

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01821

研究課題名(和文)新奇2次元トポロジカル絶縁体物質の実現とスピン分解ARPESによる電子状態解析

研究課題名(英文) Realization of novel 2D topological insulator materials and its electronic structure analysis by spin-resolved ARPES

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) 12,200,000円

研究成果の概要(和文)：Bi単原子層(ビスマセン)などの2DTI候補物質をMBE法を用いて作製しARPES実験を行うことで、それらのディラック電子物性およびトポロジカルに非自明なエッジ物性に関する研究を行った。2DTI作製のために半導体水素加熱装置を建設することで、清浄な水素終端SiC半導体表面を得ることに成功した。その表面にBi蒸着を行うことでビスマセン由来のLEED像を観測するとともに、ARPESによってビスマセン由来のホールバンドの観測に成功した。今後、ディラック電子におけるバンドギャップやエッジ物性解明を行う予定である。また本研究では、ヘテロ構造化による2DTIのディラック電子状態制御の新たな手法を開拓した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2DTIを実験的に実現させ近年注目を集めているスピントロニクス分野へ応用展開を行うためには、成長する半導体基板のダングリングボンドを異なる原子で終端させ清浄な基板を得ることと、金属的な性質を持たない基板上に成長させることが強く求められる。本研究では、上記について解決することで、新たな2DTIを生成することが可能であり、2DTI特有のエッジ物性開拓に一つの道を開くことが可能となり、大きな意義を持つと研究者は考えている。

研究成果の概要(英文)：I have fabricated a 2DTI (two-dimensional topological insulator) like Bi monolayer film (called Bismuthene) by using a molecular-beam-epitaxy and characterized the electronic state like Dirac-electron and topological non-trivial edge state by angle-resolved photoemission spectroscopy (ARPES). Firstly, by developing a semiconductor hydrogen-annealing system, I obtained a clean hydrogen-terminated SiC (H-SiC) semiconductor surface. After depositing Bi atoms into H-SiC substrate, I clearly observed not only the superstructure patterns by LEED but also the hole-like dispersive feature by ARPES. These results indicate that we have succeeded in fabricating Bismuthene on H-SiC. In the future, I would clarify the band-gap feature of Dirac electrons and the edge-state in 2DTI. In this study, I also developed a new method for controlling the Dirac electrons by 2DTI heterostructures.

研究分野：光電子固体物性学

キーワード：2次元トポロジカル絶縁体 水素終端処理 ARPES MBE

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爆発的に行われている。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。さらに、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、これらの特徴から 2 次元トポロジカル絶縁体(2DTI)として研究が進められている。しかしながら、グラフェンはスピン軌道相互作用が小さいため、グラフェンの構成元素である炭素にかわる新たな単原子層材料の新たな探索が始まった。炭素と同じ IV 族であるシリコン(Si)・ゲルマニウム(Ge)・スズ(Sn)がグラフェンと同様な蜂の巣格子を組むことができればグラフェンよりも大きなスピン軌道相互作用を導入することができ、2DTI として振舞うことが期待できる。しかしながら、上記の単原子層物質は金属基板上で実現することが徐々に理解される一方、それらが持つはずの π バンドが金属基板の最表面におけるダングリングボンドや基板の金属的性質を担う電子軌道との混成によって消失してしまう可能性がある。また、IV 族の隣族である V 族元素ビスマス(Bi)およびアンチモン(Sb)の単原子層ビスマセン・アンチモセンもまた 2DTI の可能性が指摘されているが、そのエッジ状態の実験的検証は得られていない。

2. 研究の目的

上記の研究背景を踏まえ本研究では、2DTI 候補物質シリセン(Si 単原子層)・ゲルマネン(Ge 単原子層)・スタネン(Sn 単原子層)・ビスマセン・アンチモセン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し、スピン分解 ARPES 実験によるスピン偏極電子状態の直接観測およびスピントクスチャー(スピンの配向性)の決定によって、それらが 2DTI である確証を得ることで新規物性を創出することが目的である。上記 2DTI 候補物質を MBE 法で作製し、スピン分解 ARPES 実験を行うことで、2DTI の確証を得る。さらに、2DTI で実現していると期待されるヘリカルエッジ状態の直接観測および制御を行うことで、2DTI を基盤としたスピントロニクス応用への基盤技術構築を目指す。さらに本申請研究では、上記 2DTI 候補物質を金属基板以外の半導体基板や絶縁体基板上で作製するために、対称性などを含めた様々な結晶構造の情報を Materials Project と呼ばれるデータベース web site から取得し、第一原理計算を基にした機械学習を行うことで、2DTI 成長用半導体基板を選定することで新たな材料開発手法として発展させることも目的としている。

