

Adsorption News

Vol. 37, No. 3 (November 2023)

通巻 No.146

目 次

○巻頭言.....	2
「意味のある研究」	西原 洋知
○第 36 回日本吸着学会研究発表会のお知らせ	4
○第 36 回日本吸着学会研究発表会プログラム	5
○特別寄稿.....	13
「吸着ナノ科学遍歴：どこから、どこに、どこへ」	金子 克美
○会員探報.....	21
名古屋大学大学院工学研究科物質プロセス工学専攻	川尻研究室
○維持会員一覧.....	23

日本吸着学会
The Japan Society on Adsorption

巻 頭 言

意味のある研究

東北大学材料科学高等研究所 西原 洋知



昨年の夏、第14代目の学会長を務めた宮原稔先生の突然の訃報が届き、その悲しみもまだ心に残る中、今年5月には第11代目の学会長であった田門肇先生が逝去され、大きな喪失感を抱いている会員の方々も多いことと存じます。筆者自身、田門先生は修士課程から博士課程をご指導いただいた恩師であり、宮原先生も同じ京大化学工学教室の尊敬する先生でした。今でも、お二人との貴重な思い出が鮮明に蘇ってきます。お二人とも長年に渡り多くの優秀な人材を育て上げ、そのために全力を尽くされていたことは周知の事実です。遺志を継ぐ、と言うのは過大な表現かもしれませんが、お二人から学んだ教訓や受け取った言葉を自分自身に深く刻み込み、研究、特に吸着科学の分野でより優れた活動を行うことが、お二人への最大の追悼になるものと信じています。

さて、では具体的に研究活動の何をどうすべきか？と思案した際、故先生たちがしばしば言及していた「意味があるのか、無いのか」という基準が、筆者の思考を導く指針として浮かんできます。「原料だけを変更した吸着材の合成研究には意味が無い」、「高性能でもあまりに高価な材料には意味が無い」、「実験と連動していないシミュレーションには意味が無い」など。化学工学教室に所属していましたので、「世の中の役に立つ」＝「意味がある」という意味として学生時代はそれらの言葉を受け取っていました。しかし、学界での長い活動と数多くの研究者との交流を経て、「意味がある・無い」というのは、個々の立場や背景によって随分と振れ幅が大きい概念であると理解するようになりました。

最近一例として、東南アジアの研究者から「果物の食べられない部位を炭素化して吸着材を製造する」という言わば月並みな研究について、目を輝かせながら熱弁をされました。一方、JACSなど著名なジャーナルに数多くの論文を掲載している知り合いの教授は、「自分の専門分野は既にオワコンであり、自分自身含

め、著名なジャーナルに掲載されているほとんどの化学論文にはあまり意味がない」と日頃から嘆いています。これら2つの例は両極端ですが、「意味があるのか、無いのか」という基準が、個々の立場、視点、状況によって大きく変動することを示しています。筆者が思うに、結局どれだけ「意味がある」のかは、

(自分の信念・熱意) × (周囲への影響の大きさ) で決まるように思います。

約20年前、筆者が学生であった当時、田門研究室では活性炭の製造やカーボングルの製造に取り組んでいました。よく田門先生は、「外国製の安い活性炭は1000 m²/gくらいで、1 kgを数百円以下で買える。単に比表面積が2000 m²/gのカーボンを作っても、値段が活性炭の倍以上するなら意味がない。安い活性炭を大量に使えばいいだけだから。」「新しいポラスカーボンを作る研究をするなら、如何に高付加価値を付けるのが重要だ。」と仰っていたのを思い出します。筆者自身は2005年に東北大学の京谷隆先生の研究室の助手に着任し、鋳型炭素の研究に取り組みました。鋳型炭素の製造は高コストであり、産業的には「あまり意味が無い」と見られていました。それゆえ、京谷先生は基礎研究に注力しつつ、同時に高付加価値の追求も目指していました。そのような状況で筆者が2013～2016年に開発した鋳型カーボン「グラフェンメソスポンジ」は、高コストを克服し得る圧倒的な物性を示したため、この材料を基に、2022年に株式会社3DCを設立しました。現在では研究室内外の多くの研究者を巻き込んだ国際的な共同研究を推進しつつ、3DCでは約20名のスタッフが社会実装に向けた検討を熱心に行っています。まだ将来どうなるか分かりませんが、現時点では世界の多くの人々に新しい「プレイグラウンド」を提供できており、少なくともそのことには「意味があった」と感じています。最近、日本の研究力低下が大きな問題となっておりますが、我々研究者の1人1人が、自分が「意味のある」と確信す

る研究に情熱を傾けることこそが、最良の解決策なのではないでしょうか。

今から約 20 年前、筆者が博士課程の学生であった当時、田門先生が出張でタイを訪れている期間を狙い、筆者の個人的な旅行をぶつけてバンコクで合流したことがありました。ちょうど今、当時と同じホテルに宿泊して本稿を書いており、当時の楽しい思い出が蘇ります。あれこれ思案する筆者に対し、今でも田門先生の口癖が聞こえてきそうです。

「ええんちゃう？ 知らんけど」

氏名 西原 洋知

所属 東北大学 材料科学高等研究所 教授

略歴 2005 年 3 月 京都大学工学研究科化学工学専攻
博士後期課程修了、博士（工学）
取得

2005 年 4 月 東北大学多元物質科学研究所
助手

2011 年 8 月 東北大学多元物質科学研究所
准教授

2013～2017 年 JST さきがけ研究員（兼務）

2017 年度 University of Calgary 客員教授
（兼務）

2020 年 4 月 現職
東北大学多元物質科学研究所
教授（兼務）

第 36 回日本吸着学会研究発表会

- 主 催：**日本吸着学会
- 共 催：**金沢大学新学術創成研究機構
- 会 期：**2023年 12月 7日(木)、8日(金)
- 協 賛：**(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, 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, (一社)日本ゼオライト学会, 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)
- 講演会場：**石川県立音楽堂 交流ホール (石川県金沢市昭和町 20-1)
交通アクセス (https://ongakudo.jp/c_access/417)
- 懇 親 会：**12月 7日(木) 19時～21時
ホテル金沢 5階 アプローチ (石川県金沢市堀川新町 1番 1号)
交通アクセス (<https://www.hotelkanazawa/>)
参加費：9,000円
- 参加登録：**<https://www.j-ad.org/annual-meeting/> の参加登録申込フォームに必要事項をご記入のうえ、お申込みください。
第 2 次予約参加登録締切：2023年 11月 24日(金)
(第 1 次予約参加登録締切：2023年 10月 27日(金))
※登録締切以降の申込につきましては研究発表会ホームページをご確認ください。
- 実行委員会 (問合せ・連絡先)：**〒 920-1192 石川県金沢市角間町
金沢大学 新学術創成研究機構
児玉 昭雄
E-mail : jsad-36kanazawa@ml.kanazawa-u.ac.jp / TEL 076-264-6472

第 36回 日本吸着学会研究発表会プログラム

全体スケジュール

第 1 日目 令和 5 年 12 月 7 日(木)

時 間	講演種別等	座 長
8 : 30	受付開始	
9 : 00-10 : 20	口頭発表 1-01～ 1-04	西原 洋知（東北大学）
10 : 20-11 : 20	口頭発表 1-05～ 1-07	飯山 拓（信州大学）
11 : 20-11 : 50	招待講演 1-A01 奨励賞受賞講演	松田亮太郎（名古屋大学）
11 : 50-13 : 00	昼食（理事・評議員会）	
13 : 00-14 : 30	ポスター発表	
14 : 30-15 : 30	口頭発表 1-08～ 1-10	上田 貴洋（大阪大学）
15 : 30-16 : 50	口頭発表 1-11～ 1-14	瓜田 幸幾（長崎大学）
16 : 50-17 : 20	招待講演 1-A02 学術賞受賞講演	児玉 昭雄（金沢大学）
17 : 20-17 : 30	休憩	
17 : 30-18 : 30	日本吸着学会総会 学会賞授与式	
19 : 00-21 : 00	懇親会	

第 2 日目 令和 5 年 12 月 8 日(金)

時 間	講演種別等	座 長
8 : 40-10 : 00	口頭発表 2-15～ 2-18	稲垣 怜史（横浜国立大学）
10 : 00-11 : 20	口頭発表 2-19～ 2-22	田中 秀樹（信州大学）
11 : 20-11 : 50	招待講演 2-A03 奨励賞受賞講演	山根 康之（大阪ガスケミカル）
11 : 50-13 : 00	昼食（運営委員会、Adsorption News編集委員会、 標準化委員会）	
13 : 00-14 : 00	口頭発表 2-23～ 2-25	川尻 喜章（名古屋大学）
14 : 00-15 : 20	口頭発表 2-26～ 2-29	大坂 侑吾（金沢大学）
15 : 20-17 : 00	口頭発表 2-30～ 2-34	日下 心平（名古屋大学）

● 1日目 令和5年12月7日(木) 9:00～18:30

8:30 受付開始

9:00～10:20 口頭発表

[座長 西原 洋知 (東北大学)]

