



## 室温付近で「うず巻き状スピン構造体；スキルミオン」 の実現に成功 (次世代省電力の磁気メモリ素子に期待)

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」との共同で、これまで、極低温 (<40K) でしか存在しなかった巨大な電気と磁気との結合を有する磁気状態であるスキルミオン結晶<sup>注1)</sup> を室温付近 (270K) で実現することに世界で初めて成功しました。これにより高速かつ省電力の磁気メモリ素子への応用をはじめとしたスピントロニクスへの応用展開が期待されています。

本研究共同グループは、室温付近でらせんスピン磁気構造を持つ FeGe を数十 nm 程度の厚さの薄膜状に加工することにより、60K から室温付近までの広い温度範囲で、弱磁場 (数百～二千ガウス) 下でスキルミオン結晶状態 (図 1) を実現し、磁場下でのローレンツ電子顕微鏡法<sup>注2)</sup> により実空間観測することに成功しました。また、スキルミオン結晶の結晶状態の詳細を明らかにしたほか、スキルミオン結晶の欠陥構造やスキルミオンの渦巻き回転の反転構造 (図 3) も明らかにしました。さらに、ナノメートルスケールの薄片化がスキルミオン結晶を安定化させるために極めて有効であることを見出しました (図 4)。膜厚がスキルミオン結晶の格子定数  $a_s$  より非常に小さい時、2 次元のスキミオン相は広い温度領域で安定に存在します。一方、膜厚の増加に伴って、スキルミオン相の安定領域が縮小し、膜厚が  $a_s$  を超えると、スキルミオン相は不安定になり、らせん磁性転移温度付近のわずか数°C の温度範囲にしか存在しないことが判明しました。

今回の成果は磁気状態と電気伝導が強い結合を示すスキルミオン結晶が室温付近でも安定化されることを示したものであり、次世代省電力磁気メモリ素子の実現に画期的な一歩をもたらすものです。特に、安定なスキルミオン結晶を創成する指針が明らかになったことで、今後さまざまなスキルミオンデバイスの作成が可能となりました。

本研究は、物質・材料研究機構と理化学研究所と共同で行われました。

本研究成果は、平成 2 2 年 1 2 月 5 日 (英国時間；午後 6 時) に英国科学雑誌「Nature Materials」のオンライン速報版で公開されております。

## <研究の背景>

スキルミオンと呼ばれるナノスケールの渦巻き状スピン状態では、スピカイラリティとよばれるスピンのねじれを表す量が有限のトポロジカルスピン構造体であり、巨大なホール効果が発現するなど磁気状態と電気伝導の強い相関を示します。最近、らせん磁性体<sup>注3)</sup>  $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Si}$  において、3つのらせんスピン状態が干渉を起こして二次元スキルミオン結晶を形成することが、極低温ローレンツ電顕法での実空間観察により報告され、この新奇なスピン構造体が急速に注目を集めてきました。しかし、これまでのスキルミオン結晶は、40K以下の極低温でしか現れず、スピントロニクスなどへの応用は困難でした。また、安定なスキルミオン結晶の創成も、応用上の大きな課題となっていました。

## <研究の成果>

本研究は、らせん磁気構造への転移温度が高い(280K) FeGe に着目し、高温でスキルミオン結晶を創成することを目的としました。試料をナノメートルスケールの厚さの薄膜状に加工することによって、室温付近(270K)でスキルミオン結晶を創成し、磁場下のローレンツ顕微鏡法と磁化の定量解析法<sup>注4)</sup>を用いて、その実空間像を直接観察することに成功しました。また、磁気状態の試料膜厚依存性を観測し、ナノスケールの厚み制御がスキルミオン相の安定性に極めて重要であることを示しました。これらの結果は、スキルミオン結晶を新機能デバイスへ展開するために重要な役割を果たすものと期待されます。

本研究で得られた主な成果を以下にまとめます。

- (1) 物質・材料研究機構のローレンツ電子顕微鏡を用いて、室温付近(270K)において、図1右のパネルに示されているスキルミオンの実空間像を観測いたしました。
- (2) 試料の厚さがおよそ50nmのFeGeに垂直な弱磁場(0.1T)を印加しながら磁区構造を調べた結果、室温近傍(~260K)において、六方晶構造をもつスキルミオン結晶が形成されている(図2)ことを見出しました。
- (3) 双晶境界付近において、スキルミオンの渦巻きの回転方向が逆転している(図3)ことを、実空間観察によって初めて実証しました。
- (4) FeGeにおける磁場誘起スキルミオン相の安定性を調べ、図4に示した温度T-磁場B相図上でスキルミオン相の膜厚依存性を得ました。膜厚が15nm程度で、らせん磁気構造の周期(~70nm)より比較的小さい場合には温度T-磁場B相図上の広い範囲でスキルミオン結晶相が安定になりますが、膜厚が約75nmとらせん磁気構造の周期より大きくなるとスキルミオン結晶相は転移温度直下の狭い範囲に限られることが明らかになりました。こうして、FeGeのスキルミオン相がナノスケール試料加工によって極めて安定化されることが明らかになりました。

