

計測エンジニアリングシステム
KESCOセミナー 2021.3.26

スピントロニクス入門

東京農工大学名誉教授
佐藤勝昭



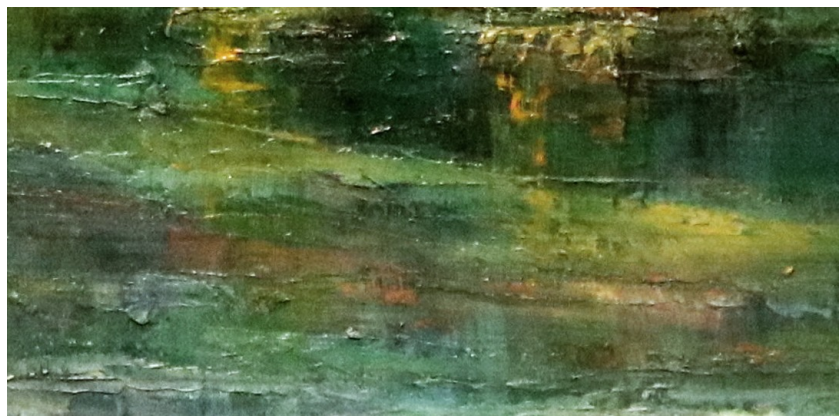


講師 自己紹介

- ▶ 1966 京都大学修士課程修了(1978 京都大学工学博士)
- ▶ 1966 NHK入局
1968-1984 基礎研物性研究部
- ▶ 1984 東京農工大学助教授
1989 同教授
2005 同理事(副学長)
2007 同名誉教授
2018 同リサーチアドバイザー
- ▶ 2007-2013 JSTさきがけ「次世代デバイス」研究総括
2008-2019 JST研究広報主監
2010-2018 JST研究開発研究センターフェロー
2018- 同 特任フェロー
- ▶ 2017-2019 文科省ナノテクノロジープラットフォームサブPD
2019-2022 同PD
- ▶ 主な著書
「光と磁気」(朝倉書店)、「応用電子物性工学」(コロナ社)、「
「応用物性」(オーム社)、「金色の石に魅せられて」(裳華房)、「
「機能材料のための量子工学」・「半導体なんでもQ&A」(講談
社)、「太陽電池のキホン」(SBクリエイティブ)、「磁気光学
超入門」
(共立出版)、「基礎から学ぶ磁性材料」(R&D支援センター)
他
- ▶ 洋画家： 日府展洋画部理事・審査員、個展17回開催
川崎市麻生区美術家協会事務局長、麻生区文化協会総務

CONTENTS

1. はじめに
2. 巨大磁気抵抗効果がハードディスクを変えた
3. 巨大磁気抵抗の発見
4. トンネル磁気抵抗の発見
5. MgOバリアTMR素子
6. 固体磁気メモリ(MRAM)の登場



7. スピン移行トルクとSTT-MRAMの製品化
8. STTの動的解析とスピントルク発振素子
9. スピン流が開く新しい物理
10. スピンホール効果と逆スピンホール効果
11. スピンゼーベック効果とスピン量子整流
12. 終わりに



1. はじめに

これまで、磁性体が示す磁気的な諸性質について学んできました。今回のテーマはスピントロニクスです。化学系の読者にはなじみの薄い分野ですが、電子のもつ二つの性質である電荷とスピンの絡み合いを考える分野だと理解してください。

スピントロニクスの最も重要な成果が、巨大磁気抵抗効果の発見です。これによってハードディスクの面記録密度が飛躍的に向上しました。今回はここから始め、最近のスピン流

しにも以前はコイルが使われていたように読み出しヘッドがあります。

図2は、ハードディスクです。面記録密度を上げると小さくしなければなりません。弱いためコイルでは十分でした。このため1998年しかありませんでした。

現代化学 11
CHEMISTRY TODAY No. 596 2020

特集 新型コロナウイルス
次波に備える

はじめに

- ▶ スピントロニクスは、spinとelectronicsをあわせた造語で、電子の持つ2つの性質である電荷とスピンの絡み合いを考える科学技術分野です。
- ▶ スピントロニクスの最も重要な成果が、巨大磁気抵抗効果の発見です。これによってハードディスクの面記録密度の飛躍的に向上しました。
- ▶ この講座では、巨大磁気抵抗効果(GMR)からスタートして、急速に発展しつつあるスピントロニクスの世界を垣間見ることにしましょう。
- ▶ この講座の内容は、東京化学同人発行の雑誌「現代化学」に執筆した連載講座「磁石に親しもう」の第5回（2020年11月号）に基づきます。



2. 巨大磁気抵抗効果が ハードディスクを 変えた

HDDの読み出しヘッド

- ▶ 図1はハードディスクのしくみを描いたものです。磁気ヘッドは書き込みヘッドと読み出しヘッドから構成されています。記録ヘッドはコイルを使って発生した磁場によって記録媒体に磁気記録します。記録した情報の読み出しに以前はコイルが使われていましたが、現在の磁気ヘッドには、図1に示すように読み出しヘッドには巨大磁気抵抗素子(GMR or TMR)が使われています。

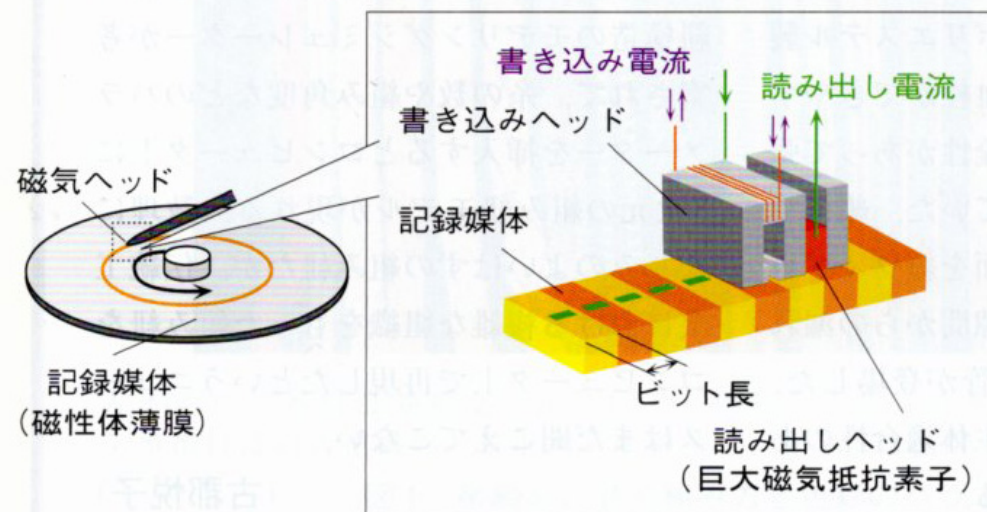
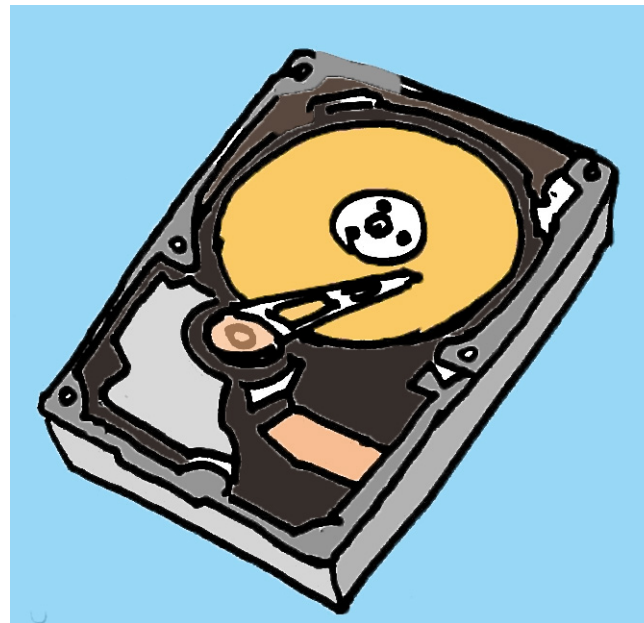


図1 ハードディスク (HDD) と磁気ヘッドの仕組み

GMRヘッドで記録密度が飛躍的向上

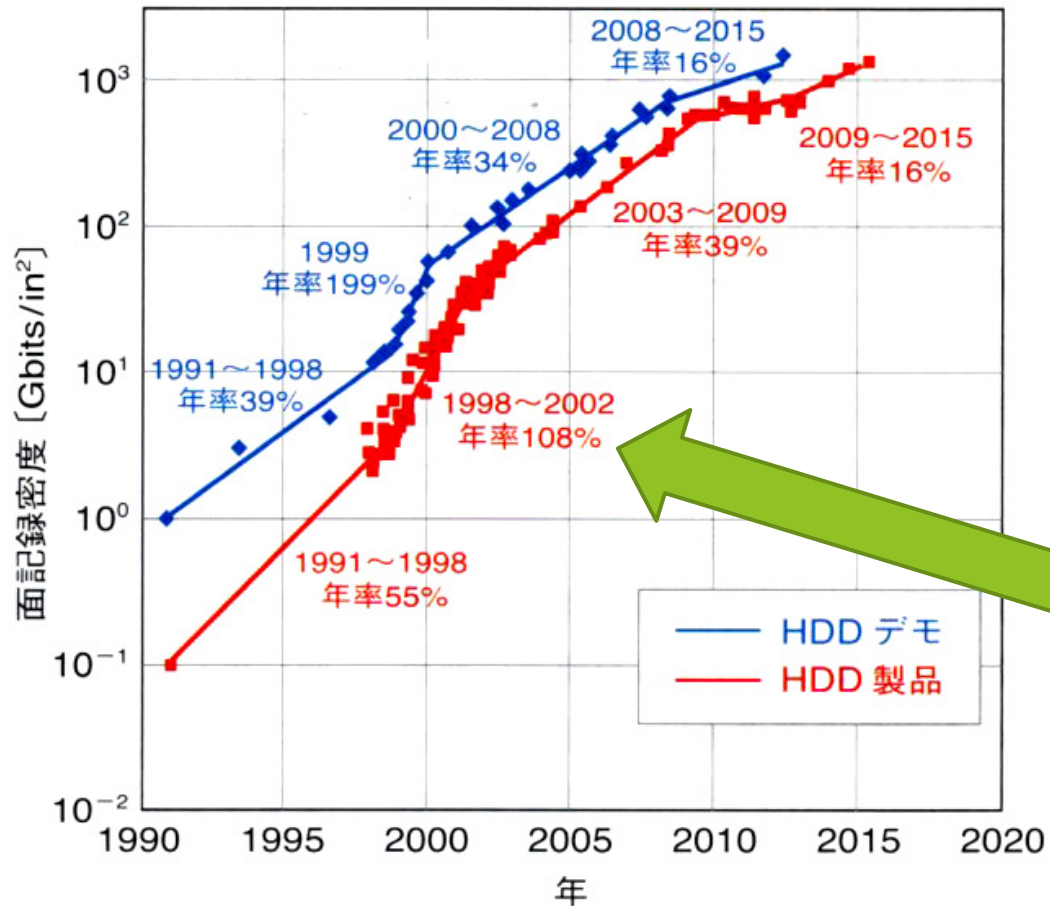


図2 ハードディスクの面記録密度の推移 (H. Li (米国カーネギーメロン大学) の学位論文を参考に作成)

- ▶ 図2は、ハードディスクの面記録密度の推移を表すグラフです。面記録密度を上げるには、記録されたビットの寸法を小さくしなければなりません。媒体からの洩れ磁場が弱いためコイルでは十分な電気信号が取り出せなくなっていたのです。
- ▶ このため1998年までは面密度は年55%程度の伸びしかありませんでした。
- ▶ 巨大磁気抵抗効果(GMR)を用いた読み出しヘッドが搭載された1998年を境に弱い洩れ磁場でも電気信号に変換できるようになり、年率100%を超える面記録密度の急上昇が起きたのです。

GMRは、2つの強磁性層で数Åの薄い非磁性層を挟んだデバイスの電気抵抗が磁場によって大きく変化する現象です。GMRは微細構造の作製が可能になった20世紀末になって、初めて実現したのです。



3. 巨大磁気 抵抗効果 (GMR)の発見

ナノサイエンスと磁性電子の出会い(1)

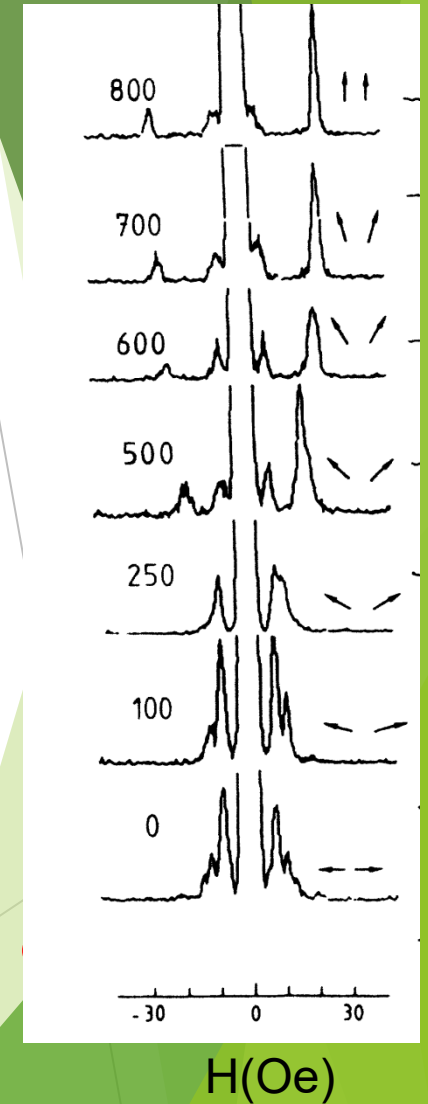
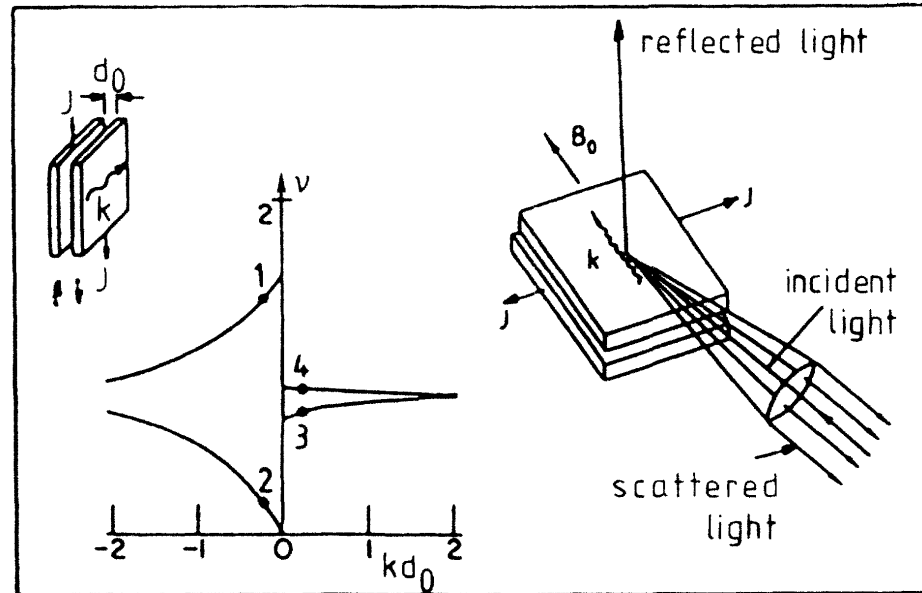
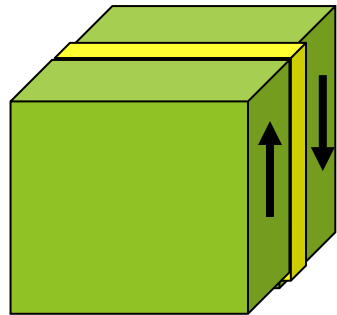
- ▶ 江崎によって拓かれた半導体超格子をはじめとするナノテクノロジーは、半導体における2次元電子ガス、量子閉じこめ、バンド構造の変調など半導体ナノサイエンスを切りひらき、HEMT, MQW レーザなど新しい応用分野を拓きました。
- ▶ 電子のドブロイ波長は半導体においては10nmのオーダーと長いいため、比較的大きなサイズの構造の段階で量子効果が現れましたが、磁性体の3d電子はnm程度の広がりしか持たないため、nm以下の精密な制御が可能になった80年代まで待たねばなりませんでした。



