

## 科学研究費補助金研究成果報告書

平成24年6月8日現在

機関番号：14401

研究種目：特定領域研究

研究期間：2007～2011

課題番号：19053006

研究課題名（和文）

表面機能元素の制御と原子構造解析

研究課題名（英文）

Atomic Modification and Structure Analysis of Surface Nanodopant

研究代表者

森田 清三 (MORITA SEIZO)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：50091757

研究成果の概要（和文）：半導体表面異種原子で原子埋め込み文字を構築する室温交換型水平原子操作時間を約十倍短縮する室温交換型原子ペンを発明した。共有結合力の比で非破壊に半導体原子を室温元素識別するフォース・カーブ測定を発展させ、フォース・マッピングでその場元素識別する元素マッピング法を開発した。原子間力顕微鏡の探針先端原子と試料表面原子との共有結合力と表面準位のギャップ・オープニングの相関を同時測定する方法を開発した。

研究成果の概要（英文）：Invention of single atom pen that can vertically interchange heterogeneous atoms at room temperature, and the drastic decrease of construction time for embedded atom letters compared with the former (lateral atom interchange manipulation) method. Invention of in-situ elemental mapping method based on nondestructive force mapping at room temperature, and the drastic decrease of chemical identification time compared with the former (force curve) method. Development of simultaneous force/tunnel current measurements to investigate the correlation between increase of covalent bonding force and gap opening of surface states.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	23,200,000	0	23,200,000
2008年度	21,300,000	0	21,300,000
2009年度	24,500,000	0	24,500,000
2010年度	23,200,000	0	23,200,000
2011年度	11,300,000	0	11,300,000
総計	103,500,000	0	103,500,000

研究分野：Atomic Force Microscopy

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：原子間力顕微鏡、表面機能元素、元素識別、原子構造解析、原子制御、化学配位効果

1. 研究開始当初の背景

(1) 原子間力顕微鏡 (AFM)：室温交換型「水平」原子操作による室温原子埋め込み文字“Sn”の組み立てに成功したが、水平の交換を

何度も繰り返す方式は交換回数が多く、組み立て時間が掛りすぎる問題点があった。[9時間（大半は画像化時間）120回（交換回数）以上交換型水平原子操作] (2) 価電子（外

殻電子)による室温非破壊元素識別法[混在した個々の原子の共有結合(化学結合)引力の最大値の比測定による①凹凸に依存しない、②探針に依存しない、③周辺原子との化学結合効果に影響されない、④原子分解能を有する、⑤非破壊な、Si半導体系の新しい元素識別法]を開発したが、混在した個々の原子の共有結合(化学結合)引力の最大値の比測定は、その場識別が出来ず時間が掛りすぎる問題点があった。(3)AFMと走査型トンネル顕微鏡(STM)の室温原子分解能同時測定の技術が未完成であった。

## 2. 研究の目的

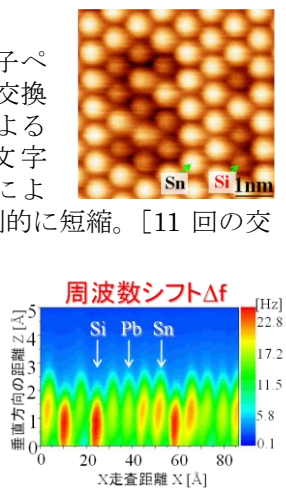
混在した表面原子の個々の原子の力学的物性評価を行い、つぎに、元素識別を実現し、さらに、機能元素析出を人工的に制御・作成することで、新研究分野の開拓を行う。具体的には、自家製の超高分解能原子間力顕微鏡(AFM)を使って、(1)アトムトラッキング法を用いた高精度・高感度なフォース・スペクトロスコピーにより特定位置のドーパント(機能元素)などの結合エネルギーや結合距離や化学結合効果などの物性情報を抽出する。測定した物性情報から、(2)多元素が混在した表面での元素識別方法を確立する。さらに、(3)特定の原子を一箇所に集めて人工的に機能元素のナノ析出状態を作成する。また、(4)共通試料表面に析出したナノ機能元素の物理を明らかにする。

