

令和元年5月24日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2014～2018

課題番号：26220911

研究課題名(和文) ナノ空間を利用したシングルサイト光触媒の設計と応用

研究課題名(英文) Design and applications of single-site photocatalysts using nano-space

研究代表者

山下 弘巳 (YAMASHITA, HIROMI)

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：40200688

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 113,500,000円

研究成果の概要(和文)：ゼオライトやメソポーラスシリカ・金属有機構造体(MOF)などのナノ多孔体を利用し、細孔空間や骨格内に調製したシングルサイト光触媒(孤立四配位酸化物種、光機能性金属錯体)を基盤とし、高活性・高選択性を示す可視光応答型光触媒、プラズモニック金属ナノ触媒、超親水性超撥水性薄膜などの環境調和型機能材料を開発した。細孔構造と表面化学を制御することで、水素製造やワンポット反応の高効率化を可能にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ナノ多孔体に組込んだ「シングルサイト光触媒」の特異な局所構造と光触媒特性に注目し、従来の半導体光触媒と全く異なる励起構造と反応特性を見出す先駆的な成果を挙げた。さらに、シングルサイト光触媒を基盤として「ものづくり」に応用し、可視光応答性光触媒、プラズモニック金属ナノ触媒、超親水性超撥水性薄膜、などの機能性材料を開発し、多くの触媒開発(錯体化学を含む)へ有用な指針を示すことができた。

研究成果の概要(英文)：Based on single-site photocatalysts (isolated four-coordinated oxide species, photofunctional metal complex) prepared in pore space and framework using nanoporous materials such as zeolite, mesoporous silica and metal organic frameworks (MOF). We have developed environmentally-friendly functional materials such as visible light responsive photocatalysts with high activity and high selectivity, plasmonic metal nanocatalysts, and superhydrophilic superhydrophobic thin films. By controlling the pore structure and surface chemistry, we have made it possible to improve the efficiency of hydrogen production and one-pot reaction.

研究分野：工学、触媒・資源化学プロセス

キーワード：シングルサイト光触媒 ナノ多孔体 ナノ金属 プラズモン 水素製造

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、光触媒の研究および実用化は活発である。その主流は、酸化チタンに代表される半導体光触媒である。半導体光触媒は照射下で数多くの励起電子や正孔を作り出すことで高い光触媒活性を示し、水分解による水素製造、汚染物の完全酸化分解が可能である。一方、ゼオライトやメソポーラスシリカの主成分はシリカであるが、構成元素として少量のTi、V、Cr、Mo、Wなどの金属種を合成段階で添加すると、これら金属原子は孤立高分散状態でナノ多孔性材料の骨格内に組み込まれる。申請者は、シリカ基盤に孤立高分散状態で担持され半導体光触媒と全く異なった光励起状態と反応特性を示す光触媒活性種に着目し、「シングルサイト光触媒」と命名して、その調製、構造解析、光触媒特性の評価を行っている。この孤立活性種は紫外照射下で、半導体光触媒とは全く異なった励起状態、電荷分離状態を作りだし、極めてユニークな光触媒特性を示すことから、シングルサイト光触媒を利用することで新しい環境調和型機能材料の開発と応用を行うことにした。

### 2. 研究の目的

ナノ多孔体に組み込んだシングルサイト光触媒の機能・特性の評価、およびナノ多孔材料の構造・形態制御、表面修飾や他の機能性材料との複合化を通して、シングルサイト光触媒を利用する環境調和型機能材料の開発と応用を行った。ナノ多孔材料とシングルサイト光触媒の特徴を融合利用することで、高選択性光触媒、可視光応答性光触媒、金属ナノ触媒、プラズモニック触媒、超親水性超撥水性薄膜、コア・シェル型触媒、ワンポット反応触媒、光機能性金属錯体などの機能性材料の開発を目指した。

