

機関番号：32629

研究種目：基盤研究(B) 一般

研究期間：2008～2010

課題番号：20360022

研究課題名(和文) フラーレン-黒鉛ハイブリッド超潤滑材料表面解析用摩擦力顕微鏡シミュレータの開発

研究課題名(英文) Development of Friction-Force Microscopy Simulator for Analysis of Superlubric Fullerene-Graphite Hybrid Material Surface

研究代表者

佐々木 成朗 (SASAKI NARUO)

成蹊大学・理工学部・教授

研究者番号：40360862

研究成果の概要(和文)：

フルーレン-黒鉛ハイブリッド超潤滑界面の摩擦過程を分子力学法で計算するシミュレータを開発し、本界面が走査方向に対して格子の整合・不整合に由来する顕著な異方性を示す事を明らかにした。特に整合性の良い[1010]方向の超潤滑の起源が、(1) C<sub>60</sub>分子の微小回転(傾き)、(2) C<sub>60</sub>分子とグラファイトとの点的接触及びそれが誘起するC<sub>60</sub>分子の弾性変形である事を示した。そして[1230]方向の近似的なゼロ摩擦の出現理由が、隣接する2極小点間のエネルギーバリアが走査過程中消失しないで、常に存在するためである事を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：

Simulator calculating frictional process of superlubric fullerene-graphite hybrid interface using molecular mechanics method has been developed, and the marked anisotropy of this interface due to the commensurate and incommensurate contacts at the interface is revealed. Particularly it is clarified that origins of superlubricity along the commensurate [1010] scan direction are (1) C<sub>60</sub> small rotation (tilting), and (2) point-like contact between C<sub>60</sub> molecule and graphite and its induced elastic deformation of C<sub>60</sub> molecule. Furthermore, origin of the near-zero friction along [1230] direction is ascribed to that the energy barrier between neighboring minima does not vanish or always exists during the scanning process.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

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：(1) 走査プローブ顕微鏡 (2) トライボロジー (3) フラーレン (4) 表面・界面物性  
(5) ナノ材料 (6) 超潤滑 (7) 接着 (8) グラフェン

## 1. 研究開始当初の背景

近年のナノテクノロジーの発展によって  
微細加工のバリエーションは驚くほど多岐

に渡り、マイクロマシン、ナノマシンの実用  
化への夢が膨らむが、現実には問題は簡単で  
はない。その理由はミクロの世界では機械が

動きにくくなってしまふからである。例えば半径1cmの球体と1nmの球体を比較すると、表面積の体積に対する比率は、1nmの球の場合、1cmの球に比べて1000万倍にも及び、表面の効果が1000万倍になる。この時表面を介して働く微視的な物理結合・化学結合が顕在化して摩擦力が極めて大きくなる。つまりナノテクで作成に成功した微細機械を動かし始めても、何らかのきっかけで摩擦が生じて機械が止まってしまう可能性が高い。これはマイクロ・ナノマシン市場の拡大を推進する上で大きな障害となり得る。こうしてナノテクノロジー産業の要請から、微小領域での摩擦をコントロールする研究、特に超低摩擦・超潤滑研究のニーズが発生する。

そこで我々はナノサイズのボール（フラーレン）をナノサイズのシート（黒鉛）で挟んだシステムにおいてボールの回転・転がり超低摩擦を誘起するのではというアイデアに基づき、申請者（佐々木・成蹊大）は、連携研究者（三浦・愛教大）と協力して摩擦力顕微鏡を用いた超低摩擦の研究を理論と実験の両面から展開している。2003年にグラファイト薄膜でC<sub>60</sub>単層膜を挟んだサンドウィッチ界面、2005年にC<sub>60</sub>インターカレートグラファイト界面を作製し、本システムが実験装置の測定精度以下の最大静止摩擦力と平均摩擦力（動摩擦力）を示す事を発見した。すなわち、このシステムは、100nN以下の荷重で0.001以下の摩擦係数を示しており、グラファイトや二硫化モリブデンの値よりも小さくなっている。透過電子顕微鏡によると、得られたフィルムにおいて、C<sub>60</sub>分子はグラファイトの平面内で最密充填構造をとる一方、[0001]軸方向にはC<sub>60</sub>単分子層が約1.3nmの間隔で積層する構造になっている。申請者は若手研究(B)(H17~H18)においてこの積層距離を分子力学シミュレーションにより説明する事に成功している。

