本件の取り扱いについては、下記の解禁時間以降でお願い申し上げます。
新聞　　：日本時間　８月８日（水）朝刊
テレビ・ラジオ・インターネット　：日本時間　８月８日（水）午前０時

2012 年 8 月 7 日
独立行政法人理化学研究所
国立大学法人東京大学
独立行政法人物質・材料研究機構

電子スピンの渦「スキルミオン」を微小電流で駆動

―従来の 10 万分の 1 の低電流密度での磁気情報操作技術の実現に大きく前進―

本研究成果のポイント

○らせん磁性体 FeGe で、室温付近でも安定な「スキルミオン結晶」をマイクロ素子中に生成
○直径 70nm のスキルミオンを、わずか 5A/cm^2 の低電流密度で駆動
○スキルミオンを情報担体として利用する次世代磁気メモリ素子の実現に道筋

理化学研究所（野依良治理事長）と東京大学（濱田純一総長）、物質・材料研究機構（潮田資勝理事長）は、らせん磁性体※1 である FeGe を用いたマイクロ素子中に、電子スピンが渦巻状に並ぶスキルミオン結晶※2 を生成し、強磁性体中の磁壁※3 を駆動するのに必要な電流の 10 万分の 1 以下という微小電流密度で、スキルミオン結晶を駆動することに成功しました。これにより、磁気的な情報担体の状態を、極めて低い消費電力で電気的に操作する技術の実現に向けて有効な指針を得ることができました。これは、理研基幹研究所（玉尾皓平所長）強相関量子科学研究グループ強相関物性研究チームの于秀珍（ウ　シュウシン）特別研究員と十倉好紀グループディレクター（東京大学大学院工学系研究科教授）、物質・材料研究機構先端的共通技術部門（藤田大介部門長）表界面構造・物性ユニット木本浩司ユニット長らによる研究成果です。

磁石の源である電子スピンの向きをデジタル情報として利用する磁気メモリ素子は、高速・不揮発性などの特徴をもつデバイスとして注目されており、その磁気情報を磁場を用いずに電気的に操作する試みが近年盛んに行われています。強磁性体中に電流を流すと、磁化が上向きの磁区※3 と下向きの磁区の境界である磁壁（そこでは電子スピンの向きが徐々に変化している）を移動させることができるため、磁化反転が可能になり、情報を書き込むことができます。しかし、磁壁を移動させるには、最低でも 1 平方センチメートル（cm^2）あたり約 10 万アンペア（A）という大電流密度が必要でした。これでは、大量のエネルギー損失が生じる（消費電力が大きい）ため、より低い電流密度で磁気情報担体を操作する方法が望まれていました。

さまざまな機能性磁気材料を探索してきた研究チームは、2010 年、らせん磁性体 FeGe の薄片に、室温付近で 200 ミリテスラ（mT）以下の弱磁場を加え、スキルミオン結晶の生成と観測に成功しています。今回、この FeGe を用いて、縦 165 μm、横 100 μm、厚さ 100 nm～30 μm のマイクロ素子を作製し、−23℃ ~ 室温近傍（−3℃）で約 150 mT の磁場を加えたところ、直径約 70nm の安定したスキルミオンが三角格子状に並ぶスキルミオン結晶を観察しました。さらに、従来の強磁性体における磁壁駆動の場合に比べて 10 万分の 1 以下という微小な電流密度（~5 A/cm^2）で、スキルミオン結晶を駆動することに成功しました。このような微小な電流密度でスキルミオンを駆動できることは、スキルミオンを情報担体として用いた低消費電力の磁気メモリ素子の開発に向けての第一歩であり、現在、次世代の電子技術として研究の盛んなスピントロニクス※4 分野においてさまざまな応用が期待できます。

