

2022年5月20日



分野:自然科学系 キーワード:マルチフェロイクス、スピントロニクス、スピンドバイス、SDGs

## 世界最高性能のスピントロニクス 界面マルチフェロイク構造を実証

--スピントロニクスデバイスの電圧情報書き込み技術へ新たな道--

### 【研究成果のポイント】

- ◆ 強磁性体(磁石)<sup>※1</sup> と圧電体<sup>※2</sup> の接合構造(界面マルチフェロイク構造<sup>※3</sup>)において、スピントロニクス界面マルチフェロイク材料の世界最高性能を達成。
- ◆ 電界印加による磁化方向の繰り返しスイッチングを実証。
- ◆ 不揮発メモリとして期待される STT-MRAM<sup>※4</sup> を含む全てのスピントロニクスデバイス<sup>※5</sup> における低消費電力磁化制御技術として期待される「新たな電圧情報書き込み技術」の可能性を提示。

### ❖ 概要

大阪大学大学院基礎工学研究科の藤井竣平氏(当時 大学院博士前期課程)、宇佐見喬政特任研究員、浜屋宏平教授、同大学大学院工学研究科の白土優准教授、東京工業大学物質理工学院の合田義弘准教授らの共同研究グループは、スピントロニクスデバイスにおける新たな電圧情報書き込み技術のために、高性能なスピントロニクス界面マルチフェロイク構造を開発し、世界最高レベルの性能指標(磁気電気結合係数<sup>※6</sup>)を達成するとともに、電界印加による不揮発メモリ状態の繰り返しスイッチングを実証しました。

次世代の半導体不揮発メモリとして注目されている STT-MRAM などのスピントロニクスメモリデバイスは、情報書き込み時に電流を印加しているため、書き込み時のエネルギー消費電力が大きいことが課題となっています。そこで、低消費電力書き込み方式として、様々な電界印加方式<sup>※7</sup> の技術開発が進められています。中でも最近、図1(a)に示すような強磁性体(磁石)と圧電体の2層から構成される界面マルチフェロイク構造を利用した電界印加方式が注目されています。これは、圧電歪みを強磁性体に伝播させることで、強磁性体の磁化方向を制御する手法です。