更に2007年、C<sub>70</sub>インターカレートグラファイト界面を作製し、実験装置の測定精度以下の平均摩擦力（動摩擦力）を示すことを発見しているが、摩擦力像の示すドメイン構造の解釈や、C<sub>70</sub>の充填構造が未解明である[5]。このように申請者らは超低摩擦を示すフラーレン-黒鉛ハイブリッド材料の開発に成功し、開発サイドは量産化に向けた試みを進めている。また摩擦力顕微鏡を用いて展開される超低摩擦の研究は、申請者のグループを中心にここ2~3年の間に急激に進みつつあり、特に申請者のフラーレン-黒鉛ハイブリッドナノ界面の超低摩擦研究は当該分野の研究を世界的にリードしている。このことは、2005年ワシントンD.Cで開催された世界トライボロジー会議(WTC)の「超潤滑」シンポジウムで、我々の超低摩擦研究が、基調報告(Keynote speaker)としてコミッティ賞を

受賞)として報告されたことから分かる。さらに、H17年度文科省若手科学者賞、UBSスペシャルアワード(2006)、H18年度表面科学会論文賞、2006年度トライボロジー学会論文賞、Excellent Poster Award(2007)など国内外で数多くの賞を授与されている。

しかし原子スケールの超潤滑の発現機構は2003年の最初の測定以来理論的には全く明らかになっていない。そこで申請者は「基盤研究として、フラーレン-黒鉛ハイブリッド材料界面解析専用の摩擦力顕微鏡シミュレータを開発し、これまでの測定結果に明確な解釈を与える事で、アトムスケール超低摩擦のメカニズムを解明し、将来更に優れた超潤滑剤開発が可能になるのではないか。」と着想するに至った。上述のように現状で既に理論・実験の両面からプライオリティを持つ申請者のグループが、理論的な側面から更に世界を大きくリードするため、本研究計画の推進が必要不可欠である。

## 2. 研究の目的

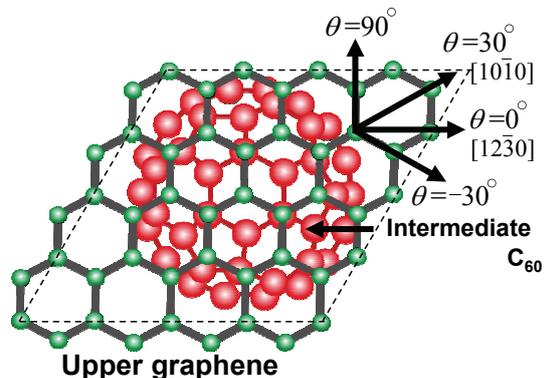
本研究では以下を目的とする。

フラーレン-黒鉛ハイブリッド超潤滑界面の摩擦過程を分子力学法で計算するシミュレータを開発すること。

開発したシミュレータを用いて、超低摩擦力の走査方向依存性を調べること。

特徴的な走査方向に対する超低摩擦特性のメカニズムを、C<sub>60</sub>分子の運動や変形などの挙動に着目して明らかにすること。

## 3. 研究の方法



分子力学シミュレーションを用いてグラフェン/グラフェン界面とグラフェン/C<sub>60</sub>界面(C<sub>60</sub>ベアリング系：上図)のトライボロジー特性を数値的に調べる。

グラフェン、C<sub>60</sub>分子内部の炭素原子ネットワークの共有結合を表す Tersoff ポテンシャルと、ナノ探針-グラフェン、グラフェン-グラフェン、C<sub>60</sub>-グラフェン、C<sub>60</sub>-C<sub>60</sub>間の非結合相互作用を表す LJ ポテンシャルの和で表わされる全エネルギーを、Polak-Rebierre タイプの共役勾配法(CG)法を用いて極小化

