

2007年4月12日

独立行政法人 理化学研究所

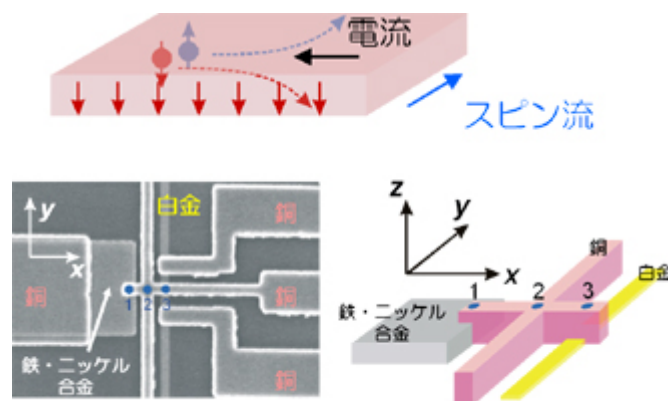
## 電流の中の電子スピンの方向を選り分ける スピンホール効果の電気的検出に成功 - 次世代を担うスピントロニクス素子の物質探索が前進 -

携帯電話やインターネットが普及した情報化社会は、さらに、大容量で高速に情報を処理する素子開発を求めています。そのため、エレクトロニクス分野では、さらに便利な技術革新の必要性が日増しに高まっています。この答えの一つが、これまであまり目を向けられていなかった電子の「スピン」を活用したエレクトロニクス、「スピントロニクス」。世界で激しい研究開発競争が始まったばかりですが、大容量の情報を記憶するメモリー、量子コンピュータ、高速光素子などを可能にし、情報化社会に新たなパラダイムを提供すると注目されている研究分野です。

理研フロンティア研究システム量子ナノ磁性研究チームは、このスピントロニクスの源である「スピン流」を電気的に検出し、計測することに成功しました。理研フロンティア研究システム量子ナノ磁性研究チームは、このスピンエレクトロニクスの源である「スピン流」を磁石を使わずに発生させ、計測することに成功しました。スピン流は、電子の自転運動「スピン」の拡散現象を通じて生じますが、大きさが極めて小さく、流れる領域がナノスケールであるため、電気的な検出が困難でした。

研究チームは、ナノスケールの白金細線に電流を流して生じるスピンの蓄積（スピンホール効果）を検出することに成功しました。その結果、電流からスピン流への変換効率が、これまで知られていたガリウム砒素化合物半導体に比べて1万倍以上も大きいことが明らかとなりました。

これは、スピントロニクス素子の探索を可能とした成果で、より大容量・高速を求める社会のニーズに応える結果を導くこととなります。



(図) スピン流(上)とスピンホール効果の計測システム(下)

2007年4月12日  
独立行政法人 理化学研究所

## 電流の中の電子スピンの方向を選り分ける スピンホール効果の電氣的検出に成功 - 次世代を担うスピントロニクス素子の物質探索が前進 -

### ◇ポイント◇

- ・室温でスピン流と電流の間の可逆的な相互変換（スピンホール効果）の実現に成功
- ・電流からスピン流への変換効率、ガリウム砒素化合物半導体に比べ、1万倍以上
- ・ナノスケールのスピン流回路の設計手法の確立

独立行政法人理化学研究所（野依良治理事長）は、室温で伝導電子に対して強いスピン軌道相互作用<sup>\*1</sup>を示すナノスケールの白金細線に電流を流し、生じるスピン蓄積（スピンホール効果）を、電氣的に検出することに成功しました。この研究は、非局所手法<sup>\*2</sup>を用いてスピン流<sup>\*3</sup>を顕在化させ、三次元的に流れを制御する手法を確立したことで可能となりました。これは、情報を大容量で高速に処理することができる記憶媒体などを、強磁性体を使わずに実現する次世代金属スピントロニクス<sup>\*4</sup>素子の開発に新たな手法を提供します。理研フロンティア研究システム量子ナノ磁性研究チームの大谷義近チームリーダー（東京大学物性研究所教授）と木村崇客員研究員（東京大学物性研究所助教）らによる研究成果です。

