

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2011～2015

課題番号：23245020

研究課題名(和文) 脱合金によるナノポーラス金属材料触媒。分子変換における革新的手法

研究課題名(英文) Fabrication of nanoporous metal catalysts by a dealloying method for molecular transformations

研究代表者

山本 嘉則 (YAMAMOTO, Yoshinori)

東北大学・原子分子材料科学高等研究機構・名誉教授

研究者番号：60029519

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 38,100,000円

研究成果の概要(和文)：脱合金法によりAu、Pd、Cu、AuPdなどの様々なナノポーラス金属触媒の創製法を確立した。AuNPore触媒は、アルコールの酸化反応、アルキン、キノリン、イミン、アルデヒドなどの選択的還元反応、アルキンの選択的付加反応、脱水素化クロスカップリング反応、などにおいて優れた反応性、選択性、再利用機能を示した。PdNPore触媒はSuzukiカップリングやHeck反応において優れた不均一触媒活性を示した。CuNPore触媒はクリック反応において特異なリガメントサイズに依存する触媒活性を示した。AuPdNPore異種金属触媒が環状共役エノンの1,4-ヒドロシリル化反応において優れた相乗効果を示した。

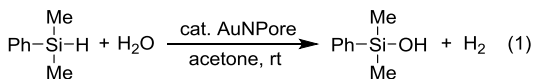
研究成果の概要(英文)：Various nanoporous metals including Au, Pd, Cu, AuPd have been fabricated and their nanoporous structures were characterized by SEM, TEM, HRTEM, EDX, and BET. The nanoporous gold proved to be an excellent heterogeneous catalyst in oxidation of alcohols and organosilanes, selective reduction of alkyne, quinoline, imine, aldehyde, and ketone, selective diborylation of and hydrosilylation of alkynes, dehydrogenative cross-coupling of $-C(sp^3)-H$ of amines, and benzannulation. Moreover, the nanoporous-Pd catalyst is a promising heterogeneous catalyst for the Suzuki coupling and Heck reaction. The nanoporous copper catalyst exhibited a distinct nanosize-dependent catalytic activity in the Click reaction of the terminal alkynes and organic azides. Interestingly, the AuPd alloy nanoporous catalyst showed a remarkable synergistic effect for the heterogeneous 1,4-hydrosilylation of conjugated cyclic enones with organosilane in comparison with nanoporous monometallic catalysts.

研究分野：合成化学

キーワード：ナノポーラス金属触媒 触媒プロセス 有機化学反応

1. 研究開始当初の背景

これまで、ナノポーラス金属材料触媒は主に物理・材料分野で研究がなされているが、その触媒機能を生かした化学反応への応用例は少なく、最近になってナノポーラス金 (AuNPore) 触媒を用いた選択的気相酸化反応例がいくつか報告されているのみである (例えば、Baumer らによるメタノール酸化反応と一酸化炭素の酸化反応) [1]。極く最近、我々は初めてナノポーラ金触媒 (直径 20-40 nm) が液相反応で高い触媒活性と再利用性を示すことを報告した (式 1) [2]。すなわち、様々な有機シラン化合物がナノポーラス金触媒の存在下、室温で速やかに水と反応し、高収率で対応するシラノールおよび水素ガスを生成した。さらに、4 回再利用した結果、触媒の活性と表面上の細孔形状に変化なく、いずれも高収率かつ高選択的に反応が進行した。HAP (Ca₅(PO₄)₃(OH)) 安定剤などで固定された金や銀ナノ粒子触媒が加熱条件で同様な反応を促進していることが知られている [3]。このことは、金属ナノ粒子触媒に比べて、ナノポーラス構造金触媒 (金属材料触媒) は、さらに高い触媒活性を示していることを示唆している。



本研究では、これらの触媒の細孔サイズを自在にコントロールする「サイズ制御」の精密調整を行うとともに、様々な変換反応に展開し、高効率・高機能触媒反応系を確立し、「金属分子触媒からナノ構造金属材料触媒であるナノポーラス金属触媒へ」という新たな切り口により新手法を開拓することを目指した。

