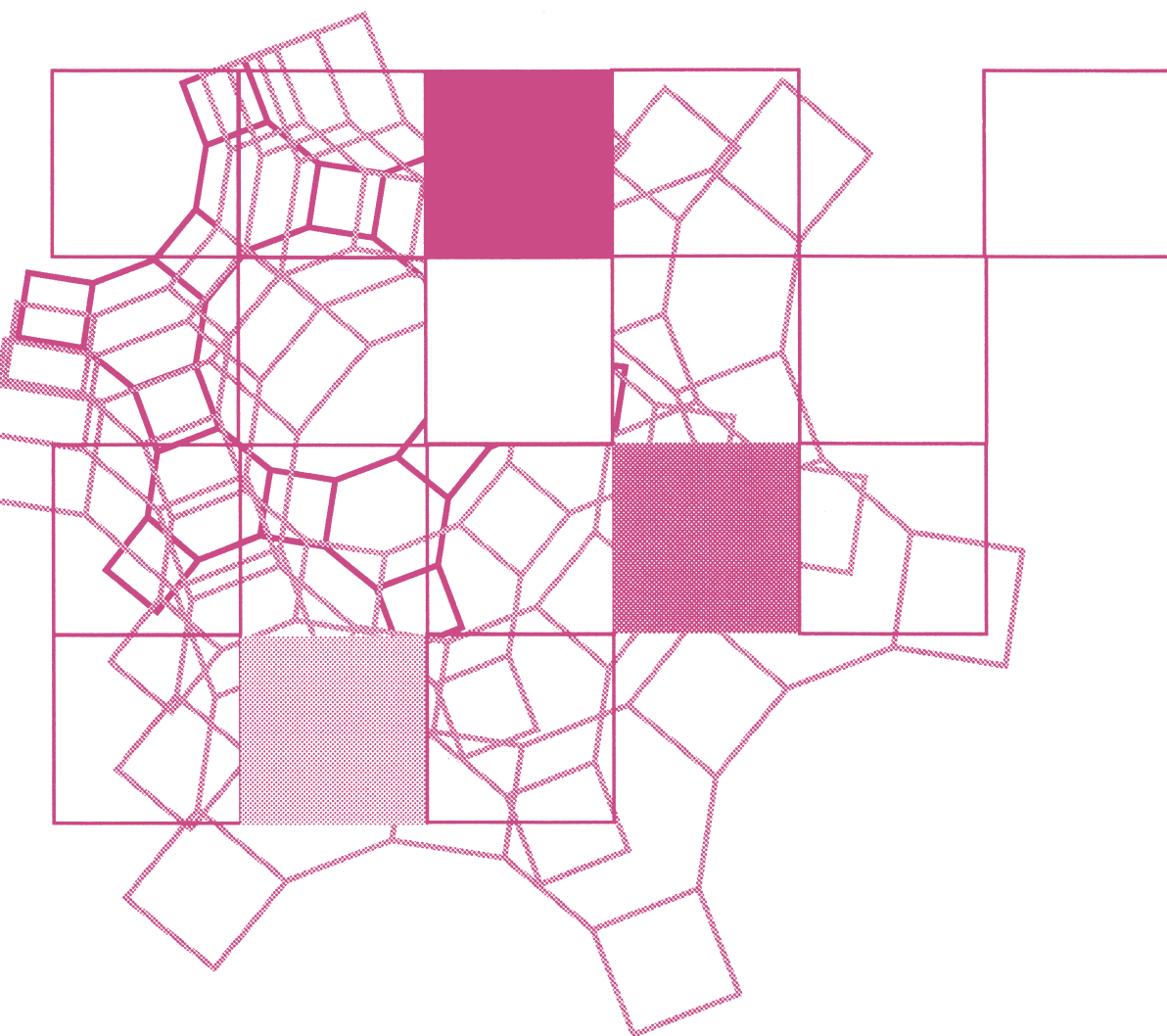


Vol.38
No.2
2021

ゼオライト



日本ゼオライト学会
Japan Zeolite Association

目 次

解 説 MOF 合成における結晶転換法の可能性
.....田中俊輔 ...31

レポート (41) お知らせ (42) 法人会員名簿 (47)

《 解 説 》

MOF 合成における結晶転換法の可能性

田中俊輔

MOF に関する研究が飛躍的に進む背景には、MOF の組成・構造の多様化ばかりでなく、合成方法の多様化、生産技術の効率化の進展がみられる。多くの MOF 合成は異なる分野の技術に着想を得て、独自の製造工程の確立ならびに機能開拓が進められている。金属イオンと有機配位子の自己組織化を利用する通常の液相プロセスによる MOF 合成に対して、本稿では非多孔質な結晶性金属源あるいはガラス相の錯体前駆体を結晶転換する方法（「メカノケミカル法」、「気相輸送法」、「噴霧乾燥法」）について紹介する。

キーワード：金属有機構造体、メカノケミカル法、気相輸送法、噴霧乾燥法、結晶転換、階層構造

1. はじめに

金属有機構造体 (metal-organic frameworks: MOF) は、均一な細孔径分布と構造・組成の多様性を備えており、ガス貯蔵、分離、触媒、ドラッグデリバリーとしての幅広い用途展開が期待されている。MOF のもっとも一般的な合成手法はソルボサーマル法や水熱合成法であり、数ミリグラム～数グラム程度のラボスケールの合成が報告の多くを占める¹⁻⁵⁾。これらの手法では、金属塩と有機配位子を溶解した原料溶液を耐圧反応容器に密閉、加熱して、微結晶の析出と成長を促し、生成物を沈殿させて得る。このように高温高压の溶媒を反応場として用いる湿式化学プロセスは工業的に広く用いられる方法であるが、生産性の向上を目指して反応容器を大型化すれば、単位体積当たりの伝熱面積や混合性能などが変化することにより、所望のスケールまでスケールアップできず限界に至ったり、反応率や選択性が低下したりする。たとえスケールアップが達成されたとしても、反応時間の短縮化、消費エネルギーならびに溶媒使用量の削減、生成物と溶媒の分離・回収の効率化など多くの課題を解決しなければならない。これに対して、有機合成やゼオライト合成に適用実績のあるマイクロ波加熱が MOF 合成にも導入

され、反応速度の大幅な加速や収率向上などの効果が報告されている⁶⁻⁹⁾。MOF を工業的に製造するためには、溶媒使用量を低減あるいは無溶媒にしたり、高温高压の過酷な処理条件を回避したり、バッチスケールの処理から連続処理へ切り替えたりするなどして、歩留まり性と汎用性の高いプロセスを確立する必要がある。これまでに、ソノケミストリーやメカノケミストリー、フローケミストリーなどの工学的応用によって、MOF の構造・組成ばかりでなく、MOF の合成手法も多様化している¹⁰⁻¹⁸⁾ (Fig. 1)。本稿では、「無溶媒のメカノケミカルプロセス (固固反応)」、「気相供給のドライプロセス (気固反応)」、「噴霧乾燥のエアロゾルプロセス (気液反応)」に注目して、金属酸化物の結晶構造あるいは金属イオン／配位子のガラス相を MOF に結晶転換させる合成方法について、それぞれの合成方法独自の生成物の特徴とともに解説する。

2. メカノケミカル法による MOF 合成

メカノケミカル法は、機械的な力を用いて化学結合を活性化し、固体の物理化学的性質を変化させ、化学反応を誘発させて固体間の反応を短時間かつ高収率で促進することができるため、幅広い分野で応用されている。冶金、メカニカルアロイングや鉱物処理におけるメカノケミカル効果は古くからよく知られているが、ここ数十年間におけるメカノケミストリーの進展は触媒、無機化学および製薬合成の分野にまで広がり、その有用性が再発見されている^{19,20)}。

MOF の合成におけるメカノケミカル法は、大き

受理日：2021 年 1 月 29 日

関西大学環境都市工学部エネルギー・環境工学科

〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35

E-mail: shun_tnk@kansai-u.ac.jp

Copyright © 2021 Japan Zeolite Association All Rights Reserved.

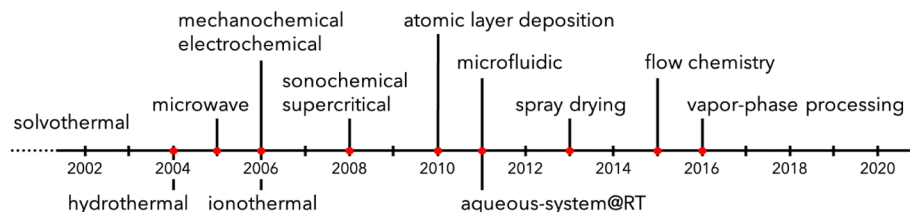


Fig. 1. Timeline of the most common methods developed for MOF synthesis.

