

平成 30 年 5 月 18 日現在

機関番号：15401
 研究種目：基盤研究(C) (一般)
 研究期間：2015～2017
 課題番号：15K05132
 研究課題名(和文)トポロジカル近藤絶縁体：希土類六ホウ化物の表面ディラックコーンの電子状態の解明

 研究課題名(英文) Study of the topological surface state in the topological Kondo insulator of rare earth hexaborides

 研究代表者
 有田 将司 (Arita, Masashi)

 広島大学・技術センター・技術専門職員

 研究者番号：20379910
 交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：トポロジカル近藤絶縁体SmB6と候補物質YbB6、それらの置換物質Sm1-xYbxB6やTm置換した系Yb1-xTmxB6について、角度分解光電子分光法を用い、強相関バルク電子状態のギャップ内に形成されるトポロジカル表面状態についての研究を行った。Yb1-xTmxB6の測定から、YbB6では、トポロジカル表面状態の存在は確認できなかった。Sm1-xYbxB6では、x=0.1においてSmB6との電子状態の違いは見られず、ロバストなトポロジカル表面状態が観測された。直線偏光依存性と温度依存性から、SmB6では、 Γ 点を中心とした円状のフェルミ面を持つトポロジカル表面電子状態が存在することが分かった。

研究成果の概要(英文)：We have investigated the topological Kondo insulator: SmB6, the candidate material: YbB6, compounds: Sm1-xYbxB6 and Yb1-xTmxB6 by means of angle resolved photoemission spectroscopy. In Yb1-xTmxB6, Dirac-cone-like band structure is observed at \bar{X} and $\bar{\Gamma}$ near EF. According to the band calculation, the structures are derived from bulk bands which have small overlap between valence and conduction bands. Thus, it is assumed that YbB6 is not the topological Kondo insulator.

Since there are no changes of the band structures between SmB6 and Sm0.9Yb0.1B6, the electronic structure of SmB6 are robust for the Yb substitution less than 10% of the Sm site. In SmB6, we found the metallic band structure which forms the circular Fermi surface centered at $\bar{\Gamma}$ point at 10 K. Metal insulator transition is clearly observed in the band between 30K and 60 K. It is concluded that the band stems from the topological surface state.

研究分野：数物系科学

キーワード：トポロジカル絶縁体 近藤絶縁体 角度分解光電子分光

1. 研究開始当初の背景

多体フェルミ粒子系の新しい量子相として注目を集めているトポロジカル絶縁体は、バンド絶縁体であるが、エネルギーギャップ内にギャップの無い金属電子状態が表面や界面に現れる物質である。時間反転対称性のあるスピン軌道相互作用の強い系では、スピン分極し、散逸の無いスピン流を生成する。この表面状態は、低エネルギーでディラック方程式に従い、バンド形状はディラックコーンを成すことが知られている [C. L. Kane and E. J. Mele, Phys Rev. Lett. 95, 146802(2005), Phys Rev. Lett. 95, 226801(2005)]。トポロジカル絶縁体では、基礎物性的な観点のみならず、スピントロニクスデバイス開発など応用上でも研究が進み、新奇トポロジカル絶縁体の探索もなされ、トポロジカル結晶絶縁体やトポロジカル近藤絶縁体などが提唱され、実験的な実証もなされてきていた。[Y. Tanaka et al., Nature Physics 8,800(2012), M. Dzero et al., Phys. Rev. Lett.104,106408(2010)]

2011年に近藤絶縁体表面のバルクエネルギーギャップ内にディラックコーンが形成される“トポロジカル近藤絶縁体”が理論予測された [T. Takimoto et al., J. Phys. Soc. Jpn. 80 123710 (2011)]。そのうちの 하나가 SmB_6 であり、近藤絶縁体として長年研究がされてきている。その表面のディラックコーンの観測が試みられているが、まだ明瞭な観測には至ってはいなかった [J. Jiang et al., Nat. Commun, 4, 3010(2013)]。また、 SmB_6 と同様な結晶構造を持つ YbB_6 でも、2014年に[111]表面と[100]表面の c-f 混成ギャップ内にディラックコーンの存在が予測された [Hongming Weng et al. Phys. Rev. Lett. 112 016403 (2014)]。代表者グループでも、 YbB_6 を磁性や強相関の観点から角度分解光電子分光測定を行い、劈開[001]面での測定で Γ 点にディラックコーンの下部と類似の形状のバンドが観測されていたが、“ディラックコーンかどうか?”、“トポロジカル絶縁体か?”について、結論はついていない状況であった。

