

機関番号：14401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23681023

研究課題名(和文) 超高精度3次元分子追跡法を用いた凝縮系ナノ空間反応ダイナミクスの単一分子解析

研究課題名(英文) Investigation of nanoscale spatial heterogeneity in polymeric materials by using 3D single-molecule tracking techniques

研究代表者

伊都 将司 (Ito, Syoji)

大阪大学・基礎工学研究科・助教

研究者番号：10372632

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円、(間接経費) 4,290,000円

研究成果の概要(和文)：高精度3次元単分子追跡装置の構築とその性能評価、それらの手法を用いた高分子固体のナノ空間不均一性評価等を目指し研究を行った。シリンドリカルレンズを結像光学系に挿入することで、蛍光分子の光軸(Z軸)方向の変位に対応して検出される発光スポットの楕円率が変化する装置を構築し3次元イメージングを実現した。同時にZ軸方向に周期的光強度分布を有する構造照明でゲスト分子を励起し、検出される蛍光強度からZ軸変位に関する情報を得る手法を開発し、Z分解能20 nmを達成した。構築した装置を用い、高分子薄膜材料中のゲスト分子が示す不均一な拡散挙動の原因を明らかにし、またナノレベルの不均一性の可視化に成功した。

研究成果の概要(英文)：In this project, we have focused on constructing single-molecule imaging apparatuses with three-dimensional (3D) resolution for the investigation of spatial heterogeneity at the molecular level in polymeric materials. To achieve 3D localization, two approaches were employed. The first one is so-called the astigmatism imaging method, in which a cylindrical lens was inserted into the imaging system to modify the shape of the fluorescent image of a single molecule depending on Z-position. The second approach is a structured illumination with a periodic intensity modulation along the Z-axis due to the interference of two laser beams. These imaging apparatuses provided the 3D resolution of several tens of nanometers. By using the 3D super-resolution techniques, we have clarified the mechanism of anomalous diffusion of guest molecules in polymer films. In addition, we have also succeeded in the visualization of spatial heterogeneity in polymeric materials.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学・ナノ材料・ナノバイオサイエンス

キーワード：1分子科学 ナノ反応ダイナミクス計測

1. 研究開始当初の背景

重合/架橋反応によるネットワーク形成や化学結合の開裂/分解は、粘弾性、溶解度、ガラス転移温度、誘電率、機械的強度など高分子固体の物性を劇的に変化させる。その特性を利用した材料は多岐に渡るが、その中でもレジスト及びその関連材料は、半導体超微細加工には欠かせない非常に重要な材料系である。また類似の反応性高分子材料は、ナノインプリントや3次元マイクロ光造形等の次世代微細加工技術にも応用されており、その重要性は今後ますます高まると予想される。また自然界に目を向けても、重合・架橋反応は生体高分子の機能発現にも深く関与しており、生命機能を理解する上でも非常に重要な反応である。

しかしながら、これほど重要な反応であるにもかかわらず高分子固体内部で起こるネットワーク形成や分解反応の nm スケールでのダイナミクスに関しては研究がほとんど進んでいない。高分子系固体は反応の進行と共にその物性が時々刻々変化することに加え、反応の進行度が場所ごとに異なる非常に複雑なダイナミクスを示すため、従来のバルクの測定手法で系全体の反応を追跡しても、分子レベル~数百 nm の空間スケールで見られる反応の空間的不均一性を評価できないことがその主たる理由であり、このようなナノ空間での複雑な反応ダイナミクスを追跡するためには高い時空間分解能を有し、且つ固体内部の情報を得ることの可能な測定手法が不可欠である。そのためのアプローチとして、申請者は近年、蛍光分子をプローブとして反応性高分子材料中に添加し、一個一個のプローブ分子の並進拡散挙動を数 nm 程度の高い精度で詳細に追跡することで、ネットワーク形成反応など高分子固体内部で進行するナノスケールの反応ダイナミクスが評価可能になるとの着想に至った。また実際に単分子追跡法や単分子蛍光デフォーカスイメージング法を駆使することで光/熱架橋性高分子内部で進行するネットワーク形成反応のナノスケール反応ダイナミクスやその空間的不均一性評価などが可能であることを示してきた。

