

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05494

研究課題名(和文) ボトムアップ合成に立脚した錯体ナノチューブの空間構築と伝導機構解明

研究課題名(英文) Nanospace design and proton conduction of metal-organic nanotube based on bottom-up synthesis

研究代表者

大坪 主弥 (Otsubo, Kazuya)

京都大学・理学研究科・助教

研究者番号：90601005

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)：新規に合成した金属-有機ナノチューブ(MONTs)において疎水性空間における特異な水クラスター構造をX線結晶構造解析から明らかにし、水分子クラスター間の水素結合ネットワークを介した超プロトン伝導性について、実験と理論の両面から多角的に明らかにすることに成功した。加えて、多様な開口径を有するMONTsの合成にも成功し、チューブの開口径とプロトン伝導性の関係についての知見を得ることに成功した。また、白金ダイマー錯体からなる新規配位高分子の合成にも成功し、結晶中でカチオン性ゲストが水分子の吸着/脱着に伴い超プロトン伝導性発現のためのスイッチとして機能することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題で着目したナノチューブ内の狭いナノ空間に補足された水分子に関する理解が進めば、水素結合様式に依存したプロトン伝導性の変化等の基礎科学的な知見が得られるだけでなく、将来的には生体膜タンパク質が持つ指向性のあるプロトン/水の輸送現象(高速輸送、選択的輸送、一方向輸送、能動輸送)の解明や生体模倣材料の構築に繋がると期待される。さらには、高効率な水浄化膜や高機能な燃料電池材料等、我々の生活に直結する将来的な機能材料創成にブレークスルーをもたらすと期待される。

研究成果の概要(英文)：Unique water cluster structures in the hydrophobic nanospace in newly synthesized metal-organic nanotubes (MONTs) has been revealed by X-ray study, and the superprotonic conductivity via hydrogen-bonding networks among water clusters has been successfully clarified from both experimental and theoretical aspects. In addition, we succeeded in synthesizing MONTs with various pore diameters and obtaining valuable insights into the relationship between the pore diameter and proton conduction. We also succeeded in synthesizing the first platinum-dimer based metal-organic framework, and revealed that the protic cation trapped inside its pore works as a preinstalled switch for superprotonic conduction vis water adsorption/desorption.

研究分野：錯体化学、固体物性化学

キーワード：ナノチューブ 疎水性空間 水クラスター 水素結合 プロトン伝導

1. 研究開始当初の背景

近年、直径数 nm 以下の狭い疎水性空間内に捕捉された水分子がバルク状態と全く異なる相挙動や、特異なクラスター形成、そして高いプロトン(水分子)輸送を発現することについて大きな注目が集まっている。これは、捕捉された水分子と外壁との間に相互作用がないために水分子同士の水素結合形成がバルク状態と比較して不十分なためであると解釈されている。このような系は構造的な興味だけではなく、生体内におけるプロトンポンプや水輸送膜タンパク質(アクアポリン)等のモデル物質として非常に重要である。これまでに CNTs やグラフェン等を用いていくつかの実験例があるものの、これらの研究では精密な物質設計の困難さから、形状や大きさが揃ったナノチューブを用いた厳密な実験とは言えない。

最近になり、申請者は自己集合から生成する四角形型の環状金属錯体とヨウ素を用いた簡便な酸化的高分子化を用いて金属-有機ナノチューブ(MONT)、 $[\text{Pt}(\text{en})(\text{bpy})\text{I}]_4(\text{NO}_3)_8 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$ の合成に成功した。X線構造解析の結果、一次元の疎水的な空間が存在する明瞭な四角柱型のナノチューブ構造を有していることが明らかになった。

2. 研究の目的

狭い疎水性空間中の水分子については、これまでにナノカーボン材料を用いていくつかの実験例があるが、これらの物質では精密な物質設計の困難さから、形状や大きさが揃ったサンプルを用いた実証が困難である。この点から、疎水性空間内の水分子の特異な性質についての研究は、モデル構築に基づいた計算面の研究のみが国内外を問わず先行して行われており、実験的アプローチが圧倒的に不足していた。つまり、実験・理論の両面からの実証、つまり空間サイズと物性パラメータ(クラスター構造や拡散係数、輸送特性)の相関の解明や実在の物質(空間)設計指針の提示は未だに未達成なテーマである。

本申請課題において、申請者は実験的なボトムアップ合成に立脚したプロトン伝導性 MONTs のライブラリ構築、直径数ナノメートル以下の狭い疎水性内空間で実現する高速プロトン輸送現象を中心とした機能材料創成、輸送機構の解明と材料設計指針を得ることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究課題においては、主に下記の観点から研究を行った。

