

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2011～2015

課題番号：23225006

研究課題名(和文) 高効率な光捕集・局在化を可能にする光アンテナの開発とその太陽電池への応用

研究課題名(英文) The development of plasmonic antennae realizing light harvesting/localization and its application to solar cells

研究代表者

三澤 弘明 (Misawa, Hiroaki)

北海道大学・電子科学研究所・教授

研究者番号：30253230

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 166,400,000円

研究成果の概要(和文)：局在プラズモンを示す金ナノ構造を光アンテナとした光電変換系において、水が酸化的に分解して酸素が発生することを明らかにした。また、光電気化学重合反応を用いて本水分解が金ナノ構造/半導体基板/水の接触するナノ空間で生起することを明らかにした。これらの成果を人工光合成へ展開し、可視光による水の完全分解、並びにアンモニア合成にも成功した。一方、独自に開発した超高速時間分解光電子顕微鏡を活用し、四重極子プラズモンや局在プラズモンと分子系との強結合状態を利用した光アンテナが高い光閉じ込め機能を有することも明らかにした。さらに、ホール移動層に酸化ニッケルを用いた全固体プラズモン太陽電池の創出にも成功した。

研究成果の概要(英文)：We have successfully elucidated that oxygen evolution was induced as a result of water oxidation in the photoelectric conversion system which employs gold nanostructures showing localized surface plasmon (LSP) as an optical antenna. It was also clarified that the water oxidation is induced at a restricted nanospace near gold/semiconductor/water interface, which were visualized by photoelectrochemical polymerization. These principles have developed artificial photosynthesis, so that overall water splitting and ammonia synthetic systems were successfully constructed. On the other hand, we have clarified that quadrupole plasmon resonances and optical antennae utilizing strong coupling between LSP and molecular system shows efficient light confinement function, which were studied by the developed time-resolved photoemission electron microscopy in this study. Furthermore, we have successfully developed all solid state plasmonic photovoltaic cell using nickel oxide as a hole transport layer.

研究分野：光化学

キーワード：局在プラズモン ナノ材料 光物性

1. 研究開始当初の背景

太陽光は紫外から赤外波長域に至る幅広いスペクトルを有しており、地表に到達する太陽エネルギーの44%は波長800 nm以上の赤外光で占められている。しかし、シリコン太陽電池を含め、赤外光を高効率に光電変換できる太陽電池はほとんど存在しない。従来有効に利用する術がなく、光電変換としては未踏の赤外光を確実に電気エネルギーに変換する機能を具備し、可視～赤外域の幅広い太陽光スペクトルにตอบสนอง可能な革新的な太陽電池の開発が、高い光電変換効率の実現に向け強く求められている。

2. 研究の目的

研究代表者は、酸化チタン単結晶基板(ルチル、0.05wt% ニオブドープ)上に「光アンテナ機能」を有する金ナノ構造をアレイ状に配置した金ナノ構造/酸化チタン電極界面に波長1050 nm付近の近赤外光を照射することにより、金ナノ構造に誘起される局在表面プラズモン共鳴に基づく光電流が観測されることを明らかにした。本系の大きな特長は、従来の色素増感太陽電池において必要不可欠な電子メディエータを加えることなく、電解質水溶液のみで長時間光電流が観測される点である。本研究では、局在プラズモンによって光を捕集・局在化させることが可能な「光アンテナ機能」を有する金ナノ構造/酸化チタン電極における光電子移動・光電荷分離のメカニズムを明らかにするとともに、光電変換効率を増大させるための重要な鍵となる「光アンテナ」の機能を極限まで高めるための学理と技術を構築することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究を遂行するために、以下に示す3つの研究項目を設定した。

1) 本光電変換系における光電流発生メカニズムの解明

1-1) 本光電変換系における電子源、および正孔のトラップサイトの特定 (担当: 三澤・村越・上野・石・大学院生)

