

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01757

研究課題名(和文)電子状態イメージングと第一原理計算を融合した原子層材料のエッジ物性創発

研究課題名(英文) Emergence of edge properties in atomic-layer materials by combining electronic structure imaging and first-principles calculation

研究代表者

菅原 克明 (Sugawara, Katsuaki)

東北大学・理学研究科・准教授

研究者番号：70547306

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、MBE法で作製した単原子層薄膜の電子状態をARPESによってイメージング化し、ある結晶構造/端構造を持つ原子層構造を定義することで得られる電子状態と比較する理論計算スクリーニングを行う。これにより、原子層物質の結晶構造および端構造を特定し、新物質の創製およびエッジ物性の創出を可能にする。本研究によりH-SiC上における2DTI候補物質ビスマセンやラシュバ絶縁体a-BIやa-Sbの作製および結晶構造の同定と電子状態解明をARPESおよび第一原理計算によって実現した。また、1T'-WTe₂における負の熱膨張係数を起源とする電子状態の変化をARPESおよび第一原理計算によって解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで常識であるX線構造解析による結晶構造同定法以外にも逆格子空間の情報である電子状態解析から結晶構造の同定が可能であるのこれまで考えてきた。すなわち実格子空間と逆格子空間を紐付けして量子物性を総括的に解明することが高分解能ARPESにて可能であることを実証する必要がある。本研究によって、高分解能ARPESが電子状態からの電子物性解明のみならず結晶構造の同定という実空間情報へ活用することが可能であることを証明したことは学術的意義として高いと考えている。さらに、電子状態から得られたデータは、現在活発な動きがあるデータサイエンスの学理構築に十分繋がると考えている。

研究成果の概要(英文)：In this study, we perform the electronic states imaging by ARPES for monoatomic layer thin films fabricated by MBE. Also, theoretical calculation screening which compares with the first principle calculation result obtained by defining some atomic layer and/or edge structures is performed to identify crystalline and/or edge structures. This procedure is not only to clarify the new crystal and edge structures in atomic layer materials but also to create new functional materials and edge properties. In this study, we have succeeded in fabricating bismuthene as a 2DTI candidate material and a-BI and a-Sb as Rashba insulators grown on H-SiC(0001), uncovering their crystal structures and electronic states by using ARPES and first-principles calculations. Also, in monolayer 1T'-WTe₂, the unusual change of electronic structure caused by the negative thermal expansion coefficient has been revealed by ARPES and first-principles calculations.

研究分野：光電子固体物性学

キーワード：原子層材料 ARPES MBE エッジ状態

1. 研究開始当初の背景

炭素が蜂の巣格子を組んだ原子 1 個程度の厚さしかもたない原子層グラフェンにおけるディラック電子の発見によって、原子層物質の基礎/応用研究が世界各地で行われている。特にグラフェンは、大きなスピン軌道相互作用を導入することで、グラフェンの電子状態において、ディラック電子に関連する π バンドと π^* バンドがバンド反転を引き起こし、その内側に半導体的または絶縁体的なバンドギャップ(禁制帯)が形成されるとともに、グラフェンの端(エッジ)に金属的なヘリカルエッジ状態が形成される 2次元トポロジカル絶縁体(2DTI)として機能する可能性が理論的に提案され注目を集めた。トポロジカル絶縁体は、金属・半導体・絶縁体とは異なる第 4 の物質であり、バルクでは絶縁体として、表面やエッジはスピン偏極した金属として振舞うことが知られている。しかしながら、これまでの研究では、エッジに関連した電子状態の実験的理解が進められていないのが現状である。その理由は、結晶構造が同定されていない単原子層薄膜のエッジ構造を特定するために用いられる X 線回折(XRD)などでは、その回折強度が成長基板と成長薄膜の回折強度やバックグラウンドに埋もれてしまい、原理的に不可能となる。

