

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：63903

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B)）

研究期間：2019～2023

課題番号：19KK0137

研究課題名（和文）光電子波数顕微鏡法で切り拓くナノスピン・オービトロニクス

研究課題名（英文）Nano-spintronics and orbitronics innovated by photoelectron microscopy

研究代表者

解良 聡（Kera, Satoshi）

分子科学研究所・光分子科学研究領域・教授

研究者番号：10334202

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,100,000円

研究成果の概要（和文）：次世代分析法である光電子運動量顕微鏡装置の開発を目的とし、量子材料の原子構造と電子構造の相関の理解とその制御を目指した。開発途中であるが装置性能評価と基礎物性について7件の原著論文を発表した。学会誌「表面と真空」にて特集号（2021）が生まれ開発装置の紹介をした。研究期間のほとんどを未曾有のコロナ禍が襲い、目的のface-to-faceの国際交流のほとんどは実施不能であったが、国際会議をドイツと日本で各2回開催した。幸にして連携協定の5年間延長が契約され、今後も継続的に相互交流による技術開発を行っていく。期間中に若手メンバ2名が助教と准教授に昇進し、当該分野の今後の持続的発展が期待できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電子構造の高効率かつ全空間の完全計測実現に向けた装置開発であり、従来の光電子分光法による電子構造研究のパラダイムシフトを目的とした。その後、各地で類似の装置開発が行われており、共同利用機関が我が国を先導した社会的意義は高い。開発途中の各段階で要素技術に関する論文だけでなく、これまでの手法では見出せなかった基礎的研究成果の発信も行い、学術面においても効果的な研究推進ができた。昨今の傾向として、新手法や装置開発に携わることのできる研究者の数は少なく、研究施設が主導する形で特に若手の経験値を高め、人材育成を行うことができた点は社会的意義があった。

研究成果の概要（英文）：The aim of the project was to develop a photoelectron momentum microscopy system, a next-generation analytical method, to understand and control the correlation between the atomic and electronic structure of quantum materials. Although the development is still in progress, 7 original papers were published on the evaluation of the instrument's performance and basic physical properties. A special issue (2021) of the journal 'Surface and Vacuum' introduced the developed device. The unprecedented COVID19 disaster hit most of the research period, making most of the intended face-to-face international exchanges impossible, but international conferences were held twice each in Germany and Japan. Fortunately, a five-year extension of the cooperation agreement was signed and we will continue to develop technology through mutual exchange. Two young members were promoted to academic professors during this period, and sustained development in this field can be expected in the future.

研究分野：物理化学

キーワード：運動量顕微鏡 バンド構造 分子軌道 光電子分光 機能材料 シンクロトロン放射光 電子スピン

1. 研究開始当初の背景

ナノスケールの材料の創成と利用が省エネルギーかつ超高速の新規デバイス開発に向けて活発に進められている。機能性分子やトポロジカル絶縁体などの新奇材料群の設計指針を与え、その機能・物性を創成するために、局所的な原子構造と原子軌道・スピン配列とが物性・機能発現にどのように寄与し、いかにしてこれらの自由度を制御するかが積年の課題であった。角度分解光電子分光 (ARPES) はこうした電子状態の一断面 (エネルギー対運動量 (波数) のバンド分散関係) を直接計測する強力な手法であるが、物質の物性・機能を大きく支配するフェルミ準位やフロンティア軌道近傍の電子状態を、いかに高い分解能と信頼度で3次元運動量空間の極めて広範囲で計測し、物質のバンド構造の全体像を包括的に研究するかが、今や研究の核心的な問いとなってきた。

一方で、2013年にドイツ(当時マックスプランク研究所、現在ユーリッヒ総合研究機構:FZJ)においてTusche・菅らのプロジェクトから100×100チャンネルを超えるスピン・2D運動量分解光電子分光装置が登場した。2重連のCHAに光電子顕微鏡(PEEM)と2次元スピンフィルターを組み合わせることで初めて実現する機能から、運動量顕微鏡(Momentum microscope)と名付けられたこのシステムは、これまでの諸限界を打破する新たな2次元表示型分析器である。今後の開発要素として、高感度2次元スピン検出とエネルギー分解能の向上により2次元光電子回折・分光法(イメージング法)を飛躍的に発展させることができる潜在性をもつシステムであった。PEEMを初段に持つので物質や材料のサブ μm 領域までの電子状態が解明でき、試料サイズの制約から解放される。更に収差補正のできる2重連CHAと組み合わせることで試料から放出される光電子のほぼ全方位を対象としたスピン分解ARPESを可能にしている。本邦のスピン分解光電子分光の開拓者の一人(菅)がこのドイツにおける運動量顕微鏡装置開発に関わっていた。本研究では、共同利用機関を通じて同装置の絶対的優位性を国内に広く紹介するとともに、超伝導物性研究、有機薄膜物性研究と光電子分光手法開発の専門家が結集することで、更なる装置性能の向上と独自機能の付与、ならびに先端利用分野の拡大を意識したプロジェクト目標となった。先端設備の開発力が低下する中、ドイツの既存システムでは為しえない高機能運動量顕微鏡の開発を進め、我が国における光電子分光研究の水準を世界最先端に再び引き上げる必要があった。多彩な試料を標的とする研究チームの協奏により、マクロ(バルク結晶)・ミクロ(薄膜)・ナノ(表面・界面・原子層)の連続的な空間サイズ変化に伴う電子状態の完全解明を目指す。これは複雑かつ多様な試料系を対象とする現代課題への必須のアプローチとして位置づけられた。全世界的に運動量顕微鏡の高い能力と秘めたる可能性に着目した動きが国外の有力な研究所や主だった海外放射光施設で続々と散見され、期を見て集中的投資により世界に先駆けてその優位性を確保しようとする動きが顕著である。本研究は日独の若手研究者が継続した国際共同研究で築かれてきた体系を継承するもので、本邦での光電子分光研究の重要拠点である分子科学研究所UVSOR放射光施設に運動量顕微鏡を導入するプロジェクトと密接に連携している。新機能が付加された最新顕微鏡システムの構築は、FZJグループにとっても大きなメリットとなるとともに、新学理創成・デバイス開発の基盤となる唯一無二の最先端計測プラットフォームを構築する好機である。新規装置と手法開発の技術を相補的に共有する日独共同研究は世界的に類例がなく、本研究課題は双方の研究力を飛躍的に向上させるものである。

