



スピンの世界へようこそ！

～スピントロニクスのための磁性の基礎からスピントロニクスの今後まで～
第2部・第3部

工博 佐藤勝昭
国立大学法人 東京農工大学名誉教授

独立行政法人 科学技術振興機構 (JST)
さきがけ「次世代デバイス」研究総括



CONTENTS

1. 10:00–12:00 知っているのと得をする磁性の基礎
2. 13:00–13:45 コイルなしに磁気を電気に変える
3. 13:50–14:20 コイルなしに電気を磁気に変える
休憩
4. 14:40–15:15 スピン流がパラダイムを変える
5. 15:20–15:50 スピントロニクス材料
6. 15:55–16:10 まとめと今後のスピントロニクス
- 16:10–16:30 質疑応答・名刺交換
 - 質問は各セクションでも受け付けます。



スピントロニクスと磁性学の違い

- ▶ 物質の磁氣的性質は電子のもつ軌道運動とスピンのもたらしていますが、磁性学(magnetism)は物質の磁氣的性質のみを対象とし、電気伝導などの輸送現象との関係はあまり重視してきませんでした。
- ▶ 電子スピンの電気輸送現象に及ぼす効果が磁気抵抗効果です。電気輸送を通じて電子スピンの磁性に及ぼす効果がスピントランスファートルクです。スピントロニクスはこの両者を含めた概念です。



電気と磁気の相互変換

- ▶ これまで、電気→磁気、磁気→電気の変換にはいずれも電磁気学、したがって、コイルが使われておりました

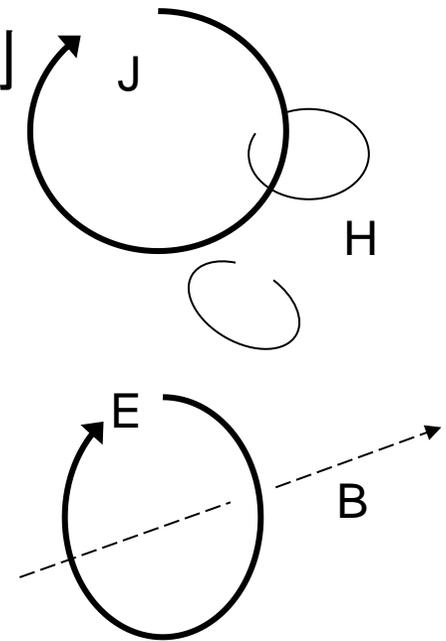
- ▶ 電気→磁気: アンペールの法則

$$\nabla \times \mathbf{H} = \partial \mathbf{D} / \partial t + \mathbf{J}$$

- ▶ 磁気→電気: ファラデーの電磁誘導の法則

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t$$

- ▶ スピントロニクスは
電気と磁気の相互変換から
コイルを追放します。



2. コイルなしに磁気を電気に変える



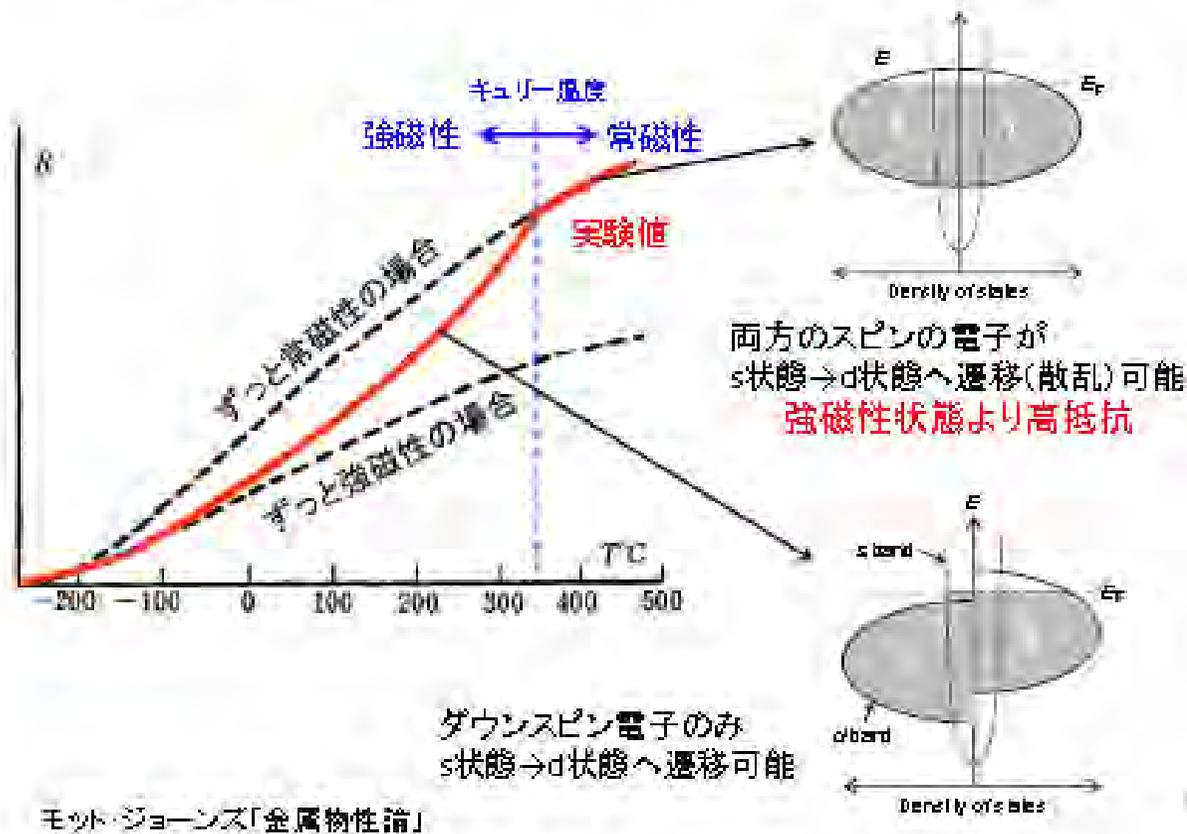
1960年代から知られていた電気輸送と磁気の関係

- ▶ Niの T_c 直下での抵抗の温度係数の増大: スピン2流体モデルとスピン散乱で説明されていました。
 - ▶ A. Fert and I.A. Campbell: Phys. Rev. Lett. 21 (1968) 1190.
- ▶ 強磁性体のAMR(異方性磁気抵抗効果)や異常ホール効果も1950年代から知られていました。
 - ▶ R.Karplus and J.M. Luttinger: Phys. Rev. 95 (1954) 1154
- ▶ 磁性半導体 $CdCr_2Se_4$ や EuO において T_c 付近ではスピンの揺らぎによる散乱が電気抵抗の増大をもたらすこと、磁界を加えると揺らぎが抑えられて電気抵抗が下がることがわかっていました。
 - ▶ C. Haas: Phys. Rev. 168, 531–538 (1968)
- ▶ しかし、そのころの認識では、これらは「作りつけ」の効果であって、人間が制御できるとは考えもしませんでした。



スピン依存散乱 ～Niの電気抵抗率の温度依存性～

スピン依存伝導 ～Niの抵抗率の温度変化～



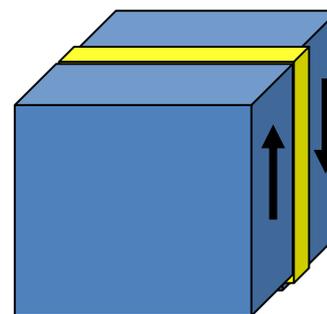
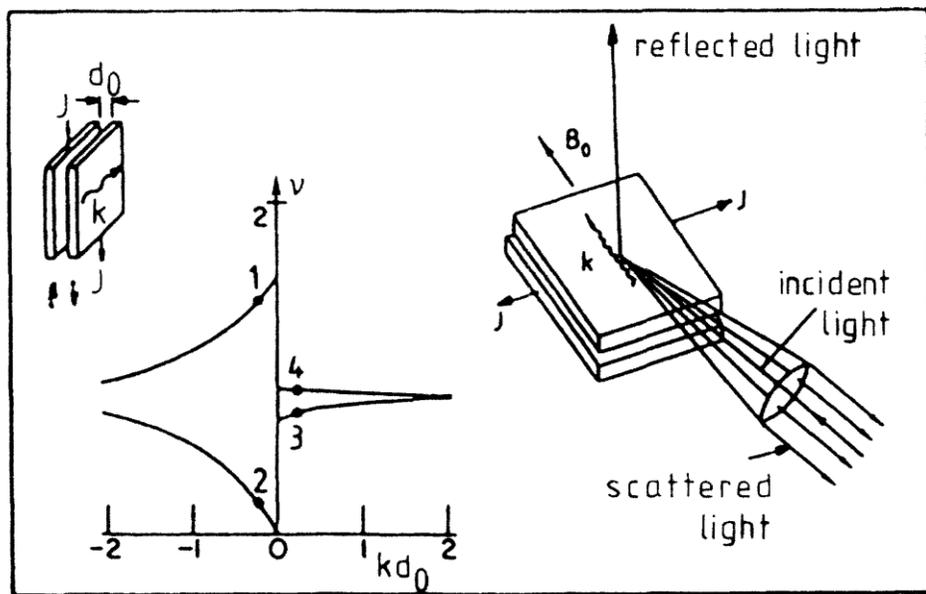
ナノサイエンスと磁性電子の出会い(1)

- ▶ 江崎によって拓かれた半導体超格子をはじめとするナノテクノロジーは、半導体における2次元電子ガス、量子閉じこめ、バンド構造の変調など半導体ナノサイエンスを切りひらき、HEMT, MQW レーザなど新しい応用分野を拓きました。
- ▶ 電子のドブロイ波長は半導体においては10nmのオーダーと長い
ため、比較的大きなサイズの構造の段階で量子効果が現れましたが、磁性体の3d電子はnm程度の広がりしか持たないため、nm以下の精密な制御が可能になった80年代まで待たねばなりませんでした。

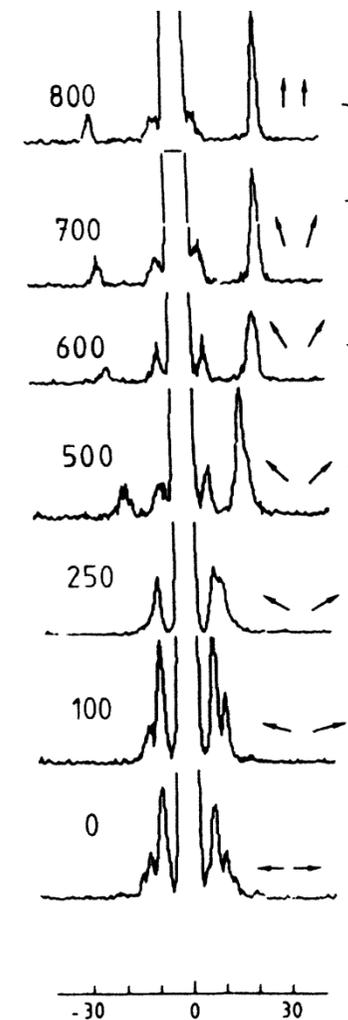


ナノサイエンスと磁性電子の出会い(2)

