

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02431

研究課題名(和文) マクロ孔内自己充填による欠陥フリー・ナノ多孔質セラミックスの創製と有機物膜分離

研究課題名(英文) Creation of defect-free nanoporous ceramics via self-filling of macropores for membrane-separation of organic materials

研究代表者

鈴木 義和 (Suzuki, Yoshikazu)

筑波大学・数理工学系・准教授

研究者番号：40357281

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：造孔剤を用いず、1500℃で焼結したAl₂O₃支持体の気孔率は18.8%となり、連続貫通孔は残るものの、やや緻密体寄りの力学特性を示すようになり、基材としての信頼性は向上した。この支持体を基板として、エアロゾルデポジション(AD)法によるコーティングを行った。平均粒子径d₅₀=0.358μmのMgAl₂O₄粉末を合成し、室温下でAD製膜を行った。約1μmの厚みでMgAl₂O₄層が堆積しており、表面にはマクロ欠陥が存在しないことが確認できる。AD-MgAl₂O₄/Al₂O₃積層膜では、除去率44%を達成しており、実用レベルの濃縮にかなり近づいたと言えるだろう。

研究成果の学術的意義や社会的意義

1-10 nm程度の分子や超微粒子を対象とするナノろ過膜(NF膜)や10-100 nm程度の高分子・微粒子・ウイルス等を対象とする限外ろ過膜(UF膜)が、国内セラミックスメーカーによって開発されている。しかし、細孔直径1-100 nm程度、特に、2-50 nm程度のメソ孔に相当するサイズの多孔質セラミックスチューブをマクロ欠陥なしに大面積成膜することは非常に困難であった。本研究は、この「メソポーラスギャップ」を克服し、大面積・欠陥フリー・ナノ多孔質セラミックスを創製することで、高分子やタンパク質分子の高効率膜分離を実証することに成功した。

研究成果の概要(英文)：The porosity of the Al₂O₃ support sintered at 1500 °C without using a pore-forming agent was 18.8%, and although continuous through-holes remained, it showed mechanical properties slightly closer to that of a dense body, improving its reliability as a base material. This support was used as a substrate for coating by the aerosol deposition (AD) method. MgAl₂O₄ powder with an average particle size d₅₀ = 0.358 μm was synthesized, and AD film formation was performed at room temperature. A MgAl₂O₄ layer was deposited with a thickness of approximately 1 μm, and it was confirmed that there were no macro defects on the surface. The AD-MgAl₂O₄/Al₂O₃ laminated film achieved a removal rate of 44%, which can be said to be quite close to a practical level of concentration.

研究分野：セラミックス科学

キーワード：多孔体 アルミナ 有機物膜分離 限外ろ過 阻止率 フィルター

1. 研究開始当初の背景

化学・石油関連産業は、産業全体の約30%超のエネルギーを消費しており、うち約40%（産業分野全体の約12%）が分離精製を目的とする蒸留プロセスで消費されている（NEDO、2016）。同産業分野では、省エネルギー化を格段に進歩させるために、膜分離技術の研究開発が進められており、平成21～25年度にはNEDO「規則性ナノ多孔体精密分離膜部材基盤技術の開発」（5年間・13.4億円規模）が実施されている。具体的には、イソプロピルアルコール（IPA）や酢酸の脱水濃縮をゼオライト系の無機多孔質膜で実現することに挑んでいる。

無機膜は有機膜と比べ機械的強度が高く、耐熱性・化学的安定性に優れている一方で、マクロ欠陥フリーの大面積膜の製造が困難であり、分離性能が不十分（膜透過速度が遅い、目的成分の純度が低い）という大きな問題がある。実際、上記NEDOプロジェクトで開発された多結晶ゼオライト膜は完全な分離膜ではなく、目的成分を濃縮するための濃縮膜（蒸留との併用が必要・図1）という位置づけである。このようなゼオライト膜を作製するには、多孔質アルミナ管等の基材上に、ゼオライト種結晶を担持し、さらに共沈法・水熱法等で2次的なコーティングを行うという手法がとられている。ゼオライトの細孔（~0.1-1.0 nm 程度）を分離に用いることから、対象分子はIPAや酢酸といった低分子に限定されてしまうのが実情であった。