## 3. 研究の方法

(1)原子間力顕微鏡(AFM)を使って、探針先端原子と試料表面原子との原子間力を測定して、原子分解能AFM像を測定する。(2)AFMを使って、原子分解能でフォース・カーブ測定やフォース・マッピングをする。(3)AFMを使って、混在した個々の原子を原子操作してナノ構造を組み立てる。(4)導電性テコを用いてAFMと走査型トンネル顕微鏡(STM)の室温原子分解能同時測定を行う。

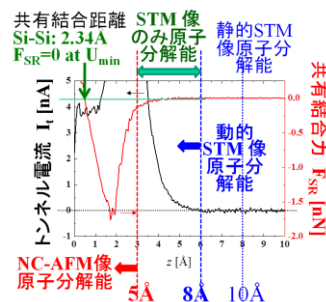
## 4. 研究成果

(1)室温交換型「単原子ペン」を発明して、室温交換型「垂直」原子操作による室温原子埋め込み文字“Si”の直接描き込みにより、組み立て時間を劇的に短縮。[11回の交換型垂直(+1回交換型水平)原子操作で組立時間が1.5時間(大半は画像化時間)]  
 (2)周波数シフトを2次元、または3次元マッピングす

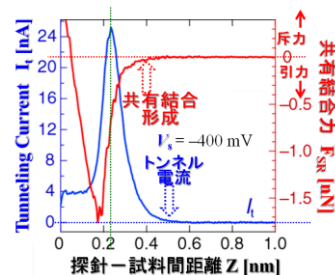


ることにより、混在した個々の原子の共有結合(化学結合)引力の最大値の比をカラーでその場「実時間元素マッピング」。

(3)PtIrで被覆した導電性探針を使うことにより、原子分解能が得られる探針-試料間距離がAFMではSTMより約3Å近いことを明らかにした。



(4)PtIrで被覆した導電性探針を使うことにより、AFMで共有結合力を測定しながら、STMでトンネル電流を測定して表面準位のギャップ・オープニングでトンネルが起こらなくなることを見出した。



## 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55件)

- ①Ayhan Yurtsever, Delia Fernández-Torre, César González, Pavel Jelínek, Pablo Pou, Yoshiaki Sugimoto, Masayuki Abe, Rubén Pérez and Seizo Morita, “Understanding image contrast formation in TiO<sub>2</sub> with force spectroscopy”, Physical Review B, 査読有, Vol.85, Issue 12, 2012, 125416 [9pp], DOI:10.1103/PhysRevB.85.125416
- ②S. Torbrügge, O. Custance, S. Morita and M. Reichling, “Manipulation of individual water molecules on CeO<sub>2</sub>(111)”, J. Phys.: Condens. Matter, 査読有, Vol.24, No.8, 2012, 084010 [10pp], DOI:10.1088/0953-8984/24/8/084010
- ③Yoshiaki Sugimoto, Keiichi Ueda, Masayuki Abe and Seizo Morita, “Three-dimensional scanning force/tunneling spectroscopy at room temperature”, J. Phys.: Condens. Matter, 査読有, Vol.24, No.8, 2012, 084008 [7pp], DOI:10.1088/0953-8984/24/8/084008