- ▶ 1986年ドイツのグリーンベルグのグループは、Fe/Cr(8 Å)/Feの構造において、Feの2層の磁化が途中の非磁性金属を通して反強磁性的に結合していることを(光散乱法を使って)発見しました。



P. Grünberg, R. Schreiber and Y. Pang: Phys. Rev. Lett. 57 (1986) 2442.

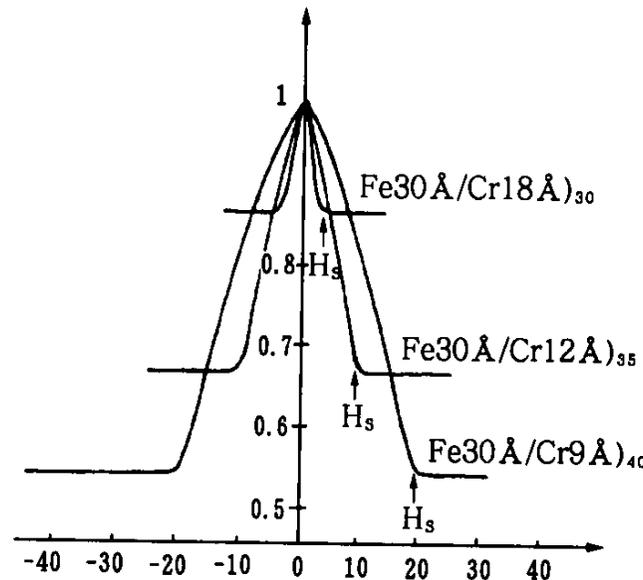
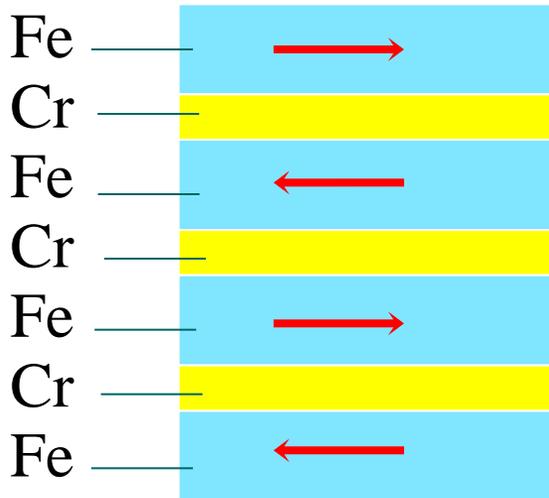


巨大磁気抵抗効果(GMR)の発見(1)

- ▶ フランスのフェールは、Fe/Cr/Fe₃層膜での反平行結合の実験結果を受けて、磁界印加で電気抵抗が低下するはずと確信。
- ▶ 1988年、Fe/Cr人工格子において電気抵抗値の50%もの大きな抵抗変化を発見し巨大抵抗効果GMRと名付けました。



アルベール・フェール博士

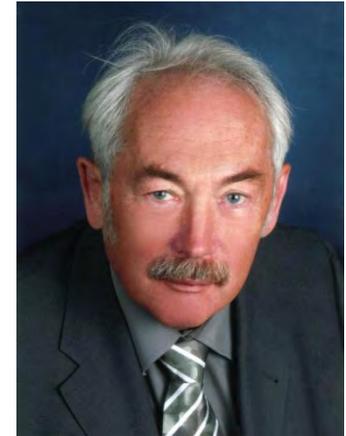


M.N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Eitenne, G. Creuzet, A. Friedrich, J. Chazelas: Phys. Rev. Lett. 61 (1988) 2472.

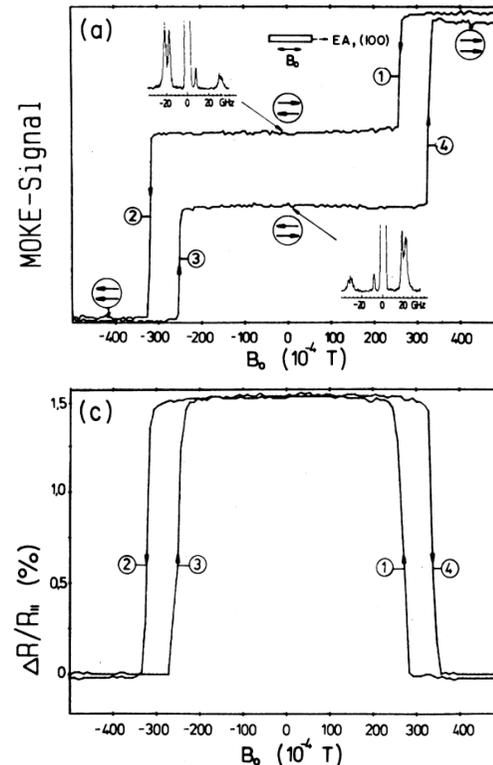
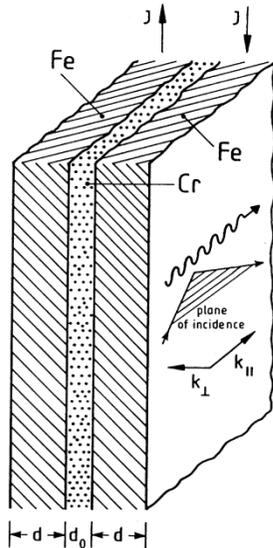


巨大磁気抵抗効果(GMR)の発見(2)

- ▶ 同じ時期、グリーンベルグのグループもFe-Cr-Feの3層膜で磁界印加による電気抵抗の低下を発見しましたが、その大きさは1.5%という小さなものでした。



ペーター・グリーンベルク博士

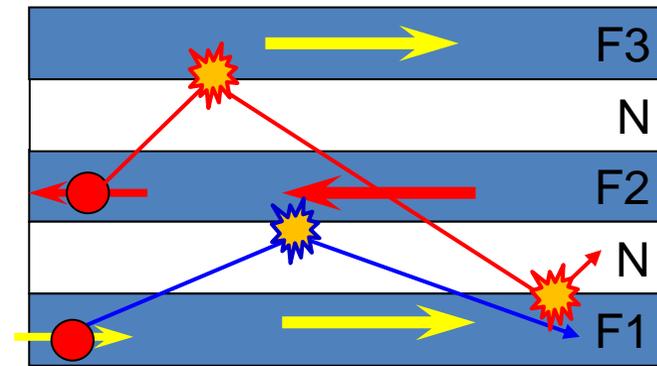
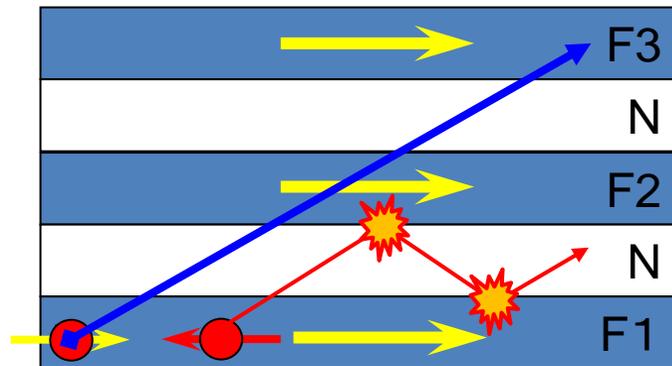


G. Binasch, P. Grünberg, F. Saurenbad, W. Zinn: Phys. Rev. B 39 (1989) 4828.



巨大磁気抵抗効果GMRの原理

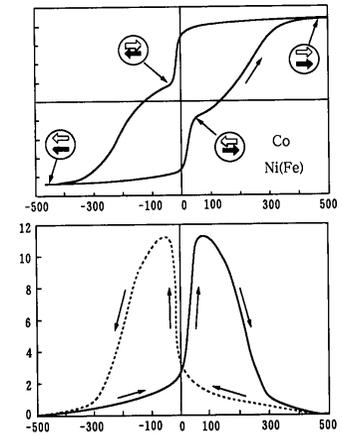
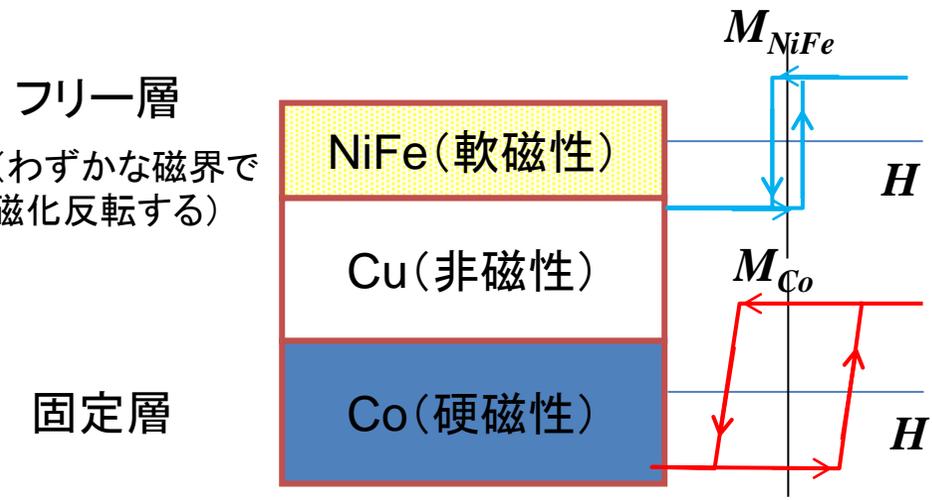
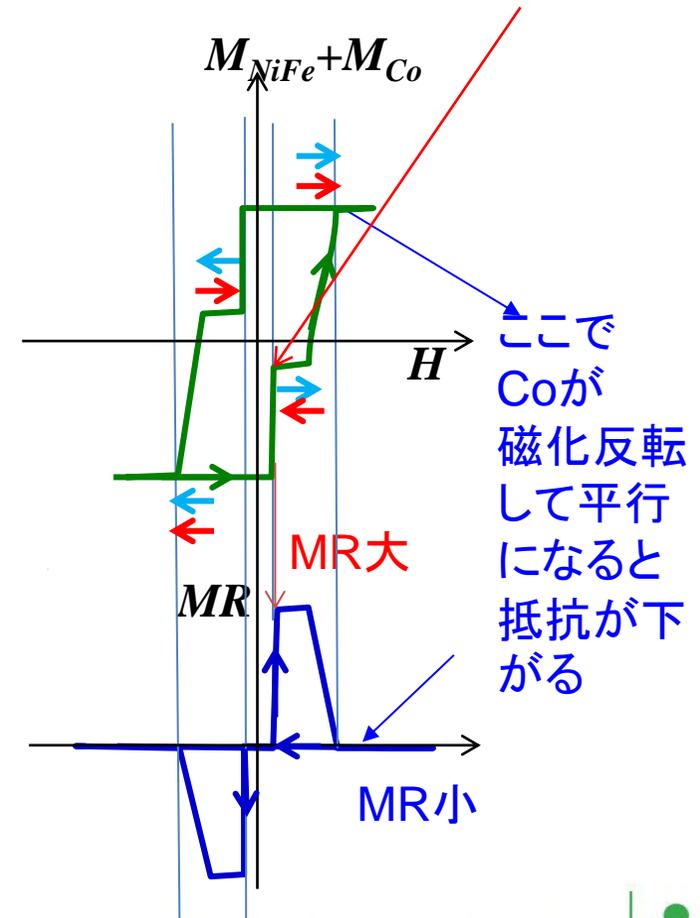
- ▶ フェールはGMRについて次のように説明しました。
- ▶ 強磁性体(F)/非磁性金属(N)/強磁性(F)/・・・の構造を考えます。
- ▶ F層同士の磁化が平行なら多数スピン電子は散乱を受けず、少数スピン電子のみ散乱されますから低抵抗です。
- ▶ 隣り合うF層の磁化が反平行だとどちらのスピンを持つ電子も散乱を受けるので高抵抗です。



