

# トポロジカル絶縁体表面で高効率スピン流を生成

近藤 浩太、大谷 義近

## 【背景】

電流とスピン流はスピンホール効果を通じて相互に変換される。この効果は、1971年に M. I. Dyakonov と V. I. Perel によって理論予測されていたが[1]、約 30 年後の 2004 年になって初めて実験的に検証された[2]。その後の約 10 年間で金属薄膜の微細加工技術が著しく発展し、スピンホール効果を利用した磁化反転[3]やマイクロ波発振[4]などの新しい磁化制御手法が次々と実現され、スピンホール効果はスピントロニクス素子に必要不可欠な物理現象のひとつとなった。特に、スピン流から電流が直交方向に生成されるため、電流とスピン流の分離が容易となり、素子構造の簡素化に直結している。さらに、最近ではスピン流を媒介させることで、熱や光から電流を取り出す手法が開拓され環境発電の観点からも注目されている[3, 4]。これらスピンホール効果を利用したスピントロニクス素子では、スピン流と電流間の相互変換効率が素子性能を決定付ける。さらなる低消費電力スピントロニクス素子を実現し、かつデバイスの超薄膜化を目指すためには、これまで以上に高効率な電流-スピン流変換現象の発見が求められている。

ここ数年、スピンホール効果に代わる新たなスピン流生成の原理として、スピン分裂を伴う表面あるいは界面電子状態におけるエデルシュタイン(Edelstein)効果が注目を集めている[5-7]。この効果は、スピンホール効果と同様に電流と垂直方向に偏極したスピン蓄積が生じる現象であるが、その生成原理は全く異なる。トポロジカル絶縁体表面や、ランシュバ効果が存在する界面では、空間反転対称性が破れているためスピン軌道相互作用によって、スピン縮退が解けたバンド構造が形成される。特に、トポロジカル絶縁体表面では、電子スピンの進行方向に対して垂直に仮想磁場が作用するため、“スピン運動量ロッキング”という特殊な電子状態が形成される。すなわち一方に流れる電流はすべてその流れの方向に垂直にスピンを向けた電子(スピン偏極電子)を運ぶことになり、理想的にはスピン流の生成効率を 100%近くまで向上させることができると期待される。

## 【トポロジカル絶縁体表面におけるスピン流生成】

トポロジカル絶縁体の伝導特性は、そのフェルミ準位の位置に強く依存する。図 1(a)に示すように、ディラックコーン(Dirac cone)と呼ばれる二つの円錐形のエネルギー分散の頂点が接するディラック点(Dirac point: DP)よりも高いエネルギーにフェルミ準位があればキャリアが電子の N 型トポロジカル絶縁体になり、低いエネルギー準位にあればキャリアが正孔の P 型トポロジカル絶縁体になる。また、ディラック点からさらに離れた高いエネルギー準位では、バルクの伝導帯、逆に低いエネルギー準位では、バルクの価電子帯の影響を受ける。

トポロジカル絶縁体 $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_3$  (BST)のフェルミ準位  $E_F$  は、Sb 濃度(x)を調整することで、エネルギー分散の形を保ちながら規則的に変化することが知られている。図 1(b)に示すように、Sb 濃度(x)が  $0 < x < 0.82$  の BST 薄膜では、10K で測定したホール係数  $R_H$  は負の値を取り、その後、符号が反転し、 $0.88 < x < 1$  では正の値を取る。このように、 $E_F$  は Sb 濃度(x)に依存して N 型から P 型まで規則的に変化し、 $x = 0.84$  付近でほぼディラック点に一致する。

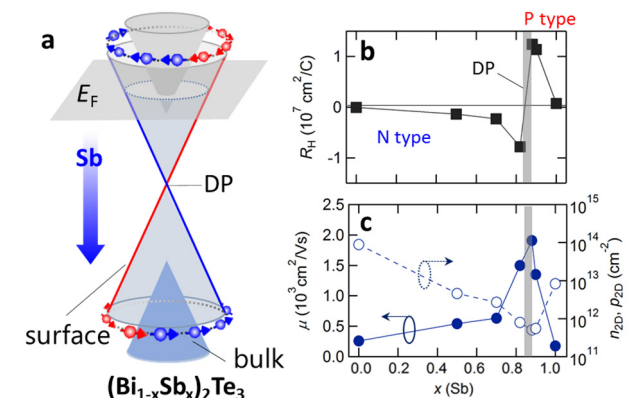


図 1 トポロジカル絶縁体 $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_3$ (BST)薄膜の伝導特性 a, トポロジカル絶縁体 $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_3$ の表面バンドとバルクバンド構造 Sb 濃度が上昇するほどフェルミ準位は下がる b, ホール係数の Sb 濃度依存性 c, BST 薄膜のキャリア密度(左軸)と移動度(右軸)灰色部分の組成比でフェルミ準位がディラック点近傍にある。



