光電子分光詳論」を出版した。広角取り込み分析器に加え、全角度分布計測を可能にする全天球光電子取り込み電場レンズ、直角偏向イメージングでスピン量子数の垂直成分の解析の道を拓く分析器の考案を行い、それぞれ特許出願にこぎつけた。計測手法考案・新装置開発・基礎学理開拓を通じて基礎科学に貢献する。

研究成果の概要(英文)：Element and atomic-site selective information on the electronic structure can be obtained from the photoelectron diffraction (PD). We have developed methods and analyzers for measuring orbital magnetic quantum numbers from PD circular dichroism. We discovered that circular dichroism also appears in the resonant Auger electron diffraction at the L-shell absorption edge. This effect (2-hole generation) is significant in 3d transition metals, especially in late transition metals from Cu to Fe. On the contrary, in the early transition metal compounds such as TiO₂, the resonance photoelectron emission of 1-hole generation became dominant, and it was shown that the specific band dispersion was emphasized and observed elementally. Furthermore, we studied the resonance process at the K-shell absorption edge of light elements, and found a resonance Auger transition process in graphite, in which the total momentum of two electrons is conserved, which is different from ordinary photoelectrons.

研究分野：表面物理、放射光科学

キーワード：光電子回折 軌道角運動量 電子状態

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 軌道磁気量子数(OMQ)は局所的な電子運動の対称性と結びつき、様々な電子物性の発現と密接な関係にある。しかし、こうした物性発現の鍵となる物理量を計測する手段がこれまでなかった。円偏光励起光電子回折で始状態の OMQ と光の偏光(ヘリシティー)の合算された角運動量が保存量として光電子に受け渡される。当時、この現象を利用した原子構造解析を行っていた[1,2]が、原子配列が既知であれば逆に始状態の OMQ を求める手段になることに気づき、新手法として提案した[3]。さらに吸収端近傍では共鳴オーজে電子回折にもこうした円二色性が現れることを見出した。従来、共鳴光電子分光はスペクトル形状の議論にとどまっていたが、本提案は角度分布の詳細を解析することによって価電子帯の電子状態を元素選択的に評価するという新しい視点を創発するスタートラインとなった。

(2) また、広い立体角にわたり光電子角度分布を一度に取得する分析器として表示型球面鏡電子分析器を用いていたが、エネルギー分解能に限界があり、次世代の投影型分析器の開発が待たれていた。当時新たにコリメータプレートを導入した投影型エネルギー分析器 PESCATORA (Projection-type electron-spectroscopy collimator analyzer)を考案した。

2. 研究の目的

本研究課題の目的として下記の3点を掲げ、研究を始めた。

[1 現象説明 手法確立] 光電子角度分布からの始状態 OMQ の抽出法の原理と手法確立

[2 分析技術 精密測定] 広角取り込みエネルギー分析器の開発

[3 新規材料 物性研究] 低次元系への応用と様々な内殻励起への展開

2017 年度に研究を開始し、2018 年度に奈良先端科技大から分子科学研究所へと異動した。新たに放射光施設 UVSOR を拠点とした研究展開の機会が加わり、

[1]共鳴光電子回折における現象の解明の部分で深化

[2]スピン磁気量子数計測にも有効な分析器開発に進展

[3]前周期遷移金属や軽元素への伸張

という具合に研究の守備範囲を一回り大きくし、共鳴光電子回折全体の中で当初の提案の特異性と汎用性を位置づけることができた。

3. 研究の方法

(1) 光電子角度分布からの始状態 OMQ の抽出法の原理と手法確立

光電子回折における前方収束ピークから元素・原子サイト選択的に電子構造の情報が得られる。円偏光励起の場合、始状態の OMQ と光の偏光(ヘリシティー)の合算された角運動量が保存量として光電子に受け渡される。その結果光電子が角運動量をもって放出されるため、回折模様が入射光を軸に回転シフトする現象が起こる。励起原子と周囲の散乱原子を結ぶ方向に現れる前方収束ピークに注目すると回転シフトが原子間距離に反比例し、光電子の角運動量(OMQ とヘリシティーの和)に比例する。