非結合系でも保磁力が異なればGMRが出る

- ▶ 新庄らは、ソフト磁性体とハード磁性体との3層構造を作れば、弱い磁界でも反平行状態をすることができ、大きな磁気抵抗効果が得られることを見いだしました。1990年のことです。

ここでNiFeは磁化反転するがCoは反転しないので反平行→抵抗高い。

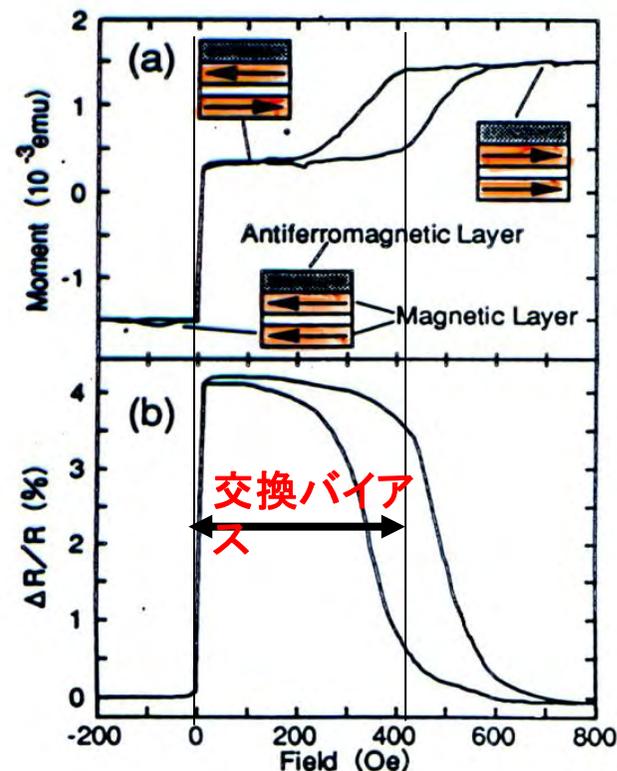
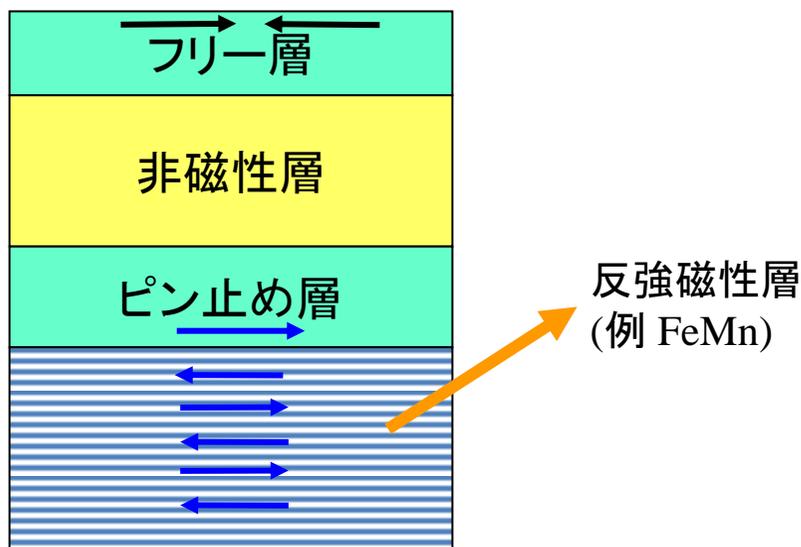


(強い磁界をかけないと磁化反転しない)



スピバルブ

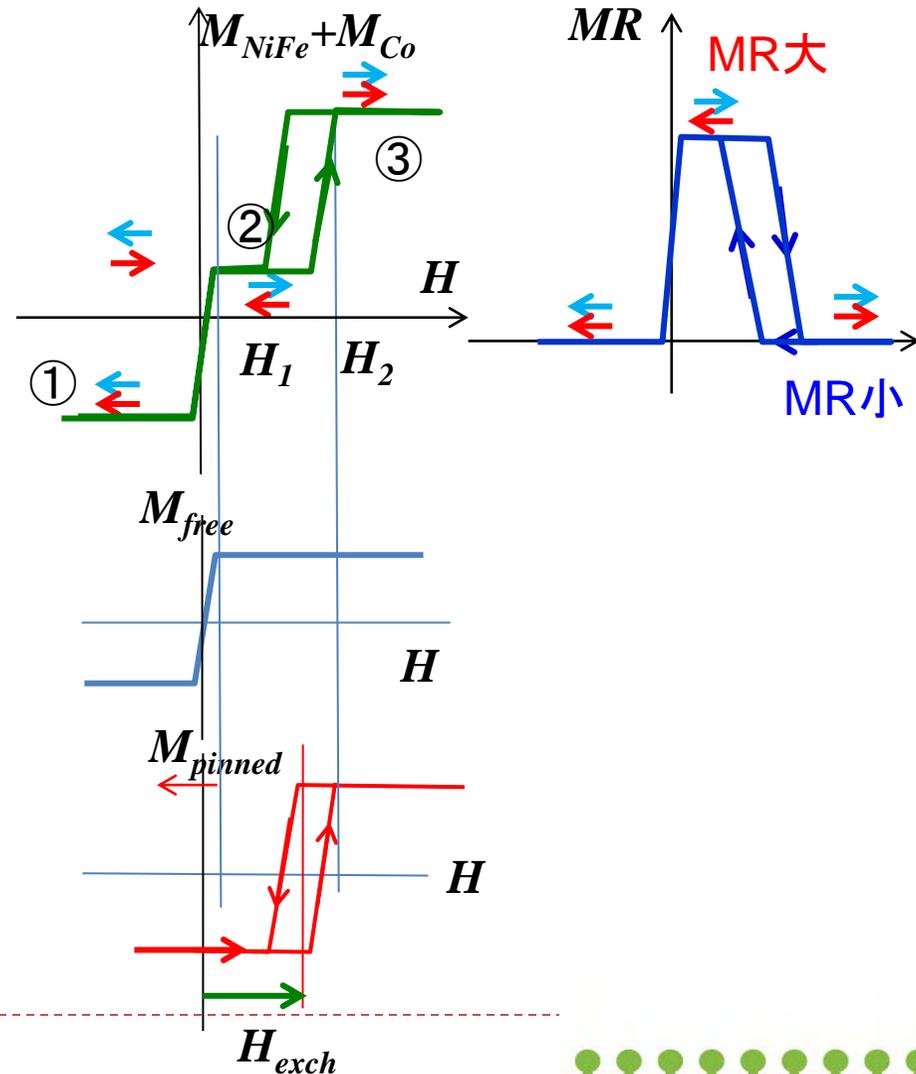
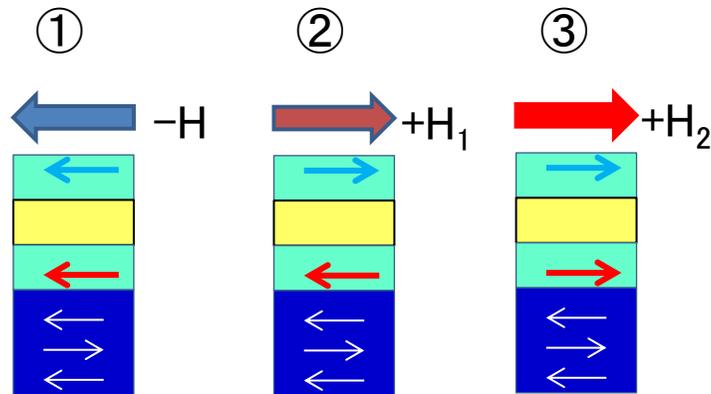
- ▶ IBMのParkinらは、非磁性層を挟む二つの磁性層に同じパーマロイを用いながら、片方だけに反強磁性体をつけることで、ピン留め層としたNiFe/Cu/NiFe/FeMnの非結合型サンドイッチ構造をつくりスピバルブと名付けました。
- ▶ 反強磁性体と強磁性体の交換結合による交換バイアスを用いることにより、わずかな磁界でフリー層が反転する高感度なセンサーが実現しました。



