

# 磁石からのスピンのしみ出し

大谷義近

電気伝導は電荷をもった電子の流れとして理解されているが、電子は電荷のほかにスピンをもち、それが磁石の磁化の源でもある。強磁性体と非磁性体を相互に積層した金属人工格子において、巨大磁気抵抗効果が発見されたのを契機に磁性体を用いたスピン依存伝導(磁石からのスピンのしみ出し)に関する研究の重要性が認識され、新しい分野であるスピン電子工学(スピンエレクトロニクス)が活発化している。

## スピンのしみ出し

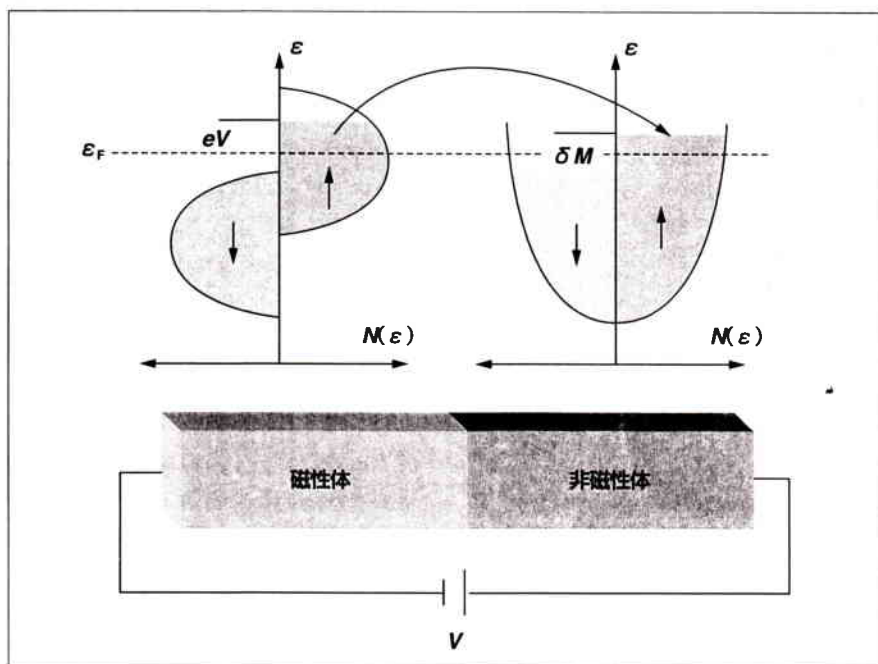
磁石の磁石たる所以は、自発磁化をもつことにある。これは、電子構造を考えると自発的にスピンバンドが分極しているため、電子状態密度は上向きスピンと下向きスピンでは異なり、電子数が異なることを意味する。したがって、電流の主な運び手であるフェルミ面近傍の伝導電子の寿命もスピンの向きによって異なってくる。磁性体中のスピンの向きを乱す散乱が無視できるならば、磁性体の電気伝導の直観的なイメージは2つの上下スピンバンドが並列に電流を運ぶという物理描像でよい。これが、磁性体の伝導を記述する2電流モデルであり、モットの提唱以来改良が加えられ、多くの磁性体の磁気抵抗が説明されてきた<sup>1)</sup>。

