

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K20564

研究課題名（和文）ナノポーラス錯体によるダイナミック熱スイッチ材料の創製

研究課題名（英文）Creation of Dynamic Thermal Switching Material with Nanoporous Metal Complexes

研究代表者

松田 亮太郎（Matsuda, Ryotaro）

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：00402959

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 20,000,000円

研究成果の概要（和文）：ガス雰囲気下 in situ 熱量測定装置を独自に構築した。この装置を用いて様々なMOFにおけるCO₂吸脱着熱の直接観測を行った。特に剛直なMOFと柔軟なMOFの吸着における熱動態を明らかにすることができた。MIL-53(Al)について、同一組成で柔軟、剛直の2種類を作り分け、それぞれに対して吸着熱測定を行った結果、柔軟なMIL-53(Al)は吸着時の構造変化で大きな発熱を抑制することが分かった。また、構造膨張区間での吸着熱が一定となった結果に着目し、同区間における構造変化を詳細に解析することで、構造変化の度合いと発熱の抑制量に相関があるということを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

柔軟なMOFは吸脱着熱を構造変化によって抑制できることを実験的に明らかにした。柔軟なMOFを用いると、構造変化を示す狭い圧力領域において、効率的にPSAを運転可能なだけでなく、吸着における発熱・吸熱の抑制が可能であることがわかり、柔軟性MOFを用いた省エネデバイスへの応用が期待できる。また、本研究では当初予期していなかった様々な空間構造を有する新規MOFを見出すこともでき、MOFナノ空間を利用した熱制御材料や反応場を提供する材料としての応用展開も期待される。以上、本研究において持続可能な社会を実現に資する有用な材料科学分野の研究成果を挙げる事ができた。

研究成果の概要（英文）：We uniquely constructed an in situ calorimeter under a gas atmosphere. Using this device, we carried out direct observations of CO₂ adsorption/desorption heat in various Metal-Organic Frameworks (MOFs). Notably, we were able to elucidate the thermal dynamics involved in the adsorption process for both rigid and flexible MOFs. For MIL-53(Al), we produced two versions with identical compositions but different flexibilities, and conducted heat of adsorption measurements for each. The results revealed that the flexible MIL-53(Al) can suppress significant heat release during adsorption due to its structural changes. Furthermore, we found that the heat of adsorption became constant in the structural expansion range. Through detailed analysis of the structural changes in this range, we clarified that there is a correlation between the extent of structural changes and the amount of heat suppression.

研究分野：錯体化学

キーワード：多孔性金属錯体 ナノ空間 吸着熱

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

一般にマイクロ孔に分類される 2nm 未満の細孔は、上下左右の細孔表面からのエネルギーポテンシャルの重なり合いで -2000K を超える高エネルギーポテンシャル空間を形成する。代表的なマイクロ孔物質である活性炭は炭素のみが構成元素であるにも関わらず、窒素等の単純な分子でも $10\sim 40\text{kJ/mol}$ もの強いエネルギーで細孔内に捕捉する事が可能である。また、マイクロ孔物質はこのような空間を高密度に有し、有害物質等を大量に吸着除去する材料として広く利用されている。一方、高エネルギーポテンシャル空間への分子吸脱着には、巨大な熱エネルギー移動が伴うので、エネルギー変換デバイスとしても非常に有用と考えられるが、この視点に立った研究は非常に限定的であり、ゼオライトへの水吸脱着に伴う熱移動を利用したヒートポンプ等に限られている。多孔性物質の1種である多孔性金属錯体(MOF)は構成単位の有機分子や金属イオンを選択して、ナノ空間を自在に設計できることから、新しい機能性ナノ空間物質として大きく期待され、大量ガス吸着や選択的分子吸着等、吸着材料として多くの研究がなされてきた。しかし他のナノ空間材料と同様に、MOFはこれまでが、熱エネルギー輸送材料としての研究はあまりなされていない。柔軟性を有するMOFは吸着に伴う構造相転移を示すことが知られており、吸着熱と構造相転移が相関する新しい機能開拓も期待される。また、高エネルギーポテンシャル空間としてのMOFナノ空間の反応場としての基礎・応用研究も不十分であり、熱物性ととも新しい反応場としての開拓も期待されていた。

