

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 26 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26248001

研究課題名(和文) プラズモン誘起電子遷移過程の制御

研究課題名(英文) Control of electronic excitation induced by localized surface plasmon resonance

研究代表者

村越 敬 (Kei, Murakoshi)

北海道大学・理学研究院・教授

研究者番号：40241301

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,000,000円

研究成果の概要(和文)：局在プラズモンモードが異なる金属ナノ構造を作製し、in-situ電気化学ラマン計測を有機小分子、ナノカーボン、半導体ナノドットを対象とし、局所電子励起プロセスと観測されるラマンモードの相関から検証した。局在電場特有の電子遷移過程の詳細が明らかとなった。電極電位依存性から界面ナノ物質の配向、電子状態の情報が得られることが分かった。触媒活性が発現する分子やナノカーボン系の反応活性と界面電子状態の相関についても明らかとした。さらには局在光電場を起因とする光散乱特性の制御、光電変換デバイスの光起電力増大などの機能が発現することも見出すことに成功した。

研究成果の概要(英文)：We have revealed that strong coupling states between localized surface plasmons and molecule excitons affect the Raman enhancement. Tuning of the localized surface plasmon resonance energy by changing metal nano-dimer structures leads to the modulation of the hybridized polariton energy of the hybridized system between metal nano-dimer structures and organic dye molecules. Maximum Raman enhancement was obtained at an optimized resonant energy between the hybrid states and Raman excitation. The coupling strength can be controlled by not only the structure of metal nano-dimer, but also the electrochemical potential of the system. The density of free electrons in metal nanostructures as well as the redox states of molecules can be varied by the electrochemical potential of the systems, resulting in the changes of the strong coupling states. The present finding can be extended into general scheme of the control for the light-matter interaction.

研究分野：物理化学

キーワード：電気化学 局在表面プラズモン 表面物理化学 半導体量子ドット カーボンナノチューブ グラフェン 強結合

### 1. 研究開始当初の背景

光と物質の相互作用を高効率に制御することは、光化学反応、光エネルギー変換、光デバイス、高感度物質検出など広範な光科学技術応用に向けて重要な課題として位置づけられている。それらの課題解決に向けて、金属ナノ構造への光照射に伴い誘起される局在表面プラズモンを利用した光エネルギーの微小空間への局在化は非常に有効な手段であると考えられている。そのため、形成した微小光電場において、物質同士や物質-光子間の引力・斥力などを根本的に理解することが将来の光科学技術に寄与できると考えられている。この微小光電場を利用して、励起状態に基づく現象の制御を可能とするためには、系を構成する分子・物質の幾何構造、振動構造、電子状態を高精度でプローブしつつ、光の分極応答を分子サイズ領域の精度をもって知る必要がある。

### 2. 研究の目的

局在光電場によって誘起される分子・物質の光励起状態形成の特徴を明らかとすることを本申請課題の目的とする。エネルギーと波数が規定された局在プラズモンと伝播型進行プラズモンのそれぞれに対して、相互作用する分子の種類、方位、配列、密度を制御して導入し、選択的な電子準位の励起、禁制励起の許容化、または強結合状態形成を可能とする場の構築を試みる。種々の分光測定を駆使することで、光局在場における物質挙動を精査する。また、系全体の電気化学電位を制御して、励起状態を自在に制御するとともに、形成したユニークな電子準位の電気化学絶対ポテンシャル電位を決定する。これらの局在光と分子が強く相互作用する系の顕微分光イメージング技術確立し、従来の光励起では困難であった励起プロセスの有効利用についての可能性を探求する。

### 3. 研究の方法

(1) 局在光電場空間内に存在する分子が存在する場合、分子の励起状態の誘起双極子のエネルギーと光エネルギーの相互作用により光と物質の強結合状態が生成し、励起状態はラビ分裂することが知られている。局在プラズモンを生成する金属ナノギャップ構造を電気化学電位の制御を可能とする導電性基板上に構築し、金属ナノ間隙において形成する強結合状態を、電気化学電位制御下において評価した。金属構造に担持する分子の量を調整し、強いラビ分裂が誘起される条件を見出し、電気化学 *in-situ* 表面増強ラマン散乱 (SERS) 測定、消光スペクトル測定を行った。分光計測によって、ギャップ内における分子数、局在分極に対する分子の方位を調査した。強結合によって形成した分裂準位のエネルギー幅を消光スペクトル計測により明らかとした後に、系全体の電気化学電位を変化させ、ラマン、消光スペクトルの電位依存性を

