

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 10 月 19 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289289

研究課題名(和文) 可視光下で駆動する有機-無機複合デバイスの構築と高難度光還元反応

研究課題名(英文) Development of visible-light responsive organic-inorganic hybrid catalysts for selective reduction

研究代表者

森 浩亮 (Mori, Kohsuke)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90423087

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、金属錯体と各種無機材料を階層的に集積し、太陽光の捕捉、高エネルギー電子の生成、および高難度還元反応という一連の光化学反応を駆動する有機-無機ハイブリッド光触媒の開発を目的とした。対象とする反応は、水からの水素生成や、二酸化炭素からのCOなどの還元反応であり、高難度であるが実用性の高いエネルギー貯蓄型のアップヒル反応である。さらに、溶液中の金属錯体とは異なる特異な物理化学的特性を示した。この特性は、制限された細孔空間による立体的、電子的影響だけでなく、触媒担体表面の官能基などのにも影響している。

研究成果の概要(英文)：In this study, hybrid photocatalysts that enable efficient Sun-light absorption, formation of hot electrons with high reduction energy, and reduction reaction has been developed. Target reactions are selective photochemical molecular transformations including H₂ evolution from water and CO₂ reduction to CO. In comparison with inherent properties of complexes in solution, such hybrid materials exhibit unexpected physicochemical properties that are induced by not only both steric- and electrostatic effect within the restricted void spaces, but also the nature of the surface functional groups on the host materials.

研究分野：触媒化学

キーワード：光触媒 金属錯体 還元反応 ハイブリッド

1. 研究開始当初の背景

将来のクリーンエネルギー生産システム構築に資する極めてポテンシャルの高い反応として、クリーンで無尽蔵な太陽光と光触媒を利用した水の分解による水素 (H_2) 製造がある。一方で、光触媒反応を用いて常温・常圧下で二酸化炭素 (CO_2) の還元により CO 、ギ酸、メタノールを合成することも可能である。特に日本は世界に先駆けた研究開発がなされているが、主流は酸化チタン (TiO_2) に代表される半導体光触媒のバンドギャップエンジニアリングである。また、他の太陽光起源の水素製造システムと比較して見ても、エネルギー効率が 1~2 桁低く、基礎研究の域を脱していないのが現状である。

一方で、金属錯体・有機触媒をモチーフとした研究は、反応機構が比較的明確であり、また分子軌道計算に基づいた配位子設計や分子設計といったモレキュラーエンジニアリングにより、より精密な触媒デザインが可能であるといった特徴をもつ。水素生成反応として、 $Ru(bpy)_3^{2+}$ を光捕捉サイト、Pt コロイドを水素生成触媒、メチルビオロゲン (MV^{2+}) を電子伝達剤、EDTA を電子供与剤とした溶液系での 3 成分電子移動系が古くから知られているが、 MV^{2+} が高価で毒性が高い、また反応が煩雑で操作性に劣るといった理由などから実用化には適していない。最近では、光捕捉サイトの Ru 錯体と還元触媒サイトの Pt 錯体を連結させ、電子伝達剤非存在下、分子内での電子移動により効率的に光触媒反応が進行するシンプルな 2 成分系システムも構築されているが、操作性の劣る均一系での研究に留まっており、実用化には適していない。以上に点から、半導体光触媒に比べて研究が遅れているのが現状である。

2. 研究の目的

金属錯体を利用した高難度還元反応を達成させるためには、光捕捉サイトから還元触媒サイトへの電子移動が重要な役割をしており、これを効率よく進行させることが、高活性触媒設計の鍵となっている。

本研究では、金属錯体と電気伝導性無機材料を階層的に集積し、太陽光の捕捉、高エネルギー電子の生成、相界面での不可逆的な電子移動、および高難度還元反応という一連の光化学反応を駆動する有機・無機ハイブリッド光触媒の開発を目的とする。対象とする反応は、水からの水素生成や、二酸化炭素からの CO 、ギ酸、メタノール合成などの還元反応であり、高難度であるが実用性の高いエネルギー貯蓄型のアップヒル反応である。さらに、表面プラズモン増強電場を利用した反応高効率化、および放射光 in situ XAFS を駆使した活性点の局所構造解析・反応素過程の解明も同時に行い、材料の探索・新規触媒設計に多面的なアプローチをする。

