

トポロジカルスピン結晶の新しい制御法を発見 -スピンの波の位相変化による新しい磁気渦結晶と伝導特性の開拓-

1. 発表者：

速水 賢（東京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻 講師）

大久保 毅（東京大学 大学院理学系研究科 量子ソフトウェア寄付講座 特任准教授／
附属知の物理学研究センター 特任准教授）

求 幸年（東京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻 教授）

2. 発表のポイント：

- ◆ トポロジカルスピン結晶（注1）の1つである磁気スキルミオン結晶（注2）において、スピンの波の位相変化がもたらす効果を理論的に解明しました。
- ◆ 磁性金属に対する大規模数値計算により、トポロジカルな性質が異なる磁気スキルミオン結晶と磁気渦結晶（注3）を相互にスイッチする機構を発見しました。
- ◆ 本研究で見出した位相制御は、質的に新しいトポロジカルスピン結晶の創出やスピントロニクスデバイスへの応用に新しい可能性をもたらします。

3. 発表概要：

東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻の速水賢講師、東京大学大学院理学系研究科量子ソフトウェア寄付講座／知の物理学研究センターの大久保毅特任准教授、東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻の求幸年教授らは、幾何学的なスピントクスチャ（注4）をもつトポロジカルスピン結晶における新しい制御変数として、スピンの波の重ね合わせにおける位相に着目し、その変化によって生じる新しいトポロジカルスピン結晶やトポロジカル相転移現象（注5）の微視的な機構を理論的に発見しました。

近年、固体中の電子スピンの渦構造を形成することによって現れるトポロジカルスピン結晶が注目を集めています。この現象は、磁気構造がトポロジカルな性質によって保護されていることや、通常の磁性体では実現の難しい巨大な電磁応答が現れることから、高速・高効率・省エネルギー性能をもつ新しいデバイスへの応用が期待されています。これまで、トポロジカルスピン結晶として主に磁気スキルミオン結晶や磁気ヘッジホッグ結晶（注6）が精力的に調べられてきましたが、応用の可能性を広げる上で、新しいタイプのトポロジカルスピン結晶の開拓が望まれていました。

本研究グループは、トポロジカルスピン結晶を構成するスピンの波の重ね合わせにおける位相に着目し、その役割を理論的に調べることで、磁気スキルミオン結晶とは異なる幾何学的なスピントクスチャをもつ新しいタイプの磁気渦結晶を見出しました。さらに、磁性金属の理論モデルに対して大規模数値シミュレーションを行うことで、得られた磁気渦結晶と磁気スキルミオン結晶をスイッチする微視的な機構を明らかにしました。本研究の成果は、スピンの波の位相制御による新しいトポロジカル物質科学へ向けた学理の構築につながると期待できます。

本研究成果は2021年12月1日（英国時間）に英国科学誌「Nature Communications」オンライン版に掲載されました。

4. 発表内容：

固体中に多数存在する電子は、スピンの波が平行に揃った強磁性や反平行に並んだ反強磁性をはじめとするさまざまなスピン配列を形成します。近年、トポロジカルな性質をもった渦構造からなるトポロジカルスピン結晶が注目を集めています。ここでは、幾何学的なスピントクスチャが生み出す創発電磁場（注7）によって、従来の電磁気学では説明できない電磁応答現象が現れます。これまで、2次元的なスピントクスチャである磁気スキルミオン結晶や、3次元的な磁気ヘッジホッグ結晶などが精力的に調べられ、トポロジカルホール効果（注8）と呼ばれる非従来型の異常ホール効果といった興味深い電磁応答現象が見出されています。