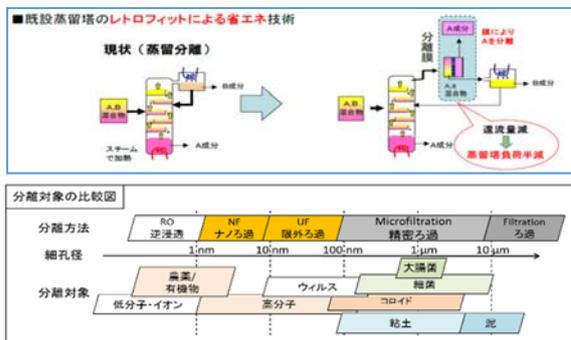


図1 目的成分を濃縮するための濃縮膜

では、化学工学的に重要な、少しサイズの大きな分子（染料や界面活性剤ミセル）やナノ微粒子の膜分離はどのように行われているのであろうか。1-10 nm 程度の分子や超微粒子を対象とするナノろ過膜(NF 膜)や 10-100 nm 程度の高分子・微粒子・ウイルス等を対象とする限外ろ過膜(UF 膜)が、日本ガイシやノリタケといった国内セラミックスメーカーに

よって開発されている。ナノろ過膜には多結晶チタニア膜(TiO₂)が用いられており、高分子膜と比べれば耐久性は高いものの、耐熱性・耐食性の点でさらなる改善が必要である。また、限外ろ過膜には多結晶アルミナ膜(Al₂O₃)が用いられている。Al₂O₃膜はTiO₂膜よりもバランスの良い特性を示し、機械的強度や耐熱性、耐食性がさらに向上すれば、セラミックス分離膜の用途が格段に拡大されることが期待されている。しかしながら、細孔直径1-100 nm 程度、特に、2-50 nm 程度のちょうどメソ孔に相当するサイズの多孔質セラミックスチューブをマクロ欠陥なしに大面積成膜することは非常に困難であり、多孔質セラミックスプロセッシングにおけるメソポーラスギャップとも言える状況にあった。

2. 研究の目的

本研究は、この「メソポーラスギャップ」を克服すべく、大面積・欠陥フリーナノ多孔質セラミックスを創製し、タンパク質分子の高効率膜分離への適用を目指すものである。2019年、我々は「階層型マイクロ・ナノ構造を有する多孔質材料」をソルボサーマル法で合成することに成功した。この階層型マイクロ・ナノ構造体をミクロン径レベルの貫通孔を有する多孔質セラミックスチューブに自己充填させることができれば、目標とする大面積・欠陥フリーナノ多孔質セラミックスを実現できるのではないかという着想を得た。この着想を実証するため、以下の3項目において研究を実施することを目的とした。

- (1) マクロ孔内自己充填による大面積・欠陥フリーナノ多孔質セラミックスチューブの創製
- (2) ソルボサーマル過程の液中その場観察による自己充填プロセスの可視化・定量化
- (3) 大面積・欠陥フリーナノ多孔質セラミックス膜でのタンパク質膜分離の実証

3. 研究の方法

従来のゼオライト膜では、多孔質アルミナ管基材上にゼオライト種結晶を担持し、さらに2次的なコーティングを行う手法がとられている。このゼオライト膜は多結晶性の緻密膜であり、結晶内細孔が分子ふるいとして機能する。CO₂分離膜などの非常に優れた機能を発揮する一方で、結晶内細孔サイズ以上の分離には適用できなかった。最近、我々は、スピネル構造をもつナノ八面体結晶集合体のソルボサーマル合成に取り組んでおり、Co₃O₄の例では200 nm 級のナノ八面体結晶が集積したマイクロキューブというユニークな構造体を得ることに成功した[1](図2左)。ナノ八面体間の空隙(図2中)はメソ孔となり、合成条件を変化させることで10 nm 程度のシャープなメソ孔(図2右)が得られるという非常に有望な結果が得られている。このナノ八面体結晶集合体のユニークな点は、従来のキューブ状メソクリスタルと異なり、粒子間メソ孔が安定に存在するという点である。また、本研究で提案した微構造制御は図3のとおりである。