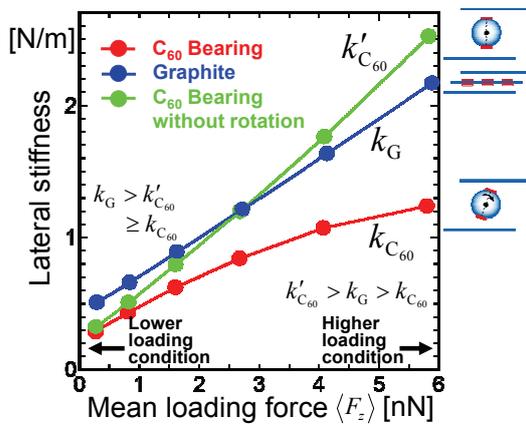
する。

C<sub>60</sub> ベアリング系の計算の場合のみ、グラフェンシート 2 枚と単一 C<sub>60</sub> 分子を含むユニットセルに、周期的境界条件を適用する。グラフェン/グラフェン界面には非周期モデルを適用する。準静過程の近似が成立する条件下、すなわち  $v \rightarrow 0$ 、 $T \rightarrow 0$  K の極限で、ナノ探針、非周期孤立グラフェンシート、周期的上層グラフェンシートの滑り（走査）や剥離に対して、モデル全系の構造最適化を行う。

#### 4. 研究成果

(1) [1010]方向の超潤滑 C<sub>60</sub> ベアリング機構の解明

(N. Itamura, K. Miura, N. Sasaki: Jpn. J. of Appl. Phys. **48**, 030214 (2009))



グラファイト/C<sub>60</sub>/グラファイト界面の超低摩擦シミュレータを開発した。これを用いて、グラファイト/C<sub>60</sub>/グラファイト界面で、上層グラフェンを走査する時、C<sub>60</sub> 分子に特徴的な、スティック・スリップを伴う並進運動や振動運動、回転、転がり運動がどのように超潤滑機構に寄与するかを、[1010]方向の走査に対して調べた。計算の結果、超潤滑には、C<sub>60</sub> 分子の回転だけではなく、弾性変形やグラフェン/C<sub>60</sub> 界面での接触状態など複数のファクターが寄与している事が示された（上図）。このように C<sub>60</sub> 分子の内部自由度が、ベアリング系がグラファイト系よりも優れた超潤滑特性を示す起源の一つであることを明らかにした。

(2) 原子スケール摩擦：グラフェン探針生成機構の解明

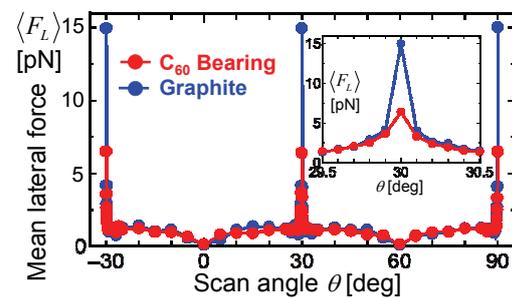
(N. Sasaki, H. Saitoh, K. Terada, N. Itamura, K. Miura: e-J. Surf. Sci. Nanotechnol. **8**, 173-180 (2009))

フラーレン-グラファイトハイブリッド表面を探針でこする場合、グラファイト/グラファイト界面で滑りが起きる場合と、フラーレン/グラファイト界面で滑りが起きる場合が想定される。グラファイトの超低摩擦機構を知る事は、フラーレン-グラファイトハイ