2. 研究の目的

トポロジカル近藤絶縁体 SmB_6 及び YbB_6 について、角度分解光電子分光法を用い、エネルギーギャップ内のディラック電子状態を測定し、その詳細な電子構造測定を行う。バルクが強相関電子系の近藤絶縁体表面に存在する準粒子散乱が抑制された電子状態:ディラックコーンの電子軌道成分や、バルク電子状態との関係を明らかにする。強相関バルク電子状態近傍、狭ギャップ内にディラックコーンが存在することで、ディラック電子が 4f, 5d 電子との混成を受け準粒子散乱が増大することが予測される。また、近藤絶縁体は、温度によりエネルギーギャップ幅が変化し金属絶縁体転移を起こすが、この転移点周辺でのトポロジカル表面状態の状態変化に注目する。

また、伊賀(分担者)は、Tm を置換した $\text{Yb}_{1-x}\text{Tm}_x\text{B}_6$ ($x < 0.46$) の合成に成功した。これまで合成はされていない TmB_6 は、バンド計算では c-f

混成ギャップがフェルミ準位近傍に存在することがわかり、絶縁体になる可能性がある。この置換系では、磁性不純物である Tm を導入することでの時間反転対称性を破れによりディラック電子状態が壊れる転移、もしくは、ホールドープによる金属相への転移が起こると考えられる。Tm 置換系では、表面とバルク双方の多彩な電子状態の変化が観測でき、f 電子を舞台とした新しいディラック電子系の物理が展開できる。

具体的には、1) トポロジカル表面状態の存在を、 SmB_6 及び YbB_6 (また、その電子ドープ型) について角度分解光電子分光 (ARPES) 測定により確かめ、トポロジカル表面状態の分散形状フェルミ面の形状を調べる。さらにより詳細に直線偏光依存性を使った測定を行うことで、トポロジカル表面状態やバルクバンドを構成する電子軌道の対称性を明らかにし、バンド計算と組み合わせることで、構成する電子軌道の成分分離を行い、軌道成分が明らかにする。2) Tm 置換による YbB_6 は 4f ホールドープになるが、それによるバルク電子状態、物性が大きく変化する。電子状態がどのように変化するかを明らかにする。また YbB_6 と SmB_6 の混晶系において、電子状態がどのように変化するかを明らかにする。

トポロジカル絶縁体の表面電子状態は、散乱が抑制された準粒子状態をなしている。一方、近藤絶縁体のバルクギャップ端には、強相関電子が占めている。そのバルクの強相関電子が近傍に存在する、散乱が抑制されたトポロジカル表面電子という、相反する性質を持つ電子状態について明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、 $\text{Yb}_{1-x}\text{Tm}_x\text{B}_6$ ($x=0.0, 0.1, 0.2, 0.35$)、 $\text{Sm}_{1-x}\text{Yb}_x\text{B}_6$ ($x=0.0, 0.1, 0.8, 0.9, 1.0$) について、研究を進めた。フローティングゾーン法で育成した試料に対し、ラウエ像を撮り、純良な単結晶性が得られていることを確かめた。測定は、広島大学放射光科学研究センター HiSOR BL-9A にて、高分解能 ARPES を実施した。試料の方位を確認したのち、極高真空下へ導入後、[001]面を劈開し、清浄表面を得た。 $\text{Yb}_{1-x}\text{Tm}_x\text{B}_6$ に関しては、X 点を中心としたトポロジカル表面状態の存在が予測されているため、kz 依存性を考慮し垂直放出で X 点付近を観測できる $h\nu \sim 30\text{eV}$ を入射光として ARPES 測定を行った。一方、 $\text{Sm}_{1-x}\text{Yb}_x\text{B}_6$ に対しては、 Γ 点周りにおいて、トポロジカル表面状態の存在が予測されているため、垂直放出で Γ 点付近を観測できる $h\nu \sim 26\text{eV}$ を入射光として ARPES 測定を行った。これらの測定では、検出面(入射面)に対し水平と垂直の直線偏光を入射光として利用し、直線偏光依存性スペクトルを得た。水平偏光配置は、P 偏光配置、垂直偏光配置は S 偏光配置と呼ばれ、それぞれ、検出面に偶対称と奇対称の電子軌道が主に観測される。これによりバンド構造の分離、電子軌道の対称性の議論に利用した。

