

(II)電気を磁気に変える
電流→磁化反転



スピン注入磁化反転の提案と実現

- ▶ 1996年、新たなスピントロニクス分野としてスピン注入磁化反転のアイデアがSlonczewski[i]およびBergerら[ii]によって提案され、実験的に検証されました[iii]。強磁性電極FM1からスピン偏極した電流を、傾いたな磁化をもつ対極強磁性電極FM2に注入すると、注入された電子のスピンの向きに傾けられるときの反作用として、スピン角運動量のトルクが対極電極の磁化にトランスファーされて、それがきっかけで磁化反転をもたらすというのです。

- ▶ [i] J. Slonczewski: J. Magn. Magn. Mater. 159 (1996) L1.
- ▶ [ii] L. Berger: Phys. Rev. B 54 (1996) 9353.
- ▶ [iii] E. B. Myers, D. C. Ralph, J. A. Katine, R. N. Louie, R. A. Buhrman: Science 285 (2000) 865.

$$\frac{d\mathbf{M}_2}{dt} = \gamma \mathbf{M}_2 \times \mathbf{H}_{eff} + \alpha \mathbf{m}_2 \times \frac{d\mathbf{M}_2}{dt} - g(\theta) \frac{\hbar I_e}{2e} \mathbf{m}_2 \times (\mathbf{m}_2 \times \mathbf{m}_1)$$

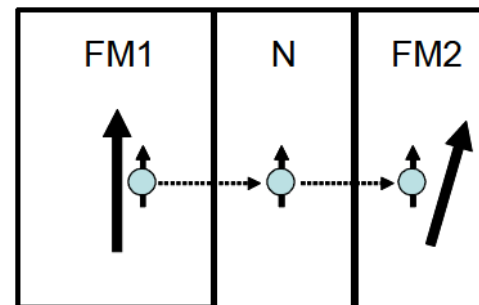


図7 スピン注入磁化反転の概念図

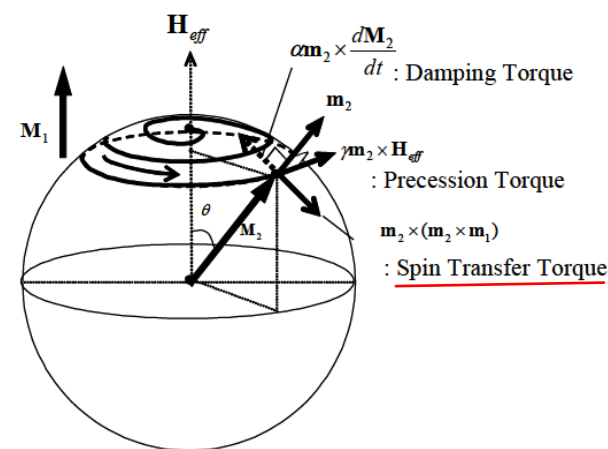


図8 スピン注入磁化反転のダイナミクス

スピン注入磁化反転の実例

- ▶ スピン注入磁化反転を実現するための代表的な素子は図 (a) のような非常に小さな断面 ($60\text{nm} \times 130\text{nm}$) を持つ柱状素子である。素子は2層の強磁性層(Co)とそれを隔てる非磁性層(Cu)からなる。
- ▶ この素子において膜面に垂直に電流を流して電気抵抗の磁場依存性を測定した結果が図(c)である。二つのCo層の磁化の平行 (P) ・ 反平行 (AP) に応じて明瞭な抵抗変化が得られている。
- ▶ 図 (d) は外部磁界がない状態で測定した電気抵抗の測定電流依存性である。+2mA程度で磁化が平行配置から反平行配置にスイッチする様子が電気抵抗ジャンプとして現れている。
- ▶ この状態は電流をゼロにしても安定であり、-4mA程度で再び平行配置へ戻る。すなわち、正の電流で反平行配置を、負の電流で平行配置を実現できる。
- ▶ サブナノ秒で磁化反転ができることから、磁気ランダムアクセスメモリ (MRAM) の新しい書き込み方式として期待され、既に、スピン注入書き込みを利用したMRAM(スピンRAM)の試作もなされている。

小野輝男：スピントロニクス入門セミナーテキスト(2011.12.16)

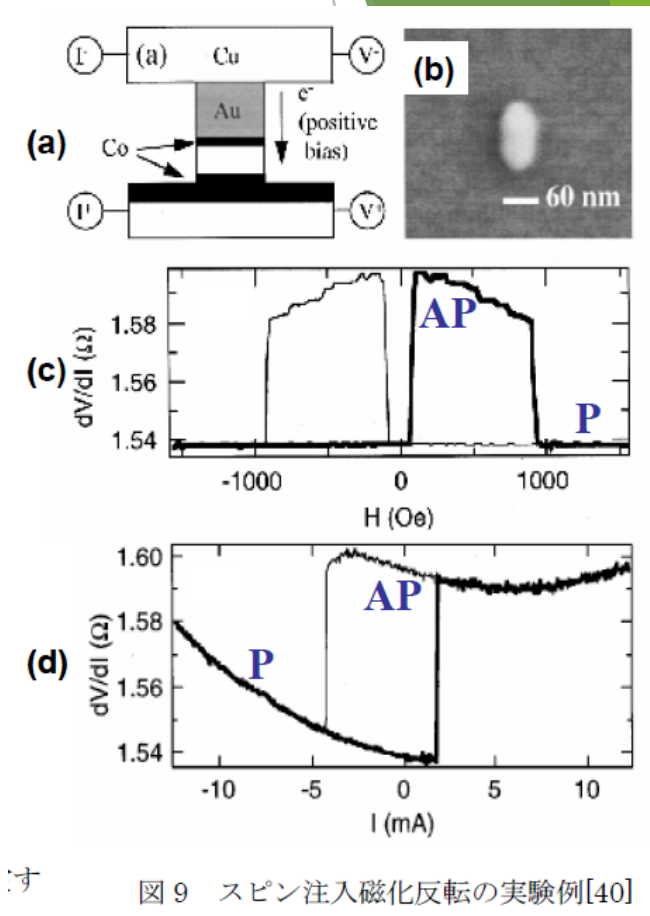
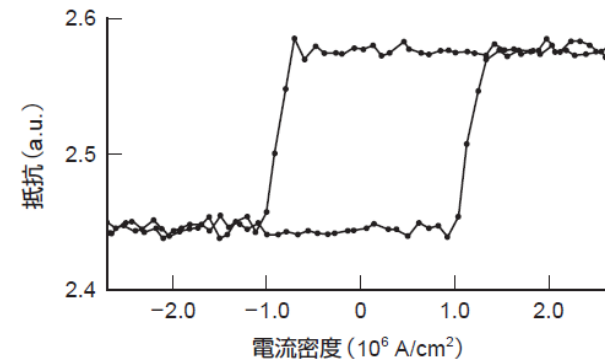
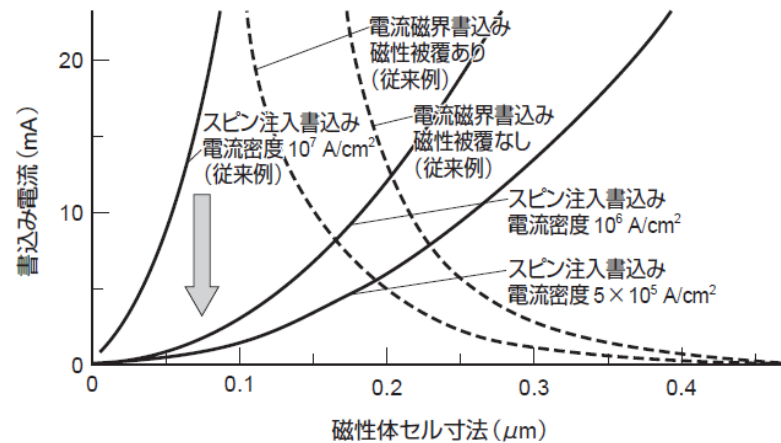
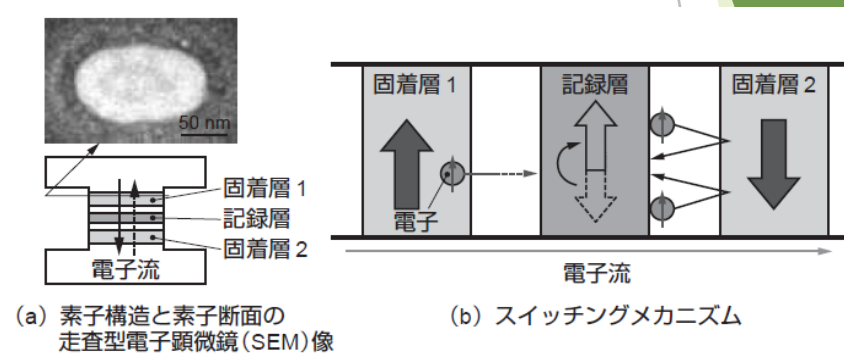


