



平成 22 年 6 月 15 日

科学技術振興機構 (JST)
Tel : 03-5214-8404(広報ポータル部)

物質・材料研究機構 (NIMS)
Tel : 029-859-2026(企画部広報室)

東 京 大 学
Tel : 03-5841-1790 (工学部 広報室)

理化学研究所 (RIKEN)
Tel : 048-467-9272 (広報室)

世界で初めて「渦状スピン構造体：スキルミオン結晶」の直接観察に成功 (ハードディスクの読み取り感度の画期的向上に期待)

JST 課題解決型基礎研究の一環として、東京大学 大学院工学系研究科の十倉 好紀教授とJST 戦略的創造研究推進事業 ERATO型研究「十倉マルチフェロイックプロジェクト」の千 秀珍(ウ・シュウチン) 研究員らは、世界で初めて新スピン構造体(スキルミオン結晶^{注1)})の直接観察に成功しました。このスピン構造体は、多数のスピンが渦状に配列したスキルミオン(図1右)が格子状に規則正しく並んだスキルミオン結晶(図1左)のことです。スキルミオン結晶は、スピンがらせん構造を持つことから電気と磁気との関係に大きな物理的相互作用があると考えられ、その特徴的な構造から結晶中では巨大な異常ホール効果の発生(実用化されている半導体ホール素子の数十倍から数百倍)が予見されています。ハードディスクなどに使う高感度の磁気センサー素子への応用をはじめ、これまでには存在しなかった新しい物性を持った材料として今後の応用展開が期待されています。しかしスキルミオン結晶はこれまで、極低温の非常に限定された条件下で間接的に存在が予想されるだけで、その発生機構もよく分かっていませんでした。

本研究グループは今回、らせんスピン構造を持つ $Fe_{0.5}Co_{0.5}Si$ に着目し、ローレンツ電子顕微鏡^{注2)}を用いることでスキルミオンの直接観察に初めて成功しました。また、このスキルミオン結晶はわずか数百ガウスの弱磁場下、広い温度範囲(5Kから30K)に存在し、比較的安定した状態であることも分かりました。これらのスキルミオンの観察結果は、理論的な検討結果ともよく一致しています。今回の成果によりスキルミオンの発生機構のモデルが確認されたことで、今後さまざまなスキルミオン結晶の作成が可能となります。新機能物質の作成に向け、新しい道筋が見えてきました。

本研究は、物質・材料研究機構、東京大学、理化学研究所と共同で行われ、本研究成果は、2010年6月17日(英国時間)発行の英国科学雑誌「Nature」に掲載されます。

本成果は、以下の事業・研究プロジェクトによって得られました。

戦略的創造研究推進事業 ERATO型研究

研究プロジェクト：「十倉マルチフェロイックプロジェクト」

研究総括：十倉 好紀(東京大学 大学院工学系研究科 教授)

研究期間：平成18～23年度

JSTはこのプロジェクトで、電気と磁気との強い相関を持つマルチフェロイック物質の創製と、その物性を説明する学理の構築を総合的に行うことで、材料の新たな設計指針を見いだしつつ、ものづくり手法の高度化と合わせて、新規材料群の開拓を行っています。

<研究の背景>

固体中では原子が規則的に配列しています。これ以外にも、電子軌道やスピンの配向などの秩序状態がしばしば観察されています。これらの秩序を制御することによって、特異な物理現象、例えば巨大磁気抵抗効果や巨大異常ホール効果の創成が期待されます。これにはスピン秩序状態やその温度、磁場依存性などを知ることが重要な課題です。スキルミオン結晶と呼ばれているナノスケール（nmは、10億分の1m）の磁気（スピン）構造は、外部磁場によって形成された新しいスピン構造です。立方晶構造を持つらせん磁性体^{注3）} MnSi で、中性子線を使った回折実験によってスキルミオン結晶の存在が示唆され、この新奇なスピン構造が急速に注目を集めています。しかし、このスキルミオン結晶は非常に不安定で、30Kの温度付近しか現れず、直接観察は困難でした。

