

平成 21 年 5 月 20 日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19560752
 研究課題名（和文） 熱と物質の同時移動現象解析に基づく吸着材デシカントローターの設計・操作指針の構築
 研究課題名（英文） Interpretation of simultaneous heat and mass transfer in an adsorptive desiccant rotor for its optimal design and operation
 研究代表者
 児玉 昭雄（KODAMA AKIO）
 金沢大学・機械工学系・准教授
 研究者番号：30274690

研究成果の概要：デシカント空調に用いる吸着材ローターの設計・操作指針を広く提供する目的で、詳細実験を行うとともに数値計算の高度化を図った。総括物質移動係数の諸数変数依存性を確認し、その中で特に影響が顕著であったローター回転数との関係を浸透説によって説明し、吸着材の種類によっては吸着と脱着速度に差があることを実験で確認した。また、数値計算による設計指針の一例として、吸着材ローターの吸着・再生面積比の最適化の有効性を示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：プロセス工学・化工物性・移動操作・単位操作

キーワード：デシカント，吸着，除湿，空気調和，物質移動，デシカントローター

1. 研究開始当初の背景

省エネルギー施策の一つとして 28℃空調があるが、エアコン室内機の熱交換器温度の上昇により除湿能力は不足し、室内環境は悪化する。さらに 24 時間換気の義務付けにより室外から湿気が流入し、室内の相対湿度は高止まりとなる。一方で、多くのエアコンメーカーが「冷え過ぎない除湿（再熱除湿）」をセールスポイントにしていることから快適性を保障するには湿度制御が必要である。しかしながら、再熱除湿は原理から考えても省エネルギーではない。さらに、従来エアコンはトップランナー方式によって効率改善は限界に近く、現行方式のままではさらなる効率向上は期待できない。このような社

会的背景の中で、快適空調と省エネルギーを同時達成できるデシカント空調が注目されている。この空調プロセスは太陽熱や低温排熱で駆動可能な換気型除湿冷房装置である。

デシカント空調プロセスの性能向上のためには、デシカント用途に適した吸着材開発とその吸着材特性を十分に発揮できるシステム開発があわせて必要である。吸着材開発とシステム開発を結び付けるために多くの理論的研究が行われてきたが、数学モデル内で扱われる物質移動係数はフィッティングパラメーターであることが多く、あるいは熱移動現象のアナロジーとして処理される場合がほとんどで、吸着材の静的特性をもとにハニカムローター化した後の動的特性を的確

に予測する方法は確立されていない。

本研究はデシカント空調に関する豊富な実験データとノウハウの蓄積から、デシカントロータ内の熱と物質の同時移動現象を正確に把握し、信頼できる物質移動係数の推算手法とロータの設計・操作指針を構築できる最有力な研究であると位置付けられる。これまでの研究成果を踏まえ、さらに詳細な数学モデルを構築し、妥当な熱・物質移動係数を与えることで、デシカントロータ仕様と装置・操作変数の相関を明確にでき、ロータの最適設計・操作を支援できるツールが提供可能であると着想するに至った。

2. 研究の目的

デシカント空調プロセスの開発において、ロータ仕様はロータ化メーカーのノウハウに大きく依存しており、ロータ仕様の自由度は小さい。このため、吸着材ロータ仕様に合わせてシステム開発および最適化を繰り返す必要がある。それにもかかわらず、吸着材開発者、システム開発者ともにロータ仕様に対して明確な設計指針を持つことができていない。国内外で多くの理論的研究が吸着材特性とデシカントロータ性能の関連付けに取り組んでいるが、特に物質移動係数の推算手法は不明確なままである。そこで、本研究では詳細実験とのフィッティングにより総合的な物質移動係数と諸変数の関係を見出し、数学モデルの高度化と汎用化を推し進めること、ロータ内部の空気温度分布の実測により、局所での熱・物質移動現象を明確にすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) ハニカム化吸着材の基礎特性