4. 研究成果

1) $\text{Yb}_{1-x}\text{Tm}_x\text{B}_6$ ($x=0.0, 0.1, 0.2, 0.35, 1.0$)

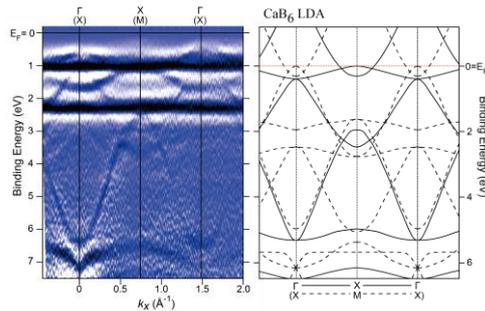


図1

トポロジカル近藤絶縁体の候補物質である YbB_6 の価電子帯全体の ARPES スペクトルを図1に示す。すべての電子状態を観測するために円偏光、 $h\nu=30.6\text{eV}$ の励起光を用い、試料温度は 10K 、表示は強度の2階微分のスペクトルとなっている。 $E=1.1, 2.2\text{eV}$ にある局在バンドは、 $4f_{7/2} 4f_{5/2}$ であり、広い分散は、 $B 2\text{sp}$ と帰属できる。 $E < -10\text{eV}$ に Yb^{3+} の構造は見られなかったため、 YbB_6 中の Yb は完全 2 価であることが分かった。ここでバンド計算と比較すると、価電子帯の構造は、閉殻である $4f$ を除き、エネルギーシフトを考慮すれば、 CaB_6 のバンド構造とほぼ同一であることが分かる。また、 $h\nu \sim 30\text{eV}$ では、電子の脱出深度が浅いことから、 k_z 依存性が弱くなり、高対称線 $\Gamma-X$ と $X-M$ のバンドが同時に観測されている。

次に YbB_6 ($x=0.0$) と Yb を Tm に置換した $\text{Yb}_{0.9}\text{Tm}_{0.1}\text{B}_6$ ($x=0.1$)、 $\text{Yb}_{0.8}\text{Tm}_{0.2}\text{B}_6$ ($x=0.2$) の価電子帯全体の ARPES スペクトルを比較する。図2に a) $x=0.0$ 、b) $x=0.1$ 、c) $x=0.2$ に対して、S 偏光配置と P 偏光配置で測定した結果を示す。高結合エネルギー側に $x=0.1$ では、 -80meV 、 $x=0.2$ では -140meV のリジッドバンド的エネルギーシフトが見られる。 Tm は、 Yb より電子数が 1 つ少ないことから、 Tm 置換によりホールドーピング型になると予測されたが、逆に電子ドーピングされる様子が見られ、ことから、 Tm は形式価数 3 価 (d^2) で Yb と置換されていることが分かる。これは、硬 X 線光電子分光測定の結果とも一致している。また、d)、e)、f) に $x=0.0, 0.1, 0.2$ に対するフェルミ準位近傍、S 偏光配置と P 偏光配置で測定した ARPES スペクトルを示す。 $x=0.0$ では、明瞭に観測されていないが、電子ドーピングされた $x=0.1, 0.2$ については、S 偏光配置では、上に凸型のバンドと P 偏光配置では、下に凸型のバンド形状が、 Γ 点、 \bar{X} 点に観測された。

これらのバンド形状の詳細を調べるために図3に、 $\text{Yb}_{0.9}\text{Tm}_{0.1}\text{B}_6$ ($x=0.1$) の S 偏光配置、測定温度 15K 、フェルミ準位から $E = -0.8\text{eV}$ までの

