

Adsorption News

Vol. 39, No. 2 (July 2025)

通巻 No.153

目 次

- 巻頭言..... 2
最高峰に触れる 大久保貴広
- 奨励賞受賞記念寄稿.....□
プルシアンブルー類似体によるアンモニア吸着と資源化
高橋 顕
- ホットトピックス.....□
液相におけるシリカ系多孔質材料細孔内での芳香族化合物
の拡散機構 中坂 佑太
- 会員探訪.....□
京都大学 高等研究院 物質－細胞統合システム拠点
(KUIAS-iCeMS) 北川グループ
- 会告.....□
- 維持会員一覧.....□

日本吸着学会
The Japan Society on Adsorption

巻 頭 言

最高峰に触れる

岡山大学学術研究院環境生命自然科学学域（理） 大久保貴広



12年ぶりのFOAに向けて発表準備を進めている最中、渡航の10日程前に編集委員会から巻頭言の執筆依頼が届きました。タイミング的にFOAの様子をネタに執筆するプランでいたところ、その依頼を受けた数日後に今度はFOAの会議レポートの執筆依頼が舞い込んできました。良く見るとFOA関連の記事は秋号にまとめて掲載されるようです。今回の巻頭言で書いてしまうとフライングになりそうなので控えることにします。

筆者は今年4月から理事を拝命致しました。これまで長年にわたりお世話になってきた日本吸着学会ですので、微力ではありますが貢献できればとの思いでお引き受けしました。吸着に関する科学と技術の発展に貢献できるように邁進します。

吸着分野の発展のため、様々な各論的意見が本紙の巻頭言でも提案されてきていますが、まずは次世代を担う若手が育つ環境が必要です。幸い日本吸着学会では2009年から「吸着夏の学校」を吸着シンポジウムの一環として開催しており、各分野で活躍する気鋭な研究者を交えての討議や、若手間、そして時には海外の研究者を招いて交流するなど、次世代の吸着分野を担う研究者・技術者の底上げを図っています。筆者は2014年と2024年の2回、吸着夏の学校をお世話する機会に恵まれました。特に、昨年の吸着夏の学校は岡山での初の開催となり、また、コロナ禍後初の夏の学校ということで開催に不安を抱きながら運営に当たったのを覚えています。最終的には31名の参加者が集い、瀬戸内海に囲まれた、スーパーもコンビニもない孤島で1泊2日のプログラムを無事終えることができました。ご参加頂いた皆様には改めて御礼申し上げます。一方で、10年を経て夏の学校をお世話する中で変化したと感じるところもありました。

まず、女性参加者の割合です。2014年開催時は40人中6人が女性でしたが、昨年の参加者は全員男性でした。一概に比較はできませんが、昨今の研究発表会

を思い起こしてみても（あくまで主観ですが）女性による発表が少ない印象は否めません。この点は上田貴洋会長（阪大）がVol. 39, No. 1の巻頭言で指摘された課題の一つでもあります。

もう一つは、企業からの参加割合についてです。こちらは筆者による呼びかけ不足、コロナ禍を経ての企業の考え方の変化、そして岡山という大都市圏から遠方という複数の要因が考えられます。と、前置きをしたところで具体的に挙げると、2014年は40名中12名が企業からの参加者だったのに対し、昨年は31名中1名でした。児玉昭雄前会長（金沢大）が会長就任当時（2023年）に執筆なさった巻頭言でも、「産業界と学界の連携強化（協働）をさらに推し進める必要があります」と述べられています。学生にとって、企業の皆様との交流は大学では得難い貴重な時間になり得る一方で、企業の皆様にとっても参加しやすい、参加したいと思ってもらえるような企画を実施することも今後の学会の発展には重要であると考えています。

研究発表会と併せて吸着夏の学校は吸着分野に携わる多くの若手が集まる絶好の機会です。自由に楽しく吸着を語り合う場として夏の学校は続いて参りましたが、若手が将来にわたり吸着関連の研究開発に携わってくれるような企画・運営が強く望まれます。多くの大学での問題でもありますが、研究職に目を向けてくれるために何をすれば良いか、悩ましい限りです。

筆者が大学のリテラシー関連の講義で良く引用する宮大工・小川三夫氏の一節¹⁾にヒントがあるような気がしてなりません。

「先輩がきれいにカンナをかけているのを見てみると、自分も1日でも早くあいうふうにかかけたい、かけたいと思ってくる。十分に思わせておいて『削ってみい』って削らせるんですよ。すると、うれしくて柱が板になっちゃうくらいに削ります。その時大切なのは、自分の持っている一番いいカンナを貸すこと。最高の切れ味を知ったら、人間が一気が変わります。」

吸着夏の学校のような若手が集うイベントが果たすべき役割は、吸着の基本を学ぶこともさることながら、若手を夢中にさせる、若手のマインドを一変させる「最高峰」に触れさせる場を提供することではないかと考えています。先人たちの唯一無二のアイデア、手法、コンセプトを携え、自らの研究開発で革新的な成果を収める。ここまで来れば次のステップに進みたいと誰もが思うでしょう（思うだけでなく実際に進んで欲しい！）。吸着学会に御所属の皆様が各々の最高峰を披露すること、そこが最初のステップだと信じて止みません。

1) 日本経済新聞, 2015年 2月 28日

氏名 大久保貴広

所属 岡山大学学術研究院環境生命自然科学学域(理)
教授

略歴 2003年 3月 千葉大学大学院自然科学研究科
修了
博士（理学）
2003年 4月 日本学術振興会 特別研究員
2004年 4月 東京理科大学総合研究所 助手
2007年 4月 岡山大学大学院自然科学研究科
准教授
2023年 4月 現職

受賞記念寄稿

プルシアンブルー類似体による アンモニア吸着と資源化

Ammonia adsorption and utilization with
Prussian blue analogues

国立研究開発法人 産業技術総合研究所
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

高橋 顕
AKIRA Takahashi

1. はじめに

20世紀にハーバー・ボッシュ法が確立され、窒素肥料の安定供給を可能にし、食料の安定供給に貢献した。一方、20世紀から反応性窒素による水質汚濁が社会問題として認知され、さらに21世紀になり水質汚濁だけではなく、大気汚染や地球温暖化など幅広い問題に対して、窒素処理が課題になっていることが明らかになってきた。国連環境計画の決議を経て2024年に環境省は、「持続可能な窒素管理に関する行動計画」を策定した¹。計画内には、窒素の適切な処理だけでなく、回収による有効利用も述べられている。本稿では最も一般的な反応性窒素化合物であるアンモニアを選択的に回収する材料であるプルシアンブルーとその回収技術について紹介したい。

プルシアンブルー ($\text{Fe}^{\text{III}}[\text{Fe}^{\text{II}}(\text{CN})_6]_{0.75}$) は紺青とも呼ばれ、人工的に合成される深青色の粉体であり、18世紀初頭から青色顔料として使用され、葛飾北斎も富嶽三十六景に用いている (図1)。

プルシアンブルー (Prussian blue) は「プロイセンの青」を意味し、その合成法は1706年のベルリンにて、赤色顔料の合成時に偶然発見された¹⁾、2)。赤色顔料を合成する際に、通常合成に用いる原料の在庫が不足していたため、動物性油脂の精製に用いていたカリウム塩を使用したところ、青色の沈殿が生成された²。この現象は、動物性油脂生成の過程で少量の副産物として生じたヘキサシアノ鉄酸 ($[\text{Fe}(\text{CN})_6]$) 塩に汚染されていたカリウム塩が、赤色顔料の原料として含まれていた鉄イオンと反応することで合成されたものと考えられる。

近年、日本でプルシアンブルーが広く注目されたの



図1 葛飾北斎 富嶽三十六景「神奈川沖浪裏」

は、放射性セシウム吸着材としての利用である。これまでにプルシアンブルーは顔料以外にもイオン吸着材や色変化ディスプレイなど多彩な用途に用いられてきた。2011年の福島第一原発事故により、環境中に放射性セシウムが拡散した。このため、河川や湖沼から放射性セシウムを除去することが急務となり、プルシアンブルーおよびその類似体を用いた除染に関する研究開発が広く行われた³⁻⁵。環境除染以外にも、プルシアンブルーは優れたセシウムイオンやタリウムイオンの吸着材として知られており、薬としてセシウムイオンを吸着し体外に排出するために用いられている。また、プルシアンブルーは電気的酸化還元により色変化するエレクトロクロミック材料としての機能を有しており、深青色と透明を可逆的に色変化するスマートウィンドウとして既に販売されている。

このようにプルシアンブルーは18世紀に発見され、顔料として使用されただけでなく、20世紀には様々な用途での研究開発が進んだ多彩な材料である。さらに21世紀には新たな機能として高いアンモニア吸着能力が、筆者らによって実証された。アンモニアはトイレや畜産における悪臭の原因物質であるだけでなく、大気汚染物質であるPM2.5や温室効果ガスであるN₂Oの主要な生成要因でもあることが明らかになっており、対策が求められている。本稿では、色材かつ機能性顔料であるプルシアンブルーとその類似体の構造及びアンモニア吸着能について紹介するものである。

2. プルシアンブルーの性質

プルシアンブルー ($\text{Fe}[\text{Fe}(\text{CN})_6]_{0.75}\cdot\text{zH}_2\text{O}$) は、金属イオンが配位子で架橋された多孔性配位高分子、もしくはMOF (metal organic framework) の一種である。その結晶構造は、3価の鉄カチオンとヘキサシアノ鉄酸 ($[\text{Fe}^{\text{II}}(\text{CN})_6]^{4-}$) アニオンが交互に結合した三次元的なジャングルジム状をしている⁶。このジャ

ングルジムの基本単位であるユニットセルの一辺は1ナノメートルで、0.5ナノメートル以下の細孔があるため、小分子の吸着に適した構造である。一般的な吸着材である活性炭との大きな違いは、特定の分子への選択的な吸着性である。活性炭はさまざまな孔径を持ち多くの分子を吸着できるのに対して、プルシアンブルーは均一な孔径を持ち、特定の分子を選択的に吸着することが期待される。

プルシアンブルーはFe(III)-N-C-Fe(II)とシアノ(CN-)基のN側に3価の鉄イオンが、C側には2価の鉄イオンが3次元的に結合した構造を持つ。この顔料が特徴とする深い青色は、異なる価数の鉄イオン間の電荷移動による可視光吸収が原因である。このため、鉄イオンの価数が変わると色が変化し、Fe(II)-N-C-Fe(II)は白色を、Fe(III)-N-C-Fe(III)は黄色を呈し、それぞれプルシアンホワイトは、プルシアンイエローとも呼ばれる。プルシアンブルーをスマートウィンドウや表示素子として使用する際には、C側の鉄イオンは2価のまま、N側の鉄イオンの価数を変化させることで深青色のプルシアンブルーと白色または透明のプルシアンホワイトに変化させることを利用する。

プルシアンブルーを構成する2種の鉄イオンを別の金属イオン(M,M')に置き換えたものを、プルシアンブルー類似体($A_xM[M'(CN)_6]_{1-y} \cdot zH_2O$)と呼ぶ(A:カリウムイオン等のアルカリ金属イオン、x:アルカリ金属比、y:[M'(CN)₆]⁻の欠陥率、z:水和数)。その合成方法は合成時の原料となる金属塩を変えるだけで、非常に簡単である。例えば、プルシアンブルーの合成法において、硝酸鉄を硫酸銅に替えるだけで、茶色を呈する銅プルシアンブルー($K_xCu[Fe(CN)_6]_{1-y} \cdot zH_2O$)を合成することが可能である。プルシアンブルー類似体は[M'(CN)₆]⁻欠陥率(y)を範囲内で制御することが可能である。その最大値はy=0.5であり、これは半分の[M'(CN)₆]⁻サイトが欠落した状態で元のジャングルジム上の結晶を維持することができることを意味する。筆者らはマイクロミキサーを用いたフロー合成と、フロー洗浄システムにより、銅プルシアンブルー($K_xCu[Fe(CN)_6]_{1-y} \cdot zH_2O$)が、0.25<y<0.50の範囲で欠陥率を制御した精密な合成を報告している⁷。

3. プルシアンブルーの吸着サイト

ここでは、プルシアンブルーの結晶構造中の吸着サイトとアンモニア吸着の事例を紹介する。プルシアン

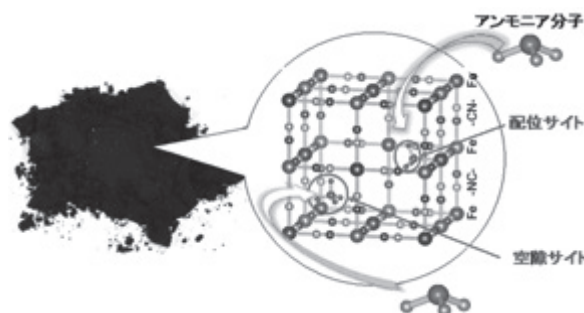


図2 プルシアンブルーの結晶構造における空位サイトと欠陥サイト

ブルーはその結晶内部に有る2つの吸着サイトにイオンや分子を取り込み吸着することが可能である(図2)⁸。1つは空位サイト(interstitial site)と呼ばれるユニットセル当たり1/8の体積を持つ立方体内部の空間であり、この空位サイトに水分子やアンモニア等の分子やセシウムイオン等のアルカリ金属イオンを取り込むことができる。先述の通り、プルシアンブルーは顔料としてだけではなく、セシウムイオンやタリウムイオンといった空隙を利用したカチオン吸着材として利用されてきた。もう一方は、ヘキサシアノ鉄酸イオンの欠陥に存在する配位不飽和な金属イオンであり、ここでは欠陥サイト(vacancy site)と呼ぶ。ヘキサシアノ鉄酸には6つのシアノ基が存在している為、その欠陥1つあたりには6つの欠陥サイトが存在する。プルシアンブルーとその類似体は多くの場合、水溶液中で合成されるため、アルカリ金属イオンの入っていない空隙サイトと欠陥サイトには水分子が吸着されている。また、加熱乾燥にて脱水したとしても空気中に放置することで空気中の水分子を吸着するため、乾燥環境下を維持しない限り、水分子を吸着していると考えてよい。

プルシアンブルー類似体それ自身が配位結合で構成される錯体高分子であるが、この欠陥サイトは配位を用いて極性分子を吸着するため、吸着機構も錯体と同様である。化学分光系列でも水分子よりもアンモニア分子の方が、配位傾向が強いことが知られている。実際に遷移金属イオンは水中でアンモニア分子が配位したアンミン錯体を構成することから、水分子よりもアンモニア分子の方が、遷移金属への配位傾向が強いことは腑に落ちる。この配位傾向の高さから、プルシアンブルーはアンモニア選択性を有し、水蒸気と共存する中でも低濃度なアンモニアを吸着可能である。

