繊維系有機吸着剤の過渡的脱着特性*

稲葉英男^{*1}, 尾崎公一^{*1}, 堀部明彦^{*1}
下山力生^{*2}, 木田貴久^{*3}

Transient Desorption Characteristics of Fibrous Organic Adsorbent

Hideo INABA^{*4}, Koichi OZAKI, Akihiko HORIBE,
Rikio SHIMOYAMA and Takahisa KIDA^{*4} Okayama University, Dept. of Mechanical Engng. Tsushimanaka 3-1-1, Okayama, Okayama, 700-8530 Japan

An experimental investigation was performed to determine the transient desorption characteristics of a fibrous type organic adsorbent, which was composed of the bridged complex of sodium polyacrylate as a new kind of adsorbent. The test fibrous adsorbent was packed in a cylindrical vessel, and dry air was passed through it. The experiments were conducted under various conditions of air velocity, temperature, relative humidity and vessel length. As a result, the pressure loss for the packed bed of the test fibrous adsorbent showed a similar tendency to that for the packed bed of spherical particles. The mass transfer data was correlated by the modified Sherwood number, the Reynolds number, the Schmidt number, the ratio of desorbed water vapor mass to fibrous adsorbent mass, the nondimensional temperature and the ratio of vessel length to fiber diameter. Fourier number for the completion times of adsorption processes were also correlated by Reynolds number, and the ratio of desorbed water vapor mass to fibrous adsorbent mass, the nondimensional temperature and the ratio of vessel length to fiber diameter.

Key Words: Mass Transfer, Packed Bed, Organic Adsorbent, Water Vapor, Desorption

1. 緒言

近年, 省エネルギーや環境問題の観点から, フロン系冷媒を用いない低温排熱回収型機器の開発が急務となっている. 特に, 水(水蒸気)を作動冷媒とする吸着式冷凍機やデシカントクーリングシステムは, 環境調和型の省エネルギー機器として注目されている⁽¹⁾. この種の吸着剤を用いた従来の研究は, ゼオライト/水系, シリカゲル/水系⁽²⁾や活性炭/アルコール⁽³⁾に関する実験や数値計算による吸着平衡特性や吸着剤充填層の非定常特性に関する研究が報告されている. しかしながら, シリカゲルなど無機系の吸着剤を使用した吸着システムでは, 吸着・脱着過程の繰り返しによる吸着剤の劣化(微粒子化現象)による吸着能力の低下や通気抵抗の増大に伴う吸着システム性能の低減が問題とされてきた.

著者らは, このような無機系吸着剤にみられる性能劣化が無く, 吸着量の大きな繊維状の有機吸着剤であるポリアクリル酸ナトリウム架橋体に着目し, その吸着特性に関する基礎研究を行ってきた. 前報⁽⁴⁾においては, 繊維状有機吸着剤を用いた各種の冷凍・空調システム開発の基礎資料を得る目的より, 繊維状有機吸着剤充填層に一定温度・湿度・流速の湿潤空気を通気させた場合の, 水蒸気吸着特性および流動抵抗について定量的な検討を行った.

本研究においては, 水蒸気を吸着した繊維状有機吸着剤の再生過程に着目し, 繊維状吸着剤充填層に低湿度の空気を通気させた場合の非定常脱着特性および流動抵抗特性について実験的に検討したものである. 特に, この種の有機系吸着剤の基本的性質は現在のところあまり知られていないので, 前報の吸着特性と本脱着特性の対比を行いながら, マクロな立場で取り上げた吸着剤充填層の特徴を明らかにする.

本文中の主な記号

D : 空気と水蒸気の分子拡散係数, d_e : 等価直径, d_m : 繊維状有機吸着剤の平均直径, H : エンタルピー, L : 試験部充填層長さ, ℓ_m : 繊維状有機吸着剤の平均長さ, f_k : 無次元圧力勾配(式(3)), m_0 : 繊維状有機吸着剤の乾燥質量, m_w : 繊維状有機吸着剤の水蒸気吸着量, p : 圧力, RH : 相対湿度, u_0 : 空塔流速, Re : レイノルズ数(式(10)), Re_d : レイノルズ数(式(4)), S_f : 繊維状有機吸着剤1本当たりの表面積, S_{total} : 繊維状有機吸着剤の総表面積, Sc : シュミット数, Sh_m^* : 修正シャウウッド数(式(8)), T : 絶対温度, t_f : 脱着完了時間, x : 吸着剤充填層入口からの流動方向距離

ギリシャ文字 ε : 空隙率, θ : セルシウス温度, ν : 動粘性係数, ρ : 水蒸気密度, ρ_0 : 繊維状有機吸着剤の見掛けの乾燥密度, ϕ : 繊維状有機吸着剤の形状係数

添字 0: 初期における吸着剤の周囲空気, f : 繊維, 又は脱着完了, in : 流入空気, s : 飽和, sat : 平衡状態, w : 水蒸気, $*$: 修正無次元数

* 原稿受付 1998年6月29日.

