

令和 6 年 5 月 23 日現在

機関番号：10101

研究種目：特別推進研究

研究期間：2018～2022

課題番号：18H05205

研究課題名（和文）ナノ共振器 - プラズモン強結合を用いた高効率光反応システムの開拓とその学理解明

研究課題名（英文）Development and elucidation of highly efficient photoreaction systems using a strong coupling between nanocavity and plasmon

研究代表者

三澤 弘明（Misawa, Hiroaki）

北海道大学・電子科学研究所・客員研究員

研究者番号：30253230

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 481,200,000円

研究成果の概要（和文）：酸化チタン薄膜/金反射膜によりナノ光共振器機能を発現する酸化チタン電極を作製し、それに局在プラズモン共鳴を示す金ナノ粒子を担持するとモード強結合が誘起される。これを光アノードとして用いると、共振器構造のない非強結合電極に比べ、大きな光電場増強が誘起され、水を電子源とする光電流発生の量子収率が増強する。

本研究では、強結合電極における光電場増強に寄与する因子を明らかにするとともに、より大きな光電場増強を実現し、量子収率の増強を達成した。さらに、複数の局在プラズモン間に共振器を介して量子コヒーレンスが発現すること、またそれによりホットキャリア生成と電子移動反応の量子収率が増強することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で明らかとなった強結合電極において発現する複数の局在プラズモン間の量子コヒーレンスは、天然の光合成の色素タンパク質複合体における励起色素間でも観測されており、反応中心への高効率な光エネルギー伝達に寄与していることが示唆されている。今後、人工光合成においても量子コヒーレンスは太陽光エネルギー変換効率を改善する新たな因子として重要な役割を果たすと期待され、本研究成果の学術的意義は極めて大きい。また、本研究で得られた設計指針に基づき、量子コヒーレンスを用いた人工光合成をアルミニウムなどの安価な金属を用いて達成すれば、カーボンニュートラルな社会の実現に資すること大であり、その社会的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：We fabricated a titanium oxide electrode that exhibits optical nano-cavity functionality through a titanium oxide thin film/gold reflective film. Supporting gold nanoparticles that exhibit localized surface plasmon resonance on this electrode induces modal strong coupling. When used as a photoanode, this structure significantly enhances the optical electric field compared to plasmonic electrodes without an optical cavity, thereby increasing the quantum yield of photocurrent generation using water as an electron source.

In this study, we identified the factors contributing to the enhancement of the optical electric field in strong coupling electrodes and achieved greater optical electric field enhancement based on these principles, leading to increased quantum yield. Furthermore, we demonstrated that quantum coherence is induced between multiple localized surface plasmons via the cavity, which in turn enhances the quantum yield of hot carrier generation and electron transfer reactions.

研究分野：光化学

キーワード：プラズモン ナノ共振器 強結合 電子移動反応 光電子顕微鏡

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究代表者らは、局在プラズモンの緩和によって金ナノ粒子(AuNP)/酸化チタン(TiO₂)半導体電極界面で生ずる「ホットエレクトロン-ホットホール(ホットキャリア)」の電荷分離を用い、水を酸化して酸素を生成させるとともに、可視光エネルギーを電気エネルギーに変換できることを初めて示した。さらに、これらの研究を進展させ、可視光による水の完全分解に基づく水素発生や、空中窒素を常圧・室温下にて固定し、アンモニアを選択的に生成させることにも成功した。これらの光反応系は、ありふれた物質である水を電子源とし、かつ太陽光に豊富に含まれる可視光を反応の駆動力として高いエネルギーを有する電子を生み出すことができるため、水素発生やアンモニア合成の他にも様々な有用な化学物質の合成へ展開できるものと期待されている。しかし、単層の AuNP を担持した半導体電極では、入射光を効果的に吸収することができず、また反応の量子収率も低いなど、それらの向上が強く求められていた。

この課題を解決するために、我々はナノサイズの厚さのファブリ・ペロー(FP)ナノ共振器と局在プラズモンが「モード強結合」した[AuNP/TiO₂/金フィルム(AuF)]の強結合電極(ATA電極と略す)を作製することに成功し(TiO₂/AuF部分がナノ共振器として作用)光吸収効率の増大、および吸収帯のブロード化を実現した。さらに、非強結合電極(AuNP/TiO₂:AT電極と略す)に比べて光の吸収効率のみならず、水を電子源とする光電流発生の量子収率が増大することも見出した。時間領域差分(FDTD)法シミュレーションにより、ATA電極は、AT電極に比較して大きな光電場増強を発現することが示され、ATA電極においてより大きな光電場増強を実現する因子を明らかにできれば、量子収量の増強が図れると推察された。また、本ATA電極に関しては、光電場増強以外の光学、および光化学特性は未解明な部分が多く、特にホットキャリア生成、およびそれに続く電子移動反応プロセスに関する未知なる因子の探索とその学理解明は、モード強結合を用いる高効率な光反応システムの実現に向けて極めて重要となると考えられた。

2. 研究の目的

本研究は、強結合電極を用いた光電流発生の量子収率の増強に寄与すると考えられる光電場増強のさらなる増大を可能にする因子を明らかにすること目的とした。さらに、モード強結合に特異的な「結合強度」に変調を与える様々な因子に焦点を当て、それらがホットキャリア生成、それに続く AuNP から TiO₂ への電子移動、さらにホットホールによる水の酸化反応プロセスなどにどのような影響を与えるかを電磁場シミュレーション、および様々な実験より多角的に追求し、量子収率の増強のメカニズムを解明することを目的とした。また、得られた知見に基づき、可視光を利用する高効率なモード強結合光反応システムを実現することを目指した。

