



配位高分子から MOF へ 革新の歩みと持続可能社会への展望

北川 進 Susumu KITAGAWA

本稿では、配位高分子 (coordination polymer) から金属有機構造体 (MOF: Metal-Organic Framework) へと至る研究の発展を振り返り、その学術的意義と社会的インパクト、さらに将来展望について述べる。

配位高分子という用語は、1916年に柴田雄次によって初めて提唱された¹⁾。有機分子と金属イオンが配位結合によって連続的に結び付いたネットワーク構造を持つ物質群であり、基本的には固体として存在する。この分野は長らく構造化学的関心の対象にとどまっていたが、結晶構造解析の進展により精密な構造理解が可能となり、やがて機能性材料としての可能性が見いだされるようになった。

1959年、齋藤喜彦らによる銅(I)錯体の研究²⁾は、ネットワーク構造を明確に示した初期の重要例である。しかし、この構造は相互貫入しており、有効な細孔空間を持たなかった。その後、1989年に Richard Robson がダイヤモンド型骨格を報告し、構造設計の概

念的基盤が提示されたものの、「有機配位子を用いて安定な多孔性構造を構築できるのか」という根源的な問題はなお残されていた。

この長年の課題に対し、筆者らは1997年にコバルト(II)と4,4'-ビピリジンからなる多孔性配位高分子を創製し、ゲスト分子を除去した後も骨格構造が維持され、気体の可逆的吸着が可能であることを実証した³⁾。これは、「多孔性固体は密でなければ安定でない」という従来の常識を覆すものであり、MOF化学の成立を決定づけた記念碑的成果であった。

この成果を契機として、MOF化学は2つの根源的概念によって飛躍的發展を遂げる。1つは Omar Yaghi によって体系化された網目の化学 (reticular chemistry)⁴⁾ である。これは、金属ノードと有機リンカーをトポロジーに基づいて設計し、意図した骨格構造を構築するという原理であり、MOFの構造多様性と設計可能性を飛躍的に拡張した。

これと双璧をなすのが、筆者らが提唱・実証した「ソフト多孔性結晶 (Soft Porous Crystal)」の概念⁵⁾ である。これは、MOFが単なる剛直な多孔性骨格ではな

きたがわ・すすむ

京都大学 理事(研究推進担当)・副学長, 特別教授
〔経歴〕1979年京都大学大学院工学研究科博士課程修了, 工学博士。近畿大学理工学部助教授, 東京都立大学理学部教授, 京都大学物質-細胞統合システム拠点拠点長, 同大学高等研究院副院長などを経て, 2024年より現職。〔専門〕錯体化学, 配位空間の化学。〔趣味〕歴史と文化を楽しむウォーキング。



第106春季年会でのひとコマ



く、ガス吸脱着や温度・圧力といった外部刺激に応答して構造が可逆的に変化する「柔らかい結晶」であることを示すものである。MOFは静的な空間を提供するだけにとどまらず、構造がダイナミックで選択的吸着や特異な吸着挙動（ゲート開閉現象など）を示す極めてユニークな材料でもある。この動的構造機能の発見と体系化は、多孔性材料に対する従来の物質観を根本から刷新し、新しい化学の領域を切り拓いた。興味深いことに、1997年に筆者らが世界で初めて気体吸蔵を実証した前述のCo系MOFは、30年の時を経て、最新の構造解析と吸着測定によって、その本質が「柔らかいMOF (Soft Porous Crystal)」であったことが明らかとなった。今振り返ると、その物質はすでに「気体を吸蔵するMOF」であると同時に、「構造が応答する柔軟なMOF」という、後にMOF化学を特徴づける2つの本質を内包していたのである⁶⁾。

このように、「構造設計の化学 (reticular chemistry)」と「動的機能の化学 (soft porous crystal chemistry)」は、MOF化学の中核を成す二大概念であり、前者が精緻な構造創製を可能にする設計原理を、後者がそれに新たな機能次元を付与する機能原理を与えたといえる。この2つの視座の統合こそが、MOFを従来の多孔性材料とは一線を画す革新的物質群へと昇華させたのである。

MOFの本質的な革新性は、(1) 設計可能な多様な骨格構造、(2) 分離・捕捉・貯蔵・触媒・センサー・輸送などにわたる多機能性、(3) 動的応答性を備えたソフトな結晶という3点に集約される。特に第三の特性は、ゼオライトや活性炭といった従来の材料には見られないものであり、MOFを新しい材料科学のパラダイムへと押し上げた。

こうした基礎概念の確立は、現代社会が直面する課題への応用へと直結する。人類はこれまで石炭や石油といった地下資源に依存して発展してきたが、その結果として資源枯渇や地球温暖化といった深刻な問題を招いている。これに対し、持続可能な社会の実現には、

地下資源に依存しない新たな物質・エネルギー循環の構築が不可欠である。

大気中にはC、H、O、Nといった元素が豊富に存在しており、これらを原料とする循環型化学の確立が強く求められている。とりわけCO₂の回収と資源化は喫緊の課題であり、MOFはその高い選択的吸着能により、希薄な大気中からCO₂を効率的に捕集する有力な材料である。さらに、再生可能エネルギーと組み合わせることで、カーボンニュートラル社会の実現に資する可能性を有する。資源に乏しい我が国においては、この「どこにでも存在する空気」を資源と見なす発想に立ち、科学技術の総力によって新たな産業基盤と生活基盤を築くことが求められている。

今後、MOF研究は構造安定性のさらなる向上やスケールアップ技術の確立に加え、動的構造と機能の相関理解へと深化していくであろう。特にSoft Porous Crystalの概念は、分子認識や非平衡現象とも深く結び付き、次世代の物質科学に新たな方向性を与えると期待される。

配位高分子からMOFへと至る研究の歩みは、構造と機能という2つの軸において化学の新たな地平を切り拓いた。その中心にあるreticular chemistryとsoft porous crystalという二大概念を擁する化学は、今後も他分野を巻き込んでますます発展していくであろう。そしてその広がりや、持続可能な社会の実現という人類共通の課題に対し、化学が果たし得る役割の大きさを力強く示している。

文献

- 1) Y. Shibata, *J. Coll. Sci., Imp. Univ. Tokyo*, **1916**, 37(ART 8), 1.
- 2) Y. Saito et al., *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **1959**, 32, 1221.
- 3) M. Kondo, T. Yoshitomi, K. Seki, H. Matsuzaka, S. Kitagawa, *Angew. Chem., Int. Ed.* **1997**, 36, 1725.
- 4) O. M. Yaghi, M. J. Kalmutzki, C. S. Diercks, *Introduction to Reticular Chemistry: Metal-Organic Frameworks and Covalent Organic Frameworks*, Wiley, **2019**.
- 5) a) S. Kitagawa, M. Kondo, *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **1998**, 71, 1739; b) S. Horike, S. Shimomura, S. Kitagawa, *Nat. Chem.* **2009**, 1, 695.
- 6) H. Sakamoto, K. Otake, S. Kitagawa, *Commun. Mater.* **2024**, 5, 171.

© 2026 The Chemical Society of Japan



MOFの図を背景に

