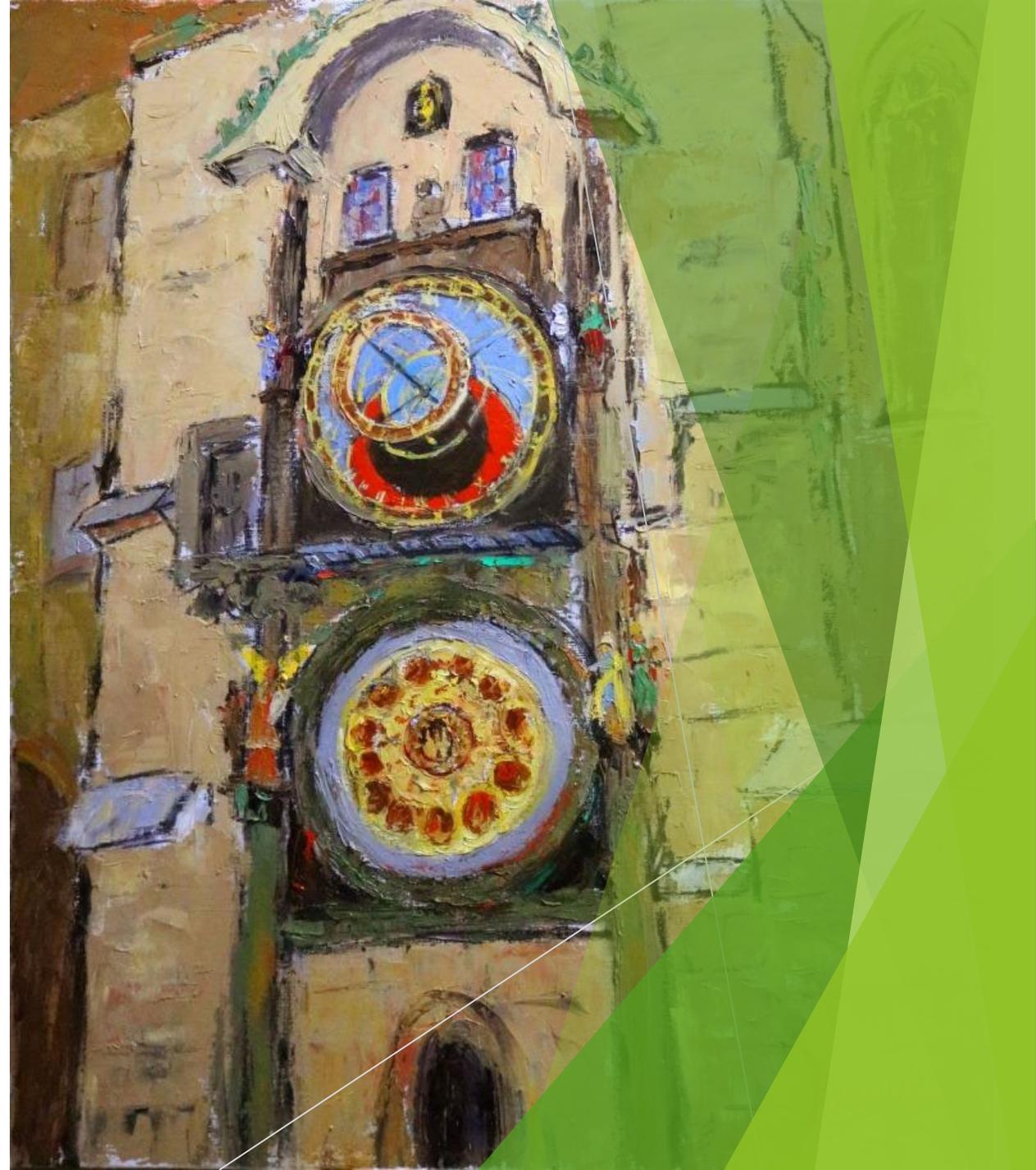


スピントロニクス

基礎から最近の展開まで

佐藤勝昭

東京農工大学名誉教授



講師 自己紹介

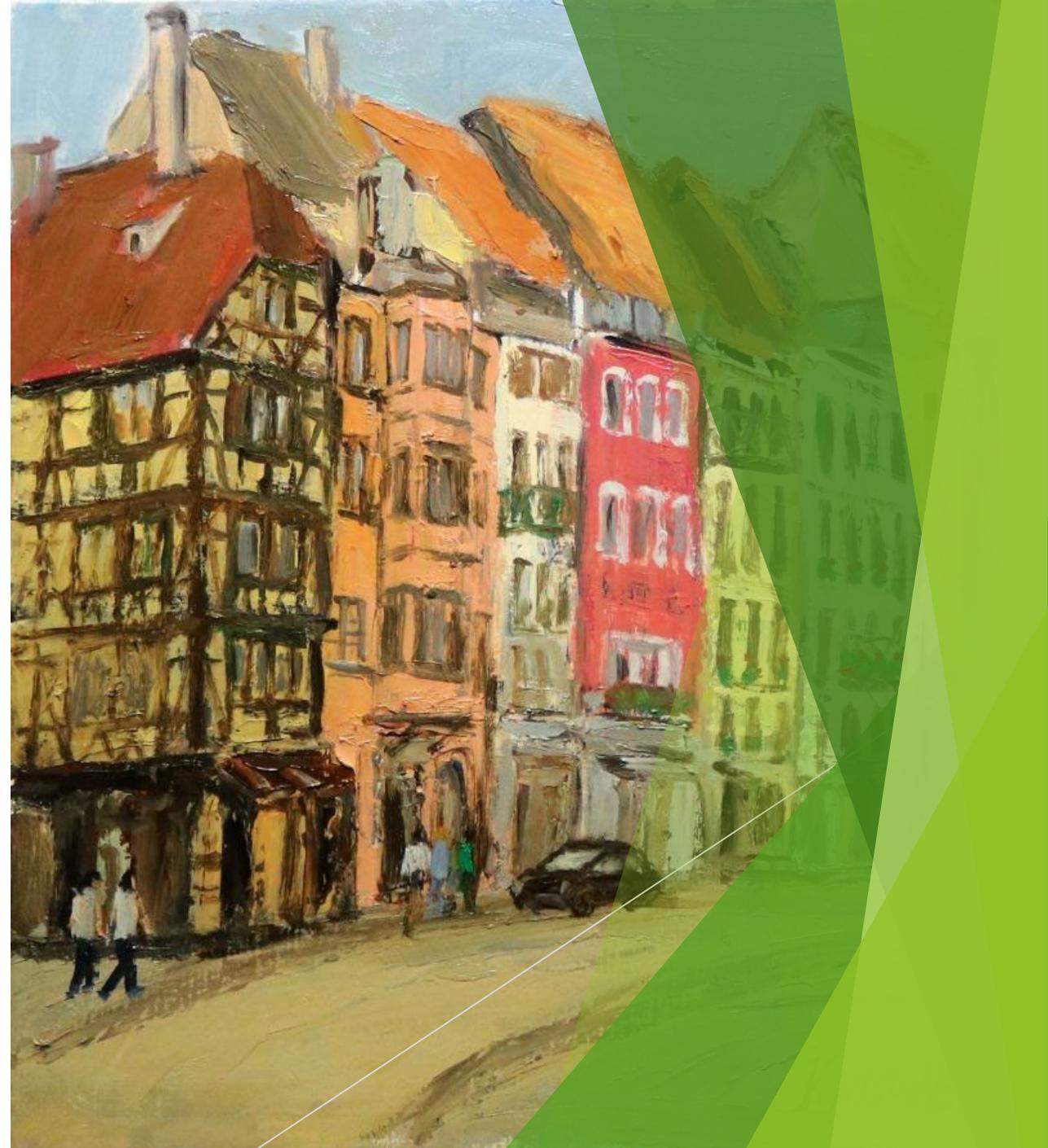
- ▶ 1966 京都大学修士課程修了(1978 京都大学工学博士)
- ▶ 1966 NHK入局
1968-1984 基礎研 物性研究部
- ▶ 1984 東京農工大学 工学部助教授
1989 同教授
2005 同理事(副学長)
2007- 同名誉教授
2018- 同リサーチアドバイザー
- ▶ 2007-2013 JSTさきがけ[次世代デバイス]研究総括
2008-2019 JST研究広報主監
2010-2018 JST研究開発研究センターフェロー
2018-2023 同 特任フェロー
- ▶ 2017-2019 文科省ナノテクノロジープラットフォームサブPD
2019-2022 同PD
- ▶ 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： 日府展洋画部副理事長・審査員、個展18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



長岡技科大学長室にて(2022. 8.9)

CONTENTS

1. はじめに
2. 巨大磁気抵抗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 (TMR)の発見
5. MgOを絶縁層に用いた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. スピンカロリとロニクス
12. スピントロニクス、最近の注目分野
13. 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、最近のスピントロニクス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

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

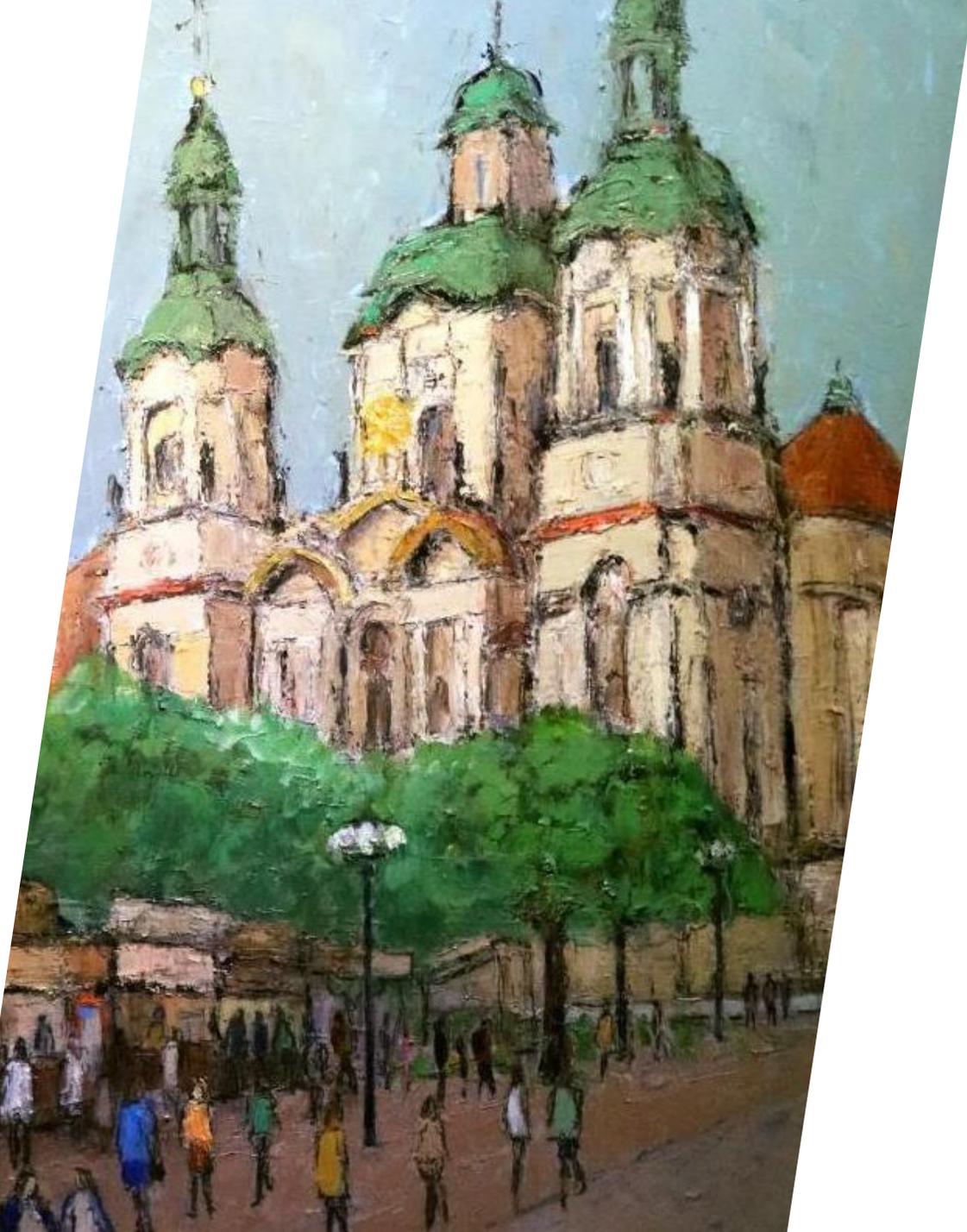
図2は、ハードディスクです。面記録密度を上げようと小さくしなければなりません。弱いためコイルでは十分でした。このため1998年しかありませんでした。

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。
- ▶ この勉強会では、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。
- ▶ この講義の内容は、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

ハードディスクドライブ 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。

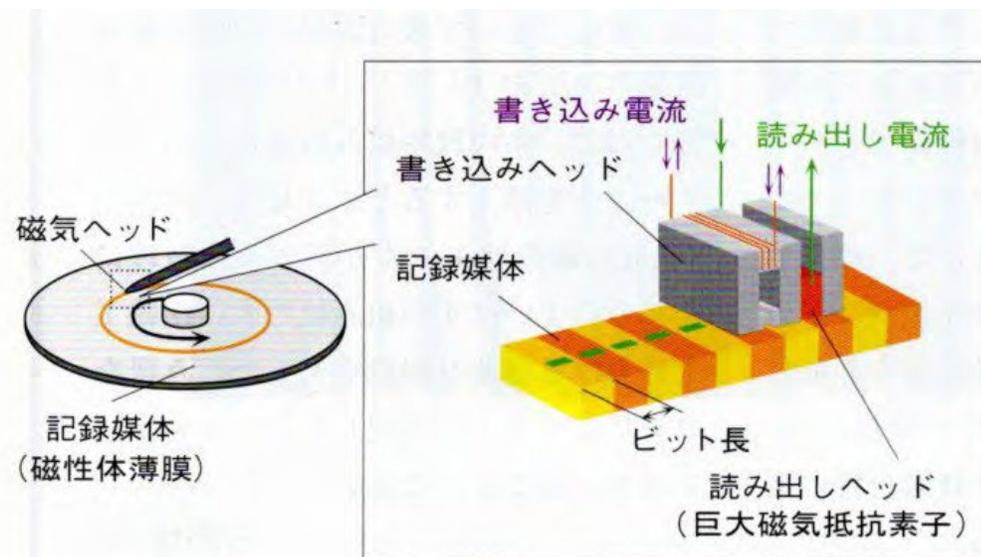
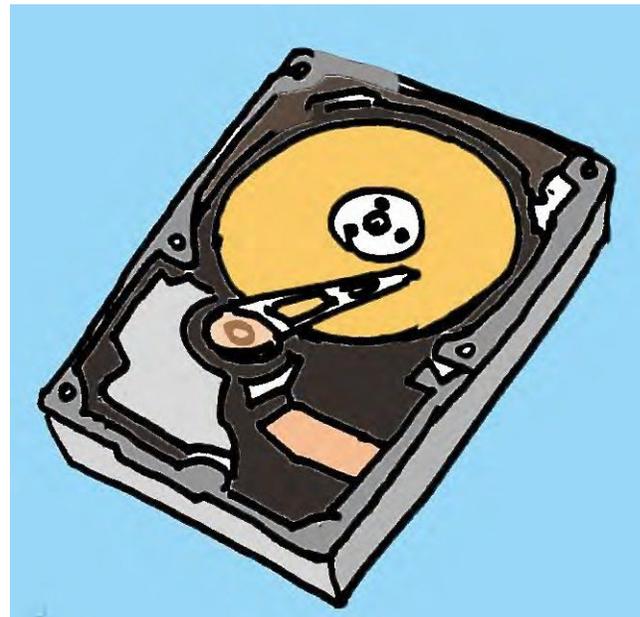


図1 ハードディスク (HDD) と磁気ヘッドの仕組み

GMRヘッドで記録密度が飛躍的向上

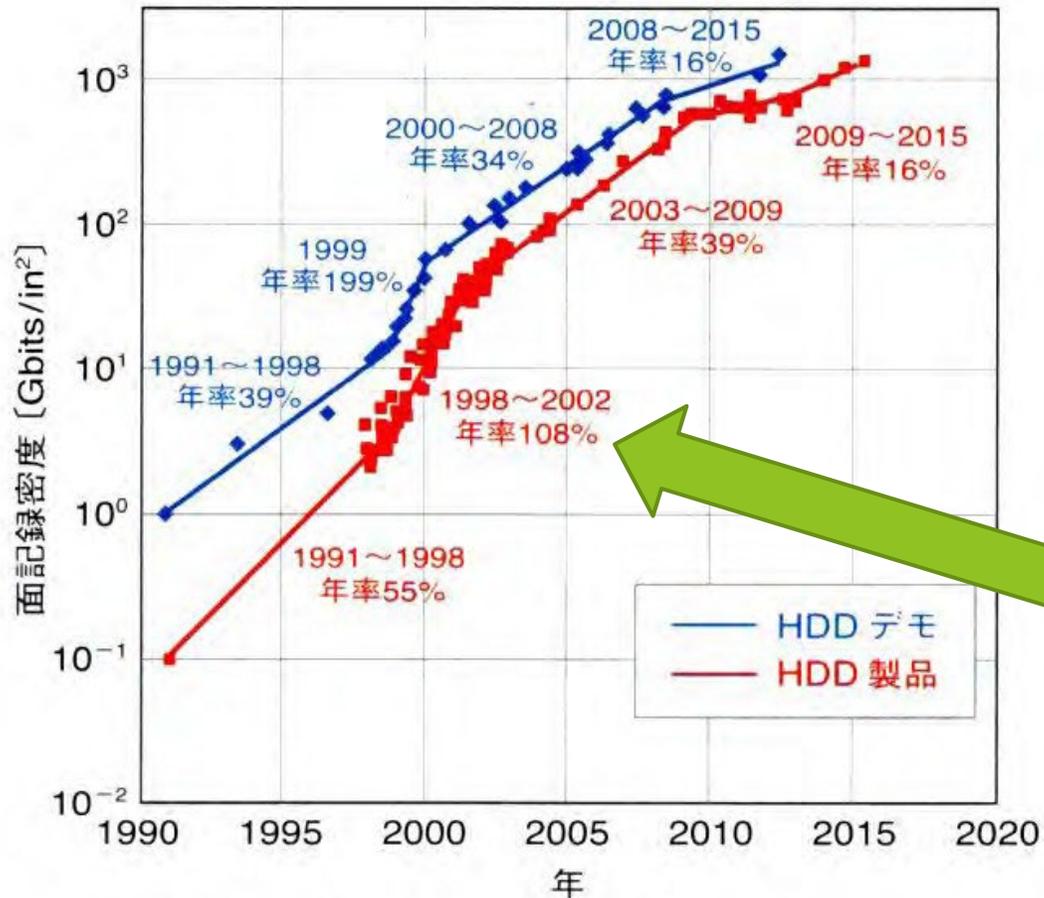


図2 ハードディスクの面記録密度の推移 (H. Li (米国カーネギーメロン大学) の学位論文を参考に作成)

- ▶ 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。

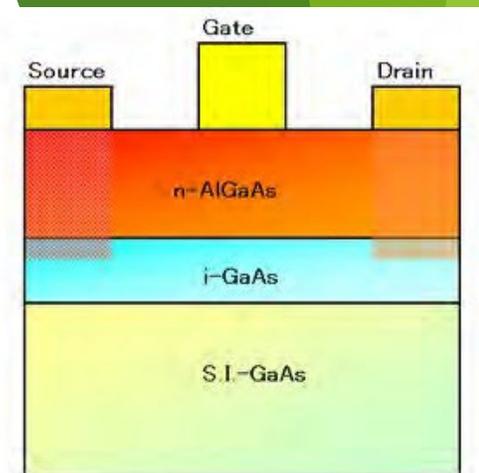
GMRは、2つの強磁性層で数Åの薄い非磁性層を挟んだデバイスの電気抵抗が磁場によって大きく変化する現象です。GMRは微細構造の作製が可能になった20世紀末になって、初めて実現したのです。



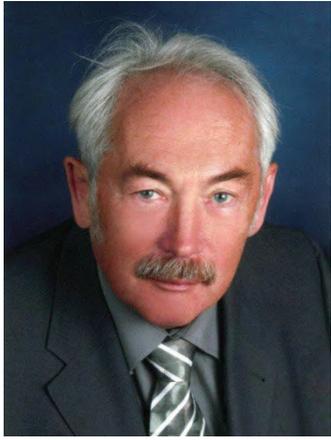
3. 巨大磁気 抵抗効果 (GMR)の発見

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。



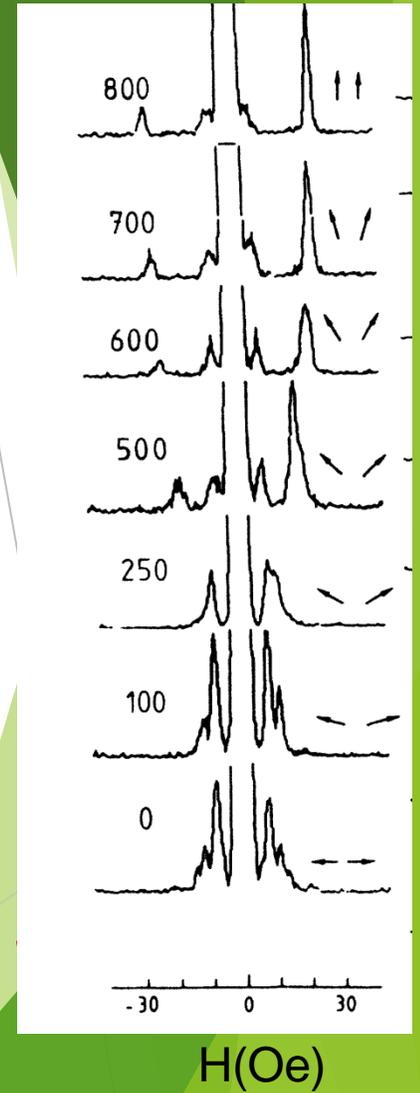
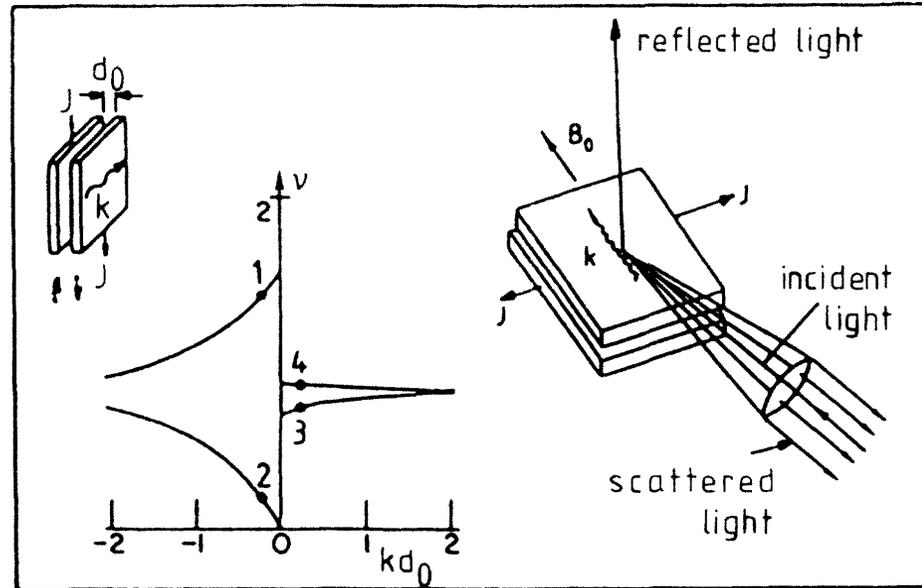
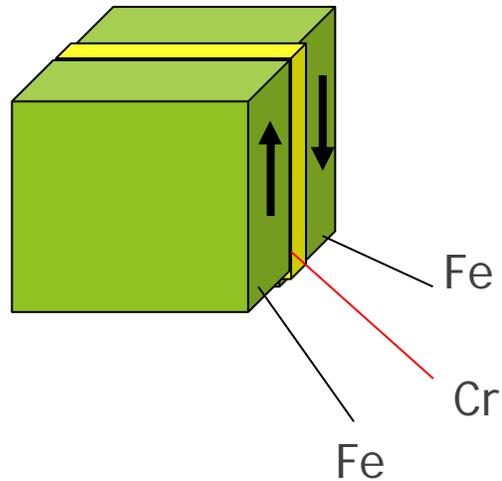
HEMT



