

トポロジカル絶縁体の表面金属状態の絶縁化 — 特殊な電気磁気効果観測のための物質基盤を確立 —

要旨

理化学研究所（理研）創発物性科学研究センター強相関物性研究グループの茂木将孝研修生（東京大学大学院工学系研究科大学院生）、十倉好紀グループディレクター（同教授）、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（同教授）、強相関量子伝導研究チームの川村稔専任研究員、東北大学金属材料研究所の塚崎敦教授と産業技術総合研究所の白川直樹研究チーム長らの共同研究グループ^{*}は、磁性層と非磁性層を交互に積み重ねた「トポロジカル絶縁体」^[1]積層薄膜を作製することで、特殊な「電気磁気効果」の発現が期待される新しい量子状態を実現しました。

電気磁気効果は電場印加によって磁化（磁石としての性質）が発生したり、逆に磁場印加によって電気分極^[2]が起きたりする現象のことで、将来の省電力メモリー素子への応用が期待されています。トポロジカル絶縁体は、物質内は電気を通さないが表面は電気を通す物質であり、トポロジー（位相幾何学）^[3]に由来する特殊な電気磁気効果が発現すると理論的に予測されています。しかし、トポロジカル絶縁体では通常、金属的な表面状態があるため電気磁気効果が生じません。そのため、電気磁気効果の観測にはトポロジカル絶縁体の表面を絶縁化する必要があります。理論的には、二つの磁性層の磁化を、表面に対して垂直にそれぞれ逆向き（反平行）に向かせると絶縁体になると予測されていますが、従来の技術では磁化の向きを制御するのは困難でした。

今回、共同研究グループは独自に開発した「磁気変調ドーピング」^[4]という手法で、トポロジカル絶縁体「 $(\text{Bi}_{1-y}\text{Sb}_y)_2\text{Te}_3$ （Bi：ビスマス、Sb：アンチモン、Te：テルル）」と、それに磁性元素Cr（クロム）を添加した磁性トポロジカル絶縁体「 $\text{Cr}_x(\text{Bi}_{1-y}\text{Sb}_y)_{2-x}\text{Te}_3$ 」を用いて、磁性/非磁性/磁性の三層に積層した薄膜を作製しました。この薄膜を調べたところ、二つの磁性層の磁化が反平行になる状態ができ、表面が絶縁化していました。この結果は、理論的に予測されている特殊な電気磁気効果発現の条件であり、電気磁気効果観測のための物質基盤を確立したことになります。

今後、作製した積層構造の薄膜を用いて特殊な電気磁気効果を直接観測できると考えられます。また、今回の積層技術の開発によって可能になった新しい量子状態はトポロジカル絶縁体の理解をより深め、さらにスピントロニクスや

量子コンピューティングへの応用に役立つと期待できます。

本成果は、英国の科学雑誌『*Nature Materials*』に掲載されるのに先立ち、オンライン版（2月13日付け：日本時間2月14日）に掲載されます。

本研究は、最先端研究開発支援プログラム（FIRST）課題名「強相関量子科学」、戦略的創造研究推進事業（CREST）課題名「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」の事業の一環として行われました。

1. 背景

2016年のノーベル物理学賞は「物質におけるトポロジカル相転移、トポロジカル相の理論的発見」に対してデイビッド・J・サウレス博士、ダンカン・ホールデン教授（米国プリンストン大学）、ジョン・M・コステリッツ教授（米国ブラウン大学）の3人に与えられました。このように、物質に内在する「トポロジー」（位相幾何学）に着目する研究が、近年世界で急速に進められています。「トポロジカル絶縁体」はその代表的な例の一つであり、内部は電流が流れない絶縁体である一方、表面はトポロジーが生み出す特殊な金属的状态により電流が流れる物質です。

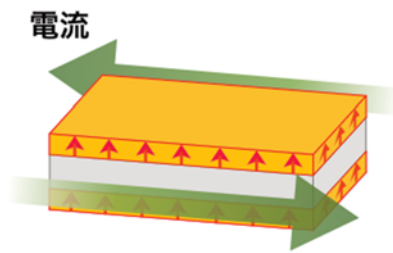
トポロジカル絶縁体に磁性不純物を添加することで磁化（磁石としての性質）を持たせると、表面の金属的状态が磁化と絡み合い、異常な電気伝導特性を示します。近年の研究で、磁化が一方向に全て揃っている場合（図1(a)）には、試料の端にだけ電流が流れる「量子異常ホール効果^[5]」が生じることが分かってきました。

