The Japan Society of Mechanical Engineers

日本機械学会論文集(B編)
67巻660号(2001-8)

論文 No. 00-0969

湿り空気による粉末状有機系収着剤流動層の水蒸気収着特性*

稲葉英男*1, 木田貴久*2, 堀部明彦*1
亀田澄広*3, 岡本民雄*3, 徐 貞 均*3

Water Vapor Sorption Characteristics of Powder Type Organic Sorbent in a Moist Air Fluidized Bed

Hideo INABA*4, Takahisa KIDA, Akihiko HORIBE,
Kiyohiro KAMEDA, Tamio OKAMOTO and Joung-kuen SEO

*4 Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University,
3-1-1 Tsushimanaka, Okayama-shi, Okayama, 700-8530 Japan

This paper has dealt with water vapor sorption characteristics of powder type organic sorbent bed by flowing a moist air. The powder type sorbent was fluidized in a rectangular vessel by the moist air flow. The sorption rate of vapor and the variation in temperature in the sorbent bed were measured under various air temperature and humidity conditions. It was found that the volume of the sorbent particles increased with in an increase in the amount of water vapor sorption. Finally, Sherwood number for water vapor mass transfer was expressed in terms of Reynolds number, the modified Stefan number, the ratio of sorbent particle diameter to fluidized bed height and Schmidt number.

Key Words: Sorption, Powder Type Organic Sorbent, Water Vapor, Fluidized Bed, Mass Transfer

1. 緒言

近年,都市部において冷暖房や給湯機器等からの排熱は,100℃以下の低温排熱として大量に周囲環境へ放出され,ヒートアイランド現象の主要因となっている.これらのエネルギー消費に伴う環境問題を解決する手段の一つとして環境負荷が小さく,同時に低温未利用熱エネルギーの回収利用可能な熱源機器の開発が熱望されている.水蒸気の潜熱回収可能な全熱交換器や水蒸気を作動流体とする吸着式冷凍機は,比較的低温度レベルの排熱を利用して運転可能な熱駆動型機器である.このことから次世代のヒートサイクルとして従来から開発が続けられてきた.しかしながら,現在低温排熱駆動ヒートサイクル用吸着剤として用いられているシリカゲルやゼオライト等の無機系吸着剤は,吸着・脱着操作の繰り返しにより,その顆粒状吸着剤粒子の微細化現象が起こり,吸着剤充填層内での水蒸気に対する流動抵抗の増大となる.その結果,水蒸気の物質および伝熱性能の低下となり,この種の装置の小型化を阻害している大要因となっている[1].

著者らは,このような無機系吸着剤に代わるものとして,高分子からなる有機系収着剤(ポリアクリル酸ナトリウム架橋体)の収着量の多さ,その収着剤の柔軟そして加工性の良さに着目し,繊維状に成形した収着剤[2]やハニカム状に加工した収着剤[3]のオープンサイクルにおける水蒸気の収着特性に関する基礎研究を報告してきた.本研究では,粉末状に加工した収着剤を充填した層に湿り空気を吹き込み,その粉末状収着剤充填層を流動層化した場合の粉末状収着剤の流動状態や水蒸気の収着特性に関する実験的検討を行うものである. 実験因子としては,収着剤充填層高さ,流動湿り空気の温度や湿度そして流速等を取り上げ,その収着剤の水蒸気および熱移動特性に及ぼすそれら実験因子の効果を検討するものである.

* 原稿受付 2000年8月7日.
*1 正員,岡山大学大学院自然科学研究科(〒700-8530 岡山市津島中3-1-1).
*2 正員,日本エクスラン工業(株)(〒704-8510 岡山市金岡東町3-3-1).
*3 正員,岡山大学大学院.
E-mail: inaba@mech.okayama-u.ac.jp

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Mechanical Engineers

本文中の主な記号

D：空気と水蒸気の分子拡散係数[m²/s]，d_m：有機系粉末状収着剤粒子の平均粒子径[m]，H：単位時間当たりのエンタルピー変化（$M\times h$）/(1+x)）[kJ/s]，h：比エンタルピー[kJ/kg']，h_m^*：有効物質伝達係数[m/s]，L_s：水蒸気の収着に伴う発生熱量[kJ/kg]，l：粉末状収着剤充填層高さ[m]，M：湿り空気の質量流量[kg/s]，m_0：乾燥状態にある収着剤質量[kg]，m_w：収着剤の収着水質量[kg]，Q：熱量[kJ]，Re：レイノルズ数，S：収着剤の表面積[m²]，Sc：シュミット数，Sh：シャーウッド数，Ste^*：修正ステファン数，T：絶対温度[K]，t：時間[s, hour]，t_f：収着完了時間[hour]，Δt：時間刻み[s]，u_0：空塔流速[m/s]，ΔP：圧力損失[Pa]，x：絶対湿度[kg/kg']

ギリシャ文字

ν：動粘性係数[m²/s]，ρ：水蒸気密度[kg/m³]，θ：セルシウス温度[℃]，ϕ：相対湿度

添字

a：空気，in：入口，ini：初期状態，o：氷点，out：出口，p：粉末状有機系収着剤，s：飽和，$test$：充填層内，w：水蒸気，wo：粉末状有機系収着剤周囲空気の水蒸気状態.