(a) ボトムアップ合成に立脚した MONTs ライブラリの構築

種々の環状錯体をボトムアップ的にハロゲン酸化し高分子化した多彩な開口サイズを有する金属錯体ナノチューブを合成し、金属錯体を基盤としたボトムアップ合成技術でしか成しえない実験的な疎水性空間の設計・制御を行うことで多彩な MONTs ライブラリの構築を目標とした。

(b) 疎水性空間の水分子クラスター構造とプロトン輸送特性の体系化

(a) で得られた開口径を系統的に制御した種々の MONTs における水クラスターについて実験的に可視化するとともに、開口径とクラスターサイズ・プロトン輸送特性等の相関について明らかにする。また、疎水性空間内のプロトン拡散機構の解明と安定クラスター構造について、理論的な観点からも検討した。さらに、界面活性剤等を用いて有機溶媒に分散可能な MONTs を合成し、電子顕微鏡法を用いたナノチューブ・クラスター構造の直接的な観測にも取り組んだ。

4. 研究成果

有機配位子に 4,4'-bipyridine を用いた新規の金属錯体ナノチューブ、 $[\text{Pt}(\text{dach})(\text{bpy})\text{Br}]_4(\text{SO}_4)_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ (dach: (1R, 2R)-(-)-1,2-diaminocyclohexane; bpy: 4,4'-bipyridine) を新規に合成に成功した。単結晶 X 線構造解析の結果から、開口径のサイズが 0.6 nm × 0.6 nm のナノチューブにおいては内部の疎水性空間に拘束された水分子(結晶水)がリング状の 4 量体(tetramer)や 8 量体(octamer)といったバルク状態にはない特徴的なクラスターを形成していることが明らかとなった(図 1)。さらにこれらのクラスターが弱い水素結合により一次元のネットワーク(アイス・チューブ)を構築している。

このような背景から、交流インピーダンス法を用いてプロトン伝導度を測定したところ、ナノチューブ内に存在する水素結合ネットワークを介して $10^{-2} \text{ S cm}^{-1}$ オーダー (25°C, 95% RH) に達する超プロトン伝導性を見出した。これは、理論的に指摘されている疎水性空間における速いプロトン輸送を実験的に確かめた例である(Nature Communications, 2020)。この他にも、有機配位子が異なる複数種の MONTs の合成に成功し、チ

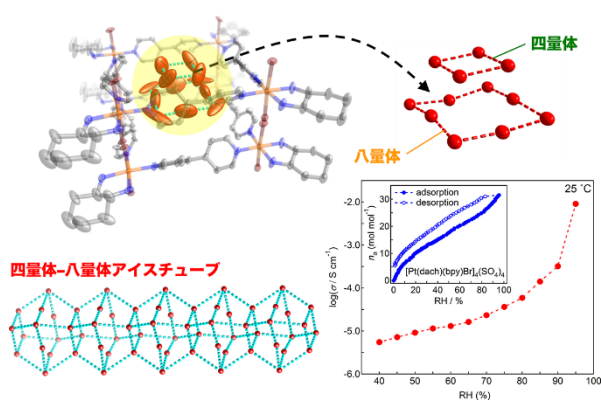


図1. MONT中の特異な水分子クラスター形成と超プロトン伝導性

チューブの開口径やチューブ内に存在する水分子クラスターの構造とプロトン伝導性の間に明確な相関があることを明らかにした(投稿準備中)。

また、カチオン性のナノチューブの対アニオンとして界面活性剤アニオンを用いることで有機溶媒中に分散可能な新規のMONTs、 $[\text{Pt}(\text{en})(\text{bpy})\text{I}]_4\text{Y}_8$ ($\text{Y} = \text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{O}_4\text{S}^-$ (dsa); $\text{C}_{18}\text{H}_{29}\text{O}_3\text{S}^-$ (dbs); $\text{C}_{20}\text{H}_{37}\text{O}_7\text{S}^-$ (dcs)) を合成することに成功した。これらのナノチューブは有機溶媒の中でもクロロホルムに良好な溶解性を示し、溶液試料を用いた UV-vis 測定においてもナノチューブ構造に特徴的な光学吸収が観測されたことから、期待通り溶液中でもナノチューブの骨格構造が保持されていることが確認された。この溶液を Si 基盤にキャストした薄膜試料では、原子間力顕微鏡観察において溶液の濃度に依存した特徴的な表面構造が観測され、さらに、溶液を Cu グリッドに滴下した試料を用いて透過型電子顕微鏡 (TEM) 観察を行ったところ、特徴的なバンドル様の構造が観測された(図 2)。現在、より高分解能の TEM 像の取得を試みており、MONTs 構造の直接観測を目指している(投稿準備中)。

