

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01845

研究課題名(和文) 2次元電子スピン検出器の開発と強磁性トポロジカル物質の研究

研究課題名(英文) Development of 2D electron spin detector and research of ferromagnetic topological insulator

研究代表者

相馬 清吾 (Souma, Seigo)

東北大学・材料科学高等研究所・准教授

研究者番号：20431489

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 16,700,000円

研究成果の概要(和文)：強磁性トポロジカル絶縁体(CrxSb1-x)2Te3について高分解能ARPESによりフェルミ面の明確なCrドーピング依存性を見出し、状態密度を見積もった結果、強磁性機構の主要因はRKKY機構であると結論した。さらに、表面ディラック電子状態についてキュリー温度の前後の明確な変化を観測し、その変化はEFより上で100 meV程度の大きな磁性ギャップによるものと結論した。また、NdBiにおいて、磁気ドメイン分割したARPES実験に成功し、反強磁性相の表面ディラック電子状態がドメインに依存してギャップを形成する様子を観測し、この物質が反強磁性トポロジカル絶縁体であること実験的に確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、論争のあったトポロジカル絶縁体の強磁性機構について、電子構造の見地から明確な答えが得られた。今後、より高いTcをもつ強磁性トポロジカル絶縁体を理論設計する上で、本研究の知見は重要な指針となる。また、磁性転移と明確に連動するディラック電子状態は理論的には期待されていたことではあるが、実際にそのような物質は少なく、ディラック電子と磁性の関わりについて実験的混乱があったが、本研究の成果により理論の妥当性も証明された。これにより、磁性トポロジカル物質の研究と高機能物質探索が進み、省エネルギー技術や量子技術に貢献するような材料開発につながると期待される。

研究成果の概要(英文)：We have performed high-resolution ARPES study on ferromagnetic topological insulator (Cr_xSb_{1-x})₂Te₃, and revealed a clear Cr-doping dependence of the Fermi surface. The density of states estimated from the experimental results, we concluded that the RKKY interaction is a main cause of carrier induced ferromagnetism in topological insulator. Furthermore, we observed a distinct change in the surface Dirac electron states across the Curie temperature, attributing it to a significant magnetic gap about 100 meV above EF. We have also succeeded in domain-selective ARPES on NdBi. We found that the surface Dirac cone states shows clear energy gap depending on the domain. This experimentally establishes that NdBi is the antiferromagnetic topological insulator.

研究分野：光電子固体物性

キーワード：トポロジカル絶縁体 スピン分解光電子分光 磁性薄膜 希薄磁性半導体 ワイル半金属

1. 研究開始当初の背景

3次元トポロジカル絶縁体が発現する巨視的量子現象を観測する上で鍵となるのは、内部磁場(交換相互作用)により形成されるディラック電子状態のギャップである。トポロジカル絶縁体では表面のスペクトルが連続的であるのに対し、強磁性トポロジカル絶縁体でギャップが形成され、その中にフェルミ準位が来ることでホール伝導度や光学応答などの巨視的物理量が量子化する。すなわち、トポロジカル絶縁体の強磁性化はトポロジカル数を直接観測するための唯一の実験的なアプローチである。

しかしながら、交換相互作用の他に、薄膜試料における表面と裏面の混成、元素置換によるスピン軌道相互作用の変化、不純物ポテンシャルの影響など、様々な要因でディラックギャップは形成され得る。そのために、強磁性トポロジカル絶縁体におけるディラック電子状態のギャップが強磁性秩序によるものか全く実証されていない状況にあった。これを解決するには、スピン分解 AREPS によるスピントクスチャーの精密決定が必要であるが、既存の装置ではスピン検出効率の低さのために、そのような実験が十分に行われてこなかった。

さらに、強磁性トポロジカル絶縁体においては、そもそも強磁性発現機構について統一的な見解が得られていないという問題があった。閉殻価電子による Van-Vleck 型の巨大な常時性応答や、ホール価電子が磁性を媒介する *p-d* Zener モデル、磁性イオンのパーコレーションなど様々な強磁性モデルが提案されているが、キュリー温度のキャリヤ依存性などの実験結果に食い違いあり、強磁性機構の議論に決着がついていなかった。これを解決するには、フェルミ面(キャリヤ数)やバンド構造、それらの交換分裂を直接観測し、その背後にある物理機構を特定する必要があった。