2. 研究の目的

上記のように、単一分子をプローブとした物性評価法はミクロな反応ダイナミクスや空間的不均一性評価などの評価に有効であるが、ナノ空間で起こる複雑反応を理解するには解決すべき問題が残る。まず第一の課題は、蛍光顕微鏡を用いたイメージング法では3次元的な分解能を持たず、ゲスト分子の動きに関して得られる情報は2次元情報に限定される点である。さらに、反応ダイナミクスの分子論的理解には、ゲスト分子追跡精度のさらなる向上も必要である。

そこで本研究では、高精度3次元単分子追跡装置の構築とその性能評価、それらの手法

を用いた高分子固体のナノ空間不均一性評価等を主たる研究目的とした。

3. 研究の方法

超高感度蛍光顕微鏡にナノレベルの3次元位置決定精度を持たせるため、結像光学系にシリンドリカルレンズを挿入することで非点収差を導入し、蛍光分子の光軸方向の変位に対応して CCD で検出される蛍光スポット形状(楕円)の楕円率(X軸方向の長さ L_x と Y 軸方向の長さ L_y の比)が変化するイメージング系を構築し、検出される蛍光スポットの L_x/L_y 値から Z 軸(光軸)変位に関する情報を得た。同時に、楕円状の蛍光スポットを2次元のガウス関数で解析し、その重心の位置をゲスト蛍光分子の XY 平面上の位置として決定した。

高分子薄膜中にペリレンジイミド誘導体などの蛍光分子をゲストとして添加し、上記の3次元単一分子イメージング装置を用い、ゲスト分子の並進拡散を追跡した。3次元拡散挙動の高分子膜厚、ゲスト分子依存性等に関して詳細なデータを取得し解析すると共に、データの合理的解釈のため実験条件を再現する計算機シミュレーションも行った。

上記に加え、顕微鏡光軸(z軸)方向に周期的光強度分布を有する構造照明でゲスト分子を励起し、検出される蛍光強度から Z 軸(光軸)変位に関する情報を得る手法の開発も同時に行った。図1に示すように、対物レンズを上下に突き合わせた光学系を有する顕微鏡を自作し、蛍光励起用レーザー光を2つに分け、同じ光路長を経て上記2つの対物レンズの後ろ側焦点にそれぞれ集光し、対物レンズの物体面で光軸に沿って干渉縞が生じる構造照明系を実現した。

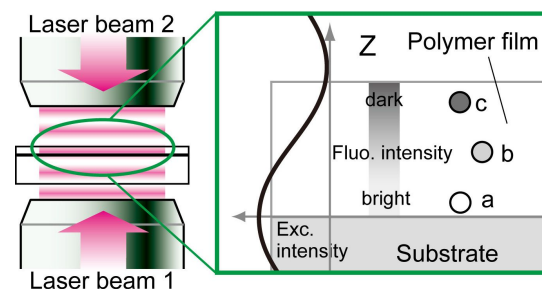


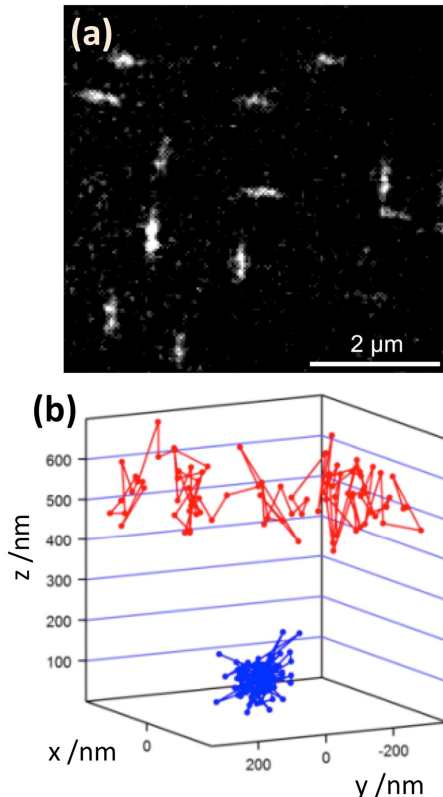
図1 光干渉により光軸方向に強度変調された励起光学系と Z 位置に依存した蛍光強度の模式図。

