

# 波として伝わる磁気振動の周波数の瞬間切替に成功

—超低消費電力情報処理へ道—

## 概要

京都大学化学研究所の塩田陽一 准教授、小野輝男 同教授らの研究グループは、韓国科学技術院 (KAIST) の Kab-Jin Kim 准教授の研究グループ、同大学の Se Kwon Kim 准教授、蔚山大学の Sanghoon Kim 准教授の研究グループと共同で、二つの磁石の磁極が逆方向に結合した人工反強磁性体<sup>注1)</sup>において、波として伝わる磁気振動 (マグノン<sup>注2)</sup>) の異なる振動モード間を瞬時に切り替える現象を観測しました。

反強磁性体中を伝播するマグノンには複数の振動モードが存在し、それらを高速かつ効率的に制御する新たな原理の実現が求められていました。今回、研究グループは、人工反強磁性体を伝播する二種類のマグノン振動モード (音響モードと光学モード<sup>注3)</sup>) に着目し、特定条件下において振動モードが瞬時に切り替わる「モード変換現象」を観測しました。さらに、外部から与えるマイクロ波励起の強度や磁場を制御する事で、マグノンの周波数が数 GHz 以上にわたって急峻に変化することを明らかにしました。この成果は、複雑な電子回路を用いずにマグノンの周波数制御を実現できる新原理を示すものであり、将来的には超低消費電力の情報処理技術やニューロモルフィック計算、次世代スピントロニクス素子への応用が期待されます。

本研究成果は、2026年3月12日に国際学術誌「*Nature Communications*」にオンライン掲載されました。

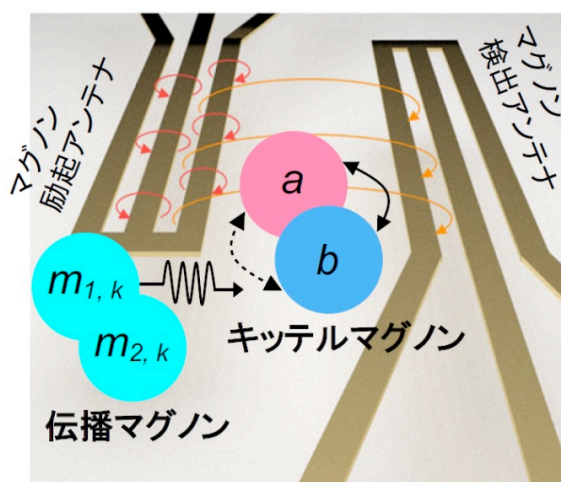


図 非線形マグノン散乱過程の概略図

クレジット: Nature Communications (CC BY-NC-ND 4.0)

## 1. 背景

近年、生成 AI や IoT 技術の急速な発展に伴い、情報処理デバイスの消費電力や発熱の増大が深刻な課題となっています。現在の電子デバイスでは、電子の移動によって情報を伝送・処理するため、配線抵抗によるエネルギー損失や発熱を避けることが困難です。そのため、より低消費電力で動作する新しい情報処理原理の開拓が求められています。このような背景のもと、電子の電荷ではなくスピンの波として情報を運ぶ「マグノン（スピン波）」を利用した「マグノニクス」が注目されています。マグノンは電荷の流れを伴わないため、従来の電子回路に比べて発熱を大幅に低減できる可能性があります。また、マグノンは周波数や位相などの波の性質を利用して情報処理を行えることから、次世代の超低消費電力デバイスやニューロモルフィック計算への応用も期待されています。特に、二つの磁性層の磁化が互いに反対方向を向く人工反強磁性体は、反強磁性体特有の高速な磁気ダイナミクスと、人工構造ならではの高い設計自由度を兼ね備えており、高周波マグノン制御の有望なプラットフォームとして注目されています。一方で、人工反強磁性体中には複数のマグノン振動モードが存在し、それらを高速かつ効率的に切り替える手法はこれまで確立されていませんでした。