^{*1} 正員, 岡山大学工学部(〒700-8530 岡山市津島中3-1-1).^{*2} 学生員, 岡山大学大学院.^{*3} 正員, 日本エクスラン工業(株)(〒704-0080 岡山市金岡東町3-3-1).

E-mail: inaba@mech.okayama-u.ac.jp

2. 繊維状有機吸着剤の特徴

本繊維状有機吸着剤は、ポリアクリル酸ナトリウム架橋体にバインダーを加えて繊維状に整形したもので、水蒸気吸着サイトであるカルボン酸ナトリウム基 ($-\text{COONa}$) を含有する。この種の有機吸着剤は吸着サイトに水蒸気を多層吸着するもので、その架橋体構造が吸着剤の変形に対する柔軟性を保つことが可能なことより、より多くの水蒸気を吸着サイトに吸着することができる特徴を有する。なお、本繊維状有機吸着剤は水蒸気の吸・脱着に伴い膨潤・収縮し、 $p_w/p_s = 0 \sim 84\%$ において、繊維平均直径 d_m は $20.1 \sim 22.4 \mu\text{m}$ 、繊維平均長さ ℓ_m は $41.6 \sim 51.3 \text{ mm}$ の範囲で変化する⁽⁴⁾。その際の体積増加率 $\Delta V_{fm}/V_{f0}$ は、無次元吸着量 m_w/m_0 に対して直線的に増大し、以下の式にて表される⁽⁴⁾。

$$\frac{\Delta V_{fm}}{V_{f0}} = 0.505 \frac{m_w}{m_0} \quad (1)$$

ここで、 V_{fm0} は乾燥時における平均繊維体積、 V_{fm} は各相対湿度条件における平均繊維体積、 m_0 は乾燥時の繊維状有機吸着剤の質量、 m_w は吸着した水蒸気の質量である。また、本繊維状有機吸着剤の無次元吸着量 m_w/m_0 は、相対湿度 p_w/p_s および無次元温度 T/T_0 ($T = \theta + T_0$, $T_0 = 273.15 \text{ K}$) の関数として、平均偏差 5.0% にて次式(2)で表される⁽⁴⁾。

$$m_w/m_0 = f \{ 2.00(p_w/p_s) - 6.06(p_w/p_s)^2 + 9.07(p_w/p_s)^3 - 3.93(p_w/p_s)^4 \} \quad (2)$$

$$f = \begin{cases} 1 & (T/T_0 \leq 1.11) \\ 1.74(p_w/p_s)^{0.188} (T/T_0)^{-3.88} & (T/T_0 \geq 1.11) \end{cases}$$

適用範囲: $T/T_0 = 1.02 \sim 1.26$ ($\theta = 5 \sim 70^\circ\text{C}$), $p_w/p_s = 0.11 \sim 0.88$ 。

3. 実験装置および方法

実験装置および方法は、前報⁽⁴⁾と同様であるので、主要な点のみを述べる。オイルレス式コンプレッサーからの作動流体としての圧縮空気は、水冷式アフタークーラーにて冷却後、平均径 $0.3 \mu\text{m}$ および $0.01 \mu\text{m}$ の二つのフィルターを介して、湿度制御部へ至る。湿度制御部は、膜式除湿器と湿式加湿器から構成しており、所定の空気湿度条件を得る構造になっている。温度制御部は、ワイヤー型の電気ヒーターから構成し、所定の空気温度を得る構造になっている。このように温度・湿度を制御した空気は、浮子式流量計にて空気流量を測定後試験部へ送られる。

図1に試験部の詳細を示す。試験部はポリカーボネイト樹脂製の円筒容器(全長 $660 \text{ mm} \times$ 内径 $105 \text{ mm} \times$ 外径 115 mm) であり、内部には繊維状有機吸着剤(見

