

Adsorption News

Vol. 33, No. 1 (May 2019)

通巻 No.128

目 次

- 巻頭言..... 2
会長就任のご挨拶 松本 明彦

- 研究ハイライト..... 3
炭素表面および細孔内への水蒸気吸着に関する
基礎的研究 堀河 俊英

- 技術ハイライト.....10
低温再生可能な超低露点ハニカム除湿ロータと
除湿機の開発
井上 宏志、島田 隆寛、金 偉力、岡野 浩志

- 会告.....17
第33回日本吸着学会研究発表会のお知らせ

- 関連学会のお知らせ.....19

- 維持会員一覧.....23

日本吸着学会
The Japan Society on Adsorption

巻 頭 言

会長就任のご挨拶

豊橋技術科学大学大学院工学研究科 松本 明彦



このたび、加納博文前会長の後任として2019年度と2020年度の日本吸着学会会長をお引き受けすることになりました。まことに光栄に思いますとともに身の引き締まる思いです。本会の発展のために微力ながらも努力する所存です。副会長の森口勇先生（長崎大工）・関建司様（大阪ガスケミカル株）、理事の皆様ならびに会員各位のご協力、ご支援を宜しくお願い申し上げます。

元号が令和に改まり、日本全体が新しい時代の新鮮な気分に含まれて5月が始まりました。本会関連行事として、5月26日から5月31日までオーストラリア・ケアンズにてInternational Adsorption Society (IAS) 主催のthe 13th International Conference on Fundamentals of Adsorption (FOA2019)が開催されるとともに、5月21日から23日まで千葉・幕張にて、FOA2019のプレシンポジウムであるInternational Symposium on Adsorption 2019 (Japan Adsorption 2019)が本会主催で開催されます。まずはこれらの会議が盛会となるように、会員の皆様の積極的な参加と活発な議論をお願いいたします。

さて、昨年度の総会でご承認をいただいたとおり、今年度から本会の運営方法が変わりました。これまで事務局は会の運営に係る実務だけでなく、理事会の審議に基づく原案のとりまとめ、諸資料の作成などを担当してきました。しかし、事務局として行うべき実務と理事会が担当する事項を整理したうえで、事務局の業務を外部に委託することにしました。理事会が担当する総務、財務、広報、運営委員会に係る事柄については、それぞれ飯山拓先生（信大理）、仲井和之氏（マイクロトラック株）、児玉昭雄先生（金沢大理工）の各理事が担当いたします。広報担当理事の児玉先生はAdsorption News編集委員長も兼務してください。外部委託するにあたり、昨年度まで事務局をご担当いただいた遠藤明先生（産総研）には、引き継ぎ事項とそれに伴い委託する資料の整理をしながら事務局のスリム化にも取り組んでいただきました。

私は1997年度から1998年度まで事務局の実務を担当しました。事務局は、会費請求、名簿管理、資産管理、理事会・各委員会などの会場の手配と資料の準備、学会賞の盾や賞状の手配など様々な仕事があります。事務局を担当することで、会の組織が理解でき、会全体の様子を俯瞰できるという点では有意義でしたが、仕事自体は結構大変でした。そのころから、事務局は役員の方の研究室が大体2年ごとに持ち回りで担当されるようになり、現在にいたりました。しかし、昨今では大学の研究室が事務局を担当するのは、当時よりもだいぶ困難になってきたように見受けられます。それは、2004年の国立大学の法人化が遠因ではないかと思えます。大学では法人化後に教育・研究以外の仕事が増えました。このため学会の事務局を担当する余裕がなくなってきたのだと思います。多分、国立研究所も独法化前後での事情は一緒だと思います。そうした状況下でこれまで事務局を引き受けてくださった皆様に対して改めて御礼申し上げます。

今回の事務局運営と理事の業務の改革により、会運営が一層スムーズになり、役員と会員の皆様との連絡・連携がより緊密になることを期待いたします。本会はこれからも様々な企画で会の活性化を図ってゆく所存です。これにより会員諸氏が活発に学会活動に参加され、吸着科学と吸着技術がさらに発展することを願っております。

氏名 松本 明彦（会長）

所属 豊橋技術科学大学大学院工学研究科
応用化学・生命工学系

略歴 1990年 千葉大学大学院自然科学研究科修了後、イギリス原子力公社 Harwell 研究所客員研究員

1991年 豊橋技科大助手、文部省在外研究員・ドイツ学術交流会研究者（ドイツ Mainz 大学派遣）、同大助教授をへて2009年から現職

研究ハイライト

炭素表面および細孔内への水蒸気吸着に関する基礎的研究

Fundamental Study of Water Adsorption on Graphite and Porous Carbons

徳島大学 大学院社会産業理工学研究部 理工学域
 応用化学系 化学プロセス工学分野
 Graduate School of Technology, Industrial and
 Social Sciences, Tokushima University

堀河 俊英
 Toshihide Horikawa

1. はじめに

炭素系吸着剤への気相吸着において、アルゴン、窒素などの非極性分子と水、メタノールなどの極性分子の吸着挙動は大きく異なる。吸着剤が最もシンプルな平滑炭素表面を有する高炭素化グラファイト (GCB) の場合、非極性分子はその面に対して層を形成しながら吸着が進行するのに対し、極性分子はグラファイトエッジ部に存在する表面官能基と静電相互作用により吸着し、特に水の場合はその強い水素結合により官能基に吸着した水分子を起点にクラスターを形成しながら吸着が進行する。細孔への吸着はそれら層形成またはクラスター形成の延長により進行するといえる。

Adsorption News Vol.27, No.4 のホットトピックスにて、多孔質炭素への水蒸気吸着について我々が提案する水蒸気吸着理論 (HD モデル) を多孔質炭素への

$$C_{total} = S_0 \frac{K_f \sum_{n=1}^m n x^n}{1 + K_f \sum_{n=1}^m x^n} + C_{\mu s} \frac{K_{\mu} \sum_{n=a_1+1}^m x^n}{K_{\mu} \sum_{n=a_1+1}^m x^n + \sum_{n=a_1+1}^m x^{n-a_1}} + C_{ms} \frac{K_m \sum_{n=a_2+1}^m x^n}{K_m \sum_{n=a_2+1}^m x^n + \sum_{n=a_2+1}^m x^{n-a_2}} \quad (1)$$

(C_{total} : 全吸着量、 $C_{\mu s}$: ミクロ孔への飽和吸着量、 C_{ms} : メソ孔への吸着量、 S_0 : 表面官能基量、 a_1 : ミクロ孔吸着に対するクラスターサイズ (水分子数)、 a_2 : メソ孔吸着に対するクラスターサイズ ($a_1 < a_2$)、 K_f : (表面官能基への吸脱着平衡定数) / (表面官能基へ吸着した水への吸脱着平衡定数)、 K_{μ} : ミクロ孔吸着に対する吸着平衡定数、 K_m : メソ孔吸着に対する吸着平衡定数、 x : 相対圧)

水蒸気吸着等温線に適用し、それら解析結果を基に多孔質炭素の細孔への水蒸気挙動について紹介した^[1]。HD モデルは式(1)に示すように3項から成り、それぞれの項が順に表面官能基、ミクロ孔、メソ孔への水蒸気吸着を表現する^[2]。第一項は表面官能基への水蒸気の吸着過程を示し、水蒸気のクラスター形成過程による官能基上への水蒸気吸着量を表す。第二項、第三項はそれぞれ形成したクラスターがミクロ孔、メソ孔へ吸着する過程を示し、各孔への水蒸気吸着量を表す。

本稿では、前回の寄稿後に得られた知見を中心に、HD モデル式の各項に対応する水蒸気吸着等温線を示し、これら系統的に取得した等温線から水蒸気吸着挙動の詳細な検討により得られた知見について紹介する。

2. 水蒸気吸着等温線

本稿で使用した吸着剤について簡単に説明する。平滑炭素表面 (GCB)^[3]は2000℃以上の高温で炭素化さ

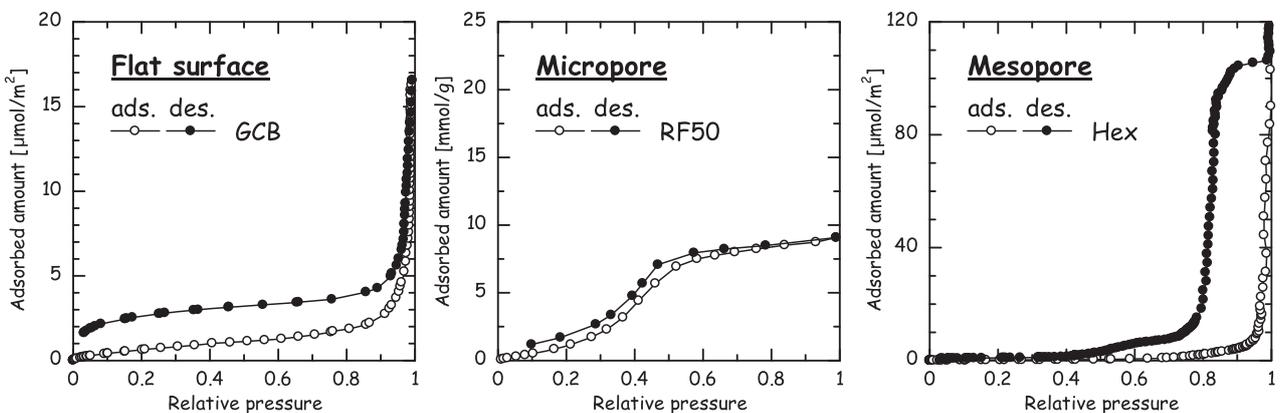


図1 平滑炭素表面 (GCB)^[3]、ミクロポーラス炭素 (RF50)^[2]、メソポーラス炭素 (Hex)^[4]への298 Kにおける水蒸気吸着等温線

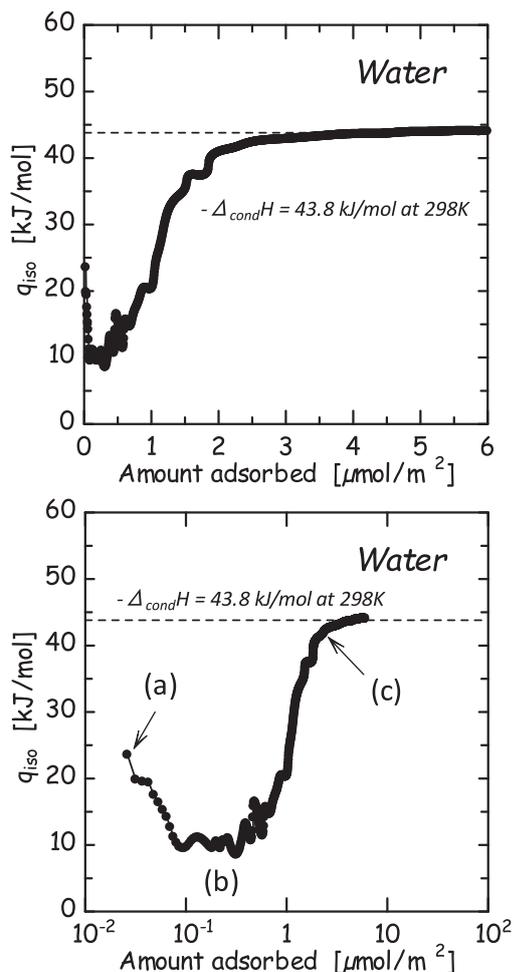


図2 GCB への水蒸気吸着に係る吸着熱^[3]

