

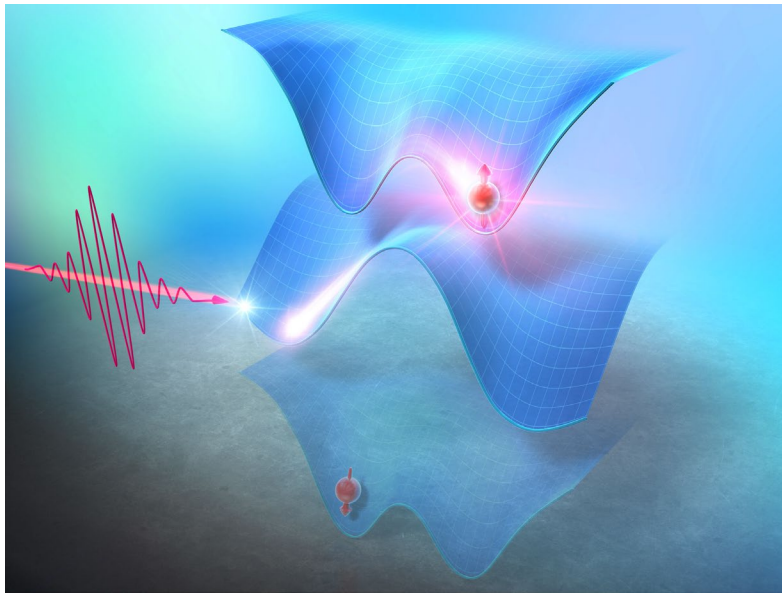
# 非熱的な超高速スピンスイッチング動作の発見

## —光による物性制御の新原理—

### 概要

京都大学化学研究所の廣理英基 准教授、章振垂 博士研究員、金光義彦 特任教授、丸山慶 修士課程学生（研究当時）、千葉大学大学院理学研究院の佐藤正寛 教授、金賀穂 博士課程学生、大阪大学レーザー科学研究所の中嶋誠 准教授、東京大学物性研究所の栗原貴之 助教、東海大学工学部の立崎武弘 講師らの研究グループは、物質内部でテラヘルツ（THz）波<sup>注1</sup>の磁場強度を増強させ、スピンの方向を約1兆分の1秒の時間内に変化させる方法を発見しました。近年、THz周波数帯にスピン歳差運動を持つ反強磁性体は、強磁性体よりも高速なスピンドバイスへの応用が期待されており、そのスピンドYNAMICSは精力的に研究されています。しかし、従来の可視光やTHz波によるスピンの励起手法では長寿命の加熱効果が生じるため、高速なスピン制御が困難でした。本研究では、反強磁性体<sup>注2</sup>  $\text{Sm}_{0.7}\text{Er}_{0.3}\text{FeO}_3$  表面に作製した金属メタマテリアル<sup>注3</sup>構造を利用して1テスラを超えるTHz磁場を印加すると、瞬間的に反強磁性体のスピンの方向を変化させられることを発見しました。そして、THz磁場によりスピンが受ける磁気的エネルギー<sup>注4</sup>の時間周期的な変調効果が、高速スピンスイッチングの駆動力であることを明らかにしました。今回の成果は、光による物性制御に関する理解を深化させ、高速な磁気デバイスや光デバイス開発に向けた基盤技術となることが期待されます。

研究成果は、2024年10月25日に国際学術誌「*Nature Materials*」にオンライン掲載されました。



図：THz波の照射により磁気的エネルギーが変調し、それを駆動力としてスピンの方向が変化する様子を示す概念図。

## 1. 背景

情報通信機器が扱う膨大な情報量に伴い情報処理・通信速度の更なる向上が必要であり、従来の GHz( $\sim 10^9$  Hz)を超えてポスト 5G と呼ばれる通信周波数であるテラヘルツ波帯域( $\sim 10^{12}$  Hz)を用いた高速な通信技術の構築が求められています。一方で、スピントロニクスによる情報ストレージ・情報通信関連技術は、情報ストレージや不揮発性メモリにおける低消費電力化・高密度化に大いに貢献し、デジタル情報化社会を支える技術となることが期待されています。スピントロニクス材料として、反強磁性体はそのスピン集団運動モードがテラヘルツ (THz) 波帯域に達し、THz 波による反強磁性体のスピン制御が注目を集めています。しかし、従来の可視光や THz 波によるスピンの励起方法では、長寿命の加熱効果が生じるため、高速なスピン制御が困難でした。

