

令和 3 年 6 月 11 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：18H01160

研究課題名(和文) スピン分解ARPESによるフェルミオロジーに基づいた革新的原子層超伝導体の開発

研究課題名(英文) Development of novel atomic layer superconductor based on fermiology by spin-resolved ARPES

研究代表者

高橋 隆 (Takahashi, Takashi)

東北大学・材料科学高等研究所・学術研究員

研究者番号：00142919

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)：電子構造評価を基軸とした物質開発効率の飛躍的な向上を目的として、超高分解能スピン分解光電子分光装置と原子層薄膜作製MBE装置および試料評価槽を、同一の超高真空下で連動して稼働させるプラットフォームの構築を行った。構築したプラットフォームにより、鉄系高温超伝導体、遷移金属カルコゲナイド、高温超伝導ハイブリッド、トポロジカル原子層ハイブリッドなど、様々な原子層物質やその接合系を作製し、その電子構造をARPES実験により即座の直接的な観測を行い、高温超伝導機構や2次元超伝導体の物性、トポロジカル超伝導について多くの知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で構築した原子層プラットフォームにより、鉄系高温超伝導の超伝導機構が薄膜内の電子間相互作用によるものであることや、Pb/TlBiSe<sub>2</sub>において表面ディラック電子状態が6-7nmもの長さでPb薄膜内に到達していることを見出しことは、超伝導物性の新しい知見として大変意義深い。また、プラットフォームが技術的に確立したことで、ARPESに限らず他の様々な実験で原子層物質の測定が可能となり、今後、原子層物質の物性の解明やデバイスへの応用研究が大きく発展することが期待される。

研究成果の概要(英文)：In order to improve the efficiency of materials development based on the electronic structure, we have constructed a platform in which an ultrahigh-resolution spin-resolved photoemission spectroscopy system, an atomic layer thin film fabrication MBE system, and a sample evaluation chamber are operated in conjunction with each other under the same ultrahigh vacuum condition. We have fabricated various atomic layer materials and their junctions, such as iron-based high-T<sub>c</sub> superconductors, transition metal chalcogenides, high-T<sub>c</sub> superconductor hybrids, and topological insulator hybrids. By using the platform, we have immediately observed their electronic structures by ARPES experiments without contamination by exposure to air. Our definitive and accurate experiment has provided much knowledge about the mechanism of high-T<sub>c</sub> superconductivity, physical properties of 2D superconductors, and topological superconductivity.

研究分野：光電子固体物性学

キーワード：スピン分解光電子分光 分子線エピタキシー 高温超伝導体 トポロジカル絶縁体 遷移金属ダイカルコゲナイド 原子層物質 ディラック半金属 トポロジカル超伝導

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

近年、単一原子層物質であるグラフェン、表面ディラック電子状態を持つトポロジカル絶縁体、バルクの超伝導転移温度を遥かに凌駕する FeSe 原子層超薄膜など、新たな機能性物質の発見が、超薄膜や結晶表面などの数原子層領域に局在した 2 次元電子系で相次ぎ、大きな注目を集めた。これらの物質群では、物質中のディラック方程式や電子状態におけるトポロジーなど、新たな物理概念の導入と、それに基づく新奇な巨視的量子現象の予測が活発に報告されている。その一方で、理論的に提案されている新現象の多くはまだ実験的な検証段階にあり、これらを実現するための研究が精力的に進められている。また、原子層薄膜はデバイス開発研究とも強く関係し、その研究領域は基礎だけでなく応用に至るまでの幅広い分野にまで波及している。

原子層数層で構成される物質の研究には、その電子構造を曖昧さなく同定し、2 次元系固有の物質相であることを確立しなければならない。この点において、物質の電子状態を直接決定することのできる高分解能角度分解光電子分光(ARPES)は、これら原子層物質の確立と、その機能のさらなる高度化に大きな役割を果たしてきた。その実証として、申請者らは、高分解能 AREPS を用いたバンド構造およびフェルミ面トポロジーの精密な制御を行うことで、FeSe 原子層薄膜や 2 層グラフェン層間化合物の超伝導体化に成功した。しかしながら、液体窒素温度を超える原子層超伝導体はまだ実現しておらず、それを実現するためには、高温超伝導の発現に関与する電子構造について、種々の物質で系統的かつ網羅的に研究を推進する必要がある。