S. S. P. Parkin, Z. G. Li and David J. Smith: Appl. Phys. Lett. 58 (1991) 2710.



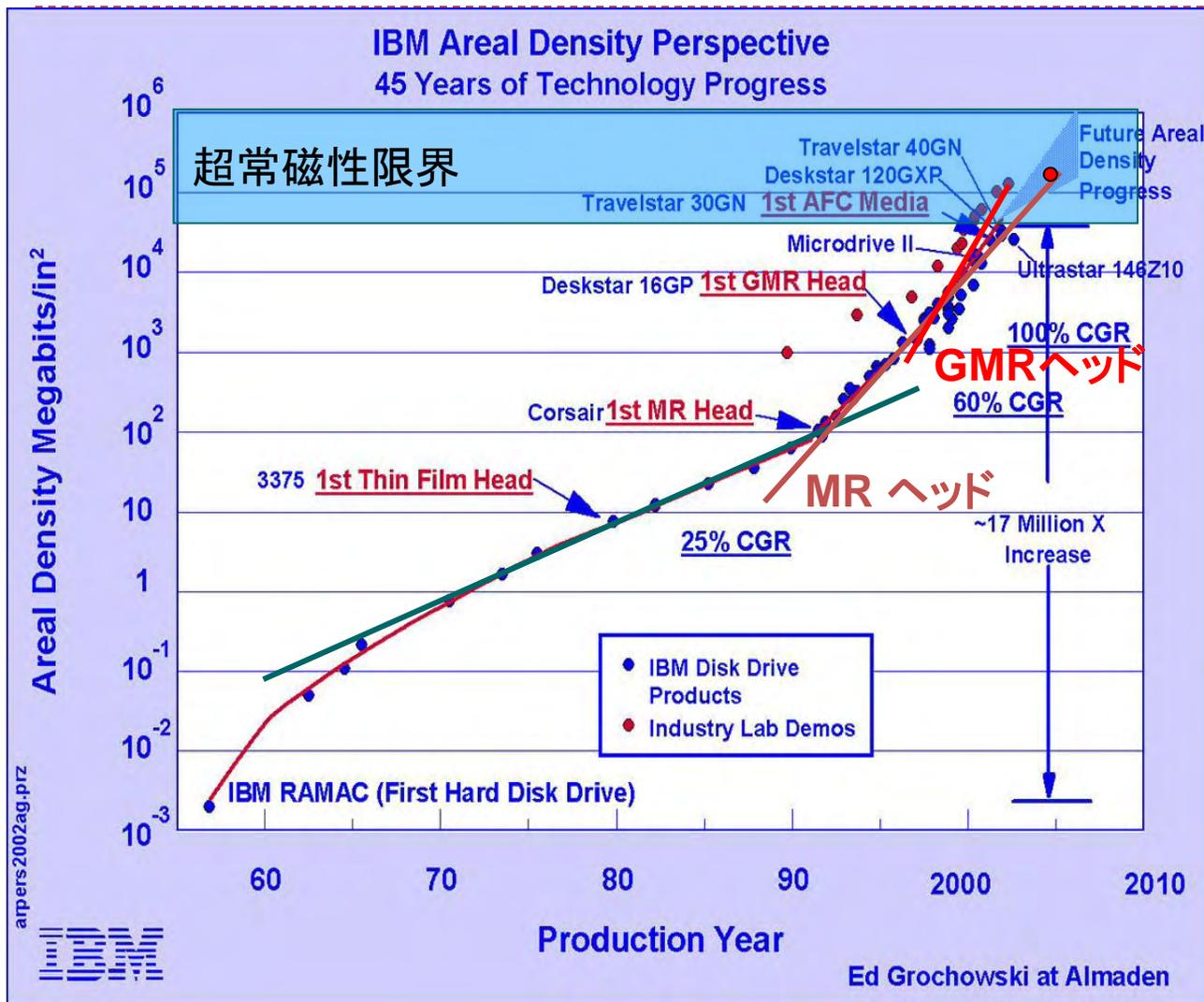
スピンバルブのキモは交換バイアス



交換バイアスとは、強磁性体が反強磁性体と界面で交換結合しているために見かけ上働く磁界のこと。



スピバルブがハードディスクを変えた



▶ Spin Valveの導入によって、微細な磁区から生じるわずかな磁束の検出が可能になり、HDDの高密度化が非常に加速された。



HDの記録密度の状況



- ▶ HDの記録密度は、1992年にMRヘッドの導入によりそれまでの年率25%の増加率(10年で10倍)から年率60%(10年で100倍)の増加率に転じ、1997年からは、GMRヘッドの登場によって年率100%(10年で1000倍)の増加率となっています。
- ▶ **超常磁性限界**は、 $40\text{Gb}/\text{in}^2$ とされていたが、AFC(反強磁性結合)媒体の登場で、これをクリアし、実験室レベルの面記録密度は2003年時点ですでに $150\text{Gb}/\text{in}^2$ に達しました。しかし、面内磁気記録では十分な安定性を確保できず、市場投入された $133\text{Gb}/\text{in}^2$ を超える高密度記録は、垂直磁気記録によって実現しました。その後、 $200\text{Gb}/\text{in}^2$ のHDDが投入され、 $1\text{Tb}/\text{in}^2$ に向けて開発が進んでいます。
- ▶ Y.Tanaka: IEEE Trans Magn. 41 (2005) 2834.

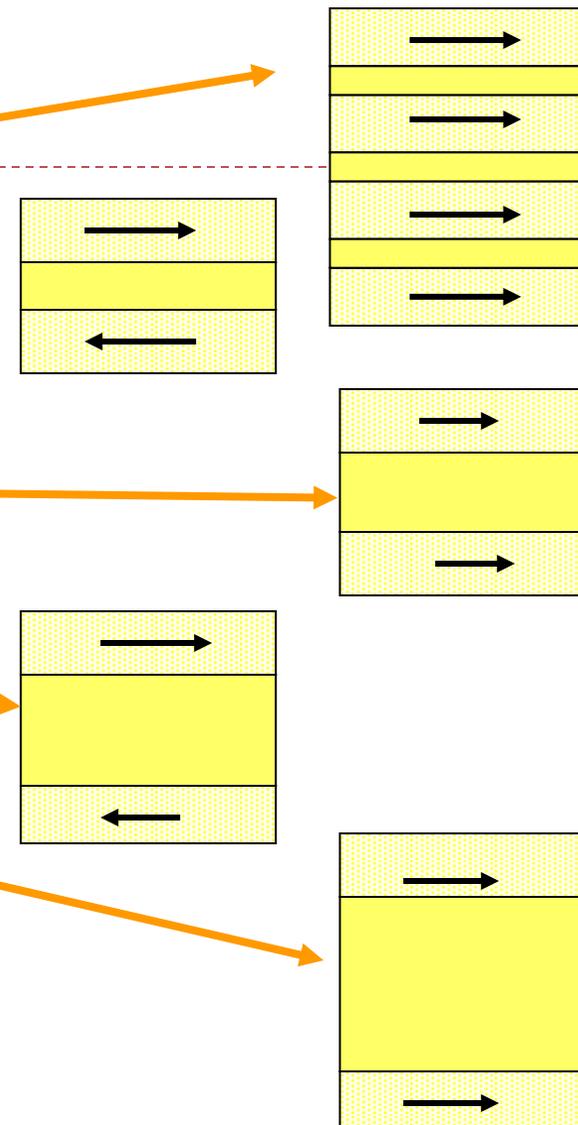
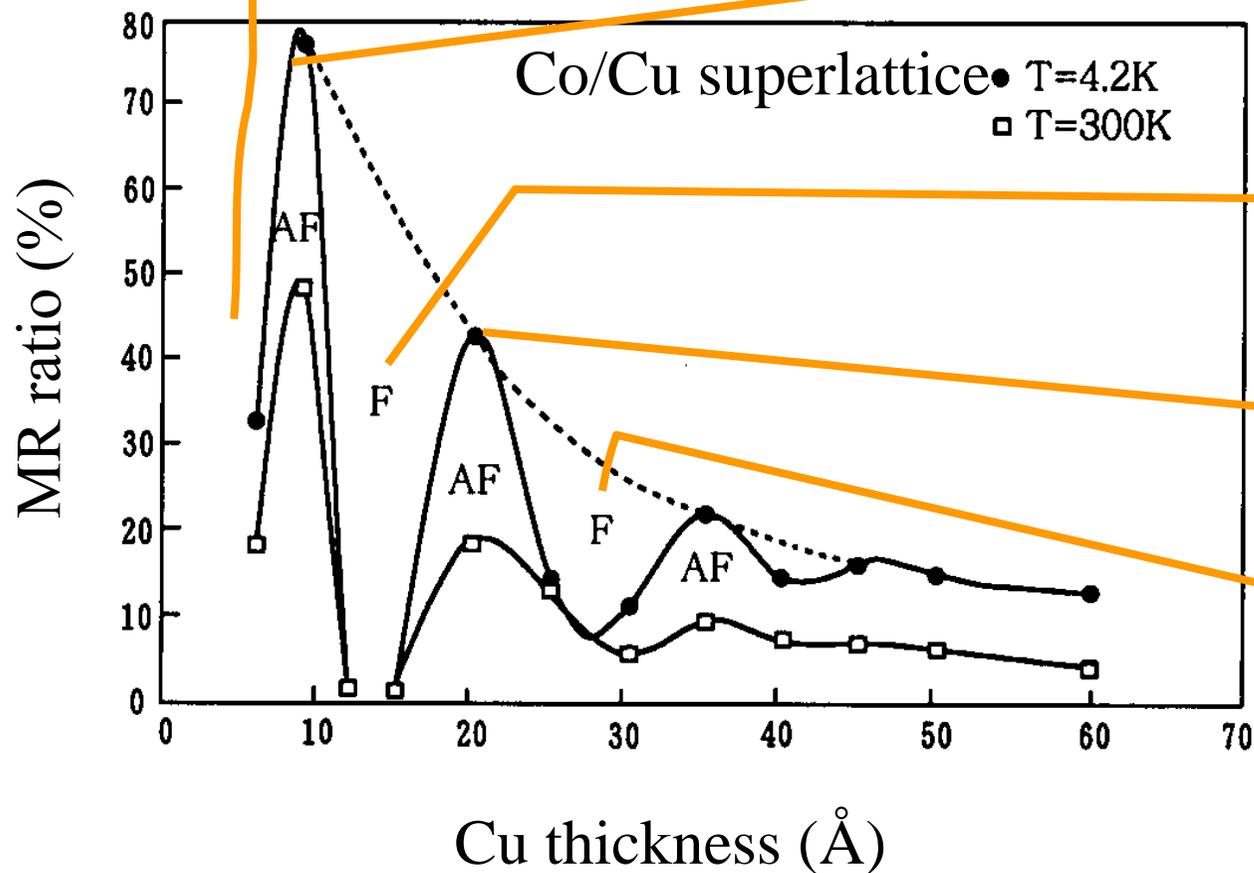


交換相互作用さえも人工的に制御

- ▶ 同じ時期に、磁性／非磁性の人工格子において、磁性層間に働く交換相互作用が非磁性層の層厚に対して数ナノメートルの周期で、強磁性→反強磁性→強磁性→・・・と振動的に変化することが発見されました^[i]。
 - ▶ ナノテクノロジーの確立によって、人類は、ついに交換相互作用さえも人工的に制御する手段を手にしたのです。
- ▶ ^[i] S. S. P. Parkin, N. More, and K. P. Roche: Phys. Rev. Lett. 64 (1990) 2304.



GMR 振動と層間結合

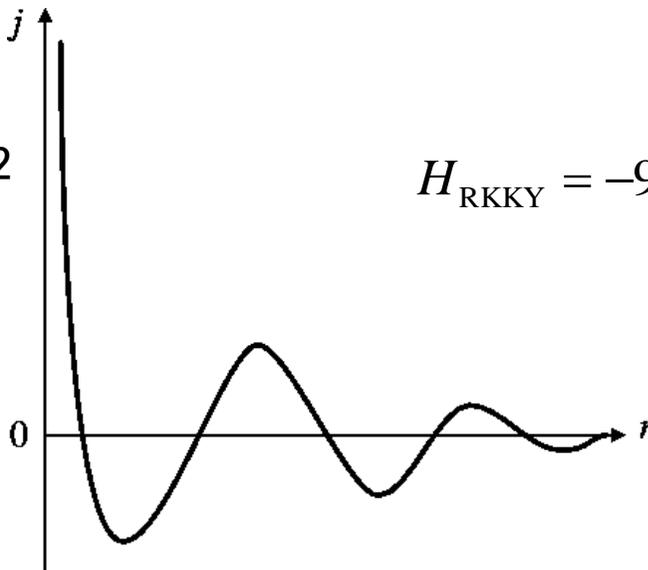
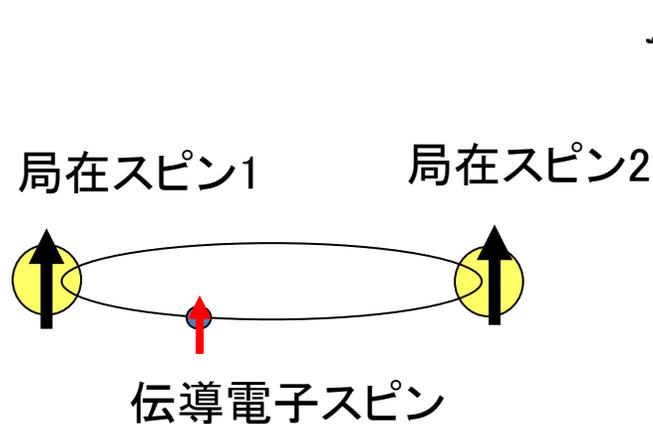


