

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：82108

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2016

課題番号：26708028

研究課題名（和文）電析法によるナノポーラス金属の合成とその応用

研究課題名（英文）Electrochemical synthesis of nanoporous metals and their applications

研究代表者

山内 悠輔（Yamauchi, Yusuke）

国立研究開発法人物質・材料研究機構・国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・MANA主任研究員

研究者番号：10455272

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 17,200,000円

研究成果の概要（和文）：様々な界面活性剤を用いて、低濃度界面活性剤溶液を作製し、金属イオン種を溶液中に溶存させた。金属イオンの還元後、ミセルの大きさに応じた細孔が形成した。また、Co, Pd, Auなどを加えたPt系合金などへの展開も同時に行った。ナノポーラス金属は、従来の報告には例を見ない非常に高い秩序性を有しており、特異なメソ構造に起因した今までにない新たな物性の発現が十分に期待できる。例えば、細孔壁には多くのキンクやステップがあり、これら電極触媒反応の活性サイトとして機能することができた。従来の市販のPt触媒と比較した実験も展開し、これらのサイトの有効性を実証している。

研究成果の概要（英文）：In this project, we propose new synthetic way for reducing the use of Pt in a catalytic system by increasing the surface area and modifying the Pt surface structure (i.e., alloying). Several types of mesoporous Pt films with different pore sizes ranging from 5 to 50 nm are prepared by electrochemical plating in aqueous surfactant solutions. Interestingly, the atomic crystallinity in the pore walls is coherently extending across over several mesopores, showing a large number of atomic steps. These can serve as active sites for electrochemical reactions. As a result, our mesoporous Pt and Pt-based alloys exhibit high potentiality as a superior electrocatalyst.

研究分野：無機合成化学

キーワード：多孔体

1. 研究開始当初の背景

触媒として高い活性を持つことが知られている白金は、現在まで電池などの電極や工業触媒として広く用いられている。ナノ構造化することで、通常の粉末よりも大幅に表面積を広くすることが可能になるのである。希少元素の使用量を減らす最近の社会の動きからも、少量の白金で大きい表面積を実現し、高い触媒活性を示す新たな白金ナノ材料の開発が極めて重要な課題である。

白金のナノワイヤやナノ粒子は、非常にサイズが小さいため、量子サイズ効果を発現し、バルクの物質とは異なった性質を示すことから近年注目されている。その他、ナノチューブ、白金担持カーボンなどの様々な白金ナノ材料の合成が報告されている。しかしながら、従来の白金材料は、熱的安定性が乏しく、すぐに白金の凝集ができてしまい、表面積の著しい低下をまねくことがある。また、もともとの表面積も白金1gあたり50-100 m²程度であり、それほど高い値ではない。

我々は、従来から界面活性剤をはじめとする両親媒性分子を用いて、高い表面積を有するナノポーラス物質、主に無機酸化物を骨格とするものを中心に扱い、吸着剤や触媒・触媒担体などをはじめ様々な応用展開を行ってきた。特に、適切な電気化学プロセスと融合させることにより、組成を金属まで拡張可能し、高品質な金属メソ多孔体を作製可能であることを明らかにした。我々のナノポーラス金属は、骨格が金属のみから形成している電気伝導性の高い多孔体であり、従来の無機酸化物系ナノ（メソ）ポーラス物質とは異なる電気化学系への応用が期待される。

2. 研究の目的

精密な構造制御の観点からみると、現状の合成技術はまだまだ発展途上であり、組成・形態・構造において、さらに高度に制御されたナノポーラス金属の創製を目指す必要がある。特に、ナノポーラス Pt や Pt 系合金は、次世代の DMFC（メタノール直接型燃料電池）の電極材料として最適であり、電極の多孔質化は、反応面積の増大ばかりでなく、電極中における物質の拡散性が向上し、より高い反応効率を達成することができる。高い表面積を持つ反応触媒担体電極、二次電池用電極や化学センサー等の電気化学系デバイスや金属触媒等への幅広い応用も期待できる。しかしながら、いまだナノポーラス構造に直接起因する機能発現の例は少なく、基礎的な合成研究をふまえた上で、実用レベルに向けての応用に展開していきたいと考えている。単なるナノ空間を作ることにとどまらず、個々のメソ構造と物性の相互作用の解明、更にはナノ構造単位を高次構造化することによる機能発現を目指したい。

