

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560193

研究課題名(和文) 排熱を利用する水蒸気収着剤流動層方式を用いた新規空調機器の開発

研究課題名(英文) Development of a new air-conditioning system of fluidized bed with organic powder sorbent using waste heat

## 研究代表者

堀部 明彦 (HORIBE AKIHIKO)

岡山大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号：50229241

## 研究成果の概要(和文)：

本研究は、排熱を利用する収着剤流動層による新たな空調システムの開発を目的としている。空調の基礎となる収着・脱着挙動を検討するために、空気流速、温度、湿度、収着剤充填量、および収着・脱着切り替え時間を関連因子として実験を行った。その結果、流動層内での水蒸気の収着・脱着挙動に及ぼす各因子の影響を明らかにした。さらに、除湿量が最大となる収着・脱着切り替え時間を求めるなど、実機として用いる際の基礎的データを整理し、新たな空調機器の知見を公表した。

## 研究成果の概要(英文)：

The aim of this research is to develop a new air conditioning system of fluidized bed with organic powder sorbent which is able to utilize the low temperature waste heat. The experiments were carried out under the various conditions such as inlet air flow velocity, air temperature, air humidity, amount of sorbent, and batch cycle time. As a result, the effects of each factor for sorption and desorption in the fluidized bed were clarified. The cycle time which maximizes the amount of dehumidification became clear. Basic data of this system for using as a real equipment were obtained and the findings of the new air-conditioning equipment were made public.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：伝熱工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：収着，空気調和，流動層，温湿度制御，物質移動

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 概要

現在、環境負荷を伴わず省エネルギーに寄与できる空調機器の開発が求められている。そのため、空気中の水蒸気を直接出し入れすることにより、湿度および温度を制御する吸着式空調システムが注目を集めている。本研究は、吸着剤より吸湿性能が高い新規有機系吸着剤を用いて、その特性を生かすために槽内に吸着剤粒子を充填し、下方より空気を流入させ、空気により吸着剤粒子を流動混合させる流動層型空調システムを提案するものである。本システムは、環境に有害な冷媒を用いず、吸着した水分を80℃以下の未利用低温廃熱の利用により水蒸気を脱着させ吸着剤を再生する省エネルギー型の新空調システムである。

### (2) 新規有機系吸着剤

新規有機系吸着剤は、シリカゲルなどの無機吸着剤と同様に水蒸気を取り込み、吐き出す性質を有する物体であり、ポリアクリル系高分子架橋体に水蒸気吸着サイトを付与したものである。現在、吸着式空調システムについては、無機吸着剤に関する材料開発や吸着剤デシカントローターを用いた空調システムに関する研究がなされている。しかし、無機吸着剤ではその性能に限界があるため機器体積が大きくなり、また、本研究で提案する吸着剤に比べて水蒸気を放出する脱着（再生）温度が高い熱源を必要としている。シリカゲルなどの吸着剤は材料表面にのみ蒸気が付着するが、本研究で使用する有機系吸着剤は、材料内部に蒸気分子を取り込み、その膨潤作用により従来の吸着剤に比較して2倍以上の大量の水蒸気を吸着し、80℃から60℃の低温熱で収縮を伴いながら水蒸気の脱着が可能であるなどこれまでの材料には見られないユニークな特徴を有している。

なお、「吸着」とは、物体表面に分子が付着する「吸着」と内部に入り込む「吸収」の両方が生じる現象である。本吸着剤を用いることにより、ノンフロンタイプの高性能な空調機器が可能となるばかりではなく、これまで捨てられていた排熱を利用して、省エネルギー的に除湿冷房や加熱操作を行う高度な調湿・調温サイクルの構築が可能となる。