これまで申請者は、高品質なグラフェン薄膜を半導体 SiC 基板上で作製する技術を開発し、それを単原子層薄膜成長基板として用いることで、様々な単原子層膜[遷移金属ダイカルコゲナイド(TMDs)原子層、グラフェン層間化合物など]を作製し、その電子状態を角度分解光電子分光(ARPES)によって明らかにしてきた。その研究の中で特質すべき点は、2セレン化ニオブ(NbSe₂)単原子層薄膜を成長させた際、バルク体としてこの世に存在しない正八面体型構造(1T)と呼ばれる結晶構造を有する NbSe₂ 単原子層薄膜を作製することに世界で初めて成功した点である。その結晶構造の同定には、高分解能 ARPES によって得られた電子状態データと quantum espresso による第一原理計算結果との比較によって実現した。この一連の研究は、これまで常識である XRD による結晶構造解析以外にも高分解能 ARPES による電子状態解析から結晶構造の同定が可能であることを示している。そこでエッジ状態にかかわらず、未知の結晶構造が形成する電子状態を第一原理計算を用いて予言し、ARPES によって観測する電子状態との比較から、結晶構造の同定とともにエッジ電子物性の解明を行うことで新たなエッジ物性の開拓が可能となる。

2. 研究の目的

上記の研究背景を踏まえ本研究では、ビスマセン・アンチモセン・スタネンなどの単原子 2DTI 候補物質や遷移金属ダイカルコゲナイド(TMDs) 2DTI 候補物質である 1T'-MoS₂ や 1T'-WTe₂ などをこれまで申請者が培ってきた MBE 技術を最大限に活用して作製する。また、これらとは異なる未知の構造を持つ単原子層薄膜を作製し、電子状態の直接観測が可能な ARPES を用いて、これらの電子状態イメージングを行う。得られた電子状態イメージングの結果と、第一原理計算結果との比較による理論計算スクリーニング法によって、これまで報告例のない結晶構造をもつ原子層物質の同定や、特定のエッジ局在状態に対応する電子状態を理論計算を活用することで見出し、新原子層物質の創製およびエッジ電子物性の新奇創出を行うことが目的である。

3. 研究の方法

上記研究を実現するための研究方法を以下に示す。

本研究目標を達成するためには、これまで培ってきた TMDs や 3次元トポロジカル絶縁体(3DTI)等の配向性に優れた単結晶薄膜の作製が可能な分子線エピタキシー(MBE)技術をさらに高度化して積極的に活用するとともに、第一原理計算などの理論計算技術を瞬時に行える第一原理計算プログラムワーキングステーションの構築の二つの研究環境構築が必須である。そこでまず初めに、様々な 2DTI 原子層の作製が可能な MBE 装置となるように、既存 MBE 装置に新たな蒸着源および試料加熱機構の改良などを行った。その後、様々な結晶構造を仮定したバンド計算や、特定の材料のエッジ電子状態の特定を目指した第一原理計算プログラムワーキングステーションの構築を行った。本ワークステーションは、ARPES 実験を行いながらリモートで計算が行えるようネットワーク環境の構築を行うとともに、ARPES 実験のリモート制御も行えるよう改良した。現在、Materials Project のデータベースから様々な原子層材料や 2DTI などのデータを取得しながら自動計算可能なアルゴリズム構築を進めている。以上の原子層薄膜材料開発を行える研究環境の整備を行うことで、本研究を強力に推進した。

4. 研究成果

本研究によって得られた成果について研究項目ごとに分けて以下に示す。

(1) 水素終端 H-SiC 表面上のビスマセンおよび α -Bi の作り分け

水素終端 H-SiC 基板上で蜂の巣格子状に組んだ Bi 単原子で構成されたビスマセンにおいて 2DTI の可能性が理論的に提案がなされている。そこで H-SiC 上におけるビスマセンの電子状態を明らかにする目的で、H-SiC 表面上に Bi 原子を蒸着させ、ビスマセンの合成およびその電子状態を ARPES によって研究を行った²⁾。その結果、基板温度 650 度で Bi 原子を蒸着させた表面