2．有機系粉末状吸着剤の外観及び化学構造

本粉末状有機系収着剤（以下粉末状収着剤と呼ぶ）は，ポリアクリル酸ナトリウム架橋体を粉末状に加工成形したものであり，水蒸気の収着サイトとしてカルボン酸ナトリウム基(-COONa)を含有するものである．ポリアクリル酸ナトリウム架橋体は，4個の窒素原子を持つテトラジンを架橋点とした三次元網目構造を形成するもので，カルボン酸ナトリウム基のナトリウム原子の周囲に水蒸気が結合する．ポリアクリル酸ナトリウムの鎖状結合を有する高分子群がテトラジンを架橋点として膨潤しながら水蒸気がその内部へ浸透するようになる．このように，高分子架橋体が変形しながら，その周囲に水蒸気が比較的弱い結合力で付着する現象を収着(Sorption)[4]といい，比較的低温での脱着(Desorption)が可能であり，その収着熱も水蒸気の凝縮熱（L_s = 2500kJ/kg）とほぼ同じである．図1は，粉末状収着剤の外観を示したものである．粉末状収着剤は，ナトリウムを含有していることからピンク色を示し，その多孔質構造内へ水蒸気が収着して収着剤が膨潤することになる．温度θ= 5 ～70℃の範囲における粉末状収着剤の径は，30～50μm 間に分布し，本実験条件範囲における平均粒子直径はd_m = 39 x10⁻⁶ m（μm）である．本粉末状収着剤の平衡収着特性を恒温恒湿槽内にて種々の温度や湿度条件のもとで測定した．図2は，測定結果を収着剤の収着した水分の質量 m_wと乾燥状態の収着剤質量 m_0の比で示される無次元収着割合 m_w/m_0 と相対湿度ϕの関係で示したものである．粉末状収着剤の無次元収着割合 m_w/m_0は，いずれの温度θにおいても，相対湿度ϕの増加と共に増大する傾向を示す．一方，無次元収着量は，温度の増加と共に減少する傾向がある．また，温度θ= 27℃において，粉末状収着剤とシリカゲルの収着特性を比較すると，全ての相対湿度領域において粉末状収着剤の方が多く収着することが理解できる．両者の差は，相対湿度ϕが増加するに従って大きくなり，相対湿度ϕ = 60%では 最大 1.8 倍程度の大きな値となる．

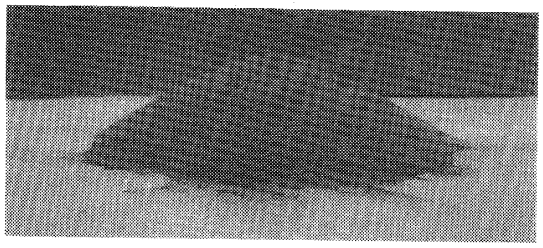

Fig.1 Appearance of powder type organic sorbent

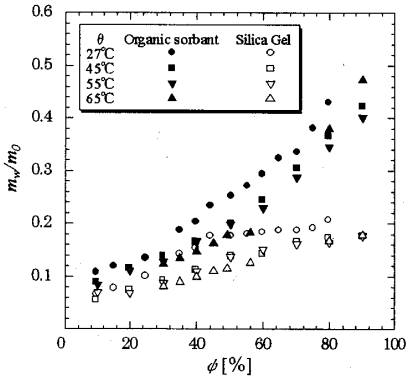

Fig.2 Variation of sorption particle diameter d_m with m_w/m_0

以上の結果をもとに，周囲空気の相対湿度ϕ，周囲空気の絶対温度Tと大気圧での氷点T_0= 273.15 K の比である無次元温度T/T_0の関数にて，粉末状収着剤の無次元収着割合 m_w/m_0の整理を行った結果，平均偏差9.4%にて整理できる次式を得た．

$$m_w/m_0=0.635\times(\phi/100)^{0.80}(T/T_0)^{-1.53} \quad \cdots\cdots\cdots (1)$$

なお，上式の適用範囲はϕ=2～88%，T/T_0=1.02～1.26（θ=5～70℃）である．

本粉末状有機系収着剤は収着および脱着に伴い，膨潤および収縮する特徴を有していることから，体積変化

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Mechanical Engineers

割合の測定を行った.

その平均粒子径 d_mは，主に無次元吸着割合 m_w/m_0に依存すると考えられるので，無次元吸着割合 m_w/m_0の関数で粉末状収着剤の平均粒子径 d_m [m]の変化を整理した結果，次式を得た.

$$d_m = 30.9\times10^{-6}(m_w/m_0)+30.1\times10^{-6} \quad \cdots\cdots (2)$$

なお,上式の適用範囲は $m_w/m_0=0.0 \sim 0.88$ である.