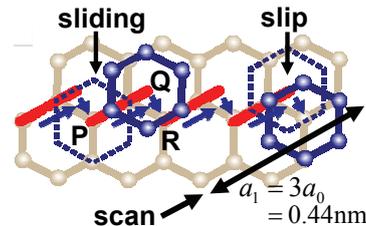
ブリッド材料の超低摩擦機構を議論する事につながるため、探針-グラファイト多層膜系のシミュレーションを行い、特に探針-表面接触領域近傍の探針、及び最外層グラフェン、第二層グラフェンの振る舞いを調べた。フラー探針の生成する機構と超低摩擦との関係を議論するため、各探針高さの任意の結晶軸方向に対して、水平走査を行い水平力曲線を計算したところ、滑り特性が、摩擦顕微鏡探針による摩擦からフラー探針による摩擦への転移を見せた。この知見は原子スケール摩擦の初期過程とみなす事が出来る。

(3) 超潤滑 C<sub>60</sub> 分子ベアリングの異方性

(N. Itamura, K. Miura, N. Sasaki: Jpn. J. of Appl. Phys. **48**, 060207 (2009))



初年度開発した超低摩擦特性解析シミュレータを用いて、C<sub>60</sub> 分子ベアリング系（グラファイト/C<sub>60</sub>/グラファイト界面）の走査方向依存性を発見し、グラファイト系（グラファイト/グラファイト/グラファイト界面）と比較した。計算で得られた摩擦力は、[1010]方向の非常に狭い領域でピークを示し、他の走査方向では、1pN 以下でほぼ一定の値を取っている（上図）。特に[1230]方向では、摩擦力はほぼゼロとなった。水平力曲線の振る舞いは、六員環を介した C<sub>60</sub> 分子の炭素結合上の滑りと、隣接 AB 積層サイト上への不連続ジャンプを反映している事が明らかとなった（下図）。摩擦力の荷重依存性は上記の異方性を顕著に反映する振る舞いを見せた。荷重依存性の結果からシミュレーションによって得られた摩擦係数の大きさは、これまでに我々のグループの実験で得られた摩擦係数の大きさとほぼ等しいオーダーになった。



(4) 単層グラフェンシートの剥離過程の超潤滑 1

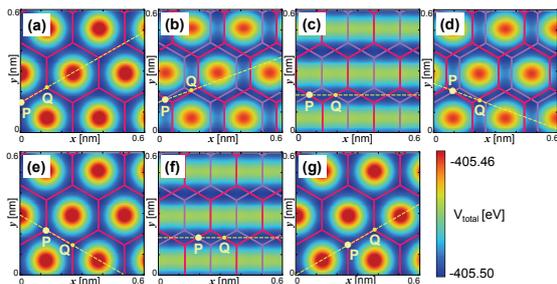
(N. Sasaki, H. Okamoto, N. Itamura, K.

Miura: e-J. Surf. Sci. Nanotech. **8**, 105 (2010))

C<sub>60</sub> 分子ベアリング系のスライド部分であるグラフェンシートの剥離過程における面接触時の超潤滑スライド運動を計算し、水平方向の摩擦力の振る舞いと同期した振る舞いが垂直方向の剥離力に現れる事を示した。

(5) C<sub>60</sub> 分子超潤滑ベアリングにおける特異なゼロ摩擦領域の原子スケール機構

(N. Itamura, H. Asawa, K. Miura, N. Sasaki: J. Phys.: Conference Series **258**, 012013 (2010))



C<sub>60</sub> 分子ベアリング系 (グラファイト/C<sub>60</sub>/グラファイト界面) の超潤滑の異方性を発見した際に見いだされた、摩擦力が 1pN 以下で近似的にゼロになる特異な領域の微視的メカニズムを議論した。上層グラフェンの各走査位置に対して、C<sub>60</sub> 分子一個が受ける全ポテンシャルエネルギー  $V_{total}$  を C<sub>60</sub> 分子の中心位置の関数として計算した結果、全走査過程で(1) C<sub>60</sub> 分子は極小点 P に位置しながら移動する事、(2) 上層グラフェンの走査に伴う、隣接二極小点間のエネルギーバリア  $\Delta V_{total}$  が、常に有限値となる事が分かった (上図)。従って  $T \rightarrow 0K$  かつ走査速度  $v \rightarrow 0$  の極限では、C<sub>60</sub> 分子は現在の極小点 P から隣接極小点にジャンプしない。このように往復の全走査過程で全ポテンシャルエネルギー面上に有限のエネルギーバリアが存在するため極小点 (C<sub>60</sub> 分子) が連続移動し、その結果特異なゼロ摩擦領域が現れる事を明らかにした。

