

令和 3 年 5 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H02072

研究課題名(和文) 多孔錯体チャネルを有するガス分離変換膜の開発

研究課題名(英文) Development of Gas Separative Membrane Reactor with Coordination Nanochannels

研究代表者

細野 暢彦 (Hosono, Nobuhiko)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・講師

研究者番号：00612160

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：我々の社会生活を支えるガス分離膜の高機能化を目指し、多孔性金属錯体(MOF)および中空金属錯体(MOC)を分子を選別し変換するナノ空間チャネルとしてとらえ、それらを高分子材料と融合させることで全く新しいガス分離膜材料の合成を行った。結果、MOCと高分子を有機的に結合させ膜化する技術の開発に成功したほか、超高選択的ガス分離機能を発現するMOF、二酸化炭素を工業的に有用な有機物質へと変換するMOF触媒の合成も達成し、目指す分離変換膜の合成を実現させるための基盤技術群の開発に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、ガス分離膜設計に対してこれまでとは大きく異なるコンセプトを与えるものであり、今後の高機能性膜開発へ向けた重要な足がかりとなる成果を生んだ。本研究においてガス分離素子、物質変換素子として開発した新しいMOF材料は、類を見ない超高選択的ガス分離機能や分子変換機能を示した。これらの成果は、我々の生活を支えるガス分離材料の性能向上に資するだけでなく、次世代の物質分離技術、触媒技術開発のエッセンスとなる重要なものである。

研究成果の概要(英文)：Gas separation membrane is one of indispensable materials for our daily life. In order to improve the performance of gas separation membranes, we developed new synthetic approach of gas separation membranes by using metal-organic frameworks (MOFs) and metal-organic cages (MOCs) as nano-space channels for sorting gas molecules. As a result, we succeeded in developing new technologies to synthesize hybrid materials of MOCs and organic polymers that can be formed into gas separation membranes by simple thermal and solution processes. In addition, we developed a new MOF that exhibit ultra-high performance gas separation ability and a MOF with catalytic activity that convert carbon dioxide into industrially useful organic materials.

研究分野：高分子化学、錯体化学

キーワード：分離膜 多孔性金属錯体 多孔性配位高分子 分子認識 ガス分離 触媒 CO2変換

1. 研究開始当初の背景

我々の生活を支える重要な技術の一つに物質分離技術がある。とりわけガス分子の分離は、昨今のエネルギー問題や環境コストへの要請の高まりから、重要度が極めて高い。しかし、従来の膜材料開発においては、既存材料の改善・改良といったアプローチで進められているものが多く、抜本的な視点から膜の高機能化を目指した研究が必要とされ始めている。したがって、次世代の高機能分離膜材料開発には、既存材料の改良・改善ではなく、本質的な膜機能を高めていくための全く新しい方法論が必要であるとの考えに立ち、本研究を開始した。

本研究のモチーフは、生体内に見られる膜材料の仕組みである。生体は「膜」を巧みに利用している。物質の移動を制御し、かつ化学変換までも担わせている。すなわち、膜の分離機能へ変換機能を付与した複合機能系が達成されている。事実、生体エネルギー変換を行う重要な酵素群(変換チャネル)は、機能素子(モジュール)として生体膜内に位置し、膜の表裏へと物質を分離させ、かつ変換している。膜を物質変換の場として捉え、反応物と生成物を連続的に分離できる人工システムができれば、二酸化炭素を始めとするガス分離・変換技術に革新をもたらす。

昨今では、環境問題解決の糸口として、とりわけ二酸化炭素の分離を目的とした効率的ガス分離技術の開発が急務となっており、エネルギーコストの小さい高分子膜による分離法が注目されている。この高分子ガス分離膜に関する研究の歴史は長く、PRISM®膜のように商品化された製品も多い。一方で、昨今の分離膜材料開発では、コストやプロセス面の効率化が重視されるようになり、膜素材自体の化学構造や膜内部のナノ構造といった基礎化学的検討は、既存の膜材料のマイナーチェンジが主流となっている。これらの既存の高分子膜は分子デザイン性が乏しいために、難しいガス種の分離には歯が立たず、機能の拡張性も低い。このような背景から、これまでの膜開発には挑戦的な分子設計やナノスケールからのボトムアップ的分子デザインが精力的に検討されてこなかったと言える。

本研究では、錯体化学・多孔体化学・高分子化学といった異なる分野を横断しつつ、それらを駆使し、膜材料を分子レベルから総合的にデザインすることで、気体を「分離」し、同時に「変換」する新しい高分子膜材料を造り出す方法論を見つけ出すことを目的とした。ここでは、膜へ高機能性を付与するための機能性素子として、多孔性配位高分子(Metal-Organic Framework: MOF, 図1)および中空金属錯体(Metal-Organic Cage: MOC)を利用する。MOFおよびMOCは、金属イオンと有機配位子の自己組織化的な錯形成反応によって得られる多孔性の化合物であり、内部にナノメートルサイズの微小な空間(細孔)を有する。この細孔のサイズや、内部の環境を自在に制御できるだけでなく、触媒反応性や分子認識機能を付与できるというMOF/MOCの特長を最大限に利用し、MOF/MOCの機能を本質的に高めるための研究に加え、これらの素子を膜へ有機的に組み込むための方法論の研究を行った。これらMOF/MOCの細孔素子を、生体膜を模倣するような「分子変換チャネル」として見立て、これまでにないナノ空間機能を有する分離変換膜材料の創成に繋がる基盤技術の開拓を行った。

