

Adsorption News

Vol. 30, No. 4 (February 2017)

通巻 No.119

目 次

○巻頭言.....	2
「吸着技術で地球を救おう」	岡野 浩志
○平成 28 年度日本吸着学会学会賞	3
○平成 28 年度日本吸着学会大学院生研究奨励賞	4
○ホットトピックス.....	5
中空糸型吸着剤による二酸化炭素回収プロセスの設計と 経済性評価	川尻 喜章
○吸着基礎シリーズ.....	10
吸着状態描像へのアプローチー吸着熱ー	延澤 聡美・類家 正稔
○第 30 回日本吸着学会研究発表会開催報告	23
	森口 勇
○第 30 回日本吸着学会研究発表会ポスター賞	24
○第 26 回吸着シンポジウム（夏の学校）開催報告	28
	近藤 篤
○会告.....	31
「吸着材評価の基礎講習 2017」開催のお知らせ 第 27 回吸着シンポジウム（吸着夏の学校）開催のお知らせ 日本吸着学会国際交流スカラーシップについて 日本吸着学会大学院生研究奨励賞について 平成 29 年度日本吸着学会賞受賞候補者推薦のお願いと要領	
○関連学会のお知らせ.....	37
○追悼記事.....	38
William A. Steele教授のご冥福をお祈りして	金子 克美
○維持会員一覧.....	39

日本吸着学会
The Japan Society on Adsorption

巻 頭 言

吸着技術で地球を救おう

株式会社 西部技研 岡 野 浩 志



私が(株)西部技研に入社した1977年当時弊社は吸着とは無関係で、アスベストペーパーをハニカムロータ化して、塩化リチウムを含浸した全熱交換器とロータ除湿機を開発し、事業拡大を目指していました。しかし吸湿剤として塩化リチウムを使用しているための問題が多発しました。

全熱交換ロータでは、アスベスト規制対応に、難燃紙製のハニカムロータに塩化リチウムを含浸して対応しようとしたのですが、吸湿・乾燥による繰り返しで収縮し、大クラックを生じてクレームになりました。人材や資金力の有る大手企業が、セラミック繊維や無機粉体を抄き込んだ全熱交換ロータ用の紙を開発し、弊社は委託加工を受けるしかありませんでした。新たな紙の開発には多額の資金と時間が掛かる。そこで入手の容易なアルミ箔にシリカゲル粉末を塗布する、アルミ製の全熱交換ロータを、1981年に開発したのが「吸着」との係わりの始まりでした。

また除湿ロータでは、全熱交換ロータよりも多量の塩化リチウムを含浸するため、さらに問題が多く発生。セラミック繊維製のハニカムは粉々になり、周辺は塩水で錆だらけになりました。そこで試行錯誤の末、吸着式シリカゲルハニカムロータを1985年に開発し、1992年に日本吸着学会から技術賞を頂きました。

VOC濃縮ロータでは、疎水性ゼオライトが開発されるといち早くVOC濃縮用ゼオライトロータを開発しました。VOC処理は生産性に寄与しないため普及が進みませんでした。徐々に普及し、近年中国では深刻な大気汚染により、日本よりかなり厳しい法規制が施行され、1980年当時は全く予想しなかった大量の需要を生んでいます。

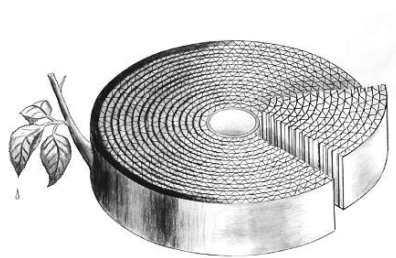
昨年驚いたことがあります。じつは10年前に某学会の基調講演の講演内容が学会誌に全文紹介されており、大変興味深く読んだことが有ります。その中に、産業革命以前の大気中二酸化炭素濃度は280ppmであったのが、今(2007年当時)380ppmになっている。10年後に400ppmになるだろうとの記述がありました。そこへ、昨年の夏頃に大気中二酸化炭素濃度が400ppmを超えたとの報道があり、まさに「地球温暖化は進んでいる」と実感した次第です。これから

の世の中、産業界の成長路線は地球温暖化防止の技術開発に集約されていくのではないかと、そのような気がします。

例えば弊社の全熱交換器は省エネの一手段であり、VOC濃縮装置は大気汚染VOCの省エネ処理装置、低露点除湿機は、自動車等の二酸化炭素排出量削減技術の目玉となるリチウム電池や、省エネディスプレイ有機ELの生産に欠かせない製造工程の空調技術として、間接的にも地球温暖化防止に貢献、また将来的には二酸化炭素処理技術開発を目指しています。

文末の図は1986年頃に開発したシリカゲル除湿ハニカムを、地中の水分を吸い上げ大気中に放出する樹になぞらえて描いた図ですが、現在開発中の二酸化炭素処理ハニカム技術にも繋がるようで、運命的なものを感じます。

吸着学会、及び吸着に関係する業界は、吸着技術を応用して、地球温暖化防止対策に貢献する責任と義務があるのではないかと思います。弊社のハニカム技術は吸着材ありきで、特別な機能、特徴を持った吸着材があれば、ハニカム化技術と組み合わせることで特別な機能製品を実現させることができます。その意味で新しい機能を持った吸着材の出現を待望しています。



氏名 岡野 浩志

所属 株式会社 西部技研

略歴

1977年3月 九州産業大学工学部機械工学科卒業
同年 (株)西部技研入社

1997年 取締役技術開発本部長 現職

2001年 熊本大学工学部大学院自然科学研究科
博士課程終了(工学博士)

平成 28 年度日本吸着学会学会賞

会員の皆様にご推薦をお願いしておりました平成 28 年度日本吸着学会学術賞、奨励賞（カルゴンカーボンジャパン賞）、技術賞につきまして、学会賞選考委員会における審議を経て、以下のように受賞者が決定されました。第 30 回研究発表会に合わせて開かれました日本吸着学会総会において報告され、引き続き表彰式にて各賞の顕彰が行われました。

学 術 賞

応募なし

奨 励 賞（カルゴン カーボン ジャパン賞）

西原 洋知 氏（東北大学多元物質科学研究所）

受賞対象研究：カーボン系材料のナノ空間制御と応用に関する研究

西原氏は、鋳型炭素化法、無機多孔体の均一炭素ナノ被覆、有機系結晶の炭素化等の手法により、従来よりもナノ細孔構造を単純化した種々のカーボン系材料を調製し、吸着や界面現象に基づく応用において鍵となる材料の構造および物性を明らかにするとともに、電気化学キャパシタ、水素吸蔵、リチウムイオン電池等、幅広い応用に向けた研究を展開している。特に、ゼオライトを鋳型として調製される規則性ミクロポーラスカーボンを利用した一連の研究は特筆すべき多くの成果に結びついている。西原氏はこのカーボンが帯状の単層ナノグラフェンから成る特異的な構造を有し、活性炭等の従来の多孔質カーボン材料よりも大幅に単純化したモデルでその構造を描写できることを明らかにしている。この炭素の特長を利用することで、ミクロ孔であっても構造規則性があればイオンの拡散抵抗が小さく電気化学キャパシタを高速化できることを見出している。また、ナノグラフェン骨格には電解液中でキノン類等の官能基が大量に導入可能であり、大きな疑似容量が得られることを見出している。水素貯蔵に関しては、この炭素をモデル物質として利用することで、実用化に重要である室温高圧条件における物理吸着量の限界値を提示すると共に、金属の作用によるスピルオーバー貯蔵のメカニズムを提案している。さらに、調製したカーボン系材料の特異的な構造に由来する新機能の創出について、連続したグラフェン 1 層からなるミクロ多孔質カーボンが優れた弾性を示し、応力印加により細孔を微小化でき、なおかつガス吸着特性を変化させ得ることを発見している。以上の一連の研究業績は、35 報の学術論文等で発表されており、International Journal の表紙にも多数選ばれており、国内外で多くの注目を集めている。よって、吸着学会奨励賞を授与するにふさわしいものである。



技 術 賞

応募なし

平成 28 年度日本吸着学会大学院生研究奨励賞

日本吸着学会は、将来の日本の吸着関連分野を支える人材育成のため、吸着関連の研究で博士号取得を目指す学生会員の研究中間成果と今後の研究計画に対して審査を行い、優秀と認めたものに対して研究奨励賞を授与して研究を支援します。平成 28 年度は下記の 2 件が選ばれました。活躍を祈念いたします。

大崎 修司（京都大学大学院工学研究科）

「ソフト多孔性錯体の粒子サイズ・形状制御と自由エネルギー解析に立脚した特異的吸着挙動の精密制御」

吉田誠一郎（北海道大学大学院総合化学院）

「マイクロハニカム構造を有する材料の連続プロセスへの応用」

ホットピックス

中空糸型吸着剤による二酸化炭素回収プロセスの設計と経済性評価

Design and economic evaluation of carbon dioxide recovery process using hollow fiber adsorbent

ジョージア工科大学科学学生体分子工学科

School of Chemical & Biomolecular Engineering, Georgia

Institute of Technology

川尻 喜章

Yoshiaki Kawajiri

1. はじめに

大気中の二酸化炭素濃度上昇による地球温暖化を防ぐため、様々な二酸化炭素回収技術が開発、検討されている。米国における二酸化炭素排出量の 37%が発電所からのものと推算されており¹、この排出源からの効率的な回収技術の開発が急務となっている。火力発電所からの二酸化炭素回収には燃焼前回収(pre-combustion)、燃焼後回収(post-combustion)、及び酸素濃度を高めて燃焼させる酸素燃焼(oxy-fuel)があり、本稿では燃焼後回収技術について述べる。

燃焼後二酸化炭素回収のための有力な技術として、吸収、膜分離と並んで吸着分離が挙げられる。大量の水を必要とする液相アミン吸収に比べ、固体吸着剤による回収は、再生に必要なエネルギーが低く抑えられる可能性が指摘されている。しかしながら、二酸化炭素の高純度、高回収率を達成しながら毎時 2000 トンを超える排ガス処理量に対応しなければならない²。この巨大なスケールでの分離コストを抑えるにはエネルギー効率を高めねばならず、技術的進歩が求められている。

本稿では、火力発電所からの二酸化炭素回収を目的として開発された新しい単位操作概念である、中空糸型吸着剤を用いた高速温度スイング(Rapid Temperature Swing Adsorption, RTSA)プロセスについて紹介する。このプロセスは中空糸状の吸着剤を熱交換器に似たモジュール内に配置し、効率的な伝熱と物質移動を実現するものである。このプロセスのモデリング、設計、及び技術経済性評価を行った。

1. 中空糸型吸着剤

ジョージア工科大学の Ryan Lively および William Koros 教授のグループによって開発された中空糸型吸着剤の原理を図 1 に示す^{3,4}。これはポリマー(セルロースアセテート、Torlon®等)製の中空糸型支持層(porous polymer matrix)の中に固体粒子の吸着剤(sorbent particles)が埋め込まれている。内部の空洞に冷水を通すことにより吸着操作時には吸着熱を除去し、脱着操作時には温水を通すことにより脱着熱を供給することが

できる。この中空糸型の形状により伝熱の効率が上がり、高速温度スイングを可能にしている。この空洞とポリマー層はネオプレン製の非浸透内腔層(impermeable lumen layer)で分離されており、気相から温水や冷却水への浸透は遮断され、伝熱のみが起こる。

更には、中空糸型吸着剤はモノリス型吸着剤と同じく規則的構造を持っていることから、充填層に比べて圧力損失が低いことも利点である。この中空糸型吸着剤は、中空糸膜と同じように紡糸法による製造、及びモジュールに充填してスケールアップが可能である。

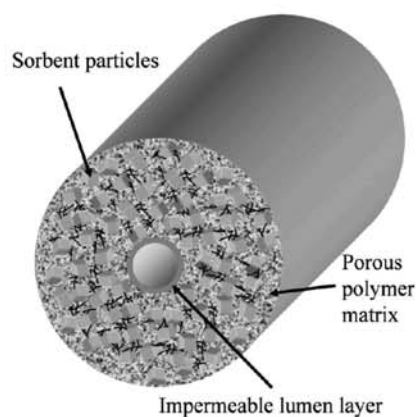


図 1 中空糸型吸着剤概念図

(ACS Publications の許可を得て文献 4 より転載)

中空糸型吸着剤の走査型電子顕微鏡写真を図 2 に示す⁵。ポリマー層の半径は数百 μm 程度の薄さであり、温水による加熱と冷却水による冷却を極めて高速に行うことが出来る。この高率な伝熱により、RTSA プロセスのサイクル時間は4分以下まで短縮することができる⁶。

ポリマー層に埋め込まれる固体粒子吸着剤として、活性炭、13X ゼオライトなどが提案されている。本稿で紹介する二酸化炭素回収の研究では、粒子状吸着剤としてアミンを充填、結合させたシリカゲルを用いた。ゼオライトの代わりに固定化アミンを使用することにより、水分でほぼ飽和された火力発電所からの排ガスを、前処理することなく吸着プロセスに供給することが可能になる。

この中空糸型吸着剤を使った吸着モジュール、およびそれを使った温度スイング操作を図 2 に示す。この吸着モジュールは多管円筒式熱交換器、あるいは中空糸膜モジュールと似た構造になっている。高速温度スイング操作のサイクルは、吸着、加熱、脱着(スイープ)、冷却(それぞれ図 3 (a)、(b)、(c)、(d))の 4 工程から成る。これらの工程のうち、吸着および冷却の 2 工程においては、内部の空洞内に冷水を通すことにより冷却

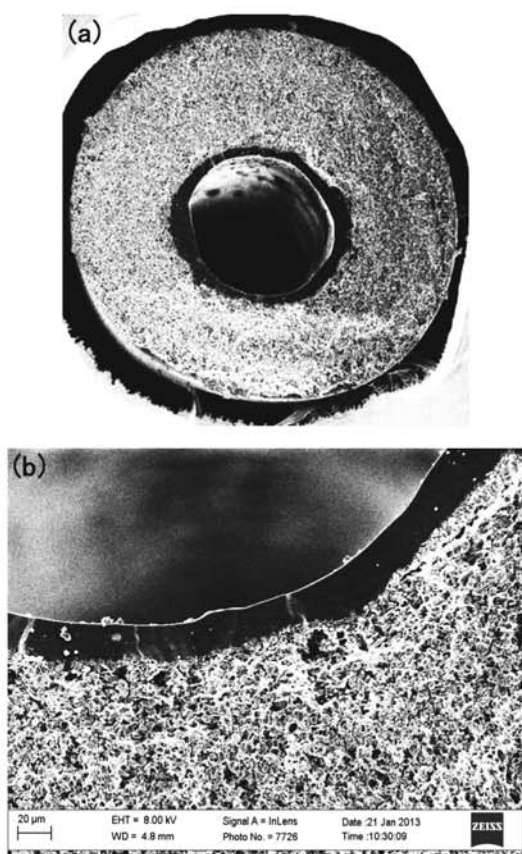


図 2 走査型電子顕微鏡写真 (a) 断面図 (b) 非浸透内腔層拡大図 (ACS Publications の許可を得て文献 5 より転載)

と吸着熱の除去を行う。そして脱着および加熱の工程では、内部の空洞内に温水を通すことにより加熱と脱着熱の供給を行う。

中空糸型吸着剤を用いた破過応答試験を図 4 に示す⁸。この実験では Torlon®をポリマー層として用い、質量分析によるモジュール出口濃度(図 4 (a))及び熱電温度計により吸着剤温度(図 4 (b))を測定した。空洞内に冷水を流した実験と流さない実験での破過容量を測定し、吸着熱を除去することによる破過容量の増加を確認した。図 4(a)に示されるように、冷却水を流した場合は破過時間が長くなることが確認された。この冷却効果により破過容量は0.54 mmol/gから0.82 mmol/gまで増加することが確かめられた。

使用済みの温水及び冷却水はリサイクルすることにより、熱統合が可能となり⁶、後述するようにエネルギー費用を削減することができる(図 5)。吸着工程では吸着熱によって温度が上がった使用済み冷却水を回収し、補助的に加熱をした後に温水としてリサイクルする。同様に脱着工程で温度が下がった使用済み温水を回収し、補助的に冷却した後に冷却水としてリサイクルする。

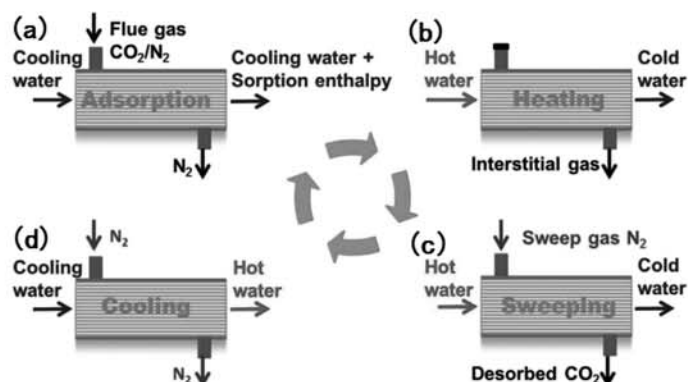


図 3 高速温度スイング(RTSA)プロセス (a) 吸着工程、(b) 加熱工程、(c) 脱着(スイープ)工程、(d) 冷却工程 (John Wiley and Sons の許可を得て文献 8 より転載)

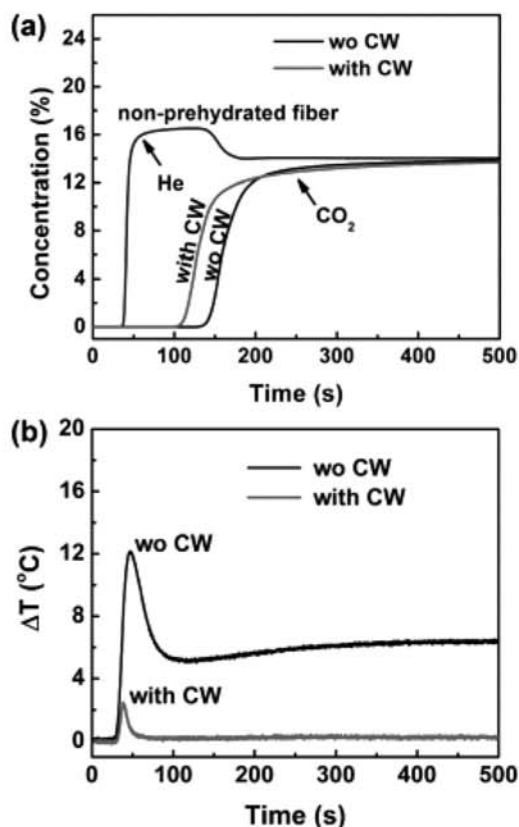


図 4 冷却水なし(wo CW)と冷却水あり(with CW)での破過応答試験比較⁸ (a) モジュール出口二酸化炭素濃度、トレーサーとしてヘリウム(He)を使用、(b) 吸着剤温度 (John Wiley and Sons の許可を得て文献 8 より転載)

