

トポロジカル結晶絶縁体への強磁性の染み出しを初めて観測 ～超省エネルギーデバイス実現に道筋～

トポロジカル絶縁体は、結晶の内部は絶縁体であるのに対して、表面は電気を流す金属としての性質を有する物質です。その表面では、スピンのそろった電子が散乱を受けずに高速で運動する特異な状態にあることから、超省エネルギーデバイスなどへの応用が期待されています。本研究では、トポロジカル結晶絶縁体である SnTe（テルル化錫）と身近な鉄とを接合した試料において、両者の境界面で鉄の強磁性の性質が SnTe 側に「染み出す」ことにより、SnTe 表面で電子のスピンのそろった強磁性の状態になっていることを中性子を用いた観測（偏極中性子反射率測定）で明らかにしました。

トポロジカル絶縁体の中でも比較的新しい種類であるトポロジカル結晶絶縁体において、強磁性の染み出しが観測されたのは初めてであり、本来、磁石の性質を持たないトポロジカル結晶絶縁体の表面の電子に磁石の性質が付与されていることが確認されました。本研究では、磁石である鉄とトポロジカル結晶絶縁体との層を空間的に分離して、磁石の性質だけをトポロジカル表面に染み出させることができ、その染み出しによる強磁性は室温でも残っていることが確認されました。これにより、量子異常ホール効果や磁気スキルミオンなどの新奇物性の、これまでより高い温度での実現に向けた道が拓かれ、超低消費電力デバイスや超微細な磁気メモリなどへの応用が期待されます。

研究代表者

筑波大学数理物質系

黒田 眞司 教授

東京大学大学院理学系研究科

秋山 了太 助教

総合科学研究機構中性子科学センター

阿久津 和宏 副主任技師

研究の背景

トポロジカル絶縁体は、結晶の内部は絶縁体で電気を流さないのに対して、表面は電気を流す金属としての性質を示し、かつ表面ではスピが一方向に揃った電子が散乱されずに流れるという「トポロジカル表面状態」^{注1)}を有する新しい物質として注目されています。この表面状態に磁石の性質である強磁性を付与すると、量子異常ホール効果^{注2)}や磁気スキルミオン状態^{注3)}などの新奇な現象が観察されることが報告されており、それぞれ、消費電力のきわめて小さい電子デバイスや、外部からの擾乱（じょうらん）に強い磁気メモリへの応用が期待されています。トポロジカル絶縁体に強磁性を付与するには、これまでは結晶に磁石の性質を持つ元素（磁性元素）をドーピングすることで、結晶全体を強磁性にする方法が多く用いられてきました。ただし、この方法で強磁性となったトポロジカル絶縁体では、量子異常ホール効果は30mK（マイナス273℃）程度と非常に低い温度でしか観測されておらず、この原因は、磁性元素のドーピングによる欠陥の生成や磁性元素が結晶内部でランダムに配置することによる電子状態の揺らぎにあると考えられています。実用的な電子デバイスとしての応用を考えると、より高温での量子異常ホール効果状態の実現が求められていました。

一方、トポロジカル絶縁体の一種であるトポロジカル結晶絶縁体^{注4)}は2012年に発見された比較的新しい物質群で、従来のトポロジカル絶縁体が時間反転対称性によってトポロジカル表面状態が生じているのに対して、トポロジカル結晶絶縁体では結晶の鏡映対称性があること（鏡に写したときの像が実際の結晶と一致すること、図1は代表物質であるテルル化錫SnTeの結晶の例）によって表面状態が生じるという違いがあります。トポロジカル結晶絶縁体においては、強磁性を付与した場合の表面状態の応答が異なると予測され、量子異常ホール効果も通常のトポロジカル絶縁体とは異なる現れ方を示す可能性が指摘されているにもかかわらず、実際にトポロジカル結晶絶縁体に強磁性を付与された場合に表面状態がどのようなになるかは明らかにされていませんでした。

