

# Press Release

2026年4月1日

京都大学アイセムス（高等研究院 物質－細胞統合システム拠点）

## ナノ空間分子を紡いでつくる、多孔性ナノ糸の開発 ～多孔性と柔軟性をあわせ持つ新材料～

- ・金属錯体多面体<sup>\*1)</sup>（MOP）分子を一次元に並べることで多孔性ナノ糸の合成に成功
- ・弱い相互作用で分子をつなげることで、高い加工性を有する多孔性材料を実現
- ・分子集合体からなる柔軟で軽量な多孔性エアロゲルの作製に成功

### <概要>

京都大学アイセムス（高等研究院 物質－細胞統合システム拠点：WPI-iCeMS）の宮田彩名 工学研究科博士後期課程学生と古川修平 教授らの研究グループは、ファンデルワールス力<sup>\*2)</sup>という弱い力を利用して分子を一次的につなぎ合わせることで、新しい多孔性材料の開発に成功しました。この技術を用いることにより、従来は脆く応用範囲が限られていた多孔性材料において、合成過程の加工性が向上し、柔軟な多孔性材料の設計が可能となりました。

2025年のノーベル賞の対象となった多孔性配位高分子（MOF）と呼ばれる多孔性材料は、精密に設計された細孔を有し、ガス貯蔵や分離材料としての応用が期待されています。一方で、MOFは分子同士が強い結合によって三次元的な網目構造を形成する結晶性材料であり、硬いが脆いという特性を有しています。そのため、実用化に向けては機械的柔軟性を得ることが重要な課題となっていました。

本研究では、分子の「接続性」に着目し、ナノ空間を持つ分子を弱い相互作用を用いて一次的に並べることで、多孔性を有するナノ糸の開発に成功しました。具体的には、金属錯体多面体（MOP）と呼ばれるナノ空間を持つ分子を用い、自己集合化により分子を整列させることで、幅約15ナノメートルの多孔性ナノ糸を合成しました。MOP分子を三次元的に接続した結晶性材料は剛直で脆いのに対し、一次的に接続した多孔性ナノ糸からなるエアロゲル材料は、大きな圧縮に対しても柔軟に変形できることが明らかになりました。また、分子が強い化学結合で接続した材料では、一度結合が切れると元の構造に戻ることが困難です。一方、本研究の多孔性ナノ糸は分子同士が引き合う弱い力（ファンデルワールス力）によって形成されているため、振とうなどの非常に小さなエネルギーでもMOP分子の会合・解離状態を可逆的に制御することが可能です。これにより、多孔性ナノ糸が絡み合うことで形成されたエアロゲル材料は、鋳型に合わせて自在に成形できる高い加工性を示しました。

本研究で示された材料設計の考え方は、MOP分子だけでなく、さまざまな多面体型分子にも適用可能です。そのため、ガス分離やガス貯蔵など、成形体としての多孔性材料が必要とされる産業分野において、その実用化を後押しする新しい材料設計指針につながるものが期待されます。

本成果は2026年3月19日（日本時間）に、米国出版社 American Chemical Society の雑誌である「Journal of the American Chemical Society」オンライン版で公開されました。

## 1. 背景

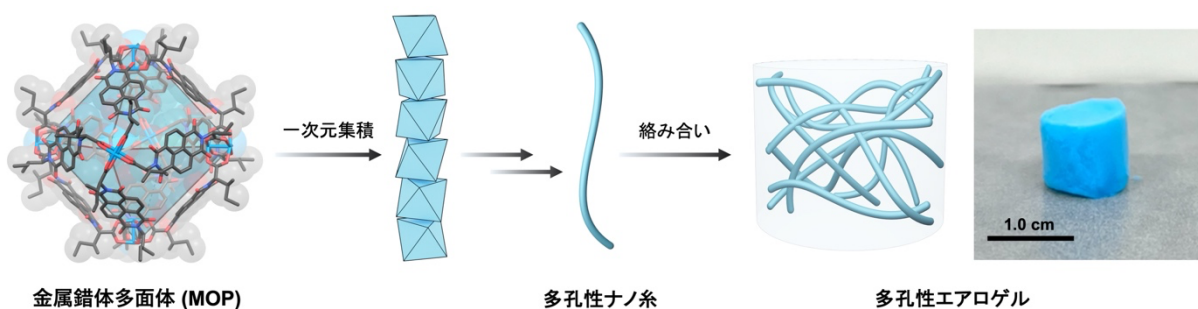
多孔性材料はナノサイズの空間（細孔）を利用した分子の透過や貯蔵が可能であり、ガス分子の分離や貯蔵、水質浄化、触媒としての利用など幅広い分野で注目されています。特にガスの分離・貯蔵は産業規模が大きく、化学産業の中でもエネルギー消費の大きな分野であり、環境コストに優れた多孔性材料の開発は世界全体におけるエネルギー効率を改善する上で重要です。

