



〔PCP×高分子〕

# ナノ空間で高分子を制御する

植村卓史 Takashi UEMURA

筆者が京都を離れてからは、MOF と呼称することが多かったが、ここでは多孔性配位高分子 (porous coordination polymer: PCP) と呼ぼう。タイトルにあるとおり、配位高分子と有機高分子を「掛け合わせる」ことで、これまでにない精密なレベルで材料の構造や機能の制御が可能になる。これら異種高分子の組み合わせは無数に存在することから、研究・開発の可能性が無限に広がっている。

## はじめに

PCPの研究開発においては、その黎明期から現在に至るまで、ガスや溶媒などの小分子の吸着を対象にしたものが多い。しかし、トンネル状の長いナノ空間を持つPCPは、鎖状形態である有機高分子と本質的に構造的相性が良いはずである(図1)。有機-無機ハイブリッド構造であるPCPは、配位子と金属イオンを合理的に設計し組み合わせることで、そのトンネル状空間の次元性や形状、サイズの制御だけではなく、相互作用サイトの導入まで可能である。このような設計性ナノ空間を利用すれば、高分子材料の合成、集積状態、物性などを精密に制御でき、通常のパルクや溶液中では構築不可能な高分子材料の創出につながる。

## 高分子の合成

PCPのナノ空間を重合反応場として利用すれば、モノマーの配向、位置、距離、電子状態などを巧みに制御し、既存法では達成できない高分子が生み出せる。PCPを用いた初めての高分子合成の例として、筆者らはスチレンのラジカル重合を行った<sup>1)</sup>。その後、PCPを利用した新たな重合触媒や機能性高分子の開発などが各地で行われるようになった。例えば、PCP細孔内にモノマーを固定化すると、逐次重合においても分子量

うえむら・たかし

東京大学大学院工学系研究科応用化学専攻 教授  
〔経歴〕2002年京都大学大学院工学研究科博士課程修了、博士(工学)。同年同大学同研究科合成・生物化学専攻助手、同助教、同准教授を経て、18年より現職。〔専門〕高分子化学、ナノ空間材料、錯体化学。

E-mail: uemurat@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

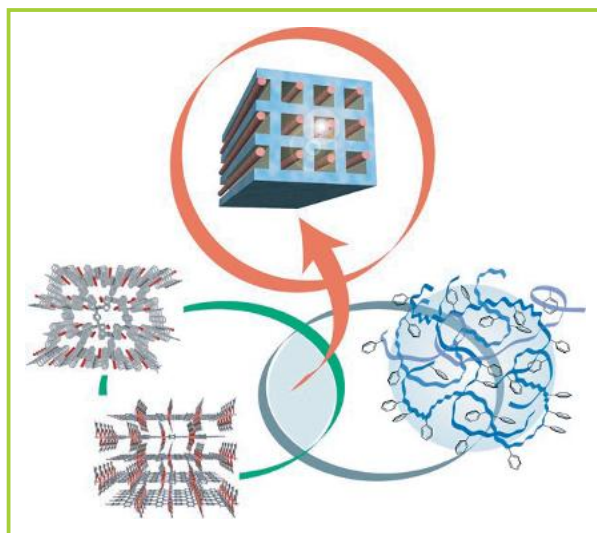


図1 「PCP×高分子」研究の概念図

の制御ができることがわかった<sup>2)</sup>。数種類のモノマーが関与する共重合において、空間内でモノマー分子を選別・配置させることで、PCPの周期情報が転写されたモノマー配列の達成や交互アレー型高分子の合成が可能になった<sup>3)</sup>。

ベンゼン環が直線状に縮環したアセン化合物は環数が増えるに従って、優れた光電子物性を示すと予測されている。そのため、ベンゼン環が無数に連なったポリアセンは、100年以上にわたり多くの研究者が合成に挑んできたが、アセン分子は長くなると溶解性や安定性が大きく低下するため、実現には至らなかった。最近、筆者らはPCPのナノ空間を反応場とすることで、長いものではベンゼン環が数十個以上連なったポリアセンの合成に成功した<sup>4)</sup>。ポリアセンはグラフェンを最も細く切り出したリボン状物質であることから、特異な電子物性の発現が予言され、物性物理や材料科学分野にも大きなインパクトを与えた。

