

巨大磁歪 CoFe_2O_4 の謎を解明

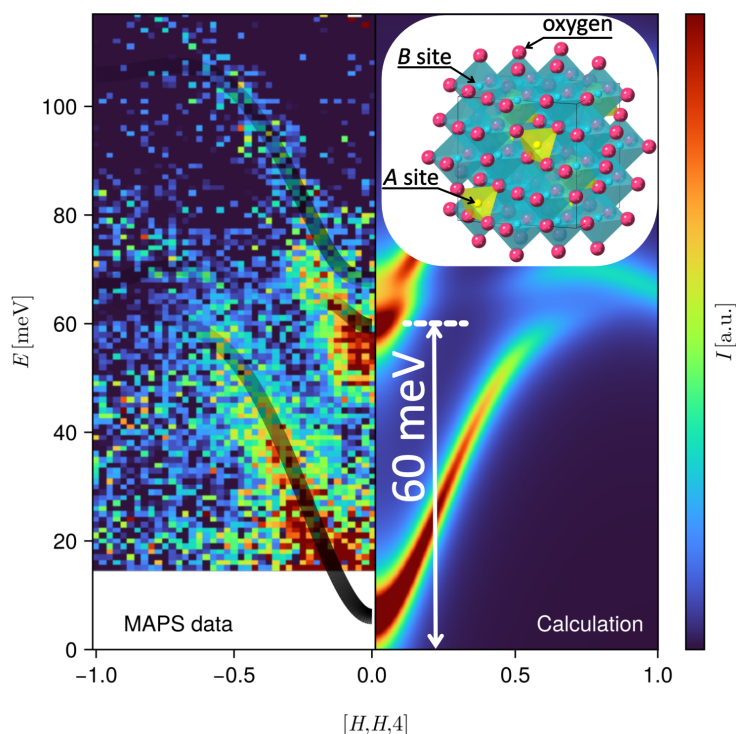
—室温で使える磁石材料の核心に迫る—

概要

京都大学複合原子力科学研究所 南部雄亮特定教授らの国際共同研究グループは、非希土類材料として室温で最大級の磁歪（形が変わる磁石の性質）を示す酸化物 CoFe_2O_4 （コバルトフェライト）の内部で何が起こっているのか、その根本的な仕組みを中性子散乱と理論解析により解明しました。

CoFe_2O_4 は逆スピネル構造をもち、異なる位置にある鉄イオンとコバルトイオンがつくる「分子場」の大きさの差が非常に大きいことが特徴です。本研究では、この分子場の不均衡がマグノン（スピン波）のエネルギーを約 60 meV も分裂させる“バンド分裂”を生み、その結果として構造ドメインの切り替えが磁場で起きやすくなり、巨大磁歪を引き起こすことを明らかにしました。また、マグノンの低エネルギーモードに 3 meV の異方性ギャップが存在することも確認し、室温付近での磁気安定性を支える重要な要因であることを示しました。

本研究成果は、2025 年 11 月 12 日に国際学術誌 *Advanced Functional Materials* にオンライン掲載されました。今回得られた知見は、低電力で動作する磁歪アクチュエータやスピン熱電デバイスの開発など、産業・医療応用に向けた材料設計の新たな指針を提供します。



MAPS 分光器で測定された CoFe_2O_4 のスピン波スペクトル（左）と、それに対応するスピン波計算（右）。約 60 meV に及ぶ二つのマグノン分散の大きな分裂は、挿入図の結晶構造に示すように、A サイトと B サイトの陽イオンに作用する分子場が強く不均衡であることに起因している（南部雄亮）。

1. 背景

磁歪材料は、外部磁場に応じて伸び縮みする性質を利用し、精密アクチュエータやセンサーなどに広く使われています。特に CoFe_2O_4 は希少な元素を含まず、かつ 780 K という高いキュリー温度（磁石として働く温度の上限）をもつため、室温での産業利用が期待されています。しかし、その巨大磁歪がどのように生まれるのかは長年十分に理解されていませんでした。