Mosca et al.: JMMM 94 (1991) L1



間接交換(RKKY)相互作用

- ▶ 伝導電子を介した局在スピン間の磁氣的相互作用は、距離に対して余弦関数的に振動し、その周期は伝導電子のフェルミ波数で決められる。これをRKKY (Rudermann, Kittel, Kasuya, Yoshida)相互作用という。



$$H_{\text{RKKY}} = -9\pi \frac{J^2}{\varepsilon_{\text{F}}} \left(\frac{N_e}{N} \right)^2 f(2k_{\text{F}}R) S_1 \cdot S_2$$

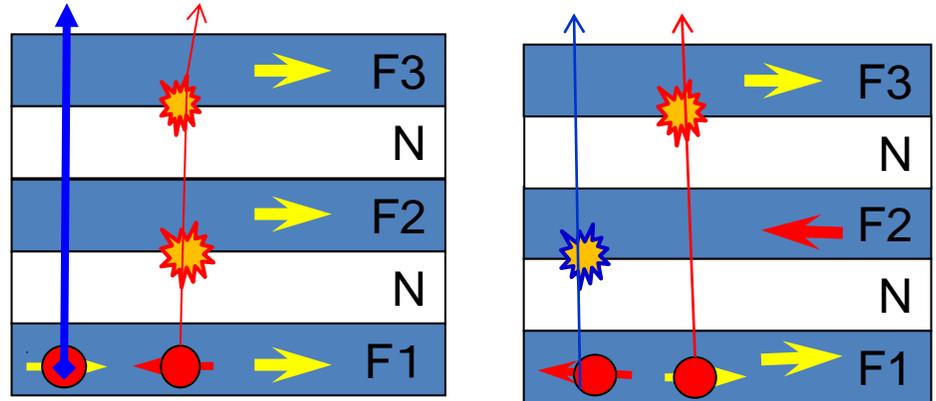
$$f(x) = \frac{-x \cos x + \sin x}{x^4}$$



CPP-GMR

(電流を層に垂直に流す配置での巨大磁気抵抗効果)

- ▶ 電流を層に垂直に流すので、磁気抵抗効果が顕著になる。
- ▶ 低抵抗なので次世代読み出しヘッドに使われる。



室温での大きなトンネル磁気抵抗効果の発見

- ▶ 磁性と伝導の関係にさらなるブレークスルーをもたらしたのは、Miyazakiによる1995年の磁気トンネル接合(MTJ)における室温での大きなトンネル磁気抵抗効果(TMR)の発見で、TMR比[1]は18%におよびました[2]。

- ▶ [1] TMR比は、向かい合う2つの磁性層の磁化の向きが磁化の向きが平行のときの抵抗 $R_{\uparrow\uparrow}$ と反平行のときの抵抗 $R_{\uparrow\downarrow}$ との差を平行の抵抗で割った百分比で表されます。 $TMR(\%) = (R_{\uparrow\uparrow} - R_{\uparrow\downarrow}) / R_{\uparrow\uparrow} \times 100$
- ▶ [2] T. Miyazaki, N. Tezuka: J. Magn. Magn. Mater. 139 (1995) L231.



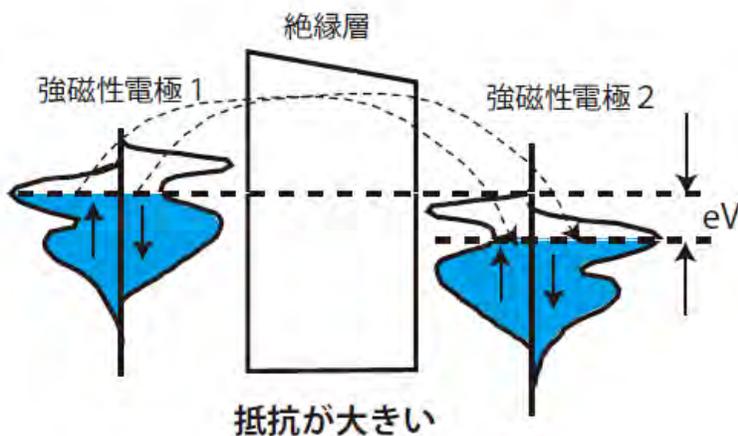
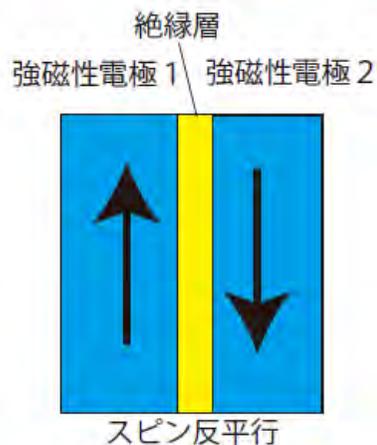
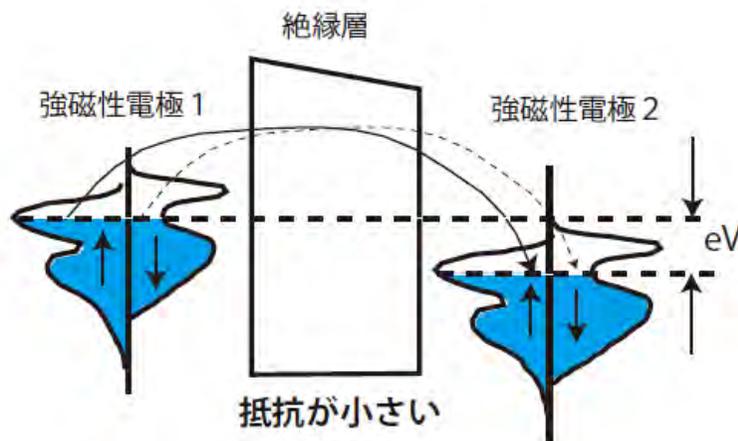
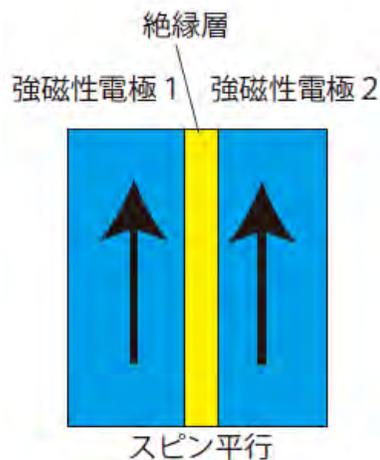
磁気トンネル素子(MTJ)とMRAM

- ▶ MTJとは2枚の強磁性体層で極めて薄い絶縁物を挟んだトンネル接合で、磁化が平行と反平行とで電気抵抗が大きく異なる現象です。スピン偏極トンネリング自体は、1980年代から知られていたおり[i]、磁性層間のトンネルについて先駆的な研究[ii]も行われていたのですが、トンネル障壁層の制御が難しく、再現性のよいデータが得られていなかったのです。Miyazakiら[iii]は成膜技術を改良して、**平坦でピンホールの少ない良質のAl-O絶縁層の作製に成功**したことがブレークスルーとなりました。この発見を機にTMRは、世界の注目するところとなり、直ちに固体磁気メモリ(MRAM)および高感度磁気ヘッドの実用化をめざす研究開発が進められました。

- ▶ [i] R. Meservey, P.M. Tedrow, P. Flude: Phys. Rev. Lett. 25 (1980) 1270.
- ▶ [ii] S. Maekawa, U. Gäfvert: IEEE Trans. Magn. MAG-18 (1982) 707.
- ▶ [iii] T. Miyazaki, N. Tezuka: J. Magn. Magn. Mater. 139 (1995) L231



TMR(トンネル磁気抵抗効果)の原理



- ▶TMRは磁性体のバンド構造を使って説明されます。
- ▶フェルミ面における状態密度が上向きスピンと下向きスピンとで異なります。
- ▶両電極のスピンの平行だと、状態密度の大きな状態間の電子移動により低抵抗になります。
- ▶反平行だと、大きな状態と小さな状態の間の移動なので高抵抗になります。



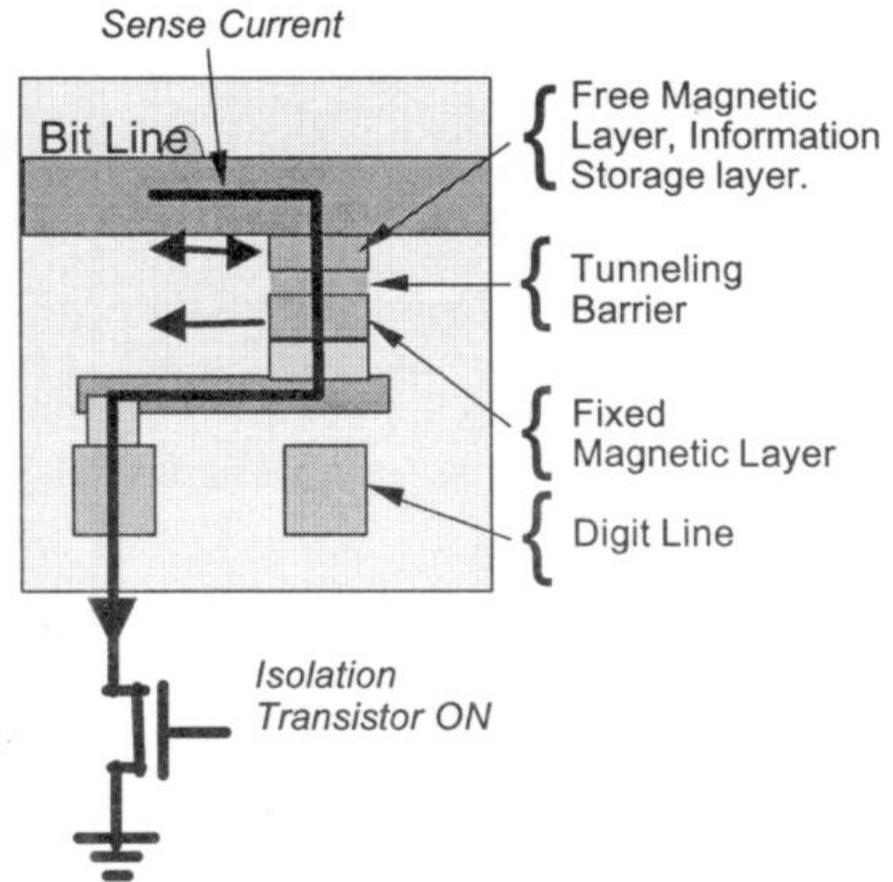
MRAM(磁気ランダムアクセスメモリ)

- ▶ 記憶素子に磁性体を用いた不揮発性メモリの一種です。
- ▶ MTJとCMOSが組み合わされた構造となっています。
- ▶ 直交する2つの書き込み線に電流を流し、得られた磁界が反転磁界 H_K を超えると、磁気状態を書き換えることができます。しかし、電流で磁界を発生している限りは高集積化が難しいという欠点があります。
- ▶ MRAMは、アドレスアクセスタイムが10ns台、サイクルタイムが20ns台とDRAMの5倍程度でSRAM並み高速な読み書きが可能です。また、フラッシュメモリの10分の1程度の低消費電力、高集積性が可能などの長所があり、SRAM(高速アクセス性)、DRAM(高集積性)、フラッシュメモリ(不揮発性)のすべての機能をカバーする「ユニバーサルメモリ」としての応用が期待されています。
- ▶ このため、FeRAM(強誘電体メモリ)、OUM(カルコゲナイド合金による相変化記録メモリ)とともに、「ユニバーサルメモリ」としての応用が期待されています。