トポロジカルスピン結晶が示す電子スピンの複雑な空間配列は、スピンの波の重ね合わせによって特徴づけることが可能です。例えば、図1左に示すように、磁気スキルミオン結晶は、2次元平面内で互いに120度をなす3つのスピンの波の重ね合わせとして記述できます。また、磁気ヘッジホッグ結晶は、3次元空間内で互いに直交した波の重ね合わせとみなせます。さらに、構成するスピンの波の種類を変えることで、図1右のように、異なるトポロジカル数（注9）で特徴づけられる磁気スキルミオン結晶も得られます。このようにさまざまな重ね合わせによって多彩なトポロジカルスピン結晶が現れることが知られていますが、重ね合わせるスピンの波の位相変化をもたらす効果はこれまで十分に調べられていませんでした。とりわけ、位相を制御する物理的な機構は未解明でした。

本研究グループでは、トポロジカルスピン結晶の1つである磁気スキルミオン結晶におけるスピンの波の位相の役割を調べることにより、位相のずれが新しいタイプの磁気渦結晶をもたらすことを見出しました（図2）。これは、局所的には磁気スキルミオン結晶とよく似た幾何学的なスピントクスチャをもっていますが、トポロジカルな性質が異なることから、全く新しいトポロジカルスピン結晶となっています。

さらに、この新しい磁気渦結晶が安定に存在する条件を明らかにするために、磁性金属に対する大規模数値シミュレーション手法を用いた解析を行いました。磁性金属に対する理論モデルの解析から、ある温度領域で新しい磁気渦結晶が現れることを見出しました。さらに、温度を下げることで、トポロジカル数2の磁気スキルミオン結晶へと位相変化を伴うトポロジカル相転移が生じることも明らかにしました。この機構を詳細に調べることで、磁性金属がもつフェルミ面（注10）に起因した多スピン間相互作用（注11）と類似の相互作用がエントロピーの効果として現れ、それが位相変化を引き起こす上で重要な役割を果たしていることを解明しました。また、基底状態を調べることで、同様の位相変化が生じるために重要なフェルミ面の形状やスピン間相互作用の条件を明らかにしました。

本研究によって、磁気スキルミオン結晶をはじめとするトポロジカルスピン結晶において、スピンの波の位相が新しい制御変数となりうること、さらにその変化が異なるタイプのトポロジカルスピン結晶を生み出すことが明らかになりました。これらの結果は、磁気スキルミオン結晶だけではなく、磁気ヘッジホッグ結晶を含む他のトポロジカルスピン結晶にも未踏の可能性が残されていることを示しており、今後のトポロジカルスピン結晶の物質探索と設計指針に大きな影響を与えるものです。

本研究は、科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業個人型研究（さきがけ）の「トポロジカル材料科学と革新的機能創出」研究領域（No. JPMJPR20L8）および「革新的な量子情報処理技術基盤の創出」研究領域（No. JPMJPR1912）、同戦略的創造研究推進事業CRESTの「トポロジカル材料科学に基づく革新的機能を有する材料・デバイスの創出」研究領域（No. JPMJCR18T2）、日本学術振興会（JSPS）科学研究費補助金基盤研究B（No. 19H01834・21H01037）、同基盤研究C（No. 19K03752・19K03740）、同若手研究（No.

18K13488)、同 科学研究費補助金 新学術領域研究「J-Physics：多極子伝導系の物理」(課題番号：18H04296) および「量子液晶の物性科学」(課題番号：19H05822・19H05825)の助成と東京大学大学院理学系研究科「量子ソフトウェア」寄付講座の支援を受けて行われました。

5. 発表雑誌：

雑誌名：「Nature Communications」(12月1日(英国時間)オンライン版掲載)

論文タイトル：Phase Shift in Skyrmion Crystals

著者：Satoru Hayami*, Tsuyoshi Okubo, and Yukitoshi Motome

DOI 番号：10.1038/s41467-021-27083-0

6. 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

講師 速水 賢 (はやみ さとる)

<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)

