



スピン流生成・検出のための基礎物理現象の開拓

電子スピンを利用した新しいエレクトロニクスの基礎

齊藤 英治

慶應義塾大学 理工学部物理情報工学科
専任講師
科学技術振興機構さきがけ研究員(兼)

研究の背景

電子は電荷とスピンを持つ素粒子である。従来のエレクトロニクスは電子のこの2つの自由度のうち電荷のみを利用し、スピンは殆ど利用されてこなかった。その最大の理由は、スピンの情報は固体中では高々マイクロメートルスケールで擾乱されてしまうことにある。しかし現代のナノテクノロジーの進展により、サブミクロンスケールの構造を自在に作成することが可能になり、電子のスピンと電荷の両者を積極的に利用する新しい電子技術「スピントロニクス」がにわかに注目を集めはじめた。

スピントロニクスの主役は「スピン流」即ち電子のスピン角運動量の流れである(図1参照)。これは、エレクトロニクスの主役である電流のスピン版である。電流に加えてスピン流を使うことで、スピントロニクスは磁場を介さない磁化の制御やこれに基づく情報書き込み技術、低損失での(量子)情報伝送を可能にする。しかし一

方で、スピン流の利用に不可欠な基礎物理は未開拓であり、スピン流の物理の開拓が緊急課題となっている。我々は、スピン流の物理体系の基礎となるスピン流の生成及び測定方法の研究を行い、逆スピンホール効果やスピンゼーベック効果を含むスピン流の物理現象を発見した。

研究の成果

1. 逆スピンホール効果

スピンホール効果とは、スピン軌道相互作用により電流からスピン流が生成される現象である。この逆効果としてスピン流が電場(電圧)に変換される現象—逆スピンホール効果—が存在するはずであり、我々は白金を用いることでこの効果の観測にはじめて成功した(図2)^[1-2]。白金は強いスピン軌道相互作用を示す物質である。スピンポンプと呼ばれる方法で白金薄膜にスピン流を注入すると電場が現れることが観測され、そのスピン流分極方向依存性は逆ス

ピンホール効果の予言と一致した。電荷の流れである電流は磁場を作る(アンペールの法則)のに対して、スピンの流れであるスピン流は電場を作るのである。ここに磁気と電気的双対性が垣間見える。この手法は、スピン流の基本的な高感度検出手法として現在幅広く利用されている。2007年には逆スピンホール効果がナノスケール非局所配置でも観測され^[3]、更に近年巨大な逆スピンホール電圧も観測されており^[4]、微視的機構の観点から材料依存性の研究に注目があつまっている。

2. スピンゼーベック効果

スピン流検出技術である逆スピンホール効果を利用することで、熱流とスピン流が直接結合する新しい現象「スピンゼーベック効果」を発見した(図3)^[5]。スピンゼーベック効果とは、金属磁石に温度勾配を与えると温度勾配と平行方向にスピン流とスピン圧(電圧のスピン版)が誘起される現象である。この発見によって、熱

図1 スピン流と電流の概念図

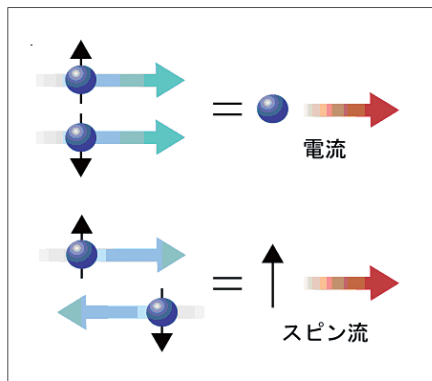


図2 逆スピンホール効果とスピンポンプの概念図、及びNiFe/Ptで観測された逆スピンホール効果に起因する電圧スペクトル。

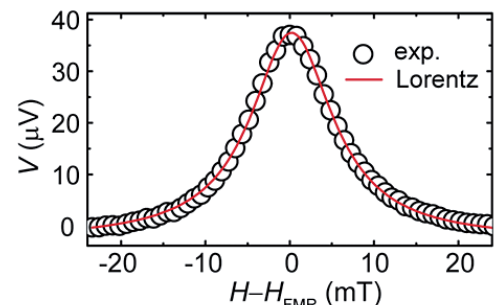
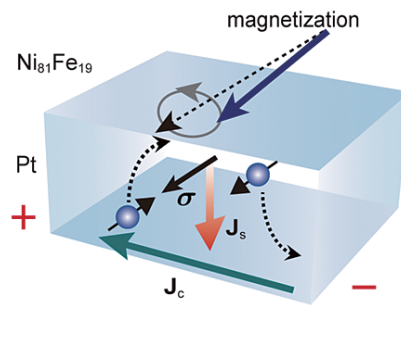
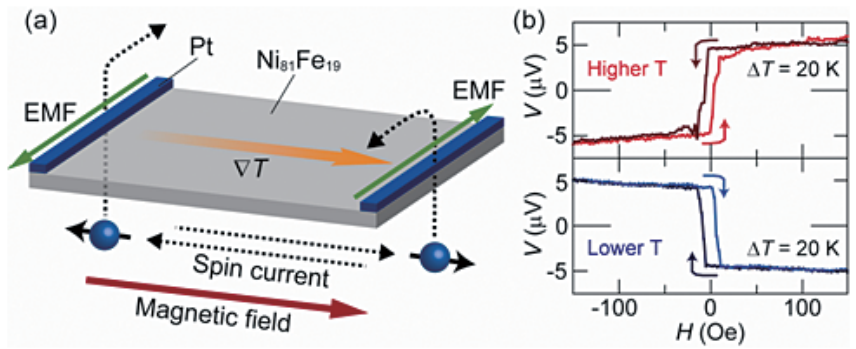