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。

まず、様々な 2DTI 原子層を作製するための新たな MBE 装置と半導体基板水素加熱処理装置を建設し(図 1)、新たな 2DTI 原子層材料作製装置の建設を行った。半導体基板水素加熱処理装置は半導体基板を原子レベルで平坦かつ水素原子で終端された表面を作製するために必要な装置である。その装置を用いて半導体基板表面処理を行った後、連結した MBE 装置に半導体基板材料を輸送し、Si・Ge・Sn・Bi・Sb を半導体表面に蒸着することで、単原子層 2DTI 材料の作製を行った。単原子層薄膜作製後、上記装置を連結した spin-ARPES 装置に輸送して電子状態評価を行った。また、本研究では、新たな試みとして 3 次元トポロジカル絶縁体(3DTI)を 2 次元ヘテロ接合系にする試みなども行ったので、それらの研究成果も併せて紹介する。さらに、成長基板選定を目指した第一原理計算を基にした機械学習システムを、Python と第一原理計算プログラム Quantum Espresso と融合することで、電子状態計算および成長基板選定を行うアルゴリズム開発も進めた。

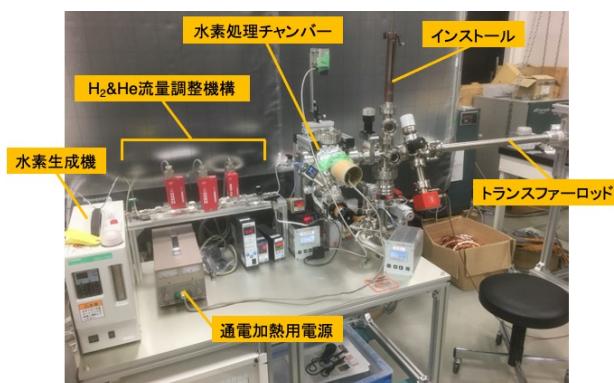


図 1:新たに建設した半導体基盤水素加熱処理装置。

4. 研究成果

本研究成果について下記に研究項目ごとに記す。

(1)水素終端 SiC 半導体基板の作製および電子状態解析

建設した水素終端加熱処理装置の性能評価を行うために、水素ガスを流入しながら半導体基板の加熱処理を行った。その結果、終端処理前後において LEED 測定を行った結果、SiC 由来の

明瞭な 1×1 構造とともに、ブロードな $\sqrt{3} \times \sqrt{3} R30^\circ$ 構造を観測した[図 2(a)]。この構造は Si と酸素原子が結合したシリケートと呼ばれる酸素残存構造であることが知られており、単原子層薄膜成長において阻害因子となる恐れがある。そこで、さらなる水素ガスによるエッチング作用が加速することを目的として、高温加熱したタングステンフィラメント

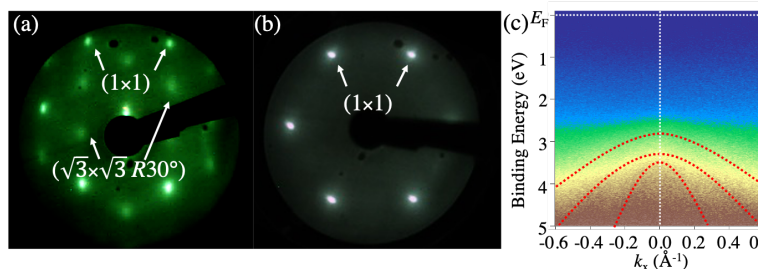


図 2 : 半導体 SiC 基板の水素終端処理後(a)および(b)水素ガス乖離による水素原子蒸着後の LEED 像。(c)水素原子蒸着 SiC 基板の ARPES 結果.