### 2. 研究の目的

超伝導発現の決め手となるのは、フェルミ準位近傍の数~数 10 meV のエネルギースケールの微細電子構造である。従って、新しい超伝導体開発の効率を向上させるには、電子構造を精密に制御しながら物質を高度化していく必要がある。本研究では、この開発プロセスを加速するために、高分解能 ARPES による電子状態の完全評価と MBE(分子線エピタキシー)法による原子層試料作製を同一のプラットフォームに一体化して行った。原子層物質においては、成長基板との格子整合や吸着物質等との相互作用により電子バンドのエネルギー相互位置の大幅な変調や、バンドベンディングによる幅広いレンジでのキャリア制御が可能である(図 1)。さらに空間反転対称性の破れで増大したスピン軌道相互作用により、バンドのスピン分裂を引き起こすこともできる。これら

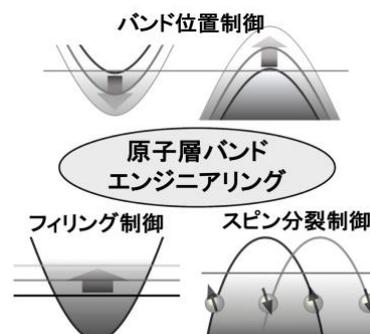


図 1: 原子層物質の電子構造制御

は 3 次元バルク物質にはない原子層物質特有の多彩な自由度であり、単一の母物質においても広範な超伝導探索を可能にする。本研究では、電子状態評価と原子層薄膜作製を高度に融合した物質材料開発を強力に推進することで、新しい超伝導体の創成を目指す。具体的な原子層超伝導体を作り出すことで、本研究の材料開発方針を、より広範な原子層物質やバルク物質へと拡張し、より多くの高機能材料の研究・開発に貢献することを目指した。また、原子層高温超伝導体の実現は、薄膜超伝導デバイスへの応用の道を拓くだけでなく、超伝導接合系におけるマヨラナ準粒子の検出など、エキゾチックな基礎量子現象の観測・解明にも大きく貢献すると考えられる。

### 3. 研究の方法

電子構造評価を基軸とした物質開発効率の飛躍的な向上を目的として、超高分解能スピン分解光電子分光装置と原子層薄膜作製 MBE 装置および試料評価槽を、同一の超高真空下で連動して稼働させるプラットフォームの構築を行った。異なるシステム間で MBE 成膜した試料を超高真空下で移送するため、ポータブル UHV システムを作製し、これを用いた Pb 薄膜の移送を行った。極低温 ARPES により量子化したバンドと超伝導ギャップを観測したことから、実験に十分な水準の試料移送に成功したと判断した。さらに原子層超伝導薄膜作製プラットフォームの拡張として試料ホルダの標準化とポータブル真空搬送装置の作成を行い、東北大で作成した試料を放射光まで移送し、明瞭な ARPES スペクトルを観測することに成功した。さらに、放射光光源による精密な電子状態解析を行うために、KEK-PF の高分解能 AREPS ビームラインにおいて MBE 薄膜作製装置を建設し、これをエンドステーションと接続した。

空間分解能向上のために、電子分析アナライザーの電子光学系の調整を行うとともに、レーザ

一の集光位置を高精度でアライメントするための測定点計測器を導入した。さらに、装置各部の数ミクロン以下の振動をレーザーで評価し、測定真空槽内の試料への振動の低減対策を行なうとともに、コンピュータにエンコーダーを導入し、試料の3次元座標の高安定化を達成した。また、高い空間分解能と高いエネルギー分解能を同時に実現するために、高調波発生装置の設置と光学系の構築および調整を行い、第四次高調波による真空紫外領域のレーザー光の発生に成功した。レーザー光の集光光学系を改良することで40  $\mu\text{m}$  以下の微小スポットを得ることに成功した。試料の超伝導ギャップの高精度観測のために、装置の電子レンズパラメーターやスリット調整し分解能を向上させ、さらに試料マニピュレーター制御の低温化を行った。測定効率の向上とコロナ禍における無人測定を行うために、電子状態の自動マッピングの制御および解析システムの実装を行った。

