

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成30年5月31日現在

機関番号：14301

研究種目：特別推進研究

研究期間：2013～2017

課題番号：25000007

研究課題名（和文） 階層的配位空間の化学

研究課題名（英文） Chemistry of Hierarchical Coordination Space

研究代表者

北川 進 (KITAGAWA, Susumu)

京都大学・高等研究院物質・細胞統合システム拠点・特別教授

研究者番号：20140303

交付決定額（研究期間全体）（直接経費）：452,700,000円

研究成果の概要（和文）：

多孔性配位高分子(Porous Coordination Polymer: PCP)の造りだすナノ空間を階層的に集積化させ、あらゆる細孔機能を統合した「階層的配位空間」の学理創成を目的として研究を行った。特に分子の分離・変換・輸送機能をテーマに、PCPの合成および細孔内空間での新現象の開拓、そしてナノから巨視的スケールに渡るPCPの階層的集積化法を確立し、新しい空間の学問領域を開拓した。結果、PCPの階層的細孔構造を精緻にデザインすることによって、一般的に極めて難しいとされるガス種の分離や変換を達成するPCPの合成に成功した。さらに、高分子素材との複合化手法を開発しPCPの階層的集積化への道筋を開き、PCPを基盤とする新しい分離膜の開発に成功した。

研究成果の概要（英文）：

We have developed a new paradigm of chemistry for hierarchical nanospaces using porous coordination polymers (PCPs). PCPs have been designed and assembled in a hierarchical manner to accumulate their functions beyond the size scale. By the hierarchical design approach, we succeeded in the development of PCPs and related porous materials with molecular separation, conversion, and mass transportation functions. In addition, hybridization method of PCP and organic polymers was newly developed, which leads to the hierarchically assembled structures in macroscopic scale affording flexible membranes promising for practical separation devices.

研究分野：錯体化学

キーワード：多孔性配位高分子、ガス分離・吸着材料、階層構造

1. 研究開始当初の背景

多孔性材料は古代エジプトの時代(活性炭)から現代まで(ゼオライトなど)に至る3500年にわたって人類の生活に不可欠なものとして利用されてきた。もし、活性炭やゼオライトが担ってきた貯蔵、分離、変換などの機能について、それらを凌駕する、もしくは全く新しい多孔性機能を有する材料が創製されれば、人類の生活に革新的な変化をもたらす事が期待される。そのためには、微少空間を持つ物質の合成、構造、性質についての新しいサイエンスの開拓が必要である。

分離・変換といった科学は、身の回りの空気や工場排ガス等に含まれる気体分子を有用物質へと変換する産業技術へ繋がり、エネル

ギー問題、天然資源問題を根本から解決する可能性を秘めている。

従来の多孔性材料では、その細孔サイズに基づき、マイクロ孔 (< 2 nm)、メソ孔 (2~50 nm)、マクロ孔 (> 50 nm) と分類され、個々の材料が実現している。空間の機能を最大限発揮するためには、マイクロ~メソ~マクロ孔が一体となり、それぞれの細孔が機能を果たすような多孔性材料が存在してしかるべきであるが、このような階層的構造体を合理的に構築する化学は存在しなかった。また、異なる性質を持つ空間を、ある機能を創成する目的で逐次集積する、すなわち機能の階層化を実現する化学はこれまで未開拓であった。さらに、材料の機能発現には分子運動や物質の拡散といった時間スケールの異なる現象が

介在し複雑に連携している。こういった時間的階層をも積極的にデザインし制御してゆく物質設計が必要である。

本研究ではこのような空間を「階層的配位空間」と名付け、その化学を開拓し、有用な材料として創出することを目指した。多孔性配位高分子(Porous Coordination Polymer: PCP)を足場として、多様な超機能空間のデザイン、およびそれらを階層的に集積化させる方法論の開拓を基盤目標とし、時空間が階層的に積み上げられた配位空間の連携が生み出す新現象・新機能の探索を行った。

