



TOHOKU
UNIVERSITY



電子情報技術産業協会 (JEITA)
半導体技術ロードマップ専門委員会 (STRJ) ワークショップ
2010年3月5日 コクヨホール

スピン流とスピントロニクス

高梨弘毅

東北大学・金属材料研究所

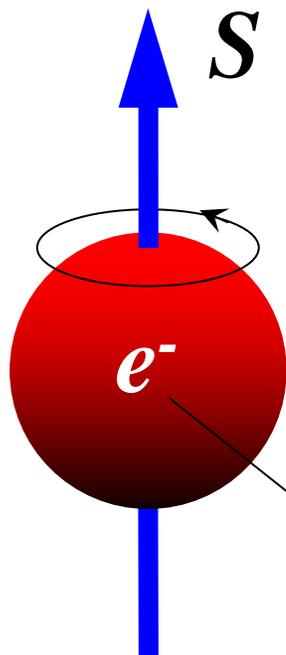


発表構成

1. イントロダクション
スピン流とは何か
スピントロニクスとスピン流の関係
2. 歴史的経緯
GMR/TMRと磁気ヘッド
3. スピントロニクスデバイスの現状
磁気ヘッド・MRAM・スピントランジスタ
4. スピン流研究の最近の進展と応用
5. まとめ

スピン流とは (1)

自転の角運動量



電子

S — スピン → スピン流

磁気の根源

最近注目されるようになった新概念

$$J_s = J_{\uparrow} - J_{\downarrow}$$

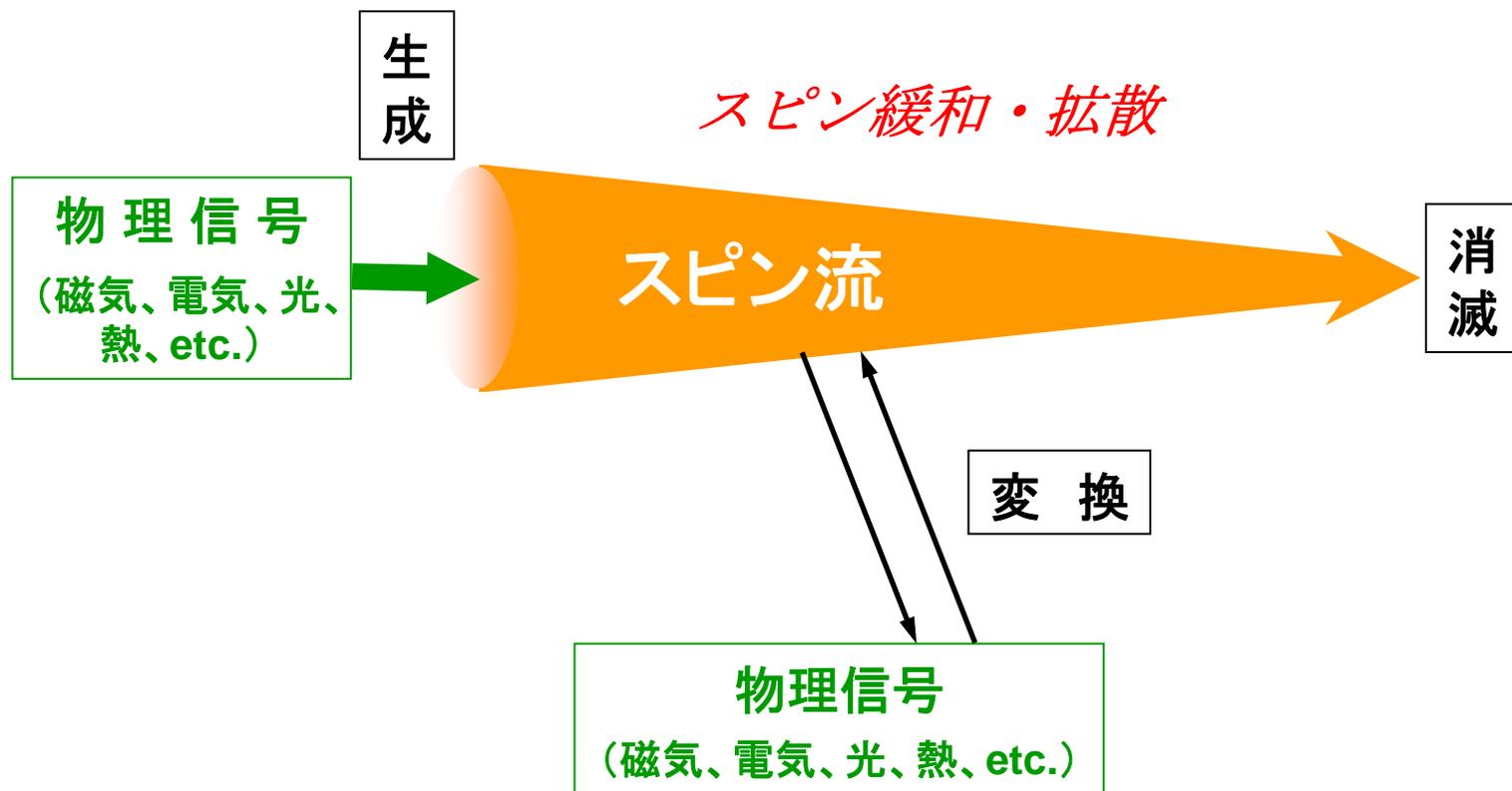
電荷 → 電流

電気の根源

200年以上にわたる研究
日常生活に不可欠

$$J_e = J_{\uparrow} + J_{\downarrow}$$

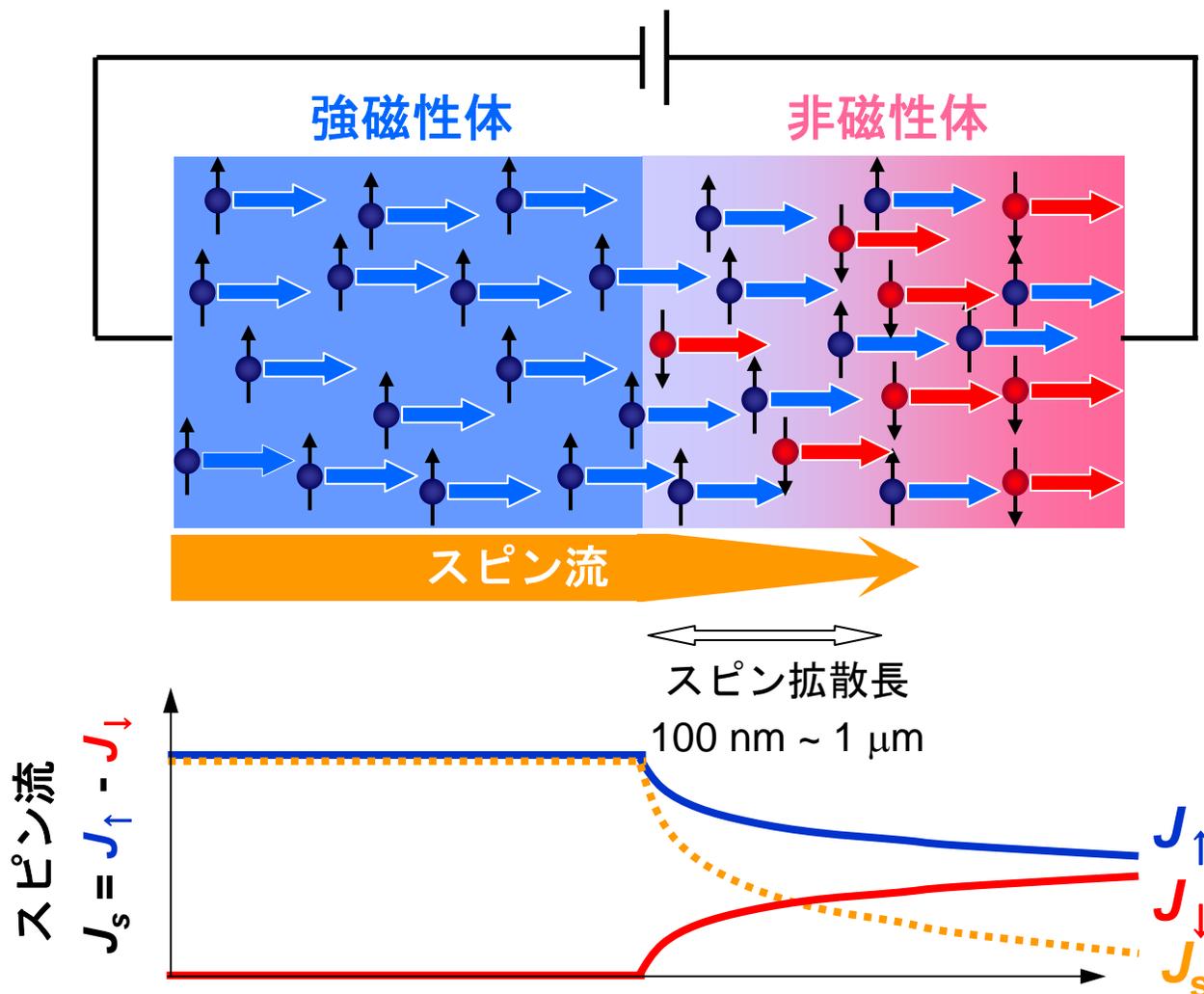
スピン流とは (2)



スピンの例 (1)

- 電流を伴う場合

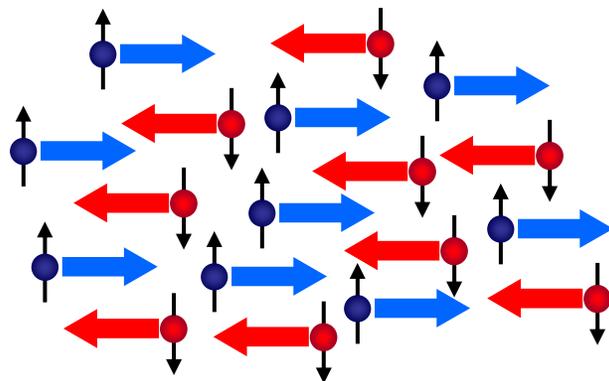
強磁性体から非磁性体への電氣的スピン注入.