<報道に関すること>

東京大学 大学院工学系研究科 広報室

東京大学 大学院理学系研究科・理学部 広報室

科学技術振興機構 広報課

7. 用語解説：

(注1) トポロジカルスピン結晶

トポロジー(位相幾何学)は物体の形を論じる数学の1分野です。ある物体が特徴的な形態をもつことをトポロジカルであると言います。固体中のスピン配列にもトポロジカルなものが存在し、代表例に磁気スキルミオンや磁気ヘッジホッグといったものがあります(注2、6参照)。こうしたトポロジカルなスピン配列が固体中で規則的に結晶のように並んだものをトポロジカルスピン結晶と呼びます。これは、複数のスピンの波の重ね合わせとして表すことができます。

(注2) 磁気スキルミオン結晶

磁気スキルミオンとは、固体中の多数の電子スピンが形成する2次元的な渦構造の1つです。磁気スキルミオンのスピン構造は、スピンの向きが球面を覆う回数に対応するトポロジカル数と呼ばれる整数によって特徴づけられます(注9参照)。磁気スキルミオンが固体中に周期的に並んだものを磁気スキルミオン結晶と呼びます。

(注3) 磁気渦結晶

磁気渦とは、固体中の多数の電子スピンの形成する渦構造の1つです。それが固体中に周期的に並んだものを磁気渦結晶と呼びます。

(注4) 幾何学的なスピントクスチャ

隣り合う3つ以上のスピンの傘を開くような形で立体角をもつスピンの空間的な配列を指します。こうしたスピン配列は、電子にはたらく実効的な電磁場である創發電磁場(注7参照)を生じることが知られています。

(注5) トポロジカル相転移現象

温度や圧力などによって水が氷や水蒸気に変化するように、物質の状態が変化することを相転移と言います。物質のトポロジカルな性質が変化する相転移をトポロジカル相転移と呼びます。

(注6) 磁気ヘッジホッグ結晶

磁気ヘッジホッグとは、固体中の多数の電子スピンの形成する3次元的な渦構造の1つです。それが固体中に周期的に並んだものを磁気ヘッジホッグ結晶と呼びます。

(注7) 創發電磁場

電子が幾何学的なスピントクスチャのもとで運動するとき、量子力学的な位相を獲得します。この効果は、電子が電磁場を感じていると捉えることができるため、このようにして現れる実効的な電磁場を創發電磁場と呼びます。

(注8) トポロジカルホール効果

幾何学的なスピントクスチャ(注4参照)のもとで現れるホール効果を指します。

(注9) トポロジカル数

トポロジカル数とは、トポロジーにおいて物体の形状を特徴づける数のことです。トポロジカルスピン結晶では、スピンの渦構造における巻き付き数に相当します。磁気スキルミオン結晶の場合には、周期構造の1ユニットに含まれるスピンを集めて、それらの矢尻を束ねた際に球面を覆う回数に対応する整数値で与えられます。

(注10) フェルミ面

固体中の電子状態から決まる運動量空間上の曲面を指します。金属の諸性質にはフェルミ面近傍の運動量をもった電子が重要な役割を果たします。

(注11) 多スピン間相互作用

ここでは3つ以上のスピン間にはたらく相互作用を指します。通常、2つのスピンにはたらく相互作用が支配的な役割を担いますが、ここで論じている磁性金属のように、3つ以上のスピンにまたがる相互作用が重要となる場合があります。