2. 研究の目的

合金 M₁M₂ から電気化学的手法あるいは酸処理等により、特定の金属 (例えば M₂) を脱合金化 (溶出) して取り除き、穴あき状態の M₁O としてナノポーラス金属とする。このナノポーラス金属材料を触媒として、各種分子変換反応に適応してグリーンでリサイクル可能な触媒プロセスを確立することを目的とする。脱合金化過程で、金属の種類、孔径サイズ、形状、構造、成分などが厳密に制御でき、かつ、再現性のあるナノポーラス金属触媒の創製法をまず確立する。次に様々な分子変換反応への触媒機能を検討し、ナノポーラス金属触媒の構造と反応性の関係を解明する。有機合成、医薬品製造、機能性材料など分野で実用性のある触媒としての広範囲の応用が期待される。

3. 研究の方法

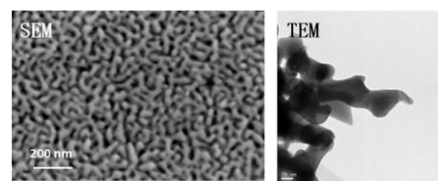
脱合金によるナノポーラス金属触媒の創製方法を徹底的に検討することと、分子変換反応への適応によるナノ金属材料触媒の高機能・新機能の発見を目指す。合金種類の選択と作製から、脱合金に用いる電解液の選択、

および電気分解条件などを詳しく検討する。また、走査型プローブ顕微鏡 (SEM) および透過電子顕微鏡 (TEM) の観察によりナノ細孔構造を明確にする。創製したナノ金属材料触媒を用いて、種々の変換反応や新反応を検討する。研究過程でナノ構造による触媒活性の変化を検討し、触媒の新機能および反応機構を解明する。また、触媒としての再利用性を検討する。

4. 研究成果

(1) ナノポーラス金 (AuNPore) 触媒を用いた変換反応

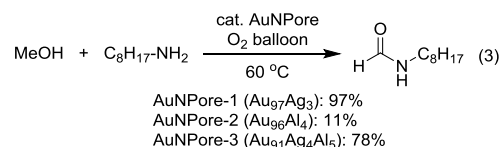
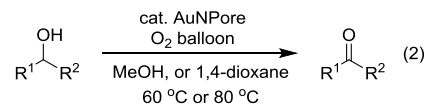
濃硝酸電解液中、Au₃₀Ag₇₀ 合金を温度と腐食時間を変化しながら、異なるリガメントサイズを有する様々な AuNPore 触媒を作製した。また、SEM と EDX 解析により、ナノリガメントサイズ (30nm) と組成 (Au₉₈Ag₂) を明らかにした (図 1)。



リガメントサイズ: ~30nm 凹凸リガメント表面
図 1. AuNPore触媒のナノ構造

(a) アルコールの酸化反応

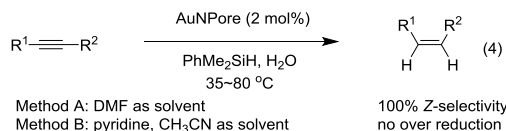
AuNPore 触媒の存在下、種々の二級アルコールを適当な溶媒を用いて酸素雰囲気下 60~80°C の条件で撹拌すると、中程度から高収率でケトン体が生成することを見出した (式 2)。本反応は塩基などの添加剤を必要としないため、操作が極めて簡単である。また本材料に対して昇温脱離を行ったところ、酸素の脱離が観測された。別途調整した多孔質構造を持たない Au (111) 薄膜からは脱離が観測されないことから、本結果は通常の金と比べナノ多孔質金は酸素と高い親和力を有していることを示唆している。



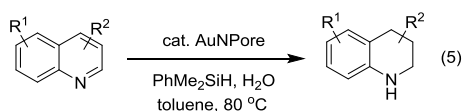
また、AuNPore 触媒を用いたメタノールの酸化反応に様々な一級および二級アミンを酸素雰囲気中で加えると、様々な官能基を有するホルムアミドが高効率かつ化学選択的に得られることを見出した (式 3)。興味深いところは、AuNPore 触媒に残留した微量の銀原子がメタノールの酸化反応活性を向上することを明らかにした。

