

2007年12月26日  
独立行政法人 理化学研究所

## 電子の流れで磁性体のスピンの向きを反転させる

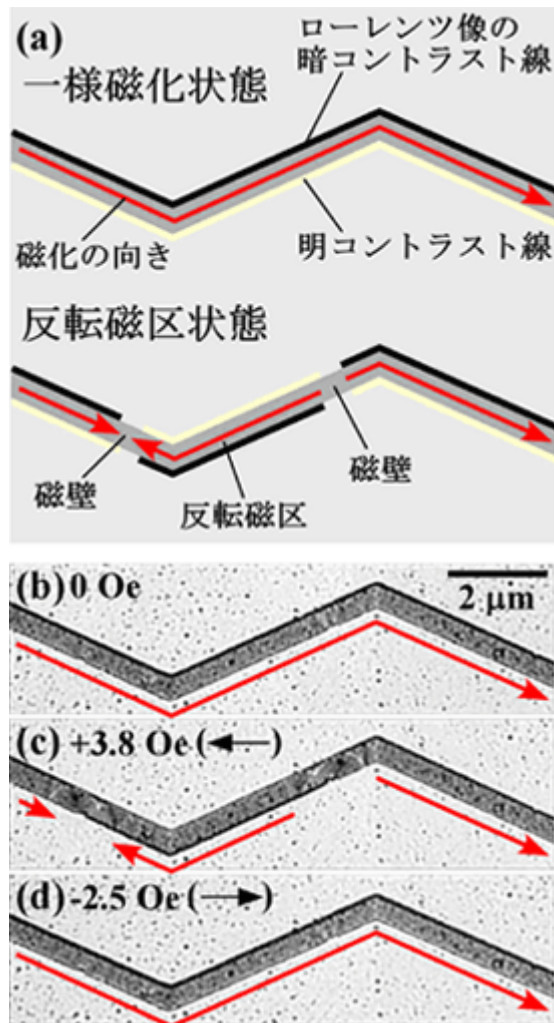
- スピン流を用いたメモリーなどの次世代電子素子が大きく前進 -

キロ (10<sup>3</sup>)、メガ (10<sup>6</sup>)、ギガ (10<sup>9</sup>) と、私たちが気軽に扱うことができる情報量は、巨大化しています。これに伴って、メモリーカード、スティックメモリー、光ディスク、ハードディスクなどの情報を記録する媒体は、めまぐるしく世代交代しています。

この大量な情報を一瞬に記録する方法には、「微細な磁石で、書き込み、読み出しを制御する磁気記録素子」を活用することが、現在のコンピュータの基本の1つとなっています。この際、磁化の状態を制御して変更したり、状態を読み出したりすることで、情報を読み書きします。この磁化の制御には、磁場による反転を自在に行えることが必須となります。

ところが、記録媒体に詰め込む情報が、大容量化し、微細化するにしたがって、磁化を反転するための磁場は大きくなるため、現在の磁化制御法では、やがて限界に達してしまいます。この壁を破る手法として、「磁性体に電流を通すと、流れる電子のスピンに応じて磁化が変化する現象」を活用する「スピントロニクス」が注目されています。

理研フロンティア研究システム量子現象観測技術研究チームらは、微細に加工した磁性体細線に、外部から微弱な磁場を加えながら電流を送り、スピンの向きを自由に切り替えることに世界で初めて成功しました。用いた磁性体細線は、幅 500nm、厚さ 30nm、長さ 40 $\mu$ mのパーマロイ磁性細線で、数Oe (エルスレッド) の微弱磁場を加えながらパルス電流を送ると、磁化が逆さに変わることを見出し、この現象を透過型電子顕微鏡を使って直接観測しました。今回、スピン流によって磁化の状態を不安定にして、磁化を反転することに成功したわけですが、これは、電流を送り込むだけで微細な磁性素子への情報記録を可能にする新たな手法を見出すこととなりました。この成果は、スピン流を使った次世代のスピントロニクス素子の動作原理の1つになると期待できます。



図は (上)ローレンツ像の模式図と(下)パーマロイ磁性細線の実際のローレンツ像

2007年12月26日  
独立行政法人 理化学研究所

## 電子の流れで磁性体のスピンの向きを反転させる

- スピン流を用いたメモリーなどの次世代電子素子が大きく前進 -

### ◇ポイント◇

- ・電流だけで、直接、磁性体のスピンの向きを変える
- ・数 Oe(エルステッド) の微弱な磁場のもと、スピンの制御性よく、自由に切替わる
- ・次世代スピントロニクス素子の動作原理として応用可能に

