

薄膜・表面物理のための磁性・スピントロニクス入門

長谷川修司

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻

〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

物質の磁性には、強磁性、反強磁性、フェリ磁性などの種類があるが、それらはすべて平行・反平行スピン（共線的スピン）配列からなっている。磁気ディスク、固体磁気メモリ、磁気ヘッドなどの情報記録媒体やデバイスに利用されてきた。最近、スピンの平行・反平行以外の角度をとる配置（非共線的スピン）や、電子の運動量ベクトルに常に直角方向に固定されたスピンをもつ物質（トポロジカル絶縁体など）などが注目され始めている。また、電子が持つ電荷の流れである電流とスピンとの絡み合い、あるいは電流を伴わないスピンだけの流れなどに注目した物理とその応用研究が、スピントロニクスと呼ばれるホットな分野となっている。本講演では、とくに、薄膜・表面系でのスピンに関連する事項の基礎を概観する。

Keywords: トンネル磁気抵抗, スピン軌道相互作用, トポロジカル絶縁体, スピンホール効果, スピン流

1. はじめに

図1に示すように、(a)強磁性、(b)反強磁性、(c)フェリ磁性は、各スピンが平行か反平行の共線的（collinear）な配置をとる状態である。これらは、ある臨界温度以上になると、熱エネルギーのために各スピンの向きが無秩序化して常磁性状態に転移する。一方、(d)に示すように、スピンの角度をなして配置する特殊な反強磁性体や、(e)に示すような「スキルミオン」と呼ばれる渦巻き状のスピン配列を示す物質も最近発見されており、このような非共線的（non-collinear）なスピン配列も最近盛んに研究されている。これらの物質は、共線的スピン配置の起源となる交換相互作用のほかに、物質表面やヘテロ界面での空間反転対称性の破れによる「ジャロシンスキー・守谷相互作用」がはたらいてスピン間に角度が付けられることになる。また、そのようなスピン配列では、いわゆる「ベリー位相」が生じ、巨大な異常ホール効果やトポロジカルホール効果という興味深い現象を引き起こすことが解明され、デバイス応用の可能性も研究されつつある。

また、トポロジカル絶縁体に体表される「スピン軌道相互作用」の強い物質では、図1(f)に示すような「スピン・運動量固定（ロッキング）」という現象がおき、伝導電子のスピンの向きが必ず運動量ベクトルと直角になる。これによって、トポロジカル絶縁体の表面や端では、スピン偏極電流や、電荷の流れを伴わないスピンの流れ「純スピン流」を作りだせることが

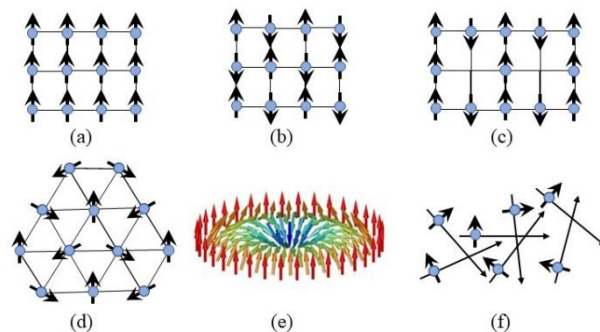


図1 様々なスピン配列：(a)強磁性、(b)反強磁性、(c)フェリ磁性、(d) 120°スピン配列、(e) スキルミオン、(f)スピン・運動量ロッキング。

示され、超省エネデバイスへの可能性など、これまた最近のホットトピックスとなっている。

このように、従来の磁性物理を拡張する新しい話題がスピントロニクスの分野で最近盛り上がり、そこでは薄膜・表面が重要な舞台となっている。本講演では、その基礎となる事項を、いくつかの例を示しながら概観する。

2. 時間反転対称性と空間反転対称性

外部磁場を印加したり磁気秩序を持ったりと時間反転対称性が破られる。一方、物質表面やヘテロ界面では、その垂直方向での空間反転対称性が破られる状況となる。これらどちらの対称性が破られてもスピンの向きに依存したエネルギーの違いが生まれ、スピン・磁性に起因する物性の起源となる。

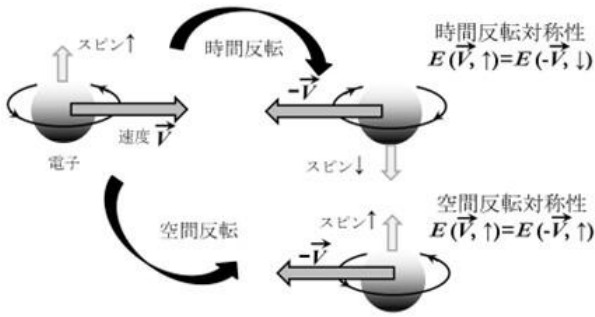


図2 時間反転対称性と空間反転対称性

時間反転によって、電子の運動の速度 (\vec{v}) の向きが逆転し ($-\vec{v}$)、なおかつスピンも逆転する (例えば上向きスピン \uparrow が下向きスピン \downarrow になる)。よって、時間反転対称性がある場合、速度の向きが反対向きで、なおかつスピンの向きも反対の電子 ($-\vec{v}, \downarrow$) は、もとの状態の電子 (\vec{v}, \uparrow) と同じエネルギーをもつということを意味する (図2)。