TMRを用いたMRAM

- ▶ ビット線とワード線でアクセス
- ▶ 固定層に電流の作る磁界で記録
- ▶ トンネル磁気抵抗効果で読出し
- ▶ 構造がシンプル



MRAMの回路図

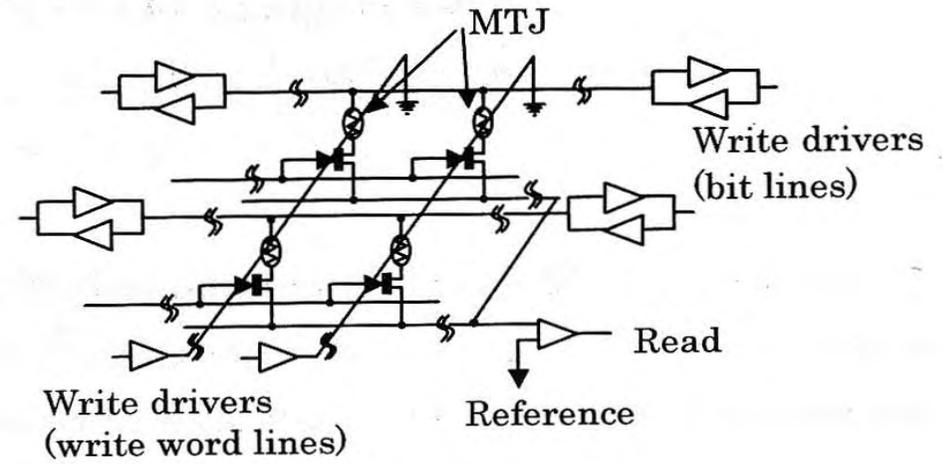
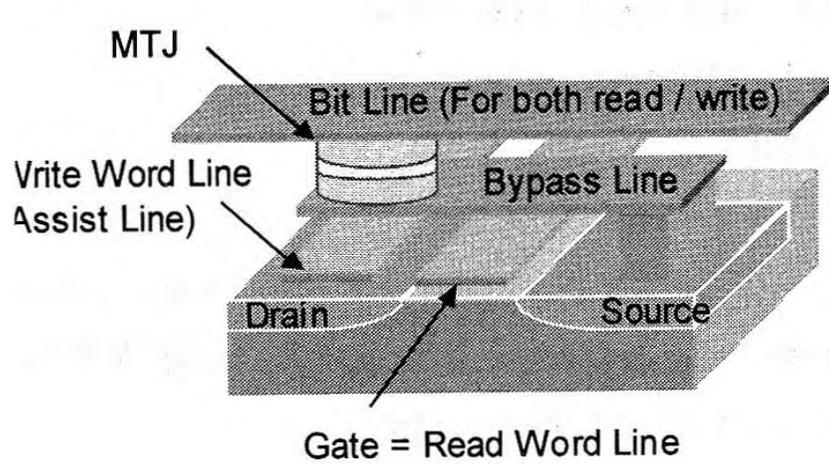


Fig. 1 Schematic of 1T1J type MRAM

- ▶ 鹿野他：第126回日本応用磁気学会研究会資料p.3-10



MRAM と他のメモリとの比較

	SRAM	DRAM	Flash	FRAM	MRAM
読出速度	高速	中速	中速	中速	中高速
書込速度	高速	中速	低速	中速	中高速
不揮発性	なし	なし	あり	あり	あり
リフレッシュ	不要	要	不要	不要	不要
セルサイズ	大	小	小	中	小
低電圧化	可	限	不可	限	可



MgO単結晶バリアの採用でブレークスルー

▶2004年、TMRは革命的なブレークスルーを迎えます。Yuasaらはそれまで用いられてきたアモルファスAl-Oに代えてMgO単結晶層をトンネル障壁に用いることで、200%におよぶ大きなTMR比を実現しました。その後もTMRは図1のように伸び続け、最近では**600%**に達しています。

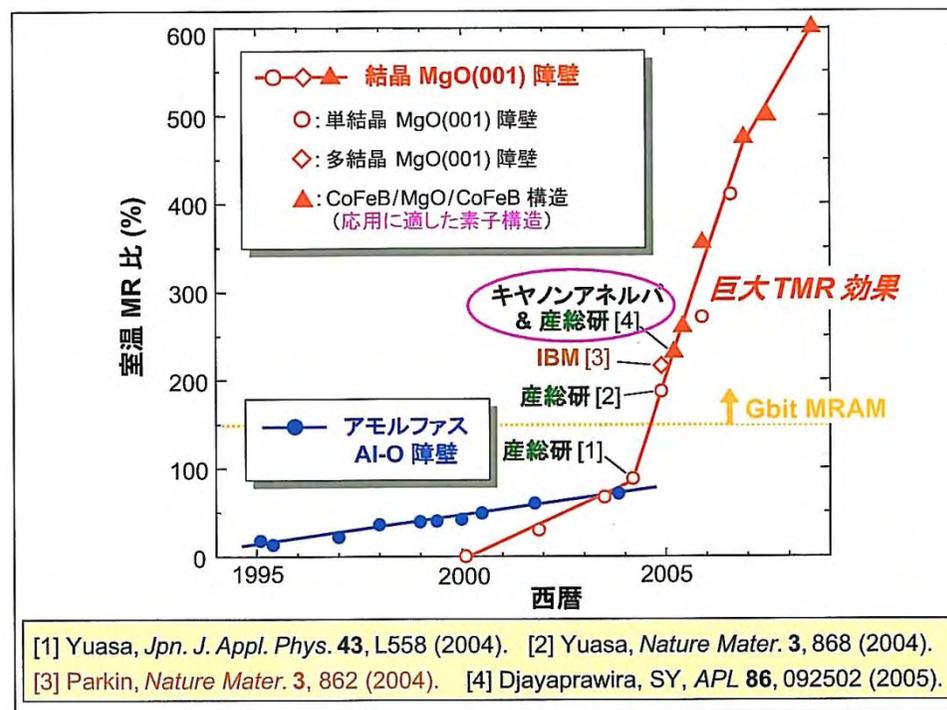


図1. トンネル磁気抵抗効果の進展のグラフ
[産総研資料2011による]



散漫散乱トンネルとコヒーレント・トンネル

▶ 通常、トンネルする際スピンは保存され、散漫トンネルの場合TMRは一般に強磁性電極のスピン分極率 P_i ($i = 1, 2$)を用いて次のようなJullierの式で表されます。[1]

$$\text{TMR} = 2P_1P_2 / (1 - P_1P_2)$$

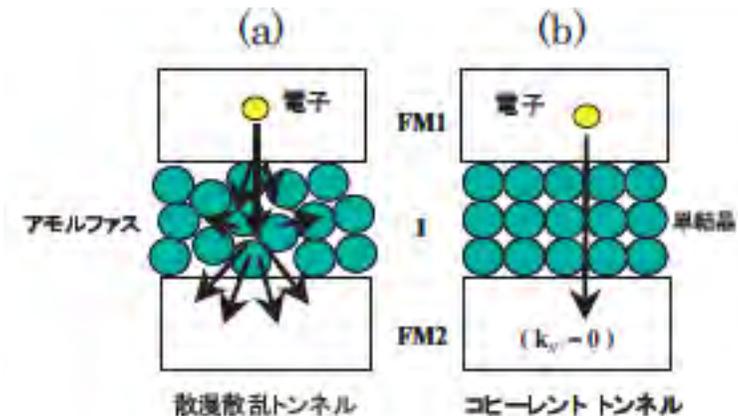
▶ MTJにおけるスピン分極率は磁性体固有のものではなく界面電子状態と関係し、バリア材料や界面性状に依存します。

▶ コヒーレントトンネルではエネルギーのほかに運動量が保存されるため、MRは電極のバンド構造を反映し、磁化が平行のときはトンネルできるが反平行のときはトンネルできません。そのため、1000%という巨大TMRが理論的に予測されました。[2]

[1] M. Jullier, Phys. Lett. 54A, 225 (1975).

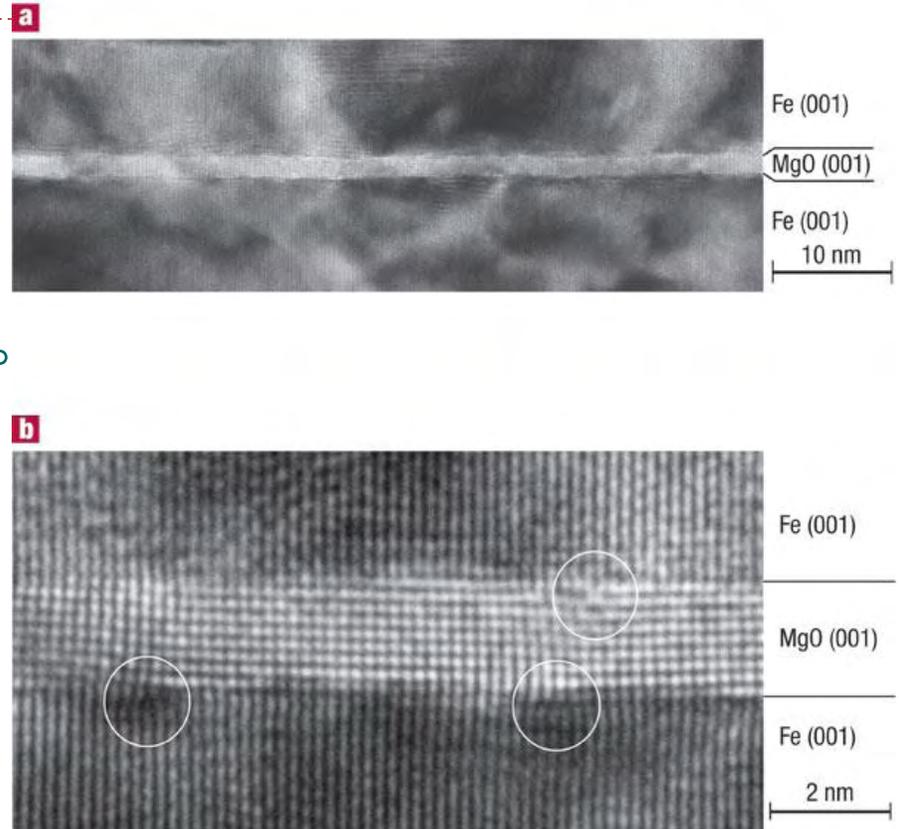
[2] W. H. Butler et al., Phys. Rev. B 63 (2001) 054416, J. Mathon and A. Umeski, Phys. Rev. B 63 (2001) 220403R

猪俣浩一郎: RISTニュースNo. 42(2006) 35.から引用



Fe/MgO/Fe構造のTEM像

- ▶理論の予測を受けて多くの研究機関が挑戦しましたが、成功しませんでした。
- ▶YuasaらはFe(001)/MgO(001)/Fe(001)のエピタキシャル成長に成功し、トンネル層の乱れがほとんどない構造を得ています。また、界面でのFe酸化層も見られていません。
- ▶結晶性のよいMgOの成膜技術の確立があって初めてブレークスルーが得られたのです。まさに結晶工学の成果と言えるでしょう。