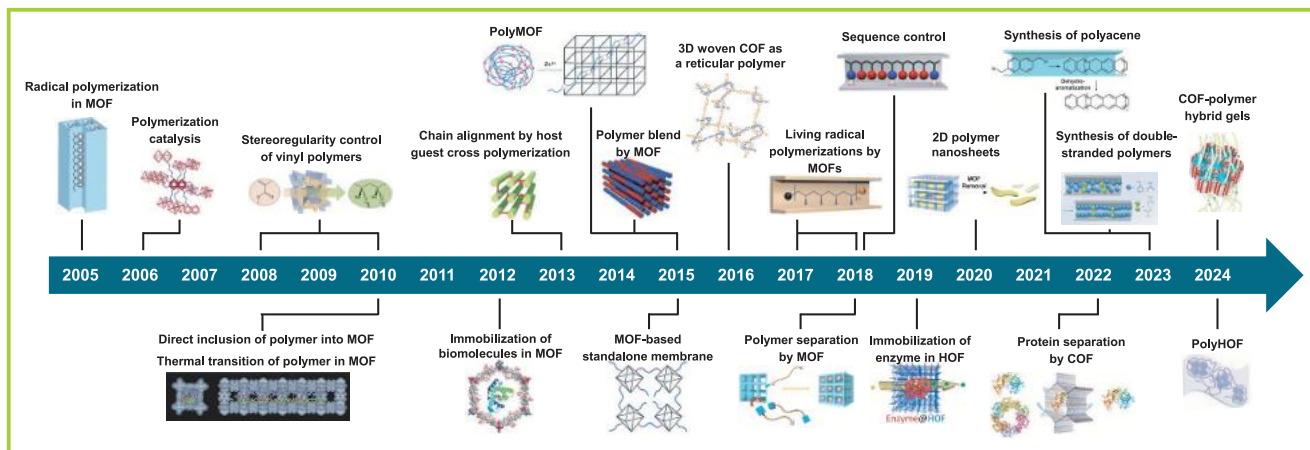


図2 分子性ナノ空間を利用した高分子材料の研究・開発

### 高分子の認識・分離

分子構造を認識し、夾雑化合物から目的物質のみを取り出す分離技術は物質科学における最重要課題の1つである。しかし、従来の分子認識の対象は低分子に限られており、それとは対照的に高分子を精密に認識・分離する技術はほとんど存在しなかった。筆者がまだ京都にいた2010年、巨大な高分子の鎖でさえPCP細孔内に直接導入できることを初めて示した<sup>5)</sup>。この発見が足掛かりとなり、「精密高分子分離」という新境地が展開された。

PCPのチャンネル内には、糸まり状の高分子鎖を引き延ばして導入できるので、鎖構造を余すことなく見極めることができる。これにより、高分子のトポロジー、定序性、立体規則性、さらには長い鎖中のたった1原子の違いでさえ見極める他に類を見ない分子認識・分離が実現された<sup>6)</sup>。合成高分子にとどまらず、天然高分子の認識も可能で、不要な変性体を選択的に除去するタンパク質精製も達成された<sup>7)</sup>。このような巨大分子の分離・精製・循環技術は社会的インパクトの大きい事業（ペプチド創薬、水浄化、プラスチックリサイクルなど）につながると期待され、2025年10月、この技術をベースにしたスタートアップが設立された<sup>8)</sup>。

### 高分子の物性制御・機能化

PCPの空間は高分子の鎖が1本から数本程度で包接される大きさである。空間のサイズや形状、表面状態によって、空間内に拘束された高分子は特異な集合状態を形成し、絡み合ったバルク状高分子とは大きく異なる物性（運動性、熱物性、導電性など）を示す<sup>5)</sup>。このようなホスト-ゲスト複合体は、有機高分子と配位高分子が分子レベルで完全交互に配置した複合体であることから、それぞれのユニットが密接に影響し合い、従来材料を凌駕する新たな高機能性材料（ガスセ

ンサー、太陽電池、分子モーターなど）の創出も可能になった。

近年では、種々の高分子とPCPを混ぜ合わせた混合マトリクス膜の開発が進んでいる<sup>9)</sup>。分子性骨格材料であるPCPは、一般的な無機フィラーと比べ、高分子と高い親和性を示すことが多い。そのため、得られた複合体はガス分離膜やナノ分離膜、固体電解質として優れた機能を示すことも実証されている。

### おわりに

PCP空間を利用すれば、合成高分子に限らず、天然高分子や酸化物、ナノカーボンといった様々な巨大分子群の構造や物性を制御できる。この幅広い応用範囲は、錯体化学や高分子化学の枠を超え、多様な機能性物質を制御する方法論として革新をもたらした。京都で産声を上げた「高分子」材料の掛け合わせ研究は、今や多くの研究者が参画する分野となり、年間に約千報ものPCP-高分子関連の論文が発表されるようになった。共有結合性有機構造体（COF）や水素結合性有機構造体（HOF）といった新たな材料群も登場し、これらはPCPとは異なった空間特性を示すことから、分子性ナノ空間を利用した高分子材料の研究・開発はますますの広がりを見せるであろう（図2）<sup>10)</sup>。

- 1) T. Uemura, K. Kitagawa, S. Horike, T. Kawamura, S. Kitagawa, M. Mizuno, K. Endo, *Chem. Commun.* **2005**, 5968.
- 2) S. Anan, Y. Mochizuki, K. Kokado, K. Sada, *Angew. Chem., Int. Ed.* **2019**, *58*, 8018.
- 3) K. Beamsley, N. Hosono, T. Uemura, *Nat. Commun.* **2025**, *16*, 6984.
- 4) T. Kitao, T. Miura, R. Nakayama, Y. Tsutsui, Y. S. Chan, H. Hayashi, H. Yamada, S. Seki, T. Hitosugi, T. Uemura, *Nat. Synth.* **2023**, *2*, 848.
- 5) T. Uemura, N. Yanai, S. Watanabe, H. Tanaka, R. Numaguchi, M. T. Miyahara, Y. Ohta, M. Nagaoka, S. Kitagawa, *Nat. Commun.* **2010**, *1*, 83.
- 6) N. Hosono, T. Uemura, *Matter* **2020**, *3*, 652.
- 7) H. Taketomi, N. Hosono, T. Uemura, *J. Am. Chem. Soc.* **2024**, *146*, 16369.
- 8) <https://mofgraphy.co.jp/> (2026年5月現在)
- 9) M. Kalaj, K. C. Bentz, S. Ayala, J. M. Palomba, K. S. Barcus, Y. Katayama, S. M. Cohen, *Chem. Rev.* **2020**, *120*, 8267.
- 10) B. Cheng, N. Hosono, T. Uemura, *Adv. Mater.* **2026**, *38*, e14489.