

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 12 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289374

研究課題名(和文) デシカントロータ内水蒸気移動機構の解明と制御による吸着系エネルギーシステムの拡充

研究課題名(英文) Analysis and controlling of a simultaneous heat and mass transfer behavior in a desiccant rotor for expanding adsorptive energy systems

研究代表者

児玉 昭雄 (Kodama, Akio)

金沢大学・機械工学系・教授

研究者番号：30274690

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：デシカントロータの設計・操作の簡単化と迅速化を目的とし、ロータ内温度分布測定によって水蒸気移動現象を可視化し、また吸着材小片を用いた吸脱着試験から物質移動係数の導出方針を得て数値計算の信頼性向上を図った。続いて、デシカントロータの応用として廃熱昇温への適用可能性を探った。ゼオライト13Xは吸着熱が大きく、100 程度の排蒸気温度が200 近くにまで上昇するが、外気を利用した濃度差だけで水蒸気を脱着することは難しい。A形シリカゲルは、温度上昇度はゼオライトよりも40 低いものの濃度差脱着が可能であり、連続昇温操作の実現が期待される。

研究成果の概要(英文)：This study aimed to clarify the simultaneous heat and mass transfer behavior in an adsorbent desiccant rotor for the effective use of the low temperature exhaust heat. Influences of the pore size distribution on the dehumidifying performance and the adsorption/desorption behavior of the adsorbent desiccant rotor was experimentally investigated. Air temperature distribution in the adsorbent desiccant rotor was also measured and interpretation of the temperature distributions was carried out. Furthermore, time variations of the weight of a small piece of desiccant rotor measured at various adsorption / desorption time and their duration time ratio were discussed. Numerical computation in consideration of these results indicates good agreement with experiments. Temperature increase of wasted steam by using adsorption heat was investigated as an extended application of the desiccant materials. By employing A-type silica gel, continuous temperature increase operation is possibly achieved.

研究分野：プロセス工学

キーワード：廃熱利用 省エネルギー 吸着 除湿 空調装置 環境技術

1. 研究開始当初の背景

吸着材デシカントロータを要素とするデシカント除湿空調は、各種排熱や太陽熱の積極利用による節電・省エネルギーと地球温暖化対策、また、従来空調装置と連携した潜熱顕熱分離処理による空調の高品質化への貢献が期待される。特に、ここ数年の技術開発および研究展開は目覚ましく、様々なデシカント材が開発あるいは改良され、また、ヒートポンプとの組み合わせなど流路構成やシステムに関する工夫も多く検討されている。また、吸着蓄熱や湿度差スイングによる昇温操作など、廃熱利活用プロセスへの展開可能性もある。ここで、デシカントロータの最適化ツール(数値計算法)を高精度化し、実験と併用することにより、デシカント空調の設計操作および導入指針を迅速に得ることができ、その普及が促進される。さらに吸着蓄熱や排熱の昇温操作など新規プロセスへの展開可能性の検討も比較的容易となり、吸着系エネルギーシステムの拡充すなわち排熱利用の促進につながる。

2. 研究の目的

- (1) デシカント吸着材ロータ内の水蒸気吸脱着機構を解明し、物質移動係数に関連付けて定量的に説明する。これにより物質移動係数の算出根拠を明確にする。
- (2) 数値計算法の高度化と信頼性向上を図り、デシカントロータの設計操作指針を示す。
- (3) デシカントロータの吸着蓄熱および昇温操作への応用について検討を進め、その可能性と課題の克服手段を明らかにする。

3. 研究の方法

- (1) 数値計算の高度化に資するため、デシカント吸着材ロータの系統的性能評価と平均細孔径が異なるシリカゲルロータにおける水蒸気吸脱着挙動の解明に取り組んだ。あわせて、デシカントロータ内で生じる熱・物質同時移動現象を可視化する一手段として、ロータ内の空気温度分布を測定し、その解釈を試みた。
- (2) 空気流れ方向、ロータ回転方向、吸着材深さ方向に局所物質移動係数を考慮した高度数学モデルを構築し、前述の実験結果とのすり合わせにより数値計算結果の信頼性を向上させた。この数値計算と実験結果の比較により、物質移動の支配因子を明確にすることを試みた。
- (3) 低温排蒸気の有効活用を目的として、吸着熱を利用した昇温操作を検討した。本研究では、基礎検討としてシリカゲルおよびゼオライト13Xを充填した吸着塔の昇温挙動および塔高さ方向の温度分布を調べた。

