

令和 3 年 5 月 13 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04988

研究課題名(和文) プラズモニックホットスポットにおけるプラズモンと分子の強結合評価モデルの創出と実証

研究課題名(英文) Development and demonstration of evaluation model for strong coupling plasmons and molecules in plasmonic hotspots

研究代表者

伊藤 民武 (Itoh, Tamitake)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・生命工学領域・上級主任研究員

研究者番号：00351742

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：金や銀などのナノ粒子が2つ連なった隙間に存在する数nm<sup>2</sup>領域は、ホットスポット(HS)と呼ばれている。HSではプラズモンと電磁場との共鳴によって光の状態密度が増大し、単分子分極とプラズモン分極の強結合や超高速蛍光などの極限的な現象が観測可能となる。しかし、これらの現象を定量的に取り扱える理論的、実験的な手法は開発途上である。本研究では「分子の多準位性」と「高次のプラズモンモード」を反映させた共振器量子電磁力学(QED)モデルを構築し、光実験で取得された強結合状態や増強ラマン・増強蛍光のスペクトルを評価可能とした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

数ナノメートル以下の領域に光を閉じ込めて分子と相互作用させると、自由空間における相互作用とは大きく異なる振る舞いを示す。例えば、真空電磁場との強い相互作用で分子の励起状態の性質を大きく変化させて新しい機能を持たせることもできる。本研究成果の学術的意義は銀ナノ粒子二量体間隙がそのような場として利用できる可能性があることを示したことである。また、社会的意義は、従来は余り関心を持たれなかった電磁場のゼロ点振動である真空揺らぎの振幅を増強することで物質の性質を操作できる可能性を示したことである。真空揺らぎの応用光学として新規材料開発に結び付くことが期待できる。

研究成果の概要(英文)：The place of several nm<sup>2</sup> at the gap between two nanoparticles such as gold and silver is called a hot spot (HS). In HS, the density of states of light increases due to the resonance between plasmons and electromagnetic fields, making it possible to observe extreme phenomena such as strong coupling between single molecule polarization and plasmon polarization and ultrafast fluorescence. However, theoretical and experimental methods that can quantitatively evaluate these phenomena are still under development. In this study, we developed a cavity quantum electrodynamics (QED) model that includes "multi-level properties of molecules" and "higher-order plasmon modes". The model quantitatively reproduced the experimental results of enhanced Raman and fluorescence spectra of molecules in the HS under strong coupling.

研究分野：プラズモニクス

キーワード：強結合 プラズモン 表面増強ラマン 表面増強蛍光

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

近年、プラズモン共鳴を利用した超高感度分光や新奇光触媒反応などが急速に発展している。プラズモンとは伝導電子の集団振動モードのことで、伝導電子が豊富な金属ナノ粒子のプラズモンと光が共鳴することで、光をナノ粒子近傍の数 10 nm 程度の領域に局在できる。ナノ粒子は 2 つ連なって 2 量体を形成すると、その間隙の 1 nm 程度の領域に更に強い光が局在する。このような領域では光強度が自由空間の  $10^5$  倍程度に増強されるため“ホットスポット(HS)”と呼ばれている。この HS におけるプラズモンと分子との電磁相互作用を応用することで、超高感度分光や新奇光触媒反応などの測定感度や分子機能が大幅に向上する成果が世界中で上がっており、新しい科学技術分野の創生に繋がると期待されている。

