



スピンの世界へようこそ！

～スピントロニクスのための磁性の基礎から スピントロニクスの今後まで～

第5部 スピントロニクス材料/第6部 まとめと今後の課題

工博 佐藤勝昭

国立大学法人 東京農工大学名誉教授

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



CONTENTS

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



スピントロニクス材料の考え方

- ▶ スピントロニクス材料選択にはいくつかのポイントがあります。
 - ▶ スピン源としては、スピン分極率 P の高い材料が必要です。
ハーフメタルの P は理想的には100%です。
 - ▶ スピン流の通路にはスピン拡散長 λ_s の大きな材料が必要です。
軽い元素はスピン軌道相互作用が小さいので λ_s が大きくなります。
 - ▶ スピン流は逆スピンホール効果で電流に変換できます。
重い元素はスピン軌道相互作用が大きく変換効率が高いです。
 - ▶ 磁性体と非磁性体の界面における導電率の整合が重要です。
トンネル層を通して注入すると導電率不整合を解決できます。
 - ▶ TMR素子では、トンネル障壁の散乱がTMR比を左右します。
MgOバリアでは波動関数がつながるのでTMRが高くなります。
 - ▶ 磁性ガーネットは電氣的に絶縁体でもスピン流については導体。



磁気抵抗素子の材料

▶ CIP-GMR 磁性体/非磁性体/磁性体/反強磁性体

- ▶ 磁性体: NiFe, CoFe
- ▶ 非磁性体: Cr, Cu

反強磁性体: IrMn, FeMn,
SAF(合成反強磁性体)
CoFe/Ru/CoFe

▶ CPP-GMR

- ▶ 磁性体: ホイスラー合金; $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Al}, \text{Si})$, $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Ga}, \text{Ge})$, etc.
- ▶ 非磁性体: Cu

▶ TMR 磁性体/絶縁体/磁性体/反強磁性体

- ▶ 磁性体: Fe, CoFeB, FePt, ホイスラー合金
- ▶ 絶縁体: $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, MgO

▶ CPP-NC(ナノコンタクト)GMR

- ▶ 絶縁体 Al_2O_3 埋め込みナノコンタクトFeCo



スピン注入磁化反転素子/ スピントルク発振素子・スピントルクダイオード

▶ スピン注入磁化反転素子

▶ CPP-GMR Co/Cu/Co_vc

▶ TMR → スピンRAM

▶ CoFeB/MgO/CoFeB (面内磁化)

▶ bcc-CoFeB/MgO/bcc-CoFeB/L₁₀FePt (垂直磁化) TMR > 200%

▶ TbCoFe/CoFeB/MgO/CoFeB/L₁₀FePt (垂直磁化) 7-9μAで反転

▶ スピントルク発振素子 (STO)・スピントルクダイオード (STD)

▶ CPP-GMR Co/Cu/Co STO

▶ CPP-GMR CoFe/Cu/CoFeAlSi STO 12-14GHz マイクロ波発振

▶ TMR CoFeB/MgO/CoFeB/Ru/CoFeB/PtMn STD



スピン流デバイス

- ▶ スピンホール効果
 - ▶ Al/Pt, FePt/Au
- ▶ スピン注入
 - ▶ 磁性体 : Fe, Fe₃Si, FeNi , YIG
 - ▶ 非磁性体 GaAs, Si, Graphene, Al, Cu
- ▶ スピンゼーベック効果
 - ▶ FeNi/Pt 熱純スピン流
 - ▶ YIG/Pt 熱スピン波スピン流