独立行政法人理化学研究所（野依良治理事長）は、外部から加えた数Oe（エルステッド）<sup>\*1</sup>の微弱な磁場下において、電流だけで、微細に加工した磁性体細線のスピンの向きを自在に切り替えることに、世界で初めて成功しました。これは、理研フロンティア研究システム（玉尾皓平システム長）量子現象観測技術研究チームの戸川欣彦研究員、外村彰チームリーダーら、量子ナノ磁性研究チームの大谷義近チームリーダー（国立大学法人東京大学物性研究所教授）、木村崇客員研究員（国立大学法人東京大学物性研究所助教）、株式会社日立ハイテクフィールドディングによる研究成果です。

ハードディスクに代表される磁気記録素子は、磁性体材料で作られ、磁性体中のスピンの並び（磁化）を変化させて、情報を記録します。情報を書き換えるには、通常、素子の外部から大きな磁場をかけ、必要な磁化の向きを反転します。しかし、記録情報の大容量化に伴い、記録素子が微細化するにつれて、磁化を反転するのに必要な磁場が大きくなり、その結果、磁場を用いた制御は技術的に困難となります。そこで、電流が磁性体に流れるときに生じるスピンの流れ（スピン流<sup>\*2</sup>）を利用して磁化を反転するという、従来の制御方法に代わる新しい技術が注目を集めています。

研究グループは、幅 500nm、厚さ 30nm で長さ 40 $\mu$ m のパーマロイ<sup>\*3</sup>磁性細線にパルス電流を流し、磁化を反転することに成功しました。数Oeという微弱な磁場を外部から加えている状態で、パルス電流を流したときに磁化が反転する確率が、磁場の大きさや向きに依存しながら大きく変化することを世界で初めて見出しました。これは、磁化の向きが制御性よく切り替わることを、透過型電子顕微鏡を用いて直接観察したものです。この研究結果は、スピン流によって磁化状態が不安定化し、磁化が反転することを示唆するもので、スピン流を用いる次世代のスピントロニクス<sup>\*4</sup>素子の動作原理の1つとなると期待されます。

本研究成果は、米国の科学雑誌『*Applied Physics Letters*』に近く掲載される予定です。

### 1. 背景

電流は物質中を流れますが、このとき、電子が動きます。電子は、電荷とスピンの性質を持ち、電子が磁性体中を流れるときには、電荷が流れるのと同時に、スピンの流れ（スピン流）が流れます（スピン流）。最近の研究から、微細に加工した磁性体で、スピン流

がさまざまな物理現象を引き起こすことがわかってきました。ハードディスクの大容量化に貢献し、今年度のノーベル物理賞が授与された「巨大磁気抵抗効果」は、スピン流が関わる現象の一例です。これらの研究は、電子のスピンとしての性質を積極的に利用するもので、スピントロニクスと呼ばれています。スピントロニクスは、従来の電子の電荷としての性質を利用するエレクトロニクスを拡張するもので、次世代の電子素子の新たな動作原理を提供すると期待されており、世界中で盛んに研究が進められています。

スピン流が、磁性体のスピンの向き（磁化）を変化させるのに利用できることが理論的に提唱されて以来、スピントロニクスによる磁化状態の制御方法が注目を集めています。例えば、スピン流が複数の磁区<sup>\*5</sup>構造を持つ磁性体中を流れると、磁区の境界である磁壁<sup>\*5</sup>が、スピン流の流れに沿って移動することが知られています。この現象を応用した、新しい細線形状の磁気記録素子が、提案されました。細線内の磁区の並びによって磁気情報を記録し、電流を用いてそれらの磁区を次々と細線内で動かすことにより、ハードディスクや磁気テープで用いられる情報を読み込むための従来の機械的な動作が不要となります。

また、スピン流が、一様に磁化した磁性体の中を流れると、スピン流により磁化状態が不安定化され、磁性体の中に新たに磁区が生成されることが理論的に指摘されています。これは、スピン流を用いて直接的に記録媒体の磁化状態を制御することを可能とし、今後ますます大容量化・微細化していく磁気記録素子において、磁場を用いた従来の制御方法に代わる手法になりうると考えられています。

