

計測エンジニアリングシステム

KESCOセミナー 2021.10.8

スピントロニクス スタートダッシュセミナー

佐藤勝昭

東京農工大学名誉教授





このセミナーで 学ぶこと

- ▶ 前回セミナー（2021.3.26）では、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、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内容でした。
- ▶ 今回は、前回セミナーの後半部分にフォーカスをあてたおさらいから始めて、スピントロニクスの最近の展開に進みたいと存じます。

内容

▶ 前半：前回セミナーの振り返り

巨大磁気抵抗の発見

巨大磁気抵抗効果がハードディスクを変えた

トンネル磁気抵抗の発見

MgOバリアTMR素子の登場

固体磁気メモリ(MRAM)の登場

スピン移行トルクとSTT-MRAM の製品化

STTの動的解析とスピントルク発振素子

スピン流が開く新しい物理

スピンホール効果と逆スピンホール効果

スピンゼーベック効果とスピンペルチエ効果

スピン量子整流

▶ 後半：スピントロニクスの最近の展開

スピン軌道トルクMRAM

電圧駆動MRAM

電圧駆動スピントロニクスメモリ

高感度磁場センサ

スピンMOSFET

シリコンスピントロニクス

ニューロモルフィックスピントロニクス

トポロジカルスピントロニクス

超伝導トポロジカル量子整流

フレキシブルスピントロニクス



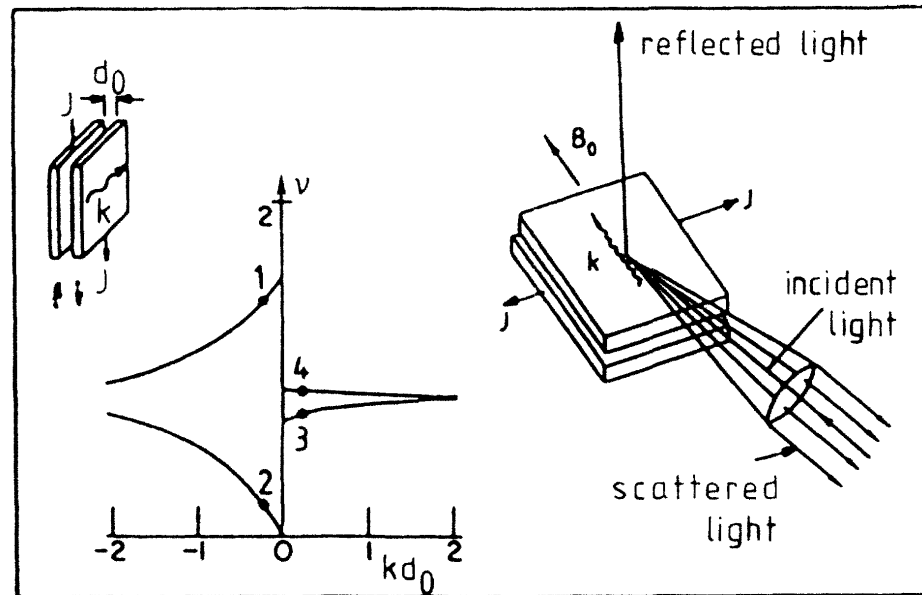
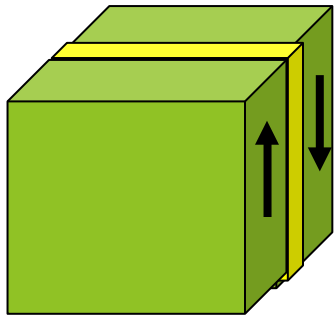
前回セミナー の振り返り



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

- ▶ 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⁾。



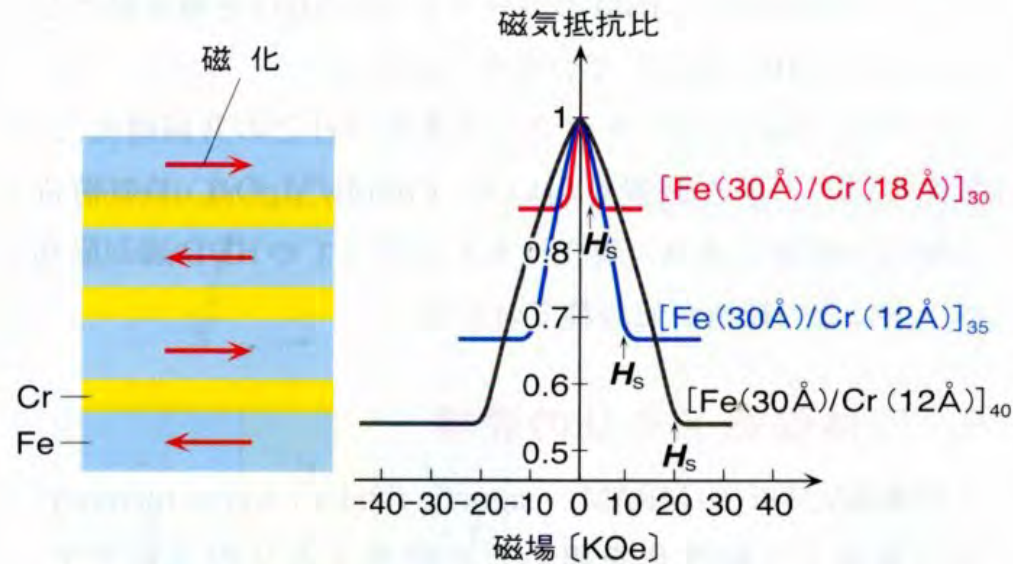
1) P. Grünberg, R. Schreiber and Y. Pang: Phys. Rev. Lett. 57 (1986) 2442.

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⁾。



アルベール・フェール博士



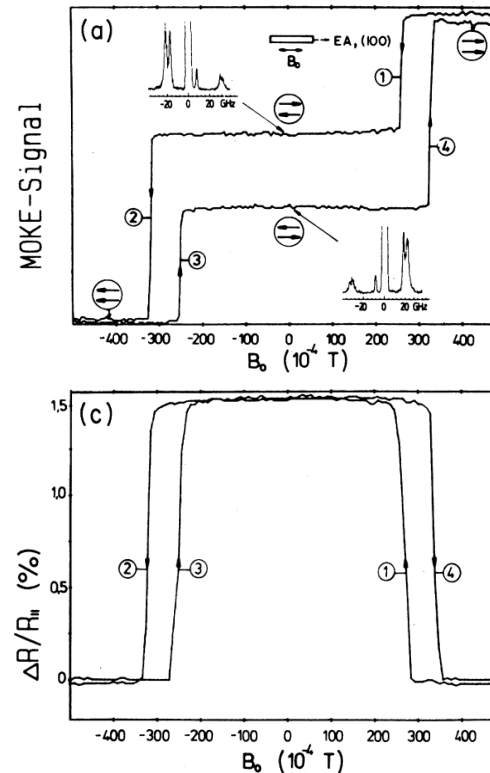
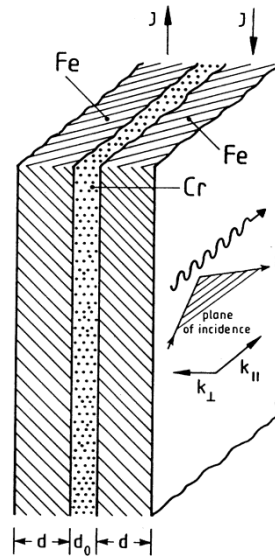
磁気抵抗比は $[R(H) - R(0)]/R(0)$ で定義されます。ここに $R(H)$ は磁場 H における抵抗、 $R(0)$ は磁場0の抵抗です。 H_s は飽和磁場。

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)/強磁性体(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。

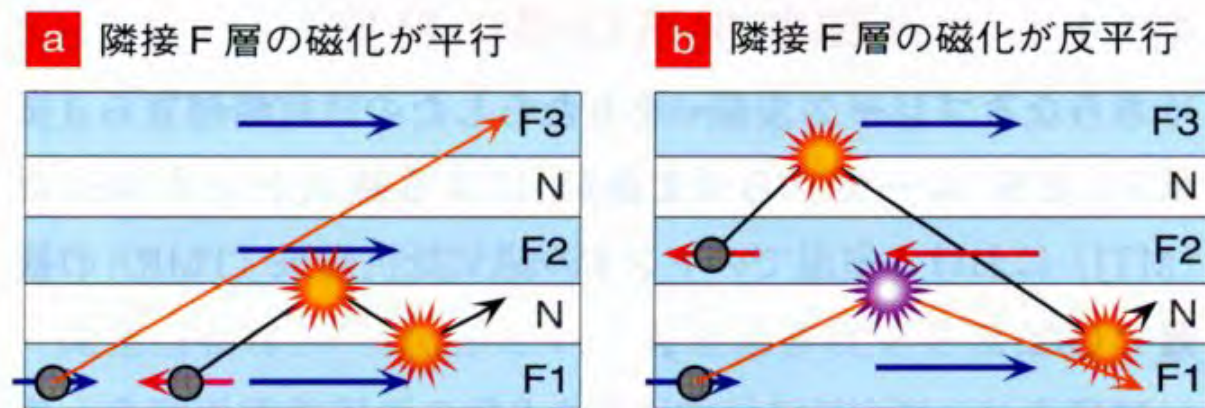
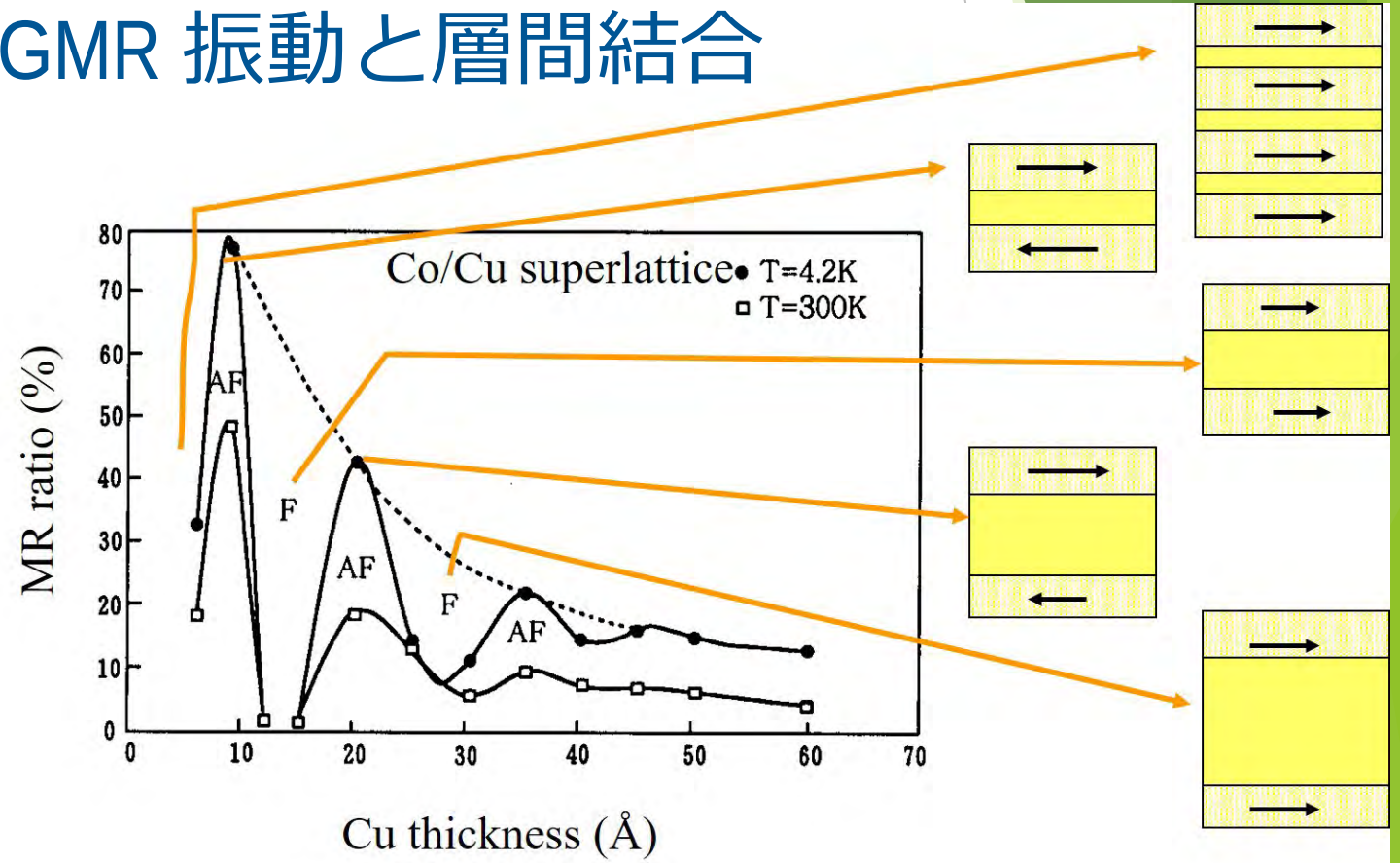


図4 巨大磁気抵抗効果の説明図

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



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。

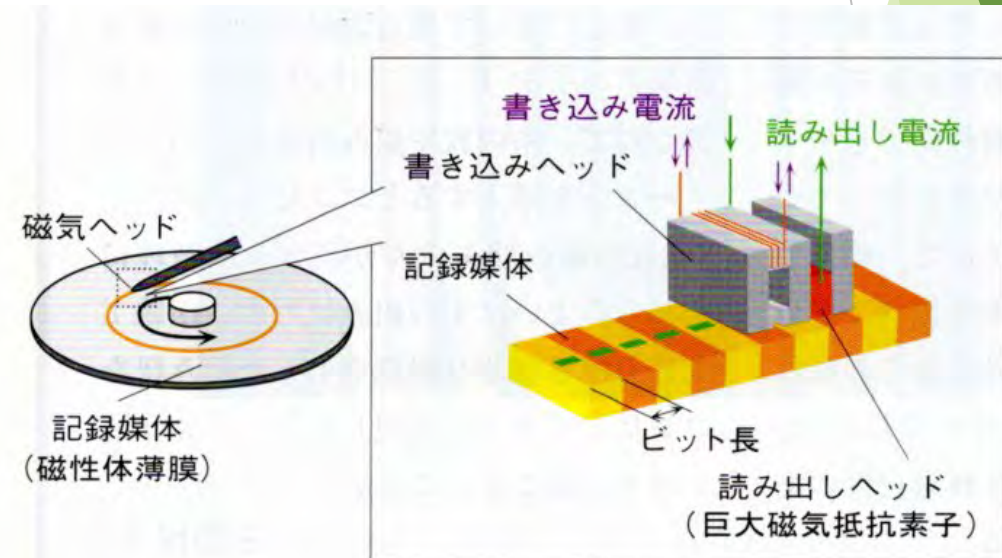
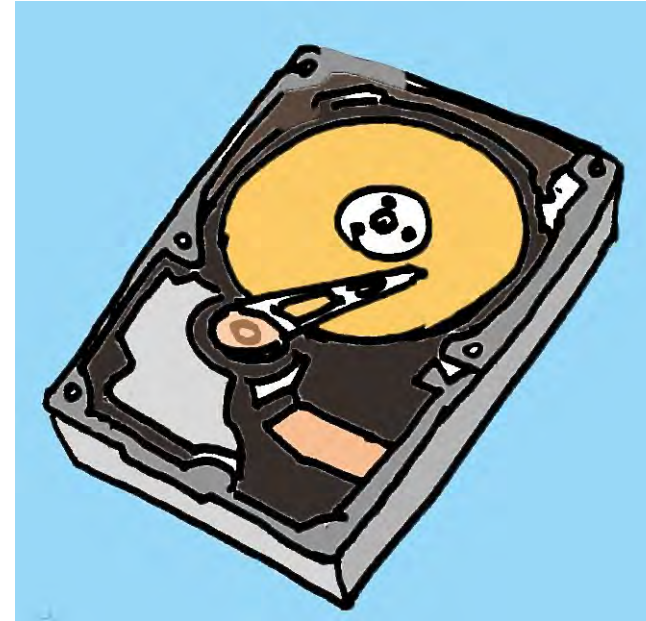
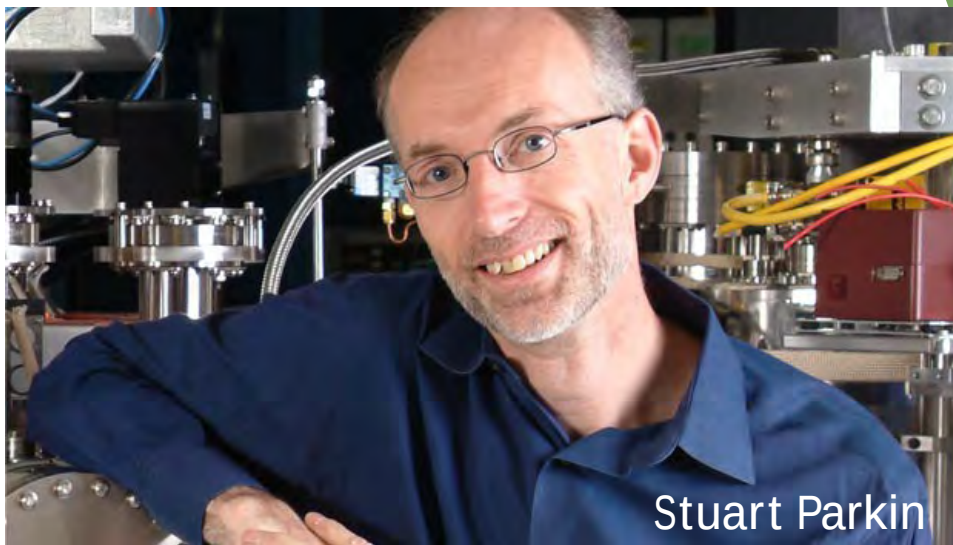


図1 ハードディスク (HDD) と磁気ヘッドの仕組み

応用の道はスピンバルブによって拓かれた

- 反強磁性体は自発磁化をもたないので、反強磁性を積極的に応用するという発想は20世紀後半になるまでほとんどなく、化合物、金属、合金などのさまざまな物質において、その磁気構造や磁気物性が基礎的な興味から研究されるだけの地味な存在でした。
- ところが、IBMが磁気ヘッド用GMR素子「スピンバルブ」を開発したことによって、反強磁性体がにわかに応用技術者の注目を集めることとなりました。

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



Stuart Parkin

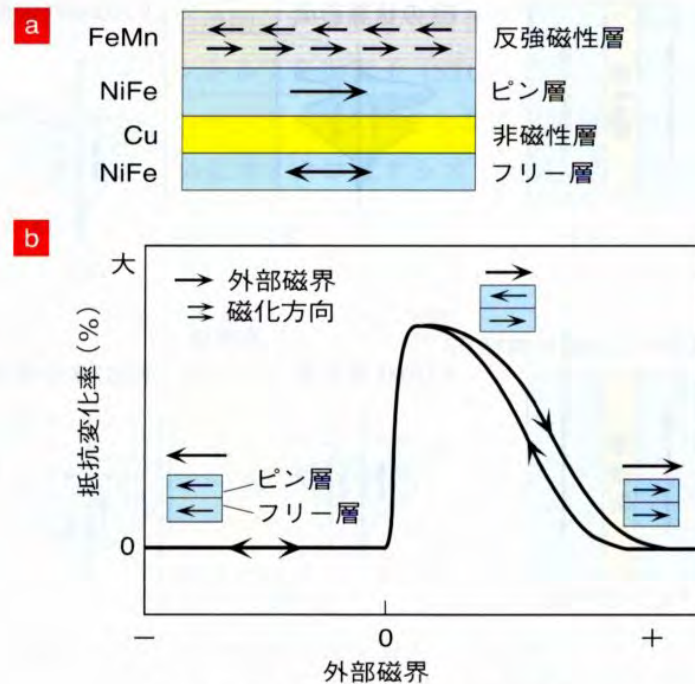


図5 スピンバルブの原理と動作

- ▶ 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)

GMRヘッドで記録密度が飛躍的向上

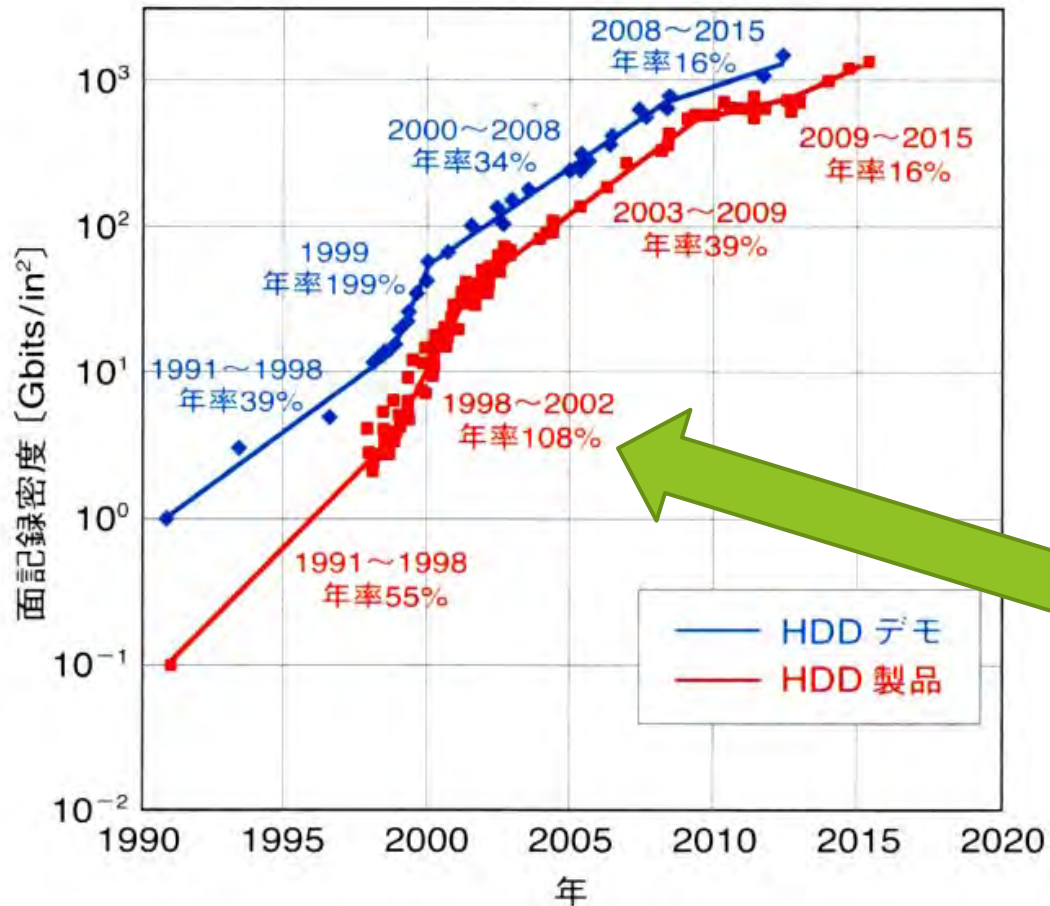


図2 ハードディスクの面記録密度の推移 (H. Li (米国カーネギーメロン大学) の学位論文を参考に作成)

- ▶ 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。

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。

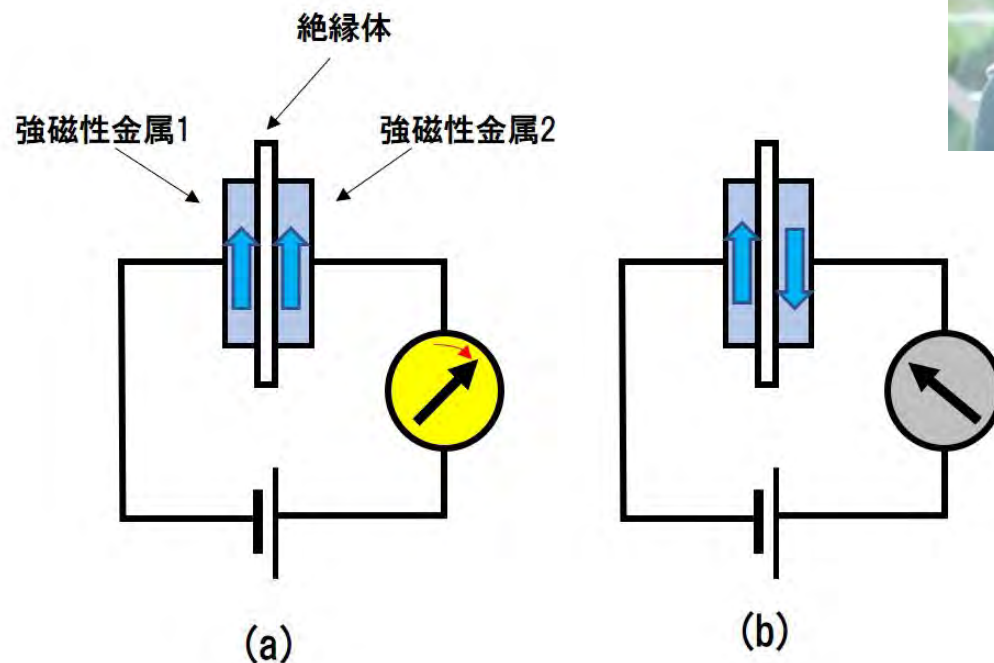
▶ 宮崎らは成膜技術を改良して、平坦でピンホールの少ない良質のAl-O絶縁層の作製に成功し室温での大きなTMRの観測につながったのです。

