

2022年5月20日

報道関係者各位

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構

エネルギーは、電流ではなく「摩擦」で失われていた
～電気自動車用モーターの効率化に向けた新発見～

【本研究成果のポイント】

- 金属などに電流が流れると、電気抵抗による熱が発生してエネルギーが失われる
- 電気自動車へ応用が期待される高性能モーターは、電流が流れない材料を使っているのにエネルギー損失があるのが謎だった
- 計算機シミュレーションの結果、抵抗による発熱ではなく金属内部のある種の「摩擦」現象が原因とわかった
- 材料設計に生かして輸送部門のCO₂排出削減へ

【概要】

高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所 塚原宙 協力研究員（研究当時は研究員）は、産業技術総合研究所エレクトロニクス・製造領域 今村裕志 研究チーム長、物質・材料研究機構 三俣千春 特別研究員、オーストラリア モナッシュ大学 鈴木清策教授、および高エネルギー加速器研究機構 小野寛太特別教授と共同で、エネルギー損失が少ないモーターの主要部品として使用されるナノ結晶軟磁性材料^{*1}のエネルギー損失機構をコンピューターシミュレーションにより明らかにしました。ナノ結晶軟磁性材料に与えられた磁気エネルギーは、結晶格子を歪ませ、力学エネルギーに変換されます。この力学エネルギーは、磁区構造^{*2}の変化に伴う磁壁^{*3}移動によって格子歪が緩和されることで、格子振動、すなわち熱エネルギーに変換されて失われるため、エネルギー損失が生じます。この新たなエネルギー損失機構の解明はモーターのエネルギー効率の更なる向上を可能にします。本研究は2022年5月20日にNPG Asia Materials 誌でオンライン公開されました。本研究はトヨタ自動車株式会社の支援により行われました。

【背景】

持続可能な社会実現のため近年電気自動車への移行が進んでいます。電気自動車はガソリンエンジンを必要とせずモーターで動きます。モーターの主要部品を担うのが軟磁性材料^{※1}です。軟磁性材料は鉄などの硬磁性材料に比べ、加えていた外部磁場を取り去ると、磁石の性質が消えやすい（保磁力が小さい）という性質があります。

図1にモーターの動作原理を図示します。軟磁性材料に交流磁場をかけると、磁区構造が変化し磁石の源である磁化^{※2}が同じ方向を向きます。磁化は近距離では平行になる性質と長距離では反並行になる性質があるので、異なる方向を向く磁化の集団が磁区構造を作ります。方向が揃った磁化は大きな磁場を発生しモーターは強い回転力を生み出します。モーターに使われる軟磁性材料では薄い鉄板である電磁鋼板^{※4}が有名ですが、この材料は保磁力および電気伝導率が高く回転力発生時に大きなエネルギー損失が発生してしまいます。

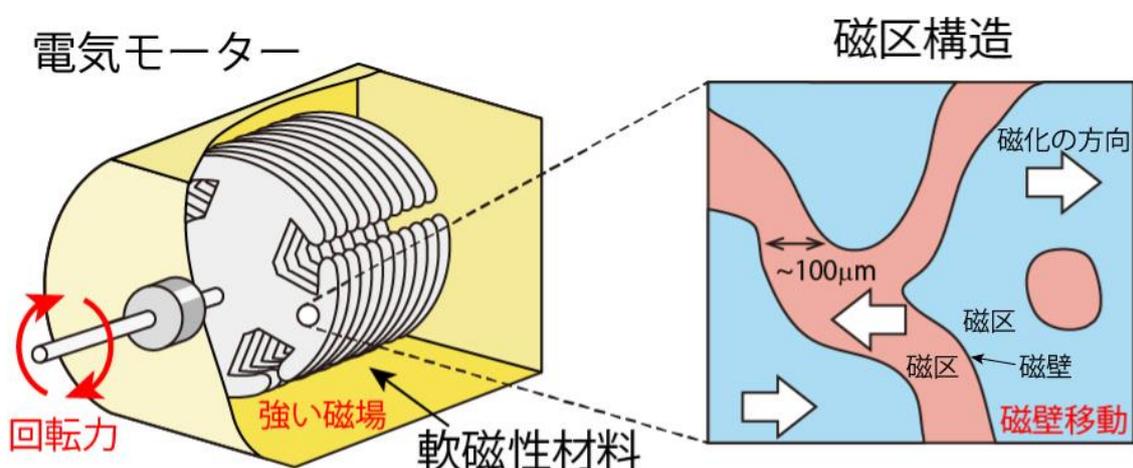


図1：モーターにおける動作原理の概念図。モーター内部に存在する軟磁性材料に交流磁場をかけると大きな磁場が発生しモーターが回転する。これは軟磁性材料内部で磁区構造が変化することにより起こる。磁区と磁区の間には磁区の境界である磁壁がある。

