

スピン歳差運動をテラヘルツ光で読み出す技術を開発 —スピンとテラヘルツがつなぐ磁気インターフェースの構築—

概要

京都大学化学研究所の Zhang Zhenya 博士研究員（研究当時、現：清華大学 博士研究員）、渡邊優一氏（修士課程学生）、廣理英基教授、塩田陽一准教授、軽部修太郎特定准教授、小野輝男教授は、強磁性体におけるスピン(磁化)歳差運動の情報を、テラヘルツ (THz、テラは 1 兆) 光の偏光回転として直接読み出すことに成功しました。従来、磁化の超高速ダイナミクスを検出には、磁気光学効果や THz 光放射の観測が用いられてきましたが、スピン歳差運動の情報を THz 光の偏光変調として直接検出する技術は確立されていませんでした。本研究では、Co-Pt 多層膜構造を用いて光励起-THz ファラデー回転測定を行い、スピン歳差運動（複数のスピンの歳差運動）に伴う異常ホール伝導度の時間変化を THz 偏光の変調として観測しました。外部磁場の強度に応じてスピン歳差運動の周波数が変化することで、歳差運動が THz 偏光に変調をもたらしていることがわかりました。この成果は、スピン情報を THz 光によって読み出す新たな手法を提示するものであり、スピントロニクスと THz エレクトロニクスの融合に向けた重要な一歩となることが期待されます。

本研究成果は、2025 年 10 月 24 日（米国東部時間）に米国の学術誌「Physical Review Applied」オンライン版に掲載されました。

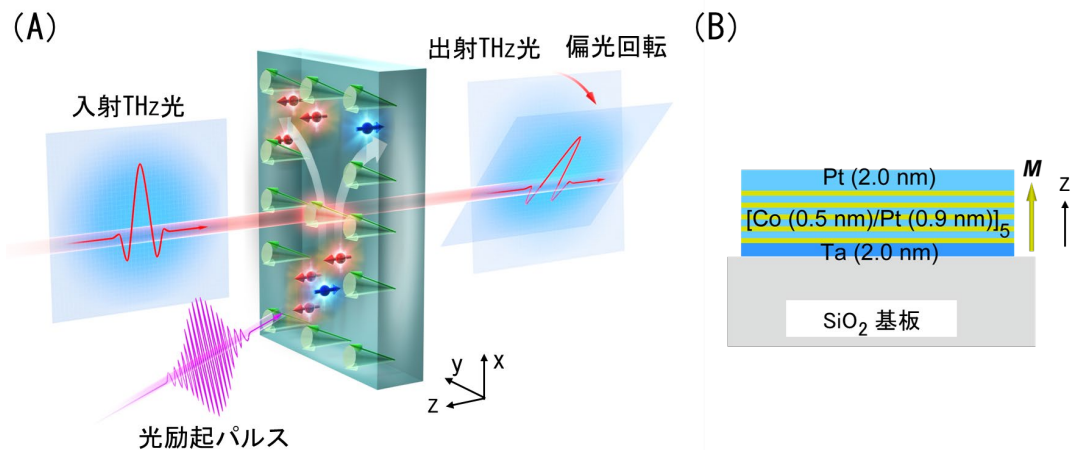


図 1：スピン歳差運動と THz ファラデー回転測定 の概念とサンプル構造

(A) 磁性体における異常ホール効果 (AHE) と THz 偏光回転の概念図。スピンの歳差運動しており、y 軸方向の電流と THz 光の偏光が変調される。太矢印 (白色) は上向きスピン (↑) と下向きスピン (↓) の電子がそれぞれ異なる方向に流れる様子を示す。(B) SiO₂基板上に成膜された強磁性多層膜構造。M：磁性体内部の磁化ベクトル。

1. 背景

近年、情報処理技術の高速化と省電力化を目指し、電子のスピン自由度を活用する「スピントロニクス^{※1}」が注目されています。特に、磁性体におけるスピン歳差運動^{※2}（スピン波を量子化したものを、粒子のようなふるまいを持つ「準粒子」のひとつとみなし、マグノンと呼ぶ）を利用したデータ処理は、電荷ベースの従来技術に比べて省エネルギー性に優れ、次世代情報デバイスへの応用が期待されています。一方、テラヘルツ（THz）波^{※3}の電磁波は、可視光よりも波長が長く、半導体材料を透過できるなどの特性を持ち、THz エレクトロニクスとしての応用が進んでいます。これらの技術の融合は、超高速かつ低消費電力な情報処理の実現に向けた重要な研究課題であり、近年関心が高まっています。従来、スピン歳差運動の検出には磁気光学効果（光と磁場や磁化との相互作用による偏光変化）や THz 光放射（テラヘルツ帯の電磁波を放射する現象）の観測が用いられてきましたが、THz 光を用いた新たな検出・制御手法の開発が、今後の技術革新に向けた鍵となると考えられています。

2. 研究手法・成果

本研究では、コバルト（Co）とプラチナ（Pt）から成る強磁性体 Co-Pt 多層膜構造を用いて、スピン歳差運動（マグノン）の情報をテラヘルツ（THz）光の偏光回転として読み出す新たな手法を実証しました。フェムト秒パルスレーザー（1 フェムト秒は 1000 兆分の 1 秒）による光励起と THz ファラデー回転測定^{※4}を組み合わせることで、磁化（N 極-S 極の向き）の超高速ダイナミクスが異常ホール伝導度（異常ホール効果（AHE）^{※5}に対応する伝導度）に与える影響を時間分解で評価しました。図 1（A）は、強磁性体における異常ホール効果と THz 偏光回転の関係を示しています。異常ホール効果は、磁性体内部の磁化ベクトル（M）の大きさと向きに比例して、電流が磁化方向に対して垂直方向に偏向する現象です。これは、電子のスピンと軌道運動の相互作用により、スピンの向きに応じて伝導電子が異なる方向に散乱されることで生じます。図中では、上向きスピン（↑）と下向きスピン（↓）の電子がそれぞれ異なる方向に電流を流す様子が描かれており、スピンの向きに応じて y 軸方向の電流が反転することを示しています。また、図 1（B）には、SiO₂基板上に成膜された Co-Pt 多層膜試料の構造が示されています。光励起によって試料中に誘起されたスピン歳差運動により、磁化

