

酸化物界面におけるスキルミオンの電界制御

ー界面設計による高密度スピントロニクスに向けてー

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界面研究グループの大内祐貴研修生（東京大学大学院工学系研究科博士課程3年）、松野丈夫専任研究員、川崎雅司グループディレクター（東京大学大学院工学系研究科教授）らの共同研究グループ[※]は、原子レベルで制御可能な酸化物界面において、磁化とスキルミオン^[1]に由来する輸送特性を電界で大きく制御することに成功し、スピントロニクス^[2]デバイス設計の新たな指針を見いだしました。

電子の持つスピン^[3]をエレクトロニクスに役立てるスピントロニクスが注目を集めています。そのためにスピンと電子の運動を結びつけるスピン-軌道相互作用^[4]が重要な因子となっており、なかでも異常ホール効果^[5]とトポロジカルホール効果^[6]という2種類のホール効果^[5]がスピン-軌道相互作用に由来する興味深い磁気輸送現象として盛んに研究されています。この二つの効果を高密度スピントロニクスデバイスに展開するには、磁界や電流注入ではなく電界で制御することが必要になります。しかし、電界が遮蔽される金属強磁性体（磁石）においてはそれが困難であるという問題がありました。

今回、共同研究グループは、強磁性体 SrRuO₃ による異常ホール効果に加えて、非磁性体 SrIrO₃ の強いスピン-軌道相互作用から生成されるスキルミオンに由来するトポロジカルホール効果も示す界面構造を、SrTiO₃ 基板上に作製しました。原子レベルで薄膜の積層を制御し、SrRuO₃ と SrIrO₃ の積層の順序を入れ替えたところ、SrRuO₃/SrIrO₃/SrTiO₃ の順で積層したときのみ、異常ホール効果とトポロジカルホール効果の両方で電界効果^[7]が観測されました。SrTiO₃ 基板はゲート絶縁体^[7]を兼ねるため、今回の観測は強磁性体とゲート絶縁体との間に強いスピン-軌道相互作用を持つ物質を挿入することで、強い電界効果を実現できることを意味しています。

本成果は今後、磁化やスキルミオンを磁気メモリ^[8]として使う際の設計指針となることが期待できます。また、スピン-軌道相互作用に由来する現象はホール効果以外にも数多く存在するため、それらを電界で制御しデバイスへ応用する際にも有用な成果といえます。

本研究は、英国のオンライン科学雑誌『Nature Communications』（1月15日付け）に掲載されました。

※研究チーム

理化学研究所 創発物性科学研究センター

強相関物理部門 強相関界面研究グループ

研修生 大内 祐貴 (おおうち ゆうき)

(東京大学大学院工学系研究科 博士課程3年)

専任研究員 松野 丈夫 (まつの じょうぶ)

客員研究員 小塚 裕介 (こづか ゆうすけ)

(東京大学大学院工学系研究科 講師)

客員研究員 打田 正輝 (うちだ まさき)

(東京大学大学院工学系研究科 助教)

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)

統合物性科学研究プログラム 創発光物性研究ユニット

ユニットリーダー 小川 直毅 (おがわ なおき)

強相関物理部門 強相関物性研究グループ

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)

1. 背景

高密度スピントロニクスデバイスには、スピんに起因する電子の輸送特性を電界で制御することが必須です。そのような磁気輸送現象の例として、異常ホール効果とトポロジカルホール効果が注目を集めています。異常ホール効果は金属強磁性体における磁化に比例するホール効果であるのに対し、トポロジカルホール効果は金属磁性体(磁石)中における特殊な磁気渦構造であるスキルミオンの密度に比例するホール効果です。

これらは共にスピン-軌道相互作用に由来し、前者は波数空間(運動量空間)での電子構造の位相幾何学(トポロジー)、後者は実空間でのスピン構造のトポロジーに関連しています。これらのホール効果の電界制御に興味は持たれますが、金属磁性体とゲート絶縁体が隣接した構造では、電界が金属磁性体で遮蔽されるため効果的な電界制御は困難とされてきました。