現在、世界でしのぎを削る競争が繰り広げられているスピントロニクス研究の中で、大容量のハードディスクを可能にした巨大磁気抵抗（GMR）効果<sup>\*5</sup>に代表されるスピン依存伝導現象を支配するものがスピン流です。スピン流は、非磁性体中に蓄積されたスピンの拡散現象として生じる（電流を伴わない）スピンの流れを意味し、等量の上向き電子スピンと下向き電子スピンが各々逆向きに流れているものとして理解されます。これまでのスピン注入<sup>\*6</sup>では、もっぱら強磁性体と非磁性体から成る積層構造に電流を流すことで、上述のようにスピン偏極した電流が生成されてきました。本研究では、強いスピン軌道相互作用を示す白金などの貴金属を用いることにより、磁性体を用いずに室温でスピン流を生成できることを電氣的に検出し、その実態を明らかにすることに成功しました。今回の結果より得られた電流からスピン流への変換効率は、これまで報告されていたガリウム砒素化合物半導体に比べ、1万倍以上も大きいことが明らかとなりました。さらに本研究で開発した素子を用いて電流からスピン流、その逆のスピン流から電流に可逆変換できることも実験的に検証しました。

本研究成果は、米国の科学雑誌『*Physical Review Letters*』（4月13日号）に掲載されます。

### 1. 背景

近年、電子の「スピン」という特性を活用して生まれるスピン依存伝導現象の理解が進み、電子が持っている電荷を活用した半導体デバイスに替わり、電子スピンの性質を積極的に利用した新規なスピントロニクス素子の開発が急速に進んでい

ます。特に、情報を大容量で高速に処理することができるスピンドバイスなどが開発のターゲットとなっています。また、最近では、漏れ磁場や熱・エネルギー損失の問題を低減できることから、伝導電子スピンと局在電子スピンの間に働くスピントルク<sup>\*7</sup>を利用する研究が注目され、外部磁場を用いない磁化方向制御技術が確立されつつあります。この次世代スピントロニクス実現の鍵を握るスピントルクの主役がスピン流です。強磁性体内では、自発磁化が存在し、電子の移動度である動きやすさは、電子が持っている“小さな磁石”スピンに依存するため、電流を流すだけでスピン流が発生します。一方、非磁性体に電流を流しても、スピン軌道相互作用による散乱で、電流に対して垂直方向にスピン流が発生する現象が起こることが、以前より理論的に指摘されてきました。この現象は、「スピンホール効果」として知られており、強磁性体を使わない新しいスピン流の生成手法として、近年、非常に注目されています。スピンホール効果の研究は、理論計算が大半でしたが、最近になって、化合物半導体を用いた素子で、実験的に観測され始めてきました。ごく最近では、金属系でも実験的に観測されつつありますが、電氣的な検出が困難であったことや、電氣的検出ができて極低温下のみで実験が可能であることや、小さなスピンホール伝導率のために発生するスピン流が少ないことなどから、現実の素子に応用するには程遠く、数多くの課題が残されていました。

研究グループは、これまでの系統的な実験により、スピン流を三次元的に制御する手法を確立してきました。今回、強いスピン軌道相互作用を起こす白金細線内のスピン流に同様の手法を適用することで、室温でのスピンホール効果の観測に成功しました。

## 2. 研究手法と成果

物質中を伝導する電子の軌道は、スピン軌道相互作用によって、電子が持つスピンの方向と伝導する方向に垂直な方向へと曲げられます。電子のスピンの方向が反転すると、作用する力の方向も反転します。そのため、図 1(a)のように、非磁性体に電流を流すと、上向きスピンは奥側に、下向きスピンは手前側に曲げられ、スピン流が電流と垂直方向に発生します。

研究グループは、強いスピン軌道相互作用を示す白金を用いて、このスピンホール効果によるスピン流を電氣的に検出することに成功しました。

### (1) 測定した素子

図 1(b)に本研究で用いた素子の電子顕微鏡写真と概念図を示します。素子構造の詳細は、次の通りです。スピン注入源あるいは検出器として用いられるミクロンサイズで厚さ 30 ナノメートルの強磁性体パーマロイ<sup>\*8</sup>矩形パッドに、線幅 100 ナノメートル、厚さ 80 ナノメートルの十字型の銅ナノ構造を接続し、その反対側の腕には銅細線と直交するように幅 80 ナノメートル、厚さ 4 ナノメートルの白金ナノ細線を接合しています。図中の番号 1,2,3 は、素子中の位置を示し、以下に用いるグラフ中の番号に対応します。

