

スキルミオン生成に表れるトポロジーの融合

—低消費電力エレクトロニクスに新原理—

要旨

理化学研究所（理研）創発物性科学研究センター強相関物性研究グループの安田憲司研修生（東京大学大学院工学系研究科 大学院生）、十倉好紀グループディレクター（同 教授）、強相関界面研究グループの川崎雅司グループディレクター（同 教授）、強相関理論研究グループの若月良平研修生（同 大学院生）、永長直人グループディレクター（同 教授）、東北大学金属材料研究所の塚崎敦教授らの共同研究グループ[※]は、トポロジカル絶縁体^[1]である $(\text{Bi}_{1-y}\text{Sb}_y)_2\text{Te}_3$ （Bi：ビスマス、Sb：アンチモン、Te：テルル）薄膜上に、磁性元素Cr（クロム）を添加したトポロジカル絶縁体 $\text{Cr}_x(\text{Bi}_{1-y}\text{Sb}_y)_{2-x}\text{Te}_3$ を積層させた構造の作製により微小な渦状の磁気構造である磁気スキルミオン^[2]を生成することに成功し、スキルミオン生成の新たな設計指針を見出しました。

トポロジー（位相幾何学）とは、連続変形を行っても変化しない量を扱う学問です。連続変形によって変化しないということは、多少のノイズや不純物が加わっても、扱う物質の性質が変わらないということを意味しています。したがって、トポロジーの概念は、安定な物性や機能を持つ物質を設計する観点から工学的にも重要です。トポロジカル絶縁体や磁気スキルミオンはトポロジーに守られた物質として、盛んに研究されています。

トポロジカル絶縁体と磁気スキルミオンは電子と磁気という異なる領域のトポロジーを持ちます。それらの融合を目指し、共同研究グループは、 $(\text{Bi}_{1-y}\text{Sb}_y)_2\text{Te}_3$ 薄膜上にCrを添加した磁性トポロジカル絶縁体 $\text{Cr}_x(\text{Bi}_{1-y}\text{Sb}_y)_{2-x}\text{Te}_3$ を積層させた薄膜を作製しました。共同研究グループは、以前より本薄膜の作製に成功しています^注。本研究では、積層構造の試料内部の電子数を電圧を加えることによって連続的に変化させながらホール抵抗^[3]を測定したところ、特定の電子数において、トポロジカルホール効果^[4]を観測しました。この観測は、作製した積層構造が持つ磁気構造が単純な強磁性ではなく、磁気スキルミオンが形成されていることを意味します。また、理論モデルを用いて積層構造における磁気構造の安定性を計算したところ、実験結果をよく再現する結果が得られ「ジャロシンスキー・守谷相互作用」^[5]を引き出す積層構造がスキルミオン生成に有効な設計指針となることを明らかにしました。今後、スキルミオンを用いた低消費電力デバイスである磁気メモリ^[6]への応用が期待できます。

本研究は、最先端研究開発支援プログラム（FIRST）課題名「強相関量子科学」の事業の一環として行われました。

成果は、英国の科学雑誌『*Nature Physics*』に掲載されるのに先立ち、オンラ

イン版（2月22日付け：日本時間2月23日）に掲載されます。

注) R. Yoshimi, K. Yasuda, A. Tsukazaki, K.S. Takahashi, N. Nagaosa, M. Kawasaki and Y. Tokura, "Quantum Hall states stabilized in semi-magnetic bilayers of topological insulators", *Nat. Commun.* 6, 8530 (2015).
2015年10月26日プレスリリース 薄膜積層化で整数量子ホール効果を従来より高温・弱磁場で実現
http://www.riken.jp/pr/press/2015/20151026_1/

