

平成 21 年 5 月 15 日現在

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19360017

研究課題名（和文） 局所的フォーススペクトル法による単原子物性計測手法の確立

研究課題名（英文） Establishment of atom-by-atom interaction force using site-specific force spectroscopy

研究代表者

阿部 真之(ABE MASAYUKI)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：00362666

研究成果の概要：

超高真空・室温で動作する周波数変調方式原子間力顕微鏡（FM-AFM）を用い、AFM 探針先端の原子1つと、測定試料表面の所定の原子1つの間に働く原子間力の距離依存性を測定するフォーススペクトロスコピーの手法を確立した。この手法を用いて、フォーススペクトロスコピーによる原子識別、フォースマッピングによる原子識別、原子識別画像化測定手法、原子ペンによる原子レベル構造物の作成とフォーススペクトロスコピーへの応用、フォースマッピングによる FM-AFM の画像化機構の解明を行えるようになった。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	10,500,000	3,150,000	13,650,000
2008年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
年度			
年度			
年度			
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎

キーワード：原子間力顕微鏡、フォーススペクトロスコピー、交換型原子操作、

フォーススペクトロスコピー、フォースマッピング、原子識別、国際研究者交流

1. 研究開始当初の背景

個々の原子間に働く相互作用力やポテンシャルを測定することは、物性物理学や表面科学の基本的な測定の一つであると考えられるが、実験の技術的制約から信頼性のある測定がこれまで困難であった。このような測定を行うために、原子間力顕微鏡（AFM）探針の先端原子と試料表面原子の間に働く相互作用を測定する方法（局所的フォーススペクトル法）が2000年ごろから欧州で始ま

った。しかしながら、信号対ノイズ比および再現性、測定時間などの課題が多く、信頼性のある測定が困難であり、超高真空極低温環境下のみで行えなかった[例えば M. A. Lantz et al., Science 291, 2580 (2001)]。しかも、得られた力と距離の曲線も物理や化学の教科書で示されているような理論計算による結果とは異なるものが得られていた。近年、申請者は、これまでの測定技術に関する問題を一挙に解決する手法を開発し[Appl.

Phys. Lett. 87, 173503 (2005)、特願2005-112342、他]、原子種の識別を行える可能性[Phys. Rev. B 73, 205329 (2006)、他]を示した。さらに表面におけるエネルギーの散逸も測定できることを実証した[Phys. Rev. Lett. 96, 106101 (2006)]。一方、局所的フォーススペクトル法のデータに含まれる物理量についての解釈はほとんど行われておらず、実験手法としての普遍性は明らかになっていなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、局所的フォーススペクトル法によって、物理学の基本的な物理量である相互作用力やポテンシャルエネルギーを個々の原子レベルで定量的に測定し、固体を形成する個々の原子の結びつきの強さや距離依存性を、周辺原子の構造や原子種の影響をふまえて解明するところにある。さらに、本研究は実験的研究であるため、海外の理論研究者と国際連携を行うことで、本手法の普遍性を明らかにする。具体的には、以下の項目に関して研究を行う。

(1) 原子種の識別に関する本手法の普遍性の検証

2もしくは3種類の元素が混在する材料系において、本手法を適用し、得られた距離依存性曲線の違いから原子種の識別に関する指針を得る

(2) 結晶方位や原子配列による表面への影響の解明

原子操作技術によって任意の原子配列を作成し、周辺原子種の違いによる電荷移動に基づく波動関数の違いや格子歪みの効果を議論できるようにする

3. 研究の方法

これまでに開発を行ってきた、超高真空・室温で動作し、原子分解能を有する周波数変調方式のAFM(FM-AFM)を用い、AFM探針先端の原子1つと、測定試料表面の所定の原子1つの間に働く原子間力の距離依存性を測定する(フォーススペクトロスコピー)さらに、フォーススペクトロスコピーを2次元に拡張したフォースマッピングも行うことで、本研究を行った。

