

論文博士

吸着式デシカント空調用エソメントの  
吸着特性と除湿性能に関する研究

Study on Adsorption Characteristics and  
Dehumidification Performance of Desiccant Element  
for Adsorptive Desiccant Air Conditioning

横浜国立大学  
大学院環境情報学部

2008年3月

三代 義和  
Yoshiwaka Yashiro

吸着式デシカント空調用エレメントの  
吸着特性と除湿性能に関する研究

2006年3月

田代 義和

# 目 次

## 第1章 緒 論

1.1 吸着式デシカント空調機器に関する研究の現状と問題点	1
1.2 除湿エレメントに関する研究の現状と問題点	7
1.3 本研究の目的と概要	10
参考文献	12
図表	14

## 第2章 各種吸着剤の水蒸気吸脱着特性およびその有効吸着量の評価

2.1 緒言	18
2.2 実験方法	19
2.2.1 各種吸着剤	19
(1) シリカゲル	
(2) ゼオライト	
(3) 活性炭	
(4) メソポーラスシリケート	
2.2.2 水蒸気の吸脱着特性評価	20
2.2.3 比表面積および細孔径分布の測定	21
2.3 結果および考察	21
2.3.1 各種吸着剤の水蒸気吸着等温線	21
2.3.2 有効吸着量の比較	25
2.4 結論	27
参考文献	29
図表	30

### 第3章 除湿エレメントの動的除湿性能

3.1 緒言	39
3.2 実験方法	40
3.2.1 除湿エレメントと水蒸気吸着等温線の測定	40
3.2.2 除湿性能測定装置	41
3.2.3 除湿性能の測定	41
3.2.4 装置の空気漏れ量の測定	42
3.2.5 各種パラメータと実験条件	43
3.3 結果および考察	43
3.3.1 除湿エレメントのロータ厚みの影響	43
3.3.2 再生熱量の影響	44
3.3.3 面積比の影響	45
3.3.4 除湿性能比較	46
3.4 結論	47
参考文献	48
図表	49

### 第4章 除湿エレメント用シートの調製とその除湿性能

4.1 緒言	61
4.2 実験方法	62
4.2.1 除湿エレメントの調製方法	62
4.2.2 除湿シートの水蒸気吸着特性および比表面積の測定	63
4.2.3 除湿エレメントの水蒸気吸着速度の測定	63
4.2.4 除湿エレメントの除湿性能	64
4.3 結果および考察	65
4.3.1 水蒸気の吸着等温線および比表面積	65

4.3.2	吸着速度	67
4.3.3	除湿性能	67
4.3.4	除湿エレメントの実用化の検討	68
4.4	結論	70
	参考文献	71
	図表	72

## 第5章 除湿エレメントの性能評価に関するシミュレーションの検討

5.1	緒言	85
5.2	数値解析	86
5.2.1	共通記号	86
5.2.2	基礎方程式	87
5.2.3	基礎式の差分化	88
5.3	実験方法	89
5.3.1	除湿エレメントの水蒸気の吸着特性評価	89
5.3.2	除湿エレメントの総括移動係数の算出	89
5.3.3	吸着・再生実験	91
5.4	結果および考察	91
5.4.1	吸着・再生繰り返し時の重量変化および数値解析結果	92
5.4.2	除湿エレメントの吸脱着特性と除湿性能評価	92
5.4.3	回転型除湿装置への適用結果	94
5.4.4	デシカント空調システムへの設計への応用	94
5.5	結論	96
	参考文献	97
	図表	98

<b>第6章</b>	<b>デシカント除湿機の実用化とその性能評価</b>	
6.1	緒言	113
6.2	デシカント除湿機の構造と除湿原理	114
6.3	実験	115
6.3.1	除湿エレメント	115
6.3.2	熱交換器	115
6.3.3	除湿性能評価	116
6.3.4	除湿エレメントの耐熱性の評価	116
6.4	結果および考察	117
6.4.1	除湿エレメントの最適回転数	117
6.4.2	再生空気の最適風量	117
6.4.3	デシカント除湿機の除湿性能評価	118
6.4.4	除湿エレメントの耐熱性	118
6.5	結論	120
	参考文献	121
	図表	122
<b>第7章</b>	<b>総括</b>	<b>134</b>
	本研究に引用した著者の学術論文	139
	査読論文	
	口頭発表	
	謝辞	140

# 第1章 緒 論

## 1.1 吸着式デシカント空調機器に関する研究の現状と問題点

多湿は、静電気の蓄電を防止する上においては非常に有効に働く他、冬季の風邪を引き起こすインフルエンザウイルスの繁殖を抑制するなど、ある面では歓迎すべき点もあり、また建築物や芸術品の保管・保護にあつてはある程度の湿度が要求される分野もある。しかし、ある湿度範囲を超えると問題を発生する場合がある。わが国は、高温多湿の気候であり、特に梅雨の時期は不快であるばかりでなく、多湿はカビの増殖や各種工業製品、食品などの取扱いをはじめとして保存・保管時において、吸湿や結露による品質の低下・変質などの問題を生じる。除湿装置としては、電子機器や医薬品などの製造工程、低温保管倉庫・美術館など工業用途から一般家庭用に至るまで各種の製品が開発・販売されており、除湿性能、露点温度や省エネ性などが提案され目的に合致した除湿方法が選定されている<sup>1-3)</sup>。

除湿方法<sup>4)</sup>としては、主として次の4つの方法に分類される。

### (1) 冷却による除湿

湿り空気を冷却コイルなどで露点温度に冷却し、凝縮して除湿する方法である。一般のエアコンと同じ方式でフロンなどの冷媒を用いた冷凍サイクルで空気を冷却し、水蒸気を凝縮させる方法である。この方法では、低露点温度までの適用は期待できないが、装置の取扱いが極めて容易で、消費電力も少ない部類に入る。しかし、最近のオゾン層破壊の問題から、利用できるフロンの種類や使用方法が厳しく規制されている。

### (2) 圧縮による除湿

空気を圧縮すると、飽和絶対湿度が低下する。そのときジュール・トムソン効果によって温度が上昇する。その空気を圧縮したまま冷却すると、飽和絶対湿度が低下した分だけ水蒸気が凝縮し、結果的に除湿されることになる。この方法は、極めて多大なエネルギーが必要であるため、比較的高圧でかつ低湿気体が必要な場合に限って用いられている。

### (3) 液体吸収剤による除湿

塩化リチウムやトリエチレングリコールなどを液体吸収剤として用い、空気中の水蒸気を吸収除湿する方法である。この吸収剤をハニカム状のエLEMENTに含浸させ、そのELEMENTを回転させることで、除湿と熱による再生を繰り返し行う装置が開発されている。この吸収式の除湿装置は、比較的安価で調湿機能が優れており、殺菌効果もあるため医療施設で普及した。しかし、用いられる吸収剤は腐食性の性質を有しており、このような吸収剤がミストとなって飛散する可能性を持っていることが欠点となっている。

### (4) 吸着剤による除湿

シリカゲルやゼオライトなどの固体吸着剤に湿り空気を流通させて、除湿する方法である。吸着剤の再生は、減圧下および加熱条件下で行う。この方法は、低露点の空気が得られる特長があり、特に圧カスイング吸着法 (Pressure Swing Adsorption, PSA) による吸着と脱着を繰り返す方法が化学プラントを中心に発展してきた。また、吸着剤をハニカム状のエLEMENTに担持させ、吸収式と同様に熱再生による回転式の除湿装置も考案・開発されている。しかし、冷却方式と比較して消費エネルギーが大きいため、この除湿装置は低露点が必要な用途を中心とした分野で採用されている。

以上の除湿方法の中で、ビルや事務所などの空調に用いる業務用や、一般の家庭用除湿機に用いられている方法は、現在冷凍サイクル方式を用いた冷却による除湿が主流となっている。しかしながら、近年のオゾン破壊や温暖化防止など地球環境問題を考慮して、フロンを使用した冷凍サイクルのエアコンや除湿機などから、フロンを使用しない吸着剤による空調機器や除湿機などの研究開発が盛んに行われようになり<sup>5-7)</sup>、各種の製品が市販されてきた。さらには、除湿のための使用目的のみならず、無給水加湿ユニットとして、エアコンなどへも応用展開が図られている。一般的に、吸着剤および液体吸収剤を用いたELEMENTで除湿し、熱による再生を行うことを原理とする除湿機器をデシカント除湿機、更なるその除湿された空気を加湿し、その際に要する蒸発熱を利用して冷房する機器をデシカント空調機と呼んでいる。

本論文では、デシカント空調機に用いるための吸着剤や除湿ELEMENTと吸着剤を用いたデシカント除湿機に関する研究成果をまとめることが目的であるので、本章においては以降吸着式のデシカント方式除湿機について解説する。なお、本論文の著者は長年



松下電器グループの研究開発部門に席を置き、開発研究から商品化までの職について関係で、関連する自家製品を例に除湿性能や消費電力を中心に記述する。表 1-1 に松下電器産業(株)製のデシカント方式の除湿機 2 機種を、表 1-2 に冷凍サイクルを用いたコンプレッサー方式の除湿機 2 機種の除湿能力と消費電力を示す。同じ除湿量であるデシカント方式の除湿機 (F-Y100Z2) の除湿能力 (10L/日 (60Hz)) とコンプレッサー方式の除湿機 (F-YB10W) の除湿能力 (10L/日 (60Hz)) における消費電力を比較すると、コンプレッサー方式は 250W であるのに対し、デシカント方式は 790W と消費電力が大きい。しかし、コンプレッサー方式は、冬季の室温が低い場合には極端に除湿能力が低下することに対して、デシカント方式は、軽量かつコンパクトな装置になっており、低温でも除湿能力の低下が少ないため、梅雨の時期だけでなく、日本海側の地域での冬季における除湿や室内での衣類乾燥などの用途に性能を発揮している。その他にデシカント除湿を応用した例として、除湿エレメントを用いて、室外の湿度 (水分) を除湿エレメントに吸着させ、室内に再生しながら放出することで、給水不要の加湿器として使用する商品も開発されている。その他のメーカーにおいてもデシカント除湿機が開発・販売されているが、小型・軽量および室内が低温時でも高い除湿性能が保持できるなどの特長があるものの、コンプレッサー方式と比較して、消費電力が高いという課題が残されており、消費電力が低いデシカント除湿機開発の必要性が認識されている。

また、デシカント除湿を応用して室内を冷房するデシカント空調機も開発されている。図 1-1 に、一般的なデシカント式空調機器の構成図と各構成部材による空気の状態を空気線図を用いて示す。室外の高温・高湿度の空気は、全熱交換器によって室内空気と熱および湿度を交換し除湿エレメントに入る (①→②)。除湿エレメントで除湿されると同時に、発生する吸着熱によって温度は上昇する (③→④)。この除湿された空気は顕熱交換器によって室内空気と温度交換し (③→④)、加湿器によって加湿された水が蒸発することにより冷却され (④→⑤)、冷房空気として室内に供給される。即ち②と⑤の状態のエンタルピー差が冷房能力となる。一方、室内からのリターン空気 (⑥) は、全熱交換器、顕熱交換器によって加温された後 (⑥→⑦→⑧→⑨)、除湿エレメントを再生するために必要な温度にまで廃熱やヒーターなどによって加熱される (⑨→⑩)。除湿エレメントを再生した後の高温かつ高湿度の空気は室外へ放出される (⑪)。デシカント空調機器

の消費電力は、送風するためのファンや除湿エレメントおよび顕熱交換器を回転させるための駆動用モーターなどに必要な電力もあるが、大部分は除湿エレメントを再生するための熱量である。また、冷房能力も除湿エレメントの性能に依存する。デシカント空調機器は、工場あるいは事務所などの比較的大きな空間の冷房などに用いるため、例えば、工場の廃熱を利用できれば、それだけ省エネ化が図れる。いずれにしても低温で再生することができ、しかも高い除湿性能を有する除湿エレメントの開発が要望されている。

一方、家庭用のデシカント除湿機の場合は、除湿した空気を室外に排出する構造にするとダクト配管などが必要になり、除湿機の移動ができないなどの問題が生じるため、除湿エレメントから放出された高温高湿空気を室内空気によって冷却することで結露させ、水をドレインとして回収できる構造にしておくことが要求される。また、利用できる特別な廃熱もないので、ヒーター加熱による除湿エレメントの再生を行う。したがって、上述のデシカント空調機と異なり高温での再生であっても、再生風量をできるだけ少なくすることにより、トータル的に低消費電力でかつ高除湿性能が要求されている。家庭用のデシカント除湿機の構成および各構成部材での空気の状態の変化は、第6章で詳細に述べる。

吸着剤を用いた除湿装置は、前述のP S A<sup>8)</sup>が古くから研究され、主してはプラント設備など工業用の空気の除湿装置として発展してきた<sup>9-11)</sup>。これは、吸着剤を熱で再生する熱スイング吸着法(Thermal Swing Adsorption, TSA)と比較して、熱源がないため、非常に省エネ型であることや、吸着・脱着の切替えが瞬時にでき、連続的除湿操作ができるなどのメリットがあるためである。さらに、吸着剤の吸着性能から、システムを構成した場合の除湿性能を予測するシミュレーションも研究され<sup>8, 12)</sup>、実際の装置での検証も進んでいる。しかしながら、P S A方式では設備が大きくなるため、食品貯蔵庫など大空間の除湿を行うためには設備費がかかり、かつ設置面積も広いなどの問題があって不向きである。このような工業用途として、ハニカム状の除湿エレメントに塩化リチウムなどの吸収剤を含浸させ、この除湿エレメントを再生と除湿に分割して回転させることで、低露点の除湿空気を供給する除湿装置が開発された<sup>4)</sup>。更に吸収剤を含浸させるとミストの飛沫による金属の腐食などの問題があるため、シリカゲル、ゼオ

ライトや活性炭などの吸着剤を基材に担持させた除湿エレメントを用いる除湿装置も開発され、活用されている。図 1・2 に西部技研(株)製の主な除湿装置の外観図を示す。この装置は、冷凍サイクルを用いた除湿機と比較して消費電力が非常に大きいため、食品や電子部品の貯蔵庫、低湿度が必要な製造ラインや図書館、美術館など限られた用途と場所で使用されている。しかし、昨今の地球問題によりフロンが使用できなくなったことから、これらの分野においても低消費電力の除湿が可能である吸着式の除湿装置が見直されている。