を導入することで水素ガスを水素原子に乖離させ、SiC 表面に直接蒸着する新たな試みを行った。その結果 SiC 由来の 1×1 構造のみ観測することに成功した[図 2(b)]。その表面において ARPES 測定を行った結果、SiC 由来のホールバンドを観測する一方、水素原子が抜けることで現れるダングリングボンド由来のフラットな不純物状態が観測されないことから[図 2(c)]、清浄な水素終端 SiC 基板(H-SiC 基板)の作製に成功したと結論した。本研究結果は、2DTI を含めた様々な単原子層材料を創製するための基盤技術になることが期待される。また、本研究において、Python と第一原理計算プログラム Quantum Espresso と併せることで新たな成長基板選定アルゴリズムの開発を行った。格子定数や対称性の情報を外部データベースから取得し、得られた成長基板と 2DTI の組み合わせを Python を用いて自動的に選定しながら、Quantum Espresso によるバンド計算を行うことが可能となる。現在もこのアルゴリズムの改良を進めて最適化を進めている。

(2) H-SiC 基板上的 Bi 単原子層薄膜の高分解能 ARPES

2DTI 候補物質 Bi 単原子層(ビスマセン)が SiC 上で生成される可能性が指摘されている。そのため、様々なグループがその作製に取り組んでいる。しかしながら、そのエッジに局在したヘリカルスピンエッジ状態やビスマセンの空間反転対称性

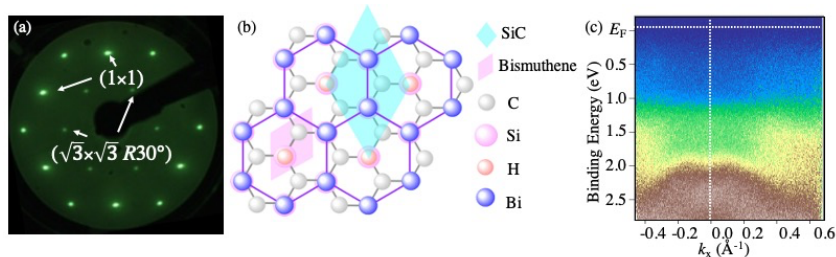


図 3:(a)H-SiC 表面上に Bi 蒸着後の LEED 像と(b)H-SiC 上のビスマセンの結晶構造の模式図。(c) H-SiC 上 Bi 単原子層の ARPES 結果.

の破れに起因したスピン・バレーディラック電子状態の形成の有無は未解明である。そこで本研究では、H-SiC 表面を加熱しながら水素を脱離し、そのダングリングボンドに Bi を蒸着させることでビスマセンを作製し、その電子状態を ARPES を用いて研究を行った。まず、H-SiC 表面に Bi 原子を蒸着した際の LEED 像を示す[図 3(a)]。SiC 由来の 1×1 構造のみならず、前述したシリケートとは異なるシャープな $\sqrt{3} \times \sqrt{3} R30^\circ$ の構造を観測した。この構造は図 3(b)に示すように SiC の単位格子に対して $\sqrt{3} \times \sqrt{3} R30^\circ$ の周期性を持ったビスマセンに対応することから、SiC 上にビスマセンが形成された可能性が示唆される。そこで、この表面の ARPES を行った結果を図 3(c)に示す。 Γ 周辺のフェルミ準位近傍で APRES 測定を行った結果、 Γ 点の 2.4 eV 周辺で縮退し、 Γ 点から離れる分裂するようなブロードなホールのバンド分散を観測した。また、1.5 eV で最大値を持つホールのバンド分散も観測した。以上の結果は、図 2(c)で観測された H-SiC のバンド分散結果とは大きく異なっていることから、H-SiC 上にビスマセンが生成され、絶縁体的な電子状態を形成していると結論した。現在、マイクロ ARPES を用いた詳細なバンド分散測定を進めながら、ディラック電子状態におけるバンドギャップの有無やエッジ状態の理論および実験を引き続き強力に進めている。

