

〈特別研究課題〉 低温再生用吸着材塗布型空冷式吸着器を用いた
デシカント調湿システムの開発

助成研究者 名古屋大学 窪田 光宏



低温再生用吸着材塗布型空冷式吸着器を用いた デシカント調湿システムの開発

窪田 光宏
(名古屋大学)

Development of Desiccant Dehumidification System with Air Cooling Adsorber Coated with Low Temperature Regenerable Adsorbent Mitsuhiro Kubota (Nagoya University)

Abstract :

In order to promote utilization of low temperature heat below 100 °C and achieve a comfortable life, we have focused on a desiccant dehumidification system using heat exchanger type adsorber coated with adsorbent. The system has the advantage to remove actively both sensible heat of adsorber and heat of adsorption by flowing cooling air. Consequently, it is expected to improve dehumidification performance of the system by proceeding water adsorption isothermally, especially for low-temperature regenerable adsorbent, which has a strong temperature dependency on water adsorption. In this study, we had made a lab-scale experimental set-up using cross-flow type heat exchanger coated with ALPO zeolite, and conducted dehumidification experiments under various regeneration temperatures and cooling air velocities. As a result, it was demonstrated that air cooling of adsorber was effective to enhance water adsorption on ALPO zeolite. Besides, ALPO zeolite indicated high dehumidification performance even at low regeneration temperature around 60 °C. An amount of dehumidified water was found to increase as cooling air velocity.

1. はじめに

現在、民生分野における燃料電池や太陽熱などの分散型エネルギーシステムの利用促進が注目されている。しかし、それらの課題の一つとして熱需要が十分でないために、結果的に熱が未利用のまま廃棄される“熱余り”がある。この課題を解決するために、本研究では“熱”の積極活用と同時に我々の生活環境の改善を目指す。具体的には、吸着材(デシカント)の吸・放湿作用により湿度調節を行うとともに、その再生熱源として低温熱を利用するデシカント調湿システムに着目し、低温熱の積極活用と除湿空気の供給による居住空間の空気質の改善を図る。このために、1) 吸着材塗布型空冷式吸着器の利用、2) 60℃級の低温熱で再生可能な低温再生用吸着材の利用の2点に着目した。

1) 吸着材塗布型空冷式吸着器の利用に関して、すでに実用化されているハニカムロータ方式の調湿システムでは、除湿操作において水蒸気の吸着に伴い発生する吸着熱により吸着材およびロータ基材の温度上昇が引き起こされ、吸着材の利用効率が低下するという課題点が知られている。この課題点に対して、除湿時に空気や水などの熱交換媒体を流通させることで吸着材を強制的に冷却して吸着熱を除去するシステムが提案され、国内外で数例の検討がなされている[1-6]。このような中、我々も吸着材塗布型空冷式吸着器を用いたデシカント調湿システムに着目し検討を行っている。本システムの吸着器の動作概念を図1に示す。

