

吸着式デシカント除湿・空調プロセス Adsorptive Desiccant Cooling / Dehumidification

児玉 昭雄 (金沢大学)
Akio KODAMA (Kanazawa University)
e-mail: kodama@t.kanazawa-u.ac.jp

1. はじめに

2005年2月16日、京都議定書が発効した。わが国に課せられた温暖化効果ガス排出量の削減目標を達成するには今や13~14%の排出量抑制が必要とされている。そして、それには京都メカニズムの運用と並行して省エネルギー効果の高いプロセスの開発と普及が不可欠である。

エネルギー利用の効率化を目指して各種コージェネレーションシステムやヒートポンプ式給湯器の普及が進んでいるが、そのエネルギー利用効率を高く維持するためには余剰温熱を積極活用することが必要である。特に余剰温熱量が増加する夏季には、冷房装置の駆動熱源として活用することが合理的と言える。熱駆動冷房装置の中でもデシカント除湿空調プロセスは換気型かつ除湿重視のシステムであり、室内空気品質の改善効果も得ることができるとして注目されている。デシカント空調システムは図1に示すように基本的に除湿機、熱交換器、冷却器(オプション)、加熱器、送風機から構成されており、状況に応じて様々な組合せ、あるいは多様な流路構成が可能である。その除湿操作は吸着剤あるいは吸収液への水蒸気の吸着/吸収作用を利用しており、特に潜熱負荷の大きな空間で有効である。従来空調機との組み合わせ(ハイブリッド化)では、温度と湿度の独立制御が容易になるとともに、従来空調機は顕熱処理に専念できることから、COP値の向上が期待できる[2]。なお、デシカント空調機はその除湿操作に固体吸湿材を用いる吸着式プロセスと塩化リチウム等の液体吸湿材を用いる吸収式プロセスに大別できるが、設備費あるいはメンテナンスの点からは吸着剤除湿ローターを用いた吸着式デシカント空調機が有利とされる。

普及しつつあるデシカント空調機ではあるが、駆動熱源となり得るコージェネレーションシステムの導入数に遠く及ばない。これは操作原理/設計

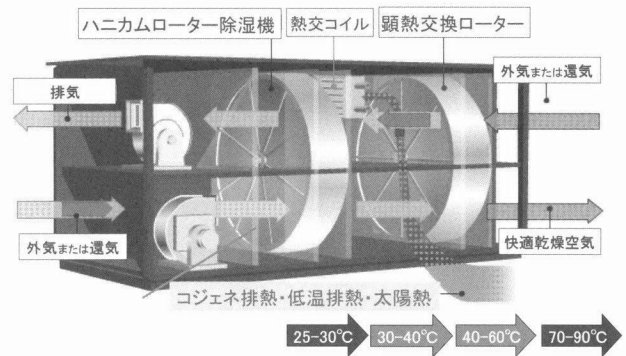


図1 2ローター式デシカント空調プロセス[1]

指針が確立されていないこと、装置が大型であること、高コストが最大の理由である。これらの課題解決に加えて、今後普及が期待される家庭用燃料電池や小型コージェネレーションシステムと組み合わせを考えると50~60℃程度の熱駆動でも十分な除湿性能が発揮できる吸着剤、流路・システム構成、運転手法を開発しておく必要がある。

本稿では高湿度対応と更なる低温熱駆動を目指した当研究室での取り組み(図2)を中心に吸着式デシカント空調プロセスの研究開発状況を紹介する。詳しくは参考文献[3-7]をご覧ください。