(6) 単層グラフェンシートの剥離過程の超潤滑 2

(N. Sasaki, H. Okamoto, S. Masuda, K. Miura, and N. Itamura: J. Nanomat. **2010**, 742127 (2010))

C<sub>60</sub> 分子ベアリング系のスライド部分である矩形グラフェンシートの剥離に着目し、剥離過程が矩形グラフェンの縦横比率に強く依存する変形を伴って進行する事を示した。

## 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 15 件)

※全て査読付論文

- ① N. Itamura, H. Asawa, K. Miura, and N. Sasaki: “Unique Near-Zero Friction Regime of C<sub>60</sub> Molecular Bearings Along [1230] Direction”, J. of Phys.: Conference Series **258**, pp.0120131-0120139 (2010).
- ② T. Ishida, K. Kakushima, N. Sasaki, and H. Fujita: “In-situ TEM Observation of Nano Bonding Formation between Silicon MEMS Tips at Room Temperature”, Nanotechnology **21**, pp. 4357051-4357055 (2010).
- ③ N. Sasaki, H. Okamoto, S. Masuda, K. Miura, and N. Itamura: “Simulated Nanoscale Peeling Process of Monolayer Graphene Sheet - Effect of Edge Structure and Lifting Position”, J. Nanomat. **2010**, pp. 74212701-74212712 (2010).
- ④ M. Ishikawa, S. Kamiya, S. Yoshimoto, M. Suzuki, D. Kuwahara, N. Sasaki, and K. Miura: “Nanocomposite Materials of Alternately Stacked C<sub>60</sub> Monolayer and Graphene”, J. Nanomat. **2010**, pp. 8915141-8915146 (2010).
- ⑤ N. Sasaki, H. Okamoto, N. Itamura, and K. Miura: “Atomic-Scale Friction of Monolayer Graphenes with Armchair- and Zigzag-Type Edges During Peeling Process”, e-J. Surf. Sci. Nanotech. **8**, (2010), pp.105-111 (2010).
- ⑥ N. Sasaki, S. Kawai, and H. Kawakatsu: “Dithering amplitude dependence of STM/DLFM maps on Si(111)- $7 \times 7$ ”, Phys. Rev. B **80**, 1934021-1934024 (2009).
- ⑦ M. Ishikawa, R. Harada, N. Sasaki, and K. Miura: “Adhesion and peeling forces of carbon nanotubes on a substrate” Phys. Rev. B **80**, 1934061-1934064 (2009).
- ⑧ N. Sasaki, H. Okamoto, N. Itamura, and K. Miura: “Peeling of Graphene Sheet - Simulation Study”, e-J. Surf. Sci. Nanotech. **7**, pp.783-786 (2009).
- ⑨ S. Kawai, N. Sasaki, and H. Kawakatsu: “Direct mapping of the lateral force gradient on Si(111)- $7 \times 7$ ”, Phys. Rev. B **79**, pp.1954121-1954125 (2009).
- ⑩ N. Itamura, K. Miura, and N. Sasaki: “Simulation of Scan Directional Dependence of Superlubricity of C<sub>60</sub> Molecular Bearings and Graphite”, Jpn. J. Appl. Phys. **48**, pp.0602071-0602073 (2009).