4. 研究成果

- (1) デシカント吸着材ロータ内の水蒸気吸脱着機構の解明
 - ① 除湿挙動に与える吸着等温線形状の影響

図1に実験装置の概略を示す。装置は加温槽、ブローア、ヒータ、デシカントロータから構成されており、図中のT・Hで示す箇所の温度、湿度を測定する。ロータには流れ方向に40mm間隔で熱電対を挿入し、内部の温度分布を測定した。デシカントロータはセラミック紙製のハニカム基材にシリカゲルを担持したもので、ロータの直径、厚さはそれぞれ300mm、200mmである。

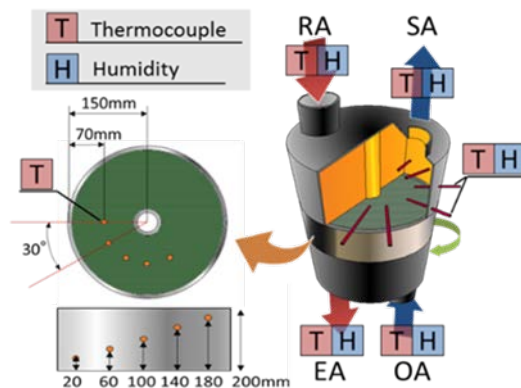


図1 デシカントロータの性能試験装置

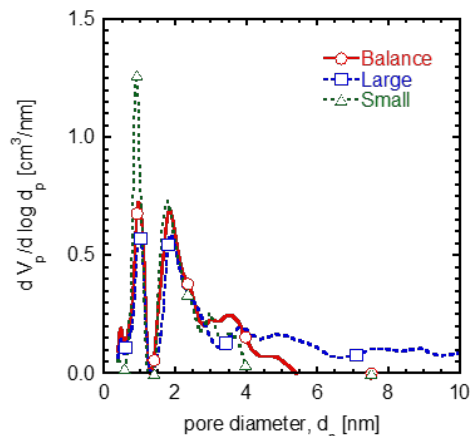


図2 デシカントロータの細孔径分布

ロータは、図2の細孔径分布に示すように、細孔径分布がブロードであるもの(Balance)を基本に、大口径化したもの(Large)、小口径化したもの(Small)の3種類あり、吸着等温線形状が図3のように異なる。

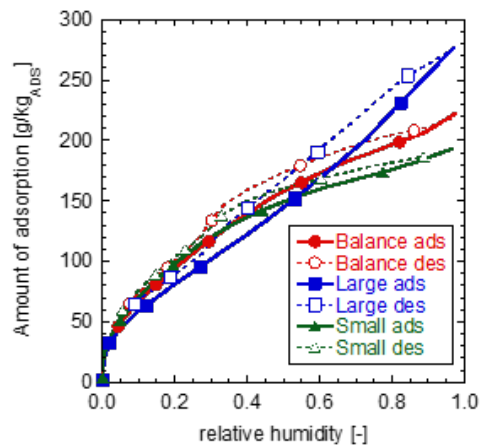


図3 デシカントロータの吸着等温線

図4に除湿量に与える入口湿度の影響を示す。除湿量が最も多い回転数は50°C再生で12rph、70°C再生で18rphであった。50°C再生時では、入口湿度条件に関係なくSmallロータの除湿量が最も少ない。これは除湿空気(OA)と再生空気(RA)条件での吸着量の差である有効吸着量の大小と一致しており、除湿性能には有効吸着量が大きく影響していると考えられる。しかし、70°C再生ではSmallロータの有効吸着量が他のロータと比較して小さいのにも関わらず除湿量が最も多い結果となった。除湿性能に大きく影響を与える因子が他にも存在することが示唆される。

