

わずか数原子層の金属膜で電氣的磁化操作効率を制御

—極薄磁性膜を用いた不揮発性メモリ・演算素子技術への展開に期待—

平成24年12月26日

独立行政法人 物質・材料研究機構

国立大学法人 東北大学

概要

1. 独立行政法人物質・材料研究機構（理事長：潮田 資勝）磁性材料ユニットの林 将光主任研究員らの研究グループは、国立大学法人東北大学省エネルギー・スピントロニクス集積化システムセンター、電気通信研究所及び、原子分子材料科学高等研究機構の大野 英男教授らと共同で、極薄の強磁性金属層を非磁性金属層と酸化物層で挟んだ磁性ナノヘテロ接合¹⁾において、非磁性金属層の膜厚をわずか数原子層程度変化させるだけで、強磁性金属層における磁化方向の電氣的制御効率を大きく変えられることを見出した。
2. 磁性体の磁化の向きを情報の記憶ビット²⁾として用い、その磁化の向きを電氣的に制御するスピントロニクス素子³⁾は、電源を切っても情報が保持される不揮発性メモリ⁴⁾や不揮発性論理演算素子⁴⁾への応用の期待が高まっている。スピントロニクス素子実現に向けて課題となっているのは、いかに低電力で磁化方向を制御できるかという、情報の「省エネルギー書き込み」技術である。
3. 研究グループは今回、膜厚が数原子層程度のコバルト鉄ボロン（CoFeB）からなる磁性層を、タンタル（Ta）金属層と酸化マグネシウム（MgO）絶縁層で挟んだ磁性ナノヘテロ接合に電流を流したときの磁化に作用する力（トルク）の大きさが各層の膜厚によってどのように変化するかを詳細に調べた。その結果、電流が誘起するトルクには、電流と平行な成分と直交する成分が存在することを発見した。さらに、Ta層の膜厚がわずか1ナノメートル増えるだけでトルクの大きさが倍増することがわかった。トルクの大きさは電氣的に磁化を制御するのに必要な電力に直結しており、大きければ大きいほど低電力で磁化反転を誘起できる。
4. 今回の成果は、磁性ナノヘテロ接合においてスピンホール効果などのスピン流生成機構を利用した新たな磁化制御の基盤技術につながるものであり、不揮発性素子を適用した論理演算素子集積回路の高性能化・省電力化などへの応用が期待される。
5. 本研究成果は、日本時間平成24年12月24日3:00にイギリスの科学雑誌「Nature Materials」のオンライン速報版で公開される。

研究の背景

磁性体の磁化の向きを情報の記憶情報として用い、それを電氣的に制御するスピントロニクス素子は、電源を切っても情報が保持される不揮発性メモリや不揮発性論理演算素子への応用が可能であり、それらを適用した集積回路の高性能化・省電力化への期待が高まっている。スピントロニクス素子実現に向けて課題となっているのは、いかに低電力で磁化を制御できるかという、情報の「省エネルギーな書き込み」技術である。従来用いられていた磁場による情報の書き込み方式では消費電力が大きく素子の高記録密度化に対応できないので、それに代わる書き込み方式としてスピン注入磁化反転⁵⁾が開発された。スピン注入磁化反転とは、情報を保持している磁性体素子に直接電流を流すことで磁化の向きを制御する手法であり、電流の向きを変えることで磁化の向きを反転させることができる。スピン注入磁化反転を利用することで、メモリの高記録密度化に対応でき、また消費電力も軽減できるため、高速で動作する磁気ランダムアクセスメモリや、記録密度が高い磁壁移動メモリ⁶⁾の開発につながってきている。

しかしながら、スピントルクを利用した上記デバイスのさらなる高性能化のためには、磁化方向の制御に必要な電流の低減が求められている。このような中で最近、膜厚がわずか数原子層程度の膜を積層した磁性ナノヘテロ接合において、磁性層の磁化方向を低電力で操作できるとする報告が相次いでいる。スピン注入磁化反転において磁化方向を電氣的に操作する際、重要となるのは電子の「スピン」の向きをそろえたスピン分極電流⁷⁾である。スピン分極電流を磁性体に導入し、その大きさがある一定量を超えた場合、磁性体の磁化方向が反転する。スピン注入磁化反転では、1つの磁性体を使って電流を「スピン分極」させ、それをもう一方の磁性体に導入して磁化方向の操作を行う。一方、最近の磁性ナノヘテロ接合における低電力磁化反転は、磁性体が1つしかないため、スピン注入磁化反転のようなスピン分極電流を利用した反転機構とは別の現象が起きていると推測される。現在その現象の鍵を握るとされているのが、「スピン流⁸⁾」と呼ばれる量である(図1参照)。

