

論文の内容の要旨

論文題目 遷移金属及びその合金におけるスピントロニクス効果の実験的機構解明
(Experimental elucidation of the mechanism of spin Hall effect in transition metals and their alloys)

氏名 大森 康智

本研究は、遷移金属系におけるスピントロニクス効果の体系的な理解を目的として行った。スピントロニクスは角運動量の流れであるスピントロニクス流の概念が根幹になっており、スピントロニクス輸送現象の理解を目指す基礎学術的研究やスピントロニクス流を用いたデバイス応用など研究が進んでいる。ゆえにスピントロニクス分野では、スピントロニクス流を創出・制御・検出することが基本的かつ重要な課題である。スピントロニクス効果は、スピントロニクス軌道相互作用を通じて、物質中でスピントロニクス流と電流がそれぞれスピントロニクス量子化軸と直交方向に変換される現象であり、スピントロニクス効果の創出・検出を可能にする点で重要視される。スピントロニクス効果は実験的には半導体 GaAs 系でカー効果を用いて最初に検出され、その後、スピントロニクスポンピングや非局所スピントロニクス注入による検出が相次いだ。近年ではスピントロニクス流電流変換効率であるスピントロニクスホール角 θ_{SH} が性能指標として重視され、スピントロニクス効果の研究は精力的に行われた。スピントロニクス効果は、理論的には異常ホール効果と同一の機構によって生じるとされている。機構としては、物質のバンド構造に由来して生じる内因性機構や、散乱過程を通じて生じる外因性機構など複数存在する。スピントロニクス効果においては、異常ホール効果における場合と比べて、実験的な各種機構の定量的評価はあまり進んでいない。その一因としては、スピントロニクス効果の測定素子構造及び解析手法は、異常ホール効果と比べて複雑性が増しており、定量的な評価が難しくなったことが挙げられる。スピントロニクス効果の逆過程である逆スピントロニクス効果を用いると、スピントロニクス流を電流に変換することでスピントロニクス流の電氣的な検出が可能になる。この現象は多くのスピントロニクス研究で用いられており、その機構などの物性を評価することは極めて重要である。特に、スピントロニクス効果と同一の機構によって生じるとされる異常ホール効果との比較の上で、その機構を含め評価し理解することで、統一的な学理の構築につながる。

本研究ではスピントロニクス吸収法と呼ばれる、非局所スピントロニクス注入による実験手法を用いた。金属系においてスピントロニクス効果を定量的に評価しながら、その機構や異常ホール効果との関連性を研究した。具体的には、まず、スピントロニクス流-電流変換現象である逆スピントロニクス効果に関

して、閉回路構造に逆スピホール効果によって電流が生じることを実証し、得られる電流を解析的に表現した。その後、素子中での逆スピホール効果の振る舞いを理解した上で、各物質における機構解明に取り組んだ。スピホール物質として最も研究例が多いにもかかわらずスピホール角について統一的理解が得られていない白金について、スピホール効果の機構を同定し、その寄与の大きさを示した。同時に、異常ホール効果においては知られていた、電気伝導度依存性に伴う内因性効果と外因性効果のクロスオーバーを初めて観測した。最後に強磁性体において、異常ホール効果とスピホール効果の直接的比較を試みた。強磁性体におけるスピホール効果は、特に研究が始まったばかりの領域であり、異常ホール効果とは関連付けられない温度依存性など、興味深いものが観測された。以下に実際の実験と得られた成果を示す。実験は面内スピバルブ構造を用い、非局所スピ注入によってスピ流を注入するスピ吸収法によって行った。以下で各実験について述べる。

まず、閉回路構造における逆スピホール効果の実験について述べる。正スピホール効果は電流からスピ流へと変換する効果であるが、その逆過程の逆スピホール効果は、スピ流から電流へと変換される効果である。通常の逆スピホール効果の測定系は開口端構造を取っているため、境界条件のために電流が生じることはできない。よって従来の測定系では電流は生じず、定常状態における電荷蓄積を測定している。我々はスピホール効果を有する物質としてビスマス添加銅及び白金を用いたリング状の閉回路を作製し、非局所スピ注入により、スピ流を注入した。逆スピホール効果を介してリング内には電流が誘起され、電流に伴う電圧降下を明瞭に観測した。これは、逆スピホール効果により生じる電流を観測した最初の例である。生じる電流を1次元スピ拡散モデルにより解析的に表すと得られた電流が良く説明され、電流の大きさはリングの持つ電気抵抗や、shunting効果によって強く制限され、単純に変換された電流がすべて流れるわけではないことを明らかにした。本研究で得た知見は、逆スピホール効果を利用したデバイス設計において有用である。

