

弱い磁場で生成・制御可能な磁気渦を

“トポロジカル原子層サンドイッチ構造”で発見

1. 発表者：

高城 拓也（東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 博士課程2年生）
秋山 了太（東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 助教）
長谷川 修司（東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 教授）
平原 徹（東京工業大学理学院物理学系 准教授）
佐々木 泰祐（物質・材料研究機構磁性・スピントロニクス材料研究拠点 主幹研究員）

2. 発表のポイント：

- ◆ トポロジカル絶縁体の上下を、磁性原子が1原子層に規則的に並んだトポロジカル強磁性体で挟んだ“原子層サンドイッチ構造”を作製した。
- ◆ 従来よりもずっと弱い磁場で磁気渦（スキルミオン、（注1））が生成することを電氣的に観測した。
- ◆ 外乱があっても壊れないスキルミオンが弱磁場で制御可能となり、書き換え容易な新奇磁気メモリへの応用が期待される。

3. 発表概要：

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻の高城拓也大学院生、秋山了太助教、長谷川修司教授、および東京工業大学理学院物理学系の平原徹准教授らのグループは、物質・材料研究機構の佐々木泰祐主幹研究員およびロシア科学アカデミーの A. A. Saranin 教授らとの国際共同研究で、スピン（マイクロな磁石の性質）を持つマンガン原子が規則的に密に並んだ単一原子層を含むトポロジカル強磁性体 $\text{Mn}(\text{Bi},\text{Sb})_2\text{Te}_4$ （注2）を使って、トポロジカル絶縁体 $(\text{Bi},\text{Sb})_2\text{Te}_3$ 原子層の上下を挟んだ“原子層サンドイッチ構造”を作製し、その電気伝導を測定しました。その結果、これまでの1/10程度の弱い磁場でトポロジカルホール効果（注3）が観測され、マイクロな磁気渦（スキルミオン）（注1）が形成されていることを発見しました。

近年、上述のような磁性原子が規則的に並んだ原子層をもつトポロジカル強磁性体が世界的に盛んに研究されていますが、この物質系におけるトポロジカル絶縁体の持つカイラルスピン構造を利用したスキルミオンの観測は本研究が初めてです。

本研究で見出されたスキルミオンは外乱があっても壊れず、弱い磁場で書き換え容易な磁気メモリ（注4）への応用などが考えられ、スピントロニクス分野への貢献も期待されます。

本研究は、アメリカ化学会誌『Nano Letters』に掲載されます。

4. 発表内容：

・研究の背景

トポロジカル絶縁体は、その結晶内部は電気を通さないが、その表面ではスピンが揃った電子が高速で流れる特殊な金属のように振る舞う新規物質であり、近年高い注目を集めています。この表面の状態は、ノイズや不純物などの擾乱によって壊されることはなく、「トポロジカル

に保護」された状態と言われます。この性質は、基礎物理学上興味深いだけでなく、次世代電気磁気素子への応用も強く期待されています。

さらに最近では、トポロジカル絶縁体の長所を活かして電子のスピンを活用する研究に発展しています。トポロジカル絶縁体に磁石（強磁性体）の性質を導入した「トポロジカル強磁性体」が盛んに研究され、特にトポロジカル強磁性体がつまみの渦（カイラルスピン状態）を用いると頑丈なスキルミオン（原子磁石の向きがナノスケールの渦状に並んだもの）（図 1(a)）が実現できると期待されています。これまでもマンガンシリコン結晶といった従来の強磁性金属に特定の強さの磁場を印加することでスキルミオン渦が形成されると報告されていますが、トポロジカル強磁性体はカイラルスピン状態という「トポロジカルに保護」された特有のスピン配列を持ち、それを起源としてスキルミオンの磁気渦が作られているため、結晶中の不純物や欠陥によって壊されることなく、通常の強磁性金属よりも安定的に磁気渦が保たれるという特長が予測されています。