3. 研究の方法

(1) ナノポーラス金属の手法の確立を試み

る。今まで手法に基づいて、迅速に白金をポーラス化する手法を提案する。具体的には、工業的な手法である電解メッキなどを取り入れ、より簡単な量産化プロセスを提案したい。電極中の拡散性向上を目指し、ナノ細孔の配向制御や細孔径の拡大を試みる。

(2) 他の金属と複合化させ合金化、コアシェル化を設計すること（高次構造制御）で、白金の被毒を防ぐことができると期待される。さらに、より安価な金属と複合化されることで、白金の使用量を大きく軽減できる。同時に、薄膜化、ファイバーなど、更なる高次構造制御も進める。

(3) 電気化学プロセスの最大の強みは、微細加工した複雑形状の基板の上に金属を成膜できることである。ナノポーラス構造を微細部位に集積化し、プロトタイプの作製を試みる。同時に、従来の材料と比較して、我々のナノポーラス材料の優位性を明らかにしていく。

4. 研究成果

(1) 様々な界面活性剤を用いて、低濃度界面活性剤溶液を作製し、白金イオン種を溶液中に溶存させた。その際、白金イオンの水和水とエチレンオキシド鎖との間で水素結合が形成し、容易に白金イオンはミセル表面に取り込まれることが分かった。透過型電子顕微鏡、SAXS などを用いて確認した。その後、電解析出法で導電性基板上へのナノポーラス金属の成膜を行った。ミセルの大きさに応じた細孔が形成した。また、Co、Pd、Auなどを加えた Pt 系合金などへの展開も同時に行い、元素マッピング、XRD 測定などからも合金化していることを確認している。

(2) 陽極酸化ポーラスアルミナを鋳型にして用いて、アルミナ中の一次元細孔中にナノポーラス白金を形成した。その後、アルミナを除去することで、階層構造有するファイバー電極の作製が可能となった。ファイバーの直径は、アルミナの細孔の大きさに一致していた。このように、界面活性剤ミセルの大きさより、一回り大きな鋳型を有効に活用することで、メソスケールからマクロスケールまで階層的に細孔空間をデザインすることができるようになる。

また、電析法も用いず、化学還元を使用したナノポーラス金属粒子の合成にも成功している。例えば、界面活性剤を溶存させた溶液中に白金塩とルテニウム塩を溶存させ、還元剤を加えることでメソポーラス PtRu 合金粒子の合成が可能である。高い表面積を有し、かつ高い耐 CO 被毒性能を確保している触媒は、今後有望である。

(3) 次世代エネルギーデバイス用電極の開発を更に進めた。構造的な安定性に優れたコ

ア-シェル型のナノ粒子の合成も行った。コアに比較的安価な金属を導入することで、熱的安定性やメタノール酸化反応における活性が大幅に向上した。

また、ナノポーラス金属は、従来の報告には例を見ない非常に高い秩序性を有しており、特異なメソ構造に起因した今までにない新たな物性の発現が十分に期待できる。例えば、細孔壁には多くのキンクやステップがあり、これら電極触媒反応の活性サイトとして機能する。従来の市販の Pt 触媒と比較した実験も展開し、これらのサイトの有効性を実証している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 50 件)

[1] Perfectly Ordered Mesoporous Iron-Nitrogen Doped Carbon as Highly Efficient Catalyst for Oxygen Reduction Reaction in Both Alkaline and Acidic Electrolytes (査読有)

Haibo Tana, Yunqi Li*, Xiangfen Jiang, Jing Tang, Zhongli Wang, Huayu Qian, Peng Mei, Victor Malgras, Yoshio Bando, and Yusuke Yamauchi*, *Nano Energy*, in press (2017). DOI: 10.1016/j.nanoen.2017.04.014

[2] Chiral Sensing with Mesoporous Pd@Pt Nanoparticles (査読有)

Yuxi Fang, Cuiling Li, Jiang Bo, Joel Henzie, Yusuke Yamauchi*, and Toru Asahi* *ChemElectroChem*, in press (2017). DOI: 10.1002/celec.201700257

