

トポロジカル母物質のキャリア制御に成功
—非散逸なトポロジカル伝導現象の低消費電力エレクトロニクスへの応用に向けて—

1. 発表者：

西早 辰一（東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻 博士課程 2年）

打田 正輝（東京大学大学院 工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター・
物理工学専攻 助教）

中澤 佑介（東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻 博士課程 1年）

M. Kriener（研究当時：理化学研究所 創発物性科学研究センター 強相関物質研究チーム 研究
員／現 強相関物質研究グループ 研究員）

小塚 裕介（研究当時：東京大学大学院 工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センタ
ー・物理工学専攻 講師／現：国立研究開発法人物質・材料研究機構 磁性・スピン
トロニクス材料研究拠点 独立研究者）

田口康二郎（研究当時：理化学研究所 創発物性科学研究センター 強相関物質研究チーム チーム
リーダー／現 強相関物質研究グループ グループディレクター）

川崎 雅司（東京大学大学院 工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター・
物理工学専攻 教授／理化学研究所 創発物性科学研究センター 副センター長）

2. 発表のポイント：

◆トポロジカル物質の母物質にあたるトポロジカル半金属について、化学置換と電界効果による
キャリアの制御手法を新たに確立した。

◆量子化伝導の観測とそのキャリア濃度制御を通して、トポロジカル半金属の薄膜試料で実現さ
れる二次元的な電子構造を明らかにした。

◆低消費電力エレクトロニクスへの応用に向けて、トポロジカル半金属において予測されている
特異な伝導現象の観測・利用に向けて多角的なアプローチを可能とした。

3. 発表概要：

東京大学大学院工学系研究科の西早辰一 大学院生、打田正輝 助教、川崎雅司 教授らの研究グループは、理化学研究所創発物性科学研究センターの田口康二郎 チームリーダーらの研究グループと共同で、近年発見されたトポロジカル半金属 Cd_3As_2 について、化学置換や電界効果を用いたキャリア制御手法を確立し、量子化された伝導現象である量子ホール効果の観測を通してトポロジカル半金属薄膜で実現される電子構造を明らかにしました。

トポロジカル物質とは、電子の波動関数に由来して電子状態に非自明なよじれを持ち、従来の物質の分類（金属・半導体・絶縁体など）には属さない物質群です。トポロジカル物質は、非散逸な電子やスピンの伝導が現れることから低消費電力エレクトロニクスの有望な材料として期待されています。これまでトポロジカル物質に関する研究は、電子構造にエネルギーギャップを持つ「トポロジカル絶縁体」において精力的に行われてきました。

一方、近年ではエネルギーギャップを持たない「トポロジカル半金属」と呼ばれる新たなトポロジカル物質が発見され、トポロジカル絶縁体を含む広範なトポロジカル物質群を束ねる高次の性質をもつ母物質として注目を集めています（図1）。トポロジカル半金属では、既存の物質では起こらない特殊な電氣的・磁氣的な性質が生じます。例えば、トポロジカル半金属において価

電子帯と伝導帯が一点で接する点（ワイル点）では、あたかも仮想的な磁気単極子（注1）が存在するかのようにみなすことができます。ワイル点に磁場を加えることによって非散逸電流が流れたり、スピンの流れであるスピン流が生じたりするなど、既存の物質では起こらない特殊な電氣的・磁氣的な性質が生じます。したがって、将来的な応用を見据えたトポロジカル半金属における輸送現象の学理構築が急務とされています。しかしながら、これらの輸送現象は物質中の電荷キャリア（電子や電子が不足した状態である正孔（せいこう））の濃度が高い状態では観測しづらく、トポロジカル半金属のキャリア濃度の制御が重要な課題となっていました。

本研究グループは、典型的なトポロジカル半金属である Cd_3As_2 について、高い結晶性をもつ薄膜試料を独自の成膜技術で作製し、化学置換や電界効果を用いてキャリアを系統的に制御する手法を確立しました（図2）。さらに、低キャリア濃度の領域では非散逸な伝導現象である量子ホール状態を観測し、キャリア濃度を制御して詳細な測定を行うことで二次元的な電子構造の詳細を明らかにしました。

