

平成22年5月18日現在

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2005 ～ 2009

課題番号：17105006

研究課題名(和文) ボトムアップナノテクノロジーを用いた高分子ナノデバイスの創製

研究課題名(英文) Fabrication of Polymer Nano-Devices Using Bottom-up Nanotechnology

研究代表者

宮下 徳治 (MIYASHITA TOKUJI)

東北大学・多元物質科学研究所・教授

研究者番号：40124630

研究成果の概要(和文)：

研究代表者らが世界に先駆けて開拓した両親媒性高分子の単分子膜作製技術を基盤技術とする集積型高分子ナノシート構築技術を開発し、光・電子機能を付与した高分子ナノデバイスの作製を行った。支持基板を必要としない自己支持性高分子ナノ薄膜や π 共役系高分子超薄膜を用いた電気化学トランジスタ、金属ナノ粒子単粒子層を発光性高分子ナノシートや非線形光学高分子ナノシートと組み合わせたハイブリッドナノ集積体の構築に着手し、高分子ナノシート特有の光・電子機能を発現することに成功した。

研究成果の概要(英文)：

We have carried out basic research aiming at new type of nano-devices based on polymer nanosheet assemblies using the Langmuir-Blodgett (LB) technique. We demonstrated photochemically patterned polymer nanosheets for 3D nanoarchitecture and an efficient organic electrochemical transistor composed of polymer LB film. We also investigated preparation of free-standing polymer nanosheet assemblies with highly ordered structure and nanoscale periodicity from nanometer to micrometer. Hybrid polymer nanoassemblies for luminescence sensor application, and enhancement of nonlinear optical efficiency via surface plasmon coupling were also investigated. For these outstanding results, we were invited to contribute a Highlight article to Journal of Materials Chemistry.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	22,200,000	6,660,000	28,860,000
2006年度	21,200,000	6,360,000	27,560,000
2007年度	15,600,000	4,680,000	20,280,000
2008年度	13,200,000	3,960,000	17,160,000
2009年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
総計	79,000,000	23,700,000	102,700,000

研究分野：化学

科研費の分科・細目：材料科学・高分子・繊維材料

キーワード：ナノ材料、超薄膜、表面・界面特性、先端機能デバイス

1. 研究開始当初の背景
次世代の高度情報化時代を支える材料・

素子開発においては、従来の物質の持つバルクの性質に基づいた材料開発でなく、多

様なナノ物質群を集積・組織化するボトムアップナノテクノロジーを基盤とした材料開発が求められている。

現段階では分子構造に基づいた機能設計が中心となっている。しかし、半導体の微細加工技術（トップダウン）に比べて、多様な物質群を集積・組織化するナノテクノロジーは残念ながら、十分に開発されていない。

本研究代表者は、1分子の厚さ（1~2 nm）を有し、分子が高度に配向した高分子ナノシートの自在集積技術の開発に世界に先駆け成功している。また、高分子の多様性を利用し、光・電子機能、分子認識機能などの機能団の組み込みも行い、光電変換機能、フォトニック機能、分子センサー機能を有する集積型高分子ナノシートの開発を行ってきた。

2. 研究の目的

本研究では、集積型高分子ナノシート構築技術を基盤として、無機ナノ粒子や液晶、生体たんぱくなど様々なナノ物質によるハイブリッドナノ集積体の構築、および光、電子を中心とした高分子ナノデバイスの創製を目的とした。高分子化合物を一分子レベルで調製した超薄膜や積層ナノ組織体を用いた機能材料の創製を行う。個々の機能分担を担った高分子単分子膜の作製及びその組織化やヘテロ接合を行い、分子が高秩序に配列した集合ナノ組織体として高度な機能を発現する材料設計学の発展を目指した。

3. 研究の方法

本研究は東北大学多元物質科学研究所ハイブリッドナノ組織体研究部の宮下徳治を研究代表者として、三ツ石方也、渡辺明、松井淳、Kim Yeji、三箇山毅 5 人の研究分担者、さらには複数の研究協力者からなる研究体制のもと進められた。