2. 研究の目的

本研究は、PCPの細孔構造および集積構造を制御し、サイズスケールおよび時間スケールを横断した動的空間機能を有する新しい多孔性物質の合成を目的とした。さらには、階層構造を有する有機・無機複合材料の開発や、時間分解測定による動的な吸着現象の理解を通し、分子の分離や輸送、変換を実現する多孔性物質の創製に挑んだ。

3. 研究の方法

PCPは有機配位子と金属イオンが自己組織化プロセスによって組み上がる結晶性の多孔体である。PCPはその骨格構造に均一な細孔(直径数Å~数nm)を有し、そこへ気体分子を含む様々なゲスト分子を吸着させ取り込むことができる。一からナノ配位空間を設計、構築できるPCPの利点を最大限に引き出すことで、随意に組み上げられた階層的配位空間材料を創製し、ナノからメゾ、マイクロ、マクロサイズにわたる集積空間を実現させる。この階層的配位空間における未知の分子凝集、分子活性化の新規諸現象を開拓し、さらにはそれらの時間的发展を解析することで階層的配位空間が繰り広げる新しい化学の確立へと繋げる。

4. 主要な研究成果

PCPのナノ配位空間を精密に設計・構築し、その機能を引き出すことで、一酸化炭素/窒素、アセチレン/二酸化炭素、エタン/エチレンといった混合ガスの分離を可能にする新材料の創製に成功した。これらのガスは既存の技術による分離法ではエネルギーコストが高く、難しいとされながらも、産業的には需要が大きく、分離技術に関するブレークスルーが強く望まれていたものである。

また、PCPの階層的集積複合化を達成する方法として、非常に温和な条件でグラフェンオキシドを積層させ、あらゆる形状のメソ多孔体を得る新手法を開発した。さらに、マイクロ孔を有する高分子ハイブリッドの合成も行い、中空有機金属錯体と高分子の複合体を新たに合成した。その複合体を加工し柔軟な膜素材を得ることに成功し、二酸化炭素分離膜として機能することを実証した。

一次元細孔チャンネルを有するPCPへ水分子を吸着させ、その吸着ダイナミクスを時間分解赤外分光スペクトル測定によって追跡する手法を開発した。これにより、水分子が細孔内で特異なクラスターを形成しながら特定の吸着サイトへ吸着してゆく過程が明らかにされた。その他、細孔内へ触媒機能を集積化させる試みも行い、高効率固体触媒の合成にも成功した。

以下、代表的な成果をハイライトして記述する。

(1) 一酸化炭素/窒素分離細孔

一酸化炭素(CO)と窒素(N₂)は、動力的直径や分子量、沸点が極めて近く、一般的な手法(例えば深冷分離法)では分離が困難なガス種とされてきた。我々は複数の細孔径をPCP内に実現させ、ゲストに対する階層的応答を実現させることでCOとN₂を非常に効率よく分離する材料を開発した[1]。本PCPは、イソフタル酸誘導体配位子が銅(II)二核クラスターでカゴメ格子を組んだ構造を持ち、その二次元カゴメ格子が縦に積み重なることで大きさの異なる2種類の一次元細孔構造を作っている(図1a)。

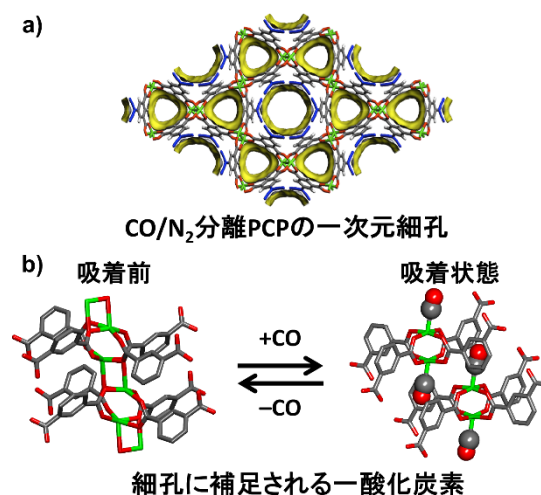


図1. カゴメ構造を有するCO/N₂分離PCP

2種類の細孔のうち小さい細孔の方へCOが侵入し、銅(II)へ配位することで構造を階層的に変化させる。低圧では細孔が閉じた構造となっているため吸着はほとんど見られないが、ある圧力を超えると急激にCOが細孔へ侵入し、ゲート(細孔窓)を開く(図2)。