3. 研究の方法

強結合電極の作製においては、光学的な特性に影響を与える AuNP のサイズ、その均一性、形状、合金化による電子密度の変調、および数密度など、様々なパラメータを金薄膜の熱溶解、電子線リソグラフィ、AuNP の自己組織化など、異なる手法を駆使して制御し、ナノ共振器として用いる TiO₂/AuF の構造上に担持した。また、原子層堆積装置を用いて TiO₂ の膜厚を制御し、ナノ共振器の 1 次モード、または 2 次モードと局在プラズモンモードとを強結合させた。計測に関しては、AuNP から TiO₂ 伝導帯への電子注入はフェムト秒過渡吸収計測法を用いた。また、近接場の空間分布、多光子近接場スペクトル、位相緩和時間、ホットキャリアのエネルギー分布に関しては、時間分解光電子顕微鏡を用いて計測した。水の酸化反応中間体の検出は光電気化学反応セルを具備したラマン散乱スペクトル計測装置を用いて行った。

4. 研究成果

(1) 本研究課題による研究成果

モード強結合における結合強度(同調時の分裂エネルギー)の大きさは、AuNP 近傍の光電場増強のみならず、ホットキャリアの生成、AuNP から TiO₂ への電子移動反応、水の酸化反応の効率にも影響を与えると考えられた。そこで有限要素法を用いたシミュレーションにより、結合強度の大きさに寄与する因子を抽出したところ、1) AuNP の共振器への埋め込み深さ、2) 局在プラズモンを示す金属ナノ粒子の電子密度、3) 単位面積あたりに存在する AuNP の数(数密度)、などが重要な因子であることが示された。我々は、これらの因子に着目して「強結合電極」や、結合強度がより大きな「超結合電極」を作製し、それらの光電気化学計測、過渡吸収計測、時間分解光電子顕微鏡計測、ラマン散乱スペクトル計測を行った。その結果、強結合電極、および超強結合電極が示す光電流発生の量子収率の増強には、光電場増強に加え、複数の局在プラズモン間にナノ共振器を介した「量子コヒーレンス」が発現することによりホットキャリア生成と電子移動反応の量子収率が増強することを初めて明らかにした。これらは当初の研究目的を十分達成し、それを上回る成果であると考えられる。上記の 1)~3) を中心に得られた研究成果を以下に記す。

1) AuNP の共振器への埋め込み深さ：強結合電極におけるナノ共振器の共鳴エネルギーと局在プラズモンのエネルギーが一致して同調状態を形成していることは、ナノ共振器の TiO₂ 膜厚を変化させることにより分散曲線を求め確認した。FDTD シミュレーションより光電場増強は同調したときに最大になることが示されており、光電変換効率 (IPCE) も同調したときに最大値を示した。さらに、ATA 電極上の粒径 12±5 nm の AuNP の TiO₂ への埋め込み深さを変化させると図 1a に示すように分裂エネルギーが増大し、ほぼ完全に AuNP が TiO₂ に内包されたときに最大となった。また、FDTD シミュレーションより AuNP 近傍に生ずる近接場強度も埋め込み深さが増大するにつれて大きくなることが示された。一方、図 1b に示すように、IPCE も埋め込み深さの増加に伴って増大し、埋め込み深さが 7 nm において波長 500~900 nm の平均 IPCE は最大値となった。しかし、埋め込み深さを 14 nm まで増大させると、0 nm の場合より IPCE は小さい値となった。これらの結果は、IPCE は光電場増強に加え、水の酸化反応が生じる空間も重要であり、金/酸化チタン/水の 3 相界面が反応場となるため、その空間が最も大きくなるよう AuNP が TiO₂ 埋め込まれたときに最大値となることを示唆している。さらに、図 2 に示すように、ATA 電極においては、IPCE のみならず、光電変換の内部量子収率 (IQE) が AT 電極に比べ増強されることが初めて示された。本研究成果は研究当初に示した目的を達成するものであると考える。また、本研究は国際的にも高い評価を得ており、その成果は *Nat. Nanotechnol.*, 13, 953 (2018) に掲載された。

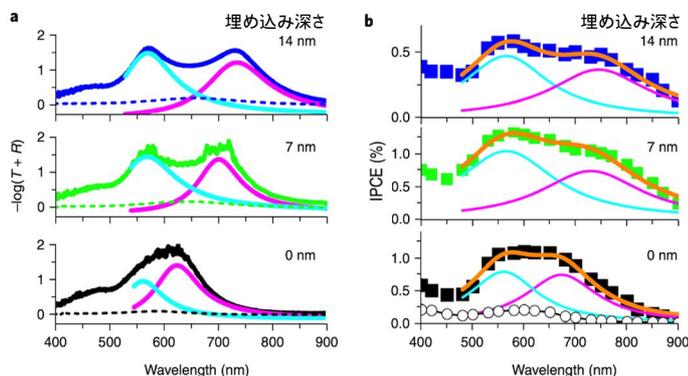


図 1 吸収と IPCE 作用スペクトル. a: AuNP 埋め込み深さを变化させた時の吸収スペクトル. 水色と紫色の曲線は、吸収帯のローレンツフィッティング. b: 異なる埋め込み深さの IPCE スペクトル. 水色と紫色の曲線は、IPCE スペクトルのローレンツフィッティング. 0nm における白丸のプロットは埋め込み深さ 0 nm の非強結合電極の IPCE スペクトル. a と b のスペクトル形状を比較するために b のスペクトルの y 軸のスケールは同じではない。

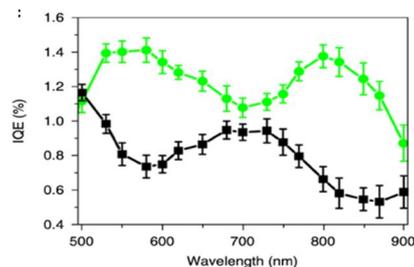


図 2 光電流発生量子収率 (IQE). 強結合電極 (緑色) と非強結合電極 (黒色) の IQE 作用スペクトル. 金ナノ粒子の埋め込み深さ 7 nm.