そのトポロジカル強磁性体におけるスキルミオンの観測は、従来はマンガンやクロムといった磁性原子を結晶内部に無秩序に添加した物質で試みられてきましたが、磁性原子がランダムに分布するために強磁性の相互作用が不均一で弱いことや、磁性原子どうしが意図せずに凝集する恐れもあるため、精密に制御可能な物質系が探索されていました。そのため近年では、結晶の作製条件を最適化すると、磁性原子が自動的に規則的な配列となるトポロジカル強磁性体、マンガンビスマスアンチモンテルル($\text{Mn}(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_4$: 以下 **MnBST** と表記) という合金結晶が高い注目を集めています。この結晶構造は、磁性を持たないトポロジカル絶縁体ビスマスアンチモンテルル($(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_4$: 以下 **BST** と表記)結晶格子に、強磁性のマンガントルル(MnTe)原子層が入り込んだ構造です。2017 年に同じ手法で形成されるトポロジカル強磁性体マンガンビスマスセレン MnBi_2Se_4 が同研究グループから報告されたのを皮切りに（注 5）、この自己形成型トポロジカル強磁性体を舞台に電気・磁気特性の研究が爆発的に行われるようになりました。

・ 研究内容

同研究グループは、磁性を持たないトポロジカル絶縁体 **BST** 原子層の上下を、**MnBST** でサンドイッチしたナノスケール構造（図 1(b)）を設計・作製し、これまで自己形成型トポロジカル強磁性体で実現例のない弱磁場生成スキルミオンを、トポロジカルホール効果の観測を通じて電氣的に観測することに成功しました。

通常、強磁性体のホール効果は印加磁場に比例する「正常ホール効果」と、磁化の強さに比例する「異常ホール効果」の足し算で表現されます。一方、スキルミオンを発現する強磁性体では、スキルミオンが誘起する仮想的な磁場（創発磁場）の強さに依存する「トポロジカルホール効果」を加味することが必要です。実際、本研究では、スキルミオン渦が形成される印加磁場領域では図 2(a)のように、ホール抵抗がこぶ状に上昇することが確認され、これがトポロジカルホール効果の証拠となります。

また、サンドイッチ構造のように 2 層の **MnBST** 間に **BST** 層が挿入されている場合と、**BST** が挿入されていない場合で比較したところ、**BST** 層がある場合にのみトポロジカルホール抵抗が観測されることが明らかになりました（図 2(b)）。これは、単に 2 層の **MnBST** を積層させただけではスキルミオンが安定して存在せず、サンドイッチ構造にして **BST** 層の上下面の磁性トポロジカル表面状態を“カップリング”することで初めて安定化する証拠と言えます。

さらに、従来報告例のあるマンガン原子を無秩序に添加したトポロジカル強磁性体と比較すると、今回観測されたスキルミオンは従来の 1/10 程度の弱い磁場の印加で生成できることが

分かりました。これは本系ではマンガン原子が自己形成によって原子レベルで規則的かつ密に並んだことで強磁性相互作用が強まったことが原因と考えられ、磁性原子の配列状態がスキルミオン特性に大きく影響していることを明瞭に示すものです。

・ 社会的意義

本成果は、トポロジカル強磁性体の結晶構造と磁性が密接に関連することを示すものであり、カイラルスピン誘起のスキルミオンの基礎的物性の理解に資するのみならず、外的擾乱に対して頑強なスキルミオンを弱い印加磁場で制御できるという点で、将来的には書き換えが容易なスキルミオン磁気メモリの開発などにつながることを考えられ、次世代スピントロニクスデバイスへの応用が期待できます。

5. 発表雑誌：

雑誌名：「*Nano Letters*」

論文タイトル：Soft-Magnetic Skyrmions Induced by Surface-State Coupling in an Intrinsic Ferromagnetic Topological Insulator Sandwich Structure

著者：Takuya Takashiro, Ryota Akiyama*, Ivan A. Kibirev, Andrey V. Matetskiy, Ryosuke Nakanishi, Shunsuke Sato, Takuro Fukasawa, Taisuke Sasaki, Haruko Toyama, Kota L. Hiwatari, Andrey V. Zotov, Alexander A. Saranin, Toru Hirahara, Shuji Hasegawa

DOI 番号：10.1021/acs.nanolett.1c02952

6. 注意事項：

日本時間 1 月 28 日（金）午前 0 時（米国東部時間：1 月 27 日（木）午前 10 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）

