

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560049

研究課題名(和文) 単一銀ナノ粒子2量体と単一色素分子で構成された電磁気学的強結合系の実証

研究課題名(英文) Demonstration of strong coupling system composed of single silver nanoparticle dimer and dye molecule

研究代表者

伊藤 民武 (Itoh, Tamitake)

独立行政法人産業技術総合研究所・健康工学研究部門・主任研究員

研究者番号：00351742

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：分子分光法に超高感度性を与えるための手法として金属ナノ粒子2量体間隙に分子を吸着させプラズモン共鳴で分子光学応答を増強させる手法がある。本研究では増強の標準理論として電磁気学的強結合に着目し検証した。検証は実験で得られた銀ナノ粒子2量体形状、この2量体のプラズモン共鳴、この2量体からの増強スペクトルを強結合モデルで評価することで行った。この結果、ラマンなどのコヒーレント応答の増強は弱電磁結合モデルで定量的に再現できることを示した。蛍光などのインコヒーレント応答については再現できない場合があることを示し、その原因は増強放射遷移速度が分子内電子緩和速度を超えるためであることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：There is a method to enhance sensitivity of molecular spectroscopy using plasmon resonance by locating molecules at the junction of a metal nanoparticle (NP) dimer. In this study, we focus on electromagnetic strong coupling model as a standard for the enhancement. We examined the model using experimentally obtained dimer shapes, plasmon resonance, and enhanced molecular optical responses. In the case of surface enhanced Raman, the theory well reproduces the experiments, but in the case of surface enhanced fluorescence, the theory is not suitable for the reproduction. We elucidate electromagnetic enhancement of radiative decay rates exceeding the vibrational relaxation rates within an electronic excited state, resulting that molecular electronic dynamics in strong plasmonic fields can be largely deviated from that in free space.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 応用光学・量子光工学

キーワード：強結合系 蛍光消光増強因子 表面増強ラマン散乱 表面増強蛍光 電磁場増強因子

1. 研究開始当初の背景

銀ナノ粒子 2 量体接点ではプラズモン共鳴によって光の状態密度が数万倍に増大する。この光状態密度増大の結果、プラズモン共鳴と接点に吸着した分子の分極とが 2 量体接点でコヒーレントにエネルギーを交換し量子電磁力学(QED)的な強結合が発現すると期待できる。本研究の目的は、強結合の発現が最も期待できる系、即ち、吸着分子の表面増強ラマン散乱(SERS)を発現している単一銀ナノ粒子 2 量体を対象として強結合を実証することである。この実証は主に SERS 発現前後におけるプラズモン共鳴スペクトルの変化の分析で行いラビ分裂観測で強結合状態の評価を行う。実現すれば単一分子の量子状態制御が可能となる。

2. 研究の目的

共振器内において共鳴波長域では光の状態密度が真空に比べ増大する。この増大の結果、共振器内の分子の光励起効率もしくは光放射効率が光状態密度増大の分だけ向上する。この増大効果をパーセル効果という。銀などの金属ナノ粒子には伝導電子の集団振動を起源とする強い共鳴、すなわちプラズモン共鳴がある。特に銀ナノ粒子 2 量体の粒子接点の約 1 nm^3 の領域ではプラズモン共鳴によって光の状態密度が数万倍から数百万倍に増大することが FDTD(時間領域差分法)などの電磁場解析から明らかになってきた。伝導電子集団振動の位相緩和時間は数フェムト秒であるためプラズモン共鳴の線幅は 100 nm ほどと広い。従って、波長シフト数 10 nm の分子ラマン散乱過程においては、光励起と放射効率の両方がプラズモン共鳴と重なりパーセル効果が働く。その結果、ラマン散乱断面積 ($\sim 10^{-30} \text{ cm}^2$) がトータルで最大 $10^{14}(10^7 \times 10^7)$ 倍ほど向上する。この向上によって、ラマン散乱の実効的断面積が蛍光の断面積 $\sim 10^{-16} \text{ cm}^2$ とほぼ等しくなり単一分子ラマン散乱検出が可能となる。この増強ラマン散乱は SERS と呼ばれ、この理論は電磁増強理論と呼ばれる。本研究においてこの実証の重要な点は、「SERS を引き起こす」プラズモン共鳴と「プラズモン共鳴を引き起こす」銀ナノ粒子形状を特定し理論を定量的に実証した手法にある。この手法によって、申請者は今まで見逃されてきた SERS 発現前後のプラズモン共鳴スペクトル変化を初めて発見することが出来た。SERS 電磁増強とは吸着分子が大きなパーセル効果をプラズモン共鳴から受けていると言い換えられる。このような系ではプラズモン共鳴と分子の量子状態が混合し強結合が実現している可能性がある。今回発見したプラズモン共鳴スペクトル変化を詳細に分析することで単一分子と銀ナノ粒子 2 量体で構成された強結合系の存在を証明できる可能性がある。この様な強結合系は今までになく証明されれば QED の基礎分野