図9 スピン注入磁化反転の実験例[40]

F.J. Albert et al., Appl. Phys. Lett. 77(2000) 3809.

スピン注入磁化反転のメリット

- ▶ スピン注入磁化反転は、反転電流は素子面積に比例し、素子面積が小さいほど低電力化が可能になる。
- ▶ 素子寸法が $0.2\mu\text{m}$ 以下になると、電流磁界書き込みよりも書き込み電流が小さくなる。



中村他：東芝レビューVol.61 No.2 (2006)

スピントランスファーによる磁壁移動

▶ Onoらはスピントランスファー効果によって伝導電子スピンのトルクが磁壁に渡されることにより容易に磁壁移動が起きることを実験的に検証しました。

▶ 電流方向を反転すると移動方向が反転することが、温度ではなくスピン流によることを示しています。

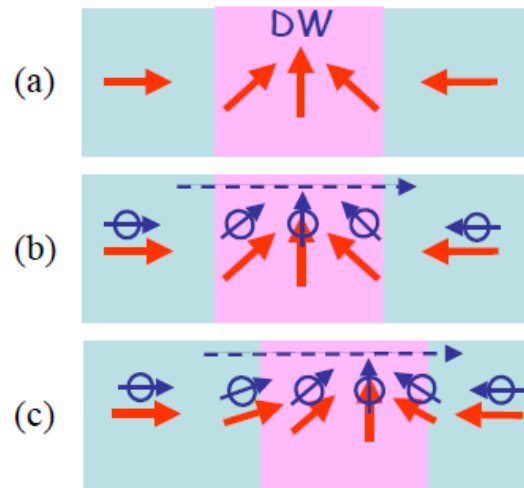


図5 スピントランスファー効果による磁壁の電流駆動の説明図

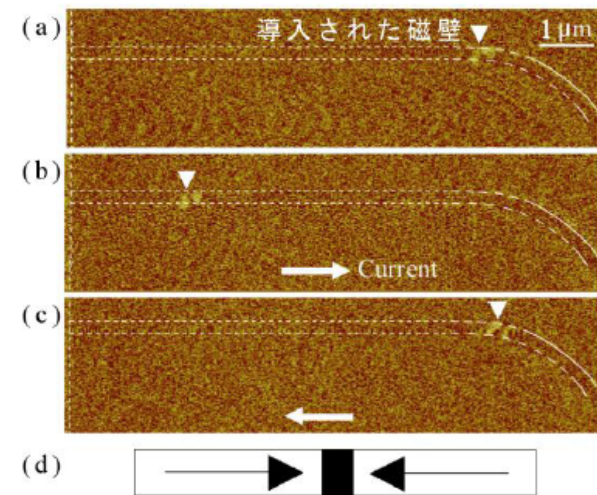


図6 磁気力顕微鏡による電流駆動磁壁移動の観察結果

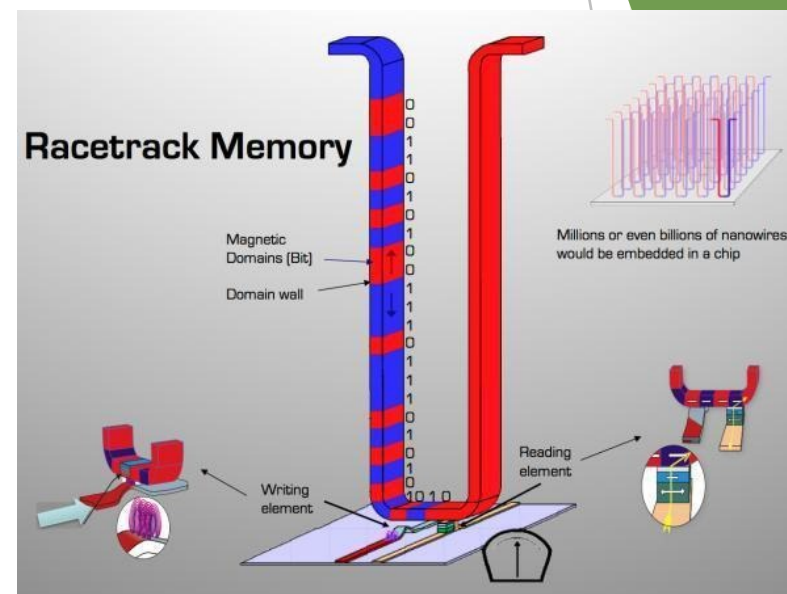
A. Yamaguchi, T. Ono, S. Nasu, K. Miyake, K. Mibu, and T. Shinjo, Phys. Rev. Lett., 92 (2004) 077205.

小野輝男：スピントロニクス入門セミナーテキスト(2011.12.16)

Race track memory

- ▶ スピントランスファーによる磁壁移動の現象が注目されるきっかけとなったのは、IBMのParkinによるRace-track Memoryと名付けられた3次元メモリーの提案です。
- ▶ Race-track Memoryでは、一つの磁性細線中に多数の磁壁を導入し、これらを電流パルスで前後に移動させることで情報を伝達します。
- ▶ また、NECは、トンネル磁気抵抗素子を用いた磁気メモリーの情報書き込みに電流駆動磁壁移動を利用することで、スタティックランダムアクセスメモリ（Static Random Access Memory: SRAM）代替可能な高速メモリーが実現できるとしています。

S. S. P. Parkin, U.S. Patent 6,834,005 (2003); S. S. P. Parkin et al., Science 320 (2008) 190.



TECH.BLORGE

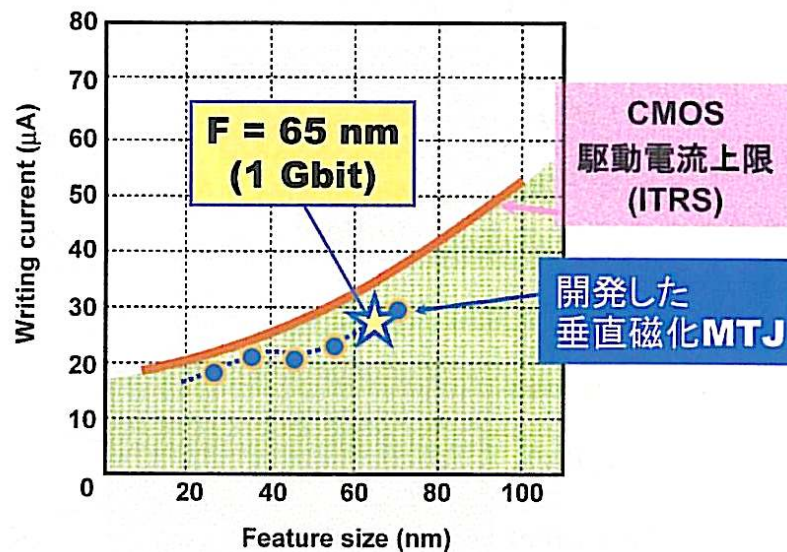
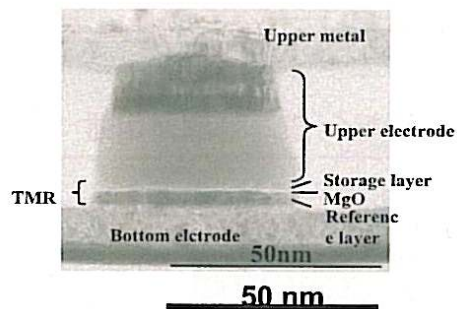
Racetrack memory is 100,000 times faster while using 300 times less energy, November 17, 2010