▶ 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)

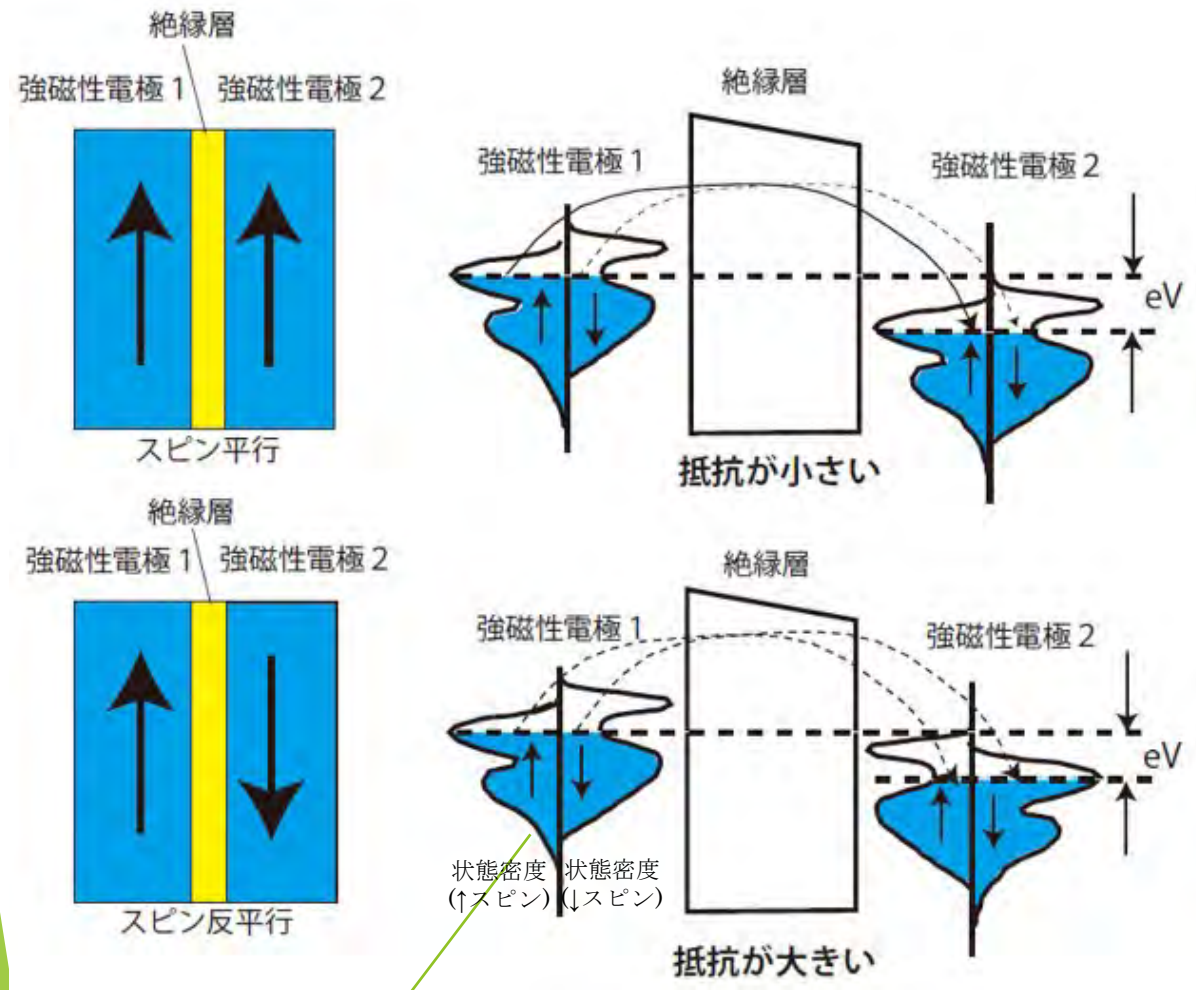


TMR比は、向かい合う2つの磁性層の磁化の向きが磁化の向きが(a)平行のときの抵抗 $R_{\uparrow\uparrow}$ と(b)反平行のときの抵抗 $R_{\uparrow\downarrow}$ との差を平行の抵抗で割った百分比で表されます。

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



宮崎照宣



スピン偏極バンドの状態密度曲線

TMRの原理

- ▶ TMRは磁性体のスピン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。

強磁性金属のスピンの偏極バンド構造

↑スピンバンドと↓スピンバンドの占有状態密度の差によって磁気モーメントが決まる

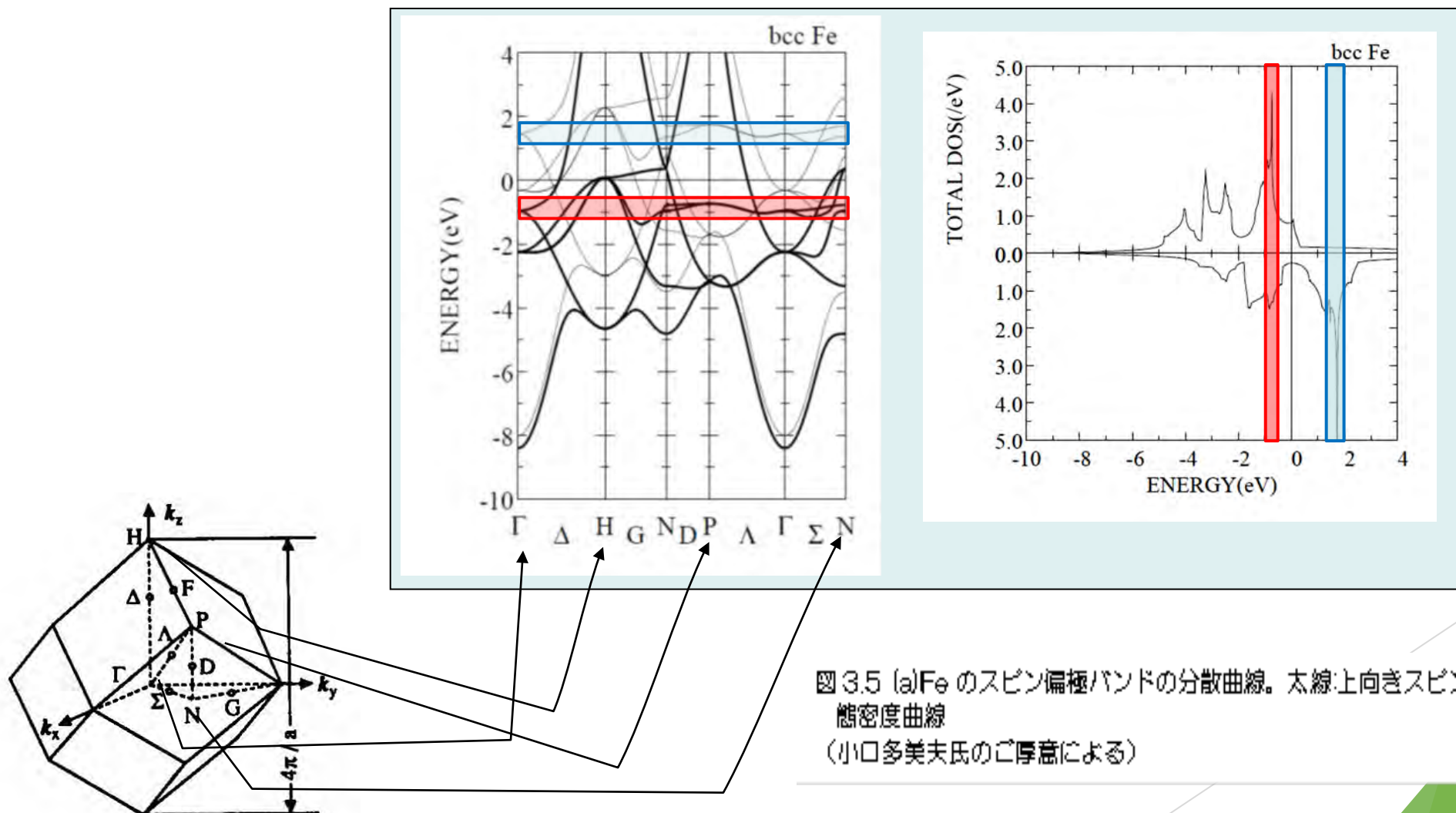
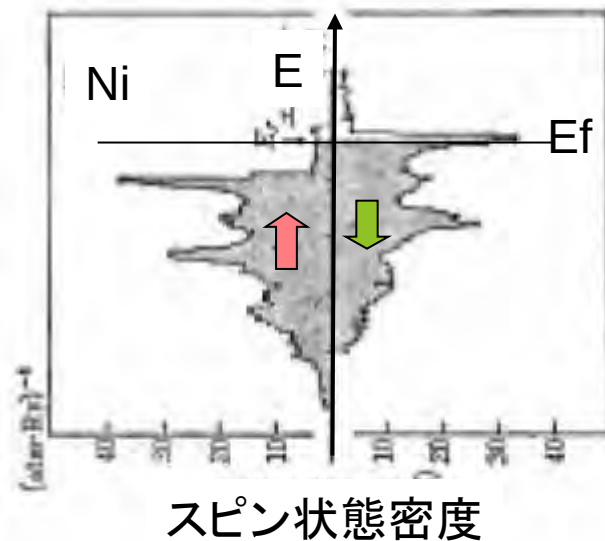
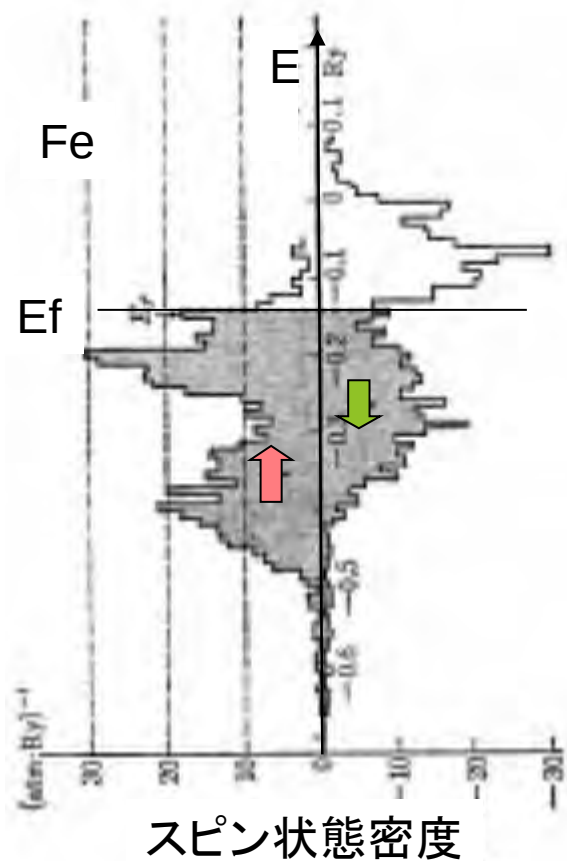


図 3.5 (a) Fe のスピン偏極バンドの分散曲線。太線: 上向きスピン、細線: 下向きスピン。 (b) スピン偏極状態密度曲線 (小口多美夫氏のご厚意による)

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個の空孔があると、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。

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 Al_2O_3 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。
- ▶ $\text{Fe}/\text{MgO}/\text{Fe}$ 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、 $\text{Fe}(001)/\text{MgO}(001)/\text{Fe}(001)$ 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、 $\text{CoFeB}/\text{MgO}/\text{CoFeB}$ 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).

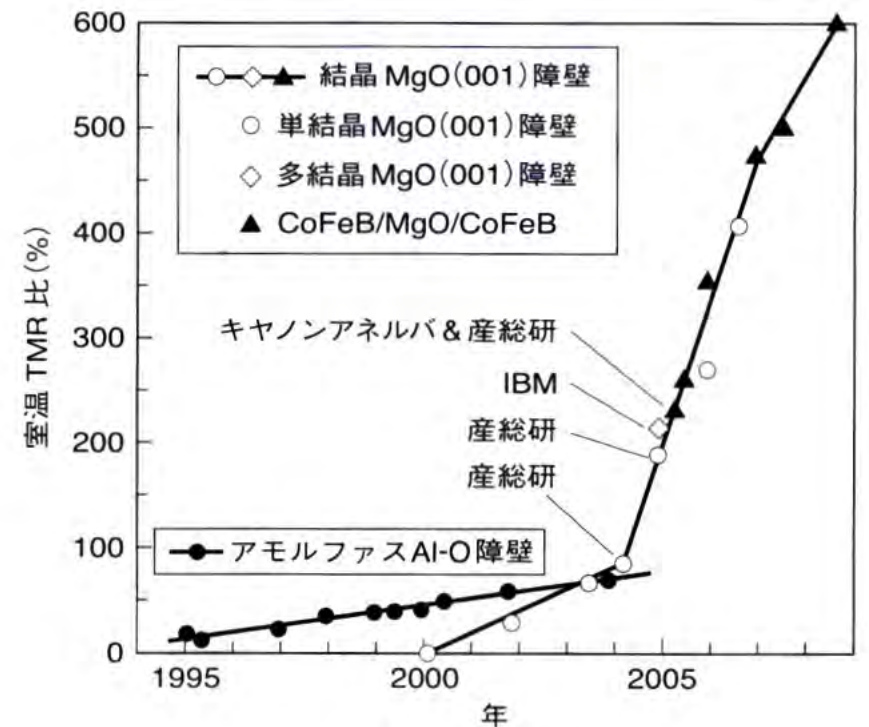
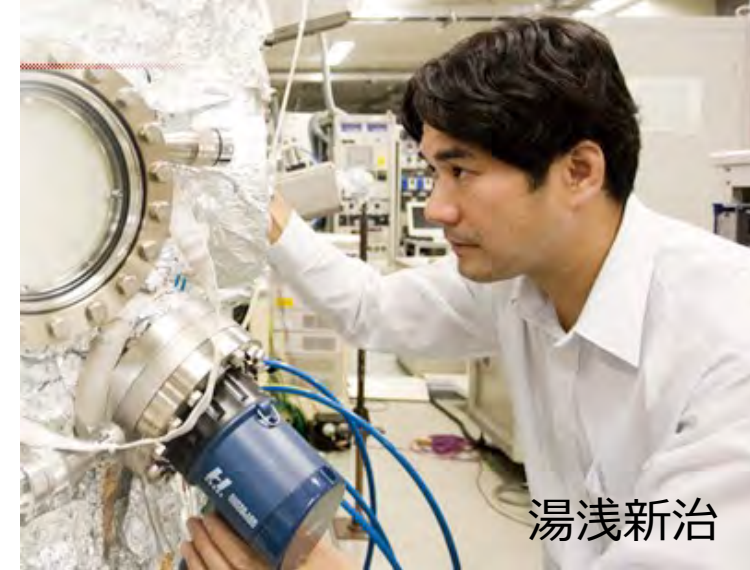
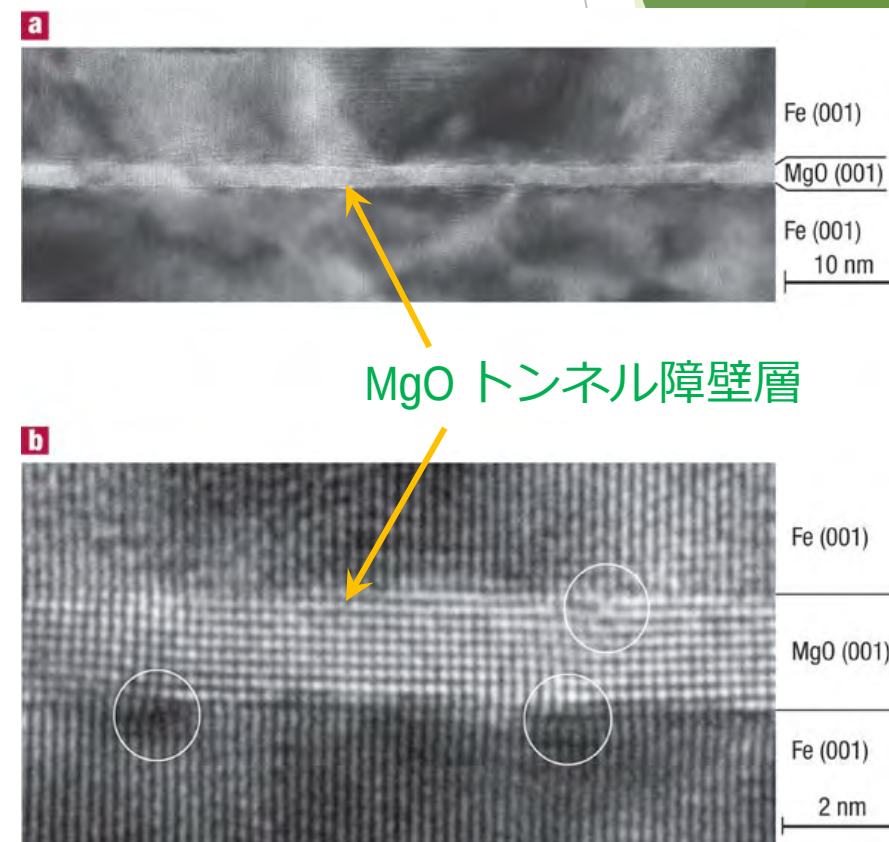


図7 トンネル磁気抵抗比の経緯

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。

散漫散乱トンネルとコヒーレント・トンネル

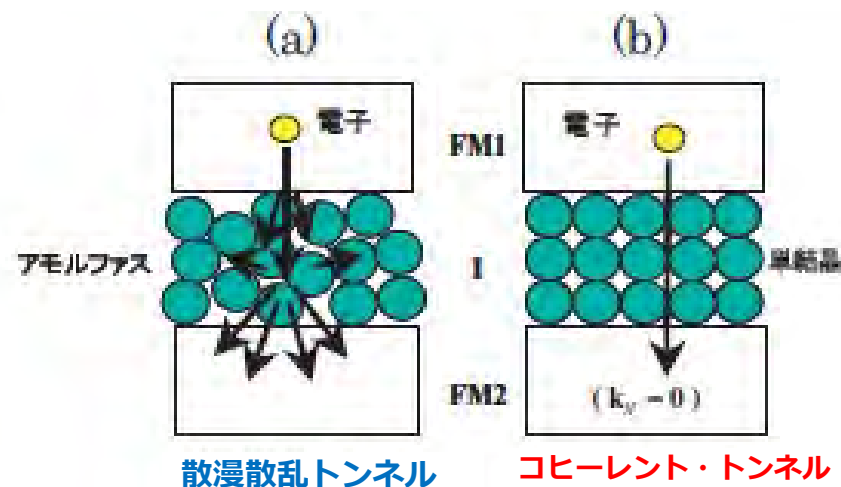
▶ 通常、トンネルする際スピンは保存され、散漫トンネルの場合TMRは一般に強磁性電極のスピン分極率 $P_i (i=1,2)$ を用いて次のようなJullierの式^[i]で表されます。

$$\text{▶ } TMR = 2P_1 P_2 / (1 - P_1 P_2)$$

▶ 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。

- 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

▶ 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。



CoFeB/MgO/CoFeBスパッタにより産業化

- ▶ MgO-MTJ素子の産業応用は、下部強磁性電極にアモルファスCoFeB合金を用いると、その上に高品質の配向性多結晶MgO (001) トンネル障壁層を室温で成長できることを発見したことで大きく進展しました。
- ▶ この成長様式を用いたCoFeB/MgO/CoFeB構造のMTJ素子は任意の下地層の上に室温成膜で作製でき、巨大TMR効果を示し、大面積ウエハ上の均一性や歩留まり、量産プロセス適合性、生産効率などもよいことが明らかになりました。
- ▶ なお、CoFeB/MgO/CoFeB構造のMTJ素子で巨大TMR効果が出現する機構として、アモルファスCoFeB層がポスト・アニールの過程でMgO(001)層と格子整合の良いbcc(001)構造に結晶化する“固相エピタキシー”の結晶化機構が関係していることが明らかにされました
- ▶ 現在、このCoFeB/MgO/CoFeB構造のMTJ素子は、スピントロニクス基礎と応用の両面で主流技術となっています。

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的一种です。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。

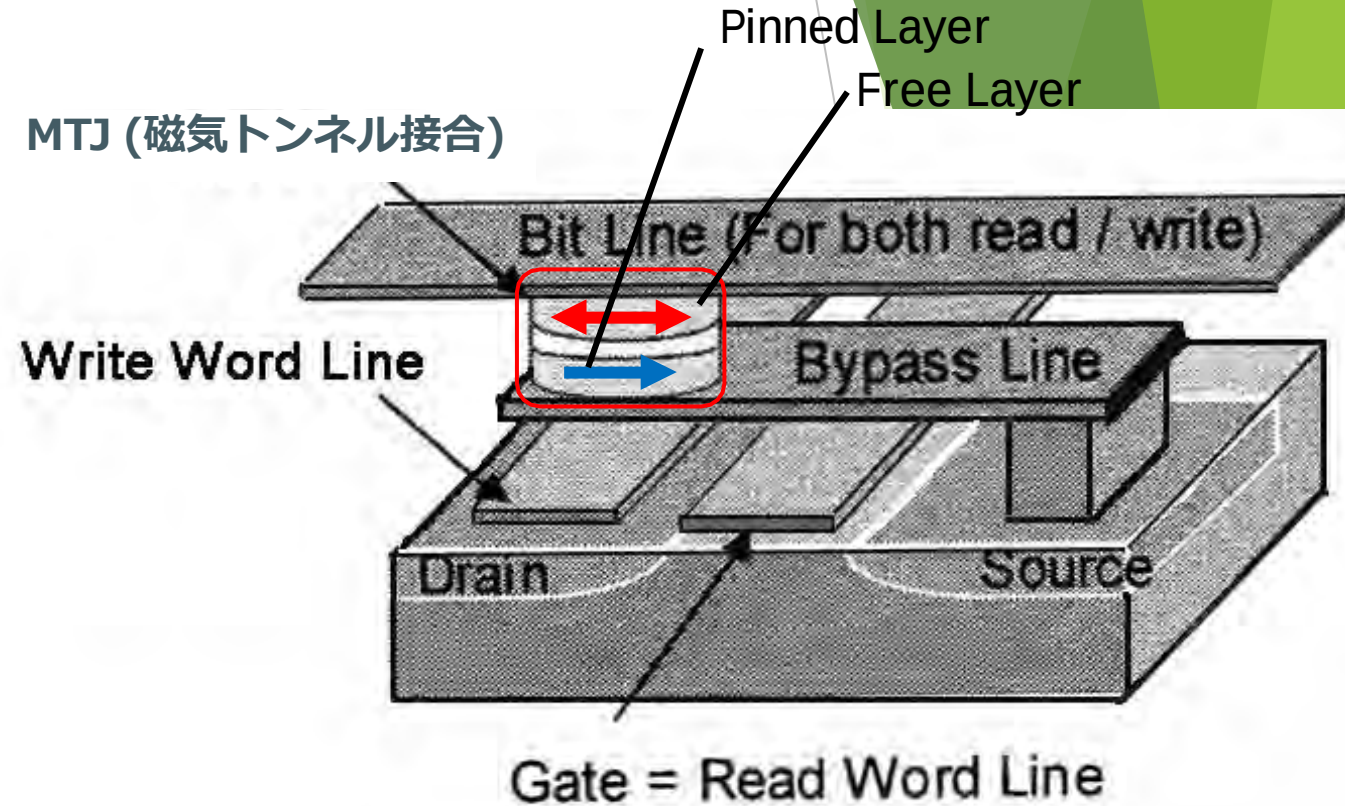
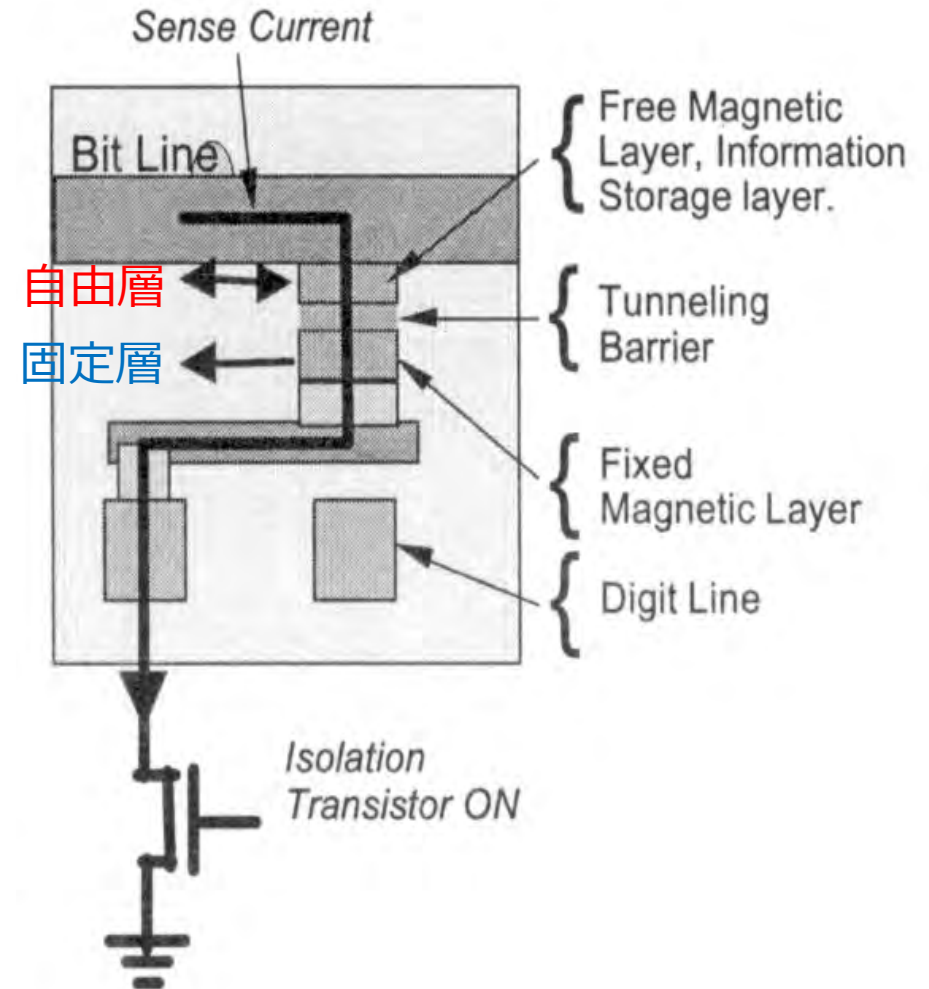