本研究成果の主たる部分は、総合科学技術会議により制度設計された最先端研究開発支援プログラム(FIRST)の「強相関量子科学」事業（中心研究者：十倉好紀）によるもので、日本学術振興会を通じて助成され実施されました。また一部は科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業・ERATO 型研究プロジェクトおよび文部科学省ナノテクノロジーネットワークによる支援を受けており、英国の科学雑誌『*Nature Communications*』オンライン版（8 月 7 日付け：日本時間 8 月 8 日）に掲載されます。

1. 背　景

スキルミオンと呼ばれる電子スピンの渦（図 1）は、2009 年の中性子小角散乱実験によって、らせん磁性体中にその存在が示唆されていました。これまでに研究チームは、らせん磁性体である $Fe_{0.5}Co_{0.5}Si$ や FeGe に磁場を印加すると、電子スピンの向きが徐々に変化しながら渦巻状に並んでスキルミオンが形成され、一定の磁場・温度では、スキルミオンが規則的に並んでスキルミオン結晶を形成することを、2010 年に磁場中のローレンツ電子顕微鏡※5 観察で発見しました。スキルミオン結晶に電流を流すと、通過する伝導電子にスキルミオンから実効的に磁場が加わり、トポロジカルホール効果※6 など新奇な電磁気現象が現れたり、伝導電子のスピンの向きが変わったりします。一方、スキルミオンのスピンも、伝導電子のスピンの向きの変化に応じて変化するため、スキルミオンが回転したり電流方向へ移動したりします（スピントランスファートルク効果※7)。

電子の磁化を情報担体として利用する磁気メモリ素子では、電子スピンの向きを制御することが重要です。強磁性体中に電流を流すと磁壁を移動させることができるため、磁化反転が可能になり、情報を書き込むことができます。しかし、スピントランスファートルク効果で磁壁を移動させるには、約 10 万 A/cm^2 より大きな電流密度が必要でした。一方、スキルミオンは結晶中の欠陥などに補足されにくい性質があるために、微小な電流密度でスキルミオンを移動させたりすることができると予測されていました。

そこで今回、スキルミオンの電流駆動を検証するために、FeGe のマイクロ素子を作製し、スキルミオンの動態観察に挑みました。

2. 研究手法と成果

磁性体中の電子スピンの向きを反映する磁化状態を観察するには、試料中に電子線を透過させて観察するローレンツ電子顕微鏡法が有効です。そこで研究チームは、電子線が透過できる厚さ 100nm の薄膜部分を持った、縦 165 μm、横 100 μm、厚さ 100nm～30 μm の FeGe のマイクロ素子を作製しました（図 2）。次に、素子に垂直な方向に 0～150 mT の磁場を印加しながら、ローレンツ電子顕微鏡で素子の磁化状態を観察しました。ゼロ磁場では、温度が－268℃～2℃の範囲でスキルミオンは生成せず、周期 70 nm のストライプ構造が観測されました（図 3a）。次に、150 mT の弱磁場を印加すると、－23℃から室温近傍（－3℃）という広い温度範囲で、直径 70nm のスキルミオンが三角格子状に並んだスキルミオン結晶が形成されることを見出しました（図 3b、c）。焦点の違う 2 枚のローレンツ電子顕微鏡像から電子スピンの向きを解析したところ、確かにスキルミオン中の磁化分布は渦状であることを確認しました（図 3d）。

次に、－23℃において、電流が流れることで発生するジュール熱によってスキルミオンが消滅してしまわない範囲内で電流密度を徐々に増やし、ローレンツ電子顕微鏡で観察しました。その結果、電流密度が約 18 A/cm^2 以上になるとスキルミオン結晶は回転しはじめ、26 A/cm^2 を超えるとスキルミオン全体が移動しはじめました（図 4a、4b)。スキルミオンを駆動するのに必要な最小の電流密度（臨界電流密度）を調べたところ、温度の上昇に伴って臨界電流密度は減少し、らせん磁性体の転移温度（2℃）の直下である－3℃のとき、約 5 A/cm^2 であることが分かりました。