ここまで来たスピン注入磁化反転技術

垂直磁化MTJの開発: 第1世代(東芝)

IEDM 2008(岸, 薬師寺, 他)

50nmサイズ垂直磁化MTJ素子
1 kbit CMOS集積回路における評価



開発した垂直磁化MTJにより**1 Gbit**対応可能な書込電流を達成
(同時に、**50k_BT**以上の記録保持と**10ns**以下の高速書込も達成)

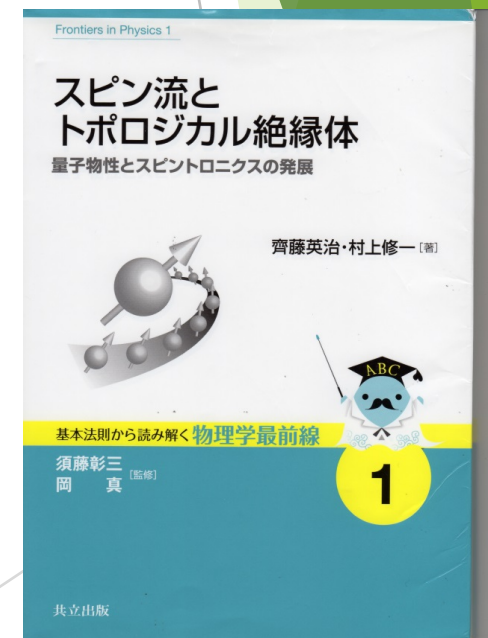
コイルによらず電流を磁気に変換

- ▶当初はGMR素子によって 10^7 - 10^8 A/cm²という大電流密度を必要としたので実用は無理であろうと言われましたが、現在ではMgO-TMR素子を用いて 10^6 A/cm²台の実用可能な電流密度にまで低減することができるようになりました[i]。
- ▶これまではMRAMの記録のためには電流を流してそれが作る磁界で磁化反転をして記録していたので電力消費が集積化のネックでしたが、スピントルクを使うとMTJ素子に電流を流すことによって磁化反転できるので、高集積化が可能になります。
- ▶かくして、ついに人類は、コイルによらずに、電気を磁気に変換することに成功したのです。

[i] 久保田均, 福島章雄, 大谷祐一, 湯浅新治, 安藤功児, 前原大樹, 恒川孝二, D. Djayaprawira, 渡辺直樹, 鈴木義茂: 日本応用磁気学会第145回研究会資料「スピン流駆動デバイスの最前線」(2006.1)p.43

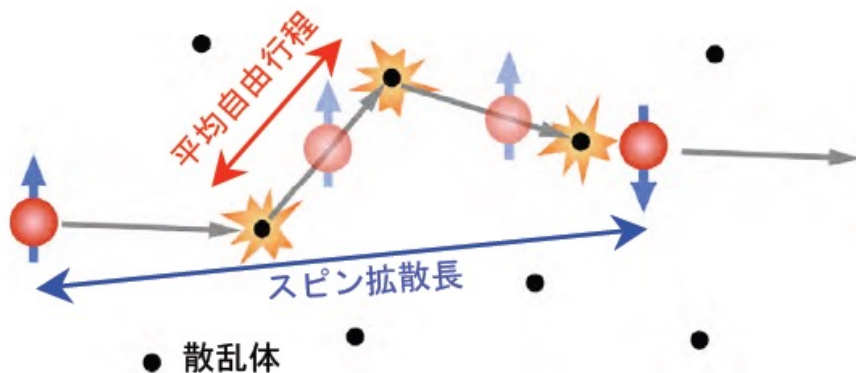
スピン流のもたらす新しい物理

熱スピン流が電気をつくる



大きなトピックス：「スピン流」

- ▶ 電荷の流れとしての電流は、平均自由行程（1-10nm）で表される散乱を受けるのですが、スピンの流れは電子の不純物やフォノンとの衝突の際にあまり散乱を受けないためスピン拡散長は平均自由行程よりかなり長く、強磁性金属で5-10nm、非磁性金属では100nm-1 μ mもあります。
- ▶ 非磁性の誘電体ではmmに達するものもあります。



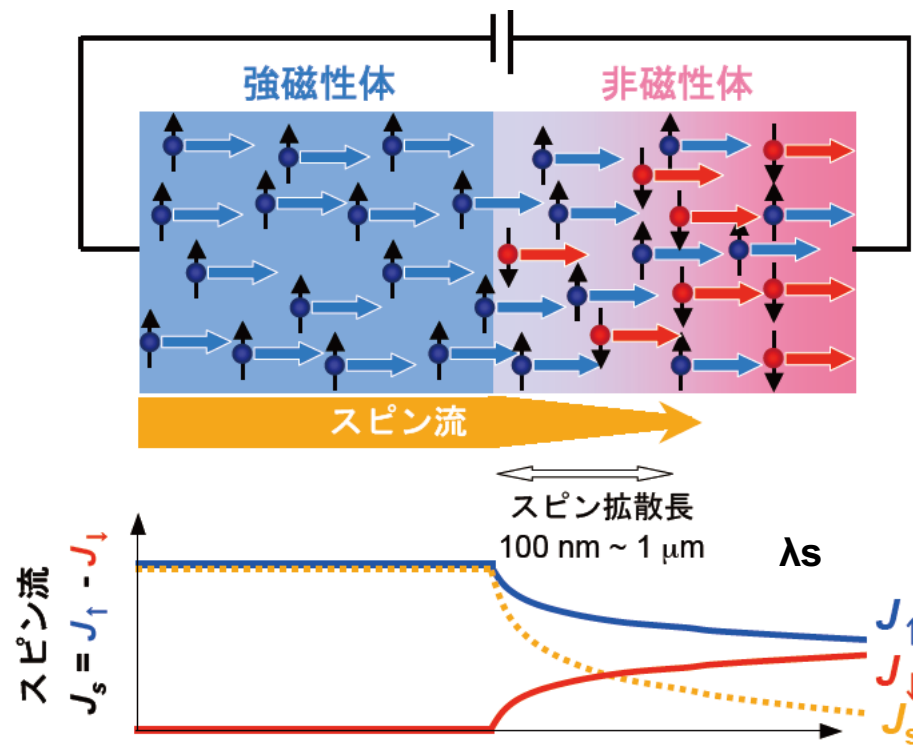
図は東北大高梨弘毅先生のご厚意による

ナノスケールでの
磁気変調構造

↓
スピン依存伝導
(GMR)

ナノ磁性と密接不可分

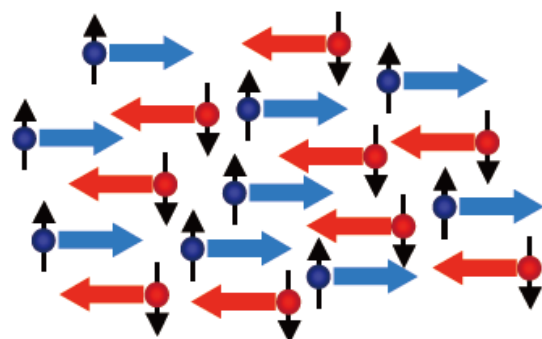
(1) 電流を伴うスピンの流



図は東北大高梨弘毅先生のご厚意による

- ▶ **非磁性体**の中では本来↑スピンと↓スピンの電子の数は等しいのです。
- ▶ 強磁性体から↑スピンをもつ電子が非磁性体への移動すると、界面からスピン拡散長 λ_s 離れたところまでは↑スピンの数と↓スピンの数がアンバランスな状態が生じます。
- ▶ このことを**スピン注入**が起きているといいます。

