

令和 4 年 6 月 1 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04218

研究課題名（和文）金属被覆吸着剤粒子等の複合材料における新たな熱物質移動特性の解明と空調への展開

研究課題名（英文）Research on mass and heat transfer characteristics of composite materials such as metal coating sorbent particles for development in air conditioning

研究代表者

堀部 明彦（Horibe, Akihiko）

岡山大学・自然科学学域・教授

研究者番号：50229241

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：新たな空調のための、吸着材粒子や複合吸着剤粒子の特性を考慮した水蒸気の出し入れを行うために、平衡吸着量や吸着速度、および粒子層内の熱伝導率など様々な因子の効果把握した。各粒子の平衡吸着量などの物性値は、吸着量測定装置を用いて、粒子層の有効熱伝導率は、温湿度が制御できる熱伝導率測定装置を製作して測定し、各種熱物性値を検討した。次に、各粒子を充填して下部より空気を流入させる、吸着剤の吸着と脱着（乾燥）による空気の除湿サイクルを想定した実験装置を作製し、実験因子として、空気流速、温度、湿度、および粒子量を変化させ、熱と水蒸気の移動量を検討し、熱物質移動について知見をまとめた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

水蒸気を出し入れする材料（デシカント、吸着剤）によるデシカント空調は、多くのメリットを有しているが、システムを展開するためには材料と機構両面からの知見が必要とされる。本研究で使用する有機系吸着剤は、従来の吸着剤に比較して2倍以上の水蒸気を吸着し、50℃以下の低温熱で水蒸気の脱着（再生）が可能であるなど優れた特徴を有している。本研究では、単位体積当たりの充填量が大きくなる吸着剤粒子層に着目し、吸着材粒子および吸着剤粒子に水蒸気が出し入れできる金属被覆を施した複合粒子等の熱物質移動の把握をすることにより、吸着剤層を用いた除湿・加湿を行う新たな空調システムを構築するための基礎的知見を得ている。

研究成果の概要（英文）：Some factors such as equilibrium sorption amount, sorption speed, thermal conductivity in the particle layer have been studied, for the purpose of taking in and out of water vapor for new air conditioning using a sorbent particles and composite sorbent particles. The equilibrium sorption amount of water vapor was measured using a sorption amount measuring device and the effective thermal conductivity the particle layer were measured by making a thermal conductivity measuring device that can control the temperature and humidity. An experimental device was made for batch-type execution of the air dehumidification cycle by filling the sorbent particles and inflowing air from the bottom to sorption and desorption (dry) the sorbent particles. The air flow velocity, temperature, humidity, and the amount of particles were changed, and the amount of heat and water vapor transfer was examined as experimental factors. As a result, these findings are summarized.

研究分野：熱工学

キーワード：デシカント空調 水蒸気吸着 吸着剤 粒子 熱物性

1. 研究開始当初の背景

近年、空調ニーズが多くなっているが、これまでの圧縮式冷凍機の技術改良では更なる大幅な効率改善は困難であり、また、電気以外にも動力源を多様化する必要がある。これらの問題解決の一方策として、デシカント空調が見直されている。デシカント空調とは、デシカント(Desiccant: 吸着剤や収着剤などの乾燥剤)を用いた空気の除湿動作により種々の操作を行うものである。デシカント空調システムは、装置の規模が大きい点や効率面などがこれまで障害と考えられ普及は遅れてきた。一方で、デシカント空調は熱を主な動力源として作動するため、廃熱など多様な熱を使用できる特徴があり、温度と湿度を分離した制御や大量の外気処理ができることなど環境調和型機器として大きな利点を有している。

デシカント空調の飛躍的な性能進化を図るためには、材料面での開発とその材料の熱物質移動特性の把握および利用が必要な知見となる。

2. 研究の目的

シリカゲルなどの無機吸着剤は材料表面にのみ蒸気が付着するのに対し、本研究で使用する有機系収着剤は、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収着し、50℃以下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優れた特徴を有している。また、一般的に吸着剤はハニカム等に塗布されて用いるが、収着剤の粒子とすることで体積当たりの充填量が増加する。本研究では、収着剤を粒子状にすることにより熱物質移動特性を改善しその特性を把握すること、および、水蒸気が出し入れできる金属被覆を施した新たな複合粒子等の熱物質移動の把握を行う。