(b) 還元反応

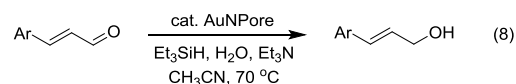
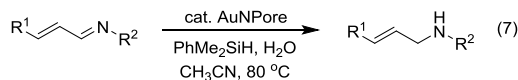
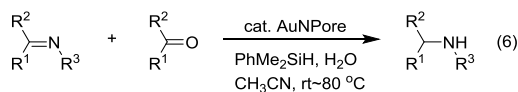
AuNPore触媒存在下、ヒドロシランと水にアミンの添加剤を加えると、アルキンの半水素化反応が高効率かつ高選択的に進行することを見出した(式4)。本触媒システムは様々なアセチレン化合物に対して適用可能であり、半水素化物を100%化学選択性とZ-選択性得ることができた。これはナノポーラス金属触媒を用いた初めての還元反応の例である。



また、ヒドロシランと水を用いてナノポーラス金属触媒存在下キノリンの高選択的還元反応の開発に成功した。キノリン骨格のピリジン部位のみが選択的還元された様々な官能基を有するキノリン誘導体が高収率で得られた(式5)。

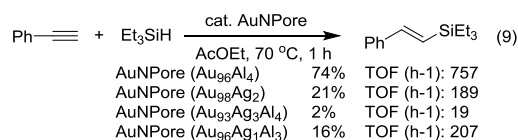


アルジミンやケチミンとアルデヒドやケトンの混合物に AuNPore 触媒と有機シランおよび水を用いると、イミンが高選択的に還元され対応するアミンを与えることを見出した。通常高い求電子性を有するアルデヒドの還元比べ、本触媒系を用いると比較的低い活性を有するアルジミンが選択的還元されることを初めて見出した(式6)。また、共役エンイミンを用いた場合は、炭素-炭素二重結合は還元されず、イミン骨格のみが選択的還元されアリルアミン生成物が効率的に得られることを見出した(式7)。また、AuNPore 触媒の存在下、有機シランと水にトリエチルアミンを加えると、共役 enal 化合物のアルデヒド部位のみが選択的に還元され、アリルアルコールを効率的に与えることを見出した(式8)。

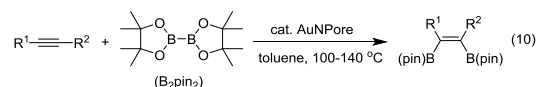


(d) 付加反応

ナノポーラス金属触媒を用いた末端アルキンのヒドロシリル化反応において、AuAl 合金から作製した AuNPore 触媒が、AuAg 合金を用いて作製した AuNPore 触媒に比べて顕著な触媒活性を示すことを明らかにした(式9)。さらに、異なる金属組成を有する AuAgAl 合金からナノポーラス金属触媒を作製し反応を検討した結果、本反応において微量の銀原子の存在が反応の活性を障害していることがわかった。

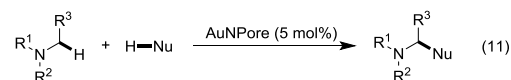


アルキンのジホウ素化反応において様々なナノポーラス金属触媒の検討を行った結果、AuNPore 触媒が唯一の不均一触媒機能を示すことを明らかにした(式10)。本反応は初めての不均一触媒を用いたアルキンへのジホウ素化反応の例である。様々な選択的ジホウ素化アルケンが、塩基や配位子など添加剤を加えずに高収率で得られた。本反応ではピナコールジボランの B-B 結合が AuNPore 触媒の固体表面で切断され、それに続くアルキンへの付加反応により反応が進行していることを明らかにした。



(e) 脱水素化酸化的クロスカップリング

我々は、ターシャリーアミンの窒素原子の α-C(sp³)-H 結合がナノポーラス金属触媒と酸素や TBHP 酸化剤により活性化され様々な求核剤と脱水素化クロスカップリング反応が効率的に進行することを見出した(式11)。バルク状のナノポーラス金属触媒は反応溶液から簡単に回収でき、さらに10回まで再利用しても触媒活性とナノ構造に変化が見られず、優れた不均一触媒機能を示すことを明らかにした。

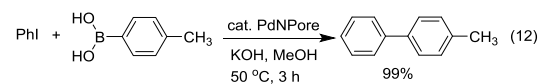


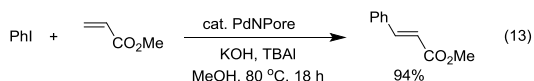
Condition A: O₂ (1 atm), CH₃NO₂ or MeOH, 80 °C, 24 h
Condition B: TBHP (1 equiv), CH₃NO₂ or CH₃CN, rt or 80 °C, 24 h

