



ポロジカル表面状態が出現する。

図 1 にレーザーで測定した $\beta$ -Bi<sub>4</sub>I<sub>4</sub> の ARPES 結果を示す。本測定で用いたレーザー光のスポットサイズは 50  $\mu\text{m}$  程度であり試料表面のドメインに対して十分に大きいため、上面・側面の 2 つの面のバンド分散の重ね合わせが観測される。図 1(d) から、すべての角度でディラック型の分散が観測されており、図 1(c) に見られる擬一次元のフェルミ面を構成していることが分かる。このような擬一次元のディラック型状態は、バルクバンドや STI に現れるディラックコーン型の表面バンドでは説明できず、また (100) 面の  $\bar{\Gamma}$  点と  $\bar{Z}$  点に対応する角度でギャップレスとなっている特徴から、WTI に現れる側面表面状態であると考えられる。そこでスピン分解 ARPES 測定を行ったところ、図 1(e) に示すように側面 (100) 面内に強いスピン偏極が観測され、測定されたバンドが実際に側面のトポジカル表面状態であることが示唆された。

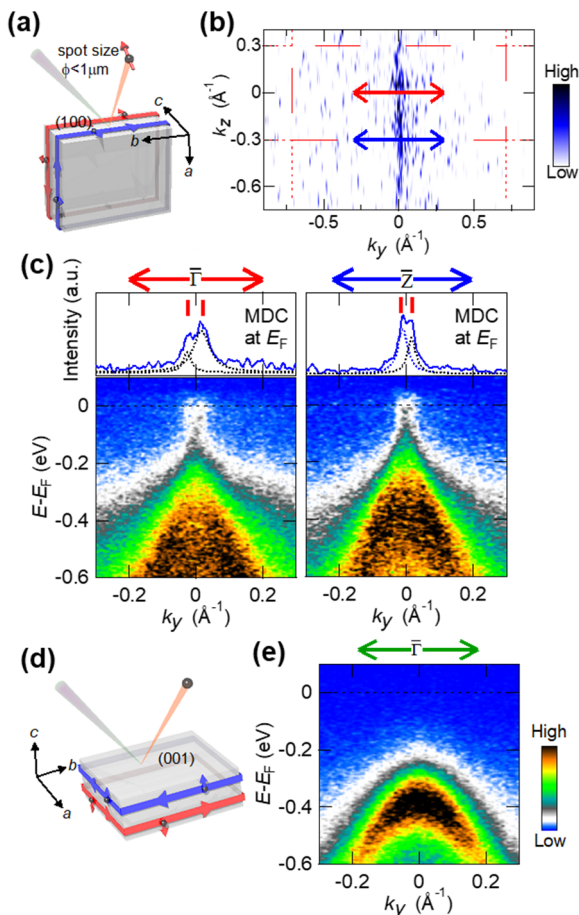


図 2 (a) Nano-ARPES による側面選択測定の概略。(b) 側面 (100) のフェルミ面マッピング結果。(c) 高対称点を通る ARPES 画像とフェルミ準位での運動量分散曲線 (MDC)。MDC ではディラック分散に対応する 2 つのピーク構造が確認できる。(d) 上面選択測定の概略。(e) (001) 面の  $\bar{\Gamma}$  点を通る ARPES 画像。

しかし前述したようにレーザーARPES では上面・側面を同時に測定しているため、放射光を利用して励起光のスポットサイズを 1  $\mu\text{m}$  以下に絞った nano-ARPES 装置を用いることで、上面と側面の表面選択測定を行い、ディラック型のバンドの由来を決定した。厚さ 30  $\mu\text{m}$  程度の薄い試料をサンプルホルダーに垂直に固定し、スコッチテープを使って直接側面を劈開することで試料側面のみでの ARPES 測定を行った(図 2(a))。測定されたフェルミ面は一次元的な光電子強度から形成されており、(100) 面の特徴と対応することが分かった。さらに  $\bar{\Gamma}$  点と  $\bar{Z}$  点を通るカットで ARPES 測定を行った結果を図 2(c) に示す。Diamond の nano-ARPES ではゾンプレート方式でスポットサイズを絞るため、励起光の強度が通常の測定装置の数 100 分の 1 程度となっている。そのため、一つの角度での光電子分布を 4 時間程度積算することで、十分なシグナルを得ることができた。運動量分布曲線から、フェルミ準位で 2 つのピーク構造が形成されており、ディラック型の分散が測定されていることが分かる。一方で (001) 面の測定も行ったところ、このような特徴は見られず(図 2e)、レーザーで測定された擬一次元状態は側面 (100) のみに出現する WTI の表面状態であることが結論できた。