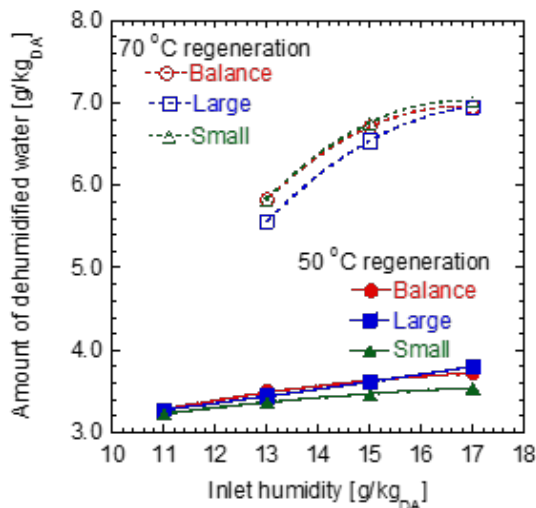
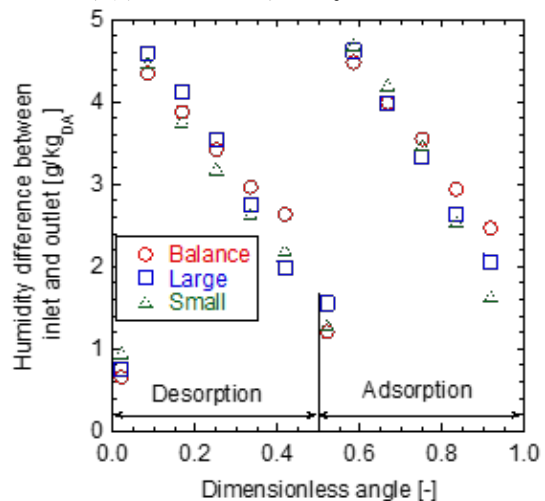


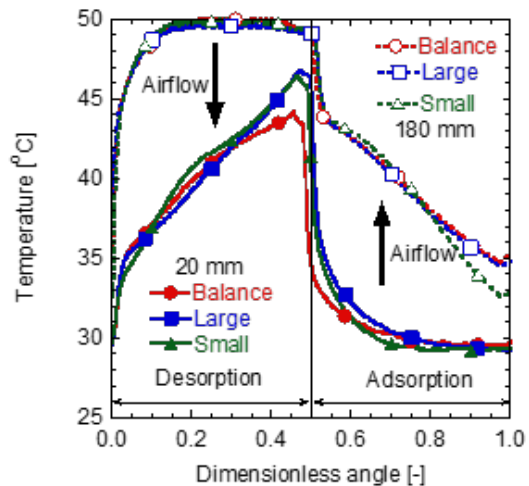
図4 除湿量に与える入口湿度の影響

各ロータの差が最も顕著に現れた条件として入口湿度 15g/kg-DA, 6rph におけるロータ回転方向の除湿量分布とロータ内温度分布を図5に示す。図5(a)より50°C再生では、除湿区間後半においてSmallロータの除湿量低下が最も大きいことが分かる。これは、Smallロータの有効吸着量が最も少ないことから、除湿区間後半では吸着破過により吸着能力が低下したためである。ロータ内温度分布においても当該区間におけるSmallロータの温度低下が著しい。この温度低下は除湿量すなわち吸着量の減少に伴い発生する吸着熱発生量が減少したことにより起因しており、温度分布からロータ内の除湿挙動を窺うことができる。図5(b)温度分布の再生区間を見ると、再生出口付近(20mm)の温度変化はロータによって形状が異なり、Smallロータはいくぶん上に凸の形状であるのに対して、Largeロータでは直線的に変化している。これはLargeロータでは再生区間序盤での蒸気量脱着量が多いことから、蒸発熱によって温度上昇が抑制されたためである。Smallロータに関しては再生区間中盤の脱着があまり進行せずロータ温度が上昇するものの、区間後半で温度変化が鈍化し、最終的にはLargeロータと同じ温度に終止している。この傾向から細孔径の小さい吸着材の再生には、より低い相対湿度の空気が必要であり、再生が遅

