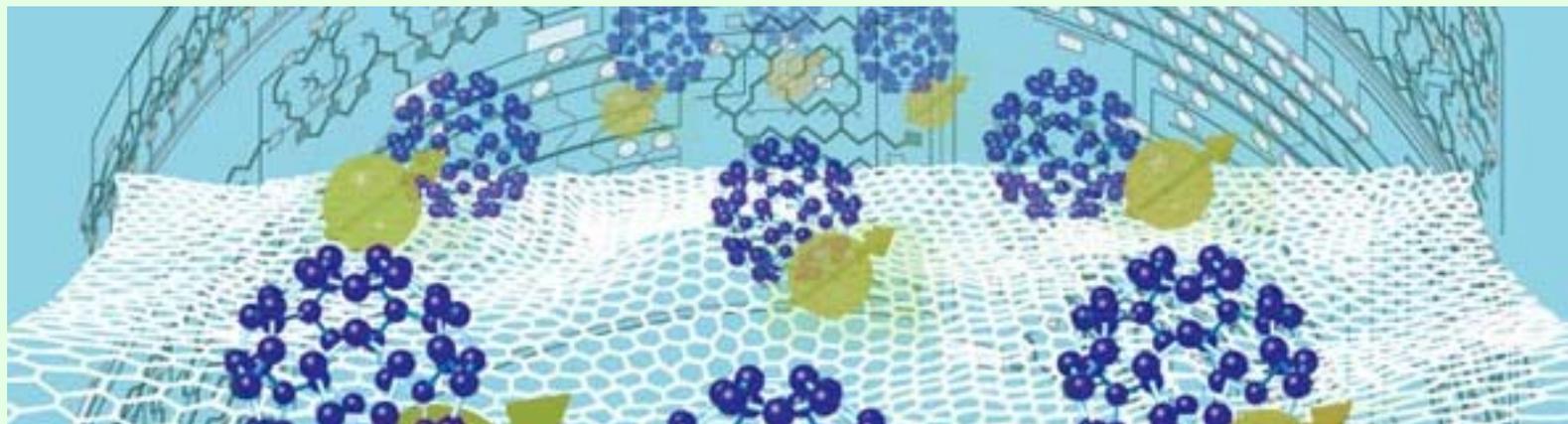


2007年12月14日応用物理学会結晶工学分科会年末講演会



# 結晶工学が拓く次世代材料

## —若手研究者への期待—

東京農工大学工学府／科学技術振興機構

佐藤勝昭



独立行政法人

科学技術振興機構

Japan Science and Technology Agency



# お話の目次

1. はじめに
2. いまスピントロニクスが熱い
3. いまふたたび化合物半導体
4. カーボンナノチューブ
5. 「さきがけ研究」佐藤領域について
6. おわりに

# Abstract

- シリコンテクノロジーは、微細化の限界を迎えつつあり、この限界を突破するためには、革新的なコンセプトによるデバイス、およびそれを実現するための材料が必要とされている。また、環境や省エネルギー、省資源に配慮したデバイスや材料へのニーズも高まっている。
- この講演では、私が個人的に興味をもっているスピントロニクスを中心に次世代材料につながる話題をとりあげ、現代的ニーズをもった材料開発のために結晶工学の役割がいかに重要であるかについて述べ、従来のコンセプトにとらわれない斬新な発想をもった若手研究者への期待を述べたい。

# 1. はじめに

Crystal Letters No.30「結晶工学分科会50周年記念特別号」において、藤崎幹事長(当時)は、

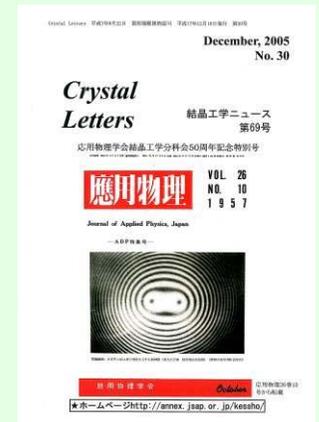
•日本の結晶工学が今日のエレクトロニクス隆盛に世界的な貢献を果たしたことはまぎれもない事実です。この発展を支えた仕組みは、ひたすら微細化を追求し製品の製造単価を下げることで市場を拡大し、その結果、エレクトロニクス産業は大きな利益を享受し、その利益をまた投資するというビジネスモデルでした。

その微細化技術も2020-2030年頃には物理的な限界を迎え、いままでのビジネスモデルが崩壊するのではないかと危惧されています。

と書き、

•いままでエレクトロニクスを支えることで飛躍的に発展してきた結晶工学もそろそろ別の土俵を探索する時期に近づいているといえるでしょう。…ちょうどADP研究会が設立されたころの初心に立ち戻り、逆境をバネに換え再発展の基礎を気づくべき時期かもしれません。

と結んでおられます。



# はじめに(つづき)

筆者は、同じCrystal Letters No.30の「結晶工学の未来」と題した小文の中で、

•結晶に対するこだわりを捨て、結晶工学が培ってきた技術を、結晶を含む**広範な材料科学**において活かしていくことが、発展の鍵であると信じている。

と書きました。

•結晶工学のノウハウは、半導体に限らず、さまざまな材料・デバイス開発・評価に大きな役割を果たすはずで

以下では、私がこのところ興味を持っているトピックスを紹介しながら、結晶工学が果たすべき役割についてのべて行きたいと思います。

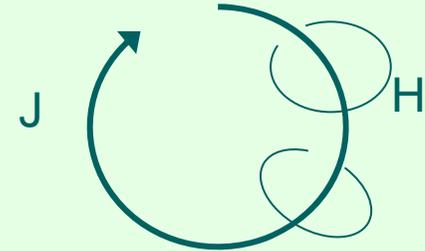
## 2. いまスピントロニクスが熱い

- 電気と磁気の相互変換：
  - コイルからスピントロニクスへ
- ナノサイエンスと磁性の出会い
  - 人工超構造における磁性体層間反強磁性結合の発見
  - 人工超格子において巨大磁気抵抗効果(GMR)を発見
- Spin Valve磁気ヘッドがハードディスクを変えた
- 交換相互作用さえも人工的に制御
- 室温での大きなトンネル磁気抵抗効果(TMR)の発見
- MgO単結晶バリアの採用→MRAM, TMR磁気ヘッド
- スピン注入磁化反転 の提案と実現

# 電気と磁気の相互変換

- 電気→磁気: アンペールの法則

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

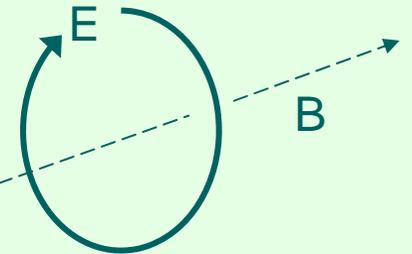


- 磁気→電気: ファラデーの電磁誘導の法則

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

いずれの変換にも電磁気学、

したがって、コイルが使われておりました



- あとで述べますように、スピントロニクスによって電気・磁気の相互変換をコイルなしで行う道筋が拓けてきました。

# 電気輸送現象への磁気の寄与は 1960年代から知られていた。

- NiのTc直下での抵抗の温度係数の増大: スピン2流体モデルとスピン散乱で説明された。
  - A. Fert and I.A. Campbell: Phys. Rev. Lett. 21 (1968) 1190.
- 強磁性体のAMR(異方性磁気抵抗効果)や異常ホール効果も1950年代から知られていた。
  - R.Karplus and J.M. Luttinger: Phys. Rev. 95 (1954) 1154
- しかし、そのころの認識では、これらは「作りつけ」の効果であって、人間が制御できるとは考えもしなかった。

# 異常ホール効果と異方性磁気抵抗効果

$$\rho_{\perp}(\mathbf{E}) = \rho_{\perp} + \rho_{\perp}^{(0)}(\mathbf{B})$$

$$\rho_{//}(\mathbf{E}) = \rho_{//} + \rho_{//}^{(0)}(\mathbf{B})$$

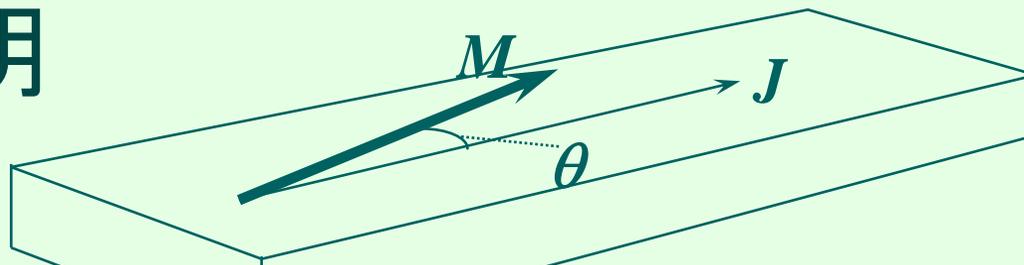
$$\rho_H(\mathbf{E}) = \rho_H + \rho_H^{(0)}(\mathbf{B})$$

第1項:磁化Mにのみよる項;異常項

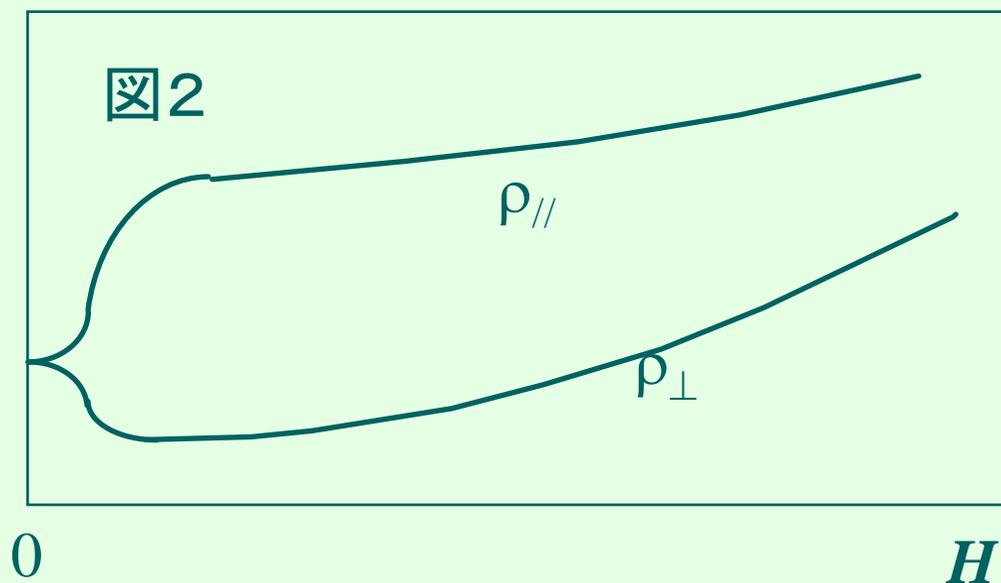
第2項:実効磁束密度Bに依存する項;正常項

- $\rho_{//}$ は、電流が磁化に平行である場合の抵抗率の $B \rightarrow 0$ 外挿値。 $\rho_{\perp}$ は、電流が磁化に垂直である場合の抵抗率の $B \rightarrow 0$ 外挿値。 $\rho_H$ は異常ホール抵抗率である。
- 一般に $\rho_{//} \neq \rho_{\perp}$ である。これは、抵抗が磁化 $M$ と電流 $J$ の相対的な向きに依存していることを示している。

# AMRの説明



- 図1に示すような配置を考え、 $M$ と $J$ のなす角度を $\theta$ とすると、MR比を求めると



$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\rho_{//} - \rho_{\perp}}{\frac{1}{3}\rho_{//} + \frac{2}{3}\rho_{\perp}}$$

磁気抵抗比の符号は正負どちらも取りうる。大きさは2-3%程度である。

## 2流体電流モデル(two current model)

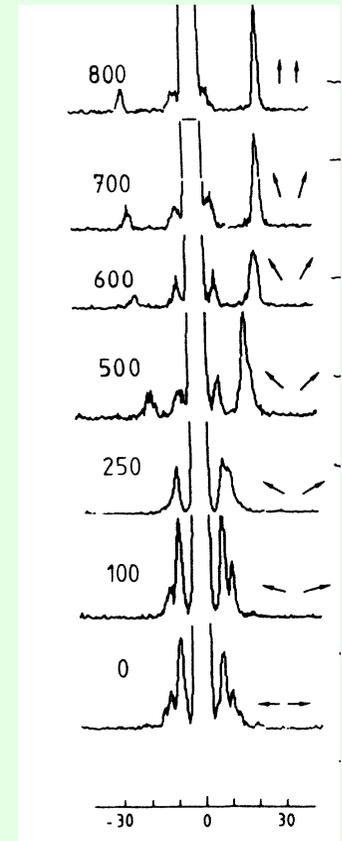
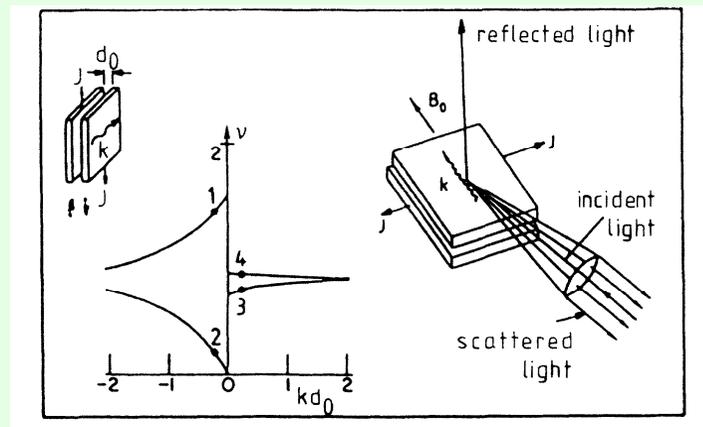
- スピン依存の散乱ポテンシャルを考え、電流は↑スピンと↓スピンの伝導電子[1]によってそれぞれ独立に運ばれると考える。散乱によってs電子がd電子帯に遷移するが、↑スピンd電子帯と↓スピンd電子帯では空の状態密度が異なるため、s電子はスピンの向きに応じて異なった散乱確率を感じるようになる
  - [1] 全磁化と平行な磁気モーメントを持つ電子(多数スピンバンドの電子)を↑で表し、反平行なもの(少数スピンバンドの電子)を↓で表す。