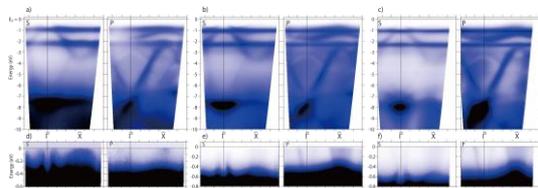


図2

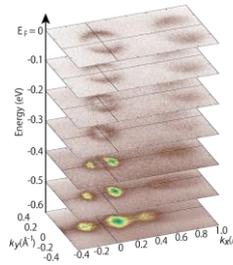


図3

ARPES スペクトルの k_x - k_y マップを等エネルギー面表示で示す。 $(k_x, k_y) = (0, 0) \text{ \AA}^{-1}, (0.72, 0) \text{ \AA}^{-1}$ は、それぞれ表面ブリルアンゾーン Γ 点、 \bar{X} 点に対応する。両点に $E = -0.3 \sim -0.4\text{eV}$ に収斂構造を持つディラックコーン状の分散が見られ、 k_x, k_y 方向

に対し強い強度変調が観測された。検出面 ($k_y=0$) では、S 偏光配置と P 偏光配置での測定結果である図2 e) と比較し、コーン下部 (ホールのバンド) は、S 偏光配置で、コーン上部 (電子のバンド) は、P 偏光配置で明瞭に観測される。つまり、コーン下部は、奇対称の電子軌道を持ち、コーン上部では偶対称の電子軌道を持つことが分かり、このことからトポロジカル表面状態とは考えにくい。さらに、 \bar{X} 点周辺のコーン下部の等エネルギー面での形状は、 k_x 方向に長い楕円状をしており、バルクのバンド計算から予測される形状と一致する (図1のバンド計算結果参照)。

次に、 $\text{Yb}_{0.65}\text{Tm}_{0.35}\text{B}_6$ ($x=0.35$) の価電子帯全体の ARPES スペクトルの結果を示す。 Yb^{2+} の局在バンドは観測されず、 $x=0.2$ と $x=0.35$ の間で、 Yb の 2 価から 3 価への価数転移を起こすことが分かる。 $B 2\text{sp}$ バンドは YbB_6 と比較して、高結合エネルギー側に約 1eV のリジッドバンド的シフトがある。 CaB_6 とのバルクのバンド計算との比較をすると、観測されるすべての構造がバルクの計算結果に帰属できる。

ここまでの結果から、 $x=(0.0,) 0.1, 0.2$ で観測されるディラックコーン状のバンド構造は、図4よりコーン上部は、バンド d、バンド e に、コーン下部はバンド a、バンド b に帰属することができる。計算の結果も含めるとコーン上部は、偶対称であることから $\text{Yb } 5d e_g$ 、コーン下部は、奇対称であることから $B 2p_y$ であることが分かる。よって YbB_6 で理論予測されるトポロジカル表面状態は ARPES で観測されず、類似の分散形状は、バルクのバンド構造と考えられる。

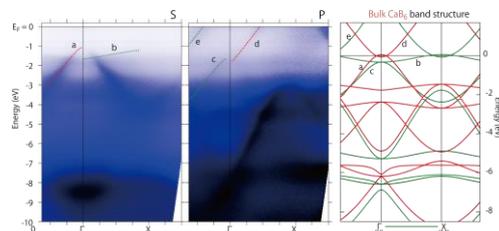


図4

2) -1 $\text{Sm}_{1-x}\text{Yb}_x\text{B}_6$ ($x=0.0, 0.1$)

研究開始時には、 SmB_6 の ARPES 測定、また、Spin 分解 ARPES 測定がなされ、低温で $c-f$ 混成ギャップ中にトポロジカル表面状態が存在するとの報告はなされていた [N. Xu et al., Nat. Comms. 5566 (2014)]. しかしながら、 Yb 置換や理論予測されている Γ 点を中心としたトポロジカル表面状態については、結論が出ていなかった。これらについて解明するために研究を進めた。