- ⑪ N. Sasaki, H. Saitoh, K. Terada, N. Itamura, and K. Miura: "Simulation of Atomic-Scale Wear of Graphite – Nanotip Induced Graphene Formation", e-J. Surf. Sci. Nanotech. 7, pp.173-180 (2009).
- ⑫ N. Itamura, K. Miura, and N. Sasaki: "Analysis of Mechanism of Low Lateral Stiffness of Superlubric C<sub>60</sub> Bearing System", Jpn. J. Appl. Phys. 48, pp.0302141-0302143 (2009).
- ⑬ N. Sasaki, H. Saitoh, N. Itamura, and K. Miura: "Analysis of Lateral Orientation of Single-Walled Carbon Nanotube on Graphite", e-J. Surf. Sci. Nanotech. 7, pp.48-52 (2009) (eJSSNT Paper of The Year 2009, Silver Medal).
- ⑭ 石川誠, 原田竜一, 佐々木成朗, 三浦浩治: 「力検出機構を備えたマニピレーション SEM」, 表面科学 vol.29, pp. 713-715 (2008).
- ⑮ M. Ishikawa, M. Kato, R. Harada, and N. Sasaki, K. Miura: "Visualization of nanoscale peeling of carbon nanotube on graphite", Appl. Phys. Lett. 93, pp. 0831221-0831223 (2008).

[学会発表] (計 82 件)

国際会議 招待講演 (主著)

- ① N.Sasaki: "Nano-Tribological Functions of Carbon Hybrid Interfaces Formed by Graphene, Fullerene and Carbon Nanotube", *The 3rd International Symposium on Interdisciplinary Materials Science, ISIMS-2011*, Tsukuba International Congress Center, EPOCHAL, Tsukuba, Japan, 2011.3.9.
- ② N.Sasaki: "Mechanism of Superlubricity of Fullerene Molecular Bearings", *SIS2010, The 18th International Symposium on Surfactants in Solution, "Surfactants in Tribology"*, Melbourne, Australia, 2010.11.15
- ③ N.Sasaki: "Mechanism of Superlubricity of Fullerene Molecular Bearings", *The Fifth International Conference on Multiscale Materials Modeling, MMM2010, IMTEC 2010*, Symposium Tribology: Understanding Friction, Freiburg, Germany, 2010.10.6.
- ④ N. Sasaki: "Atomic-Scale Friction and Wear of Graphene - Simulation Study of Tip-Scan and Peeling Processes", *International Conference on Science of*

*Friction (ICSF2010)*, Ise-Shima, Mie, Japan, 2010.9.14.

- ⑤ N. Sasaki: "Simulation of atomic-scale wear of graphite - nanotip induced graphene formation", *CIMTEC 2010*, Symposium: Session CC-2 Friction and Wear, Montecatini, Italy, 2010.6.10.
- ⑥ N. Sasaki: "Keynote Speech : How to Design and Control Superlubric Molecular Bearings", *World Tribology Congress 2009 (WTC IV)*, Micro-, Nano- and Molecular Tribology, Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan, 2009.9.11.
- ⑦ N.Sasaki: "Nanomechanics of Superlubricity and Force Microscopy", *World Tribology Congress 2009 (WTC IV)*, Symposium: Large-scale simulation in the field of tribology I, Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan, 2009.9.8.
- ⑧ N.Sasaki: "Mechanism of Superlubricity of Fullerene Molecular Bearings", *5th I Tribochemistry Kyoto 2009*, Univ. of Kyoto, Kyoto, Japan, 2009.9.2.
- ⑨ N. Sasaki: "Mechanism of Lateral Force Microscopy and Superlubricity of Carbon Hybrid Systems", *Taiwan-Japan Symposium*, IIS, Univ. of Tokyo, Tokyo, Japan, 2008.10.27.
- ⑩ N. Sasaki: "Theoretical studies of nano-scale ultralow friction and force microscopy", *The 1st International Tribology Forum ~ Boundary Communication between Nanotechnology and Tribology*, AIST waterfront center, Japan, 2008.5.15.

招待講演 (主著) 他 9 件  
その他講演 他 63 件

[図書] (計 18 件)

- ① N. Sasaki, H. Okamoto, K. Miura, and N. Itamura: "Simulated Nanoscale Peeling Process of Monolayer Graphene Sheet - Effect of Edge Structure and Lifting Position," "Graphene, Theory, Research and Applications", Edited by Segey Mikhailov, Published by Intech, Croatia, pp.195-214 (2011).
- ② K. Miura, R. Harada, M. Kato, M. Ishikawa, and N. Sasaki: "Ch6: Chaotic Behavior Appearing in Dynamic Motions of Nanoscale Particles", *Toward Functional Nanomaterials, Springer, Lecture notes in Nanoscale*

*Science and Technology Vol.5*, Wang, Zhiming M. (Ed.), Springer-Verlag, pp. 213-222 (2009).