ところで、デシカント空調機で除湿冷房を行う場合、当然ながら除湿エレメントの除湿性能が冷房能力に大きな影響を与える。シリカゲルを主体とした除湿エレメントを用いたデシカント空調機の除湿性能や冷房能力評価に関してはいくつか報告<sup>13, 14)</sup>されており、除湿エレメントの性能向上に関する研究<sup>15, 16)</sup>も行われている。児玉ら<sup>15)</sup>の研究によれば、高い除湿性能を得るためには、回転式の除湿エレメントの最適な回転数を求め、その最適回転数のもとでの冷房能力や除湿性能を評価することが必要であるとの指摘がなされている。しかしながら、この最適回転数は、システムとして構築した装置の状態、除湿エレメントの除湿と再生の面積比、エレメントの厚みや処理風量などによって異なるため、各々の条件時の最適回転数を実験で求めることが必要である。また、デシカント空調機としての性能を評価する場合、熱交換器などの除湿エレメントの他に重要な構成部材を含むために、パラメータがそれだけ複雑に絡み合うこともあって、除湿エレメントが持つ基本的吸着特性がシステムとしての除湿性能に与える影響に関する研究はほとんど行われていない現状にある。金ら<sup>13)</sup>は、除湿冷房装置での再生空気や外気温度、湿度の影響などの評価を行い、処理風量と再生風量の最適な比などについて、詳細な検討を行っており、この分野では貴重な報告となっているが、しかし除湿エレメントの吸着特性と除湿性能の関係については検討していない。一方、除湿エレメントの最適な回転数を求める場合には、膨大な実験が必要である。例えばシリカゲルとゼオライトを吸着剤とした除湿エレメントの除湿性能を比較する場合、同条件での比較で除湿性能を比較すれば優劣の評価は簡単であるが、各々の吸着特性が異なるため各々の最適な条件が異なり、その条件時での除湿性能を評価する必要がある。その最適条件を実験で探るためには膨大な作業が必要になる。

田中らは、流体および除湿エレメントについての水分量の収支式を基礎式として、除湿エレメントの除湿性能を予測するシミュレーションを実施しているが<sup>17)・18)</sup>、まだ十分満足できるシミュレーションではなく、実際の装置や最適的な除湿エレメントを選定するためのシミュレーションとしては多くの課題が残されたままで、これを超えるものの開発は報告されていない。除湿エレメントの吸着特性を評価した上で、システムとして構築する前に除湿エレメントに関する各種パラメータを変えた除湿性能を予測するまでには致っておらず、吸着特性との関係を知るにはまだまだ不十分であり改善する必要がある。除湿操作に適した除湿エレメントの材料を選定することが、結果的に再生の低温化あるいは低熱量化に繋がるため、優れたシミュレーションの開発が望まれているところである。なお、実験の効率化や除湿エレメントの適性を簡易に判断するためにも、材料特性から除湿性能を予測できるシミュレーションの開発も要望されている。

## 1.2 除湿エレメントに関する研究の現状と問題点

吸着と加熱による脱着を繰り返すT S Aのデシカント空調機器や除湿機などに用いられている吸着剤は多種多様である<sup>1, 19, 20)</sup>。吸着と再生を連続的に行わず単純に乾燥という用途であれば、水の吸着性能が高い吸着剤が良い。加熱再生を行う場合には、再生に必要な温度や、工業的に用いるために物理的な強度や耐久性なども考慮する必要がある。しかしながら、これまでの吸着剤に関する研究は、工業用途で用いる場合の吸着剤の特性評価に限られ、前述のデシカント空調機器や家庭用除湿機に使用する除湿エレメントに最適な吸着剤という視点からの評価はあまりなされていなかった。

除湿エレメントに用いられている主な吸着剤について以下に概略を述べる。

### (1) シリカゲル

シリカゲルは二酸化珪素からなるコロイド状シリカの三次元構造体であり、乾燥剤として用いられている。シリカゲルは多くの種類があるが、系統的に明確になっており、代表的なものとしてはA型シリカゲルやB型シリカゲルがある。水蒸気の吸着等温線に関して、一般的にA型シリカゲルは直線型であり、B型シリカゲルはS字型の吸着等温線の形を示している。また、シリカゲルは製造段階で細孔径や比表面積を制御することが可能とされており、シリカゲルの細孔構造およびその表面物性に依りてさまざまな吸着等温線の形を示す。A型シリカゲルとRD型シリカゲルの吸着特性について、YehらやChuaらが詳細に評価<sup>21, 22)</sup>を行っている。しかし、吸着特性と除湿エレメントに用いた場合の適性との関係についての考察はされておらず、吸着特性の面からの可能性について今後も詳細な検討が必要である。

### (2) ゼオライト

水の吸着剤としては、一般的にA型、X型、Y型ゼオライトが用いられることが多い。しかし、ゼオライトの水の吸着等温線は、Langmuir型であり、化学吸着をしているために高い再生温度が必要である。しかし、ゼオライトの中でもY型ゼオライトは酸処理で骨格中のAlを除き、Si/Al比を高めることで親水性から疎水性になる<sup>23, 24)</sup>。また、Si/Al比を制御することで、Langmuir型、直線型や疎水型の水の吸着等温線を示す

吸着剤を得ることができる。ゼオライトは、他の吸着剤と比較して機械的強度や耐熱性に優れているので、除湿エレメントに加工しやすく、高温で再生する場合に適している吸着剤である。特に高温で再生することが低消費電力になるようなシステムの除湿エレメントの吸着剤としてゼオライトは有望である。

### (3)活性炭

活性炭は疎水型の吸着剤であり、除湿エレメントに用いる吸着剤としては適していないと言わざるを得ない。しかしながら、古くから化学成分を活性炭に添着した添着活性炭が開発され、各種ガスの吸着剤や脱臭剤としてとして幅広く使われている<sup>25)</sup>。活性炭では吸着しにくいガス成分であっても、その大きい比表面積を活かして、例えばアニリンを添着することで、一酸化窒素を化学吸着させること<sup>26)</sup>やホルムアルデヒドの吸着剤<sup>27)</sup>としても開発されている。除湿エレメントの吸着剤として適用できるようにするために、活性炭表面上でシリカゲルを形成させることで、活性炭表面を疎水性から親水性にする試みも行われてきている<sup>28)</sup>。活性炭は疎水性でありながら、比表面積が大きいため、80%RH以上の高湿になると高い水の吸着量を有している。この特性を活かしながら表面を親水性にすることで、除湿操作が行われる60%RHで高い吸着量を得ることができれば、非常に有望な吸着剤になる。コストも安く、添着による改良も比較的簡単にできるため、目的にあった改良を加えれば、今後除湿エレメント用の吸着剤として有望な材料になると考えられる。

以上、代表的な吸着剤に関しての概略について問題点を含めて述べた。その他の水蒸気の吸着剤としては活性アルミナや吸着樹脂などが挙げられるが、除湿エレメントの吸着剤として用いられることは少ない。また、最近の新しい吸着剤としては、メソポーラスシリケートがある。メソポーラスシリケートは均一なメソ孔を持つ多孔体で、比表面積および細孔容積が非常に大きいことから、MCM-41やFSM-16などの研究が最近盛んに行われている<sup>29-32)</sup>。メソポーラスシリケートは、目的の細孔径が製造段階で制御できるため、水蒸気の吸着特性に有効な細孔径などを評価できれば、目的に合った吸着剤として得ることができる。しかし、機械的な強度や一度水が吸着すると疎水性から親水性に表面が変化するなどの問題もあり、今後も研究が必要な材料である。

いずれの吸着剤に関しても、製造方法や表面の改質によって、吸着特性が変化して水

の吸着等温線が変わる。したがって、一概にこの材料が最も適していると選定することが困難である。むしろ、除湿エレメントに適した材料の選定というよりも、除湿操作の条件や再生温度など要求されるスペックに応じて、どの材料を出発点にして、改質などを実施すれば目的の特性を有する吸着剤を得ることができるかを材料毎に評価・検討することが重要であると考えられる。

デシカント空調機器や除湿機などに用いる除湿エレメントは、多量の空気を通過させることが必要であるため、通気抵抗が小さいハニカム状（あるいは格子状やコルゲート状）に成形されている。除湿エレメントの成形方法の一例を述べると、粒子状の吸着剤をシート化して除湿シートを作製し、その除湿シートをハニカム状に成形する。その除湿シートを作製する際に、吸着剤の他にシートのもとになる基材や、吸着剤を基材に担持するためのバインダーなどが用いられる。しかし、除湿シートの調製方法や除湿エレメントの成形方法については、各メーカーで独自に開発し製造ノウハウとして蓄積されているため、ほとんど公表されていない。現時点では、主に(株)西部技研とニチアス(株)が除湿エレメントを製造・販売している。西部技研(株)製のシリカゲル主体の除湿エレメントの作製方法<sup>33)</sup>は、無機繊維製のシートに水ガラスを塗布し、酸性溶液に含浸させることで、シート上でシリカゲルを形成させ、そのシートをハニカム状に成形するものである。さらにアルミニウムあるいはマグネシウムといった金属塩の溶液に含浸させることで、除湿性能が向上すると報告されている<sup>34)</sup>。

ゼオライトなどを担持する場合には、シリカゲルと異なり、シート状でゼオライトを合成することが非常に困難であるため、一般的には粒子状のゼオライトを水に懸濁して、無機繊維のシートあるいはそのシートをコルゲート状に加工したものをゼオライト懸濁水に含浸して、その後焼成することで除湿エレメントを作製する。しかし、調製方法だけでなく、基材として用いられる無機繊維やその他バインダーなどに関して、どのような材料が適しているのか、およびその材料特性などが製造ノウハウになっており、公表されていないのが実情である。したがって、除湿エレメントに用いられている材料毎の吸着特性だけでなく、除湿シートや除湿エレメントを成形する場合の調製方法によって吸着剤に与える影響などがほとんど解明されていないと言っても過言ではない。

### 1.3 本研究の目的と概要

第1節、第2節において、デシカント空調機器および除湿エレメントの現状と問題点を述べた。吸着剤や除湿エレメントの吸着特性に関して、デシカント空調機器や除湿機の高性能化や省エネ化を図る上で解決すべき事項および実用的な機器の開発と製品化を具現化するために重要となる課題などをまとめた。著者は、松下精工(株) (現松下エコシステムズ(株))の研究開発部門に在籍し、これまで低消費電力型のデシカント空調機器や除湿機の開発を目指して、各種吸着剤の水蒸気の吸着特性評価、除湿エレメントの材料評価やシステムの最適化に関する研究開発を行ってきた。本論文は、著者がこれまでにやってきた研究の成果をまとめたものである。開発の具体的目標と研究の目的は以下のような内容を含むものであった。低消費電力型のデシカント空調機器や除湿機の開発を行うためにはまず、低温でかつ低エネルギーで再生することができる除湿エレメントに最適な除湿材料の特性を把握する必要があること。また、除湿エレメントは吸着材料だけでなく、エレメントを形成するためには基材やバイダーなどが必要であり、これら吸着剤以外の材料が吸着剤に与える影響も明確にする必要があること。同時に吸着剤の特性を最大限に発揮できる除湿シートの調製方法を検討する必要があること。

さらに、システムの最適化を図るためには、除湿エレメントの吸着特性、厚み、量などや、システムとしての風量、再生温度、除湿と再生の面積比などのパラメータから除湿性能を評価して、低熱量でかつ高除湿性能を得ることができる最適な条件を見つける必要があること。これらの除湿エレメントをデシカント空調機器や除湿機に組み込んだ場合の最適な除湿性能を得るためには、各種パラメータが複雑に絡み合っているので膨大な実験が必要であるが、その実験量をできるだけ減らし、最適な条件を見出すためのシミュレーションが必要不可欠であること。

以上の背景から、(1)除湿エレメントに用いる吸着剤の最適な吸着特性の把握、(2)除湿エレメントの吸着特性とシステム化としてのパラメータが除湿性能に与える影響、(3)除湿エレメントを作製するための吸着剤や基材材料および調製方法が吸着特性に与える影響、(4)除湿エレメントの吸着特性から除湿性能を予測するシミュレーションの開発、を目的とした。



本論文は、7章から構成されている。

第1章「緒論」では、デシカント空調機器や除湿エレメントの現状と課題を概説し、本研究の背景と目的を述べた。

第2章「各種吸着剤の水蒸気の吸脱着特性およびその有効吸着量の評価」では、各種吸着剤に関する水蒸気の吸着特性を把握し、低温で再生可能な吸着等温線の理想的型を考察し、各吸着剤の吸着等温線を基に除湿と再生における各相対湿度時の吸着量の差を有効吸着量として定義し、その値の大きいものが除湿エレメントの吸着剤として適していることを論じた。

第3章「除湿エレメントの動的除湿性能」では、市販の除湿エレメントを用いて、その吸着特性を評価し、また最適な除湿性能を得るための実験条件である各種パラメータを検討して、低熱量で再生を行うためのシステム化の条件について論じた。

第4章「除湿エレメント用シートの調製と除湿性能」では、第2章で検討したシリカゲルを吸着剤として、パルプやセラミック繊維で調製した除湿シートについて、除湿性能を評価した。また、除湿エレメントの実用化について論じた。

第5章「除湿エレメントの性能評価に関するシミュレーションの検討」では、除湿エレメントの吸着特性値から再生温度、回転数や除湿・再生の面積比などのパラメータから除湿性能を予測するシミュレーションを開発し、除湿性能の実験値との整合性について確認し、その有効性を論じた。

第6章「デシカント除湿機の実用化とその性能評価」では、2章から5章までの基礎的研究結果を踏まえて、実用化した除湿機を例としてその特性と性能を評価した内容をまとめた。

第7章「総括」では、本研究で得られた結果をまとめ、総括とした。

## 参考文献

- 1) 柳井弘：化学装置，8，11-25(1982).
- 2) 木村泰之：化学装置，8，40-44(1982).
- 3) 木村泰之：空気調和と冷凍，22[4]，82-89(1982).
- 4) 鈴木謙一郎，大矢信夫，除湿の実用設計，共立出版，(1980).
- 5) 出雲政矩，建築と配管工事，10，63-70(1985).
- 6) 桑康孝，ニチアス技術時報，4，1-8(1984).
- 7) 信夫善治，ニチアス技術時報，3，1-6(1999).
- 8) 川井利長編：圧カスイング吸着技術集成，工業技術会，(1986).
- 9) 川井利長：ケミカルエンジニア，7，55-59(1984).
- 1 0) 鈴木謙一郎：化学装置，8，58-69(1976).
- 1 1) 鈴木謙一郎：ケミカルエンジニア，7，31-53(1980).
- 1 2) K. Chihara, M. Suzuki: Journal of Chemical Engineering of Japan, 16[1], 53-61(1980).
- 1 3) 金偉力，児玉昭夫，後藤元信，広瀬勉：化学工学論文集，24[6]，894-900(1998).
- 1 4) A. Kodama, M. Goto, T. Hirose, T. Kuma: Journal of Chemical Engineering of Japan, 26[5], 530-535(1993).
- 1 5) A. Kodama, M. Goto, T. Hirose and T. Kuma: Journal of Chemical Engineering of Japan, 28[1], 19-24(1995).
- 1 6) T. Kuma and T. Hirose: Journal of Chemical Engineering of Japan, 29[2], 376-378(1996).
- 1 7) 田中宏史，白石啓一，宮武修：九州大学生産科学研究所報告，80，39-49(1986).
- 1 8) 田中宏史，白石啓一，宮武修：日本伝熱シンポジウム講演論文集，373-375(1986).
- 1 9) 埜田博史，小坂岑雄，朝比奈正，野口哲夫：太陽エネルギー，8[1]，29-37(1982).
- 2 0) 斎藤義和：太陽エネルギー，18[2]，28-32(1992).
- 2 1) Rong-Luan Yeh, Tushar K. Ghosh, and Anthony L. Hines, Journal of Chemical and Engineering Data, 37[2], 259-261(1992).