れた炭素欠陥がほとんどない表面を有する数 100 マイクロメートルの多角体粒子である。マイクロポラス炭素 (RF50)^[2]はレゾルシノール-ホルムアルデヒド樹脂を原料に 900°C で炭化した材料で、窒素 (77 K) を全く吸着せず、二酸化炭素 (298 K) を吸着するマイクロポラス炭素である。また、メソポラス炭素 (Hex)^[4]はグラファイト構造を細孔表面にもつ約 9 nm の規則性メソ孔を有するメソポラス炭素である。これらの詳細は参考文献を参照頂きたい。全ての吸着等温線測定は定容系自動吸着装置 (BELSORP-max, MicrotracBEL) を使用した。

図 1 に GCB^[3]、RF50^[2]、Hex^[4]への 298 K における水蒸気吸着等温線を示す。これら 3 つの水蒸気吸着等温線は IUPAC の V 型^[5]に近い等温線形状を示すが、それぞれ形状が大きく異なる。そして、これら 3 つの等温線形状は HD モデル式の 3 項が表現する表面官能基、マイクロ孔、メソ孔への理論水蒸気吸着等温線と非常によく一致する。この吸着等温線の形状の違いが何故生じるのか、各等温線を詳細に観ていこう。

GCB への水蒸気吸着等温線は吸着初期から相対圧 0.9 付近まで圧力の増加に伴い比例的に吸着量が徐々に増加する。相対圧 0.9 を超えると吸着量が急激に増加する。GCB に対して水蒸気の吸着量が約 15 μmol/m² であるのに対して、非極性分子のアルゴン、窒素の吸着量が約 60 μmol/m² であることから、水蒸気が非極性分子と比較して 4 分の 1 程度しか吸着していない^[6]。この水蒸気吸着挙動をより詳細に理解するために、図 2 に GCB への水蒸気吸着に係る吸着熱を示す。この吸着熱の算出には、吸着温度 298 K および 283 K の水蒸気吸着等温線データを用い Clausius-Clapeyron (CC) 式を適用した。水蒸気の吸着過程では、吸着初期に 25 kJ/mol 程度の高い熱が放出され、その後吸着量が増加すると吸着熱が 10 kJ/mol 程度まで減少して最小となり、さらに吸着量が増加すると最終的に水の凝縮熱に到達する。

水分子は極性を有し、水一分子内の酸素原子と水素原子間で生じる分極のため指向性を有する“結合”をする。本系において、水分子は GCB のエッジ部に存在する表面官能基と最も強く相互作用し、次いで水分子間、そして、GCB 表面と最も弱い相互作用を示す^[7]。GCB は高温にて炭素化処理が施されているが、数 at % の酸素を有しており表面官能基が GCB エッジ部に存在する^[4]。したがって、吸着の初期段階において水分子は水素結合により GCB の官能基上に吸着する。官能基がカルボキシル基である場合、水分子が官能基に吸着して放出される吸着熱は 39 kJ/mol と統計熱力学的に算出でき^[8]、図 2 a の吸着初期に観られた大きな吸着熱の理由が表面官能基と水分子間の強い相互作用に起因するものと示唆される。次に、官能基に吸着した水分子と新たな水分子が水素結合により吸着することで小さなクラスターを形成し、このとき吸着熱は 9 kJ/mol 程度となる (図 2 b)。さらに水分子間の相互作用によるクラスター同士の合一とクラスター成長に伴いバルク水の凝縮熱に等しい吸着熱が得られる (図 2 c)。

この吸着熱の挙動は、コンピュータシミュレーションにより同様の傾向が得られ、吸着初期の高い吸着熱が表面官能基-水分子間の相互作用に起因し、水分子が全ての表面官能基と水素結合により吸着すると、さらに導入される水分子は官能基との水素結合ができないためその相互作用の寄与が弱まり吸着熱が減少する。続いて、水分子は官能基に吸着した水分子と水素結合をしてクラスターを形成する。そのため一旦減少した

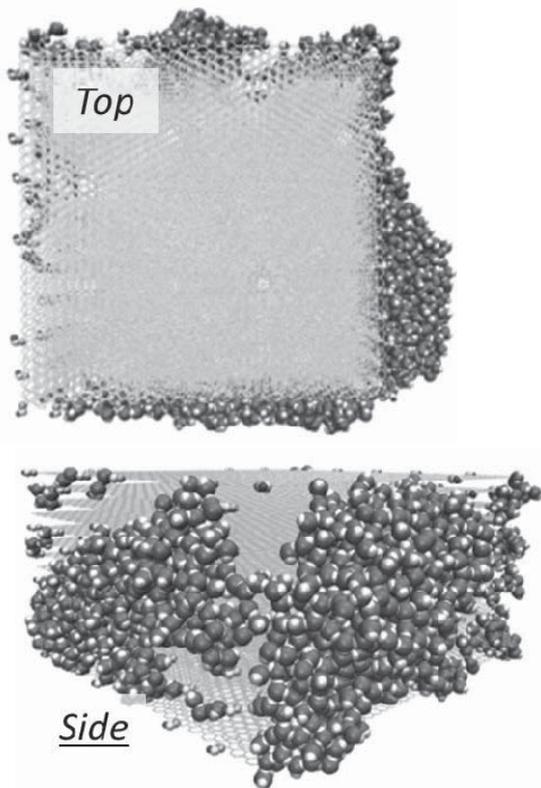


図3 官能基をエッジ部に配置した GCB モデルを用いた水蒸気吸着シミュレーションから得られたスナップショット^[10]

吸着熱は水分子-水分子間の相互作用が増加し、最終的に凝縮熱に達することがより詳細に明らかとなった^[9]。

したがって、GCB への水蒸気吸着は表面官能基に水素結合により水分子が吸着、さらに水分子間の水素結合でクラスター成長とクラスター同士の合一により吸着が進行する。この結果は、図3に示すコンピュータシミュレーションから得られたスナップショット^[10]からも明らかである。水分子は GCB 表面との相互作用が小さいため表面官能基部分以外の均一 GCB 表面

には吸着しないことが分かった。また、Dubinin らが 1969 年に異なる割合で水蒸気を吸着させた GCB に対してアルゴン吸着測定を行った結果によると、水蒸気の吸着量に関係なくアルゴンの吸着量は清浄な GCB に対する吸着量とほぼ等しくなることを報告している^[11]。この結果から、アルゴンは GCB 表面へ、水蒸気は GCB エッジに存在する表面官能基へとそれぞれ異なる吸着サイトへ異なる吸着機構で吸着することが明らかである。

図1に示す Hex への水蒸気吸着等温線は相対圧 0.9 まで圧力の増加に伴い比例的に僅かに増加し、その挙動が GCB への水蒸気吸着挙動とほぼ一致したことから、吸着メカニズムは GCB への水蒸気吸着と同様にクラスター形成により進行することが分かる。そして、相対圧 0.9 以上で吸着等温線が急激に立ち上がる。図1に示したミクロ孔のみを有する RF50 の水蒸気吸着等温線では、細孔への水蒸気吸着が飽和に達すると等温線が水平に移行する。しかし、Hex ではメソ孔を全て満たす量に達するまでシステム内への水蒸気導入量を増やしても等温線は水平に移行しなかった。この挙動は GCB への水蒸気吸着等温線においても同様にみられた。

3. 脱着スキャンニングカーブ

水蒸気脱着等温線に着目すると、GCB、Hex 共に脱着初期の脱着等温線は吸着等温線に対し可逆性を示す。しかし、GCB では相対圧 0.95 付近から、Hex では相対圧 1 の途中から吸着等温線を大きく逸脱してそれぞれ形状の異なるヒステリシスが生じている。これら脱着挙動を理解するために、図4に示すヒステリシス内の脱着スキャンニングカーブを測定した。脱着スキャンニングカーブとは、吸着過程において任意の圧力

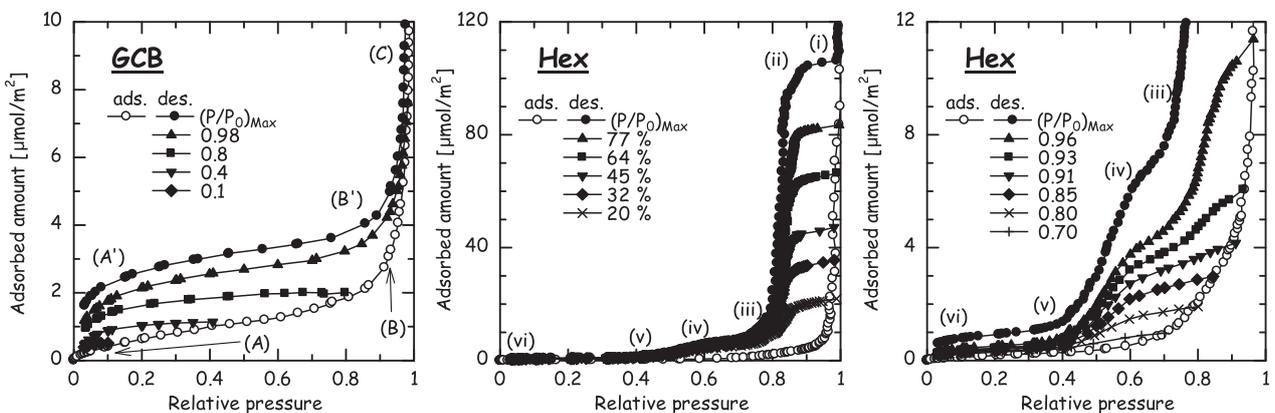


図4 GCB および Hex の水蒸気吸着等温線に対する脱着スキャンニングカーブ^[4]