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(Cr)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⁾。

ペーター・グリュンベルク博士



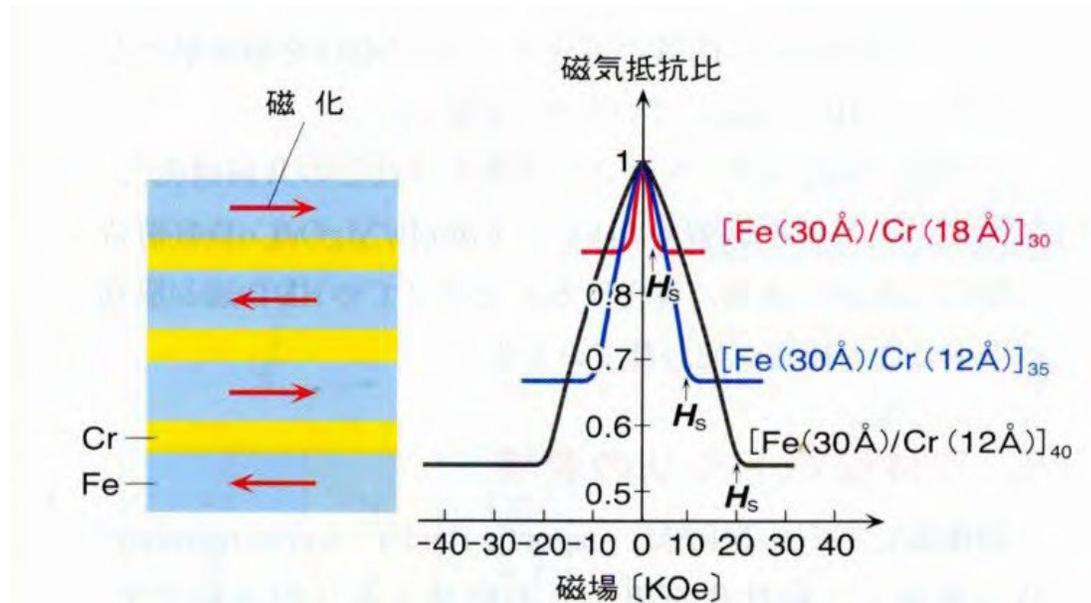
1) P. Grünberg, R. Schreiber and Y. Pang: Phys. Rev. Lett. 57 (1986) 2442.

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/Fe)3層膜での反平行結合の実験結果を受けて、磁場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⁾。



アルベール・フェール博士



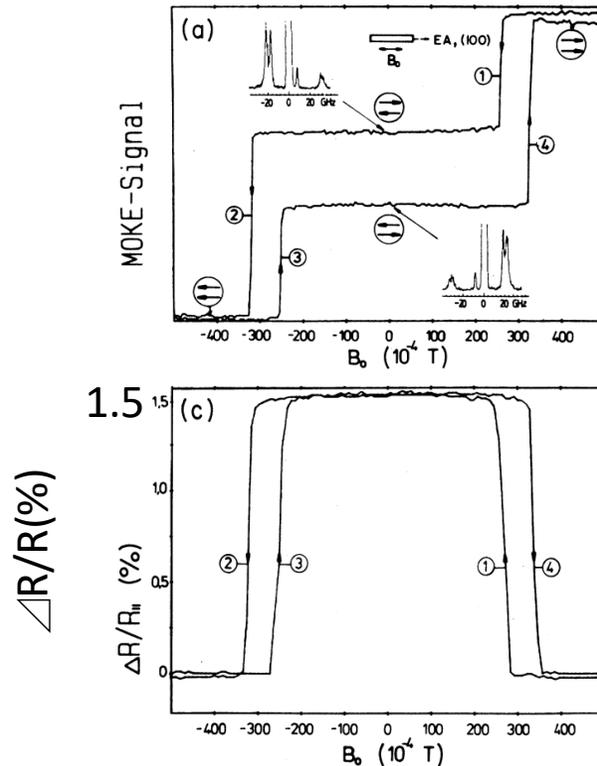
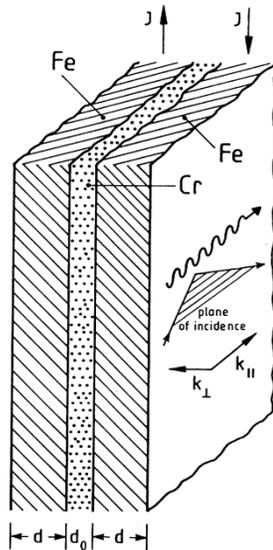
磁気抵抗比は $[R(H) - R(0)]/R(0)$ で定義されます。ここに $R(H)$ は磁場 H における抵抗、 $R(0)$ は磁場0の抵抗です。 H_s は飽和磁場。

図3 Fe/Cr人工格子の巨大磁気抵抗効果

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層膜で磁場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。

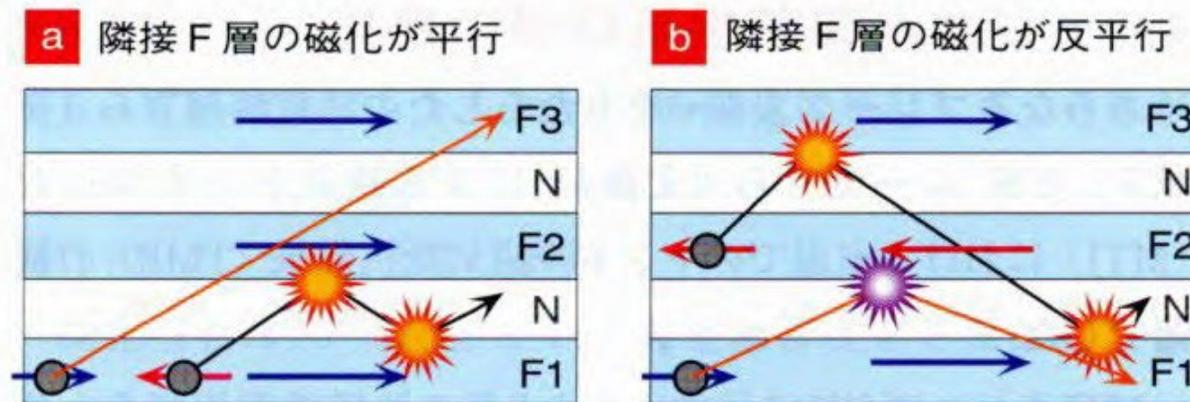
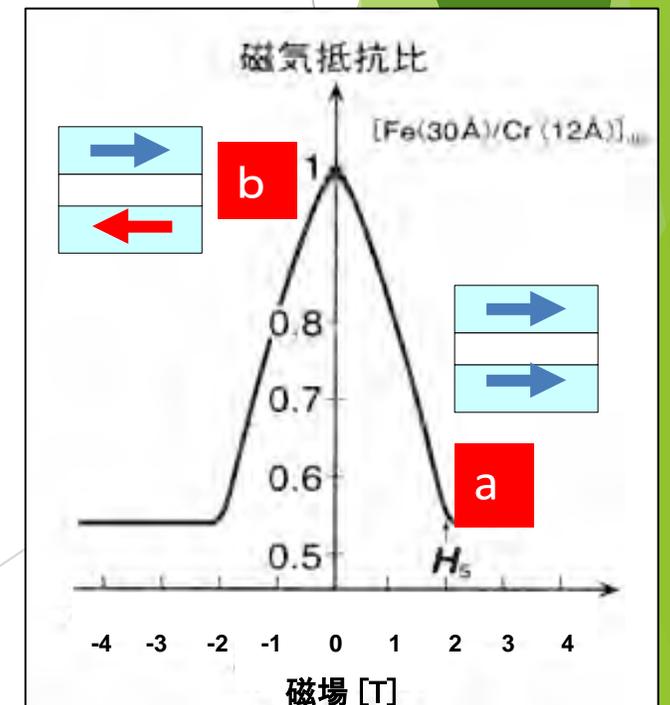


図4 巨大磁気抵抗効果の説明図





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)

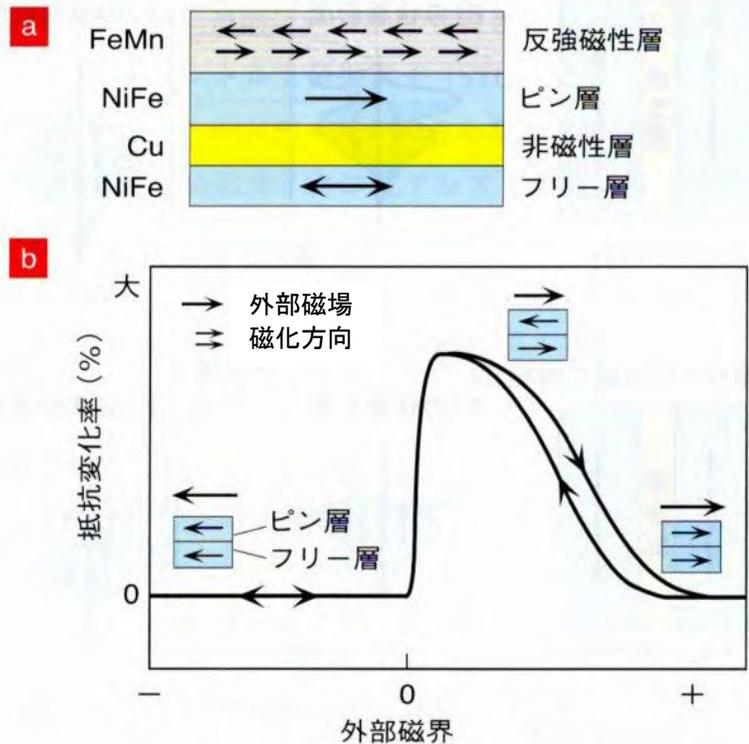
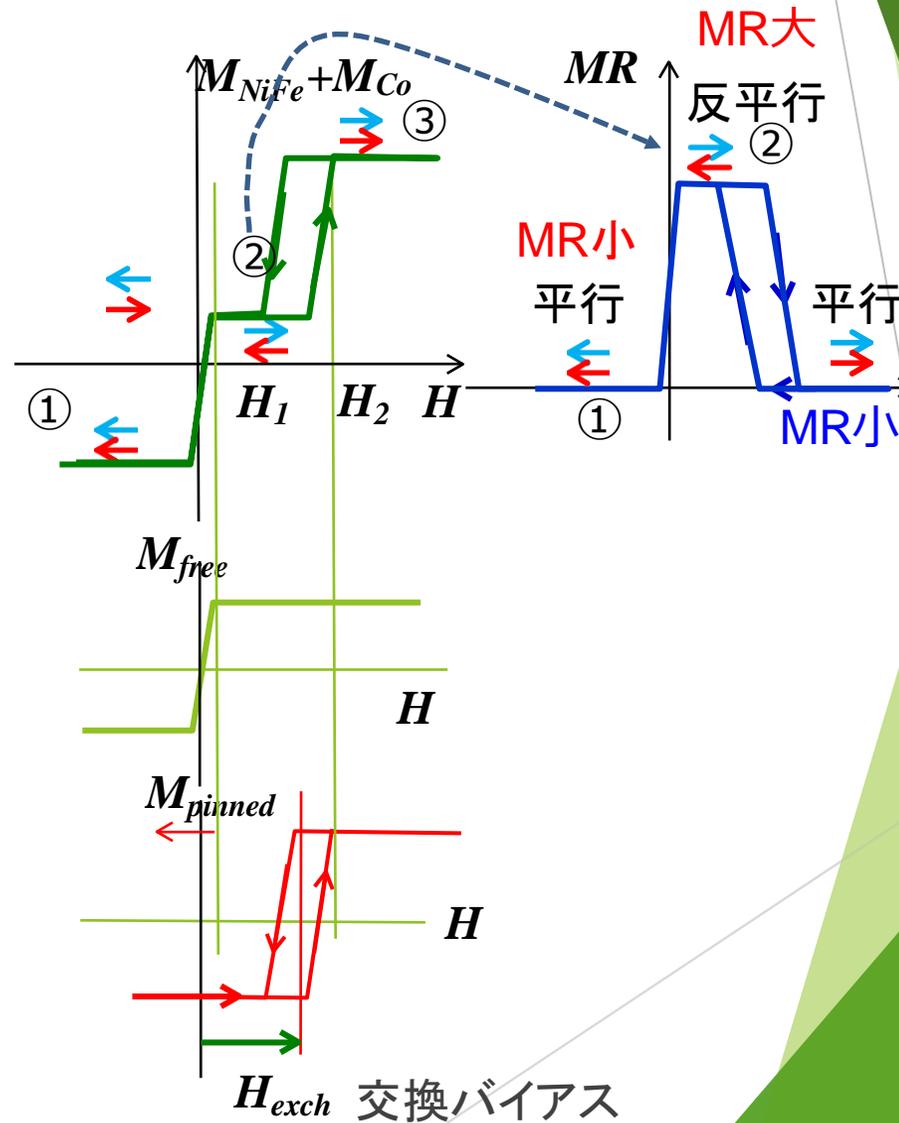
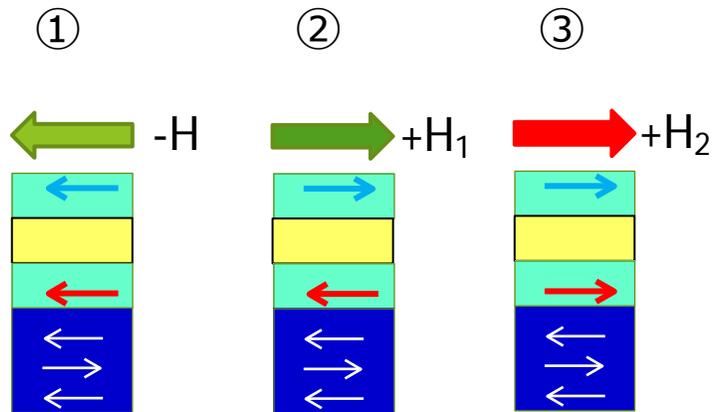


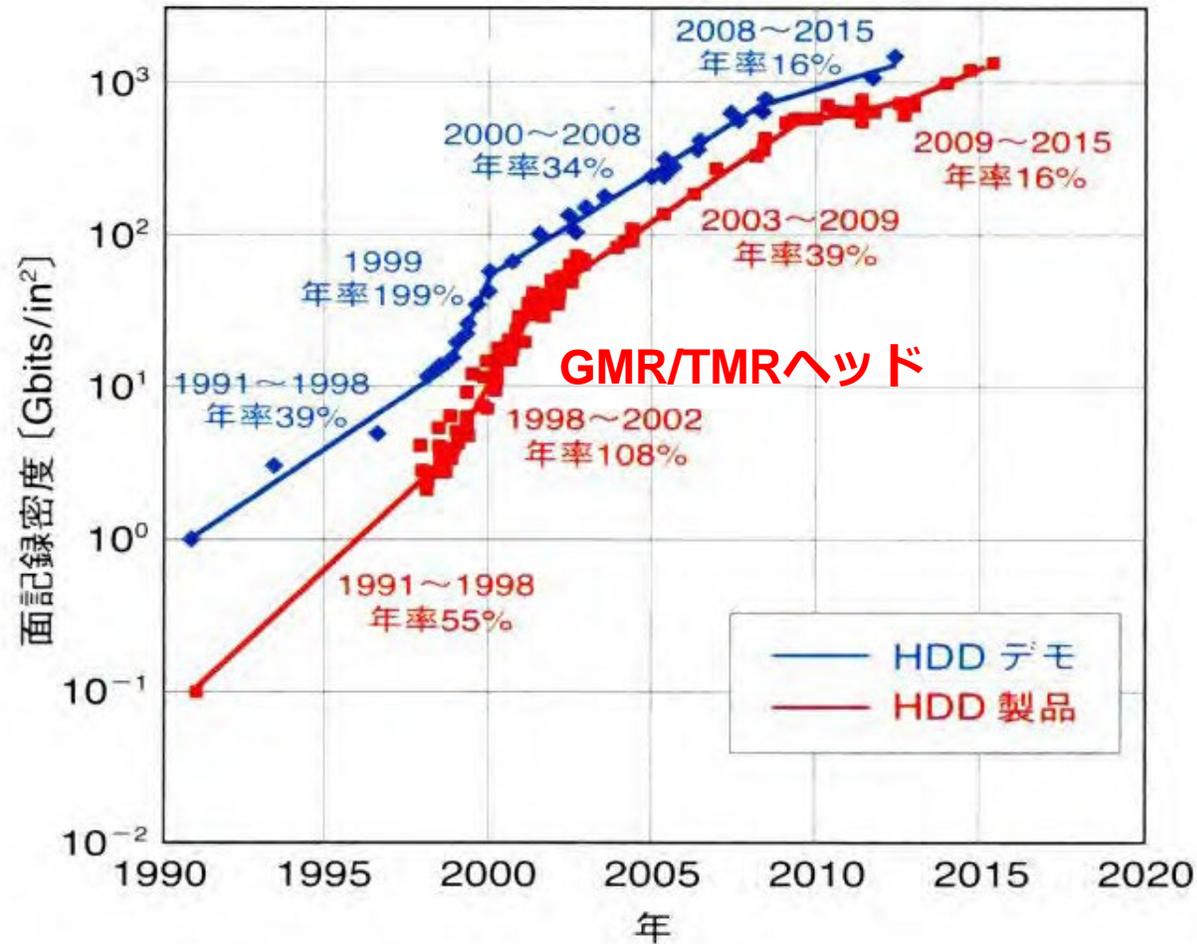
図5 スピンバルブの原理と動作

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場です。

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。

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)

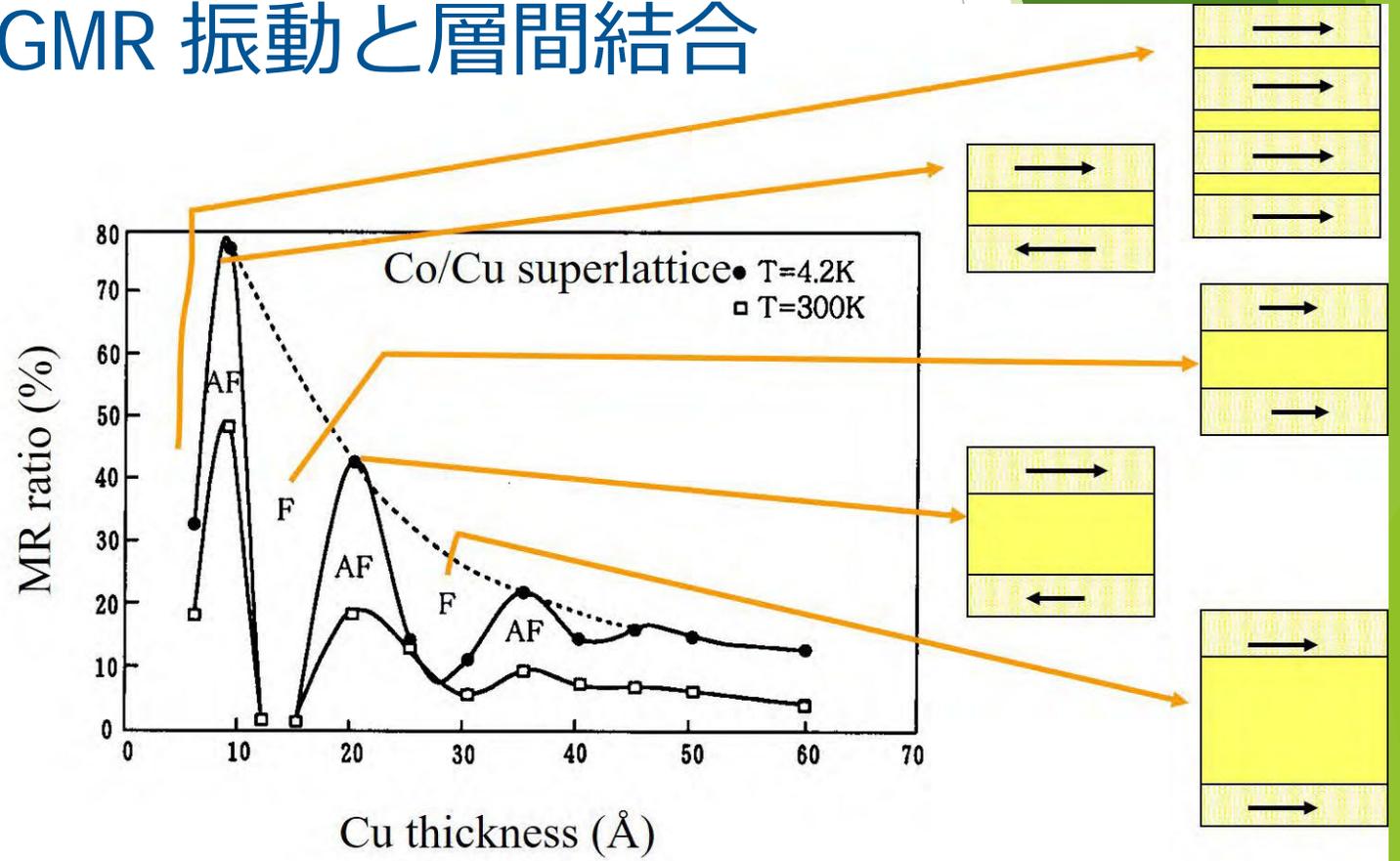
ちょっと寄り道

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[1]。
- ▶ 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。

- ▶ [1] S. S. P. Parkin, N. More, and K. P. Roche: Phys. Rev. Lett. 64 (1990) 2304.