2. 研究の目的

本研究では運動量顕微鏡技術を導入し、我が国の光電子分光研究の水準を世界最先端に再び引き上げ、マクロ・ミクロ・ナノの連続的な実空間サイズ変化に伴う電子状態の完全解明を目指す。日独の研究グループが、独自測定手法と新規分析装置の開発技術を相補的に共有し、先端電子物性(スピントロニクス・オービトロニクス)研究を推進する世界的にもユニークな計画である。運動量顕微鏡はPEEMとS字型配置の2重連CHAで構成され、必要に応じて2次元スピンフィルターを接続する。既にPEEMが10nmの空間分解能を達成している。球面収差なく高エネルギー分解能(15meV程度以下を目指す)で2次元データが一度に得られる。拡大率を調整し実空間像をPEEM出射部に結像すると、CHAの入口窓で試料表面の任意の微小(ミクロ・ナノ)領域からの光電子強度分布が広範囲で2次元(k_x, k_y)スクリーンに投影される。この機構は機能材料評価の障壁であった微小サイズ・不均一性の試料調整問題から解放する。PEEM内のアパーチャーを絞れば運動量範囲は狭くはなるが容易に 0.005 \AA^{-1} より良い運動量分解能での高精度測定が可能になる。角度分布をPEEM出射部に投影し任意の回折スポットを選択すれば特定の周期構造の暗視野像としての電子状態マップがスクリーン上で得られる。更に最終段で2次元スピン検出器に切り替えると100×100点以上の実空間・運動量空間のスピン偏極2次元分布データの超高効率測定が可能となる。従来のスピン・角度分解光電子分光に用いられてきたような単一チャンネル測定に比べて1万倍の効率となり、測定時間が大幅に短縮され表面劣化を

引き起こすことなく信頼度の高いスピン角運動量の完全実験が初めて実現する。

光電子分光法において軌道角運動量(オービタル)の知見は気相系の研究に留まり、固体系においては実験装置の制約により深く検討されずに留まっている。従来型の装置では、多くの場合、エネルギー分析器と光源の幾何学的配置から実現が困難であったが、本研究で新規機構として付与する直入射光偏向システムにより、前人未達の電子状態完全実験が可能となる。この機構は新型運動量顕微鏡の最大の特徴ともいえ、FZJのメンバーも多大なる学術好奇心と共に、全面的な協力を確約してくれている。これにより世界的に稀有な唯一無二の「励起エネルギー・偏光可変・運動量空間・実空間分解光電子分光装置」が UVSOR 施設にて実現し、スピントロニクス・オービトロニクス研究を推進できる。このような独自性を最大限に利用し多様な試料の高信頼度測定をおこなえば、確実に創造的な材料評価と材料開発、さらにはデバイス開発に直結した応用研究に繋がる。

3. 研究の方法

運動量顕微鏡装置はドイツ・マックスプランク微細構造物理研究所で日独プロジェクトとして開発され、日本側からは固体物性および光電子分光の研究分野を先導してきた菅教授が共同でイニシアティブをとってきた。その後、Tusche 博士(FZJ)主導で後継新型装置が設計され、さらに高度化が進んだ。2018 年度、同装置を光電子分光拠点の一つである UVSOR 施設に導入する計画が企てられ、解良(施設長)と FZJ の Schneider(FZJ /PGI 主幹)が学術交流協定書を締結した。そこへ SPring-8 およびスイス放射光施設にて長年 2 次元光電子回折・分光法の研究分野を開拓してきた松井が UVSOR に着任し、本研究における装置開発を推進する任に当たる。欧州での先端設備を利用した実験では、新進気鋭の若手研究者が担当し現地での経験を積む。運動量顕微鏡装置を利用した研究推進課題を以下に示す。

課題 1: 回折スペクトロスコーピー (研究分担者の松井が独自に考案した手法)