「電気磁気効果」は電場の印加によって磁化が発生したり、逆に磁場の印加によって電気分極が起きたりする現象のことで、将来の省電力メモリー素子への応用が期待されています。電気磁気効果は特殊な磁性体でも観測される効果ですが、トポロジカル絶縁体の電気磁気効果は巨大で、その大きさが物質に必ず存在する欠陥や不純物の量に左右されない、ある決まった値をとるという特徴があります。

ところが、通常のトポロジカル絶縁体では、その表面の金属的状态のために、電気磁気効果が生じません。そのため、電気磁気効果の観測にはトポロジカル絶縁体の表面を絶縁化する必要があります。理論的には、磁化を表面に対して反平行な方向（図1(b)）に向かせると、表面の金属的状态が全て消えて完全な絶縁体になると予測されています。しかし、トポロジカル絶縁体で磁化の方向を制御するのは技術的に困難でした。

そこで共同研究グループは、トポロジカル絶縁体の表面に対して磁化を反平行な方向に制御することを目指しました。

(a) 量子異常ホール効果



(b) 電気磁気効果

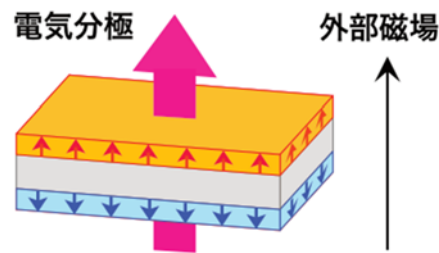


図1 トポロジカル絶縁体積層薄膜における量子異常ホール効果と電気磁気効果の概念図

- (a) トポロジカル絶縁体の表面に対して磁化が一方向にそろっているときには、試料の端にだけ電流が流れる（緑の大きな矢印）量子異常ホール効果が現れる。
- (b) トポロジカル絶縁体の表面に対して磁化が反平行になっているときには、試料の端にも電流が流れなくなり、完全な絶縁体を実現する。この完全な絶縁体では、特殊な電気磁気効果の観測が期待されており、例えば外部磁場を印加すると同じ向きに電気分極が生じる（ピンクの大きな矢印）。

2. 研究手法と成果

共同研究グループはまず、高品質な薄膜を成長させる方法の一つである分子線エピタキシー^[6]装置を用いて、独自に開発した「磁気変調ドーピング」^注という手法によりトポロジカル絶縁体「 $(\text{Bi}_{1-y}\text{Sb}_y)_2\text{Te}_3$ (Bi: ビスマス、Sb: アンチモン、Te: テルル)」と、磁性元素 Cr (クロム) を添加した磁性トポロジカル絶縁体「 $\text{Cr}_x(\text{Bi}_{1-y}\text{Sb}_y)_{2-x}\text{Te}_3$ 」の薄膜の積層構造を、半導体材料のインジウムリン (InP) 基板上に作製しました。磁性/非磁性/磁性の三層にわたる積層構造 (図 2(a)) とし、磁性層の保磁力 (磁性体の磁化を反転させるのに必要な外部磁場の大きさ) に差を持たせることで、二つの磁性層の磁化方向を制御することが可能です。このような磁化の制御法は、現在のハードディスクドライブの磁気ヘッドに用いられる巨大磁気抵抗効果 (GMR) 素子^[7]としてよく知られています。

次に、作製した薄膜試料に対して垂直方向に強い外部磁場を印加して磁化方向を揃えたところ、量子異常ホール効果が観測されました (図 1(a))。外部磁場の印加方向を反転させてだんだん強くしていくと、ある大きさの磁場で保磁力の小さい層の磁化が反転します (図 1(b))。その結果、磁化の反転、つまり二つの磁性層の磁化が反平行になる状態ができると同時に薄膜試料に電流が流れなくなり、表面が完全に絶縁化しました (図 2(b)、(c))。

これは磁化の方向を制御することで、トポロジカル絶縁体の表面を絶縁化し、量子異常ホール効果から特殊な電気磁気効果の観測が期待される絶縁体状態へ変換できたことを示しています。