ペーター・グリュンベルク博士

ナノサイエンスと磁性電子の出会い(2)

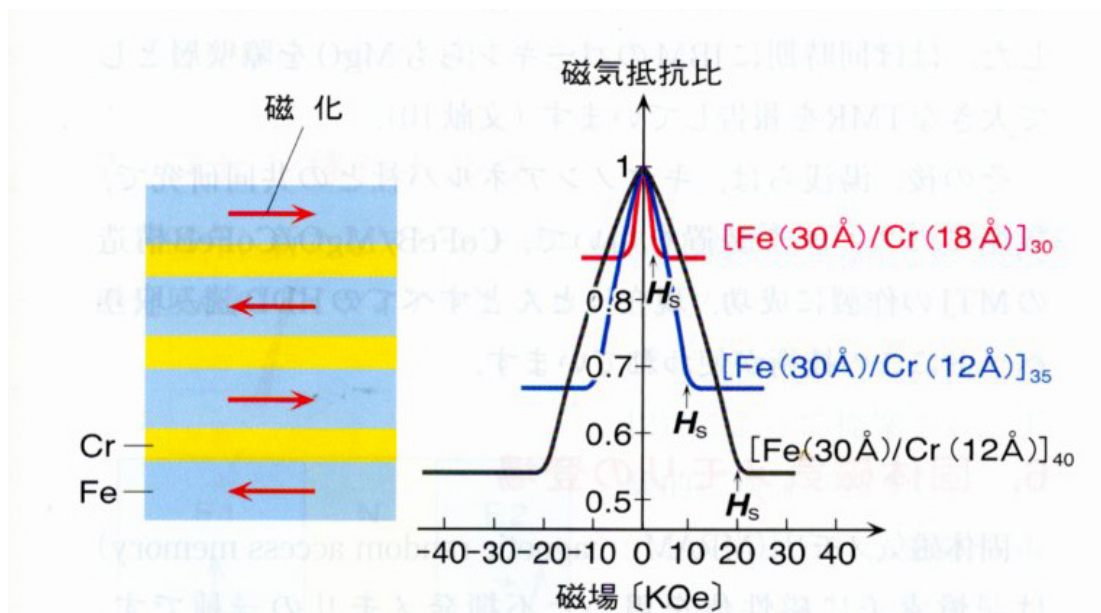
- ▶ 1986年ドイツのグリュンベルグのグループは、Fe/Cr(8 Å)/Feの構造において、Feの2層の磁化が途中の非磁性金属を通して反強磁性的に結合していることを（ブリルアン散乱法を使って）発見しました¹⁾。



1) 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²⁾。



磁気抵抗比は $[R(H) - R(0)]/R(0)$ で定義されます。ここに $R(H)$ は磁場 H における抵抗、 $R(0)$ は磁場0の抵抗です。 H_s は飽和磁場。

図3 Fe/Cr人工格子の巨大磁気抵抗効果

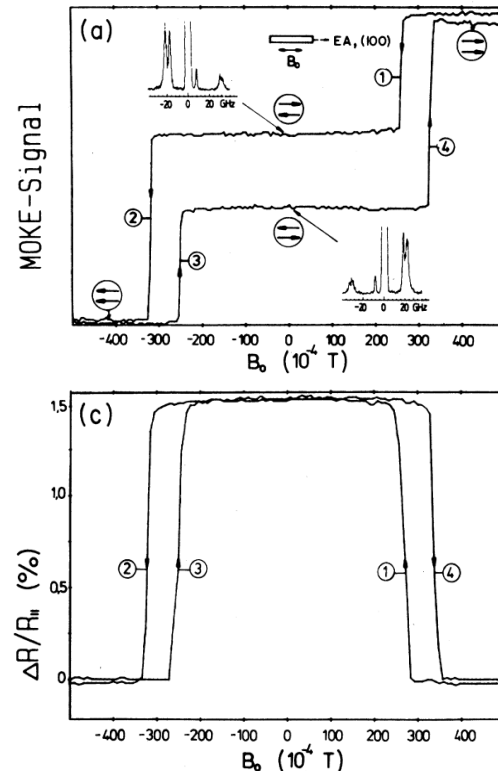
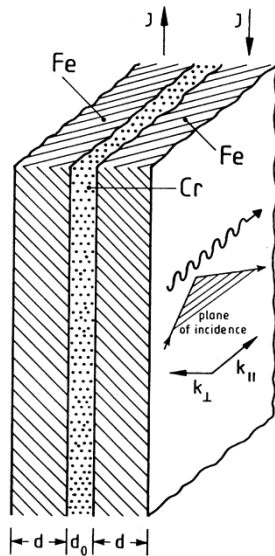


アルベール・フェール博士

2) 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、グリュ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³⁾。



3) 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。

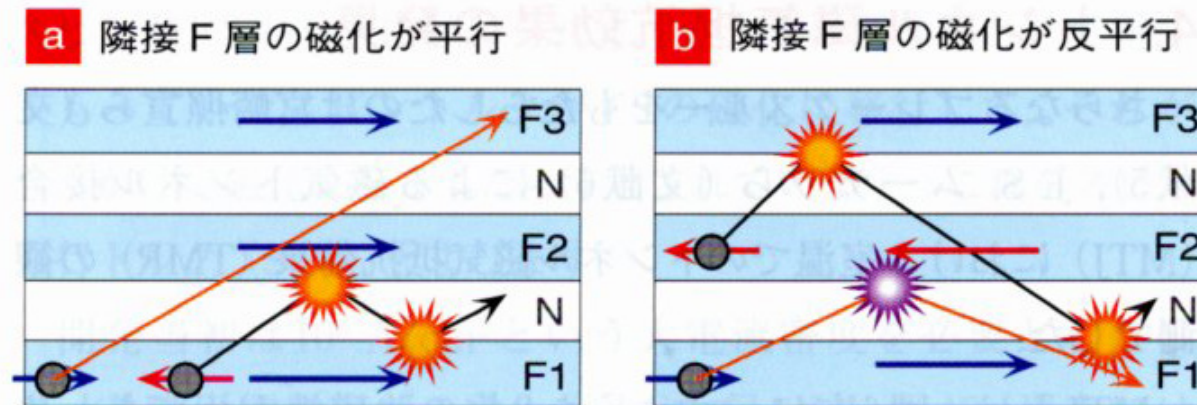
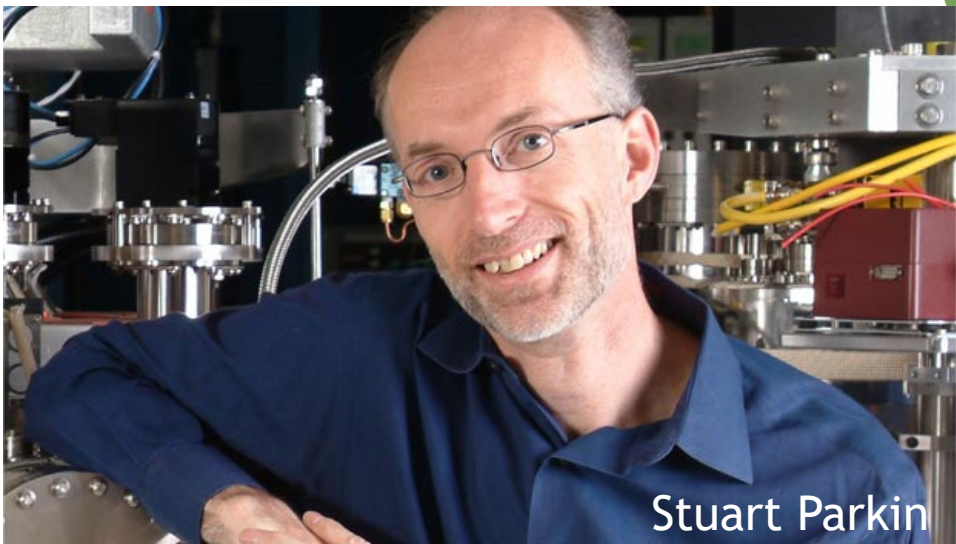


図4 巨大磁気抵抗効果の説明図



Stuart Parkin

弱い磁場で磁化反転するよう 反強磁性体を使ってピン止め

▶ しかし、強磁性体/非磁性体/強磁性体の人工格子では、2Tもの強い磁場を印加しないと大きな抵抗変化を得られず、センサーとしては使えません。

▶ この問題を解決したのがIBMのParkinらです。彼らは、図5(a)のようなNiFe/Cu/NiFe/FeMnの非結合型サンドイッチ構造を作り、スピンバルブと名付けました⁴⁾。このデバイスには、外部磁場で磁化が変化するフリー層と外部磁場で磁化が変化しないピン層の二つの磁性層で、非磁性層のCuを挟む構造となっています。

▶ 2つの磁性層は同じパーマロイ (NiFe) ですが、一方の層に反強磁性体を堆積することで、反強磁性体と強磁性体の界面に働く交換結合により、図5(b)に示すように、わずかな磁界でフリー層が反転するのです。これを交換バイアスと呼びます。高感度なセンサーが実現し、GMRヘッドとしてハードディスクの面記録密度の飛躍的向上に寄与しました。

▶ 4) B. Dieny, et al.: J. Appl. Phys. 69, 4774 (1991)

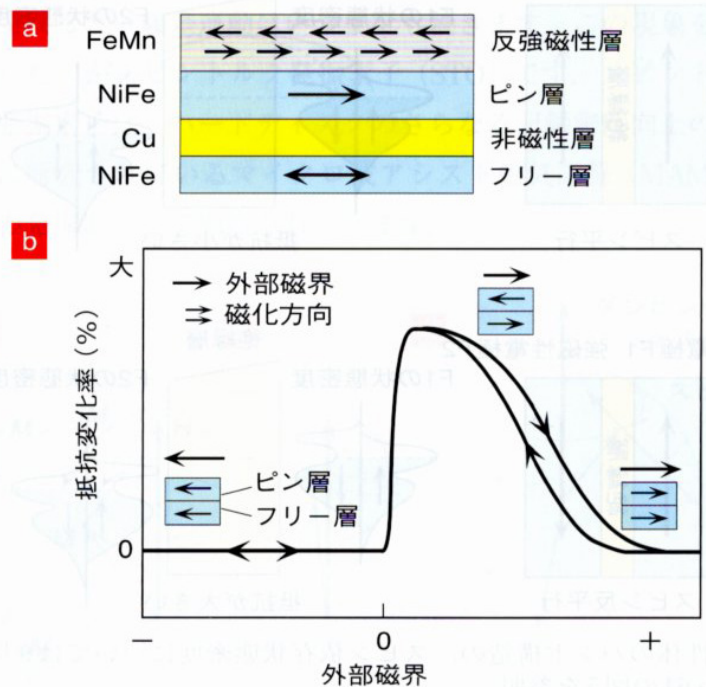
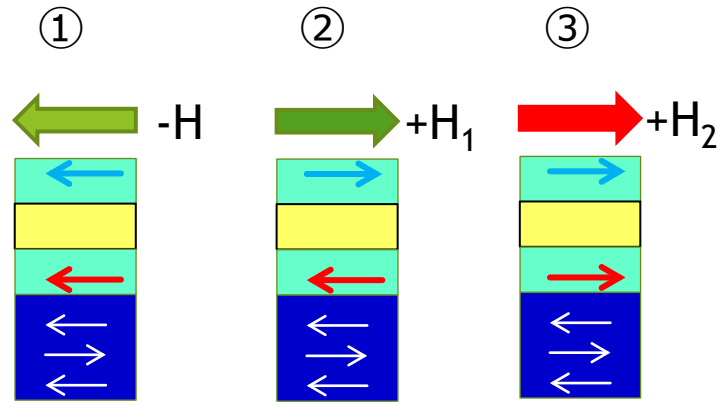
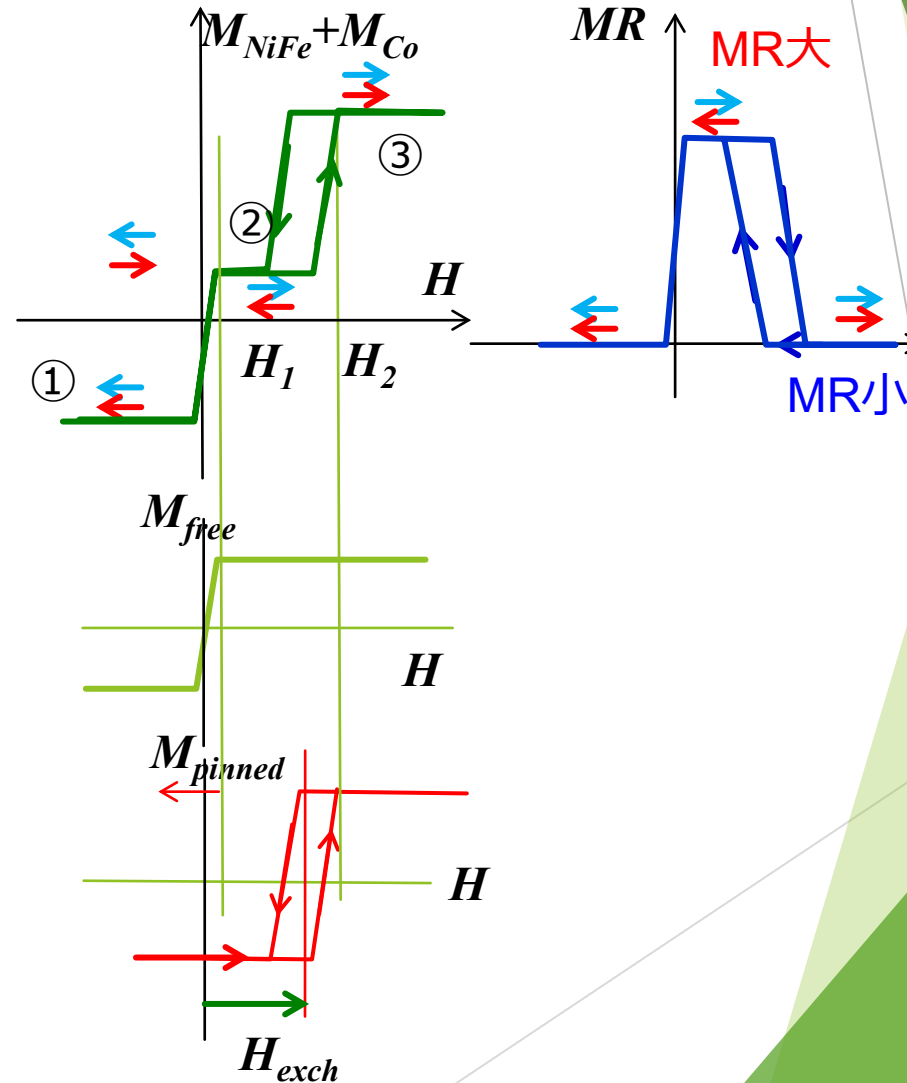