- ④ Hong Jing Chung, Ayhan Yurtsever, Yoshiaki Sugimoto, Masayuki Abe, and Seizo Morita, “Kelvin probe force microscopy characterization of TiO<sub>2</sub> (110)-supported Au clusters”, Applied Physics Letters, 査読有, Vol.99, Issue 12, 2011, 123102 [3pp], <http://dx.doi.org/10.1063/1.3641418>
- ⑤ 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, 査読有, Vol.84, Issue 8, 2011, 085413 [7pp], DOI:10.1103/PhysRevB.84.085413
- ⑥ Seizo Morita, “Atom world based on nano-forces: 25 years of atomic force microscopy”, Journal of Electron Microscopy, 査読有, Vol.60, Suppl. 1 (60th Anniversary Issue: Physical), 2011, pp.S199–S211 DOI: 10.1093/jmicro/dfr047
- ⑦ Y. Sugimoto, Y. Nakajima, D. Sawada, K. Morita, M. Abe and S. Morita, “Simultaneous AFM and STM measurements on the Si(111)-(7×7) surface”, Physical Review B, 査読有, Vol.81, Issue 24, 2010, 245322 [9pp], DOI:10.1103/PhysRevB.81.245322
- ⑧ A. Yurtsever, Y. Sugimoto, M. Abe and S. Morita, “NC-AFM imaging of the TiO<sub>2</sub>(110)-(1 × 1) surface at low temperature”, Nanotechnology, 査読有, Vol.21, No.16, 2010, 165702 [7pp], DOI:10.1088/0957-4484/21/16/165702
- ⑨ 森田清三、杉本宜昭、阿部真之、原子分解能を持つ非接触原子間力顕微鏡の開発研究、表面科学、査読有、(社)日本表面科学会創立 30 周年記念特集号、分野別記念解説、Vol.31, No.1, 2010, pp.19-24. <http://www.sssj.org/jsssj/Vol31/31-01/index.htm>
- ⑩ Sascha Sadewasser, Pavel Jelinek, Chung-Kai Fang, Oscar Custance, Yusaku Yamada, Yoshiaki Sugimoto, Masayuki Abe and Seizo Morita, “New insights on atomic-resolution frequency-modulated Kelvin-probe force-microscopy imaging of semiconductors”, Physical Review Letters, 査読有, Vol.103, Issue 26, 2009, 266103 [4pp], DOI:10.1103/PhysRevLett.103.266103
- ⑪ Oscar Custance, Ruben Perez and Seizo Morita, “Atomic force microscopy as a tool for atom manipulation”, Nature Nanotechnology, 査読有, Vol. 4, No 12, 2009, pp.803-810 DOI:10.1038/nnano.2009.347
- ⑫ Daisuke Sawada, Yoshiaki Sugimoto, Ken-ichi Morita, Masayuki Abe and Seizo Morita, “Simultaneous measurement of force and tunneling current at room temperature”, Applied Physics Letters, 査読有, Vol.94, Issue 17, 2009, 173117 [3pp], <http://dx.doi.org/10.1063/1.3127503>
- ⑬ Yoshiaki Sugimoto, Takashi Namikawa, Masayuki Abe and Seizo Morita, “Mapping and imaging for rapid atom discrimination: A study of frequency modulation atomic force microscopy”, Applied Physics Letters, 査読有, Vol. 94, Issue 2, 2009, 023108 [3pp], <http://dx.doi.org/10.1063/1.3046736>
- ⑭ Y. Sugimoto, K. Miki, M. Abe and S. Morita, “Statistics of lateral atom manipulation by atomic force microscopy at room temperature”, Physical Review B, 査読有, Vol.78, No.20, 2008, 205305 [5pp], DOI:10.1103/PhysRevB.78.205305
- ⑮ Yoshiaki Sugimoto, Pablo Pou, Óscar Custance, Pavel Jelinek, Masayuki Abe, Rubén Pérez and Seizo Morita, “Complex Patterning by Vertical Interchange Atom Manipulation Using Atomic Force Microscopy”, Science, 査読有, Vol.322, Issue 5900, 2008, pp.413-417, DOI:10.1126/science.1160601
- ⑯ Yoshiaki Sugimoto, Takashi Namikawa, Koutaro Miki, Masayuki Abe and Seizo Morita, “Vertical and lateral force mapping on the Si(111)-(7x7) surface by dynamic force microscopy”, Physical Review B, 査読有, Vol. 77, No. 19, 2008, 195424 [9pp]. DOI:10.1103/PhysRevB.77.195424
- ⑰ Óscar Custance and Seizo Morita, “How to Move an Atom”, Science, 査読有, Vol.319, Issue 5866, 2008, pp.1051-1052. DOI:10.1126/science.1154853
- ⑱ 森田清三、「走査プローブ顕微鏡—見果てぬ夢のツール—」、応用物理、査読有、世界物理年記念レビュー、Vol.77, No.9, 2008, pp.1049-1058. <http://www.jsap.or.jp/ap/2008/ob7709/content7709.html>
- ⑲ Yoshiaki Sugimoto, Seiji Innami, Masayuki Abe, Óscar Custance and Seizo Morita, “Dynamic force spectroscopy using cantilever higher flexural modes”, Applied Physics Letters, 査読有, Vol.91, Issue 9, 2007, 093120 [3pp],

