

表面磁性を高分解能に可視化する強磁性共鳴を用いた 磁気力顕微鏡の開発



技術解説

菅原 康弘*

Development of the Magnetic Force Microscopy using Ferromagnetic Resonance
to Image Surface Magnetism with High Spatial Resolution

Key Words：磁気力顕微鏡、強磁性共鳴、磁気材料、強磁性、走査型力顕微鏡
Magnetic force microscopy, ferromagnetic resonance, magnetic materials,
ferromagnetism, scanning force microscopy

1. はじめに

磁性材料は現代の情報化社会を支える極めて重要な構成要素であり、とりわけ情報記憶において重要な役割を演じている。磁性体の物性は、電子のスピンが持つ磁気モーメントによって大きく影響を受ける。従って、新しい機能を有するナノ磁性体や磁気演算素子、磁気記録デバイスを思い通りに設計するには、磁性材料表面のナノメートルのスケールでの磁気特性を解明することが必要となる。

固体表面の磁気特性を高分解能に直接測定できる手法として、磁気力顕微鏡 (Magnetic Force Microscopy: MFM) がある [1-4]。この顕微鏡は、原子分解能で表面を観察できる原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscopy: AFM) [5] の探針として磁性体探針を用い、磁性体探針・磁性体試料間に働く磁気力を検出する。磁気力顕微鏡では、磁性体探針をその共振周波数付近で振動させ、試料と探針との相互作用による磁性体探針の力学特性の変化 (例えば、振動探針の周波数や振幅、位相の変化) から試料の磁気特性を測定する。一般に、磁性体探針と磁性体試料の間には、ファンデルワールス力や静電気力のような非磁気的な力も作用するため、試料表面の磁気特性を高感度・高分解能に測定するためには、磁気的な相互作用力をいかに分離測定するかが重要と

なる。従来、磁気的な相互作用力を分離する方法として、リフトモードという方法が広く使用されてきた。この方法では、磁性体探針を試料表面に近づけて試料表面の凹凸像を取得した後、磁性体探針を試料表面から等しい距離だけ遠ざけて同じラインをなぞることで磁気特性を測定する。この方法では、磁性体探針・磁性体試料間に働く非磁気的な力を減少させて、非常に簡単に磁気力だけを高分解能に測定できる。より高感度・高分解能に試料の磁気特性を測定するためには、磁性体探針と磁性体試料との間の距離を近づけた測定が望ましいが、リフトモードでは、ファンデルワールス力や静電気力のような非磁気的な力が磁気力に重畳するため、そのような測定は困難である。

そこで、本研究では、磁気力だけを分離測定する方法として、強磁性共鳴を利用するというアイデアを導入した。すなわち、強磁性体をコートした探針に変調されたマイクロ波を照射し、探針先端の磁化状態を強磁性共鳴により変調し [6]、探針・試料間相互作用力の変調成分を抽出することにより、磁気力だけを分離測定しようとするものである (図1)。

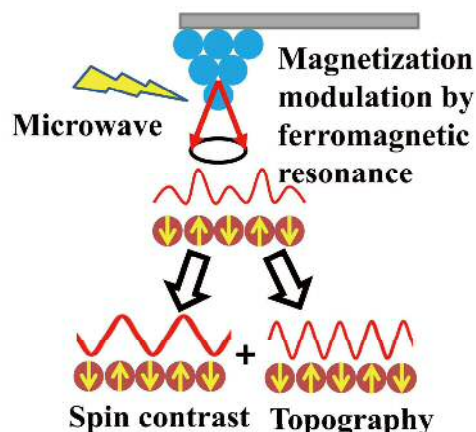


図1 強磁性共鳴を用いた磁気力顕微鏡の概念図。



* Yasuhiro SUGAWARA

1961年2月生

東北大学大学院工学研究科電気及通信工学専攻博士課程修了 (1988年)

現在、大阪大学大学院 工学研究科

教授 工学博士 走査型プローブ顕微鏡、表面科学

TEL：06-6879-7853

FAX：06-6879-7856

E-mail：sugawara@ap.eng.osaka-u.ac.jp

以下、強磁性共鳴を利用して磁性体探針の磁化状態を変調できることを確認した実験結果や、磁性体探針・磁性体表面間の磁氣的相互作用だけを分離測定できることを確認した実験結果について紹介する。