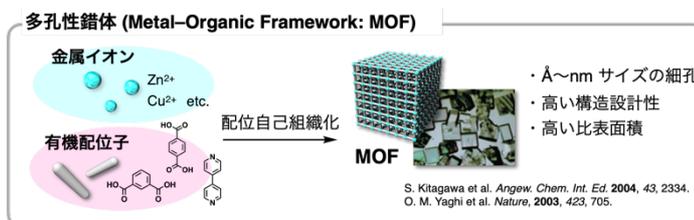


図1. MOFの特長

2. 研究の目的

本研究では、分離・変換機能を有する新規膜材料の創成に繋がる基盤技術の開発を目指した。必要とされる機能をMOF/MOCからなるチャネル型素子へとコンパートメント化し、高分子膜内部へ埋め込むというアプローチで高機能ガス分離膜の合理的設計手法を開発する。

MOFが有するナノメートルサイズの細孔は、特定の分子をサイズや物理的性質(極性や配位能)により識別し、吸着・捕集することができる。また、細孔内部に触媒機能を付与することも可能である。近年ではこのガス選択的吸着機能を利用し、世界中でMOFによるガス分離技術の開発競争が巻き起こっている。ゼオライトや活性炭といった多孔性物質とは異なり、MOFは有機配位子のデザインや金属イオンの種類により、細孔機能を自在に設計できるという点に特長を有する。上述のように、既に分子デザインに限界を迎えつつある高分子膜開発と、デザイン性と機能ポテンシャルを有するMOF開発を融合することで、新しい膜開発指針を与える。

3. 研究の方法

本研究は、MOFおよびMOCの合成および機能化に関する先駆的な研究に携わってきた研究者

(細野・日下・梶原) および膜のガス分離評価および理論的考察を担う研究者(山田) が分担して推進した。課題を大きく三つにわけ、(A)MOF および MOC と高分子との融合化手法の開発による新規膜材料の合成、(B)MOF の高機能化および形態制御法の開発、(C)MOF を反応場とする物質変換触媒の開発について詳細に検討を行った。(A) の高分子融合化および膜化手法の開発を核とし、(B)、(C) で開発した MOF を (A) へと適用しゆくことで研究のハイスループット化を目指した。

4. 研究成果

それぞれの研究課題 (A, B, C) において、顕著な成果が複数得られた。代表的なものについて以下(1)～(3)に概説する。また、興味深い新しい発見も得られた。これまで、専らガス分離等の小分子分離に用いられた MOF が、高分子化合物の分離にも利用できるという事実を見出した。本成果については(4)に概説する。

(1) MOC と高分子の融合化技術による二酸化炭素分離膜の開発

MOF を含む高機能の多孔性材料が次々と創出されている現在、これらを膜へ加工して高機能のガス分離膜として利用する研究が世界的に加速している。しかし、MOF のみから成る無機固体膜は優れた分離性能を示す反面、成形や加工が難しく、大面積化も困難であるという問題を抱えている。そのような背景の中、MOF と高分子材料を混合することにより得る Mixed-Matrix Membrane (MMM) が注目されている。MOF は一般に結晶性の固体であるため、それ単体では熔融成形や塗布といった加工を施すことはできない。一方で、高分子マトリックスと混合させることで、成形加工性を付与することが可能になる。しかし、MMM においては、粉体と高分子との混合物という性質から均一な膜を合成することが難しく、結晶と高分子の界面に欠陥が生じ、期待通りの性能を発揮できないというさらなる課題が突きつけられており、これらの問題に対する抜本的な解決策が必要とされている。

この課題に対し本研究では、MOF と類似のナノ細孔を有する MOC からなる空間素子と、高分子化合物を有機的に直接結合させる分子設計を行い、MOC をボトムアップ的に組織化させることで、流動的かつ成形加工可能なソフト多孔体を構築する方法を開発した(図2)。本手法により液晶性を示す MOC の合成も可能となった。これは、空間素子が高次の秩序配列構造(例えば bcc キュービック相)をとりつつ、かつ流動性を有するという新しいタイプの多孔性物質である。本ソフト多孔体を用いて作成した膜は有効なイオン伝導やガス分離機能を示した。本成果は多孔体化学とガス分離膜などへの応用開発に新しい技術展開をもたらす重要な成果である。