内殻吸収端における共鳴オーজে電子回折にも円二色性が現れることを発見した。3d 遷移金属では特に Cu ~ Fe の後期遷移金属でこの効果(2 正孔生成)が顕著に現れる。Cu および Ni について角度分布を計測し、共鳴オーজে電子の角運動量について研究した。

逆に Ti 化合物など前期遷移金属では1正孔生成の共鳴光電子放出が支配的となり、元素選択的に特定のバンド分散が強調されて観測できることを示した。2正孔生成の共鳴過程では「特定の原子サイ

トをハイライトして OQM を解析」できるのに対し、1 正孔生成の共鳴過程では「特定の電子状態をハイライトしてバンド分散の OQM を解析」できる手法となる。いずれも元素選択的なアプローチである。

(2) 広角取り込みエネルギー分析器の開発

電子分光計測において高エネルギー分解能の静電半球分析器が普及している。2 次元角度分布計測は試料の極角と方位を掃引する。光エネルギーや試料位置をパラメータとした測定では各点でこの掃引を行う必要があり長大な時間を要するので現実的ではない。本研究では広い立体角にわたり光電子角度分布を一度に取得する分析器として表示型球面鏡電子分析器を用いた。ただ、エネルギー分解能に限界があり、次世代の投影型分析器の開発が待たれていた。電場計算とプロトタイプ器の作製・実証で分析器開発を進めた。

(3) 低次元系への応用と様々な内殻励起への展開

分子科学研究所極端紫外光研究施設に異動となり、直線偏光軟 X 線に設置した光電子分光装置[4-7]を利用し、引き続き共鳴光電子回折の研究を推進した。円偏光励起とは異なり、円二色性からの軌道磁気量子数の算出はできないが、光エネルギーを内殻からフェルミ準位付近への遷移に合わせ、各バンド分散の強度の解析からバンドの軌道角運動量の情報が得られる。グラファイト・カルコゲナイドなど、低次元系物質の電子状態について角度分解共鳴光電子回折で研究した。

4 . 研究成果

(1) Ni および Cu のオージェ電子回折の前方収束ピークに大きな方位の円二色性が現れることを見出した。特定のオージェ過程では通常と逆の回転シフトが起こる現象も見出した。軌道磁気量子数とオージェ電子の角運動量との会計について Phys. Rev. B 誌で報告した[8]。光電子回折による構造電子状態の研究を種々の系(低次元系・鉄単結晶・酸化物など)に適用した[9-11]。

(2) オージェ電子収量 X 線吸収分光測定にて光触媒 TiO₂ 伝導帯の Ti 部分状態密度を詳細に観察しルチル型表面の含硫黄分子表面処理による欠陥準位のパッシベーション機構を明らかにした[12]。またオージェ電子回折を駆使し、欠陥準位の正体である局在的な Ti 3d 電子の軌道磁気量子数を明らかにした。

(3) 軽元素のK殻吸収端での共鳴過程を研究し、グラファイトで通常の光電子とは異なる2電子の総運動量が保存される共鳴オージェ遷移過程を見出した。グラファイト単結晶を用い、価電子帯共鳴光電子分光による バンドの角度分布とC KLLオージェ電子回折の角度分布が異なる様子を解析し、それぞれ共鳴光電子(1空孔生成)と共鳴オージェ電子(2空孔生成)過程に対応することを明らかにした。後者では通常の光電子とは異なり2電子の総運動量が保存される遷移過程を経ることを見出した。また、グラファイトの価電子帯 k_z 分散の実験・理論研究がまとめ、Phys. Rev. B誌に掲載された[13]。分子研にて化合物層状物質MoSe₂の k_z 分散の場合について比較研究に展開することができた。価電子帯の元素選択的な原子軌道とその線形結合の情報が得られる。

