新機構が生み出す過去最小の磁気渦粒子を発見
-超高密度な次世代情報担体としての活用に期待-

１．発表者：

Nguyen Duy Khanh（研究当時：理化学研究所 創発物性科学研究センター 強相関量子構造研究チーム　特別研究員、現所属：東京大学物性研究所　特任研究員）

中島　多朗（研究当時：理化学研究所 創発物性科学研究センター 強相関量子構造研究チーム研究員、現所属：東京大学物性研究所　准教授）

于　　秀珍（理化学研究所 創発物性科学研究センター 電子状態マイクロスコピー研究チームチームリーダー）

Shang　Gao（研究当時：理化学研究所 創発物性科学研究センター 強相関量子構造研究チーム特別研究員、現所属：オークリッジ国立研究所　研究員）

柴田　基洋（研究当時：理化学研究所 創発物性科学研究センター 強相関量子構造研究チーム基礎科学特別研究員、現所属：東京大学生産技術研究所　助教）

Max Hirschberger（東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター特任講師／理化学研究所　創発物性科学研究センター　トポロジカル量子物質研究ユニット　ユニットリーダー）

山崎　裕一（物質・材料研究機構 統合型材料開発・情報基盤部門 材料データ科学グループ主任研究員／科学技術振興機構　さきがけ研究者）

佐賀山　基（高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所　准教授）

中尾　裕則（高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所　准教授）

Licong Peng（理化学研究所 創発物性科学研究センター 電子状態マイクロスコピー研究チーム特別研究員）

中島　清美（理化学研究所 創発物性科学研究センター 電子状態マイクロスコピー研究チームテクニカルスタッフⅠ）

高木　里奈（東京大学大学院工学系研究科総合研究機構・物理工学専攻　助教）

有馬　孝尚（東京大学大学院新領域創成科学研究科物質系専攻　教授／理化学研究所 創発物性科学研究センター 強相関量子構造研究チーム　チームリーダー）

十倉　好紀（理化学研究所 創発物性科学研究センター　センター長／東京大学　卓越教授）

関　真一郎（東京大学大学院工学系研究科総合研究機構・物理工学専攻　准教授／科学技術振興機構　さきがけ研究者）

２．発表のポイント：

◆高い対称性を持つ希土類合金（$GdRu_2Si_2$）中で、既知の化合物では過去最小となる直径 1.9 nm の磁気スキルミオン（粒子性を持った渦状スピン構造）を観察することに成功。

◆従来、スキルミオンは結晶構造の低い対称性に起因して生じるとされてきたが、この物質では動き回る電子が媒介する新機構によってナノスケールのスキルミオンが実現している。

◆今回の発見は、極小サイズのスキルミオンの新しい設計指針を与えており、超高密度な次世代情報担体としての応用を後押しすることが期待される。

３．発表概要：

理化学研究所 創発物性科学研究センターの Nguyen Duy Khanh 特別研究員（現所属：東京大学物性研究所）、中島多朗研究員（現所属：東京大学物性研究所）、于秀珍チームリーダーと、東京大学の関真一郎准教授（JST さきがけ研究者兼任）、有馬孝尚教授、十倉好紀卓越教授らの研究グループは、物質・材料研究機構、高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所との共同研究を通じて、既知の化合物では過去最小となる直径 1.9 nm の磁気スキルミオン（磁性体の中で現れる渦巻き状のスピン構造）を観察することに成功しました。スキルミオンは、幾何学的に保護された安定な粒子としての性質を持つため、次世代の情報担体の候補として盛んに研究が行われています。従来、スキルミオンを生み出すには、対称性の低い結晶構造が必要であると考えられてきましたが、本研究では動き回る電子が媒介する新機構を活用することにより、対称性の高い希土類合金中で過去最小のスキルミオンを実現することに成功しました。今回の発見は、極小サイズのスキルミオンを生み出すための新しい物質設計指針を与えており、超高密度な情報素子への展開に役立つことが期待されます。