(2) 電流を伴わないスピンの流



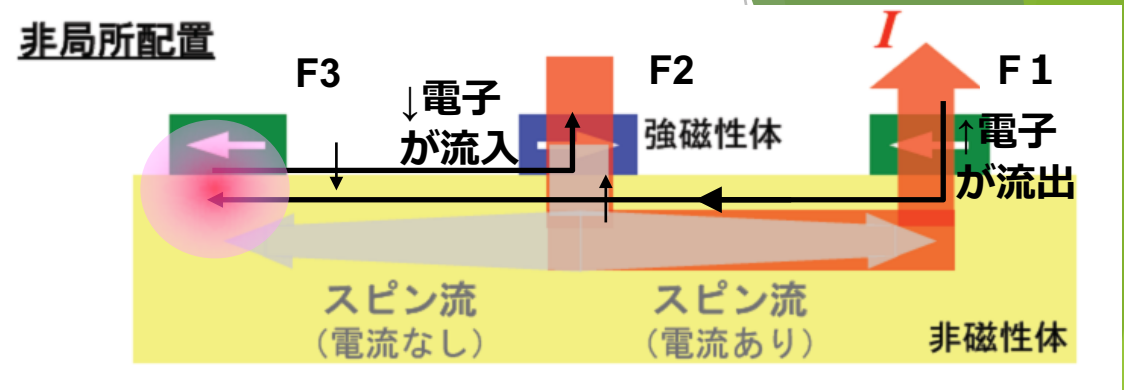
$$J_e = J_{\uparrow} + J_{\downarrow} = 0$$
$$J_s$$

非局所スピン注入
スピホール効果

- ▶ ↑スピンの電子が右方向に進み↓スピンの電子が左方向に進むとすれば、電荷の流れとしての電流は流れません。
- ▶ 一方、スピンだけを見ると、↑スピンは右側に、↓スピンは左側に流れますから、 $J_{\uparrow} - J_{\downarrow}$ で定義されるスピンの流は右に向かって流れるのです。
- ▶ これが純スピン流です。

図は東北大高梨弘毅先生のご厚意による

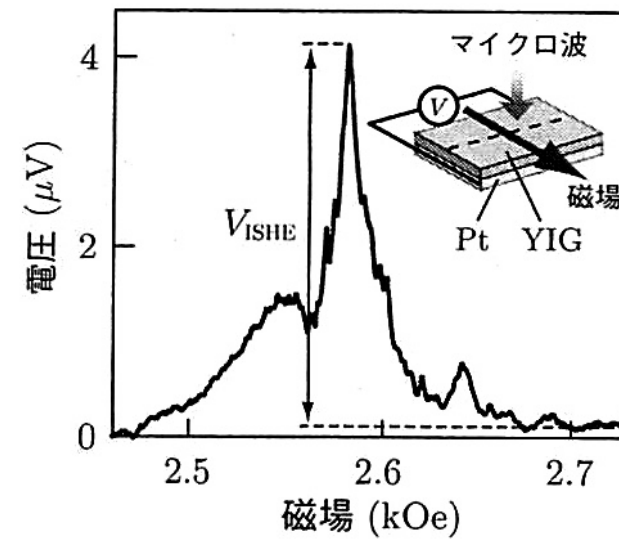
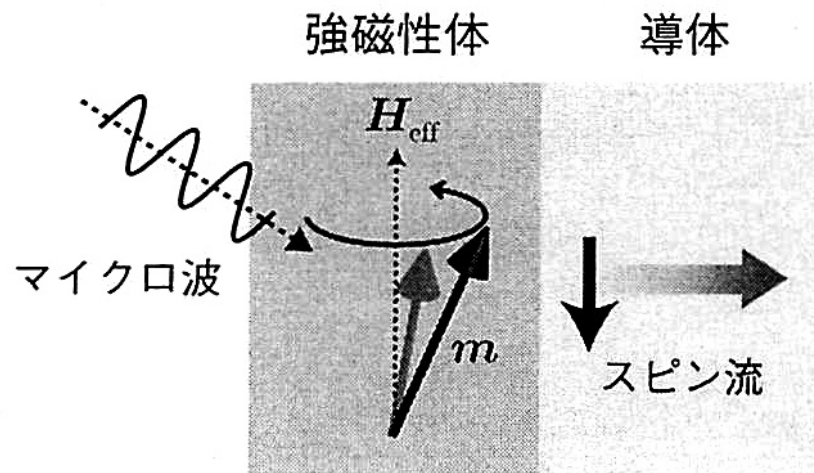
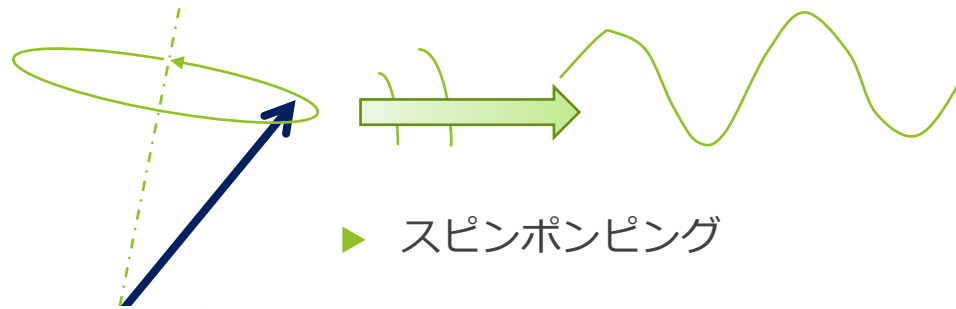
スピン流を作る



- ▶ 非磁性体に、3つの強磁性電極をつけて、F2の磁化はF1に反平行、F3の磁化はF1に平行としましょう。
- ▶ このとき、F2からF1に電流を流すと、F1から非磁性体に注入された↑スピン電子はF2には入れませんからF2・F3間に流れ出します。
- ▶ それでもF2からF1に電流を流さなければなりませんから、F2・F3間から↓スピン電子が流れ込みます。この結果、F2・F3間には正味の電流は流れませんが、スピン流 ($J_{\uparrow} - J_{\downarrow}$) は左に流れます。
- ▶ この結果、F3付近には**スピンの蓄積**が起きます。

東北大高梨弘毅先生の作られた図に書き加えました。

スピン流を作る

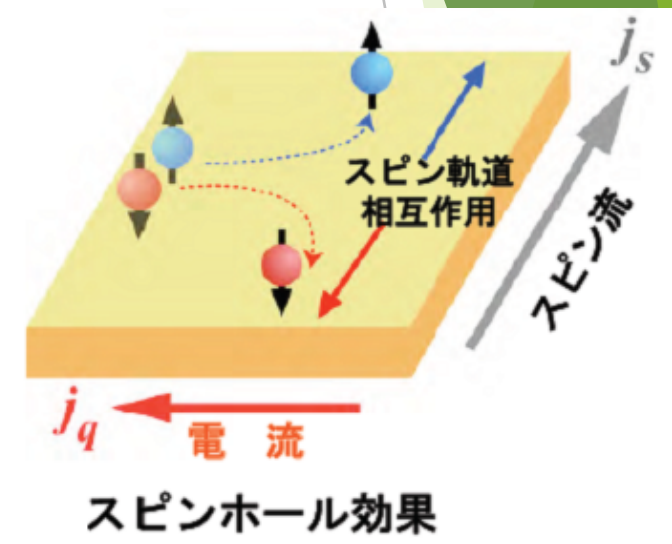


スピン流を観る

(1) スピンホール効果

- ▶ スピン流の性質を端的に表しているのがスピンホール効果です。
- ▶ 普通のホール効果は磁界下に置かれたキャリアがローレンツ力で電流に垂直な方向に曲げられる効果です
- ▶ スピンホール効果では、電流が流れるだけで、スピン軌道相互作用の効果で↑スピンと↓スピンの分離され、電流 j_q と垂直方向にスピン流 j_s を生じるのです。