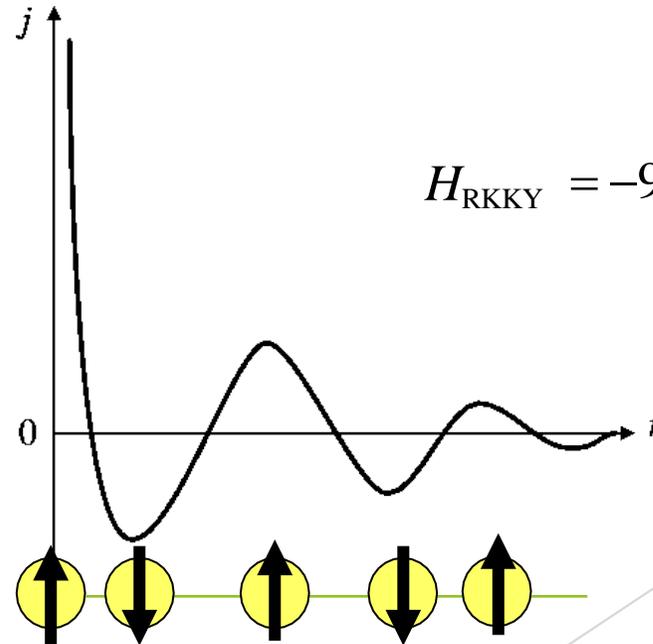
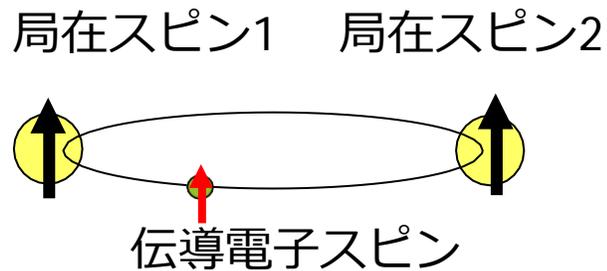
GMR 振動と層間結合



ちょっと寄り道

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。



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

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



4. 室温での トンネル磁気抵抗 (TMR)の観測

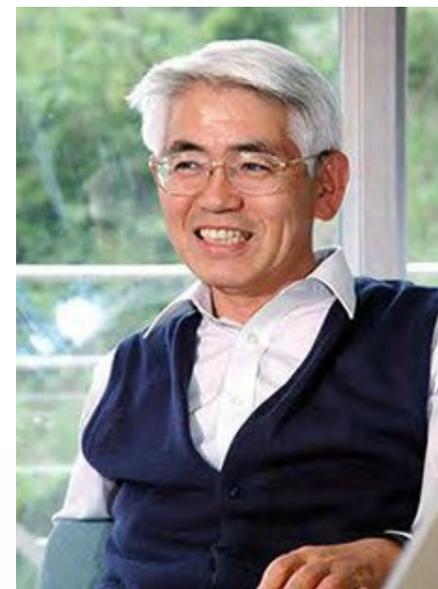
トンネル磁気抵抗

- ▶ 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

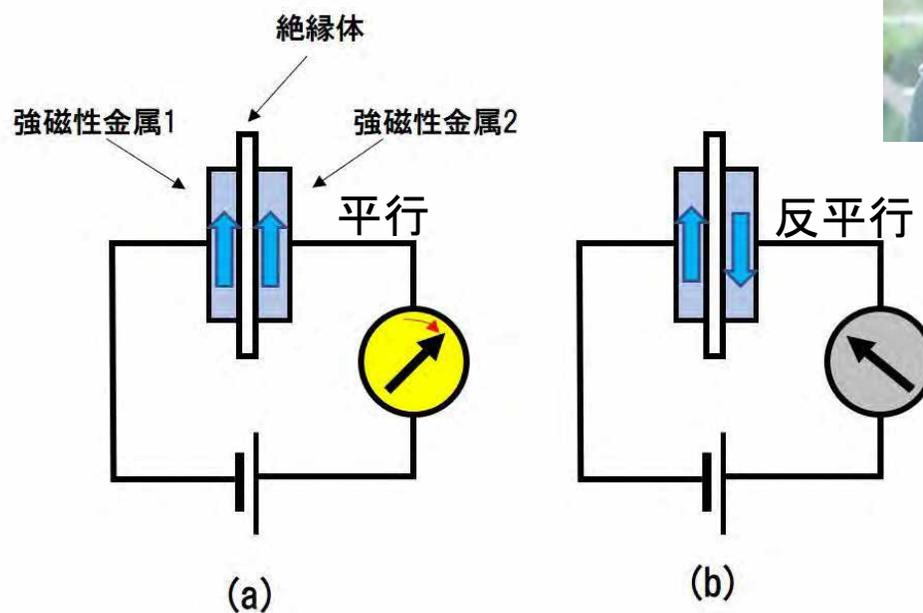
さらなるブレークスルーをもたらしたのは、宮崎ら⁵⁾、ムーデラら⁶⁾による**磁気トンネル接合(MTJ)**における室温でのトンネル磁気抵抗効果(TMR)の観測でした。

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)



宮崎照宣

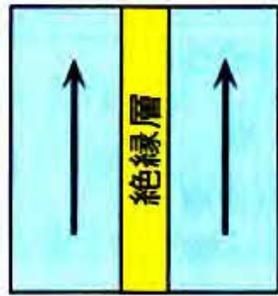


TMR比は、向かい合う2つの磁性層の磁化の向きが磁化の向きが(a)平行のときの抵抗 $R_{\uparrow\uparrow}$ と(b)反平行のときの抵抗 $R_{\uparrow\downarrow}$ との差を平行の抵抗で割った百分比で表されます。

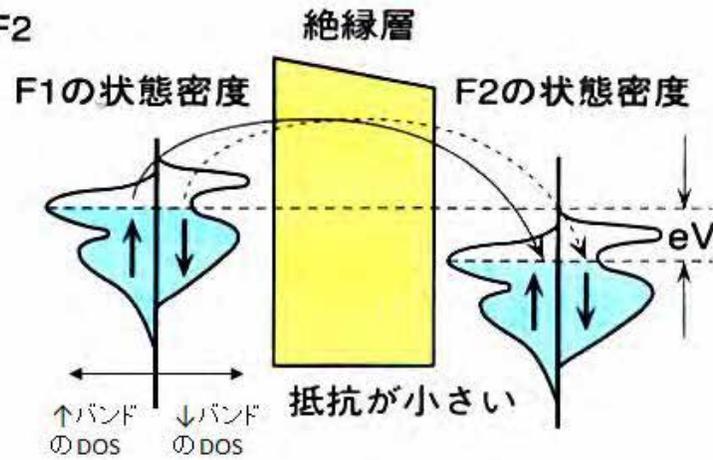
$$TMR(\%) = (R_{\uparrow\uparrow} - R_{\uparrow\downarrow}) / R_{\uparrow\uparrow} \times 100$$

TMRの原理

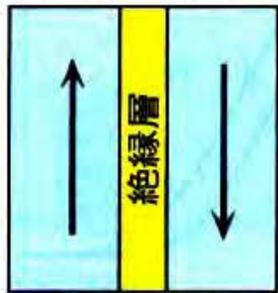
強磁性電極 F1 強磁性電極 F2



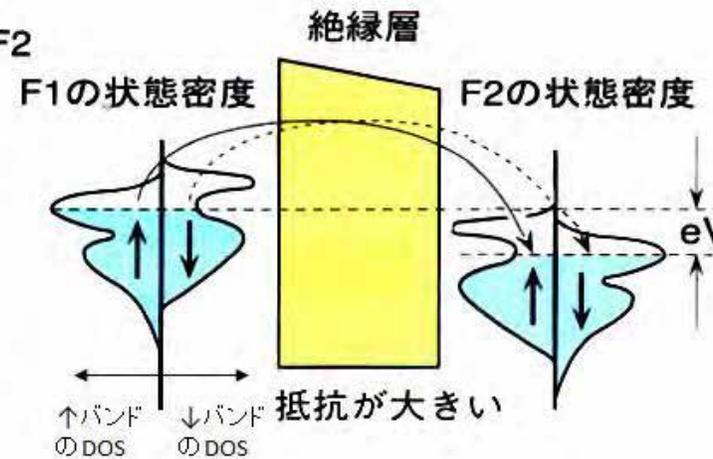
スピン平行



強磁性電極 F1 強磁性電極 F2



スピン反平行



- ▶ TMRは磁性体のスピン偏極バンドの状態密度(DOS)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ンと下向きスピンとで異なります。
- ▶ 両電極のスピンが平行だと、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。

図6 トンネル磁気抵抗効果 (TMR) の原理

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)」とといいます。
- ▶ 磁性体といえ、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はです。

ちょっと寄り道

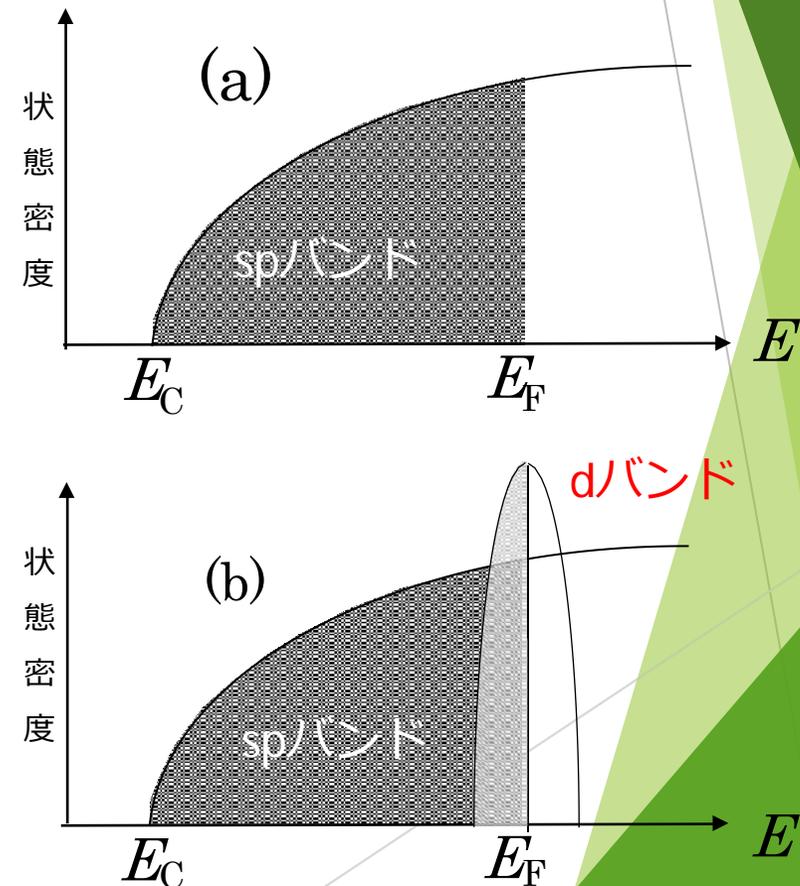
非磁性金属のバンド構造と磁性金属のバンド構造

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。

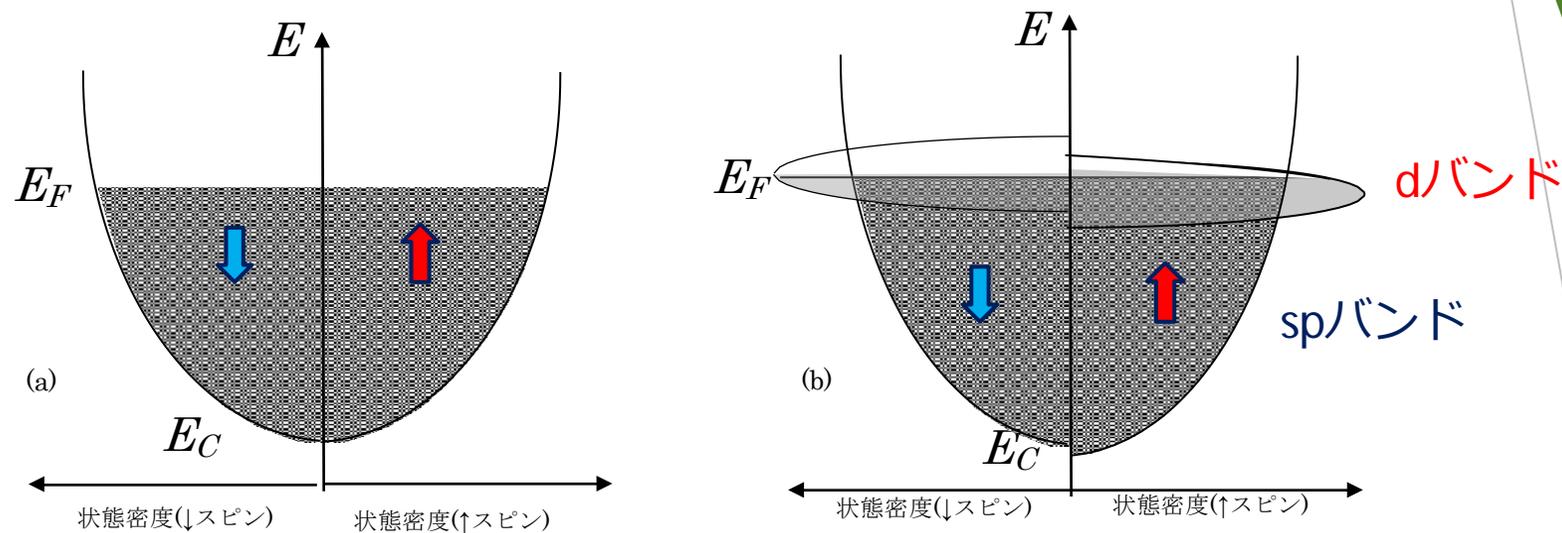
(b)は、磁性をもたない遷移金属のバンド状態密度です。

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。



ちょっと寄り道

常磁性金属と強磁性遷移金属

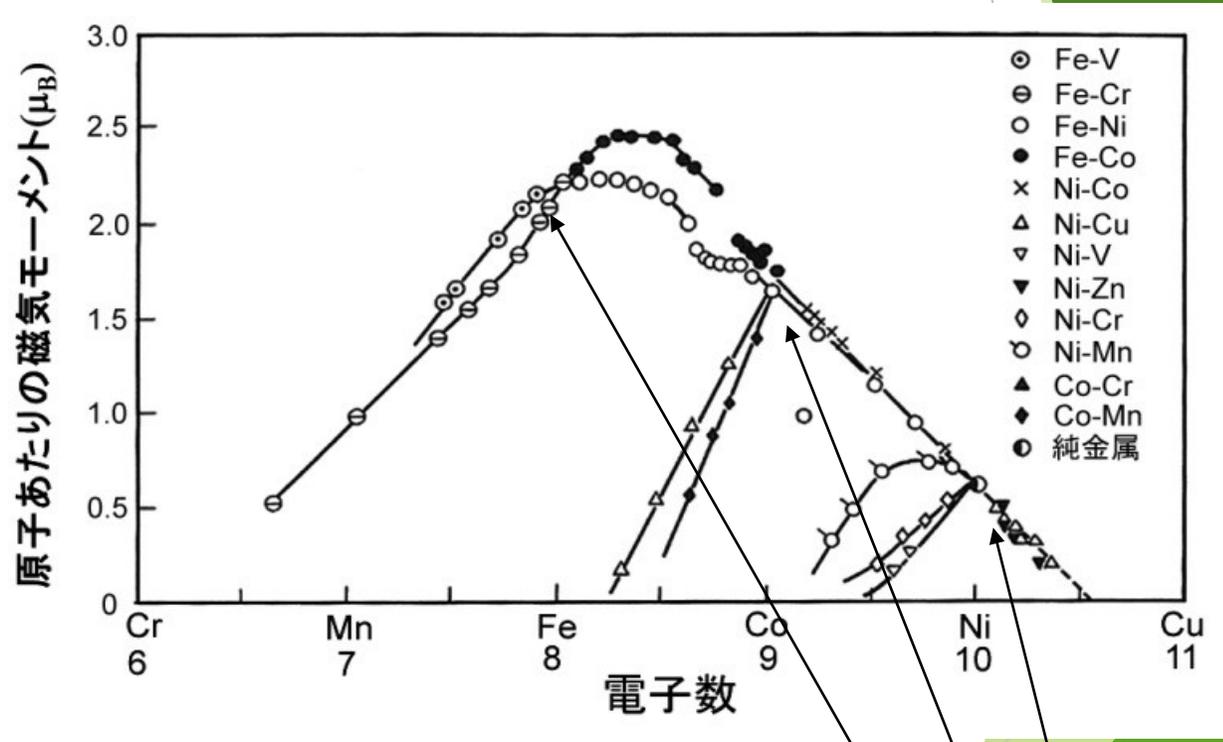


- ▶ 磁性がある場合のエネルギーバンドを考えるに当たっては、電子のスピンのごとくにバンドを考えなければなりません。右側が上向きスピン、左側が下向きスピンを持つ電子の状態密度です。
- ▶ 普通の非磁性金属では図(a)のように、左右対称です。これに対し、強磁性体では、図(b)に示すように上向きスピンバンドと下向きスピンバンドとが分裂します。分裂は、狭い3dバンドで大きく、広いspバンドでは小さいです。この分裂を交換分裂といいます。

ちょっと寄り道

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。



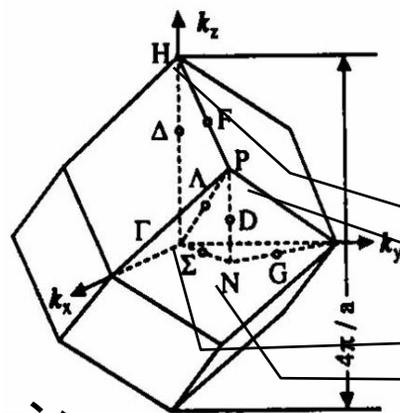
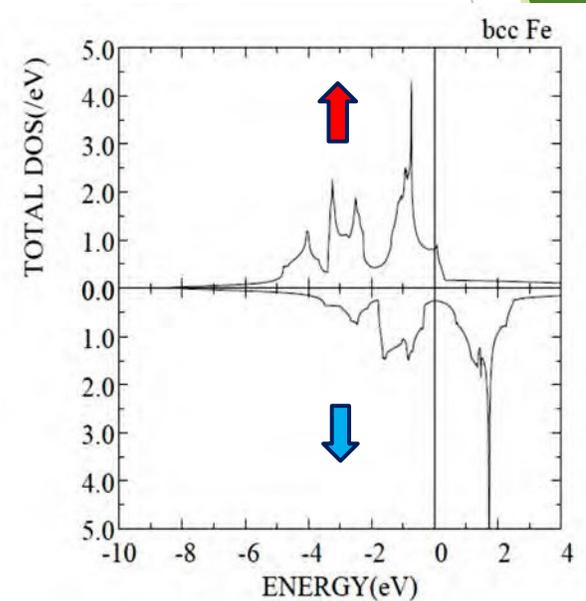
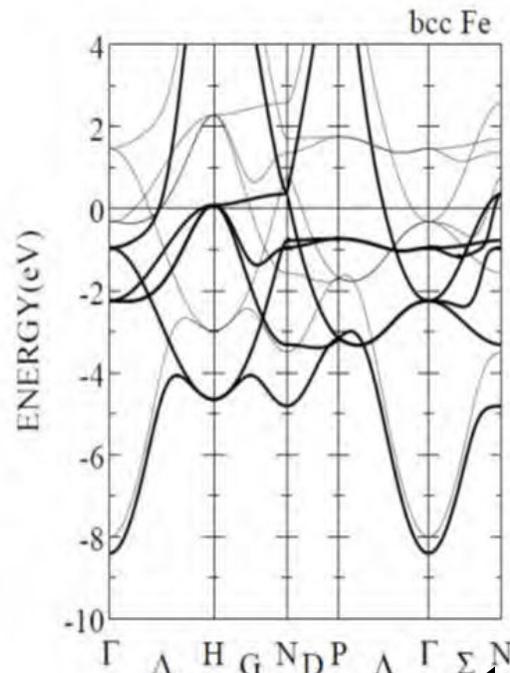
Fe, Co, Niの磁気モーメントはそれぞれ2.2, 1.7, 0.6 μ_B 、この値はフント則から期待される値より小さい。

ちょっと寄り道

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。



Feのブリルアンゾーン

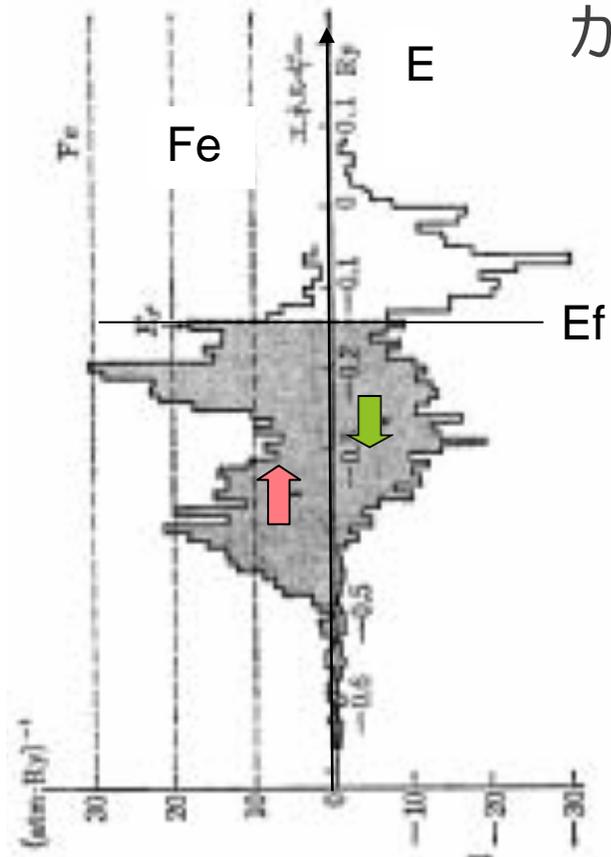
図 (a)Feのスピンの偏極バンドの分散曲線。太線:上向きスピン、細線:下向きスピン。(b)スピンの偏極状態密度曲線,(c)bcc構造のブリルアンゾーン(BZ)
(小口多美夫氏のご厚意による)

