



平成 27 年 1 月 7 日

科学技術振興機構 (JST)
東 北 大 学
日 本 原 子 力 研 究 開 発 機 構

絶縁体に光を照射してスピン流を創り出す新しい原理を発見 ～新原理・新機能のエネルギー変換技術開発に道～

ポイント

- 光からスピン流を生成できる新しい原理、現象を発見。
- 光、熱、振動、電磁波などのさまざまなエネルギーを単一デバイスの駆動源として用いることが原理的に可能に。
- 新しいエネルギー変換技術や融合研究分野の形成に貢献。

JST 戦略的創造研究推進事業において、東北大学 金属材料研究所の内田 健一 准教授らは、特定の金属微粒子を含む磁石に可視光を照射することで、スピン^{注1)} (磁気) の流れを生成できる新しい原理を実証しました。

近年、持続可能な社会に向けた環境、エネルギー問題への取り組みが活性化する中、身近に存在する光、熱、振動、電磁波などをエネルギー源として利用するような、新しいエネルギー変換原理の創出が期待されています。例えば、クリーンで信頼性の高いエネルギー変換技術の候補として、太陽電池や熱電素子、圧電素子などを用いた発電技術が盛んに研究されています。

今回、内田准教授らは、特定の金属微粒子への光照射で誘起される「表面プラズモン^{注2)}」と呼ばれる電子の集団運動を磁石の中で励起することで、光のエネルギーをスピン流に変換することに世界で初めて成功しました。また、これまでにスピン流を電流に変換する技術も確立しており、光のエネルギーから電流を生成する新たなエネルギー変換原理が創出されたこととなります。

これまでに確立されてきた熱や音波、電磁波によるスピン流生成と同様の材料で、今回実証した光-スピン流生成も発現することが分かりました。このことから、電流やスピン流の駆動力として同時に利用可能なエネルギー源の選択肢をさらに広げられることが明らかになりました。今後の研究の進展により、表面プラズモンとスピン流を融合した新しい研究分野の形成や、外部電源を必要としない電気、磁気デバイスの研究開発に貢献することが期待されます。

本研究は、東北大学 原子分子材料科学高等研究機構および金属材料研究所の齊藤 英治 教授 (日本原子力研究開発機構 先端基礎センター 客員グループリーダー兼任)、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、安立 裕人 副主任研究員らと共同で行ったものです。

本研究成果は、2015年1月8日 (英国時間) 発行の英国科学誌「Nature Communications」においてオンライン公開されます。

本成果は、以下の事業・研究領域・研究課題によって得られました。

戦略的創造研究推進事業 個人型研究 (さきがけ)

研究領域 : 「エネルギー高効率利用と相界面」

研究総括 : 笠木 伸英 (JST 研究開発戦略センター 副センター長・上席フェロー/東京大学 名誉教授)

研究課題名 : 「スピン流を用いた革新的エネルギーデバイス技術の創出」

研究代表者 : 内田 健一 (東北大学 金属材料研究所 准教授)

研究期間 : 平成24年10月~平成30年3月

<研究の背景と経緯>

現在のエレクトロニクスは、電子の電荷の流れである電流によって機能しています。近年、電荷に加えてスピンの性質も積極的に利用する「スピントロニクス」が次世代電子技術の有力候補として注目を集めています。このスピントロニクスを用いれば、電源を切ってもデータが消えない不揮発性のメモリーを構築可能であり、MRAM（磁気抵抗メモリー）やSTT-RAM（スピン注入メモリー）などがすでに製品化されています。さらに、電荷の流れとして電流が用いられてきたように、21世紀初頭に磁気の流れである「スピン流」の概念が確立し、その物理的な重要性や電流を伴わないスピン情報輸送機能から、世界中でスピン流の生成、検出、制御技術に関する研究が進められるようになりました。

このような状況の中、内田准教授らは2008年に磁性体に温度差をつけることによりスピン流が生じる現象「スピンゼーベック効果^{注3)}」を世界に先駆けて発見しました。2010年には、スピンゼーベック効果が金属や半導体のみならず絶縁体でも発現することが明らかになり、従来は利用できなかった絶縁体中の熱からもスピン流を取り出し、発電することを可能としてきました。2011年には、スピンゼーベック効果と同様の素子構造で音波からもスピン流を生成できることが見いだされました。

これまでのスピン流に関する研究の大部分は、情報伝送、演算やメモリー応用を意図したものでしたが、これらの成果によってスピン流をエネルギー変換や発電技術に利用するという新しい概念が生まれました。スピン流を用いたエネルギー変換の性能は、既存の技術や素子の水準に達していないのが現状ですが、

- ・ シンプルな薄膜構造のため、デバイスの設計自由度が高い
- ・ デバイスの基板、筐体でしかなかった絶縁体を利用可能
- ・ さまざまなエネルギー源を単一デバイス構造において同時利用可能