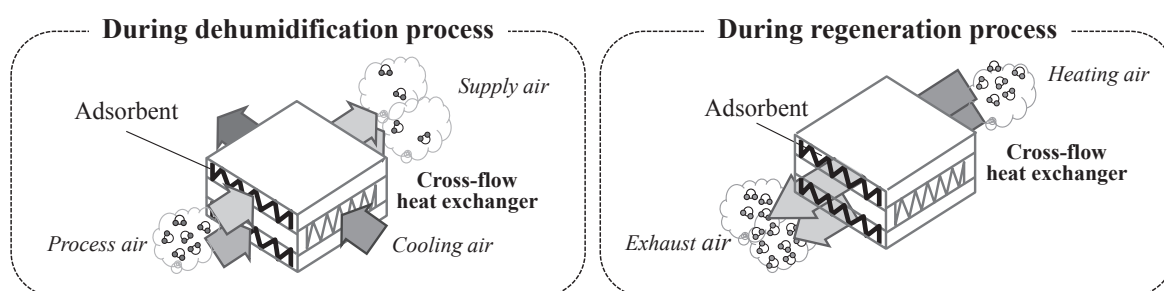


図1. 吸着材塗布型空冷式吸着器を用いた調湿システムの動作概念図

本システムにおける吸着器は一方の流路内壁に吸着材を塗付した積層式直交流型熱交換器である。除湿操作では吸着材を担持した流路に湿潤空気を流通させ、吸着材が有する水蒸気の吸着能力を利用して除湿を行う。それと同時に、その流路と直交する上下の流路に冷却空気を流通させる。結果として、冷却空気により吸着材温度の上昇が緩和され、吸着材の利用効率の向上が期待できる。一方、再生操作では吸着材を担持した流路に加熱空気を直接流通させて吸着材の再生を行う。本システムはロータ方式で問題となる断熱除湿に伴う除湿限界も回避することができ、調湿システムのさらなる高性能化が期待できる。さらに、冷却媒体として、一般的に用いられる水ではなく空気を使用するため、伝熱性能は低下するものの、冷媒循環用の配管類が不要となり、たとえば移動体などへの応用も期待できる。

2) 60℃級の低温熱で再生可能な低温再生用吸着材の利用に関しては、近年、Functional Adsorbent Material (FAM) など、低温再生に適した独特の水蒸気吸着特性を有する吸着材の開発が進んでいる。これまでに低温再生用吸着材を用いたハニカムロータ方式によるデシカント調湿システムの検討が数多くなされているが、たとえばFAMは吸・脱着に強い温度依存性を有するため、吸着に伴う温度上昇により除湿性能が大幅に低下する可能性がある。これに対して、本システムで

は空気を用いた強制冷却により吸着材の温度上昇を抑制できるため、FAMなど低温再生用吸着材を利用する場合に有効と考えられる。

本システムの実現に向けたこれまでの検討として、我々は装置設計に不可欠な等温条件下における吸着材の水蒸気吸着特性の把握を行ってきた。具体的には、一定膜厚でシリカゲルを塗布した試験片を用いてシリカゲル／水蒸気系における総括物質移動係数の推算を行った[7]。この結果、等温条件下における水蒸気の物質移動は境膜および膜内拡散の両抵抗の影響を受けることを明らかにした。また、等温条件下における水蒸気の総括物質移動係数のシリカゲル膜厚依存性に関する定式化を行った。さらに、直交流型熱交換器の一方の流路に最も汎用性の高い吸着材であるシリカゲルを塗布したラボスケールの吸着器を実際に試作し、空気冷却による除湿性能の向上を実証した[8]。また、処理空気流速、冷却空気流速および吸着材塗付量が吸着器の伝熱・除湿特性に及ぼす影響についても考察を行った。この結果、冷却空気流速の増大に伴い水蒸気吸着率が向上することを確認するなど、除湿性能の向上に対する空気冷却の有効性を実証した。

以上の検討を踏まえ、本研究では実システムにより近い条件での除湿実験を実施するため、吸着器サイズのスケールアップを行い、システム全体の再構築を行った。さらに、熱交換器に塗布する吸着材として、これまで用いてきたシリカゲルから空気冷却の効果がより顕著に得られると考えられる低温再生用吸着材に変え、再生温度、冷却空気流速などをパラメータとした除湿実験を行った。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

実験装置の概略図および写真を図2と図4に示す。本装置は直交流型熱交換器の一方の流路にALPO系低温再生用吸着材を塗布した低温再生用吸着材塗布型空冷式吸着器、それに直交する2つの空気流路および温湿度調整室、流量測定部から構成されており、これらの実験装置全体が約30℃に保持された部屋の中に設置されている。なお、吸着器については次節で詳述する。

空気流路は空冷式吸着器の吸着材を塗布した側に空気を供給する流路(Primary flow channel：除湿操作では処理空気：PAを、再生操作は加熱空気：HAを流通)と吸着材を塗布していない側に空気を供給する流路(Secondary flow channel：除湿時に冷却空気：CAを流通)から成り、いずれも透明ポリカーボネート製である。なお、Primary flow channelについては、十分流れが発達した空気を吸着器に導入するために、吸着器の上流部に約2.4 mの助走区間を設けた。