## 2. 研究の目的

本研究では、この優れた吸湿性能を生かしコンパクトな空調システムを構築するために、単位体積当たりの充填量を大きくすることができる粒子状吸着剤充填槽を用いて空調を行う方法を提案するものである。また、吸着剤の特徴である多大な吸湿のために粒子が膨潤し、通常の充填層では空気の圧力損失が大きくなることをさけるため、圧力損失が少ない状態で用いることができる流動層を採用する。想定している空調システムは、流動層を2つ有するバッチ式システムであり、空気を片方の流動層に流入させ除湿し、吸着剤の水蒸気吸着量が所定の値に達するともう一方の流動層に流路をきりかえる。その後当初の流動層の吸着剤は排熱により加熱して脱着（再生）を行い、連続的に除湿を行うものである。さらに、水蒸気の吸着の際には冷却により反応が促進されるため、流動層内に冷却用の伝熱管（吸着除湿時）を兼ねた排熱を利用する加熱用伝熱管（脱着再生時）を配置し、水蒸気吸着反応における熱・物質伝達を検討するなど、実用化への諸方策における特性を把握することを目的としている。

## 3. 研究の方法

(1) 吸着剤流動層における基礎的挙動の実験的解明と評価

### ① 吸着剤流動層実験装置の作製

実験装置は大別して空気調節部、試験部、

温水または冷却水循環部から構成する。試験部は可視化を可能とするためにアクリル製の矩形容器とする。その上部と下部に分散板としてポリプロピレンフィルタを設置し、内部に収着剤を充填する。また空気入口および出口に試験部の圧力損失を測定するための圧力タップ並びに湿度測定用の湿度センサーを設け、出口には精密湿度測定用の露点計も設置し、入口、出口の空気湿度を測定する。また、流動層内および空気入口、出口には熱電対を取り付けて温度を測定する。また、収着剤を直接サンプリングすることによって水蒸気収着割合の経時変化を測定するため、サンプリング口を設ける。試験部の外郭部は断熱材で覆い熱ロスを減少させる。流動層内部には水平銅製伝熱管群を設置し、収着時には冷却水、脱着時には温水を流すことによって流動層と顕熱交換を行う。伝熱管表面には熱電対を設置し、管表面熱伝達の評価を行うための温度測定を行う。

空気調節部は、コンプレッサーによって圧縮された空気を水冷式アフタークーラーとボルトレスクーラーを通過させ冷却・乾燥し、さらにメンブレンドライヤーを通過させることで乾燥空気を得る。その後、気泡塔によって加湿し、エアヒーターで温度を調節する事によって所定の温・湿度の空気とし、浮子式流量計によって流量を調節し、試験部に送風させる。なお、水冷式アフタークーラーは配管の周りにブラインを循環させることで空気中の水蒸気を凝縮し、低湿度の空気にする。また、メンブレンドライヤーは、いわゆる膜式除湿器であり、水蒸気を透過し易く空気を透過し難い高分子膜を用いて除湿し、得られた乾燥空気の一部を用いて高分子膜を乾燥させ、一定の除湿能力を保つ構造となっている。気泡塔は、温水を満たしたステンレス円筒容器の下方より分散板を介して空気を送り込み、

気泡となった空気が温水中を上昇する過程でその温度における飽和湿度まで加湿される仕組みとなっている。この温水温度は、試験部入口に設置した湿度センサーの出力をPID制御し、気泡塔内部に設置されたヒーターを加熱することによって調節する。

試験部に設置された伝熱管への温水または冷却水は、恒温水槽を用いて所定の温度に制御しマグネットポンプによって伝熱管に送られる。温水または冷却水は試験部で熱交換を行った後、再び恒温水槽に戻り循環する。流量は試験部出口側に設けられたバルブによって調整される。伝熱管入口および出口には熱電対を設置し、入出口温度差および冷却水流量から試験部での交換熱量の算出を行う。

## ②収着剤流動層における基礎的挙動の把握と評価

実験において種々のデータを採取して、空気流速、温度、湿度および加熱・冷却管温度、収着剤層高さ等、水蒸気の物質移動に関係する因子の影響を検討し整理する。さらに、本収着剤を利用した流動層式空調システムが、吸着剤を用いた既存のデシカント空調システムに比べて有効かどうか評価する。さらに、実用化に向けたバッチ式パイロットプラント作製において装置上改善すべき点を明らかにする