# ナノサイエンスと磁性の出会い(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のオーダーと長いとため、比較的大きなサイズの構造の段階で量子効果が現れましたが、磁性体の3d電子はnm程度の広がりしか持たないため、nm以下の精密な制御が可能になった80年代まで待たねばなりませんでした。

# ナノサイエンスと磁性の出会い(2)

- 1986年JuhlichのP.Grunbergらは、Fe/Cr(8 Å)/Feの構造において、magnon-Brillouin散乱法により、Feの2層のスピンの反強磁性的に結合することを発見しました。



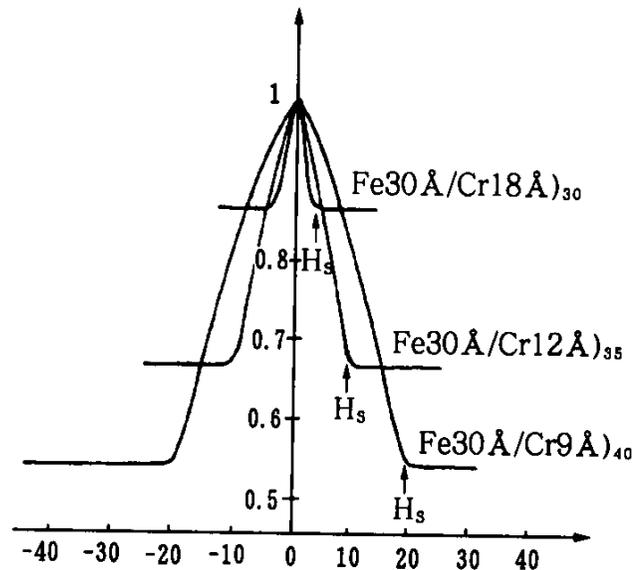
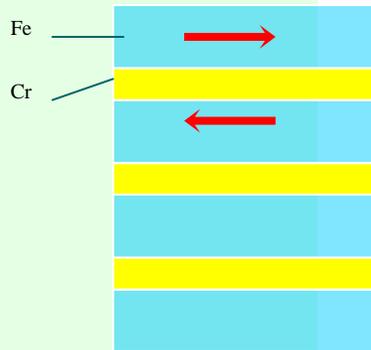
P. Grünberg, R. Schreiber and Y. Pang: Phys. Rev. Lett. 57 (1986) 2442.

# 巨大磁気抵抗効果(GMR)の発見(1)

- 1988年フェールのグループは、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と名付けた。



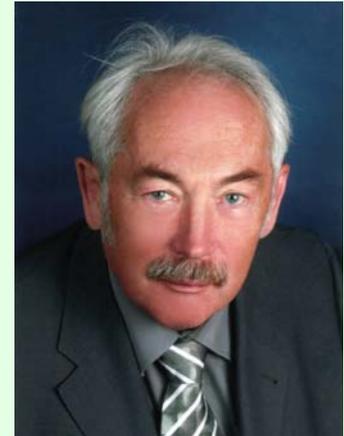
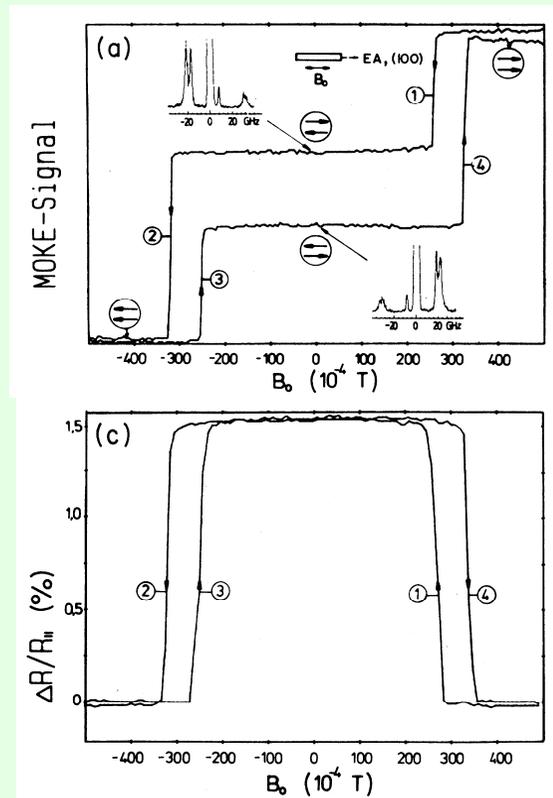
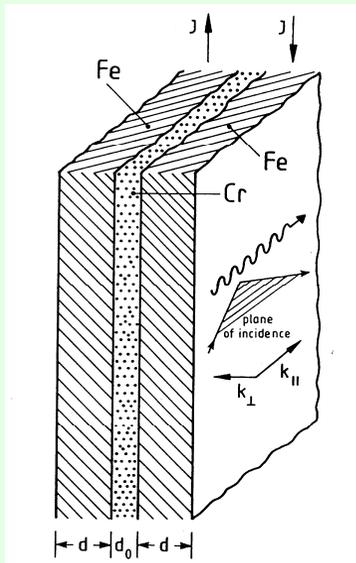
アルベール・フェール博士



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

# 巨大磁気抵抗効果(GMR)の発見(2)

- 同じ年、グリーンベルグのグループはFe-Cr-Feの3層膜でGMR効果を発見した。



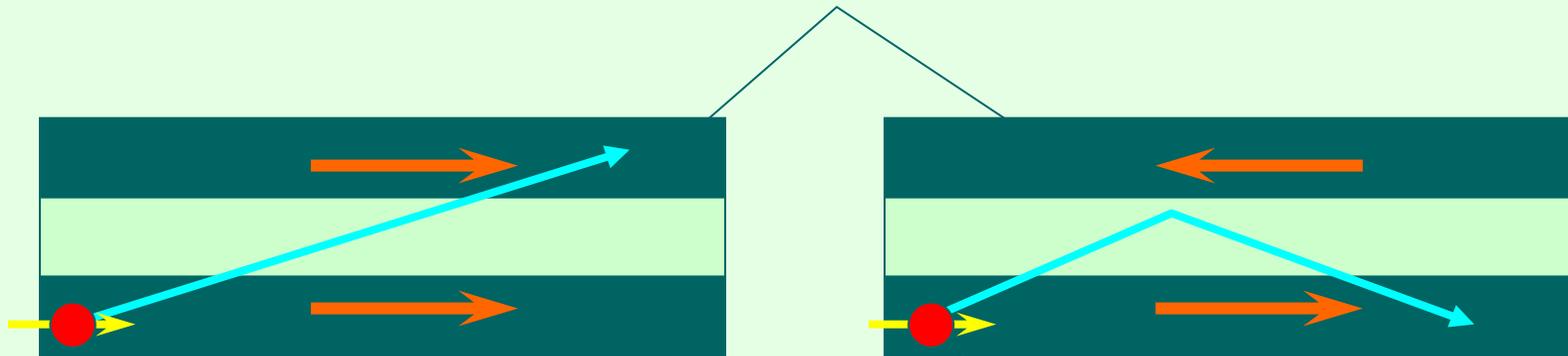
ペーター・グリーンベルグ博士

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

# GMR(巨大磁気抵抗効果)とは？

- 強磁性体(F1)/非磁性金属(N)/強磁性(F2)多層膜
- F1, F2平行なら抵抗小。反平行なら抵抗大。

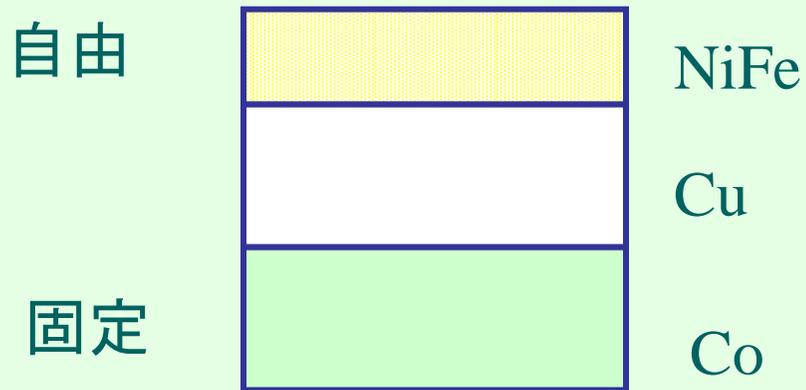
フリー層(外部磁界に応じて磁化の向きが変わる層)



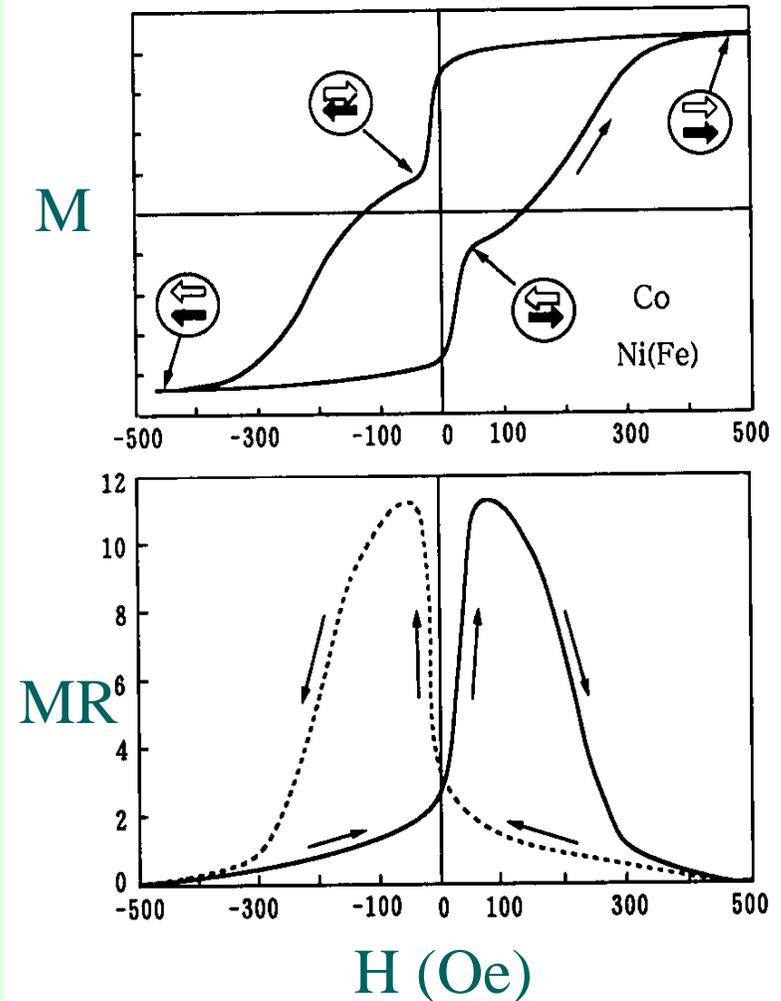
ピン層(外部磁界によって磁化の向きが変わらない層)

# 非結合系のGMR

- ソフト磁性体とハード磁性体との3層構造



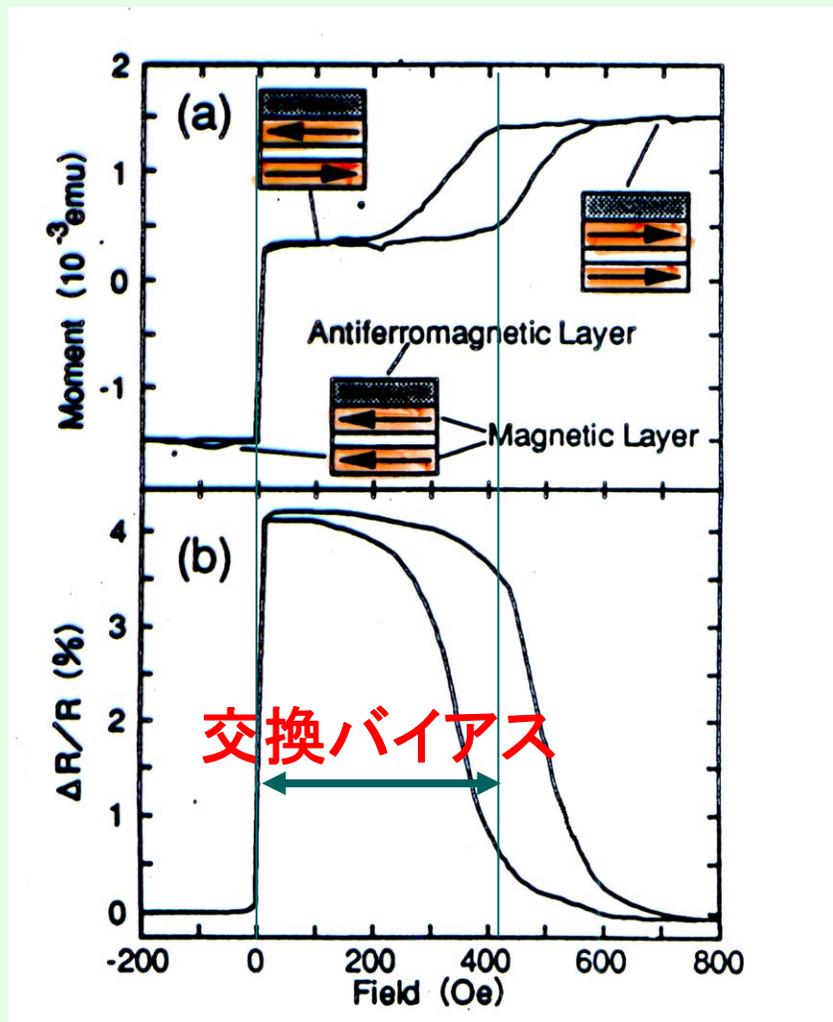
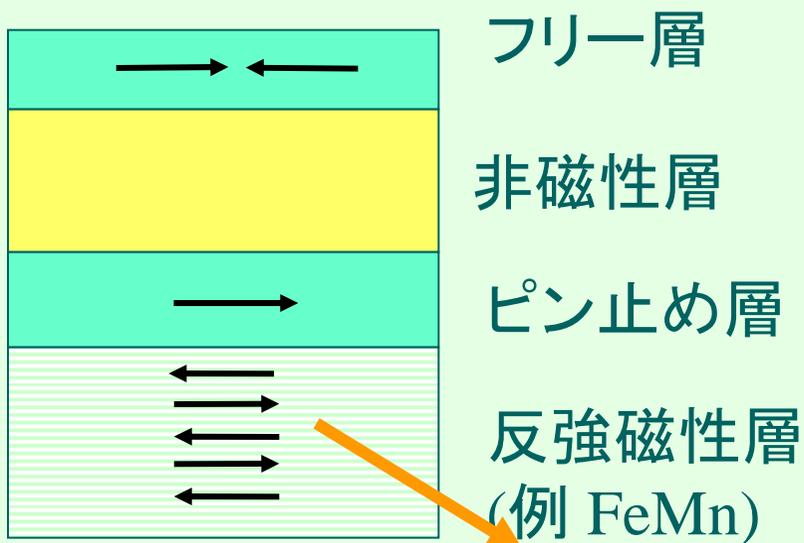
Shinjo et al.: JPSJ 59 (90) 3061