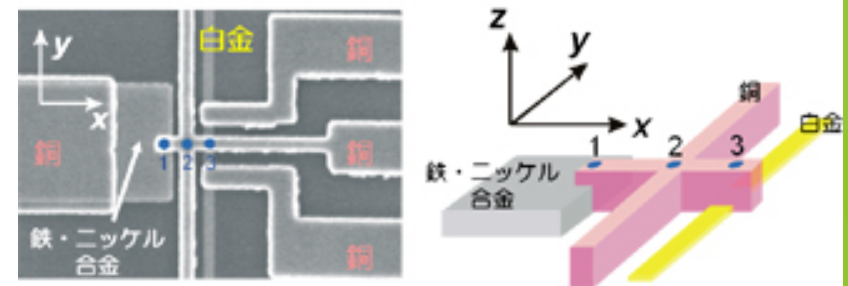
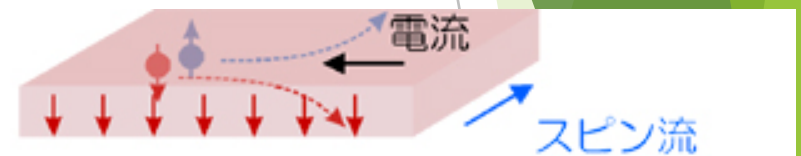
S. Murakami, N. Nagaosa, S.C. Zhang: Science 301 (2003) 1348.



図は東北大高梨弘毅先生のご厚意による

スピンホール効果の実験

- ▶ 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。



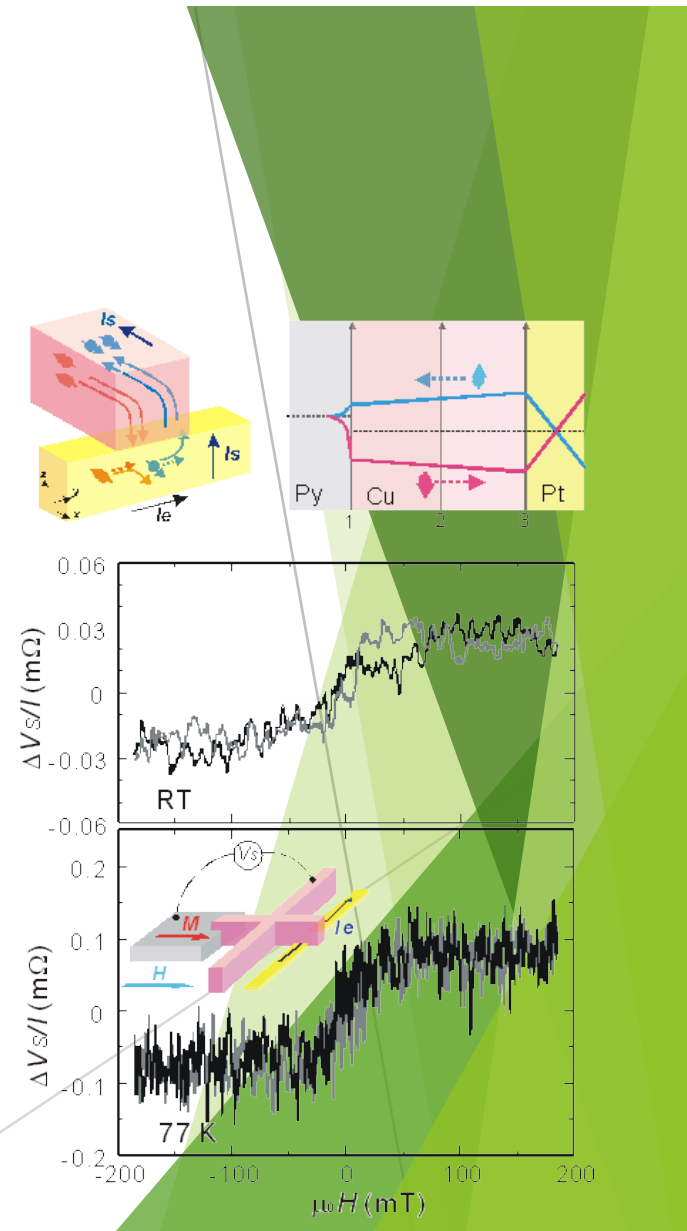
(図) スピン流(上)とスピンホール効果の計測システム(下)

独立行政法人 理化学研究所

プレスリリース 2007.4.12

スピンホール効果の検出結果

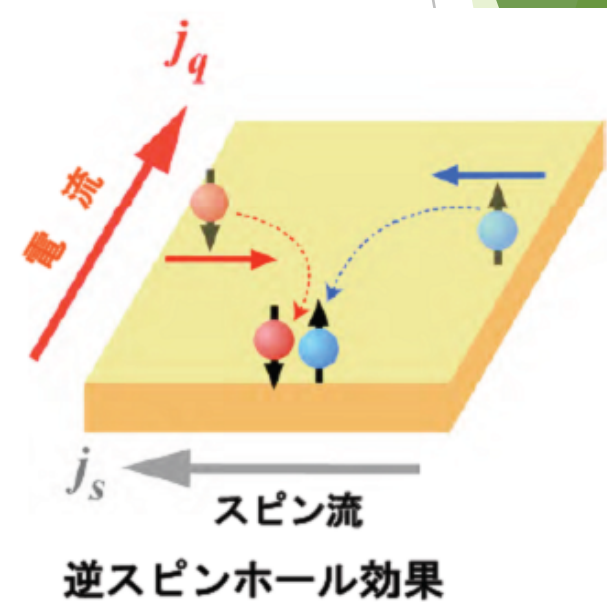
- ▶ 図2(b)に、室温、および77 K (ケルビン) での電圧の磁場依存性を示します。上述したようにスピン分極の大きさは電圧として測定されますが、その大きさは投入された電流の大きさ I_e に依存してしまうので、ここで縦軸は、電圧 ΔV を白金細線内に流す電流 I_e で除することで抵抗の単位 ($\Delta V/I_e$) に変換して示しています。
- ▶ また、横軸は外部から印加した磁場の大きさを表します。(b) 磁場をx軸正方向に加えてパーマロイの磁化をスピン分極と平行に配向させると抵抗が最大に、また、負方向の磁場を加え磁化を反転させると抵抗が最小になりました。
- ▶ つまり、前述の通り、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 $2.4 \times 10^4 (\Omega\text{m})^{-1}$ 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트로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