この新しい分野の発展を更に促進するために、解決すべき問題が 2 点ある。一つ目は、HS におけるプラズモンと分子との電磁相互作用の実験測定結果が、従来の分光学の理論では定量的に再現できない問題である。その原因は従来の分光学が想定していた近似則、即ち、カシャ則や弱結合近似則などが HS 内では破綻している為だと示されている。分子分極とプラズモンの弱結合近似則の破綻とは、プラズモンによって増強された両者の光子交換速度が両者の位相緩和速度を超えることによって生じる準位の分裂であり強結合状態の生成と言える。カシャ則の破綻とは、プラズモンによって増強された蛍光放射速度が分子内振動緩和速度を超えることによって生じる振動励起状態からの蛍光であり、超高速プラズモン増強蛍光(ここでは表面増強蛍光: SEF と呼ぶ)の生成と言える。しかし最近、これらの破綻だけでは説明できない二つの現象 A, B を発見されている。(A) 単分子の分極と強結合したプラズモン共鳴が、既存の電磁相互作用モデルでは説明できない複雑なスペクトル変化を示す。(B) 超高速 SEF スペクトルの強度が、既存の電磁相互作用では説明できないくらい弱い。現在のところ、これらの未解明現象が、HS における分光結果の活用や実用化を困難にしている。

上記の二つの問題を解決するための核心をなす学術的「問い」を二つ挙げる。一つ目は従来の電磁相互作用モデルで無視されている要素、即ち「①分子の多準位性」と「②高次のプラズモンモード」を取り入れることで、HS における前述の未解明現象を定量的に再現し定量評価できるかという問いである。従来のモデルでは、プラズモンは双極子モードのみを考慮し、分子は 2 準位系で近似していた。しかし、分子の多準位性を考慮することで、分子エキシトンとプラズモンの強結合状態の複雑なスペクトル変化を定量的に解明できることが予想される。また、プラズモンの高次モードが超高速 SEF の非放射過程増加に寄与することで、超高速 SEF スペクトルの強度を大きく減少させていると予想している。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、HS における単分子分極とプラズモン分極の強結合や超高速 SEF を定量的に取り扱える理論的、実験的な手法を開発することである。その為に新たに上記①分子の多準位性と②高次のプラズモンモードを反映させた電磁相互作用モデルを構築し、これらの定量的評価を可能とする。そしてその実証用プラットフォームとして、銀ナノ粒子 2 量体間隙を HS として活用する。そして上記に述べた理論に基づき実験結果を分析することで、HS におけるプラズモンと分子との電磁相互作用が取り扱える枠組みを新たに創出する。

学術的独創性は、HS を扱う電磁相互作用モデルに従来の近似的な取り扱いでは無視されてきた①分子の多準位性、②高次のプラズモンモードを取り入れることである。これにより「①分子の多準位性による(A)プラズモンと様々な分子エキシトンとの複雑な電磁相互作用」と「②高次のプラズモンモードによる(B)ラマン散乱や蛍光の超高速消光過程」とが初めて取り入れられ、実験結果を定量的に再現・評価できる。

学術的創造性は「HS の単分子分光学」の創出である。HS 内では分子とプラズモンが強結合することで超高感度分光測定や新奇光触媒反応などが可能となる。しかし、この領域では分光学の基礎であるカシャ則や弱結合近似則や長波長近似則などが破綻している。従って、この領域を扱える正しい理論モデルの創出が HS を新しい分光技術として確立するカギとなる。その為本研究では、HS でのプラズモンと分子との電磁相互作用モデルの高度化を行う。そして、強結合系の新奇光触媒反応への応用の為、単一 HS の吸収分光を開発する。最後に電磁相互作用モデルを古典電磁気学のモデルで検証する。古典電磁気学では強結合効果は共振器や物質の誘電率と構造に非明示的に含まれている為、今回開発した共振器量子電磁力学的モデルの妥当性が評価できる。

## 3. 研究の方法

上記に述べた①分子の多準位性、②高次のプラズモンモードを超高速 SEF およびプラズモン増強ラマン散乱解析に取り入れることで、共振器電磁力学の Jaynes-Cummings(JC)モデルを進展させ、HS におけるプラズモン共鳴と分子との電磁相互作用モデルとして構築する。まずは光子交換速度  $g$  で繋がったプラズモンと分子との混合量子状態を数式で記述する。 $g$  の値がプラズモン分極と分子分極の位相緩和速度を超えると、強結合状態が形成されスペクトルが分裂する。この現象は従来モデルでは二つの電気バネの結合系として表されており、ここでプラズモンは双極

