

令和元年6月11日現在

機関番号：32689

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2014～2018

課題番号：26107003

研究課題名(和文)メソ構造を利用した光化学反応の高次機能制御

研究課題名(英文)Advanced Function Control of Photochemical Reactions Using Mesoscopic Structures

研究代表者

井村 考平(Kohei, Imura)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：80342632

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 46,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ナノイメージング分光手法を確立し、金属メソ構造体に励起される局在場の空間構造の可視化と理解を実現した。メソ構造の光化学過程への適用を行い、双極子近似を超えた光励起、非線形応答の増強、光磁気双極子遷移の顕在化など、従来の平面波励起と比べて格段に光化学過程を効率化できることを明らかにした。さらに、光電場の空間制御による光励起過程の開拓、光学選択則の変調、近接場相互作用による電子状態制御を実現した。機能性分子材料の開発にも取り組み、多様な発光特性を示す物質合成と発光特性、さらに光伝播制御を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

サブマイクロメートルサイズのメソ構造体は、光アンテナ効果により特異な性質を示す。本研究では、メソ構造を活用することで、通常では困難であった光機能を実現することを明らかにした。本研究で確立した光機能化の手法は、光エネルギーの有効活用や光の伝播制御を実現する。これらは、物理化学における新学問分野の創出に貢献するとともに、今後、新規材料開発、光デバイスの高度化、光の効率的利用など社会の安全と発展に貢献すると期待される。

研究成果の概要(英文)：Elementary excitations in meso-structures squeeze light spatially and result in the amplified optical fields. We developed various near-field spectroscopic imaging system to visualize spatial distributions of the localized optical fields in the vicinity of the metallic meso-structures. We applied the localized fields to amplify and modulate linear and non-linear optical processes of various molecules. We revealed that the localized fields enable to excite photochemical processes that are not accessible by the plane wave illumination. We also developed space-selective chemical reaction methods to synthesize photo-functional materials, and demonstrated the control of the photoluminescence and the guiding of the light in the desired way.

研究分野：物理化学

キーワード：メソ構造 高次機能制御 近接場相互作用 プラズモン フォトクロミズム

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

化学合成手法の発展により、複雑な構造や高機能な分子の合成が可能となっている。しかし、分子の光機能を精密に制御することは未だに困難である。分子の光の吸収確率は、励起前後の波動関数の空間特性に大きく依存するため、従来の光励起手法を適用する限り光吸収特性を能動的に制御することができない。つまり、選択則を超える光励起は実現しない。一方、光励起された分子は、振動緩和により速やかにエネルギーを散逸したのちに、発光するため励起エネルギーをすべて発光に変換することができない。研究開始当初は、このように光励起と光放出過程において、原理的に回避困難な制限が複数存在した。これらの困難を克服し分子機能を高度化し光を有効に活用するためには、光と物質の相互作用に従来の枠組みを超えた新しい光化学過程を創出し活用することが不可欠であった。また、分子の高度かつ高品質な活用を実現するためには、高次複合光応答を実現する学理の構築が課題となっていた。

2. 研究の目的

従来の光と分子の相互作用は、光が平面波であると近似し静電場と分子の相互作用を摂動論により取り扱うことで理解することができる。ほとんどの光学過程では、分子のスケールと比べて、光の空間スケールが十分に大きいため、この平面波近似がよく成立する。このため、分子の波動関数の空間特性のみで光機能が決まる。この状況を一変させることができれば、光物質機能に新たな展開をもたらすことができる。光の波長と同程度の空間スケールであるメソ構造体は、光アンテナ効果や遅延効果により、ナノスケールの空間に光を閉じ込めて光電場を増強することができる。増強光電場はメソ構造体近傍に局在し、これを励起源にすることができれば、光と分子の相互作用に新しい枠組みを創り出すことが可能である。また、増強光電場では、光と物質に強結合相互状態を誘起することから、物質の電子状態の変調が実現し、これにより、あらたな光学過程が誘起できると期待される。本研究では、メソ構造に誘起される局所光電場を用いて物質の電子状態を変調し、光-物質相互作用に新たな機軸を開拓すること、またこれにより光化学反応の高次機能制御を実現することを目的とした。また、局在光電場と分子の近接場相互作用を活用することで、従来の光学選択則を超える光励起と光応答の増強を実現することを目的とした。本研究により、近接場相互作用による光学遷移制御のメカニズムを究明し、これらの知見を駆使して高次光応答分子機能材料の開発へと展開することを最終目標とした。

