

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04120

研究課題名(和文) 有機物を用いない新規撥水性酸化物セラミックスのプロセス開発と機構解明

研究課題名(英文) Processing and property of hydrophobic oxide ceramics without using organic compounds

研究代表者

中島 章 (Nakajima, Akira)

東京工業大学・物質理工学院・教授

研究者番号：00302795

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、ZrO<sub>2</sub>の各粉末を一軸加圧成形後、1600°Cで合成空気下で焼結した。1週間程度暗所中で保持することにより80~100°まで接触角が上昇した。オゾン暴露や、合成空気下での熱処理の結果から、撥水性は焼成後の雰囲気中の炭素分の吸着に依ることが示唆された。FT-IRの結果から、合成空気雰囲気下で焼成した試料と、大気雰囲気下で焼成した試料とでは、固液界面でのOH基の伸縮振動に違いがあることがわかった。合成空気の効果はZnOナノロッドでも確認された。これらの知見を活かして自己撥水性を有する抗菌・抗ウイルス材料の開発に成功した。

研究成果の概要(英文)：Sintered bodies of Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> were prepared by uniaxial pressing of an oxide powder, followed by firing in a synthesized air atmosphere. Samples were initially hydrophilic after firing. However, their water contact angles increased during storage in ambient air. The surface hydrophobicity was non-existent after ozonation, but it recovered during two weeks of ambient air storage. It corresponded to the carbon concentration ratio on the surface. Fourier-transform infrared spectroscopy revealed a difference in stretching vibrations of the OH group at around 3400 cm<sup>-1</sup> and 3600 cm<sup>-1</sup> between Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and other oxides. Results suggest that this hydrophobicity originated from the adsorption of organic substances from ambient air onto the surface. Similar effect was confirmed also on ZnO nanorod samples. Based on these results, we have successfully prepared an oxide ceramics with self-hydrophobicity, antibacterial and antiviral properties.

研究分野：無機材料科学

キーワード：撥水 合成空気 希土類

## 1. 研究開始当初の背景

### 研究の学術的背景

撥水処理は、固体と水や様々な物質との相互作用を低減できるため、防滴や着雪着氷防止、防汚、潤滑性向上など様々な目的で用いられている。金属酸化物は、元素間のイオン結合性の割合が大きいこと、融点や強度が高く、表面エネルギーが高い。このため  $\text{Al}_2\text{O}_3$  など通常の酸化物セラミックスは一般に親水的であり、水接触角は  $10\text{--}40^\circ$  程度を示すことが多い。このような表面を撥水化するには、高分子やワックス、界面活性剤、有機シランなどの有機物をコーティングすることが必要である。しかしながら、このようにして得られる撥水性は耐久性に乏しく、一定期間毎にメンテナンスを入れなければ、撥水性を長期間維持することができない。簡便なプロセスで、耐久性の高い撥水性能を金属酸化物に付与する技術は、自動車等の輸送機械、建築物の内装や外壁(屋根・浴室等)、食器等の日用品など、多くの分野で現在も渴望されている。

有機物を用いずに、撥水的な酸化物セラミックスを得たとの報告は、これまでもいくつか散見したが、再現性が得られず、信頼性に乏しかった。最近、Azimiら(*Nature Mater.*, 12, 315 (2013))は、合成空気中で焼成された希土類酸化物セラミックスが水接触角で  $100^\circ$  程度の撥水性を示すことを報告した。彼らは、希土類の  $4f$  軌道が外側の  $5s^2p^6$  軌道の電子に遮蔽されるため、水と相互作用しにくいことにより、撥水性が発現すると考察している。

一般に酸化物セラミックスを焼成する際には、大気雰囲気を用いられるが、合成空気を用いた場合には、焼成過程での雰囲気の水分量は3桁以上低下する。酸化物が、水分が大幅に少ない環境で焼結や結晶化する場合、最表面にある金属元素と酸素の結合に違いが生まれ、そのことに撥水性発現の本質的な理由である可能性がある。このことが事実であれば、酸化物表面科学の新しいパラダイムシフトとなり得るが、この視点からの研究はこれまでまったく行われていなかった。

