

令和 3 年 5 月 28 日現在

機関番号：24403

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15292

研究課題名(和文) 金属有機構造体(MOF)の配向薄膜によるサーマルマネジメント

研究課題名(英文) Fabrication of free-standing metal-organic framework oriented film toward anisotropic thermal conductivity

研究代表者

岡田 健司 (Okada, Kenji)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30750301

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では結晶性かつ多孔性の金属有機構造体(MOF)が大面積で配向した独立膜の合成手法を確立した。この配向独立膜ではMOFのマイクロ細孔、あるいは、有機部位、無機部位が規則的に配列した骨格も周期性を保ち、方位を揃えたまま熱拡散率の測定に十分なサイズにおいて配向している。構造の異なる2種類のMOFの配向独立膜を作製し、面内方向の熱拡散率の角度依存性を評価した。その結果、1次元細孔を有するMOFの配向自立膜では1次元細孔に平行な方位に約1.46倍高い熱拡散率を示すことがわかった。今後、MOFの格子/骨格構造や導入物質を変化することで熱輸送特性を制御した材料の合成が期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、スマートフォン、コンピュータの電子機器においてチップの集積化に伴う発熱密度の上昇が大きな問題となっており、断熱、スイッチング、異方性、熱フィルターなど新しい熱制御技術の開発のためには新材料の合成は必須となる。本研究では、分子・ナノスケールの構造を自在に設計できる金属有機構造体(MOF)を新規熱輸送媒体として研究を行った。欧米、中国を中心にMOFを用いて異方的な熱輸送が可能であるといった理論研究はあったが、実現はされていなかった。今回の研究でMOFの配向独立膜の合成に成功した結果、初めてMOFを用いた異方的熱輸送を実現した。MOFの構造多様性から今後の進展が期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have established a method for the fabrication of large-scale oriented freestanding films of crystalline and porous metal organic frameworks (MOFs). In the oriented freestanding films, the micropores and the framework of the MOFs are also oriented with sufficient size to measure the thermal diffusivity. Oriented freestanding films of two different types of MOFs with different structures were prepared and the angular dependence of the in-plane thermal diffusivity was investigated. As a result, the oriented freestanding film of MOFs with one-dimensional pores showed about 1.46 times higher thermal diffusivity in the direction parallel to the one-dimensional pores. In the future, it is expected to synthesize materials with controlled thermal transport properties by changing the lattice/framework structure of MOFs and the introduced substances.

研究分野：無機材料

キーワード：熱伝導 有機-無機ハイブリッド 配向 独立膜 Metal Organic Framework 熱拡散 異方的

1. 研究開始当初の背景

近年、スマートフォン、コンピュータの電子機器においてチップの集積化に伴う発熱密度の上昇が大きな問題となっている。これら発熱によりリチウムイオンバッテリーの暴発やチップ性能の劣化などが生じるためである。熱源であるチップ側壁からの除熱では限界があるが、熱源から電子機器の最表面に指向性を持って直接熱を輸送し、環境へ放熱することで、現在の限界を打破できる可能性がある。また、これまで“熱”は断熱や環境中への放熱など、エネルギーとして考えたときにその多くが無駄となっている。電気、光における導線、光ファイバーのように指向性や選択性(特定の波長など)をもって熱を輸送したり、熱の輸送方向を右から左へと自在にスイッチングすること(サーマルマネージメント)ができれば、効率的な除熱だけでなく、未利用のまま放出されている熱エネルギーを有効活用できる未来が見えてくる。