- 2 2) Hui T, Chua, Kim C, Ng, A. Chakraborty, Nay M. Oo, and Mohamed A. Othman, *Journal of Chemical and Engineering Data*, **47**[5], 1177-1181(2002).
- 2 3) 福島利久, 宮崎弘, 浅野精一: 東ソー研究報告, **33**[2], 155-166(1983).
- 2 4) 清水博監修: 吸着技術ハンドブック, エヌ・ティー・エス, (1993)
- 2 5) 化学工学協会編: 悪臭・炭化水素排出防止技術(2), 技術書院, (1977)
- 2 6) T. Meguro, Y. Tashiro, T. Mizuno, N. Susuki, K. Komeya, I. Tomizuka, "Adsorption Characteristics of NO by Activated Carbon Impregnated with Aniline", *Science and Technology of Carbon, EUROCARBON98*, 339-340(1997)
- 2 7) 田代義和, 尾本英晴: 「ホルムアルデヒド専用空気清浄機の開発」, 臭気の研究, **30**[1], 34-38(1999)
- 2 8) 三浦敏昭, 渡辺藤雄, 架谷昌信, 内川靖夫, 木村二三夫: 日本吸着学会・日本イオン交換学会連合研究発表会講演要旨集, 51(1997).
- 2 9) Y. Fukushima, S. Inagaki and K. Kuroda, *J. Chem. Japan*, **5**, 327-333(1995).
- 3 0) M. Kruk, M. Jaroniec, and A. Sayari, *J. Phys. Chem*, **101**[4], 583-589(1997).
- 3 1) M. Grun, K.K. Unger, A. Matsumoto, K. Tsutsumi, *Microporous and Mesoporous Materials*, **27**, 207-216(1999).
- 3 2) A. Matsumoto, K. Tsutsumi, K. Schumacher and K. Unger, *Langmuir*., **18**[10], 4014-4019(2002).
- 3 3) 特開昭 63-175619
- 3 4) 特開平 1-11142

Table 1-1 Desiccant dehumidifiers produced by  
Matsushita Electric Industrial Co.,Ltd.

品 番		F-Y100Z2	F-Y600Z2
除湿能力(L/日)		9.6(50Hz)／10.0(60Hz)	5.8(50Hz)／6.0(60Hz)
消費電力 (W)	衣類乾燥	790(および冬の除湿)	540(強運転時)
	強	480(標準運転時)	330(標準運転時)
	中	—	—
	弱	320(静音運転時)	220(静音運転時)

Table 1-2 Dehumidifiers working with refrigerant produced by Matsushita Electric Industrial Co.,Ltd.

品番		F-YB10W	F-YB16W
除湿能力(L/日)		9.0(50Hz)／10.0(60Hz)	14.0(50Hz)／16.0(60Hz)
消費電力 (W)	衣類乾燥	230(50Hz)／250(60Hz)	360(50Hz)／410(60Hz)
	除湿	220(50Hz)／240(60Hz)	—
	強	—	350(50Hz)／400(60Hz)
	弱	—	340(50Hz)／390(60Hz)

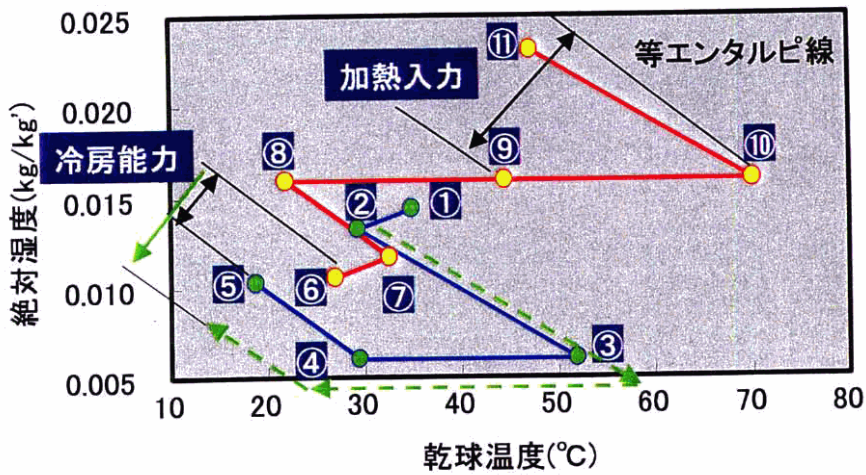
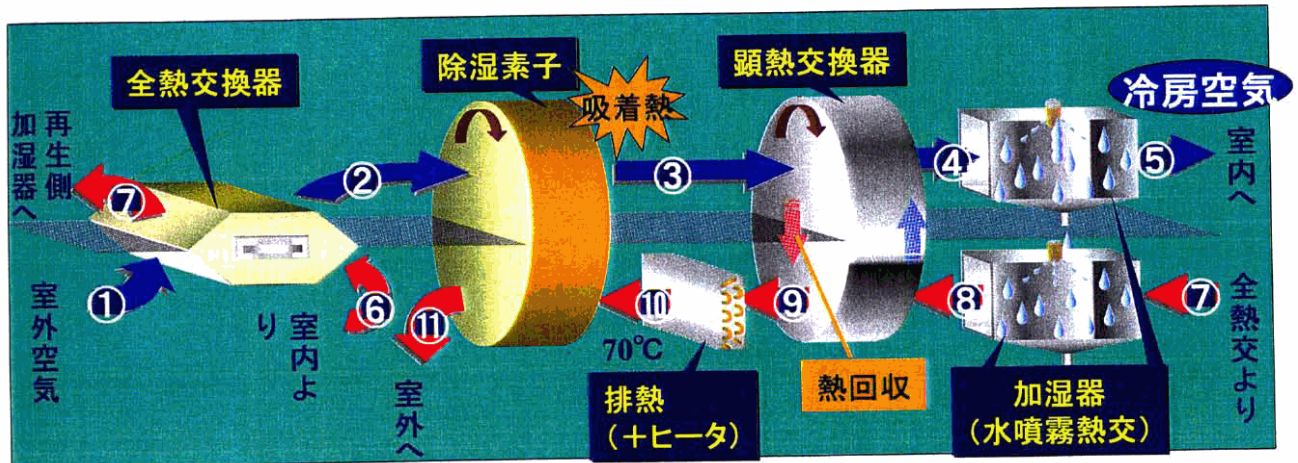
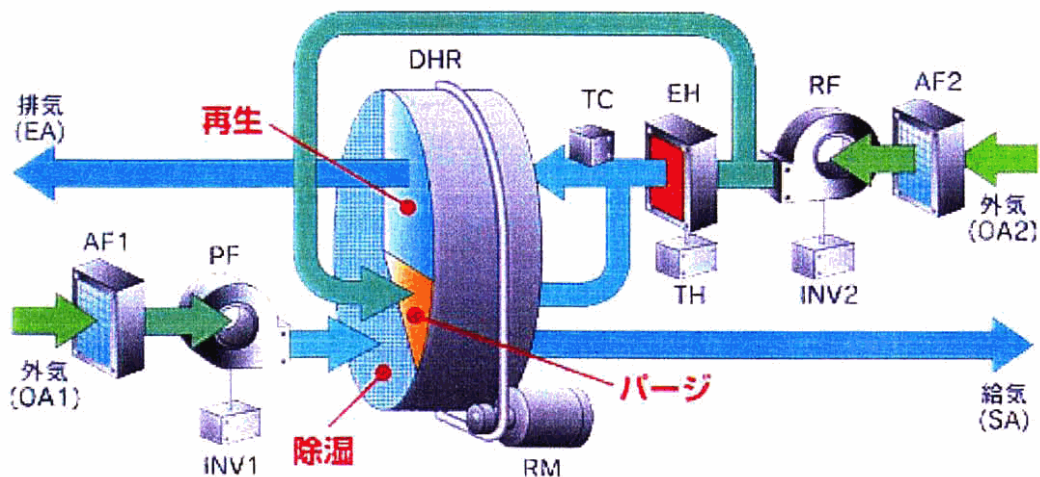


Fig.1-1 Schematic diagram of desiccant cooling system and history of air condition on psychrometric chart.



記号	名称	記号	名称	記号	名称
DHR	除湿ロータ	AF1	エアフィルタ	TH	サーモスタット
RM	ロータ駆動モータ	EH	電気ヒータ	AF2	エアフィルタ
PF	処理ファン	INV	インバータ		名称
RF	再生ファン	TC	再生温度調節		

Fig.1-2 Desiccant dehumidifier  
produced by Seibu Giken Co.,Ltd.

## 第2章 各種吸着剤の水蒸気吸脱着特性および その有効吸着量の評価

### 2.1 緒 言

第1章で述べたように、吸着と加熱による再生を繰り返す TSA 方式のデシカント空調機器や除湿機などに用いられている吸着剤は多種多様である<sup>1-3)</sup>。実際に用いられている除湿エレメントの吸着剤としては、シリカゲル、ゼオライトや活性炭などが挙げられる。吸着剤に着目した場合、低温再生の面ではシリカゲルが適しており、一方高温再生、低露点除湿の面から判断すれば、ゼオライトが適していると言われている<sup>4)</sup>が、シリカゲルやゼオライトに関しても多くの種類があり、また、ゼオライトに関しては同じ結晶構造であっても親水性か疎水性かによって吸着特性が大きく異なる。しかし、高い除湿性能を得ることができ、しかも低温で再生できる吸着剤の特性評価に関してはほとんど報告されておらず不明な点が多いため、どのような特性が除湿エレメントの吸着剤として適しているのか、必ずしも明らかでないのが現状である。

このような背景から、これまで各種吸着剤の水蒸気の吸着等温線を基本にして実際の除湿操作を設定した場合、除湿と再生における各相対湿度時での吸着量の差が重要な数値となることから、これを“有効吸着量”と定義し、その量が大きい吸着剤がデシカント空調機器に用いられる除湿エレメントの材料として有効であると考え、種々評価を行った。

本章においては、吸着剤の水蒸気の吸着特性について、異なる温度における吸着等温線が相対湿度と吸着量との関係で示すことで同じになることを確認した。その上で、各種吸着剤の有効吸着量による評価と細孔分布や吸着表面の特性の変化が有効吸着量に及ぼす影響について解明し、低温あるいは低熱量での再生に適した吸着剤に関する指針を得ることを目的とした。



## 2.2 実験方法

### 2.2.1 各種吸着剤

#### (1) シリカゲル

実験に供じたシリカゲルは、JIS規格のA型シリカゲル(富士シリシア化学製 A5-10)に分類されるS(a)、B型シリカゲル(富士シリシア化学製 B10-20)に分類されるS(b)、およびA型シリカゲルを基に細孔容積と比表面積を調整してA型シリカゲルより細孔径分布を小さくなるように調製されたRD型シリカゲル(富士シリシア化学製 Rdon8)S(c)の3種類である。

#### (2) ゼオライト

ゼオライトは結晶骨格中のカチオンサイトに存在するAlによって水と化学結合するため、高温でないと再生しにくいとされている。しかし、ゼオライトの中でもY型ゼオライトは酸処理を行うことで、骨格中のAlを除くことが可能であり、Alを取り除くことで親水性から疎水性になることが知られている<sup>5)</sup>。本章ではY型ゼオライト(東ソー製)を用いて、ゼオライト成分中のSiとAlの比を酸処理により変化させ、Si/Al=5.6, 29.0, 47.0, 91.0, 220.0の5種類を調製した。これらの試料を順にZ(a), Z(b), Z(c), Z(d), Z(e)と名付けた。

#### (3) 活性炭

一般的に活性炭は表面が疎水性であるため低湿度側では吸着量が小さく、高湿度側で吸着量が急激に増加する傾向を示す。除湿時の相対湿度である60%RH付近での吸着量が低いため、除湿エレメントの吸着剤としては適していないと考えられる。したがって本章では、活性炭の表面にシリカゲルを添着することで親水化処理を試み、60%RH付近での平衡吸着量の向上を図った<sup>6)</sup>。出発材料の活性炭としては、粒径0.15~0.30mmのヤシ殻活性炭(北越炭素工業製 Y-60)を使用した。この活性炭を120℃で2時間加熱して脱気した後、1wt%の珪酸ナトリウム水溶液に30℃で72時間含浸して活性炭の表面にシリカ源となるSiO<sub>2</sub>を担持した。続いて、濾過・水洗を行い120℃で2時間乾燥し

た。これを 3.9N 硫酸水溶液に 30℃, 24 時間含浸して濾過した後, 80℃, 2 時間乾燥を行い, 担持されている SiO<sub>2</sub> をシリカゲルへと変換して親水化処理活性炭を作製した。出発材料の活性炭を AC(a), 親水化処理活性炭を AC(b)と名付けた。

#### (4) メソポーラスシリケート

メソポーラスシリケートは均一なメソ孔を持つ多孔体で, 比表面積および細孔容積が非常に大きいことから, メソポーラスシリケートの種類の中でも特に MCM-41 や FSM-16 などの研究が盛んに行われている<sup>7, 8)</sup>。本章では, MCM-41 を合成し, 水の吸脱着特性を評価した。