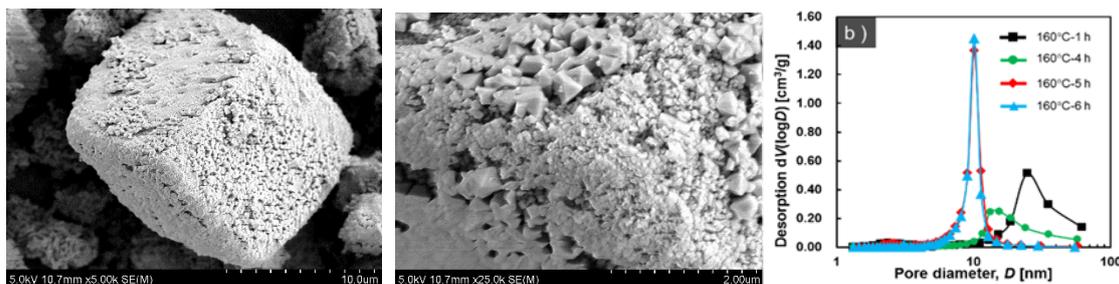


図2 200 nm 級のナノ八面体結晶が集積したマイクロキューブ

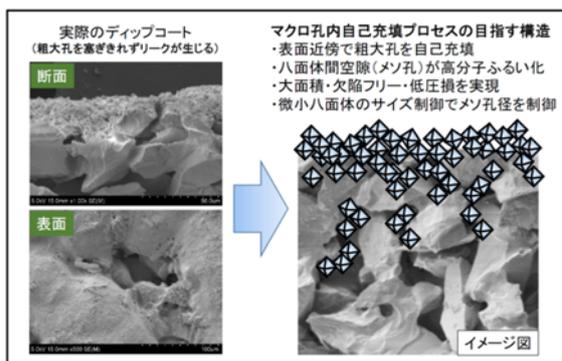


図3 本研究での微構造制御の模式図

当グループでは放射光測定および共焦点レーザー顕微鏡その場観察での実績があり、放射光 X 線小角散乱による動的細孔径解析および共焦点レーザー顕微鏡による液中観察を実施する予定であったが、これらについては継続検討課題となっている。

動的・局所的なプロセス解析を行うことで、製膜メカニズムを解明するとともに速度論的解析も行えるという学術的意義があると考え

られる。

より具体的な研究内容としては、分子量 60,000 程度の球状タンパク質を仮定すると、モル質量は 60 kg/mol、1 分子あたりの質量は 1.0×10^{-22} kg/分子となる。密度が 1.2 g/cm^3 の場合、幾何的な半径は $r=2.7 \text{ nm}$ (直径は $D=5.4 \text{ nm}$) となる。すなわち細孔径が 5 nm であれば、完全ろ過が原理的に可能となる。

前頁に示したナノ八面体粒子が、多孔質アルミナチューブ基材 (細孔径 10 μm 程度) のマクロ孔内へ自己充填することにより、10-20 nm 径のシャープな細孔分布が実現可能であると考えられる。さらに、これまで我々が独自開発してきた熱分解反応焼結膜を基材とし、よりサイズの小さなナノ八面体粒子を充填できれば 5 nm 径のシャープな細孔分布を実現できる可能性がありシングルナノサイズの細孔径を目指す方法論として創造性が高い。

表 1: 有機物膜分離応用に向けた各種無機膜の比較

	ゼオライト結晶成長膜	ディップコート膜	ナノ八面体充填膜 (本提案)	熱分解反応焼結膜 (提案者の従来法)
膜の形態	緻密質多結晶膜 (多孔質基板上)	多孔質多結晶膜 (多孔質基板上)	規則性多孔質多結晶膜 (多孔質基板上)	三次元ネットワーク状多結晶パルク体
細孔のオリジン	ゼオライト骨格による結晶内細孔	部分焼結多結晶セラミックスの粒子間細孔	ナノ八面体間空隙	原料中のガス化成分 (CO ₂ 等)・粒子間細孔
細孔径分布のシャープさ	◎	△	○~◎	○~◎
細孔径の制御可能範囲	◎ (0.5-10 nm) × (> 10 nm)	△~○ (1-100 nm)	◎ (10-100 nm) ○ (5-10 nm)	◎ (100-2000 nm) △ (50-100 nm)
有機物膜分離への適用性	低分子のみ	適用範囲は広いが完全分離は困難 (濃縮のみ)	タンパク質分子を対象	大型ウイルス・細菌類・コロイド粒子