(3) Bi₂Te₃/Bi₂Se₃ ヘテロ構造薄膜のディラック電子状態制御

3DTI におけるディラック表面電子状態はこれまで、組成原子を異なる原子材料に置換することで行われてきた。しかしながら、不純物散乱の増大などの外因的機能阻害を防止するためには、置換などを行わないディラック電子状態の新たな制御法を生み出す必要がある。そこで着目したのが、3DTI 自身が持つ仕事関数に違いによる電子状態制御法である。本研究は当初予定にはなかったが、アルカリ金属蒸着吸着による電子キャリア注入を用いたディラック電子状態制御とは異なり、上記に述べた不純物散乱効果を著しく抑えることが可能である。そこで、異なる 3DTI 材料同士のヘテロ構造化によるディラック電子状態の制御を実現することを目的として、

Si 上に作製した 3DTI の Bi_2Se_3 薄膜に Bi_2Te_3 薄膜を 1 層(層数: n) ごと成長することで、その表面電子状態の変化を高分解能 ARPES を用いて実験を行った(図 4)。その結果、 Bi_2Se_3 上に 1QL- Bi_2Te_3 を成長後、ディラック電子状態の縮退点であるディラック点がフェルミ準位に向かってシフトする振る舞いを観測した。さらに成長させると 3QL まで系統的にシフトする振る舞いを観測した。この振る舞いは、仕事関数の違いによる Bi_2Te_3 からのホルドーピング効果によるものと結論した。さらに興味深いことは、 Bi_2Te_3 が持つ Dresselhaus 型スピン軌道相互作用を Bi_2Se_3 側のディラック電子状態に誘起させることが可能であることを実験的に見出した。以上の結果は、3DTI または 2DTI の同士のヘテロ構造化によって表面またはエッジ電子状態を制御することができる新たな提案である。本研究成果はアメリカ科学学会(ACS)において Editors' choice に選ばれた。

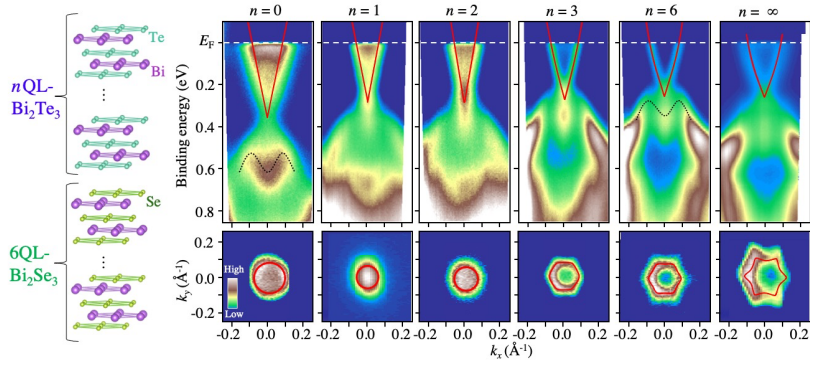


図 4: ARPES によって決定した Bi_2Se_3 薄膜上に Bi_2Te_3 薄膜を 1 層ごと成長した際の電子状態の変化。上部はバンド分散、下部がフェルミ面に対応する。

(4)強磁性半導体上の 2DTI の電子状態
トポロジカル絶縁体における表面およびエッジにおいて形成するディラック電子状態には縮退点(ディラック点)が存在する。そのディラック点に時間反転対称性の破れによってエネルギーギャップを誘起することができれば、異常量子ホール効果やトポロジカル磁気近接効果などの新量子現象の創発が期待される。時間反転対称性の破れを誘起するための一つの方法として、強磁性体と 2DTI または 3DTI とのヘテロ接合化があげられる。そこで本研究では、強磁性半導体 $\text{Cr}_2\text{Si}_2\text{Te}_6$ 上に 2QL- Bi_2Se_3 (3DTI を極限まで薄くすることで実現した 2DTI 候補物質)を MBE 法で作製し、その電子状態を高分解能 ARPES を用いて研究を行った(図 5)。その結果、3DTI の Bi_2Se_3 を薄くすることで表裏のディラック電子状態の混成効果によって生じる混成ギャップが、非磁性半導体 Si(111)表面に成長させた場合に比べて、 $\text{Cr}_2\text{Si}_2\text{Te}_6$ 上で増大することを見出した。バンド計算結果との比較から、 $\text{Cr}_2\text{Si}_2\text{Te}_6$ とディラック電子状態が混成することによって、バンドギャップが増大すると結論した。