本研究は、電気伝導性無機材料に光捕捉ユニットと還元触媒サイトを、それぞれの機能を最大限に生かせるように集積することで、電子を高効率かつ、不可逆的に輸送できる電子移動相界面をもった有機・無機ハイブリッド型光触媒を創成できるのではないかとこの考えに基づいている。さらに、機械的強度、耐久性に優れ、かつ精密制御可能なマイクロ分子反応場を提供する層状化合物や多孔質材料、カーボン材料を利用することで、操作性、安全性、経済性を兼ね備えた真に実用的な光触媒プロセスが構築できると考える。

3. 研究の方法

本申請課題では、可視光で駆動する光応答性金属錯体をモチーフとし、高難度還元反応を可能とする、全く新しい機能をもった次世代光触媒開発の斬新で画期的な方法論を提供することを目的とする。具体的には、以下の 3 つのサブテーマを行い多面的にアプローチする。

- 1) 有機・無機ハイブリッド型光触媒デバイスの構築
- 2) 表面プラズモン増強電場を利用した反応高効率化
- 3) 放射光 in situ XAFS を駆使した活性点の局所構造解析・反応素過程の解明

1) では、金属錯体と電気伝導性無機材料を階層的に集積し、その機能を高度に連携させた有機・無機ハイブリッド光触媒を開発するだけでなく、表面プラズモン増強電場を利用した反応高効率化の面からもアプローチする。また、このマイクロ・マクロ的な観点からの構造・物性評価と合わせてでは、実験的および計算科学的検討により、反応機構の解明にも取り組み、更なる高活性触媒の設計指針へとフィードバックする。

本研究は、光捕捉サイトや還元触媒サイトである金属錯体と電気伝導性セラミック材料を、それぞれの機能を最大限に生かせるように原子・分子レベルで集積することで、電子を高効率かつ、不可逆的に輸送できる相界面をもった光触媒を創成する。具体的には、電気伝導性層状化合物への金属錯体の階層的固定化を行う。さらに、これまで独自に発展させてきた、表面プラズモン増強電場を利用した反応高効率化、および放射光 in situ XAFS を駆使したナノレベルの構造解析という触媒設計の概念・知見・技術を融合し、光触媒の高次制御により活性の大幅増大を狙う。研究期間内での目標は、光触媒活性を一桁向上させることである。

4. 研究成果

イオン交換樹脂固定化金属錯体による光触媒の水素生成反応

本研究では、光吸収触媒として $[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{bpy})]^+$ を、水素生成触媒として $[\text{Rh}(\text{bpy})_3]^{3+}$ をイオン交換樹脂にイオン交換的に固定化することで、電子伝達剤非存在下においても高活性で再利用可能な水素生成光触媒となることを見出した(Figure 1)。

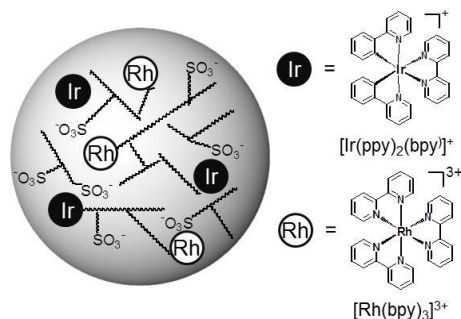


Figure 1. Schematic illustration of the Ir and Rh complexes-exchanged acidic resin.

光触媒は所定量の $[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{bpy})]^+$ 、 $[\text{Rh}(\text{bpy})_3]^{3+}$ およびイオン交換樹脂を水、アセトニトリル 9:1 溶液中で撹拌することで調製した。水素生成反応はパイレックスガラス製の試験管を用い、所定量の光触媒、水、アセトニトリル、犠牲還元剤としてのトリエチルアミンを入れ、Ar で試験管内を置換した後行った。光源には 500 W Xe ランプを用いてカットフィルター ($\lambda > 420 \text{ nm}$) を使用した。生成物の定量にはガスクロマトグラフを用いた。

XAFS スペクトル及び UV-vis スペクトルから、両錯体は局所構造を維持したままイオン交換樹脂のマトリックス内に固定化できていることを確認した。また光吸収触媒の Ir 錯体の $^3\text{MLCT}$ 由来の発光強度が水素生成触媒 Rh 錯体の量が増加に伴い減少したことから、Ir 錯体から Rh 錯体へ電子移動が起こっていると考えられる(Figure 2)。

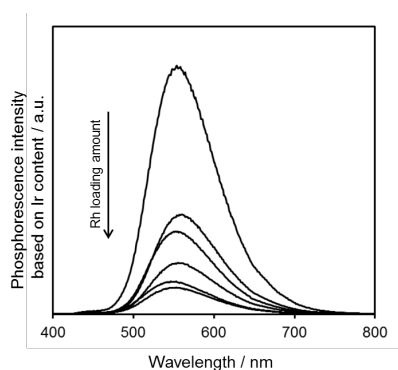


Figure 2 Photoluminescence spectra of Ir-Rh/resin with different Ir/Rh molar ratios at room temperature ($\lambda_{\text{ex}} = 370 \text{ nm}$).

光触媒の水素生成活性はイオン交換樹脂の性質や 2 つの錯体の比率に大きく依存する。スルホ基を有する強酸性イオン交換樹脂に Ir 錯体と Rh 錯体を 2 : 1 で固定化したものが最

も高活性であった(Figure 3)。また本光触媒の活性は、同一条件下における均一系錯体によるものよりはるかに高く、さらに反応中の錯体の溶出はなく、反応後も錯体の構造は維持されたままであるため、再利用が可能となったことも確認している。また、Ir 錯体と Rh 錯体を酸性層状化合物であるニオブ酸カリウム ($\text{K}_4\text{Nb}_6\text{O}_{17}$) に階層的にインターカレートした無機 - 有機ハイブリッド型光触媒の開発にも成功している。

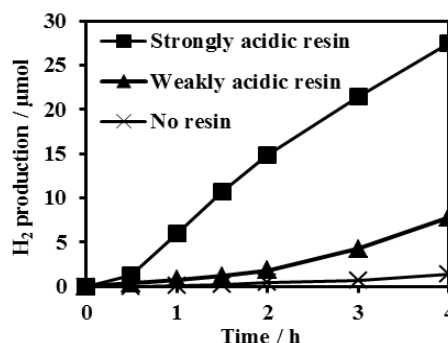


Figure 3. Effect of resin in the H_2 production.

可視光による水からの高効率な光触媒的水素生成反応を可能とする新規 Ni 錯体固定化触媒の開発

本研究では、水素生成サイトとして Ni 錯体 ($\text{Ni}(\text{NiL}_2)_2^{2+}$, ($\text{L} = \beta\text{-mercaptoethylamine}$)) をイオン交換樹脂に担持した Ni 錯体固定化触媒や、Ni 錯体と有機色素であるチアゾールオレンジを同時に有機半導体の $g\text{-C}_3\text{N}_4$ (グラフェンカーボンナノライド) に固定化した可視光応答性 Ni 錯体固定化触媒を開発した。

所定量の Ni 錯体とスルホン酸基を有する強酸性イオン交換樹脂を蒸留水中で 3 時間撹拌し、イオン交換樹脂固定化 Ni 錯体を調製した。光触媒反応はパイレックス試験管に Ni 触媒を 0.1 g、エオシン Y を 0.02 g 入れ、犠牲剤として $\text{pH} = 8.5$ に調整した 15% の TEOA 水溶液を加え、Ar バブリングした後に $1800 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, $\lambda > 420 \text{ nm}$ の光を照射することで行った。水素生成量はガスクロマトグラフにより測定した。

三核構造の前駆体 Ni 錯体 ($\text{Ni}(\text{NiL}_2)_2^{2+}$ ($\text{L} = \beta\text{-mercaptoethylamine}$)) を、スルホン酸基 ($-\text{SO}_3^-$) を有するイオン交換樹脂に固定化した不均一系触媒が、有機色素存在下での水からの水素生成反応において均一系 Ni 錯体に比べて 5 倍程度高い活性を示した(Figure 5)。一方、弱酸性イオン交換樹脂に固定化した場合、あるいは Ni^{2+} イオンのみを強酸性樹脂に固定化した場合には水素はほとんど発生しない。このことから水素生成を効率的に行うには $\beta\text{-mercaptoethylamine}$ 配位子とイオン交換樹脂のスルホン酸基 ($-\text{SO}_3^-$) が必要なことが分かる。さらに本触媒系では、反応初期に約 30 分の誘導期が確認されることから、反

反応中の構造変化により活性な Ni 種が生成していることが示唆される。

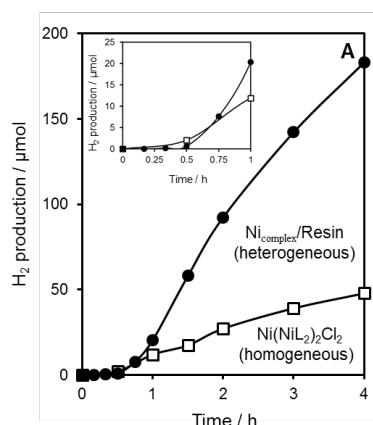


Figure 4. Photocatalytic hydrogen production using Nicomplex/resin 1 () and Ni(NiL₂)₂Cl₂ (L=β-mecaptoethylamine) ().

そこで、Ni K-edge XAFS により反応前後の触媒の構造解析を行った。XANES スペクトルより固定化後 4 配位から 6 配位構造をとっていることを確認した。FT-EXAFS スペクトルでは、前駆体 Ni 錯体の 1.7Å 付近に見られる Ni-N、Ni-S 結合由来のピークが、固定化後に僅かに短距離側にシフトした。これは Ni-S 結合の配位数が減少し、Ni-N(O)結合の配位数が増加していることを示す。さらに、2.3Å 付近に見られる Ni-S-Ni に起因するピークが固定化後は観測されなかった。以上の結果より、最初三核の前駆体 Ni 錯体は、一つの β-mercaptoethylamine 配位子と複数の水配位子により囲まれた単核の錯体としてイオン交換樹脂に固定化されていると言える。

さらに、反応開始 30 分後の試料についても構造解析を行った。FT-EXAFS スペクトルでは 2.5 Å 付近に新たにピークが確認された。Ni(TEOA)₂Cl₂ にも酷似したピークが見られることから、犠牲剤還元試薬の TEOA が配位子として機能していることを示しており、これが新たな活性種の生成に重要な役割をしていることが分かった(Figure 5)。

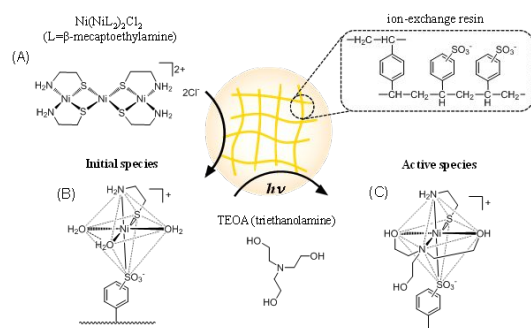


Figure 5. Schematic illustration of (A) Ni(NiL₂)₂Cl₂ (L=β-mecaptoethylamine) into (B) proposed structure of fresh Ni_{complex}/resin 1 and (C) in-situ generated active species during the photocatalytic reaction.

さらに、色素と Ni 錯体の同時固定化触媒においては、担体としてナノポーラス構造を有する nano-C₃N₄ を用いた場合触媒活性が向上した。これは nano-C₃N₄ に担持することで、チアゾールオレンジの光の吸収や発光強度が増大したためである。すなわち可視光捕捉サイトである色素から水素生成サイトである Ni 錯体への電子移動が促進されたためと考えられる。

5. 主な発表論等

(雑誌論文)(計 43 件)

1. K. Mori, K. Miyawaki, and H. Yamashita, "Ru and Ru-Ni Nanoparticles on TiO₂ Support as Extremely Active Catalysts for Hydrogen Production from Ammonia Borane", *ACS Catalysis*, in press.
2. K. Mori and H. Yamashita, "Design Strategy of Supported Metal Complexes on the Solid Matrices for Visible-Light-Driven Molecular Transformations", *Chemistry - A European Journal*, in press.
3. P. Verma, Y. Kuwahara, K. Mori, H. Yamashita, "Pd/Ag and Pd/Au bimetallic nanocatalysts on mesoporous silica for plasmon-mediated enhanced catalytic activity under visible light irradiation", *Journal of Material Chemistry A*, in press.
4. A. Nozaki, Y. Tanihara, Y. Kuwahara, Y. Kuwahara, T. Ohmichi, K. Mori, T. Nagase, H. Yasuda, and H. Yamashita, *ChemPhysChem*, **2016**, 17, 412-217.
5. K. Nakatsuka, Y. Kuwahara, K. Mori, H. Yamashita, New Method for the Synthesis of Ru Nanoparticles Using Photoexcited Fullerene C₆₀-containing Mesoporous Silica as a Catalyst Support", *Chemistry Letters*, **2015**, 44, 1691-1693.
6. K. Mori, T. Itoh, H. Kakudo, T. Iwamoto, Y. Masui, M. Onaka, H. Yamashita, "Nickel-supported Carbon Nitride Photocatalyst Combined with Organic Dye for Visible-light-driven Hydrogen Evolution from Water", *Physical Chemistry Chemical Physics*, **2015**, 17, 24086-24091.
7. M. Navlani-García, K. Mori, M. Wen, Y. Kuwahara, H. Yamashita, "Size Effect of Carbon-supported Pd Nanoparticles in the Hydrogen Production from Formic Acid", *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, **2015**, 88, 1500-1502.
8. P. Verma, Y. Kuwahara, K. Mori, H. Yamashita, "Development of Highly Dispersed Pd/Ag Bimetallic Nanocatalyst Supported on Mesoporous Silica SBA-15 for Efficient Plasmonic Catalysis under Visible Light Irradiation", *Journal of Material Chemistry A*, **2015**, 3, 18889-18897.
9. H. Cheng, X. Qian, Y. Kuwahara, K. Mori, H. Yamashita, "A Plasmonic Molybdenum Oxide Hybrid with Reversible Tunability for Visible-Light-Enhanced Catalytic Reactions", *Advanced Materials*, **2015**, 27, 4616-4621.
10. M. Wen, K. Mori, Y. Kuwahara, H. Yamashita, "Efficient Visible-Light-Responsive CO₂ Reduction System Using Rhenium Complex Intercalated into Zirconium Phosphate Layered Matrix", *ChemCatChem*, **2015**, 7, 3519-3525

11. A. Nozaki, Y. Tanihara, Y. Kuwahara, T. Ohmichi, T. Kamegawa, K. Mori, and H. Yamashita, "Active skeletal Ni catalysts prepared from Ni-Zr amorphous alloys by oxygen treatment", *Applied Catalysis A: General*, **2015**, 504, 559-564.
12. K. Mori, H. Tanaka, M. Dojo, K. Yoshizawa, and H. Yamashita, "Synergic Catalysis of PdCu Alloy Nanoparticles within a Macroporous Basic Resin for Hydrogen Production from Formic Acid", *Chemistry - A European Journal*, **2015**, 21, 12085-12092.
13. K. Mori, P. Verma, R. Hayashi, K. Fuku, and H. Yamashita, "Color-controlled Ag Nanoparticles and Nanorods within Confined Mesopores: Microwave-assisted Rapid Synthesis and Application in Plasmonic Catalysis under Visible-light Irradiation", *Chemistry - A European Journal*, **2015**, 21, 11885-11893.
14. M. Wen, Y. Kuwahara, K. Mori, D. Zhang, H. Li, H. Yamashita, "Synthesis of Ce Ions Doped Metal-Organic Framework for Promoting Catalytic H₂ Production from Ammonia Borane under Visible Light Irradiation", *Journal of Material Chemistry A*, **2015**, 27, 14065-14470.
15. A. Nozaki, S. Kittima, Y. Tanihara, Y. Kuwahara, T. Ohmichi, T. Kamegawa, K. Mori, H. Yamashita, "Efficient Hydrogen Generation from Ammonia borane on Skeletal Cu Catalysts Prepared from Cu-Ti Amorphous Alloys", *Materials Transactions*, **2015**, 4, 485-489.
16. K. Mori, T. Taga, H. Yamashita, "Synthesis of Fe-Ni alloy on Ceria Support as a Noble-Metal-Free Catalysts for Hydrogen Production from Chemical Hydrogen Storage Materials", *ChemCatChem*, **2015**, 7, 1285-1291 [Cover Picture]
17. M. Wen, P. Liu, K. Mori, Y. Kuwahara, S. Xiao, H. Yamashita, H. Li, D. Zhang, "Uniform Anatase Single-Crystal Cubes with Highly Thermal Stability and Fully Enclosed by Active {010} and {001} Facets", *RSC Advances*, **2015**, 5, 11029 - 11035
18. K. Mori, T. Sato, K. Watanabe, H. Yamashita, "Environmental Transmission Electron Microscopy Study of Diesel Carbon Soot Combustion at Simulated Catalytic Reaction Conditions", *ChemPhysChem*, **2015**, 16, 1347-1351. [Cover Picture]
19. Cheng, K. Fuku, Y. Kuwahara, K. Mori, H. Yamashita, "Harnessing Single-active Plasmonic Nanostructures for Enhanced Photocatalysis under Visible Light", *Journal of Material Chemistry A*, **2015**, 3, 5244-5268. [Cover Picture]
20. M. Wen, S. Takakura, K. Fuku, K. Mori, and H. Yamashita, "Enhancement of Pd-catalyzed Suzuki-Miyaura Coupling Reaction Assisted by Localized Surface Plasmon Resonance of Au Nanorods", *Catalysis Today*, **2015**, 242, 281-385.
21. M. Navlani-García, M. Martis, D. Lozano-Castelló, D. Cazorla-Amorós, K. Mori, H. Yamashita, "Investigation of Pd Nanoparticles Supported on Zeolites for Hydrogen Production from Formic Acid Dehydrogenation", *Catalysis Science & Technology*, **2015**, 5, 364-371.
22. K. Mori, H. Kakudo, H. Yamashita, "Creation of Nickel-Based Active Species within a Macroporous Acidic Resin: A Noble-Metal-Free Heterogeneous Photocatalyst for H₂ Evolution from Water", *ACS Catalysis*, **2014**, 4, 4129-4135.
23. X. Qian, Y. Kuwahara, K. Mori, and H. Yamashita, "Ag nanoparticles supported on CeO₂-SBA-15 by microwave irradiation possessing metal-support interaction and enhanced catalytic activity", *Chemistry - A European Journal*, **2014**, 20, 15746-15752. [Cover Picture]
24. K. Mori, M. Kawashima, and Hiromi Yamashita, "Visible-light-Enhanced Suzuki-Miyaura Coupling Reaction by Cooperative Photocatalysis with Ru-Pd Bimetallic Complex", *Chemical Communications*, **2014**, 50, 14501-14503. [Cover Picture]
25. M. Wen, K. Mori, T. Kamegawa, and H. Yamashita, "Amine-Functionalized MIL-101(Cr) with Imbedded Platinum Nanoparticles as a Durable Photocatalyst for Hydrogen Production from Water", *Chemical Communications*, **2014**, 50, 11645-11648. [Cover Picture]
26. M. Kawashima, K. Mori, J. Aoyama, and Hiromi Yamashita, "Visible-Light-Induced Hydrogen Evolution using Ir and Rh Complexes Intercalated into Layered K₄Nb₆O₁₇ as a Hybrid Heterogeneous Photocatalyst", *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, **2014**, 87, 874-881. [Cover Picture]
27. M. Martis, W. Meicheng, K. Mori, H. Yamashita, "Fabrication of Metal Nanoparticles in Metal Organic Framework NH₂-MIL-125 by UV Photo-assisted Methods for Optimized Catalytic Properties", *Catalysis Today*, **2014**, 235, 98-102.
28. K. Nakatsuka, K. Mori, S. Okada, S. Ikurumi, T. Kamegawa, and H. Yamashita, "Hydrophobic Modification of Pd/SiO₂@Single-Site Mesoporous Silicas by TEFS: Enhanced Catalytic Activity and Selectivity for One-Pot Oxidation", *Chemistry - A European Journal*, **2014**, 20, 8343-8354. [Cover Picture]
29. X. Qian, K. Fuku, Y. Kuwahara, T. Kamegawa, K. Mori, and H. Yamashita, "Design and Functionalization of Photocatalytic System within Mesoporous Silica", *ChemSusChem*, **2014**, 7, 1528-1536. [Cover Picture]
30. K. Mori, J. Aoyama, M. Kawasaki, H. Yamashita, "Visible-light Driven H₂ Production Utilizing Iridium and Rhodium Complexes Intercalated into Zirconium Phosphate Layered Matrix", *Dalton Transactions*, **2014**, 43, 10541-10547.
31. K. Mori, Y. Iwata, M. Yamamoto, N. Kimura, A. Miyauchi, G. Okamoto, T. Toyoshima, and H. Yamashita, "An Efficient Cu/BaO/La₂O₃ Catalyst for the Simultaneous Removal of Carbon Soot and Nitrogen Oxides from Simulated Diesel Exhaust", *Journal of Physical Chemistry C*, **2014**, 118, 9078-9085.
32. 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*, **2014**, 53, 2910-2914.
33. S. Ikurumi, S. Okada, K. Nakatsuka, T. Kamegawa, K. Mori, H. Yamashita, "Enhanced Activity and Selectivity in the One-pot Hydroxylation of Phenol by Pd/SiO₂@Fe-containing Mesoporous Silica Core-shell Catalyst", *Journal of Physical Chemistry C*, **2014**, 118, 575-581.
34. M. Martis, K. Mori, H. Yamashita, "Control of Physicochemical Properties and Catalytic activity of Tris(2,2'-bipyridine)iron(II) encapsulated within Zeolite Y cavity by Alkaline Earth Metal Cations", *Dalton Transactions*, **2014**, 43 1132-1138.
35. M. Martis, K. Mori, K. Fujiwara, W.-S. Ahn, H. Yamashita, "Amine-Functionalized MIL-125 with Imbedded Palladium Nanoparticles as an Efficient Catalyst for Dehydrogenation of Formic Acid at an

- Ambient Temperature”, *Journal of Physical Chemistry C*, **2013**, 117, 22805-22810.
36. K. Mori, T. Urata, S. Okada, H. Yamashita, “Pt-supported Spherical Mesoporous Silica as a Nanosized Catalyst for Efficient Liquid-phase Hydrogenation”, *Topics in Catalysis*, **2014**, 57, 1026-1031.
 37. K. Mori, T. Yamaguchi, S. Ikurumi, H. Yamashita, “Positive Effect of the Residual Templates within the MCM-41 Mesoporous Silica Channels in the Metal-Catalyzed Catalytic Reactions”, *Chemical Communications*, **2013**, 49, 10468-10470.
 38. K. Mori, Y. Kubota, H. Yamashita, “Iridium and Rhodium Complexes within a Macroporous Acidic Resin: A Heterogeneous Photocatalyst for Visible-light Driven H₂ Production without an Electron Mediator”, *Chemistry An Asian Journal*, **2013**, 8, 3207-3213.
 39. X. Qian, T. Kamegawa, K. Mori, H. Li, Hexing, H. Yamashita, “Calcium Phosphate Coatings Incorporated in Mesoporous TiO₂/SBA-15 by a Facile Inner-Pore Sol-Gel Process Toward Enhanced Adsorption-Photocatalysis Performances”, *Journal of Physical Chemistry C*, **2013**, 117, 19544-19551.
 40. K. Fuku, R. Hayashi, S. Takakura, T. Kamegawa, K. Mori, H. Yamashita, “The Synthesis of Size- and Color-Controlled Silver Nanoparticles by Using Microwave Heating and their Enhanced Catalytic Activity by Localized Surface Plasmon Resonance”, *Angewandte Chemie International Edition*, **2013**, 52, 7466-7450.
 41. Y. Kuwahara, T. Yamanishi, T. Kamegawa, K. Mori, H. Yamashita, “Activity, Recyclability, and Stability of Lipases Immobilized on Oil-filled Spherical Silica Nanoparticles with Different Silica Shell Structures”, *ChemCatChem*, **2013**, 5, 2527-2536.
 42. K. Mori, M. Dojo, H. Yamashita, “Pd and Pd-Ag Nanoparticles within a Macroporous Basic Resin: An Efficient Catalyst for Hydrogen Production from Formic Acid Decomposition”, *ACS Catalysis*, **2013**, 3, 1114-1119.
 43. M. Martis, K. Mori, K. Kato, G. Sankar and H. Yamashita, “What are the active species in the Photoinduced H₂ Production with Terpyridyl Pt(II) complexes? An investigation by in situ XAFS”, *ChemPhysChem*, **2013**, 14, 1122-1125.