結晶粒の大きさを 10nm 程度に小さくしたナノ結晶軟磁性材料は、低い保磁力および低い電気伝導率を実現する優れた材料です。近年ではモーターへ応用され輸送部門におけるCO₂排出削減への期待が高まっています。しかしながらナノ結晶軟磁性材料は周波数の1.5乗でモーターのエネルギーを損失する性質があります。電磁鋼板などの材料では局所的な電流がエネルギー損失の原因であるとされますが、ナノ結晶軟磁性材料では電気抵抗が高く電流が流れないため、その原因は不明でした。この奇妙なエネルギー損失との関係を疑われていたのが磁歪^{※5}です。ナノ結晶軟磁性材料が磁化されると原子間に力が働き結晶格子が歪みます。これを磁歪と呼びます。磁歪が大きいほどエネルギー損失が大きくなることは実験で知られていましたが、エネルギー損失の発生機構は不明でした。

【研究手法と成果】

本研究では交流外部磁場によるナノスケールの磁化および磁歪応答を調べるためにマイクロ磁気シミュレーション^{※6}を使用しました。この数値計算技術はスピントロニクス^{※7}や磁性材料研究に広く使われていますが、ナノ結晶軟磁性材料における磁歪効果を正確に計算した例はありませんでした。そこで高エネルギー加速器研究機構の塚原宙研究員はナノ結晶軟磁性体における磁歪を正確に計算可能な手法を考案し、磁歪効果を含めたマイクロ磁気シミュレーターを開発しました。シミュレーターは並列計算可能であり、スーパーコンピュータ上で動作します。

開発されたシミュレーターが計算したナノ結晶軟磁性体における磁歪分布を図2に示します。ナノ結晶軟磁性材料では図2(a)に示されるように各結晶粒の結晶軸がランダムな方向を向いています。そのため図2(b)に示される非常に複雑な磁歪が現れます。シミュレーションモデルは平均粒径 12.7nm の結晶粒で分割されており、1辺の長さが 2nm の計算メッシュで分割されているためナノ結晶粒内部の局所的な磁歪まで明らかにすることができました。

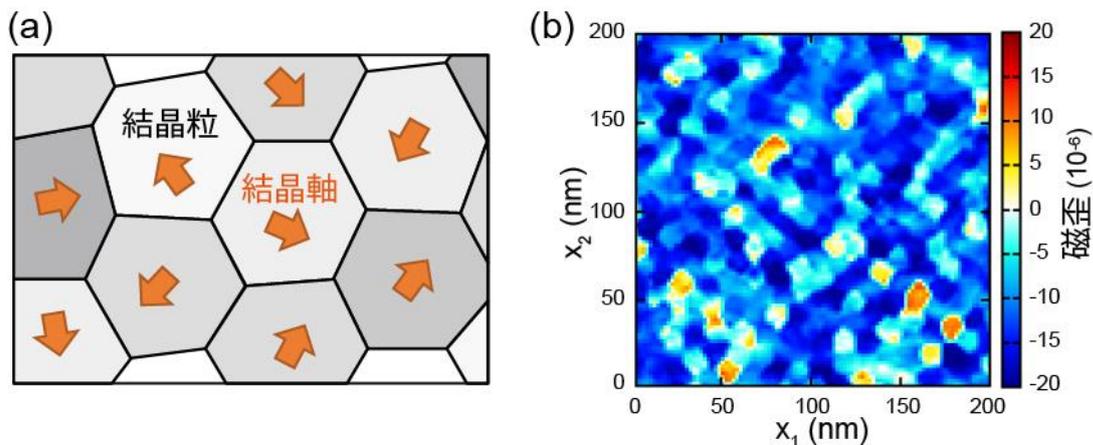


図2：マイクロ磁気シミュレーションで計算されたナノ結晶軟磁性体における磁歪分布。(a) ナノ結晶軟磁性材料の模式図。結晶粒毎に結晶軸の方向が異なる。(b) 計算された磁歪分布。ナノメートルサイズの結晶粒内部でも歪みが変わる。

このような磁歪分布はエネルギー損失に影響を与えます。図3にシミュレーション結果から計算されたナノ結晶軟磁性材料のエネルギー損失を示します。局所的に存在する磁歪の平均値がゼロでなく平均磁歪^{※8}が存在する場合、エネルギー損失は顕著に増加します。これは磁壁内部で磁歪として蓄えられたエネルギーが磁壁移動にともなって格子振動すなわち熱へと変換されるためです。エネルギーの損失が少ない材料を開発するためには平均磁歪が存在しない、もしくは磁壁移動しても磁歪の大きさが一定に保たれるような設計を行うことが重要となります。さらに本研究では平均磁歪が存在しなくても局所的磁歪は磁壁移動を妨げエネルギー損失を増加させることも明らかにしました。従って平均磁歪のみならず局所的磁歪を考慮して材料設計を行うことも重要となります。