#### 4. 研究成果

##### 【原子層高温超伝導体】

単層で65 Kの高温超伝導を示すFeSe/SrTiO<sub>3</sub>原子層超薄膜の超伝導機構としては、FeSeにおける磁気軌道ゆらぎの他に、STO基板における酸素(O)の格子振動との結合や、STO基板からの電荷移動など、原子層であるが故に単体物質よりも多くの機構が提案されている。この点について一つの回答を得るために、同じSTO基板の上に非超伝導の参照物質であるFeS原子層を作製し、APRES測定を行った(図2)。FeSは硫黄(S)の高い蒸気圧のためMBE法では直接成膜が困難であったので、一度FeTeを成膜し、その後TeをSで置換するトポタクティック反応を用いてFeS原子層薄膜を作成した。本研究で構築した原子層プラットフォームにより、超高真空下で試料を移送し高分解能ARPESによる電子構造を評価した結果、FeSにもFeSeと同程度の基板からの電子ドーピングが起きていることを明らかにした。もし原子層超伝導がこのキャリア数の増加と氧化物基板の高振動フォノンとの結合に起因するものだとすれば、FeSにも超伝導が起こるはずではあるが、単原子層FeSにおいて超伝導が観測されないことから、鉄系高温超伝導体の超伝導機構には薄膜内の電子間相互作用が重要であると考えられる。

銅酸化物高温超伝導体で議論されてきたように、多体相互作用を反映する準粒子スペクトルの精密な形状解析も超伝導機構の検討に必須である。単原子層FeSe/STOおよび、電子ドーピングした20原子層FeSe/STOの超伝導状態における準粒子バンドを高精度で測定した結果、通常のボゴリウボフ準粒子では説明できない分散構造を見出した。どちらの場合においても、ギャップ関数 $\Delta(\mathbf{k})$ はフェルミ波数( $k_F$ )近傍でのみ局所的に大きい値を示し、10-20 meVの低エネルギーボゾンとの結合構造を示す。このような特徴的なスペクトル構造が両極端(1MLと20ML)な膜厚で観測されていることは、両者における超伝導機構の共通性と薄膜内相互作用の重要性を示唆する。

以上の結果から、原子層鉄系高温超伝導体の超伝導機構は、基板との相互作用や電荷移動よりは、むしろ原子層薄膜内における電子間相互作用が重要であると結論した。鉄系超伝導体は多バンド超伝導であるために、スピン揺らぎに加えて軌道揺らぎが発達しており、それらが高い $T_c$ の実現に寄与するかについては、ARPESによる超伝導ギャップ測定に加えて、STMなどの顕微分光による電子秩序の観測、RIXSや中性子散乱などによるボゾン励起の観測を、原子層物質で行うことが重要であると考えられる。

銅酸化物高温超伝導体で議論されてきたように、多体相互作用を反映する準粒子スペクトルの精密な形状解析も超伝導機構の検討に必須である。単原子層FeSe/STOおよび、電子ドーピングした20原子層FeSe/STOの超伝導状態における準粒子バンドを高精度で測定した結果、通常のボゴリウボフ準粒子では説明できない分散構造を見出した。どちらの場合においても、ギャップ関数 $\Delta(\mathbf{k})$ はフェルミ波数( $k_F$ )近傍でのみ局所的に大きい値を示し、10-20 meVの低エネルギーボゾンとの結合構造を示す。このような特徴的なスペクトル構造が両極端(1MLと20ML)な膜厚で観測されていることは、両者における超伝導機構の共通性と薄膜内相互作用の重要性を示唆する。

##### 【原子層遷移金属カルコゲナイド】

MBE法により2BLグラフェン上に成膜した単原子層TaSe<sub>2</sub>において、原子層プラットフォームによりバンド構造を直接観測した結果、異なる結晶構造をもつ1T-TaSe<sub>2</sub>と1H-TaSe<sub>2</sub>を、成長温度の制御により作り分けられることを見出した。さらに、1H-TaSe<sub>2</sub>はhalf-fillingの金属物質である一方、1T-TaSe<sub>2</sub>はモット絶縁体であったことから、原子層TaSe<sub>2</sub>のみを用いたplaner型の