Langmuir-Blodgett 法や浸漬法などのボトムアップ的手法により、高分子ナノ集積体を作製し、その光・電子機能性に関し、購入したレーザゼータ電位計、原子間力顕微鏡、インピーダンス/ゲイン・フェイズアナライザなどにより、測定・評価を行った。

4. 研究成果

本研究により、高分子ナノシートによる光電子機能の発現に大きな成果を上げることができた。高分子ナノシートと無機ナノ粒子のハイブリッド化を実現するとともにその表面プラズモン特性を見出し、また、研究当初の予定にはなかった自己支持型高分子ナノシートの作製に成功することができた。以下に研究成果の内容を項目ごとに示す。

(1) 自己支持型高分子ナノシートの開発

両親媒性高分子材料であるポリ(*N*-ドデシルアクリルアミド)(pDDA)を用いてLangmuir-Blodgett(LB)法により高分子ナノシートを作製し、2分子膜(3.4nm)から数百層膜(マイクロ)まで同じ一層あたり厚さ(1.7nm)を保持した自己支持性高分子ナノシートの取り出しに世界ではじめて成功した。従来のナノ薄膜は固体基板の支持を必要としたが、開発した高分子ナノシートはそのような支持基板を必要とせず、ナノレベルでの高安定性・秩序性・平滑性を維持した積層構造を有している。得られた成果は掲載雑誌(*J. Mater. Chem.*, **18**, 1302 (2008))の Front Cover Page として採択されており、全世界に大きな学術的インパクトを与えた(図1)。さらに、高分子ナノシート中にアミノ基とグリシジル基を導入することで高分子ナノシート中での架橋反応を利用した自己支持性高分子ナノシートの作製を試みたところ、pDDA 単体の場合に比べ、同一条件で約 100 倍の大面積化に成功している。このようなナノメートルレベルの超薄膜のみを利用した機能性ソフトナノデバイスの構築は全く未知の領域であり、今後の研究展開が期待される。

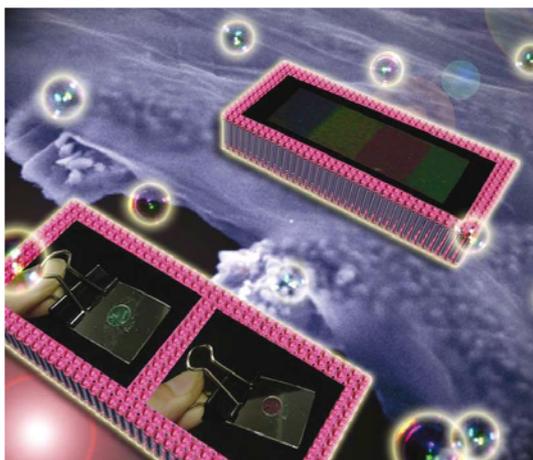


図1 グリッド上に転写された自己支持性高分子ナノシート(背景写真) 積層数や観測角度に応じてきれいな干渉色が見られる(全面各枠内写真)

(2) 精密ハイブリッドナノ集積体による光第二高調波(SH光)増強

LB法の利点の一つに分子配向を制御できることがあげられる。非線形光学活性な高分子ナノシートの構築を目指し、ディスプレイ用1(DR)とN-ドデシルアクリルアミドの共重合体 p(DDA/DR)ナノシートを金ナノ粒子単粒子層と組み合わせることで約8倍のSH光強度の増強が達成された

(*Appl. Phys. Lett.*, **89**, 011903 (2006))。紫外可視スペクトル測定および環境制御型走査型電子顕微鏡(ESEM)により観察したところ、2 個の近接した金ナノ粒子対の存在を確認し、SH 光強度増強は 2 個の近接した金ナノ粒子対の間で生じる局在プラズモンカップリングによる電場増強に起因すると考えられた(*J. Am. Chem. Soc.*, **131**, 4418 (2009))。このような研究業績に対し、第 23 回応用物理学会講演奨励賞など数多くの講演賞・ポスター賞を受賞した。金ナノ粒子単粒子層と非線形光学活性層の精密集積によって、SH 光強度が飛躍的に増強されることを欧文誌(*Chem. Comm.*, (2008))に発表し、**Inside Cover Page**(図 2)に採用された。ボトムアップ型アプローチによる光機能性ソフトナノデバイスの構築法として非常に注目されている。