図8 MRAMの構成を表す図

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。

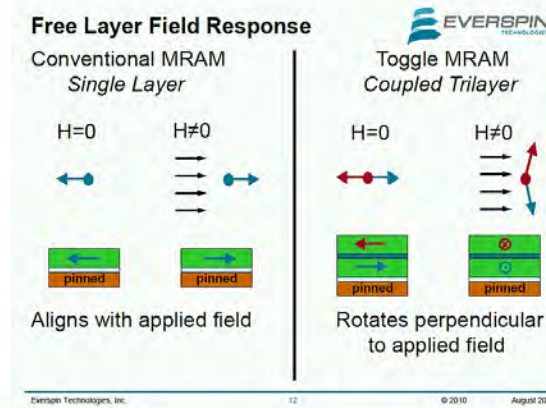
MRAM(磁気ランダムアクセスメモリ)

- ▶ 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。

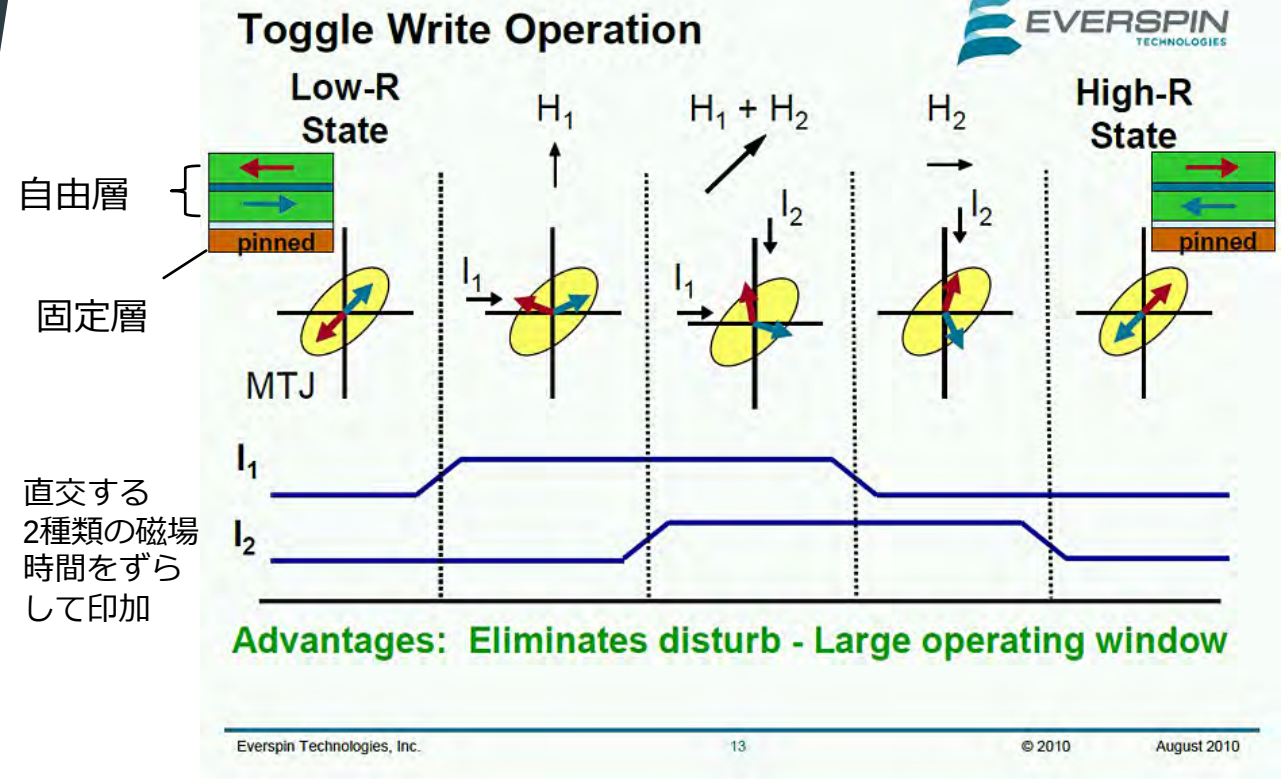


トグルMRAMの登場

- ▶ MRAMセルの記憶素子として研究開発コミュニティで当初考えられていた構造は、磁化層(固定層)、トンネル障壁層、磁化層(自由層)の3層構造である。この3層構造を貫通するように電圧を加え、電流の大きさをデータとして読み出す。自由層の磁化の方向が、データの論理値に対応する。固定層の磁化の向きと自由層の磁化の向きが同じであるときは貫通電流は多く流れ、磁化の向きが逆であるときは貫通電流は少なく流れる。
- ▶ これに対してEverspin社の開発したトグル技術では、自由層を2層構造にした。自由層の各層で磁化の向きは180度、逆である。そして自由層の2層とも磁化の向きを反転させることで、データを書き込んだ。このとき重要なのは、直交する2種類の磁界によって自由層の磁化の向きを回転させることにある。2種類の磁界が加わるのは選択セルだけで、ワード線あるいはビット線を共有するセルには、1種類の磁界しか加わらず、磁化反転が起こらない。したがって余裕(マージン)を持ってデータを書き込める。この余裕が、高い信頼性を支えている。



自由層は2層構造、各層で磁化の向きは180度逆である。



強磁性電極F1の
磁化

伝導電子のスピ

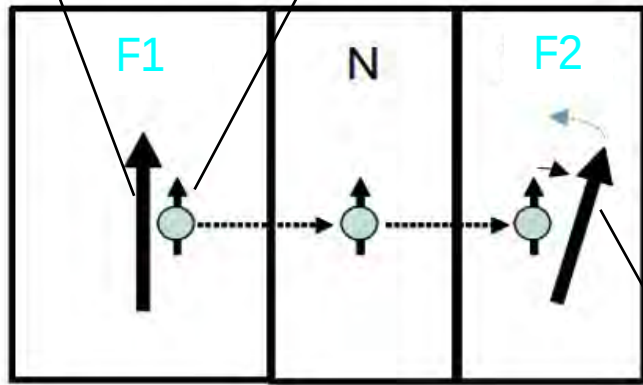


図9スピン移行トルクの説明図

強磁性電極F2の
磁化

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 10^8 A/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 10^6 A/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⁾。

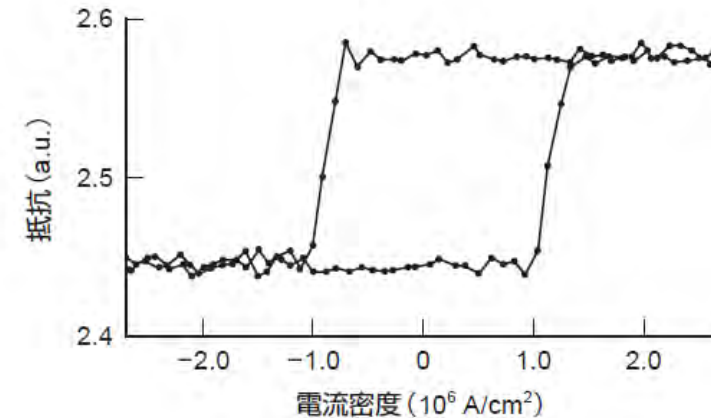
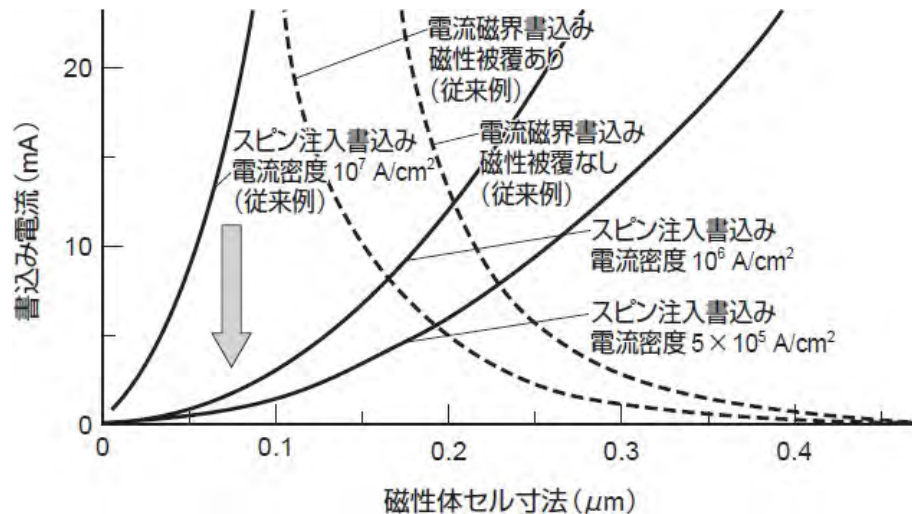
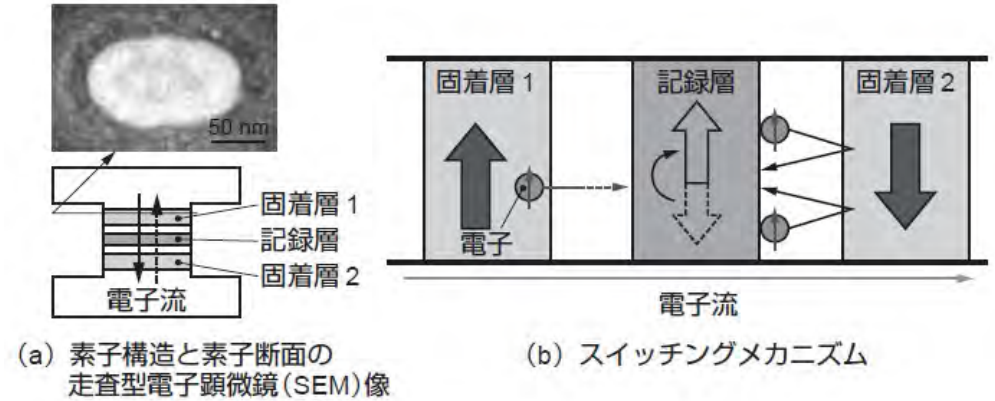
11) J. Slonczewski: J. Magn. Magn. Mater. 159, L1 (1996)

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

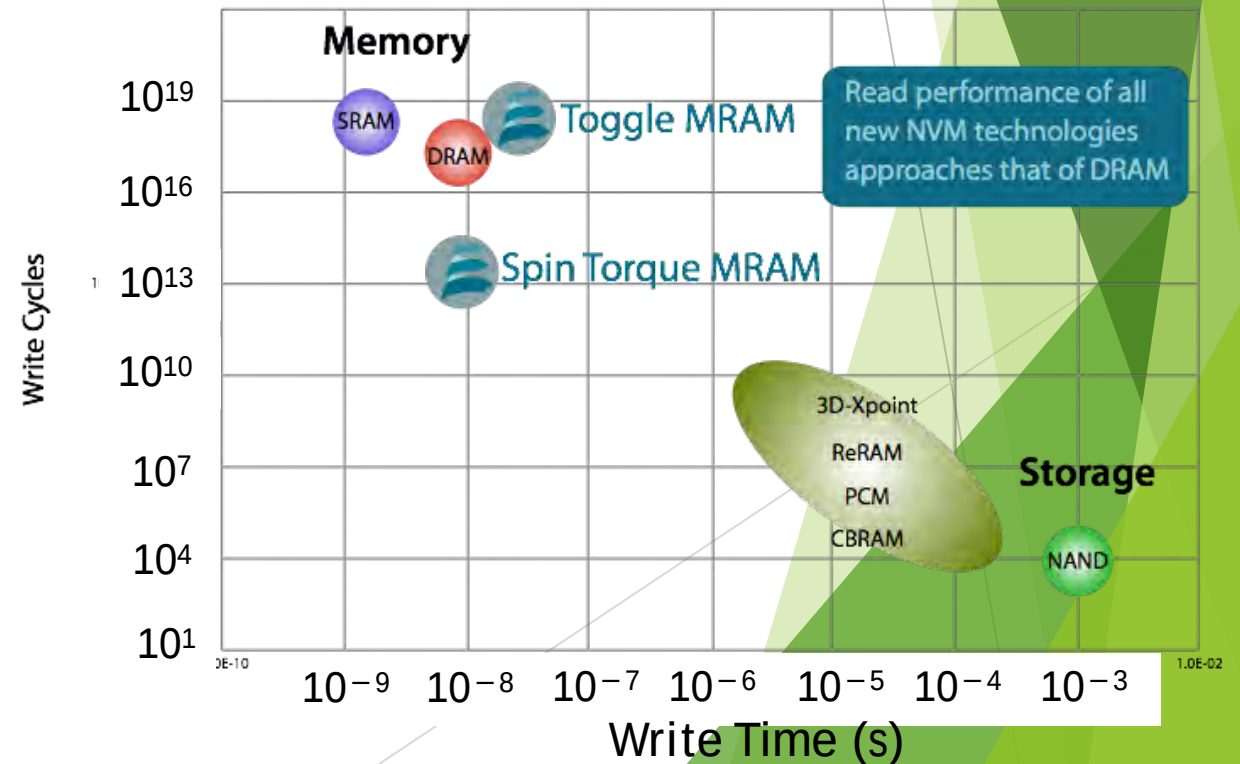
- ▶ スピン注入磁化反転は、反転電流は素子面積に比例し、素子面積が小さいほど低電力化が可能になる。
- ▶ 素子寸法が $0.2\mu\text{m}$ 以下になると、電流磁界書き込みよりも書き込み電流が小さくなる。



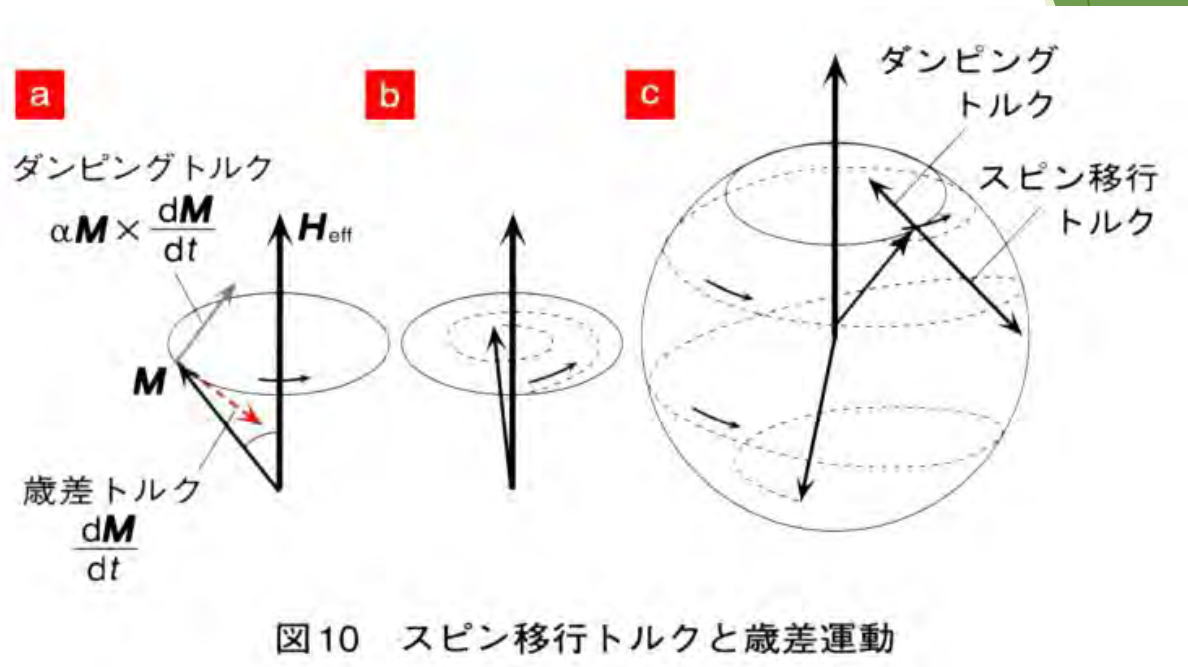
中村他：東芝レビューVol.61 No.2 (2006)

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⁾。



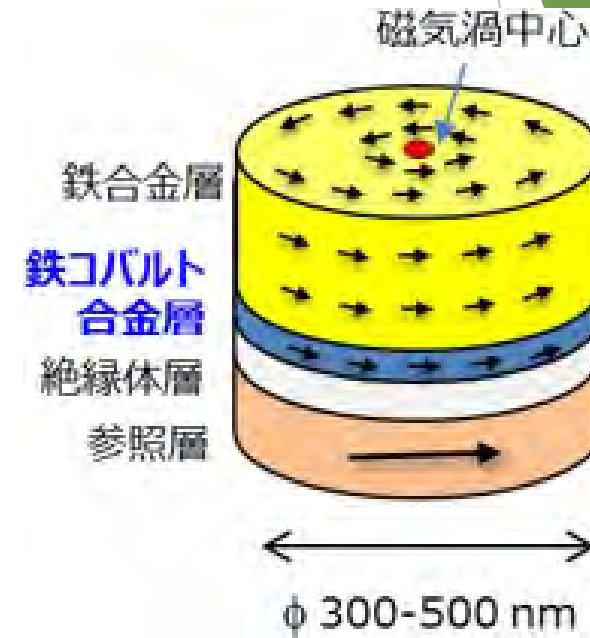
スピントルクで磁気モーメントを反転できるわけ



- ▶ 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 $\mathbf{M}$ は、外部磁場 $\mathbf{H}_{\text{eff}}$ を加えるとその外積 $\mathbf{M} \times \mathbf{H}$ で表されるトルクを受けて歳差運動を始めます。
- ▶ そして、 $\mathbf{M} \times d\mathbf{M}/dt$ 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移行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

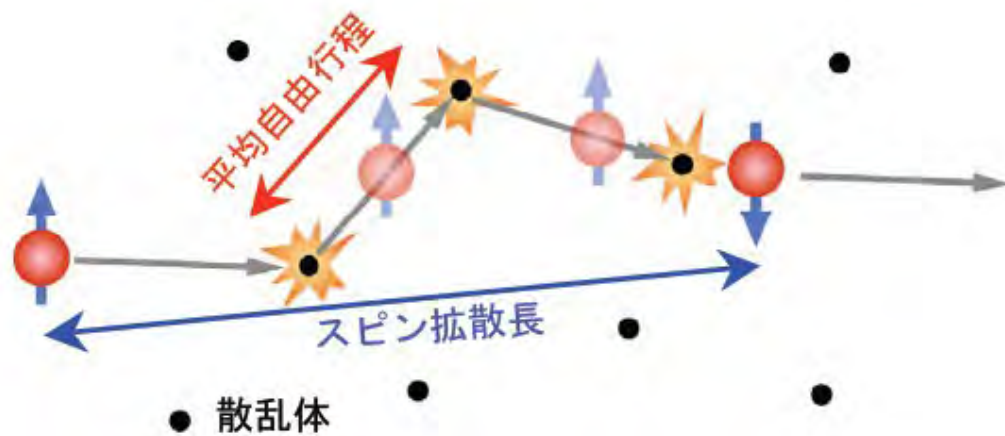
https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2016/pr20161216/pr20161216.html



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。

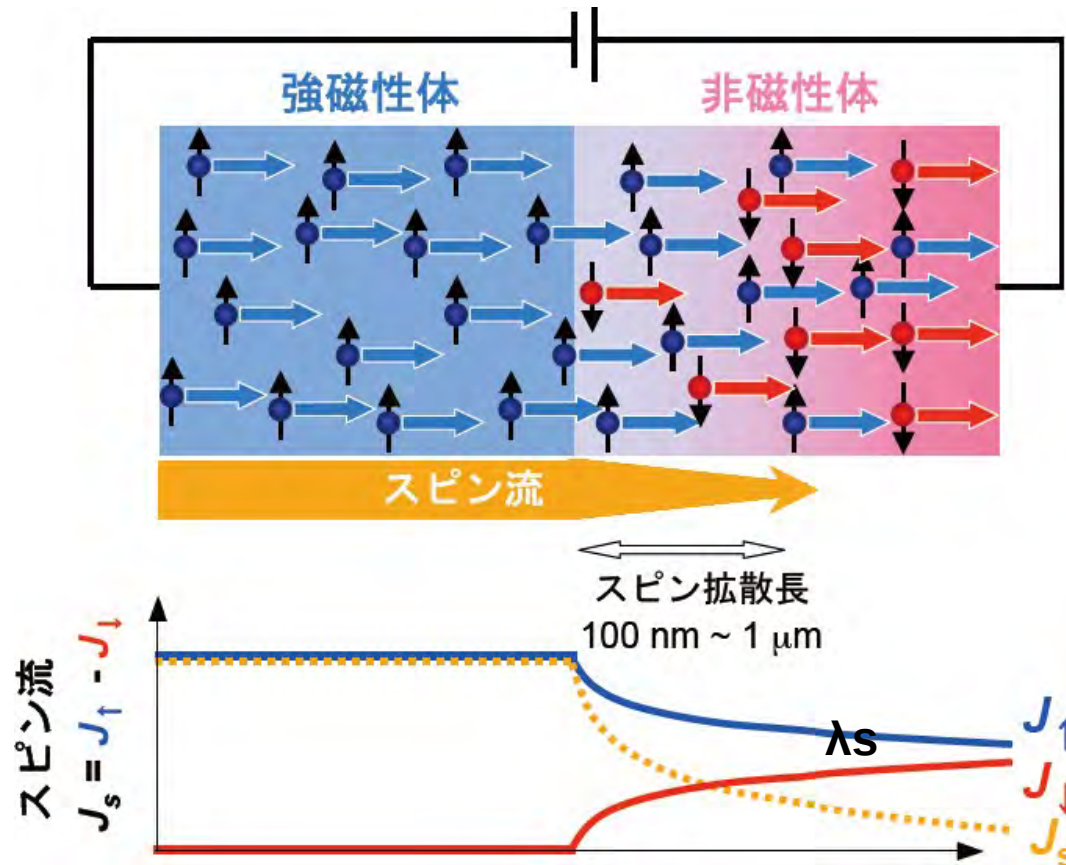


ナノスケールでの
磁気変調構造

スピン依存伝導
(GMR)