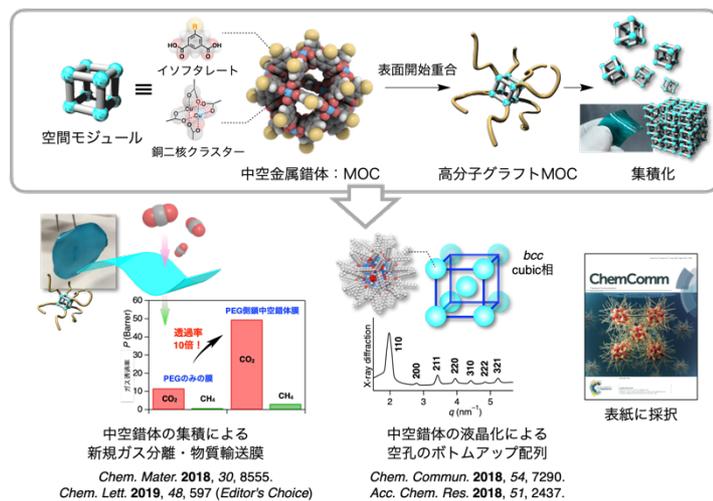


図2. MOC と高分子の融合によるソフト多孔体の開発

(2) 動的な分子素子を組み込んだ MOF による超高選択的分子認識・分離

MOF におけるガス分離研究においては、これまで専ら吸着ガス分子と MOF との吸着親和性を調節する方法で機能向上が図られてきた。一方で、MOF 内部のガスの拡散速度の制御による速度論的なガス分子認識機能の開拓は大きく遅れていた。本研究では、MOF の細孔内へ熱によって振動する分子素子を導入することで、MOF 内を移動するガス分子の拡散速度を精密に制御することを目的とし、新しい多孔体を合成した。実際、得られた MOF のガス吸着速度の温度依存性を調査したところ、ガス拡散速度が温度変化により大きく変化することが確かめられた。詳細な構造解析の結果、この MOF が有する細孔には振動分子素子がつくるゲート(扉)が存在することがわかり、このゲートの開閉挙動が熱によって影響を受けた結果、ガスの拡散速度および吸着速度が大きく変化する新しいメカニズム(分子ゲート機構)が明らかとなった(図3)。

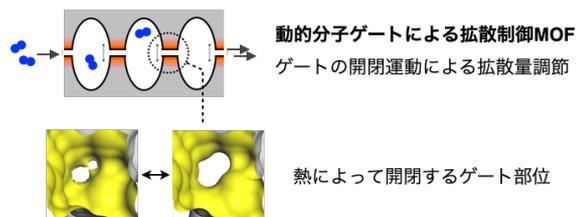


図3. 開発した MOF の動的な分子ゲート機構

本 MOF に備わっている分子ゲートは、熱に基づく開閉運動によりゲート部位において従来にはない高いレベルで精密にガス分子のサイズを認識することが明らかとなり、結果、極めて高純度にガスを分離させることを発見した。実際、一般的な吸着分離法では分離が困難な酸素とアルゴンの混合ガスから、95%以上の純度で酸素を取り出すことに成功している（図4）。本 MOF の分子ゲート機構により、吸着温度を適切に制御することであらゆる種類のガス種（水素、酸素、アルゴン、二酸化炭素、メタン、エチレン、エタン等）に対して高選択率の分離が可能であることも示された。更に、本ゲート機構によりガス分子の閉じ込めにも成功し、常温常圧におけるエチレンガスの貯蔵にも成功した。これらの結果は、これまでの多孔性材料設計に新しい指針を与える大きな発見である。本成果は、米国 Science 誌に掲載された。

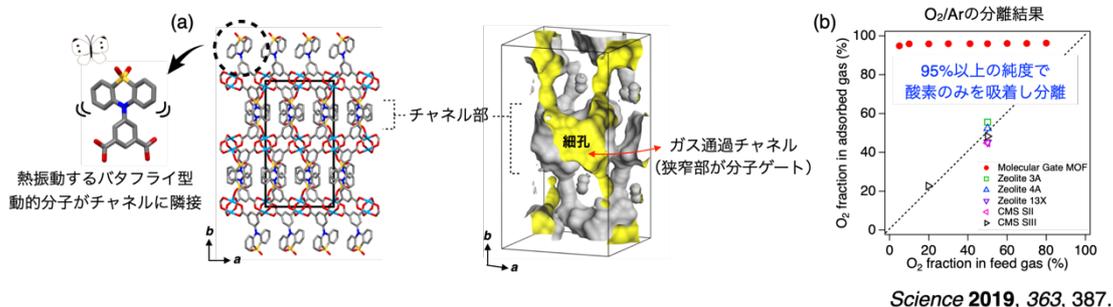


図4. (a)分子ゲート部位の構造と(b)酸素とアルゴンの分離結果

(3) MOF を反応場とした二酸化炭素変換触媒の開発

MOF の細孔構造を精密に設計し、触媒活性部位を細孔内部へ戦略的に配置することにより二酸化炭素を高効率かつ高選択的に有用な化学物質へと変換させる MOF 触媒の開発に成功した。本 MOF 触媒は、基質となる二酸化炭素分子を細孔の中へ閉じ込めることで、反応活性サイトの周囲に濃縮させることが可能である（図5）。結果、従来の同様の触媒に比べて10倍以上の変換効率を示すことが明らかとなった。本成果は、英国 Nature Communications 誌に掲載された。また、本成果は多数の一般メディアにも報道された。