現在工業的に利用されている多孔性材料として活性炭やシリカゲル、ゼオライトなど、これら全ての多孔性材料に共通するのが、ナノサイズの原子・分子の網目が強い化学結合によって三次元的に構築されている点です。例えばシリカゲルは酸素原子（O）とケイ素原子（Si）が安定な共有結合によって結び付き網目を形成することによって、多孔性材料としての機能を発揮しています。これはナノサイズの空間が潰れずに保たれるには強固な網目構造が必要であるためです。この考え方は、昨年のノーベル賞の対象となった多孔性配位高分子<sup>※3</sup>（MOF）と呼ばれる新しい多孔性材料にも引き継がれています。MOFの場合、金属イオンとそれらをつなぐ有機分子の間に働く配位結合と呼ばれる化学結合を巧みに利用して三次元の網目構造を形成しています。

このように、従来の多孔性材料では、ナノサイズの空間を維持するために強い化学結合を用いて三次元の網目構造を形成することが一般的です。一方で、こうした三次元網目構造は機械的に脆いという課題を抱えています。三次元の網目構造では外部から力が加わると応力が一点に集中しやすく、脆い破壊が生じやすいことが知られています。そのため、従来の多孔性材料は加工性に乏しく、実用化に向けた加工プロセスに大きな制約がありました。

## 2. 研究内容と成果

こうした従来の多孔性材料の限界を克服するために開発したのが、本研究で提案する多孔性ナノ糸です。この糸は、ナノ空間を持つ分子である金属錯体多面体（MOP）が一次元的に並んだ構造をしています。従来の多孔性材料のような強い結合ではなく、ファンデルワールス力と呼ばれる弱い分子間相互作用でMOPを並べることで、柔軟な糸を紡ぐことができました。最終的には、この多孔性ナノ糸を編むことでエアロゲルと呼ばれる多孔性材料をつくることに成功しました（図1）。



**図1.** MOP分子の集積による多孔性ナノ糸の合成スキーム。このナノ糸は互いに絡み合うことでエアロゲルを形成する。MOP分子は八面体構造を有し、ナノ糸中では隣り合う分子が八面体の面同士を密着させるように整列することで、幅約15ナノメートルのナノ糸を形成する。これらのナノ糸が三次元的に絡み合うことで、多孔性エアロゲルが生成され、最終的に青色のモノリスとして得られる。

本研究で用いた MOP 分子は八面体構造を有しており、分子表面には平面状のナフタレンジイミド誘導体配位子を備えています。この平面が向かい合うように整列することで、隣接する MOP 分子同士が効率よく接触できるよう設計されています。また、この MOP 分子は直径約 3 ナノメートルと大きく、MOF を構築する有機分子に比べて約 4 倍以上のサイズを有しています。

このような特徴を持つ MOP 分子を溶液中で集積させることで、幅約 15 ナノメートルの多孔性ナノ糸の形成に成功しました。MOP 分子の直径を考慮すると、ナノ糸の幅方向には約 5~6 個の MOP 分子が集積していることが明らかになりました。溶媒条件によって、MOP 分子は三次元的に集合した機械的に脆い結晶、あるいは一次元的なナノ糸へと集合することが確認されました。この多孔性ナノ糸からなるエアロゲルは、桜の花の上に載せても、雄しべがつぶれないくらい非常に軽量です (図 2)。