2. 測定原理

まず、磁性体探針の磁化状態を変調するために利用した強磁性共鳴の概念図を図2に示す。強磁性体の電子のエネルギー準位は、外部静磁場が存在しなくても、強磁性体自体の自発磁化により、縮退がとけている。電子は、通常、安定なエネルギー状態である下の平行向きの状態を取りたがる。ここで、エネルギー準位差 ΔE に等しいエネルギーをもつマイクロ波を強磁性体に照射すると、一部の電子はエネルギーを吸収し、上の反平行の向きの状態に遷移する。この現象が強磁性共鳴である。

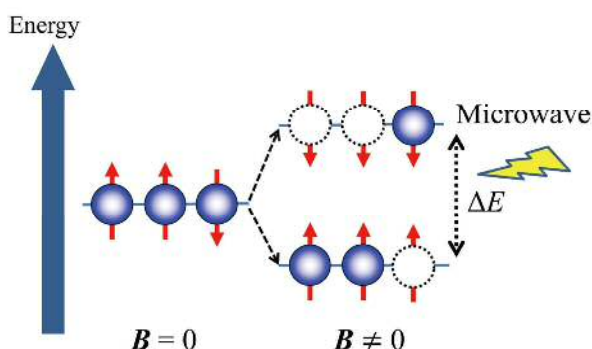


図2 強磁性共鳴の概念図。

図3は、強磁性体探針にマイクロ波を照射した時、マイクロ波周波数 f_{rf} に対するマイクロ波吸収がどのように変化するかを表している。強磁性共鳴はマイクロ波吸収の最も大きい周波数 f_{res} で生じる。この時、マイクロ波周波数 f_{rf} を周波数変調し、磁性

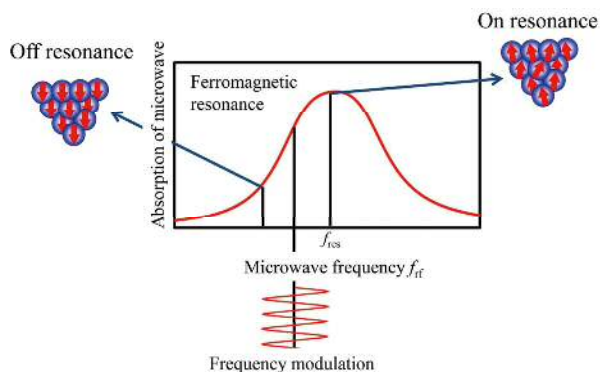


図3 強磁性体のマイクロ波吸収とマイクロ波周波数との関係。

体探針先端を交互に磁気共鳴状態と非共鳴状態にすることにより、強磁性体探針の磁化状態を周期的に変調することが可能となる。したがって、探針・試料間相互作用に現れる変調成分を検出すれば、磁気交換力に関する情報だけを分離測定可能となる。なお、周波数変調されたマイクロ波を利用する理由は、磁性体探針を照射するマイクロ波のエネルギーが変動しないようにするためである。振幅変調されたマイクロ波を用いると、磁性体探針を照射するマイクロ波のエネルギーが変動するため、それによって磁性体探針（カンチレバー）の共振特性そのものが影響を受けてしまうという問題が生じる。

3. 実験装置

図4に強磁性共鳴を用いた磁気力顕微鏡のブロック図を示す。探針・試料間相互作用は、周波数変調方式[7]の原理間力顕微鏡（FM-AFM）を用いて測定する。表面凹凸像は、カンチレバーの周波数シフトが一定になるように探針・表面間距離を制御するフィードバック信号から取得される。磁気力の像は、次のようにして取得される。まず、マイクロ波発生器から出力された周波数変調されたマイクロ波を磁性体探針に照射する。これにより、磁性体探針の磁化が変調周波数 f_m で変調され、したがって、探針・試料間の磁氣的相互作用も変調されることになる。カンチレバーの周波数シフトに現れる変調成分をロックインアンプで検出することにより、磁気力の像を取得する。