2. 研究の目的

【①本研究の目的】

我々が消費するエネルギーのうち未利用の廃熱エネルギーが60%も占めている。そのため、この廃熱を必要な箇所に運び有効利用するための材料開発が求められている。これまでに、様々な熱制御材料が検討されてきたが、実用的な材料は極めて限られている。また、発熱・吸熱を能動的かつ任意に制御可能な材料に至ってはほとんど検討されていない。本研究では、ナノ空間物質へのガス吸脱着を利用した全く新しい熱制御材料の開発に挑戦する。本研究では多孔性物質の一種である多孔性金属錯体

(MOF)を熱制御材料として用いる。MOFは構成単位の有機分子や金属イオンを選択することで、ナノ空間の構造や機能を自在に設計できることから、新しい機能性ナノ空間物質として期待されている。ところがMOFの研究のほとんどは、安定な細孔を作り、ガス吸着やガス分離といった従来多孔性物質の機能に主眼がおかれている。その一方で、細孔への分子吸脱着により熱の移動を詳細に検討した研究はほとんど見当たらない。本研究ではMOFの「吸着・脱着機能」と「熱制御機能」を統合することで、まったく新しい「動的熱制御機能」を有する物質を創製する。これにより、環境の圧力や温度を変化させることで自在に熱移動の制御が可能になるだけでなく、これまで注目されていなかった「吸着化学」と「熱科学」を融合した新しい学問領域を開拓する(図1)。

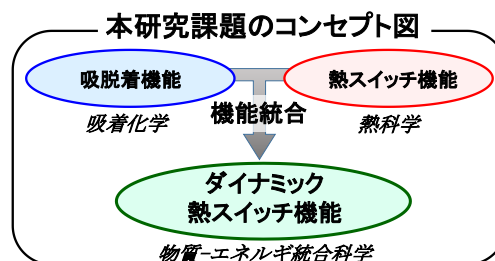


図1. 本研究課題のコンセプト

3. 研究の方法

本研究課題を実現するために必須の下記A、Bの課題を計画的に取り組み成果を挙げる。

A: MOFの気体分子に伴う熱移動の計測システムの構築

従来のMOF材料の研究は吸着質の物質移動に着目したものがほとんどであり、吸着に伴う熱移動に関する研究は十分なされていない。MOFの吸着熱に関する基礎的知見を得るためには、吸着に伴う物質移動現象と熱移動の相関を明らかにする必要がある。しかしながら、そのような測定装置は一般的ではなく、従来は吸着等温線から微分吸着熱を間接的に得る方法が主流であった。そこで、本研究では、吸着量と熱の移動を直接観測を可能にする装置を開発する。吸着量測定装置と吸着熱測定装置を組み合わせ、等温条件および等圧条件において自由自在にすべての吸着測定点での吸着熱の直接測定を可能にし、吸着過程における熱移動の本質的理解を可能にする。

B: MOFの構造と吸着熱特性の相関の解明

MOFは分子の吸脱着によって構造が変化しない剛直なタイプと、分子の吸脱着に伴って、構造が柔軟に変化するタイプのものが知られている。構造が柔軟なタイプは構造変化にエネルギーが必要であるため、吸着熱との相関あると考えられるが、これまでにその相関を実験的データに基づいて検討した例はない。そこで、まず剛直なMOFと柔軟なMOFの構造を数種類合成するとともに、同じ骨格構造を有するが、構造の柔軟性を変化させられるMOFを合成する。続いてそれらの合成したMOFを上述の吸着量-吸着熱同時測定装置で二酸化炭素を吸着質として測定を行い、構造と吸着熱特性の相関の解明に挑戦する。

4. 研究成果

(4-1) 試料合成

(4-1-1) HKUST-1 ($[\text{Cu}^{\text{II}}_3(\text{btc})_2]_n$)の合成と構造

6 mL の N,N-dimethylformamide (DMF) に 1,3,5-benzenetricarboxylic acid (H3btc) (0.42 g; 2.0 mmol) を溶解させたものと、6 mL の $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (0.70 g; 2.9 mmol) 水溶液を Teflon-lined stainless steel vessel の中で混合させた。この容器を 85 °C のオーブンで 3 日間加熱し、目的の結晶を得た。単結晶 X線結晶構造解析により、HKUST-1 は 2 価の銅イオンにトリメシン酸の酸素部分が架橋する形で配位したパドルホイール型ユニットが無限に連なることで 3 次元骨格を有しており、また、細孔表面に配位不飽和な金属サイト (Open metal sites; OMSs) が露出する構造であることを確認した。

