ハーフメタル材料の磁化歳差運動を電界で変調

―スピン波を情報担体とする新型デバイスの実現に道―

【研究成果のポイント】

- 高性能スピントロニクス※1 材料として有名な強磁性※2 ホイスラー合金※3 の一種である Co_2FeSi と表面弾性波材料※4 として有名な圧電体※5 ニオブ酸リチウム（$LiNbO_3$）からなるエピタキシャル※6 $Co_2FeSi/LiNbO_3$ 界面マルチフェロイク構造※7 を実現。
- スピン波※8 の長距離伝播が示唆される低磁気摩擦特性（低ダンピング定数）領域で磁化ダイナミクス（磁化の歳差運動※9）の電界変調に成功。
- 表面弾性波を利用したスピン波の生成技術と本研究技術を融合することで、全電界制御型マグノニクスデバイス※10の実現につながる成果。

❖ 概要

大阪大学大学院基礎工学研究科の山田晋也准教授、宇佐見喬政助教（研究当時）（現：先導的学際研究機構講師）、浜屋宏平教授、京都工芸繊維大学電気電子工学系の三浦良雄教授、慶應義塾大学理工学部の能崎幸雄教授、名古屋大学大学院理学研究科の谷山智康教授らの共同研究グループは、高性能スピントロニクス磁石材料（ハーフメタル材料）であるコバルト（Co）基ホイスラー合金磁石（Co_2FeSi）と表面弾性波材料として有名な圧電体ニオブ酸リチウム（$LiNbO_3$）からなる界面マルチフェロイク構造を作製することに成功し、ジュール発熱※11 のない情報担体として応用が期待されている「スピン波（マグノン）」を利用した全電界制御型マグノニクスデバイスの実現の鍵となる技術を開発しました。ハーフメタル材料はスピン波の長距離伝搬が示唆される低磁気摩擦特性（低ダンピング定数）を示すため、従来よりも高性能なマグノニクスデバイスを実現できる磁化ダイナミクス（磁化の歳差運動）の電界変調を達成しました（図 1）。

磁性体（磁石）中の磁化の歳差運動が波として伝搬するスピン波は、ジュール熱を伴わない超低消費電力情報担体として注目されており、「マグノニクス」と呼ばれる新たな研究分野に発展しています。その一方、これまでスピン波の励起（生成）および制御（ON/OFF）には、通常、アンテナ構造を用いた交流磁場の印加手法が利用されており、真の超低消費電力マグノニクスデバイスを実現するには、スピン波の励起および制御を全て「電圧印加」で実現する必要がありました。

本研究では、磁性体としてハーフメタル材料で知られる Co 基ホイスラー合金磁石の一種である Co_2FeSi と、表面弾性波材料で有名な圧電体ニオブ酸リチウム（$LiNbO_3$）からなるエピタキシャル界面マルチフェロイク構造を実証することに成功し（図 1 左）、スピン波の長距離伝搬が示唆される低ダンピング定数の領域（0.004～0.006）で磁化ダイナミクスを電界で変調することに成功しました（図 1 右）。これは、磁性体中のスピン波の伝搬距離を電界で制御するための基盤技術の構築を意味します（図 2）。

