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1）数値計算による吸放湿性能予測

山口　麻有　（大阪大学）
相良　和伸　（大阪大学）
甲谷　寿史　（大阪大学）
桃井　良尚　（大阪大学）
山中　俊夫　（大阪大学）

Osaka University　大阪大学工学部地球総合工学科　建築都市環境工学領域

はじめに

近年、地球温暖化防止や室内温熱環境改善の観点から、シリカゲルに代表される多孔質材料を吸湿材として用いたデシカント空調が注目されている。

通常のデシカント空調

除湿された空気の冷却には、回転型の顕熱交換ロータや静止型の顕熱交換器が用いられる
- × 装置の巨大化
- × 除湿された空気の温度が上昇する

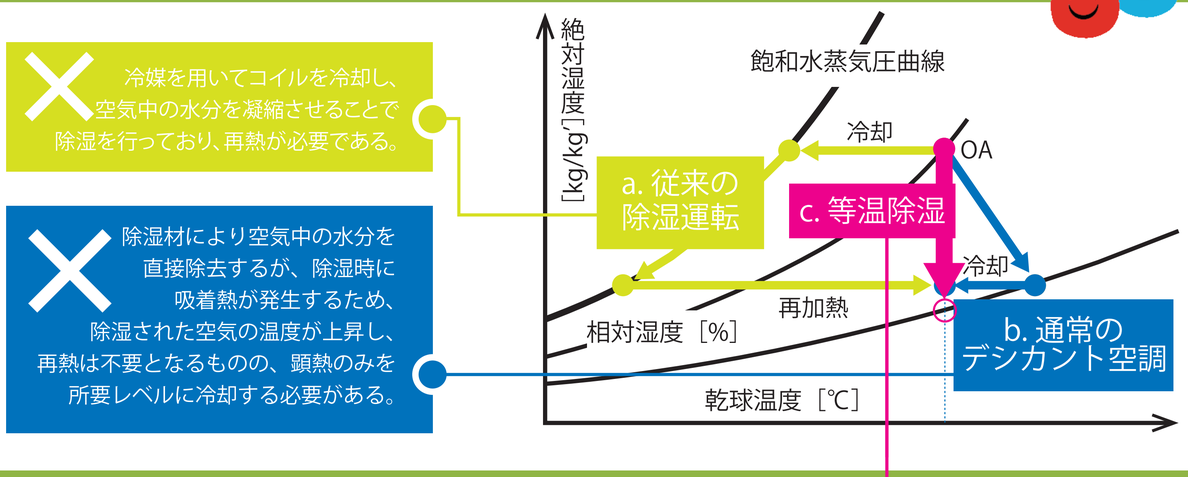
本研究

通常のデシカント空調 に
潜熱蓄熱材｜PCM を組み込む

- ○ 吸湿過程における発熱を PCM に吸収させ除湿された空気の温度上昇を抑える
- ○ 除湿材の再生には、太陽熱やヒートポンプの廃熱を有効利用
- ○ PCM の再生は、除湿材と分離し、外気冷却