3. 今後の期待

従来の強磁性体における磁壁駆動に必要な電流密度に比べ、FeGe のマイクロ素子では 4 桁以上小さい電流密度でスキルミオンを駆動することに成功しました。これは次世代の低消

費電力磁気メモリ素子の開発につながる重要な成果です。

原論文情報：
Xiuzhen Yu, Naoya Kanazawa, Weizhu Zhang, Takuro Nagai, Toru Hara, Koji Kimoto, Yoshio Matsui, Yoshinori Onose, and Yoshinori Tokura.“Skyrmion flow near room temperature in an ultra-low current density”, *Nature Communications,* 2012, doi: 10.1038/ncomms1990

＜報道担当・問い合わせ先＞
（発表者）
独立行政法人理化学研究所
基幹研究所　強相関量子科学研究グループ
強相関物性研究チーム特別研究員
于　秀珍(ウ　シュウシン)
TEL：048-462-1111(内線 6324)　FAX：048-462-4703

強相関量子科学研究グループ　グループディレクター
兼　強相関物性研究チーム　チームリーダー
国立大学法人東京大学大学院工学系研究科教授
十倉　好紀（とくら　よしのり）
TEL：03-5841-6870　FAX：03-5841-6839

（研究課題「強相関量子科学」支援全般に関する問い合わせ先）
独立行政法人理化学研究所　基幹研究所
強相関量子科学研究グループ　副グループディレクター
兼強相関研究支援チーム　チームリーダー　平林　泉
TEL：048-462-4660　FAX：048-462-1687
URL: http://www.riken.jp/qs2c/index.html

（報道担当）
独立行政法人理化学研究所　広報室　報道担当
TEL：048-467-9272　FAX：048-462-4715

＜補足説明＞

※1 らせん磁性体

原子が作る 1 つの層（原子面）内で一方向に配列した電子スピンが、原子面が変わるごとに少しずつ向きを変えてらせん状に回転しているようなスピン配列を持つ物質のこと。希土類金属 Tb や MnSi 合金などが有名。酸化物、硫化物、有機物でも見いだされている。らせん回転の周期は数 nm から数百 nm までさまざまで、らせんスピン状態では、らせん軸周りのスピンの回転に伴い、らせん軸を含む投影面内のスピンの方向が、平行・反平行と

交互に配列しているので、ローレンツ電子顕微鏡像は間隔の等しい縞模様となる。

※2 スキルミオン結晶

スキルミオンとは、渦状の模様を形成しているスピンの集団構造（渦状スピン構造）のこと。固体中の原子の周期的な配列と同じように、スキルミオンが固体中に格子状に規則的に配列している状態を「スキルミオン結晶」と呼ぶ。スキルミオンは、宇宙や素粒子分野の理論研究者であるトニー・スキルム（Tony Skyrme）の名を冠したもので、3 つのクオークからなるバリオン粒子（重粒子；バリオンは宇宙の始まりであるビッグバン直後に生成された素粒子）の状態を記述するために、局在する特殊な状態としてスキルミオンを考えた。スキルミオンの中心スピンと外周スピンは反平行であり、その間のスピンは渦状に配列している。スキルミオンの中心および外周では、磁気モーメントは面に垂直な成分しかないが、その中間では磁気モーメントが面内で渦状に回転している。

※3 磁壁、磁区

一般に、磁性体の磁化状態は、磁化の向きが一様にそろった領域が複数集まって構成される。この磁化の向きが一様にそろった領域を磁区と呼ぶ。隣り合う磁区の間では磁化の向きは異なり、その境界で磁化は緩やかに変化しながらつながる。このような磁区の境界領域を磁壁と呼ぶ。

※4 スピントロニクス

エレクトロニクス（電子の電荷としての性質を利用した電子工学）の概念を拡張し、電子の持つ電荷とスピンの性質の両方を利用する電子工学。スピンエレクトロニクスとも呼ばれ、次世代の省電力・不揮発性の電子素子の動作原理を提供すると期待されている。