### (2) スピンホール効果の実験

図 2(a) 左図は、位置 3 (図 1 の(b)) 近傍の拡大図を示します。白金細線の長手

方向 (y 方向) に沿って電流  $I_e$  を流すと、スピンホール効果により、基板面に対し垂直方向 (z 方向) にスピン流  $I_s$  が発生し、白金細線の上表面近傍に +x 方向の上向き (青丸) スピン、そして下表面には -x 方向の下向き (赤丸) スピンが掃き寄せられて蓄積します。このスピン蓄積を検出するため、白金細線の上部にスピン緩和の小さい銅細線をスピン蓄積情報の引き出し線として接続しました。このことで、銅細線内にもスピン蓄積が誘起されます。スピン蓄積の大きさは、それぞれ蓄積した上向きスピンと下向きスピンの数密度で与えられる全エネルギー (電気化学ポテンシャル) の差に相当します。図 2(a)右図はこの電気化学ポテンシャルの空間分布を示し、青は上向きスピン、赤は下向きスピンの電気化学ポテンシャルを示します。図中の番号 1,2,3 はそれぞれ図 1(b) で示した番号の位置に対応します。例えば位置 1 と 3 の間は銅細線でスピン蓄積情報が引き出されているので上向きと下向きスピンの電気化学ポテンシャルは大きく異なり、これをスピン分極するとも言います。接合面からの距離の増加とともにスピン緩和のため減衰しますが、これまでの実験から、銅細線内ではサブミクロン以上の距離にわたってスピン分極が伝播することが確認されています。図 1(b)の 1 の位置でスピン分極している銅細線に強磁性パーマロイ細線を接続すると、電気化学ポテンシャルの連続性から、両細線の間には電位差  $\Delta V$  が発生します。通常これをスピン分極電圧と呼び、その大きさは、検出器として働くパーマロイの磁化の方向に依存します。磁化  $M$  が銅細線内のスピン分極の方向と平行なときに電圧は正になり、反平行なときには負になります。本研究では、x 方向に沿って磁場を掃引し、パーマロイの磁化方向をスピン分極と平行および反平行に配向した場合のスピン分極電圧の変化を調べました。

### (3) スピンホール効果の検出結果

図 2(b)に、室温、および 77 K (ケルビン) での電圧の磁場依存性を示します。上述したようにスピン分極の大きさは電圧として測定されますが、その大きさは投入された電流の大きさ  $I_e$  に依存してしまうので、ここで縦軸は、電圧  $\Delta V$  を白金細線内に流す電流  $I_e$  で除することで抵抗の単位 ( $\Delta V/I_e$ ) に変換して示しています。また、横軸は外部から印加した磁場の大きさを表します。磁場を x 軸正方向に加えてパーマロイの磁化をスピン分極と平行に配向させると抵抗が最大に、また、負方向の磁場を加え磁化を反転させると抵抗が最小になりました。つまり、前述の通り、白金細線のスピンホール効果によって、銅細線にスピン分極が生じていることが確認できます。この抵抗変化の大きさから、電流からスピン流への変換の指標となるスピンホール伝導率を計算すると  $2.4 \times 10^4$  ( $\Omega m$ )<sup>-1</sup> となりました。この値は、これまでに報告されている半導体の値に比べて一万倍以上も大きい値であり、室温でこのような大きな値が得られたことは、スピンホール効果で発生するスピン流を、現実のスピンエレクトロニクス素子に将来的に十分適用できる可能性があることを示しています。

### (4) 逆スピンホール効果の実験

また、同一試料において、電流・電圧端子を入れ替えると、図 3(a)に示すように、パーマロイ細線から発生したスピン流を、銅細線を介して白金細線に注入

することができます。この場合のスピントロニクス相互作用を考えると、上向き(+x)と下向き(-x)のスピントロニクスを持つ電子は、前述の電気化学ポテンシャルの勾配に沿って互いに逆方向に流れているため、両方とも同じ-y方向に曲げられます。その結果、白金細線に沿って電流が流れることになり、電荷が細線の両端で蓄積し、細線両端に電位差を生じます。これは、前述のスピントロニクス効果と逆の現象であり、「逆スピントロニクス効果」として知られています。