次世代のスピントロニクスデバイスにおける低消費電力情報書き込み技術への応用を目指すには、より小

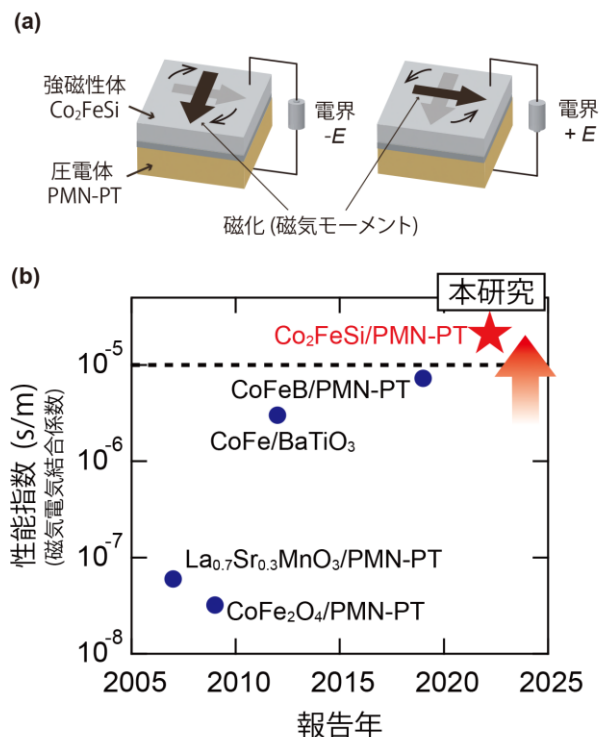


図 1. (a) 界面マルチフェロイク構造と電界印加による磁化方向制御の模式図。(b) 界面マルチフェロイク構造における性能指標(磁気電気結合係数)の現状。

## Press Release

小さな電圧で磁化方向を制御することができる**界面マルチフェロイク材料**の開発が重要であり、世界中で材料開発が行われています。界面マルチフェロイク材料の性能指標は、磁気電気結合係数と呼ばれています。この値が大きいほど、小さな電界で大きな磁化の変化が発現することを意味しており、実用化のためには  $10^{-5}$  s/m を超えることが必要とされています。しかしながら、これまで強磁性体として**スピン偏極率<sup>※8</sup>**の高い物質を用いた場合、磁気電気結合係数は  $10^{-5}$  s/m 未満に留まっており、この壁を超えることは非常に困難でした。

本研究では、**強磁性体として高いスピン偏極率を有することで知られる Co 系ホイスラー合金磁石<sup>※9</sup>**の一種である  $\text{Co}_2\text{FeSi}$  と、高い圧電性能を有する圧電体の一種である  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$  (PMN-PT)を組み合わせた新しい**界面マルチフェロイク構造**を高品質に作製し、実用化の壁として存在していた  $10^{-5}$  s/m 台の磁気電気結合係数を世界で初めて実証しました[図1(b)]。さらに、電界印加による**不揮発メモリ状態の繰り返しスイッチング**を実証しました(図 2)。近年 IoT 技術・AI 技術がますます進展する中、半導体素子の消費電力が爆発的に増加することが予想されています。本成果は、**不揮発メモリ素子として期待される MRAM を含む全てのスピントロニクス素子における低消費電力な磁化方向制御技術として期待されるため、「新たな電圧情報書き込み技術」の可能性を提示するものです。**