- 1-01 官能基と炭素膜の協奏による分子ふるい炭の創製
(長崎大、大阪ガスケミカル、信州大) ○瓜田 幸幾、濱崎 美有、丸林 海翔、石田 俊、山根 康之、
田中 秀樹、能登原 展穂、森口 勇
- 1-02 コロイド状態を制御したグラフェン包接体
(信州大) ○大塚 隼人、久保 圭、佐伯 大輔、金子 克美
- 1-03 グラフェン・規則性メソポーラスシリカサンドイッチ型複合構造制御及び酵素充填剤への応用
(産総研) 川上 晴生、佐藤 由也、高橋 伊久磨、○王 正明
- 1-04 吸着等温線からのカーボンナノ細孔の3次元可視化の試み
(信州大) F. Vallejos-Burgos、C. de Toms、K. Urita、S. Wang、C. Urita、I. Moriguchi、A. V. Neimark、
Y. Gogotsi、○K.Kaneko

10:20～11:20 口頭発表

[座長 飯山 拓 (信州大学)]

- 1-05 ヘテロ原子導入ハードカーボンのナトリウム吸蔵挙動
(北陸先端大、岡山大、群馬大) 安東 映香、畠山 義清、○後藤 和馬
- 1-06 多孔性炭素を用いた水系 EDLC特性へのアルコール添加の影響
(長崎大) ○能登原 展穂、Pierre-Louis Taberna、瓜田 幸幾、森口 勇
- 1-07 機能性活性炭の吸着・脱着現象を用いたフロン類の回収・分離・再生の可能性評価
(九州大) ○徐 祥源、Kyaw Thu、宮崎 隆彦

11:20～11:50

[座長 松田 亮太郎 (名古屋大学)]

- 1-A01 招待講演 奨励賞受賞講演
分子カーボンナノリングの吸着科学への展開
(京成大 iCeMS) ○坂本 裕俊

11:50～13:00 昼食 (理事・評議員会)

13:00～14:30 ポスター発表

14:30～15:50 口頭発表

[座長 上田 貴洋 (大阪大学)]

- 1-08 Mathematical analysis of adsorption phenomena by cylindrical particles
(韓国工學大) 趙 榮相

- 1-09 蛍光発光を示す π 共役系イオン液体を用いたナノ空間中でのイオン液体のドメイン構造形成の解明
(信州大) ○中村 健人、村田 夢斗、飯山 拓、二村 竜祐
- 1-10 トポロジカル解析による極微小水の構造決定
(信州大) ○杉山 泰啓、中野 智康、飯山 拓、二村 竜祐

15:50-16:50 口頭発表

[座長 瓜田 幸幾 (長崎大学)]

- 1-11 細孔内溶液の形成と溶質の逆析出・溶解現象
(信州大、大阪大) 横山 赳、松田 優花、上田 貴洋、二村 竜祐、○飯山 拓
- 1-12 ACFスリット状マイクロ孔に閉じ込められた重水の分子再配向に関する 2H-NMR による研究
(大阪大、信州大) 浅田 拓己、岩月 倫、飯山 拓、○上田 貴洋
- 1-13 吸着量制御 ^{129}Xe -NMR法による活性炭とXe分子の吸着相互作用評価
(九州大) ○李 明昊、出田 圭子、中林 康治、尹 聖昊、宮脇 仁
- 1-14 固体NMR法を用いた金属-有機構造体の CO_2 吸着メカニズムの解明
(金沢大) ○栗原 拓也、犬飼 宗弘、水野 元博

16:50-17:20

[座長 児玉 昭雄 (金沢大)]

- 1-A02 招待講演 学術賞受賞講演
吸着マイクロカロリーメトリーを中心とした多孔性固体表面への吸着機構の解明
(豊橋技科大) ○松本 明彦

17:20-17:30 休憩

17:30-18:30 日本吸着学会総会、学会賞授与式

19:00-21:00 懇親会

● 2日目 令和5年12月8日(金) 8:40~17:00

8:40-10:00 口頭発表

[座長 稲垣 怜史 (横浜国立大学)]

- 2-15 放射線グラフト重合によるパウダー状ホウ素吸着材の開発
(量子科学技術研究開発機構) ○保科 宏行、瀬古 典明、大道 正明、植木 悠二、天田 春代、物部 長順、
物部 長智、内村 泰造、小國 匿児、中野 正憲、宮外 清貴
- 2-16 グラフト吸着材を充填剤とするバネフィルタ吸着装置の開発
(量子科学技術研究開発機構) ○瀬古 典明、大道 正明、植木 悠二、天田 春代、物部 長順、物部 長智、
内村 泰造、小國 匿児、中野 正憲、宮外 清貴、保科 宏行
- 2-17 多孔性配位錯体UiO-66シリーズへの薬物吸着機構に関する実験および数値解析的検討
(大阪公立大) ○大島 一輝、大崎 修司、仲村 英也、綿野 哲

2-18 固定層吸着における ELM-11 の CO₂ 脱着挙動
(名古屋大) ○藤木 淳平、上代 洋、矢島 智之、川尻 喜章

10:00-11:20 口頭発表

[座長 田中 秀樹 (信州大学)]

2-19 柔軟な多孔性配位高分子を用いた CO₂ の排他的分離のためのゲートメカニズム
(京都大) ○大竹 研一、Yifan Gu、Jiajia Zheng、北川 進

2-20 官能基化カルバゾール配位子を用いた MOF の柔軟性制御およびガス吸着挙動
(立教大) ○菅又 功、天野倉 夏樹、白井 昭宏、箕浦 真生

2-21 原子間力顕微鏡によるソフト多孔性錯体単粒子への外力印加とゲート型脱着挙動の解析
(京都大) ○有馬 誉、永野 拓幸、平出 翔太郎、渡邊 哲

2-22 吸着駆動型逆スピン転移を示すナノポーラス金属錯体
(名古屋大) Yunsheng Ma、堀 彰宏、高坂 亘、日下 心平、宮坂 等、○松田 亮太郎

11:20-11:50

[座長 山根 康之 (大阪ガスケミカル)]

2-A03 招待講演 奨励賞受賞講演

ゲート型吸着剤を活用した吸着分離プロセスの実用化に向けた基礎研究
(京都大) ○平出 翔太郎

11:50-13:00 昼食 (運営委員会・Adsorption News編集委員会・標準化委員会)

13:00-14:00 口頭発表

[座長 川尻 喜章 (名古屋大学)]

2-23 温度スイング吸着 (TSA) 法を用いた O₂ 濃縮
(西部技研、金沢大) ○酒井 春菜、井上 宏志、古木 啓明、児玉 昭雄、大坂 侑吾

2-24 分子ふるい炭素を用いた酸素富化 TSA プロセス開発
(金沢大、西部技研) ○大坂 侑吾、辻口 拓也、児玉 昭雄、酒井 春菜、古木 啓明、井上 宏志

2-25 排ガス中に含まれる NO_x をアンモニアに変換する選択吸着+触媒反応 2 段階システムの構築
(東京大、西部技研) ○小倉 賢、大西 武士、藤 章裕、野中 みのり、井上 宏志

14:00-15:20 口頭発表

[座長 大坂 侑吾 (金沢大学)]

2-26 ガス分取型 VPSA による CO₂-H₂ 同時分離
(JFEスチール) ○紫垣 伸行、沖田 智之

2-27 新規ゼオライトを使った CO₂ 回収プロセスの最適化と経済性評価
(名古屋大) ○濱田 亮、William Nguyen、大西 良治、引間 脩、矢島 智之、川尻 喜章

2-28 シミュレーションを用いた CO₂ 連続回収プロセスの最適化
(RITE) ○木下 朋大、余語 克則

- 2-29 DAC向け固体アミン CO_2 吸着体容量に及ぼすアミン特性の影響について
(トヨタ自動車) ○渡辺 真祈、坂野 充、長田 さつき、貞光 貴裕

15:20-17:00 口頭発表

[座長 日下 心平 (名古屋大学)]

- 2-30 アナターゼ型 TiO_2 薄膜中の格子間酸素の局所構造解析
(東京大・中部大) ○簾 智仁、上田 礼一、三浦弓恵、清水 亮太、中山 亮、山田 直臣、一杉 太郎
- 2-31 プロパン・プロピレン分離の吸着材を指向する純シリカゼオライトベータでのプロパンの優先的な吸着挙動
(横浜国立大、東ソー) ○稲垣 怜史、林 雅斗、西 裕子、中尾 圭太、中澤 直人、窪田 好浩
- 2-32 ゼオライト細孔内における水吸着ダイナミクスの近赤外吸収分光測定
(大阪公立大) ○竹内 雅人、須摩淵 浩基、三國 諒宏、松岡 雅也
- 2-33 Y型ゼオライトの脱 Al 挙動と細孔構造変化
(産総研) ○上村 佳大、小平 哲也、遠藤 明
- 2-34 Ag置換ゼオライト膜におけるプロピレン吸着メカニズムの計算科学的検討
(信州大) ○緒方 智希、酒井 求、松方 正彦、手嶋 勝弥、田中 秀樹