#### (5) 逆スピントロニクス効果の検出結果

図 3(b) に、白金細線に生じる電圧の磁場依存性を示します。ここで縦軸は、白金細線に発生した電圧です。やはりこの場合もスピントロニクス効果の実験と同様の理由で、素子に投入した電流で除することにより抵抗換算してあります。さらに、前の実験と同じく印加磁場を掃引することで、パーマロイ細線の磁化方向に対応した抵抗変化が観測でき、白金細線に注入したスピントロニクス流が電流に変換され、上述の電圧が発生していることが確認できます。ここで、注目すべき点は、スピントロニクス効果と逆スピントロニクス効果の実験で得られた抵抗変化の大きさ ( $\Delta R_{SHE}$ ) が同じであることです。このことは、電流からスピントロニクス流、およびスピントロニクス流から電流の変換において、オンサーガーの相反定理<sup>\*9</sup>が成り立つことを表しています。

### 3. 今後の期待

研究グループは、スピントロニクス相互作用の大きな物質におけるスピントロニクス効果の電氣的検出法を確立しました。これにより、様々な物質のスピントロニクス伝導率を実験的に算出することが可能となり、今後のスピントロニクスRAM<sup>\*10</sup>をはじめとするスピントロニクス素子に用いる物質探索に大きく貢献すると考えられます。また、本研究で確立した技術を発展・応用すると、消費電力の少ないスピントロニクス流を用いた演算回路などを作製することも可能となります。さらに、研究グループは、白金細線が室温ではこれまでにない大きなスピントロニクス伝導率を持つことを発見しました。このことは、スピントロニクス効果が単なる興味深い物理現象としてだけでなく、現実のスピントロニクス素子に利用可能であることを示しています。今後、より大きなスピントロニクス伝導率を持つ物質を探索するとともに、強磁性体を用いない新しいスピントロニクス素子の実現も目指していきます。

(問い合わせ先)

独立行政法人理化学研究所

フロンティア研究システム 量子ナノ磁性研究チーム

チームリーダー 大谷 義近 (おおたに よしちか)

Tel : 048-467-9605 / Fax : 048-467-9650

(報道担当)

独立行政法人理化学研究所 広報室 報道担当

Tel : 048-467-9272 / Fax : 048-462-4715

Mail : koho@riken.jp

## <補足説明>

### ※1 スピン軌道相互作用

電子の持つスピン角運動量とその電子の軌道角運動量の間に働く相互作用。

### ※2 非局所的手法

通常電流の流れている部分に生じる電圧を測定する方法を局所的、今回のように電流の流れていない部分に電子の拡散伝導を生じさせ、スピン分極によって発生する電位差を測定する手法を非局所手法という。

### ※3 スピン流

スピンとは、電子の磁石としての性質である。スピンは、地球の自転に似た運動量のこと、電気を帯びた電子が一定の速度で自転することで磁力が発生する。電子の電荷の運動である電流に対して、スピンの運動をスピン流と呼ぶ。

### ※4 スピントロニクス

従来の電子の電荷を用いたエレクトロニクスに加えて、電子のスピンの性質も工学的に利用する新しいエレクトロニクス分野。

### ※5 巨大磁気抵抗(GMR)効果

ナノメートル程度の強磁性薄膜と非強磁性薄膜の積層構造に電流を流しながら磁場を印加すると、磁性層の磁化配置を反映して電気抵抗は数 10%以上の変化を示す。このような現象を巨大磁気抵抗効果と呼ぶ。この効果を用いて、ハードディスクのヘッドが実用化されている。

### ※6 スピン注入

上向きスピンと下向きスピンの数に偏りがある状態、すなわちスピン分極した電流を強磁性・非磁性金属や半導体に流し込む事を、一般にスピン注入と言う。

### ※7 スピントルク

強磁性体の磁化を作る局在電子のスピンの、強磁性体中を動き回る伝導電子のスピンの交換相互作用することで、磁化が伝導電子のスピンの平行になるように作用する力のモーメント。

