



2025年5月12日

報道関係者各位

慶應義塾大学
科学技術振興機構 (JST)

シリコンとアルミニウムでプラチナを超えるスピントロニクス材料を開発 ～レアメタルに依存しない次世代メモリへの応用に期待～

福岡大学の洞口泰輔助教（研究当時、慶應義塾大学理工学部特任助教）と慶應義塾大学理工学部の能崎幸雄教授、物質・材料研究機構（NIMS）の介川裕章グループリーダー、中国科学院大学カブリ理論科学研究所の松尾衛准教授らによる研究グループは、日常的に使われるシリコンとアルミニウムという一般的な素材をナノメートルレベルで組み合わせた「**ナノ傾斜材料**」が、レアメタルのプラチナを超える効率で磁気トルクを生み出すことを発見しました。これは、電子の流れに生じる回転運動を活用する全く新しい原理（図1）による成果であり、レアメタルに依存せずに次世代メモリや電子機器の省電力化・高性能化を可能にする環境負荷の少ないサステナブル技術の開発に寄与します。本成果は、2025年5月9日（米国東部時間）に米国科学誌 *Science Advances* に掲載されました。

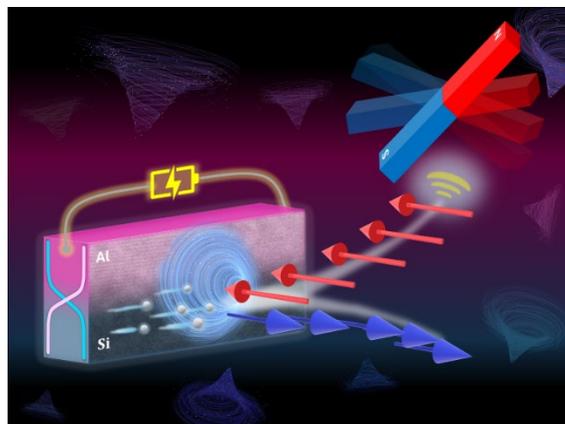


図1 ナノ傾斜材料の軌道渦によるスピンの流と磁気トルク発現の概念図

【発表のポイント】

- ✓ **レアメタル不要で高性能**：シリコンとアルミニウムという身近な素材で、プラチナを超える磁気制御性能を実現
- ✓ **原子レベルの精密制御がカギ**：原子数個分の厚みで素材の構成比を調整することで、性能を最大化
- ✓ **次世代メモリへ直結**：低電力・高耐久な次世代メモリ素子（以下、MRAM）（注1）などへの応用が期待され、省エネルギー社会の実現に貢献

【研究の背景と意義】

人工知能 (AI) やモノのインターネット化 (IoT) の進化に伴い、情報処理の高速化・大容量化・省電力化が求められる中、「スピントロニクス」(注2) と呼ばれる技術が注目されています。これは、電子の持つ「スピン」という磁気的な性質を使って、より速く、より効率的に情報を処理しようというものです。この技術の中核となるのが「スピン流」(注3) と呼ばれる磁気の流れですが、従来のスピン流生成は**プラチナなどのレアメタル**に依存していました。しかし、これらの素材は高価で、日本では安定確保が難しいため、新たな代替技術の開発が急務でした。

今回の研究は、**地球上に豊富に存在するシリコンとアルミニウム**という身近な材料で、レアメタルを超える性能を実現した点で、環境・資源問題にも応える画期的な成果です。

【研究の内容と成果】

研究チームは、**シリコン(半導体)とアルミニウム(金属)を原子レベルで交互に堆積**し、その組成をナノメートルスケール(1ナノメートル=1ミリの100万分の1)で徐々に変化させる「**ナノ傾斜構造**」(注4)を開発しました(図2)。この構造により、電子の流れに生じる「**軌道渦**」と呼ばれる回転運動を局所的に強め、これが**磁気トルク**(注5)の源となることを突き止めました。