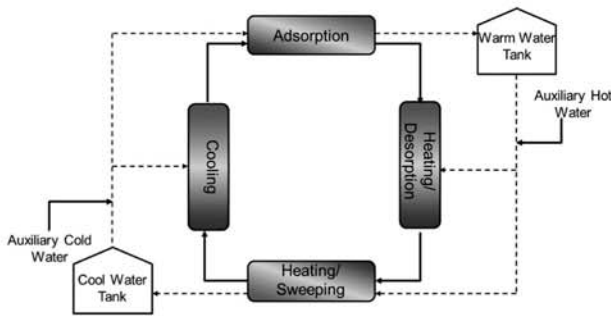


図 5 熱統合概念図(Elsevier の許可を得て文献 6 より転載)

2. プロセスモデリング

この中空糸型吸着剤モジュールは、従来型の充填層型吸着モジュールと同様のモデリングを行うことができる。モジュール内の中空糸型吸着剤一本を考え、その周りにある自由体積中のガスとの物質収支をモデル化した。同様に空洞内の冷却水、温水と吸着剤の間の熱収支も数式モデルとして表した。物質収支モデルには、熱重量分析により別途測定した吸着等温式を使用した。

上記の物質・熱収支式をプロセスシミュレータ gPROMS に実装し、実験によって得られた破過応答曲線及び温度データにフィッティングすることによりパラメータを推定した⁹。このモデルはガス流速、モジュール長さ、温度などのパラメータを変えた様々な条件化で実験データとの比較を行った(図 6)¹⁰。

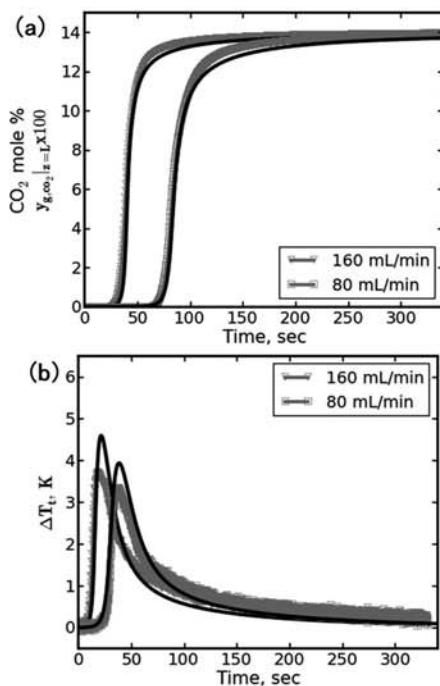


図 6 破過試験応答のモデル予測と実験データの比較 (a) モジュール出口での二酸化炭素濃度(モル分率)、(b)吸着剤温度変化(Elsevier の許可を得て文献 9 より転載)

3. プロセス設計及び経済性評価

上記の数式モデルを使い、RTSA プロセスの設計を行った。この設計では、以下の最適化問題を数値計算手法を使って解くことにより、最適設計及び操作パラメータを決定した⁷。

$$\text{Maximize throughput} \quad (1)$$

$$\text{Subject to: Purity}_{\text{CO}_2} \geq \text{Purity}_{\text{min}} \quad (2)$$

$$\text{Recovery}_{\text{CO}_2} \geq \text{Recovery}_{\text{min}} \quad (3)$$

ここで、throughput は二酸化炭素の単位時間当たり処理量、 $\text{Purity}_{\text{CO}_2}$ 及び $\text{Recovery}_{\text{CO}_2}$ は製品の二酸化炭素純度及び回収率、 $\text{Purity}_{\text{min}}$ 及び $\text{Recovery}_{\text{min}}$ は要求される二酸化炭素純度及び回収率である。上記(1)-(3)で表される最適化問題を解くことにより、最適な操作変数(吸着時間、加熱時間、脱着時間、冷却時間、二酸化炭素製品と排ガス切り替え時間、冷却水及び温水流速)が求められる。吸着は 40℃、脱着は 120℃で行われると仮定した。

上記の手法により設計された RTSA プロセスの経済性評価を行った。経済性評価は米国エネルギー省の国立エネルギー技術研究所(National Energy Technology Laboratory)が発行しているガイドラインに準拠した^{2, 11-14}。このガイドラインでは、電気エネルギー正味出力が 550 MW-electricity の火力発電所を基準とし、排ガスの組成及び処理量が与えられている。この排ガス中の二酸化炭素を 95%の純度 90%の回収率で除去することが目的とされている。この二酸化炭素回収プロセスに必要なユーティリティ(冷却水、スチーム、電気)の規格及びコストも同ガイドラインで定められている。ポンプ、タンク、コンプレッサー、ブロー、熱交換器、冷却水及び温水ろ過装置などのプロセス機器は ASPEN In-plant Cost Estimator により原価を推算した。中空糸型吸着剤のコストは、中空糸膜のコストを推算した文献に基づき、\$10/m² と仮定した。本稿の経済性評価手法の更なる詳細は文献 7 を参照されたい。

二酸化炭素回収プロセスで使用されるエネルギーは同じ発電所から供給されるため、発電所の出力を拡大しなければならない。NETL のガイドラインでは、正味出力が 550MW-electricity になるようスケールアップして計算される。この計算のため、寄生エネルギー必要量 κ (parasitic energy demand)を以下に定義する⁷。

$$\kappa = \left(\sum_i E_i \right) + Q_{\text{steam}}(p - p_{\text{ILP}}) \quad (4)$$

ここで、 E_i は各プロセス機器に必要な電気エネルギー (MW-electricity)、 Q_{steam} は脱着操作に使う温水に必要な総熱エネルギー (MW-thermal)、 p は熱エネルギーから電気エネルギーへの変換係数 (MW-electricity/MW-thermal)、 p_{ILP} は RTSA プロセスの脱着工程に必要な温水を蒸気を冷却することにより作る際にタービンによって生産される電気エネルギー (MW-electricity/MW-thermal)である。上記の寄生エネルギー必要量 κ を使い、拡大係数 (escalation factor)を以下に定義する。

$$\text{Escalation factor} = 550 / (550 - \kappa) \quad (6)$$

更に均等化発電原価(levelized cost of electricity, LCOE)を以下の計算式で推算することが NETL より指定されている²。

$$\text{LCOE} = 0.3073 \kappa + 64 \text{ (mills /kWh)} \quad (5)$$

ここで、単位 mills は 0.1 セントである。NETL のガイドラインでは、これらの指標を比較することにより多様な二酸化炭素プロセスの比較を行っている。特に、超臨界アミンを使った Econamine プロセスをベンチマークとして用いている¹⁵。

技術経済性評価の結果を表 1 及び図 7 に示す。RTSA プロセスの拡大係数は Econamine プロセスよりも小さくなっているが、これは様々な仮定が含まれていることに注意しなければならない。特に、二酸化炭素純度と回収率をそれぞれ 90%と 80%まで下げた基づく計算であり、NETL が要求している純度 95%と回収率 90%を想定していない。更には二酸化炭素と水の吸着平衡への相互作用も無視しており、より厳密な推算のためには更なる研究が必要である。

表 1 技術経済性指標比較

	Econamine	RTSA
LCOE (mills/kWh)	129	121
CO ₂ 回収コスト(\$/ton)	(不明)	39.4
Escalation factor	1.382	1.338

資本費用及び運営管理費用の内訳を図 7 に示す。資本のうち、最も高い割合を中空糸型吸着剤モジュールが占めており(図 7(a))、このコストを減らすことが資本費用を更に削減するために必須である。そして運営管理費用の最も高い割合を蒸気が占めており(図 7(b))、脱着操作をより効果的に行うことが必要である。また、吸着剤の寿命は 3 年と仮定したが、評価の精度を更に上げるには長期の寿命試験を行わなければならない。また、二酸化炭素輸送、貯蔵、モニタリングの費用は、エネルギー省により指定された値である、二酸化炭素 1 トンあたり \$4.05 を用いた²。

最後に

火力発電所からの二酸化炭素回収技術として、吸着分離は有力な手段として考えられている。しかしながらその大きいスケールとコスト要求に対応したプロセスの開発は厳しい研究課題である。この課題に対処するため、新しい単位操作概念である中空糸型吸着剤を使った RTSA プロセスを提案した。このプロセスの効率的な伝熱と熱統合により、エネルギーコストの削減を図った。

火力発電所からの二酸化炭素回収を経済的に行うための課題はまだ数多くある。これを実現するためには、材料開発、プロセス開発、そして技術経済性評価など、様々なスケールでの専門領域を持った研究者間の緊密な連携と共同研究が必要である。

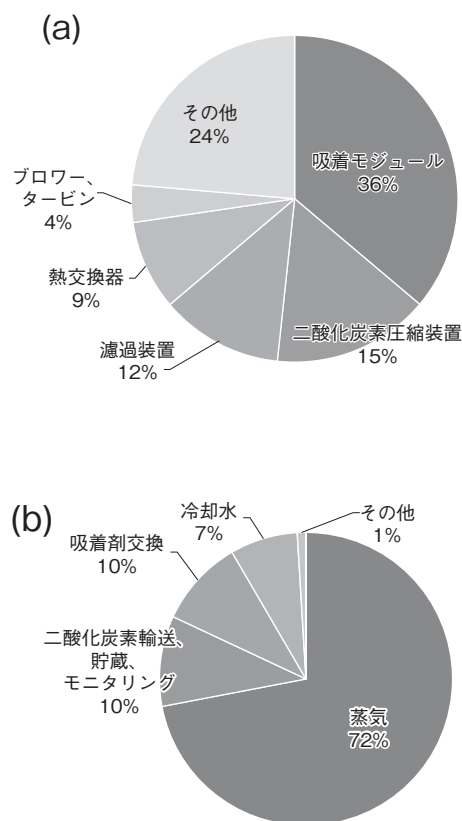


図 7 技術経済性評価, (a)資本費用内訳, (b)運営管理費用内訳

謝辞

本稿で述べた内容は米国エネルギー省 (US Department of Energy) の国立エネルギー技術研究所 (National Energy Technology Laboratory) の研究助成により実施したものである (DE-FE0007804)。本稿の意見、結果、結論などは著者個人によるものであり、米国エネルギー省を代表するものではない。この研究はジョージア工科大学の教授である Christopher Jones、William Koros、Ryan Lively、Matthew Realff とその研究グループ、及び Trimeric Corporation の Katherine Searcy と共同で行われた。関係者全員に改めて深く謝意を申し上げる。

[参考文献]

- 1) U.S. Energy Information Administration, How Much of U.S. Carbon Dioxide Emissions Are Associated with Electricity Generation?, <http://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=77&t=11>, (1/4/2017)
- 2) National Energy Technology Laboratory: US Department of Energy, *Bench-Scale and Slipstream Development and Testing*

of Post-Combustion Carbon Dioxide Capture and Separation Technology for Application to Existing Coal-Fired Power Plants, DE-FOA-0000131 (2011).

3) R. P. Lively, R. R. Chance, W. J. Koros, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **49**, 7550 (2010).

4) R. P. Lively, R. R. Chance, B. T. Kelley, H. W. Deckman, J. H. Drese, C. W. Jones, W. J. Koros, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **48**, 7314 (2009).

5) Y. Labreche, Y. Fan, F. Rezaei, R. P. Lively, C. W. Jones, W. J. Koros, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **6**, 19336 (2014).

6) F. Rezaei, S. Subramanian, J. Kalyanaraman, R. P. Lively, Y. Kawajiri, M. J. Realff, *Chem. Eng. Sci.*, **113**, 62 (2014).

7) S. Swernath, K. Searcy, F. Rezaei, Y. Labreche, R. P. Lively, M. J. Realff, Y. Kawajiri, in *Computer Aided Chemical Engineering*, (Ed: F. You), Elsevier, Waltham, MA 253-278 **2015**.

8) Y. Fan, Y. Labreche, R. P. Lively, C. W. Jones, W. J. Koros, *AIChE J.*, **60**, 3878 (2014).

9) J. Kalyanaraman, Y. Fan, R. P. Lively, W. J. Koros, C. W. Jones, M. J. Realff, Y. Kawajiri, *Chem. Eng. J.*, **259**, 737 (2015).

10) Y. Fan, J. Kalyanaraman, Y. Labreche, F. Rezaei, R. Lively, M. Realff, W. J. Koros, C. W. Jones, Y. Kawajiri, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **54**, 1783 (2015).

11) National Energy Technology Laboratory: US Department of Energy, *Updated Costs (June 2011 Basis) for Selected Bituminous Baseline Cases*, DOE/NETL-341/082312 (2012).

12) National Energy Technology Laboratory: US Department of Energy, *Quality Guideline for Energy System Studies (QGESS): Process Modeling Design Parameters*, DOE/NETL-341/081911 (2012).

13) National Energy Technology Laboratory: US Department of Energy, *Quality Guideline for Energy System Studies (QGESS): Capital Cost Scaling Methodology*, DOE/NETL-341/013113 (2013).

14) National Energy Technology Laboratory: US Department of Energy, *Quality Guideline for Energy System Studies (QGESS): Cost Estimation Methodology for Netl Assessments of Power Plant Performance*, DOE/NETL-2010/1455 (2010).

15) National Energy Technology Laboratory: US Department of Energy, *Cost and Performance Baseline for Fossil Energy Plants Volume 1: Bituminous Coal and Natural Gas to Electricity Rev. 2*, DOE/NETL-2010/1397 (2010).



川尻 喜章

米国ジョージア工科大学

化学生体分子工学科

准教授、Thomas Malone Faculty Fellow

Specialty Separations Center センター長

Ph.D.

1999 年 3 月

関西大学大学院工学研究科修士課程
修了

1999 年 4 月

オルガノ株式会社入社

1999 年 6 月

同社 退職

1999 年 8 月

米国カーネギーメロン大学化学工学科
Ph.D. 課程入学

2007 年 7 月

同校修了、Ph.D.

2007 年 10 月 - 2008 年 8 月

独国マクデブルク市マックス
プランク研究所 (Max-Planck-Institut
für Dynamik komplexer technischer
Systeme) ポストドクトラルフェロー

2008 年 9 月

米国ジョージア工科大学化学生体分子
工学科 助教授

2015 年 7 月

同校 終身在職権付准教授、Thomas
Malone Faculty Fellow

2016 年 7 月より現職

吸着基礎シリーズ

吸着状態描像へのアプローチ ー吸着熱ー

東京電機大学理学研究科
延澤聡美・類家正稔

1 はじめに

吸着現象には必ず発熱が伴う。これは次のように説明される。まず、吸着現象は自発的におこるから、この過程では Gibbs の自由エネルギーが減少する。

$$\Delta_{\text{ads}}G = \Delta_{\text{ads}}H - T\Delta_{\text{ads}}S < 0 \quad (1)$$

ここで、 $\Delta_{\text{ads}}G$ 、 $\Delta_{\text{ads}}H$ 、 $\Delta_{\text{ads}}S$ 、 T はそれぞれ、吸着に伴う Gibbs 自由エネルギー変化、エンタルピー変化、エントロピー変化、絶対温度を表す。また、気相 (3 次元) にある分子が固体表面 (2 次元) に集まるのだから、この過程では (統計力学的な意味で) エントロピーは減少する。すなわち、 $\Delta_{\text{ads}}S < 0$ である。 $-T\Delta_{\text{ads}}S$ が正であるにもかかわらず、 $\Delta_{\text{ads}}G < 0$ であるためには、 $\Delta_{\text{ads}}H$ が負でなければならない。 $\Delta_{\text{ads}}H < 0$ は発熱であるから、すなわち、吸着過程は発熱を伴う、というわけである*1。そして、吸着に伴い発生する熱を「吸着熱」という*2。ところで、吸着には物理吸着と化学吸着とがあり、いずれの場合でも吸着熱が発生する。しかし、吸着熱を熱力学関数と関係付けて議論する場合は、可逆変化である物理吸着に限定されることが多い。

そもそも、吸着は吸着質と固体表面間に働く相互作用 (縦の相互作用) と吸着質どうしの相互作用 (横の相互作用) によって進行する。つまり吸着熱を測定することは、これらの相互作用の総和を測定することであ

り、吸着熱は吸着等温線とともに吸着現象を理解するのに重要である。さらに、吸着質ー固体相互作用と吸着質間相互作用を完全に分離して議論できれば、本稿の題目である「吸着状態描像へのアプローチ」はより容易になる。しかし、吸着熱を吸着質ー固体相互作用と吸着質間相互作用に分離して測定することは不可能であるし、何らかの方法で (測定後に) 分離することができたとしても、系に即した仮定や考察が必須になる。また、これらの相互作用は吸着初期、中期、飽和付近と吸着の進行に伴いその大きさが変化していくので、吸着熱は吸着量の関数として表すことが多い。これにより吸着がいかんして進行していくのか、ということに関し情報が得られる。

本稿では、まず「吸着熱とは何か」という基本的な事柄について説明する。これには、その定義を示すのが最も適切だと考えた。その次に、吸着熱の求め方について説明した。これには、吸着熱を熱量計で直接測定する方法と、間接的に求める方法があるので、それぞれについて代表的なものについて説明した。その後で、最近の素晴らしい研究結果も含めて、著者の知限りの報告例から何例か紹介した。いくつか研究例を見ていただくことで、吸着熱測定から何がわかり、いかにして吸着状態の描像へアプローチするのかを理解していただけると考えたからである。