MCM-41 の合成方法<sup>9)</sup>を以下に示す。シリカ源として tetraethoxy silane (TEOS, アルドリッチ製)を, テンプレートとして n-tetradecyl trimethyl ammonium bromide (C16N, アルドリッチ製)を用いた。テンプレートを蒸留水 120g に溶かし 0.055mol/l になるように濃度を調整した。この溶液に 25wt%のアンモニア水溶液 9.5g を加えた。さらに, この溶液に 98wt%TEOS 溶液 10g を 15 分かけて滴下した。生成した析出物を濾過し, 約 1 l の蒸留水で水洗した。この析出物を 90℃で乾燥した後, 室温から 550℃まで 1℃/min の速度で昇温し, 550℃で 5 時間焼成することで MCM-41 を得た。

なお, MCM-41 のようなメソポーラスシリカゲルは, 一度水が吸着することにより, 表面の疎水性の特性が親水性に変化すると言われており<sup>10)</sup>, また, ヒステリシスも大きい。

### 2.2.2 水蒸気の吸脱着特性評価

各吸着剤の吸着特性を把握するために, 298Kにおける水蒸気の吸着等温線を測定した。測定装置は, 日本ベル(株)製の BELSORP18 を用いた。約 0.2g の各吸着材を試料ガラス管内に投入して, 真空脱気しながら 150℃で 5 時間前処理したものを出発試料とした。本装置は容量法での測定であるため, 吸着量の測定値の単位は, ml(S.T.P.)/g は表すべきであるが, 本章および以降の章において, 重量法の単位に換算して吸着量を g/g の単位で示した。

### 2.2.3 比表面積および細孔径分布の測定

上記測定装置を用いて、77Kにおける窒素の吸着等温線を測定した。その結果を BET 式に適用して比表面積を算出した。また、同じ等温線を用いて細孔径 2nm 以上の細孔分布を Dollimore-Heal method (DH 法)<sup>11)</sup> で、2nm 以下の細孔分布を Micro Pore Analysis method (MP 法)<sup>12)</sup> で解析を行った。

DH 法では、細孔径 2nm 以上の細孔分布を算出することができるが、2nm 以下については算出することができない。A 型および R 型のシリカゲルなどはミクロ孔を有しているため、本章では上記のように 2nm 以下の細孔分布については、MP 法を用いて細孔分布の解析を行った。

## 2.3 結果および考察

### 2.3.1 各種吸着剤の水蒸気吸着等温線

吸着式のデシカント空調機器や除湿機に適した吸着剤の吸着特性は、単純に水蒸気の吸着量が大きければ良いものではなく、吸着時と脱着時の吸着量の差が大きい吸着剤であることが望ましい。例えば除湿機の J I S 規格<sup>13)</sup> では除湿性能を 27℃、60%RH (relative humidity, 相対湿度) の空気条件で除湿性能を測定することになっているが、これを参考にすると、27℃、60%RH の空気条件で吸着させ、70℃で再生させる場合、27℃、60%RH の空気を 70℃まで加熱すると約 7%RH となる。つまり、水蒸気の吸着量は温度を変化させると吸着量も変化するが、相対湿度と吸着量の関係は、温度を変化させても相対湿度に依存<sup>14, 15)</sup> するので、60%RH と 7%RH 時の吸着量の差 (以下有効吸着量という) が大きければ、それだけ吸着と再生時の出入りする水の量が増加する。もちろん吸脱着速度は単位時間当たりの吸脱着させる量に関係するが、本章では水蒸気の吸着等温線のみを検討の対象とした。

図 2-1 に代表的な吸着剤の水蒸気の吸着等温線を示す。シリカゲルは直線型、ゼオライトは Langmuir 型、活性炭は疎水型、メソポーラス材料は S 字曲線になること

が報告されている<sup>16)</sup>。本章において、吸着剤として aerosil を用いて、25℃および70℃時における吸着等温線を測定した。その結果を図2-2に示すが、aerosil の25℃と70℃の相対湿度と吸着量で示した吸着等温線は、ほぼ同一の曲線に近いことが確認された。なお、ここでは図示を省略するが、Aerosil の他にシリカゲルや市販の除湿エレメントなどについても、25~90℃(90℃については、相対湿度30%まで)の温度範囲における相対湿度と吸着量の関係がほぼ同一の曲線に近いことが確認された。また、Yehらはシリカゲルについて異なる温度における水蒸気の吸着量を報告しており<sup>15)</sup>、そのデータを用いて相対湿度で整理した結果でもほぼ同じ吸着等温線で表せることが確認された。したがって、相対湿度と吸着量との関係で示した吸着等温線から、吸着時の湿度と再生時の湿度における吸着量の差が大きいほど除湿性能が大きい吸着剤であると判断された。また、より低温で再生を行う場合、再生時の相対湿度はより大きな値になるが、再生温度を70℃に設定した除湿操作(60%RHで吸着、7%RHで再生)における上記4種類の吸着剤について、吸着等温線の評価実験を行った。なお、有効吸着量はヒステリシスの大きいメソポーラス材料を除いて、吸着時のみの等温線から算出した。メソポーラスシリカゲルについては、吸着-脱着を行い、吸着時は吸着、再生時は脱着の等温線から算出した。

#### (1) シリカゲル

図2-3に各シリカゲルの細孔分布を示す。代表的なS(a)は1nm付近にシャープな細孔分布を持っている。S(c)は、S(a)とほぼ近い細孔分布を示したが、若干小さい径にピークを有し、2~6nm付近の細孔を多く有している。一方S(b)は2~10nmの広範囲で幅広い細孔分布を持っているが、2nmより小さい細孔は見られなかった。

図2-4に各シリカゲルの吸着等温線を示す。S(a)とS(c)は60%RH以下の範囲で直線型を示し、S(b)は変形的S字型を示した。S(c)はS(a)に比べ、低湿度側ではほとんど同じ吸着量であるが、70%RH以上の高湿度側は高い吸着量を示し、低湿度側では逆にやや低い吸着量となっている。有効吸着量を求めると、S(a)が0.28g/g、S(b)が0.06g/g、

S(c)が 0.31g/g となった。S(a)と S(c)の値は近い値を示している。これは、図 2-3 で示す細孔径分布からもわかるように S(a)と S(c)は近い細孔径分布を示しており、また、吸着等温線も同じような形であるため、有効吸着量もほぼ同等の値になることが理解できる。一方 S(b)は、70%RH 以上から立ち上がりを示し、90%では S(a)よりも高い吸着量を示すが、有効吸着量は非常に低い値であった。これは、60%RH 前後の吸着量が低いためである。S(b)の細孔分布は、2nm 以下の細孔は見られないが、S(a)、S(c)は 1nm 付近に細孔径のピークを有しており、この細孔径が低湿側の水の吸着に大きく関与していると考えられる。

シリカゲルは、製造方法によって細孔径や細孔容積などの物理的構造をある程度制御することができる。本章では、一般的な A 型および B 型シリカゲルに加えて、水蒸気の吸着量の向上を目指して、2 nm にシャープな細孔径分布を持つ RD 型のシリカゲルを調製し、吸着等温線を測定した。この RD 型のシリカゲル S(c)は、A 型シリカゲル S(a)と比較して低湿側ではほぼ同じ吸着量であったが、高湿側では高い吸着量を示し有効吸着量が向上した。S(a)の比表面積は  $762\text{m}^2/\text{g}$  であり、S(b)は  $528\text{m}^2/\text{g}$ 、S(c)は  $772\text{m}^2/\text{g}$  であった。S(a)と S(c)はほぼ同じ比表面積であることから、細孔径のシフトにより有効吸着量が向上したと考察した。また、2nm 以下に細孔径を持たない B 型シリカゲルは、低湿側では低い吸着量であるが、S(a)および S(c)と比較して小さいものの、高湿側では高い吸着量を示した。以上の結果から判断して 1 nm 以下に細孔径を持たず、2 nm 付近にシャープな細孔径を持つシリカゲルを調製することができれば、さらに有効吸着量の大きい吸着剤を得ることが可能であると考えられる。

## (2) ゼオライト

Y 型ゼオライトから Si/Al 比を変化させた各種試料の吸着等温線を図 2-5 に示す。明らかに Si/Al 比が吸着等温線の形に影響していることが確認された。Si/Al 比が高い Z(c)、Z(d)と Z(e)は、低湿側で低い吸着量になっており、高湿側になるに従って高い吸着量を示している。このことは、Si/Al 比が大きいほど脱 Al 量が多いため疎水性に変化していることを示している。Z(b)は、ほぼ直線関係の Henry 型吸着等温線を示し、最も Si/Al

比が小さい Z(a)は、Langmuir 型の吸着等温線を示している。各種ゼオライトの有効吸着量は、Z(a)が 0.05g/g、Z(b)が 0.13g/g、Z(c)が 0.05g/g、Z(d)が 0.02g/g、Z(e)が 0.02g/g となり、Z(b)がこの中では最も高い値を示した。

一般的にゼオライトは、Z(a)で示される Langmuir 型の吸着等温線であり、再生時の相対湿度をかなり低くしないと有効吸着量を大きくすることができない。本章では、Y 型ゼオライトを用いて、親水性から疎水性に改質することによって、有効吸着量の向上を試みた。その結果、Si/Al 比を大きくすることによって吸着等温線は、Langmuir 型から直線型、疎水型へ変化し、直線型の試料で有効吸着量が大きい値を示したが、シリカゲルと比較して、小さい値であった。ゼオライトは水の吸着に有効な均一な細孔径を有しているが、Langmuir 型の吸着等温線であるため低温で再生する吸着剤としては適していないと言われている。しかし、親水性から疎水性に改質することによって、低温でも再生できることが明らかになった。

### (3) 活性炭

図 2-6 に AC(a)および親水性処理を施した AC(b)の細孔分布を示す。AC(a)と AC(b)の細孔分布はほとんど変わっていないことから、親水性処理が細孔分布の変化に及ぼす影響は少ないことが確認された。また、AC(a)の比表面積は  $1333\text{m}^2/\text{g}$  であり、AC(b)の比表面積は  $1090\text{m}^2/\text{g}$  であり、親水性処理を行うことで約 20%比表面積が減少した。このことは、親水化処理を行うことで活性炭表面に形成されたシリカゲルが細孔径 3nm 以下の細孔の一部を閉塞するため、親水化処理が比表面積に影響を与えると考察した。

図 2-7 に AC(a)と AC(b)の吸着等温線を示す。AC(a)は、典型的な疎水型の吸着等温線と示し、7%RH 時における吸着量は約 0.02g/g と小さく、疎水性であるため吸着等温線が高湿側で立ち上がったが、結果的に有効吸着量は 0.18g/g と小さかった。AC(b)は親水性処理を行ったため立ち上がりが低温側にシフトし、直線型に近い形になり有効吸着量も 0.25g/g に向上した。

活性炭は大きな比表面積を有しているが、本来疎水性であるため水蒸気の吸着剤としては適していないと言われている。しかし、活性炭表面にシリカゲルを形成させること

によって吸着量の立ち上がりが低湿側へシフトし、有効吸着量も大きく向上した。したがって、活性炭の細孔分布をほとんど変化させずにシリカゲルを表面に形成させることで、低温で再生させる除湿エレメントに適した吸着等温線を有する活性炭に改質できることが明らかになった。

#### (4) MCM-41

図 2-8 に MCM-41 の吸脱着等温線を示す。吸着等温線の形は、50%RH 付近で急激に吸着量が増加する S 字カーブを示している。一方、脱着等温線は 60%RH から 40%RH にかけて大きなヒステリシスを示した。有効吸着量は、0.39g/g であり、7%RH 時の脱着等温線上の吸着量から再び吸着して吸着等温線上の 60%RH 時の吸着量が維持できるのであれば、有効吸着量という観点から非常に有望な材料となる。

低温で再生できる吸着剤は、低湿側の吸着量はできるだけ小さく、高湿側（60%RH）の吸着量が大いものが適していることが明らかである。したがって、S 字カーブの吸着等温線を有した MCM-41 などのメソポーラスシリケートがこの条件を満たしている。しかし、MCM-41 以外の材料も含めてメソポーラスシリケートは、水を吸着させると親水性に特性が変化することや機械的な強度や耐久性が低いと言われており、この点を解決しなければ長期間使用することを前提とする除湿エレメントに使用することは難しいと思われる。

### 2.3.2 有効吸着量の比較

本章では、TSA 方式のデシカント空調機器や除湿機などに使用する低温で再生可能な除湿エレメントに用いるための各種吸着剤の評価を行った。一般的に高い吸着性能を有する吸着剤が望ましいと考えられるが、実際の除湿操作（除湿：27℃，60%RH，再生：70℃，7%RH）に即した条件での有効吸着量を算出し、この有効吸着量で各種吸着剤の評価を行った。但し、上述したように吸着特性は、温度に依存せず、湿度のみに依存するので、25℃の吸着等温線から有効吸着量を算出した。評価したサンプルとその吸着量の結果を表 2-1 にまとめて示す。有効吸着量の大きいシリカゲルや親水化処理活性炭お

よび MCM-41 は、有効吸着量が大きく、デシカント空調機器や除湿機などに使用する除湿エレメントの吸着剤として有効な材料と思われる。また、ゼオライトは疎水性にすることで、有効吸着量の増加は図れたが、上記吸着剤と比較すると吸着量は低いと判定せざるを得なかった。

除湿操作 60%RH, 再生操作 7%RH を想定して有効量を算出したが、この条件が異なれば有効吸着量も異なってくる。実際の除湿・再生の条件によって最適な吸着剤の選定が必要であるとともに、今回吸着速度の評価は実施しなかったが、有効吸着量だけでなく、吸着速度も考慮した検討が必要である。これについては第3章および第4章において述べる。



## 2.4 結 論

異なる温度における吸着等温線を測定し、吸着温度が異なっても相対湿度と吸着量の関係が同じであることを明らかにした。そして、除湿時の湿度と再生時の湿度における吸着量の差を有効吸着量として定義し、その差が大きい吸着剤が除湿エレメントに適していると判断として、各種市販品および吸着表面の改良を行った吸着剤について水蒸気の吸脱着特性評価を行った。また、低温での再生を視点を、実際の除湿操作に即した条件での有効吸着量を算出し、各種吸着剤の除湿エレメントに有効な材料を選択するための比較検討を行った。得られた結論は下記の通りである。

