



## Science Plaza

## 2025年ノーベル化学賞



ノーベル化学賞授賞決定当日の様子  
(左から、北川 進特別教授、樋口 雅一氏、坂本 裕俊氏)

## 多孔性金属錯体の開発

京都大学 高等研究院 物質-細胞統合システム拠点

特定講師 坂本 裕俊

特定拠点准教授 樋口 雅一

## 1. はじめに — ナノ世界の建築学とその夜明け

2025年のノーベル化学賞が「金属-有機骨格 (Metal-Organic Framework: MOF) の開発」に対して授与されました。受賞者は、京都大学の北川進教授、メルボルン大学のリチャード・ロブソン教授、カリフォルニア大学バークレー校のオマール・ヤーギ教授の3氏です。彼らの業績は、「空間を化学で設計できる」という新しい科学概念を確立した点にあります。MOFは、その構成や結合様式から、「多孔性金属錯体」や「多孔性配位高分子 (Porous Coordination Polymer: PCP)」とも呼ばれます。

化学はこれまで、単一分子 (0次元) の精密合成を中心に発展してきましたが、結晶や網目構造のように二次元・三次元へ無限に広がる拡張構造を意図通りに組み上げることは長らく困難で、「合成の荒野」とさえ呼ばれてきました。本授賞は、金属イオンを節点、

有機配位子を梁に見立て、ナノスケール空間を設計する「分子建築」という解決策を提示した点を評価するものです。MOFの本質は、単なる多孔質材料ではなく、空隙そのものが機能の中心となる材料である点にあります。スポンジのような従来の多孔質材料とは異なり、MOFでは結晶構造の周期性により、孔の大きさや形、内壁の化学的性質を原子レベルで揃えることができます。その結果、分子を選択的に「入れる/入れない」「通す/通さない」「強く/弱く捕まえる」といった精密制御が可能となり、材料は単なる物質から『分子を制御する装置』へと進化しました。

私たちは、石炭や石油の時代を経て、水素・メタン・二酸化炭素といった気体が重要性を増す「ガスの時代」に立っています。拡散しやすく扱いの難しい気体資源を、MOFはナノ空間に集め、濃縮・制御する鍵となります。高圧ボンベに依存しないガス利用の可

## Contents

|   |          |
|---|----------|
| <b>Science Plaza</b>  |          |
| 2025年ノーベル化学賞 多孔性金属錯体の開発<br>京都大学 高等研究院 物質-細胞統合システム拠点<br>坂本 裕俊/樋口 雅一          | 1        |
| <b>Topics</b>   |          |
| 研究者としてうまくやっていくには -高校生へのメッセージ-<br>東京大学大学院教授 長谷川 修司                           | 10       |
| 三毛猫の毛色をつかさどるオレンジ遺伝子の発見<br>九州産業大学 生命科学部 教授 松田 美穂<br>九州大学 高等研究院 特別主幹教授 佐々木 裕之 | 14       |
| 温暖化で増幅する異常気象—日本は二季化、なぜ?—<br>三重大学大学院教授 立花 義裕                                 | 18       |
| 連載:PER実践紹介<br>物理教育研究の衝撃と物理教育の未来<br>香川大学名誉教授 笠 潤平                            | 22       |
| 改訂教科書紹介<br>物理 新訂版 / 化学 academia 新訂版<br>化学 新訂版 / 生物 新訂版                      | 27       |
| 高校生へ私が選んだ1冊の本<br>「宇宙の謎に迫る! 中学生からわかる現代天文学」<br>「免疫の守護者 制御性 T 細胞とはなにか」         | 31<br>32 |

能性を示した点に、基礎科学と社会を結ぶ大きな意義があります。

本稿では、2025年ノーベル化学賞を受賞した3氏の思想と業績を、同年12月8日に行われたノーベルレクチャーの内容を踏まえつつ、高校理科の知識を交えながら解説します。あわせて、MOFがどのように社会実装へ向かってきたのか、その歴史・現在地・将来への展望を概観します。

## 2. 配位結合がつくる骨格構造 — MOF/PCPの成り立ち

MOFおよびPCPという物質を理解するうえで、決定的に重要となるのが配位結合です。高校化学では、配位結合は「一方の化学種（配位子）が非共有電子対を提供し、それを主に金属イオンが受け取ることで形成される結合」と説明されます。共有結合のように電子を出し合うのではなく、金属イオンがもつ空の電子軌道が受け皿となり、分子がそこに結びつく結合様式です。この性質により、金属イオンは複数の配位子と同時に結合でき、結合の本数（配位数）や向き（配位方向）が明確に定まります。ただし、配位数4の場合でも、正四面体型や平方平面型など複数の配位形があり、どれが安定になるかは金属イオンの種類や電子状態、配位子の性質によって決まります。

配位結合の利点は、分子を単につなぐだけでなく、「どの方向に」「いくつ」結びつけるかを設計できる点にあります。共有結合も結合の向きや本数は定まっていますが、三次元空間で複数の結合生成・開裂を同時に制御することは容易ではなく、これは現在でも最先端の研究課題です。配位子に配位部位が一つしかない場合、構造はそこで途切れますが、複数の配位部位をもつ配位子を用いれば、金属イオンを介して結合が次々と連結し、構造は無限に広がります。このように配位結合による連結が一方、あるいは二次元・三次元的に無限に続いて骨格状に組み上がった化合物を配位高分子（Coordination Polymer：CP）と呼びます。さらに内部に分子が入り出できる空洞（細孔）をもつものが多孔性配位高分子（PCP）であり、現在では金属有機骨格（MOF）とほぼ同義で用いられています。PCPは「つながり方」、MOFは「構成要素」に着目した名称といえます（図1）。