2 吸着熱とは

ひとくちに吸着熱といっても様々な定義があり、実際に測定することを考えても、その測定法によって得られる吸着熱の意味が異なる。本稿ではそれらのうち、微分吸着熱、積分吸着熱、等量吸着熱を取りあげた*3。ここでは吸着を熱力学で取り扱うが、吸着媒が剛体であつ不活性である、つまり吸着媒の表面積と表面の力学的特性が不変であると仮定する。すなわち、吸着媒として活性炭やシリカゲル、ゼオライト、カーボンブラックのような「ふつうの多孔性固体」もしくは「非多孔性固体」を想定し、最近活発に研究されている金属ー有機構造体 (MOF) のように吸着に伴って構造の変化するような「やわらかい多孔性固体」はここでは考えない*4。

*1 ごくまれに、吸熱を伴う吸着現象も確認されている。吸着相で吸着質が解離したり、解離吸着した吸着質が表面を自由に動き回る場合には、吸着に伴うエントロピー変化 $\Delta_{\text{ads}}S$ が正になる可能性があり、この場合は吸熱でも吸着は進行する。たとえば、銀への酸素吸着やガラス表面への水素吸着など、吸熱状態で吸着が進行する例が知られている [1, 2]。

*2 吸着熱はエンタルピー変化で定義されるものと、内部エネルギー変化で定義されるものがある。すぐ次節では、内部エネルギー変化で吸着熱を定義する。

*3 これら以外でも、等温吸着熱や断熱吸着熱などがある [3]。

*4 MOF のように吸着に伴って吸着媒が変形する場合、この変形に伴う体積変化、エントロピー変化、エンタルピー変化を考慮した熱力学を構成しなければならない。すなわち、吸着

2.1 積分吸着熱

ここでは、等温過程における固体への気体吸着を考える。具体的には、図1に示すようなバルブを介して接続された2つの容器A、Bを恒温体で囲んだ孤立系を考える。はじめ、容器Aには気体が圧力 P_1 だけ入っており、容器Bには吸着媒だけが入っていて真空状態であるとする。バルブを開けると容器Aの気体が拡散し、容器Bに入り込む。すると、気体は固体表面へ吸着し、新たな圧力 P_2 で平衡状態になる。このとき、 n_a molの気体分子が吸着して q_{int} の熱が発生したとする。この熱は、容器を取り囲む恒温体（無限の熱容量を持つと考える）に速やかに移り、系の温度を変えることはない。この吸着に際して生ずる熱 q_{int} を積分吸着熱という*5。

ところで、いま考えているのは恒温体まで含めると「孤立系」であるから、バルブを開ける前の始状態iとバルブを開けて吸着が終了した終状態fで系の全エネルギーは等しい。これを次のように書く。

$$U_i + nU_{g,m} = U_f + (n - n_a)U_{g,m} + n_a U_{a,m} \quad (2)$$

ここで、 U_i 、 U_f は始状態と終状態の恒温体の内部エネルギー、 $U_{g,m}$ は気体のモル内部エネルギー、 $U_{a,m}$ は吸着相のモル内部エネルギーを表す*6。まず、恒温体

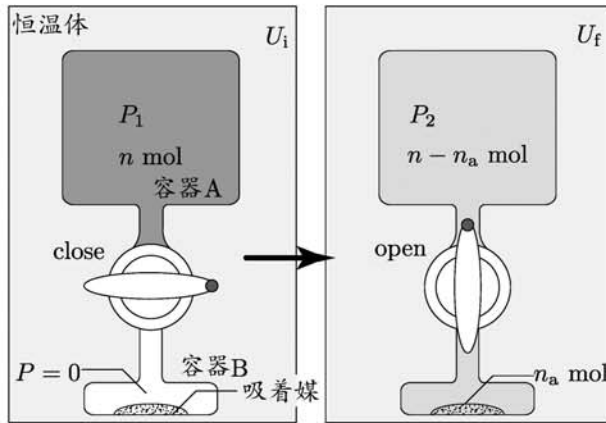


図1 吸着過程の概念図

媒をあらわに熱力学に取り込まなければならない[4]。一方、吸着媒が変形しない場合は、基本的に吸着媒は吸着セルの一部と考えてよく、熱力学にあらわに取り込む必要がない。すなわち、実質的に吸着質だけを考えればよい。MOFの例については、5.5項で紹介する。

*5 脚注*7参照。

*6 後述するように、 $(\partial U_a / \partial n_a)_T$ は吸着量に依存するから、 $U_{a,m}$ は吸着相の「平均」モル内部エネルギーである。また本稿では、下つきmを添えたものは1 molあたりの量を表す。

の内部エネルギーの変化について考える。恒温体は積分吸着熱 q_{int} を取り込んでいるから、

$$\begin{aligned} U_f - U_i &= q_{\text{int}} + w && \text{熱力学第一法則より} \\ &= q_{\text{int}} && w = 0 \text{ より} \end{aligned} \quad (3)$$

がいえる（系の体積変化がないから、体積変化の仕事 $w = PdV = 0$ とした）。また、この恒温体の内部エネルギー変化は(2)式から、

$$U_f - U_i = n_a(U_{g,m} - U_{a,m}) \quad (4)$$

とも書ける。よって、この2式より積分吸着熱 q_{int} は、

$$q_{\text{int}} = n_a(U_{g,m} - U_{a,m}) \quad (5)$$

と表せる。また、この両辺を n_a で除すと、モル積分吸着熱 $q_{\text{int},m}$ を得る。

$$q_{\text{int},m} = \frac{q_{\text{int}}}{n_a} = U_{g,m} - U_{a,m} \quad (6)$$

これは、 n_a molまで吸着したときに発生する全熱量を吸着質1 molあたりで表した平均的な吸着熱を表す*7。

2.2 微分吸着熱

次に、ごく微量（理想的には無限小量） dn_a の気体が吸着し dq_{int} の発熱が生じた場合を考える。この場合、微分吸着熱 q_{diff} を、

$$q_{\text{diff}} = \left(\frac{\partial q_{\text{int}}}{\partial n_a} \right)_T \quad (7)$$

と定義する。これに(5)式を代入すると、

$$\begin{aligned} q_{\text{diff}} &= \left(\frac{\partial n_a(U_{g,m} - U_{a,m})}{\partial n_a} \right)_T && (5) \text{ 式を代入} \\ &= \left(\frac{\partial(n_a U_{g,m})}{\partial n_a} \right)_T - \left(\frac{\partial(n_a U_{a,m})}{\partial n_a} \right)_T && \text{分配した} \\ &= U_{g,m} - \left(\frac{\partial(n_a U_{a,m})}{\partial n_a} \right)_T && \frac{\partial U_{g,m}}{\partial n_a} = 0 \text{ より} \end{aligned} \quad (8)$$

となる*8。ここで $(\partial(n_a U_{a,m}) / \partial n_a)_T$ は吸着相の部分モル内部エネルギーであると理解できるから、結局、微分吸着熱は気相のモル内部エネルギーから吸着相の部分モル内部エネルギーを差し引いたものとわかる[5, 6, 7]。

*7 文献によっては、 $q_{\text{int},m}$ を積分吸着熱と定義する場合もある。

*8 気相のモル内部エネルギー $U_{g,m}$ は吸着量 n_a によらないから $\partial U_{g,m} / \partial n_a = 0$ とした。ところで、第1式からわかるように、吸着質が気相にある場合と吸着相にある場合の内部エネルギー差を用いて微分吸着熱が定義されている。後述するが、Clausius–Clapeyron式より求める吸着熱は、これのエンタルピーバージョンと言える。

3 吸着熱の測定

固体表面への気体の吸着熱を求める方法には、吸着等温線や昇温脱離データなどから計算によって求める間接的な方法と、熱量計を用いて直接測定する方法がある。間接的な方法は簡便ではあるが、計算過程において種々の仮定が含まれたり、可逆過程を基礎とする熱力学的な計算では物理吸着に限定される場合がある。一方、熱量計による直接測定ではそのような制限はなく、固体表面の研究方法として非常に有効な手段である。

吸着熱を直接測定するには熱量計を吸着等温線測定用の真空ライン^{*9}につなげて、圧力（平衡圧）を測りながら吸着量とそれに伴う熱を同時に測る必要がある。この吸着熱の測定は、典型的な静的熱測定であり、恒温壁型熱量計・断熱型熱量計・伝導型熱量計など、各種熱量計が用いられる。これらのなかで、長時間にわたる熱の変化を測定するのに優れているのが伝導型熱量計である。一般的に吸着平衡には長時間を要するため、吸着熱の測定には伝導型熱量計を用いることが多い。伝導型熱量計は Tian-Calvet 型やヒートフロー型とよばれることもある。伝導型熱量計の概念図を図2に示した。伝導型熱量計では、セルが熱伝導体を兼ねた感熱素子（半導体素子、熱電対列など）を介して熱容量の大きな恒温体（ヒートシンク）に熱的に接続している。吸着に伴う発熱 q によりセル容器と恒温体の間に温度差 ΔT が生じる。この熱は試料セル壁、感熱素子、恒温体の順に伝導していく。これを感熱素子で電気信号として検出し、経時変化をサーモグラムとして得る。図3に実際のサーモグラムの一例を示す。横軸は時間 t で、縦軸は感熱素子から出力された電気信号（ほとんどの場合、 μV レベルの電圧）である。

伝導型熱量計では、次の Tian の式により熱量 q を

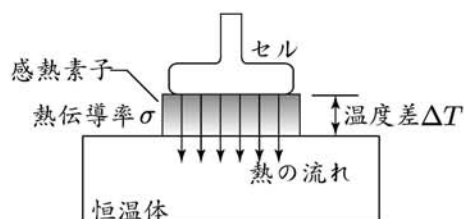


図2 伝導型熱量計の概念図

^{*9} 基本的に吸着量測定は容量法による。容量法による吸着等温線の測定は、本シリーズ [8] に詳しい。

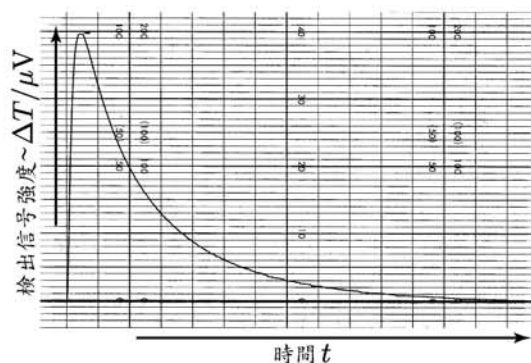


図3 実際のサーモグラム

算出する。

$$\frac{dq}{dt} = c \frac{d(\Delta T(t))}{dt} + \sigma \cdot \Delta T(t) \quad (9)$$

ここで、 dq/dt 、 c 、 ΔT 、 σ はそれぞれ、セル内での単位時間の熱の出入り、セルおよび熱伝導体（感熱素子）の有効熱容量、セルと恒温体の温度差、見かけの熱伝導率を表す。(9) 式を積分すると、

$$q = c \left[\Delta T(t) \right]_0^{\infty} + \sigma \int_0^{\infty} \Delta T(t) dt \quad (10)$$

を得る。測定前 $t = 0$ と測定後 $t = \infty$ ではセルと恒温体の温度差がゼロ、すなわち $\Delta T(0) = \Delta T(\infty) = 0$ であるから、第1項はゼロとなり、第2項だけで熱量が計算できる^{*10}。 $\Delta T(t)$ はサーモグラムそのものであるから、第2項はサーモグラムの面積に比例する。そこで、試料からの発熱を q_1 、そのときのサーモグラムの面積を S_1 、校正用の基準熱量^{*11} q_2 を加えたときのサーモグラムの面積を S_2 とすると、

$$q_1 = \frac{S_1}{S_2} q_2 \quad (11)$$

から熱量 q_1 が求められる。

実際に吸着熱を測定することを考える。ステップ j での吸着量が $\Delta n_{a,j}$ で Δq_j の熱量が測定されたとき、 Δq_j を $\Delta n_{a,j}$ で除すことにより微分吸着熱を得る。これを吸着量 n_a に対してプロットしたものを微分吸着熱曲線とよぶ^{*12}。ところで、前節で説明したとおり、

^{*10} すなわち、伝導型熱量計では熱量計算に測定容器の熱容量は影響しない [9]。

^{*11} 基準熱は、あらかじめ感熱素子に接触させた電熱線から供給する。

^{*12} 一般に、吸着熱は吸着量の低いところで変化が大きいの、吸着初期の領域では1回あたりの吸着量をできるだけ少量におさえるよう、吸着質の導入を少量ずつ行う。

微分吸着熱は $(\partial q_{\text{int}}/\partial n_a)_T$ で定義されるが、実験的に得られるデータはあくまで、 $\Delta q_j/\Delta n_{a,j}$ である。この $\Delta n_{a,j}$ をできるだけ小さくすることにより、その結果得られる Δq_j を小さくし、これらから計算される $\Delta q_j/\Delta n_{a,j}$ を微分吸着熱と近似する。

著者らが用いている伝導型熱量計のセル周辺の概略図を図4に示した。実際の装置では、全く同一の作りをした試料容器と感熱素子を2組対称的に配置し、片方を試料セル、もう片方を参照用セルとして用いる。これを双子型伝導熱量計とよぶ。双子型熱量計では感熱素子からの出力を差動型とすることで、温度の変動やノイズによる影響を相殺できるため、より精度の高い吸着熱測定が可能となる。双子型の効果はいかに2つの測定容器を同一に作るか、ということが決まる。ふつう、種々の変動の影響は単一セルの場合に比べて1/10～数十分の1におさえられる。

また、著者らが用いている装置では、底の平らになったガラス製のセルを感熱素子に乗せる配置になっている^{*13}。これらの間には、流動パラフィンを入れて熱接触を良くする工夫を講じてある。また、試料セルはVCRのグラウンドにコパール溶接で接続し、ステンレスの真空ラインとはVCRで接続している。また、容量法による吸着量の測定も同時に行うため、できるだけ死容積を小さくしたい。そのため、バルブはセルのそばに配置する必要がある。実際にはバルブは熱量計の中に配することになり、バルブの開閉を熱量計の外から遠隔でできるように工夫されている。

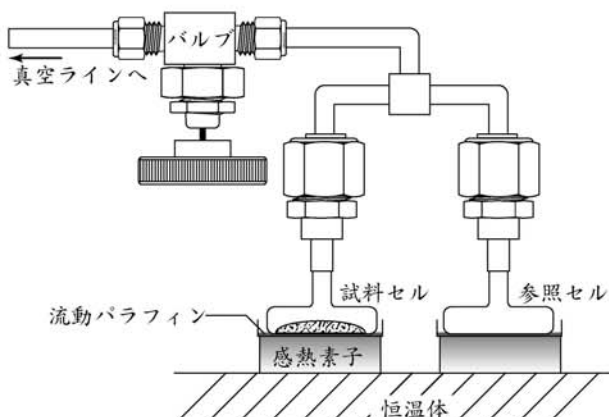


図4 筆者の用いている吸着熱測定用の伝導型熱量計のセル周辺部

^{*13} 具体的には、東京理工製の MULTI MICRO CALORIMETER MMC-5111 に自作の容量法吸着ラインを接続して吸着熱の測定を行っている。

4 直接熱測定以外の吸着熱の求め方

4.1 吸着量の温度依存性から求める方法

吸着熱の直接測定は熱量計が必要であったり時間がかかるため、異なる温度で測定した吸着等温線から Clausius–Clapeyron 式を用いて算出する方法がある。

温度 T において、気相分子が吸着することを考える。このとき、気相と吸着相のエントロピー差 $\Delta_{\text{ads}}S$ は $\Delta_{\text{ads}}H/T$ に等しいから、Clapeyron の式は、

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta_{\text{ads}}H}{T\Delta_{\text{ads}}V} \quad (12)$$

となる。ここで、 $\Delta_{\text{ads}}V$ は吸着に伴う気相分子の体積変化で、気相および吸着相における分子の体積を V_g 、 V_a とすれば、 $\Delta_{\text{ads}}V = V_a - V_g$ となる。 $V_a \ll V_g$ で、気相を理想気体近似すれば、 $\Delta_{\text{ads}}V = -RT/P$ となるから、Clausius–Clapeyron 式は、

$$\frac{1}{P} \frac{dP}{dT} = \frac{d \ln P}{dT} = -\frac{\Delta_{\text{ads}}H}{RT^2} \quad (13)$$

と書ける。 $\Delta_{\text{ads}}H$ は吸着に伴うエンタルピー変化であるから、吸着熱 q_{iso} と $q_{\text{iso}} = -\Delta_{\text{ads}}H$ の関係がある。すなわち、

$$q_{\text{iso}} = RT^2 \left(\frac{\partial \ln P}{\partial T} \right) \quad (14)$$

と書ける。Clausius–Clapeyron 式から求められる吸着熱 q_{iso} は等量吸着熱とよばれ、上述のように吸着に伴うエンタルピー変化 ΔH_{ads} により定義される。このエンタルピー変化が温度によらず一定である場合、(14) 式は積分でき、

$$\ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) = -\frac{q_{\text{iso}}}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (15)$$

もしくは

$$\ln P = -\frac{q_{\text{iso}}}{RT} + C \quad (16)$$

を得る。そこで、2種類の温度で測定した吸着等温線を用いて、吸着量一定のところでの温度と圧力 (T_1, P_1) と (T_2, P_2) を求め、(15) 式に代入すれば等量吸着熱 q_{iso} が得られる。さらに異なる温度における吸着等温線を測定し、 (T_3, P_3) 、 (T_4, P_4) 、… を求め、縦軸に $\ln P$ 、横軸に $1/T$ をプロットすれば、(16) 式からわかるように、この勾配より q_{iso} が求められる。こちらの方が、2点から求める場合より確からしさを上げることが期待できる。ただし、「吸着に伴うエンタルピー変

化が温度によらず一定である」と仮定しているの、温度変化の幅はあまり広くない方がよい。また、本手法では吸着等温線の全領域で等量吸着熱を計算できるから、吸着熱の吸着量依存性まで知ることができる。