## <今後の展開>

今後は、これらの知見をもとにスキルミオン結晶が極めて安定化された薄膜作製およびそれを舞台とした電気磁気機能の開拓など、デバイス応用を念頭に置いた研究を展開し、スピントロニクスの分野に新たな道を開くことが期待されます。

<参考図>

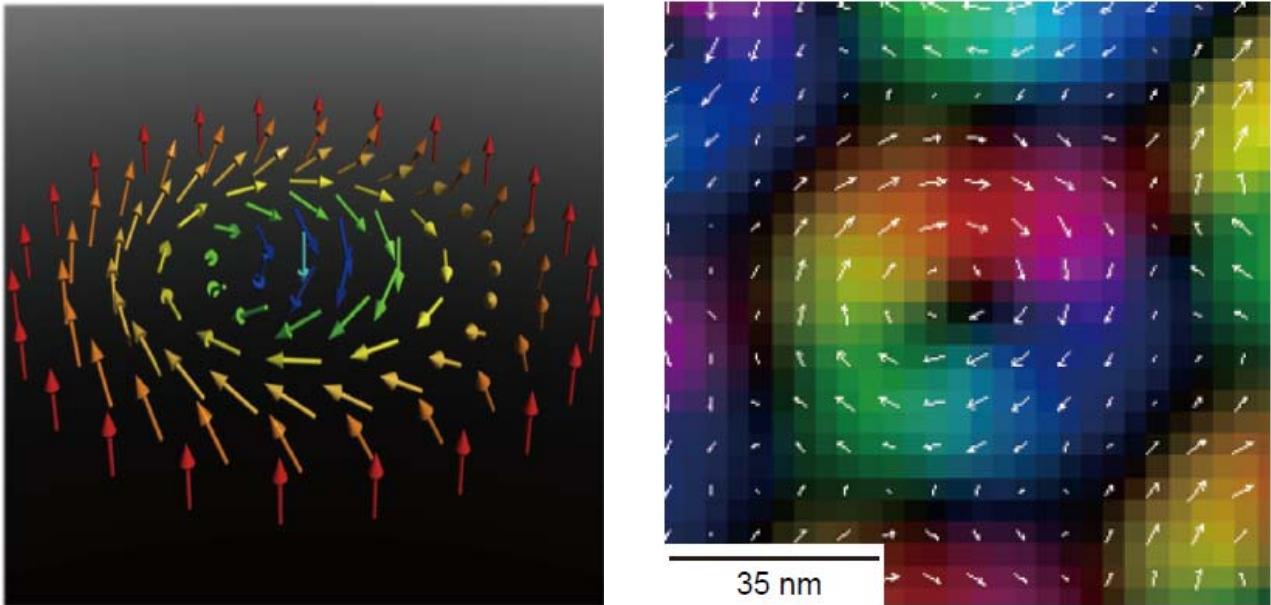


図1 スキルミオンの模式図(左)とローレンツ電顕法によって実際に測定されたスキルミオンの実空間像(右)(260K)。

矢印はスピンの方向を示します。スキルミオン中のスピンの渦巻き状に回りながら中心に向かっていきます。中心部のスピンの向きは下向きで、上を向いた外側のスピンと反対の方向です。