ポスター発表

- P-01 硫黄含有誘導体の熱処理による高濃度硫黄ドーピングカーボンの調製
(東北大) ○千田 晃生、吉井 丈晴、祖父江 健貴、大谷 俊介、加藤 研一、生越 友樹、神谷 和秀、西原 洋知
- P-02 固定層および疑似移動層クロマトグラフィーを用いたマイナーアクチノイド分離の運転最適化
(JAEA、名古屋大) ○小嶋 茜音、佐野 雄一、矢瀧 智之、川尻 喜章
- P-03 吸着ポテンシャルを操作した層状 MnO_2 による水系からの色素吸着性の評価
(関東学院大) ○松井 誠実、佐藤 匠、友野 和哲
- P-04 アミン修飾グラフェンナノフレークの二酸化炭素吸着メカニズム
(北海道大) ○平井 隆介、田地川 浩人
- P-05 ZnS導入FAUへの光照射のON/OFFによる CO_2 吸着挙動
(静岡理工科大) ○馬場 早穂、村松 雪乃、山崎 誠志
- P-06 配向性向上を目指したシリカライト膜の成膜と二酸化炭素の分離
(徳島大、岐阜大、マイクロトラックベル) ○畠山 大輝、赤木 空良、大栗 光、花田 隆文、加藤 雅裕、近江 靖則、仲井 和之
- P-07 金属ドーピンググラフェンナノフレークのメタン吸着メカニズム
(北海道大) ○橋本 幸樹、田地川 浩人
- P-08 環境測定での異種固体捕集剤における有機溶剤脱着率の濃度依存性
(労働者健康安全機構) ○安彦 泰進
- P-09 アルミニウム平板上への炭素系吸着材層の形成
(金沢大) ○玉生 沙弥、児玉 昭雄、辻口 拓也、汲田 幹夫
- P-10 応力誘起型ヒートポンプのシステム体積低減に向けた検討
(東北大、日産自動車) ○篠塚 亮輔、金丸 和也、伊藤 仁、内村 允宣、伊倉 亜美、市川 靖、曾根 和樹、

西原 洋知

- P-11 ナノ層状リアクターのメソ孔内を反応場とした色素吸着と分解速度の向上
(関東学院大) ○佐藤 匠、小岩 一郎、友野 和哲
- P-12 酸化チタンナノ粒子と酸化グラフェンを用いたハイブリッド体の細孔構造制御
(大分大、エア・ウォーター・パフォーマンスケミカル) ○片平 一司、長谷川 照、岡部 明弘、櫻井 翔太、近藤 篤
- P-13 テレフタル酸と NaOH から得られる Na_2CO_3 炭素ナノコンポジットの焼成温度が CO_2 回収特性に与える影響
(千葉大) ○ZHANG BO、加納 博文
- P-14 ナノ細孔構造評価における陽電子消滅寿命法の有効性と課題
(信州大) ○久保 圭、大塚 隼人、佐伯 大輔、酒井 俊郎、金子 克美
- P-15 ガス貯蔵材料を指向した新規トリプチセン MOF の合成と性質
(立教大、日本曹達) ○山田 翔子、菅又 功、天野倉 夏樹、白井 明宏、箕浦 真生
- P-16 in-situ X線散乱測定機構を備えた高温での蒸気吸着測定装置の開発
(信州大) ○表山 知加、杉山 泰啓、飯山 拓、二村 竜祐
- P-17 酸化グラフェン層間に挿入されたイミダゾールの分子運動とプロトン伝導
(北陸先端大、岡山大、金沢大) ○山口 和輝、重田 泰宏、水野 元博、後藤 和馬
- P-18 窒化ホウ素細孔体の表面化学状態およびナノ細孔構造制御手法の開発
(岡山大) ○山下 雅仁、黒田 泰重、大久保 貴広
- P-19 音場内における X 型ゼオライトの二酸化炭素吸着挙動
(名古屋大) ○藤木 淳平、上田 祐樹
- P-20 急峻なゲート吸着を示す Flexible MOF の合成・賦形手法確立と吸着分離プロセスへの展開
(京都大) ○西本 圭佑、平出 翔太郎、渡邊 哲
- P-21 分子形状と極性の有無による吸着速度への影響
(信州大) ○辻井 太斗、二村 竜祐、飯山 拓
- P-22 メカノケミカル法を用いた CD-MOF の合成と薬物導入
(関西大、大阪医科薬科大) 藤田 脩平、田中 俊輔、門田 和紀、内山 博雅、戸塚 裕一、
- P-23 硫化物系固体電解質を用いた全固体電池の operando NMR 解析
(北陸先端大、岡山大) ○田上 修、高橋 勝國、岡橋 亜希子、後藤 和馬
- P-24 ハニカムロータを用いた酸素富化 TSA プロセスの数値解析に関する研究
(金沢大、西部技研) ○岩本 響輝、大坂 侑吾、辻口 拓也、児玉 昭雄、酒井 春菜、古木 啓明、井上 宏志
- P-25 グラフェンの官能基化によるガスセンシング挙動の制御
(千葉大) ○岩上 壮吾、大場 友則
- P-26 活性炭ミクロ孔内での酸性吸着層形成および硝酸イオンの吸着状態解析
(岡山大) ○小綿 紀洋、大久保 貴広
- P-27 細孔内カチオン種が GME 型ゼオライトの特異的 CO_2 吸着挙動に与える影響
(関西大) ○末次 由奈、安田 知弘、樋口 雄斗、田中 俊輔
- P-28 高性能電極創製に向けた電極その場 TEM 解析手法の開発
(長崎大) ○幾竹 海斗、能登原 展穂、森口 勇、瓜田 幸幾
- P-29 シクロデキストリン系 MOF の複数薬物担体としての応用
(大阪公立大) ○大橋 歩実、大島 一輝、大崎 修司、仲村 英也、綿野 哲

- P-30 温度スイング条件下における分子ふるい炭素の酸素 / 窒素吸脱着挙動に関する研究
(金沢大、西部技研) ○細川 毅人、大坂 侑吾、辻口 拓也、児玉 昭雄、酒井 春菜、古木 啓明、井上 宏志
- P-31 環境中の低濃度シロキサン化合物の吸着除去による MEMS型ガスセンサの耐久性向上
(大阪公立大) ○小川 智広、須摩淵 浩基、古野 純平、井澤 邦之、西村 瑠美、谷口 卓史、三橋 弘和、竹内 雅人
- P-32 リン酸賦活で得られるもみ殻活性炭の細孔特性と賦活メカニズム
(大阪技術研) ○岩崎 訓、長谷川 貴洋
- P-33 CO₂電気化学還元触媒層構造がギ酸吸着におよぼす影響
(金沢大) ○早出 拓、中嶋 利輝、辻口 拓也
- P-34 酸塩基協働メカニズムによる LTA表面でのホルモース反応
(豊田中研) ○脇 稔、白井 聡一、長谷 陽子
- P-35 MXene電極へのイオン (Li・Na・Mg) インターカレーション機構の考察
(長崎大学) ○青木 俊輔、能登原 展穂、瓜田 幸幾、森口 勇
- P-36 破過曲線測定による Ag-X中のプロピレン動的吸着特性の検討
(早稲田大) ○藤本 早希、酒井 求、松方 正彦
- P-37 ナノシリカコロイド分散多孔質吸着材の水蒸気吸着
(東洋大、明治大) ○清田 佳美、加世田 大雅、小川 熟人
- P-38 細孔性グラフェン膜の CO₂/CH₄分離ダイナミクス
(千葉大) ○蓮見 駿介、川端 駿介、大場 友則
- P-39 水吸着によるマイクロ溶液の形成と溶質の排出、再溶解メカニズムの解明
(信州大、大阪大) ○横山 越、松田 優花、上田 貴洋、二村 竜祐、飯山 拓
- P-40 回転式吸着ヒートポンプの COP/出力向上に関する解析的検討
(金沢大) ○坂本 大樹、大坂 侑吾、辻口 拓也、児玉 昭雄
- P-41 ZnO鋳型法による窒素ドーピングメソポーラスカーボンの合成
(関西大、パナソニックホールディングス) ○小針 晃一、堀野 統己、門林 健太、田中 克和、田中 俊輔、及川 一摩、桑原 涼
- P-42 氷点以下の吸着材塗布層における水蒸気吸着および着霜挙動
(名古屋大) ○窪田 光宏、加甲 起也、川村 拓也、山下 誠司、北 英紀
- P-43 等量吸着熱を用いた活性炭細孔内の水吸着状態の検討
(信州大) ○岩月 倫、二村 竜祐、飯山 拓
- P-44 吸着誘起スピン転移を利用したナノポーラス金属錯体の吸着熱制御
(名古屋大) ○大野 華子、Pirillo Jenny、Qu Liyuan、日下 心平、土方 優、井口 弘章、松田 亮太郎
- P-45 ELM-11の二酸化炭素吸収反応に対する SO₂の影響
(千葉大) ○片岡 洋人、上代 洋、加納 博文
- P-46 容量法による分子ふるい炭素の空気質吸脱着挙動評価
(金沢大) ○佐藤 信吾、大坂 侑吾、辻口 拓也、児玉 昭雄
- P-47 ハイブリッド型固体吸収材の CO₂吸収性能評価
(RITE) ○清川 貴康、井下 智哉、木下 朋大、Chowdhury Firoz Alam、Vu Thi Quyen、余語 克則
- P-48 分枝鎖置換基を有するイソフタル酸と銅 (II) イオンからなるカゴメ型 MOFの合成と吸着特性
(名古屋大) ○竹内 優紀乃、Pirillo Jenny、Qu Liyuan、日下 心平、土方 優、井口 弘章、松田 亮太郎

