

## 磁化方向制御に必要な電力を極限まで低減可能な新たな方法を実証

### 1. 発表者：

レ デュック アイン(Le Duc Anh) (東京大学大学院工学系研究科総合研究機構 助教)  
山下 貴史 (東京大学工学部電気電子工学科 学部4年生：研究当時)  
山崎 浩樹 (東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻 修士課程2年：研究当時)  
荒木 大晴 (東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻 修士課程2年：研究当時)  
関 宗俊 (東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻 准教授)  
田畑 仁 (東京大学大学院工学系研究科バイオエンジニアリング専攻 教授)  
田中 雅明 (東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻 教授)  
大矢 忍 (東京大学大学院工学系研究科総合研究機構 准教授)

### 2. 発表のポイント：

- ◆強磁性酸化物(磁石)を用いて、磁石に15~200 mV程度の極めて小さな電圧を印加するだけでN極とS極(磁化)の向きが90°回転する現象を発見しました。この現象は、電圧の印加により電子の軌道の対称性が変化することによって起こっているものと考えられます。
- ◆磁化回転に必要な電流密度は $10^{-2}$  A/cm<sup>2</sup>程度で、この値は最先端の磁気ランダムアクセスメモリ(MRAM)で用いられている典型的な電流密度(約 $10^7$  A/cm<sup>2</sup>)より9桁程度小さな値です。
- ◆本結果は、強磁性材料の電子構造を適切に設計することにより、磁化制御に必要な電力を極限まで低減できる新たな可能性を示しています。

### 3. 発表概要：

東京大学大学院工学系研究科のレデュックアイン助教、田中雅明教授、大矢忍准教授のグループと関宗俊准教授、田畑仁教授のグループは、磁石のN極とS極の向き(磁化の向き)を非常に小さい電力で回転できる革新的な方法を実証しました。研究グループは、絶縁体SrTiO<sub>3</sub>の4 nmの極薄膜を、磁石の性質をもつ強磁性酸化物LaSrMnO<sub>3</sub>で挟み込んだ磁気トンネル接合(注1)素子を作製しました。この接合に15~200 mVの小さな電圧を印加したところ、片方の強磁性酸化物層の磁化が90°回転することが分かりました。この際に流れる電流密度は極めて小さく、 $10^{-2}$  Acm<sup>-2</sup>程度でした。

現在、強磁性体の電子のスピン自由度(注2)を用いて新たな省エネルギーデバイスを実現しようとする研究が精力的に行われています。通常、磁化回転には、向きの揃ったスピンをもつ電子を磁気トンネル接合に流して、電子のスピン向きを強磁性体の磁化に受け渡す方法などが用いられています。しかし、従来の方法では、一般的には $10^7$  Acm<sup>-2</sup>程度の大きな電流密度が必要でした。

本実験に用いたLaSrMnO<sub>3</sub>という物質は、SrTiO<sub>3</sub>層との接合界面では、わずかな電圧を印加するだけで、伝導に寄与する電子の軌道の対称性が変わると考えられています。本研究では、この変化に伴って磁化の向きやすい方向が変化し、磁化が回転しているものと考えられます。本成果は、磁化反転に必要なエネルギーを極限まで抑えることが可能な新たな手法の実現につながるものと期待されます。

#### 4. 発表内容：

現代の情報社会が IoT(Internet of Things)の時代を迎え、爆発的に増大するデータ量やインターネット接続機器の数に対し、情報通信技術 (ICT) を担う半導体集積回路の性能を飛躍的に向上させることが強く求められています。特に、情報処理に必要なエネルギーを低減することは極めて重要な課題です。現在のパソコンやスマートフォンを始めとしたほとんどの電子機器において、情報処理を担う中枢的な部分には「トランジスタ」が利用されており、データの「0」と「1」の状態を電子の「電荷」の量で記録しています。しかし、この情報を維持するためだけに、大量の電力を供給し続ける必要があります。一方で、電子のもつスピン自由度を利用して、現在のトランジスタに長期記憶の機能を持たせる研究が進んできており、このような技術を用いて新たなデバイスが実現できれば、大幅な電力の削減が可能となります。このようなスピンドバイスを用いれば、デバイス出力を磁石の磁化の向きで制御することができ、情報を磁化の向きとして蓄えて電力を使わずにデータを保持できるようになります。しかし、磁化の向きを変えるには、一般的には  $10^7 \text{ Acm}^{-2}$  程度の大きな電流が必要であるため、スピンを用いた次世代の電子デバイスを実現する上で、磁石の磁化を小さな消費電力で制御する方法の実現が、最も重要な課題のひとつとなっています。

