

## ついに「ドメインウォール・スキルミオン」の観測成功！

～新「スキルミオン」制御方法の開発で磁気メモリなどへの応用に期待～

国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学大学院工学研究科の長瀬 知輝 博士前期課程学生(当時)、川口 由紀 教授、田仲 由喜夫 教授、名古屋大学未来材料・システム研究所の石田 高史 助教、長尾 全寛 准教授、桑原 真人 准教授、齋藤 晃 教授、五十嵐 信行 教授らの研究グループは、磁性体において、様々な物理学分野で存在が予測されてきた「ドメインウォール・スキルミオン」と呼ばれる状態の観測に成功しました。

「ドメインウォール・スキルミオン」とは「欠陥」の一つであり、これまで理論的に提唱されてきましたが、明確に観測されたことはありませんでした。

研究グループは、ローレンツ電子顕微鏡を用いて、磁性薄膜の磁気構造を調べたところ、正味の磁気モーメント<sup>注 1)</sup>が揃った領域(磁区)が隣接している境界(磁壁<sup>注 2)</sup>・ドメインウォール)において、「トポロジカル磁気構造」<sup>注 3)</sup>の一つである「スキルミオン」が鎖状に配列して磁壁の役割を担っている状態、「ドメインウォール・スキルミオン」を直接観測しました。

本研究は、様々な物理学分野の進展が期待されます。また、磁性体中の「ドメインウォール・スキルミオン」は磁壁に沿って電流誘起駆動<sup>注 4)</sup>が予測されており、磁区を制御することで、情報担体とみなせる「スキルミオン」の駆動経路を設計できる可能性があります。

本研究成果は、2021 年 6 月 9 日 18 時(日本時間)付英国科学誌「Nature Communications」に掲載されました。

本研究は、科学研究費助成事業(18K04679, 15K17726, 19H01824, 18K03529, 17H02737, 17K14117, JP15H05853, 20K20899)、ナノテクノロジープラットフォーム事業、未来社会創造事業(JPMJMI18G2)、CREST(JPMJCR16F2)、先端研究基盤共用促進事業、村田学術振興財団の支援のもとで行われたものです。

## 【ポイント】

- ・磁性体中で、理論的に予測されていた「ドメインウォール・スキルミオン」の直接観察に成功。
- ・この観測の成功は、様々な物理学分野で進展が期待される。
- ・「スキルミオン」の電流駆動経路を制御することで、磁気メモリなどへの応用の可能性がある。

## 【研究背景と内容】

「欠陥」は、宇宙規模から原子スケールに至る様々なシステムにおいて見られる、普遍的な存在です。「欠陥」の性質や成因を明らかにすることは、そのシステムの物理的本質を解明する鍵となり、「欠陥」の制御は応用上重要な課題となっています。そのため、「欠陥」は様々な分野で長年に渡って研究されてきました。

秩序化した領域同士の境界に現れる「ドメインウォール」は、代表的な「欠陥」の一つとして知られています。例えば、図 1 のように、磁性体中では磁気モーメントが揃った微小な領域（ドメイン：磁性体では磁区と呼ばれている）に幾つも分かれており、隣接する磁区と磁区の境界が「ドメインウォール」です（磁性体では「磁壁」と呼ばれている）。磁壁は電流で駆動できることから、メモリなどへの応用が期待されています。さらに、「スキルミオン」と呼ばれる「欠陥」も知られています。「スキルミオン」は、元々、素粒子物理学で提唱された粒子的な性質を持つ渦状の「欠陥」であり、量子ホール強磁性体・ボース＝アインシュタイン凝縮体・液晶・超伝導体・磁性体など様々なシステムで観測されてきました。特に、磁性体中の「スキルミオン」(図 2) は、磁壁と同様に電流によって駆動し、駆動に必要な電流密度の閾値が磁壁に比べて 5 桁も小さくて済むことから、省エネルギーのデバイス実現へ向けた研究開発が加速しています。