本研究成果は 2020 年 5 月 18 日に英国科学誌「Nature Nanotechnology」に掲載されます。

本研究は、科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業さきがけ研究領域「トポロジカル材料科学と革新的機能創出」研究課題「磁気構造と電子構造のトポロジーを利用した巨大創発電磁場の生成と制御」（No. JPMJPR18L5）、同戦略的創造研究推進事業 CREST 研究領域「量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出」研究課題「ナノスピン構造を用いた電子量子位相制御」（No. JPMJCR1874）、日本学術振興会（JSPS）科学研究費補助金基盤研究 A「磁気構造のトポロジー・対称性に由来した新しいマグノン・熱輸送現象の開拓」（No. 18H03685）および「電子顕微鏡によるトポロジカルスピン構造とそのダイナミクスの実空間観察」（No. 19H00660）、同新学術研究領域「ナノスピン変換科学」（No. 17H05186）、同外国人特別研究員プログラム（No. 18F18804）、フンボルト財団、旭硝子財団、村田学術振興財団の支援を受けて行われました。共鳴 X 線散乱実験は、高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 フォトンファクトリーの研究課題（2018G570）に基づいて行われました。

４．発表内容：

■研究背景

近年、磁気スキルミオン（注１）と呼ばれる電子スピン（注２）の渦巻き構造（図１）が、幾何学的な特徴（トポロジー）によって守られた粒子としての性質を持つことが発見され、大きな注目を集めています。スキルミオンの直径は非常に小さく、またその粒子性に由来して通常の磁壁（注３）より５桁以上小さな閾値電流で駆動できることから、超低消費電力な次世代の情報担体としての応用が期待されています。しかし、スキルミオン発現の舞台となる物質はまだ報告例が少なく、情報のさらなる高密度化に向けて、できるだけ小さな直径のスキルミオンを普遍的に生み出せるような物質設計指針の確立が強く求められています。

従来、スキルミオンを生み出すためには、空間反転対称性（注４）の破れた結晶構造の下で生じるジャロシンスキー・守谷相互作用（注５）と呼ばれる機構を利用する必要があるとされてきました。一方で、最近ではこうした条件を満たさない系でもスキルミオンが安定化できることが明らかになりつつあり、2019 年には空間反転対称性の保たれた三角格子構造を持つ希土類合金 Gd_2PdSi_3 において、スキルミオンの発現が報告されています[T. Kurumaji *et al.*, Science **365**, 914 (2019)]。この新しい物質系では、三角格子の特殊な結晶構造に起因した幾何

学的フラストレーション（注６）と呼ばれる相互作用の競合が、スキルミオンの安定化に重要な役割を果たしていると考えられています。一方で、既知のスキルミオン発現条件である(1)空間反転対称性の破れ (2)幾何学的フラストレーションのどちらも存在しない場合に、スキルミオンを安定化できるかどうかについては、これまで明らかになっていませんでした。

■研究内容

そこで本研究では、新たに空間反転対称性の保たれた正方格子構造を持つ希土類合金 $GdRu_2Si_2$ に着目し、その磁気構造を共鳴 X 線散乱（注７）とローレンツ電子顕微鏡（注８）の実験手法を用いて詳細に調べました。この物質の結晶構造は図２(a)のようになっており、磁性を担う Gd（ガドリニウム）の３価イオンが２次元の正方格子の層を形成し、その間に電気伝導を担う Ru（ルテニウム）と Si（シリコン）の層が位置しています。積層方向に磁場をかけていくと、多段階の磁気構造相転移が生じ（図２(b)）、特に２テスラ付近の中間磁場領域において、図３に示すような直径 1.9 nm（既知の単一組成の化合物としては過去最小）のスキルミオンの正方格子状態が実現していることを発見しました。この物質では、幾何学的フラストレーションや空間反転対称性の破れが存在しないことから、従来とは異なる新しい機構によってスキルミオンが安定化していると考えられます。最新の理論研究によると、結晶中を自由に動き回る遍歴電子が媒介する多体相互作用を利用することで、普遍的にナノスケールの小さなスキルミオンが実現できることが予想されており、本物質はこうした新しいスキルミオン生成機構を検証するための理想的な物質系になっていることがわかりました。

■社会的な意義および今後の予定

今回の研究によって、これまでスキルミオンの生成に必須であると考えられてきた空間反転対称性の破れや幾何学的フラストレーションを利用しなくても、動き回る遍歴電子が媒介する相互作用を活用することで、従来より高密度な極小サイズのスキルミオンを実現できることが明らかになりました。上記の発見は、高い対称性の結晶構造を持った希土類合金であれば、普遍的にナノスケールのスキルミオンを生み出せることを強く示唆しており、スキルミオン発現の舞台となる物質の大幅な拡張につながると考えられます。スキルミオン粒子は、記憶・演算素子における情報担体として、また最近では人工ニューラルネットワークのシナプスとしても活用できることが提案されており、今回の新機構に由来した過去最小のスキルミオンの発見は、こうした次世代素子の超高密度化・超小型化に貢献することが期待されます。