研究グループは、これまでに、透過電子顕微鏡を用いたローレンツ法<sup>\*6</sup>によって、微細な領域で現れる超伝導の現象を微視的に観察してきました（2005年8月17日プレスリリース：超伝導磁束量子の運動を制御）。同様の手法を用いて、微細に加工した磁性体細線において、電流によって引き起こされるさまざまな磁化状態の変化を観察しています。今回、極微弱な磁場を加えながらパルス電流を流すことで、磁化の反転を自由に引き起こし、磁化状態を制御することに成功しました。

## 2. 研究手法

研究グループは、透過型電子顕微鏡を用いて観察を行うために、300 $\mu\text{m}$ 四方の穴が開いたシリコン基板の上に載る、厚さ30nmの窒化シリコン薄膜を用意し、磁壁が動く際に角で止まりやすくするため、その膜の上に幅500nm、厚さ30nm、長さ40 $\mu\text{m}$ のジグザグ形状（ジグザグの折り返しまでの長さは5.6 $\mu\text{m}$ 、角度は132°）のパーマロイ（ $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ ）強磁性細線を作製しました（図1）。作製した試料は、260Oe以上の大きな磁場を、細線長手方向と面内垂直方向（図1(b)の紙面内上下方向）に加えない限り、形状磁気異方性<sup>\*7</sup>のため、細線長手方向に向きがそろって一様に磁化しています。この試料にパルス電流を流し、磁化状態の変化を観察しました。

パルス電流の印加中に、試料に流れるパルス電流値と試料の抵抗値を測定し、試料温度を調べました。試料温度が、強磁性転移温度キュリー点 $T_C$ <sup>\*8</sup>（850K）以下となる電流密度の範囲内で、電界放出型透過電子顕微鏡を用いたローレンツ法により、パルス電流を加えた前と後で生じる磁化状態の変化を観察しました。

### 3. 研究成果

ゼロ磁場のもとで、一様に磁化したパーマロイ細線試料に加えるパルス電流を大きくすると、細線中の磁化が反転した領域（反転磁区）が新たに出現する現象をとらえました。しかし、このような電流により磁区が生成される確率は、0.3%と極めて低く、いったん生成した磁区は、次のパルス電流を加えると、90%以上の高い確率で消滅してしまいました。このことは、電流による磁化の反転が確率的に起きる現象であり、電流だけで磁化の反転を制御することが困難であることを示唆しています。

しかし、研究グループは、細線長手方向へ数 Oe という微弱な磁場を加えた状況の中でパルス電流を流すと、制御性よく磁化反転が起きることを発見しました。図 2(b~d)に示すのは、磁性細線のローレンツ像で、各磁場のもとでパルス電流を加えることによって現れた磁化状態の変化をそれぞれ示しています。加えている磁場の大きさは数 Oe と小さいために、パルス電流が加わらない限り、磁化状態は変化しません。しかし、パルス電流を印加すると、磁場の向きがもともとの磁化の向きと逆向きである場合、磁化反転が生じました（図 2(c)）。その後、パルス電流を引き続き印加しても、生成された反転磁区は安定に存在し続けました。一方、磁場の向きが磁化の向きと同じである場合は、磁化反転は生じませんでした（図 2(d)）。

パルス電流を繰り返し印加しながら、出現する磁化状態を観察し、電流により磁化が反転する確率を調べました。すると、3.8 Oe 以上の高磁場が加わった状態では磁区が反転した状態が発生しますが、1.7 Oe 以下の低磁場では一様に磁化した状態が安定に現れました。つまり、数 Oe 程度の極微弱な磁場を加えることにより、磁化反転の確率を大幅に変化させることができることがわかりました（図 3(a)）。また、電流密度を小さくすると、磁化反転の確率分布はゼロ磁場をまたいで広がります（図 3(b)）。このことは、低電流のパルス電流に対しては、高磁場下でいったん生成した磁区がゼロ磁場においても安定に存在することを意味しています。このような特徴的な磁化反転の確率分布特性を理解することで、一様磁化状態と反転磁区状態を制御よく出現させることが可能となりました（図 3(c)）。

本研究で見出した、電流を用いた磁化反転は、スピン流による磁化状態の不安定化により引き起こされる現象と考えられます。また、電流を流している間は試料温度が上昇しているため、熱の影響も受けます。スピン流や熱は、磁化状態を励起し不安定にしますが、これは、基本的に、ゼロ磁場下で観測したように確率的に発生します。しかし、微弱な磁場は磁化が反転した状態のエネルギーを下げるために、磁化反転を起こしやすくします。このため、電流を用いて磁化状態を制御するのに微弱な磁場が非常に有効となりました。

