

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656337

研究課題名(和文)PCMと除湿材を併用した等温除湿空調システムの開発

研究課題名(英文)Development of Isothermal Desiccant Cooling System Combined PCM with Silica-gel

研究代表者

桃井 良尚(MOMOI, YOSHIHISA)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：40506870

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円、(間接経費) 810,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、除湿材と潜熱蓄熱材を併用することで、高性能なデシカント空調装置を開発することを目的とし、まず、除湿材の平衡含水率測定を行った。次に、除湿材のみを充填した充填槽に通気を行い、充填槽内温湿度分布及び重量の時間変化を把握した。さらに、充填槽内の温湿度変化について、計算結果と実験結果とを比較することにより計算シミュレーションの精度検証を行った上で、PCMを組み込んだ際の効果を予測した。最後に、PCMと除湿材を併用した場合の槽内温度分布、絶対湿度変化、及び質量含水率変化を測定し、除湿材のみの充填槽通気実験の結果と比較することで、PCMの効果について検討を行った。

研究成果の概要(英文)：Recently, desiccant cooling system has attracted our attention, from the point of view of global warming and in order to improve indoor thermal environment. The purpose of this study is to develop high-efficiency desiccant cooling system by using phase change materials with desiccant materials. It is reported that moisture content of silica-gel, phase change temperature of PCM, and temperature and humidity distribution of PCM and silica-gel packed bed were measured. Moreover, effect of PCM on adsorption performance was predicted by numerical simulation.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学、建築環境・設備

キーワード：デシカント シリカゲル PCM 除湿

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化防止や室内空気質改善の観点から、シリカゲルに代表される多孔質材料を吸着材として用いたデシカント空調が注目されている。デシカント空調では、除湿された空気は吸着熱により昇温する。そこで一般的に除湿後空気の冷却には、回転式の顕熱交換ロータもしくは静止型の顕熱交換機が用いられることが多いが、装置の巨大化が問題となり、このことが普及の弊害の一因となっている。そこで、本研究では、除湿材に潜熱蓄熱材(PCM)を併用または混在させ、吸湿過程における発熱をPCMに吸収させることで、除湿材の温度上昇を抑制させる方法を考えた。この方法により、除湿時の温度操作を最小にすることが可能となり、理論上除湿量も増加するため(図1)、装置の小型化・簡素化も期待できる。

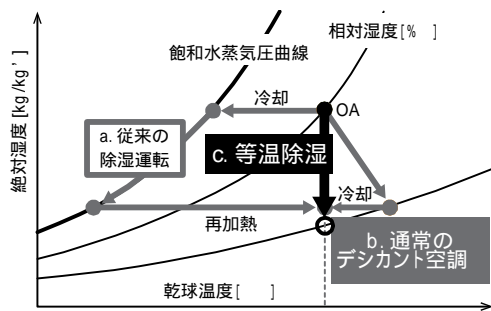


図1 等温除湿の考え方

2. 研究の目的

本研究では、除湿材と潜熱蓄熱材を併用することで、高性能なデシカント空調装置を開発することを目的としている。本研究の具体的な目的と明らかにする内容は、下記の通りである。

(1) 数値解析モデルの検討(関連学会発表①②③④)

除湿材の数値解析モデルに関しては、国内外でいくつかの計算モデルが提案されている。本研究では、これまで研究を行ってきたシリカゲルの除湿計算モデルに潜熱蓄熱材計算モデルを組み合わせた新たな計算モデルを構築し、除湿材と潜熱蓄熱材を併用したシステムの最適化検討を行うことのできる数値計算モデルの確立を目指す。

(2) シリカゲルの平衡含水率測定(関連学会発表)

使用する試料の物性値を把握するため、平衡含水率の測定を行う。得られた平衡含水率曲線の式は、数値計算シミュレーションに用いる。

(3) シリカゲル充填槽内の温湿度分布測定(関連学会発表)

除湿材としてシリカゲルのみを充填した充填槽に通気を行い、充填槽内温湿度分布及びシリカゲル重量の時間変化を把握する。

(4) 数値計算モデルによる吸着性能予測(関連学会発表)

充填槽内の温湿度変化について、計算結果と実験結果とを比較することにより計算シミュレーションの精度検証を行った上で、PCMを組み込んだ際の効果を予測する。

(5) PCM相変化温度の測定(関連学会発表)

PCMの物性確認のため、PCMのみを充填した充填槽に通気を行い、温度変化を測定することで、凝固温度、融解温度、過冷却の状況について把握する。

(6) PCM・シリカゲル併用充填槽内の温度分布及び吸着性能(関連学会発表)