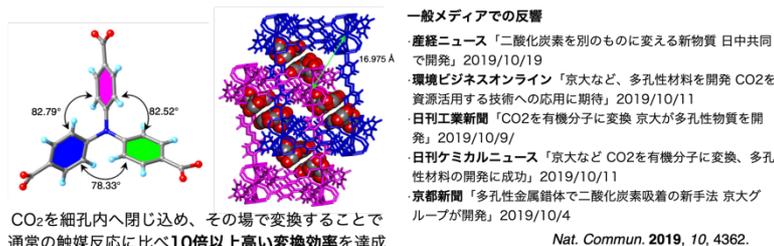


図5. 二酸化炭素を有用なエポキシ化合物へと変換する MOF

(4) MOF による高分子化合物の認識と分離技術の開発

従来の MOF による物質分離材料開発では、専らガス分子等の小分子が分離対象とされきた。本研究では、MOF が小分子だけでなく高分子化合物の構造も認識し、分離させることを見出した。実際に MOF を固定相としたカラムを試作し、高分子の末端基構造を精密に認識し、分離可能であることを実証した（図6）。これは、従来分離が難しかった様々な高分子化合物の精製を可能にする画期的技術であり、当該分野に新しい潮流を生む成果である。本知見を今後活用することで、ガス分子等の小分子に限らず、巨大な高分子化合物の構造も認識し分離させることのできる新しい分離膜の開発に繋がると期待される。これまでの高分子用分離膜は、専ら分子サイズによって分離する透析膜に限られていた。本発見は、従来の透析膜とは一線を画す全く新しい認識・分離原理を提供するものであり、将来の広い応用可能性を見込める極めて重要なものである。