- (1) 細孔径と比表面積が異なる 3 種類のシリカゲルについて、60%RH と 7%RH の吸着量の差である有効吸着量を算出した。S(a), S(b), S(c) の有効吸着量は、それぞれ 0.28, 0.06, 0.31g/g であった。シリカゲルの場合、低温側では 2nm 以下の細孔が、70%RH 以上の高湿度側では細孔径 2~10nm の大きい部分の細孔容積が関与しているものと考察された。シリカゲルは製造方法によって、細孔径、細孔容積や比表面積を変えることが可能である。A 型シリカゲルよりも細孔径が 2nm 付近に、よりシャープな細孔分布を有する RD 型のシリカゲルは、高湿度側で高い吸着量を有し、有効吸着量も向上することが確認された。したがって、シリカゲルは細孔径を調整することでさらに低温で再生可能な吸着剤が得られる可能性をあることが示唆された。
- (2) Y 型ゼオライトの Si/Al を変えることにより、親水性から疎水性の特性を有するゼオライトを調製し、それらの有効吸着量を評価した。Z(a)(Si/Al=5.6), Z(b)(Si/Al=29.0), Z(c)(Si/Al=47.0), Z(d)(Si/Al=91.0) および Z(e)(Si/Al=220.0) の有効吸着量は、それぞれ 0.05, 0.13, 0.05, 0.02, および 0.02g/g となり、Henry 型の吸着等温線を示す Z(b) がこれらの中では最も高い値を示した。ゼオライトは、高温で再生する場合には適切な吸着剤であるが、低温で再生する場合に適していない。しかし、親水性から疎水性に改質することで有効吸着量が大きく向上することが認められたことか

ら、低温再生の可能性を示唆した。しかし、シリカゲルや他の吸着剤と比較して、有効吸着量は低い値であった。

- (3) ヤシ殻活性炭の有効吸着量は 0.18g/g であったが、ヤシ殻活性炭の表面にシリカゲルを含浸させ、親水性表面に変えることによって、有効吸着量は 0.25g/g まで向上した。活性炭のような疎水性の表面を持つ吸着剤はそのままでは除湿用の吸着剤には適さないと言われているが、活性炭表面を親水性に変えることで有効な吸着剤になることが明らかになった。
- (4) MCM-41 の有効吸着量は、0.39g/g と今回検討した吸着剤の中で最も高い値であった。MCM-41 のようなメソポーラスシリケートは、S 字型の吸着等温線であり、低温で再生させる吸着剤として適していることが明らかになったが、一度水を吸着させると表面が疎水性から親水性に変化する特性があり、有効吸着量も低下する傾向がある。また、劣化しやすいなど耐久性の点でも問題があり、除湿エレメントの吸着剤としては適してないと判断された。
- (5) 実際の除湿操作に即した条件（除湿時 60%RH と再生時 7%RH）において、除湿エレメントの吸着剤として有望な材料は、A 型シリカゲル S(a)、細孔分布を調製した RD 型シリカゲル S(c)、およびシリカゲルを含浸させた活性炭 AC(b) であると結論された。
- (6) 除湿操作の湿度条件が異なれば、上記有望な吸着剤も大きく異なる可能性があるが、吸着等温線から有効吸着量を算出することによって、その条件に適した吸着剤を選択できることを確認した。

## 参考文献

- 1) 埜田博史, 小坂岑雄, 朝比奈正, 野口哲夫: 太陽エネルギー, 8[1], 29-37(1982).
- 2) 斎藤義和: 太陽エネルギー, 18[2], 28-32(1992).
- 3) 柳井弘: 化学装置, 8, 11-25(1982).
- 4) 山田興一, 浜野誠一: 化学装置, 8, 34-39 (1982).
- 5) 福島利久, 宮崎弘, 浅野精一: 東ソー研究報告, 33[2], 155-166(1983).
- 6) 三浦敏昭, 渡辺藤雄, 架谷昌信, 内川靖夫, 木村二三夫: 日本吸着学会・日本イオン交換学会連合研究発表会講演要旨集, 51(1997).
- 7) M. Kruk, M. Jaroniec, and A. Sayari, *J. Phys. Chem*, 101[4], 583-589(1997).
- 8) Y. Fukushima, S. Inagaki and K. Kuroda, *J. Chem. Japan*, 5, 327-333(1995).
- 9) M. Grun, K.K. Unger, A. Matsumoto, K. Tsutsumi, *Microporous and Mesoporous Materials*, 27, 207-216(1999).
- 10) A. Matsumoto, K. Tsutsumi, K. Schumacher and K. Unger, *Langmuir*., 18[10], 4014-4019(2002).
- 11) D. Dollimore and G.R. Heal: *J. Appl. Chem.*, 14, 109(1964).
- 12) Mikhail, R. H., Brunauer, S. and Bodor, E. E., *J. Colloid Interface Sci.*, 26, 45(1968).
- 13) 日本工業規格 除湿機 C9617.
- 14) A.Kodama, M.Goto, T.Hirose and T.Kuma:*J. Solar Energy Engineering*, 120, 45-50 (1998).
- 15) Rong-Luan Yeh, Tushar K. Ghosh, and Anthony L. Hines, *J. Chem. Eng. Data*, 37, 259-261(1992).
- 16) 化学工学会編: 化学工学便覧 (丸善), 697(1999).

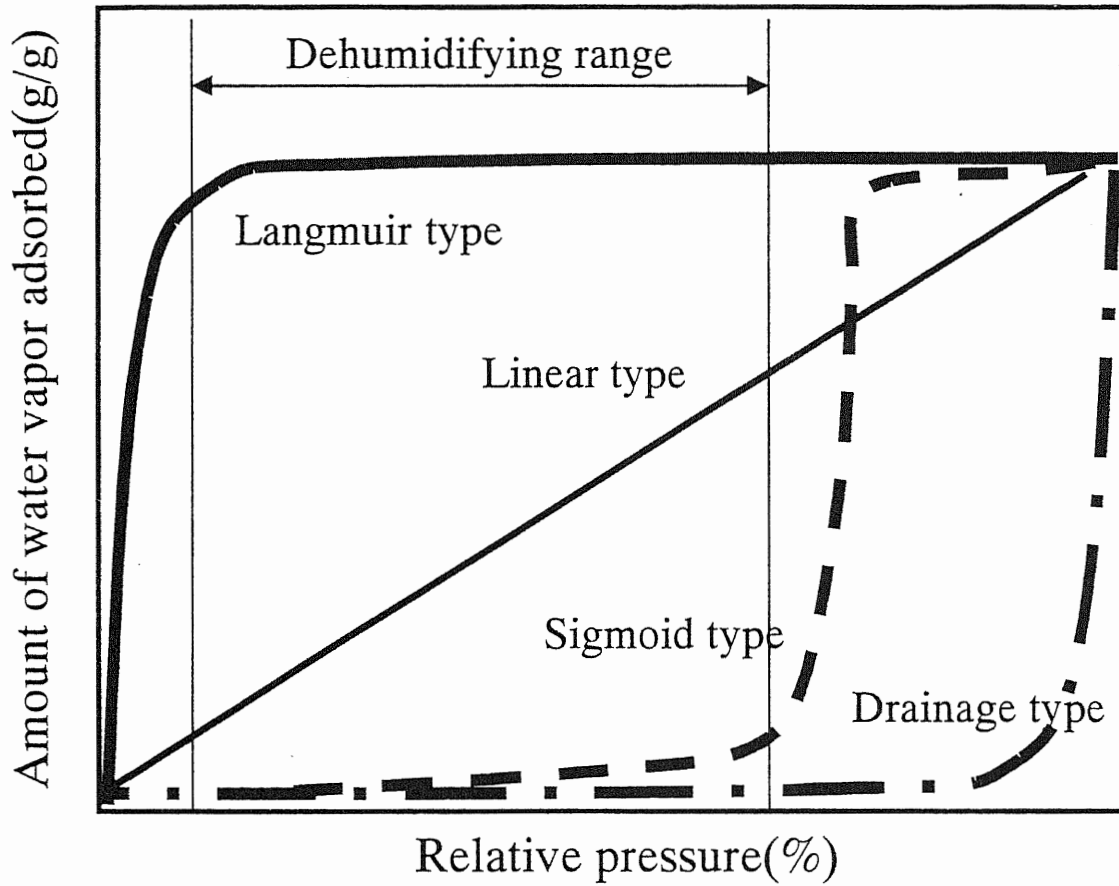


Fig.2-1 Illustration of water vapor adsorption isotherms.

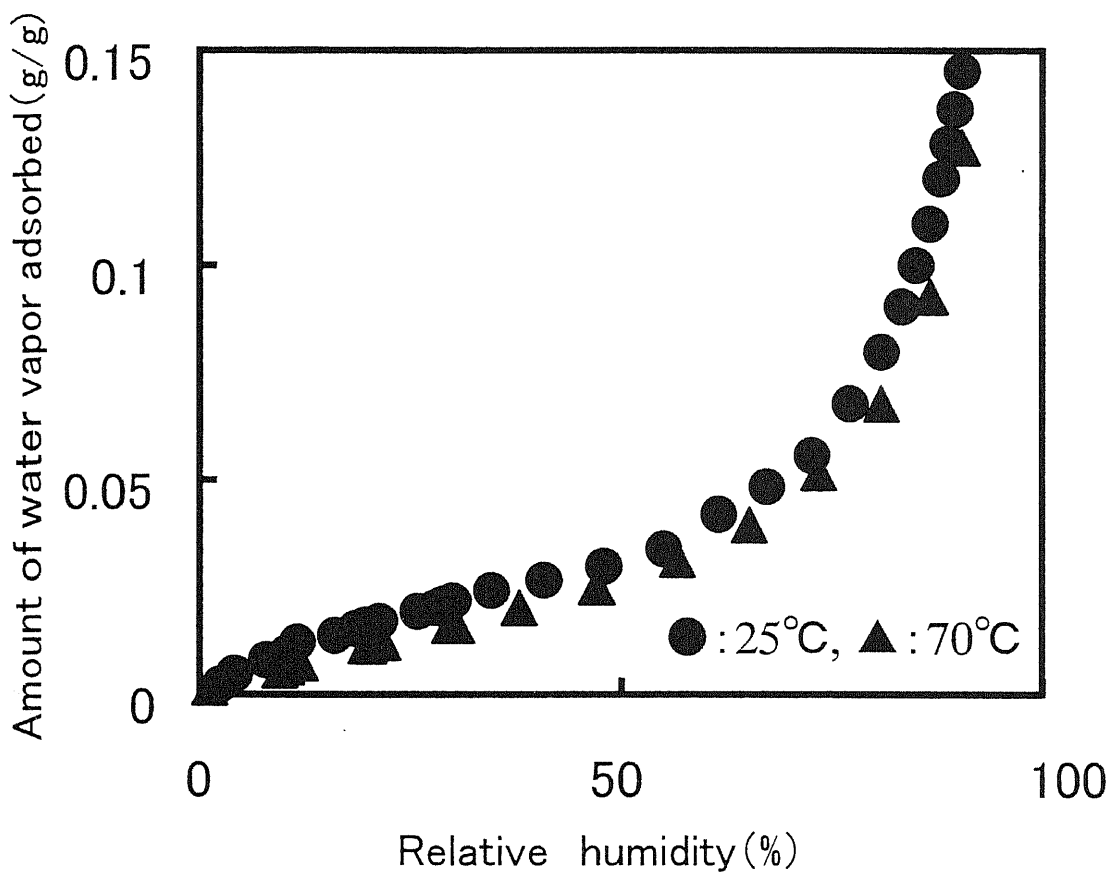


Fig.2-2 Water vapor adsorption isotherms on aerosil.

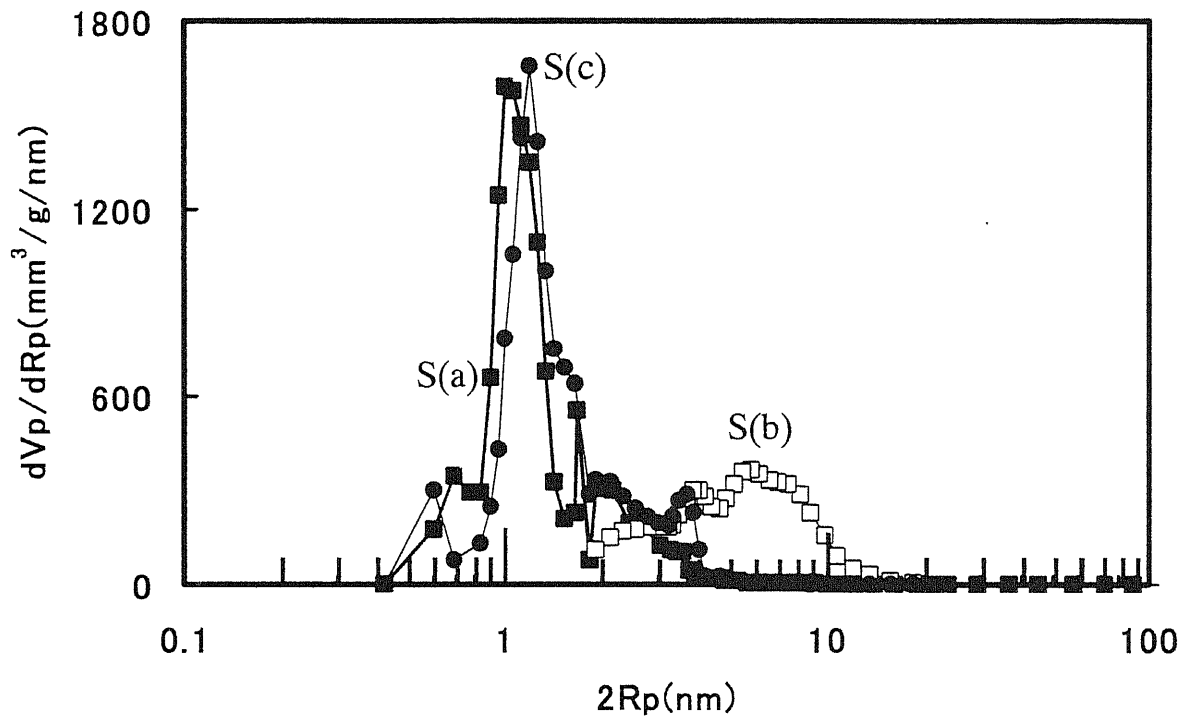


Fig.2-3 Pore size distributions of silica gels.

