

PRESS RELEASE

2016年7月25日

理化学研究所
東京大学
東北大学金属材料研究所
九州工業大学

トポロジカル絶縁体表面で高効率スピン流を生成

—省電カスピントロニクスデバイス応用に期待—

要旨

理化学研究所（理研）創発物性科学研究センター—量子ナノ磁性チームの近藤浩太研究員、福岡康裕客員研究員（九州工業大学准教授）、大谷義近チームリーダー（東京大学物性研究所教授）、強相関量子伝導研究チームの吉見龍太郎 基礎科学特別研究員、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研究科教授）、強相関物性研究グループの十倉好紀グループディレクター（東京大学大学院工学研究科教授）、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]「 $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_3$ 」の表面を用いた新しい電流-スピン流^[2]変換現象の実験的観測および定量的評価に成功しました。

電流-スピン流変換は、スピントロニクス^[3]デバイスの駆動原理として重要な現象の一つです。これまで、電子の運動と電子のスピンを結びつける相互作用（スピン軌道相互作用^[4]）が強い遷移金属を用いたスピンホール効果^[4]の実験から効率検証が行われてきました。しかし、その変換効率は低く、デバイスの低消費電力化に向けて、新しい変換原理に基づく飛躍的な効率向上が求められています。

今回、共同研究グループは、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) を利用したスピントロニクス素子を作製し、トポロジカル絶縁体の表面における電流-スピン流変換現象について調べました。その結果、界面での高効率な変換現象の観測に成功しました。そして、界面での変換現象は、従来の金属系でのスピンホール効果とは本質的に異なる現象であるため、比較基準を改め新しい評価基準を定めました。さらに、その変換係数の符合が伝導キャリアのタイプ^[5]（電子型か正孔型か）に依存しないという、トポロジカル絶縁体特有の現象を検出することに成功しました。

本成果により、今後、界面を利用した省電カスピントロニクスデバイスのさらなる発展が期待できます。

本研究は、新学術領域研究 課題名「ナノスピン変換科学」および最先端研究支援プログラム (FIRST) 課題名「強相関量子科学」の事業の一環として行われました。成果は、国際科学雑誌『*Nature Physics*』オンライン版（7月25日付け：日本時間7月26日）に掲載されます。

※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

量子情報エレクトロニクス部門

量子ナノ磁性研究チーム

研究員 近藤 浩太 (こんどう こうた)
客員研究員 福岡 康裕 (ふくま やすひろ)
(九州工業大学大学院情報工学研究系 准教授)
チームリーダー 大谷 義近 (おおたに よしちか)
(東京大学物性研究所 教授)

強相関物理部門

強相関量子伝導研究チーム

基礎科学特別研究員 吉見 龍太郎 (よしみ りゅうたろう)

強相関物性研究グループ

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

専任研究員 松野 丈夫 (まつの じょうぶ)

上級研究員 高橋 圭 (たかはし けい)

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)

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)

(理研客員主管研究員)

1. 背景

電流-スピン流の相互変換は、スピントロニクスデバイスの駆動原理として重要な現象の一つです。特に、電流に比べ発熱効果を抑制できるスピン流を磁化操作に利用した磁気メモリ素子の開発が盛んに行われています。これまで、スピン軌道相互作用の強い遷移金属を用いてスピンホール効果によるスピン流検証実験が行われてきました。しかし、スピン流を活用した省電力デバイスの実現に向けて、より高効率での変換が求められています。

そこで、共同研究グループは、近年発見された「トポロジカル絶縁体」に着目しました。この物質は、内部が絶縁体で表面のみが金属的特性を示します。表面で金属的性質を示す電子は、電子の進行方向に依存してスピンの方向が決まる「スピン運動量ロッキング^[6]」という特長を持っています (図 1 (a))。

共同研究グループは、この特長を利用することで、これまでとは全く異なる変換原理に基づいたスピントロニクス素子を作製することにより、界面での電流-スピン流変換現象^[7]の実験的観測および定量的評価を目指しました。