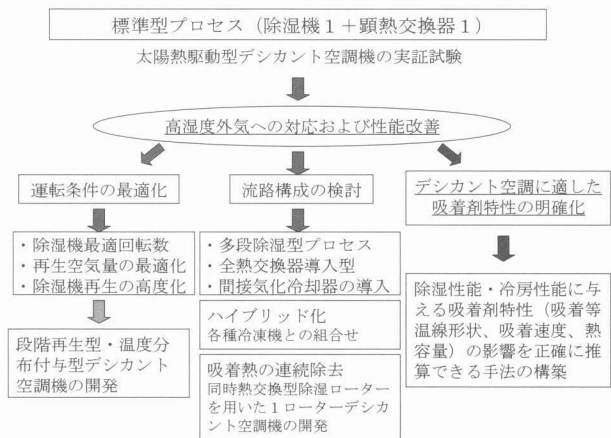


図2 当研究室におけるデシカント空調機の開発

2. 従来型デシカント空調機の高度化

2.1 究極性能と除湿機の性能向上

図 3(a)に理想的な除湿機，温度効率 100%の顕熱交換器，加湿効率 100%の冷却器を用いた冷却器付デシカント空調機 (Desiccant Evaporative Cooling) の空気状態変化を示す．このデシカント空調機の究極性能は外気温湿度 $35^{\circ}\text{C} \cdot 14.2\text{g/kg}$ ，室内温湿度 $26.7^{\circ}\text{C} \cdot 11.2\text{g/kg}$ という ARI 条件において再生温度 80°C の場合，冷却効果 (給気と還気のエンタルピー差) $\text{CE}=23\text{kJ/kg}$ ，室内空気基準 $\text{COP}=1.5$ である．残念ながら，実際のプロセス内空気状態変化は図 3(b)に示すように理想挙動とは異なり，理想性能に比べて極めて低いプロセス性能を示す．

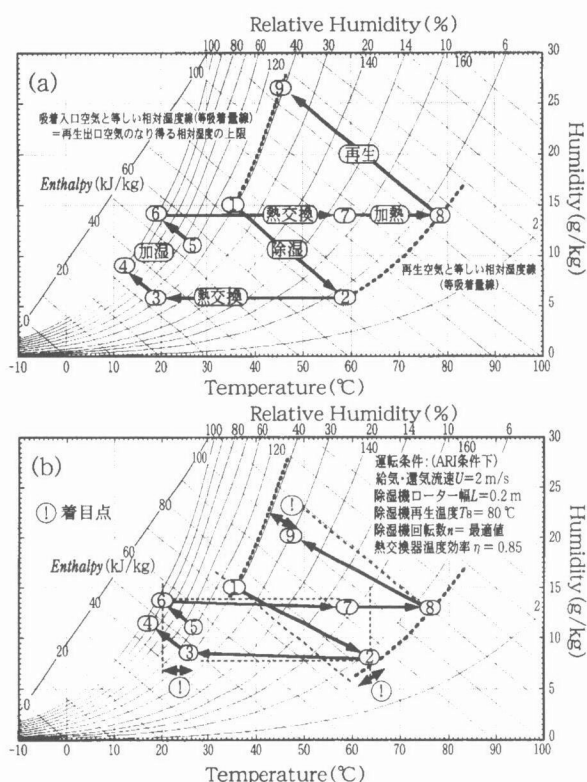


図 3 全換気デシカント空調機内の空気状態変化
(a) 理想的な変化と (b) 実際

例えば，デシカントローターではほぼ断熱状態で除湿が進行するため，得られる空気湿度の下限界は図 3(a)中②で示されるが，実際の除湿操作では (1)吸着材ローターを介した再生側から給気側への顕熱移動による除湿出口空気のエントルピー増加，(2)水の蒸発潜熱よりも大きい吸着熱，(3)物質

移動抵抗，により除湿性能が低下する．これに対する改良策の一例として，吸着ゾーン初期部分へのパージゾーン設置がある．また，「吸着材」の改良によっても対応可能である．すなわち，吸着容量が大きく吸着速度が速い吸着ローターを用いることによって，最小湿度を示す除湿ローターの回転数すなわち最適回転数が低くでき，回転によって持ち込まれる熱量を低減することができる．当然，吸着材の改良は物質移動促進の点からも重要であり，デシカントローターの性能予測や最適化など吸着材開発につながる研究が多くなされている．吸着材自体の開発として，平衡吸着特性を制御するために，感温性材料を採用した研究や孔径が均質なメソポーラス吸着体の採用などが提案されている．いずれも対象空間の温湿度に対して，最も効果的に吸脱着量を稼ぐ吸着材の特性発現が目的である．

2.2 除湿機再生の効率化

効率的な除湿機再生方法として再生ゾーンを 2 分割して段階的に吸着材再生を行う「段階再生手法」が有効である[4]．段階再生手法とは図 4 に示すように顕熱交換器を通過した還気を再生ヒーター手前で 2 つに分け，1 つは加熱器により升温して本再生空気とし，もう一方は顕熱交換器の熱回収により余熱された空気をプレ再生空気として加熱器を通過させず除湿機の再生前段部分に通気させることで再生効率の向上が期待できる．