研究内容と成果

本研究チームは、トポロジカル結晶絶縁体の代表物質であるSnTeと身近な強磁性体である鉄とを、別々の層として積層、接合した単結晶ヘテロ接合^{注5)}の試料を作製し、鉄の強磁性の性質のSnTe側への「染み出し」を利用して、本来は磁石の性質を持たないSnTeの表面状態に強磁性の性質を付与することに成功しました。この「染み出し」を利用する方法は、「研究の背景」で挙げたような鉄の原子をSnTe中にドーピングする方法に比べて、結晶の内部に欠陥を発生させず高品質の状態を保ったままSnTeに強磁性の性質を付与できると考えられます。作製したヘテロ構造試料に対して、中性子を用いた測定により試料構造内部の磁化（磁石の性質の強さ）の分布を調べ、SnTeの表面から2nm程度の深さの領域が強磁性となっていることを明らかにしました。

強磁性の評価は、図2のような偏極中性子反射率法によって行いました。実験は、大強度陽子加速器施設（J-PARC）物質・生命科学実験施設（MLF）に設置されている偏極中性子反射率計（SHARAKU-写楽）にて実施しました。この方法では、試料の深さ方向の磁化の分布を知ることができます。中性子の粒子自体も磁石としての性質（スピン）を持つため、スピンの向きをそろえて試料に対して浅い角度で当てると、試料の磁化の大きさと向きに応じて反射強度が変化し、その反射率を解析することで試料の磁化の分布が分かります。また中性子は、結晶中の原子核でも反射されるため、原子分布の正確な情報も同時に得られます。反射率から求めた構造と磁化の深さ方向の分布を図3に示します。鉄からSnTeへ向けて界面で構造（緑）と磁化（黄色）の減衰の仕方が異なっており、その違いは両者の差（黒色）を取ることでより明瞭に見ることができます。この黒色の曲線のピークが、染み出しによってSnTeの表面からの内部にかけて誘起された強磁性ということになります。今回の結果では、強磁性は鉄との境界面からSnTe

側に 2 nm 程度の深さまで染み出しており、またその染み出しは温度上昇とともに減少するものの、室温まで保たれていることが明らかになりました。トポロジカル結晶絶縁体においてこのような強磁性の染み出しが明らかにされたのは本研究が初めてであり、トポロジカル結晶絶縁体においても量子異常ホール効果などの実現によるデバイス応用の可能性が示されたと言えます。

今後の展開

今後は、鉄と SnTe とのヘテロ構造試料に対し、中性子を用いた磁化測定以外の測定手法も組み合わせ、境界面付近の磁化の染み出しをより詳しく調べることを計画しています。加えて、低温・磁場中の電気抵抗・ホール測定を行い、SnTe の表面状態への強磁性付与により出現すると期待される量子異常ホール効果の観察を試みます。また、本研究で得られた結果を基に、磁化の染み出しの大きさを決定するメカニズムや温度依存性を支配する物質のパラメーターを探索し、それらが最適となるような物質の組み合わせを検討します。これにより、量子異常ホール効果などのより高温での観測が可能となり、実用的な低消費電力デバイスの実現に近づくと期待されます。

参考図

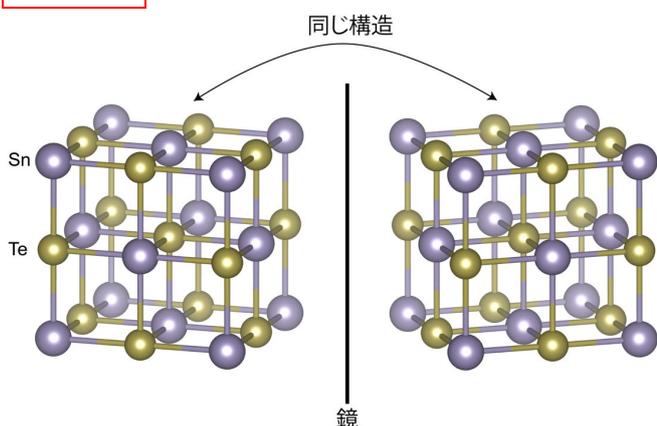


図 1：トポロジカル結晶絶縁体 SnTe の結晶構造（岩塩型構造）と鏡映対称性。結晶の特定の面に鏡を置いて結晶を映すと元の結晶と一致する（鏡映対称性）。この性質が、SnTe の表面でトポロジカル表面状態が生じる起源となる。