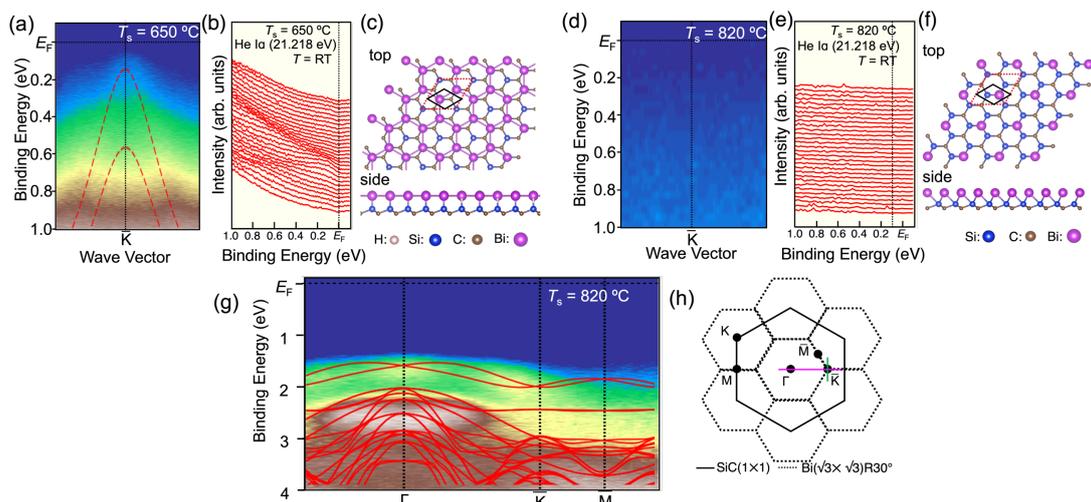


図1 (a,b) 基板温度 650°Cで蒸着した H-SiC 上のビスマセンにおける K 点周辺の(a)ARPES 強度プロットおよび(b)スペクトル. (c) H-SiC 上のビスマセンの模式図. (d-f) (a-c)と同じだが、 α -Bi に対応. (g) α -Bi の価電子帯の実験結果と理論計算(赤線)を重ねたもの. (h) SiC およびビスマセンまたは α -Bi が形成する $(\sqrt{3}\times\sqrt{3})R30^\circ$ 超構造の第一ブリルアンゾーン の模式図.

において、ビスマセンのブリルアンゾーンの K 点周辺において理論的に提案がなされているディラック電子状態の直接観測に成功したことから、基板温度 650 度ではビスマセンが成長すると結論した[図 1 (a-c)]。一方、基板温度 820 度で Bi 原子を蒸着させた場合は、ビスマセンで観測された超周期構造である $(\sqrt{3}\times\sqrt{3})R30^\circ$ と全く同様の LEED 像を観測するにもかかわらず、K 点のディラック電子状態が消滅する振る舞いを観測した[図 1 (d,e)]。そこで、この電子状態の起源を明らかにするために、第一原理計算において、ビスマセンよりも Bi の原子吸着数が少ない α -Bi と呼ばれる構造[図 1 (g)]を仮定してバンド計算を行った結果、 Γ 点でのみスピン縮退したラシュバ分裂し、1eV 以上のバンドギャップを持つ半導体的電子状態[ラシュバ絶縁体]を形成していることがわかり、その計算結果と良い一致を示すことを見出した。すなわち、これまで報告例のない α -Bi を SiC 上で作製することに初めて成功するとともに[図 1 (f)]、ラシュバ絶縁体であることを実験および理論計算によって明らかにした。

(2) 水素終端 H-SiC 表面上の α -Sb および α -Bi におけるラシュバ絶縁体

ビスマセンと同様な構造を持つ単原子層 Sb(アンチモネン)において理論的に提案されているディラック電子状態の有無を明らかにする目的で、H-SiC 表面上に Sb 原子を蒸着させ、アンチモネンの合成およびその電子状態を ARPES によって研究を行った³⁾。その結果、ビスマセンの合成温度の基板温度 650 度では、Sb 原子を蒸着させても $(\sqrt{3}\times\sqrt{3})R30^\circ$ 超構造が形成されないことから、アンチモネンの合成は困難であると結論した。一方、基板温度 820 度で Sb を蒸着すると、AREPS ではディラック電子状態が観測されないながらも、 $(\sqrt{3}\times\sqrt{3})R30^\circ$ 超構造を LEED 像において観測した。そこで、 Γ 点周辺の電子状態を調べたところ、 α -Bi と同様な電子状態の観測に成功し、その構造を仮定した第一原理計算結果と良い一致を示したことから、 α -Sb が SiC 表面上に形成したと結論した。さらに、スピン分裂が大きいと期待される α -Bi でスピン分解 ARPES を行った結果、面内方向でスピン偏極度を観測したことから、確かにラシュバ絶縁体を形成していると結論した。現在は第一原理計算とマイクロ-ARPES を用いたエッジ状態の可視化および同定の研究を進めている。

