

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 23 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24510154

研究課題名(和文) 選択的ガス吸着を示す多孔性配位高分子におけるゲスト-ホスト相互作用の解明

研究課題名(英文) Guest-host interaction in porous coordination polymers with selective sorption property

研究代表者

久保田 佳基 (Kubota, Yoshiki)

大阪府立大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50254371

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では選択的吸着を示す多孔性配位高分子のガス吸着に伴う結晶構造の変化を放射光粉末回折法により調べた。Interdigitate型のある多孔性配位高分子はCO₂吸着状態で通常とは異なる骨格構造を取っていることが分かった。通常、Interdigitate型多孔性配位高分子では、積層した配位子分子間の弱いπ-π相互作用により骨格構造が形成されるが、この物質では配位子分子間にも新たな細孔が形成されゲスト分子が吸着していることが示唆された。そして、この特異な骨格構造によりCO₂吸着量が増大していると考えられた。多孔性配位高分子特有の構造柔軟性とガス分子の選択的吸着の関わりが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：This study revealed the structural change in the gas adsorption of porous coordination polymers (PCPs) with selective sorption property by the synchrotron powder diffraction method. It was found that a certain interdigitate type PCP has an unusual framework structure in CO₂ adsorbed phase. Interdigitate type PCPs usually have framework structure in which the ligand molecules stack by π-π interaction. But in this compound, another pore is formed between the ligand molecules and the amount of adsorbate CO₂ increased. The relation between the characteristic flexible framework and selective sorption property of PCPs was revealed.

研究分野：構造物性

キーワード：多孔性材料 ガス吸着 放射光粉末回折 精密電子密度解析

1. 研究開始当初の背景

多孔性配位高分子は、金属イオンと有機配位子の配位結合により構成される骨格構造を持ち、ナノスケールの細孔が規則正しく配列した結晶性物質である。この10年ほどの間、多孔性配位高分子の研究は急速に発展し膨大な数の論文が輩出されている。骨格構造を自在に設計し、合成することが可能であるという他の材料にはない際立った特徴を持つことがひとつの理由と考えられる。2010年度のノーベル化学賞の候補に、この物質の研究の第一人者である O. M. Yaghi 教授や北川進教授の名前が挙げられたことからわかるように現在最も注目されている物質群のひとつである。多孔性配位高分子の特徴を活かした応用として最も一般的なものはガス貯蔵であり、Yaghi らを始めとして比表面積がより大きな多孔性配位高分子が続々合成されている。もう一つのターゲットは、CO₂などのガスの効率的な分離であり、骨格構造の柔軟性や吸着活性点を利用した様々な方法でガスの分離が試みられている。

多孔性配位高分子のガス吸着研究において、ガスの吸着量は吸着等温線の測定などから知ることができるが、細孔内のどこにどのような状態で吸着されているかは全くわからなかった。しかし、これらの情報はゲスト-ホストの相互作用を理解する上で大変重要である。研究代表者らのグループは世界に先駆けて、放射光粉末回折法とマキシマム・エントロピー法(MEM)という電子密度イメージング法を組み合わせ、多孔性配位高分子のガス吸着構造解析に着手した。そして、2002年に酸素分子が細孔内で整列構造をとりながら吸着されている様子を世界で初めて明らかにした。この研究を契機に、回折法により求めたガス吸着構造に基づいた吸着機構の研究が世界中で進んだ。

私たちのこれまでの研究の中により、ガス分子の効率的な吸着には骨格構造の柔軟性がキーであることがわかってきた。すなわち、配位結合と有機分子自身が持つ自由度に由来する柔軟性により、骨格が吸着ガス分子に応じて変形する機構である。研究代表者は平成21~23年度の基盤研究(C)において骨格の柔軟性に着目してガス吸着構造解析を進めてきた。その成果として、例えば、ある多孔性配位高分子では、CO₂分子吸着に伴う骨格の変形により、吸着されているレポーター分子の蛍光が変化し、CO₂を検知することに成功した。

一方、酸素に対して電子的に相互作用可能な TCNQ(テトラシアノキノジメタン)分子を細孔表面に配置した多孔性配位高分子を合成し、酸素分子の効率的な分離に成功した。O₂やCOは骨格構造を構成するTCNQと電子をやり取りし、結晶格子の変化を伴いながら細孔中に取り込まれることが分かった。N₂には電子のやり取りはなく細孔には取り込まれない。このような電子的な相互作用を利用