ナノ磁性と密接不可分

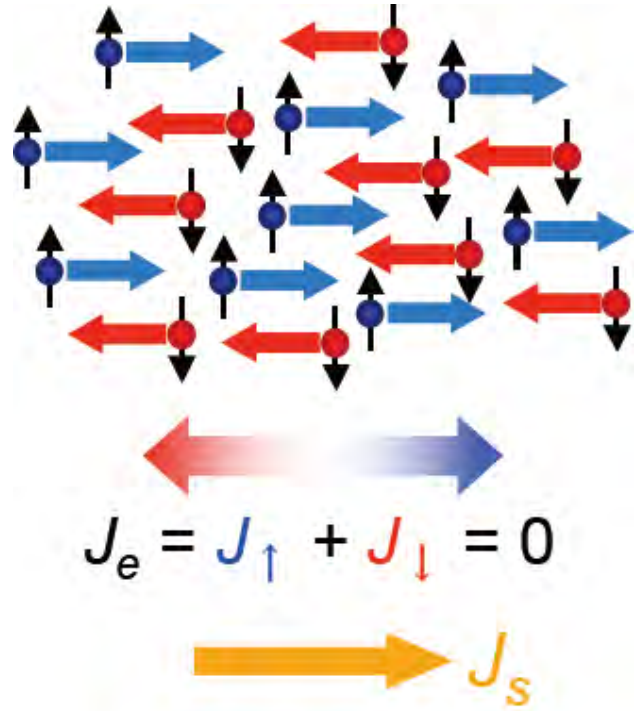
(1) 電流を伴うスピン流



- ▶ **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流：純スピン流



非局所スピン注入
スピンホール効果

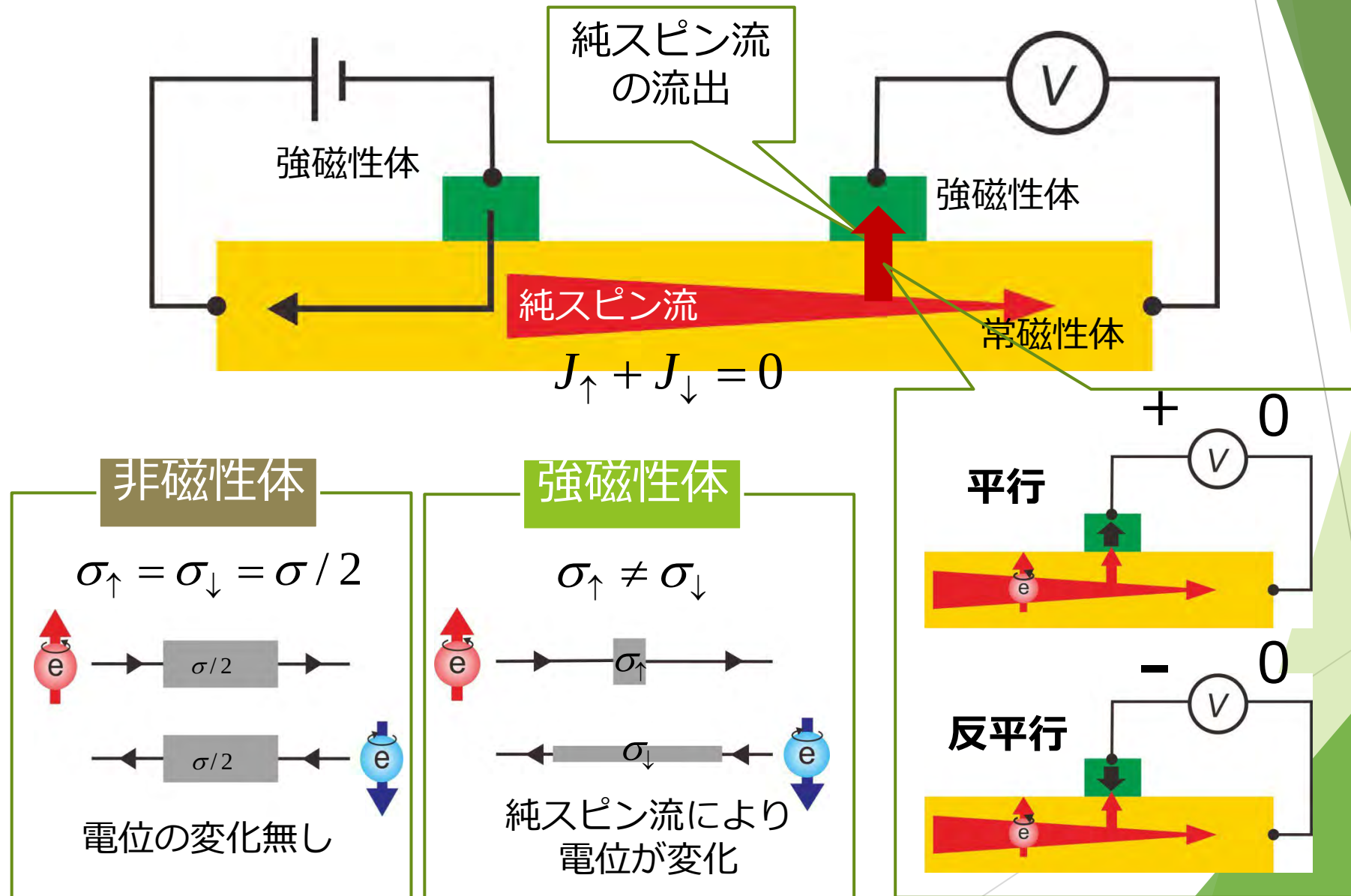
電流を伴わないスピン流

- ▶ $\uparrow$ スピンの電子が右方向に進み
 $\downarrow$ 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。
- ▶ 純粹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 of 新しい流れなのです。
- ▶ 前のスライドで述べたように純粋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氣的検出



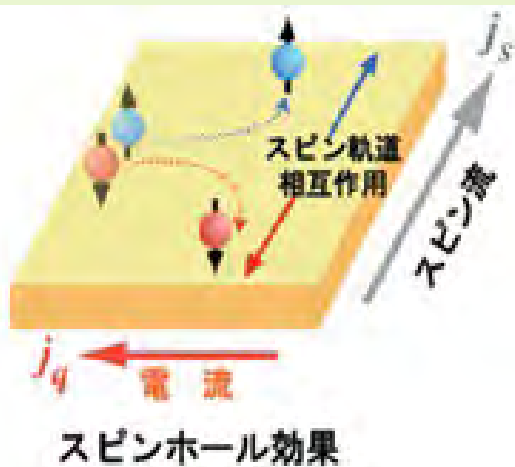


スピンホール効果と 逆スピンホール効果

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⁾。

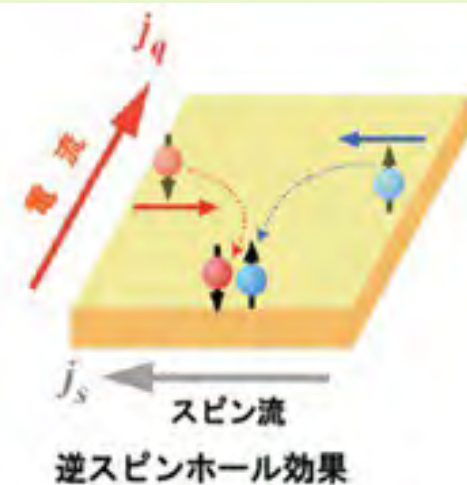
17) M.I. Dyakonov et al.: JETP Lett..13 467 (1971)



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

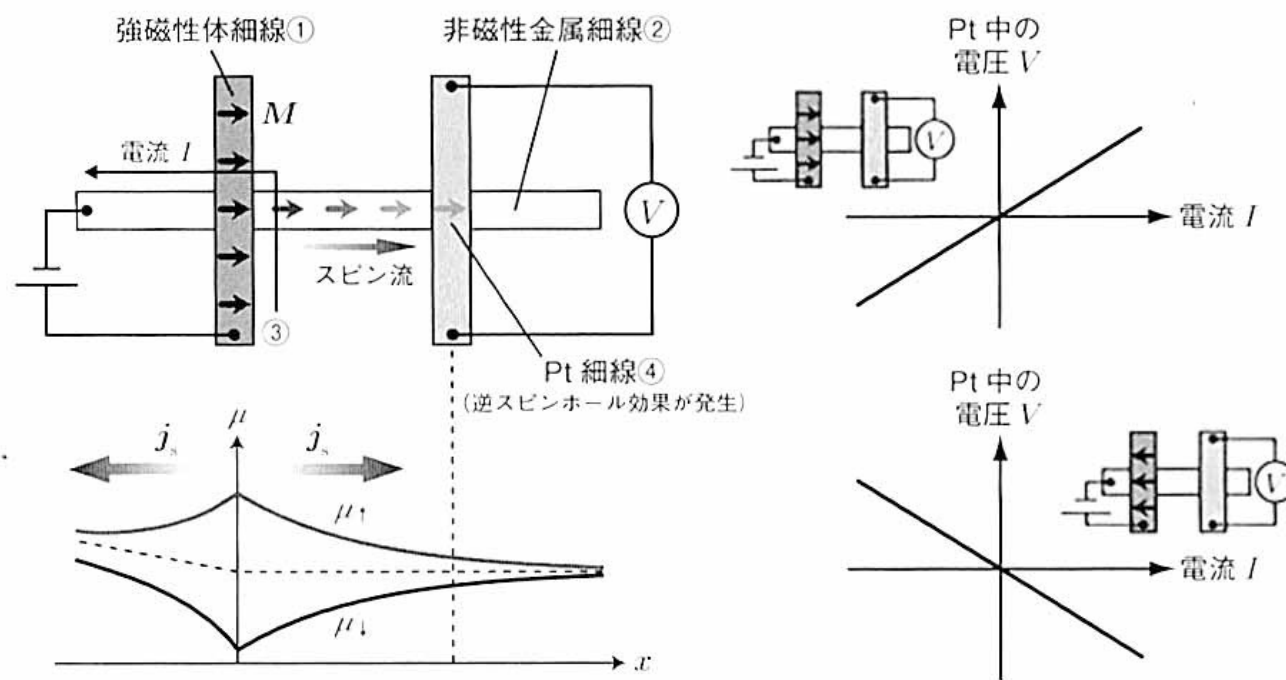


図 4.4 非局所配置を用いた逆スピンホール効果実験の模式図。右図はそれぞれ強磁性金属 ① の磁化が右向きおよび左向きの条件で、電流 I を ③ に沿って流したときに右側の白金 (Pt) 細線 ④ の両端に生じる電圧信号 V である。電流は ③ に沿って流れるが、スピン拡散長は十分に長いため、スピン蓄積が非磁性金属 ② 中を拡散し Pt 細線 ④ まで到達し、スピン流を注入する。このスピン流による逆スピンホール効果電圧が検出された。

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



スピンゼーベック効果
とスピネルチエ効果
+ 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の流れが生じます。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).

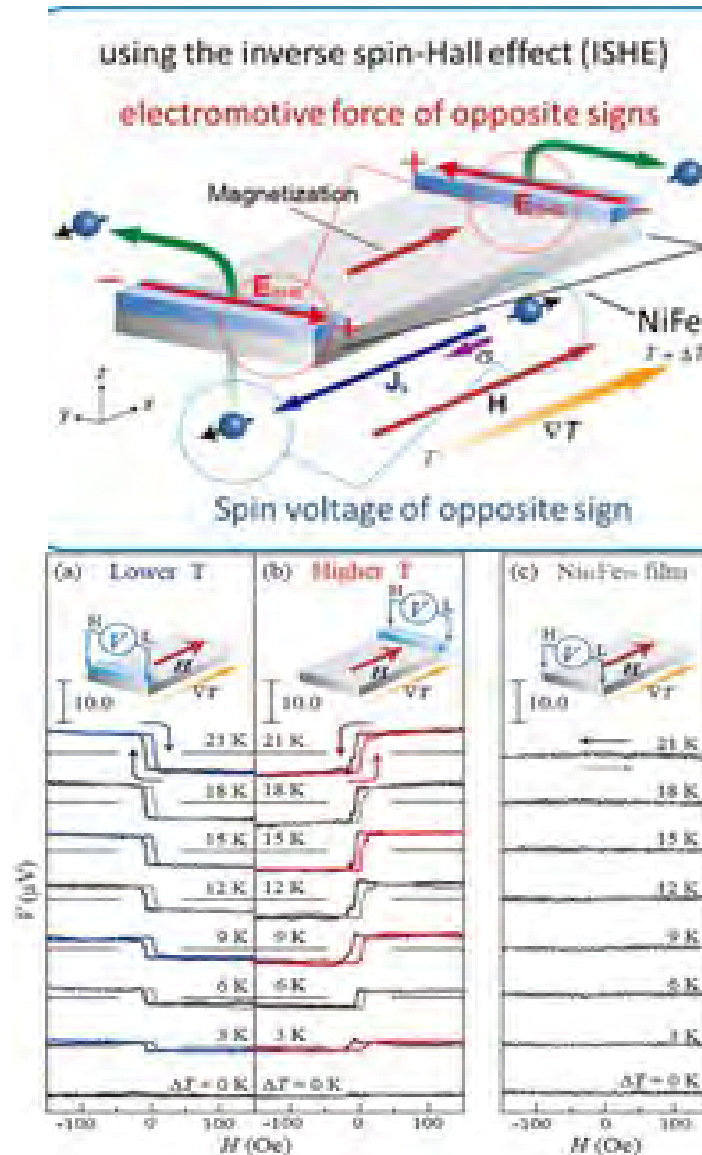
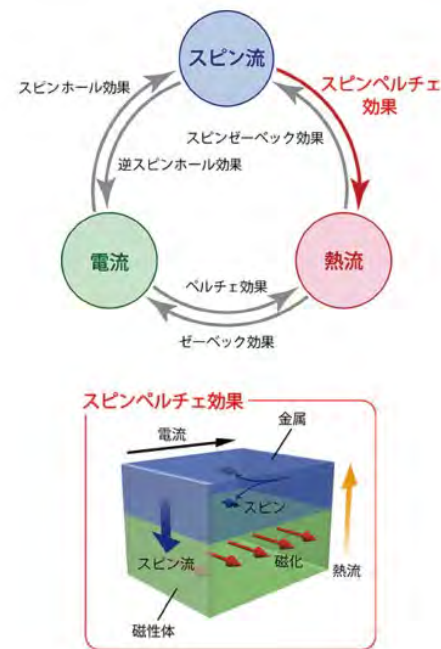


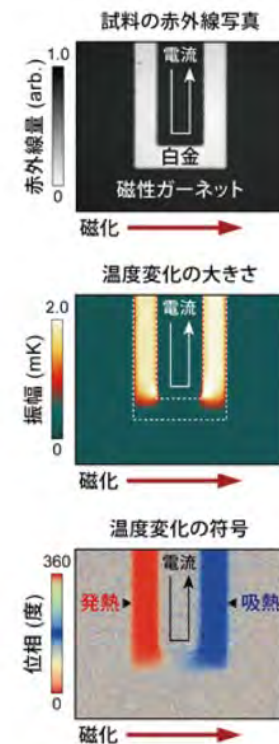
図15 Pt電極をつけたパーマロイにおける
スピンゼーベック効果

スピネルルチェ効果

- ▶ スピネルルチェ効果による物質中の温度変化を可視化することによって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、今回スピネルルチェ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ネル流です。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1）スピネルルチェ効果とは、スピネル流^{注1}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、スピネルルチェ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ネル流が生成されるスピネルホール効果が発現し、接合界面にスピネル流が生じます。これによりスピネルルチェ効果が生じて界面に流れるスピネル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2）。スピネルルチェ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わかります。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。



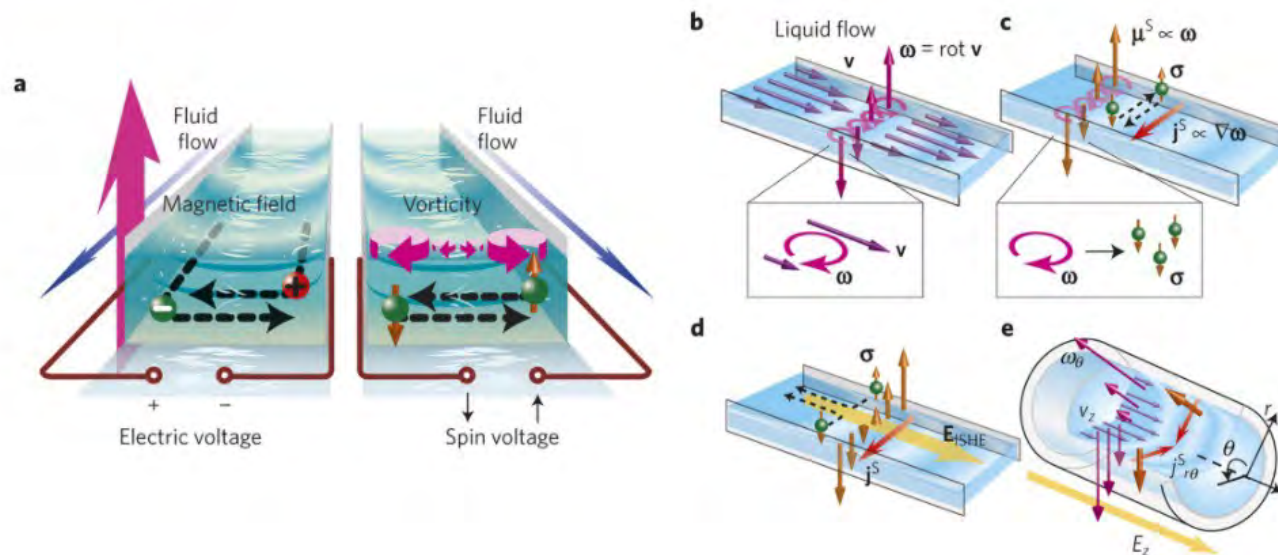
スピン量子整流

- ▶ 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



An impressionist painting of a cityscape, likely Vienna, featuring a large cathedral with a green dome and spires, situated on a hill overlooking a river. The style is characterized by visible brushstrokes and a vibrant color palette.

2. スピントロニクス注目分野

スピン軌道トルクMRAM

電圧駆動MRAM

電圧駆動スピントロニクスメモリ

高感度磁場センサ

スピンMOSFET

シリコンスピントロニクス

ニューロモルフィックスピントロニクス

トポロジカルスピントロニクス

垂直熱電相互変換

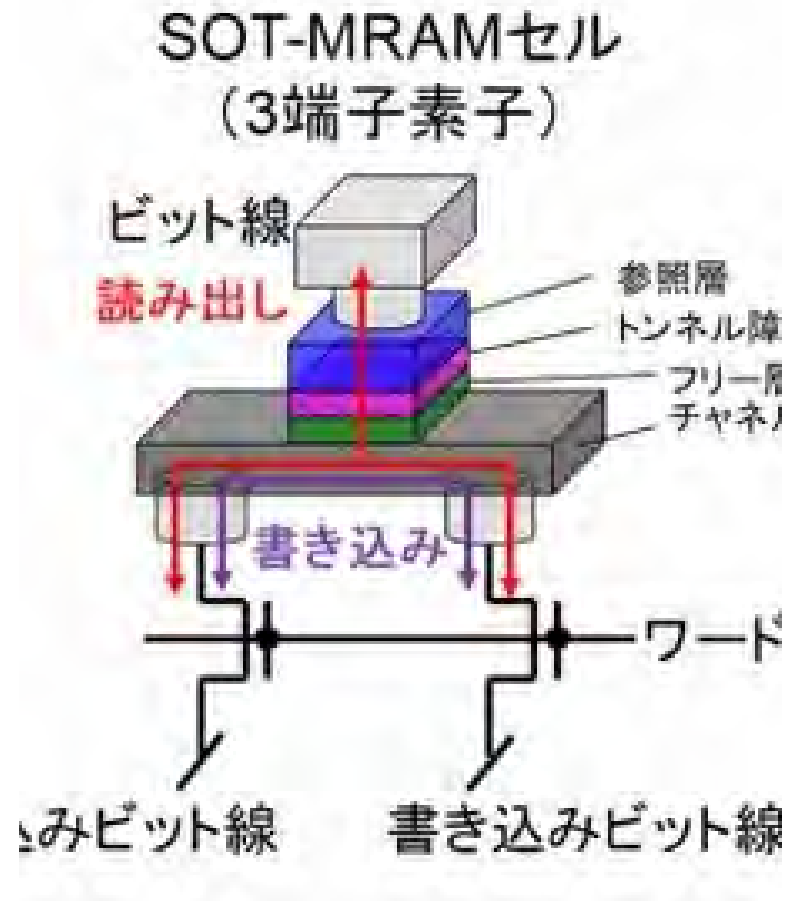
超伝導トポロジカル量子整流

フレキシブルスピントロニクス

(ナノテクノロジー・材料分野 (CRDS-FY2020-FR-03))

スピン軌道トルクMRAM

SOT-MRAM



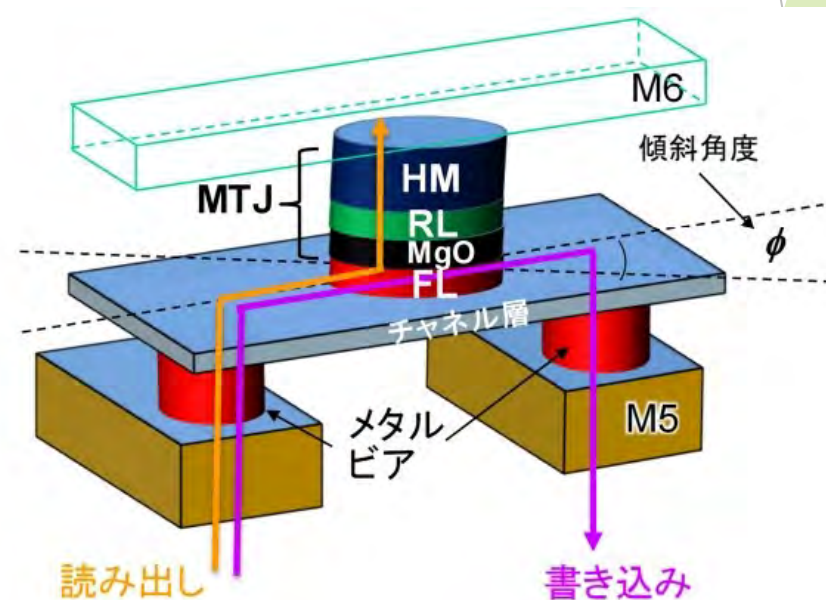
- ▶ スピンホール効果あるいはスピン軌道相互作用によるラッシュバトルクを用いることで、現在実用化が進むSTT-MRAMに比べて高効率のMRAMが作れることが期待されている。
- ▶ 原理的に3端子であるため書き込みラインと読み出しラインを分離できるという回路上の利点もある一方で、素子サイズが大きくなるという問題も抱えている。
- ▶ 近年、その高速性、高信頼性を生かしたSRAM置き換えの研究開発が進んでいる。
- ▶ MRAMによりキャッシュを不揮発にすることで携帯端末などの省エネルギー化も期待されている。

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)

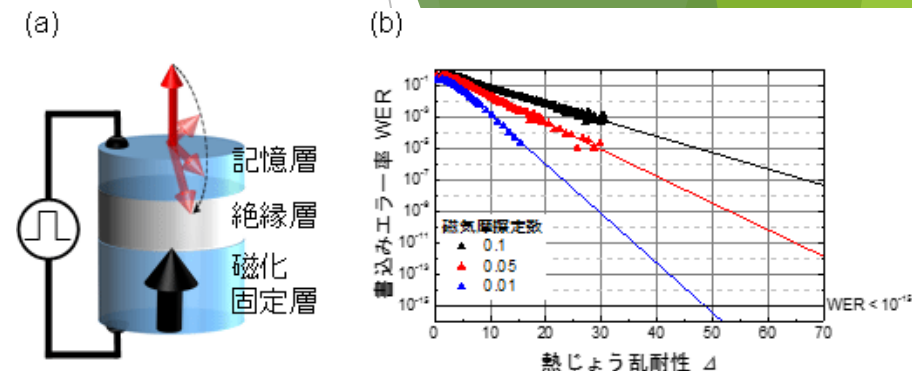
- ▶ 東北大学国際集積エレクトロニクス研究開発センター（CIES）の遠藤哲郎センター長と同電気通信研究所の大野英男教授（現総長）らの研究グループは2019年12月、400℃の熱処理耐性と無磁場で350ピコ秒の高速動作、10年間データ保持を可能とする熱安定性を実現した。
- ▶ この素子はSOTを用いたMRAMである。MTJの下部に設けたチャンネル層に電流を流し、チャンネル層に隣接する強磁性体のみ磁石方向を反転させる方式。書き込み速度が速く、SRAMを代替する技術として注目されている。

- ▶ 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。

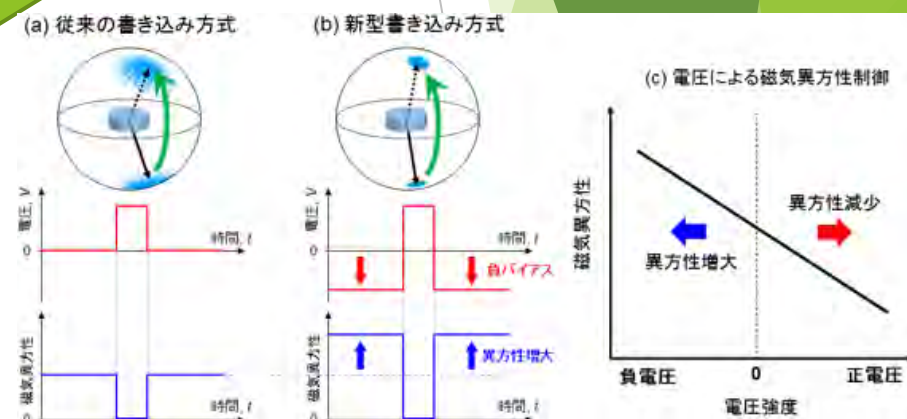


電圧駆動MRAM 電圧トルク書き込み

- ▶ 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



産総研プレスリリース2016.12

Rashba効果

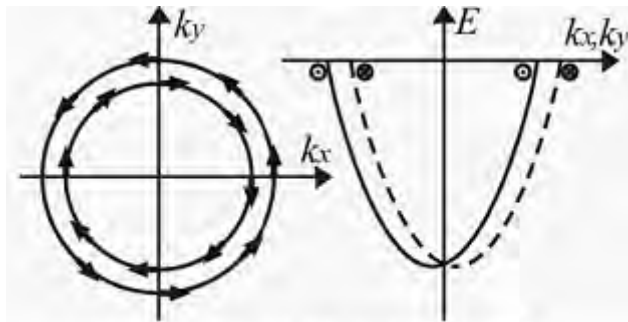
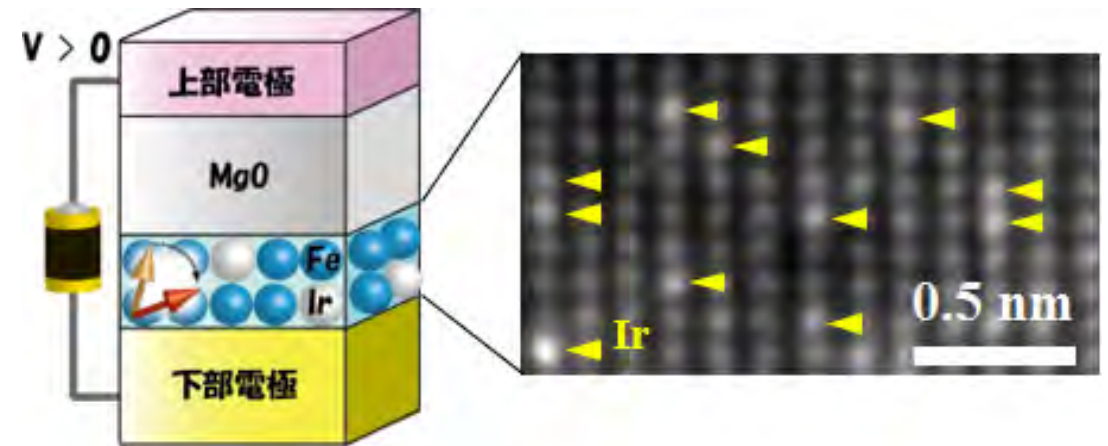