一定風量までは空気の通過抗力の影響を受けにくい磁気浮遊式天秤の特長を活用して、重量法により水蒸気の吸脱着挙動を観察するとともに吸脱着速度を測定した。実験装置の概略を図1に示す。本装置は磁気浮遊式天秤、ブロー、ヒーター、電動ボールバルブおよび加湿器を設置した加湿槽で構成されており、吸着側流路、再生側流路、重量測定部に大別される。吸着・再生側流路は、それぞれ独立した流路であり、各流路と試験片を設置する重量測定部は電動ボールバルブによって接続され、シーケンス制御により任意の時間で切り替えることができる。重量測定部には、電動ボールバルブ開口側の流路から若干の圧力差によって空気が流入する。その後、ハニカムで整流され試験片を設置したバスケットを通過し、排気される。通常、運転状態にある除湿ロータは回転によって吸着・再生を繰り返すが、本装置ではバルブを用いて流路を切り替えることによって吸着・再生を繰り返す。なお、試験片に対して

供給空気量は大きく、吸着および脱着過程において試験片は常に同一湿度雰囲気になされることになる。

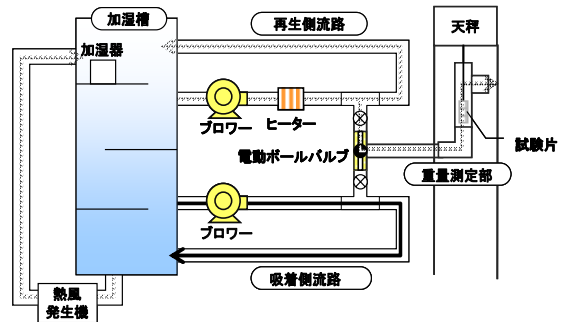


図1 磁気浮遊式天秤を用いたハニカム吸着材の水蒸気吸脱着量の測定

(2) 吸着材デシカントロータ内温度分布

ロータの設計・運用指針の構築に資することを目的とし、直接測定不可能なロータ内の水蒸気吸脱着挙動を温度分布測定により把握し、考察することを試みた。検討対象とした吸着材デシカントロータの吸着等温線(35°C)を図2に示す。ロータAは市販シリカゲルロータであり、水蒸気吸着熱は吸着量に関係なく水の蒸発潜熱にほぼ等しい。一方、ロータBは相対湿度が15~25%付近で、またロータCは25~30%付近で急激に吸着量が増加する“S”型の吸着等温線を示す。ロータBとCは相対湿度70%程度までは従来ロータに比べて吸着量は少ないが、再生空気の相対湿度が上記相対湿度域より低ければ有効吸着量はロータAほど減少しないため、低温再生でも良好な除湿性能が期待できる。

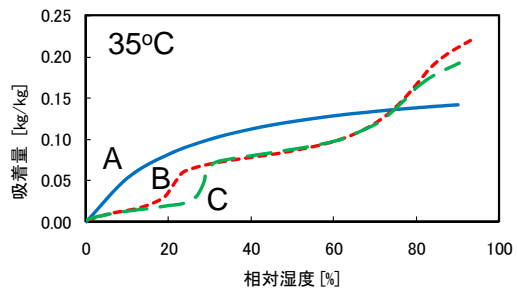


図2 水蒸気吸着特性(35°C)

実験装置外観を図3に示す。吸着再生面積比1:1を主たる検討対象とした。実験には直径320mm、空気流れ方向厚さ200mmのデシカントロータを用いた。ロータ内温度分布は吸着空気入口から空気流れ方向25mm間隔でロータ側面から半径方向深さ55mmの位置にT型熱電対(素線径0.32mm)を挿入して測定した。熱電対はロータ側面に貼り付けた小型データロガー(キーエンスNR-1000)に接続し、回転体に対して連続し

た温度測定が可能となっている。湿度測定には鏡面露点計(GENERAL EASTERN 社製 HYGRO-M4+1311DR)を用いた。

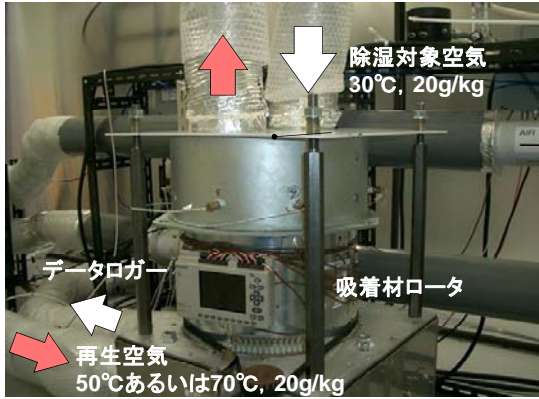


図3 ロータ内温度分布の測定

(3) 物質移動係数の推算と数値計算の高度化
数値計算と実験結果とのフィッティングにより総括物質移動係数を求め、ロータ回転数や空気流速など諸変数に対する依存性を検討した。境膜抵抗の流速依存性を利用して、総括物質移動係数(物質移動抵抗)を境膜拡散(抵抗)と粒子内拡散(抵抗)に分離することを試みた。なお、本研究で構築した数学モデルを以下に示す。