3. 研究の方法

メソ構造に誘起される局在場と分子の相互作用を理解し高次機能制御を実現するためには、メソ構造に励起される空間モードと光増強場の空間分布を可視化することが本質的に重要である。しかし研究開始当時は、メソ構造に励起される空間モードに関する知見は十分得られていなかった。また、ナノイメージング手法の適用により、メソ構造の特性をすぐに究明することが困難であった。そこで本研究では、まずナノイメージングシステムの高度化を行い、メソ構造の特性を究明することを計画した。具体的には、透明・不透明、発光性・非発光性の試料の計測評価を実現するために、近接場吸収分光法の開発、近接場反射分光法の開発、蛍光色素を活用した非発光性試料可視化法の開発、透過と反射測定を活用した散乱・吸収評価法の開発を計画した。また、これらの手法を活用して、金属や半導体メソ構造体を対象とした観測を行うとともに、電磁気学理論解析によりメソ構造体の光学特性の解明を行うことを計画した。さらに、これらメソ構造の特性評価と並行して、メソ構造体に誘起される光増強場を、さまざまな光化学過程へと適用し、新規光化学過程の創成と高次機能制御を実現することを計画した。これらに加えて、領域内の研究者との連携により、例えば、メソ構造を活用した空間選択的な電子状態制御や光応答の増強を実現することを計画した。

4. 研究成果

(1) 近接場イメージングシステムの高度化

メソ構造近傍に誘起される局在光を活用するためには、まずその分光特性と空間特性を解明する必要がある。一方、その空間スケールは光の波長よりも小さいために、通常の光学顕微鏡ではこれを可視化することができない。ナノメートルの空間分解を達成する手法として、最近、透過型電子顕微鏡と電子エネルギー損失分光を組み合わせた手法がしばしば利用されている。この手法は、非常に高い空間分解能を実現する一方で、試料を真空中に設置しなければいけないなどの制約がある。メソ構造に誘起される局在光をさまざまな化学反応に利用するためには、測定環境に制約を受けない光局在場の評価が不可欠である。このような理由から、我々は、近接場光学顕微鏡を基礎とした分光手法を活用して、さまざまなメソ構造体の光物性評価を実現することとした。一方、これまで開発されてきた近接場分光手法は、例えば不透明基板上の非発光性試料の分光測定が困難であるなどの問題があった。本研究では、このような困難を克服するために複数の顕微分光手法を新たに開発した。

まず、非発光性のメソ構造に誘起される光増強場を効率的に可視化する手法として、蛍光色素を活用したイメージング手法を開発した (Imaeda *et al.*, *Chem. Phys. Lett.* 646, 179 (2016))。この手法では、メソ構造に誘起される増強場により蛍光色素の二光子励起を実現し、色素分子か

らの蛍光を測定することで、メソ構造近傍の光電場の可視化を実現した。この研究から、色素分子からの蛍光の退色速度がメソ構造の位置により変化することが明らかとなった。このことは、光局在場と分子の相互作用が、平面波と比べて増強されること、メソ構造の利用により新しい光化学過程が誘起可能であることを示す。局在光により、色素分子の蛍光が速やかに退色することを活用し、次に光退色前後の透過スペクトルの比較から、メソ構造の光吸収特性を解明する方法を開発した (Imura *et al.*, *Bull. Chem. Soc. Jpn.* 89, 1518 (2016))。