だけでなく応用分野にも大きな貢献が可能となる。

SERS 活性を示す銀ナノ粒子 2 量体が強結合系を実現していることを証明する。次に、銀ナノ粒子 2 量体と吸着分子との結合強度を定量的に明らかにする。まず、強結合系の証明について述べる。この系における強結合とはプラズモン共鳴と分子の量子状態が混合している状態のことを言う。この状態はプラズモン共鳴と分子は近接電磁相互作用を介してコヒーレントにエネルギーを交換しているともいえる。この様なエネルギー交換の結果、プラズモン共鳴の位相緩和を実時間軸で測定すれば位相緩和曲線に振動構造が観測されると予想できる。周波数軸でこの様なエネルギー交換はプラズモン共鳴スペクトルの分裂として現れることが予想できる。この分裂量はエネルギー交換の周波数に対応する。予備実験結果のプラズモン共鳴スペクトルの分裂量(数 100 meV)を振動周期に変換すると数フェムト秒となるため実時間測定で強結合を実証することは難しい。そこで本研究ではプラズモン共鳴スペクトル分裂の評価から強結合の証明を行う。

最近の強結合の研究では、数 μm の共振器中に光を閉じ込め量子化された光と量子ドットの励起子の強結合を扱っている。この系では共振器の高い Q 値を利用し強結合を実現している。つまり光子を「時間的」に閉じ込めることで強結合を達成している。本研究の特色はプラズモン共鳴によって銀ナノ粒子 2 量体接点の約 1 nm^3 の領域に光子を集中させ単一分子との強結合を実現する点にある。つまり、光子を「空間的」に閉じ込めることで強結合を達成する点にある。本研究の独創的な点は、SERS 活性を示す銀ナノ粒子 2 量体を選択することで強結合が自発的に発現している系を用いることにある。また、プラズモン共鳴の広帯域性を利用し単一分子の吸収遷移と発光遷移との両方に対してプラズモン共鳴との強結合を発現させることも独創的な点である。実現すれば斬新な単一分子の量子状態制御が可能となる。その結果、更に、QED の分野が扱っている単一光子光源や量子位相ゲートに用いるエンタングル光子生成などを単一の銀ナノ粒子 2 量体で実現する可能性がある。

3. 研究の方法

本研究では上記の目的を達成するため 23 年度は単一銀ナノ粒子 2 量体の SEM 測定と顕微分光測定を簡便に行える実験装置を開発する。そして、銀ナノ粒子 2 量体の形状とプラズモン共鳴による光状態密度の増大効果、SERS と増強蛍光をお互いに関連付けて強結合状態の存在の検証を行う。24 年度は実験結果を FDTD 法やラビ分裂モデルを利用し定量的に解析しプラズモン共鳴と分子分極との結合強度を定量的に評価する。具体的には、SERS 発現前後(強結合

