

ナノスケールの磁化分析を可能にするスピン走査トンネル顕微鏡

Spin-Polarized Scanning Tunneling Microscopy for Magnetic Imaging with Nanometer Spatial Resolution

奥野 志保
OKUNO Shiho

岸 達也
KISHI Tatsuya

田中 国義
TANAKA Kuniyoshi

磁性材料の磁化状態をナノメートル分解能で評価するスピン走査トンネル顕微鏡(スピンSTM)技術を開発した。この技術は、磁性薄膜探針をプローブとしてスピントンネル電流を検出することにより、試料の磁化状態をとらえる。スピン偏極度の変化が大きいバイアス電圧にてバイアス変化/変調を測定することで、表面凹凸情報に埋もれた微弱なスピン信号の抽出を可能とした。媒体材料であるコバルト(Co)への適応において、約23%のコントラスト比でCo元素の磁化状態を二次元画像化することに成功した。今後この技術により、テラ(T: 10^{12})ビット級ストレージ材料をはじめとしたナノスケール磁性体の微細な磁化状態が明らかにされると期待される。

Toshiba has developed spin-polarized scanning tunneling microscopy for magnetic imaging of magnetic storage materials. Magnetic information was obtained utilizing the bias-voltage dependence of the spin-polarization of the system. The magnetization direction of Co elements was displayed as two-dimensional images with a contrast ratio of 23%. This analysis method can be used to reveal the magnetic structures of ultrafine magnetic materials of nanometer size.

1 まえがき

現在、ハードディスク(HDD)は年率100%を超える勢いで超高密度化している。記録密度向上に伴い、記録ビットサイズは縮小する。現在の記録密度30~40ギガ(G: 10^9)ビット/平方インチ(6.45 cm^2)で既に40nmであるビット長は、1Tビット/平方インチ以上で10nmを切るのは必至である。このような微小ビットを鮮明に記録・再生するためには、ビットの形成を直接的に観察・評価することが欠かせず、ビットサイズを考慮すると、ナノメートルの分解能で磁化分析が必要な技術が必要である。

一方、ナノスケールでの成膜技術や加工技術の進歩は、材料の電子スピンを積極的に利用する新しい技術領域としてスピントロニクスを発生させた。スピン反転の特性長より寸法の短いナノ領域では、電子のスピンの依存した伝導現象が顕著になるためである。その伝導特性は、磁性体あるいは半導体の磁化制御が握っている。磁化を制御するには、HDD同様、ナノスケールでの磁化状態の解明が望まれる。

われわれは、微細な磁性材料の磁化状態をナノスケールで分析するために、スピンSTMを開発した。ここでは、スピンSTMの基本原理とスピン検出法、スピンコントラストの程度、そして具体的観察例について述べる。

2 スピンSTMの基本原理

スピンSTMの基本形態を図1に示す。磁性薄膜をコーテ

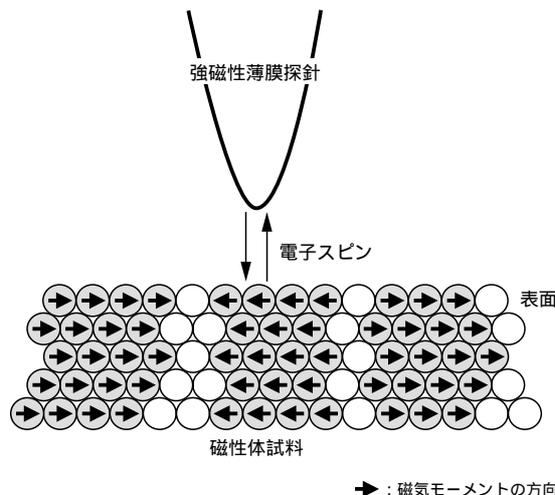


図1. スピンSTMの基本形態 強磁性薄膜を先端にコーティングした探針を磁性体試料表面上で走査しながら、探針と試料間の距離、及び探針と試料間に流れるスピン依存したトンネル電流を制御し検出する。