不透明基板上的試料の分光測定には、反射分光測定が有効である。挑戦的萌芽研究 (H26,H27) により近接場反射分光顕微鏡の原理検証を行い、観測される信号には、吸収と散乱 (反射) の両方の寄与があり、分光特性の解釈が容易ではないことが明らかとなっていた。また、非常に精緻な距離制御が必要なために安定的運用が困難である問題があった。本研究では、高度な距離制御を実現することで高安定に動作するように装置を改良し、高度な理論計算により吸収と散乱特性の分離評価を達成した。さらに透過測定と反射測定を組み合わせることで、メソ構造体の吸収特性と散乱特性を分離評価できる分光手法を開発した。図1に、銀メソプレートの近接場反射測定と透過測定により可視化した近接場イメージを示す。図中の *R* と *T* はそれぞれ反射と透過を示す。図中の数値は観測波長を示す。すべてのイメージにおいて、メソプレート内部に特徴的な空間構造が観測されることがわかる。また、透過像では観測波長によらずプレート内部で透過光の減少に起因する暗部が観測される一方、反射像では波長によりコントラストの明暗が変化することがわかる。図1右に反射測定と透過測定から得た近接場散乱スペクトルと吸収スペクトルを示す。図から、可視域から近赤外の広い範囲において散乱が吸収と比べて優勢であること、長波長側 (1000 nm) においては、逆に散乱と比べて吸収が強くなることがわかる。波長 1000 nm において反射像に暗部が観測され、波長 870 nm において反射像に明部が観測されるのはこのような分光特性に起因することが明らかとなった。このように、あらたな分光イメージング手法を開発することにより、メソ構造体の分光特性と空間特性の本質的理解を実現した。

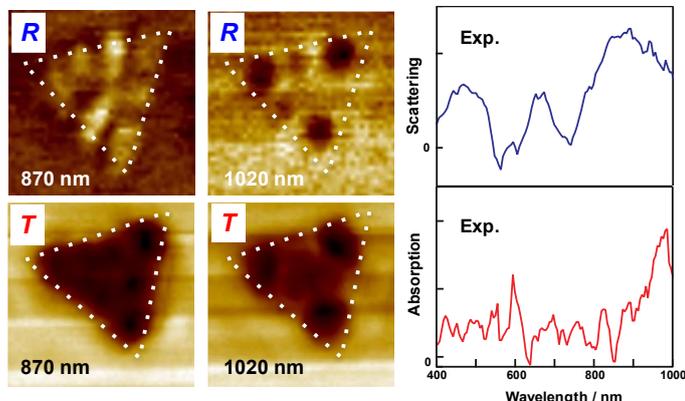


図1. 銀メソプレートの近接場反射像 (左上) と近接場透過像 (左下)、透過スペクトルと反射スペクトルから再構成した近接場散乱スペクトルと近接場吸収スペクトル (右)。

(2) メソ構造の光学特性の解明

棒状や円板状など単純な形状のメソ構造に誘起される光励起状態の空間分布は、井戸型ポテンシャル内に存在する粒子の波動関数を用いて概ね説明できる。メソプレートの近接場透過測定を行った結果、プレートに励起される空間構造は波動関数を用いて理解できる一方、プレートの微細な形状によりその励起確率が大きく変化することが明らかとなった (Imaeda *et al.*, *J. Phys. Chem. C* 122, 7399 (2018))。観測された励起確率の大小は、近接場光に対する選択則を反映している可能性があり、メソ構造の利用において非常に重要な結果である。本研究では、波動関数を基礎とする解析手法をさらに複雑な形状のメソ構造に適用し、励起状態の対称性により分光特性を理解できることを明らかにした。さらに、励起状態の対称性に注目することで、メソ構造体において、通常平面波励起では実現することができない光励起状態を創出することも理論的に解明した。これらの成果は、メソ構造に誘起される局在光の利用において極めて重要であり、新しい光物性制御法やそれを基礎とした光物理化学の学理へと発展することが期待される。

金属ワイヤと金属薄膜にワイヤと相補的な開口をもつヴォイド構造は、バビネの原理によると類似した光学特性を示す。具体的には、ワイヤとヴォイドの透過特性が相補的になるとともに、ワイヤの光電場とヴォイドの光磁場が対応することが予想される。しかしこれらの相補性が可視域で成立しているか、近接場において成立しているかは不明であった。ヴォイドにおいて光磁場の増強が達成されれば、光と物質の相互作用に新しい側面を創出すること

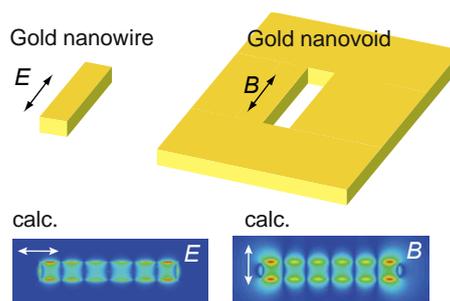


図2. 金ナノプワイヤと金薄膜内の長方形開口 (ナノヴォイド) の模式図とワイヤに励起される増強光電場 (*E*) とヴォイドに誘起される増強光磁場 (*B*) 像。