20 nm 程度の蛍光性高分子ナノ粒子を参照試料とし、ピエゾステージを用い、光軸方向に一定の速度で移動させその時の蛍光強度変化を高感度 CCD カメラで検出した。蛍光強度の変化から Z 軸方向の分子位置を決定し、同時に2次元ガウス関数による画像解析から顕微鏡焦平面(XY平面)上の分子位置を決定した。得られたデータを解析し、構築した

3次元イメージング装置の分解能を評価した。

4. 研究成果

ガラス転移温度が室温より低い15程度の高分子薄膜中のゲスト蛍光分子(ペリレンジイミド誘導体)3次元単一分子追跡の結果の一例を図2に示す。図2aは得られた蛍光イメージで、Z位置の参照用にガラス基板に蛍光色素を共有結合で固定化しており、その蛍光スポットが縦長に、薄膜中のペリレンジイミド誘導体の蛍光スポットは横長となった。縦長の蛍光スポットは並進運動を示さず、



一方横長のスポットは並進運動を示した。

図2 (a)非点収差を導入した結像光学系で取得したゲスト蛍光分子の蛍光イメージと(b)3次元単一分子追跡により得られた並進拡散の軌跡の一例。高分子膜厚は約1 μm。

図2bは縦長及び横長の蛍光スポットの3次元拡散の軌跡の一例である。Z位置がほぼ0で並進運動を示していない軌跡が縦長のスポットに対応し、これは基盤に固定化した色素の信号であることが分かる。一方、Z位置が500 nm付近で、より広い範囲にわたる軌跡が横長の蛍光スポットに対応する。この並進拡散運動をXY成分とZ成分に分離し、XY平面に投影した並進拡散挙動に対し平均自乗変位の時間変化をプロットするとほぼ傾き1の直線となり、これよりXY平面上の並進拡散ほぼ2次元のランダムウォークであることが分かった。一方、図2bでZ軸方向の位置の変化に注目すると、ある平均的

な値を中心にランダムに上下動しており、一見すると束縛されたランダムウォークのように見える。平均自乗変位の時間変化をみると、時間と共に平均自乗変位の値は増加せずほぼ一定値を示した。これにより、Z方向の並進運動は束縛のないランダムウォーク(所謂正常拡散)を示すXY平面上の拡散挙動と全く異なり、ある空間に束縛されていることが明らかとなった。

光軸方向に構造を有する照明により励起されたナノサイズ蛍光体の位置決定精度を実験的に明らかとするために、ステップ幅を40 nm, 30 nm, 20 nm, 10 nm, 5 nmとし、1ステップ移動(移動時間<30 ms)、400 ms待機の操作を繰り返し行いつつ、蛍光イメージを露光時間31 msで取得した。この時、検出される蛍光強度は励起レーザー光の干渉パターンに依存し、構造照明が設計どおり構築されている場合、Z方向への移動に伴い励起光の波長オーダーで蛍光強度が増減すると予想される。実験結果は予想された挙動を示し、設計どおりの励起光強度分布が実現されていたことが示された。

