

PRESS RELEASE

2021年3月3日

理化学研究所
東京大学大学院工学系研究科
東北大学金属材料研究所
科学技術振興機構

トポロジーの異なる絶縁体界面による高効率磁化制御

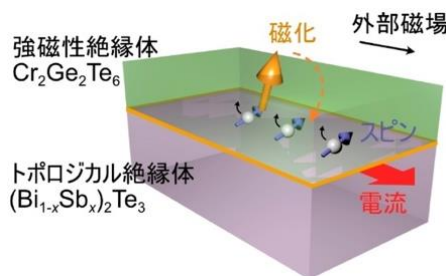
ー トポロジカル電流を用いたスピントロニクス素子応用に期待 ー

理化学研究所（理研）創発物性科学研究センター強相関量子伝導研究チームの茂木将孝客員研究員、十倉好紀チームリーダー（東京大学卓越教授／東京大学国際高等研究所東京カレッジ）、吉見龍太郎研究員、強相関界面研究グループの川崎雅司グループディレクター（東京大学大学院工学系研究科教授）、創発光物性研究チームの小川直毅チームリーダー、東京大学大学院工学系研究科の藤村怜香（修士課程2年）、東北大学金属材料研究所の塚崎敦教授らの共同研究グループ^{*}は、トポロジカル絶縁体^[1]と強磁性絶縁体^[2]の積層構造において、電流を流すことにより磁化方向が反転することを実証しました。

本研究成果は、二つの異なるトポロジーを持つ絶縁体界面に流れるトポロジカル電流^[3]が、強磁性絶縁体層の磁化に対して高効率にトルク^[4]（回転力）を与えることを示しており、低消費電力スピントロニクス素子^[5]への応用が期待できます。

今回、共同研究グループは、独自に開発したトポロジカル絶縁体「 $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_3$ （Bi：ビスマス、Sb：アンチモン、Te：テルル）」と強磁性絶縁体「 $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ （Cr：クロム、Ge：ゲルマニウム）」の薄膜積層界面において、強い磁気近接効果^[6]が生じることに着目しました。薄膜面内に電流を流したところ、界面に生じたスピン蓄積が強磁性絶縁体の磁化にトルクを与え、磁化方向が上下に反転することが分かりました。さらに、トポロジカル絶縁体層の組成調整によって、トポロジカル絶縁体と強磁性絶縁体の界面におけるトポロジカル電流が高効率な磁化反転の起源として支配的であることが明らかになりました。

本研究は、オンライン科学雑誌『*Nature Communications*』（3月3日付）に掲載されました。



電流印加（赤）による磁化反転（黄）の概念図

※共同研究グループ

理化学研究所 創発物性科学研究センター

強相関量子伝導研究チーム

チームリーダー 十倉 好紀 (とくら よしのり)
 (東京大学卓越教授/東京大学 国際高等研究所東京カレッジ)
 客員研究員 茂木 将孝 (もぎ まさたか)
 (マサチューセッツ工科大学 博士研究員)
 客員研究員 安田 憲司 (やすだ けんじ)
 (マサチューセッツ工科大学 博士研究員)
 研究員 吉見 龍太郎 (よしみ りゅうたろう)
 専任研究員 川村 稔 (かわむら みのる)

強相関界面研究グループ

グループディレクター 川崎 雅司 (かわさき まさし)
 (東京大学 大学院工学系研究科 教授)
 上級研究員 高橋 圭 (たかはし けい)

創発光物性研究チーム

チームリーダー 小川 直毅 (おがわ なおき)
 (東京大学 大学院工学系研究科 教授(委嘱))

東京大学 大学院工学系研究科

修士課程2年 藤村 怜香 (ふじむら れいか)

東北大学 金属材料研究所 低温物理学研究部門

教授 塚崎 敦 (つかざき あつし)

(理研 創発物性科学研究センター 強相関界面研究グループ
 客員主管研究員)

研究支援

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へテロ接合による量子技術の基盤創成 (研究代表者: 川崎雅司)」などによる支援を受けて行われました。

1. 背景

近年、物質の端や表面に特殊な電子構造を持つ「トポロジカル物質^[3]」が注目を集めています。その代表的な例であるトポロジカル絶縁体は、物質内部は絶縁体ですが、その表面は電気を流す金属的な性質を持っています。注目すべき特徴として、表面伝導電子の運動方向に対して、そのスピンのみが必ず垂直方向を向くというスピン運動量ロッキングがあります。このトポロジカル絶縁体特有の性質により、電流を流すことで高効率にスピンを生成できるため、スピントロニクス素子への応用が期待されています。