2) 局在プラズモンを示す金属ナノ粒子の電子密度：

銀は金に比べて電子密度が高いため、その局在プラズモンはより大きな光電場増強を示すが、反応性が金よりも高く、銀自身が酸化されるため、水の酸化反応に利用することは難しい。この問題を突破するために銀/金の合金が利用可能ではないかと着想した。そこで、銀の原子比率が 30% の金銀合金ナノ粒子 (Au-AgNP) を用いた強結合電極 (AATA 電極) を作製したところ、図 3a に示すように、AuNP の場合 (ATA 電極) よりも遥かに大きな分裂エネルギー 620 meV を示す「超強結合」が誘起されることを初めて見出した。さらに、AATA 電極を作用極とし、水を電子源とする光電流を観測したところ、合金表面に存在する銀が全て溶出した後、合金ナノ粒子内部の銀は安定して残存し、安定な光電流を示した。AATA 電極は、ATA 電極に比べて短波長のピーク (上枝) における IPCE (図 3b)、および IQE が共に 2.4 倍程度増強されることが明らかとなった。さらに、AATA 電極における Au-AgNP から TiO₂ への電子注入量の励起波長依存性を過渡吸収計測より求めたところ、IPCE 作用スペクトルと同様の挙動を示した。

Au-AgNP と AuNP をそれぞれ共振器構造のない TiO₂ 電極に担持して非強結合電極を作製し、

IPCE を測定したところ、Au-AgNP は AuNP に比べ 1.7 倍増強された。この原因を明らかにするために、Au-AgNP の仕事関数を光電子分光計測から求めたところ、AuNP に比べて 300 meV 低いことが示され、Au-AgNP では AuNP より卑な電位を有するホットエレクトロンを生成可能なためと結論された。さらに、FDTD シミュレーションより、AATA 電極と ATA 電極の上枝波長における光電場増強度を求めたところ 3.0 倍であった。一方、共振器構造のない場合は 2.1 倍となることが示された。この結

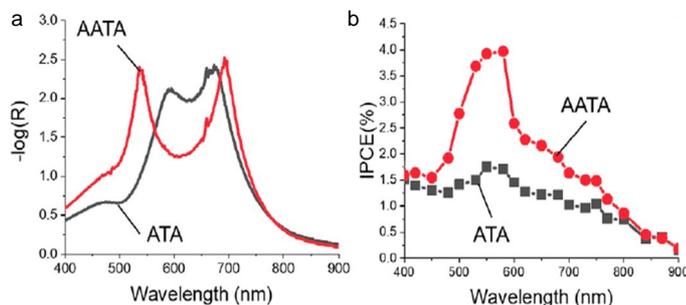


図 3 a: AATA 電極と ATA 電極の吸収スペクトル. b: AATA 電極 (赤線), および ATA 電極 (黒線) を作用極として用いた場合の IPCE 作用スペクトル. 印加電圧は Ag/AgCl に対して 0.5 V.

果は、超強結合電極においては、共振器構造のない電極より光電場増強が1.5倍程度増強されることを示しており、この効果も加わり、AATA電極のIPCE、およびIQEがATA電極より2.4倍程度増強されたと結論した。本研究で示した局在プラズモンとナノ共振器との「モード超強結合」を化学反応へ展開した報告は我々が知る限りなく、新規性の高い成果であると考え。また、本研究成果は研究当初に示した目的を達成するものであると考え。本成果については、*Angew. Chem. Int. Ed.*, **60**, **34**, 18438 (2021) に掲載され、「Hot Topic」に選ばれた。

3) 単位面積あたりに存在する AuNP の数 (数密度): 半導体微細加工技術を用いて金ナノディスク (AuND) のサイズ、および単位面積当たりの AuND 数 (数密度: Particle Number Density=PND) を精緻に制御し、強結合 (ATA) 電極を作製した。これらの吸収スペクトルを測定したところ、PND の増加に伴い分裂エネルギーの増大は観測されたが、スペクトルの積分強度はほぼ一定となった。他方、非強結合 (AT) 電極においては、PND の増加に伴ってスペクトル積分強度は線形に増加し、分子濃度と吸収強度の関係として知られている Lambert-Beer の法則に従った。さらに、FDTD シミュレーションより ATA 電極における近接場スペクトルの PND 依存性を求めたところ、吸収スペクトルと同様に PND の増加に伴い分裂エネルギーは増大したが、スペクトル積分強度は PND に依存せずほぼ一定の値となった。これらの結果は、ATA 電極においては PND が増加しても近接場強度は増大することなく、言い換えると、AuND1 個当たりの光電場増強度は減少することを示している。