目的

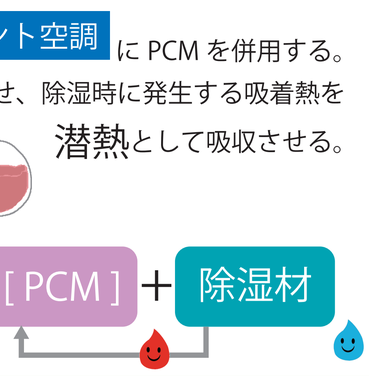
実験と数値計算により、その有効性を検証する



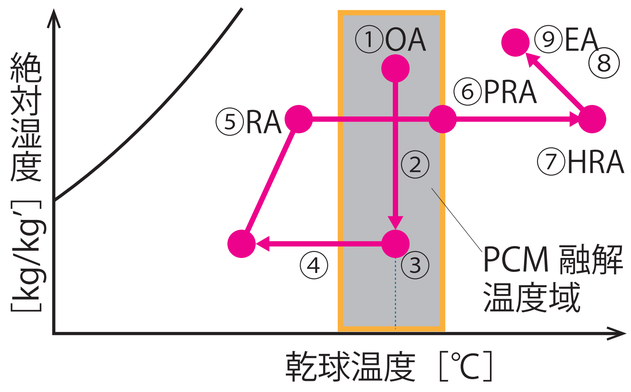
PCM デシカント

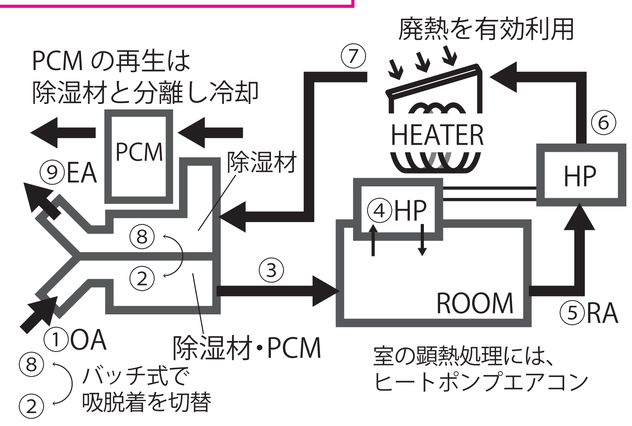
通常のデシカント空調 に PCM を併用する。
PCM を相変化させ、除湿時に発生する吸着熱を潜熱として吸収させる。

潜熱蓄熱材 [PCM] ＋ 除湿材



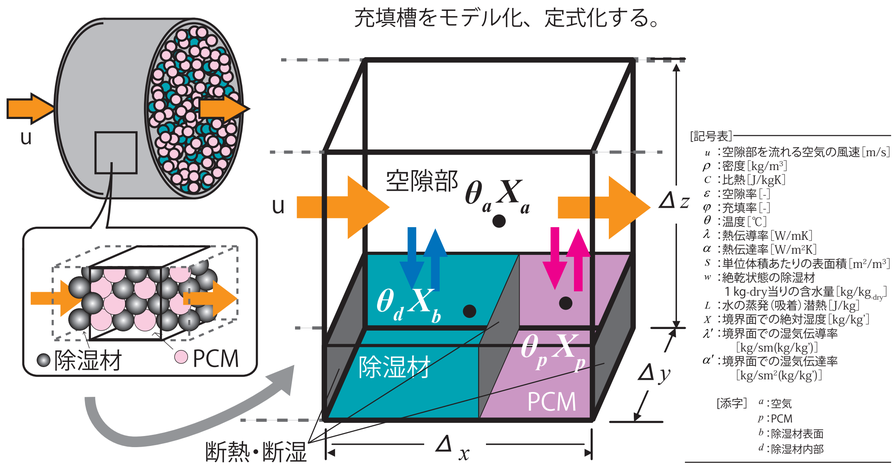
除湿された空気の顕熱変化を最小にし
等温除湿することができ
除湿量の増加も期待できる。





数値解析モデル

充填槽をモデル化、定式化する。



[記号表]
- u :空隙部を流れる空気の風速[m/s]
- ρ :密度[kg/m³]
- C :比熱[J/kgK]
- ε :空隙率[-]
- φ :充填率[-]
- θ :温度[℃]
- λ :熱伝導率[W/mK]
- α :熱伝達率[W/m²K]
- S :単位体積あたりの表面積[m²/m³]
- w :絶乾状態の除湿材 1 kg-dry当りの含水量[kg/kg$_{dry}$]
- L :水の蒸発（吸着）潜熱[J/kg]
- X :境界面での絶対湿度[kg/kg']
- λ' :境界面での湿気伝導率 [kg/sm(kg/kg')]
- α' :境界面での湿気伝達率 [kg/sm²(kg/kg')]

