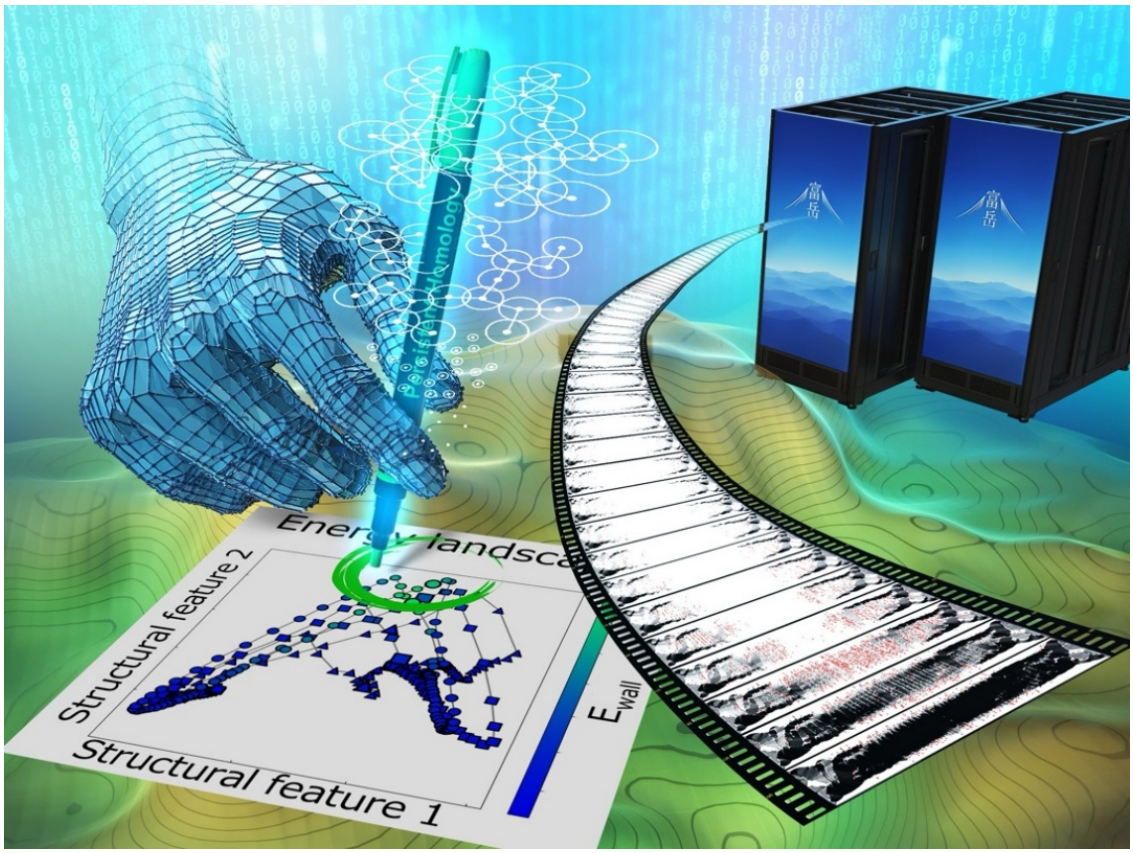
説明可能 AI で時空間磁気ゆらぎの起源を解明

～拡張型自由エネルギーモデルで EV・データセンターの省エネ化へ～

研究の要旨とポイント

- 次世代の説明可能 AI「拡張型自由エネルギーモデル」とスーパーコンピューター「富岳」を用いて、軟磁性材料の高周波エネルギー損失の起源を特定しました。
- 高周波帯で磁区構造が細分化し、逆磁区の先端部と磁壁の一部がエネルギー損失を引き起こすことが明らかになりました。
- AI for Science により、人間が認識できなかった材料知の発見が加速され、EV・データセンターの省エネルギー化への貢献が期待されます。



【研究の概要】

東京理科大学 先進工学部 マテリアル創成工学科の小嗣 真人教授、西岡 宏祐氏（2025 年度修士課程修了）、筑波大学、岡山大学、京都大学、東北大学、Mainz 大学（ドイツ）らの研究グループは、説明可能 AI「拡張型自由エネルギーモデル（＊1）」とスーパーコンピューター「富岳」を用いて、電気自動車（EV）やデータセンター向けの軟磁性材料の高周波エネルギー損失の原因を明らかにしました。

