



東北大学



平成 23 年 6 月 27 日
国立大学法人東北大学金属材料研究所
独立行政法人日本原子力研究開発機構

あらゆる物質で利用可能な新たなスピントロニクス注入手法を発見

— 次世代の省エネルギーデバイス開発に向けて大きな進展 —

【発表のポイント】

- あらゆる物質への応用が可能な新しいスピントロニクス注入の原理を発見
- 電界制御により従来型スピントロニクス注入の1000倍以上のスピントロニクス流を作り出すことに成功
- 高い効率と汎用性により、次世代スピントロニクス材料開発・省エネルギーデバイス開発に期待

国立大学法人東北大学金属材料研究所の安藤和也助教、齊藤英治教授、独立行政法人日本原子力研究開発機構先端基礎研究センターの前川禎通センター長らは、あらゆる物質へ応用可能な新たなスピントロニクス^{注1)}注入手法を発見しました。

近年、電子の電気的性質の流れである電流の代わりに、電子の磁気的性質の流れ「スピントロニクス流」を利用するスピントロニクス^{注2)}が次世代の省エネルギー電子情報技術として期待されています。量子コンピュータや超低消費電力情報処理デバイスといった、スピントロニクスを利用した次世代電子デバイスを実現するためには、あらゆる物質に利用できる汎用的なスピントロニクス流の注入方法を確立することが最重要課題です。しかしスピントロニクス流を作り出すことは容易ではなく、これまで物理的な制限から非常に限定された物質にしかスピントロニクス流を注入をすることはできませんでした。

今回、安藤助教らは磁気ダイナミクスを利用することで、上記制限を一切受けない極めて汎用的なスピントロニクス注入手法を発見しました。さらにこの方法は電界により制御可能であることを明らかにし、これにより従来用いられてきた方法の1000倍以上のスピントロニクス流を作り出すことに成功しました。

本研究成果によって、金属だけでなく半導体・有機物・高温超伝導体といったあらゆる物質への高効率なスピントロニクス注入が容易に可能となり、スピントロニクスデバイス設計の自由度が大きく拡大されることで、環境負荷の極めて小さい次世代省エネルギー電子技術への貢献が期待されます。

本研究は、独立行政法人日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター、ケンブリッジ大学キャベンディッシュ研究所と共同で行われたものです。

本研究成果は、英国科学誌「Nature Materials(ネイチャーマテリアルズ)」のオンライン版(6月26日付:日本時間6月27日)に掲載されます。

【本件に関する問い合わせ先】

(研究内容について)

国立大学法人東北大学金属材料研究所	量子表面界面科学研究部門	助教	安藤 和也	TEL: 022-215-2023
国立大学法人東北大学金属材料研究所	量子表面界面科学研究部門	教授	齊藤 英治	TEL: 022-215-2021
独立行政法人日本原子力研究開発機構	先端基礎研究センター	センター長	前川 禎通	TEL: 029-282-5093

(報道担当)

国立大学法人東北大学金属材料研究所	総務課庶務係主任	小玉 亨	TEL: 022-215-2181, FAX: 022-215-2184
独立行政法人日本原子力研究開発機構	広報部報道課長	上原 勇相	TEL: 03-3592-2346, FAX: 03-5157-1950

【背景と経緯】

現代のエレクトロニクスデバイスは電子の電氣的性質（電荷）の流れである電流により動作しています。しかし、電流を利用した場合、発熱（ジュール熱^{注3)}）による巨大なエネルギー損失を原理的に避けることができず、素子構造の微細化の限界とともに近年極めて重大な問題と認識されています。このため次世代の省エネルギー社会を担う電子デバイスの実現には、全く新しい原理に基づく電子技術の開拓が急務となっています。

電子は電氣的性質の他に磁氣的性質（スピン）を持っており、この磁氣的性質の流れ「スピン流」を作り出すことも可能です。スピン流にはジュール熱によるエネルギー損失機構がないため、電流をスピン流に置き換えることができれば、電流を用いた場合とは桁違いの超省電力電子デバイスを実現することが可能となります。しかし、スピン流を作り出すことは容易ではなく、特に電気抵抗率の高い物質に関しては、インピーダンスミスマッチ^{注4)}と呼ばれる物理的制限によりスピン流を注入することが原理的に不可能でした。この制限を回避する唯一の方法は高品質な絶縁膜をスピン流注入源との界面に成長させることでしたが、このような良質な絶縁膜を作成するためには莫大な労力・時間が必要であり、スピントロニクス材料の開拓、スピントロニクスデバイスの設計のために、あらゆる物質へ応用可能な汎用的且つ高効率なスピン流注入手法が強く求められていました。