本研究成果の関連情報は、英国科学誌 Nature 系の専門誌「NPG Asia Materials」(オンライン: 5 月 20 日)に掲載されます。

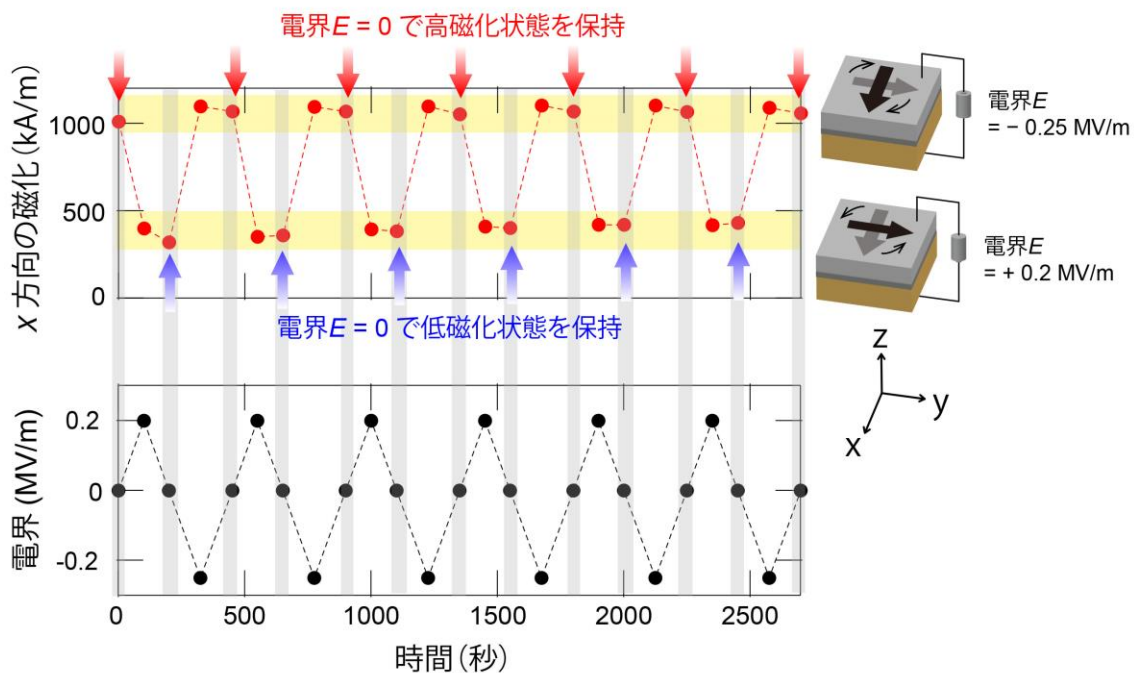


図 2. 電界印加による磁化方向(状態)の制御の様子。電界  $E$  の符号を反転させると磁化方向が変化する。また、ゼロ電界( $E = 0$ )状態では、高磁化状態と低磁化状態の 2 つの状態を保持することができる。

### ❖ 研究の背景と研究成果

磁石の磁化の向き(N 極 と S 極)を情報の「1」と「0」に対応させる磁気メモリでは、情報を不揮発に記録することができるため、ハードディスクドライブ(HDD)<sup>※10</sup>などの大容量ストレージは世界中のデータセンターなどで用いられています。この磁石の不揮発メモリ機能を電子デバイスに応用した「スピントロニクスデバイス」の代表例である MRAM は、国内外の研究機関をはじめ、世界中の半導体メーカーが盛んに研究開発を進めています。ここで、MRAM の記憶素子として用いられている磁気トンネル接合素子<sup>※11</sup>では、情報書き込み時に磁



## Press Release

石の磁化方向をスイッチするために、素子に大電流を印加することが求められています。その結果、電流印加による情報書き込み方式はジュール発熱によるエネルギー損失を伴い、消費電力が大きいことが課題となっています。そこで近年、低消費電力書き込み方式として、様々な電界印加方式の技術開発が進められていますが、最近、図1(a)に示すような強磁性体(磁石)と圧電体の2層から構成される界面マルチフェロイク構造を利用した方式が注目を集めています。これは、圧電歪みを強磁性体に伝播させることで、強磁性体の磁化方向を制御する手法です。

この界面マルチフェロイク構造は、材料の組み合わせが豊富であり、室温を含む幅広い温度での動作が可能となるため、他の手法に比べてデバイス応用上の多くの利点を有しています。これまで、界面マルチフェロイク構造の研究分野では、効率的な磁化制御に向けて、その性能指標である磁気電気結合係数を  $10^{-5}$  s/m 台まで向上させるために、スピントロニクスデバイスに適用できない「磁歪材料<sup>\*12</sup>」を用いた研究が多くなされてきました。しかし、応用上重要である「スピントロニクスデバイス用の磁石」を用いた高性能実証には至っていませんでした。

本共同研究グループでは、スピントロニクスデバイス用の磁石として重要な指標である「高スピン偏極率」を有することが知られる Co 系ホイスラー合金磁石の一種の  $\text{Co}_2\text{FeSi}$  に着目し、高い圧電性能を有する圧電体 PMN-PT と組み合わせて高品質な界面マルチフェロイク構造を作製しました。その結果、図1(b)のように、界面マルチフェロイク構造における性能指標(磁気電気結合係数)は、スピントロニクス用磁石を用いた原理実証において世界最高値である  $1.8 \times 10^{-5}$  s/m に到達することが明らかになりました。これは、これまでの最高値の2倍以上の値です。さらに、電界印加による不揮発メモリ状態の繰り返しスイッチングも実証することができました(図2)。