(4) 広い波数領域での光電子回折を一度に取得するための装置開発を進めた。コリメータプレートを導入した投影型エネルギー分析器 PESCATORA (Projection-type electron- spectroscopy collimator analyzer)を考案し、特許が成立した。さらに、全角度取り込みを可能にする OPAL (全天球光電子取り込み電場レンズ)[14]、90°偏向イメージングでスピン量子数の垂直成分の解析の道を拓く分析器[15]の考案を行い、それぞれ特許出願にこぎつけた。

(5) 最終年度に遷移金属及び軽元素の共鳴光電子・オージェ電子過程を包括した一連の研究を盛り込んだ教科書(「光電子分光詳論」丸善)を出版した。

<引用文献>

- [1] “光電子ホログラフィーと顕微光電子回折分光” 松井文彦, 大門寛, 松下智裕, 触媒 **39**, 76 (2017).
- [2] "Holographic reconstruction of photoelectron diffraction and its circular dichroism for local structure probing" F. Matsui, T. Matsushita, and H. Daimon, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **87**, 061004 (2018).
- [3] “軌道磁気量子数の計測と応用”松井文彦, 表面科学 **38**, 542-547 (2017).
- [4] "Bulk and Surface Band Dispersion Mapping of the Au(111) Surface by Acceptance-cone Tunable PES System" F. Matsui, S. Makita, H. Matsuda, T. Ueba, T. Horigome, H. Yamane, K. Tanaka, S. Kera, and N. Kosugi, *e-J. Surf. Sci. Nanotechnol.*, **18**, 18-23 (2020) .
- [5] "Identification of Twinning-induced Edges on the Cleaved Graphite Crystal Surface" F. Matsui, S. Makita, H. Matsuda, T. Ohigashi, H., Yamane, and N. Kosugi, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **88**, 114704 (2019).
- [6] "Acceptance-cone-tunable electron spectrometer for highly-efficient constant energy mapping" H. Yamane, F. Matsui, T. Ueba, T. Horigome, S. Makita, K. Tanaka, S. Kera, and N. Kosugi, *Rev. Sci. Instrum.*, **90**, 093102 (2019).
- [7] "Photoelectron Momentum Microscope at BL6U of UVSOR-III synchrotron" F. Matsui, S. Makita, H. Matsuda, T. Yano, E. Nakamura, K. Tanaka, S. Suga, and S. Kera, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **59**, 067001 (2020).
- [8]"Parallel and antiparallel angular momentum transfer of circularly polarized light to photoelectrons and Auger electrons at the Ni L_3 absorption threshold" F. Matsui, H. Ota, K. Sugita, M. Muntwiler, R. Stania, and T. Greber, *Phys. Rev. B*, **97**, 035424 (2018).
- [9]"Photoelectron diffraction and holography studies of 2D materials and interfaces" M. V. Kuznetsov, I. I. Ogorodnikov, D. Yu. Usachov, C. Laubschat, D. V. Vyalikh, F. Matsui, and L. V. Yashina, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **87**, 061005 (2018).
- [10]"Chemical and magnetic properties of polycrystalline iron surface revealed by Auger electron holography, spectroscopy, and microscopy" F. Matsui, K. Yasuda, N. Maejima, H. Matsui, T. Matsushita, and H. Daimon, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **58**, 110602 (2019).
- [11]"Disorder and mixed valence properties of Sr_2FeMoO_6 studied by photoelectron diffraction and x-ray absorption spectroscopy" M. Taguchi, F. Matsui, N. Maejima, H. Matsui, and H. Daimon, *Surf. Sci.*, **683**, 53-56 (2019) .
- [12] "Separation of surface- and bulk-specific Ti L-edge XANES spectra of rutile (110) surface" H. Ota, M. Shimomura, and F. Matsui, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **87**, 013601 (2018).
- [13]"The 4π kz periodicity in photoemission from graphite" F. Matsui, H. Nishikawa, H. Daimon, M. Muntwiler, M. Takizawa, H. Namba, and T. Greber, *Phys. Rev. B*, **97**, 045430 (2018).
- [14]"Principle and basic design of omnidirectional photoelectron acceptance lens" H. Matsuda and F. Matsui, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **59**, 046503 (2020).
- [15] "90°-deflection imaging electron analyzer for measuring wide 2D angular distribution and perpendicular spin texture" H. Matsuda, and F. Matsui, *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.*, **245**, 147001 (2020).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計28件（うち査読付論文 28件 / うち国際共著 8件 / うちオープンアクセス 10件）