検討した。

(2) 液相析出法により作製した酸化チタン電極表面に担持した電極表面に Au ナノ構造を担持することによりプラズモン活性な Au / TiO<sub>2</sub> 電極を作製した。この電極表面にサイズが規定された励起子を生成する半導体量子ドット (PbS) を制御して配置する。金属ナノ構造が誘起する増強光電場内に生じる磁場勾配により誘起される異常励起プロセスの発現を確認するために、種々の波長の光照射下における光電気化学測定を行った。

(3) 光の電場が強く局在する系の探索を行うために、電気化学的金属ナノ構造制御技術の確立に向けて種々の検討を行った。導電性基板上に半導体プロセスにより作製した金属ナノ構造の表面で電気化学反応の反応量を制御することで金属ナノ構造の精密制御を行った。加えて、反応の進行に伴い変化する光学特性変化は、暗視野散乱顕微鏡を系に導入することでその場観察を可能とする系を構築し、調査した。

### 4. 研究成果

(1) 図 1 に示すのは、Au ナノ構造体が規則配列したプラズモン活性基板上に色素分子を担持することで形成した強結合状態の電気化学応答を示す消光スペクトルである。図中の破線に示すのは使用した色素分子の極大吸収波長であり、測定した電極電位は図中に示している。得られた消光スペクトルに見られる明らかな光学特性の変化から、強結合状態の形成を確認した。興味深いことに、電極電位の負電位側への掃引に伴い、ラビ分裂の分裂エネルギーが変化する様子が確認された。電極電位が -0.4 V の条件においてラビ分裂幅が最大になることが判明し、プラズモン-励起子間の相互作用が最も強くなる条件、並びに電子準位のエネルギー準位の情報が明らかとなった。

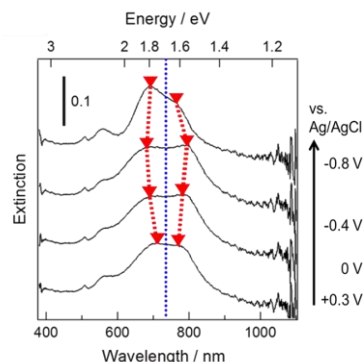


図 1. *in-situ* 電気化学消光スペクトル。

次いで、強結合状態の形成下における分子挙動を詳細に理解するために、同条件において SERS 測定を行った結果を図 2 に示す。消光スペクトル測定の際にも見られたような電極電位に依存したスペクトル変化が観測された。このことは、強結合状態の変調が SERS 強度に影響を与えることを明確化して

いる。ラマンバンドの相対強度比の変化からは Au 表面に対する分子配向、ならびにプラズモン-励起子相互作用が変化していることが分かる。使用した色素分子は、 $-0.6\text{ V}$  付近に還元電位を有する。つまり、負電位領域で消光、SERS スペクトルに観測された光学挙動は、色素分子の電気化学的還元による Au 表面での分子透明化が原因であると予測される。

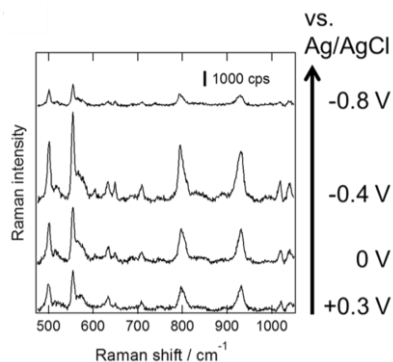


図 2. *in-situ* 電気化学 SERS スペクトル。

更なる検討として、負電位領域のそれぞれの電気化学電位において、特徴的な SERS バンドである  $555\text{ cm}^{-1}$  のバンド強度を蛍光バックグラウンドで規格化したものを励起光照射時間に対してプロットしたものを図 3 に示す。初期電位を  $0\text{ V}$  とし、励起光照射開始より 120 秒後に、図中に示す電気化学電位へと電圧を変化させた。SERS 強度における蛍光強度の変化は、分子と金属構造体間の距離変化を表すことが知られているため、本系においては、プラズモン-励起子間相互作用が弱まることにより、金属-分子間の距離が大きくなっていることが  $-0.8\text{ V}$  における結果から明らかになった。以上、強結合状態形成状態の電気化学変調に加えて、消光、SERS の電気化学その場測定を駆使することにより、これまでに明確でなかった強結合状態下における分子挙動が初めて明確化し、電気化学手法が強結合制御に向けて極めて有効であることも示された。