- P-49 電荷分離型細孔表面を有するナノポーラス金属錯体の設計と吸着機能
(名古屋大) ○高原 哲平、Pirillo Jenny、Qu Liyuan、日下 心平、土方 優、井口 弘章、松田 亮太郎
- P-50 その場合合成を利用した PDMS-MOF複合体の作製と機能評価
(金沢大) ○西川 卓良、渡村 歩、栗原 拓也、重田 泰宏、雨森 翔悟、井田 朋智、水野 元博
- P-51 SWCNT中の H_2O - H_2O 構造へのイオンの影響
(信州大) ○河又 悠真、二村 竜祐、飯山 拓、金子 克美
- P-52 柔軟性のある MIL-53への低級炭化水素の吸着・脱離等温線の解析
(石巻専修大) ○菊池 尚子、山崎 達也
- P-53 ZIF-8中の直鎖アルカン吸着状態の解明
(信州大、大阪大) ○三原 龍太、二村 竜佑、上田 貴洋、飯山 拓
- P-54 Operando NMR測定による酸化物系全固体電池の内部状態解析
(岡山大、北陸先端大) ○芦塚 桃子、寺西 貴志、笹岡 香織、後藤 和馬
- P-55 金属有機構造体のガラス化を利用した分離・吸着材の合成と評価
(関西大、日本ガイシ) ○丸田 大翔、田中 俊輔、宮原 誠、野田 憲一

特別寄稿

吸着ナノ科学遍歴：どこから、どこに、どこへ

信州大学 先鋭材料研究所 金子 克美



1. はじめに

2022年11月の35回日本吸着学会研究発表会において、日本吸着学会名誉会員に推戴して頂いた。日本吸着学会に深く感謝申し上げたい。私は世界吸着学会、英国王立化学会、日本化学会のフェローの称号を頂いているが、私の科学研究はまだまだ不十分であり、なんとか自分でも納得できる独自性の高い学術を作り上げたいという気持ちが強い。今でも私の研究室の若い人たちと修了生にはいまだにあれこれお願いして迷惑をかけている。

最近、*Carbon*誌 (Sharpening senses as a key to advance science: 208, 432-435 (2023)) にニューヨーク市立大の T. Bandoz教授との対談で、研究姿勢と方針などを述べさせて頂いた。そこで本特別寄稿では研究の流れに重きを置き、少し長くなるが、私の研究との出会い、現状、更に比較的近い今後について書かせて頂くこととした。

2. どこから

私が横浜国大（工学部応用化学科）に入って一番興味を持ったのは量子力学であった。最初にポーリングの量子力学序論を読み、面白いと思った。その後同期の仲間と有機化学への分子軌道法の応用に関する英語の本を読んだ。これは理屈が簡単である反面、わからないことだらけであった。その後もう少し理解したいと思い、大学4年になる前の春休みにカンパニエーツの理論物理学を読み上げた。訳本で600ページ以上ある本であったが、相当程度に量子力学が分かったような気がして、感動したことを覚えている。そんなことから卒研は量子化学研究室にはいり、一般化原子価結合法によるSiHの電子状態の計算を行った。直感的なHeitler-London近似法を、一般化原子価結合法では電子スピンの交換を考慮した難解なものであった。小谷正雄教授（当時：東大理）が開発した理論で、回転群がわからないと全く歯が立たないしろものであった。

まず、犬井鉄郎著の回転群の本を必死で読みながら、5電子系なので5!個の変換行列を求めた。その後ハミルトニアン行列要素を計算してから、東大の大型計算機センターで計算するというものであった。行列要素の計算には手回し計算機を必死に回す必要があった。この時は全国的に大学がストライキでロックアウトされており、時間はかかったが、何とかSiHの基底状態だけは計算できた。しかし、量子化学には大型計算機が必要であることを実感して、量子化学に魅力を感じなくなった。計算から離れて分子よりもう少し大きな系に関する実験的な研究をやりたいという気持ちが強くなっていた。ただ、私の父は大工で、私がいつも父の手伝いをしていたので、彼は私が大工になることを望んでいた。従って、大学院進学には反対であったが、次第に反対しなくなった。

そんな訳で東大理学部物理学の有機半導体のパイオニアの赤松英雄教授の研究室に入れさせて頂いた。赤松先生最後の修士課程の学生であった。赤松先生はゼオライトの吸着研究をされていた鮫島先生の後継教授であり、最近では見えない“縁”を感じている。先輩たちは錚々たるメンバーであった。物性研究所には井口洋夫先生がおられ、そことはよく交流しており、多くの若い人と知り合いになれた。研究室に入った時に、赤松先生から大学院の試験で数学と物理の成績は極めてよかったが、化学は普通と研究室のメンバーに紹介された。今ではすっかり数学も物理も駄目になったが。

修士課程では「分子性結晶の光吸収スペクトル」と言うテーマを頂いた。赤松先生が広いタイトルなので、これなら何でもできるだろうということであった。ただし、最初のころは先輩が行っていた電荷移動吸収体測定の前踏であり、つまらないので、低温測定装置を作らせて欲しいと申し出た。低温にすると電荷移動相互作用が強まり、新しい知見が得られて面白いと考えたからである。赤松先生はすぐに了承してくれた。た

だし、何も知らない学生が当時ポピュラーでない微細な単結晶計測用の低温セルを作るのは大変であった。この時六本木にある東大生産研の工場でステンレスセルを作ってもらった。この低温セルの温度制御は液体窒素の流量制御で行うという体力勝負の装置であった。修士課程の2年目の10月頃に信頼できるデータが出てくるという状態であった。そんな訳で修士論文提出もぎりぎりになり、赤松先生には本当にご迷惑をおかけした。ある程度の目的とする実験データは得られたが、学術論文を書くまでには至らなかった。しかし、励起子やエネルギー移動など固体科学における大事な概念を把握できた。

これらは後にカーボンナノチューブを扱う時に大変に役だった。ナノチューブの分光の論文で当時の古い論文を引用しているのには驚いた。また、装置作りの楽しさを実感した。千葉大に職を得てから、 10^2 - 10^7 Hz交流伝導度測定システム、ns電子パルス発生装置、極低温伝導度測定システム、マイクロ波装置などを自分で作製したのもこの影響である。もっともほとんど論文になってはいないが。千葉大時代に多くの学生達に高度な装置作りをお願いしたのはこのためである。私が修士時代に作製した装置よりはるかに高度な測定系を作ってくれた多くの学生らに感謝している。さて、上述のようなドタバタであったが修士課程を修了し、折よく新設された千葉大学理学部化学科の物理化学研究室に就職した。赤松先生は停年で、分子科学研究所の新設のお仕事に移られた。

千葉大の研究室は鉄系酸化水酸化物 (FeOOH) のコロイド科学研究を始めていたので、その物質の界面科学特性を電気伝導度から調べるという研究を始めた。直流だけでは情報が限られるので、前述したが、古い装置を集めて電気伝導度の周波数特性を求めるという方法を採用した。コロイド科学は私には現象論的な学問で未知の魅力があった。千葉大理学部は新設されたばかりで、大学院の修士課程もなく、卒研究生の1年ごとの研究実験の手伝いをした。約10名の卒研究生の簡単な実験装置の立ち上げと実験指導なども、勉強しながら進めた。微粒子試料について密度測定、粘度測定、接触角測定など極めて基本的な測定法をある程度理解できるようになった。この期間は私にとってゲーテの“徒弟”時代に対応しているが、これらの経験は将来の私の研究を強く支えてくれた。鯨島実三郎先生の物理化学実験法が大変役に立った。私は、腐食に関係する SO_2 、 NO_x および H_2O 吸着と FeOOH 微粒子の直流と

交流電気伝導との関係を調べた。一応、吸着を測定していたが化学吸着に近い観点であった。この頃は光電子分光法などが広がり始めており、電気伝導度で固体表面現象を調べるというのは大変な時代遅れと認識されだしていた。超高真空を用いた単結晶試料についての表面科学が我が国にも導入され、高真空での“粉体試料”の電気伝導による表面研究は“無意味”とみなされる状況になりつつあった。しかし、高温超電導体が見出されてから、粉末の電気伝導測定はまた日の目をみている。

3. どこに

1986年かと思うが、千葉大の私のボスであった井上教授、竹内教授（明治大学）、鈴木教授（東大、生産研）、堤教授（豊橋技科大）、高石教授（立教大）らが中部化学関係学協会連合の学会で、豊橋技科大に集まり、日本吸着学会を立ち上げる準備がなされた。翌年、鈴木教授らのご尽力で本吸着学会が発足した。ほぼ同じ頃と思うが、井上教授が退職され、私が理学部の物理化学を担当することになった。この頃には理学部にも大学院修士課程が設置され、博士課程も新設された。最初は鉄系が主ではあったが遷移金属酸化物一般の表面物性の検討も継続した。松本君（現豊橋技科大教授）が最初の博士課程学生で、彼には in-situ 赤外分光法で、 SO_2 や NO が鉄系酸化物表面に化学吸着して表面ドーピング作用があるという研究 (*J. Phys. Chem.* 1989) と ACF の表面修飾の仕事をしてもらった。また、修士学生と1 ms の時間差で2種類のガスを導入して電気伝導を測定する装置をつくり、新しい表面解析法を提案した (*J. Chem. Soc. Faraday*, 1992)。しかし前に述べたように、粉体の電気伝導研究には風当たりが強かった。上川君（現千葉大教授）が電子状態の計算も進めつつ、遷移金属酸化物薄膜の新物性などの領域を開いてくれた (N. Uekawa, K. Kaneko, *Adv. Mater.* 1995) が、次に述べるように物理吸着とナノ細孔体の研究に軸足を移した。