内殻光電子角度分布には励起原子周りの構造が回折模様として記録され、実空間の原子配列が再生できる。松井は回折法で励起原子を特定し、その強度の光エネルギー依存性から局所電子状態を引き出す回折スペクトロスコーピーを考案した。層状化合物の光電子回折分光を実施し、層ごとに異なるスピンの局所構造を調べる。小さな試料が多く顕微機能が重要となる。

課題 2: 分子軌道トモグラフィー (研究代表者の解良が開発の第一人者)

既に 共役系分子吸着種の分子軌道可視化に成功したが、エネルギー分解能が向上すると、例えば官能基の置換効果や振電相互作用の温度依存性を解明できる。照射損傷がシビアであるため、高感度測定の本手法での分子スピン研究の展開に期待がかかっている。

課題 3: スピンホログラフィー (松井の円偏光光電子回折、田中のスピン分解光電子分光の研究を発展)

光電子や Auger 電子回折の円二色性から元素・サイト選択的な軌道・スピン角運動量を調べる研究を行ってきた。挑戦的課題として運動量顕微鏡を用いてスピンの局所実空間構造情報を再生する手法・理論を、JRC を欧州拠点とし、国際共同研究の枠組みで進める。日本側から独自の 2 次元光電子回折・分光法の蓄積をドイツ側に伝授するのも共同研究の重要なミッションであった。本研究と相補的に、運動量顕微鏡装置を日本で建設するための広範な作業を進めている。本計画は共同研究成果をもとに我が国においても更に機能高度化・装置改良した新装置の導入をはかり、世界のフロンティアに立てる実験を速やかに推進できる体制(人材育成・基盤技術ノウハウ)の準備となる重要な布石である。

4. 研究成果

予算措置直後の 2020 年 1 月から始まった未曾有の COVID-19 のため、人的交流を主たる手段とする本研究計画の推進には甚大なる影響があったことは否めない。渡航による face-to-face 活動こそ当初予定について十分に満足できるものではできなかったが、オンライン技術を最大限に活用し、研究力向上に向けた活動を行なった。COVID-19 による活動制限になる直前に、本共同研究体制の顔合わせとして、メンバー 5 名全員が先方のユーリッヒ総合研究機構を訪問し、ミニ研究会を開催した。加えて関連する UVSOR 施設の技術職員も施設経費により同行させ、我々の本計画にかけ強い意思をアピールするとともに、人的交流のさらなる相乗効果を狙った。また活動制限がかかる前に、ドイツ SPECS 社からプロトタイプ型の新規分析装置が UVSOR 施設に納品されたことも極めて幸運なことであった。こうして最低限の設備環境と人的環境が構築され、その後の 5 年間にわたり当初目的の実現に向けた共同研究が最大限の努力と共に進められた。またウクライナ情勢による物品価格の高騰、備品納期の大幅な遅れなど更なる困難にも直面したが、一歩ずつ着実に装置開発を前に進めてきた。

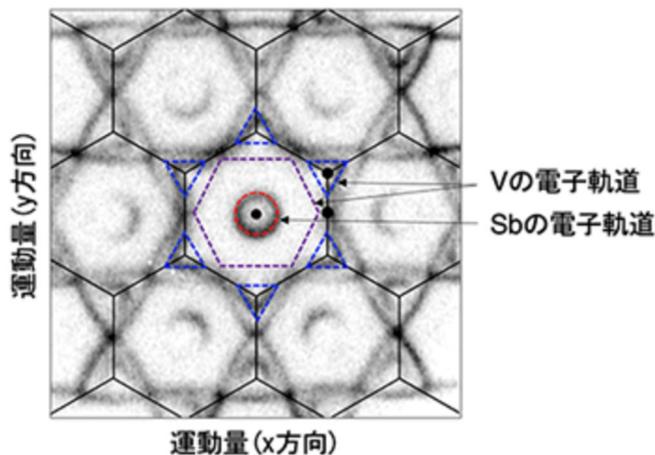
国際ワークショップは、2020 年度に "Next Generation Spectro-Micro/Micro-Spectroscopy Workshop" (日本)、2021 年度に "Photoemission Tomography: Applications and Future Developments" at Wilhelm & Elsa Heraeus Seminar 734 (ドイツ)、2022 年度に "Comprehensive Spectroscopy by Photoelectron Momentum Microscope" at ALC'22 (日本)、2023 年度に、

Workshop on “Seeds and Needs for Tomorrow's Synchrotron Radiation Photoelectron Spectroscopy Research (日本)”を開催し情報交換と先端技術に関する議論を深めた。

一方、装置技術開発については、開発途中の各段階で要素技術に関する論文だけでなく、これまでの手法では見出せなかった基盤的研究成果の発信も行い、学術面においても効果的な研究推進ができた。以下に各成果から抜粋して示す。