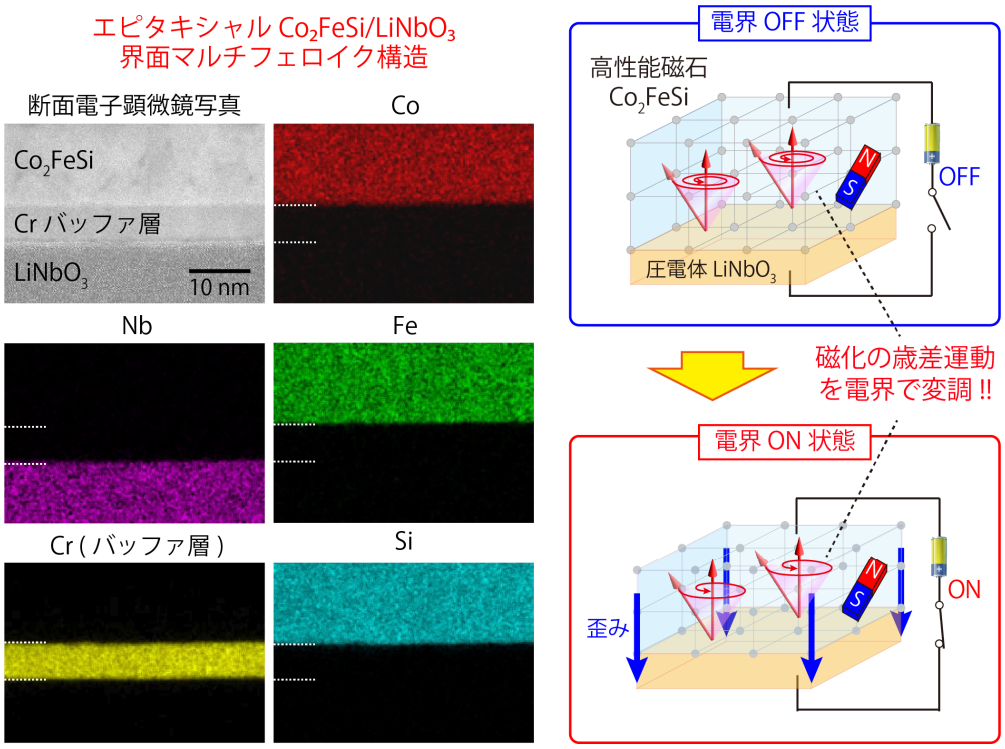

図 1. 本研究で実証したハーフメタル材料/圧電体界面マルチフェロイク構造(左)と磁化ダイナミクスの電界変調の概念図(右)。電界の制御(ON/OFF)で圧電体の結晶の歪みが磁性体中に伝搬することで、磁性体中の磁化ダイナミクス(磁化の歳差運動)が変調される。

今後、本成果と表面弾性波を利用したスピン波生成技術を融合することで、電界印加のみで動作する真の超低消費電力マグノニクスデバイスの開発に発展する可能性があります。

近年、IoT 技術・AI 技術がますます進展する中、半導体素子の発熱量の増加とそれに伴う消費電力の爆発的な増加が社会問題となっています。本成果は、ジュール熱を伴わない超低消費電力情報担体のスピン波(マグノン)を、省電力で制御するための基盤技術を提供するものです。今後、本成果をデバイス開発へと展開することにより、スピン波(マグノン)を活用した新しい情報処理素子、すなわち「マグノニクスデバイス」の実現に向けて、大きな波及効果が期待されます。

本研究成果に関する情報は、Wiley 発行の「Advanced Science」(オンライン:2025 年 9 月 18 日:日本時間)に掲載されました。

❖ 研究の背景

近年、IoT 技術や AI 技術の急速な発展に伴い、半導体デバイスの発熱量の増加やそれに起因する様々な電力消費量の急増が深刻な社会問題となっています。このような背景のもと、ジュール発熱のない情報担体を用いた新しいデバイスの開発が求められています。中でも近年注目されているのが、スピン波(マグノン)を情報担体として用いたデバイスです。スピン波は、磁性体中で磁化の歳差運動が波として伝播する現象であり、その伝搬にジュール熱を伴わないことから、低消費電力な情報担体として期待されるばかりでなく、次世代の情報処理技術への応用も期待されています。このスピン波を情報担体として用いた次世代デバイス開発を目指す研究分野は「マグノニクス」と呼ばれ、現在急速に発展しています。マグノニクスデ

バイスの実現には、スピン波の制御技術の確立が不可欠です。従来は、外部から交流磁場を印加することでスピン波の励起および制御をする手法が一般的でしたが、この方法は電流印加でスピン波を制御するため、エネルギー効率が低く、高集積化にも不向きであることから、実用性の観点から課題が残ります。したがって、真の超低消費電力マグノニクスデバイスの実現には、スピン波の励起（生成）および制御（ON/OFF）を全て電圧印加で実現することが極めて重要であり、その基盤技術を構築する必要があります。

