

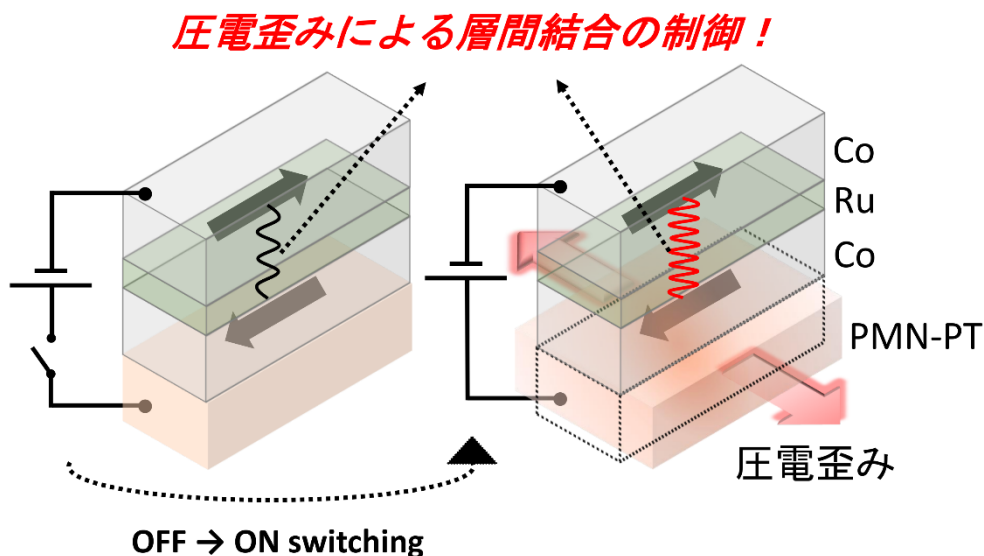
2025年12月10日

報道機関 各位

## 電流を使わず人工反強磁性体の電界制御技術を構築 超省エネルギー型スピントロニクスデバイスへの応用に新たな扉

### 【本研究のポイント】

- ・ジュール発熱<sup>注1)</sup>の原因となる電流を用いず、電界のみで磁気結合の制御を実証。
- ・[Co/Ru/Co] エピタキシャル<sup>注2)</sup>多層膜人工反強磁性体<sup>注3)</sup>/圧電単結晶<sup>注4)</sup>PMN-PTヘテロ構造の創製。
- ・人工反強磁性体[Co/Ru/Co] エピタキシャル多層膜における層間磁気結合<sup>注5)</sup>の電界制御に成功。
- ・超低消費電力電界制御型反強磁性スピントロニクスデバイス<sup>注6)</sup>の実現に新たな道。



## 【研究概要】

名古屋大学大学院理学研究科の久田 優一 博士後期課程学生、小森 祥央 助教、井村 敬一郎 講師、谷山 智康 教授の研究グループは、東京科学大学物質理工学院の沈晨宇 博士後期課程学生、合田 義弘教授、南洋理工大学の Calvin Ching Ian Ang 研究員、Wen Siang Lew 教授との共同研究で、コバルト (Co)とルテニウム (Ru) から成る [Co/Ru/Co] エピタキシャル多層膜人工反強磁性体と  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$  (PMN-PT) 圧電単結晶との積層構造において電界による Co 層間の磁気結合(交換結合)の変調制御に成功しました。

隣り合った磁気モーメントが互いに逆向きに配向した反強磁性体は、外部からの浮遊磁場に対する頑健性やテラヘルツ (THz) 帯域における超高速磁化ダイナミクスなど優れた磁気特性を示すことから、新たなスピントロニクスデバイスへの応用が期待されています。一方、[強磁性体/非磁性体/強磁性体]多層膜構造では、非磁性層の厚さを調整することで二つの強磁性層の磁化を逆向きに結合させることができることから、反強磁性体と類似した磁気特性を人工的に作り出すことが可能です。このように強磁性層の磁化が逆向きに結合した磁性多層膜構造は人工反強磁性体と呼ばれ、一般的な反強磁性体と比較して層間に働く交換結合の強さが小さく外部制御が容易であると考えられ、スピントロニクスデバイスにおいて磁化配向を制御して新機能を実現するための新たな材料として期待されています。