そこで、ATA 電極、および AT 電極における AuND から TiO_2 への電子注入に関する量子収率の PND 依存性を過渡吸収計測によって求めたところ、図 4 に示す結果が得られた。AT 電極の場合は、量子収率は PND に依存せず、ほぼ一定となった。これは一般的な光化学反応において観測される量子収率は光増感剤濃度には依存しない現象と同じである。一方、ATA 電極の場合は、2つの吸収極大の上枝 (短波長) と下枝 (長波長) のどちらを励起しても量子収率は PND の増加に伴って増大した。前述の近接場スペクトルの PND 依存性より、PND の増加に伴って AuND1 個当たりの光電場増強度は小さくなるにもかかわらず、AuND から TiO_2 への電子注入は増強されるという、これまで我々が検証してきた光電場増強度の増大に伴って電子注入が増強される、という概念とは相反する新たな現象に直面した。

我々は、本現象を理解するためにナノ共振器上の複数の AuND の局在プラズモンが、ナノ共振器を介して量子コヒーレンスを有し、非局在化して同位相で振動しているとの仮説を立てた。これを検証するために、異なる AuND 数のクラスターをナノ共振器上 (ATA)、および共振器構造のない TiO_2 上 (AT) にそれぞれ作製し、それらの近接場強度の空間分布を観測した。ATA の場合、クラスターの中心部が暗くなり干渉パターンが観測されたが、AT の場合は、近接場強度が ATA の 1/9 と小さく、またクラスター全体にほぼ均一に分布していることが示された。これらの結果が、FDTD シミュレーションより求めた近接場強度の空間分布とも一致したことから、ATA 電極においては複数の AuND の局在プラズモン間に量子コヒーレンスが存在することが強く示唆された。

続いて本 ATA 電極における量子コヒーレンスがどれほどの空間に広がっているか (コヒーレンスエリア) を検討した。共振器と共振器中の励起子とが強結合する「アンサンブル強結合」とモード強結合は区別されるが、アンサンブル強結合において知られている分裂エネルギーが共振器に導入した分子数の 1/2 乗に比例するという関係を用いてコヒーレンスエリアを見積もった。種々の PND に対して観測された分裂エネルギーを図 5a に示した。PND が低い領域では、分裂エネルギーは PND の 1/2 乗のフィッティングカーブ (黒実線) によく一致するが、高い領域においては正の偏差を示した。理論モデルによる計算 (阪大・基礎工の石原一教授との共同研究) から、この偏差は複数の AuND の局在プラズモンがナノ共振器を介して量子コヒーレンスを有すること

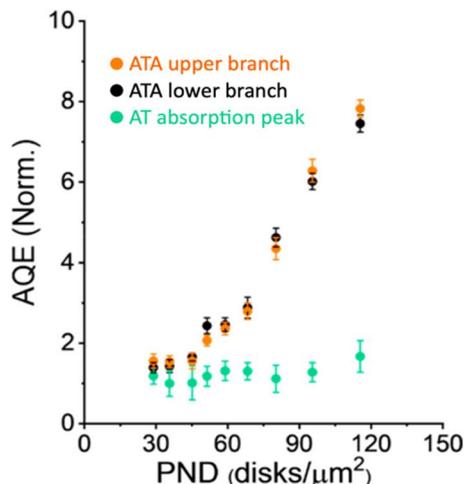


図 4 AuND から TiO_2 への電子注入に関する見かけの量子収率 (AQE) の PND 依存性. AQE (Norm.) は AQE の最小値により規格化した. 各電極の励起条件は図左上に記載.

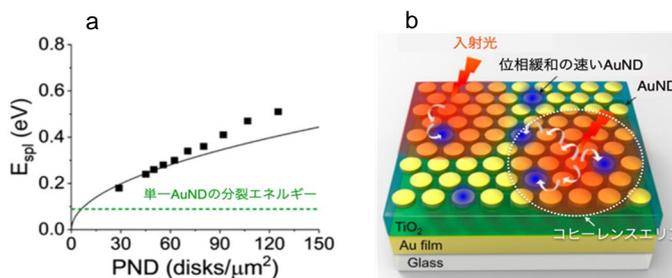


図 5 a: PND と分裂エネルギーの関係. 黒実線は \sqrt{PND} のフィッティングカーブ. 緑点線は単一 AuND の分割エネルギー. b: 量子コヒーレンスによる AuND から TiO_2 への電子注入の AQE 増強メカニズム.

によって現れ、PNDが増加するほど大きくなることが示された。図5aにおける緑点線は、FDTDシミュレーションにより求めた単一のAuNDをナノ共振器上に配置した場合の分裂エネルギーである。フィッティングカーブとの交点から5.2ディスク/ μm^2 のPNDと同等であることが示された。この値から単一AuNDのコヒーレンスアリアを求めると、直径460nmとなった。同様にFDTDシミュレーションから求めた分裂エネルギーを用いてコヒーレンスアリア求めたところ、直径495nmとなり、実験から求めた値とよく一致した。さらに、コヒーレンスアリア内に他のAuNDよりも位相緩和が速く、ホットキャリアが生成しやすいAuNDが存在する場合のモデル計算を行ったところ、AuNDから TiO_2 への電子注入が図4と同様にPNDの増加に伴って増大した。これは図5bに示すようにPNDの増大に伴い、コヒーレンスアリア内に位相緩和が速いAuNDの存在確率が増えるため、 TiO_2 への電子注入が促進されると考えられる。一方、AT電極に関する同様のモデル計算を行ったが、量子コヒーレンスが存在しないため、電子注入の量子収率はPNDに依存することではなく、ほぼ一定の値を示した。従来の人工光合成で量子コヒーレンスにより量子収率の向上を図った研究はなく、本成果は学術的にも大きな意味を持ち、関連分野の研究者にも大きなインパクトを与えた。本研究成果はACS Nano, 17, 9, 8315 (2023)に掲載された。