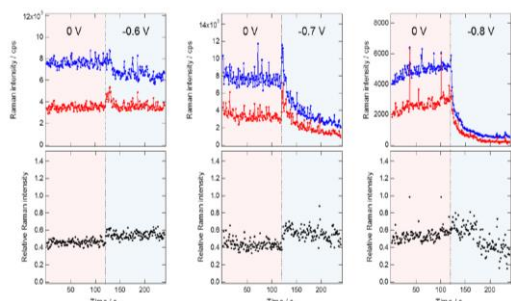


図.3 各電気化学電位における SERS バンドの相対強度比の経時変化

(2)酸化チタン電極上に作製したプラズモン活性な Au ナノ構造表面に、半導体量子ドットを制御して配置し、金属ナノ構造由来の局在表面プラズモンと物質の励起子が相互作用するハイブリット構造を構築した(図 4)。使

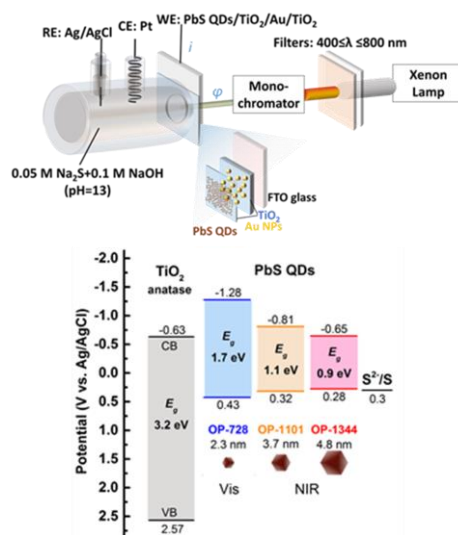


図 4.測定系の概念図と半導体量子ドットの各粒径におけるバンド構造。

用した量子ドットの粒径に依存したエネルギーダイアグラムも図 4 に示している。図に示す種々の粒形を有する半導体ナノ粒子を用いて量子ドットと金属ナノ構造間の距離を制御しながら光電流測定を行った。その結果、ある種の条件において、従来酸化チタンが光応答を示さない可視光領域において光電変換効率が飛躍的に向上することを見出した。さらに興味深いことに、局在電場光と強く結合している狭バンドギャップの PbS 量子ドットが多重励起子生成を発現することを見出し、その効果として発生する光起電力が飛躍的に向上することを明らかとした (図 5)。発生した光電流の励起波長依存性に関して言えば、特定の波長において生成する局在光電場の強度が最大になるために励起された電子密度が増大するため、結果として電子注入効率が增大するということが予測される。以上から、生成する増強電場と半導体ナノドットの励起が良好に結合することで、特定の電気化学ポテンシャルにおいて高密度に電子の形成が促進され、励起された電子と正孔の再結合と競合する電子注入が最適化

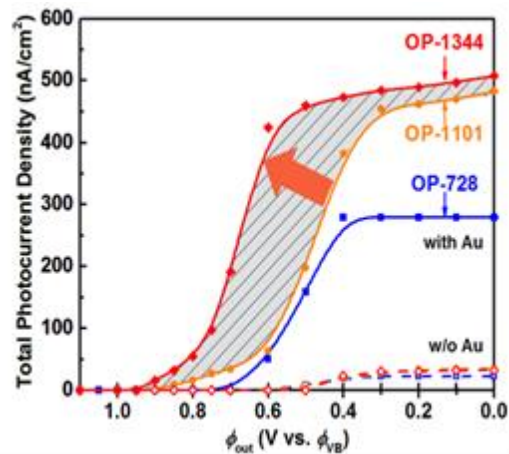


図 5. 種々の粒形を有する量子ドットを用いて得られ光電流測定結果

されることを見出した。これにより、出力電位が向上し、半導体のバンドギャップよりも高いエネルギーの光を利用することで光起電効率が著しく向上することを明らかにした。この事実は、量子ドットに基づくプラズモニック太陽電池の構築に向けて極めて有効な手段であると考えられる。