本研究では、人工反強磁性体である [Co/Ru/Co] 多層膜の高品質成長を実現し、圧電単結晶 PMN-PT と積層化することで、ジュール発熱の原因となる電流を用いることなく、電界のみで、二つの Co 層間の交換結合の変調制御を実証しました。また、交換結合の電界変調効果が交換結合の強さと共に顕著となることを見出しました。さらに、実験結果とマイクロマグネティクスシミュレーション<sup>注7)</sup>や第一原理計算<sup>注8)</sup>などの計算結果と併せて精査することで、交換結合の電界変調効果が、PMN-PT に生じる圧電歪みとそれに伴う Ru 層の電子状態の変調効果に起因することを突き止めました。

本成果は、人工反強磁性体を構成する磁性層の磁化配向を極低消費電力で切り替え制御するための技術基盤を提供するものであり、新たな省エネルギー反強磁性スピントロニクスデバイスの開発への道を切り開くものとして期待されます。

本研究成果は、2025 年 11 月 28 日付国際学術雑誌『Advanced Science』に掲載されました。

## 【研究背景と内容】

隣り合う磁気モーメント（スピン）が互いに反対方向に強く交換結合している反強磁性体は、スピンの動的な特性がテラヘルツ帯域で応答するなど多くの優れた性質を有します。この反強磁性体を利用した反強磁性スピントロニクスデバイスの実用化のためには、反強磁性体のスピンを高効率で制御することが重要となってきます。しかし、その強い交換結合ゆえに外部からスピンを制御するには大きな電流が必要となり、ジュール発熱によるエネルギー損失が避けられません。これは、反強磁性スピントロニクスデバイス実現への大きな障壁となっています。一方、我々は、人工的な反強磁性状態の実現が可能な、[強磁性体/非磁性体/強磁性体]磁性多層構造に着目しました。これらの構造では、非磁性体を媒介した層間の磁気結合により、上下二つの強磁性体の磁気モーメントが逆向きに結合し、反強磁性体と似た磁気特性を示します。また、非磁性体の膜厚を変化させることで、層間の反強磁性磁気結合の強さを調整することができます。この“人工反強磁性体”は、一般的な反強磁性体と比較して弱い磁気交換結合を有することから、低消費電力での反強磁性秩序の制御が期待できる構造となります。

本研究では、強磁性体であるコバルト（Co）と、非磁性体であるルテニウム（Ru）を用いた人工反強磁性体を、単結晶圧電体である  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ （PMN-PT）上にエピタキシャル（高品質）成長させた界面マルチフェロイク構造<sup>注9)</sup>に着目しました。界面マルチフェロイク構造とは、圧電体上に強磁性体を積層させた構造であり、電界を印加することで生じる圧電歪みを強磁性体へと伝播することで、磁気異方性（磁気モーメントが特定の方位に向く現象）などの磁気特性が変調されることが知られています。本研究では、この圧電歪みを利用し、人工反強磁性体における Co 層間の反強磁性的な磁気結合の制御を実証しました（図 1）。

図 2(a)は、試料に印加した電界に対する Co 層間の反強磁性磁気結合の強さを示しています。特定の電界を試料に印加した際に、結合の強度にとびが生じ大きく変化していることが分かります。詳細な解析の結果、この電界では、圧電体 PMN-PT に大きな圧電歪みが生じていることが明らかになりました。すなわち、圧電歪みによる反強磁性層間結合の変調を捉えた結果と言えます。さらに、異なる Ru 膜厚を持つ試料（すなわち反強磁性結合の強さが異なる試料）を作製し、圧電歪みによる層間磁気結合の変化量を系統的に調査しました。その結果、反強磁性結合が強い試料の方が、より効率的に結合強度を制