子モード、分子は2準位系と仮定されている。光を受け取るのは双極子モードのプラズモンなので前者の仮定は妥当である。しかし、分子には振電相互作用があるため後者の仮定は妥当ではなく、本来は多準位系で扱う必要がある。しかしここが見逃されているため申請者は、分子を複数の共鳴周波数を持つ電気バネの重ね合わせとしてモデルに組み入れる。その重ね合わせはフランクコンドン原理に基づき吸収スペクトルから導く。バネごとの  $g$  の値は対応する共鳴の振動子強度に比例させる。そして実験で得られたプラズモン共鳴スペクトルの複雑な変化を  $g$  の値の関数として電気バネの強結合系の計算で再現可能とする。HS で分子の光学応答の放射過程を増強している双極子モードのプラズモンについて共鳴周波数  $\omega_d$ 、位相緩和速度  $\gamma_d$ 、モード体積  $V_d$  が設定でき、ここから放射過程の増強因子  $F_R$  を導く。また  $\omega_d$ 、 $\gamma_d$ 、 $V_d$  の値から高次モードのプラズモンの共鳴周波数  $\omega_m$ 、位相緩和速度  $\gamma_m$ 、モード体積  $V_m$  も解析的に導く。そして  $\omega_m$ 、 $\gamma_m$ 、 $V_m$  の値から光学応答の非放射過程の増強因子の総和  $F_{SNR}$  を導き  $F_R$  と  $F_{SNR}$  の比  $F_R/(QF_{SNR})$  を自由空間の分子の既知のラマン断面積  $\sigma_R$  と蛍光断面積  $\sigma_F$  に掛け合わせることで、HS における分子の SERS と SEF スペクトルを  $F_R^2/(Q_R F_{SNR})\sigma_R$  と  $F_R^2/(Q_F F_{SNR})\sigma_F$  として導く(ただし  $Q_R$  と  $Q_F$  はそれぞれラマンと蛍光の量子効率)。

自作の顕微分光装置で単一銀ナノワイヤ 2 量体のプラズモン共鳴と超高速 SEF と SERS の時間分解分光測定を実現する。SEF スペクトルは SERS スペクトルの背景光として取得できる。プラズモン共鳴スペクトルは SERS 活性を示す 2 量体を暗視野照明しその散乱光として、SEF と SERS スペクトルは同一の 2 量体をレーザー光照明し分光測定する。プラズモン共鳴と SEF、SERS の測定を繰り返すことで 2 量体が電磁相互作用を失うまでの過程、即ち、 $g$  の値が減少の後ゼロとなり SEF と SERS が消失するまでの過程のプラズモン共鳴スペクトルと SEF と SERS スペクトルを取得できる。得られたスペクトルから、プラズモン共鳴による放射過程の増強因子 ( $M_R$ ) と非放射過程の増強因子 ( $M_{NR}$ ) を実験的に導く。

構築した理論モデルを用いてプラズモン共鳴スペクトルの評価を行う。モデルでは実験のプラズモンの  $\omega_d$  と  $\gamma_d$  を用いる。そして、 $g$  の値のみを変化させることで実験のスペクトルの複雑な変化が再現されるか検証する。再現される場合は、分子の多準位性が実験で観察された複雑なスペクトル変化を引き起こしていると証明できる。再現される場合について、 $g$  の値から  $F_R/(QF_{SNR})$  を導き SEF と SERS スペクトルを算出し、実験から得られた  $\sigma_{SERS}$  と  $\sigma_{SEF}$  と定量的に比較する。実験の  $M_R$  と  $M_{NR}$  が計算の  $F_R^2/(Q_R F_{SNR})$  と  $F_R^2/(Q_F F_{SNR})$  で再現された場合、高次のプラズモンモードによる損失の即ち FSNR の重要性を初めて示したことになる。SEF スペクトルが再現されない場合、 $g$  の減少によって超高速 SEF が通常の SEF に戻る過程として再解析を遂行する。次に