などの特徴があるため、特にスピンゼーベック効果を用いた新原理の熱電変換技術がにわかに注目を集めています。これまでに、半導体における光-スピン変換は実証されていましたが、絶縁体への光照射によるスピン流生成原理は実証されていませんでした。

<研究の内容>

今回の研究の概念図を（図1（a））に示します。特定の波長の可視光によって誘起された表面プラズモンと呼ばれる電子の集団運動を用い、絶縁体磁石に埋め込んだ金微粒子（図1（b））近傍に強力な電磁場を発生させ（図1（c））、この電磁場によりスピンの運動を効果的に駆動させることで、絶縁体磁石における光-スピン変換を初めて実現しました。

本実験では、絶縁体である磁性ガーネット（ $\text{BiY}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ ）薄膜^{注4)}の表面に白金（Pt）薄膜を接合した素子を用いました。この素子はスピンゼーベック効果の研究においても用いられていますが、今回の研究で用いた素子は従来と異なり、磁性ガーネット層にナノ（ナノは10億分の1）メートルサイズの金（Au）微粒子を埋め込んだ構造となっています（図1（b））。この素子に分光した可視領域の単色光を照射しながら、白金層に発生する電気信号の精密測定を行いました。

本研究で用いた素子に光を照射すると、入射光の波長が表面プラズモン共鳴条件を満たした際に金微粒子中の自由電子が集団運動し、それに伴って微粒子近傍に局在した強力な電磁場が発生します。すなわち金微粒子は光アンテナとして機能しており（図2（a））、増強された電磁場によって磁性ガーネット中のスピンの運動が励起された結果として、上部の白金薄膜中にスピン流が誘起されます（図2（b））。白金に注入されたスピン流は、「逆スピンホール効果^{注5)}」と呼ばれる固体中の量子相対論的效果によって起電力に変換されます。今回の実験では、この逆スピンホール効果によって生成された起電力を測定し、検出された信号が磁性ガーネットから生成されたスピン流に由来することを明らかにしま

した。さまざまな対照実験やシミュレーションを行うことで、光照射による発熱の効果を分離し、観測された信号は光が表面プラズモンを介してスピン流を励起する新しいプロセスによって生じていることを確認しました。

これまでの手法では、熱、音波や電磁波を用いてスピン流を生成していました。光とスピンの相互作用については、これまで半導体を用いて研究されてきましたが、今回の実証した効果は全く異なる物理原理に基づくものであり、初めて絶縁体磁石における光―スピン流変換が可能になりました。

＜今後の展開＞

本研究成果は、表面プラズモンをスピン流素子に導入した初めての例であり、これまで独立して研究されてきたスピントロニクス分野とプラズモニクス分野^{注6)}を融合した新しい研究分野の形成につながるものです。表面プラズモンとスピン流の相互作用に関する物理はこれまで全く研究されておらず、今後の研究によってさらなる新原理の解明や新機能の発現が期待されます。

今回実証した光―スピン流変換原理を実際のデバイスにおいて利用するためには大幅な効率向上が必要ですが、応用面における本成果の重要な点は、光、熱、音波、電磁波といったさまざまなエネルギー源を同様の素子構造においてスピン流や電流に変換可能であることを示したことにあります。充電、取り替え、燃料補給なしで長期間エネルギー供給が可能な電源としてエネルギーハーベスティング技術^{注7)}に関する研究開発と実証が活発に行われていますが、その最大の課題は常時利用可能な動力源の確保であり、これを実現するために複数のエネルギー源を同時利用できるデバイス構造の開発が求められています。スピン流を用いれば単一デバイスにおいてさまざまなエネルギー源を同時利用できるため、次世代の分散型発電・省エネルギー技術やスピndeバイスの駆動源としての応用につながる可能性があります。