で測定を中断し、その点から脱着測定を行ったときに得られる脱着等温線である。

GCBの水蒸気吸着等温線に対する吸着量 $2\mu\text{mol}/\text{m}^2$ 以上の点からの脱着スキヤニングカーブは、図1に示した元の脱着等温線と同様の挙動を示し、脱着初期に大きく脱着を示した後に相対圧0.8付近からほぼ吸着量に変化せず水平となった。一方、興味深いことに $2\mu\text{mol}/\text{m}^2$ より吸着量が小さい点からの脱着スキヤニングカーブは脱着開始時から低圧部まで吸着量の変化がほとんどなく脱着が起こらないことが示唆された。この挙動の違いは脱着スキヤニングカーブ測定開始時の吸着した水分子の状態に依存する。吸着量が $2\mu\text{mol}/\text{m}^2$ 以上のとき、吸着熱は水の凝縮熱とほぼ等しくなり吸着した水分子はバルク水の状態に等しく圧力に応じて蒸発が起こる。逆に $2\mu\text{mol}/\text{m}^2$ より小さいとき、吸着熱からわかる吸着した水分子の状態はクラスターの成長過程にあり、官能基からの強い相互作用を受け、吸着した水分子は固相様の状態になっていると推測できる。そのため相対圧0.01付近まではほとんど脱着を示さなかったといえる。

Hexの場合、脱着等温線は大きく3つの段階を示す。相対圧1-0.8(図4i-iii)、0.8-0.4(図4iii-v)、そして0.4以下(図4v-vi)である。

脱着等温線は図4iの点まで吸着枝と可逆性を示すことを先で示した。図4iの点における吸着量 $107\mu\text{mol}/\text{m}^2$ はHexが有するメソ孔を水分子が完全に満たした状態であり、それ以上に吸着した水分子は細孔外に凝縮した凝縮水であると考えられる。

次にヒステリシス内の脱着挙動を詳細に検討するために、飽和吸着量 $107\mu\text{mol}/\text{m}^2$ を基準として吸着量77-20%の各点から脱着スキヤニングカーブをそれぞれ測定すると、全て基準の脱着等温線と同様に脱着開始と同時に相対圧0.8まで吸着量に変化せず水平に移行し、そして急激な脱着を示した。吸着量が77-20%以上のとき細孔内の水分子の状態は各脱着開始点の吸着熱から水の凝縮熱と一致したことから、液体状態の水として存在することが示唆された^[4]。細孔外に凝縮した水と細孔内で液体状態にある水の吸着熱が等しかったことから、このメソ孔内における水の凝縮が一般的な非極性分子がメソ孔への吸着で示す毛管凝縮現象と同様のメカニズムで起こることが示唆された。

細孔内外に凝縮した水分子は同じ液体状態の水であるが、細孔外に凝縮した水分子は細孔壁からの相互作用を受けないため、減圧すると容易に蒸発でき図4i

まで相対圧が変化せず脱着が起こったのに対し、細孔内に存在する水分子は細孔壁からの相互作用を受けるため相対圧0.8まで脱着が起こらなかった。そして、相対圧0.8でメソ孔からの毛管蒸発が一気に起こり急激な吸着量減少を示した。

次に相対圧0.8-0.4(図4iii-v)のステップに関連する脱着スキヤニングカーブをみると、相対圧0.96、0.93からの脱着スキヤニングカーブは3ステップであるが、0.91以下では2ステップとなり、相対圧0.8付近にみられた毛管蒸発に伴う吸着量減少が消滅した。吸着過程において、相対圧0.91では細孔内に吸着水の架橋構造の形成はなく、相対圧0.93では架橋構造が形成していたと考えられる。さらに、開始圧力を低下させると、脱着スキヤニングカーブは1ステップのみとなり、先ほど示したGCBからの脱着挙動と類似する。2ステップの脱着スキヤニングカーブは、相対圧0.6-0.4で大きな脱着を示すことから、一般的にRF50のようなマイクロ孔を有する炭素に吸着した水分子の脱着挙動と類似する。しかし、Hexにマイクロ孔が存在しないことから、官能基上に形成したクラスター-クラスター間に吸着した水分子の脱着であると考えられる。

そして、相対圧0.4以下の脱着挙動は先に述べたGCBに吸着した水蒸気の脱着挙動と同じであり、官能基上に形成したクラスターからの水分子の脱着のため低相対圧までほとんど吸着量が減少しない。

このように、Hexに吸着した水分子の脱着は3つの異なる吸着状態(1)毛管凝縮水、(2)クラスター間吸着水、(3)官能基上に形成したクラスター、から(1)→(2)→(3)の順に脱着が起こることで3段階の脱着挙動を示したといえる。

4. 水蒸気吸脱着メカニズム

前節でHexのメソ孔に吸着した水分子が異なる3段階の過程により脱着することを示した。一方、Hexへの吸着過程では図1に示した通り大きな1段階の吸着等温線であり、脱着とは異なる吸着過程を経て吸着が進行することになる。しかし、前節で示したように3つの吸着状態が存在するのであれば、吸着過程も同様に3段階のステップにより進行するはずである。そこで、より詳細に吸着等温線を観察するために、縦軸の吸着量を図5のように対数プロットし、さらに、吸着枝に対して微分値を取り実線で示した。すると、吸着等温線は3ステップあり、脱着過程と同様に3段階

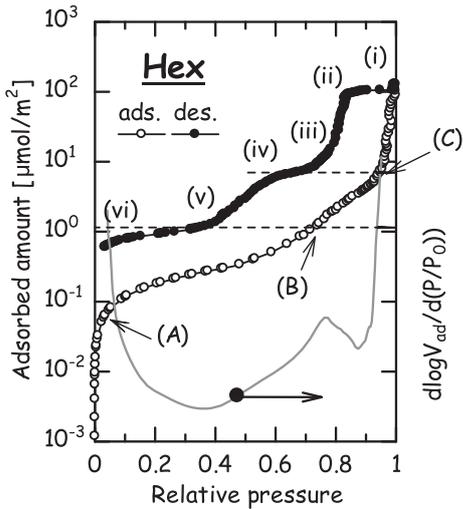


図5 Hex への水蒸気吸着等温線と吸着等温線の吸着変化量^[4]

の吸着過程があることが明らかとなった。さらに興味深いことに、各ステップの吸着量と脱着量がほぼ一致することが分かった（図5中に示した破線参照）。

GCB と Hex に対する水蒸気吸脱着メカニズムの概略図を図6、および Hex の水蒸気吸着等温線にみられる1段階目のヒステリシスが生じるメカニズムの概略図を図7にそれぞれ示す。吸着と脱着において、同じ吸着量における吸着している水分子が形成する構造

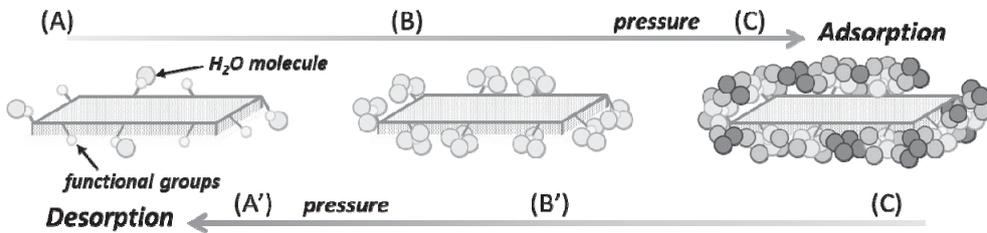
はいずれも同じであるが、それら構造を形成するときの圧力が異なるのでヒステリシスが生じる。

GCB の水蒸気吸着等温線に生じたヒステリシスは、(A) から (B) で形成するクラスターに起因し、水分子-表面官能基間の強い静電相互作用によってもたらされる。

Hex では、(A) から (B) の過程は GCB の場合と同様であるが、(B) に至る圧力は GCB の場合より低圧となる。それは、Hex が有する六角形の規則性細孔の形状に起因し、GCB にはない細孔接合部の存在により、より強い固体-流体間相互作用を示すためである。相対圧 0.75 でクラスター同士が合一化すると、その六角形細孔の接合部に沿ってクラスターの凝集体が形成される。さらに圧力が増加するとそこから細孔表面へ水クラスターが零れ落ちるように広がり相対圧 0.95 で細孔壁を水クラスターが覆い尽くし吸着層を形成する。そしてさらに圧力が増加すると、水蒸気吸着層間に架橋構造が形成され、毛管凝縮が起こる。

メソ孔を完全に満たした状態からの水の脱着は、吸着された水の状態に関するより詳細な情報を与えることから非常に興味深い。メソ孔を完全に満たした水(図5-7i)は相対圧 0.8 までその構造を保ち(図5 ii)、

GCB



Hex

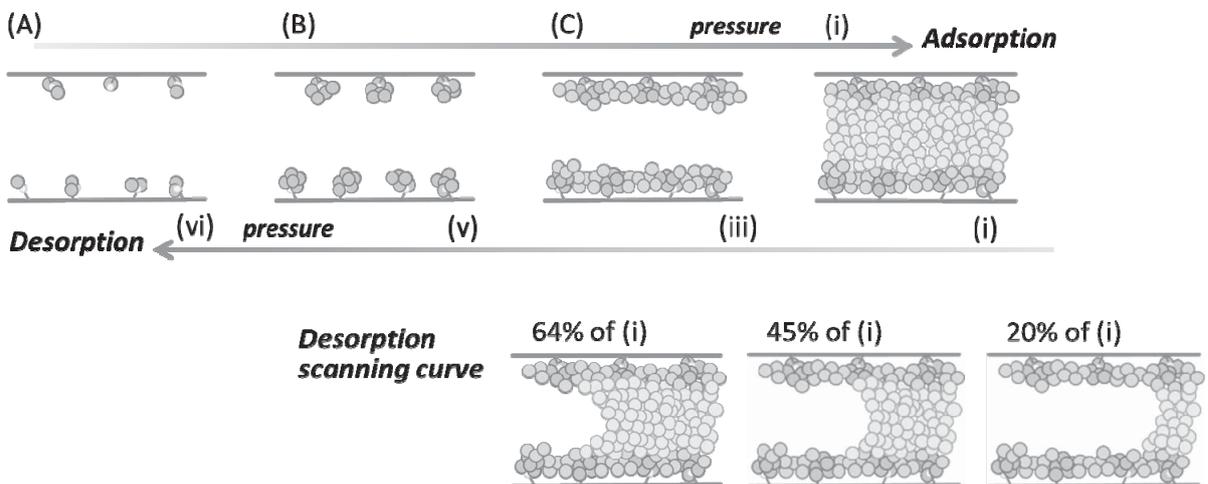


図6 GCB および Hex への水蒸気吸脱着メカニズムの概略図^[4]