した吸着材料はこれまでに例がなく、新しいガス分離の概念を提案したことは非常に大きな成果である。このように結晶格子の情報だけでも、スペクトロスコピーなど他の化学的な知見も併せて考えれば、何が起きているかを想像することができる。しかし、電子のやり取りを伴うようなケースでは特に、個々の原子位置を求め、さらに電子密度までも含めた直接的な構造情報を基にゲスト-ホスト相互作用を考えることが大変重要である。

2. 研究の目的

本研究では、高輝度放射光を利用して得た高精度粉末回折データを、MEMを始めとする精密結晶構造解析法により解析し、多孔性配位高分子のガス吸着における電荷移動まで含めた構造情報に関する知見を得る。主な対象は選択的ガス吸着を示す物質である。具体的にはホスト骨格構造を明らかにするとともに、吸着ガス分子の位置、配向を明らかにする。さらに、電子密度解析により吸着サイトにおける電荷移動の有無を調べる。また、細孔表面の特定の吸着サイトの電荷の偏りを、静電ポテンシャルマッピングの手法により可視化する。ガス吸着状態に加えて、degas状態についても同様に調べ、吸着に伴うホスト骨格の変化、静電ポテンシャルの変化を明らかにする。以上のようにして得た原子レベルおよび電子密度レベルの精密な構造情報を基に選択的ガス吸着の機構を解明する。

3. 研究の方法

多孔性配位高分子試料は、京都大学工学部研究科北川進グループで合成する。測定する試料はX線回折実験に先立ち、予め吸着等温線を測定し、飽和吸着量および吸着温度と圧力の関係を抑えておく。ホスト-ゲストの電子状態の情報は、ラマン散乱や赤外分光などにより得る。

X線回折データは粉末法により得る。構造柔軟性が高い多孔性配位高分子では、ガス吸着に伴い結晶格子の体積変化が大きく変化するため、単結晶は崩壊することが多い。したがって、このような物質の結晶構造解析は粉末法により行う以外にない。粉末法は本来3次元の回折データが1次元に重なるために単結晶に比べて不利であるが、近年の放射光光源の進歩により高分解能の粉末回折データが得られるようになってきた。

放射光粉末回折実験は大型放射光施設SPring-8において行う。研究代表者は同施設の粉末結晶構造解析ビームラインBL02B2のパワーユーザーとして活動しており、粉末回折実験および粉末回折データの解析には精通している。また、本申請にかかわる実験のためのビームタイムは確保できる。

測定はビームラインBL02B2常設の大型デバイシエラカメラを用いて行う。デバイシエラ法では、全ての回折データが同じ条件

で同時に測定されるので、統計精度が極めて高い粉末回折データを得ることが可能である。また、測定中のビームの変動などの影響を受けにくいというメリットもある。吸着ガスの導入と圧力制御には吸着等温線測定装置をベースとして製作されたガス・蒸気圧力制御システム(GVPC)を用いることにより、低圧でのガス導入と制御が可能であり、吸着等温線に対応した条件での測定ができる。試料温度は窒素ガス吹付け低温/高温装置(90 K~473 K)により制御する。

得られた粉末回折データは Rietveld 法により構造の精密化を行い、更に MEM により電子密度解析する。MEM はいわゆる打ち切り効果の影響を受けにくく、高分解能の電子密度分布をモデルフリーに求めることができる方法であり、電子密度から化学結合の有無や電荷移動の情報を得ることができる。MEM はこの 20 年ほどの間に発展、普及した方法ではあるが、粉末回折データから高精度の電子密度分布を求めることはそれほど簡単ではない。研究代表者はこの手法を結晶構造解析に導入し、発展させた研究グループの出身であり、MEM 解析に精通している。Rietveld 法のための初期構造モデルの導出には MEM/Rietveld 法や未知構造解析の手法(シミュレーテッド・アニーリング法や遺伝的アルゴリズムなどによる実空間法)を用いる。

選択的吸着能を持つ新規多孔性配位高分子について調べる。放射光粉末回折法により得た精緻な構造情報とラマン散乱などのデータを合わせて検討し、多孔性配位高分子のガス吸着におけるホスト-ゲストの相互作用を明らかにする。

