

## 自己評価報告書

平成23年4月28日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究（S）

研究期間：2008～2012

課題番号：20221004

研究課題名（和文） 複合極限場原子間力顕微鏡を用いた絶縁体表面での力学的な原子分子操作法の開発

研究課題名（英文） Investigation of mechanical manipulation of atoms and molecules on insulator surface with extreme field atomic force microscopy

研究代表者

菅原 康弘 (SUGAWARA YASUHIRO)

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：40206404

研究分野：複合振領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学 ナノ構造科学

キーワード：複合極限場、原子間力顕微鏡、絶縁体表面、原子分子操作

## 1. 研究計画の概要

原子や分子を操作し、新ナノ物質を思い通りに構築するためには、ナノスケールでの物質の自然法則を解明し、これを実用技術に発展させる基礎研究が不可欠である。本研究は、複合極限場（極低温、強磁場、超高真空）原子間力顕微鏡を駆使して、絶縁体表面上で原子や分子を力学的に操作する技術を確立し、ナノ構造体の新規な物性を探索することを目的とする。

## 2. 研究の進捗状況

**(1) 絶縁体表面での力学的な原子操作に成功**

絶縁体表面として酸化銅表面を取り上げ、その表面の銅原子を水平操作できるかどうか検討した。その結果、表面の原子を水平操作するために必要な力（引力あるいは斥力）が、探針先端の原子種に大きく依存することを初めて見出した。この結果は、力学的な原子操作は、探針・表面間の化学的相互作用に強く依存することを示唆している。

**(2) フォース分光法の開発と力学的な原子操作の機構解明に成功**

原子操作の機構を解明するため、探針・試料間のポテンシャル分布を導出し、表面原子の吸着サイトと最近接サイト間のエネルギー障壁の大きさを測定した。その結果、最近接サイトへの拡散障壁の減少が原子移動の原因であることを明らかにした。

**(3) 原子操作により絶縁体表面にナノ構造体を構築することに成功**

力学的な原子操作の制御条件と機構解明の成果を生かして、実際に絶縁体表面上の原子を力学的に操作して、ナノ構造体を構築することに成功した。

**(4) 強磁場下での磁性原子の操作に世界****で初めて成功**

複合極限環境において、酸化銅 Cu(110)-0 表面で磁性原子である Co 原子を水平方法ならびに垂直方法に操作することに成功した。また、原子操作を用いて、1次元ならびに2次元のナノ構造体を構築することにも成功した。なお、強磁場環境下で力学的な原子操作に成功したのは、本研究が初めてである。

**(5) 交換相互作用を分離測定する方法を考案・実証**

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、原子間の交換相互作用である。交換相互作用だけを測定する方法として、強磁性体探針の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という方法を考案し、それを実験的に検証した。

## 3. 現在までの達成度

②おおむね順調に進展している。

(理由)

以下に述べるように、研究目標を達成するための具体的な研究計画が順調に進展し、ほぼ予定通りの成果が得られている。

(1) 絶縁体表面上で原子を操作する制御条件を系統的に検討し、それを明らかにした。具体的には、絶縁体表面としては、Cu(110)表面を熱酸化させた酸化銅 CuO 薄膜表面を取り上げ、また、絶縁体表面の吸着原子として銅 Cu や酸素 O などを取り上げ、水平および垂直に操作するための条件を明らかにした。

(2) 探針・試料間距離を変えながら、カンチレバーの周波数シフトを3次的に測定し、数値計算により、試料表面の力とポテンシャルの3次元分布を導出できるようにした。

(3) 上記(2)の手法を駆使して、絶縁体表面での原子操作の機構を解明した。具体的には、酸化銅表面で最表面の銅原子を水平操作する機構について検討し、銅原子の吸着サイトと最近接サイト間のエネルギー障壁が探針・試料間距離の減少によって引き起こされ、原子が移動することを明らかにした。