く分けて三つの系統に分類される²¹⁾。一つは、無溶媒法であり、溶媒をまったく使用しない方法である。これは、出発原料である金属源と有機配位子の固体混合物を混練する操作であり、もっとも単純であるが、合成できるMOFが限られており、非多孔性の生成物や非晶質化をもたらす場合もある。これに対して、溶媒の存在は、金属イオンおよび有機配位子の物質移動を促進し、所望の配位反応を完結させるのに有効であり、ごく微量の溶媒を添加する liquid-assisted grinding (LAG) 法が提案されている。さらに、溶媒とともに微量のイオン性物質を添加して、MOF生成を促進させる ion- and liquid-assisted grinding (ILAG) 法がある。LAGやILAG法において、添加物は金属源と有機配位子の反応性を向上させるだけでなく、細孔充填剤として作用することによって、形成したMOFの非晶質化を抑制することが実証されている。メカノケミカル法によるMOF合成では、金属塩や金属炭酸塩、金属酸化物、金属水酸化物、金属単体など多様な金属源を用いることができ、MOF-5²²⁾、HKUST-1²³⁻²⁵⁾、MOF-74^{26,27)}、pillared MOF^{28,29)}、ZIF³⁰⁻³⁵⁾、UiO-66³⁶⁾ など、多くの主要なMOFを短時間で定量的に合成できる。

2.1 酸化亜鉛からの結晶転換(固固反応)

メカノケミカル法によるMOF合成の初報では、酢酸銅(II)一水和物とisonicotinic acid (Hina)の固体混合物を無溶媒条件下で混練することによって、副生する酢酸と水分子が細孔内に充填されたCu(ina)₂ (ina = isonicotinate)を合成できることが報告された³⁷⁾。従来のソルボサーマル法によるCu(ina)₂の合成では、高温(150℃)かつ長時間(48時間)の反応を要するのに対して、メカノケミカル法では室温で10分以内に合成され、経済的かつ低環境負荷型のMOF合成法の一つとして、メカノケミカル法の優位性が示された。同様の手順で、HKUST-1 (Cu₃(btc)₂; btc = 1,3,5-benzenetricarboxylate)の合成

も報告されている。溶媒を添加しない合成条件であるが、低融点の配位子の融解および反応によって副生する水などが物質移動を促進し、反応を進行させると考えられている。

メカノケミカル法の大きな特徴の一つとして、溶媒に溶けにくい金属酸化物を出発原料として利用できることが挙げられる。筆者らはZnOのナノ粒子(平均一次粒子径24 nm)を用いて固相反応の界面積を増大させることによって、ZnOと2-methylimidazoleからZIF-8を無溶媒で合成できることを実証した³³⁾。副生成物は水のみであり、固液分離を必要としないため生成物のロスが少なく、大量生産が可能であるため、工業化にも適している。メカノケミカル法では、ZIF-8は微粒子の集合体で得られ、不定形であり、従来の単結晶体に見られるような特定の結晶面を電子顕微鏡で観察することはできない。また、無溶媒条件でメカノケミカル合成した場合、ZnOの20%程度が未反応で残存する。これは、ZnOからZIF-8への結晶転換において、①ZnOナノ粒子の凝集体の解砕、②錯形成反応によるZIF-8生成およびZIF-8によるZnO粒子表面の被覆、③粒子の凝集化が並行して進行するためであると考えられる(Fig. 2)。②および③のZnO粒子表面へのZIF-8被覆と生成粒子の凝集がある程度進行すると、凝集粒子内部にZnOが残存し、ZnOのZIF-8への結晶転換が抑制される。一方、ZnOを含む生成物質量あたりの表面積(～1500 m²/g)は、従来の単結晶体と同等であり、見た目はアモルファス状であるが、細孔特性という観点からは結晶性が良好なZIF-8が得られていることが確認されている。

2.2 階層構造化と吸着特性

固体間の単純な物理的混合のみでは反応が起こらない場合、溶媒および塩触媒を添加したり、機械的な力を増大させたり、加熱したりして反応を促進させなければならない。また、MOFが生成したとし

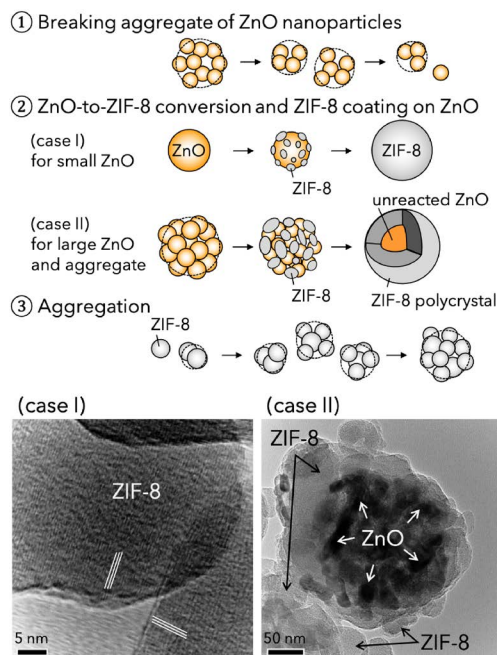


Fig. 2. Schematic illustration of the proposed mechanism for mechanochemical dry conversion of ZnO to ZIF-8. (case I) The isolated ZnO nanoparticles were completely converted into ZIF-8. (case II) The aggregates of ZnO nanoparticles remained partially unreacted and ZIF-8 crystals were formed on the surface.

でも、機械的な力によって非晶質化する場合もあり、最適な操作条件を検討する必要がある。ZnOからZIF-8への結晶転換を促進させるためにイオン性物質や有機溶媒を添加するILAG法が有効である³⁸⁾。これに対して、筆者らはZnOからZIF-8を無溶媒で合成する際に、酢酸亜鉛を添加(亜鉛源全量の10 mol%)することによってZnOのZIF-8への転換の促進と反応時間の大幅な短縮を可能にした³⁴⁾。反応中に副生する水および酢酸が物質移動を促すとともに、逐次的に副生する酢酸がZnOを溶解することによってZIF-8の生成が促進されることを明らかにした。酢酸亜鉛に代えて酢酸コバルトを用いれば、ZnとCoからなる二元金属のZIFを合成することもできる³⁵⁾。酢酸塩を添加する本手法は、粉粒体のみを原料とするためILAG法に比べて操作しやすい。また、酢酸塩の添加は、ZIF-8粒子を樹状構造化させ、均一なメソおよびマクロ間隙を形成させるとともに、結晶欠陥とみられるミクロ孔も発達す

ることを明らかにした(Fig. 3)。得られるZIF-8粒子の二次粒子径は大きいながらも、このように階層化された構造によって拡散距離が低減されることから、溶液法で調製した粒子径の小さい六面体および十八面体のZIF-8(6ZIF-8, 18ZIF-8)単結晶に比して*n*-butanolや*n*-hexaneなど有機物の吸着速度において優位性をもつ(Fig. 4)。

2.3 メカノケミカル法による連続フロー合成

一般的にメカノケミカル法では、ボールミルが使用される。回転式のボールミルに対して、遊星ボールミルでは二つの回転軸、すなわち反応容器の自転とターンテーブルの公転を組み合わせて、強い遠心力を作用させ、反応時間を短縮することができる。大量生産に対して、大型の工業用ボールミルや遊星ボールミルを使用した研究が行われているが、生成物の回収において装置の運転停止時間が長いことなどの課題がある。

Crawfordらはaluminum fumarate, HKUST-1, およびZIF-8などのMOFのメカノケミカル合成に押出成形プロセスを適用した^{39,40)}。押出成形は、冶金、プラスチック、食品、医薬品などの産業で使用される連続加工技術である。押出成形機にはバレルと称される筒の中に材料を運搬するスクリーフィーダーがある。スクリーウの回転によって押し出される材料はバレルの内側で剪断応力を受ける。また、バレル外部からの加熱によって、材料を熱処理することもできる。aluminum fumarateは、硫酸アルミニウム、水酸化ナトリウム、およびフマル酸を150℃に加熱しながら押し出すことによって連続合成された。HKUST-1は、メタノールの存在下で水酸化銅と1,3,5-benzenetricarboxylic acidを押し出すことによって連続合成された。ZIF-8は、炭酸亜鉛および2-methylimidazoleを添加物なしで200℃に加熱しながら押し出すことによって連続合成された。押出成形プロセスは、低環境負荷かつ高い空時収量でMOFを連続生産できる方法として有望である。

3. 気相輸送法によるMOF合成

3.1 酸化亜鉛からの結晶転換(気固反応)

金属酸化物や金属単体などの金属源と有機配位子との配位結合生成の活性化エネルギーを超えられるならば、その手段は機械的エネルギーを利用するメカノケミカル法に制限されるものではない。筆者