５．発表雑誌：

雑誌名：*Nature Nanotechnology*（オンライン版 5 月 18 日掲載予定）
論文タイトル：Nanometric square skyrmion lattice in a centrosymmetric tetragonal magnet
著者：N. D. Khanh*, T. Nakajima, X. Z. Yu, S. Gao, K. Shibata, M. Hirschberger, Y. Yamasaki, H. Sagayama, H. Nakao, L. C. Peng, K. Nakajima, R. Takagi, T. Arima, Y. Tokura, S. Seki*
DOI 番号：10.1038/s41565-020-0684-7
アブストラクト URL：https://www.nature.com/articles/s41565-020-0684-7

６．注意事項：

日本時間 5 月 19 日（火）午前 0 時 （英国夏時間：5 月 18 日（月）午後 4 時)以前の公表は禁じられています。

７．問い合わせ先：

（研究に関すること）
東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻・総合研究機構
准教授　関 真一郎（せき しんいちろう）
Tel: 03-5841-7696
E-mail：seki@ap.t.u-tokyo.ac.jp

（JST 事業に関すること）
科学技術振興機構　戦略研究推進部　グリーンイノベーショングループ
嶋林 ゆう子（しまばやし ゆうこ）
Tel: 03-3512-3531
E-mail：presto@jst.go.jp

（報道に関すること）
理化学研究所　広報室　報道担当
E-mail：ex-press@riken.jp

物質・材料研究機構 経営企画部門 広報室
Tel：029-859-2026　Fax：029-859-2017
E-mail：pressrelease@ml.nims.go.jp

高エネルギー加速器研究機構 広報室
Tel：029-879-6047　Fax：029-879-6049
E-mail：press@kek.jp

科学技術振興機構　広報課
Tel：03-5214-8404　Fax：03-5214-8432
E-mail：jstkoho@jst.go.jp

東京大学　大学院新領域創成科学研究科　広報室
Tel：04-7136-5450
E-mail：press@edu.k.u-tokyo.ac.jp

東京大学 大学院工学系研究科　広報室
Tel：03-5841-6295　Fax：03-5841-0529
E-mail：kouhou@pr.t.u-tokyo.ac.jp

８．用語解説：

注１）磁気スキルミオン
スキルミオン（Skyrmion）は、もともと素粒子物理の分野で、1960 年代に Tony Skyrme 博士によって提唱された概念です。2000 年代以降、磁性体や液晶といった物質中で現れる渦状構造も、スキルミオンと同等の特徴を持つことが明らかになり、こうした構造は連続変形によって取り除くことができないことから、安定した粒子としての性質を持つことがわかっています。特に、磁性体中

のスキルミオン（スピンの渦巻き構造）は、電流によって効率的に動かせるため、次世代の情報担体の候補として盛んに研究が行われています。

注２）スピン
エレクトロニクスの主役である電子は、電荷とスピンの２つの自由度を持つ粒子です。このうち、スピンの自由度は電子の「自転」に由来しており、自転軸の方向に極小サイズの棒磁石のＮ極・Ｓ極のような性質が現れることから、通常はこの自転軸に向いた矢印を用いてスピンを表現する方法が採られます。日常でよく利用される磁石は、強磁性体と呼ばれ、その内部ではスピンが向きを平行に揃えて整列しています。一方、スピン間に働く相互作用によっては、磁気スキルミオンのように複雑なスピン構造が実現することがあります。

注３）磁壁
一般的な磁気記憶素子の中では、強磁性体のスピンの向き（上向き・下向きのどちらを向いているか）によって、0/1 のビット情報が記憶されています。このスピンが上向き・下向きの領域（磁区）の境界面は「磁壁」と呼ばれ、磁壁を電流によって動かすことで、情報の書き換えや伝送を行うことが可能です。一般に、磁壁は結晶中の欠陥等によって運動が阻害されやすいことが知られていますが、粒子としての性質を持つスキルミオンはこうした欠陥を上手く避けることができるため、磁壁よりも５桁小さな電流で動かすことが可能であり、磁気記憶素子の消費電力を大きく低減できる可能性が期待されています。