EV やデータセンターの拡大で電力需要が増加する中、エネルギー損失の削減が世界的な課題となっています。その鍵となるのが、電力変換を支える軟磁性材料の低損失化です。しかし、高周波では時空間の磁気ゆらぎが顕著になり、材料内部の損失が増大するという課題がありました。

そこで本研究では、ナノ結晶軟磁性材料を対象に、「富岳」で大規模磁気シミュレーションを行い、磁区構造（＊2）の高周波応答を計算しました。得られた磁区構造を、数学的手法であるパーシステントホモロジー（＊3）で記述し、その特徴量と自由エネルギーをデータ空間で対応づけることで、時空間の磁気ゆらぎがエネルギー損失にどう関係するかを説明できるようにしました。

その結果、高周波帯で磁区構造が細かく分かれ、磁化反転を妨げるエネルギー障壁が増大することが分かりました。さらに、特徴量を元の磁区画像へ逆写像することで、エネルギー損失に寄与する磁壁（＊4）は、逆磁区の先端部や微細な磁壁の一部に選択的に集中することを可視化しました。

本成果は、人間が認識困難だったエネルギー損失の起源を、物理に基づく AI で見える化したものです。これにより、超低損失な次世代軟磁性材料の実現に向けた新たな道を切り拓くことが期待されます。さらに、自由エネルギーの汎用性を生かし、半導体や電池材料など、幅広い環境・エネルギー材料への応用展開も見込まれます。

研究成果は、2026 年 11 月 17 日に国際学術誌「NPG Asia Materials」にオンライン掲載されました。

（関連プレスリリース）

（1）磁性材料のエネルギー損失に潜む「熱ゆらぎ」を説明可能 AI で解明　～エントロピーの効果を世界初で可視化、新材料の設計指針を提示～

https://www.tus.ac.jp/today/archive/20260420_0220.html

（2）次世代 AI で磁性材料のエネルギー損失の原因を解明　～省エネルギーな次世代 EV 開発への応用に期待～

https://www.tus.ac.jp/today/archive/20250715_8098.html

【研究の背景】

EV やデータセンターの電力需要が世界的に急増する中、エネルギーの効率的な利用が重要になっています。軟磁性材料は、インダクターやインバーターの電力変換で必要不可欠なキーマテリアルです。しかし、動作周波数が高くなるほど材料内部のエネルギー損失が増大し、特に MHz 領域は顕著になることが、産業応用上の大きな課題となっていました。

こうした損失はこれまで経験則を用いて評価されてきましたが、複雑に変化する磁区構造の中で、どの磁壁がどのように損失に寄与するのかを具体的に特定することは困難でした。低損失材料を設計するには、損失量の評価に加え、時空間の磁気ゆらぎを定量的に解析し、損失メカニズムを明らかにする必要があります。

これまで我々は、数学のトポロジーと自由エネルギーを融合した説明可能 AI「拡張型自由エネルギーモデル」を開発し、磁性材料の複雑な磁区構造と機能の関係を解析してきました。先行研究では、熱ゆらぎと構造ゆらぎの解析を実践してきました。そこで、本研究では「時間」に着目し、高周波磁化反転における磁壁のダイナミクスを解析しました。

【研究結果の詳細】

本研究では、FINEMET 型のナノ結晶軟磁性材料を設定し、大規模マイクロマグネティクスシミュレーションで、100 kHz、1 MHz、10 MHz の高周波磁化反転過程を計算しました。得られた磁区画像は、パーシステントホモロジーと呼ばれるトポロジーの概念で微細構造を解析しました。これにより、磁区構造に含まれる「つながり」や「ネットワーク構造」を記述し、磁気ゆらぎを定量的に表すことができます。

次に、主成分分析を用いて構造の特徴量を低次元空間に圧縮し、そこに磁壁エネルギーを対応付けることで、データ空間でエネルギー地形を描画しました。これにより、ミクロな磁区構造とマクロな磁壁エネルギーを解釈可能な形で結びつけることが可能になりました（図 1）。詳細なデ

ータ解析の結果、磁化反転時の保磁力付近で顕著なエネルギー障壁が現れ、その大きさは周波数の上昇とともに増大することがわかりました。さらに、アダマール積を用いてエネルギー障壁の特徴量を抽出し、元の磁区画像に逆写像しました。その結果、エネルギー障壁に寄与する因子は、すべての磁壁に一様に分布するのではなく、逆磁区が進展する先端部や、そこから伸びる微細な磁壁に集中していることを、具体的に明らかにすることができました（図 2）。これは、一見同じように見える磁壁の中にも役割の違いがあり、磁化反転を妨げる「抵抗因子」と、磁化反転を促進させる「促進因子」に分けられることを示しています。つまり本研究は、時間とともに複雑に変化する磁壁を、その働きの違いに応じて区別し可視化した、世界初の例となります。