4. 研究成果

(1) Interdigitate 型多孔性配位高分子[Cu(dhbc)₂(bpy)]_n (dhbc=2,5-dihydroxybenzoic acid, bpy=4,4'-bipyridyl)の結晶構造は bpy 分子と dhbc 分子によって形成される二次元シート同士が隣接する dhbc 分子間の π - π 相互作用によって積層した配列をしており、結晶構造内にあるナノ細孔の大きさは 3.6 Å × 4.2 Å である。この物質系への CO₂ 吸着量は bpy を dpa(di-(4-pyridyl)-acetylene)や dptz(3,6-di-(4-pyridyl)-1,2,4,5-tetrazine)に変えた化合物でそれぞれ bpy: 1.97, dpa: 3.85, dptz: 3.33 mol/unit cell であり、dpa 化合物の吸着量は配位子の長さから予測される量よりかなり多くなっている。dpa 化合物の高い CO₂ 吸着能の原因を探るため大型放射光施設 SPring-8 の BL02B2 で粉末回折実験を行い、粉末未知構造解析を行った。

構造決定にはシミュレーテッド・アニーリング法を用い、Rietveld 解析により構造精密化を行った。dpa 化合物と bpy 化合物の degas 状態の結晶構造を比較すると、dpa 化合物では Cu-N の結合距離が長くなっており、隣接する dhbc 分子間の距離は dpa、bpy 化合物でそれぞれ、3.9 Å、4.2 Å となっていた。dpa 化合物の degas 相の結晶構造は分子間の隙間

を埋めるようにパッキングし、細孔がない状態(Closed-form)になっていた。一方、単結晶構造解析により解かれた合成時(水分子吸着相)の結晶構造は分子同士がスライドして細孔を形成し(Open-form)、dhbc 分子同士の π - π 相互作用により構造が安定化している。これらの結晶構造について bpy 化合物と基本的に違いは見られなかった。ところが、dpa 化合物の CO₂ 吸着相の結晶構造はこれらとは全く異なっていることが示唆された。通常、同種の interdigitate 型構造を持つ多孔性配位高分子では、ゲスト分子の吸脱着に伴い π - π 相互作用部位がスライドしながら細孔の大きさが変化するが、この dpa 化合物の CO₂ 吸着相では dhbc 分子間にも CO₂ が入り込んでいると考えられる。CO₂ 分子の大きさに極めてよくフィットするサイズの細孔の形成によりアクセス可能な細孔表面が増加したことが CO₂ 吸着量の特異的な増加につながっていると考えられる。

(2) 多孔性配位高分子を用いた研究の中でも物理分野の研究者として興味深いものは、この物質が作る様々なナノ空間を利用したクラスターの形成や、それらとナノ細孔との相互作用、その低次元構造による特異な物性に関する研究である。酸素分子 O₂ は分子間力に静電的相互作用だけでなく磁氣的相互作用が大きく関与していることから、私たちは制限された空間内で形成される O₂ クラスターの構造と磁性の關係に着目した。多孔性配位高分子 Cu-CHD (Cu-1,4-cyclo-hexanedicarboxylic acid)の酸素吸着構造解析を行った。O₂ の参照として調べた吸着 N₂ 分子ダイマーは Shifted-parallel の S 型の配列をとるのに対し、O₂ は 20 K において平行な H 型の配列をとっていることが示された。熱的に励起された 90 K では quintet 状態の S 型が混在するため O₂ 分子の MEM 電子密度はブロードな S 型の分布を示していると解釈された。この結果は、O₂ ダイマーの分子配列と磁氣的相互作用とが密接に関わっていることを示しており、小林らが提唱した磁場誘起再配列機構を支持するものである。そして、そのモデルに基づいて酸素吸着 Cu-CHD および CPL-1 (Cu-2,3-prazinedicarboxylate-pyrazine)の磁化測定データが統一的に解釈された。両者にはギャップパラメータに大きな違いがあり、CPL-1の方が Cu-CHD に比べて、細孔ポテンシャルが O₂ 分子の分子間ポテンシャルに対してより大きな影響を与えていることが示唆された。この物質は選択的吸着を示さないが、構造柔軟性とゲスト-ホスト相互作用を定量的に考察した初めての成果であると言える。

(3) 多孔性配位高分子の高いガス吸着能を利用して金属ナノ粒子の水素吸蔵特性の向上を図ることができた。HKUST-1 (Cu-1,3,5-benzenetricarboxylate)と呼ばれる多孔性配位

高分子表面を覆った Pd ナノ粒子複合体の水素吸蔵・放出過程の放射光粉末回折データその場測定と構造評価を行った。その結果、表面を覆わない Pd ナノ粒子に対して吸蔵量で約 1.7 倍、かつ吸蔵速度でも約 2 倍の向上が見られることが明らかになった。本研究課題の本題とは少し離れるが、多孔性配位高分子の極めて高いガス吸着能力と Pd の水素吸蔵能が相乗的に働いたと考えられ、多孔性配位高分子の応用研究につながる成果と言える。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 15 件)