1. 著者名 Matsuda Hiroyuki, Matsui Fumihiko	4. 巻 59
2. 論文標題 Principle and basic design of omnidirectional photoelectron acceptance lens	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 046503 ~ 046503
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab7bac	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 Uesugi Eri, Uchiyama Takaki, Goto Hidenori, Ota Hiromi, Ueno Teppei, Fujiwara Hirokazu, Terashima Kensei, Yokoya Takayoshi, Matsui Fumihiko, Akimitsu Jun, Kobayashi Kaya, Kubozono Yoshihiro	4. 巻 9
2. 論文標題 Fermi level tuning of Ag-doped Bi ₂ Se ₃ topological insulator	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 5376 ~ 5376
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-019-41906-7	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 Matsui Fumihiko, Makita Seiji, Matsuda Hiroyuki, Ohigashi Takuji, Yamane Hiroyuki, Kosugi Nobuhiro	4. 巻 88
2. 論文標題 Identification of Twinning-induced Edges on the Cleaved Graphite Crystal Surface	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 114704 ~ 114704
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.114704	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 Matsui Fumihiko, Yasuda Kaoru, Maejima Naoyuki, Matsui Hirosuke, Matsushita Tomohiro, Daimon Hiroshi	4. 巻 58
2. 論文標題 Chemical and magnetic properties of polycrystalline iron surface revealed by Auger electron holography, spectroscopy, and microscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 110602 ~ 110602
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab4d37	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 Kinoshita Toyohiko, Muro Takayuki, Matsushita Tomohiro, Osawa Hitoshi, Ohkochi Takuo, Matsui Fumihiko, Matsuda Hiroyuki, Shimomura Masaru, Taguchi Munetaka, Daimon Hiroshi	4. 巻 58
2. 論文標題 Progress in photoelectron holography at SPring-8	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 110503 ~ 110503
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab4d28	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 Matsushita Tomohiro, Muro Takayuki, Matsui Fumihiko, Happo Naohisa, Hayashi Kouichi	4. 巻 59
2. 論文標題 Data processing for atomic resolution holography	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 020502 ~ 020502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab4b3a	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 Usachov Dmitry Yu, Tarasov Artem V, Matsui Fumihiko, Muntwiler Matthias, Bokai Kirill A, Shevelev Viktor O, Vilkov Oleg Yu, Kuznetsov Mikhail V, Yashina Lada V, Laubschat Clemens, Cossaro Albano, Floreano Luca, Verdini Alberto, Vyalikh Denis V	4. 巻 6
2. 論文標題 Decoding the structure of interfaces and impurities in 2D materials by photoelectron holography	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 2D Materials	6. 最初と最後の頁 045046 ~ 045046
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2053-1583/ab3ea8	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 該当する