[3] Layer-by-Layer Motif Architecture: Programmed Electrochemical Synthesis of Multilayer Mesoporous Metallic Films with Uniformly Sized Pore (査読有)

Bo Jiang, Cuiling Li, Huayu Qian, Md. Shahriar A. Hossain, Victor Malgras, and Yusuke Yamauchi* *Angewandte Chemie International Edition*, in press (2017). DOI: 10.1002/anie.201703609

[4] Mesoporous Metallic Rhodium Nanoparticles (査読有)

Bo Jiang, Cuiling Li, Ömer Dag, Hideki Abe, Toshiaki Takei, Tsubasa Imai, Md. Shahriar A. Hossain, Md. Tofazzal Islam, Kathleen Wood, Joel Henzie, and Yusuke Yamauchi* *Nature Communications*, **8**, 15581 (2017). DOI: 10.1038/ncomms15581

[5] Hollow Carbon Nanobubbles: Monocrystalline MOF Nanobubbles and Their Pyrolysis (査読有)

Wei Zhang, Xiangfen Jiang, Yanyi Zhao, Arnau Carne Sanchez, Victor Malgras, Jeonghun Kim, Jung Ho Kim, Shaobin Wang, Jian Liu*, Ji-Sen Jiang, Yusuke Yamauchi*, and Ming Hu* *Chemical Science*, **8**, 3538-3546 (2017). DOI: 10.1039/C6SC04903F

[6] Controlled Growth of Polythiophene Nanofibers in TiO₂ Nanotube Arrays for Supercapacitor Applications (査読有)

Rohan B. Ambade, Swapnil B. Ambade, Nabeen K. Shrestha, Rahul R. Salunkhe, Wonjoo Lee, Sushil S. Bagde, Jung Ho Kim, Florian J. Stadler*, Yusuke Yamauchi*, and Soo-Hyoung Lee*

Journal of Materials Chemistry A, **5**, 172-180 (2017). DOI: 10.1039/C6TA08038C

[7] Hollow Carbon Nanospheres Using an Asymmetric Triblock Copolymer Structure Directing Agent (査読有)

Yunqi Li, Haibo Tan, Rahul R. Salunkhe, Jing Tang, Lok Kumar Shrestha, Bishnu Prasad Bastakoti, Hongpan Rong, Toshiaki Takei, Joel Henzie, Yusuke Yamauchi*, and Katsuhiko Ariga*

Chemical Communications, **53**, 236-239 (2017). DOI: 10.1039/C6CC07360C

[8] Synthesis and Cytotoxicity of Dendritic Platinum Nanoparticles with HEK-293 Cells (査読有)

Kyubin Shim, Jeonghun Kim, Yoon-Uk Heo, Bo Jiang, Cuiling Li, Mohammed Shahabuddin, Kevin C. W. Wu, Md. Shahriar A. Hossain, Yusuke Yamauchi*, and Jung Ho Kim*

Chemistry-An Asian Journal, **12**, 21-26 (2017). DOI: 10.1002/asia.201601239

[9] A Three-Dimensionally Structured Electrocatalyst: Cobalt-Embedded Nitrogen-Doped Carbon Nanotubes/Nitrogen-Doped Reduced Graphene Oxide Hybrid for Efficient Oxygen Reduction (査読有)

Changting Wei, Hongjing Wang*, Kamel Eid, Jeonghun Kim, Jung Ho Kim, Zeid Abdullah Alothman, Yusuke Yamauchi*, and Liang Wang* *Chemistry-A European Journal*, **23**, 637-643 (2017). DOI: 10.1002/chem.201604113

[10] Three-Dimensional Super-Branched PdCu Nanoarchitectures Exposed on Controlled Crystal Facets (査読有)

Muhammad Iqbal, Cuiling Li*, Jung Ho Kim, Saad M. Alshehri, Tsuruo Nakayama, and Yusuke Yamauchi*

Chemistry-A European Journal, **23**, 51-52 (2017). DOI: 10.1002/chem.201604026

[11] Mesoporous Ni-Fe Oxide Multi-Composite Hollow Nanocages for Efficient Electrocatalytic Water Oxidation Reactions (査読有)