このような背景からサーマルマネージメントに関する研究が近年重要視され、精力的な研究がなされている。例えば、数十～数百 nm の穴を周期的に形成した材料において、導熱や集熱が達成されている[*Nature Commun.*, 2017, 8, 15505]。これは用いる物質自体で指向性を創出しているのではなく光でのフォトニック結晶のように熱におけるフォノン構造体を形成することで実現している。このように数十～数百ナノスケールの構造をトップダウン的に形成することで集熱などを達成した例はあるが、更にスケールダウンした分子・ナノスケールの“物質の構造”を駆使したサーマルマネージメントは実現されていない。熱輸送には分子振動・回転や格子振動(フォノン振動)など、物質の分子・ナノスケールの構造が大きく関与していることから、分子・ナノスケールの構造を制御して利用することで、断熱、スイッチング、指向性、熱フィルターを実現することができると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では結晶性かつ多孔性の有機-無機金属構造体(Metal-organic framework: MOF)を新規熱輸送物質として用いることで「異方性熱輸送」、「各波長に分解した熱輸送」、「熱輸送方向のスイッチング」などの自在な熱輸送(サーマルマネージメント)を目指した。MOFは金属イオン(無機部位)と有機配位子(有機部位)の自己組織化により得られ、規則的なマイクロ細孔を有する多孔質材料である(図1)。MOFは自己組織化的に得られる結晶性材料であることから、有機部位、無機部位が規則的に配列した結晶性の骨格を持ち、その間には均一で方位の揃ったマイクロ細孔(Sub nm～数 nm)が存在する。MOFの構造を熱輸送の観点で考えると、マイクロ細孔は断熱的な役割を果たし、周期的な有機部位、無機部位から成る骨格が熱輸送のパスとなる。細孔の向き、有機部位、無機部位の配列の向きに方向性があることから、MOFは異方性の新規熱輸送媒体として大きな可能性を秘めている。分子動力学法を用いた第一原理計算によるとMOFは熱輸送に異方性を有することが報告されるなど[*J. Phys. Chem. C*, 2015, 119, 26000]、欧米、中国を中心にMOFを新規熱輸送物質とした理論研究に関する報告が増えつつある。しかし、国内外を見渡しても、実際にMOFによる異方性の熱輸送を実現した研究例はなく、現状では理論研究で止まっている。これは実用スケールの配向性MOFが実現されなかったためである。一般的にMOFは大きくても数 μm の結晶性粒子でしか得られないため、MOFの特徴であるマイクロ細孔の方向性、有機部位と無機部位の規則的な配列は一つの粒子内(数 μm の領域)で制限される。熱輸送距離が数 μm 程度となるため実質的な異方性熱輸送の実現は困難である。材料科学的アプローチでこれらのMOFの材料としての問題点を解決することで先に挙げる目的の達成を目指した。

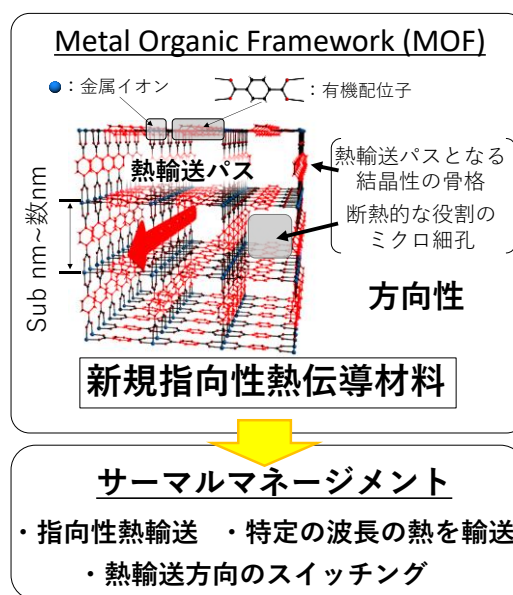


図1.本研究の目的. Metal-organic framework: MOFの構造とMOFを新規指向性熱伝導材料としてサーマルマネージメントの実現.

実際にMOFによる異方性の熱輸送を実現した研究例はなく、現状では理論研究で止まっている。これは実用スケールの配向性MOFが実現されなかったためである。一般的にMOFは大きくても数 μm の結晶性粒子でしか得られないため、MOFの特徴であるマイクロ細孔の方向性、有機部位と無機部位の規則的な配列は一つの粒子内(数 μm の領域)で制限される。熱輸送距離が数 μm 程度となるため実質的な異方性熱輸送の実現は困難である。材料科学的アプローチでこれらのMOFの材料としての問題点を解決することで先に挙げる目的の達成を目指した。

3. 研究の方法

研究者らは、近年、MOFの配向薄膜の形成に成功した[研究者ら, *Nature Mater.*, 2017, 16, 342]。MOF配向薄膜は、MOFの結晶が実用スケール(cmスケール)において配向しているため、ミクロ細孔、あるいは、有機部位、無機部位が規則的に配列した骨格も周期性を保ち、方位を揃えたまま実用レベルで繋がっている。そのため、MOF配向薄膜を用いることで、理論的に証明されているMOFの異方性熱輸送を初めて実現することが可能となる。