1. 著者名 Yamane Hiroyuki, Matsui Fumihiko, Ueba Takahiro, Horigome Toshio, Makita Seiji, Tanaka Kiyohisa, Kera Satoshi, Kosugi Nobuhiro	4. 巻 90
2. 論文標題 Acceptance-cone-tunable electron spectrometer for highly-efficient constant energy mapping	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 093102 ~ 093102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5109453	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 Taguchi Munetaka, Matsui Fumihiko, Maejima Naoyuki, Matsui Hirotsuke, Daimon Hiroshi	4. 巻 683
2. 論文標題 Disorder and mixed valence properties of Sr ₂ FeMoO ₆ studied by photoelectron diffraction and x-ray absorption spectroscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Surface Science	6. 最初と最後の頁 53 ~ 56
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.susc.2019.02.001	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 Matsui Fumihiko, Makita Seiji, Matsuda Hiroyuki, Ueba Takahiro, Horigome Toshio, Yamane Hiroyuki, Tanaka Kiyohisa, Kera Satoshi, Kosugi Nobuhiro	4. 巻 18
2. 論文標題 Bulk and Surface Band Dispersion Mapping of the Au(111) Surface by Acceptance-cone Tunable PES System	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 e-Journal of Surface Science and Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 18 ~ 23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1380/ejssnt.2020.18	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 Greber T., Seitsonen A. P., Hemmi A., Dreiser J., Stania R., Matsui F., Muntwiler M., Popov A. A., Westerstrom R.	4. 巻 3
2. 論文標題 Circular dichroism and angular deviation in x-ray absorption spectra of Dy ₂ ScN@C ₈₀ single-molecule magnets on h-BN/Rh(111)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 014409-1 ~ 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.3.014409	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 該当する

1. 著者名 Usachov Dmitry Yu., Tarasov Artem V., Bokai Kirill A., Shevelev Viktor O., Vilkov Oleg Yu., Petukhov Anatoly E., Rybkin Artem G., Ogorodnikov Ilya I., Kuznetsov Mikhail V., Muntwiler Matthias, Matsui Fumihiko, Yashina Lada V., Laubschat Clemens, Vyalikh Denis V.	4. 巻 98
2. 論文標題 Site- and spin-dependent coupling at the highly ordered h-BN/Co(0001) interface	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 195438-1 ~ 10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.195438	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 該当する

1. 著者名 Fujita Yoshiki, Ota Hiroshi, Matsushita Tomohiro, Muro Takayuki, Senba Yasunori, Matsui Fumihiko	4. 巻 51
2. 論文標題 Mapping nanometer and micrometer-scale structures at graphite surface by photoelectron diffraction	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Surface and Interface Analysis	6. 最初と最後の頁 74 ~ 78
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/sia.6551	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 Uesugi Eri, Uchiyama Takaki, Goto Hidenori, Ota Hiromi, Ueno Teppei, Fujiwara Hirokazu, Terashima Kensei, Yokoya Takayoshi, Matsui Fumihiko, Akimitsu Jun, Kobayashi Kaya, Kubozono Yoshihiro	4. 巻 9
2. 論文標題 Fermi level tuning of Ag-doped Bi ₂ Se ₃ topological insulator	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1 ~ 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-019-41906-7	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 Matsui Fumihiko, Matsushita Tomohiro, Daimon Hiroshi	4. 巻 87
2. 論文標題 Holographic Reconstruction of Photoelectron Diffraction and Its Circular Dichroism for Local Structure Probing	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 061004 ~ 061004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.061004	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 Kuznetsov Mikhail V., Ogorodnikov Ilya I., Usachov Dmitry Yu., Laubschat Clemens, Vyalikh Denis V., Matsui Fumihiko, Yashina Lada V.	4. 巻 87
2. 論文標題 Photoelectron Diffraction and Holography Studies of 2D Materials and Interfaces	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 061005 ~ 061005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.061005	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 該当する

1. 著者名 Matsushita Tomohiro, Muro Takayuki, Matsui Fumihiko, Happo Naohisa, Hosokawa Shinya, Ohoyama Kenji, Sato-Tomita Ayana, Sasaki Yuji C., Hayashi Kouichi	4. 巻 87
2. 論文標題 Principle and Reconstruction Algorithm for Atomic-Resolution Holography	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 061002 ~ 061002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.061002	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 Muntwiler Matthias, Zhang Jun, Stania Roland, Matsui Fumihiko, Oberta Peter, Flechsig Uwe, Patthey Luc, Quitmann Christoph, Glatzel Thilo, Widmer Roland, Meyer Ernst, Jung Thomas A., Aebi Philipp, Fasel Roman, Greber Thomas	4. 巻 24
2. 論文標題 Surface science at the PEARL beamline of the Swiss Light Source	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Synchrotron Radiation	6. 最初と最後の頁 354 ~ 366
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1107/S1600577516018646	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 該当する