今回確立した化学置換・キャリア濃度制御の手法は、トポロジカル半金属特有の電気・磁気特性を解明していく上で重要な制御パラメータです。今回確立した制御手法を利用することで、今後多角的な研究が可能になると期待されます。

本研究成果は、日本時間 5 月 19 日午前 3 時（米国東海岸夏時間 18 日午後 2 時）、米国科学誌「Science Advances」に掲載されます。

本研究は、科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業 CREST「トポロジカル絶縁体ヘテロ接合による量子技術の基盤創成」（No. JPMJCR16F1）、日本学術振興会科学研究費補助金 基盤研究(C)（No. JP15K05140）、新学術領域研究「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」（No. JP16H00980）の助成を受けて行われました。

4. 発表内容：

<研究の背景>

従来の物質にはない電子・スピンの非散逸伝導を示すトポロジカル物質は、将来的な低消費電力デバイス実現に向けた有望な材料として、基礎・応用の両方面から精力的に研究されています。近年では、トポロジカル物質にもさまざまな種類が存在することが分かり、特に電子構造にエネルギーギャップのないトポロジカル物質である「トポロジカル半金属」が存在することが 2014 年に発見されました。トポロジカル半金属では仮想的な磁気単極子が電子構造に存在する（図1左）ことによって既存の系に見られない特殊な電気・磁気応答が生じると予測されています。トポロジカル半金属のキャリア濃度やバンド構造を制御することで、その電気・磁気応答の発現機構を実験的に検証・解明することに注目が集まっています。

<研究の経緯>

東京大学大学院工学系研究科の打田正輝 助教らは、典型的なトポロジカル半金属である Cd_3As_2 の高品質薄膜作製手法を 2017 年に開発しました（2017 年 12 月 22 日プレスリリース「トポロジカル母物質」の高品質薄膜作製に成功）。一方、トポロジカル半金属に特異な物理現象は、固体中の電荷キャリアの濃度に強く依存し、特にキャリア濃度の高い状態では観測しづらくなってしまったため、トポロジカル半金属のキャリアを系統的に制御する手法を確立することが課題となっていました。そこで、東京大学大学院工学系研究科の西早辰一 大学院生、打田正輝 助教らは、トランジスタ構造での電界効果によってキャリアが制御できる（図1右）こと

に着目し、 Cd_3As_2 および化学置換を行った $(\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x)_3\text{As}_2$ についてパルスレーザー堆積法（注2）を用いた高品質な薄膜の作製と電気抵抗の測定を行いました。

<研究内容>

電子過多となりやすいトポロジカル半金属 Cd_3As_2 薄膜に対して、少量のZn置換（化学置換）を施すことで、電子濃度の低下を実現しました。また、 SrTiO_3 単結晶基板をゲート絶縁体に用いたバックゲート構造（注3）で電界を加えること（電界効果）で、電子過多の領域から電荷中性を経て正孔過多の領域に至るまで、キャリア濃度を広範に制御することに成功しました（図2）。

高品質な $(\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x)_3\text{As}_2$ 薄膜は、トポロジカル半金属が持つディラック型の電子分散（注4）に由来した非常に高い電子移動度（ $\sim 30,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ）（注5）を持っています。特に、低キャリア濃度の領域では、高移動度二次元系に見られる非散逸伝導である量子ホール効果（注6）が観測されました。また、電子構造はZnの置換量にも依存して変化することが明らかになりました。

<展望・社会的意義>

本研究では、トポロジカル半金属物質の薄膜試料において、キャリアの制御手法を確立しただけでなく、化学置換による電子構造の変化の観測にも成功しました。今後はトポロジカル半金属の非散逸な伝導現象について、キャリア濃度だけでなく、電子構造自体の制御という側面からも多角的なアプローチが可能となります。これにより、これまでのトポロジカル半金属試料では実現できなかった、ワイル点に由来した特殊な電氣的・磁氣的な性質が利用可能になります。