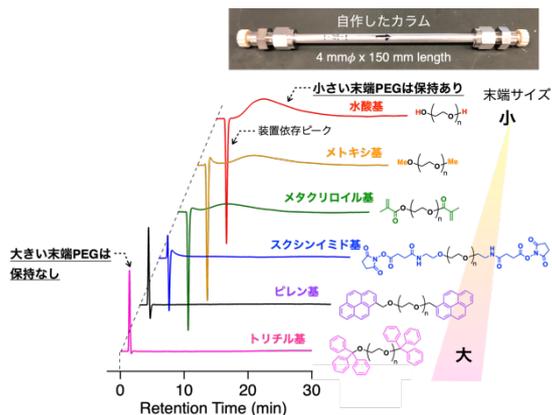


図6. MOF を固定相とするカラムによる末端修飾高分子の分離結果

以上、本研究では、MOF と高分子の融合化、超高選択的ガス分離を実現する MOF の開発、および二酸化炭素変換触媒開発において特に顕著な成果を得た。これらの技術を結合させた膜材料合成についての課題が残されているが、本研究で得られた成果を基盤技術として検討を続けることで、物質の分離変換を実現させる高機能膜材料の創出が可能になると期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計28件（うち査読付論文 28件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Omoto Kenichiro, Hosono Nobuhiko, Gochomori Mika, Kitagawa Susumu	4. 巻 54
2. 論文標題 Paraffinic metal-organic polyhedrons: solution-processable porous modules exhibiting three-dimensional molecular order	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 7290 ~ 7293
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8CC03705A	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 Hosono Nobuhiko, Kitagawa Susumu	4. 巻 51
2. 論文標題 Modular Design of Porous Soft Materials via Self-Organization of Metal/Organic Cages	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Accounts of Chemical Research	6. 最初と最後の頁 2437 ~ 2446
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.accounts.8b00361	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 Nagarkar Sanjog S., Tsujimoto Masahiko, Kitagawa Susumu, Hosono Nobuhiko, Horike Satoshi	4. 巻 30
2. 論文標題 Modular Self-Assembly and Dynamics in Coordination Star Polymer Glasses: New Media for Ion Transport	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Chemistry of Materials	6. 最初と最後の頁 8555 ~ 8561
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.chemmater.8b03481	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 Hosono Nobuhiko, Terashima Aya, Kusaka Shinpei, Matsuda Ryotaro, Kitagawa Susumu	4. 巻 11
2. 論文標題 Highly responsive nature of porous coordination polymer surfaces imaged by in situ atomic force microscopy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature Chemistry	6. 最初と最後の頁 109 ~ 116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41557-018-0170-0	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 Gu Cheng, Hosono Nobuhiko, Zheng Jia-Jia, Sato Yohei, Kusaka Shinpei, Sakaki Shigeyoshi, Kitagawa Susumu	4. 巻 363
2. 論文標題 Design and control of gas diffusion process in a nanoporous soft crystal	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 387 ~ 391
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.aar6833	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 Hosono Nobuhiko, Guo Wenbo, Omoto Kenichiro, Yamada Hidetaka, Kitagawa Susumu	4. 巻 48
2. 論文標題 Bottom-up Synthesis of Defect-free Mixed-matrix Membranes by Using Polymer-grafted Metal?Organic Polyhedra	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 597 ~ 600
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.190131	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 Ito Fuminori, Yamada Hidetaka, Kanamura Kiyoshi, Kawakami Hiroyoshi	4. 巻 29
2. 論文標題 Preparation of Biodegradable Polymer Nanospheres Containing Manganese Porphyrin (Mn-Porphyrin)	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials	6. 最初と最後の頁 1010 ~ 1018
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10904-018-0991-8	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 Ito Fuminori, Nishiyama Yuriko, Duan Shuhong, Yamada Hidetaka	4. 巻 26
2. 論文標題 Development of high-performance polymer membranes for CO2 separation by combining functionalities of polyvinyl alcohol (PVA) and sodium polyacrylate (PAANa)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Polymer Research	6. 最初と最後の頁 106-1 ~ 106-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10965-019-1769-6	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 Liu Yi, Hori Akihiro, Kusaka Shinpei, Hosono Nobuhiko, Li Mingrun, Guo Ang, Du Dongying, Li Yanshuo, Yang Weishen, Ma Yunsheng, Matsuda Ryotaro	4. 巻 14
2. 論文標題 Microwave Assisted Hydrothermal Synthesis of [Al(OH)(1,4 NDC)] Membranes with Superior Separation Performances	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chemistry ? An Asian Journal	6. 最初と最後の頁 2072 ~ 2076
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/asia.201900152	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 Wu Pengyan, Li Yang, Zheng Jia-Jia, Hosono Nobuhiko, Otake Ken-ichi, Wang Jian, Liu Yanhong, Xia Lingling, Jiang Min, Sakaki Shigeyoshi, Kitagawa Susumu	4. 巻 10
2. 論文標題 Carbon dioxide capture and efficient fixation in a dynamic porous coordination polymer	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 4362
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-019-12414-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