8. 添付資料：

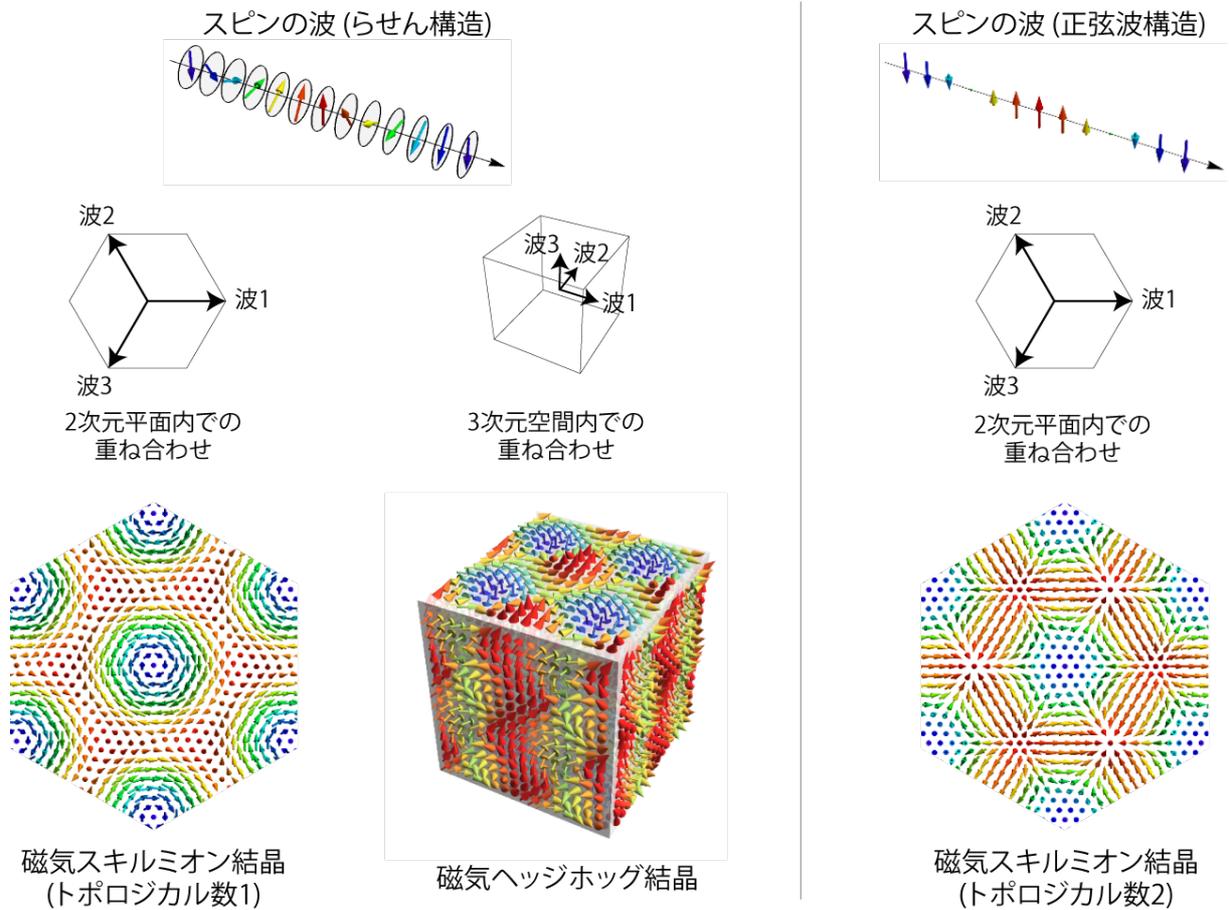


図1：スピンの波の重ね合わせによって特徴づけられるトポロジカルスピン結晶の模式図

左側はスピンのらせん構造を2次元平面（3次元空間）内で重ね合わせた際に得られる磁気スキルミオン（ヘッジホッグ）結晶を表し、右側はスピンの正弦波構造を2次元平面内で重ね合わせた際に得られる磁気スキルミオン結晶を表します。色のついた各矢印は電子がもつスピンの向きを表し、矢印の色は2次元の場合には紙面、3次元の場合には図中の立方体の底面に垂直な成分に対応します（上向きが赤系色、下向きが青系色）。