(4)強磁性半導体上の 2DTI の電子状態

トポロジカル絶縁体における表面およびエッジにおいて形成するディラック電子状態には縮退点(ディラック点)が存在する。そのディラック点に時間反転対称性の破れによってエネルギーギャップを誘起することができれば、異常量子ホール効果やトポロジカル磁気近接効果などの新量子現象の創発が期待される。時間反転対称性の破れを誘起するための一つの方法として、強磁性体と 2DTI または 3DTI とのヘテロ接合化があげられる。そこで本研究では、強磁性半導体 $\text{Cr}_2\text{Si}_2\text{Te}_6$ 上に 2QL- Bi_2Se_3 (3DTI を極限まで薄くすることで実現した 2DTI 候補物質)を MBE 法で作製し、その電子状態を高分解能 ARPES を用いて研究を行った(図 5)。その結果、3DTI の Bi_2Se_3 を薄くすることで表裏のディラック電子状態の混成効果によって生じる混成ギャップが、非磁性半導体 Si(111)表面に成長させた場合に比べて、 $\text{Cr}_2\text{Si}_2\text{Te}_6$ 上で増大することを見出した。バンド計算結果との比較から、 $\text{Cr}_2\text{Si}_2\text{Te}_6$ とディラック電子状態が混成することによって、バンドギャップが増大すると結論した。

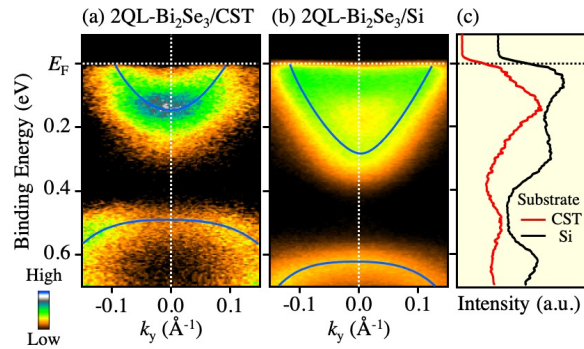


図 5: ARPES によって決定した(a) $\text{Cr}_2\text{Si}_2\text{Te}_6$ 上および (b)Si 上の 2QL- Bi_2Se_3 薄膜のバンド分散結果。(c) は(a)(b)における Γ 点の ARPES スペクトル。