Fig.1 Detail of test section

掛け密度 209.8 kg/m^3 、乾燥時) が充填されている。繊維状有機吸着剤はその両端をステンレス製の金網で保持されており、この金網の間隔を調節することにより、試験部充填層長さが $L = 60 \sim 600 \text{ mm}$ で設定可能になっている。また、繊維状有機吸着剤は水蒸気脱着時に収縮するため、試験部内壁近傍に間隙を生じないように独立気泡型のスポンジ(厚さ 10 mm) をライニングしてある。試験部充填層内には K 型熱電対(測定精度 $\pm 0.1 \text{ K}$) が、試験部円筒容器の円筒中心線上に、空気の流れ方向に 6 点設置されている。試験部出入口には、素線径 0.1 mm の K 型サーモパイル(測定精度 $\pm 0.05 \text{ K}$) および湿度センサ(測定精度 $\pm 2\% \text{ RH}$) を設置した。試験部外壁上部には、直径 1 mm の静圧孔が空気流れ方向に 50 mm 間隔で 6ヶ所設けられており、試験円筒容器における静圧分布の測定を各孔に接続したマンオメーターにより行った。また、空気の試験部に対する単位時間当たりの流入エンタルピー H_{in} と流出エンタルピー H_{out} は、それぞれの空気流量、温度そして湿度の測定値と比熱の関係から算出した。繊維状吸着剤のエンタルピー H_f は、試験部内 6ヶ所設けた熱電対の温度情報等から求めた。吸着水のエンタルピー H_w は、ある時間間隔で吸着剤充填層全質量の測定差から脱着水量を求め、水の比熱と層内の平均温度より算出した。試験円筒容器のエンタルピー H_c は、円筒容器の温度測定値とその比熱および質量から求めた。さらに、試験部からの熱損失に伴う単位時間当たりのエンタルピー H_{loss} は、試験部外壁に取り付けた熱流束センサーからの情報から算出した。なお、予備実験の結果、空気の流入エンタルピーと他のエンタルピーのバランスの結果から、本実験における熱エネルギー保存は十分達成しているものと判断した。

繊維状有機吸着剤充填層からの水蒸気の脱着量 m_w は、三方弁の切り替えにより空気流をダミー試験部へ送風した後、迅速に試験部である吸着剤充填層を取り外し、電子天秤(分解能 0.01 g) で測定した。脱着量測定後再び迅速に吸着剤充填層を取り付け、三方弁の切り替えに

Fig.2 Time histories of $\Delta p/L$, (m_w/m_0) and ε

より空気流を試験部に導き実験を再開した。尚、脱着が急に進行する実験初期においては、水蒸気脱着量を数十分毎に測定し、脱着過程が緩慢となるに従い、測定間隔を長くした。

4. 実験結果及び考察

4.1 圧力損失特性

図2は、圧力損失勾配 $\Delta p/L$ 、空隙率 ε 、無次元吸着量 (m_w/m_0) の経時変化を、吸着剤充填層長さ $L = 60$ mm、初期温度 $\theta_0 = 30^\circ\text{C}$ 、初期相対湿度 $(p_w/p_s)_0 = 80\%$ 、流入空気温度 $\theta_{in} = 30^\circ\text{C}$ 、流入空気の相対湿度 $(p_w/p_s)_{in} = 3\%$ 、空塔流速 $u_0 = 0.357$ m/s の実験条件について示したものである。なお、空隙率 ε は、無次元吸着量 m_w/m_0 の測定値と繊維状有機吸着剤の体積変化に関する式(1)を用いて算出している。

図2において、吸着剤充填層出入口の圧力勾配 $\Delta p/L$ は、実験初期に大きく減少した後、時間の経過とともに減少割合を低下させ、実験開始約6時間後にほぼ一定値に達する。この $\Delta p/L$ 値の低下は、水蒸気の脱着に伴う繊維状有機吸着剤の収縮に関係するものと考えられる。この種の繊維状有機吸着剤は、吸着サイトであるカルボン酸ナトリウム基へ水蒸気が多層吸着するもので、その架橋構造が水蒸気の吸着・脱着に伴う大幅な体積膨張・収縮を可能とする複雑な体積変化を伴う。このような繊維状吸着剤の繊維構造を取り込んだ流動抵抗評価法の一つとして、従来から繊維状物質に関しても適用可能とされる、等価直径理論⁽⁵⁾を用いた繊維状有機吸着剤充填層の脱着過程における圧力損失に関する実験データの整理を試みた。