4. 研究成果

以下では、本研究の主要な成果について述べる。

4. 1 水溶性高分子の分離性能評価

具体的な積層膜の作製プロセスを紹介する前に、分離対象の高分子と、その分離性能評価方法について説明する。対象とする水溶性高分子には、分子量 1,000,000 のポリエチレンオキシド (PEO) を用いた。PEO とは分子量が数万以上のポチエチレングリコール (PEG) のことであり、HO-(CH₂-CH₂-O)_n-H の構造式をもつ。直鎖状高分子であるが、球状コンフォメーションを考えた場合、分子量 1,000,000 は約 70nm 程度のストークス直径に相当する。精密ろ過 (microfiltration) では分離・濃縮に不十分であり、限外ろ過 (ultrafiltration) レベルの分離膜が必要となる。

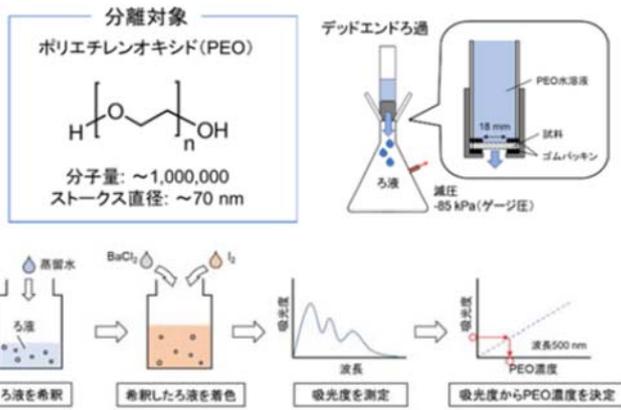


図4 減圧ろ過試験。

実際の化学工学プロセスでは、数気圧から数十気圧をかけて加圧下で分離・濃縮が行われることが多いが、本研究では安全上とコスト的な制約から、差圧が最大1気圧となる減圧下でろ過試験を実施した(図4)。なお、PEOはPEGと同じく無色透明な水溶液であるため、PEGの定量分析に用いられるBaCl₂とI₂を添加してオレンジ色の水溶液とし、可視光吸収分析で波長550nm(あるいは500nm)

の吸光度から検量線を作成してろ過前後の濃度測定を行った。

4.2 ディップコート+反応焼結法

まず、はじめに試みたのは、オーソドックスなディップコートをベースとした製膜法である。実際の有機物膜分離に移行する前の段階で進めていた2019年時点の研究では、クロスフローろ過を想定して市販の細孔径15 μ mのアルミナ管(直径約1cm)を支持層とし、塩基性炭酸マグネシウムと α -Al₂O₃(0.7 μ m)の混合スラリーにディップコートして反応焼結でMgAl₂O₄中間層を形成させ(図2)、さらに塩基性炭酸マグネシウムと α -Al₂O₃(0.2 μ m)の混合スラリーからの反応焼結でMgAl₂O₄ろ過層(トップ層)を形成させていた。現実的なろ過速度を得るためには、支持層の細孔径が15 μ m程度というのには有望ではあるが、このように粗大な細孔を2段階のディップコートで完全に塞いでろ過層をメソ孔のみ(マクロ欠陥フリー)にするには、実際には非常に大変な最適化が必要となる。

