



Press RELEASE ご取材案内

配布先：文部科学記者会、科学記者会、長野市政記者クラブ、
松本市政記者クラブ
報道各社：科学部・社会部 ご担当者各位

2025 年 11 月 4 日

早稲田大学

信州大学

科学技術振興機構（JST）

スキルミオンの流体挙動と論理ゲート機能を理論的に発見 ～ナノ磁気構造体の流体力学の創成とそのデバイス機能の開拓に道～

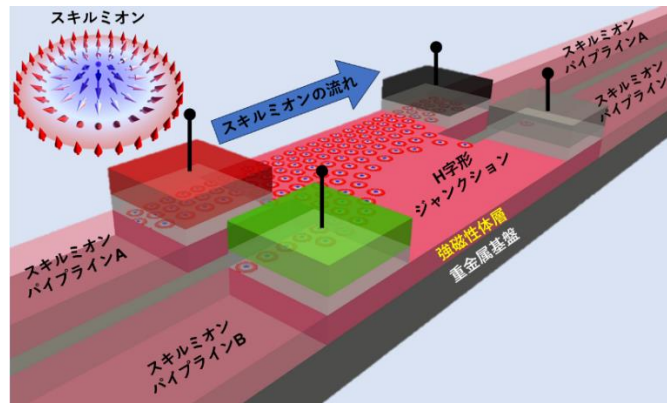
【発表のポイント】

- 磁性体中に発現する「スキルミオン」と呼ばれる粒子状のナノ磁気構造体が無数に集まると、流体のように振る舞うことを発見しました。
- 「スキルミオン流体」をアルファベットの H の形状をした磁性体素子に流すと、AND（論理積）や OR（論理和）に対応する論理演算ができることを数値シミュレーションにより発見しました。
- これらの流体挙動と論理演算機能は、位相幾何学的な磁化配列を持つスキルミオンが無数に集まった結果として現れる創発的な現象と機能です。
- この成果により、スキルミオン 1 個 1 個を制御する高度な技術が不要となり、スキルミオンの素子応用の研究・開発が促進されると期待されます。また、ナノ磁気構造体の流体力学を研究対象とする科学分野が創成されるとともに、新たな機能を開拓する応用研究の展開が期待されます。

ナノサイズ（ナノは 10 億分の 1）の磁気構造体であるスキルミオン^{※1}は将来の磁気デバイスの素材として期待されていますが、極めて微小なスキルミオン 1 個 1 個を精密に制御する難しさが、研究・開発における大きな課題になっています。

早稲田大学理工学術院総合研究所 張溪超（ちょうけいちょう） 次席研究員/研究院講師と、同大理工学術院 望月維人（もちづきまさひと） 教授、信州大学工学部 劉小晰（りゅうしょうし） 教授らの研究グループは、この課題を克服するために、無数のスキルミオンを集合体として活用する可能性について検証しました。数値シミュレーションにより、膨大な数のスキルミオンの集合体の挙動を調べた結果、電流存在下で流体のように振る舞うことや、AND（論理積）や OR（論理和）に対応する論理ゲート^{※2}としての機能を持つことを発見しました。この成果により、スキルミオンを使った素子の実現を阻んでいた課題が解決され、その素子応用の研究・開発が促進されると期待されます。また、ナノサイズの磁気構造体の流体力学^{※3}を研究対象とする新しい科学分野が創成され、その現象と機能を開拓する研究の展開も期待されます。

本研究成果は、2025 年 11 月 1 日（土）に Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 誌にオンライン掲載されました。



キーワード：

スキルミオン、ナノ磁気構造体、スキルミオン流体、流体力学、論理演算、論理ゲート

(1) これまでの研究で分かっていたこと

スキルミオンは位相幾何学（トポロジー）※⁴で特徴付けられる特殊な磁化（原子レベルでの N 極-S 極の向き）配列を持つナノサイズの磁気構造体であり、2010 年頃に、キラル磁性体※⁵や、強磁性体/重金属積層系※⁶などの空間反転対称性の破れた磁性体で発見されました。このナノ磁気構造体は、磁性体中で非常に安定に存在し、まるで粒子のように振る舞います。特に、磁性体に電流を流し、スキルミオンを構成する磁化にトルク（回転力）を与えることで、スキルミオンを動かすことができます。驚くことに、スキルミオンは通常の磁気構造体（磁壁）に比べて 10 万分の 1 から 100 万分の 1 の極めて小さな電流で動かすことができます。

