

Press Release

2024 年 9 月 4 日

京都大学アイセムス（物質－細胞統合システム拠点）

多孔質膜で水汚染物質を除去・検出する技術を開発 ～ナノ空間がつながった空間ネットワーク膜～

- ・ 医薬品・パーソナルケア製品（PPCPs）由来の水中汚染物質の除去と検出に成功
- ・ 金属錯体多面体（MOP）を連結した空間ネットワーク膜（PNM）という新しい多孔質膜の概念を提案
- ・ ゲルから膜へと変換する技術を用いて PNM の作成に成功

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）のワンザオミン 博士研究員、パチェコ-フェルナンデス イダイラ 日本学術振興会 外国人特別研究員（現・オランダグローニンゲン大学博士研究員）、古川修平 教授らの研究グループは、「空間ネットワーク膜（Pore-Networked Membrane: PNM）」という新しい多孔質膜を開発しました。この技術は水の中に含まれる医薬品や化粧品の成分を取り除き、さらにその存在を確認できるものです。

水環境中に含まれる微量の医薬品や、化粧品・殺虫剤・日焼け止め液などのパーソナルケア製品（PPCPs）の成分は、健康や生態系に重大な影響を及ぼす可能性があることから、これらを効率的に検出し除去する技術が求められています。従来の水処理技術では、汚染物質の除去と検出は別々に行われ、複雑で時間がかかる工程を経る必要がありました。

本研究では、金属錯体多面体（MOP）という微細なナノ空間をもつ分子をつなげ、高分子膜中に埋め込むことで PNM を作成しました。この空間により対象の PPCPs 分子を選択的に取り込み除去することに成功しました。また補足した分子を放出する方法も開発し、分析装置と組み合わせることで ppb 以下での極微量検出も可能になりました（ppb は 10 億分の 1 を表す：1 ppb は 1 トンの水の中に対象物質が 1 mg 入っている濃度）。

この技術は水中の環境汚染物質のみならず、液体中の微量な物質除去と検出に応用できる成果であり、環境問題のみならず医療分野などへの発展も期待されます。

本成果は 2024 年 8 月 20 日に、英国出版社 Springer Nature の雑誌である「Communications Materials」オンライン版で公開されました。

1. 背景

現代社会では、私たちが日常的に使用する医薬品や化粧品成分が、使用後に排水を通じて環境中に放出されています。これら医薬品・パーソナルケア製品（PPCPs）には、抗生物質、鎮痛剤、抗炎症剤、日焼け止め液、殺虫剤、化粧品などが含まれます。これら PPCPs から排出される成分は、河川や湖沼、さらには海洋や氷河にまで広がっていることが確認されています。これらは非常に低濃度であっても、生態系や人間の健康に悪影響を与える可能性があります。そのため、各国では PPCPs に含まれる成分や濃度の監視リストを作成しており、特に EU は最も厳しい監視リストを作成しています。

これらの化学物質は水生生物のホルモンバランスに影響を与え、内分泌かく乱作用を引き起こすことが懸念されています。例えば、抗生物質のトリクロサンや日焼け止め成分であるベンゾフェノン、微量であっても生態系に有害な影響を及ぼすことが知られており、現在では多くの国で水質規制の対象とされています。このように、PPCPs の汚染は、地球規模の問題として無視できない状況にあり、その対策が急務となっています。

しかし、PPCPs の効果的な除去と検出は、従来の水処理技術にとって大きな課題となってきました。従来の技術では、ポリマー膜や吸着剤を用いた汚染物質の除去が一般的でしたが、これらの方法は特定の化学物質に対する選択性が低く、環境水中の微量な PPCPs を効果的に捕捉することが難しいという問題がありました。また、PPCPs を検出するためには高度な分析技術が必要であり、このプロセスは時間とコストがかかる上、複雑な操作が必要でした。

具体的には、従来の水処理プロセスは「検出」と「除去」の2つの工程に分かれており、まず汚染物質を濃縮して存在を確認し、その後、吸着剤やフィルターを使用して除去するという手順が取られていました。しかし、この方法では、汚染物質の濃度が非常に低い場合、前処理が複雑になり、時間と費用がかかるだけでなく、最終的な除去効果も限定的でした。また、汚染物質が複数存在する環境では、それぞれに対応する選択性の高い技術が必要とされるため、従来の方法では対処しきれない状況が頻繁に発生していました。