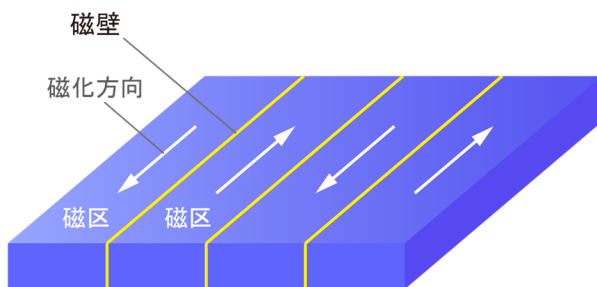


図 1. 磁性体中の磁気構造。磁気モーメントが揃った領域が磁区。磁区同士の境界が磁壁。

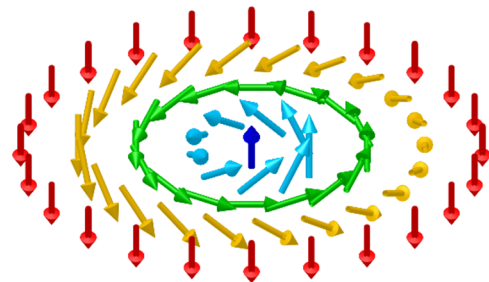


図 2. 磁気スキルミオンのスピン構造。矢印はスピンの向きを表す。

一方、「ドメインウォール・スキルミオン」と呼ばれる「欠陥」が理論的に提唱されてきました。これは「欠陥中の安定な欠陥」と見なせるもので、「ドメインウォール」中に「スキルミオン」が存在、もしくは「スキルミオン」が 1 次元状に配列して「ドメインウォール」を構成したものを指します。「ドメインウォール・スキルミオン」は、最初に、1999 年に量子ホール強磁性体において理論的に予測されました。これ以降「ドメインウォール・スキルミオン」は、量子ホール強磁

性体・液晶・磁性体、類似の「欠陥」が超伝導体・ボース＝アインシュタイン凝縮体・場の理論など様々な物理学分野において予測されてきましたが、これまで、「ドメインウォール・スキルミオン」が明確に観測されたことはありませんでした。

本研究では、名古屋大学超高压電子顕微鏡施設のローレンツ電子顕微鏡を用いて、コバルト・亜鉛・マンガで構成される磁性薄膜試料の磁気構造を調べました。この磁性体は、室温以上でスキルミオン三角格子(粒子的性質を反映して、ボールを敷き詰めた時のように、スキルミオンが三角格子状に規則配列した状態)が現れる物質として知られてます。また、以前に、研究グループはこの磁性体を特定の結晶方位に沿って切り出して、厚さ約 100 ナノメートル<sup>注 5)</sup>まで薄くした薄膜試料で「スキルミオン」の液晶構造<sup>注 6)</sup>を報告しています。今回は、さらに約 50 ナノメートルまで薄くした薄膜試料を対象としました。図 3 がローレンツ電子顕微鏡像から得られた磁束密度分布像です。正味の磁気モーメントが、右方向に向いた磁区(赤色領域)と、左方向に向いた磁区(水色領域)の境界に、通常の磁壁(黒線)が見られますが、それに加えて、もう片方の磁区と磁区の境界に鎖状に配列した「スキルミオン(渦状の楕円体)」が観測されました。つまり、「スキルミオン」が磁壁の役割を担っており「ドメインウォール・スキルミオン」の存在が実証されました。また、本研究は通常の磁壁中に孤立した「スキルミオン」も観測しています。今回観測された「ドメインウォール・スキルミオン」の形成は、スピンを特定の結晶方位に向けようとする磁気異方性、磁性体の内部に作られる反磁界<sup>注 7)</sup>、隣り合うスピン同士を 90 度に傾けようとする「ジャロシンスキー・守谷相互作用」が組み合わさった効果によるものと考えられます。この形成機構は、これまで磁性体で予測されてきたものとは異なり、シミュレーションによって、「ドメインウォール・スキルミオン」が様々な磁性体で現れる可能性が見い出されました。

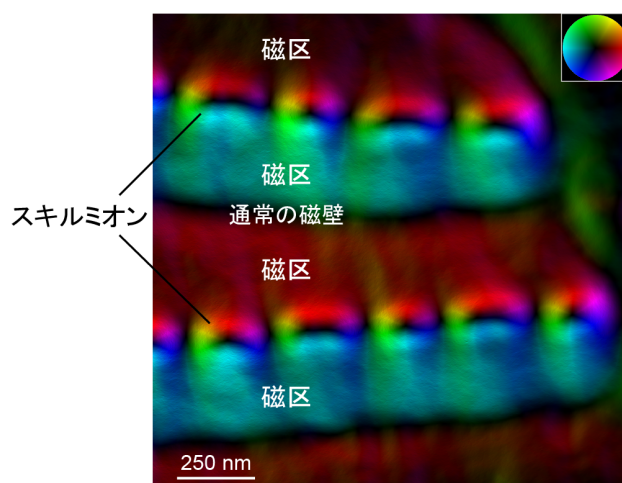


図 3. 磁束密度分布像。磁区と磁区の境界で通常の磁壁(黒線)に加えて、右巻きの楕円スキルミオンが鎖状に配列した「ドメインウォール・スキルミオン」が形成されていることが分かる。なお、右上のカラーホイールは凡例で、色の違いは「磁束密度の方向」、色の明度は「磁束密度の強さ」を表す。