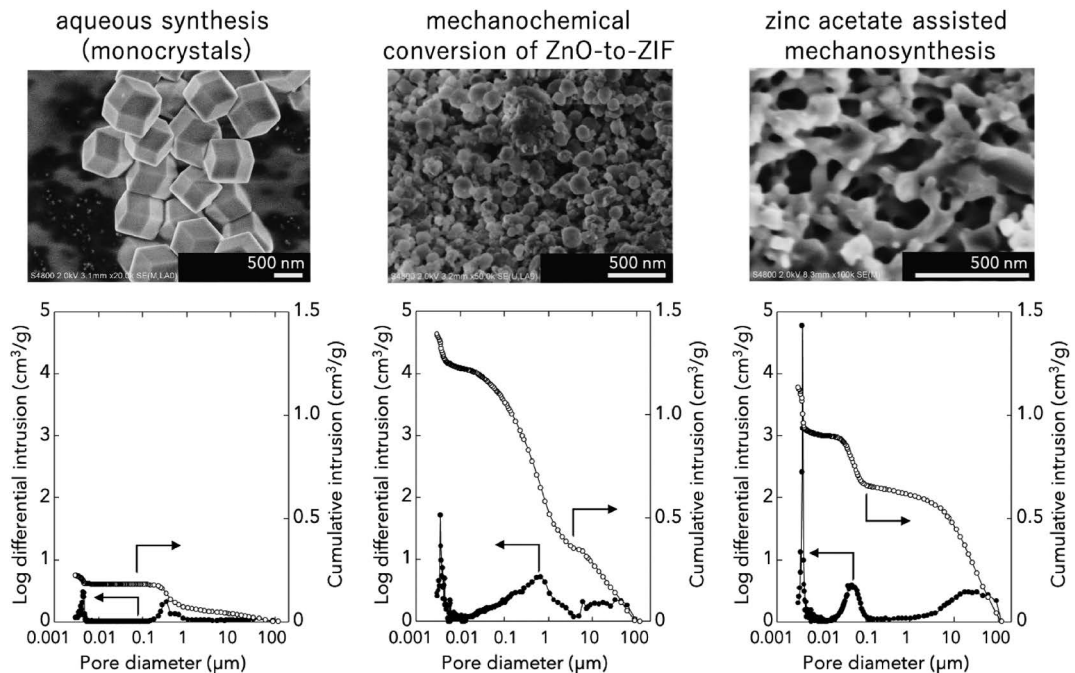


Fig. 3. SEM images and pore size distributions (mercury intrusion porosimetry) of conventional monocrystalline ZIF-8 and mechanosynthesized ZIF-8.

ら⁴¹⁾ および Stassen ら^{42,43)} は 2-methylimidazole を気相で供給する気固反応に注目した。Stassen らは原子層堆積 (atomic layer deposition: ALD) 法を利用して ZnO の極薄膜を平滑基板上に作製し、それを 100℃ で 2-methylimidazole 蒸気に暴露することによって ZIF-8 薄膜に転換する MOF-CVD プロセスを提案、実証した。ALD プロセスでは、240℃ において①前駆体の diethylzinc の投入、②パージ、③前駆体のプラズマ酸素の投入、④パージのサイクルを繰り返すことによって原子層を一層ずつ堆積させて、膜厚 3, 6, 15 nm の ZnO を作製した。MOF-CVD プロセスによって、膜厚 3 および 6 nm の ZnO はそれぞれ膜厚 52 および 104 nm の ZIF-8 に転換された。およそ 17 倍の膜厚増加は ZnO と ZIF-8 の結晶内 Zn のモル体積比 (ZnO: 14.3 cm³/mol-Zn, ZIF-8: 239.9 cm³/mol-Zn) とよく一致する (eq. (1))。一方、膜厚 15 nm の ZnO の MOF-CVD プロセスによる膜厚変化は 124 nm に留まった。これは、ZnO の膜深さ方向に均一に ZIF-8 に転換されず、基板界面付近に未反応の ZnO が残存したことに起因する。一方、筆者らは長軸が長く (3.3 μm)、短軸がナノサイズ (50 nm) の ZnO ナノロッドアレイ膜を金属源として、ZIF-8 の厚膜 (マ

イクロフィルム) を作製した (Fig. 5)。気相輸送法による MOF 合成は、Tsapatsis らによって多孔質支持体上への製膜に拡張され、膜分離にも展開された⁴⁴⁾。気相法は一旦合成した MOF の骨格構造を維持しつつ表面修飾したり、多様な官能基を導入したりする後処理法としても期待される。

$$\text{volume expansion} = \frac{M_{\text{ZIF-8}}}{M_{\text{ZnO}}} \frac{\rho_{\text{ZnO}}}{\rho_{\text{ZIF-8}}} \quad (1)$$

M : molecular weight, ρ : physical density

3.2 結晶転換における結晶面方位依存性

気相輸送法による MOF 合成では有機配位子の拡散過程が律速段階になる。また、金属酸化物の表面を被覆するように MOF が生成することによって、結晶転換は自己抑制される。そのため、有機配位子の拡散距離を短縮させるように極めて薄い固相の前駆体を用いることが重要である。それゆえ、気相法によって得られる MOF も自ずと極薄層の形態にならざるを得ない。

筆者らはバルク状 ZnO 単結晶基板を用いて、ZnO の結晶面方位が 2-methylimidazole との気固反応に及ぼす影響について調べた⁴⁵⁾。六方晶系ウルツ鉱構

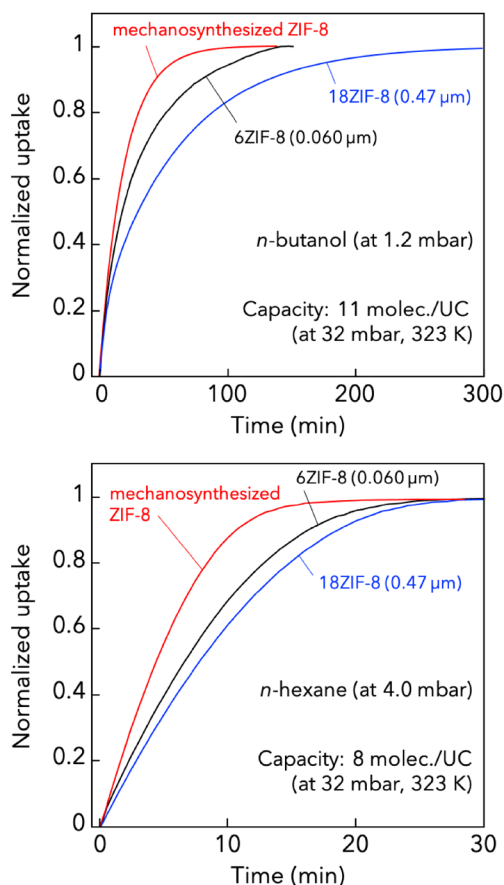


Fig. 4. Uptake curves of *n*-butanol and *n*-hexane by conventional monocrystalline ZIF-8 (6ZIF-8 and 12ZIF-8) and mechanosynthesized ZIF-8.

造をもつ ZnO は、[0001] 方向に亜鉛と酸素原子層を交互に繰り返す⁴⁶⁾。亜鉛と酸素の二種類の終端面から構成される (0001) 面において、ZnO は ZIF-8 にほとんど結晶転換されなかった。これに対して、非極性方位に相当する (10-10) および (11-20) 面では ZIF-8 の生成が確認され、結晶転換の反応性が結晶面方位に依存して異なることを明らかにした (Fig. 6)。ZnO ナノ粒子 (平均一次粒子径 24 nm) に 2-methylimidazole を気相で供給し、結晶転換させると ZnO の一部は未反応のまま残存するのに対して、ZnO ナノロッドアレイ膜はその軸径 (50 nm) も膜厚 (3.3 μm) も ZnO ナノ粒子に比べて大きいにも関わらず、ZnO は残存せず ZIF-8 に結晶転換された (Fig. 5)。ZnO を [0001] 方向に異方成長させることによって、露出表面が 2-methylimidazole と反応しやす

い非極性面で支配されたため、ZIF-8 への結晶転換が促進されたと考えられる。また、気相輸送法で得られた ZIF-8 マイクロフィルムは高い比表面積 (1730 m^2/g) と細孔容積 (0.61 cc/g) を有し、ヘキサン異性体の吸着において効率よく直鎖炭化水素と分枝上炭化水素をふるい分けることが確認された。

4. 噴霧乾燥法による MOF 合成

噴霧乾燥 (スプレードライ) 法は、食品、医薬品、化学産業における乾燥粉末生産に幅広く利用されている。噴霧乾燥法では、高速あるいは加圧気流下で溶液を霧状の液滴として微粒化し、熱風気流中で溶媒を急速に蒸発させる。液滴は表面積を最小にするように球形となり、瞬時に乾燥されるため、残存する固体成分は高い球形度を保って乾燥粒子を形成し、気流から分離回収される。噴霧乾燥法による粉末調製は、基本的に①噴霧、②液滴乾燥/粒子形成、③粒子回収の工程から構成される。噴霧工程では、高い表面对体積比をもつ液滴に微粒化される。噴霧ノズルの設計は、液滴の粒度分布や処理量を決定する上で重要である。