4. 研究成果

(1) フィードフォワード技術による位置決め精度の向上

アトムトラッキング技術とフィードフォワード技術を組み合わせることで、室温に

おける非接触原子間力顕微鏡を用いたフォーススペクトロスコピーおよび原子操作実験の精度を向上させた。さらに、表面の力の場を可視化できるフォースマッピングの精度を向上させることに成功した。

(2) フォーススペクトロスコピーによる原子識別方法の確立

フォースマッピング法を原子識別実験に適用した。具体的には、(Si, Pb, Sn)/Si(111)-($\sqrt{3}\times\sqrt{3}$)表面の3元素を識別することに利用した。原子間力顕微鏡凹凸像では、あたかも2種類しかないように見えるが、フォースマッピングによって、相互作用力の2次元分布を視覚的にとらえることが可能となり、3種類の原子が存在することが実証できた。

(3) フォースマッピングによる原子識別方法の確立

上記(2)の方法をフォースマッピングに適用し、フォーススペクトロスコピーよりも簡便、高速、視覚的に表面の力やポテンシャルの分布を測定できることを明らかにした。

(4) 原子識別画像化方法の確立

上記(3)の手法を応用して、原子の識別を画像として得ることに成功した。具体的には、探針-試料間距離を変調し得られた応答は原子間結合力に相当することから、その応答の振幅を画像化した。その結果、フォーススペクトロスコピーやフォースマッピングでは時間と技術が必要であった原子識別実験を、簡単に高速に行えることが可能になった。

(5) 原子ペンによる原子レベル構造物の作成とフォーススペクトロスコピーへの応用

AFM探針先端に存在する原子を、ペンのインクのように試料表面に埋め込む技術を開発した。再現性を実証するために、シリコン製探針をもちいてスズの表面にシリコン原子を埋め込んでいき、文字を書いた(描いた)。さらに、その手法を用いて、自然界に存在しない構造を作成し、フォーススペクトロスコピーによって、周辺原子の効果を明らかにした(論文準備中)。

(6) フォースマッピングによるFM-AFMの画像化機構の解明

Si(111)-(7×7)表面上で周波数シフトマッピングを行うことによって、力のマップ、さらにポテンシャルマップ、水平力マップを算出

し、カンチレバーの振動振幅によって、得られるコントラストが変わることを実証した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計13件)

1. D. Sawada, Y. Sugimoto, T. Namikawa, M. Abe, and S. Morita: "Simultaneous atomic imaging of atomic force microscopy and scanning tunneling microscopy using metal coated cantilevers", *Material Transactions* Vol.50, No.5, pp.940-942 (2009).
2. Y. Sugimoto, T. Namikawa, M. Abe, and S. Morita: "Mapping and imaging for rapid atom discrimination: A study of frequency modulation atomic force microscopy", *Applied Physics Letters* Vol.94, pp.023108-1/-3 (2009).
3. Y. Sugimoto, P. Pou, Ó. Custance, P. Jelinek, M. Abe, R. Pérez, and S. Morita, "Complex Patterning by Vertical Interchange Atom Manipulation Using Atomic Force Microscopy", *Science* vol.322, 413 (2008).
4. Y. Sugimoto, K. Miki, M. Abe, and S. Morita, "Statistics of lateral atom manipulation by atomic force microscopy at room temperature", *Physical Review B* vol.78, 205305 (2008).
5. D. Sawada, T. Namikawa, M. Hiragaki, Y. Sugimoto, M. Abe, and S. Morita, "High-spatial resolution topographic imaging and dimer distance analysis of Si(100)-(2x1) using noncontact atomic force microscopy" *Japanese Journal of Applied Physics* vol.47, 6085 (2008).
6. Y. Sugimoto, T. Namikawa, K. Miki, M. Abe, and S. Morita, "Vertical and lateral force mapping on the Si(111)-(7x7) surface by dynamic force microscopy", *Physical Review B* vol.77, 195424 (2008).
7. 森田清三、杉本宜昭、大藪範昭、Óscar Custance、阿部真之, "フォースカーブによる元素識別とフォース・マッピング", *表面科学* Vol.29, No. 4, pp.214-220(2008).
8. A. Ohiso, M. Hiragaki, K. Mizuta, M. Abe, and S. Morita, "Atom-by-Atom Chemical Coordination Effect Observed in Noncontact AFM Topography of

Pb/Si(111)-(3 × 3) Mosaic Phase", *e-Journal of Surface Science and Nanotechnology* vol.6, pp.79-83, 2008.