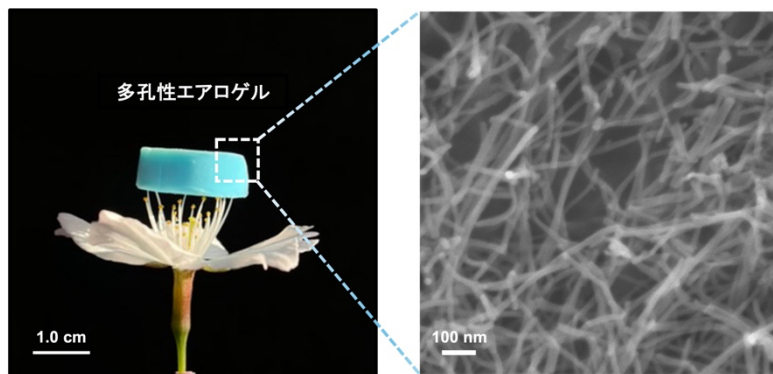


図 2. 合成された多孔性エアロゲル (左)。顕微鏡観察により、幅約 15 ナノメートルのナノ糸が多数絡み合った構造が確認された (右)。

詳細な構造解析と計算の結果、ナノ糸中で隣接する MOP 分子は、八面体構造における 3 つのナフタレンジイミド部位からなる面同士を密着させるように接続し、さらにこの相互作用が八面体の対向する面でも生じることで一次元構造を形成していることが明らかになりました。その分子間相互作用は主に弱いファンデルワールス力であり、振とうなどのごく小さなエネルギーでもナノ糸を構成する MOP 分子の会合と解離を可逆的に制御することが可能です。その結果、このナノ糸からなるゲルは、鋳型に応じて自在に成形可能な高い加工性を示しました (図 3)。

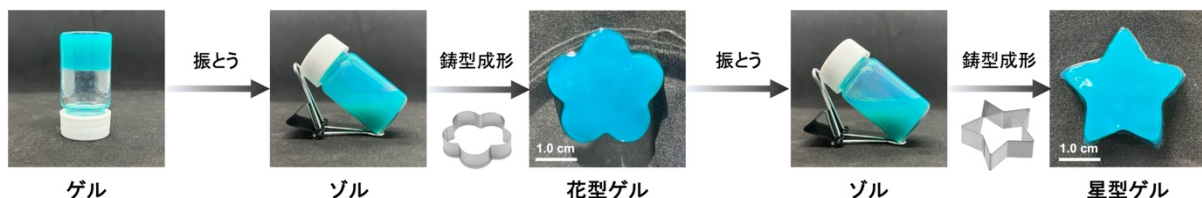


図 3. 合成直後のゲルは振とうによって流動性の高いゾル状態へと変化する。このゾルを花型の鋳型に流し込むことで、その形状を保持したゲルが得られる。さらに振とう刺激を加えて再びゾル化した後、星型の鋳型に流し込むことで、星型のゲルを得ることができた。さまざまな形状へと加工できることを示した。

さらに、多孔性ナノ糸は一次元構造を持つため、ナノ糸同士の隙間によって応力を分散させる自由度が残されています。力学試験の結果、このエアロゲルは外部から圧縮力が加わっても壊れ