この問題を解決するための突破口として、酸化物磁性体を用いることが考えられます。2016年に松野専任研究員らが開発した2種類のペロブスカイト構造^[9]酸化物 SrRuO_3 (Sr:ストロンチウム、Ru:ルテニウム、O:酸素)と SrIrO_3 (Ir:イリジウム)からなる界面構造が有望です^{注1)}。強磁性体 SrRuO_3 における異常ホール効果に加え、界面での空間反転対称性の破れ^[10]と非磁性体 SrIrO_3 の強いスピン-軌道相互作用から生成されるスキルミオンによる、トポロジカルホール効果も観測されます。

注1) 2016年7月9日プレスリリース「酸化物界面を用いたスキルミオン制御」
http://www.riken.jp/pr/press/2016/20160709_1/

2. 研究手法と成果

共同研究グループは、原子レベルで薄膜を積み重ねるパルスレーザー堆積法技術^[11]を用いて SrRuO₃ と SrIrO₃ からなる界面構造を SrTiO₃ (Ti:チタン) 基板の上に作製しました (図 1)。基板はゲート絶縁体の役目を兼ねており、電界効果を大きくするため、膜厚は SrRuO₃ では 1.2~2 ナノメートル (nm、1nm は 10 億分の 1 メートル)、SrIrO₃ では 0.8nm と薄くしました。基板から薄膜に至るまで一貫してペロブスカイト構造が保たれ、原子レベルで理想的界面を作製することができました。

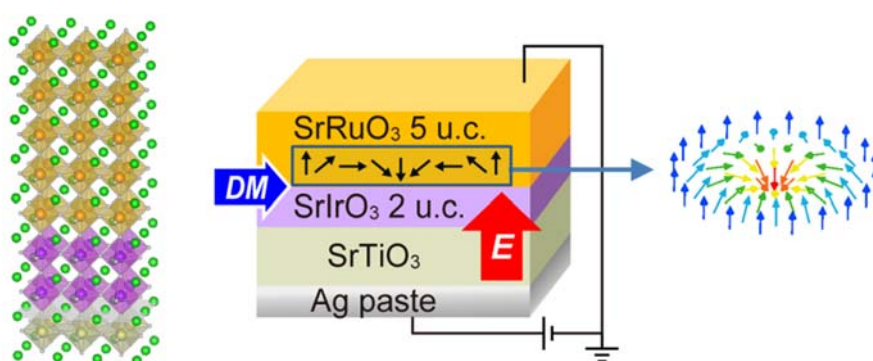


図 1 作製した界面構造の模式図

- 左：基板、界面の結晶構像を模式図で示したものの。一貫してペロブスカイト構造が保たれる理想的な界面となっている。
- 中：電界効果の模式図。バックゲート方式のため、ゲート絶縁体 SrTiO₃ に近いところで大きな電界 (E) が加えられる。 DM はジャロシンスキー・守谷相互作用を示す。
- 右：界面に生じたジャロシンスキー・守谷相互作用により誘起されるスキルミオンの磁気渦構造。

ここで重要になるのは積層の順番です。積層構造を SrIrO₃/SrRuO₃/SrTiO₃ と SrRuO₃/SrIrO₃/SrTiO₃ の 2 種類作製し、ホール抵抗^[5]の電界効果を測定したところ、後者の構造でのみ電界効果が観測されました。特に、異常ホール効果に対しては電界で符号を変えることに成功しました (図 2 左)。異常ホール効果の符号反転は通常は磁化反転の結果ですが、今回は磁界も磁化も反転していませんに関わらず、電界によって電子の軌道が曲げられています (図 2 右)。

SrIrO₃ を挿入しない場合にはこのような大きな電界効果は観測されないことから、強いスピン-軌道相互作用を持つ SrIrO₃ をゲート絶縁体と強磁性体の間に置くことが異常ホール効果の電界効果に対して本質的に寄与することが明らかとなりました。