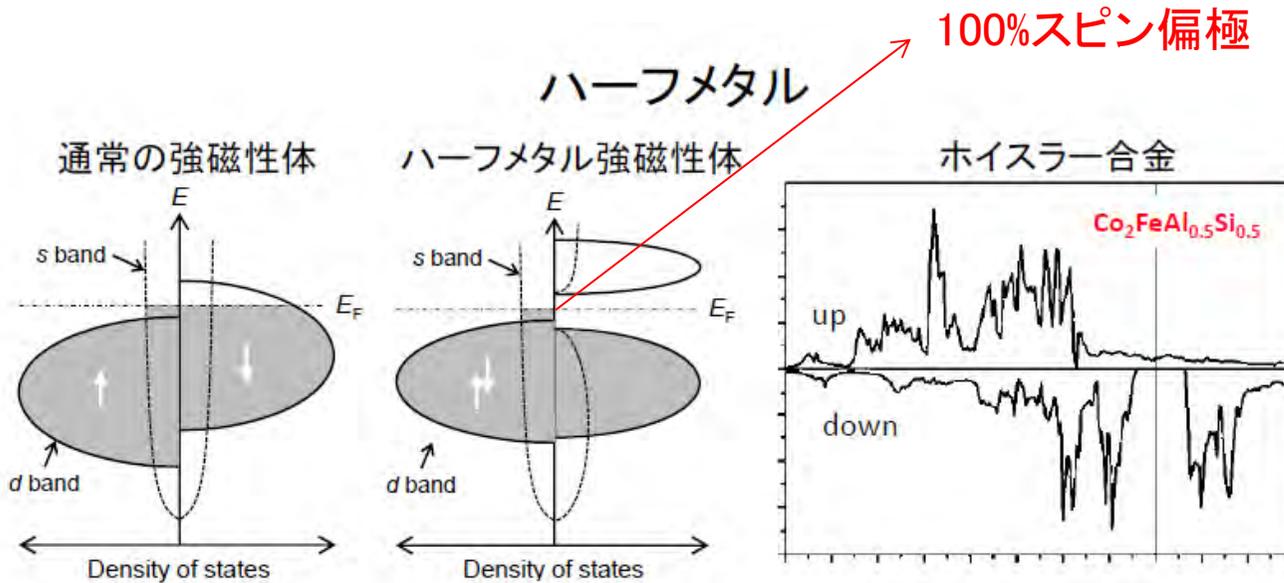


Nature Materials 3, 868–871 (2004)

Yuasaのこの結果は、JSTさきがけ神谷領域(ナノと物性)の第2期(2002-2005)における課題「超Gbit-MRAMのための単結晶TMR素子の開発」の成果です。



ハーフメタル電極の採用



1983年 ハーフホイスラー合金NiMnSb
において理論的に予言

CrO₂, LaSrMnO, Co₂MnSiの低温での
ハーフメタル性が実験的に示されている。

フェルミレベル近傍
アップスピン: s-like
ダウンスピン: 状態無し
⇓

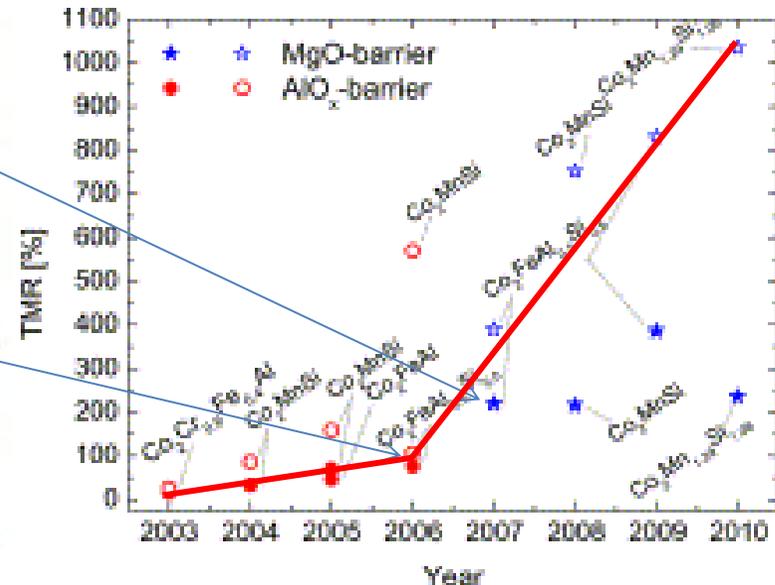
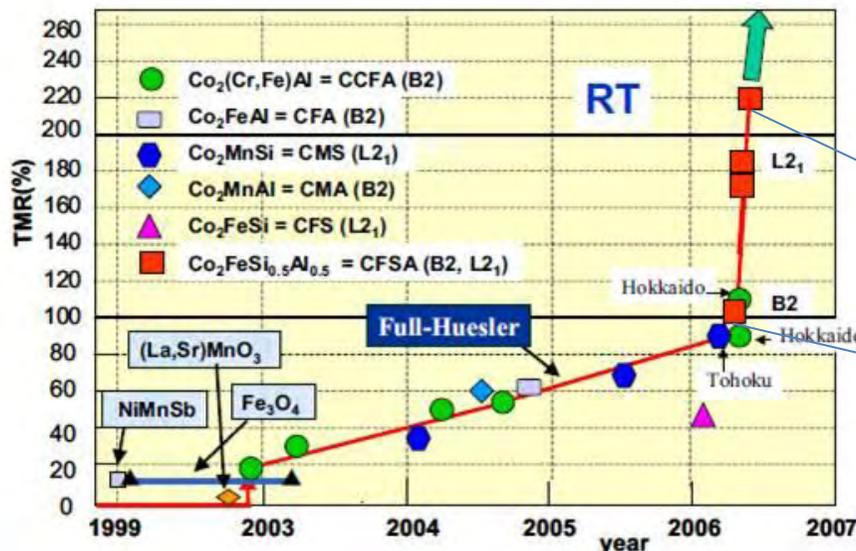
高いスピン分極率
理想的には, $P=1$

- ▶ ハーフメタルとは、↑スピンに対しては金属、↓スピンに対しては半導体のようなバンド構造をもつ物質です。
- ▶ このためフェルミ準位においては、100%スピン偏極していることが特徴です。
- ▶ TMR用ハーフメタルとしては、ホイスラー合金が最適候補とされています。



フルホイスラー合金とTMR

- ▶ ホイスラー合金をTMR電極として用いる試みは、多く行われました。実際に高いTMRが得られるようになったのは精密な結晶構造制御が行われるようになった2006年頃からです。今ではMgO絶縁層を用いて1000%を超えるTMRが報告されています。



Tanja Graf, Claudia Felser, Stuart Parkin:
 Simple rules for the understanding of Heusler compounds;
 Progress in Solid State Chemistry 39 [1] (2011) 1-50



CONTENTS

1. 10:00–12:00 知っているのと得をする磁性の基礎
2. 13:00–13:45 コイルなしに磁気を電気に変える
3. 13:50–14:20 コイルなしに電気を磁気に変える

休憩

4. 14:40–15:15 スピン流がパラダイムを変える
 5. 15:20–15:50 スピントロニクス材料
 6. 15:55–16:10 まとめと今後のスピントロニクス
- 16:10–16:30 質疑応答・名刺交換

➤ 質問は各セクションでも受け付けます。



3. コイルなしに電気を磁気に変える



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がFM2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.

