

報道関係者 各位

東京工業大学広報センター長
大谷 清

グラフェンを超越する新電子機能物質を創製 ー極性トポロジカル絶縁体を世界で初めて発見ー

【ポイント】

- ・新種の「空間反転対称性の破れた(=極性)トポロジカル絶縁体」を発見
- ・グラフェンの課題を克服し、グラフェンにない電子機能を兼ね備える新物質
- ・革新的電子デバイスの開発に弾み

【概要】

東京工業大学応用セラミックス研究所の笹川崇男准教授と英オックスフォード大学や米スタンフォード大学などの日英米共同研究チームは、革新的電子デバイス向けの新物質「極性トポロジカル絶縁体」を世界で初めて発見した。内部は絶縁体で表面だけがグラフェン(用語1)に似た特殊な金属状態となるトポロジカル絶縁体(用語2)と呼ばれる物質の新種で、これを用いることにより、従来材料では難しかった新原理の電子デバイスを、単純な構造で開発できるようになる。

この成果は英国の科学誌「Nature Physics (ネイチャーフィジックス)」においてオンラインで先行出版(10月6日発行:日本時間10月7日)された。

●研究の背景と経緯

表面だけ電子が超高速で動き回る特殊な絶縁体「トポロジカル絶縁体」は、従来の特性を凌ぐ機能や新たな機能を持った電子デバイスへの利用が期待されている。その理由の一つは、2010年ノーベル賞で話題のグラフェンと同様な「2次元に閉じ込められた質量ゼロの電子(=ディラック電子と呼ばれる)状態」を表面にもつことであり、その応用で超高速・低消費電力なCPUやメモリーなどが実現できると考えられている。

さらにグラフェンがまねできない優れた性質として①単層原子シートである必要がない②電子スピンも方向を揃えて伝導する③伝導状態が不純物で乱されない④磁性や超伝導との相互作用により革新的な電子機能につながる新奇量子状態が出現する一などの特筆すべき点も多々ある。そのため、2007年の理論予言以降、実用で使えるトポロジカル絶縁体の材料開発が世界中で活発に行われている。

●研究成果

今回、新しい種類のトポロジカル絶縁体物質を発見した。この新物質は、図1に示すようなビスマス、テルル、塩素が交互に積層した結晶構造をもつ化合物である。原子の並び方を反映して六角形に育つ単結晶の試料作製に成功した。これを用いて角度分解光電子分光法(用語3)という電子構造の詳細を直接観察する実験を行うことにより、この物質がこれまでになかった新種のトポロジカル絶縁体であることが分かった。

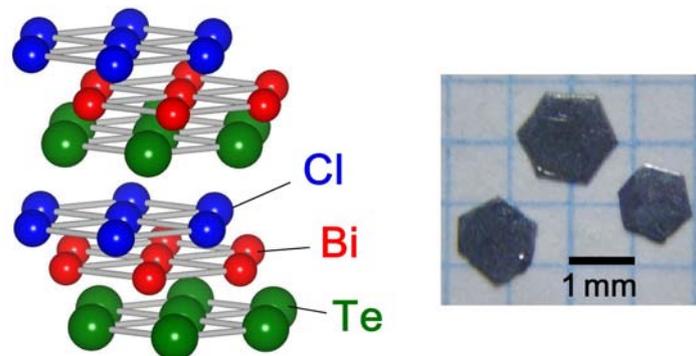


図1. 今回発見した新種のトポロジカル絶縁体の結晶構造(左)と育成に成功した単結晶の写真(右)

これまでに実験で確認されたトポロジカル絶縁体は、すべて極性のない結晶構造をもっていた。これは、例えばABAの単位を繰り返して積層した構造で、ひっくり返しても同じ並び方になる(=空間反転対称性がある)結晶構造となっている(図2上)。

一方で、今回発見された物質は、ABCを単位とする繰り返しのために、表と裏をもつ構造になっている。この場合には、それぞれの原子の電子を引き寄せる力の違いが単位構造の中で打ち消されず、磁石のNS極のように、層の上面と下面の両端に電荷の偏りをもつ極性構造になる(図2下)。

