

研究シーズ探索プログラム 研究課題別評価書

1. 研究課題名

磁気交換相互作用の原子分解能計測手法の開発

2. 研究代表者

菅原 康弘(大阪大学 大学院工学研究科 教授)

3. 研究シーズ探索成果の概要

革新的なスピントロニクスデバイスの概念の実現は、原子スケールの磁氣的性質を解析し、思い通りに作り上げる能力に大きく依存する。ナノ構造体の磁氣的性質を理解するために最も重要なものは、原子の磁気モーメント(スピン)間の磁気交換相互作用である。そこで本研究は、『強磁性共鳴を用いて、物質表面の結晶構造と交換力を原子分解能で分離測定できる磁気交換力顕微鏡を開発すること』を目的とする。まず、強磁性共鳴を利用して探針の磁化状態を変調するため、マイクロ波を探針先端に高効率に照射する機構を検討した。次に、探針・試料間に働く磁気交換力を最も高感度に測定するため、力測定システムの低ノイズ化を実現するとともに、最適な観察条件を解明した。最後に、反強磁性体表面の個々の原子の結晶構造と交換力(スピン配列)を原子分解能で観察することを試みた。現時点では、原子分解能観察には成功していないが、同じ方向性で続けてもいけば結果を出せる可能性が高く、将来的にも推進すべき研究シーズである。

4. 研究シーズ探索のねらい

革新的なスピントロニクスデバイスの概念の実現は、原子スケールの磁氣的性質を解析し、思い通りに作り上げる能力に大きく依存する。ナノ構造体の磁氣的性質を理解するために最も重要なものは、原子の磁気モーメント(スピン)間の磁気交換相互作用である。磁気交換相互作用を直接測定できる革新的な手法として、磁気交換力顕微鏡が注目されている。この手法は、磁性体探針・磁性体試料間に働く交換力を検出する。最近、交換力を原子分解能で測定できることが、ドイツのグループにより実証されたが、得られた画像は、装置のノイズレベルをわずかに上回る程度であり、また、表面の結晶構造と磁気信号の分離も行われていない。

本研究は、『強磁性共鳴を用いて、物質表面の結晶構造と交換力を原子分解能で分離測定できる磁気交換力顕微鏡を開発すること』を目的とする。このような磁気交換力顕微鏡が開発されれば、原子スケールの磁気交換相互作用を直接測定できるようになる。得られる知見は、磁性材料の原子スケールの機能発現機構を解明することを容易にすると期待され、特に、物性科学において極めて重要な学問領域である『表面磁性科学』を大きく進歩させる。また、このような革新的な研究手法の出現は、磁性研究の仕方を質的に変える可能性がある。

5. 研究シーズ探索の方法と成果

5.1 方法

磁気交換力顕微鏡において、磁気交換力だけを分離測定する方法として、顕微鏡探針の磁化状態の変調に強磁性共鳴を利用するというアイデアを導入する(図1)。すなわち、強磁性体をコートした探針先端に変調されたマイクロ波を照射し、探針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、交換力だけを分離するという考えである。

具体的な研究課題は、以下のようになっている。

1) マイクロ波を磁性体探針の先端に効率的に照射する機構の構築

強磁性共鳴を利用して探針の磁化状態を変調するには、マイクロ波を探針先端に高効率に照射する必要があり、そのための機構を検討する。

2) 磁気交換力を高感度に測定するためのシステムの低ノイズ化と最適観察条件の解明

探針・試料間に働く磁気交換力を最も高感度に測定するために、力測定システムの低ノイズ化を実現するとともに、最適な観察条件を解明する。

3) 原子分解能で交換力だけを分離観察できることを実証

反強磁性体である酸化ニッケルNiOを磁性体試料として取り上げ、この表面の個々の原子の結晶構造と交換力(スピン配列)を原子分解能で観察できることを実証する。

5.2 成果

1) マイクロ波を探針先端に高効率に照射できるアンテナの実現

磁性共鳴を利用して探針の磁化状態を変調するためには、照射するマイクロ波の周波数を強磁性共鳴が生じる周波数に設定するとともに、マイクロ波を探針先端に高効率に照射する必要がある。本研究では、3種類のアンテナ(ループアンテナ、GSGプローブ、探針アンテナ)について理論的・実験的に検討した(表1)。その結果、ループアンテナは、使用できる周波数が極めて限定されるため、マイクロ波の周波数を強磁性共鳴が生じる周波数に一致させることが困難である。また、照射領域が波長程度(数cm)に広がってしまうため、探針先端を十分なパワーで照射することが困難である。他方、近接場マイクロ波を利用するGSGプローブと探針アンテナは、放射特性に周波数依存性がなく、マイクロ波の周波数を強磁性共鳴が生じる周波数に一致させることが容易である。また、近接場効果を利用しているため、極めて限られた領域にマイクロ波を放射できる。特に、探針アンテナ