これまでに、強磁性金属層との接合化を通してトポロジカル絶縁体の高いスピン生成能力が明らかにされ^{注1)}、電流を流すことで磁化方向を制御できることが実証されてきました。しかし、これらの実験では金属強磁性層の電気伝導により、流れる電流が表面状態以外に分配されるといった難点がありました。そのため、学術的観点では、スピントルク^[4] (スピンの回転力) がトポロジカル絶縁体表面

状態に由来することの証拠として議論の余地が残されており、応用の観点からも、磁化反転の際に不要な電流が消費されるという問題がありました。

注1) 2016年7月26日プレスリリース「トポロジカル絶縁体表面で高効率スピン流を生成」
https://www.riken.jp/press/2016/20160726_1/

2. 研究手法と成果

共同研究グループは、典型的なトポロジカル絶縁体物質である $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_3$ (Bi: ビスマス、Sb: アンチモン、Te: テルル) と、強磁性と絶縁性の両方の性質を持つ化合物 $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ (Cr: クロム、Ge: ゲルマニウム) の積層構造を独自に開発しました。薄膜成長手法の一つである分子線エピタキシー法^[7]を利用することで、半導体基板 InP (In: インジウム、P: リン) 上に結晶間に混じりのない明瞭な積層界面を持つ高品質な結晶薄膜が作製できます (図1左)。これまでに共同研究グループは、トポロジカル絶縁体と強磁性絶縁体 $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ に巨大な異常ホール効果^[8]を観測しており^{注2)}、トポロジーの異なる絶縁体界面に生じるトポロジカル表面状態に対して、強い磁気近接効果が生じることに着目しました。

まず、フォトリソグラフィー法によってホールバー形状に加工した薄膜試料 (図1右) を、 $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ 層が強磁性化する2ケルビン (約-271°C) まで冷却しました。

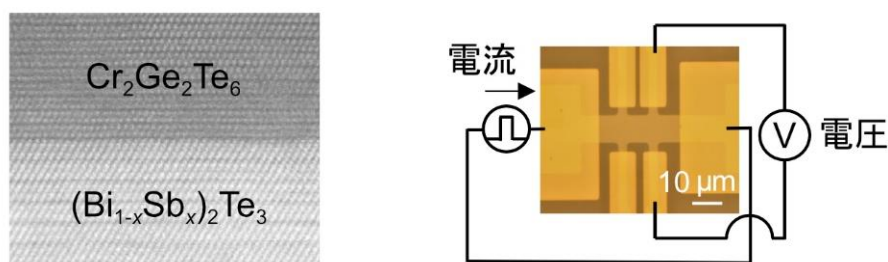


図1 透過型電子顕微鏡による積層構造の断面像と作製したホールバーの光学顕微鏡像

左: 典型的なトポロジカル絶縁体物質 (下) と、強磁性と絶縁性の両方の性質を持つ化合物 (上) の積層構造。

右: 真ん中の濃い茶色の部分が積層構造である。

次に、試料面内に弱磁場 (0.1 テスラ) を加えながら、電流を磁場と平行、もしくは反平行方向に流しながら、異常ホール効果を通して磁化の向きを測定しました。すると、約 2mA (ミリアンペア) 程度かけたところで、磁化方向が上向きから下向き (もしくは下向きから上向き) に反転することが分かりました (図2)。また、弱磁場の向きを反転すると、磁化反転方向が変わることも分かりました (図2)。これにより、磁化反転の起源が電流による発熱や磁場発生によるものではなく、スピントルク発生によるものと確かめられました。