この結果は、磁性トポロジカル絶縁体の磁化方向制御によって、特殊な電気磁気効果観測のための物質基盤を確立したことになります。

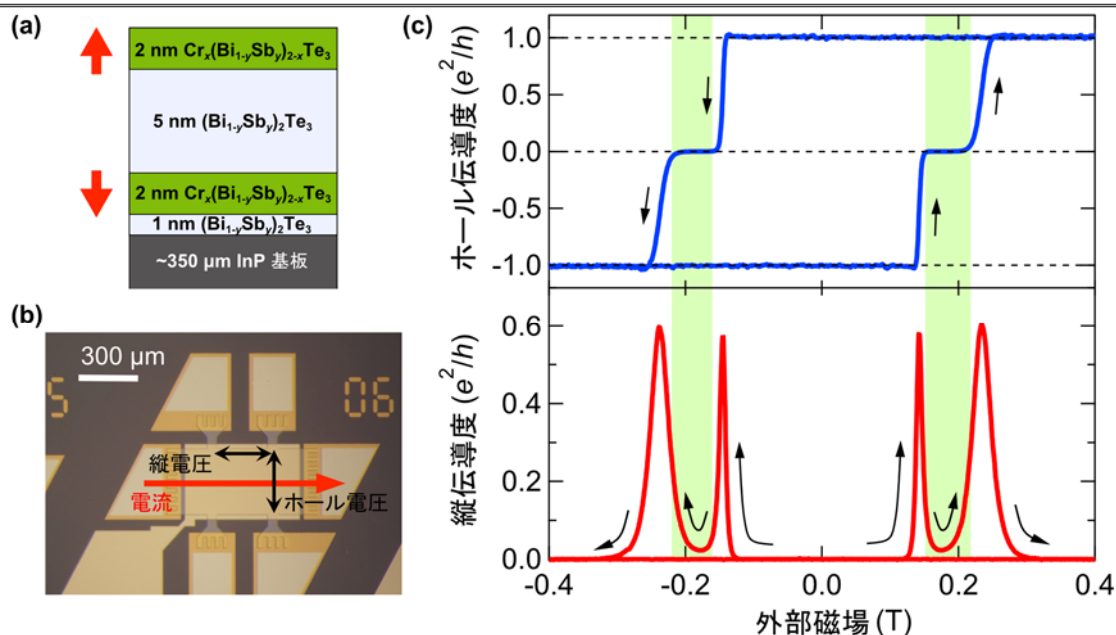


図 2 積層薄膜のホール伝導度と縦伝導度の外部磁場依存性

- (a) 作製したトポロジカル絶縁体薄膜と磁性トポロジカル絶縁体の積層構造。
 (b) 作製した薄膜を測定用に加工した試料の光学顕微鏡写真。
 (c) 緑の影をつけた部分が絶縁化の状態を表している。電流印加方向の電気の流れやすさを表す縦伝導度と、電流方向と垂直方向への電流の流れやすさを表すホール伝導度が同時にゼロに近づき、電流がどこにも流れにくい状態を意味している。縦伝導度とホール伝導度は測定された縦電圧とホール電圧から計算される。

注) M. Mogi, R. Yoshimi, A. Tsukazaki, K. Yasuda, Y. Kozuka, K.S. Takahashi, M. Kawasaki and Y. Tokura, "Magnetic modulation doping in topological insulators toward higher temperature quantum anomalous Hall effect", *Appl. Phys.Lett.* 107, 182401 (2015).

3. 今後の期待

今後は、本研究で実現した新しい量子状態において、電気磁気効果の直接観測が期待できます。この特殊な電気磁気効果の観測は、物質のトポロジーの性質の理解という基礎科学として重要なものです。特にトポロジカル絶縁体はスピントロニクスや量子コンピューティングへの応用が期待されており、実用化に向けたさらなる発展のためにトポロジカル絶縁体そのものの理解を深めることが重要です。

4. 論文情報

<タイトル>

A magnetic heterostructure of topological insulators as a candidate for an axion insulator