図5に測定温度 10K、P 偏光配置、入射光エネルギー $h\nu=26\text{eV}$ 、 $\bar{\Gamma}$ - \bar{X} 方向での SmB_6 の a)価電子帯全体と、b)フェルミ準位近傍の ARPES スペクトルを示す。E=-20, -140 meV に $\text{Sm}^{2+} 4f$ の局在バンドが観測され、それを除き大きく分散を示すバンドは、約-1.8eV 以下では B 2sp、約-1.8eV 以上は Sm 5d と帰属できる。B 2sp と Sm 5d の分散形状は、 CaB_6 のバンド計算の結果を約-2eV シフトさせたものとはほぼ一致する(図1参照)。Sm 5d バンドは、フェルミ準位近傍の 2 本の 4f バンドと強く混成する様子が観測される。図5 c)に、10K で測定したフェルミ準位極近傍の ARPES スペクトルを示す。近藤絶縁体である SmB_6 は10K でバルクでは絶縁体であるが、4f と混成した 5d バンドが、フェルミ準位に達しており、金属的バンド構造が観測される。このバンドは、スピン縮退が解けており、フェルミ準位上でヘリカルスピン構造を持つことからトポジカル表面状態であると結論付けられている[N. Xu et al., Nat. Comms. 5566 (2014)]。

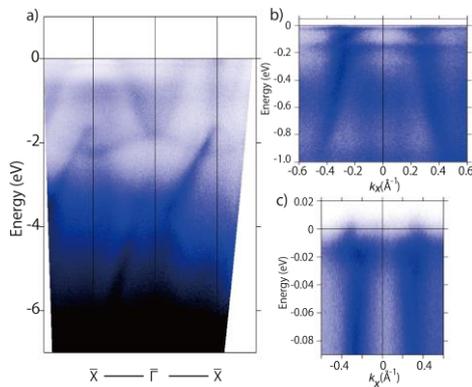


図5

不純物効果を調べるために Sm を Yb に 10% 置換した系 $\text{Sm}_{0.9}\text{Yb}_{0.1}\text{B}_6$ について測定を行った。図6 a) b)に、測定温度 10K、P 偏光配置、入射光エネルギー $h\nu=26\text{eV}$ 、 $\bar{\Gamma}$ - \bar{X} 方向での ARPES スペクトルを示す。また、c) フェルミ準位近、 $(k_x, k_y)=(0,0)$ でのエネルギー方向の強度スペクトルを示す。Sm 4f のエネルギー位置、B 2sp バンド形状やエネルギー位置に差は無く、フェルミ準位近傍のトポジカル表面状態にも、顕著な変化は見られなかった。よって Yb 10%以下の置換に対しては、“ロバスト”であることが分かった。今後、置換量を増やした物質での研究が必要である。

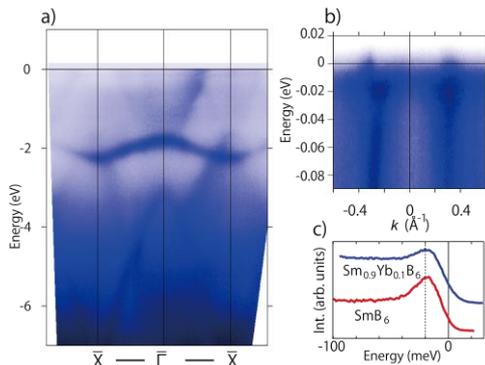


図6

SmB_6 のトポジカル表面状態が形成するフェルミ面形状を調べるために、フェルミ面マッピングを行った。図7に P 偏光配置と S 偏光配置で測定したフェルミ準位上の ARPES 強度マップを示す。P 偏光配置では、第一ブリルアンゾーン \bar{X} 点を中心とした楕円状のホールのフェルミ面が観測された。一方、 $\bar{\Gamma}$ 点周りでは、明瞭な構造が見られなかった。第二ブリルアンゾーンには、 $\bar{\Gamma}$ 点を中心としたリング状と円形の2つのフェルミ面が観測された。S 偏光配置でも同様に、第一ブリルアンゾーン \bar{X} 点を中心とした楕円状のフェルミ面が観測されたが、 $k_y=0$ の $\bar{\Gamma}$ - \bar{X} 線では、強度が抑制される様子が観測された。 $\bar{\Gamma}$ 点周辺では、弱い円形の構造と $\bar{\Gamma}$ 点上に強度が観測された。第二ブリルアンゾーンでは、P 偏光配置とは違い、 \bar{X} 点を中心とした楕円上のフェルミ面の一部が観測された。