1. 著者名 Oka Daichi, Hirose Yasushi, Matsui Fumihiko, Kamisaka Hideyuki, Oguchi Tamio, Maejima Naoyuki, Nishikawa Hiroaki, Muro Takayuki, Hayashi Kouichi, Hasegawa Tetsuya	4. 巻 11
2. 論文標題 Strain Engineering for Anion Arrangement in Perovskite Oxynitrides	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 3860 ~ 3866
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnano.7b00144	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 Fukami Shun, Taguchi Munetaka, Adachi Yutaka, Sakaguchi Isao, Watanabe Ken, Kinoshita Toyohiko, Muro Takayuki, Matsushita Tomohiro, Matsui Fumihiko, Daimon Hiroshi, Suzuki Taku T.	4. 巻 7
2. 論文標題 Correlation Between High Gas Sensitivity and Dopant Structure in W-doped ZnO	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 064029-1 ~ 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.7.064029	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 Sanchez-Barriga Jaime, Ogorodnikov Ilya I., Kuznetsov Mikhail V., Volykhov Andrey A., Matsui Fumihiko, Callaert Carolien, Hadermann Joke, Verbitskiy Nikolay I., Koch Roland J., Varykhalov Andrei, Rader Oliver, Yashina Lada V.	4. 巻 19
2. 論文標題 Observation of hidden atomic order at the interface between Fe and topological insulator Bi ₂ Te ₃	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 30520 ~ 30532
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C7CP04875K	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 該当する

1. 著者名 Mori Daisuke, Oyama Yoshiki, Hirose Takayuki, Muro Takayuki, Matsui Fumihiko	4. 巻 111
2. 論文標題 Local structural determination of N at SiO ₂ /SiC (000-1) interfaces by photoelectron diffraction	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 201603 ~ 201603
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4997080	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 Ota Hiroshi, Shimomura Masaru, Matsui Fumihiko	4. 巻 87
2. 論文標題 Separation of Surface- and Bulk-specific Ti L-edge XANES Spectra of Rutile (110) Surface	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 013601 ~ 013601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.013601	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 MATSUI Fumihiko	4. 巻 38
2. 論文標題 Magnetic Orbital Quantum Number Measurements: Phenomena and Applications	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Hyomen Kagaku	6. 最初と最後の頁 542 ~ 547
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1380/jsss.j.38.542	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 Tsutsui Kazuo, Matsushita Tomohiro, Natori Kotaro, Muro Takayuki, Morikawa Yoshitada, Hoshii Takuya, Kakushima Kuniyuki, Wakabayashi Hitoshi, Hayashi Kouichi, Matsui Fumihiko, Kinoshita Toyohiko	4. 巻 17
2. 論文標題 Individual Atomic Imaging of Multiple Dopant Sites in As-Doped Si Using Spectro-Photoelectron Holography	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 7533 ~ 7538
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.7b03467	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 Matsui Fumihiko, Ota Hiroshi, Sugita Kenji, Muntwiler Matthias, Stania Roland, Greber Thomas	4. 巻 97
2. 論文標題 Parallel and antiparallel angular momentum transfer of circularly polarized light to photoelectrons and Auger electrons at the Ni L3 absorption threshold	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 035424-1 ~ 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.97.035424	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 該当する

1. 著者名 Matsui Fumihiko, Nishikawa Hiroaki, Daimon Hiroshi, Muntwiler Matthias, Takizawa Masaru, Namba Hidetoshi, Greber Thomas	4. 巻 97
2. 論文標題 The 4pi kz periodicity in photoemission from graphite	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 045430-1 ~ 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.97.045430	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 該当する