ちょっと寄り道

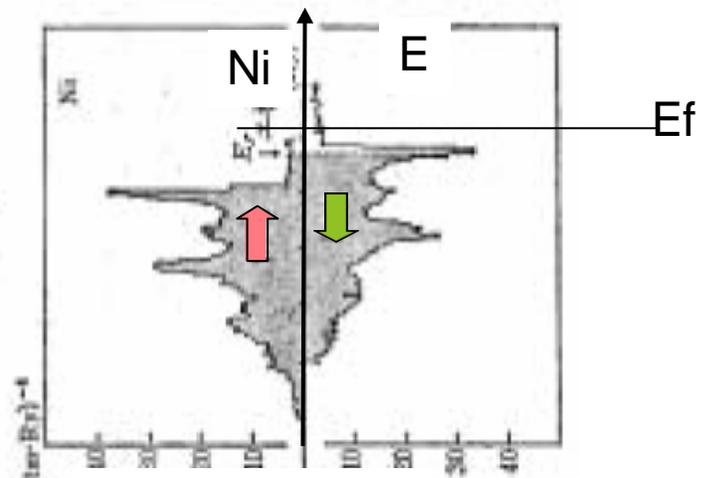
FeとNiのバンド状態密度

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。 $n_{\uparrow} - n_{\downarrow} = 0.6$



スピン状態密度



スピン状態密度

↓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

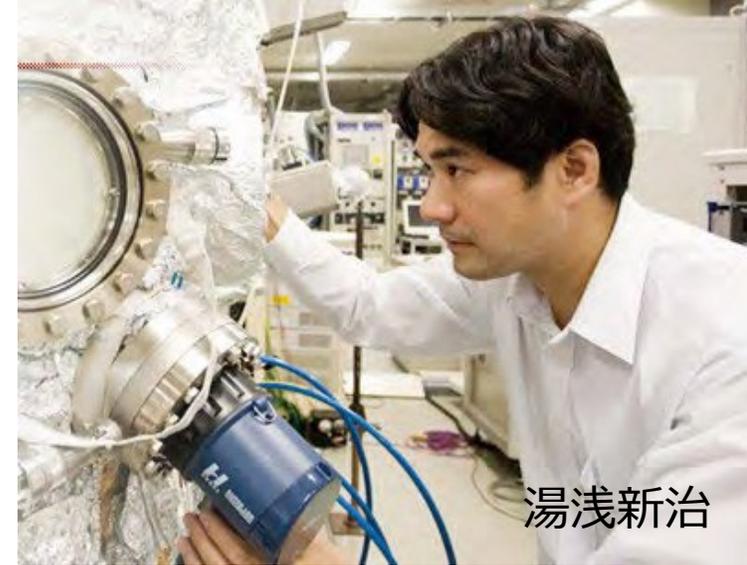
MgOバリアTMR素子の登場

- ▶ 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

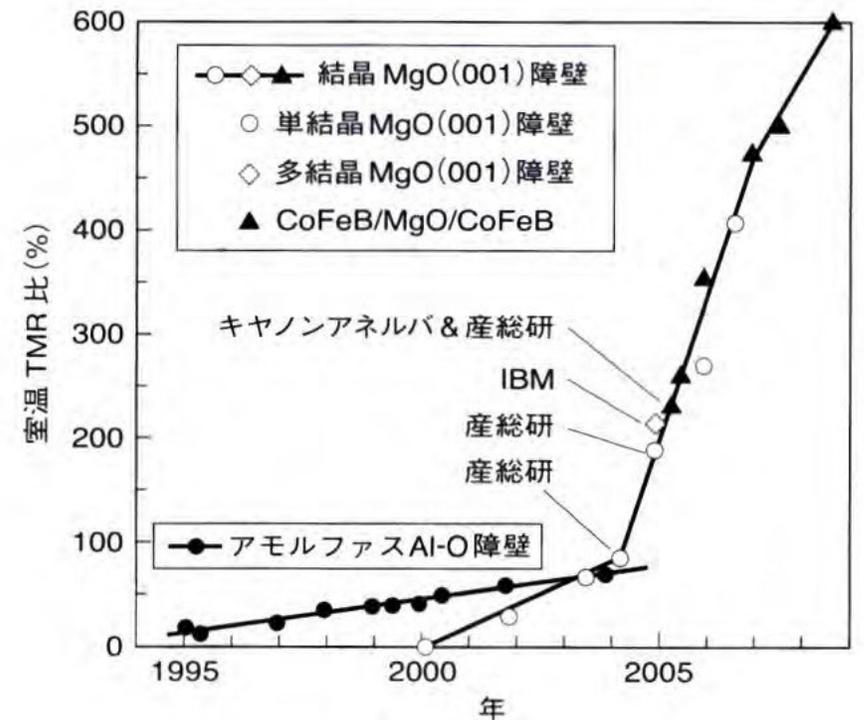


図7 トンネル磁気抵抗比の経緯

ちょっと寄り道

散漫散乱トンネルとコヒーレント・トンネル

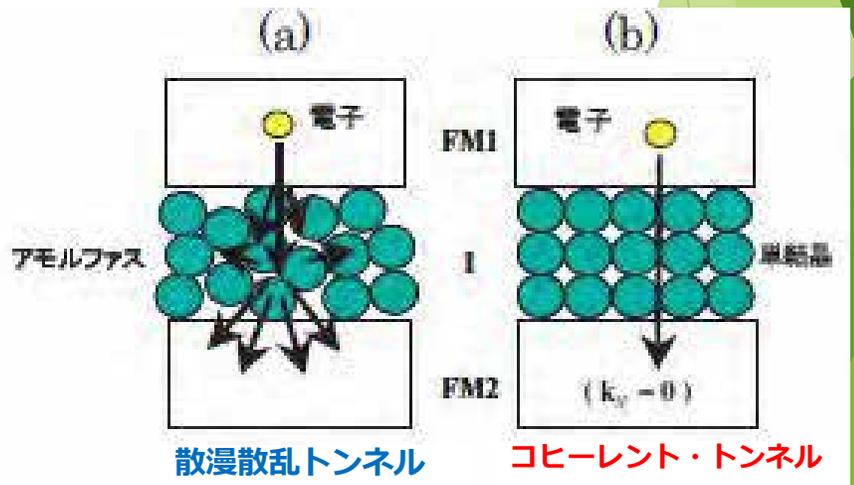
▶ 通常、トンネルする際スピンは保存され、散漫トンネルの場合TMRは一般に強磁性電極のスピン分極率 $P_i (i=1,2)$ を用いて次のようなJullierの式^[1]で表されます。

$$TMR = 2P_1P_2 / (1 - P_1P_2)$$

▶ 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。

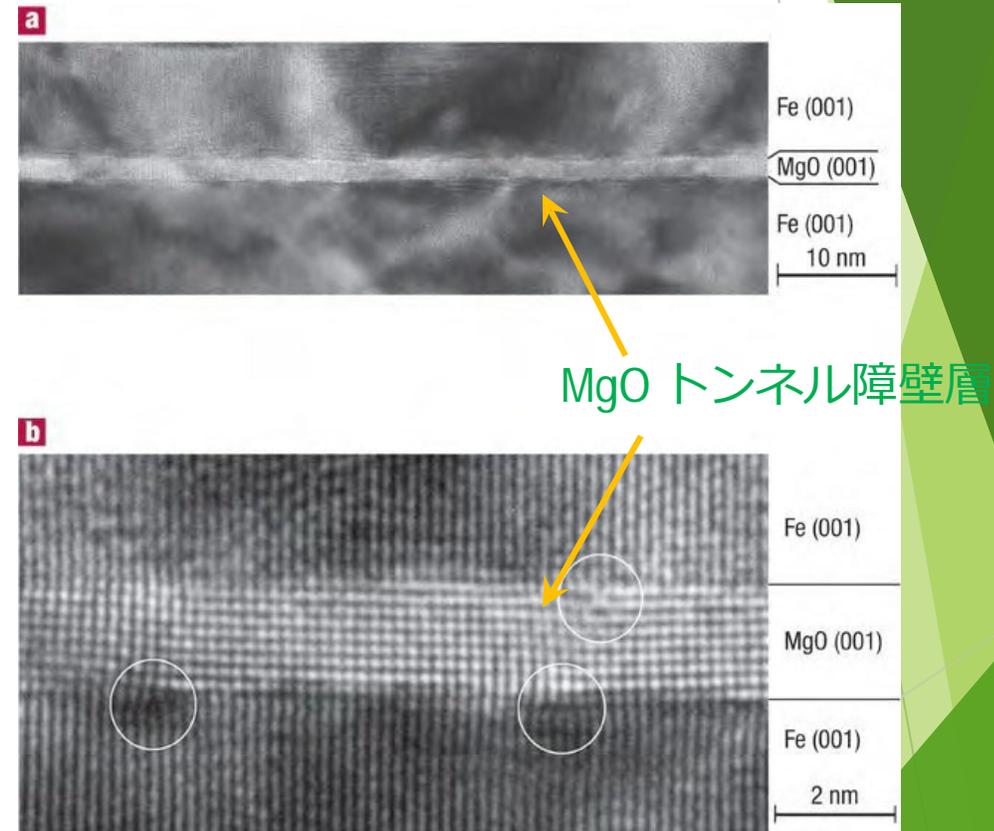
◆ コヒーレントトンネルではエネルギーのほかに運動量が保存されるため、MRは電極のバンド構造を反映し、磁化が平行のときはトンネルできるが反平行のときはトンネルできません。そのため、1000%という巨大TMRが理論的^[2]に予測されました。

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一種です。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HK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。

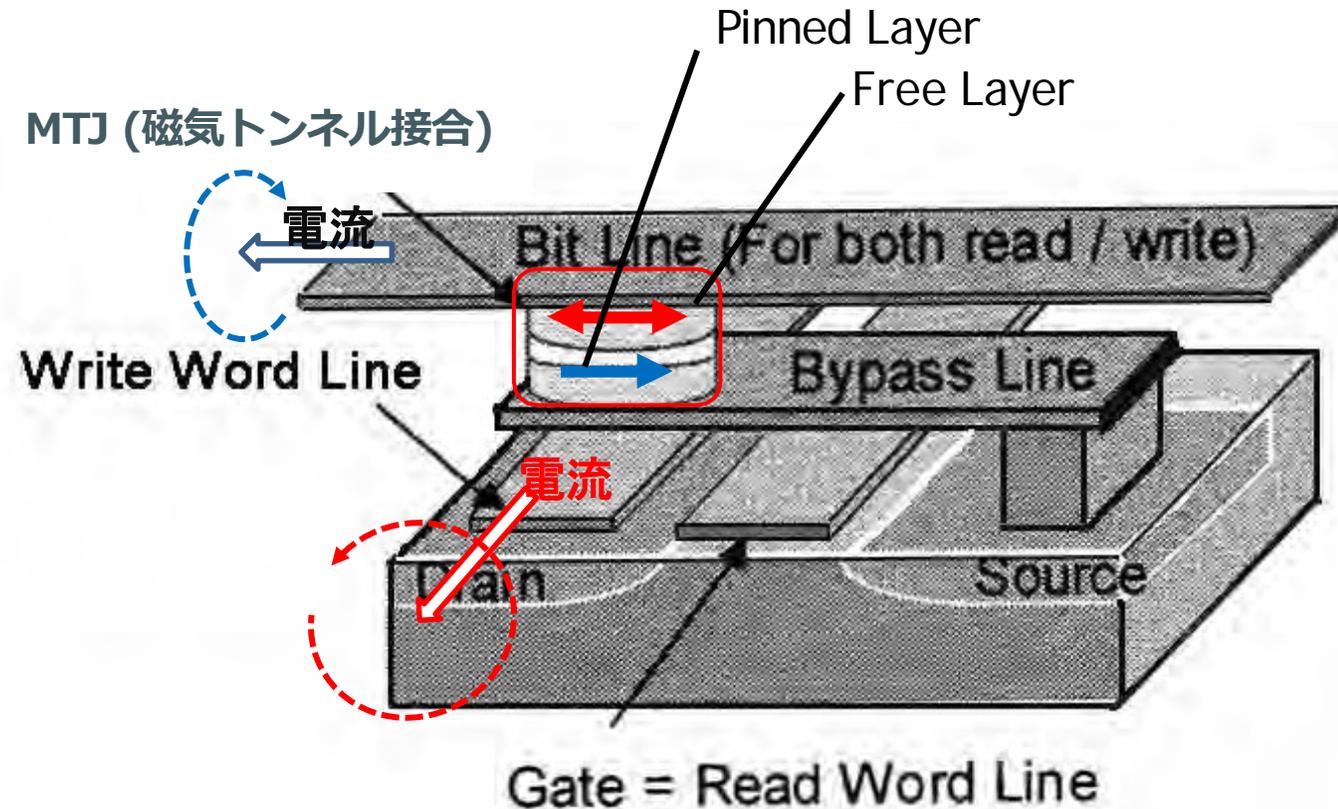
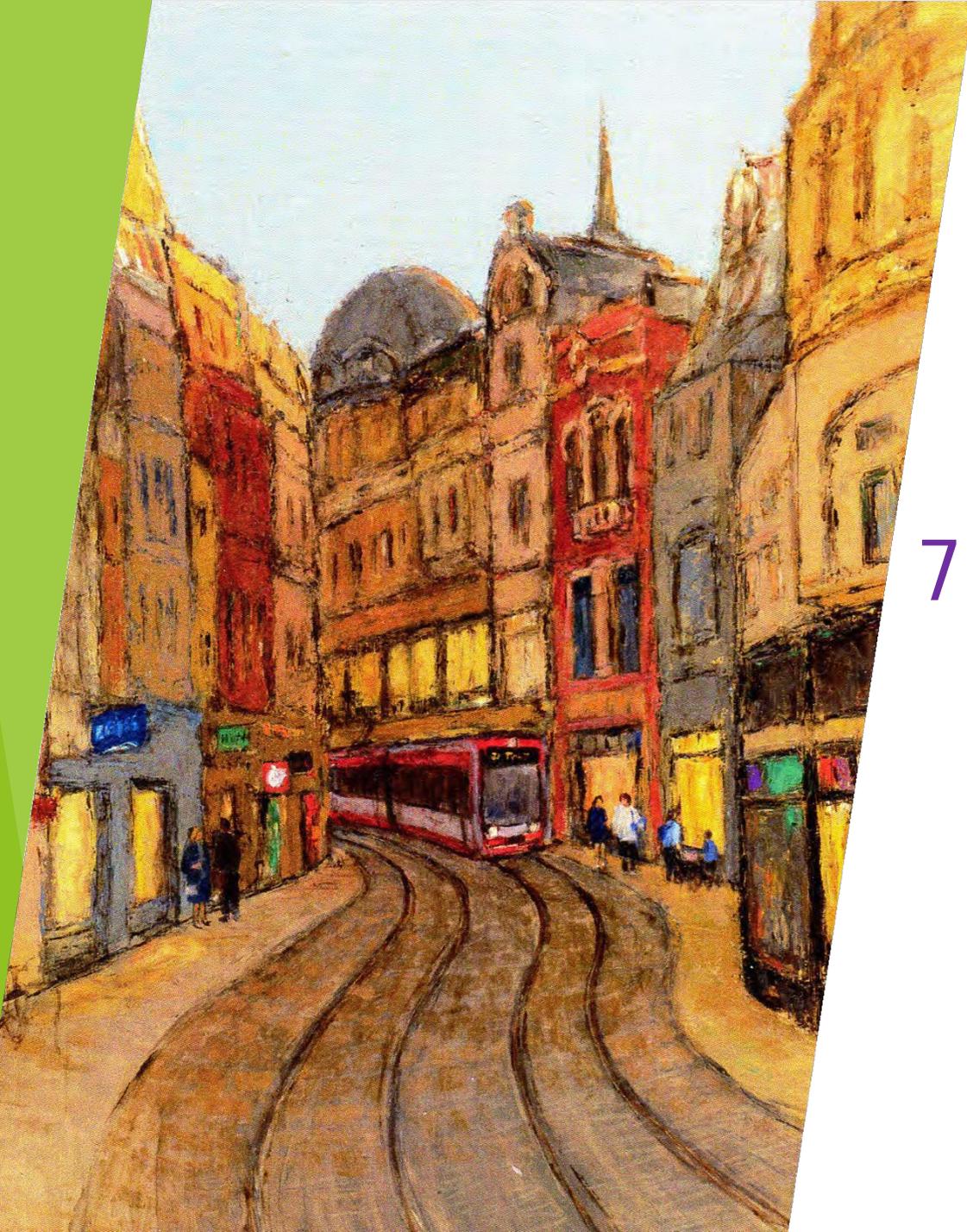


図8 MRAMの構成を表す図

しかし、電流で磁場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

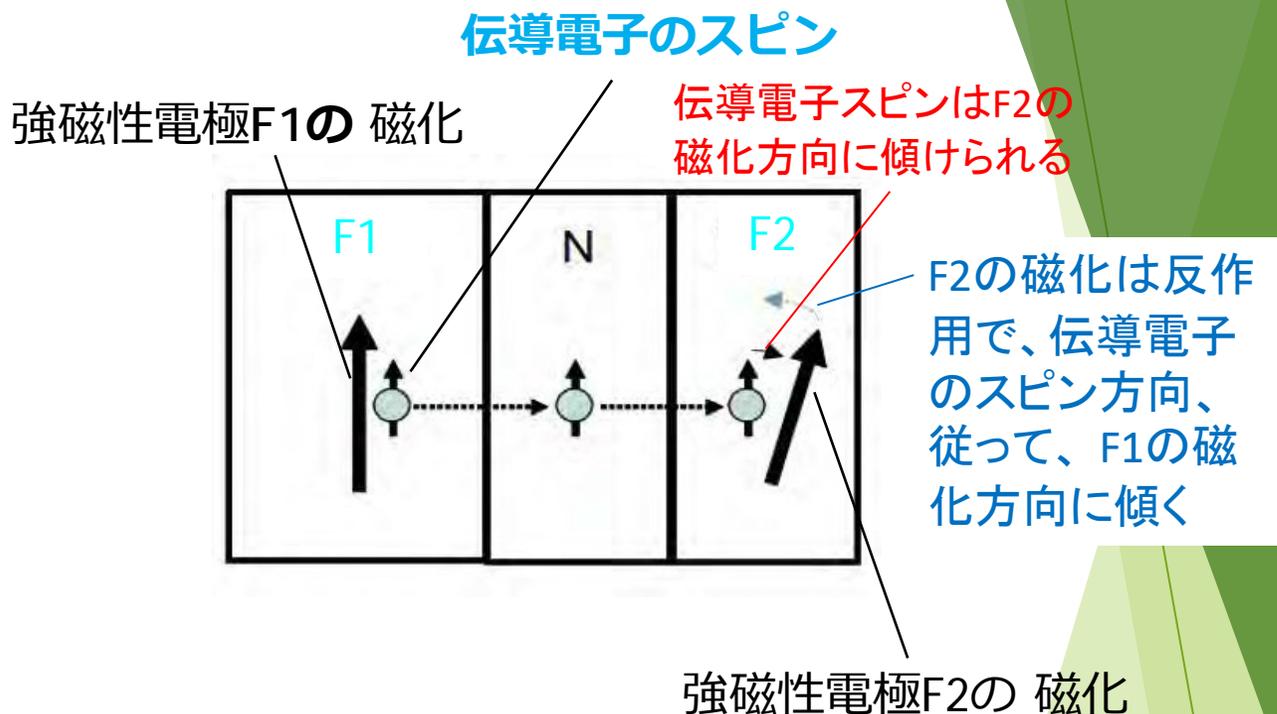


図9スピン移行トルクの説明図

- ▶ 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子流を、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。これをスピン移行トルク (Spin Transfer Torque: STT) と呼びます。
- ▶ 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てきましたが、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⁾。

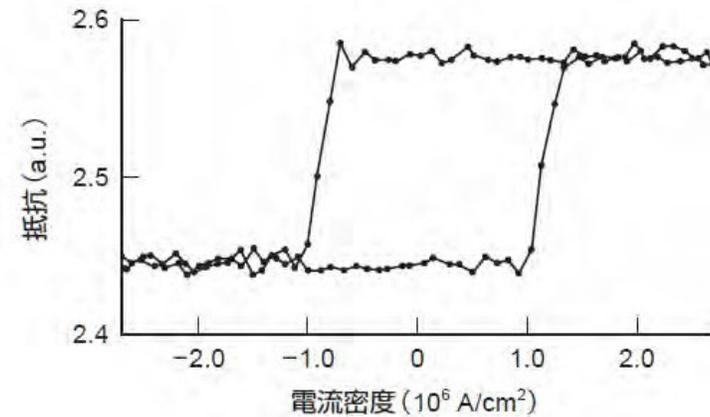
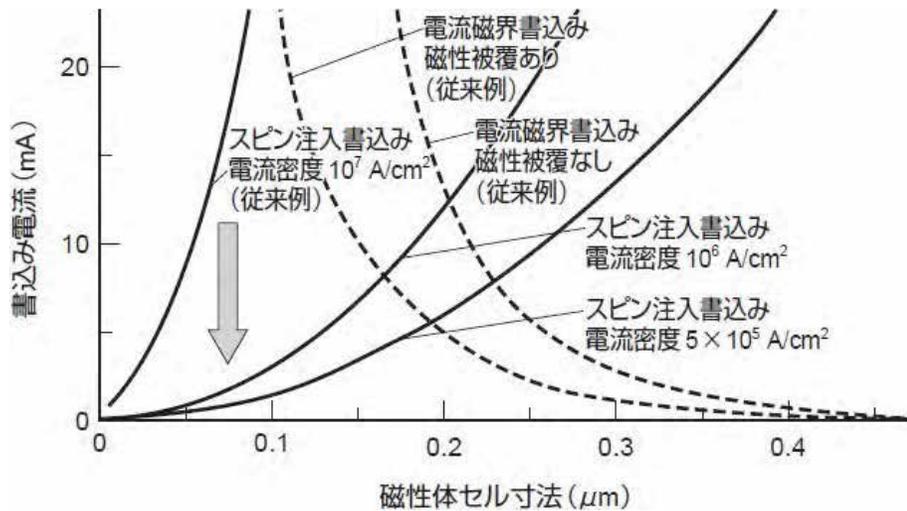
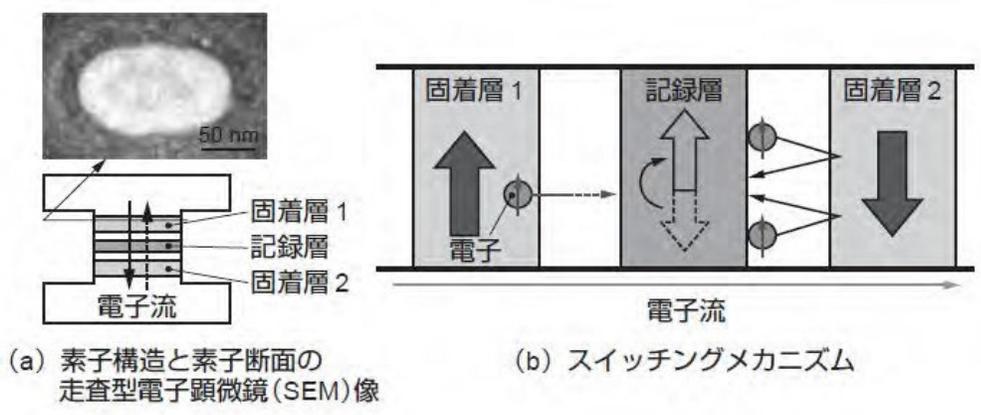
11) J. Slonczewski: J. Magn. Magn. Mater. 159, L1 (1996)