<参考図>

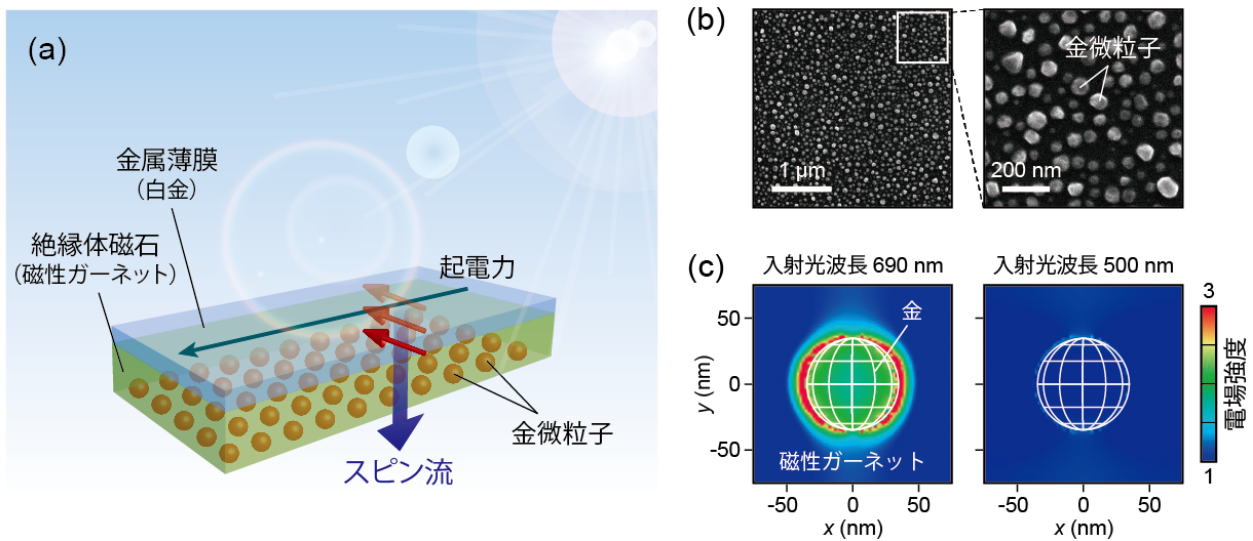


図 1 表面プラズモンを用いた光-スピン変換

- (a) 本実験に用いた素子の模式図。素子に可視光を照射すると、金微粒子中に励起された表面プラズモンを介して光とスピンの相互作用し、磁性ガーネットと白金の界面近傍にスピン流が生成される。このスピン流を起電力に変換することで、電気信号として観測した。
- (b) 走査型電子顕微鏡により撮影した金微粒子。直径 100 nm (ナノメートル) 以下の金微粒子が光アンテナとして作用する。
- (c) 金微粒子近傍の電磁場分布のシミュレーション結果。可視光域の波長 690 nm 近傍の光を照射すると表面プラズモン共鳴が生じるため、金微粒子の周りに局在した強力な電磁場が発生し (左図)、スピンの運動が励起される。表面プラズモン共鳴条件を満たさない波長 500 nm の光を照射した場合には、電磁場の増強効果は起こらない (右図)。

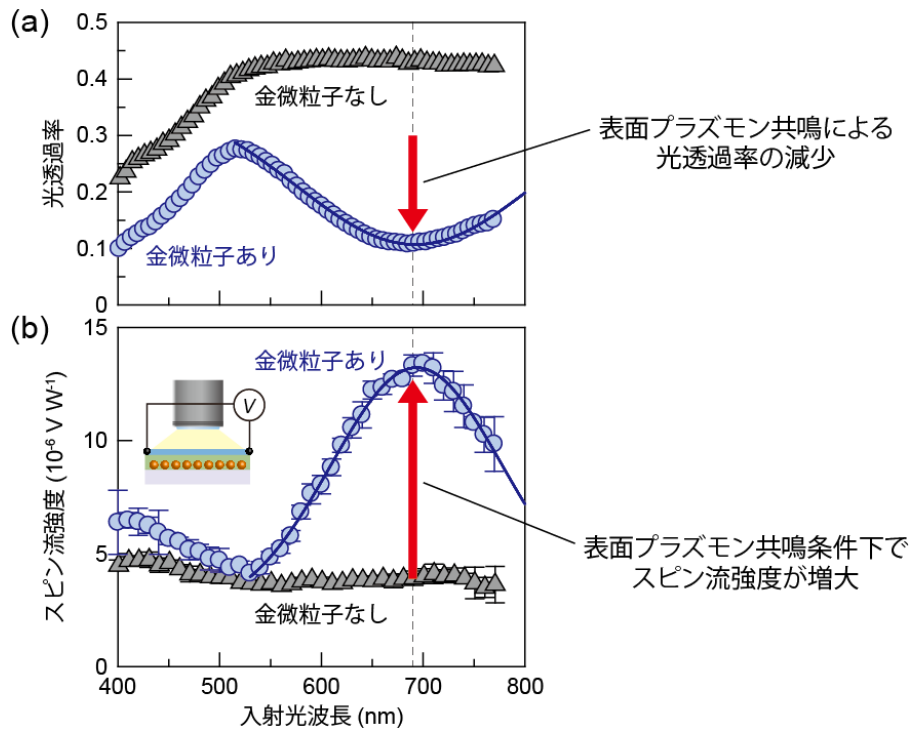


図2 本研究で用いた素子の光透過率とスピンの強度の波長依存性

- (a) 光透過率の入射光波長依存性。金微粒子を磁性ガーネット中に埋め込んだ素子では、入射光波長が690 nm近傍になると表面プラズモン共鳴によって光エネルギーが吸収され、光透過率が大きく減少する。
- (b) 白金層に生成されたスピンの強度の入射光波長依存性。表面プラズモン共鳴が生じた際に、スピンの強度が大きく増大していることがわかる。