Ligand-based solid solution approach to stabilisation of sulphonic acid groups in porous coordination polymer $Zr_6O_4(OH)_4(BDC)_6$ (UiO-66), Maw Lin Foo, Satoshi Horike, Tomohiro Fukushima, Yuh Hijikata, Yoshiki Kubota, Masaki Takata, Susumu Kitagawa, *Dalton Trans.* **41**, 13791-13794, (2012), DOI:10.1039/C2DT31195J, 査読有り

Modular design of domain assembly in porous coordination polymer crystals via reactivity-directed crystallization process, Tomohiro Fukushima, Satoshi Horike, Hirokazu Kobayashi, Masahiko Tsujimoto, Seiji Isoda, Maw Lin Foo, Yoshiki Kubota, Masaki Takata, Susumu Kitagawa, *J. Am. Chem. Soc.* **134**, 13341-13347, (2012), DOI:10.1021/ja303588m, 査読有り

Study of Argon Gas Adsorption in Ordered Mesoporous MFI Zeolite Framework, Hae Sung Cho, Keiichi Miyasaka, Hyungjun Kim, Yoshiki Kubota, Masaki Takata, Susumu Kitagawa, Ryong Ryoo, Osamu Terasaki, *J. Phys. Chem. C* **116**, 25300-25308, (2012), DOI:10.1021/jp306268d, 査読有り

A Stand-Alone Mesoporous Crystal Structure Model from an in situ X-ray Diffraction: Nitrogen Adsorption on 3D Cage-like Mesoporous Silica SBA-16, Keiichi Miyasaka, Hiroko Hano, Yoshiki Kubota, Yangzheng Lin, Ryong Ryoo, Masaki Takata, Susumu Kitagawa, Alexander V. Neimark, Osamu Terasaki, *Chem. Eur. J.* **18**, 10300-10311, (2012), DOI:10.1002/chem.201201398, 査読有り

Structural transformation of Sb-based high-speed phase-change material, Toshiyuki Matsunaga, Rie Kojima, Noboru Yamada, Yoshiki Kubota, Kouichi Kifune, *Acta Cryst.* **B68**, 559-570, (2012), DOI:10.1107/S0108768112039961, 査読有り

Spin-Dependent Molecular Orientation of O_2-O_2 Dimer Formed in the Nanoporous Coordination Polymer, Akihiro Hori, Tatsuo C. Kobayashi, Yoshiki Kubota, Akira Matsuo,

Kouichi Kindo, Jungeun Kim, Kenichi Kato, Masaki Takata, Hirotohi Sakamoto, Ryotaro Matsuda, Susumu Kitagawa, *J. Phys. Soc. Jpn.* **82**, 084703(6 pages), (2013),

DOI:10.7566/JPSJ.82.084703, 査読有り

High $CO_2/N_2/O_2/CO$ Separation in a Chemically Robust Porous Coordination Polymer with Low Binding Energy, Jingui Duan, Masakazu Higuchi, Rajamani Krishna, Tomokazu Kiyonaga, Yosuke Tsutsumi, Yohei Sato, Yoshiki Kubota, Masaki Takata, Susumu Kitagawa, *Chem. Sci.* **5**, 660-666, (2014), DOI:10.1039/c3sc52177j, 査読有り

Microporous Structures Having Phenylene Fin: Significance of Substituent Groups for Rotational Linkers in Coordination Polymers, Ryotaro Matsuda, Wataru Kosaka, Ryo Kitaura, Yoshiki Kubota, Masaki Takata, Susumu Kitagawa, *Microporous and Mesoporous Materials* **189**, 83-90, (2014), DOI:10.1016/j.micromeso.2013.10.029, 査読有り

Structural Properties in Incommensurately Modulated Spinel Compound CuV_2S_4 , Shogo Kawaguchi, Hiroki Ishibashi, Naruki Tsuji, Jungeun Kim, Kenichi Kato, Masaki Takata, Yoshiki Kubota, *J. Phys. Soc. Jpn.* **82**, 064603(7 pages), (2013),

DOI:10.7566/JPSJ.82.064603, 査読有り

Crystal structures of X-phase in the Sb-Te binary alloy system, Kouichi Kifune, Tomoko Fujita, Takuya Tachizawa, Yoshiki Kubota, Noboru Yamada, Toshiyuki Matsunaga, *Cryst. Res. Technol.* **48**, 1011-1021, (2013),