(4-1-2) ELM-11 ($[\text{Cu}^{\text{II}}(\text{bpy})_2(\text{BF}_4)_2]_n$)の合成と構造

20 mL の EtOH に 4,4'-bipyridine (0.19 g; 1.2 mmol) を溶解させたものを、20 mL の $\text{Cu}(\text{BF}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (0.21 g; 0.60 mmol) 水溶液へゆっくりと室温で加えた。即座に青色の沈殿物が形成した。この混合物を室温で 1 日間攪拌した。その後、結晶を濾過し、水と EtOH で洗浄、室温で乾燥させ、続いて 120°C で 8 時間真空乾燥して目的の化合物を得た。ELM-11 は 2 価の銅イオンとビピリジンから成る 2 次元グリッドシートが、水素結合やファンデルワールス力によって相互作用し無限に積層する骨格を形成していることを確認した。

(4-1-3) ELM-12 ($[\text{Cu}^{\text{II}}(\text{bpy})_2(\text{OTf})_2]_n$)の合成と構造

20 mL の EtOH に 4,4'-bipyridine (0.19 g; 1.2 mmol) を溶解させたものを、20 mL の $\text{Cu}(\text{OTf})_2$ (0.22 g; 0.60 mmol) 水溶液へゆっくりと室温で加えた。即座に青色の沈殿物が形成した。この混合物を 24 h 室温で攪拌した。その後、結晶を濾過し、水と EtOH で洗浄、室温で乾燥させた。得られた結晶を 393 K、8 時間真空させ目的物を得た。ELM-12 ($[\text{Cu}^{\text{II}}(\text{bpy})_2(\text{OTf})_2]_n$) は、ELM-11 と同じ 2 次元レイヤー構造を有しており、ELM-11 の銅イオンに対するアニオン BF_4^- が OTf^- に置換された構造となっていることを確認した。

(4-1-4) MIL-53(A1)_Flexible の合成と構造

$\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (1.3 g; 3.5 mmol) と terephthalic acid (H2bdc) (0.29 g; 1.7 mmol) と H_2O (5.0 g; 2.9×10^2 mmol) を Teflon-lined stainless steel vessel の中で混合させた (mol 比 = 1: 0.5: 80)。この容器を 493 K のオーブンで 3 日間加熱した。室温まで降温させた後、溶け残った溶媒テレフタル酸を完全に除去するために DMF で置換し 120 °C で 1 日間加熱した。室温まで降温させた後、EtOH で 3 回洗浄した。得られた結晶を 393 K、8 時間真空させて目的物を得た。MIL-53(A1) ($[\text{Al}^{\text{III}}(\text{OH})(\text{bdc})]_n$) 30 は $\text{AlO}_4(\text{OH})_2$ 八面体がテレフタル酸 (bdc) 配位子で接続されることで 3 次元の無限骨格を形成している。合成直後は細孔内に溶媒が入っており、広い細孔 (large pore; lp) を有しているが、脱溶媒を行うことで狭い細孔 (narrow pore; np) へと遷移する構造柔軟性を有することを確認した。

(4-1-5) MIL-53(A1)_Rigid の合成と構造

$\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (1.4 g; 3.8 mmol) と H2bdc (0.56 g; 3.4 mmol) と 20 mL の acetonitrile (CH_3CN) を Teflon-lined stainless steel vessel の中で混合させた。この容器を 130 °C のオーブンで 22 時間加熱した。得られた結晶は MIL-53(A1)_Flexible と同様の手順で目的物を得た。構造は MIL-53(A1)_Flexible と同じであるが、構造欠陥から構造柔軟性を示さないことが期待されるものである。

(4-2) ガス雰囲気下 in situ 熱量測定 (図 2)

本研究でガス雰囲気下 in situ 熱量測定を構築した(図)。吸着測定装置はマイクロトラック・ベル社の Belsorp-18 と、熱量測定装置は SETARAM 社の BT 2.15 CALORIMETER (カルベ式熱量計) の 2 つの装置をガス導入配管で接続し、吸着測定を行いながら、熱収支が観測で切れるよう設計した。熱量測定装置は、装置の外側が断熱層で覆われ、その内側にある液体窒素層は常に満たされた状態で、ヒーターで加熱することにより 84~473 K で温度制御を可能にした。ヒーターの熱は熱交換ガスであるヘリウムを介して試料部

