

2025年7月18日

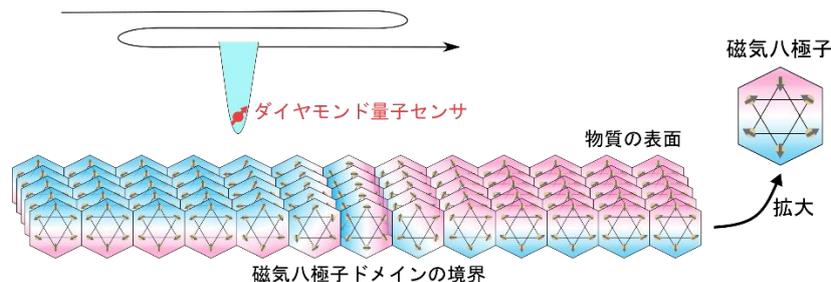
東京大学

科学技術振興機構（JST）

量子センサで“見えない磁石”の構造を解明 ——八極子磁壁の正体に迫る——

発表のポイント

- ◆反強磁性体 Mn_3Sn において、磁気八極子秩序に由来するキラルな磁壁の構造を初めて実空間で観測しました。
- ◆ダイヤモンド量子センサによる高精度磁場測定と高品質単結晶薄膜を組み合わせ、複雑な磁気構造に対応する解析手法を新たに開発することによって、従来困難だった磁区と磁壁の詳細な構造を解明しました。
- ◆本成果は、エネルギー効率に優れた次世代の高速・省エネスピントロニクス素子の実現に向けた設計指針を与え、多極子磁性の理解と応用の深化に貢献することが期待されます。



ダイヤモンド量子センサによる八極子磁壁の高精度測定

磁気八極子（六角形）の秩序方向（青と赤の向き）が空間的に変化している構造（磁壁）の測定イメージ。磁気八極子は6つの磁気双極子（六芒星の各頂点の灰色矢印）から構成されています。ナノスケールの量子センサを物質表面で走査して計測することで、八極子の空間的な構造を明らかにしました。

概要

東京大学大学院理学系研究科の塚本萌太大学院生（当時）、肥後友也特任准教授（当時）、佐々木健人助教、中辻知教授、小林研介教授らによる研究グループは、東京大学物性研究所の大谷義近教授、三輪真嗣准教授、理化学研究所の近藤浩太上席研究員（当時）およびスイス連邦工科大学チューリッヒ校のChristian Degen（クリスチャン デーガン）教授、Pietro Gambardella（ピエトロ ガンバルデーラ）教授らと共同で、八極子秩序（注1）のある反強磁性体（注2） Mn_3Sn の磁壁（注3）の内部構造の観測に成功しました。

反強磁性体の磁区構造（注3）は、次世代の高速・省エネスピントロニクス（注4）デバイスの鍵となる構造です。反強磁性体は周囲に磁場をほとんど漏らさないという特性から高い集積度が期待されますが、その特性ゆえに、磁区や磁壁といった内部構造の観測が非常に困難でした。本研究は、高品質な Mn_3Sn 結晶の磁区制御の過程をダイヤモンド量子センサ（注5）で測定することで、わずかな漏れ磁場の变化から、八極子秩序を保った磁壁の内部構造を明らかにしました。本成果は、多極子秩序に関する基礎的理解を深めるとともに、今後のデバイス開発に向けた指針を提供するものです。なお、本研究成果は米国物理学会誌Physical Review BにLetter論文として出版され、さらにEditors' Suggestionに選定されました。

発表内容

磁気記録技術は今日の情報化社会の基盤を形成しています。現在の製品には主に強磁性体が使用されており、一般的な磁石のように周囲に強い磁場を発生させます。磁場の検出により情報を容易に読み取れる一方で、高集積化や動作速度の面で課題がありました。磁気八極子秩序を有する反強磁性体 Mn_3Sn は、情報の読み出し性能と磁場漏洩の少なさを両立する解決策として注目されています。しかし、八極子方向の詳細な空間分布（磁区構造）やその方向が反転する境界（磁壁）といった基礎的構造には未解明の点が残されていました。これは、周囲に生じる磁場が通常より 2 桁以上小さく、実験的観測が著しく困難であることが原因です。これまで数多くの研究で観測が試みられてきましたが、定量性と空間分解能の両立が難しく、決定的な成果には至っていませんでした。本研究ではこれらを解決し、磁気秩序の向きを明らかにするとともに、磁壁の内部構造の解明に成功しました。