本研究で研究目的を達成するために、次に示す2つの研究項目を同時に進行した。

(1) MOFの配向薄膜の合成に対する基礎研究

研究者らがこれまで水酸化銅ナノベルトが配向した膜を基板上に形成し、水酸化銅ナノベルトを、MOFを構成する有機配位子と反応させることで、MOF配向薄膜の形成を行ってきた。この手法では、有機配位子との反応による水酸化銅の溶解と、水酸化銅上でのMOFのエピタキシャル成長が同時に起こり、長時間反応させることで基板上にMOFの配向薄膜が得られる。先に研究者らが報告した論文では4種類のMOFの配向薄膜の形成しか報告しておらず、本研究の目的であるMOFの構造を利用したサーマルマネージメントの達成には十分ではないと言える。そこで本研究ではこの手法の拡張を目指し、他のMOFの配向薄膜の合成や異なるMOFが配向して多層化したMOF-on-MOF薄膜の合成を行った。

(2) MOFの配向独立膜の合成手法の開拓および熱拡散率測定

研究者らがこれまで行ってきた手法である基板上で形成したMOFの配向薄膜を用いては、MOFの熱輸送挙動に対する基板の影響が大きすぎるため、MOF自体の異方性熱輸送を実証できなかった。そこで本研究では上記(1)の研究と同時に、MOFの配向独立膜の合成に注力した。

MOF配向自立膜の合成は次の手法で行った。まず、有機溶媒に溶解する犠牲層をスピニングした基板上に水酸化銅の配向薄膜を形成した。この基板上に成膜した水酸化銅の薄膜を有機溶媒中に浸漬することで、犠牲層が溶解し、水酸化銅が配向した独立膜を得た。基板上でのMOFのエピタキシャル成長手法と同様に、水酸化銅の配向独立膜を有機配位子と反応させることでMOFの配向独立膜を合成した。温度波熱分析法を用いてMOFの配向自立膜の面内方向の熱拡散率を測定した。この際、熱拡散率の測定方向とMOF配向独立膜のある結晶方位が成す角度を変えて熱拡散率を測定することで、MOF配向独立膜の面内方向の熱拡散率の異方性を調査した。また、X線構造解析(XRD)を用いてMOFの配向を調べることで、MOFの構造と熱輸送の関係性を調査した。

4. 研究成果

(1) MOFの配向薄膜の合成に対する基礎研究

研究目的に示したようにMOFの構造を反映して異方的な熱輸送特性を示す材料の合成を行うためには、格子の異方性が大きなMOFの利用が考えられる。そこで本研究では分子サイズの細孔が1次元に連なった1次元ナノチャンネルを有する $\text{Cu}_2(\text{Linker})_2\text{DABCO}$ (Linker: 1,4-benzenedicarboxylate (BDC), 1,4-naphthalenedicarboxylate (1,4-NDC), 2,6-naphthalenedicarboxylate (2,6-NDC), and 4,4'-biphenyldicarboxylate (BPDC),