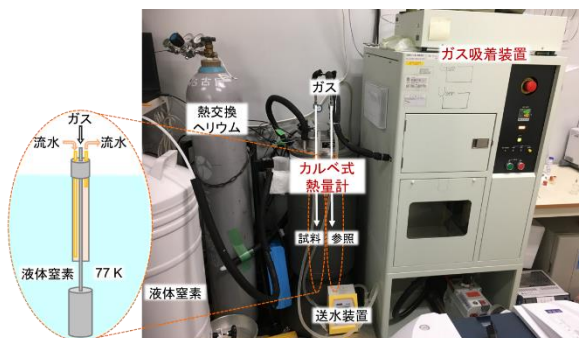


図 2. in situ 吸着・熱量測定装置

へ伝達される。沸点が高温である CO_2 や H_2O のような吸着質を用いる際に凝縮してしま事をさけるため、配管周りに熱媒となる流水管を取り付けたプローブを設計・作製した。

(4-3) ガス雰囲気下 in situ 熱量測定

合成したサンプルの CO₂ 雰囲気下 in situ 熱量測定を行った。

(4-3-1) HKUST-1 の測定結果 (図 3)。

Cu₁ 原子あたりに CO₂ が 1 分子吸着する区間までが大きな発熱に相当していることが分かった。また、全ての Cu が CO₂ で満たされた後、2 分子までは 22 kJ/mol 程度の一定の発熱となっている。これは OMSs 以外の細孔表面との吸着熱に相当すると考えられる。2 分子以降はほとんど吸着が進行しておらず、195 K における CO₂ の凝縮熱 (25.2 kJ/mol) に近い値となっていることから、細孔表面部分は飽和状態となり、多層吸着となっていることが考えられる。したがって HKUST-1 の吸着熱測定から、OMSs のような活性サイトとの相互作用に関する熱の観測に成功し、OMSs による影響を受けない部分の吸着熱はおよそ一定の値を示すということが示された。

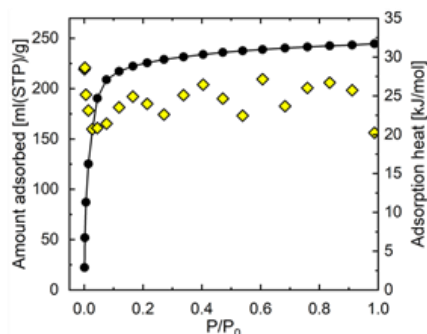


図 3. HKUST-1 の吸着等温線および吸着熱

(4-3-2) MIL-53(A1)_Flexible の測定結果 (図 4)。

得られた微分吸脱着熱は、吸着過程での膨張起こる圧力域 (相対圧 0.1 付近) 及び脱着過程での収縮が起こる圧力域 (相対圧 0.03 付近) に関しては、熱の相殺が確認された。ゲートオープニング圧領域での平均吸着熱は 15.3 kJ/mol、ゲートクロージング圧領域での平均脱着熱は 19.8 kJ/mol となった。一方で、吸着過程の 1 点目から 3 点目においてはかなり大きな吸着熱が観測されている。この領域を in situ PXRD 測定結果と合わせて考察すると、lp から np へと遷移する収縮変化が起こっており、吸着エネルギーの発熱だけでなく収縮による発熱も加わるため、非常に大きな発熱を示したのだと推測できる。また、柔軟な MOF である ELM-11 や ELM-12 も同様の測定を行った結果、同様に構造変化に伴って、吸着熱が相殺されることが分かった。

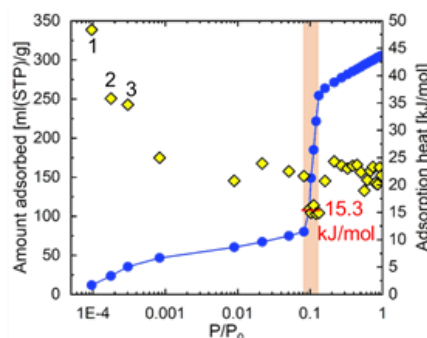


図 4. MIL-53(A1)_Flexible の吸着等温線および吸着熱

(4-3-3) MIL-53(A1)_Rigid の測定結果 (図 5)。

得られた微分吸着熱は、低圧の立ち上がり部分で小さな値となり、等温線のプラトー区間は 25 kJ/mol 程度の値を示し、相対圧 0.5 以降は減少する結果となった。この結果を HKUST-1 の場合と同様に考察すると、プラトー区間は多層吸着に対応していると考えられる。また、高圧領域の吸着熱の低下に関しては、吸着がほとんど進行していないことから、新たに導入されたガス分子と吸着しているガス分子が入れかわる平衡状態となっていることが示唆される。MIL-53(A1) の細孔表面に対する吸着熱の領域は赤色でマークした部分に相当し、平均吸着熱は 20.9 kJ/mol となった。