(3) 単層 1T-WTe₂ の局所構造歪みと電子状態変調

単層 1T-WTe₂ が 2DTI 候補物質であることが明らかにされるのみならず、近年、100K 以下で励起子凝縮を起こして 2DTI 化する励起子 2DTI の可能性が実験理論で指摘され注目を集めている。そこで、単層 1T'-WTe₂ をグラフェン上に作製し、その電子状態の温度変化から、励起子凝縮の起源を明らかにする研究を行った⁴⁾。その結果、400K 以上でもバンドギャップを形成しており、温度を下げることによってバンドギャップが増大する振る舞いを観測した。この結果から、励起子凝縮を伴う必要なく 2DTI に必要なバンドギャップを形成していると結論した。さらに、バンド分散のエネルギー準位が大きく変化するこれまで報告例のない特異な電子状態の振る舞いを観測した。この変化を定性的に明らかにする目的で、1T-WTe₂ における面内格子定数の変化や W 原子の変位など原子層への応力に着目した理論計算を行った結果、温度減少に伴うバンドギャップの変化およびバンド分散のエネルギー準位の変化が、1T-WTe₂ 内の W 原子の相対距離を大きくすることによって説明できることを見出した。この振る舞いは、温度減少によって歪みが増大する負の熱膨張係数を有する可能性がある興味深い結果である。以上の結果は ARPES に

よる精密測定および第一原理計算をフル活用することで得られた成果である。

以上の研究成果の他にも ARPES および第一原理計算を駆使することで、これまで報告例のない高次ネスティングによって駆動する電荷密度波相転移⁵⁾やモアレポテンシャルによる構造安定化⁶⁾など興味深い研究成果を上げることができた。

<引用文献>

- ① Y. Nakata, et al., NPG Asia Mater. 8, e321 (2016).
- ② K. Yaegashi et al., Langmuir 38, 13401 (2022).
- ③ K. Yaegashi et al., submitted.
- ④ R. Ando et al., et al., under review.
- ⑤ T. Kawakami, et al., npj 2D Mater. Appl. 7, 35 (2023).
- ⑥ Y. Saruta, et al., Adv. Sci. 10, 2304461 (2023).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 14件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 T. Kawakami, K. Nakayama, K. Sugawara, and T. Sato	4. 巻 -
2. 論文標題 In-situ topotactic chemical reaction for spectroscopy	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Spectroscopy	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 田邊陽一、伊藤良一、菅原克明	4. 巻 -
2. 論文標題 グラフェンによる3次元の局面の電子物性	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 固体物理	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 菅原克明、佐藤宇史	4. 巻 58
2. 論文標題 2次元遷移金属ダイカルコゲナイドの角度分解光電子分光 ダビデの星型秩序相	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 固体物理	6. 最初と最後の頁 623
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 14.A. Honma, D. Takane, S. Souma, K. Yamauchi, Y. Wang, K. Nakayama, K. Sugawara, M. Kitamura, K. Horiba, H. Kumigashira, K. Tanaka, T. Kim, C. Cacho, T. Oguchi, T. Takahashi, Yoichi Ando, and T. Sato	4. 巻 14
2. 論文標題 Antiferromagnetic topological insulator with selectively gapped Dirac cones	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 7396-1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-023-42782-6	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 Yanagizawa Koki, Sugawara Katsuaki, Kawakami Tappei, Ando Ryuichi, Yaegashi Ken, Nakayama Kosuke, Souma Seigo, Tanaka Kiyohisa, Kitamura Miho, Horiba Koji, Kumigashira Hiroshi, Takahashi Takashi, Sato Takafumi	4. 巻 7
2. 論文標題 Switching of charge-density wave by carrier tuning in monolayer TiTe ₂	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 104002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.7.104002	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 Saruta Yasuaki, Sugawara Katsuaki, Oka Hirofumi, Kawakami Tappei, Kato Takemi, Nakayama Kosuke, Souma Seigo, Takahashi Takashi, Fukumura Tomoteru, Sato Takafumi	4. 巻 10
2. 論文標題 Moire Assisted Realization of Octahedral MoTe ₂ Monolayer	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advanced Science	6. 最初と最後の頁 2304461
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/advs.202304461	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 Kawakami Tappei, Sugawara Katsuaki, Oka Hirofumi, Nakayama Kosuke, Yaegashi Ken, Souma Seigo, Takahashi Takashi, Fukumura Tomoteru, Sato Takafumi	4. 巻 7
2. 論文標題 Charge-density wave associated with higher-order Fermi-surface nesting in monolayer VS ₂	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 npj 2D Materials and Applications	6. 最初と最後の頁 35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41699-023-00395-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 -