図3は、球状粒子充填層の圧力損失特性の実験整理法⁽⁵⁾を参考に、繊維状有機吸着剤充填層の圧力損失に関する無次元整理を行ったものである。ここで、 f_k および

Fig.3 Nondimensional pressure drop data

$Re_d/(1-\varepsilon)$ は次式にて定義される。

$$f_k = (\Delta P/L) \phi d_e \varepsilon^3 / \{\rho_a u_0^2 (1-\varepsilon)\} \quad (3)$$

$$Re_d/(1-\varepsilon) = u_0 \phi d_e / \{\nu_a (1-\varepsilon)\} \quad (4)$$

なお、繊維状有機吸着剤の等価直径 $d_e = (3\ell d_m^2/2)^{1/3}$ および形状係数 $\phi = \pi d_f^2/S_f$ 、 S_f は繊維状有機吸着剤一本当たりの表面積)は、無次元吸着量 m_w/m_0 の測定値を式(1)に代入して算出している。また、図3中には、球状粒子充填層の圧力損失特性⁽⁵⁾を破線にて、繊維状有機吸着剤充填層の吸着実験時の圧力損失に関する次式⁽⁴⁾を一点鎖線にて併記している。

$$f_k = 2.4 \times 10^2 \{(1-\varepsilon)/Re_d\}^{0.81} (1-1.2\varepsilon) \quad (5)$$

図3の破線で示す球状粒子充填層(空隙率 $\varepsilon = 0.3 \sim 0.42$)の圧力損失特性と参考までに本繊維状有機吸着剤(空隙率 $\varepsilon = 0.71 \sim 0.79$)の実験結果を比較すると、両者の基本的構造上の違いにより両者の f_k の値には差が見られるが、 f_k の $Re_d/(1-\varepsilon)$ に対する変化割合はほぼ等しく、繊維状吸着剤における空隙率 ε の f_k への依存性も本整理法で十分表現できる結果となっている。しかしながら、球状粒子を均一に充填した破線で示す f_k よりも、本繊維状吸着剤の脱着過程における f_k 値が小さくなっている。前掲の式(1)で表した本繊維状吸着剤の水蒸気吸脱着に伴う体積変化そして脱着量測定時の可視観察から繊維状吸着剤層の収縮現象による局所的に充填状態の疎な領域の形成が認められ、その結果本繊維状吸着剤における f_k の値が均一充填である球状粒子の場合よりも低下したものと判断される。

また、一点鎖線にて示す吸着実験時の圧力損失特性と、脱着実験に関する本実験結果を比較すると、両者の傾向には良い一致が認められるが、 ε と $Re_d/(1-\varepsilon)$ を固定した場合には、 f_k の本実験値は吸着時に関する一点鎖線に比べて約20%程度小さい値となる。これは、水蒸気を脱

Fig.4 Time histories of measured parameters

着しながら吸着剤が収縮している場合と、水蒸気を吸着しながら吸着剤が膨潤している場合とでは、同一の空隙率 ε においてもその充填状態に差が生じるためと考えられる。すなわち、脱着に伴う繊維状吸着剤の収縮現象が充填円筒容器内壁に取り付けたスポンジライニング層近傍での吸着剤の充填密度が小さくなり、結果的に吸着過程で繊維体積膨潤の場合よりも流動抵抗の低減となる。このように繊維状物質の体積変化の過程に起因する特有の流動抵抗の変化が理解できる。一方、 f_k の本実験結果に及ぼす繊維状有機吸着剤充填層長さ L および温度 θ の影響は、ほとんど観察されなかった。

繊維状有機吸着剤の無次元圧力損失 f_k に関する本実験結果を最小二乗法にて整理することにより、次式 (6) を得た。

$$f_k = 1.9 \times 10^2 \{(1 - \varepsilon)/Re_d\}^{0.81} (1 - 1.2\varepsilon) \quad (6)$$

適用範囲: $Re_d = 3.6 \sim 18$, $\varepsilon = 0.71 \sim 0.79$

4.2 脱着特性

4.2.1 諸測定値の経時変化

図 4 は、温度 θ 、相対湿度 p_w/p_s 、無次元吸着量 m_w/m_0 の経時変化を、流入空気温度 $\theta_{in} = 30^\circ\text{C}$ 、流入空気の相対湿度 $(p_w/p_s)_{in} = 3\%$ 、空塔流速 $u_0 = 0.355 \text{ m/s}$ 、吸着剤充填層長さ $L = 60 \text{ mm}$ 、初期温度 $\theta_0 = 30^\circ\text{C}$ 、初期相対湿度 $(p_w/p_s)_0 = 40\%$ の条件について示したものである。

図 4 において、流出空気の相対湿度 $(p_w/p_s)_{out}$ は、実験開始直後に高い値を示し、その後は緩やかに減少し、約 2 時間後には流入空気の相対湿度 $(p_w/p_s)_{in}$ にほぼ一致する。流出空気の温度 θ_{out} に関しても、実験開始直後に約 20°C にまで急激に降下した後に緩やかに上昇し、流入空気の温度 θ_{in} へと近づく。また、無次元吸着量 (m_w/m_0) に関しても、実験初期に大きく減少した後、時間の経過