温湿度調整室内にはブロワー(EC-04S-R3A, 昭和電機製)を設置するとともに、ブロワーから供給される空気を所定湿度・温度に調整するための加湿器、サーキュレーター、電気ヒーターを設けた。さらに、加熱空気の昇温にはエアヒーター(マイクロケーブルエアヒーター MCA-3P-5000, 坂口電熱製)を用い、スライダック(ボルトスライダー S-3P-240-20, 山菱製)により空気温度の手動制御を行った。なお、温湿度調整室は2室に分かれており、処理空気と加熱空気の制御が独立に行える構造となっている。

流量測定部には流量計(エア用超音波式流量計 TRX80D-C/4P, 愛知時計電機製, 測定誤差 $\pm 2.0\%$ RS)を設置し、処理空気・加熱空気および冷却空気の吸着器出口空気流量の測定を行った。

また、Primary flow channelの吸着器入口・出口には温湿度計(HUMICAP HMT-333, VAISALA製, 測定精度 $\pm 0.2\%$ ℃, $\pm 1\%$ RH)を設置して流通空気の温度・相対湿度を計測した。また、吸着器

入口・出口における各流路の空気温度を測定するため、吸着器から30 mm離れた位置に3本ずつ熱電対を設置した。なお、流通空気の代表温度としては流路中心に設置した熱電対の指示値を用いた。

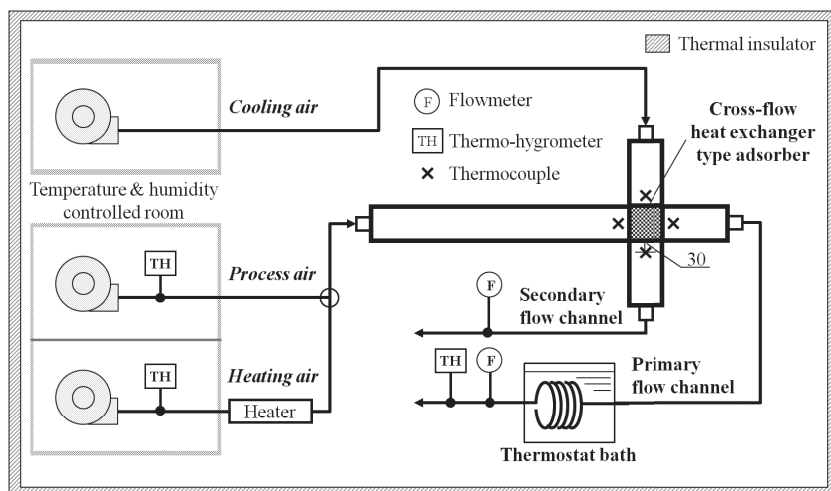


図2. 実験装置 全体図

2.2 低温再生用吸着材塗布型空冷式吸着器

実験では図3および図4に示すアルミ製直交流型熱交換器(西武技研製, 200W×200L×198H, 熱交換器重量905 g)の一方の流路に低温再生に適したALPO系ゼオライトを塗布したものを吸着器として用いた。アルミ製直交流型熱交換器にはPrimary flow channelに46段, Secondary flow channelに47段の流路が設けられており, 各流路のコルゲートフィンのフィンピッチ, 高さはいずれも約2 mmとなっている。

