



スピホール効果の理論的研究

電場によるスピンの制御の理論

村上 修一

東京工業大学大学院 理工学研究科

准教授

科学技術振興機構さきがけ研究員(兼)

研究の背景

エレクトロニクスにおいて、電荷に加えてスピンの自由度を利用して高機能のデバイスを目指すスピントロニクスの研究が盛んになっている。特に半導体スピントロニクス素子はさまざまな応用の可能性を持っているため、スピンの制御方法について、世界中の研究者が実験・理論両面から研究を重ねている。ここで重要な役割を果たすのがスピンの流れであり、上向きスピンと下向きスピンとが互いに逆向きに流れているものである。我々が指摘したように、このスピンの流れは時間反転で不変(図1)であり、そのことは磁場なしにスピンの流れを作ることができることを示唆している。

単純にはスピンの流れは強磁性体金属中に電流を流せば作ることができるが、強磁性体から出ている磁場は周囲にも影響を及ぼし、スピンの流れの測定、制御等に影響する。集積化を視野に入れると、磁場を使わずに電気的手段でスピンの流れを制御することが望ましい。

研究の成果

本研究では、スピンの量子力学的性質に着目して、電場でスピンの流れを誘起する「スピンの流れ効果」を予言し、それに関連して新現象の予言を行ってきた。

1. 内因性スピンの流れ効果

スピンの電気的制御の手段の一つとして我々は、不純物散乱によらず物質のバンド構造に起因してスピンの流れ効果が起こること(内因性スピンの流れ効果)を、世界で初めて理論的に見出した^[1,2,3]。スピンの流れ効果とは、外部電場によりそれに垂直にスピンの流れが生じる効果(図2)であり、私たちはGaAs等のp型半導体においてこの効果が起こることを理論的に導いた。この現象は固体中のスピンの軌道相互作用が、電子に対しては有効磁場として作用することによって起こる。

スピンの流れ効果が固体中の不純物散乱によって現れること(外因性スピンの流れ効果)は1970年代に理論的に予

言されていたが、それに対して我々の予言した内因性スピンの流れ効果は、不純物散乱によらず固体のバンド構造自身に起因して起こる。内因性スピンの流れ効果は、不純物による外因性スピンの流れ効果と違って、①理論的に見積もりが容易、②実験的に観測、制御が可能、③効果自身の大きさが大きく物質によっては室温でも起こる、という理由で、本研究を契機に国内外で盛んに研究されるようになった。特に、スピンの流れ効果の実験的実証が国内外で行われ、n-ZnSeやPtに関しては確かに室温でもスピンの流れ効果が観測された。

内因性スピンの流れ効果は固体のバンド構造からくるベリーの位相に起因するため、バンド構造のバンド交差(バンドのエネルギーが近接した点)の点で増大することを我々は指摘した。これは従来の半導体スピンの輸送には全くなかった考え方である。特に金属Ptではスピンの流れ効果が大きく、室温でも実験で観測されているが、我々はこの巨大スピンの流れ効果が、Ptのバン