物理吸着とナノ細孔体（カーボンが主であった）の研究については、私自身が科研費の環境科学関係のプロジェクトで見出した超臨界 NO の吸着を科学的に捉えることから開始した。この時、室温で300 mg/g以上の NO を吸着する炭素系材料を開発していた。この吸着量はシリカゲルの水蒸気吸着量に対応している。 NO は室温で超臨界気体であり多量に物理吸着できないはずであり、上述の吸着量は異常であった。この吸

着は本質的に物理吸着であり、従来の理論では説明できない現象であり、解明する必要があった。また、当時、物理吸着の分野ではフラクタル科学の応用と分子シミュレーション研究がスタートしたところで、新たな風を感じていた。その後 D. Avnir (Hebrew大) とともに親しくなった。興味があった表面科学は、貧乏研究者の私にはとてもアメリカに太刀打ちできないと判断し、NO吸着を端緒にして固体中のナノスケール細孔空間に隠れている分子集団系の構造論的科学の確立を目指すこととした。また、このころ K. Unger教授 (Mainz大) が開催した第一回目の Characterization of Porous Solids (COPS) (ドイツ、Badsoden、1987) に参加して、Du Pont研究所長の L. Abrams博士に出会い、科学について語れる知己を得ることができた。また、その後、彼の紹介で参加した Gordon conferenceで超微粒子科学の M. P. Pileni教授 (パリ大、現：ソルボンヌ大) と出会い、未だに交流している。彼女はパリ大で私のためのシンポジウムを開催してくれたこともある。10月に信州大で開催した 7CBNMシンポジウムに手弁当で参加してくれた。彼女以外にも 7CBNMには海外から 14名ほど参加してくれた。

ナノ細孔体としてゼオライトに比べカーボン系ははるかに未開拓であり、将来性があると考えた。また、構造論的手法である X線を用いるには、非晶性のカーボンのほうが適している面がある。しかし、いわゆる活性炭様のカーボンでは学問は無理と言うのが当時の状況で、活性炭素繊維 (ACF) の細孔構造の論文を、*J. Phys. Chem.* に投稿したところ、rejectされた。*J. Phys. Chem.* にはその後 100報程度論文を出していると思うが、最初は rejectであった。その理由は活性炭で物理化学を論ずることはできないという審査員の意見による。1年程反論を繰り返したが、結局だめであった。ACFが均一な細孔構造を有する物質で科学研究に適していると明言してくれたのが、*Langmuir* の編集長も務めた W. Steele教授 (Penn State大) であった。彼はグラファイトと分子の相互作用を表す Steeleポテンシャルで知られているが、カーボンナノチューブについてのポテンシャル関数を導いてくれた (K. Murata, W. A. Steele et al. *Nano Lett.* 2001)。私が訪ねた時に、彼は NYからピアニストを呼び、ギタリストの息子さんらとホームコンサートを開いてくれた。

ともかくも、カーボンのミクロ細孔構造をより明確

にする必要があったので、 $P/P_0 = 10^{-6}$ から高分解能で窒素吸着測定ができる装置を立ち上げることにした。これが高分解能窒素吸着法の始まりとなった (K. Kakei et al. *J. Chem. Soc., Faraday Trans.*, 1990)。近藤精一教授 (当時大阪教育大) のご教示で読み取りセンサーを導入し、コンピュータ制御にして多点の吸着等温線が得られるようになった。この等温線に Sing教授の a_s プロットの考えを取り入れ、ミクロ細孔場による余剰吸着を取り除いた Subtracting-Pore-Effect (細孔場効果除去法：SPE) 法により、ミクロ細孔性カーボンの表面積を相当正しく決定できるようにした (K. Kaneko et al. *Carbon*, 1992)。同時に分子シミュレーションを適用して SPE法の妥当性を示した (N. Setoyama et al. *Carbon*, 1998)。最近、この解析ソフトも発表した (S. Wang, F. Vallejos-Burugos et al. *Carbon*, 2021)。しかし、カーボンは窒素で評価できない小さな細孔ならびにナノ構造があるために、極限的に小さな Heをプローブとした 4.2 Kでのウルトラミクロ孔評価法に挑戦した。確かに、77 Kでの窒素吸着とは異なる細孔径分布が得られた。ところが予想とは異なる結果が出てきて、量子効果があることに気づいた。つまりスリット型の狭い幅方向の併進運動は量子化されており、4.2 Kでさえ励起されており Heは見かけ上大きく振る舞っていた (K. Kaneko et al. *COPSIII*, Marseille, 1993)。この時ももう少し厳密に取り組むべきであったが、この量子効果は Beenakkerら (*Chem. Phys. Lett.*, 1995) により定式化され量子分子篩効果として新たな物理吸着分野へと広がっていった。

He吸着法の限界に気づいたために、別のアプローチを採用した。つまり、プローブ分子を極めて少量ずつウルトラミクロ細孔に導入することにした。超高真空装置を立ち上げて、装置の壁からの脱ガスに留意しながら、 $P/P_0 = 10^{-10}$ から窒素吸着測定を可能とした。この方法は確かに有効であり、非細孔性カーボンブラックに実はウルトラミクロ細孔があることなどを検証できた (M. Sunaga et al. *J. Phys. Chem. B*, 2004)。しかし、信頼性の高い重量法を採用したために新潟での地震の揺れの影響などを鋭敏に受け、吸着等温線測定に2週間以上を要した。このため、超高真空装置による超広域相対圧吸着等温線測定を幅広くは活用できなかった。

一方、細孔構造分布算出法の理論家達の努力により DFT理論から細孔径分布が計算しやすくなった。し

かし、それらの分布にはいわゆる 1 nm のギャップがあった。一方、平均細孔径が違う ACF で酸素分子の極低温域からの磁性を測定すると、細孔径による違いが明確に現れていた（H. Kanoh, K. Kaneko, *J. Phys. Chem.* 1995）、1 nm ギャップは存在しないと考えていた。そのため A. V. Neimark 教授（Ratogers 大）らに、理論を改善して欲しいと常々頼んでいた。その後提案された QSDFFT 法（A. V. Neimark et al. *Carbon*, 2009）は我々の実験結果にも合致する細孔径分布となっている。

カーボンミクロ細孔構造をよく把握できるようになったので、ミクロ細孔中の分子集団系の構造研究に重点を移していった。最初は水をターゲットに選んだ。水は難敵でいまだに理解できたとは言えない。McBain が古くその異常性を指摘した通りであった（J. W. McBain et al, *J. Amer. Chem. Soc.* 1933）。ミクロ細孔径が変わるにつれて水蒸気吸着等温線が著しく変化した（J. Miyawaki et al, *Langmuir*, 2011）。飯山君（現信州大教授）は大変苦勞して温度可変の in situ X 線散乱装置を立ち上げ、0.7 nm 細孔中では室温でも固体であることを示した（T. Iiyama et al, *J. Phys. Chem.* 1995）。その後、大場君（現千葉大准教授）が計算科学的にクラスター構造の重要性を明確にし、相当程度まで理解できるようになった（T. Ohba et al, *J. Amer. Chem. Soc.*, *Nano Lett.* 2004, K. Kaneko, *Nature Chem.* 2015）。

先述したが、He は極低温で量子化されていることに気づいたが、しっかりと定式化しなかった。J. K. Johnson 教授（Pittsburg 大）は Beenakker らの簡単な量子分子篩理論を厳密に取り扱い、その新規性を明らかにした（*Phys. Rev. Lett.* 1999）。ただし、実験的検証はされないままであった。当時修士課程学生であった田中君（現信州大教授）は博士課程でこの課題に取り組みたいと申し出てきた。彼は 20 K から温度可変にできる吸着装置を立ち上げ、同時に in situ 赤外スペクトルも測定できるようにした。これにより単層カーボンナノホーン（SWCNH）を用いて量子分子篩効果を、実験と計算から見事に実証した（*J. Amer. Chem. Soc.* 2005）。この装置のお陰で SWCNH 空間中のメタン分子の回転運動がバルクの沸点で凍結していることも示せた（S. Hashimoto et al, *J. Amer. Chem. Soc.* 2011）。

ここで触れておきたいことは、SWCNH は飯島澄夫教授（名城大）が開発した（*Chem. Phys. Lett.* 1999）

もので、数 g の試料をいつも供給してくれた。活性炭よりずっと明瞭な構造でナノ制約関係の研究を各段に進めることができた。SWCNT を今のように購入できなかったのも、世界に先んじて大事な研究ができたことを大変感謝している。