一方、空間反転によって、速度の向きが逆転するがスピンの向きは変わらないので、空間反転対称性がある場合、速度が逆転しているがスピンは逆転していない状態の電子 ($-\vec{v}, \uparrow$) は、もとの状態の電子 (\vec{v}, \uparrow) と同じエネルギーをもつことを意味する。

よって、時間反転対称性と空間反転対称性の両方が同時に成り立っている場合、($-\vec{v}, \downarrow$) の状態の電子と ($-\vec{v}, \uparrow$) の状態の電子は同じエネルギーをもつことになる。つまり、スピンの向きが上向きか下向きかに関わらずに、運動の速度が同じであれば同じエネルギーをもつということになる。このような状況を「スピン縮退」または研究者の名前をとって「クラマース縮退」と呼ばれている。このような状況は、空間反転対称性のある結晶構造をもつ常磁性の物質内部であれば必ず実現される (磁気秩序の無い常磁性であれば時間反転対称性が保たれているので)。

このスピン縮退を解く第1の方法が時間反転対称性を破ることであり、そのために磁場を印加したり磁気秩序を物質に導入したりする。そうするとスピンアップとスピンダウンの電子のエネルギーが違ってくる。これを「ゼーマン分裂」という。

もう一つのやりかたは、空間反転対称性を破ることによってスピン縮退を解くことができる。結晶表面やヘテロ界面近傍では、面直方向に空間反転対称性が必ず破れている。つまり、上向きスピンの電子と下向きスピンの電子は、運動する速度が同じであっても異なるエネルギーをもちえる。このようにスピンの向きに依存して電子のエネルギー状態が異なるという現象を

「ラシュバ (=ピチュコフ) 効果」と呼ぶ。これはゼーマン分裂と違って磁気秩序をもたない常磁性体で起こる。これは後述する仮想磁場がはたらくためである。強磁性体でないのに、強磁性体のように上向きスピンと下向きスピンが違った振る舞いをするということは、物性物理学の常識からすると驚きの性質だと思う。

3. トンネル磁気抵抗効果

薄膜・表面物理研究者に馴染みのある実験手法の「スピン偏極 STM」(走査トンネル顕微鏡) では、図3(a)に示すように、強磁性体の探針を用いて原子スケールで磁区を観察できる。強磁性探針から出るスピン偏極した電子が試料側にトンネルする確率が、探針と同じ方向のスピンをもつ磁区では高く (図3(b))、反対向きの磁区ではトンネル確率が低い (図3(c))。その差を STM 像のコントラストとして描き出す。

この「トンネル磁気抵抗効果」(Tunnel Magnetoresistance Effect, TMR) は、磁気ヘッドや固体磁気メモリなどにすでに利用され、スピントロニクスの大成功例といえる。2つの強磁性体層の間に絶縁体層を挟み込み、その間のトンネル確率が、2つの強磁性体層の磁化が平行か反平行かで異なることを利用して、情報を記録したり読み出したりする。TMR は、フェルミ準位 (E_F) 近傍のスピンの向きに依存した状態密度の違いに起因するトンネル確率の差で説明できる