※共同研究グループ

理化学研究所 創発物性科学研究センター

強相関物性研究グループ

研修生

安田 憲司（やすだ けんじ）
（東京大学大学院工学系研究科 修士課程2年）

研修生

吉見 龍太郎（よしみ りゅうたろう）
（東京大学大学院工学系研究科 博士課程3年）

グループディレクター

十倉 好紀（とくら よしのり）
（東京大学大学院工学系研究科 教授）

強相関界面研究グループ

グループディレクター

川崎 雅司（かわさき まさし）
（東京大学大学院工学系研究科 教授）

上級研究員

高橋 圭（たかはし けい）

強相関理論研究グループ

研修生

若月 良平（わかつき りょうへい）
（東京大学大学院工学系研究科 博士課程1年）

特別研究員

森本 高裕（もりもと たかひろ）

グループディレクター

永長 直人（ながおさ なおと）
（東京大学大学院工学系研究科 教授）

東京大学大学院工学系研究科

講師

江澤 雅彦（えざわ もとひこ）

東北大学 金属材料研究所

教授

塚崎 敦（つかざき あつし）
（理研創発物性科学研究センター 客員主管研究員）

1. 背景

トポロジー（位相幾何学）とは、連続変形を行っても変化しない量を扱う学問です。連続変形によって変化しないということは、多少のノイズや不純物が加わっても、扱う物質の性質が変わらないということを意味しています。したがって、トポロジーの概念は、安定な物性や機能を持つ物質を設計する観点から工学的にも重要です。このようなトポロジーに守られた物質の例として、近年、トポロジカル絶縁体が注目されています。トポロジカル絶縁体は、固体内部は電流の流れない絶縁体状態で、表面のみで金属状態を示す物質です。この表面の金属状態には、トポロジーで守られたワイル電子^[7]と呼ばれる特殊な電子が存在し、電子の運動方向に対しスピン^[8]（電子の自転）が特定の方向に固定されています（図1b）。

一方、トポロジーの概念は磁気構造にも現れます。近年いくつかの物質中で、磁気スキルミオンと呼ばれる磁気構造が発見されました。これは磁化（磁気分極）が微小な渦状に巻いた構造であり、通常の強磁性状態からは連続的に変形することができないため、トポロジーによって守られた安定な粒子として振る舞います。このような安定性から、スキルミオンは磁気メモリへの応用が期待され、盛んに研究されています。しかし、現在ではスキルミオンを生成する物質は特定の結晶構造を持った物質に限られており、結晶構造に依らずにスキルミオンを生成する設計指針が期待されていました。

2. 研究手法と成果

共同研究グループは、トポロジカル絶縁体のワイル電子状態がスキルミオンの形成に有利であることに着目し、積層構造によるスキルミオンの生成を目指しました（図 1c、d）。共同研究グループは、これまでの研究で $(\text{Bi}_{1-y}\text{Sb}_y)_2\text{Te}_3$ （Bi：ビスマス、Sb：アンチモン、Te：テルル）薄膜上にCr（クロム）を添加した磁性トポロジカル絶縁体「 $\text{Cr}_x(\text{Bi}_{1-y}\text{Sb}_y)_{2-x}\text{Te}_3$ 」を積層させた、トポロジカル絶縁体積層薄膜の作製法を確立しています^注。この物質では、組成制御(y)や電圧を加えることによって、電子数を自在に変化させることができます。そこで、電子数をさまざまに変化させつつ、ホール抵抗を測定したところ、正孔^[9]（電子が欠落した部分）数を増やした場合にのみ、強磁性状態（図 1a）とは異なる振る舞いを観測しました。

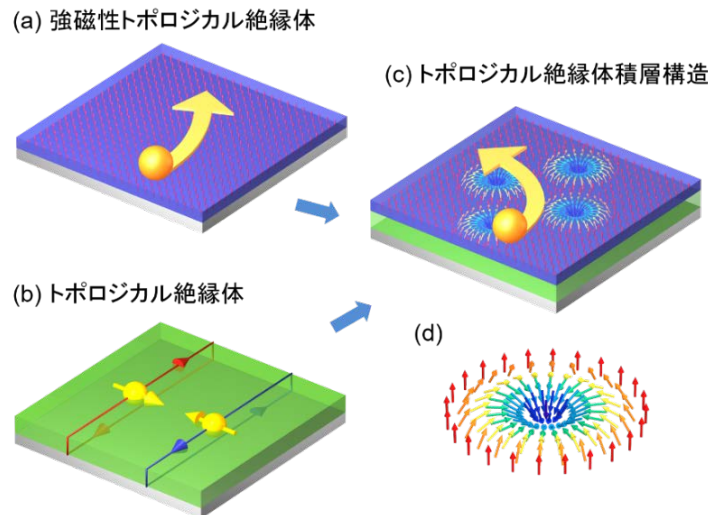


図 1 トポロジカル絶縁体積層構造によるスキルミオン形成の概念図

- (a) 強磁性トポロジカル絶縁体において、隣り合う磁気スピンはすべて平行に配列する（赤の上向き矢印）。このとき異常ホール効果（黄の太い矢印）が生じる。
- (b) トポロジカル絶縁体と表面状態。表面では、電子の運動方向（赤や青の矢印）に対し、電子のスピン方向（黄の矢印）が固定されている。
- (c) トポロジカル絶縁体積層構造。スキルミオン生成の結果、異常ホール効果に加え、トポロジカルホール効果が観測される。黄の太い矢印は両方の効果を足し合わせたもの。
- (d) 単一スキルミオンの模式図。矢印は磁気スピンを表す。