(3) 光の更なる高集約化に向けては、金属ナノ構造を再現性良く原子レベルで構造制御することを可能とする系の構築が必要不可欠である。数ナノメートル程度に近接した金属二量体構造は、前述のように、特定波長の光を照射することで局在型表面プラズモン共鳴の誘起によって間隙に非常に強い光電場を形成する。この形成する電場強度を極限まで制御するためには、間隙形状を原子レベルで規定する技術が必要であるが、再現性や操作性の問題から未だ技術開発は道半ばである。本取り組みでは、導電性基板上に作製した種々の Au 二量体構造を用いて、電気化学的金属溶解/析出平衡反応を制御することでサブナノスケール以下の精度で間隙距離を制御する新規技術の確立を試みた。さらに本系において、構造変化に起因する光学特性の変調を顕微散乱分光測定によりその場観察することで、構造変化に伴うプラズモン特性変化の詳細な議論を可能とした。

電気化学 in-situ 暗視野顕微散乱測定により取得した Au 酸化溶解反応進行下における金属ナノ構造の散乱スペクトルの経時変化を図 6 に示す。電気化学電位の印加に伴い、構造変化に依存した散乱強度の減少と散乱極大の変化が観測された。電気化学測定前後において取得した SEM 像では、Au 二量体構造が溶解したことにより二量体間にわずかな間隙が形成したことが確認された。電位の印可を開始した 600 秒後には光学特性の著しい変化が観測されている。これは、間隙の形成に伴い光が極限まで集約された電場空間が形成していることに起因している。実際に散乱強度を電圧印可時間に対してプロットすると、この状態において光の散乱が著しく減

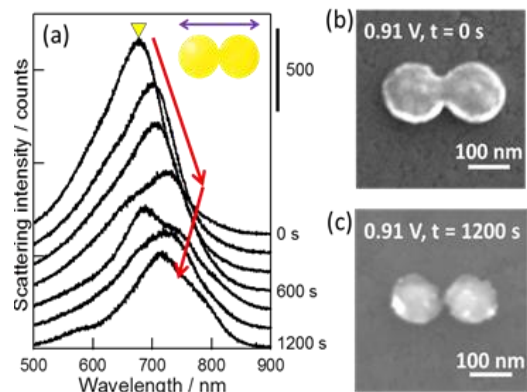


図 6. 金二量体構造の酸化溶解反応に伴う光学特性変化

少する様子も確認できている。一方で、これ

らの二量体構造に金属単原子層を析出することにも挑戦した。その場合は、構造体の体積上昇、間隙距離の減少に起因すると考えられる光学特性変化が確認された。以上から本手法の形状制御により、Au 二量体構造間隙における電子トンネリングと誘起双極子混成モードが自在に制御され得る可能性が示され、より高効率に物質の光励起選択制を制御し得る場の構築が可能になったと考えている。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① S. Yasuda, S. Hoshina, S. Chiashi, S. Maruyama, K. Murakoshi, "Electronic Structure Characterization of Individual Single-Walled Carbon Nanotube by in-situ Electrochemical Surface-Enhanced Raman Scattering Spectroscopy", *Nanoscale*, **8**(45), 19093-19098, 査読有(2016). DOI:10.1039/c6nr05209f
- ② H. Minamimoto, T. Toda, R. Futashima, X. Li, K. Suzuki, S. Yasuda, K. Murakoshi, "Visualization of Active Sites for Plasmon-Induced Electron Transfer Reactions using Photoelectrochemical Polymerization of Pyrrole", *J. Phys. Chem. C*, **120**(29), 16051-16058, 査読有(2016). DOI:10.1021/acs.jpcc.5b12727
- ③ X. Li, K. Suzuki, T. Toda, S. Yasuda, K. Murakoshi, "Plasmonic Enhancement of Photoenergy Conversion in Visible Light Region Using PbS Quantum Dots Coupled with Au Nanoparticles", *J. Phys. Chem. C*, **119**, 22092-22101, 査読有(2015). DOI:10.1021/acs.jpcc.5b04693
- ④ S. Yasuda, R. Kumagai, K. Nakashima, K. Murakoshi, "Electrochemical Potential Stabilization of Reconstructed Au(111) Structure by Monolayer Coverage with Graphene", *J. Phys. Chem. Lett.*, **6**, 3403-3409, 査読有(2015). DOI: 10.1021/acs.jpcclett.5b01488