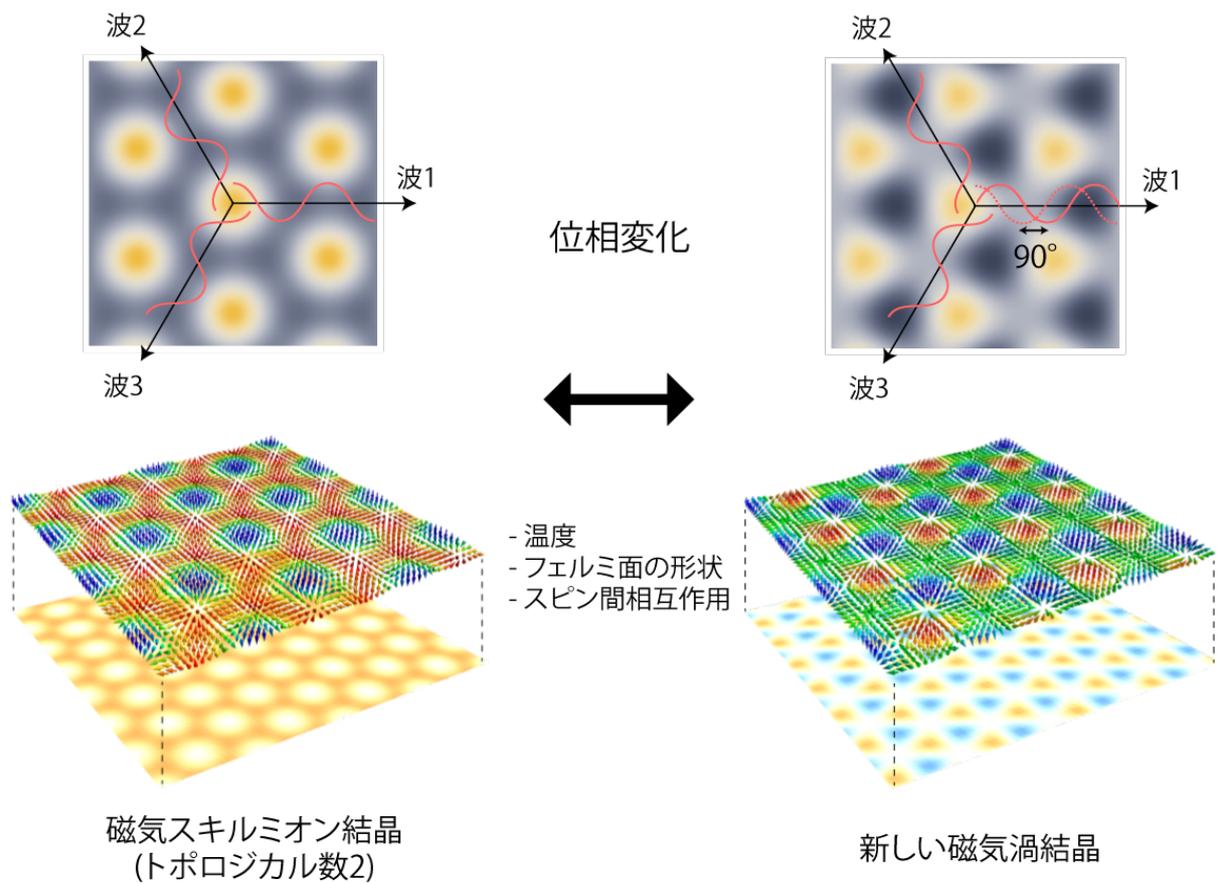


図2：スピンの波の位相変化がもたらすトポロジカル相転移

上図に示すように、波の重ね合わせの位相をずらすことによって全く異なる模様（干渉縞）が得られます。下図はトポロジカルスピン結晶における位相変化の例を示しています（上面はスピン配列、下面は幾何学的なスピントクスチャがもたらす創発電磁場と関係のある物理量）。左はトポロジカル数が2の磁気スキルミオン結晶、右は本研究で得られた新しい磁気渦結晶を表します。これらの間のトポロジカル相転移は、温度、フェルミ面の形状、スピン間相互作用などの変化によって引き起こされます。