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。

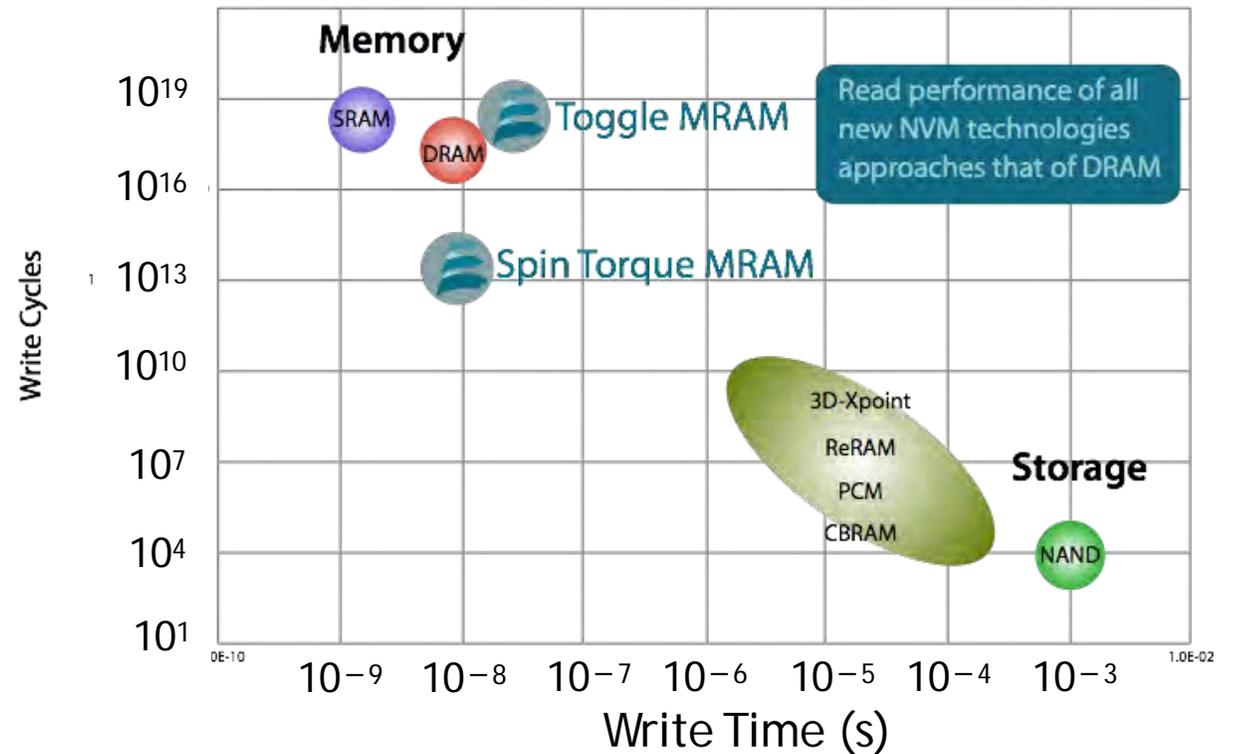


中村他：東芝レビューVol.61 No.2 (2006)



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⁾。

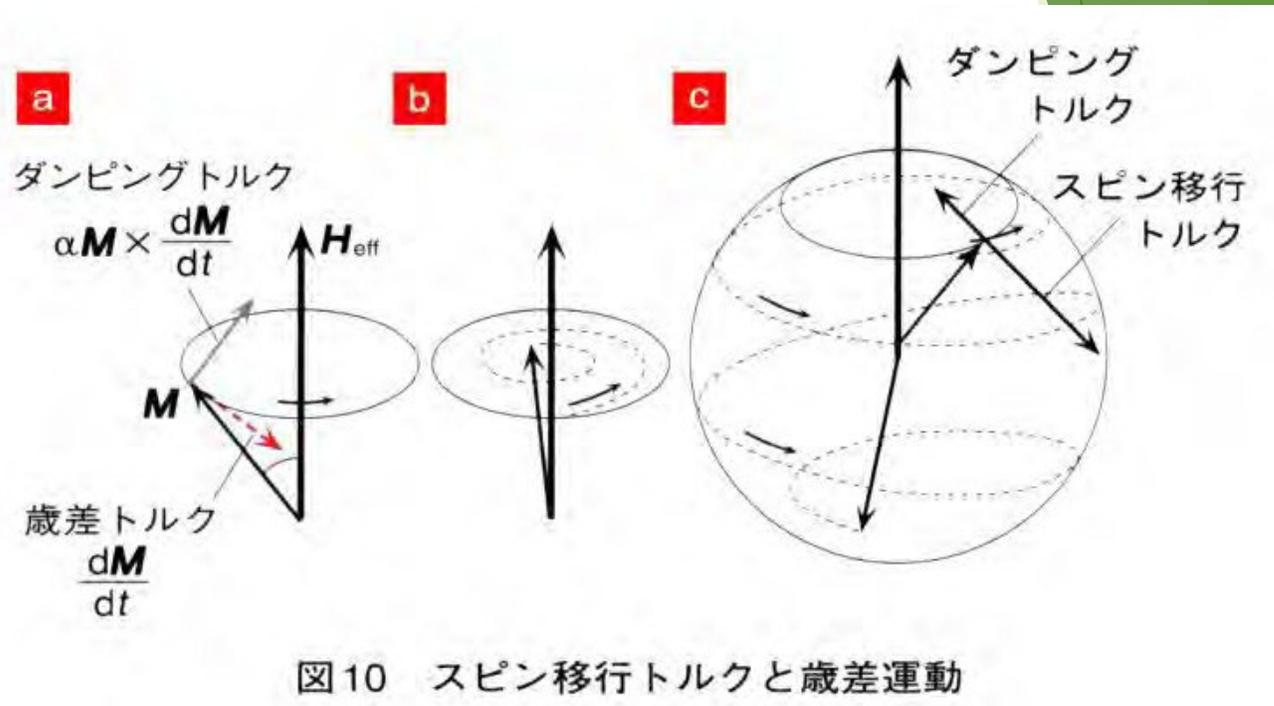


STT=Spin Transfer Torque(スピン移行トルク)



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



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。

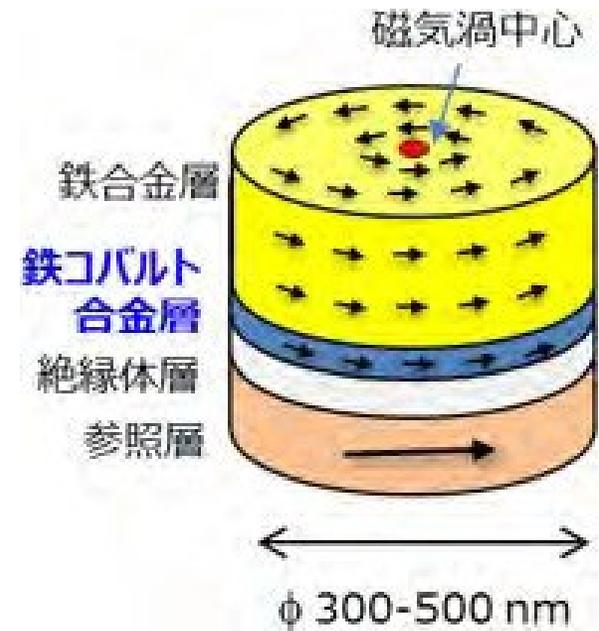
図10に示すように、磁性体の磁気モーメント M は、外部磁場 H_{eff} を加えるとその外積 $M \times H$ で表されるトルクを受けて歳差運動を始めます。

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場方向に傾いていきます。

スピン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

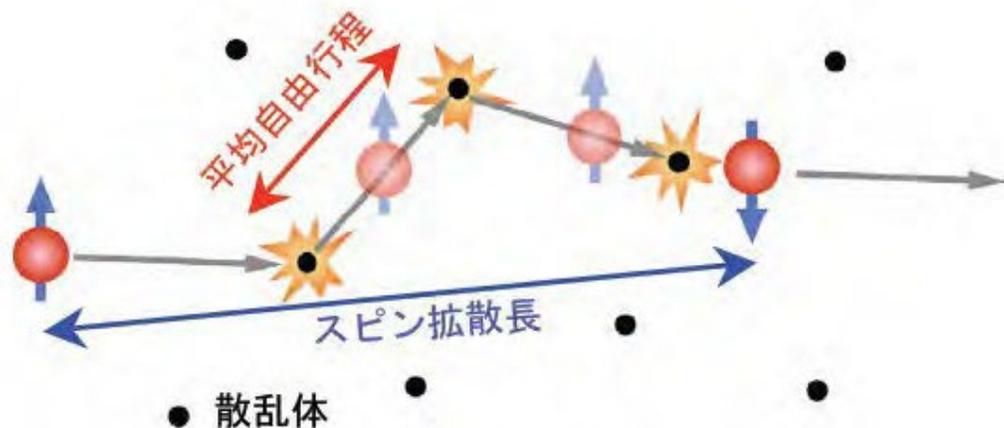
https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2016/pr20161216/pr20161216.html



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。

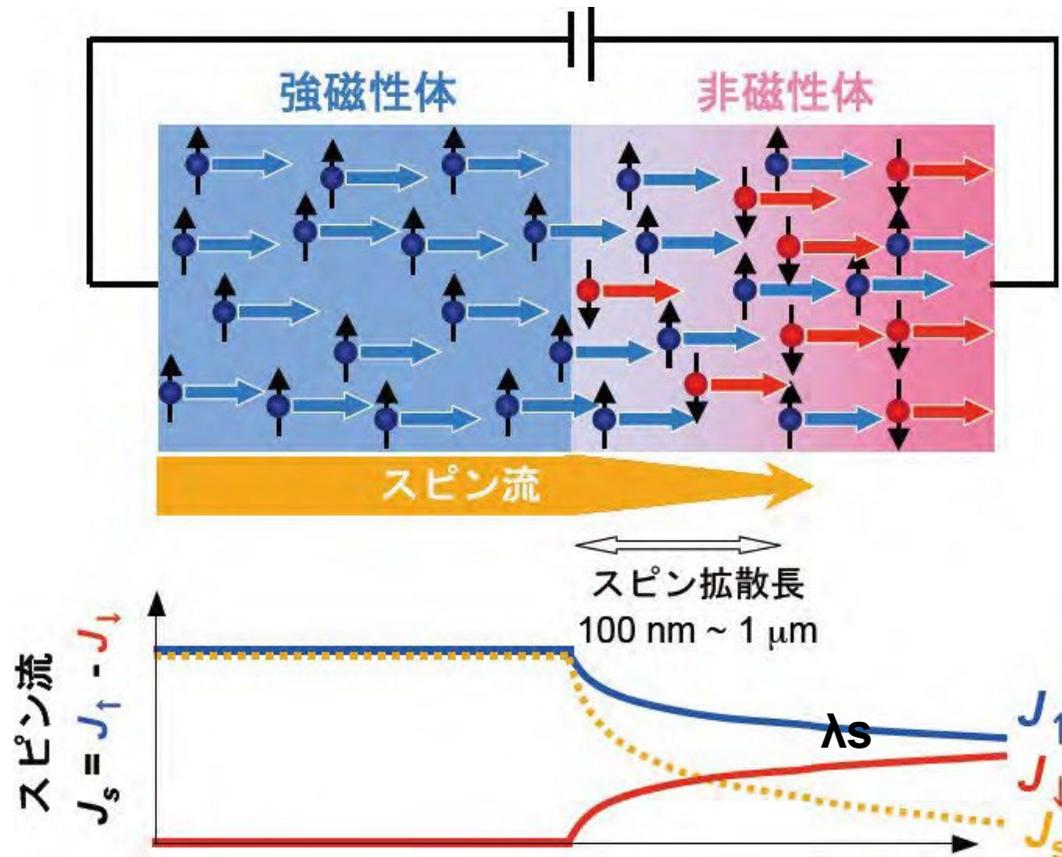


ナノスケールでの
磁気変調構造

↓
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 \uparrow スピンと \downarrow スピンの電子の数は等しいのです。
- ▶ 強磁性体から \uparrow 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 \uparrow スピンの数と \downarrow 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。

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・純スピン流

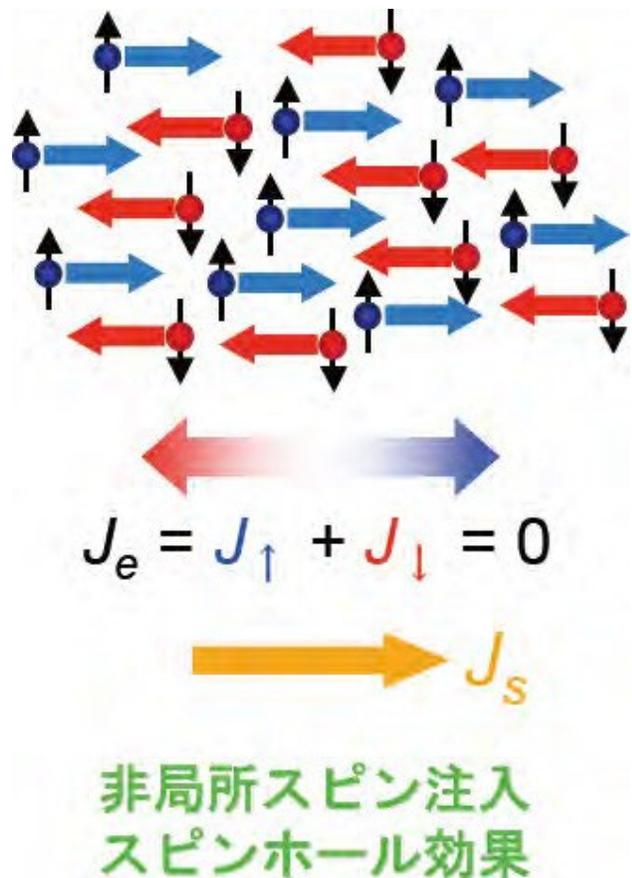


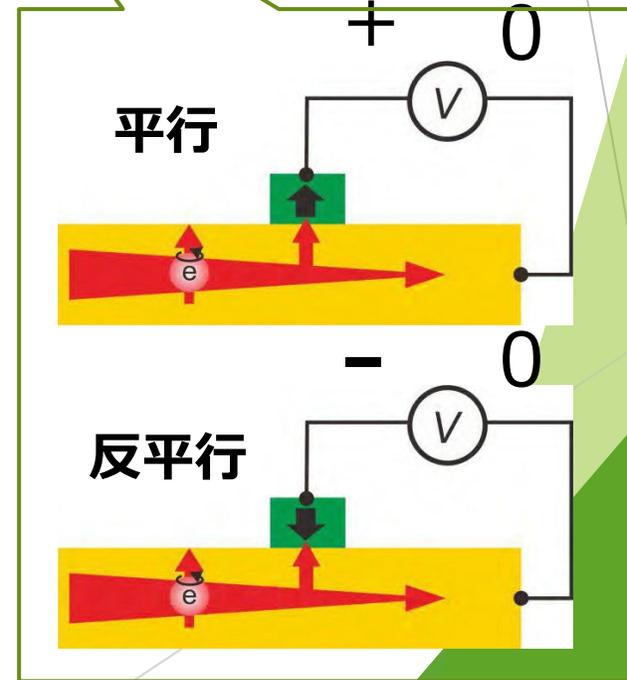
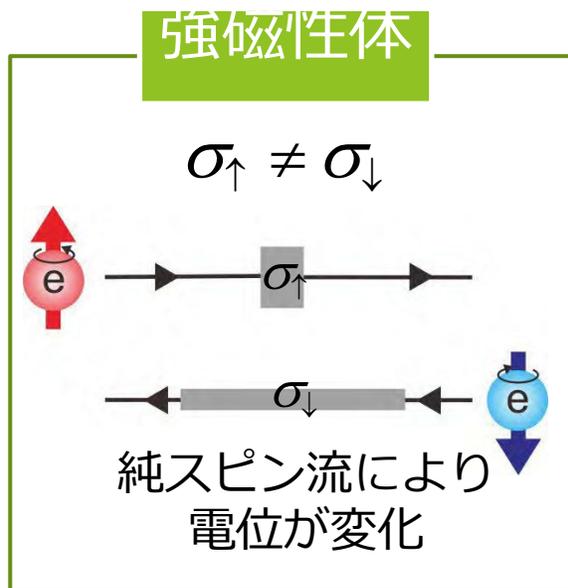
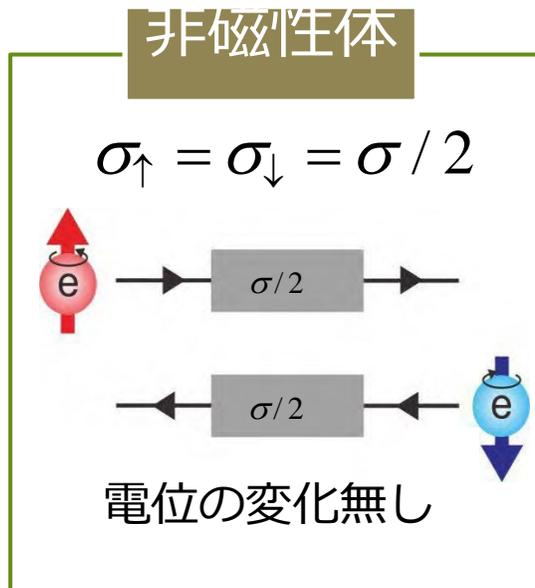
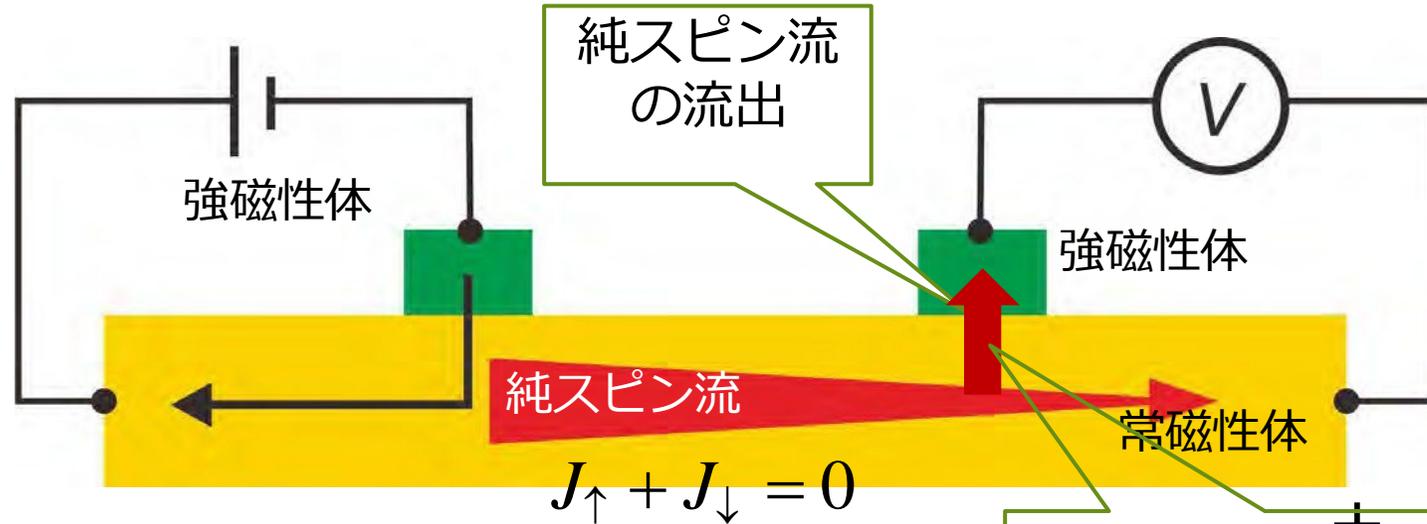
図12 電流を伴わないスピン流

- ▶ ↑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流 J_s は右に向かって流れるのです。
- ▶ 純粋スピン流を用いれば、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

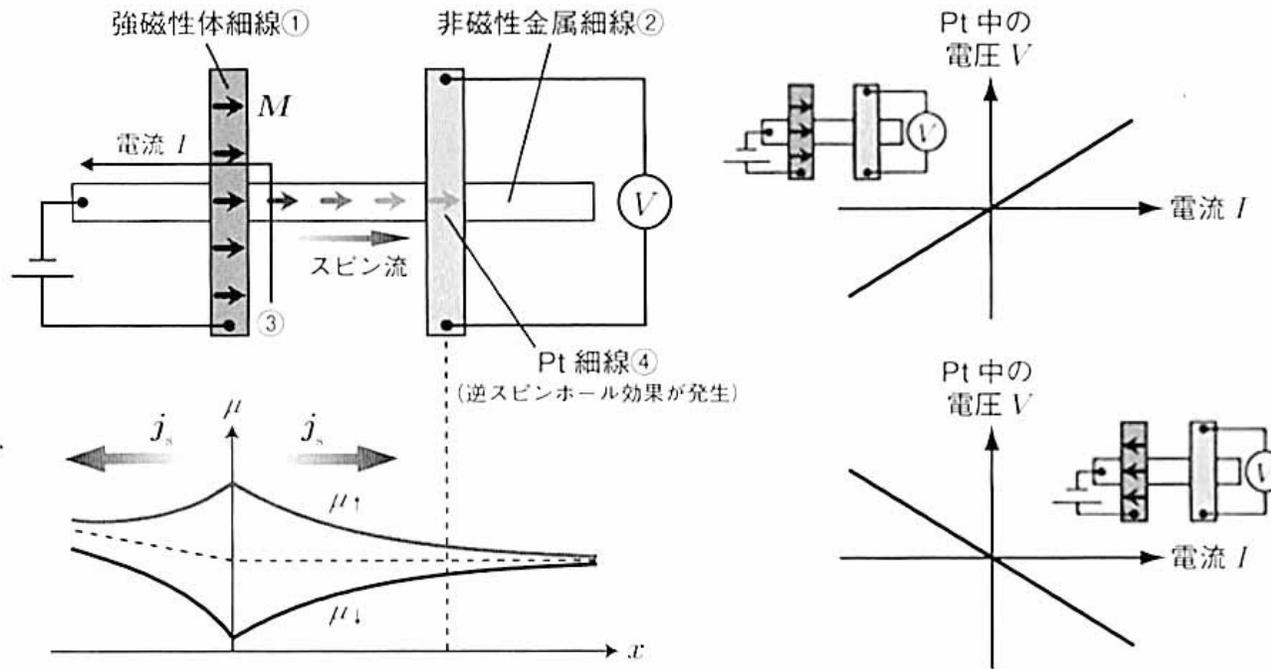


図 4.4 非局所配置を用いた逆スピンホール効果実験の模式図。右図はそれぞれ強磁性金属①の磁化が右向きおよび左向きの条件で、電流 I を③に沿って流したときに右側の白金 (Pt) 細線④の両端に生じる電圧信号 V である。電流は③に沿って流れるが、スピン拡散長は十分に長いため、スピン蓄積が非磁性金属②中を拡散し Pt 細線④まで到達し、スピン流を注入する。このスピン流による逆スピンホール効果電圧が検出された。