プルシアンブルーの欠陥サイトはMOFで議論されるオープンメタルサイトと呼ばれる配位不飽和な金属

イオンの吸着サイトと同じ機能を有している。では、MOFではなくプルシアンブルーを使う利点は何だろうか。プルシアンブルー自体が安定であり、顔料として商用化されている材料であること以外に、そのサイト密度があげられる。シアノ基が有機配位子ととらえるかは議論の余地があるが、プルシアンブルーはシアノ基 (CN) で架橋された MOF ととらえると、他のベンゼン環などを有する有機配位子に対して、サイズが小さいという特徴を有する。ハロゲンイオンを除けばシアノ基は最小の架橋性配位分子であり、プルシアンブルーは他の MOF と比較して、最も高密度に配位不飽和な金属イオンのサイト (欠陥サイト) を導入できるといえる。一方、架橋性配位分子の大きさが小さいということは、空孔自体も小さくなることを意味し、大きな分子の吸着には適さない。プルシアンブルー類似体はアンモニアのような小さな分子を高密度に吸着することに優位性があるといえる。

プルシアンブルー類似体の吸着サイトがアンモニア吸着に有用であることを検証するために、欠陥率 (y) が異なる次の三種のプルシアンブルー類似体を合成し、評価した。プルシアンブルー (PB, $K_{0.23}Fe[Fe(CN)_6]_{1.026}$)、コバルトプルシアンブルー (CoHCC, $Co[Co(CN)_6]_{1.04}$)、銅プルシアンブルー (CuHCF, $Cu[Fe(CN)_6]_{1.05}$) の 25℃ におけるアンモニア吸着等温線を図 3 に示す⁹。比較のため、市販の吸着剤 (イオン交換樹脂、ゼオライト、活性炭) を載せている。吸着等温線はある温度での、対象ガスの分圧 (または濃度) における吸着量を評価したグラフである。分圧は大気中における濃度に変換することが可能であり、1 bar での吸着量アンモニアガス 100 % における吸着量に相当し、0.1 bar では濃度 10 % での吸着量に相当する。PB はゼオライトや活性炭といった市販の吸着剤よりも高い吸着容量を持ち、特に CoHCC ($21.9 \text{ mmol}(\text{NH}_3)/\text{g}(\text{CoHCC}) = 372 \text{ mg}(\text{NH}_3)/\text{g}(\text{CoHCC})$) は発表当時の既報論文で最も高い吸着能を持つ BPP-5 を超える吸着容量を示した。

CoHCC と PB のアンモニア吸着量は欠陥サイトと空隙サイトの総和とほぼ一致し、両吸着サイトがアンモニア吸着に有効であることが明らかになった。CuHCF は欠陥率 50 % とプルシアンブルー類似体の中で最高の欠陥率をするため、より高いアンモニア吸着容量を示すことが期待されたが、結果として CoHCC の吸着容量を下回った。粉末エックス線回折の結果から、CuHCF の吸着サイト数とアンモニア吸着量の不

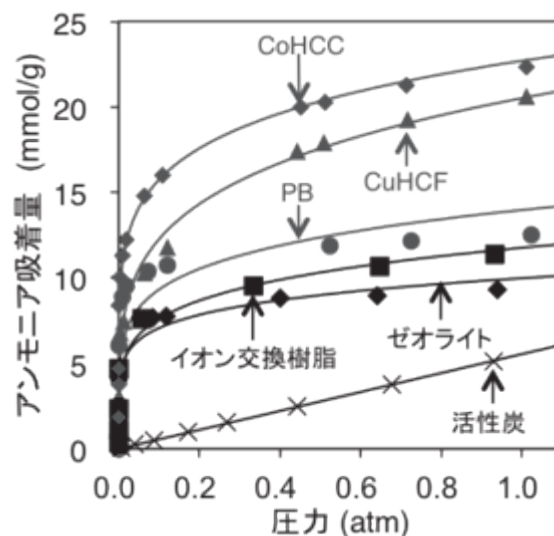


図3 25℃におけるアンモニアガス吸着等温線、コバルトプルシアンブルー類似体 (CoHCC)、銅プルシアンブルー類似体 (CuHCF)、プルシアンブルー (PB)、イオン交換樹脂、13Xゼオライト、活性炭。

整合は、高アンモニア濃度下では CuHCF の結晶構造が破壊されてしまう為であることが判明した。高濃度なアンモニア環境下では配位性の高いアンモニア分子が取り入れられることで、ヘキサシアノ鉄酸イオンの配位よりもアンモニアの配位が優勢になると想定される。100 ppmv 程度の低濃度な環境下では結晶構造は維持されるため、悪臭除去などの用途では問題なく使用可能である。

4. プルシアンブルーによる悪臭の除去

アンモニアが悪臭物質であることは広く知られているが、悪臭を感じるのはどの程度の濃度なのかはあまり知られていない。おおむね臭いと感じるアンモニア濃度は 10 ppmv (体積 100 万分率) = $0.001 \text{ 体積} \%$ 程度の濃度と非常に低い値である¹⁰。また、空気中には水蒸気が $10,000 \text{ ppmv}$ 以上の濃度で存在するため、同じように配位性分子である水が 1000 倍濃度で共存する中で、アンモニアを除去する能力が求められる。一般的には硫酸などの不揮発性の酸を用いること低濃度までアンモニアを除去できることが知られているが、強酸では回収したアンモニアを脱離することが困難であり、繰り返し使用することができない。プルシアンブルー類似体は欠陥サイトにてアンモニアをトラップするため、加熱や水洗浄によりアンモニアを脱離し、再利用することができる。

悪臭除去の観点から重要である、 10 ppmv でのアンモニア吸着量を比較するために、アンモニア濃度 10

ppmv、25℃でのカラム破過試験を実施した。プルシアンブルー（PB）、CoHCC、CuPBAのアンモニア吸着容量はそれぞれ 3.1 mmol/g、1.9 mmol/g、2.1 mmol/gと既存吸着剤であるイオン交換樹脂 0.38 mmol/g、ゼオライト 13X 0.28 mmol/g、活性炭 0.02 mmol/gを大きく上回る値を示した（図4）¹¹。また、吸着後に水を流すことで、プルシアンブルー類似体はアンモニアを脱離するため、水で洗浄により繰り返し使用可能である。このため、例えば、カーテンや衣服にプルシアンブルー類似体を織り込んでおけば、悪臭を除去する機能を付与することができ、洗濯により悪臭除去の機能を再利用できる、付加価値のある衣服ができると考えている。

水蒸気が共存する空気中に含まれる低濃度のアンモニアを吸着したプルシアンブルーを評価したところ、吸着されたアンモニアをアンモニウムイオンとして吸着していることがわかった。プルシアンブルーはプロトン伝導体としても知られており、欠陥サイトに吸着した水分子からプロトンがとれて、吸着した水分子によるプロトンネットワークによりプロトンを伝導させる機構が提唱されている¹²⁻¹⁴。これは、欠陥サイトに吸着した水分子がプロトン供給源となり、ブレンステッド酸として働くことを意味しており、ブレンステッド酸としてアンモニアをアンモニウムとすることでより安定的に吸着することができる。先述の欠陥サイトへのアンモニアの配位による吸着は、欠陥サイトがルイス酸として働くともいえる。より低濃度では吸

着後にアンモニウムイオンとしてプルシアンブルー類似体に吸着される割合が多いことから、低濃度での吸着においてはこのブレンステッド酸としての欠陥サイトと吸着水の機能が重要である。通常、吸着水はアンモニア吸着を阻害するライバルにあたるが、プルシアンブルー類似体の結晶内においては、アンモニアを低濃度でも吸着する協力者として働くことは興味深い。

人が臭いを感じないごく低濃度でもアンモニアを除去する需要はある。微細な配線作業を行う半導体で使用するガスや、反応性ガスの影響を抑え、絵画などの状態をよく保つ必要がある美術館の中の空気は、アンモニアガス濃度を人の感知可能な濃度の 1/1000 以下に抑える必要がある。プルシアンブルー類似体はこのような濃度域でもブレンステッド酸としての機能をつかってアンモニアを吸着することができる。

5. 畜産環境からの悪臭除去

筆者らはプルシアンブルー類似体を用いて、畜産環境中のアンモニアの除去にも取り組んでおり、簡単に紹介する。

畜産において悪臭問題は近隣住民からの苦情の主たる原因となっており、対策が求められている。悪臭の原因物質は様々であるが、窒素化合物の多くはアンモニアとして排出されるため、他の悪臭物質と比較してアンモニアは処理の必要量が多いことが特徴である。また、近年では人だけではなく家畜の環境に配慮する考え方であるアニマルウェルフェアの観点から、畜舎環境中のアンモニア濃度を 25 ppmv以下と、人の労働環境基準値と同じ値にすることが推奨されている¹⁵。

豚舎では 10 kg以上のアンモニア吸着材が必要であり、プルシアンブルー類似体を用いるに際して、粉体として大型な吸着システムを構築することは困難である。そこで、有機バインダと銅プルシアンブルー類似体の複合体を造粒したものを作成し、実験に用いた。このとき造粒体の隙間が詰まりすぎていると、ガスな効率的に内部に浸透せず、吸着速度が低下してしまう。適度な隙間をあけることが造粒体において重要である。プルシアンブルー類似体結晶には 1ナノメートル程度の穴があいており、造粒体にはマイクロメートルオーダーの穴が開いており、さらに造粒体として数ミリメートルの大きさのものを、0.6メートル程度のフィルターカードに入れて数ミリメートルオーダーの造粒体間の隙間をガスが流れていく（図5）。このように、結晶としてのナノメートル程度からメートルオーダー

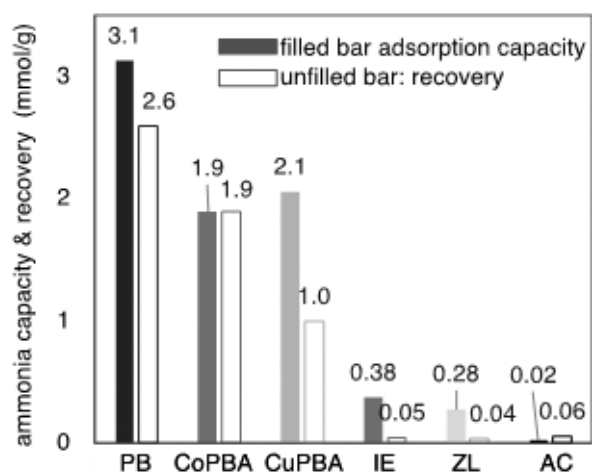


図4 各試料のアンモニア 10 ppmv、25℃でのアンモニア吸着量（中塗り棒）と水洗浄による脱離量（中空棒）。プルシアンブルー（PB）、コバルトプルシアンブルー類似体（CoPBA）、銅プルシアンブルー類似体（CuPBA）、プロトン型イオン交換樹脂（IE）、ゼオライト（ZL）、活性炭（AC）。Reprinted with permission from ref 11. Copyright 2025 American Chemical Society

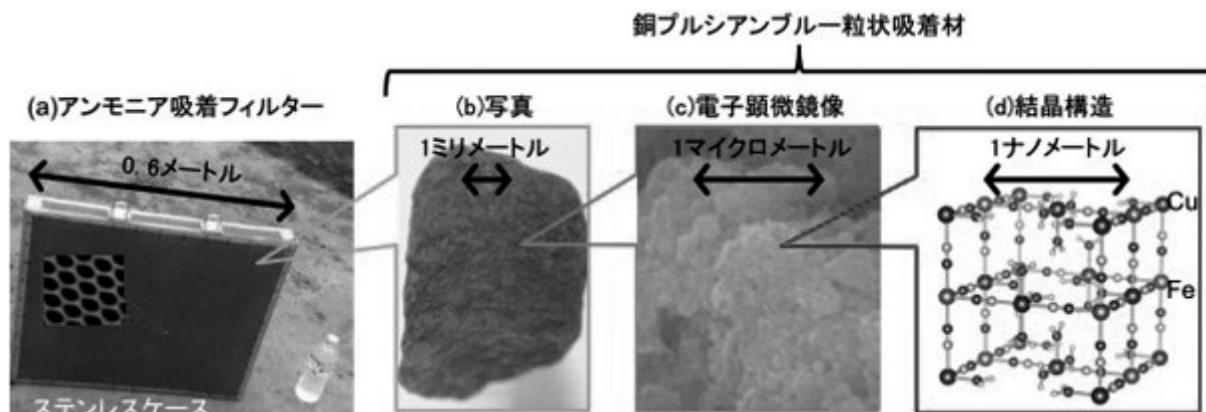


図5 銅ブルシアンブルー類似体を用いたアンモニアフィルタ (a)、造粒体の光学写真 (b)、電子顕微鏡画像 (c)、結晶構造 (d)

まで、幅広く吸着に適したサイズ設計を行うことが、吸着システムには求められる。

この銅ブルシアンブルー造粒体を入れたステンレス製のフィルタとファンを組み合わせて吸着装置とし、幅8 m、奥行き6 m、高さ2 mに覆われた区画で40頭の豚の育成を行う豚房に設置した（図6）。吸着装置を設置しない同じサイズで同数の豚を育成する豚房と対照評価したところ、吸着装置を設定していない区域はアンモニア濃度が高く、最大で約30 ppmvに達した。一方、吸着装置を設置した区域では臭いの強さの指標である5段階の臭気強度で3.5に想定する5 ppmvをほぼ下回っており、悪臭を低減することが確認された¹⁶。筆者も実際に豚舎で作業を行っていたが、空間の臭気濃度が明らかに異なることを体感し、作業者の方にも臭いの削減を体感していただいた。

吸着したカートリッジはカートリッジごと筆者らが作成した洗浄装置に入れ希酸水溶液により洗浄され、再利用した。希酸を用いることで、水だけで洗浄するよりも仕様する水量を減らすことができるため、排水処理量を減らすことができる。吸着材は数ヶ月の間、吸着と再生を繰り返し、そのまま使用し続けることが

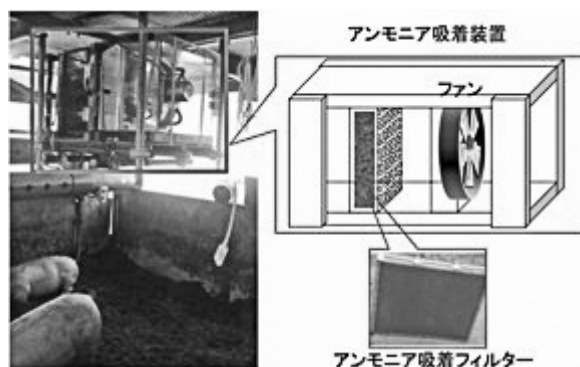


図6 豚房に設置したアンモニア吸着装置とその内部構成

できた。豚舎から排出されるアンモニア量を考えると、ある程度量の吸着材使用は不可欠であり、もし繰り返し使用できない吸着材を用いた場合には、頻繁に十キロ以上の吸着材を納入・廃棄する必要がある。洗浄により繰り返し使用することができるブルシアンブルー類似体は、畜産からのアンモニア除去に適した材料であるといえる。