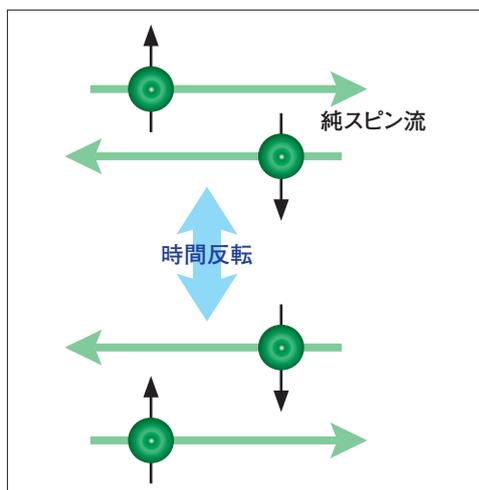


図1 スピンの流れの模式図

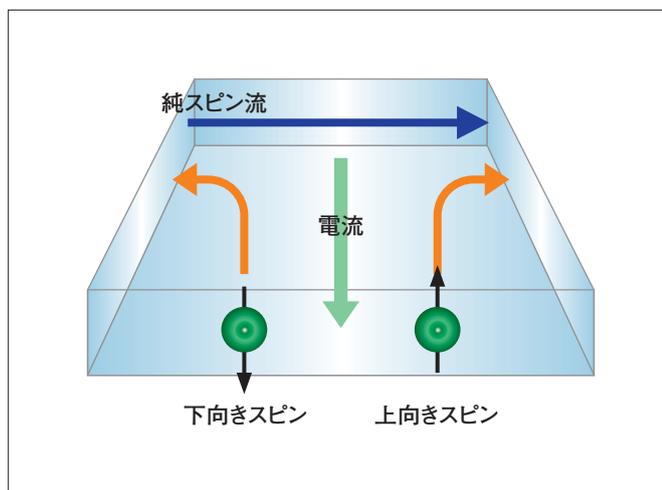


図2 スピンの流れ効果の模式図

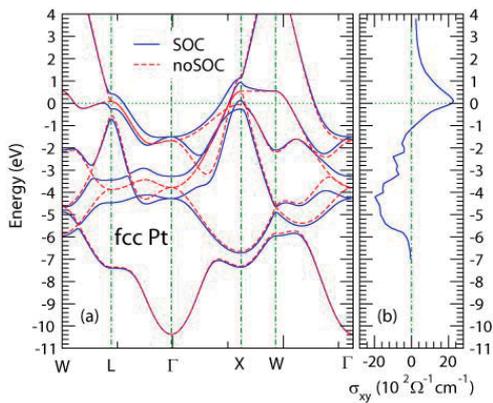


図3 バンド計算による白金でのスピホール伝導率の計算結果

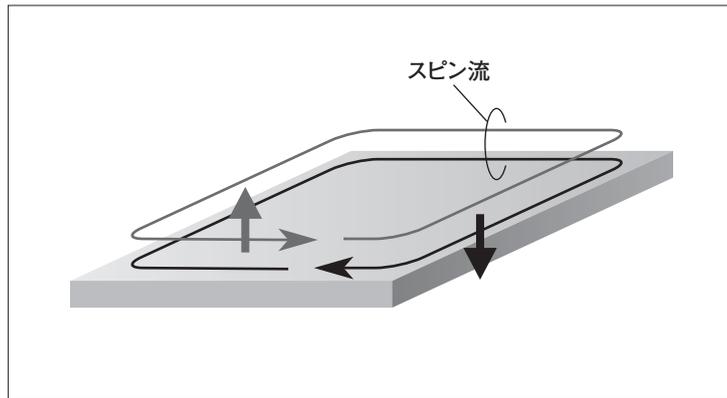


図4 2次元量子スピホール系の模式図

ド構造のバンド交差に起因することを、第一原理計算で見出した[4](図3)。現在Ptでは実験がかなり進んでいる。例えば、Ptのスピホール効果を用いた他の試料へのスピホールの注入、もしくはPtの逆スピホール効果を用いたスピホールの電気的検出などが行われており、スピホール効果を研究対象とするだけでなく、スピ物性測定の手段としてスピホール効果が利用され始めている。

2. 量子スピホール効果

また我々は、絶縁体でのスピホール効果の理論的予言[5]を行い、また、バルクは絶縁体だがエッジ状態がスピホールを運ぶ

「量子スピホール効果」(図4)を示す物質を探索する研究を行った。その結果、ピスマス薄膜が量子スピホール相を示すことを理論的に予言した[6]。これは量子スピホール効果を示す現実の物質を提案した初めての論文であり、最近のBi_{1-x}Sb_x等での3次元量子スピホール効果の実験への契機となり、現在注目を浴びている分野の一つである。

3. 種々の系でのスピホール効果

本研究に関連して、スピホール効果は半導体に限らず、さまざまな系で広く見られることを指摘した。半導体でのスピホール効果は電子の波動性に伴うベリ-

位相に起因した現象であるため、電子や光を含む一般の波動現象に広く現れると期待される。これに着目して新現象を探索し、光のスピホール効果[7](図5)や歪んだ結晶中でのX線波束のシフト、励起子系のスピホール効果などを理論的に予言した。

将来展望

スピントロニクス分野、トポロジカル絶縁体分野とも、理論と実験とがうまく連携して急速に発展してきている。提唱された新理論を実験で検証したり、また実験で観測された新奇現象を理論的に説明したりなど、数年前には想像もしていなかった多くの研究結果が発表され、一大分野となりつつある。鍵となるのはスピ軌道相互作用に基づいたスピンの物性とその制御であり、この分野では今後もこうした実験と理論の連携による発展が続き、現在我々が想像していない新しい世界が広がってくるのが期待される。

本研究の一部は、東京大学の永長直人教授とスタンフォード大学のShoucheng Zhang教授、及び多くの共同研究者との共同研究に基づいており、ここに深く感謝いたします。

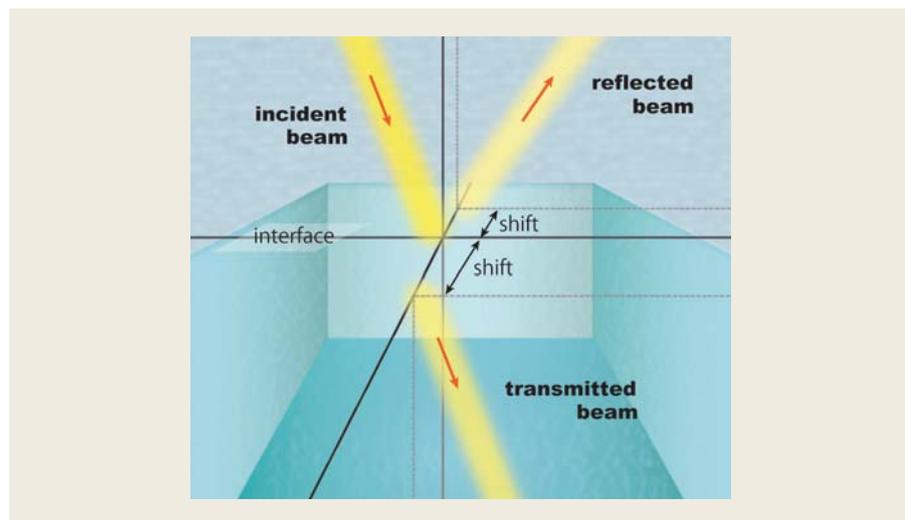


図5 界面での光のスピホール効果(Imbertシフト)

References(参考文献)

- [1] S. Murakami, N. Nagaosa and S.-C. Zhang, Science 301, 1348 (2003).
- [2] S. Murakami, N. Nagaosa and S.-C. Zhang, Phys. Rev. B 69, 235206 (2004).
- [3] S. Murakami, Phys. Rev. B 69, 241202(R) (2004).
- [4] G. Y. Guo, S. Murakami, T.-W. Chen, N. Nagaosa, Phys. Rev. Lett. 100, 096401 (2008).
- [5] S. Murakami, N. Nagaosa, S.-C. Zhang, Phys. Rev. Lett. 93, 156804(2004).
- [6] S. Murakami, Phys. Rev. Lett. 97, 236805 (2006).
- [7] M. Onoda, S. Murakami, N. Nagaosa, Phys. Rev. Lett. 93, 083901 (2004).