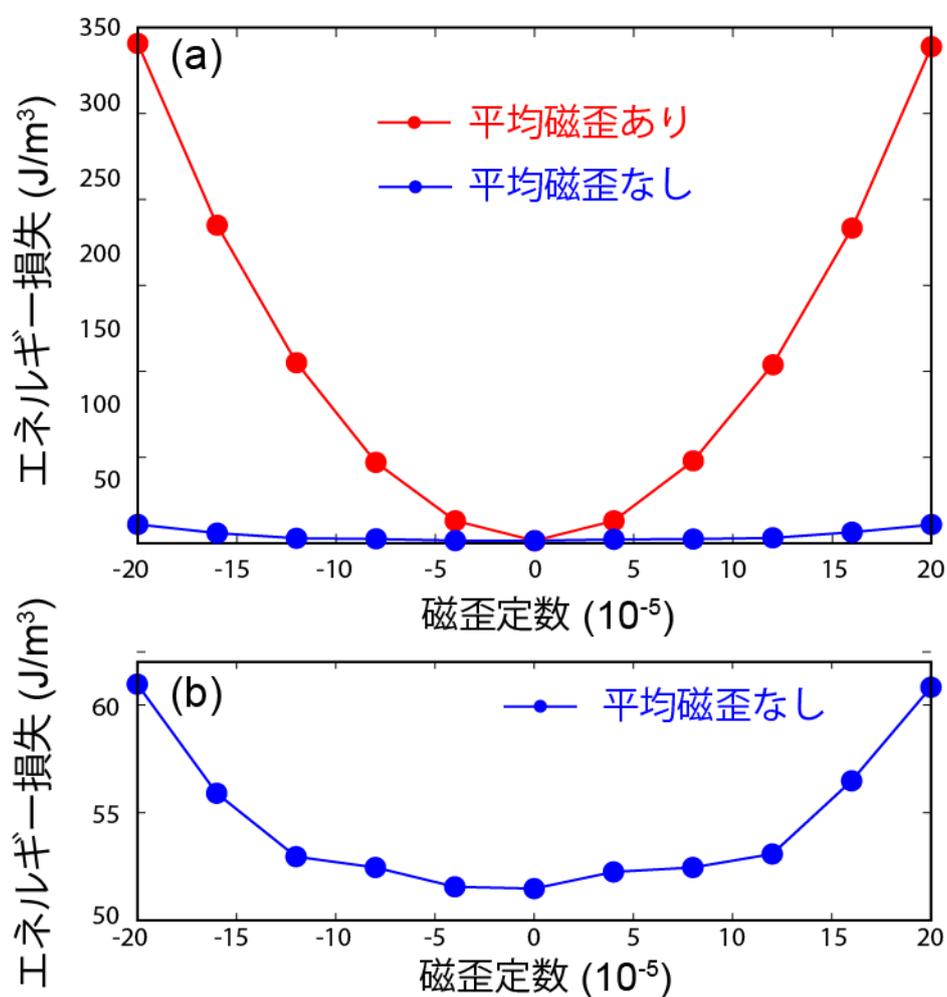


図3 : (a) 平均磁歪がある場合 (赤線) と無い場合 (青線) でのエネルギー損失と磁歪の関係。横軸は磁性材料内部の磁化が全て同じ方向を向いたときの平均磁歪を表す磁歪定数^{※9}。(b) 平均磁歪が存在しない場合のエネルギー損失の拡大図。平均磁歪の存在の有無に関わらず磁歪の増減によりエネルギー損失が増加する。

【本研究の意義、今後の課題】

ナノ結晶軟磁性材料は低保磁力および低電気伝導を実現する優れた軟磁性材料でありモーターへの応用が実現されています。しかしながら高周波数領域で大きなエネルギー損失が発生しエネルギー効率を低下させています。本研究では磁歪によるエネルギー損失発生機構を明らかにし、磁壁移動による磁歪の変化を抑えることでナノ結晶軟磁性材料のエネルギー効率を更に改善する方法を提示しました。輸送部門における温室効果ガス排出量は世界全体で16.2%を占め、軟磁性材料はモーターが発生するエネルギー損失の15-25%を占めます。ナノ結晶軟磁性材料のエネルギー損失を低く抑えることでCO₂排出削減に大きく寄与します。