図1 2次元自由電子におけるラッシュバ効果

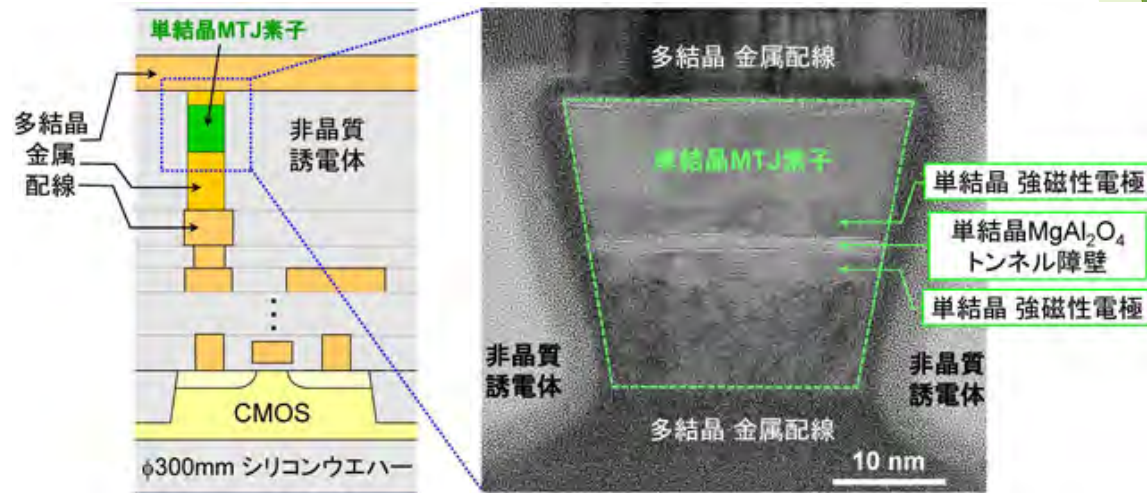
- ▶ 1960年にE. Rashbaによって提唱された効果。界面や表面などの系は、面の法線に垂直な方向に2次元系を形成している。この2次元電子系において、面直方向（面に垂直な方向）に電位差を与えることによって非磁性体であってもスピン偏極電子が生じ、電子スピンについて縮退していた電子状態にスピン分裂が現れる現象で、分裂した電子バンドが観測される（図1）。
- ▶ 電子の波数ベクトルは表面平行方向であり、スピン偏極ベクトルは二次元面内のみを向いている。面直方向の対称性が破れていることによってその方向に電位差が生じ、スピン偏極電子が生じる。
- ▶ この効果においては、表面での「空間反転対称性の破れ」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があるが、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300cmウェーハに集積化



トンネルバリア層にスピネルを採用

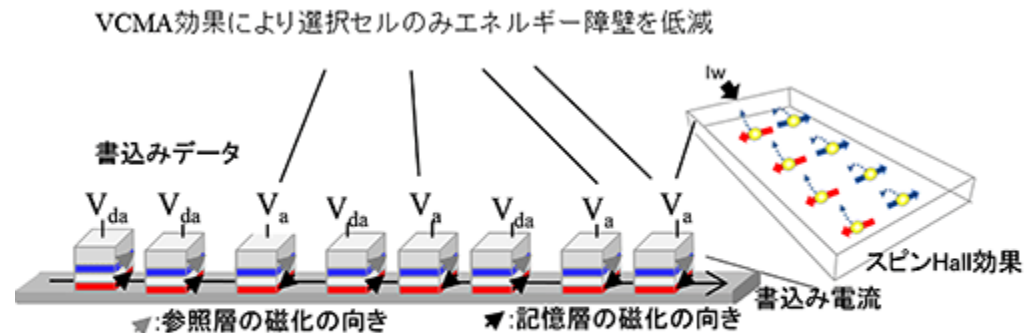
- ▶ 不揮発性メモリーMRAMは、記憶素子である磁気トンネル接合 (MTJ素子) からの記録ビット、ビット選択に用いる半導体トランジスタ (CMOS)、それらを繋ぐ金属配線などで構成される。
- ▶ このメモリーは、酸化マグネシウム(MgO)トンネル障壁を用いた多結晶MTJ素子を多結晶の金属配線上に直接堆積することにより作製される。しかし、この従来からの技術では、多結晶MTJ素子の性能の不揃いや材料特性に起因して、MRAMの微細化が限界に達すると予想されるため、その解決策として新材料を用いた単結晶MTJ素子およびその集積化技術が注目されている。
- ▶ 今回、 MgO に代わる新材料としてスピネル酸化物 MgAl_2O_4 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。

電圧駆動スピントロニクスメモリ(VoCSM)

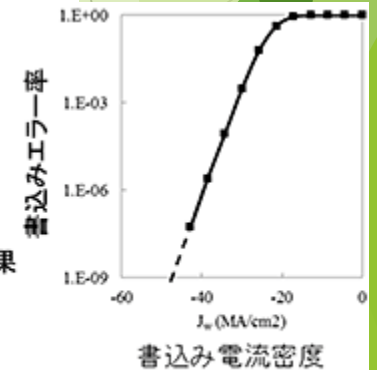
電圧制御磁化反転を使った不揮発性磁気メモリに新たな書込み方式を提案

- ▶ 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**ことが特徴で、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ることができる**。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)



(i)VCMA-スピンホール効果(重畳)一括書込み



(ii)書込みエラー率の測定結果

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

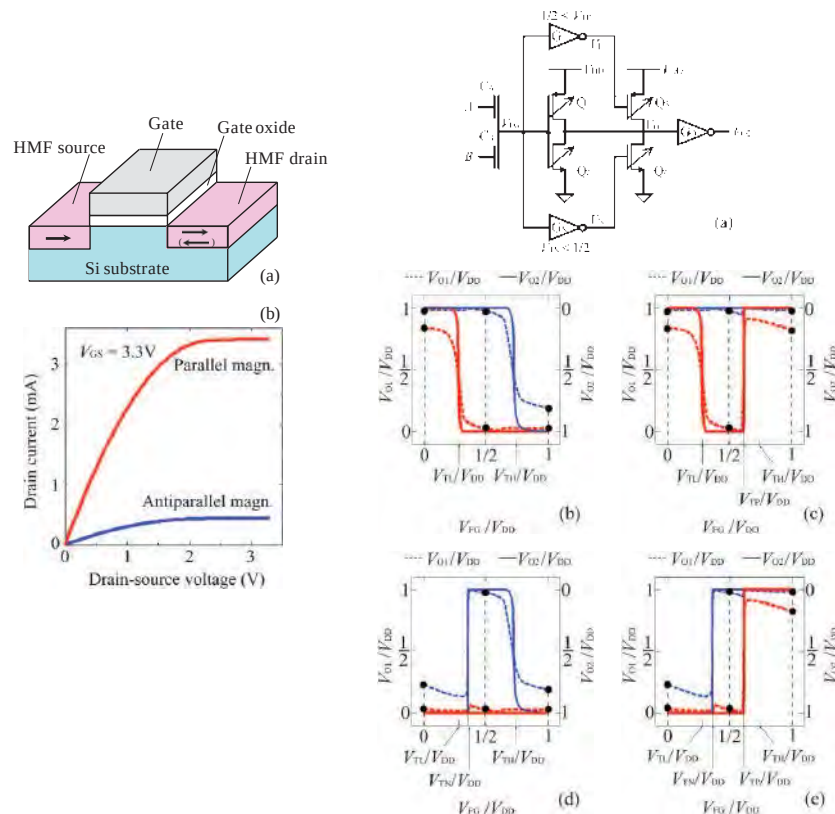
スピンMOSFET

- ▶ 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。

シリコンスピントロニクス

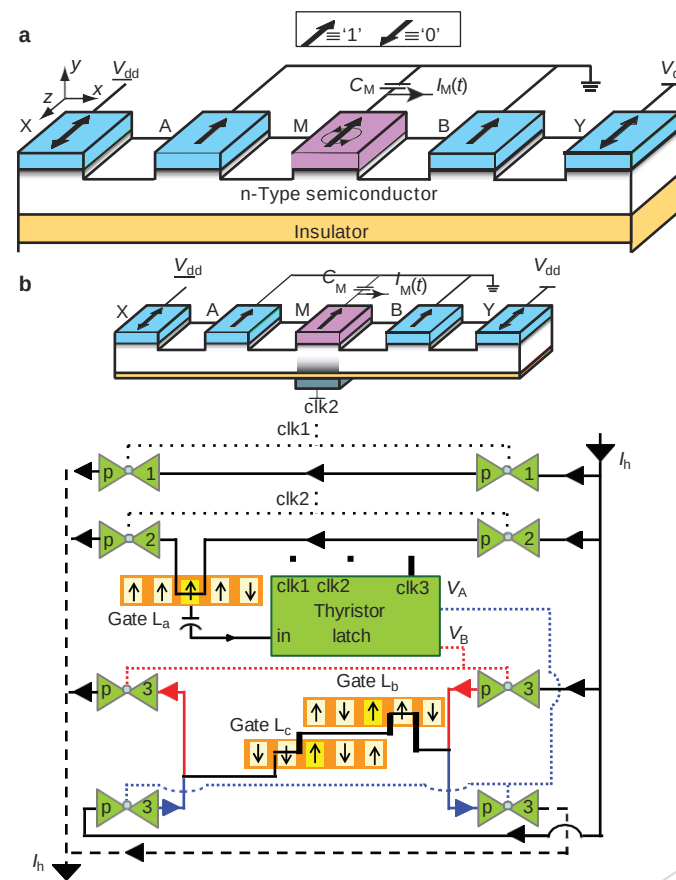
- ▶ 大阪大学-TDKグループは、スピンMOSFETの作製とその動作実証を試み室温でスピン MOSFETを動作させたと報告した。ゲート電圧によるドレイン電流の変調はある程度できているが、スピン注入と検出による磁気抵抗比は0.01~0.04 %程度と非常に小さいものであった。
- ▶ 京都大学白石誠司 同教授らのグループは TDK 株式会社、大阪大学と共同で、産業のコメとも言えるシリコンにおける、従来の物性理解を超越する新奇なスピン物性の発見に成功した。
- ▶ 最近、東京大学グループは、GaMnAs/GaAs/GaMnAsからなる強磁性半導体ヘテロ接合を用いた縦型FETにサイドゲートを付けた独特のトランジスタ構造を作製し、低温ではあるがスピンMOSFETの動作と大きな磁気抵抗比60 %の達成に成功した。
- ▶ 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

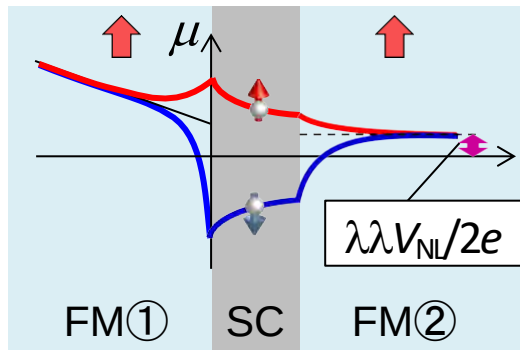
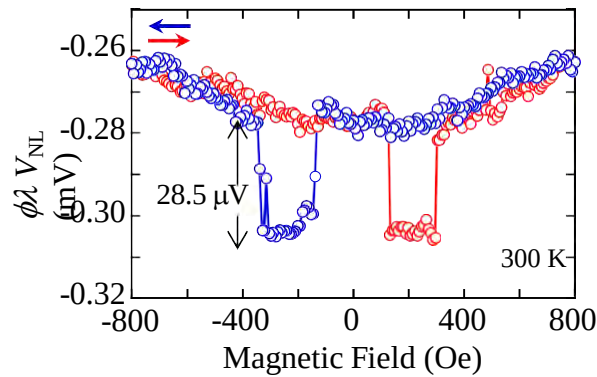
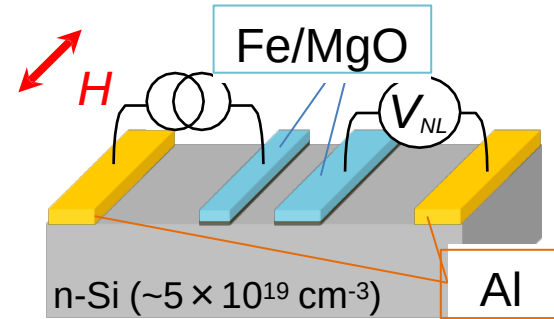
スピン流ロジックゲート



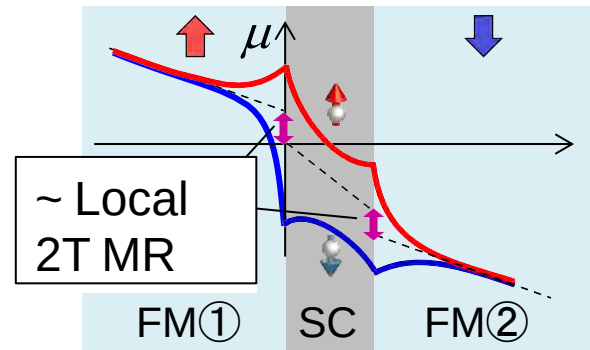
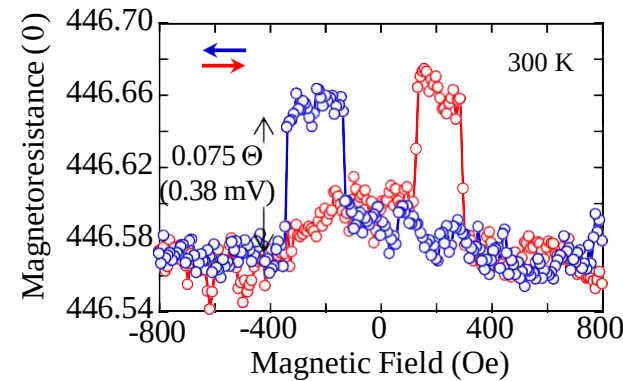
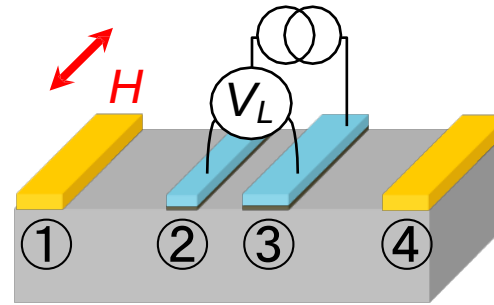
Dery=Sham型ロジックゲート
(Nature 2007) ※ スピンMOSFETが基盤技術

Siスピントランジスタにおける磁気抵抗効果 (測定手法別)

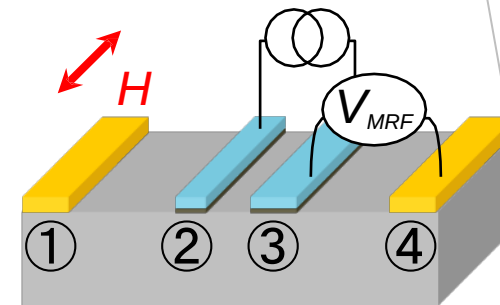
Nonlocal



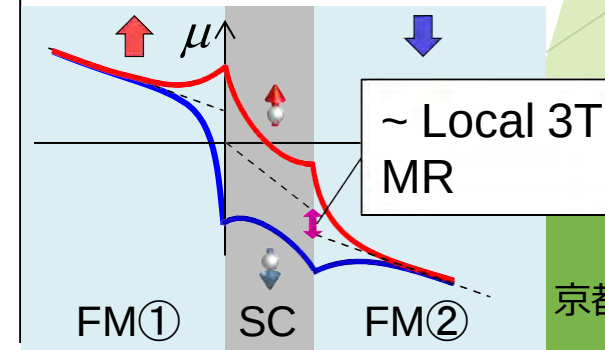
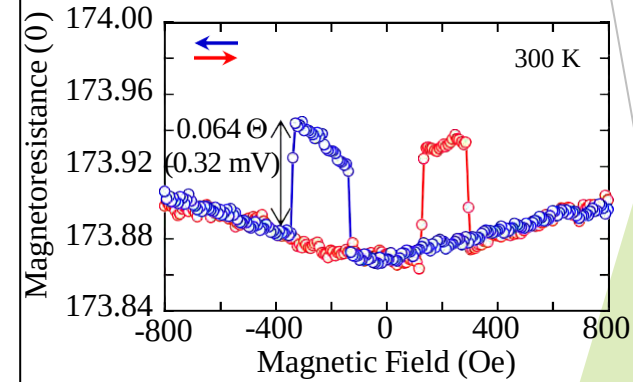
Local 2T MR



Local 3T MR

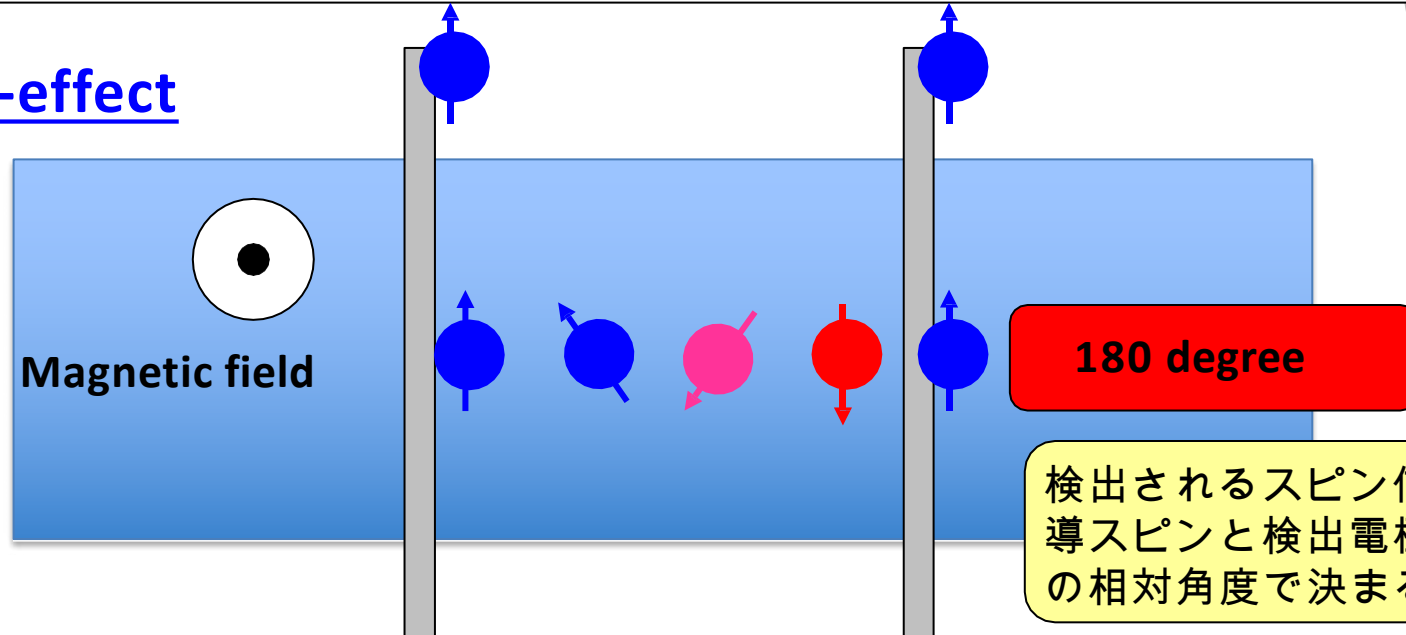


Sasaki, Ando, M.S. APL 2014.

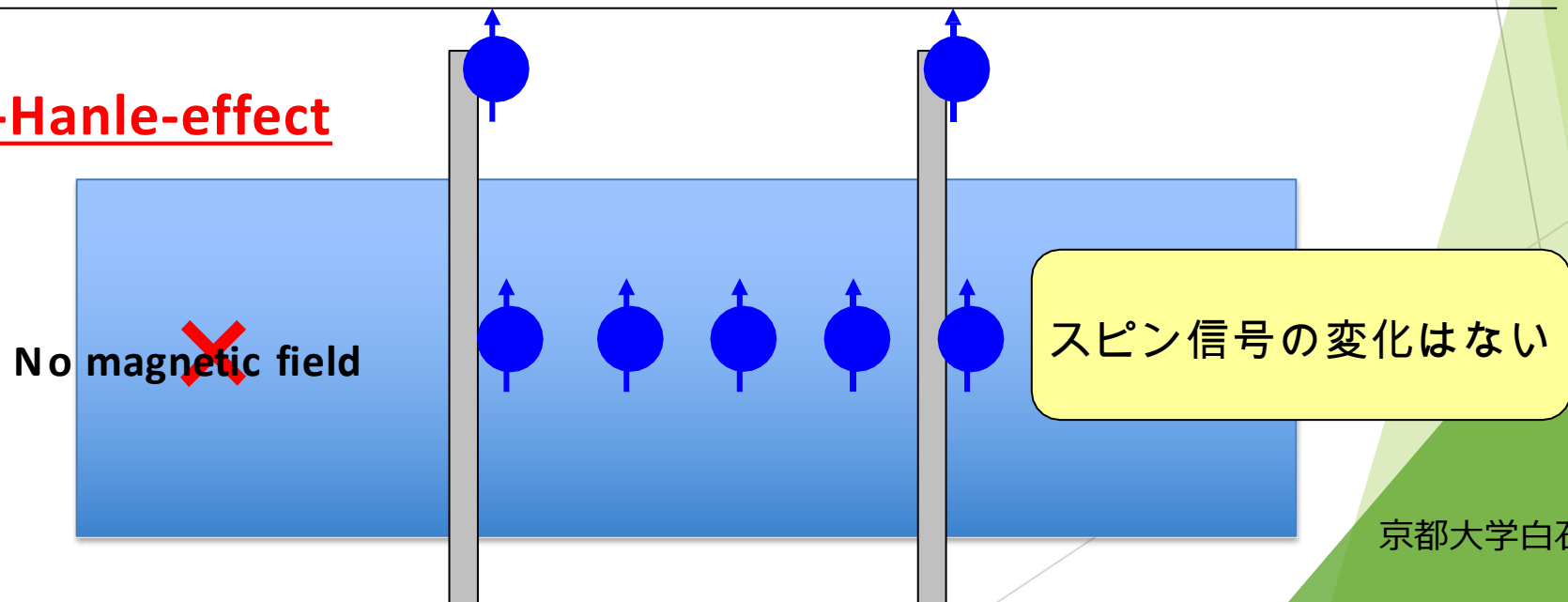


Hanle型スピン歳差測定 (スピン輸送の証拠)