# スピンバルブ

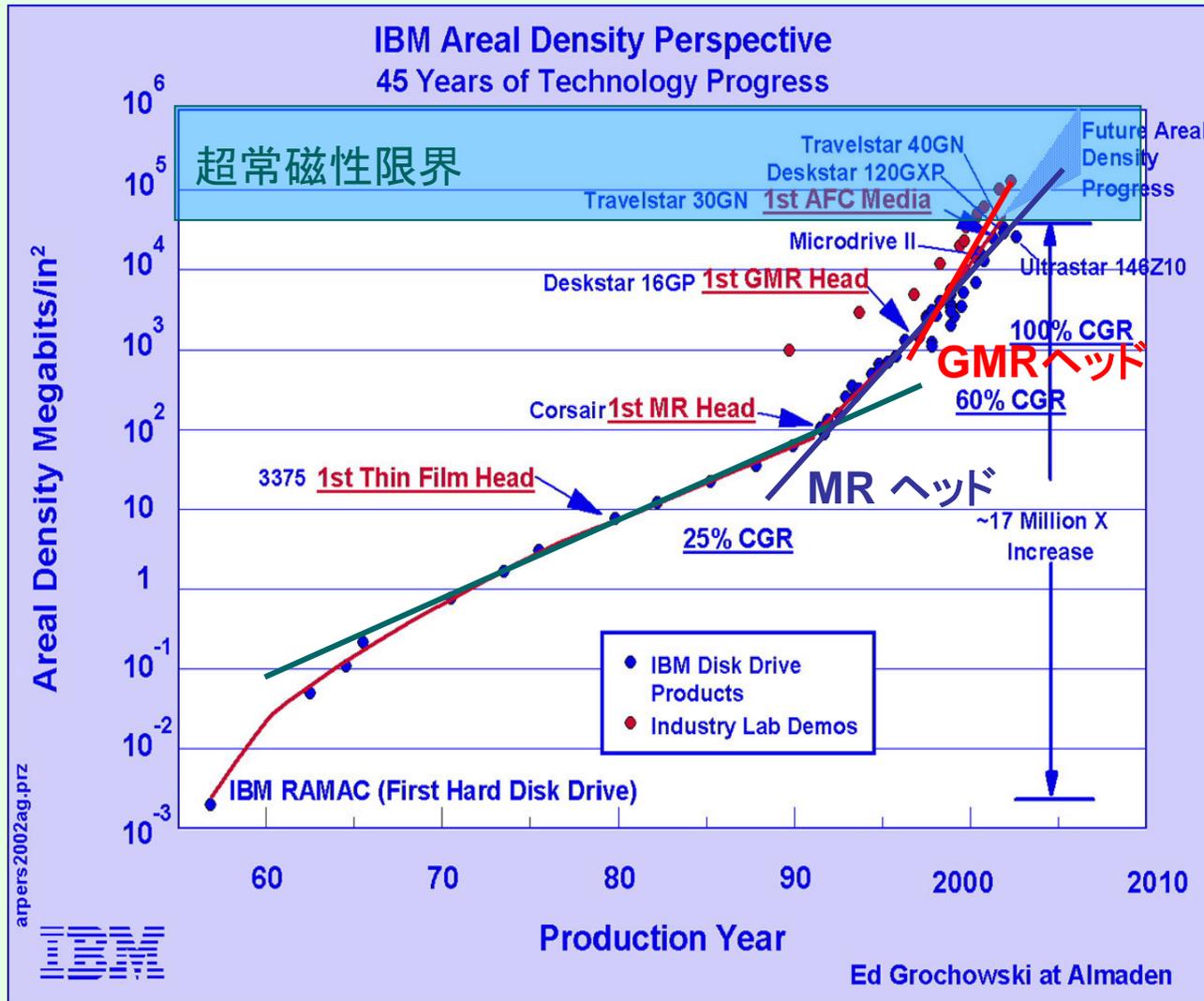
- NiFe(free)/Cu/NiFe (pinned)/AF(FeMn)の非結合型サンドイッチ構造

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



最近はSAF (Synthetic antiferromagnet) に置き換え

# 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の高密度化がそれまでの10年10倍のペースから10年100倍のペースに急展開しました。

# HDの記録密度の状況



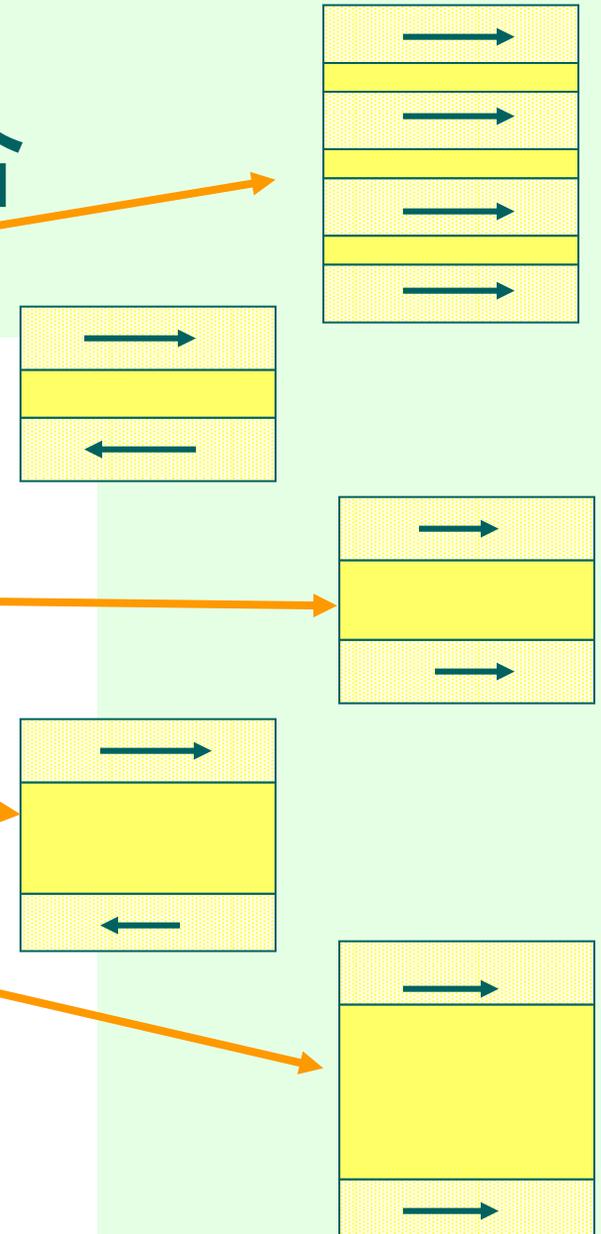
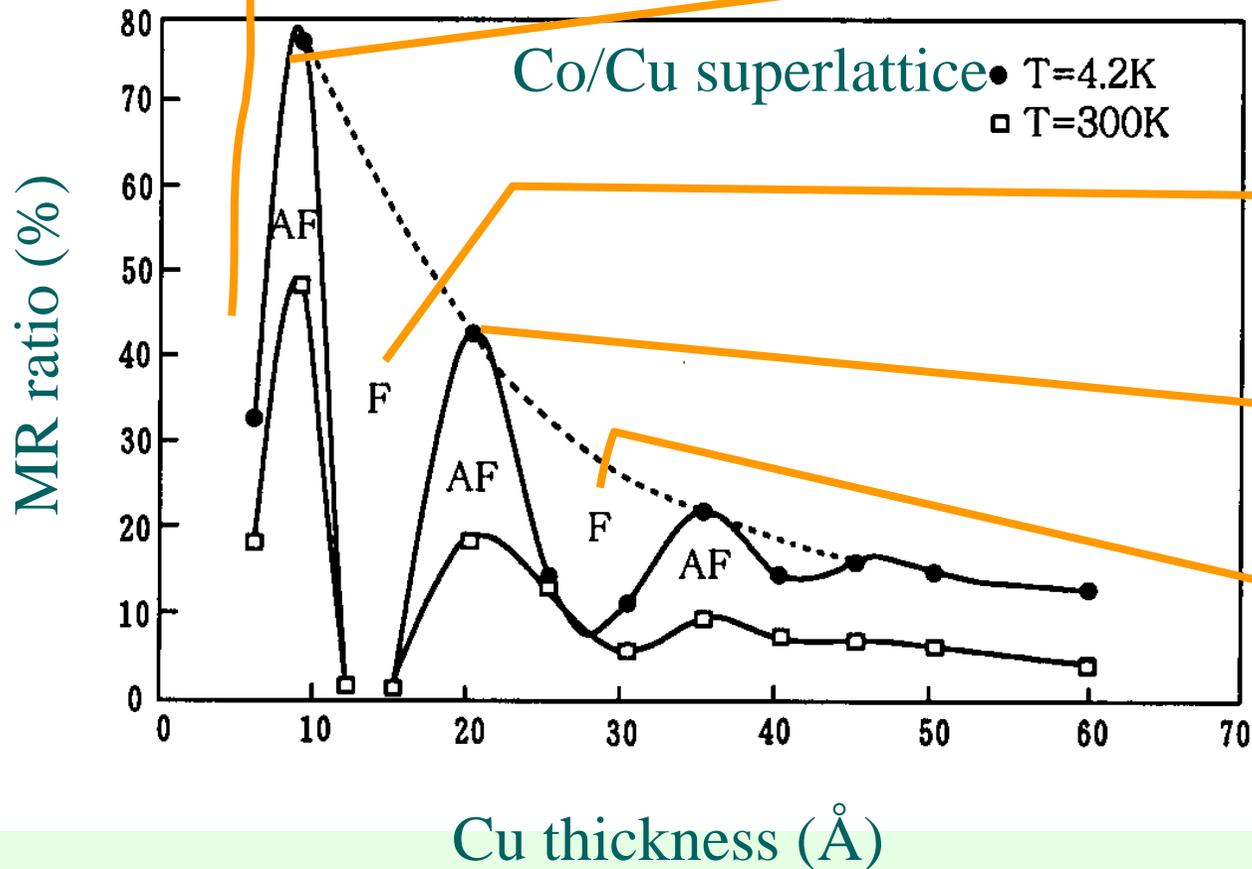
- HDの記録密度は、1992年にMRヘッドの導入によりそれまでの年率25%の増加率(10年で10倍)から年率60%(10年で100倍)の増加率に転じ、1997年からは、GMRヘッドの登場によって年率100%(10年で1000倍)の増加率となっています。
- **超常磁性限界**は、40Gb/in<sup>2</sup>とされていたが、AFC(反強磁性結合)媒体の登場で、これをクリアし、実験室レベルの面記録密度は2003年時点ですでに150 Gb/in<sup>2</sup>に達しました。しかし、面内磁気記録では十分な安定性を確保できず、市場投入された133Gb/in<sup>2</sup>を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

# 交換相互作用さえも人工的に制御

- 同じ時期に、磁性／非磁性の人工格子において、磁性層間に働く交換相互作用が非磁性層の層厚に対して数ナノメートルの周期で、強磁性→反強磁性→強磁性→・・・と振動的に変化することが発見されました[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



# にわかに注目されたTMR

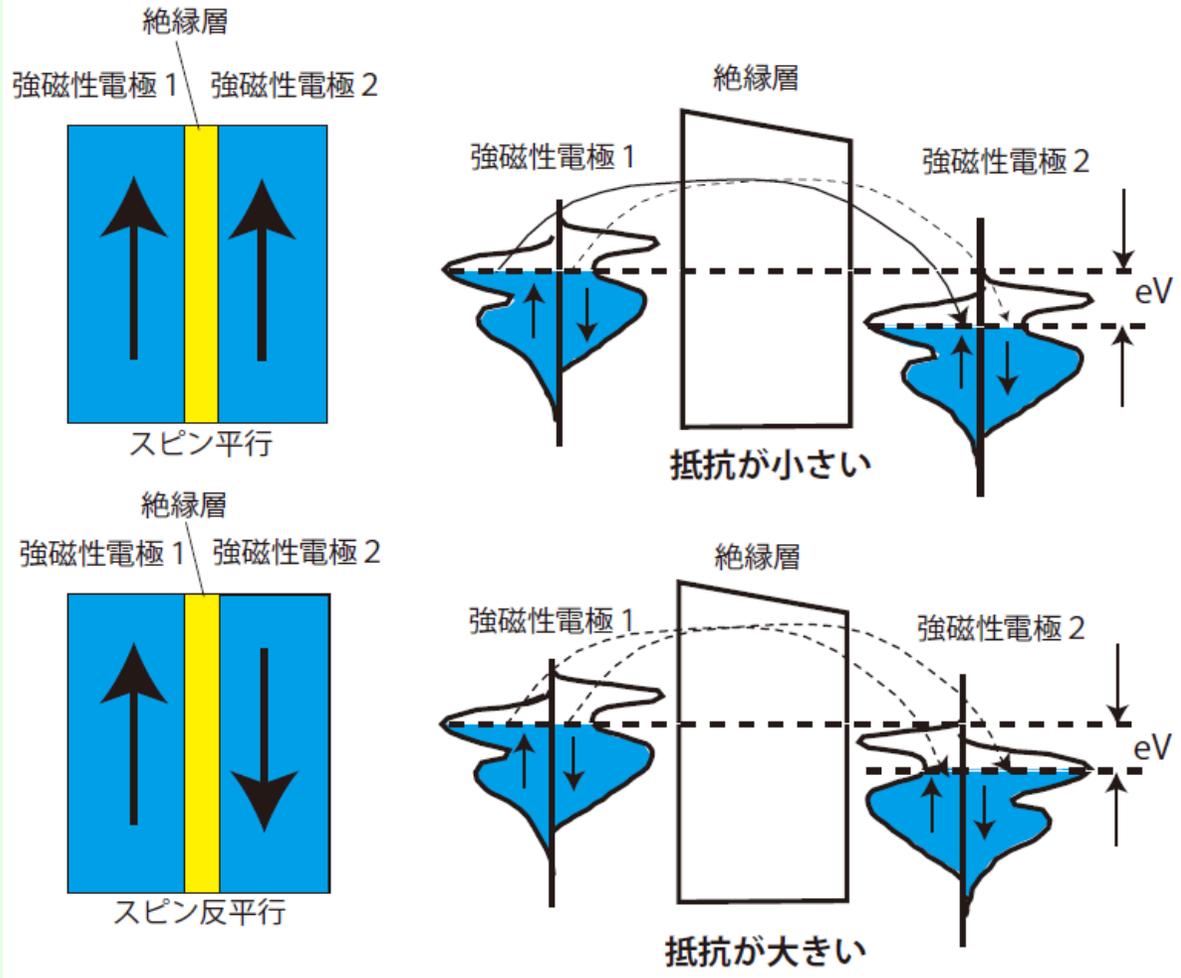
- 磁性と伝導の関係にさらなるブレークスルーをもたらしたのは、Miyazakiによる1995年の磁気トンネル接合(MTJ)における室温での大きなトンネル磁気抵抗効果(TMR)の発見で、TMR比[1]は18%におよびました[2]。
  - [1] TMR比は、向かい合う2つの磁性層の磁化の向きが磁化の向きが平行のときの抵抗 $R_{\uparrow\uparrow}$ と反平行のときの抵抗 $R_{\uparrow\downarrow}$ との差を平行の抵抗で割った百分比で表されます。 $TMR(\%) = (R_{\uparrow\uparrow} - R_{\uparrow\downarrow}) / R_{\uparrow\uparrow} \times 100$
  - [2] T. Miyazaki, N. Tezuka: J. Magn. Magn. Mater. 139 (1995) L231.

