

新機能素子の実現が期待される“磁気渦粒子” 磁気スキルミオンで、新たな構造を実現

名古屋大学大学院 工学研究科の 長瀬 知輝 博士前期課程一年生（研究当時 学部四年生）、川口 由紀 准教授、田仲 由喜夫 教授、同大学 未来材料・システム研究所 高度計測技術実践センターの 石田 高史 助教、桑原 真人 准教授、齋藤 晃 教授、同研究所 未来エレクトロニクス集積研究センターの 長尾 全寛 准教授、五十嵐 信行 教授らの研究グループは、磁気スキルミオン^(注1)と呼ばれる“磁気渦粒子”の、新しい構造（液晶状態）の実現に成功しました。

磁気スキルミオンは渦状の磁気構造を持ち、あたかも粒子のように振る舞う性質を持っています。このスキルミオンをひとつの単位として、いろいろな配列が作れるようになると、新しい機能を持った素子への応用が拓けることが期待されるため、世界中で研究が活発化しています。これまで、円盤状のスキルミオンが、固体の中の原子と同じように、前後左右に規則正しく並ぶ様子や、無秩序に配置している様子は報告されてきました。今回、本研究グループは、スキルミオン物質を極薄く制御して、磁気異方性^(注2)と呼ばれる性質を利用することで、細長く伸びたスキルミオンが、一方向を向き、層になっている状態を作り出すことに成功しました。このスキルミオンの形状と配置は、スメクティック液晶^(注3)と呼ばれる種類の液晶によく似ており、“スキルミオン液晶”と呼べる状態です。

スキルミオンを用いた次世代デバイスを実現するには、スキルミオンの動きや配置を制御することが必要不可欠です。今回の“スキルミオン液晶”の実現は、スキルミオンを思い通りの構造に作り込む第一歩であり、さらに新しい動作原理を持つ省エネルギーの次世代スピndevice^(注4)の開発につながることを期待されます。

本研究成果は、アメリカ物理学会が発行する「*Physical Review Letters*」に2019年9月27日付けで掲載されました。

なお、本研究成果は長瀬知輝 博士前期課程一年生が、学部四年生のときに行った卒業研究をまとめたものです。このことは、名古屋大学の教育研究が、若い研究者の発想および行動力と相乗効果をもって発展していることを示しています。

【ポイント】

- 液晶と類似する磁気スキルミオンの構造を実現（図 1）。
- 新しい動作原理を持つ次世代スピndeバイスの開発や、新たなトポロジカル磁気構造体^(注5)の発見に繋がるのが期待。

【研究背景】

磁気スキルミオン（以下、スキルミオン、図 2(a)および注 1）は、渦巻状に並んだ電子スピン構造（磁気構造）が持つトポロジーに由来して、全体として粒子のような性質を持つ、トポロジカル磁気構造体と呼ばれるものの一種です。スキルミオンの配列としては、これまで、三角格子や四角格子、アモルファス（図 2(b)）といった、固体中の原子配列と同様の状態が観測されていました。

ところで、物質の状態には、気体、液体、固体の他に、液体と固体の両方の性質を併せ持つ液晶状態があります。分子で構成される液晶は、分子の向きによって光の透過量をコントロールすることができるため、液晶ディスプレイとしてスマートフォンやテレビなどで実用化されています。このように、粒子の状態を自在に制御することが、新しい素子の特性を発現させるために重要なのですが、スキルミオンにおいては、液晶に類似した状態の実現はこれまで報告されていませんでした。

