

# 近藤絶縁体 $\text{SmB}_6$ (111)のトポロジカル表面電子状態 Topological Surface State on Kondo Insulator $\text{SmB}_6$ (111)

大坪嘉之<sup>1\*</sup>, 山下雄紀<sup>1</sup>, 湯川龍<sup>2</sup>, 堀場弘司<sup>2</sup>, 組頭広志<sup>2</sup>, 平野航<sup>3</sup>, 伊賀文俊<sup>3</sup>, 木村真一<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup>大阪大学, 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-3

<sup>2</sup>物質構造科学研究所, 放射光科学研究施設 〒305-0801 つくば市大穂 1-1

<sup>3</sup>茨城大学, 〒310-8512 茨城県水戸市

Yoshiyuki OHTSUBO<sup>1\*</sup>, Yuki YAMASHITA<sup>1</sup>, Ryu YUKAWA<sup>2</sup>, Koji HORIBA<sup>2</sup>,  
Hiroshi KUMIGASHIRA<sup>2</sup>, Wataru HIRANO<sup>3</sup>, Fumitoshi IGA<sup>3</sup> and Shin-ichi KIMURA<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup>Osaka University, 1-3 Yamadaoka, Suita, 565-0871 Japan

<sup>2</sup>Institute of Materials Structure Science, Photon Factory,  
1-1 Oho, Tsukuba, 305-0801, Japan

<sup>3</sup>Ibaraki University, Mito, 310-8512 Japan

## 1 はじめに

バルク電子構造の対称性により分類され、非自明な電子状態を示す、いわゆるトポロジカル物質に関する研究は近年極めて盛んに行われている。なかでも強い電子相関とトポロジカル秩序相の共存により実現するトポロジカル近藤絶縁体(TKI: Topological Kondo Insulator)は、両者の協奏による新奇トポロジカル電子物性の発現を期待されている興味深い物質群である[1]。

しかしながら今日に至るまで、TKIの実験的な研究事例は豊富とは言い難い。これはTKI候補物質のなかで、実験的にその表面電子状態を観測可能な清浄かつ一様な表面構造を準備可能なのが $\text{SmB}_6$ の(001)表面にほぼ限られてしまっていたためである。 $\text{SmB}_6$ (001)の表面電子状態に関する研究は2012年の宮崎等による報告[2]を皮切りにして多数行われてきたが、試料が限られていたために得られた表面電子状態の特徴が $\text{SmB}_6$ (001)に特有のものか、それともTKIのトポロジカル表面状態において普遍的に成立するものであるのかの弁別が困難であった。そのため得られた電子状態の解釈はいまだ定まっているとはいえず、 $\text{SmB}_6$ がTKIであるか否かという基礎的な議論においてすら可否それぞれの解釈が並立していた[3]。

筆者等は独自の手法によりTKI候補物質である希土類硼化物単結晶( $\text{SmB}_6$ および $\text{YbB}_{12}$ )の清浄表面を面指数を問わずに作製することに成功し、 $\text{YbB}_{12}$ (001)が第2のTKIとして極めて有力であることを示した[4]。そこで本申請課題では同様の手法を $\text{SmB}_6$ 単結晶に適用し、これまでの方法では得られていなかった面方位である3回対称な(111)清浄面を作製することを試みた。さらに、得られた $\text{SmB}_6$ (111)清浄面に対してPF-BL2Aにおいて角度分解光電子分光(ARPES: Angle-Resolved PhotoElectron

Spectroscopy)を用いてその電子状態のトポロジーを決定した。

## 2 実験

$\text{SmB}_6$ 単結晶はフローティングゾーン法により育成した。単結晶試料は(111)方位に切り出した後、大気中で機械研磨を行い、顕微鏡で大きな疵が見えなくなる程度の平坦な鏡面を準備した。続いて単結晶試料をBL-2A エンドステーションの試料準備槽内に搬送し、超高真空中で1400°Cまで加熱することで表面の清浄化を行った。清浄面の確認として電子回折パターンと内殻準位の光電子分光の測定を行った[5]。

$\text{SmB}_6$ (111)表面電子状態の観測はPhoton Factory BL-2Aにおいて行った。ARPES測定は円偏光した35 eVの入射光を用い、試料温度は15 K程度の低温に保った。この測定におけるエネルギー分解能は試料と電気的に接触したTa箔のフェルミエッジ測定によって較正したが、約15 meVであった。

## 3 結果および考察

図1に $\text{SmB}_6$ 単結晶の原子構造モデルと清浄化後の(111)表面から得られた電子回折パターンを示す。図1(a)に示すように(111)面は3回対称かつ鏡面を持つ $C_{3v}$ 対称性を示すが、得られた電子回折パターン