### 3. 研究の方法

本研究では、ナノ多孔体とシングルサイト光触媒の特徴を融合することで、以下のように環境調和型機能材料の開発と応用を目指した。研究代表者・研究分担者が既に有する多くの技術と実績を基盤として、連携しながら研究を実施した。研究代表者の山下は、研究全体を総括し、研究分担者は以下のように各課題を担当した。研究の円滑な遂行のため、関連する研究者(学生を含む)が集まり、研究の進捗状況や内外の研究動向、新しいアイデアなどについて議論する機会を頻繁に持った。研究方法と役割分担を以下に示す。

(1) シングルサイト光触媒の特異反応性の評価と可視光応答性の付与【亀川、山下】ナノ多孔体にTi、VやCrを細孔骨格内に組み込むことで、各金属原子が高分散四配位構造をとるシングルサイト光触媒が調製できる。光析出法や逐次的な化学蒸着(CVD)法を用いることで、高い選択性を示すシングルサイト光触媒をハイブリッド調製し、可視光応答性の付与を検討した。

(2) シングルサイト光触媒を組み込んだ三次元ナノ細孔構造とコア・シェル構造の設計【亀川、桑原、山下】二種類の鋳型材料(自己組織化した球状高分子ポリメタクリル酸メチル(PMMA)コロイド結晶と界面活性剤)を鋳型に用いて細孔構造の制御を試み、ナノ多孔体にマクロ孔とメソ孔を併せ持つ三次元細孔構造を設計し、シングルサイト光触媒の高機能化を試みた。

(3) 疎水性多孔体の創製による光触媒の高効率化【桑原、山下】フッ素、アパタイト、グラフェン修飾で表面疎水化・親油化したナノ細孔と光触媒を組み合わすことで、希薄な有機物を吸着濃縮することにより効率の良い光触媒系の開発を試みた。

(4) シングルサイト光触媒を利用する金属ナノ触媒・プラズモニック触媒の調製【森、山下】紫外光やマイクロ波照射で活性化したTi種と金属前駆体との相互作用を通し、シングルサイト光触媒を利用した金属ナノ粒子(Ag, Pd)や合金ナノ粒子を調製した。細孔内に形状・サイズ制御したナノ粒子を調製し、表面プラズモン共鳴を利用した可視光応答型光触媒による水素貯蔵分子からの水素製造を検討した。

(5) コア・シェル構造触媒設計による高効率ワンポット触媒反応系の設計【桑原、森、山下】コア・シェル型やヨーク・シェル型触媒構造を構築し、調製した種々の金属・合金微粒子触媒上における水素・酸素からの過酸化水素合成、シングルサイト光触媒上における過酸化水素を酸化剤とした逐次的な有機物の選択酸化反応を可能とするワンポット触媒反応系を設計した。

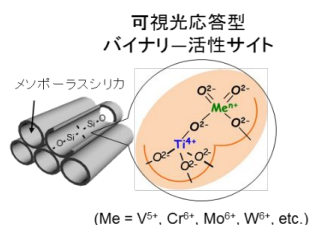
(6) シングルサイト光触媒を組み込んだ超親水性・超撥水性多孔透明薄膜の調製【亀川、山下】スピニング法などを利用して、シングルサイト光触媒を含有したメソポーラスシリカ透明薄膜を作成し表面親水性を評価した。シングルサイト光触媒含有薄膜上にポリマーやカーボンナノチューブをコートすることで、超撥水性表面の構築も目指した。

(7) ナノ細孔空間で機能する金属錯体シングルサイト光触媒の設計【森、山下】光応答性金属錯体をナノ多孔性材料へ固定化し金属錯体シングルサイト光触媒を設計した。光励起過程は、励起種を取り囲む環境場に支配されるため、ナノ細孔の形状・サイズを改良することで、水からの水素生成反応に有効な金属錯体シングルサイト光触媒の開発を試みた。

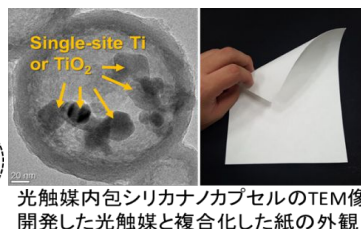
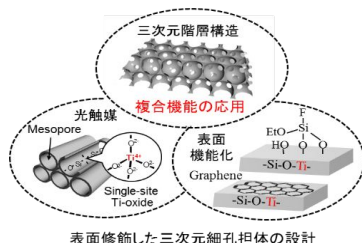
### 4. 研究成果