1. 著者名 K. Sugawara, H. Kusaka, T. Kawakami, K. Yanagizawa, A. Honma, S. Souma, K. Nakayama, M. Miyakawa, T. Taniguchi, M. Kitamura, K. Horiba, H. Kumigashira, T. Takahashi, S. Orimo, M. Toyoda, S. Saito, T. Kondo, and T. Sato	4. 巻 23
2. 論文標題 Direct imaging of band structure for powdered rhombohedral BS by micro-focused ARPES	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 1673-1679
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.2c04048	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 Y. Tanabe, Y. Ito, K. Sugawara, S. Jeong, N. Kawada, S. Kimura, T. Takahashi, M.-W. Chen	4. 巻 34
2. 論文標題 Coexistence of Urbach-like localized states and metallic conduction channels in nitrogen-doped 3D curved graphene	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Materials	6. 最初と最後の頁 2205986-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adma.202205986	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 T. Taguchi, K. Sugawara, H. Oka, T. Kawakami, Y. Saruta, T. Kato, K. Nakayama, S. Souma, T. Takahashi, T. Fukumura, and T. Sato	4. 巻 107
2. 論文標題 Charge order with unusual star-of-David lattice in monolayer NbTe2	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L041105-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.107.L041105	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 K. Yaegashi, K. Sugawara, T. Kato, T. Takahashi, and T. Sato	4. 巻 38
2. 論文標題 Selective Fabrication of Bismuthene and a-Bi on Hydrogen-Terminated SiC(0001)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Langmuir	6. 最初と最後の頁 13401-13406
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.langmuir.2c01678	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 I. Watanabe, S. Souma, K. Nakayama, K. Sugawara, C. X. Trang, K. Segawa, K. Yamauchi, T. Oguchi, T. Takahashi, and T. Sato	4. 巻 -
2. 論文標題 Unusual evolution of electronic states and proximity-induced superconductivity in ultrathin bismuth	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 T. Kawakami, K. Sugawara, T. Kato, T. Taguchi, S. Souma, T. Takahashi, and T. Sato	4. 巻 104
2. 論文標題 Electronic States of Multilayer VTe ₂ : Quasi-One-Dimensional Fermi Surface and Implications to Charge-Density Wave	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 45136-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.045136	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 Y. Nakata, K. Sugawara, A. Chainani, C. Bao, S. H. Zhou, P.-Y. Chuang, C.-M. Cheng, S. Y. Zhou, T. Takahashi, and T. Sato	4. 巻 12
2. 論文標題 Robust Mott-insulator strengthened by lattice distortion in monolayer 1T-TaSe ₂ and 1T-NbSe ₂	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 5873-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-021-26105-1	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 D. Takane, Y. Kubota, K. Nakayama, T. Kawakami, K. Yamauchi, S. Souma, T. Kato, K. Sugawara, S. Ideta, K. Tanaka, M. Kitamura, K. Horiba, H. Kumigashira, T. Oguchi, T. Takahashi, K. Segawa, and T. Sato	4. 巻 21
2. 論文標題 Dirac semimetal phase and switching of band inversion in XMg ₂ Bi ₂ (X = Ba and Sr)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Report	6. 最初と最後の頁 21937-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-01333-z	査読の有無 無
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 M. Kitamura, S. Souma, A. Honma, D. Wakabayashi, H. Tanaka, A. Toyoshima, K. Amemiya, T. Kawakami, K. Sugawara, K. Nakayama, K. Yoshimatsu, H. Kumigashira, T. Sato, and K. Horiba	4. 巻 93
2. 論文標題 Development of a versatile microfocused ARPES system with Kirkpatrick-Baez mirror optics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 033906-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0074393	査読の有無 無
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41件(うち招待講演 12件/うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Katsuaki Sugawara
2. 発表標題 Anomalous charge orders of atomic-layer transition-metal dichalcogenides studied by high-resolution ARPES
3. 学会等名 International Workshop on 2D Materials (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 菅原克明、日下陽貴、川上竜平、柳沢幸紀、本間飛鳥、相馬清吾、中山耕輔、宮川仁、谷口尚、北村未歩、堀場弘司、組頭広志、高橋隆、折茂慎一、豊田雅之、斎藤晋、近藤剛弘、佐藤宇史