3.実験装置および方法

図3は実験装置の概略を示したものである．本実験装置は，所定の空気温度および湿度を得るための空気調整部と粉末状収着剤が充填される試験部⑧より構成されている．空気状態調整部は，①空気コンプレッサー，②空気清浄部，③膜式除湿器,⑤気泡塔式加湿器,⑥電気ヒーター加熱器および⑦浮子式流量計から主に構成されており，試験部入口空気温度は $\theta_{in}=0\sim80$℃そして空気相対湿度は $\phi_{in}=2\sim80$%の範囲内で制御可能である．オイルレス方式の空気コンプレッサー(2.5kW，最高圧力：0.8 MPa，最大吐出量：4×10^{-3} m^3/s)からの圧縮空気は，流量調整弁で所定の流量に調節された後，空気清浄部に入る．空気清浄部は，0.3μm 以上の塵埃が除去可能な②エアフィルターと 0.01 μm 以上の塵埃が除去できる②ミクロミストフィルターが順に設置されている．清浄された空気は，(A)湿度制御部そして(B)温度制御部を経て，試験部への入口空気温度や湿度が制御される．湿度制御部は，乾き空気を得るための③膜式除湿器，飽和湿り空気を作ることが可能な⑤気泡塔式加湿器およびこれらの乾きそして飽和空気の混合割合を調節する2つの④流量調整バルブより構成されている．膜式除湿器は，水蒸気透過性の高分子膜（ポリイミド製の中空糸膜）を用いて，流入した空気を除湿するものである．膜式除湿器で得た乾燥空気の一部を利用して高分子膜を乾燥させて一定の除湿能力を維持する構造になっている．除湿量の調整は，除湿器に戻す乾燥空気のパージ流量で行う．気泡塔式加湿器は，温水の満たされたステンレス製円筒容器の下方より分散板を介して空気を流入させ，空気泡が温水中を上昇する間に加湿される仕組みとなっている．なお，気泡塔式加湿器は，内部に設置された電気ヒータ出力をＰＩＤ制御することにより，任意の温度の飽和湿り空気が得られる構造となっている．また，低湿度条件での湿度コントロールには膜式除湿器のみを使用し，中・高湿度条件においては膜式除湿器と加湿器を併用した．結果として，本実験の湿度範囲では設定相対湿度に対して±0.5％以内での湿度制御が可能である．温度制御部は，周囲を厚さ 50mmの断熱材で覆われたステンレス製円管(長さ1m×内径 50mm)および最大出力 1.5 kWのステンレス保護管付き電気ヒータ⑥から構成されている．その電気ヒータは，ステンレス製円管内に渦巻き状に設置されており，通過する湿り空気を直接加熱する仕組みとなっている．なお，電気ヒータの出力は，試験部入口に設置した 直径 0.1 mm のK 型熱電対(測定精度±0.05 ℃)の起電力をもとに，ＰＩＤ制御により調整を行った．試験部入口空気温度は，設定温度に対して±0.5℃以内に制御することが可能である．これら一連の制御操作を経て所定の温度や湿度に設定した空気は，流量制御弁で流量の設定後，浮子式流量計（測定レンジ 1.2 ～6.0 m^3/s：測定精度±0.1 m^3/s）を介して，試験部底部へ導かれる．

図4は，粉末状収着剤が流動層化する試験部の詳細を示したものである．試験部は横幅 150 mm×奥行き 150 mmの正方形断面そして高さ 450 mmの透明アクリル製矩形容器（厚さ5 mm）で，その周囲は厚さ50mmの発泡系断熱材で覆われている．温度および湿度を調整した流入空気は，試験部下部に設けた分散板(ポリフロン製フィルター，開孔径2μm)を通過することで，均一な分散流入状態となり，粉末状収着剤充填層へ流動する．また，収着剤粒子の試験部外への飛散を防止するため，試験部上部にはポリフロンフィルター(開孔径2μm)を設置した．試験部出入口における空気温度および相対湿度は,それぞれ 直径 0.1mm のK型熱電対（測定精度±0.05℃）および高分子薄膜静電容量型湿度センサー（測定精度±0.5 %）により測定した．また，粉末状収着剤試料充填部には，収着剤充填層の局所温度を測定するのに必要なK型熱電対（素線直径 0.1mm，測定精度±0.05℃）を 4 本をステンレス製保護管にて支持したものを図4に示すように試験部断面中心線上に設置した．周囲環境への試験部からの単位時間当たりの損失熱量 Q_{loss}は，試験部壁両面に設置した6点の熱電対により試験部壁面温度の測定値と試験部壁材の熱伝導率等から算出した．試験部における圧力損失は,試験部入口および収着剤充填部側面に圧力タップを設け，これにマノメータ（測定精度±1 %以内）を接続して測定した．なお，粉末状収着剤充填層の正味の圧力損失 ΔP は，ポリフロンフィルターの圧力損失を予備実験で測定し，その値を除くことにより算出してある．収着剤への水蒸気の収着量は，試験部側面に取り付けた直径 15mmのシリコン栓付きサンプル抽出口より収着剤 0.5g程度を任意の時間間隔で取り出し，電子天秤(フルスケール 200g，最

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Mechanical Engineers

小目盛 1μg)にて質量測定後，ドライオーブンで乾燥処理(120℃，48時間乾燥)を施すことで算出した．

また，空気の粉末状収着剤に対する単位時間当たりの流入エンタルピー変化 H_{in} と流出エンタルピー変化 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および水蒸気の潜熱量の関係から算出した．任意の時間の時間刻み Δt における粉末状収着剤の熱量変化 ΔQ_f は，試験部内4ヶ所に設けた熱電対の温度情報等から求めた．任意の時間の時間刻み Δt における収着剤の収着水の熱量変化 ΔQ_w は，上述の収着量の測定結果，そして水の比熱と充填層内の平均温度より算出した．さらに，試験部からの熱損失に伴う単位時間当たりの損失熱量 ΔQ_{loss} は，上述の方法により算出した．なお，予備実験の結果，空気の流入エンタルピーと他の熱量の平衡関係から，本実験における熱エネルギーおよび物質平衡状態は十分に達成しているものと判断した．