トポロジカル絶縁体における表面およびエッジにおいて形成するディラック電子状態には縮退点(ディラック点)が存在する。そのディラック点に時間反転対称性の破れによってエネルギーギャップを誘起することができれば、異常量子ホール効果やトポロジカル磁気近接効果などの新量子現象の創発が期待される。時間反転対称性の破れを誘起するための一つの方法として、強磁性体と 2DTI または 3DTI とのヘテロ接合化があげられる。そこで本研究では、強磁性半導体 $\text{Cr}_2\text{Si}_2\text{Te}_6$ 上に 2QL- Bi_2Se_3 (3DTI を極限まで薄くすることで実現した 2DTI 候補物質)を MBE 法で作製し、その電子状態を高分解能 ARPES を用いて研究を行った(図 5)。その結果、3DTI の Bi_2Se_3 を薄くすることで表裏のディラック電子状態の混成効果によって生じる混成ギャップが、非磁性半導体 Si(111)表面に成長させた場合に比べて、 $\text{Cr}_2\text{Si}_2\text{Te}_6$ 上で増大することを見出した。バンド計算結果との比較から、 $\text{Cr}_2\text{Si}_2\text{Te}_6$ とディラック電子状態が混成することによって、バンドギャップが増大すると結論した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計19件（うち査読付論文 19件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Harada T., Sugawara K., Fujiwara K., Kitamura M., Ito S., Nojima T., Horiba K., Kumigashira H., Takahashi T., Sato T., Tsukazaki A.	4. 巻 2
2. 論文標題 Anomalous Hall effect at the spontaneously electron-doped polar surface of PdCoO ₂ ultrathin films	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 13282
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.2.013282	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 Trang C. X., Shimamura N., Nakayama K., Souma S., Sugawara K., Watanabe I., Yamauchi K., Oguchi T., Segawa K., Takahashi T., Ando Yoichi, Sato T.	4. 巻 11
2. 論文標題 Conversion of a conventional superconductor into a topological superconductor by topological proximity effect	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 159
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-019-13946-0	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 -
1. 著者名 Shigekawa Koshin, Nakayama Kosuke, Kuno Masato, Phan Giao N., Owada Kenta, Sugawara Katsuaki, Takahashi Takashi, Sato Takafumi	4. 巻 116
2. 論文標題 Dichotomy of superconductivity between monolayer FeS and FeSe	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 24470 ~ 24474
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1073/pnas.1912836116	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 Owada Kenta, Nakayama Kosuke, Tsubono Ryuji, Shigekawa Koshin, Sugawara Katsuaki, Takahashi Takashi, Sato Takafumi	4. 巻 100
2. 論文標題 Electronic structure of a Bi ₂ Te ₃ /FeTe heterostructure: Implications for unconventional superconductivity	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 64518
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.100.064518	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 Nakata Y., Sugawara K., Chainani A., Yamauchi K., Nakayama K., Souma S., Chuang P.-Y., Cheng C.-M., Oguchi T., Ueno K., Takahashi T., Sato T.	4. 巻 3
2. 論文標題 Dimensionality reduction and band quantization induced by potassium intercalation in 1T-HfTe2	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 71001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.3.071001	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 Sugawara Katsuaki, Nakata Yuki, Fujii Kazuki, Nakayama Kosuke, Souma Seigo, Takahashi Takashi, Sato Takafumi	4. 巻 99
2. 論文標題 Monolayer VTe2: Incommensurate Fermi surface nesting and suppression of charge density waves	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 241404
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.241404	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 Ichinokura Satoru, Nakata Yuki, Sugawara Katsuaki, Endo Yukihiro, Takayama Akari, Takahashi Takashi, Hasegawa Shuji	4. 巻 99
2. 論文標題 Vortex-induced quantum metallicity in the mono-unit-layer superconductor NbSe2	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 220501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.220501	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 Y, Ichinokura S, Akiyama R, Takayama A, Sugawara K, Nomura K, Takahashi T, Hasegawa S	4. 巻 30
2. 論文標題 Weak localization in bilayer graphene with Li-intercalation/desorption	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 305701 ~ 305701
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-648X/aaccc4	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 Shimamura Natsumi, Sugawara Katsuaki, Sucharitakul Sukrit, Souma Seigo, Iwaya Katsuya, Nakayama Kosuke, Trang Chi Xuan, Yamauchi Kunihiko, Oguchi Tamio, Kudo Kazutaka, Noji Takashi, Koike Yoji, Takahashi Takashi, Hanaguri Tetsuo, Sato Takafumi	4. 巻 12
2. 論文標題 Ultrathin Bismuth Film on High-Temperature Cuprate Superconductor Bi ₂ Sr ₂ CaCu ₂ O ₈ + as a Candidate of a Topological Superconductor	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 10977 ~ 10983