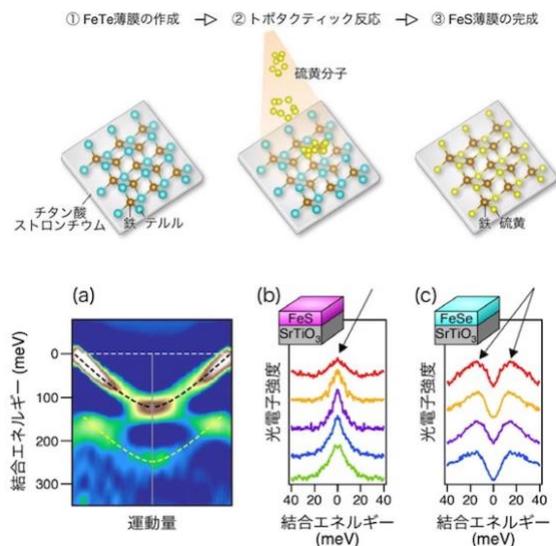


図2: (上) 原子層 FeS の成膜法. (下)(a)単原子層 FeS のバンド構造. (b) 単原子層 FeS および(c)FeSe の対称化光電子スペクトル

FET 素子の構築や、ドーピングや圧力による金属-絶縁体転移制御の可能性を示唆した。

CDW 物質である  $\text{VSe}_2$  においては、原子層化によって電子構造を2次的にしたところ、CDW 転移温度以上において擬ギャップ構造を観測した。この特徴は銅酸化物高温超伝導体と類似しており、原子層  $\text{VSe}_2$  が超伝導母物質となる可能性を示唆する。

原子層プラットフォームにより、4 探針プローブによる単原子層超伝導体  $\text{NbSe}_2$  の磁場下における電気抵抗実験に成功した(図3)。保護膜などの影響が全くない清浄な状態で低磁場領域の電子相図を明らかにした結果、超伝導相と常伝導相の間において、ゆらぎによるクーパー対の位相が一部壊れたボーズ金属相の発現を見出した。

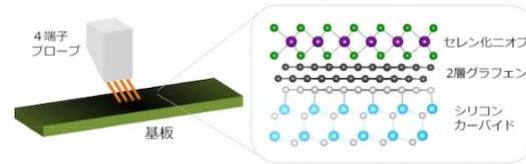


図3:単原子層  $\text{NbSe}_2$  の4探針 STM

以上の結果から、遷移金属カルコゲナイドにおける CDW や超伝導などの秩序が、原子層において2次元化することで強い揺らぎとして発達すると結論した。高温超伝導化するにはさらにキャリアドーピングが必要と考えられるが、これが揺らぎや相互作用を抑制せずに電子数を増やせるかどうかは、更なる研究が必要である。また、本研究において原子層プラットフォームが、ARPES 以外にも電気伝導実験などの他の物性測定にも有効であることを実証した。

#### 【高温超伝導ハイブリッド】

強いスピン軌道作用によりスピン縮退の解けたバンドに  $s$  波超伝導を誘起させることでマヨラナ準粒子を発現させようとする研究が大変精力的に行われているが、超伝導ギャップが小さく、転移温度が低いという問題がある。これを克服するため、銅酸化物高温超伝導体  $\text{Bi2212}$  の上に、強いスピン軌道相互作用をもつ  $\text{Bi}$  超薄膜を成長させた原子層ハイブリッドを作製し、その電子構造を測定した。 $\text{Bi}$  薄膜はある程度以上の膜厚では(111)方位に成長するが、4BL 以下の超薄膜領域において、基板である  $\text{Bi2212}$  の格子により整合する(110)方位に成長することを見出した。この超薄膜  $\text{Bi}(110)/\text{Bi2212}$  において、 $\text{Bi}$  のフェルミ面上の超分解能測定の結果、基板の  $T_c$  (130 K)以下において最大 20 meV のギャップの観測に成功した。同様に作成した超薄膜  $\text{Bi}(110)/\text{Bi2201}(T_c=0\text{K})$  ではそのようなギャップが観測されないことから、超薄膜  $\text{Bi}(110)/\text{Bi2212}$  において観測したエネルギーギャップは基板の超伝導により誘起された近接超伝導ギャップであると結論した。マヨラナ準粒子の観測には、磁場を面直に印加して超伝導ギャップより大きなゼーマン分裂を引き起こす必要があるが、 $\text{Bi}$  の大きな  $g$  因子( $\sim 200$ )により、 $\text{Bi}(110)/\text{Bi2212}$  は比較的低い磁場( $\sim 1\text{T}$ )と高温で超伝導マヨラナモードの観測が可能と考えられる。