物質に電流を流すとすべての(伝導)電子は一方向に動く。一方、スピン流ではスピンの向きによって電子が動く方向が異なる。例えば上向きと下向きのスピンをもった電子はそれぞれ、右向き、左向きに動く。全体で見ると電子の移動は正味ゼロとなるが、スピンだけに着目すると「流れ」が生じているように見える。磁性体で観測される異常ホール効果⁹⁾はスピン流が生成された結果生じるものであるとされている。また非磁性体においてもスピン流は観測されている。スピン分極電流は一般的に磁性体でのみ発現するが、スピン流は磁性体に限らず様々な物質で観測されている。

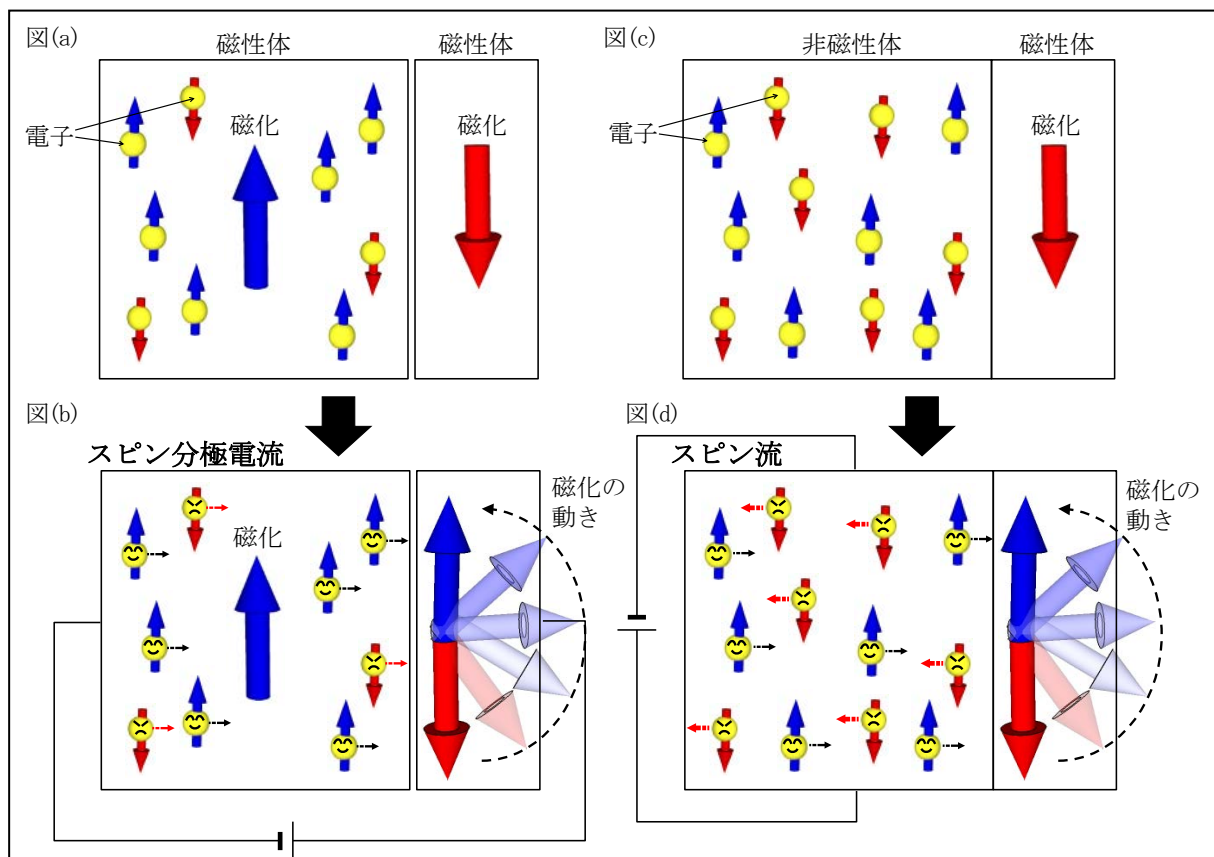


図1. スピン分極電流とスピンの違い。大きな矢印は磁性体の磁化、黄色の球（電子）にささった小さな矢印は電子のスピンの向きを表す。左図はスピン注入磁化反転のようにスピン分極電流を用いて磁化反転が起きる様子を模式的に表したものである。スピン分極電流は磁性体の中で生成される。図(a)に示すように、磁性体の中では磁化と同じ方向のスピンの（ここでは青色スピン）を持った電子が多いと考えることができる。図(b)のように素子に電圧を印加すると、電子が左側の磁性体から右側の磁性体に移動する（これは電流が流れていることを意味する）。左側の磁性体から右側の磁性体に入ってくる電子の多くは、スピンの向きが上向き（青色）であるため、このような電流を「スピン分極電流」と呼ぶ。右側の磁性体に十分な量のスピン分極電流が入ると、スピントルクと呼ばれる効果によって磁化が反転する（下向きから上向きになる）。より低電流で磁化反転を誘起するためには、スピン分極度が高い電流（ここでは赤色のスピンが少ない状態）を右側の磁性体に流す必要がある。