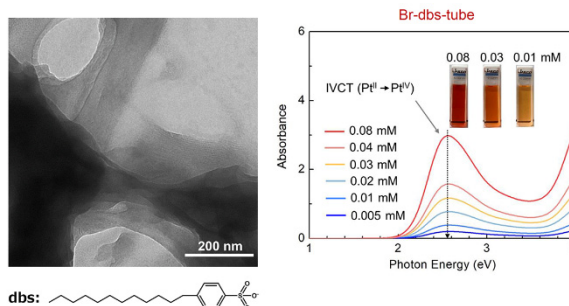


図2. dbsアニオンを用いたMONTsのTEM像とUV-visスペクトル

この溶液を Si 基盤にキャストした薄膜試料では、原子間力顕微鏡観察において溶液の濃度に依存した特徴的な表面構造が観測され、さらに、溶液を Cu グリッドに滴下した試料を用いて透過型電子顕微鏡 (TEM) 観察を行ったところ、特徴的なバンドル様の構造が観測された(図 2)。現在、より高分解能の TEM 像の取得を試みており、MONTs 構造の直接観測を目指している(投稿準備中)。

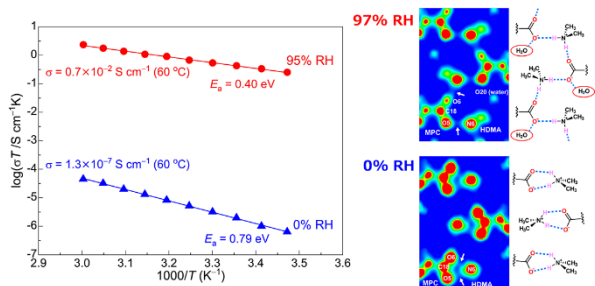


図3. Ptダイマーを用いたMOFのプロトン伝導性と、湿度に依存したカチオン性ゲストのMEM電子密度マップ

結合しネットワーク内に取り込まれているが、このMOFは加湿により $10^{-2} \text{ S cm}^{-1}$ オーダー (25°C, 95% RH) に達する超プロトン伝導性を示すことを見出した(図 3)。放射光粉末 X 線回折パターンを使った最大エントロピー法 (MEM) と Rietveld 解析を用いて、乾燥状態と加湿状態の結晶構造を検討したところ、細孔内の HDMA⁺ が湿度に依存してそのポジションを変えて水素結合ネットワークを切り替えるスイッチのような効果的なプロトンソースとして働いていることが電子密度レベルで明らかとなった。さらに、結晶の 3 方向に電極を取り付け、単結晶プロトン伝導度測定を行うことで、HDMA⁺ カチオンが結晶内で動く方向(結晶 *b* 軸方向)で最も高いプロトン伝導性が観測されたことから、カチオンのスイッチングによる効果的なプロトン伝導パスの形成が重要な役割を果たしていることが明らかとなった(JACS Au, 2022)。

一方で、新規の MONTs 合成を行う中で白金ダイマー錯体をビルディングブロックとする新規の多孔性配位高分子 (MOF)、 $[\text{Pt}_2(\text{MPC})_4\text{Cl}_2\text{Co}(\text{DMA})(\text{HDMA})\cdot\text{guest}]_n$ (DMA: dimethylamine) を合成することに成功した。MOF は 2000 年代から盛んに研究が展開され、これまでに多種多様な化合物が合成されているものの、本化合物は白金ダイマー錯体をビルディングブロックとする初の MOF である。この MOF では、プロトン化された DMA 分子、ジメチルアンモニウムイオン (HDMA⁺) がカルボキシル基と水素