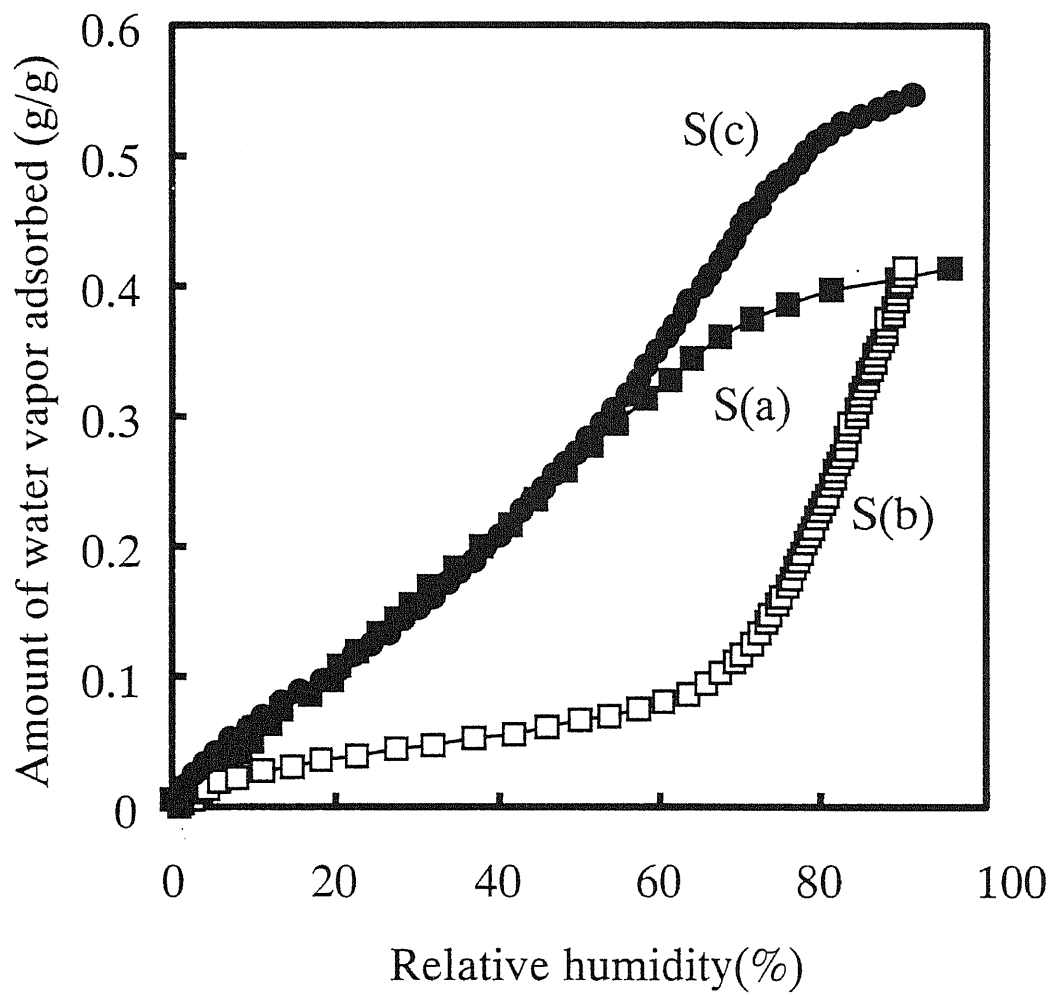


Fig.2-4 Water vapor adsorption isotherms on silica gels.

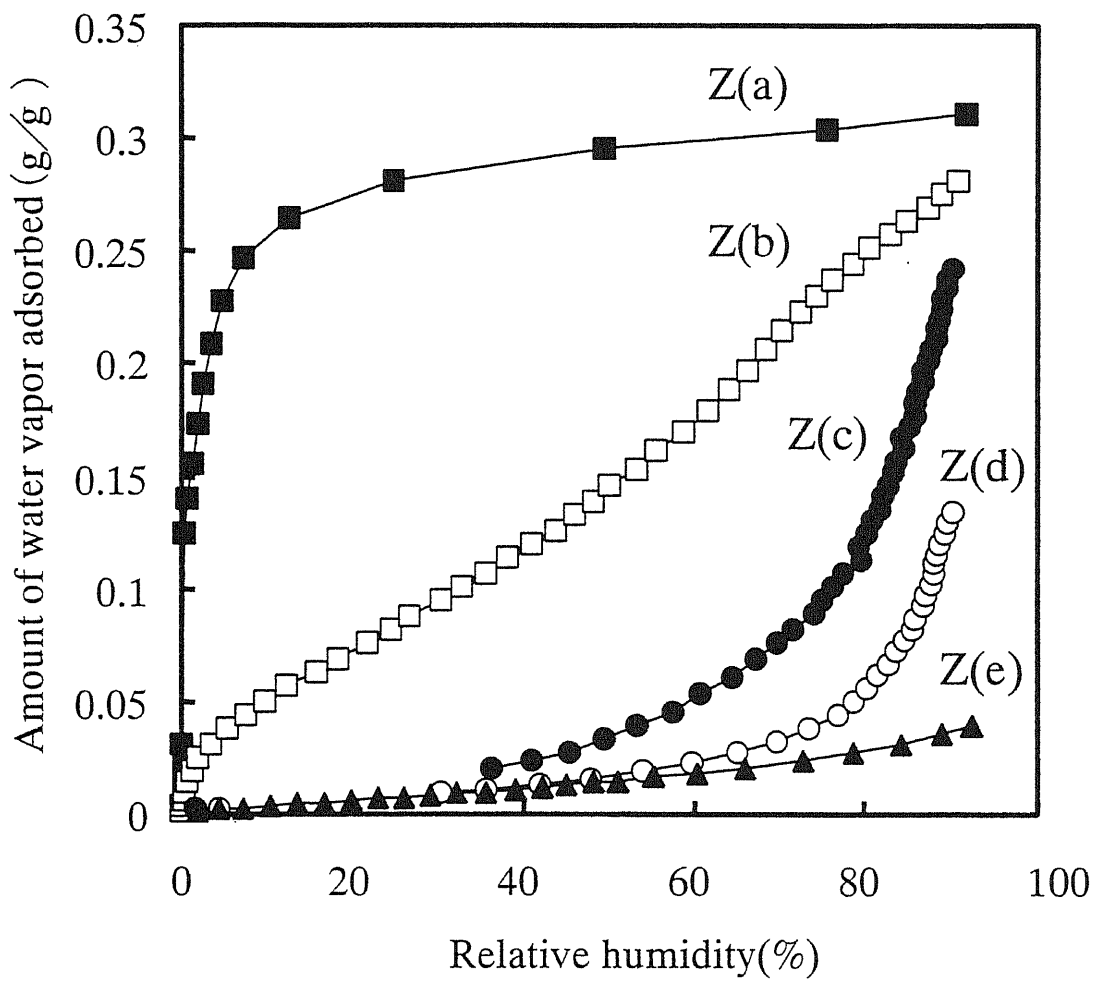


Fig.2-5 Water vapor adsorption isotherms on zeolites.



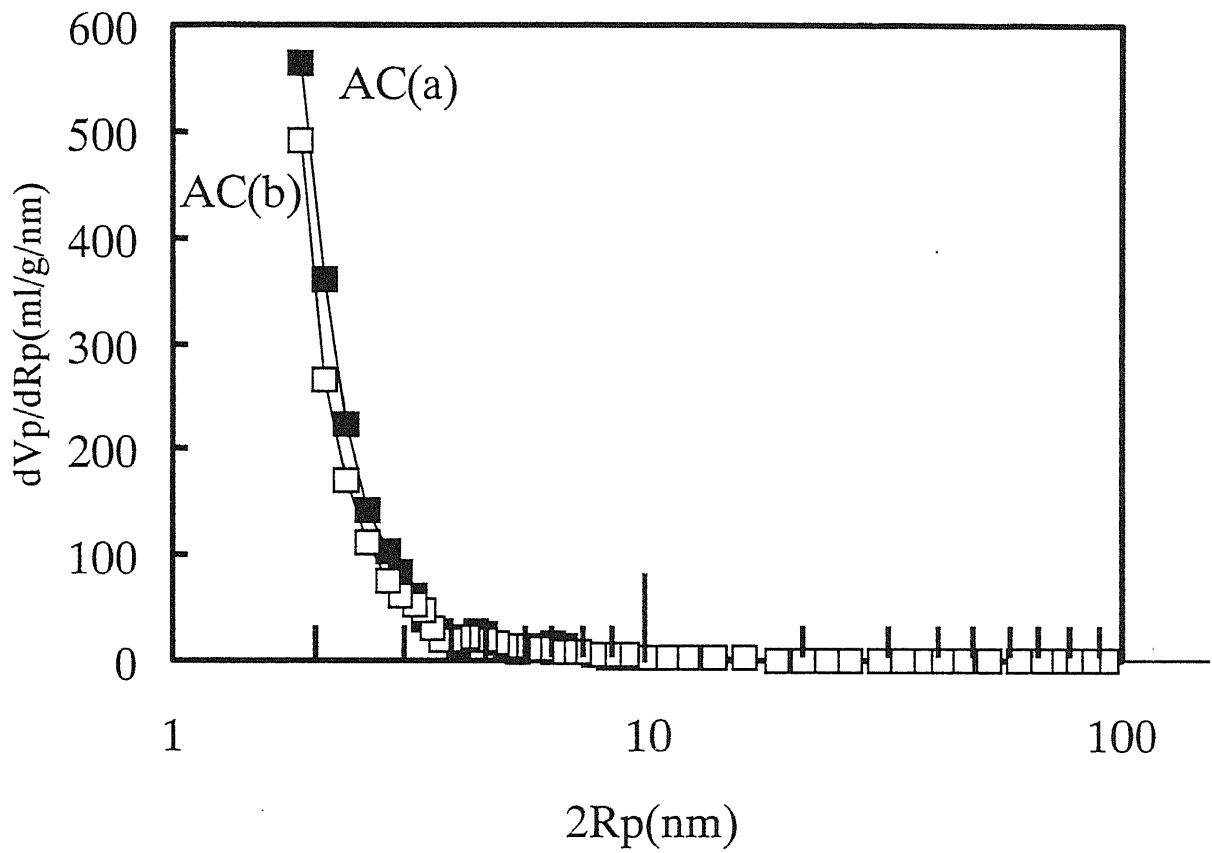


Fig.2-6 Pore size distributions of activated carbons.

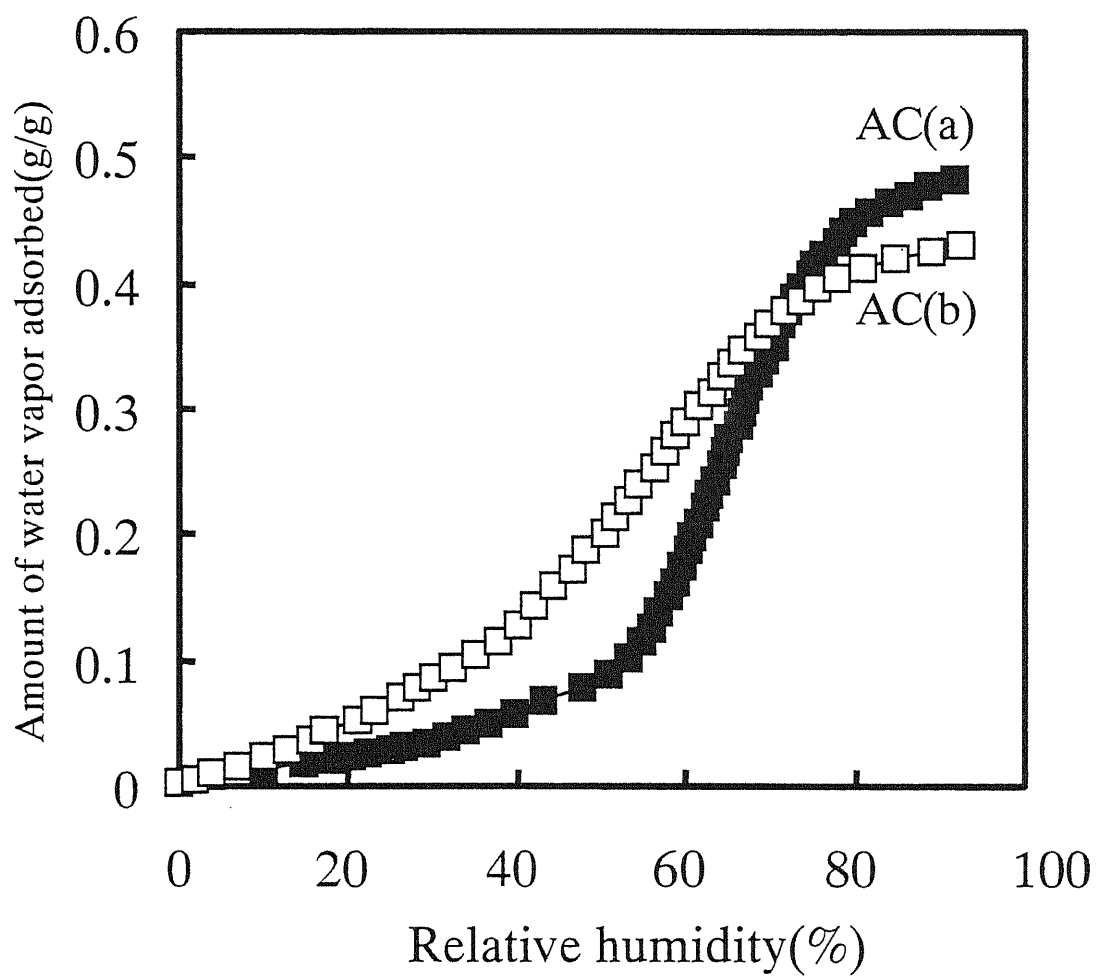


Fig.2-7 Water vapor adsorption isotherms on activated carbons.