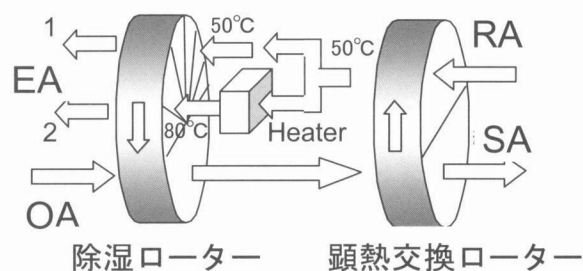


図 4 除湿機の段階再生

図 5 は除湿量に与える加熱再生ゾーン面積比率の影響の一例である．外気湿度が低い場合，加熱再生ゾーン面積比率の影響が小さい．これは低い外気湿度領域では吸着量が少なく，加熱再生ゾーン面積が小さくてもプレ再生過程とともに脱着に必要なエネルギーを供給することができるからである．しかしながら高い外気湿度領域では大きな

加熱再生ゾーン面積比率が必要となる。よって、求められる給気湿度によっては加熱再生ゾーン面積を調整することでエネルギー投入量の削減が可能である。また、高い外気湿度領域では除湿量変化が小さいが、これは吸着材の吸着等温線形状および吸着速度に起因し、今後のデシカント空調プロセス用途吸着材開発の重要な検討課題の一つである。

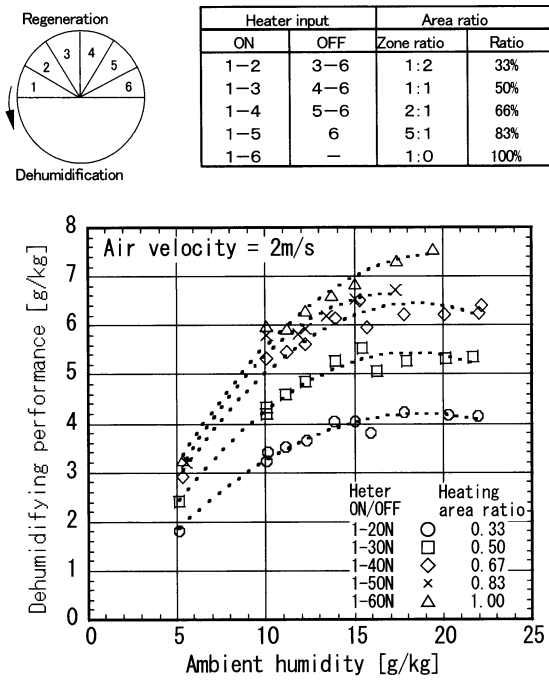


図5 除湿量に与える加熱再生面積比率の影響 (ローター断面図は再生側入口から見たもの)

図6は加熱再生ゾーン面積比率と相対冷却効果 CE/CE' (ゾーン1-6全てを加熱再生した場合に得られる冷却効果を1とする)および投入熱量比 kW/kW' (ゾーン1-6全てを加熱再生した場合の投入熱量を1とする)の関係である。加熱再生ゾーン面積比率が小さくなるにつれて熱投入量は直線状に減少しているのに対し、相対冷却効果は当初緩やかに減少する。この結果、例えば加熱再生ゾーン面積比率0.67の場合、投入熱量比は0.75に対して相対冷却効果は0.9程度を維持できており、 COP_m 値は20%向上できることになる。

2.3 熱交換器

室内への給気のエンタルピーを下げているのは顕熱交換器の働きによるものであり、その温度効率向上の重要性は言うまでもない。数値シミュレ

ーション結果から5%の温度効率の向上によりプロセス性能が格段に上昇することが予想されている。また、回転型熱交換器は除湿ローターに比べて数十倍高速で回転するために再生側空気から給気側への湿分の移動は避けられない。この湿分移動を抑制するためにプレートフィン形などの静止形熱交換器の利用が抜本的な解決法になると思われるが、回転型よりも低い温度効率が難点である。