[学会発表] (計 37 件)

1. X. Li, H. Minamimoto, S. Yasuda, K. Murakoshi, "Enhanced Photocurrent Generation of Size-Dependent PbS Quantum Dots by Coupling with Plasmonic Gold Nanoparticles", 電気化学会第 84 回大会, 2017/3/25-27, 首都大学東京, 東京都八王子市.
2. 村越 敬, "局在光電場における分子応答", 平成 28 年度「分子システム研究」研究報告会, 2017/2/7, 理化学研究所, 埼玉県和光市. (招待講演)
3. K. Murakoshi, "Surface-Enhanced Raman Scattering from Molecule Catalysis for Hydrogen Evolution Reaction", *SHTP*

- Annual International Conference 2016*, 2016/11/17-18, Hochiminh, Vietnam. (招待講演)
4. K. Murakoshi, "Plasmonic Field for Molecule Manipulation", *AsiaNANO 2016*, 2016/10/11, Sapporo Convention Center, Sapporo, Hokkaido, Japan. (招待講演)
  5. X. Li, H. Minamimoto, K. Murakoshi, "Photocurrent Generation of PbS Nanoparticles with Narrower Bandgap coupled with Localized Surface Plasmon Resonance", *PRiME 2016*, 2016/10/2-7, Hawaii, USA. (招待講演)
  6. 村越 敬, "固液界面における分子プロセスの光制御", *日本分析化学会第65年会*, 2016/9/14-16, 北海道大学, 北海道札幌市. (招待講演)
  7. K. Murakoshi, "Surface-Enhanced Raman Scattering as A Probe for Interaction between Photons and Molecules at Electrified Interfaces", *67th Annual Meeting of International Society of Electrochemistry*, 2016/8/21-26, Hague, Netherlands. (招待講演)
  8. X. Li, T. Toda, H. Minamimoto, K. Murakoshi, "Enhanced Photo-Electrochemical Response of Size-Dependent PbS Quantum Dots Excited by Localized Surface Plasmon Resonance", *67th Annual Meeting of International Society of Electrochemistry*, 2016/8/21-26, Hague, Netherlands.
  9. K. Murakoshi, "Manipulation of Molecules adsorbed on Metal Nanostructures under Plasmon Excitation", *The 7th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics*, 2016/7/25, Malaga, Spain. (招待講演)
  10. K. Murakoshi, "Metal Nanostructures Manipulate Light for Effective Excitation of Electrons in Materials", *Design and Characterization of Advanced Materials*, 2016/6/27, Embassy of Ireland, Japan, Chiyoda-ku, Tokyo, Japan. (招待講演)
  11. 加藤郁也, 脇坂優美, 南本大穂, 村越 敬, "電気化学制御下における強結合分子系のin-situ分光評価", *第32回ライラックセミナー・第22回若手研究者交流会*, 2016/6/25, おたる自然の家おこばち山荘, 北海道小樽市. (ポスター賞受賞)