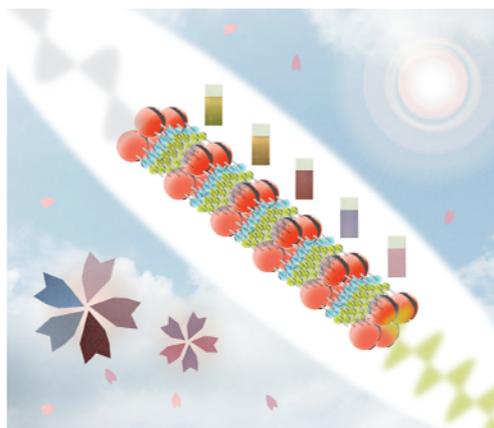


図 2 光第二高調波増強をもたらすハイブリッド高分子ナノ集積体 中央部 5 枚の基板は金ナノ粒子単粒子層と非線形光学ナノシートの交互積層回数を 1 から 5 まで繰り返した時の写真である

(3) 高分子ナノシートをテンプレートとした光酸化 SiO₂ 超薄膜の作製

シルセスキオキサンを有する p(DDA/SQPh) ナノシート(*Chem. Mater.*, **20**, 4310 (2008))を前駆体とし、紫外線照射を行うことで光酸化 SiO₂ 超薄膜の作製を検討した。Deep UV ランプを用い、大気下で p(DDA/SQPh) ナノシートを照射したところ、FT-IR よりシルセスキオキサン由来の Si-O-Si(cage) 吸収 (1130cm⁻¹) が減少し、1065(cm⁻¹) の Si-O-Si(network) 吸収が増加することが明らかになった(*J. Am. Chem. Soc.*, **130**, 11848 (2008))。これはケージ構造を有するシルセスキオキサンが、光照射によりネットワーク型の SiO₂ 超薄膜に変化したことを示唆する。膜厚は層数によらず、いずれも光照射前の約 1/5 へと減少した。ま

た、光照射後も平滑性は失われないことが原子間力顕微鏡観察より確かめられた。最薄 1.6 nm の SiO₂ 超薄膜の作製に成功した。X 線光電子分光(XPS)法により、光照射後のサンプルについて検討したところ、ネットワーク形成に伴って、従来の熱酸化法により得られる SiO₂ 薄膜の場合と同じピーク位置に Si2P シグナルがシフトすることがわかった。さらに X 線検出角度を変えながらスペクトルを測定したところ、XPS スペクトルの入射角度による Si2P シグナルの顕著な違いは見られず、膜全体にわたって均一な SiO₂ ネットワークが形成されていることが明らかとなった。フォトマスクを介して紫外光を照射することで、自在に SiO₂ 超薄膜が作製できることを実現している(図 3)。

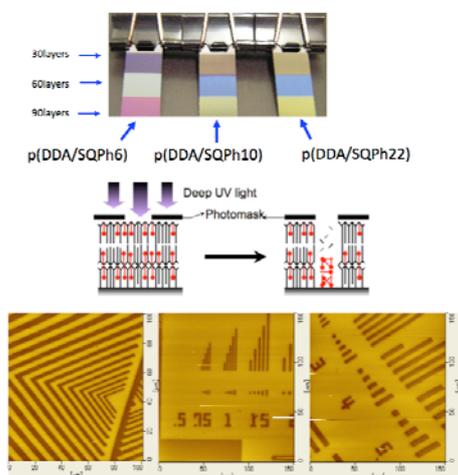


図 3 シルセスキオキサンを有する高分子ナノシート(上)と光酸化 SiO₂ 超薄膜の微細描画(下) 膜が膨潤することなく、フォトマスクのパターンが転写されている

(4) パイ共役高分子ナノシートを用いた電気化学トランジスタの構築

パイ共役高分子であるポリチオフェンとポリ(N-ドデシルアクリルアミド)混合溶液を作製することで、LB 法によりパイ共役高分子ナノシートを得ることに成功している(*Langmuir* **21**, 5343 (2005))。パイ共役高分子ナノシートを用い、電気化学的なドーブ、脱ドーブを利用した新規な電気化学トランジスタの構築を行った。金をガラス基板上に真空蒸着することにより櫛型電極を作製し、ソース、ドレイン電極とした。シリコーンゴムをスペーサーとして電解質溶液を注入し、ITO 電極をゲート電極として密封した(図 4)。作製した電気化学トランジスタはポリチオフェンナノシートを半導体層として用いており、電気化学反応を利用することで、1.2 V という低駆

