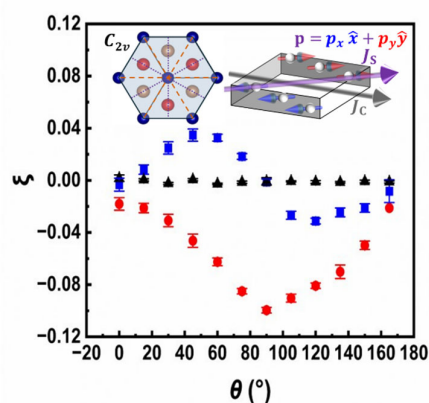


エピタキシャル CrSb が生み出す結晶学的スピン軌道トルク

ー 結晶方位を利用した次世代スピントロニクスデバイスへ ー

概要

京都大学化学研究所の Tseng Chih-Hsiang 博士後期課程学生（研究当時）、輕部修太郎特定准教授、小野輝男教授らの研究グループは、同研究所の佐藤良太特定助教、寺西利治教授らの研究グループ、米国ネブラスカ大学リンカーン校の Kirill Belashchenko 教授、日本電気株式会社の矢作裕太研究員と共同で、交替磁性体^{注1)}として注目される CrSb において、電流が磁化に与えるスピントルク^{注2)}の大きさと方向が結晶方位に強く依存することを明らかにしました。結晶方位を制御した CrSb 薄膜をエピタキシャル成長^{注3)}し、スピントルク強磁性共鳴測定によって2つの CrSb 結晶面を比較した結果、従来のスピンホール効果では説明できないトルク成分を観測し、その主要な起源が交替磁性固有の効果ではなく CrSb/強磁性体界面の結晶・界面对称性にあることを示しました。トルク効率は Pt や Ta などの重金属に匹敵し、結晶の向きを新たな設計自由度として利用するスピントロニクスデバイスや、将来の磁気ランダムアクセスメモリ（MRAM）^{注4)}への応用に向けた指針となります。本研究成果は、2026 年 9 月 10 日午前 10 時（ドイツ時間）に国際学術誌「*Advanced Functional Materials*」にオンライン掲載されます。



研究概念図：交替磁性体 CrSb に電流を流すと、結晶の向きに応じて生成されるスピントルクの大きさと方向が変化します。本研究では、この結晶方位依存性が主に CrSb/強磁性体界面の結晶学的・界面的対称性に由来することを明らかにしました。©京都大学化学研究所 小野研究室

1. 背景

近年、AI や IoT の発展に伴い、高速かつ低消費電力で動作する情報デバイスへの要求が高まっています。磁気ランダムアクセスメモリ (MRAM) などの磁気デバイスでは、電流によって磁化の向きを制御する「スピントルク」が重要な役割を担います。従来、スピントルクの生成には Pt や Ta などの重金属が広く用いられてきましたが、高い結晶対称性を持つ一般的な材料では、生成できるスピンの向きやトルクの方に強い制約があります。一方、交替磁性体は、全体の磁化がほぼゼロでありながら大きなスピン分裂を持ち得ることから、新しいスピン流^{注5)}源として注目されています。さらに、結晶の対称性そのものを利用すれば、従来とは異なる方向のスピントルクを生み出せる可能性があります。しかし、交替磁性体において、交替磁性に固有なスピン流生成機構と、結晶・界面の対称性に由来するスピントルクが実験的にどのように現れるのかは十分に明らかになっていませんでした。そこで本研究では、交替磁性体として注目される CrSb を用い、結晶方位とスピントルクの関係を詳細に調べました。

2. 研究手法・成果

本研究では、マグネトロンスパッタリング法を用いて、結晶方位を制御したエピタキシャル CrSb/強磁性体ヘテロ構造を作製し、スピントルク強磁性共鳴 (ST-FMR) 測定用デバイスに加工しました。ST-FMR は、試料に高周波交流電流を流し、CrSb から隣接する強磁性層に働くスピントルクによって生じる磁化の共鳴運動を電気的に読み取る手法です (図 1)。外部磁場と電流の角度を変えながら共鳴信号を測定することで、スピントルクの向きと大きさを成分ごとに評価しました。さらに、電流を流す方向を CrSb の結晶軸に対して変えた複数のデバイスを比較し、スピントルクの結晶方位依存性を調べました。

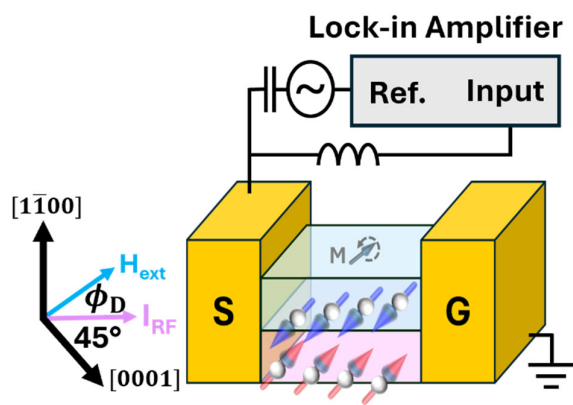


図 1 ST-FMR 測定の模式図。

測定の結果、CrSb では、一般的な重金属で生じる従来型のスピントルク効果だけでは説明できないスピントルクが観測されました。特に、電流の向きに対して通常とは異なる方向にスピントルク成分が現れ、その大きさは結晶に対して電流を流す方向を変えると大きく変化しました（図 2）。また、2 つの異なる結晶面を比較すると、一部のダンピングライクスピントルクの向き（符号）が反転しました（図 2）。このような振る舞いは、従来のスピントルク効果やラシュバ-エデルシュタイン効果では説明できません。さらに、最大のダンピングライクスピントルク効率は Pt や Ta などの重金属と同程度に達しました。対称性解析の結果、これらの特徴は、CrSb 表面が持つ C_{2v} 点群の結晶対称性によって許される「結晶学的スピントルク」として説明できることが分かりました。