## (2)パイロットプラントの作製および性能評価

実機として想定しているものは、収着剤流動層を2つ用いて、収着（除湿）と脱着（再生）を繰り返して連続的に空気の湿度および温度を制御するシステムであり、システム稼働状況、性能、効率を把握するために、一般家庭用の小型プラントを模擬したものを作製し、実機で想定される条件にて実験を行う。実験装置の空気調節部および温水または冷却水循環部は、基礎的試験の実験装置の構成を

基本とし、バッチシステムを行うための空気流路の切り替え機構、および流動層内の冷・加熱をするための伝熱管に流入させる冷却水と温水の切り替え機構を作製する。種々の条件において実験を行い、バッチ切り替えに伴う収着・脱着挙動の経時変化を明らかにする。さらに、空気流速などを変化させて、装置の熱容量と収着挙動を考慮した収着、脱着の切り替え時間の最適化について特に詳細な検討を行い、本システムの除湿特性について明らかにし、実機として用いる際の基礎的データを取得する。

### (3) 除湿挙動推定のためのモデル化およびデータの整理

本システムは、一般家庭用の他に大型の工場やビル用として用いることも想定している。実験では、種々の大きさにおける性能を明らかにすることは困難であるため、上記の実験結果を元にして本システムをモデル化し実機を想定した性能予測を行う。物質伝達率に関しては、本収着剤の場合、理論的に算定することが困難であるため、実験整理式より推定する。

## 4. 研究成果

### (1) 収着剤流動層実験装置の作製

収着剤流動層における基礎的挙動の実験的解明を行うための実験装置を作製した。実験装置は大別して空気調節部、試験部、温水または冷却水循環部から構成している。試験部はアクリル製の矩形容器とし、その上部と下部に分散板としてポリフロンフィルタを設置し、内部に収着剤を充填した。また空気入口および出口に圧力タップ並びに湿度測定用の湿度センサー、温度測定用熱電対を設け、出口には精密湿度測定用の露点計も設置し、入口、出口の空気湿度・温度を測定できる構造とした。流動層内部には水平銅製伝熱管群を

設置し、収着時には冷却水、脱着時には温水を流すことによって流動層と顕熱交換を行う。

空気調節部では、コンプレッサーからの空気を水冷式アフタークーラーとメンブレンドライヤーを通過させて乾燥空気を得る。その後、気泡塔によって加湿し、エアヒーターで温度を調節する事によって所定の温・湿度の空気とし、浮子式流量計によって流量を調節し、試験部に送風させる。試験部に設置された伝熱管へ供給される温水または冷却水は、恒温水槽を用いて所定の温度に制御したものをを用いた。

### (2) 収着剤流動層における基礎的挙動の把握と評価

収着剤流動層における収着・脱着実験を行い、空気流速、温度、湿度の影響、および加熱・冷却管温度を変化させ、収着と脱着に関する基礎的挙動を把握し、さらに収脱着切り替え運転に関する検討を行った。その結果、流動層内での冷却、加熱によって、収着、脱着現象が促進され、より多くの水蒸気移動が行われることが判明した。また、収着の際には空気流速が増加すると除湿量は増加するが、出口側空気の絶対湿度低下は少なくなることや、空気の温湿度が変化した場合の物質伝達挙動と収着完了時間に与える影響について明らかにした。

### (3) パイロットプラントの作製および性能評価

想定する実機は、収着剤流動層を2つ用いて、収着（除湿）と脱着（再生）を繰り返して連続的に空気の湿度および温度を制御するシステムであり、システム稼働状況、性能、効率を把握するために、一般家庭用の小型パイロットプラントを作製し、実機で想定される条件にて実験を行った。実験装置の空気調節部および温水または冷却水循環部は、前年度までに使用した収着・脱着実験装置の構成

