

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 27 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H01830

研究課題名(和文) 表面超構造・電子状態同時測定拠点の実現による表面電子状態の徹底解明

研究課題名(英文) Elucidation of surface electronic states with accurate measurement systems of surface superstructures and surface electronic structures

研究代表者

湯川 龍 (Yukawa, Ryu)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：40759479

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は表面近傍の新奇な電子物性を解明するため、表面の超構造を正確に決定し、同一試料表面に於いて角度分解光電子分光(ARPES)で電子状態を明らかにするための実験手法の高度化と本手法を用いた試料表面の解明を目的とした。酸化チタンの清浄表面計測手法の開発に伴い表面超構造がadmolecularモデルで記述されることを突き止めた。ZnO表面では表面近傍の結晶性が発光特性を大きく変化させることを明らかにした。さらに、トポロジカル絶縁体表面では強固と考えられていた表面状態を表面超構造によって変えられることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ナノ微細化技術の発展に伴い、試料表面が電子物性へ与える影響についてへの理解がますます重要になりつつある。酸化物試料は電子デバイス応用だけでなく、発光デバイスや光触媒としても応用される。トポロジカル絶縁体試料は、原子構造に起因した電子状態への理解が必須となる。本研究では酸化物試料やトポロジカル絶縁体試料に於いて、表面超構造や表面近傍の結晶性が電子物性を大きく変えることを示した。本研究で得られた知見は表面を利用した高速・低消費電力素子や発光素子開発を加速すると期待される。加えて、20年以上議論の別れているアナターゼ型酸化チタンに於ける表面超構造の決定に重要な役割を果たした。

研究成果の概要(英文)：This study aims to elucidate the novel electronic properties in the vicinity of surfaces by accurately determining the surface superstructure and using an advanced experimental technique, angle-resolved photoemission spectroscopy (ARPES), to clarify the electronic states on the same sample surface.

Through the development of a measurement technique for the clean surface of titanium oxide, it was discovered that the surface superstructure can be described by the admolecular model. It was revealed that the crystallinity in the vicinity of the ZnO surface significantly modulate its luminescent characteristics. Furthermore, on the surface of topological insulators, it was demonstrated that the surface electronic states, which were believed to be robust, can be modified by the surface superstructure.

研究分野：物性物理

キーワード：表面超構造 電子構造 酸化物 全反射高速陽電子線回折 光電子分光

### 1. 研究開始当初の背景

近年の目覚ましい薄膜作製技術と単結晶表面清浄化技術の発展に伴い、結晶表面近傍に発現する特異な電子状態および、これらに起因した電子物性に大きな注目が集まっている。角度分解光電子分光法(ARPES)はこれら表面近傍の電子状態を直接計測する非常に強力な手法として用いられ、バルクの結晶構造から予想される表面状態や表面近傍に於ける電子状態の観測に成功してきた。一方、表面近傍の原子構造(表面超構造)が電子状態、そして表面近傍の構造や電子状態が電子物性へ及ぼす影響は理解されていない点が多い。一因として、表面超構造を考慮しなくても ARPES で得られる電子状態をある程度説明できたことや、そもそも表面超構造を実験的に決定することが難しく、構造まで考慮した深い解析が困難であったことが挙げられる。しかしながら、実際には表面超構造・表面近傍の結晶性が表面に形成される2次元金属状態や表面近傍の電子物性に強い影響を及ぼし、バルクの結晶構造からは予想できない電子状態の発現が活発に報告されている。こうした理由のため、表面近傍に於いては表面超構造や結晶性を考慮した電子状態や機能の解明が望まれる。

### 2. 研究の目的

表面近傍に於ける原子構造と電子状態、電子物性の対応を関係づけることを困難にする要因の一つとして、表面の結晶構造が外部因子により簡単に変質してしまう点が挙げられる。例えば表面近傍の電子状態は結晶作成時の加熱温度や搬送時の水吸着、大気中での結晶劣化、さらには結晶中の不純物濃度に敏感に依存する。そのため、ある結晶表面に於いて表面近傍の原子構造が電子物性に及ぼす影響を明らかにするためには、同一手法で作製した試料表面に於ける電子状態や原子配置、電子物性の計測が期待される。そこで本研究では、結晶表面近傍の電子状態や物性を解明するため、同一試料表面で表面超構造と電子構造を決定し、その電子状態・電子物性を明らかにすることを目的として研究を実施した。