2. 発表標題 粉状半導体r-BSのマイクロARPES
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 佐々木洗輔, 柳沢幸紀, 安藤龍一, 川上竜平, 菅原克明, 高橋 隆, 佐藤宇史
2. 発表標題 "μ-ARPESによる単層TiCh ₂ (Ch=S, Se, Te)薄膜の微細電子状態"
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 安藤龍一, 川上竜平, 八重樫健, 柳沢幸紀, 菅原克明, 高橋隆, 佐藤宇史
2. 発表標題 原子層1T'-WTe ₂ 薄膜における電子状態の温度依存性: 高分解能ARPES
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 八重樫 健, 川上竜平, 菅原克明, 高橋 隆, 佐藤宇史
2. 発表標題 SiC上の単層BiおよびSb薄膜の作製と角度分解光電子分光
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 岩谷拓実、守谷歩美、中山耕輔、本間飛鳥、加藤剛臣、川上竜平、菅原克明、相馬清吾、田中清尚、北村未歩、堀場弘司、組頭広志、高橋隆、瀬川耕司、佐藤宇史
2. 発表標題 キャリア制御したカルコパイライトCdGeAs ₂ の高分解能ARPES
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 中山耕輔, 加藤剛臣, Yongkai Li, Zhiwei Wang, 菅原克明, 田中清尚, 高橋 隆, Yugui Yao, 佐藤宇史
2. 発表標題 アルカリ金属量子井戸の高分解能ARPES
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 Takemi Kato, Kosuke Nakayama, Yongkai Li, Zhiwei Wang, Katsuaki Sugawara, Kiyohisa Tanaka, Takashi Takahashi, Yugui Yao, Takafumi Sato
2. 発表標題 Quantum Well States in Alkali-Metal Thin Films Grown on Kagome Metals
3. 学会等名 The 7th Symposium for the Core Research Clusters for Materials Science and Spintronics and the 6th Symposium on International Joint Graduate Program in Materials Science and Spintronics
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Yaegashi, T. Kawakami, K. Sugawara, T. Takahashi, and T. Sato
2. 発表標題 Modulation of Dirac cones in Antiferromagnetic Topological Insulator NdBi Studied by Micro-ARPES
3. 学会等名 The 7th Symposium for the Core Research Clusters for Materials Science and Spintronics and the 6th Symposium on International Joint Graduate Program in Materials Science and Spintronics
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Asuka Honma, Daichi Takane, Seigo Souma, Kunihiro Yamauchi, Yongjian Wang, Kosuke Nakayama, Katsuaki Sugawara, Miho Kitamura, Koji Horiba, Hiroshi Kumigashira, Kiyohisa Tanaka, Timur K. Kim, Cephise Cacho, Tamio Oguchi, Takashi Takahashi, Yoichi Ando and Takafumi Sato
2. 発表標題 High-resolution ARPES study of monoatomic bismuth and antimony thin films on SiC
3. 学会等名 The 7th Symposium for the Core Research Clusters for Materials Science and Spintronics and the 6th Symposium on International Joint Graduate Program in Materials Science and Spintronics
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 菅原克明, 日下陽貴, 川上竜平, 柳沢幸紀, 本間飛鳥, 相馬清吾, 中山耕輔, 宮川仁, 谷口尚, 北村未歩, 堀場弘司, 組頭広志, 高橋隆, 折茂慎一, 豊田雅之, 斎藤晋, 近藤剛弘, 佐藤宇史
2. 発表標題 マイクロARPESによる粉状半導体r-BSの電子状態
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 柳沢幸紀, 川上竜平, 中山耕輔, 菅原 克明, 相馬清吾, 北村未歩, 堀場弘司, 組頭広志, 高橋 隆, 佐藤 宇史
2. 発表標題 単層TiS ₂ 薄膜の電子状態：高分解能μ-ARPES
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 菅原克明, 日下陽貴, 川上竜平, 柳沢幸紀, 本間飛鳥, 相馬清吾, 中山耕輔, 宮川仁, 谷口尚, 北村未歩, 堀場弘司, 組頭広志, 高橋隆, 折茂慎一, 豊田雅之, 斎藤晋, 近藤剛弘, 佐藤宇史
2. 発表標題 マイクロARPESによる粉状半導体r-BSの電子状態
3. 学会等名 第71回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 中山耕輔, 徳山敦也, 山内邦彦, 守谷歩美, 加藤剛臣, 菅原克明, 相馬清吾, 北村未歩, 堀場弘司, 組頭広志, 小口多美夫, 高橋 隆, 瀬川耕司, 佐藤宇史
2. 発表標題 マイクロ ARPES による Te(0001)の電子状態イメージング
3. 学会等名 日本物理学会2024春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 佐々木洗輔, 柳沢幸紀, 安藤龍一, 川上竜平, 菅原克明, 高橋 隆, 佐藤宇史
2. 発表標題 高分解能ARPESによる遷移金属ダイカルコゲナイドNiSe2のバンド構造
3. 学会等名 日本物理学会2024春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Takemi Kato, Kosuke Nakayama, Yongkai Li, Zhiwei Wang, Katsuaki Sugawara, Kiyohisa Tanaka, Takashi Takahashi, Yugui Yao, and Takafumi Sato
2. 発表標題 Quantum well states in Cs thin films epitaxially grown on the kagome superconductor CsV3Sb5
3. 学会等名 APS March Meeting 2024
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 加藤剛臣, 中山耕輔, Yongkai Li, Zhiwei Wang, 菅原克明, 田中清尚, 高橋 隆, Yugu Yao, 佐藤宇史
2. 発表標題 カゴメ金属CsV3Sb5上に成長したCs薄膜の電子状態: 高分解能ARPES
3. 学会等名 日本物理学会2024春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 八重樫 健, 川上竜平, 菅原克明, 高橋 隆, 佐藤宇史
2. 発表標題 原子層ZrSe2薄膜の高分解能ARPES
3. 学会等名 日本物理学会2024春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 八重樫健, 川上竜平, 菅原克明, 高橋 隆, 佐藤宇史
2. 発表標題 原子層ZrSe2薄膜の高分解能ARPES
3. 学会等名 PASPS-27(Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 柳沢幸紀, 菅原克明, 川上竜平, 中山耕輔, 相馬清吾, 高橋 隆, 佐藤宇史
2. 発表標題 原子層ZrSe2薄膜の高分解能ARPES
3. 学会等名 日本物理学会2024春季大会
4. 発表年 2024年