  12. 及川隼平, 大貫温順, 木村夏実, 南本大穂, 村越 敬, "Auナノ二量体構造のin-situ電気化学顕微散乱分光評価", *ナノ学会第14回大会*, 2016/6/14, 北九州国際会議場, 福岡県北九州市. (ポスター賞受賞)
  13. 加藤郁也, 脇坂優美, 南本大穂, 村越 敬, "強結合分子系の電気化学in-situ表面増強ラマン散乱観測", *ナノ学会第14回大会*, 2016/6/14, 北九州国際会議場, 福岡県北九州市.
  14. K. Murakoshi, "Effect of Highly Localized Plasmonic Field on Molecule Polarization", *Korean Raman Workshop*, 2016/5/27, Seoul, Korea. (招待講演)
  15. 村越 敬, "金属ナノ構造による光と物質の相互作用制御", *粉体粉末冶金協会平成28年度春季講演大会*, 2016/5/24, 京都工芸繊維大学, 京都府京都市. (特別講演)
  16. 村越 敬, "固液界面における局在プラズモンによる分子制御の試み", *2015年度日本分光学会北海道支部シンポジウム*, 2016/1/27, 北海道大学, 北海道札幌市. (招待講演)
  17. K. Murakoshi, "Molecule Trapping Monitored by Surface-Enhanced Raman Scattering Spectroelectrochemistry", *The 2015 International Chemical Congress of Pacific Basin Society*, 2015/12/15, Hawaii, USA. (招待講演)
  18. X. Li, K. Suzuki, T. Yoshii, S. Yasuda, K. Murakoshi, "Surface-Enhanced Raman Scattering from Size-Controlled PbS Quantum Dots at Gap of Au Nanodimer", *The 2015 International Chemical Congress of Pacific Basin Society*, 2015/12/15-20, Hawaii, USA.
  19. X. Li, K. Suzuki, T. Toda, S. Yasuda, K. Murakoshi, "Plasmon Excitation of Size-controlled PbS Quantum Dots on Au/TiO<sub>2</sub> Electrode for Effective Photocurrent Generation at Visible Wavelength Region", *The 2015 International Chemical Congress of Pacific Basin Society*, 2015/12/15-20, Hawaii, USA.
  20. 村越 敬, "局在表面プラズモンによるナノ物質の物性制御に向けて", *テラヘルツ科学の最先端II*, 2015/11/20, 作並温泉岩松旅館, 宮城県仙台市. (招待講演)
  21. K. Murakoshi, "Molecule Manipulation in Plasmonic Field", *Plasmonic Nanogaps and Circuits*, 2015/10/29, Beijing, China. (招待講演)
  22. 村越 敬, "光応答性ナノ界面の機能と応用", *第26回東海地区光電気化学研究会・2015年東海地区ヤングエレクトロケミスト研究会合同講演会*, 2015/9/25, 名古屋大学, 愛知県名古屋市. (招待講演)
  23. 加藤郁也, 脇坂優美, 長澤文嘉, 南本大穂, 村越 敬, "色素励起子-プラズモン強結合系の電気化学in-situ表面増強ラマン散乱計測", *2015年光化学討論会*, 2015/9/11, 大阪市立大学, 大阪府大阪市.
  24. 及川隼平, 大貫温順, 木村夏実, 南本大穂, 村越 敬, "電気化学Auナノ構造制御と顕微散乱分光評価", *2015年光化学討論会*, 2015/9/9-11, 大阪市立大学, 大阪府大阪市.
  25. K. Murakoshi, "Field Gradient of Localized Surface Plasmons to Manipulate Molecules",

