

空にして満つー動く結晶と「無常」の科学ー

多孔性配位高分子（MOF/PCP）化学の創始と「分離文明」への大いなる展開

京都大学高等研究院物質・細胞統合システム拠点

北川 進

1. 私たちの世界概観と方向性ー採掘文明から分離文明へ

1.1 「採掘文明」の限界と行き詰まり

過去2世紀にわたり、人類の進歩は、有限な地下資源（石炭や石油などの固体・液体）を「掘り出し、燃焼させ、大気中へ一方的に放出する」という資源の枯渇を前提とした直線的な生産モデルに全面的に依存してきました。この「採取・放出」の一方通行モデルは、二酸化炭素（CO₂）などの環境に負荷をあたえる物質を大気中や海洋に蓄積させ、地球規模のESG危機を誘発しています。従来の「掘る文明（採掘文明）」の思考回路や産業インフラだけでは、現代社会が直面する持続可能性の課題を解決することは難しい状況です（図1）。



図1 これまでの掘削文明から分離文明

1.2 「見えないもの」気体制御の難題

人類は固体や液体を自在に操る技術を確認してきましたが、一方で、目に見えない「気体（ガス）」の制御には依然として苦戦を強いられています。気体は「迅速拡散」「不可視」「短寿命（安定して保持しにくい）」「混合・希薄」「有毒」などの独自の性質

をもつため、従来の固定的で硬直的な産業インフラやポンペ、パイプラインにとっては、きわめて扱いにくく、制御が困難な対象だからです。

1.3 21世紀最大の課題：「希薄資源経済（Dilute Molecule Economy）」の開拓

21世紀の地球規模課題の本質は、自然界が「極めて希薄な状態で」有用な資源分子を隠している点にあります。例えば、地球温暖化の主因であり資源炭素源でもある大気中の二酸化炭素（CO₂）の濃度は、わずか0.04%（400 ppm、空気分子2,500個の中に1分子）にすぎません。他にも、医療やエネルギーに不可欠な重水（D₂O）は天然水中にわずか0.015%（150 ppm）、海水中のウランに至っては3 ppb（10億分の3）という超希薄環境にあります。これからの時代に求められるのは、鉱山などの偏在（Localization）資源を掘り出すことなく、空気や海水のようにどこにでも遍在（Ubiquity）する環境中から、必要な分子だけを正確に見分け、極めて低エネルギーで分離して回収する「希薄資源経済」の開拓にあると言えるでしょう。

1.4 未来のインフラ「分子精製所（Molecular Refinery）」

地下資源を採掘する「石油精製所」に代わる、未来の持続可能なインフラが「分子精製所（Molecular Refinery）」です。これは、どこにでもある空気や排ガスを原料とし、常温・大気圧のきわめて穏やかな条件下（低エネルギープロセス）において、次の3つの段階を統合的に稼働させる技術です：

- ・ 第1段階【分離・回収】：混合気体（空気や排ガス）から特定の対象分子（CO₂やH₂Oなど）だけを高い選択性で分離・吸着する。
- ・ 第2段階【濃縮・貯蔵】：回収したガス分子を、ナノ細孔内に高密度に充填し、常温・低圧で安全かつ効率的に貯蔵・輸送する。
- ・ 第3段階【変換】：貯蔵したガス分子を化学的に活性化し、再生可能燃料、プラスチック原料（feedstock）、食品、医薬品などへと再資源化する。

2. 問題解決に資するMOF化学の創生と「Soft MOF」の構築

2.1 金属-有機構造体（MOF）の誕生とノーベル賞受賞の意義

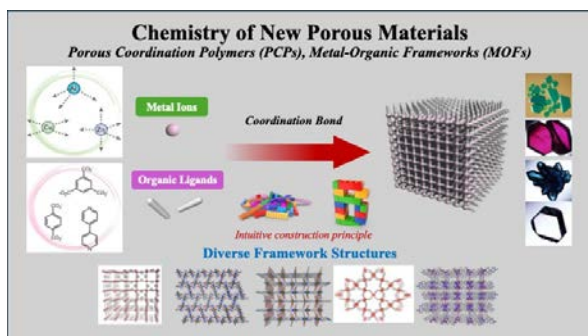


図 2 デザインできる MOF から生み出される多様な多孔性構造。現在、13万種以上合成されている

希薄なターゲット分子だけを分離・回収・貯蔵するためには、形状やサイズが似ている分子種を選択的に認識するナノ空間を実現する必要があります。その理想的な材料として注目されているのが金属イオン（接着剤）と有機配位子（リンカー）を用いて、3次元規則的なナノ細孔空間を自在に創り出す多孔性材料、金属-有機構造体（MOF: Metal-Organic framework）であり、多孔性配位高分子（PCP: Porous Coordination polymer）とも呼ばれます（図2）。