具体的には、粒子の見かけの比熱や熱伝導率の変化や、収着剤の水蒸気移動特性の知見を得る。

3. 研究の方法

収着剤粒子や収着剤複合粒子の熱物質移動機構の解明を実現するためには、収着剤複合粒子の開発、各粒子の熱物性測定、熱物質移動機構の検討、実用化を考えた粒子層における脱着(収着剤乾燥)・収着(空気除湿)機構の検討、種々の条件における基本的特性、実機への適用に応じた性能評価と予測など体系的な研究が必要となる。本報告では、本研究で対象とした以下の内容のうち、粒子充填層の有効熱伝導率測定実験および収着速度の測定実験について記述する。

- ・収着剤複合粒子の材質の検討、基礎熱物性の把握
- ・収着剤粒子および複合粒子の熱移動メカニズムに関する検討
- ・粒子層実験装置の作製
- ・種々の条件における基本的特性の把握
- ・システム全体性能の評価と実機の性能予測

(1) 粒子充填層の有効熱伝導率測定実験

①実験装置

粒子充填層の有効熱伝導率を測定には平板比較法を用いた。実験装置は試験部、直流電源装置、および恒温槽から構成されている。図1に試験部の概略図を示す。試験部は主に、試料充填部、上下の加熱・冷却用の銅板、熱流束を測定するためのポリカーボネート板で構成されている。黒点で示した位置に熱電対を設置し、各点で温度を測定する。試料充填部の大きさは、底面を80 mm×80 mmの正方形、高さを60 mmとする直方体である。また、その周囲を断熱材で囲み、側面からの熱移動を防いでいる。

②実験方法

所定の相対湿度条件下にて収着割合が定常状態になった試料を図1の試験部に充填して密閉し、恒温槽から下側の冷却部に水を流すことで試験部内の温度を調節する。直流電源装置によって、ヒータを加熱し、試験部各部の温度が変化しなくなったことを確認して、ポリカーボネート部分で熱伝導率の値より熱流束 q [$W \cdot m^{-2}$]を算定し、試料充填部の上下方向の温度差から、粒子充填層有効熱伝導率 λ_e [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]を算出する。

恒温槽の設定温度は27℃で、試験部上面のヒータへの供給電力は1Wとした。用いる試料は収着剤粒子、銀被覆粒子、および他の複合収着剤粒子である。相対湿度条件はそれぞれ0、30、45、60%RHである。粒子の充填量は充填高さ60mmで統一している。

(2) 収着速度の測定実験

銀被覆粒子は表面の被膜により、収着が阻害されることが予想された。そこで、銀被覆粒子と収着剤粒子の収着速度を測定し、それらを比較することで、表面の被膜層が及ぼす影響を検討した。なお、収着速度は後述の総括物質伝達係数をも用いて議論する。

①実験装置

図2に実験装置の全体図を示す。装置は空気制御部と試験部で構成されている。空気制御部はブロー、熱交換器、超音波加湿器、および乾・湿球温度計で構成されている。PIDにより所定の温度・湿度に調節した空気を試験部に送風する。測定試料は電子天秤(最大分解能10mg)につり下げることができるようになっており、その質量経時変化をPCに出力する。

試験部は60 mm×60 mm、高さ370 mmの矩形管である。底部の直径48.0 mmの穴から空気を流入させる構造となっており、入口部には流入空気を均一にするために整流装置を設置してある。

②実験方法

ドライオーブンにより絶乾状態にした測定試料を試験部に設置して、試験部に所定の空気を流入させて測定を開始する。電子天秤により 5 秒ごとの質量経時変化を測定し、質量の変化が 30 分間で $\pm 0.002 \text{ g}$ となったことを確認して実験を終了した。実験パラメータは相対湿度、温度および流入流速の 3 つであり、それぞれの条件は相対湿度：75.0, 56.0 %RH, 温度：20, 30, 40 °C, 流入流速：0.15, 0.30, 0.50 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ である。