ガス吸着下での放射光X線構造解析や、ガス吸着下in-situ赤外分光スペクトル測定法などを駆使し、そのメカニズムを詳細に調査したところ、COは銅二核錯体上へ配位した状態で吸着されており、自らが引き金となって格子の構造変形を誘起し、次々と細孔内へ拡散してゆく興味深い機構が明らかとなった(Self-Acceleration機構)(図3)。一方、N₂はそのような配位状態をとらず、細孔内部への侵入は許されない。

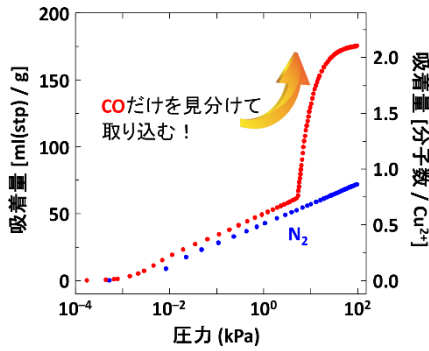


図 2. CO/N₂分離 PCP の吸着等温線 (120 K)

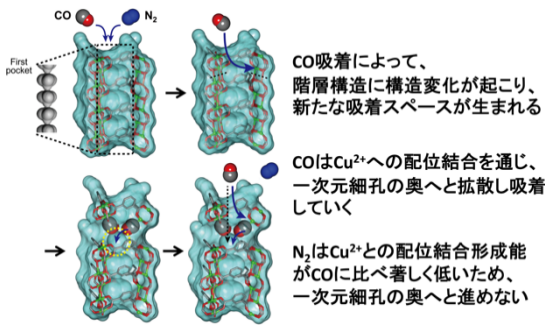


図 3. CO/N₂分離 PCP の CO 吸着メカニズム

実際に我々は、本 PCP を吸着剤として使用し CO/N₂ の等量混合気体から 2 回の脱吸着プロセスを経て 94% まで CO を濃縮することに成功した。

(2) アセチレン/二酸化炭素分離細孔

π - π 相互作用や CH- π 相互作用を始めとした静電的な相互作用を活用し、C₂H₂/CO₂ の吸着・分離を可能とする PCP を新規に設計・合成した (図 4) [4]。本 PCP は、有機配位子の芳香環に由来する π 電子平面で囲まれた、3.3 × 3.5 × 5.6 Å³ の 0 次元細孔を持つ。本 PCP が示す C₂H₂/CO₂ 吸着挙動並びにそれに伴う PCP 骨格の動的挙動を、吸着等温線測定および PXRD 測定により詳細に評価した。

結果、低温条件 (195 K) 下において本 PCP は CO₂ に対してはガス圧上昇により、緩やかな構造変換を伴う吸着挙動・構造変換を示す一方、C₂H₂ に対してはゲートオープン現象を示すことが確認され、幾何学的・熱力学的特性が酷似した C₂H₂/CO₂ に対して顕著に異なる吸着挙動を発現することが明らかとなった (図 4)。

さらに、比較的温和な温度条件 (273 K) 下において、本 PCP は C₂H₂/CO₂ の 50/50 混合物から、CO₂ を高選択的に分離可能であることも明らかにした。これは本 PCP が工業的に重要な C₂H₂ から不純物である CO₂ を分離・除去する吸着剤として有用であることを示している。