い原因となっていると言える。Smallロータの除湿量の少なさは、この再生速度の遅さにも起因するものと考えられる。



(a) 出入口除湿量差のロータ回転方向変化

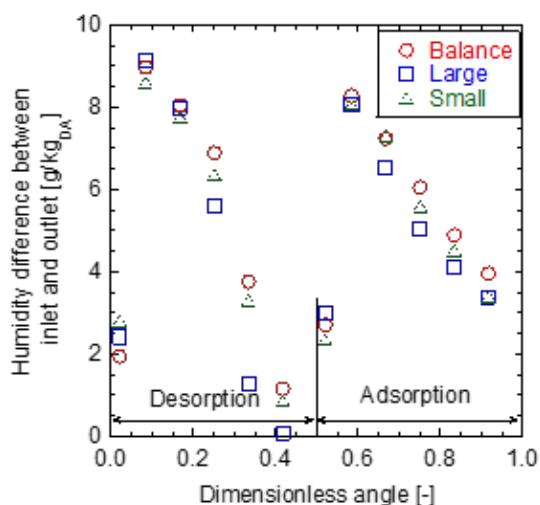


(b) ロータ内空気温度の回転方向変化

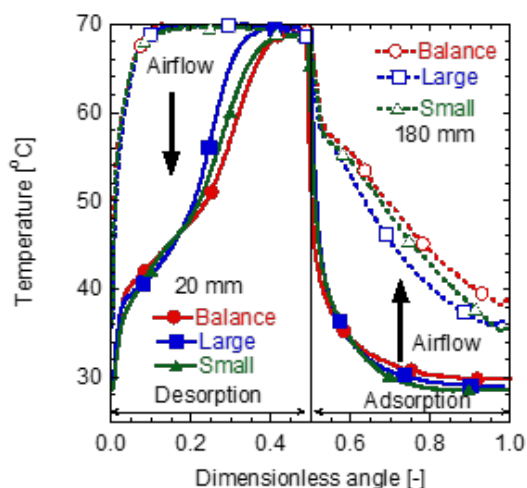
図5 除湿量差とロータ内温度の回転方向分布(再生温度50°C)

70°C再生になると、図6に示すように。再生区間終了時には再生出口の温湿度が入口と同じ値を示しており、脱着が完了する。70°C再生における最適回転数が高回転数側に移動することを述べたが、これは高温再生により脱着の進行が速くなるためである。図6(a)湿度分布をみると、脱着が完了しているのにも関わらず、有効吸着量に反して除湿区間中盤でLargeロータの除湿量が少なく、細孔径の大きな吸着材では吸着の進行が遅いことが分かる。Largeロータの吸着等温線は、高相対湿度領域での吸着量変化が大きく、吸着区間において顕熱の持ち込みや吸着熱により空気温度が上昇し相対湿度が低下した際に、吸着量が大幅に低下する。温度上昇により吸着推進力が大幅に低下するため、顕熱の持ち込みが大きい高温再生では除湿性能が大幅に低下する。一方Smallロータでは再生温度が高くなったことで小さい細孔から

水蒸気が十分に脱着可能となったため、除湿性能が向上したと考えられる。



(a) 出入口除湿量差のロータ回転方向変化



(b) ロータ内空気温度の回転方向変化

図6 除湿量差とロータ内温度の回転方向分布 (再生温度 70°C)

② デシカントロータ片の水蒸気吸脱着挙動

図7に重量法による水蒸気吸脱着量測定装置 (重量測定部) の概略を示す。秤量皿に置いた真鍮製の台座の先端に直径 45mm, 厚さ 5mm のデシカントロータ小片が装着してある。装置は、吸着材、電子天秤のほか、加湿槽、ブロウ、ヒーター、から構成され、吸着空気と脱着空気が交互に吸着材に供給されるよう各流路が一定周期でスライドする。この際に生じる吸着材重量変化を電子天秤で測定する。吸着・脱着空気温度はそれぞれ 30°C, 70°C とし、絶対湿度と風速は両方とも等しく 17g/kg と 1m/s である。また、吸着・脱着の半サイクル時間をそれぞれ 30, 60, 90, 120s (サイクル時間=吸着時間+脱着時間=60, 120, 180, 240s) に変更しながら実験を行なった。