スピン流を観る

(2) 逆スピンホール効果

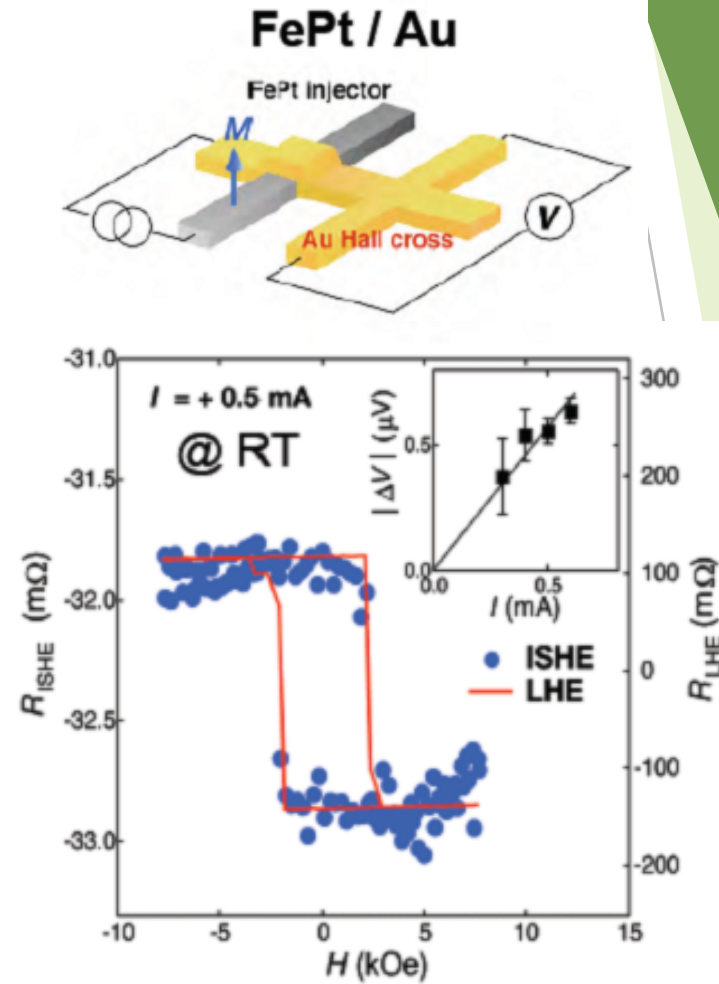
- ▶ スピンホール効果と逆にスピン流 j_s を流すと、垂直方向に電流 j_q が流れる効果があります。
- ▶ スピン軌道相互作用の効果で \uparrow スピンは左に、 \downarrow スピンは右に曲げられます。その結果、スピン流 j_s と垂直方向に電流 j_q が生じるのです。



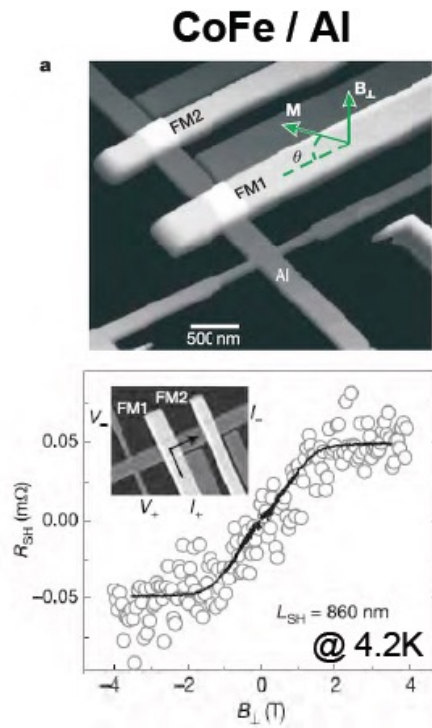
図は東北大高梨弘毅先生のご厚意による

逆スピンホール効果の実験

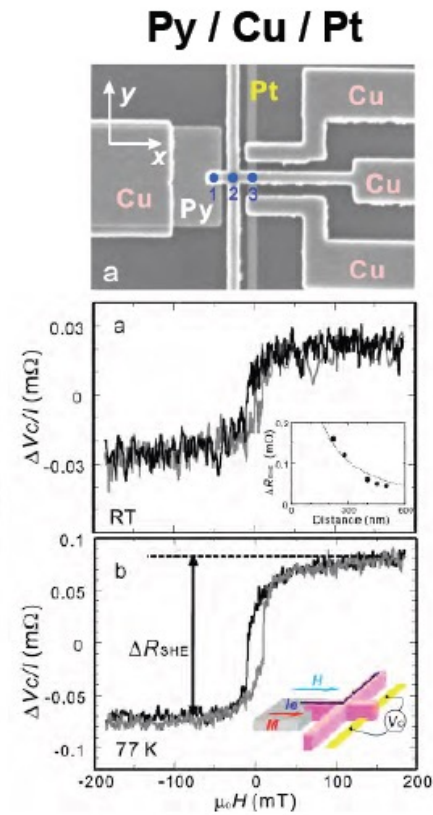
- ▶ 非局所配置において、磁性金属から非磁性金属にスピン流を流すと、逆スピンホール効果のために直交する金属の両端に電圧が生じる。