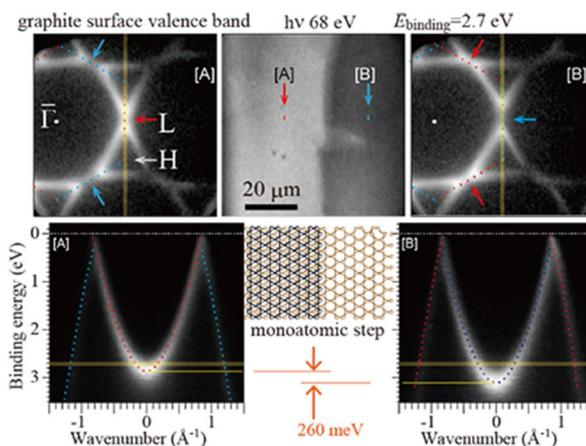
1) カゴメ格子超伝導を担う電子軌道を解明：放射光を用いた先端電子計測で照らし出す

カゴメ格子は、三角形や六角形からできる結晶格子である。このカゴメ格子を持つ物質は、特殊な電子構造や強い幾何学的フラストレーションを示す。フラストレーションはバリー博士が昨年のノーベル物理学賞を受賞するきっかけにもなった興味深い性質で、様々な新規物性を引き起こす源として期待されている。特に、最近発見されたカゴメ格子金属 CsV_3Sb_5 (セシウムバナジウムアンチモニド)において、カゴメ格子では稀有な超伝導をはじめ、高温超伝導体と類似する対称性の低下など、特異な性質が次々と明らかになってきた。しかしながら、これらの性質が生じる仕組みは未解明のままである。東北大学材料科学高等研究所 (WPI-AIMR)、多元物質科学研究所、分子科学研究所、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 物質構造科学研究所、量子科学技術研究開発機構、北京理工大学による国際共同研究グループでの成果である。 CsV_3Sb_5 の電子構造について放射光を用いた先端分光測定によって調べた結果、これまで提案されている超伝導機構のモデルは V の電子だけを考慮したものがほとんどであったのに対して、V 電子と Sb 電子が協力しながら超伝導を実現していることが明らかになった。この成果は、超伝導機構の解明とより高い温度で超伝導になる物質の設計に重要な指針を与えるものである。(Phys. Rev. Lett. 2022, DOI : 10.1103/PhysRevLett.129.206402)



2) 光電子運動量顕微鏡で明らかにしたグラファイト原子1層のステップ構造

グラファイトは安価で導電性があり熱に強く環境負荷も小さいことから電池の電極材をはじめ幅広い分野で基礎材料として利用されている。その性能を十分に発揮させるには表面や端部の微細な性質を知り制御することが求められているが、多くの電子構造に関する研究が行われてきたにも関わらず、未だにその全貌は解明されていない。本来グラファイトの表面は3回対称の構造が現れるはずであるが、従来の光電子分光測定では、6回対称であることが「常識」とされてきた。極端紫外光研究施設 (UVSOR) で開発中の顕微機能を有する最新の光電子分光測定装置「光電子運動量顕微鏡」を適用し、グラファイト表面の局所的な電子状態を精密測定した。



その結果、今まで気付かれていなかった微視的な電子状態を発見し、この知見を基に原子1層のステップの可視化にも成功した。これまでよく研究されてきた物質でも、微視的な測定を行うことで、表面や端部の特徴的な構造が観測できるようになり、物性の正確な理解が飛躍的に進むことを示している。本技術は、表面・薄膜・配向分子・化合物結晶試料の原子レベルでの電子状態解析にも広く応用できるので、ナノ材料科学・量子デバイス工学を展開するうえで極めて重要となると期待される。(Phys. Rev. B 2022, DOI : 10.1103/PhysRevB.105.235126)

3) 光電子運動量顕微鏡の開発：

マイクロメートルの機能性材料の電子状態を空間・運動量分解能：50 nm・0.01 Å⁻¹で可視化

UVSORにおいて開発した最新の光電子分光測定装置の性能評価を行なった。不均一試料の微小部分を拡大して観察できる顕微(microscope)機能と試料の物性を決定づける電子のふるまい(運

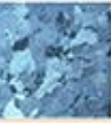
動量 momentum) を可視化する機能を 1 つの装置で同時に実現できる。本装置は主要な軽元素・遷移元素の内殻準位を励起できる高輝度放射光源に設置され、位置分解能 50 nm、運動量分解能 0.01 \AA^{-1} 、エネルギー分解能 20 meV を達成した。また試料を 9 K まで冷却、400K まで加熱でき、制限視野 $2 \mu\text{m}$ からの価電子帯分散やフェルミ面を測定することができる。本装置で初めて可能になる運動量分解顕微光電子分光法は、表面・薄膜・配向分子・化合物結晶試料の原子レベルでの電子状態解析を通じ、ナノ材料科学・量子デバイス工学を展開するうえで重要な手法となるであろう。この装置では表面・薄膜・配向分子・化合物結晶試料の元素種を分別した顕微像を得ることができ、特に選択した微小領域からの価電子帯分散や組成分析の光電子分光測定が同時に行えるので、組成・構造・電子状態がどのように物性・機能に結びついていくか研究するために極めて有効である。実空間・運動量空間の両方で拡大して計測できる光電子顕微鏡では放射光施設に導入された例として世界最高性能を達成した。(Jpn. J. Appl. Phys. 2020, DOI : 10.35848/1347-4065/ab9184)

光電子運動量顕微鏡：分子研UVSOR

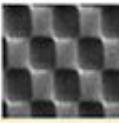
Photoelectron Momentum Microscope at IMS UVSOR BL6U

