

平成 29 年 8 月 21 日

報道機関各位

東北大学多元物質科学研究所

## ナノ磁性体の磁気異方性エネルギーの局所計測に成功 —高密度磁気記録における磁気保持性能の向上に道—

### 【発表のポイント】

- ナノサイズの磁石について、走査トンネル顕微鏡を用いて、原子構造に加えて磁石の N 極 S 極の方向を可視化。
- 外部磁場を作用させ N・S 極の反転を局所領域で観察、ナノ磁石ひとつひとつで磁気異方性エネルギー (MAE) を見積もることに成功。
- 金および銅の表面上で成長させた島状のコバルトの磁性薄膜において、基板を銅から金に変化させるだけで MAE が約 2 倍変化することを発見。
- MAE は磁石の記録保持力と密接に関係、大きな MAE の発見は微細化が進む磁気記録媒体で問題とされる微細化の限界を解消する可能性。

### 【概要】

東北大学多元物質科学研究所のプニート・ミシュラ研究員、岡博文研究員、米田忠弘教授、三重大学工学研究科の中村浩次准教授らの研究チームは、ナノ磁性材料に関する最も重要な特性である磁気異方性エネルギー (MAE) をナノ構造と同時に可視化・測定することに成功しました。

磁石が記録媒体として用いられる理由のひとつは、磁石の N・S 極を反転させるのに必要なエネルギーが高く、安定性が高いことがあります。磁気記録の高密度化が進むと、単一ビットあたりの磁性体原子の数が減少し、その反転エネルギーが低下、安定な記録が出来なくなることが大きな問題です。MAE はこの反転エネルギーと関連しており、MAE を増大させることができればナノ磁性体の記録の安定性向上につながります。そのためには MAE の現象を原子レベルで理解することが必要です。

今回の測定には原子レベルで磁気特性を測定可能なスピン偏極走査トンネル顕微鏡 (SP-STM)<sup>注1</sup> の手法を利用し、観察対象として金属基板に成長させた強磁性薄膜であるコバルト 2 層膜のナノサイズの島を用いました。この薄膜の島は、オセロの駒が白と黒のどちらかが上向く様に、N 極・S 極のどちらかが表面から飛び出す方向を向いています。外部から磁場を印加した場合、最初磁場と反対を向いていた島も、ある強さの外部磁場の印加で、それと同じ方向に反転します。この外部磁場の強度から、MAE を測定することが可能です。共に非磁性金属である銅と金を基板とした場合、銅と比較して金の基板に成長させたコバル

ト島には 約 2 倍の MAE が観察されました。理論計算との比較により、金の大きなスピン軌道相互作用の影響によって コバルトに大きな MAE が観察されたことが理解されました。さらに同様の測定によって、基板に影響された薄膜磁性体の結晶性や、基板からの電子・スピン状態への影響が MAE の決定に大きく関与していることを世界に先駆けて解明しました。今回の解明は、高密度磁気記録の実現や、ナノ材料を用いたスピントロニクス<sup>注2</sup>デバイスの構築に貢献すると考えられます。

本成果は、2017 年 8 月 16 日に、米国化学会誌「Nano Letters (ナノレターズ)」に Just Accepted でオンライン掲載されました。

### 【研究の背景と内容】

磁石は情報社会のなかで、磁気ディスクやテープなどの記録媒体として重要な役割を果たしています。磁石が記録媒体に利用される理由は、N 極 S 極の方向を一旦決定すればその情報は百年単位の長時間保持される優れた保持力をもつことです。この高い保持力は、強磁性物質において、図 1 左図に示すように、磁石の最小単位であるスピンが互いに絡み合っ同じ方向を向こうとすることに由来します。したがって、磁石の N 極 S 極の向きを反転するには 全スピが一斉に反転する必要があり、1つのスピを反転するエネルギーに比較してはるかに大きなエネルギーが必要です。このエネルギーは図 1 中央に示した  $\Delta E$  のエネルギーに相当します。このように、磁場の向きの反転に要するエネルギーは、スピン同士の多体効果によって決定されることから、その大きさは磁石に含まれるスピンの数に比例して増加します。このことは、記録密度が向上し、1つの記録要素（ビット）に割り当てられるスピンの数が減少するとき 反転エネルギーも減少し、高い保持力がもはや得られないという問題が生じます。多くのナノ材料の磁性応用が議論されますが、もし必要な保持力が得られなければ、実際の使用には耐えられません。