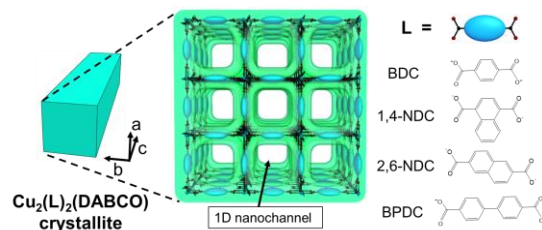


図 2. $\text{Cu}_2(\text{Linker})_2\text{DABCO}$ MOF の模式図。

DABCO: 1,4-diazabicyclo[2.2.2]octane)系 MOFの配向薄膜形成を行った。上述したように水酸化銅からMOFの配向薄膜を形成する手法では、有機配位子との反応による水酸化銅の溶解と、水酸化銅上でのMOFのエピタキシャル成長が同時に起こる。そのため、水酸化銅の溶解の速度を制御することで、MOFの結晶成長プロセスが異なり、配向の異なるMOF薄膜が得られるのではないかと考えた(図3)。具体的には、より酸性の合成溶液を用いた場合、水酸化銅の溶解が優先的に起こり、溶解した銅イオンと有機配位子が基板表面で反応することで、MOFが溶解-析出プロセスで形成される。一方、塩基性の条件では、水酸化銅の溶解が抑制され、有機配位子が水酸化銅と直接反応してMOFのエピタキシャル成長が行えると言える。MOFの合成には酸であるカルボン酸由来の有機配位子と塩基であるDABCOを用いているため、有機配位子とDABCOの比率を変えることで合成溶液の液性を変化させた。その結果、溶解-析出プロセス条件で合成したMOF薄膜においてはブロック状の結晶の長軸が基板に垂直方向に配向した薄膜が得られた(図4)。一方、エピタキシャル成長条件で合成したMOF薄膜においてはブロック状結晶の長軸が基板の面内方向で方向を揃えて配向することがわかった。XRDによる解析の結果、このブ

ロック状結晶の長軸が図 2 に示す MOF 結晶の c 軸、つまり 1 次元ナノチャンネルの方向と対応していることがわかった。そのため、溶液の液性により配向(1 次元ナノチャンネルの方向)を制御して配向薄膜を得ることに成功した。加えて、この分子サイズの 1 次元ナノチャンネルは分子を配列する鋳型として利用することができる。そこで、分子(アゾベンゼン)をエピタキシャル成長条件で合成した MOF の配向薄膜に導入した結果、センチメートルスケールの大面積でアゾベンゼンが配向した薄膜を達成した。

この $\text{Cu}_2(\text{Linker})_2\text{DABCO}$ MOF は構造・細孔異方性が大きく、また、細孔内で分子を配向することができる。そのため、この MOF を用いて、骨格自体の分子や細孔内に導入する分子に熱伝導率の大きな分子や光構造変化を示す分子を利用することで、MOF による様々なサーマルマネージメントの達成が期待できる。

(2) MOF の配向独立膜の合成手法の開拓および熱拡散率測定

研究方法に記したように MOF の配向独立膜の合成を試みた。これまで基板上での合成に実績のある $\text{Cu}_2(\text{BDC})_2$ 、 $\text{Cu}_2(2,6\text{-NDC})_2$ 、 $\text{Cu}_2(\text{BPDC})_2$ 、また、上記研究で合成に成功した $\text{Cu}_2(1,4\text{-NDC})_2\text{DABCO}$ の計 4 種類の MOF に対して、配向独立膜の合成を行った。基板上での合成とは、合成溶液中の有機配位子の濃度や反応時間などの反応条件が異なっており、合成の最適化に苦労したが、これら 4 種類の MOF の配向独立膜の合成を達成した。一例として図 5 に $\text{Cu}_2(\text{BDC})_2$ の配向独立膜の外観を示す。これら独立膜の配向は XRD で確認した。MOF 配向独立膜は、MOF の結晶が実用スケール(cm スケール)において配向しているため、マイクロ細孔、あるいは、有機部位、無機部位が規則的に配列した骨格も周期性を保ち、方位を揃えたまま実用レベルで連結している。また、独立膜であるため、熱拡散測定において懸念される基板の影響も考慮しなくても測定ができる。そのため、格子構造の異なる MOF 配向独立膜を用い、MOF の異方性熱輸送の実証を試みた。2 種類の MOF の配向独立膜 $\text{Cu}_2(\text{BDC})_2$ 及び $\text{Cu}_2(1,4\text{-NDC})_2(\text{DABCO})$ に対して面内方向の熱拡散率を測定した。図 6a,b に $\text{Cu}_2(\text{BDC})_2$ と $\text{Cu}_2(1,4\text{-NDC})_2(\text{DABCO})$ の構造模式図および独立膜の写真を示す。両方の MOF 薄膜において、15 mm×15 mm 以上のサイズの独立膜を得た。それぞれの配向自立膜の面内方向の熱拡散率異方性を測定した結果を図 6c,d に示す。 $\text{Cu}_2(\text{BDC})_2$ 、 $\text{Cu}_2(1,4\text{-NDC})_2(\text{DABCO})$ において b 軸方向である MOF のシートの積層方向(MOF の細孔方向)を 0° と定義すると、 0° や 180° で熱拡散率は最大値となった。 $\text{Cu}_2(\text{BDC})_2$ 独立膜ではポリイミド膜($5.29 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$)と比べて約 2 倍大きな $10.4 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ の熱拡散率を示した。また、 90° および 270° で最も低い値を示した ($\text{Cu}_2(\text{BDC})_2$ では $7.10 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$)。この結果より、MOF 配向独立膜が異方的な熱伝導を示すことが実証された。 0° と 90° との熱拡散率の比は、 $\text{Cu}_2(\text{BDC})_2$ 独立膜では優勢熱輸送方向に約 1.46 倍高い熱拡散率を示し、 $\text{Cu}_2(1,4\text{-NDC})_2(\text{DABCO})$ では約 1.19 倍でした。熱伝導に関する理論計算によると、異方的な骨格構造を有する MOF においては細