<研究の成果>

本研究では、らせんスピン構造を持つらせん磁性体 $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Si}$ に着目し、外部磁場の制御によって、2次元スキルミオン結晶を実現したばかりでなく、ローレンツ顕微鏡法（図2）を用いて、2次元スキルミオン結晶の直接観察に初めて成功しました。この結果、2次元スキルミオン結晶の生成や消滅を詳細に直接観察できました。また、2次元スキルミオン結晶は従来見いだされていた3次元スキルミオン結晶より広い温度範囲で存在することを発見しました。このことから室温付近までこの2次元スキルミオン結晶が存在すると考えられます。これらの結果は、らせん磁性体を用いた新規物性の創製やスピントロニクス（スピン制御を用いた新機能デバイス）の新展開に重要な役割を果たすものと期待されます。

$\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Si}$ は、無磁場では40K以下でスピンがらせん構造を持つらせん磁性体です。スピンをらせん回転させながら特定方向に90nm程度の周期を持って進行するらせんスピン構造を持ちます。25Kで膜厚20nm程度のらせん磁性体薄片試料にローレンツ電子顕微鏡で電子線の透過像を撮ると、周期的に規則正しい縞状パターンが観察でき、この縞の周期はらせんスピンの周期90nmと一致します（図3a；H）。この温度で、200ガウス程度の弱磁場を印加すると、らせんスピン構造（H）とスキルミオン（Sk）の混合状態が形成されます（図3b；H+Sk）。さらに磁場強度を増加させ500ガウスに達した時点で、らせんスピン構造が消失し、六回対称の周期性を持つスキルミオン結晶が形成されます（図3c；SkX、図4左）。700ガウス付近でスキルミオンの密度が減りはじめ、スピンの揃った強磁性（FM）とスキルミオンの混合状態が現れます（図3d；FM+Sk）。800ガウスまで磁場を増加すると、スピが一方向に揃った強磁性（図3e；FM）に変わりました。

これらのスキルミオンの直接観察から得られたスピンの温度と磁場の依存性を、5Kから40Kまでの温度領域において示します（図3下）。 MnSi の3次元のスキルミオン結晶が30K付近の狭い温度領域にのみ存在するのに対して、本研究で直接観察した2次元スキルミオン結晶は5Kから30Kの広い温度領域に存在していることが明らかになりました。

本研究で得られた主な成果は、以下の通りです。

- (1) 立方晶構造を持つらせん磁性体 $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Si}$ において、六方晶構造を持つ2次元スキルミオン結晶の創製に成功しました。

- (2) 高分解能ローレンツ電子顕微鏡法により、スキルミオンとスキルミオン結晶の直接観察に成功しました。
- (3) スキルミオンと、らせんスピン状態の共存状態や2次元スキルミオン結晶などの温度と磁場の依存性を、詳細に確定しました。スキルミオン結晶は5 Kから30 Kまでの広い温度領域において、数百ガウスの弱磁場によって誘起されることを見いだしました。
- (4) これらの結果は、モンテカルロ法シミュレーション^{注4)}を用いた理論計算結果(図4右)とよい一致を示すことが分かり、その機構の理解が進みました。

<今後の展開>

今後は、本研究で見いだされたローレンツ電子顕微鏡法によるスキルミオン結晶の直接観察手段と、比較的安定して存在する2次元スキルミオン結晶の性質を利用して、さらに広い温度範囲で安定な2次元スキルミオン結晶の設計や製作を展開します。

弱磁場で創製される2次元スキルミオン結晶を制御することによって、ハードディスクなどに用いられる高感度磁気センサーなどのスピントロニクス分野に新たな道を開くことが期待されます。