このように、安定して微小電流で動かせるスキルミオンを、次世代のメモリ素子や論理ゲート素子の情報ビットとして応用するために、世界中で精力的な研究が行われています。その中でも、磁性体の細線中に生成した一つ一つのスキルミオンを電流で動かし、スキルミオンが「ある・ない」で「0, 1」を表現するスキルミオン・レーストラックメモリ※⁷と呼ばれる磁気メモリ素子が精力的に研究されています。

しかし、スキルミオン・レーストラックメモリの研究・開発では、個々のスキルミオンを情報ビットとして使うために必要な「読み出し（検出）」、「書き込み（生成）」、「消去」、「伝送」する技術の実現が容易ではないことが課題となっています。つまり、スキルミオン 1 個 1 個を高い精度で検出し、ナノサイズの領域に指定された数だけ生成・消去し、トラップされたり失われたりすることなく確実に伝送するといった高度な技術の必要性が、スキルミオンをメモリ素子などに活用する上で大きな障害となっているのです。

(2) 新たに実現しようとしたこと、明らかになったこと、そのために新しく開発した手法

我々の研究グループは、スキルミオン 1 個 1 個を制御するのではなく、無数のスキルミオンの集まりを情報ビットとして活用することで、この課題の解決を目指しました。スキルミオンの集合体を情報担体として活用することは、個々で制御する場合と比べて、以下の 3 つのメリットがあると考えられます。

- ① 精密な位置に厳密に指定された数のスキルミオンを生成しないといけないという問題が解消する。
- ② 無数のスキルミオンを磁気細線で構成された回路の中を巡回させることで、スキルミオンを消去する必要がなくなり、そのための高度な技術が不要となる。
- ③ 無数のスキルミオンの集まりは、1 個 1 個のスキルミオンよりもはるかに容易かつ精度よく検出できるため、高度な読み出し技術が不要となる。

本研究では、強磁性体と重金属の二層構造の材料で図 1 (a)のようなアルファベットの H（を横に寝か

せたような) 形状の素子を作り、そこに膨大な数のスキルミオン[図 1 (b)参照]を流した時の挙動を、数値シミュレーションにより調べました。具体的には、上下 2 本の横棒 (パイプ A と B) の左端 (入力 A と B) どちらか一方から、あるいは両方から無数のスキルミオンを注入した時の振る舞いを調べました。その結果、無数のスキルミオンは、全体としてあたかも層流や乱流^{※8}のような流体挙動を示すことを発見しました。さらに、このスキルミオン流体が AND (論理積) や OR (論理和) の論理ゲートとして振る舞うことを発見しました。