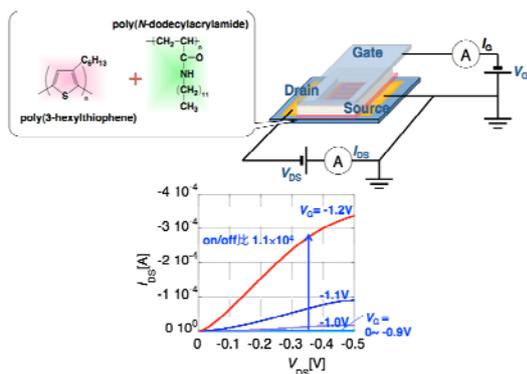


図4 混合LB法を利用した導電性高分子ナノシートによる電気化学トランジスタ 10^4 以上の ON/OFF 比を達成した

動電圧、さらには on/off 比 1.1×10^4 という非常に高いパフォーマンスを示すことが明らかとなった(Langmuir **23**, 8602 (2007))。さらに、ゲートに電解質イオンを含む高分子ゲルを用いることで、全固体型有機電気化学トランジスタの作製に取り組んでおり、フレキシブルエレクトロニクス素子への実現に向かって指針を示すことができた。

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48件)

- ① J. Matsui, S. Parvin, E. Sato, and T. Miyashita, Preparation of organic-ceramic-metal multihybrid particles and their organized assembly, Polym. J., 査読有, 42, 142-147 (2010).
- ② S. Sultana, M. Mitsuishi, J. Matsui, and T. Miyashita, Flow behavior in surface-modified microchannels with polymer nanosheets, Thin Solid Films, 査読有, 518, 606-609 (2009).
- ③ M. Ishifuji, T. Suzuki, M. Mitsuishi, and T. Miyashita, Molecular orientation of nonlinear optical polymer nanosheets on silica nanoparticle monolayer studied by optical waveguide spectroscopy, Thin Solid Films, 査読有, 518, 457-461 (2009).
- ④ J. Matsui, K. Abe, M. Mitsuishi, A. Aoki, and T. Miyashita, Quasi-Solid-State Optical Logic Devices Based on Redox Polymer Nanosheet Assembly, Langmuir, 査読有, 25, 11061-11066 (2009).
- ⑤ M. Ishifuji, M. Mitsuishi, and T. Miyashita, Bottom-up Design of Hybrid Polymer Nanoassemblies Elucidates Plasmon-Enhanced Second Harmonic Generation from Nonlinear Optical Dyes, J. Am. Chem. Soc., 査読有, 131, 4418 - 4424 (2009).
- ⑥ M. Mitsuishi, J. Matsui, and T. Miyashita, Photofunctional thin film devices composed of polymer nanosheet

assemblies, J. Mater. Chem., 査読有, 19, 325 -329 (2009).