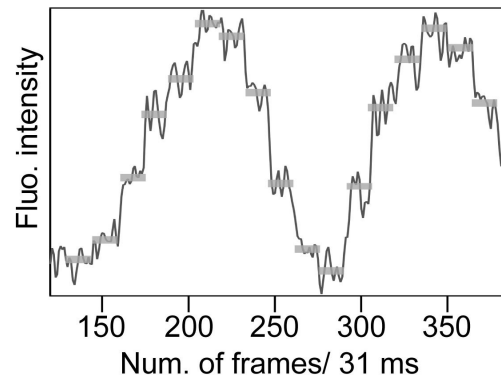


図3 400 msごとに試料を20 nmステップで光軸方向に移動させた場合の単一ナノサイズ発光体の蛍光強度の時間変化。イメージングの露光時間は約31 ms。

上で述べたステップ状のZ方向移動に対して、構築した顕微鏡が移動量に比べて十分なZ方向分解能を有する場合、蛍光強度の時間変化は400 msごとにステップ状に変化すると予想され、逆に分解能が不足する場合ステップ状の移動が判別できないと考えられるため、イメージングで得られる蛍光強度の時間変化から構築した顕微鏡のZ分解能を評価した。その結果、図3に示すように、移動量20 nm程度のステップ状の移動を判別することに成功した。10 nm以下の移動量の場合、このようなステップ状の変化を観察することができず、構築した空間変調励起系を有する顕微鏡における光軸方向分解能は現状で20 nmであると分かった。さらなるZ分解能の向上には、励起光の時間的な揺らぎのさらなる低減、装置の除振性能のさらなる向上などが必要であり、高精度アクティブ除振台の導入、温度変化、空気の揺らぎに起因する

励起レーザー光の位相変化の低減などにより数 nm 精度の Z 位置決定の実現も期待できる。

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 17 件)

Syoji Ito, Atsushi Iida, Masakazu Yasuda, and Hiroshi Miyasaka, Fluorescence Behavior of Single Guest Molecules in Nonpolar Oil Droplets Covered with Surfactants, *J. Phys. Chem. C*, 118, 10348-10357 (2014).

(dx.doi.org/10.1021/jp4112266)

Masayasu Muramatsu, Satoe Morishima, Tetsuro Katayama, Syoji Ito, Yutaka Nagasawa, Hiroshi Miyasaka, "The effect of pre-solvation in the ground state upon photoinduced electron transfer in ionic liquids" *Journal of Solution Chemistry*, (in press)

Mamoru Tamura, Syoji Ito, Shiho Tokonami, and Takuya Iida, "Theory for optical assembling of anisotropic nanoparticles by tailored light fields under thermal fluctuations, *Research on Chemical Intermediates*, Published online (2014). (in press)

Chie Kojima, Naoya Oeda, Syoji Ito, Hiroshi Miyasaka, and Takuya Iida, "Photothermogenic Properties of Different Sized Gold Nanoparticles for Application in Photothermal Therapy, *Chemistry Letters*, (in press)

Tomokatsu Kushida, Cristopher Camacho, Ayumi Shuto, Stephan Irle, Masayasu Muramatsu, Tetsuro Katayama, Syoji Ito, Yutaka Nagasawa, Hiroshi Miyasaka, Eri Sakuda, Noboru Kitamura, Zhiguo Zhou, Atsushi Wakamiya, Shigehiro Yamaguchi, "Constraint-induced structural deformation of planarized triphenylboranes in the excited state." *Chem. Sci.*, 2014, 5, 1296-1304. (DOI: 10.1039/C3SC52751D)

Satoshi Takei, Akihiro Oshima, Takumi Ichikawa, Atsushi Sekiguchi, Miki Kashiwakura, Takahiro Kozawa, Seiichi Tagawa, Tomoko G. Oyama, Syoji Ito, and Hiroshi Miyasaka, "Organic solvent-free water-developable sugar resist material derived from biomass in eco-friendly green lithography", *Microelectronic Engineering*, (in press)

(dx.doi.org/10.1016/j.mee.2014.02.026)

Mariko Toshimitsu, Yuriko Matsumura,

Tatsuya Shoji, Noboru Kitamura, Mai Takase, Kei Murakoashi, Hiroaki Yamauchi, Syoji Ito, Hiroshi Miyasaka, Yoshihiko Mizumoto, Hajime Ishihara, and Yasuyuki Tsuboi, "Metallic-Nanostructure-Enhanced Optical Trapping of Flexible Polymer Chains in Aqueous Solution as Revealed by Confocal Fluorescence Microspectroscopy, *J. Phys. Chem. C* 116, 14610-14618 (2012).

