

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25年5月27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 Surfaces 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

研究成果の概要（和文）：

これまで、絶縁体表面での原子スケールの安定かつ再現性のある原子操作は実現されていない。そこで、本研究では、複合極限場（極低温、強磁場、超高真空）環境で動作する現有の非接触原子間力顕微鏡を駆使して、絶縁体表面上で力学的な原子操作を行うための制御条件や機構を解明した。また、原子操作によりナノ構造体を構築し、その新規な物性を探索した。

研究成果の概要（英文）：

Stable and reproducible mechanical manipulation of atoms and molecules on insulator surfaces has not been realized. In the present study, by using extreme field noncontact atomic force microscopy, we investigated the control conditions and the mechanism for performing the mechanism manipulation of atoms on insulator surfaces. We also investigated the novel physical properties of nanostructures fabricated by the atom manipulation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	14,000,000	4,200,000	18,200,000
2009年度	16,900,000	5,070,000	21,970,000
2010年度	16,100,000	4,830,000	20,930,000
2011年度	14,400,000	4,320,000	18,720,000
2012年度	9,500,000	2,850,000	12,350,000
総計	70,900,000	21,270,000	92,170,000

研究分野：ナノプローブ

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、ナノ構造体

1. 研究開始当初の背景

原子や分子をナノスケールの精度で操作し、新ナノ物質を思い通りに作り上げるためには、ナノスケールでの物質の自然法則を解明し、これを未来の実用技術に発展させる基礎研究が不可欠である。原子分子操作に関す

る研究は、これまで国内外とも、走査型トンネル顕微鏡が使われてきた。しかし、電気的方法に基づく走査型トンネル顕微鏡は、絶縁体を扱えない、原子間力を測れないなどの限界がある。他方、力学的手法に基づく原子間力顕微鏡は、絶縁体も扱える、原子間力を

測れるなどの利点があり、次世代の原子分子操作のツールとして期待されている。

申請者は、過去15年以上にわたり、原子間力顕微鏡に関する先駆的な研究を推進してきた。具体的には、引力領域で動作する非接触原子間力顕微鏡の超高感度化・超高分解能化に関する研究を推進し、真の原子分解能観察を世界に先駆けて実現するとともに、力学的に原子種を同定できることなどを解明してきた。また、原子分子操作の可能性も探求し、力学的に1個の原子(シリコンSi原子)を操作することにも世界で初めて成功した。その後、国内外の幾つかのグループから力学的な原子分子操作の報告が行なわれたが、依然として、用いられている試料は、シリコン(Si)やゲルマニウム(Ge)などの導電性試料であり、絶縁体表面での原子スケールの安定かつ再現性のある原子分子操作は実現されていない。

2. 研究の目的

本研究は、複合極限場(極低温、強磁場、超高真空)環境で動作する現有の非接触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未踏の技術を確立すると共に、ナノ構造体の新規な物性を探索することを目的とする。具体的研究課題は、以下の4点である。(1)絶縁体表面上で力学的に原子分子操作を行うための制御条件や機構を解明する。(2)原子分子操作によりナノ構造体を構築し、その物性を解明する。(3)強磁場下において磁性原子を力学的に操作し、磁気相互作用を解明する。(4)強磁場を利用して、磁性原子からなるナノ構造体の新規なスピン状態を探索する。

3. 研究の方法

(1)先鋭で安定な原子分子操作顕微鏡探針の実現

原子分子操作を高安定・高精度に行うためには、原子レベルで清浄で先鋭な顕微鏡探針を使用することが必要不可欠である。顕微鏡探針としては、通常、微細加工技術により作製されたシリコン(Si)探針が用いられている。しかし、Si探針は、先端の先鋭度を保ったまま酸化膜を取り除くことが容易でなく、また、Si自体の結合力がそれほど強くないため、原子分子操作探針としては不向きである。最近、我々は、結合力の極めて強いタングステン(W)でSi探針の先端を先鋭にコートする技術の開発に成功した。そこで、現有の複合極限場環境で動作する原子間力顕微鏡に先鋭化探針作製装置(購入設備)を付加し、原子分子操作に最適な顕微鏡探針を実現する。まお、先端形状のチェックには透過型電子顕微鏡(TEM)を使用する。

