

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 31 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21246010

研究課題名（和文）

原子操作による多元素ナノ構造体の機能制御

研究課題名（英文）Function Control of Multi-atom Nanostructure with atom manipulation

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（和文）：

多元素ナノ構造体の作成・組み替えを行い、局所状態の物性計測を行いながら、その機能を制御する手法を確立した。具体的には、非接触原子間力顕微鏡を用い、フォーススペクトロスコープやフォスマッピングといった原子識別に利用できる相互作用力の定量測定技術等と局所電子状態測定との同時測定から、原子レベルで、ナノ構造体の構成元素と幾何学構造、局所状態の関係について明らかにできることを示した。

研究成果の概要（英文）：

We have established a method for controlling atom function by creating and performing measurements of the local state of multi-element nano-structure. More specifically, using a non-contact atomic force microscopy, we have succeeded in quantitative measurement of interaction forces that can be used to identify surface single atoms (force spectroscopy and force mapping). Results showed that we can expect to see the relation between the structure and the electronic local state in atomic level.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	19,000,000	5,700,000	24,700,000
2010 年度	8,000,000	2,400,000	10,400,000
2011 年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
年度			
年度			
総計	31,600,000	9,480,000	41,080,000

研究分野：走査プローブ顕微鏡

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 薄膜・表面界面物性

キーワード：走査プローブ顕微鏡、非接触原子間力顕微鏡、原子操作、ナノ構造

## 1. 研究開始当初の背景

材料の性質を決定する最小単位は、単一原子だけではなく、原子クラスターやナノワイヤ、材料内部に局在する原子が集合した状態であることが明らかにされつつある（これらの構造を本申請では“ナノ構造体”とする）。また、実用電子デバイスの微細化に伴い、ナ

ノサイズ物質の物性理解と物性制御が現実問題として重要となり、ナノ構造体に新たな物性発現の可能性がある。一方、ナノ構造体における機能の特性を明らかにし、材料設計へと展開させるためには、サブナノスケールまで立ち入った原子構造に関する知見を得て、その原子構造から予想される電子状態に

関する情報を包括的に理解することが必要となる。例えば、酸化亜鉛バリスタの場合、少量の重金属を添加することでその特性が大幅に改善される。これは重金属が粒界付近に局在することによると言われている。一方、重金属原子の位置の違いでその局所的な状態がどう変化しマクロな特性にどのように反映しているのかを明らかにするための手法は確立されていない。

## 2. 研究の目的

多元素ナノ構造体の作成・組み替えを行い、局所状態の物性計測を行いながら、その機能を制御する手法を確立することを目的とする。具体的には、非接触原子間力顕微鏡 (NC-AFM) を用い、我々のグループで発見した、探針による原子位置の交換現象 (交換型原子操作) を利用し、多元素ナノ構造体を作成する手法を確立する。さらに、フォーススペクトロスコーピーやフォースマッピングといった原子識別に利用できる相互作用力の定量測定技術等 [阿部真之, 科研費基盤(B), H19-H20 実施] と局所電子状態測定との同時測定 (つまり、導電性 AFM 探針を用いた NC-AFM と走査型トンネル顕微鏡 (STM) の同時測定) から、原子レベルで、ナノ構造体の構成元素と幾何学構造、局所状態の関係について明らかにし、材料の機能を設計するための指針を得ることを目指す。

## 3. 研究の方法

本研究課題では、超高真空で動作する NC-AFM を用いた原子操作によって機能性のある多元素ナノ構造を作成し、構造と電子状態の関係を明確にすることを目的としている。大きく以下の3項目に研究テーマを取り上げることとする。