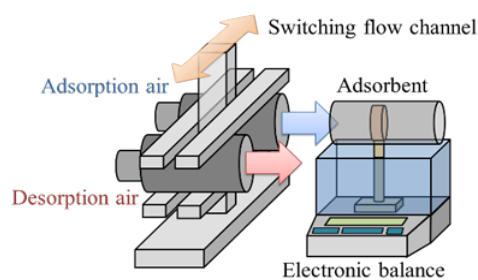


図7 重量法による水蒸気吸脱着量測定

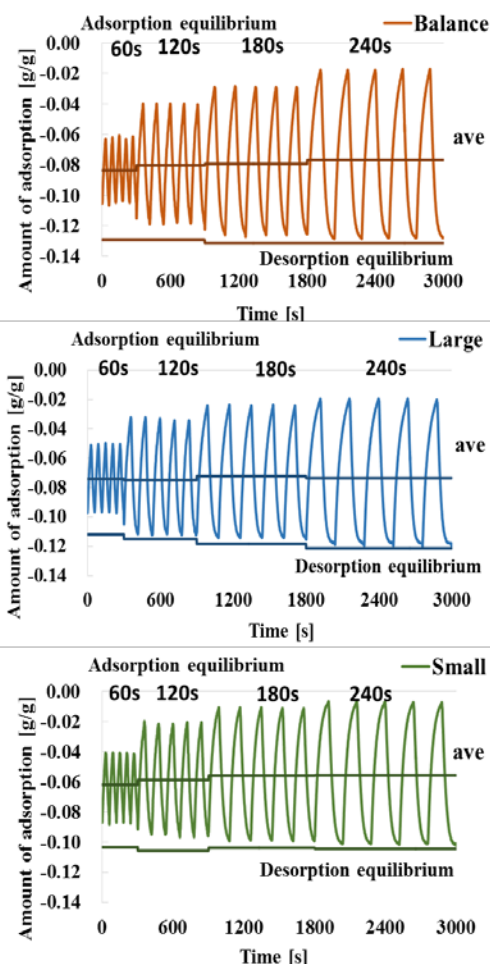


図8 吸脱着量変化とサイクル時間

図8に定常状態到達後の各サイクル時間における吸着量変化を示す。ここで吸着量=0 g/g は、吸着量側平衡を意味している。本実験条件では吸着量の時間平均値 (=吸脱着サイクルの中心値) はサイクル時間に依存しない。また Large 型と Balance 型の吸脱着サイクルは、やや脱着側に偏っていることから吸着側律速が示唆される。一方で Small 型では吸着速度と脱着速度はほぼ等しい。この実験条件では比較的大きな細孔を多く持つ Large と Balance からの水蒸気脱着が容易であると言える。

図9は、Large と Balance の水蒸気吸脱着速度の経時変化である。吸着過程について、Large と Balance では、吸着開始直後に差異があることを除き、ほぼ同様の変化を示す。

脱着過程では、**Large** は脱着初期に大きな脱着速度を示し、その後、サイクル時間の経過と共に階段状の変化をする。これは脱着初期における水蒸気脱着量が比較的多く、脱着と同時に熱が奪われて吸着材温度が一時的に低下し、脱着速度が減少したことが一因と考えられる。**Balance** では脱着初期の水蒸気脱着が幾分穏やかに進むため、水蒸気吸脱着速度の減少は緩やかである。最適な吸着/脱着時間比では、**Balance** の吸脱着量が最大であるが、これは、脱着時間終了間際まで比較的大きな脱着速度が維持されることに起因する。これには、**Balance** が、1.5nm 程度の細孔を特異的に多く持つことが関係しているものと思われる。

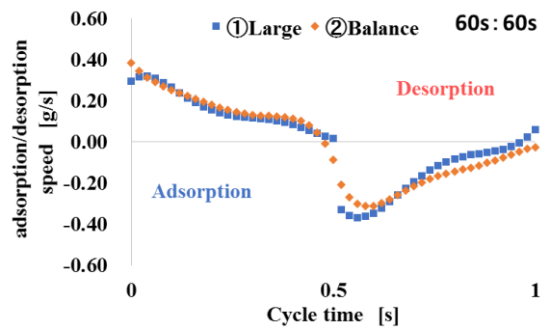


図9 吸脱着速度の経時変化

以上の結果より、デシカントロータの細孔径分布と吸脱着挙動は緊密に関係しており、特に脱着方向の速度差について数値計算に反映すべきことが明らかになった。

(2) 高度数学モデルと設計操作指針の構築

本研究では、空気流路中の湿度および温度分布も表現できるよう図10に示すモデルを考えた。図11は、デシカントロータの空気流路内部の空気温度分布の計算例である。従来の数学モデルでは、空気流路内部の円周方向の温湿度分布は考慮しないことが多いが、数値計算結果を見る限り、数学モデルに反映させるべきことがわかる。