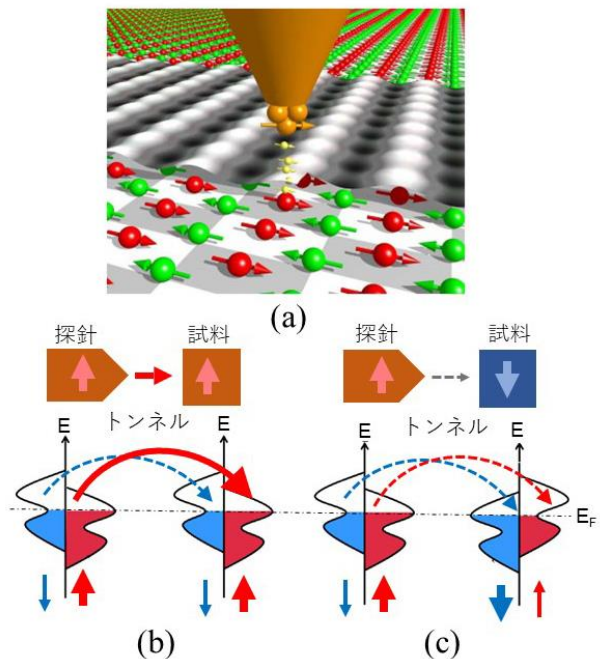


図3 (a) スピン偏極 STM The Heinrich Rohrer Medal 資料から¹⁾ (b) (c) TMR の概念図(文献²⁾をもとに作成)。

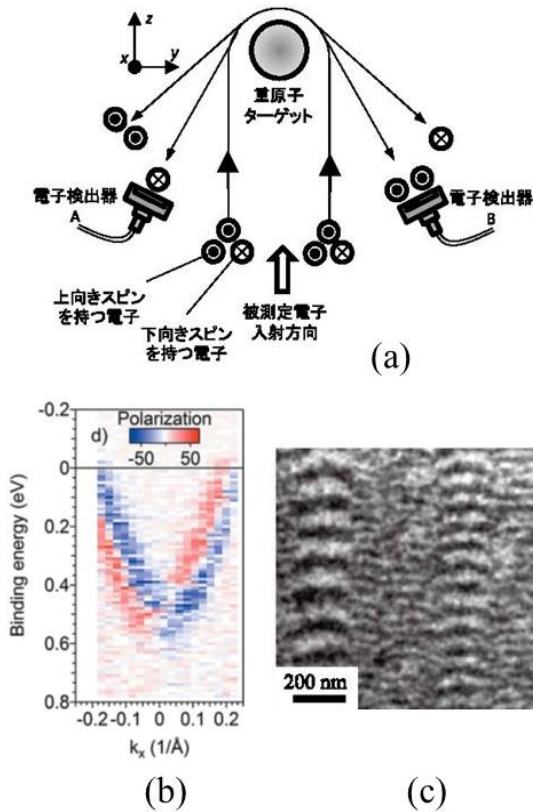


図4 (a)モット検出器の原理³⁾. (b) SARPESで測定したAu(111)表面の表面電子状態のバンド分散⁴⁾. (c) 垂直磁気記録ビットのスピensem像³⁾.

(図 3(b)(c)).

トンネル磁気抵抗効果の前に発見され、2007年のノーベル物理学賞の対象となった巨大磁気抵抗効果 (Giant Magnetoresistance Effect, GMR) は、TMR素子での真ん中の絶縁体層の代わりに非磁性金属層を使い、強磁性体層との界面での電流の透過確率が磁化の向きによって異なることを利用していた。磁気ヘッドがGMRからTMRに置き換わって、さらに記録密度の向上をもたらした。GMRもTMRも磁性と電気伝導が絡む現象であり、磁性と伝導物性を結び付けるスピントロニクスの成果の典型例となった。

4. スピン分解光電子分光とスピensem

スピン・角度分解光電子分光法 (Spin and Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy, SARPES) も薄膜・表面物理研究者に馴染みのある実験手法だろう。放出される光電子のエネルギーと角度を測定してバンド分散を描き出すARPESにおいて、光電子のスピンの向きも決定することによって、スピン分裂したバンド分散を測定できるのがSARPESである。

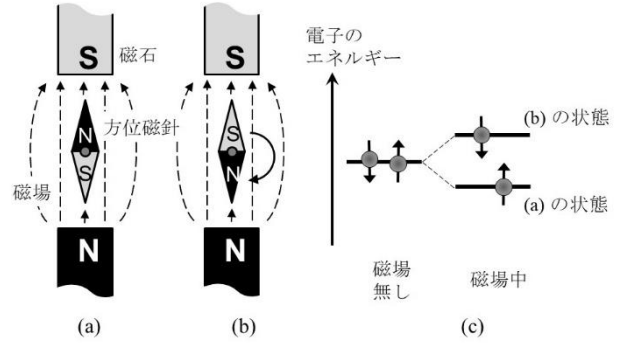


図5 磁場によるエネルギー分裂

そのスピン検出器 (モット検出器) では、図 4(a)に示すように³⁾、光電子を金箔などの重原子標的にあてて散乱させる。そのとき、光電子のスピンの向きによって、右側と左側に散乱される強度の非対称性が逆転することを利用して (モット散乱)。これは、金の原子核の周りをまわって光電子が散乱される際、次のセクションで述べるスピン軌道相互作用がはたらくために非対称が生じることを利用している。図 4(b)は、Au(111)表面での放物線的な表面状態バンドのSARPES測定結果であり⁴⁾、スピンの向きによってバンドが分裂するラシュバ効果 (後述) を示している。

同じ原理を利用して、走査電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscopy, SEM) で検出される2次電子のスピンの向きを決定することによって磁区構造を観察できる。図 4(c)は、スピensemによって観察した垂直磁気記録媒体に書き込まれたビット分布である³⁾。黒と白の領域が反対向きに磁化したビットを示し、デジタル情報単位の”0”と”1”に対応する。

5. スピン軌道相互作用

スピンに外部から磁場を印加すると、磁場の方向が量子化軸となって、スピンは磁場に平行か反平行かの2種類の配置をとる (図 5(a)(b))。その結果、スピンの磁気モーメントと磁場との相互作用によって、それらのスピンでは異なるエネルギーをとる (ゼーマン分裂) (図 5(c))。つまり、エネルギーのスピン縮退が解ける。Na原子のD1線の発光スペクトルが、磁場を印加するといくつかの線に分裂することが観測され、Stern-Gerlachの実験とともにスピンを実証した実験として有名である。強磁性体の内部では、一つのスピンは、その周りのスピンの作る磁場 (内部磁場) に平行になるためにスピンの向きがそろって強磁性体 (図 1(a)) となる (分子場近似の考え方)。