Fig.5 Time histories of each enthalpy

とともに減少割合が低下し、実験開始約 2 時間以降では一定値となる。上述の実験結果より、繊維状有機吸着剤への水蒸気吸着量 (m_w/m_0) が大きい実験初期においては、脱着現象の起動力となる繊維状有機吸着剤と流動湿潤空気との水蒸気濃度差が大きいため、脱着現象が急速に進行するが、繊維状有機吸着剤への水蒸気吸着量 (m_w/m_0) の低下と共に繊維状有機吸着剤表面近傍の水蒸気濃度が減少し、物質伝達に有効な水蒸気濃度差が小さくなるため脱着速度が低下し、最終的には平衡状態に至ることが理解できる。この初期の脱着量の急激な増大は、主に吸着サイト周囲に形成される濃度境界層を介しての外部拡散に支配されるもので、その後の吸着量の低減は、吸着サイトに形成される水蒸気が多層吸着特性に支配される内部拡散によるものである⁽¹⁾。さらに、吸着剤充填層内部の温度 (図 4 中の記号 $\theta_1 \sim \theta_6$) について詳細に観察すると、吸着剤充填層内部の温度 $\theta_1 \sim \theta_6$ は、いずれも実験開始直後に大きく低下した後に徐々に上昇し、最終的には流入空気の温度に等しくなる。なお、この際の温度上昇は、吸着剤充填層の入口からの距離とは必ずしも一致しないものとなった。これは、図 3 の圧力損失特性でも述べたように、繊維状有機吸着剤は水蒸気の脱着時に収縮を生じるため、充填状態の疎な領域が形成されて偏流を生じたものと考えられる。

図 5 は、図 4 の実験条件における、流入空気による積算流入エンタルピー $\Sigma H_{in}\Delta t$ 、流出空気による積算流出エンタルピー $\Sigma H_{out}\Delta t$ 、繊維状吸着剤のエンタルピー変化 ΔH_f 、吸着水のエンタルピー変化 ΔH_w 、試験円筒容器のエンタルピー変化 ΔH_c 、および周囲環境への積算熱損失量 $\Sigma Q_{loss}\Delta t$ の経時変化を示したものである。周囲環境への積算熱損失量は、実験装置の項で説明したように試験円筒容器に取り付けた熱流束センサーから得られた熱損失を時間積分して算出してある。なお、 ΔH_w の算出に際しては、吸着水の比熱が水に等しいと仮定してある。

Fig.6 Effect of initial moisture of the adsorbent

図5において、流入空気による積算流入エンタルピ $\sum H_{in}\Delta t$ と流出空気による積算流出エンタルピ $\sum H_{out}\Delta t$ はほぼ等しいことより、吸着剤充填層における湿潤空気の状態変化は概ね等エンタルピ変化と見なせる。繊維状吸着剤のエンタルピ変化 ΔH_f は、実験初期における急激な温度低下に伴い一時的に減少するが、その後は繊維状吸着剤の温度上昇に伴い緩やかに増大する。吸着水のエンタルピ変化 ΔH_w は、実験初期には大きく低下するが、その後は徐々に減少割合をし、最終的には一定値となる。試験円筒容器のエンタルピ変化 ΔH_c は、実験初期の急激な脱着の際の吸熱による温度降下のために低下し、その後は徐々に増加する。また、周囲環境への積算熱損失量 $\sum Q_{loss}\Delta t$ は、時間の経過に伴い単調に増大するが、その値は流入空気による積算流入エンタルピ $\sum H_{in}\Delta t$ や流出空気による積算流出エンタルピ $\sum H_{out}\Delta t$ に比較して、二桁以上小さいものであった。

(a) 吸着剤の初期湿度の効果

図6は、初期相対湿度を $(p_w/p_s)_0 = 80\%$ に設定し、その他の実験条件を図4とほぼ同じ(初期温度 $\theta_0 = 30^\circ\text{C}$, 流入空気の温度 $\theta_{in} = 30^\circ\text{C}$, 流入空気の相対湿度 $(p_w/p_s)_{in} = 3\%$, 空塔流速 $u_0 = 0.355\text{ m/s}$, 吸着剤充填層長さ $L = 60\text{ mm}$)とした場合の実験結果を示す。