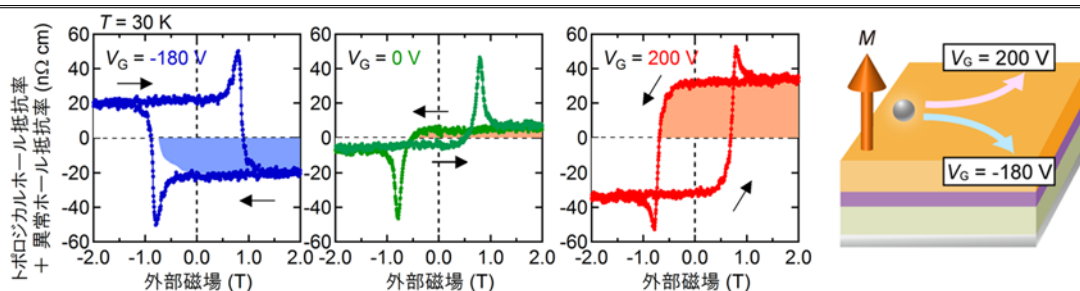


図2 異常ホール効果の電界効果

左：30 K (約-243°C) で測定した異常ホール効果の電界効果 (V_G はゲート電圧を示す。-180 V、0 V、+200 V)。塗りつぶした部分がトポロジカルホール効果を除去した異常ホール効果のみの寄与を表し、その符号がマイナス (青) からプラス (赤) へと電界によって反転していることが分かる。
右：異常ホール効果の電界効果を示す模式図。磁化 M を反転させずに電界のみで異常ホール効果の符号を反転させている。

さらに、トポロジカルホール効果でも $\text{SrRuO}_3/\text{SrIrO}_3/\text{SrTiO}_3$ の構造でのみ電界効果を観測しました (図3)。界面に生じるジャロシンスキー・守谷相互作用^[12] およびそれによって作られたスキルミオン構造がトポロジカルホール効果の起源であることは、すでに2016年に松野専任研究員らが明らかにしていました^{注1)}。観測された電界効果は、スキルミオンの数密度変化に対応すると考えられます。

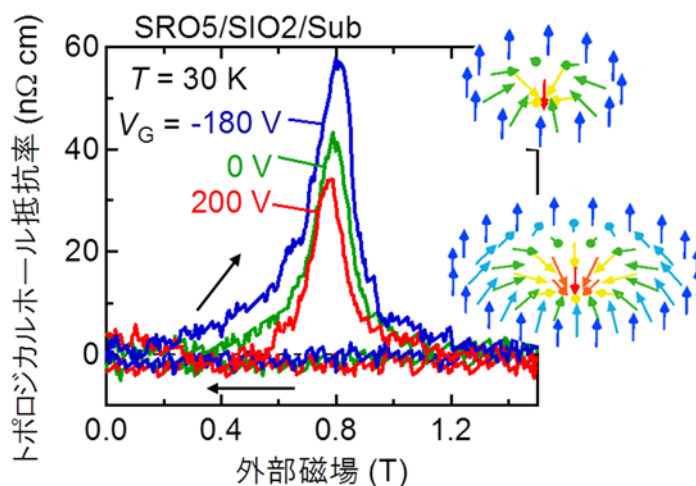


図3 トポロジカルホール効果の電界効果

ホール効果から異常ホール効果の寄与を取り除いたものがトポロジカルホール効果である。観測された明瞭な電界効果は、スキルミオンの数密度の変化に対応する。

3. 今後の期待

原子レベルで制御できる酸化物の界面において、強いスピン-軌道相互作用を持つ物質を挟み込むことにより、磁気輸送特性の電界効果を増強できることが

明らかになりました。これは、磁化やスキルミオンを磁気メモリとして使う際の設計指針となる結果です。

今回の二つのホール効果以外にも磁気異方性^[13]や磁壁^[14]などスピン-軌道相互作用に起因する磁気現象は数多くあるため、それらを電界で制御しデバイスへ応用する際にも本成果は有用であるといえます。

4. 論文情報

<タイトル>

Electric-field control of anomalous and topological Hall effects in oxide bilayer thin films

<著者名>

Yuki Ohuchi, Jobu Matsuno, Naoki Ogawa, Yusuke Kozuka, Masaki Uchida, Yoshinori Tokura & Masashi Kawasaki