❖ 研究の内容

本共同研究グループは、図 1 右に示すような磁性体（磁石）と圧電体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に着目しました。この構造では、圧電歪みを磁性体に伝播させることで、磁性体の磁気物性を電圧で制御させることができ、これまでの同グループの研究により、磁気伝導現象や磁気異方性（磁石が特定の方向に向く性質）を電圧で制御できることが示されています。

本共同研究グループは、スピン波の励起および制御を全て電圧印加で実現するために、表面弾性波材料で有名な圧電体ニオブ酸リチウム（$LiNbO_3$）とハーフメタル材料で有名な Co 基ホイスラー合金磁石の一種である Co_2FeSi からなる界面マルチフェロイク構造を着想しました。$LiNbO_3$ は通信端末に搭載される表面弾性波デバイスの基板として採用されていますが、近年、表面弾性波を利用したスピン波生成技術が報告されたことで、スピントロニクス分野でも広く用いられている材料です。Co_2FeSi 磁石は、ハーフメタル特性ばかりでなく、低い磁気ダンピング定数や高いキュリー温度など、スピントロニクス分野で有望な物性を示す高性能磁石材料です。しかし、$LiNbO_3$（三方晶構造）と Co_2FeSi（立方晶構造）は結晶構造が大きく異なり、表面の原子配列も整合していないため、$LiNbO_3$ 上に Co_2FeSi 磁石を高品質に作製する（エピタキシャル成長する）ことは極めて困難でした。

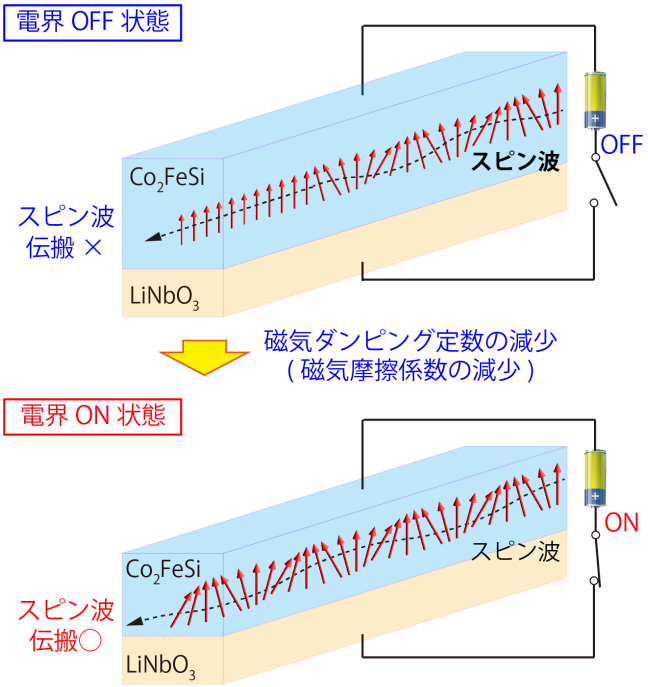

図 2. 本研究成果の展望の概念図。本研究成果は磁性体中を伝搬するスピン波（マグノン）を電圧で制御するための基盤技術の構築であり、表面弾性波でスピン波を電圧で生成する技術と融合することで、真の超低消費電力マグノニクスデバイスの実証につながる。

今回、本共同研究グループは、Co_2FeSi 磁石と $LiNbO_3$ の間にクロム（Cr）などの非磁性金属を挿入することで、エピタキシャル $Co_2FeSi/LiNbO_3$ 界面マルチフェロイク構造の作製に成功し（図 1 左）、その Co_2FeSi がスピン波の長距離伝搬が示唆される低ダンピング定数（～0.006）を示すことを明らかにしました。さらに、この界面マルチフェロイク構造に電界を印加することで、磁気ダンピング定数が大きく減少（電界印加前：～0.006→電界印加後：～0.004）することを明らかにしました（図 1 右）。これは、スピン波の長距離伝搬が示唆される低ダンピング定数の領域で、磁化ダイナミクスを電圧で制御できることを実証した成果です。

❖ **本研究成果が社会に与える影響（本研究成果の意義）**

本研究成果は、ジュール熱を伴わない情報担体として注目されるスピン波を、省電力で制御するための基盤技術を提供するものです（図 2）。これは、半導体デバイスのような電荷の移動によりジュール発熱を伴う従来の集積デバイスの課題を克服する新たな低消費電力デバイスの実現につながります。今後、スピン波を活用した新しい情報処理デバイス、すなわち「マグノニクスデバイス」が実現し、新たな低消費電力情報処理システムへと波及することが期待されます。