## 4. 研究成果

### 4-1. 強結合モデルの開発

金属ナノ粒子 2 量体間隙ではプラズモン共鳴によって吸着分子の遷移レートが極端に増強し単分子の SERS 分光も可能となる。このような間隙は HS と呼ばれる。HS ではプラズモン共鳴と単分子分極の強結合状態や分子の増強放射遷移レートが分子の振動緩和レートを超えることによって発生する超高速 SEF などの共振器電磁学的現象も観測されている。従って、HS の分子光学応答を定量するにはこれらの新規現象を取り込んだ評価法の開発が重要である。本研究では強結合状態の分析から HS における共鳴ラマンと蛍光の両方について増強因子と消光因子を導き出し、これらの因子から SERS と SEF スペクトルを再現するモデルを作成した。そして再現結果と実験で得られた SERS と SEF スペクトルとの比較評価を行った。

銀ナノ粒子分散液 ( $\sim 10^{-10}$  M)/ローダミン 6G ( $\sim 10^{-9}$  M)/NaCl (10 mM) の混合水溶液をガラス基板上に滴下し、白色光とレーザー光 (532 nm) で銀ナノ粒子 2 量体を交互に暗視野照明、落射照明することで SERS スペクトルとプラズモン共鳴スペクトルを測定した。

Fig. 1a は実験で得られた SERS と SEF の重なり合ったスペクトルの時間変化(a1: 0 s → a4: 125 s)である。時間とともに包絡線ピークが高強度化高エネルギー化し消滅する。Fig. 1b はプラズモン共鳴と分子エキシトン共鳴との結合エネルギーを減少させた時(b1: 600 meV → b4: 10 meV)に起きる SERS と SEF スペクトルの変化である。結合エネルギーの減少とともに蛍光量子収率を増加させることで実験結果が再現することが分かった。この結果は結合エネルギーの減少とともに消光因子が減少し、同時に超高速増強蛍光が通常の増強蛍光に変化していると解釈できた。

### 4-2. 強結合系の吸収分光法の開発

金や銀などのナノ粒子 2 量体間隙ではプラズモン共鳴と吸着分子の共鳴との結合レートが両共鳴の位相緩和レートを超える為、強結合状態が形成されている。真正共鳴の場合、結合エネ

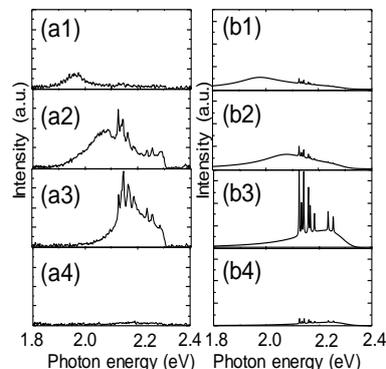


Fig. 1 (a) Temporal changes in SERS and SEF. (b) Coupling energy dependence of calculated SERS and SEF. Coupling energies for (a1) to (a4) are 600, 400, 100, and 10 meV. Rates for (a1) to (a4) are 0.1, 0.1, 0.3, and 0.99.

ルギーの だけ個々の分子の共鳴エネルギーは変化する(Nは強結合に関与する分子数)。従って、 $N \sim 1$  の場合、結合エネルギー数 100 meV の系では分子の共鳴エネルギーが大きく変調されるため、光化学反応などの光吸収エネルギー依存性が変化すると期待できる。今回、この変化を測定する手法確立の為、単一銀ナノ粒子 2 量体と少数色素分子からなる強結合系の吸収分光測定を行った。