<参考図>

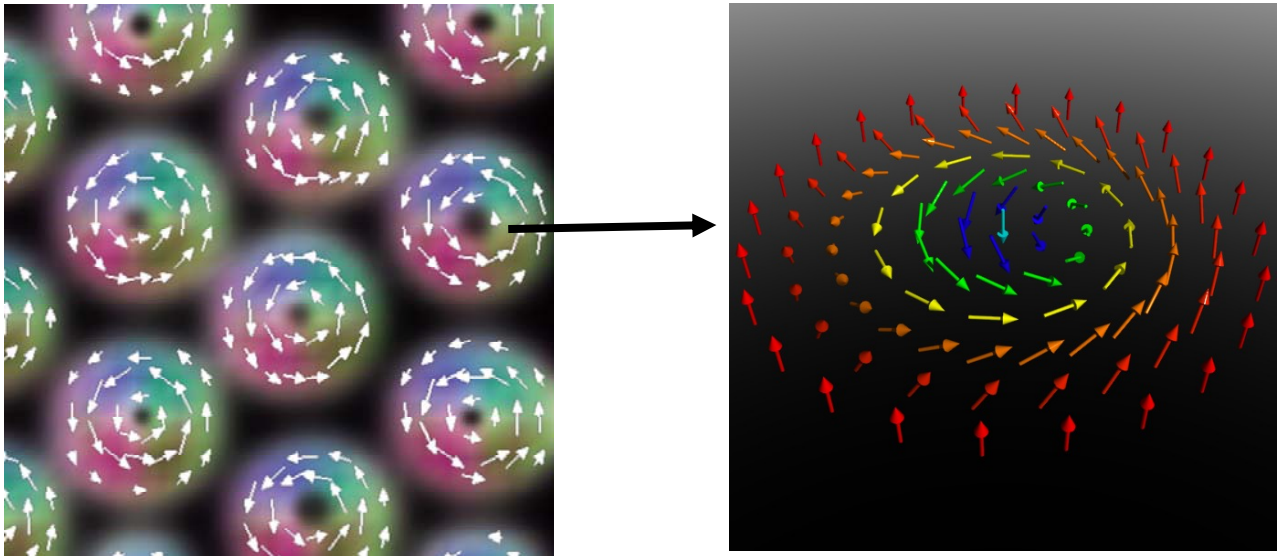


図1 モンテカルロシミュレーション法による2次元スキルミオン結晶（左）と1個のスキルミオンの図（右）

白の矢印はスピンの方向を示します。2次元スキルミオン結晶は、渦巻き上のスキルミオン（右図）が2次元の格子を作ります。各スキルミオンは、外側のスピンは垂直方向に揃い、回転しながら中心に凝縮します。中心部のスピンの向きは外側のスピンの反対の方向です。