実験は，以下の手順にて行った．まず，試験部の初期温度条件になるように，コンプレッサーからの空気温度を制御した乾燥状態の空気を試験部へ流入し，初期温度条件の確保後，試験部への送風を試験部入口の三方弁を切り替えて中断する．その後，所定の試験部入口空気条件になるように，空気状態制御系を操作し，その空気は三方弁を介してバイパス側へ排気する．その後，恒温恒湿槽で所定の温度・湿度条件に設定した粉末状収着剤を試験部へ迅速に充填後，試験部へ三方弁を切り替えて試験部へ所定の空気を流入し，収着実験を開始する．試験部および実験装置各部の空気温度および湿度は，分解能 0.1μV のデータ収録システムにて 30 秒間隔で測定した．粉末状収着剤への水蒸気収着量は，所定時間毎に三方弁を切り替えることで試験部への送風を一時的に中断し，試験部側面に取り付けられた試料抽出口より試料を抽出し，上述の手順にて算出を行った．収着剤試料抽出後，再び三方弁を切り替え試験部への送風を開始し，実験を再開した．

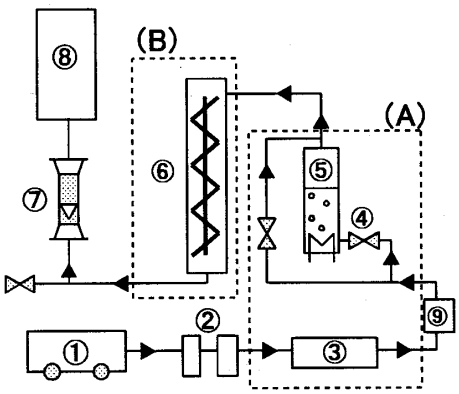

Fig.3 Schematic diagram of apparatus

4．実験結果とその考察

4·1 粉末状収着剤充填層の圧力損失特性

粉末状収着剤充填層の下部から空気を流入して流動層化する場合には，その流動層化条件を検討する必要がある．まず，空気の空塔速度(空気流量／試験部水平断面積) u_o が流動開始速度 u_{mf} (= 8.4×10^{-4} m/s) 以下[5]の場合には，本実験においても空気は収着剤充填層の空隙を流れるのみで，固定層状態を維持する様子が観察された．流動開始流速以上に流入空気の空塔速度を増大させるに伴い，粉末状収着剤充填層は収着剤粒子の循環を伴いながら膨潤する様子が観察された．さらに，空塔速度を増大すると充填層内に気泡群の発生を伴う気泡開始速度(u_{mb})を経て，最終的に空塔流速 u_t = 0.066 m/s で収着剤粒子の充填層外への飛散が見られた．これらの流動挙動は，収着剤粒子の直径や粒子密度の影響を大きく受ける．図5は，粉末状収着剤を高さ l=0.01mに充填し，空気を下部から流入し，収着材層を流動化した場合の圧力損失 ΔP と空塔空気流速 u_0 の関係をパラメーターに相対湿度 ϕ_{in} を採用して示したものである．ここでの各値は，所定湿度 ϕ_{in} の空気を長時間流動させて収着平衡に達した時点で得られたものである．また，図中の破線は，収着剤充填層を通過する流体の圧力損失と重力のつり合いより求められる固定層の理論式[6]，そして実線は，流動層状態における圧力損失に関する理論式[7]を示している．なお，ここで示した圧力損失 ΔP は，圧力損失の測定値から試験部出入口に設置した両ポリフロンフィルターの圧力損失を差し引いた収着剤充填層に関する正味の圧力損失である．図5より，本実験で測定した圧力損失 ΔP は空塔流速 u_o によらずほぼ一定値をとる．これは，完全流動層化状態が得られる流速範囲内で空塔流速条件を選択したためである．一方，空塔流速一定条件の場合，相対湿度 ϕ_{in} = 5%においては実線で示す理論値に近い値を示していることが分かる．しかしながら，相対湿度

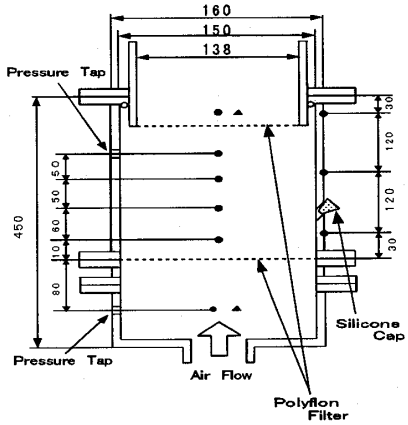

Fig.4 Detail of test section

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Mechanical Engineers

ϕ_{in} = 60%においては理論値に対して 60 Pa 程度大きな値を示すことが理解できる. この原因としては, 相対湿度の増大により収着剤の保持する水蒸気量が増加し, 収着剤の密度変化および収着剤表面に収着した収着水による収着剤粒子同士の付着力の増大による影響であると考えられる. また, 図 5 の結果より, 流動層化により圧力損失が固定層よりも 1 桁以上低減することから, 流動層型収着剤充填層を用いた収着法は, 粉末状有機系収着剤を低圧力損失のもとで収着できる有効な方法である.