図5 スピンバルブの原理と動作

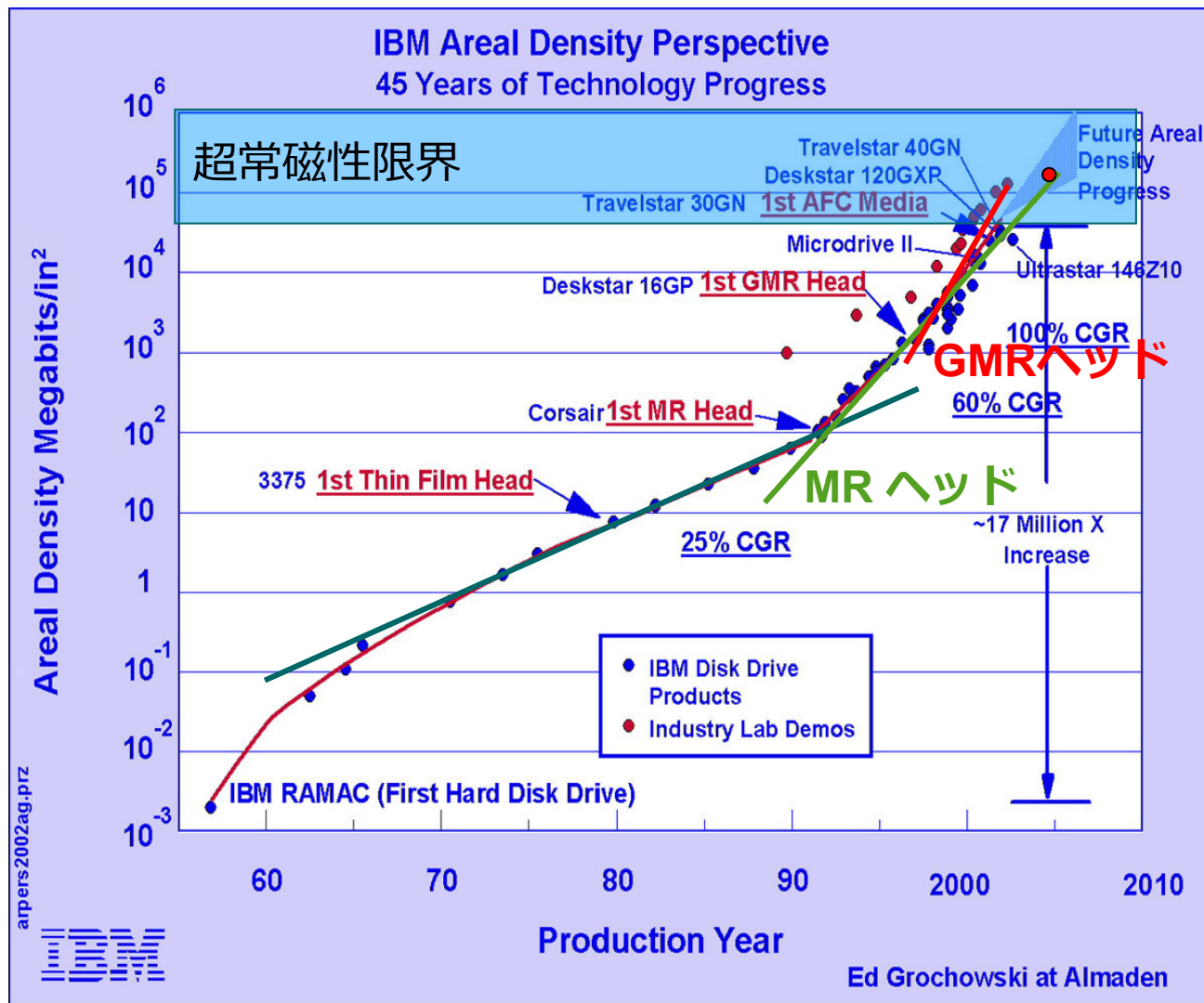
スピンバルブのキモは交換バイアス



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

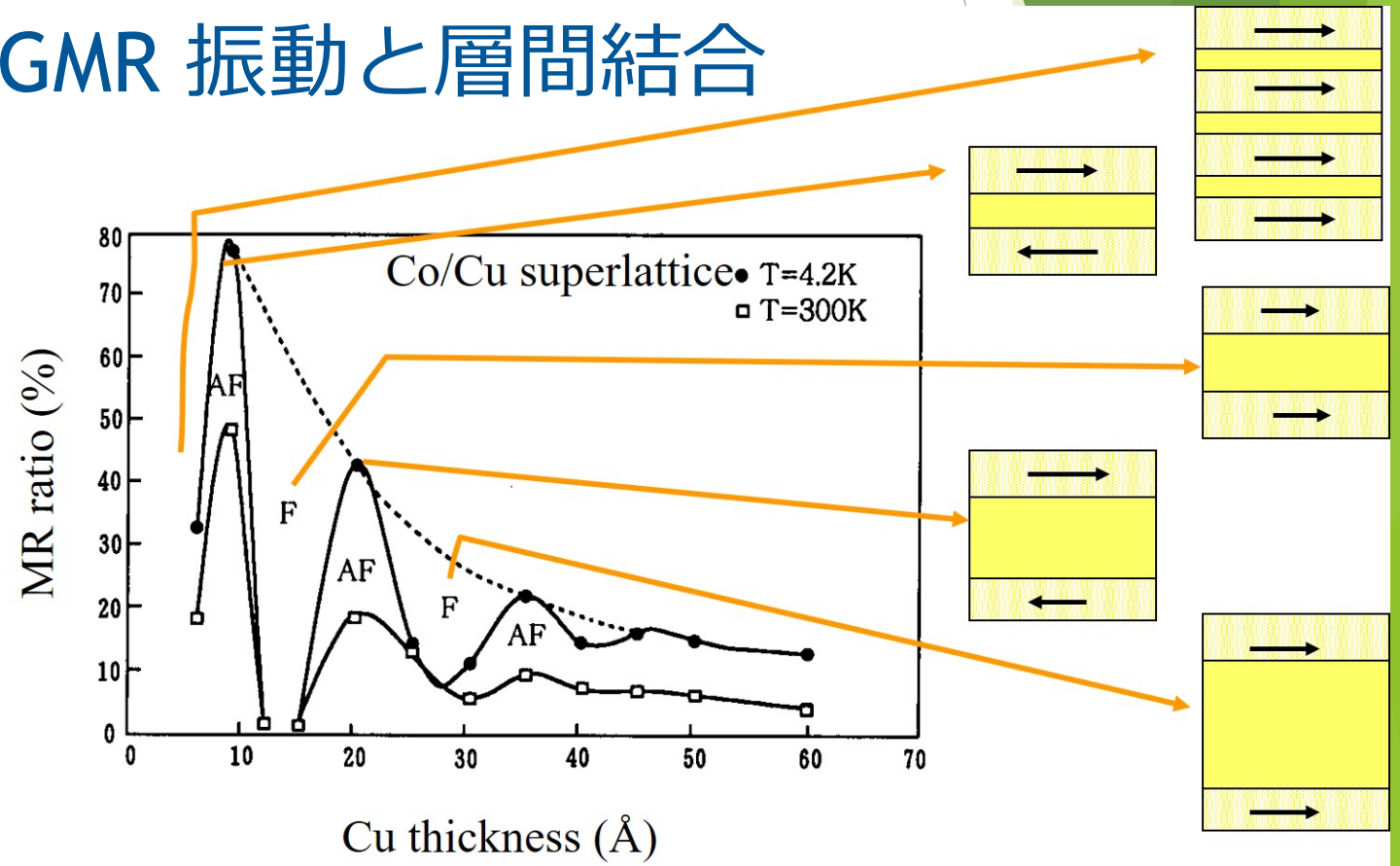


▶ Spin Valveの導入によって、微細な磁区から生じるわずかな磁束の検出が可能になり、HDDの高密度化が非常に加速されたのです。

交換相互作用さえも人工的に制御

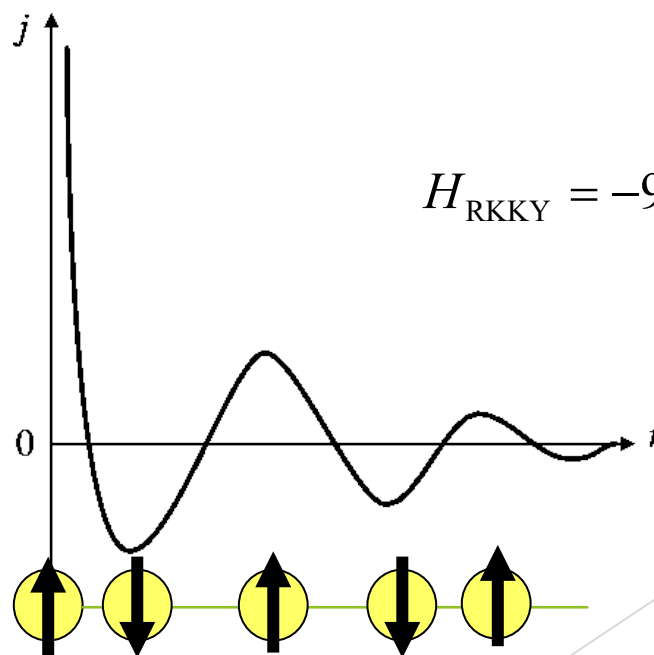
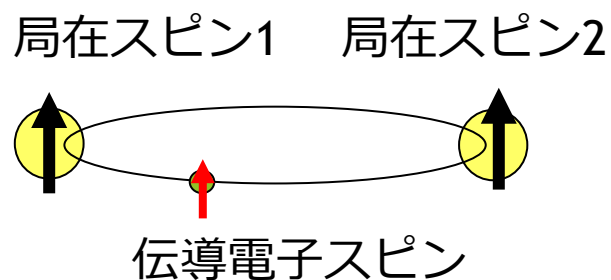
- ▶ 同じ時期に、磁性／非磁性の人工格子において、磁性層間に働く交換相互作用が非磁性層の層厚に対して数ナノメートルの周期で、強磁性→反強磁性→強磁性→・・・と振動的に変化することが発見されました[i]。
 - ▶ ナノテクノロジーの確立によって、人類は、ついに交換相互作用さえも人工的に制御する手段を手にしたのです。
- ▶ [i] S. S. P. Parkin, N. More, and K. P. Roche: Phys. Rev. Lett. 64 (1990) 2304.

GMR 振動と層間結合




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まります。これをRKKY (Rudermann, Kittel, Kasuya, Yoshida)相互作用といいます。



$$H_{\text{RKKY}} = -9\pi \frac{J^2}{\epsilon_F} \left(\frac{N_e}{N} \right)^2 f(2k_F R) \mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{S}_2$$

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



4. 室温での トンネル磁気抵抗 (TMR)の観測

トンネル磁気抵抗

▶ MTJとは、図に示すような2枚の強磁性電極で極めて薄い絶縁層を挟んだトンネル接合です。TMRとは、層に垂直方向の電気伝導が、両強磁性層の磁化が平行か反平行かで大きく異なる現象です。

▶ この現象（スピン偏極トンネリング）は、1980年代から知られており、先駆的な研究も行われていました⁷⁾。しかし当時の技術では、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

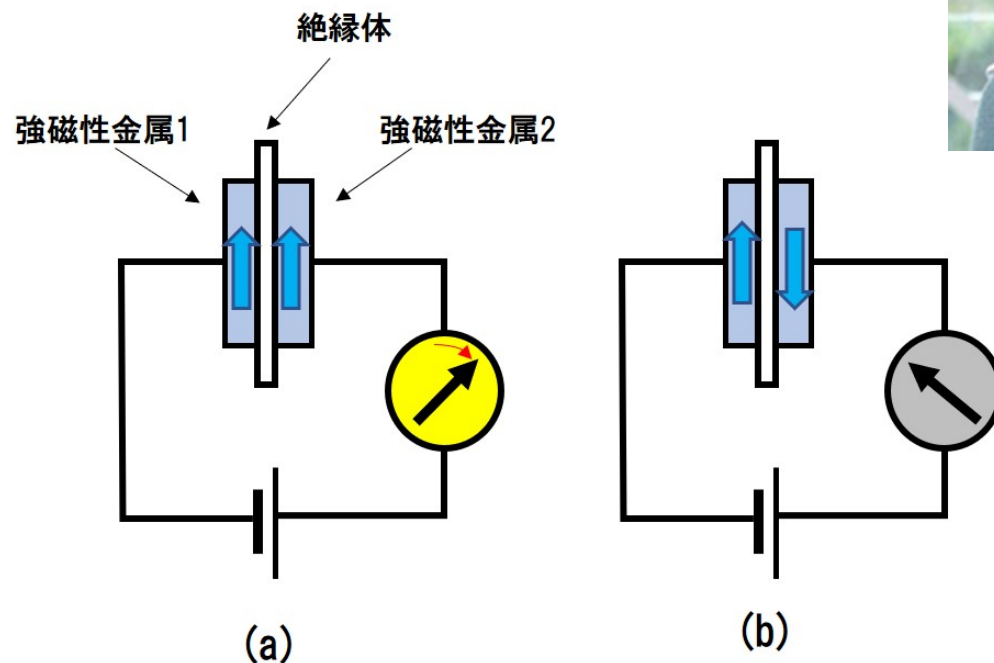
▶ 宮崎らは成膜技術を改良して、平坦でピンホールが少ない良質のAl-O絶縁層の作製に成功し室温での大きなTMRの観測につながったのです。

▶ 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たのです

さらなるブレークスルーをもたらしたのは宮崎ら⁵⁾、ムーデラら⁶⁾による磁気トンネル接合(MTJ)における室温でのトンネル磁気抵抗効果(TMR)の観測でした

5) T. Miyazaki and N. Tezuka: J. Magn. Magn. Mater. 139, L231 (1995).