試料の電子状態（組成・価電子帯分散）の原子レベル解明
結晶表面・機能性有機分子配向膜の電子の挙動を精密分析

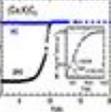
多結晶・粒界
顕微局所解析
個々の結晶粒や粒界・欠陥特有の電子物性・化学反応性を解明



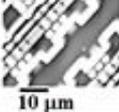
コンビナトリアル
並列多元解析
元素選択性と顕微機能を活かし物性発現の最速組成を探索



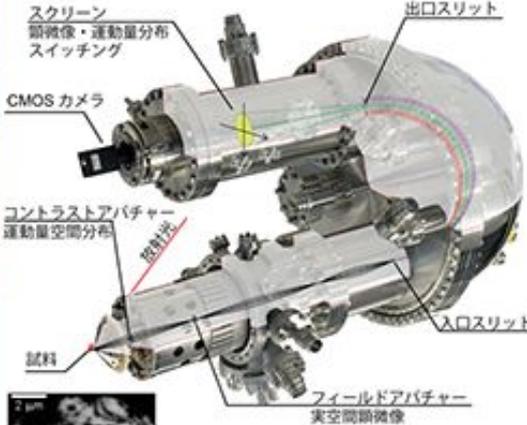
相転移・相分離
ダイナミクス
温度9~400 K
超伝導・磁気・構造相転移を顕微その場分析



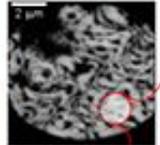
微小デバイス
 μm 構造評価
デバイス表面・界面・極薄膜の原子レベル組成/電子状態計測



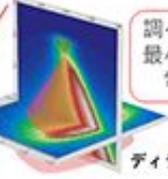
10 μm



調べたい微小領域：
最小視野 $\phi 2 \mu\text{m}$ を選択
電子の挙動を可視化



金属表面上のグラフェン



ディラック点

物性科学・材料開発—新奇物性・機能の解明のカギ
基礎研究の発展と応用研究への波及効果を目指す

試料の実空間顕微像 -位置分解能：50 nm -最大視野： $\phi 0.2 \text{ mm}$	試料の運動量空間分布 -波数分解能： 0.01 \AA^{-1} -エネルギー分解能：20 meV
--	--

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計20件（うち査読付論文 20件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Endo Osamu, Matsui Fumihiko, Kera Satoshi, Chun Wang-Jae, Nakamura Masashi, Amemiya Kenta, Ozaki Hiroyuki	4. 巻 21
2. 論文標題 Hole Doping to Perylene on Au(110): Photoelectron Momentum Microscopy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 e-Journal of Surface Science and Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 236-240
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1380/ejssnt.2023-024	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 Kato Takemi, Li Yongkai, Nakayama Kosuke, Wang Zhiwei, Souma Seigo, Matsui Fumihiko, Kitamura Miho, Horiba Koji, Kumigashira Hiroshi, Takahashi Takashi, Yao Yugui, Sato Takafumi	4. 巻 129
2. 論文標題 Fermiology and Origin of Tc Enhancement in a Kagome Superconductor Cs(V1-xNbx)3Sb5	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 206402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.129.206402	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 Endo Osamu, Matsui Fumihiko, Kera Satoshi, Chun Wang-Jae, Nakamura Masashi, Amemiya Kenta, Ozaki Hiroyuki	4. 巻 126
2. 論文標題 Observation of Hole States at Perylene/Au(110) and Au(111) Interfaces	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 15971 ~ 15979
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.2c04060	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, Okano Yasuaki, Matsuda Hiroyuki, Yano Takayuki, Nakamura Eiken, Kera Satoshi, Suga Shigemasa	4. 巻 91
2. 論文標題 Domain-Resolved Photoelectron Microscopy and μm -Scale Momentum-Resolved Photoelectron Spectroscopy of Graphite Armchair Edge Facet	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 094703-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.91.094703	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, Suga Shigemasa	4. 巻 105
2. 論文標題 Coupling of kz-dispersing bands with surface localized states in graphite	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 235126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.235126	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 Hasegawa Yuri, Matsui Fumihiko, Kera Satoshi	4. 巻 20
2. 論文標題 Resonant Photoemission Spectroscopy of Highly-Oriented-Coronene Monolayer using Photoelectron Momentum Microscope	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 e-Journal of Surface Science and Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 174 ~ 179
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1380/ejssnt.2022-031	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 Hashimoto Eri, Tamura Keigo, Yamaguchi Hayato, Watanabe Takeshi, Matsui Fumihiko, Koh Shinji	4. 巻 61
2. 論文標題 Characterization of epitaxial CVD graphene on Ir(111)/ -Al2O3(0001) by photoelectron momentum microscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SD1015 ~ SD1015
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac4ad8	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, Nakamura Eiken, Okano Yasuaki, Yano Takayuki, Kera Satoshi, Suga Shigemasa	4. 巻 90
2. 論文標題 Valence Band Dispersion Embedded in Resonant Auger Electrons	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 124710-1 ~ 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.124710	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 Iwasawa Masato, Kobayashi Shinnosuke, Sasaki Masahiro, Hasegawa Yuri, Ishii Hiroyuki, Matsui Fumihiko, Kera Satoshi, Yamada Yoichi	4. 巻 13
2. 論文標題 Photoemission Tomography of a One-Dimensional Row Structure of a Flat-Lying Picene Multilayer on Ag(110)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 1512 ~ 1518
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.1c03821	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 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 -