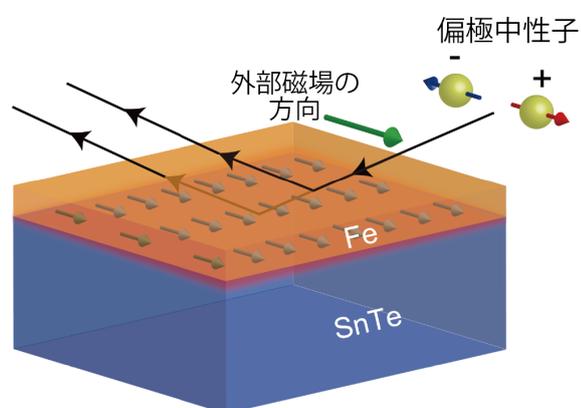


図 2：偏極中性子反射率法による測定の模式図。スピンのそろった中性子のビームを浅い角度で入射し、試料で反射させる。反射された中性子の強度を詳しく解析することで、試料中の磁化の大きさや向きの深さ方向の分布が精密に分かる。

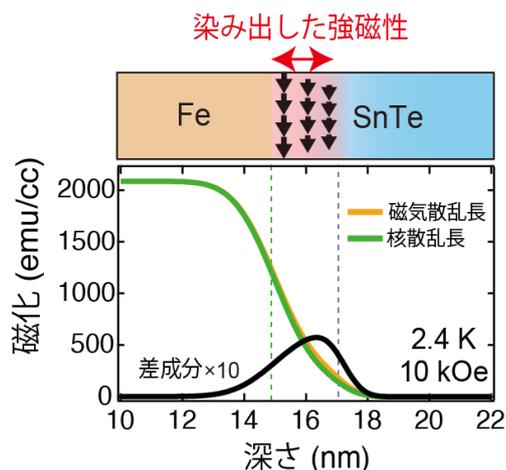


図3：鉄 (Fe) と SnTe の接合の模式図と、境界面付近で生じる磁化分布の様子。中性子が結晶中の原子核で反射される場合と磁気モーメント (磁石の性質) で反射される場合の反射強度から求めた構造と磁化の分布の深さ依存性を示す。測定温度は 2.4K (マイナス 271°C)。黄色と緑色の曲線の差 (黒色の曲線) が強磁性の SnTe 層内部への染み出しを表しており、上図では染み出しのある領域を赤色で示している。赤色の領域にある矢印は界面磁化の大きさを模式的に示したもので、本来磁化を持たない SnTe 層に強磁性が染み出していることを表す。

用語解説

注1) トポロジカル表面状態

トポロジカル絶縁体は、内部は絶縁体で電気が流れないが、結晶表面には電気が流れる金属的な状態があることが特徴で、この表面の状態のこと。この表面状態では、電子のスピン (電子の磁石としての性質を考えたときの向き) が運動方向と垂直な向きにそろっており、また不純物などによる散乱を受けずに高速で運動するという特徴がある。

注2) 量子異常ホール効果

強磁性物質に電流を流すと磁化 (磁石の性質の強さ) の大きさに比例したホール抵抗 (電流に対して垂直方向の電圧) が生じる。この現象は、磁石の性質を持たない物質における (正常な) ホール効果と対比して、異常ホール効果と呼ばれる。強磁性となったトポロジカル絶縁体においては、異常ホール効果におけるホール電圧が量子化により飛び飛びの値を取るという特異な現象が生じ、これを量子異常ホール効果と呼ぶ。この異常ホール効果が発生している状態では、原理的にはエネルギーの消費なしに電流が流れるため、この状態を利用した超低消費電力の電子デバイスの実現が期待される。