2. 研究の目的

本研究では、強磁性トポロジカル絶縁体の強磁性機構の解明、およびトポロジカル量子現象に直接関与する電子状態の解明を目的として、これまでの電子スピン分析の常識を覆し、エネルギー・運動量空間における電子のスピン偏極度を一挙に可視化する事のできる2次元電子スピン検出器を開発して、強磁性トポロジカル絶縁体の基盤電子状態の確立を目指した。数ある実験手法の中において唯一、光電子分光法は電子の「エネルギー」と「運動量」を直接同時に測定できる手段である。通常の光電子分光装置の電子検出器の後段に、高効率の電子スピン検出器を接続することで、光電子の「スピン」も同時に測定することが可能となる。申請者はこれまで、世界最高の分解能をもつスピン分解光電子分光装置の開発を行い、トポロジカル絶縁体やトポロジカル結晶絶縁体の電子状態の観測を行ってきた。本研究では光電子のスピン検出効率を格段に向上させるため、イメージング VLEED(超低速電子回折)法を開発を行った。通常の VLEED 法では、単一の電子ビーム($\phi \leq 2$ mm)を磁性薄膜に入射し、その反射ビーム強度からスピンを検出する。本開発ではその常識を覆し、角度(運動量)方向とエネルギー方向に同時に傾斜をもつ広がりのある電子ビームを大面積の強磁性単結晶薄膜($\sim 20 \times 20$ mm)に照射し、そこから直接反射されたスピン偏極電子の分布イメージ全体を、マルチチャンネルプレート(MCP)によって瞬時に可視化する。イメージング VLEED 法は、従来は単一エネルギーかつ単一運動量にのみ制限されていた、いわゆる「点」におけるスピン検出を「面」検出にまで向上させる画期的な方法である。

2次元電子スピン検出器の開発によりスピン分解 ARPES の測定精度と効率は格段に向上する。これにより meV スケールの微小スピン分裂や微小電子磁気モーメントの測定、超伝導ギャップのスピン分解実験など、これまでになかった新しい電子状態の情報を得ることが期待できる。とりわけ、交換相互作用によるバルクバンド内のスピン分裂や、ディラック電子状態への交換相互作用によるスピントクスチャーの変調など、強磁性トポロジカル絶縁体の基盤的な電子構造の確立と、物性機構の解明に極めて重要な情報が得られると期待した。

3. 研究の方法

(1) 2次元スピン検出器の開発

スピン検出器の2次元化のために、電子のスピンイメージングに最適なターゲットとなる単結晶薄膜と電子入射条件を検討し、大型磁性単結晶薄膜をシングルドメインに磁化させるための磁化制御装置を高分解能スピン分解光電子分光装置に組み込んだ。ターゲットへの電子ビーム補正新たな偏向レンズの基本設計を行い、また現時点で2台の VLEED のスピン検出性能を最適化する電圧パラメータを見出した。電子銃によるテストで、ターゲットからの反射イメージを MCP 上に結像することに成功した。また、微小な面積をもつ試料の磁気ドメイン内の電子構造を決定するために、低振動マニピュレーターの設計と製作を行った。また、磁性薄膜の磁気ドメインを可視化するために、偏光顕微鏡の立ち上げも行い、強磁性体のテスト試料により性能を確認した。さらに、微小な面積をもつ試料の磁気ドメイン内の電子構造を決定するために、低振動マニピュレーターの改良と調整を行った。電子分析器との連動部分のアルゴリズムを新たに構築し、光電子イメージの空間マッピング機能の実質的な速度を2倍近くに引き上げることに成

功した。

さらに、稼働している高分解能スピン分解光電子分光装置の改良として、CW レーザー光源を装置に導入するための光学系の設計と製作を行なった。試料の表面の粗さを克服してデータの精度と質を向上させるため、レーザー光を微小スポット化するための集光光学系の設計し、試料マニピュレーターの高安定化と微細制御の実現ために、装置各部の振動測定と位置エンコーダーの導入を行なった。