(1) シングルサイト光触媒の特異反応性の評価と可視光応答性の付与：ゼオライトやメソポーラスシリカなどのナノ多孔体の細孔骨格に金属種(Ti、V、Cr、Mo種など)を組み込み調製できるシングルサイト光触媒(孤立四配位酸化物種)が、NO分解、オレフィン部分酸化、エチレン重合反応などに高活性高選択性を示すことを見出し、新規調製法や改質法の開発を行った。特に可視光応答性の付与について重点的に検討した。独創技術である光析出法や逐次的な化学蒸

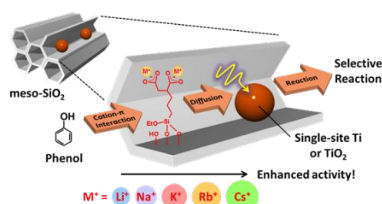
着(CVD)法を用いることで、シングルサイト光触媒活性種を相互作用させたバイナリーシステムの構築が可能となった。ナノ多孔性材料の調製時に、多核錯体を金属前駆体として用いてTi-V、Ti-Cr ダイマー種を形成させる手法や、予め調製した多孔性材料を、Ti、V、Cr 種などの金属塩化物やカルボニルの蒸気で順次処理する手法により、シングルサイトTi 種とVやCr 種を複合化した可視光応答型活性種を構築できた。シングルサイト光触媒の設計と応用に関する成果をまとめ総説に発表した (Chem. Soc. Rev., 47, 8072 (2018), Cover picture に採用)。



(2) シングルサイト光触媒を組み込んだ三次元ナノ細孔構造とコア・シェル構造の設計： ナノ空間構造を制御した多孔質材料を用いてシングルサイト光触媒を設計することで、その高機能化に取り組んだ。自己組織化した球状高分子コロイド結晶と界面活性剤を併用することで、マクロ細孔とメソ細孔で構成される三次元ナノ構造体が得られた。Ti や Cr などの孤立金属を組み込みシングルサイト光触媒として機能させることで、特異空間を光触媒反応場として利用できた。細孔内表面を薄層炭素(グラフェン)コーティングやシランカップリング剤で修飾することで、疎水的空間場を構築し、オレフィン部分酸化やエチレン重合における光触媒活性と選択性の向上を可能にした。さらに、酸化チタン種を内包した中空シリカ構造体を設計・調製した。中空シリカは内部にマクロ中空空間を、シリカシェル部にメソ細孔を有しており、中空空間に触媒活性種を内包させることで、空間的に高次に規制された三次元触媒環境場を構築できた。酸化チタン種を内包した中空シリカ構造体は、酸化チタン本来の光触媒分解能を発揮し、大気中に低濃度で存在する VOC ガス(アルデヒドなど)をより効率的に分解除去できた (ChemCatChem, 8, 2781 (2016))。シリカシェルが保護壁として働き酸化チタンと有機支持体との接触を防ぐことで、基盤の光劣化を抑制できた (Langmuir, 33, 288 (2017))。開発した光触媒を利用すれば、脱臭・防汚効果を有する壁紙、ふすま、障子などの紙製品が製造できる。

