

トポロジカル近藤絶縁体の表面電子構造の制御

生命機能研究科 生命機能専攻

教授 木村 真一

Researchmap <http://researchmap.jp/read0182671/>

研究の概要

極微小なエネルギーギャップを持つ強相関電子系物質の近藤絶縁体は、フェルミ準位の近傍に大きな電子状態を持つため、低温における熱電変換材料としての利用が期待されています。この物質系は、バルクは絶縁体でありながら、表面は金属の性質を持っており、その起源が謎でしたが、本研究等により、近藤絶縁体はトポロジカル絶縁体 (TI) であり、電子状態のトポロジカル性によって出現した金属状態が起源であることがわかってきました。今回、TI の一種である六硼化サマリウム (SmB_6) 表面にバルクとは明らかに異なる対称性を持つ異方的な構造を結晶表面近くの数原子層だけに作製し、その電子状態を角度分解光電子分光により観測することで、表面電子状態がバルク結晶構造ではなく表面超構造の異方性を反映することを明らかにしました。この結果は、これまで TI の表面電子状態はバルクの電子状態のトポロジカル性によってのみ決まっていたと考えられてきましたが、表面の構造の状態も反映することを示しています。

研究の背景と結果

ここ10年ほど、結晶内部 (バルク) の電子状態の対称性により分類される、トポロジカル物質の研究が盛んに行われています。中でも、最初期に発見されたトポロジカル絶縁体 (TI) は、バルクは絶縁体でありながら、その表面は高い電気伝導度を持つ金属であり、さらに、そこに属する電子スピンの電子の運動方向に依存した渦巻き状の偏極構造を持つことなど、次世代素子の素材として極めて有望な性質をもっており、その応用に向けて研究が進められてきました。

TI の表面電子状態、いわゆるトポロジカル表面状態 (TSS) は、その性質の多くがバルク電子状態のトポロジカルな分類により決定されます。そのおかげで、結晶表面にどのような汚染や原子欠損があっても、バルクが無事であればトポロジカル表面状態は必ず出現することが知られており、様々な周辺環境で利用される応用製品にとって重要な利点である一方で、この特徴は、TSS を目的に応じて制御することが困難であるということも意味します。

本研究では、TI の一種であるトポロジカル近藤絶縁体 SmB_6 の表面を対称性の高い正方形の結晶面 [(001) 方位] からわずかに傾けて (微傾斜) 研磨し、超高真空中で清浄化することで新たな表面超構造を作製しました (図1)。

この得られた表面超構造において TSS の特長をつかむために角度分解光電子分光による電子状態の観測を行いました。すると、図2のように斜めの1方向にだけ明るいフェルミ面を持つトポロジカル表面状態が観測されました。この結果は、微傾斜した表面超構造の作製によって、これまでとは異なるトポロジカル表面状態が作製されたことを示しています。

今回の結果は、これまで考えられていたように、TSS がバルクの状態を「頑固」に反映するわけではなく、超構造を含む表面原子構造の影響を強く受けて「柔軟」に変化することを示しています。

研究の意義と将来展望

本研究の成果は、トポロジカル表面電子状態を表面の構造で制御する手法として新たな方向性を提供する成果です。このことは、トポロジカル表面電子状態を利用した低消費電力・高速な次世代素子、さらには量子コンピューターの情報伝達への応用が期待されます。

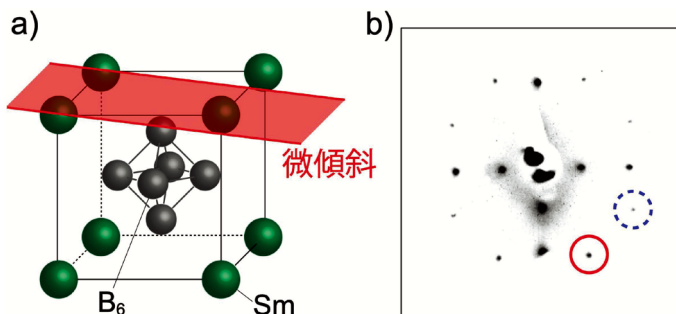


図1 a) 本研究で測定した六硼化サマリウム (SmB_6) の結晶構造と、作製した微傾斜面。b) 微傾斜面の電子線回折像。実線と破線のスポットの強度の違いが異方性を反映。

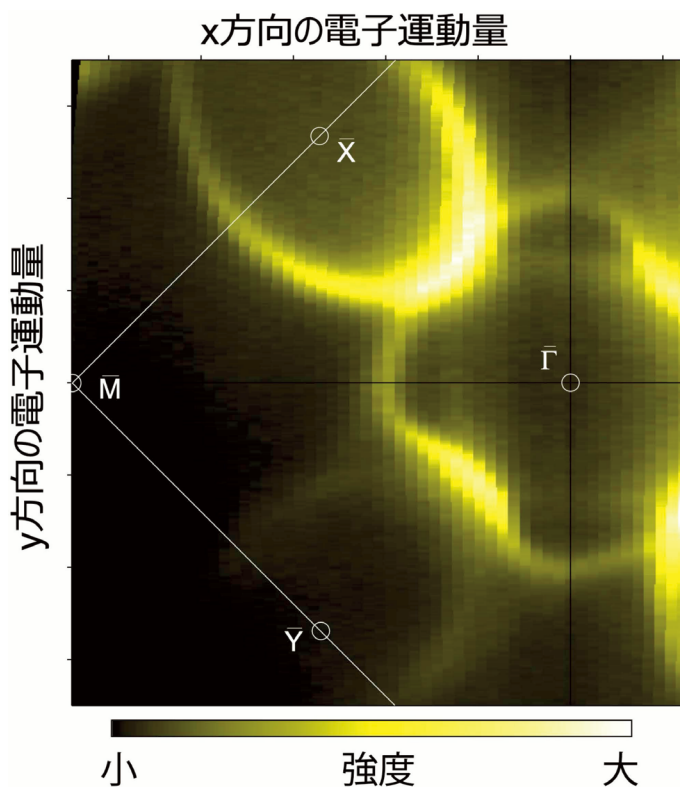


図2 角度分解光電子分光で得られた表面電子状態のフェルミ面。斜めに伸びており、バルクの4回対称性ではなく、表面の2回対称性を反映している。

特許

論文

Ohtsubo, Yoshiyuki; Kimura, Shin-ichi et al. Breakdown of bulk-projected isotropy in surface electronic states of topological Kondo insulator $\text{SmB}_6(001)$. Nature Communications. 2022, 13, 5600. doi: 10.1038/s41467-022-33347-0
Ohtsubo, Yoshiyuki; Kimura, Shin-ichi et al. Non-trivial surface states of samarium hexaboride at the (111) surface. Nature Communications 2019, 10, 2298. doi: 10.1038/s41467-019-10353-3
Hagiwara, Kenta; Kimura, Shin-ichi et al. Surface Kondo effect and non-trivial metallic state of the Kondo insulator YbB_{12} . Nature Communications. 2016, 7, 12690. doi: 10.1038/ncomms12690

参考URL <http://www.kimura-lab.com>

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、電子状態、六硼化サマリウム