(2) 強磁性トポロジカル絶縁体の基盤電子構造の確立

強磁性トポロジカル絶縁体候補物質 $(\text{Cr,Sb})_2\text{Te}_3$ について強磁性の発現機構を解明するために、高分解能 ARPES によりフェルミ準位近傍の電子構造を決定した。バルク価電子帯のキュリー温度前後のバンド構造の変化を詳細に測定し、交換分裂構造を見出す。Cr ドープによるキャリア数の変化を精密評価のために、様々な Cr 濃度試料についてフェルミ面マッピングを行った。交換分裂の温度・Cr 濃度・キャリア数依存性について理論計算と比較し、強磁性機構を考察した。ポンププローブ光源を用いて $(\text{Cr,Sb})_2\text{Te}_3$ の非占有状態のバンド構造を決定も試みた。さらに、非占有状態をプローブする実験として、XMCD 実験を行った。

(3) 新たな磁性トポロジカル物質の探索

反強磁性トポロジカル物質も磁性によるディラック電子への影響を調べるうえで重要な物質である。CeBi は $T_N=11\text{ K}$ と 25 K で段階的に異なる反強磁性相に転移する物質として知られるが、軟 X 線 ARPES により $Z_2=1$ の半金属であることを最近見出した。反強磁性転移と表面ディラック電子状態との相関を調べるために、スピン分解 ARPES により表面電子構造とスピントクチャーの温度依存性を精密に測定する。反強磁性ドメインが 3 方向に形成されるため、レーザー光を $10\text{ }\mu\text{m}$ 以下のスポットに集光できる縮小光学系を設計製作し、ドメインを分解した ARPES 実験を行う。これにより反強磁性秩序と表面ディラック電子状態の関連性を明確化し、反強磁性体のトポロジカル指数について知見を深めると共に、反強磁性ベクトルの操作による表面ディラック電子状態の制御の可能性を検討する。

4. 研究成果

(1) マイクロ ARPES 装置の建設

強磁性/反強磁性トポロジカル物質の、磁気構造に依存した電子構造を解明するには、電子状態を磁気ドメインに分割して測定を行う必要がある。そのため本研究では CW レーザーの微小スポット化と低振動マニピュレーターの開発を行い、これと並行して放射光施設光子ファクトリーにおいてマイクロ ARPES 装置の建設改良を行った。K-B 型ミラーを電子分析器の電子収束点の 50 cm ほど前に設置し、それらの調整とアライメントを行った。測定試料の高精度マニピュレーター、電子分析器、K-B ミラーの制御を一体化したプログラムと作成において、本研究で開発していたレーザー集光システムと試料マニピュレーターの制御機器とアルゴリズムを導入し、放射光において光電子像の空間マッピングシステムの作成を行った。図 1a に性能評価のために測定した Au のフォトリスグラフィの光電子像を示す。このパターンのエッジ(図 1b,c)を用いて、現時点において、横方向で $10\text{ }\mu\text{m}$ 、縦方向で $12\text{ }\mu\text{m}$ という微小スポットを実現することに成功し、建設したマイクロ ARPES 装置が磁性トポロジカル物質の光電子分光におけるドメイン分割観察に十分な性能を有していると結論した。(業績論文 M. Kitamura, SS et al., Rev. Sci. Instrum. **93**, 033906, (2022).)