Carné-Sánchez らは噴霧乾燥法を初めて MOF 合成に適用した⁴⁷⁾。工業的な MOF 製造プロセスの実現可能性を重視すると、①多くの MOF に対して汎用性に優れた合成装置であること、②生産性に優れた連続運転可能なフローシステムであること、③設備投資の経済性に優れ、管理・運用負担が低いことを考慮すべきであり、スプレードライヤーはこれらの要件に合致するものである。液滴乾燥過程において、液滴表面からの溶媒蒸発によって MOF 前駆体の濃度が上昇し、それに伴って金属イオンと有機配位子の自己集合が誘発されて MOF 粒子の生成が起こる。MOF 一次粒子の集合体として得られる噴霧乾燥顆粒には、中空や陥没構造をもつ顆粒がしばしば観察される。一次粒子の濃度や乾燥速度の影響を受けて、霧化した液滴が乾燥によって収縮する一方、液滴内部の一次粒子が液滴表面付近に集まり外殻を形成する場合に中空構造が形成される。これに対して、噴霧前に流通式反応器で核生成と粒子成長を促進させて、高粒子濃度の液滴を噴霧乾燥した場合には中実顆粒が得られやすい。Carné-Sánchez らの報告に続き、Mitsuka ら⁴⁸⁾や Kubo ら⁴⁹⁾により類似の噴霧乾燥法が報告された。Mitsuka らは、異なる

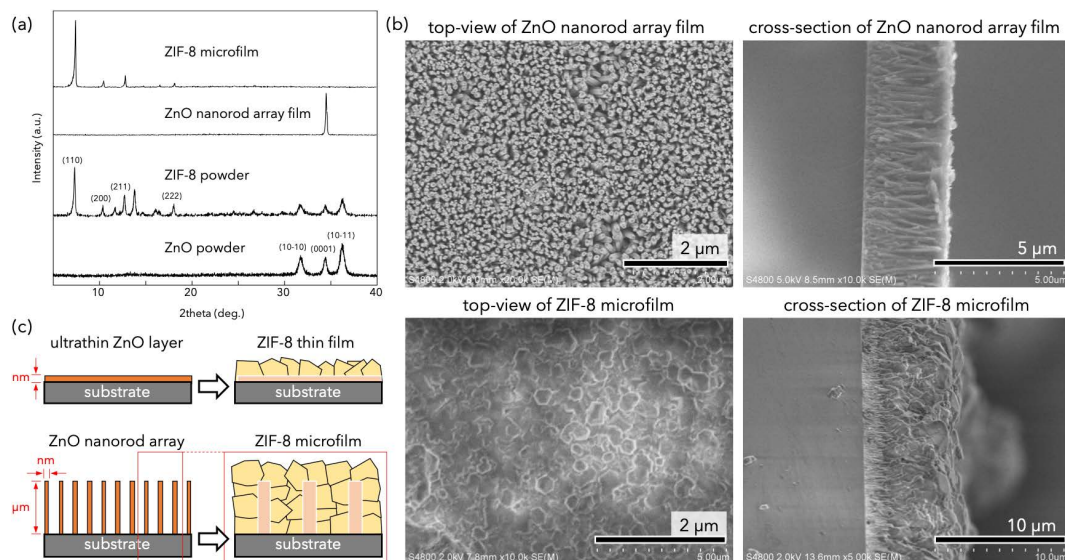


Fig. 5. Vapor phase transport synthesis of ZIF-8 microfilm from ZnO nanorod array film. XRD patterns of ZIF-8 prepared from ZnO precursor (a). ZnO nanorods were more easily transformed into ZIF-8 in the presence of 2-methylimidazole vapor compared to ZnO powder. SEM images of top-view and cross-section of ZnO nanorod array film and ZIF-8 microfilm (b). Schematic illustration of ZnO to ZIF-8 crystal conversion (c).

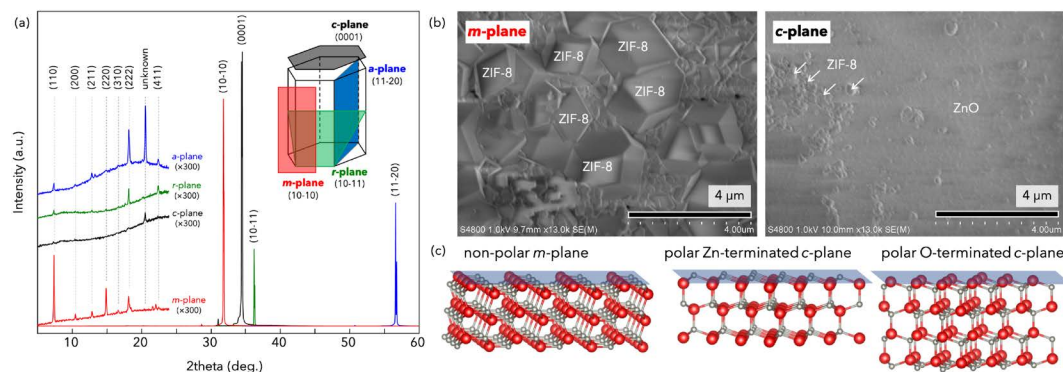


Fig. 6. XRD patterns showing the dependence of ZnO crystal plane on ZnO to ZIF-8 crystal conversion (a). SEM images of ZIF-8 transformed from bulk ZnO single crystals (b). ZIF-8 crystals were formed on the nonpolar planes, whereas ZIF-8 was hardly formed on the polar plane. In addition, among the polar planes, the ZnO-to-ZIF-8 conversion on the *m*-plane (10-10) was the highest. ZnO crystallizes in hexagonal wurtzite. The surface of ZIF-8 nanorod array is mostly dominated by *m*-plane (10-10). Stick-and-ball representations of the hexagonal wurtzite ZnO structure, where O is shown in red and Zn in gray (c).

二種類の有機配位子を構成要素とするCID-1 ($\text{Zn}_2(\text{ip})_2(\text{bpy})_2$, ip = isophthalate, bpy = 4,4'-bipyridine) の合成に噴霧乾燥条件を最適化した。Kuboらは噴霧乾燥法によるHKUST-1の合成において、銅塩の種類が及ぼす影響を報告した。

4.1 水系噴霧乾燥と結晶転換(アモルファス化と結晶化)

上述のいずれの合成条件も、Carné-Sánchezらの報告に倣い、前駆体溶液に有機溶媒(主に、PRTR法において第1種指定化学物質、REACH規制において制限対象物質に指定される*N,N*-dimethylfor-

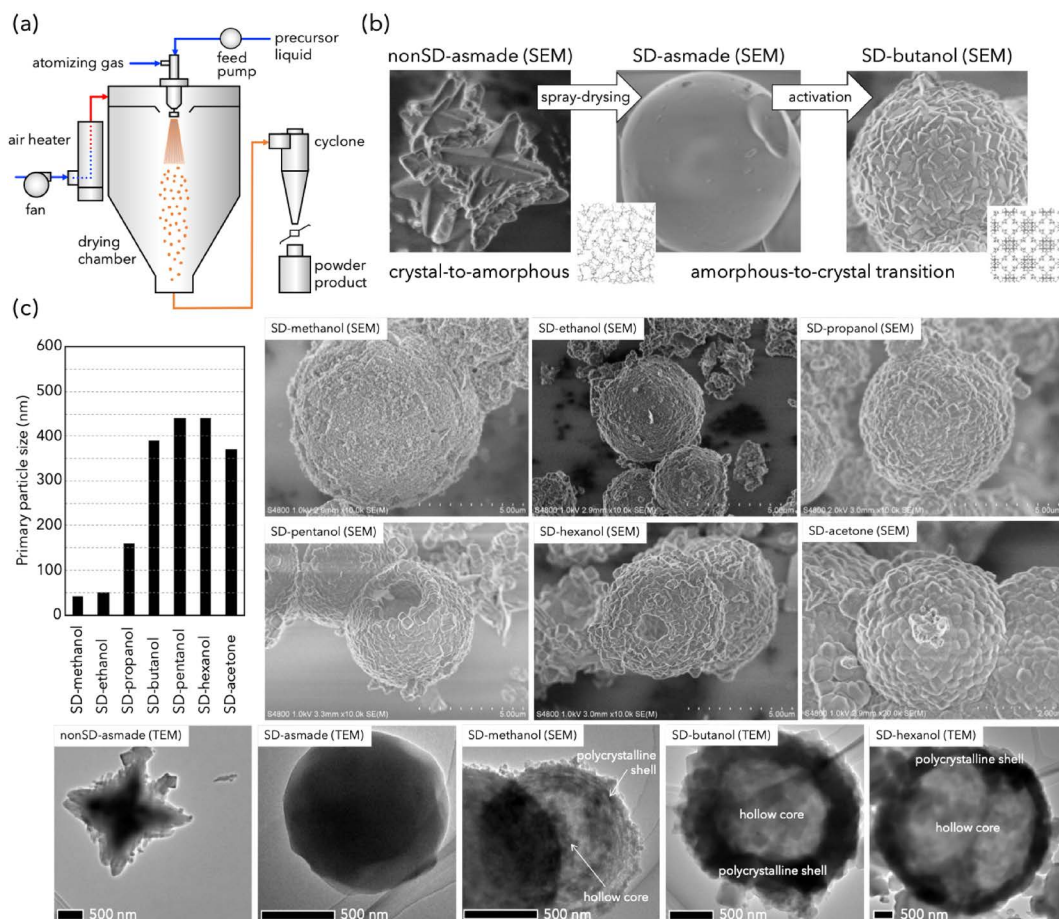


Fig. 7. Schematic of the spray drying setup (a). Aqueous-system enabled spray drying for the synthesis of hollow polycrystalline ZIF-8 particles (b). Average primary crystal size, SEM and TEM images of hollow polycrystalline ZIF-8 particles, SD-*x* (c). *x* denotes the organic solvent used for activation.