(2)絶縁体表面での力学的な原子分子操作とその制御条件の解明

絶縁体表面上で原子を水平移動させる原子操作について、顕微鏡探針の振動振幅や探針・試料間距離などを変化させて系統的に調べ、その制御条件を検討する。また、原子を探針先端に吸着させ、再び表面に戻す垂直原子操作についても同様に検討する。さらに、これらの制御条件に対する絶縁体表面と吸着原子の間の吸着エネルギー依存性を検討する。なお、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る。また絶縁体表面の吸着原子として、銅Cuや酸素Oなどを取り上げる。

(3)3次元フォース分光法の開発と3次元ポテンシャルエネルギー面の測定

絶縁体表面での原子分子操作の機構を明らかにするためには、探針・試料間の3次元ポテンシャルエネルギー分布を導出し、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議論することが本質的に重要である。そこで、探針・試料間距離を変えながら、探針・試料間の相互作用力によるカンチレバーの共振周波数の変化(周波数シフト)を3次元的に測定し、数値計算(アルゴリズムは開発済み)により、力の3次元分布、さらにはポテンシャルエネルギーの3次元分布を導出できるようにする。

(4)絶縁体表面での原子分子操作の機構解明

原子分子操作の機構を明らかにするため、原子分子操作中の探針の軌跡、探針・試料間のエネルギー散逸、ポテンシャルエネルギーの3次元分布を同時に解析することにより検討する。また、モンテカルロアルゴリズムにより導出した理論的モデルとも比較検討する。なお、この理論的な検討は、この分野の専門家であるカントロビッチ教授(King's College London)の研究協力により実施する。

(5)原子分子操作による1次元・2次元・3次元ナノ構造体の構築とその物性解明

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、1次元・2次元・3次元のナノ構造体を構築し、その物性を解明する。具体的には、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、静電気分光法を駆使して、電荷移動に伴うポテンシャル変化(仕事関数の変化)や電子状態の変化を明らかにする。

(6)強磁場下での磁性原子の操作と磁気相互作用の解明

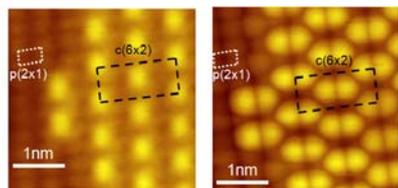
磁性原子の磁気異方性エネルギーは、原子

間距離がほんの5 pm変化しただけで、 10^2 から 10^3 倍も変化する。原子操作を用いて、絶縁体表面で磁性原子を他のナノ構造体に徐々に近づけて、磁性原子間に作用するナノスケールの相互作用力を検討する。また、その磁性原子種依存性（例えば Co-Co 間と Fe-Fe 間の違い）や磁場強度依存性を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 絶縁体表面での安定な力学的な原子操作に成功

酸化銅Cu(110)-O表面を取り上げ、c(6x2)構造の最表面のCu原子（Super-Cu原子）を水平操作できるかどうか検討した。その結果、Cu吸着探針（Super-Cu原子が画像化される）（図1(a)）の場合には、探針がSuper-Cu原子の隣の結合サイトに近づくと、引力によりSuper-Cu原子が水平移動した。一方、O吸着探針（Super-Cu原子の隣のO原子が画像化される）（図1(b)）の場合には、探針がSuper-Cu原子のサイトの真上に来ると、斥力によりSuper-Cu原子が水平移動した。このように、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。



(a) Cu吸着探針 (b) O吸着探針
図1 原子操作に用いたCu(110)-O表面の原子間力顕微鏡像

(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には、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議論する必要がある。そこで、カンチレバーの周波数シフトの距離依存性を3次的に測定し、ポテンシャル分布を導出した。その結果、Cu吸着探針の場合には、探針・試料間距離が減少すると、Super-Cu原子の隣の結合サイトの表面ポテンシャルが引力相互作用により大きく減少し、拡散障壁が減少するため、Super-Cu原子が水平移動することが分かった（図2）。他方、O吸着探針の場合には、探針・試料間距離が減少すると、Super-Cu原子サイトの表面ポテンシャル

が斥力相互作用により大きく増加し、拡散障壁が減少するため、Super-Cu原子が水平移動することが分かった。

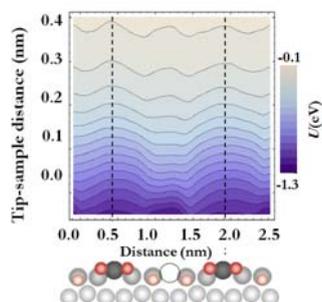


図2 ポテンシャル分布の測定結果

(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（図3）。

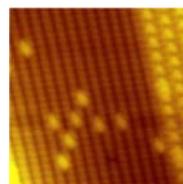


図3 原子操作によるナノ構造体構築

(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（極低温 4.2K、超高真空 2×10^{-11} Torr、強磁場 9T）において、酸化銅Cu(110)-O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（図4）。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。