Bong Kyun Kang, Moo Hyun Woo, Jooyoung Lee, Young Hyun Song, Zhongli Wang, Yanna Guo, Yusuke Yamauchi, Jung Ho Kim, Byungkwon Lim, and Dae Ho Yoon*

Journal of Materials Chemistry A, **5**, 4320-4324

(2017). DOI: 10.1039/C6TA10094E

[12] Self-Assembly of Polymeric Micelles Made of Asymmetric Polystyrene-*b*-Polyacrylic Acid-*b*-Polyethylene Oxide for the Synthesis of Mesoporous Nickel Ferrite (査読有)

Shunsuke Tanaka, Bishnu Prasad Bastakoti*, Yunqi Li, Shin-ichi Yusa, Daisuke Ishii, Kenya Kani, Amanullah Fatehmulla, Wazirzada Aslam Farooq, Muhammad J. A. Shiddiky, Yoshio Bando, Yusuf Valentino Kaneti*, Yusuke Yamauchi*, and Md. Shahriar A. Hossain* *European Journal of Inorganic Chemistry*, **2017**, 1328-1332 (2017). DOI: 10.1002/ejic.201601459

[13] First Synthesis of Continuous Mesoporous Copper Films with Uniformly Sized Pores by Electrochemical Soft Templating (査読有)

Cuiling Li, Bo Jiang, Zhongli Wang, Yunqi Li, Md. Shahriar A. Hossain, Jung Ho Kim, Toshiaki Takei, Joel Henzie, Ömer Dag, Yoshio Bando, and Yusuke Yamauchi* *Angewandte Chemie International Edition*, **55**, 12746-12750 (2016). DOI: 10.1002/anie.201606031

[14] Tunable-Sized Polymeric Micelles and Their Assembly for the Preparation of Large Mesoporous Platinum Nanoparticles (査読有)

Bo Jiang, Cuiling Li, Jing Tang, Toshiaki Takei, Jung Ho Kim, Yusuke Ide, Joel Henzie, Satoshi Tominaka, and Yusuke Yamauchi* *Angewandte Chemie International Edition*, **55**, 10037-10041 (2016). DOI: 10.1002/anie.201603967

[15] Nanoarchitectures for Mesoporous Metals (査読有)

Victor Malgras, Hamed Atae-Esfahani, Hongjing Wang, Bo Jiang, Cuiling Li, Kevin C.-W. Wu, Jung Ho Kim, and Yusuke Yamauchi* *Advanced Materials*, **28**, 993-1010 (2016). DOI: 10.1002/adma.201502593

[16] A Synergistic System for Lithium-Oxygen Batteries in Humid Atmosphere Integrating a Composite Cathode and a Hydrophobic Ionic Liquid-Based Electrolyte (査読有)

Shichao Wu, Jing Tang, Fujun Li*, Xizheng Liu, Yusuke Yamauchi, Masayoshi Ishida, and Haoshen Zhou* *Advanced Functional Materials*, **26**, 3291-3298 (2016). DOI: 10.1002/adfm.201505420

[17] Mesoporous Pt Nanospheres with Designed Pore Surface as Highly Active Electrocatalyst (査読有)

Bo Jiang, Cuiling Li*, Victor Malgras, Masataka Imura, Satoshi Tominaka, and Yusuke Yamauchi* *Chemical Science*, **7**, 1575-1581 (2016). DOI: 10.1039/C5SC03779D

[18] Nanostructured Nonprecious Metal Catalysts for Electrochemical Reduction of Carbon Dioxide (査読有)

Zhong-Li Wang, Cuiling Li, and Yusuke Yamauchi* *Nano Today*, **11**, 373-391 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2016.05.007>

[19] Unique Nanocrystalline Frameworks in Mesoporous Tin Phosphate Prepared through a Hydrofluoric Acid Assisted Chemical Reaction

Malay Pramanik, Jaewoo Lee, Satoshi Tominaka*, Yusuke Ide, Jung Ho Kim, and Yusuke Yamauchi* (査読有) *Journal of Materials Chemistry A*, **4**, 18091-18099 (2016). DOI: 10.1039/C6TA09297G

[20] Fabrication of PdCo Bimetallic Nanoparticles Anchored on Three-Dimensional Ordered N-Doped Porous Carbon as an Efficient Catalyst for Oxygen Reduction Reaction