6) J.S Moodera, et al.: Phys. Rev. Lett. 24, 3273 (1995)



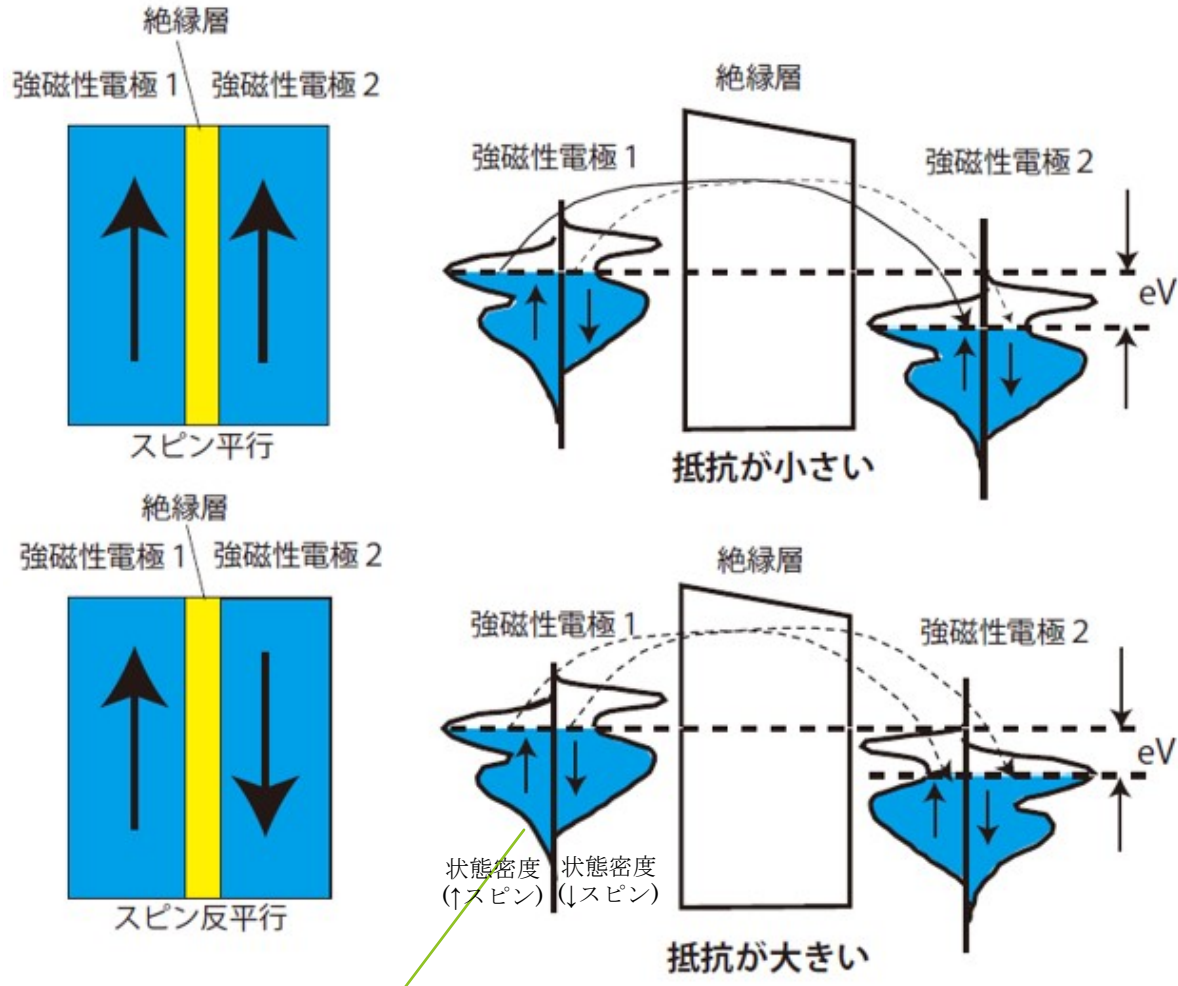
TMR比は、向かい合う2つの磁性層の磁化の向きが磁化の向きが(a)平行のときの抵抗 $R_{\uparrow\uparrow}$ と(b)反平行のときの抵抗 $R_{\uparrow\downarrow}$ との差を平行の抵抗で割った百分比で表されます。

$$\text{TMR}(\%) = (R_{\uparrow\uparrow} - R_{\uparrow\downarrow}) / R_{\uparrow\uparrow} \times 100$$



宮崎照宣

TMRの原理



スピ偏極バンドの状態密度曲線

- ▶ TMRは磁性体のスピ偏極バンドの状態密度曲線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と下向きスピとで異なります。
- ▶ 両電極のスピが平行だと、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。

バンド電子モデル

- ▶ 金属では、電子が原子位置に束縛されないで金属全体に広がって「金属結合」に寄与しています。このように、金属全体に広がった電子という考えに沿って磁気モーメントを考える立場を「遍歴電子モデル(itinerant electron model)」または「バンド電子モデル(band electron model)」といいます。
- ▶ 磁性体といえば、だれもが鉄Feを思い浮かべます。Feは金属です。鉄の磁性はバンド電子モデルで説明されます。
- ▶ 一般に金属であればエネルギーバンドモデルでは伝導帯の電子状態の一部が占有され残りが空いているような電子構造を持つはずで

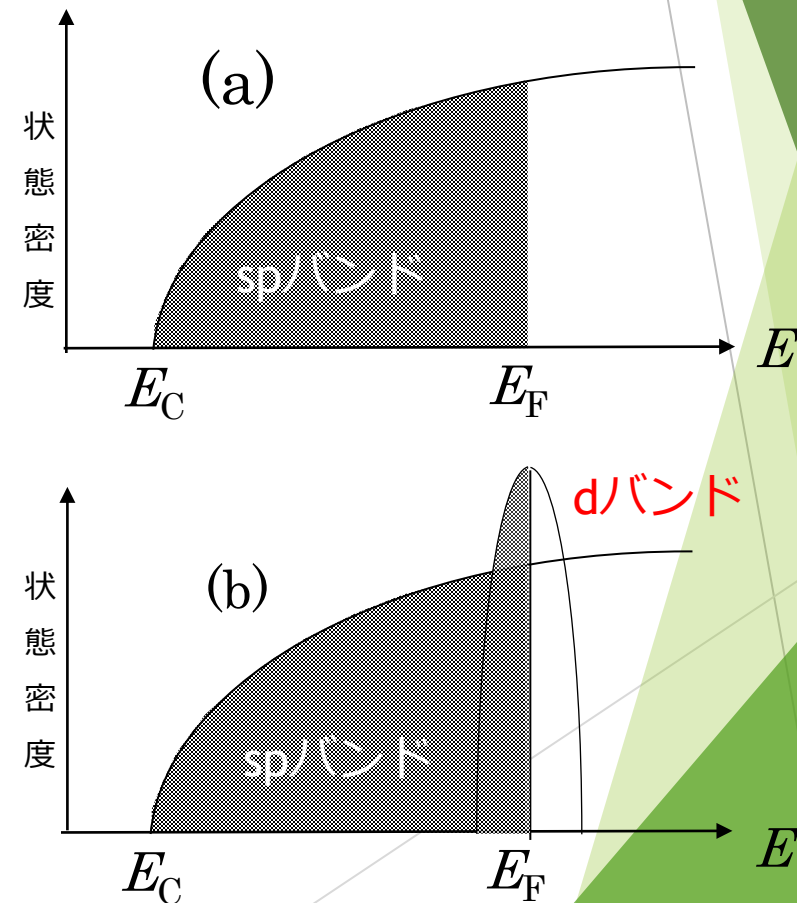
非磁性金属のバンド構造と磁性金属のバンド構造

金属においては、一般に伝導帯の電子状態の一部が電子で占有され、残りが空いているような電子構造をもちます。電子が占有された最も上のエネルギーはフェルミエネルギー E_F といいます。

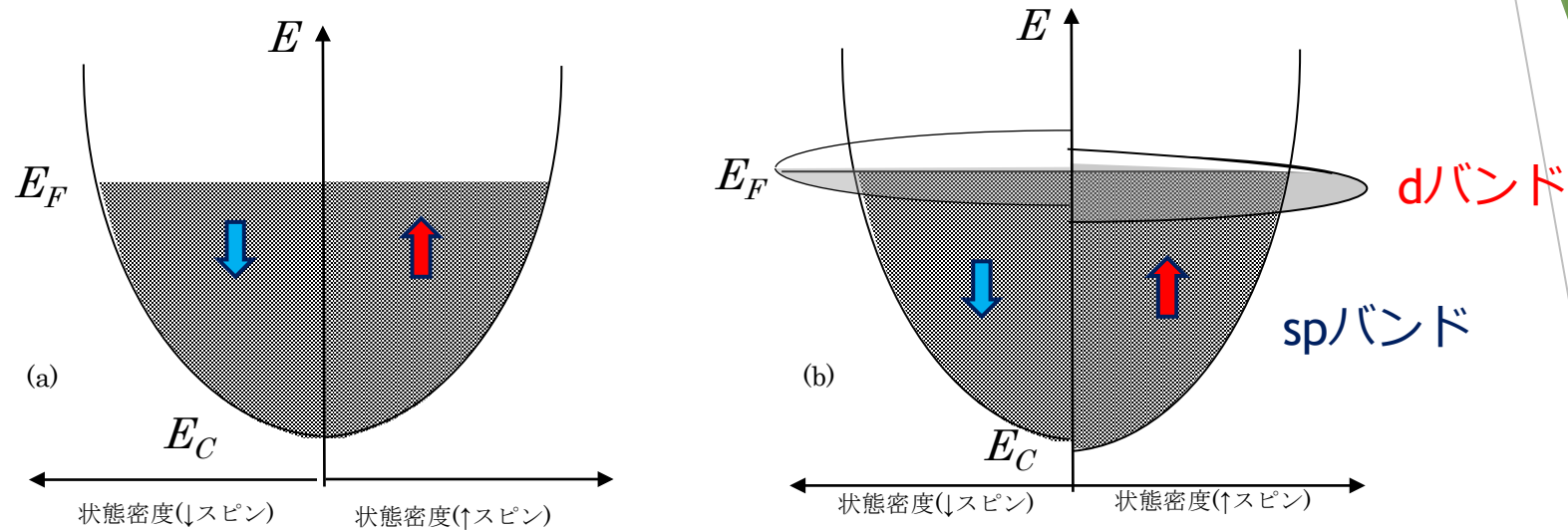
(a)はアルカリ金属(Na, Kなど)のs,p電子に由来するバンド状態密度です。

(b)は、磁性をもたない遷移金属のバンド状態密度です。

spバンドに加えて、狭く状態密度の高いdバンドが重畳しています。



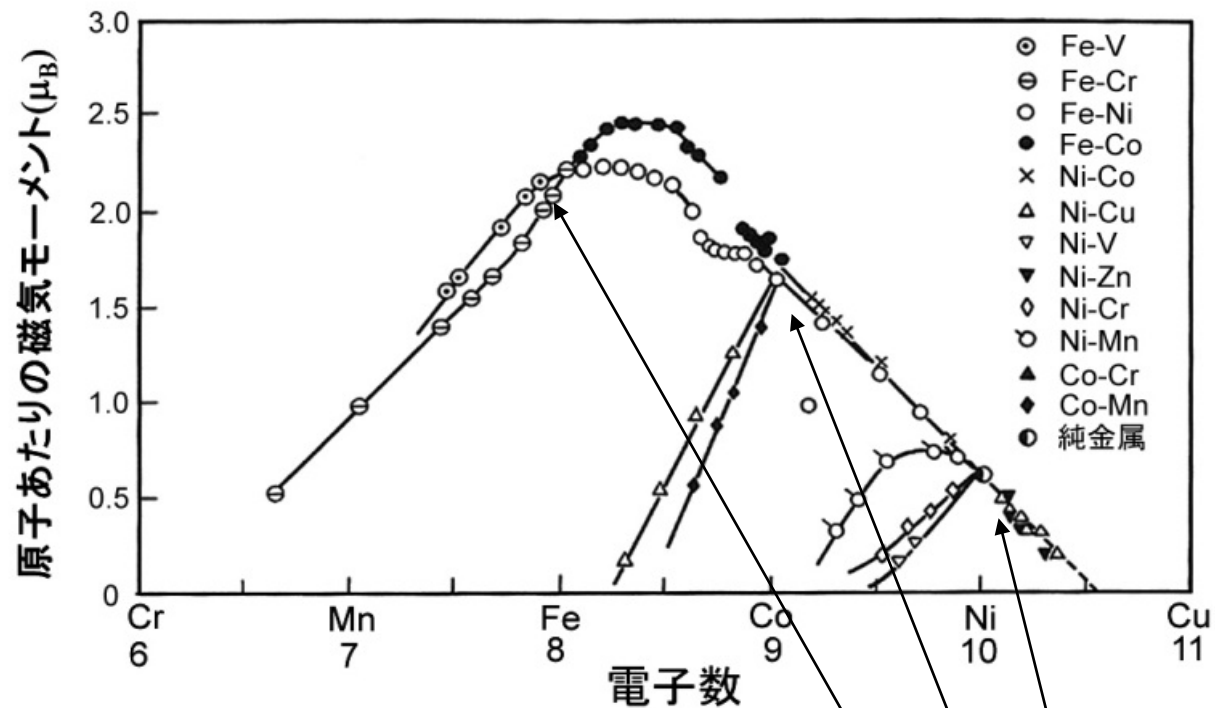
常磁性金属と強磁性遷移金属



- ▶ 磁性がある場合のエネルギーバンドを考えるに当たっては、電子のスピンのごとくにバンドを考えなければなりません。右側が上向きスピン、左側が下向きスピンを持つ電子の状態密度です。
- ▶ 普通の非磁性金属では図(a)のように、左右対称です。これに対し、強磁性体では、図(b)に示すように上向きスピンバンドと下向きスピンバンドとが分裂します。分裂は、狭い3dバンドで大きく、広いspバンドでは小さいです。この分裂を交換分裂といいます。

スレーター・ポーリング曲線

- ▶ 種々の遷移金属合金について1原子あたりの原子磁気モーメントと平均電子数の関係を示した曲線です。
- ▶ Crから始まって45°の傾斜で上昇する半直線か、Fe₃₀Co₇₀付近からNi₆₀Cu₄₀に向かって-45°で下降する半直線のいずれかに乗っています。



Fe, Co, Niの磁気モーメントはそれぞれ2.2, 1.7, 0.6 μ_B 、この値はフント則から期待される値より小さい。

強磁性金属のスピンの偏極バンド構造

図は、小口多美夫氏によりFLAPW法で計算されたFeのバンド分散曲線(a)と状態密度曲線(b)です。

上向きスピンの狭い3dバンドがフェルミエネルギー E_F の直下であり、下向きスピンの狭い3dバンドが E_F の直上にあることがわかります。これらの計算結果は、光電子分光によって実験的に検証されています。