CoFe_2O_4 の結晶内では、A サイト（四面体）と B サイト（八面体）に分かれた副格子が存在し、そこに配置される Co^{2+} と Fe^{3+} が異なる磁気環境を生み出します。本研究では、この副格子間で働く分子場の不均衡がどのようにスピンドYNAMICSを変化させ、磁歪へと結びつくのかに着目しました。

2. 研究手法・成果

飛行時間型中性子分光装置（英国 ISIS・MERLIN および MAPS）を用い、約 10 g の大型単結晶 CoFe_2O_4 のスピンド励起を 10 K で精密に測定しました。その結果、以下の主要な知見を得ました。

1. 二つのマグノンモードが約 60 meV という大きなエネルギー差で分裂していることを確認

副格子 A/B の分子場の大きな違いが原因であることを理論的に示しました。

2. 低エネルギーモードに約 3 meV の異方性ギャップを観測

Co^{2+} の局所的な結晶場歪みによる単イオン異方性が起源と特定しました。

3. 約 75 meV 付近での“反交差（avoided crossing）”を発見

磁気異方性と交換相互作用の競合による特徴的な分散構造であることが分かりました。

これらの測定結果を線形スピン波理論および大規模計算により再現し、巨大磁歪の起源が「分子場の不均衡によるマグノンバンド分裂」と「弱い異方性がもたらすドメイン切替え易さ」の組み合わせであることを明らかにしました。

3. 波及効果、今後の予定

本成果は、希土類フリーで環境負荷の小さい磁歪デバイスの高性能化に貢献します。特に、

- ・ 低磁場で動作する精密アクチュエータ、
- ・ 温度勾配を利用したスピントロニクス効果デバイス、
- ・ 高温環境下で安定動作する磁気センサー

など多様な応用が期待されます。

今後は、サイト混合の制御や結晶歪みの最適化により、分子場差を人工的に調整することで磁歪量やエネルギー効率を設計する研究が進む見込みです。また、バンド分裂を利用したマグノン輸送制御などスピントロニクス分野への展開も有望です。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は以下の支援を受けて実施されました：

Royal Commission for the Exhibition of 1851

EPSRC（英国）

STFC（英国）

Royal Society of Edinburgh

JST FOREST（JPMJFR202V）

ISIS Neutron and Muon Source ビームタイム（RB2010607, RB2220529）

<用語解説>

磁歪（Magnetostriction）

磁化の変化により物質の寸法が変化する現象。アクチュエータなどに重要。

マグノン（Magnon）

スピン波の量子。磁性体のスピンドYNAMICSを決める基本励起。

分子場（Molecular field）

副格子間の交換相互作用が生む実効磁場。CoFe₂O₄ではA/B間で大きく異なる。

スピンゼーベック効果

温度差によりスピン流が発生する現象。磁性体と金属界面で観測される。

<研究者のコメント>

「CoFe₂O₄は古くから重要な磁性材料でしたが、その内部でどのように磁歪が生まれているかは謎のままでした。本研究では、マグノン励起を広いエネルギー範囲で捉え、分子場の不均衡が巨大磁歪を生み出す本質的な要因であることを明確に示すことができました。今後は、この知見をもとに環境調和型で高性能な磁気デバイスの実現につなげていきたいと考えています。」

<論文タイトルと著者>

タイトル：Anisotropic Band-Split Magnetism in Magnetostrictive CoFe₂O₄（「巨大磁歪 CoFe₂O₄における異方的バンド分裂磁性」）

著者：Harry Lane, Guratinder Kaur, Masahiro Kawamata, Yusuke Nambu, Lukas Keller, Russell A. Ewings, David J. Voneshen, Travis J. Williams, Helen Walker, Dwight Viehland, Peter M. Gehring, Chris Stock

掲載誌：Advanced Functional Materials（2025, in press）

DOI：10.1002/adfm.202516830