さらに、光照射下、AATA電極において水の酸化反応中間体が生成する電位をラマン散乱スペクトルにより追跡したところ、AAT電極に比べ0.3V卑な電位で出現した。AATA電極においては、量子コヒーレンスにより位相緩和の速い特定のプラズモン粒子から TiO_2 へ電子注入が起きるため、ホールが特定の粒子に局在化する。そのため水の4電子酸化反応がより小さな過電圧で誘起されると考えられる。本成果は、J. Phys. Chem. C, 127, 15087 (2023)に掲載された。

また、本研究のATA電極の概念は、水の光酸化を行う光アノードのみならず、水を還元して水素を発生する光カソードにも展開可能である。n型半導体の TiO_2 の代わりにp型半導体の酸化ニッケルを用い、強結合カソードの作製にも成功し、非強結合カソードに比べて3桁高い水素発生効率を実現した。本成果はChem. Eur. J., 28, e202200288 (1-5) (2022)に掲載された。

以上、本研究では、強結合電極を用いた電子移動反応の量子収率の向上に寄与する光電場強度を増強する因子を明らかにした。また、その原理に基づき量子収率の増強にも成功し、申請時の目的を十分達成したと考える。さらに、天然の光合成では、捕集された太陽光エネルギーがほぼ100%の効率で反応中心に伝達されるが、色素タンパク質複合体の量子コヒーレンスが重要な役割を果たしていることが示唆されている。本研究で発見された強結合電極における量子コヒーレンスは、人工光合成の量子収率を増強する画期的な因子である。関連する広い研究分野の研究者にも極めて大きなインパクトを与えたと考えられ、目的を上回る成果であると確信する。

(2)当初に予見していなかった新たな展開等によって得られた研究成果

強結合電極の研究を進める中、対照実験として TiO_2 の代わりにホットエレクトロンが注入されることのない伝導帯電位を有するアルミナ(Al_2O_3)を用いてナノ共振器を構築し、AuNPの局在プラズモンとの強結合の形成を試みたが、吸収スペクトルが分裂することはなく、強結合の形成は認められなかった。しかし、電子線リソグラフィにより局在プラズモンを示す金ナノブロック(AuNB)のサイズを精緻に制御し、かつAuNBを2次元的に周期的に配置させ、光を入射したところ、金ナノブロックの局在プラズモンが励起されるとともに、AuNBの周期構造によって回折した光が金フィルムの伝搬型プラズモンを励起し、局在型と伝搬型のそれぞれのプラズモンがアルミナ薄膜を介して「強結合」することを初めて見出した。本研究の特筆すべき点は、従来、局在プラズモンの位相緩和時間は外的因子により制御することが困難であったが、位相時間が比較的長い伝搬型プラズモンとの強結合により、位相緩和時間を制御できることを見出した点である。本研究成果は当初の研究計画では予見してなかった新たな成果であり、また関連する分野の研究者に大きなインパクトを与えた。本成果はNat. Commun., 9, 4858 (2018)に掲載された。

強結合電極上で生起する水の酸化反応の中間体を表面増強ラマン散乱(SERS)計測により追跡する中、強結合電極は特異的なSERSの挙動を示すことを見出した。従来のSERS計測では非強結合電極と同様の[AuNP/誘電体基板]が広く用いられている。AuNPの直径は照射レーザー波長よりも1~2桁小さく、照射領域に存在する多数個のAuNPの中から1つのAuNPの局在プラズモンが励起され、AuNPに吸着した分子のSERSが観測される。一般的に各AuNP上の吸着分子数には不均一性があり、低濃度溶液を用いた場合より顕著となるため、SERS強度の空間的な不均一性が生じて定量性が低下する。これが、一般的分析技術としてSERSが普及しない大きな原因となっている。一方、自己組織化によりAuNPを2次元的に最密充填した強結合電極においては、複数のAuNPの局在プラズモン間には量子コヒーレンスが存在するため単一AuNPからではなく、コヒーレンスアリア全体の複数のAuNPに吸着した分子から平均化されたSERSが生じることを初めて見出した。これによりSERS強度が十分大きく、かつ空間的不均一性を抑制(相対標準偏差2%程度)できる画期的な成果が得られた。本成果は当初予見してなかった成果であり、また関連分野の研究者に大きなインパクトを与えた。本成果はACS Nano, 18, 4993 (2024)に掲載され、特許申請もされた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計121件（うち査読付論文 120件 / うち国際共著 46件 / うちオープンアクセス 38件）