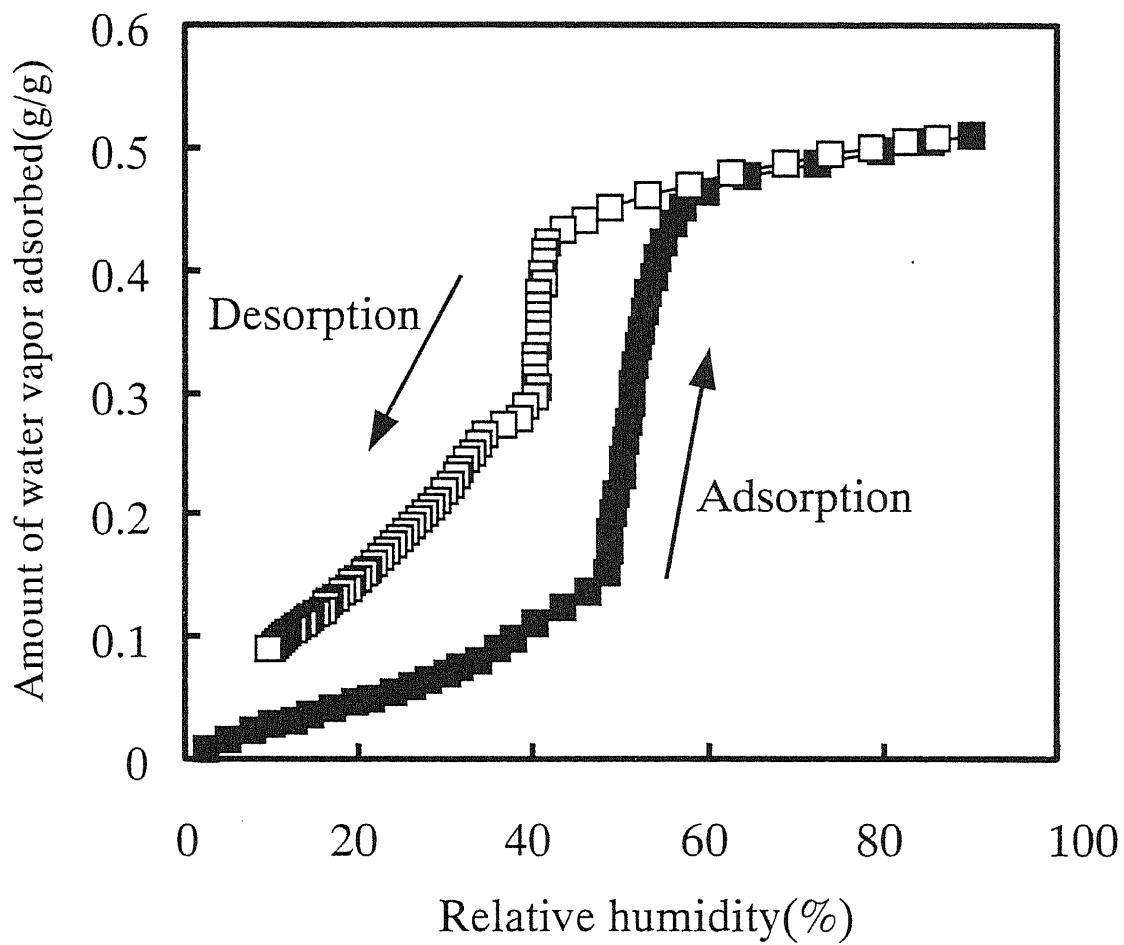


Fig.2-8 Water vapor adsorption-desorption isotherms on MCM-41.

Table 2-1 Effective adsorption amount of water vapor by various adsorbents.

Material	Specimen	Effective adsorption amount (g/g)	Amount of water vapor adsorbed (g/g) at 0.60(RH)	Amount of water vapor adsorbed (g/g) at 0.07(RH)
Silica gel	S(a)	0.28	0.33	0.05
	S(b)	0.06	0.08	0.02
	S(c)	0.31	0.36	0.05
Zeolite	Z(a)	0.05	0.30	0.25
	Z(b)	0.13	0.17	0.04
	Z(c)	0.05	0.05	0.0
	Z(d)	0.02	0.02	0.0
	Z(e)	0.02	0.02	0.00
Activated carbon	AC(a)	0.18	0.18	0.0
	AC(b)	0.25	0.29	0.4
Mesoporous silicate	MCM-41	0.39	0.46	0.07

## 第3章 除湿エレメントの動的除湿性能

### 3.1 緒 言

第2章では、デシカント空調機器や除湿機に用いられる各種吸着剤の水蒸気の吸着特性評価を行った。水蒸気の吸着等温線から実際の除湿操作を想定して、吸着時に相当する相対湿度と再生時の相対湿度における吸着量の差を“有効吸着量”と定義して、その量が大きい吸着剤がデシカント空調機器に用いられる除湿エレメントの吸着剤として適していると考え、細孔分布や吸着表面の特性の変化が有効吸着量に与える影響についての検討を行い、実際の除湿操作（除湿時：60%RH，再生時：7%RH）における除湿エレメントの吸着剤として有望な材料を選択するための検討を行った。しかし、デシカント空調機器や除湿機に用いられる除湿エレメントは、吸着剤だけでなく基材やバインダーなども使用されているため、除湿エレメント全体の吸着特性が除湿性能に与える影響を明らかにする必要がある。

ところで、シリカゲルを主体としたハニカムロータを用いた吸着式のデシカント空調機器の除湿性能評価に関してはいくつか報告<sup>1, 2)</sup>されており、除湿エレメントの性能向上に関する研究<sup>3, 4)</sup>も行われている。しかし、除湿エレメントの材料特性及び低温再生に対する性能評価に関してはほとんど報告されておらず不明な点が多い。除湿エレメントに着目した場合、低温再生の面ではシリカゲルが適しており、高温再生、低露点除湿の面から判断すれば、ゼオライトが適していると言われている。しかし、除湿エレメントの材料評価において、システム化のためのパラメータ、即ち風速、処理/再生の面積比、回転数、再生温度などの条件によって、除湿性能が大きく異なるため、最適な条件をまず確認した上で詳細な検討を行う必要がある。また、実用化を想定した場合は、廃熱を利用できることが今後重要な条件となることが避けられないことから、できるだけ低温（60℃以下）での操作を可能にすることが望ましいとされている。デシカント除湿機の場合、理想的には低温が望ましいが、高温であっても、少ない風量で再生すること

が可能であれば、結果的に低熱量、低消費電力につながり、総じて省エネ型になり得るものと考えられる。

このような背景から、本章においては除湿エレメントの吸着特性と各種パラメータが除湿性能に与える影響を評価して、低消費電力でかつ高除湿性能を得るためのシステムとしての最適化と、設計を行う上での指針を得ることを目的として市販のシリカゲル、およびゼオライトを主体とした除湿エレメントを用い、除湿エレメントのロータ厚みや面積比の影響、並びに材料による除湿性能の違いなどを明確にするための検討を行った。

## 3.2 実験方法

### 3.2.1 除湿エレメントと水蒸気吸着等温線の測定

除湿エレメントは、2種類の市販品を用意し比較検討を行った。一つは、西部技研(株)製のシリカゲルを主体とした材料をコルゲート状に成形した U-SSCR (以下エレメント S と略す) で、もう一つはニチアス(株)製のゼオライトを主体した材料を同様にコルゲート状に成形した GX-7 (以下エレメント Z と略す) である。エレメント S およびエレメント Z の写真を図 3-1 の(a), (b)に、SEM 写真をそれぞれ(c), (d)に示す。エレメント S は滑らかな表面であるのに対し、エレメント Z は粉体が担持されているのが分かるような凹凸状の表面からなっているのが観察される。また、各除湿エレメントのコルゲートの寸法と密度を表 3-1 中に示し、かつ、その高さ、厚み、幅の寸法をモデル的に表中に示した。

各エレメントの除湿特性を把握するために、水蒸気の吸着等温線を 25℃で測定した。測定装置は、日本ベル(株)製の BELSORP18 を用いた。除湿エレメントを約 0.2 g 切り出し、試料ガラス管内に投入して、真空脱気しながら 150℃で 5 時間前処理したものを出発試料とした。

### 3.2.2 除湿性能測定装置

各除湿エレメントの除湿性能を評価するための回転式で対向流型の測定装置の概要を図 3-2 に示す。また、除湿エレメント部の拡大図を図 3-3 示す。除湿エレメントは、除湿部及び再生部に各ゾーンを円周方向に区分けし、ギアモーターで任意の回転数で駆動させることができる構造になっている。各ゾーンにはそれぞれ専用のファンを設け、各ゾーンの風量はファンの吸い込み側に設けたノズルの動圧を微差圧計（フクダ製、DG-960）で測定した。再生側には、除湿エレメントが輻射熱の影響を受けない場所にヒーターを設け、任意の温度に設定できるように工夫した。

装置全体を恒温恒湿室内に設置し、この室内で設定温湿度に調整した空気を処理空気および加熱する前の再生空気として用いた。除湿された空気、および再生後の高温多湿空気は、装置から距離を置いた場所に排気した。なお、恒温恒湿室内の温湿度は、温湿度測定装置（大西熱学製、DW-4）でモニタリングした。

除湿エレメントは、構造上の問題に起因する空気の漏れをできるかぎり防止するために水平に設置するとともに、仕切り板で除湿エレメントをはさみ、仕切り板と接触させながら回転させた。また、除湿エレメントは、図 3-3 に示した処理ゾーン（除湿する空気流入部分）と再生ゾーン（再生空気流入部分）の分割比（処理：再生の面積比）の仕切り板により、図 3-4 に示すような構造とし、モーターで 3.7～40rph の範囲で回転数を変化させた。

各ゾーンに送風機を設置して、それぞれインバーターで風量を可変できるようにし、本体と送風機の間には風量測定用のノズルを設けて、そのノズルの前後の圧力差を微差圧計（フクダ製、DG-960）で測定し、圧力差とノズル径から各ゾーンの風量を算出した。

### 3.2.3 除湿性能の測定

処理ゾーンの入口・出口の温湿度から空気線図<sup>5)</sup>で絶対湿度を求め、風量を考慮して次式により各除湿エレメントの除湿量を算出した。

$$\text{除湿量 (kg/day)} = (X_i - X_o) \times Q / \gamma \times 1440$$

ここで、 $X_i$  は入口絶対湿度 (kg/kg-dryair),  $X_o$  は出口絶対湿度 (kg/kg-dryair),  $Q$  は風量 ( $\text{m}^3/\text{min}$ ),  $\gamma$  は比容積 ( $\text{m}^3/\text{kg-dryair}$ ) である。なお、上式中の 1440 (min/day) の値は日を分に換算した値である。

次に、除湿エレメントの各ゾーンの温湿度測定方法を述べる。温度は、各ゾーンの出入口の面から 3 cm 離れた位置に熱電対を設置して測定した。なお、再生ゾーンの入口は、熱電対を 4 ~ 5 箇所設置し、温度のバラツキが  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  以内であることを確認した。処理ゾーンの入口側の絶対湿度は、送風機の吸込口から 50cm 離れた恒温恒湿室内の乾球、湿球温度を測定し、空気線図から求めた。具体的には室内の乾球および湿球温度は各々  $27.0^\circ\text{C}$ ,  $22.4^\circ\text{C}$  で、絶対湿度は  $0.01348\text{kg/kg-dryair}$  であった。

処理ゾーンの出口側の絶対湿度は、各ノズルの直前にサンプリング口を設け、そこから、露点計 (EdgeTech 製, 2001DF) により露点を測定して、空気線図から求めた。処理ゾーンの出口側の絶対湿度はその条件によって変化するが本実験の範囲では  $0.004 \sim 0.009\text{kg/kg-dryair}$  であった。再生ゾーンの入口側の絶対湿度は、恒温恒湿室の空気を使用しており、加熱後も絶対湿度は変わらないため、加熱前の絶対湿度を用いた。再生ゾーンの出口側の絶対湿度は、風量測定用のノズルの直前にサンプリング口を設け、そこから、露点計 (GENERAL EASTERN 製, M2-plus) により露点を測定し、空気線図から求めた。再生ゾーンの出口側の絶対湿度はその条件によって変わるが本実験の範囲では  $0.018 \sim 0.030\text{kg/kg-dryair}$  であった。

### 3.2.4 装置の空気漏れ量の測定

実験装置は回転型であり、除湿エレメントと本体側の面、および回転時に風量の多い除湿側から再生側に漏れる可能性がある。したがって、処理ゾーンの吸込み側に、通常、換気の効果の検証試験などにトレーサガス<sup>6)</sup>として用いられている  $\text{SF}_6$  (六フッ化硫黄) ガスを流し、処理ゾーン及び再生ゾーンの各出口側の  $\text{SF}_6$  濃度をガスモニター (B&K



製 1302) で測定し、空気の漏れ量を測定した。その結果、除湿側から再生側への移行は10%以内であった。また、再生時の加湿量を算出し、除湿量との物質収支を確認した結果、±10%以内であることが判明した。これらの値はこの種の回転型装置においては、非常に小さな値であり、解析に及ぼす影響はないものと判断した。

### 3.2.5 各種パラメータと実験条件

システム化する上で重要となるパラメータと、実験における測定条件を表 3-2 にまとめて示す。なお、測定条件は、実用範囲を適用し、低温を重視する意味で再生条件としては100℃未満で検討した。

## 3.3 結果および考察

### 3.3.1 除湿エレメントのロータ厚みの影響

ロータ厚みを150mm、および100mmのエレメントSについて、風速を除湿側と再生側ともに同じく0.5~1.5m/sとして、再生温度を変えた場合の除湿性能を評価した結果を図3-5と図3-6に示す。図3-5はロータの厚みが150mmであり、図3-6は100mmのものである。なお、面積比は1:1とし、除湿エレメントの回転数を3.7~40rphの間で比較を行った。その結果から、除湿性能が最大値を示す点を求め、そのときの回転数を最適回転数<sup>7, 8)</sup>とした。除湿エレメントが同じロータ厚みで風速が同じ条件においては、再生温度が高いものほど高い除湿性能が認められる。除湿エレメントのロータ厚みと最適回転数時の除湿性能を比較すると、風速が0.5m/s時では判定が難しいが、1.0, 1.5m/sの条件では各再生温度とも150mmの方がいくぶん高い性能を示していることが認められる。また、風速が速い条件では、除湿エレメントが厚い方が高い除湿性能を示している。なお、本章では50mmの厚みについても性能評価を行っているが、同様の傾向を示しているのでここでは図示を省略した。厚みと風速を今回の測定条件よりも大きな値に設定したとしても、再生条件が同じであれば再生できない吸着剤の量が増加する