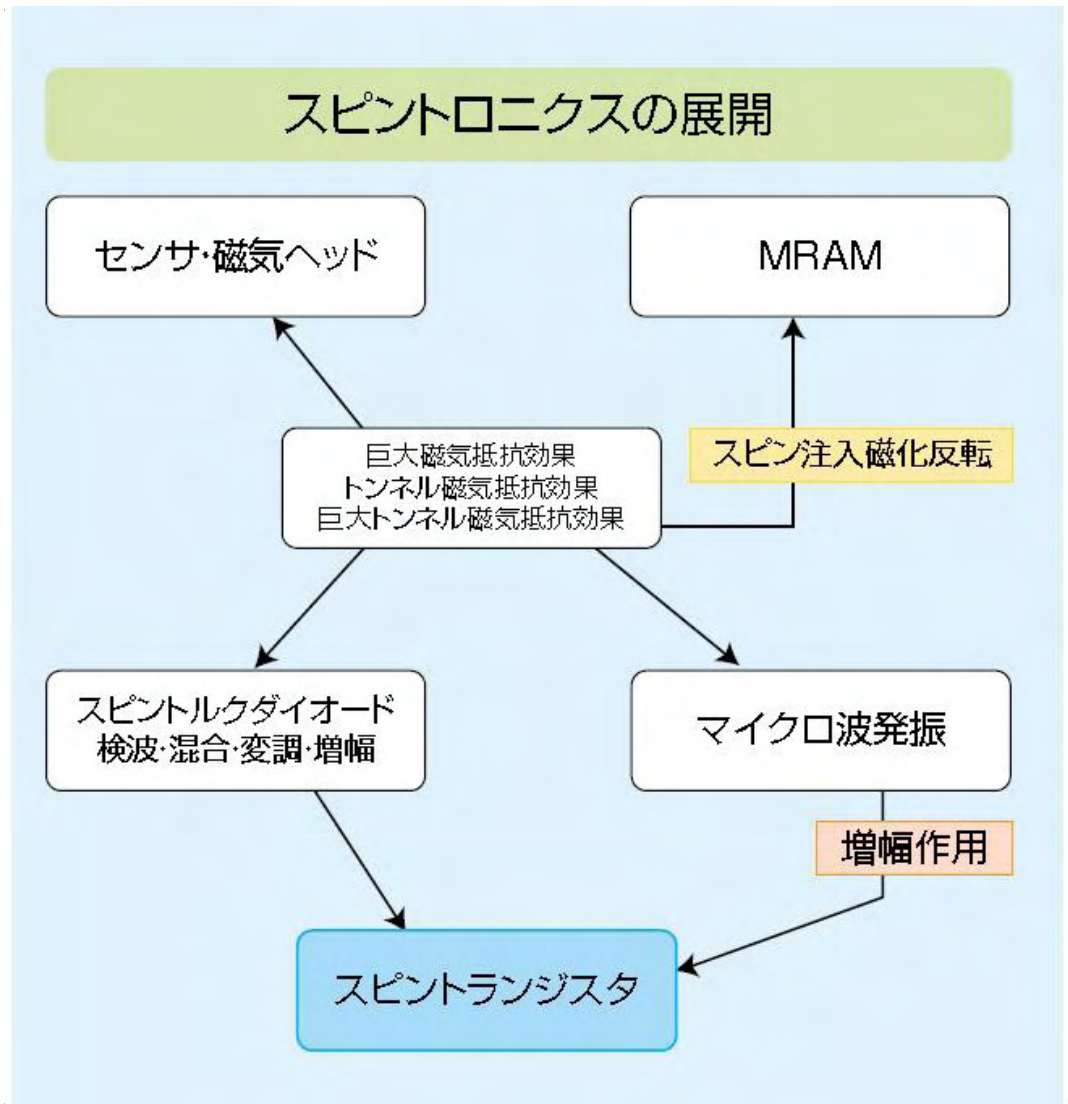
CONTENTS

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



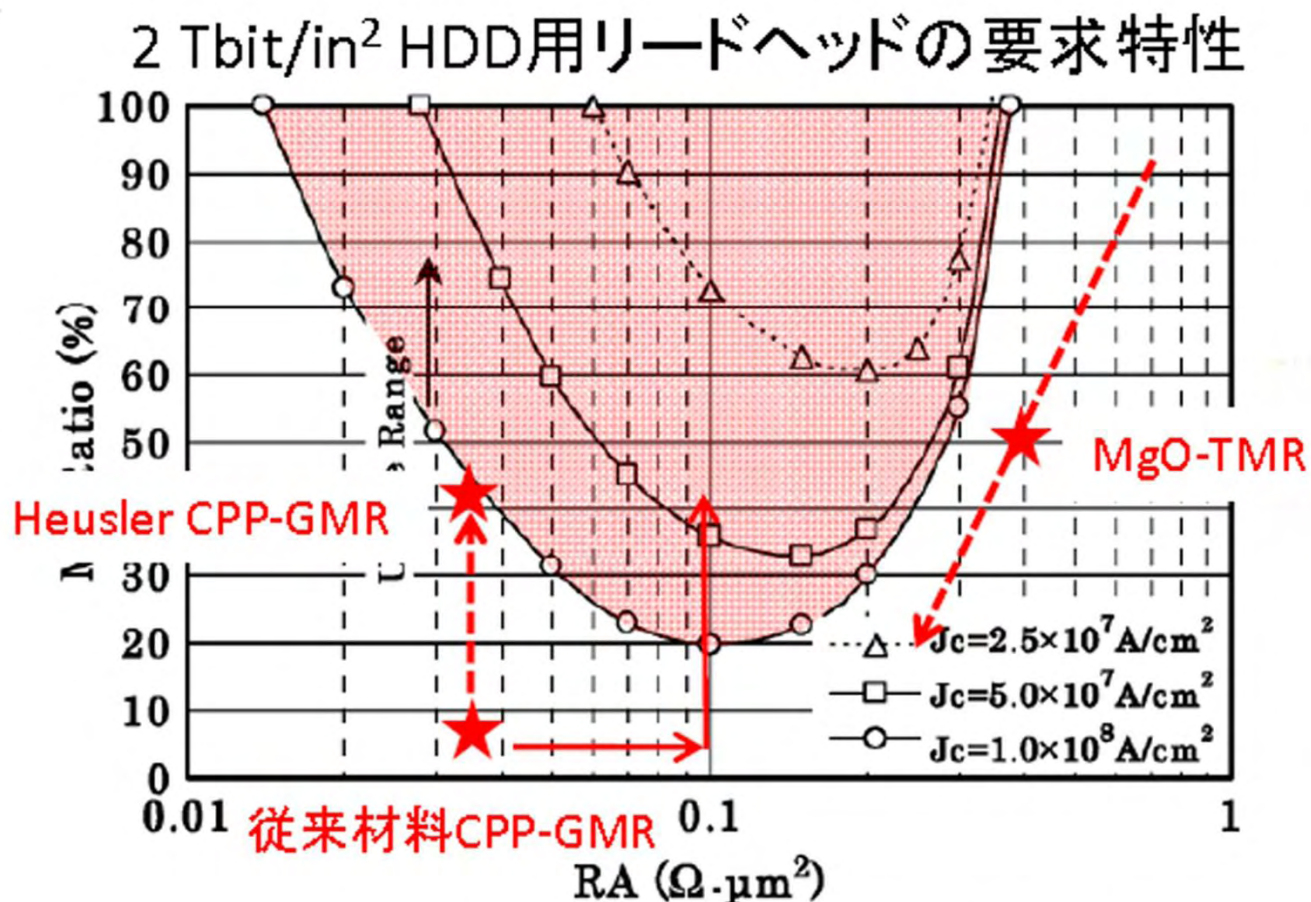
スピントロニクスの展開

- ▶ GMRの発見に始まったスピントロニクス素子は、HDDの読み取りセンサからMRAMさらにはマイクロ波素子へと応用の可能性を広げています。
- ▶ 産総研Today2006-02, pp12-16



HDD読み取りヘッド

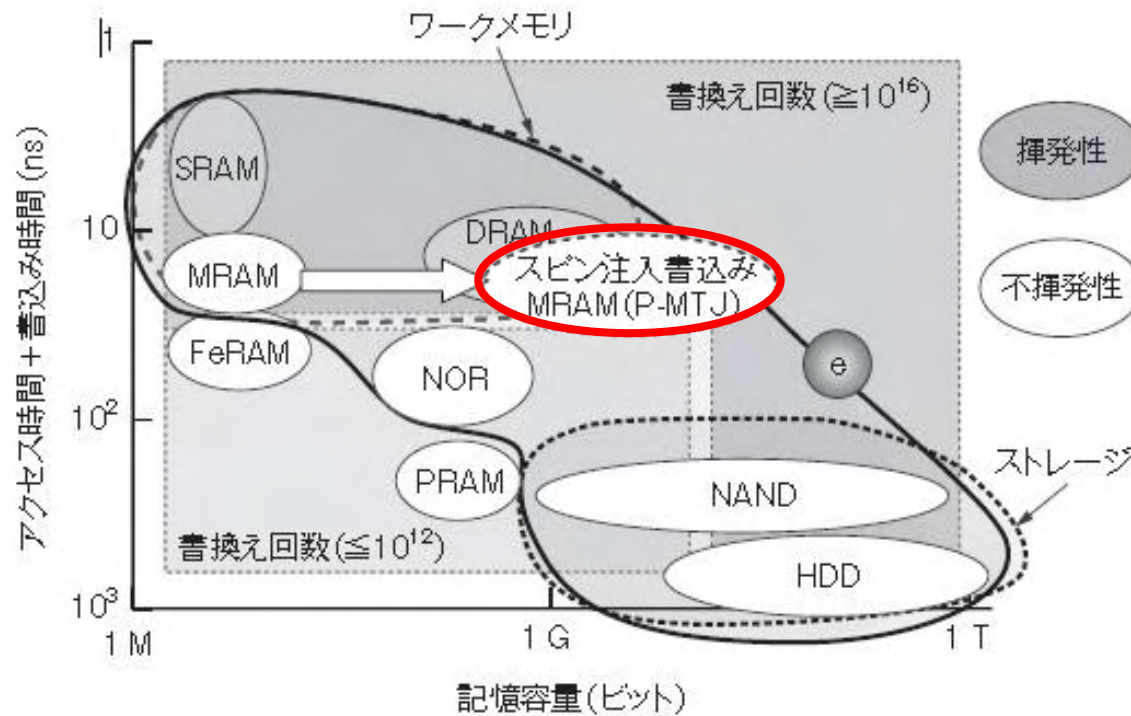
- ▶ TMRはMR比は大きいですが、RAが高すぎます。
- ▶ CPP-GMRはRAは低いが、MRが足りません。
- ▶ 今後、右図の赤く塗った部分に入るための材料開発が重要です。



Takagishi et al. IEEE Trans. Magn. 46, 2086 (2010)



スピン注入MRAMはどこを狙う



SRAM : Static RAM NOR : NORフラッシュメモリ e : 電子
PRAM : Phase Change RAM NAND : NANDフラッシュメモリ

- ▶ メモリ及びストレージもアクセス時間 + 書き込み時間と記憶容量のマッピング
- ▶ 與田 : 東芝レビュー55 [9] pp20-23 (2011)



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^[i]。
- ▶ 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、新しいパラダイムが開かれる予感を感じます。

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