MOFはまさに「分子レベルで設計や合成ができる」画期的な材料と言えます（図3）。さらに、MOFは1グラムあたりサッカー場1面分（4,500～7,000 m²/g）に匹敵する表面積をもっています。いわば、人類が手にできる最も軽量でかつ表面積の大きい多孔質材料です。このMOF化学を創始と発展、そして基礎学問から実用化への道のりを切り拓いた功績により、私はRichard Robson氏、Omar Yaghi氏とともに2025年のノーベル化学賞を受賞しました。



図 3 MOF 化学の学術的意義。密な構造が安定という常識を覆し、有機分子を用いても頑丈な多孔性構造が構築可能であることを実証

2.2 歴史的成長の原点：偶然の「穴があいていますよ」

MOFへの旅路は、当時「構造が弱く不安定で、多孔質体としては役に立たない」と考えられていた銅(I)イオン（Cu⁺）の配位化学を探究することから始まりました。1989年、京都大学計算機センターで銅錯体の複雑な構造解析を行っていた際、同伴していた学生がボソリと漏らした「この構造は穴があいています」

よ」という何気ない一言が全く新しい学問領域へ第一歩を踏み出す決定的な契機となりました。それまでの研究は、「錯体分子が密集した結晶」から機能を生み出すことを目標としていました。しかし、この気づきをきっかけに発想を大きく転換し、「錯体による多孔質空間そのものに価値を見出す化学」という前例のない研究分野の開拓に踏み出しました。これは荘子の「無用の用」を体現する挑戦でもありました。こうして密な材料の空隙、空間は「無用」であるという常識に抗って、「無用な空間」をつくる化学の創生の旅路を歩み出したのです。

2.3 アリストテレスのドグマを覆した第2世代MOFの実証

当時の結晶化学・物理学界には「自然は真空を嫌う」というアリストテレス以来の強固なドグマが暗黙の前提として受け入れられていました。「結晶の中に何もない真空の空洞（細孔）を作れば、外圧や分子吸着の衝撃に耐えられず、結晶自体の自重でたちまち崩壊する」と信じられていたのです。しかし、私はこの常識にとらわれることなく研究を続けました。そして1997年、世界で初めて「真空の空洞を持ったまま安定して自立し、室温で可逆的に気体（ガス）を吸脱着できる頑丈な多孔性配位高分子（第2世代MOF）」の合成と気体吸蔵の実証に成功し論文で報告しました。これは、世界に衝撃を与える研究成果となりました。

2.3 東洋思想の融合：第3世代「Soft MOF（呼吸する結晶）」の創出

私の研究を支えてきた思想の根本には、「集合（Assembly）」「空間（Space）」「動性（Dynamicity）」という三つの概念があります。なかでも「空間」の発想は、荘子の『無用の用』に大きな影響を受けました。一般には役に立たないと思われる「空」が、実は最も重要な機能を生み出すという考え方です。また、「動性」はヘラクレイトスの「万物流転」、さらに京都で育つ中で親しんだ『方丈記』や『平家物語』の「無常」の思想とも響き合い、「変化することこそ本質である」という世界観へとつながりました。この思想は、従来の「結晶は固く、変化しない」という常識を覆し、「動く結晶（Soft MOF）」という第三世代MOFの創出へと結実することとなります。結晶が外部刺激に応じて柔軟に構造を変化させることで、従来材料では達成できなかった高度な分子認識と選択性が実現されたのです。これが「周囲のガス環境や外部刺激に応じて、柔軟に適応・変形し、呼吸するように結晶格子自体が動的に変化するMOF（第3世代MOF: Soft Porous Crystal）」の概念を提唱・実証することにつながりました。特定のガスが一定の圧力（ゲート圧力）に達した瞬間に、パッと窓を開けるように急激に気体を取り込む「S字型（Sigmoidal）吸着特性」を発見して以降、次から次へとその機能を持つSoft MOFを合成しました。これは非生物系の人工材料としては史上初めて、生体のヘモグロビンに匹敵する「協同的吸着（Cooperative Adsorption）」を達成した、分子レベルの究極の柔軟適応技術になります。

3. MOF材料が解決する現実社会の課題と新たな学術評価軸

3.1 地球規模課題の解決に向けたMOFの具体的な活躍

MOFを用いるナノ空間制御技術は、基礎研究の枠を越え、21世紀の環境保護やクリーンエネルギーの確立に向けた「切り札」として急速に実用化が進んでいます。MOFは、気体を自在に扱うための「分子精製所（Molecular Refinery）」を実現するための基盤材料です。混合した気体から目的分子のみを選択的に分離・回収し、高密度に濃縮・貯蔵し、その後に化学変換へと導く。この一連のプロセスを常温・常圧付