図6と図4を比較すると、定性的には同様な傾向を示しているが、流出空気の温度 θ_{out} および吸着剤充填層内部の温度 $\theta_1 \sim \theta_6$ の温度降下は、初期相対湿度 $(p_w/p_s)_0$ が大きい図6の方が大きくなる。これは、繊維状有機吸着剤の初期相対湿度と流入空気の相対湿度の差 $\{(p_w/p_s)_0 - (p_w/p_s)_{in}\}$ が大きい場合には脱着速度が増大し、多量の吸着熱を空気流から吸収するためと考えられる。また、実験開始より吸着平衡に達するまでの時間に着目すると、 $(p_w/p_s)_0 = 40\%$ に関する図4では約2時間であるのに対して、 $(p_w/p_s)_0 = 80\%$ に関する図6では約6時間となっている。このことより、実験初期吸着剤の相

Fig.7 Effect of inlet air velocity

Fig.8 Effect of adsorbent layer length

対湿度 $(p_w/p_s)_0$ の増加と共に脱着完了時間が大きくなることがわかる。

(b) 流入空気流速の効果

図7は、空塔流速を $u_0 = 0.178\text{ m/s}$ に設定し、その他の実験条件を図6とほぼ同じ(初期温度 $\theta_0 = 30^\circ\text{C}$, 初期相対湿度 $(p_w/p_s)_0 = 80\%$, 流入空気の温度 $\theta_{in} = 30^\circ\text{C}$, 流入空気の相対湿度 $(p_w/p_s)_{in} = 3\%$, 吸着剤充填層長さ $L = 60\text{ mm}$)とした場合の実験結果を示す。

図7と図6を比較すると、定性的には同様な傾向を示しているが、流出空気の温度 θ_{out} および吸着剤充填層内部の温度 $\theta_1 \sim \theta_6$ の上昇は、空塔流速 u_0 の小さい場合である図7の方が小さくなる傾向にある。また、図7空塔流速 u_0 の小さい場合においては、実験開始後約10時間経過後においても脱着平衡に達しないことより、空塔流速 u_0 の減少に伴い脱着完了時間が増大することが理解できる。これは、空塔流速 u_0 の低下に比例して、吸着剤充填層へと流入する水蒸気量が減少することや、吸着剤表面における物質伝達率が減少することなどが主な原因と考えられる。

(c) 吸着剤充填層長さの効果

Fig.9 Effect of initial temperature of the adsorbent

図8は、吸着剤充填層長さを $L = 600$ mm とし、その他の実験条件を図4とほぼ同じ(初期温度 $\theta_0 = 30$ °C, 初期相対湿度 $(p_w/p_s)_0 = 40$ %, 流入空気温度 $\theta_{in} = 30$ °C, 流入空気の相対湿度 $(p_w/p_s)_{in} = 2$ %, 空塔流速 $u_0 = 0.355$ m/s)とした場合の実験結果を示す。

図8において、吸着剤充填槽内における空気温度降下の最大値は約13 °Cであり、吸着剤充填層長さ $L = 60$ mm に関する図4に比べて大きな値を示した。これは、吸着剤充填層長さの増加に伴い、流動空気と吸着剤の熱・物質伝達量が増大したためと考えられる。また、 L が大きい場合の図8においては、吸着平衡に達するまでの時間は約30時間となっていることから、 L の増大に伴い吸着完了時間の大きくなることが理解できる。これは、 L の増大に伴い吸着剤の充填量が増加し、吸着完了までに吸着する水蒸気量が増大することが主な原因と考えられる。

(d) 吸着剤の初期温度の効果

図9は、流入空気温度を $\theta_{in} = 50$ °C, 初期温度を $\theta_0 = 50$ °C とし、その他の実験条件を図4とほぼ同じ(初期相対湿度 $(p_w/p_s)_0 = 40$ %, 流入空気の相対湿度 $(p_w/p_s)_{in} = 2$ %, 空塔流速 $u_0 = 0.358$ m/s, 吸着剤充填層長さ $L = 60$ mm)に設定した場合の実験結果を示す。

図9と図4を比較すると、初期および流入空気温度が高い場合の図9においては、流出空気温度 θ_{out} の最大温度降下量は約18 °Cであり、実験開始初期および流入空気温度の増加と共に、温度降下量が増大することが理解できる。これは、相対湿度が一定の条件においては、物質伝達の起動力となる初期の吸着剤と流入空気の水蒸気濃度差が、温度の上昇と共に増大するためと考えられる。また、図9の条件においては、約3時間で平衡状態に到達していることから、初期および流入空気温度の低い図4に比較して、短時間に吸着平衡に至ることが理解できる。この原因としては、前述の水蒸気濃度差の