一方、電子が電場中を運動していると、実はその電

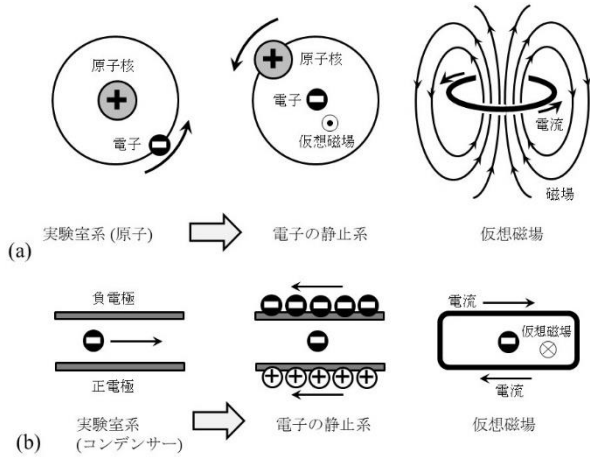


図6 スピン軌道相互作用のもとになる仮想磁場
(a) 原子軌道の場合、(b) 表面電子の場合。

子だけが感じる「仮想磁場」が生じ、その仮想磁場は、図5のリアルな外部磁場と同様に、電子のスピンの方きによってエネルギー準位を分裂させる（ラシュバ分裂）。この「スピン軌道相互作用」は、空間反転対称性が破れている状況ではたらくので、電場の中を電子が運動するときには、大小の違いはあるが、常にはたらく。

たとえば、原子内では原子核の周りのクローンポテンシャルの電場中で電子が周回運動しているとみなせる（図6(a)）。この状況を電子の静止系から見ると、電子の周りを原子核が回っているように見える。原子核は正電荷をもつので、この状況は、電子の周りを円環電流が流れているとみなせる。その円環電流によって磁場が発生しているはずで、それが中心にいる電子に印加されていることになる。その結果、図5に示したリアルな磁場の場合と同様に、スピンの向きによってエネルギーに差ができる。この磁場は、実験室系では存在しない磁場なので仮想磁場といえるが、実際に電子エネルギーのスピンスplitが観察される。このよう

に電子の軌道運動の結果、その電子自身のスピンと相互作用してエネルギー分裂が起こることをスピン・軌道相互作用と呼ぶ。

この現象は、原子内に束縛されて運動する電子だけに起こるわけではなく、伝導電子に対しても起こる。例えば結晶表面では、物質内部のフェルミ準位と物質外部の真空準位とを滑らかにつなぐとポテンシャル勾配ができており、それはすなわち電場が表面垂直方向にはたらくていることになる。それによって物質表面では常に空間反転対称性が破れていることになる。

その状態は、表面に平行に置いた平行平板コンデンサーで模倣することができる。その負電極は物質の外側の表面直上に位置し、正電極は物質内側の表面直下にあるとみなせる。そうすると、結晶表面近傍で表面に平行方向に運動している伝導電子は、このコンデンサー内の電場の中を動いているのと同じとみなせる（図6(b)）。この状況を、電子の静止系から見ると、コンデンサーの電極の電荷が逆向きに動いているように見え、それはとりもなおさず電子の上下を流れる周回電流とみなせる（無限遠で上下の電極がつながっていると考えていい）。その電流による仮想磁場がこの紙面垂直方向、つまり、結晶表面に平行方向にかかっていることになり、それによって電子のスピンは面内方向に向いてラシュバ分裂することになる。これが、図4(b)で示したスピンスplitしたバンドの起源となる。そのときのスピンは面内方向で反対向きとなる。

図6からわかるように、電子の運動方向と直角方向に仮想磁場できるので、スピンは必ず運動方向に直角となる。これがスピン・運動量ロッキングと言われる現象である。これを表すラシュバ・ハミルトニアンは

$$H_R = \frac{1}{4mc^2} \vec{\sigma} \cdot (\text{grad } V \times \vec{p}).$$

ここで $\vec{\sigma}$ は電子のスピン（ $\pm 1/2$ ）、 \vec{p} は電子の運動量、

V は静電ポテンシャルであり、 $-\text{grad } V$ は表面垂直方向の電場を表す。 $\text{grad } V \times \vec{p}$ が仮想磁場を表し、それは \vec{p} と直角となり、表面の面内方向であることがわかる。仮想磁場の方向が量子化軸となるので、電子スピン $\vec{\sigma}$ は仮想磁場に平行か反平行にな