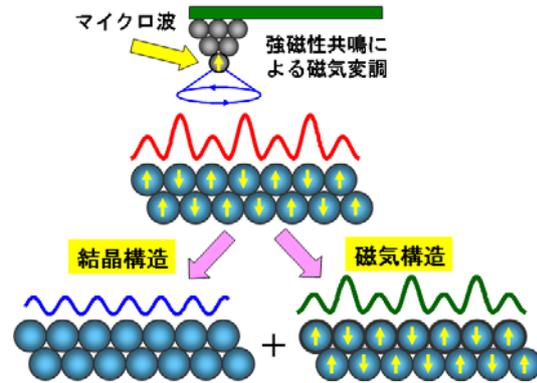


図1 強磁性共鳴を用いた探針の磁化状態の変調と結晶構造と磁気構造の分離測定

表1 各種マイクロ波アンテナの比較結果

	ループアンテナ	GSGプローブ	探針アンテナ
タイプ	伝搬場	近接場	近接場
小型化	×	△	○
指向性	○	—	—
広帯域化	△	○	○
照射効率	△	○	○

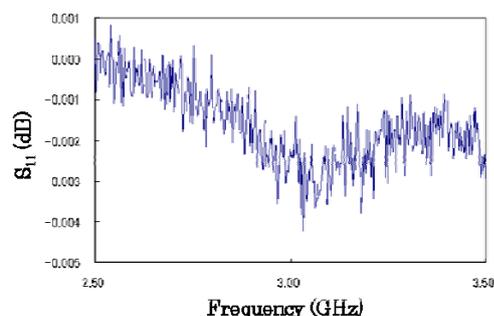


図2 近接場アンテナによる磁性カンチレバーの反射特性の測定結果

ナは極めて小型であるため、カセンサーであるカンチレバーの先端に接近させることが容易である。そこで、本研究の目的に適するアンテナとして、探針アンテナを採用した。

図2は、試作した探針アンテナを磁性カンチレバー(SiカンチレバーにFe磁性膜をコート)に接近させ、探針アンテナでのマイクロ波の反射係数 S_{11} の周波数依存性を測定した結果である。なお、この実験においては、今回の予算で購入したネットワークアナライザを利用した。図を見てわかるように、3.1GHz付近で反射係数が低下している。この反射係数の低下は、強磁性共鳴によるものと考えられる。

2) 磁気交換力を高感度に測定するためのシステムの低ノイズ化の実現

微弱な磁気交換力を高感度に測定できるように、現有の超高真空原子間力顕微鏡の高感度化について研究を推進した。具体的には、カンチレバーの微小な変位を検出する光てこ変位検出計の高感度化について検討した。現有の光てこ変位検出計のノイズは、光源である半導体レーザーのモードホップノイズが大きな原因となっていた。

そこで、半導体レーザーに高周波変調を重畳することによりモードホップノイズを低減し、変位検出計の低ノイズ化を実現した。また、レーザー光出力を最適化することにより、ほぼレーザー光のショットノイズが支配するレベルまでノイズを低減することに成功した。図3は、カンチレバーの熱ノイズを測定した結果である。これより、光てこ変位検出計の最小検出可能なノイズ密度が、約 $80\text{fm}/\sqrt{\text{Hz}}$ であり、極めて高い検出感度を実現した。

また、図4は、この高感度化した超高真空原子間力顕微鏡を用いて観察したSi(111)7x7表面の原子間力顕微鏡像である。非常に明瞭に表面の原子を観察することに成功していることがわかる。