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Mukoyoshi Megumi, Kobayashi Hirokazu, Kusada Kohei, Otsubo Kazuya, Maesato Mitsuhiro, Kubota Yoshiki, Yamamoto Tomokazu, Matsumura Syo, Kitagawa Hiroshi	4. 巻 57
2. 論文標題 Ni@ion-like carbon and Co@amorphous carbon: control of carbon structures by metal ion species in MOFs	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 5897 ~ 5900
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1CC02154K	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 Aoki Kentaro, Otsubo Kazuya, Kitagawa Hiroshi	4. 巻 23
2. 論文標題 A square-shaped complex with an electron-acceptor ligand: unique cubic crystal symmetry and similarity to the inorganic mineral katoite	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 CrystEngComm	6. 最初と最後の頁 7691 ~ 7697
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1CE00994J	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 Haraguchi Tomoyuki, Otsubo Kazuya, Sakata Osami, Fujiwara Akihiko, Kitagawa Hiroshi	4. 巻 143
2. 論文標題 Strain-Controlled Spin Transition in Heterostructured Metal-Organic Framework Thin Film	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 16128 ~ 16135
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.1c06662	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 Aoki Kentaro, Otsubo Kazuya, Yoshida Yukihiro, Kimura Yojiro, Sugimoto Kunihisa, Kitagawa Hiroshi	4. 巻 60
2. 論文標題 Synthesis and Magnetic Properties of a Dimerized Trinuclear Ni String Complex, [Ni6Cl2(dpa)8](15)2·0.2512 (dpa- = 2,2'-Dipyridylamide Anion)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Inorganic Chemistry	6. 最初と最後の頁 16029 ~ 16034
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.inorgchem.1c02660	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 Otsubo Kazuya, Nagayama Shuya, Kawaguchi Shogo, Sugimoto Kunihisa, Kitagawa Hiroshi	4. 巻 2
2. 論文標題 A Preinstalled Protic Cation as a Switch for Superprotonic Conduction in a Metal-Organic Framework	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 JACS Au	6. 最初と最後の頁 109 ~ 115
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacsau.1c00388	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 Morimoto Yuki, Koo Yun Hee, Otsubo Kazuya, Kitakado Hidetsugu, Seki Shu, Osuka Atsuhiko, Tanaka Takayuki	4. 巻 61
2. 論文標題 Dibenzodiazapyraclyenes: Doubly N Doped Cyclopenta Fused Polycyclic Molecules That Exhibit High Carrier Mobility	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie International Edition	6. 最初と最後の頁 e202200341
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.202200341	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 Sakaida Shun, Otsubo Kazuya, Otake Ken-ichi, Kawaguchi Shogo, Maesato Mitsuhiko, Kitagawa Susumu, Kitagawa Hiroshi	4. 巻 57
2. 論文標題 Surface morphology-induced spin-crossover-inactive high-spin state in a coordination framework	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 1462 ~ 1465
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0CC06682F	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 Sakaida Shun, Otsubo Kazuya, Maesato Mitsuhiko, Kitagawa Hiroshi	4. 巻 59
2. 論文標題 Crystal Size Effect on the Spin-Crossover Behavior of {Fe(py) ₂ [Pt(CN) ₄]} (py = Pyridine) Monitored by Raman Spectroscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Inorganic Chemistry	6. 最初と最後の頁 16819 ~ 16823
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.inorgchem.0c02874	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 Otake Ken-ichi, Otsubo Kazuya, Kitagawa Hiroshi	4. 巻 33
2. 論文標題 A mixed-valent metal-organic ladder linked by pyrazine	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 034002 ~ 034002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-648X/abbbc7	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 Chand Santanu, Pal Shyam Chand, Lim Dae-Woon, Otsubo Kazuya, Pal Arun, Kitagawa Hiroshi, Das Madhab C.	4. 巻 2
2. 論文標題 A 2D Mg(II)-MOF with High Density of Coordinated Waters as Sole Intrinsic Proton Sources for Ultrahigh Superprotonic Conduction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Materials Letters	6. 最初と最後の頁 1343 ~ 1350
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsmaterialslett.0c00358	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 Pal Arun, Pal Shyam Chand, Otsubo Kazuya, Lim Dae Woon, Chand Santanu, Kitagawa Hiroshi, Das Madhab C.	4. 巻 26
2. 論文標題 A Phosphate Based Silver-Bipyridine 1D Coordination Polymer with Crystallized Phosphoric Acid as Superprotonic Conductor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemistry - A European Journal	6. 最初と最後の頁 4607 ~ 4612
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/chem.201905650	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 Moriyama Hayato, Otsubo Kazuya, Aoki Kentaro, Maesato Mitsuhiko, Sugimoto Kunihisa, Kitagawa Hiroshi	4. 巻 48
2. 論文標題 A Novel Platinum(III)-Platinum(III) Neutral Dimer Complex, Pt ₂ (cdtb) ₄ I ₂ (cdtb: 4-Cyanodithiobenzoate)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 1035 ~ 1037
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.190355	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 Okawa Hisashi, Yoshida Yukihiro, Otsubo Kazuya, Kitagawa Hiroshi	4. 巻 59
2. 論文標題 Network-Selectivity, Magnetism, and Proton Conduction of 2-D and 3-D Metal-Organic Frameworks of the Constituents $\{P(CH_2OH)_4\}^+/MII$ (MnII, FeII, or CoII)/[CrIII(ox) ₃] ³⁻ ?	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Inorganic Chemistry	6. 最初と最後の頁 623 ~ 628
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.inorgchem.9b02861	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 Okawa Hisashi, Otsubo Kazuya, Yoshida Yukihiro, Kitagawa Hiroshi	4. 巻 54
2. 論文標題 Remarkably Enhanced Proton Conduction of $\{NBU_2(CH_2COOH)_2\}[MnCr(ox)_3]$ by Multiplication of Carboxyl Carrier in the Cation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 6138 ~ 6140
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0CC02192J	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 Pal Arun, Pal Shyam Chand, Otsubo Kazuya, Lim Dae Woon, Chand Santanu, Kitagawa Hiroshi, Das Madhab C.	4. 巻 26
2. 論文標題 A Phosphate Based Silver-Bipyridine 1D Coordination Polymer with Crystallized Phosphoric Acid as Superprotonic Conductor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemistry -A European Journal	6. 最初と最後の頁 4607 ~ 4612
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/chem.201905650	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 Otake Ken-ichi, Otsubo Kazuya, Komatsu Tokutaro, Dekura Shun, Taylor Jared M., Ikeda Ryuichi, Sugimoto Kuniyoshi, Fujiwara Akihiko, Chou Chien-Pin, Sakti Aditya Wibawa, Nishimura Yoshifumi, Nakai Hiromi, Kitagawa Hiroshi	4. 巻 11
2. 論文標題 Confined water-mediated high proton conduction in hydrophobic channel of a synthetic nanotube	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 843
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-14627-z	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