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

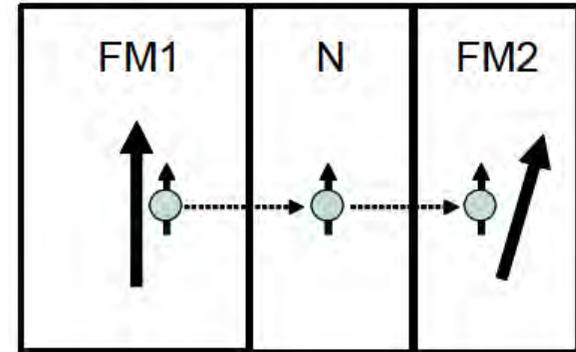


図7 スピン注入磁化反転の概念図

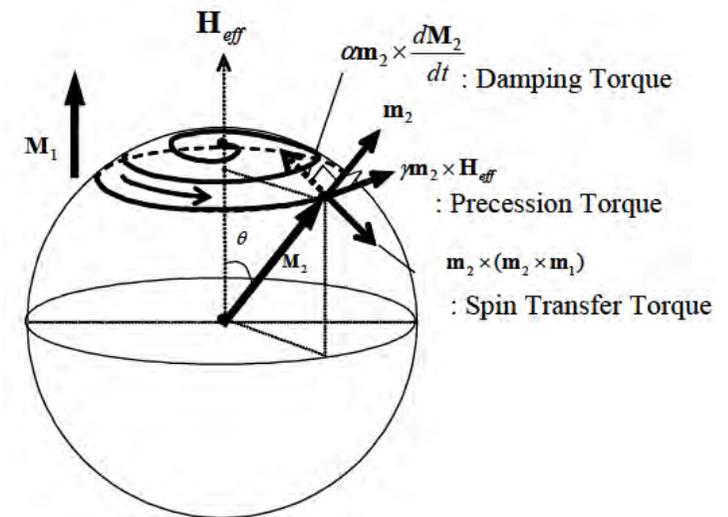


図8 スピン注入磁化反転のダイナミクス



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。

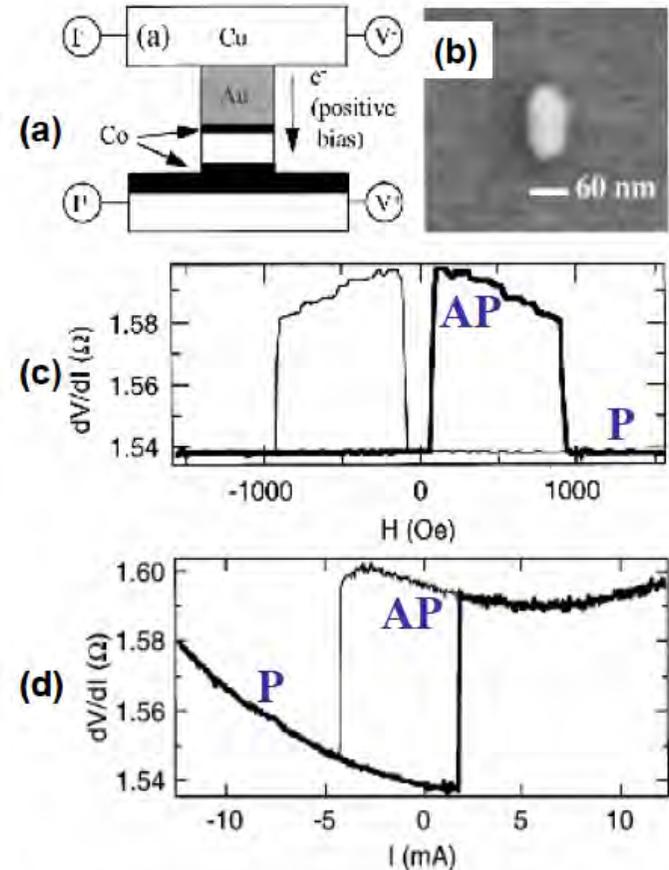


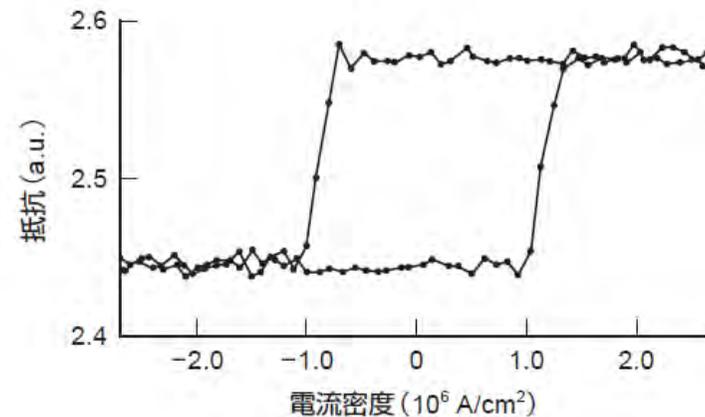
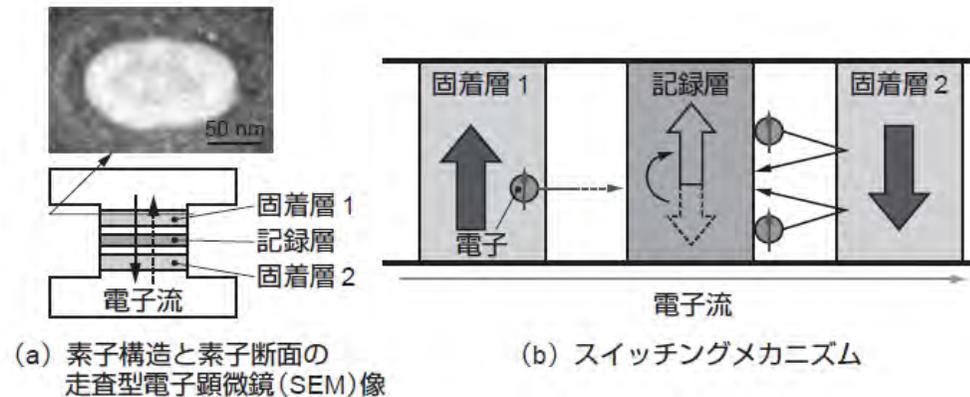
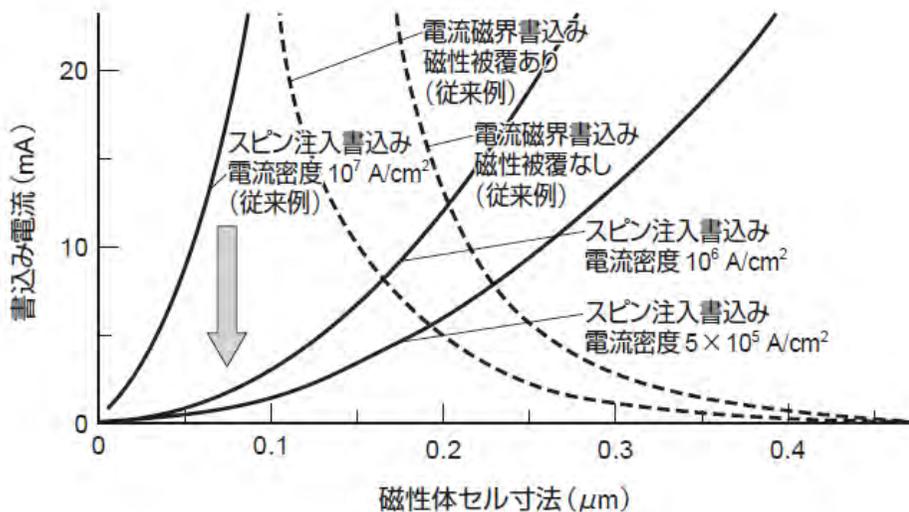
図 9 スピン注入磁化反転の実験例[40]

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。

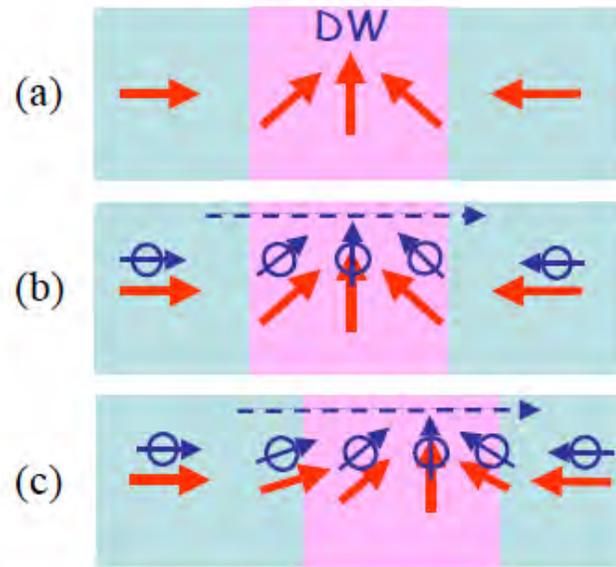


図5 スピントランスファー効果による磁壁の電流駆動の説明図

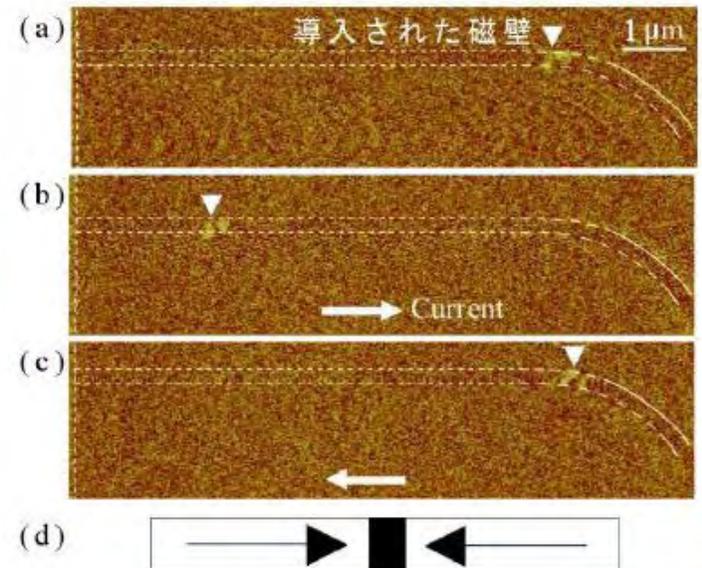


図6 磁気力顕微鏡による電流駆動磁壁移動の観察結果

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

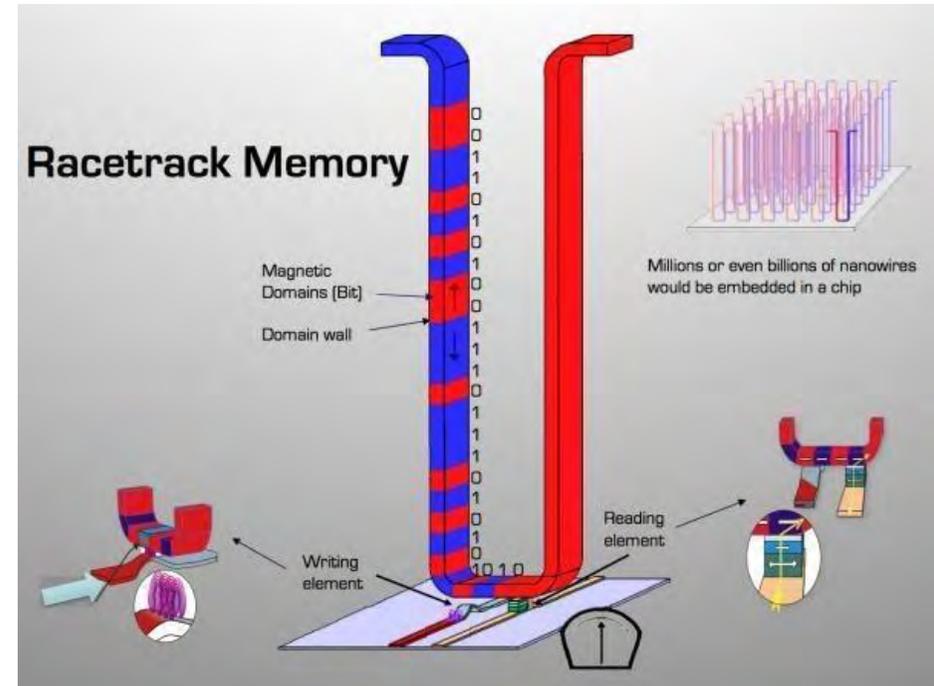
小野輝男:スピントロニクス入門セミナーテキスト(2011.12.16)



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ー(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.



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

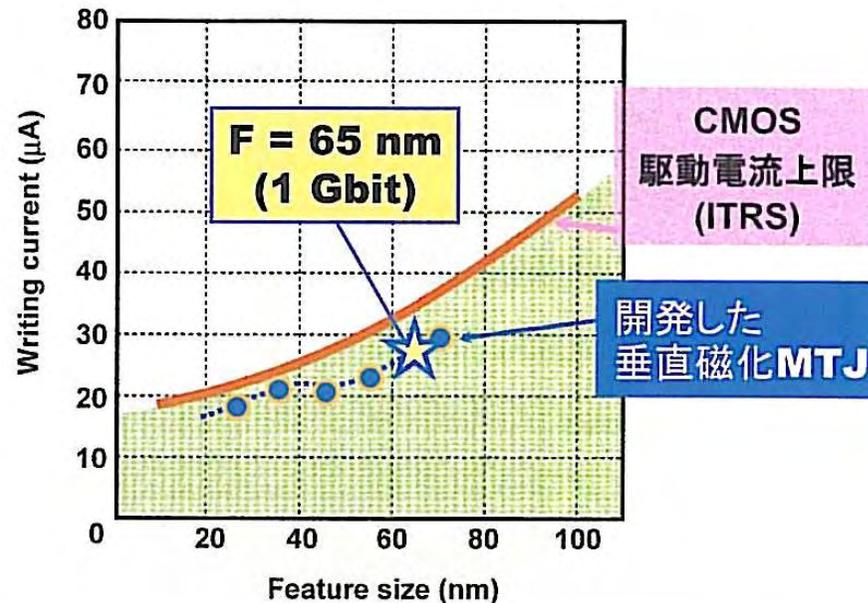
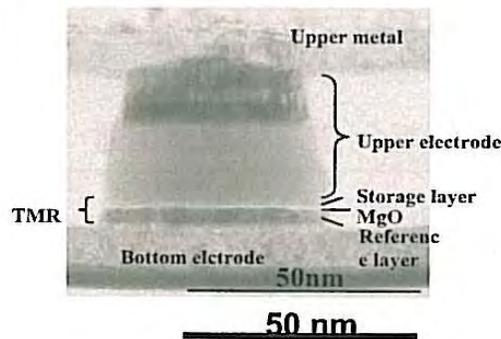


ここまで来たスピン注入磁化反転技術

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_B**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[1]。
- ▶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。**

[1] 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