- ⑦ T. Mikayama, K. Iida, Y. Suemori, T. Dewa, T. Miyashita, M. Nango, A. T. Gardiner, and R. J. Cogdell, The Electronic Behavior of a Photosynthetic Reaction Center Monitored by Conductive Atomic Force Microscopy, J. Nanosci. Nanotechnol., 査読有, 9, 97-107 (2009).
- ⑧ 15. M. Mitsuishi, M. Mihashi, M. Aminuzzaman, S. Kikuchi, and T. Miyashita, Temperature Imaging for Thermal Fluid Flow in Microchannels with Luminescent Polymer Nanosheets, J. Nanosci. Nanotechnol., 査読有, 9, 90-96 (2009).
- ⑨ H. Endo, M. Mitsuishi, and T. Miyashita, Free-standing ultrathin films with universal thickness from nanometer to micrometer by polymer nanosheet assembly, J. Mater. Chem., 査読有, 18, 1302-1306 (2008).
- ⑩ Y. Kim, F. Zhao, M. Mitsuishi, A. Watanabe and T. Miyashita, Photoinduced High-Quality Ultrathin SiO₂ Film from Hybrid Nanosheet at Room Temperature, J. Am. Chem. Soc., 査読有, 130, 11848-11849 (2008).
- ⑪ M. Ishifuji, M. Mitsuishi, and T. Miyashita, Second harmonic generation from multilayered hybrid polymer nanoassemblies enhanced by coupled surface plasmon resonance, Chem. Comm., 査読有, 1058-1060 (2008).
- ⑫ M. Mitsuishi, F. Zhao, Y. Kim, A. Watanabe and T. Miyashita, Preparation of Ultrathin Silsesquioxane Nanofilms via Polymer Langmuir-Blodgett Films, Chem. Mater., 査読有, 20, 4310-4316 (2008).
- ⑬ J. Matsui, Y. Sato, and T. Miyashita, Impedance Modulation of Polymer Nanosheet Capacitor by Light Stimuli, Colloids Surf., A. 査読有, 313, 452-455 (2008).
- ⑭ J. Matsui, Y. Sato, T. Mikayama, and T. Miyashita, Fabrication of Electrochemical Transistor Based on π -conjugate Polymer Langmuir-Blodgett Film, Langmuir, 査読有, 23, 8602-8606 (2007).
- ⑮ M. Mitsuishi, Y. Koishikawa, H. Tanaka, E. Sato, T. Mikayama, J. Matsui, and T. Miyashita, Nanoscale Actuation of Thermoreversible Polymer Brushes Coupled with Localized Surface Plasmon Resonance of Gold Nanoparticles, Langmuir, 査読有, 23, 7472-7474 (2007).
- ⑯ M. Mitsuishi, M. Ishifuji, H. Endo, H. Tanaka, and T. Miyashita, Hybrid Polymer Nanoassemblies: Polymer Nanosheets Organized with Metal Nanoparticle Arrays for Surface Plasmon Photonics, Polym. J., 査読有, 39, 411-422 (2007).
- ⑰ J. Matsui, K. Kubota, Y. Kado, and T.

- Miyashita, Electroless Copper Plating onto Polyimide Using Polymer Nanosheet as a Nano-Adhesive, Polym. J., 査読有, 39, 41-47 (2007).
- ⑱ M. Ishifuji, M. Mitsuishi, and T. Miyashita, Enhanced optical second harmonic generation in hybrid polymer nanoassemblies based on coupled surface plasmon resonance of a gold nanoparticle array, Appl. Phys. Lett. 査読有, 89, 011903-011903(2006), <http://hdl.handle.net/10097/47545>
- ⑲ H. Endo, Y. Kado, M. Mitsuishi, and T. Miyashita, Fabrication of Free-Standing Hybrid Nanosheets Organized with Polymer Langmuir-Blodgett Films and Gold Nanoparticles, Macromolecules, 査読有, 39, 5559-5563 (2006).
- ⑳ M. Mitsuishi, J. Matsui, and T. Miyashita, unctional Organized Molecular Assemblies Based on Polymer Nano-sheets, Polym. J. 査読有, 38, 877-896 (2006).
- [学会発表] (計92件)
- ① T. Miyashita, M. Mitsuishi, J. Matsui, Fabrication of Polymer Hybrid Nano Assemblies toward Film Electronics, Conference & Discussions on Molecular Electronics, Korea, 2010.1.27
- ② 宮下徳治, フィルムエレクトロニクスを目指した高分子ナノハイブリッド集積体, 第18回ポリマー材料フォーラム, 東京, 2009. 11. 27
- ③ T. Miyashita, J. Matsui, M. Mitsuishi, Organic Nano-Electronics Based on Polymer Nano-sheet Assemblies, 10th Japan-Belgium Symposium on Polymer Science, Tokyo, 2009.11.9
- ④ 石川貴啓, 渡辺明, 宮下徳治, ヒドロシリル化反応によるネットワーク型有機無機ハイブリッドポリマーの合成と物性, 第59回ネットワークポリマー講演討論会, 吹田, 2009. 10. 15
- ⑤ M. Mitsuishi, H. Tanaka, T. Miyashita, Plasmon Enhanced Luminescence using Polymer Nanosheet Assembly, 2nd Japanese German Joint Seminar Molecular Imaging Technology for Interdisciplinary Research, Germany, 2009.9.1
- ⑥ R. Fujii, A. Watanabe, T. Miyashita, Optical Properties of Organogermanium Polymer, KJF2009, Korea, 2009.8.25
- ⑦ 柴田俊明, 松井淳, 横山喬大, 増原陽人, 笠井均, 及川英俊, 宮下徳治, 液-液界面を用いた π 共役系ナノ材料の集積化, 第61回コロイドおよび界面化学討論会, 福岡, 2008. 9. 7
- ⑧ T. Miyashita, Organic Nano-Electronics based on Polymer Nano-Sheet Assemblies, US-Japan Polymat 2008 Summit, USA,