対物レンズの NA を変化(NA 0.6 と NA 1.3)させることで単一金ナノ粒子の散乱・消滅断面積スペクトルを測定しその差から吸収断面積スペクトルを評価とした。そして、銀ナノ粒子 2 量体と少数色素分子からなる強結合系に適用した。銀ナノ粒子分散液 ( $\sim 10^{-10}$  M)/ローダミン 6G( $\sim 10^{-9}$  M)/NaCl (5 mM)の混合水溶液をガラス基板に滴下し SERRS 失活前後で散乱・消滅断面積スペクトルを測定し吸収断面積スペクトルを算出した。そして、そのスペクトル変化を結合振動子モデルで評価した。

Fig. 2(a1 から a3) は実験で得られた強結合系の散乱・消滅・吸収断面積スペクトル変化(矢印の方向)。SERRS が失活すると共鳴ピークが短波長化していることが分かる。Fig. 1(b1 から b3) は計算で得られた強結合系の散乱・消滅・吸収断面積スペクトル変化(矢印の方向)。プラズモン共鳴と分子エキシトン共鳴との結合エネルギーの減少として実験を定性的に再現しているのが分かる。

#### 4-2. 強結合モデルの古典電磁気学を用いた検証

表面増強ラマン散乱が生じる金属ナノ粒子 2 量体間隙ではプラズモン共鳴と吸着色素分子のエキシトンとが電磁気学的に強結合している。この強結合はプラズモン共鳴周波数をエキシトンのエネルギーに対して掃引し真空ラビ分裂を観測することで証明される。しかしその様な掃引を 2 量体に対して実験的に行うことは難しい。本研究では古典電磁気学的計算を用い、色素膜でコートされた 2 量体のプラズモン共鳴について膜厚などを変化させて真空ラビ分裂の挙動を定量的に評価した。評価には共振器量子電力学に基づいた結合振動子モデルを用いた。

色素コートされた金属球の 2 量体の散乱スペクトルは準静電近似で R. Ruppin の手法に従い多重極まで考慮して導出した。スペクトルに表れるプラズモン共鳴を色素膜厚、間隙間距離、周辺屈折率を変化させて掃引した。観測結果を色素コート回転楕円体の計算結果と比較した。結合振動子モデルはプラズモン振動子と色素の多準性を考慮した 5 つの振動子から構成した。

Fig. 3(a1, a2) は電磁気学的計算で得られた 2 量体と回転楕円体の散乱断面積スペクトルの色素膜厚依存性である。膜厚の増加とともにピークは広帯域化し二つに分裂している。二量体はより薄い膜厚で分裂が現れる。Fig. 3(a3)は結合振動子モデルによる結合エネルギー依存性である。電磁気学的計算結果をこのモデルはよく再現した。その結果、電磁気学的計算のスペクトル分裂は最も低エネルギー側と高エネルギー側の電子遷移に基づく共鳴の低エネルギーシフトと高エネルギーシフトソフトであり、分裂幅からは結合エネルギーを見積もれないことが分かった。二量体は周辺屈折率を掃引した場合、最も明確に真空ラビ分裂が現れることが分かった(Fig. 3(a4))。

<引用文献>

- ① T. Itoh and Y. S. Yamamoto, *J. Chem. Phys.*, **149**, 244701 (2018).
- ② T. Itoh, Y. S. Yamamoto, T. Okamoto, *Phys. Rev. B*, **99**, 235409 (2019).
- ③ T. Itoh, Y. S. Yamamoto, T. Okamoto, *J. Chem. Phys.*, **152**, 054710 (2020).
- ④ T. Itoh and Y. S. Yamamoto, *Nanoscale*, **13**, 1566 (2021).

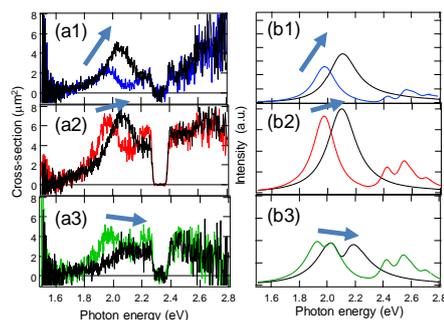


Fig. 2 Experimental blue-shifts in cross-section spectra of scattering (a1), extinction (a2), and absorption (a3) with losing activity in SERRS. Calculated ones of scattering (b1), extinction (b2), and absorption (b3) with losing coupling energy.