近という穏やかな条件で実現できることが最大の特徴です。現在、MOFは二酸化炭素回収（DACや排ガス処理）、水素やメタンの貯蔵、半導体製造用高純度ガスの精製、希ガス回収、水素同位体や重水（D₂O）の高効率分離など、多様な分野へ応用が広がっています。また、捕捉した二酸化炭素を単なる廃棄物ではなく炭素資源として利用し、再生可能エネルギーと組み合わせる燃料や化学原料へ転換する「Carbon Circular Economy」の基盤技術としても期待されています。さらに、こうした技術を実装するMOF関連スタートアップが世界各国で次々と設立され、大企業との連携も進んでいます。MOF化学は、基礎科学から社会実装へと発展する、新しい材料科学の成功例となりつつあり、「希薄資源経済」を支える次世代インフラとして、その重要性は今後ますます高まっていくでしょう。

具体的には下記の例が挙げられます。

- ・ 大気中の希薄CO₂の直接回収（DAC）:大気の中からわずか0.04%しか含まれないCO₂を極めて低エネルギーで選択的に回収できます。

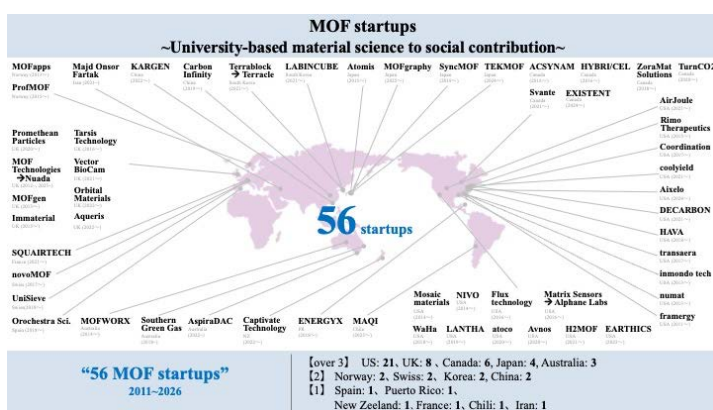


図4 MOFに関する世界のスタートアップ（2026年現）。

羽の様な動的な動きをする配位子を利用した「構造揺らぎ」を備えるsoft MOFを開発し、室温下で、分離度が最大212に達する同位体選択的分離を世界で初めて達成しました。

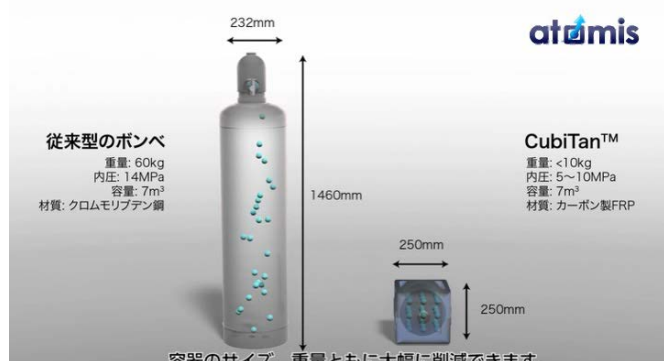


図5 従来ボンベに変わりうる Atomis 開発による気体貯蔵容器、CubiTan

フラに苦しむインドネシアの一般家庭における燃料利用実地試験が始まっています（図5）。

- ・ 排ガスやバイオガスからのCO₂回収：カナダのバーナビーでは、セメント工業の排ガスからのCO₂回収の大規模装置（2024年5月開所）により実証実験を進めています。その他、数のスタートアップがパイロット装置を用いての実証実験を進めています。

- ・ 重水（D₂O）同位体分離：重水は天然水中に0.015%しかなく、軽水（H₂O）と物理・化学的性質が極めて似通うため、分離が不可能な困難でした。これを私たちは、トンボの

- ・ ガスインフラ革命「CubiTan®」と社会実装:Atomisが開発した、コンパクトで軽量の気体貯蔵容器は100年の貯蔵ボンベの歴史を大きく変える画期的なものとして世界に向けた展開が始まっています（下記参照）。

2011～2026年までに、世界で56社（米国21社、英国8社、日本4社など）のMOFスタートアップが設立されました（図4）。京都大学発スタートアップのAtomis社が開発した高密度ガス圧縮貯蔵容器「CubiTan®」は、容器サイズ・重量を1/6以下に大幅削減することに成功し、ガスイン

4. Air Gold Society — 空気が最大の資源になる未来



図 6 空気が多様な物質を作る原料となる社会 (Air Gold の世界)