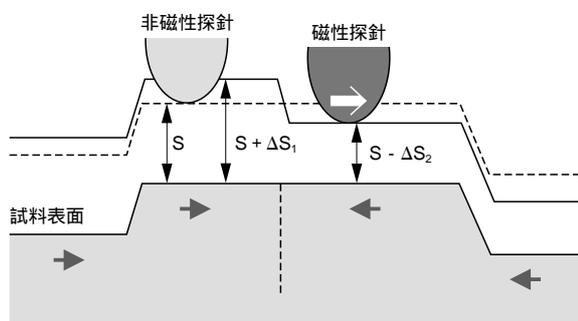
Basic schematic of spin-polarized scanning tunneling microscope (STM)

ングした探針を磁性試料表面上で走査しながら、探針と試料間の距離、及び探針と試料間に流れるスピン依存したトンネル電流を制御し検出する。トンネル電流は探針最先端部の原子一個と表面との間で流れ、探針と試料間の距離に極めて敏感であるために、試料表面を原子レベルの分解能($\sim 0.1\text{ nm}$)で観察することができる。探針を磁性体としたスピンSTMでは、トンネル電流はスピン偏極している。電子

はトンネル後もスピンを保存しようとするため、トンネル確率はスピン偏極度と磁化の向きで変わる。このためコンダクタンスを調べることで、試料の磁化方向を知ることができる。

3 バイアス電圧変化 / 変調によるスピン情報の抽出

上述のスピンSTMを実際の試料系へ適用する場合の課題は、スピン情報が表面凹凸情報に重畳して現れる点である。図2に示すように、非磁性探針で走査した場合には表面凹凸だけをなぞるが、磁性探針で走査すると表面凹凸及びスピン情報をなぞる。後述する試料の場合、表面凹凸情報はスピン情報に比べて信号強度が1,000倍近く大きい。このため、このままで微弱なスピン情報を取り出すことはできない。



S : 非磁性探針で試料表面を走査したときの探針 試料間距離
 $S + \Delta S_1$: 強磁性探針と試料表面の磁化方向が平行配置のときの強磁性探針 試料間距離
 $S - \Delta S_2$: 強磁性探針と試料表面の磁化方向が反平行配置のときの強磁性探針 試料間距離

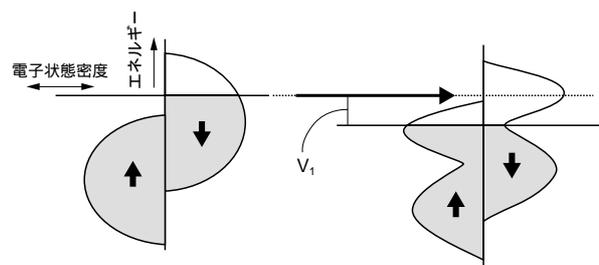
図2. 探針の描く軌道 表面凹凸と磁化分布の双方が存在する実際の系での探針先端部の軌跡。非磁性探針では表面凹凸だけを反映し、磁性探針では表面凹凸及びスピン情報を反映する。

Trajectory of probe tip

この課題を解決する方法として、系のスピン偏極度が変化するパラメータの一つであるバイアス電圧を変化させ、これに対する電流応答を調べることでスピン情報だけを抽出するスピンSTM法を提案した⁽¹⁾。探針と試料の電子状態密度は、図3に示すように、スピン電子とスピン電子とで異なった複雑なエネルギー依存性を持つ。このため、バイアス電圧を変えることでトンネルに寄与する電子を変えることができる。

図3のように探針と試料の磁化方向が平行の時には、バイアス電圧 V_1 でトンネルに寄与するスピン電子は試料へ流れやすいが、 V_2 ではトンネルしにくい。したがって、電圧を V_1 から V_2 へ変化させると、コンダクタンス変化は平均より大きくなる。一方、図3とは逆に、探針と試料の磁化方向が反平行の場合、 V_1 から V_2 へのバイアス電圧変化でコンダクタンス変化は平均より小さくなる。このように、スピン偏極度