### ※8 パーマロイ

鉄とニッケルの合金。結晶粒が小さく、結晶磁気異方性が小さいため、磁区構造が制御しやすく、ナノ構造の磁性体によく用いられる。

### ※9 オンサーガーの相反定理

磁場  $H$  が存在する系で、ある輸送係数  $L_{i,j}(H)$  について、 $L_{i,j}(H) = L_{j,i}(-H)$  が成立すること。今回の場合、スピン流誘起の電荷ホール伝導率と電荷流誘起のスピンホール伝導率の間に、上記関係が成立する。

## ※10 スピン RAM

RAM（ラム：Random Access Memory）はコンピュータで使用する記憶装置の一分類であり、複数の情報を記録し、記録順、記録位置等に関係なく読み出せる装置である。主に半導体トランジスターで構成され、電力供給を止めると記憶保持ができなくなる揮発性の問題を抱えていた。この問題を克服する不揮発メモリーの一つが磁気トンネル接合（GMR の非磁性層を絶縁体に置き換えた構造で数 100%の磁気抵抗変化を示す）を用いた磁気記憶素子 MRAM（エムラム：Magnetic Random Access Memory）である。新たにスピントルク効果を書き込み手法として改良された次世代磁気記憶素子をスピン RAM と呼び、MRAM と区別する。

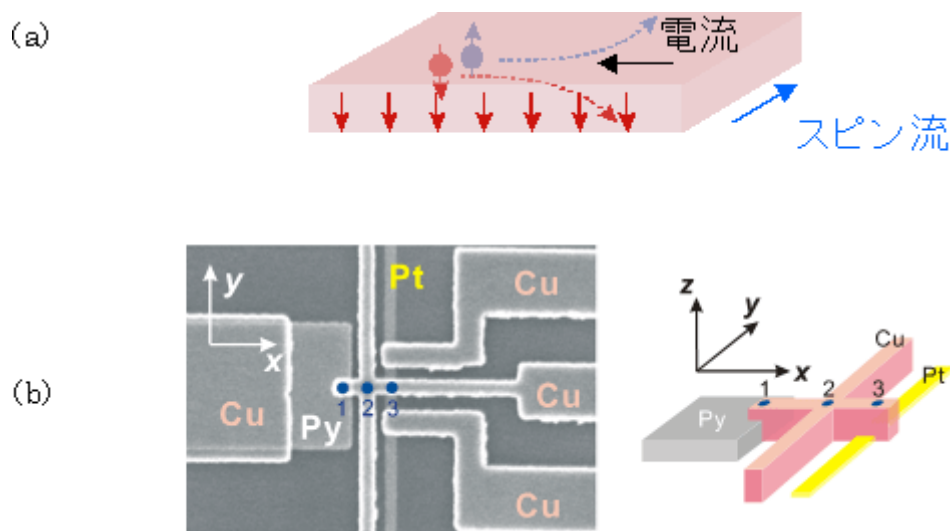


図 1 スピンホール効果

- (a) スピンホール効果によるスピン流発生 の概念図。非磁性体に電流を流すと、電流に垂直な方向にスピン流が発生する。図中の赤丸と青丸はそれぞれ下向きと上向きの異なるスピンの向きを有する電子を表す。
- (b) 白金細線を用いたスピンホール効果観測のための試料の電子顕微鏡写真（左）とその模式図（右）。