の off と on)におけるプラズモン共鳴スペクトルの分裂を上記のモデルで解析する。25年度は、レーザーパルス照射で誘起される分子吸着の不安定化を利用した強結合状態の消滅過程測定やプラズモン共鳴波長の周辺屈折率依存性を利用した結合強度の制御などを行う。具体的には、強結合状態から弱結合状態に系が移る過程における SERS と増強蛍光の変化を測定解析する。

平成 23 年度: この年度は主に実験・解析手法の確立を行う。プラズモン共鳴、SERS と増強蛍光を測定する顕微分光測定装置について述べる。SERS 活性を有しプラズモン共鳴で波長域 570 nm から 750 nm に共鳴ピークを有するローレンツ型スペクトルを示すものはほぼ銀ナノ粒子 2 量体であることを申請者は確認している。この様な銀ナノ粒子 2 量体のプラズモン共鳴では光の状態密度分布が最も単純となる双極子振動が支配的であり、そのような粒子を選択することは強結合状態の評価に不可欠である。この 1, 2 の粒子選択条件を満たすため、顕微分光測定装置を作成し、プラズモン共鳴スペクトル測定と SERS 測定を同一の銀ナノ粒子に対して行えるようにする。この顕微分光測定装置は倒立型顕微鏡、分光器、複数の波長のレーザーを組み合わせて作成する。プラズモン共鳴スペクトルは銀ナノ粒子を白色光で暗視野照明しレーリー散乱スペクトルとして取得する。SERS スペクトルは同一の粒子を可視光レーザーで照射し取得する。平成 23 年度の目標は単一銀ナノ粒子のプラズモン共鳴、SERS 測定とその粒子の SEM 測定である。ガラス表面基板には十字が刻まれている。この十字は顕微光散乱像と SEM 像両方で確認できるため、この十字を座標として用い、同一銀ナノ粒子に対してプラズモン共鳴スペクトルと SEM 像の比較が可能となる。

4. 研究成果

23 年度: SERS 分光測定は分子の振動モードの詳細な分析を可能とし生体分子の認識能力を高める。しかし、SERS の起源であるプラズモン共鳴と分子の電磁力学的結合は不明な点が多い。従って、この結合強度の定量的検証を行う。弱結合の場合はプラズモン共鳴と分子分極は独立して扱えるのでパーセル効果で SERS スペクトルを定量的に説明できる。強結合の場合では、分子分極とプラズモン共鳴の量子状態が混合しラビ分裂が発生するため、それぞれを独立して扱えない。このような弱結合と強結合の検証という観点で SERS の研究を行った。

単一銀ナノ粒子凝集体の SERS を用いて電磁力学的弱結合と強結合効果を検証する。第 1 の目標は銀ナノ粒子凝集体のプラズモン共鳴スペクトルの変化を SERS の発現前後で比較することである。第 2 の目標はそのプラズモン共鳴スペクトルの変化をラビ分裂の観点から量子電磁力学で検証することである。

第 3 の目標は分子分極とプラズモン共鳴の量子状態の混合の実験的証明である。

目標 1 と 2 は成功した。目標 3 の実験中に SERS 揺らぎに関連する重要な知見が得られたため研究の方針を転換した。SERS 揺らぎを電磁増強理論で解析し ~ 0.1 nm の分子位置変化と金属ナノ粒子形状変化で解明した。この結果は Journal of Chemical Physics に受理された。また、プラズモンによる蛍光減衰増強が電場増強より 100 倍以上強いことを発見した。この蛍光減衰増強によって分子分極率は変動し、その結果ラビ分裂に繋がる可能性がある。この研究から派生した関連研究として DNA プラズモニック可視化研究がスタートした。

