

## スピントロニクスを用いた強磁性体の正逆スピントロニクス効果の測定

物質系専攻 47-136007 大森 康智

指導教員：大谷 義近（教授）

キーワード：スピントロニクス、スピントロニクス効果、非局所スピントロニクス注入、強磁性体

### 1. 本研究の背景と目的

近年加速度的に研究が進んでいるスピントロニクス分野は、従来無視されてきた、角運動量の流れであるスピントロニクスを積極的に利用することで高性能デバイスの実現を目標としている。特に、スピントロニクスの生成及び検出が行えることから、スピントロニクス効果は最も重要な物理現象である。スピントロニクス効果とは、物質中に電流を流した時、スピントロニクス軌道相互作用を介して電流と直交方向にスピントロニクス流が生じる現象である。一方その逆過程を考えると、物質中に誘起されたスピントロニクス流は同様の機構を介して電流に変換される。これは逆スピントロニクス効果 (ISHE) と呼ばれ、スピントロニクス流を電氣的に検出する手法に広く用いられている。スピントロニクス効果は主に非磁性体を中心に研究されており、これまで、金属中のスピントロニクス効果の発現機構として、不純物散乱による skew 散乱及び side jump などの外因性機構[1]、または、Karplus & Luttinger によって提起された内因性機構[2]などが考えられてきた。歴史的にこれらは強磁性体で異常ホール効果が起こる機構として提案されてきたものであった。最近になって、磁性体中でもスピントロニクス効果が発現することが明らかになってきている[3,4]。しかしその詳細についてはまだ研究が始まったばかりで明らかになっていない。本研究では、鉄ニッケル合金であるパーマロイ(Py:  $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ ) のスピントロニクス効果を定量的に測定し、異常ホール効果と比較することにより、その発現機構や温度依存性などの詳細を明らかにすることを目的とした。なお本修士論文中では、リング状の素子にスピントロニクス流を注入することで、逆スピントロニクス効果による電流を生成した結果を Appl. Phys. Lett. 誌に報告しているが[p1]、ここでは割愛する。

### 2. 実験方法

電子線リソグラフィとリフトオフ法により図1のような面内スピントロニクスバルブ素子を作製した。まずスピントロニクス流注入用の Py 細線(Py1, Py3) 及び、逆スピントロニクス効果検出用の Py2 細線を作製した。続いて Py を Cu によって架橋し、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  によってキャッピングした。図1の端子配置で測定を行うと、電流  $I$  と逆方向に純スピントロニクス流が拡散的に流れる。拡散スピントロニクス流はスピントロニクス拡散長の短い物質に選択的に拡散する傾向にあるため、Py2 まで到達したスピントロニクス流のほとんどが Py2 によって吸収される。これをスピントロニクス吸収法と呼ぶ。Py2 によって吸収されたスピントロニクス流によって逆スピントロニクス効果が生じ、電圧信号として検出される。また、端子を  $V_+ \leftrightarrow I_+$ 、 $V_- \leftrightarrow I_-$  と入れ替え Py2 に電流を流すと、Py2 での正スピントロニクス効果 (DSHE) によってスピントロニクス蓄積が Cu 細線との接合に誘起され、拡