Hairong Xue, Jing Tang, Hao Gong, Hu Guo, Xiaoli Fan, Tao Wang, Jianping He*, and Yusuke Yamauchi* (査読有) *ACS Applied Materials and Interfaces*, **8**, 20766-20771 (2016). DOI: 10.1021/acsami.6b05856

[21] Superior electrocatalytic activity of mesoporous Au film templated from diblock copolymer micelles (査読有)

Cuiling Li*, Bo Jiang, Hungru Chen, Masataka Imura, Liwen Sang, Victor Malgras, Yoshio Bando, Tansir Ahamad, Saad M. Alshehri*, Satoshi Tominaka, and Yusuke Yamauchi* *Nano Research*, **9**, 1752-1762 (2016). DOI: 10.1007/s12274-016-1068-z

[22] Synthesis of Hollow Platinum-Palladium Nanospheres with a Dendritic Shell as Efficient Electrocatalysts for Methanol Oxidation (査読有)

Qingqing Lu, Hongjing Wang*, Kamel Eid, Zeid Abdullah Allothman, Victor Malgras, Yusuke Yamauchi, and Liang Wang* *Chemistry-An Asian Journal*, **11**, 1939-1944 (2016). DOI: 10.1002/asia.201600480

[23] Formation of Mesopores inside Platinum Nanospheres by Using Double Hydrophilic Block Copolymers (査読有)

Bishnu Prasad Bastakoti, Yunqi Li, Sudhina Guragain, Saad M. Alshehri*, Muhammad J. A. Shiddiky, Zongwen Liu, Kyubin Shim, Jung Ho Kim, Md Shahriar A Hossain, Victor Malgras, and Yusuke Yamauchi* *Materials Letters*, **182**, 190-193 (2016). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.06.076>

[24] Pd@Pt Core-Shell Nanoparticles with Branched Dandelion-like Morphology as Highly Efficient Catalysts for Olefin Reduction (査読有)