DOI:10.1002/crat.201300252, 査読有り

Hydrogen storage in Pd nanocrystals covered with a metal-organic framework, Guangqin Li, Hirokazu Kobayashi, Jared M. Taylor, Ryuichi Ikeda, Yoshiki Kubota, Kenichi Kato, Masaki Takata, Tomokazu Yamamoto, Shoichi Toh, Syo Matsumura, Hiroshi Kitagawa, *Nature Mater.* **13**, 802-806, (2014), DOI:10.1038/nmat4030, 査読有り

An Ordered BCC CuPd Nanoalloy Synthesized via the Thermal Decomposition of Pd Nanoparticles Covered with a metal-Organic Framework under Hydrogen Gas, Guangqin Li, Hirokazu Kobayashi, Kohei Kusada, Jared M. Taylor, Yoshiki Kubota, Kenichi Kato, Masaki Takata, Tomokazu Yamamoto, Syo Matsumura, Hiroshi Kitagawa, *Chem. Commun.* **50**, 13750-13753, (2014),

DOI:10.1039/c4cc05941g, 査読有り

Remarkable Oxygen Intake/Release of $BaYMn_2O_{5+\delta}$ Viewed from High-Temperature Crystal Structure, Teruki Motohashi, Taira Takahashi, Makoto Kimura, Yuji Masubuchi, Shinichi Kikkawa, Yoshiki Kubota, Yoji Kobayashi, Hiroshi Kageyama, Masaki

Takata, Susumu Kitagawa, Ryotaro Matsuda, *J. Phys. Chem. C* **119**, 2356-2363, (2015), DOI:10.1021/jp511648b, 査読有り
Solid Solution Alloy Nanoparticles of Immiscible Pd and Ru Elements Neighboring on Rh: Changeover of the Thermodynamic Behavior for Hydrogen Storage and Enhanced CO-Oxidizing Ability, Kohei Kusada, Hirokazu Kobayashi, Ryuichi Ikeda, Yoshiki Kubota, Masaki Takata, Shoichi Toh, Tomokazu Yamamoto, Syo Matsumura, Naoya Sumi, Katsutoshi Sato, Katsutoshi Nagaoka, Hiroshi Kitagawa, *J. Am. Chem. Soc.* **136**, 1864-1871, (2014), DOI:10.1021/ja409464g, 査読有り
Shape-Dependent Hydrogen-Storage Properties in Pd Nanocrystals: Which Does Hydrogen Prefer, Octahedron (111) or Cube (100)?, Guangqin Li, Hirokazu Kobayashi, Shun Dekura, Ryuichi Ikeda, Yoshiki Kubota, Kenichi Kato, Masaki Takata, Tomokazu Yamamoto, Syo Matsumura, Hiroshi Kitagawa, *J. Am. Chem. Soc.* **136**, 10222-10225, (2014), DOI:10.1021/ja504699u, 査読有り

[学会発表](計 14 件)

Incommensurate crystal structure of charge-density wave phase in spinel compound CuV_2S_4 , Shogo Kawaguchi, Hiroki Ishibashi, Naruki Tsuji, Jungeun Kim, Kenichi Kato, Masaki Takata, Yoshiki Kubota, Sagamore conference XVII, July 17, 2012, Daini Meisui Tei (Hokkaido)

多孔性配位高分子 $[\text{Cu}(\text{dhbc})_2(\text{L})]_n$ の未知構造解析, 佐藤洋平, 久保田佳基, 犬伏康貴, 高田昌樹, 日本結晶学会平成 24 年度年会, 2012 年 10 月 25 日, 東北大学(仙台市)

多孔性配位高分子 $[\text{Cu}(\text{dhbc})_2(\text{L})]_n$ の未知構造解析, 佐藤洋平, 久保田佳基, 犬伏康貴, 高田昌樹, 第 26 回日本放射光学会年会, 2013 年 1 月 12 日, 名古屋大学(名古屋市)

スピントロニクス現象を示すヨウ素包摂多孔性配位高分子の結晶構造解析, 木村和史, 久保田佳基, 堀彰宏, 加藤健一, 高田昌樹, 大谷亮, 北川進, 大場正昭, 第 26 回日本放射光学会年会, 2013 年 1 月 14 日, 名古屋大学(名古屋市)

