

# 研究スタッフ

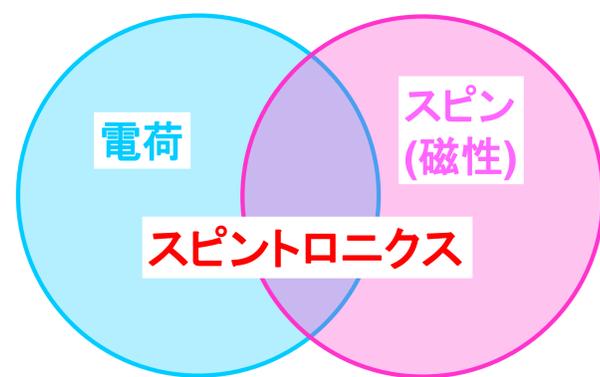
教授： 大野 英男、 准教授： 深見 俊輔

助教： 金井 駿、 助教： Justin Llandro

## 研究の概要

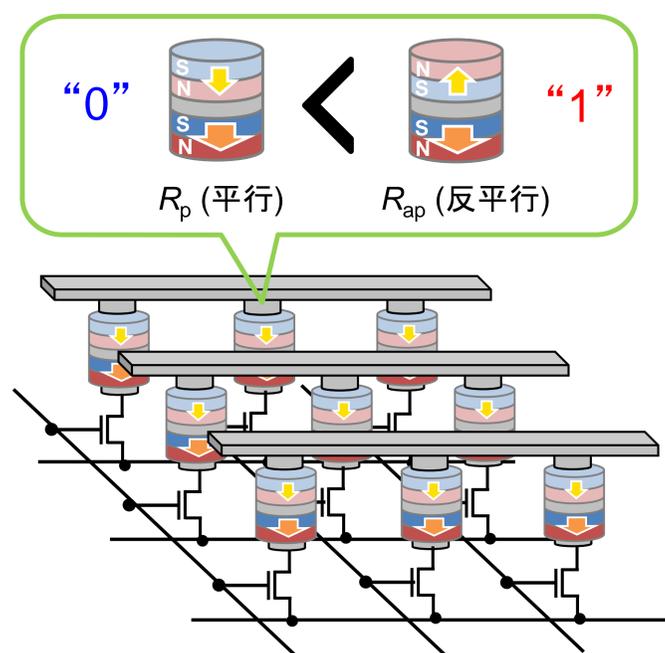
スピントロニクス研究室では、固体中の電子が持つ「電荷」と「スピン」という二つの自由度の制御と応用を目指して、スピン物性の理解、新規スピントロニクス材料の開発、及び高機能スピントロニクスデバイス開発に関する研究を行っています。

具体的には、省エネルギーかつ高機能なスピントロニクス素子への応用を目的として、半導体・金属磁性体におけるスピン物性の理解、及びそれらを利用した新規スピン機能材料、新規スピントロニクス素子の開発に関する研究を行っています。また、高機能・低消費電力が期待される不揮発性スピンメモリ・論理集積回路、及び人工知能用ハードウェアの実現に向けた基盤技術として、磁気トンネル接合(MTJ)素子、磁壁移動素子、スピン軌道トルク素子、電界効果素子などの研究開発を進めています。



## <研究テーマ>

1. スピントロニクスに関する研究
2. スピントロニクス材料における電子・光・スピン物性とその応用に関する研究
3. 磁性半導体およびその量子構造の物性と応用に関する研究
4. 金属磁性体の磁化の制御とその機能素子応用に関する研究
5. 金属磁性体素子とそのメモリ・論理集積回路への応用に関する研究