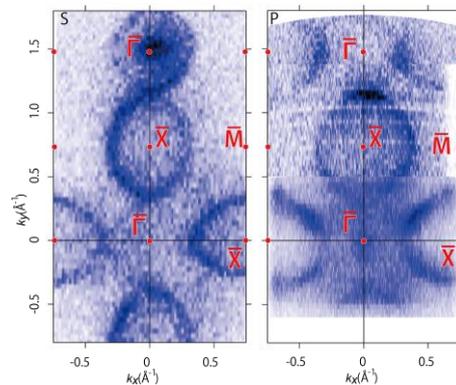


図7

これまで $\bar{\Gamma}$ 点周辺の構造は、 SmB_6 の劈開面が 2×1 や 2×2 表面再構成を起こす場合があるが、それによるウムクラップ散乱による折り畳みの構造であるとの報告がある。また、 $\bar{\Gamma}$ 点近傍に小さいフェルミ面が形成されているなどの報告がなされている[J. Jiang et al., Nat Comms 4010 (2013), N. Xu et al., Nat. Comms. 5566 (2014)]。そこで、 $\bar{\Gamma}$ 点周辺のフェルミ面や電子構造を調べるために、S 偏光配置での詳細な測定を行った。

図8 a)に、S 偏光配置、入射光エネルギー $h\nu=26\text{eV}$ 、 $\bar{\Gamma}$ - \bar{X} 方向での SmB_6 のフェルミ準位近傍の ARPES スペクトルの温度変化測定の結果を示す。10K のスペクトルでは、 $k=\pm 0.3 \text{\AA}^{-1}$ (β バンド)とその内側に $|k| < 0.1 \text{\AA}^{-1}$ (α バンド)でフェルミ準位に達する金属的バンドが観測された。また、S 偏光配置での $\bar{\Gamma}$ - \bar{M} 方向の ARPES スペクトルを図8 b)に示す。この方向においても同様に 2 本のバンドが $k=\pm 0.3 \text{\AA}^{-1}$ とその内側 $|k| < \pm 0.1 \text{\AA}^{-1}$

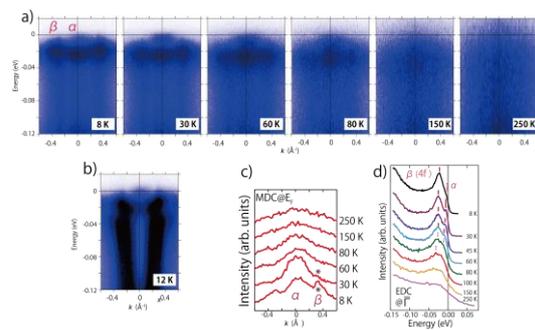


図8

でフェルミ準位に達している。よって、 Γ 点中心に半径 0.3 \AA^{-1} のリング状のフェルミ面と半径 0.1 \AA^{-1} 以下のフェルミ面が存在することが分かった。この2つのフェルミ面は、P 偏光配置、第二ブリルアンゾーン Γ 点周辺でも観測でき、明瞭な直線偏光依存性を示している。このことから、これら、 Γ 点のフェルミ面は、ウムクラップ散乱による構造とは考えにくい。次に、温度変化に注目する。図 8c)と d)に、フェルミ準位上の運動量方向の強度スペクトルと $(k_x, k_y)=(0,0)$ でのエネルギー方向の強度スペクトルを示す。外側の β バンドは、30K 以下で金属的であり60K より高温では、フェルミ準位に強度を持たず、金属絶縁体転移を起こす。一方、 α バンドは、30K で最大強度となり、60K 以上で β バンド(や Sm 4f)と重なる様子が観測され、 β バンドが観測されない 250K においても、強度が残留している。よって、 α バンドはバルクの伝導帯に帰属されると考えられる。SmB₆ は抵抗率測定より、50~100K で金属絶縁体転移を起こし、低温で絶縁体になることが分かっているが、 β バンドは、その振る舞いと逆となっている。これは、c-f 混成によるバルクのエネルギーギャップ中に存在するトポロジカル表面状態が、昇温と共に混成ギャップが閉じ、消失する様子をとらえたものと考えられる。つまり、 β バンドは、 Γ 点を中心とするトポロジカル表面状態であり、 α バンドは、バルクの伝導帯の底を観測しているものであると結論付けられる。

2) -2 Sm_{1-x}Yb_xB₆ (x=0.8,0.9,1.0)