光電流が電子メディエータ無しに電解質水溶液のみで200時間以上安定に観測されたことから、水が電子源となっていると推察された。そこで、酸素の同位体を含む水を用い、光電流の発生に伴い生成する気体をGC-MSにより定量し、本系における電子源を明らかにするとともに、分光電気化学測定、並びに光電気化学重合反応を用いて正孔のトラップサイトの解明とその可視化を検討する。また、in-situ 電気化学表面増強ラマン分光計測により正孔のトラップサイトにおける水の酸化反応中間体を同定する。

1-2) 金ナノ構造/酸化チタン電極界面の構造解析 (担当: 三澤・村越・上野・石・大学院生)

高分解能透過電子顕微鏡(TEM)と電子エネルギー損失分光法(EELS)により金ナノ構造/酸化チタン電極界面の構造を原子レベルで解析し、界面の構造が局在プラズモン誘

起電荷分離に与える影響を明らかにするとともに、最適な光アンテナ構造の設計指針を得る。

2) 太陽光を有効に捕捉・局在化させる光アンテナの設計と創成

2-1) 電子ビーム(EB)露光やスパッタリングの最適化による光アンテナ特性の向上 (担当: 三澤・上野・オリビエ・大学院生)

EB露光条件やスパッタリング成膜条件を最適化し、光アンテナ構造の光学特性、光電場増強効果、さらに光電変換特性に与える影響を検討し、光アンテナ特性の向上を図る。

2-2) ダークモードプラズモン、およびFano効果を誘起する光アンテナの設計・創出 (担当: 三澤・上野・村澤・大学院生)

局在プラズモンの位相緩和時間が比較的長く、放射ロスの小さいダークモードプラズモン、並びにダークモードとブライトモードの干渉によるFano効果を誘起する構造設計を導出するとともに、独自に超高速時間分解光電子顕微鏡を開発し、これらの近接場スペクトル、および超高速位相緩和過程を解明し、太陽光と強く結合可能な光アンテナを実現する。

2-3) 局在プラズモンと分子系との強結合状態を利用した光アンテナの創出 (担当: 三澤・上野・押切・上原・李・大学院生)

半導体量子ドットや電気双極子モーメントの比較的大きい分子であるシアニン色素のJ会合体分子などを金ナノ構造近傍に配置し、エキシトン-プラズモン強結合に基づくラビ振動を誘起して位相緩和時間の増大を図り、太陽光利用効率の高い光アンテナを創出する。

3) 全固体プラズモン太陽電池の構築

3-1) ワイドバンドギャップp型半導体を用いた全固体プラズモン太陽電池の創製 (担当: 三澤・押切・大学院生)

電解質水溶液の代わりにp型半導体である酸化ニッケルをホール移動層とした全固体プラズモン太陽電池を創製し、その光電変換特性を明らかにする。

4. 研究成果

1-1) 本光電変換系における電子源、正孔のトラップサイトの特定

水が電子源となり光電流が観測されていることを検証するために、酸素の同位体を含む水を用いて光電気化学測定を行い、発生する酸素をGC-MSにより定量した。図1に光電変換の内部量子収率(IPCE)に関する作用スペクトル、及び観測された光電流に対する酸素発生効率を示す。図から明らかなように波長500~700 nmの光照射に対してはほぼ化学量論的(84%以上)な酸素の発生を確認した。一方、800~1000 nmの近赤外光照射では酸素発生効率が減少したため、過酸化水素の生成に関して分析したところ、過酸化水素も同時に生成していることが明らかとなった。したがって、本系における光電流は、水の酸化分解に伴って生じることが検証された。また、