6. 悪臭の資源としての回収

豚舎の実証実験では吸着したアンモニアは水に溶解する形で脱離され、排水処理されていた。アンモニアは悪臭や水質汚濁の問題になる物質であるが、高純度に回収できれば肥料や工業原料として使用可能な資源としての使用可能である。また、資源として扱うためには輸送も必要であるため、純度だけではなく密度も重要である。アンモニアガスは常温一気圧ではガス状のため密度が低い。加圧することで高压ガスかつ劇物である液化アンモニアガスとして用いることができるが、豚舎に劇物や高压ガス製造装置を設置することはコストと安全性の両面から現実的ではない。肥料として用いられているアンモニアは硫酸アンモニウム（硫安）として、酸を用いて常温常圧で固体として取り扱っている。しかしながら、酸を用いること自体もコストと安全性の両面から、避けたい。理想論としては、酸自体も豚舎で調達可能なものが望ましい。

そこで、我々は畜舎の空気に含まれる酸である二酸化炭素を利用してアンモニアを固体回収する手法を考案した。アンモニア、二酸化炭素、そして空気中の水分は高濃度に濃縮することで炭酸水素アンモニウム（重炭安、 NH_4HCO_3 ）が合成される（ $\text{NH}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH}_4\text{HCO}_3$ ）を得ることができる。重炭安は窒素肥料としても用いられる物質であり、アンモニアガ

スとはことなり劇物に指定されていない安全な物質として取り回しが容易である。重炭安は常温で固体であり、その窒素密度は 0.18 t-N/t であり、硫酸アンモニウムの 0.21 t-N/t と同定と、十分なアンモニア密度を持つ。また、重炭安は加熱により用意にアンモニア、水蒸気、二酸化炭素にわけることができることから、安全なアンモニアキャリアとしての利用も期待できる。

筆者らは炭酸を用いたプルシアンブルーによるアンモニア資源化を検討する過程で、プルシアンブルー類似体がアンモニアを吸着する際に、空気中の二酸化炭素を同時に吸着することを見出した。先述のとおりプルシアンブルーは水分子も吸着するため、重炭安の原料となる 3つの分子を回収できる吸着材であるといえる。吸着挙動を評価するために、銅プルシアンブルー類似体に、乾燥空気中 (A)、湿潤空気中 (AH)、二酸化炭素が含まれている湿潤空気中 (AHC)、の 3種類の空気中のアンモニア吸着量を比較したところ、吸着量はどの条件下でもほぼ 6.2 mmol/g で横ばいであった (図 7 (a))¹⁷。一方、吸着した後の水で洗浄した際のアンモニア脱離量を比較したところ、二酸化炭素が含まれる湿潤空気中では 2.3 mmol/g のアンモニアが脱離し、二酸化炭素が含まれない条件の 10倍以上であった (図 7 (b))。また、脱離水の 1つの目の

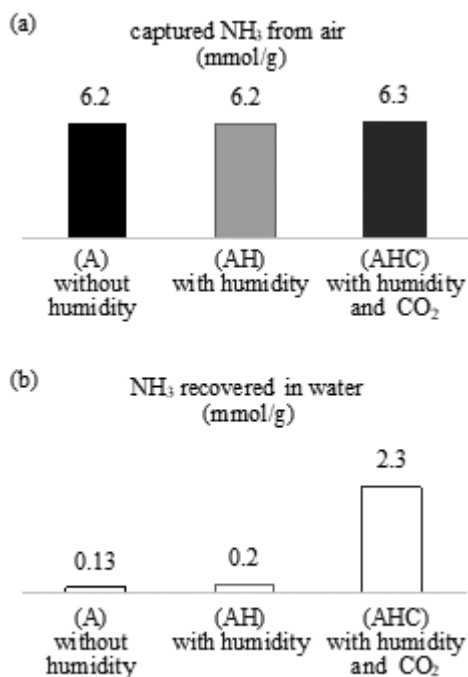


図 7 銅プルシアンブルー類似体の乾燥空気中 (A)、湿潤空気中 (H)、 CO_2 が共存する湿潤空気中 (AHC) でのアンモニア吸着量 (a) と、水洗浄による脱離量 (b) Reprinted with permission from ref 17. Copyright 2025 American Chemical Society

回収液の中にはアンモニアの 0.71 倍の二酸化炭素が含まれており、脱離アンモニアと同程度の二酸化炭素が吸着されていることが判明した。これは、アンモニア吸着時に同量程度の二酸化炭素を吸着していることを意味する。プルシアンブルー類似体の空隙を考慮すると、二酸化炭素分子が結晶内に侵入することは知られていたが、アンモニアが共存しない環境ではより高濃度の二酸化炭素の共存下でなければ、これほどの吸着量は有さない。アンモニアを吸着した環境下のみで発生する、協奏的な吸着現象であるといえる。

上記の試験により、アンモニア、二酸化炭素、水という重炭安の原料すべてをプルシアンブルー類似体は吸着できることが分かっている。このため、吸着後に適切に脱離させることで、重炭安の固体として回収することが期待できる。まず水分量の調整として、アンモニアと CO_2 を吸着させた銅プルシアンブルー類似体をガラスチューブオープンに入れ、80℃で真空引きしながら 4 時間脱水した。脱水後に、銅プルシアンブルーを 150℃で加熱し吸着した二酸化炭素とアンモニアを気体として脱離させ、脱離ガスを氷水で冷却したところ、冷却部分に白い析出物が確認された (図 8)。この析出物の組成分析、FTIR スペクトル、XRD パターンから、重炭安であることを確認した¹⁷。

ラボ試験での成功をもとに、実際の豚舎でも同様に重炭安の回収が可能かどうかを確認するために試験を行った。まずアンモニア濃度 12 ppmv、二酸化炭素濃度 4,000 ppmv の豚舎にてアンモニアを吸着させた銅プルシアンブルー類似体を準備した。この銅プルシアンブルー類似体を実験室と同様に脱水後に、加熱脱離回収したところ、ラボ試験と同様に重炭安を回収できた。吸着したアンモニアから量と回収した重炭安の量から計算したアンモニアの収率は 16 % と少量ではあるが、実際の環境下からも回収可能であることを実証することができた。今後はプロセス改良による収率

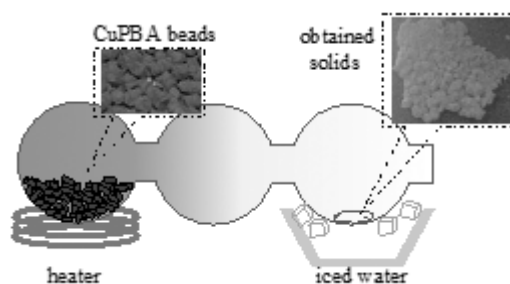


図 8 アンモニアと二酸化炭素を吸着した銅プルシアンブルー類似体からの炭安回収試験。Reprinted with permission from ref 17. Copyright 2025 American Chemical Society

の向上や材料検討によるサイクル耐久性の検証を行う必要がある。

本研究では、空気中のアンモニアを資源として回収するために必要な酸資源として、同じく空気中に含まれる二酸化炭素を活用している。一般的には空気中の二酸化炭素をDAC (direct air capture) による高濃度に回収して利用するが、本研究では濃縮せずにそのまま資源として利用していることが特徴的である。見方を変えると、アンモニアだけでなく空気中の希薄な二酸化炭素も資源化として活用する技術といっても過言ではない。

7. おわりに

本稿では基礎技術としてプルシアンブルー類似体のガス吸着材としての機能の発見から、実用研究として豚舎における実証実験を経て、回収したアンモニアを空気中の二酸化炭素を利用して、固体資源として回収する新たな技術まで、足早に紹介した。窒素利用に関する問題解決の1つの手段としてアンモニアの固体回収利用について、最新の研究を述べた。希薄なアンモニアも選択的に高濃度に回収することで、資源として利用が期待できる。回収の形態として重炭安の、回収方法として、加熱と凝華を組み合わせた手法を紹介したが、そのほかに洗浄と晶析を組み合わせた手法も研究開発を進めている。どちらの手法においても、コストの観点から吸着剤に十分な耐久性が必要であり、長期間の運用と安定的なアンモニアの回収について引き続き検証が必要である。

近年、アンモニアに関しては脱炭素燃料や水素キャリアとして応用が期待されており、日本政府の計画では2050年には現在の使用量の10倍以上のアンモニアを国内で使用する予定である。日本国内でもアンモニアの使用量は増大するため、窒素循環技術の確立を急ぐ必要があり、本技術も貢献していきたいと考えている。

8. 謝辞

本研究テーマに対し、2024年度日本吸着学会奨励賞をいただきました。この場を借りて関係者の方々に厚く御礼申し上げます。基礎研究から応用研究に至るまで、支援いただいた産総研 材料・化学領域企画室関係者、ナノ材料研究部門幹部、川本徹首席研究員を始めとしたナノ粒子機能設計グループの皆様に厚く御礼申し上げます。

[参考文献]

1. 環境省. 持続可能な窒素管理に関する行動計画. (2024).
2. Kraft, A. On the discovery and history of Prussian blue. *Bull. Hist. Chem.* **33**, 61-67 (2008).
3. Kitajima, A., Tanaka, H., Minami, N., Yoshino, K. & Kawamoto, T. Efficient Cesium Adsorbent Using Prussian Blue Nanoparticles Immobilized on Cotton Matrices. *Chem. Lett.* **41**, 1473-1474 (2012).
4. Ishizaki, M. *et al.* Proton-exchange mechanism of specific Cs⁺ adsorption via lattice defect sites of Prussian blue filled with coordination and crystallization water molecules. *Dalt. Trans.* **42**, 16049 (2013).
5. Parajuli, D. *et al.* Application of Prussian blue nanoparticles for the radioactive Cs decontamination in Fukushima region. *J. Environ. Radioact.* **151**, 233-237 (2016).
6. Ludi, A., Güdel, H. U. & Rüttger, M. The Structural Chemistry of Prussian Blue Analogs. A Single-Crystal Study of Manganese (II) Hexacyanocobaltate (III), Mn₃ [Co(CN)₆]₂ · xH₂O. *Inorg. Chem.* **9**, 2224-2227 (1970).
7. Takahashi, A. *et al.* Unveiling Cs-adsorption mechanism of Prussian blue analogs: Cs + -percolation via vacancies to complete dehydrated state. *RSC Adv.* **8**, 34808-34816 (2018).
8. 国立研究開発法人産業技術総合研究所. プレスリリース：青色顔料が高性能アンモニア吸着材であることを発見. プレスリリース：青色顔料が高性能アンモニア吸着材であることを発見 (2016).
9. Takahashi, A. *et al.* Historical Pigment Exhibiting Ammonia Gas Capture beyond Standard Adsorbents with Adsorption Sites of Two Kinds. *J. Am. Chem. Soc.* **138**, 6376-6379 (2016).
10. 環境省環境管理局大気生活環境室. 臭気対策行政ガイドブック. (2002). Available at: <https://www.env.go.jp/air/akushu/guidebook/01.pdf>. (Accessed: 13th March 2018)
11. Takahashi, A., Minami, K., Noda, K., Sakurai, K. & Kawamoto, T. Trace Ammonia Removal from Air by Selective Adsorbents Reusable with

- Water. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **12**, 15115 - 15119 (2020).
12. Ohkoshi, S. I. *et al.* High Proton Conductivity in Prussian Blue Analogues and the Interference Effect by Magnetic Ordering. *J. Am. Chem. Soc.* **132**, 6620-6621 (2010).
13. Agrisuelas, J. *et al.* Electronic Perspective on the Electrochemistry of Prussian Blue Films. *J. Electrochem. Soc.* **156**, P74 (2009).
14. Takahashi, A. *et al.* Surface modification enhances the bulk proton conductivity of Prussian blue. *Chem. Commun.* **59**, 4927 -4930 (2023).
15. 社団法人 畜産技術協会. アニマルウェルフェアの考え方に対応した豚の飼養管理指針. (2011).
16. 国立研究開発法人産業技術総合研究所 プレスリリース 簡単に再生できる粒状吸着材で豚舎や堆肥化施設の空気をキレイに. (2019).
17. Takahashi, A., Minami, K., Noda, K., Sakurai, K. & Kawamoto, T. Harvesting a Solid Fertilizer Directly from Fetid Air. *ACS Sustain. Chem. Eng.* **9**, 16865-16869 (2021).
-



略歴

氏名：高橋 顕

所属；産業技術総合研究所 材料・化学領域 材料基盤研究部門

学歴：

2009年 3月 京都大学工学部物理工学科 学士課程修了

2011年 3月 京都大学工学系研究科 修士課程修了

2016年 9月 東京大学理学系研究科 博士課程修了

2011年 4月 産業技術総合研究所に修士研究者として入所、現職に至る

2019年 マサチューセッツ工科大学にて在外研究

2023年 経済産業省へ出向

ホットトピックス

液相におけるシリカ系多孔質材料細孔内での芳香族化合物の拡散機構

Diffusion mechanism of aromatic compounds in pores of porous silica materials in the liquid phase

北海道大学大学院工学研究院応用化学部門
Division of applied chemistry, Faculty of Engineering,
Hokkaido University

中坂 佑太
YUTA Nakasaka

1. はじめに

ゼオライトやメソポーラスシリカ、多孔質炭素に代表される多孔質材料は触媒や触媒担体、吸着材として様々な分野で広く利用されている。このような多孔質材料を触媒として用いる場合、活性点は多孔質材料の細孔内壁あるいはその近傍に存在するため、反応物質は多孔質材料の細孔内を拡散し、活性点に吸着することではじめて反応が進行する。とりわけゼオライトはその結晶内に0.4 nm～1.0 nm程度と分子レベルの規則的なミクロ孔を有しているため、ゼオライトの細孔サイズと反応物／生成物との幾何学的な関係が生成物の選択性に影響する^{1), 2)}。特長的な選択性の一方で、ゼオライト細孔内における物質の拡散係数はバルク中の物質の拡散係数に比べると著しく低い。反応物が活性点に吸着しなければ反応が進行しないため、ゼオライトを用いた触媒反応ではゼオライト細孔内の拡散速度が反応速度に影響を及ぼす場合がある³⁻⁵⁾。また、これら多孔質材料を充填した反応器を用いて反応を行う場合、粉末のままでは圧力損失が高くなるために、一般的にはペレット状に成形して用いられる。ペレット状の成形体にはミクロ孔、メソ孔、マクロ孔が階層的に形成しているため、このような材料を用いた反応では、流体中の反応物はペレット外表面近傍の境膜、ペレット内のメソ～マクロ孔（ゼオライト等の一次粒子の間隙やペレット化に用いるバインダー等の細孔等）を拡散し、次いで一次粒子の細孔内へと拡散する。活性点上での反応に至るまでに複数の拡散抵抗が存在する。観測される反応速度は、このような物理的な過程の拡散速度と反応速度の中で最も遅い過程の速度であ

る。そのため、多孔質材料の関わる触媒設計には、反応速度の高い活性点の設計はもちろん重要ではあるが、拡散速度に着目した触媒反応工学の観点からの触媒設計も重要である。