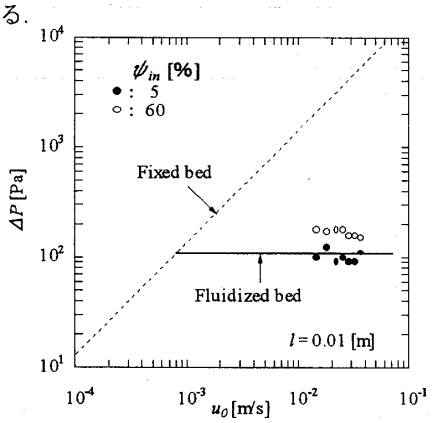

Fig.5 Relationship between ΔP and u_0

4·2 粉末状収着剤流動層の収着特性

図 6 は, 空気温度 θ, 相対湿度 ϕ そして無次元吸着割合 m_w / m_0 の経時変化を示したものである.なお, 図 6 に示す基本条件は, 充填層高さ l = 0.01m における粉末状収着剤層を温度 θ_{ini} = 30℃および 相対湿度 ϕ_{ini} = 5 %の初期条件に設定し, 入口空気温度 θ_{in} = 30℃および相対湿度 ϕ_{in} = 60% の湿潤空気を空塔流速 u_0 = 0.037m/ s で試験部へ流入した場合である. 図 6 に見られるように, 試験部出口空気の相対湿度 ϕ_{out} は, 実験開始直後大きく減少することより, 本粉末状収着剤が湿潤空気の除湿に有効なことが理解できる. その後, 試験部出口空気の相対湿度 ϕ_{out} は, 実験開始約 8 時間後まで増加し, その後,緩やかに増加割合が減少して約 13 時間後には入口空気相対湿度 ϕ_{in} に漸近する. また,試験部出口空気相対湿度 ϕ_{out} の経時変化に対応するように, 収着剤サンプルの抽出により算出した無次元吸着割合(m_w/m_0)は, 実験初期に大きく増加した後, 時間の経過とともに増加割合を減少させ, 実験開始約 13 時間後にはほぼ一定な値となり, 収着平衡に達する.この無次元収着割合(m_w/m_0)の変化挙動は, 以下のように説明できる. 実験開始直後, 収着現象の起動力となる粉末状収着剤と流動湿り空気との水蒸気濃度差が大きいため, 収着現象が急速に進行する. さらに粉末状収着剤への水蒸気収着量の増大と共に粉末状収着剤の水蒸気濃度が増大し, 粉末状収着剤と流動湿潤空気との水蒸気濃度差が小さくなるため, 水蒸気移動量が減少し, 最終的に収着平衡状態に至る.

また,試験部出口空気温度は, 実験開始直後 θ_{out} = 37.5 ℃と大きく上昇することより, 粉末状収着剤が収着過程で空気の昇温にも利用できることが分かる. その後, 試験部出口空気温度 θ_{out} は緩やかに減少し, 収着平衡となる約 13 時間後には試験部入口の空気温度 θ_{in} = 30 ℃にほぼ一致する. この試験部出口空気温度 θ_{out} の挙動は, 前述の試験部出口空気相対湿度 ϕ_{out} や粉末状吸着剤への無次元吸着割合 (m_w/m_0) の経時変化と密接に関連しており, 水蒸気収着量の大きい実験開始初期においては大きな収着熱が発生するため, 試験部における空気の温度上昇も大きくなる. 水蒸気収着量の減少に伴い試験部における発熱量が減少し, 収着平衡となる収着完了時においては収着熱の発生が無くなるため, 試験部出口空気温度 θ_{out} は試験部入口空気温度 θ_{in} にほぼ一致することになる.

次に, 流動状態にある収着剤充填層内部の温度(図 6 中の記号 θ_{test})について考察する. なお, 試験部温度 θ_{test} は, 分散板から 10 mm 離れた試験部断面中心線上に設置した温度センサーにより測定したものである. 試験部内温度 θ_{test} は,実験開始直後に大きく上昇しており, 約 10 ℃の最大温度上昇が確認される. その後, 試験部内温度 θ_{test} は徐々に減少し, 最終的には試験部入口温度 θ_{in} に等しくなる. 本実験においては, 収着平衡付近では空気の温度上昇が得られなくなることを考慮し, 実験開始時の無次元収着割合$(m_w/m_0)_{ini}$ と最終的に主流空気と平衡に達した時点における無次元収着割合 $(m_w/m_0)_f$ の差 $\Delta(m_w/m_0) = (m_w/m_0)_f - (m_w/m_0)_{ini}$ の 90%に無次元収着割合 m_w/m_0 が達した時間をもって, 収着完了時間 t_f を定義した. 上述の定義により収着完了時間 t_f を算出した結果, 図 7 の条件に関しては t_f= 10.2 時間を得た.

図 7 は, 図 6 の基本条件における, 試験部への積算流入空気エンタルピー $\Sigma H_{in}\Delta t$ [MJ], 試験部からの積算流出空気エンタルピー $\Sigma H_{out}\Delta t$ [MJ], 任意の時間での時間刻み Δt における粉末状収着剤の熱量変化 ΔQ_p[kJ], 任意の時間での時間刻み Δt における収着水の熱量変化 ΔQ_w[kJ], 任意の時間での時間刻み Δt における試験容器の熱量変化 ΔQ_c[kJ], および周囲環境への積算損失熱量 $\Sigma Q_{loss}\Delta t$ [kJ]の経時変化を示す. 図 7 において, 空気の試験部への積算流入エンタルピ-$\Sigma H_{in}\Delta t$ および試験部からの積算流出エンタルピー $\Sigma H_{out}\Delta t$ は, ほぼ等しいことが理解できる.まず, 粉末状収着剤の熱量変化 ΔQ_p は, 実験開始初期の急激な収着に伴う発熱のために, 実験初期には一時的に増加する. そ