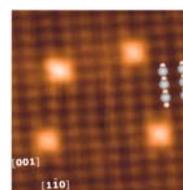


図4 強磁場下でのCo原子の水平操作

(5) 磁気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、原子間の磁気交換相互作用である。最近、申請者は、磁気交換力顕微鏡において、この磁気交換相互作用だけを

測定する方法として、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という着想に至った(図5)。鉄(Fe)コートされた顕微鏡探針に周波数が約1.7GHzのマイクロ波を照射することにより、探針の磁化状態を変調できることを実験的に検証することに成功した。

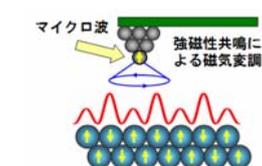


図5 強磁性体共鳴による交換力の測定

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 22 件)

- 1) "The stray capacitance effect in Kelvin probe force microscopy using FM, AM and heterodyne AM modes", Z. Ma, L. Kou, Y. Naitoh, Y. J. Li and Y. Sugawara, *Nanotechnol.*, 査読有, **24**, 225701(1-8), 2013. DOI:10.1088/0957-4484/24/22/225701.
- 2) "Complex Design of Dissipation Signals in Non-Contact Atomic Force Microscopy", J. Bamidele, Y. J. Li, S. Jarvis, Y. Naitoh, Y. Sugawara, and L. Kantorovich, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 査読有, **14**, 16250-16257, 2012. DOI: 10.1039/c2cp43121.
- 3) "Quantification of atomic-scale elasticity on Ge(001)-c(4×2) surfaces via noncontact atomic force microscopy with a tungsten-coated tip", Y. Naitoh, T. Kamijo, Y. J. Li and Y. Sugawara, *Phys. Rev. Lett.*, 査読有, **109**, 215501(1-5), 2012. DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.215501.
- 4) "Chemical tip fingerprinting in scanning probe microscopy of an oxidized Cu(110) surface", J. Bamidele, Y. Kinoshita, R. Turanský, S. H. Lee, Y. Naitoh, Y. J. Li, Y. Sugawara, I. Štich, and L. Kantorovich, *Phys. Rev. B*, 査読有, **86**, 155422(1-8), 2012. DOI: 10.1103/PhysRevB.86.155422.
- 5) "High potential sensitivity in heterodyne amplitude modulation Kelvin probe force microscopy", Y. Sugawara, L. Kou, Z. Ma, T. Kamijo, Y. Naitoh, and Y. J. Li, *Appl. Phys. Lett.*, 査読有, **100**, 223104(1-4), 2012. DOI: 10.1063/1.4723697.
- 6) "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, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 査読有, **51**, 035201(1-5), 2012. DOI: 10.1143/JJAP.51.035201.
- 7) "Fabrication of Sharp Tungsten-coated Tip for Atomic Force Microscopy by Ion-beam Sputter deposition", Y. Kinoshita, Y. Naitoh, Y. J. Li, and Y. Sugawara, *Rev. Sci. Instrum.*, 査読有, **82**, 113707(1-5), 2011. DOI:10.1143/JJAP.51.035201.
- 8) "Switching surface polarization of atomic force microscopy probe utilizing photoisomerization of photochromic molecules", Y. Aburaya, H. Nomura, M. Kageshima, Y. Naitoh, Y. J. Li and Y. Sugawara, *J. Appl. Phys.*, 査読有, **109**, 064308(1-8), 2011. DOI: 10.1063/1.3552926.
- 9) "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*, 査読有, **28**, 1210-1214, 2010. DOI: 10.1116/1.3503611.
- 10) "High force sensitivity in Q-controlled phase-modulation atomic force microscopy", N. Kobayashi, Y. J. Li, Y. Naitoh, M. Kageshima and Y. Sugawara, *Appl. Phys. Lett.*, 査読有, **97**, 011906(1-3), 2010. DOI: 10.1063/1.3457431.
- 11) "Multifrequency High-Speed Phase-Modulation Atomic Force Microscopy in Liquids", Y. J. Li, K. Takahashi, N. Kobayashi, Y. Naitoh, M. Kageshima, and Y. Sugawara, *Ultramicroscopy*, 査読有, **110**, 582-585, 2010. DOI: 10.1016/j.ultramic.2010.02.014.
- 12) "Step Response Measurement of AFM Cantilever for Analysis of Frequency-Resolved Viscoelasticity", T. Ogawa, S. Kurachi, M. Kageshima, Y. Naitoh, Y. J. Li and Y. Sugawara, *Ultramicroscopy*, 査読有, **110**, 612-617, 2010. DOI: 10.1016/j.ultramic.2010.02.020.
- 13) "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.*, 査読有, **79**, 013601 (1-4), 2010. DOI: 10.1143/JPSJ.79.013601.