スピン流の例 (2)

- ・電流を伴わない場合

電子の動きあり

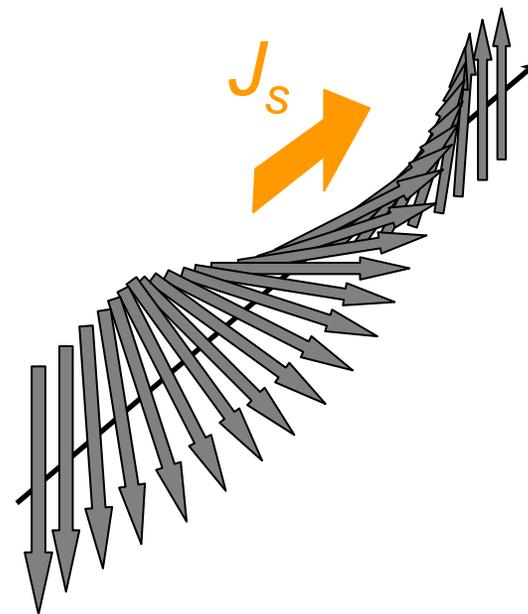


$$J_e = J_{\uparrow} + J_{\downarrow} = 0$$



非局所スピン注入
スピンホール効果

電子の動きなし



磁壁の移動
スピン波, など

スピン流の特徴

電流にとっての

伝導体
(金属・半導体)

絶縁体

≠

スピン流にとっての

伝導体

絶縁体

スピントロニクスとは

電子

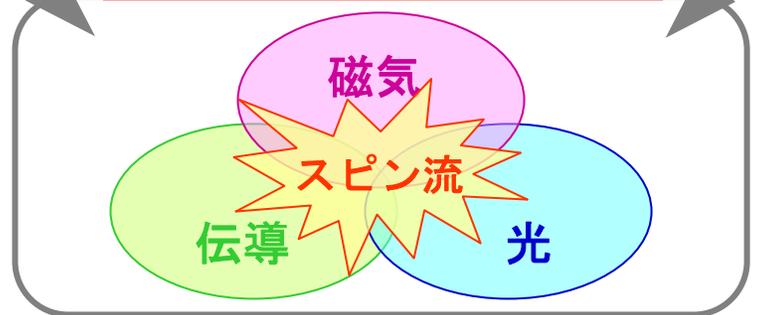
電荷 + スピン

エレクトロニクス
電気伝導と光学特性を制御
(s, p 電子)

マグネティクス
磁化を制御
(d, f 電子)

ナノテクノロジー

電流や光で
磁化を制御する

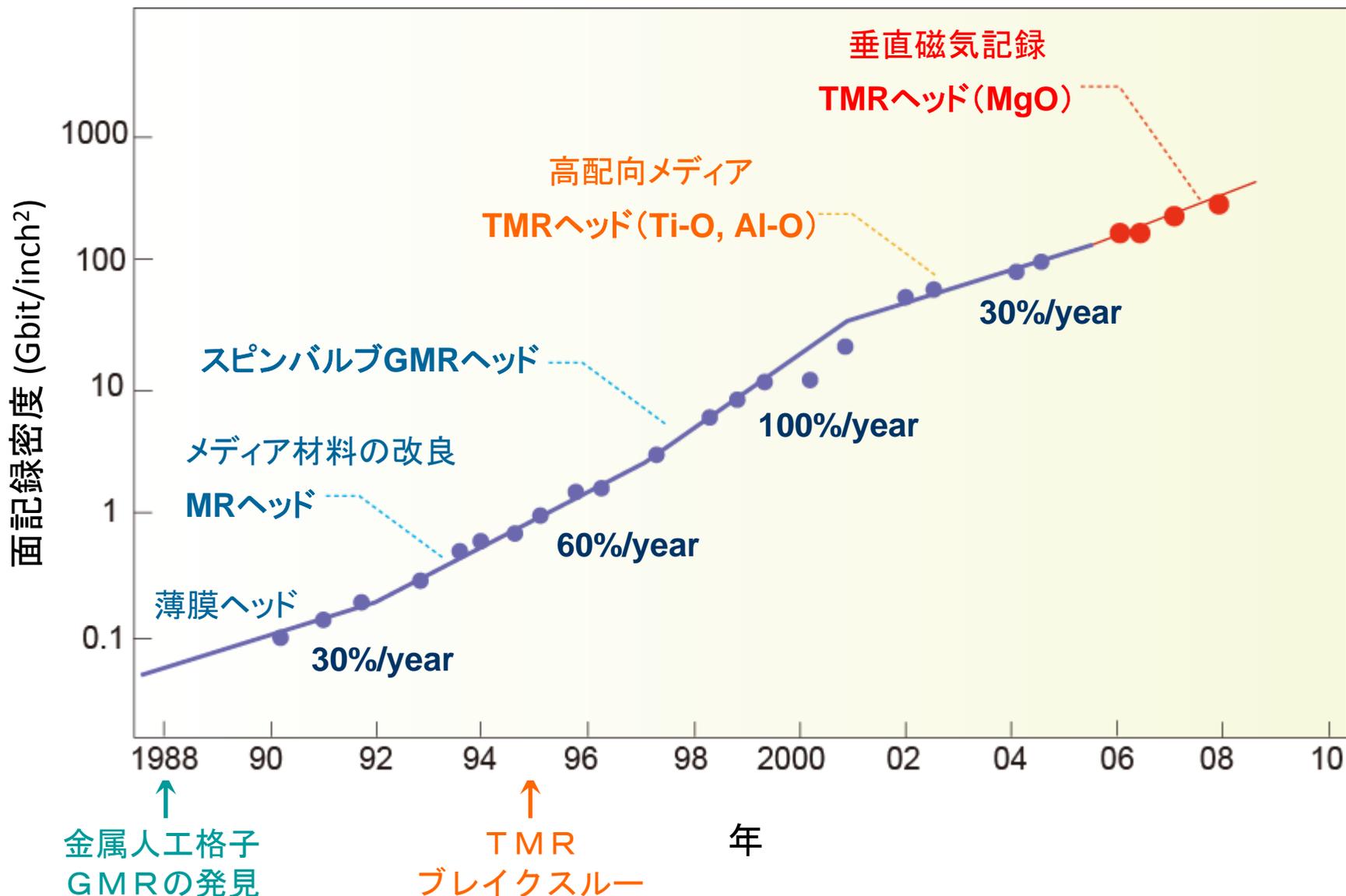


磁化で
電流や光を制御する

現象
巨大磁気抵抗 (GMR) 効果
トンネル磁気抵抗 (TMR) 効果
スピン注入 / スピン蓄積
電流誘起磁化反転
キャリア / 光誘起強磁性

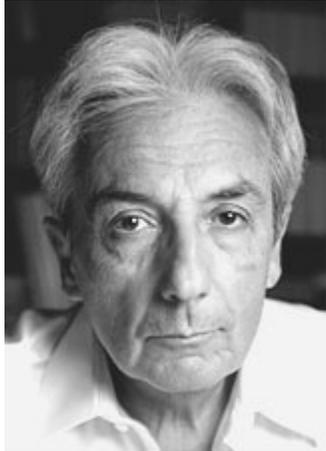
デバイス
GMR / TMR ヘッド
磁場センサー
磁気ランダムアクセスメモリ (MRAM)
スピンスイッチ / トランジスタ
スピンドラーム

ハードディスク面記録密度の変遷

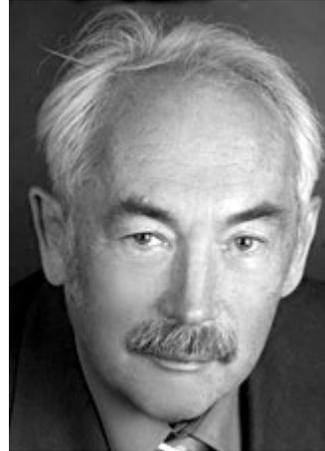


2007年 ノーベル物理学賞

Albert Fert
(France)



Peter Grünberg
(Germany)