### 3. 研究の方法

本研究では表面原子構造と電子状態、電子物性を明らかにするため主に、トポロジカル絶縁体表面の電子状態の解明と表面酸素欠陥及び電子構造に起因した発光スペクトル解明、データ駆動科学的手法を取り入れた  $\text{TiO}_2(4 \times 1)$  表面超構造解析の3つの観点で研究を実施した。以下にそれぞれの研究手法の詳細を示す。

#### 表面原子構造に起因したトポロジカル絶縁体表面の電子状態の解明

トポロジカル絶縁体とはバルクは絶縁体であるが表面のみに特異な電子スピン構造を有する金属的なバンド構造(トポロジカル表面状態)が現れる物質であり[1]、次世代のスピン트로ニクス電子材料として注目されている。トポロジカル絶縁体の一種である六硼化サマリウム( $\text{SmB}_6$ )は希土類のサマリウム Sm を含んだ化合物の一種で、室温付近では通常の金属であるが、低温では半導体になり、トポロジカル近藤絶縁体と呼ばれている[2-4]。このトポロジカル絶縁体表面の数原子層にバルクの結晶構造と異なる表面超構造を形成させ、その構造に起因した電子構造を ARPES で計測した。

$\text{SmB}_6$  単結晶試料はフローティングゾーン法で作製した。 $\text{SmB}_6$  の表面を対称性の高い正方形の結晶面[001]方位]からわずかに傾けて研磨して図1(a)、超高真空中で清浄化することで新たな表面超構造を作製した。清浄化に於いてはアルゴンスパッタと1400 Kでの高温加熱を繰り返すことで $\text{SmB}_6(001)$ 清浄面を得た。そのまま超高真空下で搬送し、清浄表面における表面超構造と電子状態の計測を行なった。表面超構造は低速電子線回折法(LEED)で決定した。一方、表面に於ける電子状態はフランスの放射光

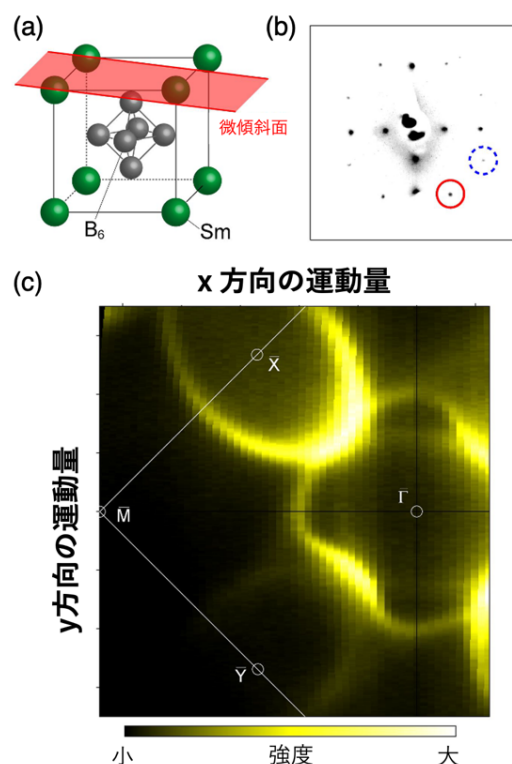


図1 (a)本研究で使用した  $\text{SmB}_6$  の原子構造と測定で使用した微傾斜面。(b) LEED 測定で得られた電子線回折パターン。実線と破線の丸印で囲まれた回折スポットでは強度が異なる。(c)ARPES 測定で得られた表面電子状態のフェルミ面[5]。

実験施設 SOLEIL の CASSIOPÉE ビームラインに設置された ARPES 実験装置を用いて計測した。ARPES 装置に於けるエネルギー分解能は 15 meV 程度であり、フェルミ準位は試料に取り付けられた Ta 箔を用いて決定した。主な ARPES 測定は十分トポロジカル近藤絶縁体領域になつていていると考えられる 13 K で実施した。