# 磁気トンネル素子(MTJ)

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

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

# TMR(トンネル磁気抵抗効果)の原理



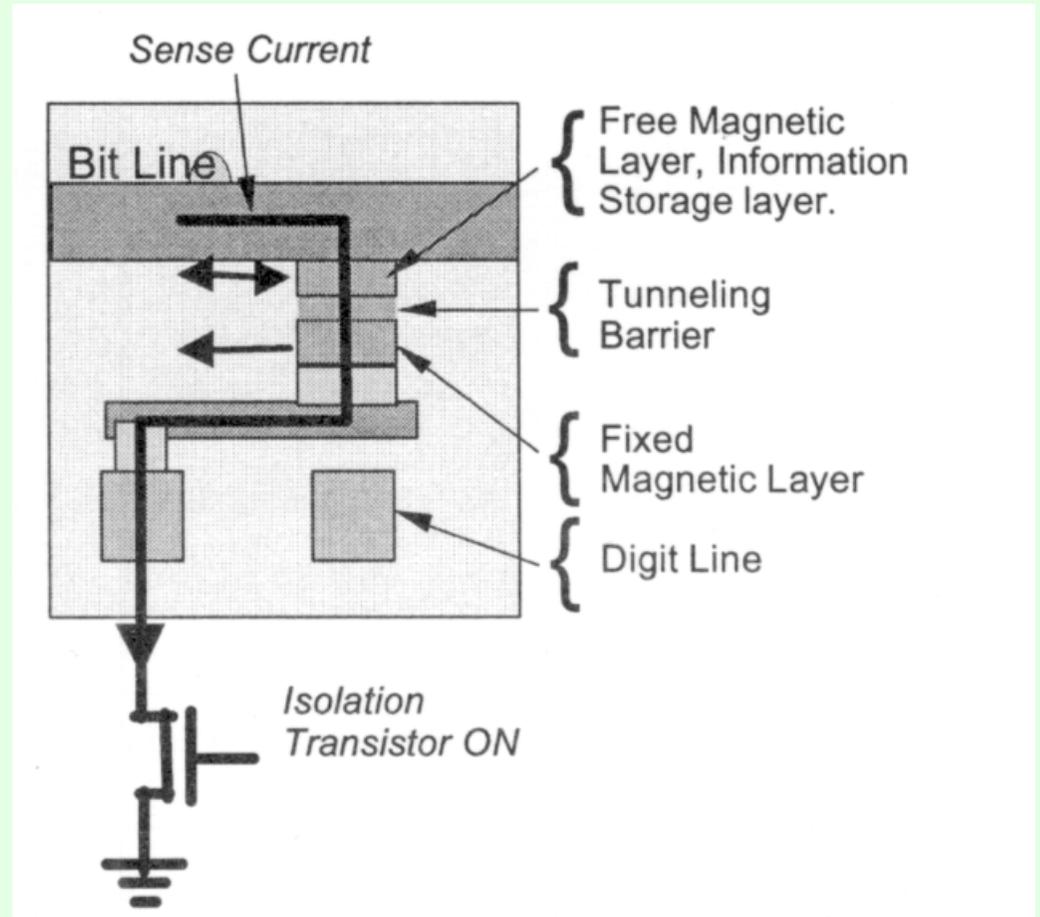
- TMRは磁性体のバンド構造を使って説明されます。
- フェルミ面における状態密度が上向きスピと下向きスピとで異なります。
- 両電極のスピが平行だと、状態密度の大きな状態間の電子移動により低抵抗になります。
- 反平行だと、大きな状態と小さな状態の間の移動なので高抵抗になります。

# MRAM(磁気ランダムアクセスメモリ)

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

# TMRを用いたMRAM

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



# MRAMの回路図

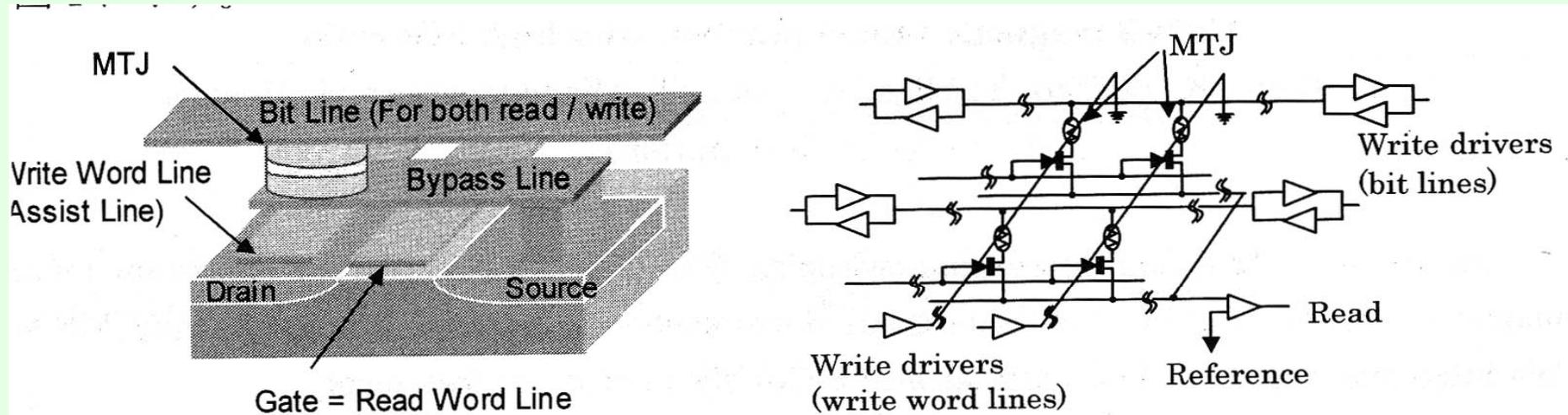


Fig. 1 Schematic of 1T1J type MRAM

- 鹿野他:第126回日本応用磁気学会研究会資料p.3-10

# MRAM と他のメモリとの比較

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

# MgO単結晶バリアの採用でブレークスルー

•2004年、TMRは革命的なブレークスルーを迎えます。Yuasaらはそれまで用いられてきたアモルファスAl-Oに代えてMgO単結晶層をトンネル障壁に用いることで、200%におよぶ大きなTMR比を実現しました[i]。その後もTMRは図1のように伸び続け、最近では**500%**に達しています[iii]。

–[i] S. Yuasa, A. Fukushima, T. Nagahama, K. Ando, Y. Suzuki: Jpn. J. Appl. Phys. 43 (2004) L588.

–[iii] Y. M. Lee, J. Hayakawa, S. Ikeda, F. Matsukura, H. Ohno : Appl. Phys. Lett. 90 (2007) 212507.

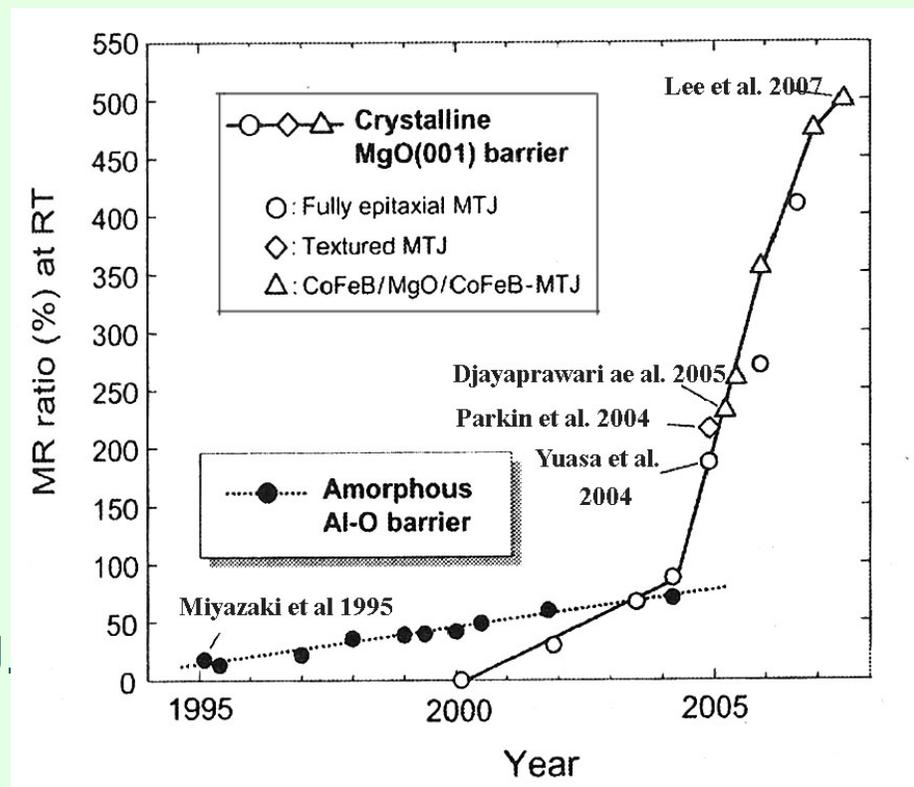


図1. トンネル磁気抵抗効果の進展のグラフ  
[S. Yuasa: 第45回茅コンファレンス予稿集 (2007.8.19) p.19]

# 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の分極率 $P$  ( $i = 1, 2$ )を用いて次のようなJullierの式で表されます。[1]

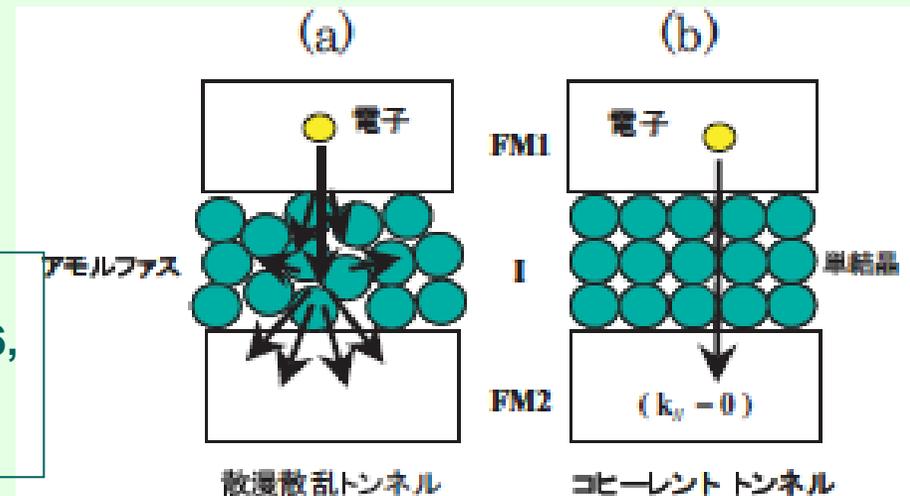
$$-TMR = 2P_1P_2 / (1 - P_1P_2)$$

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

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

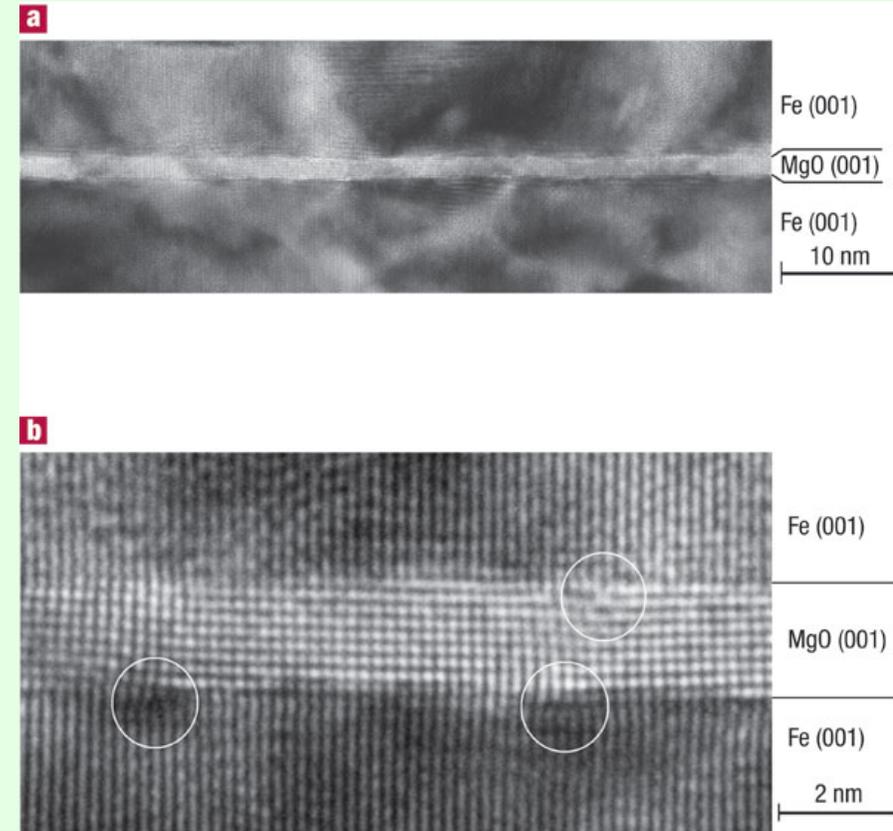
[1] M. Jullier, Phys. Lett. 54A, 225 (1975).