金ナノ微粒子が帯電するとプラズモン共鳴帯の波長シフトが観測されるが、分光電気化学測定の結果、スペクトル変化は観測されず、金ナノ微粒子が正孔のトラップサイトではないことが示された。したがって、局在プラズモン共鳴により形成した近接場が金の内殻電子、または伝導電子を励起して酸化チタンの伝導帯に電子注入し、生じた正孔は酸化チタンの表面準位にトラップされ、水を酸化することにより光電流と酸素・過酸化水素が発生すると考えられる。また、波長 1000 nm 程度の近赤外光によっても酸素生成が認められたのは、プラズモン共鳴に基づき局所的なナノ空間に高効率な電荷分離が誘起され、高密度な正孔に対して水分子からの多電子移動が生じ、それら近接する中間体がほとんど拡散することなく酸素分子を形成するためであると考えられる。そこで、in-situ 電気化学表面増強ラマン分光計測により電極/電解質界面の反応中間体の検証を行った。その結果、本系における水の酸化反応においては、通常金の電極を用いた水の電気化学的酸化反応による酸素発生とは異なり、酸素発生の前段階の過電圧の非常に小さな電位領域において観測される特徴的な表面吸着種が観測された。この結果は、本系における酸素発生は、高い活性化エネルギーを必要とする中間体の形成を経ずに、低エネルギーの近赤外光によって低い過電圧で効果的に多電子移動反応が駆動されることを強く示唆している。さらに、同様の電極系を用いて局在プラズモンにより正孔を生成させ、ピロールの電気化学的重合反応を誘起することにより正孔のトラップサイトを可視化することについて検討したところ、重合物が金と酸化チタン界面のナノ空間に生成することを見出した。これは、本系の正孔トラップサイトが金ナノ微粒子/酸化チタン基板/水の 3 相界面近傍に存在することを示している。これらの成果は、本系が太陽電池のみならず、多電子変換を必要とする人工光合成にも展開できることを示しており、本研究分野にブレークスルーをもたらす画期的な発見と言える。

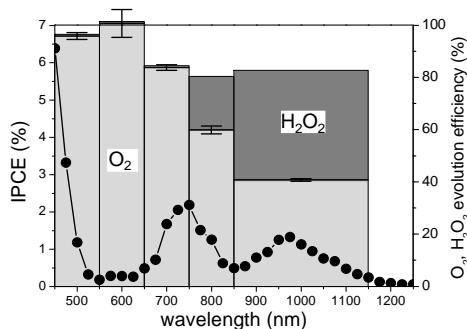


図1 光電変換効率 (ICPE) のアクションスペクトル (●) と酸素 (棒グラフ (薄灰色)) および過酸化水素発生効率 (棒グラフ (濃灰色))

1-2) 金ナノ構造 / 酸化チタン電極界面の構造解析

金ナノ構造 / 酸化チタン電極界面のナノ構造が光電流に与える影響を検討した。酸化チタン単結晶基板にスパッタにより膜厚 3nm

の金薄膜を形成し、窒素雰囲気下でアニールすると、酸化チタン表面に数原子分の還元層が形成する。800 °C でアニールした場合は金が還元層を貫通し (図 2(a)参照)、酸化チタン結晶表面に原子レベルで接合するが、アニール温度 150 °C の場合、金と酸化チタン結晶の間に還元層が残り直接接合できないことが高分解能 TEM と EELS 計測から明らかにした。重要な点は、図 2(b) に示すように 800 °C でアニールした場合は光電流と酸素発生が観測されるが、150 °C では観測されなかった点である。つまり、金ナノ構造が原子レベルで酸化チタン結晶表面に密着することが光電流発生の必要条件であり、局在プラズモンにより金から酸化チタン単結晶への電子移動が誘起されていることを証明する重要な結果となった。また、研究項目 1 にも関連するが、面方位によって酸化チタンの表面露出度が変化するチタン酸ストロンチウム基板上に金ナノ構造を作製し、光電変換効率の面方位依存性を検討した。その結果、100%酸化チタン表面が露出している 100 面が最も高い光電変換効率を示し、水の酸化反応が効率的に進行していることを見出した。また、ラマン分光計測からも 100 面において酸素発生に關与する中間体の量が最も多く観測され、酸化チタン表面が光電流発生に重要な役割を果たしていることを明らかにした。