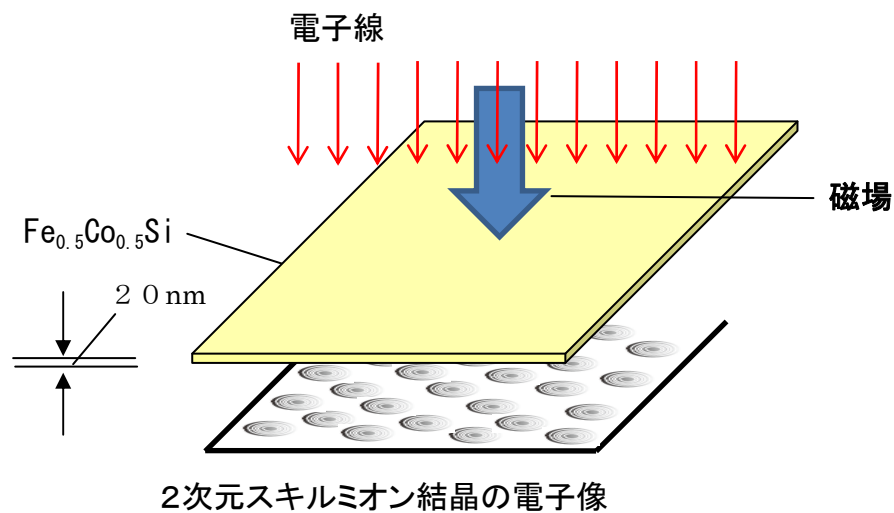


図2 2次元スキルミオン結晶のローレンツ電子顕微鏡観察図

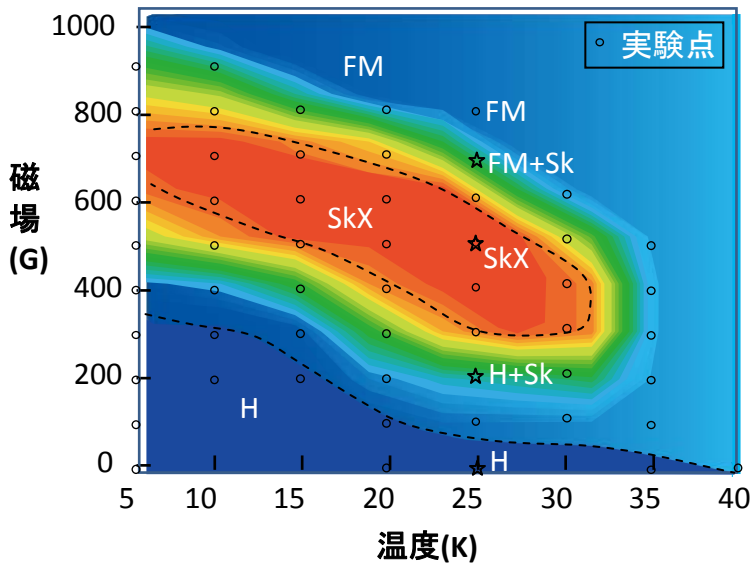
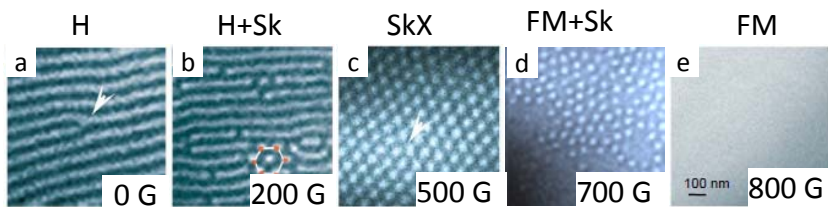


図3 $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Si}$ における2次元スキルミオン結晶 (SkX) の温度と磁場の依存性
 上段パネルのローレンツ像は、下段のパネルの星印☆に示された条件で得られました。