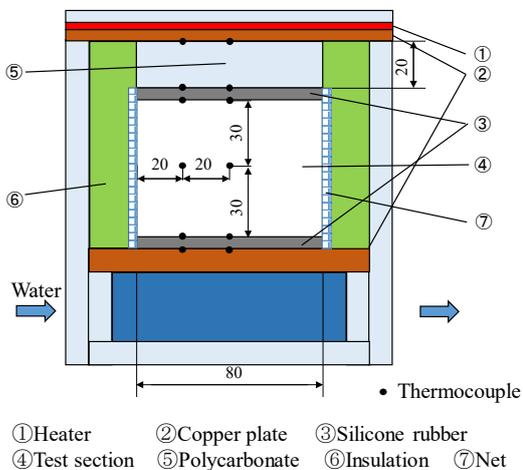


図 1 有効熱伝導率測定装置

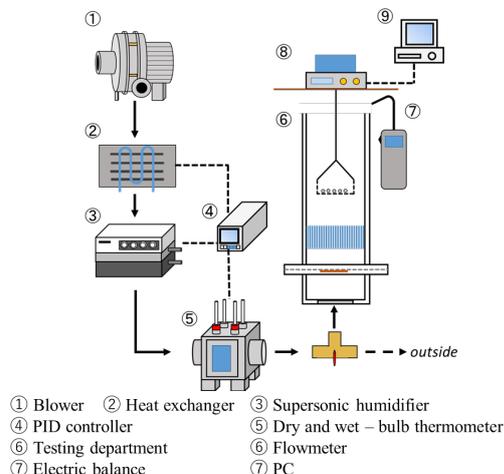


図 2 収着速度測定装置

4. 研究成果

図 3 に、銀被覆粒子の外観写真と表面拡大写真および収着剤粒子の外観写真をそれぞれ示す。絶乾時（相対湿度 0 %RH）では、銀被覆粒子は平均粒子径 2.73 mm, 平均質量 12.5 mg であり、粒状収着剤は平均粒子径 2.55 mm, 平均質量 9.9 mg である。なお銀被覆粒子には体積割合にして約 0.3 %の銀が含まれている。

図 4 に銀被覆粒子および収着剤粒子の各相対湿度における粒子直径 d_p [mm] を合わせて示す。いずれの粒子も相対湿度の増加に伴い、 d_p は増加している。これは収着剤が水分を収着することで膨潤し、体積が増大するためである。