## 2. 研究手法・成果

本研究では、二つの強磁性層を非磁性金属層を介して反強磁性的に結合させた人工反強磁性体をマグノン伝播の媒体としたデバイスを作製し、マイクロ波を用いた高周波測定によってマグノンのダイナミクスを詳細に調べました。人工反強磁性体中では、二つの磁性層の磁化が同位相で歳差運動する「音響モード」と、逆位相で歳差運動する「光学モード」という二種類の代表的なマグノン振動モードが存在します（図1）。

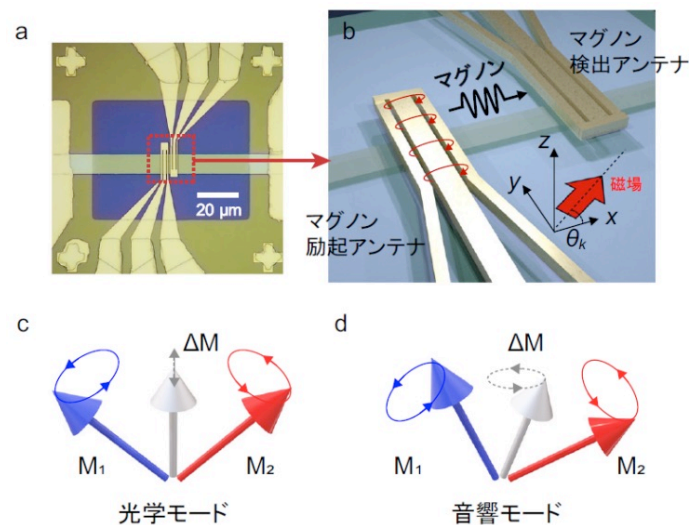


図1 (a)(b)本研究で作製したデバイスの光学顕微鏡図および詳細図。(c)(d)人工反強磁性体におけるマグノンモード。

実験の結果、特定の磁場条件およびマイクロ波励起条件において、励起されたマグノンが一方の振動モードからもう一方の振動モードへ瞬時に移行する「モード変換現象」を観測しました。この現象に伴い、伝播するマグノンの周波数が5 GHz以上にわたり急峻に変化することを確認しました。さらに理論解析との比較から、このモード変換は、複数のマグノン間でエネルギーがやり取りされる非線形相互作用によって生じていることを明らかにしました。

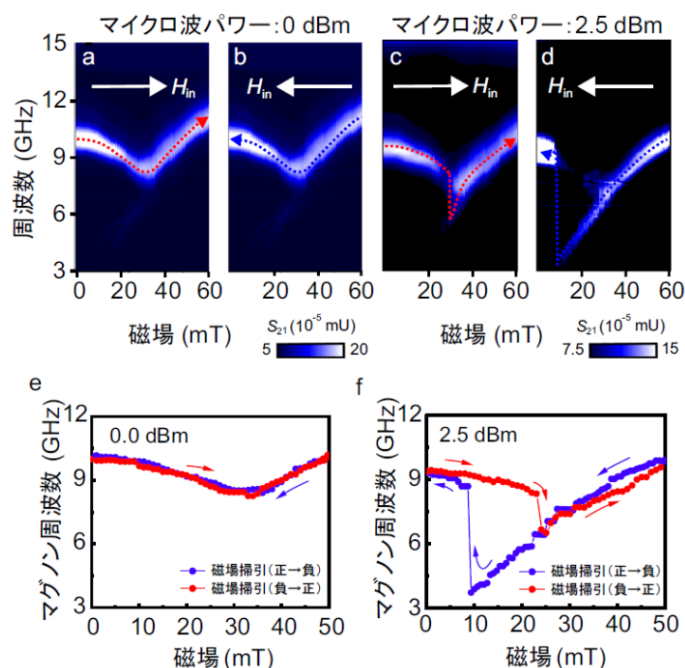


図 2 (a)(b) 低いマイクロ波パワーおよび(c)(d) 高いマイクロ波パワーでの異なる磁場掃引のマグノンスペクトル。(e)(f) それぞれのマイクロ波パワーでのピークを抽出したマグノン周波数の磁場依存性。低いマイクロ波パワーでは磁場の掃引方向に依存せずマグノン周波数は一致しているのに対して、高いマイクロ波パワーでは非線形ダイナミクスに起因したマグノン周波数の飛び（モード変換）が観測される。