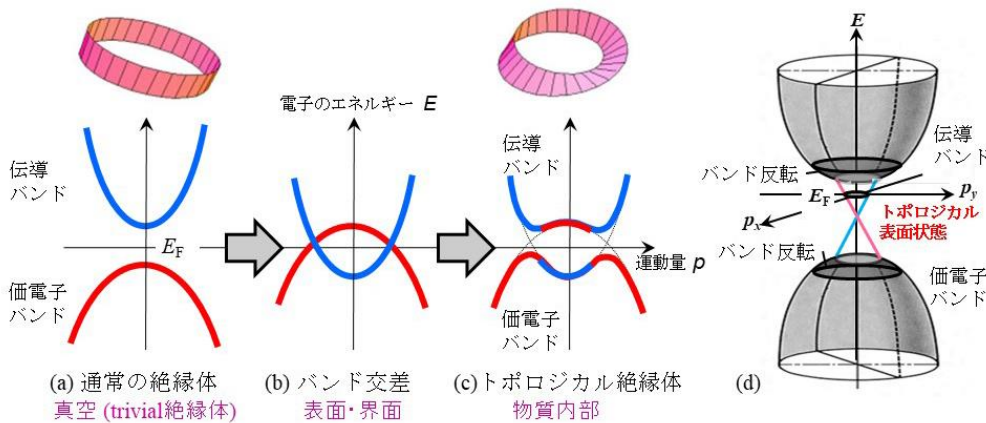


図7 バンド反転とトポジカル絶縁体

る、つまり表面の面内方向となる。

6. トポロジカル絶縁体

上述のスピンの軌道相互作用がトポロジカル絶縁体の起源となる。図 5 に示したように、(仮想) 磁場によってスピンの向きに依存して電子のエネルギー準位が上がったり下がったりする。そのような状況が、半導体(絶縁体)の伝導電子と価電子に対して起こると、そのスピンの向きに応じてエネルギーが上がったり下がったり大きく変化する物質がある。その結果、図 6(b) に示すように、価電子バンドの上端と伝導バンド下端のエネルギーの上下関係が逆転する場合がある(バンド反転)。そうするとバンド混成が起こってバンドギャップが開くことになるが(図 7(c))、そのとき、伝導バンドの下端に価電子バンドが入り込み、価電子バンドの上端に伝導バンドがはまり込むという状況になる。つまり、一つのバンドの中で、性質の異なる(パリティの異なる)部分が入り込む。これがトポロジカル絶縁体と言われる物質のバンドである。そのため、バンドの形やバンドギャップの大きさだけでは通常の(trivial)絶縁体かトポロジカル絶縁体か判断できず、バンド端などでの波動関数のパリティを調べて初めて判定できるので、少しやっかいである。

真空はトポロジカルに trivial 絶縁体とみなせるので(図 7(a))、バンドが反転したトポロジカル絶縁体(図 7(c))とバンドが反転していない真空との境目、すなわちトポロジカル絶縁体表面では図 7(b)の状態、つまりバンドが交差した状態になっている。これはすなわち金属状態である。つまり、物質内部では、スピン軌道相互作用のために(バンド反転に起因する)バンドギャップの開いている絶縁体(半導体)であるが、その物質表面には、金属的な表面電子状態ができてるのがトポロジカル絶縁体である(図 7(d))。

このトポロジカル表面状態は、表面物理の分野で従来から知られていた表面状態とは成因も性質も全く異なるもので、表面物理の分野でも新しいトピックスとして研究されている。従来の表面電子状態は、結晶表面での周期性の切断やポテンシャルの変化などに起因する電子状態であり、表面酸化や汚染で容易に変化・消失する。一方、トポロジカル表面状態は上述のように結晶内部のバンド反転に伴って不可避免的に生じる電子状態であるので、内部でのバンド反転が解消されない限り消失しない頑強な表面電子状態である。

トポロジカル表面状態では、前述のスピン・運動量ロッキング効果が効いていて、様々な興味深い伝導現象

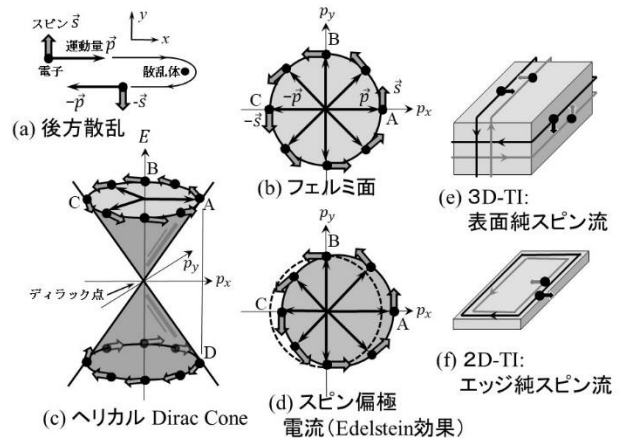


図 8 (a) スピン運動量ロッキング, (b) 表面状態のフェルミ面, (c) スピンヘリカルディラックコーン, (d) スピン偏極電流, (e) 純スピン流

象が起こる。例えば、図 8(a) に示すように、伝導電子が不純物や欠陥によって 180° 後方散乱される場合を考える。このとき運動量ベクトルが反転するのでスピンの向きも反転しなければならない。しかし、不純物・欠陥が磁性を持たない場合には、スピンを反転させる角運動量の供給がないので、スピン反転はおきない。そうすると、運動量反転も起こらなくなる。つまり、 180° 後方散乱が禁止されることになる。スピン・運動量ロッキングはこれほど「強い」。物質表面は 2次元なので、 180° 以外の角度の(後方)散乱が(多少抑制されるが)起きるので、この 180° だけの後方散乱禁止の効果は表面伝導にはさほど影響を与えない。しかし、後で述べるエッジ(端)状態では、1次元チャンネルでの伝導なので、 180° 後方散乱禁止のために無散逸伝導となるので、大変重要な現象である。

表面電子状態は 2次元なので、波数(運動量)空間では図 8(b)のようにフェルミ面は円で表現できる(等方的な場合)。原点からの矢印が運動量ベクトルを表し、それに直角な短いベクトルがスピンを表す。あらゆる方向に動く電子があるので、電子スピンもあらゆる方向を向き、トータルとしてゼロとなる。そのため、トポロジカル絶縁体では磁化がなく、時間反転対称性が保たれている。