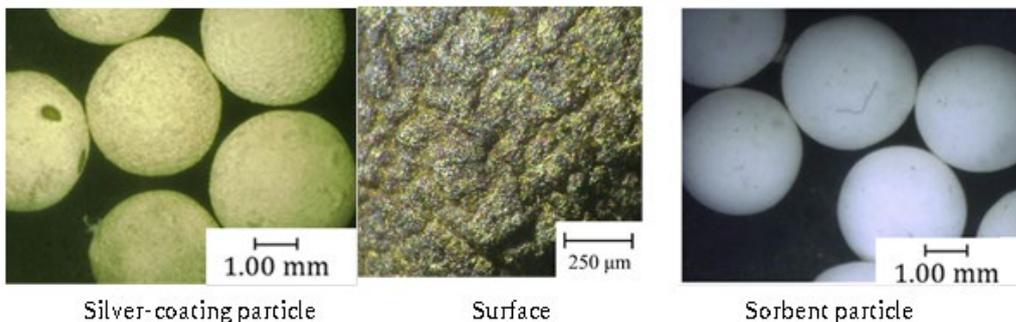


図 3 銀被覆粒子の外観と表面写真および収着剤粒子外観

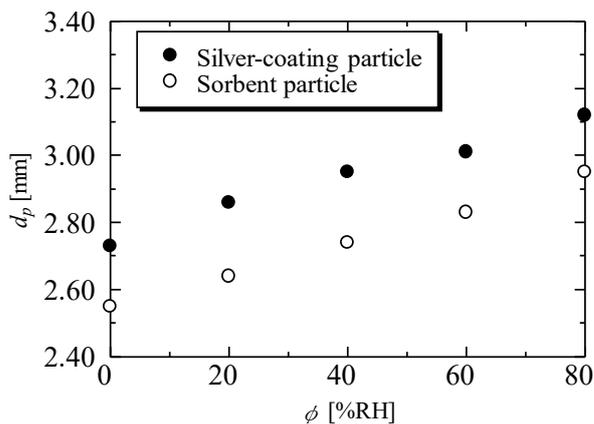


図 4 銀被覆粒子および収着剤粒子直径

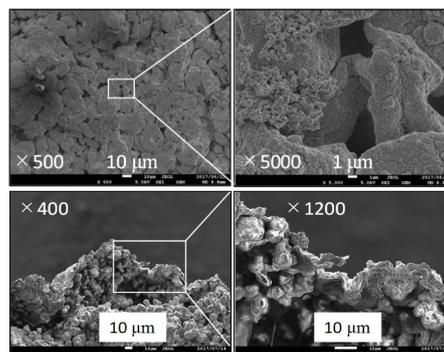


図 5 銀被膜 SEM画像

図5に銀被覆粒子表面および切断面表面の走査型電子顕微鏡（SEM）画像をそれぞれ示す。図より、銀被膜は非常に薄く、隙間があることが確認できる。このことから水分子は被膜の隙間を通り抜け収着することが推定され、粒子内部の収着剤が膨潤すると、粒子径も増大したと考えられる。

図6に、銀被覆粒子および収着剤粒子の充填層の有効熱伝導率 λ_e の測定結果を示す。いずれも相対湿度が増加するに伴い、 λ_e の値は増加している。これは絶乾時に空気（熱伝導率： $0.026 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ）で満たされていた収着剤の細孔内に、それよりも熱伝導率の大きな水分（熱伝導率： $0.618 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ）を収着によって取り込んだために、収着剤のみかけの熱伝導率が増加したことによると考えられる。次に銀被覆粒子と収着剤粒子を比較すると、銀被覆粒子の方が有効熱伝導率 λ_e の値が大きくなっている。絶乾時の収着剤と銀の熱伝導率はそれぞれ $0.085 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ と $418 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ であるから、熱伝導率の大きな銀の被膜をもつ銀被覆粒子の方が λ_e が大きくなったと考えられる。銀被覆粒子に含まれる銀は0.3%と非常に少ないにもかかわらず、銀被膜の有無が λ_e に及ぼす影響は比較的大きい。このことから、銀被覆粒子中の熱伝導では表面の被膜を熱が移動する割合が大きいと考えられる。また両者の相対湿度上昇に対する λ_e の増加割合を比較すると銀被覆粒子の方が小さくなっている。 λ_e の増加は前述したように、収着剤のみかけの熱伝導率の増加によることから、銀被覆粒子の熱伝導では内部の収着剤の影響が小さくなっていると考えられる。

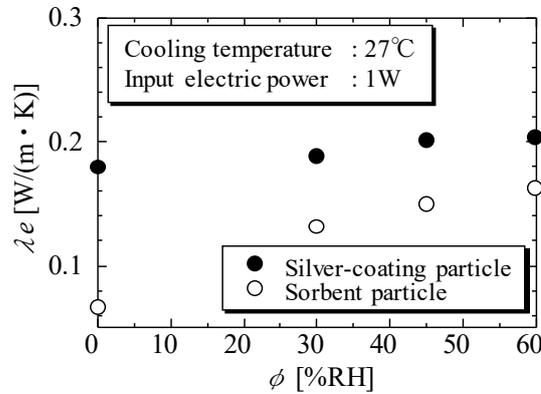


図6 銀被覆粒子および収着剤粒子の充填層の有効熱伝導率

図7に、例として温度 30°C 、相対湿度 $75\% \text{RH}$ 、および流速 $0.15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ の条件における、銀被覆粒子および粒状収着剤の無次元収着割合の経時変化を示す。いずれの試料も実験開始から無次元収着割合は増加し、そして時間が経過するにしたがって平衡状態に近づき、ある値に漸近している。漸近する値は粒状収着剤の方が大きい。