逆スピホール効果によって生じる電流の素子中での振る舞いを理解した上で、次に我々は、機構の理解に迫るため、白金のスピホール効果の電気伝導度依存性を調べた。異常ホール効果においては、電気伝導度依存性からそれぞれの機構の寄与を分離する取り組みがすでに行われている。また、大域的な振る舞いとして、moderately dirty と呼ばれる低電気伝導度の領域では内因性が支配的となり σ_{xy}^{AHE} が一定になり、super clean と呼ばれる高電気伝導度の領域ではスキュー散乱が支配的となり $\sigma_{xy}^{AHE} \propto \sigma_{xx}$ のような振る舞いを見せることが知られている。起源を同じくすると考えられているスピホール効果においても同様の振る舞いが期待されるが、そのような系統的な取り組みはほとんど行われていなかった。また、白金はスピホール効果の研究の初期から様々な研究で用いられているため、スピ拡散長 λ_{sf} 及びスピホール角 θ_{SH} は多くの報告があるが、その値は $\lambda_{sf} = 1 - 10 \text{ nm}$ 、 $\theta_{SH} = 1 - 10 \%$ 程度と手法やグループによってばらつきがあり議論となっていた。我々はスピ吸収法によりスピ拡散長及びスピホール角の電気伝導度依存性を調べ、このようなばらつ

きが電気伝導度依存性から説明可能であることを明らかにした。さらにスピン緩和が Elliott-Yafet 機構が支配的であることを示し、スピンホール効果は、低伝導度領域では内因性が支配的であり、高伝導度領域になるとスキュー散乱が支配的となるクロスオーバーを示した。また、白金の内因性スピンホール伝導度 $\sigma_{xy}^{int} = 1600 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ を実験的に分離することに成功した。

このように、スピンホール効果においても、異常ホール効果と同様のスケーリングが適用できることを受けて、最後に、 $3d$ 遷移金属強磁性体のスピンホール効果と異常ホール効果について直接的な比較を試みた。強磁性体におけるスピンホール効果は近年存在が認識されるようになったばかりで、その機構は自明ではない。各種機構においてスピンホール効果と異常ホール効果になんらかの関係性は存在するのか、またはどのような関係性があるのか調べることは、両現象を統一的に理解するために重要である。直感的にはスピン偏極率 p によってスピンホール効果と異常ホール効果を結びつけられるように考えられるが、それは自明ではない。本研究では $3d$ 遷移金属強磁性体である鉄 (Fe)、コバルト (Co)、ニッケル (Ni)、及びパーマロイ (Py) において、スピンホール効果及び異常ホール効果を測定した。低温における振る舞いから、パーマロイのスキュー散乱機構においてはスピンホール効果と異常ホール効果の間にスピン偏極率 p によって結び付けられるような関係があることが示唆され、かつこれは単純なモデルを通じて理解可能であることを示した。ただし、これは一般的に成立する関係ではなく、内因性機構などでは成り立たないことが分かった。高温においては、本研究の全ての強磁性体でスピンホール効果では異常ホール効果と比較して非常に強い温度依存性が観測された。同一の起源とされていたにもかかわらず、このような違いが得られたことは、異常ホール効果には現れない、強磁性体のスピンホール効果に特有の機構が存在している可能性を示唆している。

以上のように本研究ではスピンホール効果の振る舞いに関してその機構に踏み込み、異常ホール効果と関連しながら系統的に実験を行った。非磁性体におけるスピンホール効果の振る舞いが異常ホール効果の先行研究と一致したことは、今後のスピンホール効果の研究および素子開発において、その性能予測を可能にする有用なものであった。一方で強磁性体においては異常ホール効果とスピンホール効果は異なる振る舞いを示すことが明らかになった。このことはスピンホール効果の従来理解では説明できない機構が存在することが示唆しており、更なる研究が期待される。