Bi_2Se_3 のような代表的なトポロジカル絶縁体の場合、表面状態のエネルギー E と波数(運動量 p) の分散関係が、図 8(c) のような線形分散となる。これを「ディラック錘」と呼ぶ。ディラック錘の上下では、電子の持つスピンの向きと運動量の向きの関係が逆になる。たとえば、図 8(c) の電子 A と電子 D を比べてみると、運動量(波数)は同じだが、スピンの向きが反対向きになっ

ているために、エネルギーが違っている。これはまさに前節で述べたスピン・軌道相互作用のためにスピンの向きに依存してエネルギーが異なるラシュバ分裂である。

図 8(b)の状態に電場を表面平行方向に印加して $-x$ 方向に電流を流すとフェルミ円は図 8(d)のようにずれ、 $+x$ 方向に動く電子、つまり $+p_x$ の運動量の電子が $-p_x$ の電子より速く動く。そうすると、電子流は $+p_x$ の電子のスピン（この図では $+y$ 方向のスピン）を主にもつことになり、自動的にスピン偏極した電子流（電流）となる。つまり、電流を流すことでスピン偏極を生み出せるわけで、これを「エーデルシュタイン効果と呼ぶ。

逆に、例えば表面平行方向に電場をかけていない図 8(b)の状態に、 $+y$ 方向のスピンを注入すると、それは電子Aのスピンと同じ向きなので、 $+p_x$ の運動量を持つ電子となり、 $+x$ 方向に電子流が自動的に発生する。これを「逆エーデルシュタイン効果」という。このように、トポロジカル絶縁体表面では、スピン偏極電流を作り出したり、スピンを電流に変換したりできる。

もういちどスピン・運動量ロックを真面目に考えてみると面白いことに気づく。図 8(b)の電子Aと電子Cを見比べると、お互い運動量ベクトルが反対向きなので、スピンも反対向きとなる。それを実空間で考えると、図 8(e)のように、反対向きのスピンをもつ電子が反対向きに流れていることを意味している。つまり、電子が反対向きに動いているのでトータルとして電流はゼロである。しかし、スピンの流れはトータルとしてゼロではない。なぜなら反対向きのスピンの電子が反対向きに動くことと同じなので、スピン流としては2倍になるからである。つまり、トポロジカル絶縁体の表面では、純スピン流があらゆる方向に自然と流れていることになる。2次元トポロジカル絶縁体の場合には、図 8(f)のようにエッジ（端）に1次元の純スピン流が流れている。

このような純スピン流は、フェルミ速度で電子が動き回っていることに起因するので、エネルギー散逸はない。純スピン流は、電流がゼロなのでジュール熱を発生しない、そのためにエネルギー無散逸な流れだと言われることがあるが、上述のようにフェルミ速度での電子の運動に起因するので、ドリフト流ではなく拡散流であり、そのためにエネルギー散逸が無いと言うべきであろう。後述のように、このような純スピン流

に信号を載せて伝搬させることができるので、超省エネデバイスの可能性が開けてくる。

7. 磁性トポロジカル絶縁体

図 8 に示したように、トポロジカル絶縁体では独特なスピン構造（ヘリカルスピン構造）をもっているが、物質全体として磁化をもっていないので、時間反転対称性が保たれている。そこで、トポロジカル絶縁体に意図的に磁気秩序を導入して時間反転対称性を破ると、どうなるだろうか。

強磁性の磁気秩序を投入すると、その内部磁場によるゼーマン効果によって、ディラック錘型の表面電子状態のディラック点での縮退がとけ、図 9(b)のようにバンド反転のような状態になる。そうすると、図 7 と同様に、エネルギーギャップが開き、金属だったトポロジカル表面状態が絶縁体（半導体）的になる。そうすると、3次元結晶がトポロジカル絶縁体になって金属的なトポロジカル表面状態ができたように（図 9(d)）、2次元の表面電子状態が絶縁体化すると同時に、そのエッジ（端）に金属的な電子状態が形成される（図 9(e)）。

このエッジ状態は1次元伝導チャンネルとなる。磁性トポロジカル絶縁体では時間反転対称性が破れているので、図 8(f)のような純スピン流（反対向きのスピンをもつ電子が反対向きに流れている）が流れているわけではなく、電流が一方方向に流れている。そうすると図 8(a)で述べた 180° 後方散乱禁止則が重要になってくる。つまり、その禁止則のためにエッジ状態での電流がエネルギー無散逸に一方方向に流れる。この状態は、2次元電子系に対して、それに垂直な強磁場を印加したときに出現する量子ホール効果状態に似た状態となっている。実際、図 9(e)で、フェルミ準位が半

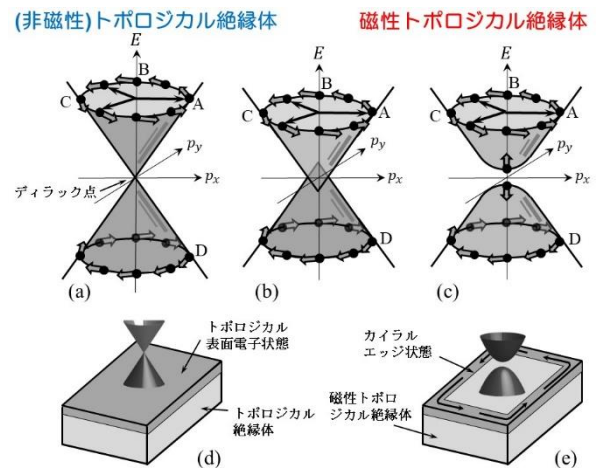


図9 磁性トポロジカル絶縁体

導体化したトポロジカル表面状態のエネルギーギャップ中に位置するときにはホール係数が量子化され、「量子異常ホール効果」と呼ばれている状態になる。つまり、磁性トポロジカル絶縁体では、外部磁場を印加する必要がない状態で無散逸のエッジ伝導を実現できるので、これまた超省エネデバイスへの応用が期待されている。