- ③ K. Miura, N. Sasaki: "Nanomechanics of Superlubricity", *ENCYCLOPEDIA of Nanoscience and Nanotechnology* (2nd version), Edited by Hari Singh Nalwa, American Scientific Publishers (2009).
- ④ 佐々木成朗, 三浦浩治: 「現代表面科学シリーズ」日本表面科学会編 (株) 共立出版 第3巻 表面物性 第1章 力学特性, 印刷中.
- ⑤ 三浦浩治, 佐々木成朗: 「ナノトライボロジー」 (株) 森北出版, 印刷中.
- ⑥ 佐々木成朗, 三浦浩治: 「カーボン系超潤滑薄膜」 (株) 丸善 「現代界面コロイド科学の事典」, pp.63-64 (2010年5月) (総ページ数: 272).
- ⑦ 佐々木成朗, 三浦浩治: 「ナノイメージング」 (株) エヌ・ティ・エス 第1編第4章第2節「摩擦顕微鏡」, pp.79-91 (2008年6月).

他 11 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 0 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〕

(1) ホームページ

① <http://www.ap.seikei.ac.jp/ntechlab>

② <http://www.ml.seikei.ac.jp/ntechlab> (2011年5月より)

(2) プレス発表

- ① Benesse 進研ゼミ 大学受験講座 エンカレッジ物理 2008年~2011年9月号, p.56
- ② キラリ☆研究開発 第46回(日刊工業新聞 2010年4月19日号, 第19面)
- ③ キラリ☆研究開発 第45回(日刊工業新聞 2010年4月5日号, 第18面)

- ④ 日経大学・大学院ナビ ([http://campus.nikkei.co.jp/ck/5770602\\_1.html](http://campus.nikkei.co.jp/ck/5770602_1.html))
- ⑤ 摩擦力計測の最小単位 ピコニュートン (日刊工業新聞 2010年1月1日 24面)
- ⑥ 現代を読み解く 4 「炭素の超微細ボールが拓く摩擦ゼロの新世界」 (AERA 2009年12月7日号 広告記事)
- ⑦ 成蹊大・東大・バーゼル大 観察前の予測も可能(日刊工業新聞 2009年11月18日 22面)

(3) 受賞

- ① Excellent Poster Award (ICSF2010) (2010年9月15日)  
"Simulation of Fullerene Molecular Bearings"  
N. Itamura, K. Miura, N. Sasaki
- ② Excellent Poster Award (ICSF2010) (2010年9月15日)  
"Nanoscale Shear of Opposing Nanoscale Silicon Tips - Molecular Dynamics Study"  
T. Ishikawa, N. Itamura, N. Sasaki
- ③ 2010年 eJSSNT Paper of The Year 2009 (Silver Medal) (2010年1月24日付)  
e-J. Surf. Sci. Nanotech. 7, pp. 48- 52 (2009).  
N. Sasaki, H. Saitoh, N. Itamura, K. Miura
- ④ 2009年 eJSSNT Paper of The Year 2008 (Gold Medal) (2009年1月11日付)  
e-J. Surf. Sci. Nanotech. 6, pp. 1- 8 (2008).  
M. Harada, M. Tsukada, N. Sasaki

(4) その他

○研究論文①の Fig.1 が表紙に採用。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐々木成朗 (SASAKI NARUO)

成蹊大学・理工学部・教授

研究者番号: 40360862

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

三浦浩治 (MIURA KOUJI)

愛知教育大学・教育学部・教授

研究者番号: 50190583

板村賢明 (ITAMURA NORIAKI)

成蹊大学・理工学部・助手

研究者番号: 90433854