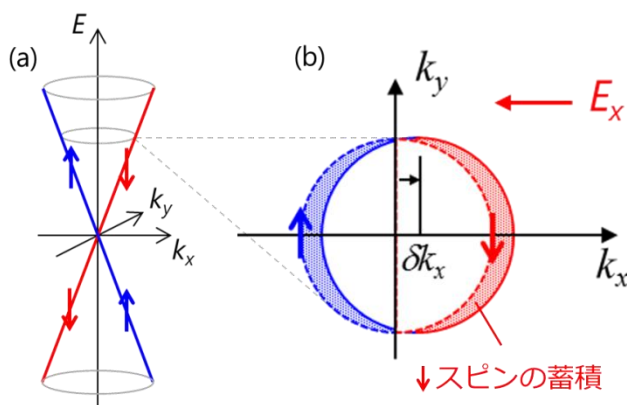


図1 トポロジカル絶縁体の表面電子バンド（エネルギー準位）と外部電界によるスピン蓄積

- (a): トポロジカル絶縁体表面におけるスピン運動量ロッキングを表した図。電子の進行方向 (k の方向) によって、電子スピンの方向 (赤と青の矢印) が決まる。
- (b): (a) のフェルミ準位を上から見た図。図の方向から外部電界 E_x を加えると、電子の進行方向が δk_x の分だけ k_x の方向にずれる。その結果、赤や青のドット部分のスピンがトポロジカル絶縁体の表面に蓄積する。

2. 研究手法と成果

共同研究グループは、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) / 非磁性体 (Cu: 銅) / 強磁性体 $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (Ni: ニッケル、Fe: 鉄) の三層積層膜構造の素子を作製しました (図 2)。このトポロジカル絶縁体はアンチモン濃度を変えることで、ディラック表面状態^[8]のフェルミ準位^[9] (絶対零度で電子のとり得る最高のエネルギー準位) を制御することができるため、伝導キャリアのタイプ (電子型か正孔型か) による変換現象の変化を検証することができます。

この三層積層膜構造の素子の面内方向に電界を加えると、スピン運動量ロッキングによりトポロジカル絶縁体層の表面にスピンが蓄積します (図 1(b))。蓄積されたスピンは、非磁性体層/強磁性体層へスピン流として拡散します。このスピン流は、スピントルク強磁性共鳴法^[10]を用いることで定量的に評価することができます (図 2)。

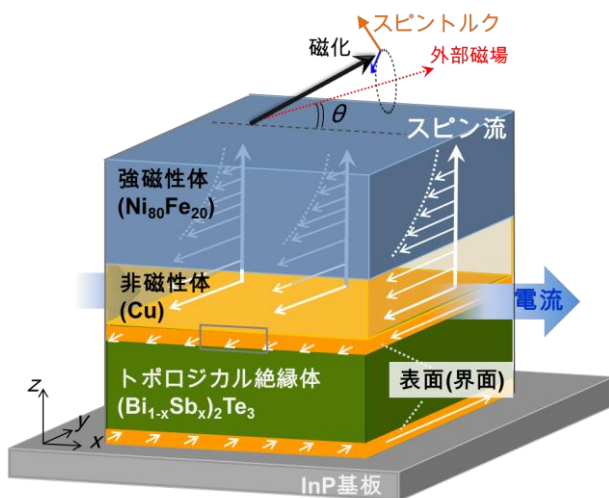


図2 トポロジカル絶縁体/非磁性体/強磁性体の三層積層膜の素子

素子面内方向に電界を加えると、いちばん下のトポロジカル絶縁体層の表面(界面)にスピンの蓄積する。蓄積されたスピンは、下から2番目の非磁性体層と3番目の強磁性体層へスピンの流として拡散する。このスピンの流は強磁性体層で検出され、定量的評価ができる。

そこで、共同研究グループは、フェルミ準位を系統的に変化させたトポロジカル絶縁体を用いた測定素子を作製し、スピントルク強磁性共鳴を測定しました。その結果、界面における電流-スピン流変換の効率は、ディラック点^[11](価電子帯と伝導帯が交わる点)近傍以外では、フェルミ準位に依存せず一定値になることが分かりました。また、従来の遷移金属を用いたスピンホール効果よりも、高効率で変換されていることも示しました。さらに、伝導キャリアが電子型(n型)から正孔型(p型)に変化しても、界面電流-スピン流変換係数の符合が変化しないことを示しました(図3)。