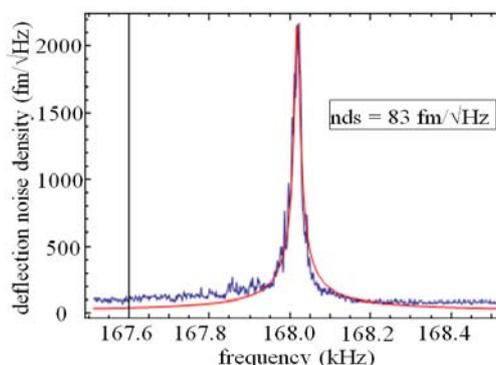


図3 カンチレバーの熱ノイズ測定結果

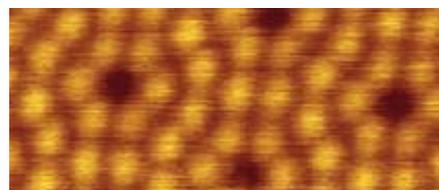


図4 Si(111)7x7表面の原子間力顕微鏡像。

3) 磁気交換力を高感度に測定するための観察条件の解明

磁性体探針・磁性体試料間に働く磁気交換力は、カンチレバーの共振周波数のシフトとして測定される。その周波数シフトの大きさは、磁気交換力が短距離相互作用力であるため、カンチレバーのばね定数、機械的共振周波数、振動振幅などの観察条件に大きく依存する。例えば、探針先端と試料表面の最近接距離が等しいとする。カンチレバーの振動振幅が減少すると、探針と試料とが相互作用する時間が増加し、周波数シフトは増加する。一方、カンチレバーの振動振幅が増加すると、カンチレバーの振動運動に対する熱エネルギーの擾乱が増加し、周波数シフトのノイズは増加する。このため、磁気交換力を最も高感度に測定できる最適なカンチレバーの振動振幅が存在する。ここでは、磁気交換力を最も高感度に測定するための様々な観察条件を理論的に解明した。

4) 試料のへき開機構の構築

磁性体試料として反強磁性体である酸化ニッケルNiOを取り上げ、この表面の個々の原子の結晶構造と交換力(スピン配列)を原子分解能で観察できることを実証する。酸化ニッケル表面を原子分解能で観察するためには、原子レベルで平坦で清浄な表面を準備する必要がある。そこで、現有の超高真空原子間力顕微鏡に酸化ニッケルNiOを超高真空中でへき開するための機構を準備した(図5)。



試料へき開機構

図5 試料のへき開機構を付加した磁気交換力顕微鏡の外観

5) 原子分解能での交換力の分離観察の試み

試料として酸化ニッケル NiO(001)を、磁性体探針として FePt 磁性膜カンチレバーを取り上げ、表面の個々の原子の結晶構造と交換力(スピン配列)を原子分解能で観察できるかどうかを検討した。具体的には、強磁性共鳴を利用して探針の磁化状態を変調し、カンチレバーの周波数シフトに現れるこの変調成分をロックインアンプで検出することにより、磁気交換力だけを分離測定しようとした。残念ながら、現時点では、酸化ニッケル NiO(001)表面の反強磁性的なスピン配列(隣接原子のスピンが反平行に配列)を画像することには成功していないが、同じ方向性で続けてもいけば結果を出せる可能性が高い。

6. 自己評価

磁気交換力顕微鏡において、磁気交換力だけを分離測定するためには、磁性探針の磁化状態を効率よく変調することが極めて重要である。そこで、本研究プロジェクトでは、探針の磁化状態の変調に磁性共鳴を利用するという新しいアイデアを導入した。このアイデアは、非常に革新的で、評価に値するものと考えられる。また、当初、マイクロ波を探針に照射する手段としてループアンテナを考えていた。しかし、ループアンテナでは、マイクロ波の周波数を強磁性共鳴が生じる周波数に設定したり、探針先端にマイクロ波を高効率に照射したりすることが困難であることが判明した。この問題は、本研究プロジェクトの根幹を揺るがすものである。この問題に対して、放射特性に周波数依存性が少なく、また、極めて限られた領域にマイクロ波を放射できる近接場効果を利用するマイクロ波アンテナの使用を思いつき、使用できることを実証した。このアイデアも、評価に値すると考えている。

さらに、本研究プロジェクトを実現するためには、磁気交換力を高感度に測定するための測定システムの低ノイズ化や最適観察条件の解明、原子レベルで平坦で清浄な表面を準備するためのへき開機構の準備が重要となる。これらはほぼ順調に進展したと考えている。ただし、1年間という短い期間内では、磁性材料のスピン配列を原子分解能で画像化することには成功していない。本研究の各要素技術をしっかりと高めることにより、近い将来、必ず、本研究プロジェクトの目的が達成されると確信している。