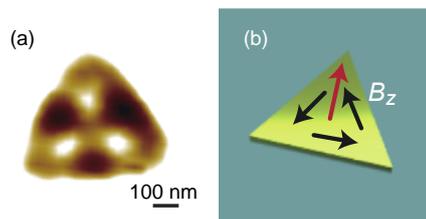


図3. (a) 金メソプレートの近接場透過像, (b) 推定される磁気双極子モードの模式図。

ができ、光の効率的利用に繋げることが可能である。我々は、近接場透過測定と電磁気学シミュレーションを用いてワイヤとヴォイドの光学特性評価を行い、相補性について研究した。近接場透過スペクトルは、一見相補性が認められないが、遠方場成分と近接場成分を分離することで、近接場においてのみスペクトルの相補性が存在することが明らかとなった。このことは、ヴォイドにおいて光磁場が増強することを示唆する。通常近接場測定では、光磁場を直接可視化することはできない。ヴォイドにおける光磁場の空間特性を解明するため、電磁気学シミュレーションを用いてヴォイドに光励起される光磁場を可視化し、これをフーリエ解析することで光近接場を可視化する方法を考案した (Mizobata *et al.*, *Opt. Express* 25, 5279 (2017))。この方法により可視化したヴォイド近傍の光磁場 (B) を図2に示す。ヴォイド内部に明瞭な振動構造が観測され、それがワイヤに誘起される光電場 (E) の空間特性と定性的に一致することが明らかとなった。これらの結果は、近接場においてバビネの原理を適用して空間構造の予測が可能で、ヴォイドにおいて光磁場の増強が起こることを示す。

金属メソプレート内部に環電流を励起することができれば、プレートに直交する方向に光磁場が発生すると考えられる。金属ナノ構造に励起される局在モードを詳細に研究すると、磁気双極子モードに帰属されると考えられる空間モードが可視化されることが明らかとなった (図3)。以上のようにメソ構造を利用することで、光磁場増強が実現されることが、これにより新しい光励起が開拓できることが明らかとなった。将来的には、電気双極子と磁気双極子の相互作用を利用することで新しい光応答制御法へと発展することが期待される。

(3) メソ構造の光化学過程への応用

メソ構造を光化学過程に利用するためには、局在場の強度を増大し、大面積にする必要がある。これまで電子線リソグラフィを用いたナノ構造配列の作製が報告されているが、大面積化にはかなりの時間を要する。また、一般にナノ構造体の共鳴帯域は、数十 nm の狭い範囲に限られるため、利用可能な波長帯域に制限がある。大面積化には、自己組織化が有用であるが、単純な構造の最密充填構造では、局在場の強度が低下することが明らかとなっている。我々は、メソ構造の共鳴とサブ波長の金属マイクロ配列に誘起されるフォトニックモードを強結合させることで、局在場の強度を高く保ちつつ広帯域化を達成した (Uchida *et al.*, *J. Phys. Chem. Lett.* 7, 3652 (2016))。図4に示す金属マイクロ配列上の金ナノ粒子三量体は、粒子間の強い光閉じ込め効果と金粒子と薄膜間の光閉じ込め効果、さらには配列のフォトニック光閉じ込め効果、これらの協奏的效果により、極めて高い光増強度を実現した。色素分子を用いた表面増強ラマン計測の結果、信号増強度が 10^{8-9} 倍に達することが明らかとなった。さらに類似の構造においてジアーリルエテンを用いて光異性化の速度が 10^{8-9} 倍に達することが明らかとなった。これらの結果は、メソ構造が分子の光応答の増大に極めて有効であることを示す。