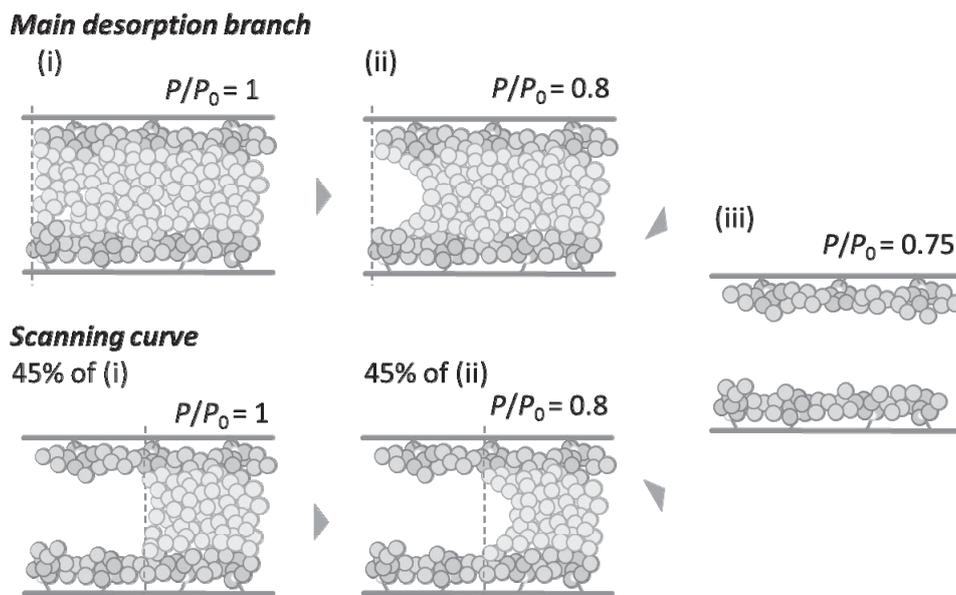


図7 Hexの水蒸気吸着等温線にみられるヒステリシスが生じるメカニズムの概略図^[4]

細孔入口でメニスカスを形成する（図7 ii）。この点からほんの僅かに圧力を減少させると、細孔の中心部を満たしていた水が一気に蒸発して、細孔表面に吸着した水が形成する吸着層だけが残る（図6、7 iii）。この図4-7で示す状態 (i) から状態 (iii) までの脱着は、アルゴンなど希ガスが両端の開いたメソ孔から蒸発する際の挙動と全く同じである。この大きなヒステリシス内の $100 \mu\text{mol}/\text{m}^2$ から $20 \mu\text{mol}/\text{m}^2$ の間から測定を開始したスキヤニングカーブは吸着等温線から脱着等温線に向かって水平に横断する軌跡を示し、相対圧 0.8 に達すると一気に $20 \mu\text{mol}/\text{m}^2$ まで吸着量が減少する。これは各吸着量（図6：64% of (i) は、飽和吸着量 $107 \mu\text{mol}/\text{m}^2$ (i) を基準として吸着量が64%であることを表す）からの脱着が飽和吸着状態からの脱着と同様に、均一メソ孔内へ毛管凝縮した吸着水がメニスカスを形成し（図7）、その界面の後退による脱着が起こるため相対圧 0.8 まで圧力変動を示さず、その毛管凝縮した水が形成する細孔壁間の架橋構造が壊れるまで同機構で脱着が進むためである。

メソ孔に架橋構造により凝縮していた中心部の水が蒸発した後は、図4および図5に示す (iii) から (v) にみられるヒステリシスに関連した2段階目の脱着が起こる。この脱着はメソ孔表面に形成した吸着層からの水分子の脱着である。この吸着層 (iii) は表面官能基に水素結合により強く固定されている。吸着層内で水分子がより強い水分子-水分子間、固体-水分子間の相互作用が働くため、先に示した毛管蒸発よりも吸

着層からの水分子の脱着にはより強いエネルギーが必要となる。したがって、ヒステリシスの幅は毛管蒸発の場合よりも広い。

さらに圧力が減少すると、(v) から (vi) にかけて3段階目の脱着に関連するヒステリシスがみられる。この脱着に必要なエネルギーが非常に大きな表面官能基-水分子間、水分子-水分子間の両方の相互作用のため最も大きくなり、3段階の脱着の中で最も幅の広いヒステリシスを示す。この過程は、GCBの水蒸気吸着等温線が非常に幅の広いヒステリシスを示した理由と同じである。

5. おわりに

理想状態に近い均一平面、ミクロ孔、メソ孔を有する炭素系吸着剤に対して水蒸気吸着測定を行うことで詳細な吸脱着等温線を取得し、それぞれの吸着剤に対する水蒸気の吸着および脱着挙動について詳細に紹介した。

GCBでは非常に幅広い大きなヒステリシスが観察され、表面官能基-水分子間、水分子-水分子間の強い相互作用により官能基上で形成したクラスターが固相様状態になったことが要因であることを示した。また、Hexへの水蒸気吸着では、3段階のそれぞれ異なるメカニズムによる吸着および脱着が起こることを示した；(1)高相対圧部ではメソ孔への毛管凝縮により水分子が吸着し、脱着にはより強いエネルギーが必要となるためヒステリシスを示し、希ガスなどの非極性

分子が示す毛管凝縮・蒸発と全く同じメカニズムである、(2) 2段目の脱着は官能基により固定化された吸着層からの脱着のため、ヒステリシスはより広くなる、(3) 3段目の脱着はGCBの場合と同じメカニズムである。

よりシンプルな理想的な吸着剤を適用することで系統的に水蒸気吸着現象を取り扱うことが可能となり、より詳細な水蒸気吸着メカニズムの理解に成功したといえる。

謝辞

本研究は、JSPS 科学研究費補助金、JSPS 優秀若手研究者海外派遣事業、Australian Research Council (DP 160103540) からの研究支援を受けて行われた。そして、特に共同研究者である Queensland 大学 Do 教授、さらに研究グループの学生諸君のサポートにより推進したものである。ここに謝意を示す。

【参考文献】

- 1) 堀河俊英, *Adsorption News* **27** (4), 11 (2014).
- 2) T. Horikawa, T. Sekida, J. Hayashi, M. Katoh, D. D. Do, *Carbon* **49**, 416 (2011).
- 3) T. Horikawa, Y. Zeng, D. D. Do, K.-I. Sotowa, J. R. Alcántara Avila, *J Colloid Interf Sci* **439**, 1 (2015).
- 4) T. Horikawa, T. Muguruma, D. D. Do, K.-I. Sotowa, J. R. Alcántara-Avila, *Carbon* **95**, 137 (2015).
- 5) M. Thommes, K. Kaneko, A.V. Neimark, J.P. Olivier, F. Rodriguez-Reinoso, J. Rouquerol, K.S.W. Sing, *Pure Appl Chem* **87**, 1051 (2015).
- 6) T. Horikawa, *Acc Mater Surf Res* **3** (2), 51 (2018).
- 7) V.T. Nguyen, T. Horikawa, D. D. Do, D. Nicholson, *Carbon* **61**, 551 (2013).
- 8) D. D. Do, D. Nicholson, H. D. Do, *J Colloid Interf Sci* **324**, 15 (2008).
- 9) Y. Zeng, H. Xu, T. Horikawa, D. D. Do, D. Nicholson, *J Phys Chem C* **122**, 24171 (2018).
- 10) V.T. Nguyen, D. D. Do, D. Nicholson, *Carbon* **66**, 629 (2014).
- 11) Y.F. Berezkina, M.M. Dubinin, A.I. Sarakhov, *Izv Akad Nauk SSSR, Ser Khim* 2653 (1969).
- 12) K. Morishige, T. Kawai, S. Kittaka, *J Phys Chem C* **118** (9), 4664 (2014).



堀河 俊英

徳島大学 大学院社会産業理工学
研究部 理工学域 応用化学系
化学プロセス工学分野
准教授
博士 (工学)

- 2004年3月 関西大学大学院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
- 2004年4月 徳島大学工学部化学応用工学科助手
- 2008年2月 徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部先進物質材料部門講師
- 2010年3月-2011年2月 豪州 Queensland 大学 School of Chemical Engineering 客員准教授
- 2015年5月 同准教授
- 2017年4月 改組に伴い名称変更 現職

技術ハイライト

低温再生可能な超低露点ハニカム除湿ロータと除湿機の開発

Development of Super Low Dew Point Honeycomb Desiccant Rotor and Desiccant Dehumidifier Capable of Low Temperature Regeneration

株式会社 西部技研 開発本部
Research and Development Department.
SEIBU GIKEN CO., LTD.