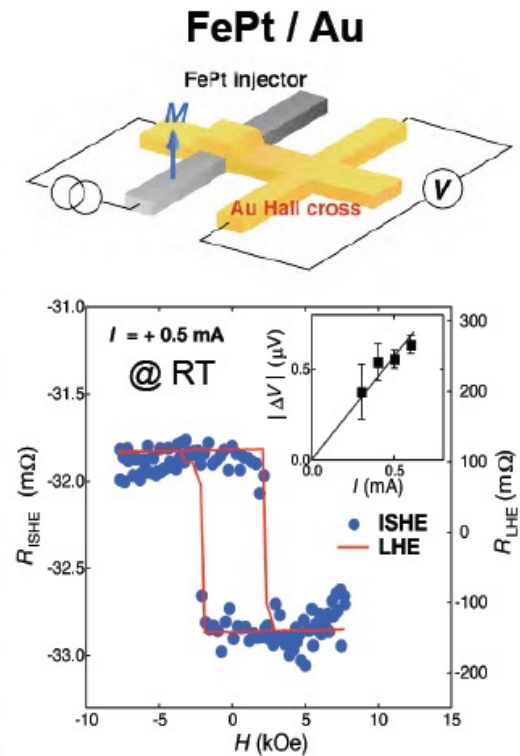
スピンホール効果



S. O. Valenzuela, M. Tinkham,
Nature **442**, 176 (2006).



T. Kimura *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*,
98, 156601 (2007).



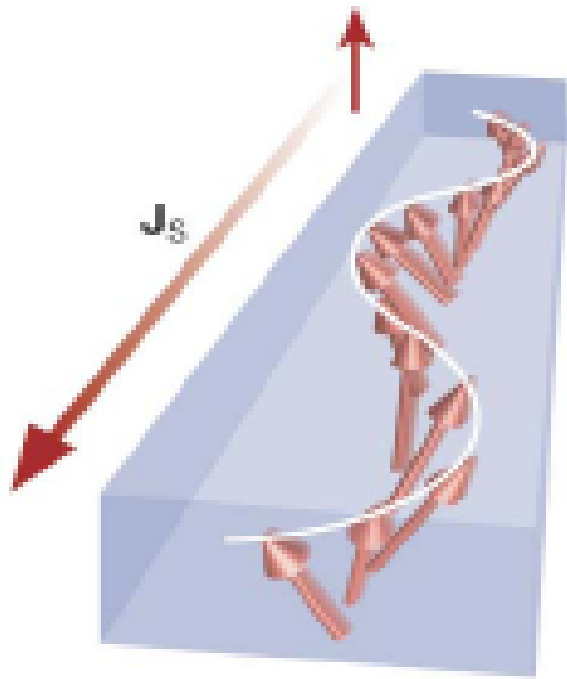
$\alpha_H \sim 0.1$

T. Seki *et al.*, **14pC-11**

東北大高梨弘毅先生のご厚意による

スピン波スピン流が電気を運ぶ

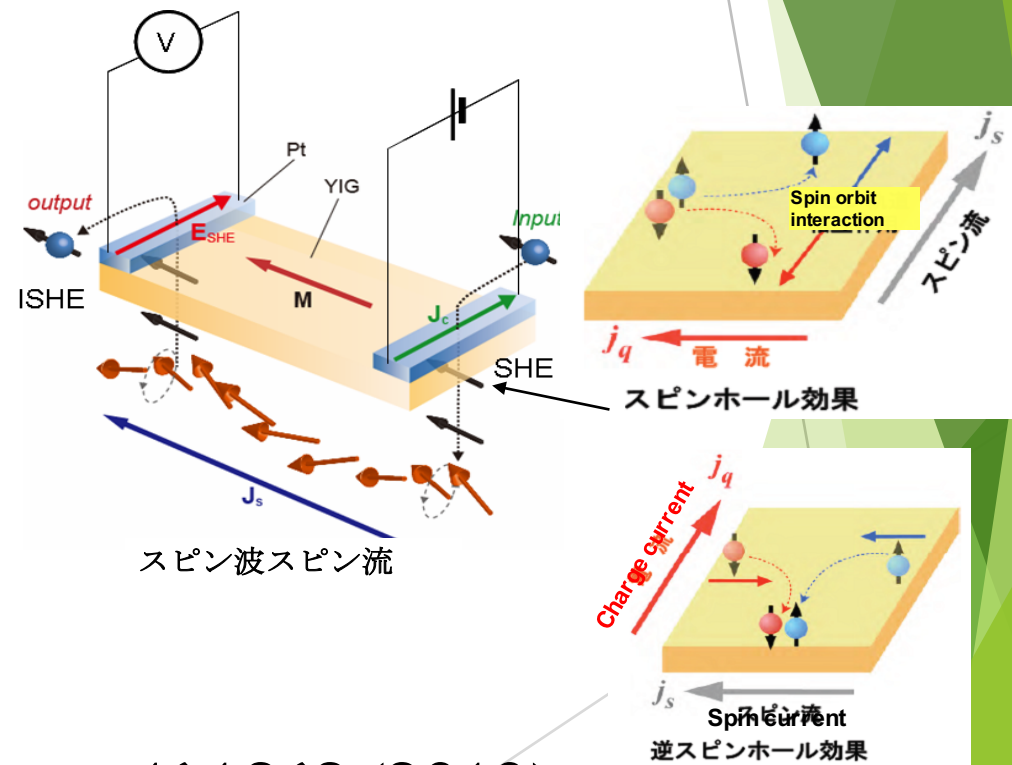
スピン波スピン流



スピン波とは磁性体中の磁化の波であり、ある種のスピン波はスピン流(スピン角運動量の流れ)を運ぶことができる。

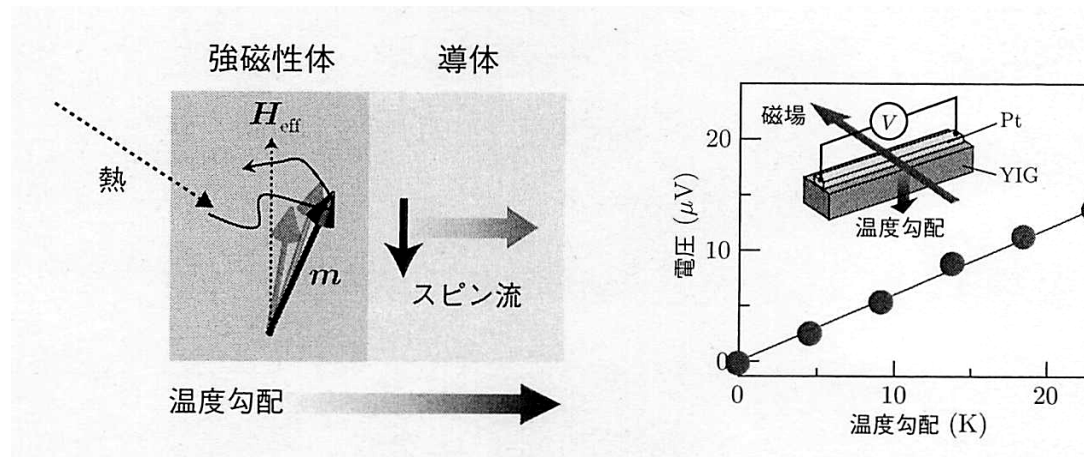
絶縁体が電気を通す？

- ▶ 白金電極に電流を流すと垂直方向にスピン流が発生、
- ▶ これが磁性絶縁体のスピン波を誘起、スピン波が伝搬して対抗電極にスピン流を起こし、
- ▶ 逆スピンホール効果で電流に変換



Y.Kajiwara et al., Nature 464 262 (2010)