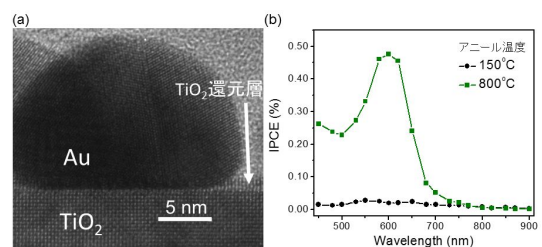


図 2 (a) 金ナノ構造 / 酸化チタン電極界面の TEM 像 (800 °C アニール) (b) 光電流のアクションスペクトル; 緑 800 °C、黒 150 °C

2-1) 電子ビーム (EB) 露光やスパッタリングの最適化による光アンテナ特性の向上

EB 露光条件やスパッタリング条件の最適化を図り、構造体同士がナノメートルで近接したナノギャップ金構造体や結晶性の高い金ナノ構造体を高精度かつ比較的広い面積 (数 cm 四方) に作製することに成功した。金ナノ構造体自身や、近傍分子からの発光・蛍光/ラマン散乱計測より、作製した光アンテナ構造が大きな光電場増強効果を示すことを見出した。他方、酸化チタン単結晶基板上に同様の構造を配置して光電流を測定したところ、若干の光電流の増大が観測されたが、大きな増強は得られなかった。そこで、局在プラズモンの緩和に關与する光散乱と光吸収のうち、光電子移動に關与しない光散乱の抑制を積極的に図ることが可能な光アンテナを探索した。本構想は研究項目 4 や 5 にも関連するが、アルミニウムナノ構造を用いた光アンテナにおいては、可視~近赤外波長域における局在プラズモンの緩和過程のおよそ 80% 以上が光吸収による緩和であり、光散乱による放射ロスが強く抑制されることを

見出した。

2-2) ダークモードプラズモン、および Fano 効果を誘起する光アンテナの設計・創出

超高速時間分解光電子顕微鏡 (TR-PEEM) を独自に開発し、金ナノブロック構造の放射口が小さいダークモードプラズモンの位相緩和時間を計測したところ 9 fs であり、ブライトモードの 5 fs に比べて長寿命であることを世界で初めて明らかにした (図 3 参照)。局在プラズモン励起がトリガーとなる光化学反応においては、電磁場を金属ナノ空間に閉じ込めることによる「空間的效果」と、位相緩和時間が影響を与える「時間的效果」が存在するが、本成果は、従来、実験的に計測することが困難で議論できなかった「時間的效果」を解明するために有効な特筆すべき成果である。さらに、ブライトモードとダークモードの周波数を一致させた金/誘電体/金の 3 層からなるナノギャップ積層構造を作製し、光学特性と光電場増強効果を明らかにした。本構造においては、2 つのモード間の干渉による Fano 効果が誘起され、反射スペクトルに光散乱が著しく抑制されることによって生ずる Fano ディップが観測された。また、TR-PEEM を用いて本構造の近接場スペクトル、及び位相緩和時間を測定したところ、本来禁制であるダークモードとブライトモード間の遷移が構造の歪みから許容となることを世界で初めて見出した。これは遠方場スペクトル計測のみでは得ることができない新しい知見であり、その学術的価値は極めて高い。このような研究代表者らの独自の発想に基づく本 3 次元構造による Fano 共鳴は、2 次元構造に比べ広い空間での電場増強が可能であると考えられ、優れた光アンテナに発展するものと期待される。