井上 宏志、島田 隆寛、金 偉力、岡野 浩志
Koji Inoue, Takahiro Shimada, Weili Jin, Hiroshi Okano

1. はじめに

シリカゲルハニカムロータは、1984年に株式会社西部技研が世界で初めて開発、実用化し、1992年に日本吸着学会技術賞を受賞した。その後も絶えずシリカゲルハニカムロータを始めとするデシカントロータの高性能化の研究を継続するとともに、ロータの特性・性能・運転方法などのデータを蓄積して除湿空気を常時安定して供給できるハニカムロータ式デシカント除湿機を開発してきた¹⁾。

ハニカムロータ式デシカント除湿機の最大の特徴は、低露点空気を容易に製造できることにある。図1に代表的な除湿方式である、冷却式除湿、吸収式除湿、吸着式除湿、吸着式除湿の中でも大風量に適するハニカムロータ式の適用範囲を示す。

冷却式除湿は空気を冷却除湿することによって水蒸気を露点温度以下で凝縮分離するもので、空調用の除

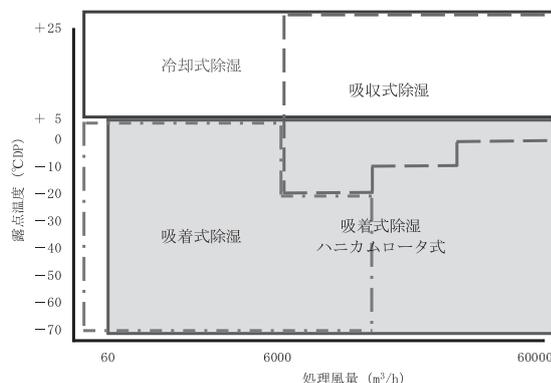


図1 各除湿方式の適用範囲

湿では最も一般的な除湿方法である。しかし、低温では原理的に凝縮水が結霜または凍結するために、露点温度5℃以下の低湿度を目的とした除湿には向いていない。

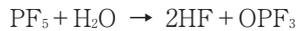
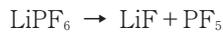
吸収式除湿は吸湿性の強い液体吸収剤を使用して除湿する方式で大風量が可能、殺菌性があるなどの特徴がある反面、吸収剤として使用している吸湿性の塩溶液（塩化リチウムなど）が腐食性を持つという欠点もあるため、殺菌を要求される一部食品用途以外には用いられない。

吸着式除湿はシリカゲルなどの固体吸着材の粒を詰めた塔または回転筒に処理空気を通過させて除湿を行うもので、露点温度マイナス60℃以下まで除湿できるという特徴がある。しかし、圧力損失が高く大容量が困難で、容量のわりに大型となり設備費が高くなるなどの欠点がある。この欠点を解決する方式として、大風量で低露点除湿空気が得られるハニカムロータ式除湿機が使用されている。冷却式除湿機と区別するためにデシカント除湿とも呼ばれている。ハニカムロータ式デシカント除湿機の用途として、金属類の防錆用途、収蔵庫の保存・保管用途、お菓子や食品の製造ライン、水害で被害を受けた家屋や工場の乾燥用途などが挙げられる。さらに近年ではリチウムイオン二次電池の製造工程といった露点温度がマイナス60℃以下という超低露点環境を作るための装置として使用されている²⁾。

2018年時点で、リチウムイオン二次電池のノートパソコン、スマートフォン、デジタルカメラなどの電子・電気機器の小型民生用途での電池市場の伸びは穏やかであるが、車載用と電力貯蔵・UPS（無停電電源装置）分野は活況を呈しており、これまで小型民生用途のリチウムイオン二次電池や、他の二次電池を展開していたメーカーが、同分野への参入の動きをみせている。また、車載用では補助金獲得に向けた生産能力向上が必須となっており、電池メーカー各社で生産能力増強の動きが積極化している。これら新用途が牽引することによって、2016年は2.2兆円だったリチウムイオン二次電池市場が2021年には4.1兆円まで成長すると推測されている³⁾。

リチウムイオン二次電池の製造工程で必要とされる低湿度環境は、電池を構成する材料や製造方法などで異なるが、どの場合においても組立工程、中でも電解液注入工程では低湿度管理が必要とされている。電解液中の電解質として、ヘキサフルオロリン酸リチウム

(LiPF₆が使用されており、ヘキサフルオロリン酸リチウムは溶媒に含まれる水分(H₂O)によって、例えば、下記式



のように、容易に加水分解して、フッ化水素(HF)などの酸性不純物を生成する。このようなフッ化水素(HF)を含有した電解液をリチウムイオン電池に使用すると、正極、負極、溶媒と反応し、電池の放電容量の低下、内部抵抗の増大、サイクル寿命の低下など種々の問題を引き起こすことが報告されている⁴⁾。このように水分はリチウムイオン二次電池にとって非常に有害であるため、リチウムイオン二次電池の製造工程では低露点(露点温度マイナス60℃以下、空气中水分10ppm以下)のドライ環境が必要となる。リチウムイオン二次電池を製造するためにはデシカント除湿機が必須であり、リチウムイオン二次電池のコストが下がりにくい要因の一つとしてドライ環境を作る必要があるためと言える。逆に言うと、リチウムイオン二次電池製造工程での低露点環境の空調エネルギーが過大になって、リチウムイオン二次電池の製造原価を押し上げる一因となっている。ハニカムロータ式デシカント除湿機はリチウムイオン二次電池を製造するためには必須な装置ではあるが、リチウムイオン二次電池を従来よりも安く製造するために、より一層のランニングコストの低減が求められている。

西部技研では、これら顧客のニーズに答えるために、低温再生でも低露点除湿が可能な高性能シリカゲルロータを開発した。さらに低温排熱を利用するに適したフローも工夫考案して、ヒートポンプ排熱利用でも再生可能な、ランニングコストを従来装置比40%削減したヒートポンプ排熱利用の低温再生超低露点除湿機を開発した。本稿ではこれら技術について紹介する。

2. デシカントロータを用いた低露点空気製造方法

2.1. 吸着ハニカム

ハニカムに吸着材を担持した吸着ハニカムは、広い表面積を有しながら通気抵抗が低く(粒状ペレットの10分の1程度の圧力損失)、軽量でありながら構造体としての十分な強度を有しているなどの特長から、様々な空気処理装置に応用されている⁵⁾。吸着ハニカムは、0.1秒という短い滞留時間で水分及びVOCを高速交換することを可能とし、あわせて大容量処理に適した空気処理装置の工業化を実現することができる。

	AS-20	AS-22	AS-24	AS-26	AS-31	AS-42	AS-50	AS-63	AS-70	AS-85
P (mm)	2.0	2.2	2.6	2.6	3.4	4.2	5.2	6.4	7.2	9.0
H (mm)	0.85	0.95	1.10	1.40	1.90	2.50	3.00	3.50	4.50	5.20
表面積 (m ² /m ³)	5,400	4,800	4,200	3,500	2,400	2,000	1,700	1,400	1,100	900
セル数 (セル/inch)	750	600	450	350	200	120	80	60	40	30

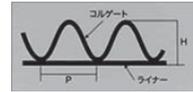


図2 ハニカムの種類と形状

例えば、湿った空気を瞬時に乾かしたり、空気中に含まれるVOCなどの成分を瞬時に分離したり、臭気を分解することができるなど短時間で大量の空気を処理するのに適した特徴を備えている。

図2にハニカムの種類と形状を示す。除湿及びVOC除去にはAS-31が多く採用され、ハニカムフィルタ用途のうち高性能が要求されるものはAS-22~AS-26が、低圧力損失が要求されるものはAS-50~AS-63が比較的多く採用されている。なお、本稿で用いた吸着ハニカムは、ハニカム形状に加工したのち、吸着材を含浸担持して取り込む方法で製作している。

2.2. シリカゲルロータ

1960年頃にスウェーデンのMunters社が、アスベスト繊維ペーパーで製作したハニカムに吸湿材として塩化リチウムを含浸したハニカムロータを開発した。Kathabar式などの塩化リチウム溶液を使用する湿式除湿機に対し、ハニカムロータを用いた除湿機は溶液を使用しないため、日本では乾式除湿機と呼ばれている。乾式除湿機は湿式よりも塩化リチウム溶液のキャリアオーバーが少なく、粒状吸着材を用いた除湿機よりも圧力損失が低く、取り扱いや大型化が容易であったため広く用いられるようになった。しかしながら、乾式除湿機は塩化リチウムを使用しているために、湿度の高い空気をロータに流すと塩化リチウムが液化しキャリアオーバーしたり、性能劣化やロータが破損したりするなど多くの問題が発生した。その欠点を解消するために、1984年に株式会社西部技研にて、塩化リチウムを使用しないシリカゲルロータを世界で初めて開発し、商品化した。シリカゲルロータは相対湿度100%の高湿度空気を流しても問題ないため冷却式除湿機との組み合わせも良く、耐久性も高く、メンテナンスも容易であった。さらに塩化リチウムロータと比

較して低露点除湿性能が優れていたことから、幅広い湿度域で使用できるロータとして、シリカゲルロータは塩化リチウムロータからほとんど入れ替わった。

シリカゲルロータは無機繊維紙をコルゲート状に加工してロータ化したのち、ハニカムマトリックス内部で吸湿性を持つシリカゲルを合成することによって得られる。この方法によればシリカゲルはハニカムマトリックスに化学的に結合しており、バインダーを全く使用していないので吸着性能が阻害されることなく、シリカゲルの吸着性能は100%発揮されることになる。今日では競合各社もシリカゲルロータを追従することで、シリカゲルロータはデシカントロータの世界的標準ロータとなっている⁶⁾。

2.3. デシカント除湿機の基本構成

図3にデシカント除湿機の基本構成を示す。デシカントロータはケーシング内でギヤドモータの駆動で低速回転している。ケーシング内は、処理ゾーン・再生ゾーン・冷却ゾーンに分かれており、処理空気は処理ゾーンより、回転中のデシカントロータ内へ導かれ、ロータを通過する際に空気中の水分をロータに吸着、除湿させ、乾燥空気として低露点環境が必要とされるドライルームへ供給される。一方、水分を吸着したロータは、回転によって再生ゾーンへ移動し、高温に加熱された再生空気の熱風によって水分を脱着し、再生される。再生ゾーンで加熱されたロータは冷却ゾーンへ移動し、パージ空気によって冷却され、再び処理ゾーンへと移動する。このようなロータ内での水分の吸着・脱着サイクルにより、連続的に低露点乾燥空気を供給する仕組みになっている⁷⁾。

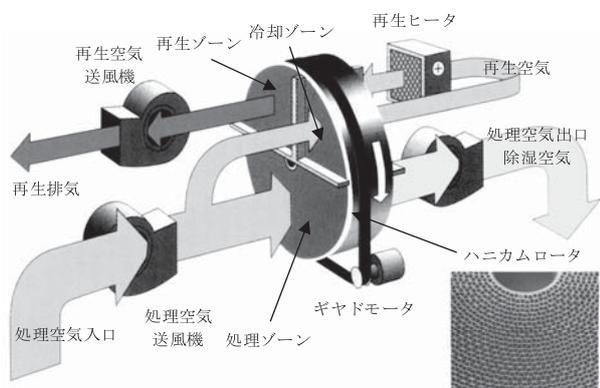


図3 デシカント除湿機の基本構成

3. シリカゲルハニカムロータの高性能化

3.1. 水蒸気吸着等温線と除湿性能

デシカント除湿機は温度スウィング吸着法 (Thermal Swing Adsorption : TSA) を用いているため、例えば除湿するためには強い吸着力が必要であるが、再生するためには吸着力が弱いほうがよい、という相反する特性が吸着材に要求される。すなわち、TSA における除湿性能は吸着材の吸着力と再生性のバランスによって決まる。