熱スピンの流が電気を起こす —スピンゼーベック効果—



スピンゼーベック効果の概念図

磁性体に白金電極を取り付け、膜面に垂直に温度勾配をつけながら白金薄膜に生じる電圧を測定。

スピンゼーベック効果で白金にスピン流が注入され次いで逆スピンホール効果によって電圧に変換される。

スピンゼーベック効果の機構

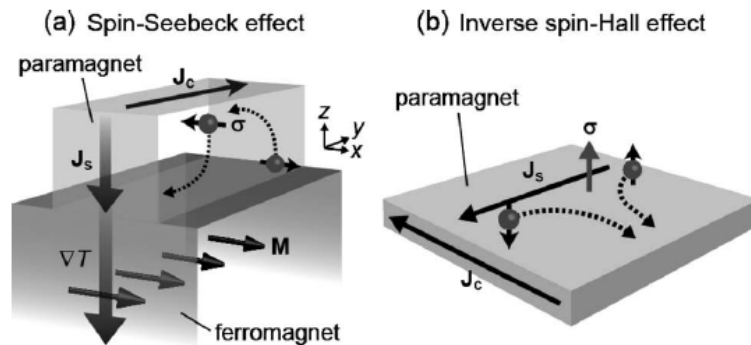
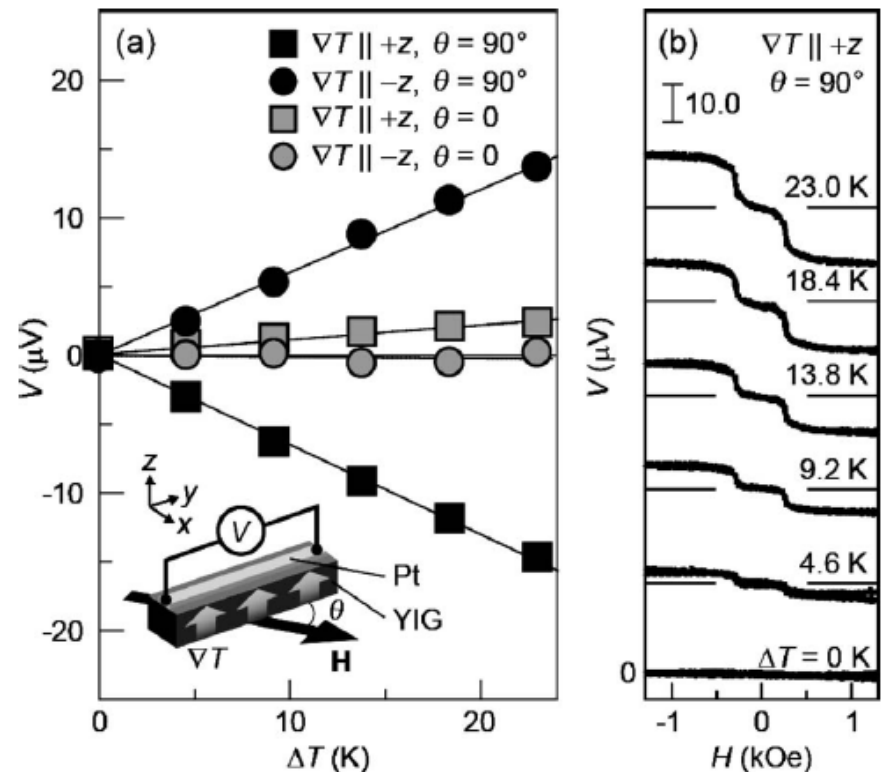
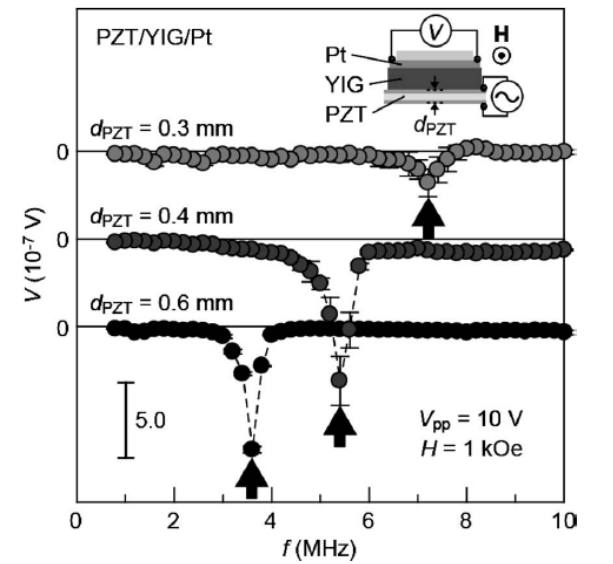
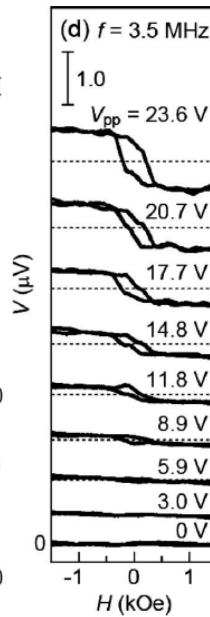
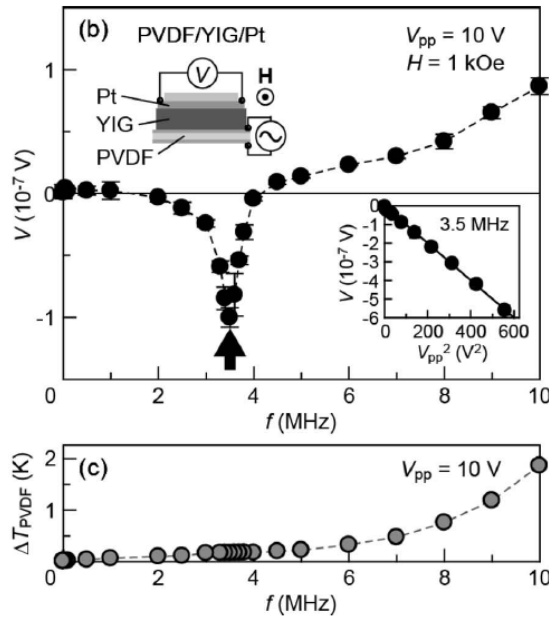
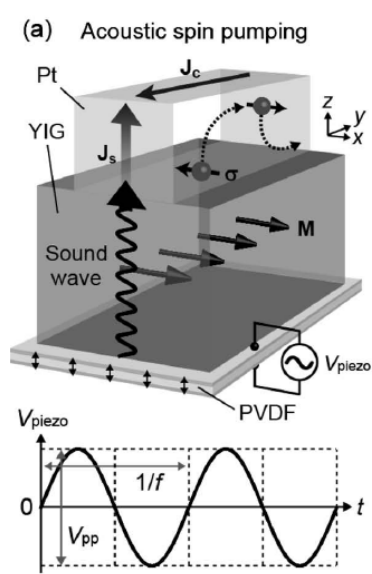


Fig. 1(a)に模式的に示したような強磁性体/常磁性体接合構造に温度勾配を付けた状況を考える。スピンゼーベック効果が発現すれば、強磁性層に生じたスピン圧によって常磁性層にスピン流が誘起される。このスピン流の起源は、強磁性中の局在スピン（マグノン）系と常磁性体中の伝導電子系との間に誘起される熱的非平衡性である



音響スピンプンピング



温度勾配を付ける代わりに，磁性絶縁体に音波を注入することでもマグノン有効温度を変調でき，スピンプを生成可能

K. Uchida, H. Adachi, T. An, T. Ota, M. Toda, B. Hillebrands, S. Maekawa, and E. Saitoh: Nature Mater., 10,737 (2011).

熱と音響の利用

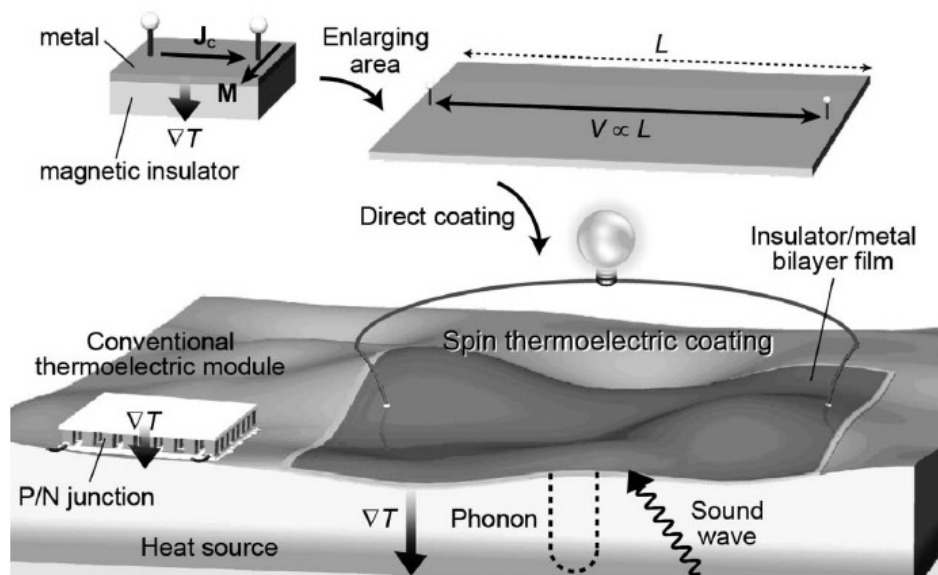


Fig. 6 Conceptual illustration of voltage generator based on SSE and ASP.

A. Kirihara, K. Uchida, Y. Kajiwara, M. Ishida, Y. Nakamura, T. Manako, E. Saitoh, and S. Yorozu: Nature Mater., 11, 686 (2012).

スピンゼーベック効果や音響スピンプンピングに基づくスピン流生成は、既存のエネルギー利用技術とは全く異なる原理に基づくものであり、

- (1) 絶縁体からもスピン圧・電圧を生成可能
- (2) 熱・音波を単一デバイス構造において同時利用可能
- (3) シンプルな二層構造であるので、大面積化・積層構造化が容易で低コストなどの希少な特性を有する。

このような新規性を活かしたスピン流発電を実現するための要素技術として、2012年にNEC社との共同で、塗布プロセスにより作製したスピンゼーベック素子の動作実証実験を報告している

K.Sato and E.Saitoh eds. Spintronics for Next Generation Innovative Devices



- ▶ John Wileyから2015年6月22日刊行
- ▶ さきがけ「次世代デバイス」領域のスピントロニクス研究者による最新の研究成果を解説

熱い視線を浴びる発展途上分野

- ▶ このように、スピン注入、スピン蓄積、スピン緩和などスピン流の制御は、CMOSに代表されるSiのデバイスが限界を迎えつつあるいま、それに代わる新しい革新的次世代デバイス技術の芽として熱い視線を浴びているのです。
- ▶ スピン科学は、ナノという舞台を得て、大きく育ちつつあります。Nagaosaは、強磁性体における異常ホール効果をベリー位相という量子論の深淵のコンセプトで説明し、彼は固体の中に宇宙論が成立すると言っています [i]。
- ▶ この分野は進歩が速すぎて一時も目が離せないほどです。理論と実験がかみ合って、新しい世界が開かれる予感を感じます。

[i] 永長直人：固体物理41 (2006) 877, 同42 (2007) 1, 同42 (2007) 487.