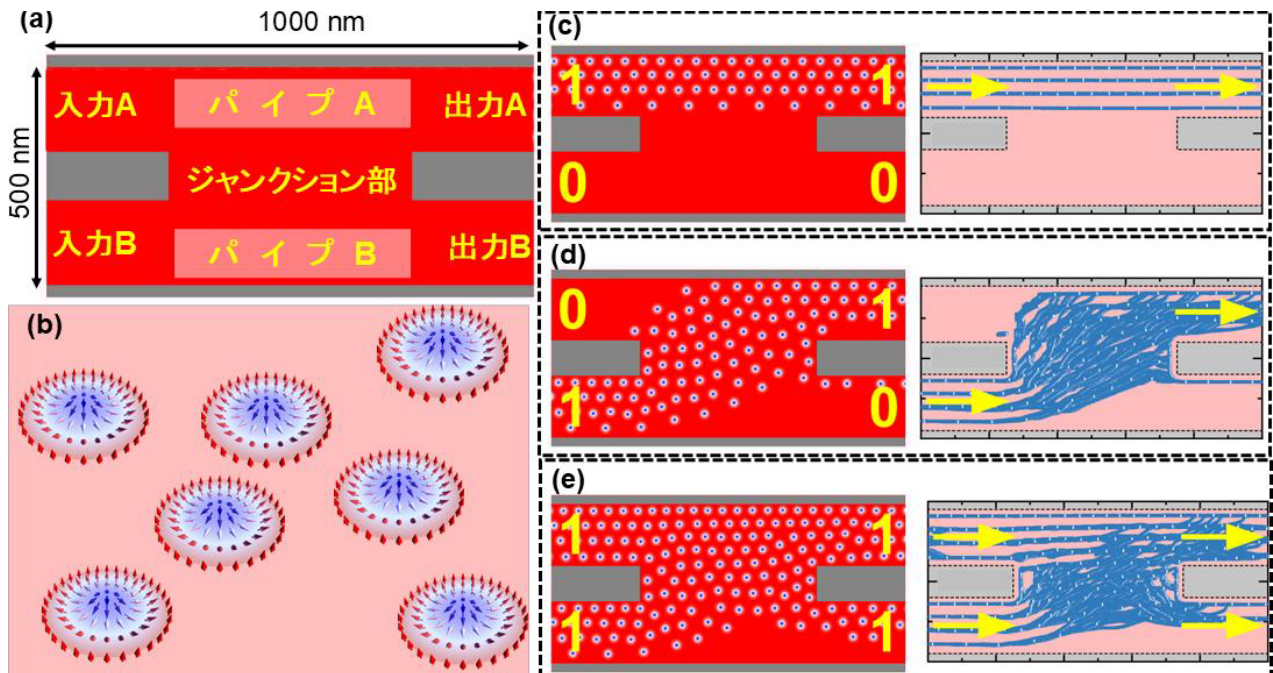


図 1 : (a) スキルミオンの流体挙動をシミュレーションにするために用いたアルファベットの H を横に寝かせた形状の磁性体素子。強磁性体/重金属積層構造でできている。

(b) 入力端子から(a)の素子に注入する無数のスキルミオンの概念図。(c)-(e)の左側の図では青い点のように見えている。

(c) 入力 A からのみスキルミオン流体を注入した時の挙動。スキルミオン流体は上の横棒 (パイプ A) を流れ続ける。

(d) 入力 B からのみスキルミオン流体を注入した時の挙動。最初、下の横棒 (パイプ B) を流れていたスキルミオン流体はジャンクション部を通って、上側のパイプ A に流れ込む。

(e) 入力 A と B 両方からスキルミオン流体を注入した時の挙動。上の(d)の場合とは異なり、パイプ B を流れていたスキルミオン流体はパイプ A に跳ね返される結果、パイプ B を流れ続ける。

(c)-(e)の左パネルは磁化分布を表しており、「0」「1」の数字は入力端子と出力端子におけるスキルミオンの有無に対応している。右パネルはスキルミオン流体を構成するスキルミオンの軌跡を表している。

強磁性体/重金属積層構造において、電流からトルクを受けたスキルミオンは、電流に対しやや斜めの方向に駆動されます。その結果、図 1 (a)のような「横向き H 型素子」の中を流れるスキルミオン流体は、二本の横棒部分 (パイプ A と B) では右方向に流れていこうとしますが、縦棒にあたるジャンクション部では右斜め上方向に流れていこうとします。これにより、下の横棒 (パイプ B) の左端 (入力 B) から注入されたスキルミオン流体は、上の横棒 (パイプ A) にスキルミオン流体が流れていない時はジャンクシ

ン部を通り、上の横棒（パイプ A）を流れるようになる一方、上の横棒（パイプ A）にスキルミオン流体が流れている場合は跳ね返されてそのまま下の横棒（パイプ B）を流れ続けることになります。