(dx.doi.org/10.1021/jp305247a)

Takahiro Kaji, Toshiki Yamada, Syoji Ito, Hiroshi Miyasaka, Rieko Ueda, and Shin-ichiro Inoue, and Akira Otomo, "Controlled Spontaneous Emission of Single Molecules in a Two-Dimensional Photonic Band Gap, *J. Am. Chem. Soc.* 135, 106-109 (2013).

(dx.doi.org/10.1021/ja3115357)

Hiroaki Yamauchi, Syoji Ito, Ken-ichi Yoshida, Tamitake Itoh, Yasuyuki Tsuboi, Noboru Kitamura, and Hiroshi Miyasaka, "Temperature near Gold Nanoparticles under Photoexcitation: Evaluation Using a Fluorescence Correlation Technique, *J. Phys. Chem. C* 117, 8388-8396 (2013).

(dx.doi.org/10.1021/jp311173j)

Tatsuya Shoji, Junki Saitoh, Noboru Kitamura, Fumika Nagasawa, Kei Murakoshi, Hiroaki Yamauchi, Syoji Ito, Hiroshi Miyasaka, Hajime Ishihara, and Yasuyuki Tsuboi, "Permanently Fixing or Reversible Trap-and-Release of DNA Micropatterns on a Gold Nanostructure using Continuous-wave or Femtosecond Pulsed Near-Infrared Laser Light, *J. Am. Chem. Soc.* 135, 6643-6648 (2013).

(dx.doi.org/10.1021/ja401657j)

Syoji Ito, Hiroaki Yamauchi, Shimpei Hidaka, Mamoru Tamura, Hironori Hattori, Taichi Hamada, Keisuke Nishida, Shiho Tokonami, Tamitake Itoh, Hiroshi Miyasaka, and Takuya Iida*, "Selective Optical Assembly of Highly Uniform Nanoparticles by Doughnut-Shaped Beams, *Scientific Report*, 3, 3047 (2013).

(doi:10.1038/srep03047)

Masayasu Muramatsu, Tetsuro Katayama, Syoji Ito, Yutaka Nagasawa, Daisuke Matsuo, Yoshinori Suzuma, Akihiro Orita, Junzo Otera, and Hiroshi Miyasaka, "Photoinduced Charge-Transfer Dynamics of Sequentially Aligned Donor - Acceptor Systems in Ionic Liquid, *Photochemical & Photobiological Sciences* 12[10], 1885-1894 (2013).

(DOI: 10.1039/C3PP50198A)

伊都将司:「分子系への光トラッピング応用」, 光化学, Vol. 44, No. 1, 18-25 (2013), 光化学協会.

伊都将司:「三次元ナノ構造を光で見る超解像蛍光顕微鏡法の発展」, 化学, Vol. 68, No. 11, 62-63 (2013).

Syoji Ito, Yoshito Tanaka, Hiroyuki Yoshikawa, Yukihide Ishibashi, Hiroshi Miyasaka, and Hiroshi Masuhara, Confinement of Photopolymerization and Solidification with Radiation Pressure, J. Am. Chem. Soc., 2011, 133 (37), pp 14472-14475

(DOI: 10.1021/ja200737j)

Masakazu Yasuda, Atsushi Iida, Syoji Ito, and Hiroshi Miyasaka, Fluorescence detection of single guest molecules in ultrasmall droplets of nonpolar solvent" Phys. Chem. Chem. Phys., 2012, 14 (1), 345-352.

(DOI: 10.1039/C1CP22207D)

伊都将司、宮坂博:“単一ゲスト分子の動きから高分子材料の複雑な反応ダイナミクスを追跡する”、高分子 Vol. 60, pp. 54-57 (2011)、(社)高分子学会.

[学会発表](計 27件)

池上雄大, 伊都将司, 宮坂博, 宇野何岸, 高木祐太, 森本正和, 入江正浩, ジアリアルエテン誘導体を用いた超解像蛍光スポット, 日本化学会第 94 春季年会(2014), 2014年3月28日, 名古屋大学 東山キャンパス.