このように、結合の向きと本数を制御できる配位結

合の特性こそが、MOF/PCPにおける骨格構築を可能にし、原子・分子レベルで空間そのものを設計するという新しい発想を化学にもたらしました。さらに配位子は、有機合成化学によって官能基を所望の位置に精密に導入できるため、「金属イオン × 配位子」という膨大な組み合わせから、目的に応じた骨格構造や機能を設計することが可能になります。

MOFの基本的な合成は、選択した金属イオンと有機配位子を溶液中で混合することから始まります。溶液中では配位結合の生成と解離が可逆的に繰り返され、不安定な結合配置は自然に解消され、より安定な組み合わせが選び直されていきます。その結果、同じ配位数・配位方向をもつ結合が繰り返し選択され、構造は無秩序ではなく規則性をもった骨格へと成長し、最終的に周期性をもつ結晶構造が形成されます。MOFの骨格は、人為的に一つ一つの結合を操作するのではなく、分子自身が安定な構造を選び取る自己組織化（self-assembly）の結果として得られるのです。

骨格構造が成長すると、溶液中に溶解した状態を保つことが熱力学的に不利となり、微小な固体粒子として析出します。この固体はすでにMOF特有の規則構造を備えた結晶核として振る舞い、その表面で金属イオンと配位子が取り込まれることで結晶はさらに成長します。こうして、自己組織化、核生成、結晶成長の過程を経て、材料として扱えるMOF結晶が得られます。

しかし、固体が得られただけでは、その結晶構造が設計どおりかどうかは分かりません。そこで用いられるのがX線回折（X-ray diffraction）による結晶構造解析の技術です。X線は分子や固体中の原子間距離と同程度の波長をもち、原子中の電子によって散乱されます。結晶中で規則正しく並んだ原子による散乱波は、特定の方向で強め合い、回折として観測されます。回折の方向と強度は原子配列に直接対応しており、0.1 nm程度の単結晶から得られる多数の回折データを解析することで、結晶構造を決定できます。近年では、X線の代わりに電子線を用いる回折法も大きく発展しています。電子は波としての性質をもち、原子との相互作用がX線より強いいため、1 μm程度の微小結晶からでも十分な構造情報を得ることが可能です。MOF/PCPは周期構造をもつ結晶であるため、これらの手法によって骨格構造だけでなく、細孔の形状や大きさまで原子レベルで正確に決定できます。非晶質の活性

炭やシリカゲルとは対照的に、「どのような空間が、どこに、どのように存在するか」を直接把握できる点は、MOF/PCPの大きな特徴です。

ここまでで、MOF/PCPを理解するための科学的背景と基本概念が整いました。次章では、この基盤の上に立ち、受賞者それぞれがどのような発想から研究を始め、何を切り拓き、どの点が科学の流れを決定的に変えたのかを順に見ていきます。

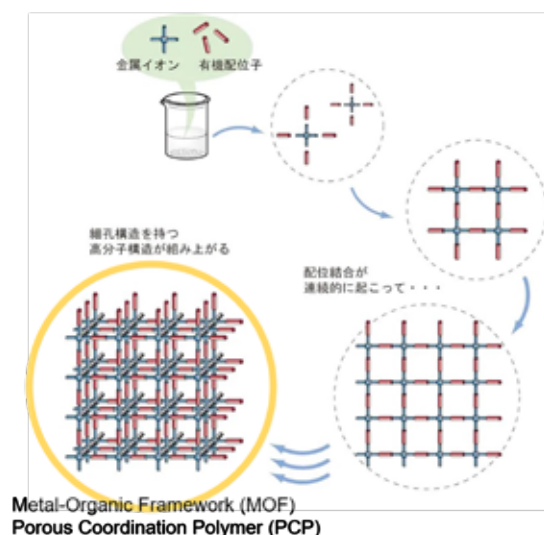


図1 金属イオンと架橋有機配位子のあいだの配位結合によってMOF/PCPの骨格が構築される。(堀毛・坂本・北川ら「材料化学の基礎 第7号 2012」の図を引用、一部改変。https://www.sigmaaldrich.com/JP/ja/campaigns/materials-science-basic#7)

### 3. リチャード・ロブソンと幾何学的設計の導入

リチャード・ロブソン教授は1980年代後半から、結晶構造を偶然の産物として得るのではなく、あらかじめ幾何学的情報を組み込んだ部品を用いて設計するという「事前組織化 (pre-organization)」の概念を提唱しました。その発想の原点は1974年に遡ります。当時、ロブソン教授は塩化ナトリウムや閃亜鉛鉱といった無機結晶構造を、木製の球と棒からなる教育用模型で再現する作業に携わっていました。球(原子)と棒(結合)を実際に組み立てるなかで、次のような着想が芽生えます。