生成されるスピントルク効率(=単位電流あたりの磁気トルクの強さ)を測定したところ、組成傾斜の幅を最適化することで、**従来材料であるプラチナを上回る性能**を発揮することが明らかになりました(図3)。この成果は、これまでのスピントロニクス理論では考えられていなかった**新しいスピン流生成メカニズム**を示すものです。

さらに、材料の電気伝導性(=電気の通しやすさ)とスピントルク効率を掛け合わせた「**性能指数**」を評価した結果、**プラチナを大きく上回る**ことが分かりました(図4)。この指標は、**高速で省エネなMRAM**に必要な性能であり、実用材料としてのポテンシャルの高さを示しています。

【今後の展望】

今回のナノ傾斜材料は、**MRAM**や**スピントランジスタ**(注6)など、**次世代メモリや演算素子に直結**する応用が期待されます。また、

- **レアメタル不要** → 安価で安定供給が可能
- **ナノ構造の制御だけで性能が変わる** → 材料設計の自由度が高い
- **半導体材料にも直接スピン流を注入可能** → 半導体スピントロニクスの新展開へ

といった特長により、**環境負荷の少ないサステナブル技術**の開発に寄与します。

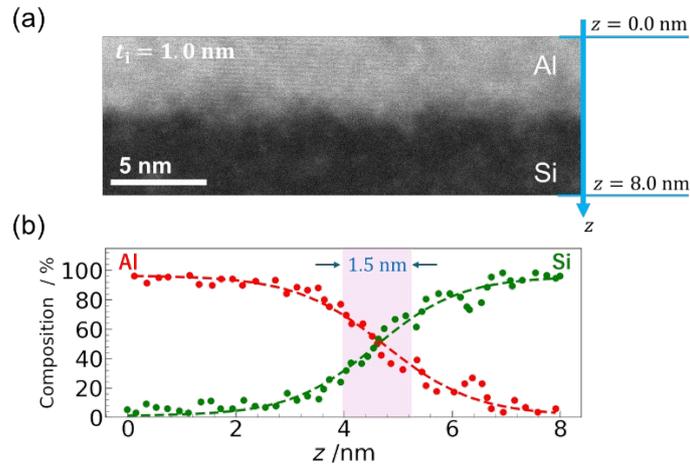


図2 開発したナノ傾斜材料（交互堆積層の厚さ $t_l = 1.0$ nm）の(a)断面写真、および図(a)右の矢印方向 (z 軸方向)における(b)シリコン (Si) とアルミニウム (Al) の組成分布。観察した組成分布を双曲線関数(破線)で近似して求めた組成傾斜の幅 L は、交互堆積層の厚さ t_l によって制御できることが分かった。

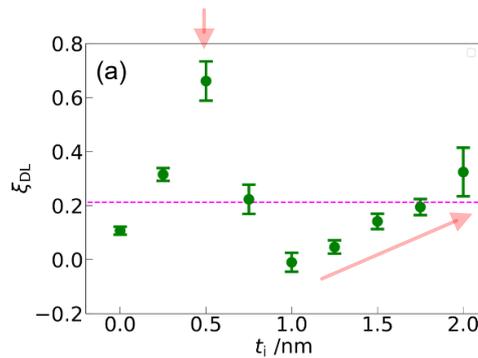


図3 ナノ傾斜材料のスピントルク効率（縦軸）と交互堆積層の厚さ（横軸）の関係。ピンク色の点線は従来材料（プラチナ）のスピントルク効率。交互堆積層の厚さによって組成傾斜の幅を最適化することで、プラチナを上回る性能を発揮することが分かった。