## 2. 研究手法・成果

本研究では、これまでに実現した世界最高強度の THz 波発生技術と、独自に考案したメタマテリアル金属マイクロ共振器 (金属メタマテリアル) を融合することにより、反強磁性体試料  $\text{Sm}_{0.7}\text{Er}_{0.3}\text{FeO}_3$  内部に 1 テスラを超える高強度 THz 磁場パルスを実現しました。この物質は室温付近(310 K)でスピン再配列転移を示し、それより高温側では巨視的磁化(秩序変数)が異なる 2 つの方向に向いた安定な状態が存在します。実験では、サンプル温度を高温側の 311 K に設定し、試料に対して面直方向に THz 磁場パルスを印加することで、強磁性モード(FM、0.05 THz)と反強磁性モード(AFM、0.55 THz)の振動を観測しました。反強磁性体を含む磁性体において THz 波により駆動されるスピン運動は、一般に巨視的磁化の変化として記述され、光の偏光の変化として観測できます。THz 磁場強度が 1 テスラを超えると、偏光変化の時間波形に長寿命のオフセット成分が現れ、磁場強度に対して急峻な依存性を観測しました。この閾値応答は、初期の安定状態とは異なるもう一つの状態にスピンの向き(巨視的磁化の向き)が変化したことを示しています。

磁化ダイナミクスの強度依存性と温度依存性を観測し、これら測定結果が Landau-Lifshitz-Gilbert(LLG)方程式から導出した sine-Gordon 方程式によって統一的・定量的に説明できることを示しました。この解析により、THz 振動磁場により AFM モードが励起され、さらに AFM モードと FM モードとの結合効果が、磁気的エネルギーの動的な変調をもたらすことを示しました。これにより、スピンスイッチングを引き起こす FM モード (0.05 THz) に対して非共鳴的な THz 磁場 (0.46 THz) を印加しているにもかかわらず FM モードが強く励起され、磁化は磁気ポテンシャル障壁から遠ざかる方向に運動して高いエネルギーを獲得します。そして、THz 磁場パルスが消えるとポテンシャルの変調・変化も消滅し、磁化は慣性効果によって障壁を超えてスイッチングすることを明らかにしました。

## 3. 波及効果、今後の予定

本研究は、THz 磁場パルスにより、試料を加熱することなく (非熱的に) 超高速でスピンの方向制御が可能であることを示しました。今回観測した新たな THz 波に対するスピン応答はスピントロニクスに新たな動作原理を提供し、次世代のテラヘルツ基盤技術を創出すると期待されます。また、THz 磁場パルスは様々な量子スピン系への応用が可能であり、基礎研究に新たな実験方法を提供します。

## 4. 研究者のコメント

「近年、光による物性制御の新たな手法として、レーザーなどの周期的電場を印加して生じる電子状態 (フロッケ状態とも呼ばれる) を活用する方法 (フロッケエンジニアリング) が注目を集めています。今回の周期

的な THz 磁場パルスによる磁性制御の実証は、フロッケエンジニアリングの可能性をさらに広げるものであり、今後磁気的フロッケ状態のさらなる検証を行い、新たな光磁気デバイス開発にもつながることを期待しています。」(廣理英基)

## 5. 研究プロジェクトについて

本研究は、下記の助成金の支援を受けて行われました。

- JSPS 科研費・特別推進研究 (JP19H05465)、新学術領域研究 (JP19H05824)、基盤研究 B (JP21H01842、JP19H05825、JP20H02206)、JST SPRING (JPMJSP2110、JPMJSP2109)、自然科学研究機構 (01212301)、キャノン財団、京都大学化学研究所・国際共同研究助成 (2024-18)

## 6. 螺旋金属メタマテリアル構造に関連する知財情報

特願 2022-090139, 発明者: 廣理英基, 金光義彦, 章振亜, 発明の名称: 積層体, 出願人: 国立大学法人京都大学, 出願年: 2022 年 6 月 2 日

### <用語解説>

※1 **テラヘルツ (THz) 波**: テラヘルツ波とは光波と電波の中間の周波数帯に位置する電磁波のことである。1 テラヘルツは光子のエネルギーにすると約 4 ミリエレクトロンボルト (meV)、周期にすると 1 ピコ秒に相当する。

※2 **反強磁性体**: 隣り合うスピン (原子磁気モーメント) が反平行に規則正しく配列し、全体の磁化が 0、あるいは小さい磁性体のこと。

※3 **メタマテリアル**: 電磁波 (光) の波長よりも小さなマイクロ構造が刻まれた物質群。マイクロ構造の形状に依存して、通常物質とは異なる電磁波応答を発現させられる。

※4 **磁気的エネルギー**: 磁性体中のスピンが感じるエネルギーでありスピンの運動を決定する。今回の試料では反強磁性交換相互作用、ジャロシンスキー・守谷相互作用、磁気異方性相互作用からなる。

### <論文タイトルと著者>

タイトル: Spin switching in  $\text{Sm}_{0.7}\text{Er}_{0.3}\text{FeO}_3$  triggered by terahertz magnetic-field pulses (テラヘルツ磁場パルスによる  $\text{Sm}_{0.7}\text{Er}_{0.3}\text{FeO}_3$  のスピンスイッチング)

著者: Zhenya Zhang, Minoru Kanega, Kei Maruyama, Takayuki Kurihara, Makoto Nakajima, Takehiro Tachizaki, Masahiro Sato, Yoshihiko Kanemitsu, Hideki Hirori

掲載誌: *Nature Materials*

DOI: 10.1038/s41563-024-02034-4