「この模型で示されている結合方向や結合数を、同じような結合方向性をもつ分子や金属イオンで置き換えたなら、結晶と同じ空間構造を化学的に作れるのではないか。」

この着想の本質は、「原子そのもの」を置き換えることではなく、結合原子数や結合角といった“結合の幾何学的制約”をもつ化学部品を用いれば、結晶構造そのものを設計できるのではないか、という点にありました。模型を実際に組み立てることで、どのような結合方向をもつ要素を選べば、どのような三次元空間が立ち上がるのかを、理論ではなく身体感覚として理解できたことが、その後の研究の基盤となったのです。

この発想を現実の化学として具現化するうえで、重要な役割を果たしたのが銅(I)イオン( $\text{Cu}^+$ )です。 $\text{Cu}^+$ は電子配置の特性から、配位数4の条件下で正四面体型の配位形をとりやすく、4本の配位結合が空間的に均等に広がるという、結晶構築にとって都合のよい「向き」を自然に備えています。1989年、ロブソン教授は、この正四面体型の配位方向をもつ $\text{Cu}^+$ と、同様の配位方向性をもつテトラシアノ配位子を溶液中で反応させ、結晶性固体が形成されることを見いだしました。結晶構造解析の結果、 $\text{Cu}^+$ と配位子が連結したダイヤモンド型の三次元ネットワーク構造が構築されていることが明らかになりました。この構造では、体積の半分以上が大きな空隙として存在し、合成時に用いた溶媒分子で満たされていました。当時の結晶化学では「原子が密に詰まっていること」が安定性の条件と考えられていましたが、ロブソン教授は、配位結合によって組み上げられた骨格が、大きな空間を保ったまま安定に存在できることを実験的に示しました(図2)。

さらにロブソン教授は、結晶構造を金属や分子の種類ではなく、幾何学的な接続関係(トポロジー)とし

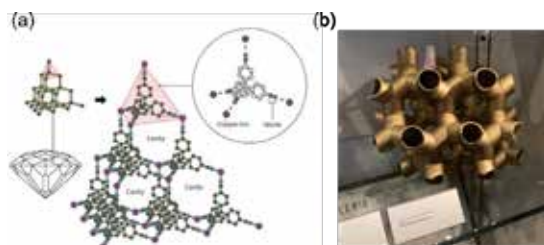


図2 ロブソン教授が1989年に報告したダイヤモンド型フレームワーク。(a) ダイヤモンド、および合成したフレームワークの結晶構造。(スウェーデン王立科学アカデミーから発表された「Scientific Background (科学的背景)」より引用。https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2025/advanced-information/) (b) スtockホルムのノーベル博物館に寄贈された模型。

て整理する枠組みを確立しました。これは、「何を使うか」以上に「どのようにつながるか」を重視する発想への転換であり、配位結合という「向きと数が明確な結合」があったからこそ、構造を図形として抽象化し体系的に扱うことが可能になりました。また1996年には、可逆反応を利用した共有結合型骨格、後に Covalent Organic Framework (COF) と呼ばれる構造の構築可能性についても論じています。ここには、配位結合研究で培われた「結合生成反応を利用して結晶を設計する」という思想が色濃く反映されており、後の多孔性材料研究へとつながる重要な伏線となりました。

#### 4. オマール・ヤーギと MOF 科学の確立

1992年、ヤーギ教授がアリゾナ州立大学で独立した当初、配位ネットワーク研究は将来性のある分野とは見なされていませんでした。当時主流だったのは、ピピリジンなどの中性配位子を用いた配位ネットワークで、構造としては美しいものの、溶媒を除去すると容易に崩壊する「脆弱な結晶」でした。教授自身も、こうした材料を「役に立たない」と評価していたといいます。ヤーギ教授が目指したのは、人がいなくなっても崩れない建築物のように、「中身が空になっても維持される骨格」でした。そのために採用したのが、カルボン酸からプロトンが脱離したカルボキシレート ( $-\text{COO}^-$ ) のような電荷をもつ配位子です。これにより金属イオンとの結合エネルギーは大きく向上しましたが、結合が強すぎると反応が急速に進み、秩序をもたない非晶質になりやすいという新たな問題が生じました。

この壁を越える鍵となったのが、「結合の強さ」と「可逆性」のバランスでした。配位結合がもつ生成と解離を繰り返す性質を生かし、塩基性アミンを用いてカルボキシレートの生成速度を制御することで、誤った結合を修正しながら結晶化を進める手法が確立されました。研究室で「魔法のレシピ」と呼ばれたこの方法により、強固で秩序だった結晶が初めて得られるようになります。この過程で形成される金属-カルボキシレートクラスター、すなわち二次構築単位 (SBU) は、建築物の接合部のように骨格全体の安定性を決定づけました。こうして、溶媒を完全に除去しても空隙が潰れない「永久細孔」という概念が、実体を伴って確立されました。

1998年には、77 Kにおける窒素ガス吸着測定によって、この永久細孔が実験的に証明されます。翌

1999年に報告された MOF-5 は、この分野に決定的な衝撃を与えました。従来の常識を大きく超える比表面積を示し、1 g の物質の内部にサッカー場 1 面に相当する表面積が存在するという事実は、「固体とは何か」という直感そのものを書き換えました。MOF-5 では、すべての原子が内部空間に面しており、その空間は単なる空洞ではなく、分子を扱うための「部屋」として機能します。ここで無機化学と有機化学は、「空間」を媒介として融合しました。