<用語解説>

注1) スピン、スピン流

電子が持つ自転のような性質はスピンと呼ばれる。スピンの状態には上向きと下向きの2つがあり、スピンの方向に揃った物質が磁石になる。電流が流れることなくスピンだけが流れている状態がスピン流であり、上向きスピンを持った電子と下向き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って生じる。

注2) 表面プラズモン

金属表面の自由電子が光電場によって集団的に振動を起こす現象。自由電子の振動によって引き起こされる電場と光電場が共鳴する現象を表面プラズモン共鳴と呼ぶ。分子吸着を検出するためのセンサーの駆動原理として用いられている他、さまざまな応用機能が提案、実証されている。

注3) スピンゼーベック効果

磁性体に温度差を与えることによってスピン流が生成される現象。スピントロニクス分野において、汎用性の高いスピン流源としての応用が期待されるとともに、逆スピンホール効果^{注5)}と組み合わせることで熱電変換素子としての応用の可能性が示唆されている。

注4) 磁性ガーネット ($\text{BiY}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}$) 薄膜

組成式が $\text{RFe}_5\text{O}_{12}$ (R: 希土類元素、Fe: 鉄、O: 酸素) で表される化合物。本研究では、イットリウム鉄ガーネット ($\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$) のイットリウム (Y) をビスマス (Bi) で一部置換した材料であるビスマス置換イットリウム鉄ガーネット ($\text{BiY}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}$) を用いた。ビスマス置換イットリウム鉄ガーネットは大きな磁気光学効果を示す材料として知られている。

注5) 逆スピンホール効果

スピン流と垂直な方向に起電力が発生する現象。電子のスピンと軌道の相互作用により上向きスピンを持った電子と下向きスピンを持った電子が互いに逆方向に散乱されることによって生じる。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。

注6) プラズモニクス分野

表面プラズモンを積極的に利用することで、金属ナノ構造と光との相互作用に基づく応用技術の開発を目指す研究分野。スピントロニクスとともに、次世代のエレクトロニクス技術として期待されている。

注7) エネルギーハーベスティング技術

身の周りの環境から微小なエネルギーを収穫して電力に変換する技術の総称。環境発電とも呼ばれる。光・熱・振動・電磁波などのエネルギー源に対するさまざまな発電方式が提案、検証されている。

<論文タイトル>

“Generation of spin currents by surface plasmon resonance”

(表面プラズモン共鳴によるスピン流生成)

Ken-ichi Uchida, Hiroto Adachi, Daisuke Kikuchi, Shun Ito, Zhiyong Qiu, Sadamichi Maekawa, Eiji Saitoh

doi : 10.1038/ncomms6910

<お問い合わせ先>

<研究に関すること>

内田 健一（ウチダ ケンイチ）

東北大学 金属材料研究所 准教授
〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1
Tel : 022-215-2022 Fax : 022-215-2020
E-mail : kuchida@imr.tohoku.ac.jp

齊藤 英治（サイトウ エイジ）

東北大学 原子分子材料科学高等研究機構（AIMR）・金属材料研究所 教授
〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1
Tel : 022-215-2021 Fax : 022-215-2020
E-mail : saitoheiji@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 Fax : 029-282-5927
E-mail : maekawa.sadamichi@jaea.go.jp

<JSTの事業に関すること>

古川 雅士（フルカワ マサシ）

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
〒102-0076 東京都千代田区五番町 7 K's 五番町
Tel : 03-3512-3525 Fax : 03-3222-2063
E-mail : presto@jst.go.jp

<報道担当>

科学技術振興機構 広報課

〒102-8666 東京都千代田区四番町 5 番地 3
Tel : 03-5214-8404 Fax : 03-5214-8432
E-mail : jstkoho@jst.go.jp

水戸 圭介（ミト ケイスケ）

東北大学 金属材料研究所 総務課総務係
〒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

中道 康文（ナカミチ ヤスフミ）

東北大学 原子分子材料科学高等研究機構（AIMR） 広報・アウトリーチオフィス
〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1
Tel : 022-217-6146 Fax : 022-217-5129
E-mail : outreach@wpi-aimr.tohoku.ac.jp

中野 裕範（ナカノ ヒロノリ）

日本原子力研究開発機構 広報部報道課
〒100-8577 東京都千代田区内幸町 2-2-2 富国生命ビル 19 階
Tel : 03-3592-2346 Fax : 03-5157-1950
E-mail : nakano.hironori@jaea.go.jp