- 2008.8.12
- ⑨ M. Ishifuji, M. Mitsuishi, T. Miyashita, Optical Second Harmonic Generation from Polymer Nanosheet Assembly Organized with Gold Nanoparticles, MACRO2008, Taiwan, 2008.7.3
- ⑩ 石藤美紀, 三ツ石方也, 宮下徳治, 金ナノ粒子-高分子ナノシート積層体の非線形光学特性, 第55回応用物理学関係連合講演会, 船橋, 2008. 3. 28
- ⑪ Y. Kim, F. Zhao, M. Mitsuishi, A. Watanabe, T. Miyashita, Photoinduced Network Formation of Hybrid Nanosheet Consisting of Silsesquioxane KJF 2007, Korea, 2007.9.27
- ⑫ Kim Yeji, 趙峰, 三ツ石方也, 渡辺明, 宮下徳治, シルセスキオキサンを含むハイブリッドナノシートの光照射によるシリコン酸化膜の作製, 第68回応用物理学学会学術講演会, 札幌, 2007. 9. 7
- ⑬ Parvin Salina, 佐藤絵理子, 松井淳, 宮下徳治, Functionalization of Inorganic Nanoparticles based on Reactive polymer Shell, 第56回高分子学会年次大会, 京都, 2007. 5. 31
- ⑭ J. Matsui, Y. Sato, T. Mikayama, T. Miyashita, Electrochemical Transistor Fabricated by Polythiophene Polymer Nano-sheets, MRS Fall Meeting 2006, USA, 2006.11.29
- ⑮ 宮田拓, 松井淳, 宮下徳治, 親水性側鎖を有する高分子LB膜の表面モルフォロジーの検討, 第55回高分子討論会, 富山, 2006. 9. 22
- ⑯ 田中宏幸, 高橋昌弘, 三ツ石方也, 宮下徳治, 小幡誠, 矢野重信, 金属ナノ粒子-酸素応答性高分子ナノシートハイブリッド集積体の構築, 第55回高分子討論会, 富山, 2006. 9. 21
- ⑰ 遠藤洋史, 三ツ石方也, 宮下徳治, ナノスケールの周期構造を有する自己支持性高分子ナノ薄膜の作製, 第55回高分子討論会, 富山, 2006. 9. 21
- ⑱ 佐藤吉隆, 松井淳, 三箇山毅, 宮下徳治, 導電性高分子ナノシートを用いた電気化学トランジスタの検討, 第54回高分子討論会, 山形, 2005. 9. 20
- ⑲ 久保田康介, 角裕子, 松井淳, 宮下徳治, 高分子ナノシート接着剤を用いたポリイミド表面への微細銅配線作製, 第54回高分子討論会, 山形, 2005. 9. 20
- ⑳ 三箇山毅, 新沢達朗, 松井淳, 宮下徳治, 光伝導性高分子ナノシートを用いた有機フォトトランジスタの作製, 第66回応用物理学学会学術講演会, 徳島, 2005. 9. 11