- XXIV *International Materials Research Congress*, 2015/8/18, Cancun, Mexico. (招待講演)
26. K. Murakoshi, Y. Wakisaka, M. Takase, K. Suzuki, S. Yasuda, S. Ito, H. Miyasaka, T. Shoji, Y. Tsuboi, "Optical Force Applied to Molecules at the Gap of Metal Nanodimer", *27th International Conference on Photochemistry*, 2015/6/28-7/3, Jeju Island, South Korea.
27. K. Murakoshi, Y. Wakisaka, K. Suzuki, S. Yasuda, M. Takase, "Possibility of Molecule Trapping in Localized Surface Plasmon Field at Room Temperature", *The 2nd Optical Manipulation Conference*, 2015/4/22-24, Pacifico Yokohama, Yokohama, Kanagawa, Japan.
28. 村越 敬, "ナノサイズ光太陽電池の可能性", 太陽電池発電効率向上用材料の最新動向 - 多波長における光電変換性能の向上技術 -, 2015/4/17, 中央大学 駿河台記念館, 東京都千代田区. (招待講演)
29. X. Li, K. Suzuki, S. Yasuda, K. Murakoshi, "Enhanced Photocurrent via Plasmon Excitation of Ultra-Small PbS Quantum Dots on Au/TiO<sub>2</sub> Electrode", *249th ACS National Meeting & Exposition*, 2015/3/22-26, Denver, USA.
30. 村越 敬, "局在プラズモンによる物質光励起プロセス制御", 日本分光学会 高感度表面・界面部会 第6回シンポジウム, 2015/3/6, 東北大学, 宮城県仙台市. (招待講演)
31. K. Murakoshi, "Polariton Chemistry at Electrified Interface", *Pioneers in Photonic Nanostructures and Nanophotonics 2014*, 2014/12/5, Seoul, South Korea. (招待講演)
32. K. Murakoshi, "Modulation of Photoexcitation Process at Nanostructured Metal Surface", *8th Asian Photochemistry Conference*, 2014/11/9-13, Thiruvananthapuram, India. (招待講演)
33. X. Li, K. Suzuki, T. Toda, S. Yasuda, K. Murakoshi, "Photo-Electrochemical Response of Size-Dependent PbS Quantized Nanoparticles excited by Localized Surface Plasmon Resonance", *2014年光化学討論会*, 2014/10/11-13, 北海道大学, 北海道札幌市.
34. 李 笑璋, 鈴木健太郎, 戸田貴大, 保田 諭, 村越 敬, "Construction of Plasmonic Photoenergy Conversion System using PbS Quantized Nanodots Coupled with Au Nanoparticles", *第65回コロイドおよび界面化学討論会*, 2014/9/4, 東京理科大学神楽坂校舎, 東京都新宿区.
35. 大貫温順, 長澤文嘉, 鈴木健太郎, 保田 諭, 村越 敬, "局在表面プラズモン-励起子間強結合状態の電気化学電位制御", *第8回分子科学討論会*, 2014/9/21-24, 広島大学, 広島県東広島市.
36. K. Murakoshi, "Enhanced Raman Scattering from Exciton-Polariton System", *XXIV. International Conference on Raman Spectroscopy*, 2014/8/13, Jena, Germany. (招待講演)
37. 大貫温順, 長澤文嘉, 鈴木健太郎, 村越 敬, "局在表面プラズモン-励起子強結合状態の電気化学スイッチング", *ナノ学会第12回大会*, 2014/5/22-24, 京都大学宇治キャンパス, 京都府宇治市.
- [図書] (計4件)
- ① M. Takase, S. Yasuda, K. Murakoshi, "Single-Site Surface-Enhanced Raman Scattering beyond Spectroscopy", *Front. Phys.*, **11**(2), 117803 (2016).
- ② S. Yasuda, K. Murakoshi, "Synthesis and Characterization of Carbon Nanotube", in *Handbook of Carbon Nano Materials*, Editors: F. D'souza, K.M. Kadish, WORLD SCIENTIFIC, 51-88 (2015).
- ③ 保田 諭, 村越 敬, "局在プラズモンを用いた単一カーボンナノチューブの局所ラマン散乱分光技術の開発", *分光研究*, **63**(3), 235-245 (2014).
- ④ M. Takase, F. Nagasawa, H. Nabika, K. Murakoshi, "Single Molecule Surface-Enhanced Raman Scattering as a Probe for Adsorption Dynamics on Metal Surfaces", in *Frontiers of Surface-Enhanced Raman Scattering: Single-Nanoparticles and Single Cells*, Editors: Y. Ozaki, K. Kneipp, R.R. Aroca, John Wiley & Sons, 89-106 (2014).
6. 研究組織
- (1)研究代表者  
村越 敬 (MURAKOSHI, Kei)  
北海道大学・大学院理学研究院・教授  
研究者番号：40241301
- (2)研究分担者  
保田 諭 (YASUDA, Satoshi)  
北海道大学・大学院理学研究院・准教授  
研究者番号：90400639
- 南本大穂 (MINAMIMOTO, Hiro)  
北海道大学・大学院理学研究院・助教  
研究者番号：80757279
- (3)連携研究者  
池田勝佳 (IKEDA, Katsuyoshi)  
北海道大学・大学院理学研究院・准教授  
研究者番号：50321899