## 2. 研究の目的

以上の背景に鑑み、本研究では希土類を含む各種の酸化物を合成空気中で焼成し、撥水性の発現の有無を調査するとともに、その機構について検討し、さらに、得られた撥水表面の各種液体に対する動的撥液性とその耐久性等を評価・測定し、特徴付けを行うことを目的とした。これらの検討を通じて、これまで報告されていなかった酸化物固体表面の化学結合に関する新規概念を構築し、この技術をセラミックスのバルク材だけでなく、薄膜にも展開することで、酸化物セラミックスに対する、有機物を使わない環境に優しい撥水処理方法を確立するとともに、これを用いた環境・エネルギー技術の開発に繋げていくことを目指した。

## 3. 研究の方法

### 3-1 試料の作製

#### (i) 焼結体試料

市販の  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、YSZ を乳鉢で粉碎した後、 $100\text{ MPa}$ 、 $3$  分保持の条件で一軸加圧成形した。得られた成形体を白金箔に乗せ、雰囲気制御が可能な密閉式マuffle炉にセットした。 $5^\circ\text{C}$  で昇温し、 $1600^\circ\text{C}$  で2時間保持して焼成した。焼成は合成空気雰囲気下(流量: $1\text{ L/min.}$ )で行い、試料の取り出しは特に  $40^\circ\text{C}$  付近まで冷却してから行った。なお焼成に用いた炉は予め合成空気雰囲気下(流量: $0.5\text{ L/min.}$ )で  $1600^\circ\text{C}$ 、2時間の条件で空焼きし、耐火物に含まれる水分を除去してから使用した。

#### (ii) 薄膜試料

ガドリニウムイソプロポキシドをトルエンに溶解した。その後、トルエンとアセチルアセトン、イソプロピルアルコールを加え、この液体を2週間静置後、上澄み液を濾過した。この Gd コート液と TEOS をパイレックスガラス基板上に  $1500\text{ rpm}$ 、 $5\text{ s}$  の条件でスピコートした。得られた前駆体薄膜は、 $500^\circ\text{C}$ 、2時間保持の条件で焼成した。焼成は純空気(水分  $< 0.5\text{ ppm}$ ) 雰囲気下で行った。

### 3-2 試料の評価

焼結前の粉の表面積は窒素吸着法で評価した。得られた焼結体、薄膜の結晶相は XRD により確認した。焼結体の密度はアルキメデス法により測定した。試料の濡れ性は、蒸留水  $3\ \mu\text{L}$  を用いて接触角計で測定した。表面形状は FE-SEM により観察した。表面粗さの評価は原子間力顕微鏡またはレーザー顕微鏡により行った。試料表面の水分子の配向を調べるために、各焼結体、薄膜試料に関して ATR による IR 分析を行った。本測定では、ダイヤモンドプリズム上に蒸留水を  $10\ \mu\text{L}$  測定滴下し、その上に試料を押し付けて測定した。また、薄膜表面に吸着される炭素量を評価するために、XPS による表面分析を行った。測定には、作製した  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$  薄膜に加え、比較試料として樹脂を用いた。 $\text{Gd}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$  薄膜を焼成後、0時間、2日後、4日後、1ヶ月後に測定を行った。

## 4. 研究成果

得られた焼結体の密度は、いずれも相対密度で概ね  $95\%$  以上であった。焼結後の結晶相は、 $\text{Gd}_2\text{O}_3$  のみ立方晶から単斜晶に転移していた。この相転移は既存の報告と一致する。