多孔質材料の中でもゼオライトの細孔内の拡散に関する研究は気相系を中心に多数行われてきた。NMR⁶⁾やQENS⁷⁾を用いた微視的な方法、重量法⁸⁾や定容法⁹⁾、Zero-length column (ZLC) 法¹⁰⁾、Effectiveness factor法¹¹⁾などの巨視的な方法が報告されている。

液相系についてはチタノシリケートを用いた液相酸化反応などの実用化されている反応プロセスが多くある¹²⁾。また、化石資源の枯渇懸念からバイオマスの有効利用が注目され、ゼオライトなどの多孔質材料を用いたリファイナリー技術の開発が進められている。しかし、液相系を対象とした触媒設計に知見を与える拡散に関する報告事例^{13, 14)}は気相系に比べ少ない。

著者らのグループでは、Raman分光光度計を用いた液相中の濃度測定により定容法を用いて多孔質材料の細孔内の拡散係数を実測することに成功している。本稿では、液相でのゼオライトやメソポーラスシリカ細孔内における芳香族化合物の拡散現象に関する著者らのグループの成果について紹介する。

2. 液相における多孔質材料細孔内拡散係数測定法¹⁵⁾

液相での多孔質材料細孔内における物質の拡散係数の測定はRaman分光光度計を用いて定容法により行っている。拡散物質濃度の異なる溶液のラマンスペクトルを測定することで、拡散物質濃度と拡散物質と溶媒に由来するピークの面積あるいは高さの比の関係をえることができる。多孔質材料への拡散物質の吸着過程における混合溶液のラマンスペクトルを*in-situ*で測定しピークの面積比あるいは高さの時間変化をえることで、濃度の経時変化をえることができる。

本研究で使用している測定装置の概略図を図1に示す。Ramanスリーブを直接取り付け耐圧容器内を溶媒で満たした。圧縮成型器を用いてバインダーを用いずに成型後、粉碎・篩分けした多孔質材料を白金製の籠に入れ、容器内に吊るし、マグネティックスターラーで溶媒を攪拌した。測定温度まで装置を昇温した後、装置上部より拡散物質をパルス状で導入した。上述の方法で多孔質材料への吸着に伴う溶液中の拡散物質濃度の経時変化を測定した（図2）。多孔質材料を用いた場合には濃度の低下が確認されるが、無孔性の材料を用いて同様の測定を行った時には濃度がほとんど

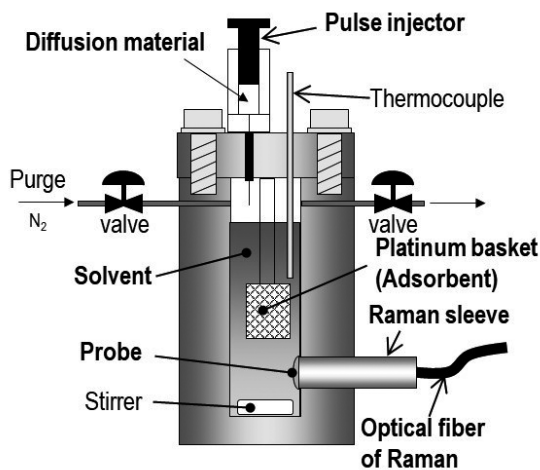


図1 測定装置の概略図

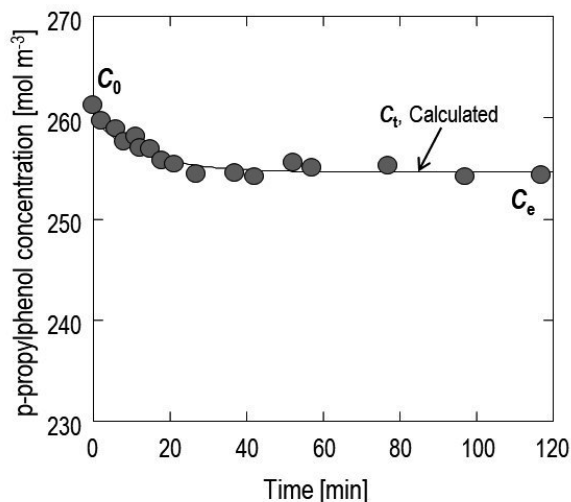


図2 濃度の経時変化の一例
拡散物質：p-プロピルフェノール、吸着材：silicalite-1、
溶媒：メシチレン、温度：313 K

ど変化しないことを確認している。

多孔質材料の細孔内における拡散係数は、濃度の経時変化と以下に示す式¹⁶⁾を用いることで求めることができる。

・ 平板状の粒子

$$\frac{M_t}{M_e} = \frac{C_0 - C_t}{C_0 - C_e} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\alpha(1+\alpha)}{1+\alpha+\alpha^2 q_n^2} \exp\left[-D\left(\frac{q_n}{L}\right)^2 t\right] \quad (1)$$

$$\alpha = V/(a_m WHL) \quad (2)$$

$$\tan q_n = \alpha q_n \quad (3)$$

・ 球状の粒子

$$\frac{M_t}{M_e} = \frac{C_0 - C_t}{C_0 - C_e} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{6\alpha(1+\alpha)}{9+9\alpha+\alpha^2 q_n^2} \exp\left[-D\left(\frac{q_n}{R_0}\right)^2 t\right] \quad (4)$$

$$\alpha = V/(a_m WHR_0) \quad (5)$$

$$\tan q_n = 3q_n/(3 + \alpha q_n^2) \quad (6)$$

ここで M_t と M_e はそれぞれ時間 t および吸着平衡時におけるの拡散物質の吸着量、 C_t 、 C_0 および C_e はそれぞれ時間 t 、吸着開始時および平衡時の溶液中の拡散物質濃度を示している。また、 L およ R_0 は拡散距離を示しており、平板状粒子の半径あるいは球状粒子の半径を拡散距離として用いている。さらに、 V は溶液の体積、 W は多孔質材料の質量、 a_m は多孔質材料の単位質量あたりの外表面積、 H は分配係数を示しており、分配係数は吸着等温線から求めることができる。なお、上式中の α は吸着装置の体積と多孔質材料の容積比を表すパラメータであり、 q_n は式(3)および式(6)を満たす一連の解 q の第 n 番目の正の解である。

3. ゼオライト結晶内におけるフェノール類の拡散係数^{17, 18)}

バイオマスを構成する主要元素は、“炭素”、“水素”、“酸素”であり、化石資源由来の炭化水素とは“酸素”を多く含む点で異なる。木質系バイオマスは、セルロース、ヘミセルロース、リグニンから構成されている。リグニンはアルキルフェノール構造を有するの天然の高分子であり、リグニン分解によりアルキルフェノール、アルキルフェノールの脱アルキル化によりフェノールをえることができ、ゼオライトなどの多孔質材料が触媒として期待される^{5, 19-21)}。一方、フェノールは室温で固体であり、アルキルフェノールは飽和蒸気圧が低いことから気相での拡散係数の測定は困難であり報告はほとんどない。液相での測定によりゼオライト細孔内でのフェノール類の拡散に関する情報をえることができる。

MFI型ゼオライトの細孔内におけるフェノール類の拡散係数を測定した。溶媒には、MFI型ゼオライトの細孔径よりも分子径が大きく細孔内への拡散が難しいため吸着量が小さいメシチレンを用いた。まず吸着材には骨格中に Al を含まない MFI 型ゼオライトである silicalite-1 を用いた。図3はメシチレン溶液中での silicalite-1 結晶内におけるフェノール、p-プロピルフェノール、m-クレゾール、トルエンの拡散係数の温度依存性を示している。測定した条件下においてフェノールと p-プロピルフェノールの結晶内拡散係数はトルエンとほぼ等しい拡散係数あった。一方、m-クレゾールはトルエンよりも100倍程度低い結晶内拡散係数を示した。気相中での silicalite-1 結晶内におけるト

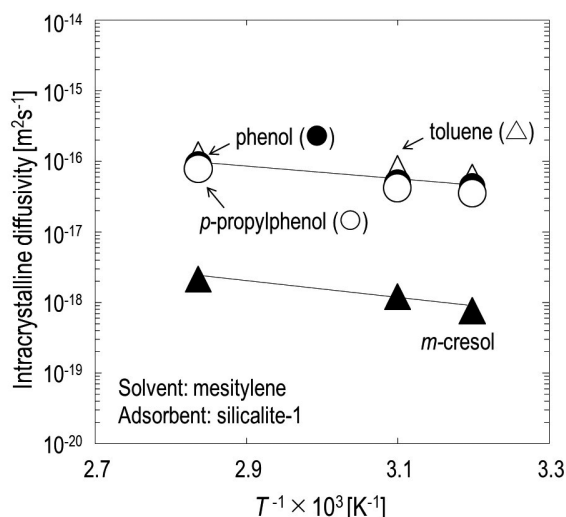


図3 silicalite-1結晶内におけるフェノール、*p*-プロピルフェノール、*m*-クレゾール、トルエンの拡散係数の温度依存性

ルエンの拡散係数 (423~723 K) は、*p*-キシレンとはほぼ同程度あり、*m*-キシレンの拡散係数に比べ 10~25 倍程度大きいことが報告されている²²⁾。Silicalite-1 の細孔径は芳香環と同程度の大きさを有しているため、これら分子は silicalite-1 の細孔内壁を押し広げながら拡散しており、拡散物質の最小分子径が大きいほど細孔内での立体的な抵抗が大きくなるためである。フェノールや *p*-プロピルフェノールはヒドロキシル基を有しておりトルエンと異なるが、これらの最小分子径はトルエンとほぼ等しいため、結晶内拡散係数はほぼ等しい。一方、*m*-クレゾールは最小分子径がトルエンよりも大きいため立体的な抵抗が大きく拡散係数が低下したと考えられる。

H-MFI (Si/Al 比：約 300) の結晶内におけるフェ

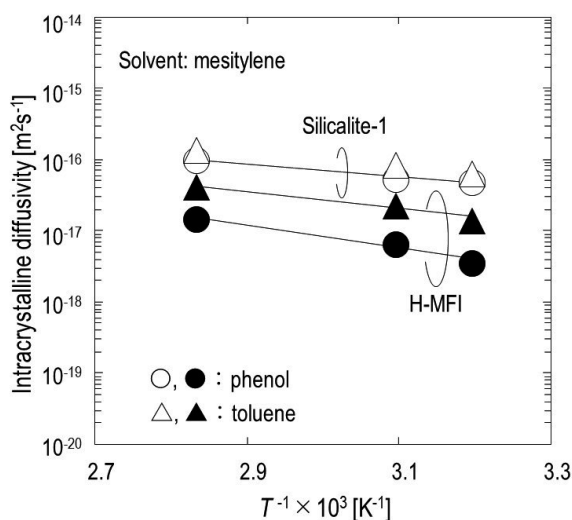


図4 H-MFIの結晶内におけるフェノールとトルエンの拡散係数の温度依存性

ノールとトルエンの拡散係数の温度依存性を図4に示す。トルエンおよびフェノールの結晶内拡散係数は、silicalite-1結晶内での拡散係数よりも低い値を示した。H-MFIは細孔内壁にBrønsted酸点を有しているため、拡散分子は上述と同様の細孔径と分子径との関係による立体的な抵抗に加えて、細孔内のBrønsted酸点への吸着と酸点からの脱離を繰り返しながら細孔内を拡散する。Brønsted酸点に吸着した分子の酸点上での滞留時間が長くなると他の分子の拡散が阻害されるため、拡散係数は低下する。このため、H-MFI結晶内におけるフェノールおよびトルエンの拡散係数はsilicalite-1結晶内よりも低下したと考えられる。H-MFI結晶内におけるフェノールの拡散係数はトルエンよりも低い値を示した。また、フェノールおよびトルエンの結晶内拡散係数の活性化エネルギーはそれぞれ 31.4 kJ/mol、24.4 kJ/molであり、H-MFI結晶内におけるフェノールの拡散抵抗がトルエンよりも大きいことを示している。さらに、H-MFIに対するフェノールの吸着量はトルエン吸着量に比べて大きい。JavadianとEktefaは、DFT計算を用いることでH-MFIのBrønsted酸点とフェノールとの水素結合の強さはBrønsted酸点とベンゼンとの相互作用の強さと異なることを示している²³⁾。フェノールはトルエンに比べてBrønsted酸点へより強く吸着することでBrønsted酸点上での分子の滞留時間が長くなり、結晶内拡散係数がより低い値になったと考えられる。

MFI型ゼオライトよりも細孔径の大きいY型ゼオライトを用いてフェノールの吸着等温線、細孔内拡散係数を測定した。また、Y型ゼオライトの細孔径は大きく多くの溶媒が細孔内へ拡散できる。フェノールの関わる触媒反応においても溶媒種により反応機構が異なることが知られている²⁰⁾。溶媒種の影響について検討するため、メシチレン、シクロヘキサン、2-プロパノールを用いた。メシチレンを溶媒に用いた時のフェノールおよびトルエンの吸着等温線を図5に示す。H-MFIを吸着材に用いた場合と同様に、いずれの吸着温度においてもフェノールはトルエンよりも高い吸着量を示した。吸着開始時において細孔内では溶媒であるメシチレンが吸着しており、フェノールあるいはトルエンはメシチレンと置換されるように吸着する。フェノールはH-YのBrønsted酸点との水素結合によりトルエンに比べて強く吸着するためと考えられる。溶媒種の影響を確認するため、メシチレン、シクロヘキサン、2-プロパノールを溶媒に用いてフェノールの

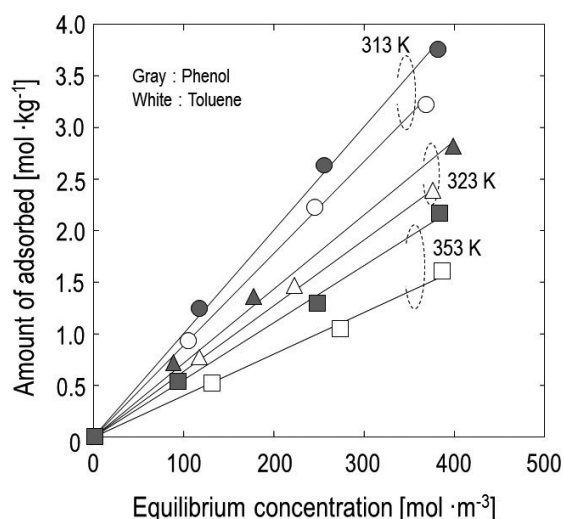


図5 フェノールおよびトルエンの吸着等温線 (吸着材: H-Y、溶媒: メシチレン)

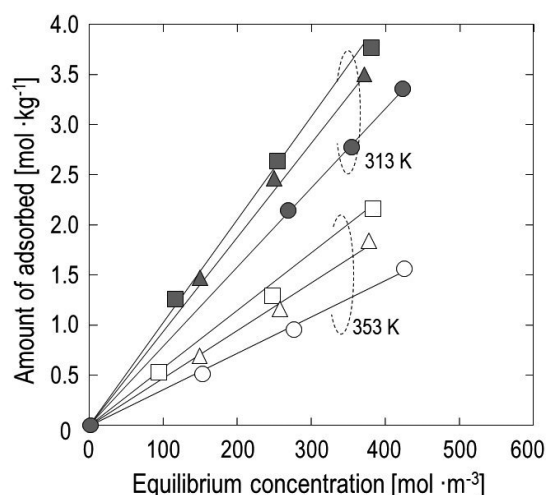


図6 フェノールの吸着等温線 (吸着材: H-Y、溶媒: 2-プロパノール (●、○)、シクロヘキサン (▲、△)、メシチレン (■、□))