空気側水蒸気収支式

$$\rho_g u \frac{\partial H}{\partial x} + \rho_d \frac{\partial q}{\partial t} \frac{a_d}{a_g} = 0 \quad (1)$$

吸着材層水蒸気収支式

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{k}{a_d} (q^* - q) \quad (2)$$

ここで平衡吸着量 q^* は次式で表される。

$$q^* = \frac{0.733RH}{1+2.18RH} \quad (3)$$

空気側熱収支式

$$\rho_g u C_{pg} \frac{\partial T_g}{\partial x} + \frac{h(T_g - T_d)}{a_g} = 0 \quad (4)$$

熱伝達係数 h について、解析対象としたデシカントロータの中では、特にロータ長さが短いときには、ロータの大部分で温度境界層が十分に発達していないことが考えられる。この場合、すなわち、空気境膜が十分に発達していない部分では、温度発達区間における円管の局所熱伝達係数として次式で与えられる。

$$Nu_x = 0.53837 \cdot (B)^{\frac{1}{3}} \cdot (y^*)^{\frac{1}{3}} \quad (y^* < 0.1) \quad (5)$$

$$y^* = \frac{(x/d)}{Re \cdot Pr} \quad (6)$$

このとき、 B は流路壁面における無次元の速度勾配であり、流路形状によって異なる値を持ち、流路形状が二等辺三角形の場合では $B=10.26$ となる。一方、温度境界層つまり境膜が十分に発達している場合、局所熱伝達係数は次式により算出できる。

$$Nu_x = 2.52 \quad (y^* \geq 0.1) \quad (7)$$

本研究では計算の簡略化のため、伝熱係数は総括値を用いることとし、空気流れ方向全域の局所ヌセルト数を平均した値から等価直径を用いて伝熱係数を算出した。

吸着材層熱収支式

$$\rho_d (C_{pdd} + qC_{pw}) \frac{\partial T_d}{\partial t} = \rho_d \frac{k}{a_d} (q^* - q) q_h + \frac{h(T_g - T_d)}{a_d} \quad (8)$$

ここで、 q_h は吸着発熱量であり、本研究で用いたデシカントロータへの水蒸気の吸着熱は吸着量に関係なく水の蒸発潜熱に等しいことを確認している。また、初期条件、境界条件は以下のように与える。

$$H_p = H_{pi}, \quad T_{pg} = T_{pgi} \quad \text{at } Z=0 \quad (9)$$

$$H_r = H_{ri}, \quad T_{rg} = T_{rgi} \quad \text{at } Z=1$$

$$q_p = q_r \quad \text{at } \tau=1, \quad q_p(\tau=0) = q_r(\tau=2) \quad (10)$$

$$T_{pd} = T_{rd} \quad \text{at } \tau=1, \quad T_{pd}(\tau=0) = T_{rd}(\tau=2)$$

ここで Z は吸着入口を 0 とした無次元空気流れ方向距離、 τ は無次元回転角度である。

4. 研究成果

(1) ハニカム化吸着材の基礎特性

図4は吸着空気および再生空気に平衡な吸着量の間をスイングしたときの吸着量変化である。試験片Aはシリカゲル系吸着材、試験片BはAlPO系ゼオライト吸着材であり、吸着および再生空気条件は表1に示す。図4より、脱着過程では、試験片Bが試験片Aよりも早く平衡に達し、反対に吸着過程では試験片Aの方が早く吸着平衡に至る。図5に吸脱着速度を示すが、吸脱着開始直後に現れる最大値を比較すると、試験片Aは吸着・再生ともほぼ同じ吸着速度を示し、試験片Bは吸着開始直後の吸着速度が圧倒的に遅い。試験片Aはセラミクスマトリクス内にシリカゲルを直接合成した吸着材、試験片BはAlPO系ゼオライトをバインダーによりマトリク