研究グループはまず、できる限り大きな磁区サイズを実現するために、高品質な Mn_3Sn 単結晶薄膜の作製に取り組みました。次に、原子 1 個程度のサイズを持つダイヤモンド量子センサを薄膜上で走査し、得られた磁場分布についての詳細な解析を行い、磁区形状に対応する磁化の分布を明らかにしました（図 1）。八極子秩序を有する薄膜において、これほど明瞭な磁区画像が得られたのは初めてであり、局所的な磁化の値や秩序方向を詳細に決定することが可能となりました。

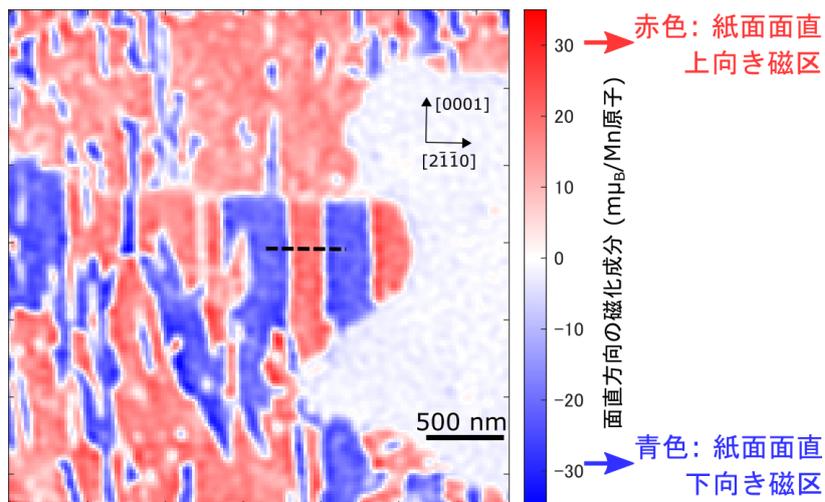


図 1 : Mn_3Sn の磁区構造に対応する磁化分布画像

Mn_3Sn 薄膜における磁化の空間分布を示しています。赤色と青色の部分はそれぞれ、紙面面直上向きと下向き方向に八極子が向いた磁区に対応します。八極子の方向が統一されている領域は数百ナノメートル四方程度の大きさであり、それらの境界の白い線の部分が磁壁に相当します。得られた磁化の典型的な値は、マンガン原子 1 つあたりで平均すると、ボーア磁子 (μ_B : 磁気的物理定数) の 0.016 倍であり、通常のマンガンの磁性体と比べて 100 分の 1 の大きさです。

さらに研究グループは、磁壁の位置を精密に制御しながら測定を行うことで、2 つの磁壁に起因する磁場信号のみを抽出することに成功しました（図 2）。複数の理論モデルを比較検討することにより、磁壁の詳細な構造が検証され、磁壁は八極子秩序を保ち、その八極子の回転方向（キラリティ）が同じ方向（左ネール磁壁（注 6））で揃っていることが明らかとなりました。さらに、磁壁の幅が 40 ナノメートルであると正確に決定できました。

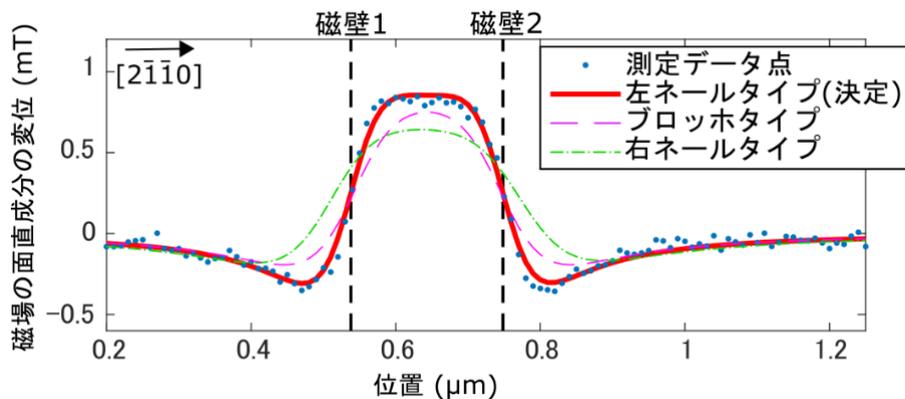


図 2 : Mn_3Sn の 2 つの磁壁からの漏れ磁場分布の解析

2 つの磁壁 (磁壁 1 と磁壁 2) からの漏れ磁場分布を、様々な磁壁構造に対する理論モデルと比較検討した結果、左ネールタイプであることが分かりました。この磁場分布は、図 1 点線部の磁壁 2 つを意図的に消失させる前後の磁場分布の差分を取って得られたものです。(横軸の単位はマイクロメートルです)