ことが予測される。そこで、界面有効膜厚  $t_{\text{int}}$  を 1 nm と仮定した場合のバルク絶縁の変換効率を見積もると、バルク絶縁 BST 薄膜( $x=0.5, 0.7, 0.9$ )において 45~57%となった。この値は、これまで報告されている遷移金属におけるスピンホール効果よりも大きな変換効率である。

最後に、超低消費電力スピントロクスデバイスへの応用という観点から、スピン流伝導度について述べる。スピン流伝導度は(電気伝導度) $\times$ (変換効率)で定義され、この値が大きいほど、小さな電流でスピン流生成ができる(=低消費電力)ことを示している。今回測定したバルク絶縁 BST 薄膜( $x=0.5, 0.7$ )では、スピン流伝導度は  $18 (\mu\Omega\text{m})^{-1}$  であった。この値はこれまでに遷移金属で報告されているスピン流伝導度(Pt  $34 (\mu\Omega\text{m})^{-1}$ ,  $\beta$ -Ta  $0.8 (\mu\Omega\text{m})^{-1}$ ,  $\beta$ -W  $13 (\mu\Omega\text{m})^{-1}$ ) [13] と近い値になることがわかった。さらに、遷移金属(Pt,  $\beta$ -Ta,  $\beta$ -W)では、上記のスピン流伝導度を得るためには、スピン拡散長(1~2 nm)よりも十分に厚い必要があるため、遷移金属を BST 薄膜の界面膜厚(~1 nm)と同程度の膜厚にすると、スピン流伝導度は 1/3 程度に減少する。

以上から、トポロジカル絶縁体の表面を用いた電荷-スピン変換現象をスピンホール効果の代わりに用いることで、スピントロクス素子の超薄膜化と低消費電力化を同時に実現する可能性が期待される。

### 【今後の展開】

本稿ではトポロジカル絶縁体表面状態を用いたスピン流の生成およびスピン流検出に関する実験研究を紹介した。このような特殊な表面状態を用いることで、従来のスピンホール効果と同等以上の効率でスピン流生成やスピン流の電氣的検出が実現できることが理論と実験の両面から解明されてきた。前述したように、それらの変換効率は、フェルミ速度、スピン緩和時間が重要な物理因子となる。特にスピン緩和時間は、スピン分裂した界面に緩和時間の短い金属などを接合した場合には、変換効率が大きく変化することが実験的にも示されている。これらの物理因子は、従来のスピンホール効果の大きさを決定する物理要因とは異なるものであり、これまでスピントロクス分野で注目されてこなかった物質群へ目を向ける良いきっかけを与える。ここでは触れなかったが、界面を用いる大きな利点は、外部電界により界面近傍の電子状態を制御できることである。そのため、今後電場による界面スピン流・電流変換機能の制御に関する研究が一層盛んになることが予想される。

### 【謝辞】

本研究成果は、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との共同研究によるものである。

- [1] M. I. Dyakonov and V. I. Perel, Sov. Phys. JETP **13**, 467 (1971).
- [2] Y. K. Kato, *et al.*: Science **306**, 1910 (2004). J. Wunderlich, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **94**, 047204 (2005).
- [3] K. Uchida, *et al.*: Nature **455**, 778 (2008), Appl. Phys. Lett. **97**, 172505 (2010)., H. Adachi, *et al.*: Phys. Rev. B **83**, 094410 (2011).
- [4] K. Uchida, *et al.*: Nature Commun.s **6**, 5910 (2015).
- [5] V. M. Edelstein, Solid State Commun. **73**, 233-235 (1990).
- [6] C. H. Li, *et al.*: Nature Nanotech. **9**, 218 (2014).
- [7] A. R. Mellnik, *et al.*: Nature **511**, 449 (2014).
- [8] L. Liu, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **106**, 036601 (2011).
- [9] K. Kondou, *et al.*: Nature Phys. **12**, 1027-1031 (2016).
- [10] M. Miyamoto, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **109**, 166802 (2012).
- [11] S. Souma, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **109**, 186804 (2012).
- [12] Y. Zhang, *et al.*: Nature Physicis **6**, 584-588 (2010).
- [13] A. Hoffman, IEEE Transactions on Magnetics **49**, 5172 (2013).