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Mechanical Engineers

の後は粉末状収着剤の温度低下に伴いΔQ_pも緩やかに減少し，収着平衡状態となり収着熱の発生を終える収着完了時には，粉末状収着剤の温度も流入空気温度に等しくなるため，ΔQ_pはほぼ零となる．収着水の熱量変化ΔQ_wは，実験初期の急激な収着に伴う収着水質量の増加や温度上昇により大きく増加し，その後は時間の経過と共に増加割合を減少させる．その後，収着平衡状態となる収着完了時には，ΔQ_wは一定値となる．試験容器の熱量変化ΔQ_cは，実験初期の急激な収着熱の発生による温度上昇のために急激に増加し，その後は徐々に減少し，最終的にはΔQ_cはほぼ零となり収着完了となる．

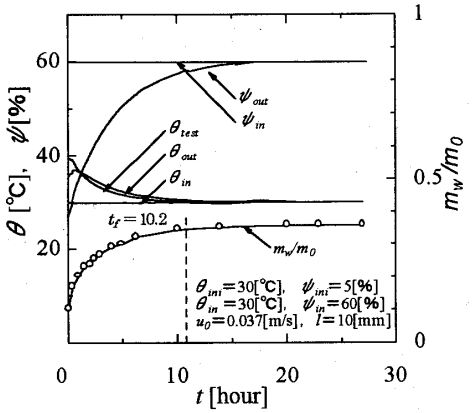

Fig.6 Time histories of measured parameters

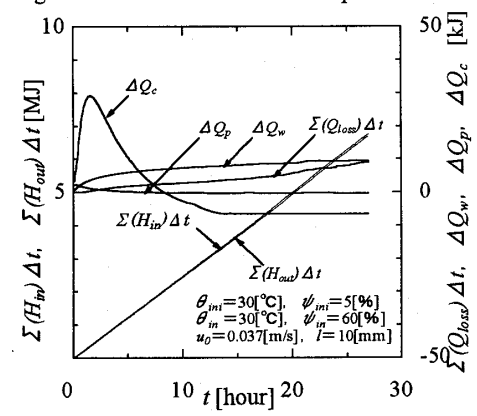

Fig.7 Time histories of measured parameters

4·3 空気流速の収着特性に及ぼす影響

空塔流速u_0が収着特性に与える影響を調べるために，基本条件から空塔流速をu_0=0.014m/sに変化させた場合の結果を図8に示す．まず，温度に着目してみると試験部出口空気温度θ_{out}の最大温度上昇量は約5℃であり，空塔流速u_0=0.037m/sの場合(図6)と比較して，その温度上昇量が約2.5℃減少する．このように空塔流速u_0が小さい場合には，単位時間当たりに湿り空気から供給される水蒸気量が少なくなることに加え，収着剤表面周囲の空気側に発達する水蒸気濃度境界層厚さの増大が，その外部拡散速度の減少をもたらし．その結果，水蒸気の収着量が減少し，その収着熱量の減少が収着剤充填層における温度上昇の低減となる．また，無次元吸着割合m_w/m_0の増加割合は空塔流速の減少に伴い低減する傾向を示している．この影響を受けて収着完了時間は大きく遅れu_0=0.014m/sの場合はt_f=17.9時間となり，u_0=0.037m/sの1.7倍となる．

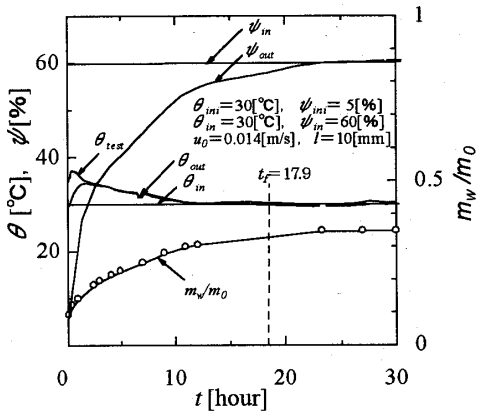

Fig.8 Time histories of measured parameters

4·4 収着剤充填高さの収着特性に及ぼす影響

図9に，基本条件から充填層高さをl = 0.0025 mに変更した場合の結果が示されている．まず，温度に着目してみると試験部出口空気温度θ_{out}の最大温度上昇量は約7.3℃であり，基本条件である空塔流速u_0=0.037m/sの場合(図6)とほぼ同様の温度上昇が観察されるが，時間的な変化で見ると実験開始と同時に温度上昇の最大値を示し，迅速に入口空気温度θ_{in}に漸近することが分かる．この原因としては，収着剤充填層高さの減少に伴い，収着剤の単位体積当たりに供給される水蒸気量が増加したことと，粉末状収着剤の熱容量が減少したために，短時間に大きな温度上昇となって現れたものである．また，無次元吸着割合m_w/m_0は実験開始から急速に増加する傾向になる．このように充填層高さがl = 0.0025 mの収着完了時間はt_f= 2.78時間となり，l = 0.01 mの基本条件に比較して約1/3.6に短縮される．