Hanle-effect

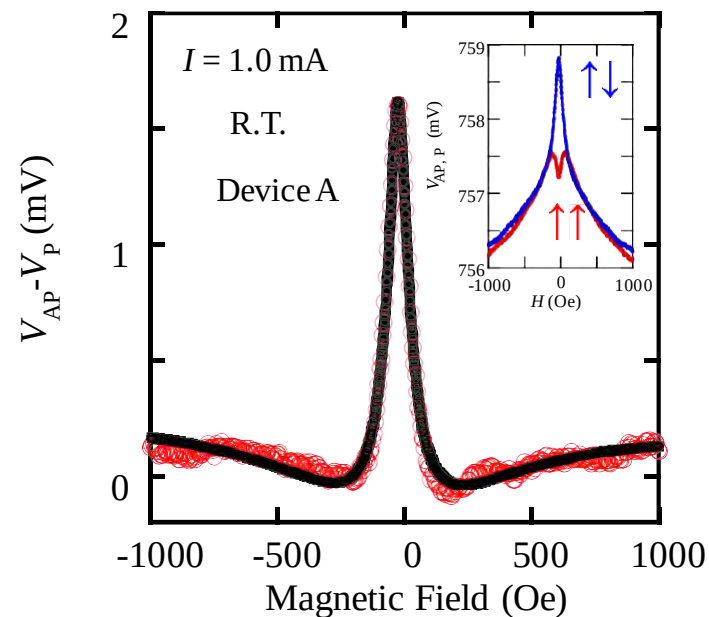
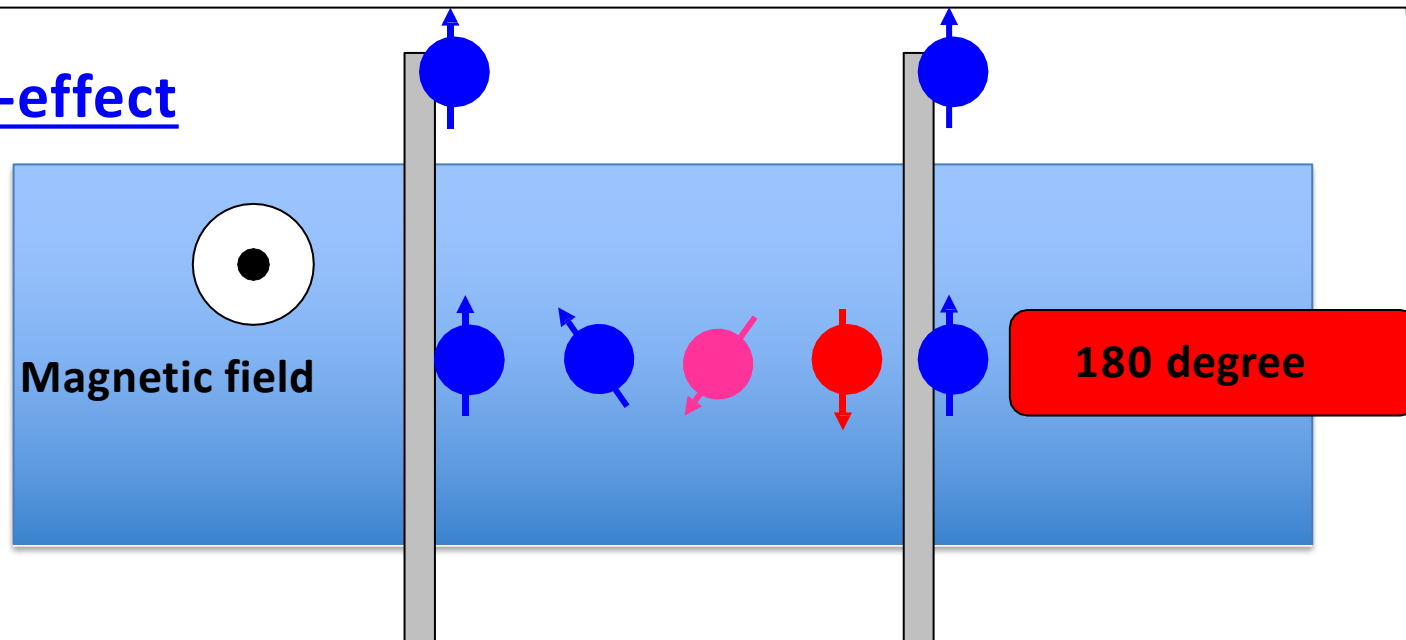


No-Hanle-effect

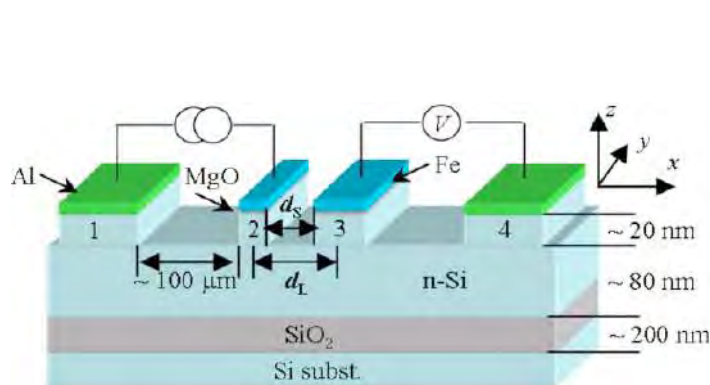


Hanle型スピン歳差測定 (スピン輸送の証拠)

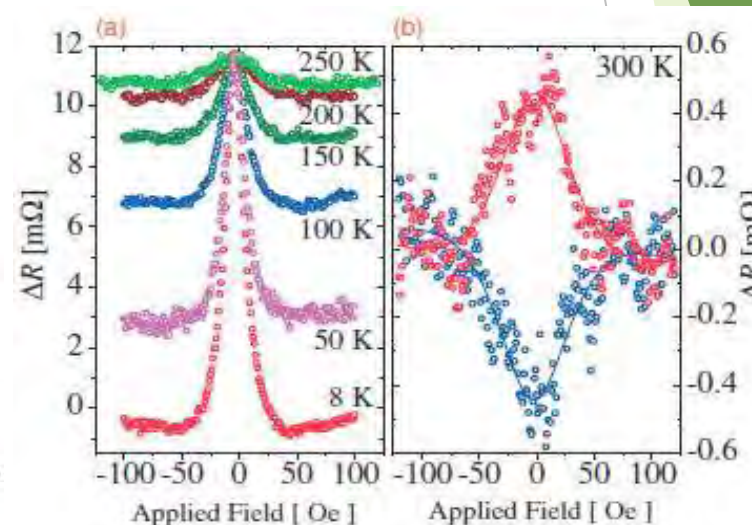
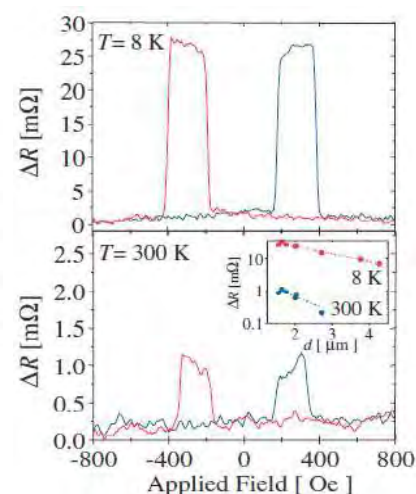
Hanle-effect



磁気抵抗 & Hanle型スピン歳差
同じ素子で300Kまで観測できた



Spin channel : $\sim 5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$

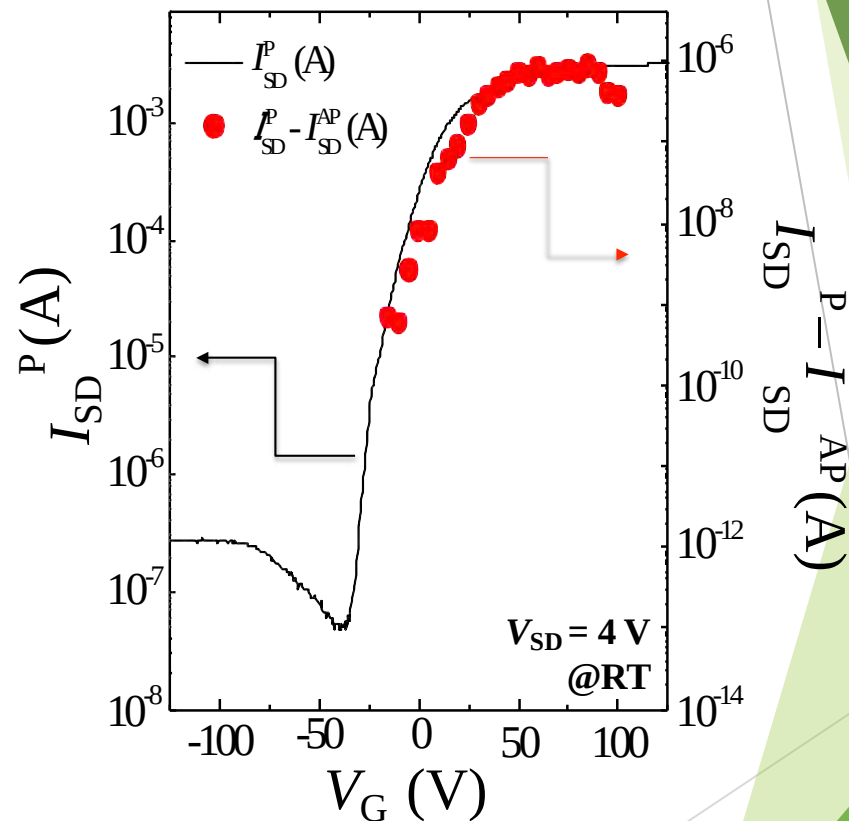
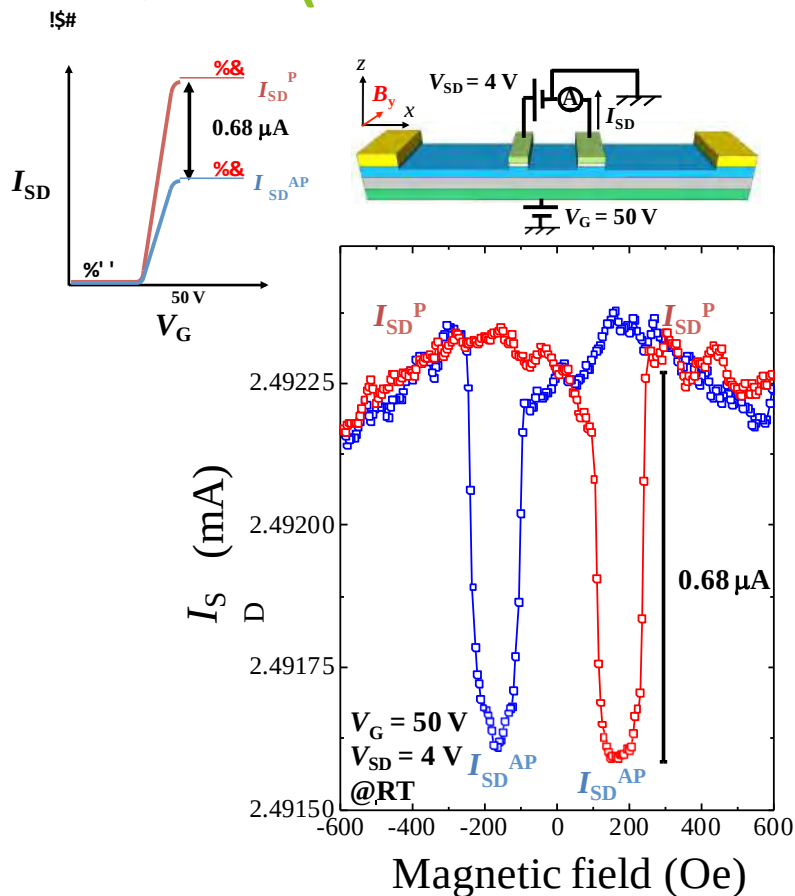


TDK株式会社・秋田県産業技術センター・大阪大学

T. Suzuki, M. Shiraishi et al., Appl. Phys. Express 4, 023003 (2011).



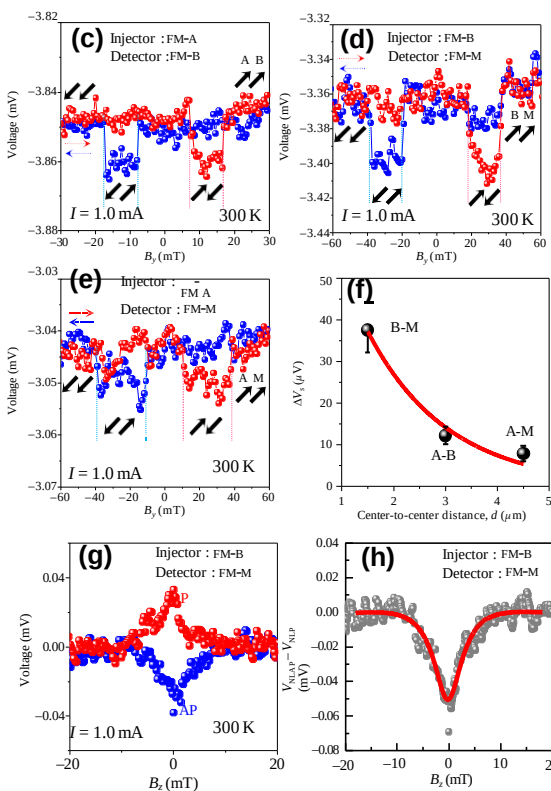
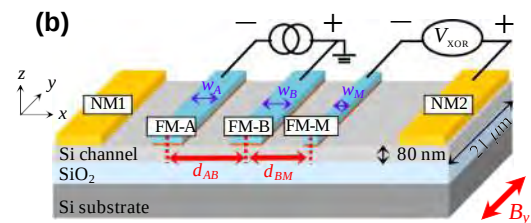
Si スピンMOSFETの室温動作の観測(世界初：2015年)



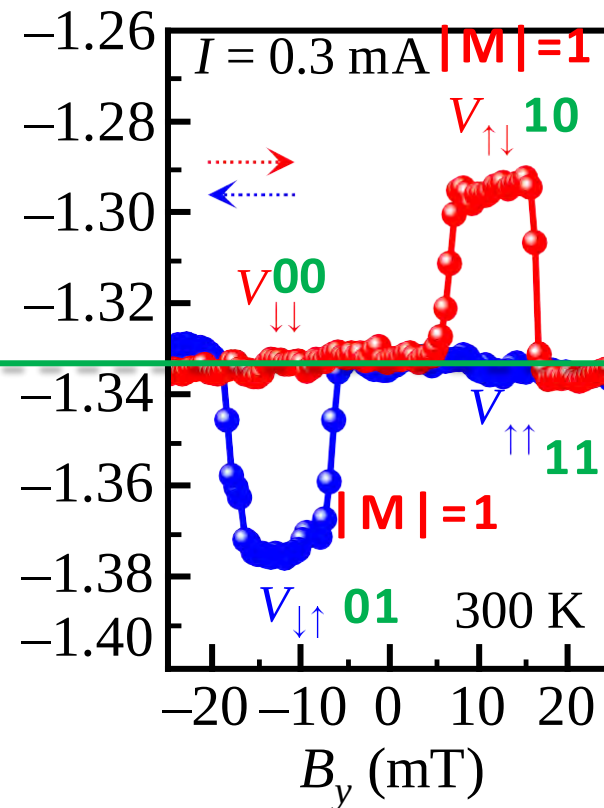
T. Tahara, M.S. et al., Appl. Phys. Express 8, 113004 (2015) [selected as Spotlight Paper]

京都大学白石誠司 教授による

Dery=Sham型ロジック演算の実現(世界初：2020年)



SiスピンのMOSFET機能の拡張



真理値表

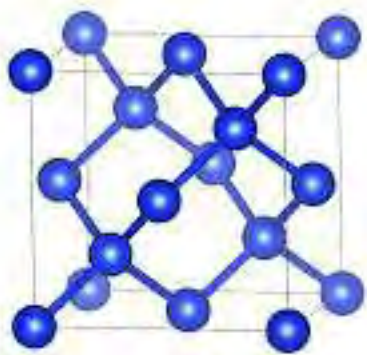
AB	M
00	0
11	0
10	1
01	1

M=0

XOR演算の実現
(XORができれば他の全ての演算は可能)

京都大学白石誠司 教授による

Siを伝導するスピンを「磁場を用いず」操作する



Silicon

/ 軽元素である($Z=14$)

/ 結晶の空間反転対称性がある

→ **本質的にスピン軌道相互作用が小さい**

※磁場を使わずにスピンを操作できる源、みたいなもの



ゲート絶縁膜 (SiO_2)

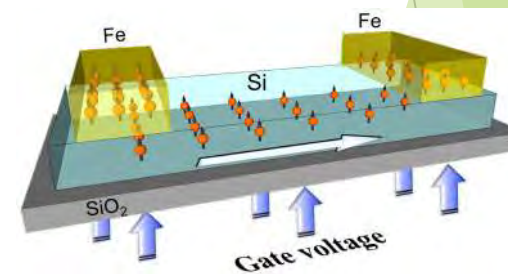
しかしながら . . .

SiスピンMOSFETではゲート絶縁膜がある

⇒ **そこに着目すれば対称性は破れている**

⇒ **人工的に磁場を生む**

(しかもゲート電圧で「磁場」強度変調可能)



Si/SiO₂界面は「人工的に」スピン軌道相互作用を生成する!!

人工的な磁場？

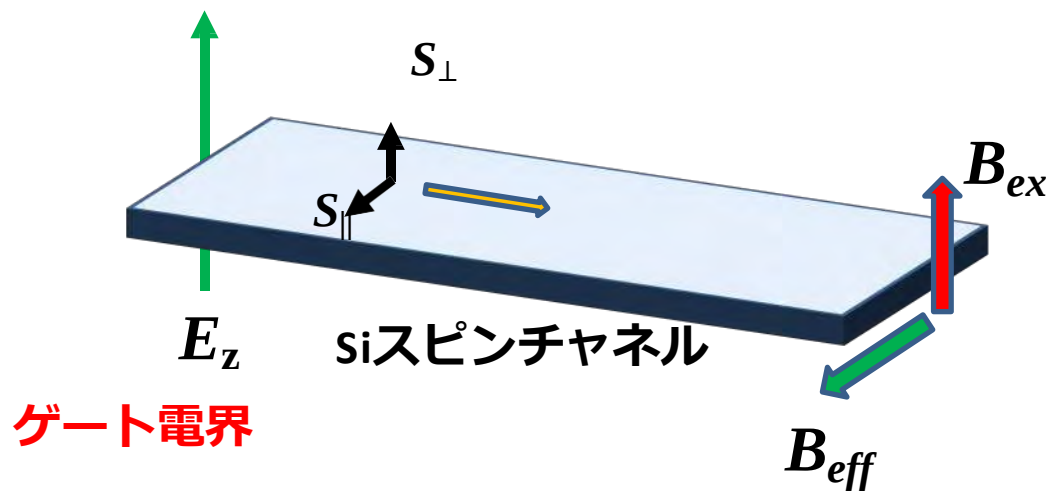
ポイント) スピン軌道相互作用 = 相対性理論(+)に基づく効果

- 1) 対称性が破れる $\Rightarrow$ スピン軌道相互作用が生まれる $\Rightarrow$ (+) **有効磁場(B_{eff})**が生まれる
- 2) (+) 更にスピン軌道相互作用は電場 (**ゲート電界**) を磁場に変換する(電磁双対性)
- 3) ゲート絶縁膜とゲート電圧のおかげで外部磁場をかけなくても有効磁場はある

～何が起こるか？～

Siを伝導する**スピンの寿命**が面内($s_{\parallel}$)と面直($s_{\perp}$)で異なる

(有効磁場のせいで面内寿命のほうが長くなる)



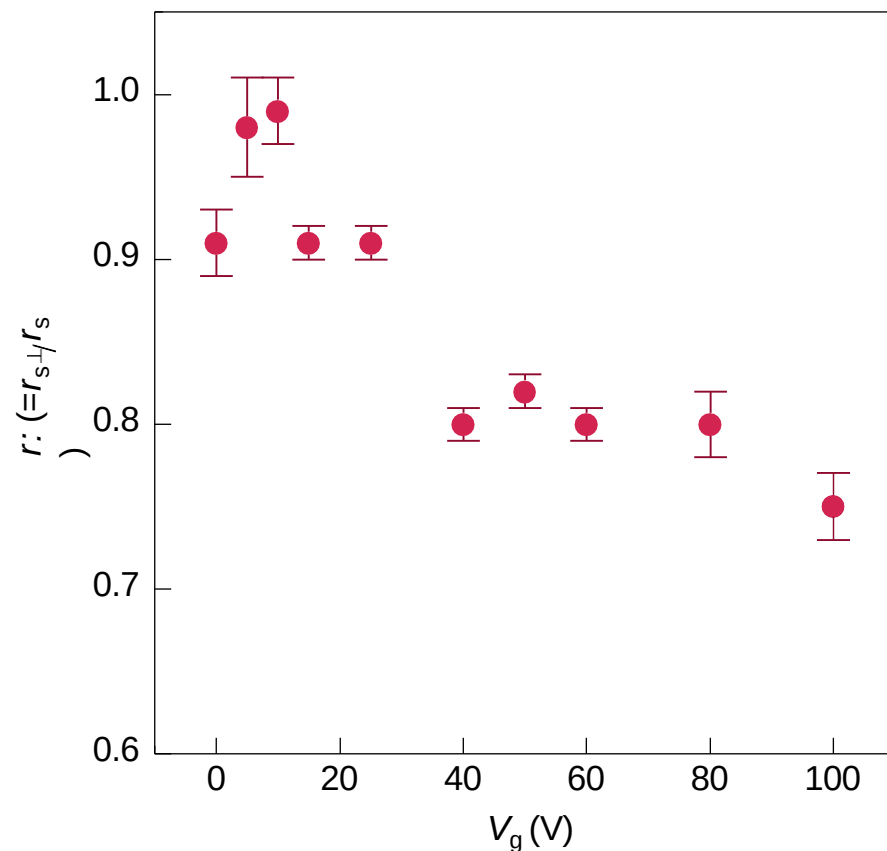
有効磁場 (人工的な磁場) 京都大学白石誠司 教授による



磁場を用いないスピン操作の実現(世界初、2021年)

スピン寿命 $s_{||}$ と $s_{\perp}$ の比 ζ ($=1$ なら両者は同じ) のゲート電圧依存性

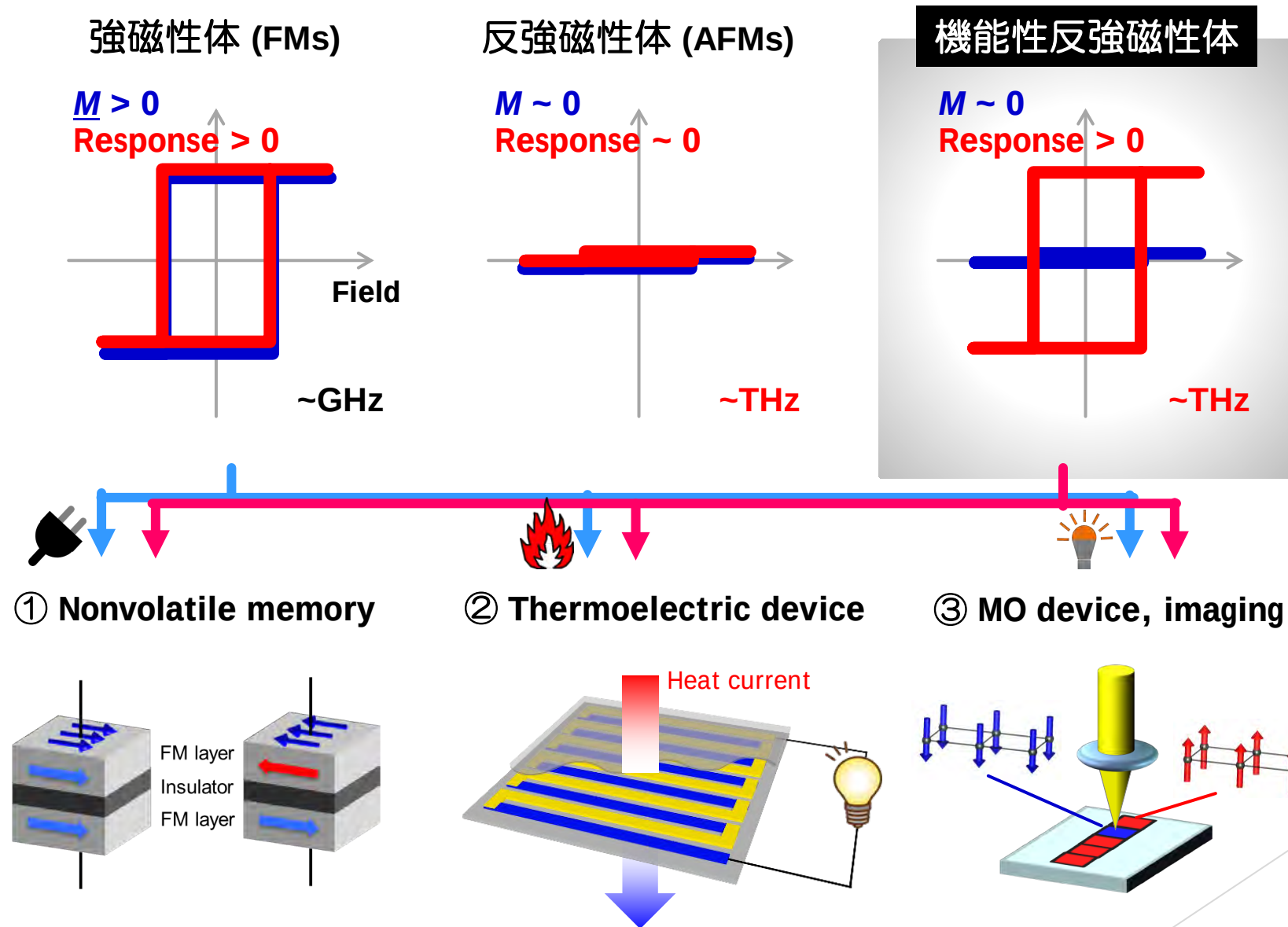
- $s_{||} > s_{\perp}$ が B_{eff} によって実現されている
- ゲート電圧をかけるほど有効磁場が強くなって ζ が 1 から離れる



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の流やトポロジカル反強磁性体の仮想磁場などのトポロジ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、高効率なスピン流・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。

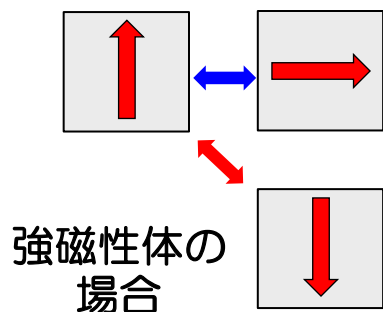
反強磁性体スピントロニクスに対する要請



反強磁性体への書き込みと読み出し

書き込み

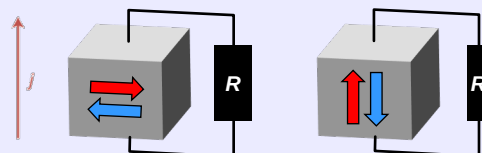
- 磁場
- 電場
- スピン流
- 光
- 電場



Železný et al., Nat. Phys. (2018).