YbB₆ 近傍の物質 x=0.8,0.9 について、Sm の置換効果を調べるために ARPES 測定を行った。図 9 a)と b)に x=0.8 に対して測定温度 10K、P 偏光配置での価電子帯全体のスペクトルとフェルミ準位近傍のスペクトルを示す。また $(k_x, k_y)=(0,0)$ でのエネルギー方向の強度スペクトルを c)x=0.8 のフェルミ準位近傍と、d) x=0.8,0.9,1.0 の価電子帯全体について示す。YbB₆ (x=1.0)に対して x=0.9 では-80meV、x=0.8 では-160meV のエネルギーシフトが見られ、電子ドープされることが分かった。よって、置換された Sm は主として3価であると考えられる。一方、フェルミ準位近傍では、Sm²⁺ 4f の局在バンドが観測されている。エネルギーは E=-20, -160meV で SmB₆ とほぼ一致する。Yb 5d_{eg} バンドと Sm 4f バンドの明瞭な混成の様子は観測されず、x \geq 0.8 では Sm は不純物的にふるまうことが分かった。

今後、Sm_{1-x}Yb_xB₆ については、0.1<x<0.8につ

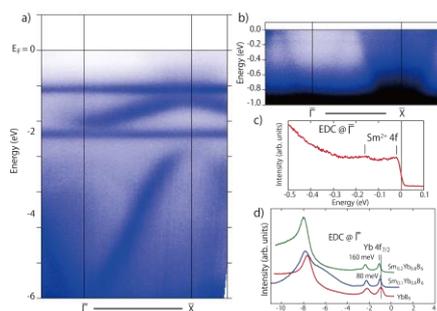


図 9

いて、測定を進め、近藤温度、金属絶縁体転移温度とトポロジカル表面状態の相関について明らかにしていきたい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

- ① J. He, T. Hogan, T. R. Mion, H. Hafiz, Y. He, J. D. Denlinger, S. K. Mo, C. Dhital, X. Chen, Q. Lin, Y. Zhang, M. Hashimoto, H. Pan, D. H. Lu, M. Arita, K. Shimada, R. S. Markiewicz, Z. Wang, K. Kempa, M. J. Naughton, A. Bansil, S. D. Wilson, and R.-H. He, spectroscopic evidence for negative electronic compressibility in a quasi-three-dimensional spin-orbit correlated metal, 査読有, Nature Materials 14, 577 (6 pages) (2015).
- ② S. Ito, B. Feng, M. Arita, A. Takayama, R. Y. Liu, T. Someya, W. C. Chen, T. Iimori, H. Namatame, M. Taniguchi, C. M. Cheng, S. J. Tang, F. Komori, K. Kobayashi, T. C. Chiang, and I. Matsuda, Proving Nontrivial Topology of Pure Bismuth by Quantum Confinement, 査読有, Physical Review Letters 117, 236402 (6 pages) (2016).
- ③ M. Horio, T. Adachi, Y. Mori, A. Takahashi, T. Yoshida, H. Suzuki, L. C. C. Ambolode li, K. Okazaki, K. Ono, H. Kumigashira, H. Anzai, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, D. Ootsuki, K. Sawada, M. Takahashi, T. Mizokawa, Y. Koike, and A. Fujimori, Suppression of the antiferromagnetic pseudogap in the electron-doped high-temperature superconductor by protect annealing, 査読有, Nature Communications 7, 10567 (8 pages) (2016).
- ④ S.-L. Wu, K. Sumida, K. Miyamoto, K. Taguchi, T. Yoshikawa, A. Kimura, Y. Ueda, M. Arita, M. Nagao, S. Watauchi, I. Tanaka, and T. Okuda, Direct evidence of hidden local spin polarization in a centrosymmetric superconductor LaO_{0.55}F_{0.45}Bi₂, 査読有, Nature Communications 8, 1919 (7 pages) (2017).
- ⑤ B. Feng, B. Fu, S. Kasamatsu, S. Ito, P. Cheng, C.-C. Liu, Y. Feng, S. Wu, S. K. Mahatha, P. Sheverdyevaeva, P. Moras, M. Arita, O. Sugino, T.-C. Chiang, K. Shimada, K. Miyamoto, T. Okuda, K. Wu, L. Chen, Y. Yao, and I. Matsuda, Experimental realization of two-dimensional Dirac nodal line fermions in monolayer Cu₂Si, 査読有, Nature Communications 8, 1007(6 pages) (2017).
- ⑥ H. Anzai, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, M. Ishikado, K. Fujita, S. Ishida, S. Uchida, and A. Ino, A New Landscape of