1. 著者名 Kanoo Prakash, Matsuda Ryotaro, Sato Hiroshi, Li Liangchun, Hosono Nobuhiko, Kitagawa Susumu	4. 巻 26
2. 論文標題 Pseudo Gated Adsorption with Negligible Volume Change Evoked by Halogen Bond Interaction in the Nanospace of MOFs	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemistry - A European Journal	6. 最初と最後の頁 2148 ~ 2153
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/chem.201904703	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 Ichii Tomoaki, Arikawa Takashi, Omoto Kenichiro, Hosono Nobuhiko, Sato Hiroshi, Kitagawa Susumu, Tanaka Koichiro	4. 巻 3
2. 論文標題 Observation of an exotic state of water in the hydrophilic nanospace of porous coordination polymers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Communications Chemistry	6. 最初と最後の頁 16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42004-020-0262-9	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 Mizutani Nagi, Hosono Nobuhiko, Le Ouay Benjamin, Kitao Takashi, Matsuura Ryoichirou, Kubo Takuya, Uemura Takashi	4. 巻 142
2. 論文標題 Recognition of Polymer Terminus by Metal?Organic Frameworks Enabling Chromatographic Separation of Polymers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 3701 ~ 3705
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.9b13568	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 Ito Fuminori, Yamada Hidetaka, Kanamura Kiyoshi, Kawakami Hiroyoshi	4. 巻 29
2. 論文標題 Preparation of Biodegradable Polymer Nanospheres Containing Manganese Porphyrin (Mn-Porphyrin)	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials	6. 最初と最後の頁 1010 ~ 1018
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10904-018-0991-8	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 Ito Fuminori, Nishiyama Yuriko, Duan Shuhong, Yamada Hidetaka	4. 巻 26
2. 論文標題 Development of high-performance polymer membranes for CO2 separation by combining functionalities of polyvinyl alcohol (PVA) and sodium polyacrylate (PAANa)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Polymer Research	6. 最初と最後の頁 106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10965-019-1769-6	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, Yonezu Akira, Kusaka Shinpei, Hori Akihiro, Ma Yunsheng, Matsuda Ryotaro	4. 巻 10
2. 論文標題 Direct observation of dimethyl sulfide trapped by MOF proving efficient removal of sulfur impurities	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 RSC Advances	6. 最初と最後の頁 4710 ~ 4714
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9RA09702C	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 Kusaka Shinpei, Kiyose Atsushi, Sato Hiroshi, Hijikata Yuh, Hori Akihiro, Ma Yunsheng, Matsuda Ryotaro	4. 巻 141
2. 論文標題 Dynamic Topochemical Reaction Tuned by Guest Molecules in the Nanospace of a Metal-Organic Framework	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 15742 ~ 15746
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.9b07682	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 Gu Yifan, Zheng Jia Jia, Otake Ken-ichi, Sugimoto Kunihisa, Hosono Nobuhiko, Sakaki Shigeyoshi, Li Fengting, Kitagawa Susumu	4. 巻 59
2. 論文標題 Structural Deformation Energy Modulation Strategy in a Soft Porous Coordination Polymer with an Interpenetrated Framework	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie International Edition	6. 最初と最後の頁 15517 ~ 15521
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.202003186	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 Krause Simon, Hosono Nobuhiko, Kitagawa Susumu	4. 巻 59
2. 論文標題 Chemistry of Soft Porous Crystals: Structural Dynamics and Gas Adsorption Properties	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie International Edition	6. 最初と最後の頁 15325 ~ 15341
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.202004535	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 Hosono Nobuhiko, Uemura Takashi	4. 巻 3
2. 論文標題 Metal-Organic Frameworks for Macromolecular Recognition and Separation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Matter	6. 最初と最後の頁 652 ~ 663
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.matt.2020.06.013	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 Ping, Otake Ken ichi, Hosono Nobuhiko, Kitagawa Susumu	4. 巻 60
2. 論文標題 Crystal Flexibility Design through Local and Global Motility Cooperation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie International Edition	6. 最初と最後の頁 7030 ~ 7035
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.202015257	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 Hosono Nobuhiko	4. 巻 94
2. 論文標題 Design of Porous Coordination Materials with Dynamic Properties	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Bulletin of the Chemical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 60 ~ 69
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/bcsj.20200242	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 Sawayama Taku, Wang Yubo, Watanabe Tomohisa, Takayanagi Masayoshi, Yamamoto Takuya, Hosono Nobuhiko, Uemura Takashi	4. 巻 60
2. 論文標題 Metal Organic Frameworks for Practical Separation of Cyclic and Linear Polymers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie International Edition	6. 最初と最後の頁 11830 ~ 11834
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.202102794	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 Yamada Hidetaka	4. 巻 53