#### 表面酸素欠陥及び電子構造に起因した発光スペクトル解析

酸化物半導体を用いた発光材料の高機能化には電子と正孔のキャリアダイナミクスの詳細な理解が重要となる。特に酸化亜鉛(ZnO)は化学的に安定な透明酸化物半導体であり、直接遷移型のギャップを有することから、高効率光応答デバイスとして期待されている。ZnO にバンドギャップを超えたエネルギーを有する光を照射することで励起された電子と正孔による励起子が形成される。良質な ZnO 結晶に於いては、この励起子が再結合する過程でバンドギャップ程度のエネルギー(～3.3 eV)を有する光が放出される。こうした ZnO の発光に関して、発光スペクトルや発光の緩和時間が表面近傍の電子状態に影響されるという報告がある[6]。しかし、そのメカニズムはよくわかっていない。発光材料としての高機能化には表面電子構造が励起子ダイナミクスへ及ぼす影響についての解明が欠かせない。励起子の再結合時に放出される発光スペクトルの時間変化を調べることで励起子のダイナミクスを間接的に計測することができる。

そこで本研究では ZnO の表面の電子構造に起因した光物性を解明するため、表面近傍の電子構造を光電子分光測定で明らかにした ZnO 単結晶[7]に於ける発光スペクトルの時間発展を計測した。本実験ではレーザーを用いて価電子帯の電子を伝導帯へ励起することで電子と正孔の対からなる励起子を生成し、その励起子消滅過程に於ける発光スペクトルの時間変化を計測することで発光現象の解明を行った。励起光として ZnO のバンドギャップを超えるエネルギーを有するチタンサファイアレーザーの第三高調波(波長:290 nm, 4.28 eV)を用いた。時間分解発光スペクトルの計測には、励起レーザーと同期させたストリークカメラユニットを用いた。レーザー強度は 1.7 mJ/cm<sup>2</sup>/pulse に設定した。実験に於けるエネルギー分解能と時間分解能はそれぞれ 92 meV と 30 ps である。また、単結晶中の電子ドーパ量を Hall 測定で見積もっている。全ての実験は室温で行った。

#### データ駆動科学的手法を取り入れた TiO<sub>2</sub>(4×1)表面超構造解析

アナターゼ型酸化チタン(a-TiO<sub>2</sub>)は光触媒材料として知られるが、近年の ARPES 研究に於いて特異な多体間相互作用が働く金属状態の形成が報告されており、電子材料の候補物質としても注目を集めている。a-TiO<sub>2</sub>(001)の清浄面に於いては、4×1の周期を有する表面超構造が形成されることが知られており、ARPES 測定に於いて、この4×1の周期に起因した2次元電子状態の発現も報告されている。そのため、4×1表面超構造に起因した2次元金属の変異という新奇低次元電子物性発現の場として期待されている。しかしながら、4×1超周期の表面超構造モデルに於いては幾つかの原子構造モデルが提唱されており確立されていない。そのため、4×1の周期を有する表面超構造の確定が重要となる。

そこで高精度で表面超構造を決定可能な全反射高速電子回折(TRHEPD)を用いて a-TiO<sub>2</sub> 表面を計測した。TRHEPD 測定は表面で陽電子が全反射する性質を利用して、従来の表面超構造決定手法を大きく上回る表面感度で原子位置座標を決定可能である。試料は既に表面の電子構造を調べている高品質な a-TiO<sub>2</sub> 薄膜を用いた。表面の清浄化は超高真空下で高温加熱することで行い、反射高速電子線回折測定でシャープな4×1の周期パターンが観測されることを確認した。そのまま超高真空下で搬送し室温で TRHEPD 測定を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 表面原子構造に起因したトポロジカル絶縁体表面の電子状態の解明

正方形の結晶面[(001)方位]からわずかに傾けた微傾斜面の清浄面で計測した LEED 回折パターンでは、(001)方位で計測していれば等価となるはずのスポット強度に明暗が生じた[図 1(b)]。このことは微傾斜面を反映して4回回転対称性が破れていることを示している。この表面に於いて、ARPES 測定で得た表面電子状態のフェルミ面を図 1(c)に示す。斜め1方向のみだけ明るいフェルミ面を有する表面状態が観測された。これまでに報告されている表面状態は全て結晶構造の対称性を反映して90°の回転対称性を有するものだけであったが、本試料に於いては180°の回転対称性のみを有している。このことは表面超構造がトポロジカル表面状態へ影響を与えることを示している。