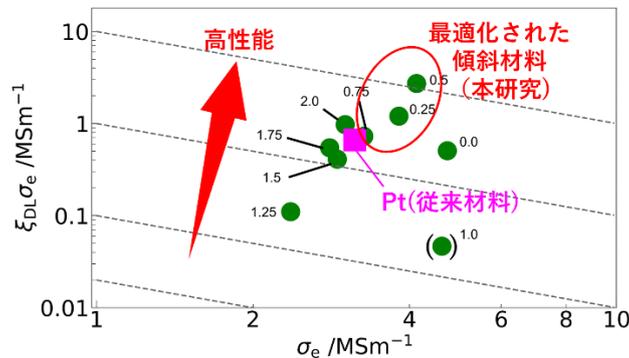


図4 ナノ傾斜材料の性能指数。横軸が電気伝導率（省電力性の指数）、縦軸がスピントルク効率。破線は、性能指数（=電気伝導率×スピントルク効率）の等高線を表し、赤矢印の方向ほど高性能な材料であることを示す。ピンク色の■は従来材料(プラチナ)の性能指数。

【論文情報】

論文名：Nanometer-thick Si/Al gradient materials for spin torque generation

著者名：Taisuke Horaguchi, Cong He, Zhenchao Wen, Hayato Nakayama, Tadakatsu Ohkubo, Seiji Mitani, Hiroaki Sukegawa, Junji Fujimoto, Kazuto Yamanoi, Mamoru Matsuo, Yukio Nozaki

掲載誌：Science Advances

DOI：10.1126/sciadv.adr9481

本研究は、科学技術振興機構（JST） 戦略的創造研究推進事業 CREST「実験と理論・計算・データ科学を融合した材料開発の革新（研究総括：細野 秀雄）」研究領域における「ナノ構造制御と計算科学を融合した傾斜材料開発とスピンドバイス応用」（課題番号：JPMJCR19J4）、日本学術振興会（JSPS） 科学研究費助成事業 学術変革領域（A）「キメラ準粒子の物理」（課題番号：JP24H02233）、基盤研究（A）「結晶構造制御による非断熱的磁気回転効果の微視的機構解明と巨大スピントルクの発現」（課題番号：JP24H00322）、および研究活動スタート支援「Si/Al 界面のナノスケール傾斜制御と高効率スピンドバイス生成に関する研究」（課題番号：JP22K20359）の支援により実施されました。

【用語の説明】

（注1） MRAM

磁気を使った次世代メモリ。速くて壊れにくく電源を切っても情報が消えないので待機電力が不要であり、省エネルギーにつながる。

（注2） スピントロニクス

電子の持つ「スピン」という量子特性（小さな磁石のような性質）を使って、情報を記録・処理する次世代技術。

（注3） スピン流

電子のスピン（磁気）だけを流す流れ。電気と違ってエネルギーロスが少ない。

（注4） ナノ傾斜構造

原子レベルで成分比を徐々に変えた特殊な構造。性質が連続的に変化する。

（注5） 磁気トルク

磁石の方向を回転させる力。これを使ってメモリの ON/OFF を切り替える。

（注6） スピントランジスタ

磁気を使った次世代トランジスタ。従来の電界効果に加えてスピンの向きによる電子制御により、デバイスサイズの超小型化、機能の書き換え、省電力化が可能になる次世代技術。

※ご取材の際には、事前に下記までご一報くださいますようお願い申し上げます。
※本リリースは文部科学記者会、科学記者会、各社科学部等に送信させていただいております。

〈研究に関する問合せ〉

慶應義塾大学理工学部物理学科
教授 能崎 幸雄 (のざき ゆきお)
Tel : 045-566-1692
E-mail : nozaki@phys.keio.ac.jp

〈報道に関する問合せ〉

慶應義塾広報室
増田 祥子 (ますだ さちこ)
Tel : 03-5427-1541
E-mail : m-pr@adst.keio.ac.jp

科学技術振興機構広報課

Tel : 03-5214-8404
E-mail : jstkoho@jst.go.jp

〈JST 事業に関する問合せ〉

科学技術振興機構戦略研究推進部グリーンイノベーショングループ
安藤 裕輔 (あんど うすけ)
Tel : 03-3512-3531
E-mail : crest@jst.go.jp