(2) ナノポーラスパラジウム触媒 (PdNPore) を用いた変換反応

PdNPore触媒は、Pd₃₀Ni₅₀P₂₀金属ガラスを希硫酸電解液中電気化学方法でエッチングを行うことにより効率的に作製した。走査型プローブ顕微鏡 (SEM) およびエネルギー分散型 X 線解析 (EDX) の観察により、PdNPore触媒はナノ孔サイズ30nmから60nm、またPd₆₇Ni₂₃P₁₀の組成を示した。

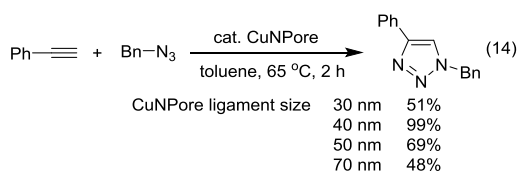
我々は、PdNPore 触媒が Suzuki カップリングと Heck 反応において、反応が短時間で高い収率で進行することを明らかにした(式12と13)。また、高い触媒の再利用性と反応前後のナノポーラス構造は変化が見られないこと、ICP-AES 分析により反応溶液への Pd 原子のリッチングがほかのパラジウム固体触媒より少ないことから、有機合成および工業的应用にグリーン不均一触媒的プロセスとして広範に用いられると考える。





(3) ナノポーラス銅触媒 (CuNPore) を用いたクリック反応

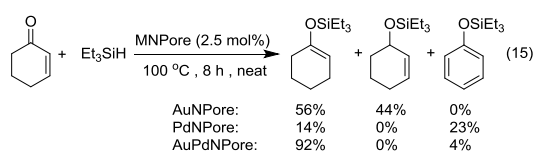
Cu₃₀Mn₇₀ 合金を用いて MnSO₄ と (NH₄)₂SO₄ 電解溶液中で脱合金温度を調整することにより、リガメントサイズ 30nm から 70nm までの種々の CuNPore 触媒の精密作製に成功した。これらの触媒を末端アルキンと有機アジドのクリック反応に用いたところ、室温で作製したリガメントサイズ 40nm を有する CuNPore が高い収率で対応するトリアゾールを与えることを見出した (式 14)。これに対して、40nm より小さいサイズ及び大きいサイズを有する CuNPore では触媒活性の大きな低下が見られた。XPS 解析及び触媒表面上のナノ構造を有する銅アセチリドの生成から本反応は CuNPore 触媒表面の Cu(I)触媒種で進行していることを明らかにした。



(4) AuPd 異種金属ナノポーラス触媒 (AuPdNPore) の相乗効果

AuPdNPore 触媒は Pd-Au-Al 合金を水酸化ナトリウム水溶液電解液中で Al 成分を脱合金することで作製した。SEM と TEM の観察から AuPdNPore 触媒の平均リガメントサイズは非常に小さい 8nm を示した。

興味深いことに、環状共役エノンの 1,4-ヒドロシリル化反応において、AuPdNPore 異種金属触媒が優れた相乗効果を示し、シリルエノールエーテルを高効率かつ高化学選択性で与えることを見出した (式 15)。本触媒反応において AuNPore 触媒を用いると、カルボニル官能基に対する 1,2-付加反応と 1,4-ヒドロシリル化反応の混合生成物を与える。また、PdNPore 触媒を用いると、1,4-ヒドロシリル化と酸化反応の混合生成物を与えた。これに対して、AuPdNPore 異種金属触媒は高い選択性で 1,4-ヒドロシリル化生成物を与えることを明らかにした。SEM や TEM など電子顕微鏡、XPS など分析から、高い 1,4-選択性はナノ合金触媒の Pd 原子から Au 原子への電荷移動による合金効果であると考えられる。