東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻

助教 秋山 了太（あきやま りょうた）

TEL：03-5841-4209 E-mail：akiyama@surface.phys.s.u-tokyo.ac.jp

東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻

教授 長谷川 修司（はせがわ しゅうじ）

TEL：03-5841-4167 E-mail：shuji@surface.phys.s.u-tokyo.ac.jp

（報道に関すること）

東京大学大学院理学系研究科・理学部 広報室

特任専門職員 武田 加奈子、教授・広報室長 飯野 雄一

TEL：03-5841-0654 E-mail：kouhou.s@gs.mail.u-tokyo.ac.jp

東京工業大学 総務部 広報課

TEL：03-5734-2975 E-mail：media@jim.titech.ac.jp

8. 用語解説：

(注1) スキルミオン

複数の原子の磁石(磁化)が渦状の秩序を示すような角度を持って配列したナノスケールの磁気状態。条件が揃ったときに強磁性体の磁化反転の過程で生成されうるもので、スキルミオンの渦の大きさに依存した仮想的な磁場（創発磁場）が生み出される。このタイプのスキルミオンはトポロジカル絶縁体と同様にトポロジカルに保護された磁化配列であるため外乱に対し頑強である。

(注2) トポロジカル強磁性体

トポロジカル絶縁体とは数学上の概念であるトポロジーによって分類された物質群であり、これまで多くの物質で実証されている。そこでは固体内部は電気を通さないが、その表面ではスピンのそろった電子を高速で流すことができる。トポロジカル絶縁体表面に存在する電子は、トポロジカルに保護されているため、不純物や欠陥、ノイズなど外的擾乱に対して頑強である。トポロジカル強磁性体とは、このトポロジカル絶縁体に磁石の性質を組み込んだ物質であり、その特異な表面電子状態（カイラルスピン状態）を反映した量子異常ホール効果、アクシオン絶縁状態、スキルミオンなどの新奇電気磁気現象が発現することが示され、近年高い注目を集めている。

(注3) トポロジカルホール効果

電流を流した固体物質に磁場を印加すると、ローレンツ力によって電子の軌道が磁場と電流の両方に対し垂直方向に曲げられ、その方向に抵抗が発生する（ホール抵抗）。そのホール抵抗は印加磁場の強さに比例する（正常ホール効果）。また、強磁性体中では磁化（マイクロな磁石の揃い具合）が磁場の役割を果たすことで電子が曲げられ、ホール抵抗が生じる。これを異常ホール効果といい、そのホール抵抗は強磁性体の磁化の大きさに比例する。さらに、スキルミオンが存在する物質では、スキルミオン渦の持つ仮想磁場が電子軌道を曲げ、トポロジカルホール効果を発生させる。

(注4) 磁気メモリ

電子の”電荷”の性質を利用して情報を記憶するメモリ素子はパソコン、スマートフォン、テレビ、ゲーム機など、あらゆる電子機器に内蔵されており、現代社会には欠かせない素子である。一方で、近い将来には電子の”磁石”の性質を利用して、磁石の向きに応じて書き換え・読み出しなどの情報操作を行うことができる大容量記憶素子、磁気メモリ素子の実用化が期待されている。スキルミオンは渦の巻き方・大きさなどを情報として扱うことができるため、磁気メモリ素子への応用が期待され、特にその安定性を利用してエラー発生率の低く情報が失われにくい記憶素子の開発が期待されている。

(注5) 2017年6月2日プレスリリース

「トポロジカル絶縁体を強磁性にする新たな方法を発見－量子異常ホール効果を利用したデバイス開発へ進展－」 <http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/news2.html?pid=1239>

9. 添付資料 :