なお、このようにして求められる等量吸着熱 q_{iso} は微分吸着熱の一種で、 q_{diff} と次の関係にある。

$$\begin{aligned}
 q_{\text{iso}} &= \left(\frac{\partial n_a (H_{g,m} - H_{a,m})}{\partial n_a} \right)_T \\
 &\quad (8) \text{ 式の一番上の式を見よ} \\
 &= \left(\frac{\partial (n_a H_{g,m})}{\partial n_a} \right)_T - \left(\frac{\partial (n_a H_{a,m})}{\partial n_a} \right)_T \quad \text{分配した} \\
 &= H_{g,m} - \left(\frac{\partial (n_a U_{a,m})}{\partial n_a} \right)_T \quad H_{a,m} \simeq U_{a,m} \\
 &= U_{g,m} + PV_m - \left(\frac{\partial (n_a U_{a,m})}{\partial n_a} \right)_T \quad H_{g,m} = U_{g,m} + PV_m \\
 &= U_{g,m} + RT - \left(\frac{\partial (n_a U_{a,m})}{\partial n_a} \right)_T \quad PV_m = RT \\
 &= q_{\text{diff}} + RT \quad (8) \text{ 式より}
 \end{aligned} \tag{17}$$

ここで、 $H_{g,m}$ 、 $H_{a,m}$ は気体と吸着相のモルエンタルピー、 V_m は気体のモル体積を表す。なお、吸着相では PV 項が十分小さいとして、モルエンタルピー $H_{a,m}$ とモル内部エネルギー $U_{a,m}$ を等しいとした。(17) 式からわかるように、等量吸着熱 q_{iso} と微分吸着熱 q_{diff} は RT だけ異なる。

本手法は基本的に可逆変化を前提とするため、吸着ヒステリシスを持つ場合や化学吸着には適用できない。また、吸着初期においては温度の違いによる吸着量の変化が顕著でないため、これより計算される等量吸着熱は誤差を多く含みやすい。しかし、近年吸着等温線の温度依存性を精密に測定することにより、ごく吸着量の少ない領域でも精度よく等量吸着熱を算出することが可能になってきた [10, 11, 12, 13]。

例 : Aerosil 200 への水吸着

293 K、298 K、303 K における Aerosil 200 への水吸着等温線を図 5(a) に示した。図中で吸着量 $V = 50 \text{ mL/g}$ に達する圧力 P を矢印で示した。これで同吸着量における 3 組の温度と圧力 (T_1, P_1)、(T_2, P_2)、(T_3, P_3) が求められた。これを Clausius–Clapeyron 式に従ってプロットしたものが図 5(b) である。この傾きに $-R$ を乗じて $q_{\text{iso}} \simeq 40 \text{ kJ/mol}$ を得る。この

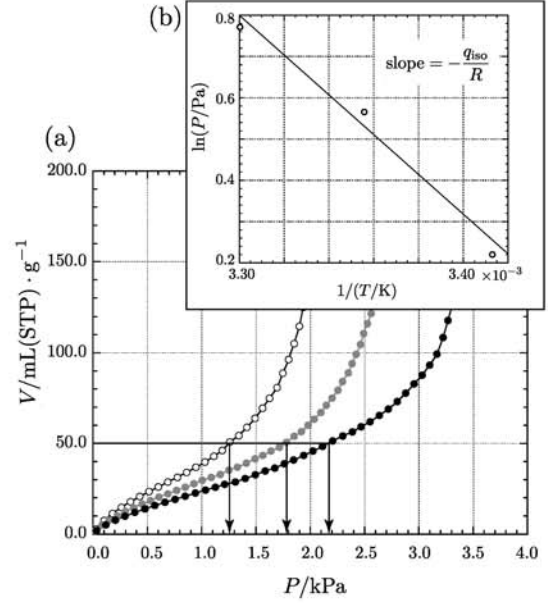


図 5 Aerosil 200 への水吸着等温線の温度依存性：
○, 293 K; ●, 298 K; ●, 303 K.

ようにして求めた q_{iso} を吸着量 V に対してプロットした等量吸着熱曲線を図 6 に示した。図 6 には直接熱測定によって求めた実測値も示した。実測値は微分吸着熱 q_{diff} に RT を加え、等量吸着熱 q_{iso} とした。この例では、直接熱測定による実測値と吸着等温線の温度依存性から求めた値が完全には一致しないが、吸着量依存性をみると、両者はよく似た挙動を示している。ただし、Clausius–Clapeyron 式を用いる方法では、吸着量がごくわずかな領域での熱挙動をとらえきれないが、これは、より精密に吸着等温線の温度依存性をとれば解決できるものと考えられる。

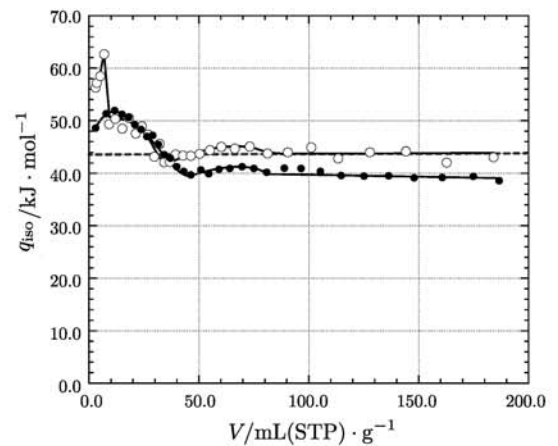


図 6 Aerosil 200 への水の吸着熱曲線：○, 直接熱測定による値；●, Clausius–Clapeyron 式による値；破線、水の凝縮熱。

4.2 DR プロットから求める方法

Dubinin–Radushkevich (DR) 法で充填率 $\theta = 1/e$ のときの吸着熱を計算することが可能である。Dubinin と Radushkevich はマイクロ孔への吸着は細孔壁に層状に吸着するのではなく細孔内への容積充填であると考えた [14]。マイクロ孔充填の駆動力を分散力と考えると、標準物質の吸着エネルギー ϵ_0 と、ある吸着質との吸着エネルギー ϵ の比は分極率の比に等しいと考えられる。

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{\alpha}{\alpha_0} = \beta \quad (18)$$

ここで、 α_0 、 α はそれぞれ標準物質と試料の分極率を表し、この比 β を親和係数とよぶ。また、マイクロ孔の充填の程度を表すパラメータとして、相対圧が P/P_0 のとき満たされているマイクロ孔容積 W と全マイクロ孔容積 W_0 の比で充填率 θ を定義する。

$$\theta = W/W_0 \quad (19)$$

ここで、 θ は P/P_0 の関数であり、細孔径分布が Gauss 分布に従うと仮定すると、次の DR 式を得る。

$$\theta = \exp[-(A/\beta E_0)^2] \quad (20)$$

$$\text{ただし、} A = RT \ln(P_0/P) \quad (21)$$

A は Polanyi の吸着ポテンシャル、 E_0 は吸着媒に由来する特性エネルギーである。 $\ln W$ を $[\ln(P_0/P)]^2$ に対してプロットしたものが DR プロットであり直線が得られる。縦軸の切片が $\ln W_0$ であり、これより全マイクロ孔容量が求められる。また、傾きは $-(RT/\beta E_0)^2$ となる。いま、 $\theta = 1/e$ のときを考えると、吸着ポテンシャルは $A = \beta E_0$ となり [15]、このときの等量吸

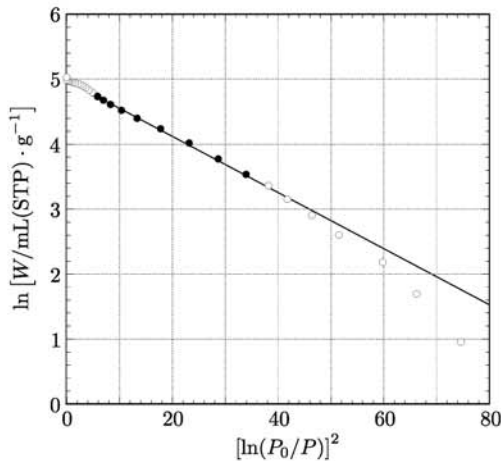


図7 活性炭素繊維 A20 へのヘキサン吸着の DR プロット

着熱 $q_{\text{iso}, \theta=1/e}$ は、

$$q_{\text{iso}, \theta=1/e} = \Delta_{\text{vap}}H + \beta E_0 \quad (22)$$

となる [16]。 $\Delta_{\text{vap}}H$ は吸着質間相互作用を表す。一般にマイクロ孔充填を生じる場合は I 型の等温線を示す。この場合、 $\theta = 1/e \sim 0.368$ では吸着はほぼ飽和していると考えられるので、吸着質間相互作用は凝縮熱で代用するのがふつうである。

例：活性炭素繊維へのヘキサン吸着

ピッチ系活性炭素繊維 A20 へのヘキサン吸着 (298 K) を DR 解析した結果を図 7 に示した。DR プロットの傾きは、およそ -0.042 を得た。この傾きより等量吸着熱 $q_{\text{iso}, \theta=1/e}$ を計算すると、 43.7 kJ/mol となる。

4.3 吸着質 – 吸着媒相互作用ポテンシャルから求める方法

前述の 2 つの方法は、いずれも吸着等温線から吸着熱を算出する方法であるが、最後に紹介する方法は吸着等温線から求めるものではなく、吸着質 – 吸着媒間の相互作用ポテンシャルから計算する方法である。必要な情報は、適切な吸着質 – 吸着媒間の相互作用ポテンシャルであり、これから被覆率 0 における吸着熱を計算で求めることができる。ここで、スリット型細孔への吸着を考え、吸着質の細孔内ポテンシャルを $\phi_p(z)$ とすると、ごく初期における (被覆率 0 での) 微分吸着熱 q_{diff}^0 は次式で計算できる [17, 18, 19, 20]。

$$q_{\text{diff}}^0 = - \frac{\int_0^H \phi_p(z) \exp\left(-\frac{\phi_p(z)}{RT}\right) dz}{\int_0^H \left[\exp\left(-\frac{\phi_p(z)}{RT}\right) - 1\right] dz} \quad (23)$$

ここで、 H 、 z はそれぞれ物理細孔径、細孔壁からの垂直距離を表す。

例：活性炭素繊維へのヘキサン吸着

先ほどと同じ系、活性炭素繊維へのヘキサン吸着のモデル計算で例を示す。まずは、活性炭素繊維をスリット型炭素細孔とモデル化し、吸着質のヘキサンは TraPPE-UA でモデル化する [21]。そして、細孔壁と吸着質との相互作用を Steele10-4-3 ポテンシャル：

$$\phi(z) = Z \left[\frac{2}{5} \left(\frac{\sigma}{z}\right)^{10} - \left(\frac{\sigma}{z}\right)^4 - \frac{\sigma^4}{3\Delta(0.61\Delta + z)^3} \right] \quad (24)$$

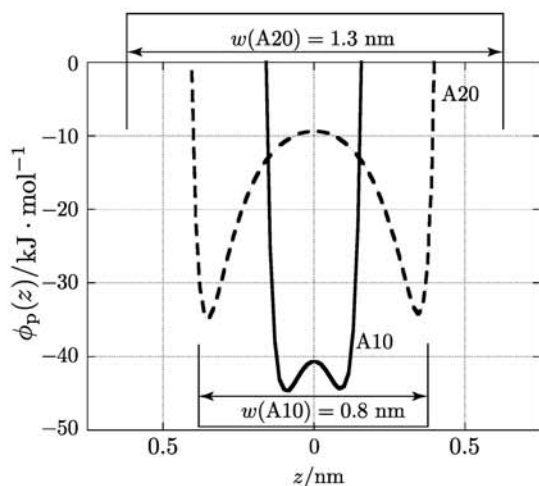


図8 スリット型炭素細孔中のヘキサンのポテンシャル

$$\text{ただし、} Z = 2\pi\rho\epsilon\sigma^2\Delta \quad (25)$$

で表す [17]。ここで、 z はグラファイト表面と吸着質の垂直距離を表し、 Δ はグラファイトの層間距離、 ρ は炭素原子の数密度を表す。 ϵ と σ は表面炭素原子と吸着質のポテンシャル井戸の深さと衝突直径をもとに、Lorentz-Belthelot 混合則によって求めることができるパラメータである [22, 23]。スリット型の細孔中では、細孔内ポテンシャル $\phi_p(z)$ は2枚の壁に対する Steele ポテンシャルの重ね合わせで表すことができる。

$$\phi_p(z) = \phi(z) + \phi(H - z) \quad (26)$$

ここで、物理細孔径 H は実際の細孔径 w とは、

$$w = H - (2z_0 - \sigma_{ff}), \quad z_0 = 0.8506\sigma_{sf} \quad (27)$$

の関係がある [24]。

以上のようにモデル化した TraPPE-UA モデルのヘキサンの細孔内ポテンシャル $\phi_p(z)$ を図8に示した*14。これを用いて被覆率 0 における微分吸着熱を計算すると、それぞれ $q_{\text{diff}}^0(\text{A10}) = 43.3 \text{ kJ/mol}$ 、 $q_{\text{diff}}^0(\text{A20}) = 33.5 \text{ kJ/mol}$ を得る。 RT を加えて等量吸着熱になおすと、 $q_{\text{iso}}^0(\text{A10}) = 45.8 \text{ kJ/mol}$ 、 $q_{\text{iso}}^0(\text{A20}) = 36.0 \text{ kJ/mol}$ を得る*15。

*14 被覆率 0、すなわち吸着のごく初期を考えているので、ヘキサンは細孔壁に平行に配向しているとした。

*15 なお、ピッチ系活性炭繊維へのアルカン吸着に関しては、松本らによる包括的な報告がある [25]。

5 研究例の紹介

この節では、いくつか吸着熱に関する研究例を紹介する。吸着熱を測定することにより「いかにして吸着状態描像へアプローチするのか」を紹介するのが目的である。

5.1 グラファイト表面への不活性気体の吸着

ここでは、窒素やアルゴンなどの不活性気体のグラファイト表面への吸着について述べる。この系は、とくに多くの研究者によって検討されており、かなり古くから吸着等温線と吸着熱の測定がなされ、最近ではコンピュータシミュレーションによる詳細な検討もなされている [26, 27, 28, 29]。

図9に示したのは、Sterling FT-FF カーボンブラックを高温処理した黒鉛化カーボンブラックへの 77 K での窒素吸着等温線と吸着熱曲線である（これ以降、 θ は被覆率、もしくは吸着層数を表す） [27]。2000 K 以上の温度で黒鉛化した試料の等温線で、単分子層容量 ($\theta = 1$) 付近でサブステップが見られる。このサブステップが見られる箇所で、吸着熱曲線では特徴的な極大を示す（図9(c), (d)）。Grillet らは、単分子層が完成する付近で2次元液体から2次元固体への相転移、いわば結晶化が occurring と結論づけている。77 K においてグラファイト上で形成される窒素の2次元結晶は、グラファイト表面上の炭素原子の配列に沿っており、炭素原子のつくる六角形3つに1つの割合で窒

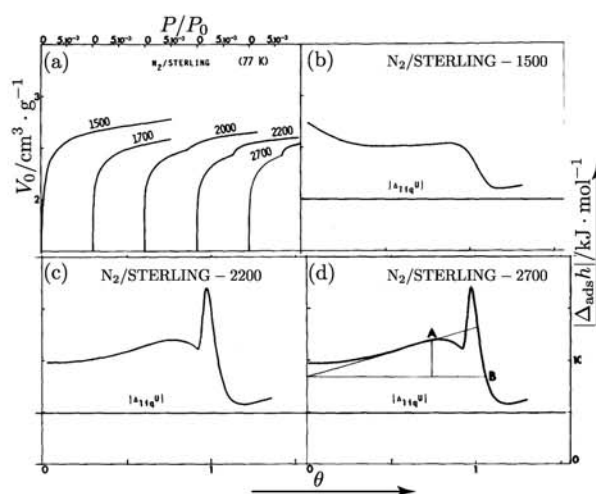


図9 Sterling カーボンブラックへの窒素の吸着等温線と微分吸着熱曲線（図中の4桁の数字はカーボンブラックの処理温度を表す）：文献 [27] より改変して転載

素分子が配列する。ゆえに、窒素分子のつくる 2 次元結晶はグラファイト表面の結晶性（グラファイト面の広さ）に非常に敏感である。逆に言えば、黒鉛化の程度が低い試料では 2 次元液体から 2 次元固体への結晶化がおこらないと考えられる。実際、黒鉛化処理の温度が低い試料では、等温線にサブステップが現れず、吸着熱曲線にも特徴的なピークが現れない（図 9(b)）。

同論文では吸着質をアルゴンにかえて吸着等温線と吸着熱を測定している。アルゴンでもおおむね窒素と同じ結果を得るが、黒鉛化温度の低い試料（1500 K）でも 2 次元結晶化に特徴的な熱挙動が確認される。これは、アルゴンはそもそもグラファイト表面上の炭素原子の配列には影響を受けずに独自で結晶化するため、グラファイトシートの大きさには無関係に結晶化するためであると報告されている。すなわち、グラファイト表面上への 77 K での窒素吸着では、単分子層が形成する付近で 2 次元結晶が形成されるが、これはいわゆるエピタキシャル成長である。一方、アルゴンもおなじく 77 K で 2 次元結晶化がおこるが、こちらはグラファイト結晶面とは無関係に独立に結晶が形成される。

ところで、Do らは図 9(c)、(d) に示されるような特徴的な熱挙動を図 10 のように吸着質－固体表面相互作用と吸着質間相互作用に分解し、図 11 のモデルで吸着メカニズムとその熱挙動を説明している [29]。まず、 θ が 1 付近まで緩やかに吸着熱が増大するのは（図 10：A～B）、吸着質－固体表面相互作用が一定で、吸着質間相互作用が増大しているためである。この領域