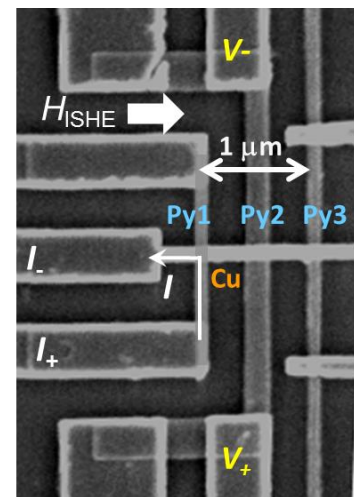


図1 パーマロイの逆スピントロニクス効果測定素子の電子線顕微鏡像。 $H_{\text{ISHE}}$  は逆スピントロニクス効果における正の磁場の向きを示す。

散スピン流が流れる。そのスピン流が Py1 において電気信号として検出される。この場合、図 1 と逆向きに磁場の正の向きを取る。

### 3. 実験結果と考察

図 2 に本研究で得られた 10 K におけるスピホール抵抗  $R_{\text{SHE}} (\equiv V/I)$  の測定結果を示す。スピホール抵抗は、磁化の向きと面直に流れるスピン流の向きが直交したときに最も大きくなる。従って、Py 細線の磁化が飽和する 2000 Oe 程度でスピホール抵抗も飽和する。そのスピホール抵抗の変化分  $\Delta R_{\text{SHE}}$  は正逆両方のスピホール効果において同程度の値となった。このことはパーマロイ中においてスピホール効果がオンサガーの相反性を満たしていることを示唆する。磁場の大きさが 2000 Oe 以下の領域ではパーマロイの磁化過程に由来すると考えられる特異な振る舞いがみられ興味深いが、ここでは取り扱わず、本研究では主に  $\Delta R_{\text{SHE}}$  の大きさのみ議論する。得られた  $\Delta R_{\text{SHE}}$  からスピホール抵抗率  $\rho_{\text{SHE}}$  を見積ると  $\rho_{\text{SHE}} = 0.23 (\pm 0.04) \mu\Omega \cdot \text{cm}$  であった。電流とスピン流の変換効率であるスピホール角に直すと  $\alpha_{\text{H}} =$

$0.01 (\pm 0.002)$  程度であり、これはスピホール効果を示す物質としてよく知られる Pt の半分程度の大きさである。更に本研究では別途、図 3 のようにパーマロイのホールバーを作製し、異常ホール効果の測定も行った。低磁場領域での信号の大きな変化は、磁化過程に伴うプラナーホール効果によるものと考えられる。高磁場における磁場に比例した振る舞いは通常のホール効果によるものであり、それらをゼロ磁場まで外挿した点の差分が異常ホール効果による信号であるとして扱う。パーマロイの異常ホール抵抗率は 10 K において  $\rho_{\text{AHE}} = 0.052 (\pm 0.004) \mu\Omega \cdot \text{cm}$  であった。ここでは詳細は省略するが、Mott の 2 流体モデルに基づいた理論的考察によると、アッ

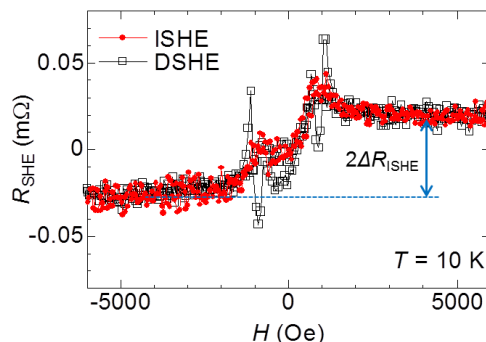


図 2 10 K におけるパーマロイの正・逆スピホール効果。

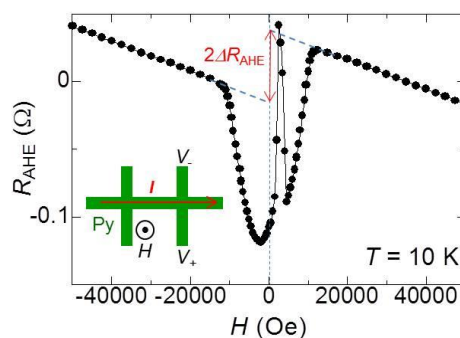


図 3 10 K におけるパーマロイの異常ホール効果。挿入図はホールバーの模式図。

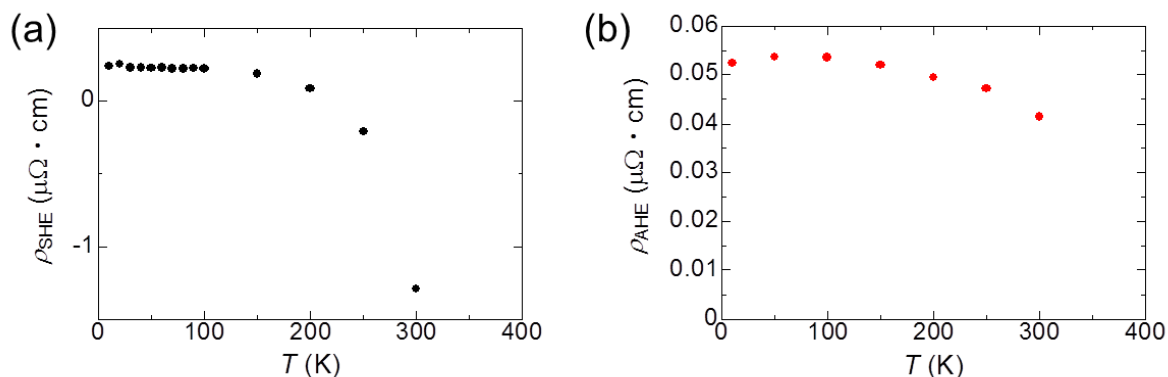


図 4 (a)スピホール抵抗率  $\rho_{\text{SHE}}$  と (b)異常ホール抵抗率  $\rho_{\text{AHE}}$  の温度依存性。