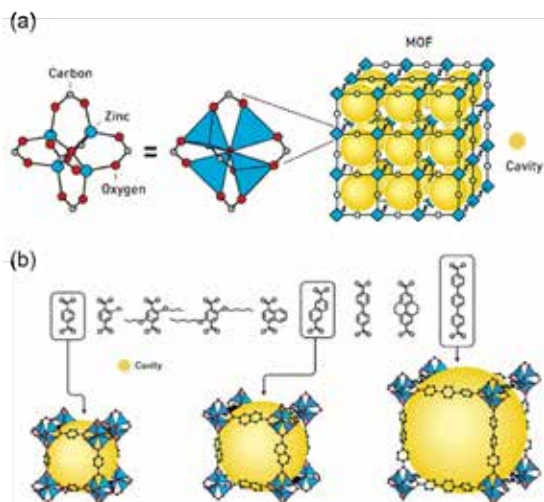


図3 (a) ヤーギ教授が1999年に報告した MOF-5 の骨格構造。4つの亜鉛イオン ( $\text{Zn}^{2+}$ ) が1つの酸化物イオン ( $\text{O}^{2-}$ ) を中心に取り囲み、6つのカルボキシレート基 ( $-\text{COO}^-$ ) によって架橋された中性で安定な金属クラスター  $\text{Zn}_4\text{O}(\text{COO})_6$  を形成する。このクラスターは骨格の節点 (ノード) として機能し、テレフタル酸由来の有機配位子が梁 (リンカー) としてそれらを結ぶことで、三次元的に広がる堅牢な骨格が構築される。このような安定なクラスター構造は「二次構築単位 (Secondary Building Unit: SBU)」と名付けられた。

(b) ジカルボキシレート配位子の官能基や長さを変えても、MOF-5と同じつながり方 (トポロジー) をもつ骨格を構築できる。これらは同質の網構造 (isorecticular) の関係にある (スウェーデン王立科学アカデミー「Scientific Background」より)。

ヤーギ教授はこの考え方を「網目状化学 (Reticular Chemistry)」として体系化します。金属クラスターを節点、配位子を梁と捉え、どの構成要素を組み合わせれば、どのトポロジーの骨格が生じるかを事前に設計するという思想です。この枠組みによって、材料は偶然の産物ではなく、意図的に設計される構造物として扱われるようになりました。さらに、骨格を保ったまま内部空間を化学修飾できる点に、この設計思想の

真価があります。分子を選択的に捕捉・変換・放出する空間は、酵素に匹敵する精密さを示すこともあり、固体材料の概念を大きく拡張しました。

現在、ヤーギ教授のMOF研究は社会インフラの領域にまで広がっています。化学企業との連携によりマルチンスケールでの生産が実現し、セメント工場での二酸化炭素回収や、天然ガス車の走行距離向上といった実装が進んでいます。さらに近年ではAIを用いた材料設計が導入され、MOF-303のように、砂漠環境でも太陽光のみで空気中の水分を回収できる材料が生まれました。ここでMOFは、単なる吸着材ではなく、極めて高性能な分子フィルターとして機能しています。

## 5. 北川進とソフト多孔性結晶

北川進教授は、1997年、コバルト(II)を用いた特徴的な結晶構造—いわゆる tongue-and-groove (舌と溝) 構造をもつPCPを合成し、これが常温で明確なガス吸着挙動を示しました(図4)。重要なのは、単に「ガスが入った」ことではありません。結晶が規則正しい周期構造を保ったまま分子を取り込み、再び放出できることが、初めて実証された点にあります。この報告を起点として、世界中でガス吸着可能なPCP/MOFの開発が加速し、分野は急速に拡大しました。

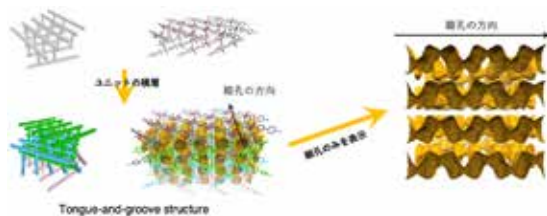


図4 1997年に報告された「はじめてガス吸着を示したPCP」とその細孔の構造。コバルト(II)イオン、硝酸イオン、ピリジン配位子から両面が凹凸したシート状のユニット構造体が生じる。複数のユニット同士の凹凸が噛み合うように積層して、その積層間に、豆のさや状の空間(黄色曲面)が生じている。この空間にガス分子を収容することができる。

初期のMOF研究では、「表面積の大きさ」や「細孔の大きさ」といった量的指標が競われる傾向にありました。これに対して北川教授は、「孔がどのように振る舞うか」という質的な視点を導入しました。分子が到来したときに孔は開くのか、分子の種類によって応答は変わるのか、吸脱着を繰り返しても元の状態に可逆的に戻れるのか—こうした問いは、分離、センサー、貯蔵、反