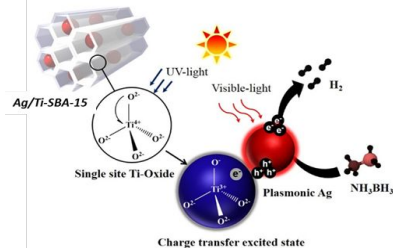


(3) 疎水性多孔体の創製による光触媒の高効率化： 疎水的表面を持つ多孔体は水中や空気中の有機化合物を吸着濃縮する性質を示す。シングルサイト光触媒と融合することで、希薄な有機物を吸着濃縮することにより光触媒活性の向上が期待できる。シリケート表面を疎水的に改質する手法として、反応物の拡散性や耐熱性を考慮し、無機官能基としてフッ素部位を有するトリエトキシフルオロシラン (TEFS; (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>O)<sub>3</sub>SiF) を用いた。水/トルエン吸着試験や細孔特性評価により、TEFS を用いて改質したシリカ担体に固定化された酸化チタン光触媒では光触媒近傍への有機物の吸着濃縮能が高められ、効率の良い光触媒反応が実現できることを体系的に示した (J. Jpn. Petrol. Inst., 59, 165 (2016), ChemSusChem, 7, 1528 (2014))。特定の基質のみを選択的に吸着濃縮・反応する場合には、基質と固体表面間に働く分子的相互作用を利用できると着想した。不飽和炭化水素化合物の電子とアルカリ金属カチオンの間には、強いカチオン-π相互作用が働く。二酸化炭素とアミノ基含有ポリマー間では静電的相互作用が発生する。これら相互作用を設計した多孔体・光触媒系は、特定のターゲット基質のみを選択的に取り込み反応させるナノ反応容器として機能できることを明らかにした。



カチオン-π相互作用を利用する  
基質選択的濃縮と光触媒反応

(4) シングルサイト光触媒を利用する金属ナノ触媒・プラズモニック触媒の調製： メソポーラスシリカ中の孤立Ti サイトの近傍にAg ナノ粒子を固定化した触媒が、孤立Ti サイト由来の紫外光吸収能、プラズモニックAg ナノ粒子由来の可視光吸収能を併せもった幅広い光を吸収し、さらに異種金属間での光誘起相互作用により、水素貯蔵分子のアンモニアボランからの水素生成反応において触媒活性が向上するという極めて興味深い現象を見出した (Chem. - Eur. J., 23, 3616 (2017), Cover picture に採用)。シングルサイト光触媒として汎用元素 Cr, V, Mo, W の利用、プラズモニックナノ粒子として Cu, Au, PdAg 合金の利用、多孔体に MOF の利用により、更なる高活性化に成功している。 (JACS., 138, 380 (2017); JACS Spotlight に採用, ACS Energy Lett., 2, 1 (2017); JACS., 140, 9203 (2018), Cover picture に採用)。



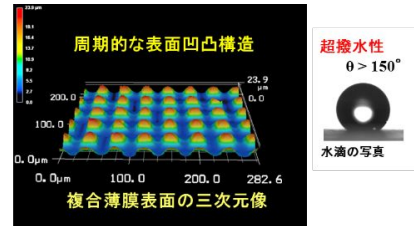
プラズモニックAg触媒とシングル  
サイトTi光触媒のハイブリッド

(5) コア・シェル構造触媒設計による高効率ワンポット触媒反応系の設計： Pd 触媒を用いた過酸化水素直接合成とシングルサイト Ti 触媒を用いた選択酸化反応の組み合わせにより、Pd 触媒上で生成した過酸化水素を同一容器内で逐次的に酸化反応に利用する高効率ワンポット触媒反応系の設計を行った。従来法では、Pd 触媒をチタノシリケート触媒に担持したものが報告されてきたが、生成した過酸化水素が効率よく Ti サイトに供給されず、低活性の原因となっていた。これに対し本研究では、O/W エマルジョンを利用した簡便な調製法によりヨーク・シェル型構造を有する Pd ナノ粒子内包シングルサイト Ti 含有中空シリカ触媒を開発した（特願 2015-029778、特開 2016-150880）。開発したヨークシェル触媒は、スルフィドのワンポット酸化反応において優れた活性を示し、中間体として生成する過酸化水素の利用効率 80%を超えることが分かった。この過酸化水素利用効率は従来の担持 Pd 触媒(30%)や以前に報告したコア・シェル型構造触媒(60%)の効率を凌駕する (Chem. Eur. J., 23, 380 (2017))。開発したヨーク・シェル型構造触媒は、オレフィンのエポキシ化反応にも高活性を示した (J. Mat. Chem. A, 7, 7221 (2019))。