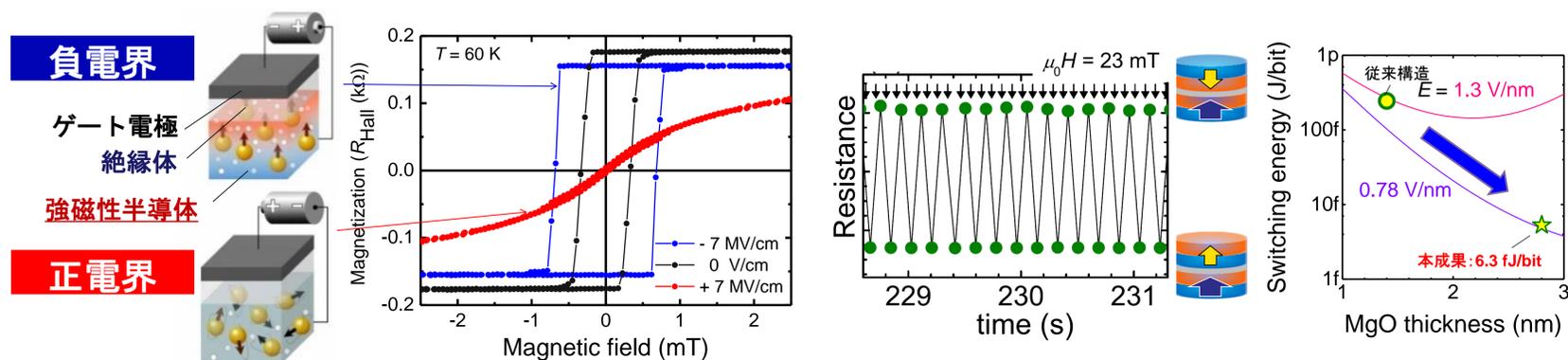


## 主な研究成果

- 強磁性半導体・超薄膜磁性金属における磁性の電氣的制御、および電界磁化反転
- 世界最高性能を有する垂直磁気異方性CoFeB/MgO磁気トンネル接合の開発
- スピン・軌道相互作用を用いた超高速磁化反転・アナログ磁化反転の実現
- スピントロニクス素子を用いた高機能低消費電力人工知能のコンセプト実証

## ➤ 磁性の電氣的制御 – 究極の省エネルギー不揮発性メモリを目指して

強磁性半導体は半導体に磁性元素をドーピングして作製される強磁性を示す半導体です。我々は、電界効果型トランジスタ構造を用いて、世界で初めてゲート電界による磁気特性の制御に成功しました。最近では、超薄膜の強磁性金属においても室温下における磁気特性の電氣的制御に成功しており、これを利用した電界による磁化反転を実現しました。

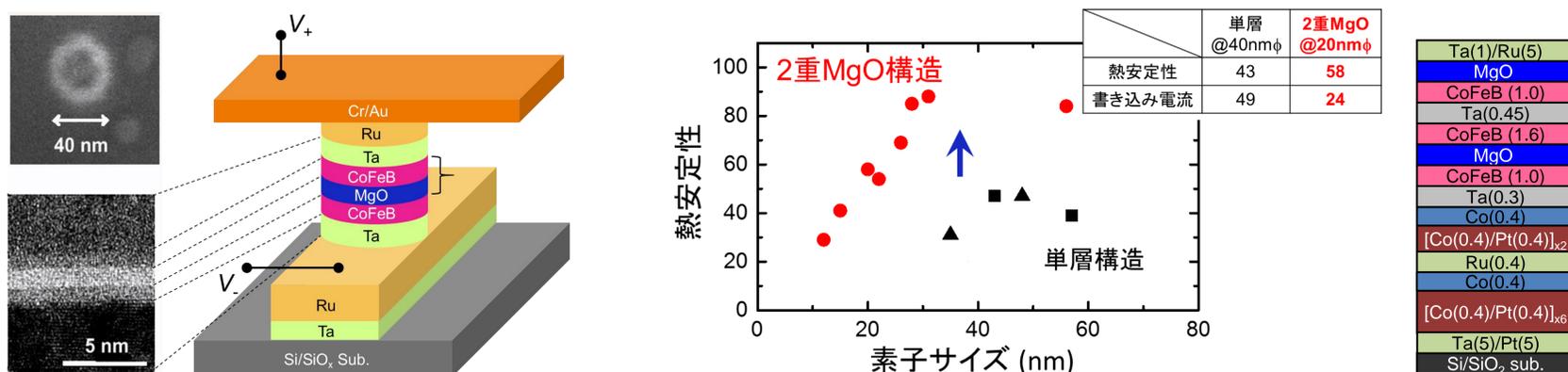


▲強磁性半導体(In,Mn)Asにおけるゲート電界印加による強磁性⇄常磁性のスイッチ：H. Ohno *et al.*, Nature (London) **408**, 944 (2000). ▲世界初の垂直磁化磁気トンネル接合の電界誘起磁化反転(左)、及び世界最小電力達成 S. Kanai *et al.*, Appl. Phys. Lett. **101**, 122403 (2012); S. Kanai *et al.*, *ibid.* **108**, 192406 (2016).