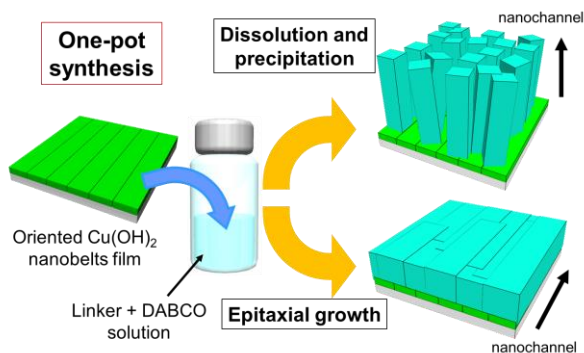


図 3. 結晶成長プロセスの違いによる配向の異なる MOF 薄膜の合成アプローチ。

この MOF を用いて、骨格自体の分子や細孔内に導入する分子に熱伝導率の大きな分子や光構造変化を示す分子を利用することで、MOF による様々なサーマルマネージメントの達成が期待できる。

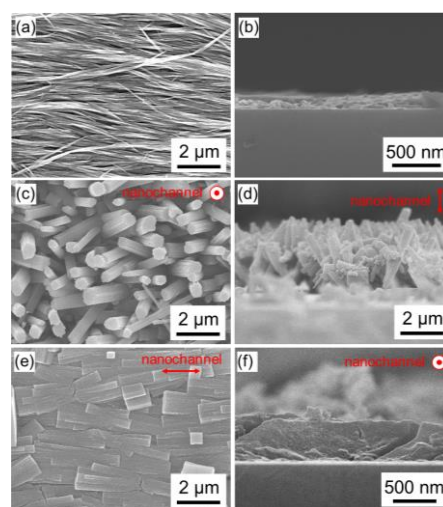


図 4. 水酸化銅薄膜(a,b)と、溶解-析出プロセス(c,d)あるいはエピタキシャル成長プロセス(e,f)で合成した MOF 薄膜の SEM 画像。

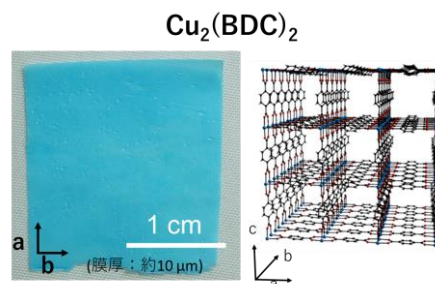


図 5. $\text{Cu}_2(\text{BDC})_2$ MOF の配向独立膜の外観と $\text{Cu}_2(\text{BDC})_2$ の構造。

孔に平行な方向に熱伝導率が高いことが報告されている。

$\text{Cu}_2(\text{BDC})_2$ は異方的な骨格構造であり、b軸方向の1次元細孔に平行な方位に優先的な熱伝導が観測された。一方、 $\text{Cu}_2(1,4\text{-NDC})_2(\text{DABCO})$ ではa、b、c軸に平行な3次元細孔構造をしている。これらのうち、c軸に平行な細孔断面積は、a軸あるいはb軸に平行な細孔の断面積と比べて大きく、c軸方向に異方性が確認できたと考察できる。これらの結果により、MOFの骨格構造と熱輸送に相関があることを実験的に示すことができた。すなわち、熱輸送を阻害したい方位の細孔断面積を大きくすることで、熱伝導率のより大きな異方性を実現できると考えられる。今回用いた独立膜は、前駆体として用いている $\text{Cu}(\text{OH})_2$ がわずかに残存していることから、 $\text{Cu}_2(\text{BDC})_2$ への変換率を上げることで熱輸送異方性の一層の向上が期待できる。また、MOFの格子/骨格構造や導入物質を変化させ、異方性熱輸送特性の向上が期待できる。