金属微粒子触媒と比べれば、ナノ多孔質金触媒に関する研究は緒に就いたばかりとい

える。今後は異種金属との相乗効果を活用した触媒活性の向上や、細孔内という特殊な反応場を利用した独自の触媒活性の探索など、今後の展開が大いに楽しみである。

<引用文献>

- ① Bäumer, M. et al, Nanoporous Gold Catalysts for Selective Gas-Phase Oxidative Coupling of Methanol at Low Temperature. *Science*, **327**, 2010, 319-322.
- ② Yamamoto, Y. et al, Nanostructured Materials as Catalysts: Nanoporous-Gold-Catalyzed Oxidation of Organosilanes with Water. *Angew. Chem. Int. Ed.* **49**, 2010, 10093-10095.
- ③ Kaneda, K. et al, Supported Silver-Nanoparticle-Catalyzed Highly Efficient Aqueous Oxidation of Phenylsilanes to Silanols. *Angew. Chem. Int. Ed.* **47**, 2008, 7938-7940.

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 21 件)

- ① Hon Eong Ho, Yoshifumi Ishikawa, Naoki Asao, Yoshinori Yamamoto, Tienan Jin, Highly efficient heterogeneous aerobic cross-dehydrogenative coupling via C-H functionalization of tertiary amines by nanoporous gold skeleton catalyst. *Chem. Commun.* 査読有, **51**, 2015, 12764-12767. DOI:10.1039/c5cc04856g
- ② Balaram S. Takale, Shanmou Tao, Xiaoqiang Yu, Xiujuan Feng, Tienan Jin, Ming Bao, Yoshinori Yamamoto, Highly chemoselective reduction of imines using a AuNPore/PhMe₂SiH₂/water system and its application to reductive amination. *Tetrahedron* 査読有, **71**, 2015, 7154-7158. DOI:10.1016/j.tet.2014.11.023
- ③ Balaram S. Takale, Ming Bao, Yoshinori Yamamoto, Abdulrahman I. Almansour, Natarajan Arumugam, Raju Suresh Kumar, Applications of Metal Nanopore Catalysts in Organic Synthesis. *Synlett* 査読有, **26**, 2015, 2355-2380. DOI: 10.1055/s-0034-1380867
- ④ Qiang Chen, Shinya Tanaka, Takeshi Fujita, Luyang Chen, Taketoshi Minato, Yoshifumi Ishikawa, Mingwei Chen, Naoki Asao, Yoshinori Yamamoto, Tienan Jin, The Synergistic effect of nanoporous AuPd alloy catalysts on highly chemoselective 1,4-hydrosilylation of conjugated cyclic enones. *Chem. Commun.* 査読有, **50**, 2014, 3344-3346.