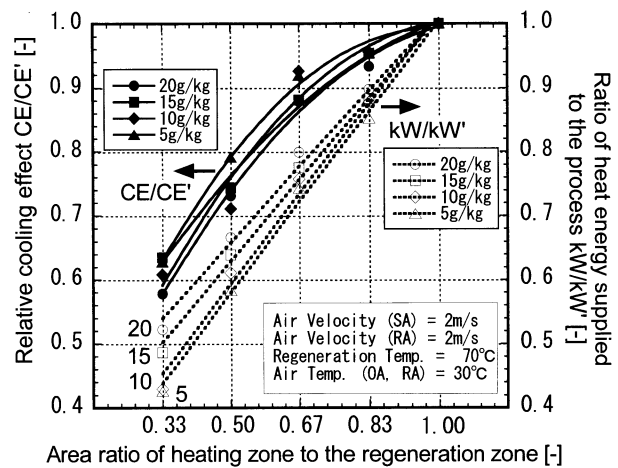


図6 段階再生手法による省エネルギー効果

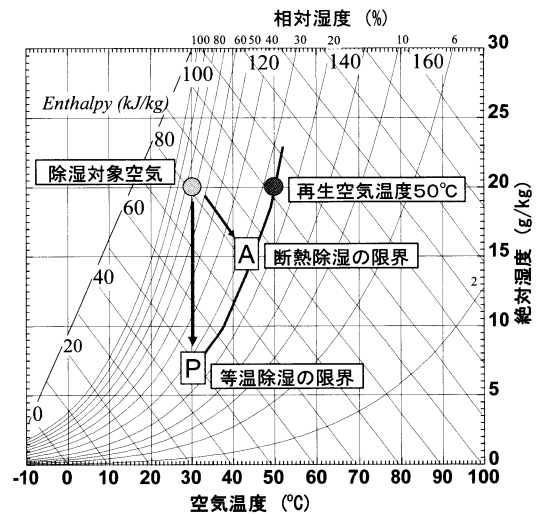


図7 断熱除湿限界と等温除湿の有効性

3. 断熱除湿限界の克服

図7に示すように除湿が断熱的に進行する限りは除湿出口湿度の下限界は外気空気と等しいエンタルピー線と再生空気と等しい相対湿度線の交点(A点)である。よって従来の流路構成では50-60°C程度の再生温度では十分な除湿量が得ら

れない。この断熱除湿限界を克服するためには除湿に伴って発生する吸着熱を除去する仕組みが必要である。例えば、図1の装置形式のままであれば、室内への供給空気の一部を除湿ローター入口に再循環させることで、除湿性能を幾分か向上できるが、給気風量が減少するという欠点がある。当研究室では給気風量の減少を伴わない手法として除湿操作の多段化を検討した。

3.1 2段除湿型プロセス

図8は除湿操作を2段にした吸着式デシカント空調プロセスの概略図である。この流路構成では、まず一段目の除湿機で高湿度な外気"1"を"A"の状態にまで除湿し、外気と熱交換した後にさらに除湿と熱交換を行い、得られる低湿度な空気"3"を得るものである。

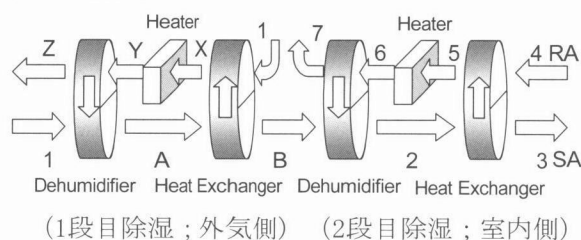


図8 2段除湿型デシカント空調プロセス

図9は2段除湿型プロセスの除湿性能およびCOPである。比較のために従来型プロセスの結果もあわせて示す。従来型プロセス単体では対応することが困難な高湿度条件下でも2段除湿型プロセスは高い除湿性能を維持した。これは2度の除湿操作に加え、除湿機間の顕熱交換器により吸着熱が除去され、有効吸着量の低下が抑制されたためである。また、実質的な熱エネルギー利用率の向上を目的とした異温度再生方式(プロセス内熱カスケード利用型"2-1モード")も2つの加熱器に同温度の熱を供給する同温度再生方式(Parallel)には若干劣るが、良好な除湿量を得ることができた。また、COP_m値も高く、実質的なエネルギー利用率の観点からは有効な流路構成であるといえる。一方で2段除湿型デシカント空調プロセスは装置が大型化し、普及の妨げの一因となる。そこで、装置の省スペース化を図るために、通常の半分であるローター幅0.1mの除湿ローターを導入した結果、高湿度条件下でも性能低下は10%程度に留まった。これは断熱除湿では吸着熱発生に