計算例として、図12は、デシカントロータ内部の物質移動における空気流路側対流物質伝達抵抗と、吸着材壁側物質拡散抵抗の関係を示したものである。これより、支配関係はデシカントロータ内部の場所によって大きく異なることが分かった。特に、除湿から再生に切り替わった直後、逆に再生から除湿に切り替わった直後の領域については、その支配関係は非常に激しく入れ替わっていることが分かる。一般的に、デシカントロータの大まかな性能を知るためには、総括的な熱・物質移動抵抗を場所によらず一定値(平均値)としても差し支えない場合が多いとされているが、例えば、デシカントロータの内部の詳細な構造などの影響や、それらの詳細な設計について検討する場合には、内

部の局所的な移動特性が重要になる。

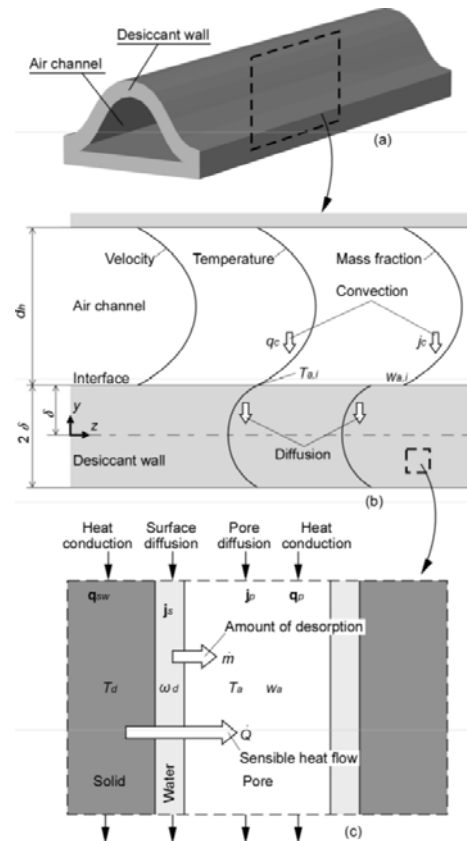


図10 デシカントロータ内部の熱・物質移動現象のモデル化

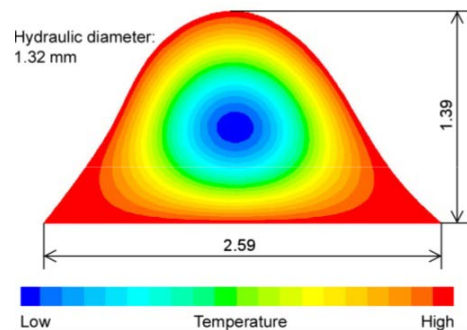


図11 デシカントロータの空気流路内部の空気温度分布(計算例)

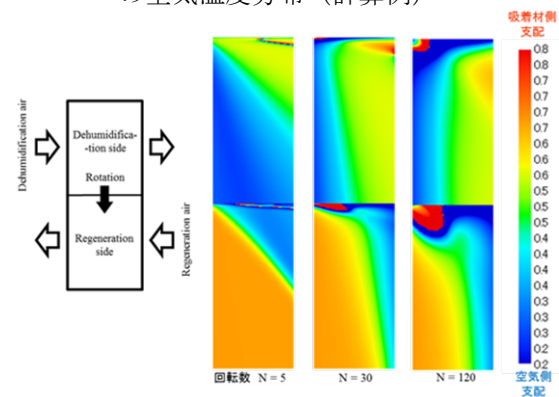


図12 デシカントロータ内部における空気流路側と吸着材壁側の物質移動抵抗の支配関係分布

(3) 昇温操作への応用可能性

図13に実験装置図を示す。チューブポンプで水の流量を制御することで蒸気発生量を調節した。発生した蒸気はコイルを通過し所定温度となり、吸着塔に流入する。吸着塔は内径18mm長さ300mmのテフロン製であり、側面に60mm間隔に取り付けた熱電対により流れ方向の温度変化を測定した。実験には、φ3~4mmの粒状シリカゲル(A形, B形, RD形)とφ1×3mmペレット状のゼオライト13Xを用いた。ゼオライト13Xは低湿度域での吸着容量, シリカゲルB形は高湿度域での吸着容量に優れる。