注４）空間反転対称性
３次元系における全ての座標を（x, y, z）→（-x, -y, -z）のように反転させた場合に、もとの像と反転後の像が一致する性質のこと。たとえば、右手と左手はこの反転操作で互いに変換され、両者は完全に一致しないため、空間反転対称性が破れているとみなすことができます。

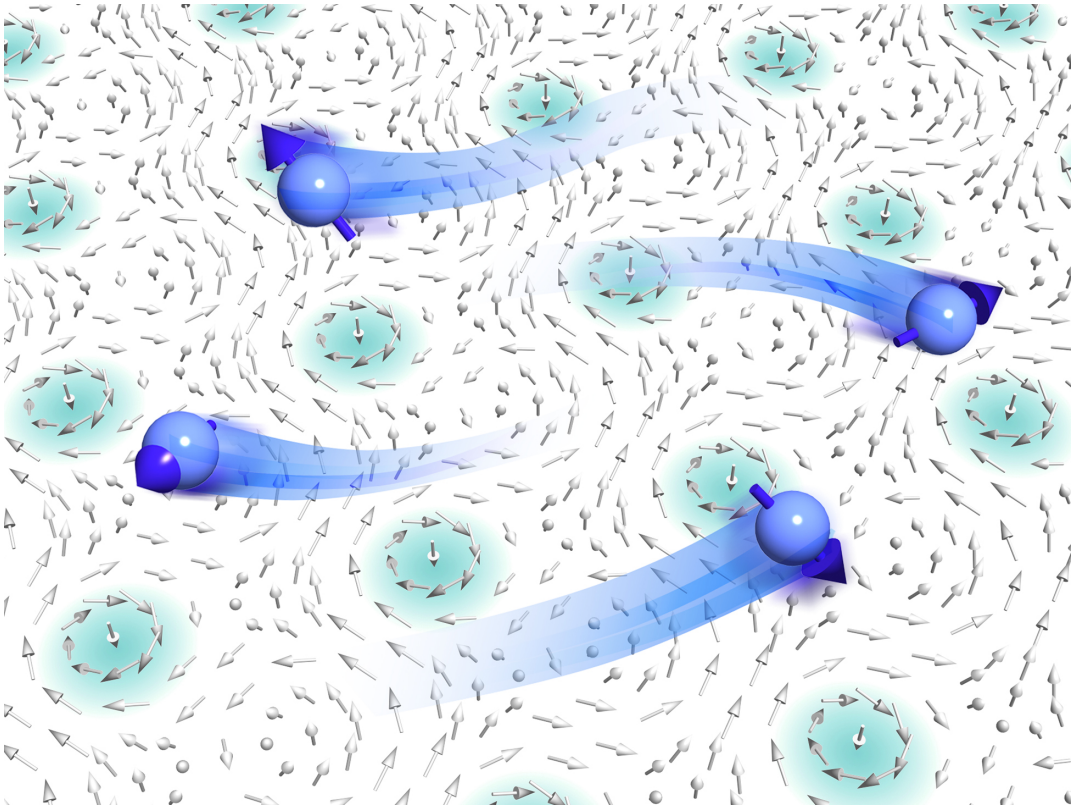
注５）ジャロシンスキー・守谷相互作用
空間反転対称性の破れた環境では、隣り合うスピンの向きを直交させようとする「ジャロシンスキー・守谷相互作用」と呼ばれる力が働き、しばしばスキルミオンのような渦巻き状のスピン構造が安定になることが知られています。

注６）幾何学的フラストレーション
正三角形の３つの頂点にそれぞれスピンが存在していて、それらの間に隣接するスピンを反平行に揃えようとする相互作用が働いているとき、最初の２つのスピンの向きを反平行にそろえると、残るスピンの向きを上向き・下向きのどちらにしても、エネルギーを損する組み合わせができてしまいます。このように、格子の幾何学的な性質に由来して、相互作用の競合が起こっている状況のことを幾何学的フラストレーションと呼び、この場合には全ての相互作用を満足させることができずにお互いが妥協する必要が生じるため、しばしば複雑なスピン秩序が生じることがあります。