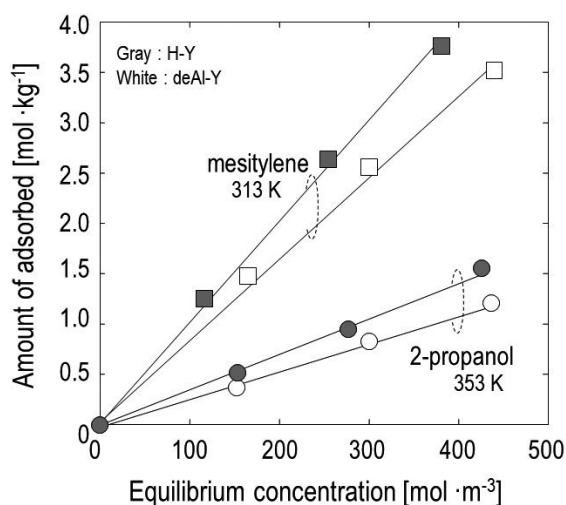


図7 H-Y、deAl-Yを吸着材に用いた時のフェノールの吸着等温線

吸着等温線を測定した (図6)。フェノールの吸着量は2-プロパノールを溶媒に用いた時に最も少なく、メシチレンを用いた時に用いた溶媒の中で最も多くなった。定容法により気相系でこれら溶媒の吸着等温線を測定すると、相対圧が0.01以上の領域で吸着量は2-プロパノールが最も多く、次いでシクロヘキサン、メシチレンとなることから2-プロパノールが最も吸着しやすいことが確認できる。溶媒とH-Yの細孔表面との親和性の違いがフェノールの吸着特性に影響していると考えられる。

H-YのBrønsted酸点量の影響を検討するため、脱アルミニウム処理したY型ゼオライト (de-Al-Y) を用いてフェノールの液相吸着を行った。H-Yとde-Al-Yではミクロ孔容積に大きな違いはないものの、フェノールの吸着量が減少している (図7)。フェノールのBrønsted酸点への吸着が減少したためであると考えられる。

図8は溶媒にメシチレン、シクロヘキサン、2-プロパノールを用いた時のH-Y結晶内におけるフェノールの拡散係数の温度依存性を示している。図示していないがメシチレン溶媒存在下においてトルエンのH-Y結晶内拡散係数の活性化エネルギーは17.2 kJ/molであり、気相系で報告される活性化エネルギー (8.1 kJ/mol)²⁴⁾ よりも高い値を示した。H-Yはその結晶内にスーパーケージと呼ばれるチャンネル細孔径よりも大きいナノ空間を有しており、拡散分子はH-Yのスーパーケージ内壁への吸着と壁からの脱離を繰り返してケージ内で滞留する。この際、チャンネル細孔近傍に吸着した拡散分子が隣のスーパーケージへと拡散する。これらの過程を繰り返しながら拡散物質はH-Yの細孔内を

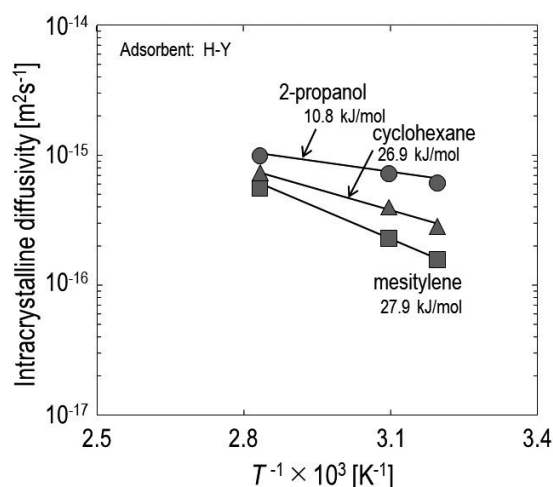


図8 メシチレン、シクロヘキサン、2-プロパノールを溶媒に用いた時のH-Y結晶内におけるフェノールの拡散係数の温度依存性

拡散しており、細孔径と分子径との関係による立体的な抵抗の影響が小さいため、活性化エネルギーは低い値となる。これに対して、メシチレン溶液中ではH-Y細孔内壁のBrønsted酸点に吸着しているメシチレンとトルエンが置き換わるようにして吸着・脱離を繰り返しながら細孔内を拡散していると考えられる。このように、液相では細孔内に溶媒が共存しており細孔内に存在する物質量が大きいいため、気相系よりも細孔内での拡散抵抗が大きくなったと考えられる。メシチレン溶液中におけるH-Y結晶内のフェノールの拡散係数はトルエンの拡散係数よりも小さく、活性化エネルギーはフェノールの方が大きい。H-MFIと同様にフェノールのヒドロキシル基とBrønsted酸点との水素結合により酸点上での滞留時間がトルエンに比べて長くなったためであると考えられる。

興味深いことに、H-Y結晶内におけるフェノールの拡散係数は溶媒の種類を変えることで変化した。2-プロパノールを溶媒に用いた際にフェノールの拡散係数は最も大きく、次いでシクロヘキサン溶媒、メシチレン溶媒の順になる。また、フェノールの結晶内拡散係数の活性化エネルギーは2-プロパノール溶媒で最も小さく、シクロヘキサン溶媒、メシチレン溶媒の順で大きくなった。これはH-Y結晶内でのフェノールの拡散機構が溶媒種により異なることを示している。上述のようにH-Yに対するフェノールの吸着量は用いる溶媒種により異なる。2-プロパノールはフェノールと同様にヒドロキシル基を有するため、2-プロパノールのヒドロキシル基がゼオライトのBrønsted酸点と水素結合するために吸着しやすく、フェノールの吸着量が少なくなる。一方、H-Yに対するシクロヘキサン、メシチレンの吸着量は2-プロパノールに比べて少ないため、フェノールはBrønsted酸点に吸着しやすい。このため、シクロヘキサンやメシチレンを溶媒に用いた時のフェノール分子のBrønsted酸点上およびスーパーケージ内での滞留は2-プロパノールを溶媒に用いた時に比べて長くなったと考えられる（図9）。

酸量の影響を検討するため、H-Yの脱アルミニウム処理を行ったdeAl-Yを用いてフェノールの結晶内拡散係数をメシチレン、2-プロパノール溶媒を用いて測定した。拡散係数の温度依存性を図10に示している。H-Yの脱アルミニウム処理によりメソ孔が形成しており細孔構造が脱アルミニウム処理前と同一ではないため、deAl-Yについては見かけの結晶内拡散係数であることに注意されたい。2-プロパノール、メシチレン

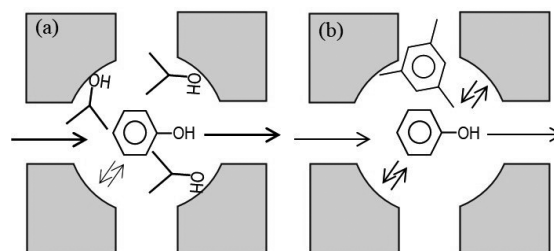


図9 推察されるH-Yの細孔内におけるフェノール拡散機構
(a) 2-プロパノール溶媒、(b) メシチレン溶媒

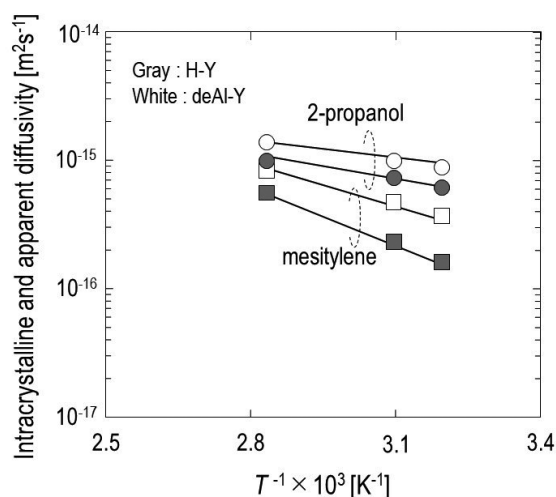


図10 H-YおよびdeAl-Yの細孔内におけるフェノールの拡散係数の温度依存性（溶媒：2-プロパノール、メシチレン）

溶媒のいずれの場合においてもdeAl-Yの細孔内におけるフェノールの拡散係数はH-Y結晶内におけるフェノールの拡散係数に比べて高い値を示している。これら拡散係数の活性化エネルギーに着目すると、2-プロパノール溶媒を用いた系においてはH-Y、deAl-Yに依らず活性化エネルギーがほぼ等しい。一方、メシチレンを溶媒に用いた系では、H-Yの細孔内におけるフェノールの拡散係数の活性化エネルギーが27.9 kJ/molであるのに対し、deAl-Yでは17.7 kJ/molであり、脱アルミニウム処理により拡散係数の活性化エネルギーが低下した。2-プロパノールが共存する場合にはH-YのBrønsted酸点へ2-プロパノールが吸着しやすいことによりフェノールの吸着が抑制されるため、Brønsted酸点がフェノールの拡散に及ぼす影響は小さい。メシチレン溶媒ではフェノールとH-YのBrønsted酸点との水素結合による吸着が生じやすいため酸点上でのフェノールの滞留の影響が大きく活性化エネルギーの違いとして表れていると考えられる。

4. 細孔径の異なる多孔質材料細孔内におけるベンゼンの拡散機構^{25, 26)}

多孔質材料が有する細孔の大きさは様々であり、その細孔径サイズからミクロ孔、メソ孔、マクロ孔と分類されている。液相における多孔質材料細孔内の拡散機構を細孔径に着目して検討した。ミクロ孔を有する材料として一般的な水熱合成法により調製した silicalite-1 を用いた。均一なメソ孔を有する材料として FSM-16 や MCM-41 等のメソポーラスシリカが知られているが、これらの多くは規則的な粒子形状を有していない。ここでは、矢野らが開発している調製法により得られる球状の単分散なメソポーラスシリカ (MMSS: Monodispersed Mesoporous Silica Spheres)^{27, 28)} および SilicaGel (GL Sciences Inc.: Inertsil SIL-100A) を、メソ孔を有する吸着材として用いた。また、マクロ孔を有する材料としてペレット状のシリカアルミナ、 γ -アルミナを吸着材に用いた。図 11 は 323 K におけるこれら材料の細孔径と細孔内におけるベンゼンの拡散係数との関係を示している。前述の通り、酸点を持たないゼオライト細孔内では拡散する分子の最小分子径と細孔径との関係による立体的な抵抗が支配的である。ベンゼン分子は silicalite-1 の細孔径と同程度の分子径を有するため細孔を押し広げながら拡散する。そのため、ベンゼンの拡散係数はフェノールやトルエンの拡散係数と概ね等しいことが確認できる。気相系では一般に細孔径が大きくなると拡散係数が大きくなることが知られており、分子の平均自由行程と細孔径との関係から *Knudsen* 拡散領域、遷移領域、分子拡散領域に分類されている²⁹⁾。興味深いことに、液相では細孔径が大きくなるにつれて拡散係数が単調に大きく

るのではなく、細孔径が 2~3 nm の領域では拡散係数が silicalite-1 細孔内の拡散係数と同程度かそれよりも小さくなり、細孔径が 3 nm よりも大きい領域では細孔径が大きくなると拡散係数は大きい値となった。拡散係数の活性化エネルギーに着目するとメソ領域でのベンゼンの拡散係数の活性化エネルギーはおよそ 10 kJ/mol であった。気相でのメソ細孔内の分子の拡散は主に表面拡散であると考えられている。吸着材は異なるが多孔質炭素内の炭化水素の表面拡散の活性化エネルギーはおよそ 40 kJ/mol³⁰⁾ であるといわれている。ここで得られた活性化エネルギーは低く分子拡散の活性化エネルギーに近い。液相系は気相系とは異なり、メソポーラスシリカ細孔内が拡散および溶媒の分子で満たされた状態にある。細孔表面は吸着分子による吸着層が形成されているため、拡散分子は細孔壁への吸着と脱離に加え、細孔壁に吸着した拡散分子・溶媒分子による立体的な障害を受けながら細孔内を拡散していると考えられる。

メソポーラスシリカ表面はアモルファスな SiO_2 により形成されているため、細孔表面にはシラノール基が存在している。シラノール基との親和性がシクロヘキサンよりも高いと考えられる 2-プロパノールを溶媒に用いると、メソポーラスシリカ細孔内におけるベンゼンの拡散係数は低下した。また、2-プロパノールを溶媒に用いた時のベンゼンの吸着量は、シクロヘキサンを溶媒に用いた時の吸着量に比べて低下した (図 12)。2-プロパノールはシクロヘキサンに比べてメソポーラスシリカ表面のシラノール基に吸着しやすいためであり、シラノール基に吸着した 2-プロパノールによりベンゼンの拡散が阻害されているためであると考

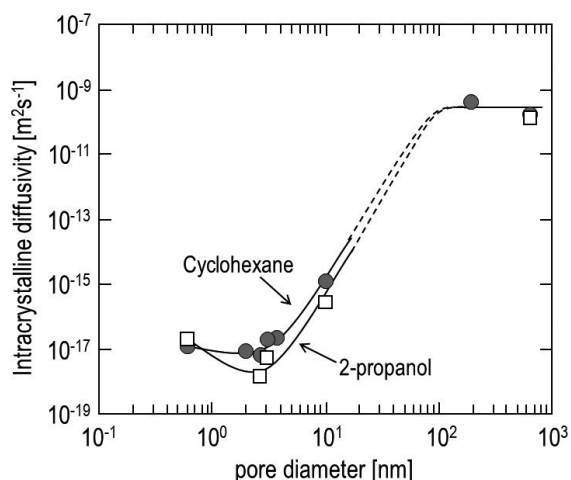


図 11 細孔径の異なる多孔質材料細孔内におけるベンゼンの拡散係数と細孔径の関係 (溶媒: シクロヘキサン、2-プロパノール)

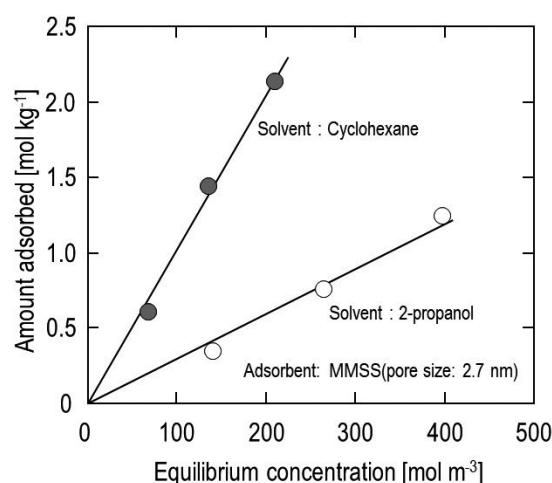


図 12 シクロヘキサン、2-プロパノールを溶媒に用いた時のベンゼンの吸着等温線 (吸着材: MMSS (細孔径: 2.7 nm)、温度: 323 K)