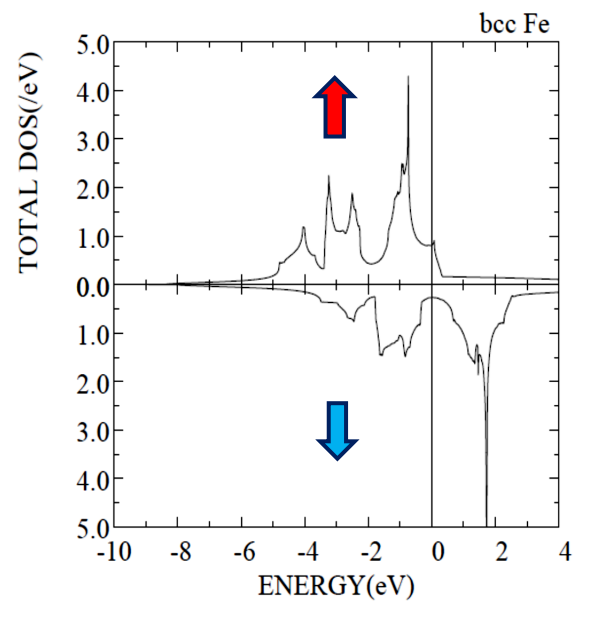
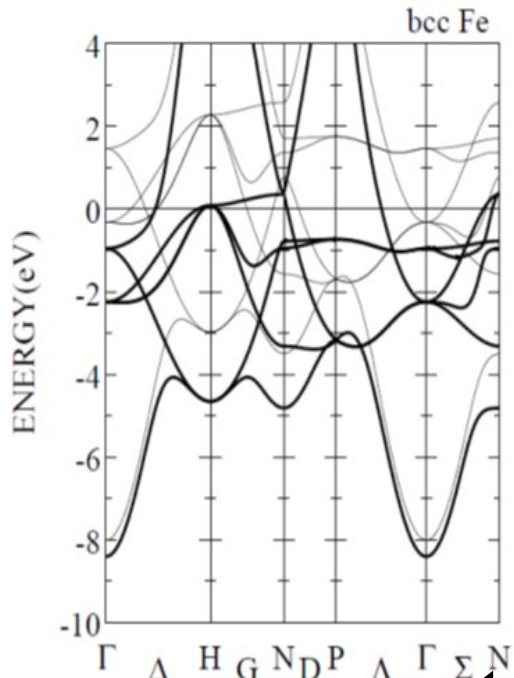
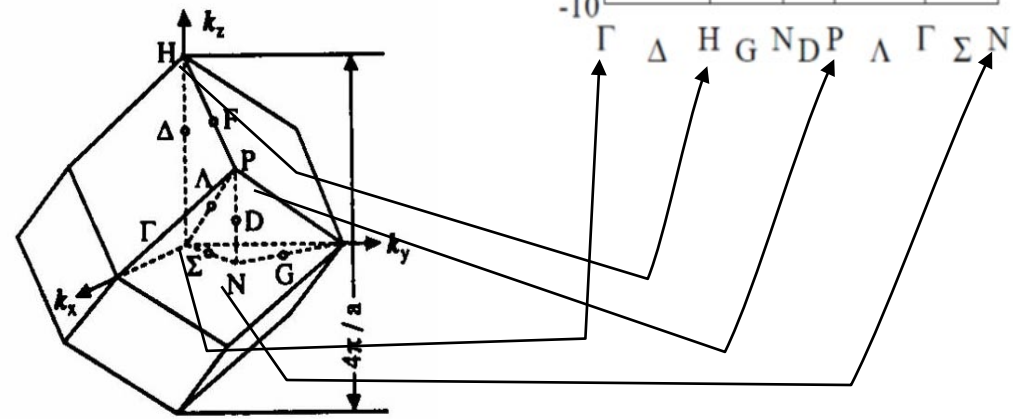
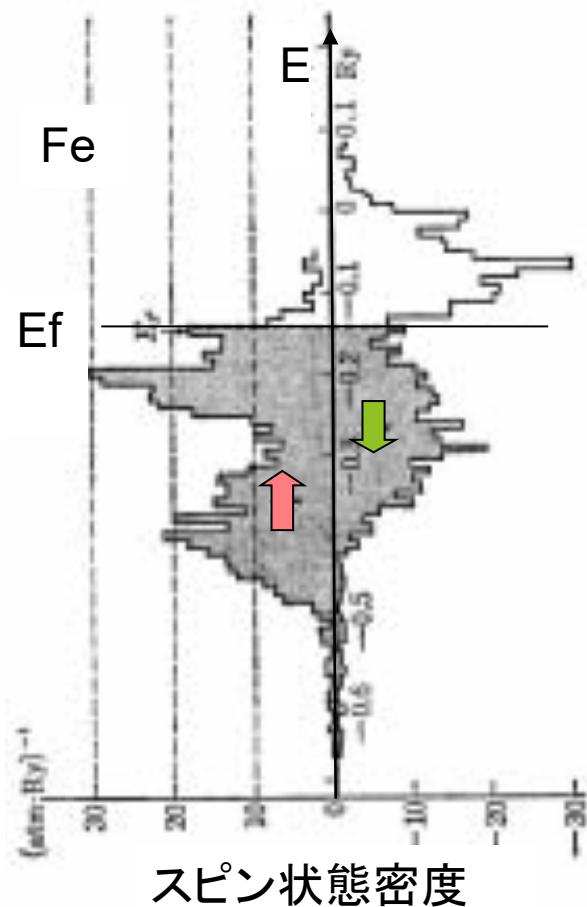


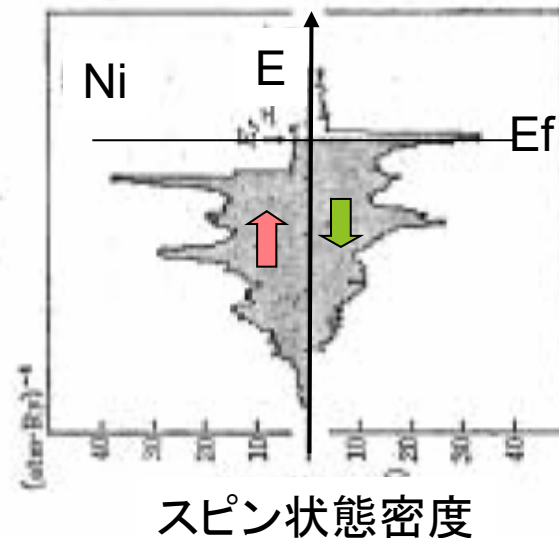
図 (a)Feのスピンの偏極バンドの分散曲線。太線:上向きスピン、細線:下向きスピン。(b)スピンの偏極状態密度曲線,(c)bcc構造のブリルアンゾーン(BZ)
(小口多美夫氏のご厚意による)

FeとNiのバンド状態密度



▶ Feは↑スピンバンドに比し↓バンドの状態密度がかなり小さい。 $n_{\uparrow} - n_{\downarrow} = 2.2$

● Niは↑スピンバンドは満ち、↓バンドにはわずかな正孔しかない。 $n_{\uparrow} - n_{\downarrow} = 0.6$



↓バンドに0.6個の空孔があるので、Cu-Ni合金ではCuからs電子が流れこみ、Cuが40%合金したときモーメントを失う。



5. TMRに革命的な ブレイクスルー

MgOバリアTMR素子の登場

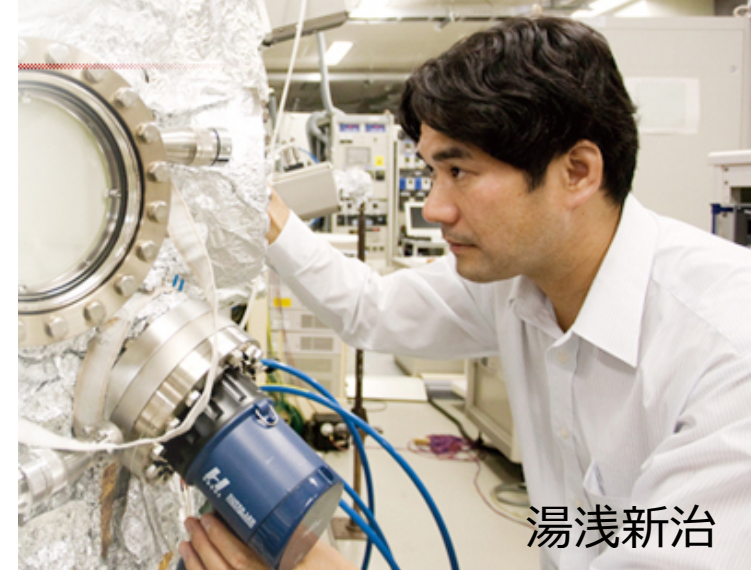
MgOバリアTMR素子の登場

- ▶ 2004年、湯浅らはトンネル障壁として、宮崎らのアモルファスAl₂O₃に代えてMgO単結晶層を用いることで、200%におよぶ大きなTMR比を実現したのです^{8,9)}。その後もTMRは図7のように伸び続け、2010年には600%に達しています。
- ▶ Fe/MgO/Fe構造において1000%におよぶTMRが理論的に予測され、これを受けて多くの研究機関が挑戦していましたが、検証できませんでした。
- ▶ 湯浅らは、Fe(001)/MgO(001)/Fe(001)のエピタキシャル成長に取り組み、トンネル層の乱れがほとんどなく、界面でのFe酸化層も見られない結晶性のよいMgOの成膜技術を確立しました。
- ▶ ほぼ同時期にIBMのパーキンらもMgOバリアMTJによる大きなTMRを報告しています¹⁰⁾。
- ▶ その後、湯浅らは、キャノンアネルバとの共同研究で、量産型のスパッタ装置を用いて、CoFeB/MgO/CoFeB構造のMTJの作製に成功、現在ほとんどすべてのHDD読み取りヘッドにこの技術が使われています。

8) S. Yuasa, et al.: Jpn. J. Appl. Phys. 43 L558 (2004).

9) S. Yuasa, et al.: Nature Mat.3, 868 (2004)

10) S.S. P. Parkin, et al.: Nature Mater. 3, 862 (2004).



湯浅新治

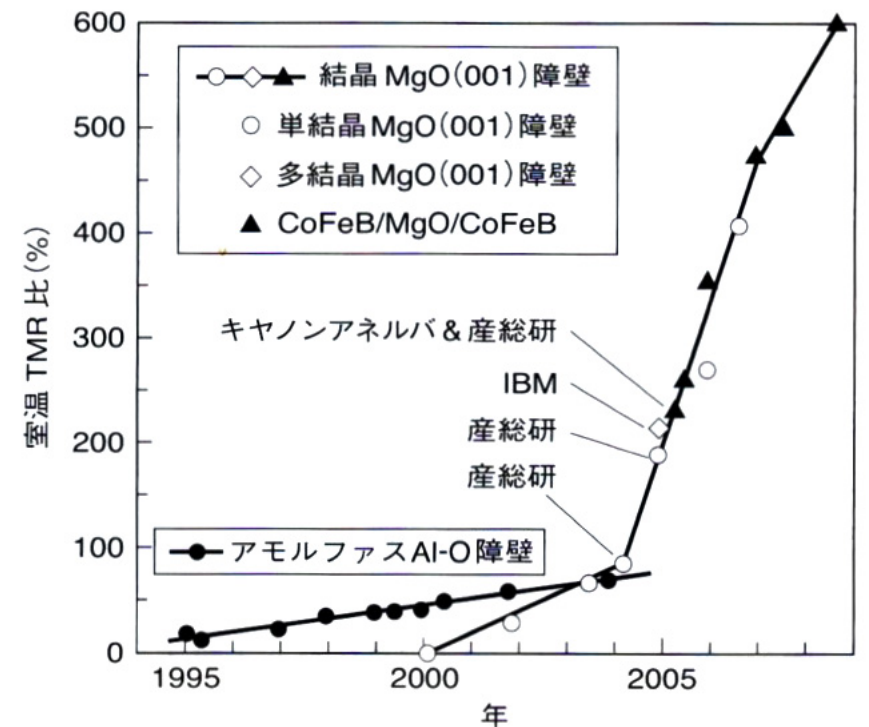


図7 トンネル磁気抵抗比の経緯

散漫散乱トンネルとコヒーレント・トンネル

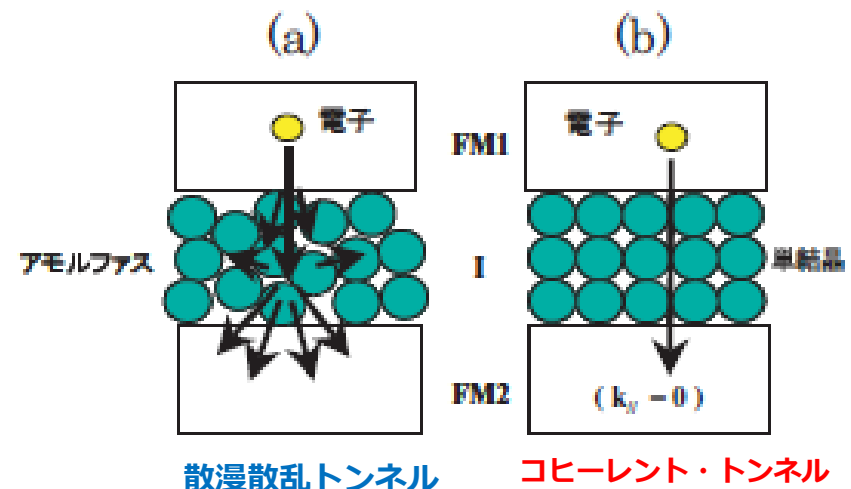
▶ 通常、トンネルする際スピンは保存され、散漫トンネルの場合TMRは一般に強磁性電極のスピン分極率 $P_i (i=1,2)$ を用いて次のようなJullierの式^[i]で表されます。

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

▶ 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。

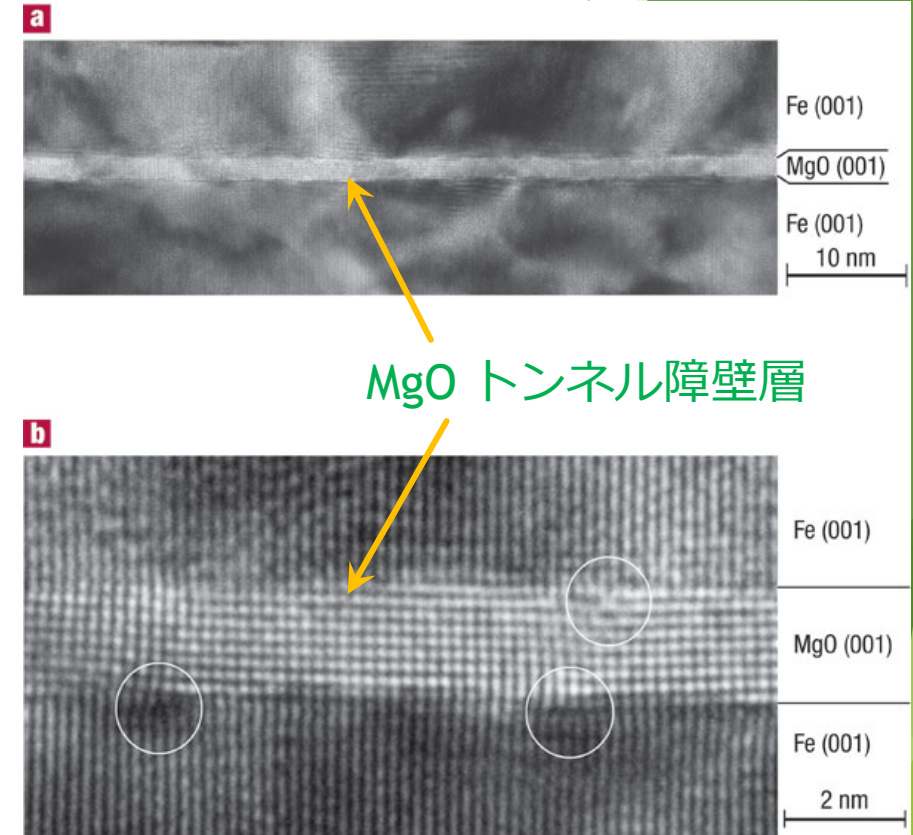
▶ コヒーレントトンネルではエネルギーのほかに運動量が保存されるため、MRは電極のバンド構造を反映し、磁化が平行のときはトンネルできるが反平行のときはトンネルできません。そのため、1000%という巨大TMRが理論的^[ii]に予測されました。

[i] M. Jullier, Phys. Lett. 54A, 225 (1975).
[ii] W. H. Butler et al., Phys. Rev. B 63 (2001) 054416,
J. Mathon and A. Umeski, Phys. Rev. B 63 (2001) 220403R



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。



6. 固体磁気 メモリ(MRAM) の登場

MRAMとは

- ▶ MRAM (magnetic random-access memory)は記憶素子に磁性体を用いた不揮発メモリの種類です。図8に示すように、MTJと半導体の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、得られた磁場が反転磁場 H_K を超えると、磁気状態を書き換えることができます。
- ▶ MRAMはアドレスアクセスタイムが10 ns台で、サイクルタイムが20 ns台と、DRAMの5倍程度なので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の高速アクセス性、DRAMの高集積性、フラッシュメモリの不揮発性の機能を合わせ持つ「ユニバーサルメモリ」としての応用が期待されています。