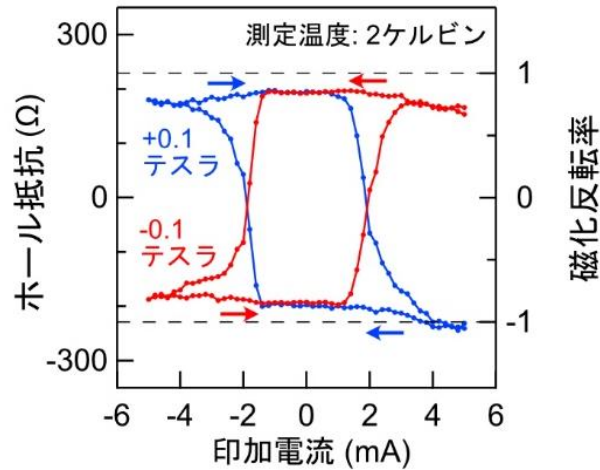


図2 電流印加による磁化反転

得られたホール抵抗の符号によって磁化の向きが分かる。ホール抵抗が正の場合は上向きの磁化、負の場合に磁化は下を向いている。印加電流を正から負にしたり、負から正にしたりすることで磁化の向きが変わることが分かる。さらに、0.1 テスラの面内磁場印加の向き（赤色と青色の線に対応）によって、磁化反転の向きが逆転していることが分かる。

さらに、磁化反転の閾値電流と強磁性絶縁体の磁気特性から磁化反転効率の評価ができます。今回、トポロジカル絶縁体の Bi と Sb の組成比率を変えることで、界面状態の伝導が支配的になる状況とトポロジカル絶縁体内部の伝導が支配的になる状況を作り分けられることを利用して、それぞれの磁化反転効率評価を行いました（図 3）。その結果、実際に界面伝導が支配的になる状況において、磁化反転効率が最大化されることから、界面で生じたトポロジカル電流が磁化反転に支配的であることが明らかになりました。

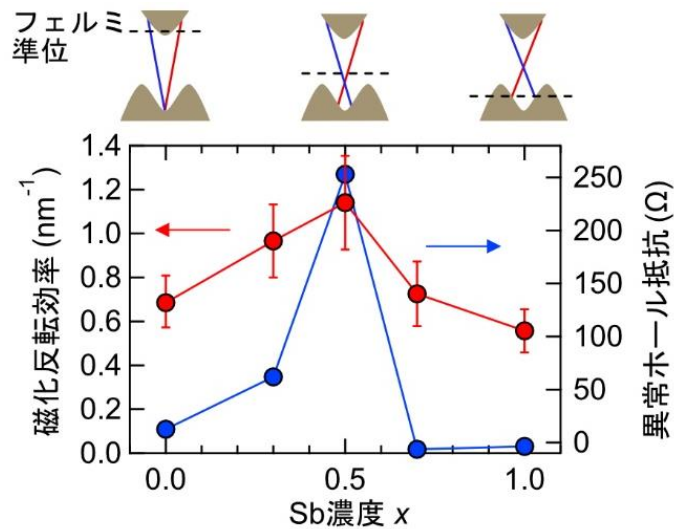


図3 異常ホール抵抗と磁化反転効率のSb（アンチモン）濃度依存性

フェルミ準位（固体中の電子が詰まっている最大のエネルギー）が変化することで（上の模式図）、異常ホール抵抗値（青色のグラフ）が変化する。フェルミ準位の界面伝導が支配的になる領域（Sb濃度=0.5）において、磁化反転効率（赤色のグラフ）が最大化されることが分かる。

注2) M. Mogi et al., Large Anomalous Hall Effect in Topological Insulators with Proximitized Ferromagnetic Insulators. *Phys. Rev. Lett.* 123, 016804 (2019).

3. 今後の期待

今回実証したトポロジカル絶縁体と強磁性絶縁体界面での磁化制御が室温で可能になれば、エネルギー損失の少ないスピントロニクス素子への応用化が期待できます。

さらに、磁性/非磁性/磁性の積層化をすることで、非散逸な電流が流れる量子異常ホール効果^[9]を発現することが知られています^{注3)}。この二層に分かれた磁化方向を電場印加によって平行/反平行と切り替えることで、非散逸電流のスイッチングが可能になります。この新しい原理を用いて、エネルギー損失のさらに少ないトポロジカル電流回路の設計が可能になると期待できます。

注3) 2017年10月7日プレスリリース「トポロジーの変化に伴う巨大磁気抵抗効果を発見」
https://www.riken.jp/press/2017/20171007_1/

4. 論文情報

<タイトル>

Current-induced switching of proximity-induced ferromagnetic surface states in a topological insulator

<著者名>

Masataka Mogi, Kenji Yasuda, Reika Fujimura, Ryutarō Yoshimi, Naoki Ogawa, Atsushi Tsukazaki, Minoru Kawamura, Kei S. Takahashi, Masashi Kawasaki, Yoshinori Tokura