私が描く未来社会は、「Air Gold Society」です(図6)。空気中には、二酸化炭素(CO₂)、窒素(N₂)、酸素(O₂)、水(H₂O)など、生命と文明を支える基本分子が無尽蔵に存在しています。これらをMOFによって分離・濃縮し、再生可能エネルギーによって化学変換すれば、空気そのものが巨大な資源鉱山となる。すなわち、空気→

分離→濃縮→化学変換→社会へ供給、という新しい循環が成立します。その結果、燃料、化学原料(Feedstock)、肥料、食品、医薬品など、人間社会を支える多くの物質を空気から創り出すことが可能になります。地下資源を掘削することなく、地球上のどこにでも存在する空気を出発点とする循環型社会である。Air Goldとは、「空気の価値」を意味するだけではありません。人類の資源観そのものを転換する新しい文明の概念ともいえます。資源は地下に眠るものではなく、私たちの頭上に遍在するものとなるのです。

5. 創造的研究を育む教訓と京都大学の新たな学術評価基準「COMON」

私が2025年ノーベル化学賞を受賞するまでの50年の研究歩みは、現代の成果主義的な科学政策に重要な示唆を与えていると考えています。日本のこれまでのノーベル賞受賞者の学術のhistoryを眺めても、共通して言えることは彼らの学術の萌芽を生み出してから、広く受け入れられ学術領域として認知される(すなわちノーベル賞受賞)まで20から30年かかっています。即時的なROI(投資収益率)や短期的な「出口志向」を求める世界的風潮だけでは、パラダイムシフトをもたらすような深い基礎研究は育ちません。真のイノベーションはある日突然生まれるものではありません。社会に役立つ研究として有用な応用研究が地上に現れる前の20年以上にわたる、独創的なアイデアが地下深くで密かに醸成される「地下水流(伏流期・揺りかご期)」研究の保護・保全が未来の科学技術を左右すると考えています。京都大学は、このような目に見えない「潜行の時代(Maturing Excellence)」を適切に評価・保護し、好奇心に駆られた基礎研究を長期的に支援するための独自の5つの多角的な評価軸「COMON」を提唱しています。

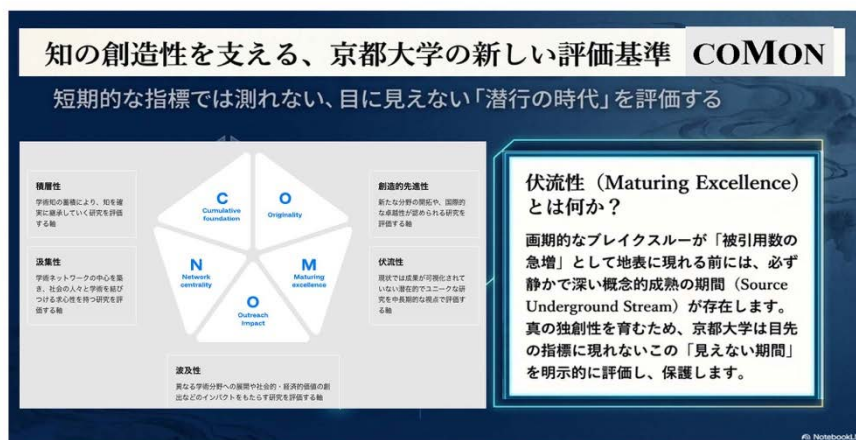


図7 京都大学の新しい領域評価軸。この五つの軸をベースに対話型で評価を行う。参照、<https://www.research.kyoto-u.ac.jp/comon/>

COMON

C: Cumulative foundation（積層性）

学術知の着実な積層と深化により、知を世代を超えて確実に継承していく研究を評価する軸

O: Originality（創造的先進性）

既存のパラダイムを打ち破り、新たな学問領

域を自ら切り拓く卓越した独創性・先進性を評価する軸

M: Maturing excellence（伏流性）

現状では成果や論文指標として可視化されていないが、地下水流のように深遠な独創性が中長期的に熟成しつつある「揺りかご期（伏流期）」の研究を保護・評価する決定的な軸

O: Outreach impact（波及性）

異なる学術分野への横断的展開や、社会的・経済的なイノベーション創出につながる多大な波及的インパクトを評価する軸

N: Network centrality（汲集性）

国際的・多面的な学術ネットワークの中心を築き、高度な知と社会の人々を強く結びつける求心性を評価する軸

私自身の研究もまた、数十年にわたる「伏流期」を経て初めて大きな流れとなり、MOFという新しい学問領域を生み出しました。未来の科学を育てるためには、すぐに成果を求めるのではなく、目に見えない可能性を信じ、長い時間をかけて育む文化と制度が不可欠です。それこそが、そして次の科学のパラダイムシフトを生み出す土壌になると信じています。