## 【成果の意義】

理論的に予測されてきた「ドメインウォール・スキルミオン」が実験的に実証されたことから、様々な物理学分野において進展が期待されます。また、磁性体中の「ドメインウォール・スキルミオン」は磁壁に沿って電流駆動すると考えられており、応用の面でも重要となります。電流によって駆動する「スキルミオン」はカーブした軌道を描くことが知られており（スキルミオン・ホール効果と呼ばれる）、「スキルミオン」のデバイス応用の障害の一つとされています。しかし「ドメインウォール・スキルミオン」は磁壁に沿って電流駆動することから、スキルミオン・ホール効果を抑制し、さらに、磁区を制御することで「スキルミオン」の駆動経路を設計できる可能性があります。

## 【用語説明】

注 1) 磁気モーメント:

磁力の強さと方向を表すベクトル量。

注 2) 磁壁:

通常、磁壁中では徐々にスピンの回転しているため、磁壁はある程度の厚さの層を形成している。磁壁はスピンの回転方向によって 2 種類に分類される。一つが「ブロッホ型磁壁」で、一つの磁区から隣接する磁区に移る過程で、進行方向を回転軸としてスピンの回転する。もう一つが「ネール型磁壁」で、進行方向に対して垂直方向を回転軸として、スピンの回転する。

注 3) トポロジカル磁気構造:

磁石のように、スピンの向きが一方向に揃った状態とは異なり「トポロジカル磁気構造」は空間的にスピンの向きが 3 次元的に捻じれた磁気構造を取り、磁気構造を分類するトポロジカル数がゼロとまらないものを指す。「スキルミオン」は  $\pm 1$  の値をとる。具体的には、全てのスピンを一点に集めたとき、スピンの向きが完全に単位球面を覆うような磁気構造体である。この値は、磁気構造を連続変形（伸ばしたり曲げたりといった操作）しても一定に保存される量であり、磁気構造体の幾何学的な制約を特徴付けている。トポロジカル磁気構造は幾何学的な制約による安定性を持ち、熱などの揺らぎに対して壊れにくいことから、電子部品への応用が期待されている。

注 4) 電流誘起駆動:

スキルミオンや磁壁は電流が持つスピンとの相互作用によって、電流を流すことで動かすことが出来る。一般にこれを電流誘起駆動と呼ぶ。

注 5) ナノメートル:

1 ナノメートルは、1 ミリメートルの 100 万分の 1 の長さ。

注 6) スキルミオンの液晶構造:

通常、「スキルミオン」は粒子的性質を反映して固体中の原子配列と類似する配列を示す。一方、以前に、同研究グループは液体と結晶の中間状態にある液晶と類似した「スキルミオン配列」を報告している。詳細は、以下の原著論文およびプレスリリースを参照。

- 原著論文: T. Nagase et al., Physical Review Letters **123**, 137203 (2019).

<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.137203>

- プレスリリース(2019年10月2日)

[https://www.nagoya-u.ac.jp/about-nu/public-relations/researchinfo/upload\\_images/20191002\\_engg1.pdf](https://www.nagoya-u.ac.jp/about-nu/public-relations/researchinfo/upload_images/20191002_engg1.pdf)

注 7) 反磁界:

磁性体内部で、磁化(N極とS極に分極した状態)方向と逆向きに現れる磁界。反磁界の大きさは、磁気モーメントの大きさ、磁性体の形状や大きさに依存する。

【論文情報】

雑誌名: Nature Communications

論文タイトル: Observation of domain wall bimerons in chiral magnets

著者: 長瀬知輝<sup>1\*</sup>, 肖英紀<sup>2</sup>, 安井隼太<sup>2</sup>, 石田高史<sup>1,3</sup>, 吉田紘行<sup>4</sup>, 田仲由喜夫<sup>1</sup>, 齋藤晃<sup>1,3</sup>, 五十嵐信行<sup>1,3</sup>, 川口由紀<sup>1</sup>, 桑原真人<sup>1,3\*</sup>, 長尾全寛<sup>1,3\*</sup>

所属: 1. 名古屋大学大学院工学研究科, 2. 秋田大学大学院理工学研究科,  
3. 名古屋大学未来材料・システム研究所, 4. 北海道大学大学院理学研究院  
\* 責任著者

DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23845-y>

URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-021-23845-y>