図4に各種吸着材の水蒸気吸着等温線を示す。4Aゼオライトは相対湿度10%の雰囲気でも多くの水分を吸着できることから低露点空気を作るためには有効な吸着材である。しかしながら一旦4Aゼオライトに吸着した水分を再生(脱着)させるためには、相対湿度を0%近くにまで下げる必要があり、実用上は200℃近い高温を4Aゼオライトに与えなければならぬため、再生エネルギーを多く投入する必要がある。結果としてランニングコストが高くなる。一方でB型シリカゲルは相対湿度20%程度でも水分吸着量が低いため、低露点空気を作るための吸着材としては使用しにくい。再生のためにA型ゼオライトほど相対湿度を下げる必要がないため50℃程度の温度をB型シリカゲルに与えることで、再生が可能となる。

以上より、デシカントロータは目的とする除湿性能と投入するエネルギーとのバランスのとれた最適な水蒸気吸着等温線が必要となる。本稿では、低温再生でかつ低露点除湿ができるデシカントロータの吸着特性について、空気線図を用いて、除湿ロータ通過空気の内での絶対湿度と相対湿度変化に着目することで、理想的な吸着特性を得ることができないか検討した。

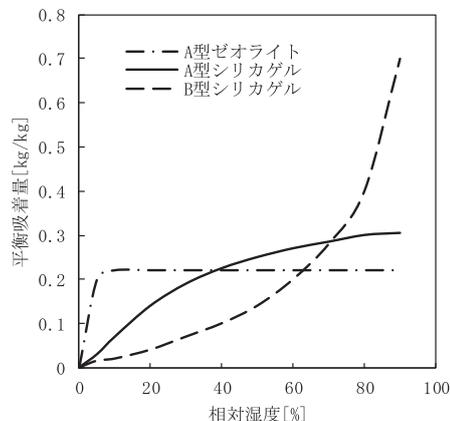


図4 各種吸着材の水蒸気吸着等温線

3.2. シリカゲルロータの理想的水蒸気吸着特性の検討

シリカゲルなどの一般的な吸着材の水分吸着力は、温度よりも主に相対湿度に依存する。図5に温度別の水蒸気吸着等温線を示す。吸着側の温度（例えば28℃）でも再生側の温度（例えば73℃）でも水蒸気吸着等温線はほぼ同じ形状になることが分かっている⁷⁾。この知見を前提条件として以下検討を進める。

図6(a)に $\alpha=1/1$ 、 $T_{P1}=32^\circ\text{C}$ 、 $T_{R1}=80^\circ\text{C}$ 、 $V=2\text{ m/s}$ 、 $X_{P1}=X_{R1}=20\text{ g/kg (DA)}$ のシリカゲルロータを用いた除湿操作時の空気の状態変化を示す。処理空気 P_1 がシリカゲルロータに入ると、シリカゲルロータ内で処理空気は除湿され、点 a - b - c - …… と経過して P_2 の除湿空気になる。一方で、再生空気 R_1 は、シリカゲルロータに吸着された水分を脱着しながら、点 h - g - f - …… と経過して R_2 の再生空気となる。 P_1 から P_2 への変化がロータ内を通過する処理空気の温湿度変化となる。同様に再生空気は R_1 から R_2 に変化する。

図6(a)で示した空気の状態変化を、縦軸を絶対湿度、横軸を相対湿度でプロットした曲線が図6(b)で示した相対湿度・絶対湿度の変化図である。図6(a)、(b)で示したアルファベットはそれぞれ対応するロータ内位置を示している。吸着材の水分吸着量は、一般に絶対湿度と温度の関数になるが、吸着熱と蒸発潜熱が等しい時には相対湿度のみの関数として表される。このような観点から、吸着を用いた除湿では相対湿度が重要な変数であると考えて図6(b)を描いた。さらに、次式で定義する絶対湿度変化率 X_c を用いた。

絶対湿度変化率 X_c :

$$\text{吸着側: } X_c = (X_p - X_{P2}) / (X_{P1} - X_{P2}) \quad (1)$$

$$\text{脱着側: } X_c = (X_R - X_{R1}) / (X_{R2} - X_{R1}) \quad (2)$$

X_p および X_R は、それぞれ処理空気および再生空気

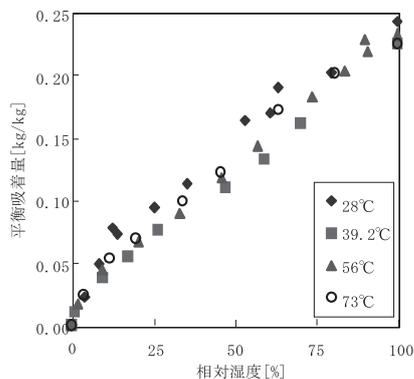
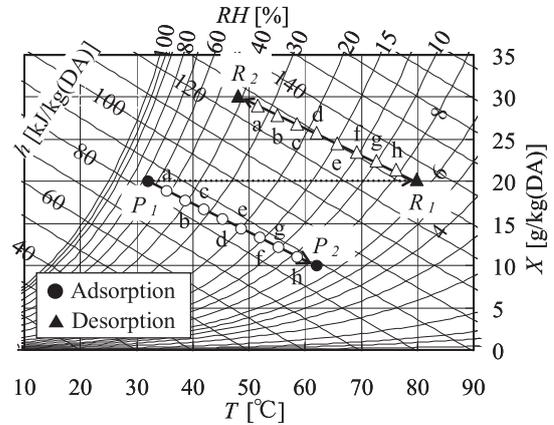
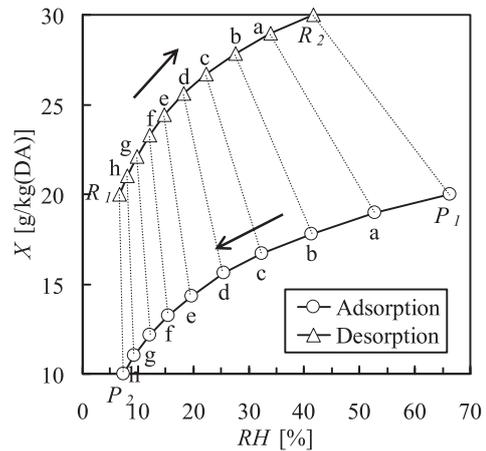


図5 温度別の水蒸気吸着等温線

がシリカゲルロータを通過している時点の絶対湿度である。即ち、処理（再生）側全体の除湿量（加湿量） ΔX に対する除湿量（加湿量）の割合が絶対湿度変化



(a) 空気線図上での状態変化



(b) 相対湿度・絶対湿度変化率

図6 シリカゲルロータを用いた除湿操作時の空気の状態変化 ($\alpha=1/1$ 、 $V=2\text{ m/s}$ 、 $T_{P1}=32^\circ\text{C}$ 、 $T_{R1}=80^\circ\text{C}$ 、 $X_{P1}=X_{R1}=20\text{ g/kg (DA)}$)

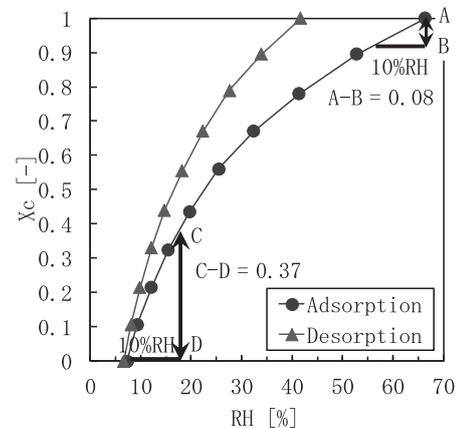


図7 絶対湿度変化率と相対湿度との関係 ($\alpha=1/1$ 、 $V=2\text{ m/s}$ 、 $T_{P1}=32^\circ\text{C}$ 、 $T_{R1}=80^\circ\text{C}$ 、 $X_{P1}=X_{R1}=20\text{ g/kg (DA)}$)

率 X_c となる。

図7に処理側と再生側の絶対湿度変化率と相対湿度との関係を示す。なお、処理側を吸着側、再生側を脱着側と示した。図7に示した吸着側のグラフに着目すると、高湿度雰囲気中で相対湿度を10%下げる(66%RH→56%RH)ために除湿する絶対湿度変化率(A-B)は0.08と少ないが、低湿度雰囲気中で相対湿度を10%下げる(17%RH→7%RH)ための絶対湿度変化率(C-D)は0.37となり、低湿度雰囲気では、多くの水分を除湿しないと相対湿度を下げられないことが分かる。シリカゲルロータを通過する吸着側の空気は、絶対湿度変化率1.0→0の挙動を示す。絶対湿度変化率が1.0の処理入口空気の相対湿度は最も高い状態にあるが(図6(b)、 P_i)、シリカゲルロータが水分を少し吸着するだけで、相対湿度は大きく下がる。一方で、ロータ中央から処理出口までには、相対湿度が低い雰囲気の中で、より多量の水分を吸着しないと相対湿度を下げるができない。図6(b)の吸着等温線を参照して上記のことを考えてみると、高い動的除湿性能を得る上で、処理側の関与する相対湿度の範囲(66%RH→7%RH)内で平衡吸着量の差 Δq^* が大きいことはもちろん必要であるが、その区間での吸着等温線の傾きあるいは湾曲の程度もまた重要であることが分かる。

図8に $\alpha=1/3$ 、 $V=2\text{ m/s}$ 、 $X_{P_i}=X_{R_i}$ 、 $T_{R_i}=140^\circ\text{C}$ の絶対湿度変化率と相対湿度との関係を示す。再生入口空気温度 $T_{R_i}=140^\circ\text{C}$ の場合でも、低湿度域で絶対湿度変化率が大きく変化する形状を示した。

なお、再生入口空気温度 $T_{R_i}=140^\circ\text{C}$ の場合では、再生側流量は処理側流量の1/3となることが多いので、再生側絶対湿度の変化が処理側の3倍大きくなり、脱着側の絶対湿度変化率は吸着側より大きな湾曲度を示す。