強磁性状態ではホール抵抗は、磁場（磁界）に比例する正常ホール抵抗と、

磁化に比例する異常ホール抵抗の足し合わせで書き表されます。一方、作製した積層構造のホール抵抗には、これらの足し合わせのみでは説明できない寄与であるトポロジカルホール抵抗を観測しました（図 2a）。これは、本質的には図 2b に示す積層構造のホール抵抗から、磁場に対して単調増加する磁化（図 2c）を引き算することで検出できます。特に、図 2c の磁化が負から正に大きく変化する領域に対応する磁化反転過程において、図 2a のトポロジカルホール抵抗が大きな値を示しており、このときスキルミオンが形成されていることを意味しています（図 2a）。

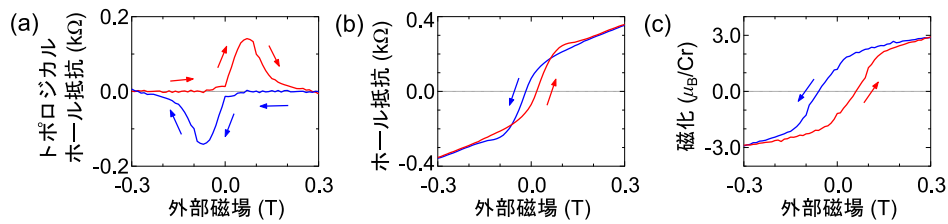


図 2 2 K（約-271℃）における積層構造のホール抵抗と磁化の外部磁場依存性

- (a) トポロジカルホール抵抗。(c)の磁化が反転する中間の磁場領域で最大値をとる。
 - (b) ホール抵抗。磁場に対して非単調な振る舞いを示している。
 - (c) 磁化。磁場に対して単調に増加する。
- ※赤矢印は磁場上げ過程、青矢印は磁場下げ過程に各々対応する。

このようなスキルミオンの安定さを調べるため、トポロジカルホール抵抗を磁場と温度に対して図示したところ、強磁性の転移温度（18K、約-255℃）以下の広い温度領域において表れていることが分かりました（図 3）。そこで、積層構造の理論モデルを用い、スキルミオンの安定性を計算したところ、実験結果をよく再現する結果が得られました。さらに、計算結果からスキルミオン生成の起源が積層構造による空間反転対称性^[10]の破れとトポロジカル絶縁体のワイル表面状態によって生じる「ジャロシンスキー・守谷相互作用」であることを明らかにしました。

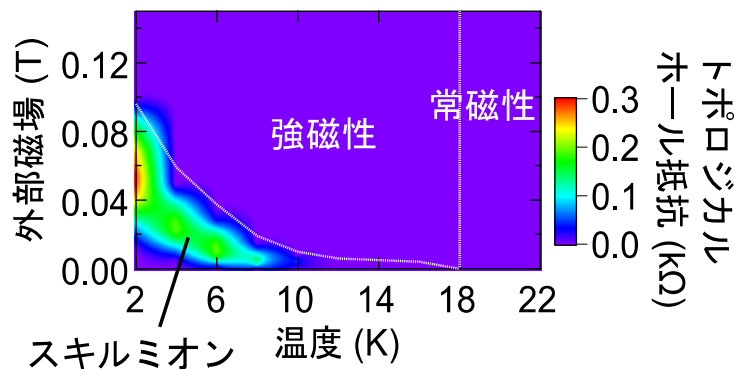


図 3 トポロジカルホール抵抗の外部磁場、温度依存性

強磁性の転移温度（18K、約-255℃）以下の広い温度領域で、スキルミオンのトポロジカルホール抵抗が表れている。つまり、スキルミオンが安定化されていることが分かる。

3. 今後の期待

今回の成果により、積層構造を用いて空間反転対称性を破ることによって、特定の結晶構造を持たない物質においても、スキルミオン生成が可能であることが明らかになりました。このような積層構造によるスキルミオン生成という新原理は、他の物質群に対しても適用することができ、適切な組み合わせを選択することでトポロジーに守られたスキルミオンを用いた、低消費電力デバイスである磁気メモリへの応用が期待できます。

4. 論文情報

<タイトル>

Geometric Hall effects in topological insulator heterostructures

<著者名>

K. Yasuda, R. Wakatsuki, T. Morimoto, R. Yoshimi, A. Tsukazaki, K. S. Takahashi, M. Ezawa, M. Kawasaki, N. Nagaosa and Y. Tokura

<雑誌>

Nature Physics

<DOI>

10.1038/nphys3671

5. 補足説明

[1] トポロジカル絶縁体

近年見出された概念に添う物質群で、固体内部では電気を流さない絶縁体であるが、物質表面でのみ電気を流す金属として振る舞う。表面状態はトポロジーによって保護されており、不純物が加わっても安定に保たれる。

[2] 磁気スキルミオン

近年、磁性体中で観測されたナノメートル (nm、1nm は 10 億分の 1 メートル) サイズの渦状の磁気スピンの配列。通常の強磁性状態からは連続的に変形することができないため、トポロジーによって守られた安定な粒子として振る舞う。