2. 論文標題 Amine-based capture of CO2 for utilization and storage	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Polymer Journal	6. 最初と最後の頁 93 ~ 102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41428-020-00400-y	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 Ito Fuminori, Nishiyama Yuriko, Duan Shuhong, Yamada Hidetaka	4. 巻 78
2. 論文標題 Effects of the polymer composite composition and amine-based additives on the performance of a polymer composite CO2 separation membrane	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Polymer Bulletin	6. 最初と最後の頁 513 ~ 528
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00289-020-03122-6	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 Ito Fuminori, Nishiyama Yuriko, Sugimoto Rie, Mori Misato, Yamada Hidetaka	4. 巻 138
2. 論文標題 CO2 facilitated transport membranes prepared by blending polyvinyl alcohol and various water absorbing agents	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Polymer Science	6. 最初と最後の頁 50191 ~ 50191
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/app.50191	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 Ito Fuminori, Nishiyama Yuriko, Sugimoto Rie, Mori Misato, Yamada Hidetaka	4. 巻 60
2. 論文標題 Factors for improving the performance of the separation membranes prepared by the blending of polyvinyl alcohol and a water absorbing agent	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Polymer-Plastics Technology and Materials	6. 最初と最後の頁 659 ~ 669
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/25740881.2020.1826521	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 Ghosh Debashis, Kajiwara Takashi, Kitagawa Susumu, Tanaka Koji	4. 巻 2020
2. 論文標題 Ligand-Assisted Electrochemical CO2 Reduction by Ru-Polypyridyl Complexes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 European Journal of Inorganic Chemistry	6. 最初と最後の頁 1814 ~ 1818
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ejic.202000259	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47件（うち招待講演 10件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 Nobuhiko Hosono, Susumu Kitagawa
2. 発表標題 Coordination Star Polymers: Synthesis of Branched Macromolecules with a Nanocage Core
3. 学会等名 第67回高分子学会年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nobuhiko Hosono, Susumu Kitagawa
2. 発表標題 Paraffinic Metal-Organic Polyhedrons as a New Class of Nanoporous Liquid-Crystalline Materials
3. 学会等名 第67回高分子討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 細野 暢彦
2. 発表標題 PCP/MOF 結晶表面の分子レベル観察とその描像: Dynamic or Static?
3. 学会等名 錯体化学若手の会 第58回近畿支部勉強会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nobuhiko Hosono
2. 発表標題 Modular Design of Soft Porous Materials by Self-Organization of Metal-Organic Nanocages
3. 学会等名 第99回日本化学会春季年会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nobuhiko Hosono, Susumu Kitagawa
2. 発表標題 Guest-Induced Transformation of Porous Coordination Crystal Surface Tracked by Atomic Force Microscopy
3. 学会等名 43rd International Conference on Coordination Chemistry (ICCC2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nobuhiko Hosono, Susumu Kitagawa
2. 発表標題 Modular Approach for Porous Soft Materials by Metal-Organic Nanocage Self-Organization
3. 学会等名 6th International Conference on Metal-Organic Frameworks (MOF 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山田秀尚
2. 発表標題 CO2回収技術の最新動向
3. 学会等名 新化学技術推進協会エネルギー・資源技術部会エネルギー分科会講演会「CO2固定化・有効利用」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Kajiwara, Koji Tanaka, Susumu Kitagawa
2. 発表標題 Design and Synthesis of Porous Coordination Polymer Hybrid Catalysts Modified with Ru(II)-polypyridyl Complexes for Photochemical CO2 Reduction
3. 学会等名 43rd International Conference on Coordination Chemistry (ICCC2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shinpei Kusaka, Ryotaro Matsuda, Susumu Kitagawa
2. 発表標題 Photo-induced Post-synthetic Modification of Sulfur Functional Groups in a Microporous Metal Complex
3. 学会等名 8th Pacific Basin Conference on Adsorption Science and Technology
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 日下心平、堀彰宏、松田亮太郎
2. 発表標題 柔軟性ナノポーラス金属錯体の構造相転移に伴う競争的混合ガス吸着特性
3. 学会等名 第32回日本吸着学会研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nobuhiko Hosono, Shinpei Kusaka, Ryotaro Matsuda, Susumu Kitagawa
2. 発表標題 Dynamic Response of Porous Coordination Polymer Surfaces Imaged by in-situ Atomic Force Microscopy
3. 学会等名 第68回高分子学会年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nobuhiko Hosono, Susumu Kitagawa
2. 発表標題 Design and Applications of Porous Coordination Materials with Soft and Dynamic Nature
3. 学会等名 錯体化学会 第69回討論会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 細野 暢彦, 北川 進
2. 発表標題 動的な分子ゲートを有する多孔性配位高分子の設計
3. 学会等名 第68回高分子討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 細野 暢彦
2. 発表標題 ナノ空間ソフトマテリアルの化学
3. 学会等名 関東高分子若手研究会 サマーキャンプ 2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nobuhiko Hosono
2. 発表標題 Design and Application of Porous Coordination Materials with Dynamic Functions
3. 学会等名 第100回日本化学会春季年会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Biplab Manna, Nobuhiko Hosono, Takashi Uemura
2. 発表標題 Polymer Recognition Enabled by Coordination-driven Insertion into Metal-Organic Frameworks
3. 学会等名 第100回日本化学会春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大江 功能・細野 暢彦・植村 卓史
2. 発表標題 多孔性金属錯体への高分子貫入ダイナミクス