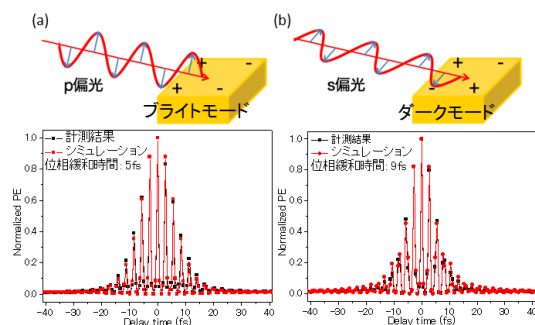


図 3 ブライト a)、およびダークモード b) プラズモンの自己相関関数、および位相緩和時間の数値解析

2-3) 局在プラズモンと分子系との強結合状態を利用した光アンテナの創出

局在プラズモンと双極子モーメントの大きい分子系との強結合を誘起するために、金属ナノ構造基板に真空蒸着によりポルフィリン系分子の J 会合体を形成させ、プラズモン共鳴波長を制御して分光測定を行った。消光スペクトルを測定したところ、プラズモン共鳴スペクトルの短波長側と長波長側にスペクトルが分裂した。そこで、分裂した 2 つのピーク周波数をプラズモン共鳴周波数に対してプロットしたところ、分散曲線は反交

差な振る舞いを示した。さらに、励起スペクトルを測定し強結合状態の吸収過程に関連するスペクトルの計測を試みたところ、強結合状態に基づくピークが観測され、強結合によって電子状態が変調されていることを明らかにした。また、サブピコ秒の過渡吸収分光計測システムを構築し、エキシトン - プラズモン強結合状態のダイナミクスを追跡したところ、プラズモン-エキシトン強結合状態がプラズモンの位相緩和時間を 1 桁程度遅くでき、金属ナノ微粒子/酸化チタン界面における光誘起電子移動反応に対して極めて有用となることも見出した。また、金ナノ構造体同士においても同様のプラズモンによるカップリング現象が観測された。金ナノロッドを基板上に平行に並べて、さらにその先端にロッドの側面を近接させた dolmen 型構造 (図 4(a)参照) の光アンテナ特性を検討した。本 dolmen 型構造の光電子強度の作用スペクトル (近接場スペクトル) は、図 4(b) に示すように消光スペクトルと同様に 2 つに分裂し、強い相互作用に基づいて、結合性と反結合性バンドからなるプラズモン混成状態が形成されることが明らかになった。これまで dolmen 型構造は、図 4(a) に示す上のロッドに誘起される双極子共鳴と下の 2 つのロッドに誘起される四重極子共鳴の干渉によって消光スペクトルに Fano ディップが観測されると説明されてきたが、本研究で近接場スペクトルを測定することによってはじめに、Fano 効果の寄与は極めて小さく、dolmen 構造自身がプラズモンの混成状態を形成することを明らかにした。さらに、このプラズモンの混成状態は、可視・近赤外の広い波長域において、Fano 効果よりも高い光電場増強効果を示すことを見出した。

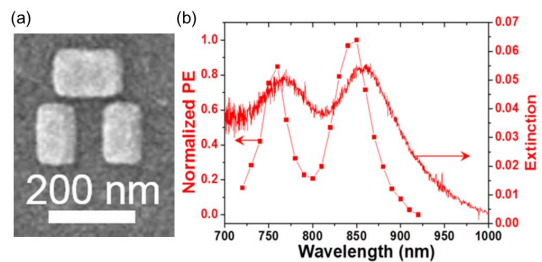


図 4 (a) dolmen 型金ナノ構造の SEM 像、(b) dolmen 構造の消光スペクトルと光電子強度 (PE) のアクションスペクトル

3-1) ワイドバンドギャップ p 型半導体を用いた全固体プラズモン太陽電池の創製

電解質水溶液の代わりにホール移動層としてワイドバンドギャップ p 型半導体である酸化ニッケルを用いて全固体プラズモン太陽電池を構築した。原子層堆積装置やパルスレーザーデポジション法により NiO 薄膜/酸化チタン薄膜、および NiO 薄膜/金ナノ構造/酸化チタン薄膜の構造を有する全固体薄膜太陽電池を作製し、特性を評価したところ、金ナノ構造を有する場合、可視波長域 (>410 nm) での光エネルギー変換効率が約 17 倍増強することが明らかになり、プラズモンによる増強効果を実証した。本薄膜太陽電池

は、全て無機物で構成されているため、長時間の照射でも安定な光電流が得られおり、また金ナノ構造のサイズにより応答波長を制御することも可能であることから世界初の安定な透明太陽電池へ発展すると期待される。