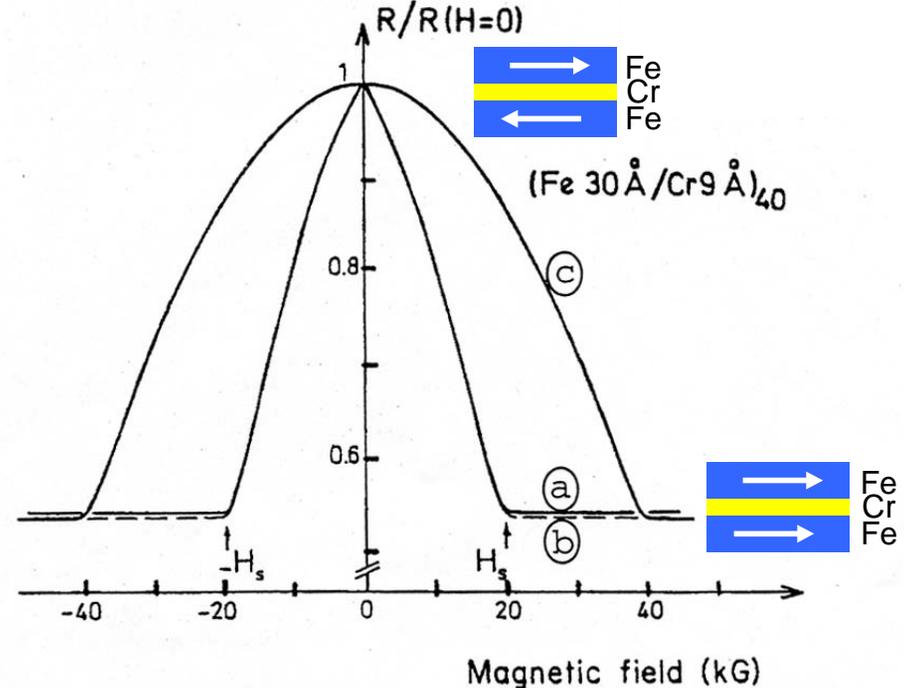


巨大磁気抵抗効果
(GMR) の発見



HDD 記録密度の飛躍的向上
The first major application
of nanotechnology

スピントロニクス的发展



M. N. Baibich *et al.*, Phys. Rev. Lett., **61** (1988) 2472.

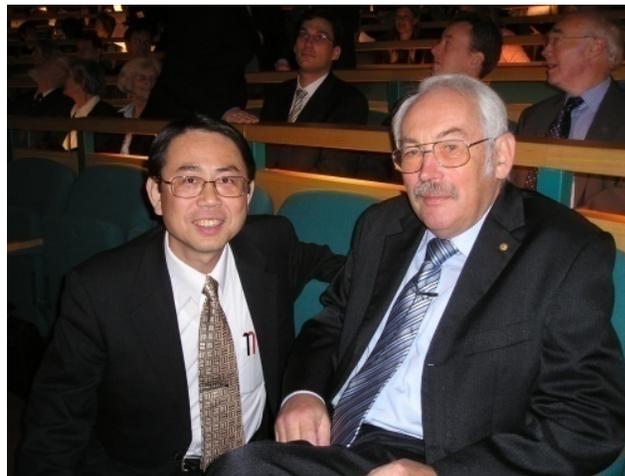
Giant Magnetoresistance (GMR)
磁化が平行状態と反平行状態とで
電気抵抗が大きく変化する。
(スピン依存伝導)

スピンバルブGMRヘッドの原理

Nobel week in Stockholm, December 2007



ノーベル賞講演にて 12月8日



授賞式にて12月10日



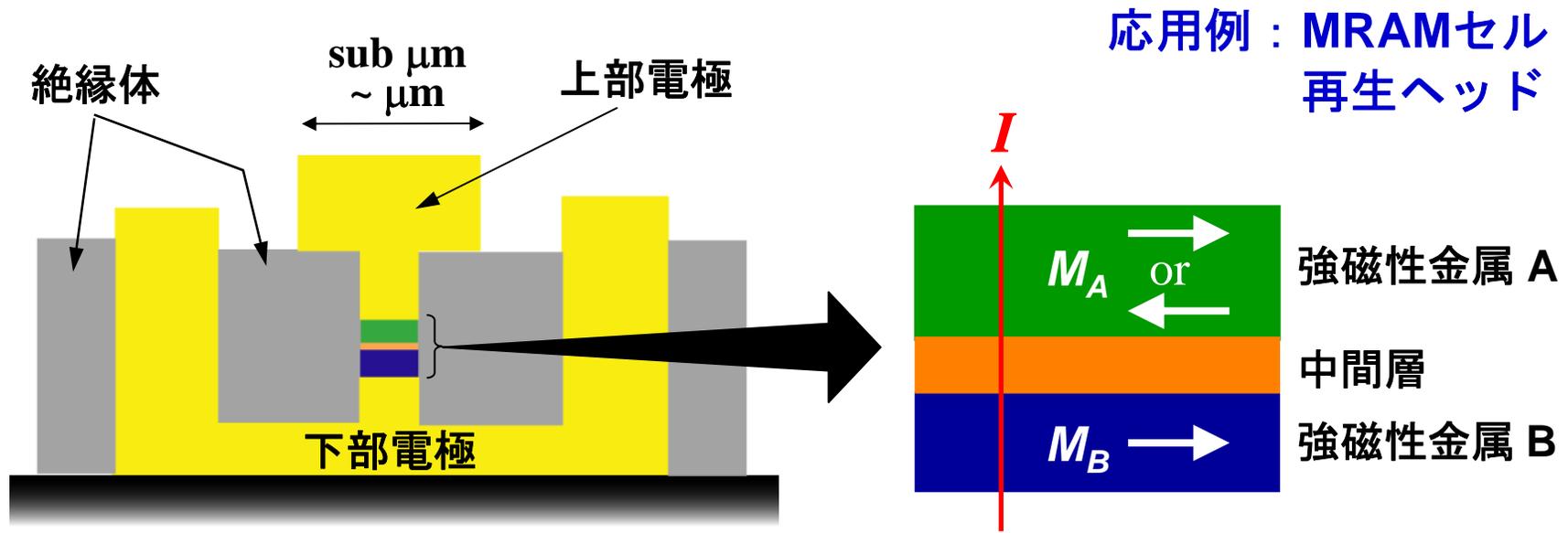
スウェーデンロイヤルアカデミーによるレセプションにて 12月7日



晩餐会にて12月10日

基本的なデバイス構造

1. CPP (Current-Perpendicular-to-Plane: 膜面垂直通電) 型



中間層 = 絶縁体：トンネル磁気抵抗効果 (TMR)

金属：巨大磁気抵抗効果 (CPP-GMR)

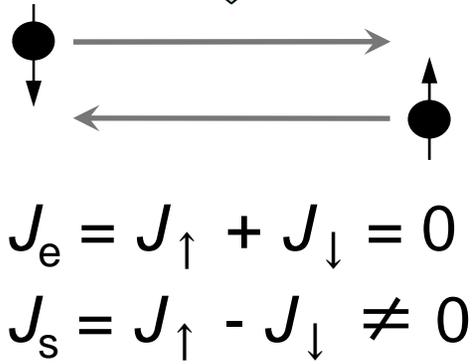
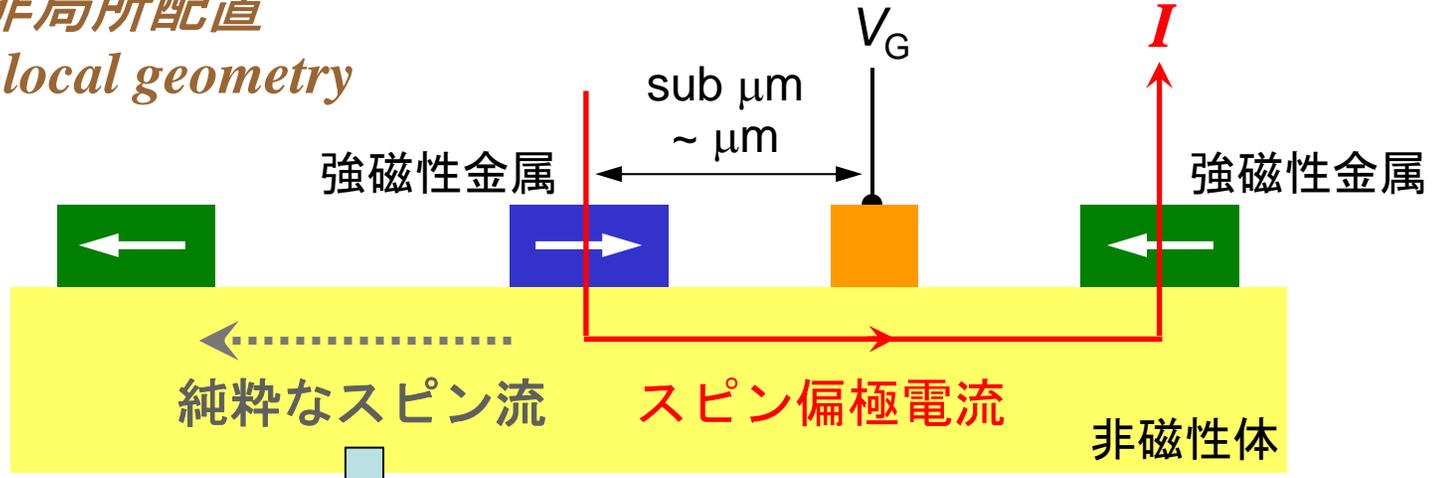
磁気抵抗効果 (MR) の大きさ： $\frac{\Delta R}{R} \propto P_A \cdot P_B$ $P_{A(B)}$ ：スピン偏極率

基本的なデバイス構造

2. Lateral structure (面内構造) 型

応用例：スピントランジスタ

非局所配置
Non-local geometry



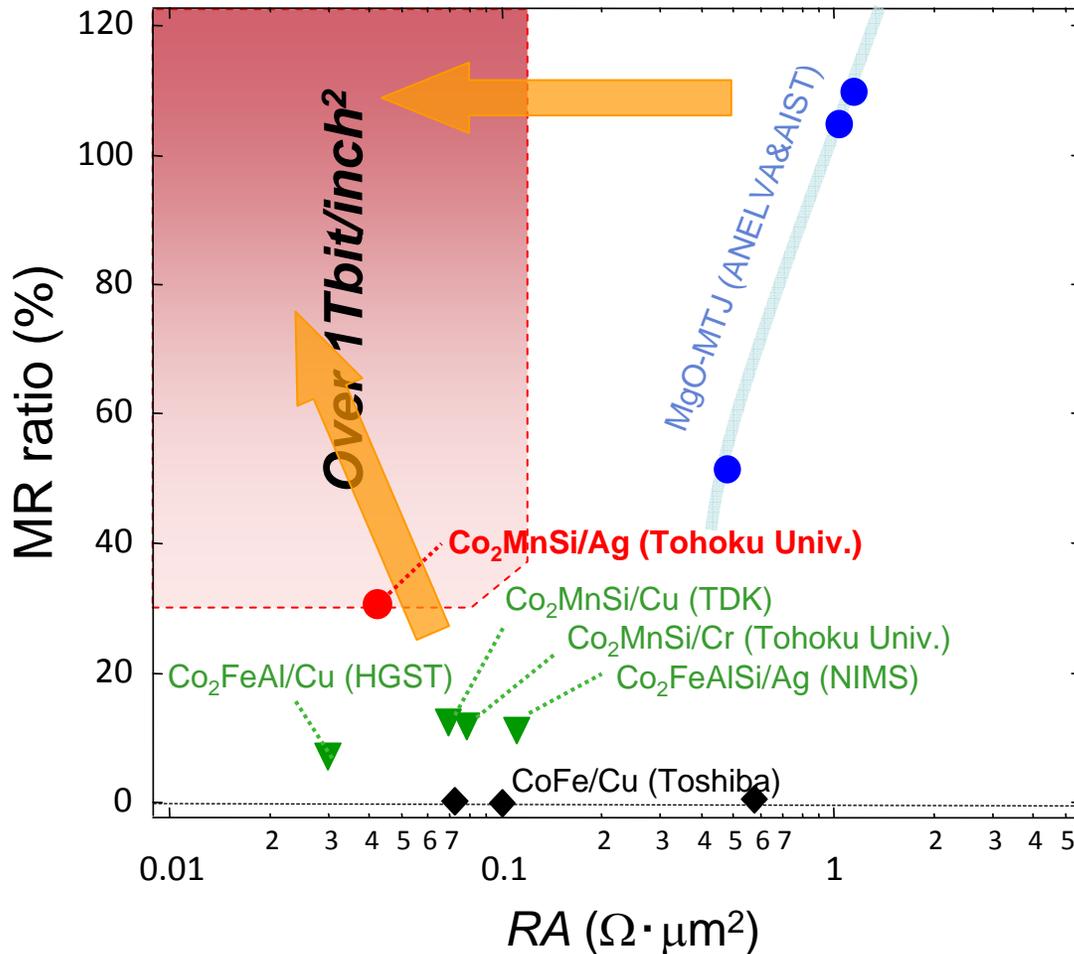
スピン注入
スピン緩和 (拡散)