[添字] a :空気, p :PCM, b :除湿材表面, d :除湿材内部

図2のような粒子状PCMと除湿材の充填槽から微小体積を切り出し、流れ方向1次元の熱・水分移動を考える。微小体積内の空隙において、単位体積、単位時間当りに変化する熱量、水分量は、それぞれ(1)、(2)式、粒子表面、PCM粒子表面での熱移動は、(3)、(4)式で表される。ただし、空気から固体部への湿気伝達は、除湿材でのみ考える。

$$\varepsilon\frac{\partial(\rho_a C_a \theta_a)}{\partial t} = -\varepsilon\frac{\partial(u\rho_a C_a \theta_a)}{\partial x} + \varepsilon\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_a\frac{\partial\theta_a}{\partial x}\right) - \alpha S_d(\theta_a - \theta_d) - \alpha S_p(\theta_a - \theta_p)$$

$$\varepsilon\frac{\partial(\rho_a X_a)}{\partial t} = -\varepsilon\frac{\partial(u\rho_a X_a)}{\partial x} + \varepsilon\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda'_a\frac{\partial X_a}{\partial x}\right) - \alpha' S_d(X_a - X_b)$$

$$\varphi_d\frac{\partial(\rho_a C_a \theta_a)}{\partial t} = \alpha S_d(\theta_a - \theta_d) - L\alpha' S_p(X_a - X_b)$$

$$\varphi_p\frac{\partial(\rho_p C_p \theta_p)}{\partial t} = \alpha S_p(\theta_a - \theta_p)$$

ここで、含水率の変化が絶対湿度差を駆動力とする湿気伝達に等しいことから(5)式が得られる。

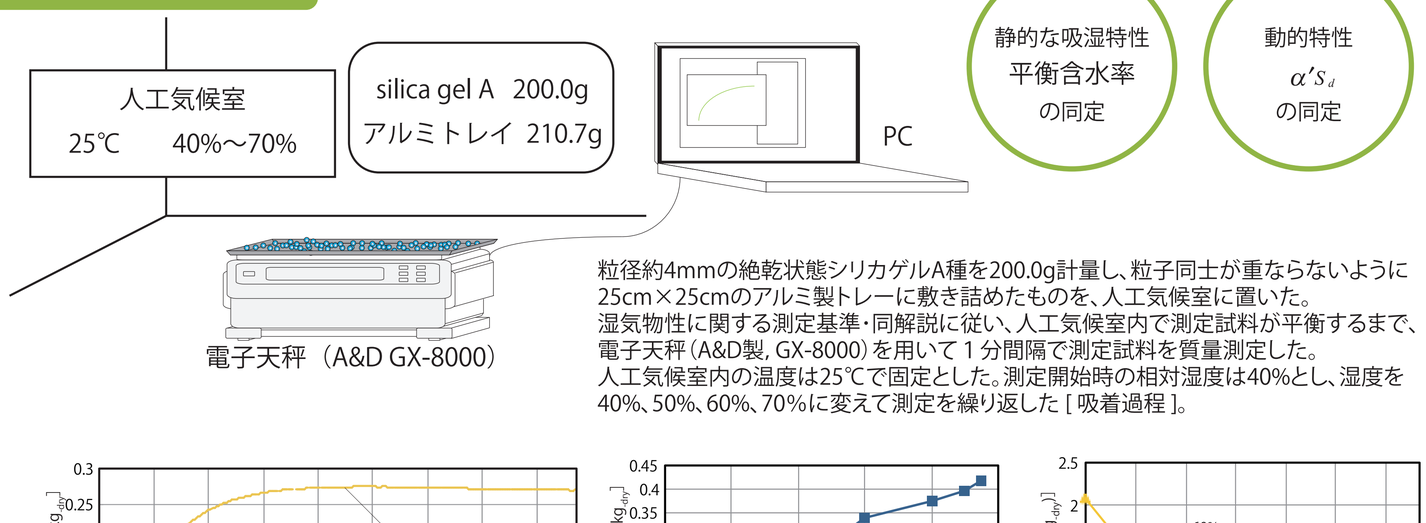
$$\varphi_d\rho_d\frac{\partial w}{\partial t} = \alpha' S_d(X_a - X_b) \quad \cdots(5)$$