ヨウ素を吸着した多孔性配位高分子 $[\text{Fe}(\text{pz})\text{Pd}(\text{CN})_4]$ の結晶構造と磁性, 佐藤洋平, 木村和史, 堀彰宏, 加藤健一, 大谷亮, 北川進, 大場正昭, 久保田佳基, 日本結晶学会平成 25 年度年会, 2013 年 10 月 12 日, 熊本大学(熊本市)

THE CRYSTAL STRUCTURE AND MAGNETIC PROPERTY OF IODINE ADSORBED $[\text{Fe}(\text{PZ})\text{PD}(\text{CN})_4]$, Yohei Sato, Kazufumi Kimura, Akihiro Hori, Ken-ichi

Kato, Masaki Takata, Ryo Ohtani, Susumu Kitagawa, Masaaki Ohba, Yoshiki Kubota, The 12th Conference of the Asian Crystallographic Association (AsCa'13), December 9, 2013, Hong Kong University of Science and Technology (HKUST) (Hong Kong)

PHASE STABILITY AND CRYSTAL STRUCTURE OF Sb-Te AND Bi-Te BINARY SYSTEM, Takuya Tachizawa, Yoshiki Kubota, Kouichi Kifune, Toshiyuki Matsunaga, Noboru Yamada, Masaki Takata, The 12th Conference of the Asian Crystallographic Association (AsCa'13), December 9, 2013, Hong Kong University of Science and Technology (HKUST) (Hong Kong)

Novel Synthetic Method and Physical Properties for Metal Nanoparticle@Metal-Organic Framework Hybrid Materials, Hirokazu Kobayashi, Megumi Mukoyoshi, Hiroshi Kitagawa, Yoshiki Kubota, Tomokazu Yamamoto, Syo Matsumura, 4th International Conference on Metal-Organic Frameworks & Open Framework Compounds (mof2014), September 29, 2014, Kobe International Conference Center (Kobe)

Direct Observation of Intermolecular Interactions by Simultaneous Measurement of Synchrotron X-Ray Diffraction and Raman Scattering, Akihiro Hori, Masaaki Ohba, Yoshiki Kubota, Ryotaro Matsuda, Kenichi Kato, Masaki Takata, Susumu Kitagawa, 4th International Conference on Metal-Organic Frameworks & Open Framework Compounds (mof2014), September 29, 2014, Kobe International Conference Center (Kobe)

Significantly Enhanced Hydrogen-Storage Capacity and Speed in Pd Nanocrystals Coated with HKUST-1, Guangqin Li, Hirokazu Kobayashi, Hiroshi Kitagawa, Yoshiki Kubota, Tomokazu Yamamoto, Syo Matsumura, 4th International Conference on Metal-Organic Frameworks & Open Framework Compounds (mof2014), September 29, 2014, Kobe International Conference Center (Kobe)

The Crystal Structure and Magnetic property of Iodine Adsorbed $[\text{Fe}(\text{Pz})\text{Pd}(\text{CN})_4]$, Yohei Sato, Kazufumi Kimura, Akihiro Hori, Ryo Ohtani, Masaaki Ohba, Kenichi Kato, Masaki Takata, Susumu Kitagawa, Yoshiki Kubota, 4th International Conference on Metal-Organic Frameworks & Open Framework Compounds (mof2014), September 30, 2014, Kobe International Conference Center (Kobe)

Molecular Motion of Oxygen in The Nanopore of Metal-Organic Frameworks, Yoshiki Kubota, Yohei Sato, Akihiro Hori,

Ryotaro Matsuda, Masaaki Ohba, Kenichi Kato, Masaki Takata, Susumu Kitagawa, 4th International Conference on Metal-Organic Frameworks & Open Framework Compounds (mof2014), September 30, 2014, Kobe International Conference Center (Kobe)

ナノ細孔内に閉じ込められた酸素分子の配列とその振動モードの観測, 佐藤洋平, 藤井駿策, 堀彰宏, 松田亮太郎, 加藤健一, 高田昌樹, 北川進, 久保田佳基, 日本結晶学会平成 26 年度年会, 2014 年 11 月 1 日, 東京大学 (東京都)

Relation between the Molecular Orientation and Spin State of O₂-O₂ dimer Adsorbed on MOF Materials, Yoshiki Kubota, OPU-FZU joint International Symposium on Photocatalysis, Photo-Functional Materials and Nano-Science & Technology, December 5, 2014, Osaka Prefecture University (Sakai)

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

久保田 佳基 (KUBOTA YOSHIKI)

大阪府立大学・大学院理学系研究科・教授
研究者番号：50254371