1. 著者名 Makita Seiji, Matsuda Hiroyuki, Okano Yasuaki, Yano Takayuki, Nakamura Eiken, Hasegawa Yuri, Kera Satoshi, Suga Shigemasa, Matsui Fumihiko	4. 巻 19
2. 論文標題 Contrast Inversion of Photoelectron Spectro-microscopy Image	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 e-Journal of Surface Science and Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 42 ~ 47
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1380/ejssnt.2021.42	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 -

〔学会発表〕 計22件（うち招待講演 9件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 F. Matsui, S. Makita, H. Ota, H. Matsuda, T. Matsushita, and M. Muntwiler
2. 発表標題 Resonant Auger Electron Diffraction and Resonant Photoelectron Spectroscopy
3. 学会等名 International Symposium ALC19 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松井文彦、牧田誠二、松田博之、D. Usachov
2. 発表標題 波数分解共鳴光電子分光と黒鉛・GNRの軌道選択励起
3. 学会等名 放射光学会JSR2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 F. Matsui
2. 発表標題 Resonant Auger and photoelectron diffraction at SX-ARPES beamline
3. 学会等名 IMS-FZJ joint symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松井文彦
2. 発表標題 光電子を用いた2次元層状物質の原子レベル解析
3. 学会等名 マイクロビームアナリシス第141委員会第179回研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松井文彦, 牧田誠二, 松田博之
2. 発表標題 Au 4f光電子表面内殻シフトピーク強度の光エネルギー依存性
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 F. Matsui, S. Makita, H. Matsuda, H. Yamane, T. Ueba, T. Horigome, K. Tanaka, S. Kera,
2. 発表標題 Bulk and surface band dispersion mapping of the Au(111) surface by acceptance-cone tunable PES system
3. 学会等名 International Symposium ALC19
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 F. Matsui, S. Makita, and H. Matsuda
2. 発表標題 Momentum/Real-space Photoemission Station at UVSOR-III Resonating Photoelectrons and Auger Electrons
3. 学会等名 International Symposium on Spectro-Microscopy of Functional Materials and Interfaces (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松井文彦
2. 発表標題 2次元物質の角度分解共鳴光電子分光測定
3. 学会等名 第5回「ポストグラフェン材料のデバイス開発研究会」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Fumihiko Matsui, Tomohiro Matsushita, Matthias Muntwiler
2. 発表標題 Photoelectron Diffraction Spectroscopy: Site-specific Atomic Orbital Characterization
3. 学会等名 The 13th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Fumihiko Matsui
2. 発表標題 Photoelectron structure factor along kz direction: orbital analysis of layered materials
3. 学会等名 Photoelectron Spectroscopy at the SLS 2.0 Joint Users Meeting of the ADRESS, PEARL and SIS beamlines (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Fumihiko Matsui, Seiji Makita, Kiyohisa Tanaka, Hiroyuki Yamane, Nobuhiro Kosugi
2. 発表標題 Photoelectron structure factor of layered compounds
3. 学会等名 International Conference on Electronic Spectroscopy and Structures-14 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Fumihiko Matsui, Seiji Makita, Kiyohisa Tanaka, Hiroyuki Yamane, Nobuhiro Kosugi
2. 発表標題 4pi kz periodicity in photoemission from MoSe2
3. 学会等名 International Workshop on Trends in Advanced Spectroscopy in Materials Science (TASPEC) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松井文彦・牧田誠二・田中清尚・山根宏之・小杉信博
2. 発表標題 広波数空間光電子分光によるMoSe2価電子帯分散測定
3. 学会等名 第32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 2019年