PCMとシリカゲルを併用した充填槽に通気し、槽内温度分布、絶対湿度変化、及び質量含水率変化を測定する。シリカゲルのみの充填槽通気実験の結果と比較し、PCMの効果について検討を行う。

3. 研究の方法

(1) 数値解析モデルの検討

デシカント除湿空調における熱・湿気輸送モデルについて、各種の数値計算モデルを概説し、既往の実験結果を用いて絶対湿度と水分ポテンシャル差を駆動力とした総括物質移動係数の比較検討や予測される質量含水率の時間変化についての比較検討を行った。

(2) シリカゲルの平衡含水率測定

実験には、図2に示す分流式湿度発生装置(アドテック製)を用いた。本装置は、乾燥及び湿潤空気の流量比率を自動制御し、任意の湿度の空気を供給できる。シリカゲル(WAKO製, 190-00471, A形・中粒)を充填した100mmの金属性の円筒容器に、10L/minで一定温湿度の空気を供給し、適宜電子天秤(A&D製, GX-8000)に載せて重量を測定し、重量が変化しなくなった時の重量を記録した。平衡判定にはJISの基準を用いた。実験条件は、供給空気の温度は25一定とし、絶対乾状態から、相対湿度20%、50%、80%、93%と増加させていった。なお、試料の絶対乾質量は360.2gであった。

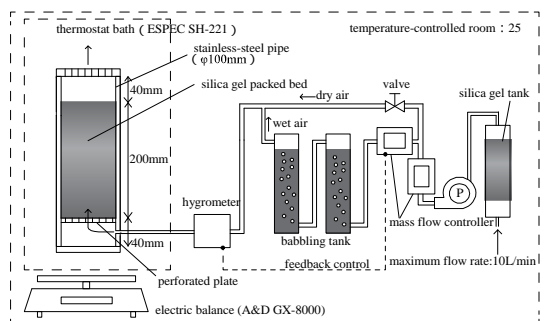


図2 実験装置

(3) シリカゲル充填槽内の温湿度分布測定

湿度発生装置は、平衡含水率測定時と同じであるが、60mmの充填槽の中心部温度が測定できるように充填高さ200mmのシリカゲル充填槽の側面からK型シース熱電対を流れ方向に等間隔に5点(上流側から測定点(1),(2),(3),(4),(5)の順)挿入している。ただし、中央の測定点(3)においては、充填槽内空気を約0.5~2L/minでサンプリングし、露点計(VAISALA製, HM70)を用いて湿度測定を行った。温度70・相対湿度10%で脱着させた状態のシリカゲル(初期含水率0.09)を使用し、温度30・相対湿度70%の空気を給気した。給気の流量が5L/minと10L/minの2条件設定した。

(4) 数値計算モデルによる吸着性能予測

表1に計算に用いた式及び計算条件を示す。PCMを入れた場合は、除湿材とPCMの容積比を1:1として各条件で与え計算した。

表1 計算式

$$\begin{aligned} \varepsilon \frac{\partial(\rho_a C_a \theta_a)}{\partial t} &= -\varepsilon \frac{\partial(u \rho_a C_a \theta_a)}{\partial x} + \varepsilon \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_a \frac{\partial \theta_a}{\partial x} \right) \\ &\quad - \alpha S_d (\theta_a - \theta_d) - \alpha S_p (\theta_a - \theta_p) \quad (1) \\ \varepsilon \frac{\partial(\rho_a X_a)}{\partial t} &= -\varepsilon \frac{\partial(u \rho_a X_a)}{\partial x} + \varepsilon \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda'_a \frac{\partial X_a}{\partial x} \right) - \alpha' S_d (X_a - X_h) \quad (2) \\ \varphi_a \frac{\partial(\rho_p C_p \theta_p)}{\partial t} &= \alpha S_d (\theta_a - \theta_p) + \alpha' S_p (X_a - X_h) \quad (3) \\ \varphi_p \frac{\partial(\rho_p C_p \theta_p)}{\partial t} &= \alpha S_p (\theta_a - \theta_p) \quad (4) \\ \cdot \theta_a < 28, \theta_a > 30 \text{ のとき} \\ C_p &= 3500 \\ \cdot 28 < \theta_a < 30 \text{ のとき} \\ C_p &= \left[\frac{60\pi}{2} \sin \left\{ \frac{\pi}{2} (\theta_a - 28) \right\} + 3.5 \right] \times 10^3 \quad (5) \\ \varphi_a \rho_a \frac{\partial w}{\partial t} &= \alpha' S_d (X_a - X_h) \quad (6) \end{aligned}$$