よって空気流れ方向に空気の相対湿度が急激に低下するため、除湿ローター下流域の吸着量は上流域に比べて少ないためである。言い換えれば、デシカント空調のように究極的な乾燥が必要ない除湿操作ではローターに含まれる吸着材の半分は効率よく機能していない。数値計算によると除湿機再生温度が高いほどこの傾向は強くなる [7]。

Heat supply								
Parallel			Serial(2-1 mode)			Conventional		
Mark	1st	2nd	Mark	1st	2nd	Mark	1st	2nd
○	50	50	◇	50	60	●	50	-
□	60	60	×	60	80	■	60	-
△	80	80				▲	80	-

Parallel: 除湿機2台とも同じ再生温度

Serial: プロセス内熱カスケード利用

(除湿機2台の再生温度は異なる)

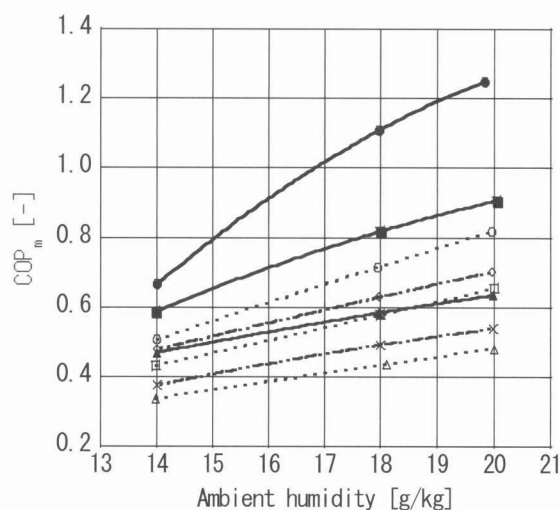
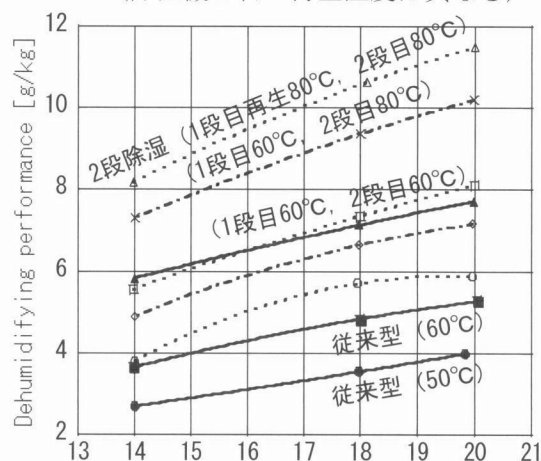


図9 2段除湿型プロセスの除湿性能およびCOP

3.2 同時熱交換型除湿プロセス

図7に示したように等温操作における除湿空気湿度の下限界は、点Pである。すなわち50℃の再生空気による等温除湿では、90℃の再生空気による断熱除湿と同じ除湿性能が得られることになる。また、等温除湿と断熱除湿で得られる除湿量を比較すると、低温度再生になるほど等温除湿の有利性は顕著になることがわかる。なお、等温除湿を達成するためには吸着工程に入る前に吸着剤の冷却、吸着工程中には吸着熱の連続除去が必要であり、吸着材の伝熱促進および熱交換性能向上のための工夫が不可欠となる。研究開発の一例として図10に同時熱交換型除湿ローターを示す。等間隔で放射状に60個設置したアルミ製のスリット間に扇形のハニカム吸着剤が組み込まれている。再生用温水をこのスリット内に通過させ、壁からの熱交換により吸着材を加熱することも可能である。この場合、加熱あるいはそのままの温度の外気を吸着剤層に供給し、水蒸気を脱着除去する。一方、吸着側ではスリット内に冷却空気を流し、吸着熱を除去して吸着材を冷却する。このとき再生側で用いた温水がスリットの内壁に残存しており、冷却空気の流れに伴う残存水の気化熱により、吸着熱をより効果的に取り除くことができる。

図11に除湿実験結果の一例を示す。再生過程ではスリットに温水を供給し、かつ吸着材層には外気を温水と同じ温度まで加熱して供給した。吸着熱除去は十分ではなく等温除湿は達成できていないが、スリット内に残存した水の蒸発潜熱による吸着材の冷却効果もあり、45-50℃という低い再生温度でも良好な除湿性能を得ることができた。例えば45℃再生で23g/kgという高湿度外気から8g/kg除湿しているが、これは従来の除湿ローターを同温度で再生した場合には決して得ることのできない除湿量である。一方、除湿量に与える再生温度の影響は小さく、特に原料空気湿度が高い領域でその傾向が強い。これは、アルミスリット等の導入により吸着材ローターの熱容量が増加したことも影響して吸着材の冷却が迅速ではなく、再生温度が高いほど吸着材層温度が高いままで吸着工程を移動することを示唆する。また、中間湿度域で除湿性能の低下が見られるが、これは除湿ローターに担持した吸着剤の特性が影響している。上記結果からローター内伝熱抵抗の削減と吸着