除湿材表面では瞬時に平衡状態に達するという、局所平衡の仮定より、(6)式が得られる。

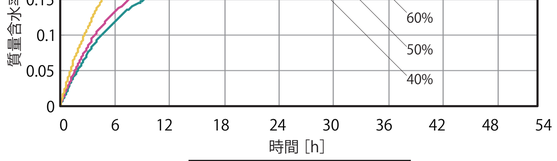
$$w = f(X_b, \theta_b) \quad \cdots(6)$$

(1)～(6)式を連成させ、完全陰解法により差分化し、ガウスザイデル法により未知数 X_a, X_b, θ_a, θ_d, θ_p, w について解く。

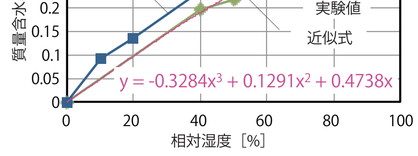
物性値同定実験



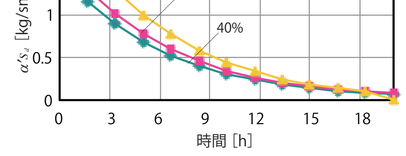
粒径約4mmの絶乾状態シリカゲルA種を200.0g計量し、粒子同士が重ならないように25cm×25cmのアルミ製トレーに敷き詰めたものを、人工気候室に置いた。
湿気物性に関する測定基準・同解説に従い、人工気候室内で測定試料が平衡するまで、電子天秤（A&D製, GX-8000）を用いて１分間隔で測定試料を質量測定した。
人工気候室内の温度は25℃で固定とした。測定開始時の相対湿度は40%とし、湿度を40%、50%、60%、70%に変えて測定を繰り返した [吸着過程]。



質量含水率の変化



平衡含水率曲線



$\alpha' S_d$の変化

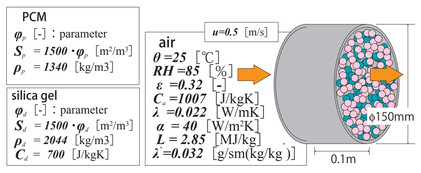
既往研究の結果と比較すると、やや含水率は小さい結果となった。数値解析では、本実験結果を３次元で近似し、図の横軸を絶対湿度に変換した平衡含水率を求め、雰囲気相対湿度による平衡含水率の変化を数値解析モデルに組み込んだ。