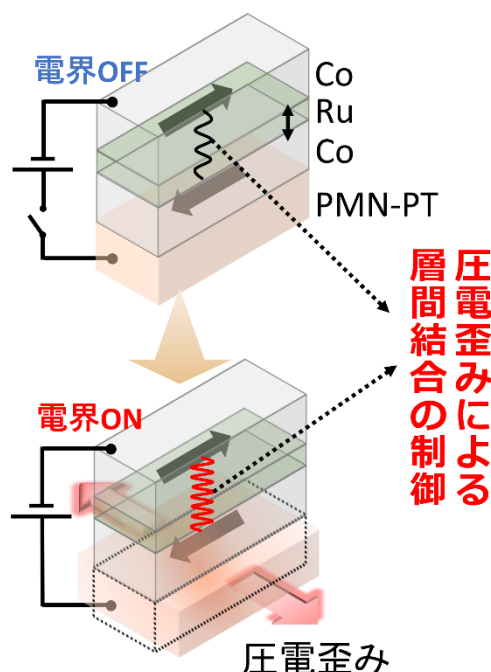


図 1 人工反強磁性体/圧電体における圧電歪みによる反強磁性層間磁気結合の変調の概念図。黒矢印は Co 内の磁気モーメントを表す。

御できることを初めて明らかにしました [図 2(b)]。さらに、マイクロマグネティクスシミュレーションや第一原理計算といった計算結果から、圧電歪みによる Ru 層の電子状態の変化が、層間磁気結合の変調をもたらしていることを突き止めました。

これらの成果は、人工反強磁性体を活用した新たな電界制御型反強磁性スピントロニクスデバイスの設計指針を与える重要な成果と言えます。

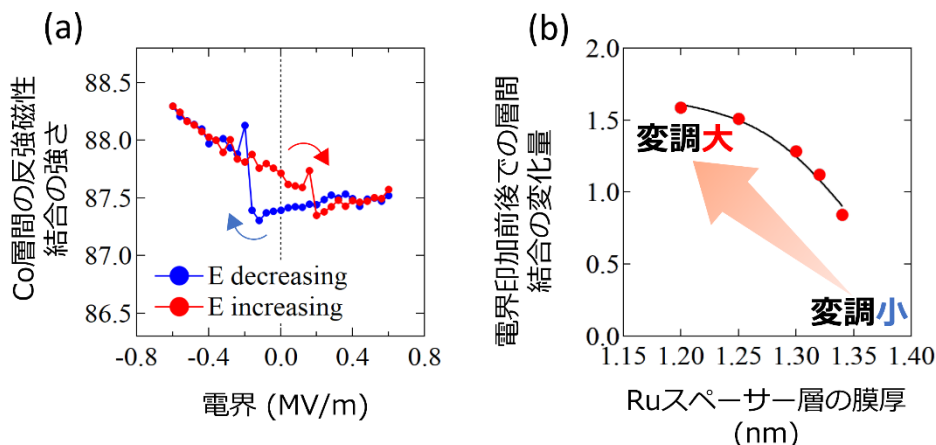


図 2 (a) 印加電界に対する反強磁性層間磁気結合の強さ。赤線と青線は電界の極性を負から正（正から負）に印加した際の結果。(b) 異なる Ru スペーサー膜厚を有する人工反強磁性体における、圧電歪みによる層間磁気結合の変化量。Ru 膜厚が薄い（反強磁性結合が強い）方が、層間磁気結合の変化量が大きい。

## 【成果の意義】

反強磁性材料では、その磁気状態を低消費電力で制御することが困難でしたが、人工反強磁性体と圧電体とを組み合わせることで、ジュール発熱の原因である電流を用いることなく、電界のみで、層間反強磁性結合の制御を実証しました。また、層間磁気結合の電界変調効率を、非磁性体の膜厚を変えることで制御できることも初めて明らかにしました。今回見出した制御技術を駆使することで、反強磁性スピントロニクスデバイスのより一層の低消費電力化が期待できます。