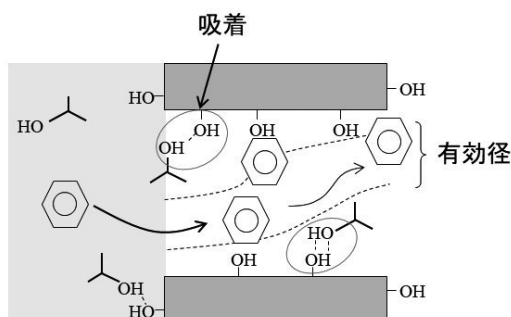


図13 推察されるメソポーラスシリカ内におけるベンゼンの拡散機構

えられる (図13)。一方、silicalite-1細孔内におけるベンゼンの拡散係数はシクロヘキサン溶媒、2-プロパノール溶媒に依らずほとんど等しい値を示すことから、このような溶媒の吸着による拡散阻害は酸点や表面シラノール基を多く有する多孔質材料特有の現象と言える。

5. おわりに

本稿では、Raman分光光度計を用いた濃度測定により定容法を用いて液相での多孔質材料細孔内の拡散係数を実測する手法を紹介するとともに、ゼオライトの酸点と拡散物質、溶媒物質との水素結合、メソポーラスシリカの細孔径と拡散物質の分子径、細孔表面のシラノール基と溶媒物質との親和性に着目したこれまでの研究成果を紹介した。液相における多孔質材料細孔内における物質の拡散は、気相とは異なり細孔内に“共存する”物質 (溶媒) の物質量が多いために共存物質 (溶媒) の影響を受けやすい。拡散物質の分子径と多孔質材料の細孔径との関係による立体的な抵抗、拡散物質の吸着サイトでの滞留による拡散抵抗が気相系における拡散速度に対する支配的な要因であった。一方、液相ではこれら要素に加えて、共存する溶媒物質の細孔表面への吸着特性が拡散物質の吸着・拡散現象に強く影響を及ぼすため、気相系での細孔内拡散の理解を液相系の細孔内拡散の理解に対してそのまま適用することはできないことを示している。

バイオマスのリファイナリーをはじめ多孔質材料を用いた液相での反応はより高温・高圧の環境で反応が行われる。実際の反応条件に近い条件で多孔質材料細孔内の拡散係数を測定しようとした場合、拡散物質や溶媒の反応が進行する場合があることは拡散研究の悩ましい点であり、用いることが可能な物質が限定される。地道であるかもしれないが、実測可能な系を対象に拡散現象の理解が深まる研究を続けることが、反応

の理解や高活性な触媒設計の一助となると信じている。気固・液固を中心に、多孔質材料細孔内の拡散現象の体系化につながる研究を実施していきたいと考えている。

6. 謝辞

本稿で紹介した内容は、筆者が学生時より実施してきた研究の成果である。ご指導いただきました増田隆夫先生 (現、室蘭工業大学)、多湖輝興先生 (現、東京科学大学)、ならびに単分散メソポーラスシリカをご提供いただきました株式会社豊田中央研究所の矢野一久氏に誌面をお借りして御礼申し上げます。

【参考文献】

- 1) L.B. Young, S.A. Butter, W.W. Kaeding, *J. Catal.*, **76**, 418 (1982).
- 2) S. Csicsery, *J. Catal.*, **23**, 124 (1971).
- 3) H. Konno, T. Okamura, T. Kawahara, Y. Nakasaka, T. Tago, T. Masuda, *Chem. Eng. J.*, **207-208**, 490 (2012).
- 4) Y. Nakasaka, T. Kanda, K. Shimizu, G. Shibata, T. Masuda, *Catal. Today*, **332**, 64 (2019).
- 5) J.A. H. Gaitan, Y. Nakasaka, T. Yoshikawa, N. Nishiyama, T. Masuda, *Chem. Eng. J.*, **464**, 142618 (2023).
- 6) H. Jobic, M. Bee, J. Caro, M. Bulow, J. Karger, *J. Chem. Soc., Faraday Trans.*, **56**, 4201 (1989).
- 7) J.R. Xial, J. Wei, *Chem. Eng. Sci.*, **47**, 1123 (1992).
- 8) D.B. Shah, C.J. Guo, D.T. Hayhurst, *J. Chem. Soc., Faraday Trans.*, **91**, 1143 (1995).
- 9) L.J. Song, L.V.C. Rees, *Micropor. Mesopor. Mater.*, **6**, 363 (1996).
- 10) M.A. Jama, M.P.F. Delmas, D.M. Ruthven, *Zeolite*, **18**, 200 (1997).
- 11) W. Ostwald, *Z. Phys. Chem.*, **15**, 705 (1894).
- 12) 小野嘉夫・八嶋建明 編, ゼオライトの科学と工学, 講談社 (2000)
- 13) V.R. Choudhary, D.B. Akolekar, A.P. Singh, *Chem. Eng. Sci.*, **44**, 1047 (1989).
- 14) R. Takahashi, S. Sato, T. Sodesawa, Y. Kamomae, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **2**, 1199 (2000).
- 15) Y. Nakasaka, T. Tago, K. Odate, T. Masuda, *Micropor. Mesopor. Mater.*, **112**, 162 (2008).
- 16) J. Crank, *The Mathematics of Diffusion*,

Clarendon Press, Oxford (1975).

- 17) X. Su, Y. Nakasaka, R. Moriwaki, T. Yoshikawa, T. Masuda, *Micropor. Mesopor. Mater.*, **319**, 111044 (2021).
- 18) X. Su, Y. Nakasaka, R. Moriwaki, T. Yoshikawa, T. Masuda, *Micropor. Mesopor. Mater.*, **332**, 111694 (2022).
- 19) T. Yoshikawa, T. Umezawa, Y. Nakasaka, T. Masuda, *Catal. Today*, **347**, 110 (2020).
- 20) W. Wanmolee, N. Laosiripojana, P. Daorattanachai, L. Moghaddam, J. Rencoret, J.C.D. Rio, W.O.S. Doherty, *ACS Sustain. Chem. Eng.*, **6**, 3010 (2018).
- 21) D. Verboekend, Y. Liao, W. Schutysera, B.F. Sels, *Green Chem.*, **18**, 297 (2016).
- 22) Y. Fujikata, T. Masuda, H. Ikeda, K. Hashimoto, *Micropor. Mesopor. Mater.*, **21**, 679 (1998).
- 23) S. Javadian, F. Ektefa, *RSC Adv.*, **122**, 100799 (2015).
- 24) T. Masuda, K. Fukada, Y. Fujikata, H. Ikeda, K. Hashimoto, *Chem. Eng. Sci.*, **51**, 1879 (1996).
- 25) Y. Nakasaka, T. Tago, K. Yano, T. Masuda, *Chem. Eng. Sci.*, **65**, 226 (2010).
- 26) Y. Nakasaka, T. Tago, K. Yano, T. Masuda, *Chem. Lett.*, **38**, 1064 (2009).
- 27) K. Yano, Y. Fukushima, *J. Mater. Chem.*, **13**, 2577 (2003).
- 28) K. Yano, Y. Fukushima, *J. Mater. Chem.*, **14**, 1579 (2004).
- 29) 橋本健治 著, 反応工学, 培風館 (1979) .
- 30) I. Prasetyo, H.D. Do, D.D. Do, *Chem. Eng. Sci.*, **57**, 133 (2002).



氏名 中坂 佑太

所属 北海道大学 大学院工学研
究院 応用化学部門

2009年 12月 北海道大学大学院工学研究科博士後期
課程修了 博士 (工学)
2010年 1月 北海道大学大学院工学研究科 博士研
究員
2012年 2月 北海道大学大学院工学研究院 助教
2019年 5月 北海道大学大学院工学研究院 准教授

会 員 探 訪

京都大学 高等研究院 物質－細胞統合システム拠点 (KUIAS-iCeMS) 北川グループ

金属錯体がつくる空間から、未来の材料を切り拓く

京都大学 高等研究院 物質－細胞統合システム拠点 (KUIAS-iCeMS) に所属する北川進研究グループでは、「分子・イオンを組み上げて空間に機能を与える」という発想のもと、金属錯体化学に基づく分子集合体の設計と機能化に取り組んでいます。特に、私たちが主軸としているのは、多孔性配位高分子 (PCP: Porous Coordination Polymer)、あるいは金属有機構造体 (MOF: Metal-Organic Framework) と呼ばれる結晶性材料です。これらの材料は、分子レベルで精密に構造を設計することで、ガス吸着・分離、触媒反応、外部刺激応答といった多様な機能を発現し、エネルギー、環境、医療など広範な分野への応用が期待されています。

PCP/MOFの原点と進化

当研究室は、1997年に世界で初めて「ガスを吸着できる多孔性配位高分子」を報告し、結晶内のナノ空間を“分子のための反応場”として活用するという、まったく新しい材料設計の概念を提示しました。その後も剛直から柔軟な構造まで幅広く設計し、分子認識の精密化と機能の高度化を進めてきました。

近年は、外部刺激に応じて構造が可逆的に変化する「ソフト多孔性結晶」の創出を重要なテーマとしています。たとえば、吸着ガスや圧力に応じて構造転移を起こす「ゲート開閉型」や「ブリージング構造」は、従来材料では得られなかった高選択性・応答性を実現し、気体の貯蔵や分離プロセスにとどまらず、膜材料、センサー、各種デバイスへの応用も広がっています。

機能発現の本質に迫る構造解析

私たちは「吸着できる材料」をつくるだけでなく、「なぜ吸着するのか?」、「どの構造要素が応答を引き起こすのか?」といった本質的な問いにも取り組んでいます。そのため、ガス吸着測定や熱分析に加えて、X線吸収微細構造 (XAFS)、単結晶/粉末 X線回折 (XRD) などによる構造動態解析を積極的に行っています。さらに、ナノ結晶化やコンポジット化によって引き起こされる相転移や新たな相互作用の探索も進め

ています。加えて、熱力学モデリング、拡散挙動の定量化、吸着熱と構造安定性のバランス評価など、理論的視点からの解析も取り入れ、材料設計と構造機能相関の深い理解を目指しています。

応用志向と学際的展開

当グループが所属する iCeMS (物質－細胞統合システム拠点) は、2007年に世界トップレベル研究拠点 (WPI) として設立された学際的研究拠点であり、化学・物理学・生物学が融合する新たな学術領域の創出と、その成果を社会貢献へとつなげることを目的としています。私たちもその理念のもと、社会実装を見据えた研究を展開しています。たとえば、CO₂の高効率分離、水の同位体分離、MOF触媒によるプラスチック分解、医療診断用センサーの開発など、基礎と応用をつなぐプロジェクトに積極的に取り組んでいます。企業との共同研究も活発で、実用化に向けた技術基盤の構築にも力を入れています。

研究環境とチームの特徴

研究室には、北川 進 特別教授、大竹研一 特定拠点准教授、坂本 裕俊 特定講師、Qiuyi Huang 特定助教のスタッフを中心に、博士研究員、企業研究員、技術職員、訪問学生などが在籍しています。メンバーは無機・有機化学、物性科学、表面科学、材料・デバイス科学など多様なバックグラウンドを持ち、国際的な環境で協働しています。これまでに、インド、タイ、シンガポール、ベトナム、中国、韓国、台湾、フランス、ドイツ、イタリア、キプロス、アメリカ、ニュージーランドなど世界各国から研究者が加わり、国際的に活躍する人材を多数輩出してきました。

なお、当研究グループは現在、京都大学の学部や大学院に属していないため、学内学生の直接受け入れは行っておりませんが、学内外の大学院生との共同研究や、ポスドク・インターンの受け入れに随時対応しています。



充実した研究環境と最先端技術へのアクセス

当研究室は、京都大学吉田キャンパス内に拠点を構えており、東山一条交差点角の高等研究院本館と、百万遍交差点近くの iCeMS 研究棟および総合研究 1 号館で活動しています。いずれもキャンパス内でも特に利便性の高い立地にあり、研究のみならず日常生活においても快適な環境が整っています。

総合研究 1 号館は、かつて工学部 9 号館と呼ばれていた建物であり、フロンティア軌道理論によって日本初のノーベル化学賞を受賞された福井謙一先生が研究室を構えていた場所でもあります。北川教授は福井先生の孫弟子にあたり、このような歴史と伝統ある場で研究に携われることに深い縁を感じるとともに、身の引き締まる思いを抱いています。

研究室には、PCP/MOF の合成、構造解析、ガス吸着測定、熱分析、分光測定といった研究に必要な設備・装置を一通り整備しており、とくにガス吸着状態のその場観測に対応した複合測定システムの開発に力を注いできました。さらに、iCeMS 解析センターが所有・管理する電子顕微鏡、固体 NMR、特殊ガス計測装置などの最先端機器も、研究目的に応じて柔軟に活用することができます。特に、2024 年に導入された電子回折装置（マイクロ ED）により、従来の X 線回折では解析が困難だった微小結晶の構造情報も取得可能となり、PCP/MOF の構造研究は新たな展開を見せつつあります。加えて、SPring-8 やあいちシンクロトロンなどの放射光施設を活用した実験も積極的に行い、世界最高水準の構造解析データの取得およびその解析にも取り組んでいます。

研究理念と未来への展望

北川教授はしばしば、研究者には、「pioneer（先駆者）」、「pioneer の follower」、そして「その follower の follower」の 3 種類がいる、と語ります。そして常に、研究室の構成員には「Pioneer たれ」というメッセー

ジを発信し続けています。この言葉に象徴されるように、私たちは、ただ興味深い現象を見出すことに満足するのではなく、「なぜその現象が起こるのか」を徹底的に突き詰める姿勢を大切にしています。こうした科学的探究心こそが、北川教授の研究哲学であり、代々この研究室に受け継がれてきた知的伝統でもあります。

また、教授がたびたび口にする「今はガスの時代」という言葉には、目に見えず軽く、制御の難しいガス分子を自在に操ることができれば、エネルギーや環境といった現代社会の喫緊の課題に挑む鍵となる——という強い信念が込められています。私たちもこの考えに深く共感し、ガス分子を動的かつ選択的に制御できる新たな多孔性材料の創出と、その応答機構の解明に取り組んでいます。

こうした探究の姿勢と社会課題への関心を両立させながら、私たちは「構造柔軟性」と「空間機能性」をキーワードに、基礎化学の深化と応用展開を並行して進めています。材料科学の新たな地平を切り拓き、「真に Pioneer と呼べる研究者集団」であり続けること——それが私たちの目指す姿です。