<http://dx.doi.org/10.1063/1.2775806>

- ⑳ Stefan Torbrügge, Michael Reichling, Atsushi Ishiyama, Seizo Morita and Oscar Custance, “Evidence of subsurface oxygen vacancy ordering on reduced CeO<sub>2</sub>(111)”, *Physical Review Letters*, 査読有, Vol.99, No.5, 2007, 056101 [4pp], DOI:10.1103/PhysRevLett.99.056101
- ㉑ Masayuki Abe, Yoshiaki Sugimoto, Takashi Namikawa, Kenichi Morita, Noriaki Oyabu, and Seizo Morita, “Drift-compensated data acquisition performed at room temperature with frequency modulation atomic force microscopy”, *Applied Physics Letters*, 査読有, Vol.90, Issue 20, 2007, 203103 [3pp], <http://dx.doi.org/10.1063/1.2739410>

[学会発表] (計 2 1 4 件)

- ① Y. Sugimoto, A. Yurtsever, M. Abe, and S. Morita, “Role of the tip reactivity for atom manipulation by atomic force microscopy”, *International Symposium on Surface Science (ISSS-6)*, Dec.14, 2011, Tokyo, Japan., 14aC2-1(D), p230 [Invited]
- ② Seizo Morita, “Atom-by-atom Creation and Evaluation of Engineered Nanostructures at Room Temperature Based on Atomic Force Microscopy”, *13th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI-13)*, 3-8 July, 2011, in Prague, Czech Republic, Faculty of Civil Engineering, CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE, HALL 1, July 7th, 09:00~10:00 [Plenary lecture]
- ③ Seizo Morita, “Atom-by-atom Creation of Engineered Nanostructures at Room Temperature Based on Noncontact Atomic Force Microscopy”, *8th International workshop on interfaces at the boundary between natural and synthetic materials*.26-30 June 2011, University of Santiago, Santiago de Compostela, Spain, June 29, 2011, 9:00~9:45 [Invited]
- ④ Seizo Morita, “Toward Atom-by-Atom Creation and Evaluation of Composite Nanostructures at Room Temperature based on AFM”, *IMRE (Institute of Materials Research and Engineering) Seminar on “Symposium on Singapore Scanning Probe Microscopy 2010 (SingSPM 2010)”*, 15 Dec, 8:30am-6:00pm, 2010, Singapore, , 14:20~15:00, Abstracts of SingSPM 2010 p.13 [Keynote Lecture]
- ⑤ Seizo Morita, “Atomic force microscopy as a tool for room temperature atom identification and manipulation”, *18<sup>th</sup> International Vacuum Congress (IVC-18)*, the Beijing International Convention Center, Beijing, China, 23 - 27 August 2010, August 25, Rm. 201ABC 17:15-18:00 CPL3-2 [Plenary Lecture]
- ⑥ S.Morita, Y.Sugimoto, M.Abe, “Toward Atom-by-Atom Nanostructuring of Composite Nanomaterials Based on Atomic Force Microscopy”, *6th Nanoscience and Nanotechnology Conference (Nano-TRVI) 15 – 18 June 2010*, Golden Dolphin Hotel, Izmir Çesme, Turkey, June 17, 8:30-9:20, YUNUS HALL, p.145 [Plenary Talk]
- ⑦ S.Morita, Y.Sugimoto, P.Pou, P.Jelinek, R. Pérez, O.Custance and M.Abe, “Toward Atom-by-Atom Assembly of Composite Nanostructures Based on AFM”, *7th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '09 (ALC'09)*, December 6 (Sun)~11(Fri), 2009, The Westin Maui Resort & Spa, Maui, Hawaii, USA, 11:50-12:20, Dec.9, “SSSJ Special Session on SPM”, Proc. of ALC'09, pp.385-387, 2009 [Invited]
- ⑧ Seizo Morita, Yoshiaki Sugimoto, Óscar Custance, Masayuki Abe, Pablo Pou, Pavel Jelinek and Rubén Pérez, “Toward Atom-by-Atom Assembly of Composite Nanostructures Based on Atomic Force Microscopy”, *21st International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2008)*, October 27-30, 2008, JAL Resort Sea Hawk Hotel Fukuoka, Japan, Session Title.: Nano Fabrication I, Session Number : 29C-7-1, Session Time: 13:30-14:00, Room: Navis C (1F), Author's Interview 15:20-15:35, Digest of Papers: pp.110-111 [Invited]
- ⑨ Seizo Morita, Yoshiaki Sugimoto, Óscar Custance, Masayuki Abe, Pablo Pou, Pavel Jelinek and Rubén Pérez : “Atomic Tool for Nanofabrication Based on Atomic Force Microscopy”, *55th AVS International Symposium in Boston, MA, USA, October 21, 2008, Nanometer-scale Science and Technology, Room: 311 - Session NS+NC-TuM, The Frontiers of Nanoscience, NS+NC-TuM11, 11:20-12:00 AM October 21, 2008*