#### 【トポロジカル原子層ハイブリッド】

トポロジカル絶縁体の表面ディラック電子状態は、強磁性や超伝導など様々な秩序を導入することで、異常量子ホール効果やマヨラナ準粒子などの、トポロジカルな量子物性を発現する。これを電子構造の立場から調べるため、トポロジカル絶縁体を用いた原子層ハイブリッド物質を作製し、高分解能 ARPES を行った。

マヨラナモードを観測するには表面敏感な手法が必要であることから、原子層薄膜/超伝導基板を用いるよりは、表面ディラック状態などのスピン軌道分裂した電子状態の上に、原子層超伝導薄膜を成長させ、マヨラナモードを物質最表面に発現させた方が良いと考えられる。その目的で、3次元トポロジカル絶縁体  $\text{TlBiSe}_2$  の上に  $\text{Pb}$  超薄膜を成長させ、その電子構造を観測した。その結果、 $\text{Pb}$  超薄膜の量子化井戸準位が  $\text{TlBiSe}_2$  の表面ディラック電子状態とバンド混成することで、元の  $\text{Pb}$  とは異なるフェルミ面が形成されることを見出した。驚くべきことに、このスピン分裂した混成バンドは 20ML 程度の膜厚でも有意に観測され、特に、この混成バンドのフェルミ波数において  $\text{Pb}$  薄膜の転移温度以下 ( $T=4\text{K}$ )において超伝導ギャップを観測した。この結果から、 $\text{Pb}/\text{TlBiSe}_2$  がトポロジカル超伝導体の新たなプラットフォームとなり得る事を提案した。

ファンデルワールス強磁性体  $\text{Cr}_2\text{Si}_2\text{Te}_6$  上に成長した  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  薄膜において超薄膜領域(2 nm)でディラックギャップを観測した。エネルギーギャップの大きさは、同じ膜厚で  $\text{Si}$  上に成長させた  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  のそれよりも大きいことから、ディラックギャップの形成に接合界面における相互作用も関わっていると結論した。また、キュリー温度前後でディラックギャップに有意な差がなく、強磁性近接効果の及ぶ範囲は 2 nm 以下の非常に小さいものであることが示唆された。 $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  のディラック電子状態の周辺には、これをバンド混成する  $\text{Cr}_2\text{Si}_2\text{Te}_6$  のバンドは存在せず、これが

短い近接効果の理由である可能性がある。

以上の結果から、表面ディラック電子状態への秩序の導入には、ハイブリッド物質とのバンド混成が重要であると結論した。Pb/TlBiSe<sub>2</sub>の結果が示すように、場合によっては表面から 6-7 nm も下の接合界面に埋もれているはずのディラック電子状態が表面にまで到達する。そのような方法でトポロジカル絶縁体を基盤とした様々な接合系を作成することで、トポロジカル量子物性の研究が進展することが期待される。