上記結果は、従来はトポロジカル表面状態はバルクの結晶構造を反映しており強固であると考えられていたが、実際には超構造を含む表面原子構造の影響を強く受けて柔軟に変化することを示している。詳細な計算により、本結果は過去の理論的な考察とも矛盾しないことがわかった。本成果は表面原子構造を制御することで柔軟に表面状態を制御できることを示しており、表面状態を利用した高速・低消費電力素子、及び量子コンピューターへの情報伝達への応用が期待される。

## (2) 表面酸素欠陥及び電子構造に起因した発光スペクトル解析

図 2(a)に自由励起子(FX)生成直後の ZnO 発光強度の時間変化を示す。10-100 ps 程度で発光強度が減衰しており、発光エネルギーに依存して緩和の時間変化が異なることが分かった。どの発光エネルギーに於いても、早い緩和(緩和時間~20 ps)と遅い緩和(緩和時間~80 ps)の2種の緩和時間を含む緩和モデルで時間変化をよく記述できることが確認された。より詳細な解析を行うため、図 2(b)に示すように、早い緩和と遅い緩和間で発光スペクトルを分離した結果、両者でスペクトル形状が大きく異なることが分かった。LO フォノンの多励起モデル(図 3)を用いてスペクトル解析を行うと、早い緩和の発光の方が FX-格子相互作用が強いことが明らかになった。このことは不純物濃度が高い場所からの発光であることを示唆している。さらに、遅い緩和では FX 直接再結合による発光強度が大きく抑制されていることが明らかになった。図 3 に示した ZnO 結晶内での FX 発光の再吸収を考慮すると、遅い緩和は結晶内部、早い緩和は結晶表面近傍からの発光であると考えられる。本研究で用いた ZnO 結晶は表面極近傍に酸素欠陥や不純物が高濃度で存在する。そのため、早い緩和の発光スペクトルでは(I)FX-格子相互作用が強く、(II)FX 発光の相対強度が強いの点に於いて表面近傍の欠陥もしくは不純物に起因した発光であることを示している。以上の研究成果は、適切な表面処理を行うことで発光素子としての性能(発光の緩和時間やスペクトル形状)を制御可能であることを示しており、本研究で得られた知見は発光素子の高機能化に繋がると考えられる。

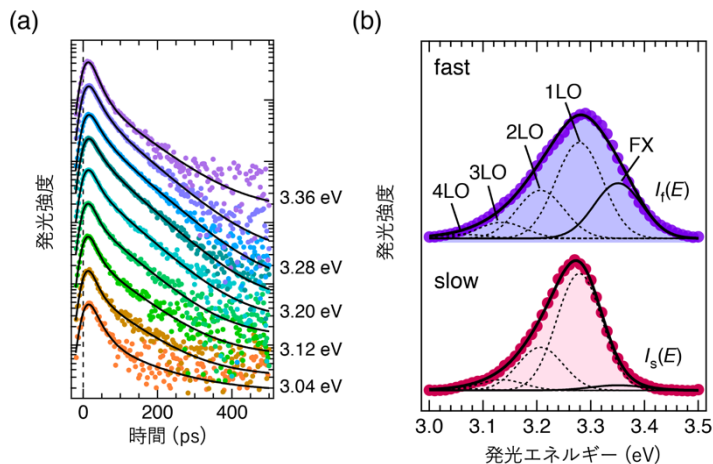


図 2 (a)ZnO の時間分解発光スペクトルの発光エネルギー依存性と(b)フィッティングで求めた早い緩和(上)と遅い緩和(下)の発光スペクトル[8]。FX 直接再結合による発光を実線、LO フォノンの多励起を伴う発光[nLO:  $n$  は自然数]を点線で示す。