❖ **特記事項**

本研究成果に関する情報は、Wiley 発行の「Advanced Science」に掲載（オンライン:2025年9月18日:日本時間）されました。

タイトル:Electric-Field Control of Low Damping Constant in Epitaxial $Co_2FeSi/LiNbO_3$ Multiferroic Heterostructures

著者名：Shinya Yamada, Takamasa Usami, Sachio Komori, Yoshio Miura, Kazuto Yamanoi, Yukio Nozaki, Tomoyasu Taniyama, Kohei Hamaya

DOI：https://doi.org/10.1002/advs.202511250

雑誌：Advanced Science

本研究は、以下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 CREST
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 東京科学大学 栄誉教授／元素戦略 MDX 研究センター特命教授）
研究課題「界面マルチフェロイク材料の創製」
[グラント番号 JPMJCR18J1]
（研究代表者:谷山智康 名古屋大学大学院理学研究科 教授）
研究課題「ナノ構造制御と計算科学を融合した傾斜材料開発とスピンデバイス応用」
[グラント番号 JPMJCR19J4]
（研究代表者:能崎幸雄 慶應義塾大学理工学部 教授）

・科学技術振興機構（JST）知財活用支援事業（令和 5 年度スーパーハイウェイ）
研究課題「電界制御型マグノントランジスタの開発」
（研究代表者:山田晋也 大阪大学大学院基礎工学研究科 准教授）

❖　**用語説明**

※1　スピントロニクス
電子の電荷とスピン（角運動量）の両方の自由度を積極的に利用することにより、新機能デバイスの開発を目指している研究分野のこと。

※2　強磁性
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、そのような特性を持つ物質を強磁性体（磁石）と呼ぶ。

※3　ホイスラー合金
構成原子が規則正しく配列した規則合金の一形態であり、その構成元素や規則性に依存して様々な特性を示す。特に、強磁性ホイスラー合金では完全にスピン偏極した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。

※4　表面弾性波材料
表面弾性波は、固体表面を伝わる弾性波の一種で、エネルギーが表面に集中して伝わる性質を持つ。この表面弾性波を高効率に伝播させられる材料を表面弾性波材料と呼ぶ。これを応用した電子部品は表面弾性波デバイスと呼ばれ、通信端末などに利用されている。

※5　圧電体
圧力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変換できるため、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。

※6　エピタキシャル
単結晶基板上に結晶方位が揃った高品質な薄膜を結晶成長させること。一般に、基板結晶と格子定数が近く原子配列が同じである場合、非常に良質な薄膜が得られる。

※7　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 層で構成された積層構造で、磁性状態を電界で制御することができる。

※8　スピン波
スピン（磁石）の歳差運動が空間的にずれて波のように伝わっていく現象。この現象を量子力学的に取り扱ったものをマグノンと呼ぶ。

※9　歳差運動
回っているコマが重力の影響で軸を傾けながら、回転軸の先端が円を描くようにゆっくり動く（コマが首を振る）現象のこと。ここでは、磁場中にある磁化ベクトルが外部磁場のまわりを回転する現象のことを指す。

※10　マグノニクスデバイス
マグノン（スピン波）と呼ばれる準粒子を使って情報を処理・伝達する次世代のデバイスのこと。将来の超低消費電力・高速情報処理を実現する可能性を持つ新しいテクノロジーとして期待され、現在急速に発展が進んでいる。

※11　ジュール発熱
電気抵抗がある導体に電流を流したときに発生する熱のこと。抵抗加熱とも呼ばれる。

【山田准教授のコメント】
本成果は、研究のコンセプトにある界面マルチフェロイク構造を作製することが極めて難しかったのですが、作製に成功した瞬間は非常に感動しました。論文として纏めるまでには多くの時間を要してしまいましたが、苦労した分、論文掲載が決まった時は大変嬉しかったです。関係者の皆様に改めまして厚く御礼申し上げます。