スピントロニクスデバイスの現状

- 磁気ヘッド（HDD用再生ヘッド）
高MRと低抵抗化の両立が鍵
- 磁気メモリ
MRAMからスピンRAM（スピン注入型）へ
- スピントランジスタ
半導体へのスピン注入が鍵

磁気ヘッド：高MRと低抵抗化

Reported MR ratio in small RA region



単位面積当たりの抵抗値 (RA) と
抵抗変化率 (MR ratio) の関係

低抵抗化に伴うTMRの減少
スピン注入効率の減少
(本質的)

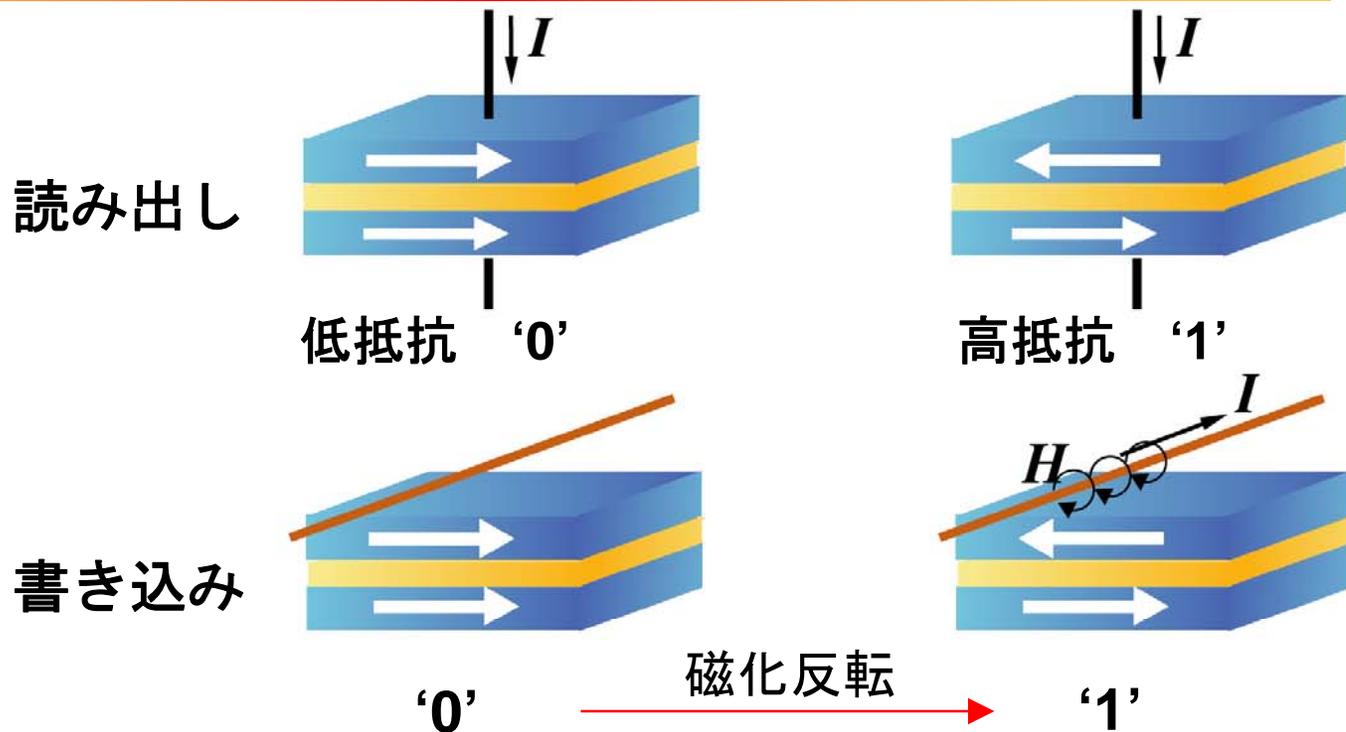


ハーフメタル
(スピン偏極率 100%)
ホイスラー合金への期待

TMR

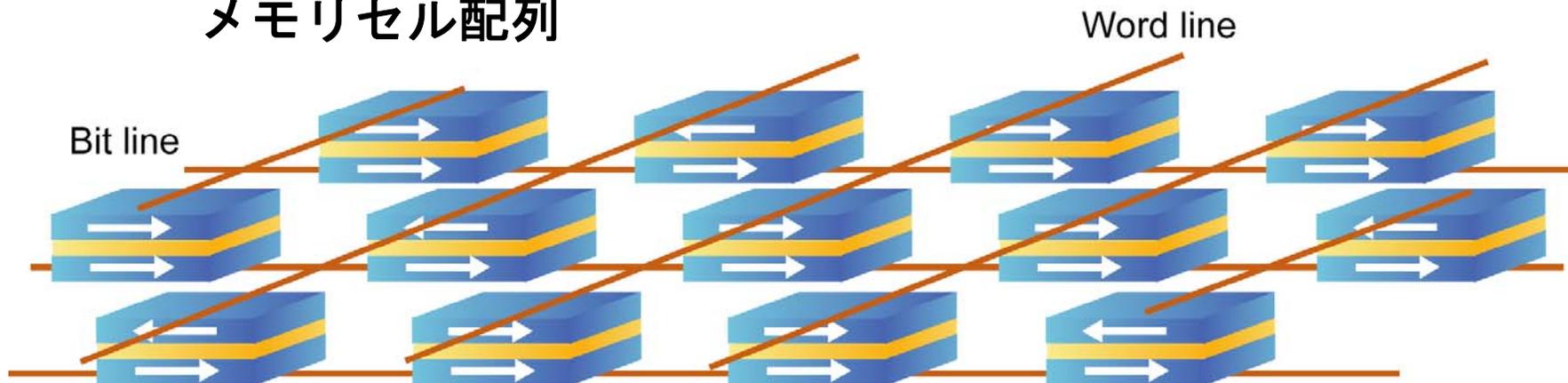
CPP-GMR

磁気ランダムアクセスメモリ (MRAM) の原理



高集積化に伴う
書き込み電流の
増大が最大課
題

メモリセル配列



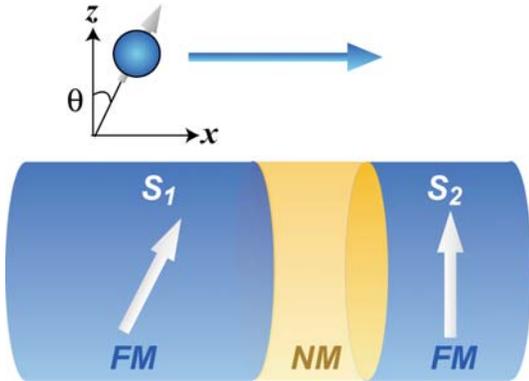
MRAMからスピンRAMへ

高集積化および低消費電力化のために
書き込み電流の低減が不可欠

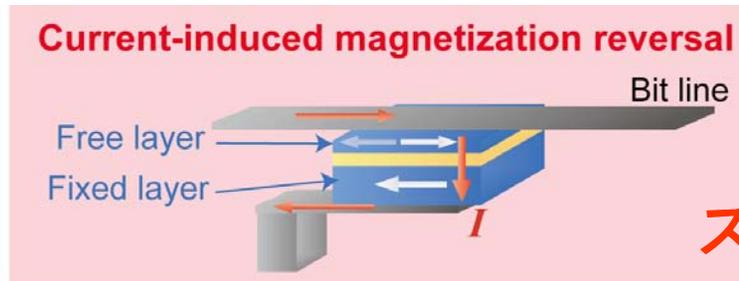
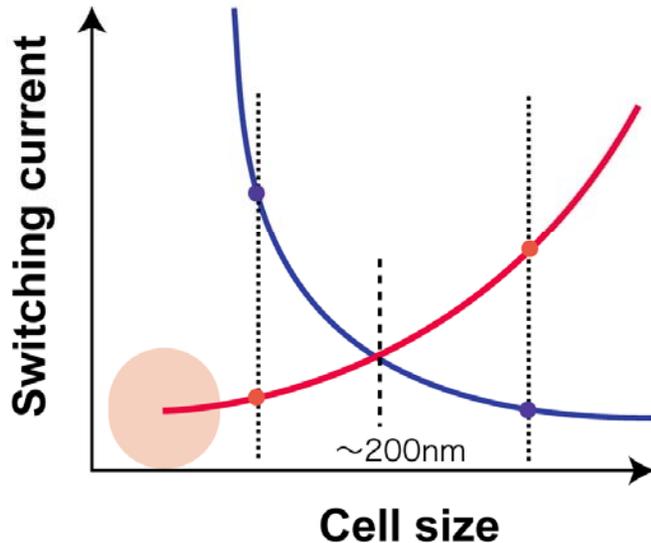