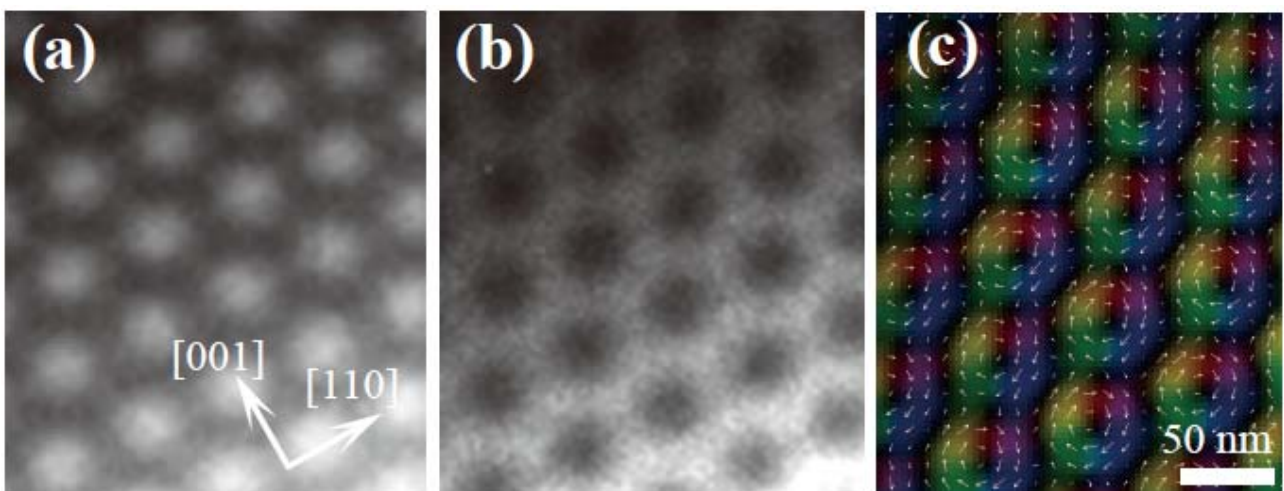


図2 260K のスキルミオン結晶のローレンツ電子顕微鏡観察図。(a)アンダーフォーカス像、(b)オーバーフォーカス像、(c)磁化分布像。

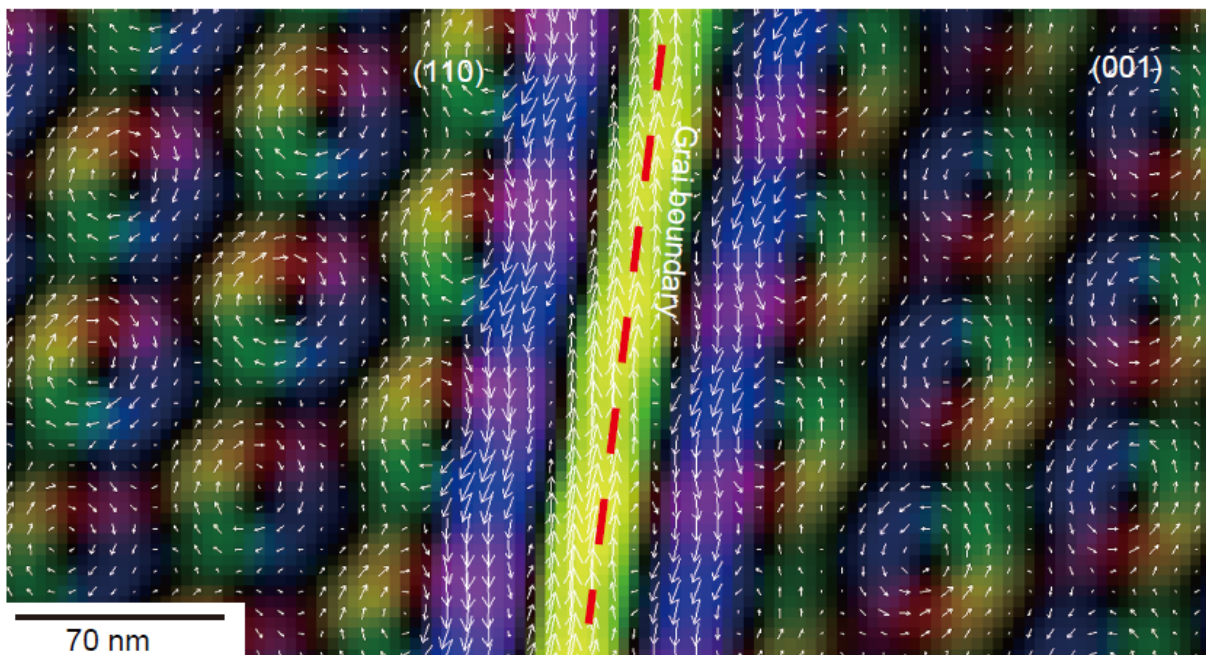


図3 結晶双晶境界 (Grain boundary) (赤線) 付近の磁化分布。白い矢印は磁気モーメントを示す

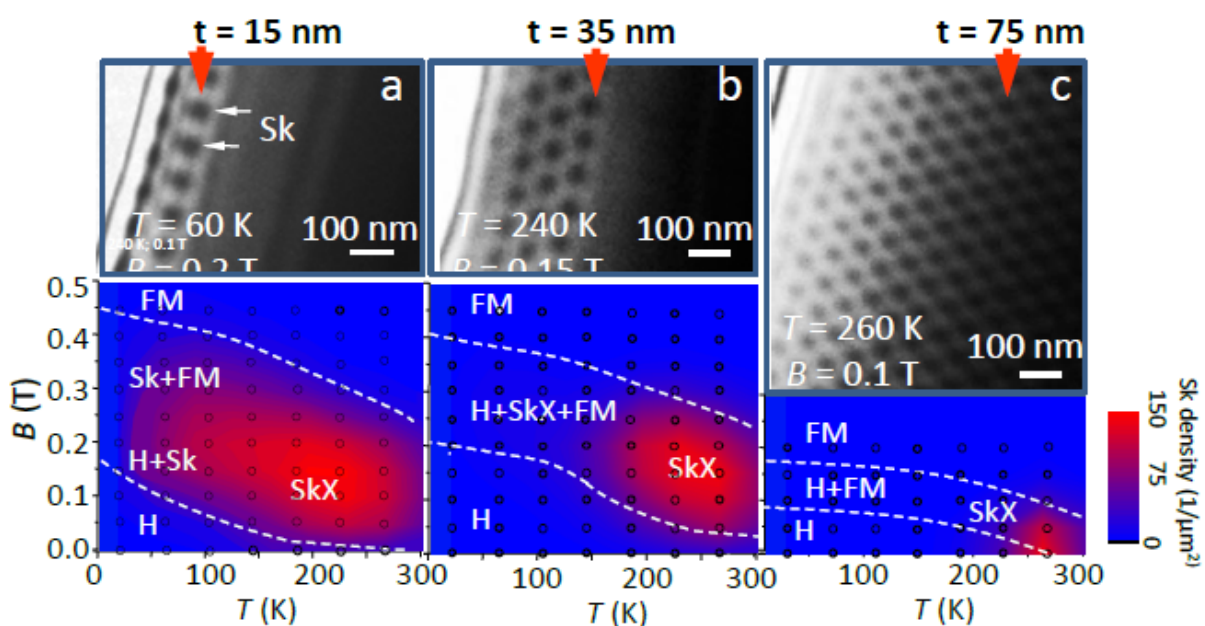


図4 ローレンツ電子顕微鏡法によって得られたらスキルミオン結晶 (上) と各膜厚に対応したスキルミオン相図 (下)。

参考図 1 ~ 4 は、以下の URL からご覧いただけます。

[http://133.11.100.212/epage/public/pdf/release\\_20101217.pdf](http://133.11.100.212/epage/public/pdf/release_20101217.pdf)

## <用語解説>

### 注1) スキルミオン結晶

スキルミオンとは、図1の左パネルに示すような渦巻き状の形になっているスピンの超構造体のことです。スキルミオンの中心スピン(水色)と外周スピン(赤)が反平行であり、その間のスピンの配列が渦巻き状に配列しています。実際に観測されたスキルミオンの面内磁化分布は図1の右パネルに示されています。矢印は磁気モーメントを示します。スキルミオンの中心および外周モーメントは面直成分しかないため黒一色ですが、その中間では磁気モーメントは面内で渦巻き状に回転していることが分かります。このようなスキルミオンが、三角格子を形成して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(図2)。

### 注2) 磁場下のローレンツ電子顕微鏡法

一般の電子顕微鏡では強力な磁界型レンズが使われるため、試料に約2テスラの磁場がかかり、このためスキルミオンを始めとする磁気構造を見ることはできません。そこで今回は、対物レンズとして使われている磁界型レンズ電流を変えながら、ローレンツ電子顕微鏡観察を試みました。その結果、試料にかかる磁場を対物レンズ電流の変動に伴って、ゼロから約0.4テスラまで制御することに成功し、スキルミオン結晶の創成とその可視化に成功しました。

### 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配列が、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です。

### 注4) 磁化の定量解析法

本研究で用いた磁化の定量解析法は強度輸送方程式法と呼ばれる一種の位相計測法です。具体的には、焦点を外した二枚(アンダーフォーカスとオーバーフォーカス)のローレンツ電子顕微鏡像の位相変化を抽出して、面内磁化の方向を得ております。

<論文名>

“Near room-temperature formation of a skyrmion crystal in thin-films of helimagnet FeGe”  
(FeGe 薄膜における室温付近のスキルミオン結晶の創成)

<お問い合わせ先>

<研究に関すること>

小野瀬佳文（オノセヨシノリ）

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」

グループリーダー

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1