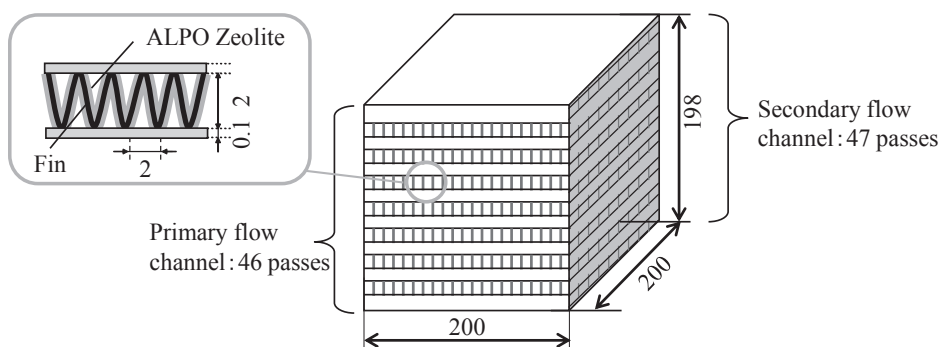


図3. 低温再生用吸着材塗布型空冷式吸着器

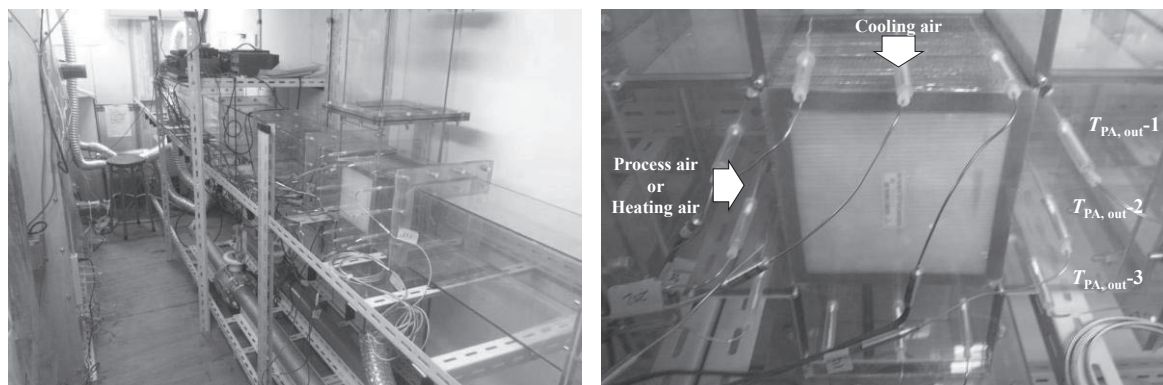


図4. 実験装置全体および吸着器写真

図5より、再生操作の完了時には吸着器の入口・出口における加熱空気の温度・絶対湿度が一致しており、吸着材が脱着平衡に到達していることが分かる。つづいてPrimary flow channelの流通空気を加熱空気から処理空気に切り替え、同時にSecondary flow channelに冷却空気を流通して除湿操作を開始すると、吸着器出口の絶対湿度が急激に低下しており、処理空気の除湿が進行していることが確認される。その後、出口絶対湿度は極小値を迎えてから徐々に上昇していき、約1000 s後に入口絶対湿度とほぼ一致して吸着平衡に到達、除湿が完了している。これは、吸着現象が吸着材の実際の吸着量と平衡吸着量との差を推進力として生じるため、実吸着量が小さく推進力が最大である除湿初期に吸着が急速に進行し、実吸着量が平衡吸着量に近づく除湿後半に吸着速度が減少するためである。一方、流通空気の温度については、除湿操作開始時に流通空気を60℃の加熱空気から30℃の処理空気に切り替えているが、実際には吸着器入口において瞬時に30℃に切り替わるのではなく35℃程度まで急激に低下した後、徐々に30℃に漸近している。これは再生操作における加熱空気の流通によりポリカーボネート製の流路が加熱され、その顕熱が処理空気を加熱した影響と考えられる。したがって、実際には除湿操作開始後しばらくの間は30℃以上での操作になるが、実験操作上やむを得ないものとした。一方、吸着器出口温度は入口温度より常に高い値で推移し、除湿操作開始後約650 sで入口温度と一致している。これは、除湿中には処理空気も吸着器と吸着材の顕熱および除湿の進行に伴い発生する吸着熱を熱交換により吸収するためである。