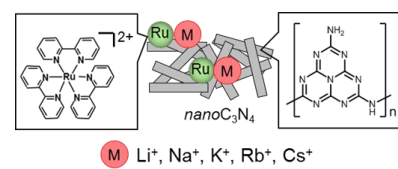
Pdナノ粒子内包シングルサイトTi含有中空シリカ触媒とワンポット反応

(6) シングルサイト光触媒を組み込んだ超撥水性・超撥水性多孔透明薄膜の調製： シングルサイト光触媒(Ti、V、Cr、Mo、W種)を含有したメソ多孔性シリカ透明薄膜は、光触媒反応性に加え、暗下でも水滴が濡れ広がる表面親水性を示し、紫外光照射後はさらに光誘起超親水性を発現することから、界面光機能性材料としての可能性を検討した。また、光触媒としての機能を巧みに用い、加熱・焼成プロセスを経ずに耐熱性に乏しいプラスチックなどの基材へのコーティングにも展開し、優れた親水性の付与に成功している。水滴を弾く表面撥水性についても検討し、ポリマーやカーボンナノチューブを表面にコートすることで、水滴の接触角 150°を超える超撥水性表面の構築にも成功している (Sci. Reports, 7, 13628 (2018))。



自浄作用を有する超撥水性透明コーティング

(7) ナノ細孔空間で機能する金属錯体シングルサイト光触媒の設計： 規則性ナノ細孔空間内に固定化した光応答性金属錯体分子が、液相や気相の均一分散系とは異なる光化学的性質を示すことを体系化し報告した (Chem. - Eur. J., 22, 11122 (2016) Minireview)。さらに、多孔担体の特性を積極的に利用する目的で導電性や化学耐久性のある炭素・ポリマー担体の利用を検討した。層状窒化炭素 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> の酸 - アルカリ処理で調製した多孔性窒化炭素 nanoC<sub>3</sub>N<sub>4</sub> のナノ細孔空間を反応場として利用すれば、可視光応答性 Ru 錯体を固定化した新規光触媒が、水からの水素製造に高活性を示すことを見出した (PCCP, 17, 24086 (2015))。担体表面に修飾されたアルカリ金属がカチオン- 相互作用により Ru 錯体の光化学特性を改質できることを明らかにした (Chem. - Asian J., 13, 1348 (2018))。



光応答性金属錯体と多孔性窒化炭素 nanoC<sub>3</sub>N<sub>4</sub> のハイブリッド

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 131 件)

Y. Isaka, Y. Kawase, Y. Kuwahara, K. Mori, H. Yamashita, “Two-Phase System Utilizing Hydrophobic Metal-Organic Frameworks for Photocatalytic Synthesis of Hydrogen Peroxide”, *Angewandte Chemie International Edition*, 58, 5402-5406 (2019). (査読有)

DOI: 10.1002/anie.201901961

P. Verma, Y. Kuwahara, K. Mori, H. Yamashita, “Design of Silver-Based Controlled Nanostructures for Plasmonic Catalysis under Visible Light Irradiation”, *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 92, 19-29 (2019). [Account/Review for Materials Innovation] (査読有)

DOI: 10.1246/bcsj.20180244

Y. Kuwahara, R. Matsumura, H. Yamashita, “Hollow titanasilicate nanospheres encapsulating PdAu alloy nanoparticles as reusable high-performance catalysts for H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-mediated one-pot oxidation reaction”, *Journal of Materials Chemistry A*, 7, 7221-7231 (2019). (査読有)

DOI: 10.1039/C9TA01481K

Y. Kuwahara, Y. Yoshimura, K. Haematsu, H. Yamashita, “Mild Deoxygenation of Sulfoxides over Plasmonic Molybdenum Oxide Hybrid with Dramatic Activity Enhancement under Visible Light”, *Journal of the American Chemical Society*, 140, 9203-9210 (2018). [Front Cover] (査読有)