1. 原子操作による多元素ナノ構造の組立
2. 多元素ナノ構造の原子レベル物性評価
3. 原子操作による多元素ナノ構造の機能制御

具体的な研究方法としては、原子を識別しながら、構造と局所電子状態を同時に評価できる手法を確立する。例えば、これまで、独立に開発してきたフォーススペクトロスコーピーやフォースマッピング (結合力や原子識別)、AFM/STM 同時測定 (凹凸と電子状態) を統合し、フォースマッピングと電流マッピングの同時測定 (AFM/STM マッピング) を行えるようなシステムを構築する。ナノ構造が発現する機能は構造 (原子の種類と配置) と電子状態が密接に絡み合った結果であり、これらの特性を原子レベルで同時に測定することが重要である。

## 4. 研究成果

代表的な成果を以下にあげる。

### (1) 多元素ナノ構造の原子レベル物性評価

ナノ構造が発現する機能は構造 (原子の種類と配置) と電子状態が密接に絡み合った結果であり、これらの特性を原子レベルで同時に測定することが重要である。昨年度は、原子間力顕微鏡 (AFM) と走査型トンネル顕微鏡 (STM) を用いて、構造と局所電子状態のマッピングを同時に評価できる手法を確立した。今年度は、それを具体的な実験に実施した。その結果、AFM と STM では、画像がもっとも綺麗に測定出来る探針-試料間距離に1から2オングストロームの差があることがわかった。さらに、AFM のノイズは長距離力成分によって増大されることがわかり、AFM の感度向上には探針の先鋭化が必要であることを実験的に示すことができた。

### (2) 機能性表面における高分解能画像測定とフォーススペクトロスコーピー

光触媒材料の TiO<sub>2</sub> 表面において、AFM 測定とフォーススペクトロスコーピーを行った。TiO<sub>2</sub>(110)表面に K を吸着し、ケルビンプローブ力顕微鏡で電荷移動について調べ、探針先端の状態によって、K 上の局所接触電位差の符号が反転しうることを見出した。

### (3) 原子操作による3次元クラスターの作成

多元素ナノ構造は周辺の原子種や個数によって構造が変化することが予想される。例えば、2次元のナノ構造の場合、格子不整合によって試料表面の周期構造が変化することがこれまでの申請者らの実験によってわかっている。クラスターやワイヤには安定原子数 (マジックナンバー) が存在する。そこで、いくつかのモデルとなる材料系において、原子操作によって多元素ナノ構造を組み立てる条件を見いだした。具体的には、室温環境下において、Si(111)-(7x7)表面のハーフユニットセル内に種々の原子 (銀や鉛など) を閉じ込めることに成功した。ハーフユニットセルはポテンシャル障壁が大きいので、探針でそれを下げることで、隣接するハーフユニットセルから表面に蒸着した金属原子を連続して入れていくことが可能になった。その結果、ハーフユニットセル内では3次元のクラスターができることがわかった。