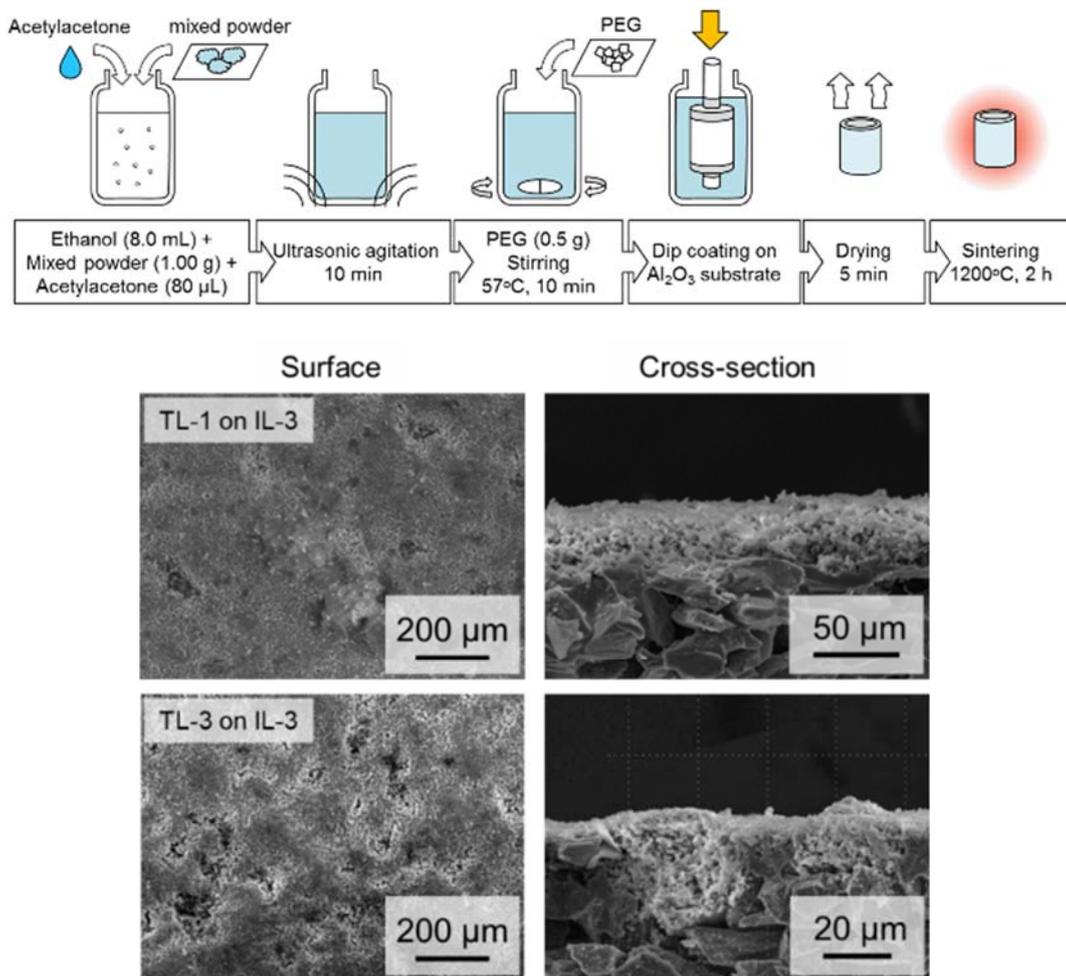


図5 ディップコート+反応焼結法のプロトタイプ

このため、以下の検討では、簡易なデッドエンドろ過（図4）を対象とし、マイクロ・ナノ多孔質積層膜を作りこむことに注力することとした。まずは $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (0.7 μm)粉末 (AKP-3000) に造孔剤としてコーンスターチを 25wt%添加し、成形圧 12MPa で一軸加圧後に大気中 1400°C で焼結し、気孔率 58.6%のサブミクロンサイズの細孔径をもつ円盤状マクロ孔支持体を作製した。その上に、図5と同様に反応焼結スピネル膜を複数回コーティングすることで中間層とろ過層を作製した。見た目は単純な円盤状であるが、3回の焼結プロセスが必要であるため、層間剝離や反りが生じないように焼結するにはかなりの試行錯誤が必要であった。

図4の装置でPEOを実際にろ過したところ、14%の除去率を得ることができた。ろ過膜を透過した濾液はろ過前の86%のPEOを未だ含んでいることとなり、ろ過効率としてはまだまだ低いものの、水溶性高分子溶液の濃縮が差圧1気圧未満で多少なりとも可能となった点は評価できるだろう。

4.3 攪拌水熱コーティング

次に試みたのが、科研費プロジェクト提案の段階で考えていた水熱合成法の応用である。我々のグループでは、フィルター研究と並行して、水熱合成法とポストアニール処理で作製した Co_3O_4 結晶が特異なナノ八面体からなる菱面体状の集合体を形成することを見出しており、このような集合体を Al_2O_3 支持体上に無欠陥で析出させることができれば、限外ろ過膜に使えるのではないかと考えた。