ることなく形状を変えることができ、高い柔軟性を示しました。これにより、従来の多孔性材料には見られなかった、高い加工性と柔軟性の両立が可能になりました（図4）。

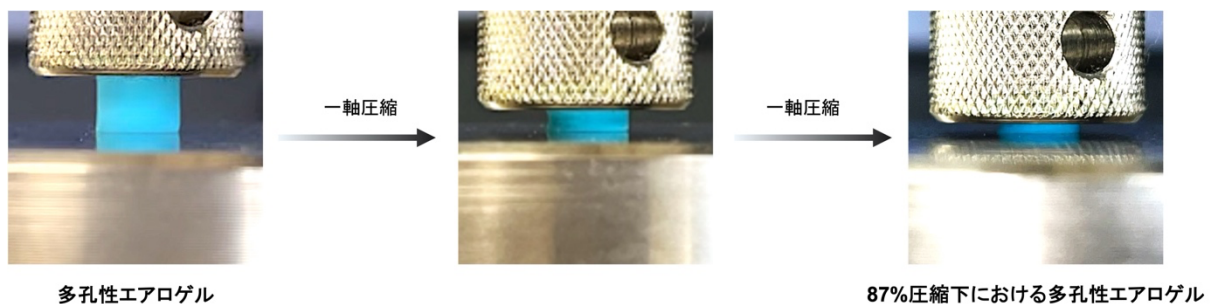


図4. 多孔性エアロゲルの力学試験の様子。圧縮前と圧縮後の外観を示す。多孔性エアロゲルは87%の圧縮下でも破壊することなく形状変化し、高い柔軟性を示した。

本研究では、MOP分子の「接続性」に着目し、これを多孔性ナノ糸へと集積させることで、機械的に柔軟な多孔性エアロゲルの合成に成功しました。この成果は、機械的特性に優れた多孔性材料の新しい設計指針を示すものです。機械的特性は材料の加工性や耐久性に直結する重要な要素であるにもかかわらず、多孔性材料においては十分に研究されてきませんでした。本成果では、MOP内部のナノ空間、一次元のナノ糸構造、そしてモノリス状のエアロゲルという長さスケールを横断した階層構造を導入することで、多孔性と機械的柔軟性を両立した材料を実現しました。

### 3. 今後の展開

本研究で合成した多孔性エアロゲルは、高い加工性と優れた機械的特性を有することから、耐久性の高い成形体が求められるガス分離・貯蔵材料としての応用が期待されます。現在は研究室レベルでの少量合成が中心ですが、将来的な工業利用に向けては、生産コストの低い多面体分子の開発やさらなる機能性の向上が重要となります。

また、本研究で得られた知見を既存の機能性分子へ応用することで、分子性材料における機械的特性に関する理解がさらに深まり、機械的特性の向上を通じた新たな材料応用へと研究が展開していくことが期待されます。本研究ではエアロゲルとして材料化しましたが、基盤となるナノ糸は多様な形態へと加工可能であり、今後さまざまな材料設計へと展開されることが期待されます。

### 4. 用語解説

※1 金属錯体多面体（MOP: Metal-organic polyhedron）：  
金属イオンと有機分子から組み上がる多面体の形状をした分子です。多面体の形状を利用することで分子内部にナノサイズの空間を設計したり、分子表面にねらった構造を持たせたりすることができます。本研究では八面体型に設計したMOPを用いました。

※2 ファンデルワールス力：  
あらゆる分子同士の間働いている、非常に弱い引力です。窒素ガスが液体窒素に変化したり、匂い分子が活性炭に吸着したりするなどの身近な現象に密接に関わっています。

※3 多孔性配位高分子（MOF: Metal-organic framework）：

---

金属イオンと有機分子を配位結合で連結させることで合成される、網目状の構造をした結晶です。1990年代での発見を皮切りに、現在では次世代の多孔性材料として活発に研究されています。

## 5. 研究プロジェクトについて

---

本成果に関わる研究は、日本学術振興会 科学研究費助成事業（基盤研究（A）JP23H00298）、科学技術振興機構（JST）ASPIRE（Adopting Sustainable Partnerships for Innovative Research Ecosystem）プログラム（JPMJAP2424）、文部科学省 データ創出・活用型マテリアル研究開発プロジェクト事業（JPMXP1122714694）、および日本学術振興会 科学研究費助成事業（特別研究員奨励費 JP25KJ1516）の支援を受けて行われました。

## 6. 論文タイトル・著者

---

“One-dimensional van der Waals Porous Fibrils Assembled from Metal-organic Polyhedra”  
（参考訳：金属錯体八面体の自己集合でつくる一次元多孔性ファンデルワールスファイバー）  
著者：Ayana Miyata, Shun Tokuda, Mako Kuzumoto, Guan-Sian Lee, Masataka Yamashita, Taichi Nishiguchi, Masaki Negoro, Brian R. Pauw, Yi-Tsu Chan, Kazuyoshi Kanamori, Kenji Urayama, Kunihisa Sugimoto, Shuhei Furukawa  
*Journal of the American Chemical Society* (American Chemical Society) |  
DOI:10.1021/jacs.5c21654

---