上記の研究結果から、本光アンテナを有する半導体電極系は、太陽電池としてだけではなく、人工光合成として具備することが求められる多電子変換機能も有する優れた光電極であることを明らかにした。すでに、酸化チタンよりも伝導帯が0.2 Vネガティブな電位に存在するチタン酸ストロンチウム基板上に光アンテナ構造として金ナノ構造を作製し、可視光を照射したところ、酸素だけではなく、同時に水素も化学量論的に発生することを明らかにした。興味深い点は、本系ではチタン酸ストロンチウムの表面に光アンテナ構造、裏面に白金触媒を配置すれば、基板の表面と裏面からそれぞれ酸素と水素を分離して取り出すことができることである。さらに、白金触媒の代わりにルテニウムを配置し、水蒸気を飽和した窒素ガスとプロトン源としての塩酸水溶液をルテニウムに接触させると、窒素の還元反応に基づきアンモニアの光合成も可能であることを明らかにした。さらに、触媒にジルコニウム/ジルコニアを用いると100%の選択性でアンモニアを合成することにも成功した。これらの研究成果は当初の目標を超える期待以上の成果であるといえる。

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65件)

- (1) K. Nakamura, T. Oshikiri, K. Ueno, Y. Wang, Y. Kamata, Y. Kotake, H. Misawa, "Properties of plasmon-induced photoelectric conversion on a TiO₂/NiO p-n junction with Au nanoparticles", *J. Phys. Chem. Lett.*, 7, 6, 1004-1009 (2016). 査読有 DOI:10.1021/acs.jpcl.6b00291
- (2) Q. Sun, H. Yu, K. Ueno, A. Kubo, Y. Matsuo, H. Misawa, "Dissecting the few-femtosecond dephasing time of dipole and quadrupole modes in gold nanoparticles using polarized photoemission electron microscopy", *ACS Nano*, 10, 3, 3835-3842 (2016). 査読有 DOI: 10.1021/acs.nano.6b00715
- (3) T. Oshikiri, K. Ueno, H. Misawa, "Selective dinitrogen conversion to ammonia using water and visible light via plasmon-induced charge separation", *Angew. Chem. Int. Ed.*, 55, 12, 3942-3946 (2016). 査読有 DOI:10.1002/anie.201511189
- (4) K. Ueno, T. Oshikiri, H. Misawa, "Plasmon-induced water splitting using metallic nanoparticle-loaded photocatalysts and photoelectrodes", *ChemPhysChem*, 17, 2, 199-215 (2015). 査読有 DOI: 10.1002/cphc.201500761
- (5) K. Ueno, T. Oshikiri, K. Murakoshi, H. Inoue, H. Misawa, "Plasmon-enhanced light energy conversion using gold nanostructured oxide semiconductor photoelectrodes", *Pure Appl. Chem.*, 87, 6, 547-555 (2015). 査読有 DOI:10.1515/pac-2014-1120
- (6) Y. Zhong, K. Ueno, Y. Mori, T. Oshikiri, H. Misawa, "Co-catalyst effects on hydrogen evolution in a plasmon-induced water-splitting system", *J. Phys. Chem. C*, 119, 8889-8897 (2015). 査読有 DOI:10.1021/acs.jpcc.5b01720
- (7) K. Ueno, T. Oshikiri, Y. Zhong, X. Shi, and H. Misawa, "Plasmon-induced artificial photosynthesis", *Interface Focus*, 5, 3, 20140082 (2015). 査読有 DOI: 10.1098/rsfs.2014.0082
- (8) B.-B. Xu, L. Wang, Z.-C. Ma, R. Zhang, Q. Chen, C. Lv, B. Han, X.-Z. Xiao, X.-L. Zhang, Y.-L. Zhang, K. Ueno, H. Misawa, H.-B. Sun, "Surface-plasmon-mediated programmable optical nanofabrication of an oriented silver nanoplate", *ACS Nano*, 8, 7, 6682-6692 (2014). 査読有 DOI:10.1021/nn5029345
- (9) T. Oshikiri, K. Ueno, H. Misawa, "Plasmon-induced ammonia synthesis through nitrogen photofixation with visible light irradiation", *Angew. Chem. Int. Ed.*, 53, 37, 9802-9805 (2014). 査読有 DOI:10.1002/anie.201404748
- (10) Y. Zhong, K. Ueno, Y. Mori, X. Shi, T. Oshikiri, K. Murakoshi, H. Inoue, H. Misawa, "Plasmon-assisted water splitting using two sides of the same SrTiO₃ single-crystal substrate: conversion of visible light to chemical energy (Cover Picture)", *Angew. Chem. Int. Ed.*, 53, 39, 10350-10354 (2014). 査読有 DOI:10.1002/anie.201404926
- (11) O. Lecarme, Q. Sun, K. Ueno, H. Misawa, "Robust and versatile light absorption at near infrared wavelengths by plasmonic aluminum nanorods", *ACS Photonics*, 1, 6, 538-546 (2014). 査読有 DOI:10.1021/ph500096q
- (12) A. Watanabe, Y. Kotake, Y. Kamata, A. Chikamatsu, K. Ueno, H. Misawa, T. Hasegawa, "Photoelectrochemical behavior of self-assembled Ag/Co plasmonic nanostructures capped with TiO₂", *J. Phys. Chem. Lett.*, 5, 1, 25-29 (2014). 査読有 DOI:10.1021/jz402320p
- (13) Q. Sun, K. Ueno, H. Yu, A. Kubo, Y. Matsuo, H. Misawa, "Direct imaging of the near field and dynamics of surface plasmon resonance on gold nanostructures using photoemission electron microscopy", *Light: Science & Applications*, 2, e118 (2013). 査読有 DOI:10.1038/lsa.2013.74
- (14) K. Ueno, H. Misawa, "Plasmon-enhanced photocurrent generation and water oxidation from visible to near-infrared wavelengths", *NPG Asia Mater.*, 5, e61 (2013). 査読有 DOI:10.1038/am.2013.42
- (15) X. Shi, K. Ueno, T. Oshikiri, H. Misawa, "Improvement of plasmon-enhanced photocurrent generation by interference of TiO₂ thin-film", *J. Phys. Chem. C*, 117, 47, 24733-24739 (2013). 査読有