さて、このように偏極スピンを運ぶ磁性体を非磁性体と接合するとどう

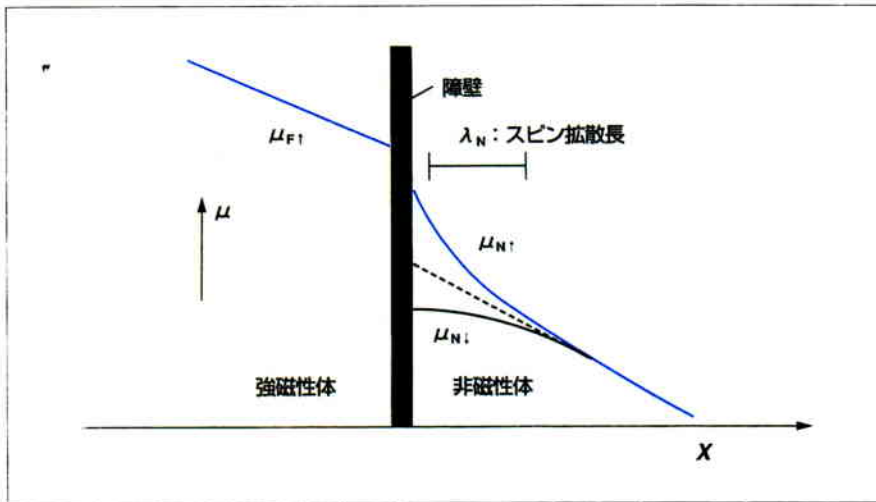
なるであろう。100%スピン分極した強磁性体を分極していない非磁性体に接合させたときの模式的なバンド図を(図1)に示す。接合の両端に電圧を加えると、強磁性体のフェルミ面近傍の偏極電子スピンは非磁性体中にスピン情報を保ちながら拡散し、やがてその情報を失う。これがスピンのしみ出し(スピン拡散)である。この拡散長の範囲で非磁性体は分極し、非平衡磁化が生じる。興味深いことは、スピン拡散長は電子の平均自由行程に比べ10倍以上長いこと、また非磁性体

が磁場を印可することなく、電圧を加えるだけで磁石からのスピンのしみ出しによって分極することである。

横軸を界面からの距離にとり、上述の接合について偏極電子スピンのエネルギー(化学ポテンシャル)をプロットしてみよう(図2)。界面によるスピン反転散乱が無視できる強磁性体/非磁性体接合の電子状態を考えると、スピンのしみ出しによって化学ポテンシャルの分極が引き起こされる。この分極の大きさ $d\mu$ は、各々上下電子スピン流に対するボルツマン方程式と全電流の保存則から算出することができる<sup>2)</sup>。もっとも単純化した場合、 $d\mu = -e(p/\sigma)\lambda = -peV$ と近似される。ここで、 $p$ はスピンの分極率、 $\sigma$ は非磁性体の伝導率、 $\lambda$ はスピン拡散長である。この分極エネルギーは、外部磁場 $H$ を印可したことによって生じ



〈図1〉強磁性体/非磁性体接合のバンド構造の模式図



〈図2〉 強磁性体/非磁性体接合における化学ポテンシャルの空間分布

るゼーマン・エネルギー  $(1/2)g\mu_B H$  と等価であるので、スピン分極率が100%、印加電圧が  $V = 1\text{mV}$  とすると、非磁性体中にはスピン拡散長の範囲で非平衡磁化が生じ、内部磁場に換算して約17Tに相当する強磁場が発生することになる。接合させる相手が非磁性体ではなく互いに磁化の向きを異にした磁性体であれば、上述の機構で生じる内部磁場によって磁化反転も期待できる。このようにスピンのしみ出しは、局所強磁場を発生させる手法としてもデバイス応用の観点から注目され、多くの研究が始められている<sup>3)-11)</sup>。

### ■ スピン拡散長の測定

上述したスピン拡散長は、スピン自由度を用いたデバイスの大きさを決める重要な物理因子である。一般に、スピン反転をとまなう電子の非弾性散乱は、スピン軌道相互作用によって生じることが知られている。簡単にいうと、電子スピンは自分自身の軌道によって生じる磁場と相互作用して反転してしまう。したがって、スピン拡散

長を長くするためには、電子を原子核に束縛する中心力の小さい、つまり軽い元素がよい。アルミニウムのような軽い元素がこれに相当し、これまでの研究では、格子欠陥などを含まないきれいな単結晶アルミニウムの場合、低温(30K)で $100\mu\text{m}$ に及ぶ長い距離をスピンが向きをそろえたまま拡散するという報告もある<sup>12)</sup>。しかしながら、正確な値については議論の余地がある。その理由は、スピンのしみ出しの機構そのものが、上述したような単純なモデルだけではよく説明されないことにもよる。

最近、偏極スピンを注入し、その寿命や拡散長を測定する試みが数多く行われている<sup>13),14)</sup>。ここでは、筆者の所属するグループで行ったスピン拡散長を異常ホール効果を用いて測定する試みについて簡単に紹介する<sup>15)</sup>。上述の議論のようにスピンのしみ出しにより非平衡磁化が非磁性体に生じるならば、通常のスピンに依存しないローレンツ力によって生じる正常ホール効果のほかに、スピン方向に依存して生じる異常ホール効果も期待される。強磁性体の場合、異常ホール効果は磁化に比例することが知られている。