#### ❖ 本研究成果が社会に与える影響(本研究成果の意義)

磁石を用いた不揮発メモリ素子として期待される STT-MRAM を含む全てのスピントロニクスデバイスでは、磁化方向を制御することが情報の書き込みに相当します。現行の電流印加方式では、約  $0.1$  pJ/bit の書き込み電力を必要としますが、電界印加方式ではそれよりも3桁低い、約  $0.1$  fJ/bit という超低消費電力で書き込むことができると期待されています。今回開発された技術は、スピントロニクスデバイスの「新たな電圧情報書き込み技術」の可能性を提示するものであり、界面マルチフェロイク材料を用いた新しいタイプの MRAM や不揮発ロジックデバイスへの可能性を期待させるものです。今後は、次世代の高集積・低消費電力半導体デバイスとの融合などを視野に研究を進めていく予定です。

#### ❖ 特記事項

本研究成果に関する情報は、英国科学誌 Nature 系の専門誌「NPG Asia Materials」(オンライン:5月20日)に掲載されます。

タイトル: Giant converse magnetoelectric effect in a multiferroic heterostructure with polycrystalline  $\text{Co}_2\text{FeSi}$

著者名: Shumpei Fujii, Takamasa Usami, Yu Shiratsuchi, Adam M. Kerrigan, Amran Mahfudh Yatmeidhy, Shinya Yamada, Takeshi Kanashima, Ryoichi Nakatani, Vlado K. Lazarov, Tamio Oguchi, Yoshihiro Gohda, and Kohei Hamaya

DOI: 10.1038/s41427-022-00389-1

雑誌: NPG Asia Materials 14, 43 (2022).

本研究は、以下の事業の支援を受けて行われました。

・科学技術振興機構 (JST) 戦略的創造研究推進事業 チーム型研究 CREST [ Grant 番号 JPMJCR18J1 ]

研究領域



「実験と理論・計算・データ科学を融合した材料開発の革新」

(研究総括: 細野秀雄 東京工業大学 栄誉教授/元素戦略研究センター長)

研究課題「界面マルチフェロイク材料の創製」

(研究代表者: 谷山智康 名古屋大学大学院理学研究科 教授)

❖ 用語説明

※1 強磁性体(磁石)

物質中の原子の磁気モーメントが同一の方向に揃って整列した状態を強磁性状態と呼び、その物質を強磁性体と呼ぶ。磁石のこと。

※2 圧電体

外場を加えた時に物質を構成する原子やイオンの相対位置が変化し、表面にプラスとマイナスの電荷(分極)が生じる現象を圧電効果と呼ぶ。一方、電界印加により物質の形状を変化させることを逆圧電効果と呼ぶ。これらの現象が顕著に現れる物質を圧電体と呼ぶ。圧電体は、機械的変化と電気的変化を互いに交換できるため、振動センサー、圧力センサー、アクチュエータなどに用いられている。

※3 界面マルチフェロイク構造

強磁性体と圧電体または強誘電体(圧電体の中でも、自発的に分極が生じ、その自発分極が電界により反転可能な物質)の2層構造で構成され、磁性状態を電界で制御することができる。

※4 STT-MRAM

磁気抵抗ランダムアクセスメモリ(MRAM)の一種。MRAM は、電源を OFF にしても情報が保持される不揮発メモリである。高速動作、高書き込み耐性などを有することから、次世代のランダムアクセスメモリとして期待されている。特にスピントランスファートルク(STT)現象を利用して電流により磁化反転を誘起し、情報書き込みを行う MRAM を STT-MRAM と呼ぶ。

※5 スピントロニクスデバイス

電子の電気的な性質(電荷)を利用するエレクトロニクスデバイスに、電子の磁気的な性質(スピン)も活用することで、低消費電力デバイスの開発を目指す研究分野をスピントロニクスと呼び、スピントロニクス技術を利用した新機能デバイスをスピントロニクスデバイスと呼ぶ。

※6 磁気電気結合係数

界面マルチフェロイク材料の性能指標として用いられる値であり、印加した電界(E)に対して変調された磁化(M)の値を用いて、 $\mu_0(dM/dE)$ で表される。ここで、 $\mu_0$ は真空の透磁率である。この値が大きいほど、効率的に電界で磁性を制御可能な材料であることを意味する。