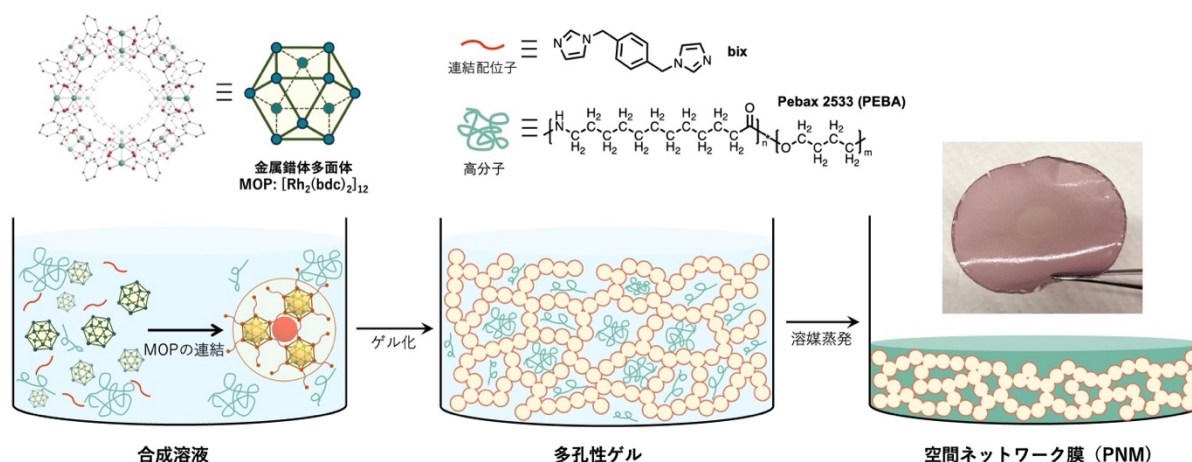
2. 研究内容と成果

こうした従来の技術の限界を克服するために、京都大学と米国ノートルダム大学の研究チームが開発したのが「空間ネットワーク型膜（PNM）」です。この PNM は、従来の技術と異なり、汚染物質の検出と除去を同時に行うことができます。

PNM の構造は非常にユニークで、高分子膜の中で金属錯体多面体（MOP）というナノ空間をもつ分子がつながり空間がつながった構造を有しています。この空間ネットワークは、汚染物質を選択的に吸着、効果的に拡散することで高い性能を発揮します。さらに、汚染物質が吸着された後、それを検出のために放出することができるため、従来の技術とは異なり、除去と検出のプロセスを一度に行うことが可能です。

具体的な作成方法としては、これまで研究グループが報告してきた多孔性ゲルを用いました。ゲルとはゼリーや寒天などの柔らかい材料であり、ほぼ液体でできているにも関わらず、ネットワーク化した分子により液体が漏れることなく存在している材料です。研究グループは、これまでに MOP を有機分子（連結配位子）でつなぐことで、MOP 分子内部のナノ空間（1 nm 程度）と、つないだ MOP に間に形成されるナノ空間（2-3 nm 程度）が連続的につながっ

た空間ネットワークを持つ多孔性ゲルの報告に成功しています。今回は、多孔性ゲルの液体部分に高分子を溶解させ、液体を揮発することで、MOP のもつ空間ネットワークを壊すことなく高分子中へと転写する合成法を開発しました（図1）。



研究チームは、PNM の性能を実証するために、13 種類の PPCPs（図2）を対象とした実験を行いました。これらの化合物は、環境水中で一般的に検出されるものであり、各国の水質規制の対象となっているものです。

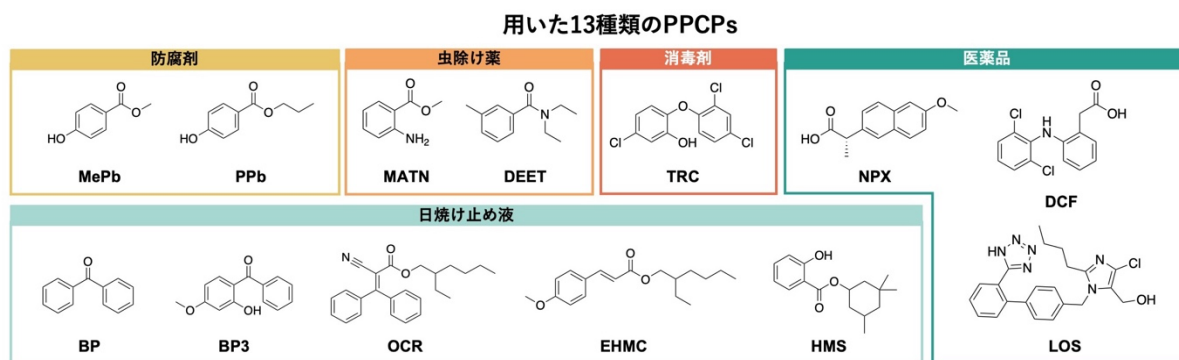


図2. 実際に実験に用いた PPCPs 分子。

その結果、PNM は従来の高分子膜や吸着剤と比較して、はるかに高い吸着能力と選択性を示しました。特に、ロサルタン (LOS)、ジクロフェナク (DCF) などの医薬品化合物に対して、非常に高い吸着率が確認されました。また、これらの化合物を効率的に検出することも可能であり、検出限界は 1 ppb 以下のレベルに達しました(1 ppb は 1 トンの水の中に対象物質が 1 mg 入っている濃度)。コンピューターシミュレーションを用いることで、PNM 中の空間が選択的に DCF を補足できることを説明することに成功しました（図3）。