興味深いことに、本 PCP が示す C₂H₂/CO₂ 選択性は、これまで報告されてきた PCP とは逆の傾向である。これには、CO₂ および C₂H₂ により誘起される構造変化のメカニズムの違いが

関係していると考えた。密度汎関数理論 (DFT) 計算及び類似化合物を用いた比較対象実験によりそのメカニズムを調査した結果、ガス吸着に伴う構造変換により本 PCP は、電気的に陽性な中心炭素を有する CO₂ を π - π 相互作用で細孔内に補足する一方、電気的に陰性な中心炭素を有する C₂H₂ は CH- π 相互作用により細孔内に補足されることが示唆された (図 4)。これらの相互作用モードの差異が C₂H₂/CO₂ に対する顕著に異なる吸着挙動を実現していると考えられる。

以上の結果は、ゲスト-細孔壁面との静電的相互作用を適切にデザインすることで、幾何学的・熱力学的特性が酷似した気体分子を分離精製することが可能であることを示している。

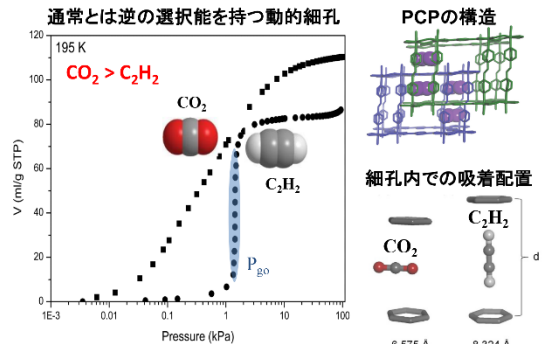
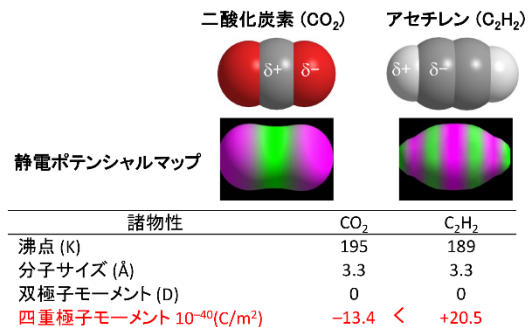


図 4. C₂H₂/CO₂分離 PCP の構造とメカニズム

(3) エチレン/エタン分離細孔

上述の PCP の発現するガス選択的ゲート吸着を利用すれば、主に圧力変動吸着法 (Pressure-Swing Adsorption: PSA) によるガス分離技術においてその分離回収効率を上げることができる。エチレン (C₂H₄)、エタン (C₂H₆) は化成品の原料として産業において非常に重要な化合物であるが、一般的にこれらの分離は大規模な深冷分離法により行われるため、冷却などにかかるエネルギーコストは大きく、新しい分離技術の開拓が必用とされている。

一般的な PCP のゲート型構造変化は、変形エネルギーと吸着エネルギーとのバランスで起こるため、エタンとエチレンのような分子サイズや沸点、極性等、物理的性質が似通っている分子においては、通常のゲート型吸着ではその識別が難しい。そこで、その両者を確実に識別する機構を PCP へデザインした。

テトラチアフルバレン誘導体(VTTF)と Co^{2+} イオンを反応させ、新規 PCP を合成した。単結晶 X 線構造解析により、本 PCP のフレームワークは、 Co^{2+} と VTTF の硫黄原子が配位結合 (Co-S) を形成し三次元的に架橋した構造をしていることが示された。ガス吸着同時粉末 X 線測定による詳細な解析を行った結果、本 PCP はエチレンのみに対して高選択に応答し、細孔を開孔させることが明らかとなった (図 5) [11]。