amide (DMF))を含む。これに対して、筆者らは前駆体溶液の溶媒を水に限定した噴霧乾燥法によるZIF-8合成について検討した⁵⁰⁾。水溶媒中で酢酸亜鉛と2-methylimidazoleをZIF-8 (Zn (2-methylimidazole)₂)骨格の組成比で反応させると数十秒で白濁し、懸濁液が得られる。このとき懸濁液中に含まれる一次粒子(nonSD-asmade)は、多孔性のZIF-8ではなく、十字形の特徴的な形状をもつ非多孔性の結晶である(Fig. 7)。この懸濁溶液を噴霧乾燥すると、興味深いことにnonSD-asmadeは非晶質化され、平滑な粒子表面をもつ中空実球(SD-asmade)が得られる。SD-asmadeは酢酸を含み、亜鉛に配位している2-methylimidazoleとフリーで存在している2-methylimidazoleが共存する。液滴乾燥過程で酢酸が濃縮され

て残存し、nonSD-asmade結晶内の配位結合(Zn-2-methylimidazole)が切断されることによって、結晶相からガラス相に転移する。SD-asmadeを少量の有機溶媒に浸漬(SD-*x*: *x*は用いた有機溶媒)あるいは有機溶媒の蒸気にさらすと、ガラス相から結晶相のSOD構造に転移する。顆粒の構造にも特徴があり、噴霧乾燥後のSD-asmadeは中空実球であるが、SD-*x*は微細なZIF-8結晶がインターグロースした外殻構造をもつ中空顆粒であり、有機溶媒の種類によって一次粒子の大きさを制御できる(Fig. 7)。

4.2 多結晶粒子の吸着特性

SD-*x*の平均二次粒子径は、噴霧液滴径に依存して決まり、3.9 μm と大きい。それを構成する微結晶の大きさ(40~440 nm)が小さいため、*n*-hexane

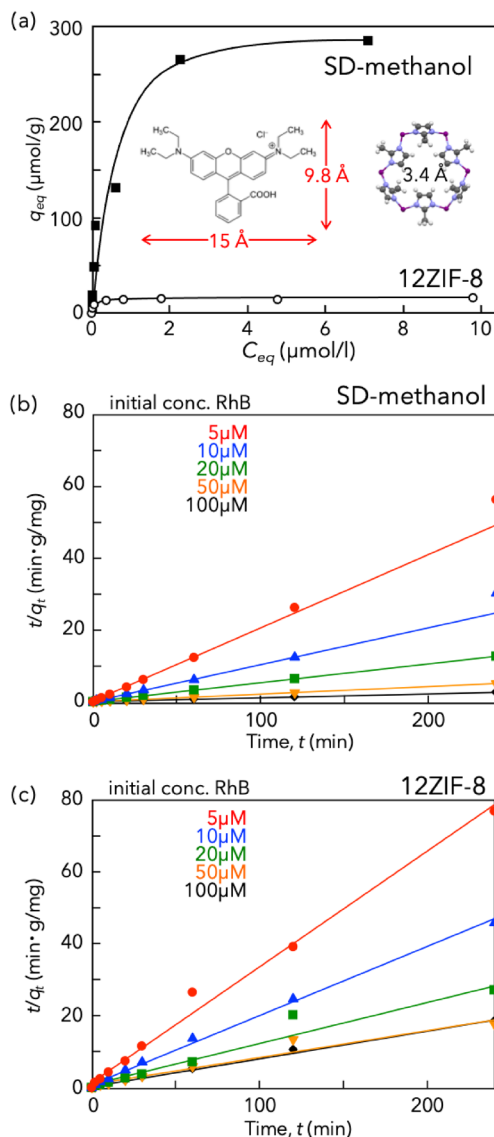


Fig. 8. Adsorption isotherms of rhodamine B (RhB) on monocrystalline ZIF-8 (12ZIF-8) and polycrystalline ZIF-8, SD-methanol (a). The kinetic adsorption performance of RhB on ZIF-8 can be well-described by a pseudo-second-order kinetic model (b and c).

など有機物の吸着速度に優れる。さらに、多結晶粒子化されたZIF-8は、その開口径ならびにケージ径 (1.16 nm) からはZIF-8には吸着し得ないバルキークな化合物であるローダミンB (RhB) ($4.3 \times 9.8 \times 15 \text{ \AA}$) を吸着することができる (Fig. 8)。SD-methanolのRhB吸着量は、溶液法で調製した十二面体のZIF-8 (12ZIF-8) 単結晶に比して、およそ19倍を示

した。また、ZIF-8によるRhBの吸着速度過程は擬二次吸着モデルにより定量的に評価され (eqs. (2) ~ (4)), SD-methanolの吸着速度 ($17.2 \mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{min})$) は12ZIF-8 ($2.70 \mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{min})$) よりもはるかに大きいことが示された。噴霧乾燥法を用いて得られるSD-xは、多数の微結晶から構成され、結晶間隙と中空構造をもつため、RhBの吸着容量ならびに吸着速度が向上したと考えられる。

$$\frac{dq_t}{dt} = k(q_{eq} - q_t)^2 \quad (2)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{kq_{eq}^2} + \frac{1}{q_{eq}} t \quad (3)$$

$$H = kq_{eq}^2 \quad (4)$$

k : pseudo-second-order rate constant,

H : initial adsorption rate

5. おわりに

MOFの合成は、既存の多孔質材料に比べて、多種多様な経路が提案されており、より容易に効率よく合成できることは工業的応用に寄与すると期待される。本稿では、MOFの工業的製造法として筆者が注目する「メカノケミカル法」、「気相輸送法」、「噴霧乾燥法」を取り上げ、結晶-結晶間および非晶質-結晶間の転換によるMOF合成について解説した。これまでに合成されたMOFの結晶構造は2万種以上とも言われるが、特に、結晶以外の相 (ガラス相や液相) に関する研究は未だ少ない。結晶転換を理解し、ガラス相から結晶相へ、またその逆への相転移を制御できれば、粒子や膜、繊維状など材料の形態を制御したり、異種材料と複合化したりすることが期待できる。組成および結晶構造の制御に加えて、粒子径や形態の制御、高次構造化や複合構造化による吸着・分離機能の精密制御の可能性が広がっており、MOFに関する研究開発は今後も飛躍的に進展するであろう。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費助成事業 (18K18983, 25790019), 科学技術振興機構事業研究成果最顕著展開支援プログラム A-STEP 機能検証フェーズ, 公益財団法人矢崎科学技術振興記念財団, 一般財団法人サクラ環境科学財団の助成を受けて実施されました。