さらに、PNM は、複数の汚染物質が混在する環境水中でも、ターゲットとなる化合物を選択的に吸着する能力を持っていることが確認されました。これは、PNM が持つ空間ネットワークの設計が、特定の分子サイズや化学特性に対して適応することができるためです。

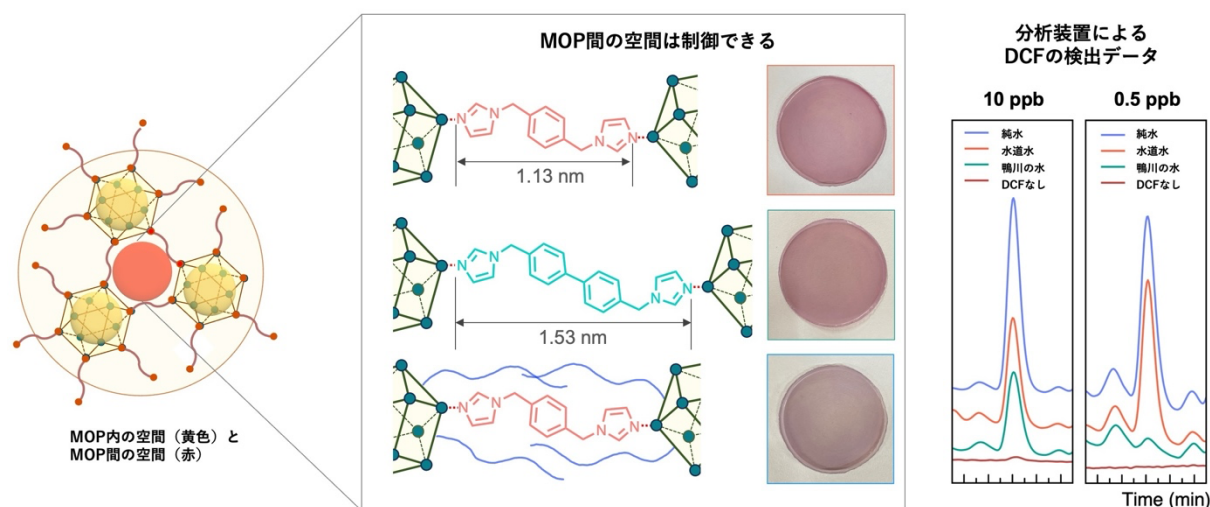


図 3. MOP 間の空間は、用いる連結配位子や MOP の構造を変化させることで、そのサイズや形状を変化させることができる。実際にいくつかの組み合わせを検討したところ、DCF を 1 ppb 以下の濃度で検出することに成功した。これらは、純水のみならず、他の物質が多く含まれる水道水や鴨川の水を用いても検出することが可能である。

3. 今後の展開

PNM の開発の本質は、液中の微量物質の除去と検出が可能になったことにあります。本成果では、水中の微量の環境汚染物質に用いましたが、PNM の構造を設計することで、血液中の微量の代謝分子の検出など他の応用も考えられます。

研究チームは、今後さらに多様な化学物質に対応できるよう PNM の改良を進めています。例えば、異なる種類の多孔質材料やポリマーを組み合わせることで、より広範な微量物質に対する選択性を向上させることを目指しています。

4. 用語解説

※1 金属錯体多面体 (MOP: Metal-organic polyhedra)

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。多面体の構造ゆえ分子内部にナノサイズの空間を有している。今回用いた MOP は、立方八面体と呼ばれる多面体形状を有している。

5. 研究プロジェクトについて

本成果に関わる研究は、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）のサポートを受けて行われました。

6. 論文タイトル・著者

“Pore-networked membrane using linked metal-organic polyhedra for trace-level pollutant removal and detection in environmental water”

（参考訳：連結された金属錯体多面体からなる空間ネットワーク膜の開発と環境水中における極微量汚染物質の除去と検出）

著者：Zaoming Wang, Idaira Pacheco-Fernández, James E. Carpenter, Takuma Aoyama, Guoji Huang, Ali Pournaghshband Isfahani, Behnam Ghalei, Easan Sivaniah, Kenji Urayama, Yamil J. Colón, Shuhei Furukawa

Communications Materials (Springer Nature) | DOI: 10.1038/s43246-024-00607-z