- Kasibhatta Josena Datta, Kasibhatta Kumara Ramanatha Datta, Manoj B. Gawande*, Vaclav Ranc, Klára Čépe, Victor Malgras, Yusuke Yamauchi, Rajender S. Varma, and Radek Zboril*
Chemistry-A European Journal, **22**, 1577-1581 (2016). DOI: 10.1002/chem.201503441
- [25] One-Step Solution-Phase Synthesis of Bimetallic PtCo Nanodendrites with High Electrocatalytic Activity for Oxygen Reduction Reaction (査読有)
Kamel Eid, Hongjing Wang*, Victor Malgras, Saad M. Alshehri, Tansir Ahamad, Yusuke Yamauchi, Liang Wang*, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, **779**, 250-255 (2016). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2015.10.035>
- [26] Mesoporous Trimetallic PtPdRu Spheres as Superior Electrocatalysts (査読有)
Bo Jiang, Hamed Ataee-Esfahani, Cuiling Li, Saad M. Alshehri, Tansir Ahamad, Joel Henzie, Yusuke Yamauchi*
Chemistry-A European Journal, **22**, 7174-7178 (2016). DOI: 10.1002/chem.201600774
- [27] Strategic Synthesis of Mesoporous Pt-on-Pd Bimetallic Spheres Templated from a Polymeric Micelle Assembly (査読有)
Yunqi Li, Cuiling Li, Bishnu Prasad Bastakoti, Jing Tang, Bo Jiang, Jeonghun Kim, Mohammed Shahabuddin, Yoshio Bando, Jung Ho Kim*, and Yusuke Yamauchi*
Journal of Materials Chemistry A, **4**, 9169-9176 (2016). DOI: 10.1039/C6TA02526A
- [28] Triblock Copolymers as Templates to Synthesize Inorganic Nanoporous Materials (査読有)
Yunqi Li, Bishnu Prasad Bastakoti, and Yusuke Yamauchi*
APL Materials, **4**, 040703 (2016). <http://dx.doi.org/10.1063/1.4946885>
- [29] Facile Synthesis of Porous Dendritic Bimetallic Platinum-Nickel Nanocrystals as Efficient Catalysts for the Oxygen Reduction Reaction (査読有)
Kamel Eid, Hongjing Wang*, Victor Malgras, Zeid Abdullah Allothman, Yusuke Yamauchi, Liang Wang*
Chemistry-An Asian Journal, **11**, 1388-1393 (2016). DOI: 10.1002/asia.201600055
- [30] Mesoporous Palladium-Copper Bimetallic Electrodes for Selective Electrocatalytic Reduction of Aqueous CO₂ to CO (査読有)
Mu Li, Junjie Wang, Peng Li, Kun Chang, Cuiling Li, Tao Wang, Bo Jiang, Huabin Zhang, Huimin Liu, Yusuke Yamauchi, Naoto Umezawa*, and Jinhua Ye*
Journal of Materials Chemistry A, **4**, 4776-4782 (2016). DOI: 10.1039/C6TA00487C
- [31] Hard-Templating Synthesis of Macroporous Platinum Microballs (MPtM) (査読有)
Hiroaki Shirai, Yu-Yuan Huang, Tetsu Yonezawa*, Tomoharu Tokunaga, Wei-Chen Chang, Saad M. Alshehri, Bo Jiang, Yusuke Yamauchi, and Kevin C.-W. Wu*
Materials Letters, **164**, 488-492 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.11.002>
- [32] One-Step Synthesis of Dendritic Bimetallic PtPd Nanoparticles on Reduced Graphene Oxide and Its Electrocatalytic Properties (査読有)
Litai Sun, Hongjing Wang*, Kamel Eid, Saad M. Alshehri, Victor Malgras, Yusuke Yamauchi, and Liang Wang*
Electrochimica Acta, **188**, 845-851 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.12.068>
- [33] Morphosynthesis of Nanoporous Pseudo Pd@Pt Bimetallic Particles with Controlled Electrocatalytic Activity (査読有)
Bo Jiang, Cuiling Li*, Joel Henzie, Toshiaki Takei, Yoshio Bando, and Yusuke Yamauchi*
Journal of Materials Chemistry A, **4**, 6465-6471 (2016). DOI: 10.1039/C6TA00037A
- [34] Smart Design of Hollow AuPt Nanospheres with a Porous Shell as Superior Electrocatalysts for Ethylene Glycol Oxidation (査読有)
Qingqing Lu, Changting Wei, Litai Sun, Zeid A. AlOthman, Victor Malgras, Yusuke Yamauchi, Hongjing Wang*, and Liang Wang*
RSC Advances, **6**, 19632-19637 (2016). DOI: 10.1039/C5RA24709H
- [35] Surfactant-Assisted Synthesis of Nanoporous Nickel Sulfide Flakes and Their Hybridization with Reduced Graphene Oxides for Supercapacitor Applications (査読有)
Palani Raja Jothi, Rahul R. Salunkhe*, Malay Pramanik, Shanthi Kannan, and Yusuke Yamauchi*
RSC Advances, **6**, 21246-21253 (2016). DOI: 10.1039/C5RA26946F
- [36] Three-Dimensional Hyperbranched PdCu Nanostructures with High Electrocatalytic Activity (査読有)
Bo Jiang, Cuiling Li*, Victor Malgras, Yoshio Bando, and Yusuke Yamauchi*
Chemical Communications, **52**, 1186-1189 (2016). DOI: 10.1039/C5CC08581K
- [37] Nitrogen-Doped Hollow Carbon Spheres with Large Mesoporous Shells Engineered from Diblock Copolymer Micelles (査読有)
Jing Tang, Jian Liu, Rahul R. Salunkhe, Tao Wang, and Yusuke Yamauchi*
Chemical Communications, **52**, 505-508 (2016).