[学会発表] 計10件(うち招待講演 5件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Kazuya Otsubo, Shuya Nagayama, Kunihisa Sugimoto, Shogo Kawaguchi, Hiroshi Kitagawa
2. 発表標題 A platinum-dimer based metal-organic framework with a pre-installed protic cation for superprotonic conduction
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 Kazuya Otsubo, Hiroshi Kitagawa
2. 発表標題 Synthesis of a wavy MX-tube complex
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 Kazuya Otsubo, Shun Sakaida, Shogo Kawaguchi, Hiroshi Kitagawa
2. 発表標題 Size effect on spin-crossover behavior in 2D Hofmann-like metal-organic framework thin films
3. 学会等名 The 1st Asian Conference on Molecular Magnetism (ACMM) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuya Otsubo, Shuya Nagayama, Kunihisa Sugimoto, Shogo Kawaguchi, Hiroshi Kitagawa
2. 発表標題 A platinum-dimer based metal-organic framework having a pre-installed cationic guest for proton conduction
3. 学会等名 日本化学会第101春季年会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大坪 主弥、大竹 研一、北川 宏
2. 発表標題 金属錯体ナノチューブの疎水性空間における超プロトン伝導
3. 学会等名 第69回高分子討論会2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuya Otsubo, Kuniyisa Sugimoto, Hiroshi Kitagawa
2. 発表標題 Structural and Electronic Properties of MX-tube Complexes Dispersed in Organic Media
3. 学会等名 日本化学会第100春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大坪 主弥
2. 発表標題 超プロトン伝導性を示す多孔性金属錯体ナノチューブの化学
3. 学会等名 第13回超分子若手懇談会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuya Otsubo
2. 発表標題 Coordination Nanomaterials Situated in Dimensional Crossover Region
3. 学会等名 Japan-Germany Bilateral Symposium on Surface-Attached Metal-Organic Framework (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大坪 主弥
2. 発表標題 多孔性金属錯体ナノチューブの疎水性空間における超プロトン伝導
3. 学会等名 第4回固体化学フォーラム研究会(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuya Otsubo
2. 発表標題 Ice-Tube Formation and High Proton Conduction in Metal-Organic Nanotubes
3. 学会等名 Nanjing University-Kyoto University Bilateral Workshop: Functional Molecular Materials(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>ナノサイズの空間に閉じ込められた水が示す不思議な性質を実証 - 高速で水素イオンを運ぶ水の状態を解明 - http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2019/200218_1.html</p>
--

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