この問題の解決手法として、各スピンの反転に必要な磁気異方性エネルギー (MAE) を増大させる手法があります。たとえば、非常に大きい MAE が実現された場合、磁石の基本単位の単一スピンでも長い時間、そのスピンの方向を保持でき、本当の磁石となることが可能です。そのような大きな MAE は現在まで得られていませんが、その実現のためには MAE の機構を原子レベルで理解することが必要であります。

本研究では MAE の原子レベルでの理解のため、金属基板に成長させた、強磁性薄膜であるコバルト 2 層膜で形成されるナノサイズの島を用います。この薄膜の島は、オセロの駒が白と黒のどちらかが上向く様に、N 極・S 極のいずれかが表面から飛び出す方向を向きます。その様子は図 2 (a) で示したように、島ごとに白黒、すなわち N・S 極が決まり、存在比率は 1 : 1 です。しかし、外部から磁場を掛ける、すなわち外部の磁石を近づけるとその様子は変化します。そ

れを図 2 (b) に示します。ここでは外部磁石が S 極を駒にむけて接近してくると考えますと、S 極の駒は反転して N 極の駒へと変化します。これはエネルギー的には図 2 (c) に示したように、外部磁場が有ると N・S 極の駒のエネルギーに差が生じ、 $\Delta E$  も減少し、 $\Delta E=0$  となる時反転が可能となります。この反転を生じる外部磁場の大きさから、 $\Delta E$ 、さらに MAE エネルギーを求めることが出来ます。

この実際の実験での結果を図 3 に示します。STM 像には金表面上に成長した 2 層のコバルト薄膜の島が存在し、4 つの類似の大きさの島と小さい島から構成されています。この STM 像からは、各島が N・S 極のいずれに相当するかを検知することは出来ません。しかし、探針に磁石の性質をもつ針を使用した場合、N 極探針から N 極コバルトへ流れるトンネル電流と、S 極コバルトへ流れる電流には、スピンの組み合わせの違いから差が生じます。その差を画像化したのが、図 3 の右 3 枚のパネルであり、黄色と青色のコントラストから島が N 極か S 極か区別が可能です。S 極の外部磁場を印加したため、最初 N・S 極の島が 2 : 2 であったのが、3.0T の磁場を掛けると 3:1 に、3.5T の磁場で 4:0 となって N 極の島のみが観察されます。反転に必要な外部磁場の強さを多くの島で計測し、MAE を正確に測定することに成功しました。共に非磁性金属である銅と金の 2 種類の基板での結果を比較すると、銅と比較して金の基板に成長させたコバルト島には 約 2 倍の MAE が観察されました。理論計算との比較により、金の大きなスピン軌道相互作用の影響によって、コバルトに大きな MAE が観察されたことが理解されました。

また図 4 に示すように、金に成長させた場合には、金の表面に特徴的なヘリングボーン構造のどの場所で、コバルトが成長するかで、コバルト薄膜の結晶構造が異なることが知られています。我々は構造と MAE を同時に精密測定できる技術を用いて、基板に影響された薄膜磁性体の結晶性や、基板からの電子・スピン状態への影響が MAE の決定に大きく関与していることを世界に先駆けて解明しました。