9. Y. Seino, S. Yoshikawa, M. Abe, and S. Morita, "Growth dynamics of insulating SrF₂ films on Si(111)", *J. Phys.:Condens. Matter* 19(2007)445001.
10. Y. Sugimoto, S. Innami, M. Abe, Ó. Custance, and S. Morita, "Dynamic force spectroscopy using cantilever higher flexural modes", *Applied Physics Letters* 91, 093120 (2007).
11. A. Ohiso, Y. Sugimoto, M. Abe, and S. Morita, "Tip-induced Local Reconstruction on the Pb/Ge(111) Surface Using Frequency Modulation Atomic Force Microscopy", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.46, No.8B, pp. 5582-5585 (2007).
12. M. Abe, Y. Sugimoto, T. Namikawa, K. Morita, N. Oyabu, and S. Morita, "Drift-compensated data acquisition performed at room temperature with frequency modulation atomic force microscopy", *Applied Physics Letters* 90, 203103(2007).
13. Y. Sugimoto, P. Jelinek, P. Pou, M. Abe, S. Morita, R. Pérez, and Ó. Custance, "Mechanism for Room-Temperature Single-Atom Lateral Manipulations on Semiconductors using Dynamic Force Microscopy", *Phys. Rev. Lett.* 98, 106104(2007).

[学会発表](計39件)

1. 阿部真之、澤田大輔、Yurtsever Ayhan、杉本宜昭、森田清三, "原子間力顕微鏡による多元素ナノ材料の元素マッピングとボトムアップ組立", *応用物理学会*(2009)
2. 杉本宜昭、三木浩太郎、阿部真之、森田清三, "AFMを用いた室温原子操作の統計的実験", *応用物理学会*(2009)
3. 澤田大輔、杉本宜昭、阿部真之、森田清三, "室温環境下における相互作用力/トンネル電流の同時測定", *応用物理学会*(2009)
4. 杉本宜昭、三木浩太郎、阿部真之、森田清三, "室温原子操作の原子移動確率の研究", *金属学会*(2009)
5. 澤田大輔、杉本宜昭、阿部真之、森田清三, "Ge(111)-c(2×8)表面におけるAFM/STM同時測定", *金属学会*(2009)
6. 澤田大輔、杉本宜昭、阿部真之、森田清三, "AFM/STMによる周波数シフトとト