参考文献

- 1) H. Li, M. Eddaoudi, M. O'Keeffe, O. M. Yaghi, *Nature*, **402**, 276 (1999).
- 2) C. Serre, F. Millange, C. Thouvenot, M. Noguès, G. Marsolier, D. Louër, G. Férey, *J. Am. Chem. Soc.*, **124**, 13519 (2002).
- 3) K. S. Park, Z. Ni, A. P. Côté, J. Y. Choi, R. Huang, F. J. Uribe-Romo, H. K. Chae, M. O'Keeffe, O. M. Yaghi, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **103**, 10186 (2006).
- 4) C. Serre, C. Mellot-Draznieks, S. Surblé, N. Audebrand, Y. Filinchuk, G. Férey, *Science*, **315**, 1828 (2007).
- 5) R. Banerjee, A. Phan, B. Wang, C. Knobler, H. Furukawa, M. O'Keeffe, O. M. Yaghi, *Science*, **319**, 939 (2008).
- 6) Z. Ni, R. I. Masel, *J. Am. Chem. Soc.*, **128**, 12394 (2006).
- 7) S. H. Jung, J. -H. Lee, P. M. Forster, G. Férey, A. K. Cheetham, J. -S. Chang, *Chem. Eur. J.*, **12**, 7899 (2006).
- 8) J. S. Choi, W. J. Son, J. Kim, W. S. Ahn, *Micropor. Mesopor. Mater.*, **116**, 727 (2008).
- 9) N. A. Khan, E. Haque, S. H. Jung, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **12**, 2625 (2010).
- 10) S.-H. Jung, J.-H. Lee, J.-S. Chang, *Bull. Korean Chem. Soc.*, **26**, 880 (2005).
- 11) J.-H. Liao, P.-C. Wu, W.-C. Huang, *Cryst. Growth Des.*, **6**, 1062 (2006).
- 12) U. Mueller, M. Schubert, F. Teich, H. Puetter, K. Schierle-Arndt, J. Pastréa, *J. Mater. Chem.*, **16**, 626 (2006).
- 13) A. P. Nelson, O. K. Farha, K. L. Mulfort, J. T. Hupp, *J. Am. Chem. Soc.*, **131**, 458 (2008).
- 14) W.-J. Son, J. Kim, J. Kim, W.-S. Ahn, *Chem. Commun.*, **47**, 6336 (2008).
- 15) K. Yussenko, M. Meilikhov, D. Zacher, F. Wieland, C. Sternemann, X. Stammer, T. Lahnorg, C. Woll, R. A. Fischer, *CrystEngComm*, **12**, 2086 (2010).
- 16) R. Ameloot, F. Vermoortele, W. Vanhove, M. B. J. Roeffaers, B. F. Sels, D. E. De Vos, *Nature Chem.*, **3**, 382 (2011).
- 17) J. J. Zhao, M. D. Losego, P. C. Lemaire, P. S. Williams, B. Gong, S. E. Atanasov, T. M. Blevins, C. J. Oldham, H. J. Walls, S. D. Shepherd, M. A. Browe, G. W. Peterson, G. N. Parsons, *Adv. Mater. Interfaces*, **1**, 1400040 (2014).
- 18) M. Rubio-Martinez, C. Avci-Camur, A. W. Thornton, I. Imaz, D. Maspoch, M. R. Hill, *Chem. Soc. Rev.*, **46**, 3453 (2017).
- 19) S. L. James, C. J. Adams, C. Bolm, D. Braga, P. Collier, T. Frisčić, F. Grepioni, K. D. M. Harris, G. Hyett, W. Jones, A. Krebs, J. Mack, L. Maini, A. G. Orpen, I. P. Parkin, W. C. Shearouse, J. W. Steed, D. C. Waddell, *Chem. Soc. Rev.*, **41**, 413 (2012).
- 20) J. L. Do, T. Frisčić, *ACS Cent. Sci.*, **3**, 13 (2017).
- 21) T. Frisčić, *J. Mater. Chem.*, **20**, 7599 (2010).
- 22) D. Lv, Y. Chen, Y. Li, R. Shi, H. Wu, X. Sun, J. Xiao, H. Xi, Q. Xia, Z. Li, *J. Chem. Eng. Data*, **62**, 2030 (2017).
- 23) A. Pichon, S. L. James, *CrystEngComm*, **10**, 1839 (2008).
- 24) M. Schlesinger, S. Schulze, M. Hietschold, M. Mehring, *Micropor. Mesopor. Mater.*, **132**, 121 (2010).
- 25) M. Klimakow, P. Klobes, A. F. Thunemann, K. Rademann, F. Emmerling, *Chem. Mater.*, **22**, 5216 (2010).
- 26) Y. Jia, C. Sun, Y. Peng, W. Fang, X. Yan, D. Yang, J. Zou, S. Mao, X. Yao, *J. Mater. Chem. A*, **3**, 8294 (2015).
- 27) P. A. Julien, K. Užarević, A. D. Katsenis, S. A. J. Kimber, T. Wang, O. K. Farha, Y. Zhang, J. Casaban, L. S. Germann, M. Etter, R. E. Dinnebier, S. L. James, I. Halasz, T. Friščić, *J. Am. Chem. Soc.*, **138**, 2929 (2016).
- 28) T. Frisčić, L. Fabian, *CrystEngComm*, **11**, 743 (2009).
- 29) I. Halasz, T. Friščić, S. A. J. Kimber, K. Užarević, A. Puškarić, C. Mottillo, P. Julien, V. Štrukil, V. Honkimäki R. E. Dinnebier, *Faraday Discuss.*, **170**, 203 (2014).
- 30) M. J. Cliffe, C. Mottillo, R. S. Stein, D. K. Bučarb, T. Frisčić, *Chem. Sci.*, **3**, 2495 (2012).
- 31) T. Frisčić, D. G. Reid, I. Halasz, R. S. Stein, R. E. Dinnebier, M. J. Duer, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **49**, 712 (2010).
- 32) C. Mottillo, Y. Lu, M. H. Pham, M. J. Cliffe, T. O. Do, T. Friščić, *Green Chem.*, **15**, 2121 (2013).
- 33) S. Tanaka, K. Kida, T. Nagaoka, T. Ota, Y. Miyake, *Chem. Commun.*, **49**, 7884 (2013).
- 34) S. Tanaka, T. Nagaoka, A. Yasuyoshi, Y. Hasegawa, J. F. M. Denayer, *Cryst. Growth Des.*, **18**, 274 (2018).
- 35) K. Imawaka, M. Sugita, T. Takewaki, S. Tanaka, *Polyhedron*, **158**, 290 (2019).
- 36) K. Užarević, T. C. Wang, S. Y. Moon, A. M. Fidelli, J. T. Hupp, O. K. Farha, T. Friščić, *Chem. Commun.*, **52**, 2133 (2016).
- 37) A. Pichon, A. Lazuen-Garay, S. L. James, *CrystEngComm*, **8**, 211 (2006).
- 38) P. J. Beldon, L. Fábán, R. S. Stein, A. Thirumurugan, A. K. Cheetham, T. Frisčić, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **49**, 9640 (2010).
- 39) D. Crawford, J. Casaban, R. Haydon, N. Giri, T. McNally, S. L. James, *Chem. Sci.*, **6**, 1645 (2015).
- 40) D. E. Crawford, J. Casaban, *Adv. Mater.*, **28**, 5747–5754 (2016).
- 41) 田中俊輔, 触媒, **58**, 135 (2016).
- 42) I. Stassen, M. Styles, G. Greci, H. Van Gorp, W. Vanderlinden, S. D. Feyter, P. Falcato, D. D. Vos, P. Vereecken, R. Ameloot, *Nature Mater.*, **15**, 304 (2016).
- 43) I. Stassen, D. D. Vos, R. Ameloot, *Chem. Eur. J.*, **22**, 14452 (2016).
- 44) X. L. Ma, P. Kumar, N. Mittal, A. Khlyustova, P. Daoutidis, K. A. Mkhoyan, M. Tsapatsis, *Science*, **361**, 1008 (2018).
- 45) S. Tanaka, K. Sakamoto, H. Inada, M. Kawata, G. Takasaki, K. Imawaka, *Langmuir*, **34**, 7028 (2018).
- 46) C. Wöll, *Prog. Surf. Sci.*, **82**, 55 (2007).
- 47) A. Carné-Sánchez, I. Imaz, M. Cano-Sarabia, D. Maspoch, *Nature Chem.*, **5**, 203 (2013).
- 48) Y. Mitsuka, K. Nagashima, H. Kobayashi, H. Kitagawa, *Chem. Lett.*, **45**, 1313 (2016).
- 49) M. Kubo, T. Saito, M. Shimada, *Micropor. Mesopor. Mater.*, **245**, 126 (2017).
- 50) S. Tanaka, R. Miyashita, *ACS Omega*, **2**, 6437 (2017).

High Potential of Interconversion Method for MOF Synthesis

Shunsuke Tanaka

Department of Chemical, Energy and Environmental Engineering,
Faculty of Environmental and Urban Engineering, Kansai University

Behind the exponential growth in research related to metal-organic frameworks (MOF) is not only their diverse design of composition and structure, but also the diversification of synthesis methods and the improvement of efficiency of production technology. A number of MOF synthesis are inspired by useful concepts from different research field, creating new perspectives that are not extensions of existing technologies. In contrast to MOF synthesis by conventional liquid phase processing that utilize the self-assembly of metal ions and organic ligands, this paper reviews the MOF formation through crystal-to-crystal or amorphous-to-crystal interconversion process by “mechanochemical”, “vapor-phase transport”, or “spray-drying” method. Comprehension of the synthesis methods and characteristics of their unique products would contribute to develop new functional MOF.

Key words: metal-organic frameworks, mechanochemical, vapor processing, spray-drying, structural conversion, hierarchical structure

Copyright © 2021 Japan Zeolite Association All Rights Reserved.