分子だけでなくナノ制約の効果はイオンでも明瞭になってきた。2000 年以前であったと思うが、大阪ガスの研究所の方にカーボン細孔中のイオン状態について意見を求められた。その頃はあまり流行っていなかったが、スーパーキャパシタに関連して重要な課題であった。私は企業の方々からいつも大きなヒントを与えて頂いた。すぐに隣の研究室の X 線吸収分光の卓越した理論家の藤川教授に相談して、RbBr をモデルとしてカーボン細孔中の水和構造を調べることにした。予想のようにイオンの配位数は減少しており、部分脱水和という概念を世に出した。大久保君（現岡山大学教授）が見事な成果を上げてくれた（*J. Amer. Chem. Soc.* 2002）。もう少し展開したいところであったが、彼はすぐに岡山大に職を得た。

実はこの新たな成果はほとんど引用されなかった。P. Simon 教授との共同論文（Chmiola et al, *Science*, 2006）で Yury Gogotsi 教授が、1 nm 以下のミクロ細孔で異常にキャパシタスが増大する現象を脱溶媒和によると説明するために、この論文を引用してくれた。それ以来、キャパシタのコミュニティでは、脱水和および脱溶媒和が当たり前の概念になったようだ。Yury はワシントンでクローズのキャパシタワークショップ（The Basic Energy Sciences Workshop on Electrical Energy Storage, April, 2007）を開催した。それに招待されたが、私はキャパシタを研究していないとメールを送ると、私が考えるキャパシタのためのカーボン細孔中のあるべきイオン構造など好きなように話してくれと返事がきた。それならということで参加した。そこで P. Simon 教授（ツールーズ大）や B. Dunn 教授（UCLA）という友人を得ることになった。また、そこでは細孔径分布法で大きな寄与をした C. Lastoski 教授（Univ. Of Michigan, *Langmuir*, 1993）の奥さんにもお会いした。彼女は Univ. of Michigan の教授で既に優れた固体電池を開発していた。Patrice や Bruce（Dunn）らとはスーパーキャパシタの総説（*Nature Energy*, 2016）をはじめ、共同論文を書かせてもらっている。Yury とはカーバイド由来カーボン（CDC）を通じて、いくつかの共同論文を継続的に出している。最近では TEM データを用いて、

窒素吸着測定だけから 3D の細孔構造予測を行う論文を公表した (F. Vallejos-Burgos et al. Carbon, 2023)。カーボン細孔の 3D 構造決定は X 線小角散乱と He 吸着から 1993 年に試みている (N. Setoyama: 現トヨタ中研、M. Ruike: 現東京電機大教授ら、Langmuir, 1993)。

私は千葉大学での研究科長や学長の助けなどの管理的な仕事に辟易としていたので、信州大学からの JST プロジェクトへの招聘に喜んで応じた。定年 2 年前であったが、千葉大に未練はなかった。信州大に異動したころ、“金子先生は週に何日くらい信州大に来るのですか”とよく聞かれた。当時千葉に家を残してはいたが、長野駅前にいわゆるマンションを借り、活動拠点を完全に長野に移していたので、その問いかけに大変驚いたものである。千葉大にほとんどの装置を残してきたので、研究環境整備には数年かかったが、ここでも企業の方々が助けてくれた。

信州大で最初に芽がでたのは、細孔内超高压効果であった。前にも述べたが、超臨界 NO が異常に吸着する現象は、NO が二量体化して蒸気となるために起こる (J. Chem. Phys. 1987)。この現象は私の人生を大きく変えた。1986 年に Georgia Tech で開かれた ACS での Kiselev Memorial Symp で一般講演発表した時に、幸運が訪れた。1981 年に ACS 会長を務めた A. Zettlemoyer 教授 (当時 Lehigh 大) が座長で、私の講演の後にこれには十分時間をかけて議論しようと言ってくれた。私は大変驚いたと同時に嬉しかった。その後、友人になる Sing 教授 (Brunel 大) や McEnaney 教授 (Bath 大) らからたくさん質問をもらった。30 分くらいかかったのではないだろうか。この 2 年後に McEnaney 教授が Kentucky 大で招聘教授をしていた時に開催したワークショップで、招待講演をさせて戴いた。そこでは細孔性カーボンの極限表面積は $2630 \text{ m}^2/\text{g}$ を超えることができることを構造モデルを示して発表した。同時に SPE 法によって正しく表面積も求まることを示した (Carbon, 1992)。この論文発表が終わると MIT の M. Dresselhaus 教授が壇上に来て、私の発表が大変気に入ったと言ってくれた。申し訳ないが、その時は Millie さんを存じ上げていなかったが、その後共同論文も出せるようになった。これらがきっかけで吸着やカーボンの国際会議にしばしば招待されるようになった。

細孔内超高压効果に話を戻したい。常磁性の NO は二量体になると反磁性の蒸気となる。この磁性転移が

原因で異常に顕著な超臨界 NO 吸着が起こる。我々は鉄イオンの磁性を利用していたが、この二量体生成そのものが超高压効果によるものでもあった。長く友人づきあいをしている K. Gubbins 教授 (当時 Cornell 大、現在 North Carolina State 大) がこれに強い関心を持ち、いくつかの計算科学論文を出版してくれている (C.K. Addington et al, Mol. Simulation, 2017)。彼は念のために有名な触媒化学者の Yate 教授に確認実験を頼んでいる。Yate らは SWCNT を用いて赤外分光法で検討し、やはりほぼ完全な NO 二量化を確認した (O. Boyle, J. Phys. Chem. B, 2003)。

この NO 関連の仕事を通じて、細孔内に吸着された分子集団が超高压下にあると、国内で発表しても反響はなかった。その後 KI の高压相の生成 (K. Urita et al, J. Amer. Chem. Soc. 2013) や金属的な 1D 硫黄鎖の生成 (T. Fujimori et al, Nature Comm. 2013) を発表してからは、国内でも超高压効果を認めるようになってきた。カーボンナノチューブ中での 1D 硫黄鎖の生成は極めてショッキングであった。驚いたことに原子の 1D でも明瞭な X 線回折ピークが認められ、完全に直線構造の硫黄鎖ではピーク位置から S-S 結合距離が得られた。この硫黄鎖の生成は真空下での円筒型細孔内で硫黄原子に 90 万気圧以上の高压が印加されたことを示す。このことから細孔内超高压効果 (in-pore superhigh pressure effect) は市民権を得た。また、カーボンメソ細孔中では高压印加が必要なメタンハイドレート生成が著しく加速されることも、アリカンテ大の古くからの友人 F. Rodriguez-Reinoso 教授の助けで確認できた (M. Casco et al, Nature Comm. 2015)。

私が気に入っている第二の仕事はカーボンのウルトラミクロ孔では、イオン吸着が Coulomb の法則に従わずに、アニオン同士あるいはカチオン同士が集まる現象の発見である。これは飯山君の助けを借りながら、二村君 (現信州大理) が辛抱強く研究してくれた成果である。もともとは前にも述べた Patrice に強く頼まれて行った実験である。イオン液体分子の厚さに対応するカーボンのウルトラミクロ細孔で顕著な現象が見つかった。アニオンの第一配位圏にはカチオンがいるべきであるが、約 25% もアニオンが存在していた。プラス電圧を印加すると 34% にまで増加した。つまり、Coulomb の法則に反して、マイナスイオンのすぐ隣にマイナスイオンが相当分布できる。この現象は電子導電性のカーボンの壁内にプラスの鏡像電荷が誘起され

て、同種イオンが近接する現象が起こっている (R. Futamura, *Nature Mater.* 2017)。つまり、見かけ上 Coulomb の法則が破れたようである。これは A. A. Kornyshev と S. Kondrat により超イオン状態として理論的に予測されていたものである (*J. Phys. : Condense Matter*, 2011)。この現象が起こるにはイオンサイズの細孔径である必要がある。細孔が大きいと鏡像効果が打ち消されてしまうためである。この解析には SO_2 吸着の双極子モーメントの鏡像効果の経験が役立った (Z. W. Wang, K. Kaneko, *J. Phys. Chem.* 1995)。

他にもいくつかある。前に述べた量子分子篩効果の理論が適用できない $^{18}\text{O}_2$ と $^{16}\text{O}_2$ との分離を見出し、ピッツバーグ大の K. Johnson 教授が格子振動の協同作用理論を考えてくれた (S. K. Ujjian et al, *Nature Comm.* 2021)。また、カーボンの細孔の深さ方向の不均一構造の研究法の提案 (Y. Yoshikawa, *J. Colloid. Interface Sci.* 2020) や、信州大で博士課程を初めて修了したボスニア・ヘルツコビナ出身の R. Kukobat (現バニヤルカ大准教授) が創製してくれた Zn-Al ゴルゲル SWCNT 分散剤がある (*Carbon*, 2015)。この SWCNT 分散剤は魔法のように SWCNT の応用性を広げてくれている。1 ppm 以下の皮膚からの CO_2 を検出できるセンサの創製 (P. Ahuja et al, *Chem. Eng. J.* 2020) や、高電気伝導性の SWCNT 自立膜の創製も可能である (Y. Nagata, R. Kukobat et al. *Carbon*, 2023)。また、この分散剤を用いた SWCNT インクが実際に F 社で実用に供されつつある。

