

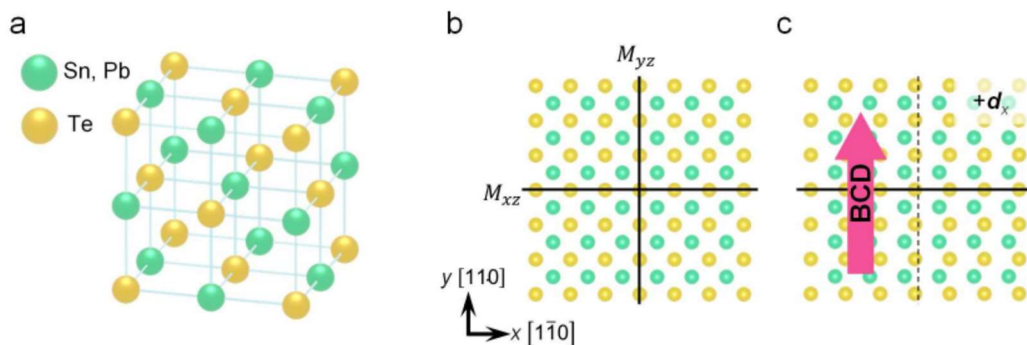
# トポロジカル量子物質の新奇スイッチング/メモリー効果を室温で実現

## 概要

京都大学大学院工学研究科電子工学専攻の西嶋泰樹 博士課程学生（日本学術振興会特別研究員 DC1）、安藤裕一郎 准教授、白石誠司 教授らのグループは筑波大学数理物質系の黒田眞司 教授グループと共同で、21世紀の新しい物質「トポロジカル量子物質」の一種である「トポロジカル結晶絶縁体」<sup>※1</sup>を用いて、そのトポロジカル性に由来する新奇なスイッチング効果を室温で実現することに成功しました。

「トポロジカル量子物質」とは、その電子状態がトポロジカルに「捻れた」物質であり、20世紀までに発見されてきた半導体・金属・磁性体などとは根本的に異なる性質を持つ物質です。2016年のノーベル物理学賞がこの研究分野の草分けとも言うべき研究に与えられたことは、トポロジカル量子物質の極めて高い重要性を示すものです。今回の研究では、このトポロジカル量子物質の一種であり「トポロジカル結晶絶縁体」と呼ばれる材料である  $\text{Pb}_{0.48}\text{Sn}_{0.52}\text{Te}$ （鉛スズテルル）を用いて、鉛スズテルルのトポロジカル性の現れである「ベリー曲率ダイポール」<sup>※2</sup>と強誘電性<sup>※3</sup>の協奏に由来するスイッチング効果とメモリー効果を室温に至るまでの温度領域で発見/実現しました。この成果はトポロジカル量子物質の電子素子への展開に新たな可能性を付与するとともに、同物質の応用への扉を開くものです。

本成果は2023年3月2日11:00（日本時間）に米国学術誌である「*Nano Letters*」誌にオンライン掲載されました。



(a) トポロジカル結晶絶縁体である鉛スズテルルの結晶構造。塩 ( $\text{NaCl}$ ) と同じ岩塩結晶と呼ばれる結晶構造を持っており、図にあるように鉛ないしスズ原子とテルル原子が入れ違いに立方体を形成している。(b) (a)図の結晶を  $45^\circ$  回して上から眺めた断面図。x 軸は  $[11-0]$  方向、y 軸は  $[110]$  方向、z 軸はその双方に垂直な（紙面に垂直な）方向と定義している。 $M_{xz}$  と  $M_{yz}$  はそれぞれ  $xz$  面、 $yz$  面を表し、鉛スズテルルはこの面に対して「対称な」（ひっくり返しても同じ）構造を持つ。(c) x 軸方向（図の右方向）に電圧をかけて原子をずらした状態では  $M_{yz}$  面が対称面とならず、そのため「ベリー曲率ダイポール」(BCD)が生成される。鉛スズテルルは強誘電性を持つため原子のズレは保持され、そのため BCD もメモリー効果として保持される。

## 1. 背景

2016年にノーベル物理学賞がトポロジカル量子物質研究の嚆矢となる研究<sup>\*4</sup>に与えられたことからわかるように、21世紀の物質科学におけるトポロジーの役割には巨大なものがあります。ここで言うトポロジーとは、例えば数学においては「ドーナツには穴が1つあるが、野球のボールには穴がなく、この1や0という穴の数=不連続な指標は変形によって変化しない」という図形の持つ「不変な」指標に着目することです。物質科学におけるトポロジー的な性質もまた、物質の状態が連続的に変化しても、その変化に影響されない「不変な」指標を与えてくれます。この観点から、近年「トポロジカル絶縁体」「トポロジカル超伝導体」などが、世界的に熾烈な研究競争の対象になっています。今回我々が研究対象とした「トポロジカル結晶絶縁体」はトポロジカル絶縁体の一種であるためトポロジー的な性質を持つ材料であり、やはり大きな注目を集める材料です。こうしたトポロジカルに特徴的な物質では、その物質の電子状態の捻れに由来する仮想的な磁場が物質内部に発生することが知られており、その仮想的な磁場を活用した新奇なスイッチング効果やメモリー効果が期待されています。