## 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 19 件)  
全て査読有

1. A. Yurtsever, D. Fernández-Torre, C. González, P. Jelínek, P. Pou, Y. Sugimoto, M. Abe, Rubén Pérez, S. Morita: "Understanding image contrast formation in TiO<sub>2</sub> with force spectroscopy", *Physical Review B* Vol.85, 125416-1/-9 (2012), DOI: 10.1103/PhysRevB.85.125416.
  2. H. J. Chung, A. Yurtsever, Y. Sugimoto, M. Abe, and S. Morita: "Kelvin probe force microscopy characterization of TiO<sub>2</sub>(110)-supported Au clusters", *Applied Physics Letters* Vol.99, pp.123102-1/-3 (2011), DOI: 10.1063/1.3641418.
  3. A. Yurtsever, Y. Sugimoto, M. Abe, K. Matsunaga, I. Tanaka, and S. Morita: "Alkali-metal adsorption and manipulation on hydroxylated TiO<sub>2</sub>(110) surface using atomic force microscopy", *Physical Review B* Vol.84, pp.085413-1/-7 (2011), DOI: 10.1103/PhysRevB.84.085413.
  4. K. Morita, Y. Sugimoto, M. Abe, and S. Morita: "Small-amplitude dynamic force microscopy using a quartz cantilever with an optical interferometer", *Nanotechnology* Vol.21 p.305704-1/-4 (2010), DOI:10.1088/0957-4484/21/30/305704
  5. Y. Sugimoto, Y. Nakajima, D. Sawada, M. Abe, and S. Morita: "Simultaneous AFM and STM measurements on the Si(111)-(7x7) surface", *Physical Review B* Vol.81, pp.245322-1/-9 (2010), DOI: 10.1103/PhysRevB.81.245322.
  6. Y. Sugimoto, I. Yi, M. Abe, and S. Morita: "Simultaneous force and current mapping of the Si(111)-(7x7) surface by dynamic force microscopy", *Applied Physics Letters* Vol. 96 pp. 263114-1/-3 (2010) DOI:10.1063/1.3457997.
  7. A. Yurtsever, Y. Sugimoto, M. Abe, and S. Morita: "NC-AFM imaging of the TiO<sub>2</sub> (110)-(1x1) surface at low temperature", *Nanotechnology* Vol.21, p.165702-1/-7 (2010), doi:10.1088/0957-4484/21/16/165702.
  8. S. Sadewasser, P. Jelínek, C.-K. Fang, O. Custance, Y. Yamada, Y. Sugimoto, M. Abe, and S. Morita: "New insights on atomic-resolution Frequency-Modulation Kelvin Probe Force Microscopy imaging on semiconductors", *Physical Review Letters* Vol.103, pp.266103-1/266103-4 (2009), DOI :10.1103/PhysRevLett.103.266103.
  9. D. Sawada, Y. Sugimoto, K. Morita, M. Abe and S. Morita: "Simultaneous measurement of force and tunneling current at room temperature", *Applied Physics Letters* Vol.94, pp.173117-1/173117-3 (2009), DOI: http://dx.doi.org/10.1063/1.3127503.
  10. 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.023108-1/023108-3 (2009), DOI: http://dx.doi.org/10.1063/1.3046736.
- [学会発表] (計 76 件)
1. K. Morita and M. Abe et al., "Simultaneous scanning force/tunneling microscopy using a quartz cantilever with a tungsten tip", 19th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM19), 20<sup>th</sup> Dec 2011, Hokkaido, Japan.
  2. Y. Sugimoto and M. Abe et al., "Measurement of atom hopping probability and interaction force for atom manipulation on the Si(111)-(7x7) surface", 19th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM19), 20<sup>th</sup> Dec 2011, Hokkaido, Japan.
  3. M. Fukumoto and M. Abe et al., "Three dimensional force mapping and KPFM measurements on the CaF<sub>2</sub>/Si(111) surface", 19th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM19) 20<sup>th</sup> Dec 2011, Hokkaido, Japan.
  4. A. Yurtsever and M. Abe et al., "Alkali-metal adsorption and manipulation on a hydroxylated TiO<sub>2</sub> (110) surface using atomic force microscopy", 19th International

Colloquium on Scanning Probe  
Microscopy (ICSPM19) 20<sup>th</sup> Dec 2011,  
Hokkaido, Japan.

6. K. Morita and M. Abe et al.,  
“Simultaneous scanning  
force/tunneling microscopy using a  
quartz cantilever with a tungsten tip”,  
3rd Global COE International  
Symposium Electronic Devices  
Innovation (EDIS2011), 16<sup>th</sup> Dec.  
2011, Osaka, Japan
7. K. Morita and M. Abe et al.,  
“Simultaneous scanning  
force/tunneling microscopy using a  
quartz cantilever with a tungsten tip”,  
International Symposium on Surface  
Science (ISSS-6), 14<sup>th</sup> Dec. 2011,  
Tokyo, Japan.
8. Y. Miyata and M. Abe et al.,  
“Fabrication of Quartz Cantilevers for  
Small-Amplitude Dynamic Force  
Microscopy Using an Optical  
Deflection Sensor”, International  
Symposium on Surface Science  
(ISSS-6), 14<sup>th</sup> Dec. 2011, Tokyo,  
Japan.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計◇件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(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