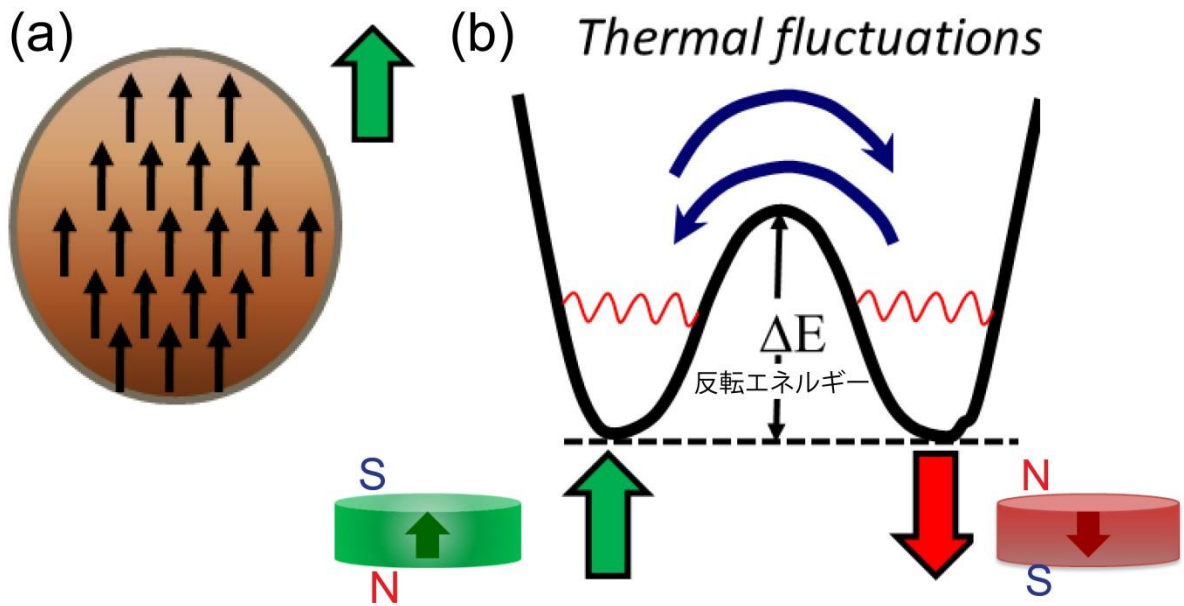


図1 (a) 磁石の微視的構造。磁石の基本単位スピンの多数絡み合い、全体として同じ方向を向く。(b) 磁石のN・S極の反転に伴うエネルギーモード図。反転エネルギー  $\Delta E$  を越えた場合、S極上向き（緑）からN極上向き（赤）に移る。