- Multiple Dispersion Kinks in a High-T_c Cuprate Superconductor, 査読有, Scientific Reports 7, 4830 (8 pages) (2017).
- ⑦ M. Yan, H. Huang, K. Zhang, E. Wang, W. Yao, K. Deng, G. Wan, H. Zhang, M. Arita, H. Yang, Z. Sun, H. Yao, Y. Wu, S. Fan, W. Duan, and S. Zhou, Lorentz-violating type-II Dirac fermions in transition metal dichalcogenide PtTe₂, 査読有, Nature Communications 8, 257 (6 pages) (2017).
- ⑧ D. Song, G. Han, W. Kyung, J. Seo, S. Cho, B. S. Kim, M. Arita, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, Y. Yoshida, H. Eisaki, S. R. Park, and C. Kim, Electron Number-Based Phase Diagram of Pr_{1-x}LaCe_xCuO_{4-δ} and Possible Absence of Disparity between Electron- and Hole-Doped Cuprate Phase Diagrams, 査読有, Physical Review Letters 118, 137001 (5 pages) (2017).
- ⑨ S. Ito, B. Feng, M. Arita, T. Someya, W. C. Chen, A. Takayama, T. Iimori, H. Namatame, M. Taniguchi, C. M. Cheng, S. J. Tang, F. Komori, and I. Matsuda, Alkali-metal induced band structure deformation investigated by angle-resolved photoemission spectroscopy and first-principles calculations, 査読有, Physical Review B 97, 155423 (8 pages) (2018).
- ⑩ B. Feng, J. Cao, M. Yang, Y. Feng, S. Wu, B. Fu, M. Arita, K. Miyamoto, S. He, K. Shimada, Y. Shi, T. Okuda, and Y. Yao, Experimental observation of node-line-like surface states in LaBi, 査読有, Physical Review B 97, 155153 (7 pages) (2018).

[学会発表] (計5件)

- ① 有田将司, 佐藤仁, 生天目博文, 谷口雅樹, 伊賀文俊, Yb_{1-x}Tm_xB₆の角度分解光電子分光, 日本放射光学学会年会, 2016年01月09日~11日, 千葉県柏市
- ② 小山内湧人, 菊地翔弥, 伊賀文俊, 水戸毅, 佐藤桂輔, 近藤晃弘, 金道浩一, 価数揺動系 Sm_{1-x}R_xB₆ (R=Yb²⁺, La³⁺, Zr⁴⁺)のエネルギーギャップの組成依存性と厚み依存性, 日本物理学会 秋季大会, 2015年09月16日~19日, 大阪府吹田市
- ③ 平野航, 江村雄輔, 近藤晃弘, 金道浩一, 伊賀文俊, 価数揺動系 Tm_xR_{1-x}B₆ (R=Ca, Sr)の磁性・伝導における x 依存性, 日本物理学会 年次大会, 2016年03月19日~22日, 宮城県仙台市
- ④ M. Arita, H. Sato, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, H. Tanida, W. Hirano, Y. Osanai, K. Hayashi, F. Iga, Angle resolved photoemission study of Sm_{1-x}Yb_xB₆, International workshop on strong correlations and angle-resolved photoemission spectroscopy, July 2-7, 2017, Hiroshima, Japan

- ⑤ 有田将司, 佐藤仁, 島田賢也, 生天目博文, 谷口雅樹, 谷田博司, 平野航, 小山内湧人, 林健人, 伊賀文俊, Sm_{1-x}Yb_xB₆の角度分解光電子分光, 日本放射光学学会年会, 2018年1月09日~11日, 茨城県つくば市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

有田 将司 (Arita Masashi)
 広島大学・技術センター・技術専門職員
 研究者番号: 20379910

(2) 研究分担者

伊賀 文俊 (Iga Fumitoshi)
 茨城大学・理学部・教授
 研究者番号: 60192473

(3) 連携研究者

島田 賢也 (Shimada Kenya)
 広島大学・放射光科学研究センター・教授
 研究者番号: 10284225