- x : 流れ方向の距離 [m] (充填槽厚さ0.2mを15分割)
- t : 時間 [s] (時間刻みは0.05s)
- u : 空隙部を流れる空気の流れ速 [m/s] : 0.05
- ρ : 密度 [kg/m³] : 除湿材は1910、空気は温度によって変化
- C : 比熱 [J/kgK] : 乾燥空気は1006、水蒸気は1846、水は4180、除湿材は580
- ε : 空隙率 [-] : 0.57
- φ : 充填率 [-] : 除湿材、PCMともに0.215
- θ : 温度 [°C]
- λ : 熱伝導率 [W/mK] : 空気は0.022、除湿材とPCMは1.0
- α : 熱伝達率 [W/m²K] : 20
- S : 単位体積あたりの表面積 [m²/m³] : 除湿材、PCMともに322.5
- w : 絶乾状態の除湿材1kg当りの含水量 [kg/kg]
- L : 水の蒸発(吸着)潜熱 [J/kg] : 2850000
- X : 絶対湿度 [kg/kg]
- λ' : 湿気伝導率 [kg/ms(kg/kg)] : 0.000032
- α' : 見かけの湿気伝達率 [kg/m²s(kg/kg)]
- 見かけの物質移動係数 $\alpha' S$: 11 [kg/m²s]

- 【初期条件・境界条件・その他設定条件】
- シリカゲルの半径 : 2 [mm]
- 流入空気の温度 : 30 [°C]
- 流入空気の絶対湿度 : 0.0188 [kg/kg]
- 初期温度 : 全て30 [°C]
- 初期絶対湿度 : 全て0.0188 [kg/kg]
- 初期含水率 : 0.09 [kg/kg] (70・10%に平衡している状態)
- 【添字】
- a : 空気
- b : 吸着相
- d : 除湿材
- p : PCM

(5) PCM相変化温度の測定

平衡含水率測定時と同じ実験装置を用いて通気実験を行い、PCMの相変化温度測定を行った。PCMにはパラフィン系の相変化材料(JSR製, GP011)を使用し、60mmの金属製円筒容器に充填し、10L/minの流量で一定温度の空気を供給し、通気中に槽内温度分布を測定した。通気温度条件として、冷却側はまずは37での通気を行って槽内のPCMを完全に融解させた後、25の通気により凝固させた。加熱側は、完全に凝固した状態から38の通気によって融解させた。通気湿度の制御は行わなかった。

(6) PCM・シリカゲル併用充填槽内の温度分布及び吸着性能

測定点はPCMの相変化温度の測定と同様であるが、中央の測定点(3)においては充填槽内空気をサンプリングし、露点計(VAISALA製, HM70)を用いて湿度測定を行った。通気中、充填槽は電子天秤の上に設置し、重量変化の測定を行った。通気条件は温度30・湿度70%、流量5L/minとした。シリカゲルの初期条件は温度70・湿度10%、絶対湿度19g/kgDAとした。PCMとシリカゲルの混合比は、体積比でおよそ1:1とした。充填重量はPCMが99.5g、シリカゲルが152.5g(絶乾時)とした。

4. 研究成果

(1) シリカゲルの平衡含水率測定

図3に、測定された平衡含水率曲線を示す。Langmuir型の吸着等温線が確認された。

各湿度条件において測定された平衡時のシリカゲル重量を図3中の式(1)に代入することにより質量含水率を算出した。

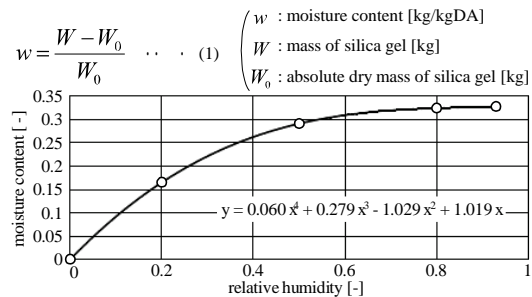


図3 平衡含水率曲線

(2) シリカゲル充填槽内の温湿度分布測定

図4、図5に、各流量条件でのシリカゲル充填槽内温度分布を示す。槽全体の平衡に要した時間は、流量の小さいcase1で約42時間、流量の大きいcase2では約24時間であった。case1では、充填槽上流部で吸着した後、徐々に吸着が充填槽下流側へ移っていき、約1時間後には最下流側でも吸着による温度上昇が見られた。流量の大きいcase2では、通気開始後すぐに下流側まで温度が上昇し、明確な吸着帯は形成されなかった。case1とcase2を比較すると、最上流の測定点(1)で