繋がりが悪いが、ゲート吸着のことを少し述べる。ポストドクの Li さんによると装置がおかしいというので、相談に乗ると新しいゲート吸着を見出していた (D. Li, K. Kaneko, *Chem. Phys. Lett.* 2001)。機構解明に実験室の X 線装置を使って挑んだが、良い結果が得られなかった。シンクロトロン XRD によって吸着による構造変化が明確になった (A. Kondo et al, *Nano Lett.* 2006)。当時、 CO_2 呼吸する固体と私は言っていた。日本製鉄の上代博士の薦めもあり、近藤君 (現大分大准教授) をミラノ大学の X 線回折グループに送り、確かな解析を行えるようにした。この時お世話になった Lucia Carlucci 教授とは今も交流がある。この MOF については、経産省プロジェクトでメタン貯蔵材への応用を試みたが、時期尚早であった。

4. どこへ

幸い私は多くの方々より長く研究を継続できている。ただ、物理吸着やナノ細孔体の吸着を初めてからは 30 年ほどであり、必ずしも長くはないかもしれない。これからどこまで科学の世界に挑戦できるかはわからないが、エネルギーと生命関連科学に関連した研究になると考えている。あたりまえのことであるが、エネルギーは人類の直面する喫緊の課題であり、私なりのアプローチが可能なためである。私からみて、上記観点から重要な領域は [1] 自然エネルギー貯蔵、[2] 高速分離膜の分離能制御と応用展開、[3] 水蒸気吸着、[4] 酸素同位体で行ったような比較的分子量の大きな気体分子の選択的吸着、が大事かとみている。ただし、[4] を更に研究することはできないかと思っている。ここでは [1]~[3] について述べたいと思う。

4. 1. 自然エネルギー貯蔵

絶えず重要性が叫ばれながら、十分な基盤研究がなされていないのが超臨界気体吸着である。再生可能エネルギーの安定供給ならびに CO_2 を出さないエネルギーとしての H_2 および CH_4 の重要性は言うまでもない。現状ではグリーンな H_2 および CH_4 が使われている訳ではないが、将来的にはグリーン化されるであろう。エネルギーの安定供給と運搬上、どうしてもこれらの安全・簡便かつ優れた貯蔵法が必要である。現状でも研究は盛んであるが、理論的深さが欠けており、吸着貯蔵量が多い少ないという論文、それも数値が大きく見えるような表現法の論文が多い。千葉大時代に博士課程研究で、村田君は超臨界気体の DFT 理論に裏付けられた吸着様式、絶対吸着量の意味などを発表した (K. Murata, K. Kaneko, *J. Chem. Phys.* 2001, K. Murata et al, *J. Phys. Chem. B*, 2002)。もう 26 年前になるが、SWCNT が超臨界水素を多量に吸着できるという衝撃的な論文 (A. C. Dillon et al. *Nature*, 1997) が出て、世界中が沸騰した。2011 年だったと思うが、水素貯蔵関係の USA の委員会委員長の Millie さん (MIT) に頼まれて、会議中に Karl (Johnson 教授) が私に電話をかけてきた。SWCNT は本当に水素を多量に吸着できるであろうかとの問いであった。私はこの論文は次の点で間違っていると述べた。ひとつは SWCNT には Co が多量に含まれていること、二つ目は水素の純度が低いすぎることを指摘した。おそらく不純物の空気成分を測定したに過ぎないと述べた。我々は 7N 水素を使っていたが、我が国以外では超高

純度水素は得難かった。不純物気体が簡単に吸着できる条件がそろっていた。その後 SWCNT の水素貯蔵の強力なプロジェクトがアメリカで走ったという話はない。

さて、再生可能エネルギーは“お天気（自然）任せ”である。定常的に再生可能エネルギーを使うには電池やスーパーキャパシタだけでは無理である。CH₄ あるいは H₂ を貯蔵しなければならない。また、当面これら気体（現状ではグリーンではない）を我が国では海外から運搬する必要もある。そのためには、液体での運搬だけでなく、吸着貯蔵法が必要となる。

このために、排熱を利用してカーボン細孔中に高压メタンを出し入れできる原理を検討し、相当良い結果を得ている。高表面積活性炭をグラフェンで包接して、バルブの役割を持たせる。グラフェンは 200℃ 付近で活発な屈曲運動を開始するので、それを利用してカーボン細孔内に高压メタンを導入し、室温にしてグラフェンバルブを閉じる。そのようにするとメタンは安定に活性炭中に貯蔵される。つまり高压ポンプの役割を小さな活性炭の粒が担えるわけである (S. Wanget al. *Nature Energy*, 改訂原稿を投稿中)。この研究を確かなものとして、更に超臨界水素貯蔵へと展開できると良いと考えている。

風力、波力や水力を機械的エネルギーとして貯蔵する簡便な方法も役立つであろう。それらに繋がる基盤科学展開を検討している。D. Tomanek 及び飯島らの研究によると SWCNT を捩じると Li イオン電池の 10 倍近くのエネルギーを貯蔵できる (*Phys. Rev. Lett.*, 2012, 235501 および 255501)。6 年以上にわたる下積み研究の甲斐があって、機械的捩じり試験が可能な SWCNT ロープを作製できるようになった。この結果 Li イオン電池の 3 倍以上のエネルギーが貯蔵できることを実証できた。また、SWCNT なので広い温度範囲で貯蔵能は一定であることも分かっている (S. Utsumi et al, *Nature Nanotech.* 修正論文を提出中)。これもまだまだ展開させるべき課題が多い。

国際的な協力を得ながら、これらの新しい貯蔵法の芽を咲かせたいと考えている。

4. 2. 高速分離膜の分離能制御と応用展開

Sholl 教授が、化学工業における熱を用いる分離法を省エネルギーの分離法に変える必要性を説いてから既に 7 年も経ってしまった (D. S. Sholl, R. P. Lively, *Nature*, 2016)。巨大な熱エネルギーによる分離法の

代替としては、吸着分離と膜分離が考えられる。これまでは分離の速度が遅いため加圧のエネルギーが必要であった高分子膜を中心とする、膜分離の状況を変革する必要がある。我々は従来の薄い高分子膜内への溶解・透過を利用する分離に対して、グラフェンのナノ窓の空気分離特性を分子動力学から検討した。それによると酸素分子よりやや小さいナノ窓が酸素/窒素の分離に極めて有利なことを示した (F. Vallejos-Burgos et. al. *Nature Comm.* 2018)。更に、現実の分離膜として結晶表面のナノ構造とグラフェン面が形成する 2 次元チャネルによる気体分離に大きな可能性を見出した。例えばゼオライト (MFI) をグラフェンで包接した分離膜は、従来の分離膜よりも 100 倍程度高速で分離が可能である。水素とメタン、二酸化炭素と窒素などは、これまでの分離膜の分離能をはるかに凌駕している (R. Kukobat ら, *Sci. Adv.* 2022)。この膜では差圧が 0.2 気圧程度でも上述の高速分離が可能のために、省エネルギーでの多量の気体の高速分離を可能にできる。このために、分離機構の更なる理解とともに、実際に応用できる分離膜の創製が望まれる。多量にかつ高速で空気分離ができると、エネルギー技術を大きく変えることができ、甚大な省エネルギー、つまり CO₂ 削減を実現できる。そこで、そのための努力を開始している (H. Otsuka ら)。また、この研究に関連して活発に研究されている酸化グラフェンには真性状態、準安定状態および還元型への準備状態があることが分かってきた (H. Otsuka et al, *Nature Comm.* 修正版投稿中)。このように素材の新たな展開も心掛けながら、技術への展開が必要となる。

これまでのところグラフェンとゼオライト表面の 2 次元のナノチャネルを十分理解していないので、大事な分離対象へと分離研究を進めるとともに、ナノ構造の理解を進め、分離の基礎過程を構造論の立場から理解したいと考えている。また、プロセスの観点の重要性を学んだので、そのあたりも考慮して進んでいくべきと考えている。

4. 3. 水蒸気吸着

この課題はかれこれ 30 年も研究が続けている。前にも述べたが、一定の理解を得ている。ナノスケール空間中の水挙動の理解は生命科学的にも重要である。同時に、スーパーキャパシタにおいても微量の水の働きが大切なようである。従って、ナノスケール空間での水の挙動と構造については、まだまだ研究を推進す

る必要がある。例えば酸化グラフェンと水の相互作用は極めて興味深い。酸化グラフェンは従来から信じられてきた整然とした層状構造ではなく、staggeredな構造のようであり、独特の D_2O phobicity を示すことも分かってきた (R. Futamura et al, *Nature Comm.* 修正版投稿中)。一方、他にも最近理解しがたい水蒸気吸着現象が見出されてきた。この現象は生命科学現象と新たな貯蔵機構の発見に繋がる可能性がある。

さて、今後の展開に期待する課題を述べてきた。実は挑戦したい研究課題が沢山ある。従って、これからも今までと同様に新たな科学創出に向かうつもりである。多くの方々の協力を得ながらではあるが。