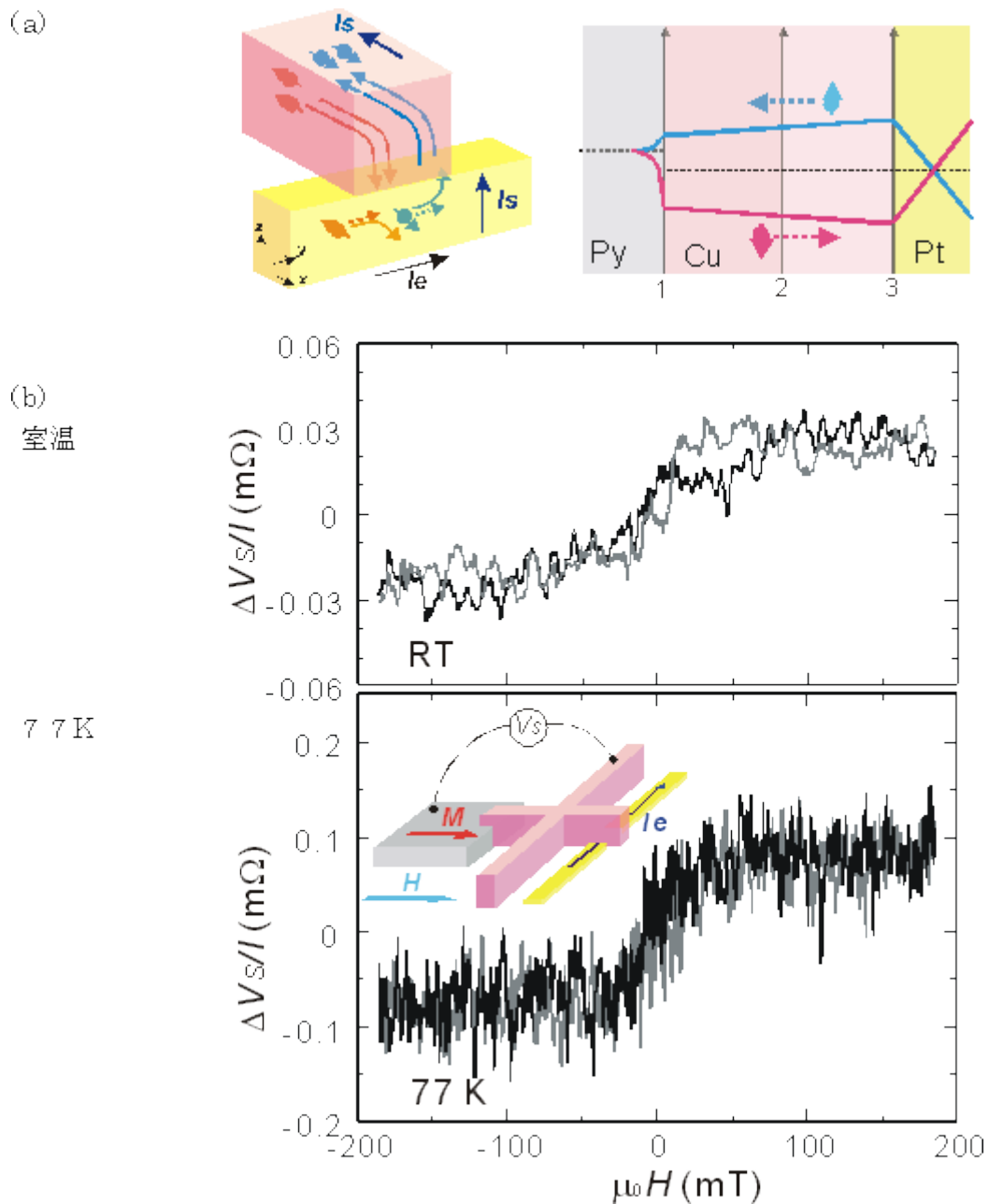


図2 スピンホール効果の電氣的検出

- (a) 白金細線内の電流によるスピンの蓄積の発生と銅・パーマロイ細線を用いたスピンの蓄積検出の概念図 (左)。 $I_s$  はスピン流を、 $I_e$  は電流を表す。素子中の電気化学ポテンシャルの空間分布 (右)。図中の番号 1,2,3 はそれぞれ図 1(b) に示した番号の位置に対応する。
- (b) 室温、および 77 K でのスピンのホール効果によるスピンの蓄積電圧の測定結果。縦軸は、抵抗換算したスピンの蓄積の大きさ、横軸は、外部から印可した磁場の大きさを示す。また、挿入図は測定に用いた素子の概略図で、それぞれ  $M$  は灰色で示したパーマロイの磁化、 $H$  は印加磁場方向、 $V_s$  は測定したスピン分極電圧を示す。