スピン注入磁化反転

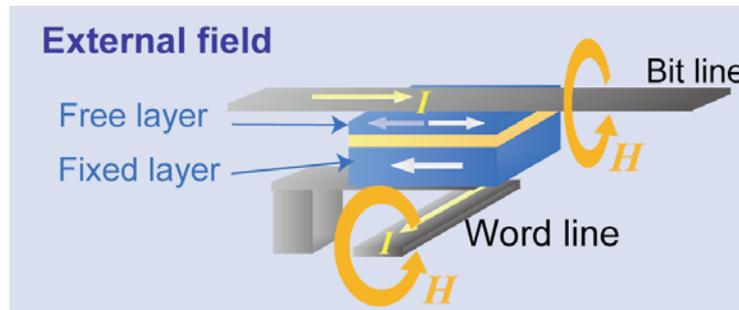
スピントランスファートルク (GMRの逆効果)
スピン流と磁気モーメントの相互作用



Advantage of current-induced magnetization reversal



スピンRAM



MRAM

スピンRAM：垂直磁化の利用

スピン注入磁化反転の臨海電流値低減が必要不可欠



垂直磁化膜の利用

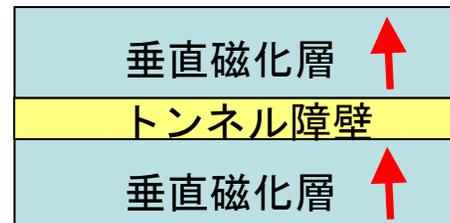
CoCr系合金膜

Ni/Co, Co/Pd 等, 人工格子膜

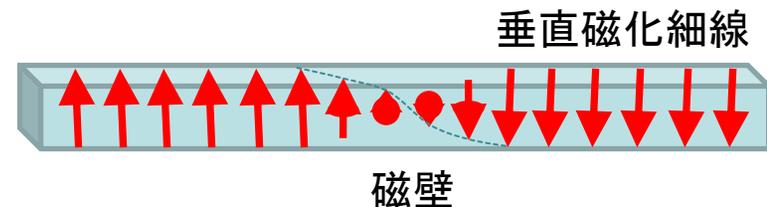
TbFeCo等, RE-TM系アモルファス合金膜

FePt, FePd, CoPt等規則合金膜

- 垂直磁化TMR型
高集積化対応



- 垂直磁化磁壁移動型
高速化対応

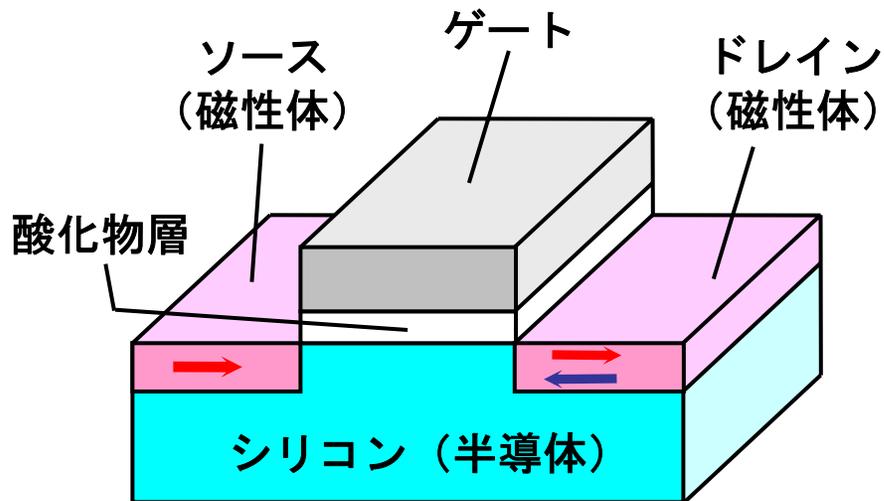


スピントランジスタ

磁性体の持つ記憶機能

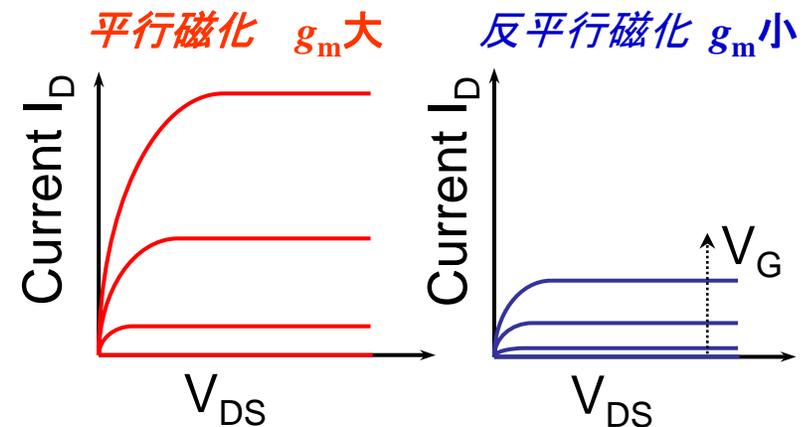
半導体の持つ論理機能

融合
スピントランジスタ



Spin MOSFET

S. Sugawara *et al.*, Appl. Phys. Lett., 84 (2004) 2307.
J. Appl. Phys., 97 (2005) 10D503.



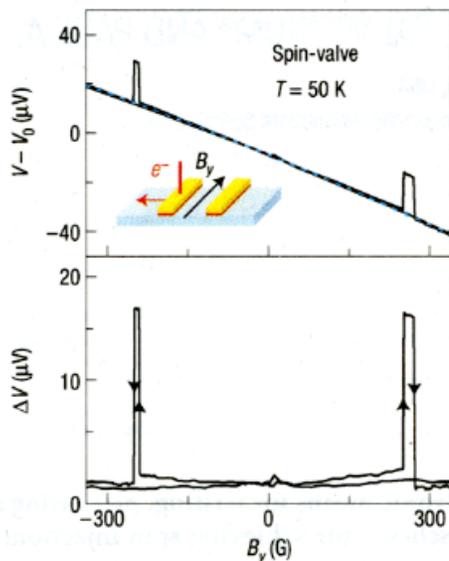
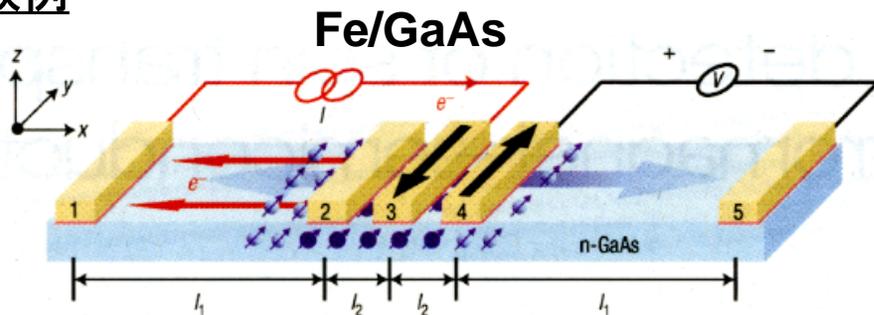
再構成可能な論理回路

リコンフィギュラブルコンピューティング

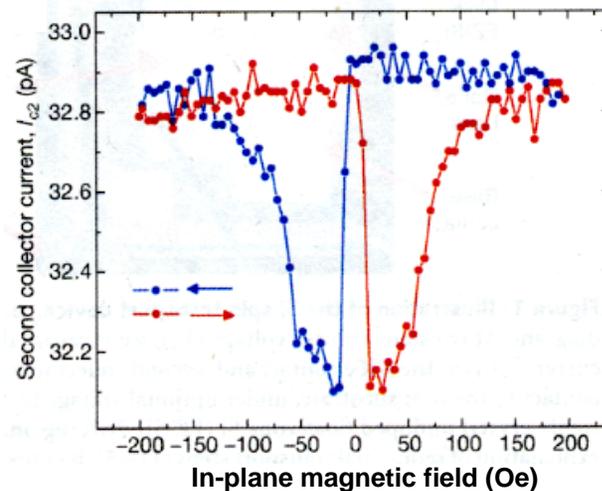
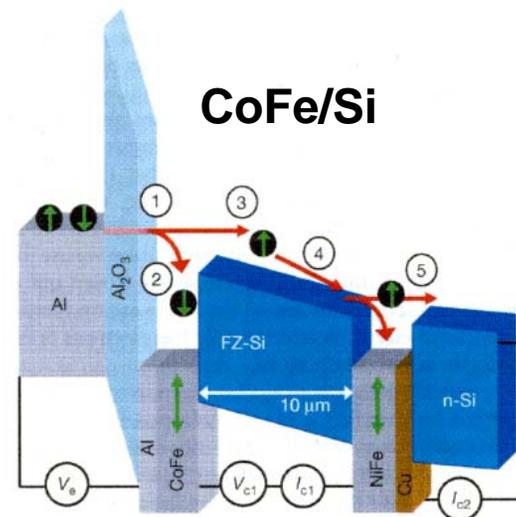
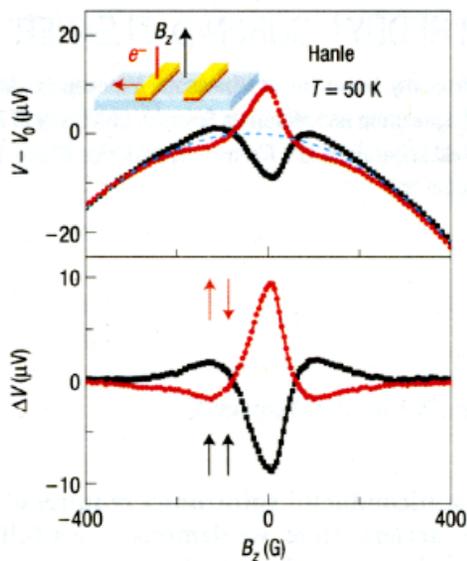
強磁性金属から半導体へのスピン注入が鍵！