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnano.8b04869	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 Yamada Keiko, Souma Seigo, Yamauchi Kunihiko, Shimamura Natsumi, Sugawara Katsuaki, Trang Chi Xuan, Oguchi Tamio, Ueno Keiji, Takahashi Takashi, Sato Takafumi	4. 巻 18
2. 論文標題 Ultrathin Bismuth Film on 1T-TaS ₂ : Structural Transition and Charge-Density-Wave Proximity Effect	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 3235 ~ 3240
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.8b01003	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 Nakata Yuki, Yoshizawa Takuya, Sugawara Katsuaki, Umemoto Yuki, Takahashi Takashi, Sato Takafumi	4. 巻 1
2. 論文標題 Selective Fabrication of Mott-Insulating and Metallic Monolayer TaSe ₂	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ACS Applied Nano Materials	6. 最初と最後の頁 1456 ~ 1460
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnanm.8b00184	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 Nakata Yuki, Sugawara Katsuaki, Ichinokura Satoru, Okada Yoshinori, Hitosugi Taro, Koretsune Takashi, Ueno Keiji, Hasegawa Shuji, Takahashi Takashi, Sato Takafumi	4. 巻 2
2. 論文標題 Anisotropic band splitting in monolayer NbSe ₂ : implications for superconductivity and charge density wave	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 npj 2D Materials and Applications	6. 最初と最後の頁 1 ~ 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41699-018-0057-3	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 Umemoto Yuki, Sugawara Katsuaki, Nakata Yuki, Takahashi Takashi, Sato Takafumi	4. 巻 12
2. 論文標題 Pseudogap, Fermi arc, and Peierls-insulating phase induced by 3D-2D crossover in monolayer VSe ₂	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nano Research	6. 最初と最後の頁 165 ~ 169
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12274-018-2196-4	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 Nakayama Kosuke, Shigekawa Koshin, Sugawara Katsuaki, Takahashi Takashi, Sato Takafumi	4. 巻 13
2. 論文標題 Unusual Temperature Evolution of Quasiparticle Band Dispersion in Electron-Doped FeSe Films	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Symmetry	6. 最初と最後の頁 155 ~ 155
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/sym13020155	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 Sato Takumi, Sugawara Katsuaki, Kato Takemi, Nakata Yuki, Souma Seigo, Yamauchi Kunihiko, Oguchi Tamio, Takahashi Takashi, Sato Takafumi	4. 巻 3
2. 論文標題 Manipulation of Dirac Cone in Topological Insulator/Topological Insulator Heterostructure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Applied Electronic Materials	6. 最初と最後の頁 1080 ~ 1085
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaem.0c00918	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 Yang Li, Wu Hao, Zhang Liang, Zhang Wenfeng, Li Luying, Kawakami Tappei, Sugawara Katsuaki, Sato Takafumi, Zhang Gaojie, Gao Pengfei, Muhammad Younis, Wen Xiaokun, Tao Boran, Guo Fei, Chang Haixin	4. 巻 31
2. 論文標題 Highly Tunable Near Room Temperature Ferromagnetism in Cr Doped Layered Td WTe ₂	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Functional Materials	6. 最初と最後の頁 2008116 ~ 2008116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adfm.202008116	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 Tanabe Yoichi, Ito Yoshikazu, Sugawara Katsuaki, Koshino Mikito, Kimura Shojiro, Naito Tomoya, Johnson Isaac, Takahashi Takashi, Chen Mingwei	4. 巻 32
2. 論文標題 Dirac Fermion Kinetics in 3D Curved Graphene	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Materials	6. 最初と最後の頁 2005838 ~ 2005838
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adma.202005838	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 Takafumi, Yamada Keiko, Kosaka Takao, Souma Seigo, Yamauchi Kunihiko, Sugawara Katsuaki, Oguchi Tamio, Takahashi Takashi	4. 巻 102
2. 論文標題 Unusual temperature evolution of the band structure of Bi(111) studied by angle-resolved photoemission spectroscopy and density functional theory	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 085112 ~ 085112
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.085112	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 Kato Takemi, Sugawara Katsuaki, Ito Naohiro, Yamauchi Kunihiko, Sato Takumi, Oguchi Tamio, Takahashi Takashi, Shiomi Yuki, Saitoh Eiji, Sato Takafumi	4. 巻 4
2. 論文標題 Modulation of Dirac electrons in epitaxial Bi ₂ Se ₃ ultrathin films on van der Waals ferromagnet Cr ₂ Si ₂ Te ₆	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 084202 ~ 084202
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.4.084202	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19件（うち招待講演 8件 / うち国際学会 11件）