(a) バイアス電圧 V_1 トンネル確率大



(b) バイアス電圧 V_2 トンネル確率小

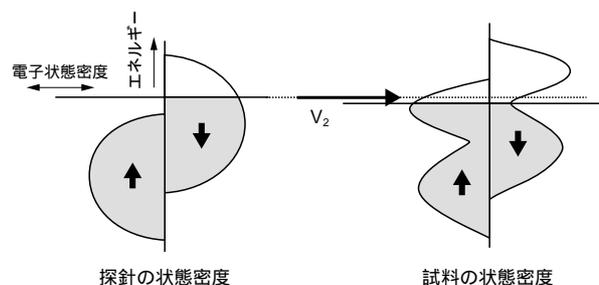


図3. 探針(左)と試料(右)のバンド構造モデル 探針と試料の電子状態はエネルギーにより異なるため、バイアス電圧によってスピン依存した電子のトンネル確率が異なる。

Band structures of probe tip and sample

が大きく変化するバイアス電圧で電圧を変化させる、あるいは変調させ、これに対応した電流変化をとらえることで、スピン情報だけを抽出できることがわかる。

磁性薄膜探針を用いたバイアス電圧変化 / 変調によるスピンSTM法は、高い信頼性を持ち、非常にシンプルな構成で測定できる点が大きな特長である。磁性探針からの漏れ磁場が試料磁化へ及ぼす影響については、磁性極薄膜探針にして磁性体の体積を小さくすることで、ほぼ無視できる。

4 磁化方向の定量化

スピンSTM測定で磁化方向を定量的に求めるために、スピンコントラストの程度を前もって実験的に確認した。図4は、あらかじめ試料と探針の磁化配置を制御して測定したCoのトンネルスペクトルである⁽²⁾。磁化配置の違いにより特にピーク部分でスペクトル強度に差が見られる。このバイアス電圧近傍で、磁化配置の違いによりコンダクタンスのこう配が異なることを示し、バイアス電圧変化 / 変調による磁化測定にとって好ましい条件である。

図4から、ピークを示す試料バイアス電圧付近で23%のスピンコントラストが得られることが明らかになった。このピークの起源については、詳細を原著論文⁽²⁾⁽³⁾に譲る。23%のスピンコントラストは、画像化のための探針走査時にも十分な大きさと考えられる。

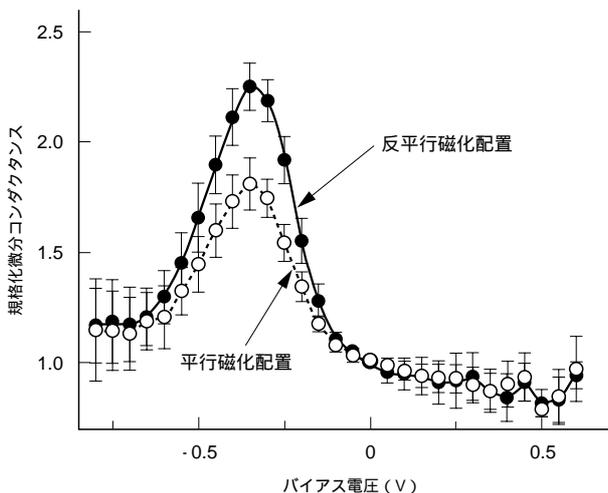


図4. スピン依存トンネルコンダクタンスのバイアス電圧依存性
Co表面はバイアス電圧 -0.35 V 付近でコンダクタンスの勾配に大きな磁化配置依存性が観察される。
Spin-dependent tunneling spectra

5 Co エLEMENTの磁化分布状態観察

基板上に成長させたCo ELEMENTを、前述の条件に基づきスピンSTMで観察した⁽⁴⁾。結果の一部を図5に示す。Coは基板上でアイランド状に成長し、様々な形状のELEMENTを形成している。虹色で示したコントラスト部はスピン偏極した表面を表し、Co ELEMENT表面に対応する。赤は、試料の磁化方向が探針磁化方向に対して反平行であることを示し、青は平行であることを示す。その間の角度は、黄・緑・水色で表されている。赤と青の間のコントラスト幅は、前述のスピン依存トンネルスペクトル測定で得られたコントラストと一致する。図が示すように、スピンSTMでは膜面内の角度分布を高感度で検出することが可能である。このスピンSTM像からは、磁化がELEMENTごとに孤立し、小さいエレ