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



# 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。

# スピン注入磁化反転の提案と実現

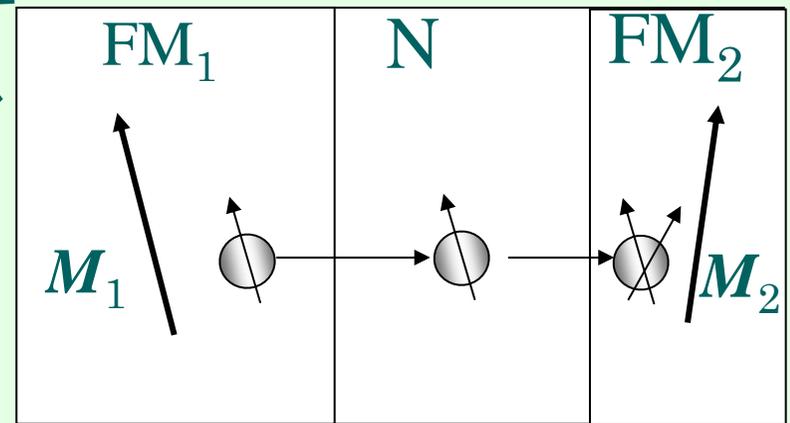
- 1999年、新たなスピントロニクス分野としてスピン注入磁化反転のアイデアがSlonczewski[i]およびBergerら[ii]によって提案され、実験的に検証されました[iii]。強磁性電極からスピン偏極した電流を反平行なスピンをもつ対極強磁性電極に注入すると、スピン角運動量のトルクが対極電極の磁化にトランスファーされて磁化反転をもたらすというのです。
  - [i] J. Slonczewski: J. Magn. Magn. Mater. 159 (1996) L1.
  - [ii] L. Berger: Phys. Rev. B 54 (1996) 9353.
  - [iii] E. B. Myers, D. C. Ralph, J. A. Katine, R. N. Louie, R. A. Buhrman: Science 285 (2000) 865.

# スピン注入磁化反転の説明

•電子は強磁性電極 $FM_1$ から非磁性電極 $N$ を介して強磁性電極 $FM_2$ に流れ、スピン各運動量を伝達して $FM_2$ の磁化を反転させる。 $FM_1$ 、 $FM_2$ の磁化をそれぞれ、 $M_1$ 、 $M_2$ とする。 $M_1$ と $M_2$ とは互いに角度をなして配置している。

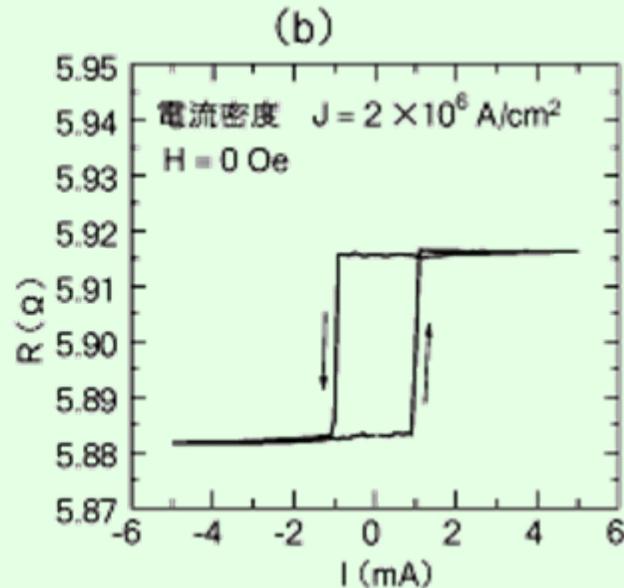
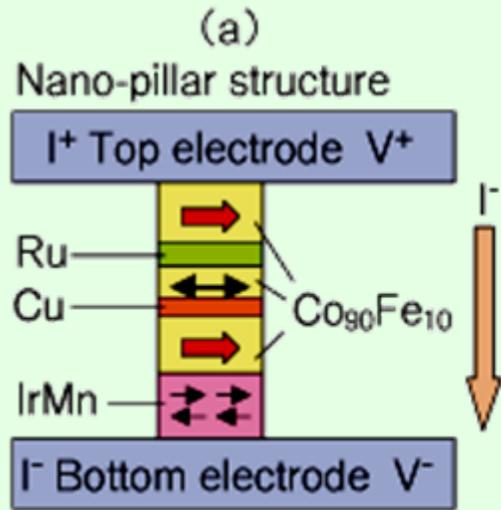
•この素子に電圧を加えて電流を流すと、伝導電子のスピンは $FM_1$ において $M_1$ 方向に偏極し、その向きを保持したまま非磁性層 $N$ を透過し $FM_2$ に入る。

•ここで、伝導電子は $FM_2$ の磁気モーメント $M_2$ 方向に再偏極を受けるが、この過程でスピン各運動量は保存されなければならないので、再偏極の過程で失った成分は $M_2$ に移行してトルクとして働く。



スピン注入磁化反転の概念図

# スピン注入磁化反転の実例



- 猪俣らの研究グループは、IrMn/Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>/Cu/Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>/Ru/Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>素子
- (図a)を作成し、スピン注入磁化反転の動作実験をした

- この素子に直接電流を流したところ(スピン注入)、電流の方向によって中央のCo<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>合金層のスピン向きが反転し、磁化が反転することが観測された(図b)。

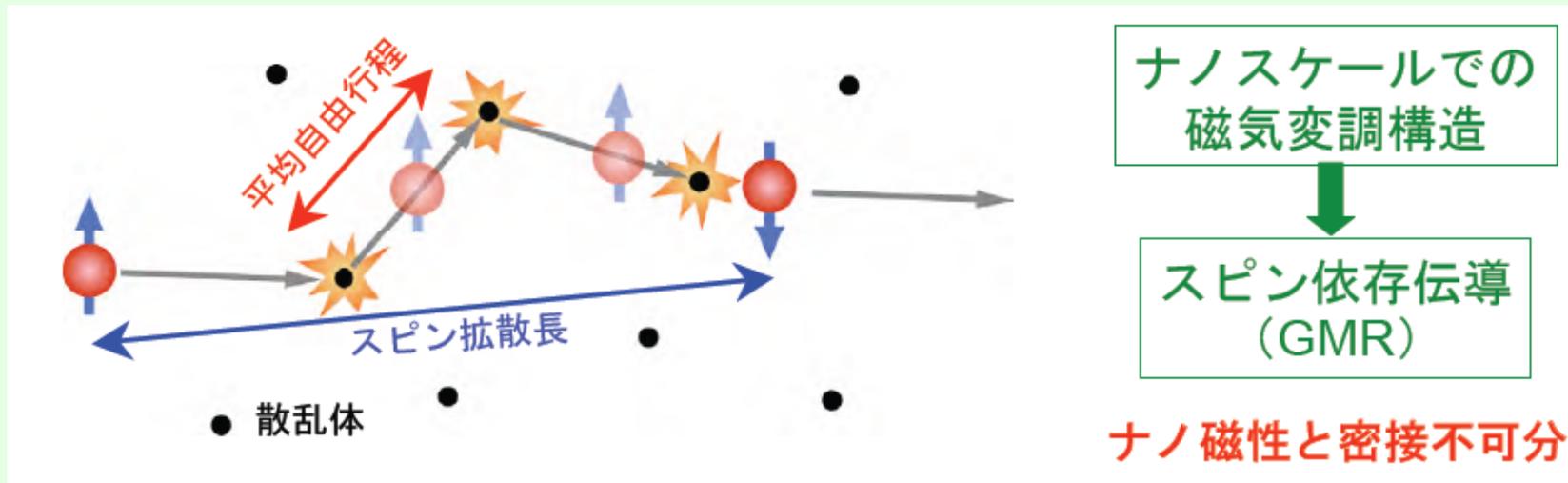
# コイルによらず電流を磁気に変換

- 当初はGMR素子によって $10^7$ - $10^8$ A/cm<sup>2</sup>という大電流密度を必要としたので実用は無理であろうと言われましたが、現在ではMgO-TMR素子を用いて $10^6$ A/cm<sup>2</sup>台の実用可能な電流密度にまで低減することができるようになりました[1]。
- これまではMRAMの記録のためには電流を流してそれが作る磁界で磁化反転をして記録していたので電力消費が集積化のネックでしたが、スピントルクを使うとMTJ素子に電流を流すことによって磁化反転できるので、高集積化が可能になります。
- かくして、ついに**人類は、コイルによらずに、電気を磁気に変換することに成功したのです。**

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

# 大きなトピックス:「スピン流」

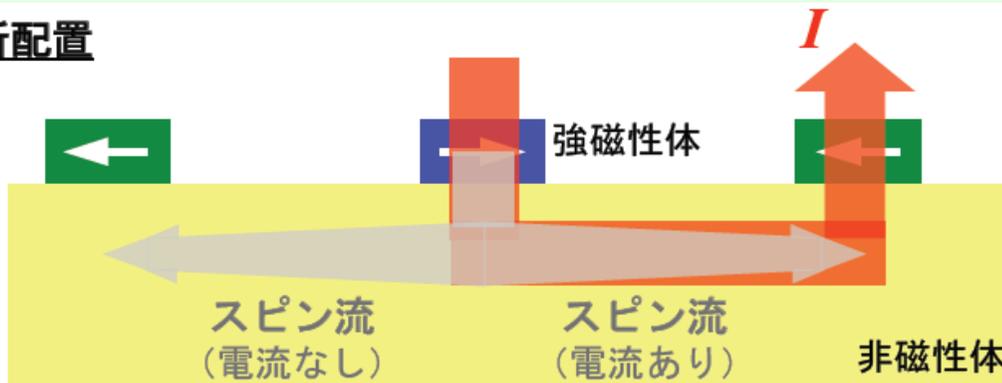
- 電荷の流れとしての電流は、平均自由行程(1-10nm)で表される散乱を受けますが、スピンの流れは電子の不純物やフォノンとの衝突の際にあまり散乱を受けないためスピン拡散長は平均自由行程よりかなり長く、強磁性金属で5-10nm、非磁性金属では100nm-1 $\mu$ mもあります。
- 非磁性の誘電体ではmmに達するものもあります。



図は東北大高梨弘毅先生のご厚意による

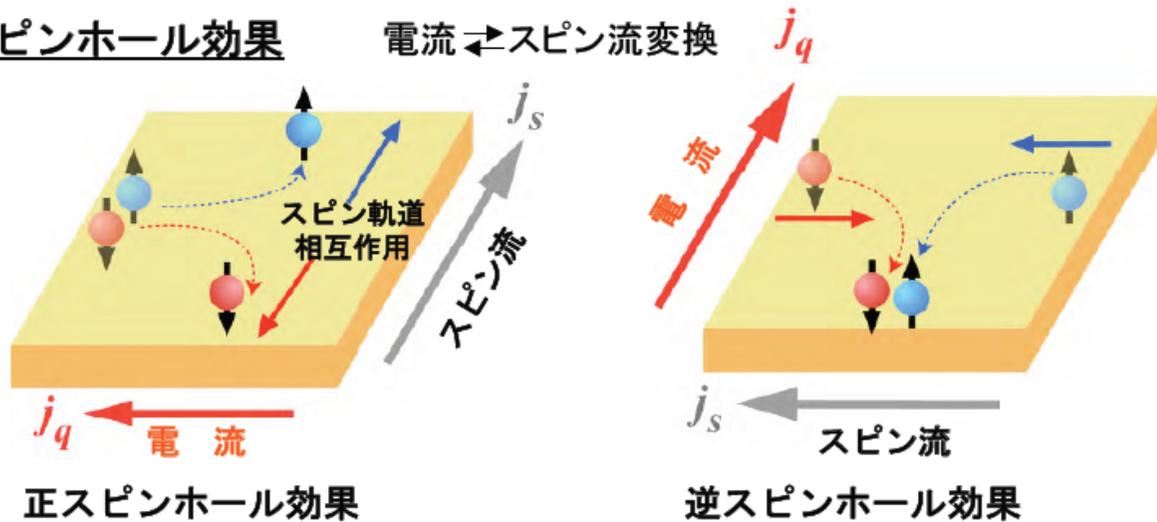
# スピン流と電流

## 非局所配置



## スピンホール効果

電流  $\leftrightarrow$  スピン流変換

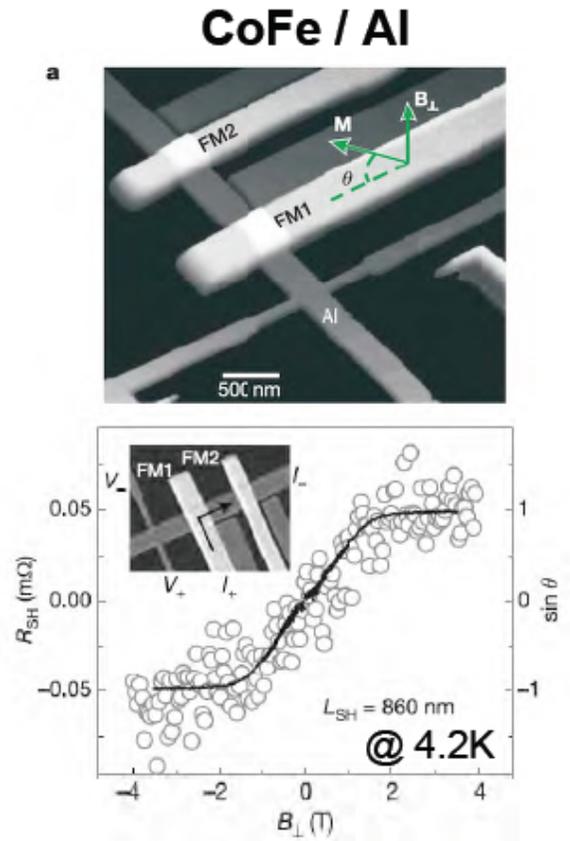


- スピン流をうまく使えば、散逸の影響を受けずに情報を伝えることができるはずです。
- スピン流の性質を端的に表しているのがスピンホール効果です。普通のホール効果は磁界下に置かれたキャリアがローレンツ力で電流に垂直な方向に曲げられる効果ですが、スピンホール効果では、電流が流れるだけで、スピン軌道相互作用の効果で上向きと下向きのスピンの左右に分離され、電流と垂直方向にスピン流を生じるのです[1]。