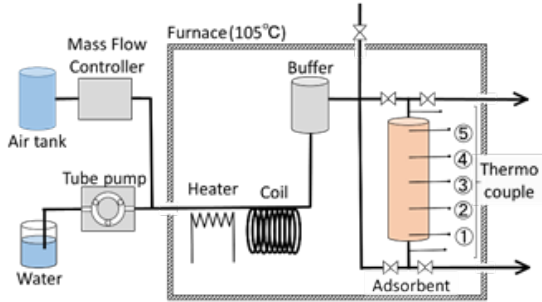


図13 吸着熱を利用した排蒸気の昇温

図14に完全再生→水蒸気吸着→外気による湿度差脱着時の吸着塔内部の温度変化を示す。上段は吸着時, 下段は脱着時の温度履歴である。吸着について, ゼオライト13Xは, 水蒸気吸着に伴って相対湿度が低下する吸着塔出口付近でも良好な吸着容量を示し, また, 吸着熱が大きいことから105°Cの排蒸気温度は200°C近くにまで達する。一方, 下段に示す再生時の温度履歴を見ると, 再生側では到達温度が低くならず脱着が継続する時間も長い。ゼオライトから水蒸気を脱着させるには濃度差だけではなく, 追加のエネルギー投入が必要であり, 吸脱着サイクル型の昇温操作への適用は難しい。A形シリカゲルは, 温度上昇度はゼオライトよりも40°C低いが, 濃度差脱着が可能であり, 連続昇温操作が可能である。

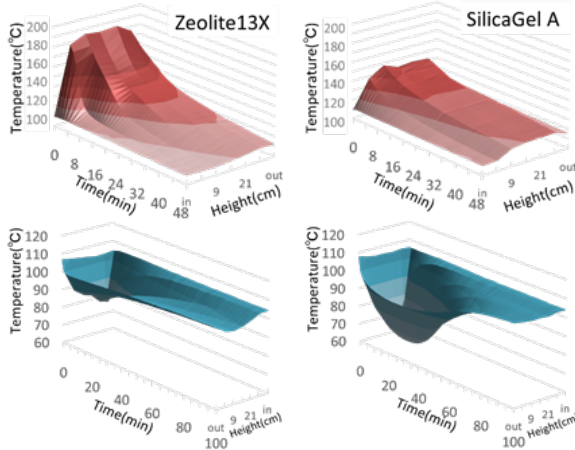


図14 吸着塔内部の温度履歴

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計6件)

- ① 児玉昭雄、辻口拓也、大坂侑吾、吸着材デシカントロータ内温度分布の測定とその考察、日本冷凍空調学会論文集, 査読有, 33巻、2016、165-172
DOI:http://doi.org/10.11322/tjsrae.16-06SI_0A
- ② 伊藤卓、大曲康仁、山口誠一、齋藤潔、低露点環境向けデシカント空調の制御に関する研究 第2報—数値計算による運転変数のパラメータスタディー、日本冷凍空調学会論文集, 33巻、2016、185-196
<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/tjsrae/-char/ja>
- ③ Y. Suwa, M. Kumita, H. Komori, A. Kodama, Y. Otani, Impregnation of Calcium Chloride into Alumina Thin Film Prepared by Oxalic Acid Anodizing, Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol.47, 2014, 602-607
DOI:http://doi.org/10.1252/jcej.13we302

〔学会発表〕(計18件)

- ① 児玉昭雄、辻口拓也、大坂侑吾、吸着材デシカントロータを用いた農業温室の除湿暖房に関する研究、日本機械学会 第26回環境工学総合シンポジウム、2016年6月30日、金沢歌劇座(石川県・金沢市)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.me.se.kanazawa-u.ac.jp/gijutsu/index.html>

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・教授
研究者番号: 30274690

(2) 研究分担者

汲田 幹夫 (KUMITA, Mikio)
金沢大学・自然システム学系・准教授
研究者番号: 60262557

(3) 研究分担者

山口 誠一 (YAMAGUCHI, Seichi)
早稲田大学・理工学術院・准教授
研究者番号: 70454030

(4) 研究分担者

齋藤 潔 (SAITO, Kiyoshi)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号: 90287970