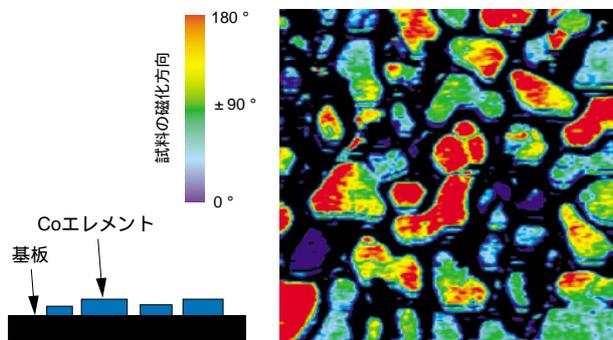


図5. Co ELEMENTの断面モデル(左)とスピンSTM像(右)
Co表面の磁化分布状態を虹色のコントラストで表示している。黒は基板部分、スキャン範囲は500 nm × 500 nmである。
Spin-polarized STM image of Co elements

メントほど単磁区を示しているようすが観察される。

図6は、より測定範囲を絞った観察結果である。右下に存在するELEMENTは、ELEMENT両端でコントラストが変化しており、図中に模式的に示したように、エッジで磁化方向が曲がっているエッジドメインが観察される。エッジドメインは磁化反転において重要な役割を果たすと考えられるが、これまで直接的な評価が難しかった。スピンSTMでは、このような微妙な磁化構造の変化を追うことができる。

薄い磁壁を観察した例を図7に示す。二つのアイランドが成長時に結合しており、その境界に、磁化の遷移領域である磁壁が形成されている。この磁壁に対して垂直なラインプロファイル(図7の右下矢印)から、この磁壁の幅は約4 nmであることが明らかとなった。このような薄い磁壁は、これまでの評価手段ではその構造を評価できない。スピンSTMを用いた磁化分析により、ナノスケール磁性体のこれまで知られていない微細な磁化構造が明らかにされようとしている。

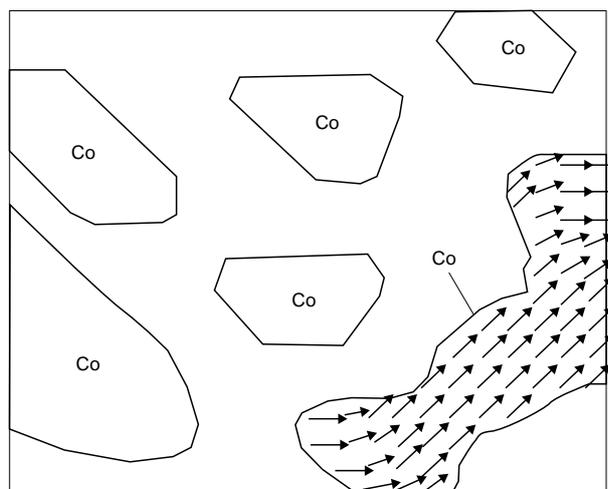
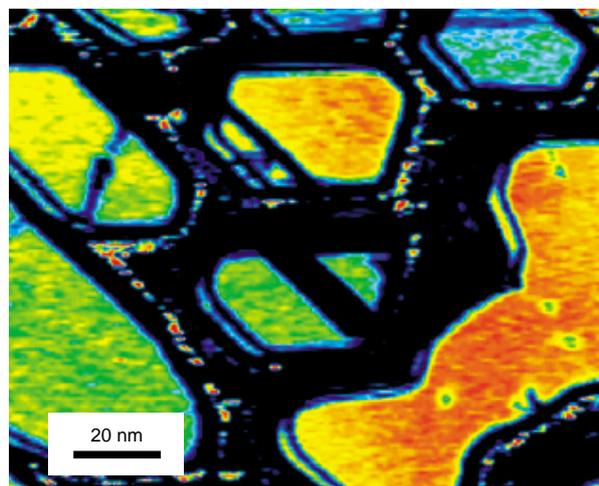