強磁性金属から半導体へのスピン注入

実験例



X. Lou *et al.*, Nature Physics, **3** (2007) 197.



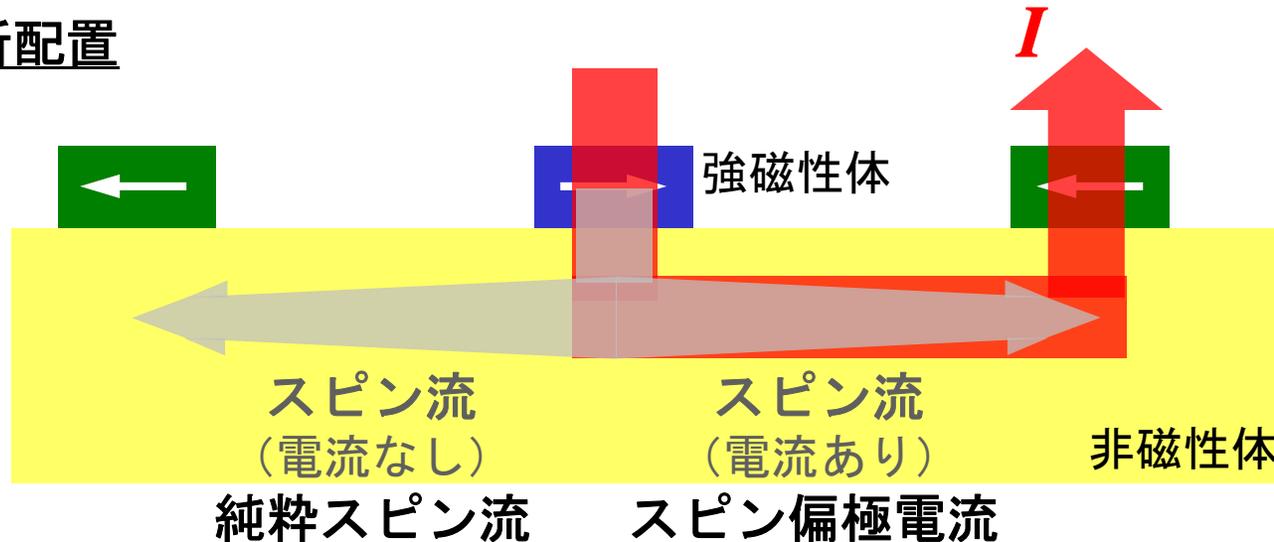
I. Appelbaum & D. J. Monsma., Nature, **447** (2007) 295.

近年急速に実験の進展がある。

純粋スピン流の創出、制御、そして応用

純粋なスピン流の創出

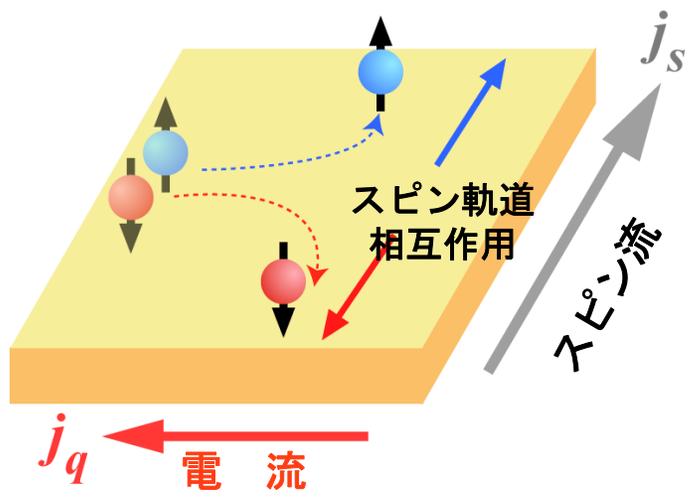
非局所配置



- ・ スピンホール効果 (電流→スピン流)
- ・ スピンポンピング (電磁波→スピン流)
- ・ スピンゼーベック効果 (熱→スピン流)

スピンホール効果

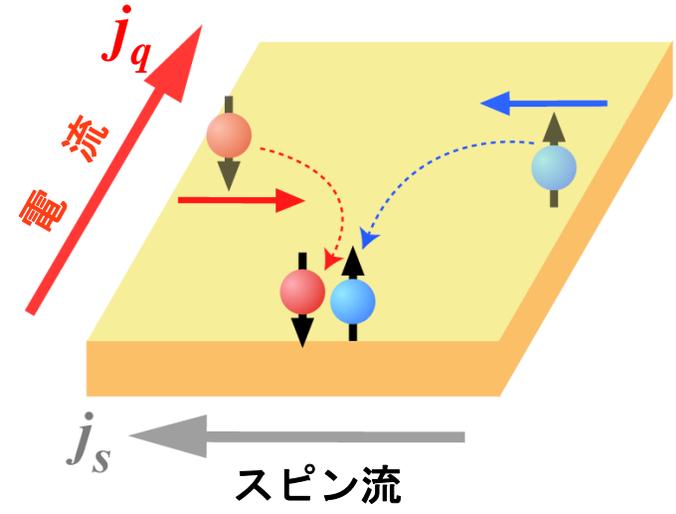
磁性体を使わない電流 \rightleftharpoons スピン流変換
 電流を伴わない純粋なスピン流の生成と検出



正スピンホール効果

電流を流すと垂直方向に
 スピン流が生じる
 =スピンホール効果

Spin Hall Effect
 (SHE)



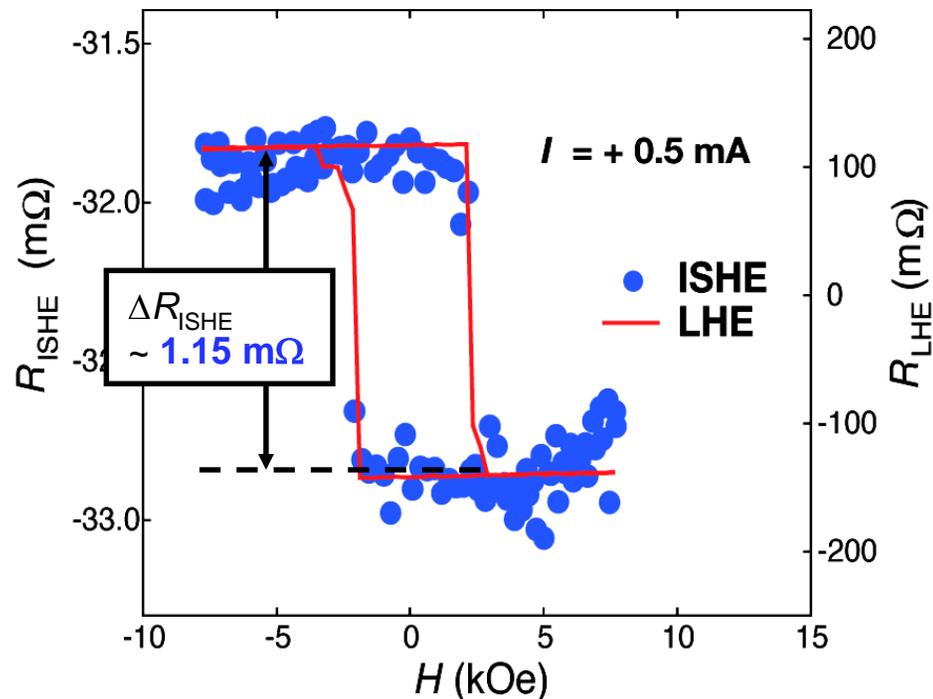
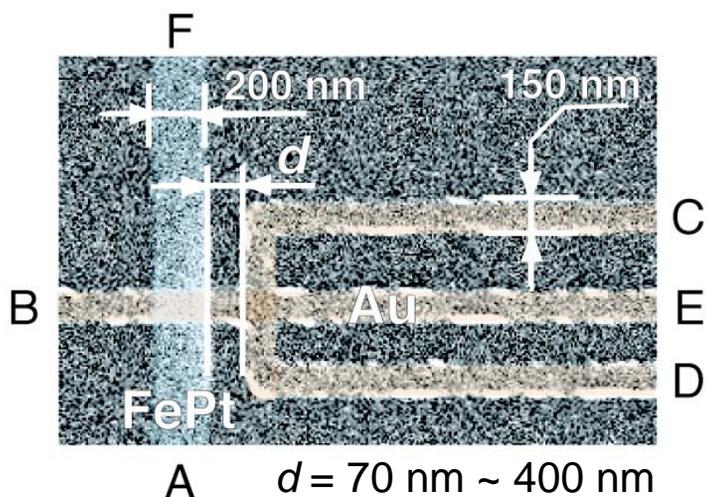
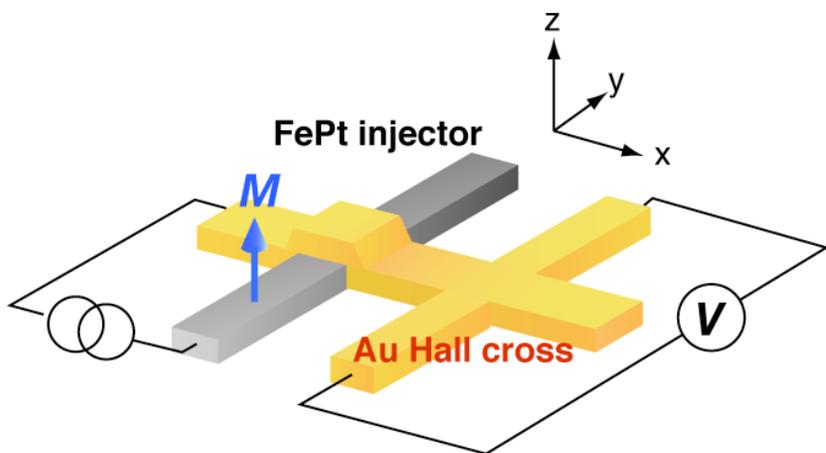
逆スピンホール効果

スピン流を流すと垂直方向に
 電流が生じる
 =逆スピンホール効果

Inverse Spin Hall Effect
 (ISHE)

Auの巨大スピンホール効果

(東北大・高梨グループ: T. Seki *et al.*, Nature Mater. 7 (2008) 125.)