エチレン吸着前は細孔を閉じた構造 (図 5 a) をとるが、エチレンを認識してゲートを開き、吸着させる (図 5 b)。一方、本 PCP はエタンに対しては全く応答せず、吸着しない。メカニズムを詳細に調査した結果、エチレン分子自らが PCP の Co^{2+} へ配位することで Co-S 結合を切断し開構造へと転移させることが明らかとなった。本 PCP のエチレン選択的応答挙動を利用して実際にエチレン/エタンの分離にも成功した。本 PCP が示すエチレン選択的ゲート機構は、生体内の酵素が示すアロステリック効果にも似た基質特異的機能を固体材料へも応用可能であることを示した点で重要な成果である。

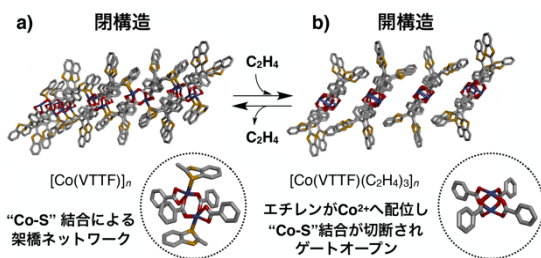


図 5. $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ 分離 PCP の構造とメカニズム

(4) 形状記憶細孔

PCP の化学構造を精密にデザインすることで、ゼオライトや活性炭などの多孔性材料とは一線を画する「形状記憶」機能を発現する多孔性材料の開発に成功した (図 6 a) [12]。本材料は、 Zn^{2+} およびジカルボン酸・ピピリジン誘導体からなる PCP であり、ひとたび二酸化炭素や一酸化炭素、窒素などを吸着させると開構造へと転移し、ガスを脱着させてもその開構造を維持する。図 6 b に 195 K における本 PCP の二酸化炭素の吸着等温線を示す。第一回の吸着サイクルではゲート開孔による顕著なステップが見られるが、脱着および第二回以降のサイクルでは構造が開いたまま維持されるため、ステップは現れない。すなわち、一度目の吸着でゲートを開けたままの構造が記憶される。

この記憶された構造は室温では充分安定であるが、400 K 以上に加熱することで閉構造へと戻る。単結晶 X 線構造解析による詳細な調査から、本 PCP は開構造においてフレームワーク内に CH-O、CH- π などの複数の分子内相互作用が生じ、開構造が準安定化されることが明らかとなった。

今後、本原理を PCP デザインへと積極的に

利用することでゲートの開閉を任意に制御できるようになり、ガス分離機能の制御のほか、センサーといった二次機能への応用も期待できる。

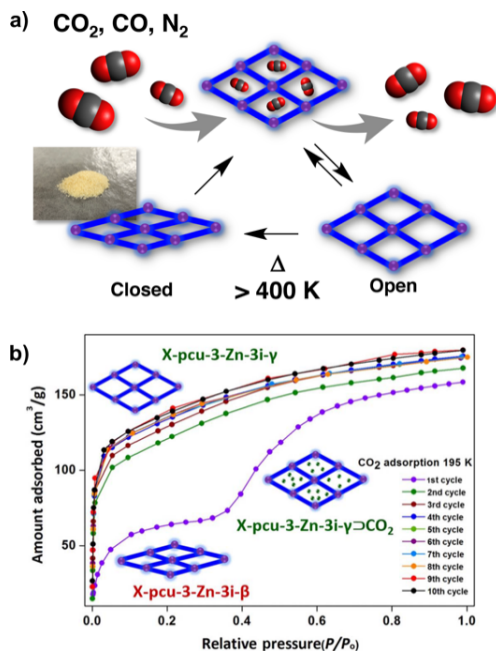


図 6. 形状記憶 PCP の概要と吸着等温線

(5) 高効率光応答細孔

微弱な光にも応答し、ガス吸着特性をダイナミックかつ可逆的に変化させる PCP の開発に成功した [8]。PCP 骨格内に組み込んだ光応答性配位子が照射によりその構造を異性化させ、PCP の二酸化炭素吸着のゲート特性が可逆的に変化する (図 7)。本 PCP は紫外光照射により細孔が閉じた構造へと変化し、可視光照射によりもとの構造へと戻ることができる。この照射前後の構造は、単結晶 X 線構造解析により明らかにされた。