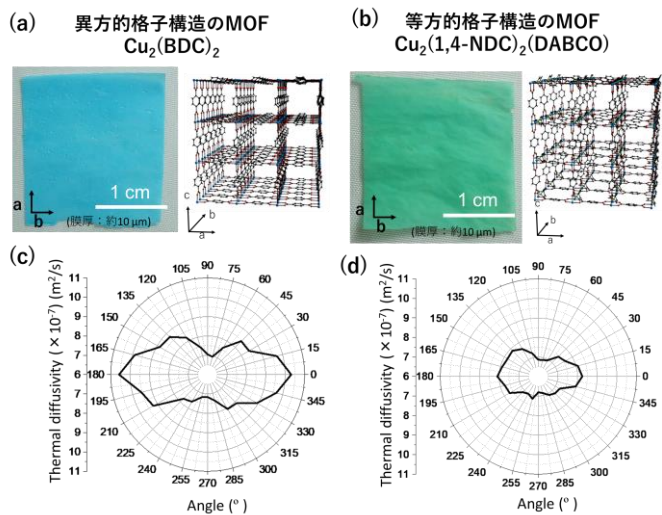


図 6. 本研究で作製した二種類の配向 MOF ((a) Cu_2BDC_2 , (b) $\text{Cu}_2(1,4\text{-NDC})_2\text{DABCO}$) 自立膜とその構造. 面内熱拡散率の角度依存性((c) Cu_2BDC_2 , (d) $\text{Cu}_2(1,4\text{-NDC})_2\text{DABCO}$). $0, 180^\circ$ で結晶 b 軸と熱拡散率測定方向が平行.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Takemoto Masanori, Tokudome Yasuaki, Murata Hidenobu, Okada Kenji, Takahashi Masahide, Nakahira Atsushi	4. 巻 203
2. 論文標題 Synthesis of high-specific-surface-area Li-Al mixed metal oxide: Through nanoseed-assisted growth of layered double hydroxide	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Clay Science	6. 最初と最後の頁 106006 ~ 106006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.clay.2021.106006	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 Ikigaki Ken, Okada Kenji, Takahashi Masahide	4. 巻 4
2. 論文標題 Epitaxial Growth of Multilayered Metal/Organic Framework Thin Films for Electronic and Photonic Applications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Applied Nano Materials	6. 最初と最後の頁 3467 ~ 3475
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnm.0c03462	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 Kino Daisuke, Okada Kenji, Tokudome Yasuaki, Takahashi Masahide, Malfatti Luca, Innocenzi Plinio	4. 巻 97
2. 論文標題 Reactivity of silanol group on siloxane oligomers for designing molecular structure and surface wettability	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Sol-Gel Science and Technology	6. 最初と最後の頁 734 ~ 742
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10971-020-05448-z	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 該当する
1. 著者名 OKADA Kenji	4. 巻 128
2. 論文標題 One-dimensional metal hydroxide nanomaterials with macroscopically controlled orientation and aggregation: fascinating surface hydroxyl groups on anisotropic structures for functionalities	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Ceramic Society of Japan	6. 最初と最後の頁 627 ~ 634
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2109/jcersj2.20105	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 Takemoto Masanori, Tokudome Yasuaki, Noguchi Daisuke, Ueoka Ryota, Kanamori Kazuyoshi, Okada Kenji, Murata Hidenobu, Nakahira Atsushi, Takahashi Masahide	4. 巻 36
2. 論文標題 Synthesis of a Crystalline and Transparent Aerogel Composed of Ni?Al Layered Double Hydroxide Nanoparticles through Crystallization from Amorphous Hydrogel	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Langmuir	6. 最初と最後の頁 9436 ~ 9442
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.langmuir.0c01292	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 Okada Kenji, Miura Yoko, Chiya Tomoya, Tokudome Yasuaki, Takahashi Masahide	4. 巻 10
2. 論文標題 Thermo-responsive wettability via surface roughness change on polymer-coated titanate nanorod brushes toward fast and multi-directional droplet transport	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 RSC Advances	6. 最初と最後の頁 28032 ~ 28036
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0RA05471B	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 Okada Kenji, Nakanishi Miharuru, Ikigaki Ken, Tokudome Yasuaki, Falcaro Paolo, Doonan Christian J., Takahashi Masahide	4. 巻 11
2. 論文標題 Controlling the alignment of 1D nanochannel arrays in oriented metal?organic framework films for host?guest materials design	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemical Science	6. 最初と最後の頁 8005 ~ 8012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0SC02958K	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 該当する