これらの実験結果は、半導体中でのスピンホール効果とは異なる振る舞いであることから、トポロジカル絶縁体表面のバンド構造(結晶内の電子に対するエネルギー準位の構造)が電流-スピン流変換現象の特性を決めていることを明らかにしました。

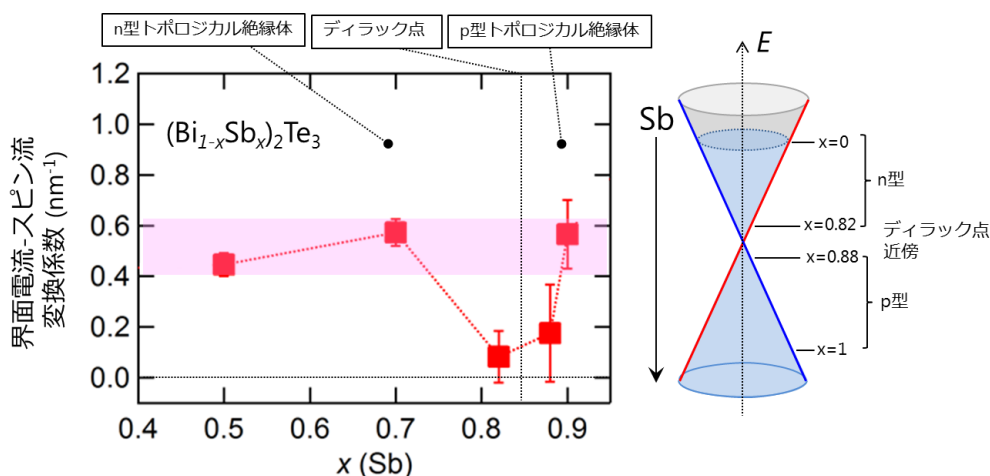


図3 界面電流-スピン流変換係数

左: トポロジカル絶縁体のアンチモン(Sb)濃度 x を上げてく(グラフの左から右へ) と、伝導キャリアが電子型(n型)からディラック点を通って、正孔型(p型)へと変化する。そのとき、界面電流-スピン流変換係数は常に正の値を示す。さらに、ディラック点近傍($x=0.82\sim 0.88$)を除くトポロジカ

ル絶縁体表面では、変換係数がほぼ一定値 ($0.45\sim 0.57\text{nm}^{-1}$ 、グラフの淡いピンク色のゾーン) を示す。

右：Sb 濃度に依存して変化するエネルギー準位の位置の変化を示した。ディラック点近傍より上のエネルギーでは n 型、下では p 型のトポロジカル絶縁体になる。

3. 今後の期待

本成果により、トポロジカル絶縁体の表面状態を利用することで高効率な電流-スピン流変換が可能であることが示されました。今後、スピントロニクスデバイスにおいて、界面の電子物性を考慮した設計をすることで、省電力デバイスの実現に向けた研究が進むと考えられます。

4. 論文情報

<タイトル>

Fermi level dependent charge-to-spin current conversion by Dirac surface state of topological insulators

<著者名>

K. Kondou, R. Yoshimi, A. Tsukazaki, Y. Fukuma, J. Matsuno, K. S. Takahashi, M. Kawasaki, Y. Tokura and Y. Otani

<雑誌>

Nature Physics

<DOI>

10.1038/nphys3833

5. 補足説明

[1] トポロジカル絶縁体

近年発見された物質で、物質内部が絶縁体である一方、物質表面だけは金属であるという性質を持つ。今回の研究では、トポロジカル絶縁体としての性質を持つことが知られる Bi_2Te_3 と Sb_2Te_3 という二つの物質の混合物を用いた。

[2] スピン流

スピンとは、電子の磁石としての性質（地球の自転に似た電子の角運動量）で、電子の電荷の流れである電流に対して、スピンの流れをスピン流と呼ぶ。

[3] スピントロニクス

エレクトロニクス（電子の電荷としての性質を利用した電子工学）の概念を拡張し、電子の持つ電荷とスピンの両方の性質を利用する電子工学。次世代の省電力・不揮発性の電子素子の動作原理を提供すると期待されている。