スに担持した吸着材である。有効吸着量や吸着材特性に加えてハニカム化手法の違いも吸脱着速度に影響したものと考えられる。

試験片Bについて、異なる周期での吸脱着実験例を図6に示す。半サイクル時間を60、180、300secに設定した。また、サイクリック操作開始前に吸着空気と平衡になるまで水蒸気を吸着させた。まず、操作開始後しばらくは、吸着量の平均値が徐々に再生空気との平衡値に近づきながら吸脱着スイングを繰り返し、最終的には再生空気と平衡な吸着量を基準とした、ある一定のスイング幅での吸脱着に収束する。また半サイクル時間が長いと収束までの時間は若干短くなるが、半サイクル時間による差はおおよそないと言える。吸脱着スイング収束時における時間当たりの吸脱着量に着目すると、半サイクル時間60secでは 4.72×10^{-5} 、180secは 3.57×10^{-5} 、300secは 4.10×10^{-5} [1/s]であり、60secサイクルにおける吸脱着速度が最大の値を示す。これには吸着速度と脱着速度の時間依存性とその違いが関与するものと考えられる。一方、サイクリック操作で得られた吸脱着速度が図5で示した値と大きく変わらないことから、水蒸気の吸脱着は吸着材表面近傍で生じ、その部分では局所的に吸着平衡が成り立っていることが示唆される。

表1 実験条件

	温度 [°C]	相対湿度 [%]	絶対湿度 [g/kg]	風速 [m/s]
吸着側	30	74	20	0.57
再生側	50	25.4		

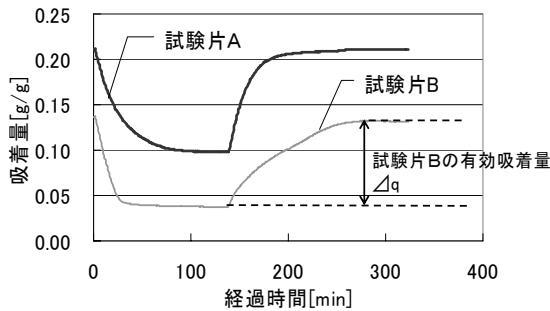


図4 吸着平衡-再生平衡間の水蒸気吸脱着挙動

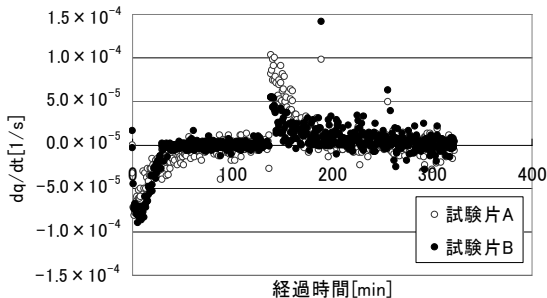


図5 平衡吸脱着操作時の水蒸気吸脱着速度

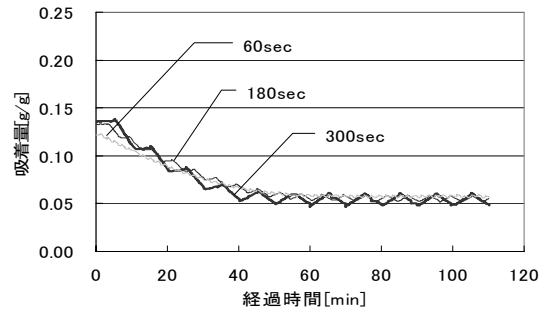
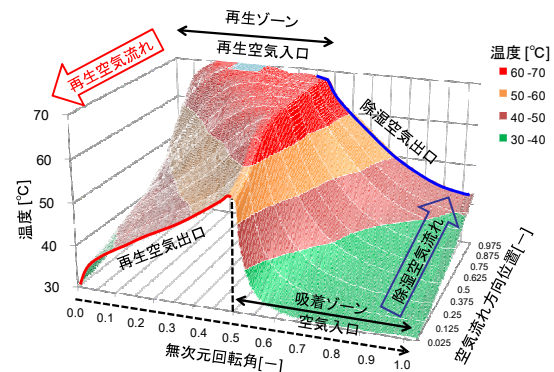