耐食性や化学的安定性では Co_3O_4 スピネルはフィルター素材として適切な材料ではないものの、 MgAl_2O_4 と比べて湿式合成が容易であるため、検証のためのモデル材としては有効であると考えた。 $\text{CoCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ と尿素をモル比で 2:15 となるように、それぞれ 0.714 g、1.351 g 秤量し、蒸留水/エタノール混合溶液（蒸留水 25 mL、エタノール 5 mL）に溶解させ、溶解した水溶液中へ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 支持体を浸漬して、攪拌しながら水熱処理を 160°C、0.5-6 h 行った。攪拌子が発生する渦巻が、生成した Co_3O_4 の前駆体である CaCO_3 微結晶を支持体上面に巻き上げ、支持体上面にはほぼ選択的に堆積するユニークな現象（"水熱うずしおコーティング"）が観察された。白色の MgAl_2O_4 とは異なり着色しているため、どの程度均一にコーティングできているかを目視でも確認することができる。

1300°Cで焼結した気孔率 58.5%の Al_2O_3 支持体のみ（スターチ造孔剤無し・一軸成形圧 9MPa）でのPEO除去率が17%、支持体に Co_3O_4 を攪拌水熱法（"水熱うずしおコーティング法"）で保持した膜での除去率は最大 20%であり、水熱法によるマクロ孔充填はある程度有効ではあるものの、現時点では決定打にはなっていない。今後、化学的安定性や安全性・コストの観点から MgAl_2O_4 や Al_2O_3 を結晶成長させることが望ましいが、大型化・連続化がやや難しいのが水熱法をベースとしたコーティング法の課題といえるだろう。

4.4 エアロゾルデポジション法の応用

先に挙げた $\text{MgAl}_2\text{O}_4/\text{MgAl}_2\text{O}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ 積層膜では、コーンスターチを造孔剤とすることで支持体の気孔率を 58.6%としていた。また、次に挙げた Co_3O_4 攪拌水熱コーティングでは、造孔剤を用いずに成形圧を多少下げることではほぼ同程度の気孔率 58.5%の支持体を作製していた。造孔剤を用いず、1500°Cで焼結した Al_2O_3 支持体の気孔率は 18.8%となり、連続貫通孔は残るものの、やや緻密体寄りの力学特性を示すようになり、基材としての信頼性は向上する。この支持体を基板として、エアロゾルデポジション（AD）法によるコーティングを行うことを検討した。

固相合成法ののち、湿式ボールミル粉碎を行うことで平均粒子径 $d_{50}=0.358\mu\text{m}$ の MgAl_2O_4 粉末を合成し、室温下でAD製膜を行った。約 1 μm の厚みで MgAl_2O_4 層が堆積しており、表面にはマクロ欠陥が存在しないことが確認できる。

AD- $\text{MgAl}_2\text{O}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ 積層膜の細孔径分布はバイモーダル構造となっており、 Al_2O_3 支持体由来の 100-500nm のマクロ孔と MgAl_2O_4 ろ過層由来の 5-35nm 程度のメソ孔が生成していることが分かる。この膜では、除去率 44%を達成しており、実用レベルの濃縮にかなり近づいたと言えるだろう。