## 2. 研究手法・成果

そこで私達の研究グループでは、トポロジカル結晶絶縁体である  $\text{Pb}_{0.48}\text{Sn}_{0.52}\text{Te}$  (鉛スズテルル) に着目しました。この材料は、そのトポロジカル性が結晶構造で保証されているこの特徴を持つトポロジカル絶縁体の一種であり、さらに強誘電性も兼ね備えている点に特徴があります。鉛スズテルルに電圧をかけると強誘電性のおかげで原子の位置にズレが生じ、しかもそのズレは電圧を切ったあとも保持されます。更にこの原子位置のズレは、鉛スズテルルの持つトポロジカル性の起源であるベリー曲率の値を場所によって変えることとなります。このときベリー曲率同士に仮想的な分極(ダイポール)が生じるため、これをベリー曲率ダイポール(BCD)と言います。このBCDの存在は、BCDが仮想的な磁場を生むことになるため、その物質の電気伝導特性を調べることで確認することができます。

従来から、BCDがスイッチングできる(向きを変えられる)ことは知られていましたが、その機能の発現と制御は低温(約140ケルビン=摂氏マイナス133°C)に限られていました。更にこのBCDを保持しておく機能があることは知られていませんでした。今回の成果のポイントは、ゼロでないBCDを持ち、さらに強誘電性を持つ鉛スズテルルを用いることでBCDのメモリー効果の存在をはじめて確認し、更に従来は不可能だった室温という応用展開に極めて重要な温度領域でBCDのスイッチング効果とメモリー効果を確認できた点にあります。

## 3. 波及効果・今後の予定

今後求められる研究としては、メモリー効果の書き込み速度を上げることやその保持時間の確認、また繰り返し耐性を確認することが挙げられます。また、さらにBCDそのものを大きくできる材料の工夫も必要です。これらを通じてトポロジカル量子物質を用いた新しい電子素子の創出に向けた道程を開拓できることが期待されます。

## 4. 研究プロジェクトについて

本研究を遂行するにあたり、科学研究費補助金・挑戦的研究(開拓)「クーパー対純スピン流計測の挑戦」、JST さきがけ「情報担体」などの支援を受けました。ここに謝意を表します。

## <用語解説>

※1 トポロジカル結晶絶縁体：トポロジカル絶縁体の一種であるトポロジカル量子物質です。一般に「トポロジカル絶縁体」と呼ばれる物質は、その物質の中で時間反転対称（時間の流れを逆にしても同じ現象になること）性があり、それがトポロジカル性を守る役割をしています。ただトポロジカル性を守る役割は時間反転対称性でなくてもよく、結晶構造の対称性でも構いません。トポロジカル結晶絶縁体は、トポロジカル絶縁体性が結晶構造の対称性で守られた材料のことを意味しています。

※2 ベリー曲率ダイポール：物質のもつトポロジカル性は、物質のベリー曲率（波動関数の捻じれ具合）がゼロでないことに起因します。物質によってベリー曲率は複数の場所で現れる場合がありますが、今回の鉛スズテルルではベリー曲率の大きさが原子位置のズレのせいで場所によって変化し、それによって異なる位置にあるベリー曲率の間に仮想的な「分極」（※3も参照）が現れます。この分極をベリー曲率ダイポールと呼びます。

※3 強誘電性：物質に電場をかけるとその電場に引きずられる形で原子はわずかにその位置を変えズレます。通常は電場が消えると原子は元の位置に戻りますが、中には電場がなくなっても原子はズレたままの位置にとどまっている物質もあります。このとき、原子位置のズレによって物質中には電場が新しく生じることになり、これを分極と呼びます。強誘電性というのは、この分極状態が保持されたままの状態をもつ性質です。

※4 トポロジカル量子物質研究の嚆矢となる研究：D.J. Thouless（ワシントン大学）、F. D. M. Haldane（プリンストン大学）、J. M. Kosterlitz（ブラウン大学）の3教授に「トポロジカル相転移および物質のトポロジカル相の理論的発見」の業績による2016年のノーベル物理学賞が贈られました。

## 研究者のコメント

（白石）トポロジカル物質は大学院時代に学んだ素粒子論などの基礎物理が物質上で顕在化する物質であり個人的な思い出も深い材料ですので、今回の成果は私にとって大きな喜びです。紆余曲折を経て今回の成果に至りましたが、そのプロセスでの筆頭著者の西嶋さんの寄与は非常に大きく、成長した学生の姿を見る喜びもまた大きかったことを付記したく思います。今後も楽しんで研究を推進していこうと思っています。

（西嶋）研究室配属時から扱ってきたトポロジカル結晶絶縁体という材料でこのような発見ができたことをとても嬉しく思います。今回の発見はトポロジカル性と強誘電性という2つの特性の共存による副産物です。今後もこのような物理的特性の融合により生まれる新しい現象を探索していきたいです。

## 論文タイトルと著者

“A Ferroic Berry Curvature Dipole in a Topological Crystalline Insulator at Room Temperature”

（トポロジカル結晶絶縁体における室温での強誘電的ベリー曲率ダイポール）

T. Nishijima<sup>1</sup>, T. Watanabe<sup>2</sup>, H. Sekiguchi<sup>2</sup>, Y. Ando<sup>1,3</sup>, E. Shigematsu<sup>1</sup>,

R. Ohshima<sup>1</sup>, S. Kuroda<sup>1</sup>, and M. Shiraishi<sup>1</sup>

1. 京都大学大学院工学研究科, 2. 筑波大学大学院数理物質科学研究科, 3. JST さきがけ

掲載誌： *Nano Letters*

DOI： <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.2c04900>