1 . 発表者名	Koki Yanagizawa, Tappei Kawakami, Kosuke Nakayama, Katsuaki Sugawara, Seigo Souma, Miho Kitamura, Koji Horiba, Hiroshi Kumigashira, Takashi Takahashi, and Takafumi Sato
2 . 発表標題	Systematic evolution of electronic structure in monolayer $TiXc_2$ ($Xc = S, Se, \text{ and } Te$)
3 . 学会等名	APS March Meeting 2024
4 . 発表年	2024年

1 . 発表者名	A. Honma, D. Takane, S. Souma, K. Yamauchi, Y. Wang, K. Nakayama, K. Sugawara, M. Kitamura, K. Horiba, H. Kumigashira, K. Tanaka, T. K. Kim, C. Cacho, T. Oguchi, T. Takahashi, Yoichi Ando, and T. Sato
2 . 発表標題	Novel Antiferromagnetic Topological Insulator $NdBi$ Studied by Micro-ARPES
3 . 学会等名	APS March Meeting 2024
4 . 発表年	2024年

1 . 発表者名	Ken Yaegashi, T. Kawakami, T. Kato, K. Sugawara, T. Takahashi, T. Sato
2 . 発表標題	High-resolution ARPES study of bismuthene on $H-SiC$
3 . 学会等名	International Workshop on Correlations and Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy (CORPES22) (国際学会)
4 . 発表年	2022年