低消費電力エレクトロニクスへの応用に向けて、トポロジカル半金属における伝導現象の解明と非散逸伝導機能の制御のさらなる研究が進められることが期待されます。

5. 発表雑誌：

雑誌名：「*Science Advances*」（オンライン版 5月18日掲載）

論文タイトル：Gate-tuned quantum Hall states in Dirac semimetal $(\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x)_3\text{As}_2$

著者：S. Nishihaya, M. Uchida*, Y. Nakazawa, M. Kriener, Y. Kozuka, Y. Taguchi, and M. Kawasaki

DOI 番号：10.1126/sciadv.aar5668

6. 問い合わせ先：

<研究に関すること>

東京大学 大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター・物理工学専攻
助教 打田 正輝（うちだ まさき）

<JST 事業に関すること>

科学技術振興機構 戦略研究推進部

<報道担当>

東京大学 大学院工学系研究科 広報室

7. 用語解説：

(注1) 磁気単極子

通常の磁石はN極・S極を必ずペアで持ち、この組み合わせを磁気双極子と呼ぶ。N極のみもしくはS極のみの単一の磁荷を磁気単極子という。

(注2) パルスレーザー堆積法

高真空中でターゲットと呼ばれる原料にパルス状の高強度レーザーを照射することで原料を昇華させ、基板上に堆積する成膜手法。ターゲットの組成がそのまま薄膜の組成に転写される特徴をもつ。

(注3) バックゲート構造

薄膜を成長させる基板をゲート材料に用いた電界効果トランジスタ構造。

(注4) ディラック型の電子分散

相対論的ディラック方程式に従うエネルギーと運動量の関係を指し、このような状態にある電子はあたかも質量を持たないような粒子として物質中を高速に移動するほか、通常の電子とは異なる量子効果を示すという特徴を持つ。

(注5) 電子移動度

単位電場あたりの電子の平均速度であり、伝導電子の動きやすさを示す量。

(注6) 量子ホール効果

二次元状に閉じ込めた電子に磁場を加えたとき、電子は運動方向に垂直なローレンツ力を受けてサイクロトロン運動と呼ばれる円運動をする。電子が1回転する間に散乱が起こらないような、移動度が極めて高い系においては、エネルギーがとびとびの値となり準位が形成される（量子化）。この際に、ホール抵抗がプランク定数 h と電気素量 e を用いて h/e^2 と表される抵抗値（約 $25.8k\Omega$ ）の整数分の1になると同時に、縦抵抗がゼロになる現象を量子ホール効果と呼ぶ。1985年のノーベル物理学賞の対象にもなった。