（文責：坂本裕俊）

京都大学 高等研究院 物質－細胞統合システム拠点 (KUIAS-iCeMS) 北川研究グループ

〒606-8501 京都市左京区吉田本町

TEL：075-753-9861

Web：<https://www.kitagawa.icems.kyoto-u.ac.jp>

会 告

第 38 回日本吸着学会研究発表会

主 催

日本吸着学会

協 賛（依頼中の団体を含む）

（公社）化学工学会、（公社）環境科学会、（公社）高分子学会、（一社）資源・素材学会、（一社）触媒学会、（一社）日本ゼオライト学会、炭素材料学会、日本イオン交換学会、（公社）日本化学会、日本キチン・キトサン学会、日本原子力学会、（公社）日本生物工学会、日本熱測定学会、（公社）日本表面真空学会、（公社）日本分析化学会、日本膜学会、（公社）日本水環境学会、（公社）日本薬学会、日本溶媒抽出学会、（一社）廃棄物資源循環学会、分離技術会（五十音順）

会 期

2025年 11月 12日(水)、13日(木)

会 場

J：COM ホルトホール大分（大分県大分市金池南 1 丁目 5-1） 大分駅前

交通アクセス（<https://www.horutohall-oita.jp/>）

開 催 方 式

対面

発 表 要 領

口頭発表：講演 12分、質疑 7分、交代 1分。プロジェクター使用。

ポスター発表：発表時間 1時間 30分（予定）

参加登録費

事前登録（一次）：（2025年 9月 26日(金)まで）

日本吸着学会・協賛学会会員（官・学・産）：7,000円、学生：3,000円

非会員（官・学・産）：10,000円、学生：4,000円

事前登録（二次）：（2023年 10月 31日(金)まで）

日本吸着学会・協賛学会会員（官・学・産）：8,000円、学生：4,000円

非会員（官・学・産）：12,000円、学生：5,000円

懇 親 会

日時：2025年 11月 12日(水) 19時～ 21時（予定）

会場：レンブラントホテル大分（大分県大分市田室町 9-20）

交通アクセス（https://rembrandt-group.com/oita/oita_info/access_o）

参加費：10,000円

主なスケジュール

発表申込期限：2025年 9月 5日(金)

要旨提出期限：2025年 9月 24日(水)

第一次予約参加登録・懇親会申込期間：2025年 8月 1日(金)～ 9月 26日(金)

第二次予約参加登録・懇親会申込期間：2025年 9月 27日(土)～ 10月 31日(金)

※昨年度と較べて一ヶ月ほどスケジュールが前倒しになっておりますのでご注意ください。

※懇親会への参加受付は一次予約申込で終了する場合があります。

※当日参加受付はございませんのでご注意ください。

そ の 他

なお、上記の研究発表会の実施要領は予定であり、変更となる場合があります。

問い合わせ・連絡先

第 38 回日本吸着学会研究発表会 実行委員会

〒 870-1192 大分県大分市大字旦野原 700 番地

大分大学 理工学部理工学科 生命・物質化学プログラム

近藤 篤

E-mail : adsorption2025@oita-u.ac.jp TEL : 097-554-7896

第 52 回炭素材料学会年会

主催：炭素材料学会

共催：(順不同、予定) 日本化学会、産学連携炭素材料研究会

協賛：(順不同、予定) 近藤記念財団、応用物理学会、化学工学会、環境資源工学会、高分子学会、触媒学会、炭素繊維協会、電気化学会、電気学会、日本吸着学会、日本材料科学会、日本セラミックス協会、日本バイオインフォマティクス学会、日本複合材料学会、フラーレン・ナノチューブ・グラフェン学会、大阪科学技術センター

後援：(順不同) 炭素協会

会期：2025年 11月 26日(水)～ 11月 28日(金) (次世代の会を 11月 25日(火) 13:30-17:00に開催*)

会場：長野市生涯学習センター TOiGO WEST (3・4階)

URL：<https://www.toigo.co.jp/access/>

〒380-0834 長野市大字鶴賀問御所町 1271-3

電車：JR長野駅善光寺口より徒歩約 10分、長野電鉄市役所前駅より徒歩約 3分

バス：長電バスまたはアルピコ交通 「昭和通り」下車 徒歩約 1分

***次世代の会会場：**信州大学工学部 国際科学イノベーションセンター 2階

URL：https://www.shinshu-u.ac.jp/access/nagano_technology/

〒380-8553 長野県長野市若里 4-17-1

電車：JR長野駅東口より徒歩約 20分

バス：長電バスまたはアルピコ交通 「信大工学部」下車 徒歩約 1分

要旨集発行日：2025年 11月 19日(水) (WEB要旨のみ。冊子体の配布は行いません)

参加費 (要旨集代込)：

事前割引料金 (10月 31日(金)まで)

炭素材料学会正会員、賛助会員、共催・協賛学協会会員	9,000円
炭素材料学会学生会員、共催・協賛学協会学生会員	4,000円
非会員	18,000円
学生非会員	8,000円

通常料金 (11月 1日(土)以降：クレジット決済のみ)

炭素材料学会正会員、賛助会員、共催・協賛学協会会員	13,000円
炭素材料学会学生会員、共催・協賛学協会学生会員	6,000円
非会員	26,000円
学生非会員	12,000円

年会最終日 (11月 28日(金)) までクレジット決済によるオンライン参加申込が可能です。会場での現金払いによる参加申込はできませんのでご注意ください。

炭素材料学会年会サイト：<https://www.tanso.org/contents/event/conf2025/> (予定)

お問い合わせ先：

1. 炭素材料学会事務局 (※学会への入会、会員登録データの更新に関するお問い合わせはこちら)

TEL：03-5389-6359 E-mail：tanso-post@as.bunken.co.jp

2. 炭素材料学会ヘルプデスク (※年会参加・講演申込に関するお問い合わせはこちら)

〒162-0801 東京都新宿区山吹町 358-5 アカデミーセンター

FAX：03-5227-8632 E-mail：tanso-desk@conf.bunken.co.jp

3. 宿泊について

学会事務局、準備委員会では宿泊などの斡旋は行いませんが、ながの観光コンベンションビューローから助成金を受けて開催されますので、宿泊は長野市内の宿泊施設にご予約をお願いします。

特別講演

11月 27日(木)

演者：①善光寺 寺務総長 若麻績 享則、②信州大学 特別荣誉教授 遠藤 守信

特別セッション「低次元ナノカーボンの創成と応用 (Synthesis and applications of low-dimensional nanocarbons)」

低次元炭素体である「ナノカーボン」は信州大学の遠藤先生によって提唱されて以来、35年余りが経っていますが、今もなおホットな研究領域として基礎から様々な応用まで研究が大きく進展しています。このような背景の中で、新しいナノ炭素科学の視点も踏まえ、あらためて議論する場を本年会では供したいと思います。

学界そして産業界の皆様からの一般講演を広く募集いたします。申込時に分野 A をご選択ください。

このセッションでは、共催・協賛学会会員であれば、炭素材料学会の会員以外でも講演することができます。大勢のご参加をお待ちしております。

インターナショナルセッション

インターナショナルセッションでの講演は英語になります。要旨は英文のものをご提出ください。本セッションは招待講演と一般講演で構成されます。一般講演の申込時には分野 B を選択ください。

このセッションでは、共催・協賛学会会員であれば、炭素材料学会の会員以外でも講演することができます。大勢のご参加をお待ちしております。

発表について

- ・オーラル発表は、討論 10分間を含め 20分間です。各自 PC をご持参ください。HDMI でプロジェクターと接続します。
- ・発表形態（オーラル発表・ポスター発表の区別）は、プログラム編成に際して変更をお願いする場合があります。

講演資格について

講演者は炭素材料学会の会員に限ります。非会員で講演を希望される方は 7月 11日(金)までに本学会へ入会申込を行っていただき、7月 24日(木)までに年会費の入金手続きをいただいた場合に限り、講演資格を得ることとなります。(期日厳守。学会入会に関する問い合わせは、学会事務局 (tanso-post@as.bunken.co.jp) まで)。ただし、特別セッション「低次元ナノカーボンの創成と応用 (Synthesis and applications of low-dimensional nanocarbons)」およびインターナショナルセッションで講演される方については、共催・協賛学会会員でも発表可能です。

講演申込について

炭素材料学会年会サイト（下記 URL）にアクセスし、申込システムから参加申込をお願いします。参加申込完了後に、講演申込が可能となります。なお、講演タイトルや概要に上付きや下付きなどの指定がある場合には、申込システム内の案内に従ってご登録ください。

炭素材料学会年会サイト：<https://www.tanso.org/contents/event/conf2025/>（予定）

- ・複数演題の申込および発表が可能です。
- ・講演申込の際、下記の分野リストの中から第一希望、第二希望をお選びください。

＜分野リスト＞

A：特別セッション	I：キャパシタ
B：インターナショナル（英語発表）	J：二次電池
C：多孔質炭素	K：燃料電池・電気化学
D：炭素繊維・複合材料	L：生物・医療用カーボン材料
E：カーボンアロイ・層間化合物	M：触媒・吸着材
F：炭素化・黒鉛化	N：その他（自由記入）
G：炭素材料の構造解析技術	
H：炭素材料の物性	

学生優秀発表賞・ポスター賞

学生のオーラル発表に優秀発表賞、ポスター発表にポスター賞を設けます。審査を希望する場合、学生優秀発表賞を希望の方は発表種別「学生オーラル」を、ポスター賞を希望の方は「学生ポスター」を講演申込時に選択してください。

以前の炭素材料学会年会にて優秀発表賞を受賞された方は、本申込における学生優秀発表賞の審査対象とはなりません。ご注意ください。（下表をご参考ください。）

なお、本制限は以前の年会で受賞された際の筆頭発表者（要旨集に○印あり）のみが対象になります。受賞発表の連名者が本申込で学生オーラル発表する場合は、審査対象となります。

以前の年会での受賞対象発表	本申込における希望発表種別	審査希望の可否
優秀発表賞（オーラル）	学生オーラル	不可
優秀発表賞（オーラル）	学生ポスター	可
ポスター賞	学生オーラル	可
ポスター賞	学生ポスター	可

審査対象の学生オーラル発表申込が発表可能件数より多い場合、発表種別の変更をお願いすることがあります。第2希望として「学生ポスター」（審査対象）または「一般オーラル発表」（審査対象外）を選択してください。学生オーラル発表の時間は一般オーラル発表と同様、20分間（討論10分間含む）です。奮ってご参加ください。

- ・講演申込の締切は 7月31日(木) 24時です。締切の延長は行いません。
- ・講演申込完了後、完了通知メールをご登録いただいたアドレス宛にお送りします。届かない場合は、年会ヘルプデスク（tanso-desk@conf.bunken.co.jp）までお問い合わせください。
- ・9月末頃に、年会のプログラム概要を年会サイトに掲載しますので、お申込をいただきました方は確認をお願いいたします。
- ・講演要旨原稿は、申込システムよりご投稿いただきます。年会サイトから要旨テンプレート（A4版1枚）をダウンロードし、原稿を作成の上、同システムからご投稿ください。
- ・原稿投稿の締切は 10月1日(水) 15時です。以降の受け付けは一切行いませんので厳守願います。

事前参加申込について

年会当日の受付の混雑を避けるため、事前申込（締切：10月31日(金)）を行っております。

クレジット決済の場合：

クレジットカードでの決済の場合は、申込時に決済方法より「クレジットカード決済」を選択してください。参加申込完了時に表示される「料金を支払う」ボタンより、お支払い手続きをお願いいたします。費用の納入をもちまして、申込み完了となります。

郵便振替の場合：

参加申込完了後、完了通知メールが配信されます。郵便局備付の払込取扱票をご利用の上、完了通知メールに記載の口座宛にSAで始まる受付番号と氏名をご記載いただき、参加費をお支払ください。（注意：システムより参加申込を行わず、参加費を支払われた場合、入金確認がきちんと行われない可能性があります。必ず参加申込完了後に、参加費をお支払ください。）

お1人様で1枚の払込取扱票をご利用ください。郵便振替でのご入金が入金確認の都合上、10月31日(金)までのお振込みとさせていただきます。10月31日(金)以降のお振込みは、受付いたしません。

名札および領収書の発行について

参加申込システムより申込後、参加費の納入が完了しますと、システムより名札および領収書の発行が可能となります。（郵便振替にてお支払いの場合、入金日から3～4日ほど入金確認にお時間をいただきます。）

申込システムにログイン後、「名札」、「領収書」ボタンからそれぞれ発行してください。名札はご自身で印刷していただき、当日会場までお持ちください。

2025吸着夏の学校 開催のお知らせ

吸着分野で活躍する若手研究者の研究活動の活性化と相互の交流を目的として、吸着夏の学校を1泊2日の合宿形式で開催します。本会は、4件の依頼講演と一般参加者（若手研究者歓迎）によるショートプレゼンテーションから構成されます。依頼講演（基礎技術講習・研究トピック講演）では、第一線でご活躍の講師陣による吸着関連の基礎から応用展開まで幅広い講演を予定しています。また、日本吸着学会会長による特別講演では、吸着分野の現状や未来像などを俯瞰的に講演頂き、若手研究者の目指すべき研究者・技術者像について考えるきっかけとしたいと思います。

今回の吸着夏の学校は「吸着分野の縦と横」をテーマに、実用化の深化と異分野への拡張を俯瞰する2日間を、参加者の皆様と共に創り上げたいと考えています。会場は京都市北東、比叡山の麓に位置し、修学院離宮と名利曼殊院に隣接した静かな環境です。多くの方のご参加をお待ちしております（参加はどなたでも歓迎です）。

会期：2025年9月4日(木)～5日(金)

会場：関西セミナーハウス 修学院きらら山荘（京都市左京区一乗寺竹ノ内町 23）

<https://www.kansai-seminarhouse.com/>

スケジュール（変更の可能性あり）

9月4日(木)

13:30 集合・自己紹介

14:00 基礎技術講習 大阪ガスケミカル株式会社 山根康之 博士

「活性炭の選定と利用方法の基礎」

15:00 特別講演 大阪大学・日本吸着学会会長 上田貴洋 先生

「嗚呼、我が研究人生、起承転転・・・・紆余曲折して、ようやく結？」

16:00 若手研究発表（数件）

18:00 夕食

（夕食後、情報交換会）

9月5日(金)

9:00 研究トピック講演 長崎大学 瓜田幸幾 先生

「吸着視点による材料設計—電極材料編—」

10:00 研究トピック講演 川崎重工業株式会社 沼口 遼平 博士

「固体吸収剤を用いた燃焼排ガスおよび空気からのCO₂回収技術の開発」

11:00 若手研究発表（数件）

12:00 解散

参加費（宿泊費・食費込み）：学生（吸着学会会員・非会員不問）9,000円

一般（吸着学会会員、維持会員企業の方）20,000円

一般（非会員）27,000円

参加費は指定の振込先（申込完了後にお知らせします）にお支払い頂きます。

定員：40名

宿泊は、基本的に男女別の相部屋です。研修施設につき個室での対応は困難です。ご理解、ご協力宜しくお願い致します。

若手研究発表：

若手（大学院生、ポスドクを含む大学、研究機関、企業の主に20～30代の方々）によるオーラルプレゼンテーションを募集します。学会ではありませんので、研究成果だけでなく、行き当たっている問題や解釈の難しい結果など、自由に発表・議論していただいて結構です。発表時間はディスカッションを含めて20分程度を予定しています。なお、発表者につきましては、参加者からの発表希望をもとに実行委員長が決定いたしますのでご了承ください。皆様からの積極的なご応募をお待ちしております。