右図はスピン流を利用して磁化反転が誘起される様子を模式的に表したものである。スピン流は様々な手法で生成することができるが、ここでは非磁性体の「スピンホール効果」によって誘起されるスピン流を例に示す。非磁性体の中の電子スピンの向きは、磁性体のように偏っておらず、例えば上向きと下向きのスピンを持った電子が同数ある。図(d)のように素子に電圧を印加すると電子が動く。電圧印加によって、すべての電子は図(d)では下方向に動く（その様子は図示していない）。さらにスピンホール効果の影響によって、スピンの向きによって電子の移動方向が変わる。ここでは、上向き（青）のスピンを持った電子は右側に、下向き（赤）のスピンを持った電子は左側に動く。その結果、右側に磁性体には上向きのスピンを持った電子のみが流入し、磁化反転にとって「悪玉」である下向き（赤）の電子スピンは磁性体から遠ざかる。十分なスピン流が右側の磁性体に流入すると磁化反転が起きる。

磁化の向き

電子の流れ

スピンの流れ

磁性層

金属層

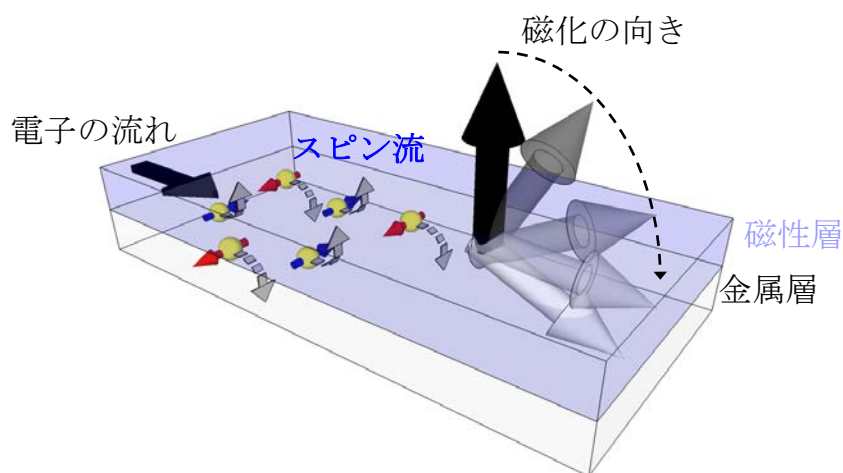


図 2. スピンホール効果を利用した磁化反転の模式図。ここでは例として、非磁性層／磁性層の 2 層膜において、電流を膜面水平方向に流すだけで磁化反転が誘起されることを模式的に表した。上図では、すべての電子は電界印加によって右方向に移動するが、スピンホール効果によって、青スピンは上に、赤スピンは下に動く。磁性層に進入した青スピン（スピンの流）が十分な大きさになると、磁性層の磁化が反転する。反転した磁化を元に戻すには、電流の向きを変えればよい。