マイクロ波を磁性体探針に高効率に照射するため、ここでは同軸ケーブルから漏洩する近接場マイクロ波を用いた。具体的には、同軸ケーブルの芯線部分を1mm程度むき出しにし、その先端部分を磁性体

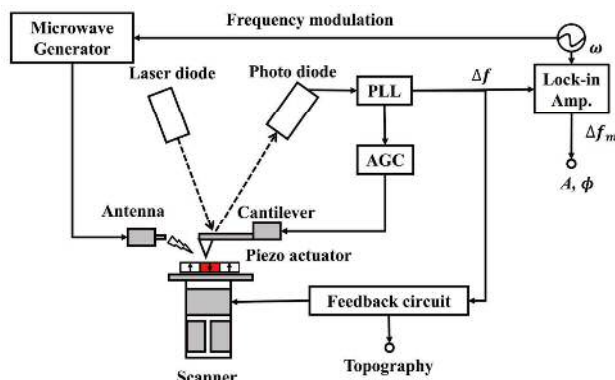


図4 強磁性共鳴を用いた磁気力顕微鏡のブロック図。

探針に近づけることにより、局所的にマイクロ波を照射できるようにした (図 5(b))。図 5(b) に同軸ケーブル先端から漏洩する近接場マイクロ波の強度分布をシミュレーションした結果を示す。この結果から分かるように、マイクロ波は同軸ケーブルの先端からおおよそ 0.5 mm 程度の範囲で漏洩していることが分かる。このことから、近接場マイクロ波を磁性体探針に照射するためには、同軸ケーブルの先端と磁性体探針との間の距離を 0.5 mm 以下までにする必要がある。

磁性体探針として、Si カンチレバーに FePt がコートされた高保磁力の磁性体探針を用いた。FePt は、薄膜状態では、磁化方向が面直方向になるので、磁性体探針先端の磁化方向は、試料表面に対して垂直下向きとなる。磁性体探針の保磁力は 14.4 kOe であり、探針先端の曲率半径はおおよそ 30 nm である。実験は全て室温・超高真空下で行った。

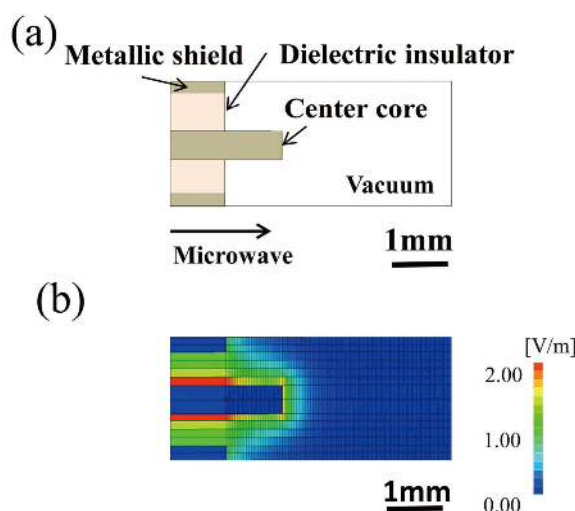


図5 (a) マイクロ波を照射する同軸ケーブルの先端の図。
(b) 漏洩マイクロ波の電界分布の計算結果。

4. 実験結果と考察

4.1 探針の強磁性共鳴周波数の測定

強磁性共鳴を用いて磁性体探針の磁化を変調できるかどうかを実験的に検討した。図 6 は、近接場マイクロ波を磁性体探針に照射した時の、マイクロ波周波数 f_{rf} に対するカンチレバーの周波数シフト Δf を測定した結果である。ここで、磁性体試料としては、120 mT の面直磁化を持つ SmCo 磁石を用いた。マイクロ波の周波数 f_{rf} が変化すると、カンチレバ