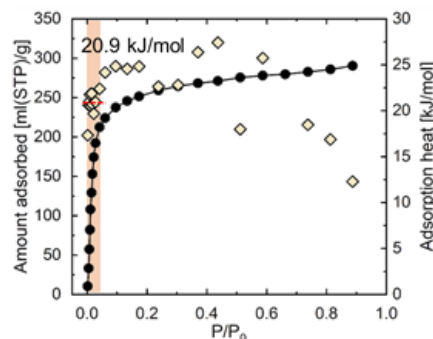


図 5. MIL-53(A1)_Rigid の吸着等温線および吸着熱

(4-4) まとめ

吸着材料のガス吸着過程での熱収支を評価するため、CO₂ 雰囲気下 in situ 熱量測定装置を独自に構築した。この装置を使用することで MOF における CO₂ 吸脱着熱の直接観測に成功した。HKUST-1 の吸着熱を測定したところ、OMSs を除く圧力領域でおよそ一定の吸着熱が観測された。この結果から、剛直な骨格を有する吸着材料は一定の大きな吸着熱を発生させることが示唆された。類似した 2 次元骨格を有する柔軟な MOF である ELM-11 と ELM-12 の測定では、ゲートオープニング圧領域前後での吸脱着熱の抑制量に差異が見られた。そこで構造変化前後の結晶構造を解析することで、構造変化の大きさが熱の自己抑制能に影響を与えていることが示された。3 次元骨格を有する柔軟な MOF である MIL-53(A1) では、同じ組成でありながら剛直な骨格を有する MOF も合成し、それぞれに対して吸着熱測定を行った。それらの結果から、構造変化によって 27 % の発熱を抑制していることが示され、構造変化による吸熱量を直接観測によって求めることができた。さらに、構造膨張区間での吸着熱が一定となった結果に着目し、同区間における構造変化を詳細に解析することで、構造変化と発熱の抑制量に相関があるということを明らかにした。以上のことから柔軟な MOF は、吸着性能を妨げる吸脱着熱を構造変化によって抑制できることが実験的に明らかになった。柔軟な MOF を用いて構造変化を示す圧力領域で吸脱着を繰り返す