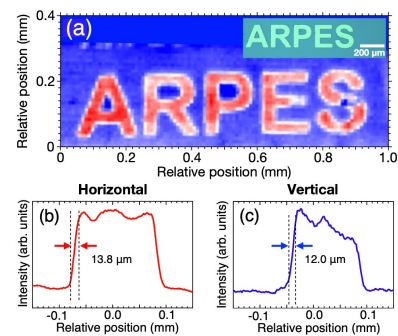


図 1 (a) Au リンググラフィーパターンの光電子強度マップ. (b) (c) 横および縦方向のエッジプロファイル

(2) 強磁性トポロジカル絶縁体 $(\text{Cr,Sb})_2\text{Te}_3$ の強磁性機構とディラック電子分散

MBE 装置で作製された $(\text{Cr}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$ ($x=0,0.07,0.15,0.35$) の薄膜試料について Te 層をキャップすることで大気中での持ち運びを可能にし、このキャップ層を真空中で取り去ることで清浄試料表面を得て高分解能 ARPES と行った。その結果、価電子帯のホールバンド分散とフェルミ面電子構造の明確な Cr ドープ依存性を見出した(図 2a,b)。Cr は Sb と同じ価数で置換するため、バンド全体のエネルギー位置は Cr により大きく変わらないにも関わらず、フェルミ面はキュリー温度 T_C の上昇に伴い、BZ の中心側へと伸びていく振る舞いを観測した。ARPES の結果から各 x 組成のフェルミ面のキャリア数と状態密度を見積もった結果(図 2c)、RKKY モデルにより見積もった T_C は高ドープ試料($x=0.15,0.35$)の T_C の 7 割以上であったことから、 $(\text{Cr}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$ における高い T_C には RKKY 機構によるキャリア誘起の強磁性相互作用が主要な寄与を担うと結論した。さらに、 $(\text{Cr}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$ の表面ディラックバンドの ARPES 観測を行った結果、Cr ドーピングとともにディラック点のエネルギー位置が系統的に上昇しながらも、 $T_C=192\text{ K}$ の高ドープ試料においてもディラック電子分散自体が消失しない様子を観測した。この表面ディラック状態の温度依存性を測定した結果、キュリー温度の前後で結合エネルギー 0.2 eV に至るまでバンド分散に明確な変化があることを観測した。このような広いエネルギー範囲で磁性によるディラック電子

分散の変化が観測されたのは初めてである。以上の結果から、 $(\text{Cr}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$ は T_C が 200 K 近くの高ドーピング物質においても非自明なバンド構造を保持する強磁性トポロジカル絶縁体であり、試料の磁性と強固に結合したディラック電子状態を用いたトポロジカル物性の磁性制御に有用な物質であると結論した。この研究成果の論文作成は済んでおり、投稿のために共著者の了解を待っていると状況である。また本物質については、電子バンドの非占有状態の情報を得るために XMCD 実験も行っており、表面状態のギャップ形成を示唆する結果を得た。この結果については投稿した論文が現在査読中である。

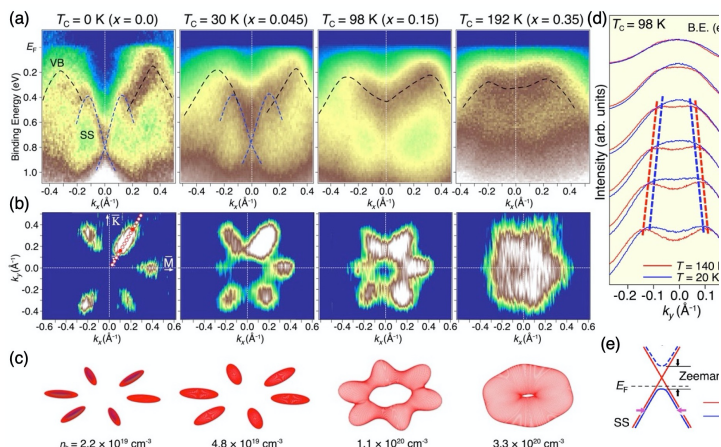


図 2 $(\text{Cr,Sb})_2\text{Te}_3$ の(a)バンド分散, (b)フェルミ面, および(c)ARPES から見積もった 3 次元フェルミ面. (d) $T_C=98$ K 試料におけるディラックバンドの温度変化と(e)その模式図.