<著者名>

M. Mogi, M. Kawamura, R. Yoshimi, A. Tsukazaki, Y. Kozuka, N. Shirakawa, K. S.

Takahashi, M. Kawasaki and Y. Tokura

<雑誌>

Nature Materials

<DOI>

10.1038/nmat4855

5. 補足説明

[1] トポロジカル絶縁体

物質中の電子状態の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] 電気分極

物質の片側にプラスの電荷がたまり、反対側にはマイナスの電荷がたまった状態。磁石の性質としての磁化が、電気の性質としての電気分極に対応する。

[3] トポロジー（位相幾何学）

ある形を連続的に変形させても変わらない性質を研究する数学的概念。トポロジカル絶縁体では、固体中で電子がとり得るエネルギー状態（バンド構造）のトポロジーによって特徴的な性質を現す。

[4] 磁気変調ドーピング

今回共同研究グループが開発した、磁性元素であるクロム（Cr）をトポロジカル絶縁体に添加する際、表面付近のCrの濃度が高くなるように薄膜成長方向にCr添加量を変調する手法。これによって高品質な磁性トポロジカル絶縁体を作製できる。

[5] 量子異常ホール効果

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。物質内では、電流を流したとき電子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」と呼び、得られる電圧値を流す電流値で割ったものを、「ホール抵抗」と呼ぶ。物質が磁性体であれば、物質の磁化によって電子の動きが曲げられるため、外部磁場がなくてもホール効果が起きる。これを「異常ホール効果」と呼ぶ。量子異常ホール効果は、ホール抵抗が量子化抵抗（約 $25.8 \text{ k}\Omega = h/e^2$ ； h はプランク定数、 e は電気素量）をとる。このとき電流は、試料の端でエネルギー損失がなく流れている。

[6] 分子線エピタキシー

高品質な薄膜を成長させる方法の一つ。超高真空（ $\sim 10^{-7}$ パスカ、Pa）中で高純度の単体を加熱して蒸発させるなどして基板上で結晶成長させる。

[7] 巨大磁気抵抗効果（GMR）素子

強磁性薄膜と非磁性薄膜を重ねた多層膜で、外部磁場により互いの強磁性の磁化方向を平行、反平行と変えることで抵抗値が大きく変わる現象を「巨大磁気抵抗効果」と呼ぶ。これを素子化し、素子の電流の流れやすさから、外部磁場の方向を読み取るこ

とが可能である。GMR は Giant Magneto Resistive effect の略。

6. 発表者・機関窓口

<発表者> ※研究内容については発表者にお問い合わせ下さい

理化学研究所 創発物性科学研究センター

強相関物理部門 強相関量子伝導研究チーム

研修生 茂木 将孝 (もぎ まさたか)

(東京大学大学院工学系研究科 大学院生)

グループディレクター 十倉 好紀 (とくら よしのり)

(東京大学大学院工学系研究科 教授)

強相関物理部門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)

強相関物理部門強相関量子伝導研究チーム

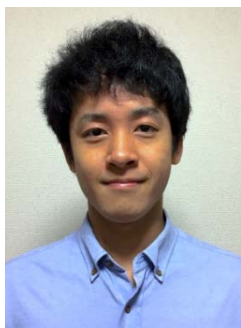
専任研究員 川村 稔 (かわむらみのる)

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)

産業技術総合研究所フレキシブルエレクトロニクス研究センター機能発現プロセスチーム

研究チーム長 白川 直樹 (しらかわ なおき)



茂木 将孝



十倉 好紀



川崎 雅司



川村 稔



塚崎 敦



白川 直樹

<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

産業技術総合研究所 企画本部報道室

※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

強相関物性研究グループ

研修生 茂木 将孝 (もぎ まさたか)

(東京大学大学院工学系研究科 修士課程2年)

グループディレクター 十倉 好紀 (とくら よしのり)

(東京大学大学院工学系研究科 教授)

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)

(科学技術振興機構さきがけ研究者)

強相関量子伝導研究チーム

専任研究員 川村 稔 (かわむら みのる)

基礎科学特別研究員 吉見 龍太郎 (よしみ りゅうたろう)

東京大学大学院工学系研究科

講師 小塚 裕介 (こづか ゆうすけ)

東北大学 金属材料研究所

教授 塚崎 敦 (つかざき あつし)

(理化学研究所 客員主管研究員)

産業技術総合研究所フレキシブルエレクトロニクス研究センター

機能発現プロセスチーム

研究チーム長 白川 直樹 (しらかわ なおき)