- DOI:10.1039/c3cc49524h
- ⑤ Balaram S. Takale, Shan Mou Tao, Xiao Qiang Yu, Xiu Juan Feng, Tienan Jin, Ming Bao, Yoshinori Yamamoto, Exclusive Chemoselective Reduction of Imines in the Coexistence of Aldehydes Using AuNPore Catalyst. *Org. Lett.* 查読有, **16**, 2014, 2558-2561.
DOI:10.1021/ol500958p
- ⑥ Balaram Takale, Shanqiang Wang, Xuan Zhang, Xiujuan Feng, Xiaoqiang Yu, Tienan Jin, Ming Bao, Yoshinori Yamamoto, Chemoselective Reduction of α , β -Unsaturated Aldehydes using an Unsupported Nanoporous Gold Catalyst. *Chem. Commun.* 查読有, **50**, 2014, 14401-14404.
DOI:10.1039/c4cc07068b
- ⑦ Balaram S. Takale, Ming Bao, Yoshinori Yamamoto, Gold nanoparticle (AuNPs) and gold nanopore (AuNPore) catalysts in organic synthesis. *Org. Biomol. Chem.* 查読有, **12**, 2014, 2005-2027.
DOI: 10.1039/c3ob42207k
- ⑧ Ming Zhao, Katsuhiko Abe, Shin-ichi Yamaura, Yoshinori Yamamoto, Naoki Asao, Fabrication of Pd-Ni-P Metallic Glass Nanoparticles and Their Application as Highly Durable Catalysts in Methanol Electro-oxidation. *Chem. Mater.* 查読有, **26**, 2014, 1056-1061.
DOI:10.1021/cm403185h
- ⑨ Qiang Chen, Jian Zhao, Yoshifumi Ishikawa, Naoki Asao, Yoshinori Yamamoto, Tienan Jin, Remarkable Catalytic Property of Nanoporous Gold on Activation of Diborons for Direct Diboration of Alkynes. *Org. Lett.* 查読有, **15**, 2013, 5766-5769.
DOI:10.1021/ol4028013
- ⑩ Mei Yan, Tienan Jin, Qiang Chen, Hon Eong Ho, Takeshi Fujita, Luyang Chen, Ming Bao, Mingwei Chen, Naoki Asao, Yoshinori Yamamoto, Unsupported Nanoporous Gold Catalyst for Highly Selective Hydrogenation of Quinolines. *Org. Lett.* 查読有, **15**, 2013, 1484-1487.
DOI:10.1021/ol400229z
- ⑪ Yoshifumi Ishikawa, Yoshinori Yamamoto, Naoki Asao, Selective hydrosilylation of alkynes with a nanoporous gold catalyst. *Catal. Sci. Technol.* 查読有, **3**, 2013, 2902-2905.
DOI: 10.1039/c3cy00242j
- ⑫ Shinya Tanaka, Taketoshi Minato, Eisuke Ito, Masahiko Hara, Yousoo Kim, Yoshinori Yamamoto, Naoki Asao, Selective Aerobic Oxidation of Methanol in the Coexistence of Amines by Nanoporous Gold Catalysts: Highly Efficient Synthesis of Formamides. *Chem. Eur. J.* 查読有, **19**, 2013, 11832-11836.
DOI: 10.1002/chem.201302396
- ⑬ Mei Yan, Tienan Jin, Yoshifumi Ishikawa, Taketoshi Minato, Takeshi Fujita, Luyang Chen, Ming Bao, Naoki Asao, Mingwei Chen, Yoshinori Yamamoto, Nanoporous Gold Catalyst for Highly Selective Semihydrogenation of Alkynes: Remarkable Effect of Amine Additives. *J. Am. Chem. Soc.* 查読有, **134**, 2012, 17536-17542.
DOI:10.1021/ja3087592
- ⑭ Takeshi Fujita, Pengfei Guan, Keith McKenna, Xingyou Lang, Akihiko Hirata, Ling Zhang, Tomoharu Tokunaga, Shigeo Arai, Yuta Yamamoto, Nobuo Tanaka, Yoshifumi Ishikawa, Naoki Asao, Yoshinori Yamamoto, Jonah Erlebacher, Mingwei Chen, *Nat. Mater.* 查読有, **11**, 2012, 775-780.
DOI:10.1038/NMAT3391
- ⑮ Naoki Asao, Tienan Jin, Shinya Tanaka, Yoshinori Yamamoto, From molecular catalysts to nanostructured materials skeleton catalysts. *Pure Appl. Chem.* 查読有, **84**, 2012, 1771-1784.
DOI: 10.1351/PAC-CON-11-10-28
- ⑯ Naoki Asao, Naoya Hatakeyama, Menggenbateer, Taketoshi Minato, Eisuke Ito, Masahiko Hara, Yousoo Kim, Yoshinori Yamamoto, Mingwei Chen, Wei Zhang, Akihisa Inoue, Aerobic oxidation of alcohols in the liquid phase with nanoporous gold catalysts. *Chem. Commun.* 查読有, **48**, 2012, 4540-4542.
DOI: 10.1039/C2CC17245C
- ⑰ Naoki, Asao, Menggenbateer, Yohei Seya, Yoshinori Yamamoto, Mingwei Chen, Wei Zhang, Akihisa Inoue, Nanoporous Gold-aCatalyzed [4+2] Benzanulation between *ortho*-Alkynylbenzaldehydes and Alkynes. *Synlett* 查読有, **23**, 2012, 66-69.
DOI: 10.1055/s-0031-1289527
- ⑱ Tienan Jin, Mei Yan, Yoshinori Yamamoto, Click Chemistry of Alkyne-Azide Cycloaddition using Nanostructured Copper Catalysts. *ChemCatChem* 查読有, **4**, 2012, 1217-1229.
DOI:10.1002/cctc.201200193
- ⑲ Tetsuro Kaneko, Shinya Tanaka, Naoki Asao, Yoshinori Yamamoto, Mingwei Chen, Wei Zhang, Akihisa Inoue, Reusable and Sustainable Nanostructured Skeleton