本成果は、八極子秩序に基づく反強磁性スピントロニクスにおける重要な知見やパラメータを提供し、磁壁制御による記録デバイスの発展や多極子磁性の基礎理解に大きく貢献するものです。科学技術振興機構 (JST) 未来社会創造事業において推進されているスピントロニクスと光電技術の融合デバイス開発に対し、本研究はその中核を担うワイル反強磁性体 Mn_3Sn の磁壁の幅や局所的な磁化の値を高精度に明らかにした初めての成果であり、本物質を用いた研究全体を大きく推進することが期待されます。

また、微小な磁場しか発生しない反強磁性体に対して、ダイヤモンド量子センシングを活用してその性質を精密に探究できる手法を確立したことは、今後の反強磁性体研究において、基礎物理・材料開発の両面から広く展開が期待されます。これは、JST 戦略的創造研究推進事業において推進されている量子スピン顕微鏡で切り拓く極限物性の探索において、量子スピン顕微鏡が反強磁性体研究において有用な量子技術となることを実証するものです。

発表者・研究者等情報

東京大学

大学院理学系研究科 物理学専攻

塚本 萌太 博士課程学生 (研究当時)

現：同大学大学院新領域創成科学研究科 物質系専攻 助教

肥後 友也 特任准教授 (研究当時)

現：慶應義塾大学 工学部電気情報工学科 准教授

佐々木 健人 助教

中辻 知 教授

兼：同大学トランススケール量子科学国際連携研究機構 機構長

小林 研介 教授

兼：同大学大学院理学系研究科 附属知の物理学研究センター 教授

兼：同大学トランススケール量子科学国際連携研究機構 教授

物性研究所

大谷 義近 教授

兼：理化学研究所 創発物性科学研究センター 量子ナノ磁性研究チーム
チームリーダー（研究当時）

三輪 真嗣 准教授

坂本 祥哉 助教（研究当時）

現：東北大学 金属材料研究所 准教授

理化学研究所

創発物性科学研究センター 量子ナノ磁性研究チーム

近藤 浩太 上級研究員（研究当時）

現：大阪大学 先導的学際研究機構 准教授

スイス連邦工科大学チューリッヒ校

Christian Degen (クリスチャン デーガン) 教授

Pietro Gambardella (ピエトロ ガンバルデーラ) 教授

論文情報

雑誌名：Physical Review B (Letter, Editors' Suggestion)

題名：Observation of chiral domain walls in an octupole-ordered antiferromagnet

著者名：Moeta Tsukamoto*, Zhewen Xu, Tomoya Higo, Kouta Kondou, Kento Sasaki, Mihiro Asakura, Shoya Sakamoto, Pietro Gambardella, Shinji Miwa, YoshiChika Otani, Satoru Nakatsuji, Christian L. Degen, Kensuke Kobayashi (*責任著者)

DOI：10.1103/njnm-nl6n

研究助成

本研究は、日本学術振興会 科研費「量子センサを用いたメゾスコピック磁性の研究」（課題番号 JP22KJ1059）、「ダイヤモンド量子センサによるメゾスコピック磁性研究の基盤構築」（課題番号 JP23K25800）、「量子金属における創発現象の相関設計」（課題番号 JP25H01248）、「窒化ホウ素量子センサによる磁性研究の新展開」（課題番号 JP24K21194）、「量子センサによるスピンダイナミクスの可視化手法の開発」（課題番号 JP22K03524）、「および科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業 CREST「量子スピン顕微鏡で切り拓く極限物性の探索」（課題番号 JPMJCR23I2）、「同 未来社会創造事業 大規模プロジェクト型「スピントロニクス光電インターフェースの基盤技術の創成」（課題番号 JPMJMI20A1）、「およびスイス国立科学財団（課題番号 200020_200465、200020_212051/1）、「およびダイキン工業株式会社、近藤記念財団、三菱財団、東北大学電気通信研究所共同プロジェクトの支援により実施されました。