ーの周波数シフト Δf が変化することが分かる。この結果は、マイクロ波周波数 f_{rf} に依存して磁性体探針・磁性体試料間の磁氣的相互作用が変化したことを示している。すなわち、磁性体探針へのマイクロ波照射により、磁性体探針の磁化が変化したことを示唆している。図 6 において、マイクロ波周波数 f_{rf} が 2.55 GHz と 3.65 GHz の時に、周波数シフト Δf にディップが表れている。2つのディップが表れる原因としては、薄膜状の強磁性体を用いているため、スピン波が励起されたためと考えられる [8]。また、得られたディップの半値幅は、先行研究の FePt 薄膜に対するマイクロ波吸収ピークの半値幅よりも大きかった [9]。半値幅が大きくなった原因は、磁性体探針で使用した FePt 薄膜が、様々なサイズの微粒子からなり、それらがそれぞれ異なった強磁性共鳴周波数 f_{res} を持つためと考えられる [9]。これらの結果は、強磁性共鳴を用いて、確かに磁性体探針の磁化を変調できることを示している。

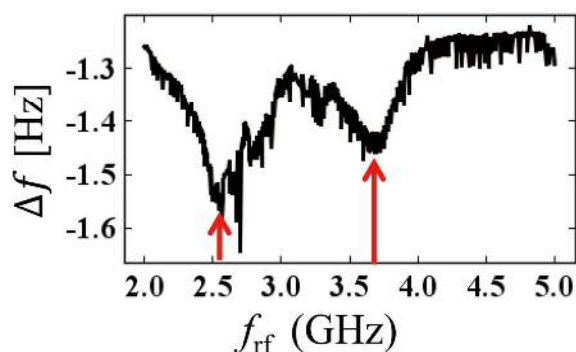


図6 マイクロ波周波数に対する磁性体カンチレバーの周波数シフトの測定結果。

4.2 漏えい磁場の分離測定 [10]

次に、磁性体試料の磁気特性だけをナノオーダーの空間分解能で分離測定できるかどうかを検証した。磁性体試料としては、磁気情報が記録された CoCrPt-SiO₂ 垂直磁気記録媒体を用いた (図 7(a))。記録された磁気情報のビット長は、約 125 nm である。この測定では、磁気交換力が作用する短距離領域ではなく、探針先端の磁気双極子と磁性試料表面から漏洩する磁場とが相互作用する長距離領域で画像化が行われた。図 7(b) および 7(c) は、それぞれ、測定された磁気強度像と磁気位相像である。強度像では、記録した磁気情報に対応する周期的な輝点が表われている。一方、位相像では、強度像のほぼ 2 倍

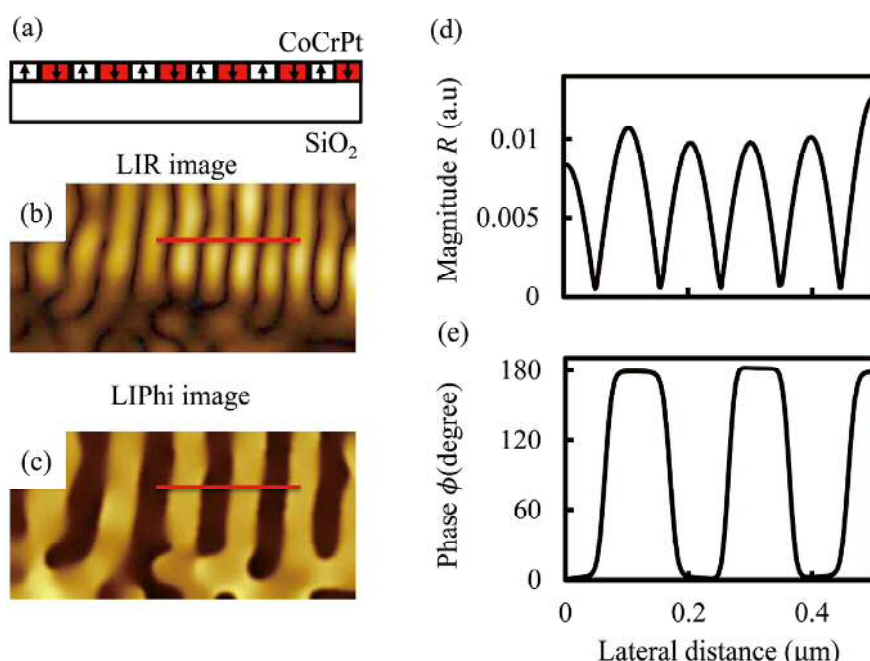


図7 (a) CoCrPt-SiO₂垂直磁気記録媒体の構造。磁気力の (b) 大きさと (c) 位相の画像。
(d) 磁気力の大きさ像の赤線における断面。(e) 磁気力の位相像の赤線における断面。