DOI: 10.1021/jacs.8b04711

K. Mori, T. Sano, H. Kobayashi, H. Yamashita, “Surface Engineering of a Supported PdAg

Catalyst for Hydrogenation of CO<sub>2</sub> to Formic Acid: Elucidating the Active Pd Atoms in Alloy Nanoparticles", *Journal of the American Chemical Society*, 140, 8902-8909 (2018). (査読有)

DOI: 10.1021/jacs.8b04852

H. Yamashita, K. Mori, Y. Kuwahara, T. Kamegawa, M. Wen, P. Verma, M. Che, "Single-site and Nano-confined Photocatalysts Designed in Porous Materials for Environmental Uses and Solar Fuels", *Chemical Society Reviews*, 47, 8072-8096 (2018). [Front Cover] (査読有)

DOI: 10.1039/C8CS00341F

M. Wen, K. Mori, Y. Kuwahara, T. An, H. Yamashita, "Design of Single-Site Photocatalyst using Metal-Organic Framework as Matrix", *Chemistry - An Asian Journal*, 13, 1767-1779 (2018). (査読有)

DOI: 10.1002/asia.201800444

T. Kamegawa, K. Irikawa, H. Yamashita, "Multifunctional Surface Designed by Nanocomposite Coating of Polytetrafluoroethylene and TiO<sub>2</sub> Photocatalyst: Self-cleaning and Superhydrophobicity", *Scientific Reports*, 7, 13628 (2018). (査読有)

DOI: 10.1038/s41598-017-14058-9

Y. Kuwahara, Y. Fujie, H. Yamashita, "Poly(ethyleneimine)-tethered Ir Complex Catalyst Immobilized in Titanate Nanotubes for Hydrogenation of CO<sub>2</sub> to Formic Acid", *ChemCatChem*, 9, 1906-1914 (2017). [Front Cover] (査読有)

DOI: 10.1002/cctc.201700508

K. Mori, T. Taga, H. Yamashita, "Single-Atom Ru Catalyst Bound on a Layered Double Hydroxide for Hydrogenation of CO<sub>2</sub> to Formic Acid", *ACS Catalysis*, 7, 3147-3151 (2017). (査読有)

DOI: 10.1021/acscatal.7b00312

H. Yin, Y. Kuwahara, H. Cheng, M. Wen, K. Mori, H. Yamashita, "High Surface Area Plasmonic MoO<sub>3-x</sub>: Rational Synthesis and Enhanced Ammonia Borane Dehydrogenation Activity", *Journal of Materials Chemistry A*, 5, 8946-8953 (2017). [Front Cover] (査読有)

DOI: 10.1039/C7TA 01217A

K. Mori, S. Masuda, H. Tanaka, K. Yoshizawa, M. Che, H. Yamashita, "Phenylamine-functionalized Mesoporous Silica Supported PdAg Nanoparticle: A Dual Heterogeneous Catalyst for the Formic Acid/CO<sub>2</sub>-mediated Chemical Hydrogen Delivery/Storage", *Chemical Communications*, 53, 4577-4580 (2017). [Front Cover] (査読有)

DOI: 10.1039/C7CC00864C

M. Wen, K. Mori, Y. Kuwahara, H. Yamashita\*, "Plasmonic Au@Pd Nanoparticles Supported on a Basic Metal-Organic Framework: Synergic Boosting of H<sub>2</sub> Production from Formic Acid", *ACS Energy Letters*, 2, 1-7 (2017). (査読有)

DOI: 10.1021/acsenergylett.6b00558

K. Mori, H. Yamashita, "Metal Complexes Supported on Solid Matrices for Visible-Light-Driven Molecular Transformations", *Chemistry - A European Journal*, 22, 11122-11137 (2016). [Minireviews] (査読有)

DOI: 10.1002/chem.201600441

H. Cheng, M. Wen, X. Ma, Y. Kuwahara, K. Mori, Y. Dai, B. Huang\*, H. Yamashita, "Hydrogen Doped Metal Oxide Semiconductors with Exceptional and Tunable Localized Surface Plasmon Resonances", *Journal of the American Chemical Society*, 138, 9316-9324 (2016). [Featured in JACS Spotlights] (査読有)