用語解説

(注1) 八極子秩序

磁性体は、N極とS極を1つずつ有する磁気双極子を基本単位とします。それらが平行や反平行などに揃った状態（秩序状態）を形成することで、磁石のような性質を示します。本研究で取り扱う Mn_3Sn の場合は、6つの磁気双極子が集まって1組となり、N極とS極が4つずつ存在する「拡張磁気八極子」（本稿では磁気八極子あるいは八極子と呼称します）を基本単位として捉えることができます。

(注2) 反強磁性体

磁石のように自発的に磁気双極子が平行方向に揃った磁性体は、強磁性体と呼ばれます。反対に、磁気双極子が自発的に反平行もしくはその他の組み合わせにより、その効果を互いに打ち消しあうような向きで秩序している磁性体を、反強磁性体と呼びます。本研究では、6つの磁気双極子の組み合わせで反強磁性の秩序が実現されています。

(注3) 磁区構造・磁壁

強磁性や反強磁性では、その秩序の様子を方向で特徴づけることができます。この秩序方向が揃った領域が磁区であり、異なる磁区の境界線が磁壁です。磁壁では、秩序方向が空間的に連続的に変化しており、その変化の仕方には複数の種類があります。本研究では磁壁がすべて左ネール磁壁（注6）で統一されることが分かりました。

(注4) スピントロニクス

物質中の電子が有する電荷とスピンの両方を活用する物理学の分野やデバイスのことです。スピンは磁氣的性質を持つため、物質の磁性と大きく関わります。従来は一般の永久磁石のような強磁性体が使われてきましたが、反強磁性体を用いることで更なる集積化や高速化が期待されています。

(注5) ダイヤモンド量子センサ

ダイヤモンド結晶中には、窒素と炭素位置欠損のペアで構成される窒素空孔中心と呼ばれる格子欠陥が存在することがあります。この欠陥にはスピンの存在し、その量子状態を制御・読み出すことが可能です。量子センシングとは、この量子状態のエネルギー準位が外場によって変調される現象を利用し、その変調を高感度かつ高精度に計測することによって外場を定量的に計測する手法です。本研究では微細加工されたダイヤモンド針中に1つだけ存在する欠陥を用いて、磁場による変化を高精度に観測しています。

(注6) 左ネール磁壁

磁壁には、秩序方向の空間的変化の仕方により、ブロッホ磁壁、ネール磁壁の2種類があります（図3）。ネール磁壁にはその回転の巻き方（キラリティと呼ばれる）によって右巻きと左巻きがあり、通常は2つの巻き方の磁壁が半分ずつの確率で現れます。しかし本研究では、左巻きのネール磁壁のみが観測されました。



図 3 : Mn_3Sn における左ネール磁壁、右ネール磁壁、ブロッホ磁壁の概念図

赤と黄の球が Mn 原子の位置を表し、橙色の矢印が八極子方向を表します。ネール磁壁では紙面内内で八極子が回転するのに対し、ブロッホ磁壁では紙面直方向を経由して八極子方向が回転します。左から右に順に見ていったときに、左ネール磁壁では矢印が左側に倒れる方向に、右ネールでは右に倒れる方向に回転しています。この左右のネール磁壁は、上下を反転せずに重ねることができず、重ねるために鏡映しが必要となるキラルな関係になっています。

問合せ先

(研究内容については発表者にお問合せください)

東京大学大学院理学系研究科

教授 小林 研介 (こばやし けんすけ)

Tel : 03-5841-4126 E-mail : kensuke[at]phys. s. u-tokyo. ac. jp

東京大学大学院理学系研究科・理学部 広報室

Tel : 03-5841-8856 E-mail : media. s[at]gs. mail. u-tokyo. ac. jp

東京大学物性研究所 広報室

Tel : 04-7136-3207 E-mail : press[at]issp. u-tokyo. ac. jp

科学技術振興機構 広報課

Tel : 03-5214-8404 E-mail : jstkocho[at]jst. go. jp

(JST 事業に関するお問合せ)

科学技術振興機構 戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ

安藤 裕輔 (あんどう ゆうすけ)

Tel : 03-3512-3531 E-mail : crest[at]jst. go. jp