今後の課題として残留アモルファス相^{*10}の存在があります。現実のナノ結晶軟磁性材料はアモルファスを前駆体として使用するため、結晶粒間にアモルファスが存在します。アモルファスも大きな磁歪を示すので、アモルファス相を考えたマイクロ磁気シミュレーションを実行する必要があります。現実の材料に近いモデルを使用することで、さらなるエネルギー効率向上が期待されます。

【塚原研究員のコメント】

未知の物理現象を表現するシミュレーターの作成はとても楽しかったです。スーパーコンピューターを効率的に使うプログラミングには苦労しましたが、磁化による格子歪を含めたマイクロ磁気シミュレーションを実行することができ、苦労した甲斐がありました。この研究成果によってモーターや発電機などの効率化が進み、CO₂排出量の削減などを通して持続可能な社会の発展に貢献できると期待しています。

【付記】

本研究はトヨタ自動車株式会社の支援を受けて行われました。本研究は部分的に JST-Mirai Program, Grant Number JPMJMI21G2 の支援を受けて行われており、マイクロ磁気シミュレーションは東北大学金属研究所のスーパーコンピューター MASAMUNE-IMR を利用して実行されました。

【論文情報】

タイトル : Role of magnetostriction on power losses in nanocrystalline soft magnets
著者 : Hiroshi Tsukahara, Hiroshi Imamura, Chiharu Mitsumata, Kiyonori Suzuki, Kanta Ono
掲載誌 : NPG Asia Materials
DOI : 10.1038/s41427-022-00388-2

【SDGs 目標】



【用語解説】

※1. 軟磁性材料、ナノ結晶軟磁性材料

外部磁場により磁化されやすく（透磁率が大きい）、外部磁場が反転すると磁石の性質が消えやすい（保磁力が低い）磁性材料。外部磁場に対して素早く応答し磁化を飽和させます。着磁後は大きな磁場を生み出すためモーターに使用されます。代表的な材料に珪素鋼板、アモルファスおよびナノ結晶があります。

結晶粒の直径を 10nm 程度に制御した磁性体をナノ結晶軟磁性材料と呼びます。一般に結晶粒径が小さくなると保磁力が小さくなります。結晶粒は結晶構造を持たない固体であるアモルファス（非晶質）を前駆体とし加熱することで生成されます。また抵抗率が高く電流が流れづらい性質を持ちます。

※2 磁化、磁区構造

軟磁性材料に外部磁場をかけると磁石の性質が現れます。これを磁化といいます。この時、磁化の向きが同じで一つの小さな磁石とみなせる小領域を磁区と呼びます。磁化は反並行に並ぶとエネルギーが下がる傾向があります。そのため軟磁性材料の磁区は特定の方向を向いた磁化で分割されます。また磁区の配置を磁区構造といいます。磁区構造の大きさは磁性材料により様々ですが、軟磁性材料では 100 μ m 程度です。

※3 磁壁

磁区構造では異なる磁区が隣接する領域が存在します。これを磁壁と言います。磁壁の長さは有限で軟磁性材料では 100nm 程度です。軟磁性材料は磁壁移動により大きな磁場を生み出します。

※4 電磁鋼板

今から 100 年以上前に発明された軟磁性材料です。安価で大きな磁場を生み出すことが可能です。現在でも自動車用モーターでは電磁鋼板が用いられています。しかしエネルギー損失が大きく新材料への置き換えが求められています。

※5. 磁歪

結晶に磁化が発生すると原子間に力が働き結晶格子が歪みます。これを磁歪と呼びます。軟磁性材料だと磁歪は非常に小さな歪で 10ppm のオーダーです。しかし、この小さな歪が材料特性に大きな影響を及ぼします。

※6. マイクロ磁気シミュレーション

磁性体を小さな領域に分割し、各計算サイトにおける磁化運動を計算するシミュレーション手法です。磁化は外部磁場や格子などから影響を受け複雑に運動します。分割の手法も様々で各原子のスピンを考える場合や、結晶粒を一つのスピンのみで表すこともあります。

※7 スピントロニクス

微小な磁性材料を用いた電子素子です。ハードディスクの読み書き装置や磁気記憶装置がそれにあたります。電流を用いずにスピンの状態を記憶することが可能なのでエネルギー効率の非常に高い電子素子が実現されます。

※8 平均磁歪

材料全体における磁歪です。通常実験において観測されるのはこの平均磁歪です。

※9 磁歪定数

磁性材料内部の磁化が全て同じ方向を向いたときの平均磁歪です。磁歪定数は非常に小さく 10ppm 程度です。

※10 残留アモルファス相

ナノ結晶軟磁性材料はアモルファスという特殊な物質を用いて作成されます。そのためナノ結晶軟磁性材料には一部アモルファスが残ります。これを残留アモルファス相といいます。