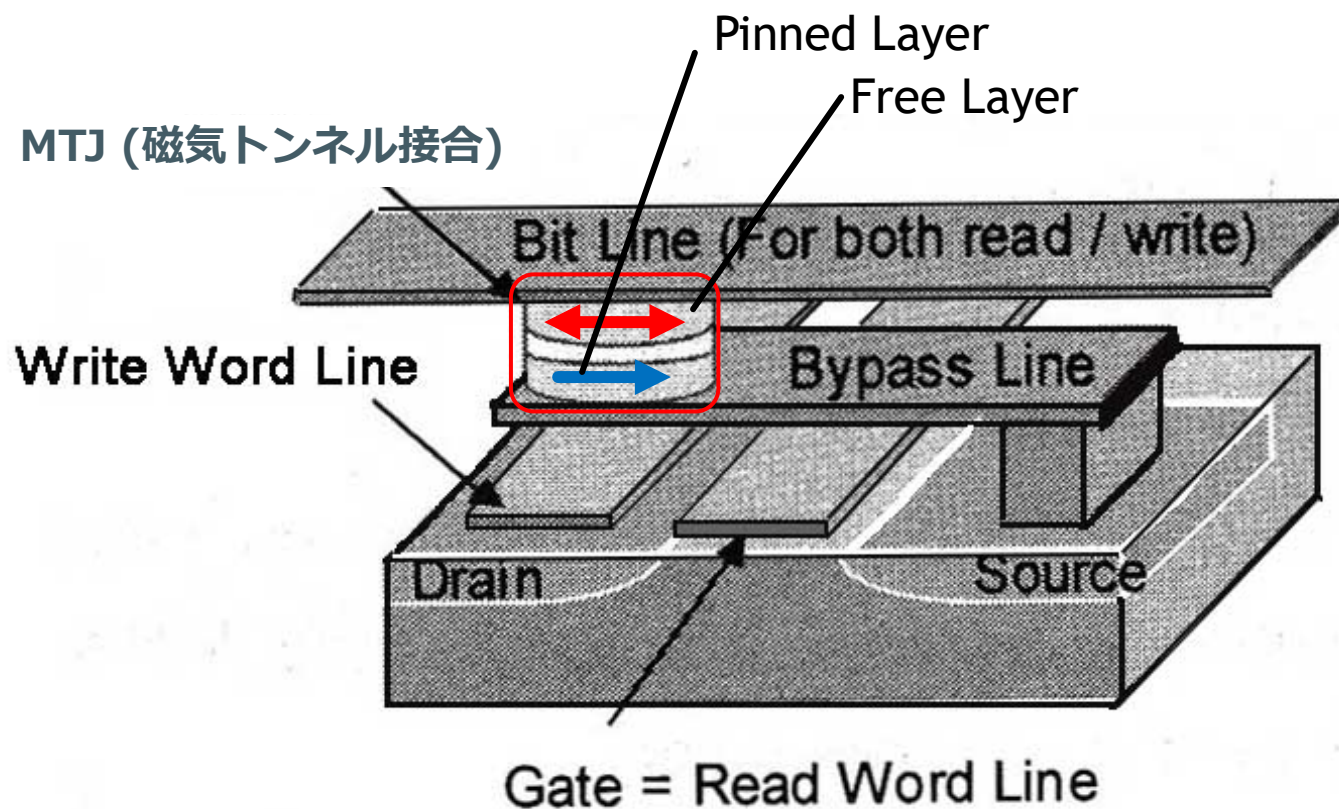


図8 MRAMの構成を表す図

しかし、電流で磁界を発生する方法では高集積化が難しいという欠点があります。この問題を解決したのが次項のスピン移行トルク(STT)でした。

MRAM と他のメモリとの比較

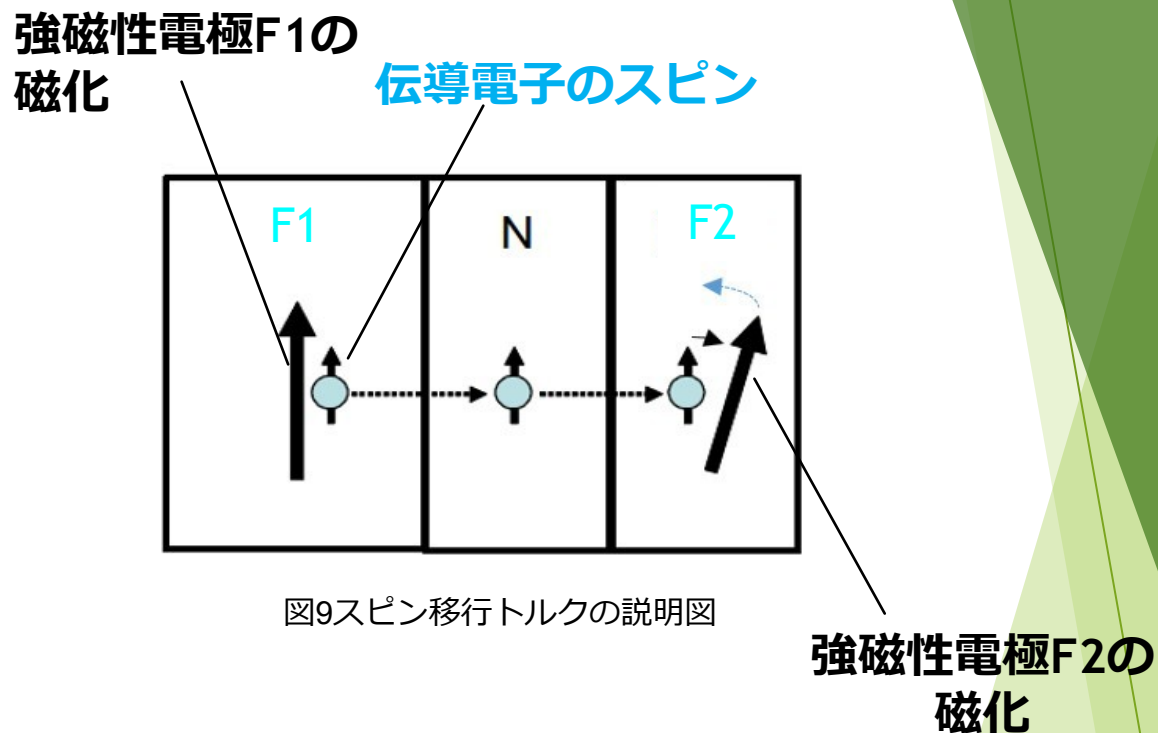
	SRAM	DRAM	Flash	FRAM	MRAM
読出速度	高速	中速	中速	中速	中高速
書込速度	高速	中速	低速	中速	中高速
不揮発性	なし	なし	あり	あり	あり
リフレッシュ	不要	要	不要	不要	不要
セルサイズ	大	小	小	中	小
低電圧化	可	限	不可	限	可



7. スピン移行トルクと STT-MRAMの 製品化

コイルなしに電気で磁気を変える

スピン注入磁化反転



- ▶ 1996年、新たなスピントロニクス分野としてスピン移行トルクによるスピン注入磁化反転のアイデアがSlonczewski¹¹⁾およびBergerら¹²⁾によって提案され、実験的に検証されました。図9に示すように、強磁性電極F1からスピン偏極した電流を、非磁性層Nを通して傾いた磁化をもつ対極強磁性電極F2に注入すると、注入された電子のスピンがF2の向きに傾けられますが、その反作用として電子が持っていたスピントルクがF2の磁化に移行して、それがきっかけで磁化反転をもたらすとされています。

- ▶ 開発当初は 10^8A/cm^2 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CoFeB/MgO/CoFeB垂直磁化のTMR素子を用いて実用可能な 10^6A/cm^2 台の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¹³⁾。

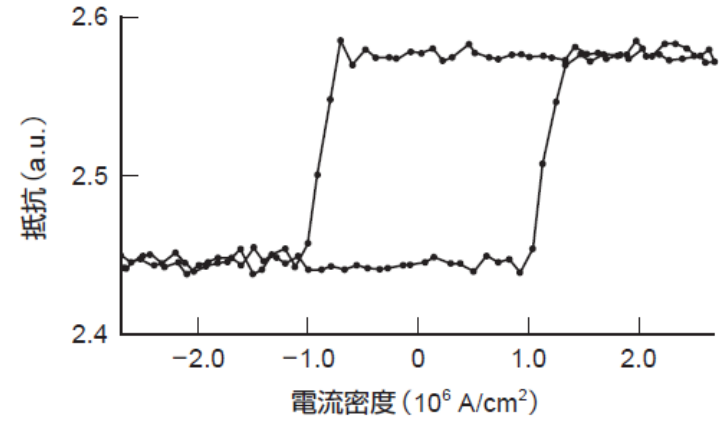
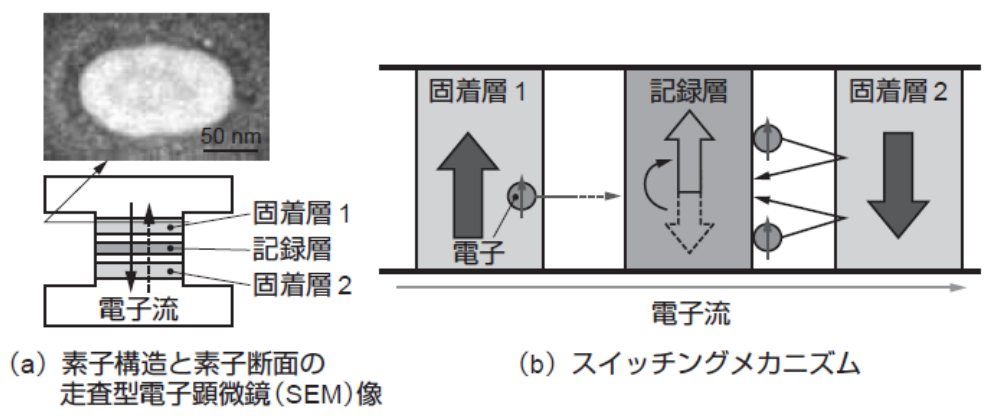
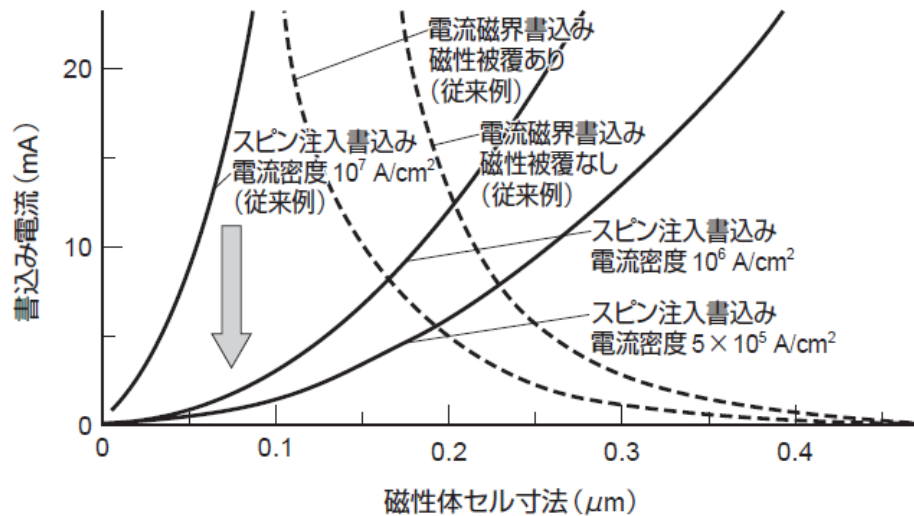
11) J. Slonczewski: J. Magn. Magn. Mater. 159, L1 (1996)

12) L. Berger: Phys. Rev. B 54 (1996) 9353.

13) S. Ikeda et al.: Nature Mater. 9, 721 (2010).

スピン注入磁化反転のメリット

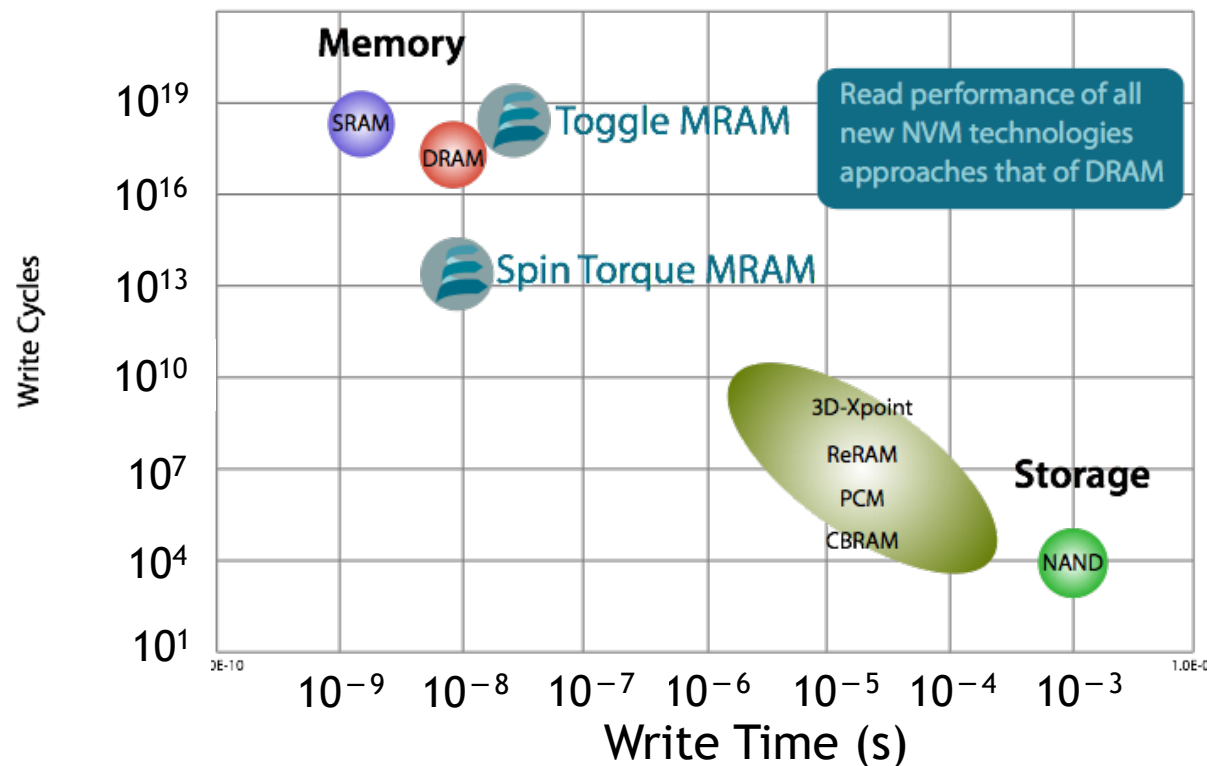
- ▶ スピン注入磁化反転は、反転電流は素子面積に比例し、素子面積が小さいほど低電力化が可能になる。
- ▶ 素子寸法が $0.2\mu\text{m}$ 以下になると、電流磁界書き込みよりも書き込み電流が小さくなる。



中村他：東芝レビューVol.61 No.2 (2006)

STT-MRAM市販

- ▶ STT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、微細化すれば電流密度も小さくできるので、高集積化することが可能になりました。
- ▶ STTを用いたMRAMはSTT-MRAMと呼ばれます。米国エバースピンテクノロジー社は256 Mbitおよび1MbitのSTT-MRAMを市販しています¹⁴⁾。
- ▶ 最近になり、スピン流を用いたスピン軌道トルク(SOT)磁化反転を用いたMRAMの開発が進められ、注目を集めています¹⁵⁾。