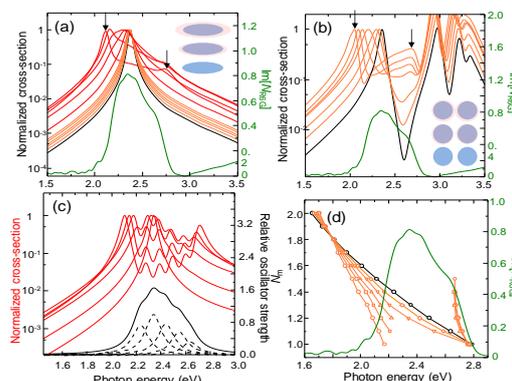


Fig. 3 Dye film thickness dependence of scattering spectra for (a1) ellipsoidal nanoparticle (NP) (0 to 10 nm) and (a2) NP dimer (0 to 0.5 nm). (a3) Coupling energy dependence of scattering spectra for coupled oscillators (0 to 250 meV). (a4) Vacuum Rabi splitting by changing refractive index of surrounding medium of dimer (1 to 2.0).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Itoh Tamitake, Yamamoto Yuko S., Okamoto Takayuki	4. 巻 99
2. 論文標題 Absorption cross-section spectroscopy of a single strong-coupling system between plasmon and molecular exciton resonance using a single silver nanoparticle dimer generating surface-enhanced resonant Raman scattering	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 235409 ~ 235409
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.235409	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Itoh Tamitake, Yamamoto Yuko S., Okamoto Takayuki	4. 巻 152
2. 論文標題 Anti-crossing property of strong coupling system of silver nanoparticle dimers coated with thin dye molecular films analyzed by electromagnetism	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 054710 ~ 054710
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5133875	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Langer Judith他	4. 巻 14
2. 論文標題 Present and Future of Surface-Enhanced Raman Scattering	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 28 ~ 117
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnano.9b04224	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Segawa Hiroki, Fukuoka Takao, Itoh Tamitake, Imai Yuichi, Iwata Yuko T., Yamamuro Tadashi, Kuwayama Kenji, Tsujikawa Kenji, Kanamori Tatsuyuki, Inoue Hiroyuki	4. 巻 144
2. 論文標題 Rapid detection of synthetic cannabinoids in herbal highs using surface-enhanced Raman scattering produced by gold nanoparticle co-aggregation in a wet system	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Analyst	6. 最初と最後の頁 6928 ~ 6935
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9AN01512D	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 盛田伸一 伊藤民武	4. 巻 70
2. 論文標題 プラスモンとラマン顕微鏡による生体組織・単一細胞・単一分子の分析化学	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 化学工業	6. 最初と最後の頁 19 25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hiroki Segawa, Takao Fukuoka, Tamitake Itoh, Yuichi Imai, Yuko T Iwata, Tadashi Yamamuro, Kenji Kuwayama, Kenji Tsujikawa, Tatsuyuki Kanamori, Hiroyuki Inoue	4. 巻 144
2. 論文標題 Rapid detection of hypnotics using surface-enhanced Raman scattering based on gold nanoparticle co-aggregation in a wet system	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ANALYST	6. 最初と最後の頁 2158-2165
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8AN01829D	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tamitake Itoh, Yuko S Yamamoto	4. 巻 149
2. 論文標題 Reproduction of surface-enhanced resonant Raman scattering and fluorescence spectra of a strong coupling system composed of a single silver nanoparticle dimer and a few dye molecules	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of chemical physics	6. 最初と最後の頁 244701
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5061816	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yasutaka Kitahama Y, Tamitake Itoh, Toshiaki Suzuki	4. 巻 197
2. 論文標題 Calculated shape dependence of electromagnetic field in tip-enhanced Raman scattering by using a monopole antenna model.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Spectrochimica Acta Part A	6. 最初と最後の頁 142-147