【成果の内容と意義】

研究グループは、スキルミオン物質のナノ構造効果（1 ナノメートルは 10 万分の 1 ミリメートル）と磁気異方性に着目し、厚さ 100 ナノメートルまで薄くした $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{7.5}\text{Mn}_4$ （Co：コバルト，Zn：亜鉛，Mn：マンガン）ナノ構造試料（薄膜試料）を作製しました。スキルミオン物質は試料表面効果により、表面からある程度の深さまで磁気構造が変化していることが知られています。厚さが 100 ナノメートルの薄膜試料では、この効果が薄膜全体に及んでいます。また、このスキルミオン物質は等価な三つの磁気異方性の方向を持っており、それらは互いに直交しています。この三つの磁気異方性の方向の一つは薄膜面に平行に、残りの二つを薄膜面垂直から 45 度傾いた方向に設定することで、薄膜面に対して磁気構造が異方的になるような試料を作製しました。次に、研究グループはローレンツ電子顕微鏡法を用いて、上述の薄膜試料の観察を行いました。ローレンツ電子顕微鏡法は、磁気構造を直接観察できる強力な手法です。観察の結果、既存のスキルミオンが円盤状であるのに対して、本薄膜試料で実現したスキルミオンは特定の方向に伸びた形状を持っていました。さらに、伸びたスキルミオンの配置を高速フーリエ変換とドロネー三角形分割法という方法を用いて解析した結果、スメクティック液晶（図 3 および注 3）と呼ばれる種類の液晶に類似した状態であることが明らかとなりました（図 1）。

この“スキルミオン液晶”の発現は、磁気異方性とナノ構造効果が薄膜内部で協奏的に働いた結果です。

スキルミオンは、省エネルギーのメモリデバイスや論理回路、ニューロモーフィック・コンピューティング・デバイス、確率的コンピューティング・デバイスなどへの応

用が提案されています。これらの次世代スピンドバイスを実現するためには、スキルミオンの動きや配置を制御することが必要不可欠です。今回の“スキルミオン液晶”のような新しい構造が実現されれば、さらに新しい動作原理を持つ省エネルギーの次世代スピンドバイスの実現が期待できます。

また、この“スキルミオン液晶”では、既存のスキルミオンでは見られなかった、薄膜試料の方向に応じて異なるスキルミオン間の相互作用（引力・斥力）が働いていることも実験的に明らかになりました。スキルミオン間の相互作用は、スキルミオンの動きや配置に大きな影響を及ぼすことが多くの理論研究により明らかとなっており、今回の成果は、スキルミオン間の相互作用の研究にも新たな展開をもたらす可能性を持っています。

今回の“スキルミオン液晶”とも呼べる構造の実現により、トポロジカル磁気構造体を用いた省エネルギー・スピンドバイスの可能性を広げることが期待されます。

なお、本研究成果は卒業研究をまとめたものであり、このことは、名古屋大学の教育研究が、若い研究者の発想や行動力と相乗効果をもって発展した結果、質の高い研究が行われていることを示している例といえます。

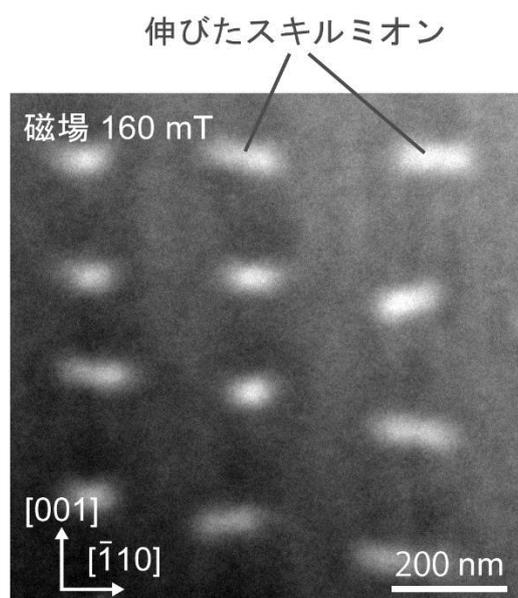


図1 “スキルミオン液晶”のローレンツ電子顕微鏡像
伸びた明るいコントラストひとつひとつがスキルミオン。スキルミオンが伸びている方向は図中の特定の方向（ $[110]$ と書かれた矢印の方向）に沿っていることが分かる。