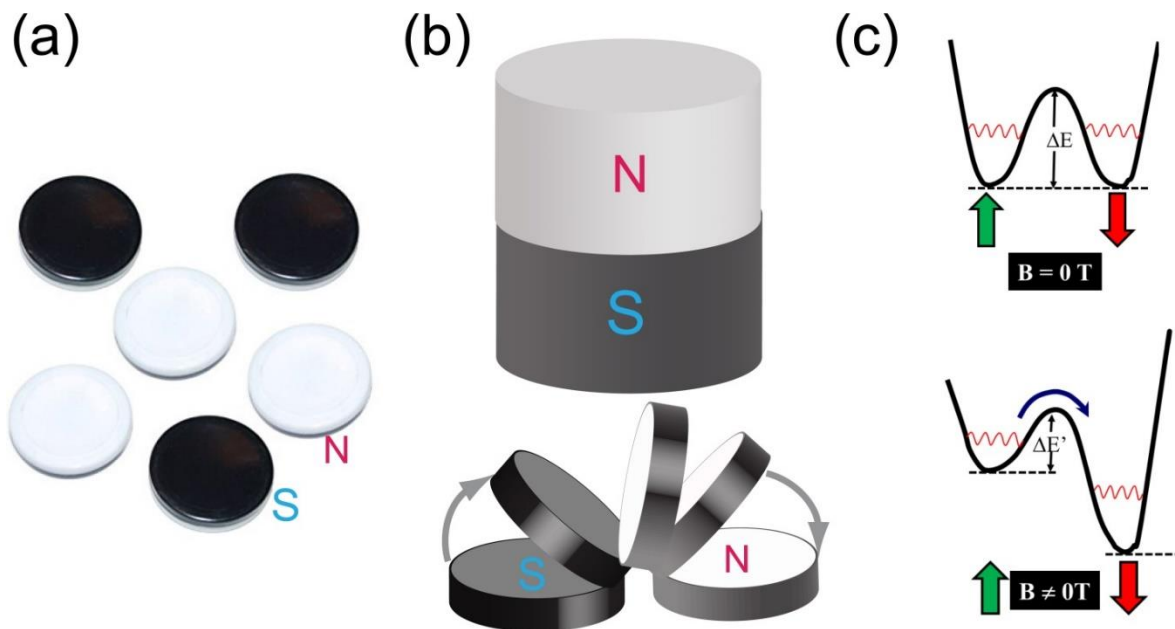
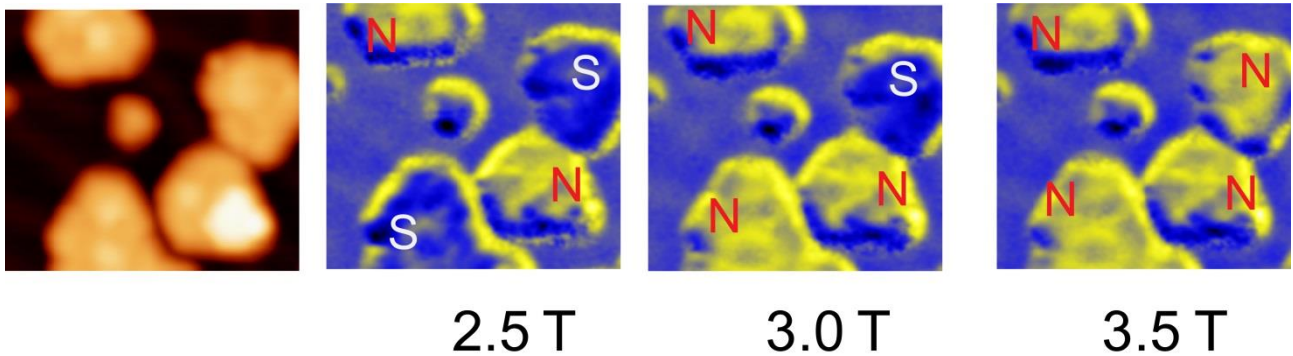


図2 (a) 強磁性体である2層コバルト薄膜の島を模式的にオセロ駒で表現。N極（S極）が上向きの島が白（黒）の駒。(b) 外部磁石を近づけることで黒から白にコバルト膜の磁場の向きが反転するモード図。(c) 磁場反転(b)に対応するエネルギーモード図。外部磁場印加でエネルギー準位が上下する。



STM像

スピン偏極トンネル電流微分像

図 3 金の表面に成長させた 2 層コバルト膜の島。STM 像 (20×20nm) とスピン偏極トンネル電流微分像。青と黄色のコントラストが S 極・N 極の島に相当する。2.5T → 3.0T → 3.5T と外部磁場を増加させると S 極から N 極への磁場反転が生じることが観察される。