## ➤ 強磁性金属を用いたナノスピンメモリ

### ■ 二端子素子 – 高性能高密度不揮発性メモリ

磁気トンネル接合(MTJ)を用いた不揮発性メモリ(STT-MRAM)の開発が盛んに行われています。2010年に、垂直CoFeB/MgOを開発し高TMR比、高熱安定性、低書き込み電流、高温熱処理耐性を同時に実現しました。続いて2012年に開発した2重MgO界面構造は現在のSTT-MRAMのデファクト構造となっています。2014年にはこの構造を用い世界最小となる直径11nmの素子の動作を確認しました。

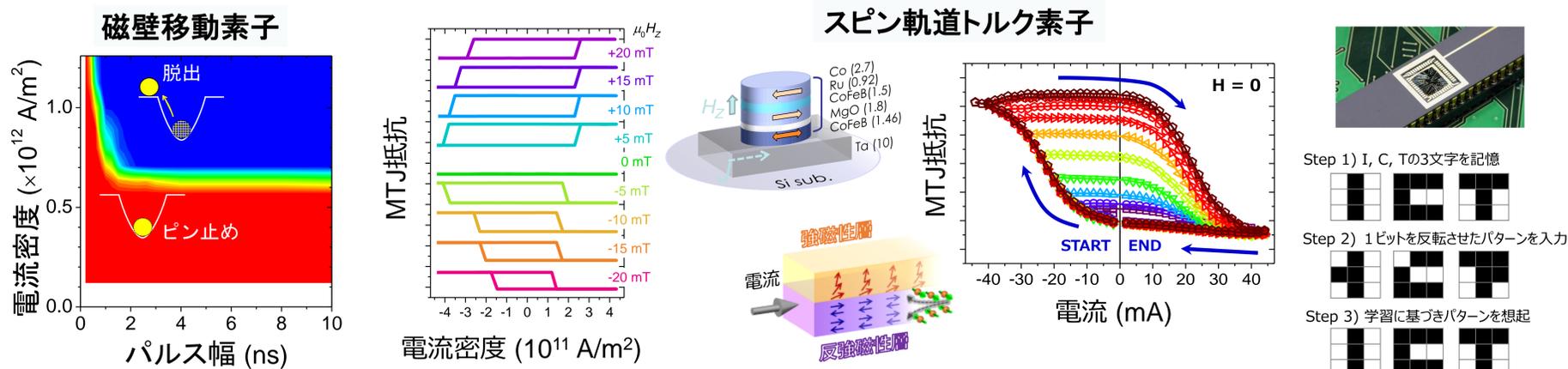


▲直径40 nmのCoFeB/MgO構造を有する垂直MTJ素子の高熱安定性・高TMR比(124%)・低書き込み電流の実現：S. Ikeda *et al.*, Nature Mater. **9**, 721 (2010).

▲2重MgO構造MTJ素子の直径20nm以下での高熱安定性の実証：H. Sato *et al.*, Appl. Phys. Lett. **101**, 022414 (2012); H. Sato *et al.*, *ibid.* **105**, 062403 (2014).

### ■ 三端子素子 – 高速不揮発性メモリから人工知能ハードウェアまで

磁壁移動やスピン軌道トルク磁化反転を用いた三端子素子は高速かつ高信頼動作に有望です。2012年にCo/Niを用いた磁壁移動素子の高速高信頼動作を実証しました。2016,17年には新構造スピン軌道トルク素子を用いたサブナノ秒磁化反転、反強磁性体を用いたアナログ的な磁化反転とそれを用いた人工知能の原理実証に成功しました。



▲Co/Niを用いた磁壁移動素子高速高信頼動作：S. Fukami *et al.*, Nature Comm. **4**, 2293 (2013). ▲新構造素子を用いた超高速動作実証(左),反強磁性体を用いた無磁場・アナログ磁化反転(中)、人工知能への応用(右)：S. Fukami *et al.*, Nat. Nanotech. **11**, 621 (2016); S. Fukami *et al.*, Nat. Mater. **15**, 535 (2016); W. A. Borders *et al.*, APEX **10**, 013007 (2017).

## 産学連携を希望するテーマ例

- 不揮発性デジタル・アナログスピントロニクス素子を用いた低消費電力集積回路、人工知能ハードウェアに関する研究