ことで、狭い幅での圧カスイングおよび、吸着材料の課題である発熱・吸熱の抑制が可能な、有望な応用が期待できると考えられる。また、本研究では当初予期していなかった様々な空間構造を有する新規 MOF を見出すこともでき、MOF ナノ空間を利用した熱制御材料や反応場を提供する材料としての展開も期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Harada Yuki, Kusaka Shinpei, Nakajo Toshinobu, Kumagai Jun, Kim Cho Rong, Shim Joo Young, Hori Akihiro, Ma Yunsheng, Matsuda Ryotaro	4. 巻 57
2. 論文標題 Stabilization of radical active species in a MOF nanospace to exploit unique reaction pathways	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 12115 ~ 12118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1CC04267J	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 Ono Katsuya, Kusaka Shinpei, Matsuda Ryotaro	4. 巻 50
2. 論文標題 Selective Photochemical Reaction by Fixing Reactant as a MOF Building Block	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 1987 ~ 1989
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.210525	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 Wang Xiaoguang, Kusaka Shinpei, Hori Akihiro, Matsuda Ryotaro	4. 巻 16
2. 論文標題 Fabrication of a Kagom type MOF Membrane by Seeded Growth on Amino functionalized Porous Al ₂ O ₃ Substrate	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemistry ? An Asian Journal	6. 最初と最後の頁 2018 ~ 2021
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/asia.202100507	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 Morita Masashi, Kusaka Shinpei, Yonezu Akira, Ohara Yuki, Sakamoto Hiroto, Matsuda Ryotaro	4. 巻 50
2. 論文標題 Enhanced CO ₂ Adsorption by Insertion Reaction in the Nanospace of a Porphyrin-based MOF	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 640 ~ 643
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.200785	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 Fujimura Masashi, Kusaka Shinpei, Masuda Ayaka, Hori Akihiro, Hijikata Yuh, Pirillo Jenny, Ma Yunsheng, Matsuda Ryotaro	4. 巻 inpress
2. 論文標題 Trapping and Releasing of Oxygen in Liquid by Metal?Organic Framework with Light and Heat	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Small	6. 最初と最後の頁 2004351 ~ 2004351
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/smll.202004351	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 Kusaka Shinpei, Nakajima Yasuaki, Hori Akihiro, Yonezu Akira, Kikushima Kenta, Kosaka Wataru, Ma Yunsheng, Matsuda Ryotaro	4. 巻 225
2. 論文標題 Molecular motion in the nanospace of MOFs upon gas adsorption investigated by in situ Raman spectroscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Faraday Discussions	6. 最初と最後の頁 70 ~ 83
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0FD00002G	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 Nakajo Toshinobu, Kusaka Shinpei, Hiraoka Haruka, Nomura Kohei, Matsubara Noriaki, Baba Rintaro, Yoshida Yuki, Nakamoto Kosuke, Honma Masakazu, Iguchi Hiroaki, Uchihashi Takayuki, Abe Hiroshi, Matsuda Ryotaro	4. 巻 59
2. 論文標題 Creation of single molecular conjugates of metal?organic cages and DNA	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 4974 ~ 4977
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D3CC000460K	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 Nakagawa Misaki, Kusaka Shinpei, Kiyose Atsushi, Nakajo Toshinobu, Iguchi Hiroaki, Mizuno Motohiro, Matsuda Ryotaro	4. 巻 145
2. 論文標題 Beyond the Conventional Limitation of Photocycloaddition Reaction in the Roomy Nanospace of a Metal?Organic Framework	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 12059 ~ 12065
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.3c01225	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46件(うち招待講演 6件/うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Ryotaro Matsuda
2. 発表標題 Molecular Trapping and Photoreactions in the Nanospace of Porous Metal Complexes
3. 学会等名 Summit of Material Science 2022 (SMS2022) and Global Institute for Materials Research Tohoku (GIMRT) User Meeting 2022 (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松田 亮太郎