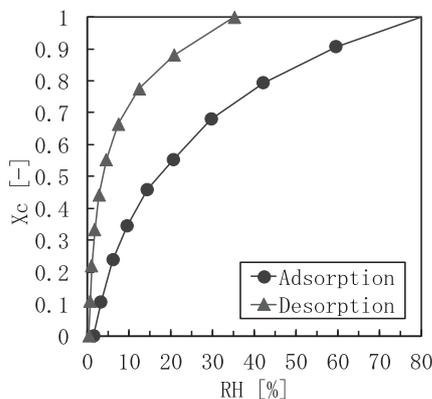


図8 絶対湿度変化率と相対湿度との関係
($\alpha=1/3$ 、 $V=2\text{ m/s}$ 、 $X_{P_i}=X_{R_i}$ 、 $T_{R_i}=140^\circ\text{C}$)

示す。従って、処理側の絶対湿度変化率より多少とも大きな湾曲度を持った水蒸気吸着等温線が望ましい可能性がある。

これら検証内容を基にして様々なタイプの水蒸気吸着等温線を持つシリカゲルロータを製作して、吸着性能を測定したところ、使用条件における相対湿度・絶対湿度変化率曲線と水蒸気吸着等温線を近似したシリカゲルロータの除湿性能が最良であることを確認した⁸⁾。

3.3. シリカゲルロータの最適化

シリカゲルロータの開発においては、シリカゲルの水分吸着特性の最適化とシリカゲルの細孔へのストレスによる劣化現象を理解することが重要である。西部技研は自社でシリカゲルロータを製造しているが、シリカゲルロータの製造条件が水分吸着特性及び劣化現象にどのような影響を及ぼすかは実験的・経験的に求めたものであり、製造方法が最適かどうかは明確にはなっていなかった。そこで、シリカゲルロータのロバスト設計と水分吸着特性の最適化を目的に、品質工学手法によりシリカゲルロータの最適化を検討した。

シリカゲルロータの水分吸着特性はその水蒸気吸着等温線と同義であるため、シリカゲルロータの機能を「水蒸気を吸着する」と設定し、信号因子Mを水蒸気分圧(=相対湿度)、出力yを平衡時の水蒸気吸着量とした。誤差因子にはシリカゲルの細孔を破壊する高温条件や無機気体物質の流入、細孔を閉塞する有機気体物質の流入を選定し、L4直行表を用いた。制御因子にはこれまでに実験的に明らかとなっているシリカゲルの水分吸着特性に影響を与えるシリカゲル合成条件について点数付けにより8因子を選定しL18直行表に割り付けた。図9にP-ダイアグラム(Parameter-Diagram)を示す。

詳細は割愛するが、品質工学手法によりSN比、感度を最適化することで、耐久性に優れ、低温再生時の除湿性能が15%アップしたシリカゲルロータを作製することができた⁹⁾。

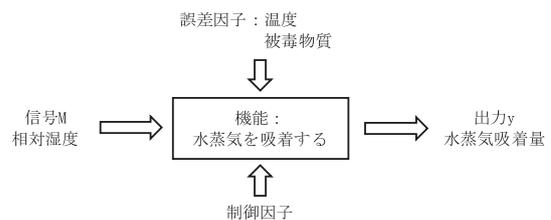


図9 機能定義のP-ダイアグラム

湿機を完成させた。

高性能ハニカム除湿ロータの開発と、新フローの考案により、ヒートポンプの排熱を再生に利用しながら、露点温度マイナス 60℃ 以下の超低露点空気を連続供給できる、従来比約 40% の省エネを達成する除湿機を開発した¹¹⁾。

5. まとめ

当社では、吸着技術を応用することにより、直接的（省エネルギー）にも、間接的（リチウムイオン二次電池の低コスト化などによる普及促進）にも、地球温暖化防止に大きく貢献している低温再生可能な超低露点ハニカム除湿ロータを開発し、省エネルギーシステムを取り入れたヒートポンプ排熱再生超低露点除湿機を開発した。これらの結果は、吸着ハニカム技術の低エネルギー消費型空気処理技術としての地位を確立、発展させるとともに、環境問題、エネルギー問題の解決に貢献できるものと考えている。

6. 謝辞

本業績について、2018 年日本吸着学会技術賞を頂き、厚く御礼申し上げます。本技術開発に携わった全ての関係者の皆様にこの場を借りて御礼申し上げます。

記号及び略号

h	: エンタルピー	[kJ/kg(DA)]
q*	: 平衡吸着量	[kg(H ₂ O)/kg(adsorbent)]
RH	: 相対湿度	[%]
T	: 温度	[°C]
V	: ロータ前面風速	[m/s]
X	: 絶対湿度	[g/kg(DA)]
ΔX	: 除湿量 (= X _{P1} - X _{P2})	[g/kg(DA)]
α	: ゾーン面積比	[-]
	(再生面積/処理面積)	

添字及び略号

P	: 処理空気
R	: 再生空気
1	: 入口
2	: 出口

[参考文献]

- 1) <http://seibu-giken.co.jp/>
- 2) 岡野浩志：化学装置、8、pp. 57~68 (2009)

- 3) <https://www.enplanet.com/Ja/Market/Data/y196.html>
- 4) 特開 2010-60511
- 5) 先端材料技術協会：ハニカム構造材料の応用 (2002)
- 6) 岡野浩志：デシカント空調システムの基礎理論と最新技術、pp. 109~117 (2015)
- 7) Toshimi Kuma, Tsutomu Hirose, Motonobu Goto, Akio Kodama, Journal of solar energy engineering February 1998, Vol.120, pp.45~50
- 8) 井上宏志、松隈伸悟、金偉力、岡野浩志、寺岡靖剛、広瀬勉：日本冷凍空調学会論文集、27(4)、327 (2010)
- 9) 島田隆寛、黒田彩子、屋形知尋、井上宏志、岡野浩志：品質工学研究発表大会講演要旨集、pp. 322~325 (2016)
- 10) 特許第 6059302 号
- 11) 金 偉力、岡野浩志：建築設備と配管工事、749. Vol. 56. No. 1 pp. 109-117 (2018)



井上 宏志
株式会社西部技研
開発本部開発部部长
博士 (工学)

- 1996 年 静岡大学大学院農学研究科応用生物化学専攻修士課程修了
- 1996 年 水澤化学工業株式会社入社
- 2003 年 株式会社西部技研入社
- 2011 年 九州大学大学院総合理工学府物質工学専攻博士課程修了
- 2017 年～ 現職

会 告

第 33 回日本吸着学会研究発表会のお知らせ

日本吸着学会研究発表会は、吸着の基礎科学から応用技術にわたる最新の研究成果が討論される年に一度の大会です。多数の皆様のご参加をお願い申し上げます。

主 催：日本吸着学会

共 催：名古屋大学大学院工学研究科

会 期：2019年11月14日(木)、15日(金)

会 場：名古屋大学 東山キャンパス (名古屋市千種区不老町)

交通アクセス (<http://www.htc.nagoya-u.ac.jp/~ishiguro/lhn/venue.html>)

詳細につきましては、ホームページをご参照ください。

宿 泊：各自で手配をお願いします。

講演会場：名古屋大学野依記念学術交流館

発表要領：口頭発表：講演12分、質疑7分、交代1分。プロジェクターでの発表をお願いします。

ポスター発表：発表時間1時間30分。ポスターサイズは、横90cm程度、縦120cm程度。

発表申込：日本吸着学会のWebサイト (http://www.j-ad.org/annual_meeting/) よりお申込下さい。

申し込みサイトへのアクセスにはユーザー名とパスワードの入力が必要です。以下に従って入力してください。

ユーザー名：jsad

パスワード：gakkai33

発表形式(口頭・ポスター)についてはご希望に添えない場合がありますので予めご了承ください。

要旨集原稿：A4版1ページに、講演題目、1行あけて所属(略称)、氏名(発表者に○)、1行あけて要旨を1行あたり45字、1段送りで記載し、最下行に連絡先(TEL、E-mail)を記入してください。原稿はE-mailの添付書類(MS Word2000-2016、およびPDF形式)として、下記実行委員会宛てお送りください。なお、学会Webサイトに原稿のテンプレート(MS Word2003形式)を用意しますのでご利用ください(http://www.j-ad.org/annual_meeting/abst_template_2019.doc)。参照できない場合には、下記連絡先までお問い合わせください。

懇 親 会：2019年11月14日(木) 名古屋大学 野依記念学術交流館(予定)

参加登録費：・予約登録(2019年9月27日(金)締切)

日本吸着学会・協賛学会会員：5,000円(官・学)、7,000円(産)、1,500円(学生)

非会員：8,000円(官・学)、10,000円(産)、2,000円(学生)

但し、維持会員企業からの参加者については、予約登録に限り3名までの参加登録費を無料に致しますので、奮ってご参加をお願いします。

(Web登録時に、参加種別として「維持会員」を選択してください。)

・当日登録(2019年9月28日(土)以降)

日本吸着学会・協賛学会会員：7,000円(官・学)、9,000円(産)、3,000円(学生)

非会員：10,000円(官・学)、12,000円(産)、4,000円(学生)

(要旨集のみの購入の場合は1冊3,000円)

懇 親 会 費：・予約参加(2019年9月27日(金)締切) 一般6,000円、学生3,000円

・当日参加(2019年9月28日(土)以降) 一般8,000円、学生5,000円

なお、懇親会費につきましては、維持会員企業からの参加者につきましても、一般の懇親会費を頂戴いたしますのでご注意願います。

参加予約申込：学会 Web サイト (<http://www.j-ad.org/registration/registration.html>) よりお申込下さい。
お申込み後は速やかに予約参加登録費と予約懇親会費を下記銀行口座へ、お振込みください。(振込み手数料は各自ご負担ください。)

振込先：【郵便振替】

記号番号：12050-19153911

加入者名：構造機能化学の会

加入者名 (カナ)：コウゾウキノウカガクノカイ

【銀行振込・他金融機関から】

ゆうちょ銀行 二〇八 (ニゼロハチ) 店 (208)

口座種目：普通

口座番号：1915391

加入者名：構造機能化学の会

加入者名 (カナ)：コウゾウキノウカガクノカイ

発表申込締切：2019 年 9 月 6 日(金)

要旨原稿締切：2019 年 9 月 27 日(金)