図 3 FX-LO フォノンの多励起モデル。

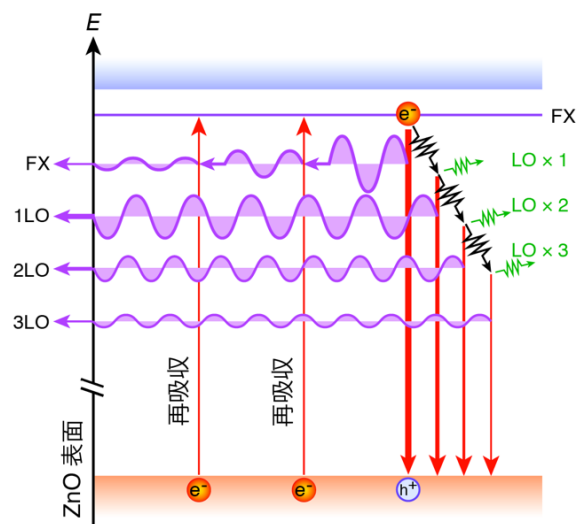


図 3 FX-LO フォノンの多励起モデル。

## (3) 表面酸素欠陥及び電子構造に起因した発光スペクトル解析

図 4 に a-TiO<sub>2</sub>(001) 表面で計測した TRHEPD ロッキング曲線を示す。本計測結果に加えて、第一原理計算と汎用構造解析ソフトウェア 2DMAT [9]を駆使することで4×1表面超構造を探索した。その結果、エネルギー的にも R 因子的にも赤線でも示した admolecule モデルが最適であることを示した。本成果は従来の電子線回折実験に加えて、TRHEPD 実験に於いても admolecule モデルが有力であることを裏付け、20 年以上議論が分かっているアナターゼ型酸化チタンに於ける4×1表面超構造の決定に重要な役割を果たした。

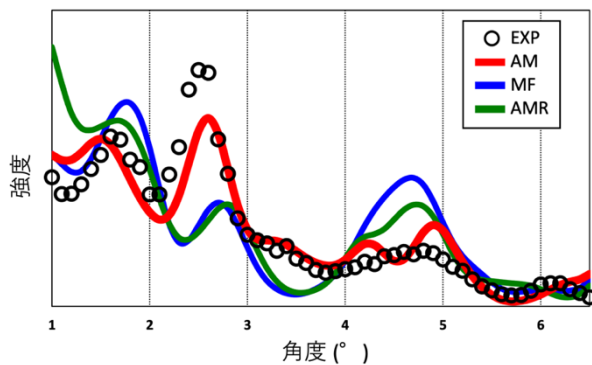


図 4 アナターゼ型酸化チタン表面で計測した TRHEPD ロッキング曲線と構造解析結果。AM、MF、AMR はそれぞれ admolecule モデル、micro facet モデル、add and missing row モデルを示す。