2. 発表標題 金属錯体ナノ空間中での光反応と分子捕捉機能
3. 学会等名 第5回固体化学フォーラム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shinpei Kusaka, Keita Kumagai, Misaki Nakagawa, Ryotaro Matsuda
2. 発表標題 Intermolecular Photo-Cycloaddition Reactions in the Flexible Nanospaces of Zn(II) Pillared-Layer Type Metal-Organic Frameworks
3. 学会等名 錯体化学会 第71回討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuki Harada, Shinpei Kusaka, Ryotaro Matsuda
2. 発表標題 Selective Removal of Platinum Anticancer Drugs in Biological Solution by Nanoporous Metal Complexes
3. 学会等名 錯体化学会 第71回討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Xiaoguang Wang, Shinpei Kusaka, Ryotaro Matsuda
2. 発表標題 Structural Diversity of 9,10-Di(4-pyridyl)anthracene based Coordination Polymers and Photoreaction Properties with Singlet Oxygen
3. 学会等名 錯体化学会 第71回討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 徳永貴也、日下心平、松田亮太郎
2. 発表標題 配位子由来の光増感作用を有するナノポーラス金属錯体の合成と酸素捕捉機能
3. 学会等名 錯体化学会 第71回討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田代真、日下心平、松田亮太郎
2. 発表標題 ニトロキシドラジカル部位を高密度に有するナノポーラス金属錯体の合成と触媒能の評価
3. 学会等名 錯体化学会 第71回討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 服部楓、日下心平、松田亮太郎
2. 発表標題 シクロファン部位を有する有機配位子を用いたピラードレイヤー型ナノポーラス金属錯体の合成と物性
3. 学会等名 錯体化学会 第71回討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 青山冬威、日下心平、松田亮太郎
2. 発表標題 フッ化アルキル基を有する新規ナノポーラス金属錯体の合成と吸着特性
3. 学会等名 錯体化学会 第71回討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉浦光、日下心平、松田亮太郎
2. 発表標題 粒径の異なるカゴメ型柔軟性MOFの合成と構造変化の評価
3. 学会等名 錯体化学会 第71回討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 根喜田康平、日下心平、松田亮太郎
2. 発表標題 構造柔軟性を有するMOFナノ粒子の集合体の作製と物性評価
3. 学会等名 錯体化学会 第71回討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 七野正典、日下心平、松田亮太郎
2. 発表標題 配位不飽和銅(II)サイトを有するナノポーラス金属錯体による水素の核スピン転換
3. 学会等名 錯体化学会 第71回討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中川岬、日下心平、松田亮太郎
2. 発表標題 ナノポーラス亜鉛錯体中での光環化付加反応の温度依存性
3. 学会等名 錯体化学会 第71回討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 熊谷啓太、日下心平、松田亮太郎
2. 発表標題 クマリン部位を有する二次元積層型ナノポーラス亜鉛()錯体の合成と光反応特性
3. 学会等名 錯体化学会 第71回討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 米津章、日下心平、安井隆雄、馬場嘉信、松田亮太郎
2. 発表標題 酸化亜鉛ナノワイヤを鋳型としたナノポーラス金属錯体膜の合成とガス分離特性
3. 学会等名 錯体化学会 第71回討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石田陸、日下心平、松田亮太郎
2. 発表標題 トリアリアルボランを配位子に有するMOFの合成、構造および性質
3. 学会等名 錯体化学会 第71回討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川村彩、日下心平、松田亮太郎
2. 発表標題 ピラードレイヤー型骨格を有する構造柔軟性ナノポーラス亜鉛(II)錯体の酸素分離特性
3. 学会等名 錯体化学会 第71回討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川村彩、日下心平、松田亮太郎
2. 発表標題 ピラードレイヤー型骨格を有する構造柔軟性ナノポーラス亜鉛(II)錯体を用いた酸素アルゴン分離
3. 学会等名 第34回日本吸着学会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中川岬、日下心平、松田亮太郎
2. 発表標題 スチリルピリジンを有するナノポーラス亜鉛錯体の光反応と吸着特性評価
3. 学会等名 第34回日本吸着学会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉浦光、日下心平、松田亮太郎
2. 発表標題 結晶粒径の異なるカゴメ型MOFのガス吸着特性と動的構造特性の評価
3. 学会等名 第34回日本吸着学会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 服部楓、日下心平、松田亮太郎
2. 発表標題 シクロファン部位を有する有機配位子を用いたピラードレイヤー型ナノポーラス金属錯体の合成と吸着特性
3. 学会等名 第34回日本吸着学会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 根喜田康平、日下心平、松田亮太郎
2. 発表標題 構造柔軟性を有するMOFナノ粒子集合体の作製と吸着特性評価
3. 学会等名 第34回日本吸着学会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 七野正典、日下心平、松田亮太郎
2. 発表標題 配位不飽和銅(II)サイトを有するナノポーラス金属錯体の水素吸着特性および核スピン転換反応の評価
3. 学会等名 第34回日本吸着学会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 徳永貴也、日下心平、松田亮太郎
2. 発表標題 光照射による室温領域で空気中の酸素を捕捉可能なナノポーラス金属錯体の開発
3. 学会等名 第34回日本吸着学会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原田悠生、日下心平、松田亮太郎
2. 発表標題 血液中の残存抗がん剤を選択的除去可能なナノポーラス金属錯体の開発
3. 学会等名 第34回日本吸着学会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toshinobu Nakajo, Shinpei Kusaka, Akihiro Hori, Ryotaro Matsuda
2. 発表標題 Property of triplet carbene generated in the nano-space of metal-organic framework
3. 学会等名 Pacifichem 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuki Harada, Shinpei Kusaka, Akihiro Hori, Ryotaro Matsuda