- ンネル電流の同時測定”，物理学会（2009）
7. M. Abe, Y. Sugimoto, and S. Morita, “Atomic force techniques for nano-engineering”, 2008 International Symposium on Physics of Quantum Technology, TU-K9
 8. Y. Sugimoto, T. Namikawa, K. Miki, M. Abe, and S. Morita, “Vertical and lateral force mapping on the Si(111)-(7x7) surface by dynamic force microscopy”, The 11th International Conference on Non-contact Atomic Force Microscopy(NC-AFM) (2008).
 9. M. Abe, Y. Sugimoto, K. Miki, T. Namikawa, and S. Morita, “Imaging and Mapping for discriminating atom species using Non-contact Atomic Force Microscopy”, The 11th International Conference on Non-contact Atomic Force Microscopy(NC-AFM) (2008).
 10. 杉本宜昭、並川 峻、三木浩太郎、阿部真之、森田清三, “フォースマッピングを用いた Si(111)-(7x7)上における探針に働く水平力の解析”, 第 69 回応用物理学学会学術講演会(2008 年秋季), 4a-L5.
 11. 杉本宜昭、並川 峻、三木浩太郎、阿部真之、森田清三, “フォースマッピングによる FM-AFM 凹凸像の考察”, 第 69 回応用物理学学会学術講演会(2008 年秋季), 4a-L4.
 12. 杉本宜昭、阿部真之、並川峻、三木浩太郎、森田清三, “原子間力顕微鏡を用いた化学結合力マッピング”, 日本金属学会春期大会(2008) S3・24.
 13. 阿部真之、杉本宜昭、澤田大輔、李仁淑、森田清三, “原子間力顕微鏡の超高空間分解能イメージング”, 日本金属学会春期大会(2008) S3・23.
 14. 杉本宜昭、院南誠嗣、阿部真之、クスタンセオスカル、森田清三, “2 次共振モード原子間力顕微鏡による Force spectroscopy”, 第 55 回応用物理学関係連合講演会(2008 年春季), 29a-Q-6.
 15. 澤田大輔、並川峻、平垣倍弘、杉本宜昭、阿部真之、森田清三, “P/Si(001)表面の高分解能 NC-AFM 観察”, 第 55 回応用物理学関係連合講演会(2008 年春季), 29a-Q-3.
 16. 岩崎悟、平井明、杉本宜昭、阿部真之、森田清三, “非接触原子間力顕微鏡を用いた Si(111)-(7x7)表面上の Si クラスターに関する研究”, 第 55 回応用物理学関係連合講演会(2008 年春季), 29a-Q-2.
 17. 澤田大輔、並川峻、平垣倍弘、杉本宜昭、阿部真之、森田清三, “AFM による P/Si(001)-(2x1)表面観察”, 日本物理学会第 63 回年次大会, 24pPSA-22(2008).
 18. Y. Sugimoto, M. Abe, Ó. Custance, S. Morita, P. Pou, P. Jelinek and R. Pérez, “Room temperature atomic manipulations using dynamic force microscopy”, The 15th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (2007)S7-1. [invited talk]
 19. D. Sawada, T. Namikawa, M. Hiragaki, Y. Sugimoto, M. Abe, and S. Morita, “AFM observation of P/Si(001)-(2x1) surface”, The 15th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (2007)S4-23.
 20. S. Iwasaki, A. Hirai, Y. Sugimoto, M. Abe, and S. Morita, “NC-AFM investigation of the Si clusters on Si(111)-(7x7) surface”, The 15th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (2007)S4-22.
 21. T. Namikawa, K. Miki, Y. Sugimoto, Ó. Custance, M. Abe, and S. Morita, “Atomic identification by dynamic force mapping”, The 15th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (2007)S4-21.
 22. K. Miki, T. Namikawa, Y. Sugimoto, M. Abe, and S. Morita, “Atomic manipulation on the Sn deposited Si(111)-(7x7) surface using atomic force microscopy”, The 15th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (2007)S4-20.
 23. S. Morita, Y. Sugimoto, Ó. Custance, M. Abe, P. Pou, P. Jelinek and R. Pérez “Atom-by-Atom Chemical Identification and Following Atom Manipulation”, 2nd International Workshop on "Materials Science and Nano-Engineering" (2007)B-14.
 24. D. Sawada, T. Namikawa, M. Hiragaki, Y. Sugimoto, M. Abe, and S. Morita, “Atomic force microscopy study of P/Si(001)-(2x1) surface”, 2nd International Workshop on "Materials Science and Nano-Engineering" (2007)PB-07.
 25. Y. Murai, R. Omae, Y. Sugimoto, M. Abe, and S. Morita, “Atomic force microscopy using quartz tuning fork in air”, 2nd International Workshop on "Materials Science and