合成空気中で焼成した試料の接触角は焼成直後は  $\text{Al}_2\text{O}_3$ :  $0^\circ$ 、YSZ:  $0^\circ$ 、 $\text{Gd}_2\text{O}_3$ :  $10^\circ$  であったが、時間が経過するにつれて増大し、1週間経過した際には  $\text{Al}_2\text{O}_3$ :  $88.6^\circ$ 、YSZ:  $91.6^\circ$ 、 $\text{Gd}_2\text{O}_3$ :  $95.7^\circ$  となり、撥水化の程度は  $\text{Al}_2\text{O}_3 < \text{YSZ} < \text{Gd}_2\text{O}_3$  となった。Fig. 1 にこれらの試料を合成雰囲気下  $1000^\circ\text{C}$  で  $1\text{ h}$  熱処理した後、暗所に保持した際の接触角の変化を示す。接触角は熱処理直後は低下するが、時間の経過とともに増大した。また撥水化したこれらの

酸化物セラミックスをオゾン雰囲気中に 5 分間暴露し、その後暗所に保持した際の接触角変化を Fig. 2 に示す。熱処理の場合と同様に、オゾン処理により接触角の一時的な低下は見られるが、2 週間後にほぼ初期の値に戻った。

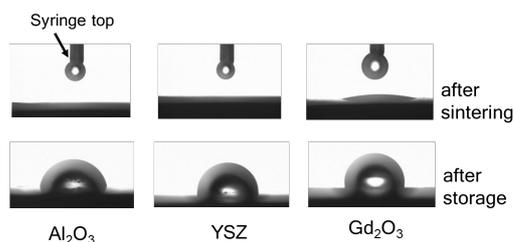


Fig. 1 焼成直後と 3 日経過後の水滴の形状の変化

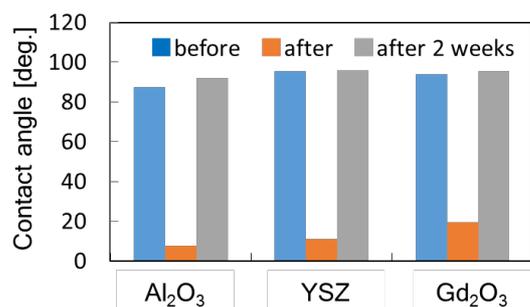


Fig. 2 オゾン処理前、直後、処理してから 2 週間後のそれぞれの試料の水接触角。

Fig. 3 に Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> と SiO<sub>2</sub> の薄膜試料を同様に合成空気下で焼成後、暗所に保管した際の接触角の変化と、XPS から得られた試料表面の元素比を示す。破断面の直接観察から、Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の膜厚は約 80 nm と見積もられたが、SiO<sub>2</sub> については測定ができなかった。XRD から、これらの試料は概ね非晶質であった。5 μm 角の領域の表面粗さは、Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> では 0.58 nm、SiO<sub>2</sub> では 0.26 nm と極めて平滑であった。Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜の XPS スペクトルの主要なピークは Gd4d, O1s, C1s であった。焼成後の時間経過とともに C1s の割合が大きくなり、O1s, Gd4d はその分減少する傾向にあった。さらに、C1s, Gd4d それぞれの占める割合から、C/Gd を算出すると、0 h では C/Gd=1.93 であったが、750 h 後には 4 以上に増大した。SiO<sub>2</sub> については特に Si2p, O1s, C1s が強く検出され、0 h 後と 750 h 後では、C1s のピークがわずかに強く検出された。0 h では C/Si=0.43 となり、750 h 後にも C/Si=0.87 であった。このことから、SiO<sub>2</sub> は Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> と比較して、C を吸着しにくいことが考えられる。PET については、主要なピークであった C1s, O1s のそれぞれの占める割合から、C/O を算出したが、Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> に見られるような C の増加は見られず、全元素についてほぼ一定の割合を維持していた。PET では接触角もほぼ一定で、炭素吸着による影響は見られなかったのに対し、

Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> では炭素量の増加に伴い接触角も上昇する傾向があった。この傾向は希土類酸化物である Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> で顕著であった。