なお、本研究は、科学技術振興機構 CREST (JPMJCR18J1)、科学研究費助成事業 (科研費) (JP24H00380, JP24K21732, JP23KK0086, JP24KJ1306, JP24K01144)、日本学術振興会国際共同研究事業 (JPJSJRP20241705)、科学技術振興機構 FOREST (JPMJFR212V)、文部科学省 DXMag (JPMXP1122715503)、池谷科学技術振興財団 (0361214-A) の支援のもと行われました。

## 【用語説明】

注1) ジュール発熱:

電気抵抗のある導体に電流を印加した際に生じる熱のこと。

注2) エピタキシャル:

単結晶基板上で、結晶方位を揃えて薄膜が成長すること。

注3) 人工反強磁性体:

[強磁性体/非磁性体/強磁性体]積層構造のうち、二つの強磁性体の磁気モーメントが反平行に結合した構造。

注4) 圧電単結晶:

圧電体に圧力を加えると、その圧力に応じて表面にプラスとマイナスの電荷が生じる。これを圧電効果と呼ぶ。一方、圧電体に電界を印加すると、形状が変形する現象が生じる。これを逆圧電効果という。本研究では、この逆圧電効果を利用し、圧電体上に成長させた人工反強磁性体へと歪みを伝播させ、反強磁性層間磁気結合を変調させた。

注5) 層間磁気結合:

人工反強磁性体において、二つの強磁性体の間に生じる磁気結合のこと。この層間磁気結合の強さは、非磁性体の膜厚を変えることで制御できる。

注6) (反強磁性)スピントロニクスデバイス:

電子の電荷と角運動量(スピン)の二つの自由度を利用し、新規物理現象を創製する学術分野をスピントロニクスという。また、これらを利活用した電子デバイスをスピントロニクスデバイスという。最近では、スピンの反平行に結合した反強磁性体をスピントロニクスデバイスへと応用する反強磁性スピントロニクスが盛んに研究されている。

注7) マイクロマグネティクスシミュレーション:

サブマイクロメートルスケールの磁性体内部の磁気挙動を数値的に解析する手法。

注8) 第一原理計算:

ある物理量を、実験値や経験則に頼らず、量子力学の基本原則に基づいて計算する手法。

注9) 界面マルチフェロイク構造:

一般には、強磁性体と圧電体との積層構造を指す。圧電体の圧電歪みによって、強磁性体の磁気特性を変化させることができる。本研究では、強磁性体の代わりに人工反強磁性体を積層させた新たな界面マルチフェロイク構造に着目した。

## 【論文情報】

雑誌名: Advanced Science

論文タイトル: Electric Field Modulation of Interlayer Coupling via Piezostain in a Synthetic Antiferromagnet

著者: Yuichi Hisada\*(名古屋大学), Sachio Komori(名古屋大学), Keiichiro Imura(名古屋大学), Chenyu Shen(東京科学大学), Yoshihiro Gohda(東京科学大学), Calvin Ching Ian Ang, Wen Siang Lew, and Tomoyasu Taniyama\*(名古屋大学)

# Press Release

---

DOI: 10.1002/advs.202517798

URL: <https://doi.org/10.1002/advs.202517798>

## 【研究者連絡先】

名古屋大学大学院理学研究科

教授 谷山 智康(たにやま ともやす)

TEL:052-789-2886 FAX:052-789-2886

E-mail: [taniyama.tomo@nagoya-u.jp](mailto:taniyama.tomo@nagoya-u.jp)

東京科学大学 物質理工学院 材料系

教授 合田 義弘(ごうだ よしひろ)

TEL:045-924-5636

E-mail: [gohda@mct.isct.ac.jp](mailto:gohda@mct.isct.ac.jp)

## 【報道連絡先】

名古屋大学総務部広報課

TEL:052-558-9735 FAX:052-788-6272

E-mail: [nu\\_research@t.mail.nagoya-u.ac.jp](mailto:nu_research@t.mail.nagoya-u.ac.jp)

東京科学大学 総務企画部 広報課 総務・メディアグループ

TEL:03-5734-2975 FAX:03-5734-3661

E-mail: [media@adm.isct.ac.jp](mailto:media@adm.isct.ac.jp)