(3) 反強磁性トポロジカル絶縁体候補物質希土類モノプニクタイトの電子構造の研究

本研究を開始した当初、トポロジカル絶縁体に磁性を導入する手段は、母物質のトポロジカル絶縁体の磁性イオンを置換するか、薄膜ヘテロ構造を作成し表面ディラック電子状態に強磁性を近接させるかの 2 種類の方法しかなかった。それぞれの手法には、不純物や界面接合などによる擾乱という問題があったため、最初から磁性イオンを結晶に当量組成で含むトポロジカル物質の開発が精力的に行われた結果、絶縁体では強磁性より反強磁性が安定することが圧倒的に多く、反強磁性トポロジカル絶縁体の合成と物性探索に大きな注目があつまるようになった。このような研究の潮流に先んじて、本研究は多様な磁気構造と電子構造のトポロジーを併せ持つ希土類モノプニクタイト RX_p (R:希土類, X_p :プニクトゲン) にいち早く着目し、研究を開始した。まず、反強磁性 Z_2 半金属 CeBi において、表面ディラック電子状態がネール温度以下でも消失はせず、バンド分散の数が常磁性状態の 2 倍になる様子を観測した。この結果から、反強磁性秩序化においても非自明なトポロジカル状態が保持されており、さらに表面ディラック電子状態には磁性イオンの周期による折り返し効果が大きな変調を及ぼすことを見出した(業績論文 H. Oinuma, SS et al., Phys. Rev. B **100**, 125112, (2019).)。この CeBi において明らかにできなかったトポロジーと磁性の関係性に深く踏み込むために、研究成果(1)で建設したマイクロ ARPES 装置を用いて、より単純な磁気構造を示す NdBi について反強磁性相における磁気ドメインを分割した ARPES 測定を行った。その結果、CeBi と同様のディラック電子状態を観測し、さらにそれが磁気ドメインの秩序方向によって大きくギャップを開く様子を明確に観測した。さらに、フェルミ面にもドメイン依存性があることを見出し、ギャップの開くドメインでは C_4 対称であったのが、閉じるドメインでは C_2 対称に対称性が落ちる様子を観測した。この対称性じよ違いは中性子散乱で報告されていた磁気秩序と表面の方位の関係性から理解できる。さらにこの反強磁性特有の対称性に着目した結果、NdBi における反強磁性相で観測されたディラック電子状態は、時間反転対称性 Θ と並進対称性 T_D の複合対称性 $S=\Theta T_D$ によって保護されており、それを破るドメイン表面でギャップが開いたことから、NdBi が反強磁性トポロジカル絶縁体であると結論した。以上の結果は現在 Nature Communications に投稿し(A, Honma, SS et al)査読結果を待っている状況である。本成果による、表面ディラック電子状態の観測により反強磁性トポロジカル絶縁体を世界で初めて実験的に確立した。

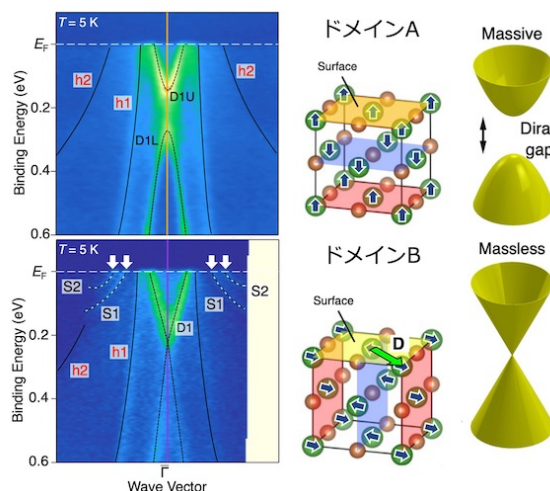


図 3 NdBi の表面ディラック電子バンドの磁気ドメイン依存性。ドメイン A の表面では複合対称性 $S=\Theta T_D$ が破れるためギャップが形成される。