通常の光異性化分子の光応答は、固体中に組み込むことで構造的に抑制されるため、高効率の異性化収率が得られないという問題があった。本成果では、多孔質かつ柔軟に構造を変化させることができる PCP へ光異性化分子 (ジアリールエテン誘導体) を組み込むというデザインにより、光異性化効率 99% 以上という高効率を達成した。本 PCP は光エネルギーを効率よく変換することのできる高機能デバイスへの応用が期待される。

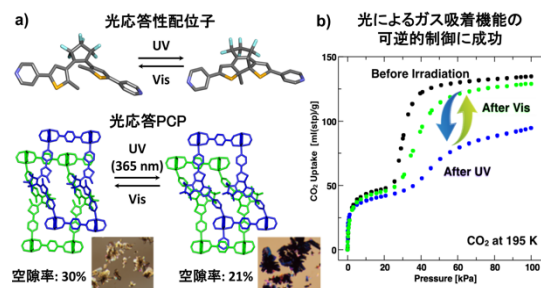


図 7. 光応答 PCP の構造と光吸着量変化

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 29 件)

1. “Self-Accelerating CO Sorption in a Soft Nanoporous Crystal”
Hiroshi Sato, Wataru Kosaka, Ryotaro Matsuda, Akihiro Hori, Yuh Hijikata, Rodion V. Belosludov, Shigeyoshi Sakaki, Masaki Takata, Susumu Kitagawa
Science, **2014**, *343*, 167–170.
DOI:10.1126/science.1246423
2. “Diffusion Driven Layer-by-Layer Assembly of Graphene Oxide Nanosheets into Porous Three-Dimensional Macrostructures”
Jianli Zou, Franklin Kim
Nat. Commun., **2014**, *5*, 5254.
DOI: 10.1038/ncomms6254
3. “A Convenient Strategy for Designing a Soft Nanospace: An Atomic Exchange in a Ligand with Isostructural Frameworks”
Yunsheng Ma, Ryotaro Matsuda, Hiroshi Sato, Yuh Hijikata, Liangchun Li, Shinpei Kusaka, Mawlin Foo, Fengfeng Xue, George Akiyama, Rongxin Yuan, Susumu Kitagawa
J. Am. Chem. Soc., **2015**, *137*, 15825–15832.
DOI:10.1021/jacs.5b09666
4. “An Adsorbate Discriminatory Gate Effect in a Flexible Porous Coordination Polymer for Selective Adsorption of CO₂ over C₂H₂”
Maw Lin Foo, Ryotaro Matsuda, Yuh Hijikata, Rajamani Krishna, Hiroshi Sato, Satoshi Horike, Akihiro Hori, Jingui Duan, Yohei Sato, Yoshiki Kubota, Masaki Takata, Susumu Kitagawa
J. Am. Chem. Soc., **2016**, *138*, 3022–3030.
DOI:10.1021/jacs.5b10491
5. “Metal-Organic Polyhedral Core as a Versatile Scaffold for Divergent and Convergent Star Polymer Synthesis”
Nobuhiko Hosono, Mika Gochomori, Ryotaro Matsuda, Hiroshi Sato, Susumu Kitagawa
J. Am. Chem. Soc., **2016**, *138*, 6525–6531.
DOI:10.1021/jacs.6b01758
6. “Constant Volume Gate-Opening by Freezing Rotational Dynamics in Microporous Organically Pillared Layered Silicates”
Kilian Bärwinkel, Markus M. Herling, Martin Rieß, Hiroshi Sato, Liangchun Li, Yamini S. Avadhut, Tobias W. Kemnitzer, Hussein Kalo, Jürgen Senker, Ryotaro Matsuda, Susumu Kitagawa, Josef Breu
J. Am. Chem. Soc., **2017**, *139*, 904–909.
DOI:10.1021/jacs.6b11124
7. “Future Porous Materials”
Susumu Kitagawa
Acc. Chem. Res., **2017**, *50*, 514–516.
DOI:10.1021/acs.accounts.6b00500