参加申込方法：

下記の申し込みサイトにご入力下さい。

<https://forms.gle/Y1PaFB4CWLEX35X39>

参加申込締切：7月 25日(金)

定員に達した段階で締切とします。参加希望の方はお早めにお申し込み下さい。

問い合わせ先：実行委員長 平出翔太郎（京都大学）

E-mail：hiraide@cheme.kyoto-u.ac.jp

第 37回イオン交換セミナー

テーマ：「挑戦するイオン交換 Ⅱ」

主 催：日本イオン交換学会

協 賛：日本化学会、日本分析化学会、高分子学会、電気化学会、日本薬学会、
(予定) 日本原子力学会、日本生物工学会、環境科学会、日本海水学会、日本吸着学会、
日本膜学会、分離技術会、無機マテリアル学会、資源素材学会、ゼオライト学会、化学工学会、
日本触媒学会、溶媒抽出学会、イオン液体研究会

日 時：令和 7 年 7 月 11 日(金) 10:00～17:00 懇親会 17:30～19:30

会 場：上智大学四ツ谷キャンパス (〒102-8554 東京都千代田区紀尾井町 7-1)

図書館 9 階 L-921 室

JR 中央線、東京メトロ丸ノ内線・南北線 / 四ツ谷駅 麴町口・赤坂口から徒歩 5 分

<プログラム>

10:00～10:10 イオン交換セミナー開催挨拶

平山 直紀 氏 (日本イオン交換学会会長: 東邦大学)

10:10～11:10 「工業用キレート樹脂の最近の動向 (仮題)」

安藤 信吾 氏 (三菱ケミカル株)

11:10～12:10 「電子線グラフト重合を用いたセレミオン新膜の展開 (仮題)」

田柳 順一 氏 (AGC エンジニアリング株)

12:10～13:30 お昼休憩

13:30～14:30 「LED を光源に用いる簡易な分析装置の開発と応用 (仮題)」

鈴木 保任 氏 (金沢工業大学)

14:30～15:30 「エンドトキシン検出用超分子複合体センサーの開発と社会実装に向けた取り組み (仮題)」

木本 洋 氏 (野村マイクロ・サイエンス株)

15:30～15:50 休憩

15:50～16:50 「原子力で発生する希少資源とその回収」

鈴木 達也 氏 (日本イオン交換学会副会長: 長岡技術科学大学)

17:30～19:30 懇親会 (13 号館 304 特別会議室 予定)

参加申込締切：令和 7 年 6 月 27 日(金)、参加費振込み締切 令和 7 年 7 月 4 日(金)

請求書発行にはお時間を頂いておりますので、請求書ご希望の方は 6 月 20 日(金)までに申し込みをお願い致します。

参加申込方法：本会 Web (<http://www.jaie.gr.jp>) より「参加申込」フォームに必要事項をご記入の上、お申し込み下さい。

参加費：(振込) 本会会員・協賛学会会員 5,000 円、非会員 8,000 円、学生無料

(当日) 会員・非会員ともに 10,000 円 (学生は予約外も無料です)

懇親会費：会員・非会員ともに 6,000 円、学生 2,000 円

参加費支払方法：郵便振替 加入者番号：00140-0-420380、加入者名：イオン交換セミナー

銀行振り込み 銀行名：ゆうちょ銀行、支店名：〇一九 (ゼロイチキョウ) 店 (019)、

預金種目：当座、口座名称 (漢)：イオン交換セミナー、

口座名称 (カナ)：イオンコウカンセミナー、口座番号：0420380

問い合わせ先：山形大学大学院理工学研究科 遠藤 昌敏

TEL：0238-26-3142、e-mail：endomasa@yz.yamagata-u.ac.jp

第 76 回コロイドおよび界面化学討論会

主催：公益社団法人日本化学会コロイドおよび界面化学部会

会期：令和 7 年 9 月 22 日(月)～25 日(木) (25 日(木)は国際シンポジウムのみ)

会場：千葉大学西千葉キャンパス (〒 263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33) 一般・企画・シンポジウム講演・ポスター

討論会主題：コロイド・界面科学と AI

催事内容 (予定)

1. アカデミックプログラム

(1) 総合講演、受賞講演

総合講演および Lectureship award 受賞講演、奨励賞受賞講演
オークラ千葉ホテル

(2) 一般研究発表 (口頭およびポスター)

①界面活性剤と両親媒性物質、②分子膜、③ソフトマターとバイオシステム、④微粒子・ナノ粒子・ナノマテリアル、⑤分散・凝集、⑥固体表面と濡れ・吸着・接着

(3) 一般シンポジウム

(4) 国際シンポジウム

(5) 企業展示セッション

2. 懇親会

会場：PIER-01 (ピアゼロワン) 千葉みなと店 (23 日(火)夕刻)

3. キャリ探セッション

学生向けのキャリア探究イベント

4. 若手セミナー (21 日(日)午後)

未来のコロイドおよび界面化学を創る若手討論会 (大学院生・若手研究者向け)

スケジュール

口頭発表申込および要旨原稿締切	6 月 6 日(金)
ポスター発表申込および要旨原稿締切	6 月 27 日(金)
参加登録予約締切	8 月 8 日(金)
要旨集発行	9 月 8 日(月)

ホームページ

<https://pub.conf.it.atlas.jp/ja/event/colloid2025>

触媒学会 第36回キャタリシススクール

主催：一般社団法人 触媒学会

共催（予定・順不同）：アントンパール・ジャパン、島津サイエンス東日本、島津製作所、日本電子、日本分光、日立ハイテク、マイクロトラック・ベル、リガク

協賛（予定・順不同）：日本化学会、高分子学会、化学工学会、電気化学会、石油学会、自動車技術会、日本機械学会、有機合成化学協会、日本表面真空学会、色材協会、日本イオン交換学会、日本エネルギー学会、日本吸着学会、日本ゼオライト学会、日本膜学会、粉体工学会

会期：2025年7月8日(火)～10日(休)

会場：7/8、10（講義）：東京大学浅野キャンパス武田ホール（東京都文京区）

※講義は現地参加のみ

7/9（分析実習）：各共催分析機器メーカーでの現地開催（一部オンライン開催）

開催詳細 URL：<https://catsj.jp/event/18571>

参加申込 URL：準備中

参加申込締切：6月9日(月)締切

※定員（60名）になり次第、期日より前に締め切ることがあります。

7月8日(火)

- | | |
|--------------------------------------|---------------------|
| 1. キャタリシススクールへようこそ | (東京都立大) 宍戸 哲也 校長 |
| 2. 触媒調製 | (千葉大) 一國 伸之 先生 |
| 3. 触媒のキャラクタリゼーション | (東京都立大) 山添 誠司 先生 |
| 4. 吸着と反応速度 | (東京大) 小林 広和 先生 |
| 5. 環境浄化用触媒：カーボンニュートラルに対応した最近の開発トピックス | (日揮ユニバーサル) 梨子田敏也 先生 |
| 6. 実用触媒の開発・ウェルカムパーティ | (ビック情報) 山松 節男 先生 |

7月9日(水)（個別実施）

・共催分析メーカーによる分析実習（現地開催、一部オンライン）

7月10日(木)

- | | |
|--|-------------------|
| 1. 触媒反応工学 | (東京科学大) 多湖 輝興 先生 |
| 2. 工業触媒 | (アイシーラボ) 室井 高城 先生 |
| 3. 研究開発を効率化する革新的 AI解析プラットフォーム「Multi-Sigma」
- 必要最小限の実験・シミュレーションで革新的発見を - | (エイゾス) 河尻耕太郎 先生 |
| 4. 触媒劣化 | (成蹊大) 里川 重夫 先生 |
| 5. 計算・情報科学・卒業式＋ミキサー | (北海道大) 宮崎 玲 先生 |

参加費：50,000円（主催／協賛学協会会員）、60,000円（一般）、20,000円（学生）

※参加せずテキスト販売のみの場合は10,000円

問合先：荻原 仁志（第36回キャタリシススクール運営委員長）

E-mail：catalschool@sec-informations.net（参加者向け専用メールアドレス）

〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255 埼玉大学 理工学研究科

第41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、一般社団法人日本地質学会、公益社団法人日本セラミックス協会、一般社団法人日本膜学会（予定、順不同）

日時：2025（令和7）年11月27日（木）～28日（金）

会場：富山国際会議場（〒930-0084 富山市大手町1番2号、TEL：076-424-5931（代））、URL：<https://www.ticc.co.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 60分（予定、討論を含む）

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）

4）ポスター発表（縦210×横90cmのボードを使用します、60分程度を予定）

発表使用機器：液晶プロジェクター利用の発表のみ。PCは各自ご用意下さい（要HDMI出力）。

講演申込：総合研究発表、一般研究発表、およびポスター発表を募集いたします。総合研究発表、一般研究発表、およびポスター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）。2025年8月1日（金）より日本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：30歳以下（2026年3月31日時点））を設けます。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。なお、ポスター発表は若手優秀講演賞の対象とはなりません。

本年度より、予稿の講演題目に英語タイトルの併記をお願いいたします。また、予稿および発表スライドの図表は英文を推奨いたします。

講演申込締切：2025年9月19日（金）

予稿原稿締切：2025年10月24日（金）（9月中に執筆要領をお送りします。）

予稿送付先：日本ゼオライト学会のホームページおよびメールでお知らせします。

参加登録費：本研究会の発表および参加には、参加登録が必要です。本年度はPayventによる登録および決済を行います。2025年8月1日（金）以降、下記URLから参加登録と参加費の支払いを行ってください。会員資格および登録手続きを行われた期間により参加費が異なります（下表）。なお、研究発表会当日の参加登録はございませんのでご注意ください。

https://jza-online.org/events/registration_meeting

→ に修正致しました

	事前第1期	事前第2期
申込期間	2025年8月1日(金)) 2025年10月24日(金) 24時まで	2025年10月25日(土)) 2025年11月26日(水) 24時まで
会員資格		
日本ゼオライト学会会員(個人会員)(不課税)		
一般会員	7,000円	8,000円
シニア会員※1・学生	3,000円	4,000円
法人会員企業の社員	7,000円※2	8,000円※2
協賛学会の会員(税込)		
協賛学会の個人会員	7,700円	8,800円
協賛学会の学生会員	3,300円	4,400円
会員外(税込)		
非会員	12,100円	13,200円

予稿集代を含みます。

※1：シニア会員 2025年4月1日に満65歳以上である方

※2：日本ゼオライト学会の法人会員企業は1社あたり3名まで無料とします。事前参加登録は必要です。

※企業展示：対面展示2名の参加登録費を無料とします。

※招待講演の講演者の参加登録費は無料です。

講演予稿集について：研究発表会の予稿集は「ゼオライト研究発表会講演予稿集」として参加登録者限定で、学会会場受付にて配布いたします。(2025年11月27日発行予定)

講演のキャンセルポリシー：講演予稿集の発行をもって発表が成立したと見なします。したがって、予稿原稿の提出以降に講演を取り下げることはいけません。予定していた登壇者が当日に発表できない場合は、共同研究者に代理発表をお願いいたします。

懇親会：2025年11月27日(木)講演終了後、富山県民会館8階(申込締切：2025年11月21日)

参加申込は研究発表会の参加申込フォーム内にありますので、参加申し込み登録時に申込をお願いいたします。

参加費(税込)：会員：8,000円、協賛学会員：9,000円、シニア会員：4,000円、学生：4,000円、非会員：10,000円

研究発表会の開催に関する最新の情報はホームページ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：椿 範立(富山大学)、田口 明(富山大学)

TEL：076-445-6925、Email：atagu@ctg.u-toyama.ac.jp(田口)

維持会員一覧

維持会員として、以下の企業各社にご協力を頂いております。

(令和 7年 7月現在、50音順)

株式会社アドール

エア・ウォーター株式会社

大阪ガス株式会社

オルガノ株式会社

株式会社キャタラー

栗田工業株式会社

株式会社重松製作所

株式会社島津製作所

株式会社西部技研

月島環境エンジニアリング株式会社

東ソー株式会社

ニチアス株式会社

富士シリシア化学株式会社

マイクロトラック・ベル株式会社

株式会社レゾナックユニバーサル

株式会社アントンパール・ジャパン

MHIソリューションテクノロジーズ株式会社

大阪ガスケミカル株式会社

関西熱化学株式会社

株式会社クラレ

興研株式会社

システムエンジニアリング株式会社

水ing株式会社

大陽日酸株式会社

帝人ファーマ株式会社

東洋紡株式会社

日本ガイシ株式会社

フタムラ化学株式会社

三菱重工業株式会社

編 集 委 員

委員長 松田亮太郎（名古屋大学）

委 員 瓜田 幸幾（長崎大学）

日下 心平（名古屋大学）

田中 俊輔（関西大学）

山根 康之（大阪ガスケミカル）

（五十音順）

大坂 侑吾（金沢大学）

坂本 裕俊（京都大学）

永石新太郎（北海道大学）

吉田 将之（マイクロトラック・ベル）

Adsorption News Vol. 39 No. 2 (2025) 通巻 No. 153 2025年 7月●日発行

事務局 〒 162-0801 東京都新宿区山吹町 358-5アカデミーセンター

Tel : 03-6824-9370 Fax : 03-5227-8631 E-mail : info@j-ad.org

編 集 永石新太郎（北海道大学）

Tel : 011-706-6593 Fax : 011-706-6592 E-mail : nagaishi@eng.hokudai.ac.jp

大坂 侑吾（金沢大学）

Tel : 076-264-6475 Fax : 076-264-6475 E-mail : y-osaka@se.kanazawa-u.ac.jp

日本吸着学会ホームページ <https://www.j-ad.org/>

印 刷 〒 850-0875 長崎県長崎市栄町 6-23 株式会社昭和堂

Tel : 095-821-1234 Fax : 095-823-8740

General Secretary

THE JAPAN SOCIETY ON ADSORPTION (JSAD)

Academic Center, 358-5, Yamabuki, Shinjuku, Tokyo, 162-0801, JAPAN

Tel : 03-6824-9370 Fax : 03-5227-8631 E-mail : info@j-ad.org

Editorial Chairman

Professor Ryotaro MATSUDA

Graduate School of Engineering, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi, JAPAN

Tel : +81-52-789-4603 E-mail : ryotaro.matsuda@chembio.nagoya-u.ac.jp

Editor

Shintaroh NAGAISHI, Hokkaido University

N13W8, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-8628, JAPAN

Tel : +81-11-706-6592 E-mail : nagaishi@eng.hokudai.ac.jp

Home Page of JSAd : <https://www.j-ad.org/>

本誌に記載された著作物を許可なく複製・公開することを禁ずる。

© 2025 The Japan Society on Adsorption