今回発見されたスピン流注入手法は上記物理的制限を一切受けない極めて汎用的なものです。さらにこのスピン流注入は電界により制御可能であることが明らかとなりました。この発見によって従来の1000倍以上のスピン流を作り出すことが可能となり、スピントロニクスデバイス設計の自由度が飛躍的に広がりました。

【研究の内容】

今回の研究では、磁性金属($\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$)と半導体(GaAs ^{注5)})から成る素子を作製し、半導体層における磁気・電気変換現象（逆スピンホール効果^{注6)}）を用いることで、磁性金属中の磁気のダイナミクスを利用した半導体へのスピン流注入の検出に初めて成功しました。さらに半導体中へ注入されるスピン流量は磁性金属と半導体の間に電界を与えることで制御可能であることが明らかとなりました。今回見出されたスピン流注入手法を用いれば、物質の電気抵抗率によるスピン流注入の制限を受けないため、半導体だけでなく有機物や高温超伝導体といったあらゆる物質への高効率なスピン流注入が可能となります。

本研究の一部は、内閣府の最先端・次世代研究開発支援プログラム、独立行政法人科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業「プロセスインテグレーションによる次世代ナノシステムの創製」の一環として実施されました。

【原理の説明】

従来のスピン流注入は、電子のスピンの向きに偏りがある磁性金属を注入したい物質に接合し、この間に電圧をかけ磁性金属中のスピン偏極した電子を移動させることで実現していました。この場合、磁性金属（電気抵抗率：小）と注入したい物質（たとえば半導体）（電気抵抗率：大）の電気抵抗率が大きく異なることに由来するインピーダンスミスマッチという強い物理的制限の

ため、原理的にほとんどの電子スピンは界面で失われてしまい、高い効率でスピンを注入することは困難でした。今回発見した方法は、電圧の代わりに磁性金属中の磁気ダイナミクスを利用することで、電子のスピンだけを直接駆動する「スピン圧」をスピン流を注入したい物質に直接与えてスピン流を作り出すものであり、上記物理的制限を一切受けないものです。このため従来の方法と比較して桁違いのスピン流を作り出すことが容易に可能となりました。

【今後の展開】

環境負荷の小さなスピントロニクスデバイス開発には、汎用的且つ高効率なスピン流注入手法の確立が最重要課題のひとつです。あらゆる物質へ応用可能なスピン流源が確立されれば、スピントロニクス材料の開拓、スピントロニクスデバイスの設計の自由度が劇的に広がります。

本研究によって初めて開拓されたスピン流注入手法は、スピン流注入の物理的制限を根本的に回避するものであり、これまでごく限られていたスピン流注入材料を半導体・有機物・高温超伝導といったあらゆる物質へと拡張します。本研究成果に基づく超低電力電子技術により、次世代の省エネルギー社会実現への貢献が期待できます。