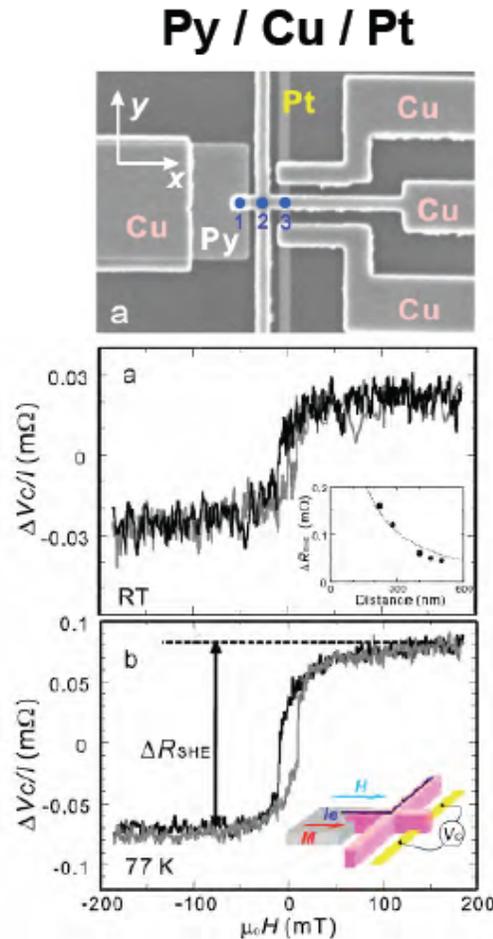
[1] S. Murakami, N. Nagaosa, S.C. Zhang: Science 301 (2003) 1348.

図は東北大高梨弘毅先生のご厚意による

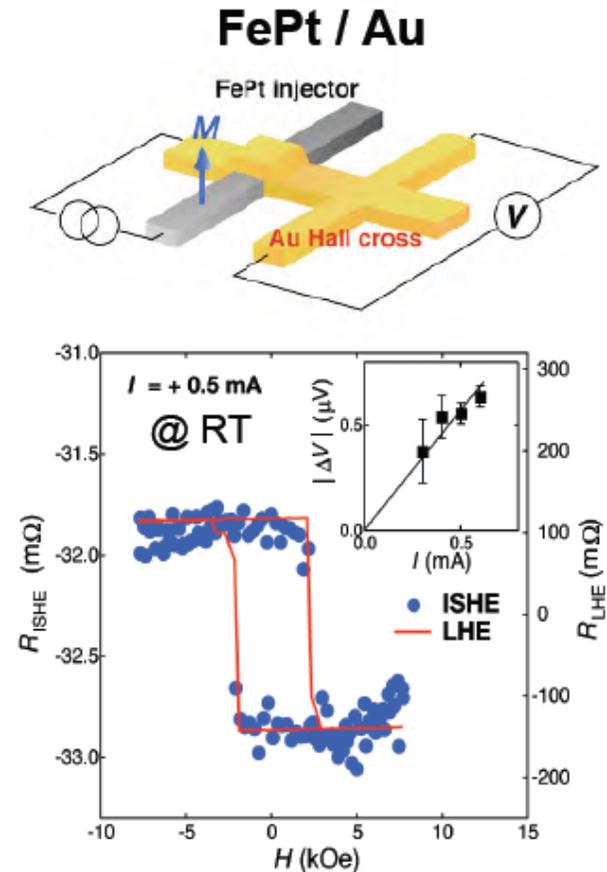
# スピンホール効果：最近の実験結果



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



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

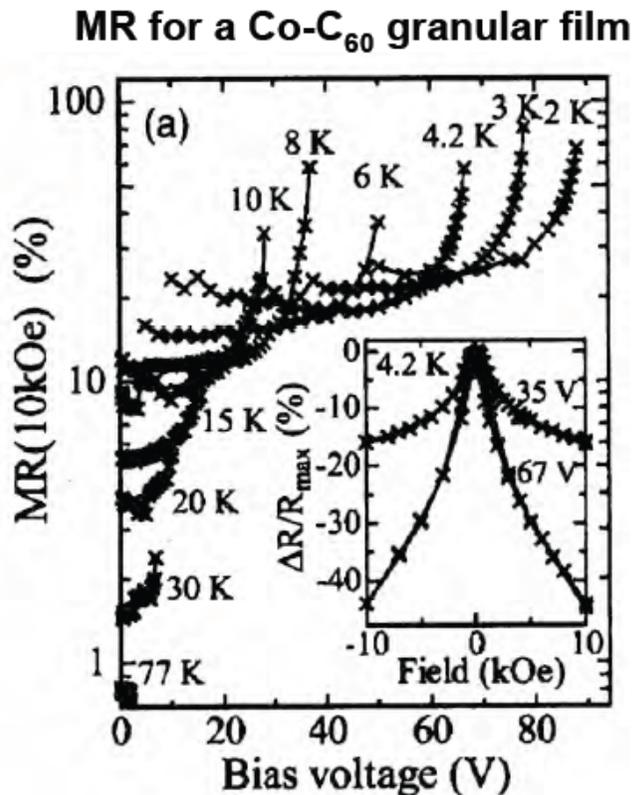


$$\alpha_H \sim 0.1$$

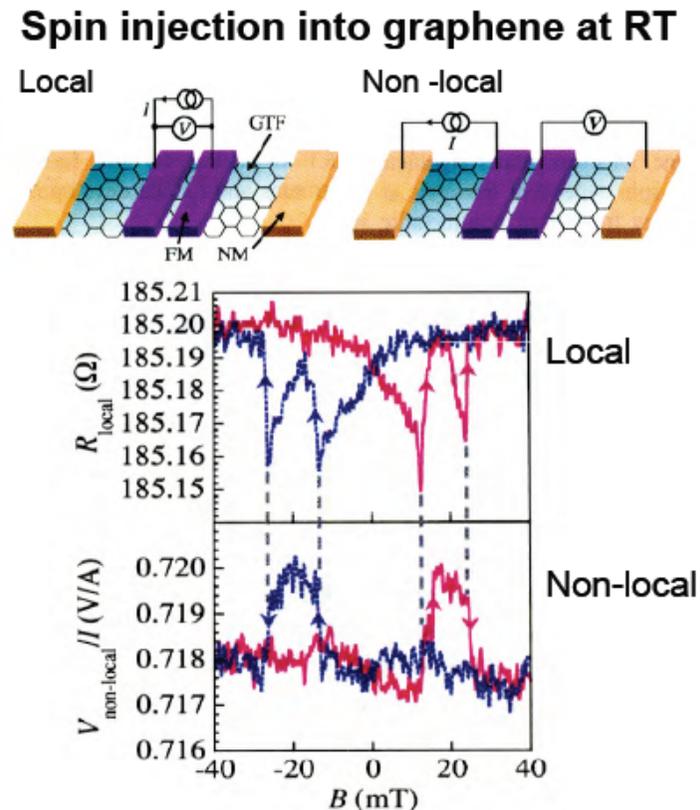
T. Seki *et al.*, **14pC-11**

# 分子スピントロニクス

- フラーレン、グラフェン、ルブレンなどにおいては、スピン軌道相互作用の小さな炭素をスピン流が流れるので、スピン拡散長がきわめて長いので、大きなMR効果、スピン蓄積効果が期待されます。



S. Sakai *et al.*, Appl. Phys. Lett., 89 (2006) 113118.  
境誠司ら, 13aC-12.



M. Ohishi *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., 46 (2007) L605.  
白石誠司ら, 14pC-10.

# 磁性半導体の展開

- 1991年、Munekata, Ohnoらは低温MBE成長によってInAsに大量のMnを添加することによってキャリア誘起強磁性を発現することに成功しました[i]。
- Ohnoは1996年にGaAs:Mnにおいてキュリー温度( $T_c$ )が120Kの強磁性を発見しました[ii]。  $T_c$ は、結晶成長技術の進展によってどんどん高くなり、 **$\delta$ -ドーピングによって250Kにまで高くなっています** [iii]。
- 特筆すべきは、磁性半導体をLED構造へのスピン注入電極として用い、発光の円偏光性が制御できることがOhnoグループと Awschalomのグループの共同研究によって明らかにされたり [iv]、InMnAsの磁性がキャリア誘起であるために、FET構造を作ることによって、キャリア密度を制御し、そのキュリー温度、ひいては磁化をゲート電圧で制御できたりすることです [v]。
- **ここでもコイルを使わずに電氣的に磁性を制御できることが実証されています。** 金属系と同様のトンネル接合が磁性半導体でもできています。Tanakaらは磁性半導体を用いてTMR素子を作ること的成功しております [vi]。そして、磁性半導体の場合、 $10^5 \text{ A/cm}^2$  台の低い電流密度で磁壁を動かせることが確認されています [vii]。

- [i] H. Munekata, H. Ohno, S. von Molnar, A. Segmüller, L.L. Chang, L. Esaki: Phys. Rev. Lett. 63 (1989) 1849.
- [ii] H. Ohno, A. Shen, F. Matsukura, A. Oiwa, A. Endo, S. Katsumoto, Y. Iye: Appl. Phys. Lett. 69 (1996) 363.
- [iii] A. M. Nazmul, T. Amemiya, Y. Shuto, S. Sugahara, M. Tanaka: Phys. Rev. Lett. 95 (2005) 17201.
- [iv] Y. Ohno, D.K. Young, B. Beschoten, F. Matsukura, H. Ohno and D.D. Awschalom, Nature **402** (1999) 790.
- [v] H. Ohno, D. Chiba, F. Matsukura, T. Omiya, E. Abe, T. Dietl, Y. Ohno, K. Ohtani: Nature **408** (2000) 944.
- [vi] M. Tanaka and Y. Higo: Phys. Rev. Lett. 87 (2001) 026602.
- [vii] 千葉大地, 北智洋, 山ノ内路彦, 松倉文礼, 大野英男: 日本応用磁気学会第145回研究会資料「スピン流駆動デバイスの最前線」(2006.1)p.7.

# 熱い視線を浴びる発展途上分野

- このように、スピン注入、スピン蓄積、スピン緩和などスピン流の制御は、CMOSに代表されるSiのデバイスが限界を迎えつつあるいま、それに代わる新しい革新的次世代デバイス技術の芽として熱い視線を浴びているのです。
- スピン科学は、ナノという舞台を得て、大きく育ちつつあります。Nagaosaは、強磁性体における異常ホール効果をベリー位相という量子論の深淵のコンセプトで説明し、彼は固体の中に宇宙論が成立すると言っています[1]。
- この分野は進歩が速すぎて一時も目が離せないほどです。理論と実験がかみ合って、新しい世界が開かれる予感を感じます。

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

# 3. いまふたたび化合物半導体

- いま、シリコンの限界が近づいたと言われているのですが、1980年代にもシリコンの限界が叫ばれ、ポスト・シリコン材料としてIII-V族化合物半導体が救世主になるとしてもはやされたた時期がありました。
- 多くの気鋭の研究者が参入し、III-V族の電子デバイスは大きな進展を見せました。特に、エピタキシャル成長技術の確立によって半導体超構造の作製が可能となり、それとともに界面における電子状態の解明が進み、それを利用した電子デバイスとしてHEMTが実用化されました。現在のように、GHzを超える超高周波が私たちの身近な生活に当たり前のように使われる状況は、III-V族半導体電子デバイスなくしてはあり得なかったでしょう。
- また、III-V族は直接遷移型バンドギャップをもつということから、光エレクトロニクス、特に、半導体レーザの分野において不動の地位を築きました。このことは、まさに、結晶工学の果実といっても過言ではないでしょう。

# Siに勝てなかったIII-V電子デバイス

- これまで、シリコンテクノロジーは、実にしぶとく、限界を超えてきました。
- これに対し、化合物半導体は、MOS構造が作れないという根本的な問題を克服できず、電子デバイスにおいてシリコンに代わるというパラダイムシフトは起きませんでした。
- その結果バルク単結晶への市場のニーズは伸びず、参入した多くの会社が手を引いてしまいました。電子デバイスに使えないとなると、バルクGaAs結晶への熱もさめ、GaAs基板単結晶の欠陥密度はいまだにシリコンのレベルには遠く及ばない状態のままです。

# シリコンの粘り

- 一方のシリコンテクノロジーも、メタルゲート・高誘電率絶縁膜スタック技術、浅い接合技術などさまざまな工夫により、ポスト・スケーリング技術を開発して、限界を突破しようとしています。
- 化合物の再登場を本気で求めるのであれば、バルク成長の基礎に帰って徹底的に結晶性の改善と、シリコンMOSに代わり得る革新技術の開発を図ることが必要でしょう。