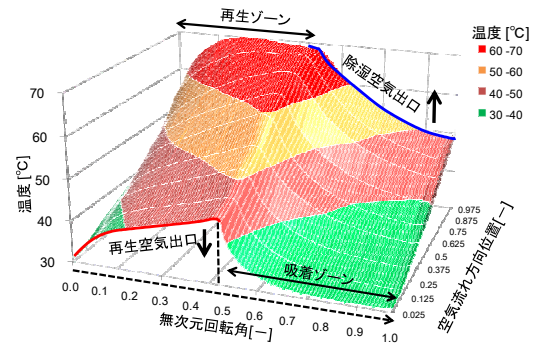
図6 水蒸気吸脱着挙動に与える半サイクル時間の影響

(2) 吸着材デシカントロータ内温度分布

① ロータ回転数の影響 除湿量が最大となる最適回転数が存在することは広く知られている。最適回転数と最適値よりも遅い回転数におけるロータ内温度分布を図7に示す。再生空気流れ方向の温度低下はロータとそれに含まれる水蒸気の熱容量と水蒸気脱着の際の顕熱→潜熱変換によるもの、一方で除湿空気流れ方向の温度上昇はロータからの熱移動と水蒸気吸着時に発生する吸着熱（潜熱→顕熱変換）によるものである。ロータ熱容量に起因する温度変化を差し引くことは難しいが、温度変化から水蒸気吸脱着の様子が一定程度把握できる。特に再生過程では温度変化が大きく、空気温度が急降下する位置で水蒸気脱着が活発、言わば脱着帯である。



(a) ロータA 回転数=15rph (<最適値)



(b) ロータA 回転数=36rph (最適回転数)

図7 ロータ内温度分布に与える回転数の影響

図7(a)に示した最適値よりも遅い回転数において、再生終了時(無次元回転角=0.5)に再生空気出口温度が再生温度に近付いており、ロータ再生がより完全となることが示されているが、吸着過程後半では空気流れ方向の温度上昇が小さく、吸着過程途中での吸着破過が示唆される。一方、最適回転数において、再生過程では再生空気出口付近の温度上昇は小さく、“最適”回転数であってもロータ空気流れ方向全域が再生されているわけではない。しかし、除湿過程後半でも空気流れ方向の空気温度上昇は低回転数に比べて大きく、再生過程に移行する間際まで除湿が継続していることがわかる。やはり、最適回転数では吸着材再生と処理空気に対する相対的な吸着容量が均衡した状態である。除湿性能を向上させるには、①ロータ空気流れ全域にわたる吸着材再生、②吸着初期における迅速な吸着材冷却、③吸着破過の回避が必要となるが、それには再生：吸着面積比や再生空気風量比の検討が不可欠であり、再生出口空気温度上昇に伴うエネルギー効率低下への対応も求められる。

② 吸着材ロータ特性の影響 ロータAに加えて、ロータB、C内の温度分布を測定した。図8に再生開始直後および再生過程終盤における空気流れ方向の温度変化を示す。再生空気温度は50°Cである。ロータB、CはロータAに比べて再生空気出口付近で温度上昇が遅れている。これにはロータ見かけ密度の違いが大きく影響している。また、ロータA、Cでは再生初期、後半に関係なく空気流れ方向の温度低下は滑らかであるのに対して、ロータBの温度変化は緩急が著しく、空気流れ方向に大きく温度低下する領域は再生が進むにつれて空気流れ下流に移動している。急な温度降下は水蒸気脱着が活発であることを示すが、ロータBではA、Cに比べて狭い領域で水蒸気脱着が生じながら、その領域はロータ回転に伴い再生空気出口へと移動することが推測される。