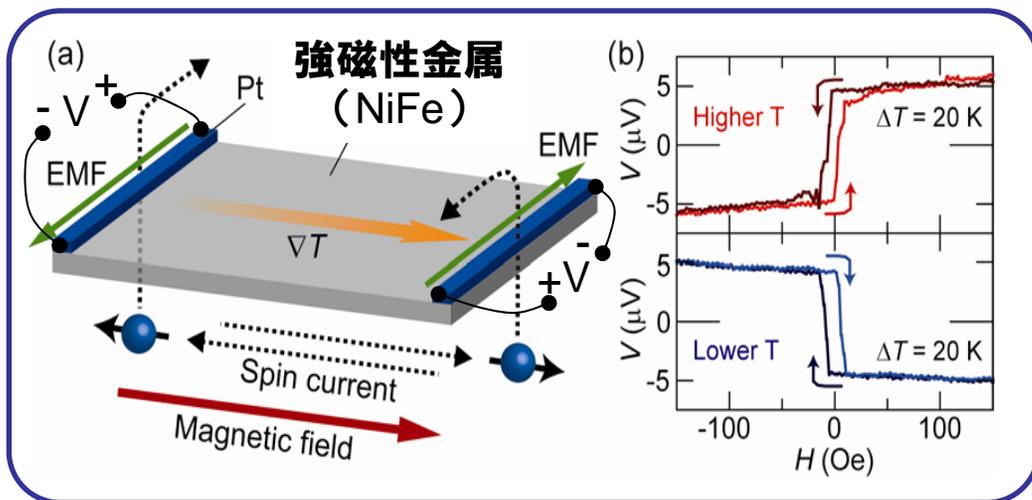
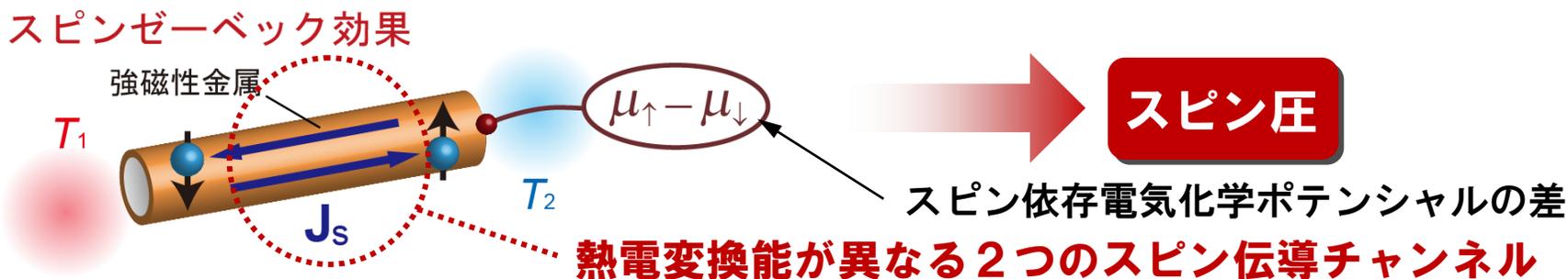
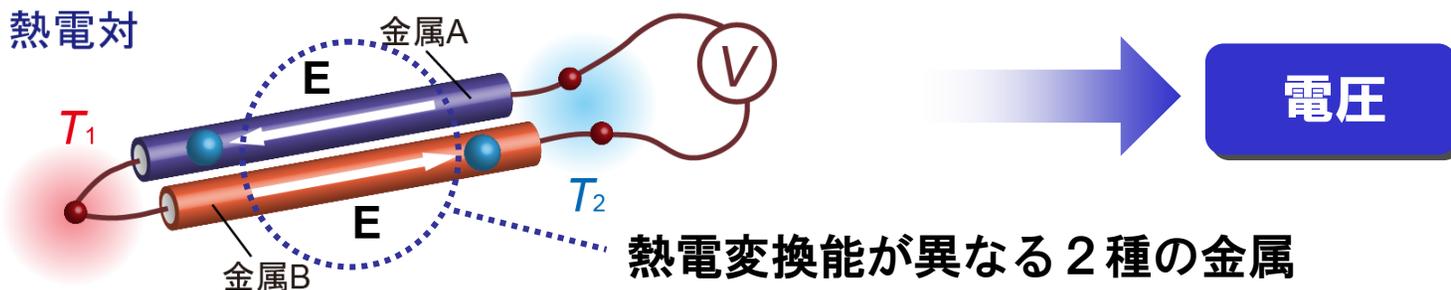
室温で巨大なスピンホール効果
の観測に成功.

スピンホール角 ~ 0.1

全体の10%に当たる電子のスピンの、
アップかダウンかに分別できる.

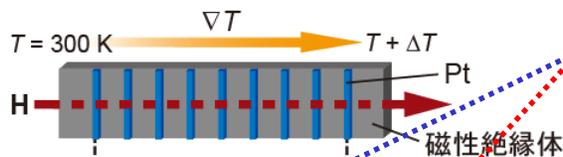
スピンゼーベック効果 (1)

(慶大/東北大・齊藤グループ: K. Uchida *et al.*, Nature 455 (2008) 778.)



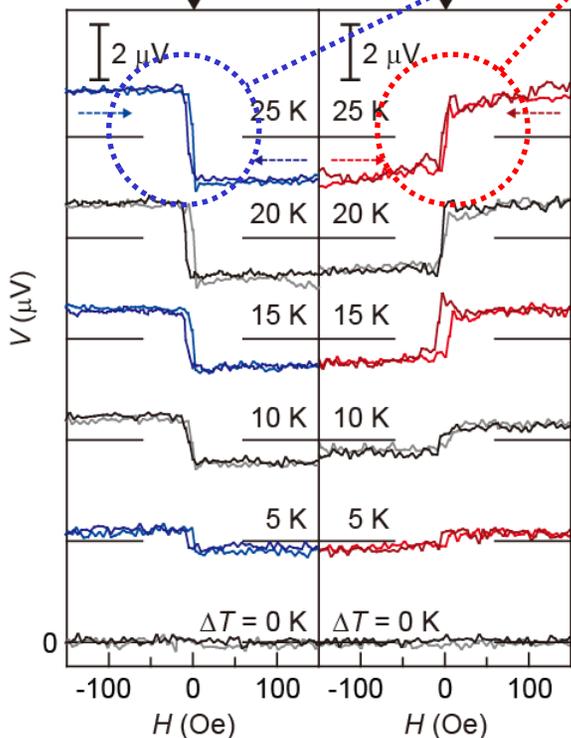
- ・ 熱によるスピン流生成
- ・ 逆スピンホール効果によるスピン流の電気的検出
- ・ 高効率熱電素子の可能性

スピンゼーベック効果 (2)



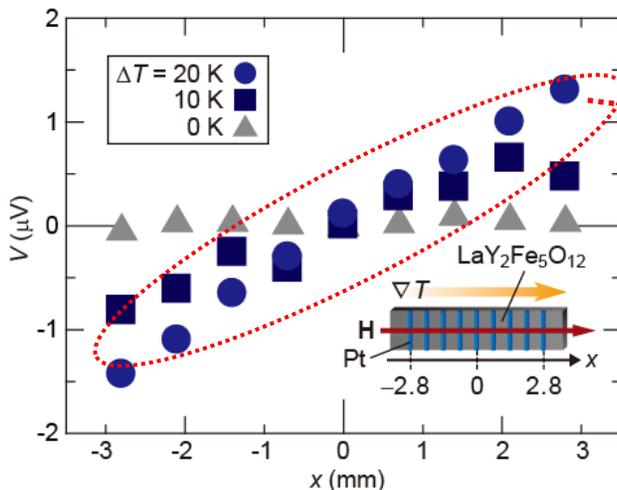
スピンゼーベック効果は磁性絶縁体でも生じる

局在スピンの集団励起(スピン波)が起源



起電力の温度差依存性

空間分布測定



金属系と同様の振舞い

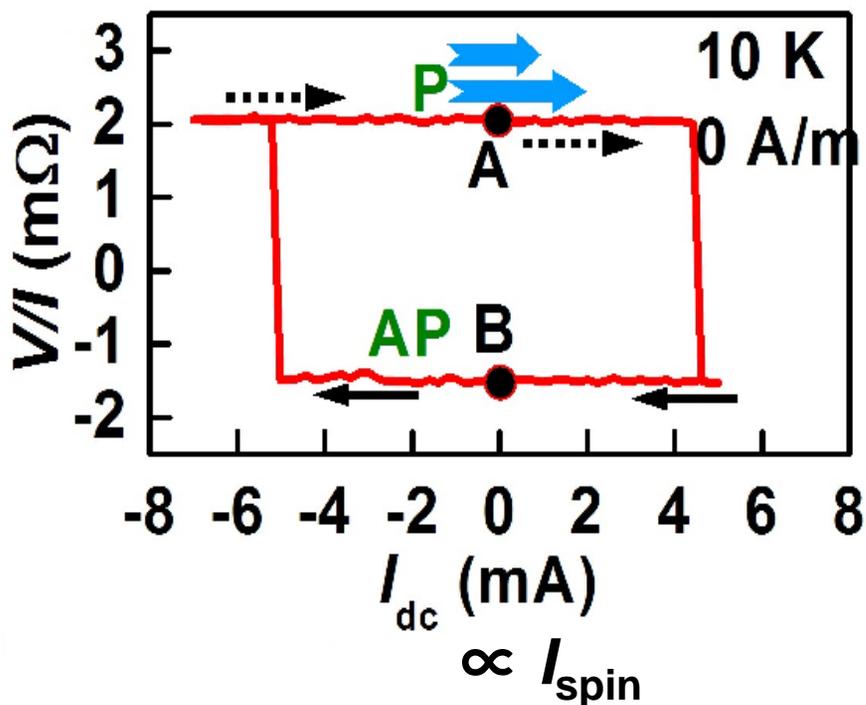
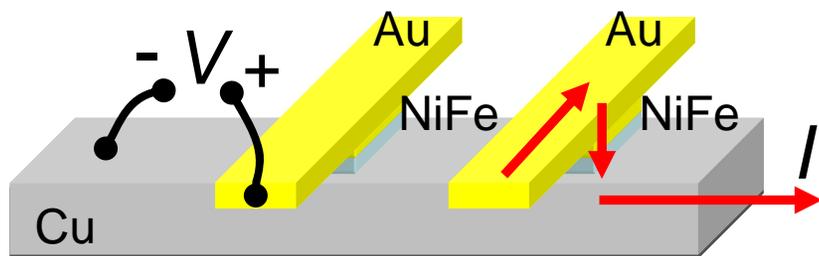
スピン圧は両端で逆符号
+ mmスケールに分布