1. 著者名 Cao En, Shi Xu, Oshikiri Tomoya, Liu Yen-En, Sun Quan, Sasaki Keiji, Misawa Hiroaki	4. 巻 11
2. 論文標題 Improving Charge Transfer under Strong Coupling Conditions via Interfacial Modulation	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 ACS Photonics	6. 最初と最後の頁 1205 ~ 1212
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsp Photonics.3c01733	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Suganami Yoshiki, Oshikiri Tomoya, Mitomo Hideyuki, Sasaki Keiji, Liu Yen-En, Shi Xu, Matsuo Yasutaka, Ijio Kuniharu, Misawa Hiroaki	4. 巻 18
2. 論文標題 Spatially Uniform and Quantitative Surface-Enhanced Raman Scattering under Modal Ultrastrong Coupling Beyond Nanostructure Homogeneity Limits	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 4993 ~ 5002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnano.3c10959	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Zang Xiaoqian, Shi Xu, Suganami Yoshiki, Liu Yen-En, Oshikiri Tomoya, Misawa Hiroaki	4. 巻 127
2. 論文標題 Investigation of Enhanced Water Oxidation under Plasmon-Nanocavity Strong Coupling Using In Situ Electrochemical Surface-Enhanced Raman Spectroscopy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 15087 ~ 15095
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.3c03625	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Liu Yen-En, Shi Xu, Yokoyama Tomohiro, Inoue Soshun, Sunaba Yuji, Oshikiri Tomoya, Sun Quan, Tamura Mamoru, Ishihara Hajime, Sasaki Keiji, Misawa Hiroaki	4. 巻 17
2. 論文標題 Quantum-Coherence-Enhanced Hot-Electron Injection under Modal Strong Coupling	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 8315 ~ 8323
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnano.2c12670	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Wang Yaguang, Shi Xu, Oshikiri Tomoya, Misawa Hiroaki	4. 巻 5
2. 論文標題 Improved water splitting efficiency of Au-NP-loaded Ga2O3 thin films in the visible region under strong coupling conditions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nanoscale Advances	6. 最初と最後の頁 119 ~ 123
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D2NA00768A	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yan Qiuchen, Cao En, Hu Xiaoyong, Du Zhuochen, Ao Yutian, Chu Saisai, Sun Quan, Shi Xu, Chan C. T., Gong Qihuang, Misawa Hiroaki	4. 巻 11
2. 論文標題 Edge states in plasmonic meta-arrays	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nanophotonics	6. 最初と最後の頁 3495 ~ 3507
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1515/nanoph-2022-0258	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 D. E. Gomez, X. Shi, T. Oshikiri, A. Roberts, and H. Misawa,	4. 巻 21
2. 論文標題 Near-Perfect Absorption of Light by Coherent Plasmon-Exciton States	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 3864 ~ 3870
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.1c00389	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 該当する

1. 著者名 S. Zu, Q. Sun, E. Cao, T. Oshikiri, and H. Misawa	4. 巻 21
2. 論文標題 Revealing the Chiroptical Response of Plasmonic Nanostructures at the Nanofemto Scale	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 4780 ~ 4786
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.1c00389	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Y. Suganami, T. Oshikiri, X. Shi, and H. Misawa	4. 巻 60
2. 論文標題 Water Oxidation under Modal Ultrastrong Coupling Conditions Using Gold/Silver Alloy Nanoparticles and Fabry-Perot Nanocavities	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie International Edition	6. 最初と最後の頁 18438 ~ 18442
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.1c01114	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 X. Zang, X. Shi, T. Oshikiri, K. Ueno, Y. Sunaba, K. Sasaki, and H. Misawa	4. 巻 125
2. 論文標題 Highly Sensitive and Spatially Homogeneous Surface-Enhanced Raman Scattering Substrate under Plasmon-Nanocavity Coupling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 19880 ~ 19886
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/nano11071730	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 T. Oshikiri, Q. Sun, H. Yamada, S. Zu, K. Sasaki, and H. Misawa	4. 巻 15
2. 論文標題 Extrinsic Chirality by Interference between Two Plasmonic Modes on an Achiral Rectangular Nanostructure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 16802 ~ 16810
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.1c05788	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Q. Yan, E. Cao, Q. Sun, Y. Ao, X. Hu, X. Shi, Q. Gong, and H. Misawa	4. 巻 21
2. 論文標題 Near-Field Imaging and Time-Domain Dynamics of Photonic Topological Edge States in Plasmonic Nanochains	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 9270 ~ 9278
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnano.1c07137	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 T. Oshikiri, H. Jo, X. Shi, and H. Misawa	4. 巻 28
2. 論文標題 Boosting Hydrogen Evolution at Visible Light Wavelengths by Using a Photocathode with Modal Strong Coupling between Plasmons and a Fabry Perot Nanocavity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chemistry A European Journal	6. 最初と最後の頁 e202200288
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jphotochemrev.2021.100472	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 Li Yaolong, Sun Quan, Zu Shuai, Shi Xu, Liu Yunquan, Hu Xiaoyong, Ueno Kosei, Gong Qihuang, Misawa Hiroaki	4. 巻 124
2. 論文標題 Correlation between Near-Field Enhancement and Dephasing Time in Plasmonic Dimers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 163901
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.0c00742	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 該当する