成果の内容

物質・材料研究機構と東北大学の研究グループは今回、膜厚が数原子層程度のコバルト鉄ボロン (CoFeB) からなる強磁性金属層を、タンタル (Ta) 非磁性金属層と酸化マグネシウム (MgO) 絶縁層で挟んだ磁性ナノヘテロ接合において、積層膜に電流を流したときの磁化に作用するトルクの大きさと方向を詳細に調べた。トルクの大きさは、電流印加によって生成されるスピンの大きさとおおむね対応しており、電氣的に磁化方向を制御するために必要な電力に直結する。トルクの大きさが大きければ大きいほど、低電力で磁化反転を誘起できる。なお、電流が流れていないとき、CoFeB 層の磁化は膜面垂直方向を向いている。

積層膜に電流を流すと、種々の効果によって生成されたスピンの流れが CoFeB 層の磁化にトルクを印加し、磁化がその向きを変える。今回磁化のトルク測定によって明らかになったのは、電流印加によって磁化が膜面垂直方向から水平方向にその向きを傾けつつ、水車のような回転を開始することである (図3参照)。ここでは、川の流れによって回転している水車をイメージするとわかりやすい。磁化を水車の軸、電子の流れ (電流と逆向き) を川の水と考える。電流 (水) を流し始めると、磁化 (水車) は生成されたスピンの流れからトルクを受け、図3のような動きを開始する。