<引用文献>

- [1] C. L. Kane and E. J. Mele, Phys. Rev. Lett. **95**, 146802 (2005).
- [2] M. Dzero *et al.*, Phys. Rev. Lett. **104**, 106408(2010).
- [3] T. Takimoto, J. Phys.Soc.Jpn. **80**, 123710 (2011).
- [4] Y. Ohtsubo, Nat. Commun. **10**, 2298 (2019).
- [5] Y. Ohtsubo *et al.*, Nat. Commun. **13**, 5600 (2022).
- [6] I. Shalish, H. Temkin, and V. Narayanamurti, Phys. Rev. B **69**, 245401 (2004).
- [7] R. Yukawa *et al.*, Appl. Phys. Lett. **105**, 151602 (2014).
- [8] R. Yukawa *et al.*, Phys. Rev. Mater. **6**, 104607 (2022).
- [9] T. Tanaka *et al.*, Acta. Phys. Pol. A **137(3)**, 188 (2020); and K. Tanaka *et al.*, JJAP Conf. Proc. **9**, 011301 (2023).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Kimura Shin-ichi, Kawabata Taishi, Matsumoto Hiroki, Ohta Yu, Yoshizumi Ayuki, Yoshida Yuto, Yamashita Takumi, Watanabe Hiroshi, Ohtsubo Yoshiyuki, Yamamoto Naoto, Jin Xiuguang	4. 巻 92
2. 論文標題 Bulk-sensitive spin-resolved resonant electron energy-loss spectroscopy (SR-rEELS): Observation of element- and spin-selective bulk plasmons	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 093103 ~ 093103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0055435	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 Hoshi Takeo, Sakata Daishiro, Oie Shotaro, Mochizuki Izumi, Tanaka Satoru, Hyodo Toshio, Hukushima Koji	4. 巻 271
2. 論文標題 Data-driven sensitivity analysis in surface structure determination using total-reflection high-energy positron diffraction (TRHEPD)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Computer Physics Communications	6. 最初と最後の頁 108186 ~ 108186
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cpc.2021.108186	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 Yukawa R., Kobayashi M., Kanda T., Shiga D., Yoshimatsu K., Ishibashi S., Minohara M., Kitamura M., Horiba K., Santander-Syro A. F., Kumigashira H.	4. 巻 12
2. 論文標題 Resonant tunneling driven metal-insulator transition in double quantum-well structures of strongly correlated oxide	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 7070-7070
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-021-27327-z	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 Kanda Tatsuhiko, Shiga Daisuke, Yukawa Ryu, Hasegawa Naoto, Nguyen Duy Khanh, Cheng Xianglin, Tokunaga Ryosuke, Kitamura Miho, Horiba Koji, Yoshimatsu Kohei, Kumigashira Hiroshi	4. 巻 104
2. 論文標題 Electronic structure of SrTi1-xVxO3 films studied by in situ photoemission spectroscopy: Screening for a transparent electrode material	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 115121~115121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.115121	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 Ohtsubo Yoshiyuki, Tokumasu Naoki, Watanabe Hiroshi, Nakamura Takuto, Le Fevre Patrick, Bertran Francois, Imamura Masaki, Yamamoto Isamu, Azuma Junpei, Takahashi Kazutoshi, Kimura Shin-ichi	4. 巻 101
2. 論文標題 One-dimensionality of the spin-polarized surface conduction and valence bands of quasi-one-dimensional Bi chains on GaSb(110)-(2×1)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 235306
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.235306	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 Sato Yusuke, Fukaya Yuki, Cameau Mathis, Kundu Asish K., Shiga Daisuke, Yukawa Ryu, Horiba Koji, Chen Chin-Hsuan, Huang Angus, Jeng Horng-Tay, Ozaki Taisuke, Kumigashira Hiroshi, Niibe Masahito, Matsuda Iwao	4. 巻 4
2. 論文標題 Electronic structure of a (3×3)-ordered silicon layer on Al(111)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 64005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.4.064005	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 Tanaka K., Hoshi T., Mochizuki I., Hanada T., Ichimiya A., Hyodo T.	4. 巻 137
2. 論文標題 Development of Data-Analysis Software for Total-Reflection High-Energy Positron Diffraction (TRHEPD)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Acta Physica Polonica A	6. 最初と最後の頁 188 ~ 192
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.12693/APhysPoIA.137.188	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 Dai J., Frantzeskakis E., Fortuna F., Lomker P., Yukawa R., Thees M., Sengupta S., Le Fevre P., Bertran F., Rault J. E., Horiba K., Muller M., Kumigashira H., Santander-Syro A. F.	4. 巻 101
2. 論文標題 Tunable two-dimensional electron system at the (110) surface of SnO <sub>2</sub>	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 85121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.085121	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 Yukawa Ryu, Yamamoto Susumu, Arita Ren, Minami Yuki, Yamanoi Kohei, Ozawa Kenichi, Sakamoto Kazuyuki, Shimizu Toshihiko, Sarukura Nobuhiko, Matsuda Iwao	4. 巻 6
2. 論文標題 Resolving decay-time dependent photoluminescence induced by phonon-dressed excitons in ZnO	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 104607
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.6.104607	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 Ohtsubo Yoshiyuki, Nakaya Toru, Nakamura Takuto, Le Fevre Patrick, Bertran Francois, Iga Fumitoshi, Kimura Shin-Ichi	4. 巻 13
2. 論文標題 Breakdown of bulk-projected isotropy in surface electronic states of topological Kondo insulator SmB6(001)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 5600
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-022-33347-0	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 Nakamura Takuto, Nakaya Toru, Ohtsubo Yoshiyuki, Sugihara Hiroki, Tanaka Kiyohisa, Yukawa Ryu, Kitamura Miho, Kumigashira Hiroshi, Imura Keiichiro, Suzuki Hiroyuki S., Sato Noriaki K., Kimura Shin-ichi	4. 巻 107
2. 論文標題 Surface valence transition in SmS by alkali metal adsorption	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L041102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.107.L041102	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 Tsujikawa Yuki, Horio Masafumi, Zhang Xiaoni, Senoo Tomoaki, Nakashima Takeru, Ando Yasunobu, Ozaki Taisuke, Mochizuki Izumi, Wada Ken, Hyodo Toshio, Iimori Takushi, Komori Fumio, Kondo Takahiro, Matsuda Iwao	4. 巻 106
2. 論文標題 Structural and electronic evidence of boron atomic chains	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 205406
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.106.205406	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 Motoyama Yuichi, Yoshimi Kazuyoshi, Mochizuki Izumi, Iwamoto Harumichi, Ichinose Hayato, Hoshi Takeo	4. 巻 280
2. 論文標題 Data-analysis software framework 2DMAT and its application to experimental measurements for two-dimensional material structures	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Computer Physics Communications	6. 最初と最後の頁 108465 ~ 108465
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cpc.2022.108465	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 Tsujikawa Yuki, Shoji Makoto, Hamada Masashi, Takeda Tomoya, Mochizuki Izumi, Hyodo Toshio, Matsuda Iwao, Takayama Akari	4. 巻 27
2. 論文標題 Structure of 3-Borophene Studied by Total-Reflection High-Energy Positron Diffraction (TRHEPD)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Molecules	6. 最初と最後の頁 4219 ~ 4219
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/molecules27134219	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 Nakamura Takuto, Ohtsubo Yoshiyuki, Harasawa Ayumi, Yaji Koichiro, Shin Shik, Komori Fumio, Kimura Shin-ichi	4. 巻 105
2. 論文標題 Fluctuating spin-orbital texture of Rashba-split surface states in real and reciprocal space	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 235141
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.235141	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 -