[4] スピン軌道相互作用、スピンホール効果

スピン軌道相互作用は、物質中で、電子の運動と電子のスピンの運動を結びつける相互作用で、スピンの情報を緩和させる原因になる。一方、スピン軌道相互作用の強い

遷移金属中では、電流-スピン流の相互変換を引き起こすことができる。この変換現象は、加えた電流と直交方向にスピン流が生成されることから、スピンホール効果と呼ばれる。

[5] 伝導キャリアのタイプ

半導体などの結晶において、電荷の“運び手”を伝導キャリアと呼ぶ。伝導キャリアのタイプには、負の電荷の電子型と、結晶中の電子が欠落した部分であたかも正の電荷を持った電子のように振る舞う正孔型（ホール型）の二つがある。

[6] スピン運動量ロッキング

トポロジカル絶縁体の表面では、電子の運動方向に依存して、電子スピンの方向が決まる。この現象をスピン運動量ロッキングと呼ぶ。

[7] 界面電流-スピン流変換

トポロジカル絶縁体表面に電界を加えると、表面で電流が生成すると同時に、スピン運動量ロッキングにより、表面にスピンの蓄積が生成される。蓄積されたスピンは、近接する物質へスピン流として拡散する。

[8] ディラック表面状態

光速に近い速度で動く電子は、相対論的量子力学においてディラック方程式を用いて記述される。近年、固体中の電子にもディラック方程式に従って運動する高速な電子が存在することが分かってきた。固体中で質量を持たない電子をディラック電子と呼び、それらが存在する状態をディラック状態と呼ぶ。

[9] フェルミ準位

物質が絶対零度（0 ケルビン、 -273.15°C ）にあるときに電子のとりうる最高のエネルギー準位。このエネルギーの電子が、電気伝導や電流-スピン流変換などに寄与する。

[10] スピントルク強磁性共鳴法

強磁性/非磁性物質などの多層膜構造において、非磁性物質中での電流-スピン流変換現象を観測する手法。非磁性物質で生成するスピン流を、強磁性体共鳴スペクトルを解析することで定量評価ができる。

[11] ディラック点

ディラック状態では線形の分散関係を持ち、価電子帯と伝導帯が交わる点をディラック点と呼ぶ。ここで、価電子とは原子内の最外殻の原子殻を回っている電子のことで、価電子帯とは価電子によって満たされたエネルギー帯のことをいう。伝導帯とは、結晶のバンド構造の中で、電気伝送に関与する自由電子がとるエネルギー帯のこと。

6. 発表者・機関窓口

理化学研究所 創発物性科学研究センター

量子情報エレクトロニクス部門 量子ナノ磁性研究チーム

研究員

近藤 浩太（こんどう こうた）

客員研究員 福間 康裕 (ふくま やすひろ)
(九州工業大学大学院情報工学研究センター電子情報工学研究系 准教授)
チームリーダー 大谷 義近 (おおたに よしちか)
(東京大学物性研究所 教授)

強相関物理部門

強相関量子伝導研究チーム

基礎科学特別研究員 吉見 龍太郎 (よしみ りゅうたろう)

強相関物性研究グループ

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)

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)

(理研客員主管研究員)

TEL: 048-467-9478 (近藤)、04-7136-3488 (大谷)

FAX: 048-467-9650 (近藤)

E-mail: kkondou@riken.jp (近藤)、yotani@issp.u-tokyo.ac.jp (大谷)

<機関窓口>

理化学研究所 広報室 報道担当

TEL: 048-467-9272 FAX: 048-462-4715

E-mail: ex-press@riken.jp

東京大学物性研究所 総務係

TEL: 04-7136-3591 FAX: 04-7136-3216

E-mail: issp-somu@issp.u-tokyo.ac.jp

東北大学金属材料研究所 情報企画室広報班

TEL: 022-215-2144 FAX: 022-215-2482

E-mail: pro-adm@imr.tohoku.ac.jp

九州工業大学 総務課 広報企画係

TEL: 093-884-3007 FAX: 093-884-3015

E-mail: sou-kouhou@jimu.kyutech.ac.jp