増大に伴う物質伝達速度の増大に加え、前報⁽⁴⁾で述べた本吸着剤の特徴である温度上昇に伴う無次元吸着量の低下、すなわち、水蒸気の総脱着量の減少が考えられる。

4.2.2 物質伝達特性および脱着完了時間の整理

(a) 物質伝達特性の整理

前節で述べたように、本研究で対象とした繊維状有機吸着剤は、ポリアクリル酸ナトリウム基を水蒸気の吸着サイトとした多層吸着系であり、その架橋構造が水蒸気の吸着に伴う大幅な吸着剤の変形を可能とする複雑な吸脱着現象を持つものである。繊維状態を保つバインダーの添加などで複雑な構造を有しており、水蒸気の吸脱着速度に影響を及ぼす気孔率や気孔径などの因子の情報は未だ十分に得られていない。さらに、繊維状有機吸着剤充填層の脱着過程においては、水蒸気の脱着量、温度、湿度や吸着剤の密度や構造等も空気の流動方向や時間と共に変化する。通常行われている定常状態における物質伝達係数を算出には困難を伴うので、ここでは従来この種の非定常状態における物質伝達係数の算出方法として次式(7)で提案されている実験開始より脱着完了までの平均値を採用する有効物質伝達係数 h_m^* の概念⁽⁶⁾を用いて本実験値の整理を試みた。

$$h_m^* = \frac{(\Delta m_w)_{t_f}}{t_f S_{total} \rho_{w0} - \rho_{in}} \quad (7)$$

ここで、 $(\Delta m_w)_{t_f}$ は実験開始から脱着完了時間 t_f までの水蒸気脱着量、 S_{total} は繊維状有機吸着剤の総表面積、 ρ_{in} は流入空気の水蒸気濃度、 ρ_{w0} は初期条件における水蒸気濃度である。なお、本研究においては、実験開始からの水蒸気脱着量 (m_w) が、初期の水蒸気吸着量 $(m_w)_0$ と流入空気温度および相対湿度条件における平衡吸着量 $(m_w)_{sat}$ の差 $\Delta m_w (= (m_w)_0 - (m_w)_{sat})$ の90%に達するまでに要した時間として、脱着完了時間 t_f を定義した。これは、図4～図9の実験結果で観察されたように、 (Δm_w) の90%に達した時点においては、吸着剤充填層における温度および湿度の変化が小さくなるため、熱機器としては有効に動作しないものと考えられるからである。また、上述の見掛けの物質伝達係数に基づき、修正シャープウッド数 Sh^* を次式にて定義した。

$$Sh^* = h_m^* L / D \quad (8)$$

また、脱着完了時間を表す修正フーリエ数 Fo^* およびレイノルズ数 Re を以下のように定義した。

$$Fo^* = D t_f / L^2 \quad (9)$$

$$Re = u_0 L / D \quad (10)$$

 Fig.10 Variation of Sh^* with Re

 Fig.11 Variation of Fo^* with Re

図 10 は、無次元物質伝達係数 $Sh^*/Sc^{1/3}$ とレイノルズ数 Re の関係を、初期相対湿度 $(p_w/p_s)_0$ 、吸着剤充填層長さ L 、流入空気と実験開始初期の温度 θ (本実験では両者を同一に設定してある) をパラメータとして示したものである。なお、シュミット数 Sc への依存性については、従来の物質伝達特性を参考に $1/3$ 乗を仮定してある。

図 10 において、初期相対湿度 $(p_w/p_s)_0$ 、吸着剤充填層長さ L および温度 θ が一定の場合には、無次元物質伝達係数 $Sh^*/Sc^{1/3}$ はレイノルズ数 Re の増加に伴い増大することがわかる。また、無次元物質伝達係数 $Sh^*/Sc^{1/3}$ は、初期相対湿度 $(p_w/p_s)_0$ および吸着剤充填層長さ L の増加に伴い減少することが理解できる。

以上に述べた実験結果に基づき、本実験結果を最小二乗法にて整理することにより、物質伝達特性に関する次式 (11) を得た。なお、次式 (11) と本実験結果の平均偏差は 26 % である。

$$Sh^* = 1.7 \times 10^{-2} Re^{1.0} (T/T_0)^{-1.6} \times (L/de)^{-1.2} (\Delta m_w/m_0)^{-0.46} Sc^{1/3} \quad (11)$$

ここに、 $T = \theta + T_0$, $T_0 = 273.15$ K, 適用範囲: $Re =$

Fig.12 Comparison between desorption and adsorption characteristics

650 ~ 13000, $Sc = 0.6418 \sim 0.6554$, $(L/de) = 186 \sim 1930$, $\Delta m_w/m_0 = 0.12 \sim 0.67$, $(T/T_0) = 1.07 \sim 1.18$ である。