※7 電界印加方式

電界を印加することにより、磁化の向きを変調する手法のこと。この方式は、通電に伴うジュール損失が生じないため、エネルギー消費の少ない新しい磁化制御技術として期待されている。歪み効果を積極的に活用する界面マルチフェロイク構造の他に、超薄膜金属強磁性体/誘電体界面に電界を印加して界面磁気異方性(磁化を特定の方向に向かせる性質)を変調することで、磁化の向きを制御するアプローチも研究されている。



## ※8 スピン偏極率

物質の電気伝導に寄与する電子のスピンは、上向きと下向きの二種類の状態を取る。スピン偏極率は、この上向きスピン数と下向きスピン数の差で定義され、スピン偏極率が1となる材料はハーフメタルと呼ばれる。スピントロニクスデバイスの高性能動作に重要な指標である。

## ※9 ホイスラー合金磁石

構成原子が規則正しく配列した規則合金磁石の一種であり、ドイツのホイスラーによって発見された。その構成元素や規則性に依存して様々な特性を示す物質が発見されている。特に、 $\text{Co}_2\text{FeSi}$  などの Co 系ホイスラー合金磁石では完全にスピン偏極したハーフメタル状態が理論的に予想されており、高性能なスピントロニクス材料として注目を集めている。

## ※10 ハードディスクドライブ(HDD)

強磁性体を記録媒体とし、磁気ヘッドを移動させることで情報を読み書きする大容量磁気メモリデバイスのこと。HDD は大容量・安価・不揮発という長所を有しており、データセンターにおいてメインストレージデバイスとして使用されている。

## ※11 磁気トンネル接合素子

強磁性層/絶縁層/強磁性層の三層で構成される構造を磁気トンネル接合と呼ぶ。このような構造においては、二つの磁性層の磁化配置が平行か反平行かによって、素子の電気抵抗が大きく変化する「トンネル磁気抵抗効果」が発現する。この効果は、HDD の読み取りヘッドや MRAM の記録セルなどに使用されている。

## ※12 磁歪材料

磁場を印加することで形状が大きく変化する効果を磁歪効果と呼び、逆に形状を変化させることで磁化が変調される効果を逆磁歪効果と呼ぶ。このような性質を有する材料を磁歪材料と呼ぶ。磁歪材料は超音波振動子などに応用されている。

## ❖ 本件に関する問い合わせ先

<研究内容に関すること>

大阪大学 大学院基礎工学研究科 附属スピントロニクス学術連携研究教育センター  
教授 浜屋 宏平(ハマヤ コウヘイ)

TEL:06-6850-6330 または 06-6850-6332 FAX:06-6850-6330

E-mail: hamaya.kohei.es@osaka-u.ac.jp

東京工業大学 物質理工学院 材料系

准教授 合田 義弘(ゴウダ ヨシヒロ)

TEL:045-924-5636 FAX:045-924-5636

E-mail: gohda.y.ab@m.titech.ac.jp

<プレスリリースに関すること>

大阪大学 基礎工学研究科 庶務係

TEL:06-6850-6131 FAX:06-6850-6477

E-mail: ki-syomu@office.osaka-u.ac.jp

大阪大学 工学研究科 総務課 評価・広報係



TEL:06-6879-7231 FAX:06-6879-7210  
E-mail: kou-soumu-hyokakouhou@office.osaka-u.ac.jp

東京工業大学 総務部 広報課  
TEL:03-5734-2975 FAX:03-5734-3661  
E-mail: media@jim.titech.ac.jp

科学技術振興機構 広報課  
TEL:03-5214-8404 FAX:03-5214-8432  
E-mail: jstkoho@jst.go.jp

<JST事業に関すること>  
嶋林 ゆう子(シマバヤシ ユウコ)  
科学技術振興機構 戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ  
TEL:03-3512-3531 FAX:03-3222-2066  
E-mail: crest@jst.go.jp