1. 著者名 MATSUI Fumihiko, MAKITA Seiji, OKANO Yasuaki, MATSUDA Hiroyuki, KERA Satoshi	4. 巻 64
2. 論文標題 Photoelectron Momentum Microscope: Development at UVSOR Synchrotron Facility	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Vacuum and Surface Science	6. 最初と最後の頁 262 ~ 268
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1380/vss.64.262	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 KERA Satoshi	4. 巻 64
2. 論文標題 Development of Photoelectron Momentum Microscope to Molecular Science	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Vacuum and Surface Science	6. 最初と最後の頁 254 ~ 261
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1380/vss.64.254	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 Hashimoto Eri, Tamura Keigo, Yamaguchi Hayato, Watanabe Takeshi, Matsui Fumihiko, Koh Shinji	4. 巻 61
2. 論文標題 Characterization of epitaxial CVD graphene on Ir(111)/ -Al2O3(0001) by photoelectron momentum microscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SD1015 ~ SD1015
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac4ad8	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, Matsuda Hiroyuki	4. 巻 92
2. 論文標題 Projection-type electron spectroscopy collimator analyzer for charged particles and x-ray detections	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 073301 ~ 073301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0051114	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 Endo Osamu, Matsui Fumihiko, Chun Wang-Jae, Nakamura Masashi, Amemiya Kenta, Ozaki Hiroyuki	4. 巻 711
2. 論文標題 Nanographene growth from benzene on Pt(111)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Surface Science	6. 最初と最後の頁 121874 ~ 121874
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.susc.2021.121874	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 Matsuda Hiroyuki, Matsui Fumihiko	4. 巻 245
2. 論文標題 90°-deflection imaging electron analyzer for measuring wide 2D angular distribution and perpendicular spin texture	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 147001 ~ 147001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.elspec.2020.147001	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, Yano Takayuki, Nakamura Eiken, Tanaka Kiyohisa, Suga Shigemasa, Kera Satoshi	4. 巻 59
2. 論文標題 Photoelectron Momentum Microscope at BL6U of UVSOR-III synchrotron	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 067001 ~ 067001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab9184	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, 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 Hagiwara Kenta, Nakamura Eiken, Makita Seiji, Suga Shigemasa, Tanaka Shin-ichiro, Kera Satoshi, Matsui Fumihiko	4. 巻 31
2. 論文標題 Development of dual-beamline photoelectron momentum microscopy for valence orbital analysis	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Synchrotron Radiation	6. 最初と最後の頁 540 ~ 546
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1107/S1600577524002406	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, Hagiwara Kenta, Nakamura Eiken, Yano Takayuki, Matsuda Hiroyuki, Okano Yasuaki, Kera Satoshi, Hashimoto Eri, Koh Shinji, Ueno Keiji, Kobayashi Takahiro, Iwamoto Emi, Sakamoto Kazuyuki, Tanaka Shin-ichiro, Suga Shigemasa	4. 巻 94
2. 論文標題 Soft x-ray photoelectron momentum microscope for multimodal valence band stereography	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 083701-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0154156	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48件（うち招待講演 21件 / うち国際学会 23件）

1. 発表者名 F. Matsui, K. Hagiwara, E. Nakamura, S. Suga
2. 発表標題 Multimodal Valence Stereography for Cutting-edge Spin Materials Science
3. 学会等名 Workshop: Seeds & Needs for Tomorrow's SR-PES Research (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Kera
2. 発表標題 Prospects required for future light-source facilities: Research Center for Autonomous Functions by Tailor-made Photon Sources
3. 学会等名 Workshop: Seeds & Needs for Tomorrow's SR-PES Research (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 F. Matsui, K. Hagiwara, E. Nakamura, S. Tanaka, S. Suga
2. 発表標題 Multimodal Valence Band Stereography by Soft X-ray / VUV Photoelectron Momentum Microscope at UVSOR
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中慎一郎, 菅滋正, 上野啓司, 福谷圭佑, 松井文彦, 田中清尚
2. 発表標題 TiSe ₂ のCDW転移に伴う3Dフェルミ面構造の変化
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 F. Matsui, K. Hagiwara, E. Nakamura, S. Suga
2. 発表標題 Multimodal Valence photoelectron spectroscopy by SX-VUV dual beam Momentum Microscope
3. 学会等名 Annual meeting of the Japan Society of Vacuum and Surface Science 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松井文彦、萩原健太、中村永研、牧田誠二、岡野泰彬、矢野隆行、解良聡、田中慎一郎、菅滋正
2. 発表標題 グラフアイト光電子角度分布再訪：Umklapp散乱について
3. 学会等名 第37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 2024年