※5 ローレンツ電子顕微鏡

電子線の偏向を利用して、磁性体の磁化状態を実空間で観察する手法。ローレンツ電子顕微鏡法は空間分解能が高く、ナノメートルオーダーの磁化状態の観察に適している。一般の電子顕微鏡では試料に約 2 テスラの磁場がかかる磁界型レンズが使われるため、スキルミオンをはじめとするスピン構造を見ることはできない。これに対してローレンツ電子顕微鏡では、試料にかかる磁場をゼロから数百ミリテスラの間で制御できるため、スキルミオン結晶の直接観察が可能となる。

※6 トポロジカルホール効果

試料に電流と磁場を互いに垂直方向に印加し、電流と磁場の両方に直交する方向に起電力が現れる現象をホール効果という。スキルミオン結晶の場合、結晶中でスピンの向きが徐々に変化していることが伝導電子に対して実効的な磁場として作用し、これによって通常のホール効果に加えて更なる起電力が生じる。これをトポロジカルホール効果と呼ぶ。

※7 スピントランスファートルク効果

スピンの向きが空間変化している領域（磁壁）に電流を流すと、伝導電子から磁性を担うスピンに、スピン角運動量の受け渡しが生じる。これによって、スピンにトルクが働き、その結果、磁壁が電流方向に平行移動する。

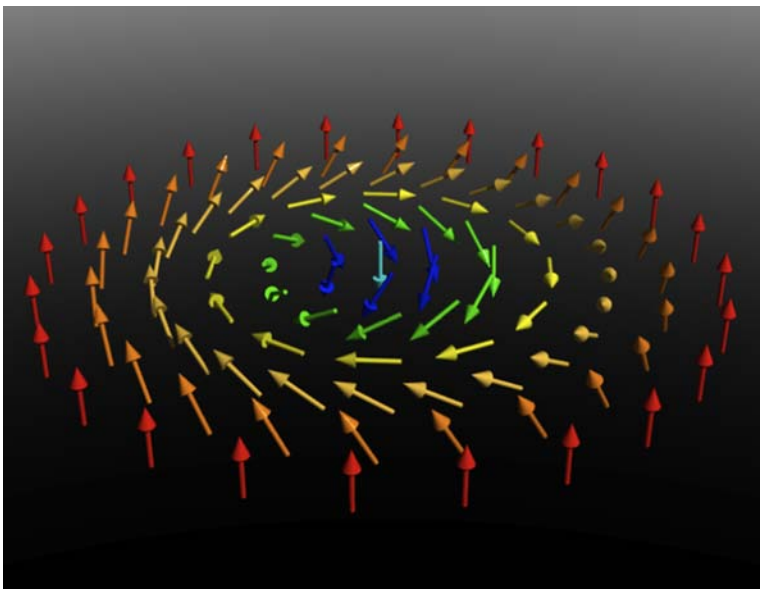

図1 スキルミオンの模式図

矢印は電子スピンの向きを表す。スキルミオン中の電子スピンは渦巻き状に回りながら、中心に向かっていく。中心と最外周のスピンの向きは上下反対になる。

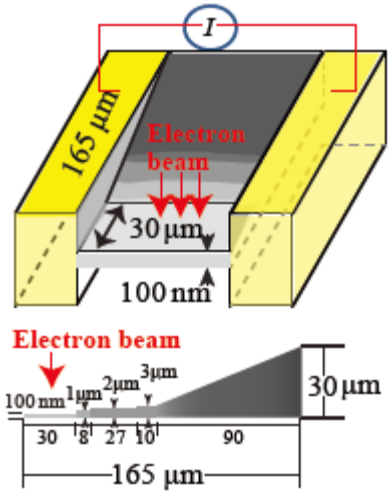

図 2 電子顕微鏡観察用のマイクロ素子の模式図

らせん磁性体 FeGe（グレー）は、厚さ 100nm の薄膜部分から 1μm 、2μm 、3μm 、30μm とだんだん厚みを増していく。この両側に電極（黄色）を接続した。