- 14)“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, 査読有, **20**, 264011 (1-7), 2009.
DOI: 10.1088/0957-4484/20/26/264011.
- 15)“Development of atomic force microscope with wide-band magnetic excitation for study of soft matter dynamics”, M. Kageshima, T. Chikamoto, T. Ogawa, Y. Hirata, T. Inoue, Y. Naitoh, Y. J. Li, and Y. Sugawara, Rev. Sci. Inst., 査読有, **80**, 023705(1-7), 2009.
DOI: 10.1063/1.3080557.
- 16)“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., 査読有, **47**, 8218-8220, 2008.
DOI: 10.1143/JJAP.47.8218.
- 17)“High-speed Phase-Modulation Atomic Force Microscopy in Constant-Amplitude Mode Capable of Simultaneous Measurement of Topography and Energy Dissipation”, Y. J. Li, N. Kobayashi, H. Nomura, Y. Naitoh, M. Kageshima and Y. Sugawara, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, **47**, 6121-6124, 2008.
DOI: 10.1143/JJAP.47.6121.
- 18)“Study of Oxidized Cu(110) Surface Using Noncontact Atomic Force Microscopy”, S. Kishimoto, M. Kageshima Y. J. Li, Y. Naitoh, and Y. Sugawara, Surface Science, 査読有, **602**, 2175-2182, 2008.
DOI: 10.1016/j.susc.2008.04.030.
- 19)“Phase modulation atomic force microscopy in constant excitation mode capable of simultaneous imaging of topography and energy dissipation”, Y. J. Li, N. Kobayashi, Y. Naitoh, M. Kageshima and Y. Sugawara, Appl. Phys. Lett., 査読有, **92**, 121903(1-3), 2008.
DOI: 10.1063/1.2901151.
- 20)“Theoretical investigation on force sensitivity in Q-controlled phase modulation atomic force microscopy in constant-amplitude mode”, N. Kobayashi, Y. J. Li, Y. Naitoh, M. Kageshima and Y. Sugawara, J. Appl. Phys., 査読有, **103**, 054305(1-4), 2008.
DOI: 10.1063/1.2890380.
- 21)“Viscoelasticity and Dynamics of Single Biopolymer Chain Measured with Magnetically Modulated Atomic Force Microscopy”, M. Kageshima, Y. Nishihara, Y. Hirata, T. Inoue, Y. Naitoh and Y. Sugawara, 査読有, AIP Conference Proceedings, **982**, 504-507, 2008.
- 22)“Development of Noncontact Atomic force Microscopy Operating at Low Temperatures”, Y. Sugawara, Y. Naitoh, M. Kageshima and Y. J. Li, J. Vac. Soc. Jpn, 査読有, **51**, 789-795, 2008.
- [学会発表] (計 21 件)
招待講演 (国際会議)
- 1)“Atom Manipulation and Force Spectroscopy on Cu(110)-O Surface with Low-Temperature AFM”, Y. Sugawara and Y. J. Li, Annual Meeting of The Chinese Vacuum Society (CVS-2012), September 21-24, 2012, Lanzhou, China.
- 2)“Investigation of TiO₂ Surface by Using Atomic Force Microscopy/Spectroscopy”, Y. Sugawara, The 3rd Annual World Congress of Catalytic Asymmetric Synthesis (WCCAS-2012), May 12-14, 2012, Beijing, China.
- 3)“Atomic Manipulation and Force Spectroscopy by Atomic Force Microscopy”, Y. Sugawara, 1st International Conference on Small Science, August 15, 2011, Sydney, Australia.
- 4)“Atom Manipulation and Force Spectroscopy on Cu(110)-O Surface with Low Temperature AFM”, Y. Sugawara, The 15th International Conference on Solid Films and Surfaces (ICSFS-15), October 5-10, 2010, Beijing, China.
- 5)“Atom Manipulation and Force Spectroscopy on Cu(110)-O Surface with Low Temperature Noncontact AFM”, Y. Sugawara, The 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, Tsukuba, Japan.
- 6)“Atom manipulation and force spectroscopy on Cu(110)-O surface with low temperature noncontact AFM”, Y. Sugawara, The 18th International Vacuum Congress (IVC-18), August 23-27, 2010, Beijing, China.
- 7)“Atom manipulation and force spectroscopy on Cu(110)-O surface with low temperature noncontact AFM”, Y. Sugawara, The 6th Nanoscience and Nanotechnology