1. 発表者名 菅原克明, 中田優樹, 川上竜平, 佐藤匠, 田口大樹, 加藤剛臣, 高橋隆, 佐藤宇史
2. 発表標題 原子層TiSe _{2-x} の高分解能ARPES
3. 学会等名 日本物理学会2020年年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Sugawara, Y. Nakata, K. Fujii, K. Nakayama, Seigo Souma, T. Takahashi, and T. Sato
2. 発表標題 Electronic structure of monolayer VTe ₂ film studied by ARPES
3. 学会等名 The 3rd Symposium for The Core Research Clusters for Materials Science and Spintronics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Sugawara
2. 発表標題 High-resolution ARPES studies of atomic-layer TMDs controlled crystal structure
3. 学会等名 Carrier doping in two-dimensional layered materials, Centro Congressi Federico II (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Sugawara, Y. Umemoto, Y. Nakata, T. Takahashi, and T. Sato
2. 発表標題 Electronic structure of atomic-layer VSe ₂ studied by ARPES
3. 学会等名 Recent Progress in Graphene Research 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菅原克明, 中田優樹, 藤井和樹, 中山耕輔, 相馬清吾, 高橋隆, 佐藤宇史
2. 発表標題 VX ₂ (X=Se, Te)原子層薄膜のCDW相転移: 高分解能ARPES
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菅原克明, 中田優樹, 吉澤拓也, 梅本侑輝, 高橋隆, 佐藤宇史
2. 発表標題 2層グラフェン上のTaSe2原子層の高分解能ARPES
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Katsuaki Sugawara, Yuki Nakata, Yuki Umemoto, T. Takahashi, and T. Sato
2. 発表標題 Electronic structure of monolayer TiSe2 studied by high-resolution ARPES
3. 学会等名 The 14th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures and The 26th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 菅原克明, 中田優樹, 梅本侑輝, 高橋隆, 佐藤宇史
2. 発表標題 原子層VSe2の高分解能ARPES
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 Katsuaki Sugawara, Yuki Umemoto, Yuki Nakata, T. Takahashi, and T. Sato
2. 発表標題 Electronic structure of monolayer VSe2 studied by high-resolution ARPES
3. 学会等名 The 2nd Symposium for World Leading Research Centers (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Sugawara, T. Takahashi
2. 発表標題 Superconducting graphene
3. 学会等名 12th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 菅原克明
2. 発表標題 遷移金属ダイカルコゲナイド原子層の高分解能ARPES
3. 学会等名 第1回新奇二次元デバイス・物質科学ワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Sugawara
2. 発表標題 High-resolution ARPES studies of 2D materials related superconductors
3. 学会等名 First International Workshop on 2D Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018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 3RD-JPAN-EU FLAGSHIP WORKSHOP ON GRAPHENE AND RELATED 2D MATERIALS (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Sugawara
2. 発表標題 High-resolution ARPES studies of group-V atomic-layer transition metal dichalcogenides
3. 学会等名 2nd International Workshop on 2D Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菅原克明
2. 発表標題 グラフェン上の遷移金属ダイカルコゲナイド原子層の高分解能ARPES
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Sugawara
2. 発表標題 The electronic state of atomic-layer TMDs studied by high-resolution ARPES
3. 学会等名 The 6th International Workshop on 2D Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菅原克明、川上竜平、加藤剛臣、田口大樹、猿田康朗、久保田雄也、坪野竜治、渡辺夏芽、北村未歩、堀場弘司、組頭広志、上野啓司、中山耕輔、相馬清吾、高橋 隆、佐藤宇史
2. 発表標題 マイクロARPESによる遷移金属ダイカルコゲナイド薄膜の電子状態
3. 学会等名 日本物理学会2021年年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Sugawara, Y. Saruta, T. Kato, T. Taguchi, T. Takahashi and T. Sato
2. 発表標題 Selective fabrication of atomic-layer 1H- and 1T' - MoTe2 films
3. 学会等名 The 4th International Symposium for The Core Research Cluster for Spintronics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中田優樹, 菅原克明, C. Bao, S. Zhou, P. Y. Chuang, C. -M Cheng, 高橋隆, A. Chainani, S. Y. Zhou, 佐藤宇史
2. 発表標題 1T-XSe2(X = Na, Ta)原子層のモット絶縁相制御: 高分解能ARPES
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 菅原 克明, 高橋 隆, 佐藤 宇史	4. 発行年 2020年
2. 出版社 エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 295-303
3. 書名 グラフェンから広がる二次元物質の新技术と応用	

1. 著者名 菅原克明, 高橋隆	4. 発行年 2019年
2. 出版社 アグネ技術センター	5. 総ページ数 172-177
3. 書名 放射光利用の手引き、第4部	

1. 著者名 菅原克明, 佐藤宇史, 高橋隆	4. 発行年 2020年
2. 出版社 エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 91-99
3. 書名 ポストグラフェン材料の創製と用途開発最前線	

〔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
---------	---------