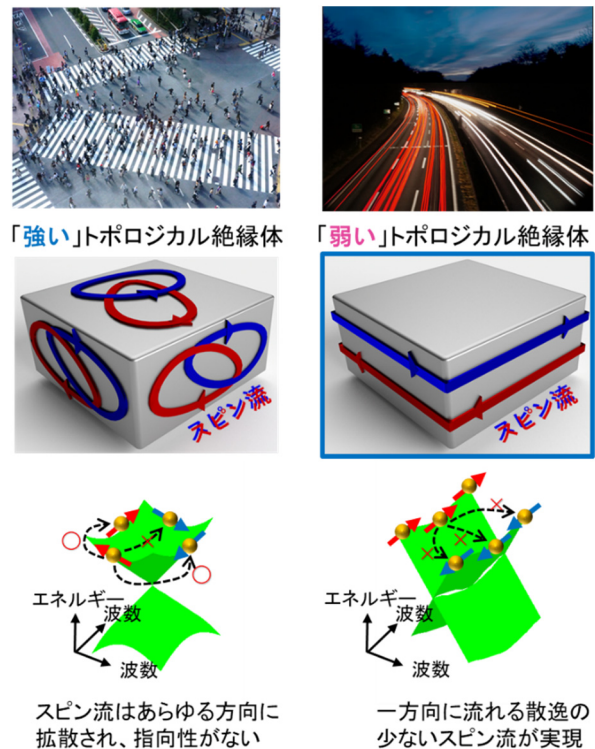


図 3 「強い」・「弱い」トポジカル絶縁体のイメージと概略図。「強い」トポジカル絶縁体では表面スピン流があらゆる方向に拡散していくのに対して、「弱い」トポジカル絶縁体では、散逸の少ない擬一次元スピン流が結晶側面を流れる。

まとめと今後の展望：

レーザー光と放射光を組み合わせた測定によって、 $\beta$ - $\text{Bi}_4\text{I}_4$ で擬一次元の表面状態が側面に出現する WTI 相が実現していることが分かった。発見した状態は WTI 相の中でも最もシンプルな構造であり、量子スピンホール絶縁体(2次元トポロジカル絶縁体)の3次元版と考えることができる。量子スピンホール絶縁体では、試料の1次元エッジに純スピン流が流れるが、WTIでは、2次元空間である側面に擬一次元のスピン流が流れる。そのため、これまで見つかってきた2次元面内で拡散的な STI の表面状態とは大きく異なり、後方散乱の影響を受けにくい、高指向性のスピン流が高密度で存在していると考えられる(図 3)。これは「弱い」トポロジカル絶縁体ならではの理想的なスピン流が実現していることを意味している。さらに  $\text{Bi}_4\text{I}_4$  は、結晶構造が異なる  $\alpha$  相で通常の絶縁体となるという性質も本研究により確かめられた。これは構造相転移を利用した表面スピン流の制御が可能であることを示しており、スピン流を利用したトランジスタなど、新しい省エネルギーデバイスの研究に発展することが期待される。

謝辞：

本研究は東京工業大学フロンティア材料研究所の笹川崇男准教授、東京大学工学系研究科の有田亮太郎教授、大阪大学理学研究科の越智正之博士、産業技術総合研究所の白澤徹郎博士、東京大学物性研究所の辛埴教授、矢治光一郎助教らとの共同研究として行われました。この場をお借りして御礼申し上げます。

[1] L. Fu, C. L. Kane, and E. J. Mele, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 106803 (2007).  
 [2] Y. Xia *et al.*, *Nat. Phys.* **5**, 398 (2009).  
 [3] G. Autès *et al.*, *Nat. Mater.* **15**, 154 (2016).  
 [4] C.-C. Liu *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 066801 (2016).  
 [5] R. Noguchi *et al.*, *Nature*, **566**, 518 (2019).  
 [6] K. Yaji *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **87**, 53111 (2016).

