

ナノ多孔質圧電触媒の開発

研究代表者 下嶋 敦
(先進理工学部 応用化学科 教授)

1. 研究課題

本研究提案では未利用エネルギーとして力学的エネルギーに着目し、圧電現象で生じる分極電荷を化学反応に用いる圧電触媒にナノ細孔構造を導入することで、kPa~MPa オーダーの微小な圧力でレドックス触媒作用を発現する圧電触媒の創出と設計指針の確立を目指す。環境中で自然発生するような小さい圧力を駆動力に活用できれば圧電触媒の利用に向けた大きな発展が期待できる。本研究提案ではありふれた圧電物質に対して精緻なナノ細孔構造を導入する技術を確立することで、細孔構造と圧電触媒活性の相関関係を明らかにする。

2. 主な研究成果

前年度までは、代表的な圧電セラミックスの一つであるニオブ酸リチウムを用いた検討を行ってきたが、本年度はその他の圧電セラミックスにおいてもナノ細孔構造の導入・制御にも成功し、圧電触媒反応を実施した。SEM、TEM、SAXS、窒素吸脱着測定により、規則的なナノ細孔構造の形成を確認した。先行研究を参考に、レドックス触媒反応としてホウ素カップリング反応を行った。アリアルジアゾニウム塩と Bis(pinacolato)diboron、ナノ多孔質圧電触媒を混合し、アセトニトリルを加えて圧力を印加した。1H、13C NMR 分析からカップリング反応の進行を確認した。組成や結晶性の異なる試料では圧電触媒活性が異なる可能性が示された。

上述のセラミックスナノ多孔体を設計するためには、精密な合成技術が必要となる。セラミックス材料に規則的なナノ細孔を導入するとともに、その結晶性を同時に制御することは機能開発のうえで重要な課題の一つである。本研究では金属酸化物に注目し、単結晶に多数のナノ細孔が空いた「単結晶性金属酸化物ナノ多孔体」を合成する技術の開発に成功した。シリカナノ粒子が規則的に集積したシリカコロイド結晶を鋳型に用いて、前駆体である金属塩化物を含浸して空気中で加熱・酸化させることで、鋳型内で金属酸化物の結晶が成長し、鋳型の除去を経て単結晶性金属酸化物ナノ多孔体が見出された。金属塩化物は蒸気圧が高く、加熱により鋳型内部を気相拡散するため、酸素との反応で形成した酸化物の核に対して連続的に原料が供給され、ナノ空間中で結晶成長が起きたと考えられる。

3. 共同研究者

松野敬成 (先進理工学部・応用化学科・講師 (任期付))

4. 研究業績

4.1 学術論文

Takuya Hikino, Hikaru Mochizuki, Takamichi Matsuno, Kazuyuki Kuroda, and Atsushi Shimojima, Tailoring nanoporous aluminosilicates with well-defined Al(OSi)₄ sites using dimethylsilanol-modified cage siloxanes and ammonium cations, *Chem. Commun.*, **61**, 7337–7340 (2025).

Daichi Oka, Kohei Takaoka, Atsushi Shimojima, and Takamichi Matsuno, Quasi-Single-Crystalline Inverse Opal α -Fe₂O₃ Prepared via Diffusion and Oxidation of the FeCl₃ Precursor in Nanospaces, *Chem. Mater.*, **37**, 5005–5014 (2025).

Takamichi Matsuno, Gen Koinuma, Hiroaki Wada, Atsushi Shimojima, and Kazuyuki Kuroda, Fabrication of three-dimensionally ordered mesoporous zirconia using nanoporous carbon as a scaffold, *New J. Chem.*, **49**, 16617–16624 (2025).

Sota Hasebe, Masashi Yatomi, Nonna Hori, Takeshi Iwakami, Takamichi Matsuno, and Atsushi Shimojima, Hierarchically Porous Materials via Co-Assembly of Exfoliated Layered Silicate with Mesoporous Silica Nanoparticles, *Langmuir*, **41**, 25954–25961 (2025).

Takumi Masuda, Takuya Hikino, Rei Umeda, Atsushi Shimojima, and Yasushi Sekine, Porous silica materials derived from cage-siloxane: structural confinement and stabilisation of dispersed Au(0) nanoparticles, *Dalton Trans.*, **54**, 15991–15997 (2025).

Tomohiro Okita, Ryoma Uchida, Atsushi Shimojima, and Takamichi Matsuno, Single-Crystalline Ordered Mesoporous Indium Tin Oxides with Controlled Sn/In Ratio via Vapor-Phase Oxidation of Metal Chlorides within Silica Colloidal Crystals, *Dalton Trans.*, **55**, 6480–6486 (2026).

4.2 総説・著書

松野敬成, 下嶋 敦

動的機能を有するシロキサン系メソ構造体の設計 (特集 シロキサン結合を活用した元素ブロック材料の高機能化戦略) Design of siloxane-based mesostructures with dynamic functions, *セラミックス*, **60**, 608–611 (2025).

下嶋 敦, かが型シロキサンのシリル化誘導体を用いたナノ多孔体合成の最近の展開, *ケイ素化学協会誌*, **42**, 26–33 (2025).

4.3 招待講演

Atsushi Shimojima, Synthesis and unique properties of layered silica/silsesquioxane and polydimethylsiloxane nanocomposites, 11th European Silicon Days, July, 2025.

Takamichi Matsuno, Daichi Oka, Kohei Takaoka, and Atsushi Shimojima, Synthesis of Quasi-Single Crystalline Nanoporous Iron Oxides using Metal Chloride as a Precursor, International Conference on Nanospace Materials 2025 (ICNM6), August, 2025.

Takamichi Matsuno, Ordered Mesoporous Organosiloxane Elastomers using Assemblies of

Silica Nanospheres as Templates toward Nanoparticle Separation, 14th Jilin-Korea-Waseda Alliance Annual Symposium, August, 2025.

Atsushi Shimojima, Nanostructured Organosiloxane Materials with Self-healing Properties, 5th International Conference on Nanomaterials for health, energy and environment (5-ICNM), September, 2025.

Takamichi Matsuno, Synthesis of Single Crystalline Nanoporous Metal Oxides using Metal Chloride as a Precursor, 5th International Conference on Nanomaterials for health, energy and environment (5-ICNM), September, 2025.

Takamichi Matsuno, Single-Crystalline Nanoporous Metal Oxides with Ordered Porous Structures Derived from Metal Chloride Precursors, The 39th International Korea–Japan Seminar on Ceramics (K-J Ceramics 39), November, 2025.

4.4 受賞・表彰

該当なし

4.5 学会および社会的活動

該当無し

5. 研究活動の課題と展望

電子顕微鏡や AFM によるナノスケールのその場分析を用いて、ナノ構造と圧電特性の相関について分析を進めている。また、単結晶性の金属酸化物ナノ多孔体を合成する技術を開発してきたため、組成展開と機能探索を進める。