24 年度: SERS 技術を用いれば一分子の構造の詳細な測定が可能となるデバイスが開発可能となる。プラズモン共鳴によって銀ナノ粒子近傍の電磁相互作用の強さは向上する。SERS はこの電磁相互作用強度の向上によって引き起こされる。しかし、プラズモン共鳴と分子との電磁相互作用は不明な点が多い。電磁相互作用が弱い場合はパーセル効果で SERS は記述できる。電磁相互作用が強い場合はプラズモン共鳴と分子が強結合系を構成している可能性があり SERS を単にラマン散乱の増強として扱えなくなる。このような弱結合と強結合の検証という観点で SERS の研究を行う。

1) SERS 活性を有する単一銀ナノ粒子凝集体を用いて強結合効果を実験的に検証する。第 1 の目標は、強結合に伴う超高速脱励起発生の証明である。この証明は高振動準位からの発光の励起波長依存性として行う。この発光はプラズモン共鳴増強放射光であり SERS 背景光として現れる。第 2 の目標は、強結合効果によってこの発光に現れると予想されるアンチバンチング挙動の測定である。測定装置を開発しアンチバンチングの有無で強結合効果の判定を行う。

目標 1 について、強結合効果の証拠と考えられる増強蛍光スペクトルの超広帯域化と短波長化を発見した。この超広帯域化と短波長化の発見は新しい蛍光素子開発技術に繋がる可能性がある。本件について論文を投稿し現在修正中である。目標 2 の実験準備中にプラズモン共鳴の揺らぎに関連する重要な知見が得られたため研究の方針を転換した。このプラズモン共鳴の揺らぎを電磁増強モデルで解析し分子とプラズモン共鳴との強結合として説明できる可能性を示した。

25 年度: SERS 技術を用いれば一分子の構造の詳細な測定が可能となるデバイスが開発可能となる。プラズモン共鳴によって銀ナノ粒子近傍の電磁相互作用の強さは向上する。SERS はこの電磁相互作用強度の向上によって引き起こされる。しかし、プラズモン共鳴と分子との電磁相互作用は不明な点が多い。電磁相互作用が弱い場合はパーセル効果で SERS は記述できる。電磁相

相互作用が強い場合はプラズモン共鳴と分子が強結合系を構成している可能性があり SERS を単にラマン散乱の増強として扱えなくなる。このような弱結合と強結合の検証という観点で SERS の研究を行う。

SERS 活性を有する単一銀ナノ粒子 2 量体を用いて強結合効果を検証する。第 1 の目標は、強結合に伴うプラズモンスペクトル分裂（ラビ分裂）の実証である。この実証は SERS 失活過程におけるプラズモン共鳴スペクトルの時間変化観察として行う。この分裂量は強結合による分子系とプラズモン系量子力学的混合状態の度合いを示す。第 2 の目標は、強結合効果を評価する物理モデルの開発である。通常の電磁解析法ではこの種の強結合状態の評価はできないためラビ分裂等を扱える無近似の量子電磁力学モデルを開発する。

目標 1 について、SERS 活性を有する単一銀ナノ粒子 2 量体を用いプラズモンと分子エキシトンとの強結合効果の証拠としてプラズモン共鳴スペクトルに現れるラビ分裂の実証に成功した。プラズモン共鳴スペクトル形状を分析し結合強度を定性的に明らかにした。第 2 の目標について、結合振動子理論を応用し強結合効果を評価する物理モデルを開発した。もう一つの強結合効果である超高速蛍光については論文が Physical Review B に掲載された。

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 18 件)

1) Y. S Yamamoto, K. Hasegawa, Y. Hasegawa, N. Takahashi, Y. Kitahama, S. Fukuoka, N. Murase, Y. Baba, Y. Ozaki, T. Itoh(C.A.).

”Direct Conversion of Silver Complexes to Nanoscale Hexagonal Columns on Copper Alloy for Plasmonic Applications”

Phys. Chem. Phys. Chem., Vol. 15 pp. 14611-14615 (2013). 査読有

2) T. Itoh(C.A.), Y. S Yamamoto, H. Tamaru, V. Biju, N. Murase, Y. Ozaki.