(4) 探針・試料間に働く散逸力を用い、エネルギー分解能が約 1meV と、極めて高感度な静電気力分光法を実現した。この結果、絶縁体表面上に形成されるナノ構造体の電荷移動に伴うポテンシャルの変化や電子状態を高感度に捉えることが可能となった。

(5) 絶縁体表面で原子を力学的に操作して、1次元・2次元のナノ構造体を構築することに成功した。この結果、ナノ構造体を構成する原子の種類や原子の数、次元を変化させ、電荷移動に伴うポテンシャル変化や電子状態の変化を解明する実験が可能となった。

(6) 複合極限環境(極低温、超高真空、強磁場)において、絶縁体表面の磁性原子を操作し、ナノ構造体を構築することに成功した。なお、このような研究はこれまで全く行われていなく、本研究が世界で初めてである。

(7) ナノ構造体の磁氣的性質を理解するために、強磁性共鳴を利用して交換相互作用を分離測定するという方法を考案し、その有効性を実験的に検証した。このアイディアは、非常に革新的で、評価に値する。

#### 4. 今後の研究の推進方策

平成23年度は、実際に1次元・2次元・3次元ナノ構造体を構築し、その物性を解明する。また、強磁場下で磁性原子の操作し、磁気相互作用を解明する。平成24年度は、ナノ構造体に現われる新規なスピン物性を探索する。

#### 5. 代表的な研究成果

(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18件)

- ① "Force Mapping on NaCl(100)/Cu(111) Surface by Atomic Force Microscopy at 78 K", Y. J. Li, K. Tenjin, Y. Kinoshita, Z. Ma, L. Kou, Y. Naitoh, M. Kageshima, and Y. Sugawara, Ultramicroscopy, 2011. (In press).
- ② "Simultaneous observation of surface topography and elasticity at atomic scale by multifrequency frequency modulation atomic force microscopy", Y. Naitoh, Z. Ma, Y. J. Li, M. Kageshima and Y. Sugawara, J. Vac. Sci. Technol. B, **28**, 1210-1214, 2010.
- ③ "Effect of Surface Stress around the

$S_A$  Step of Si(001) on the Dimer Structure Induced by Noncontact Atomic Force Microscopy at 5 K", Y. Naitoh, Y. J. Li, H. Nomura, M. Kageshima and Y. Sugawara, J. Phys. Soc. Jpn., **79**, 013601 (1-4), 2010.

- ④ "The influence of Si cantilever tip with/without tungsten coating on NC-AFM imaging of Ge(001) surface", Y. Naitoh, Y. Kinoshita, Y. J. Li, M. Kageshima and Y. Sugawara, Nanotechnology, **20**, 264011 (1-7), 2009.
- ⑤ "Atomic-Scale Imaging of B/Si(111)  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  Surface by Noncontact Atomic Force Microscopy", M. Kinoshita, Y. Naitoh, Y. J. Li, M. Kageshima and Y. Sugawara, Jpn. J. Appl. Phys., **47**, 8218-8220, 2008.

[学会発表] (計56件)

- ① "Atom manipulation and force spectroscopy on Cu(110)-0 surface with low temperature noncontact AFM", Y. Sugawara, The 18th International Vacuum Congress (IVC-18), August 23-27, 2010, Beijing, China. (Invited)
- ② "Atom manipulation and force spectroscopy on Cu(110)-0 surface with low temperature noncontact AFM", Y. Sugawara, The 6th Nanoscience and Nanotechnology Conference (NANOTR-VI), June 15-18, 2010, Izmir, Turkey. (Invited)
- ③ "Atom Manipulation on Cu(110)-0 Surface with Low Temperature Noncontact AFM", Y. Sugawara, The International Conference on Nanoscience and Technology, China 2009 (ChinaNANO 2009), September 1-3, 2009, Beijing, China. (Invited)

[図書] (計2件)

- ① "走査プローブ顕微鏡を用いたナノイメージング", 菅原康弘、ナノイメージング(エヌ・ティー・エヌ), 60-70, 2008.

[その他]

ホームページ

<http://nanophysics.ap.eng.osaka-u.ac.jp/>