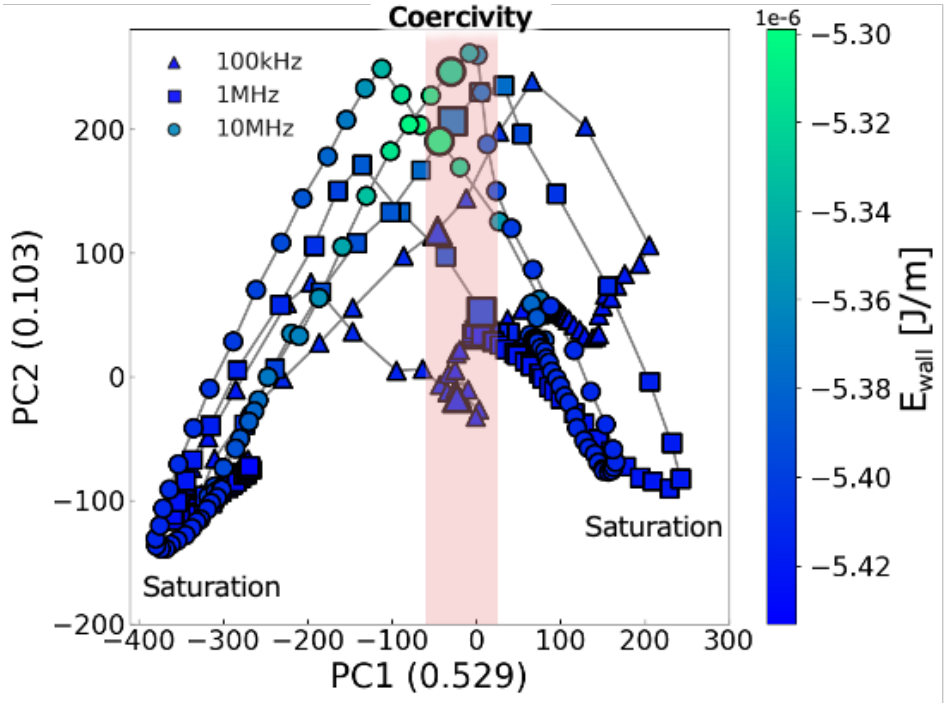


図 1　説明可能 AI「拡張型自由エネルギーモデル」で可視化した磁区構造と磁壁エネルギーの関係性。データ点の移動量が磁区構造の変化量を表し、点の色が磁壁エネルギーを表す。これにより、構造と機能の関係性を説明可能な形で可視化することができる。その結果、磁化が反転する保磁力付近（赤い帯）では、周波数に依存して磁壁エネルギーが高くなることを明らかにした。

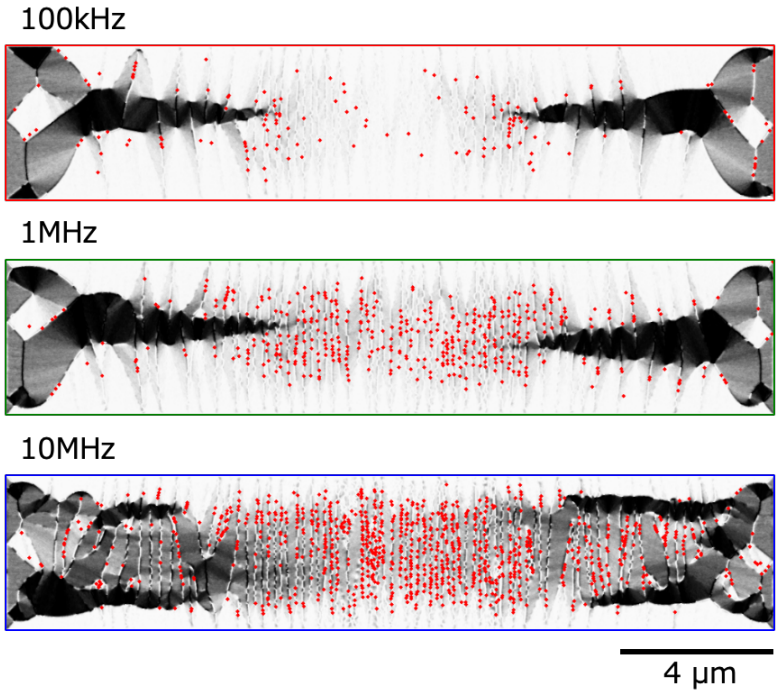


図 2　エネルギー損失に寄与する磁壁の可視化。赤い点は、磁化反転時のエネルギー障壁に強く寄与する磁壁部分を示す。高周波になるほど磁区構造が細分化し、赤い点が反転磁区の先端部や微細な磁壁に集中することが分かる。これは、すべての磁壁が同じように損失へ寄与するのではなく、特定の磁壁が損失の主要因となることを示している。