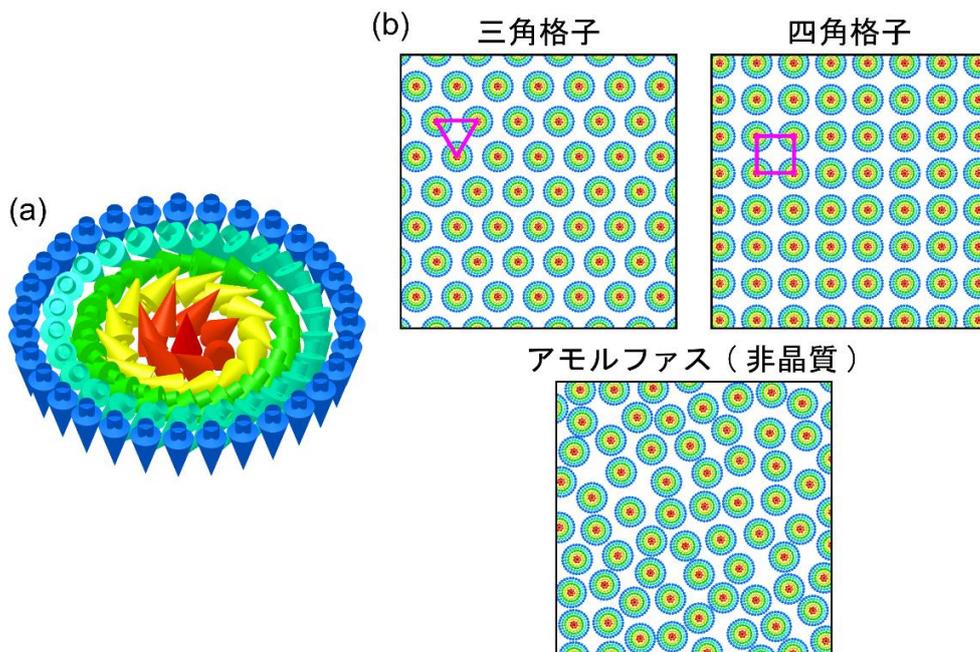


図 2 スキルミオンの磁気構造と固体的の原子配列に類似したスキルミオン配列

(a) スキルミオンの磁気構造の模式図。矢印が電子スピンの向きを表している。中心部分のスピンの向きが上向きで、中心から放射状方向に徐々にスピンの向きが回転して行き、外側で下向きとなっている。

(b) 円盤ひとつひとつがスキルミオンを表している ((a)を上から見たもの)。固体中の原子配列と類似して、円盤状のスキルミオンの並びが三角格子 (左上)、四角格子 (右上) のように規則的に配列したものや、アモルファスのように不規則に配置した様子が報告されている。

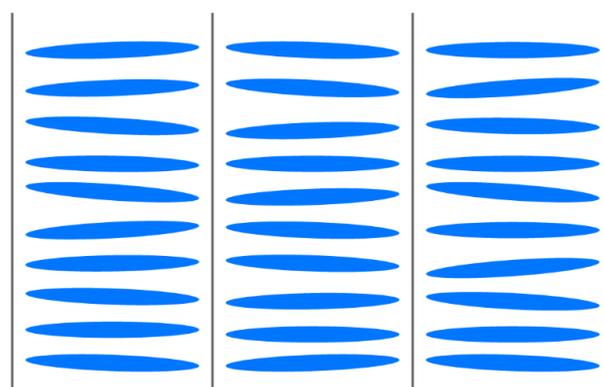


図 3 スメクティック液晶の模式図

通常の液晶では、青色の棒状で描いたものが分子に相当するが、今回の研究では伸びたスキルミオンに相当する。スメクティック液晶では、分子 (またはスキルミオン) が一方向に配向しており、縦線で示した間隔で左右方向に規則的に配列している (左右方向に層状を形成している)。しかし、上下方向の分子 (スキルミオン) の並びは規則的になっていない。

【用語説明】

(注1) 磁気スキルミオンと磁気スキルミオンの固体的な状態

電子スピンは電子が持つ自由度の一つ（性質の一つ）で、磁石が示す様な磁気的な性質の起源となっている。磁石は、物質中でスピンの向きが一方向に揃った状態である。図 2(a)は磁気スキルミオンのスピン配列（磁気構造）の模式図で、矢印がスピンの向きを表しており、中心部分のスピンの向きが上向きで、中心から放射状方向に徐々にスピンの向きが回転して行き、外側で下向きとなっている。このような磁気構造を、磁気スキルミオンと呼ぶ。スキルミオンは粒子のような性質を持ち、図 2(b)に示すように、これまでは固体中の原子の並びに類似した、規則的に並んだ三角格子や四角格子、または無秩序に配置しているアモルファス（窓ガラスはこのような原子の配置）と呼ばれるスキルミオン構造が報告されている。