8. “Flexible Interlocked Porous Frameworks Allow Quantitative Photoisomerization in a Crystalline Solid”
Yongtai Zheng, Hiroshi Sato, Pengyan Wu, Hyung Joon Jeon, Ryotaro Matsuda, Susumu Kitagawa
Nat. Commun., **2017**, *8*, 100.
DOI:10.1038/s41467-017-00122-5
9. “Density Gradation of Open Metal Sites in the Mesospace of Porous Coordination Polymers”
Jingui Duan, Masakazu Higuchi, Jia-jia Zheng, Shin-ichiro Noro, I-Ya Chang, Kim Hyeon-Deuk, Simon Mathew, Shinpei Kusaka, Easan Sivaniah, Ryotaro Matsuda, Shigeyoshi Sakaki, Susumu Kitagawa
J. Am. Chem. Soc., **2017**, *139*, 11576–11583.
DOI:10.1021/jacs.7b05702
10. “Controllable Modular Growth of Hierarchical MOF-on-MOF Architectures”
Yifan Gu, Yi-nan Wu, Liangchun Li, Wei Chen, Fengting Li, Susumu Kitagawa
Angew. Chem., **2017**, *56*, 15658–15662.
DOI: 10.1002/anie.201709738
11. “Cooperative Bond Scission in a Soft Porous Crystal Enables Discriminatory Gate Opening for Ethylene over Ethane”
Susan Sen, Nobuhiko Hosono, Jia-Jia Zheng, Shinpei Kusaka, Ryotaro Matsuda, Shigeyoshi Sakaki, Susumu Kitagawa
J. Am. Chem. Soc., **2017**, *139*, 18313–18321.
DOI: 10.1021/jacs.7b10110
12. “Readily Accessible Shape-Memory Effect in a Porous Interpenetrated Coordination Network”
Mohana Shivanna, Qing-Yuan Yang, Susan Sen, Alankriti Bajpai, Nobuhiko Hosono, Shinpei Kusaka, Tony Pham, Katherine A. Forrest, Brian Space, Susumu Kitagawa, Michael J. Zaworotko
Sci. Adv. **2018**, *4*, eaaq1636.
DOI: 10.1126/sciadv.aaq1636
13. “Efficient CO₂ Removal for Ultra-Pure CO Production by Two Hybrid Ultramicroporous Materials”
Kai-Jie Chen, Qing-Yuan Yang, Susan Sen, David G. Madden, Amrit Kumar, Tony Pham, Katherine A. Forrest, Nobuhiko Hosono, Brian Space, Susumu Kitagawa, Michael J. Zaworotko
Angew. Chem. Int. Ed. **2018**, *57*, 3332–3336.
DOI: 10.1002/anie.201706090
14. “Construction of a Hierarchical Architecture of Covalent Organic Frameworks via a Postsynthetic Approach”
Gen Zhang, Masahiko Tsujimoto, Daniel Packwood, Nghia Tuan Duong, Yusuke Nishiyama, Kentaro Kadota, Susumu Kitagawa, Satoshi Horike
J. Am. Chem. Soc. **2018**, *140*, 2602–2609.
DOI: 10.1021/jacs.7b12350

他 15 件

[学会発表] (計 181 件)

(主要なものを抜粋)

1. Susumu Kitagawa,
“Evolution of Functionality of Porous Coordination Polymer and Metal–Organic Frameworks”,
International MOF Symposium 2013 (招待講演,
国際学会), Dresden, Germany (2013, Sep. 17).