新井悠平, 多賀悠平, 竹井敏, 伊都将司, 宮坂博, 宇野何岸, 高木祐太, 森本正和, 入江正浩, 蛍光性ジアリアルエテン誘導体の単一分子発光スイッチング特性, 日本化学会第 94 春季年会(2014), 2014年3月28日, 名古屋大学 東山キャンパス.

伊都将司, 山内宏昭, 田村守, 日高慎平, 服部祐徳, 濱田大地, 西田敬亮, 床波志保, 伊藤民武, 宮坂博, 飯田琢也, 軸対称ベクトルビームによるプラズモンナノ粒子の選択的光パターンニング, 2014年3月17日, 青山学院大学相模原キャンパス.

多賀悠平, 伊都将司, 竹井敏, 北川大地, 小島誠也, 宮坂博, 高分子固体界面近傍で単一ゲスト分子が示す異常拡散挙動のメカニズム解明, 第 7 回分子科学討論会, 2013年9月25日, 京都テルサ.

伊都将司, 飯田篤史, 安田雅一, 宮坂博, 無極性溶媒のナノ液滴中における単一ゲスト分子の蛍光発光挙動, 2013年光化学討論, 2013年9月11日, 愛媛大学 城北地区

多賀悠平, 伊都将司, 竹井敏, 北川大地, 小島誠也, 宮坂博, 高分子固体の界面近傍におけるゲスト分子の異常拡散挙動: 3次元単一分子蛍光イメージングによるメカニズム解明, 2013年光化学討論 2013年9月13日, 愛媛大学 城北地区

多賀悠平, 伊都将司, 竹井敏, 宮坂博, 高分子薄膜内ゲスト蛍光分子の三次元単分子追跡, 日本化学会第 93 春季年会(2013), 2013年3月23日, 立命館大学 びわこ・くさつキャンパス.

伊都将司, 山内宏昭, 宮坂博, 田中嘉人, 吉川裕之, 増原 宏, 光輻射力で創る化学反応場, 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 2013年3月27日, 神奈川工科大学.

Syoji Ito, Yuhei Taga, Kentaro Maeda, Koh Itoh, Takatsugu Kusumi, Satoshi Takei, and Hiroshi Miyasaka, Evaluation of Nanoscale Inhomogeneity in Polymer-Based Materials using Single Fluorescent Molecules as Nanoprobes, 8th Handai Nanoscience and Nanotechnology International Symposium - Nanoscience and Nanotechnology for Energy Harvesting and Saving -, December 11, 2012, Icho-Kaikan, Osaka University, Japan.

Syoji Ito, Localization of Photochemical Reactions in Solution with Radiation Pressure, 7th Asian Photochemistry Symposium, November 13, 2012, Icho Kaikan, Osaka University, Suita, Osaka, Japan.

Hiroaki Yamauchi, Syoji Ito, and Hiroshi Miyasaka, Fabrication of Silver Nanostructures under Simultaneous Irradiations with UV and Near-IR Lasers, November 12, 2012, Icho Kaikan, Osaka University, Suita, Osaka, Japan.

Yoko Miyamoto, Syoji Ito, and Hiroshi Miyasaka, Development of a Dual-color Single Molecule Tracking System, November 13, 2012, Icho Kaikan, Osaka University, Suita, Osaka, Japan.

Syoji Ito, Yuhei Taga, Kentaro Maeda, Koh Itoh, Takatsugu Kusumi, Satoshi, Takei, and Hiroshi Miyasaka, Nanoscale Inhomogeneity in Polymeric Materials as Evaluated by Single Molecule Fluorescence Imaging, Japan-India Bilateral Seminar on Supermolecular Nanomaterials for Energy Innovation, October 15, 2012, Takamatsu, Japan.