応場設計といった実用機能に直結します。このように、分子の出入りに応じて骨格構造が柔軟に変化するMOFを包括して、北川教授は「ソフト多孔性結晶」と定義しました(図5)。その発想を最も端的に示す成果が、ゲート吸着の発見です。ゲート吸着では、ある圧力までは吸着がほとんど起こらず、閾値を超えた瞬間に吸着量が急増します。これは、孔が常に開いた通路ではなく、分子の到来に応じて開閉する「門」として機能していることを意味します。静的な『篩(ふるい)』では分離が困難な分子どうしであっても、こうした動的応答を利用すれば、わずかな分子差を大きな性能差として引き出すことが可能になります(次ページ図6)。

この「ソフト多孔性結晶」という考え方は、実用的成果にも結びつきました。代表例が、爆発性の高いアセチレンの安全貯蔵です。高压で詰め込むのではなく、ナノ空間内に分子を秩序立てて配置し、相互作用で安

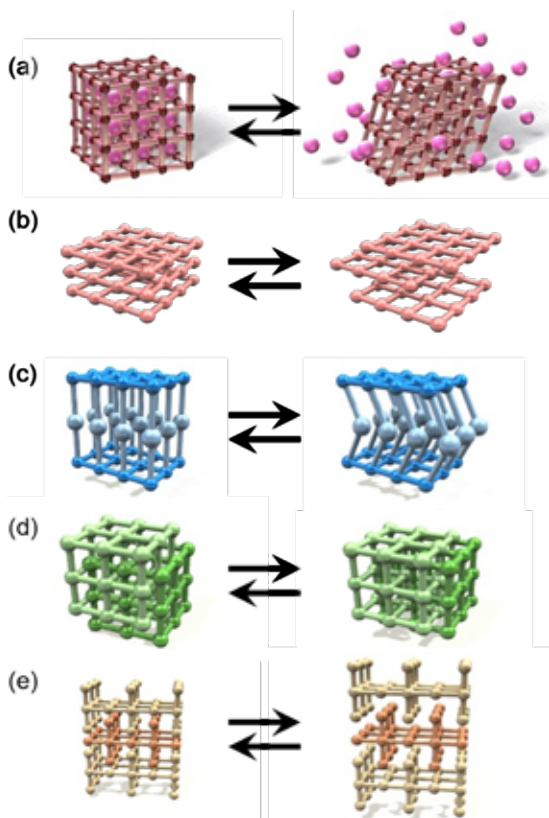


図5 分子の出し入れで構造が変化する、さまざまなタイプのソフト多孔性結晶。(a)呼吸型、(b)積層型、(c)ヒンジ型、(d)相互貫入型、(e)相互嵌合(かんごう)型。

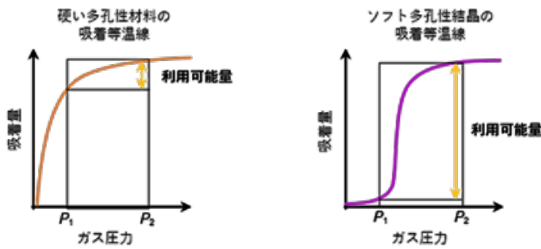


図6 典型的な硬い多孔性材料とソフト多孔性結晶における吸着等温線の比較。圧力を $P_1$ と $P_2$ で変化させた際に、出し入れできるガス量が実際のガス利用可能容量。

定化することで、「低压かつ安全に貯蔵する」という従来とは逆の解決策が示されました。さらに、水 ( $H_2O$ ) と重水 ( $D_2O$ ) の分離では、孔内の水素結合ネットワークや振動モード、結晶のわずかな変形応答を利用し、室温近傍でも高い分離性能を実現しました。ここで主役となるのは孔の大きさではなく、孔がつくる微視的環境とその応答性です。このような「動く結晶」を科学として確立するには、材料合成だけでは不十分でした。ガス雰囲気下でのその場測定、吸着等温線と構造解析の往復、測定セルの工夫などを粘り強く組み合わせることで、動的結晶という一見つかみにくい対象が、再現性のある科学へと昇華されていきました。

こうした概念と技術の進展を経て、2024年に北川教授は、1997年に報告した最初のガス吸着PCPを改めて解析し直しました。その結果、当初は「硬い孔」と考えられていた構造が、吸着過程で局所的に変形しながら分子を通す『スクイーズ機構』を備えていたことが明らかになりました。すなわち、この材料は最初から「ソフト」だったのです。この再解釈により、最初のMOFは「世界で初めてガス吸着を示した材料」であると同時に、「世界で最初のソフトMOF」であったことが明確になりました。

この事例は、科学が完成された知識の集積ではなく、問い直しによって深化していく営みであることを端的に示しています。教科書で学ぶ知識が、同時に「これから書き換えられていく知識の一部」であることを伝えるうえでも、示唆に富む歴史といえるでしょう。

## 6. 大学で生まれた材料MOF/PCPを社会へ：商業化の最新動向と「ガスの時代」の社会実装

上記のような先駆的な研究結果を踏まえて、MOF/PCP研究の焦点は「何ができるか」から、「社会でどう

使われるか（社会実装）」へと移行していきました。つまり、実際に社会の中で役にたつようにするにはどうすれば良いかです。そのためには、大学での基礎研究ではあまり扱わない、いくつかの新しい課題に取り組む必要があります。