注７）共鳴Ｘ線散乱
磁性体の中では、スピンが規則正しい周期構造を作って整列しており、そこにＸ線（電子の占有状態と非占有状態のエネルギー差に合わせて共鳴させる）を照射して回折パターンを観測することで、スピン構造に関する情報を得ることができます。

注８）ローレンツ電子顕微鏡
電子顕微鏡は、光よりも波長の短い電子線を使うことで、極めて高い空間分解能で物体を観測することが可能です。電子線は、磁性体の内部磁場を感じることで、ローレンツ力によって進行方向が曲げられるため、その透過像に現れるコントラストを解析することで、実空間のスピン構造に関する情報を得ることが可能になります。

９．添付資料：



本研究のイメージ図
動き回る遍歴電子が媒介する新しい機構によって、過去最小の直径の磁気スキルミオン（渦巻き状のスピン構造）を実現できることが明らかになりました。今回の発見は、超高密度な情報担体としてのスキルミオンの応用を後押しすることが期待されます。

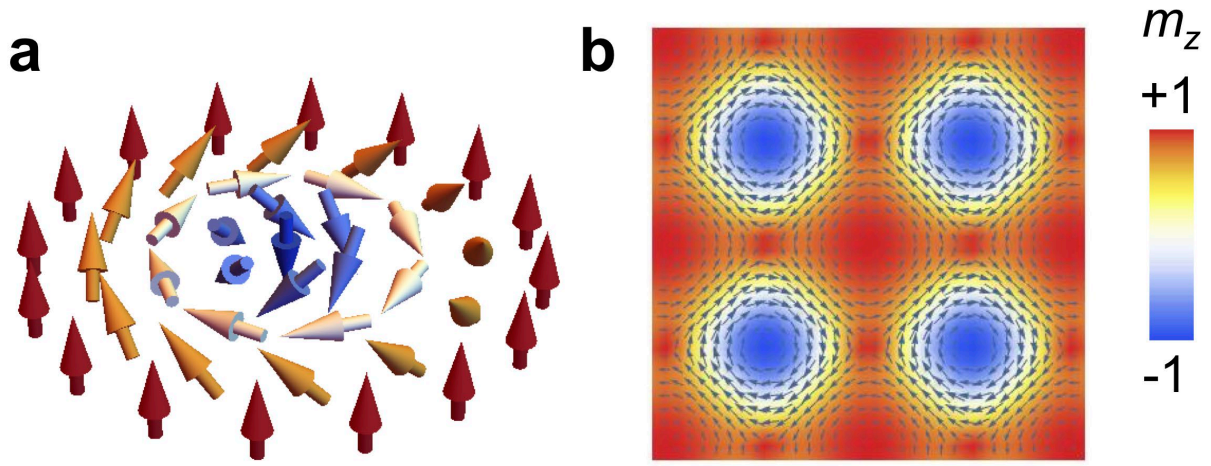


図１：(a)磁気スキルミオンの模式図。矢印は電子のスピンの向きを表している。(b)スキルミオンが正方格子を組んでいる様子。背景色は、スピンの面直成分の大きさ(m_z)を表している。