#### 【本研究のまとめ】

高温超伝導機構の解明や、新たな高温超伝導体の作成を目的として、バルク物質よりも広いキャリアドーピング範囲やバンド構造の高い制御性、2次元固有の電子状態をもつ、原子層物質を機軸に、超薄膜試料の作成と高分解能 ARPES による電子構造研究を行った。評価した電子構造を直ちに薄膜作製にフィードバックして、物質開発効率の飛躍的な向上させる原子層プラットフォームを研究室内に構築し、さらに UHV ポータブル装置を作製して、学外においても原子層物質の実験を可能にした。構築した原子層プラットフォームにより、鉄系高温超伝導体、遷移金属カルコゲナイド、高温超伝導ハイブリッド、トポロジカル原子層ハイブリッドなど、様々な原子層物質やその接合系の作製と ARPES 実験を行い、高温超伝導機構や2次元超伝導体の物性、トポロジカル超伝導における多くの知見を得た。また、本研究で技術的に確立したプラットフォームは、ARPESに限らず他の様々な実験で原子層物質の測定を可能とするものであり、今後、原子層物質の物性の解明やデバイスへの応用研究が大きく発展することが期待される。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計22件（うち査読付論文 21件 / うち国際共著 6件 / うちオープンアクセス 0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 <sub>2</sub> ultrathin films	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	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) 10.1103/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 1-6
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 Nakayama Kosuke, Souma Seigo, Trang Chi Xuan, Takane Daichi, Chen Chaoyu, Avila Jose, Takahashi Takashi, Sasaki Satoshi, Segawa Kouji, Asensio Maria Carmen, Ando Yoichi, Sato Takafumi	4. 巻 19
2. 論文標題 Nanomosaic of Topological Dirac States on the Surface of Pb <sub>5</sub> Bi <sub>24</sub> Se <sub>41</sub> Observed by Nano-ARPES	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 3737-3742
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.9b00875	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 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 Nakamura Takechika, Souma Seigo, Wang Zhiwei, Yamauchi Kunihiko, Takane Daichi, Oinuma Hikaru, Nakayama Kosuke, Horiba Koji, Kumigashira Hiroshi, Oguchi Tamio, Takahashi Takashi, Ando Yoichi, Sato Takafumi	4. 巻 99
2. 論文標題 Evidence for bulk nodal loops and universality of Dirac-node arc surface states in ZrGeXc (Xc=S, Se, Te)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.245105	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 Oinuma Hikaru, Souma Seigo, Nakayama Kosuke, Horiba Koji, Kumigashira Hiroshi, Yoshida Makoto, Ochiai Akira, Takahashi Takashi, Sato Takafumi	4. 巻 100
2. 論文標題 Unusual change in the Dirac-cone energy band upon a two-step magnetic transition in CeBi	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.125122	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 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 <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /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 1-5
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 Sugawara Katsuaki, Nakata Yuki, Fujii Kazuki, Nakayama Kosuke, Souma Seigo, Takahashi Takashi, Sato Takafumi	4. 巻 99
2. 論文標題 Monolayer VTe <sub>2</sub> : 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 1-6
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 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 1-6
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 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 1-7
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 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-TaS2: 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 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 Bi2Sr2CaCu2O8+ 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 Nakayama Kosuke, Wang Zhiwei, Trang Chi Xuan, Souma Seigo, Rienks Emile D. L., Takahashi Takashi, Ando Yoichi, Sato Takafumi	4. 巻 98
2. 論文標題 Observation of Dirac-like energy band and unusual spectral line shape in quasi-one-dimensional superconductor Tl <sub>2</sub> Mo <sub>6</sub> Se <sub>6</sub>	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 140502-1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.140502	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 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 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 -

1. 著者名 Takane Daichi, Souma Seigo, Nakayama Kosuke, Nakamura Takechika, Oinuma Hikaru, Hori Kentaro, Horiba Kouji, Kumigashira Hiroshi, Kimura Noriaki, Takahashi Takashi, Sato Takafumi	4. 巻 98
2. 論文標題 Observation of a Dirac nodal line in AIB <sub>2</sub>	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 041105-1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.041105	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 Sato Takafumi, Wang Zhiwei, Nakayama Kosuke, Souma Seigo, Takane Daichi, Nakata Yuki, Iwasawa Hideaki, Cacho Cephise, Kim Timur, Takahashi Takashi, Ando Yoichi	4. 巻 98
2. 論文標題 Observation of band crossings protected by nonsymmorphic symmetry in the layered ternary telluride Ta <sub>3</sub> SiTe <sub>6</sub>	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 121111-1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.121111	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 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 NbSe2: 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 12-1~7
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 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 TaSe2	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/acsnm.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 Shigekawa K., Nakayama K., Phan G. N., Kuno M., Sugawara K., Takahashi T., Sato T.	4. 巻 1054
2. 論文標題 Temperature insensitivity of Fermi surface in electron-doped high-temperature FeSe films on SrTiO3	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012019~012019
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1054/1/012019	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 Ito Yoshikazu, Tanabe Yoichi, Sugawara Katsuaki, Koshino Mikito, Takahashi Takashi, Tanigaki Katsumi, Aoki Hideo, Chen Mingwei	4. 巻 20
2. 論文標題 Three-dimensional porous graphene networks expand graphene-based electronic device applications	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 6024~6033
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c7cp07667c	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 Takane Daichi, Wang Zhiwei, Souma Seigo, Nakayama Kosuke, Nakamura Takechika, Oinuma Hikaru, Nakata Yuki, Iwasawa Hideaki, Cacho Cephise, Kim Timur, Horiba Koji, Kumigashira Hiroshi, Takahashi Takashi, Ando Yoichi, Sato Takafumi	4. 巻 122
2. 論文標題 Observation of Chiral Fermions with a Large Topological Charge and Associated Fermi-Arc Surface States in CoSi	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 076402-1 ~ 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.122.076402	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 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 VSe2	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 -

〔学会発表〕 計46件 (うち招待講演 19件 / うち国際学会 15件)