3. 学会等名 第100回日本化学会春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 水谷 凧・Benjamin Le Ouay・細野 暢彦・植村卓史
2. 発表標題 多孔性金属錯体による高分子の末端認識とクロマトグラフ分離法への応用
3. 学会等名 第100回日本化学会春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 澤山 拓・細野 暢彦・植村 卓史
2. 発表標題 多孔性金属錯体を用いた環状高分子の効率的分離法
3. 学会等名 第100回日本化学会春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nobuhiko Hosono, Susumu Kitagawa
2. 発表標題 Dynamic Nature of Porous Coordination Polymer Surfaces Unveiled by Real-Time Imaging Techniques
3. 学会等名 2019 China-Japan Symposium of Functional Coordination Chemistry (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nobuhiko Hosono, Aya Terashima, Shinpei Kusaka, Ryotaro Matsuda, Susumu Kitagawa
2. 発表標題 Dynamic Nature of Porous Coordination Polymer Surfaces Unveiled by Real-Time Imaging Techniques
3. 学会等名 Okinawa Colloids 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nobuhiko Hosono
2. 発表標題 Dynamic Molecular Events at the Surfaces of Metal-Organic Frameworks
3. 学会等名 Pre-symposium of The 1st International Symposium on Molecular Engine (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nobuhiko Hosono, Nagi Mizutani, Takashi Uemura
2. 発表標題 Polymer Recognition and Separation by Programmed Nanospaces of MOFs
3. 学会等名 The 1st International Symposium on Molecular Engine (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nobuhiko Hosono, Susumu Kitagawa
2. 発表標題 Nanostructures of Porous Coordination Polymer Surfaces Imaged by Atomic Force Microscopy
3. 学会等名 1st WPI NanoLSI-iCeMS Joint Symposium (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山田秀尚
2. 発表標題 CO2回収技術の最新動向
3. 学会等名 新化学技術推進協会エネルギー・資源技術部会エネルギー分科会講演会「CO2固定化・有効利用」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 水谷凧・細野暢彦・Benjamin Le Ouay・北尾岳史・松浦綾一郎・久保拓也・植村卓史
2. 発表標題 多孔性金属錯体による高分子の末端認識とクロマトグラフ分離法への応用
3. 学会等名 第69回高分子学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 澤山 拓・細野 暢彦・植村 卓史
2. 発表標題 多孔性金属錯体を用いた環状高分子の効率的分離法
3. 学会等名 第69回高分子学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大江 功能・細野 暢彦・植村 卓史
2. 発表標題 多孔性金属錯体への高分子貫入ダイナミクス
3. 学会等名 第69回高分子学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 細野 暢彦・Biplab Manna・植村 卓史
2. 発表標題 MOF の制御されたナノ空間による高分子認識
3. 学会等名 第69回高分子討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 細野 暢彦・植村 卓史
2. 発表標題 多孔性金属錯体 MOF を用いた高分子認識と分離
3. 学会等名 第69回高分子討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 水谷 凧・細野暢彦・Benjamin Le Ouay・北尾岳史・植村卓史
2. 発表標題 多孔性金属錯体による高分子の末端認識とクロマトグラフ分離法への応用
3. 学会等名 第69回高分子討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三輪 悦裕・Benjamin Le Ouay・細野暢彦・植村卓史
2. 発表標題 MOFの一次元細孔への高分子導入:超長鎖高分子の検討
3. 学会等名 第69回高分子討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大江 功能・細野 暢彦・植村 卓史
2. 発表標題 多孔性金属錯体への高分子貫入機構の解明とその応用
3. 学会等名 第69回高分子討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 澤山 拓・細野 暢彦・植村 卓史
2. 発表標題 多孔性金属錯体を用いた環状高分子の効率的分離法
3. 学会等名 第69回高分子討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三輪悦裕・Benjamin Le Ouay・細野暢彦・植村卓史
2. 発表標題 MOFの一次元細孔への高分子導入:超長鎖高分子の検討
3. 学会等名 錯体化学会 第70回討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 澤山拓・細野暢彦・植村卓史
2. 発表標題 多孔性金属錯体を用いた環状高分子の効率的分離法
3. 学会等名 錯体化学会 第70回討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nagi Mizutani, Nobuhiko Hosono, Benjamin Le Ouay, Takashi Uemura
2. 発表標題 Recognition of polymer terminus by MOF for chromatographic separation
3. 学会等名 錯体化学会 第70回討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Noriyoshi Oe, Nobuhiko Hosono, Takashi Uemura
2. 発表標題 Polymer intercalation dynamics in metal-organic frameworks
3. 学会等名 錯体化学会 第70回討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nobuhiko Hosono
2. 発表標題 Metal-Organic Frameworks for Polymer Recognition and Separation
3. 学会等名 RSC Desktop Seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 澤山拓・細野暢彦・植村卓史
2. 発表標題 多孔性金属錯体を用いた環状高分子の効率的分離法
3. 学会等名 第10回CSJ化学フェスタ2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大江 功能・細野 暢彦・植村 卓史
2. 発表標題 多孔性金属錯体への高分子貫入機構の解明とその応用
3. 学会等名 第10回CSJ化学フェスタ2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 飯塚 知也・三輪 悦裕・細野 暢彦・植村 卓史
2. 発表標題 MOFと超長鎖高分子の複合による新規材料とその物性
3. 学会等名 第101回日本化学会春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 水谷 凧・細野 暢彦・植村 卓史
2. 発表標題 MOFへの幾何学的拘束を利用した高分子の分離
3. 学会等名 第101回日本化学会春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 澤山 拓・細野 暢彦・植村 卓史
2. 発表標題 MOFを用いた環状高分子と線状高分子の実用的分離法
3. 学会等名 第101回日本化学会春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大江 功能・細野 暢彦・植村 卓史
2. 発表標題 多孔性金属錯体MOFへの高分子浸入機構の解明とその応用
3. 学会等名 第101回日本化学会春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木岡 薫・細野 暢彦・植村 卓史
2. 発表標題 MOFカラムクロマトグラフィーにおける高分子化合物の保持挙動
3. 学会等名 第101回日本化学会春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浅見 美月・Biplab Manna・細野 暢彦・植村 卓史
2. 発表標題 MOFナノ空間における配位相互作用を利用した高分子の構造認識
3. 学会等名 第101回日本化学会春季年会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 環状化合物の分離または精製方法、環状化合物の製造方法、分離材、および分離器具	発明者 細野 暢彦・植村 卓史	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-035291	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

研究代表者のwebページ
<https://www.nhosono.com>

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	山田 秀尚 (Yamada Hidetaka) (60446408)	公益財団法人地球環境産業技術研究機構・その他部局等・主任研究員 (84307)	
研究分担者	梶原 隆史 (Kajiwara Takashi) (80422799)	京都大学・高等研究院・研究員 (14301)	
研究分担者	日下 心平 (Kusaka Shinpei) (80749995)	名古屋大学・工学研究科・特任助教 (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		
インド	Central University of Haryana		
中国	Jiangsu Normal University	Tongji University	
オランダ	University of Groningen		