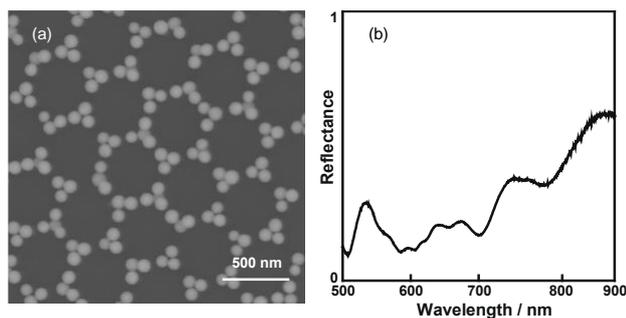


図4. (a) 金マイクロ六方最密配列上に自己組織化した金ナノ粒子の集合体, (b) 作製した試料 (a) の反射スペクトル。

領域内の小島 G との共同研究において、金ナノロッドとジアーリルエテン高分子の複合体を調製し、その光化学特性を研究した結果、配列構造と同様にジアーリルエテンの光異性化の速度が大きくなることが明らかとなった。また、ジアーリルエテン閉環体からの発光を計測した結果、励起された分子から金へのエネルギー移動が起こるため、蛍光が消光する一方、蛍光スペクトルの波形が変化することが明らかとなった。スペクトルを詳細に解析した結果、長波長側において縦モードプラズモンに起因する蛍光増強によりスペクトルの変調が起こることが明らかとなった (Noda *et al.*, *Chem. Lett.* 48, 537 (2019))。次に、蛍光増強媒体として、

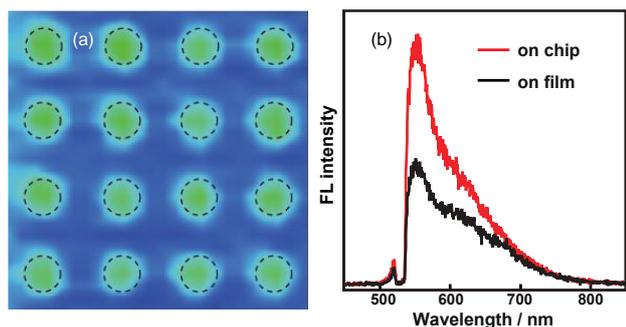


図5. (a) プラズモニックチップの蛍光励起像。破線はホール (直径 200 nm) の概形, (b) プラズモニックチップ上および金薄膜上で観測した色素分子からの蛍光スペクトル。励起波長: 532 nm。

金薄膜にホールが周期的に配列しているプラズモニックチップについて透過特性 (Imaeda *et al.*, *J. Phys. Chem. C* 123, 10529 (2019)) と蛍光特性を田和 G と共同で研究した。この系では消光を抑えるため金属と分子の間にスペーサーを導入し、近接場光学顕微鏡により蛍光スペクトルマッピングを行った。図5に示すとおり、試料の位置により、励起確率が変化すること、チップ上では金薄膜上と比べて蛍光スペクトルが変化することが明らかとなった。特に、短波長においてホール内部で蛍光強度が強くなるのはプラズモニックチップの共鳴に由来することが明らかとなった。この結果は、蛍光色素の励起確率とスペクトル特性を空間選択的に変調可能であること、メソ周期構造の利用により協奏的效果を使って光特性制御が達成されることを示す。

上野 G と共同でアルミプラズモンと J 会合体の強結合系における近接場光学測定を行い、強結合状態を可視化するとともに、この系においても空間選択的に励起確率とスペクトル特性を変調できることを明らかにした。さらに、強結合系では、電子状態変調に起因する励起エネルギーの効率的利用が実現することも明らかにした。

半導体メソ構造では、バンド端発光に加えて、しばしば欠陥発光が観測される。我々は、ZnO メソ構造をレーザーアブレーションや化学合成法により調製しその発光特性を研究した。調製した試料をアニールすることで欠陥発光が増大することが明らかとなった。この欠陥発光は、バンド端発光よりもかなり長波長側で観測されるが、バンドギャップより大きなエネルギーを持つ光子の吸収によってのみ励起することが可能である。一方、ZnO メソ構造と金メソ構造のハイブリッド構造では、欠陥発光エネルギー程度の励起光によりこれを効率的に励起できることが明らかとなった。このように、金属メソ構造に誘起される局在光を活用することで、従来非効率な励起過程を格段に効率的にすることが可能である。これは局在光の大きな光運動量に起因すると推定され、今後類似の励起スキームを活用することで、光エネルギーの効率的利用が実現すると期待される。

(4) 空間選択的の化学反応を利用した機能性物質創出法の開発

ナノイメージングシステム開発の取り組みとして、カソードルミネッセンス顕微鏡の高感度化を進めている過程で、高分子薄膜に電子線を照射すると通常観測されない発光が観測されることが明らかとなった。このことは、電子線照射により高分子内部で化学反応が起こり発光種が生成することを示す。電子線の照射条件を調整することで、紫外線励起により発光する化学種と近赤外パルスの二光子励起により発光する発光種を同時に生成させることが可能となった