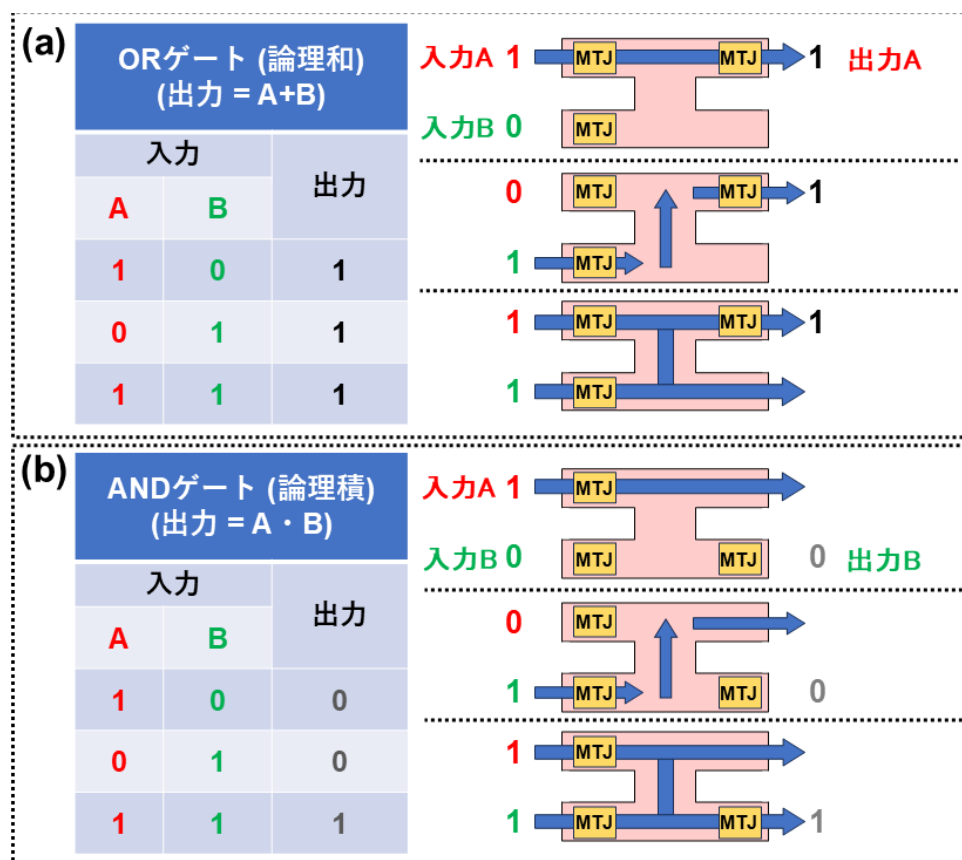


図 2：横向き H 字型磁気デバイスに注入したスキルミオン流体が示す AND（論理積）と OR（論理和）の論理ゲート機能の概念図。(a) 出力 A は OR に対応する出力を吐き出す。(b) 出力 B は AND に対応する出力を吐き出す。

図 1(c)のような振る舞いの結果、スキルミオン流体は AND（論理積）と OR（論理和）の論理演算^{※2}を自然に表現することができます。具体的には、「横向き H」の上下 2 つの横棒の左端をそれぞれ入力端子 A と B、右端をそれぞれ出力端子 A と B と見なした時に、出力端子 A にスキルミオン流体が流れるかどうかは OR の出力に対応し、出力端子 B にスキルミオン流体が流れるかどうかは AND の出力に対応します[図 2 参照]。つまり、出力端子 A に注目すると、入力端子 A と B どちらか一方、あるいは両方にスキルミオン流体を注入した時にだけ、出力端子 A にスキルミオン流体が流れてくるので「OR（論理和）」が表現される一方、出力端子 B に注目すると、入力端子 A と B 両方にスキルミオン流体を注入した場合にだけ、出力端子 B にスキルミオン流体が流れてくるので「AND（論理積）」が表現されます。この現象を活用することで、安定で動かしやすいスキルミオンの特徴を保持しつつ、高い制御性を実現できるため、堅牢で省電力な論理ゲート素子の実現が期待できます。

（3）研究の波及効果や社会的影響

磁気構造体であるスキルミオンは、言ってみれば磁性体を構成する各原子の上にある電子スピンの向きが織りなす模様過ぎません。それにもかかわらず、その模様が膨大な数集まると、まるで水のように流れ、流体として振る舞うこと、そして、そのようなスキルミオン流体が論理ゲートとしての機能を備えて