<雑誌>

Nature Communications

<DOI>

10.1038/s41467-021-21672-9

5. 補足説明

[1] トポロジカル絶縁体

物質中の電子状態の幾何学的性質（トポロジー）を反映して、中身は電気を通さない絶縁体であるが、表面では電気を通す金属となる特殊な物質のこと。

[2] 強磁性絶縁体

鉄やコバルトなど、多くの磁石は金属であり電気を通す性質を持つ。一方で、電気を通さない磁石も存在し、（強）磁性絶縁体と呼ばれる。

[3] トポロジカル電流、トポロジカル物質

トポロジカル絶縁体や磁性化されたトポロジカル絶縁体は、電子状態のトポロジーによって特徴づけられる。これらの物質を総称してトポロジカル物質という。トポロジカル物質はその表面や端に、エネルギー損失の少ないトポロジカル電流が流れる。低消費電力素子への応用に向け、その損失の最小化が重要な研究課題の一つである。

[4] トルク、スピントルク

トルクとは、ある回転軸を中心に働く力のモーメント（回転力）のことである。磁石は磁気モーメントを持ち、伝導電子の持つスピンは磁気モーメントにトルクを与えることができる。これをスピントルクという。

[5] スピントロニクス素子

電気の流れを利用して機能を生み出す技術をエレクトロニクスと呼ぶのに対し、スピン（磁石の最小単位）を利用した技術をスピントロニクスと呼ぶ。外部磁場を極力使用せずに磁性を制御することで、エネルギー損失の少ないメモリ、回路などの素子への応用が期待されている。

[6] 磁気近接効果

非磁性金属に磁性体を接合させると、非磁性金属側の電子が磁性体側から影響を受けて磁性化する効果のこと。トポロジカル絶縁体の場合、表面状態の電子が強磁性化され、異常ホール効果を生み出す。

[7] 分子線エピタキシー法

高品質な薄膜を成長させる方法の一つ。超高真空（約 10^{-7} パスカル、Pa）中で高純度の単体を加熱蒸発させ、加熱した基板上で薄膜を成長させる。

[8] 異常ホール効果

磁場中を電子などの荷電粒子が動くと、ローレンツ力によって荷電粒子の動きが曲げられる。その結果、物質内では、電流を流したとき電子の動きが曲げられることで電流の垂直方向に電圧が生じる。この現象をホール効果、測定される電圧を電流で割った値をホール抵抗と呼ぶ。磁石の中では、磁場がゼロであっても磁化によってホール抵抗が生じ、これを異常ホール効果と呼ぶ。

[9] 量子異常ホール効果

試料端にエネルギー損失の無いトポロジカル電流が流れる効果。このときホール抵抗が、プランク定数 h と電気素量 e で表される h/e^2 (約 25.8 k Ω) の値に量子化する。

6. 発表者・機関窓口

* 今般の新型コロナウイルス感染症対策として、理化学研究所では在宅勤務を実施しておりますので、メールにてお問い合わせ願います。

<発表者> ※研究内容については発表者にお問い合わせください。

理化学研究所 創発物性科学研究センター

強相関量子伝導研究チーム

客員研究員 茂木 将孝 (もぎ まさたか)

(マサチューセッツ工科大学 博士研究員)

チームリーダー 十倉 好紀 (とくら よしのり)

(東京大学卓越教授/東京大学 国際高等研究所東京カレッジ)

研究員 吉見 龍太郎 (よしみ りゅうたろう)

強相関界面研究グループ

グループディレクター 川崎 雅司 (かわさき まさし)

(東京大学 大学院工学系研究科 教授)

創発光物性研究チーム

チームリーダー 小川 直毅 (おがわ なおき)

(東京大学 大学院工学系研究科 教授 (委嘱))

東京大学 大学院工学系研究科

修士課程 2 年 藤村 怜香 (ふじむら れいか)

東北大学 金属材料研究所 低温物理学研究部門

教授 塚崎 敦 (つかざき あつし)

(理研 創発物性科学研究センター 強相関界面研究グループ 客員主管研究員)

<機関窓口>

理化学研究所 広報室 報道担当

東京大学 大学院工学系研究科 広報室

東北大学 金属材料研究所 情報企画室 広報班

科学技術振興機構 広報課

<JST 事業に関すること>

科学技術振興機構 戦略研究推進部

嶋林 ゆう子（しまばやし ゆうこ）