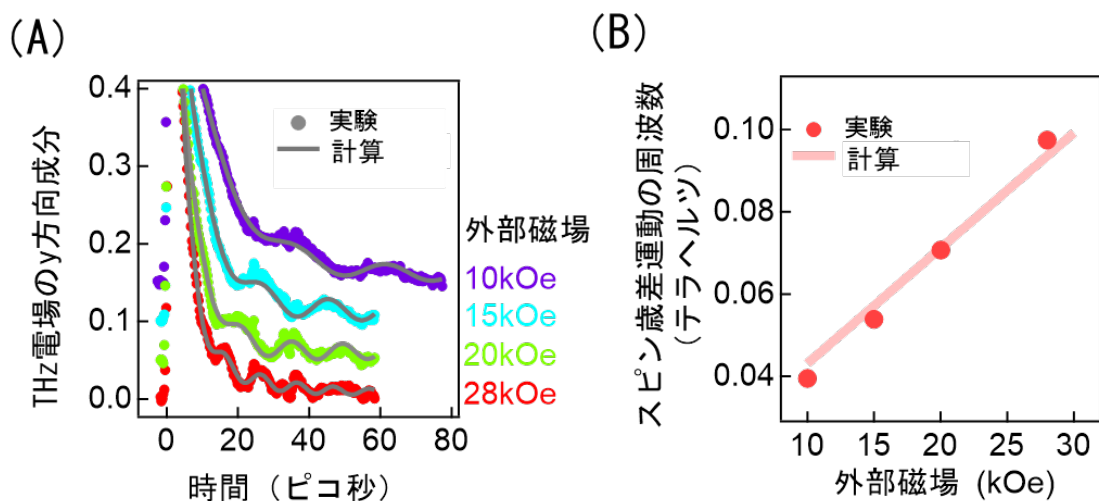


図 2：THz 偏光成分の時間応答と磁場依存性

(A) 光励起パルスと THz 光パルスの時間遅延に対する、y 軸方向に射影された THz ピーク振幅変化のプロットと、(B) スピン歳差運動周波数の外部磁場依存性。

ベクトルが時間的に変化することで、異常ホール効果による y 軸方向の電流も時間的に変調されます。この電流変調が THz 光の偏光回転として検出され、スピン状態の読み出しが可能となります。図 2 (A) では、光励起パルスと THz 光パルスの時間遅延に対する THz 偏光成分の応答を示しており、y 軸方向に射影された THz ピーク振幅の変化から、スピン歳差運動に伴う振動成分を確認しました。さらに図 2 (B) では、外部磁場の強度に応じてスピン歳差運動の周波数が変化し、最大約 100 GHz (G はギガ、1 億) に達することを観測しました。この結果は、強磁性共鳴モデル (強磁性体の磁化が外部磁場下で歳差運動し、特定の周波数でマイクロ波と共鳴する現象) と一致しており、観測された偏光変調がスピン歳差運動に起因することを示しています。

3. 波及効果、今後の予定

本研究で示された THz 帯によるスピン情報の読み出し手法は、スピン状態の時間変化を光学的に検出する新たなアプローチとして、今後のスピントロニクス研究への貢献が期待されます。特に、磁化ダイナミクス的高速応答を活用した磁気メモリや論理素子の設計において、基礎的な知見を提供する可能性があります。また、THz 偏光計測の時間分解能や空間分解能のさらなる向上により、スピン検出や光-スピン変換に関する応用可能性の評価を進めていく予定です。

4. 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。

- JST 戦略的創造研究推進事業 CREST (JPMJCR24R5)、JSPS 科研費 (JP25H00853、JP24H02233)、京都大学 SPIRIT2 プログラム、京都大学化学研究所 国際共同研究プログラム (2025-24)

<用語解説>

- ※1 **スピントロニクス**：電子のスピンを情報として活用する技術。低消費電力・高密度な情報処理が可能。
- ※2 **スピン歳差運動**：磁化ベクトルが外部磁場の影響で円運動する現象。GHz~THz 帯で動作し、磁気デバイスへの応用が期待される。
- ※3 **テラヘルツ (THz) 波**：周波数が 0.1~10 THz の電磁波 (光)。
- ※4 **THz ファラデー回転測定**：THz 偏光が物質を通過する際に変化する偏光回転角を測定する手法。
- ※5 **異常ホール効果 (AHE : Anomalous Hall Effect)**：磁性体で、磁化の向きやスピン状態に応じて電流が横方向に偏る現象。

<論文タイトルと著者>

タイトル：Ultrafast modulation of the anomalous Hall conductivity by coherent magnetization precession in Co-Pt thin films (Co-Pt 薄膜におけるコヒーレントな磁化歳差運動による異常ホール伝導度の超高速変調)

著者：Zhenya Zhang, Yoichi Shiota, Shutaro Karube, Yuichi Watanabe, Teruo Ono, Hideki Hirori

掲載誌：Physical Review Applied

DOI: 10.1103/4p39-gyrd