”Excitation laser energy dependence of surface-enhanced fluorescence showing plasmon-induced ultrafast electronic dynamics in dye molecules” ,

Phys. Rev. B, Vol. 87, No. 23540 (2013). 査読有

3) Y. S Yamamoto, K. Hirano, T. Ishido, T. Yasui, N. Murase, Y. Baba, T. Itoh (C.A.).

”Plasmonic staining of DNA molecules with photo-induced Ag nanoparticles monitored using dark-field microscopy”

Phys. Chem. Phys. Chem., Vol. 15 , pp.10316-10320 (2013). 査読有

4) K. Hirano, T. Ishido, Y. S Yamamoto, N. Murase, M. Ichikawa, K. Yoshikawa, Y. Baba, T. Itoh(C.A.).

”Plasmonic Imaging of Brownian Motion of Single DNA Molecules Spontaneously Binding to Ag Nanoparticles”

Nano Lett. , Vol. 13 ,pp.1877-1882 (2013). 査読有

5) H. Yamauchi, S. Ito, K. Yoshida, T. Itoh, Y. Tsuboi, N. Kitamura, H. Miyasaka, “Temperature near Gold Nanoparticles under Photoexcitation: Evaluation Using a Fluorescence Correlation Technique” ,

J. Phys. Chem. C Vol. 117, pp. 8388-8396 (2013). 査読有

6) Y. Kitahama, A. Enogaki, Y. Tanaka, T. Itoh, Y. Ozaki.

”Truncated Power Law Analysis of Blinking SERS of Thiocyanine Molecules Adsorbed on Single Silver Nanoaggregates by Excitation at Various Wavelengths”

J. Phys. Chem. C Vol. 117, pp.9397-9403 (2013). 査読有

7) M. S. Kiran, T. Itoh(C.A.), H. Abe, Y. Fujita, K. Tomimoto, V. Biju, S. Kavitha, A. Ganamani, M. Ishikawa.

”SERS microscopic imaging as novel tool for assessing viability and enumerating yeast cells at various stages of cell cycle in lag, log, exponential and stationary phases of growth in culture”

J. Exp. Nanosci., Vol. 8 pp.1-12 (2013). 査読有

8) Y. S Yamamoto, M. Ishikawa, Y. Ozaki, T. Itoh(C.A.).

”Fundamental studies on enhancement and blinking mechanism of surface-enhanced Raman scattering (SERS) and basic applications of SERS biological sensing”

Front. Phys., DOI 10.1007/s11467-013-0347-3. 査読有

9) M. Iga, N. Kakuryu, T. Tanaami, J. Sajiki, K. Isozaki, and T. Itoh(C.A.), “Development of thin-film tunable band-pass filters based hyper-spectral imaging system applied for both surface enhanced Raman scattering and plasmon resonance Rayleigh scattering” ,

Rev. Sci. Instrum. Vol. 83 No.103707 (2012). 査読有

10) Y. Kitahama, M. Kashihara, T. Itoh, Y. Ozaki, ”Surface-enhanced phosphorescence measurement by an optically trapped colloidal Ag nanoaggregate on anionic thiocarbocyanine H-aggregate” ,

J. Phys. Chem. C Vol. 117, pp.2460-2466, (2012) 査読有

11) M. S. Kiran, H. Abe, Y. Fujita, K. Tomimoto, V. Biju, M. Ishikawa, Y. Ozaki, T. Itoh,

”Inhibition assay of yeast cell walls by plasmon resonance Rayleigh scattering and surface-enhanced Raman scattering imaging” , *Langmuir*, Vol. 28 pp. 8952–8958 (2012). 査読有

12) T. Itoh, M. Iga, H. Tamaru, K. Yoshida, V. Biju, M. Ishikawa, "Quantitative evaluation of blinking in surface enhanced resonance Raman scattering and fluorescence by electromagnetic mechanism",