3.2 再生温度が除湿量に及ぼす影響

再生温度を45～70℃まで変化させて除湿実験を行い、図5の実験結果に基づいて式(1)により計算された除湿量を図6にまとめる。本図における除湿条件は、処理空気に関して $T_{PA, in}=30\text{℃}$ 、 $AH_{PA, in}=16\text{ g-H}_2\text{O/kg-DA}$ 、 $u_{PA}=1\text{ m/s}$ 、冷却空気に関して $T_{CA, in}=30\text{℃}$ 、 $u_{CA}=1\text{ m/s}$ である。

本図より、再生温度60℃以上ではほぼ一定の除湿量が得られているものの、除湿量は再生温度の低下とともに減少する傾向が見られる。この傾向は本実験で用いた低温再生用吸着材の水蒸気吸着特性に起因すると考えられる。低温再生用吸着材は相対湿度 $RH=20\sim30\%$ 付近で急激に水蒸気吸着量が増加する一方、それ以下の低

相対湿度域での吸着量が著しく小さくなる。本実験条件の $AH_{PA, in}=16\text{ g-H}_2\text{O/kg-DA}$ の空気の場合、除湿操作が30℃、 $RH=60\%$ で行われる一方、再生操作は加熱空気温度50℃の場合 $RH=20.7\%$ 、60℃の場合 $RH=12.7\%$ で行われる。これより、60℃以上の再生条件では相対湿度が十分低く良好に再生が行われるものの、再生温度50℃の場合は吸着等温線の立ち上がり領域と一致して再生が不十分となるため有効吸着量が減少し、図6の結果になったものと考えられる。一方、再生温度が60℃と70℃の場合に除湿量がほぼ同等であるのは、再生温度を70℃まで上げてより低い相対湿度で再生を行っても、この湿度域では吸着材の水蒸気吸着量がほとんど変化しないためである。以上より、本研究で用いた低温再生用吸着材の場合、60℃の低温熱による再生でも、より高温の再生温

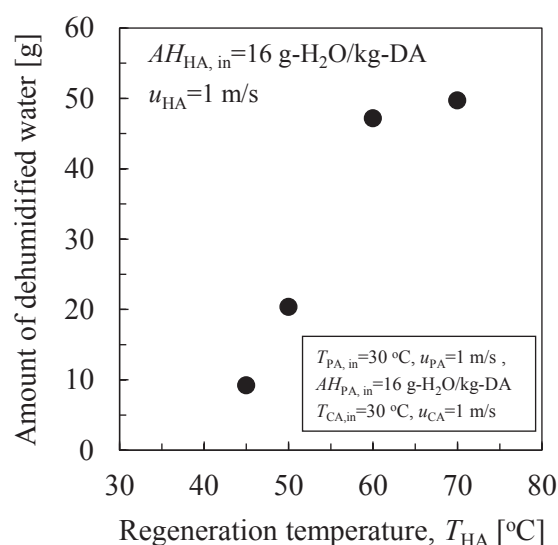


図6. 再生温度が除湿量に与える影響

度の場合と同程度の高い除湿性能が維持できることが実証された。一般的な吸着材であるシリカゲルの再生温度が80℃程度であることから、低温再生用吸着材の利用により、利用可能な熱源温度の低温化が可能であることが示された。

3.3 冷却空気の流速が除湿性能に及ぼす影響

a) 冷却空気の流速が除湿量に及ぼす影響

図7に、冷却空気を流通しない場合 ($u_{CA}=0$ m/s) と冷却空気を $u_{CA}=1, 2$ m/s で流通させて30℃, $AH_{PA, in}=16$ g-H₂O/kg-DAの処理空気の除湿を行った際の吸着器出口における処理空気の絶対湿度の経時変化を示す。なお、本図の再生条件は $T_{HA, in}=60$ ℃, $u_{HA}=1$ m/s である。