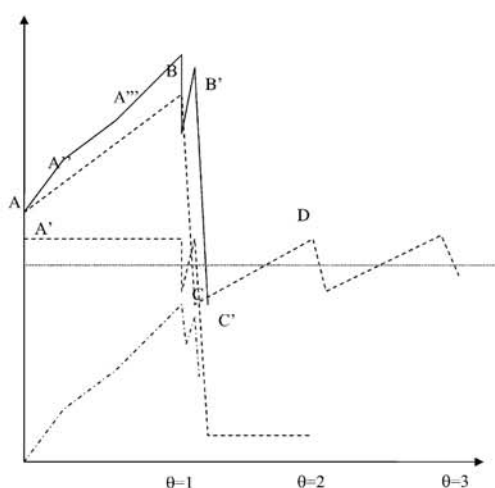


図 10 グラファイト表面への希ガス吸着の等量吸着熱曲線（点線は吸着質－固体表面間の相互作用、一点鎖線は吸着質間相互作用を表す）：文献 [29] より転載

で吸着質間相互作用が増大するのは、吸着量が増大するにつれて、新たに吸着する吸着質にとって、固体表面上で相互作用する相手（すでに吸着している分子）が増えるからである。固体表面上でほぼ単分子層が形成された後、吸着質は「2 層目」として吸着する（図 11(a)）。すると、1 層目よりは固体表面との距離が大きくなるから、吸着質－固体表面相互作用が急激に減少する。さらに、新たに吸着した吸着質にとって、相互作用する相手（吸着質分子）がそれまでよりも激減するから、吸着質間相互作用も激減する。その結果、吸着熱は急激に減少する（図 10：B の直後）。その後、新たに吸着した 2 層目の吸着質が 1 層目に押し込まれる（図 11(b)）。1 層目に押し込まれた吸着質は、すでに吸着していた 1 層目の吸着質と同じ表面からの距離にあるから、また吸着質－固体表面相互作用が大きくなる（1 層目のときと同じ値に回復する）。さらに、2 層目では相互作用する相手が少なかったため減少していた吸着質間相互作用も、密な 1 層目に押し込まれることによって回復する。これらの和として吸着熱は急上昇し、スパイク状のプロファイルを示す（図 10：B'）。これ以降は、再度 2 層目として吸着がおこるから吸着質－固体表面相互作用は大きく減少し、吸着質間相互作用も減少する。そして、2 層目で徐々に吸着が進行するにつれ、新たに吸着する分子にとって相互作用する相手（吸着質分子）が増えるから、吸着質間相互作用が徐々に増え、吸着熱は上昇する（図 10：C～D）。2 層目が完成し 3 層目に移行すれば吸着質間相互作用は減少し……… というように、以降は吸着熱が波うつような挙動を示す。

以上のように、Do らはグラファイト表面上への不活性気体吸着を layer-by-layer 機構を基本とし、第 1 層目が完成する箇所では、そのメカニズムの詳細を明らかにしている。

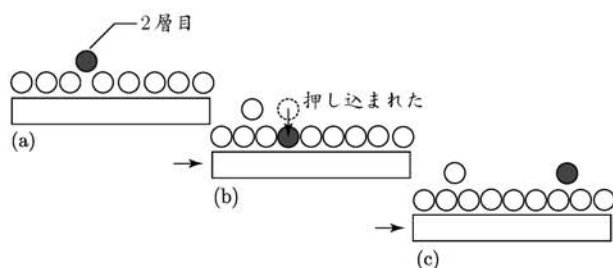


図 11 アルゴンのグラファイト表面への吸着機構

5.2 ACF へのアルコール吸着

ここで、少しでも著者らの研究結果を紹介させていただく。検討したのは、ピッチ系活性炭繊維 ACF への低級アルコール吸着である。ACF としては、細孔径の異なる A10 ($w = 0.8$ nm) と A20 ($w = 1.3$ nm) の 2 種を用いた。A10 への各種アルコールの吸着熱曲線を図 12 に示した。ACF のような、非晶性の多孔性固体への吸着熱は、このように複雑な挙動を示す。およそその傾向として、ごく吸着初期において凝縮熱よりも高い吸着熱を示し、その後なだらかに減少し、吸着末期でもう一度高い吸着熱を示す。

まずは、ごく初期の吸着熱に着目する。吸着のごく初期においては、アルコール—固体表面相互作用が支配的であり、アルコール分子間の相互作用はあまり働かないと期待できる。アルコール—固体表面間相互作用を考える上で、2 種類の相互作用、つまりアルコール—細孔壁間の分散相互作用とアルコール—表面官能基間の静電相互作用を考慮しなければならない。そこで、微分吸着熱におけるこれらの相互作用の寄与を分離できないか検討した。アルコール分子と表面炭素との分散相互作用は次式で表すことができる [30]。

$$w_{\text{dis}} = -\frac{3}{2} \frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2} \frac{\alpha_0\alpha_1}{r^6} \frac{I_0I_1}{I_0 + I_1} \quad (28)$$

ここで、 α_0 と α_1 はアルコールと表面炭素原子の分極率、 r はアルコール—表面炭素原子間距離、 ϵ_0 は真空の誘電率で I_0 と I_1 はアルコールと表面炭素原子のイオン化ポテンシャルである。これらのパラメータのうち、今回用いたアルコールでは、分極率体積 α'_0 以外は吸着質による大きな差はない (10 % 未満) [31]。そ

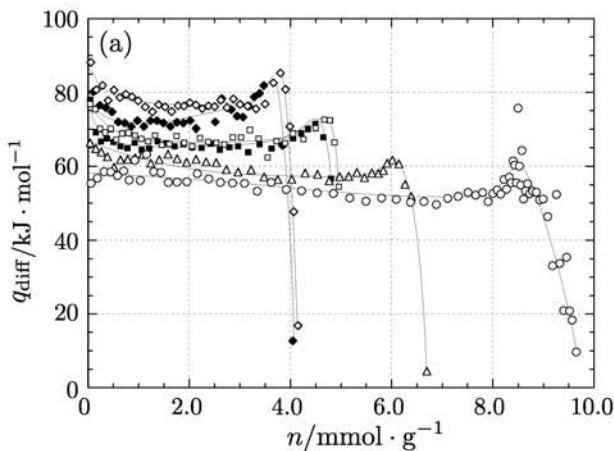


図 12 A10 へのアルコール吸着の微分吸着熱曲線：○, methanol; △, ethanol; □, 1-propanol; ■, 2-propanol; ◁, 1-butanol; ▷, 2-butanol.

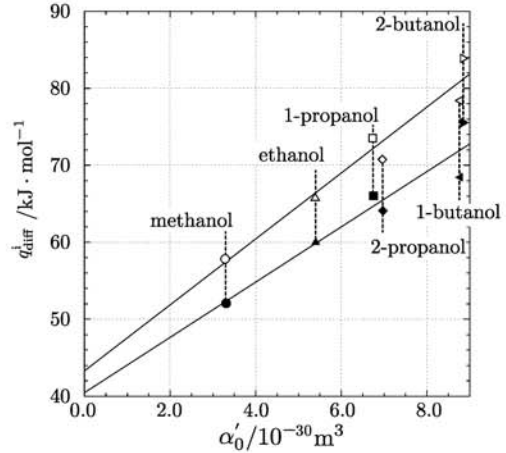


図 13 初期吸着熱 q_{diff}^i とアルコールの分極率体積 α'_0 の関係：白抜き, $w = 0.8$ nm; 黒塗り, $w = 1.3$ nm.

ここで、分散相互作用が吸着質の分極率 α_0 に比例するという特徴に着目し、初期吸着熱 q_{diff}^i を吸着質の分極率体積 α'_0 に対してプロットし図 13 に示した。初期吸着熱と吸着質の分極率体積 α'_0 は良い 1 次の相関を示した。また、A10 と A20 の結果が異なる直線を示しているのは、細孔径が異なるためであると考えられる。また、回帰直線は A10 で 43.2 kJ/mol、A20 で 40.3 kJ/mol の切片を有した。これは、初期吸着熱に分散相互作用以外の寄与があることを意味する。そこで、初期吸着熱 q_{diff}^i から直線の切片分の熱量を差し引いたもの $q_{\text{diff}}^{i,\alpha_0}$ が正味の分散相互作用に起因する熱と考えられる。そこで、細孔内ポテンシャルを Steele ポテンシャルで、吸着質を 1 中心 LJ モデルとして表し、被覆率 0 における微分吸着熱 q_{diff}^0 を (23) 式を用いて計算したところ、 $q_{\text{diff}}^{i,\alpha_0}$ と q_{diff}^0 は良い一致を示した。これにより、測定された初期吸着熱のうち、分極率に依存する成分は細孔内分散ポテンシャルに依るものであることを定量的に示した。また、分極率に依存しない成分については炭素に存在する表面官能基とアルコール分子との双極子—双極子間相互作用であることを計算機シミュレーションにより確かめた [32]。以上より、ACF へのアルコール吸着で見られる高い初期吸着熱が細孔内ポテンシャルの寄与と表面官能基との静電相互作用に分離できることがわかった。

また、全てのアルコールが吸着の末期に再度高い吸着熱を示すのは、細孔内充填の最後の段階で吸着質の再配向が生じ、充填密度の増大とともに高い吸着熱を示しているのではないかと考えている。

5.3 グラファイト表面へのアルコール吸着

次に、グラファイト表面へのメタノール吸着に関する堀川ら [11] の結果について紹介する。

堀川らは、Carbopack F へのメタノール吸着等温線を 283 K と 298 K で測定し、4.1 項で述べた Clausius–Clapeyron 式を適用することで、等量吸着熱 q_{iso} を求めた。その結果が、図 14 である。この等量吸着熱 q_{iso} 曲線は図 15 に示したメタノールの吸着メカニズムに対応する。まず、(a) では、メタノールは表面官能基に吸着し、その後 (b) では、これを核としてクラスターを形成するように吸着が進行する。表面官能基とメタノールの相互作用は強いので、(a) では 32 kJ/mol 程度の発熱を示す。しかし、(b) では単に吸着質間相互作用による発熱で 15 kJ/mol にとどまる。その後 (c) では、最も大きな発熱 49 kJ/mol を示す。(b) から (c) へと吸着が進行すると、新たに吸着するメタノールはエッジ部分の表面官能基付近から、basal 面へとこぼれ落ちる。その結果、メタノールはクラスターと相互作用する一方で、新たに炭素表面とも相互作用することになる。クラスターとの相互作用はメタノールの OH 基による水素結合が主なものであり、グラファイト面との相互作用は主にメチル基が寄与する。(d) から (e) では、メタノールの 2 次元クラスターが広がっていくように吸着が進行する。それゆえ、考えられる相互作用は basal 面上でのメタノール–クラスター相互作用とメタノール–炭素表面相互作用であり、これらの和として 43 kJ/mol を示す。これ

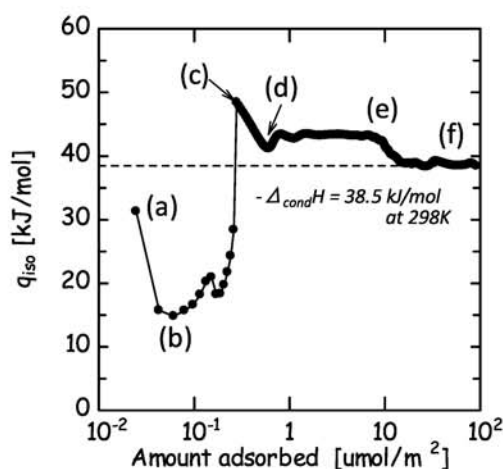


図 14 Carbopack F へのメタノールの等量吸着熱曲線：文献 [11] より転載

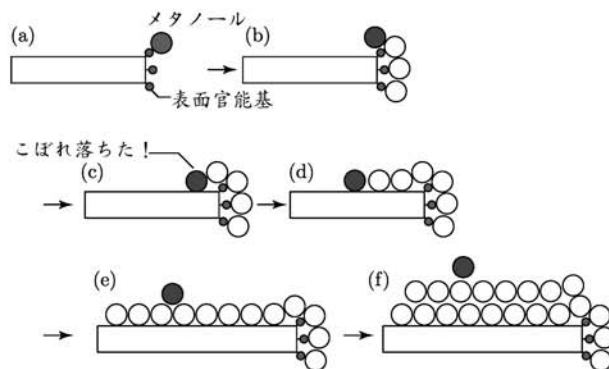


図 15 メタノールの吸着機構（黒丸は新たに吸着したメタノールを表す）

以降 (f) では 2 層目もしくは 3 層目以上の吸着であり、吸着熱は凝縮熱と等しい値 39 kJ/mol 程度を示す。

5.4 化学吸着が関与する場合

ここまでは全て物理吸着について紹介したが、ここでは、吸着質が固体表面で化学反応をおこす場合、すなわち化学吸着がおきる場合について紹介する。

松本らはメソ多孔性シリカ FSM-16 を合成し、その水蒸気吸着について検討した [33]。その結果、メソ多孔性シリカの表面は、合成・か焼直後は疎水的であるが、水蒸気吸着によって親水化すると報告している。メソ多孔性シリカの水吸着等温線を図 16、対応する吸着熱曲線を図 17 に示した。合成・か焼直後のメソ多孔性シリカの水吸着量は相対圧 $P/P_0 \leq 0.5$ では少なく、

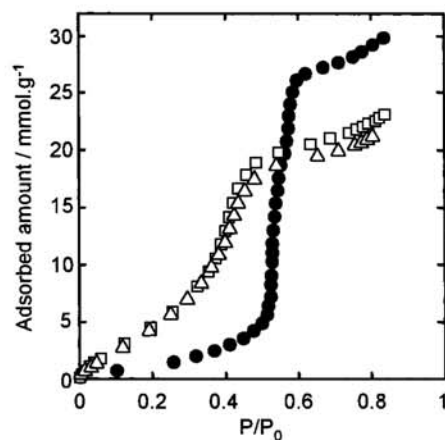


図 16 メソ多孔性シリカ FSM-16 の水吸着等温線 (298 K)：●, 1 回目；□, 2 回目；△, 3 回目. 文献 [33] より転載

疎水的挙動を示すが、 $0.5 \leq P/P_0 \leq 0.6$ で毛管凝縮により急激に増加する。このとき、微分吸着熱は、吸着のごく初期で 20 kJ/mol 程度であり、吸着量が増加するにしたがい水の凝縮熱 44 kJ/mol に近づくような挙動を示す。この吸着初期の 20 kJ/mol 程度の吸着熱は、シロキサンからシラノールへのヒドロキシル化の熱 19.5 kJ/mol にほぼ一致する。すなわち、水は疎水性表面に吸着しながら表面を加水分解してシラノールを生成し、このシラノールに多分子層吸着して毛管凝縮を引き起こすと考えられる。一度水を吸着すると、表面が親水化しているため水吸着性が高くなり、より低相対圧で吸着するようになる (図 16)。この表面の親水化は微分吸着熱にも明瞭に現れ、吸着初期の微分吸着熱は水 - 表面シラノール基の水素結合により高い値を示し、その後水の凝縮熱 44 kJ/mol に近づくような挙動を示した。

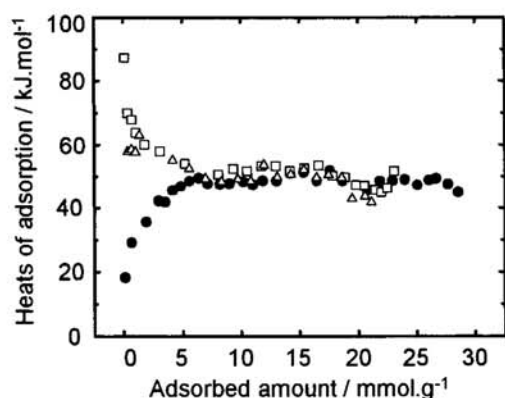


図 17 メソ多孔性シリカ FSM-16 の水微分吸着熱曲線 (298 K): ●, 1 回目; □, 2 回目; △, 3 回目. 文献 [33] より転載

5.5 MOF によるメタン吸着

これまでに紹介したのは、全て「硬い」吸着媒についての研究例であった。最後に、吸着に伴って吸着媒が変形する「やわらかい」吸着媒についての研究例を紹介する。

MOF の一種である $\text{Co}(\text{bdp})(\text{bdp}^{2-} = 1,4\text{-ベンゼンジピラゾレート})$ へのメタン吸着等温線と等量吸着熱曲線を図 18 に示した。 $\text{Co}(\text{bdp})$ はフレームワーク構造が柔軟であり、ある圧力で構造の膨潤を伴うステップ状の吸着挙動を示した。この吸着挙動は「ゲート吸着」とよばれる。このゲート吸着は大きなヒステリシスループを示すのも特徴である。一方、吸着熱も非常

に特徴的な挙動を示す。まず、吸着のごく初期で $13 \sim 14 \text{ kJ/mol}$ 程度を示すが、これは一般的な吸着媒へのメタンの物理吸着で観測される吸着熱と同程度である。その後、吸着熱は 8.4 kJ/mol 程度まで激減する。これは、吸着等温線が急激に立ち上がる箇所に対応していて、フレームの変形による「吸熱」に起因する。フレームが膨潤状態へ転移した後で吸着熱は徐々に増大し、 13 kJ/mol 程度に回復する。これは、吸着初期と同様にメタンの物理吸着に相当する。すなわち、 $\text{Co}(\text{bdp})$ の等量吸着熱は、メタンの物理吸着による発熱が吸着媒である $\text{Co}(\text{bdp})$ 自身のフレームの膨潤による吸熱によってオフセットされた値である。

このように、吸着の進行により吸着媒が変形する場合、変形に伴う体積変化、エントロピー変化、エンタルピー変化をあらわに取り込まなければ、ゲート吸着現象を熱力学で取り扱うことができない。さらに、現実的には、 $\text{Co}(\text{bdp})$ の結晶が均一でないことが原因で、

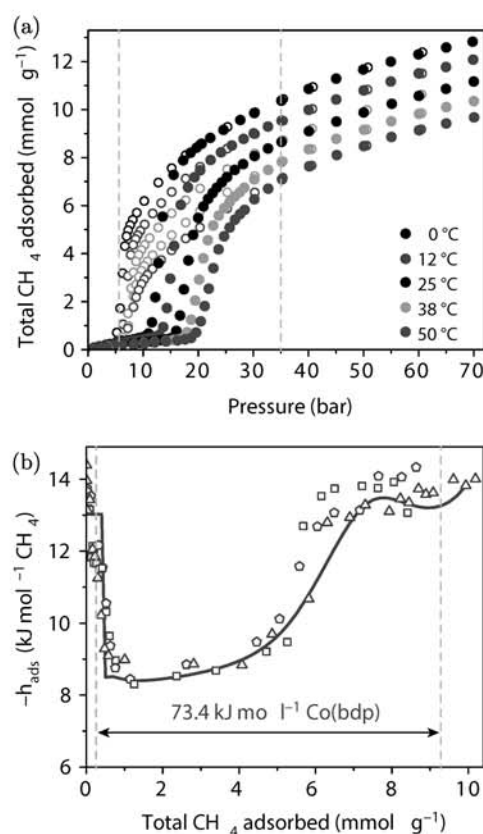


図 18 $\text{Co}(\text{bdp})$ への (a) メタン吸着等温線の温度依存性と (b) 等量吸着熱曲線 (白抜きのプロットは実測値、曲線は等温線の温度依存性から求めた値): 文献 [4] より改変して転載