(図 6)。これらの発光種は、多環芳香族化合物の混合物であり、励起条件による発光特性の違いは、生成する化学種の対称性と関係すると考えられる (Kamura and Imura, *Appl. Phys. Lett.* 112, 243104 (2018))。

さらに条件検討を進め発光特性および吸収特性がカーボンドット (CDs) と類似した化合物を合成した。透過電子顕微鏡像観測の結果は、CDs の生成を強く示唆することから、高分子内部でラジカル反応が起こり、多環芳香族から CDs が生成したと考えられる。この手法の利点は、発光特性を電子線照射量によりある程度制御できる点、さらには空間選択的に化学反応を起こすことができることから、微細パターンを作製できる点にある (Kamura and Imura, *ACS Omega* 4, 3380 (2019))。図 6 (b) に作製した発光パターン(格子像)を示す。発光線のラインプロファイルから、数百

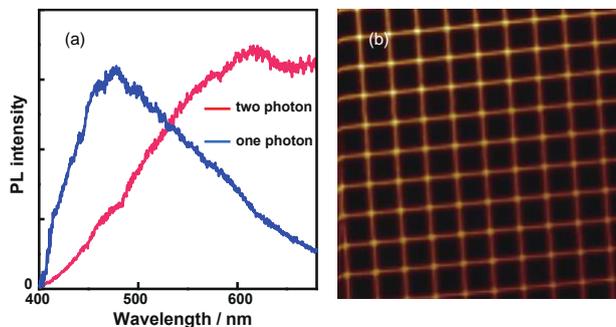


図 6. (a) 高分子の電子線照射により作製した化学種の一光子励起発光と二光子励起発光, (b) 作製した格子の二光子励起像. イメージサイズ: $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$, 励起波長: 一光子 (375 nm)、二光子 (750 nm) .

nm 以下の加工精度で発光パターンを作製することが可能であることがわかる。サブ波長程度の精度で周期的に発光体を精製することで、発光特性を制御することに成功している。項目

(1-3) では、おもに単一のメソ構造体を用いたときの光特性制御について述べたが、本項目では、複数のメソ構造が集積的に配列することで、能動的に光学特性制御が実現することを述べた。この項目で述べた空間選択的の化学反応は、さまざまな材料を反応前駆体とすることが可能で、前駆体に応じた多様な光特性が実現することが明らかになりつつある。今後、新しい材料開発と機能制御に発展することが期待される。

金属メソ構造体に励起される局在場の空間構造の可視化と理解を目的として、複数のナノイメージング分光手法を確立し、電子状態制御に不可欠となるメソ構造の設計指針を明らかにした。また、その光化学過程への適用も行い、局在光励起により双極子近似を超えた光励起が可能であること、非線形応答の増強、光磁気双極子遷移の顕在化など、従来の平面波励起と比べて格段に光化学過程を増強できることを明らかにした。さらにメソ光電場の空間制御による光励起、光学選択則の変調、近接場相互作用による電子状態制御を実現した。機能性分子材料の開発に取り組み、空間選択的な電子線誘起反応を利用することで、多様な発光特性を示す化合物合成が実現すること、さらにその空間配列を制御することで発光波長や光伝播方向の制御が可能で光デバイスの開発が実現することを明らかにした。本研究で開発した励起スキームとそれによる高次機能制御は、物理化学の新しい学理の礎となるとともに、今後、新規材料開発、光デバイス開発、光の効率的利用などに大いに貢献すると期待される。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 21 件)

- ① K. Imaeda, W. Minoshima, K. Tawa, K. Imura, Direct Visualization of Near-Field Distributions on a Two-Dimensional Plasmonic Chip by Scanning Near-Field Optical Microscopy, *J. Phys. Chem. C* **123**, 10529-10535 (2019) (査読あり), doi:10.1021/acs.jpcc.8b12495