図6. Co ELEMENT内での磁化方向の分布
右下ELEMENTの上下部分でエッジドメインが観察される。
Edge domain of Co element

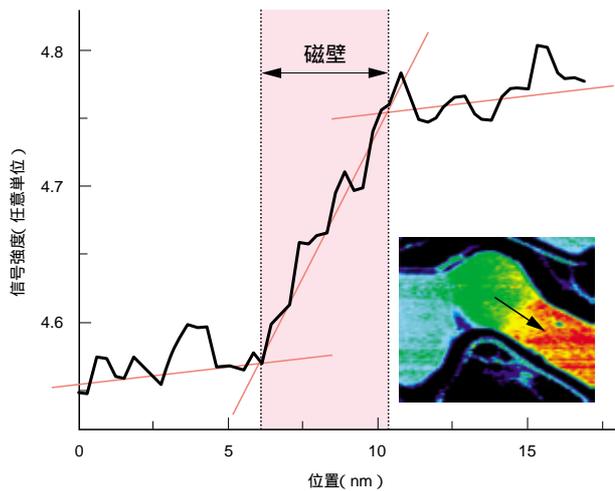


図7. 薄い磁壁とそのラインプロファイル 磁壁に垂直なラインプロファイルから、幅4 nmの幅の狭い磁壁が観察される。
Observation of magnetic domain wall

6 あとがき

磁性薄膜探針をプローブとして、バイアス電圧変化/変調によりスピンを検出するスピンSTMにより、磁性材料の微細な磁化状態をナノメートル分解能で二次元画像化することに成功した。開発したスピン検出法は、表面凹凸のある試料への適応が可能である。また、磁化制御したスピン依存トンネル測定をあらかじめ行っておくことで、試料の面内磁化分布を定量的に扱えることを示した。

紹介したスピンSTM法は、今回のCoと同様に他の磁性材料系への展開が可能である。スピンSTMは磁化状態分析技術として、原子レベルの最高分解能を持つ分析評価技術である。今後、磁気ストレージあるいはスピンエレクトロニクス開発において、ナノスケール磁性体の微細な磁化状態を解明するための基盤技術になると期待される。

謝辞

この研究開発は通商産業省(現経済産業省)超先端電子技術開発促進プロジェクト:高感度媒体技術開発の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの委託により行われた。

文献

- (1) 奥野志保,ほか.“スピンプローブ法による超微細磁化構造解析基礎技術の開発”超先端電子技術開発機構第6回磁気記録研究成果報告会,1999,p.111-118.
- (2) Okuno, S. N., et al. "Spin-polarized Tunneling Spectroscopy of Co(0001)". to be published in Phys. Rev. Lett.
- (3) Kishi, T., et al. "Spin-dependent Electronic Structure and Theoretical SP-STM Images for Co(0001) Films". Transaction on Magnetism, 36, 2000, p.2972.
- (4) 奥野志保,ほか.“スピンプローブによる超微細構造評価技術の開発”.超先端電子技術開発機構第10回磁気記録研究会成果報告会,2001,p.129-136.



奥野 志保 OKUNO Shiho, D.Eng.

研究開発センター 記憶材料・デバイスラボラトリー主任研究員,工博。磁性薄膜材料及びその評価技術の研究・開発に従事。日本物理学会,応用物理学会,応用磁気学会会員。Storage Materials & Devices Lab.



岸 達也 KISHI Tatsuya, D.Sc.

研究開発センター 記憶材料・デバイスラボラトリー研究主務,理博。シミュレーションによる磁性薄膜材料の研究・開発に従事。日本物理学会,応用物理学会会員。Storage Materials & Devices Lab.



田中 国義 TANAKA Kuniyoshi

東芝リサーチ&コンサルタンツ(株) 走査型プローブ顕微鏡システムの研究・開発に従事。Toshiba Research Consulting Corp.