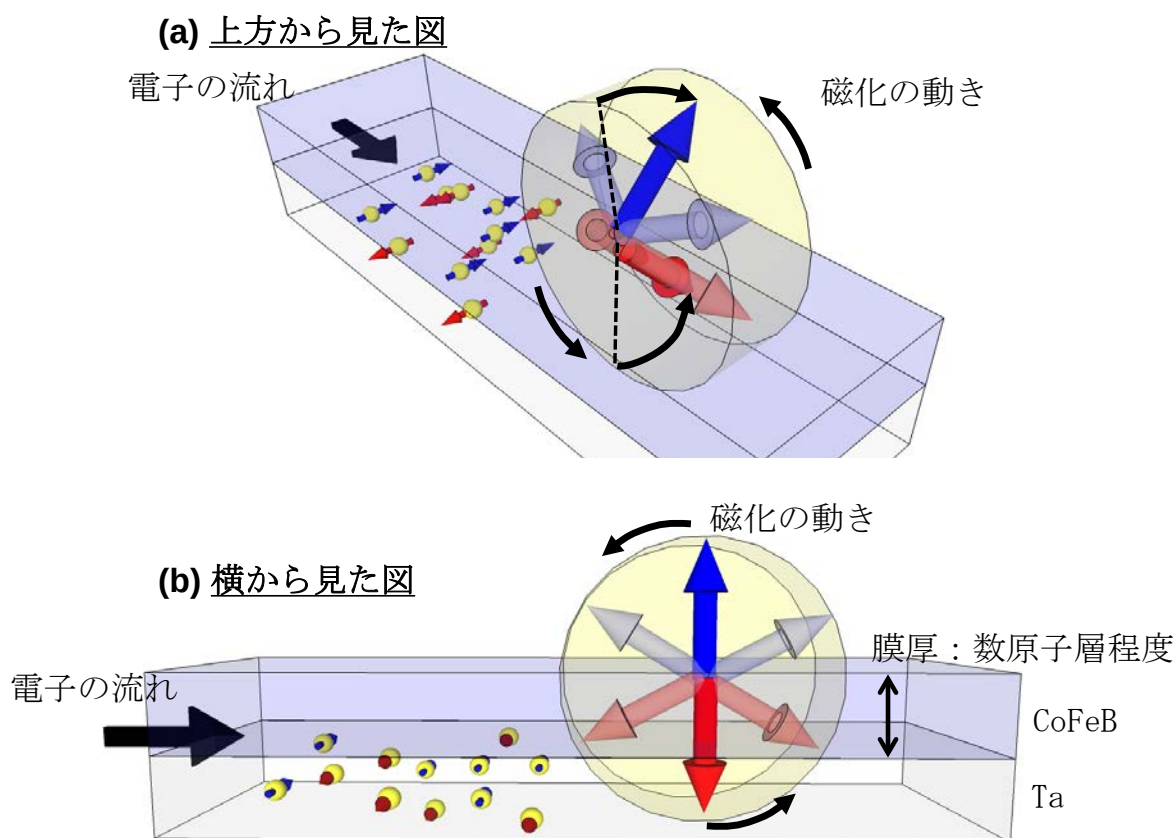


図3. Ta/CoFeB/MgO 磁性ナノヘテロ接合に電流を流した際の磁化の動きを模式的に表したもの。スピンホール効果などによってスピンの流れが生成され、その一部が磁性層に進入すると、磁性層の磁化にトルクが作用する。今回、トルクが作用する方向や大きさを調べ、電流と平行な成分と直交する成分が存在することを発見した。電流を流していない時、磁化は膜面垂直方向を向いている。電流を流すと、磁化が面内方向に傾く ((a)図参照) のと同時に回転 ((b)図参照) を始める。イメージとして、水車の軸を磁化、水車を駆動する水を電子の流れとするとわかりやすい (実際に磁化が傾斜、回転する機構は、様々な効果が絡んだより複合的なものである。)

さらに、磁化に作用するトルクの大きさが各層の膜厚によってどのように変化するかを評価した。その結果、Ta 層の膜厚がわずか 1 ナノメートル増えるだけでトルク（スピン流）の大きさが倍増することがわかった（図 4 参照）。磁化の回転を駆動している川の水量と水勢が増えた結果、回転する力（トルクの大きさ）が増加したと考えられる。Ta 層の膜厚に伴ってスピン流が増加するため、スピン流が生成される起源は Ta 層におけるスピンホール効果によるものであることがわかった。

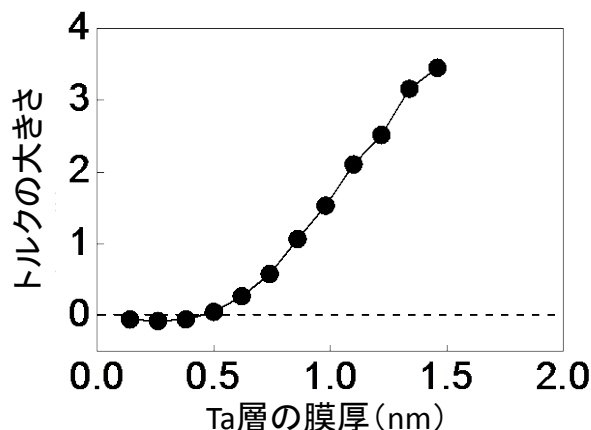


図 4 Ta/CoFeB/MgO において、膜面水平方向に電流を印加した際に CoFeB 層の磁化に作用するトルクの大きさと Ta 層の膜厚の関係。Ta 層の膜厚が 2 原子層以上（～0.6 nm）の領域では、膜厚とともにトルクの大きさが増加する。この領域では、Ta 層の膜厚がわずか 1nm 増加するだけで、トルクの大きさが倍増している。また、Ta 層の膜厚が 1 原子層程度になると（～0.3 nm）トルクの向きが反転する。これは支配的なスピン流生成機構が変わるためである。

波及効果と今後の展開

スピンホール効果などを利用してスピン流を生成し、磁化反転を誘起する技術は、従来のスピン注入磁化反転と比較してデバイスのアーキテクチャを簡素化でき、情報を読み込む際の書き込みエラーの心配がなく、また消費電力も軽減できることから、非常に注目されている技術である。原子層レベルで積層膜を制御し、巨大なスピン流を生成することができれば、従来のスピン注入磁化反転機構を置き換える新技術として、将来の高性能かつ低電力な論理集積回路の開発につながることを期待されている。今回の結果は、スピン流を用いて電氣的に磁化反転を制御する基盤技術につながる重要な成果である。

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会・最先端研究開発支援プログラム「省エネルギー・スピントロニクス論理集積回路の研究開発」（中心研究者：東北大学 大野英男教授）の支援を受けて行われた。

掲載論文

題 目 : Layer thickness dependence of the current induced effective field vector in Ta|CoFeB|MgO

著 者 : J. Kim, J. Sinha, M. Hayashi, M. Yamanouchi, S. Fukami, T. Suzuki, S. Mitani and H. Ohno

雑誌 : Nature Materials (2012) (巻・号・ページは現時点では未定)

用語解説

(1) 磁性ナノヘテロ接合

膜厚が数原子層程度の薄膜を積層した構造で、非磁性金属層、強磁性金属層、酸化物層で構成される。磁性層の磁化は、各界面における垂直磁気異方性によって、膜面垂直方向を向いていることが多い。