8.STTの動的解析と スピントルク発振子

スピントルクで磁気モーメントを反転できるわけ

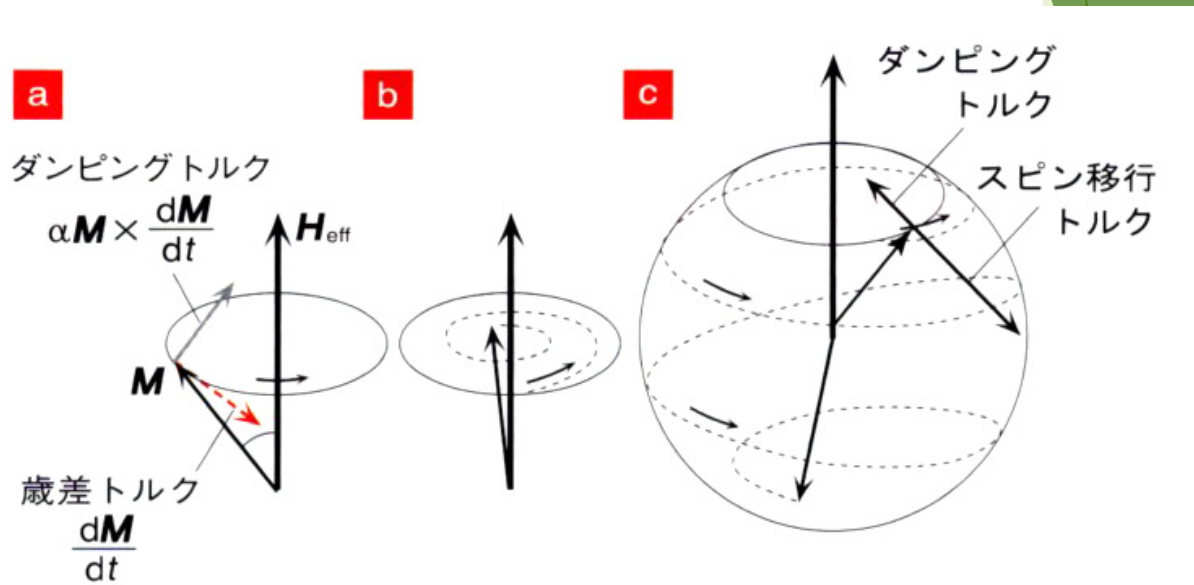


図10 スピン移行トルクと歳差運動

▶ 伝導電子のもつわずかなスピントルクだけで、なぜ相手の磁性体の磁気モーメントを反転できるのでしょうか。それは、磁気モーメントが歳差運動をする力を使うからできるのです。

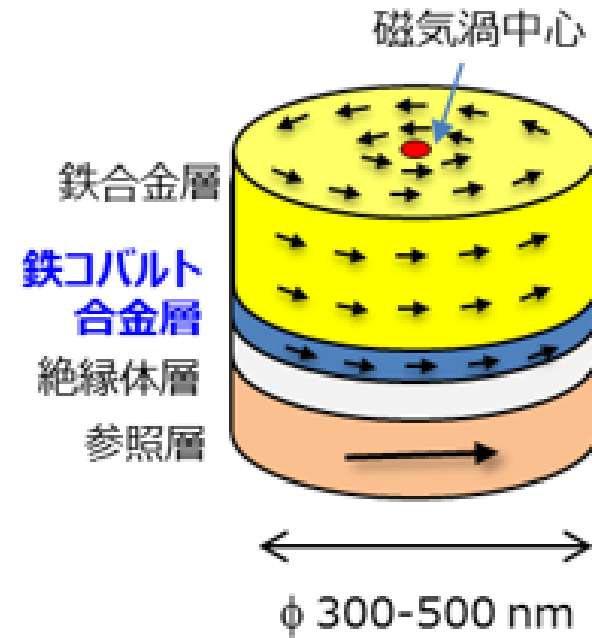
▶ 図10に示すように、磁性体の磁気モーメント M は、外部磁場 H_{eff} を加えるとその外積 $M \times H$ で表されるトルクを受けて歳差運動を始めます。

▶ そして、 $M \times dM/dt$ に比例するダンピングトルクを受けて回転しながら次第に磁界方向に傾いていきます。

▶ スピン移行トルクがダンピングトルクより大きくなると歳差運動が増幅され、ついには反転してしまうのです。このように歳差運動の助けを借りて反転するので少ない電流での磁化反転が可能なのです。

スピントルク発振子

- ▶ もし、この磁気モーメントが、ダンピングトルクを丁度打ち消すような方向のスピントルクを伝導電子スピンから受け取ると、歳差運動はいつまでも続きます。これがスピントルク発振素子(STO)です。
- ▶ 図は産総研が開発した磁気渦型STO素子を模式的に描いたものです¹⁶⁾。スピントルク発振素子は、ハードディスクのさらなる記録密度向上のために研究されているマイクロ波アシスト磁気記録(MAMR)用の発振器として期待されています。



磁気渦型スピントルク発振素子の模式図

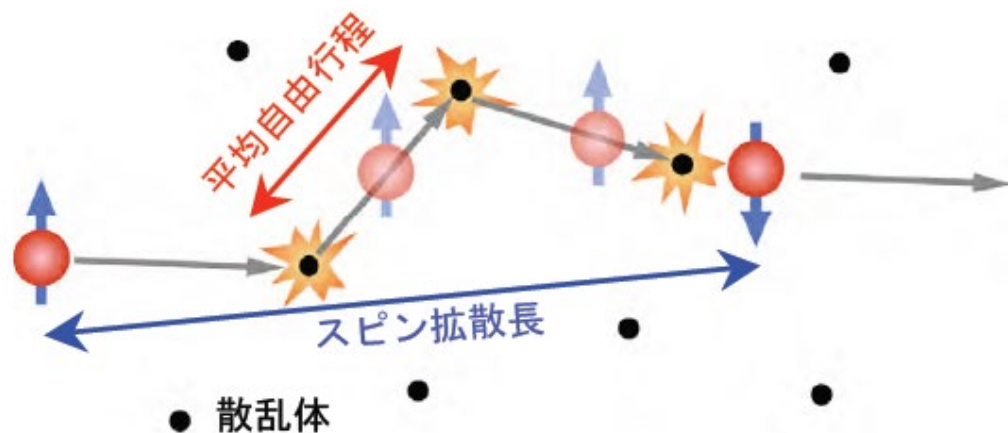
https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2016/pr20161216/pr20161216.html



9. スピン流が 拓く新しい物理

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。

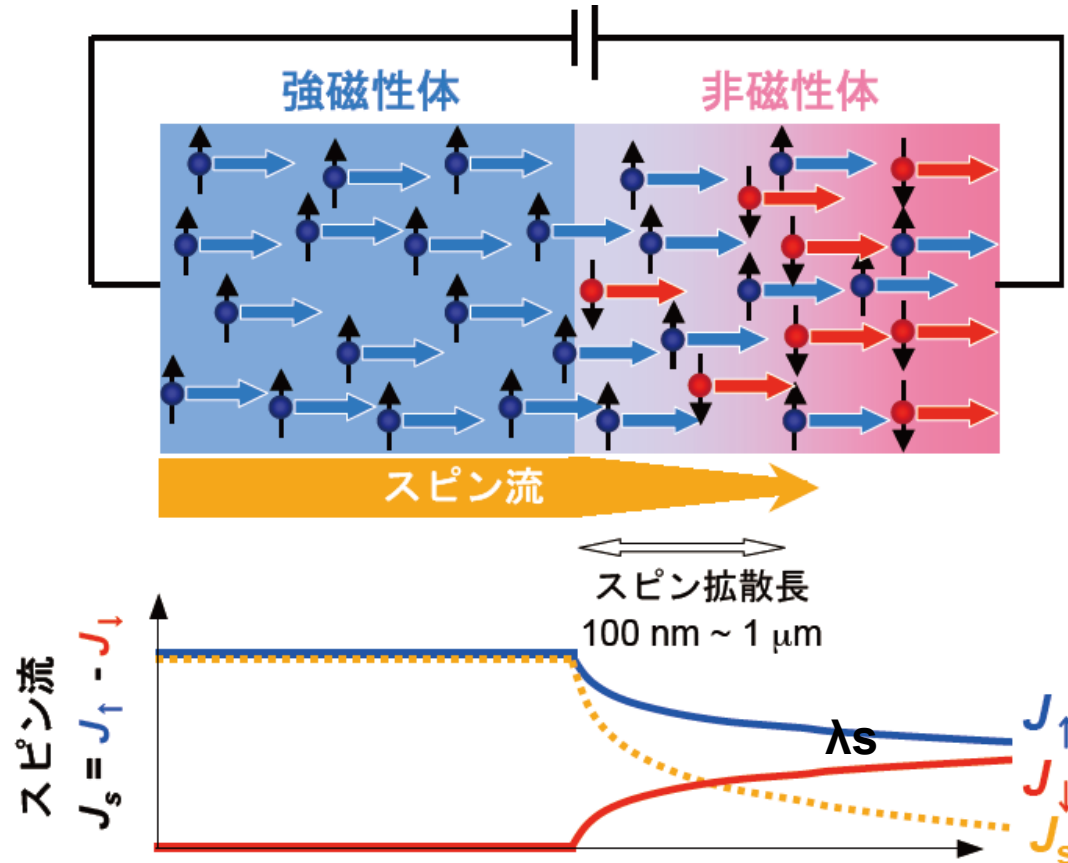


ナノスケールでの
磁気変調構造

↓
スピン依存伝導
(GMR)

ナノ磁性と密接不可分

(1) 電流を伴うスピン流



- ▶ 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えます。

図11 強磁性体と非磁性体の界面に存在するスピン流

(2) 電流を伴わないスピンの流れ：純スピンの流れ

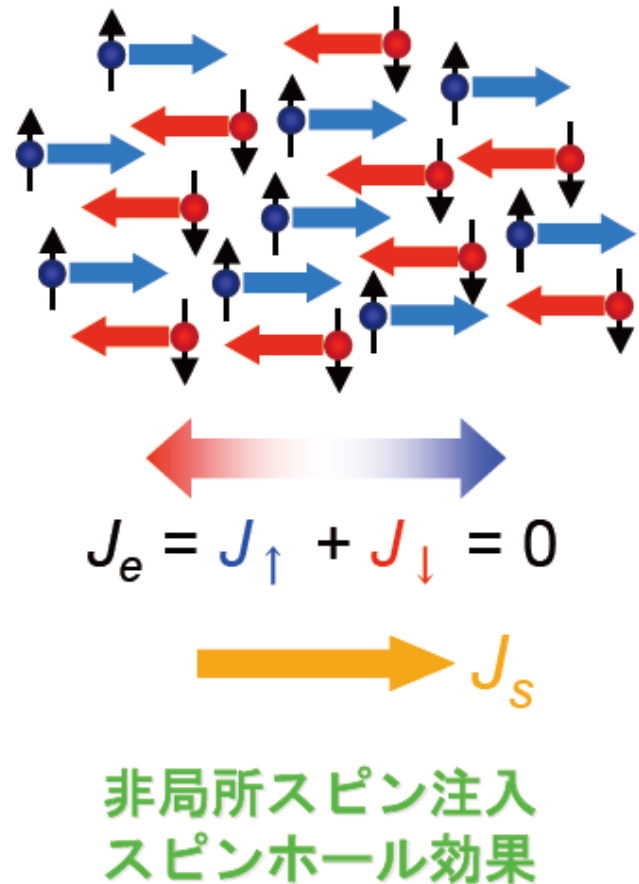


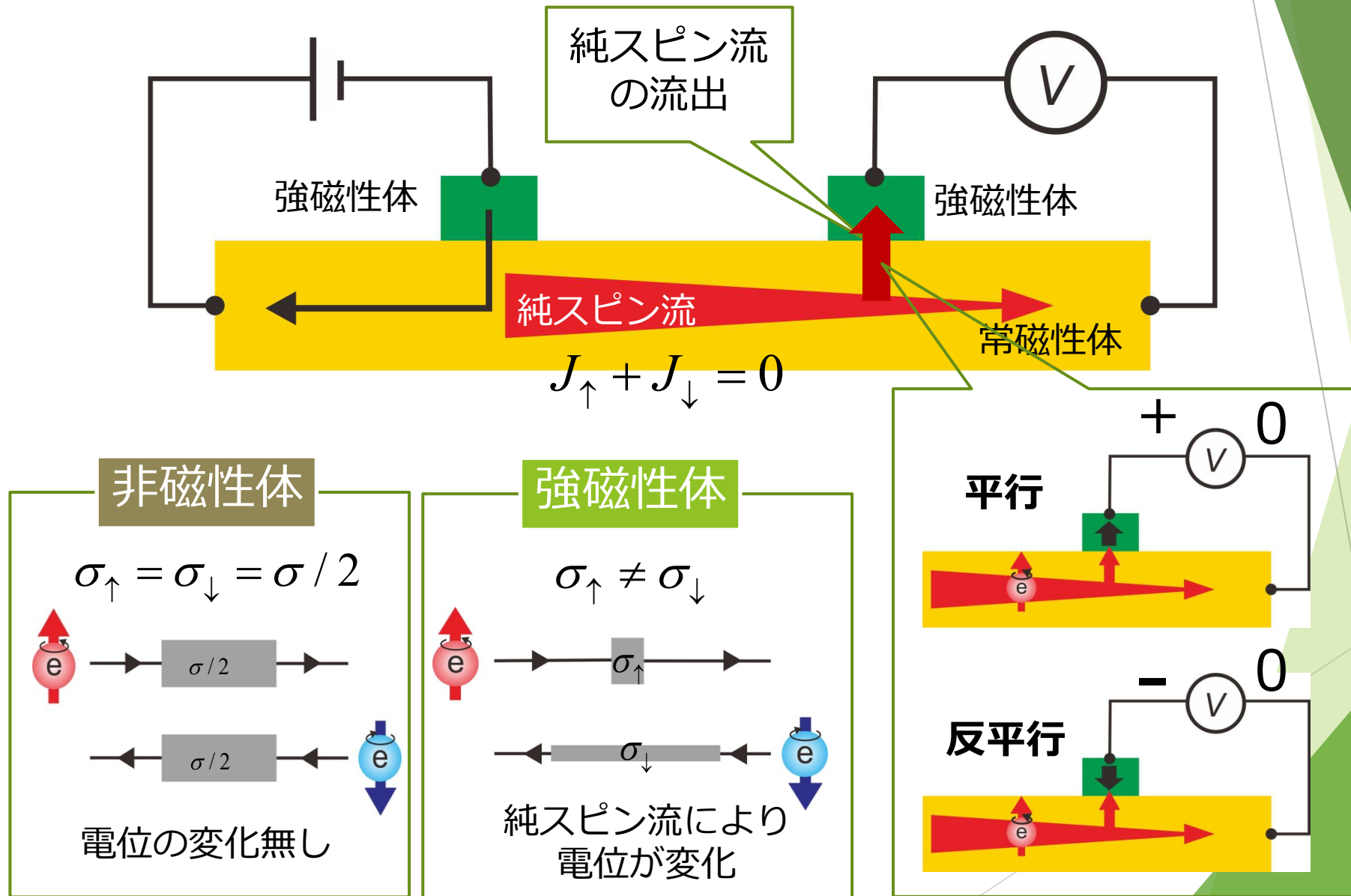
図12 電流を伴わないスピンの流れ

- ▶ ↑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ゼロです。この場合ジュール熱による損失は発生しません。
- ▶ ここで、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れ J_s は右に向かって流れるのです。
- ▶ 純粋なスピンの流れを用いれば、伝搬損失なしに情報が伝送できます。

スピン流の特徴と応用

- ▶ ふつうの電流は保存量です。回路をつくると必ず戻ってきます。
- ▶ 一方、スピン流は、上向きスピンの流れと下向きスピンの流れの差なので、スピンを注入してもいつかは緩和してしまいます。
- ▶ スピン緩和長は数10nmからサブ μm 程度なので、ずっと前の電磁気学においては、考慮する必要のない量として無視されていました。
- ▶ 最近になってスピン緩和長と同程度かそれ以下のサイズのデバイスが当たり前になってくると、スピン流を無視できなくなりました。
- ▶ それどころか、スピン流を積極的に利用しようというのが、スピントロニクス新しい流れなのです。
- ▶ 前のスライドで述べたように純粹スピン流を用いれば、電流によるジュール熱の損失なしに情報伝送ができるはずだからです。

純スピン流の発生と電気的検出





10. スピンホール効果と 逆スピンホール効果

スピン流と電流の変換

- ▶ 図(a)に示すようにPtなどスピン軌道相互作用の大きな金属に電子を流すと上向きスピンの電子と下向きスピンの電子の流れがスピン軌道相互作用で逆に曲げられ、電流と垂直の方向にスピン流が生じます。これをスピンホール効果と呼びます¹⁷⁾。

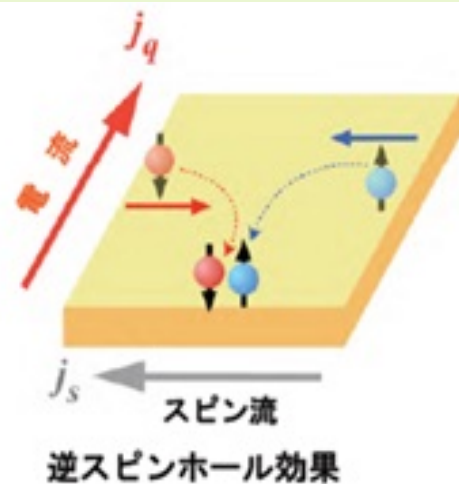
17) M.I. Dyakonov et al.: JETP Lett..13 467 (1971)



図(a)

- ▶ 図(b)のように何らかの形でスピン流がPtなどに流れ込むと、スピン流と垂直方向に電場を生じます。この現象を見出した齋藤は、逆スピンホール効果と名付けました¹⁸⁾。逆スピンホール効果を使うことによって、さまざまなスピン流を電圧に変換して観測できるようになりました。

18) E. Saitoh et al.: Appl. Phys. Lett..88, 182509 (2006).