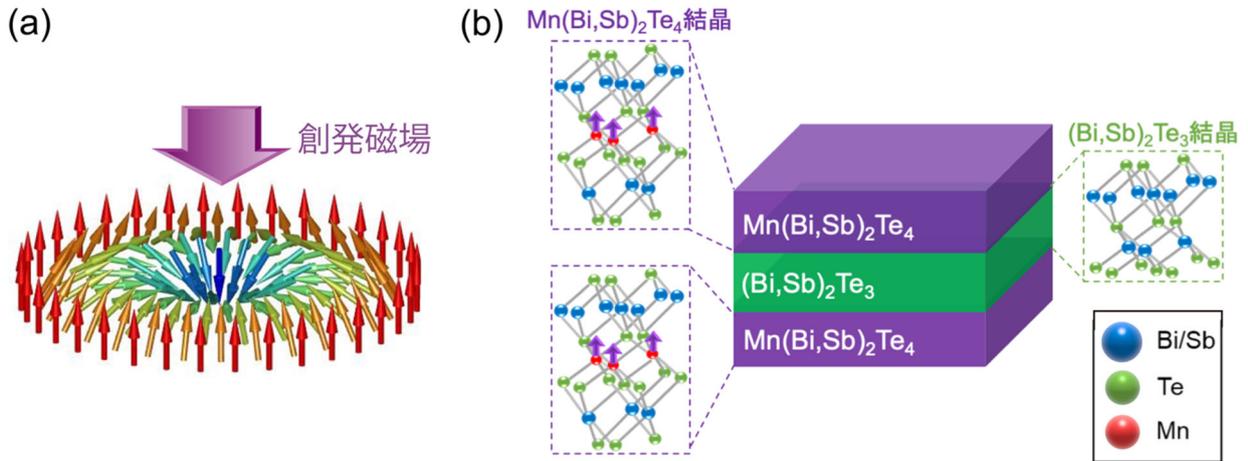


図1 (a) スキルミオンの磁化の模式図。小矢印は原子磁石(磁化)を表しており、各々が渦状に並ぶことで仮想的な磁場(大矢印)を形成する。
 (b) 今回の研究で設計・作製した“原子層サンドイッチ構造”の模式図。トポロジカル絶縁体 $(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$ と自己形成型トポロジカル強磁性体 $\text{Mn}(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_4$ の結晶構造を右・左脇にそれぞれ示す。

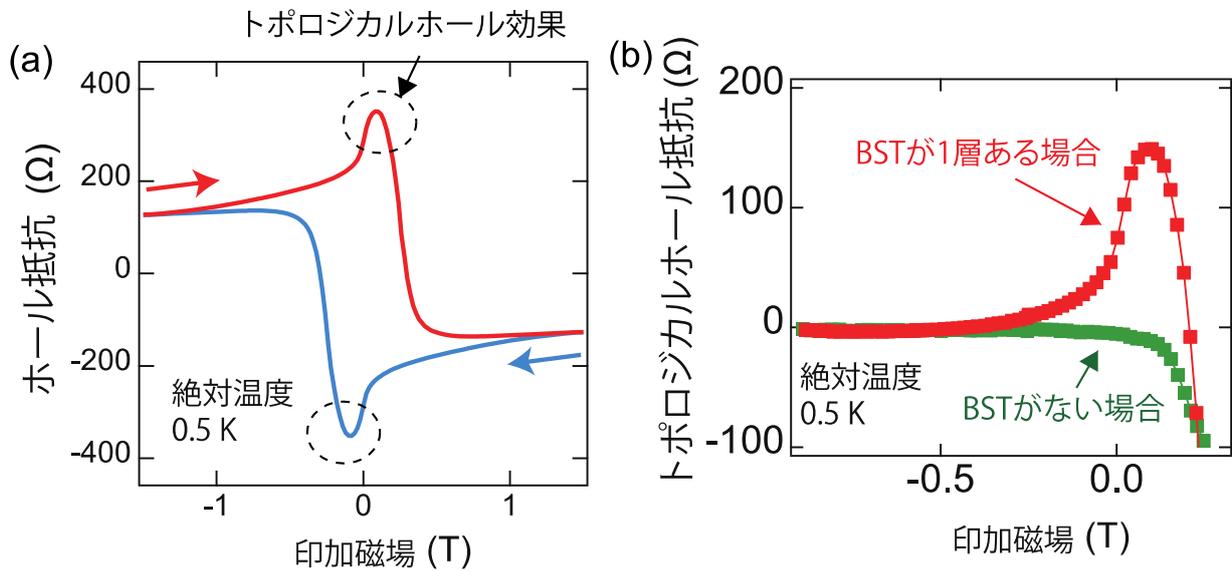


図2 (a) 本研究で観測されたサンドイッチ構造におけるホール抵抗。点線丸で囲まれたような「こぶ状」の振る舞いが見られるが、これがトポロジカルホール効果によるもので、スキルミオンの存在を示す。赤・青矢印は外部磁場の変化方向を示す。
 (b) サンドイッチ構造の BST 層がある場合とない場合の比較。2層の MnBST 層の間に BST が1層入り込むことでスキルミオンが安定化し、トポロジカルホール効果が観測される。