(2) 記憶ビット

コンピューターなどのデジタル機器では、情報はすべて「0」と「1」の2値（の組み合わせ）で表されており、ビットは「0」か「1」の状態を表す。記憶ビットとは、「0」か「1」かの情報を保存している素子であり、通常電荷の有無や磁化状態を利用して「0」か「1」かを認識する。

(3) スピントロニクス素子

磁性体の磁化の向きを情報の記憶ビットとして用い、その磁化の向きを電氣的に制御する素子。電源を切っても磁化の向きは変わらないため、「不揮発性」のメモリや演算素子への応用が期待されている。

(4) 不揮発性メモリ、不揮発性論理演算素子

電源を切っても情報が保持されるメモリや演算素子。半導体をベースにしたメモリは通常、情報を保持するために記憶ビットの書き込みを定期的に行っている。情報処理を行っていないときも電力を消費するため、更なる高性能化を目指した場合の課題となっている。不揮発性のメモリは情報の読み書きをするときにのみ、電力を消費する。ハードディスクドライブは不揮発性の情報記憶デバイスである。また、演算素子に不揮発性のメモリを搭載したデバイスを一般的に不揮発性演算素子と呼び、高密度化、高速化に適しているため、現在開発が進められている。

(5) スピン注入磁化反転

磁性層（参照層）／非磁性層／磁性層（自由層）の3層構造を基本とした積層膜において、電流を膜面垂直方向に印加すると、電流の向きによって、自由層の磁化の向きが決定される現象。電氣的に磁化を制御できるため、自由層の磁化方向を記憶ビットに用いた不揮発性のランダムアクセスメモリなどに応用されている。

(6) 磁壁移動メモリ

ナノスケールの磁性細線を用いた不揮発性メモリ。各細線中の磁区（磁化が一様な方向を向いた区画）を情報の記憶ビットに用いる。高記録密度の高性能メモリとして期待されている。

(7) スピン分極電流

電流を構成する電子のスピンの向きが、平均すると一方向に偏っているものを指す。銅などの非磁性体に電流を流すと、「上向き」と「下向き」のスピンは同数あり、平均するとゼロとなる。一方、強磁性体中の電子は、磁化と同じ方向のスピンの持った電子の方が、反対向きのスピンの持った電子よりも多く存在すると考えられ、電圧をかけると「スピン分極」した電流が流れる。

(8) スピン流

電荷（電子またはホール）の流れを測る電流に対し、ある方向のスピンの持った電子の流れを測る物理量をスピン流という。例えば、上向きのスピンの持った電子が右に動き、下向きのスピンを有する電子が左に動いた場合、電荷の流れは正味ゼロとなるが、スピン流はゼロでない有限の値を持つ。

(9) 異常ホール効果

磁性体に電流を流すと、電流と直交する方向に電圧が生じる現象。生成される電圧の向きは磁性体の磁化方向に依存する。

(10) ラッシュバ効果

電流印加によって伝導電子がスピン分極する現象。大きなスピン軌道相互作用を有する表面や界面において発現する。

(11) スピンホール効果

PtやTaなどの非磁性金属やGaAsなどの半導体に電流を印加すると、伝導電子のスピンの向きによって電子が移動する方向を変える現象。ある方向に電流を印加した場合、電流と直交する方向に移動する電子のスピンの向きは同じになる（図1参照）。電荷の流れはないが、有限のスピン流が流れる。

本件に関するお問い合わせ先

(研究内容に関すること)

独立行政法人物質・材料研究機構 磁性材料ユニットスピントロニクスグループ

主任研究員 林 将光 (はやしまさみつ)

E-mail: hayashi.masamitsu@nims.go.jp

TEL: 029-859-2136

URL: <http://www.nims.go.jp/apfim/spin/indexj.html>

(最先端研究開発支援プログラム「省エネルギー・スピントロニクス論理集積回路の研究開発」の事業に関すること)

東北大学 省エネルギー・スピントロニクス集積化システムセンター支援室

室長 門脇 豊 (かどわき ゆたか)

〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1

E-mail: yut-kado@riec.tohoku.ac.jp

TEL: 022-217-6116、FAX: 022-217-6117

(報道担当)

独立行政法人物質・材料研究機構

企画部門 広報室

〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1

TEL: 029-859-2026、FAX: 029-859-2017