- [Invited; Albert Nerken Award Lecture]
- ⑩ Seizo Morita, “State-of-the-Art and Future Prospects of Atomic Force Microscopy with Atomic Resolution”, the 2008 International Conference on Nanoscience+Technology (ICN+T 2008), July 20–25, 2008, Keystone Resort and Conference Center, Colorado, USA, PS-WeM1 (July 23, 8:00 AM-8:50AM), Technical Program & Abstracts of ICN+T 2008 p.133 [PLENARY LECTURE]
- ⑪ Seizo Morita, Yoshiaki Sugimoto, Óscar Custance and Masayuki Abe, “Atom-by-Atom Chemical Identification and Following Manipulation on Semiconductor Surfaces Toward Nanostructuring at Room Temperature”, the 14th International Conference on Solid Films and Surfaces (ICSFS-14), Trinity College Dublin, June 29-July 4, 2008, Tue-PL-2 13:45-14:25, Tuesday 1 July 2008, Programme of ICSFS-14 p.91 [PLENARY LECTURE]
- ⑫ Y.Sugimoto, M.Abe, O.Custance, S.Morita, P.Pou, P.Jelinek and R.Perez, “Room Temperature Atomic Manipulation Using Dynamic Force Microscopy”, The 15th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy, Atagawa, December 6-8, 2007, S7-1, Dec.7, 13:15-13:50, Abstract (JSAP Catalog Number:072251) p.16 [Invited]
- ⑬ Y.Sugimoto, P.Pou, M.Abe, P.Jelinek, O.Custance, R.Perez and S.Morita, “Atom-by-Atom Chemical Identification and Following Atom Manipulation Toward Cound Nanostructuring”, The 9th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-9), November 11-15, 2007, Komaba Research Campus of The University of Tokyo, Tokyo, Japan, Nov.12, Room A 16:00-16:30 12Ap2-1,2, Program and Abstracts p.64 [Invited]
- ⑭ Seizo Morita, “Principles and State of the Art of Atomic Force Microscopy”, 6th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '07 (ALC'07), Oct.28 (Sun)~Nov.2 (Fri), 2007, Kanazawa Art Hall, Ishikawa, Japan, Tutorial, 16:30~17:30 SuA-4, Oct.28, 2007, Program&Abstract p.4 [Invited]

- ⑮ Seizo Morita, Yoshiaki Sugimoto, Óscar Custance, and Masayuki Abe, “Toward atom-by-atom assembly of complex nanostructures at room temperature based on AFM”, The 10<sup>th</sup> Asia Pacific Physics Conference (APPC10), 21-24 August 2007, POSCO International Center, POSTECH, Pohang, Korea., Ac5 16:00-17:45 August 23, 2007, Condensed Matter Physics 5 (Atomic-scale phenomena on surface), 16:00-16:30, Handbook & Abstracts p.74 [Invited]
- ⑯ Y. Sugimoto, P. Jelinek, P. Pou, O. Custance, M. Abe, R. Pérez, S. Morita, “Mechanical Atom Identification and Following Atom Manipulation and Assembling Compound Nanostructure”, International Conference on Materials for Advanced Technologies (ICMAT) 2007, 1-6 July 2007, Singapore, Symposium G - SPM in materials research, 2 July 2007, 14:30 - 15:15, Abstract Booklet of Symposium G, pp.7-8 [keynote speaker]

[図書] (計2件)

- ① 森田清三、科学同人編集部編、原子を見る、測る、動かす 新たな万能ツール、化学のブレークスルー(304 ページ)、PART III「機器分析のブレークスルー」、2011, pp.262~265、ISBN 978-4-7598-1466-8
- ② Seizo Morita, Franz J. Giessibl, Roland Wiesendanger (Eds.), Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, “Noncontact Atomic Force Microscopy Volume 2”, Series: NanoScience and Technology, 2009, pp.1-401, ISBN: 978-3-642-01494-9

[産業財産権]

○出願状況 (計3件)