【参考図】

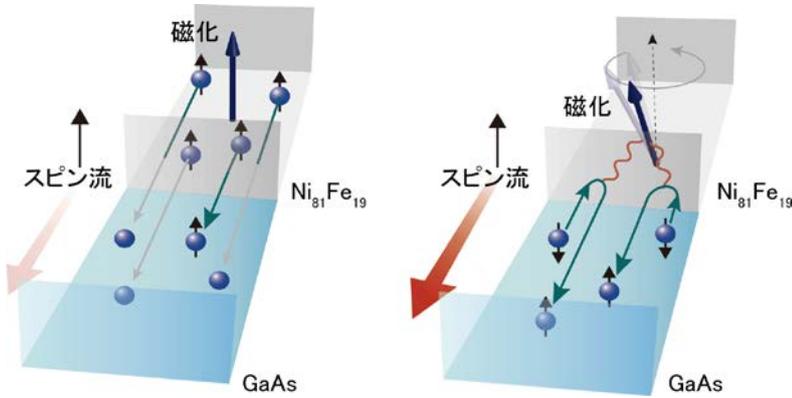


図1 従来のスピンの注入方法(左図)と本研究により発見されたスピンの注入方法(右図)。

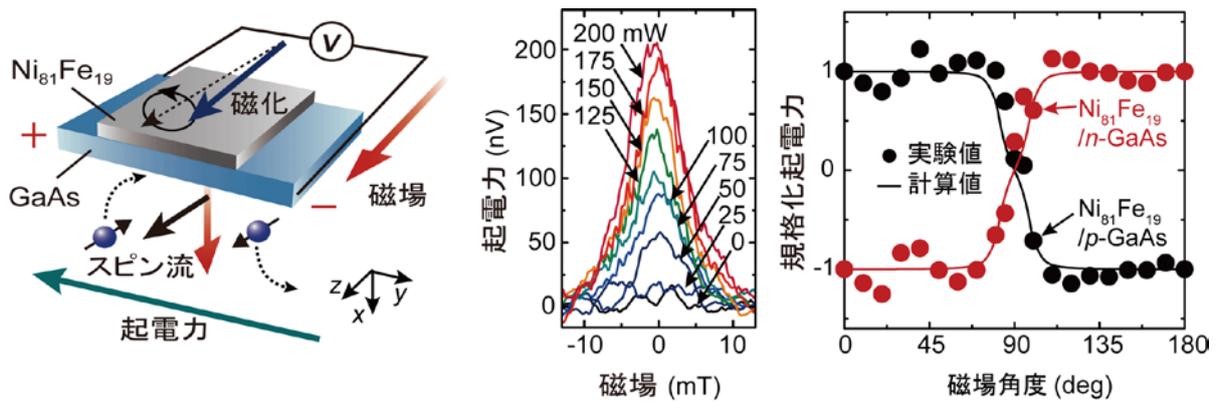


図2 スピンの注入と検出。磁性金属($\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$)と半導体(GaAs)から成る素子において、 $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ 中の磁気のダイナミクスを励起するとGaAs層にスピンの注入され電圧が発生する。

【用語解説】

注1) スピン流

スピンは電子が有する自転のような性質である。電子スピンは磁石の磁場の発生源でもあり、スピンの状態には上向きと下向きという2つの状態がある。電流が流れることなく、スピンだけが流れているのがスピン流であり、上向き状態のスピンを持った電子と下向き状態のスピンを持った電子がそれぞれ逆方向に流れることによる。

注2) スピントロニクス

電子の磁氣的性質であるスピンを利用して動作する電子デバイスを研究開発する分野である。電子スピンは応答が早く、熱エネルギーの発生も非常に少ないため、これを利用したスピントロニクス素子は、超高速、超低消費電力の次世代電子素子の最有力候補とされている。

注3) ジュール熱

金属や半導体に電流を流すと、電気抵抗により熱が発生する。このジュール熱の存在により、金属や半導体ではエネルギーの損失なしに電流を流すことはできない。

注4) インピーダンスミスマッチ

スピン流を注入する物質とスピン流注入源のそれぞれの電気抵抗率が同程度であるときスピン流の注入効率が最大となり、電気抵抗率が大きく異なると注入効率は著しく小さくなる。一般的にはスピン注入源として電気抵抗率の小さな金属が用いられるため、電気抵抗率が大きな半導体や有機物といった物質にスピンを注入することは困難であり、この問題をインピーダンスミスマッチと呼ぶ。

注5) GaAs

半導体材料の一種でSiよりも電子移動度（電子の動きやすさ）が高いため、これを利用した半導体素子は高速・低消費電力で動作する。現在は携帯電話などに利用される小型の高周波素子や半導体レーザーの材料として用いられている。

注6) 逆スピンホール効果

スピン流と垂直な方向に電圧が発生する現象。スピンが物質中を流れると、流れを横向きに曲げる力が働く「スピン軌道相互作用」という現象が以前から知られている。このとき、上向き状態のスピンと下向き状態のスピンでは逆向きの力を受ける。スピン流では上向き状態のスピンと下向き状態のスピンが逆向きに流れているため、両者とも同じ方向に曲げられる結果となり、スピン流の流れと垂直な方向に電圧が発生することになる。スピン情報と電気情報をつなぐ現象として、スピントロニクスにおいて重要である。

【論文名・著者名】

“Electrically tunable spin injector free from the impedance mismatch problem”

(電氣的に制御可能なインピーダンスミスマッチフリースピン流注入源)

K. Ando, S. Takahash, J. Ieda, H. Kurebayashi, T. Trypiniotis, C. H. W. Barnes, S. Maekawa,
and E. Saitoh

<お問い合わせ先>

<研究に関すること>

安藤 和也 (アンドウ カズヤ)
東北大学金属材料研究所 助教
〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1
Tel: 022-215-2023
E-mail: ando@imr.tohoku.ac.jp

齊藤 英治 (サイトウ エイジ)
東北大学金属材料研究所 教授
〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1
Tel: 022-215-2021
E-mail: eizi@imr.tohoku.ac.jp

前川 禎通 (マエカワ サダミチ)
日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター センター長
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4
Tel: 029-282-5093
E-mail: maekawa.sadamichi@jaea.go.jp

<報道担当>

東北大学金属材料研究所 総務課庶務係主任 小玉 亨 (コダマ トオル)
〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1
Tel: 022-215-2181, Fax: 022-215-2184
E-mail: imr-som@imr.tohoku.ac.jp

日本原子力研究開発機構 広報部 報道課長 上原 勇相 (ウエハラ ユウスケ)
〒100-8577 東京都千代田区内幸町 2 丁目 2 番 2 号富国生命ビル 1 9 階
Tel: 03-3592-2346, Fax: 03-5157-1950
E-mail: uehara.yusuke@jaea.go.jp