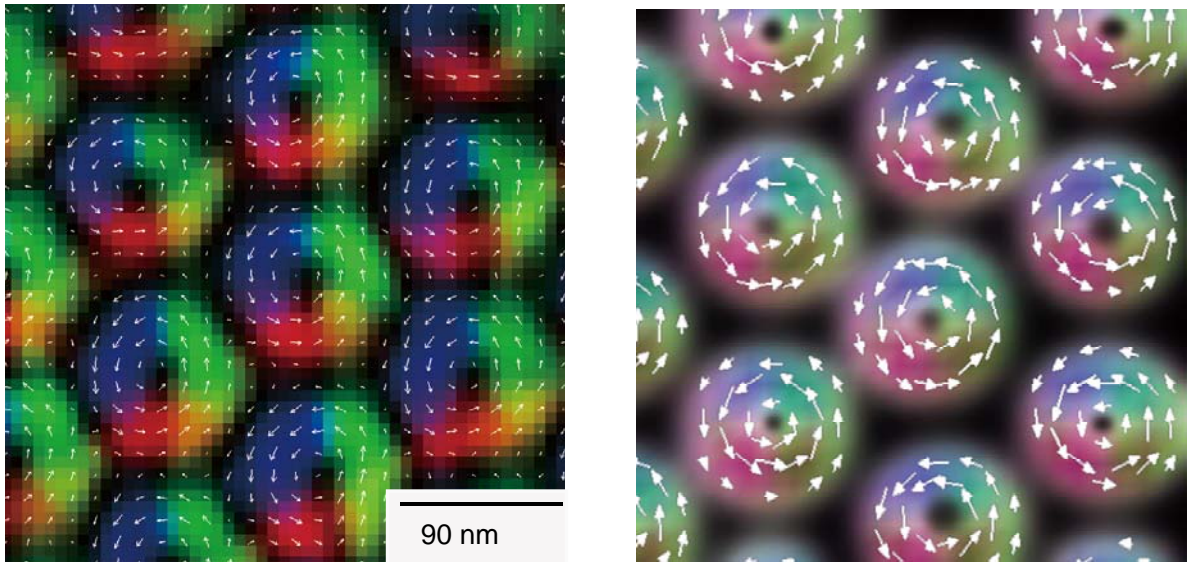


図4 ローレンツ電子顕微鏡法によって得られたら2次元スキルミオン結晶 (左) とモンテカルロ法シミュレーションで得られた2次元スキルミオン結晶図 (右)

2次元スキルミオン結晶は六回対称の綺麗な電子パターンを示します。モンテカルロ法シミュレーションでもこの格子対称性をよく説明しています。

<用語解説>

注1) スキルミオン結晶

スキルミオンとは、渦状に向いているスピンの集団構造（渦状スピン構造）です。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」と呼びます。

スキルミオンは、宇宙や素粒子分野の理論研究者であるTony Skyrme（トニー・スキルム）を冠したものです。彼は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ました。

今回、電子がぎっしり詰まった電子集団のスピン系で、このスキルミオンを世界に先駆けて直接観察することに成功しました。電子が凝集した系で、素粒子空間の記述のために提案されたモデルが有効であることを示すものです。

注2) ローレンツ電子顕微鏡

一般の電子顕微鏡では、試料に約2万ガウス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ません。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ごく微小（数100ガウス）の間で制御できるため、今回スキルミオン結晶の直接観察に成功しました。

注3) 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の、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、らせんスピン配列を持つ物質のことです。希土類金属Tb、あるいはMnSi合金などが有名です。酸化物、硫化物、有機物でも見いだされています。らせん回転の周期は、数nmから数百nmにも及ぶものまでさまざまです。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ため、ローレンツ電子像は間隔の等しい縞模様を観察できます。

注4) モンテカルロ法シミュレーション

統計力学によれば、熱力学量は統計平均の計算に帰着されます。平均値は標本とその確率の積の和として計算されますが、すべての標本の数はしばしば膨大なものとなり、その計算は容易ではありません。すべての標本を用いる代わりに、各標本をその確率に従い発生させる統計サンプリングにより平均値を計算する手法がモンテカルロ法です。

<論文名>

“Real-Space Observation of Two-Dimensional Skyrmion Crystal”
(2次元スキルミオン結晶の直接観察)

<お問い合わせ先>

<研究に関すること>

金子 良夫 (カネコ ヨシオ)

科学技術振興機構「ERATO 十倉マルチフェロイクスプロジェクト」 技術参事
〒351-0198 埼玉県和光市広沢2-1 理化学研究所 フロンティア中央研究棟208号室
Tel : 048-467-9785 Fax : 048-462-4703
E-mail : yskaneko@riken.jp

<JSTの事業に関すること>

小林 正 (コバヤシ タダシ)

科学技術振興機構 イノベーション推進本部 研究プロジェクト推進部
〒102-0075 東京都千代田区三番町5 三番町ビル
Tel : 03-3512-3528 Fax : 03-3222-2068
E-mail : kobayash@jst.go.jp