- Nano-Engineering" (2007)PB-05.
26. T. Namikawa, K. Miki, Y. Sugimoto, Ó. Custance, M. Abe, and S. Morita, "Potential mapping using non-contact atomic force microscopy", 2nd International Workshop on "Materials Science and Nano-Engineering" (2007)PB-04.
 27. A. Ohiso, M. Hiragaki, K. Mizuta, Y. Sugimoto, M. Abe, and S. Morita, "Non-Contact AFM observation of the "Chemical Coordination Effect" of Pb/Si(111)-(3 × 3) Mosaic Phase", 2nd International Workshop on "Materials Science and Nano-Engineering" (2007)PB-03.
 28. M. Hiragaki, D. Sawada, Y. Sugimoto, M. Abe, and S. Morita, "Force spectroscopy using human interface", 2nd International Workshop on "Materials Science and Nano-Engineering" (2007)PB-02.
 29. 杉本宜昭、院南誠嗣、阿部真之、クスタンセ・オスカル、森田清三, "高次共振モード原子間力顕微鏡によるフォーススペクトロスコピー", 日本表面科学会第27回表面化学講演大会, 1D25(2007).
 30. Y. Murai, R. Omae, Y. Sugimoto, M. Abe, and S. Morita, "Atomic force microscopy using quartz tuning fork in air", 2nd International Symposium on Atomic Technologies (2007) P-1-17.
 31. A. Ohiso, M. Hiragaki, K. Mizuta, Y. Sugimoto, M. Abe, and S. Morita, "Surrounding atoms effects" on the Pb/Si(111)-(3 × 3) mosaic phase", 2nd International Symposium on Atomic Technologies (2007) P-1-14.
 32. T. Namikawa, Y. Sugimoto, Ó. Custance, M. Abe, and S. Morita, "Potential mapping at room-temperature using dynamic force microscopy", 2nd International Symposium on Atomic Technologies (2007) P-1-13.
 33. Y. Sugimoto, M. Abe, Ó. Custance, S. Morita, P. Jelinek, P. Pou, and R. Perez, "Room temperature lateral atom manipulations on semiconductors using dynamic force microscopy", 2nd International Symposium on Atomic Technologies (2007) P-1-7.
 34. Y. Murai, R. Omae, Y. Sugimoto, M. Abe, and S. Morita, "Atomic force microscopy using quartz tuning fork in air", Handai Nanoscience and Nanotechnology International Symposium 2007(P-16).
 35. A. Ohiso, M. Hiragaki, K. Mizuta, Y. Sugimoto, M. Abe, and S. Morita, "Non-contact atomic force microscopy investigation of the Pb/Si(111)-(3 × 3) mosaic phase", Handai Nanoscience and Nanotechnology International Symposium 2007(P-11).
 36. T. Namikawa, Y. Sugimoto, K. Morita, Ó. Custance, M. Abe, and S. Morita, "Tip-surface interaction potential mapping at room-temperature using non-contact atomic force microscopy", Handai Nanoscience and Nanotechnology International Symposium 2007(P-8).
 37. M. Abe, Y. Sugimoto, O. Custance, and S. Morita: "Drift-compensated data acquisition performed at room temperature with frequency modulation atomic force microscopy", 17th International Vacuum Conference, July 2-6 2007, Stockholm, Sweden (NSP1-76).
 38. Y. Sugimoto, M. Abe, Ó. Custance, S. Morita, P. Jelinek, P. Pou, and R. Perez, "Mechanism for room-temperature single-atom lateral manipulations on semiconductors using dynamic force microscopy", Handai Nanoscience and Nanotechnology International Symposium 2007(P-7).
 39. S. Morita, M. Abe, Y. Sugimoto, Ó. Custance, "Drift-compensated data acquisition performed at room temperature with frequency modulation atomic force microscopy", 17th International Vacuum Conference(2007).
- 〔図書〕(計1件)
1. M. Abe "Precise Force Measurement" Chap. 2 in "Noncontact Atomic Force Microscopy vol.2" 2009年出版予定 (Springer)
- 〔産業財産権〕
出願状況(計1件)
出願国: 米国、出願番号: 11/802624, 発明者: Masayuki Abe, Masahiro Ohta, Yoshiaki Sugimoto, Kenichi Morita, Noriaki Oyabu, Morita Seizo, Oscar Custance 発明の名称: 「Probe position control system and method」, 出願人: SHIMADZU CORPORATION and OSAKA UNIVERSITY, 出願日: 2007/5/24.

(1)研究代表者

阿部 真之 (ABE MASAYUKI)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：00362666

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし