

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：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630409

研究課題名(和文)光励起電子移動による電子リッチPdの創成と光触媒的炭素-炭素結合形成反応

研究課題名(英文)Creation of electron rich Pd species by the photo-induced electron transfer and photocatalytic C-C bond formation

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) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、太陽エネルギーを利用し、鈴木-宮浦カップリング反応に代表される炭素-炭素結合形成反応を可能とする、全く新しい機能をもった光触媒開発の斬新で画期的な方法論を提案することを目的とした。具体的には光応答性金属錯体、またはプラズモニックナノ粒子から成る光捕捉サイトを可視光で励起し、励起電子を隣接するPd種へ注入を試みた。この反応系中で創り出された活性な電子リッチPd(0)種を巧みに利用して、炭素-炭素結合形成反応の律速段階である酸化的付加の飛躍的な加速を可能とし、反応速度の飛躍的な向上に成功した。

研究成果の概要(英文)：In this research, I proposed a new photoinduced Suzuki-Miyaura coupling reaction by the formation of active electron rich Pd(0). A photoinduced Suzuki-Miyaura coupling reaction has been realized by molecule Pd(II) complex containing a Ru(II)-polypyridyl derivative as a visible light photosensitizing unit, where an electron and/or energy transfer from excited Ru species to Pd(II) may facilitate the formation of active electron rich Pd(0) and oxidative addition step with aryl halides. Furthermore, the formation of bimetallic Pd/Au and Pd/Ag NPs exhibited specific photocatalytic activity in the Suzuki coupling reaction via localized surface plasmon resonance (LSPR)-assisted deposition under visible light irradiation.

研究分野：触媒化学

キーワード：光触媒 カップリング 合金 プラズモン 金属錯体

1. 研究開始当初の背景

高選択的で超高効率な触媒系を構築するには、クリーンで無尽蔵な光エネルギー(太陽光)を利用した選択的物質変換反応を可能とする光触媒の開発が重要な課題と言えるが極めてチャレンジングである。酸化チタンに代表される半導体光触媒は、強い酸化・還元力を利用して既に実用化されているが、その応用は完全酸化分解反応などダウンストリームプロセスに留まる。紫外光を利用した環化、異性化、転位反応なども古くから研究がなされているが、低収率・低選択性などの問題があり、実用化には適していない。

Pd触媒による、アリアルハロゲン化物とホウ素化合物とのカップリング反応である鈴木-宮浦反応は、高付加価値生成物であるピアリアル誘導体の合成法として広く利用されている。本反応は、Pd(0)種へのアリアルハロゲン化物の酸化的付加を經由して進行する。一般的な熱反応では、電子リッチなPd(0)種が律速段階である酸化的付加を促進させることが知られているため、その触媒設計指針のもと様々な電子供与性配位子が開発されている。

本申請課題では、これまで不可能とされてきた可視照射下での鈴木-宮浦カップリング反応を、電子リッチなPd(0)種を可視光捕捉サイトからの電子移動により反応系中で創り出すという、申請者が考案した新しい触媒設計の方法論を具現化することで達成する。具体的には1) Ru錯体などの増感剤を可視光で励起させ、生成した励起電子を隣接したPdに注入することで活性な電子リッチPd(0)種を生成し、酸化的付加を促進させる。あるいは、2) AgやAuなどのプラズモニックナノ粒子を可視光捕捉サイトとし、分極により生じた励起電子をPdに移動させることで電子リッチなPd(0)種の生成を試みる。

2. 研究の目的

本申請課題では、可視光照射下、鈴木-宮浦カップリング反応に代表される炭素-炭素結合形成反応を可能とする次世代型光触媒を、申請者が考案した全く新しい方法論に基づき設計・開発する。本反応は、光触媒では進行しないと考えられてきたが、電子リッチなPd(0)種を可視光捕捉サイトからの電子移動により反応系中で創り出すことができれば、反応の律速段階である酸化的付加を促進し、飛躍的な活性向上が狙えると考えた。具体的には光捕捉サイトとPd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し、励起電子を高効率にPdに蓄積できるナノ構造制御された触媒を合成することで達成する。さらに理論計算の支援を受けつつ、放射光 in situ XAFS を駆使した活性点の局所構造解析、電子移動ステップの解明も同時に行い、材料の探索・新規触媒設計に有機

的なアプローチをする。これまで同種の研究は皆無であり、独創性は極めて高い。

本研究の最大の特徴は、室温・可視光照射下での鈴木-宮浦カップリング反応を可能とする光触媒を開発するため、申請者が考案した触媒設計コンセプトを具現化する点にある。これまで国内外で同様の研究は皆無で、極めて画期的である。また、選択的な物質変換反応を指向した様々な可視光応答性光触媒に応用できる可能性があり、光触媒設計に新たな方法論を提案できる。

3. 研究の方法

本申請課題では、目的実現のため、新規光触媒の設計・開発 → 光触媒性能評価 → 触媒の構造・物性解析 → 電子移動過程の解明という一連の研究を行う。では、Ru錯体、あるいはAuまたはAgナノ粒子を光捕捉サイトし、活性サイトであるPd種との相互作用を考慮しつつ触媒設計に取り組み、の触媒反応実験結果と合わせて、でミクロ・マクロ的な観点から構造・物性に関する知見を得る。さらにでは、実験的および計算科学的検討により、反応機構だけでなく電子移動過程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。それぞれの新規光触媒の設計・開発方針を以下に示す。

金属錯体を可視光捕捉サイトとした分子光触媒の設計

金属錯体をモチーフとした触媒設計は、反応解析が比較的容易であり、また分子軌道計算に基づいた配位子設計(モレキュラーエンジニアリング)により、精密な触媒デザインが可能である。Ru(bpy)₃²⁺に代表される可視光応答性金属錯体は、光励起により最低三重項状態(³MLCT)から電子受容体に励起電子を注入することができる。そこで、可視光捕捉サイトとして利用し、電子受容体としてPd(0)種を隣接させることで、電子リッチなPd(0)種の生成を試みる。分子軌道計算に基づいた配位子設計により、光捕捉サイトの置換基や、Pdサイトとの連結部位の効果を検討する。また、光捕捉サイトとして、より量子収率の高いIr錯体の利用も試みる。

プラズモニックナノ粒子を可視光捕捉サイトとしたナノ構造光触媒の設計

表面プラズモン共鳴とは、AuやAgなどの金属ナノ粒子表面の自由電子の集団振動が入射光と共鳴することで、分極が起こる現象である。本研究では、分極により生じた励起電子を隣接したPdサイトに移動させ、活性な電子リッチPd(0)種の生成を試みる。表面プラズモン共鳴の影響は、金属の種類(Au, Ag)、粒子径、形状(球状、ロッド状)により大きく異なるため、その影響を詳細に検討し、本反応に最適なナノ構造制御された光触

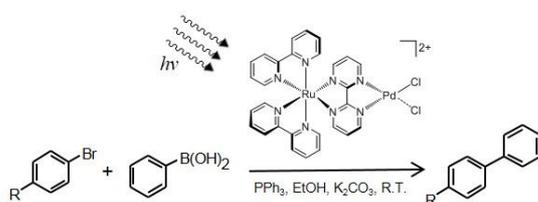
媒を開発する。

4. 研究成果

金属錯体を可視光捕捉サイトとした分子光触媒の設計

Pd 触媒による、鈴木-宮浦カップリング反応は、Pd(0)種へのアリールハライドの酸化的付加を経由して進行する。一般的な熱反応では、電子リッチな Pd(0)種が律速段階である酸化的付加を促進させるため、bulky で電子供与性の配位子を有する各種 Pd 錯体が合成されている。

本研究では、可視照射下、鈴木-宮浦カップリング反応の活性向上を目指し、Ru-Pd 二核錯体の利用を試みた。光捕捉サイトの Ru 錯体を可視光で励起させ、生成した励起電子を隣接した Pd に注入することで活性な電子リッチ Pd(0)種を生成し、アリールハライドとの酸化的付加を促進させた(Scheme 1)。



Scheme 1. Suzuki-Miyaura coupling reaction under visible-light irradiation.

$[(bpy)_2Ru(bpm)](PF_6)_2$ (bpy: bipyridine, bpm: bipyrimidine)と $Pd(CH_3CN)_2Cl_2$ をアセトン中で 2h 反応させ、Ru-Pd 二核錯体 $[(bpy)_2Ru(bpm)PdCl_2](PF_6)_2$ を合成した。光触媒反応はガラス製反応器に、所定量の錯体、EtOH、基質、 K_2CO_3 、 PPh_3 を加えて可視光照射下($\lambda > 420$ nm)で行った。

可視光捕捉サイトのみから成る $[(bpy)_2Ru(bpm)](PF_6)_2$ は、656 nm に 3MLCT 由来の発光を示したのに対して、Pd を導入したものでは、その強度が著しく減少した(Figure 1)。一方、 $(bpy)PdCl_2$ 錯体との物理混合では消光されない。すなわち、Ru 錯体部位と Pd 錯体部位が分子内で隣接することで効率的な電子移動が起こると言える。

様々な条件下で鈴木-宮浦カップリング反応を行った結果を Figure 2 に示す。Ru-Pd 二核錯体では、暗所での反応に比べて可視光照射下では約 2 倍活性が向上した。Ru 錯体部位のみでは反応は進行しない。また、Ru 錯体と Pd 錯体の物理混合、あるいは Pd 錯体のみでは可視光照射による反応促進効果は発現しないことから、分子内での Ru 部位から Pd 部位への電子移動が活性向上に重要であると言える。

可視光照射下では、種々のパラ置換プロモベンゼンを用いた競争反応から得られた

Hammett ρ 値は 0.52 であったのに対して、暗所下での反応では、 $\rho = 2.96$ であった。この結果は、可視光照射下で電子リッチ Pd(0)種が生成し、反応の律速段階であるアリールハライドとの酸化的付加を促進したことを示している。

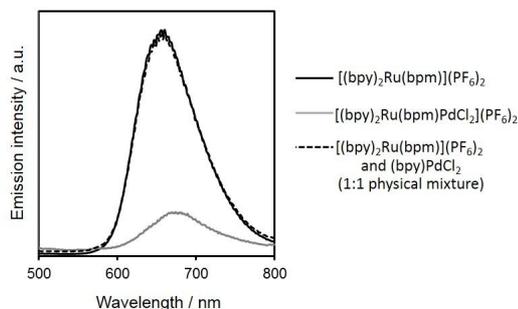


Figure 1. Emission spectra in EtOH solution ($\lambda_{ex} = 420$ nm).

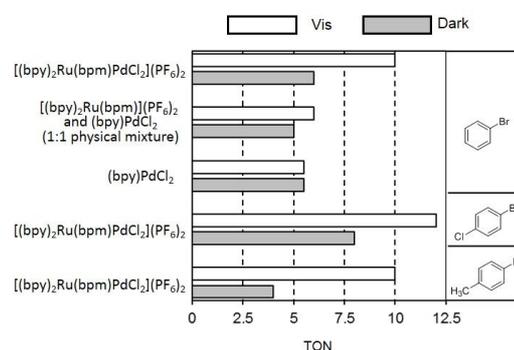


Figure 2. Suzuki-Miyaura coupling reactions under several sets of conditions. Bromobenzene (5×10^{-2} mmol), phenylboronic acid (5×10^{-2} mmol), catalyst (5×10^{-4} mmol), PPh_3 (1×10^{-3} mmol) and K_2CO_3 (5×10^{-2} mmol), EtOH (10 mL), Ar atmosphere, 6 h. Irradiation was performed from the side using a 500 W Xe lamp through the glass filter ($\lambda > 420$ nm).

プラズモニックナノ粒子を可視光捕捉サイトとしたナノ構造光触媒の設計

これまでマイクロ波(Mw)を用いた誘導加熱を利用して、均一な粒径分布を有する金属ナノ粒子を合成してきた。マイクロ波を用いた誘導加熱は電子レンジなどの形で一般家庭にも広く普及しており、通常加熱に比べ均一に溶媒や担体を急速加熱することが可能である。一般家庭で使用される電子レンジと同一出力(2.45 GHz)で、金属前駆体と触媒担体を含む溶液にマイクロ照射することで、通常加熱による調製に比べより微細で高分散な貴金属ナノ粒子を担持できる。この技術をさらに発展させ、マイクロ波加熱を利用したサイズ制御とメソポーラスシリカのメソ細孔空間を利用した形状制御を融合することで、反応や光環境に応じたサイズ・色彩を有する Ag ナノ粒子の合成に成功した。

一方で、シングルサイト Ti 種を含むゼオラ

イト(TS-1)やメソポーラスシリカ(Ti-HMS)の特異な光触媒特性を利用し、金属前駆体を含む溶液を加えた後に照射することで、光励起した Ti と金属前駆体との相互作用を通し、最終的に微細かつ高分散な金属ナノ粒子を担持できる光析出法を開発してきた。この概念をさらに応用することで、調製した Ag ナノ粒子の LSPR 効果を利用した Pd ナノ粒子の担持に成功した(Figure 3)。すなわち、LSPR に相当する可視光を照射することで Ag ナノ粒子を活性化させ、そこに相互作用した Pd 前駆体を還元固定するため、Ag ナノ粒子近傍に Pd を選択的に固定化することができる。

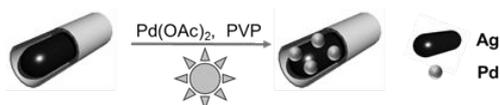


Figure 3. Pd deposition of the Ag/SBA-15.

UV-vis 吸収スペクトルから、Pd 固定化後も Ag ナノ粒子のプラズモン吸収が維持している。EDS 元素マッピングの結果、メソポーラスシリカの細孔内に Ag ナノ粒子が存在し、さらにその周辺に Pd が選択的かつ高分散な状態で存在していることが確認できる。また、Pd-K-edge XAFS において金属結合由来のピークが確認されることから、Pd ナノ粒子で存在していると言える。

室温・暗所下における NH_3BH_3 からの水素生成反応を検討したところ、黄色、赤色、青色を呈する Ag ナノ粒子いずれの触媒においても Pd を固定化することで、触媒活性の向上が見られた。Ag ナノ粒子のサイズによって触媒性能に違いが見られ、より微粒子な Ag ナノ粒子であるほど高い水素生成活性を示した(Figure 4)。

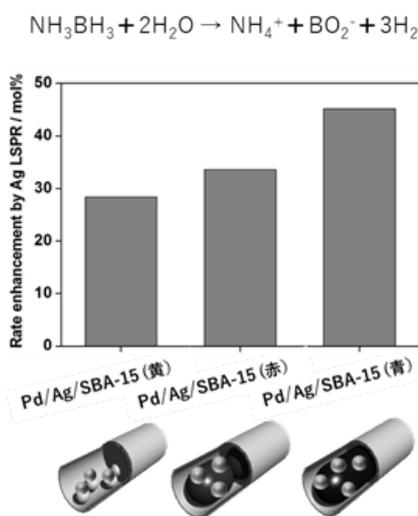


Figure 4. H_2 evolution from NH_3BH_3 aqueous solutions at room temperature using Pd/Ag/SBA-15 under visible light irradiation ($\lambda > 420 \text{ nm}$ 320 mWcm^{-2}).

この傾向は Pd 固定化前のものと一致する。光照射下での反応では、いずれの Ag ナノ粒子においても水素生成活性の向上が確認された。LSPR に誘起された Ag ナノ粒子の表面電荷の変化が Pd ナノ粒子にも伝播し、触媒活性が向上したと考えられる。また、活性の増加率は Ag ナノ粒子の種類によって大きく異なり青色のナノロッドで最も活性が向上したことから、二元系触媒においても色彩の違いにより LSPR 効果を制御できることが分かった。

本反応系はさらにヨードベンゼンとフェニルボウ酸の鈴木宮浦カップリング反応にも適用可能であり、可視光照射下において Ag ナノ粒子のサイズ、形状に依存した触媒活性の向上が確認された(Figure 5)。通常加熱に比べて光照射下での活性向上が顕著であることから、Ag-LSPR による表面電荷密度の変化が活性向上の要因であると言える。

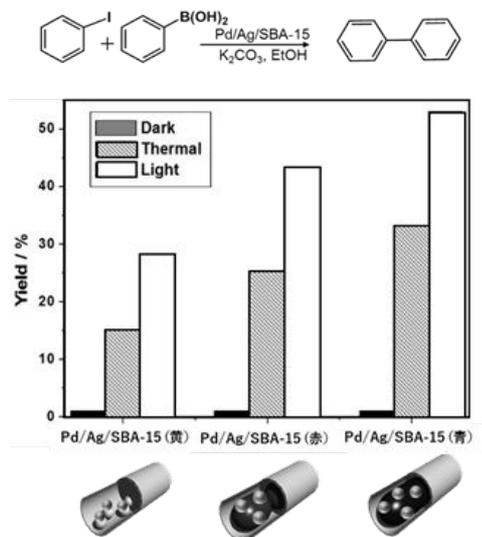


Figure 5. Suzuki-Miyaura coupling reaction for Pd/Ag/SBA-15 catalysts under dark, thermal (35 °C) and light irradiation conditions.

5. 主な発表論等

〔雑誌論文〕(計 36 件)

1. K. Mori, K. Miyawaki, and H. Yamashita, "Ru and Ru-Ni Nanoparticles on TiO_2 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-Garcia, 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.
 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.
 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.
 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.
 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.
 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.
 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.
 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.

[学会発表](計9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 Macroreticular 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.

[図書](計4件)

1. 森浩亮, 山下弘巳, 第1章より多孔体類, 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. Kojiro 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)

[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