フレイムが膨潤する圧力に幅が生じる。これにより、データの解釈、解析は更に複雑になる。

6 おわりに

分子や原子が固体表面に吸着すると、新たに生じる全ての相互作用の総和が吸着熱として生じる。すなわち、吸着熱には「固体表面上にある吸着質がどのような相互作用をしているか」に関する情報を全て含んでいる。つまり、これを解釈できれば、固体表面上での吸着状態に関して多くの知見が得られる。しかし、厄介なのは、全てが混ざった状態、総和でしか測定にからないことである。ある程度「きれいな系」であれば、計算機シミュレーションを援用することによって、あたかも見てきたような議論が可能になるが、全ての系でシミュレーションができるわけではない。やはり、系に即した考察によって吸着熱を「解釈する」必要がある。これは、なかなか一筋縄ではいかないことが多い。しかし、そうした試行錯誤によって、吸着状態の描像へ近づくことが可能となる。

謝辞

豊橋技術科学大学 松本明彦先生には、吸着熱全般について、いろいろとご教授いただきました。ここに記して謝意を表します。また、京都大学 田中秀樹氏、同大学院工学研究科 平出翔太郎さんには本稿を精読していただき、様々なご意見を頂きました。感謝申し上げます。

参考文献

- [1] J. H. de Boer, *Adv. Catal.* **9**, 472–480 (1957).
- [2] 山中一郎、「触媒便覧」(5章)、触媒学会編(2008).
- [3] 長尾眞彦、「第5版 実験化学講座 6 温度・熱・圧力」(7章)、日本化学会編(2005).
- [4] J. A. Mason, J. Oktawiec, M. K. Taylor, M. R. Hudson, J. Rodriguez, J. E. Bachman, M. I. Gonzalez, A. Cervellino, A. Guagliardi, C. M. Brown, P. L. Llewellyn, N. Masciocchi, and J. R. Long, *Nature*, **527**, 357–361(2015). Supplementary information に熱力学の丁寧な説明がある。
- [5] 堤和男、松本明彦、「触媒の事典」、小野嘉夫、御園生誠、諸岡良彦(編)、朝倉書店(2000).
- [6] 松本明彦、「ケイ素化合物の選定と最適利用技術：応用例集(下巻)」、技術情報協会(2006).
- [7] 松本明彦、ゼオライト、**20**, 9–17 (2003).
- [8] 吉田将之、*Adsorption News*, **30**, 14–21 (2016).
- [9] 天谷和夫、*工業化学雑誌*, **69**, 1571–1579 (1966).
- [10] T. Horikawa, T. Muguruma, D.D. Do, K. Sotowa, and J. R. A. Avila, *Carbon*, **95**, 137–143 (2015).
- [11] T. Horikawa, Y. Zeng, D.D. Do, K. Sotowa, and J. R. A. Avila, *J. Colloid Inter. Sci.*, **439**, 1–6 (2015).
- [12] L. Prasetyo, T. Horikawa, P. Phadungbut, S. Tan, D.D. Do, and D. Nicholson, *J. Colloid Inter. Sci.*, **478**, 402–412 (2016).
- [13] L. Prasetyo, M. A. Razak, D.D. Do, T. Horikawa, K. Nakai, and D. Nicholson, *Coll. Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, **512**, 101–110 (2017).
- [14] M. M. Dubinin, *Chemical Reviews*, **60**, 235–241 (1960).
- [15] M. M. Dubinin, in: *Progress in Surfaces and Membrane Science*, **9**, Academic Press (1980).
- [16] K. Kaneko, *Journal of Membrane Science*, **96**, 59–89 (1994).
- [17] W. A. Steele, *Surface Science*, **36**, 317–352 (1973).
- [18] H. Pan, J. A. Ritter, and P. B. Balbuena, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **37**, 1159–1166 (1998).
- [19] E. J. Bottani, *Langmuir*, **15**, 5574–5577 (1999).
- [20] X. Zhao and J. K. Johnson, *Molecular Simulation*, **31**, 1–10 (2005).
- [21] M. G. Martin and J. I. Siepmann, *J. Phys. Chem. B*, **102**, 2569–2577 (1998).
- [22] H. A. Lorentz, *Ann. Phys.*, **248**, 127–136 (1881).
- [23] D. Berthelot, *C. R. Acad. Sci. Hebd. Seances*, **126**, 1703–1855 (1898).
- [24] K. Kaneko, R. F. Cracknell, and D. Nicholson, *Langmuir*, **10**, 4606–4609 (1994).
- [25] A. Matsumoto, J-X. Zhao, and K. Tsutsumi, *Langmuir*, **13**, 496–501 (1997).
- [26] J. Rouquerol, S. Partyka, and F. Rouquerol, *J.*

- Am. Chem. Soc. Faraday Trans. I*, **73**, 306–314 (1977).
- [27] Y. Grillet, F. Rouquerol, and J. Rouquerol, *J. Colloid Inter. Sci.*, **70**, 239–244 (1978).
- [28] M. J. Bojan and W. A. Steele, *Langmuir*, **3**, 1123–1127 (1987).
- [29] D.D. Do, D. Nicholson, and H.D. Do, *J. Colloid Inter. Sci.*, **325**, 7–22 (2008).
- [30] J. N. イスラエルアチヴィリ、分子間力と表面力 (第3版)、朝倉書店 (2013).
- [31] D. R. Lide (editor), in: *Handbook of Chemistry and Physics*, edition 78, CRC Press (1997).
- [32] S. Nobusawa, H. Kaku, T. Amada, H. Asano, K. Satoh, and M. Ruike, *Coll. Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, **419**, 100–112 (2013).
- [33] A. Matsumoto, T. Sasaki, N. Nishimiya, and K. Tsutsumi, *Langmuir*, **17**, 47–51 (2001).

第 30 回日本吸着学会研究発表会開催報告

長崎大学大学院工学研究科 森 口 勇

第 30 回日本吸着学会研究発表会は、平成 28 年 11 月 10 日(木)から 11 日(金)の 2 日間の日程で、長崎大学文教キャンパス（長崎市文教町）で開催されました。長崎での日本吸着学会関連のイベントは、FOA 7（2001 年 5 月 20 日から 25 日）の開催以来である。今回は、30 回目ということもあって、より研究発表会に参加しやすくするために、学会会員および学生の参加登録費の値下げを行いました。結果的に、参加登録者数は 158 人、招待講演者およびスタッフ等を含め、総勢 181 人のご参加を頂きました。多くの方々のご協力と会員の皆様のご理解により、成功裡に滞りなく終了できましたこと、厚く御礼を申し上げます。

研究発表会は、長崎大学中部講堂にて、1 件の招待講演、35 件の口頭発表、31 件のポスター発表が行われました。1 日目は、午前中に吸着の基礎からカーボン材料の合成・応用に関する口頭発表 7 件と、招待講演として東北大学西原洋知先生より、「カーボン系材料のナノ空間制御とエネルギー貯蔵への応用」と題して本年度日本吸着学会奨励賞（カルゴンカーボンジャパン賞）受賞講演が行われました。午後は、ポスター発表ののちに、カーボン材料の合成・応用およびナノサイエンスに関する口頭発表 9 件が行われました。ポスター会場が狭く、混雑のために十分にポスター発表に対する討論ができなかった方々もおられた様で、今回の反省点の一つとして上げられます。従来と同様に、投票によって優秀ポスター賞 5 件が選定されました（詳細は、ポスター賞寄稿をご覧ください）。夕方



口頭発表会場の様子



ポスター発表会場の様子

には、日本吸着学会総会および奨励賞授与式、ついで大学生協にて懇親会が開催されました。懇親会には、予想を超える 100 人以上の多くの方が参加され、大変盛況でした。徳島大学で開催された前回の研究発表会懇親会では、“阿波踊り”が用意され、大変すばらしいものでした。しかしながら、このような出し物を今回どうすべきか悩んだところですが、今後にあまり負荷がかからないように、アットホームな吸着学会を意識して、長崎大学学生サークル「龍踊部」に依頼して、“龍踊”（国指定重要無形民俗文化財“長崎くんち”の奉納踊の一つ）を披露して頂きました。会場の天井が低く、小さい龍しか使えなかったのが、迫力には欠けるところがありましたが、学生が一生懸命に演じているところは、吸着学会らしいのでは、と個人的には勝手に満足しています。最後の方では、宮原会長自ら龍を導く先頭の玉遣を演じられ（写真参照）、大いに盛り上がりを見せていました。懇親会終了後は、それぞれで長崎の夜をご堪能されたのではと推察いたします。

2 日目は、午前は MOF やセオライト等の吸着・触媒作用に関する口頭発表 9 件、午後は各種吸着材を利用した吸着・分離およびプロセスに関する口頭発表 10 件が行われました。両日ともに、いずれの研究発表においても活発な質疑応答がなされ、吸着の基礎から応用に至る幅広い領域で研究が活発化している状況が伺われました。

企業展示は、カンタクローム・インスツルメンツ・

ジャパン合同会社、マイクロトラック・ベル株式会社、マイクロメリティクスジャパン合同会社、DKSH ジャパン株式会社より行って頂き、発表会要旨への広告掲載を含めて財政的支援を頂きました。各社に厚く御礼を申し上げます。

最後になりましたが、本研究発表会の開催にあたり、児玉昭雄運営委員長、学会事務局の遠藤 明先生にはいろいろとご協力を頂きました。前研究発表会実行委員長の加藤雅裕先生には、計画において多くのご助言を頂きました。また、長崎大学研究室メンバーには、事前準備から後片づけ等、細部に至るまでお世話頂きました。ここに記して、深く感謝申し上げます。



懇親会の様子

第 30 回日本吸着学会研究発表会ポスター賞

SnO₂/活性炭複合体の充放電特性に与えるナノ空間の効果 (ポスター番号：P-12)

長崎大学大学院工学研究科

田中 瑠璃・瓜田 幸幾・森口 勇

この度はポスター賞を頂きまして、誠にありがとうございます。多くの方々に発表ポスターをご覧いただき、貴重なご意見を賜りましたことを、心より感謝申し上げます。今後の研究の励みとさせていただきます。以下に本研究の概要を紹介させていただきます。

SnO₂は、高容量化が期待できるリチウムイオン二次電池の負極活物質として注目されています。SnO₂の電極反応は不可逆性や体積膨張による容量低下が起るために、電気化学特性の向上には反応空間の制御が必要不可欠となります。我々のこれまでの研究から、SnO₂をメソ細孔性カーボン材料と複合化することで反応場の空隙率が制御され、SnO₂の反応可逆性が向上することが分かっておりました¹⁾。そこで本研究では、更に小さい細孔を有する活性炭素繊維（ACF）と複合化し、マイクロ細孔が与える電気化学特性の究明を行うことを目的としました。

カーボン材料にはスリット状マイクロ細孔もしくはメソ細孔を有する ACF（A1：㈱アドール）を用いました。ACF へ SnCl₂ を気相導入し SnO₂/ACF[w]（w：SnO₂ の担持量）を得ました。XRD 測定および TEM 観察より、いずれの SnO₂/ACF[w]においても 5 nm 以下の SnO₂ ナノ結晶の生成を確認しました。

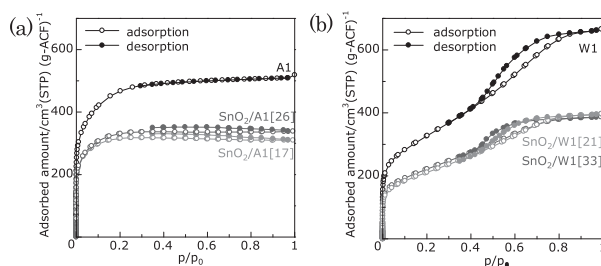


Fig. 1 N₂ 吸着等温線(a) A1、SnO₂/A1[w] (b) W1、SnO₂/W1[w]

Fig. 1 の N₂ 吸着等温線@77 K より複合体の N₂ 吸着量の減少が確認でき、この結果より SnO₂ は細孔内に存在していると言えます。定電流充放電測定から、SnO₂/ACF[w]は高容量を発現し、容量維持率が向上したことから、既往研究より更に小さい細孔空間に反応場を制約することは電気化学特性の向上に有用であることを明らかにしました。

最後になりましたが、本研究を進めるにあたりご指導を賜りました、森口勇教授、瓜田幸幾助教、活性炭素繊維をご提供頂きました㈱アドールの宇山豊樹氏に厚く御礼申し上げます。

[参考文献] 1) S. Oro, K. Urita, I. Moriguchi, *J. Phys. Chem. C*, **2016**, 120, 25717-25724

Quasi-wall effect in Graphene Nanowindows

(ポスター番号：P-14)

Shinshu University

Fernando Vallejos-Burgos and Katsumi Kaneko

By making holes in a graphene layer, nanowindows can be created. Graphene nanowindows are one of the most promising materials for innovation in molecular separation based membranes technologies. Due to its single-atom thickness, graphene nanowindows exhibit negligible resistance to mass transport. To increase separation selectivity, the nanowindow size and its chemistry play a central role. Graphene nanowindows are not simply a rim formed by carbon atoms, but a mixture of functional groups due to the passivation of the reactive groups after exposure to air. A consequence of the presence of functional groups is that the partial charges in the nanowindow rim induce an electrostatic field, which interacts with molecules having charges (ions) or even a distribution of charges (multipoles).

In the case of N_2 , a quadrupolar molecule, this enhanced interaction in the nanowindow results in N_2 adsorbing preferentially in the nanowindow and then in the basal plane of the graphene. Then, the nanowindow acts like wall, even though there are no atoms, this is what we call the *quasi-wall effect*. In

contrast, an atom without electrostatic interactions such as Ar, cannot cover the nanowindow and stays adsorbed only in the basal plane. This electrostatic stabilization of multipolar molecular was evident in two different observations: (i) the kinetics of permeation of N_2 is faster than Ar, which is experimentally observable in the larger adsorption hysteresis at low pressure of the latter due to slow diffusion. (ii) 20% higher surface area obtained for N_2 than for Ar, by adding the coverage on top of the nanowindow sites. In the future, the quasi-wall effect should be considered for separation purposes and the nanowindow chemistry tuned for the desired separations.

APPENDIX: A virtual reality (VR) movie was shown to attendants at the poster presentation. It was made with beta version of VMD 1.9.3. The viewer was an inexpensive Google Cardboard (<https://vr.google.com/cardboard/get-cardboard/>) with a smartphone inside. The 3D VR movie can be watched freely in <https://youtu.be/RiK0LFQUzo0>

規則シリカ多孔体における毛管凝縮挙動の速度論的理解

(ポスター番号：P-15)

京都大学大学院工学研究科

平塚 龍将・田中 秀樹・宮原 稔

このたびはポスター賞を頂き、大変光栄に存じます。多くの方々に発表ポスターをご覧いただくとともに、有意義なご意見を賜り、心より御礼申し上げます。以下に本研究の概要を紹介させていただきます。

メソ細孔内ではバルクの飽和蒸気圧よりも低い圧力において毛管凝縮・蒸発が進行することが知られています。蒸発過程は熱力学的に平衡な相転移であるということが知られており、多くの予測モデルが提案されています。一方で、毛管凝縮はしばしば準安定状態から活性化過程を経て進行するため、従来の熱力学モデ

ルではその予測が困難となります。そこで本研究では、分子シミュレーションおよび遷移状態理論により毛管凝縮の速度定数を計算し、実験結果と比較することで、速度論的な観点から毛管凝縮の理解・予測を試みました [1]。

計算された速度定数は圧力が大きくなるにつれ大きくなっていくことがわかりました (Fig. 1(a)-(c))。速度定数の圧力依存性と吸着等温線の比較から、平衡転移圧では速度定数が小さすぎる、つまりは毛管凝縮速度が遅すぎるため、実験の平衡待ち時間内に観測で

きず、速度が十分に速くなる高圧になってはじめて毛管凝縮が観測できる、ということが分かります。その十分に速い速度を「臨界速度定数」として $k_c^* = 10^{-17}$ と決定することで、実験の毛管凝縮圧を定量的に予測することに成功し (Fig. 1 (d), (e))、さらには 87 K の Ar 吸着等温線においては吸着ヒステリシスが生じない、ということも予測することができました (Fig. 1 (f))。

最後になりましたが、本研究を進めるにあたりご指導を賜りました、宮原稔教授、田中秀樹准教授に厚く御礼を申し上げます。

[1] T. Hiratsuka, H. Tanaka, and M. T. Miyahara, *ACS Nano*, **11**, 269 (2016)

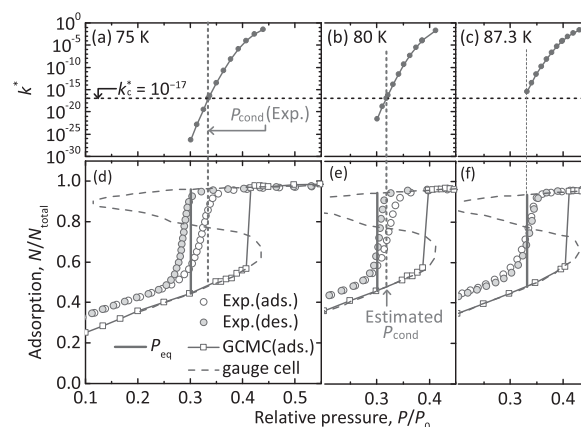


Fig. 1 (上段) MCM-41 (細孔径 3.3 nm) における Ar の毛管凝縮の速度定数の圧力依存性 (下段) Ar 吸着等温線

一次元銅配位高分子の開鎖空間への吸着 (ポスター番号：P-18)

東京農工大学大学院工学府

鈴木 貴幸・小谷 亮介・近藤 篤・前田 和之

この度はポスター賞を頂き、大変光栄に存じます。多くの方々に発表ポスターを御覧頂き、貴重な御意見を賜りましたことを御礼申し上げます。以下に本研究の概要を紹介させていただきます。

ゲート吸着は、優れた分子選択性が期待される特異な吸着現象です。この現象は一部の柔軟な配位高分子に見られ、そのほとんどは分子選択的に Closed form から Open form へ構造変化して細孔内に分子を取り込む吸着メカニズムを有しています。しかしながら、Open form へ構造変化した後の分子選択性には懸念があります。

一次元銅配位高分子 $[\text{Cu}(\text{BF}_4)_2(\text{bpp})_2]$ ($\text{bpp} = 1,3\text{-bis}(4\text{-pyridyl})\text{propane}$) は、 CO_2 や複数の低級アルコールに対してゲート吸着現象を示します。本配位高分子の脱ゲスト体は Closed form であるものの、結晶構造内に空間 (閉鎖空間) を有します。また、吸着等温線に対応する *in situ* XRD パターンの変化および吸着熱の特異な傾向から、吸着に伴う構造変化が示唆されていました¹⁾。今回、*in situ* XRD パターンを用いてエタノール蒸気吸着後の結晶構造を求めたところ、興味深いことに Closed form を維持したまま閉鎖空間にエタノール分子を取り込んでいることが明らかになりました²⁾。さらに、様々なゲスト種を用いた検討より、他のゲスト種においても同様に閉鎖空間にゲストを取り込むこ

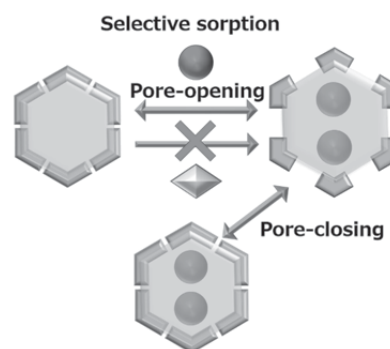


Fig. 1. 閉鎖空間への吸着メカニズム。

とや、取り込んだゲストに適合するよう柔軟に構造変化する induced fit の性質があることが示唆されました。

以上から、本配位高分子は、吸着の際に閉鎖空間の入口を開き、内包する分子の数や種類に応じて構造を変え、分子を取り込んだ後は再び細孔入口を閉じる吸着メカニズムを持つと考えられます (Fig. 1)。この吸着メカニズムでは分子吸着後に細孔が閉じているため、開孔体と比較して立体的に他分子の侵入を阻害できます。分子選択的に細孔を開閉することで、分子選択性を合理的に高められると考えています。

最後に、本研究を進めるにあたり御指導をいただきました皆様に深く御礼申し上げます。

[参考文献]

- 1) R. Kotani, A. Kondo, K. Maeda, *Chem. Commun.*, **48**, 11316 (2012).
- 2) T. Suzuki, R. Kotani, A. Kondo, K. Maeda, *J. Phys. Chem. C*, **120**, 21571 (2016).