DOI: 10.1021/jacs.6b05396

H. Cheng, Y. Kuwahara, K. Mori, H. Yamashita, "Plasmonic Molybdenum Oxide Hybrid with Reversible Tunability for Visible-Light-Enhanced Catalytic Reactions", *Advanced Materials*, 27, 4616-4621 (2015). (査読有)

DOI: 10.1002/adma.201501172

M. Wen, Y. Kuwahara, K. Mori, H. Yamashita, "Synthesis of Ce Ions Doped Metal-Organic Framework for Promoting Catalytic H<sub>2</sub> Production from Ammonia Borane under Visible Light Irradiation", *Journal of Material Chemistry A*, 3, 14134-14141 (2015). [Front Cover] (査読有)

DOI: 10.1039/C5TA02320C

M. Wen, K. Mori, T. Kamegawa, H. Yamashita, "Amine-Functionalized MIL-101(Cr) with Imbedded Platinum Nanoparticles as a Durable Photocatalyst for Hydrogen Production from Water", *Chemical Communications*, 50, 11645-11648 (2014). [Front Cover] (査読有)

DOI: 10.1039/C4CC02994A

H. Cheng, T. Kamegawa, K. Mori, H. Yamashita, "Surfactant-Free Nonaqueous Synthesis

of Plasmonic Molybdenum Oxide Nanosheets with Enhanced Catalytic Activity for Hydrogen Generation from Ammonia Borane under Visible Light”, *Angewandte Chemie International Edition*, 53, 2910-2914 (2014). (査読有)

DOI: 10.1002/anie.201309759

X. Qian, K. Fuku, Y. Kuwahara, T. Kamegawa, K. Mori, H. Yamashita, “Design and Functionalization of Photocatalytic System within Mesoporous Silica”, *ChemSusChem*, 7, 1528-1536 (2014). [Front Cover] (査読有)

DOI: 10.1002/cssc.20140111

[学会発表](計 538 件)

H. Yamashita, “Design and Applications of Photocatalysts Using Nanoporous Materials”, The 3rd International Conference on Environmental Catalysis (Tianjin), 23 Sept. (2018). [Plenary Lecture]

H. Yamashita, “Design of Photocatalysts Using Nanoporous Materials”, The 3rd International Symposium on Energy and Environmental Photocatalytic Materials (Krakov), 17 May (2018). [Plenary Lecture]

山下弘巳、「ナノ空間を利用するシングルサイト光触媒の設計と応用」、錯体化学会第 66 回討論会(福岡)9月11日(2016)。[受賞講演]

[図書](計 5 件)

田中庸裕、山下弘巳、森浩亮他、講談社サイエンティフィク、「触媒化学 - 基礎から応用まで - 」(2017)、276。

Hiromi Yamashita, Hexing Li, (Ed), Springer, “Nanostructured Photocatalysts: Advanced Functional Materials: Nanostructure Science and Technology”, (2016) 544.

[その他]

ホームページ公開

1. 基盤研究(S)「ナノ空間を利用したシングルサイト光触媒の設計と応用」ホームページ  
<http://www.mat.eng.osaka-u.ac.jp/msp1/KibanS.html>

2. 「大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻材料理化学領域」ホームページ  
<http://www.mat.eng.osaka-u.ac.jp/msp1/MSP1-HomeJ.htm>

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：森 浩亮

ローマ字氏名：(MORI, Kohsuke)

所属研究機関名：大阪大学

部局名：大学院工学研究科

職名：准教授

研究者番号(8桁)：90423087

研究分担者氏名：桑原 泰隆

ローマ字氏名：(KUWAHARA, Yasutaka)

所属研究機関名：大阪大学

部局名：大学院工学研究科

職名：助教

研究者番号(8桁)：40635330

研究分担者氏名：亀川 孝

ローマ字氏名：(KAMEGAWA, Takashi)

所属研究機関名：大阪府立大学

部局名：研究推進機構

職名：講師

研究者番号(8桁)：50525136