いるということは驚くべき発見です。この現象や機能を活用することで、堅牢性と省電力性を兼ね備えた次世代の論理ゲート素子の実現が期待できます。さらに、今回の発見は、スキルミオン流体が基礎科学の観点からも技術応用の観点からも大きな可能性を秘めていることを示しています。

(4) 課題、今後の展望

今回の発見は、スキルミオン流体が秘める豊かな可能性の一端を明らかにしたことに過ぎないと考えています。また、粒子的な振る舞いを見せるナノサイズのトポロジカル磁気構造体^{※9}は、スキルミオン以外にも近年次々に発見されています。これらの磁気構造体も膨大な数集まることで流体としての挙動を示す可能性があります。さらに、流体の性質は、それを構成する個々の粒子や粒子間の相互作用の性質に強く依存することを考えると、今後まったく新しい挙動や性質を示す「磁気構造体の流体」が発見されてもおかしくありません。様々なナノ磁気構造体を対象に、その流体として挙動や現象を広く探索・解明し、普遍的な物理を追求する研究の展開が重要になります。さらに、これらの研究を通じて、「ナノ磁気構造体の流体」ならではの新しい物質機能を探索し、そのスピントロニクス^{※10}への応用の可能性を探ることも重要な課題であると考えています。

(5) 研究者のコメント

今回の研究成果は、「スピントロニクス」という現代物理学の最先端の研究領域に、物理学における古典的な基礎学問である「流体力学」の概念を取り入れた画期的な成果と言えます。これにより、「ナノ磁気構造体の流体力学」とも呼ぶべき新しい研究分野が創成され、まったく新しい物理学の概念や、これまでにない応用研究の展開が生まれることを期待しています。

(6) 用語解説

※1 スキルミオン

磁性体中に現れる磁化が渦状、あるいは噴水状に配列した磁気構造のことです。中心の磁化は下向きですが、外側に向かうにつれてなめらかに回転し、最外周では上向きとなります。通常、数 nm（ナノメートル）～数百 nm の大きさの円形状をしており、磁性体中で粒子のように振る舞います。スキルミオンを作ったり、消したりするには、必ず局所的に磁化を反転する操作が必要になりますが、この操作は比較的大きなエネルギーを要するために起こりにくく、スキルミオンは安定で、熱揺らぎや外部からの擾乱に強い磁気構造になっています。

※2 論理演算、論理ゲート

論理演算とは、「真 (True)」と「偽 (False)」という二値 (0 と 1 でも表される) を入力として、その組み合わせに基づき一定の規則で出力を決める操作のことをいいます。これは日常の「はい・いいえ」に対応する単純な判断を、数学的に扱えるようにしたものです。代表的な論理演算には以下のようなものがあります。

- ・AND (論理積) : 両方が真のときだけ真を返す
- ・OR (論理和) : どちらか一方でも真なら真を返す
- ・NOT (否定) : 入力が真なら偽、偽なら真を返す

これらを組み合わせると、より複雑な条件判断を記述することができます。論理ゲートは、この論理演算を物理的に実現する最小単位の装置です。電子回路では、トランジスタやダイオードを使って 0 と 1 の信号を処理する仕組みとして構成されます。たとえば、AND ゲートは「二つの入力端子が両方 1 のとき



だけ出力が 1 になる」回路です。コンピュータは、これらの基本的な論理ゲートを大量に組み合わせることと、加算や乗算、記憶、プログラム実行など、複雑な情報処理を行っています。つまり、論理ゲートは現代の情報処理装置の最も基本的な構成要素なのです。