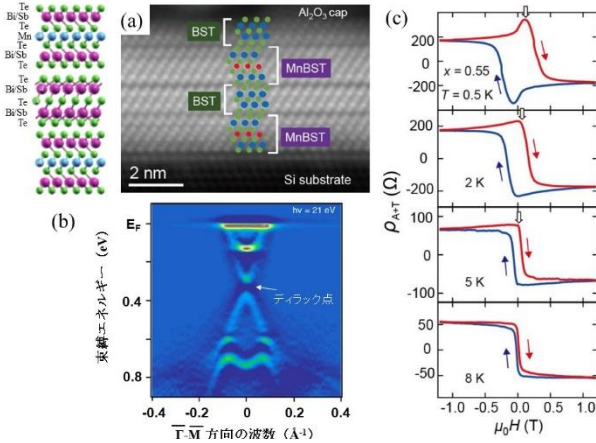


図 10 (a) MnBST/BST/MnBST サンドイッチ構造⁵⁾, (b) ARPES による表面状態の分散⁶⁾, (c) ホール効果 (異常ホール効果とトポロジカルホール効果成分)⁵⁾.

図 10(a)に、我々のグループで実現した磁性トポロジカル絶縁体の例を示す⁵⁾。トポロジカル絶縁体の代表例として知られている Bi_2Te_3 結晶中において、フェルミ準位のチューニングのために Bi 原子を Sb 原子で一部置換した $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_3$ 結晶薄膜 (BST と略記) を分子エピタキシー法で作成した。さらに、そこに MnTe 原子層を蒸着・アニールすると、BST の単位胞の 5 原子層 (quintuple layer) が自己組織的に変化して $\text{Mn}(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_4$ という 7 原子層 (septuple layer) に変化し (MnBST と略記)、その中の Mn 原子のスピンの向きが面直向きで強磁性的に配列する。その結果、図 10(b)に示すように、ARPES によって測定したバンド分散図では、ディラック錘のディラック点にエネルギーギャップが開いて図 9(c)の状態になっていることが実証された⁶⁾。またホール効果を測定すると図 9(d)のように ($x=0.55$ の組成)、外部磁場の掃引に対してホール抵抗値の変化にヒステリシスが現われ、そのヒステリシス幅が低温になるほど大きくなる⁵⁾。これが強磁性の証拠である。また、0.5 K の極低温では、磁化反転のときにヒステリシス曲線に「こぶ」ができる。これは、磁化反転の途中で、図 1(e)に示したようなスキルミオンが形成され、それが作る過剰な磁場 (創発磁場) によってホール抵抗が一時的に増大すると解釈

されており、「トポロジカルホール効果」と呼ばれている。図 9(a)に示したようなヘテロ接合構造では空間反転対称性が破れているため、ジャロシンスキー・守谷相互作用と呼ばれるスピン間相互作用がはたらい非共線的なスピン配列が実現することに起因する。

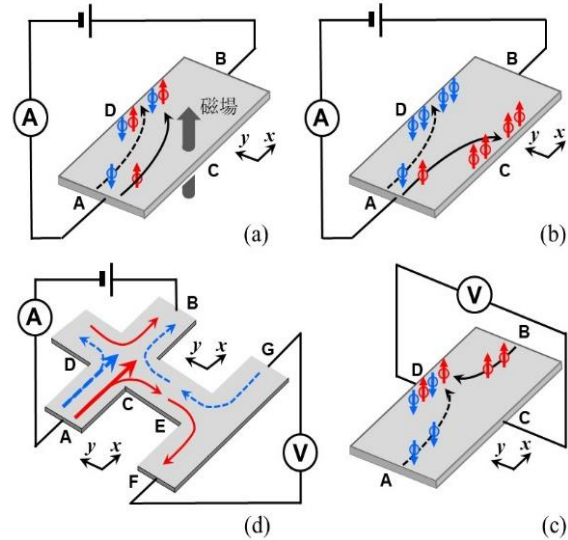


図 11 (a) ホール効果, (b) スピンホール効果, (c) 逆スピンホール効果, (d) 純スピン流による情報伝達

8. スピン流

図 11(a)は、通常のホール効果の現象を示す。薄膜・表面系に電流を x 方向に流している状態で、それに対して垂直方向 (z 方向) に磁場を印加すると、伝導電子のスピンの向きに関わらずローレンツ力によって軌道が曲げられ、試料の一端に電子が蓄積されて y 方向に電圧 (ホール電圧) が生じる。