- ①新しい製品開発：これまでにない新しい製品やサービスが作れるか
- ②安定性の確認：数ヶ月間、時には数年間にわたって、求められる使用条件ですべて安定して機能するか
- ③量産手法の開発：多くの種類を大量に簡単に作れるか
- ④コスト：いかに安く作れるか

これらの課題は、社会実装においては避けて通れません。特に、コストに関しては、大学では全く意識することがなく基礎研究が進められているため、社会実装する時に初めて気にすることになります。このような新たな課題を乗り越え、MOF/PCP研究は、産業や社会との接点へと踏み出すことになりました。

次は、社会実装に向けてこれらの課題を誰がやるかです。選択肢は2つ。すでに存在する企業、または新しく創った企業（新興企業：スタートアップ）か、です。すでに存在する企業もこれらの課題のいくつかに取り組んでいます。MOF/PCPでは、スタートアップが多く誕生し、精神的に課題に取り組むことになりました。MOF/PCPに関するスタートアップ・ベンチャー企業は、2011年に世界で初めて誕生し、2025年末時点では世界に50社以上確認されています（次ページ図7）。ここで強調すべきは、スタートアップの登場によって、MOF/PCPが「研究室の材料」から「社会の材料」への移行が加速したということです。

これまでのMOF/PCPの社会実装は、全てスタートアップ企業とすでに存在する企業が協力して行われました。社会実装に成功している例を5つみていきましょう。

### 1) 果物や野菜の鮮度を維持し、フードロス削減

ある種の果物や野菜が放出する熟成促進ガス（エチレン）は、自分自身がそのエチレンに触れると熟成し始めます。それらの野菜や果物にとっては次世代へ子孫をつなぐ大切な機能ですが、それらを食べ物として扱う私たちにとっては、少し困る機能です。そこで、スタートアップのMOF technologies社（英）がDecco worldwide社（蘭）と協力して、果物などと一緒に袋の中に入れておくと、普通は2週間で腐ってしまうもの

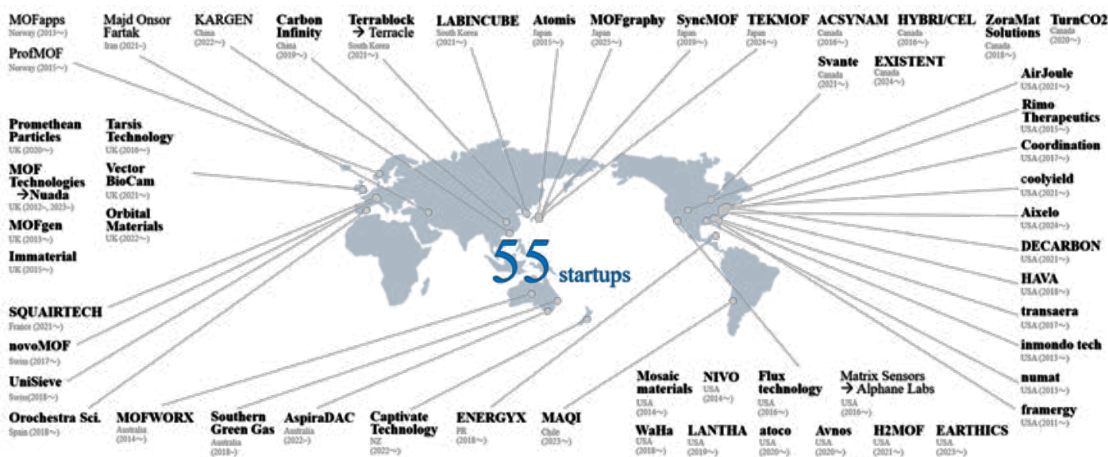


図7 世界のMOFスタートアップ・ベンチャー企業 (2025年12月時点)

が、9ヶ月も鮮度を保つことのできる小さな錠剤を作りました。この錠剤は、エチレンに似た分子、1-メチルシクロプロペン (1-MCP) が吸着されたMOF/PCPを固めたものです。果物などから出た水分がこの錠剤に触れるとMOFを壊し、壊れたMOFの穴から1-MCPが放出され、本来はエチレンが入る果物の表面にあるタンパク質の穴に1-MCPが入ってしまいます。そうすると、エチレンが入るはずの穴に、すでに1-MCPが入っているため、エチレンが入れず、果物は腐らない、というわけです。この技術によって、野菜や果物を長期間にわたって鮮度を維持させることができるため、社会課題の一つであるフードロスの削減に貢献しました。この社会実装の面白いところは、MOF/PCPの水に弱い性質を克服して成功したのではなく、逆に水に弱い性質を利用したことです。逆転の発想が、世界で初めてのMOF/PCPの社会実装に繋がりました。

## 2) 半導体の材料 (毒ガス) の安全輸送

生成AIが開発され、今後ますます半導体の開発が重要になるといわれています。半導体の材料の一つにドーパントガス (アルシン (AsH<sub>3</sub>), ジボラン (B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) など) という人間が吸ってしまえば死んでしまう毒ガスがあります。この毒ガスは通常は、高压ガスボンベで運ばれていて、もし、このボンベが倒れて壊れると中から毒ガスが出てきて大変な事故になってしまいます。社会の中にこのような危険なものがない方がいいと考