<雑誌>

Nature Communications

<DOI>

10.1038/s41467-017-02629-3

5. 補足説明

[1] スキルミオン

近年、磁性体中で観測された nm 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。

[2] スピントロニクス

エレクトロニクス（電子の電荷としての性質を利用した電子工学）の概念を拡張し、電子の持つ電荷とスピンの性質の両方を利用する電子工学。スピンエレクトロニクスとも呼ばれ、次世代の省電力・不揮発性の電子素子の動作原理を提供すると期待されている。

[3] スピン

電子の持つ自由度の一つで、微小な磁石として働く。電子の自転として理解できる。

[4] スピン-軌道相互作用

電子の自転運動によって生じる「スピン角運動量」と電子が原子核の周りを周回運動すること（軌道運動）によって生じる「軌道角運動量」との間に働く相対論的相互作用。原子番号が大きい（重い）元素ではより大きくなる。

[5] 異常ホール効果、ホール効果、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、これらに加えてトポロジカルホール効果が現れる。

[6] 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。

[7] 電界効果、ゲート絶縁体

電場(電界)によって材料の表面や接合界面に電荷が集まる効果。ゲート絶縁体と呼ばれる絶縁体を二つの電極で挟んで電圧をかけると(ゲート電圧)、正の電圧がかかった電極にはプラスの電荷が、負の電圧がかかった電極にはマイナスの電荷が蓄積する。この電極の片方を半導体で置き換えると蓄積した電荷は半導体の中を自由に動き回る伝導キャリアとして振る舞う。このように電界によって伝導キャリアを集める手法を電界効果と呼び、電圧によって半導体中の電流の流れを制御するトランジスタに広く使われている(電界効果トランジスタ)。

[8] 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。

[9] ペロブスカイト構造

遷移金属酸化物の代表的な結晶構造の一つ。酸化物の場合、 ATO_3 や A_2TO_4 (Aはランタノイドあるいはアルカリ土類金属、Tは遷移金属)の組成式で表される。電子機器に用いるチップコンデンサではTにチタンが入った酸化物が用いられ、高温超伝導はTに銅が入った酸化物で出現する。

[10] 空間反転対称性の破れ

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いう。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。

[11] パルスレーザー堆積法技術

原料となる多結晶ターゲットに、高出力パルスレーザーを照射することでプラズマ化し、基板上に固体として堆積させることにより薄膜を作る方法。

[12] 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一つ。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、隣接スピン間の中心が、空間反転対称性の中心でない場合に生じる。

[13] 磁気異方性

磁性体の磁化は向きやすい方向（磁化容易軸）と向き難い方向（磁化困難軸）を持ち、磁気異方性を示す。磁気異方性は、磁化の方向によりエネルギーが異なるために生じる。

[14] 磁壁

磁性体の磁化状態は一般に、磁化の向きが一様にそろった領域が複数集まって構成される。この磁化の向きが一様にそろった領域を、磁区と呼ぶ。隣り合う磁区の間では磁化の向きは異なり、その境界で磁化は緩やかに変化しながらつながる。このような磁区の境界領域を磁壁と呼ぶ。

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

強相関物理部門 強相関界面研究グループ

研修生 大内 祐貴 (おおうち ゆうき)

(東京大学大学院工学系研究科 博士課程3年)

専任研究員 松野 丈夫 (まつの じょうぶ)

客員研究員 小塚 裕介 (こづか ゆうすけ)

(東京大学大学院工学系研究科 講師)

客員研究員 打田 正輝 (うちだ まさき)

(東京大学大学院工学系研究科 助教)

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)

統合物性科学研究プログラム 創発光物性研究ユニット

ユニットリーダー 小川 直毅 (おがわ なおき)

強相関物理部門 強相関物性研究グループ

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)



左から大内研修生、松野専任研究員、小塚客員研究員、打田客員研究員



左から川崎グループディレクター、小川ユニットリーダー、十倉グループディレクター

<機関窓口>

理化学研究所 広報室 報道担当

東京大学大学院工学系研究科 広報室