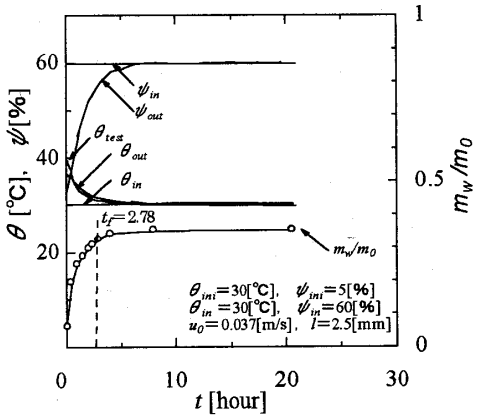

Fig.9 Time histories of measured parameters

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Mechanical Engineers

4·5 粉末状収着剤の物質伝達特性の検討

ここでは，水蒸気を収着する粉末状収着剤の物質伝達係数を実験データから求め，その無次元整理式の誘導を行う．本収着現象は，非定常状態で推移することより，収着剤が水蒸気の収着開始から収着完了までの全過程を時空的に平均化する，従来から提案[4]されている総括的な取り扱いにより，式（3）に示す有効物質伝達係数 h_m^* を定義して，実験データの整理を試みた．

$$h_m{}^* = \frac{1}{i}\sum_{n=1}^{i}\left\{\frac{1}{s(\rho_{in}-\rho_{wo}{}^*)}\left(\frac{\Delta m_w}{\Delta t}\right)_n\right\} \quad \cdots\cdots\cdots (3)$$

ここで，i：時間刻みの数，Δm_w：時間刻み Δt 間の水蒸気収着量，S：収着剤の総表面積，ρ_{in}: 流入空気の単位体積当たりの水蒸気質量，$\rho_{wo}{}^*$：初期状態における収着剤周囲空気の単位体積当たりの水蒸気質量である．式（3）で示す有効物質伝達係数 $h_m{}^*$の無次元量としてのシャーウッド数 Sh を次式で定義した．

$$Sh = h_m{}^* d_m / D_{as} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (4)$$

ここで，d_m: 粉末状収着剤の平均粒子直径，D_{as}:空気と水蒸気の分子拡散係数[9]である．

次に，シャーウッド数に影響を及ぼす諸因子の無次元数の誘導を次元解析や前述の諸因子の実験結果より行う．まず，収着剤の外部拡散係数に関連する空気流れ状態の無次元量として，空気流速 u_oを用いたレイノルズ数 Re を採用した．

$$Re = u_o d_e / \nu \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (5)$$

さらに，流入空気の顕熱と潜熱量からなるエンタルピーも収着剤の膨張や収縮などに関連することより，水蒸気の収着熱量 L_s（=2500kJ/kg）を加味した修正ステファン数 Ste^*を次のように定義した．すなわち，修正ステファン数は，水蒸気の持つ収着(凝縮)熱量に対する乾燥空気 1kg または湿り空気（1＋x）kg の保有する流入空気の熱量（比エンタルピー h_{in}）の割合と定義される．

$$Ste^* = h_{in} / L_s = \{c_{pa}\,\theta_{in} + \chi(L_s + c_{pa}\,\theta_{in})\} / L_s \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (6)$$

粉末状収着剤充填層高さ l も空気中の水蒸気の外部拡散係数に関連することより，その無次元量として，粉末状収着剤の平均粒子直径 d_m に対する充填層高さ l の比，l/d_m を採用した．なお，空気の物性値としてのシュミット数 Sc は，従来の例を参考としてシャーウッド数に対して 1/3 乗に比例するものとした．

図 10 はシャーウッド数 $Sh/Pr^{1/3}$ とレイノルズ数 Re の関係で実測値を示したものである．実験条件としては，基本条件のもとで様々な空塔空気流速 u_o による Re の変化による Sh の関係を検討したもので，Re の増加に従い Sh は増大傾向にある．この傾向は空気流速の増大に伴う収着剤粒子の撹拌効果の増加や単位時間当たりの流入水蒸気量の増大などが，外部拡散係数の増大をもたらし，結果として有効物資伝達係数の増大となる．図 10 に示す両対数グラフから，その Re に対する Sh の勾配は約 0.70 となる．

図 11 はシャーウッド数 $Sh/Pr^{1/3}$ と修正ステファン数 Ste^* の関係を示したものである．

図 11 より入口空気の状態量であるエンタルピーの無次元量としての修正ステファン数の増大とともに Sh の減少がみられ，この傾向は次のように説明される．入口空気のエンタルピーH_{in} の増大は，式(6)から空気温度に依存する顕熱と空気中の湿度に依存する潜熱量の増加を意味する．まず，入口空気の持つ顕熱に関して，初期収着剤温度が低い場合には，入口空気温度の増加(Ste*の増加)は，熱交換により粉末状収着剤の温度上昇による収着量の減少（図 2），すなわち Sh の減少となる．また，高い初期収着剤温度の場合には，入口空気温度の増大は，空気と収着剤との温度差を縮小し，結果的に収着剤の収着量は減少（Sh の減少）となる．一方，入口空気の持つ潜熱の効果に関して，入口空気湿度の増加(エンタルピーの増加)は，図 2 で示した収着平衡の関係から，収着剤による収着量の増加をもたらす．このように、入口空気の温度や湿度の変化の相互作用から，結果的にエンタルピーの増大すなわち修正ステファン数の増大は，収着量すなわち Sh の減少傾向となるものと思われる．