2. 発表標題 Introduction of open metal sites in nanoporous metal complexes via partial metal replacement for selective oxygen adsorption
3. 学会等名 Pacifichem 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akira Yonezu, Masashi Morita, Shinpei Kusaka, Akihiro Hori, Ryotaro Matsuda*
2. 発表標題 Selective adsorption of trace amount of sulfur-containing molecules using nanoporous metal complexes with open metal sites
3. 学会等名 Pacifichem 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Xiaoguang Wang , Shinpei Kusaka , Akihiro Hori, Ryotaro Matsuda
2. 発表標題 Synthesis of a Cu(II)-based 2-dimensional metal organic framework membrane using layer-by-layer seeding method and secondary growth for gas separation
3. 学会等名 Pacifichem 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中川 岬、日下 心平、Susan Sen、松田 亮太郎
2. 発表標題 スチリルビリジンを有するナノポーラス亜鉛錯体における[2+2]光環化付加反応の温度依存性
3. 学会等名 日本化学会第102春季年会(2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉浦 光、日下 心平、Susan Sen、松田 亮太郎
2. 発表標題 カゴメ型柔軟性MOFのガス吸着過程における構造変化の結晶サイズ依存性
3. 学会等名 日本化学会第102春季年会(2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 服部 楓、日下 心平、Susan Sen、松田 亮太郎
2. 発表標題 面不斉を有するシクロファン配位子を用いたナノポーラス金属錯体の合成と性質
3. 学会等名 日本化学会第102春季年会(2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 根喜田 康平、日下 心平、Susan Sen、松田 亮太郎
2. 発表標題 構造柔軟なMOFナノ粒子の自己組織化構造体の作製と吸着特性
3. 学会等名 日本化学会第102春季年会(2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 青山 冬威、日下 心平、Susan Sen、松田 亮太郎
2. 発表標題 フッ化アルキル基で修飾された新規ナノポーラス金属錯体の合成と吸着特性評価
3. 学会等名 日本化学会第102春季年会(2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡田 侑也、日下 心平、Susan Sen、松田 亮太郎
2. 発表標題 ポルフィリンとアントラセン部位を有する新規ナノポーラス金属錯体の設計と合成
3. 学会等名 日本化学会第102春季年会(2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡安 凌平、日下 心平、Susan Sen、松田 亮太郎
2. 発表標題 電荷移動部位を表面に修飾したケージ型ナノポーラス金属錯体の合成
3. 学会等名 日本化学会第102春季年会(2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平松 大知、日下 心平、Susan Sen、松田 亮太郎
2. 発表標題 クエン酸を配位子とするナノポーラス金属錯体の合成
3. 学会等名 日本化学会第102春季年会(2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 浅井 俊哉、日下 心平、Susan Sen、松田 亮太郎
2. 発表標題 ピラードレイヤー型ナノポーラス金属錯体の熱伝導特性
3. 学会等名 日本化学会第102春季年会(2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 黒野 巧己、中城 世宣、日下 心平、Susan Sen、松田 亮太郎
2. 発表標題 高い溶解性を有するケージ型ナノポーラス金属錯体の合成と物性
3. 学会等名 日本化学会第102春季年会(2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 浅野 駿也、日下 心平、Susan Sen、松田 亮太郎
2. 発表標題 電子豊富な 平面を有する配位子を用いたナノポーラス金属錯体の酸化還元反応と構造変化
3. 学会等名 日本化学会第102春季年会(2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高原 哲平、日下 心平、Susan Sen、松田 亮太郎
2. 発表標題 ピアクリジン部位を有するナノポーラス金属錯体の合成と構造
3. 学会等名 日本化学会第102春季年会(2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryotaro Matsuda
2. 発表標題 Advanced in situ characterization of MOF adsorption processes
3. 学会等名 MOF2020web Precon Expert View Series: Adsorption and Separation Science & Technology Fundamentals for Energy and Environmental Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryotaro Matsuda
2. 発表標題 Molecular motion in the nanospace of a MOF upon gas adsorption investigated by in situ Raman spectroscopy
3. 学会等名 Faraday Discussion: Cooperative phenomena in framework materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryotaro Matsuda
2. 発表標題 Management of gas and heat by nanoporous metal complexes
3. 学会等名 International Workshop on Nanotechnology for a Sustainable Future (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryotaro Matsuda
2. 発表標題 Molecular Recognition and Trapping in the Nanospace of Switchable Metal-Organic Frameworks
3. 学会等名 2020 Dalian University of Technology-Overseas Partner Universities Series Online Exchange Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松田 亮太郎
2. 発表標題 金属錯体ナノ空間における分子捕捉
3. 学会等名 オンライン研究会「錯体化学に基づく分子の構造変換設計と機能制御」(招待講演)
4. 発表年 2020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
研究 分 担 者	日下 心平 (Kusaka Shinpei) (80749995)	名古屋大学・工学研究科・助教 (13901)	

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