J. Chem. Phys., Vol. 136 -2, No. 024703 (2012).
査読有

13) V. Biju, A. A. Anas, H. Akita, E. S. Shibu, T. Itoh, H. Harashima, M. Ishikawa, "RET from Quantum Dots to Photodecompose Undesired Acceptors and Report the Condensation and Decondensation of Plasmid DNA",

ACS Nano, Vol. 6 pp. 3776-3788 (2012). 査読有

14) Y. Kitahama, T. Itoh, T. Ishido, K. Hirano, M. Ishikawa, "Surface-Enhanced Raman Scattering from Photoreduced Ag Nanoaggregates on an Optically Trapped Single Bacterium",

Bull. Chem. Soc. Jpn., Vol. 84-9 pp. 976-978 (2011). 査読有

15) H. Kudo, T. Itoh, T. Kashiwagi, M. Ishikawa, H. Takeuchi, H. Ukeda, "Surface enhanced Raman scattering spectroscopy of Ag nanoparticle aggregates directly photo-reduced on pathogenic bacterium (*Helicobacter pylori*)",

J. Photochem. Photobio. A., Vol. 221-2-3 pp.181-186 (2011). 査読有

16) T. Itoh, K. Yoshida, H. Tamaru, V. Biju, M. Ishikawa,

"Experimental demonstration of the electromagnetic mechanism underlying surface enhanced Raman scattering using single nanoparticle spectroscopy",

J. Photochem. Photobio. A., Vol. 219-2-3 pp.167-179 (2011). (invited future article) 査読有

17) Y. Kitahama, Y. Tanaka, T. Itoh, Y. Ozaki, "Power-law analysis of surface-plasmon-enhanced electromagnetic field dependence of blinking SERS of thiocyanine or thiocarbocyanine adsorbed on single silver nanoaggregates",

Phys. Chem. Chem. Phys., Vol. 13-16 pp. 7439-7448 (2011). 査読有

18) Y. Kitahama, Y. Tanaka, T. Itoh, Y. Ozaki, "Analysis of excitation laser intensity dependence of blinking SERRS of thiocarbocyanine adsorbed on single silver nanoaggregates by using a power law with an exponential function",

Chem. Comm., Vol. 47-13, pp. 3888-3890 (2011).
査読有

【学会発表】(計 16 件)

1) Electromagnetic enhancement factors on surface-enhanced resonance Raman scattering quantitatively analyzed by single nanoparticle 伊藤 民武, Workshop on characterizations for OPV materials and devices: part II, 宮崎市河畔コンベンションエリア、2011/09/05

2) Demonstration of Two Fold Electromagnetic

Enhancement in Surface-enhanced Raman Scattering, 伊藤 民武、尾崎幸洋, The 8th Korea-Japan Symposium on Frontier Photoscience, Konkuk University Seoul, Korea, 2011/11/29

3) Analysis of blinking in surface enhanced resonance Raman scattering and fluorescence by molecular fluctu

ations and plasmon resonance changes, 伊藤 民武、伊賀 光博、吉田健一、田丸博晴、Biju Vasudevan Pillai、石川 満, The Third Asian Spectroscopy Conference, Xiamen, China、2011/11/30

4) Surface enhanced Raman scattering spectra affected by the refractive index of media around single Ag nanoparticle dimers, 伊藤 民武、吉田健一、Biju Vasudevan Pillai、石川 満、尾崎幸洋, TSRP-2012, ムンバイ、2012/01/07

5) Experimental evaluation of electromagnetic enhancement and blinking in surface-enhanced Raman scattering, 伊藤 民武、尾崎幸洋, The 2nd International Conference on Frontiers of Plasmonics, Sichuan University、2012/04/09

6) Evaluation of plasmonic enhancement and fluctuation in surface-enhanced Raman scattering and surface-enhanced fluorescence using single silver nanoparticle dimers, 伊藤 民武、伊賀光博、山本 裕子、田丸博晴、吉田健一、Biju Vasudevan Pillai、石川 満、尾崎幸洋, the 23rd ICORS meeting, Bangalore、2012/08/14