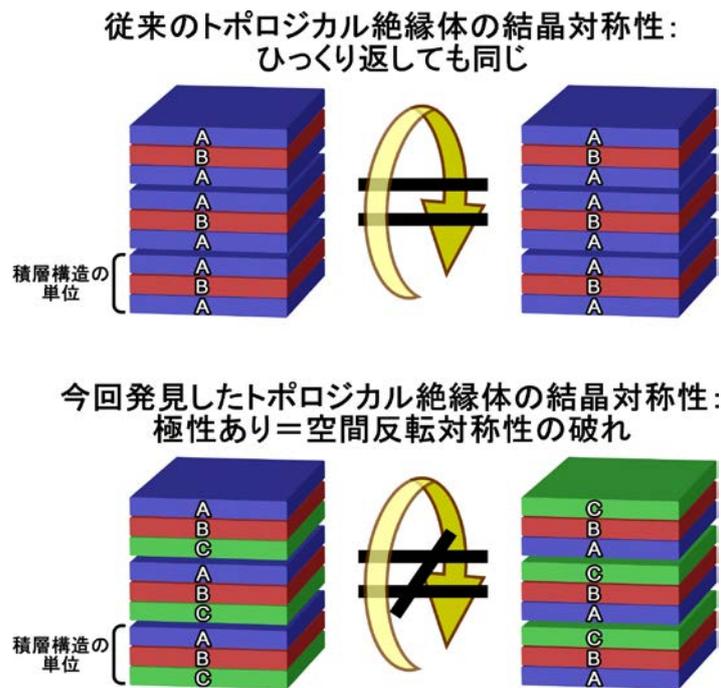


図2. 従来と今回のトポジカル絶縁体をもつ結晶対称性の違い

今回の極性をもつ新物質では、結晶の上部はA層、下部はC層という異なった面が表れることになり、超高速で動き回れる表面ディラック電子も上面と下面で異なる状態になることが予想される。観測の結果、確かに異なった電子構造を持つことが確認されたが、さらに電子の分布状態にも大きな違いのあることも分かった。図3に示すように、片方の面は電子を過剰にもつn型、もう片方は不足したp型の電子状態になっており、これまでになかったトポジカル絶縁体のpn接合が自発的に生じている物質であることが明らかになった。

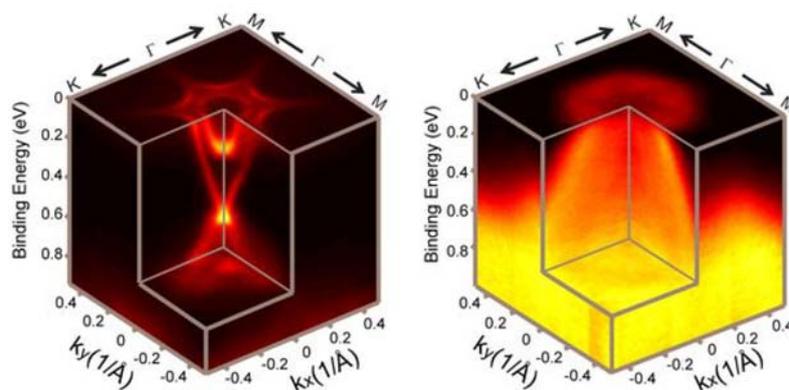


図3. 角度分解光電子分光法で観察した結晶の上表面と下表面の電子状態

●今後の展開

トポロジカル絶縁体には、エネルギーロスなしでスピンの揃った電流を流したり、(電流ではなくて)電場で磁化を発生させたりできるような、グラフェンを遙かに凌ぎトポロジカル絶縁体でしか実現できない数々の電子機能が理論予測されている。これまでに見つかっているトポロジカル絶縁体は、スピンの流れや磁場が同じ性質をもつ表面状態から発生されるために、上表面と下表面とで逆向きになって打消しあってしまうという課題があった。そのため、例えば、電場で磁化を発生できるトポロジカル磁気電気効果では、上表面には上向き、下表面には下向きの磁場をかける工夫が必要で、図4(a)に示すような複雑なデバイス構造が考案されていた。今回発見された極性トポロジカル絶縁体を用いると、飛躍的にシンプルな図4(b)の構造でトポロジカル電子機能を活かした新原理のデバイスが開発できることになる。