- ② S. Noda, S. Hasegawa, H. Hamada, S. Kobatake, K. Imura, Plasmon enhanced optical responses of diarylethene molecules adsorbed on gold nanorods, *Chem. Lett.* **48**, 537-540 (2019) (査読あり), doi:10.1246/cl.190068
- ③ T. Matsuura, K. Imaeda, S. Hasegawa, H. Suzuki, K. Imura, Characterization of Overlapped Plasmon Modes in Gold Hexagonal Plate Revealed by Three-Dimensional Near-Field Optical Microscopy, *J. Phys. Chem. Lett.* **10**, 819-824 (2019) (査読あり), doi:10.1021/acs.jpcclett.8b03578
- ④ Y. Kamura, K. Imura, Space-Selective Fabrication of Light Emitting Carbon Dots in Polymer Films Using Electron-Beam-Induced Chemical Reactions, *ACS Omega* **4**, 3380-3384 (2019) (査読あり), doi:10.1021/acsomega.9b00085
- ⑤ K. Imaeda, S. Hasegawa, K. Imura, Static and Dynamic Near-Field Measurements of High Order Plasmon Modes Induced in a Gold Triangular Nanoplate, *J. Phys. Chem. Lett.* **9**, 4075-4081 (2018) (査読あり), doi:10.1021/acs.jpcclett.8b01671
- ⑥ K. Imaeda, S. Hasegawa, K. Imura, Imaging of Plasmonic Eigen Modes in Gold Triangular Mesoplates by Near-Field Optical Microscopy, *J. Phys. Chem. C.* **122**, 7399-7409 (2018) (査読あり), doi:10.1021/acs.jpcc.8b00678
- ⑦ H. Mizobata, S. Hasegawa, K. Imura, Development of Aperture-Type Near-Field Reflection Spectroscopy and Its Application to Single Silver Nanoplates, *J. Phys. Chem. C.* **121**, 11733-11739 (2017) (査読あり), doi:10.1021/acs.jpcc.7b04027
- ⑧ H. Mizobata, K. Ueno, H. Misawa, H. Okamoto, K. Imura, Near-field spectroscopic properties of complementary gold nanostructures: applicability of Babinet's principle in the optical region, *Opt. Express.* **25**, 5279-5289 (2017) (査読あり), doi:10.1364/OE.25.005279
- ⑨ T. Uchida, T. Yoshikawa, M. Tamura, T. Iida, K. Imura, Multiple Resonances Induced by Plasmonic Coupling between Gold Nanoparticle Trimers and Hexagonal Assembly of Gold-Coated Polystyrene Microspheres, *J. Phys. Chem. Lett.* **7**, 3652-3658 (2016) (査読あり), doi:10.1021/acs.jpcclett.6b01493
- 他 12 件

[学会発表] (計 116 件)

- ① Kohei Imura, Spatio-Temporal Responses of Plasmons Excited in Metal Nanostructures, *The 26th International Conference on Raman Spectroscopy*, Jeju, Korea (2018)
- ② Keisuke Imaeda, Seiju Hasegawa, Kohei Imura, Near-field visualization of plasmons in single gold nanotriangles, *The 8th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics*, Inchon, Korea (2017)
- ③ Kohei Imura, Visualization of plasmons in single metal nanoplates using advanced near-field imaging methods, *The 11th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics*, Tainan, Taiwan (2017)
- ④ 井村考平, プラズモンのナノ分光イメージング, 第12回プラズモニク化学シンポジウム, 東京 (2017)
- ⑤ Kohei Imura, Visualization of Plasmon Properties by Advanced Near-field Optical Microscopy, *9th Asian and Oceanian Photochemistry Conference*, Singapore (2016)
- ⑥ Kohei Imura, Hidetoshi Mizobata, Keisuke Imaeda, Development of Advanced Near-field imaging methods for visualization of plasmon modes in metal nanostructures, *The 14th International Conference on Near-Field Optics, Nanophotonics and Related Techniques*, Hamamatsu, Japan (2016)
- ⑦ 井村考平, 金属ナノ構造における素励起の可視化とその時空間制御, ナノ学会・部会合同シンポジウム, 福岡 (2015)
- ⑧ 井村考平, 近接場顕微分光法によるプラズモンの研究, 分子研シンポジウム, 岡崎 (2015)
- ⑨ Kohei Imura, Visualizing plasmons by near-field spectroscopy, 第75回応用物理学会秋季学術講演会, JSAP-OSA Joint symposium, Sapporo (2014)
- 他 107 件

[その他]

ホームページ等

<http://www.chem.waseda.ac.jp/imura/>

6. 研究組織

(1) 研究協力者

研究協力者氏名：今枝 佳祐

ローマ字氏名：(IMAEDA, Keisuke)