スピンゼーベック効果と絶縁体スピン流を用いることで、
スピン情報の長距離伝送が可能に！

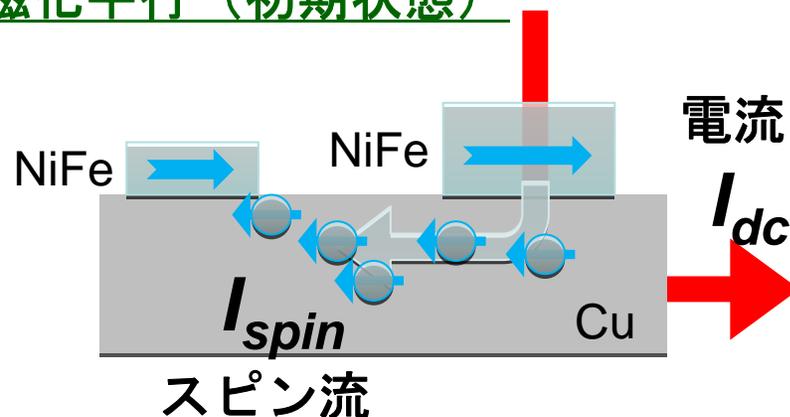
スピン流の伝搬

純粹スピンの流による磁化反転

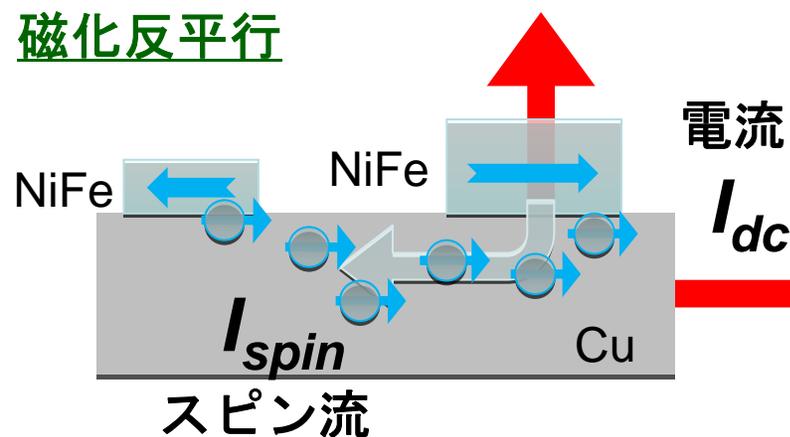
(東大・大谷グループ: T. Yang *et al.*, Nature Phys. 4 (2008) 851.)



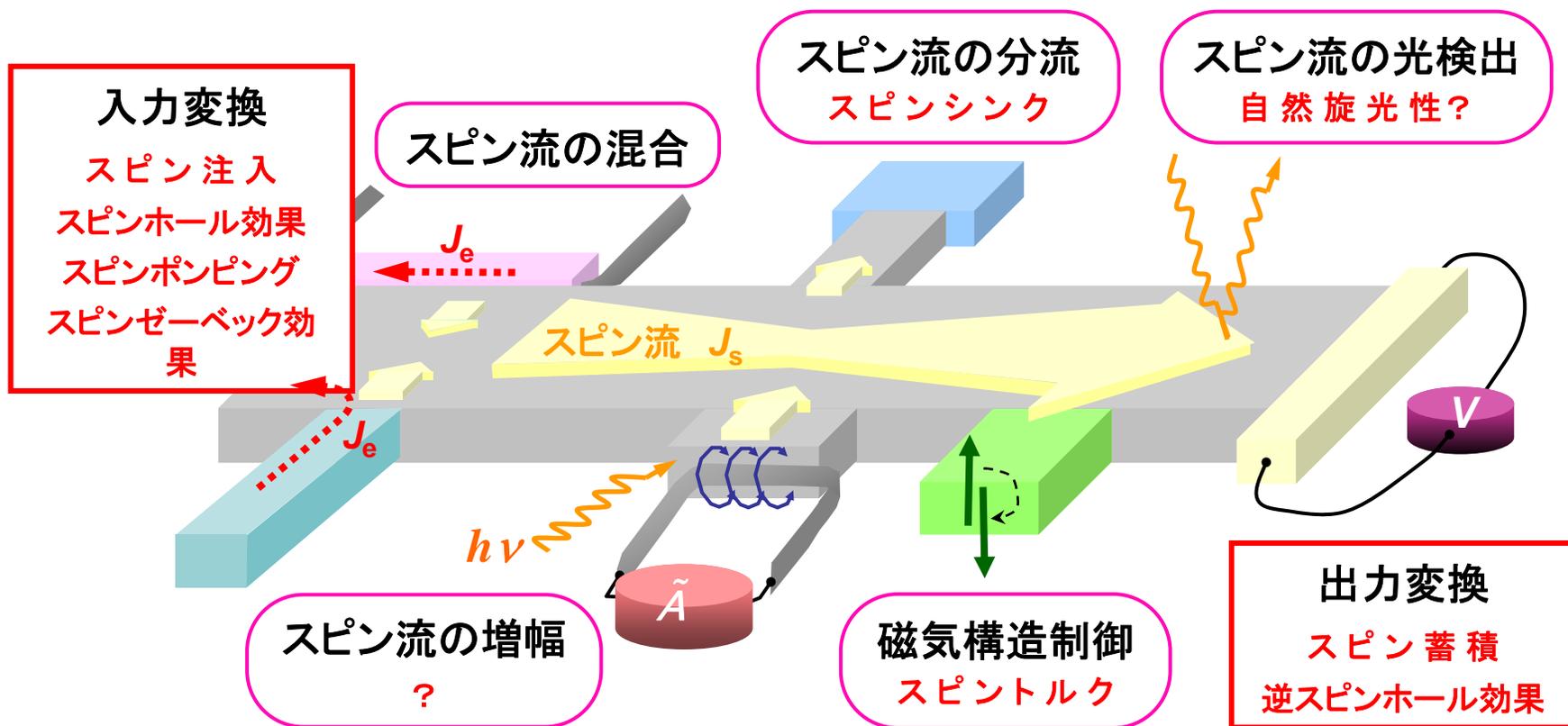
磁化平行 (初期状態)



磁化反平行



スピントル回路



省エネルギー？
低ノイズ？

科研費特定領域研究「スピン流の創出と制御」

(2007~2010年度)



A01
スピン源の探索・創製

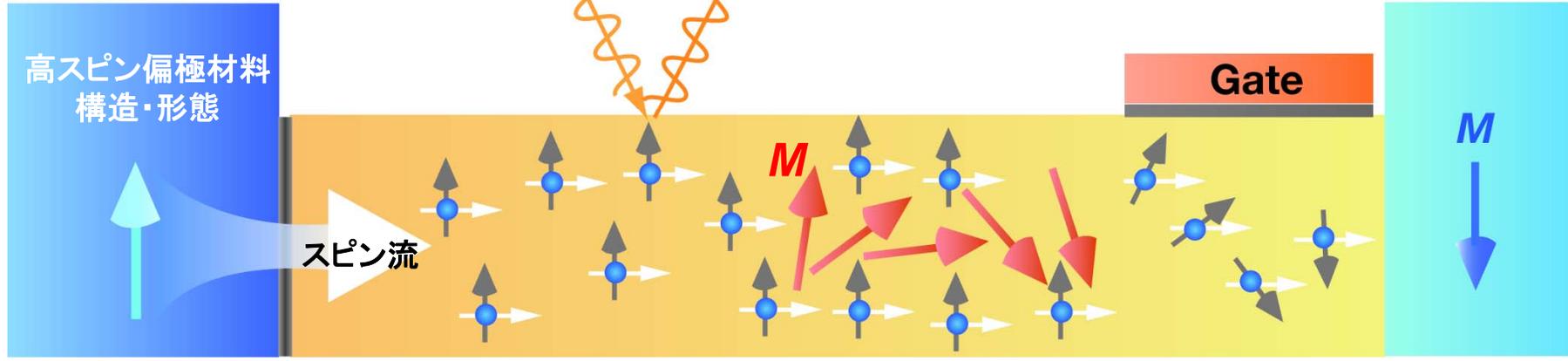
- 高梨 (東北大)
- 黒田 (筑波大)
- 白井 (東北大)
- 高橋 (物材機構)
- 藤森 (東大)
- 山本 (北大)

A03
スピン流と光物性

- 大野 (東北大)
- 安藤 (東北大)
- 永長 (東大)
- 宗片 (東工大)

A05
スピン流の機能と制御

- 田中 (東大)
- 清水 (農工大)
- 鈴木 (阪大)
- 仲谷 (電通大)



A02
スピン流とナノヘテロ構造

- 大谷 (東大)
- 秋永 (産総研)
- 井上 (名大)
- 新田 (東北大)

A04
スピン流と電子物性

- 小野 (京大)
- 勝本 (東大)
- 齊藤 (東北大)
- 多々良 (首都大)
- 前川 (東北大)