これらの結果はこれらの撥水性の起源が大気中の低分子量の有機物の吸着によることを示唆している。このため、焼成直後の Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 焼結体試料を異なる有機物雰囲気に暴露し、接触角の変化を検討したところ、有機物濃度が高い雰囲気では疎水化が促進されることが判明した。この実験を通し、吸着炭素が撥水性の発現に関わっていることが裏付けられた。また Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を焼成後、炉から取り出す温度が高くなると、疎水化に要する時間が短縮される傾向も得られた。合成空気下で焼成された Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は何らかの理由で疎水的になっており、有機物との親和性が高いと推察される。しかしながら焼成直後に大気に暴露されると、大気中の水（大気中の水の濃度は低分子量の有機物の濃度に比べ、3~4 桁高い）が表面に物理吸着し一時的に親水化する。この表面の水は徐々に有機物に置き換わり、熱力学的な最安定な疎水化状態になっていくと考えられる。雰囲気からの吸着過程は温度に依存するため、炉から取り出し温度が変化すると、有機物の吸着量が変化するため疎水化に要する時間が変化すると考えられる。この現象も外部雰囲気からの有機系物質の吸着が撥水化に寄与していることを示している。

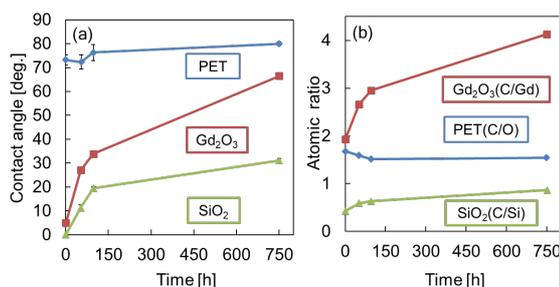


Fig. 3 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> と SiO<sub>2</sub> の薄膜試料を合成空気下で焼成後、暗所に保管した際の(a)接触角の変化と、(b) XPS から得られた試料表面の元素比。比較参照試料は PET フィルム。

Fig. 4 に Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> と SiO<sub>2</sub> の薄膜試料に関して ATR 法により得られた赤外吸収スペクトルである。水のピークは大きく 3 つに分類され、3400 cm<sup>-1</sup> 付近は OH 基の伸縮振動に、1600 cm<sup>-1</sup> 付近は H-O-H の変角振動に、600 cm<sup>-1</sup> 付近は稜動モードに由来する。固/液界面の水の振動によるスペクトルは、3000-3800 cm<sup>-1</sup> の領域で検討され、Azimi らはこの領域のピークを 3200cm<sup>-1</sup>(バルク水の OH), 3400cm<sup>-1</sup>(界面を跨いで水素結合した OH), 3600cm<sup>-1</sup>(界面に点で向かっている、水素結合をしていない OH) のピークに分離して界面の OH 基の配向と撥水性を関連付けている。今回作製した Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜は SiO<sub>2</sub> 薄膜に比べ、3400 cm<sup>-1</sup>, 3600 cm<sup>-1</sup> のピークが大きく現れる傾向にあ

った。このことから、 $Gd_2O_3$  は  $SiO_2$  に比べ、水と相互作用をしにくく、界面の水が疎水的な水和構造をとることが考えられた。同様の解析を焼結体、合成空気雰囲気と通常の大気雰囲気それぞれ焼成した  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$ ,  $Gd_2O_3$  焼結体に対して実施した結果、 $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$  では合成空気中で焼成したもののほうが  $3400\text{ cm}^{-1}$ ,  $3600\text{ cm}^{-1}$  のピークが大きく現れる傾向にあったが、 $Gd_2O_3$  ではほとんど差が見られなかった。このことは、これら3種類の酸化物が有機物を吸着しやすくなる表面を発現する際の、雰囲気条件が異なることを示唆していると考えられる。