1. 著者名 Okazaki Megumi, Suganami Yoshiki, Hirayama Naoki, Nakata Hiroko, Oshikiri Tomoya, Yokoi Toshiyuki, Misawa Hiroaki, Maeda Kazuhiko	4. 巻 3
2. 論文標題 Site-Selective Deposition of a Cobalt Cocatalyst onto a Plasmonic Au/TiO ₂ Photoanode for Improved Water Oxidation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Energy Materials	6. 最初と最後の頁 5142 ~ 5146
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.163901	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shi Xu, Li Xiaowei, Toda Takahiro, Oshikiri Tomoya, Ueno Kosei, Suzuki Kentaro, Murakoshi Kei, Misawa Hiroaki	4. 巻 3
2. 論文標題 Interfacial Structure-Modulated Plasmon-Induced Water Oxidation on Strontium Titanate	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Energy Materials	6. 最初と最後の頁 5675 ~ 5683
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaem.0c00857	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Sun Quan, Zu Shuai, Misawa Hiroaki	4. 巻 153
2. 論文標題 Ultrafast photoemission electron microscopy: Capability and potential in probing plasmonic nanostructures from multiple domains	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 120902
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nanoen.2020.104965	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Wang Yaguang, Shi Xu, Oshikiri Tomoya, Zu Shuai, Ueno Kosei, Misawa Hiroaki	4. 巻 12
2. 論文標題 Plasmon-induced electron injection into the large negative potential conduction band of Ga2O3 for coupling with water oxidation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nanoscale	6. 最初と最後の頁 22674 ~ 22679
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d0na00641f	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Cao Yanfeng, Shi Xu, Oshikiri Tomoya, Zu Shuai, Sunaba Yuji, Sasaki Keiji, Misawa Hiroaki	4. 巻 57
2. 論文標題 Near-field engineering for boosting the photoelectrochemical activity to a modal strong coupling structure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 524 ~ 527
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d0nr06319c	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Sun Quan, Yu Han, Ueno Kosei, Zu Shuai, Matsuo Yasutaka, Misawa Hiroaki	4. 巻 2
2. 論文標題 Revealing the plasmon coupling in gold nanochains directly from the near field	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Opto-Electronic Advances	6. 最初と最後の頁 1800300(1-7)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.29026/oea.2019.180030	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Cao Yanfeng, Oshikiri Tomoya, Shi Xu, Ueno Kosei, Li Jie, Misawa Hiroaki	4. 巻 5
2. 論文標題 Efficient Hot Electron Transfer under Modal Strong Coupling Conditions with Sacrificial Electron Donors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ChemNanoMat	6. 最初と最後の頁 1008 ~ 1014
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0NR06681H	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 Tsai Wei Yi, Sun Quan, Hu Guangwei, Wu Pin Chieh, Lin Ren Jie, Qiu Cheng Wei, Ueno Kosei, Misawa Hiroaki, Tsai Din Ping	4. 巻 7
2. 論文標題 Twisted Surface Plasmons with Spin Controlled Gold Surfaces	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advanced Optical Materials	6. 最初と最後の頁 1801060
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adom.201801060	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Oshikiri Tomoya, Ueno Kosei, Misawa Hiroaki	4. 巻 21
2. 論文標題 Ammonia photosynthesis via an association pathway using a plasmonic photoanode and a zirconium cathode	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Green Chemistry	6. 最初と最後の頁 4443 ~ 4448
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adom.201900580	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Oshikiri Tomoya, Sawayanagi Hiroki, Nakamura Keisuke, Ueno Kosei, Katase Takayoshi, Ohta Hiromichi, Misawa Hiroaki	4. 巻 152
2. 論文標題 Arbitrary control of the diffusion potential between a plasmonic metal and a semiconductor by an angstrom-thick interface dipole layer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 034705(1-8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c9gc01658a	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 Oshikiri Tomoya, Shi Xu, Misawa Hiroaki	4. 巻 2020
2. 論文標題 Enhancement of Selective Fixation of Dinitrogen to Ammonia under Modal Strong Coupling Conditions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 European Journal of Inorganic Chemistry	6. 最初と最後の頁 1396 ~ 1401
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.9b10485	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 X. Shi, K. Ueno, T. Oshikiri, Q. Sun, K. Sasaki, H. Misawa	4. 巻 13
2. 論文標題 Enhanced water splitting under modal strong coupling conditions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nat. Nanotech.	6. 最初と最後の頁 953-958
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41565-018-0208-x	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 J. Yang, Q. Sun, K. Ueno, X. Shi, T. Oshikiri, H. Misawa, Q. Gong	4. 巻 9
2. 論文標題 Manipulation of the dephasing time by strong coupling between localized and propagating surface plasmon modes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nat. Commun.	6. 最初と最後の頁 4858
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-018-07356-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 H. Song, Q. Sun, J. Li, F. Yang, J. Yang, Y. Li, K. Ueno, Q. Gong, and H. Misawa	4. 巻 123
2. 論文標題 Exotic Mode Suppression in Plasmonic Heterotrimer System	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Phys. Chem. C	6. 最初と最後の頁 1398-1405
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.8b10263	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 該当する

1. 著者名 W.-Y. Tsai, T. L. Chung, H.-H. Hsiao, J.-W. Chen, R. J. Lin, P. C. Wu, G. Sun, C.-M. Wang, H. Misawa, D. P. Tsai	4. 巻 31
2. 論文標題 Second Harmonic Light Manipulation with Vertical Split Ring Resonators	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Adv. Mater.	6. 最初と最後の頁 1806479
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adma.201806479	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 該当する

1. 著者名 K. Ueno, J. Yang, Q. Sun, D. Aoyo, H. Yu, T. Oshikiri, A. Kubo, Y. Matsuo, Q. Gong, H. Misawa	4. 巻 14
2. 論文標題 Control of plasmon dephasing time using stacked nanogap gold structures for strong near-field enhancement	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Appl. Mater. Today	6. 最初と最後の頁 159-165
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apmt.2018.12.004	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 該当する

[学会発表] 計229件 (うち招待講演 101件 / うち国際学会 137件)