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 大坪 嘉之, 上野 哲郎, 岩澤 英明, 宮脇 淳, 堀場 弘司, 安居院 あかね, 稲葉 健斗, 井波 暢人, 中谷 健, 今園 孝志, 藤井 健太郎, 木村 洋昭, 高橋 正光
2. 発表標題 Design for nano-spintronics beamline at 3-GeV next-generation synchrotron radiation facility
3. 学会等名 14th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大坪 嘉之, 上野 哲郎, 岩澤 英明, 宮脇 淳, 堀場 弘司, 安居院 あかね, 稲葉 健斗, 中谷 健, 今園 孝志, 藤井 健太郎, 木村 洋昭, 高橋 正光
2. 発表標題 次世代放射光施設 共用ビームライン検討状況II - 顕微スピントロニクスビームライン-
3. 学会等名 第35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 2021年

1. 発表者名 望月出海, 和田健, Rezwan Ahmed, 兵頭俊夫
2. 発表標題 SPFの試料準備チェンバー整備
3. 学会等名 陽電子科学とその理工学への応用
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 望月出海
2. 発表標題 低速陽電子実験施設における全反射高速陽電子回折(TRHEPD)装置
3. 学会等名 スパコンを用いた実験データ解析の新展開;量子ビームによる2次元物質構造解析への適用(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 湯川龍, 山本達, 有田廉, 南佑輝, 山ノ井航平, 小澤健一, 坂本一之, 清水俊彦, 猿倉信彦, 松田巖
2. 発表標題 ZnOにおけるフォノンと相互作用した励起子の時間分解発光研究
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大坪嘉之
2. 発表標題 近藤絶縁体SmB6の単結晶表面清浄化技術の開発とトポロジカル表面 電子状態の観測
3. 学会等名 第34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・国内）（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 I. Mochizuki, K. Wada, Y. Fukaya, T. Shirasawa, Y. Endo, A. Takayama, S. Hasegawa, A. Ichimiya, Y. Nagashima, M. Maekawa, A. Kawasuso, A. Ishida, N. Toge, K. Furukawa, Y. Nagai, T. Hyodo
2. 発表標題 Present Status of the Slow Positron Facility of Institute of Materials Structure Science, KEK
3. 学会等名 15th International Workshop on Slow Positron Beam Techniques & Applications (SLOPOS-15)（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 望月出海
2. 発表標題 表面の水素を見るための 全反射高速陽電子回折(TRHEPD)による新手法
3. 学会等名 触媒科学計測共同研究拠点ミニシンポジウム「超高速データ駆動科学と先端計測技術の融合による触媒科学イノベーション」（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 望月出海
2. 発表標題 KEK物構研低速陽電子施設での2DMATの利用
3. 学会等名 CCMS Webハンズオン：2DMAT講習会（招待講演）
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 回転伝達装置、および移送装置	発明者 湯川龍、坂本一之、 板谷亮太	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2022-201608	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
研究 分担者	望月 出海  (Mochizuki Izumi)  (30579058)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・助教   (82118)	
研究 分担者	大坪 嘉之  (Ohtsubo Yoshiyuki)  (70735589)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・次世代放射光施設整備開発センター・主任研究員   (82502)	

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		
フランス	Paris-Saclay University	Synchrotron SOLEIL	