アミン修飾メソ多孔体の CO₂ 吸着性能に及ぼす隣接アミノ基間距離の影響 (ポスター番号：P-30)

¹ 奈良先端科学技術大学院大学, ² 地球環境産業技術研究機構 (RITE)
東條彩音¹・沼口遼平^{1,2}・山田秀尚^{1,2}・余語克則^{1,2}

この度は、優秀ポスター賞をいただきまして、大変光栄に存じます。多くの方々に発表ポスターをご覧頂くとともに、有意義なご意見を賜り、心より御礼申し上げます。以下に本研究の概要を紹介させていただきます。

宇宙船などの閉鎖空間では、人間の呼吸により CO₂ 濃度が高まり、作業効率の低下や健康被害を引き起こすため、CO₂ を回収することは重要です。近年、アミノシランを多孔質シリカに担持した CO₂ 吸着剤が注目されています。本材料は、アミノ基との化学反応により CO₂ を吸着するため (図1)、高い選択性を有し、水蒸気耐性にも優れます。しかし、現状ではアミンの利用効率が低く、CO₂ 吸着量が十分ではありません。そこで、本研究では、アミンの利用効率の向上を目的として、材料作製の条件を体系的に比較検討しました。

グラフト手法として、担体とアミノシランを溶媒中で加熱還流する標準的な手法 (①) に加え、担持密度の増大のため、事前に煮沸した担体を用いる手法 (②)、溶媒中に水を添加する手法 (③)、前記二つを併用した手法 (④) を用いて吸着剤を作製しました。また、アルコキシ基の比較のため、それぞれメトキシ基とエトキシ基を有するアミノシランを用いました。

その結果、アミン利用効率は標準法①と比較して、②では大きな差は見られず、溶媒に水を添加した③と④で顕著な増加を示しました (図2)。この理由として、アミノ基間距離の違いが挙げられます。CO₂ はアミノ基二つを消費して吸着する (図1) ため、アミノ基同士が近い距離に存在する必要があります。水を添加することで、アミノシラン同士のオリゴマー化が起こり、アミノ基同士が隣接し、CO₂ との反応効率が増加したと考えられます。アルコキシ基部位の比較では、いずれの条件でもメトキシ基がエトキシ基よりもアミ

ン利用効率が高い結果となりました。これも同様に、立体障害の低いメトキシ基を有する方が、アミノ基同士が近くなりやすいためであると考えられます。以上の結果から、アミノ基同士を密接に担持できる条件において、CO₂ 吸着性能が大きく向上することが分かりました。

最後になりましたが、本研究を進めるにあたり御指導を賜りました、余語克則教授に感謝の意を表します。

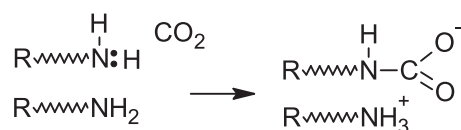


図1 アミノ基と CO₂ の反応

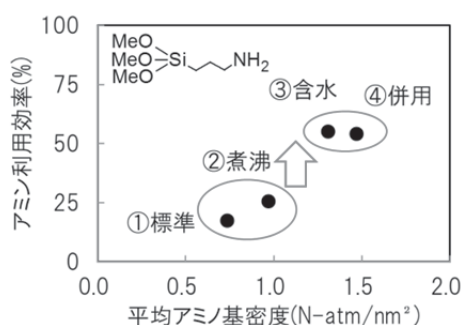


図2 平均アミノ基密度とアミン利用効率

[参考文献]

- 1) K. Yogo et al., *Micropor. Mesopor. Mater.* **84** 357-365 (2005).
- 2) R. Kishor et al., *Chem. Eng. J.* **262** 882-890 (2015).

第 26 回吸着シンポジウム（吸着夏の学校）報告

東京農工大学大学院工学研究院 近 藤 篤

第 26 回吸着シンポジウムは、2016 年 9 月 12 日(月)～13 日(火)に、長野県茅野市の新日本空調株式会社茅野研修所で開催された。本会は吸着分野の若手研究者の活性化と相互交流を目的の 1 つとして開催されたが、講師を含む参加者 52 名のうち 30 歳代以下の参加者が 38 名と全体の 7 割以上にのぼり、吸着分野の若手の研究者の意識やアクティビティーの高さを感じた。

本会では第一線でご活躍の 6 名の著名な講師陣により、基礎技術講演 3 件、特別講演 1 件、研究トピック講演 2 件をご講演いただいた。また、スケジュールの関係で限定させていただいたが、若手有志の一般講演を 1 件いただいた。吸着関連の基礎技術から最新のご研究内容、現行の吸着技術やその展望、吸着技術に期待される役割等々についてのご講演であり、大変興味深い内容であった。また、とてもわかりやすく、若手研究者から「目からうろこ」といったご意見が多数あり、夏の“学校”として大成功であった。全体では 52 名（うち学生 26 名）もの方々にご参加頂き、盛大に開催できた。

講演タイトルと講師リスト

基礎技術講演

「表面性固体の界面科学」

信州大学 金子 克美

「ゼオライトをはじめとしたミクロ多孔体を用いた膜分離プロセスの基礎と応用」

早稲田大学 松方 正彦

「PSA/TSA などの吸着分離プロセスとその産業応用」

太陽日酸株式会社 中村 章寛

特別講演

「20 世紀の材料ができなかったこと、21 世紀にはできそうなこと？教科書技術を疑おう！吸着に関わる機能革新」

三菱化学株式会社 瀬戸山 亨

研究トピック講演

「AIPO 系ゼオライトの水蒸気吸着特性」

三菱化学株式会社 武脇 隆彦

「家庭用燃料電池システム“エネファーム”向け脱硫

器開発」

東京ガス株式会社 大橋 雅史

一般講演

「有機構造規定剤を用いずに合成したベータ型ゼオライトの CO₂ 吸着特性」

産業技術総合研究所 上村 佳大

(以上、敬称略)

会場の新日本空調茅野研修所は IR 中央本線茅野駅からタクシーで約 20 分の山間にあり、まさに自然に囲まれた場所であった。国際学会等では時々見られるが、外にふらふらと遊びに行くことを許さないこのような環境は、夏の“学校”を開催するのにある意味最適であった。また、施設の充実度は大変高く、研修所を貸切で使用させていただいた新日本空調株式会社様には改めて感謝申し上げる。

さて、午後 1 時半の開会挨拶ののち、早速、信州大学の金子先生のご講演を皮切りに、著名な先生方の興味深いお話が次々と続いた。多くの参加者の皆様からも「面白かった」という言葉がたびたび出ていたが、私自身も講師の先生方のご講演に魅了されていた。細孔性材料として有名な炭素材料やゼオライトの現状や応用、それらの材料の新たな可能性等について魅力的な内容が目白押しであった。特に、実用化に必要な各種の検討事項は基礎研究を行っている研究者にとっては見えづらい部分でもあるが、超えなければならないハードルをいかにして越えてきたか苦労話を交えてお話いただいた内容は個人的に大変刺激的であった。

夕食は立食形式で行った。講演時とは異なり、終始リラックスした和やかなムードであつという間に時間が去っていった。そのような中、多くの方々が新たな交流ネットワークを形成されたのではないかと思われた。その証拠に、夕食に続き開催された懇親会でも引き続き大勢の方がそのまま参加され、話に花が咲いていた。また、著名な先生方の周りをいろいろな大学の学生諸君が囲んでお話されている様子も見られた。私自身も多くの方々とお話させていただき大変充実した時間を過ごさせていただいたが、参加した学生の皆さ

んにとっても貴重な経験ではなかったかと思う。

2日目は朝8時半から講演開始であったが、昨夜の夜遅くまで開かれていた懇親会がうそのようにほぼ全員が参加されていた。最初は大陽日酸の中村先生のご講演であったが注目度の高さが伺えた。2日目の講師の方々は全員が企業の方であり、前日に引き続き実用化を意識した研究開発のポイント等をわかりやすくご講演いただいた。個人的に興味のあるトピックが続いたため、あっという間に時間が過ぎてしまったが、多くの参加者の方からも同様のご意見をお聞きした。最後に、若手有志のご発表として産総研の上村氏にご講演いただいた。ゼオライトの問題点として指摘されている高価な有機構造規定剤の利用に対する明確な答えを示すホットな内容であった。

写真は、講演会終了後に撮影したものである。この

ように、多くの方々に参加していただき大変感謝致します。また、皆様に書いていただいたアンケートには、「とてもためになった」、「研究のモチベーションを刺激された」等のご意見をいただいております。講師の先生方のすばらしいご講演あつての結果であったと改めて感じる。運営面で至らない部分も多々あったかと思うが、多くの方々のご協力により本会を無事終了することができた。特に、金沢大学の児玉先生、信州大学の飯山先生には企画当初から当日の運営まで多大なサポートをいただいた。また、事務局の産業技術総合研究所の遠藤先生には会計面で特にお世話いただいた。紙面をお借りして改めてお礼申し上げる。以上簡単ですが、参加いただいた全ての方に感謝申し上げます、第26回吸着シンポジウム夏の学校のご報告とさせていただきます。



集合写真

吸着シンポジウム夏の学校に参加して

東京農工大学大学院応用化学専攻
北 沢 壮

私は今回、吸着シンポジウムに初めて参加させていただきました。今回の開催地である茅野を訪れるのは初めてであり、未開の地に足を踏み入れること、そして吸着シンポジウムの内容に期待を大いに膨らませながら臨みました。まず、新日本空調株式会社の茅野研修所に到着して感じたことは、研修所の従業員の方々に温かくもてなして頂いたことです。また、想像していたよりもはるかに綺麗な施設で、施設周辺は自然豊かで空気が澄んでいることが非常に印象的でした。私が普段過ごしている都会の喧騒から離れることで、心も頭もリラックスした状態で講演を拝聴することができました。

講演においては、吸着の基礎技術から工業的プロセスへの応用について、著名な先生方のお話を多数拝聴することができ、非常に有意義な時間でした。大学の研究室において、メソポーラスシリカをはじめとした吸着材料に関して研究しており、研究内容は材料合成及び解析寄りで、吸着材料が化学工学としてどう応用されているかは概論のみ知っている程度でした。講演を拝聴し、材料の吸着特性の技術化やプロセスへの導入が自分の中で明確になったこと、更に、技術力を高めるだけでなく利便性やコスト面についても考慮する必要があることなど多くのことを吸収することができました。質疑応答では、実用化に向けて解消すべき点について議論が活発に行われているのを拝聴し、その雰囲気を感じているだけでも非常に密度の濃い時間を過ごせました。

また、吸着シンポジウムは、講演に限らず懇親会での交流も盛んであることが非常に印象的でした。普段触れ合うことの出来ない企業の方々や遠方の学生と、研究内容について議論するのは勿論のこと、在住地について雑談をするなど、参加する前に固い雰囲気を想像していた反動から、楽しく食事やお酒を交わすことができました。また、先生方が持参して下さった地酒やお土産を美味しく頂くことができ、感謝の気持ちでいっぱいでした。誰でも気軽に話しかけることのできるアットホームな雰囲気は吸着シンポジウムという場の良さだと切に感じました。

吸着シンポジウム夏の学校に参加したことで、自身

の研究が工業的プロセスへどのように役立つかを常に意識する必要があると感じました。同時に、それをモチベーションとして研究生活を実りあるものにしていきたいと思います。

吸着夏の学校を振り返って

東京農工大学大学院応用化学専攻
涌 井 健太郎

私は、今年の幹事である近藤先生のサポートのため、運営スタッフの一人として吸着夏の学校に参加しました。また仕事の傍らではありますが、私の研究にも参考となる講演を聴くことができ、この度はその感謝の気持ちも込めて感想文を書かせていただきます。

今回の開催地である茅野は長野県南部に位置する町で、日本百名山の霧ヶ峰高原、蓼科高原を望む自然豊かな土地です。また、会場としてお借りした新日本空調(株)茅野研修所からも、階段の大きな窓から街と山々の景色を一望することができました。我々スタッフは集合時間より少し早めに到着し、受付等の準備を行いました。天候はあいにくの小雨でしたが、参加者の皆様は順調に到着され、胸を撫で下ろしながら講演の開始を待ちました。

金子先生、松方先生、そして瀬戸山先生による基礎技術講習、特別講演は、背景から詳しくお話しいたいただき、吸着についての理解や知識を深めることができました。先生方のお話しは、社会にある課題への吸着が求められること、さらには吸着の若手研究者へのメッセージとして示唆に富むものばかりだったように思います。講演後には食堂ホールでの懇親会があり、私達スタッフも参加しました。美味しい料理やお酒を飲みながら、色々な方とお話して交流することが出来ました。二次会では他学の学生と話すことで、これまでに無かった新しい繋がりを作る事も出来ました。二日目の企業の方の講演が中心で、吸着の応用に関する実際の事業についてもものでした。前日の懇親会の効果なのか、気づくと学生からも質問が挙がっており、この会の意義を垣間見るようでした。

スタッフとして、進行が順調に行われたことが第一に良かったと思いました。また一学生としても、吸着に関するイベントに参加することは初めてでしたが、講習会や懇親会で新たな知識、人と出会うことが出来た非常に有意義な時間でした。

会 告

「吸着材評価の基礎講習 2017」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、より効率的に研究開発が行われることが期待されます。そこで、日本吸着学会では、カンタクローム・インスツルメンツ・ジャパン合同会社、マイクロトラック・ベル株式会社、マイクロメリティックスジャパン合同会社の協力のもと、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・分析等の基礎評価に関する「吸着材評価の基礎講習」を企画いたしました。2017年度につきましては、以下の通り開催しますのでご案内申し上げます。奮ってご参加ください。

主 催：日本吸着学会

日 時：2017年6月2日(金)

会 場：マイクロトラック・ベル株式会社 大阪本社（大阪市住之江区南港東 8 丁目 2 番 52 号）

スケジュール：

＜講習会＞

8：30－ 受付

9：00－9：10 開催の挨拶

9：10－10：30 吸着基礎講習（吸着等温線測定から比表面積・細孔分布評価の基礎）

10：30－12：00 吸着装置を用いた測定実習

12：00－13：00 昼食

13：00－15：00 吸着等温線を用いた解析実習＊

15：15－16：45 “吸着等温線を用いた細孔分布解析の理論と実際”

京都大学 田中 秀樹 先生

17：00－17：30 質疑応答

＜意見交換会＞

17：40－19：30 情報交換や個別質問等を承るための時間を設けます。

（軽食を準備します）

＊解析実習時に解析ソフトウェアを用いて解説いたしますので、ソフトウェアインストール可能な下記スペック以上の PC をご準備願います。

CPU : インテル製 Core i5 相当以上

メインメモリ : 2 GB 以上

HDD : 空き容量 50 GB 以上

USB ポート : 空き 1 個（解析ソフト USB キー用）

OS : Windows 7/8（32 bit or 64 bit）以上

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：学 生 3,000 円

一 般 5,000 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

備考：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、多く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『吸着材評価の基礎講習 2017』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 26 日(金)