の周期の輝点と暗点が表れている。図7(d) および 7(e) は、それぞれ、図7(b) および 7(c) に示した白線の断面図である。図7(d) では、ピーク間の間隔が 125 nm であり、これはビットの長さに一致する。他方、図7(e) では、ピーク間隔が 250 nm であり、これはビット長の約2倍の長さである。また、位相変化が約 170° から 180° あることが分かる。これらの結果は、強度像および位相像が、それぞれ、書き込まれた磁気情報の大きさと極性を反映しているためである。このように強磁性共鳴を用いた磁気力顕微鏡は、磁性体試料の磁気特性だけを高い空間分解能で分離測定できることが分かった。

5. まとめ

探針・表面間に働く磁気相互作用だけを分離測定できる顕微鏡について紹介した。ここでは、磁気相互作用力だけを分離測定する方法として、強磁性共鳴を利用するというアイデアを導入した。すなわち、強磁性体をコートした探針に変調されたマイクロ波を照射し、探針先端の磁化状態を強磁性共鳴により変調し、探針・試料間相互作用力の変調成分を抽出することにより、磁気相互作用だけを分離測定できるようにした。実験では、磁性体探針・磁性体表面間の磁氣的相互作用だけを分離測定できること

を確認した。この手法は、原理的に、磁性体探針先端の電子軌道と磁性体試料表面の電子軌道の重なりにより生じる力の一種である磁気交換力の測定へも適用できると考えている [11]。したがって、原子数個でできた磁気構造体等 [12] のスピンの状態等を測定することにも応用できる可能性がある。このような技術は量子コンピューティングの基礎的知識を得るためにも非常に重要であり、今後の磁性研究で重要な物性情報を提供できるものと期待される。

謝辞

本研究は、大阪大学の有馬英司氏、内藤賀公氏、李艶君氏、秋田大学の齊藤準氏、吉村哲氏らとの共同研究で行われたもので、共同研究者の皆様に深く感謝いたします。また、本研究は、日本学術振興会・科学研究費補助金の下に実施された。これらの支援に感謝する。

文献

- [1] Y. Martin and H. K. Wickramasinghe, Appl. Phys. Lett. 50 1455, 1987.
- [2] P. Grutter, E. Meyer, H. Heiselmann, L. Rosenthaler, H. R. Hidber and H. J. Güntherodt, J. Vac. Sci. Technol. A, 6, 279, 1988.

- [3] D. Rugar, H. J. Mamin, P. Guethner, S. E. Lambert, J. E. Stern, I. McFadyen I and T. J. Yogi, Appl. Phys. Lett. 68, 1169, 1990.
- [4] U. Hartman, T. Goeddenhenrich and C. Heiden, J. Magn. Magn. Mater. 101, 263, 1991.
- [5] Y. Sugawara, M. Ohta, H. Ueyama and S. Morita, Science, 270, 1646, 1995.
- [6] T. An, N. Ohnishi, T. Eguchi, Y. Hasegawa and P. Kabos, IEEE Magn. Lett. 1, 3500104, 2010.
- [7] T. R. Albrecht, P. Grütter, D. Horne and D. Rugar, J. Appl. Phys., 69, 668, 1991.
- [8] A. Martins, S. C. Trippe, A. D. Santos, and F. Pelegrini, J. Magn. Magn. Mater. **308**, 120 (2007).
- [9] A. Butera, J. N. Zhou, and J. A. Barnard, Phys. Rev. B, 60, 12270 (1999).
- [10] E. Arima, Y. Naitoh, Y. J. Li, S. Yoshimura, H. Saito, H. Nomura, R. Nakatani, and Y. Sugawara, Nanotechnology, **26**, 125701, 2015.
- [11] U. Kaiser, A. Schwarz, and R. Wiesendanger, Nature 446, 522, 2007.
- [12] J. Bamidele, S. H. Lee, Y. Kinoshita, R. Turanský, Y. Naitoh, Y. J. Li, Y. Sugawara, I. Štich, and L. Kantorovich, Nature communications, **5**, 4476, 2014.