本図より、冷却空気の流通の有無によらず、いずれの場合も除湿操作開始後すぐに出口空気の絶対湿度は低下して極小値に到達している。その後、時間経過に伴って徐々に絶対湿度が上昇していき吸着平衡に達している。しかし、冷却空気を流通しない場合、除湿開始により出口湿度は低下するものの $AH=12.5$ g-H₂O/kg-DA程度で下げ止まり、約480 s間この絶対湿度を維持した後、徐々に入口湿度に回復していく。これに対して冷却空気を流通した場合、出口湿度は除湿開始直後に急激に低下し、冷却空気を流通しない場合に比べて低い絶対湿度にまで到達した後、速やかに入口湿度に回復している。特に $u_{CA}=2$ m/s では出口空気の絶対湿度が8.8 g-H₂O/kg-DAまで低下している。実システムへの適用を想定した場合、除湿操作によって、ある一定値以下まで絶対湿度が低下した空気が得られなければ除湿機としての要求性能を満たさない。たとえば一般居室に適した湿度条件として25℃, 50 %RHを想定すると、供給空気の絶対湿度は10 g-H₂O/kg-DA以下が必要条件となる。この点から考えると、 $u_{CA}=0, 1$ m/s では要求性能を満たすことができず、 $u_{CA}=2$ m/s で冷却空気を供給した場合のみ除湿空気の提供が可能であり、本実験条件では約150 s間維持できることが確認された。しかしながら、本研究では脱着平衡に到達した後に除湿を行うバッチ実験を行っている。一方、実プロセスでは除湿と再生を連続的に行うため、サイクルの切り替え時間によっては脱着平衡に至らないまま除湿が行われ、十分な低湿空気および供給時間を確保できない可能性もある。この点に関しては、今後サイクル試験を実施するなど、より詳細な検討が必要である。

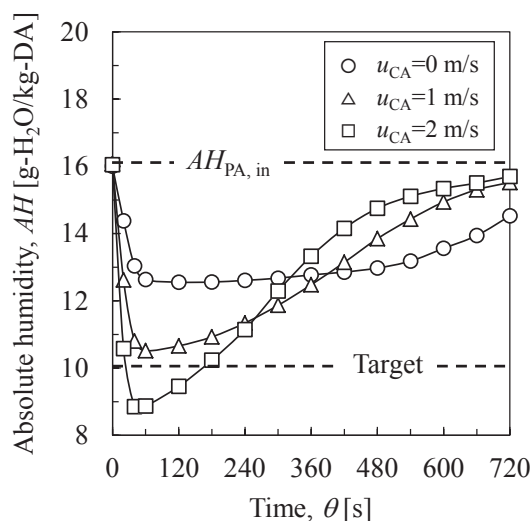


図7. 吸着器出口の絶対湿度の経時変化の流速依存性

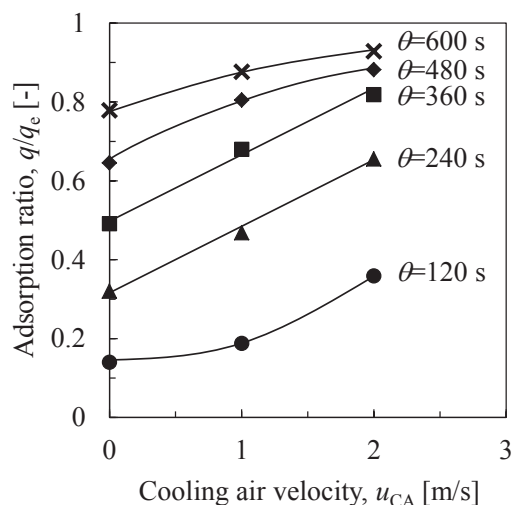


図8. 各時間における冷却空気流速と吸着率の関係

また、図8に、図7の結果より算出された各時間における吸着材の吸着率と冷却空気流速との関係を示す。本図より、いずれの時間においても冷却空気流速の増加に伴い吸着率は増大しており、若干のばらつきが見られるものの吸着率は冷却空気流速に対して概ね直線的に増大する傾向が見て取れる。本結果より、冷却空気の流通が吸着(=除湿)性能の向上に有効であることが吸着率の観点からも示された。なお、冷却空気流速に対する吸着率の依存性については、シリカゲルを吸着材として用いた場合にもほぼ同様の傾向が得られている[8]。