名称 : PROBE POSITION CONTROL SYSTEM AND METHOD

発明者 : Masayuki Abe, Masahiro Ota, Yoshiaki Sugimoto, Kenichi Morita, Noriaki Oyabu, Seizo Morita, Oscar Custance

権利者 : SHIMADZU CORPORATION and OSAKA UNIVERSITY

種類 : 特許

番号 : 1020070050792

出願年月日 : 2007年5月25日

国内外の別 : 韓国

名称 : PROBE POSITION CONTROL SYSTEM AND METHOD

発明者 : Masayuki Abe, Masahiro Ota, Yoshiaki Sugimoto, Kenichi Morita,

Noriaki, Oyabu, Seizo Morita, Oscar Custance

権利者：SHIMADZU CORPORATION and OSAKA UNIVERSITY

種類：特許

番号：7,703,314

出願年月日：2007年5月24日

国内外の別：米国

名称：探針位置制御システム和方法

発明者：Masayuki Abe, Masahiro Ota, Yoshiaki Sugimoto, Kenichi Morita, Noriaki, Oyabu, Seizo Morita, Oscar Custance

権利者：SHIMADZU CORPORATION and OSAKA UNIVERSITY

種類：特許

番号：CN 100578679 C

出願年月日：2007年5月24日

国内外の別：中国

○取得状況（計0件）

[その他]

ホームページ

森田研究室：

<http://www.afm.eei.eng.osaka-u.ac.jp/jp/>

特定領域「機能元素のナノ材料科学」：

<http://www.nanodopant.com/>

受賞

①森田清三：平成23年春の紫綬褒章（応用物理学の分野）、平成23年6月15日（水）受章発表[発令は4月29日に遡る]、伝達式と皇居（豊明殿）での拝謁は6月29日（水）、東京都

②森田清三：The 2010 IUVESTA Prize for Technology, August 23, 2010, “For outstanding contributions to the development of room temperature atom identification and manipulation using atomic force microscopy”, International Union for Vacuum Science, Technique and Applications (IUVESTA), Award Ceremony was held in the Opening Ceremony at the 18th International Vacuum Congress (IVC-18) in Beijing, China

③杉本 宜昭、阿部 真之、Oscar Custance：the 2009 Feynman Prize for Experimental work、in recognition of their pioneering experimental demonstrations of mechanosynthesis, specifically the use of atomic resolution dynamic force microscopy — also known as non-contact atomic force microscopy (NC-AFM) — for vertical and lateral

manipulation of single atoms on semiconductor surfaces, The Feynman Prizes were awarded at Foresight 2010: the Synergy of Molecular Manufacturing and AGI, January 16-17, 2010, Palo Alto, California, USA

④森田清三：日本学術振興会マイクロビームアナリシス第141委員会第15回2009年度榊特別賞、「ノンコンタクトAFMの開発と原子オーダーでの表面物性の解明」（平成21年9月29日）、賞の授与は第137回研究会[名城大学 名駅サテライトキャンパス（MSAT）]愛知県名古屋市

⑤森田清三（筆頭者）、杉本宜昭、阿部真之、Oscar Custance、平成21年度科学技術分野の文部科学大臣表彰、科学技術賞、研究部門「室温原子間力顕微鏡による多元素系ナノ構造体操作組立の研究」、平成21年4月14日（火）12:00~14:00【表彰式】虎ノ門パストラル新館1階「鳳凰の間」東京都

⑥森田清三：American Vacuum Society (AVS), the AVS Albert Nerken Award for 2008, “For the development of room-temperature, non-contact atomic force microscopy technologies and applications”, Awarded at the AVS Awards Assembly during the Symposium in Boston, USA, October 22, 2008

⑦森田清三：(社)日本顕微鏡学会 2007年度学会賞（瀬藤賞）【A：顕微鏡基礎部門（A-1）】「原子間力顕微鏡の高分解能化と原子の識別・操作・組み立てへの応用」（2007年5月21日受賞：平成19年）第63回日本顕微鏡学会、新潟

6. 研究組織

(1)研究代表者

森田 清三 (MORITA SEIZO)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：50091757

(2)研究分担者

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

西 竜二 (NISHI RYUJI) (H19)

大阪大学・超高压電子顕微鏡センター・准教授

研究者番号：40243183 (H20 連携研究者)

(3)連携研究者

杉本 宜昭 (SUGIMOTO YOSHIAKI)

(H20-H23)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：00432518