### 4. 今後の期待

研究グループは、極微弱な磁場のもと、電流によって制御性よく自在に、微細に加工した磁性細線の磁化状態を切り替えることに世界で初めて成功しました。これは、スピン流が関わる現象と考えられ、今後、次世代電子素子の 1 つであるスピントロニクス素子の動作原理として応用されると期待されます。研究グループでは、引き続き、電流を用いた磁化状態の操作・制御を目指し、研究を進めていきます。

(問い合わせ先)

独立行政法人理化学研究所

フロンティア研究システム単量子操作研究グループ

量子現象観測技術研究チーム

研究員 戸川 欣彦 (とがわ よしひこ)

Tel : 049-296-7240 / Fax : 049-296-7247

(報道担当)

独立行政法人理化学研究所 広報室 報道担当

Tel : 048-467-9272 / Fax : 048-462-4715

Mail : koho@riken.jp

## <補足説明>

### ※1 Oe (エルステッド)

cgs 単位系での磁界、磁場の単位。呼び名は、1820 年に電流が方位磁針を動かすことを発見した、ハンス・クリスティアン・エルステッドに由来する。SI 単位系では A/m (アンペア/メートル)。1 Oe は  $1000 / 4\pi = 79.6$  A/m。物質中の磁束密度 (cgs 単位系で、G (ガウス)) は外部から加わる磁場と物質の磁化の合計で大きさが決まる。磁化がない場合、1 Oe を印加すると 1G の磁束密度となる。地磁気は日本付近で 0.45 G 程度である。

### ※2 スピン流

磁性体中を電流が流れる際に生じるスピンの流れのこと。スピンとは、電子が持つ原子レベルで存在する小さな磁石。電子は電荷とスピンの性質を持つため、磁性体中を電流が流れると、電荷の流れるのと同時にスピンの流れが生じる。スピン流はナノスケールに微細化された磁性体でさまざまな物理現象を引き起こす。例えば、スピン流は、磁性体中の局所的なスピンの配列 (磁化) との強い交換相互作用を示し、スピン流のスピンの向きは局所的なスピンの向きにそろえられる。この効果の反作用として、磁化はトルクを受け運動する。その結果、磁壁のように磁化が空間変化する領域が、スピン流に沿って駆動される。このようなスピン流が引き起こす磁化状態の変化を利用して、磁化状態を操作・制御することが、スピントロニクスの研究課題の 1 つとして注目を集めている。

### ※3 パーマロイ

鉄とニッケルの合金。透磁率が極めて低く、外部磁場への応答に優れるため、パーマロイの磁化状態は制御されやすい。このため、磁性体の微細構造を作製する際の材料として多用される。

### ※4 スピントロニクス

エレクトロニクス (電子の電荷としての性質を利用した電子工学) の概念を拡張し、

電子の持つ電荷とスピンの性質の両方を利用する電子工学。スピントロニクスとも呼ばれ、次世代の電子素子の動作原理を提供すると期待されている。

#### ※5 磁区、磁壁

磁性体の磁化状態は、一般に、磁化の向きが一様にそろった領域が複数集まって構成される。この磁化の向きが一様にそろった領域を、磁区と呼ぶ。隣り合う磁区の間では磁化の向きは異なり、その境界で磁化は、緩やかに変化しながらつながる。このような磁区の境界領域を、磁壁と呼ぶ。

#### ※6 ローレンツ法

透過型電子顕微鏡を用いた磁性体の磁化状態を観察する方法の1つ。電子線は、物質中の磁化によりローレンツ力を受け、偏向される。そのため、電子顕微鏡の結像面を正焦点からずらすことで、磁化の強度・極性に依存したコントラスト像を観察できる。電界放出型透過電子顕微鏡を使い波面のそろった電子線を用いてローレンツ法を行うと、良好なコントラスト像が得られる。

#### ※7 形状磁気異方性

磁性体の磁化は向き易い方向（磁化容易軸）と向き難い方向（磁化困難軸）を持ち、磁気異方性を示す。磁気異方性は、磁化の方向によりエネルギーが異なるために生じる。特に、磁性体の形状に由来する磁気異方性を、形状磁気異方性と呼ぶ。例えば、平面に広がる磁性薄膜では、一般に、磁化は面内を向く。また、針金のような線状の磁性体では線方向へ磁化が向く。これらの特有な磁化状態は試料形状を反映しており、形状磁気異方性のため生じる。