# ワイドギャップ半導体への期待と要望

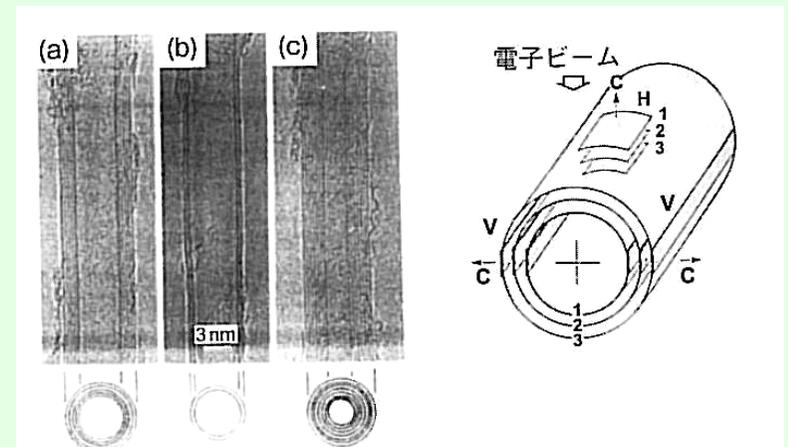
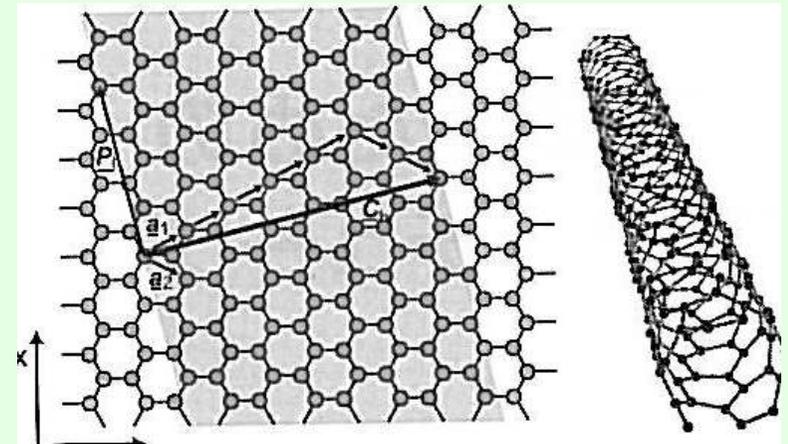
- 光エレクトロニクスにおいて確固たる地位を築きつつあるGaNをはじめとするワイドギャップの化合物半導体は、高い電子飽和速度をもち、温度耐性も高く、次世代高速電子デバイス・大電力デバイスとして大いに期待されています。
- ワイドギャップ半導体を電子デバイスに使うための基礎研究も進んできました。
- しかし、GaNやZnOをシリコンに代わる電子デバイスとして用いるには、結晶性の大幅な改善が必要でしょう。これらの結晶性は、上に述べたGaAsに比べてさえ大きな遅れがあります。
- 半導体デバイスのブレークスルーは、常に結晶工学の進展によってもたらされたことは、歴史の教えるところ です。若手の結晶工学研究者のチャレンジを期待します。

# 4. カーボンナノチューブのエレクトロニクス

•カーボンナノチューブ(CNT)は、Iijimaによって炭素繊維の高分解能電子顕微鏡観察の際に発見されました[1]。CNTは、グラファイトの1枚の層であるグラフェンを短冊状に切って丸めて作った継ぎ目のない円筒です。(グラフェン内では炭素原子は蜂の巣状の六方晶格子を作って配列しています。)これを単層ナノチューブ(SWNT)といいます。

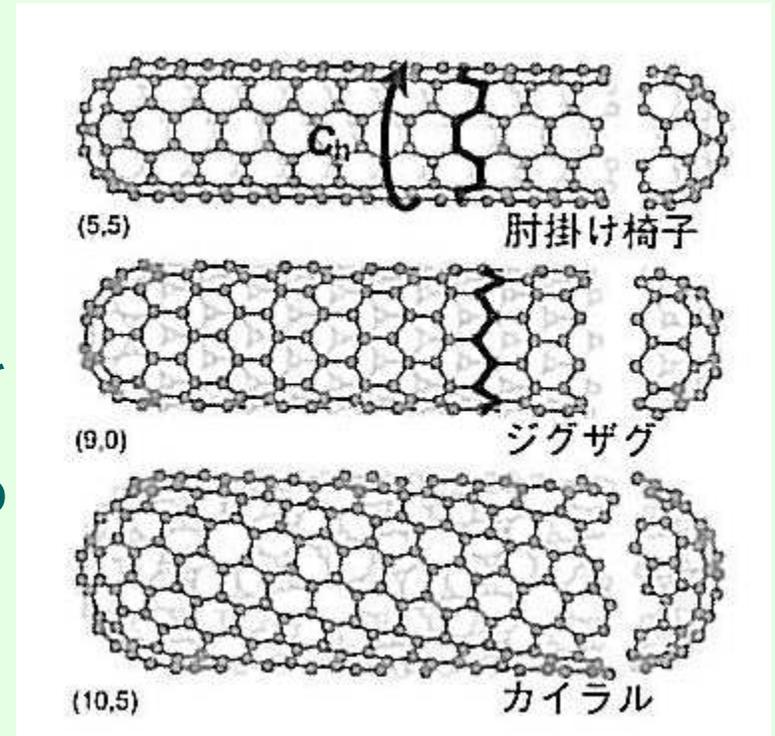
•多数の円筒がぴったりと重なって入れ子になっている多層ナノチューブ(MWNT)もあります。直径は1-10nm、長さは長いものでは10 $\mu$ mに達するものもあります。

[1] S. Iijima: Nature 354 (1991) 56.



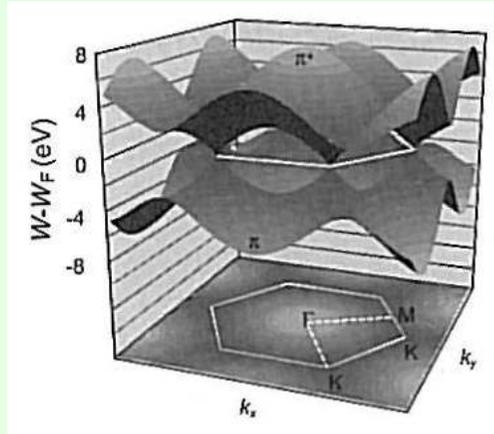
# カイラルナノチューブ

- 丸めるときに斜めに巻いてつなぐこともできます。これをカイラルナノチューブと呼びます。
- 六方晶格子のの単位ベクトルを $a_1$ ,  $a_2$ とすると、カイラルベクトル $Ch$ は $Ch=na_1+ma_2$  ( $n,m$ は整数)で定義されます。
- 角度をつけないで( $n=0,m=0$ )つないだときには炭素原子はジグザグに並びますが、 $n=m \neq 0$ のとき $30^\circ$ の角度となり原子は2つずつペアになって凹凸になるアームチェア構造をとります。
- アームチェア構造のCNTは金属的なバンド構造を示します。バンド構造は $n$ と $m$ の差が3の整数倍の時金属的に、その他の( $n,m$ )の組み合わせでは半導体的になります。

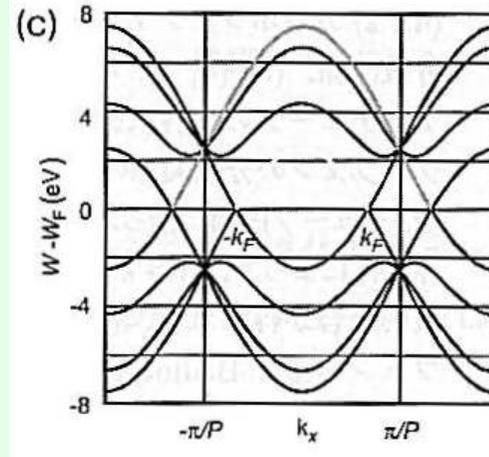
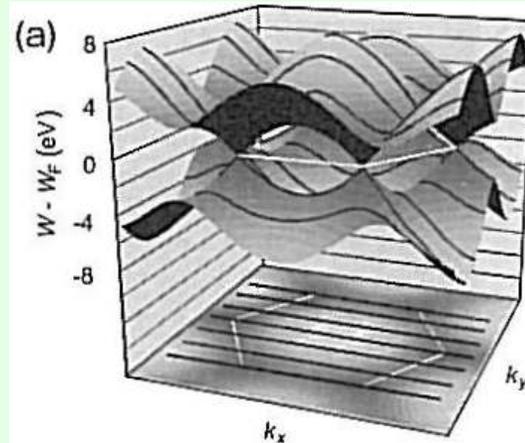


Rainer Waser 編、木村達也訳「ナノエレクトロニクス (上)」(Wiley-VCH, オーム社, 2006) セクション19 図19.4

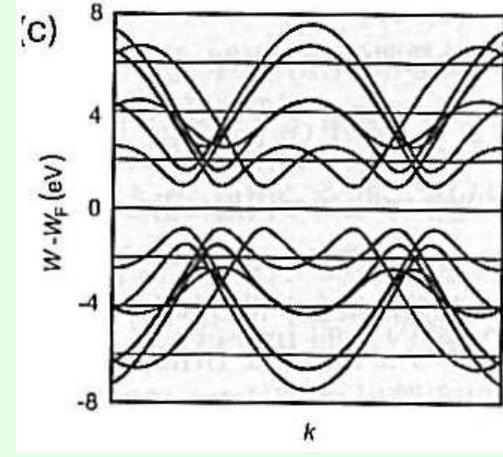
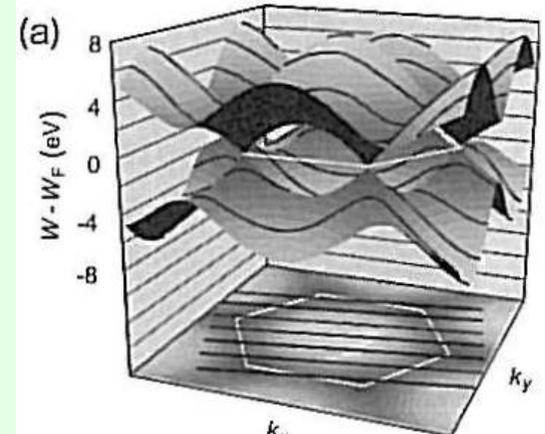
# グラフェンとCNTの電子構造



グラフェンの  
分散関係



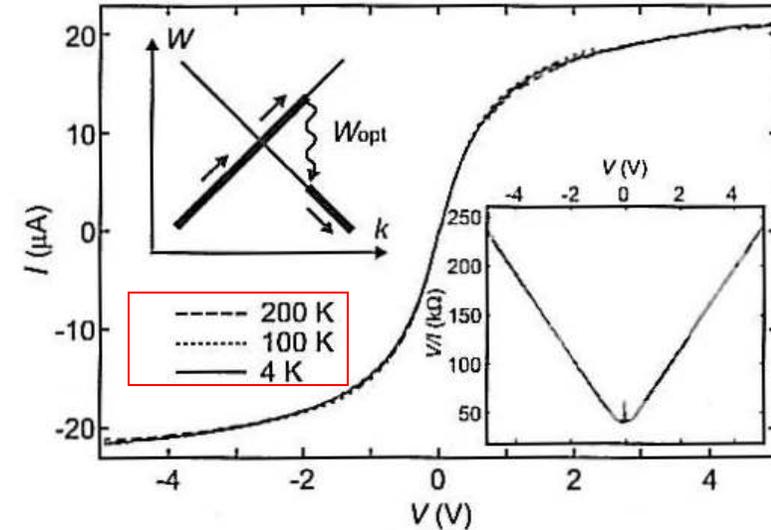
(3,3)CNTの  
分散関係



(4,2)CNTの  
分散関係

# CNTの特異な電子輸送特性

- 金属的な特性をもつCNTでは、フェルミ面付近のバンドの分散関係( $E$ と $k$ の関係)が直線になります。このとき理想的には弾道的な輸送が期待されます。
- また、電圧・電流特性は、200mV以下では直線ですが、数Vの高電界になると飽和するように曲がってきます。電気抵抗 $R$ を電圧 $V$ に対してプロットすると $V$ に対して直線になります。また、この特性は温度に依存しないのです。この特性は、光学フォノンによる散乱によって説明でき、平均自由行程は数 $\mu m$ になると考えられます。また、CNTの表面にはほとんど真性の欠陥がありませんから欠陥による散乱が無視できますから、数 $\mu m$ にわたって弾道的に電子が輸送されるのです。

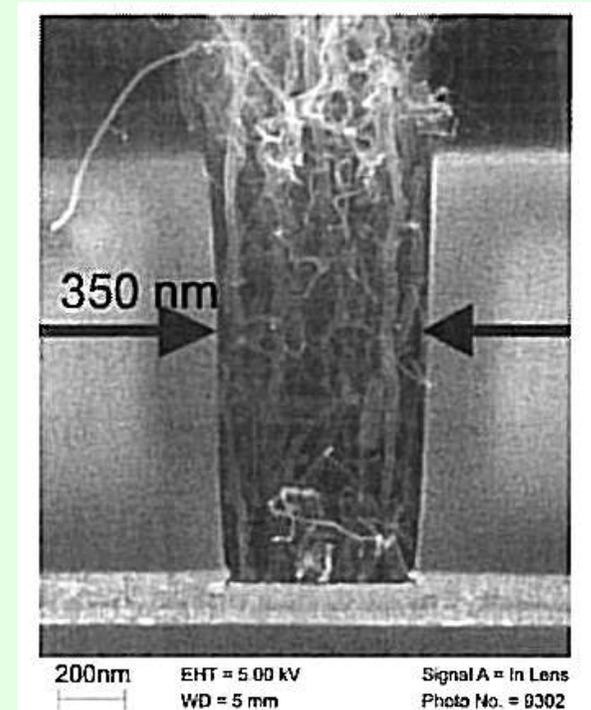


Rainer Waser 編、木村達也訳「ナノエレクトロニクス(上)」(Wiley-VCH, オーム社, 2006) セクション19 図19.12

# CNT配線

•通常のリソグラフィで金属配線の配線幅を10nm以下にすると、断面積が減ることと、表面や粒界による散乱のため電気抵抗が高くなりますが、CNTで配線することができれば、金属より高い電流密度を期待できるのです。銅配線では $10^7 \text{ A/cm}^2$ の電流密度でエレクトロマイグレーションを起こして断線するのですが、CNTでは配線長が散乱長より短ければ $10^{10} \text{ A/cm}^2$ もの電流密度の電流を流すことができますと言われてしています。

•また、このことを使って高い電流密度が必要なビア(半導体や絶縁層にあけた小さな孔を通して2つの金属層間をつなぐ配線)にCNTを使うことができれば、ビアの径を小さくできるという期待もされています。