ここで紹介した成果以外の詳細（タンパク質分離等）については、論文リストに記載した論文をご参照いただきたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Kagami Kaito, Matsubayashi Yasuhito, Goto Taku, Akedo Jun, Suzuki Yoshikazu	4. 巻 130
2. 論文標題 Nanoporous MgAl ₂ O ₄ coating on porous Al ₂ O ₃ support by aerosol deposition method for organic polymer filtration membrane	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Ceramic Society of Japan	6. 最初と最後の頁 320 ~ 323
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2109/jcersj2.21179	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 鈴木義和、馬 志元、鏡 魁登	4. 巻 57
2. 論文標題 マイクロ・ナノ多孔質積層膜の作製 と有機物膜分離への応用	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 セラミックス	6. 最初と最後の頁 338-342
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 ISHITSUKA Hikaru, NAKAMURA Yuya, ABE Hiroya, SUZUKI Yoshikazu	4. 巻 129
2. 論文標題 Synthesis, microstructure and electrochemical characterization of NiMn ₂ O ₄ nanoparticles via a simple citric acid method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Ceramic Society of Japan	6. 最初と最後の頁 332 ~ 336
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2109/jcersj2.21009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Ma Zhiyuan, Suzuki Yoshikazu	4. 巻 104
2. 論文標題 Hierarchical structure control of MgAl ₂ O ₄ porous ceramics and application to organic polymer filtration membrane	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the American Ceramic Society	6. 最初と最後の頁 6144 ~ 6154
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1111/jace.18009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 FUKUSHIMA Kenta, SUZUKI Tohru S., C. E. Ozbilgin, KOBAYASHI Kiyoshi, ABE Hiroya, SUZUKI Yoshikazu	4. 巻 130
2. 論文標題 pH-controlled synthesis and spark plasma sintering of fine and homogeneous MgZr ₄ (PO ₄) ₆ powder	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Ceramic Society of Japan	6. 最初と最後の頁 243 ~ 248
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2109/jcersj2.21149	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 NAKAJIMA Takumi, ABE Hiroya, SUZUKI Yoshikazu	4. 巻 130
2. 論文標題 Effect of transition metal oxides addition on the color tone of Bi ₄ V ₂ O ₁₁ -based red pigments	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Ceramic Society of Japan	6. 最初と最後の頁 236 ~ 242
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2109/jcersj2.21151	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hatori Rei, Suzuki Yoshikazu	4. 巻 56
2. 論文標題 Effect of sintering temperature on water-purification performance of Al ₂ O ₃ /3Y-ZrO ₂ membrane filters	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Materials Science	6. 最初と最後の頁 9668 ~ 9677
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10853-021-05927-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 川口奏子、鈴木義和
2. 発表標題 CaAl ₁₂ O ₁₉ -CaAl ₄ O ₇ 多孔質複合セラミックスの作製と評価
3. 学会等名 耐火物技術協会 年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木義和
2. 発表標題 熱分解反応焼結法を用いた多孔質セラミックスの微構造制御に関する研究
3. 学会等名 粉体粉末冶金協会 2021年度春季大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Z. Ma and Y. Suzuki
2. 発表標題 Hierarchical structure control of MgAl ₂ O ₄ porous ceramics and application to organic polymer filtration membrane
3. 学会等名 The 5th International Symposium on Hybrid Materials and Processing (HyMaP 2021)（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鏡 魁登、鈴木 義和、松林 康仁、後藤 拓、明渡 純
2. 発表標題 AD法による多孔質Co ₃ O ₄ /Al ₂ O ₃ 積層膜の微構造制御と膜分離への応用
3. 学会等名 日本セラミックス協会 2021年秋季シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坂本知洋、松林康仁、後藤拓、明渡純、鈴木義和
2. 発表標題 AD法によるTiO ₂ 電子輸送層の作製とペロブスカイト太陽電池への展開
3. 学会等名 日本電子材料技術協会 2021年度第58回秋期講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田沼 知、鈴木義和
2. 発表標題 多孔質Al ₂ O ₃ セラミックスの階層構造制御と限外・ナノ濾過膜への応用
3. 学会等名 第60回セラミックス基礎科学討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木 義和、阿部 浩也、鈴木 達
2. 発表標題 有機物膜分離に向けた多孔質セラミックスのマクロ孔内充填プロセスの検討
3. 学会等名 日本セラミックス協会 2020年秋季シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Z. Ma, Y. Suzuki
2. 発表標題 Preparation and microstructure control of porous MgAl ₂ O ₄ multilayer ceramics for filtration applications
3. 学会等名 ICACC2021 (45th International Conference and Expo on Advanced Ceramics and Composites) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鏡 魁登、鈴木義和
2. 発表標題 多孔質Al ₂ O ₃ のマクロ孔充填による微構造制御と膜分離への応用
3. 学会等名 日本セラミックス協会 2021年年会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

鈴木義和研究室 https://www.ims.tsukuba.ac.jp/~suzuki_lab/index.html 鈴木義和アカデミー https://www.youtube.com/channel/UCNtmRhN6Kgj4EcJLQ0Jq1_Q/videos 筑波大学 鈴木義和研究室 https://www.ims.tsukuba.ac.jp/~suzuki_lab/index.html YOSHIKAZU SUZUKI LABORATORY https://www.youtube.com/watch?v=E9sZuoCdiro Yoshikazu Suzuki Lab / 鈴木義和ラボ (YouTube) https://www.youtube.com/channel/UCNtmRhN6Kgj4EcJLQ0Jq1_Q 鈴木義和研究室 https://www.ims.tsukuba.ac.jp/~suzuki_lab/index.html

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	阿部 浩也 (Abe Hiroya) (50346136)	大阪大学・接合科学研究所・教授 (14401)	
研究分担者	鈴木 達 (Suzuki Tohru) (50267407)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・グループリーダー (82108)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------