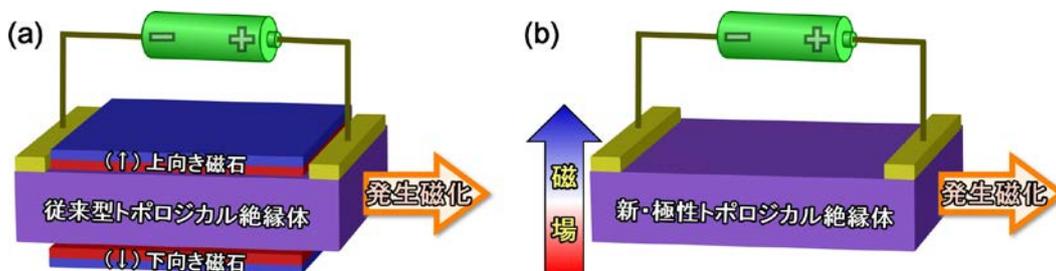


図4. トポロジカル磁気電気効果を利用できるデバイス構造。(a) 従来のトポロジカル絶縁体を使う場合。(b) 今回発見された極性トポロジカル絶縁体を使う場合。

【用語説明】

- (1) グラフェン: 炭素原子が平面上で六角形に並んだ構造をもつ1原子層の薄膜。これが積み重なって黒鉛(グラファイト)ができる。超高速に動き回れる質量ゼロのディラック電子と呼ばれる状態をもつグラフェンは、超高速で低消費電力な電子デバイスへの利用が期待されている。ただし、大型の原子薄膜を作ることが困難なこと、表面の凹凸や不純物でディラック電子状態が壊れやすいなどの課題がある。
- (2) トポロジカル絶縁体: 内部は絶縁体なのに、表面に特殊な金属状態が現われる物質。この表面にはグラフェンに似た質量ゼロの電子状態が存在する。単層にする必要がなく、表面の凹凸や不純物に質量ゼロの電子状態が安定であることも分かっている。また、トポロジカル絶縁体表面の電子は、電子の自転(=スピン)方向も揃えながら運動しており、電子の電荷だけでなくスピンも情報処理に利用しようとする次世代のスピンロニクス技術用の材料としても期待されている。
- (3) 角度分解光電子分光法: 単結晶試料の表面に強力な光を照射し、その際に試料表面から叩き出されてきた電子の方向やエネルギーを精密に分析する実験方法で、固体中の電子構造を直接観察できる。

●謝辞

本成果は、科学研究費補助金・基盤(B)「新奇物性を創発する新世代トポロジカル絶縁体の創製」(研究代表者: 笹川崇男)により得られました。

●論文情報

“Discovery of a Single Topological Dirac Fermion in a Strong Inversion Asymmetric Compound BiTeCl(反転の非対称性が強い BiTeCl 化合物における単一でトポロジカルなディラックフェルミ粒子の発見)”

Y. L. Chen, M. Kanou, Z. K. Liu, H. J. Zhang, J. A. Sobota, D. Leuenberger, S. K. Mo, B. Zhou, S.-L. Yang, P. S. Kirchmann, D. H. Lu, R. G. Moore, Z. Hussain, Z. X. Shen, X. L. Qi, and T. Sasagawa, *Nature Physics*, Published Online (6 Oct. 2013); doi:10.1038/nphys2768.

【問い合わせ先】

東京工業大学 応用セラミックス研究所／物質科学創造専攻 准教授
笹川崇男

〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259, R3-37

Email: sasagawa@msl.titech.ac.jp

TEL & FAX: 045-924-5366

URL: <http://www.msl.titech.ac.jp/~sasagawa/>