《 レポート 》

第36回ゼオライト研究発表会の開催報告

東京大学大学院工学系研究科 河野 愛紗

第36回ゼオライト研究発表会が令和2年11月19日、20日の2日間にわたり zoomを用いたオンラインにて開催されました。全国から130名の方が参加され、例年より少ない2会場(A, B)に分かれて発表が行われました。発表の内訳は、特別講演2件、総合研究発表4件、一般研究発表48件の計54件でした。

新型コロナウイルス感染症拡大の影響によりゼオライト研究発表会初のオンライン開催となりましたが、大きなトラブルもなく、各発表後には活発な議論が行われておりました。私自身もオンライン上での学会発表は初めてでしたが、対面と変わらぬ熱量のディスカッションを通じて、自分の研究をもう一度見つめ直すことができました。

1日目の午後には2つの特別講演を行っていただきました。まずは東ソー株式会社の吉田智氏が“酸素PSA用LiLSX吸着剤の開発～企業での研究開発紹介～”という題目でご講演され、実際に東ソー株式会社で行われた吸着剤開発の流れを紹介していただきました。生産技術の確立や特許の出願はこれまで大学での研究にしか触れていなかった私にとってあまり聞いたことのない話でしたが、企業での研究と大学での研究を対比させながら説明されていた

め理解しやすく興味深いものでした。

2つ目の特別講演は早稲田大学の黒田一幸教授による“多孔体研究における無機合成化学の役割”という題目のご講演でした。黒田先生のこれまでの歩みを、“有機化学的にケイ酸塩を取り扱う”という独自の切り口で説明していただきました。有機化学・無機化学という既存の枠組みに囚われない黒田先生のご講演を聴いていると、研究における広い視野の重要性と今後のケイ酸塩研究の無限の可能性を再認識しました。

また、特別講演の後に、日本ゼオライト学会の会長である横浜国立大学の窪田好浩教授からご挨拶をいただきました。このような時代だからこそ新しい時流に乗り遅れないように、という激励のお言葉を聞いて、これからも研究活動に邁進しようという決意を新たにしました。例年とは異なる情勢下でもこのような貴重な場を企画・運営していただいた日本ゼオライト学会の皆様にはこの場を借りて御礼申し上げます。どのような形になるかはわかりませんが、次回のゼオライト研究発表会に参加できる日を今から心待ちにしております。

お知らせ

行事予定

会期	イベント名	主催	場所
2021年6月4～5日	日本膜学会第43年会	日本膜学会	オンライン開催
6月8日	2021年度ゼオライトフォーラム	日本ゼオライト学会	オンライン開催
	2021年度社員総会	日本ゼオライト学会	オンライン開催
7月5～9日	FEZA2021		オンライン開催
9月8日	第28回ゼオライト夏の学校	日本ゼオライト学会	オンライン開催
12月2～3日	第37回ゼオライト研究発表会	日本ゼオライト学会	東京・江戸川区
12月16～21日	The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2021	The Chemical Society of Japan (CSJ, host society for the 2020 Congress)	アメリカ・ハワイ
2022年2月13～16日	5 th Euro-Asia Zeolite Conference	Euro-Asia Zeolite Conference Committee	韓国・釜山
7月3～8日	20th International Zeolite Conference		スペイン・バレンシア

詳細は日本ゼオライト学会のwebサイト (<https://jza-online.org/events>) を参照ください。

2021 年度ゼオライトフォーラム
「多孔質触媒の働き方改革」

主 催：日本ゼオライト学会
協 賛：調整中
日 時：2021 年 6 月 8 日 (火) 13:30～16:30
会 場：オンライン開催 (Zoom を利用予定)

※今般の新型コロナウイルス感染症の流行状況を鑑みて、本フォーラムはオンラインのみによって開催することとなりました。また、懇親会は開催いたしません。ご了承ください。

プログラム：

三津井 知宏 (日揮触媒化成株式会社)
「ゼオライトの酸性質と工業利用」
西原 洋知 (東北大学)
「金属酸化物上のコーク堆積を利用したカーボン材料の調製」
増田 隆夫 (北海道大学)
「反応工学のアプローチによる“基盤研究から複雑系の実学へ”」

参 加 費：主催・協賛学会の正会員および法人会員会社の社員 3,000 円
学生およびシニア会員，名誉会員 無料 (事前参加登録が必要です)
上記以外の方 5,000 円

参 加 申 込：日本ゼオライト学会のイベント参加登録サイトページより，事前の参加登録をお願いいたします。当日受付はございませんので，ご注意ください。

参加登録期限：2021 年 5 月 31 日 (月) 17:00

問 合 せ 先：多湖 輝興 (東京工業大学物質理工学院) tago.t.aa@m.titech.ac.jp

一般社団法人日本ゼオライト学会 2021年度社員総会

皆様のお手元に郵送しております社員総会開催通知に記載の通り、社員総会を開催しますので、社員の皆様にはご出席くださいますようお願いいたします。

日 時：2021年6月8日（金）16:45～17:45
場 所：オンライン開催（Zoomを利用予定）

定款により、本学会の社員は個人（一般・シニア・名誉）会員および法人会員と定められています。

社員の皆様は開催通知に同封した用紙に出欠の有無を記入し、また委任状を提出される場合には必要事項を記入し、5月7日（金）までに到着するよう事務局に電子メール、Fax、郵送または直接ご提出ください。

今年度はオンライン開催となりますが、接続方法等は出席登録をいただいた方に別途ご案内させていただきます。

2021年度会費納入のお願い

一般社団法人日本ゼオライト学会 会員各位

平素は学会活動にご協力いただきありがとうございます。

皆様のお手元に2021年度年会費請求書を郵送しております。ご納入のほど、よろしくお願いいたします。

第28回ゼオライト夏の学校

毎年恒例となっているゼオライト夏の学校も28回を数えるに至りました。昨年はコロナ禍の影響を受け中止となりましたが、今年は昨年計画していたものとはほぼ同じ内容でオンラインにより開催します。ゼオライトおよび関連多孔体の研究を新たに開始した学生・若手研究者を主な対象として、研究の一線でご活躍の講師の方々に、多孔体の合成、構造解析などの基礎から応用技術を含めたトピックスまで、わかりやすく解説頂きます。皆様のふるってのご参加をお待ちしています。開催要項の詳細は逐次ホームページ <https://jza-online.org/> でお知らせする予定です。

主催：日本ゼオライト学会

協賛：石油学会，日本セラミックス協会，日本化学会，触媒学会（予定）

会期：2021年9月8日（水）

会場：オンライン

プログラム予定：9:00-10:20 【1時間目】小倉 賢先生（東大）

「ゼオライト触媒の科学と応用」

10:20-11:40 【2時間目】前田和之先生（東京農工大）

「MOF・ゼオライト類縁物質の粉末X線結晶構造解析」

12:30-13:50 【3時間目】遠藤 明先生（産総研）

「ガス吸着を用いたナノ多孔体の細孔構造評価」

13:50-15:10 【4時間目】吉田 智先生（東ソー）

「ゼオライトの工業利用」

15:20-16:40 【5時間目】田中俊輔先生（関西大）

「規則性ナノ多孔体の合成と構造・形態制御」

16:40-18:00 【6時間目】脇原 徹先生（東大）

「ゼオライト合成の基礎」

申込締切：2021年8月31日（火）

参加費：主催・協賛学会の正会員および法人会員企業の社員 3,000円

学生およびシニア会員，名誉会員 無料（事前参加登録が必要です）

上記以外の方 5,000円

世話人：奥村 和（工学院大）

申込方法：電子メールにて以下の情報を下記連絡先（e-mail）にご連絡ください。詳細な参加方法をご連絡します。

①氏名，②所属と住所，③電話番号，④メールアドレス

連絡先：奥村 和（工学院大）

TEL: 042-628-4521, e-mail: okmr@cc.kogakuin.ac.jp

第37回ゼオライト研究発表会

主 催：一般社団法人日本ゼオライト学会
協 賛：一般社団法人日本粘土学会，公益社団法人石油学会，一般社団法人日本エネルギー学会，日本吸着学会，日本イオン交換学会，公益社団法人有機合成化学協会，公益社団法人日本化学会，一般社団法人触媒学会，公益社団法人化学工学会，日本地質学会，公益社団法人日本セラミックス協会，日本膜学会（予定，順不同）

日 時：2021（令和3）年12月2日（木）～3日（金）

会 場：タワーホール船堀（〒134-0091 東京都江戸川区船堀4-1-1, TEL: 03-5676-2211（代））

URL: <http://www.towerhall.jp/>

テ ー マ：ゼオライト，メソ多孔体，およびその類縁化合物に関連した研究の基礎から応用まで

講演の種類：

- 1) 特別講演（討論を含めて60分）
- 2) 総合研究発表（成果がある程度まとまっている研究を総合したもの。したがって，既発表の研究成果であっても，それらをまとめた内容であればよい。討論を含めて30分）
- 3) 一般研究発表（未発表の研究成果の発表。討論を含めて20分）

発表使用機器：液晶プロジェクター利用の発表のみ。PCは各自ご用意ください。

講演申込：総合研究発表及び一般研究発表を募集いたします。総合研究発表及び一般研究発表の登壇者は日本ゼオライト学会会員に限り（発表申込時入会申請中でも可。ただし，発表時には，年会費納入を含めて入会申込手続きが完了していること）。2021年7月1日（木）よりゼオライト学会のホームページ上の講演申込フォームに従いお申し込みください。

また，若手優秀講演賞（学生部門，および一般部門）を設けます。学生会員の発表は自動的に学生部門にエントリーされます。一般部門は一般会員または法人会員の社員で30歳以下（2022年3月31日時点）の学生ではない会員の発表を対象としますので，エントリーを希望される方は講演申込フォームのエントリー希望欄にチェックしてください。総合研究発表・一般研究発表の別は問いません。