1. 発表者名 F. Matsui, K. Hagiwara, E. Nakamura, S. Suga
2. 発表標題 Multimodal Valence Band Spectroscopy by Soft X-ray / VUV Photoelectron Momentum Microscope
3. 学会等名 MRM2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 萩原 健太、中村 永研、牧田 誠二、菅 滋正、田中 慎一郎、松井 文彦
2. 発表標題 直入射光電子運動量顕微鏡による Au(111)の軌道電子構造解析
3. 学会等名 第37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 2024年

1. 発表者名 田中 慎一郎、菅 滋正、上野 啓司、福谷 圭祐、牧田 誠二、松井 文彦、田中 清尚
2. 発表標題 放射光ARPES測定による3Dフェルミ面の検出
3. 学会等名 第37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 2024年

1. 発表者名 菅 滋正、萩原 健太、田中 慎一郎、小林 宇宏、岩本 恵美、坂本 一之、二木 かおり、上野 啓司、松井 文彦
2. 発表標題 3次元波数分解光電子顕微分光(3D-PM)による1T-TaS ₂ の電子状態の解析
3. 学会等名 第37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 2024年

1. 発表者名 S. Kera
2. 発表標題 Many body effects define the material property of molecular solids
3. 学会等名 NanoSpec FY2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 F. Matsui, K. Hagiwara, S. Suga
2. 発表標題 Multimodal photoemission investigation of 1T-TaS ₂ chiral charge density wave phase transition by soft X-ray/VUV photoelectron momentum microscope
3. 学会等名 NanoSpec FY2023 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 松井文彦
2. 発表標題 光電子運動量顕微鏡による電子状態研究ミル(観察)からワカル(解明)へ
3. 学会等名 NIFS物質科学討論会(招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 F. Matsui, K. Hagiwara, S. Tanaka, S. Suga, K. Ueno
2. 発表標題 Determination of CDW nesting vectors of 1T-TaS ₂ by photoelectron momentum microscopy
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会オンライン
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 菅滋正, C.Tusche, 岩本恵美, 小林宇宏, 坂本一之, 上野啓司, 萩原健太, 松井文彦
2. 発表標題 Potential of Photoelectron Momentum Microscopy(PMM) for Studies of Complex Electronic Structures of Materials
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会オンライン
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 萩原健太, 中村永研, 牧田誠二, 菅滋正, 田中慎一郎, 松井文彦
2. 発表標題 直入射光電子運動量顕微鏡によるAu(111)の価電子帯構造の軌道解析
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会オンライン
4. 発表年 2024年

1 . 発表者名 Shin-ichiro Ideta, T. Yoshida, K. Tanaka, W. O. Wang, B. Moritz, T. P. Devereaux, T. K. Lee, C. Y. Mou, S. Adachi, N. Sakaki, S. Yamaguchi, T. Watanabe, T. Noji, S. Uchida, S. Ishida, and A. Fujimori
2 . 発表標題 Nodal metallic behavior of underdoped triple-layer cuprate Bi2223
3 . 学会等名 ICESS-15 (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 S. Kera
2 . 発表標題 Deep insight into organic semiconductors by itinerant characteristics of the electronic structure
3 . 学会等名 International conference on Materials science, engineering and technology (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 S. Kera, K. Fukutani, H. Ishii
2 . 発表標題 Impact of vibronic coupling on the electronic structure of organic semiconductor crystals
3 . 学会等名 VUVX 2023 (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 Fumihiko Matsui, Kenta Hagiwara, Hiroyuki Matsuda, Yasuaki Okano, Takayuki Yano, Eiken Nakamura, Satoshi Kera, Shigemasa Suga, Shin-ichiro Tanaka
2 . 発表標題 Photoelectron Momentum Microscope 1.0 upgraded to 2.0 at UVSOR for characterization of surface electronic and spin structures
3 . 学会等名 日本物理学会
4 . 発表年 2023年