2. Susumu Kitagawa,
“Mesoscopic Porous Coordination Chemistry”,
41st International Conference on Coordination
Chemistry (ICCC-41)(招待講演, 国際学会),
Singapore (2013, Jul. 1)
 3. Susumu Kitagawa,
“Soft Porous Coordination Polymers - Structures
and Functions -“,
1st European Conference on Metal Organic
Frameworks and Porous Polymers (EuroMOF
2015) (招待講演, 国際学会), Potsdam, Germany
(2015, Oct. 11).
 4. Susumu Kitagawa,
“Soft and Dynamic Properties of PCPs and MOFs”
The 5th International Conference on Metal-Organic
Frameworks & Open Framework Compounds
(MOF 2016) (招待講演, 国際学会), California,
US (2016, Sep. 10).
 5. Susumu Kitagawa,
“Challenge and Creativity for Porous Crystalline
Materials”
Faraday Discussion New Directions in Porous
Crystalline Materials (招待講演, 国際学会),
Edinburgh, Scotland (2017, June 5).
- 他 176 件

[図書] (計 0 件)
該当無し

[産業財産権]

- 出願状況 (計 4 件)
1. 名称: “STAR POLYMER”
発明者: 細野暢彦, 北川進
権利者: 京都大学
種類: 特許
番号: PCT/JP2016/087317
出願年: 2016 年
国内外の別: 国外
 2. 名称: “LIGAND COMPOUND, AND SINGLE-HOLE
OR MULTI-HOLE COORDINATION POLYMER
OBTAINED USING SAME”
発明者: 細野暢彦, 松田亮太郎, 北川進
権利者: 京都大学
種類: 特許
番号: PCT/JP2016/57669
出願年: 2016 年
国内外の別: 国外
 3. 名称: “スターポリマー”
発明者: 細野暢彦, 北川進
権利者: 京都大学
種類: 特許
番号: 2015-243639
出願年: 2015 年
国内外の別: 国内
 4. 名称: “単孔性または多孔性配位高分子”
発明者: 細野暢彦, 松田亮太郎, 北川進
権利者: 京都大学
種類: 特許
番号: 2015-047768
出願年: 2015 年

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)
該当無し

[その他]

受賞: (主要なものを抜粋)

1. 第 10 回江崎玲於奈賞 (平成 25 年 11 月)
2. The RSC de Gennes Prize (平成 25 年 11 月)
3. マルコ・ポーロ イタリア科学賞 (平成 27 年 4 月)
4. 日本学士院賞 (平成 28 年 3 月)
5. 2016 Fred Basolo Medal for Outstanding
Research in Inorganic Chemistry (平成
28 年 10 月)
6. 1st Air Liquide Awards on Essential
Small Molecules 2016 (平成 28 年 12 月)
7. 第 58 回藤原賞 (平成 29 年 5 月)
8. 2017 Chemistry for the Future Solvay
Prize (平成 29 年 10 月)

他 6 件

ホームページ等:

<http://www.kitagawa.icems.kyoto-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

北川 進 (KITAGAWA, Susumu)

京都大学高等研究院物質-細胞統合シス
テム拠点・特別教授

研究者番号: 20140303

(2) 研究分担者

佐藤 弘志 (SATO, Hiroshi)

東京大学大学院工学系研究科化学生命工学
専攻・講師

研究者番号: 20598586

有川 敬 (ARIKAWA, Takashi)

京都大学大学院理学研究科・助教

研究者番号: 70598490

細野 暢彦 (HOSONO, Nobuhiko)

京都大学高等研究院物質-細胞統合シス
テム拠点・特定助教

研究者番号: 00612160

キム フランクリン (KIM, Franklin)

上海工科大学・准教授

元 京都大学高等研究院物質-細胞統合シス
テム拠点・特定拠点准教授

研究者番号: 10608566

(3) 連携研究者

植村 卓史 (UEMURA, Takashi)

東京大学大学院新領域創成科学研究科物質
系専攻・教授

研究者番号: 50346079

(8) 研究協力者 なし