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.saa.2018.01.016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 伊藤民武, 山本裕子	4. 巻 43
2. 論文標題 金属コロイド粒子を使ったプラズモン増強の原理検証実験	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Colloid and Interface Communication	6. 最初と最後の頁 16-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計16件 (うち招待講演 9件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 伊藤 民武
2. 発表標題 Unified evaluation of surface-enhanced resonant Raman scattering and surface-enhanced fluorescence under strong coupling regime
3. 学会等名 ICAVS 10, The University of Auckland (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤 民武
2. 発表標題 Surface-enhanced resonant Raman scattering and surface-enhanced fluorescence spectra of a strong coupling system between plasmon and molecular exciton
3. 学会等名 META 2019, Lisbon (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤 民武
2. 発表標題 Plasmon resonance and SERRS of strong coupling system composed of silver nanoparticle dimer and a few dye molecules
3. 学会等名 The 2nd International Conference on SERS, Suzhou in China (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤 民武
2. 発表標題 Absorption and scattering cross-section spectroscopy of a single strong-coupling system between plasmon and molecular exciton resonance
3. 学会等名 The International Symposium on Plasmonics and Nano-photonics, Kobe, Hyogo, Japan (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤 民武
2. 発表標題 プラズモン増強分光学の基礎の展開
3. 学会等名 日本分光学会中国四国支部年次講演会, 広島大学 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤 民武, 山本裕子
2. 発表標題 Unified treatment of surface-enhanced resonant Raman scattering and surface-enhanced fluorescence under strong coupling regime using single silver plasmonic nanoparticle dimers
3. 学会等名 ICNN2019, yokohama
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤 民武, 山本裕子
2. 発表標題 プラズモン 分子エキシトン強結合下における表面増強共鳴ラマン散乱スペクトルの再現
3. 学会等名 日本分光学会年次講演会, 京都大学化学研究所
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤 民武, 山本裕子, ジャヤデワン パラチャンドラン
2. 発表標題 銀ナノワイヤー2量体間隙の一次元ホットスポットでのSERRS光伝搬
3. 学会等名 第80回応用物理学会 秋季学術講演会, 北海道大学
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤民武, 山本裕子
2. 発表標題 Unified treatment of surface-enhanced resonant Raman scattering and surface-enhanced fluorescence under strong coupling regime using single silver plasmonic nanoparticle dimers
3. 学会等名 ICNN2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤民武, 山本裕子, 岡本隆之
2. 発表標題 単一銀ナノ粒子2量体間隙に生じたプラズモン・分子エキシトンの強結合系の吸収断面積分光
3. 学会等名 第66回応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤民武
2. 発表標題 プラズモニックホットスポットの分子分光学
3. 学会等名 第3回環境・生体の関わる物理・化学の研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤民武
2. 発表標題 プラズモンと少数分エキシトンの強結合下におけるプラズモン増強分光
3. 学会等名 日本光学会 ナノオプティクス研究グループ 第25回研究討論会(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤民武, 山本裕子, 岡本隆之
2. 発表標題 単一銀ナノ粒子2量体を使ったプラズモンと分子エキシトンの強結合系の散乱・消滅分光
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤民武, 山本裕子, 北濱康孝, ジャヤデワン パラチャンドラン
2. 発表標題 単一銀ナノワイヤー2量体間隙の一次元SERRSホットスポット
3. 学会等名 2018年光化学討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tamitake Itoh
2. 発表標題 Plasmon-enhanced spectroscopy under strong coupling regime
3. 学会等名 ICORS2018(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tamitake Itoh
2. 発表標題 Plasmon-enhanced molecular spectroscopy of single molecule SERRS hotspots of silver nanoparticle dimers
3. 学会等名 ICAVS (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 伊藤民武, 山本裕子	4. 発行年 2019年
2. 出版社 化学同人	5. 総ページ数 216
3. 書名 プラズモンと光圧が導くナノ物質科学	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------