- DOI: 10.1021/jp408472g
- (16) K. Ueno, H. Misawa, "Surface plasmon-enhanced photochemical reactions", *J. Photochem. Photobiol. C*, 15, 31-52 (2013). 査読有
DOI:10.1016/j.jphotochemrev.2013.04.001
- (17) T. Konishi, M. Kiguchi, M. Takase, F. Nagasawa, H. Nabika, K. Ikeda, K. Uosaki, K. Ueno, H. Misawa, K. Murakoshi, "Single molecule dynamics at a mechanically controllable break junction in solution at room temperature", *J. Am. Chem. Soc.*, 135, 3, 1009-1014 (2013). 査読有 DOI:10.1021/ja307821u
- (18) X. Shi, K. Ueno, N. Takabayashi, H. Misawa, "Plasmon-enhanced photocurrent generation and water oxidation with a gold nanoisland loaded titanium dioxide photoelectrode", *J. Phys. Chem. C*, 117, 6, 2494-2499 (2013). 査読有
DOI:10.1021/jp3064036
- (19) K. L. Lee, M. J. Chih, X. Shi, K. Ueno, H. Misawa, P. K. Wei, "Improving surface plasmon detection in gold nanostructures using a multi-polarization spectral integration method", *Adv. Mater.*, 24, 35, 253-259 (2012). 査読有
DOI:10.1002/adma.201202194
- (20) Y. Nishijima, K. Ueno, Y. Kotake, K. Murakoshi, H. Inoue, H. Misawa, "Near-infrared plasmon-assisted water oxidation", *J. Phys. Chem. Lett.*, 3, 10, 1248-1252 (2012). 査読有
DOI:10.1021/jz3003316
- (21) Y.-W. Hao, H.-Y. Wang, Y. Jiang, Q.-D. Chen, K. Ueno, W.-Q. Wang, H. Misawa, H.-B. Sun, "Hybrid states dynamics of gold nanorods/dye J-aggregate under strong coupling", *Angew. Chem. Int. Ed.*, 50, 34, 7824-7828 (2011). 査読有
DOI:10.1002/anie.201101699
- (22) S. Gao, K. Ueno, H. Misawa, "Plasmonic antenna effects on photochemical reactions", *Accounts Chem. Res.*, 44, 4, 251-260 (2011). 査読有
DOI: 10.1021/ar100117w