〈図3a〉に実験に用いられたスピン注入ホールデバイスの走査電子顕微鏡像を示す。図中複雑な形状をしているのが強磁性体Co電極であり、偏極スピンの注入源となる。Co電極は、多結晶アルミニウムでできたホール素子とトンネル接合されており、ホールバーと接合までの距離は $0.5\mu\text{m}$ である。面に対して垂直に磁場を印可することによりCo電極の磁化方向をそろえ、電極 $I_1$ と $I_2$ を電圧を印可するとCo電

〈図3〉スピンのしみ出しとホール効果

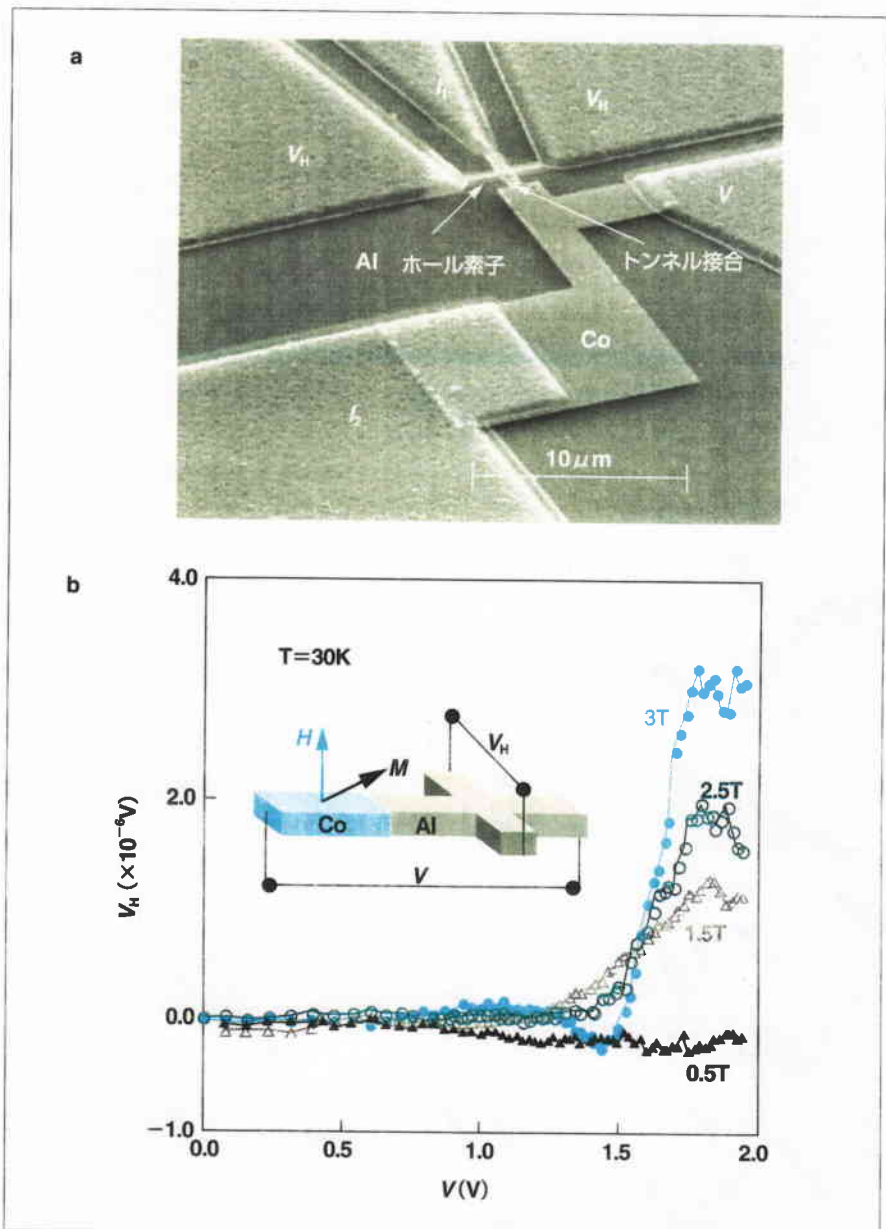
(a)スピン注入ホール効果測定用デバイスの走査電子顕微鏡像。(b)ホール電圧のバイアス電圧依存性。