[3] ホール抵抗

磁場下で電子が運動すると、電子はローレンツ力(荷電粒子が磁場の中で動くときに磁場により受ける力)を受けて、本来の運動方向に対して横方向に曲がる。したがって、電流を流すと、磁場の大きさに比例した電圧が電流の向きに対して垂直な方向に生じる。これは(正常)ホール効果と呼ばれ、垂直方向に生じる電圧を電流で割ったものをホール抵抗と呼ぶ。また、強磁性体中では磁化に比例した異常ホール効果が生じる。さらに、スキルミオンが形成されているとき、これらに加えトポロジカルホール効果([4]参照)が現れる。

[4] トポロジカルホール効果

スキルミオンは電子に対し、巨大な仮想磁場の源として働き、電子の運動を横方向に

曲げる。そのため、スキルミオンの構造が形成されているとき、正常ホール効果と異常ホール効果に加えて、トポロジカルホール効果が生じる。トポロジカルホール効果はスキルミオン密度に比例したホール抵抗を与える効果である。

[5] ジャロシンスキー・守谷相互作用

物質中の磁気スピン同士に働く相互作用の1つ。隣接するスピンの向きが平行ではなく、角度を持って配列するように働く。これは、隣接スピン間の中点が空間反転対称心でない場合に生じる。

[6] 磁気メモリ

汎用の磁気メモリは、強磁性体の磁化方向を0、1に対応させ、記憶素子としている。同様に、スキルミオンがあるときを1、スキルミオンがないときを0とすることで、スキルミオンをメモリとして使用できる。

[7] ワイル電子

相対論的量子力学の基本方程式であるワイル方程式に従って運動する電子のこと。近年、トポロジカル絶縁体表面の電子もワイル方程式に従って運動することが明らかになった。トポロジカル絶縁体表面のワイル電子は、電子の運動方向に対し、スピンの特定の方向に固定されている。

[8] スピン

電子の持つ自由度の1つで、微小な磁石として働く。電子の自転として理解できる。

[9] 正孔

固体中のバンド構造（結晶内の電子に対するエネルギー準位の構造）において電子が抜けたとき、その不足によってできた孔（穴）のこと。この孔に電子が移動する電子集団の運動は、電子と逆符号（正）の電荷を持つ正孔の運動として理解できる。

[10] 空間反転対称性

各点の座標(x, y, z)を(-x, -y, -z)に変換する操作を空間反転操作と呼ぶ。空間反転操作によって構造が一致しない場合、空間反転対称性が破れていると言う。例えば積層構造の場合には、空間反転操作によって積層の順番が逆になるため、空間反転対称性が破れている。

6. 発表者・機関窓口

<発表者> ※研究内容については発表者にお問い合わせ下さい

理化学研究所 創発物性科学研究センター

強相関物性研究グループ

研修生

安田 憲司（やすだ けんじ）

グループディレクター

十倉 好紀（とくら よしのり）

強相関界面研究グループ

グループディレクター

川崎 雅司（かわさき まさし）

強相関理論研究グループ

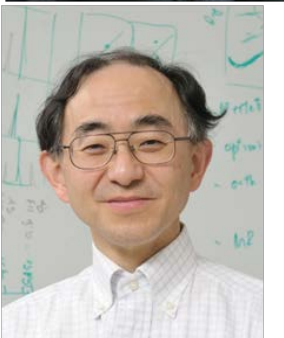
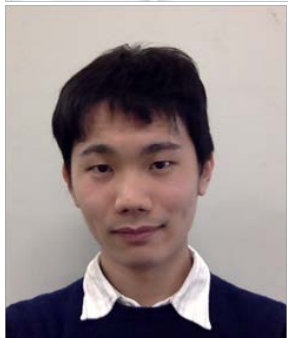
研修生

若月 良平（わかつき りょうへい）

グループディレクター 永長 直人 (ながおさ なおと)
TEL : 048-462-1111 (6328), 03-5841-6855 (安田) FAX : 03-5841-6858 (安田)
Email : yasuda@cmr.t.u-tokyo.ac.jp (安田)

東北大学 金属材料研究所
教授

塚崎 敦 (つかざき あつし)



上段左より安田研修生、十倉グループディレクター、川崎グループディレクター
下段左より若月研修生、永長グループディレクター、塚崎教授

<機関窓口>

理化学研究所 広報室 報道担当
TEL : 048-467-9272 FAX : 048-462-4715
E-mail : ex-press@riken.jp

国立大学法人東京大学大学院工学系研究科 広報室
TEL : 03-5841-1790 Fax : 03-5841-0529
E-mail : kouhou@pr.t.u-tokyo.ac.jp

国立大学法人東北大学 金属材料研究所
情報企画室広報班 横山 美沙
TEL : 022-215-2144 Fax : 022-215-2482
E-mail : pro-adm@imr.tohoku.ac.jp