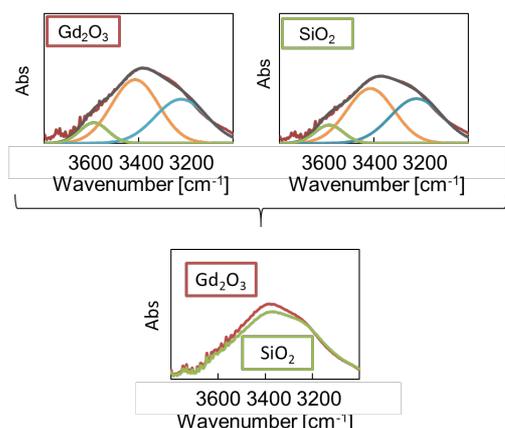


Fig. 4  $Gd_2O_3$  と  $SiO_2$  の薄膜試料に関して ATR 法により得られた赤外吸収スペクトル

以上の結果から希土類酸化物である  $Gd_2O_3$  は、 $Al_2O_3$ , YSZ,  $SiO_2$  等の遷移金属酸化物に比べ、撥水化しやすいと考えられるが、遷移金属酸化物であっても、合成空気中で焼成を実施することにより撥水性が得られることが分かった。元素の電子構造は、Gd: Xe 構造  $+4f^7+5d^1+6s^2$ , Zr: Kr 構造  $+4d^2+5s^2$ , Al: Ne 構造  $+3s^2+3p^1$  である。水分子が直接相互作用しやすい空軌道の遮蔽は  $Gd > Zr > Al$  の順になり、Azimi らの考え方と一致する。このことが撥水性の発現に必要な水蒸気濃度の大きさと関係している可能性はある。一方、本研究の結果は、原子間の結合を切り、大きな物質移動を伴う焼結プロセスにおいて、雰囲気に水分が著しく少ない環境下で形成される表面状態は、通常の大気雰囲気とは異なる可能性を示唆している。水酸基の減少した構造ができていることが推察されるが、これを明らかにするには詳細な表面分析や計算科学からの検討を必要とし、今後の課題である。同様の撥水化は、絶乾に近い環境で構造の組み換えが起これば起こり得ると考えられ、フラグメントから酸化物薄膜ができるドライプロセスでの撥水表面の発現の報告が散見するのは同様の理由によるものと思われる。また、焼結だけでなく、分解や脱水、相変態（希土類の多くは高温で相変態するため、そのことも影響している可能性はある）、結晶化等の物質移動過程が絶乾に近い環境で

起こっても、その構造が室温にまで維持される場合には、撥水化する可能性がある。

同様の現象は水熱法で作製した ZnO ナノロッドアレイ薄膜のポストアニール条件において合成空気をういた際にも得られた (Fig. 5)。また、ごく最近、希土類酸化物と他の物質を組み合わせることで、自己撥水性と抗菌・抗ウイルス性能を併せ持つ新規酸化物セラミックスの開発に成功した。この材料に関しては、現在特許出願の準備に入っている。

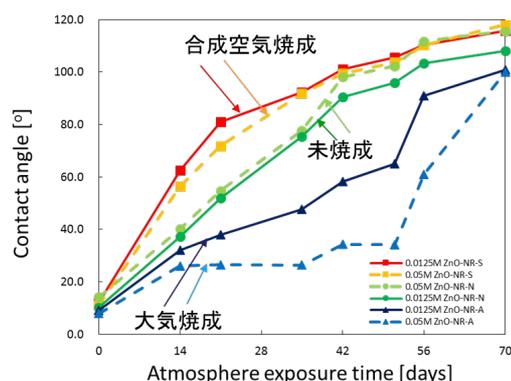


Fig. 5 ZnO ナノロッドアレイ薄膜を作製後、未焼成のもの、合成空気下でポストアニール ( $500^\circ\text{C}$  1h) したものを、大気下でポストアニールしたものの大気放置下での接触角向上速度の違い。