注3) 磁気スキルミオン状態

主に磁性体中で、スピンの向きが渦状に配列した状態。このスピンの渦状の配列が安定に存在し、かつ一塊の粒子のように運動する場合があることが報告されており、この渦状配列の存在や向きを利用した磁気メモリへの応用が期待されている。

注4) トポロジカル結晶絶縁体

トポロジカル絶縁体の一種で、結晶の鏡映対称性がトポロジカル表面状態をもたらすような物質群。電子の運動における時間反転対称性が基となる従来のトポロジカル絶縁体とは、強磁性を付与した時の表面状態の応答が異なると予想されている。

注5) ヘテロ接合

異なる種類の物質を接合した構造を指す。本研究では、鉄と SnTe という異種の物質を接合した試料を研究の対象とした。

研究資金

本研究は、科研費 基盤研究 B (課題番号: 18H01857, 20H02616)、基盤研究 A (16H02108)、若手研究 (B) (26870086)、挑戦的研究 (萌芽) (課題番号: 18K18732)、新学術領域研究 (課題番号: 16H00983、15K21717) の支援により実施されました。また、本研究の偏極中性子反射の測定は、J-PARC 物質・生命科学実験施設 (MLF) の一般課題 (No. 2017A0066) として実施されました。

掲載論文

【題名】 Direct Probe of the Ferromagnetic Proximity Effect at the Interface of SnTe/Fe Heterostructure by Polarized Neutron Reflectometry.

(偏極中性子反射法を用いた SnTe/Fe ヘテロ構造界面における強磁性近接効果の直接観察)

【著者名】 Ryota Akiyama* (秋山 了太/東京大学大学院理学系研究科 助教), Ryo Ishikawa (石川 諒/筑波大学大学院数理物質科学研究科 博士課程 (当時) /現 (株) アルバック 大阪大学アルバック未来技術協働研究所), Kazuhiro Akutsu-Suyama (阿久津 和宏/総合科学研究機構 副主任技師), Ryosuke Nakanishi (中西 亮介/東京大学大学院理学系研究科 修士課程 (当時)), Yuta Tomohiro (友弘 雄太/筑波大学大学院数理物質科学研究科 修士課程 (当時)), Kazumi Watanabe (渡邊 和己/東京大学大学院理学系研究科 修士課程 (当時)), Kazuki Iida (飯田 一樹/総合科学研究機構 副主任研究員), Masanori Mitome (三留 正則/物質・材料研究機構 グループリーダー), Shuji Hasegawa (長谷川 修司/東京大学大学院理学系研究科 教授), and Shinji Kuroda (黒田 眞司/筑波大学数理物質系 教授)

【掲載誌】 The Journal of Physical Chemistry Letters (The American Chemical Society)

【掲載日】 2022 年 8 月 29 日

【DOI】 10.1021/acs.jpcclett.2c01478

問い合わせ先

【研究に関すること】

黒田 眞司 (くろだ しんじ)

筑波大学数理物質系 教授

TEL: 029-853-5365

Email: kuroda@ims.tsukuba.ac.jp

URL: https://www.ims.tsukuba.ac.jp/~kuroda_lab/index.html

【取材・報道に関すること】

筑波大学広報局

TEL: 029-853-2040

E-mail: kohositu@un.tsukuba.ac.jp

東京大学大学院理学系研究科・理学部 広報室

TEL : 03-5841-0654

E-mail : kouhou.s@gs.mail.u-tokyo.ac.jp

総合科学研究機構 中性子科学センター 利用推進部 広報担当

TEL : 029-219-5300

E-mail : press@cross.or.jp