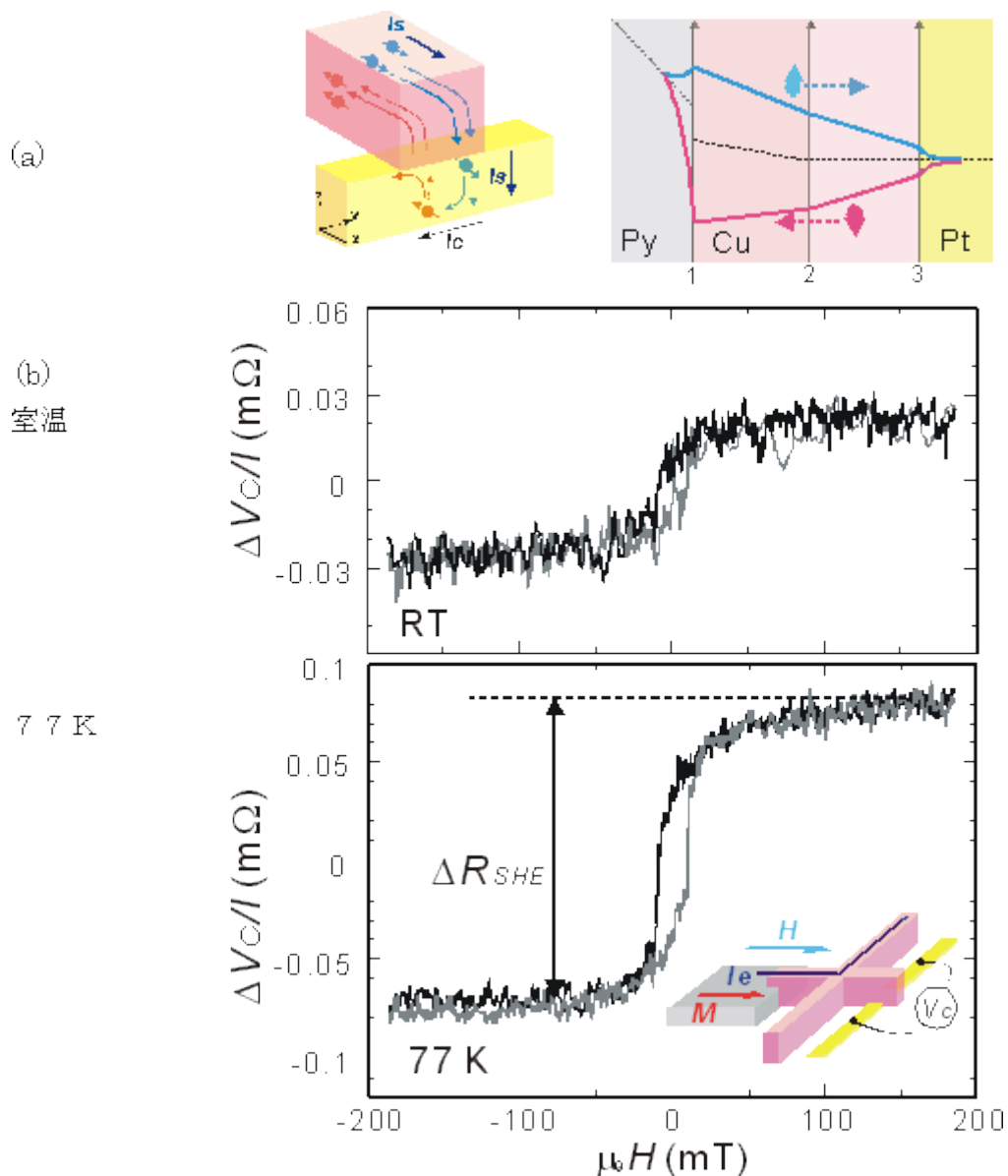


図3 逆スピホール効果の電気的検出

- (a) パーマロイ細線からのスピ流により白金細線内に発生する電流の概念図(右)。素子中の電気化学ポテンシャルの空間分布(左)。図中の番号1,2,3はそれぞれ図1(b)に示した番号の位置に対応する。
- (b) 室温、および77 Kにおける逆スピホール効果による電荷蓄積電圧の測定結果。また、挿入図は測定に用いた素子の概略図で、それぞれMは灰色で示したパーマロイの磁化、Hは印加磁場方向、 $V_c$ は測定したスピ分極電圧を示す。