1. 著者名 Okada Kenji, Takahashi Masahide	4. 巻 127
2. 論文標題 Monolithic SrTiO₃/titanate nanotube/TiO₂ nanocomposite toward enhanced photocatalytic activity	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Ceramic Society of Japan	6. 最初と最後の頁 761 ~ 766
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2109/jcersj2.19089	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 Okada Kenji, Takano Masanari, Tokudome Yasuaki, Tokuda Yomei, Takahashi Masahide	4. 巻 25
2. 論文標題 Preparation of Silicophosphate Alternating Hybrid Copolymers via Nonaqueous Acid-Base Reactions of Phosphoric Acid and Organo-Bridged Bis(chlorosilane)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Molecules	6. 最初と最後の頁 127 ~ 127
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/molecules25010127	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 Takemoto Masanori, Tokudome Yasuaki, Kikkawa Soichi, Teramura Kentaro, Tanaka Tsunehiro, Okada Kenji, Murata Hidenobu, Nakahira Atsushi, Takahashi Masahide	4. 巻 10
2. 論文標題 Imparting CO ₂ reduction selectivity to ZnGa ₂ O ₄ photocatalysts by crystallization from hetero nano assembly of amorphous-like metal hydroxides	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 RSC Advances	6. 最初と最後の頁 8066 ~ 8073
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0RA00710B	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 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 岡田健司
2. 発表標題 金属水酸化物を足場とする配向性金属有機構造体(MOF)薄膜
3. 学会等名 第1回 省エネルギーに貢献する粒子設計・粉体プロセスの薬工連携ワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡田健司
2. 発表標題 無機化合物表面における金属有機構造体の配向制御と機能創出
3. 学会等名 触媒学会 規則性多孔体研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Okada, M. Nakanishi, K. Ikigaki, M. Takahashi
2. 発表標題 Orientation-controlled Metal Organic Framework Film From Metal Hydroxide Nano-assemblies
3. 学会等名 日本セラミックス協会 第59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 岡田健司
2. 発表標題 1次元金属水酸化物ナノ材料の配向・凝集構造制御による機能創出
3. 学会等名 日本セラミックス協会関西支部 2020年度関西支部新年特別講演会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kenji Okada
2. 発表標題 Crystal growth of inorganic-organic hybrid materials on metal hydroxide: epitaxial growth of porous coordination polymer
3. 学会等名 日本化学会 第101春季年会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡田健司
2. 発表標題 配向・凝集構造制御による金属水酸化物ナノ材料の機能創出
3. 学会等名 日本セラミックス協会 2021年年会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Okada, M. Takahashi
2. 発表標題 Mesostuctured silica-based film: nm-scale structural deformation and μ m-scale structuring
3. 学会等名 3rd International Symposium on Silsesquioxanes-based Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Okada, T. Chiya, Y. Tokudome, M. Takahashi
2. 発表標題 Thermo-responsive wettability in hydrophobic regime on polymer-coated titanate nanorod brushes
3. 学会等名 International Sol-Gel Conference, Sol-Gel 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Okada, M. Takahashi
2. 発表標題 Directing pores in framework compounds for multifunctional material
3. 学会等名 International Symposium on Photocatalysis, Photofunctional Materials and Nano-Science & Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡田健司, 三浦陽子, 千屋朋也, 徳留靖明, 高橋雅英
2. 発表標題 垂直配向チタン酸ナノ構造を用いた熱応答性撥水表面の形成
3. 学会等名 日本ゾル-ゲル学会題17回討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡田健司
2. 発表標題 配向・凝集構造制御による金属水酸化物ナノ材料の機能創出
3. 学会等名 日本セラミックス協会 2020年年会（招待講演）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------