えられます。そこで、スタートアップのNumat technologies社 (米) がVersum materials社 (米) と組んで、新しいMOF入りボンベであるION-Xを開発しました。ION-Xは、ドーパントガスがボンベの中に入ってくると、MOF/PCPが吸着し、大量にガスを貯めることができ、1気圧以下でこれまでと同じ量のドーパントガスを運ぶことができるのです。1気圧以下のボンベなので、もしこのION-Xが破損しても、ドーパントガスは外にでてこず、空気がボンベの中に入っていただけです。安全に運べる、いざという時に毒ガスが出てこないボンベができました。韓国の半導体工場で使われていて、日本でも販売が始まっています。この社会実装の面白いところは、ボンベの中に入れるMOF/PCPは、水に強い性質が必要がない点です。ドーパントガスは水と反応して壊れてしまうため、とても乾燥した状態で存在し、水のない状態でこのボンベに入れられます。つまり、このボンベの中に水が入ってくることはないのです。これは開発する時にとってもメリットがあります。水で壊れるMOF/PCPでも良いので、多くのMOF/PCPを候補にすることができた点です。世界で2例目のMOF/PCPの社会実装は、多くのMOF/PCPから選ぶことができたため、早い開発ができたといえます。

## 3) 産業設備の寿命延長

日本は化学材料の生産が強い国で、化学材料を扱う多くの会社があります。きちんと締め切りを守って、

いつも同じものを早く作ってくれる会社が多く、諸外国から信頼されています。化学材料の多くは、大きな反応槽で作られています。反応槽の内側は金属やステンレスやガラス製が一般的です。しかし、半導体などの電子材料のように不純物がちょっとでも混ざってしまえば困るものの合成では、内側がフッ素樹脂コーティングされている反応槽が使われています。しかし、フッ素樹脂コーティングは、一年くらいで剥がれてしまいます。剥がれてしまうと使えないので、大きな反応槽をトラックで工場まで運んで、もう一度フッ素樹脂コーティングをすることになります。この1年で剥がれてしまうフッ素樹脂コーティングの寿命を伸ばしたのが、京大発スタートアップのAtomisと日本フッソ工業です。フッ素樹脂にMOF/PCPを混ぜてコーティングすると剥がれにくくなり、5年も寿命が伸びました。フッ素樹脂にMOF/PCPが入っていない時は、フッ素樹脂の中を合成溶媒が染み込んで、反応槽の金属部分に到達します。そうすると、次の反応で加熱した時に、その溶媒が高温で膨張してフッ素樹脂コーティングを剥がしてしまうのです。では、MOF/PCPが入っているとどうか。合成溶媒が、フッ素樹脂コーティングに染み込んでも、途中のMOF/PCPに吸着されて金属部分まで到達しないため、コーティングが剥がれないのです。世界で3例目、日本初のMOF/PCPの社会実装は、思いがけない機能で日本産業ならではの領域で達成されました。

#### 4) タバコやニンニクなどの臭いの瞬間消臭

私たちの身の回りにはタバコ臭や排泄物臭など不快な臭いがたくさんあります。これらは色々な臭い分子の混ざり物で、空气中を漂い、不快な臭いになります。時には病気や命に関わる臭い（毒ガス）もあります。衣服などに機能をつける会社、大原パラジウム化学は、タバコの臭いが取れる材料を探していました。活性炭やゼオライトで試していたのですが、逆にタバコの臭いでもない変な臭いが残ってしまっていました。そこで、MOF/PCPでタバコの臭いが取れないかを試したところ、全くタバコの臭いなくなりました、それも一回だけ、MOFを通しただけです。それから、Atomisと協力し、タバコの臭いだけでなく、他の臭いも除去できるフィルターを開発しました。今では、ホテルの調理場のニンニク臭が宴会場に拡散するのを防いだり、ゴムメーカーの工場においてゴム臭のせい

で止まっていた研究が再開できたりしています。京都大学で生まれた材料を京都の老舗企業が社会で役立てる社会実装の良例となりました。

#### 5) 空調機にある高価なフッ素系ガス（冷媒）の再利用

空調機は、フッ素系ガスを圧縮・膨張させ、室内外で熱交換を行うことで、部屋を暖かくしたり涼しくしたりすることができます。このフッ素系ガスは非常に高価であるため、エアコンが壊れると回収し再利用されています。しかし、色々なフッ素系ガスが混ざって回収されるため、再利用しようとするときれいに分ける必要があります。5種類あるうちの3種類はすでに分けられて再利用されていました。しかし、残る2種類はどうしても分けられず、燃やして捨てていたのです。そこで、ダイキン工業はこれらが分けられないかと、MOF/PCPを試したところ、綺麗に分けられることを発見しました。今では、環境負荷の少ない冷媒は再利用され、循環型社会へ向けて、MOF/PCPが役立つことが証明されました。

これら5例は、「材料開発は“性能競争力”だけでなく、“問題解決力”で価値が決まる」ことを伝える好例となっています。このほかにも多くのMOF/PCPの特徴を生かした社会実装目前の開発プロジェクトを世界のMOFスタートアップが手がけています。砂漠の乾いた空気からわずかな水蒸気を捕まえて飲み水を作る水問題解決、工場の煙突から出る二酸化炭素を捉えて地球温暖化防止、などの研究が進められています。