(4) 磁性ディラック電子系と関連物質

アクシオン絶縁体候補物質 EuIn_2As_2 について、SX-および VUV-APRES により表面とバルクの電子構造を分離して完全に決定することに成功した。フェルミ準位近傍のバンド構造の温度依存性を測定した結果、ネール温度以下でバンドの変調を見出し、第 1 原理計算との比較から反強磁性相ではアクシオン絶縁体と予想されている磁気構造が形成されていることを示唆した。磁性ディラック半金属母物質 $(\text{Ba},\text{Sr})\text{Mg}_2\text{Bi}_2$ について、マイクロ ARPES により BaMg_2Bi_2 平坦面をピンポイント計測することで明瞭なバンド分散を観測することに成功し、さらに、表面に K を吸着させてフェルミ準位を制御することにより、この物質が 3 次元ディラック半金属であることを明らかにした。また、 SrMg_2Bi_2 では明確なバンドギャップが観測され、自明な絶縁体相に転移していることを明らかにした。このことは Ba と Sr の間にトポロジカル相転移点の存在を示しており、価数やイオン半径の近い磁性イオンと置換することで磁性トポロジカル半金属相へ転移する可能性を示唆する。さらに、 Na_3Bi や Cd_3As_2 などのこれまで発見されたディラック半金属はどれも元素置換・相転移制御が困難で、大気中でも結晶が不安定だった一方、 $(\text{Ba},\text{Sr})\text{Mg}_2\text{Bi}_2$ はこれらの問題をすべてクリアしていることから、磁性トポロジカル半金属の探索に有用なプラットフォームであると結論した。本研究では、他に CaAuAs が新しいトポロジカル半金属であることを明らかにした他、巨大磁気抵抗を示す Cu_2Sb についてフェルミ面の 3 次元構造を ARPES で明確に観測し、その起源となる電子ホールの補償構造を実験的にあきらかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 18件 / うち国際共著 10件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kawakami Tappei, Sugawara Katsuaki, Kato Takemi, Taguchi Taiki, Souma Seigo, Takahashi Takashi, Sato Takafumi	4. 巻 104
2. 論文標題 Electronic states of multilayer VTe ₂ : Quasi-one-dimensional Fermi surface and implications for charge density waves	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 045136-1-11
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 Tokuda Satoru, Souma Seigo, Segawa Kouji, Takahashi Takashi, Ando Yoichi, Nakanishi Takeshi, Sato Takafumi	4. 巻 4
2. 論文標題 Unveiling quasiparticle dynamics of topological insulators through Bayesian modelling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 170-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42005-021-00673-6	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 該当する
1. 著者名 Endo Mizuki, Kawasoko Hideyuki, Soma Seigo, Yamauchi Kunihiko, Kitamura Miho, Horiba Koji, Kumigashira Hiroshi, Kimura Noriaki, Oguchi Tamio, Sato Takafumi, Fukumura Tomoteru	4. 巻 5
2. 論文標題 Large magnetoresistance of a compensated metal Cu ₂ Sb correlated with its Fermi surface topology	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 105002-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.5.105002	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, Kubota Yuya, Nakayama Kosuke, Kawakami Tappei, Yamauchi Kunihiko, Souma Seigo, Kato Takemi, Sugawara Katsuaki, Ideta Shin-ichiro, Tanaka Kiyohisa, Kitamura Miho, Horiba Koji, Kumigashira Hiroshi, Oguchi Tamio, Takahashi Takashi, Segawa Kouji, Sato Takafumi	4. 巻 11
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 Reports	6. 最初と最後の頁 21937
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 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 Kitamura Miho, Souma Seigo, Honma Asuka, Wakabayashi Daisuke, Tanaka Hirokazu, Toyoshima Akio, Amemiya Kenta, Kawakami Tappei, Sugawara Katsuaki, Nakayama Kosuke, Yoshimatsu Kohei, Kumigashira Hiroshi, Sato Takafumi, Horiba Koji	4. 巻 93
2. 論文標題 Development of a versatile micro-focused angle-resolved photoemission spectroscopy 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 ~ 033906
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 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 Kobayashi M., Khang N. H. D., Takeda T., Araki K., Okano R., Suzuki M., Kuroda K., Yaji K., Sugawara K., Souma S., Nakayama K., Yamauchi K., Kitamura M., Horiba K., Fujimori A., Sato T., Shin S., Tanaka M., Hai P. N.	4. 巻 6
2. 論文標題 Rhombic Fermi surfaces in a ferromagnetic MnGa thin film with perpendicular magnetic anisotropy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 774403
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.6.074403	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, Takane Daichi, Souma Seigo, Cui Chaoxi, Li Yongkai, Nakayama Kosuke, Kawakami Tappei, Kubota Yuya, Cacho Cepise, Kim Timur K., Arab Arian, Strocov Vladimir N., Yao Yugu, Takahashi Takashi	4. 巻 2
2. 論文標題 Signature of band inversion in the antiferromagnetic phase of axion insulator candidate Euln2As2	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 033342-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.033342	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 085112-1-6
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 Nakayama Kosuke, Wang Zhiwei, Takane Daichi, Souma Seigo, Kubota Yuya, Nakata Yuki, Cacho Cephise, Kim Timur, Ekahana Sandy Adhitia, Shi Ming, Kitamura Miho, Horiba Koji, Kumigashira Hiroshi, Takahashi Takashi, Ando Yoichi, Sato Takafumi	4. 巻 102
2. 論文標題 Observation of inverted band structure in the topological Dirac semimetal candidate CaAuAs	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 041104R-1-65
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.041104	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 Zheng Dingheng, Shiogai Junichi, Inoue Hisashi, Souma Seigo, Sato Takafumi, Tsukazaki Atsushi	4. 巻 8
2. 論文標題 Two-dimensional growth of conductive ultra-thin Sn films on insulating substrate with an Fe buffer layer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 APL Materials	6. 最初と最後の頁 061103-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0009012	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 Satake Y., Shiogai J., Mazur G. P., Kimura S., Awaji S., Fujiwara K., Nojima T., Nomura K., Souma S., Sato T., Dietl T., Tsukazaki A.	4. 巻 4
2. 論文標題 Manipulation of Dirac Cone in Topological Insulator/Topological Insulator Heterostructure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 044202-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.4.044202	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 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 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 Nanososaic of Topological Dirac States on the Surface of Pb5Bi24Se41 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 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 該当する