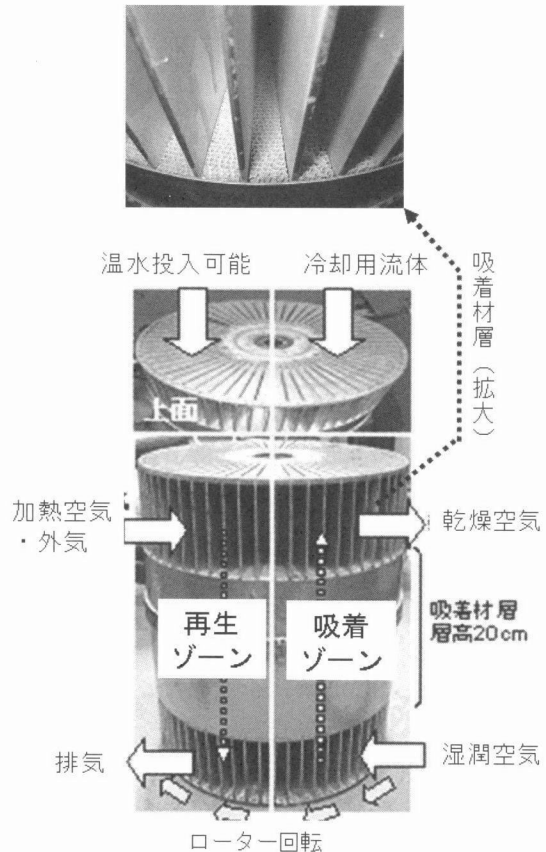


図10 同時熱交換型デシカントローター

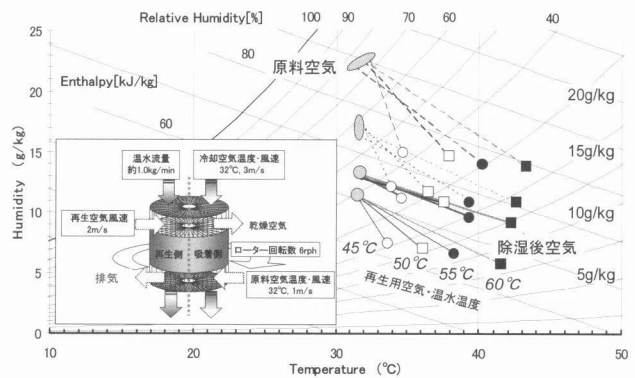


図11 同時熱交換型吸着材ローターの除湿性能

材特性の検討により除湿性能の改善が期待できる。そこで、吸着材層とアルミスリット間を熱伝導性の高い材料で接合、伝熱抵抗の削減を図った。また、等温除湿に適した吸着材特性としては、良好な吸脱着速度に加えて、再生空気の相対湿度を境に平衡吸着量が大きく変化することが望まれる。よって、このような特性を有する(株)三菱化学製の新規吸着材 FAM-Z を無機バインダーによりアルミニウム製のハニカムマトリクスに担持した。この吸着材では、温度上昇により等温線が立ち上が