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нкаロリトロニクス

スピンを通じた熱電変換

垂直熱電相互変換

従来型の熱電変換は熱流と電流が平行であったため、性能に限界があった。これに対しスピンゼーベック効果、異常ネルンスト効果は熱流と電流が垂直方向であるため、非常にシンプルな構造で高い変換効率が期待される。

理論上の上限であるカルノー効率に達することが原理的には可能であると示された。

最近の垂直熱発電の出力密度は $200\mu\text{W}/\text{cm}^2$ に達しており、あと1桁向上すればBiTe系の従来型熱電素子を超えるところまで達している。

逆過程であるスピネルチエ効果では、微小領域のスピンの流－熱流変換現象の可視化が行われる。

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。

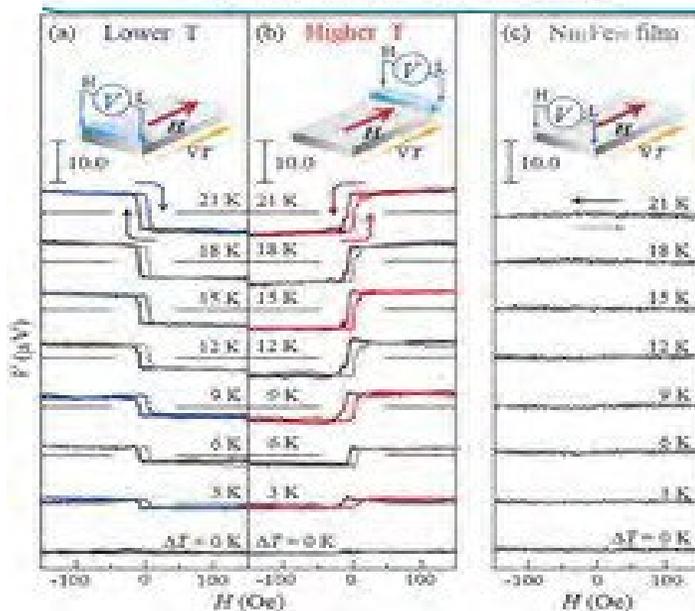
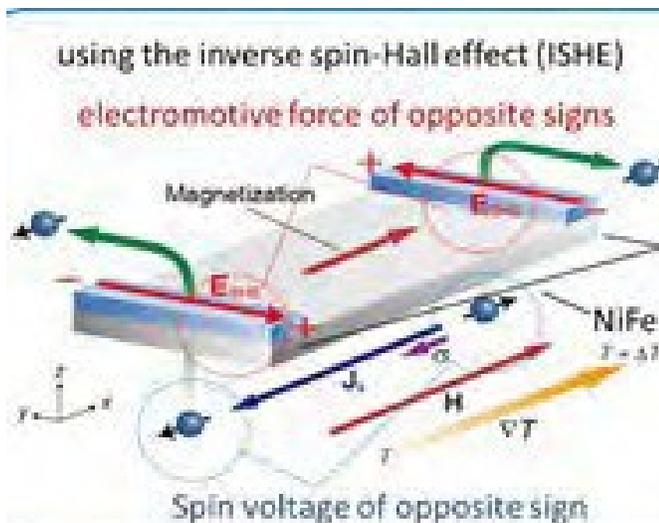


図15 Pt電極をつけたパーマロイにおけるスピンゼーベック効果

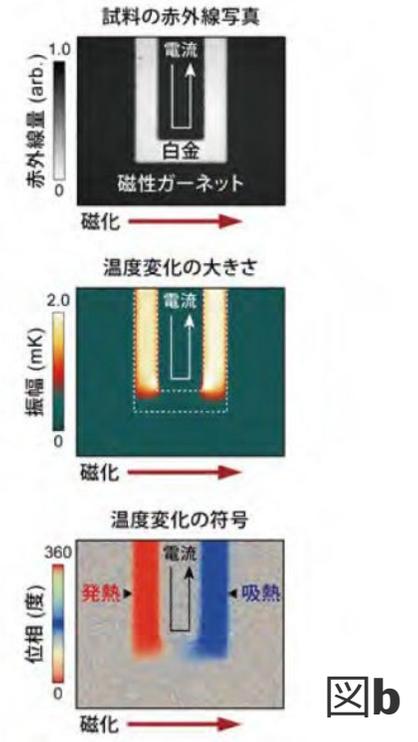
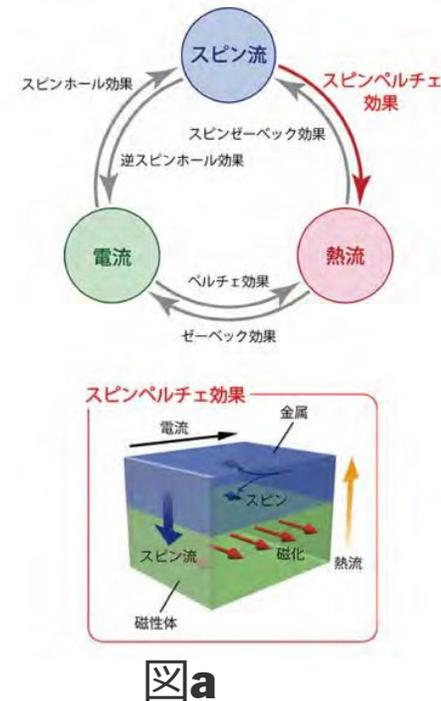
19) K. Uchida et al.: Nature 455, 778 (2008).

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).

スピネルチエ効果

- ▶ スピネルチエ効果による物質中の温度変化を可視化することに世界で初めて成功しました。熱は物質中を伝播し拡散していく、というのが従来の熱現象ですが、今回スピネルチエ効果によって生じる温度変化は周囲には広がらず、局所的に生じるということが明らかにしました。
- ▶ 物質中には様々な流れが存在します。電気の流れが電流、熱の流れが熱流、そして磁気の流れがスピン流です。これらの流れは相互に作用し、変換することができます。(図a) スピネルチエ効果とは、スピン流によって温度変化を引き起こす現象であり、磁性体と金属の接合構造に電流を流すことによって発現します。しかし、これまで試料中に流れる電流に由来するジュール熱による温度変化との分離が難しいため、どのような温度分布が生じているのかは明らかにされていませんでした。
- ▶ 今回、スピネルチエ効果を測定するため、金属薄膜と磁性ガーネットの接合構造を用いた試料を作成しました。金属薄膜に電流を流すと、電流と垂直方向にスピン流が生成されるスピンホール効果が発現し、接合界面にスピン流が生じます。これによりスピネルチエ効果が生じて界面に流れるスピン方向に依存して加熱、もしくは冷却が起こります。
- ▶ この時に生じる温度変化をロックイン・サーモグラフィ法とよばれる手法を用いて観測をおこないました。



- 実験の結果、金属と磁性ガーネットの接合界面上に明瞭な温度変化が観測されました(図b)。スピネルチエ効果による温度変化は金属薄膜の部分のみに生じており、その周囲には広がっていないことが分かります。この振る舞いはジュール熱などの通常の熱源による温度変化が熱流に伴って広がっていくこととは対照的です。



12. スピントロニクス注目分野

1. スピン量子整流
2. SOT（スピン軌道トルク）MRAM
3. 電圧駆動MRAM
4. 電圧駆動スピントロニクスメモリ
5. 高感度磁場センサ
6. シリコンスピントロニクス
7. スピン波の応用スピントロニクス
脳型コンピュータ
8. トポロジカルスピントロニクス

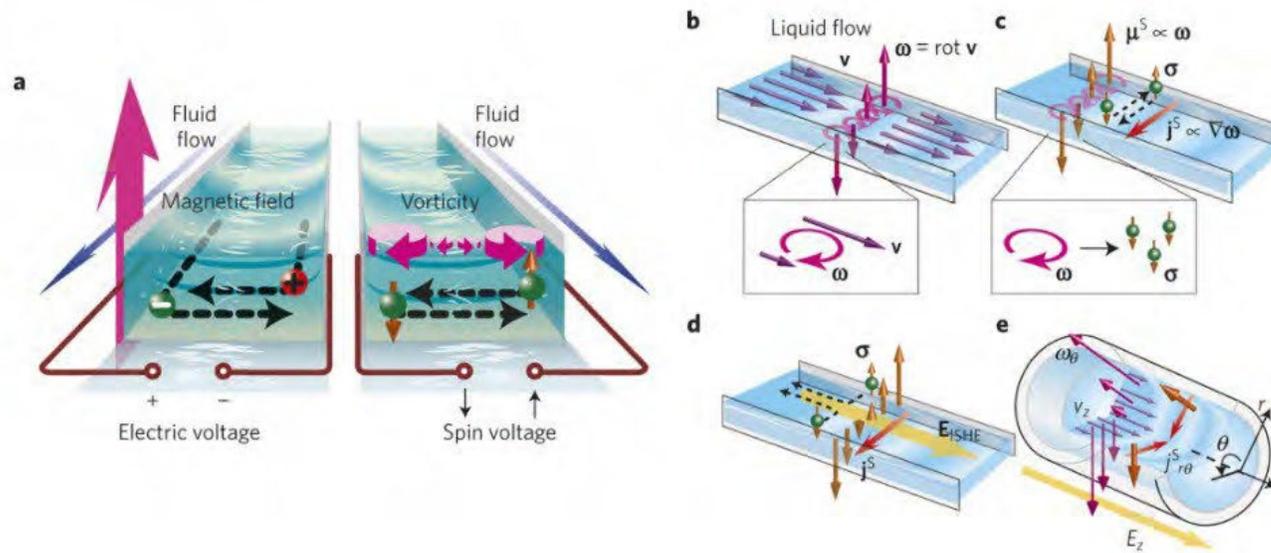
12.1 スピン量子整流

- ▶ 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⁾

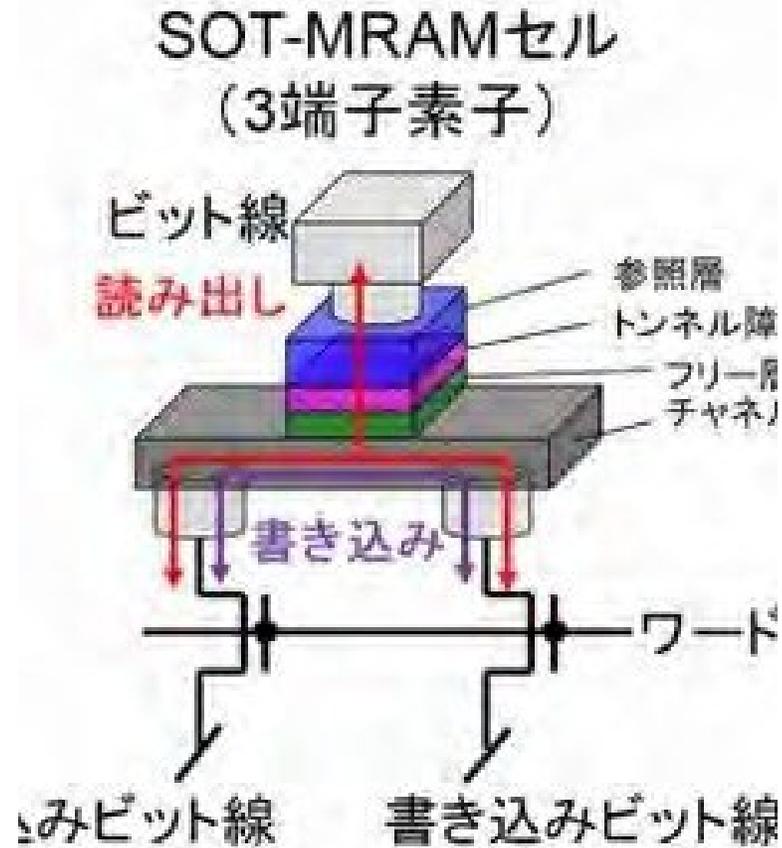
21) R. Takahashi et al.: Nature Phys. 12, 52 (2016)

Figure 1: Concept of spin hydrodynamic generation.

From: Spin hydrodynamic generation



12.2 スピン軌道トルクMRAM ・ ・ SOT-MRAM

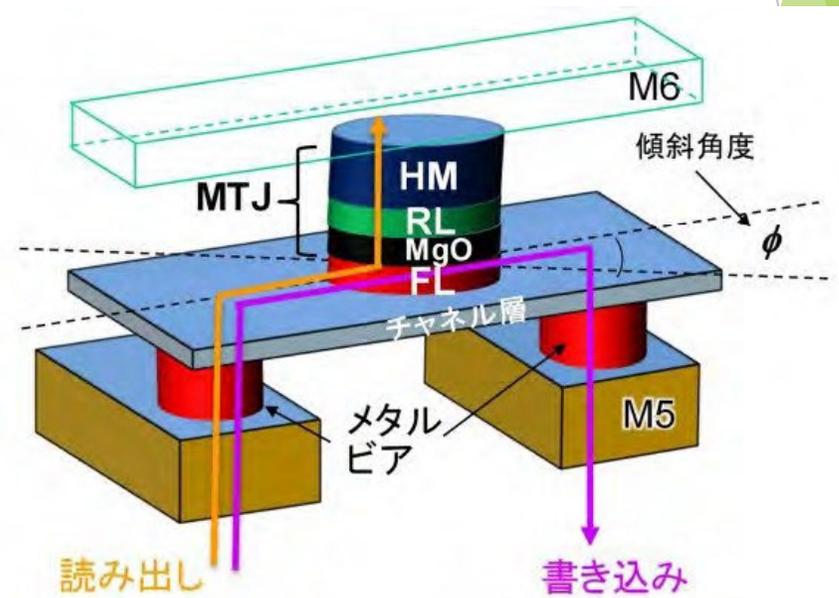


- ▶ スピンホール効果あるいはスピン軌道相互作用によるラシュバトルクを用いることで、現在実用化が進むSTT-MRAMに比べて高効率のMRAMが作れることが期待されている。
- ▶ 原理的に3端子であるため書き込みラインと読み出しラインを分離できるという回路上の利点もある一方で、素子サイズが大きくなるという問題も抱えている。
- ▶ 近年、その高速性、高信頼性を生かしたSRAM置き換えの研究開発が進んでいる。
- ▶ MRAMによりキャッシュを不揮発にすることで携帯端末などの省エネルギー化も期待されている。

東北大学、SOT-MRAMセルの動作実証に成功 (EE Times Japan 2019年12月12日)

- ▶ 東北大学国際集積エレクトロニクス研究開発センター（CIES）の遠藤哲郎センター長と同電気通信研究所の大野英男教授（現総長）らの研究グループは2019年12月、400℃の熱処理耐性と無磁場で350ピコ秒の高速動作、10年間データ保持を可能とする熱安定性を実現した。
- ▶ この素子はSOTを用いたMRAMである。MTJの下部に設けたチャンネル層に電流を流し、チャンネル層に隣接する強磁性体のみ磁石方向を反転させる方式。書き込み速度が速く、SRAMを代替する技術として注目されている。

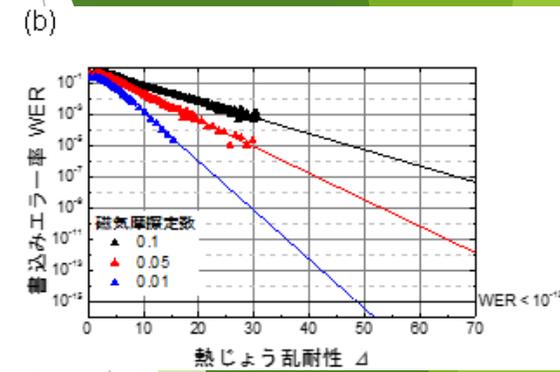
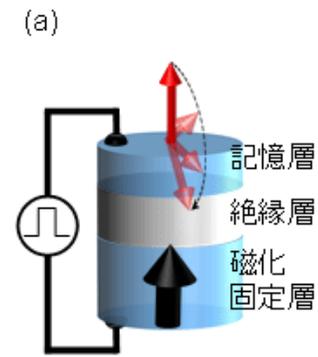
- ▶ チャンネル層のタングステン（W）に電流を流すとスピン軌道トルクが生じ、隣接した強磁性体のCoFeB層の磁化方向を反転させることで情報を記録する。チャンネル層に対してMTJを傾けると無磁場での書き込みが可能になるという。



12.3 電圧駆動MRAM

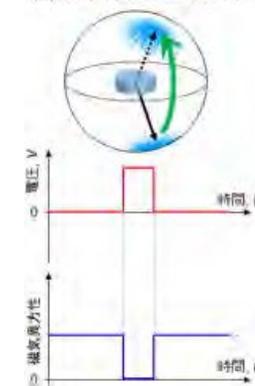
電圧トルク書き込み

- ▶ 現在、実用化が進んでいるSTT-MRAMやスピン軌道トルクを用いるSOT-MRAMは電流が作る磁界を書き込みに使う場合に比べて非常に**低消費電力**となるものの、電流を用いてスピン流を発生するために**ジュール熱によるエネルギー散逸**を伴う。
- ▶ 一方、電圧電界誘起磁気異方性変化によるトルク（電圧トルク）を書き込みに用いる新しい不揮発性メモリ「電圧駆動MRAM」は、電流をほとんど流さずに**電圧のみで書き込む**ため、理論的にはさらに**2桁程度小さなエネルギーでの書き込みが可能**となる。
- ▶ 近年、電圧パルスによる高速双方向磁気書き込みが実験的に示されたこと、 10^{-7} 台のエラーレートが実証されたことで、実用化の可能性が高まっている。

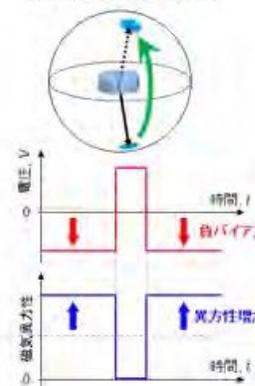


産総研プレスリリース2015.12

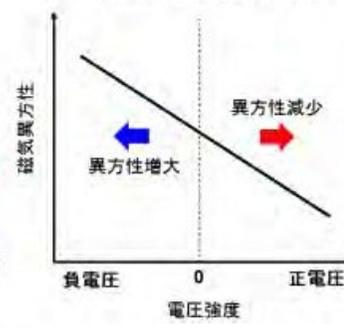
(a) 従来の書き込み方式



(b) 新型書き込み方式



(c) 電圧による磁気異方性制御



産総研プレスリリース2016.12

Rashba効果

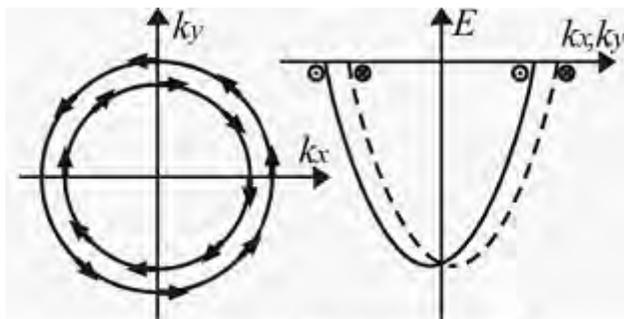
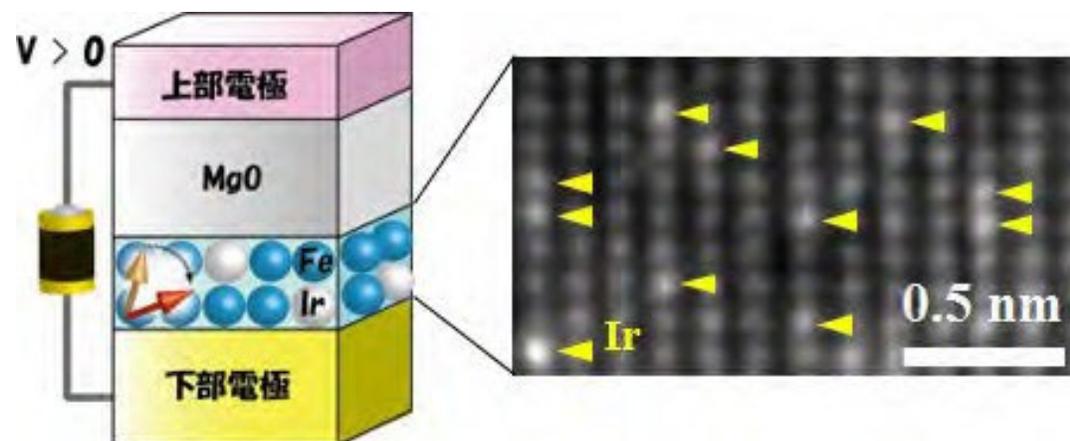