※ 3 流体力学

液体や気体の運動と力学的性質を研究する学問分野です。水や空気のように形を保たず流れる物質を「流体」と呼び、その流れ方や力の伝わり方を数理的に扱います。

※ 4 位相幾何学（トポロジー）

図形や空間構造を、その連続変形における等価性や非等価性、連続変形しても保たれる性質に着目して分類する幾何学のことを位相幾何学といいます。

※ 5 キラル磁性体

キラル磁性体とは、結晶構造やスピン（原子レベルでの磁化：N 極－S 極に相当）配置に「左右非対称性（キラリティ）」を持つ磁性体のことを指します。ここで「キラリティ」とは、右手と左手のように、鏡映像と重ね合わせることができない性質を意味します。多くのキラル磁性体は反転対称性を欠いた結晶構造を持ちます。そのため、電子スピン間には通常の対称的な（スピン対の上下を反転させても同じ）交換相互作用に加えて、非対称的交換相互作用（スピン対の上下を反転させるとエネルギーが変わる）であるジャロシンスキー・守谷相互作用が働きます。この相互作用が、らせん磁気構造（ヘリカル構造やコニカル構造）やスキルミオン格子といった、通常の強磁性体では見られない特異なスピン秩序を安定化させます。キラル磁性体の代表的な例には B20 型化合物である MnSi や FeGe、 β -Mn 型の Co-Zn-Mn 合金、絶縁磁性体の Cu_2OSeO_3 などがあります。

※ 6 強磁性体/重金属積層系

強磁性体薄膜と重金属薄膜を交互に積み重ねた人工構造のことを指します。この系では、強磁性体を持つ磁気的な性質と、重金属が持つ電子の運動と磁性を結合する効果を併せることにより、通常の磁性体では得られない多彩なスピントロニクス機能を実現できます。本研究では、特にナノスケールのトポロジカル磁気構造を安定かつ電流で操作できる「スキルミオン生成・駆動デバイス」としての機能に注目しました。

※ 7 スキルミオン・レーストラックメモリ

スキルミオンを情報の担体として用いる、新しい概念の不揮発性メモリ素子のことです。細長い磁性ナノワイヤー（レーストラック）中にスキルミオンを作り、その「いる」「いない」を「0」「1」として情報を表現します。電流を流すと、スキルミオンが滑らかに移動するため、情報を配列したまま読み書きが可能になります。スキルミオン・レーストラックメモリには様々な特徴や長所があります。まず、スキルミオンのサイズが数 nm～数百 nm と小さいため、高密度な記録が可能です。さらに、スキルミオンは非常に小さな電流（磁壁に比べると 10 万分の 1 から 100 万分の 1）でも駆動できるため、エネルギー効率に優れ、低消費電力で稼働できます。さらに、スキルミオンはナノ秒オーダーで移動できるため、高速動作が可能です。一方で、「スキルミオンの生成・消去技術の制御性」、「スキルミオンの運動が電流方向からそれてしまう現象（軌道逸脱）の抑制」、「安定動作のための材料探索とデバイス設計」といったいくつかの解決すべき課題や困難があります。これらの課題が解決されれば、スキルミオン・レーストラックメモ



りは、次世代の超高密度・低消費電力メモリとして、従来のフラッシュメモリやハードディスクを凌駕する可能性があります。

※8 層流、乱流

流体の運動は流れの秩序性に応じて大きく層流と乱流に分類されます。これは、流体力学における基礎的かつ重要な概念です。層流（Laminar Flow）は、流体の分子が互いに混じり合うことなく、平行な層をなして規則正しく流れる状態であり、摩擦損失が比較的小さく、流れが滑らかで予測しやすいという特徴があります。一方で、乱流（Turbulent Flow）は、流れが不規則に渦を巻き、速度や圧力が時間的・空間的に大きく変動する状態であり、エネルギー散逸が大きく、摩擦抵抗や混合効率が増大する傾向があります。理論的には、層流はナビエ-ストークス方程式の解を比較的単純な形で記述できる一方、乱流は非線形性が強く、その取り扱いには統計的手法や数値流体力学が必要になります。また、層流と乱流の遷移は、流体の慣性力と粘性力の比を表す「レイノルズ数（Re）」によっておおよそ判定されます。具体的には、レイノルズ数がおよそ 2000 より小さい場合は層流が現れ、およそ 4000 より大きい場合は乱流が現れます。また、中間領域では遷移流と呼ばれる両者が混在する複雑な流れが現れます。