[図書] (計8件)

- ① 宮下徳治, 三ツ石方也, 松井淳, ソフトマター 分子設計・キャラクターゼーションから機能性材料まで(単分子膜とLangmuir-Blodgett(LB) 膜), 丸善, 312(31-39) (2009)
- ② M. Mitsuishi, J. Matsui, T. Miyashita, Nanohybridization of Organic-Inorganic Materials(Chapter 5 Polymer Nanoassemblies and Their Nanohybridization with Metallic Nanoparticles), Springer, 288(103-123) (2009)
- ③ 三ツ石方也, 宮下徳治, 超分子サイエンス&テクノロジー, 高分子ナノシート, NTS出版, 1340(385-392) (2009)
- ④ 宮下徳治, 三ツ石方也, 自己組織化ナノマテリアル(第4章 高分子LB膜), フロンティア出版, 392(137-143) (2007)
- ⑤ 三ツ石方也, 宮下徳治, 機能物質の集積膜と応用展開 (第22章 金属ナノ粒子の精密集積と光機能), シーエムシー出版, 305(243-256) (2006)
- ⑥ T. Miyashita, J. Matsui, M. Mitsuishi, Functional Nanomaterials (Photofunctional Supramolecular Systems Based on Polymer Nanosheets), American Scientific Publishers, 515(361-375) (2006)
- ⑦ 宮下徳治, 三ツ石方也, ナノコンポジットマテリアル(高分子ナノシートと粒子系ハイブリッド), フロンティア出版, 363(272-277) (2005)
- ⑧ 宮下徳治, ナノハイブリッド材料の最新技術(LB法によるハイブリッド集積体), CMC出版, 335(51-59) (2005)

[産業財産権]

○出願状況 (計6件)

- ① 名称: 共重合体の単分子膜または積層膜およびそれらの製造方法
発明者: 宮下徳治, 三ツ石方也, Kim Yeji, 三谷清樹
権利者: 国立大学法人東北大学, チッソ株式会社
種類: 特許権
番号: 特開2008-232853
出願年月日: 2007年11月9日
国内外の別: 国内
- ② 名称: 高分子ナノシート集積電解質膜
発明者: 川角昌弥, 福嶋喜章, 宮下徳治, 松井淳
権利者: トヨタ中央研究所, 国立大学法人東北大学
種類: 特許権
番号: 特開2009-76331
出願年月日: 2007年9月20日

国内外の別: 国内

- ③ 名称: 局在表面プラズモン励起型超薄膜発光型センサー
発明者: 宮下徳治, 三ツ石方也, 田中宏幸
権利者: 国立大学法人東北大学
種類: 特許権
番号: 特開2008-232853
出願年月日: 2007年3月20日
国内外の別: 国内

[その他]

- ① ホームページ等
<http://www.tagen.tohoku.ac.jp/labo/miyashita/index-j.html>
- ② 東北大学の世紀「新素材!高分子超薄膜を作る」
2008年7月28日放映
<http://www.tohoku100-tv.jp/thisweek/080728/index.html>
- ③ 第27回東北大学サイエンスカフェ「折れ曲がる電子製品を作る」
2007年10月26日
http://cafe.tohoku.ac.jp/html/koen_2007.html#27

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮下 徳治 (MIYASHITA TOKUJI)
東北大学・多元物質科学研究所・教授
研究者番号: 40124630

(2) 研究分担者

渡辺 明 (WATANABE AKIRA)
東北大学・多元物質科学研究所・准教授
研究者番号: 40182901
三ツ石 方也 (MITSUISHI MASAYA)
東北大学・多元物質科学研究所・准教授
研究者番号: 70333903
松井 淳 (MATSUI JUN)
東北大学・多元物質科学研究所・准教授
研究者番号: 50361184
KIM YEJI (KIM YEJI)
東北大学・多元物質科学研究所・講師
研究者番号: 10431470
三箇山 毅 (MIKAYAMA TAKESHI)
東北大学・多元物質科学研究所・助手
研究者番号: 50327318