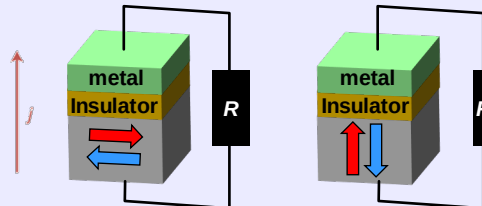
異方性磁気抵抗AMR

Marti et al., Nat. Mater. (2014).



トンネルAMR

Park et al., Nat. Mater. (2011).



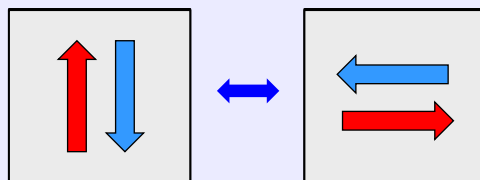
フォークト効果

Saidl et al., Nat. Photon. (2017).

SMR

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

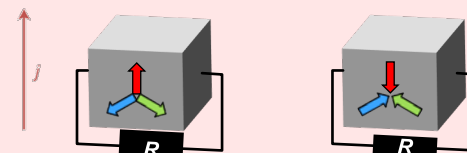
時間反転：偶 (90° 回転)



読み出し

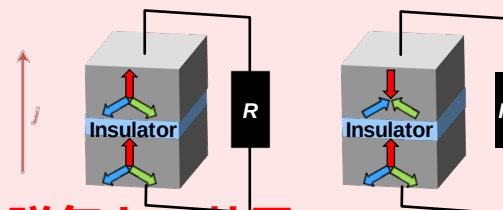
異常ホール効果

Nakatsuji, Kiyohara, Higo, Nature (2015).



トンネル磁気抵抗TMR

[Theory] Železný et al., PRL (2017).



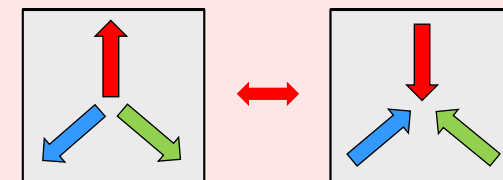
磁気力一効果

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).

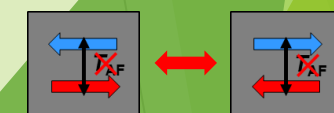
時間反転：奇 (180° 回転)



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



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

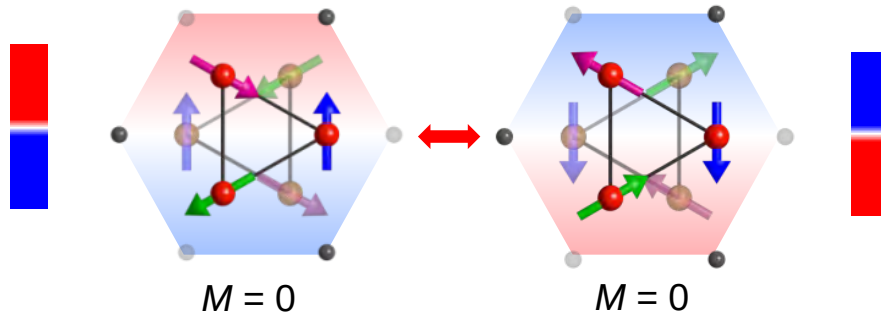


肥後 友也氏 (東京大学)提供

書き込みと読み出し[反強磁性体]

① 巨視的時間反転対称性の破れ

e.g. 非共線スピントクスチャ
with 磁気八重極子のフェロイック秩序



② 大きなベリー曲率

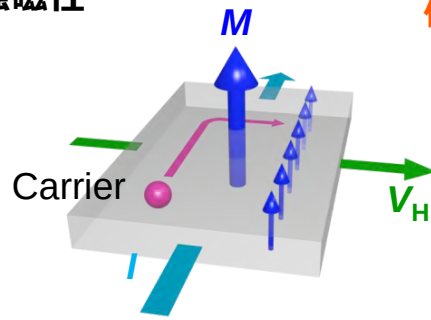
ホール伝導率

$$\sigma_{xy} = -\frac{e^2}{\hbar} \sum_n \int_{BZ} \frac{dk}{(2\pi)^3} f(\epsilon_n(k)) \Omega_n(k)$$

ベリー曲率

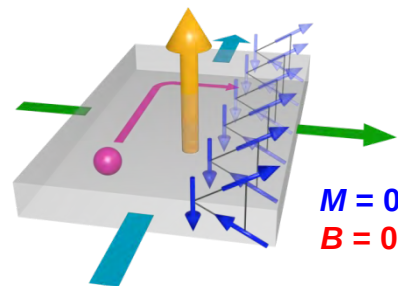
$$\Omega_n(k) = \nabla_k \times A_n(k) = -i (\nabla_k \times \langle nk | \nabla_k | nk \rangle)$$

強磁性



仮想磁場 $\Omega_n(k)$

反強磁性



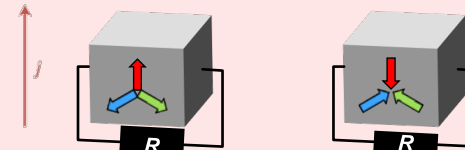
Ye et al., PRL **83**, 3737 (1999); Nagaosa et al., RMP **82**, 1539 (2010).

[Reviews] MacDonald, PRL **104**, 176801 (2010); [Theory] Železný et al., PRL (2017); Higo et al., Nat. Photon. (2018); Šmejkal, Nat. Phys. (2018); Baltz, RMP (2018)...

read

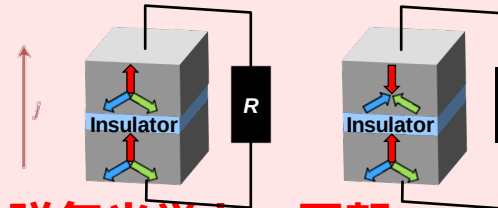
異常ホール効果

Nakatsuji, Kiyohara, Higo, Nature (2015).



トンネル磁気抵抗

[Theory] Železný et al., PRL (2017).



磁気光学カー回転

Higo et al., Nat. Photon. (2018).

異常ネルンスト効果

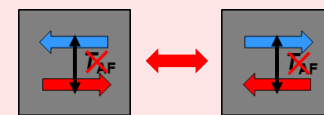
Ikhlas⁺, Tomita⁺ et al., Nat. Phys. (2017);
Li et al., PRL (2017).

時間反転：奇 (180°回転)

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



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



非共線反強磁性体 Mn_3Sn

[結晶構造]

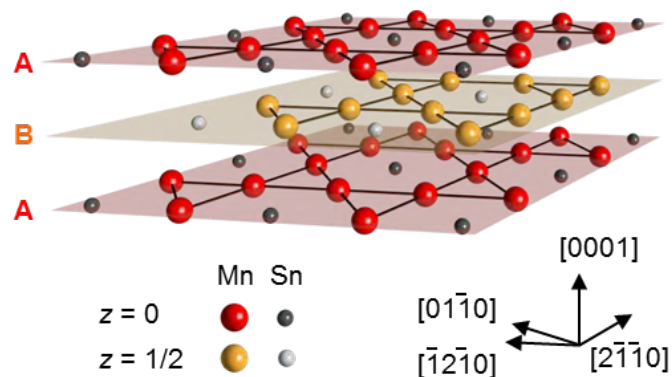
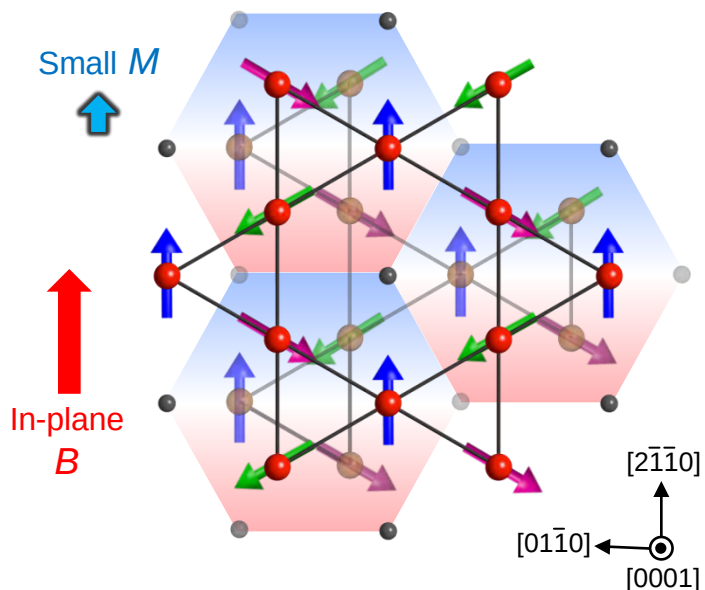


Fig. from Higo et al., Adv. Funct. Mater. **31**, 2008971 (2021).

[磁気構造]

A + B layers



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

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	$T_N \sim 430 \text{ K}$

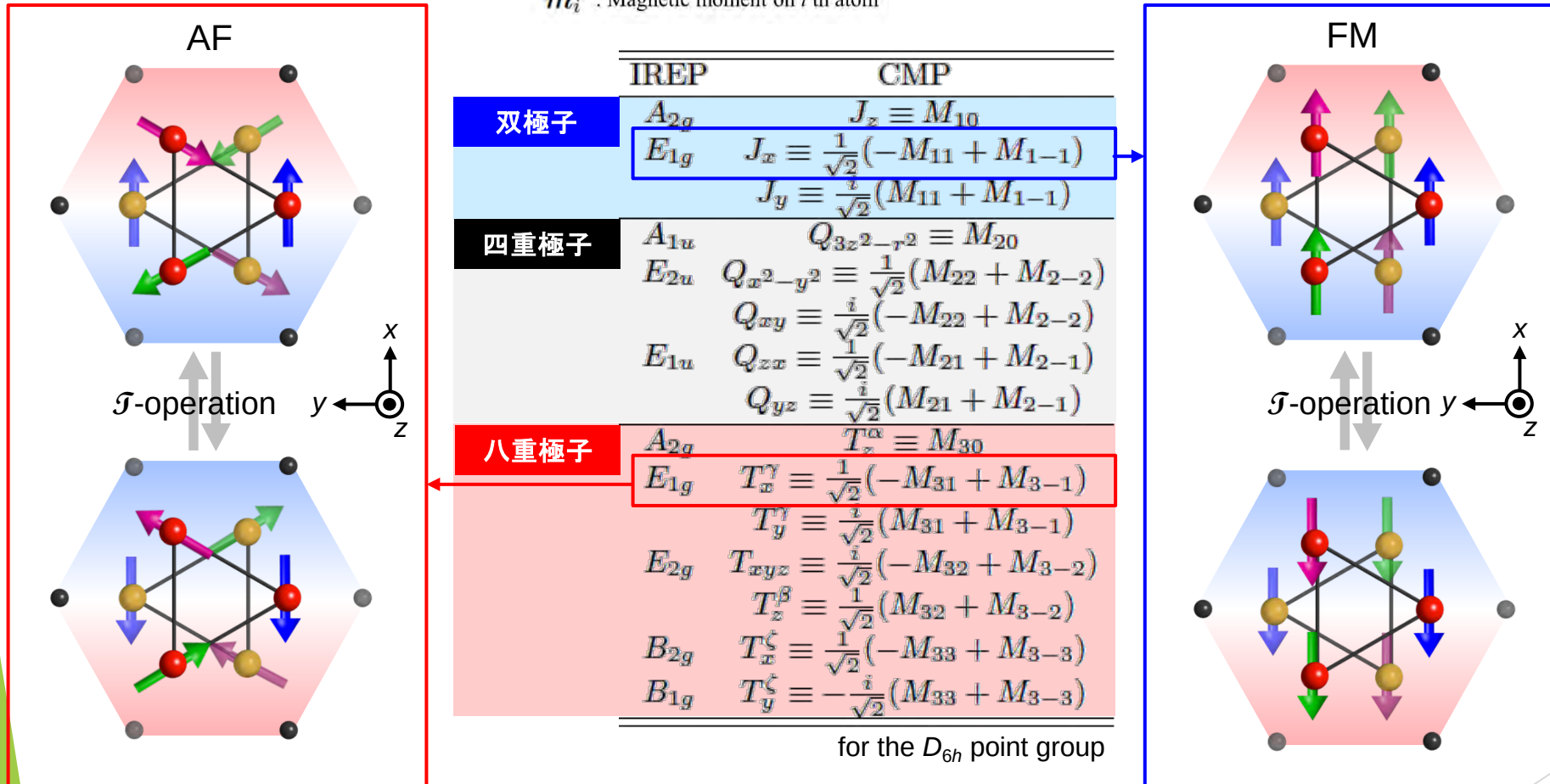
- 逆三角スピン構造(ITS)
- ➡ 巨視的 時間反転対称性の破れをともなう反強磁性
“磁気八重極子”のフェロイック秩序
- 自発弱強磁性モーメント
面内 $M \sim 0.005 \mu_B/\text{f.u.}$ ← キアント磁化 + 軌道磁気モーメント
- 小さな面内磁気異方性

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

クラスタ磁気多重極子: 対称性破れを表す巨視的オーダーパラメータ

$$M_{\ell m} \equiv \sqrt{\frac{4\pi}{2\ell+1}} \sum_{i=1}^N \nabla_i (R_i^\ell Y_{\ell m}(\hat{R}_i)^*) \cdot \mathbf{m}_i$$

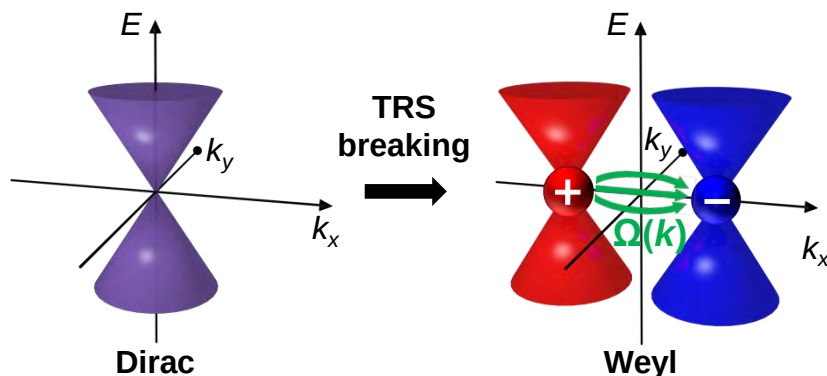
Suzuki, Koretsune, Ochi and Arita, PRB **95**, 094406 (2017).
 $\mathbf{m}_i$: Magnetic moment on i th atom



Mn₃Snの反強磁性秩序は E_{1g} -八重極子モーメントによって生じる

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

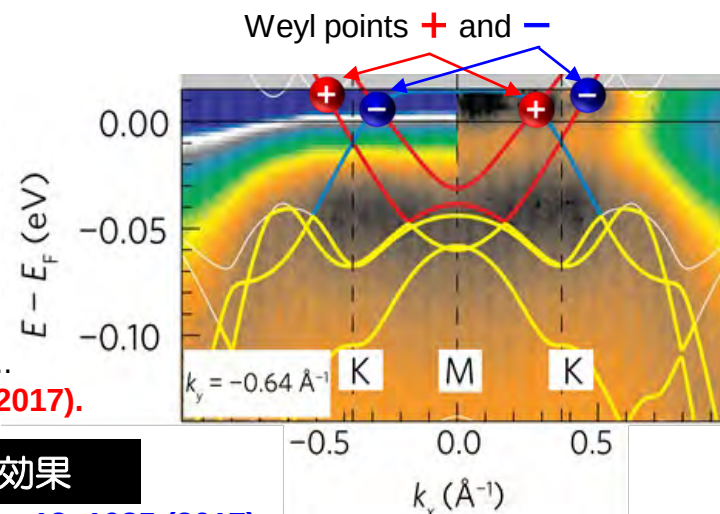


[Theory] Wan et al., PRB **83**, 205101 (2011).

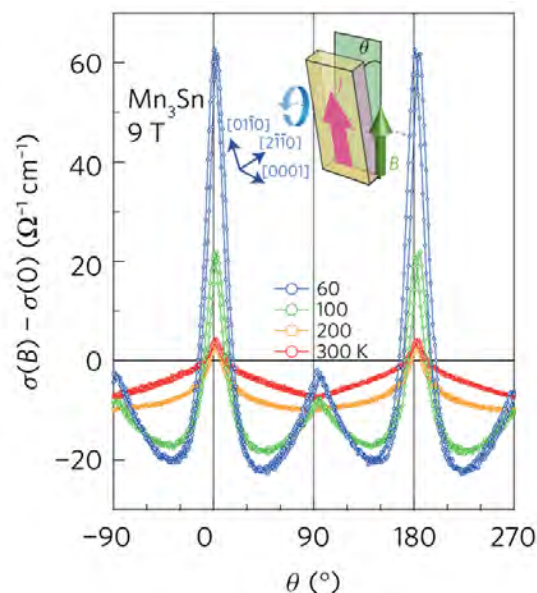
[Experiment] IS-B: Science **349**, 613 (2015); PRX **5**, 031013 (2015)..

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



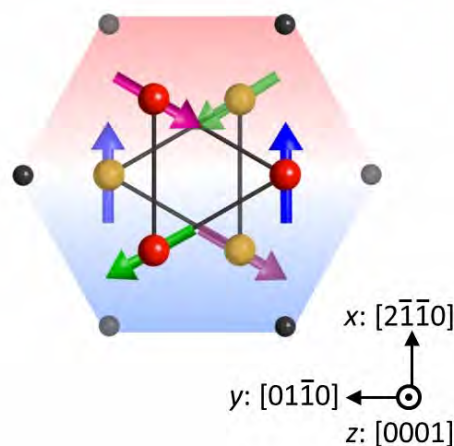
キラル異常



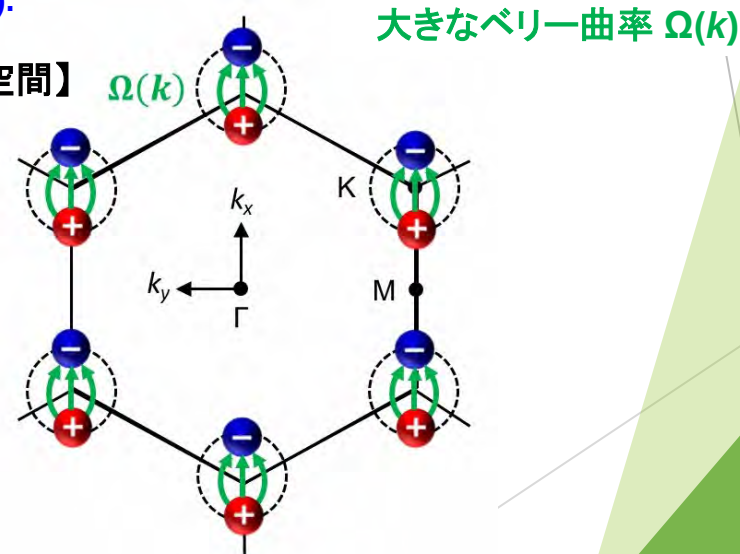
大きな異常ネルンスト効果

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

【実空間】



【k-空間】



大きなベリー曲率 $\Omega(k)$

時間対称性を破るワイル状態が反強磁性スピントキス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

マグノニクスと脳型コンピューティング

- ▶ スピン波やマグノン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。

トポロジカル物質で超伝導ダイオードを実現

- ▶ 理研ほかのグループは、トポロジカル絶縁体と超伝導体の相互作用を研究するため、FeTeとBi₂Te₃の積層界面に着目しました。いずれの物質も単体では超伝導を示しませんが、これらの積層界面では超伝導を発現することが明らかになっています。さらに、この界面にはトポロジカル絶縁体表面状態が存在することから、その表面状態と超伝導との相互作用を研究することに適しています。分子線エピタキシー法を用いてFeTeとBi₂Te₃の積層構造を作製し、試料を極低温で測定したところ、7 K程度で抵抗が0となり、界面において超伝導が発現していることを確認しました（図1 a）。
- ▶ そこで超伝導状態の理解を深めるため、界面に平行（面内）に磁場を加えた状態で、整流効果（ダイオード効果）を、図2の赤方向電流下での抵抗と青方向電流下での抵抗の差分に対応する、非相反抵抗を通して測定しました。常伝導状態では、非相反抵抗は0であるのに対し、部分的に超伝導に転移した温度では、有限な非相反抵抗が生じ、整流効果が現れました（図1 b）。特に、磁場方向の反転に伴って、非相反抵抗の符号が反転する重要な性質を確認しました。これは、超伝導電流の流れやすい方向を外部から加える磁場の方向で制御できることを意味しています。

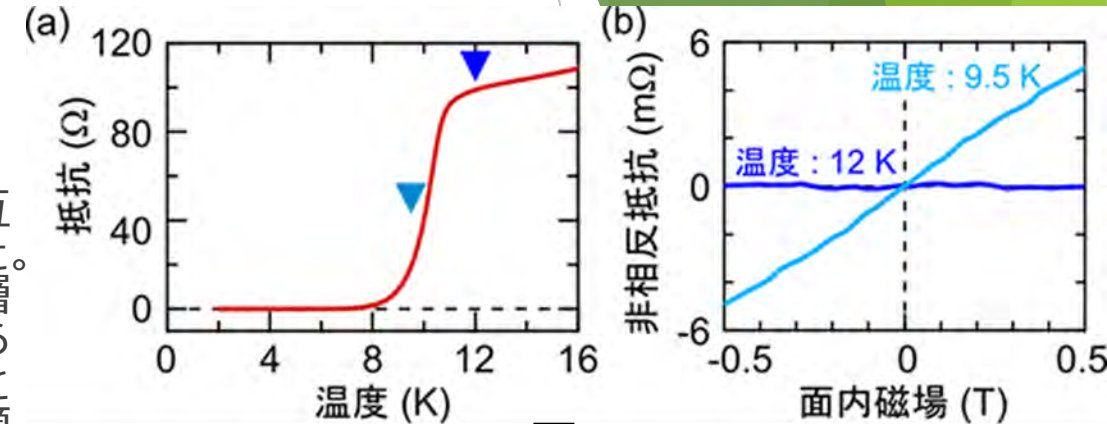


図 1 a

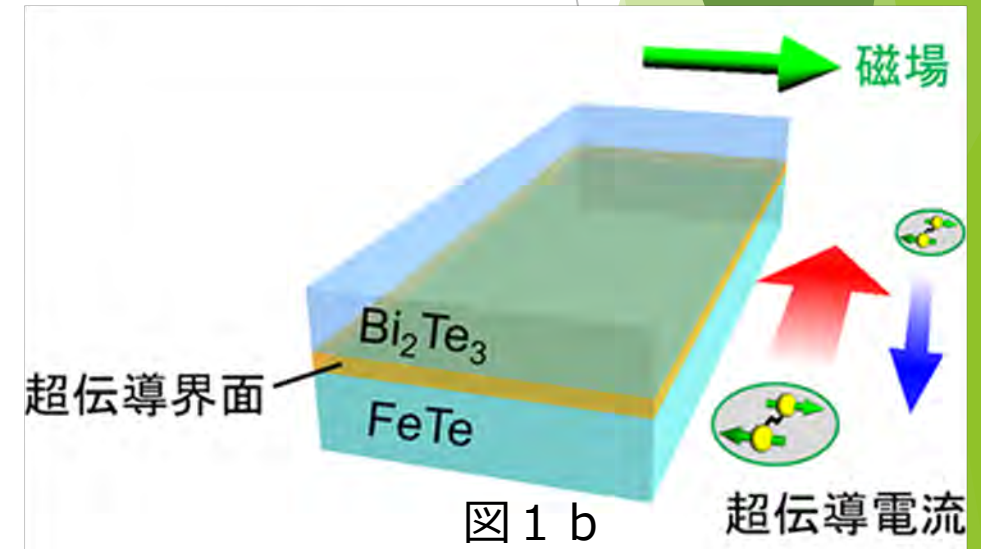


図 1 b

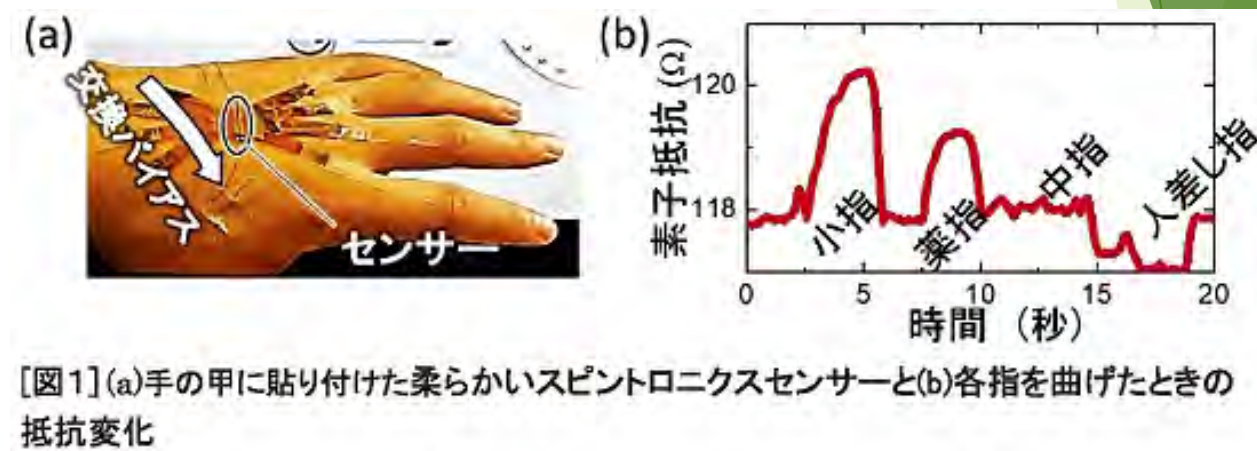
超伝導トポロジカル量子整流

- ▶ 第二種超伝導体MoGeを、磁性絶縁体 $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 基板に成膜した試料において、試料の温度を一定に保ちながらこの薄膜試料の面内方向にある特定の強度の磁場を印加すると、外部からの入力がないにもかかわらずMoGeの面内方向に直流電圧が発生した。
- ▶ この直流電圧は、電磁ノイズのある測定環境では一日中安定して観測され続けた。
- ▶ この直流電圧はMoGeがいわゆる渦糸液体相にあるときに生じており、磁性体界面と開放側界面における渦糸のアンバランスが整流機能を生じたと考えられる。
- ▶ 温度差ではなく環境のゆらぎを検出しており、低温動作ながらも非常に感度の高い整流素子であり、ノイズ評価や微弱信号の検出に利用できる可能性がある。