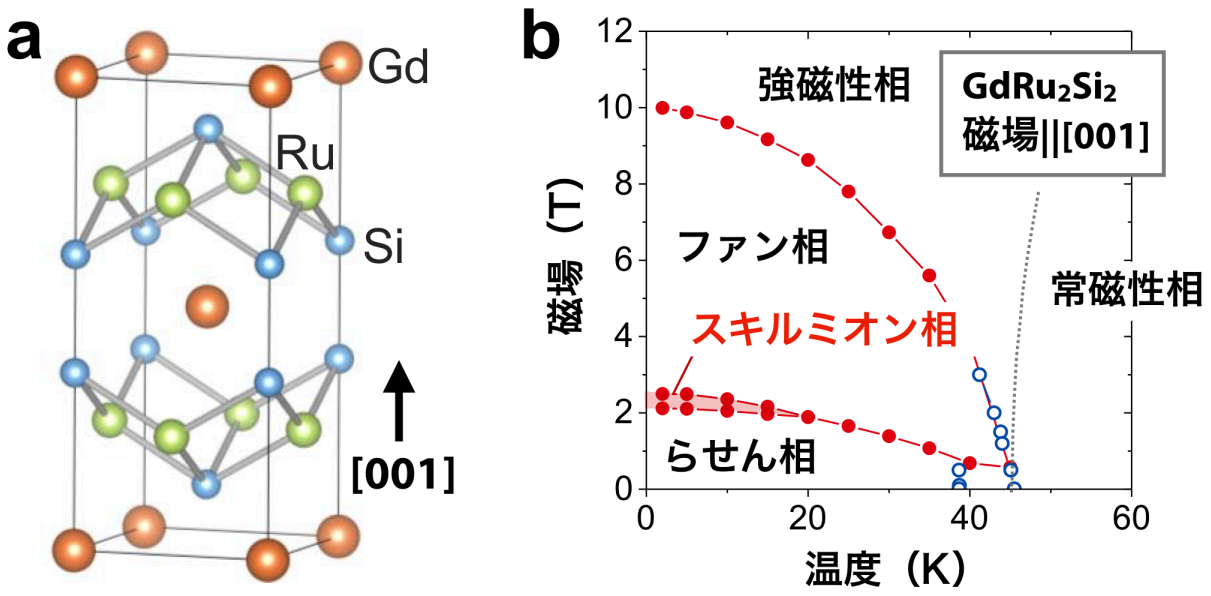


図２：(a)$GdRu_2Si_2$ の結晶構造。(b)$GdRu_2Si_2$ の積層方向に磁場を加えた際の温度磁場相図。

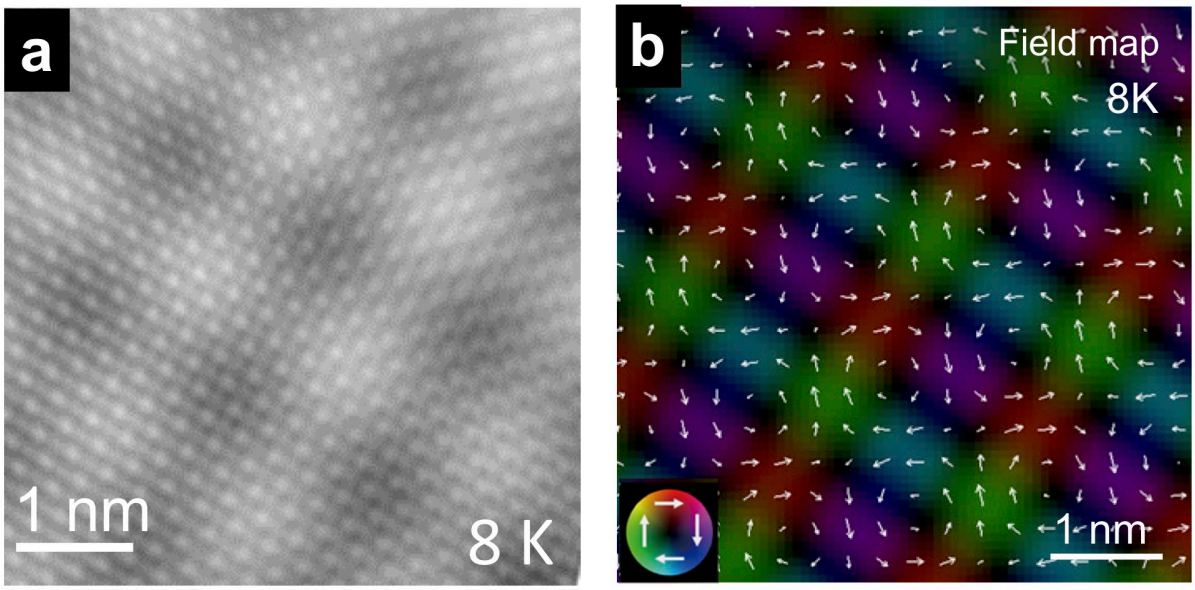


図３：(a)$GdRu_2Si_2$のスキルミオン正方格子相におけるローレンツ電子顕微鏡像（ノイズを除去するために逆格子空間でフィルタリングを施したもの）。周期的に並んだ小さな原子像の上に、より長周期のスキルミオン正方格子の磁気コントラストが重畳している様子が読み取れる。観察しているのは(001)面で、磁場は面直方向に加えている。(b)電子顕微鏡像を解析することで得られた面内磁化の空間分布。図 1(b)と同じように、渦巻き状のスピン構造が正方格子を組んでいる様子が読み取れる。