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 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 該当する

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 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 -

〔学会発表〕 計27件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 相馬 清吾
2. 発表標題 反強磁性トポロジカル絶縁体における電子構造の磁気ドメイン分割観察
3. 学会等名 東北大学電気通信研究所 共同プロジェクト研究会「固体中のスピン・軌道ダイナミクスとその制御」(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 相馬 清吾
2. 発表標題 マイクロAPRESによる反強磁性トポロジカル物質のドメイン分割観測
3. 学会等名 「スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワーク (Spin-RNJ)」シンポジウム, Spin-RNJ 2021年度報告会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 相馬清吾、本間飛鳥、北村未歩、堀場弘司、川上竜平、渡辺夏芽、中山耕輔、菅原克明、高橋 隆、組頭広志、佐藤宇史
2. 発表標題 マイクロARPESによるトポロジカル物質の局所電子状態
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 本間飛鳥、高根大地、相馬清吾、Y. Wang、中山耕輔、北村未歩、堀場弘司、組頭広志、T. Kim、C. CachoH、安藤陽一、佐藤宇史
2. 発表標題 マイクロARPESによるトポロジカル半金属NdBiの反強磁性ドメイン電子状態の観測
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 S. Souma, A. Honma, D. Takane, Y. Wang, K. Nakayama, M. Kitamura, K. Horiba, H. Kumigashira, T. Kim, C. Cacho, Yoichi Ando, and T. Sato
2. 発表標題 Micro AREPS study of antiferromagnetic topological metal NdBi
3. 学会等名 The 5th Symposium for The Core Research Clusters for Materials Science and Spintronics, and the 4th Symposium on International Joint Graduate Program in Materials Science
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本間飛鳥、高根大地、相馬清吾、Y. Wang、中山耕輔、北村未歩、堀場弘司、組頭広志、T. Kim、C. CachoH、安藤陽一、佐藤宇史
2. 発表標題 反強磁性トポロジカル半金属NdBiのマイクロARPES
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 渡辺夏芽、相馬清吾、中山耕輔、J. Ribeiro、Y. Wang、高橋隆、Z. Mao、Y. P. Chen、佐藤宇史
2. 発表標題 3層系ルテニウム酸化物Sr4Ru3O10のマイクロARPES
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 S. Souma、N. Watanabe、K. Nakayama、J. Ribeiro、Y. Wang、T. Takahashi、Z. Mao、Y. P. Chen、and T. Sato
2. 発表標題 μ -ARPES study of ferromagnetic layered oxide Sr4Ru3O10
3. 学会等名 The 4th Symposium for The Core Research Clusters for Materials (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡辺夏芽、相馬清吾、中山耕輔、J. Ribeiro、Y. Wang、高橋隆、Z. Mao、Y. P. Chen、佐藤宇史
2. 発表標題 強磁性層状酸化物Sr4Ru3O10の高分解能ARPES
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高根大地、鈴木健士、相馬清吾、山内邦彦、中山耕輔、堀健太郎、C. X. Trang、Emile D. L. Rienks、北村未歩、C. Cacho、T. Kim、堀場弘司、組頭広志、小口多美夫、高橋隆、佐藤宇史
2. 発表標題 反強磁性ハーフホイスラーGdPtBiの電子状態観測：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