その他、総説・解説(査読なし): 8件

〔学会発表〕(計 189 件)

- (1) 三澤 弘明, "Photochemical reaction field created by metal nanostructures and its application to energy conversion systems" (CSJ Award Presentation), 日本化学会第 96 春季年会、2016 年 3 月 24 日、同志社大学京田辺キャンパス、京都府京田辺市
- (2) Hiroaki Misawa, "Plasmon-induced water splitting system" (Invited), The XXVth IUPAC Symposium on Photochemistry, 2014.7.15, Bordeaux, France
- (3) H. Misawa, "Towards nanostructure-enhanced photoenergy conversion in the plasmonic chemical reaction field" (Plenary), 26th International Conference on Photochemistry (ICP 2013), 2013.7.22, Leuven, Belgium

〔図書〕(計 11 件)

- (1) 三澤 弘明、上野 貢生、押切 友也、S&T 出版、近赤外・紫外線-波長変換と光吸収増大による太陽電池の高効率化技術、2016、130-141

〔産業財産権〕

出願状況(計 5 件)

名称: 光電変換装置及び光電変換装置の製造方法

発明者: 三澤弘明、上野貢生、小竹勇己

権利者: 北海道大学

種類: 特許

番号: 特許願 2013-042858 号

出願年月日: 平成 25 年 3 月 5 日

国内外の別: 国内

取得状況(計 8 件)

名称: 光電変換装置、光検出装置、及び光検出方法

発明者: 三澤弘明、西島喜明、上野貢生、村越 敬

権利者: 北海道大学

種類: 特許

番号: 特許第 5585966 号

登録年月日: 平成 26 年 8 月 1 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

- (1) 三澤弘明、平成 28 年 3 月 26 日、第 68 回日本化学会賞受賞「金属ナノ構造を用いた光反応場の創成とその光エネルギー変換への展開」
- (2) 三澤弘明、平成 28 年 3 月 7 日付、日本経済新聞、人工光合成技術でアンモニア製造
- (3) 三澤弘明、平成 27 年 4 月 15 日、平成 27 年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰 科学技術賞(研究部門)受賞「プラズモニク化学とその人工光合成への展開に関する研究」

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三澤 弘明 (MISAWA, Hiroaki)

北海道大学・電子科学研究所・教授

研究者番号: 3 0 2 5 3 2 3 0

(2) 研究分担者

村越 敬 (KURAKOSHI, Kei)

北海道大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号: 4 0 2 4 1 3 0 1

(3) 連携研究者

上野 貢生 (UENO, Kosei)

北海道大学・電子科学研究所・准教授

研究者番号: 0 0 4 3 1 3 4 6

村澤 尚樹 (MURAZAWA, Naoki)

北海道大学・電子科学研究所・助教

研究者番号: 4 0 4 5 5 6 2 1

押切 友也 (OSHIKIRI, Tomoya)

北海道大学・電子科学研究所・助教

研究者番号: 6 0 7 0 4 5 6 7

上原 日和 (UEHARA, Hiyori)

北海道大学・電子科学研究所・博士研究員

研究者番号: 2 0 7 2 5 3 2 9

(4) 研究協力者

オリビエ・ルカルメ (LECARME, Olivier)