↑スピンと↓スピンの電子がそれぞれ独立にスピン軌道相互作用によって散乱される場合には、 $\rho_{\text{AHE}} = p \cdot \rho_{\text{SHE}}$  という関係が成り立つことが示唆されている。非局所スピバルブ測定によって得られたパーマロイの伝導電子のスピン偏極率  $p$  は 0.23 程度であり、上述の関係が成立することがわかった。次にスピンホール効果、異常ホール効果の温度依存性を測定した結果を図 4 に示す。スピンホール効果及び異常ホール効果は 100 K 以下の低温領域では

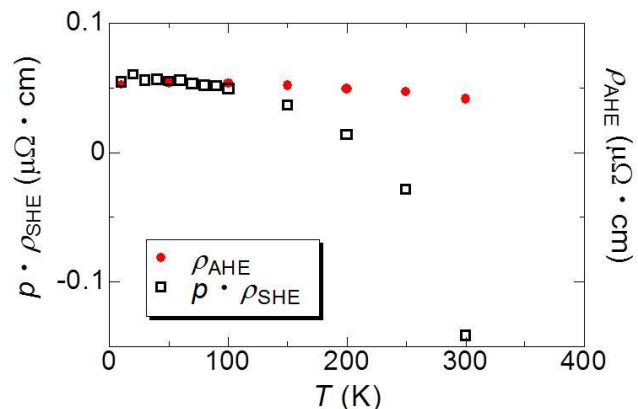


図 5 スピンホール抵抗率 $\rho_{\text{SHE}}$ と異常ホール抵抗率 $\rho_{\text{AHE}}$ のスピン偏極率 $p$ を介した関係性。

温度に対して一定である。一方で、100 K 程度から室温にかけては大きな変化がみられ、スピンホール効果では、220 K 程度において符号の反転が観測された。このことは上述の関係式が、明らかに高温側では成り立っていないことを意味している。伝導電子のスピン偏極率  $p$  を用いて、 $p \cdot \rho_{\text{SHE}}$  と  $\rho_{\text{AHE}}$  を比較すると、100 K 程度までの低温領域では  $\rho_{\text{AHE}} = p \cdot \rho_{\text{SHE}}$  の関係式は成立しているが、高温側におけるスピンホール効果だけにみられる強い温度依存性は  $p$  の温度依存性を考慮しても説明されないことが分かる(図 5)。

#### 4. まとめ

本研究では、スピン吸収法を用いて、強磁性体パーマロイの正逆両方のスピンホール効果の定量的な測定を行った。得られたスピンホール効果の信号の大きさはプラチナなどのスピン軌道相互作用の強い非磁性金属とほぼ同等の値となった。本研究では更にスピンホール効果の発現機構に踏み込み、異常ホール効果との比較や温度依存性を議論した。低温域では異常ホール効果と同一の機構によってスピンホール効果が生じることが分かった。一方で、室温付近の高温側ではスピンホール効果にのみ強い温度依存性がみられ、異常ホール効果には現れない別の機構が存在することが示唆された。

#### [参考文献]

- [1] J. Smit, Physica. **24**, 1-5, 39 (1958).; L. Berger, Phys. Rev. B **2**, 11, 4559 (1970).
- [2] R. Karplus and J. M. Luttinger, Phys. Rev. **95**, 5, 1154 (1954).
- [3] B. F. Miao, S. Y. Huang, D. Qu, and C. L. Chien, Phys. Rev. Lett. **111**, 066602 (2013).
- [4] C. Du, H. Wang, F. Yang, and Hammel, Phys. Rev. B **90**, 140407(R) (2014)

#### [発表論文]

- [p1] Y. Omori *et al.*, Appl. Phys. Lett. **104**, 242415 (2014).
- [p2] Y. Niimi, H. Suzuki, Y. Kawanishi, Y. Omori *et al.*, Phys. Rev. B **89**, 054401 (2014).

#### [学会発表]

国内学会：2014年 日本物理学会(春)、他2件。