1. 発表者名 Hiroaki Misawa
2. 発表標題 Quantum-Coherence-Enhanced hot electron transfer at Au nanostructure/TiO2 interface under modal strong coupling
3. 学会等名 12th Asian and Oceanian Photochemistry Conference (APC2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroaki Misawa
2. 発表標題 Mechanism of hot electron transfer at Au nanostructure/TiO2 interface under modal strong coupling conditions
3. 学会等名 The 10th International Conference on Surface Plasmon Photonics (SPP10) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 H. Misawa, Tomoya Oshikiri, Xu Shi, and Yoshiki Suganami
2. 発表標題 Enhanced Water Splitting at Visible Wavelength Region Using Modal Strong Coupled Photoanode and Photocathode
3. 学会等名 242nd ECS Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroaki Misawa, Tomoya Oshikiri, Xu Shi, Yoshiki Suganami
2. 発表標題 Water Splitting under Modal Strong and Ultra Strong Coupling Conditions
3. 学会等名 2022 MRS Spring Meeting & Exhibit (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroaki Misawa
2. 発表標題 Enhanced Photochemical Reactions Under Modal Strong Coupling Conditions
3. 学会等名 2021 Virtual MRS Spring Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroaki Misawa, Tomoya Oshikiri, Xu Shi, Keiji Sasaki
2. 発表標題 Enhanced water oxidation reaction under strong coupling conditions
3. 学会等名 International Conference on Photochemistry (ICP 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroaki Misawa, Xu Shi, Tomoya Oshikiri, Keiji Sasaki, Yoshiki Suganami
2. 発表標題 Enhanced Water Splitting under Modal Strong and Ultra Strong Coupling Conditions
3. 学会等名 11th Asian Photochemistry Conference (APC 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Misawa
2. 発表標題 Enhanced water oxidation reaction under strong coupling conditions
3. 学会等名 The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2021 (Pacifichem 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroaki Misawa
2. 発表標題 Dynamics of Electron Transfer in Enhanced Water Splitting Under Modal Strong Coupling Conditions
3. 学会等名 PRiME 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三澤 弘明
2. 発表標題 モード強結合によって生じる量子コヒーレンスを用いた高効率人工光合成
3. 学会等名 日本化学会第101春季年会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroaki Misawa
2. 発表標題 Enhanced Water Splitting Under Modal Strong Coupling Conditions
3. 学会等名 235th ECS Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroaki Misawa
2. 発表標題 Insight of modal strong coupling and its application to water splitting
3. 学会等名 The 12th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics (APNF012) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Misawa, X. Shi, K. Ueno, T. Oshikiri, Q. Sun, and K. Sasaki
2. 発表標題 Insight into modal strong coupling and its application to photochemical reactions
3. 学会等名 The 29th International Conference on Photochemistry (ICP 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Misawa, X. Shi, K. Ueno, T. Oshikiri, Q. Sun, and K. Sasaki
2. 発表標題 Insight of modal strong coupling and its application to photochemical reactions
3. 学会等名 SPIE. Optics+Photonics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroaki Misawa
2. 発表標題 Enhanced Water Splitting under Modal Strong Coupling Conditions
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2019 (MRM 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroaki Misawa
2. 発表標題 Water Splitting Using Strong Coupling Between Localized Surface Plasmon and Cavity Modes
3. 学会等名 Noble Metal Nanoparticles Gordon Research Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroaki Misawa
2. 発表標題 Plasmon-induced water splitting promoted by strong coupling between nanocavity and localized surface plasmon modes
3. 学会等名 The 15th international conference of Near-field Optics and Nanophotonics (NFO-15) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroaki Misawa
2. 発表標題 Enhanced Water Splitting under Modal Strong Coupling Conditions
3. 学会等名 10th Asia Photochemistry Conference (APC 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計6件

1. 著者名 Takashi Yatsui, Koichi Okamoto, Satoshi Ashihara, Ikki Morichika, Xu Shi, Hiroaki Misawa, Kazuhiro Yabana, Takashi Takeuchi, Mitsuharu Uemoto, Atsushi Yamada, Shunsuke Yamada, Kaihui Liu, Yuichiro K. Kato, Shigeo Maruyama	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 183
3. 書名 Progress in Nanophotonics 6	

1. 著者名 上野 貢生、三澤 弘明	4. 発行年 2019年
2. 出版社 共立出版	5. 総ページ数 109
3. 書名 プラズモンの化学	

〔出願〕 計3件

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 光吸収デバイスおよびその製造方法ならびに光電極	発明者 三澤 弘明、石 旭、 上野 貢生、押切 友 也、孫 泉、笹木 敬	権利者 国立大学法人北 海道大学
産業財産権の種類、番号 特許、特許第7194944号	取得年 2022年	国内・外国の別 国内

〔その他〕

研究室ホームページ
<http://misawa.es.hokudai.ac.jp>

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
研究分担者	笹木 敬司 (Sasaki Keiji) (00183822)	北海道大学・電子科学研究所・教授 (10101)	
研究分担者	上野 貢生 (Ueno Kosei) (00431346)	北海道大学・理学研究院・教授 (10101)	
研究分担者	B i j u V ・ P i l l a i (Biju V. Pillai) (60392651)	北海道大学・電子科学研究所・教授 (10101)	
研究分担者	村越 敬 (Murakoshi Kei) (40241301)	北海道大学・理学研究院・教授 (10101)	

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3件

国際研究集会 Trend in Plasmonic Photochemistry, The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2021 (Pacifichem 2021)	開催年 2021年～2021年
国際研究集会 The International Workshop on Ultrafast Micro/Nano Photonics and Photochemistry	開催年 2019年～2019年
国際研究集会 International workshop on coupled plasmonic nanostructures and their applications to chemical sensing/reactions	開催年 2018年～2018年

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			
中国	北京大学	吉林大学	天津工業大学	他1機関
台湾	国立陽明交通大学	中央研究院		
オーストラリア	RMIT大学	メルボルン大学		
米国	ライス大学			