

スピン流を超簡単に on/off スwitchング

～ 結晶を曲げるだけでトポロジカル相を自在に制御 ～

極限コヒーレント光科学研究センター Chun Lin、近藤 猛

概要：

スピントロニクスを確立させるためには、スピン流を生成し、かつそれを制御する技術が求められる。トポロジカル絶縁体は、15 年ほど前に理論的に提案され、その後さまざま実験で実証されて以降、スピン流を生成可能な物質として活発に研究されている。この物質では、物質内部の電子はスピンの向きが乱雑で互いに相殺し合うためスピン流を形成しないが、表面にはスピンの向きが揃ったスピン流が自発的に流れる特異な性質がある。この内部と表面の関係は強固であり、物質をいくら切り刻んだとしても、それらの破片の表面にはスピン流が形成される。そのため、表面積を大きくする物質設計を施せば、限られた空間においても大量のスピン流を形成することが可能となる。

トポロジカル絶縁体では磁場や電場を印加しなくてもスピン流を生成できる利点がある一方で、スピン流を流す・流さないの on/off 制御が難しく、その応用利用には工夫が必要になる。それを実現する有効な手法として、相転移が考えられる。つまり、トポロジカル絶縁体を通常の絶縁体へと意図的に切り替えることができれば、スピン流を制御することが可能となる。先行研究によって、トポロジカル

絶縁体となる物質の構成元素の一部を他の元素で置換することで、通常の絶縁体へと相転移させられることが実証されている [1]。しかし、元素置換は手間暇がかかり瞬時に施すことができないため、スピン流を瞬間的かつ可逆的に on/off 制御することはできず、デバイス応用への現実的な手法とはいえない。

我々は、タンタルセレンナイド TaSe₃ に着目した。先行研究によって、この物質がトポロジカル絶縁体状態にあることが理論的に予想されていた [2]。また、この物質は固体の中では柔らかく、引っ張ったり押したりの応力によって容易に原子間距離を変えられることが示唆された。さらに、鎖を積み重ねてできる擬一次元構造を持ち、鎖に沿った一次元方向に電気が流れやすいことから、その方向に結晶を歪ませることで効果的に電子の振る舞いを制御できることが期待された。

本研究では、角度分解光電子分光 (ARPES) を用いて TaSe₃ の詳細な電子構造観察を行い、スピン流の生成を示すスピン偏極したトポロジカル表面電子状態がその表面に発現していることを見出し、この物質がトポロジカル絶縁体状態にあることを実証した。また、試料を貼り付けた基

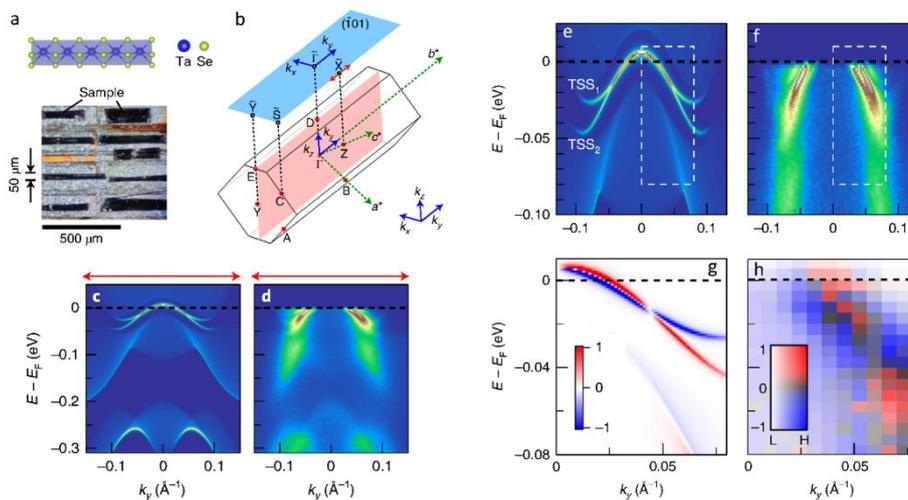


図 1: TaSe₃ で実証された強いトポロジカル絶縁体相。(a) 擬 1 次元構造を有する TaSe₃ 結晶の模式図と用いた単結晶試料の光学顕微鏡像。(b) 3 次元バルク Brillouin ゾーンとその 2 次元投影面。(c, d) トポロジカル表面状態の出現が予想されるゾーン端付近の運動量カット [(b) の赤矢印] に沿って得られるバンド分散の計算および ARPES 実験結果。(e, f) それぞれ (c, d) のバンド分散をフェルミ準位近傍で拡大した画像。(g, h) それぞれ (e, f) の破線枠で示すエネルギー・運動量範囲において計算と実験から得たスピン偏極スペクトル強度

した(図 2e)。これは、トポロジカル状態の起源となる伝導電子バンドと価電子バンドとのバンド反転が解除された結果として、通常半金属状態へとトポロジカル相転移したことを意味する。歪みを $\epsilon_{xx}=2.4\%$ まで増加させると、フェルミ準位にバンドギャップが開き(図 2f)、金属-絶縁体転移が生じた。これらの振る舞いを定量的に示すため、フェルミ準位 E_F での ARPES スペクトル強度を、*in-situ* で制御した歪み値の関数として図 2g にプロットする。スペクトル強度は歪み値が増すに従い減少し、最終的にはゼロとなる振る舞いを示す。このことから、基底状態である強いトポロジカル絶縁体相が、歪みの増大と共に、通常半金属相を経て、通常バンド絶縁体相へと 2 段階に相転移したと結論される。我々のバンド計算からも、これらの 2 段階相転移を再現する結果が得られている[3]。

まとめと今後の展望：

本研究により、TaSe₃ は基底状態において、表面にスピンを伴う強いトポロジカル絶縁体相にあることが明らかとなった。また、基板のたわみを利用して結晶試料を機械的に少し歪ませることで、強いトポロジカル絶縁体相から通常絶縁体相へと相転移させられることを実証した。印加した歪みを解除すると、スピンを示す電子構造が復活し、再びトポロジカル絶縁体相へ転移することも確認している[3]。つまり、簡単な手法ながら、トポロジカル絶縁体相と通常絶縁体相とを可逆的に行き来できること、また、それに伴いスピンを on/off 制御できることが明らかとなった。我々の結果は、スピンを容易に制御する新たな手法を提案するものであり、さらなる研究により、スピントロニクスデバイスへ応用されることが期待される。

謝辞：

本研究は、大阪大学大学院理学研究科の越智正之准教授、北海道大学大学院工学研究院応用物理学部門の丹田聡教授および迫田将仁助教、東京理科大学理学部第一部物理学科の野村温助教、学習院大学理学部物理学科の坪田雅功助教、東京大学大学院工学系研究科の有田亮太郎教授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。

参考文献：

- [1] S.-Y. Xu et al., *Science* **332**, 560-564 (2011).
- [2] S. Nie et al., *Phys. Rev. B* **98**, 125143 (2018).
- [3] C. Lin et al., *Nat. Mater.* **20**, 1093-1099 (2021).