b) 吸着器出口における処理空気の温度変化

3.3 a) で示した通り、冷却空気の流通に伴う吸着器・吸着材の顕熱および吸着熱の除熱効果によって除湿性能が大幅に向上することが認められた。この効果について、処理空気の出口空気温度の観点から検討を行う。なお、これまでは流路中心に設置した熱電対の指示値を示してきたが、直交流型熱交換器では2次元の温度分布が得られることが知られている。そこで、冷却空気流れ方向に3点設置した熱電対の計測値について、3.3 a) と同一条件で除湿実験を行った際の経時変化を図9に示す。

本図より、冷却空気を流通した場合、処理空気の出口温度には冷却空気の流れ方向に沿って温度分布が生じており、冷却空気入口に近いほど出口温度が速やかに低下して除湿温度である30℃に到達している。処理空気は吸着器を通過するにつれて吸着器・吸着材の顕熱ならびに吸着熱により温度上昇する一方、冷却空気により除熱される。この際、冷却空気も吸着器・吸着材の顕熱および吸着熱を吸収するため、吸着器出口に近づくほど冷却空気温度が上昇して熱交換性能が低下していく。結果的に除熱性能が最大である冷却空気入口付近の空気が速やかに降温される一方、出口に近づくほど降温速度が低下する。また、流速の影響について見ると、 $u_{CA}=1$ m/sでは処理空気出口の各位置の温度分布が大きく、除湿開始後600 sを経ても $T_{PA, out-3}$ は35℃以上の空気温度のままであるのに対して、 $u_{CA}=2$ m/sでは600 sでいずれの温度もほぼ30℃に到達しており、 u_{CA} が大きいほど除熱がスムーズに行われることが分かる。