5. 終わりに

随分長い寄稿になってしまった。このあたりでやめなければならないが、更に少し述べたい。

二酸化炭素の排出削減、除去と濃縮、有用化という世界的な課題が“吸着分野”を活発にしている。我が国では吸着学会のメンバーに関連予算が十分に回ってきてはいないようである。学術の本質的進歩のために、研究費よりは研究時間が保証されることを望む吸着学会員が多いかと思う。しかし、自然科学の研究にはやはり研究費が必要である。また、少なくとも1年に1～2回程度は必ず海外の学会に出るべきである。自分の研究紹介と同時に、力になってくれる友人の獲得、新たな学術的な動きの自分なりの咀嚼が必要である。駆け出しのころの私は年収の1割程度以上かかる国際会議に自費で参加していた。そのため、なるべく多くの友人を得ようと努めた。吸着学会にでることは当然であるが、世界場で自分を試す必要がある

化学工学の分野の方と、界面科学・材料科学の研究者がチームを作って、風が吹いている吸着科学関連で研究費を獲得して、海外の学会にも出て“研究で遊んだらどうであろう”。

残念ながら大学の“小刻みな改革”がまだ継続しており、大学教員は“こき使われている”。研究で大いに楽しむには、会議に無縁の博士課程学生の支援が必要である。博士課程学生達の生活支援も少しは行われるようになってきたようであるが、一部大学以外はなかなか困難である。前述のような連携で継続的にやや大型の研究費を獲得して、博士課程学生の支援ができるようにする必要がある。このようにして、世界のピークを牽引する研究を目指せるようになる。

大学教員が、科学は楽しい、面白くて仕方ないとい

う雰囲気を持続しなければ、若い学徒が後に続かない。従って、大学の研究者が楽しく研究を推進できるかが大事である。若い学生達はつらい表情の大学教員に魅力を持たない。思い出せば、私は海外の学会では大学でのこまごましたことを一切忘れて、気分一新していた。それがどれほど私自身の科学への熱情を温存、あるいは強めていたのかと思う。海外の学会で“心と頭をリフレッシュ”することが必須である。学会から帰ると大変なことになってもメリットの方が大である。“辛抱の日常”より、“科学へと開放され、帆を張った気分”に満ちた自分”を維持することが大事である。

はっきりしなくなっているが、COPSに参加していた時に触媒の研究者が、メソ細孔のゼオライトがあったら極めて大きな仕事になると、私に話した。そこで練習がてらに中国からやってきた陶君にカーボンエアロゲルを鋳型に作ってもらったところ、大きな反響があった (Y. Tao et al, *Chem. Rev.* 2006)。これは一例である。9月末(2023)に Carbon and Energy (Budapest, CESEP) の会議で Keynote 発表をしてきたが、新しい研究ヒントが二つ得られた。私は海外の学会で必ず研究したら面白い課題を思いつく。リラックスしていて柔軟に対応できるためかもしれない。

大学院生を含めて吸着学会のメンバーの方々には、最高峰の科学を目指して、思い切って帆をはり新科学と技術へと進んで欲しい。私はいろいろな方々のご支援で、いまだに研究に遊ぶのを許されている。多くの方々に感謝している。

千葉大時代から懸案の吸着に関する本（ナノ構造吸着科学）が近く丸善から出版されるところまできたので、大学院生達に役立つとよいと考えている。

最後に、日本吸着学会名誉会員に推戴して頂いたことにもう一度謝意を表して本稿を終えたい。

2023年 10月

会 員 探 訪

名古屋大学大学院工学研究科物質プロセス工学専攻 川尻研究室

はじめに

当研究室は2017年に筆者が名古屋大学に着任するとともに立ち上げられました。筆者は前任校である米国ジョージア工科大学において独立した研究室を運営し、テニユア（終身在職権）を取得した後も研究活動が続けておりましたが、同校を退職して名古屋大学に着任いたしました。大学院生時代を含めると14年間の米国における研究生活に終止符を打ち、生まれて初めて日本の大学の教員となりました。

米国での研究室運営と日本での研究室運営

着任時は、米国のシステムとの違いに右往左往する日々でした。何よりも戸惑ったのが、日本の大学では学科長にほとんど権限がなく、責任を持って意思決定をしてくれるリーダーが誰もいないまま学科が運営されているということです。このようなリーダーがいない日本の学科内では、何事においても教授会、教室会議、その他各種委員会を開いて合意によって決めなければならない、というハンデを背負っています。また、米国においては学科長が常に教員の業績に目を光らせ、業績次第で給料の上げ下げの決定まで行います。このように、責任重大な意思決定を任される学科長のステータスは高く、学科長の椅子に据えるために他大学からやり手の教授を（高額な給与オファーとともに）引き抜いてくることも珍しくありません。日本の大学は近年の世界大学ランキングにおいて苦戦を続けていますが、これはリーダーシップと責任を負う人なしに運営されていることも一因ではないかと、僭越ながら筆者は考えます（これもガバナンス改革が必要と言われる理由でしょうか）。

もちろん、日本の大学の方が良い部分もたくさんあります。特にお金に関する事で、1年間に12ヶ月分の給料が大学から支給されるのは大変ありがたいと思います。日本では当たり前すぎて意味不明に聞こえるかも

知れませんが、米国の大学は1年間の給料のうち9ヶ月分だけが支給され、残りの3ヶ月分は外部資金を取ってきて自分の給料を埋め合わせしなければなりません。また、博士課程の大学院生を一人取ると、RA経費や学費として年間600万円程度（当時）の費用を外部資金から負担する必要がありました。このように米国の大学ではお金を取ることがあまりに大変で、夜も眠れない日々を送りましたが、日本ではお金のことをそこまで心配せずとも研究室を運営できます。

そして何より筆者が日本の大学で満足しているのは、学生が勤勉であるということです。日本と米国において何十カ国の学生と接してきた筆者の経験からしても、日本の学生の勤勉さは世界屈指であると感じます。学問を修得することそのものを美德とし、学問を修得した人に強い敬意を払う日本人独特の精神は、これからもこの国を強くしていくポテンシャルになると筆者は感じています。

当研究室の特徴

当研究室の構成員は以下の通りです。教員は、教授である筆者に加え、Frantisek Miksik特任准教授、Mostafa Elshafie特任准教授、藤木淳平特任講師、矢島智之助教、Sagar Saren特任助教の計6人が在籍しています。学生は、博士課程学生が6人、修士課程学生が5人、学部学生3人が在籍しています（2023年度）。

当研究室は国際的な研究活動を積極的に推進しています。筆者自身が米国における研究生活が長かったため、今でも米国との共同研究を数多く行っています。また、筆者は2023年よりフィンランドのラッペーンランタ・ラハティ工科大学（LUT University）の客員教授も務めており、今後はフィンランドとの研究交流も増やしていきたいと考えております。当研究室で博士課程に在籍した学生は、在学中に米国やスウェーデンの研究室に滞在して共同研究を行ってきました。

当研究室の研究内容

当研究室は情報科学を吸着に応用することで新しい研究領域を開拓しています。特に吸着プロセスのモデリング、設計、最適化などに力を入れています。具体的に、二酸化炭素分離のための圧力スイング、温度スイング吸着分離プロセス、そして液相クロマトグラフィー分離、擬似移動相クロマトグラフィー分離プロセスなどを扱っています。また、新しい吸着剤を開発する研究者の方々と共同研究することで、最先端の材料技術を取り入れて、それを最大限に活かすプロセスを開発する、という課題にも取り組んでいます。

当研究室の強みは統計、データサイエンス、機械学習などの情報科学技術を取り入れて吸着プロセス開発に応用することです。また、自ら実験を行うことによって計算機に向かっているだけでは気がつかない視点を養うことも大切にしています。実験室で経験したことと、最先端の技術を使った計算結果が組み合わせることで新しく生み出されるものを探求し続けます。



名古屋大学 大学院工学研究科物質プロセス工学専攻
川尻 喜章

〒464-8603 名古屋市千種区不老町1

名古屋大学大学院工学研究科物質プロセス工学専攻

Email : kawajiri@nagoya-u.jp

Web : https://www.material.nagoya-u.ac.jp/process_info_eng/

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 5年 11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
株式会社タカギ
帝人ファーマ株式会社
東洋紡株式会社
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
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
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 向井 紳 (北海道大学)

委 員 岩村振一郎 (東北大学)

佐藤 弘志 (理化学研究所)

宮崎 隆彦 (九州大学)

山本 拓司 (兵庫県立大学)

(五十音順)

大坂 侑吾 (金沢大学)

田中 俊輔 (関西大学)

山根 康之 (大阪ガスケミカル株式会社)

余語 克則 (RITE)

Adsorption News Vol. 37 No. 3 (2023) 通巻 No.146 2023年 11月 9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 岩村振一郎 (東北大学)

Tel : 022-217-6378 Fax : 022-217-6379 E-mail : shinichiro.iwamura.b7@tohoku.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 Shin R. MUKAI

Faculty of Engineering, Hokkaido University

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

Tel : +81-11-706-6590 E-mail : smukai@eng.hokudai.ac.jp

Editor

Shinichiro IWAMURA, AIMR, Tohoku University

Katahira 2-1-1, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8577, JAPAN

Tel : +81-11-217-6378 E-mail : shinichiro.iwamura.b7@tohoku.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。

© 2023 The Japan Society on Adsorption