Yoko Miyamoto, Syoji Ito, and Hiroshi Miyasaka, Development of a dual-color

- wide-field microscopic system for the simultaneous tracking of two different fluorophores, Japan-India Bilateral Seminar on Supermolecular Nanomaterials for Energy Innovation, October 16, 2012, Takamatsu, Japan. Yuhei Taga, Syoji Ito, Satoshi Takei, and Hiroshi Miyasaka, Three-dimensional tracking of single guest molecules in polymer films, Japan-India Bilateral Seminar on Supermolecular Nanomaterials for Energy Innovation, October 16, 2012, Takamatsu, Japan.
- 伊都将司, 多賀悠平, 竹井敏, 宮坂博, 非晶質高分子固体薄膜中における単一ゲスト分子の三次元追跡, 第6回分子科学討論会2012, 2012年9月18日, 東京大学本郷キャンパス.
- 山内宏昭, 伊都将司, 宮坂博, 蛍光相関分光法を用いた金ナノ粒子近傍の局所温度計測, 第6回分子科学討論会2012, 2012年9月18日, 東京大学本郷キャンパス.
- 多賀悠平, 伊都将司, 竹井敏, 宮坂博, 高分子薄膜中ゲスト蛍光分子の並進拡散運動の三次元単分子追跡, 2012年9月14日, 東京工業大学大岡山キャンパス.
- 宮本瑤子, 伊都将司, 宮坂博, 宇野何岸, 森本正和, 入江正浩, 高分子固体中における蛍光性ジアリールエテン誘導体の単一分子追跡, 2012年9月14日, 東京工業大学大岡山キャンパス.
- Hiroaki Yamauchi, Syoji Ito, and Hiroshi Miyasaka, Size and Shape Controls of Silver Nanoparticles by Using Radiation Pressure, XXIV UPAC Symposium on Photochemistry, July 16, 2012, Coimbra, Portugal.
- 21 ITO, Syoji; YAMAUCHI, Hiroaki; MIYASAKA, Hiroshi, Estimation of local temperature in the vicinity of a plasmonic nanostructure using fluorescence correlation spectroscopy, -Yamada Conference LXVI- International Conference on the Nanostructure-Enhanced Photo-Energy Conversion, June 4, 2012, The National Museum of Emerging Science and Innovation (Miraikan), Tokyo, Japan.
- 22 伊都将司, 光子の力でつくる化学反応場 第72回応用物理学会学術講演会, 2011年8月29日, 山形大学小白川キャンパス.
- 23 伊都将司, 単一蛍光分子の動きから観る材料の局所物性 日本分光学会高感度表面・界面部会 第4回シンポジウム, 2011年12月22日, 関西学院大学 大阪梅田キャンパス.
- 24 伊都将司, 前田健太郎, 竹井敏, 宮坂博, 高時空間分解単一分子蛍光イメージング法によるポリマー薄膜のナノスケール不均一性評価, 2011年光化学討論会, 2011年9月6日, 宮崎市河畔コンベンションエリア.
- 25 伊都将司, 前田健太郎, 竹井敏, 宮坂博, 非晶質高分子固体中単一ゲスト分子の異常拡散と拡散係数の空間相関, 第5回分子科学討論会, 2011年9月21日, 札幌コンベンションセンター.
- 26 Syoji Ito, 他計10名, Mobility of individual guest molecules in channel structures of mesoporous hybrid organosilica, DAE-BRNS Eleventh Biennial Trombay Symposium on Radiation & Photochemistry (TSRP-2012), 2012年1月5日, Training School Hostel, Anushaktinagar, Bhabha Atomic Research Centre, Mumbai, INDIA.
- 27 伊都将司, 安田雅一, 飯田篤史, 宮坂博, ナノ液滴中の単一分子発光挙動, 第59回応用物理学関係連合講演会 2012年3月18日, 早稲田大学早稲田キャンパス, 早稲田中・高等学校 興風館.
- 〔図書〕(計 2件)
伊都将司, 宮坂 博: 蛍光相関分光, 発光の事典, 太田信廣ら編(朝倉書店, 印刷中)
伊都将司, 宮坂 博: 光科学の世界(仮)(朝倉書店, 印刷中)
- 〔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://www.laser.chem.es.osaka-u.ac.jp>
6. 研究組織
(1) 研究代表者
伊都 将司 (ITO, Syoji)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教
研究者番号: 10372632
- (2) 研究分担者
なし ()
- (3) 連携研究者
なし ()