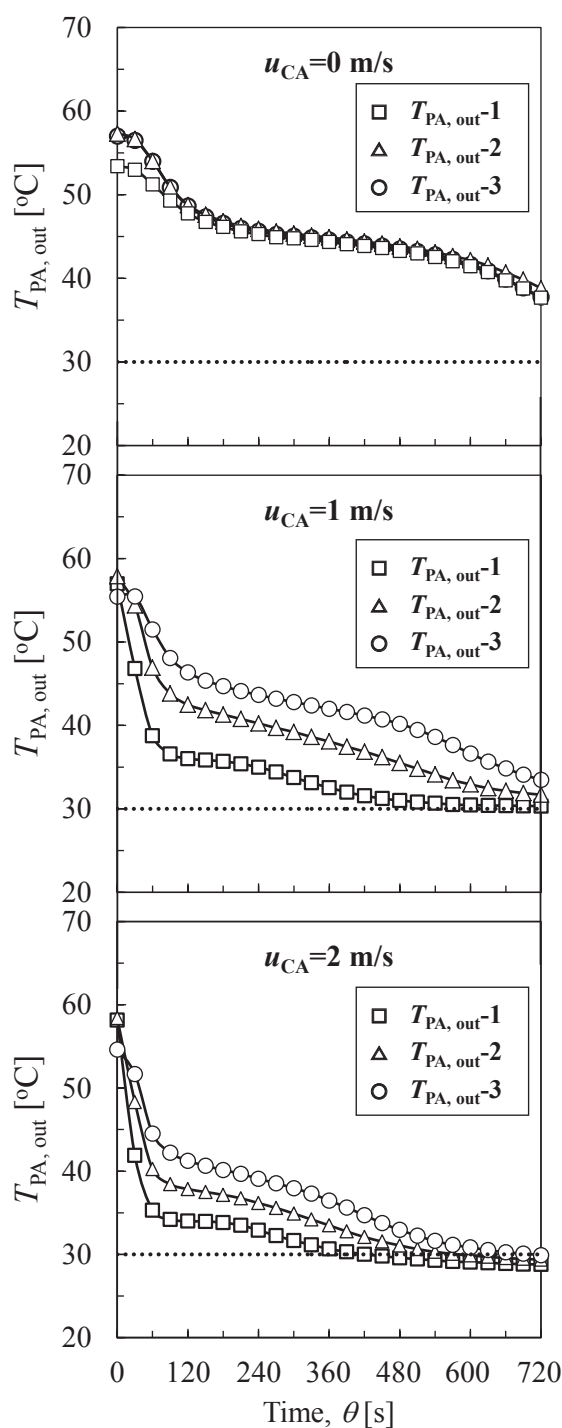


図9. 吸着器出口温度に対する冷却空気流速による影響

これに対して、冷却空気を流通しない場合では吸着器出口における処理空気の冷却空気流れ方向における温度分布は見られず、 $T_{PA, out}-1\sim 3$ がほぼ同様の挙動を示している。これは冷却空気の流通がないため処理空気のみにより除熱が行われるものの、吸着器の顕熱と吸着熱に対して処理空気のみを除熱が十分でないためであり、結果的に図8の各除湿時間における低い吸着率の原因になっていると考えられる。

4. まとめ

本研究は、民生分野において普及が見込まれる燃料電池や太陽熱などの分散型エネルギーシステムの利用促進に向け、その課題である“熱”の積極活用と同時に我々の生活環境の改善を目指し、60℃級の低温熱で再生可能な低温再生用吸着材を塗布した吸着材塗布型空冷式吸着器を用いたデシカント調湿システムに関しての実験的検討を行った。具体的には、実システムにより近い条件での除湿実験を実施するため、これまで実施してきた研究に比べて吸着器サイズのスケールアップを行うとともに、低温再生に優れたALPO系ゼオライトを塗布した空冷式吸着器および実験システムを構築し、再生温度、冷却空気流速などをパラメータとした除湿実験を行った。この結果、以下の知見が得られた。

- 1) ALPO系ゼオライトの利用により60℃の低温熱による再生でも、より高温の再生温度の場合と同程度の高い除湿性能が維持できることが実証され、利用可能な熱源温度の低温化が可能であることが示された。
- 2) 冷却空気の流通による処理空気の除熱速度の増大が確認され、除湿性能向上に対する空気冷却の有効性が示された。
- 3) 冷却空気の流速により供給可能な最低到達湿度が変化することが確認された。
- 4) 各除湿時間において、冷却空気流速0～2 m/sの範囲においては、冷却空気流速の増加に伴って吸着材の水蒸気吸着率が概ね直線的に増大することが明らかになった。

参考文献

- 1) A. Kodama, N. Watanabe, T. Hirose, M. Goto and H. Okano: Adsorption, 11 (2005) 603-608.
- 2) A. Kodama, M. Goto, T. Hirose and H. Okano: Proceedings of the 6th International Symposium on Separation Technology, Tokyo (2002) 545-548.
- 3) Y. Weixing, Z. Yi, L. Xiaoru and Y. Xiugan: Applied Thermal Engineering, 28 (17-18) (2008) 2257-2266.
- 4) T.S Ge, Y.J. Dai and R.Z Wang: Energy, 35 (2010) 2893-2900.
- 5) T.S. Ge, Y.J. Dai and R.Z. Wang: Energy Conversion and Management, 52 (6) (2011) 2329-2338.
- 6) J. Jeong, S. Yamaguchi, K. Saito and S. Kawai: International Journal of Refrigeration, 34 (4) (2011) 928-945.
- 7) 柴田翔子, 堀江永有太, 窪田光宏, 松田仁樹: 日本冷凍空調学会論文集, 29 (2) (2012) 271-278.
- 8) 窪田光宏, 柴田翔子, 松田仁樹: 日本冷凍空調学会論文集, 30 (3) (2013) 213-220.