性能予測結果｜PCM が除湿性能に与える影響

CASE 1｜withPCM　CASE 2｜withoutPCM　の比較

解析条件

図のような充填槽に通風した状態を想定した。

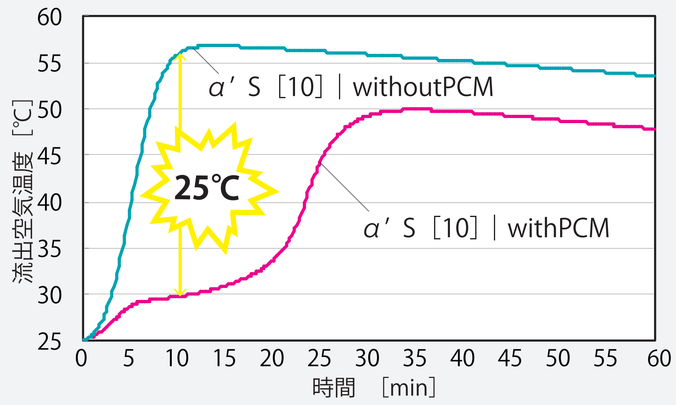


流出空気の温度

CASE 2｜withoutPCM
流出空気の温度が急激に上昇し、最大で約55℃に上昇

CASE 1｜withPCM
吸着開始直後の流出空気の温度の急激な上昇は見られず、PCMの相変化温度域である28℃～32℃
→ PCMの融解によるもの

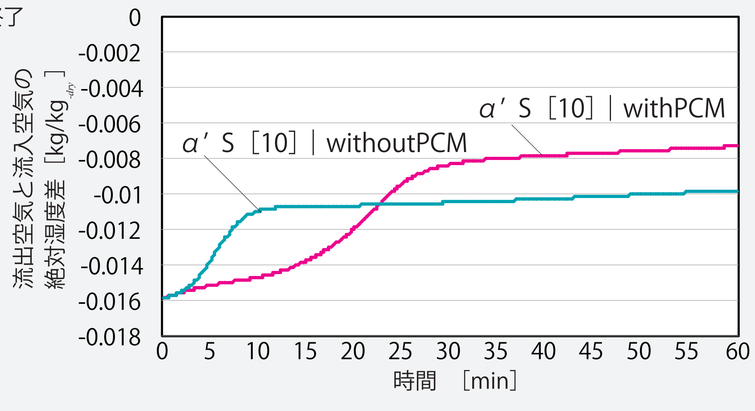
しかし、25分を過ぎると、温度の上昇が見られる
→ 約25分でPCMの融解が終了



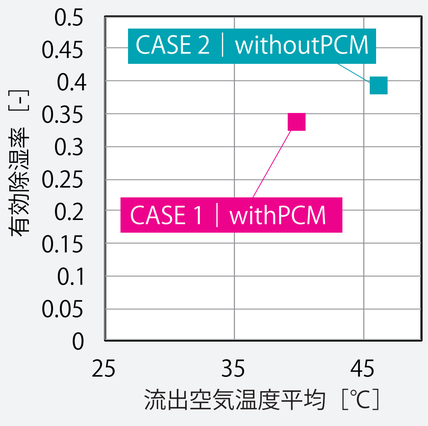
除質量 [絶対湿度差]

室内の設定温湿度を25℃、相対湿度50%とし、25℃、80%の外気の潜熱を処理する場合、0.006kg/kg$_{dry}$ の除湿が必要である。

PCMを併用した場合も十分な除湿性能を確保できることが確認できた。



除湿性能評価



横軸に、CASE1、CASE2の流出空気の温度の平均、縦軸に有効除湿率をプロットした図を示す。PCMを併用することにより、有効除湿率はわずかに低下したが、流出空気の温度は平均で約７℃低下し、総合的には除湿性能が向上すると考えられる。除湿材が平衡に達するまでの時間のみ除湿に使用することで、効率はさらに向上すると考えられる。

おわりに

- ■ 実験により除湿材の湿気特性を把握した。
- ■ 測定した質量含水率は、既往研究と比較すると少し小さい値となったが、概ね一致した。
- ■ 通気を考慮していないため、$\alpha' S_d$ は既往研究に比べて小さかった。
- ■ 実験結果を組み込んだ数値解析モデルを構築し、シミュレーションを行ない、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について検討した。
- ■ 解析結果から、潜熱蓄熱材を併用することで、流出空気の温度上昇を約25℃抑えることができることがわかった。

今後の課題

- ■ 充填槽に通気させた状態の実験を行い、$\alpha' S_d$ について再検討する。 [実験]
- ■ 実験結果をモデルに組み込むことにより、モデルの精度を向上させる。 [解析]
- ■ 潜熱蓄熱材と除湿材を併用した充填槽を用いた実験を行こない、モデルの精度検証を行う。 [実験]
- ■ 除湿材の脱着過程・PCMの再生過程についても、同様の実験を行い、数値解析モデルを構築する。 [実験] [解析]
- ■ 吸着・融解、凝固・脱着過程を考慮した、全体のシステムについて検討する。