ビアにおけるCNT選択成長

Rainer Waser 編、木村達也訳「ナノエレクトロニクス(上)」(Wiley-VCH, オーム社, 2006) セクション19 図19.19

# CNTの高い熱伝導性

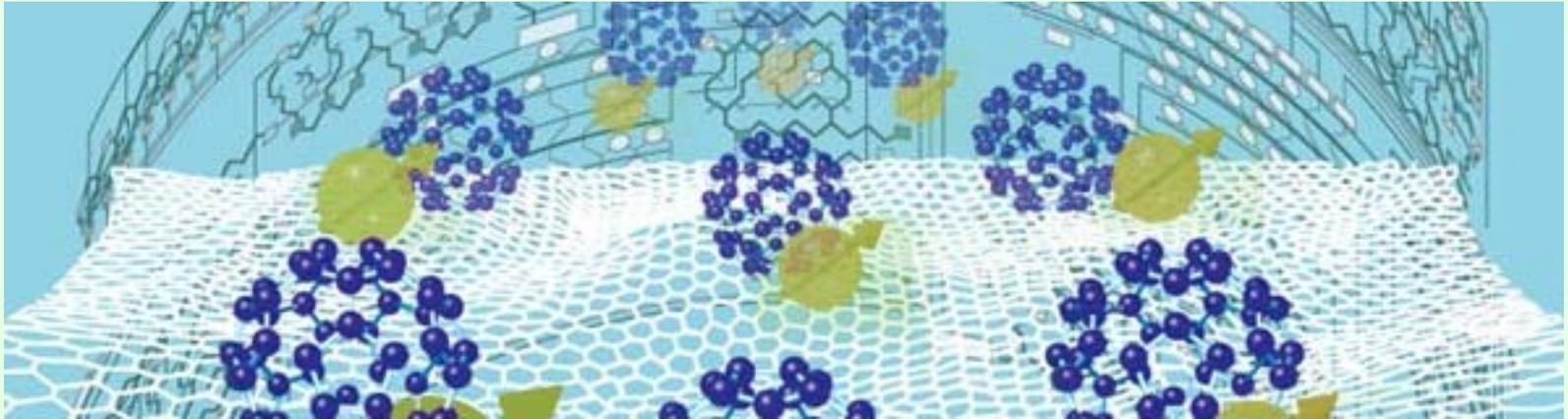
- さらに、半導体微細化の限界が叫ばれる根拠の一つである発熱の問題にもCNTが大きな力を発揮することがわかってきました[1]。CNTは高い熱伝導性と優れた耐熱性を備えているのです。Berberらの理論研究によれば、室温におけるSWNTの熱伝導率は $6600\text{W/m}\cdot\text{K}$ と見積もられています。これはダイヤモンドの熱伝導率 $2000\text{W/m}\cdot\text{K}$ を遙かにしのいでいます。今のところ、実験的には、 $1000\text{-}2000\text{W/m}\cdot\text{K}$ という値が報告されていますが、いずれにせよ熱伝導性が優れていることは確かなようです。

[1] 山本貴博, 渡辺一之, 渡邊聡: 固体物理42 (2007) 365.

# CNTエレクトロニクス

- CNTを電界効果トランジスタ(FET)に用いることも試みられ、シリコンのMOSFETに匹敵するか、それを上回る特性を示すことも報告されています。CNTだけで回路を作ることも可能であるという楽観的な見方を示す人もいます。
- しかし、現実問題として、CNTを基板上にきちんと配列して配線に使うのは、至難の業です。**CNTを制御性よく作製する技術の確立**が望まれています。
- **ここにも結晶工学の出番**があります。若手の方、是非がんばってください。

## 5. 「さきがけ研究」佐藤領域について



- 筆者は、今年度発足の新しい戦略的創造研究事業（さきがけタイプ）「革新的次世代デバイスを目指す材料とプロセス」の研究総括として、研究テーマを公募しました。この研究領域は、文部科学省の戦略目標「新原理・新機能・新構造デバイス実現のための材料開拓とナノプロセス開発」に沿って設置されたものです。

# 平成19年度戦略目標 (文科省が設定)



文部科学省

MEXT

MINISTRY OF EDUCATION,  
CULTURE, SPORTS,  
SCIENCE AND TECHNOLOGY-JAPAN

## 1. 戦略目標名

- 新原理・新機能・新構造デバイス実現のための**材料開拓とナノプロセス開発**

## 2. 該当する戦略重点科学技術との関係

- 本戦略目標は既存のシリコンデバイスの特性を超越する新概念・新構造に基づく次世代デバイスの創製を目指すものであり、「ナノ・材料」分野の戦略重点科学技術のうち、次の3つに密接に関係する。
- ①イノベーションを生む中核となる**革新的材料・プロセス技術**
- ⑤**デバイスの性能の限界を突破**する先端的エレクトロニクス
- ⑨**ナノ領域最先端計測・加工技術**

### 3. 他の戦略重点科学技術等に比して優先して実施しなければならない理由、緊急性、専門家や産業界のニーズ

- CMOSに代表される半導体集積回路(LSI)で使うシリコンは、電子情報社会の今日の発展に欠かせない材料であり、国民の生活を支える基盤材料とも言える。
- 半導体製造技術は日々高度化され、CMOSの微細加工精度がナノ領域に及ぶなど、ナノテクノロジー技術と不可分な関係にある。
- ところが、このシリコンCMOSの生産ラインにおける微細化が極めて困難になるhp(ハーフピッチ)32nmが目前に迫っており、従来のシリコンCMOSとは異なる新概念・新原理に基づいたデバイスの開発が求められている。

# ポストシリコン材料の探索とデバイス開発

- 我が国では、1980年代以降、ポストシリコン材料の探索とデバイス開発のために積極的な研究投資がなされ、世界的に見ても優れた数多くの**萌芽的研究成果**を持つこととなった。
- JST戦略的創造研究推進事業においても、**ナノテクノロジー分野別バーチャルラボ**として、平成14年度より「情報処理・通信における集積・機能限界の克服実現のためのナノデバイス・材料・システムの創製」の戦略目標の下、「非シリコン系半導体材料を用いた次世代デバイス用材料の開拓」、「新概念の論理回路・情報ストレージ等の構築のための強相関材料の開拓」、「分子エレクトロニクスに関連する材料の開拓」等のプロジェクトにおいて、**優れた研究シーズ**を創出してきた。

## 今こそ、我が国の優れた研究資産を活用し、 イノベーションとして生かす重要な時期

- 一方、諸外国、特に米国は、NSF(National Science Foundation)が中心となって、複数の産学連携組織\*)による「ハイリスク・ハイリターン」な研究開発を進めている。なぜ基礎サイエンスを担当するNSFがイニシアチブを取っているかと言え、シリコンCMOSの延長では対応できない「次世代エレクトロニクス(Beyond CMOS)への壁」を突破できた国こそが、10～15年後のエレクトロニクスの覇権を握ると認識しているからに他ならない。
- シリコンCMOSでの微細化に限界が見えた今こそ、我が国が持つこれらの優れた研究資産を活用し、イノベーションとして生かす重要な時期であり、本戦略目標は喫緊に取り組むべき最重要課題である。

## 4. この目標の下、将来実現しうる革新的な成果のイメージ 及びその背景、社会・経済上の要請

- 今後迎えるユビキタス・情報ネットワーク社会では、ネットワークの高速化、コンテンツの大容量化に伴って、高度に集積化されたCPUやメモリーデバイスの実現が必須となる。以下、本戦略によって将来実現しうる代表的な成果のイメージを列挙する。
  - Ga-As, In-Sbなどの化合物半導体、GaN, AlN, ダイヤモンドなどのワイドギャップ半導体の開拓: →高い移動度・高い飽和速度を利用した**超高速・低消費電力デバイス**により、次世代のモバイル機器の実現が可能
  - 強相関材料(含む超伝導材料)の開拓: →電子のスピン・軌道制御により、新原理に基づいた**超高速の論理回路素子**や**高密度の不揮発性メモリー**への展開が可能
  - カーボンナノチューブや量子ドット等の新材料・新構造デバイスの開拓: →ナノレベル・分子レベルでの加工性に基づいた**単一電子デバイス**、**自己組織化を利用したナノ構造転写技術**の確立が可能
  - 有機分子材料(高分子／低分子)の開拓: →軽量で衝撃に強く携帯性に優れる**フレキシブルデバイスの創製**が可能。
- このように本戦略は、数多くのイノベーションを創出する革新的なもので、社会・経済的要請にも十分応えるものである。

## 5. 戦略事業実施期間中に達成を目指す研究開発目標

(イノベーションの源泉となる知識の創出。技術シーズ。証明を目指す技術概念等)

本戦略では、以下の技術領域における材料開拓とそれらのデバイス化に向けたプロセス開発により、次世代ナノエレクトロニクスデバイスの実現につながるイノベーションを創出することを目標とする。

- (1) 非シリコン系半導体(Ga-As, In-Sbなどの化合物半導体、GaN, AlN、ダイヤモンドなどのワイドギャップ半導体)による従来のCMOSを超える次世代デバイス用材料の開拓とプロセス開発
- (2) 光・電気・磁気機能の多元的な融合・変換を利用して新規なデバイスの構築を可能にする材料の開拓とプロセス開発
- (3) ナノレベル・分子レベルでの加工により新規なデバイスの構築を可能にする材料の開拓とプロセス開発
- (4) 薄く、軽量で、湾曲性・屈曲性ならびに耐衝撃性を有する携帯デバイス用の材料開拓とプロセス開発

## 募集・選考・研究領域運営にあたっての 研究総括の方針

- CMOSに代表される既存のシリコンデバイスには微細化の限界が目前に迫っており、従来とは異なる革新的な原理に基づいた新規デバイスの開発が求められています。そこで、この研究領域では、CMOSの延長ではない次世代エレクトロニクス・デバイスの実現に結びつく新しい材料の開拓、デバイス構造やプロセスの開発に向けた独創的かつ挑戦的な研究提案を募集します。
- 上記の「エレクトロニクス・デバイス」とは、電荷を制御・輸送する従来型のデバイスにとらわれず、スピン、軌道状態、準粒子、ボルテクス、光位相などさまざまな物理量、あるいは、それらの複合体の制御・輸送・蓄積を行うデバイスを含めます。対象となる材料は特に限定せず、半導体、金属、セラミクス、有機材料まで幅広く捉えています。
- 選考にあたっては、将来の産業化を見据えた提案であるかどうかを重視しますが、現行の技術水準をもってしては実用化が困難なデバイスを目指していても、将来のイノベーションを見越して産業化が可能な提案であれば対象となります。

# 今年度の選考経過

- 本年度は、3月に公募を開始し、108件の応募がありました。11名のアドバイザーの先生方、6名の外部評価者の先生方のご協力を得て、書類選考によって25課題がヒヤリングの対象となり、11課題を採択しました。
- 応募された提案は優れたものが多く、選考会議では熱心な議論が交わされました。選考にあたっては、研究が基礎研究として優れているという視点だけでなく、その研究が戦略目標にどのように結びついているのかについてもしっかりと検討しました。基礎にしっかりと立脚しながら、目的を持った研究推進を行うというJSTの事業の位置づけを明確に意識しました。

# 採択研究者の統計

- 研究総括の専門性を意識して応募があったためでしょうか、応募の研究分野の分布にやや偏りがありました。
- 結果的に、7名がスピントロニクス関連、2名が分子エレクトロニクス、2名が半導体デバイスの分野でした。
- マテリアル的には、半導体、誘電体、金属、ハーフメタル、有機物、ナノカーボン、メタマテリアルと多岐にわたりました。
- 研究手法としては、実験9名、理論2名。
- 研究機関としては、大学9名（国立大学6名、私立大学3名）、独法研究所2名でした。
- 男女別では、男性10名、女性1名でした。

# 今年度採択の研究者

- 葛西誠也(北大)「確率共鳴を利用した新しい情報処理のためのナノデバイスと集積化」
- 齊藤英治(慶大)「誘電体スピントロニクス材料開拓とスピン光機能」
- 白石誠司(阪大)「分子を介したスピン流の制御」
- 高橋有紀子(NIMS)「スピントロニクスデバイス用室温ハーフメタルの探索」
- 谷山智康(東工大)「スピン偏極の外的制御とチューナブルスピン源の創製」
- 塚本新(日大)「フェムト秒パルス・レーザによる超高速スピン制御・計測」
- 深田直樹(NIMS)「縦型立体構造デバイス実現に向けた半導体ナノワイヤの開発」
- 村上修一(東工大)「デバイス応用に向けたスピン流と熱流の結合理論」
- 安田剛(九大)「 $\pi$ 共役高分子鎖内の超高速電荷輸送を利用した有機トランジスタ」
- 山口明啓(慶大)「ナノ磁性体集結群の新奇な磁気特性の究明」
- 若林克法(広大)「計算科学手法によるナノカーボン素子の設計と物性予測」

# 応募のおさそい

- あと2回(平成20年、21年)公募があります。次回にはぜひ、今回応募の少なかった分野(ワイドギャップ半導体、有機・分子エレクトロニクス等)からの応募をお待ちしています。
- 今年、惜しくも採択されるにいたらなかった応募者も、ぜひ、研究計画を練り直して、再チャレンジしてください。
- また、男女共同参画推進のため、女性研究者の応募を歓迎します。
- さらに、beyond-CMOSをめざす企業研究者の応募も歓迎します。なお、あくまで個人型研究であることをご理解の上応募ください。

第1期

H19	H20	H21	H22
-----	-----	-----	-----

第2期

H20	H21	H22	H23
-----	-----	-----	-----

第3期

H21	H22	H23	H24
-----	-----	-----	-----

# 第1期は10月スタートしています

- 10月から研究がスタートしています。私は、北海道から九州におよぶ採択された全研究者の研究室に、サイトビジットと称して訪問させていただき、上司・研究機関のご理解とご支援をお願いするとともに、研究者と研究方針についてディスカッションを行ってきました。
- いずれの方々も、若手ながら目標をしっかりと持って、自信をもって新しい研究に挑戦しておられる様子を拝見して、大変感銘を受けました。
- 今後、領域会議やシンポジウムを通じて、徐々に、佐藤領域のチームカラーを打ち立てていきたいと考えています。
- このプロジェクトが、採択された研究の推進に、そして次世代デバイスの礎作りに力になればと願っています。

## 6. おわりに

- この講演では、シリコンCMOSを超える次世代の材料開発に向けて、私が関心を持っている分野を中心に私の視点で概説し、新しい分野の展開やブレークスルーがいかに結晶工学に依存しているかについて述べ、これからの若手研究者へのメッセージを込めました。
- 時間の都合で、スピントロニクスと化合物半導体、および、ナノカーボンに話題を限らせていただきましたが、私自身は、有機エレクトロニクス、強相関電子系、超伝導エレクトロニクスにも強い関心をもっています。機会を改めてご紹介できればと思っています。
- 最後に、私が研究総括として本年度からスタートしたさきがけのプロジェクト「革新的次世代デバイスを目指す材料とプロセス」のねらいと、選考経過・選考結果の一端に触れ、次回からの応募への期待を述べました。