ZnO ナノロッドアレイは粗さを有するため、到達接触角も高くなる。水熱法で金属 Ti 板上に作製した  $TiO_2$  ナノファイバー層の表面は、合成空気下での焼成により接触角が  $150^\circ$  を超える超撥水状態となった。この結果はスパッタ等の非平衡ドライプロセスを用いずに、熱平衡環境に近い焼成工程で、有機物無しに酸化物の超撥水を実現した初めての例ではないかと思われる (Fig. 6)。

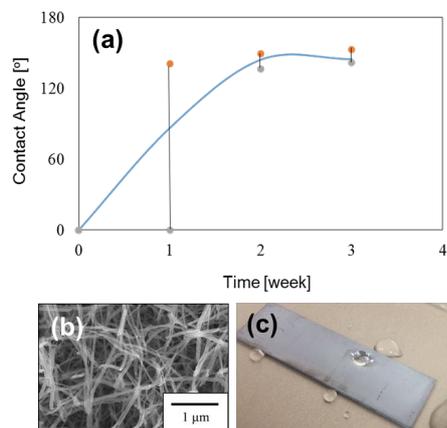


Fig. 6 (a)水熱法で金属 Ti 板上に作製した  $TiO_2$  ナノファイバー層を合成空気下で焼成した際の接触角変化, (b) 試料の微構造, (c) 試料上の水滴の形状

## 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6件)

“Droplet viscosity effects on dynamic hydrophobicity of a solid-liquid bulk composite prepared from porous glass” K. Yokoyama, M. Sakai, T. Isobe, S. Matsushita, A. Nakajima *J. Mater. Sci.*, 52, 595-604 (2017). [査読有] doi: 10.1007/s11998-018-0064-5

“Effects of storage atmosphere and surface roughness on the hydrophobicity of Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin film and sintered body” R. Tanimoto, K. Yoshikawa, T. Isobe, S. Matsushita, A. Nakajima, *J. Ceram. Soc. Jpn.*, 125[8], 638-642 (2017). [査読有] doi: <https://doi.org/10.2109/jcersj2.17087>

“Sliding of water-glycerol mixture droplets on hydrophobic solid-liquid bulk composites using Ti plates with a fibrous TiO<sub>2</sub> layer” H. Takahashi, Y. Higashino, M. Sakai, T. Isobe, S. Matsushita, A. Nakajima, *J. Mater. Sci.*, 53[2], 1157-1166 (2018). [査読有] doi: <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1582-8>

“Comparative study of the dynamic hydrophobicity of fluoroalkylsilane coatings tilted at acute and obtuse angles”, Y. Higashino, H. Takahashi, M. Sakai, T. Isobe, S. Matsushita, A. Nakajima, *J. Coatings Tech. Res.*, in press. [査読有] doi: 10.1007/s11998-018-0064-5

酒井宗寿, 中島 章:「固体表面の動的撥水性に関する最近の話題」色材協会誌、90[1], 15-22 (2017) [査読有] doi: 無し

酒井宗寿, 中島 章:「最近の撥水技術と水ハーベスタ」セラミックス、53[2], 99-103 (2018) [査読有] doi: 無し

[学会発表](計14件)

<国際会議>

A. Nakajima, “Evaluation and control of droplet motion on various hydrophobic silane coatings”, PHYS-1787, #123, Pacificchem 2015, 15 – 20 (presented on 19th) December 2015 Hawaii Convention Center, Honolulu, Hawaii, USA. (米国) [招待講演]

A. Nakajima, M. Sakai, “Evaluation and control of droplet motion on various hydrophobic silane coatings”, The 3rd Symposium of the Center for Nature-derived Materials (Excellent Core) & The 4th International Symposium for Green-Innovation Polymers (GRIP2017), September 26, 2017, Japan Advanced Institute of Science and Technology (北陸先端大), Ishikawa, Japan. (石川県) [招待講演]