1. 発表者名 松井文彦
2. 発表標題 光電子回折を利用した局所構造と電子状態解析
3. 学会等名 東京大学物性研短期研究会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松井 文彦, 太田紘志, 嶽太輔, 松下 智裕
2. 発表標題 光電子ホログラフィーによるグリーンマテリアルの表面局所構造研究
3. 学会等名 応物関西平成29年度第1回講演会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Fumihiko Matsui
2. 発表標題 Site-specific Atomic Imaging and Electron Spectroscopy by Photoelectron Diffraction
3. 学会等名 12th International Conference on the Structure of Surfaces（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松井文彦、大門寛、Matthias Muntwiler、Thomas Greber、滝沢優
2. 発表標題 グラファイトのkz分散：光電子構造因子による4 π 周期性
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会(2018年)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Fumihiko Matsui , Hiroshi Ota, Yoshiki Fujita, Takuya Shimano, Yoshinori Yoshida, Daisuke Take, Kenji Sugita, Yoshiki Oyama, Takuya Kishimoto, Hiroaki Nishikawa, Hiroyuki Matsuda
2. 発表標題 PESCATORA: Projector for ESCA to Real Space Analysis
3. 学会等名 ALC'17(International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials Devices '17)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoshiki Fujita, Fumihiko Matsui, Tomohiro Matsushita, and Takayuki Muro
2. 発表標題 Mapping micro- and nano-scale structures at Graphite surface by photoelectron diffraction
3. 学会等名 ALC'17(International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials Devices '17)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takuya Shimano, Fumihiko Matsui, Kaya Kobayashi, Teppei Ueno, Eri Uesugi, and Yoshihiro Kubozono
2. 発表標題 Local dopant structure of Ag-doped Bi ₂ Se ₃ topological insulator by photoelectron diffraction
3. 学会等名 ALC'17(International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials Devices '17)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Fumihiko Matsui
2. 発表標題 Soft-X-ray Photoelectron Momentum Microscopy for Selective Atomic / Molecular Orbital Excitation
3. 学会等名 Next Generation Spectro-Microscopy and Micro-Spectroscopy Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松井文彦、牧田誠二、松田博之、岡野泰彬、矢野隆行、中村永研、出田真一郎、田中清尚、長谷川友里、菅滋正、解良聡
2. 発表標題 UVSOR光電子運動量顕微鏡による局所電子状態解析拠点の構築
3. 学会等名 表面真空学会講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計5件

1. 著者名 R. Eguchi, F. Matsui	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Springer Singapore	5. 総ページ数 293
3. 書名 Physics and Chemistry of Carbon-Based Materials: Basics and Applications, Chapter 1 (28 pages) Graphite and intercalated compound superconductors: Atomic and electronic structures	

1. 著者名 高桑雄二編 松井文彦分担	4. 発行年 2018年
2. 出版社 講談社サイエンティフィック	5. 総ページ数 368
3. 書名 X線光電子分光法 3.4.節、5.2節	

1. 著者名 The Surface Science Society of Japan (Ed.), うち3章分担執筆	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	

1. 著者名 Hiroshi Daimon, Yuji C. Sasaki, 第二章分担執筆	4. 発行年 2019年
2. 出版社 World Scientific	5. 総ページ数 209
3. 書名 3D Local Structure and Functionality Design of Materials	

1. 著者名 松井 文彦、松下 智裕、大門 寛	4. 発行年 2020年
2. 出版社 丸善出版	5. 総ページ数 312
3. 書名 光電子分光詳論	

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 球面収差調整カソードレンズ、球面収差補正静電型レンズ、電子分光装置、及び光電子顕微鏡	発明者 松田博之、松井文彦	権利者 大学共同利用機関法人自然科学研究機構
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-227788	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 静電偏向収束型エネルギー分析器、結像型電子分光装置、反射結像型電子分光装置、およびスピンベクトル分布イメージング装置	発明者 松田博之、松井文彦	権利者 大学共同利用機関法人自然科学研究機構
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-118687	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 ELECTROSTATIC LENS , AND PARALLEL BEAM GENERATION DEVICE AND PARALLEL BEAM CONVERGENCE DEVICE WHICH USE ELECTROSTATIC LENS AND COLLIMATOR	発明者 F. Matsui, H. Matsuda	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、US 2018 / 0211812 A1	取得年 2020年	国内・外国の別 外国

〔その他〕

-

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
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------