(b) 脱着完了時間の整理

図 11 は、修正フーリエ数 Fo^* とレイノルズ数 Re の関係を、初期相対湿度 $(p_w/p_s)_0$ 、吸着剤充填層長さ L 、流入空気の温度と初期温度 θ をパラメータとして示したものである。図 11 において、初期相対湿度 $(p_w/p_s)_0$ 、吸着剤充填層長さ L および温度 θ が一定の場合には、修正フーリエ数 Fo^* はレイノルズ数 Re の増加に伴い減少する。また、修正フーリエ数 Fo^* は、初期相対湿度 $(p_w/p_s)_0$ 、吸着剤充填層長さ L および温度 θ の増加に伴い減少することが理解できる。

本実験結果を最小二乗法にて整理することにより、修正フーリエ数 Fo^* に関する次式 (12) を得た。なお、本実験結果と次式 (12) の平均偏差は 15 % である。

$$Fo^* = 6.3 \times 10^4 Re^{-1.1} (T/T_0)^{-2.0} \times (L/de)^{0.18} (\Delta m_w/m_0)^{0.33} \quad (12)$$

適用範囲: $Re = 650 \sim 13000$, $L/de = 186 \sim 1930$, $\Delta m_w/m_0 = 0.12 \sim 0.67$, $T/T_0 = 1.07 \sim 1.18$

図 12 は、無次元吸着剤充填層長さ $L/de = 200$ 、無次元温度比 $T/T_0 = 1.1$ の場合を例に、脱着過程の Fo^* 数に関する式 (12) (実線) と前報⁽⁴⁾ で得た吸着過程に関する次式 (破線) を比較したものである。

$$Fo^* = 8.3 \times 10^4 Re^{-0.89} (T/T_0)^{-3.6} \times (L/de)^{-0.08} (\Delta m_w/m_0)^{0.53} \quad (13)$$

図 12 において、いずれの吸着割合差 $\Delta m_w/m_0$ に関しても、 Re 数が小さい範囲では吸着過程と脱着過程の Fo^* 数の差は小さいが、 Re 数が大きくなるにつれ脱着の方が小さな Fo^* 数となる。これは、 Re 数が小さな領域においては、空気流により吸着剤充填層に持ち込まれる (または吸着剤充填層より持ち去られる) 水蒸気量が吸脱着

完了時間を支配するが、 Re 数が大きな領域では吸着剤内部の物質拡散が支配的となることや、本吸着剤の吸着平衡量が高湿度領域で大きく変化することによる。

5. 結言

繊維状有機吸着剤を充填した円筒状容器の一端より低湿度空気を流動させた場合の、圧力損失特性および水蒸気の動的脱着特性に関する実験を行い、以下の結論を得た。

- (1) 繊維状有機吸着剤充填層の圧力損失は、空塔流速の増加と共に増大し、空隙率の増大と共に減少する。また、圧力損失特性に関する無次元整理式(6)を得た。
- (2) 本実験条件の範囲においては、吸着剤充填層における空気の状態変化は、概ね等エンタルピ的である。
- (3) 繊維状有機吸着剤の物質伝達係数は、空塔流速の増加に伴い増大するが、初期条件と流入空気の相对湿度差や、吸着剤充填層長さ、そして流入空気の温度を増大させた場合には減少する。また、物質伝達特性に関する無次元整理式(11)を得た。
- (4) 繊維状有機吸着剤の脱着完了時間は、空塔流速および流入空気の温度の増加と共に減少するが、初期条件と流入空気の相对湿度差、吸着剤充填層長さを増大させた場合には増大する。また、脱着完了時間に関する無次元整理式(12)を得た。
- (5) 繊維状有機吸着剤の脱着完了時間は、空塔流速が小さい場合には吸着完了時間にほぼ等しいが、空塔流速が大きい場合には吸着完了時間に比べて小さくなる。

参考文献

- (1) 例えば、日本伝熱学会編、エネルギー新技術体系、(1996)、781-789、(株)エヌ・ティー・エス。
- (2) Fedorov, A., and Viskanta, R., 伝熱研究, 36-140(1997), 4.
- (3) 渡辺, 他 3 名, 第 25 回日本伝熱シンポジウム講演論文集、(1988)、154.
- (4) Inaba, H., Thermal Science and Engineering, 6-1 (1998), 11.
- (5) Ergun, S., Chem. Engng. Prog., 48 (1952), 89.
- (6) 柳井, 吸着工学要論、(1997)、59-64、共立出版。