【今後の展望】

本研究により、高周波帯のエネルギー損失の起源を、説明可能な形で解き明かす AI 解析手法を確立しました。従来はマクロに議論されてきた損失を、ミクロな微細構造に結びつけることができました。その結果、人間の目では認識困難だった、埋もれたメカニズムを明らかにすることに成功しました。

今後は、高輝度放射光や時間分解 Kerr 顕微鏡などの実験データに適用することで、実材料の損失解析が期待されます。さらに、渦電流、磁歪、静磁エネルギーなどの寄与を取り込めば、エネルギー損失をより包括的に捉えられると考えられます。ひいては、EV やデータセンター用途の次世代軟磁性材料の実現を後押しするものです。加えて、自由エネルギーの汎用性を活用することで、磁性材料にとどまらず、半導体、電池、熱電材料など、幅広い環境エネルギー材料への水平展開も期待されます。こうした取り組みは、科学研究そのものを AI で加速する「AI for Science（＊5）」の実現に貢献するものです。

※　本研究は、文部科学省「次世代パワーエレクトロニクス創出に向けた研究開発事業（JPJ009777）」の支援を受けて実施したものです。また、研究の一部は JSPS 科研費（21H04656、22A201、22H05107）および JST-CREST（JPMJCR21O1）の支援を受けました。

【用語】

＊1 拡張型自由エネルギーモデル

データ科学で熱力学の自由エネルギーを発展させた理論。複雑な構造変化を特徴量として記述し、解釈可能な機械学習を用いて、構造と自由エネルギーの関係を解析する。材料の構造―機能―メカニズム―プロセスを結びつけて解析できる、説明可能 AI の一種。

＊2 磁区構造

磁性材料の内部には、磁気の向きがそろった微細な領域が多数存在しており、その分布や並び方を磁区構造という。外部磁場や温度によってこの構造は変化し、その変化の挙動が材料の性質やエネルギー損失に関わる。

＊3 パーシステントホモロジー

画像や構造の中にある「形」や「つながり」の特徴を記述する数学的な手法。本研究では、複雑に変化する磁区構造や磁壁ネットワークを定量的に記述するために用いた。

＊4 磁壁

磁区構造（＊2 参照）の間にできる境界層。磁壁の移動や変形は、高周波帯のエネルギー損失に深く関わっている。

＊5 AI for Science

AI を用いて科学研究を加速し、人間だけでは見つけにくい法則やメカニズムを発見する研究分野。本研究では、AI を用いて材料内部に埋もれたエネルギー損失の要因を可視化した。

【論文情報】

雑誌名：	NPG Asia Materials
論文タイトル：	Physics-interpretable topological machine learning identifies domain-wall contributors to high-frequency loss in a nanocrystalline soft magnet
著者：	Kosuke Nishioka, Ryunosuke Nagaoka, Michiki Taniwaki, Alexandre Lira Foggiatto, Takahiro Yamazaki, Chiharu Mitsumata, Tomohiro Tanaka, Ippei Obayashi, Yasuaki Hiraoka, Satoshi Okamoto, Masato Kotsugi
DOI：	10.1038/s41427-026-00683-2

【発表者】

西岡 宏祐	東京理科大学 2025 年度修士課程修了
長岡 竜之輔	東京理科大学 博士課程 2 年
谷脇 三千輝	東京理科大学 2024 年度修士課程修了／Mainz 大学
Alexandre Lira Foggiatto	東京理科大学 助教（研究当時）
山崎 貴大	東京理科大学 助教（研究当時）／横浜国立大学　准教授
三俣 千春	筑波大学数理物質系 教授
大林 一平	岡山大学 学術研究院異分野融合教育研究領域（AI・数理）教授
平岡 裕章	京都大学 高等研究院 教授・センター長
岡本 聡	東北大学多元物質科学研究所 教授／副所長
小嗣 真人	東京理科大学 先進工学部 マテリアル創成工学科 教授