図3 (a) スピンゼーベック効果の模式図。(b) NiFe/Ptで観測されたスピンゼーベック効果の信号(上段: 高温側でスピン圧を検出した時、下段: 低温側でスピン圧を検出したとき)。



からスピン流を簡便に取り出すことができるようになった。スピンゼーベック効果は、スピン流源としての利用だけでなく、伝導電子のエントロピーのスピン依存性を調べる稀有なプローブとしても利用でき、熱スピントロニクスと呼ぶべき新しい領域の端緒を開くものと期待される。

3. スピントルクメーター

スピン流はスピン角運動量の交換により磁化にトルクスピントルクを与える。これを利用して、物質固有の磁化緩和(スピンの摩擦)が変調される。スピン流は磁性体の性質そのものの制御を可能にするのである。ここで特筆すべき点は、スピン流による磁化緩和の変調量は注入されるスピン流の大きさに比例し、その比例係数が物質の巨視的パラメータのみで構成される点にある。巨視的パラメータは容易に測定可能であるので、磁化緩和変調量をモニターするだけで、パラメータの仮定なしにスピン流を定量することが可能となる。このスピン

トルクメーター効果は現在知られている中で唯一スピン流を直接定量することができる手段であり、スピントロニクスの定量的研究を可能にした[2]。

将来展望

エレクトロニクスの基礎を作ったのは、電流・電荷についての基礎学理である電磁気学であった。スピン流の基礎物理の

解明は着実に進んでおり、近い将来に本研究の延長上として電磁気と同レベルの精密科学に体系化され、スピン流を利用した省エネルギー情報処理デバイスの実現が期待される。

本研究は、針井一哉氏、安藤和也氏、捧耕平氏、内田健一氏(以上慶大理工)、前川禎通先生、高橋三郎先生、家田淳一先生(東北大金研)、多々良源先生(首都大)との共同研究です。

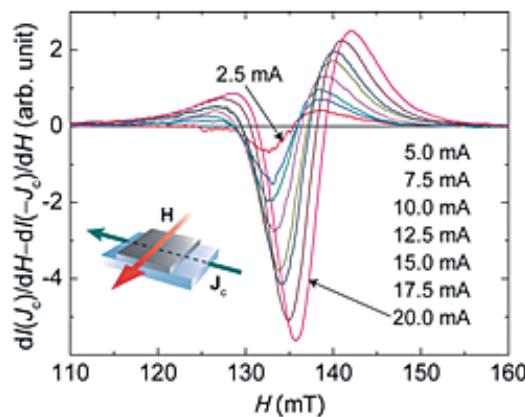
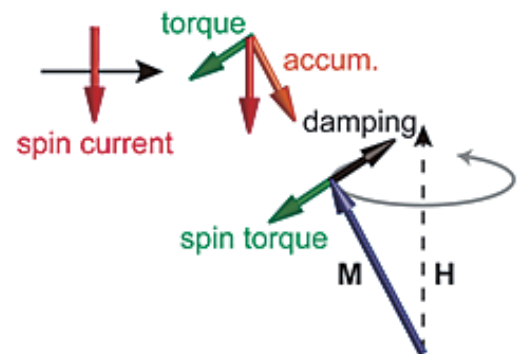


図4 NiFe/Ptにおける電流誘起強磁性共鳴変調スペクトル及びスピントルクによる磁化緩和変調の概念図。



References (参考文献)

- [1] E. Saitoh & H. Miyajima et al., Appl. Phys. Lett. 88(2006) 182509.
- [2] K. Ando & E. Saitoh et al., Phys. Rev. Lett. 98(2008) 036601.
- [3] T. Kimura & Y. Otani et al., Phys. Rev. Lett. 98(2007) 156601.
- [4] T. Seki & K. Takanashi et al., Nature Mat. 7(2008) 125.
- [5] K. Uchida & E. Saitoh et al., Nature 455(2008) 778.