従来の高周波信号制御では、複雑な電子回路や半導体素子を組み合わせることで周波数変換を行う必要がありました。一方、本研究で観測した現象は、人工反強磁性体そのものが持つ磁気ダイナミクスを利用して周波数を制御できるため、より小型かつ低消費電力な高周波機能素子の実現につながる成果として期待されます。

### 3. 波及効果、今後の予定

本研究で実証した人工反強磁性体中におけるマグノンのモード変換現象は、高周波信号の周波数を制御できる新たな原理を示すものです。従来の電子回路では、多数の半導体素子や複雑な回路構成が必要であった周波数変換機能を、磁性体中の非線形ダイナミクスによって実現できる可能性があり、超低消費電力かつ小型な高周波デバイスへの応用が期待されます。

また、人工反強磁性体は THz 帯域にまで拡張可能な高速磁気ダイナミクスを有していることから、将来的には Beyond 5G/6G 通信技術、高速信号処理、ニューロモルフィック計算、マグノン論理回路などへの展開も期待されます。さらに、本研究成果は、人工反強磁性体中の非線形マグノンダイナミクスの理解を深めるものであり、反強磁性マグノニクス of 新たな学理構築にも貢献することが期待されます。

今後は、ナノ構造化によるモード変換効率の向上や、電流・電圧による動的制御技術の開発を進めることで、実用的なマグノン周波数変換素子や超低消費電力情報処理デバイスの実現を目指します。

### 4. 研究プロジェクトについて

本研究の一部は、京都大学化学研究所・国際共拠点、科学研究費補助金「基盤研究 (B)」(JP23K23204, JP25K01288)、「学術変革領域研究(A)」(JP24H02233)、JST 戦略的創造研究推進事業さきがけ(JPMJPR25H3)などの助成を受けて行われました。

### <用語解説>

**注1 人工反強磁性体**：非磁性層を介して二つの磁性層の磁極が逆方向に結合した構造。非磁性層の膜厚に依存して、平行または反平行に結合させることができ、本研究では反平行に結合させるようにルテニウムの膜厚を設定した。

**注2 マグノン**：スピン（微小な磁石）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（スピン波）を量子力学的に取り扱ったもの。

**注3 音響モード・光学モード**：二つの振動子が互いに同位相で振動する場合を音響モード、逆位相で振動する場合を光学モードという。

### <研究者のコメント>

「今回の成果は、海外の共同研究グループとの密接な連携の中から生まれました。最初に実験結果を受け取った際には、これまでに見たことのない振る舞いに大きな驚きを感じました。一方で、その物理的な起源を理解することは容易ではありませんでした。私たちは、自分たちが得意としてきた光による磁化ダイナミクス測定や解析手法を用いることで、そのメカニズム解明に貢献できたことを大変うれしく思っています。国際共同研究の面白さと重要性を改めて実感した研究でした。」（塩田）

### <論文タイトルと著者>

タイトル：Mode hopping via nonlinear magnon-magnon coupling in a synthetic antiferromagnet（人工反強磁性体における非線形マグノン-マグノン結合を介したモード変換）

著者：Mujin You, Moojune Song, Jun Seok Seo, Donghyeon Lee, Seungha Yoon, Daiju Hayashi, Yoichi Shiota, Teruo Ono, Sanghoon Kim, Se Kwon Kim, Albert Min Gyu Park, Kab-jin Kim

掲載誌：Nature Communications DOI：10.1038/s41467-026-70298-2