DOI: 10.1039/C5CC07610B

[38] Oxygen-Assisted Synthesis of Mesoporous Palladium Nanoparticles as Highly Active Electrocatalysts (査読有)

Cuiling Li, Bo Jiang, Masataka Imura, Naoto Umezawa, Victor Malgras, and Yusuke Yamauchi*

Chemistry-A European Journal, **21**, 18671-18676 (2015). DOI: 10.1002/chem.201503129

[39] Preparation of Mesoporous Bimetallic Au-Pt with a Phase-Segregated Heterostructure Using Mesoporous Silica (査読有)

Masaki Kitahara, Saori Kubara, Azusa Takai, Daisuke Takimoto, Shinpei Enomoto, Yusuke Yamauchi, Wataru Sugimoto, and Kazuyuki Kuroda*

Chemistry-A European Journal, **21**, 19142-19148 (2015). DOI: 10.1002/chem.201503174

[40] Multimetallic Mesoporous Spheres through Surfactant-Directed Synthesis (査読有)

Bo Jiang, Cuiling Li,* Masataka Imura, Jing Tang, and Yusuke Yamauchi*

Advanced Science, **2**, 1500112 (2015). DOI: 10.1002/advs.201500112

[41] Block Copolymer-Assisted Solvothermal Synthesis of Bimetallic Pt-Pd Nanoparticles (査読有)

Yunqi Li, Bishnu Prasad Bastakoti*, Cuiling Li, Victor Malgras, Shinsuke Ishihara, and Yusuke Yamauchi*

Electrochimica Acta, **183**, 119-124 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.05.061>

[42] Electrochemical Synthesis of Mesoporous Pt Nanowires with Highly Electrocatalytic Activity toward Methanol Oxidation Reaction (査読有)

Cuiling Li, Victor Malgras, Saad M. Alshehri, Jung Ho Kim, and Yusuke Yamauchi*

Electrochimica Acta, **183**, 107-111 (2015). <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2015.04.028>

[43] Templated Synthesis for Nanoarchitected Porous Materials (査読有)

Victor Malgras, Qingmin Ji, Yuichiro Kamachi, Taizo Mori, Fa-Kuen Shieh, Kevin C.-W. Wu, Katsuhiko Ariga*, and Yusuke Yamauchi*

Bulletin of the Chemical Society of Japan, **88**, 1171-1200 (2015).

<https://doi.org/10.1246/bcsj.20150143>

[44] One-Step Synthesis of Porous Bimetallic PtCu Nanocrystals with High Electrocatalytic Activity for Methanol Oxidation Reaction (査読有)

Kamel Eid, Hongjing Wang*, Pei He, Kunmiao Wang, Tansir Ahamad, Saad M. Alshehri, Yusuke Yamauchi, and Liang Wang*

Nanoscale, **7**, 16860-16866 (2015). DOI: 10.1039/C5NR04557F

[45] Polymeric Micelle Assembly for the Smart Synthesis of Mesoporous Platinum Nanospheres with Tunable Pore Sizes (査読有)

Yunqi Li, Bishnu Prasad Bastakoti,* Victor Malgras, Cuiling Li, Jing Tang, Jung Ho Kim, and Yusuke Yamauchi*

Angewandte Chemie International Edition, **54**, 11073-11077 (2015). DOI: 10.1002/anie.201507608

[46] Surfactant-Directed Synthesis of Mesoporous Pd Films with Perpendicular Mesochannels as Efficient Electrocatalysts (査読有)

Cuiling Li, Bo Jiang, Nobuyoshi Miyamoto, Jung Ho Kim, Victor Malgras, and Yusuke Yamauchi*

Journal of the American Chemical Society, **137**, 11558-11561 (2015). DOI: 10.1021/jacs.5b06278

[47] Electrochemical Synthesis of Mesoporous Gold Films toward Mesospace-Stimulated Optical Properties (査読有)

Cuiling Li, Ömer Dag, Thang Duy Dao, Tadaaki Nagao, Yasuhiro Sakamoto, Tatsuo Kimura, Osamu Terasaki, and Yusuke Yamauchi*

Nature Communications, **6**, Article number: 6608 (2015). DOI: 10.1038/ncomms7608

[48] Polymeric Micelle Assembly with Inorganic Nanosheets for Construction of Mesoporous Architectures with Crystallized Walls (査読有)

Bishnu Prasad Bastakoti, Yunqi Li, Masataka Imura, Nobuyoshi Miyamoto, Teruyuki Nakato, Takayoshi Sasaki, and Yusuke Yamauchi*

Angewandte Chemie International Edition, **54**, 4222-4225 (2015). DOI: 10.1002/anie.201410942

6. 研究組織

(1)研究代表者

山内悠輔 (Yamauchi Yusuke)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・

国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・

MANA 主任研究者

研究者番号：10455272