次に収着速度に関する実験結果を示す。単位時間・単位面積当たりの物質移動を表す総括物質伝達係数 $K_s [\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}]$ 、およびそれを平均した平均総括物質伝達係数 $K_m [\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}]$ を用いて評価した。 K_s は無次元収着割合が平衡時の85%に達するまでの値を算出した。また平均総括物質伝達係数 K_m は得られた K_s を平均して求めた。図8は各温度 T における平均総括物質伝達係数 K_m を示している。図を見ると、 T が高くなるにつれて銀被覆粒子と粒状収着剤の両方で K_m は増加している。これは温度が高いほど、水蒸気拡散が活発になったために水分の吸着が促進されることによると考えられる。そして、2つの試料の K_m は同程度の値を示しており、表面の銀被膜により収着が阻害され、収着速度が低下するという事はほぼないと考えられる。

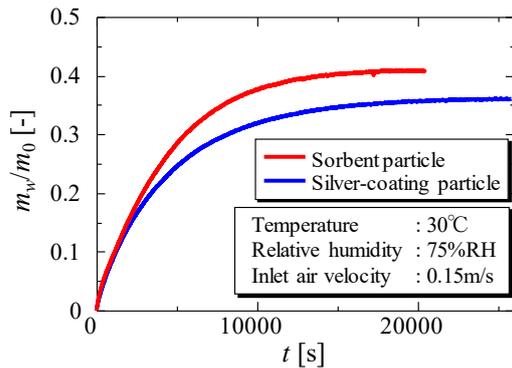


図7 無次元収着割合の経時変化

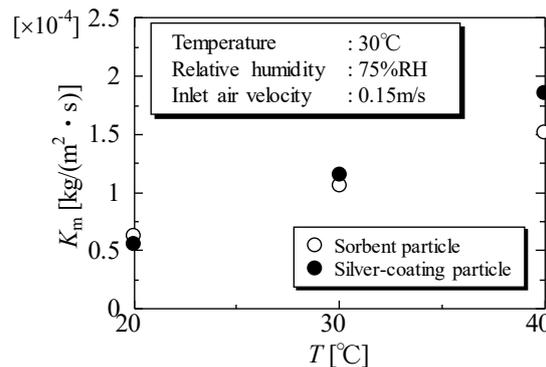


図8 平均総括物質伝達係数

以上のように、本研究では、粒子層にて収着材粒子や複合収着剤粒子の特性を考慮した水蒸気の出し入れを行うために、平衡収着量や収着速度、および粒子層内の熱の移動に作用する熱伝導率など様々な因子の効果を把握した。また、各粒子を充填して下部より空気を流入し、収着剤の収着と脱着（乾燥）による空気の除湿サイクルを想定した実験装置を作製し、実験因子として、空気流速、温度、湿度、および粒子量を変化させ、熱と水蒸気の移動量を検討し、熱物質移動について知見を別途まとめている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 堀部明彦, 山田寛	4. 巻 36
2. 論文標題 粒状収着剤を用いた気流式二槽循環流動槽による気流間水分移動-第1報: システムの試作と基礎的水分移動特性-	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本冷凍空調学会論文集	6. 最初と最後の頁 141-148
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11322/tjsrae.19-06DC_OA	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 堀田 健介, 堀部 明彦, 山田 寛, 磯部 和真, 齊藤利幸, 武井 智行
2. 発表標題 デンキーターを模擬した高分子収着剤粒子ユニットの水蒸気脱着特性
3. 学会等名 第42回日本熱物性シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野澤誠瑛, 堀部明彦, 山田寛, 磯部和真, 齊藤利幸, 武井智行
2. 発表標題 高分子収着剤粒子層における熱・物質移動挙動
3. 学会等名 第42回日本熱物性シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岸根 颯一郎, 堀部 明彦, 山田 寛, 磯部 和真, 西田 良祐
2. 発表標題 高分子収着剤表面における凝縮および着霜挙動
3. 学会等名 日本機械学会 中国四国支部 第59期総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堀部明彦, 山田寛, 佐藤匠, 前多信之介, 出居一博, 丸山智弘
2. 発表標題 有機系収着剤を用いた水蒸気収着蓄熱システムの放熱特性
3. 学会等名 2019年度日本機械学会熱工学コンファレンス
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関