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。これに対しスピナーゼーベック効果、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。
- ▶ 逆過程であるスピンペルチエ効果では、微小領域のスピン流－熱流変換現象の可視化が行われる。

フレキシブルスピントロニクス



- ▶ 磁気抵抗素子をフレキシブル基板上に製膜することにより磁歪効果を用いたベクトル型のひずみセンサとなることが示された。
- ▶ 今後、ゼロエネルギー消費のデータロガー付きセンサとなる可能性があり注目されている。

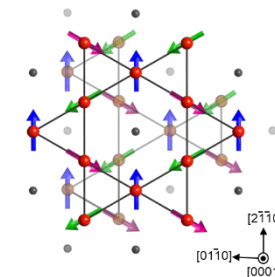
第45回日本磁気学会学術講演会

2021/8/31 A会場13:00-16:45

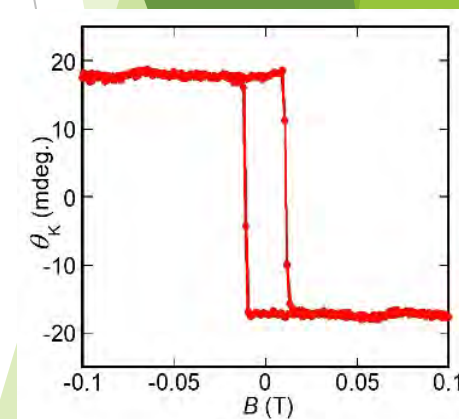
Symposium "Recent progress of relationship between magnetism and light"
シンポジウム「磁気と光の関係の最近の進展」

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)



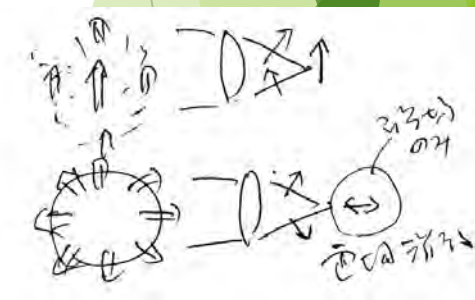
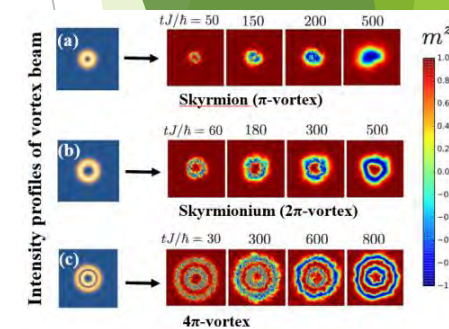
- ▶ 最近、次世代スピントロニクスデバイスにおいて、強磁性体(FM)に比して操作速度が速い反強磁性体(AFM)が急速に注目を集めている。AFMは磁化を持たないため検出や操作が困難であるが、最近、いくつかのブレークスルーが報告されている。
- ▶ 肥後らのグループは、非共線AFMである Mn_3Sn において、異常ホール効果、異常ネルンスト効果、磁気力-効果を発見した。 Mn_3Sn は六方晶 D_{019} (空間群 $\text{P6}_3/\text{mmc}$)、Mn原子のカゴメ層の(0001)のABAB積層を示す。 $T_N \sim 430 \text{ K}$ 以下では、幾何学的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。



31pA-2 スピンテクスチャと渦の制御に関する理論的提案 佐藤正寛 (茨城大)



- ▶ 光渦（軌道角運動量OAMを持った光:）はドーナツ状の強度プロファイルを持ち、OAMの如何に関わらず中心の強度がゼロであり、電場と磁場の方向が、集束面のゼロ強度中心の周りに角度依存性を持っているという特徴を持つ。これら2つの性質に基づいて、スキルミオンやスキルミオニウム、スパイラル波面を持つspin波などのトポロジカル磁気欠陥を超高速に作成する方法を提案した。
- ▶ 次に佐藤氏は、ベクトルビームの応用について述べた。OAMが+mと-mの2つの光渦を重ね合わせ集光すると焦点に強い高周波磁場（または電場）を作り出すことができる。この特性を利用して、磁性半導体やマルチフェロイック磁石の磁気共鳴の検出、トポロジカル相（トポロジカル絶縁体、トポロジカル超伝導体など）のエッジ電流の観察、金属磁石のフェルミ面の推定など、ベクトルビームの材料への応用を提案した。



31pA-3 対称性が破れたメタマテリアルとメタサーフェス 富田知志（東北大）

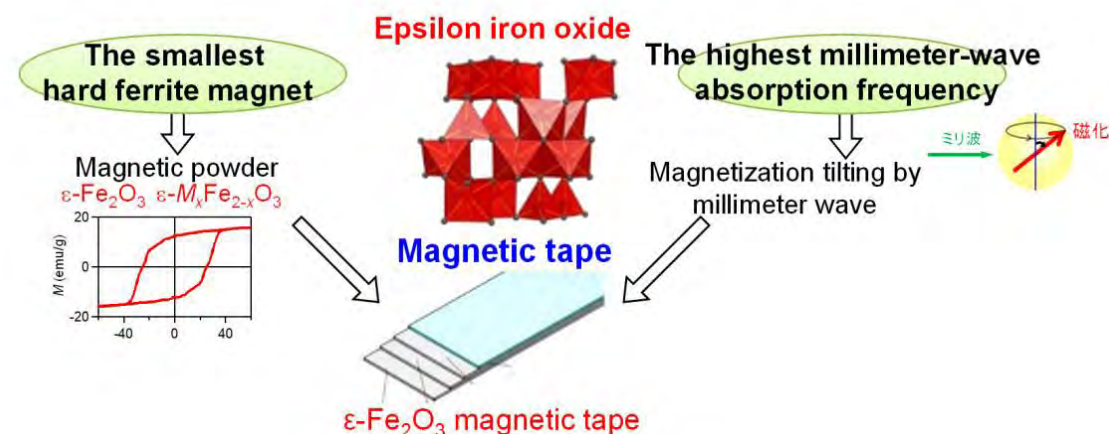


- ▶ 富田氏は「光磁気カイラル（MCh）および磁気電気（ME）効果と呼ばれる光波の偏光に依存しない指向性複屈折」に焦点を当て、「メタマテリアルとメタサーフェスは、天然素材と比較して、MChとMEの効果を数桁高めることができることを述べた。
- ▶ 光学MCh効果は、光磁気（MO）効果と旋光度（OA）の組み合わせで、TRSの破れを通じて磁気光学効果、空間反転対象の破れを通じて光学活性をもたらす。通常、天然素材では効果は非常に小さいが、メタマテリアルを使用して効果を高めることができ、表と裏のあるマジックミラーを作ることができる。
- ▶ マイクロ波よりも高周波動作の場合、MChメタ分子はひずみ駆動型セルフコイリング技術を使用して小型化され、自立型パーマロイキラルメタ分子は、キャビティFMRとコプレーナ導波路FMRを用いて観測できる。**小型メタ分子は、ミリ波およびTHz周波数で**光学MCh効果を得るのに有望である。
- ▶ 位相勾配のあるメタサーフェスでは、磁気・光・数学の協奏があり、時間的変調メタマテが設計できる。**波長より短いパスで光に働く磁場はベリー曲率**となり、マイクロ波の屈折を磁場制御可能となる。

31pA-4 ε酸化鉄を用いた集光型ミリ波アシスト記録 大越愼一(東大)



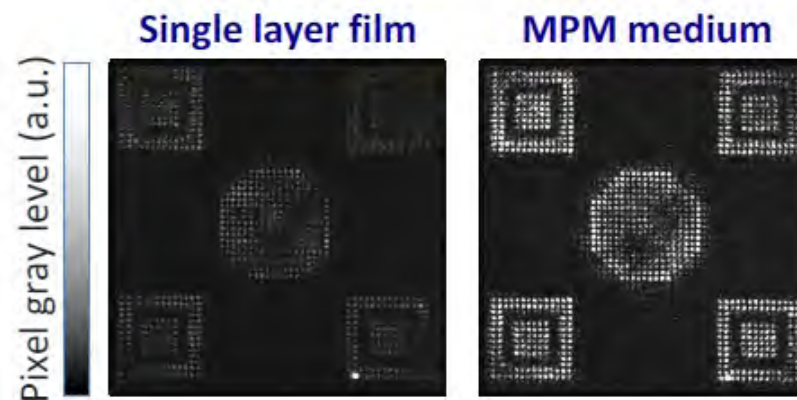
- ▶ ミリ波 (30~300 GHz) は、無線通信放送や携帯電話基地局間の無線データ伝送、高度運転支援システムなどへの利用が期待されている。一方、ビッグデータ時代の持続可能なデータストレージシステムとして磁気記録が注目されており、指数関数的に増大を続けているデータ量に対して、磁気記録容量を向上させるためには、磁性粒子のサイズを小さくする必要があるが“**磁気記録トリレンマ**”と呼ばれる問題があり限界を迎えている。このトリレンマ問題を解決するため、ハードディスクでは、**熱アシスト磁気記録**や**マイクロ波アシスト磁気記録**などが提案されている。
- ▶ 大越氏らは、磁気テープ用の新しい磁気記録方式の提唱を主眼として、イプシロン酸化鉄 (ϵ -Fe₂O₃) に着目した。①イプシロン酸化鉄は無磁場共鳴 (自然共鳴) により、金属置換量に応じて**35~222GHzの広い周波数領域でBeyond 5G用途で期待される高周波ミリ波を吸収する**。また、②シングルナノメートルサイズ (8 nm程度) まで小さくしても強磁性を維持することが可能。
- ▶ 金属置換型イプシロン酸化鉄からなる磁性フィルムを作製し、「ミリ波磁気記録」という新しいコンセプトに立脚して、**集光型ミリ波アシスト磁気記録** (Focused Millimeter Wave-Assisted Magnetic Recording, F-MIMR) という記録方式を提案した。



31pA-5 人工磁気格子メディアを用いたホログラフィックメモリの開発

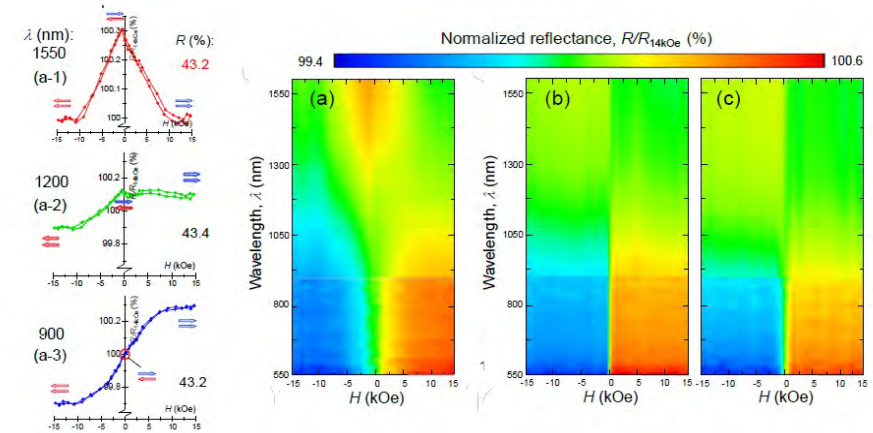
中村雄一（豊橋技科大）

- ▶ 中村らは、多結晶磁性ガーネット（Bi : RIG）膜を用いたコリニア干渉法による磁気ホログラムメモリを研究している。磁気ホログラムの記録と再構成に成功したが、この最初に報告された共線磁気ホログラフィの再構成画像は暗く、ノイズが多く、大きなバックグラウンドノイズがあった。
- ▶ 中村氏らは、人工磁性格子（AML）と呼ばれる数nmから数百nmのスケールで人工構造を導入し、その構造に応じて新しい磁性と機能を発揮する磁性材料も開発した。この知識に基づいて、磁気ホログラムの再構成画像を改善するために、AML記録媒体を含む記録条件を調査した。記録媒体の改良により、大きな磁気光学効果が得られ、明るい再構成画像が得られることを報告した。



31pA-6 磁気多層膜の近赤外磁気リフラクティブ効果： 表面プラズモン共鳴を伴うGMR膜と、強磁性/反強磁性積層膜 齊藤伸（東北大）

- ▶ 反射構成（R-MRE）による磁気屈折効果は、磁化の配置に応じて光の偏光の回転ではなく、強度が変化するだけなので注目されている。この変化の大きさは約数%と小さく、実際のデバイスにR-MREを適用することは困難である。一般に、金属磁性多層膜の場合、MREの支配的な要因は伝導帯のスピン依存散乱であると考えられ、その光学特性は磁化状態に対応する拡張ドルーデモデルによって表される。したがって、R-MREを強化するための材料の物理的特性として金属磁性多層膜の散乱時間とスピン依存散乱係数の評価が重要であるこの研究では、反強磁性的に交換結合されたCo / Ru多層膜のIR領域における磁気光学特性の測定を行った。
- ▶ 図1は、入射角70度の実験反射率のカラーマップを示す。(a) [Co(4)/ Ru(0.7)] 10、(b) [Co88B12(4)/ Ru(0.7)] 10、および (c) [Co80B20(4) / Ru(0.7)] 10の波長と磁場に対してプロット。磁場はフィルム面と反射面の法線方向に沿って印加された。サンプル (a) の $H = 14$ kOeの反射率の大きさで正規化された反射率曲線が、(a-1) 1550 nm、(a-2) 1200、および (a-3) 900nmの波長について示されている。(a) に示すように、長波長領域では、反射率は磁場に対して偶関数で変化するが、短波長領域では、磁化の方向に対応して奇関数で反射率が変化する。これは、R-MREと横カー効果（TKE）の両方が同じサンプルに現れ、それぞれバンド内およびバンド間遷移のために異なる波長領域に現れることを意味します。
- ▶ 一方、(b) と (c) に示すように結晶性Co層とアモルファスCoB層を交互に配置すると、すべての膜で反強磁性層間結合が実現されますが、R-MREは完全に消失する。この事実は、強磁性層での伝導電子の散乱が抑制されるため、結晶対称性がMREに必要な条件であることを明確に示している。



31pA-7 ナノグラニューラー膜のファラデー効果

小林伸聖（電磁研）



- ▶ 光アイソレーター材料としてはBi:YIGを超えるものが報告されていない。小型化のため多くのファラデー効果の大きい薄膜が研究されたが、その特性はバルクのBi-YIGより劣っている。
- ▶ 小林氏らは、FeCoフッ化物ナノ粒子膜の新しい磁性透明材料を提案した。
- ▶ ナノメートルサイズの磁性金属（Fe、Co、またはFeCo合金）顆粒とセラミック絶縁マトリックス（窒化物、酸化物、またはフッ化物）からなるナノ粒子膜は、顆粒とマトリックスの組成比に応じた透磁率、トンネル磁気抵抗、磁気誘電効果、磁気光学効果などのさまざまな機能特性を示す。
- ▶ 小林氏は、ナノグラニューラーフィルムの巨大なファラデー効果を紹介した。これらのフィルムのファラデー回転角は、光通信帯域の波長（1500 nm）でBi-YIGの40倍もある。
- ▶ 図1にFe₂₁Co₁₄Y₂₄F₄₁、Fe₂₅Y₂₃F₅₂ Fe₁₃Co₁₀Al₂₂F₅₅フィルム、バルクBi-YIGのファラデー回転角の波長依存性を示す。図1に示されているすべてのナノグラニューラーフィルムは、Bi-YIGよりもはるかに大きなファラデー回転角を持っている。

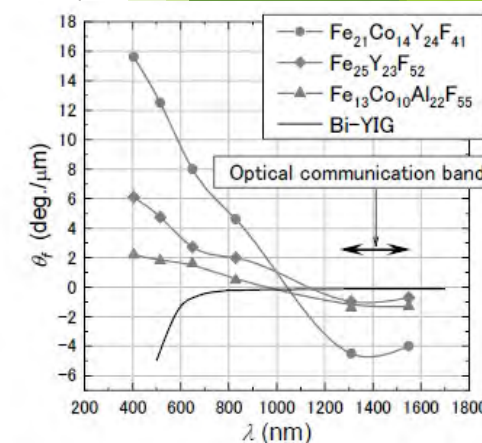


Fig.1 Relationship between the wavelength of incident light and the Faraday rotation angle of Fe₂₁Co₁₄Y₂₄F₄₁, Fe₂₅Y₂₃F₅₂ and Fe₁₃Co₁₀Al₂₂F₅₅ films. The films were deposited on substrates of 600 °C, 550 °C and 680 °C.

応用物理学会 シンポジウムT13

11p-S302

理論と実験の協奏：スピントロニクス材料・現象・素子

11p-S302-1 オープニング「理論と実験の協奏：スピントロニクス材料・現象・素子」

吉田博(CSRN)

- ▶ 吉田先生は、(1) 計算機ナノマテリアルデザイン手法とその半導体ナノスピントロニクス材料への応用、(2) 磁氣的機構の原子番号依存性と電場による磁氣的交換相互作用のスイッチング(3) 希土類原子、格子間欠陥、反位置欠陥を人工的に導入・制御した強磁性半導体の超高温強磁性転移温度のデザインと実証、(4) 交換相関相互作用による負の電子相関系のデザインと実証、(5) フント則による交換相関エネルギー利得を利用した超ワイドバンドギャップ強磁性半導体の新奇価電子制御法(EX-doping)のデザイン一般則と実証、などについて、計算機ナノマテリアルデザインを基軸にして、半導体や酸化物をベースに、新材料・新現象・新デバイスの開発研究へのデザインと実証実験の試みについて報告した。
- ▶ 特に、ドーピングによって生じるスピノーダル分解、昆布相、格子欠陥、アンチサイト欠陥などが室温での強磁性に寄与することを紹介、実験との比較も述べた



11p-S302-2 「マイクロマグネティックシミュレーション」 仲谷栄伸（電通大）

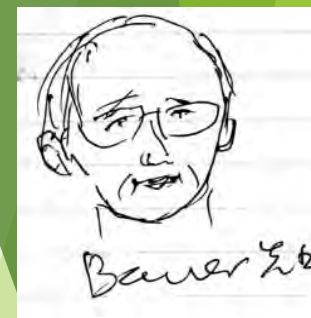
- ▶ 仲谷先生は、始めに「マイクロマグネティックシミュレーション」の様々な手法についてわかりやすく解説。
- ▶ その上に立って、実験と理論の協奏の例として磁気バブル磁区におけるブロッホラインの磁気構造のシミュレーションと光学実験結果の比較、カゴメ格子反強磁性体MnSnにおける磁壁移動機構をシミュレーションとAIの併用で解明するなど、最近の研究成果についても紹介した。



11p-S302-3 「Magnons versus ferrons」

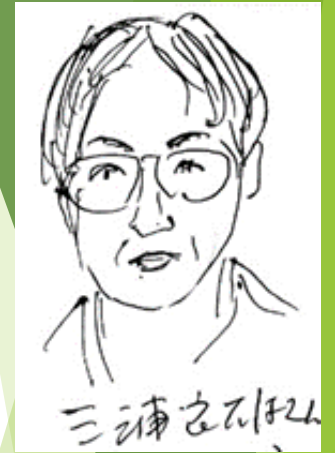
Gerrit Ernst-Wilhelm Bauer (東北大)

- ▶ Bauer先生は、強誘電体と強磁性体の電気双極子と磁気双極子の自発的秩序は、高温においても魅力的で有用である。
- ▶ スピントロニクスは、磁気秩序の輸送をスピン流の形で解釈しているのに対し、強誘電性秩序の分極電流については、注意を払われていない。
- ▶ ここでは、一次元フォノンモデルから導出されたパラメータを用いて、強誘電体デバイスにおける熱および分極輸送の理論を提示する。
- ▶ として、熱電圧、ペルチェ効果、およびストレー磁場を介して観察できるであろう「分極の流れ(フェロン)」を提唱し、将来フェロニクスがマグノニクスを補完するであろうとしている。



11p-S302-4 「軌道と四極子による磁性薄膜の結晶磁気異方性の理論」 三浦良雄（NIMS/阪大CSRN）

- ▶ 三浦先生は「磁性体デバイスにおいて重要な物性である磁気異方性は、スピン軌道相互作用から生じるが、電子構造の変化の解析からは本質的な理解は困難である」として、
- ▶ 結晶磁気異方性と直接的に結びつき、かつ放射光によるXMCD性やXLCDで観測可能な、軌道磁気モーメントや四極子モーメントなどの局所的な物理量と結晶磁気異方性の関係を述べ、
- ▶ Co/Pd(111)多層膜、fcc-Ni/BaTiO₃、L1₀-MnGa およびD0₂₂-Mn₃Ga、Fe/MgO、Fe/MgAl₂O₄ 界面を例として実験結果と対比しながら、それらの結晶磁気異方性の起源について述べた。



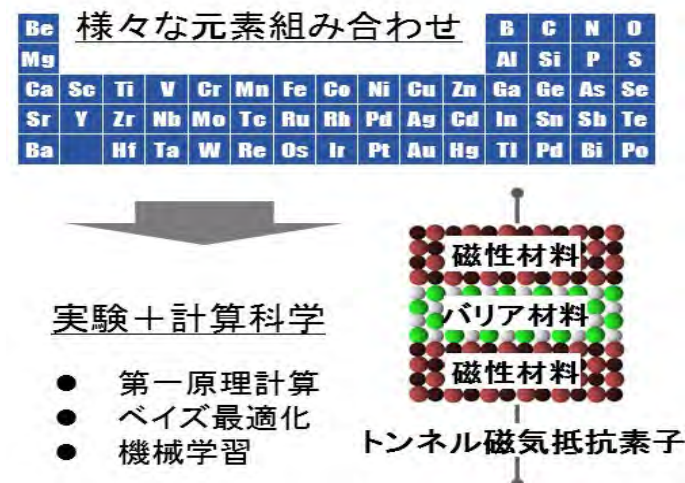
11p-S302-5 「物質chirality を基軸とするスピントロニクス」 戸川欣彦(阪府大)

- ▶ 戸川先生は、「カイラリティが関与する現象はしばしば自然科学におけるブレイクスルーとなり、関連分野に大きな進展をもたらしてきた。物質が示すカイラリティの重要性は化学や生化学では認識されているが、物性物理学ではあまり積極的に議論されていない」とし、物質カイラリティとスピンの関係に焦点をあてて議論を展開した。
- ▶ カイラル磁性結晶では反対称交換（Dzyaloshinskii-Moriya）相互作用に代表される微視的なカイラリティの効果が結晶全体に波及し巨視的スケールで物質応答が制御される様子を CrNb_3S_6 , $\text{Cr}_{1/3}\text{NbS}_2$ などを例に述べた。また、カイラル物質に誘導される巨大なスピン偏極応答を紹介し、**物質カイラリティ**が巨視的スケールでスピン応答を制御する鍵となることを示した。



11p-S302-7 「計算科学と連携したトンネル磁気抵抗素子材料の探索」 水上成美（東北大）

- ▶ 水上先生は「大きなトンネル磁気抵抗(TMR)効果を示す強磁性体／絶縁体／強磁性体三層構造からなるトンネル磁気抵抗素子(TMJ)はHDDの読み出しヘッド、MRAM、高感度磁気センサとして応用が進んでいるが、さらなる高速性や容量増大に向けたメモリ開発を進める上では、標準材料であるFeCoB やMgO バリア材料にとらわれない新しい材料の研究も求められる」として、第一原理計算＋ベイズ推定等を取り入れた材料探索の手法，ならびに機械学習といったデータ科学に基づく計算科学主導の材料探索の手法，これら二つの手法により主にTMR 効果に着目した材料探索について述べた。



11p-S302-8 「スキルミオンのブラウン運動とそれを用いたゼロエネルギー計算の試み」

石川諒(ULVAC協働研)

- ▶ 石川氏は、「磁性薄膜中に現れる磁気スキルミオンはトポロジカルに安定化した粒子状のドメインであり、室温で直径数十nm のものまで作れることが知られている。磁気スキルミオンを情報担体とすることによりBrownian 計算, Stochastic 計算, Reservoir 計算などが可能であることが議論されている」とし、Brownian 計算とスキルミオンボルツマンマシン(SBM)による超低消費エネルギー計算の試みについて紹介した。





- ▶ 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。