一方、図 11(b)では、外部磁場を印加しない状態で、スピン・軌道相互作用の強い物質に電流を流すと、スピンの向きによって、逆向きに軌道が曲げられ、その結果、一方のスピンの電子が試料の左端に、他方のスピンをもつ電子が試料の右端に集まる。一方のスピンの電子の数と反対向きのスピンの電子の数は同じなので、両端に集まっている電子の数は同じになる。つまり、 y 方向には電圧が発生しない。しかし、試料の両端で逆向きのスピンの電子が蓄積されている。この現象「スピンホール効果」という。その原因として内因性と外因性の起源が知られている。内因性起源はバンド構造によって生じるベリー位相が関係しており、外因性の起源としては、図 4 で述べたモット散乱などが寄与している。電子が不純物・欠陥で左右に散乱させる確率の非対称性が伝導電子のスピンの向きによって逆転するという効果である。

図 11(b)をよく見ると, y 方向に逆向きスピンの電子が逆向きに動いているといえる. つまり, y 方向に純スピン流が発生していることになる. このように, スピンホール効果は, 電流を流すと, それに直角方向に純スピン流を作り出す現象だといえる.

図 11(b)のスピンホール効果現象を時間反転させると, 純スピン流から電流を作り出すことも可能となる. つまり, 図 11(c)に示すように, x 方向に純スピン流が流れている状況を考える. つまり, A から B に向かって下向き電子が流れており, 逆に B から A に向かって上向きスピンの電子が同じ数だけ流れているとする. そうすると, 両方のスピンの電子は試料の左端に向かって曲げられ, その結果, C-D 間で電圧が生じることになる. C-D 間を閉回路で結べば普通の電流になって C-D 方向に流れる. これは, 図 11(b)で, それぞれのスピンの曲がる方向をよく見ると理解できる. つまり, x 方向に純スピン流を流すと, y 方向に電流が生じる. これを「逆スピンホール効果」という.

そうすると, 面白い現象を作り出すことができる. トポロジカル絶縁体などスピン・軌道相互作用の強い物質で図 11(d)に示すような形の試料を作る. まず, A-B 間で電流を流す. そうすると, スピンホール効果によって C や D から純スピン流が流れ出す. 例えば, ある向きのスピンの電子が C→E の方向に流れると (実線矢印), 逆向きのスピンの電子が逆向きに E→C の方向に流れる (点線矢印). つまり, C-E 間は純スピン流しか流れていない. その純スピン流が F-G 側に到達すると, 図 11(e)で描いた逆スピンホール効果が発生し, F-G 間に電流が流れ, あるいは電圧が発生する. そうすると, A-B 間に流す電流を変調することによって, C-E 間の純スピン流も変調され, その結果, F-G 間の電圧・電流も変調されることになる. つまり, A-B 側の電気信号を F-G 側に伝えることができるが, その間を媒介しているのが C-E 間で流れる純スピン流ということになる. つまり, 何度も強調しているように, エネルギー無散逸の純スピン流を使って信号を右から左に伝えることができることになる. これを拡張して, 純スピン流回路なるものができれば, エネルギー消費ゼロの超省エネデバイスへの夢が広がる. そのためには, いかに効率よく電流から純スピン流を作り出せるか, そして純スピン流から電流・電圧を作り出せるか, その変換効率を上げる工夫の研究が盛んに行われている. トポロジカル絶縁体は, 前述のように, その表面にすでに純スピン流が流れているので, その点でも有望な物質と目されている.

9. おわりに

以上, スピンと伝導が絡み合う現象を中心に概観してきた. とくに, トポロジカル絶縁体に代表されるスピン・軌道相互作用の強い物質が, 多彩な現象を示すことを紹介した. さらにその背景など知りたい方は, 一般向けの書籍だが拙著⁷⁾をご参照ください.

紙幅の制限から述べられなかったが, 光とスピンとの絡み合いも興味深い研究対象となっている, 例えば円偏光は, 右回りと左回り円偏光に応じて ± 1 の角運動量を持つので, 円偏光を物質に照射すると, 例えば $-1/2$ のスピンをもつ電子を $+1/2$ のスピン状態に励起することができる. そのようなスピン選択光励起によってスピン偏極電流や純スピン流を作り出せる. そのような光によるスピン注入も魅力的なスピントロニクス研究のテーマとなっている. 薄膜・表面物理の基礎物理として興味だけでなく, デバイス・センサー応用への研究もさらに進められるだろう.

文献

- 1) 日本表面真空学会の Web ページ
<https://jvss.jp/RohrerMedal/Achievement-Wiesendanger201406.pdf>
- 2) 小菅裕太郎, 山田豊和, 表面と真空 **63** (2020) 459.
- 3) 孝橋照生, 顕微鏡 **48** (1) (2013) 15.
- 4) Scienta Omicron Web page:
<https://scientaomicron.com/en/Components/Electron-Analysers/DA30-L/technology/Spin-ARPES/37>
- 5) T. Takashiro, et al., Nano Lett. **22** (2022) 881.
- 6) T. Hirahara, et al., Nano Letters **17** (2017) 3493.
- 7) 長谷川修司, 『トポロジカル物質とはなにか』 (講談社ブルーバックス, 2021)



長谷川 修司 (Shuji Hasegawa)

1985 年 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻修士課程修了. 同年 (株)日立製作所入社. 1990 年東京大学助教, 1995 年同助 (准) 教授, 2010 年同教授.
物質表面での電荷・スピン・物質輸送に関する研究に従事. 博士(理学).