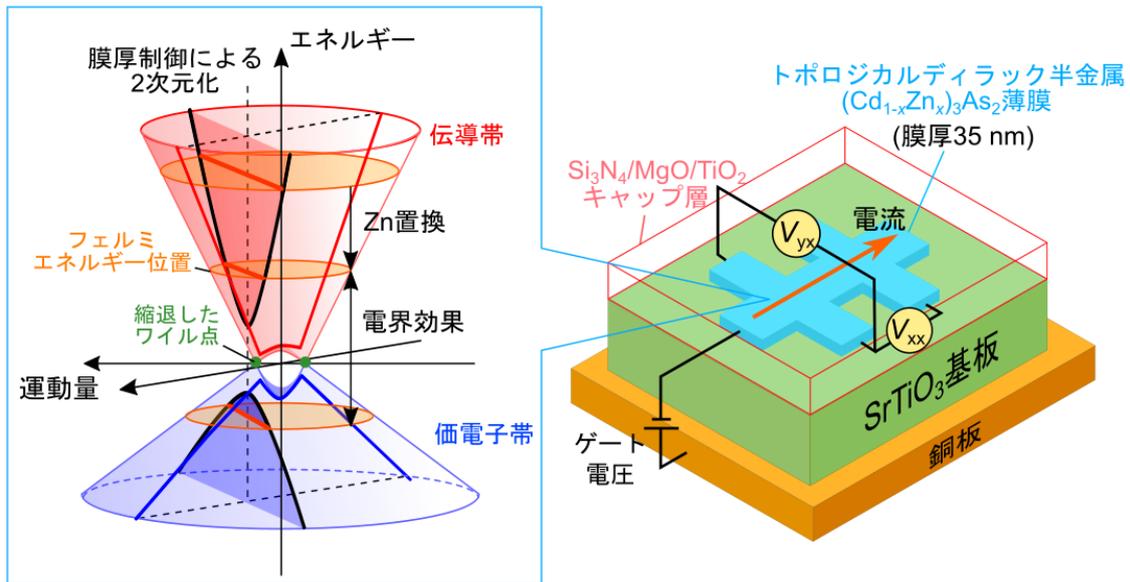


図1. トポジカル半金属 $(\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x)_3\text{As}_2$ の電子構造 (左) とトランジスタ構造でのキャリア濃度の制御 (右)。

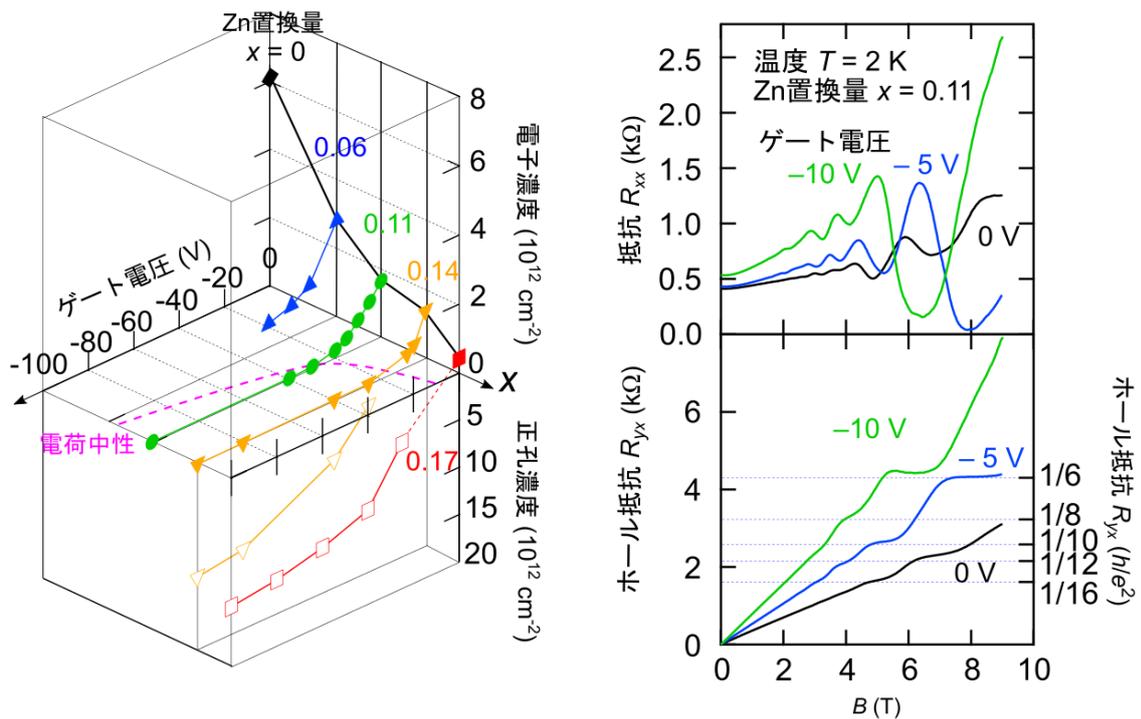


図2. 化学置換と電界効果によるキャリアタイプの反転 (左) と低キャリア濃度領域で観測された量子ホール効果 (右)。ゲート電圧の違いによって量子ホール効果を示す磁場が連続的に変調されている。