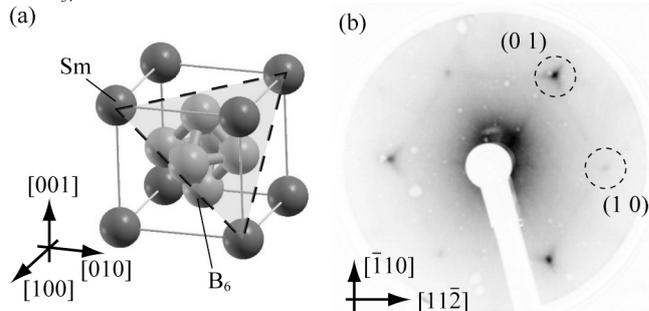


図1: (a)  $\text{SmB}_6$ 単結晶の結晶構造 (b)  $\text{SmB}_6$ (111)清浄化後の低速電子回折パターン。22 eVで測定。

はこれを反映する明瞭な回折スポットを示しており、清浄面が得られたことを示している。

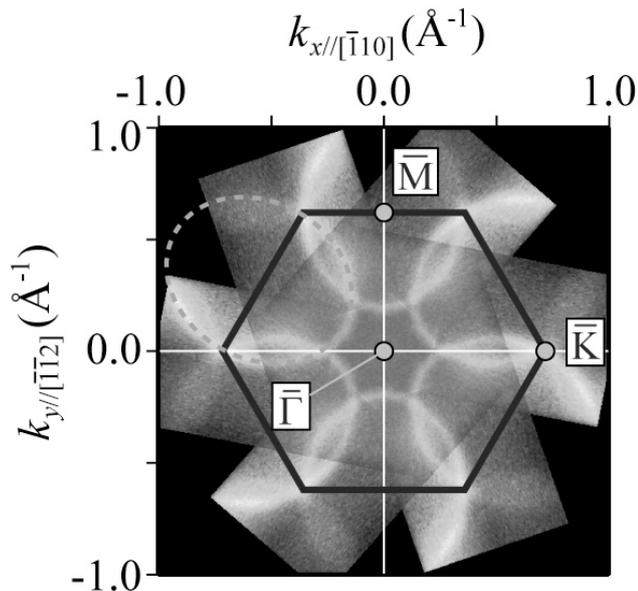


図2：ARPES 測定により得られた  $\text{SmB}_6(111)$  清浄面の表面電子状態によるフェルミ面。 $C_{3v}$  対称性に基づき対称化し、さらに左右円偏光による測定結果を足し合わせて表示している。

以上の様にして得られた  $\text{SmB}_6(111)$  清浄面において ARPES 測定を行ったところ、フェルミ準位を横切る金属的な電子状態を観測した。 $\text{SmB}_6$  のバルク電子状態は低温で近藤効果により絶縁体化することが広く知られていることと、得られた電子状態が表面垂直方向の分散を持たない2次元的な特徴を示したことから、この金属的な電子状態は(111)表面に由来するものであることが明らかになった。

得られたフェルミ面の形状を観察すると、(111)表面状態は表面ブリルアンゾーンの  $\bar{M}$  点を取り囲む楕円状の閉じたフェルミ面を形成することが見て取れる。(111)表面において非等価な  $\bar{M}$  点は3点あるため、この表面には3つの閉じたフェルミ面が表面電子状態により形成されていることが明らかになった。この状況は TKI のトポロジカル表面電子状態について理論的に予測されているものと良く一致しており、 $\text{SmB}_6$  が TKI であることを強く示唆している。

#### 4 まとめ

我々は TKI 候補物質  $\text{SmB}_6$  においてこれまで得られていなかった(111)方位の清浄面を作製し、その表面電子状態を ARPES により観測した。得られたフェルミ面形状は  $\text{SmB}_6$  がたしかに TKI であることを強く示唆した。このトポロジカル表面電子状態に関する論文を現在投稿中である [6]。

#### 謝辞

ARPES 実験に際して協力していただいた大阪大学の Wang, Chengwei 氏にこの場を借りて感謝いたします。また、本研究は科研費の支援を受けて行われました(課題番号：JP15H03676, JP17K18757)。

#### 参考文献

- [1] M. Dzero *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 106408 (2010).
- [2] H. Miyazaki *et al.*, *Phys. Rev. B* **86**, 075105 (2012).
- [3] P. Hlawenka *et al.*, *Nature Commun.* **9**, 517 (2018).
- [4] K. Hagiwara *et al.*, *Nature Commun.* **7**, 12690 (2016).  
および PF 課題番号 2015G540
- [5] Y. Ohtsubo *et al.*, *Physica B: Condens. Matt.* **536**, 75 (2017).
- [6] Y. Ohtsubo *et al.*, *arXiv*: 1803.09433 (2018).

#### 成果

上記参考文献のうち、[5]および[6]は本課題の成果になります。

\* y\_oh@fbs.osaka-u.ac.jp

\*\* kimura@fbs.osaka-u.ac.jp