##### ① 研究内容

今回研究グループは、強磁性酸化物  $\text{LaSrMnO}_3$  と絶縁体  $\text{SrTiO}_3$  の単結晶ヘテロ構造で構成される磁気トンネル接合素子を作製して、この接合に小さな電圧 (15~200 mV) を印加するだけで片方の  $\text{LaSrMnO}_3$  層の磁化が  $90^\circ$  回転することを明らかにしました。磁化回転に必要な電流はわずか  $10^{-2} \text{ Acm}^{-2}$  程度であり、ほとんど電力を消費せず磁石の向きを  $90^\circ$  回転できることが分かりました (図1)。

単結晶でできた強磁性材料は、その結晶構造を反映して、磁化が特定な方向を向きやすい性質を持ちます。この性質は結晶磁気異方性と呼ばれています。結晶磁気異方性は、その物質の伝導電子のもつ電子軌道の形や対称性と関連していることが知られています。従って、電圧を印加して電子のエネルギーを変化させることにより、対称性の異なる軌道に電子を遷移させることができれば、磁石の結晶磁気異方性が変化して磁化が回転する可能性があります。しかし、通常の金属の強磁性体などでは、伝導電子のもつエネルギーと、それとは異なる対称性をもつ軌道の電子のエネルギーが離れていることが多く、電圧でこのような遷移を起こすことは容易ではありません。今回研究に用いた強磁性酸化物  $\text{LaSrMnO}_3$  は、絶縁体  $\text{SrTiO}_3$  と接した状態において、その界面で、対称性の異なる  $e_g$  と  $t_{2g}$  という電子軌道がお互いに近いエネルギーをもっています。そのため、わずかな電圧で伝導電子の軌道を遷移させることが可能です。実際に、研究グループは、磁気トンネル接合素子にわずかな電圧を印加するだけで、片方の  $\text{LaSrMnO}_3$  層の結晶磁気異方性が大きく変化することを観測しました。また、この磁気異方性の変化を利用して、 $\text{LaSrMnO}_3$  の磁化を無磁場で  $90^\circ$  回転させることに成功しました。本実験は 3 K という低温で行われていますが、原理的には、室温でも同様の電子構造をもつ物質を実現できれば、室温での動作も可能であると考えられます。

##### ② 社会的意義・今後の予定

本研究では、磁石材料の電子構造を適切に設計することにより、極低電力での磁化反転を可能とする新たな方法が実証されました。このような物質の電子構造を設計する手法はバンドエンジニアリングと呼ばれているもので、半導体などの電子デバイスの設計において欠かすこと

のできない技術です。本研究により、今後、強磁性物質の磁化制御という新たな舞台でも、この技術を活かすことができることが明らかになりました。この新しい手法は、磁化方向を極低電力で制御することを可能とし、スピン自由度を用いた次世代の電子デバイスの研究開発を加速させるものと期待されます。

## 5. 発表論文誌：

雑誌名：*Physical Review Applied*

論文タイトル：Ultralow-power orbital-controlled magnetization switching using a ferromagnetic oxide interface

著者：Le Duc Anh, Takashi Yamashita, Hiroki Yamasaki, Daisei Araki, Munetoshi Seki, Hitoshi Tabata, Masaaki Tanaka, and Shinobu Ohya.

## 6. 問い合わせ先：

東京大学 大学院工学系研究科  
総合研究機構 および 電気系工学専攻  
助教 レ デウック アイン (Le Duc Anh)  
(日本語、英語、ベトナム語で対応可能)

東京大学 大学院工学系研究科  
スピントロニクス学術連携研究教育センター センター長  
電気系工学専攻 教授  
田中 雅明 (たなか まさあき)  
(日本語、英語で対応可能)

東京大学 大学院工学系研究科  
総合研究機構 および 電気系工学専攻  
准教授 大矢 忍 (おおや しのぶ)  
(日本語、英語で対応可能)

## 7. 用語解説：

(注1) 磁気トンネル接合素子：非磁性絶縁層が二つの強磁性層に挟み込まれた構造をもつ。接合の上下の強磁性層の磁化方向が平行かまたは反平行であるかによって、素子の抵抗が変化し、情報の「0」と「1」の状態を読み取ることができる。

(注2) スピン自由度：電子のもつ磁石の性質としての向きの自由度。スピンは古典的には電子の自転に相当する角運動量である。電子のスピンが揃った状態が強磁性と呼ばれる状態である。これが磁石の磁化や磁力の主な起源となっている。