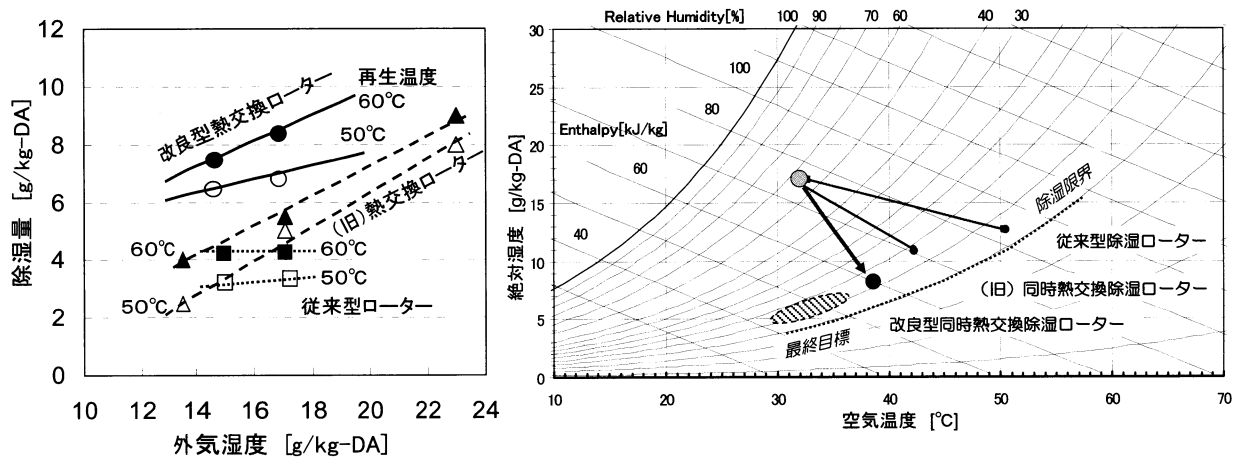


図13 伝熱促進と新規吸着材導入による同時熱交換除湿ローターの性能改善

る相对湿度域が加熱再生に好都合な方向に移動する。図 12 に改良型除湿ローターの性能を示す。ここで吸着材再生は加熱空気だけで行った。吸着材の冷却効果を高めるために少量の冷却水を追加供給したこともあり、旧熱交換除湿ローターと比べても除湿性能は大きく向上した。また、同時熱交換型除湿機は従来型に比べ吸着ゾーンの断面積が約 40%小さいものの、2 倍近い除湿量を達成しており、装置の小型化にもつながる結果となった。しかしながら、研究開始当初に期待した高速吸脱着サイクルとは程遠いローター回転数での操作である。3.1 項にも記したように試作した 20cm 層高の除湿ローターでは空気流れ方向後半部分の吸着剤が効率よく働いていないこと、また、その部分への蓄熱が高速サイクル化を妨げていることが予想される。この点で吸着材層高さの思い切った削減は小型高性能デシカント空調プロセスを導くものとして、現在検討中である。

5. おわりに

当研究室における吸着式デシカント空調機の高効率化研究を紹介させて頂いたが、湿度スイング吸着（富士シリシア化学）、高分子収着剤応用プロセス（岡山大学）、バッチ式等温除湿プロセス（名古屋大）、吸着ヒートポンプとのハイブリッド化（東京農工大・九州大）など国内でも注目すべきデシカント関連研究が数多く進んでいる。この中で低温熱駆動を目標とした研究開発の多くは吸着熱除去による等温除湿を目指しており、よりシンプルな装置構造でいかに効率よく吸着熱を除去するかがブレークスルーの鍵となっている。

国内普及数は大規模施設を中心に 200 件程度に留まっているが、80°C 程度以上の再生温度があれば既に実用性能域にあるデシカント空調プロセスである。今後、コージェネレーションシステムの普及とともにデシカント空調機の特長が認知されれば、快適環境を必要とする学校や劇場への導入も進む。私たちの家庭を考えると少ないエネルギー消費量で 24 時間換気空調が実施でき、さらには結露を防ぐことで建物そのものの寿命も長くできる。オフィスではデシカント空調機による高温低湿度空気の供給で冷房による健康被害が少なくなる。自動車への適用には小型化は不可欠であるが比較的高温のエンジン排熱が利用できる。デシカント空調機は省エネルギーだけではなく、快適空調も提供するものであり、更なる研究開発が望まれる。

参考文献

- [1] 株式会社西部技研ホームページ
<http://www.seibu-giken.co.jp/>
- [2] L. Z. Zhang and J. L. Niu, Energy, **28**, (2003) 275.
- [3] Kodama, A. et al., J. Chem. Eng. Japan, **36**, (2003) 819.
- [4] 児玉昭雄, 安藤幸助, 広瀬 勉, 後藤元信, 岡野浩志, 日本冷凍空調学会論文集, **22-1**, (2005) 33.
- [5] Kodama, A. et al., Adsorption, **11-Supplement 1**, (2005) 603.
- [6] Ando, K. et al., Adsorption, **11-Supplement 1**, (2005) 631.
- [7] 辻口拓也, 児玉昭雄, 日本冷凍空調学会論文集, **22-4**, (2005) 49