講演申込締切：2021年9月3日（金）

予稿原稿締切：2021年10月20日（水）（9月上旬からHP上で予稿フォーマットを公開予定）

予稿送付先：zeolite@nda.ac.jp（9月開始予定）

参加登録方法：Web上での参加登録および参加費支払い（peatix経由で、10月上旬から開始予定）

参加登録費：ゼオライト学会 個人会員および法人会員に所属する人：6,000円（非課税）

ゼオライト学会 シニア会員：3,000円（非課税）

ゼオライト学会 学生会員：3,000円（非課税）

協賛学協会 個人会員：6,000円（課税）

非会員：12,000円（課税）

予稿集代を含む。

懇 親 会：調整中

新型コロナウイルス感染症に関わる対応：現地開催を前提として研究発表会の開催準備を進めておりますが，今後の状況によりオンラインに変更して開催する可能性がございます。研究発表会の開催に関する情報はHPに随時掲載いたしますので，適宜ご覧いただきますようお願い申し上げます。

問い合わせ先：西 宏二（防衛大学校）

E-mail: knishi@nda.ac.jp, TEL: 046-841-3810 ext.3587, FAX: 046-844-5901

一般社団法人日本ゼオライト学会 法人会員名簿

(2021年4月現在, 五十音順)

- | | |
|----------------------|-------------------|
| 1 旭化成(株) | 19 大陽日酸(株) |
| 2 (株)アントンパール・ジャパン | 20 千代田化工建設(株) |
| 3 出光興産(株) | 21 東ソー(株) |
| 4 イビデン(株) | 22 (株)豊田中央研究所 |
| 5 宇部興産(株) | 23 日揮グローバル(株) |
| 6 エア・ウォーター(株) | 24 日揮触媒化成(株) |
| 7 エヌ・イー ケムキャット(株) | 25 日揮ユニバーサル(株) |
| 8 ENEOS(株)中央技術研究所 | 26 日本ガイシ(株) |
| 9 花王(株)マテリアルサイエンス研究所 | 27 日本ケッチェン(株) |
| 10 (株)キャタラー | 28 日立造船(株) |
| 11 クラリアント触媒(株) | 29 富士化学(株) |
| 12 コスモ石油(株)中央研究所 | 30 マイクロトラック・ベル(株) |
| 13 (株)シナネンゼオミック | 31 水澤化学工業(株) |
| 14 (株)島津製作所 | 32 三井化学(株) |
| 15 新東北化学工業(株) | 33 三井金属鉱業(株) |
| 16 住友化学(株) | 34 三菱ケミカル(株) |
| 17 セイケムジャパン合同会社 | 35 ユニオン昭和(株) |
| 18 太陽化学(株) | |

編集後記

学生時代から触媒研究に関わってまいりましたが、この度ゼオライト学会に入会し、編集委員を仰せつかることとなりました。ご鞭撻のほど何卒よろしくお願い申し上げます。

昨年11月、第36回ゼオライト研究発表会にオンラインにて参加いたしました。この形式で、個人的に嬉しく感じたのは会場間の移動です。一瞬で移動できますし、人が多くてパワーポイントが見えないということも一切ありません。開催中の時間を最大限に有効活用できました。今後もこの形式を併用することで異分野の方々の参加が増加し、今までの開催形式ではなしえなかったような技術革新も起こるのではないかと期待しております。

発表は、新規構造ゼオライトの開発、機能発現の解明、構造修飾の開発、用途開発など多岐にわたりました。私としては、構造解析技術の進歩に感銘を受けました。編集委員としてこの分野の記事を皆様にご紹介できればと思っています。

(N. W.)

ゼオライト／ZEORAITO (Zeolite) 編集委員

委員長

多湖輝興 (東工大)

Editor-in-Chief

Teruoki Tago (*Tokyo Institute of Technology, Tokyo*)

幹事

稲垣怜史 (横浜国大)

Managing Editor

Satoshi Inagaki (*Yokohama National University, Yokohama*)

近江靖則 (岐阜大)

Yasunori Oumi (*Gifu University, Gifu*)

奥村 和 (工学院大)

Kazu Okumura (*Kogakuin University, Tokyo*)

上村佳大 (産総研)

Yoshihiro Kamimura (*AIST, Tsukuba*)

黒崎文雄 (ユニオン昭和)

Fumio Kurosaki (*UNION SHOWA K. K., Yokkaichi*)

嶋 寿 (三菱ケミカル)

Hisashi Shima (*Mitsubishi Chemical Corporation, Yokohama*)

田中俊輔 (関西大)

Shunsuke Tanaka (*Kansai University, Suita*)

鶴田俊二 (日揮触媒化成)

Shunji Tsuruta (*JGC Catal. Chem., Kitakyushu*)

檜木祐介 (東ソー)

Yusuke Naraki (*TOSOH Corp., Shunan*)

野田憲一 (日本ガイシ)

Kenichi Noda (*NGK Insulators, Ltd., Nagoya*)

深澤 峻 (出光興産)

Shun Fukazawa (*Idemitsu Kosan Co. Ltd., Sodegaura*)

望月 大 (東京電機大)

Dai Mochizuki (*Tokyo Denki University, Tokyo*)

山崎淳司 (早稲田大)

Atsushi Yamazaki (*Waseda University, Tokyo*)

渡邊宣史 (住友化学)

Nobufumi Watanabe (*Sumitomo Chemical Co., Ltd., Sodegaura*)

ゼオライト／ZEORAITO (Zeolite)

Vol. 38, No. 2 令和3年4月15日発行

発 行 一般社団法人日本ゼオライト学会

〒162-0801 東京都新宿区山吹町 358-5 (株) 国際文献社

Tel: 03-6824-9379 Fax: 03-5227-8631

E-mail: jza-post@bunken.co.jp

URL <https://jza-online.org>

印 刷 株式会社 国際文献社

世界唯一の粉粒体総合分析機器メーカー マイクロトラック・ベル 信頼のブランドで最適な評価装置をご提案します

世界最高峰の吸着装置 高温蒸気吸着: MAXII-HV、高圧ガス吸着: MAXII-HPリリース

高精度ガス／蒸気吸着量測定装置

BELSORP MAX II

- 極低圧3検体、最大4検体の同時測定でさらにハイスループットな装置へと進化
- 「ガス導入量最適化機能 (Gas Dosing Optimization)」を新搭載。過去の測定データを用いて測定条件を自動で最適化
- バルブのアクティブ制御により測定時間を大幅短縮
- フリースペース連続測定法 (AFSM™) による高精度測定
- 前処理から測定まで完全自動測定 (オプション) 測定前の液体窒素の注入を自動化し、シームレスな測定を実現
- 測定範囲: 比表面積; $0.01\text{m}^2/\text{g} \sim (\text{N}_2)$ 、 $0.0005\text{m}^2/\text{g} \sim (\text{Kr})$ 細孔分布; $0.35 \sim 500\text{nm}$ (直径)



固体触媒のキャラクタリゼーションに！

触媒分析装置

BELCAT II

- TPD測定による酸／塩基性やパルス測定による金属分散度、BET比表面積や CO_2 単成分・多成分破過曲線評価 (CCU/CCSU)、各種触媒反応などさまざまな測定が可能
- ガス混合機能の標準化により、任意の比で混合ガスを調整可能
- 蒸気導入ユニットの低価格・オプション化を実現
- 温度範囲: 常温 $\sim 1100^\circ\text{C}$ (オプション $\sim 120 \sim 1100^\circ\text{C}$)
- 使用可能ガス: H_2 、 O_2 、 N_2 、 NO 、 NH_3 等



◎Think Sync

“粒子径分布・形状” 測定装置

SYNC

- 測定範囲: $0.02 \sim 2000\mu\text{m}$
- 高精度な粒子径分布と画像解析による形状評価を、1台の装置で実現
- 様々な業界でスタンダード評価装置となっている3本レーザシステムの粒子径分布測定
- 円相当径、楕円相当径 (短径・長径)、フェレー径 (短径・長径)、円形度、アスペクト比、凹凸度など30以上の形状評価が可能
- 凝集体の確認、評価など粒子径分布測定結果を裏付ける画像解析による形状評価



未来をひらくナノの表現力

動的光散乱式 粒子径分布・ゼータ電位・測定装置

NANOTRAC WAVE II シリーズ

- 測定範囲: $0.8 \sim 6500\text{nm}/\pm 200\text{mV}$
- 測定セル部に光ファイバーを採用、微弱な散乱光を捉えるFFTヘテロダイン法により低濃度～高濃度まで安定した測定を実現！
- 試料の入れ替えや電極の抜き差しなしで粒子径とゼータ電位の測定が可能



評価項目 粒子径分布、粒子形状観察 (画像解析)、スラリー分散性 (ゼータ電位 / 流動電位)、比表面積 / 細孔分布、吸着破過曲線、吸着速度評価、触媒評価 (反応、TPD / TPR / TPO、金属分散度)、親・疎水性評価、高圧吸着量評価、多成分吸着量評価、真密度測定、燃料電池評価、高分子材料評価、ガス分析、水銀ガロシメトリ

マイクロトラック・ベル株式会社

〒559-0031 大阪市住之江区南港東8丁目2番52号 TEL: 06-6655-0360 (代表)

大阪営業所
TEL: 06-6655-0362

東京営業所
TEL: 03-6457-6707

名古屋営業所
TEL: 052-228-0792

<https://www.microtrac.com/jp>
E-mail: info@microtrac-bel.com