[学会発表](計13件)

1. K. Mori, “Design of Supported Metal Complexes on the Solid Matrices for Visible-light-driven Molecular Transformations”, Photochemistry Seminar in Inha University, 2015,8,26.
2. K. Mori, “Hybrid Photocatalysts based on Visible-light-driven Molecular Complexes Combined with Solid Matrices”, Symposium of Korea PhotoScience (KPS) meeting 2015, Ewha Women University, 2015,8,25
3. 森浩亮, “エネルギーキャリアからの水素生成を駆動する金属触媒”, 触媒・電池元素戦略拠点第6回公開シンポジウム, 2015,3,18
4. 森浩亮, “貴金属低減を目指した触媒設計—エネルギー・環境触媒に関する話題—”, 東工大資源化学研究所触媒科学部門特別講演会, 2015,1,14
5. 森浩亮, “無機マトリクス上に高次制御担持された金属ナノ粒子、ナノ合金触媒のTEM観察”, 大阪大学超高压電子顕微鏡センター材料系共同利用研究

報告会, 大阪大学, 2014, 12, 16.

6. 森浩亮, “貴金属低減を志向したエネルギー・環境触媒の開発”, 第2回元素戦略に基づいた触媒設計シンポジウム, 東京, 2014, 11, 28.
7. K. Mori, “Hydrogen Production from Formic Acid Decomposition by Pd and Pd-Cu Nanoparticles within a Macroporous Basic Resin”, International Symposium on Nanostructured Catalysts and Photocatalysts (ISNCP), Osaka University, 2014, 6, 8
8. K. Mori, “Visible-light-driven Hybrid Photocatalysts based on Molecular Complexes within Inorganic Matrices”, East China University of Science and Technology, 2014, 3, 19.
9. K. Mori, “Visible-light-driven Hybrid Photocatalysts based on Molecular Complexes within Inorganic Matrices”, 第7回日本-中国NSFC研究交流, Shanghai Normal University, 2014, 3, 18.
10. 森浩亮, “多孔質シリカマトリクスに固定化したシングルサイト光触媒の開発と応用”, 触媒学会・触媒工業協会交流サロン, 化学会館, 2013, 12, 13.
11. 森浩亮, “多孔質シリカマトリクスに固定化したシングルサイト光触媒の開発と応用”, 平成24年度触媒学会奨励賞受賞講演, 秋田大学, 2013, 9, 19.
12. K. Mori, “Design of Hybrid Photocatalysts based on Visible-light-driven Molecular Complexes with Inorganic Matrices”, 1st International Symposium on Chemical Energy Conversion Processes, Kyushu University, 2013, 6, 13.
13. K. Mori, “Design of Visible-light-driven Molecular-based Photocatalysts Fixed on the Inorganic Matrices”, International Symposium on Advanced Mesoporous Catalysts and Photocatalysts (ISAM-Cat), Osaka University, 2013, 5, 25.

[図書](計5件)

1. 森浩亮, 山下 弘巳, 第1章メソ多孔体類, 第4節異種ユニット導入と触媒作用, ナノ空間材料ハンドブック, エヌ・ティー・エス, **2016**, 45-53. (共著)
2. 森浩亮, 7.2.光触媒-表面濡れ性の光調節, 光化学の事典, 朝倉書店, **2014**, 290-291. (共著)
3. Kohsuke Mori, Hiromi Yamashita, “Chapter 3, New Strategies to Fabricate Nanostructured Colloidal and Supported Metal Nanoparticles and their Efficient Catalytic Applications”, *Metal Nanoparticles for Catalysis: Advances and Applications*, RSC Books, **2014**, 30-46 (共著)
4. Kojirou Fuku, Kohsuke Mori, Hiromi Yamashita, “Chapter 9, Reductive Conversion of Carbon Dioxide using Various Photocatalyst Materials”, *Transformation and Utilization of Carbon Dioxide*, Springer, **2014**, 225-244. (共著)
5. 森浩亮, 山下 弘巳, 第6節磁性ナノ粒子による触媒の表面修飾とその効果, 触媒の設計・反応制御事例集, 技術情報協会, **2013**, 156-161. (共著)

[その他]

ホームページ等

<http://www.dma.jim.osaka-u.ac.jp/view?l=ja&u=4266>

6. 研究組織

(1)研究代表者: 森浩亮 (Mori, Kohsuke)
大阪大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 90423087