参加予約締切：2019 年 9 月 27 日(金)

実行委員会 (問い合わせ・連絡先)：

〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町

名古屋大学大学院工学研究科応用物質化学専攻固体化学講座構造機能化学 G

松田 亮太郎

E-mail：annualmeeting@j-ad.org / TEL：052-789-4603

※協賛学会については、ホームページを確認してください。

関連学会のお知らせ

触媒学会 第30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株式会社、島津製作所、ダッソー・システムズ・バイオピア、日本電子、日本分光、日立ハイテクノロジーズ、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、日本表面科学会、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：2019年6月19日(水)～21日(金)

会 場：スクーリングは東京大学（浅野キャンパス）武田先端知ホール

参加申込締切：5月10日(金)締切（定員（60名）になり次第、期日より前に締切ることがあります）

6月19日(水)

1. キャタリシススクールへようこそ（東工大）山中一郎 校長
2. 吸着と反応速度（東北大）富重圭一 先生
3. キャラクターゼーション：担持金属触媒（岩手大）白井誠之 先生
4. 触媒反応工学（静岡大）福原長寿 先生
5. 触媒調製（千葉大）佐藤智司 先生

6月20日(木)

共催分析機器メーカーでの分析実習

6月21日(金)

1. 環境触媒（東京大）小倉 賢 先生
2. 触媒劣化（成蹊大）里川重夫 先生
3. 酸化触媒（東工大）山中一郎 先生
4. キャラクターゼーション：固体酸・塩基触媒（東工大）野村淳子 先生
5. 工業触媒（アイシーラボ）室井高城 先生
6. 実用触媒の開発（東京農工大）山松節男 先生

卒業式・卒業証書授与

参加費 40,000円（主催／協賛学協会会員）、50,000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

申込方法：触媒学会 Web（<http://www.shokubai.org/general/CatSchool2019/index.html>）

より申込書をダウンロードし、下記へメール又はFAXにてお送り下さい。

問合せ・申込先：稲垣 怜史（第30回キャタリシススクール運営委員長）

FAX：045-339-3691、E-mail：catschool2019@ynu.ac.jp（参加者向け専用メールアドレス）

〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5 横浜国立大学理工学部化学棟504

第 57 回炭素材料夏季セミナー (福岡県春日市・九州大学筑紫キャンパス)

■セミナー概要

学生・若手研究者が集まり炭素材料について議論し交流を深めることを目的としています。炭素材料分野の研究開発をリードされている研究者を招き、基礎から研究の最先端までご講演していただくだけでなく、学生ポスター発表会・学生向けの企業セッションを開催することで学生の育成ならびに産学交流の場を設けます。

主 催：炭素材料学会 次世代の会

日 時：令和元年 9 月 12 日(木) 午前～9 月 13 日(金)

会 場：九州大学 筑紫キャンパス 〒816-8580 福岡県春日市春日公園 6 - 1 九州大学

定 員：70 名

内 容：研究講演会、企業による研究トピックスおよび会社紹介、学生によるポスター発表、交流会

1. プログラム (予定)

(1) 基調講演および招待講演

最前線で活躍されている多数の先生方をお招きし、炭素材料の基礎から最新の研究紹介まで、充実した講演内容を企画しています。内容は順次 Web サイトにて公開予定です。

(2) 企業の研究トピックスと会社紹介

(3) 学生によるポスター発表

優秀な発表に対してポスター賞を授与します。

また、博士後期課程学生を含む若手研究者によるディスカッションを主体としたオーラルプレゼンテーションを企画しています。

(4) 交流会

2. 参加費 (予定)

協賛会員の優遇措置・あり

炭素材料学会・協賛学会員：17,000 円、学生※：7,000 円、炭素材料学会・協賛学会賛助もしくは法人会員：22,000 円

※主催学会及び共催団体と同額の参加費を設定させていただきます。

参考まで、非会員 27,000 円です。

3. URL

<http://sample.wdc-jp.com/tanso/contents/event/seminar/summer-seminar57.html>

(詳細情報は随時更新予定です)

■参加申込に関するお問合せはこちら

炭素材料夏季セミナーヘルプデスク

E-mail：tanso-summer@bunken.co.jp

初心者のための吸着材評価の基礎講習 2019 開催のお知らせ

近年の新しい吸着材料の発展とともに、吸着評価装置の自動化・高機能化も急速に進んでいます。その一方で、吸着現象や評価手法に関する基礎知識を習得する機会が少なく、学生や開発担当者が不十分な知識のもとで研究開発を行っていることが多くあるように思われます。吸着材料の評価にたずさわる方々が、吸着評価に関する正確な知識や技術を身につけることで、研究開発のより効率的な推進が期待できます。日本吸着学会では2017年度より、株式会社アントンパール・ジャパン、マイクロトラック・ベル株式会社、株式会社島津製作所のご協力のもと、吸着材料を取り扱う産官学の研究者や学生を対象とした、吸着材料の構造解析・分析等の吸着評価に関する基礎講習会を開催しています。2019年度は以下の通り開催しますことをご案内申し上げます。皆様、奮ってご参加ください。

主 催：日本吸着学会

日 時：2019年6月26日(水) 9:30~19:00

場 所：株式会社アントンパール・ジャパン 本社
(東京都墨田区堤通1-19-9 リバーサイド隅田 13階)

《スケジュール》

〈講習会〉

- 9:10- 受付開始
- 9:30-9:40 開催の挨拶
- 9:40-10:45 吸着基礎講習 (ガス吸着の原理から比表面積と細孔分布)
- (休憩 15分)
- 11:00-12:00 吸着基礎講習 (IUPAC 2015 勧告と細孔分布解析のポイント、注意点など)
- 12:00-13:00 昼食 (お弁当)
- 13:00-14:15 吸着基礎講習 (カンタクROOMのソフトでの細孔解析実演) ならびに Q&A
- (休憩 15分)
- 14:30-17:00 粒子の構造解析に関連する実習 (Lab で5班に分かれ、次のブロックを30分間で分析実習)
- ・粒度分布計、ゼータ電位計
 - ・小角X線散乱測定装置 SAXS
 - ・粘弾性測定による分散性評価 レオメーター
 - ・ガス吸着装置 表面積・細孔分布
 - ・水銀ポロシメータ細孔分布とガス置換法真密度
- 17:00-17:05 閉会の挨拶
- (休憩 10分)

〈意見交換会〉

17:15-19:00 情報交換や個別質問のための意見交換会の時間を設けます。

講習会参加費：学生 (吸着学会会員・非会員不問)	3,000 円
一般 (吸着学会会員、維持会員企業の方)	5,000 円
一般 (非会員)	20,000 円

意見交換会参加費：一般 5,000 円

学生

3,000 円

※講習会および意見交換会参加費は当日受付にてお支払いください。

定員：50 名

※定員になり次第締め切らせていただきます。また、応募者多数の場合、複数名のお申込みをいただいている同一研究室もしくは所属部署に参加人数の調整をお願いする場合がございます。

参加申込方法：以下の参加者情報 1～6 をご記入の上、〈kisokoshu@j-ad.org〉まで E-mail でお申し込みください。

送信の際、件名を『初心者のための吸着材評価の基礎講習 2019』としていただきますようお願いいたします。事務局からの返信をもって参加受付完了といたします。

2、3 日経っても返信がない場合は、必ずお問い合わせください。

参加者情報：1. 氏名

2. 所属（学生の方は学年と研究室名まで記載）

3. 連絡先（Email アドレス、電話番号）

4. 学生・正会員・維持会員・非会員（該当するものを残してください）

5. 意見交換会に参加・不参加（該当するものを残してください）

6. 領収書の宛名

参加申込締切：5 月 24 日(金)

申込・問合せ先：初心者のための吸着材評価の基礎講習 2019 世話人

稲垣怜史（横浜国立大学）、遠藤明（産業技術総合研究所）

E-mail：kisokoshu@j-ad.org

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。

(令和元年5月現在、50音順)

株式会社アドール	株式会社アントンパール・ジャパン
エア・ウォーター株式会社	MHIソリューションテクノロジーズ株式会社
大阪ガス株式会社	大阪ガスケミカル株式会社
オルガノ株式会社	株式会社キャタラー
株式会社クラレ	栗田工業株式会社
興研株式会社	株式会社重松製作所
システムエンジニアリング株式会社	水ing株式会社
株式会社島津製作所	株式会社西部技研
大陽日酸株式会社	月島環境エンジニアリング株式会社
帝人ファーマ株式会社	東ソー株式会社
東洋紡株式会社	ニチアス株式会社
フタムラ化学株式会社	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	ミドリ安全株式会社
ユニオン昭和株式会社	ローム・アンド・ハース・ジャパン株式会社

編 集 委 員

委員長 松本 明彦 (豊橋技術科学大学)
委 員 伊藤 博光 (豊橋技術科学大学) 大場 友則 (千葉大学)
上村 佳大 (産業技術総合研究所) 近藤 篤 (東京農工大学)
瀬戸山徳彦 (株式会社 豊田中央研究所) 田中 秀樹 (京都大学)
飛弾野龍也 (大陽日酸株式会社) 山根 康之 (大阪ガスケミカル株式会社)
(五十音順)

Adsorption News Vol.33 No.1 (2019) 通巻 No.128 2019年5月31日発行

事務局 〒305-8565 茨城県つくば市東1-1-1 中央第5
国立研究開発法人 産業技術総合研究所 化学プロセス研究部門内
Tel : 029-861-4653 Fax : 029-861-4660 E-mail : info@j-ad.org
編 集 伊藤 博光 (豊橋技術科学大学)
Tel : 0532-44-6815 Fax : 0532-44-6929 E-mail : hiro_ito@ens.tut.ac.jp
日本吸着学会ホームページ <http://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)
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)
Research Institute for Chemical Process Technology,
Central 5, 1-1, Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8565, JAPAN
Tel : +81-29-861-4653 Fax : +81-29-861-4660 E-mail : info@j-ad.org

Editorial Chairman

Professor Akihiko MATSUMOTO
Graduate School of Engineering, Toyohashi University of Technology
1-1, Hibarigaoka Tempaku-cho, Toyohashi 441-8580, JAPAN
Tel : +81-53-244-6811 E-mail : aki@ens.tut.ac.jp

Editor

Hiromitsu ITO, Toyohashi University of Technology
Tel : +81-53-244-6815 E-mail : hiro_ito@ens.tut.ac.jp

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