申込・問合せ先：吸着材評価の基礎講習 2017 世話人

松田亮太郎（名古屋大学）、吉田将之（マイクロトラック・ベル）

E-mail：kisokoshu@j-ad.org

TEL：052-789-4603（松田）

※不在の事が多いので、ご質問等はできるだけメールでご連絡下さい。

アクセス：新幹線の場合：新大阪駅下車

新大阪一本町（地下鉄御堂筋線）約 11 分

本町—コスモスクエア駅（地下鉄中央線）約 15 分

コスモスクエア駅—ポートタウン東駅（ニュートラム）約 8 分

ポートタウン東駅より徒歩 8 分

飛行機の場合：・大阪国際空港（伊丹空港）より

伊丹空港—空港バス（南ターミナル 14 番のりば／北ターミナル 4 番のりば）

—梅田（マルビル・新阪急ホテル・ハービス大阪） 約 30 分

梅田—本町駅（地下鉄御堂筋線）約 6 分

本町駅—コスモスクエア駅（地下鉄中央線）約 15 分

コスモスクエア駅—ポートタウン東駅（ニュートラム）約 8 分

ポートタウン東駅より徒歩 8 分

・関西国際空港より

関西空港—弁天町駅（JR 関空快速）約 60 分

弁天町—コスモスクエア駅（地下鉄御堂筋線）約 10 分

コスモスクエア駅—ポートタウン東駅（ニュートラム）約 8 分

ポートタウン東駅より徒歩 8 分



(注：お車でのお越しの場合は、近くの駐車場に駐車いただきたくよろしくお願いします。)
最新の情報は学会ホームページ (<http://www.j-ad.org/>) にてご確認ください。

第 27 回吸着シンポジウム（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、吸着シンポジウム（吸着夏の学校）を 1 泊 2 日の合宿形式で開催します。今回のシンポジウムは、液相吸着の専門研究者および次世代研究を担う新進気鋭の研究者による特別講演と若手研究者によるショートプレゼンテーションで構成します。特別講演（液相吸着・次世代吸着研究）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。熱いディスカッションを交わし、参加者相互のつながりを強める会にしたいと考えています。大学生、ポスドクを含む大学、研究機関、企業の研究者、技術者の方のご参加をお待ちしております。もちろん、ベテランの皆様のご参加も大歓迎です。

会期：2017 年 8 月 31 日(木)～9 月 1 日(金)

会場：ホテルメイプルイン幕張（〒262-0033 千葉県千葉市花見川区幕張本郷 1-12-1）

<http://mapleinn.co.jp/>

スケジュール（予定）：

8 月 31 日(木)	13:00	オープニングリマーク
	13:10-15:10	液相吸着 招待講演
	15:10-16:30	一般講演
	17:00-18:00	次世代吸着研究 招待講演
	18:30	<懇親会>
	20:00	<自由討論会>
9 月 1 日(金)	9:00-12:00	次世代吸着研究 招待講演
	12:00	クロージングリマーク

参加費（宿泊費・食費込み）：学生（吸着学会会員・非会員不問）5,000 円

一般（吸着学会会員、維持会員企業の方）15,000 円

一般（非会員）20,000 円

宿泊不要の一般参加者（学生以外）は上記金額から 3,000 円引いた金額となります。

定員：50 名宿泊は、基本的に男女別の相部屋です。個室をご希望の場合はご相談ください。

一般研究発表：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。発表時間はディスカッションを含めて 10～15 分程度を予定しています。

参加申込方法：以下の参加者情報 1～9 をご記入の上、件名を『吸着シンポジウム参加申込』として、吸着シンポジウム実行委員会事務局宛に Email (uchida@chiba-u.jp)でお申し込みください。

参加者情報：

1. 氏名（ふりがな）
2. 所属（学生の方は研究室名まで記載）
3. 学年（学生のみ）
4. オーラルプレゼンテーション（若手発表）希望の有無
5. 性別
6. 連絡先（Email アドレス、電話番号）
7. 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）
8. 年齢層（20 代、30 代、・・・宿泊の部屋割の参考にいたします）
9. その他（一般参加で宿泊不要の場合は、その旨をこの欄に記載してください）

参加申込締切：7 月 21 日(金)

問い合わせ先：事務局 内田 高代（千葉大学） E-mail：uchida@chiba-u.jp

（実行委員長 大場 友則（千葉大学）Email：ohba@chiba-u.jp）

講師陣など最新の情報は、ホームページ (<http://moon.gmob.jp/ohba/adsorption2017/> や、<http://www-j-ad.org/>) で順次ご案内いたします。

日本吸着学会国際交流スカラーシップ （吸着関連国際学会の参加登録料の援助）について

日本吸着学会は、吸着関連分野を研究する学生諸君が、最先端の研究成果について学びながら海外の研究者と直接交流できる国際会議に積極的に出席することを奨励し、将来国際的に活躍する広い視野を持った研究者に成長してもらうことを願って、国際会議に出席し自らの研究成果を発表する学生会員諸君に、審査の上、国際交流スカラーシップとして参加登録費を援助します。

これまで支援を行ってきた FOA（International Conference Fundamental of Adsorption）、PBAST（Pacific Basin Conference on Adsorption Science and Technology）に加え、吸着関連の国際学会、および国際学会の吸着関連セッションを対象とします。

今回、2017 年度上半期（4 月～9 月）開催の学会への参加登録料の援助の募集を下記の要領で行いますので、奮ってご応募下さい。

募集要項

応募資格：国際会議に出席して自ら吸着関連分野の研究発表を行う日本吸着学会学生会員（会員受付は随時行っています）。ただし、本会以外の団体（学会、法人等、学会の Travel Grants を含む）から援助が見込まれる者あるいはすでに決定している者は除く。

対象学会：2017 年度上半期（4 月～9 月）に開催される国際学会。

(2017 年度下半期分の募集は 9 月を締切として行う予定です。)

援助の条件：援助を受けられる場合は、以下の事柄を了解していただきます。

1. 本会会員にふさわしい、しっかりとした研究発表を行うこと。
2. 世界各国から集まる優れた研究者の最新の研究について学び、彼等と積極的に交流して、学術・文化に関するより深い知見を得るよう努めること。
3. 会議終了後、速やかに参加報告書を提出すること（本会機関紙“Adsorption News”に掲載予定です）。
4. 発表において日本吸着学会（Japan Society on Adsorption）への謝辞を付すこと。

援助額：参加登録費（学生）相当額 但し 5 万円を上限とする（総額 25 万円／半期程度を予定）

なお、指導教員毎の申込数、発表内容、学会の開催場所、これまでの吸着学会研究発表会での発表状況等により審査を行い、補助対象学生数を制限する場合があります。

応募方法：下記事項をもなく記入の上、日本吸着学会事務局に e-mail で送付して下さい。

1. 申請者氏名、2. 会員番号、3. 所属・学年、4. 連絡先（住所、所属（研究室名まで記入））、TEL、FAX、e-mail アドレス、5. 指導教員氏名、6. これまでの日本吸着学会研究発表会における発表履歴、7. 参加する国際学会名とホームページアドレス 8. 発表タイトル

応募先および問い合わせ先：

日本吸着学会事務局 e-mail：info@j-ad.org

応募締切：2017 年 3 月 31 日(金) 必着

日本吸着学会大学院生研究奨励賞について

日本吸着学会は、将来の日本の吸着関連分野を支える人材育成のため、吸着関連の研究で博士号取得を目指す学生会員の研究中間成果と今後の研究計画に対して審査を行い、優秀と認めたものに対して研究奨励賞を授与して研究を支援します。

募集要項

応募資格：将来の日本の吸着科学の発展に貢献する意思を持った、吸着関連のテーマにより国内外の大学において博士課程の研究を行う大学院生。

奨励金額：15 万円

審査方法：研究概要、これまでの吸着学会研究発表会での発表状況、当学会による支援の必要性等により審査を行い、最大 3 名程度の方に授与を行います。

受賞の条件：支援を受けられる場合は、以下の事柄を了解していただきます。

1. 採択テーマ、および氏名は“Adsorption News”およびホームページに掲載します。
2. 学位取得時に、本会機関紙“Adsorption News”に研究概要をご寄稿いただきます。
3. 学位取得前に研究を終了したり、テーマを変更する場合には、奨励金の返還をしていただく場合があります。
4. 採択された方の同奨励賞への再度の応募はできません。

応募方法：下記事項をもなく記入の上、日本吸着学会事務局に e-mail で送付して下さい。

1. 申請者氏名、2. 会員番号、3. 所属・学年・学位取得見込み年月・博士課程入学年月、4. 連絡先（住所、所属（研究室名まで記入））、TEL、FAX、e-mail アドレス、5. 指導教員氏名、6. これまでの日本吸着学会研究発表会における発表履歴、7. 他の経済支援状況（学術振興会特別研究員、育英会奨学金など）
8. 研究テーマ 9. 研究概要（1000 字程度）

応募先および問い合わせ先：

日本吸着学会事務局 e-mail：info@j-ad.org

応募締切：2017 年 4 月末日 必着

平成 29 年度日本吸着学会賞受賞候補者推薦のお願いと要領

学術賞

賞状、副賞ならびに記念品の授与をもって表彰致します。受賞対象者は吸着における科学技術に関する一連の論文、著作等、学術的研究成果が特に優れた正会員とし、1 名程度を選考する予定です。

候補者をご推薦ください。自薦、他薦は問いません。推薦される方は下記の事項と論文のコピーを事務局にお送りください。

＜送付事項・書類＞

1. 候補者氏名、2. 生年月日、3. 所属、4. 略歴（学歴、職歴、研究略歴）、5. 連絡先（住所、電話番号、E-mail アドレスを含む）、6. 受賞対象研究名、7. 研究概要（800 字以内）、8. 受賞対象研究に関連する論文、著作等のリスト、9. 代表的な論文等の別刷りあるいはコピー（3 件程度）

奨励賞（カルゴン カーボン ジャパン賞）

賞状、副賞ならびに記念品の授与をもって表彰致します。受賞対象者は受賞年度において 45 歳未満の正会員および維持会員である企業等に所属する者とし、3 名程度を選考する予定です。選考はおおむね過去 5 年間に、原著論文、著書、特許、学協会が主催する研究発表会・年会等における口頭発表およびポスター発表、社報、ニュースリリース等により対外的に発表された研究開発の成果に関して行います。

候補者をご推薦ください。自薦、他薦は問いません。推薦される方は下記の事項と業績のコピーを事務局にお送りください。

＜送付事項・書類＞

1. 候補者氏名、2. 生年月日（年齢）、3. 所属、4. 略歴（学歴、職歴、研究略歴）、5. 連絡先（住所、電話番号、E-mail アドレスを含む）、6. 受賞対象研究名、7. 研究概要（800 字以内）、8. 対象となる業績のリスト、9. 対象となる業績の別刷りあるいはコピー等（5 件以内）

技術賞

賞状および記念品の授与をもって表彰致します。受賞対象は維持会員である法人に属する技術者または技術グループが開発した技術とし、実用歴、実施例を考慮して 2 件程度を選考する予定です。

候補技術および開発にあたった技術者（5 名以内）をご推薦ください。自薦・他薦は問いません。推薦される方は候補者に関する下記の事項を事務局にお送りください。

＜送付事項・書類＞

1. 維持会員名、2. 対象技術、3. 対象技術の開発を担当した技術者名（原則 5 名以内。グループで開発にあたった場合は全員の職・氏名）、4. 連絡先（住所、電話番号、E-mail アドレスを含む）5. 設計図、試験成績書あるいは学会発表など候補技術を証明するもの、6. 実用歴（納入先一覧で可）

●表 彰 式 2017 年秋に開催予定の第 31 回研究発表会会期中に執り行います。

●受賞講演 学術賞および奨励賞（カルゴン カーボン ジャパン賞）の受賞者は、2017 年秋開催予定の第 31 回研究発表会において、それぞれ受賞特別講演をお願いする予定です。技術賞受賞者は、受賞後に開催される吸着シンポジウム等での講演をお願いする予定です。

●送 付 先 応募書類は事務局宛てにお送りください。

（問合せ先）〒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

日本吸着学会事務局（担当 遠藤 明）

（電話：029-861-4653 FAX：029-861-4660 E-mail: info@j-ad.org）

※メール添付による応募書類提出も受け付けます。但し、大きなサイズのファイルは送受信に支障が出る場合がございますので、送信後には必ず送信の旨をご連絡下さいますようお願いいたします。

●締 切 2017 年 4 月末（事務局必着）

関連学会のお知らせ

日本膜学会第 39 年会のお知らせ

日本膜学会第 39 年会を下記の要領で早稲田大学にて開催いたします。例年通り人工膜、生体膜。ならびに境界領域と、膜学の広範囲な内容を含む年会を企画しております。一般発表以外に人工膜と生体膜の特別講演を各 1、ならびに人工膜 2 件、生体膜 1 件、境界領域 1 件の計 4 件のシンポジウムを開催します。基礎から応用まで膜の科学・技術に関心をお持ちの皆様のご参加とご発表（口頭およびポスター発表）をお待ちしております。詳細は膜学会ホームページ（<http://maku-jp.org/>）にてお知らせいたします。会員でない皆様も、これを機に是非ともご参加、ご発表頂きたく案内申し上げます。また、学生による優秀な発表に対し学生賞を設けていますので、ふるって応募して下さい。ただし、学生賞の審査対象はポスター発表に限ります。

記

開催日程：2017 年 5 月 26 日(金)、27 日(土)

開催会場：早稲田大学（西早稲田キャンパス 63 号館）

主 催：日本膜学会

共 催：早稲田大学

日本膜学会第 39 年会プログラム

●人工膜特別講演

「イオン液体と膜科学の接点」

大野弘幸先生（東京農工大学）

●生体膜特別講演

「膜タンパク質の構造生理学」

藤吉好則先生（名古屋大学）

◆人工膜シンポジウム 1 「膜による水処理技術を展望する VIII～新しい水処理膜への挑戦～」

オーガナイザー：川勝孝博（栗田工業）、熊野淳夫（東洋紡）、赤松憲樹（工学院大学）

◆人工膜シンポジウム 2 「ナノファイバーが創る機能膜」

オーガナイザー：川上浩良（首都大学東京）

◆人工膜シンポジウム 3 「膜分離法による CO₂ 分離回収技術」

オーガナイザー：谷口育雄（九州大学）

◆生体膜シンポジウム 「生命を操る生体膜機構～膜形態と細胞機能制御の最前線～（仮）」

オーガナイザー：中瀬生彦（大阪府立大学）

◆境界領域シンポジウム 「ハイドロゲル ―その理論と材料開発―」

オーガナイザー：伊藤大知（東京大学）、大橋秀伯（東京農工大学）

問合せ先 日本膜学会事務局第 39 年会係 〒113-0033 東京都文京区本郷 5-26-5-702

Tel&Fax：03-3815-2818、E-mail：membrane@mua.biglobe.ne.jp

日本膜学会 会長 高野 幹久

日本膜学会第 39 年会組織委員長 岡村恵美子

同 副組織委員長 川上 浩良

追 悼

William A. Steele 教授のご冥福をお祈りして

Steele 教授 (Penn State University 名誉教授) が 1 月 19 日にご逝去された。昨年 K. S. W. Sing 教授のご不幸をお知らせしたばかりで、極めて残念である。Steele 教授は 1954 年に University of Washington で PhD を取得され、翌年から Penn State University で研究を継続された。アメリカの教授は大学を幾つか移動することが多いが、Steele 教授は我が国の教授のように永きにわたって State College に住んで、吸着の基礎を研究された。Steele 教授はアメリカ化学会の J. Phys. Chem. の Associate editor その後 Langmuir の editor を務めた。初代の Langmuir の editor が A. Adamson 教授であったので、Langmuir 発刊の初期は吸着科学の発展に寄与されたお二人が editor であったわけである。

分子とグラファイトとの $10-4-3$ ポテンシャルを Steele ポテンシャルと呼ぶので、Steele 教授の名前は吸着科学に浸透している。特に分子シミュレーションを扱っている方はよくご存知と思う。Steele 教授は若い頃 Halsey 式で知られる Halsey 教授と仕事をしていたようであるが、物理吸着を今でいうイメージ化したかったようである。Steele 教授は今のようコンピュータが便利でない時代から、グラファイトの基底面をモデル表面として分子の物理吸着の分子過程を解明する仕事を続けられた。グラファイトの基底面は極めて滑らかで単純であり、表面の汚れの効果も少ないことからモデル表面として取り上げてこられた。私が吸着の研究を始めた 1980 年代後半に、Steele 教授、Nicholson 博士、Gubbins 教授らによって分子シミュレーションが活発に物理吸着研究に取り入れられた。国際会議に出るとその頃の私には全く別世界の科学かと思われた。私自身は Steele 教授のもとに留学をした訳ではないが、Steele 教授とは親しく交流させて頂いた。千葉大学にも 3 度ほど来てもらったと思う。学生達にもずいぶん刺激を与えてくれた。いつだったか 11 月に彼を訪ねた時に、彼の家族とニューヨークから呼んで戴いたピアノで、ホーム演奏会を開いてくれたのは私には夢のようであった。

分子シミュレーション関係ではナノチューブ用に Steele 関数を変えたものを作って戴き、J. Phys. Chem. に共同論文で発表させて頂いた。彼の著書 The Interaction of gases with solid surfaces (Pergamon, 1974) をアマゾンで漸く手に入れた時の感激を思い出す。

2017 年 1 月

信州大学環境・エネルギー材料科学研究所 特別特任教授
金子 克美

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。

(平成 28 年 4 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	大阪ガスケミカル株式会社
オルガノ株式会社	カルゴンカーボンジャパン株式会社
カンタクローム・インスツルメンツ・ジャパン合同会社	
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
JFE スチール株式会社	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
株式会社西部技研	大陽日酸株式会社
谷口商会株式会社	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	日本たばこ産業株式会社
富士シリシア化学株式会社	フタムラ化学株式会社
マイクロトラック・ベル株式会社	
マイクロメリティックスジャパン合同会社	
三菱重工業株式会社	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 森口 勇 (長崎大学)

委 員 瓜田 幸幾 (長崎大学)

大場 友則 (千葉大学)

岡 伸樹 (三菱重工業株式会社)

近藤 篤 (東京農工大学)

田中 秀樹 (京都大学)

三輪 聡志 (栗田工業株式会社)

森貞真太郎 (佐賀大学)

山崎 誠志 (静岡理工科大学)

(五十音順)

Adsorption News Vol.30 No.4 (2017) 通巻 No.119 2017 年 2 月 10 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 瓜田 幸幾 (長崎大学)

Tel&Fax : 095-819-2668 E-mail : urita@nagasaki-u.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 Isamu MORIGUCHI

Graduate School of Engineering, Nagasaki University, 1-14 Bunkyo-machi,

Nagasaki 852-8521, JAPAN

Tel & Fax : +81-95-819-2669 E-mail : mrgch@nagasaki-u.ac.jp

Editor

Koki URITA, Nagasaki University

Tel & Fax : +81-95-819-2668 E-mail : urita@nagasaki-u.ac.jp

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