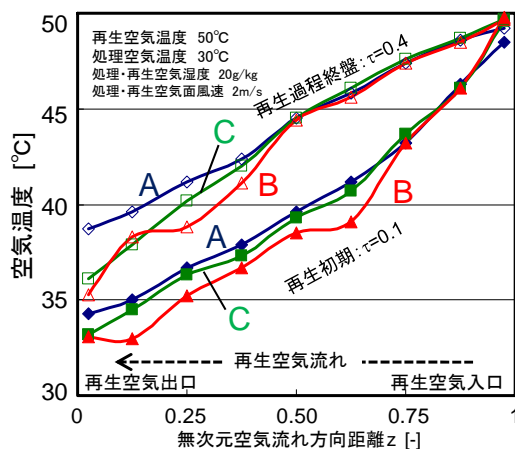


図8 再生空気流れ方向の温度変化

(3) 物質移動係数の推算と数値計算の高度化
 ① 総括物質移動係数の推算 実験結果とのフィッティングにより得られた総括物質移動係数を図9に示す。ロータ長さが短いと、総括物質移動係数は大きい。また、流速が増加に従って総括物質移動係数は増加し、その傾向はロータ長さが短い場合に顕著である。

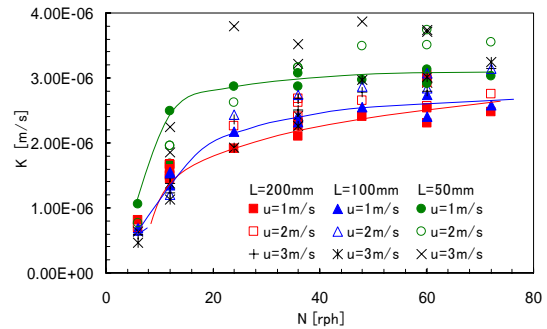


図9 総括物質移動係数の諸変数依存性

ここで固相基準の総括物質移動係数 K_s [kg/(m²·s)] は以下の式で表現できる。

$$\frac{1}{K_s} = \frac{\beta}{\rho_g k_f} + \frac{1}{k_s} \quad (11)$$

ここで、 k_f は境膜物質移動係数 [m/s]、 k_s は固相側物質移動係数 [kg/m²·s]、 β は吸着係数 [kg-DA/kg-ads] である。境膜物質移動係数 k_f は、熱と物質移動のアナロジーを考慮し、次式から算出できるものとする。

$$Sh_x = 0.53837 \cdot (10.26^3) \cdot (x^*)^{-\frac{1}{3}} \quad (x^* < 0.1) \quad (12)$$

$$Sh_x = 2.52 \quad (x^* \geq 0.1) \quad (13)$$

$$x^* = \frac{(x/d)}{Re \cdot Sc} \quad (14)$$

なお、境膜物質移動係数も熱伝達係数と同様にロータの空気流れ方向全域の平均値として与える。ロータ長さが十分に長く、空気流れ方向のほぼ全域で境膜が十分に発達している場合、境膜における物質移動は操作条件および設計条件(流速、ロータ長さ)によらず一定であると考えられるため、主に固体側物質移動係数がサイクル時間に依存し、次式で与えられることになる。

$$k_s = \rho_d \sqrt{\frac{D_p}{\pi \cdot t_c}} \quad (15)$$

図10に物質移動抵抗に与えるサイクル時間の影響を示す。今回対象とした回転数範囲では異なる条件でも総括物質移動抵抗がほぼ同じ傾きの直線で近似できることがわかる。直線の切片は境膜における物質移動抵抗を示すことから、デシカントロータの総括物質移動係数は境膜物質移動係数と固相側

物質移動係数により推算できることになる。なお、この推算値を用いた数値計算結果は実験結果と良好に一致する。

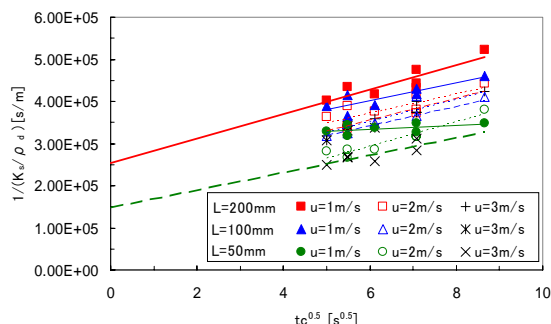


図 10 物質移動抵抗に与えるサイクル時間の影響

② 操作設計指針の一例 数値計算によりロータ体積を最小とする吸着・再生面積を検討した。図 1 1 は吸着と再生空気の湿度および風量が等しい場合の吸着側面積比 b と目標除湿性能 ΔH を達成するために必要となるロータ体積の関係である。吸着面積比が 0.5-0.6 でロータ体積が最小になることがわかる。また 80°C 再生で 6g/kg の除湿量を得るには 0.15m³ のロータ体積でよいが、8g/kg の除湿量を得ようとする場合にはおおよそ 2 倍のロータ体積が必要となる。