1. 発表者名 北村未歩、相馬清吾、若林大佑、田中宏和、豊島章雄、雨宮健太、本間飛鳥、川上竜平、菅原克明、中山耕輔、佐藤宇史、組頭広志、堀場弘司
2. 発表標題 PF BL-28におけるマイクロARPESシステムの開発
3. 学会等名 2020年度量子ビームサイエンスフェスタ
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 相馬清吾、本間飛鳥、北村未歩、堀場弘司、川上竜平、渡辺夏芽、中山耕輔、菅原克明、高橋隆、組頭広志、佐藤宇史
2. 発表標題 BL28におけるトポロジカル物質の μ -ARPESマッピング
3. 学会等名 2020年度量子ビームサイエンスフェスタ
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 相馬清吾、本間飛鳥、北村未歩、堀場弘司、川上竜平、渡辺夏芽、中山耕輔、菅原克明、高橋隆、組頭広志、佐藤宇史
2. 発表標題 マイクロARPESによるトポロジカル物質の局所電子状態
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡辺夏芽、相馬清吾、中山耕輔、J. Ribeiro、Y. Wang、高橋隆、Z. Mao、Y. P. Chen、佐藤宇史
2. 発表標題 高分解能ARPESによる強磁性酸化物Sr ₄ Ru ₃ O ₁₀ のバンド構造
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高根大地、久保田雄也、川上竜平、加藤剛臣、坪野竜治、菅原克明、中山耕輔、相馬清吾、出田真一郎、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 ディラック半金属候補物質BaMg ₂ Bi ₂ の高分解能ARPES
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Seigo Souma
2. 発表標題 New topological phases protected by T symmetry
3. 学会等名 AIMR Workshop "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 トポロジカル半金属のバルクノード構造と表面電子状態:ARPES
3. 学会等名 第11回トポロジー連携研究会 「トポロジカル半金属」(招待講演)
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 (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 T1/2対称性に保護されたトポロジカル表面電子状態
3. 学会等名 新学術領域「次世代物質探索のための離散幾何学」研究会「トポロジカル表面状態、プレーンとソリトン、指数定理(招待講演)
4. 発表年 2020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 加藤剛臣, 伊東直洋, 佐藤匠, 中田優樹, 菅原克明, 相馬清吾, 中山耕輔, 高橋隆, 塩見雄毅, 齊藤英治, 佐藤宇史
2. 発表標題 トポロジカル絶縁体/ファンデルワールス強磁性体ハイブリッドの高分解能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 堀健太郎, 相馬清吾, 中山耕輔, 高橋隆, 松倉文礼, 佐藤宇史
2. 発表標題 トポロジカル絶縁体(CrxSb1-x)2Te3の強磁性機構：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/TlBiSe2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 徳田悟, 相馬清吾, 高橋隆, 佐藤宇史, 中西毅
2. 発表標題 ARPESに対するセミパラメトリックベイズ的スペクトル分解
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 加藤剛臣, 伊東直洋, 川上竜平, 菅原克明, 相馬清吾, 中山耕輔, 高橋隆, 塩見雄毅, 齊藤英治, 佐藤宇史
2. 発表標題 ファンデルワールス強磁性体Cr2Ge2Te6の強磁性転移：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 高根大地, 鈴木健士, 相馬清吾, 山内邦彦, 中山耕輔, 堀健太郎, C. X. Trang, Emile D. L. Rienks, 北村未歩, C. Cacho, T. Kim, 堀場弘司, 組頭広志, 小口多美夫, 高橋隆, J. G. Checkelsky, 佐藤宇史
2. 発表標題 ARPESによるハーフホイスラーGdPtBiのバルク/表面電子構造の観測
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020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			
ドイツ	ケルン大学	マックスプランク研究所	BESSY放射光施設	
英国	Diamond Light Source			
フランス	SOLEIL放射光施設			
その他の国・地域(台湾)	NSRRC			