7. PO の見解

本研究は磁気交換相互作用を直接測定可能な磁気交換力顕微鏡の開発を目指したもので、原子間力顕微鏡の探針を磁化し、磁気交換力を原子分解能で観測しようとするものである。探針にマイクロ波を当て強磁性共鳴により変調し、探針磁化、変調の基本構造は明確化された。しか

しながら、原子のスピ状態を観測するまでには至っていない。
提案されている測定法のアイデアは優れており、目標とする隣接原子のスピ状態まで観測されればその応用は広い。現状の問題はマイクロ波の出力不足とのことであるが、原理に基づく測定ができていないので評価は難しい。スピエレクトロニクス発展に寄与できる技術として、早期の研究達成を期待したい。

8. 研究成果リスト

(1)論文(原著論文)発表

- ・Y. Naitoh, Z. Ma, Y. J. Li, M. Kageshima and Y. Sugawara, “Simultaneous observation of surface topography and elasticity at atomic scale by multifrequency frequency modulation atomic force microscopy”, J. Vac. Sci. & Technol. B Vol. 28, No. 6, pp.1210-1214, 2010.
- ・Y. Naitoh, Y. J. Li, H. Nomura, M. Kageshima, and Y. Sugawara, ““Effect of Surface Stress around the S_A Step of Si(001) on the Dimer Structure Determined by Noncontact Atomic Force Microscopy at 5 K”, J. Phys. Soc. Jpn., Vol. 79, No. 1, pp.013601(4 pages), 2010.

(2)特許出願

研究期間累積件数： 0 件

(3)口頭発表

①学会

国内0件, 海外6件

- ・Y. Sugawara, “Simultaneous measurement of surface topography and elasticity at atomic scale by multifrequency FM-AFM”, 3rd International Symposium on Atomically Controlled Fabrication Technology, November 24-26, Osaka University Nakanoshima Center, Osaka, Japan.
- ・Y. Sugawara, ”Atom Manipulation and Force Spectroscopy on Cu(110)-O Surface with Low Temperature AFM”, 15th International Conference on Solid Films and Surfaces (ICSFS-15), October 5-10, 2010, International Convention Center, Beijing, China (**Invited Talk**).
- ・ Y. Sugawara, “Atom Manipulation and Force Spectroscopy on Cu(110)-O Surface with Low Temperature Noncontact AFM”, 4th AEARU Advanced Materials Science Workshop on Artificial and Self-Organized Nanostructure Sciences and Nano-Technologies for the Sustainable World, August 29- September 3, 2010, University of Tsukuba, Tsukuba, Japan (**Invited Talk**).
- ・ Y. Sugawara, “Atom manipulation and force spectroscopy on Cu(110)-O surface with low temperature noncontact AFM”, 18th International Vacuum Congress (IVC-18), August 25, August 23-27, 2010, International Convention Center, Beijing, China (**Invited Talk**).
- ・ Y. Sugawara, Y. Kinoshita, Y. Naitoh, M. Kageshima, and Y. J. Li, “Atom Manipulation and Force Spectroscopy on Cu(110)-O Surface with Low Temperature Noncontact AFM”, 13th International Conference of Noncontact Atomic Force Microscopy (NCAFM2010), July 31 – August 4, 2010, Kanazawa, Japan.
- ・ Y. Sugawara, “Atom manipulation and force spectroscopy on Cu(110)-O surface with low temperature noncontact AFM”, 6th Nanoscience and Nanotechnology Conference (NANOTR-VI), June 15-18, 2010, Golden Dolphin Hotel, Izmir, Turkey (**Invited Talk**)

②その他

国内2件、 海外0件

- ・菅原康弘、“原子間力顕微鏡の現状と展望” 第 2 回けいはんな物質科学フォーラム、2010 年 5 月 15 日、奈良先端科学技術大学院大学(招待講演)。
- ・菅原康弘、“力学的な原子分子操作と分光計測”、第 4 回ナノ理工学情報交流会、2010 年 1 月 28 日、大阪大学ナノサイエンスデザイン教育研究センター(依頼講演)。

(4)その他の成果(受賞、著書、招待講演、特記事項等)

なし