#### ※8 強磁性転移温度、キュリー点 $T_c$

強磁性体の磁化が消失し、常磁性体に転移する温度。キュリー点と呼ばれる。パーマロイ（ $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ 組成）のキュリー点は 850 K である。強磁性体が温度を上げると磁性の性質を失われることを発見したピエール・キュリーに由来する。

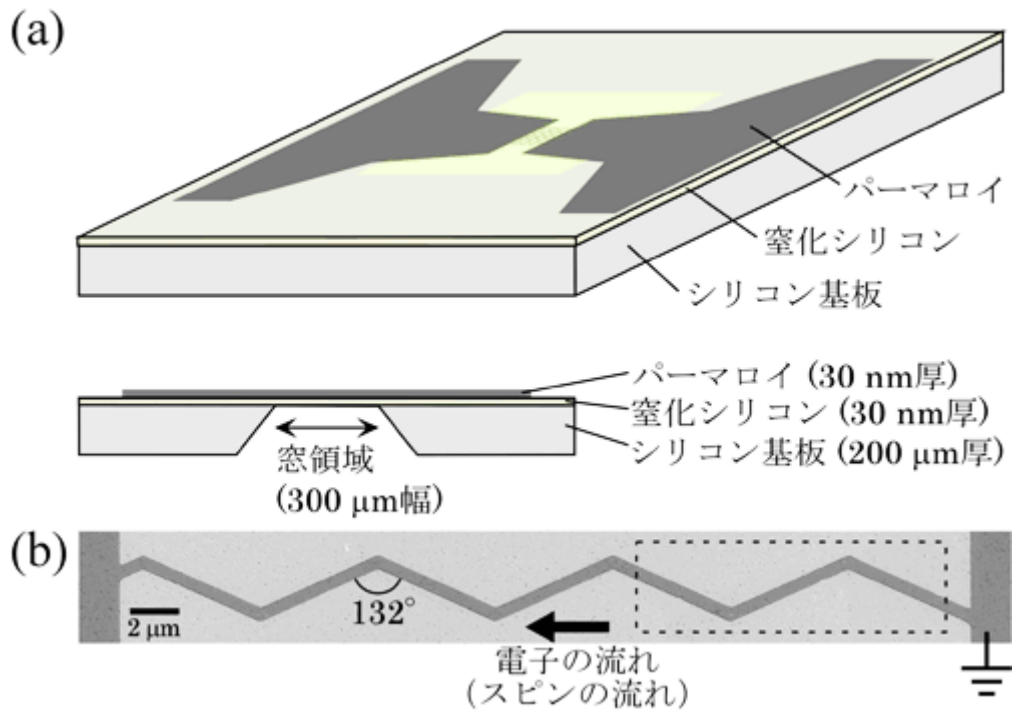


図1 作製した試料の模式図とパーマロイ細線の透過電子顕微鏡像

(a) 作製した試料の模式図

透過電子顕微鏡で観察するため、極めて薄い窒化シリコン薄膜の窓の上に試料を作製した。

(b) ジグザグ形状をしたパーマロイ細線の透過電子顕微鏡像

電流を左から右に流すと、右から左への電子（スピン）の流れが生じる。四角で囲んだ領域は、図2のローレンツ像の視野に対応する。



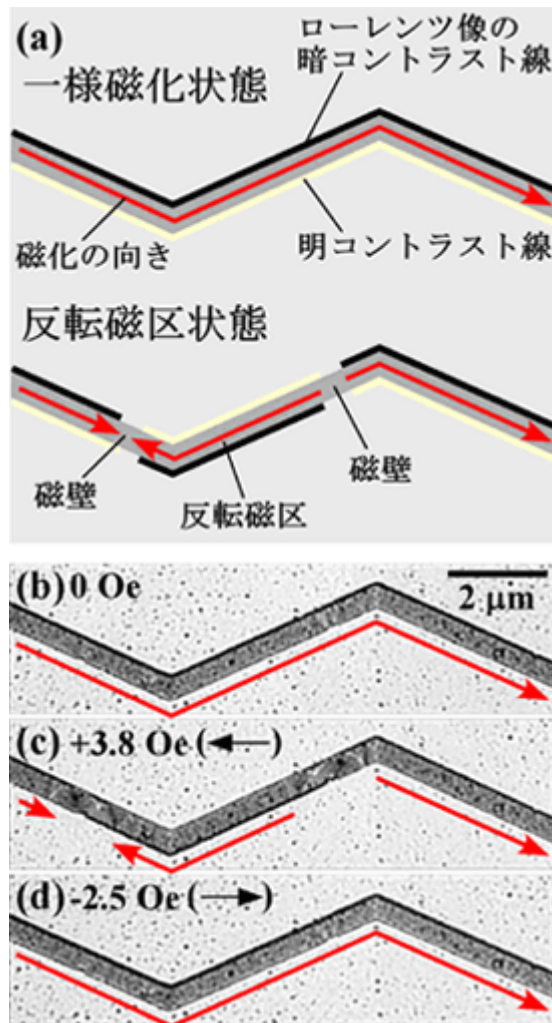


図2 ローレンツ像の模式図とパーマロイ細線のローレンツ像

(a) 一様磁化状態と反転磁区状態のローレンツ像の模式図