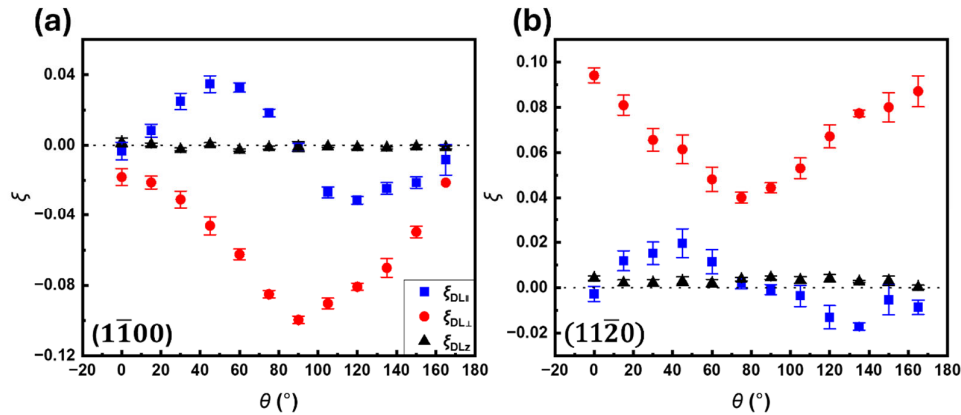


図 2 CrSb (1-100) および CrSb (11-20) におけるスピントルク効率の結晶方位依存性。

さらに、CrSb 膜の厚さを変えてもスピントルクの大きさに系統的な変化が見られないことや、2 つの結晶面で一部のトルクの符号が反転することから、観測された非従来型スピントルクは CrSb 内部の通常のスピントルク効果ではなく、主として CrSb/強磁性体界面で生じていると考えられます。一方、交替磁性に固有な磁気スピントルク効果やスピンスプリッター効果に対応する明瞭な寄与は、今回の試料では確認されませんでした。これは、異なる磁区からの信号が互いに打ち消し合うことや、CrSb における歪みによるスピンスプリッター効果が比較的弱いことが要因として考えられます。これらの結果は、交替磁性体のスピントルクを理解・設計するうえで、交替磁性のバンド分裂だけでなく、結晶方位や界面对称性を考慮することが重要であることを示しています。

3. 波及効果、今後の予定

本研究は、交替磁性体におけるスピントルク生成を考えるうえで、交替磁性に由来するスピントルクそのものだけでなく、結晶・界面の対称性が支配的な役割を果たし得ることを実験的に示しました。これは、交替磁性体のスピントロニクス応用に新たな視点を与える成果です。また、結晶方位を変えることでスピントルクの方向と大きさを制御できることから、「結晶の向き」をデバイス設計の自由度として利用できる可能性を示しています。将来的には、MRAM を含む電流駆動型の磁気デバイスにおいて、従来材料では得にくいスピントルク方向を実現するための材料・界面設計へつなげることが期待されます。

今後は、他の交替磁性体候補物質への展開に加え、圧電基板や元素置換などを用いて結晶歪みを意図的に制御し、交替磁性に固有なスピントルク生成効果をより強く引き出すことを目指します。また、結晶対称性、界面構造、歪み、ネールベクトルの向きを組み合わせることで、より高効率で自由度の高いスピントルク生成と、低消費電力スピントロニクスデバイスへの応用を進めていきます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究の一部は、大学院教育支援機構 SPRING プログラム、京都大学化学研究所・国際共同拠点、科学研究費補助金 (JP22J12061, JP24H00007)、JST 戦略的創造研究推進事業さきがけ (JPMJPR22B4) などの助成を受けて行われました。

<用語解説>

注 1) 交替磁性体：反強磁性体のように、原子レベルの磁気モーメントが互いに反対方向を向いて全体の磁化が打ち消し合う一方、電子のエネルギーバンドには強磁性体に似た大きなスピン分裂が現れる新しい磁性相です。結晶の対称性とスピンの状態が強く結び付いていることが特徴です。

注 2) スピントルク (スピン軌道トルク)：電子のスピン角運動量が磁性体の磁化に受け渡されることで生じる、いわば「磁化を動かす力」です。スピン軌道相互作用を利用して電流から生じるものをスピン軌道トルクと呼び、磁化の向きを電氣的に制御するために利用できます。

注 3) エピタキシャル成長：基板となる結晶の原子配列や結晶方位にそろえて薄膜結晶を成長させる手法です。本研究では、この方法によって CrSb の結晶方位を制御しました。

注 4) 磁気ランダムアクセスメモリ：磁性体の磁化状態を利用して情報を記録する不揮発性メモリです。高速動作と高い耐久性を持ち、次世代メモリの有力な候補として注目されています。

注 5) スピン流：電子の電荷そのものの流れではなく、電子のスピン角運動量が運ばれる流れです。磁性体に流れ込むと、磁化にスピントルクを与えることができます。

<論文タイトルと著者>

タイトル：Crystallographic Spin-Orbit Torque from Epitaxial CrSb (エピタキシャル CrSb から生じる結晶学的スピン軌道トルク)

著 者：Chih-Hsiang Tseng, Shutaro Karube, Kirill Belashchenko, Yoichi Shiota, Yuta Yahagi, Ryusuke Hisatomi, Ryota Sato, Toshiharu Teranishi, Teruo Ono

掲 載 誌： *Advanced Functional Materials* DOI : 10.1002/adfm.77835