8. 添付資料：

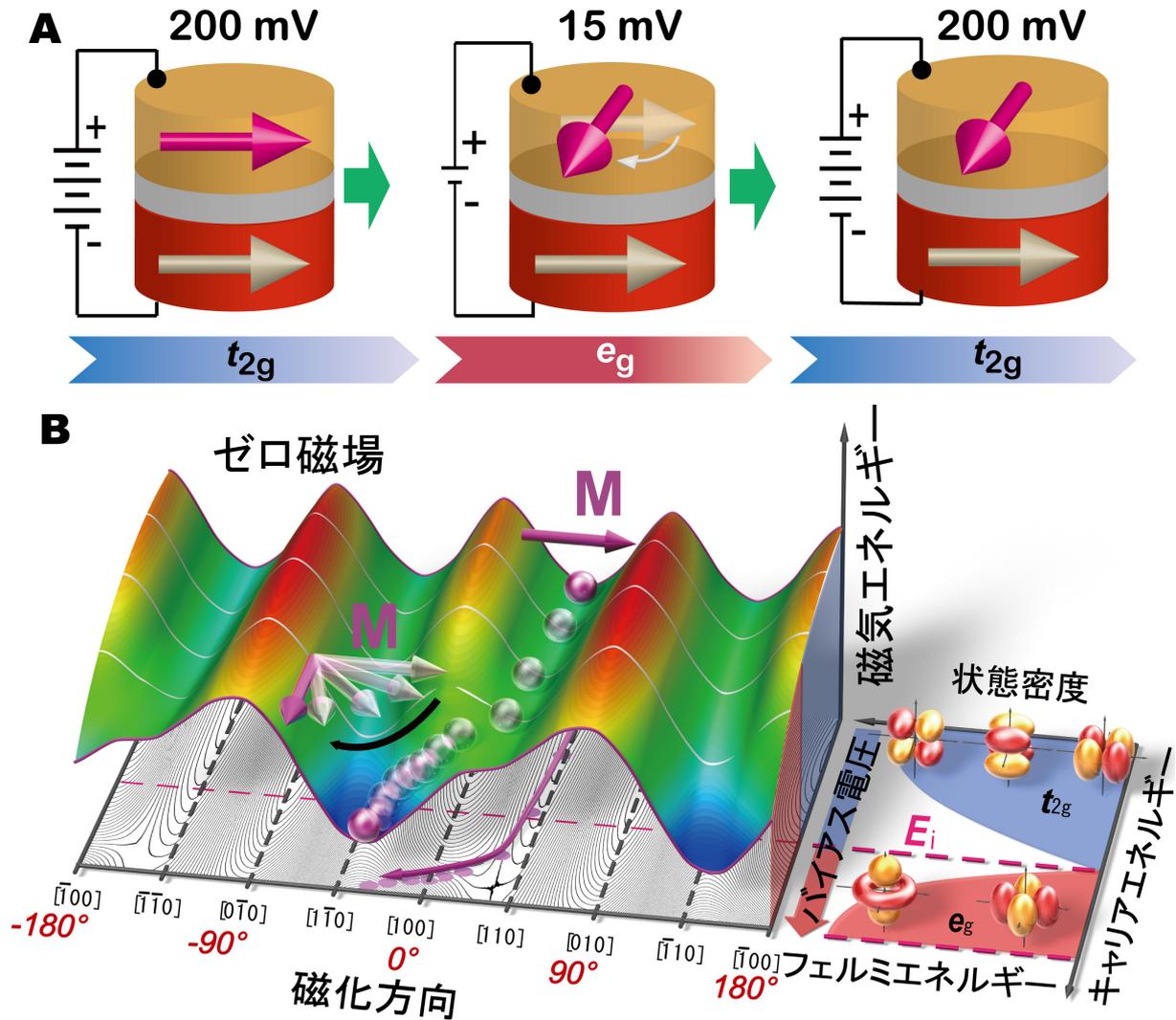


図1 A. 研究成果の模式図：磁気トンネル接合素子への印加電圧をわずかに変えることにより、上部の強磁性電極の磁化が  $90^\circ$  回転する様子。B. 上部の強磁性酸化物  $\text{LaSrMnO}_3$  層内の磁気エネルギーを、面内の磁化方向と、電圧（またはキャリアエネルギー）に対してプロットした図。高い電圧（200 mV）が印加されているときは（グラフの奥側）、伝導電子は  $t_{2g}$  軌道（右図の奥の領域）の状態となっている。このとき、左の図に示すように磁気エネルギーは面内の4方向に磁化が向いたときに低くなり（奥側）、磁化はこれらの4方向に向きやすくなっている。一方、電圧が 15 mV になると（グラフの手前側）、電子は  $e_g$  軌道をもった状態（右図の手前側の領域）に遷移する。左図に示すように、この時は、磁気エネルギーは磁化が面内の2方向を向いたときに低くなるため（手前側）、磁化はこれらの2方向に向きやすい。この結果、初め磁化を  $45^\circ$  の方向を向けておき（奥側）、電圧を 200 mV から 15 mV に変えると、磁化の向きは  $-45^\circ$  の方向に変化する（手前側、ボールの動きを参照）。従って、磁化方向が  $90^\circ$  回転する。