は、最高到達温度が約 52 と差異はなかったが、その後の温度低下が case2 の方が速く、流量が大きいほど早く吸着が完了することがわかった。また、両条件とも下流の測定点ほど最高到達温度が下がる結果となり、充填槽の断熱性が十分でないためと考えられる。

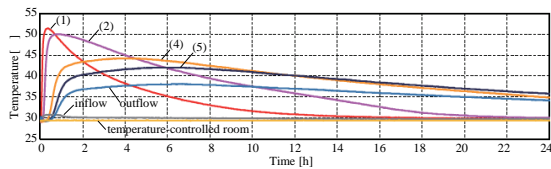


図 4 槽内温度分布の時間変化 (5L/min)

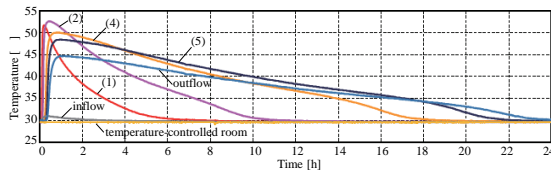


図 5 槽内温度分布の時間変化 (10L/min)

(3) 数値計算モデルによる吸着性能予測

図 6 に槽内温度分布を、図 7 に槽内中央の測定点における絶対湿度を示す。完全断熱を仮定したため、実験とは各点の最高到達温度や吸着帯が最下流まで移動した後 (測定開始 30 分以降) の絶対湿度の時間変化が異なるものの、傾向としては現象を再現できていると言える。今後、実験装置の断熱性向上や計算モデルへの熱損失の考慮などを検討する。次に、PCM を入れた場合の槽内温度分布を図 8 に示す。吸着による発熱を PCM が吸熱することにより温度上昇が抑えられ最下流の測定点(5)の温度上昇が遅れていることがわかる。しかし、時間が経過するにつれ下流側では温度上昇しており、PCM では十分には吸熱しきれていないことが分かる。図 9 及び図 10 に、それぞれ PCM の有無による槽中央測定点(3)及び最下流の測定点(5)の絶対湿度の差異を示す。PCM を入れた条件では、低い絶対湿度の時間帯が PCM なしの条件の 2 倍ほど長く継続している。しかし、絶対湿度が一度急激に上昇した後は、PCM なしの条件よりも高い絶対湿度を示している。このことより、PCM を入れた場合には、吸着の初期段階で高い除湿性能を発揮することがわかる。

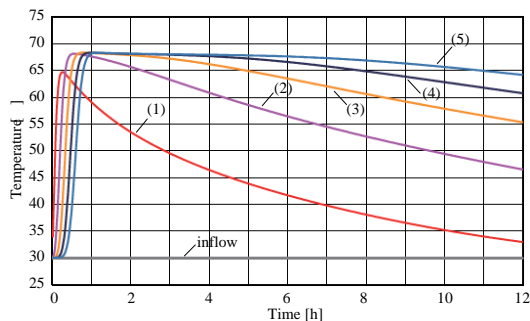


図 6 槽内温度分布の計算結果 (5L/min)

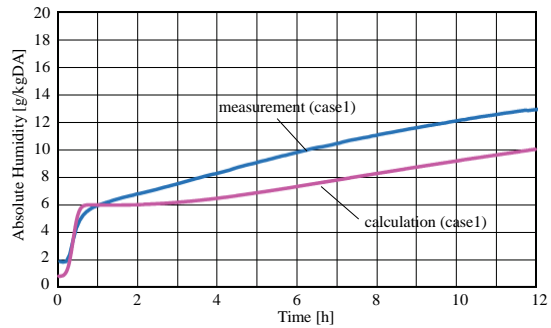


図 7 絶対湿度 (測定点(3)) の計算結果と実験結果の比較 (5L/min)

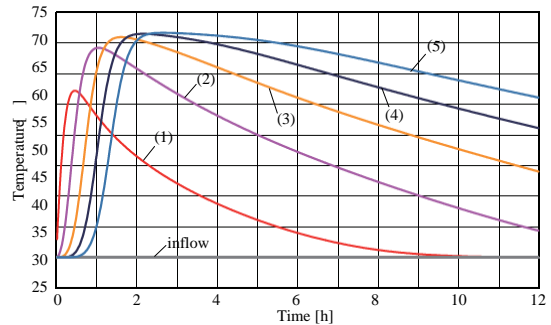


図 8 槽内温度分布の計算結果 (case1 に PCM を入れた場合) (5L/min)