図1 2次元自由電子におけるラッシュバ効果

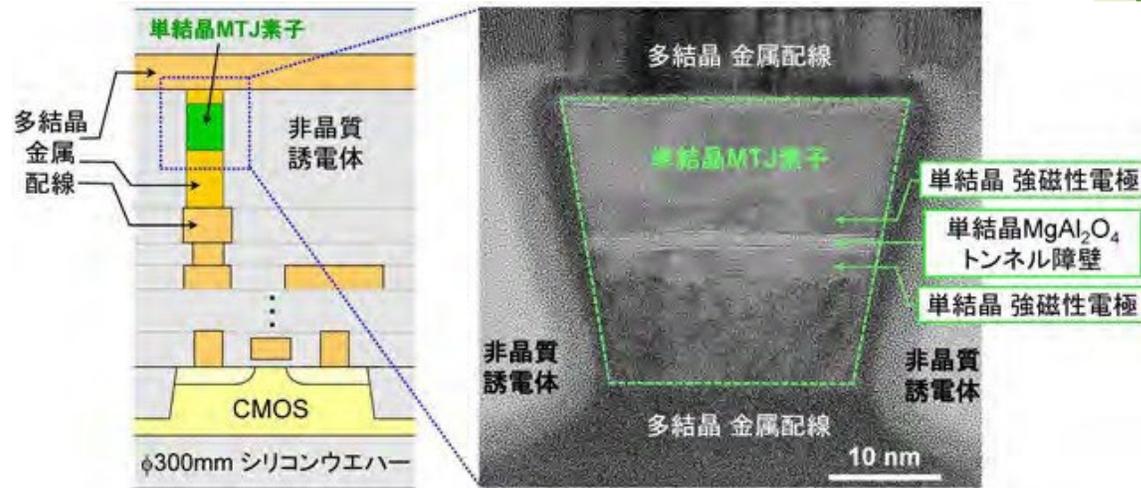
- ▶ 1960年にE. Rashbaによって提唱された効果。界面や表面などの系は、面の法線に垂直な方向に2次元系を形成している。この2次元電子系において、面直方向（面に垂直な方向）に電位差を与えることによって非磁性体であってもスピン偏極電子が生じ、電子スピンについて縮退していた電子状態にスピン分裂が現れる現象で、分裂した電子バンドが観測される（図1）。
- ▶ 電子の波数ベクトルは表面平行方向であり、スピン偏極ベクトルは二次元面内のみを向いている。面直方向の対称性が破れていることによってその方向に電位差が生じ、スピン偏極電子が生じる。
- ▶ この効果においては、表面での「空間反転対称性の破れ」と「表面電場の効果」が重要となる。
- ▶ 界面においてもこの効果は観測されており、スピン偏極ベクトルの方向が2次元面内に制約する効果をもつ。
- ▶ この効果は、電子が光の速度に近い高速で運動することにより現れる相対論効果の一つであり、スピン軌道相互作用を起源とするものである。
- ▶ これまでマクロな現象においては大きな関心を集めていなかったが、近年、電子デバイスなどの微細化が動機付けとなり、微細加工技術の進歩および観測実験技術の進歩とが相まって、このような効果を積極的に解明し、電子デバイスに応用する必要性が求められている。

電圧駆動MRAM新材料 FeIr

- ▶ 電圧による磁気異方性変化自体を大きくする必要はあるが、最近、FeIr系などで従来の10倍以上の電圧効果が見出され実用化に着実に近づいている。
- ▶ 図(左)に素子構造の模式図を示す。上部電極と下部電極との間に電圧をかけることにより、酸化マグネシウム (MgO) 層の下の超薄膜磁石の磁気異方性が変化する。これまでは典型的な磁石材料である鉄コバルト(FeCo)系合金を用いていたが、今回Feの中に5~10%程度の低濃度でイリジウム(Ir)が分散したFeIr合金の超薄膜磁石を開発した。膜厚は1ナノメートル程度である。
- ▶ 図(右)はFeIr超薄膜磁石の電子顕微鏡の例であり、Ir(黄色矢印)がFe内にランダムに分散していることが確認できる。このFeIr超薄膜磁石は、Fe内に適度に分散したIrが持つ磁気異方性により、純粋なFe/MgO接合と比較して約1.8倍の垂直磁気異方性を示した。



MRAMを300mmウェーハに集積化



トンネルバリア層にスピネルを採用

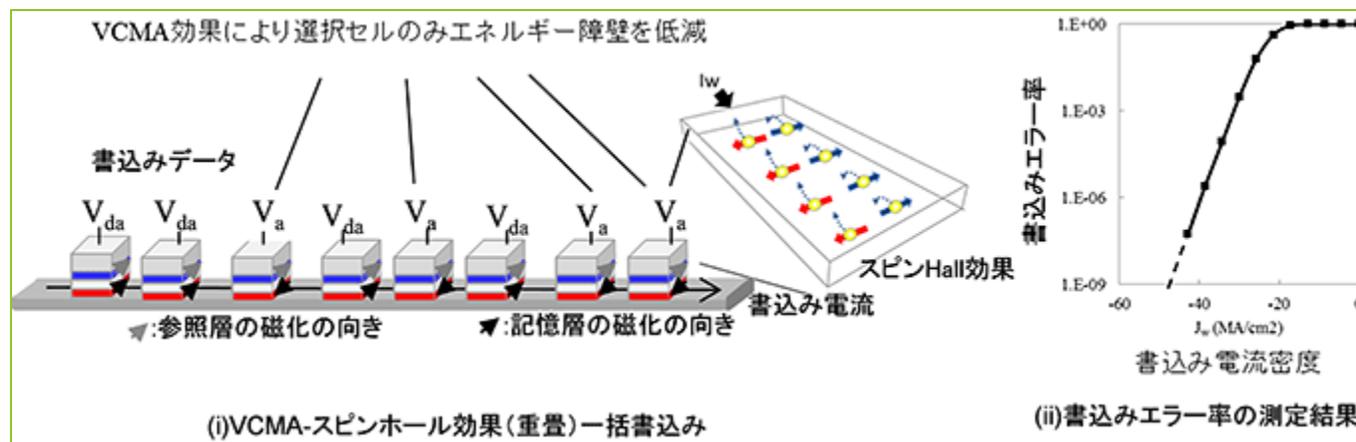
- ▶ 不揮発性メモリーMRAMは、記憶素子である磁気トンネル接合 (MTJ素子) からなる記録ビット、ビット選択に用いる半導体トランジスタ (CMOS)、それらを繋ぐ金属配線などで構成される。
- ▶ このメモリーは、酸化マグネシウム(MgO)トンネル障壁を用いた多結晶MTJ素子を多結晶の金属配線上に直接堆積することにより作製される。しかし、この従来からの技術では、多結晶MTJ素子の性能の不揃いや材料特性に起因して、MRAMの微細化が限界に達すると予想されるため、その解決策として新材料を用いた単結晶MTJ素子およびその集積化技術が注目されている。
- ▶ 今回、MgOに代わる新材料としてスピネル酸化物 MgAl₂O₄を用いた単結晶MTJ薄膜を、直径300 mmのシリコンウェーハ上に作製することに初めて成功した。また、ウェーハ直接ボンディングを用いた3次元積層技術により、単結晶MTJ素子をMRAM用のシリコンLSIに集積化することにも初めて成功した。
- ▶ この技術は、現在主流の不揮発性メモリーSTT-MRAMの超微細化だけでなく、さらに省電力な電圧駆動MRAMや量子コンピューターの中核技術である超伝導量子ビットの高性能化などにも貢献する。

12.4 電圧駆動スピントロニクスメモリ (VoCSM)

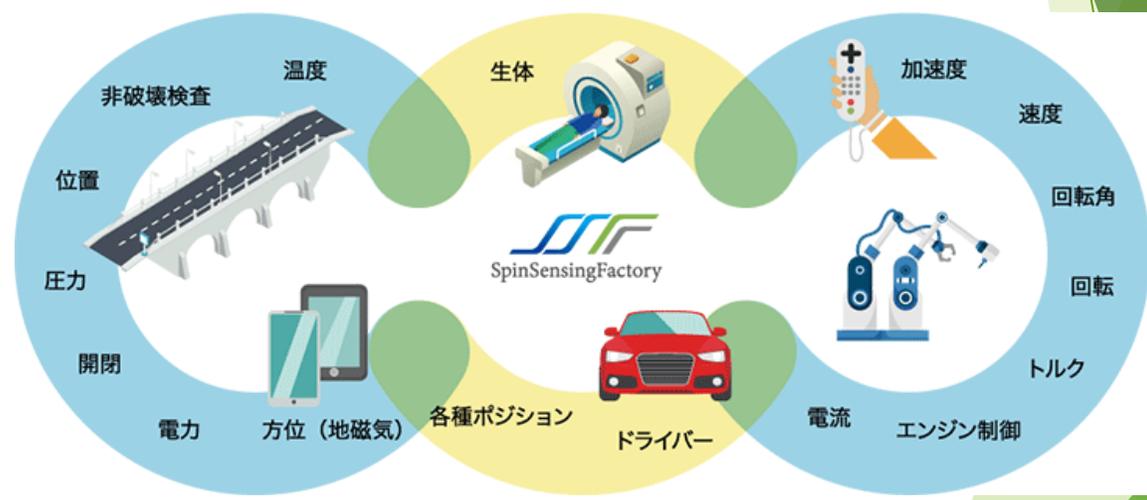
電圧制御磁化反転を使った不揮発性磁気メモリに新たな書込み方式を提案

- ▶ 2016年に提案されたスピン軌道トルクと電圧による磁気異方性変化を同時に利用することにより低電力化と高集積度を同時に満たすことをめざしたMRAMの新しいアーキテクチャである。1つの重金属ワイヤの上に複数の磁気トンネル接合を作るのが特徴で、このうち電圧をかけたもののみを低消費電力で書き換えることが可能になる。
- ▶ 電流駆動のSTT-MRAMでは、2端子構造ゆえに書込み時と読出し時の電流経路が同じであるため、いずれの際にもトンネル障壁に電流が流れ、読出し時に誤って書込みを行ってしまう誤書込みが発生する可能性がある。したがって、読出し時には誤書込みを起こさないように留意し、また書込み時にはトンネル障壁の寿命に留意した設計が必要。
- ▶ それに対してVoCSMアーキテクチャでは、印加する読出し電圧の極性を選択することで、原理上読出し時の誤書込みを無くすことができる。また、トンネル障壁に書込み電流を流す必要がないため、トンネル障壁の寿命に留意した設計をする必要がなくなる（原理上無限大の書き換え耐性を有す）。
- ▶ また、CMOS同様電圧駆動となるため、メモリセル選択用のトランジスタサイズを小面積にすることが可能になる。

(ImPACT 2016)



12.5 高感度磁場センサー



▶ トンネル磁気抵抗素子(MTJ)およびマグネトインピーダンスセンサ (MIセンサ) を用いた心磁計、脳磁計の研究が進んでいる。すでに、心磁・脳磁の信号測定に成功しており今後の実用化が期待される。

▶ JST S-イノベの成果を受けて、東北大学発ベンチャー「**スピンセンシングファクトリー株式会社**」が設立され、世界初の小型・軽量で超高感度な磁気センサーを開発、提供する。高度医療診断からインフラの監視までに貢献

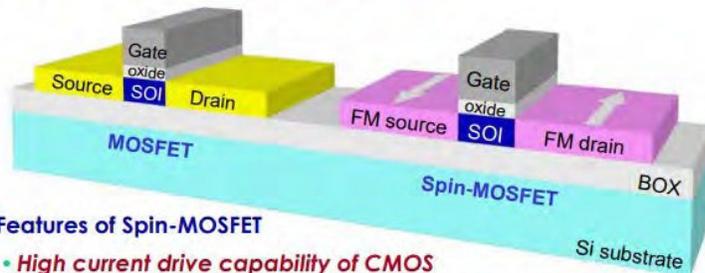
12.6 シリコンスピントロニクス

- ▶ 大阪大学-TDKグループは、スピンMOSFETの作製とその動作実証を試み室温でスピンMOSFETを動作させたと報告した。ゲート電圧によるドレイン電流の変調はある程度できているが、スピン注入と検出による磁気抵抗比は0.01~0.04 %程度と非常に小さいものであった。
- ▶ 京都大学白石誠司 同教授らのグループは TDK 株式会社、大阪大学と共同で、産業のコメとも言えるシリコンにおける、従来の物性理解を超越する新奇なスピン物性の発見に成功した。
- ▶ また、東工大-NIMS-東大グループは、既存のTMR素子とMOSFETを組み合わせるという手法により、擬似スピンMOSFETの作製と良好な特性の室温動作を示した。

スピンMOSFET

▶ Spin electronics (Spintronics)

- New concepts for future electronics using spin degrees of freedom
- Key device → **spin-MOSFET**



▶ Features of Spin-MOSFET

- High current drive capability of CMOS
- New functionality of magnetoresistive devices (Nonvolatile and reconfigurable functions)
- Excellent compatibility with CMOS

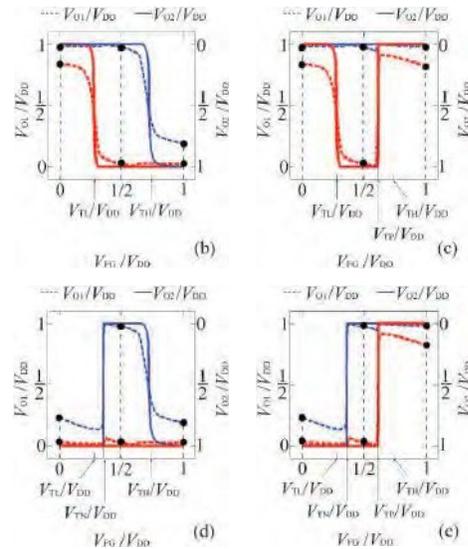
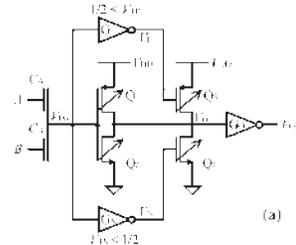
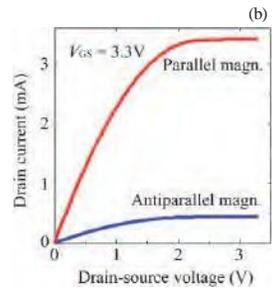
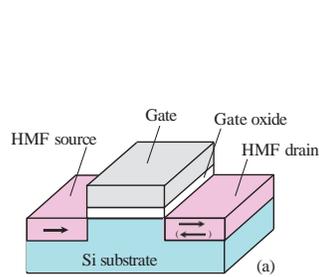
Spin-MOSFET → Functional CMOS

スピンMOSFETは、電力増幅作用を持ち、出力電流やトランスコンダクタンスを磁化状態によって操作でき、不揮発で、既存のSi集積回路で蓄積された微細加工技術や回路設計技術などの資産を使うことができるという特徴を持つ。原理的にはCMOS回路構成も可能である。

スピンMOSFETからなる論理回路は、素子数の少なさと不揮発性により低消費電力動作が期待できる。まだ理想的な出力特性を得るにはいたっていないものの、これまでいくつかの試作と原理的な動作実証の研究が行われている。

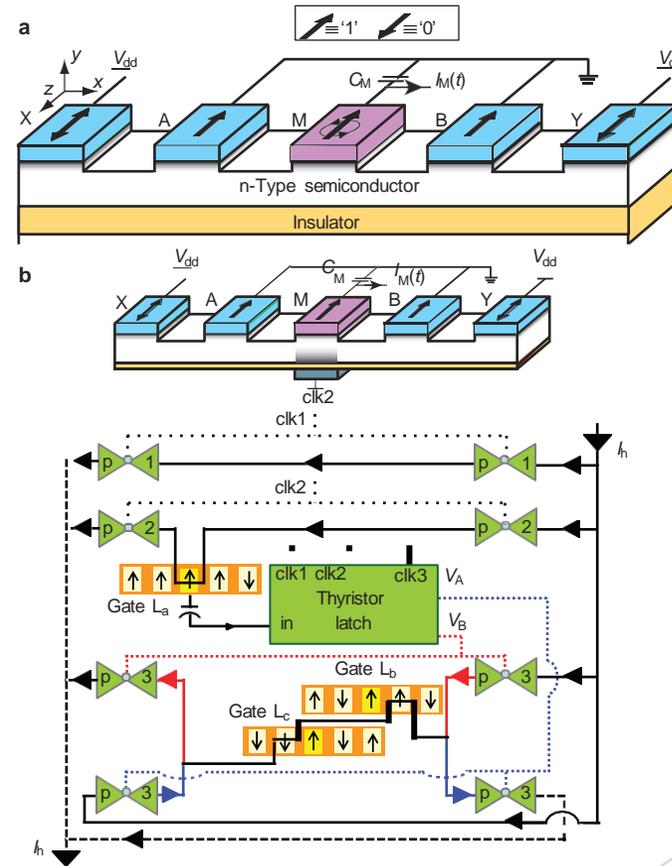
このような再構成可能な論理回路や不揮発性論理回路の実現は、今後のスピントロニクスにおける重要な目標になると考えられている。

スピンMOSトランジスタ (再構成可能論理回路)



「菅原 = 田中型スピントランジスタ」
(APL 2004) ※ Das-Datta型と異なる

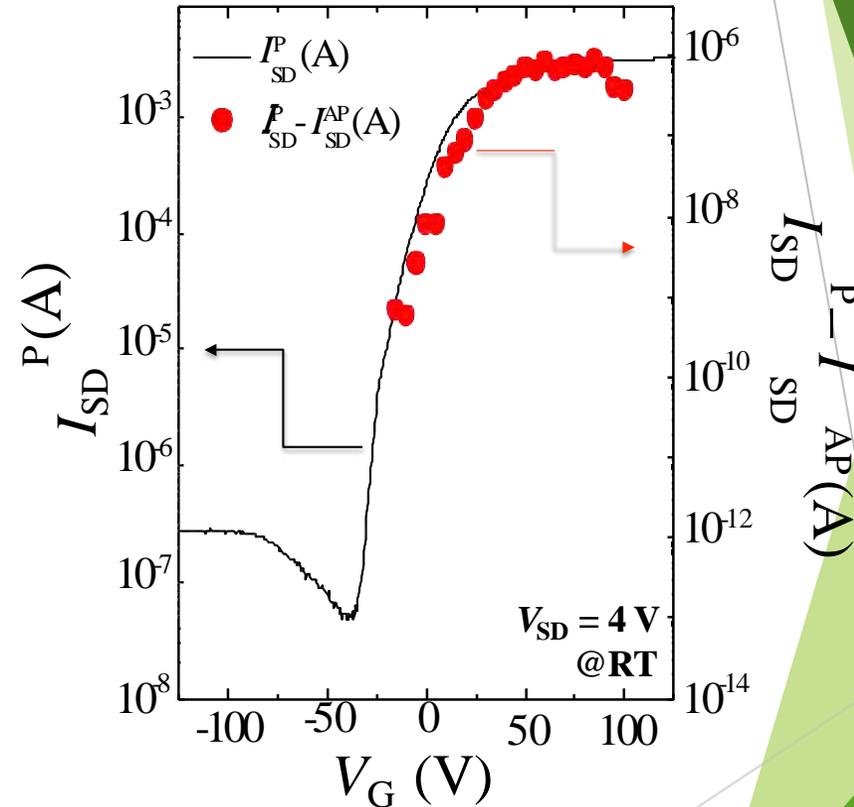
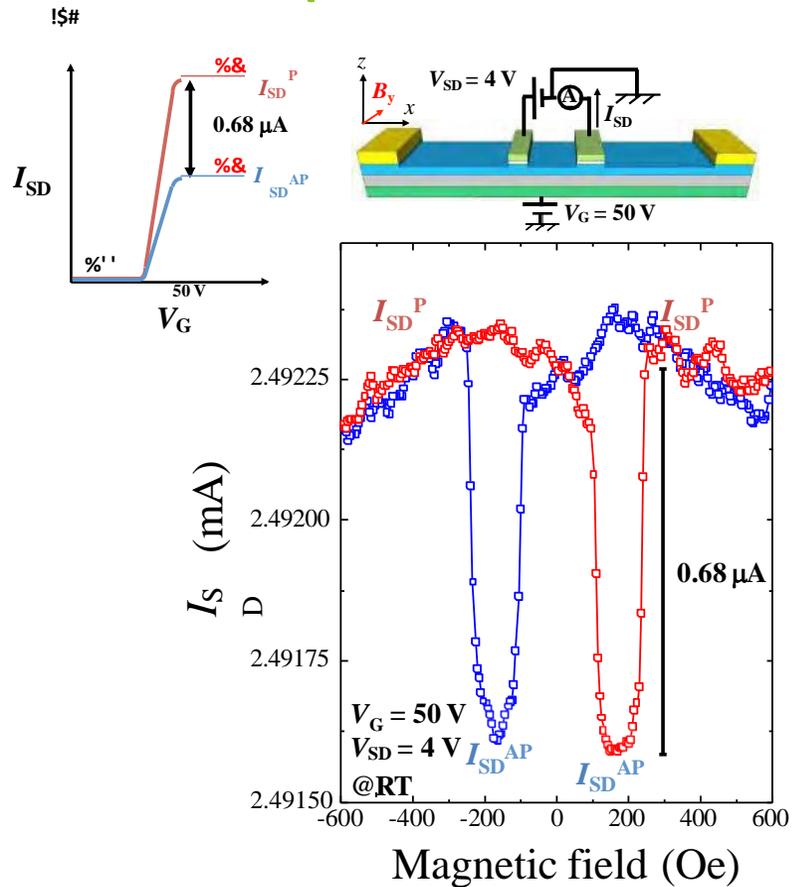
スピン流ロジックゲート



Dery=Sham型ロジックゲート
(Nature 2007) ※スピントランジスタが基盤技術



Si スピンMOSFETの室温動作の観測(世界初：2015年)



T. Tahara, M.S. et al., Appl. Phys. Express 8, 113004 (2015) [selected as Spotlight Paper]

京都大学白石誠司 教授による

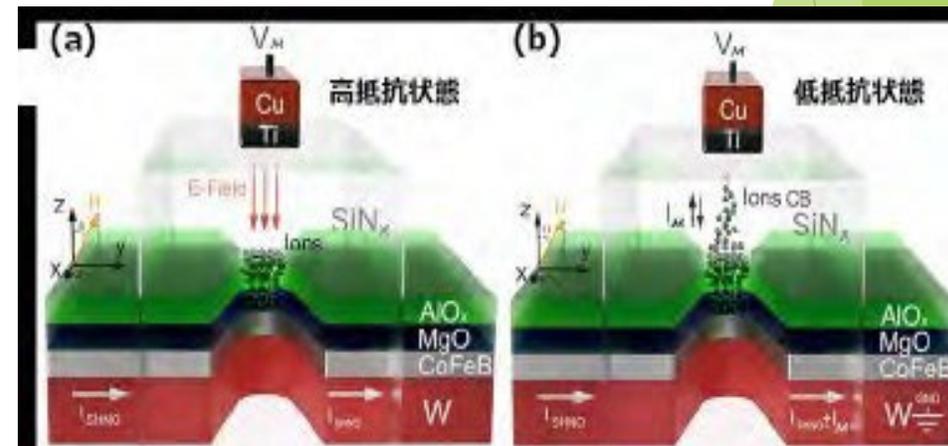
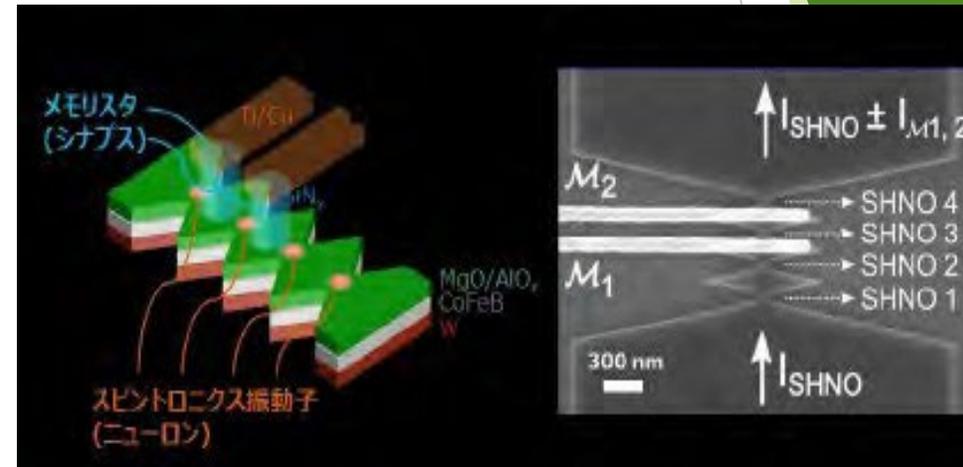
12.7 スピン波の応用