1. 発表者名 K. Nakayama
2. 発表標題 Superconductivity and Fermiology in Atomically-Thin Iron-Chalcogenide Films Studied by ARPES
3. 学会等名 Research Frontier of Advanced Spectroscopies for Correlated Electron Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Nakayama
2. 発表標題 Possible topological superconductivity in a hybrid of non-superconducting Bi2Te3 and FeTe
3. 学会等名 AIMR Workshop on Quantum Materials and Spintronics: Spin, Topology and Superconductivity (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 相馬清吾
2. 発表標題 軟X線ARPESによるスピントロニクス材料の物性機能解明
3. 学会等名 日本物理学会 領域5, 領域3 合同シンポジウム 「次世代スピントロニクスに向けた軟X線放射光計測技術の発展」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Seigo Souma
2. 発表標題 A topological perspective to electronic structure in metallic borides verified by angle-resolved photoelectron spectroscopy
3. 学会等名 20th International Symposium on Boron, Borides and Related Materials Boron, Borides and Related Materials, (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019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. Nakayama
2. 発表標題 Heterostructure-based topological materials studied by ARPES
3. 学会等名 The Future of Topological Materials (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Nakayama
2. 発表標題 High-temperature superconductivity in ultrathin iron-chalcogenide films studied by angle-resolved photoemission spectroscopy
3. 学会等名 Materials research meeting 2019 (招待講演) (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 <sub>2</sub> (X= Se, Te) 原子層薄膜のCDW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 渡邊育子, Chi Xuan Trang, 菅原克明, 相馬清吾, 中山耕輔, 瀬川耕司, 山内邦彦, 小口多美夫, 高橋隆, 佐藤宇史
2. 発表標題 トポロジカルヘテロ接合Pb/Bi/TlBiSe <sub>2</sub> の高分解能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 中田優樹, 菅原克明, Ashish Chainani, 山内邦彦, 中山耕輔, 相馬清吾, Pei-Yu Chuang, Cheng-Maw Cheng, 小口多美夫, 上野啓司, 高橋隆, 佐藤宇史
2. 発表標題 1T-HfTe <sub>2</sub> における次元性制御: 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 佐藤匠, 中田優樹, 菅原克明, 相馬清吾, 高坂崇雄, 山内邦彦, 小口多美夫, 高橋隆, 佐藤宇史
2. 発表標題 積層トポロジカル絶縁体薄膜のディラック電子制御: 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 坪野竜治, 中山耕輔, 大和田健太, 鍋島冬樹, 色摩直樹, 石川智也, 崎下雄稀, 前田京剛, 高橋隆 佐藤宇史
2. 発表標題 Fe(Te,Se)/CaF <sub>2</sub> 高温超伝導体の高分解能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 大和田健太, 中山耕輔, 坪野竜治, 重河恒心, 菅原克明, 高橋隆, 佐藤宇史
2. 発表標題 Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /FeTeヘテロ構造の電子状態: 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 中山耕輔, 重河恒心, 大和田健太, Phan Giao, 菅原克明, 高橋隆, 佐藤宇史
2. 発表標題 単層FeSの高分解能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 田口大樹, 中田優樹, 川上竜平, 佐藤匠, 加藤剛臣, 菅原克明, 高橋隆, 佐藤宇史
2. 発表標題 NbTe <sub>2</sub> 薄膜の高分解能ARPES
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 中田優樹, 川上竜平, 佐藤匠, 田口大樹, 加藤剛臣, 菅原克明, 高橋隆, 佐藤宇史
2. 発表標題 単層及び多層VTe <sub>2</sub> 薄膜の高分解能ARPES
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 坪野竜治, 中山耕輔, 大和田健太, 高橋隆, 佐藤宇史
2. 発表標題 FeSe/Bi <sub>2</sub> Se <sub>3</sub> ヘテロ構造の高分解能ARPES
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 中山耕輔, 坪野竜治, 大和田健太, 鍋島冬樹, 色摩直樹, 石川智也, 崎下雄稀, 前田京剛, 高橋隆, 佐藤宇史
2. 発表標題 Fe(Se, Te)/CaF <sub>2</sub> の電子構造の組成依存性: 高分解能ARPES
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 Trang Xuan Chi
2. 発表標題 ARPES study of superconducting Pb thin film on topological insulator
3. 学会等名 MAJORANA FERMIONS AND TOPOLOGICAL MATERIALS SCIENCE (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Seigo Souma
2. 発表標題 Topological superconductivity and unexpected surface states in nodal line semimetals
3. 学会等名 MAJORANA FERMIONS AND TOPOLOGICAL MATERIALS SCIENCE (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kosuke Nakayama
2. 発表標題 Two-Dimensional Dirac Semimetal Phase in Undoped Monolayer FeSe Film