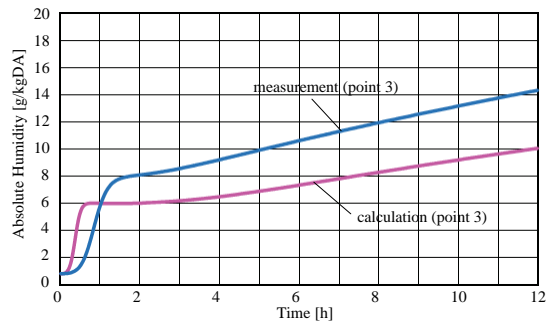


図 9 PCM の有無による絶対湿度 (測定点(3)) の比較 (5L/min)

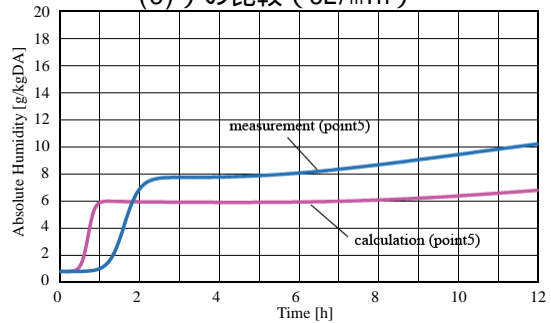


図 10 PCM の有無による絶対湿度 (測定点(5)) の比較 (5L/min)

(4) PCM 相変化温度の測定

PCM 充填槽通気時の温度分布測定結果を図 11、図 12 に示す。加熱側、冷却側ともに、流入空気温度変化に対して下流側ほど温度変化に遅れが生じている。温度変化の遅れより、実験に用いた PCM の相変化温度は約 35 と推察される。

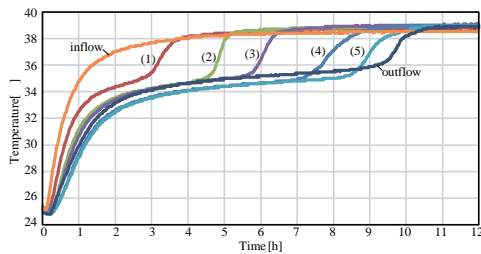


図 11 PCM 充填槽内温度分布 (加熱側)

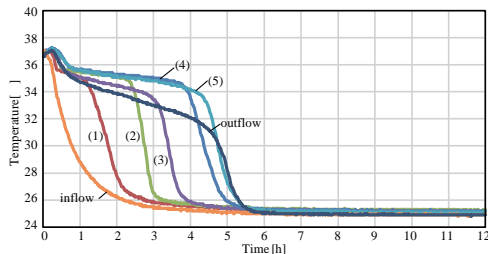


図 12 PCM 充填槽内温度分布 (冷却側)

(5) PCM・シリカゲル併用充填槽内の温度分布及び吸着性能

シリカゲル充填槽と PCM・シリカゲル併用充填槽の温度分布を、図 13 と図 14 に示す。

シリカゲル充填槽について、槽全体の平衡に要した時間は約 42 時間であった。通気開始後充填槽上流部で大きく吸着した後、漸次吸着帯が充填槽下流側へ移って行き、下流側でも吸着による発熱が長く続いた。吸着帯が充填槽最上部(下流側)まで移動するのに要した時間は、約 90 分であった。また、充填槽上部の測定点ほど最高到達温度が下がる結果となり、充填槽の断熱性が十分でなかったと考えられる。

PCM・シリカゲル併用充填槽について、槽全体の平衡には約 18 時間を要した。シリカゲルのみの充填槽と比較して、PCM の吸熱により各点の温度上昇に遅れが生じている。シリカゲルの充填量が少なくなっている分、吸着が早期に終了し、温度下降も早くなっている。最高到達温度に関しても、シリカゲルのみの充填槽と比較して低くなっている。PCM の温度上昇を抑える効果により、吸着初期段階での除湿量の増加が期待できる。

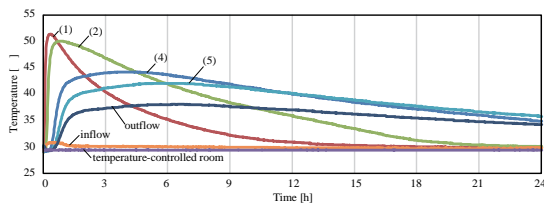


図 13 充填槽温度分布 (シリカゲル充填槽)