図 12 はシャーウッド数 $Sh/Pr^{1/3}$ と無次元充填層高さ l/d_mの関係を示したものである．

ここで，l/d_m の増大とともに単位収着剤量や短期時間当たりの水蒸気供給量が相対的に減少することと高い物質伝達率の得られる収着剤充填層と流入湿り空気が最初に接する収着剤充填層の下部領域の割合が相対的に減少することにより，Sh の減少となることが理解できる．図 13 から l/d_m に対する Sh の勾配は −0.88 となり，前述の Ste^*に対する勾配 −0.65 より，l/d_mの効果は相対的に大きくなる．

以上の結果を最小二乗法にて，次式に示す シャーウッド数 Sh に関する無次元整理式を，平均偏差±12%以内で誘導した．

$$Sh = 3.1\times10^{-3}\ Ste^{*-0.65}\ Re^{0.70}\ (l/d_m)^{-0.88}\ Sc^{1/3} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (7)$$

適用範囲：$Ste^* = 0.11\sim0.166$，$Re = 0.032\sim0.081$，$l/d_m = 61\sim310$，$Sc = 0.51\sim0.54$．

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Mechanical Engineers

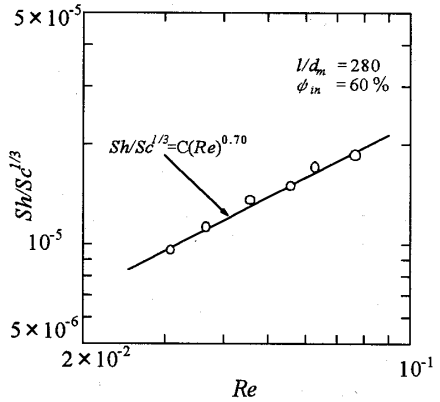

Fig.10 Relationship between $Sh/Sc^{1/3}$ and Re

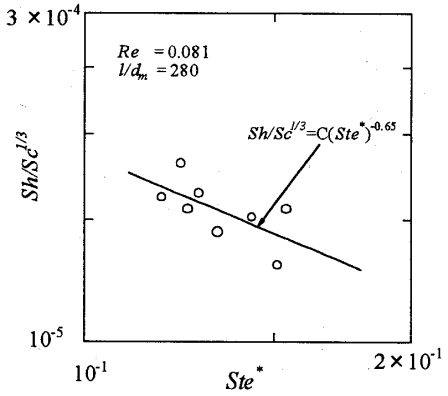

Fig.11 Relatonship between $Sh/Sc^{1/3}$ and Ste^*

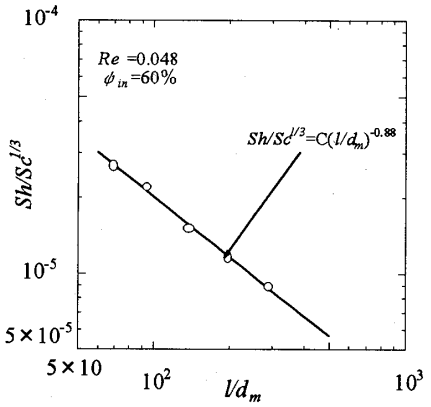

Fig.12 Relatonship between $Sh/Sc^{1/3}$ and l/d_m

5．結言

有機系物質であるポリアクリル酸ナトリウム架橋体を収着剤とした，新しいタイプの粉末状収着剤の平衡収着特性に関する測定を行った． さらに，空気吹き込みにより粉末状収着剤充填層を流動層化した場合の収着特性に影響を及ぼす諸因子の効果を実験的に検討し，次に示す結果を得た．

（1） ポリアクリル酸ナトリウム架橋体系の粉末状収着剤は，水蒸気の収着で粉末状収着剤粒子が大きく膨潤することが定量的に明らかとなった．

（2） 粉末状吸着剤充填層が空気により流動層化した場合には本実験範囲では，その圧力損失は空塔流速によらずほぼ一定値となり，収着剤粒子を固定層とした場合に比較すると，その圧力損失は 1/10 以下となることが明らかとなった．

（3）粉末状収着剤充填層を湿潤空気により流動層化した場合の非定常収着特性に影響を及ぼす，流入空気流速，温度や湿度そして収着剤充填層高さの効果を定量的に明らかにした．さらに，収着剤の有効物質伝達係数に関する無次元整理式の誘導を行った．

本研究は平成 11 年度文部省科学研究費補助金基盤研究（B）課題番号 10558073 の支援を受けたものでここに記して感謝申し上げる．

文 献

(1) 稲葉英男，エネルギー新技術大系（黒崎晏夫編），第Ⅱ編第３章第４節 吸着式冷凍機，(1998), 781-791,エヌ・ティー・エス．
(2) 稲葉英男他４名，機論，65-639, B(1999), 3777-3784.
(3) 稲葉英男他４名，機論，第 36 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，ⅡC241(1999), 359-360.
(4) 高分子学会編，高分子と水，(1995), 1, 共立出版
(5) 流動層研究会編，流動層概論，(1996), 15, 朝倉書店．
(6) Rohsenow, W. M., et al.,Handbook of heat transfer applications,2nd Ed., (1985), 66, McGraw-Hill.
(7) Ergun, S.,Chem. Engng. Prog.,48 (1952), 89.
(8) 柳井弘，吸着工学要論，(1977),59-65, 共立出版．
(9) 関信弘編，伝熱工学，(1988), 168, 森北出版．

NII-Electronic Library Service