K. Yokoyama, M. Sakai, T. Isobe, S. Matsushita, A. Nakajima, “Preparation and hydrophobicity of solid/liquid bulk composite using porous glass and low-surface-energy oil”, PHYS-1570, #403, Pacificchem 2015, 15 – 20 (presented on 18th) December 2015 Hawaii Convention Center, Honolulu, Hawaii, USA. (米国)

Y. Higashino, H. Takahashi, M. Sakai T. Isobe, S. Matsushita, A. Nakajima, “Comparative Study of the Dynamic Hydrophobicity of Fluoroalkylsilane Coatings Tilted at Acute and Obtuse Angles”, 1B09, 90<sup>th</sup> JSCM Anniversary Conference, October 17-18 (presented on 17<sup>th</sup>), 2017, Gakushi-Kaikan, Tokyo, JAPAN(東京都)

T. Kano, T. Isobe, S. Matsushita, A. Nakajima, “Preparation and Evaluation of Hydrophobic ZnO Nanorod Arrays”, P-13, 90<sup>th</sup> JSCM Anniversary Conference, October 17-18 (presented on 18<sup>th</sup>), 2017, Gakushi-Kaikan, Tokyo, JAPAN. (東京都)

<国内会議>

中島章:「固体表面の動的撥水性に関する最近の話題」日本セラミックス協会2017年年会、資源・環境材料部会特別講演、日本大学、3月18日(2017)(東京都) [招待講演]

中島章:「撥水性シランコーティングの静的・動的撥水性とその応用」日本分析化学会、高分子分析研究懇談会、明治大学、4月21日(2017)(東京都) [招待講演]

中島章:「固体表面の動的撥水性に関する最近の話題」第33回日本イオン交換学会研究発表会、特別講演、山梨大学、10月26日(2017)(山梨県) [招待講演]

谷本怜美, 磯部敏宏, 松下祥子, 中島章「撥水性希土類酸化物の作製と評価」第63回応用物理学会春季学術講演会、平成28年3月20日、東京工業大学(東京都)

横山広大, 酒井宗寿, 磯部敏宏, 松下祥子, 中島章「多孔質ガラスを用いた固体液体複合材料の作製とその動的撥水性」第63回応用物理学会春季学術講演会、平成28年3月20日、東京工業大学(東京都)

横山広大, 酒井宗寿, 磯部敏宏, 松下祥子, 中島章「多孔質ガラスを用いた固体/液体複合材料の動的撥水性に及ぼす液滴の粘性の影響」日本セラミックス協会第29回秋季シンポジウム, 2N24 (2016), 9月8日、広島大学(広島県)

東野悠太, 磯部敏宏, 松下祥子, 中島章「マイナスアングルに傾斜させたシラン表

面での動的撥水性」日本セラミックス協会  
2017年年会サテライトプログラム、(2017)、3  
月17日、日本大学(東京都)

高橋宏和、磯部敏宏、松下祥子、中島章、  
酒井宗寿「固体/液体複合撥水性材料上での水  
-グリセリン混合液体の転落」日本セラミック  
ス協会 2017年年会 2E27 (2017)、3月18日、  
日本大学(東京都)

叶野貴大、磯部敏宏、松下祥子、中島章  
「ZnO ナノロッドアレイを用いた撥水材料  
の作製と評価」日本セラミックス協会第30  
回秋季シンポジウム, 1Q06 (2017)、9月19日、  
神戸大学(兵庫県)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)  
ただし現在準備中

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.rmat.ceram.titech.ac.jp>

## **6. 研究組織**

### (1)研究代表者

中島 章 (NAKAJIMA AKIRA)  
東京工業大学・物質理工学院・教授  
研究者番号：00302795

### (2)研究分担者

松下 祥子 (MATSUSHITA SACHIKO)  
東京工業大学・物質理工学院・准教授  
研究者番号：50342853

磯部 敏宏 (ISOBE TOSHIHIRO)  
東京工業大学・物質理工学院・助教  
研究者番号：20518287