7) Luminescent quantum dots and plasmonic metal particles, versatile tools for bioimaging, 伊藤 民武、Biju Vasudevan Pillai、石川 満、筆頭, the 7th Asia and Oceania Conference on Photochemistry 2012 (APC2012), Icho Kaikan, Osaka University、2012/11/13

8) Plasmon-induced ultrafast electronic dynamics in dye molecules, 伊藤 民武、山本 裕子、田丸博晴、Biju Vasudevan Pillai、村瀬 至生、尾崎幸洋, International Conference on Advanced Vibrational Spectroscopy (ICAVS), Kobe Convention Center、2013/08/29

9) Clarification of surface enhanced Raman scattering and its application to ultrasensitive detection of biomolecules, 伊藤 民武, 日本生物物理学会第 51 回年会 国立京都国際会館、2013/10/30

10) 表面増強ラマン散乱光と表面増強蛍光の揺らぎの考察, 伊藤 民武, 日本分光学会北海道支部シンポジウム, 北海道大学、2011/10/06

11) プラズモニックナノオプティクスにおける表面増強分光の今後の展開, 伊藤 民武, 日本光学会・ナノオプティクス研究討論会, 慶応大学日吉キャンパス、2012/05/23

12) 表面増強分光の原理実証と生体分子系への応用, 伊藤 民武, 日本分光学会分光イノベーションシンポジウム, 東京工業大学、2012/11/30

13) 単一ナノ粒子分光という実験方法論と表

面増強機構解明への応用 “Single nanoparticle spectroscopy” as a methodology of experiment and its application to clarification of surface enhancement mechanism, 伊藤 民武, 関西学院大学理工学部研究会, 淡路島 淡路夢舞台、2013/07/26

14) 表面増強光学応答の電磁増強モデル実証と疾病関連分子や細胞表面タンパク質分子の超高感度検出への応用, 伊藤 民武、山本裕子, 名工大一産総研F S 合同セミナー, 産業技術総合研究所中部センター、2013/12/17

15) プラズモン共鳴場と電磁気学的に強く結合した分子をプローブとする光学応答増強の検証, 伊藤 民武、山本 裕子, 日本分光学会北海道支部シンポジウム, 北海道大学理学部、2014/01/24

16) 細胞表面に吸着した銀ナノ粒子の可視化と表面増強ラマン散乱分光への応用, 伊藤 民武、山本 裕子, 平成25年度 生細胞分光部会シンポジウム, 愛媛大学城北キャンパス、2014/03/07

〔図書〕(計 5件)

1) Functional Nanoparticles for Bioanalysis, Nanomedicine and Bioelectronic Devices , Biological applications of SERS using functional nanoparticles , 北濱康孝、伊藤 民武、プロンポンピエンピニジャム、サンオン エガシット、シャオシャハン、尾崎幸洋, American chemical society、2012/11/26

2) Frontiers of surface-enhanced Raman scattering , Experimental demonstration of electromagnetic mechanism of SERS and quantitative analysis of SERS fluctuation based on the mechanism ,伊藤 民武 , Wiley、2014/03/14

3) 現代化学 ,表面増強ラマン散乱による1分子計測 細胞表面の分子を測る , 伊藤 民武 ,(株)東京化学同人、2011/11/01

4) パリティー ,表面増強ラマン散乱による生細胞観察, 伊賀光博、伊藤 民武 , 丸善出版株式会社、2012/01/01

5) 高分子テクノロジーハンドブック ,SERS、TERS の原理と TERS のポリマー測定への応用, 山本 裕子、伊藤 民武、鈴木利明、尾崎幸洋, NTS、2014/03/14

〔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〕
ホームページ等
<http://goo.gl/hVQd6a>
6. 研究組織
(1) 研究代表者
伊藤 民武 (ITOH, Tamitake)

研究者番号：00351742

(2) 研究分担者
()

研究者番号：

(3) 連携研究者
()

研究者番号：