極の磁化状態に応じて偏極した電子スピンのアルミニウムに注入される。もし、非平衡磁化が $0.5\mu\text{m}$ 以上の距離にわたって生じていれば、非平衡磁化に依存した異常ホール効果が1対の電圧端子 $V_H$ に生じるはずである。

〈図3b〉に温度30Kにおいて測定した絶対値ホール電圧のバイアス電圧依存性を示す。予想通り、界面のトンネル障壁高さに相当するバイアス電圧以上で偏極スピンのしみ出しが顕著になり、ホール電圧はそれとともに正常ホール効果から期待される以上に大きく直線的に増大する。また、印加磁場の増加とともにホール電圧は増大する。これは、Co電極の磁化が印加磁場とともに反磁場に抗して面内から回転し、面直にそろった過程に対応する。同様の実験を接合界面とホールバーの間の距離を $1\mu\text{m}$ にした試料で行うと、上述の現象は消失してしまう。これらのことから、この研究で用いた多結晶アルミニウム中のスピン拡散長は、

$5\mu\text{m}$ から $1.0\mu\text{m}$ の間の値であることがわかる。また、測定温度を増大させるとスピン拡散長は減少し、150K以上では熱擾乱のためにまったく観測されなくなる。現在のところ、前述した単結晶アルミニウムの場合のスピン拡散長に比べて短いのは、多結晶アルミ中に含まれる微量な非磁性不純物によって生じるスピン軌道相互作用の影響と考えている。さらなる実験や解析を必要とするが、このように、比較的単純にホール効果を測定することによりスピンのしみ出しが観測できることは興味深い。また、多くのホール素子を直列に接続すれば、スピンの空間分布も測定できそうである。

強磁性体と非磁性体の界面をいか



に制御するかが今後の大きな課題の1つであるが、スピンのしみ出しに関する物理がさらに深く理解されれば、古典的な強磁性磁化制御デバイスに新しいパラダイムを開く可能性がある。

参考文献

- 1) A. Fert and I. A. Campbell: J. Phys. F: Metal Phys. **6**, pp.849-871(1976).
- 2) P. C. van Son, H. van Kempen and P. Wyder: Phys. Rev. Lett. **58**, 2271(1987).
- 3) L. Berger: Phys. Rev. **B54**, 9353(1996).
- 4) L. Berger: J. Appl. Phys. **81**, 4880(1997).
- 5) L. Berger: Phys. Rev. **B59**, 11465(1999).
- 6) J. C. Slonczewski: J. Magn. Magn. Mat. **159**, L1(1996).
- 7) J. C. Slonczewski: J. Magn. Magn. Mat. **195**, L261(1999).

- 8) M. V. Tsoi, A. G. M. Jansen and J. Bass: J. Appl. Phys. **81**, 5530(1997).
- 9) M. V. Tsoi, A. G. M. Jansen, J. Bass, W.-C. Chiang, M. Seck, V. Tsoi and P. Wyder: Phys. rev. Lett. **80**, 4281(1998).
- 10) E. Myers, D. C. Ralph, J. A. Katine, R. N. Louie and R. A. Buhrman: Science **285**, 867(1999).
- 11) J. Z. Sun: J. Magn. Magn. Mat. **202**, 157(1999).
- 12) M. Johnson: J. Magn. Magn. Mater. **140**, 21(1995).
- 13) J. Nitta, B. Hoving and H. Takayanagi: The 5<sup>th</sup> Symposium on the Physics and Application of Spin-Related Phenomena in Semiconductors 105(1997).
- 14) P. R. Hammer, B. R. Bennett, M. J. Yang and M. Johnson: J. Appl. Phys. **87**, 4665(2000).
- 15) Y. Otani, T. Ishiyama, S. G. Kim and K. Fukamichi: J. Appl. Phys. **87**, 6995(2000).