3. 学会等名 14th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Seigo Souma
2. 発表標題 Three dimensional topological semimetals
3. 学会等名 One-day Symposium on Spintronic Properties of 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, 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 Kosuke Nakayama
2. 発表標題 High-Resolution ARPES study of One-Monolayer FeSe Films on SrTiO <sub>3</sub> : Dirac Semimetal and High-Temperature Superconducting Phases
3. 学会等名 Materials and mechanisms of superconductivity 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中山耕輔
2. 発表標題 トポロジカル超伝導体候補物質Tl <sub>2</sub> Mo <sub>6</sub> Se <sub>6</sub> の高分解能ARPES
3. 学会等名 日本物理学会2018秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤匠
2. 発表標題 Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> 薄膜におけるディラック電子制御：高分解能ARPES
3. 学会等名 日本物理学会2018秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大和田健太
2. 発表標題 トポロジカル絶縁体/鉄系超伝導体ヘテロ接合の高分解能ARPES
3. 学会等名 日本物理学会2018秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 堀健太郎
2. 発表標題 高分解能ARPESによる磁性トポロジカル絶縁体(CrxSb1-x)2 Te3の電子状態
3. 学会等名 日本物理学会2018秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村剛慶
2. 発表標題 トポロジカル線ノード半金属ZrGeSeの軟X線ARPES
3. 学会等名 日本物理学会2018秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 梅本侑輝
2. 発表標題 原子層VSe2における擬ギャップの波数依存性：高分解能ARPES
3. 学会等名 日本物理学会2018秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 重河恒心
2. 発表標題 鉄系超伝導体原子層薄膜の元素置換：高分解能ARPES
3. 学会等名 日本物理学会2018秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡邊育子
2. 発表標題 トポロジカル絶縁体TlBiSe <sub>2</sub> 上のBi(111)薄膜の高分解能ARPES
3. 学会等名 日本物理学会2018秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 相馬清吾
2. 発表標題 トポロジカル半金属における電子構造の直接観測
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会 領域5,4,8,9 合同シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Katsuaki Sugawara
2. 発表標題 High-resolution ARPES studies of 2D materials related superconductors
3. 学会等名 International Workshop on 2D Materials(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Katsuaki Sugawara
2. 発表標題 High-resolution ARPES studies of atomic-layer transition metal dichlcogenides
3. 学会等名 3RD-JPAN-EU FLAGSHIP WORKSHOP ON GRAPHENE AND RELATED 2D MATERILS (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 相馬清吾
2. 発表標題 ナノARPESの現状と次世代放射光での展開
3. 学会等名 第5回放射光連携研究ワークショップ「先端計測とインフォマティクスによる可視化物質科学の発展」(招待講演)
4. 発表年 2019年

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

1. 発表者名 中山耕輔
2. 発表標題 Pb系トポロジカル絶縁体超格子のナノARPES
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中田優樹
2. 発表標題 単層TaSe2のARPES
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大和田健太
2. 発表標題 Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /FeTeの高分解能ARPES
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 堀健太郎
2. 発表標題 強磁性トポロジカル絶縁体(CrxSb1-x)2Te3の表面ディラック電子状態：高分解能ARPES
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡邊育子
2. 発表標題 トポロジカル絶縁体/Rashba金属ハイブリッドの高分解能ARPES
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤匠
2. 発表標題 Bi2Se3-Bi2Te3積層トポロジカル絶縁体薄膜のARPES
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Seigo Souma
2. 発表標題 Direct observation of nodal fermions in topological semimetals
3. 学会等名 MANA International Symposium 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 東北放射光施設推進会議推進室	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 344
3. 書名 放射光利用の手引き	

〔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
研究 分担者	菅原 克明  (Sugawara Katsuaki)  (70547306)	東北大学・理学研究科・准教授    (11301)	

	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
連携 研究者	相馬 清吾  (Soma Seigo)  (20431489)	東北大学・スピントロニクス学術連携研究教育センター・准教授    (11301)	

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