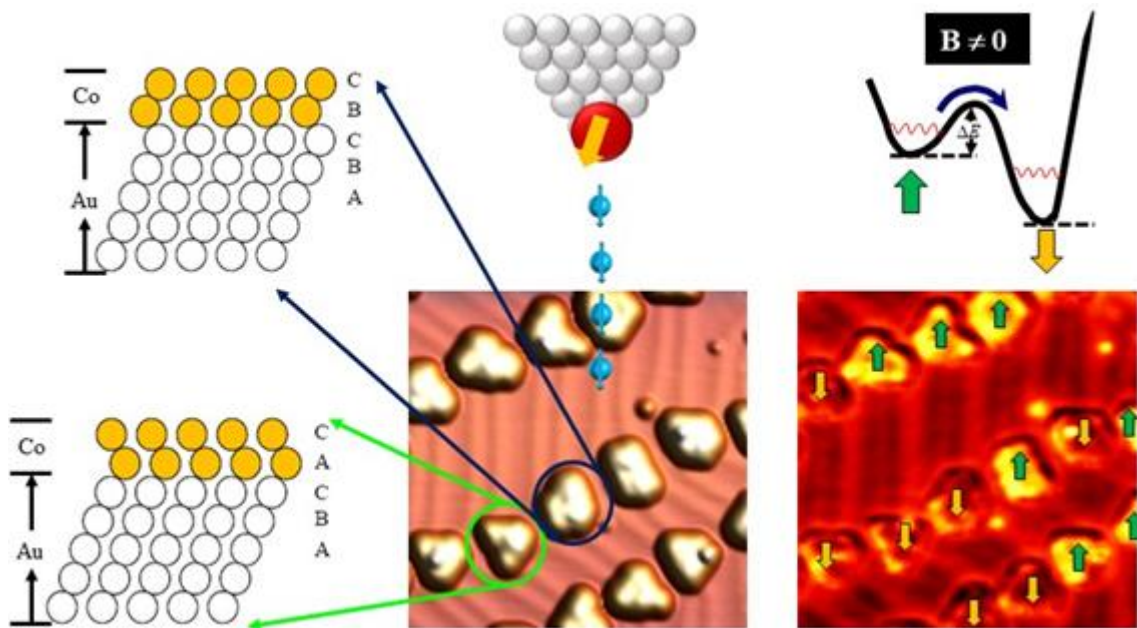


図 4 金の表面に特徴的なヘリングボーン構造に従って成長するコバルト薄膜。金の構造に影響された積層欠陥が見られ、その構造の変化が磁気異方性エネルギーに影響する。

## 【語句解説】

### 注 1) 走査トンネル顕微鏡 (STM)

先端が鋭い金属の探針を導電性のある試料に近づけ、両者に数 V (ボルト) の電圧差を設ける場合、その間の距離が 1nm (10 億分の 1m) 以下になった時にトンネル電流が生じる。この電流は探針—試料間の距離に敏感であり、探針を走査することで原子分解能を持った顕微鏡像を得ることができる。トンネル電流は本質的に局所的で、その広がりには 0.3nm 程度しかない。

### 注 2) スピントロニクス

現在、情報処理に用いられるエレクトロニクスは電荷のあるなしを情報の「0/1」に置き換えて処理していたが、スピントロニクスはその処理に電子の持つスピン情報を積極的に取り込んでいこうとするものである。スピンは電子の内部自由度であり、地球と太陽に例えるならば、プラスに帯電した原子核 (太陽) の周辺をマイナスの電荷を持つ電子 (地球) が回転している原子模型において、地球に自転があるように電子もスピンという自転運動をしていると考えられている。スピンの集合体は磁性材料であり、それがハードディスクなどで記憶材料として用いられることはよく知られているが、近年の磁気素子の縮小化はその読み書きにも電流を用いており、スピンとエレクトロニクスの融合はその発展から開始された。同時に、エレクトロニクスもさらなる微細化、省電力化、さらには量子コンピューターなどの新しい計算スキームの確立にスピンを用いることが必要となってきたという背景がある。従来、どちらかというといふ異分野であった磁性記録とエレクトロニクスが両者の微細化の結果、融合に向かったという流れである。スピントロニクスの具体的な動作には、従来の代表的な電子素子のトランジスタがゲートの電圧で、電流のオン・オフを制御していたように磁界の制御で電流量が制御できる効果などが研究されている。

#### 【問い合わせ先】

(研究に関すること)

東北大学多元物質科学研究所

教授 米田忠弘

電話:022-217-5368

E-mail: [komeda@tagen.tohoku.ac.jp](mailto:komeda@tagen.tohoku.ac.jp)

(報道に関すること)

東北大学多元物質科学研究所 広報情報室

電話:022-217-5866

E-mail: [press.tagen@grp.tohoku.ac.jp](mailto:press.tagen@grp.tohoku.ac.jp)