Catalyst: Heck Reaction with Nanoporous Metallic Glass Pd (PdNPore) as a Support, Stabilizer and Ligand-Free Catalyst. *Adv. Synth. Catal.* 査読有, **353**, 2011, 2927-2932. DOI: 10.1002/adsc.201100358

- ⑳ Shinya Tanaka, Tetsuro Kaneko, Naoki Asao, Yoshinori Yamamoto, Mingwei Chen, Wei Zhang, Akihisa Inoue, A nanostructured skeleton catalyst: Suzuki-coupling with a reusable and sustainable nanoporous metallic glass Pd-catalyst. *Chem. Commun.* 査読有, **47**, 2011, 5985-5987. DOI: 10.1039/C1CC10710K
- ㉑ Tienan Jin, Mei Yan, Menggenbateer, Taketoshi Minato, Ming Bao, Yoshinori Yamamoto, Nanoporous Copper Metal Catalyst in Click Chemistry: Nanoporosity-Dependent Activity without Supports and Bases. *Adv. Synth. Catal.* 査読有, **353**, 2011, 3095-3100. DOI:10.1002/adsc.201100760

[学会発表] (計7件)

- ① Yoshinori Yamamoto, Metal Nanoporous skeleton catalysts for greener chemical transformation. 16th Asian Chemical Congress (16ACC), Dhaka, Banglades, 2016, 3.17-19. (基調講演)
- ② Yoshinori Yamamoto, Homogeneous gold catalysis vs. heterogeneous gold nanopore, AuNPore, catalysis: Advantages and disadvantages. 2015 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (PACIFICHEM2015), Hawaii, USA, 2015, 12.15-20. (招待講演)
- ③ Yoshinori Yamamoto, Metal Nanoporous skeleton catalysts for greener chemical transformation. 45th World Chemistry Congress and IUPAC2015, Busan, Korea, 2015, 8.9-14. (招待講演)
- ④ Yoshinori Yamamoto, Metal Nanoporous skeleton catalysts for greener chemical transformation. 22th International Symposium on Metastable, Amorphous and Nanostructured Materials, Paris, France, 2015, 7.13-17. (基調講演)
- ⑤ Tienan Jin, Nanoporous Metals as Catalysts. The AIMR International Symposium 2013 (AMIS 2013), Sendai, Japan, 2013, 2.19-21. (依頼講演)
- ⑥ Yoshinori Yamamoto, Tienan Jin, Homogeneous and Heterogeneous Catalytic C(sp³)-H Bond Functionalization. Innovation on Organic Synthesis: The 1st International Symposium on C-H

Activation, Peking University, China, 2012, 10.5-8 (招待講演)

- ⑦ Yoshinori Yamamoto, From Molecular Catalysts to Nano-structured Materials Skeleton Catalysts. 16th IUPAC International Symposium on Organometallic Chemistry Directed Towards Organic Synthesis, Shanghai, China, 2011年7月24日 (招待講演)

[図書] (計3件)

- ① N. Asao, N. Hatakeyama, Y. Yamamoto, Ed. F. D. Toste, V. Michelet, "Gold-catalyzed Addition of Heteroatom Nucleophile to C-C Multiple Bond," in [Gold Catalysis, A Homogeneous Approach], World Scientific, Imperial College Press 2014, 137-174.
- ② B. S. Takale, M. Bao, Y. Yamamoto, Ed. Z. Rappoport, J. F. Liebman, and I. Marek, "Gold-catalyzed Benzannulations," in Patai's Chemistry of Functional Groups [The Chemistry of Organogold Compounds], John Wiley & Sons, Ltd. 2014, Chapter 15, 753-803.
- ③ 金鉄男, 山本嘉則, シー・エム・シー出版, 「フラーレン誘導体・内包フラーレン技術の最前線, 第2章2節, 2014, 40.

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.wpi-aimr.tohoku.ac.jp/yamamoto/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 嘉則 (YAMAMOTO Yoshinori)
東北大学・原子分子材料科学高等研究機構・名誉教授
研究者番号: 60029519

(2) 研究分担者

金 鉄男 (JIN Tienan)
東北大学・原子分子材料科学高等研究機構・准教授
研究者番号: 80431493