※9 トポロジカル磁気構造体

スキルミオンと同様に位相幾何学的に特徴付けられる磁化配列を持つ磁気構造のことです。スキルミオンと同様、連続変形により一様磁化状態に戻すことができないため、一度生成されると熱揺らぎや外部からの擾乱に強く、安定に存在できます。

※10 スピントロニクス

物質中の電子は、電気的な性質を担う「電荷」の自由度に加え、磁気的な性質を担う「スピン」の自由度を持っています。この電子のスピン自由度を積極的に活用し、エレクトロニクス技術への応用を目指す研究分野をスピントロニクスと呼びます。

（7）論文情報

雑誌名：Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)

論文名：Nanofluidic logic based on chiral skyrmion flows

執筆者名（所属機関名）：張 溪超/Xichao Zhang（早稲田大学 理工学術院総合研究所・研究院講師）

*望月維人/Masahito Mochizuki（早稲田大学 理工学術院先進理工学部応用物理学科・教授）

夏 静/Jing Xia（Sichuan Normal University 四川師範大学）

Yan Zhou（The Chinese University of Hong Kong 香港中文大学）

Guoping Zhao（Sichuan Normal University 四川師範大学）

劉 小晰/Xiaoxi Liu（信州大学工学部電子情報システム工学科・教授）

Yongbing Xu（Nanjing University 南京大学/University of York）

掲載日時（現地時間）：2025 年 10 月 31 日

掲載日時（日本時間）：2025 年 11 月 1 日

掲載 URL：<https://doi.org/10.1073/pnas.2506204122>

DOI：<https://doi.org/10.1073/pnas.2506204122>

(8) 研究助成

研究費名：科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 CREST

研究課題名：Beyond Skyrmion を目指す新しいトポロジカル磁性科学の創出（課題番号：JPMJCR20T1）

研究代表者名（所属機関名）：于 秀珍（理化学研究所）

研究費名：日本学術振興会 科学研究費助成事業 基盤研究(A)

研究課題名：スキルミオンが持つ新しい物質機能・物性現象の開拓とスキルミオニクスの創出（課題番号：JP25H00611）

研究代表者名（所属機関名）：望月 維人（早稲田大学）

研究費名：日本学術振興会 科学研究費助成事業 学術変革領域研究(A)

研究課題名：キメラ準粒子の理論（課題番号：JP24H02231）

研究代表者名（所属機関名）：村上 修一（東京大学）

研究費名：日本学術振興会 科学研究費助成事業 若手研究

研究課題名：ナノ機能界面のトポロジカル磁気テクスチャのデバイス機能の創出（課題番号：JP25K17939）

研究代表者名（所属機関名）：ZHANG XICHAO（早稲田大学）

研究費名：日本学術振興会 科学研究費助成事業 基盤研究(B)

研究課題名：磁気スキルミオンの物性とその論理演算・メモリ素子への基盤構築（課題番号：25K01606）

研究代表者名（所属機関名）：劉 小晰（信州大学）

研究費名：日本学術振興会 科学研究費助成事業 挑戦的研究(萌芽)

研究課題名：スピンソリトンを用いた室温量子リザーバーコンピューティング（課題番号：24K21711）

研究代表者名（所属機関名）：劉 小晰（信州大学）

【研究内容に関するお問い合わせ先】

早稲田大学 理工学術院 教授 望月維人

Tel : 03-5286-3447 E-mail : masa_mochizuki@waseda.jp

早稲田大学 理工学術院 研究院講師 張溪超/Xichao Zhang

Tel : 03-5286-3447 E-mail : xichaozhang@aoni.waseda.jp

【本報道に関するお問い合わせ先】

早稲田大学 広報室

Tel : 03-3202-5454 E-mail : koho@list.waseda.jp

信州大学 総務部総務課広報室

Tel : 0263-37-3056 E-mail : shinhp@shinshu-u.ac.jp



WASEDA University
早稲田大学



信州大学
SHINSHU UNIVERSITY



科学技術振興機構 広報課

Tel : 03-5214-8404 E-mail : jstkoho@jst.go.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

安藤裕輔

Tel : 03-3512-3531 E-mail : crest@jst.go.jp