1. 発表者名 松井文彦
2. 発表標題 もう一つの顕微ARPES : 光電子運動量顕微法 世界動向とUVSORの現状
3. 学会等名 NanoTerasu ARPES Symposium (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松井文彦、岡野泰彬、松田博之、中村永研、矢野隆行、解良聡、田中慎一郎、菅滋正
2. 発表標題 軟X線光電子運動量顕微鏡 : r, k, P, spin分解と元素選択
3. 学会等名 日本放射光学会年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松井文彦, 菅滋正
2. 発表標題 光電子運動量顕微法による単原子ステップ・表面对掌ドメインの計測
3. 学会等名 表面界面スペクトロスコープ-2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Fumihiko Matsui
2. 発表標題 Surface resonance and monoatomic step of graphite surface imaged by Photoelectron Momentum Microscope
3. 学会等名 14th International Symposium on atomic level characterization for new materials and devices (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 FUMIHIKO MATSUI, YASUAKI OKANO, HIROYUKI MATSUDA, TAKAYUKI YANO, EIKEN, NAKAMURA, SATOSHI KERA
2. 発表標題 Twin-domain Boundary and Monoatomic Step of Graphite Surface Imaged by Photoelectron Momentum Microscope
3. 学会等名 22nd international vacuum congress (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Fumihiko Matsui, Satoshi Kera, Eri Hashimoto, Shinji Koh, Yoshihide Aoyagi, Shinya Ohno, and Shigemasa Suga
2. 発表標題 Dark field imaging of multi-domain surfaces using UVSOR Photoelectron Momentum Microscope
3. 学会等名 14th international conference on synchrotron radiation instrumentation (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuri Hasegawa, Fumihiko Matsui, and Satoshi Kera
2. 発表標題 Resonant photoemission spectroscopy of highly oriented coronene monolayer using photoelectron momentum microscope
3. 学会等名 13th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '21 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長谷川友里、松井文彦、解良聡
2. 発表標題 光電子運動量顕微鏡を用いた高配向coronene単層膜の共鳴光電子分光
3. 学会等名 UVSORシンポジウム2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Kera, F. Matsui
2. 発表標題 Present status of UVSOR photoelectron momentum microscope: a case study for molecular film
3. 学会等名 2022 Taiwan-AVS symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Fukutani, S. Kera
2. 発表標題 Anisotropic charge localization upon strong phonon and vibronic couplings
3. 学会等名 734th WE-Heraeus-Seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 F. Matsui, Y. Okano, S. Makita, H. Matsuda, T. Yano, E. Nakamura, S. Suga, K. Fukutani, and S. Kera
2. 発表標題 Photoelectron momentum microscope at UVSOR: Resonating valence orbitals by core excitation
3. 学会等名 734th WE-Heraeus-Seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Iwasawa, F. Matsui, S. Kera, Y. Yamada
2. 発表標題 Momentum microscopy of highly oriented organic thin films
3. 学会等名 734th WE-Heraeus-Seminar (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松井文彦
2. 発表標題 光電子計測法開発による表面磁性研究：軌道磁気量子数分解XMCDと光電子運動量顕微鏡
3. 学会等名 日本磁気科学会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松井文彦
2. 発表標題 光電子運動量顕微鏡の拠点構築と展開
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 F. Matsui
2. 発表標題 Introduction to the contrarian usage of two-dimensional photoelectron spectroscopy
3. 学会等名 HiSOR-IMS joint seminar（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 F. Matsui
2. 発表標題 Soft X-ray Photoelectron Momentum Microscopy: resonating valence band element-selectively
3. 学会等名 FHI-IMS joint seminar（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 F. Matsui
2. 発表標題 Toward comprehensive analysis of electronic and spin structure by UVSOR Photoelectron Momentum Microscope
3. 学会等名 13th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '21 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Fumihiko Matsui, Satoshi Kera, Eri Hashimoto, Shinji Koh, Yoshihide, Aoyagi, Shinya Ohno, and Shigemasa Suga
2. 発表標題 Dark Field imaging of multi-domain surface using UVSOR Photoelectron Momentum Microscope
3. 学会等名 14th international conference on synchrotron radiation instrumentation (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩澤 証人、長谷川 友里、野崎 美沙、栗原 俊平、大瀧 峻也、二木 かおり、石井 宏幸、佐々木 正洋、松井 文彦、解良 聡、山田 洋一
2. 発表標題 Dph-BTBTの伝導におけるHOMO-1の影響
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長谷川友里, 松井文彦, 解良聡
2. 発表標題 光電子運動量顕微鏡を用いた配向分子薄膜の光電子分光
3. 学会等名 UVSOR Synposium2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松井文彦
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-Micro/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 表面真空学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中慎一郎, 上野啓司, 松田博之, 松井文彦
2. 発表標題 波数空間におけるMoS2価電子バンドの原子軌道への分解
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Kera
2. 発表標題 Energy and spatial distribution of frontier orbital state for organic thin films
3. 学会等名 2nd International Conference on Materials research and Innovation (ICMARI) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

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
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 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)
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

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

開催した国際会議情報 www.jvss.jp/division/mba/alc/alc22/ UVSOR施設 https://www.uvsor.ims.ac.jp 松井グループ https://www.uvsor.ims.ac.jp/staff/matui/ 田中グループ https://www.uvsor.ims.ac.jp/staff/tanaka/ 解良グループ https://groups.ims.ac.jp/organization/kera_g/

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	松井 文彦 (Matsui Fumihiko) (60324977)	分子科学研究所・極端紫外光研究施設・主任研究員 (63903)	
研究分担者	田中 清尚 (Tanaka Kiyohisa) (60511003)	分子科学研究所・極端紫外光研究施設・准教授 (63903)	
研究分担者	長谷川 友里 (Hasegawa Yuri) (60829464)	立命館大学・理工学部・助教 (34315)	
研究分担者	出田 真一郎 (Ideta SHin-ichiro) (80737049)	広島大学・放射光科学研究センター・准教授 (15401)	
研究分担者	山田 一斗 (Yamada Kazuto) (50836210)	分子科学研究所・光分子科学研究領域・特任研究員 (63903)	

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2件

国際研究集会 Workshop on "Seeds and Needs for Tomorrow's Synchrotron Radiation Photoelectron Spectroscopy Research"	開催年 2023年～2023年
国際研究集会 Special Session "Comprehensive Spectroscopy by Photoelectron Momentum Microscope" at ALC2022	開催年 2022年～2022年

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			
ドイツ	ユーリッヒ総合研究機構			
オーストリア	グラーツ工科大学			