1 . 発表者名	Ken Yaegashi, T. Kawakami, T. Kato, K. Sugawara, T. Takahashi, T. Sato
2 . 発表標題	High-resolution ARPES study of bismuthene on $H-SiC$
3 . 学会等名	29th International Conference on Low Temperature Physics (国際学会)
4 . 発表年	2022年

1. 発表者名 安藤龍一、川上竜平、八重樫健、柳沢幸紀、菅原克明、高橋隆、佐藤宇史
2. 発表標題 マイクロARPESによる原子層WTe ₂ の電子状態
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Yaegashi, T. Kawakami, T. Kato, K. Sugawara, T. Takahashi, T. Sato
2. 発表標題 Surface-termination-dependent electronic states in a kagome superconductor CsV ₃ Sb ₅ studied by micro-ARPES
3. 学会等名 The 6th Symposium for the Core Research Clusters for Materials Science and Spintronics, and the 5th Symposium on International Joint Graduate Program in Materials Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安藤龍一、川上竜平、八重樫健、柳沢幸紀、菅原克明、佐藤宇史、高橋隆
2. 発表標題 原子層WTe ₂ の相制御：高分解能ARPES
3. 学会等名 日本物理学会 年次大会 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Sugawara
2. 発表標題 Robust Mott-insulators of atomic-layer TMDs films studied by ARPES
3. 学会等名 Joint Workshop between Tsinghua, SUSTech & AIMR @ Zoom (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 菅原克明, 猿田康朗, 岡博文, 川上竜平, 加藤剛臣, 中山耕輔, 相馬清吾, 北村未歩, 堀場弘司, 組頭広志, 高橋隆, 福村知昭, 佐藤宇史,
2. 発表標題 原子層MoTe2の電子状態: マイクロARPES
3. 学会等名 2022年第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 菅原克明
2. 発表標題 マイクロ-ARPESを用いた原子層材料の電子物性開拓
3. 学会等名 機能性金属錯体懇談会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Sugawara
2. 発表標題 Electronic structure of 2D materials studied by micro-ARPES
3. 学会等名 11th International Workshop on 2D Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Sugawara
2. 発表標題 High-resolution ARPES studies of atomic-layer transition-metal dichalcogenides
3. 学会等名 15th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials 16th International Conference on Plasma-Nano Technology & Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 菅原克明
2. 発表標題 Micro-/nano-ARPESによる原子層物質の将来展望
3. 学会等名 1次元、2次元物質科学の展望と課題（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 菅原克明
2. 発表標題 MBE法と原子置換法を融合した原子層材料開発と電子物性解明
3. 学会等名 日本化学会 第103回春季大会、共催シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 菅原克明
2. 発表標題 面白そうな2Dシートを求めて
3. 学会等名 さがけ「未来材料&自在配列」合同企画（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Sugawara
2. 発表標題 High-resolution ARPES studies of atomic-layer NbSe ₂ and NbTe ₂ films
3. 学会等名 "1 day Joint Workshop of AIMR and Southern University of Science and Technology"（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菅原克明, 田口大樹, 岡博文, 川上竜平, 猿田康朗, 加藤剛臣, 中山耕輔, 相馬清吾, 高橋隆, 福村知昭, 佐藤宇史
2. 発表標題 高分解能ARPESによるNbTe ₂ 原子層の特異電子状態
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 K. Sugawara
2. 発表標題 High-resolution ARPES studies of Nb based transition-metal dichalcogenides films
3. 学会等名 The 12th Recent Progress in Graphene and two-dimensional Materials Research Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菅原克明
2. 発表標題 ARPESによる原子層材料の電子状態イメージング評価
3. 学会等名 応用物理学会 プラズマエレクトロニクス分科会第36回プラズマ新領域研究会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Sugawara
2. 発表標題 High-resolution ARPES studies of atomic-layer Nb-based TMDs
3. 学会等名 The 62nd Fullerenes- Nanotubes-Graphene General Symposium (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 菅原克明, 猿田康朗, 岡博文, 川上竜平, 加藤剛臣, 中山耕輔, 相馬清吾, 北村未歩, 堀場弘司, 組頭広志, 高橋隆, 福村知昭, 佐藤宇史
2. 発表標題 原子層MoTe2の特異電子状態: マイクロARPES
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
---------	---------