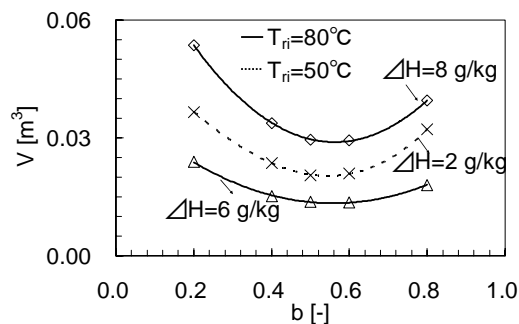


図 1 1 ロータ体積と吸着面積比の関係 (吸着/再生風量比 = 1, 湿度 23g/kg)

今後はハニカムピッチや吸着材担持量の最適化も可能となるよう数学モデルの更なる高度化を図り、また本研究の特色の一つであるロータ内温度分布の詳細解析によってロータ設計・操作の最適化を推し進めたい。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

① 辻口拓也, 児玉昭雄, 吸着材デシカントロータの水蒸気吸脱着挙動—第 3 報: 吸着等温線形状と粒子内拡散係数の影響—, 日本冷凍空調学会論文集, 24 巻, 205-216, 2007, 査読有

[学会発表] (計 11 件)

① 安達明彦, 児玉昭雄, デシカントロータ内温度分布測定に基づく水蒸気吸脱着挙動解析, 日本冷凍空調学会年次大会 2008, 2008.10.20, 大阪

② 関口啓介, 児玉昭雄, 吸着材特性を考慮した多段除湿プロセスの検討, 日本冷凍空調学会年次大会 2008, 2008.10.20, 大阪

③ Toshinobu Asada, Akio Kodama, Hisashi Asano, Parametric Study on a Honeycomb Rotor Adsorber with a Two-Stage Dehumidification, The 8th International Symposium on Separation Technology, 2008.10.4, Karuizawa

④ 梅江将司, 児玉昭雄, 還流多段吸着操作による除湿性能およびデシカントロータ利用率の向上, 化学工学会第 40 回秋季大会, 2008.9.26, 仙台

⑤ 児玉昭雄, 吸着材デシカントロータにおける水蒸気吸脱着挙動, 化学工学会第 40 回秋季大会, 2008.9.24, 仙台

⑥ Akio Kodama, Appropriate Properties of Adsorbent for a Low-Temperature Heat Regenerative Desiccant Wheel, International Symposium on Innovative Materials for Processes in Energy Systems, 2007.10.28, Kyoto

⑦ 辻口拓也, 児玉昭雄, デシカント空調プロセスの高効率化を目指した操作・設計条件の検討, 日本冷凍空調学会年次大会 2007, 2007.10.23, 東京

⑧ 梅江将司, 児玉昭雄, 粒状吸着材を用いたバッチ式多段除湿プロセスの性能評価, 化学工学会第 39 回秋季大会, 2007.9.15, 札幌

⑨ 辻口拓也, 児玉昭雄, 吸着式デシカントロータにおける物質移動の解析, 化学工学会第 39 回秋季大会, 2007.9.15, 札幌

⑩ 関口啓介, 児玉昭雄, 直交熱交換型吸着ブロックによる連続除湿操作, 化学工学会第 39 回秋季大会, 2007.9.15, 札幌

⑪ Takuya Tsujiguchi, Akio Kodama, A Numerical Investigation for the Influence of Adsorption Properties on the Dehumidifying Performance of Desiccant Wheel, The 8th Asian Thermophysical Properties Conference, 2007.8.22, Fukuoka

[その他]

ホームページアドレス

http://www.hm.t.kanazawa-u.ac.jp/gijutsu/desiccantGr_j.htm

6. 研究組織

(1) 研究代表者

児玉 昭雄 (KODAMA AKIO)

金沢大学・機械工学系・准教授

研究者番号: 30274690