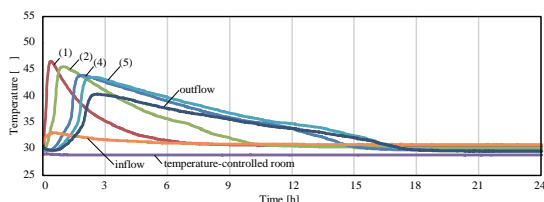


図 14 充填槽温度分布 (PCM+シリカゲル充填槽)

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)

〔学会発表〕(計 10 件)

張璐, 桃井良尚, 相良和伸, 山中俊夫, 甲谷寿史, デシカント除湿空調における熱・湿気輸送モデルに関する研究(その 1) 水分ポテンシャルによる湿気輸送モデルの検討, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, pp.45-48, 2013. 3, 大阪

張璐, 桃井良尚, 相良和伸, 山中俊夫, 甲谷寿史, デシカント除湿空調における熱・湿気輸送モデルに関する研究(その 1)絶対湿度差と水分ポテンシャル差を駆動力とした総括物質移動係数の比較検討, 日本建築学会近畿支部研究報告集第 53 号, 環境系, pp.205-208, 2013.6, 大阪

張璐, 桃井良尚, 相良和伸, 山中俊夫, 甲谷寿史, デシカント除湿空調における熱・湿気輸送モデルに関する研究(その 2)絶対湿度差と水分ポテンシャル差を駆動力とした総括物質移動係数の比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.923-924, 2013.9, 札幌

張璐, 桃井良尚, 相良和伸, 山中俊夫, 甲谷寿史, デシカント除湿空調における熱・湿気輸送モデルに関する研究(第 2 報)絶対湿度差と水分ポテンシャル差を駆動力とした質量含水率変化の検討, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 第 3 巻, pp.305-308, 2013.9, 長野

田中俊祐, 桃井良尚, 相良和伸, 山中俊夫, 甲谷寿史, 張璐, 潜熱蓄熱材と除湿材を併用したデシカントシステムの熱・湿気特性に関する研究(その 3)粒シリカゲル充填槽通気時の温湿度分布測定, pp.153-156, 2014.3, 大阪

張璐, 桃井良尚, 相良和伸, 山中俊夫, 甲谷寿史, 田中俊祐, 潜熱蓄熱材と除湿材を併用したデシカントシステムの熱・湿気特性に関する研究(その 4)粒状シリカゲル充填槽通気時の温湿度分布予測, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, pp.157-160, 2014.3, 大阪

桃井良尚, 相良和伸, 山中俊夫, 甲谷寿史, 張璐, 田中俊祐, 潜熱蓄熱材と粒状シリカゲルを併用したデシカント充填槽の熱・湿気特性に関する研究, 空気調和・冷凍連合講演会講演論文集, pp.91-94, 2014.4, 東京

田中俊祐, 桃井良尚, 相良和伸, 山中俊夫, 甲谷寿史, 潜熱蓄熱材と除湿剤を併用したデシカントシステムの性能予測に関する研究(その 3)通気流量が粒状シリカゲル充填槽内温湿度に及ぼす影響, 日本建築学会近畿支部研究報告集第 53 号, 環境系, pp.173-176, 2014.6, 大阪

田中俊祐, 桃井良尚, 相良和伸, 山中俊夫, 甲谷寿史, 潜熱蓄熱材と除湿材を併用したデシカントシステムの性能予測に関する研究(その4)粒状シリカゲル充填槽における除湿時温湿度変化, 日本建築学会大会学術講演梗概集(掲載予定), 2014.9, 神戸

田中俊祐, 桃井良尚, 相良和伸, 山中俊夫, 甲谷寿史, 潜熱蓄熱材と除湿材を併用したデシカントシステムの熱・湿気特性に関する研究(その4)潜熱蓄熱材及び粒シリカゲル併用充填槽の通気時温湿度分布, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(掲載予定), 2014.9, 秋田

6. 研究組織

(1)研究代表者

桃井 良尚 (YOSHIHISA MOMOI)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 40506870

(2)連携研究者

山中 俊夫 (TOSHIO YAMANAKA)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 80182575

相良 和伸 (KAZUNOBU SAGARA)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 30109285

甲谷 寿史 (HISASHI KOTANI)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 20243173