- ▶ スピン波やマグノンをキャリアとするデバイスの実現をめざす、マグノニクスと呼ばれる研究領域も誕生しており、ドイツや日本を中心に進展している。例えば、スピン波スピン流を用いた論理ゲートが提案され、動作実証が報告されている。
- ▶ スピン波は室温でも十分に干渉効果を得ることが可能であるため、これを利用することでデバイス構造を簡易化可能であることが指摘されている。また、スピン波やスピントルク発振の非線形性を利用して脳型コンピューティングを行おうという動きもある。スピントルク発振器とディレイラインを用いてリザーバーコンピューティングの実証が行われ注目を集めている。
- ▶ また、スピントルク発振器はHDDのさらなる記録密度向上のためのマイクロ波アシスト磁気記録（Microwave Assisted Magnetic Recording : MAMR）用の発振器としても期待されている。この他、磁性ドット間の双極子相互作用を利用した脳型計算のシミュレーションが発表されるなど近年急激に研究開発が活発になっている。

スピントロニクスで脳型コンピュータ向け新素子 ～ニューロンとシナプスの機能を一体化～

- ▶ ニューロンとシナプスの機能が一体化されたスピントロニクス素子技術を開発
- ▶ ニューロンの機能を果たすスピントロニクス振動子を数珠状に連結し、その連結部分にシナプスの機能を果たすメモristaが配置された一体化構造を作製。
- ▶ この振動子がスピントロニクスの効果により位相を揃えて振動する「同期発振」の起こる条件を、連結部分のメモristaで自在かつ不揮発に制御できることを実証
- ▶ リザーバー計算機やイジングマシンなどの脳型コンピュータの開発に新たな章

JST,東北大プレスリリース(2021.11.30)



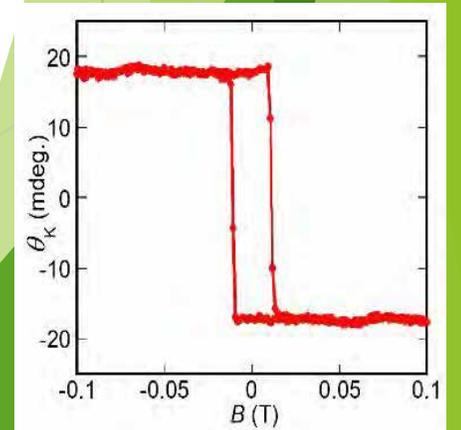
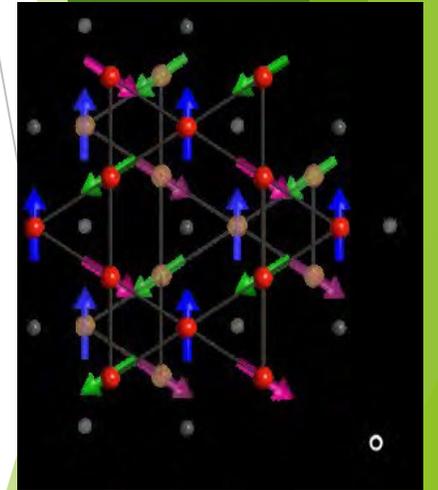
12.8 トポロジカルスピントロニクス

- ▶ トポロジカル絶縁体表面のスピンドルやトポロジカル反強磁性体の仮想磁場などのトポロジーに起因する特性を利用することにより、素子の高密度化や高速動作、高効率なスピンドル・電流変換もしくは熱電変換の実現など、新材料・新デバイス開発をめざした新しいスピントロニクス技術として期待されている。
- ▶ 特に近年、**ワイル反強磁性体である Mn_3Sn や Mn_3Ge** などにおいて、反強磁性体では発現しないと考えられてきた異常ホール効果、異常ネルンスト効果、磁気光学効果などが、電子構造のトポロジーを起源として出現することが東大物性研グループにより報告され、反強磁性体を用いたスピントロニクスに新しい方向性を切り拓きつつある。
- ▶ また、実空間でトポロジーに保護された磁気構造である**スキルミオン**に関しても、レーストラックメモリ活用に向けた研究が進められている。

非共線反強磁性体の巨大磁気光学効果と反強磁性スピントロニクスへの応用

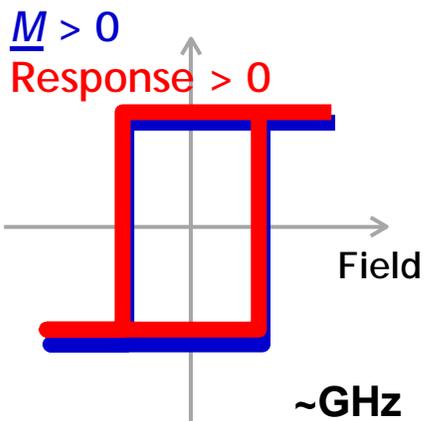
肥後友也(東大)

- ▶ 最近、次世代スピントロニクスデバイスにおいて、強磁性体(FM)に比して操作速度が速い反強磁性体(AFM)が急速に注目を集めている。AFMは磁化を持たないため検出や操作が困難であるが、最近、いくつかのブレークスルーが報告されている。
- ▶ 肥後らのグループは、非共線AFMである Mn_3Sn において、異常ホール効果、異常ネルンスト効果、磁気力-効果を発見した。 Mn_3Sn は六方晶 D_{019} (空間群 $P63 / mmc$)、Mn原子のカゴメ層の(0001)のABAB積層を示す。TN ~ 430 K以下では、幾何学的なフラストレーションによって、反転三角スピン構造と呼ばれる非共線AF秩序を示す。この状態はクラスタ磁気八重極子のフェロイック秩序とみることができる。
- ▶ この八重極秩序が、巨視的にTR対称性を破る主要な秩序パラメーターの役割を果たし、**運動量空間でのベリー曲率の分布が有効磁場として機能し、時間反転奇数の横方向応答を引き起こす**。最近の理論的および実験的進歩により、AHEはMOKEの要件と同じ対称性を持っていることがわかった。

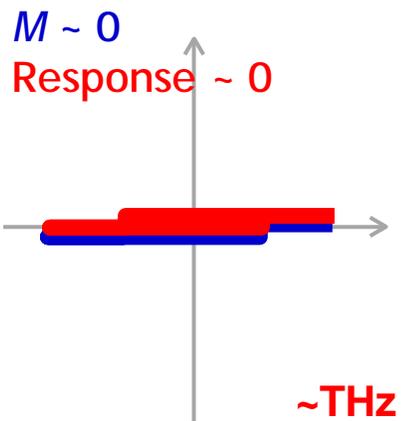


反強磁性体スピントロニクスに対する要請

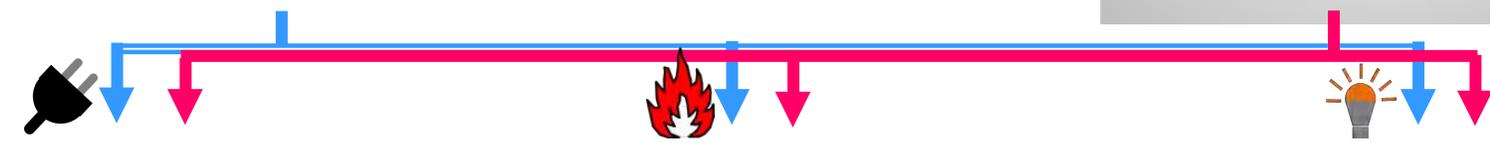
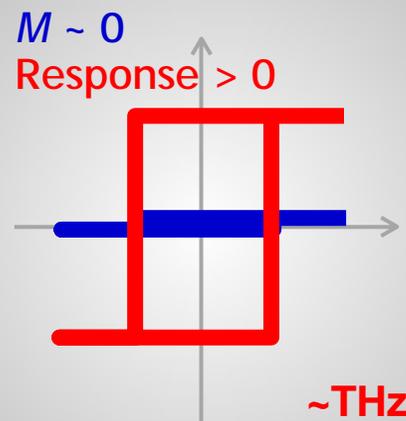
強磁性体 (FMs)



反強磁性体 (AFMs)



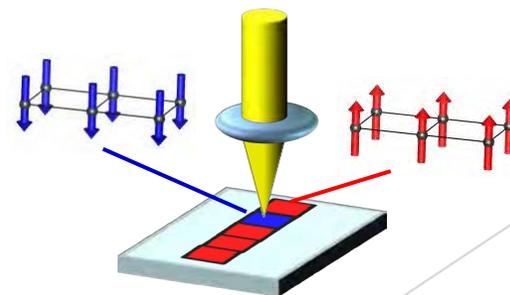
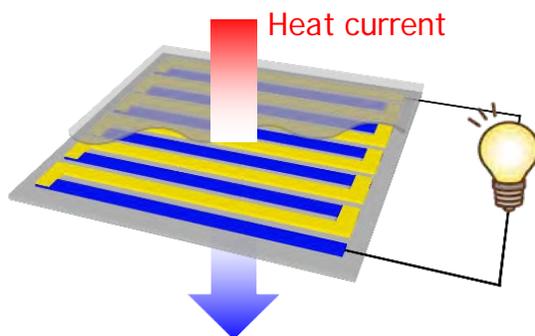
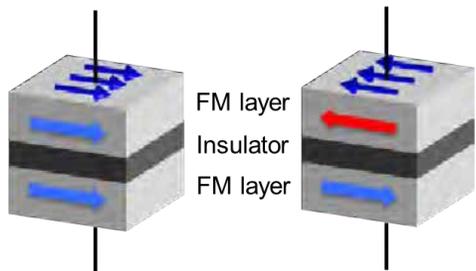
機能性反強磁性体



① Nonvolatile memory

② Thermoelectric device

③ MO device, imaging



反強磁性体への書き込みと読み出し

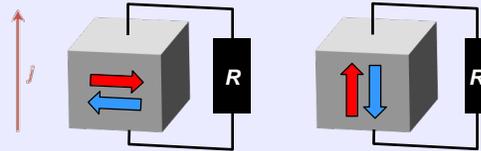
書き込み

- 磁場
- 電場
- スピン流
- 光
- 電場

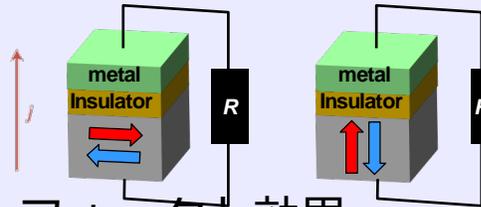
Železný et al., Nat. Phys. (2018).

読み出し

- 異方性磁気抵抗AMR
Marti et al., Nat. Mater. (2014).



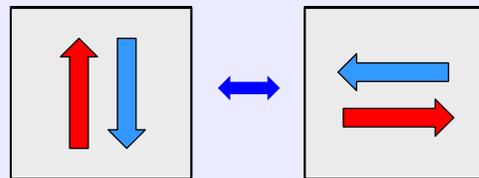
- トンネルAMR
Park et al., Nat. Mater. (2011).



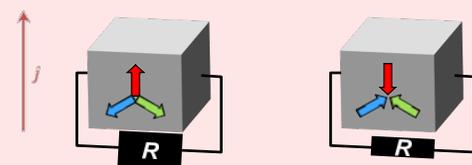
- フォークト効果
Saidl et al., Nat. Photon. (2017).

- SMR
Hou et al., PRL; Lin et al., PRL (2017).

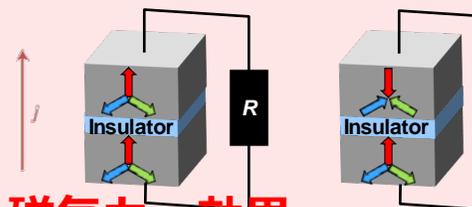
時間反転：偶 (90° 回転)



- 異常ホール効果
Nakatsuji, Kiyohara, Higo, Nature (2015).



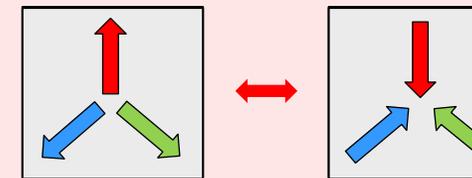
- トンネル磁気抵抗TMR
[Theory] Železný et al., PRL (2017).



- 磁気カー効果
Higo et al., Nat. Photon. (2018).

- 異常ネルンスト効果
Ikhlās+, Tomita+ et al., Nat. Phys. (2017); Li et al., PRL (2017).

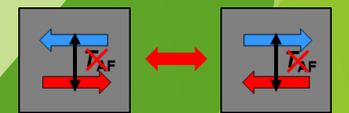
時間反転：奇 (180° 回転)



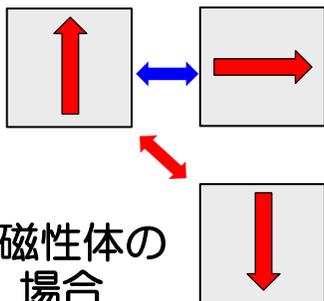
[Theory] Chen et al., PRL (2014).



[Theory] Šmejkal et al., Sci. Adv. (2020).



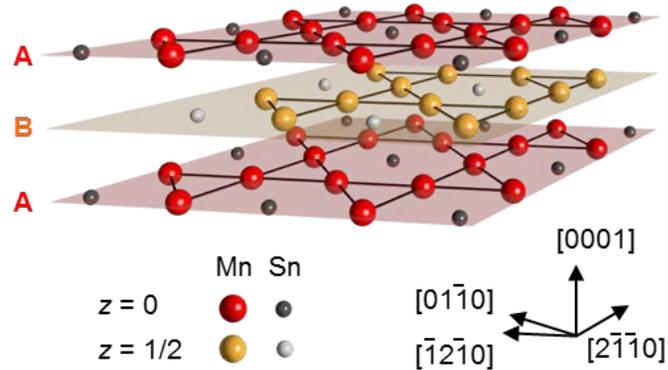
強磁性体の
場合



肥後 友也氏 (東京大学) 提供

非共線反強磁性体 Mn_3Sn

[結晶構造]



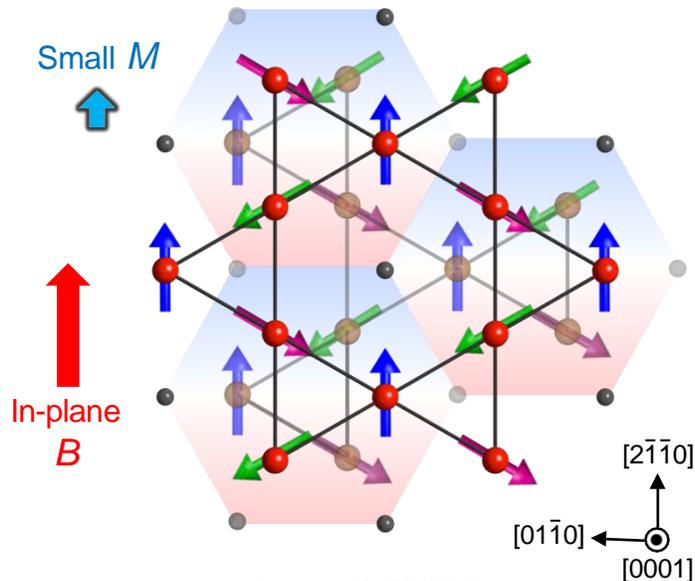
Tomiyoshi *et al.*, JPSJ **51**, 2478 (1982).
 Krén *et al.*, Physica B+C **80**, 226 (1975).
 Nagamiya *et al.*, Solid State Commun. **42**, 385 (1982).

	Mn_3Sn
空間群	$P6_3/mmc$
格子定数	$a = 5.67 \text{ \AA}, c = 4.53 \text{ \AA}$
磁性イオン	Mn ($\sim 3 \mu_B$)
ネール温度	$T_N \sim 430 \text{ K}$

Fig. from Higo *et al.*, Adv. Funct. Mater. **31**, 2008971 (2021).

[磁気構造]

A + B layers



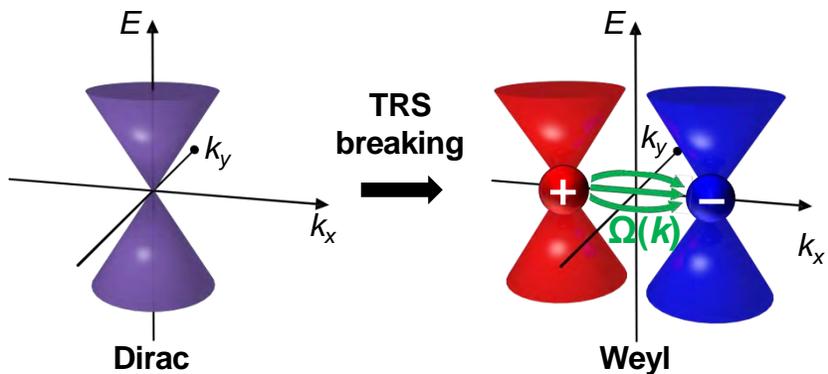
Figs from Higo *et al.*, Nature Photon. **12**, 73 (2018).

- 逆三角スピン構造(ITS)
 ➔ 巨視的 時間反転対称性の破れをともなう反強磁性
 “磁気八重極子”のフェロイック秩序
- 自発弱強磁性モーメント
 面内 $M \sim 0.005 \mu_B/f.u.$ ← キヤント磁化 + 軌道磁気モーメント
- 小さな面内磁気異方性

AF domains breaking the global TRS can be controlled by the in-plane B

Mn₃Sn における反転対称性が破れた(磁性)ワイル金属状態

② 大きなベリー曲率

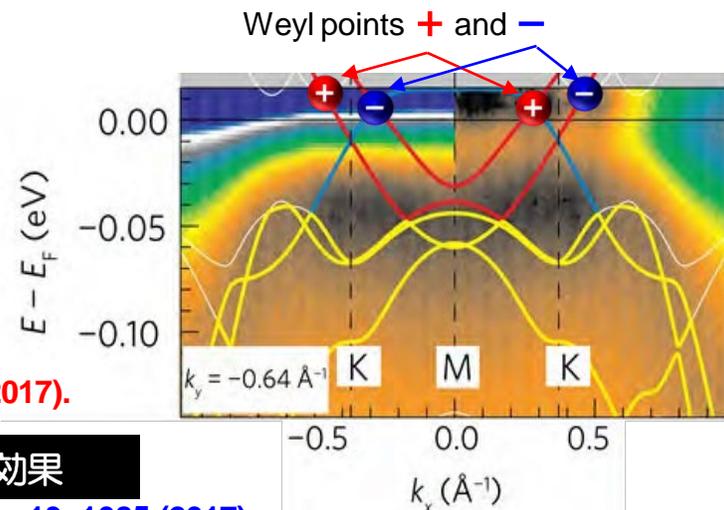


[Theory] Wan et al., PRB **83**, 205101 (2011).

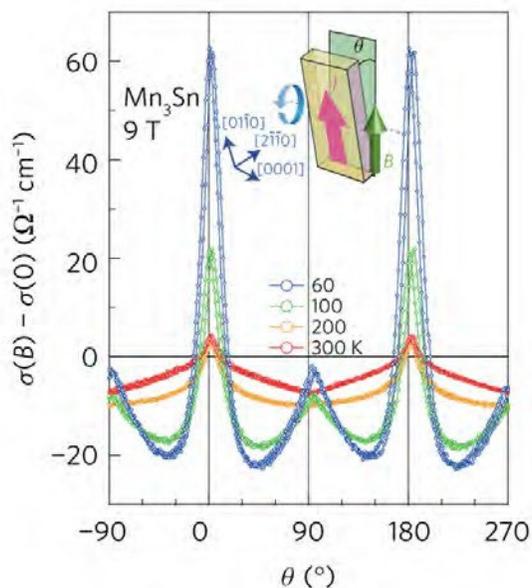
[Experiment] IS-B: Science **349**, 613 (2015); PRX **5**, 031013 (2015)..

TRS-B: Kuroda, Tomita et al., Nat. Mater. **16**, 1090 (2017).

角度分解光電子分光+ 第1原理計算



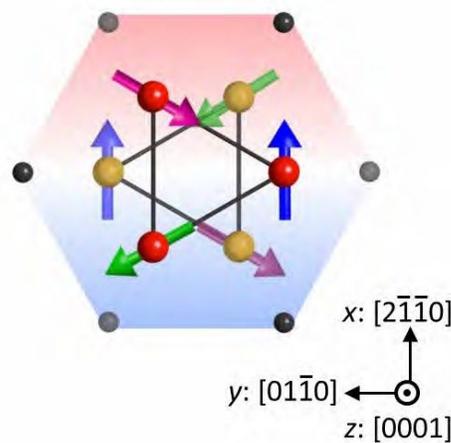
キラル異常



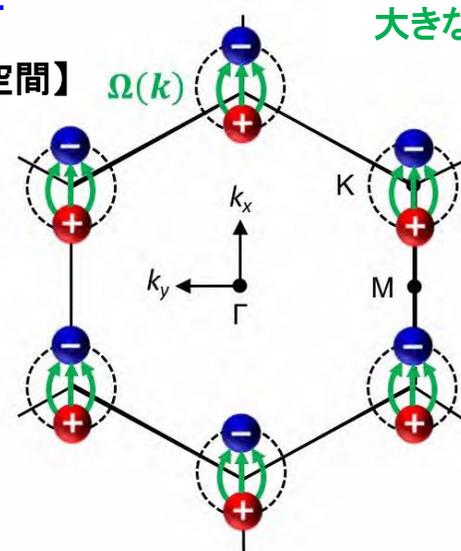
大きな異常ネルンスト効果

Ikhlas, Tomita et al., Nat. Phys. **13**, 1085 (2017).

【実空間】



【k空間】



大きなベリー曲率 Ω(k)

時間対称性を破るワイル状態が反強磁性スピントキシチャによって大きなベリー曲率をもたらす

肥後 友也氏 (東京大学)提供

13. 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。