図(b)

非局所配置を用いた逆スピンホール効果 実験の模式図

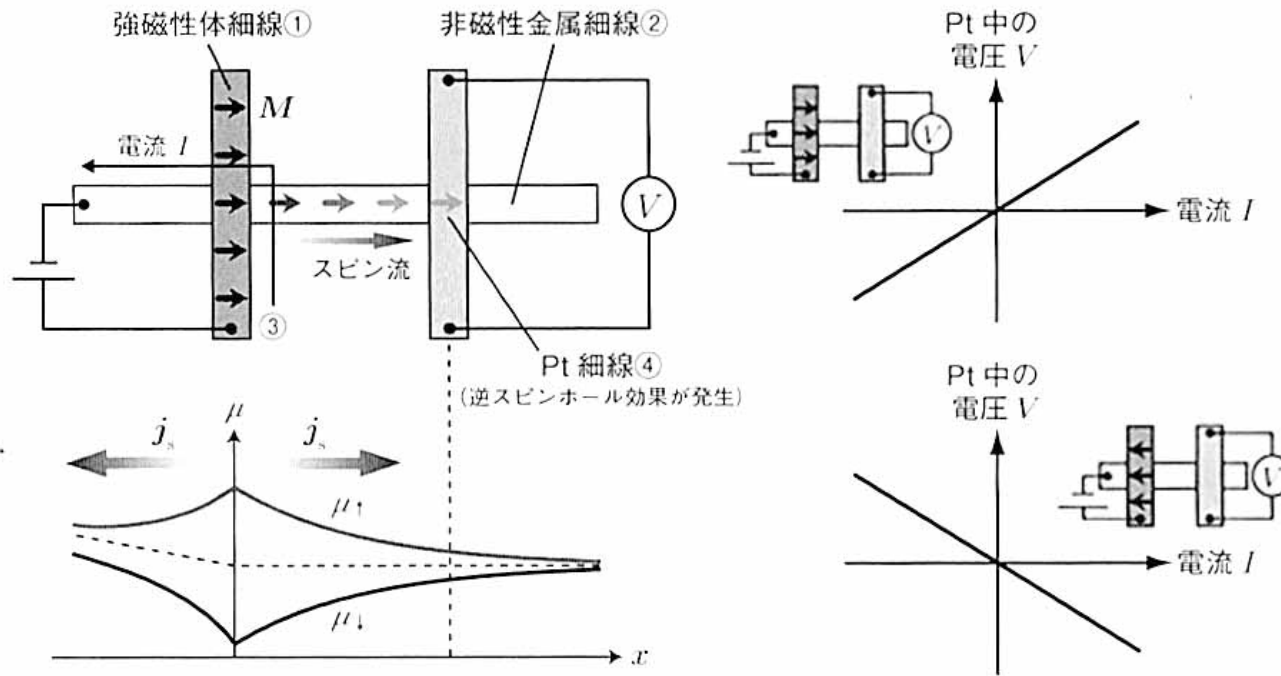
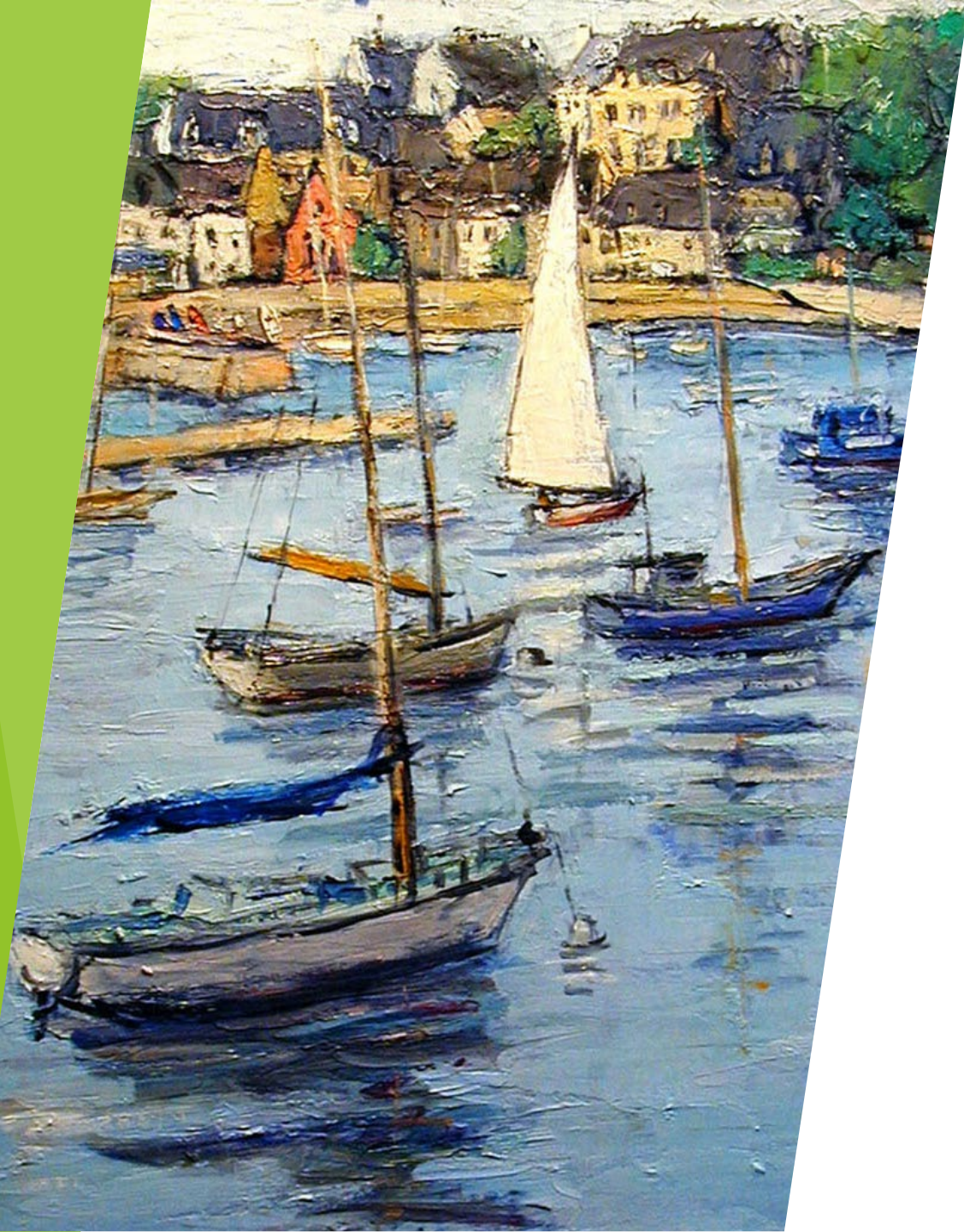


図 4.4 非局所配置を用いた逆スピンホール効果実験の模式図。右図はそれぞれ強磁性金属 ① の磁化が右向きおよび左向きの条件で、電流 I を ③ に沿って流したときに右側の白金 (Pt) 細線 ④ の両端に生じる電圧信号 V である。電流は ③ に沿って流れるが、スピン拡散長は十分に長いため、スピン蓄積が非磁性金属 ② 中を拡散し Pt 細線 ④ まで到達し、スピン流を注入する。このスピン流による逆スピンホール効果電圧が検出された。

齊藤英治・村上修一：スピン流と
トポロジカル絶縁体（共立2014）より



11. スピン ゼーベック効果 と スピン量子整流

スピンゼーベック効果

- ▶ 強磁性体に温度勾配をつけると熱流によるスピン流が生じます。このスピン流をスピン軌道相互作用の大きな金属に注入すると、逆スピンホール効果によって電圧に変換することができます。これをスピンゼーベック効果と呼びます。内田らは、図15の上図に示すように、温度勾配をつけたパーマロイにPt電極を付けることによって、この効果の観測に成功しました¹⁹⁾。
- ▶ 図15の下図右に示すように、温度勾配の低温側と高温側でスピンゼーベックの符号が反転しています。

19) K. Uchida et al.: Nature 455, 778 (2008).

強磁性体としては、パーマロイなどの金属だけでなく、磁性ガーネットのような絶縁性の磁性体でも観測されます²⁰⁾。この場合のスピン流に電子の流れは関与せず、磁性原子の局在スピンの振動が波として伝播するスピン波スピン流と考えられています。

20) K. Uchida et al.: Appl. Phys. Lett. 97 172505 (2010).

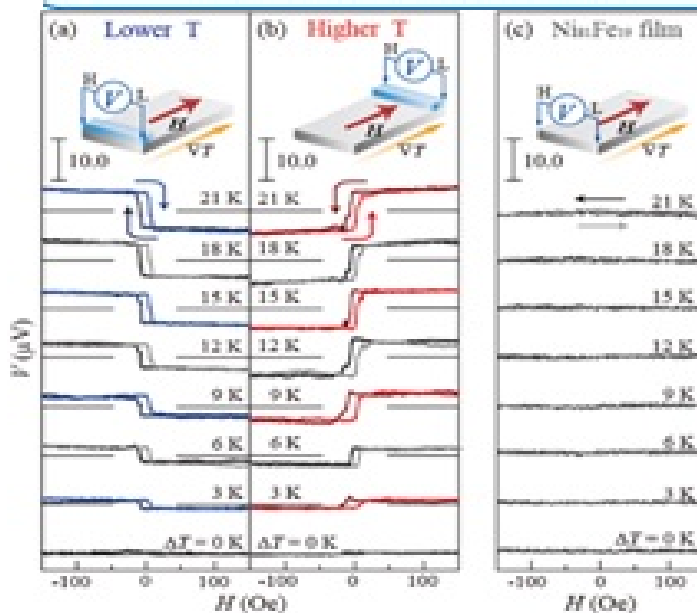
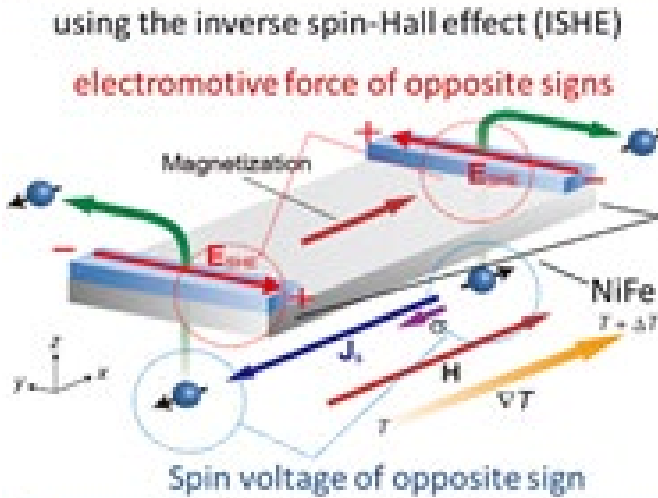


図15 Pt電極をつけたパーマロイにおけるスピンゼーベック効果

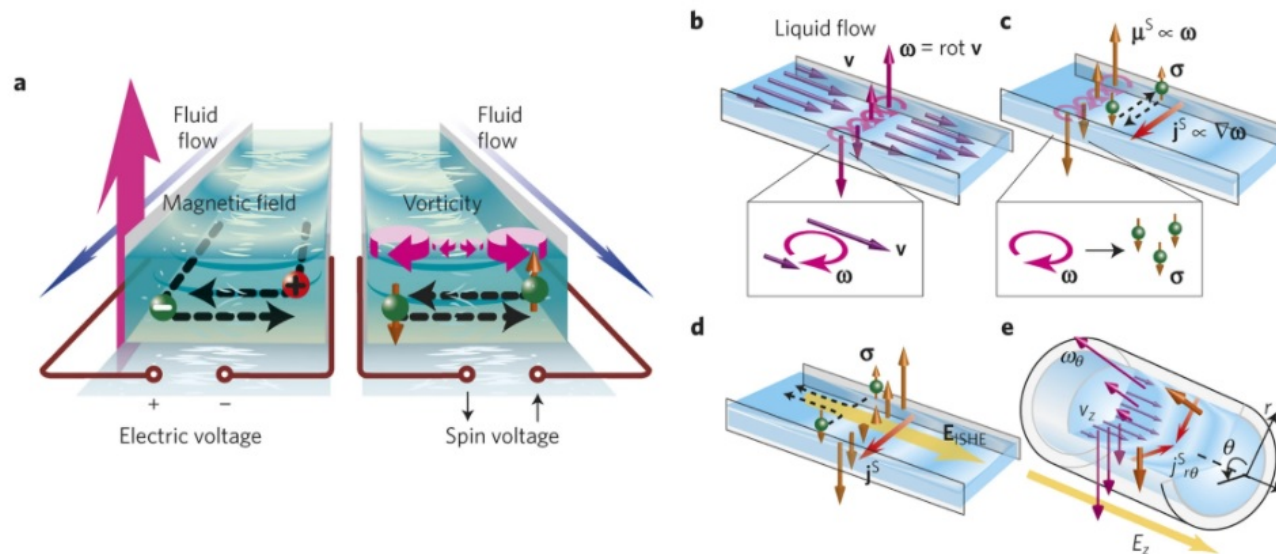
スピン量子整流

- ▶ 電流は時間を反転すると逆方向に流れますが、スピン流は時間反転対称性がないので変わりません。物質のランダムな運動をスピン流として一方向に整えれば、外部から大きなエネルギーを加えることなく、別のエネルギーに変換したり情報処理したりできるようになります。
- ▶ 管に液体金属を流すだけで、管の壁付近で液体金属中に渦運動ができ、電気エネルギーを取り出せるという、驚くべき現象も発見されています²¹⁾

21) R. Takahashi et al.: Nature Phys. 12, 52 (2016)

Figure 1: Concept of spin hydrodynamic generation.

From: Spin hydrodynamic generation



12. 終わりに

- ▶ スピントロニクス領域で見出された数々の基礎物理法則は、新たなデバイス開発への道筋を示しており、次世代の革新的デバイス技術の芽として熱い視線を浴びています。
- ▶ 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。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。