最後に、日本で初めて誕生したMOFスタートアップのAtomisの開発プロジェクトを紹介します。Atomisは、北川進教授の研究室から2015年に起業された京大発スタートアップで、北川教授が科学顧問を務めています。Atomisが推進するプロジェクトに次世代高圧ガスポンプ「CubiTan<sup>®</sup>（キュビタン）」の開発があります（次ページ図8）。CubiTanは、四角いケースの色で、ガスの種類が分かるようになっています（図8a）。MOFのガス吸着・濃縮機能を利用し、従来は高圧が不可欠だったガスを、低圧かつ軽量で、積み重ね可能な容器として扱えるようにする試みです（図8b）。ケースの中には、球状の高圧ポンプが入っています。さらにIoT化によって残量管理や配送を最適化し、個人間でのポンプのシェアリングを可能にする、いわば「エネルギーのパケット化」の構築を目指しています（図8c, d）。市場の大きさなどを考慮して、

エネルギーガスである天然ガス、つまりメタンガスを圧縮できるMOF/PCP入りCubiTanを開発しています。その他のガスに関しては、MOF/PCPが入っていないCubiTanとして、インターネットで管理できるポンプとして日本ですでに発売しています。

現在、CubiTanはインドネシアでの実証実験中で、2027年に社会実装が予定されています。しかしこの段階で問われるのは、もはや材料の性能だけではありません。物流の仕組み、規格や法制度、そして利用者が利便性を感じて初めて社会に広がっていきます。CubiTanは、材料科学が社会基盤に役立てるかどうかの最前線に位置する試みといえるでしょう。

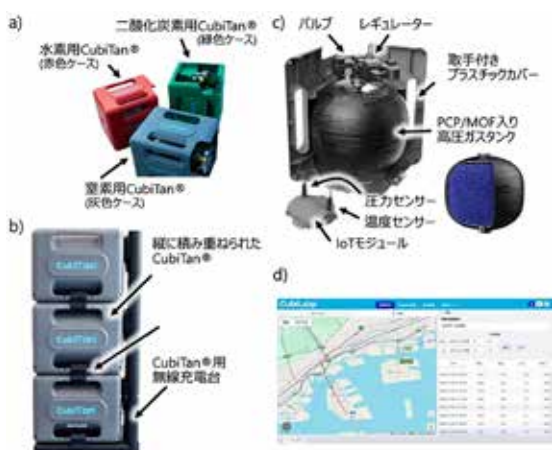


図8 CubiTan® (キュービタン) の詳細 a) さまざまなガス種のキュービタン, b) 無線式充電台に縦積みで載ったキュービタン, c) キュービタンの内部, d) パソコンやスマートフォンでのキュービタン管理画面 (地図上の配送ルートが赤線)

## 7. おわりに — 無用の空間を、社会の用へ

多孔性金属錯体 (MOF/PCP) の開発は、人類が「ナノ空間という究極の反応場」を自在に設計し、利用できる段階に到達したことを意味します。結晶中の空隙は、かつては「何もない部分」や欠陥のように捉えられてきました。しかしMOF/PCPの登場によって、その「何もない空間」こそが、分子を集め、選び、通し、時に変換する機能の舞台であることが明確にな

りました。この発想は、約2400年前に荘子が説いた「無用の用」と深く響き合います。一見無意味に見える空間が、実は本質的な価値を生む。MOF/PCPは、この思想が現代科学において「分子建築学」として結実した例といえるでしょう。空間はもはや『無』ではなく、設計可能な機能そのものとなったのです。

一方で、MOF/PCPの社会実装が本格化するためには、依然として3つの大きな壁があります。安定性、サイクル特性、そしてコスト (低価格化) です。これは「反応が一度起きるかどうか」という基礎的な問題ではありません。「何百回繰り返しても同じ働きを保てるか」「水分や不純物、温度変化といった現実の環境下でも壊れずに機能するか」「実験室レベルではなく、社会で使える量を作れるか」といった、科学が工学へと橋を渡る段階で必ず直面する課題です。さらに、新しい材料や技術を社会に届けるためには、性能だけでなく、それが安全で、信頼でき、使う意味があることを人々に理解してもらう必要があります。いわゆる「社会受容性」の構築です。科学コミュニケーションや教育が、最先端材料の普及を左右する理由はここにあります。

私たちは今、石炭や石油の時代を経て、水素・メタン・二酸化炭素といった気体資源が主役となる「ガスの時代」に生きています。扱いの難しい気体を、MOF/PCPはナノ空間に集め、低圧・低エネルギーで制御する道を示しました。これは、基礎科学がエネルギー・環境・安全といった社会課題と、同じ地平で結びつくことを強く示しています。北川進教授が語る「空間」は、単なる研究対象にとどまりません。それは、空气中に遍在する水やCO<sub>2</sub>、窒素、酸素を、必要な場所で必要な量だけ利用する未来社会の資源像へとつながっています。「エア・ゴールド」とは、空気がどこにでもあるという事実そのものではなく、技術によって空気を資源へと変える時代の到来を示す言葉です。MOF/PCPは、基礎科学の美しさと社会実装が同じ延長線上にあることを示す、現代化学を象徴する存在といえるでしょう。