Conference (NANOTR-VI), June 15-18, 2010, Izmir, Turkey.

- 8) "Atom Manipulation on Cu(110)-O 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.
- 9) "Phase Modulation Atomic Force Microscopy in Constant Amplitude Mode", Y. Sugawara, The XI International Scanning Probe Microscopy Conference 2009, June 18, 2009, Madrid, Spain.

招待講演 (国内会議)

- 1) 走査型プローブ顕微鏡 (SPM) ”、菅原康弘、第 54 回表面科学基礎講座 表面・界面分析の基礎と応用、2012 年 10 月 16 日、大阪大学・コンベンションセンター
- 2) “原子間力顕微鏡による原子操作と力学分光”、菅原康弘、日本表面科学会 平成 23 年度関西支部セミナー、2012 年 3 月 7 日、京都大学宇治キャンパス
- 3) “フォース顕微鏡における最先端計測技術”、菅原康弘、日本顕微鏡学会走査型プローブ顕微鏡分科会平成 23 年度オープン研究会、2011 年 12 月 2 日、物質・材料研究機構
- 4) “走査型プローブ顕微鏡 (SPM) ”、菅原康弘、第 52 回表面科学基礎講座 表面・界面分析の基礎と応用、2011 年 9 月 14 日、大阪大学・コンベンションセンター
- 5) “SPM を用いた元素分析の可能性について”、菅原康弘、第 1 回「顕微表面分析」セミナー、2011 年 7 月 29 日、島津製作所関西支社マルチホール
- 6) “走査型プローブ顕微鏡 (SPM) ”、菅原康弘、第 50 回表面科学基礎講座 表面・界面分析の基礎と応用、2010 年 10 月 20 日、大阪大学・コンベンションセンター。
- 7) “原子間力顕微鏡の現状と展望”、菅原康弘、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。
- 8) “力学的な原子分子操作と分光計測”、菅原康弘、第 4 回ナノ理工学情報交流会、2010 年 1 月 28 日、大阪大学。
- 9) “原子間力顕微鏡の高感度化・高速化・多機能化”、菅原康弘、2009 年秋季第 70 回応用物理学会学術講演会 シンポジウム「非接触原子間力顕微鏡で拓くナノテク最前線」、2009 年 9 月 8 日、富山大学。
- 10) “液中 AFM の基礎と応用”、菅原康弘、

有機バイオ SPM 研究会 (応用物理学会・有機分子バイオエレクトロニクス分科会主催) 2009 年 9 月 4 日、幕張メッセ国際展示場。

- 11) “SPM の現状概観とロードマップ 点検 (AFM) ”、菅原康弘、日本学術振興会 振 167 委員会 第 55 回研究会、2008 年 7 月 23 日、桐生地域地場産業振興センター。
- 12) “非接触原子間力顕微鏡による金属酸化物表面での原子種識別と原子操作”、菅原康弘、第 27 回マイクロ化学談話会 ポジウム、2008 年 6 月 20 日、京都大学

〔図書〕 (計 3 件)

- ① 菅原康弘、李艶君、内藤賀公、“プローブ顕微鏡用高速アクチュエータの開発”、エヌ・ティー・エヌ、新アクチュエータ開発の最前線、pp.131-135, 2011.
- ② Y. Sugawara, Y. J. Li, Y. Naitoh and M. Kageshima, “Development of High-Speed Actuator for Scanning Probe Microscopy”, Springer, Next Generation Actuators Leading Breakthroughs, 2010, pp.45-54, 2010.
- ③ 菅原康弘、“走査プローブ顕微鏡を用いたナノイメージング”, ナノイメージング (エヌ・ティー・エヌ), 60-70, 2008.

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

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

6. 研究組織

(1) 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