(注2) 磁気異方性

磁性体内では磁気モーメントが特定の方向に向きやすい性質がある。これは、磁性体のもつ基本的な性質で、磁性体の形状や結晶構造に応じて、その向きが決まる。

(注3) スメクティック液晶

液晶とは、構成する原子などの配置が秩序を持たない液体と秩序立った配置を持つ固体の中間的な状態で、ある程度の秩序を持つ液体のような状態である。液体と固体の両方の性質を併せ持つ。スメクティック液晶は、典型的には、図 3 に示すように、棒状の分子が一方向に配向しており、縦線で示した間隔で規則的に配列している（層状を形成している）。しかし、層に沿った方向には秩序立った配列は示さない。本研究では、棒状の分子が細長く伸びたスキルミオンに相当する。

(注4) 次世代スピンドバイス

スピンドバイスはスピントロニクス・デバイスとも呼ばれる。半導体に代表されるエレクトロニクスは、電子が持つ自由度の一つである電荷のみを利用する技術であるのに対して、スピントロニクスは、電子が持つスピンと電荷の両方を利用する技術。身近な例として、ハードディスクドライブの読み取りに用いられている。スピントロニクス・デバイスは、電流による発熱を抑えたデータの伝送や電源を切っても情報が保持される不揮発性、メモリの大容量・高速化などの実現が期待されている。磁気スキルミオンは、省エネルギー・大容量・高速・不揮発性を兼ね備えたメモリデバイスや論理回路に加えて、最近では、ニューロモーフィック・コンピューティング・デバイス、確率的コンピューティング・デバイスなどへの応用が提案され始めている。

(注5) トポロジカル磁気構造体

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体は多くの場合、空間的にスピンの向きが連続的に捻じれた磁気構造を取っており、磁気構造をトポロジカル・ナンバーと呼ばれる式に当てはめたときの値が、ゼロとならないものを指す。スキルミオンは ± 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、磁気構造体を連続変形（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

構造体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、デバイスへの応用が期待されている。

【研究プロジェクトについて】

本研究は、以下のプロジェクトによる支援のもとで行われたものです。

- 科学技術振興機構 未来社会創造事業 探索加速型 共通基盤領域「コヒーレント超短パルス電子線発生装置を活用した超時空間分解電子顕微鏡」(JST-Mirai Grant Number JPMJMI18G2)
- 日本学術振興会 科学研究費補助金・新学術領域研究「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」(JSPS KAKENHI Grant Number JP15H05853)
- 日本学術振興会 科学研究費補助金 (JSPS KAKENHI Grant Numbers 15K17726, 17H02737, 17K14117, 18K03529, 18K04679)
- 文部科学省「ナノテクノロジープラットフォーム」事業 名古屋大学 微細構造解析プラットフォーム
- 名古屋大学 未来材料・システム研究所 未来エレクトロニクス集積研究センター 若手研究ユニット
- 北海道大学 次世代研究基盤戦略 先端物性共用ユニット
- 村田学術振興財団 研究助成

【論文情報】

雑誌名 : *Physical Review Letters*

論文タイトル : Smectic Liquid-Crystalline Structure of Skyrmions in Chiral Magnet $\text{Co}_{8.5}\text{Zn}_{7.5}\text{Mn}_4(110)$ Thin Film

著者 : 長瀬 知輝*, 小松 正弥, 肖 英紀, 石田 高史, 吉田 紘行, 川口 由紀, 田仲 由喜夫, 齋藤 晃, 五十嵐 信行, 桑原 真人*, 長尾 全寛* (*は責任著者)

DOI : [10.1103/PhysRevLett.123.137203](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.137203)