パーマロイ細線内の磁化の向きに従い、細線端に沿って明暗のコントラスト線が現れる。

コントラスト線がどちらの端にあるか、またその変化を観察することで、細線内の磁区構造がわかる。

(b)~(d) パーマロイ細線のローレンツ像

ゼロ磁場と微弱な磁場のもとで電流パルスを加えた後の磁化状態を示している。

もともとの磁化の向きと逆向きに磁場が加わっている場合、パルス電流を加えると、磁化の反転が生じる (c)。磁場の向きがもともとの磁化と同じである場合は、磁化の反転は生じない(d)。

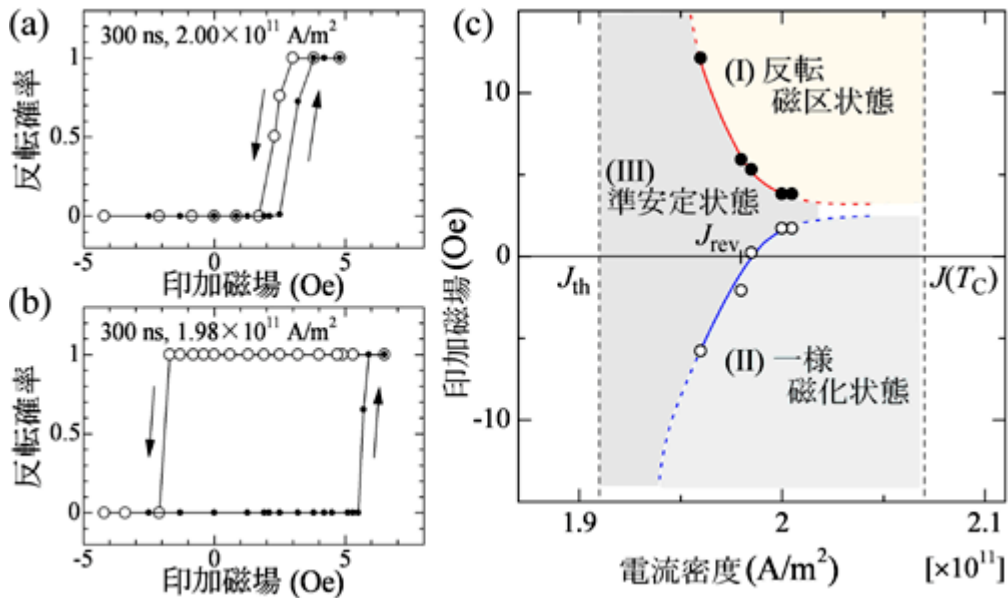


図3 磁化が電流により反転する確率分布図

(a, b) 磁化反転の確率分布の電流密度依存性

高磁場では反転確率が1となり、反転磁区が現れる。低磁場では、一様磁化状態が安定に存在する。高電流密度では、磁化反転の確率を正の磁場領域で変化させることができる(a)。低電流密度では、磁化反転の確率分布はゼロ磁場をまたいで広がる(b)。

(c) 磁気相図

3つの領域が示されており、領域(I)では反転磁区状態を、領域(II)では一様磁化状態を選択的に出現させることができる。領域(III)では、磁場とパルス電流を加えた履歴に応じて、どちらかの状態が選択的に現れる。