を基本とし、また、バッチシステムを行うための空気流路の切り替え機構、および流動層内の冷却・加熱をするための伝熱管に流入させる冷却水と温水の切り替え機構を作製した。

#### (4)パイロットプラントの性能評価

空気流速や空気温度、湿度、および収着剤充填量など影響するパラメーターを変化させた実験を行い、収着・脱着の経時変化や装置の熱容量を考慮したバッチ式の収着、脱着の切り替え時間の最適化や除湿特性について明らかにし、実機として用いる際の基礎的データを整理した。

#### (5)除湿挙動推定のためのモデル化およびデータの整理

本システムの除湿挙動を推定するための解析モデルの検討、および上記の実験結果を元にして、空気流速、温度、湿度などの影響について実験整理式より推定できるようにデータ整理を行った。

#### (6)実機を想定した改良型収着剤流動層方式空調システムの試作および試験

これまでの研究では、収着（除湿）と脱着（再生）を交互に繰り返すバッチ式システムを想定し、流動層内収着剤の冷却・加熱により収脱着の切り替えを行ってきたが、収着剤の熱容量に加え、流動層容器の熱容量の影響により層内の冷却加熱に要する熱量が大きくなり、これが収脱着反応の妨げとなっていることが明らかとなった。そのため、更なる性能向上のため、収着反応と脱着反応をそれぞれ別々の流動層で行い、輸送パイプを用いて収着剤を輸送することで、流動層容器の熱容量の影響を小さくし、収着・脱着反応の切り替えを行うことなく連続運転を可能にする二槽循環式流動層システムを試作し、試験的な実験を行い、除湿挙動を明らかにした。

以上のように、本研究は、膨大に分散賦存

する低温排熱を利用することができ、従来の吸着剤に比較して2倍以上の性能を有する有機収着剤を用いる新たな流動層式空調システムを提案し、基礎的性能を明らかにしたものである。排熱を利用した空調機器としては、吸収式冷凍機やシリカゲルなどを用いたデシカント空調システムが実用化されているが、本システムでは、60℃程度までの未利用低温排熱が有効利用出来ることを示し、現在改良が限界にきている従来の空調システムの新たな展開を図ることが可能となった。なお、実用化に向けての改良点を今後検討する予定である。研究成果は、論文発表などを行うことにより国内外に新たな知見として発信している。

#### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計3件）

①堀部明彦, 稲葉英男, 春木直人, 藤田尚利, 有機系収着剤流動層の収脱着連続運転時の除湿性能, 日本冷凍空調学会論文集, 査読有, Vol. 26, 2009, pp. 173-184.

② A. Horibe, S. Husain, H. Inaba, N. Haruki, P. Tu, An experimental investigation of sorption process in fluidized bed with cooling pipe, Journal of Heat Transfer, 査読有, Vol. 130, No. 11, 2008, 114509-pp. 1-4

③ A. Horibe, S. Husain, H. Inaba, N. Haruki Sorption characteristics of organic powder sorption material in fluidized bed with a cooling pipe, Journal of Thermal Science and Technology, 査読有, Vol. 3, No. 2, 2008, pp. 207-218.

〔学会発表〕（計2件）

①堀部明彦, 春木直人, スクマワチ, 中野敬士, 二塔循環式流動層における粉末有機系収

着剤の収脱着特性, 日本機械学会中国四国支部第 49 期総会・講演会, 2011 年 3 月, 岡山.  
②堀部明彦, 稲葉英男, 春木直人, 藤田尚利,  
機系収着剤流動層の収脱着連続運転時の除湿性能, 2008 年度日本冷凍空調学会年次大会, 2008 年 10 月, 大阪

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

堀部 明彦 (HORIBE AKIHIKO)

岡山大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号 : 50229241

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

春木 直人 (HARUKI NAOTO)

岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授

研究者番号 : 10311797