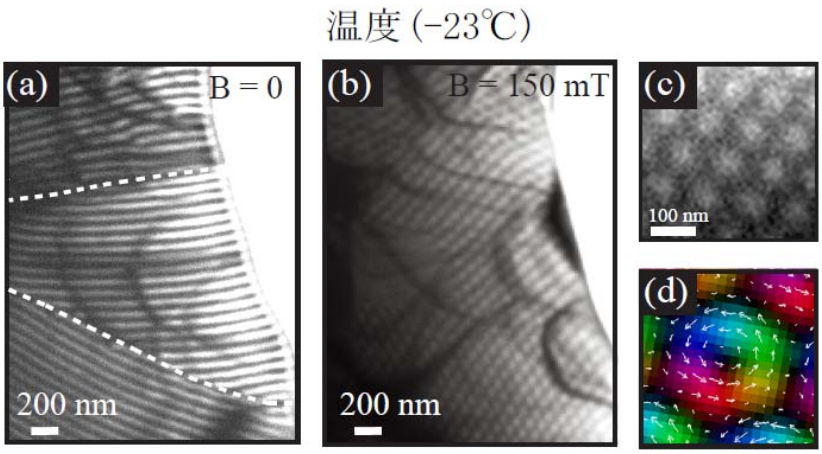

図 3　ローレンツ電子顕微鏡によって観察した磁気構造

(a)ゼロ磁場のストライプ（らせん）構造。点線は結晶粒界を示す。
(b)デバイスに垂直に 150mT の磁場を印加して生成したスキルミオン結晶。
(c)スキルミオン結晶の拡大図。
(d)単一スキルミオン中の磁化分布。カラーと矢印はスキルミオン中の電子スピンの向きを示す。

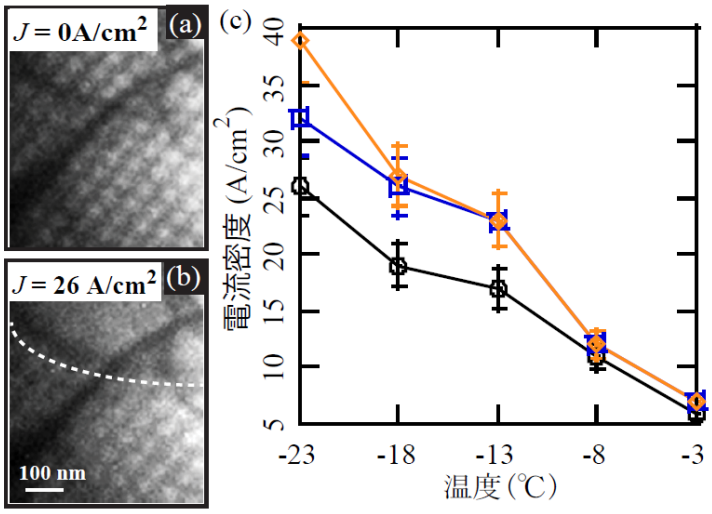

図 4 スキルミオンの移動の様子と、並進運動するのに必要な電流密度の温度依存性

(a)　−23℃において、印加電流密度がゼロのときのローレンツ電子顕微鏡の像
(b)　−23℃において、印加電流密度が 26 A/cm^2 のときのローレンツ電子顕微鏡の像
　スキルミオン結晶が右下へ移動し、点線より上側にはスキルミオン結晶が存在しない。
(c)　スキルミオン並進運動の臨界電流密度の温度依存性
　温度の上昇とともに臨界電流密度は減少し、スキルミオン結晶が存在している−3℃で、5A/cm^2 になる。黒、青、オレンジ色の線はそれぞれ異なる観察領域での測定データを示す。