だけで、除湿性能はある値からは向上せず飽和に達するものと推定される。

再生温度が高いほど、また風速が大きいほど、さらに厚みが薄いものほど、最適回転数は高い値となることが明らかとなったが、これは低回転数の場合には、再生が十分に行われた後に除湿工程に入り、除湿能力が残されている状態で再生工程に入ることと、高回転数の場合には、再生が不十分うちに除湿工程に移行するため、除湿性能が低下する結果と考えられる。最適回転数の条件下では、除湿と再生のバランスがとれているものと解釈される。したがって、再生能力が改善されれば、それだけ短い時間で再生できるため、最適回転数は、高い方にシフトすることになる。また、除湿能力が大きくなる場合も、短時間で再生させた方が結果的に除湿性能が高くなるため、最適回転数は大きい方にシフトするものと判断される。図 3-5 および図 3-6 において、エレメントが厚い場合に比べて薄い場合の方が最適回転数はより高速側にシフトしているのが認められる。なお、除湿エレメントが薄い状態では、除湿エレメントの量に対して、除湿される水分量が多くなることを反映しており、より短時間で再生した方が除湿性能を向上させるものと推察される。

### 3.3.2 再生熱量の影響

前項で述べたように、再生温度が高いほど除湿能力は高い値を示すことが判明した。このことは脱着という観点から判断して矛盾はないが、しかし消費電力を考慮に入れないと真の評価はできない。そこで、最適回転数で、エレメント厚み 150mm の場合の条件下における再生熱量を計算し、再生熱量当たりの除湿能力を比較することにした。実用化の場合、加熱した空気を再度熱交換器などで熱回収を行い省エネ化を図る工夫がなされるが、本研究においてはこの点を考慮せず、空気を昇温させるために必要な熱量のみを考えることにした。この場合の再生熱量は次式から計算される。

$$\text{再生熱量 (W)} = \text{風量 (m}^3/\text{h)} \times \text{温度差 (}^\circ\text{C)} \times \text{空気比熱 (kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C)} \times \\ \text{空気比重 (kg/m}^3) / 3600 \text{ (h/s)} \times 4187 \text{ (W} \cdot \text{s/kcal)}$$

結果を図 3-7 に示すが、最適回転数における除湿量と再生熱量との間には原点を通る直線関係にあることが認められる。即ち、このことは再生温度・処理風速に依存せず再生熱量によって除湿量が決まることを意味するものであり、大変興味ある結果と考えられる。再生温度が同一で再生風速を変えた場合、本実験では処理風速と再生風速を同一にしているため、処理の風速も同様の値に変えている。したがって、風速 0.5m/s 時と 1m/s とでは風量が 2 倍異なり、処理および再生の風量も 2 倍となり、かつ処理の場合には除湿される水分も 2 倍、再生に使用される低湿度の空気も 2 倍となっている。風速 0.5m/s と 1m/s の各条件下では、最適回転数は異なるものの除湿性能の最大値は約 2 倍になっている。このことは処理の空気量と再生の空気量の比が一定であれば、除湿量は処理の空気量に比例することを示している。なお、本章では再生温度を 70~90℃ という狭い範囲で行ったものであり、この範囲を広げた場合については不明である。この点は今後更なる検討が必要であると考えている。

### 3.3.3 面積比の影響

処理ゾーンと再生ゾーンの面積比を 1:1, 2:1, 3:1 にした場合の除湿性能評価結果を図 3-8 に示す。参考のため除湿量に対する水の気化熱も図 3-8 中に破線で示した。面積比を変化させても再生熱量と除湿量との関係は、前項と同様に比例関係にあり、いずれも原点を通る直線関係となっている。また、再生熱量一定の条件で比較すると、再生風量が少なくなるほど除湿量は大きくなる傾向が認められる。即ち、吸着の面積を大きくした方が脱着の効果は高くなる傾向を示している。

再生熱量と除湿量との関係が直線を示していることは、除湿された単位重量当たりの水の脱着に要するエネルギーが各面積比で一定であることを意味するものであり、再生熱量で除湿量が決まることを示している。したがって、吸着熱が吸着量に依存しない範囲の水が物理的に吸脱着しているものと考察される。但し、水の蒸発熱と比較すれば、いずれの面積比の直線もかなり下方にあることから判断して、脱着時の効率は低いと考えざるを得ない。再生に要する熱量は、大別して、水の蒸発熱と除湿エレメントの熱容

量と吹き出しから逃げる熱が考えられる。面積比が低いほど再生の効率が向上するのは、面積比が低いほど再生するエレメントの体積が小さくなるため、除湿エレメントの温度上昇に使われる熱量の割合が小さくなるためと考えられる。各面積比における同一再生熱量に対する除湿性能の比は、再生の面積の比とほぼ合致しており、結果として再生の面積が小さいほど再生効率が向上するものと推察される。

### 3.3.4 除湿性能比較

エレメント S およびエレメント Z の 25℃ で測定した水蒸気の吸着等温線を図 3-9 に示す。一般に、ゼオライトの場合は、Langmuir 型で、シリカゲルは直線型に近い吸着等温線を示すことが知られている<sup>9)</sup>。本実験で用いたエレメント S の吸着等温線が直線に近い様子を呈しているのは、用いられている物質がシリカゲル主体であることを裏付けている。一方、エレメント Z はゼオライト主体であるため、Langmuir 型に類似しているが、高湿部で立ち上がりを示していることから判断して、除湿エレメントにするための基材やバインダーなどが吸着特性に関与している可能性もあると推測される。なお、両材料ともヒステリシスが観察され、エレメント S では中湿部であり、シリカゲルでも同様に観察させる。エレメント Z では高湿部に広範囲で生じており、ゼオライトでは観察されないことから、基材やバインダーなどが影響していると考えられる。

次に、材料による除湿性能の差を確認するために、面積比を 3:1、処理風速を 1m/s に固定し、再生熱量が 2kW で一定になるように再生風量と温度を調整し、各除湿エレメントの除湿性能を比較検討した。結果を図 3-10 に示すが、再生温度が 110℃ の場合は両エレメント共に同等の除湿量であるが、80、70℃ と温度が低くなるに従い、シリカゲル主体のエレメント S の方が除湿量は大きくなる傾向にある。このことは、エレメント Z の吸着等温線が、特に 65%RH 以下では Langmuir 型であるため、十分高い温度にして結果的に低湿度の再生空気を用いないと性能が向上しないことを示すものと考えられる。したがって、低温再生の場合再生熱量を考慮に入れれば、除湿性能はシリカゲルを主体とするエレメント S の方が有利であると結論される。

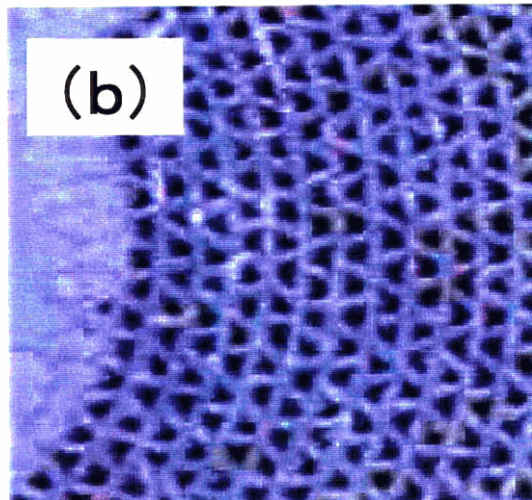
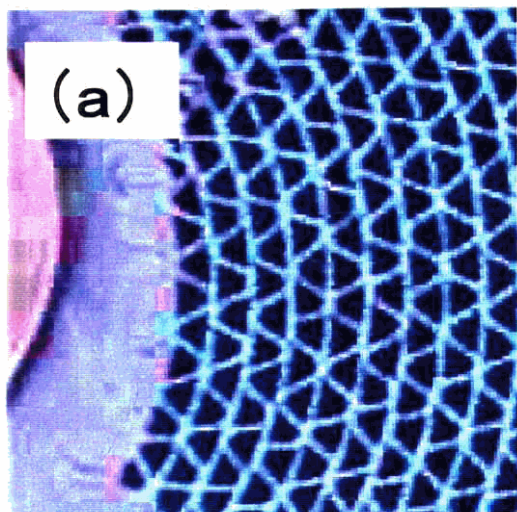
### 3.4 結 論

本章は市販のシリカゲルおよびゼオライトを主体とした除湿エレメントを用いて、システム化する上で重要な各種パラメータを変えることによる除湿性能と除湿エレメントの吸着特性との関係を明らかにし、低温あるいは低熱量で高除湿性能を有するシステムの設計の指針を得るための検討を行ったものである。得られた結論は下記の通りである。

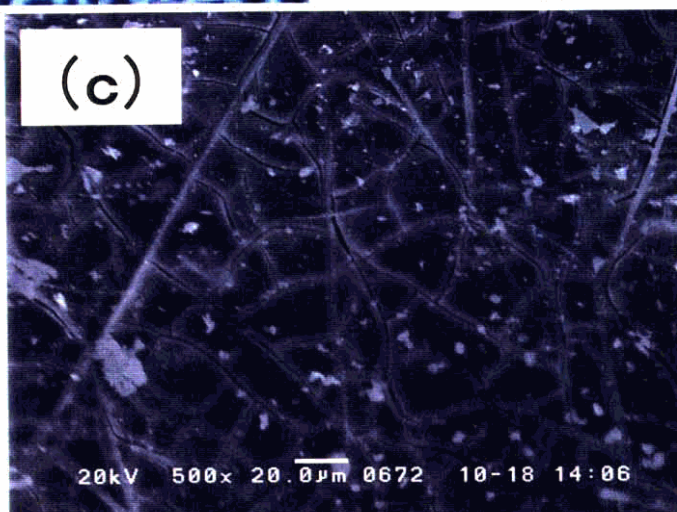
- (1) 除湿エレメントのロータ厚みの影響に関しては、除湿エレメントの厚みが大きいほど高い除湿性能を示した。また、風速も大きいほど高い除湿性能を示すことが認められた。
- (2) 再生熱量の影響に関しては、同一の面積比で除湿と再生の風速が同じ場合、再生温度 70～90℃の範囲では、再生熱量と除湿量との関係は原点を通る直線関係が成立し、再生熱量当たりの除湿量は、風速と再生温度には無関係であり、再生熱量のみで除湿性能が決まることが明らかになった。
- (3) 面積比を変えても、再生熱量と除湿性能との関係は、上記(2)と同様に原点を通る直線関係を示すことが認められた。また、再生部分の面積比が小さいほど、同じ再生熱量で除湿効率が高くなることから判断して、低温あるいは低熱量で高除湿性能を得るには、再生面積を小さくすることが重要であると結論された。
- (4) 水蒸気の吸脱着等温線を測定した結果、吸着剤の材料特性に応じた型となり、シリカゲルを主体とするエレメント S では直線型、ゼオライトを主体とするエレメント Z では Langmuir 型となることが観察され、いずれもヒステリシスをもつことが認められた。水蒸気の吸脱着等温線と再生熱量一定のもとでの除湿性能から、低温再生においてはエレメント S の方が有利であり、110℃以上ではエレメント Z が有利であると結論された。

## 参考文献

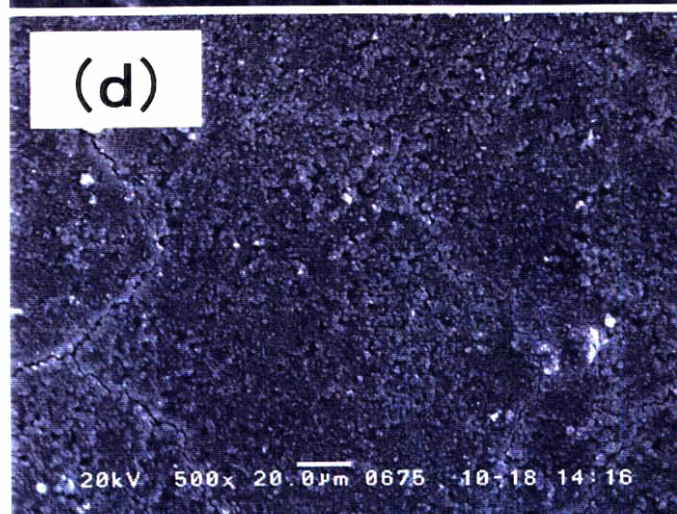
- 1) 金偉力, 児玉昭雄, 後藤元春, 広瀬勉: 化学工学論文集, 24[6], 894-900(1998).
- 2) 広瀬勉, 隈利実: 熊本大学工学部研究報告, No.2, 139(1995).
- 3) A. Kodama, M. Goto, T. Hirose and T. Kuma; Journal of Chemical Engineering of Japan, 28[1], 19-24(1995).
- 4) T. Kuma and T. Hirose; Journal of Chemical Engineering of Japan, 29[2], 376-378(1996).
- 5) ASHRAE; ASHRAE Handbook, Fundamentals, Chap.6, (1997).
- 6) 中村慎二, 赤林伸一, 水谷国男, 近藤俊晴, 桑原亮一: 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, 41429(1996).
- 7) A. Kodama, M. Goto, T. Hirose, and T. Kuma: Journal of Chemical Engineering of Japan, 26[5], 530-535(1993).
- 8) A. Kodama, M. Goto, T. Hirose and T. Kuma; Journal of Chemical Engineering of Japan, 27[1], 644-649(1994).
- 9) 化学工学会編, 化学工学便覧 (丸善), 697(1999).



2mm



20 µ m

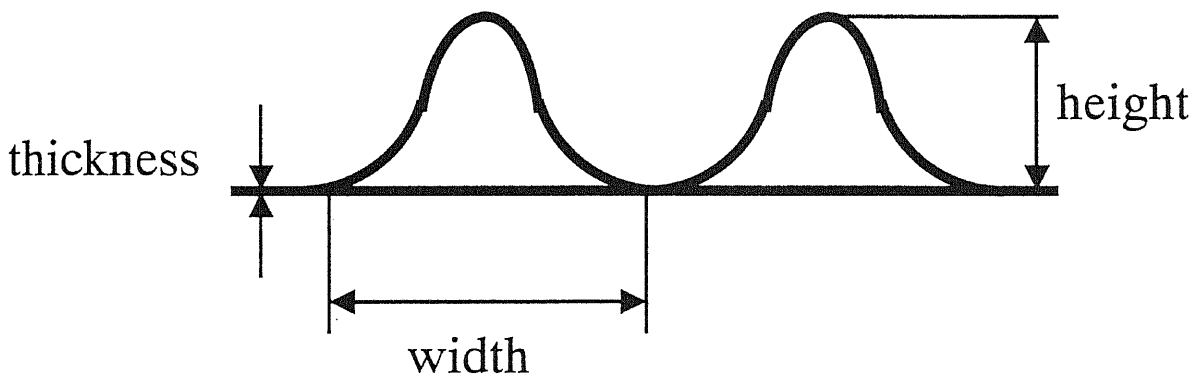


20 µ m

Fig.3-1 Photographs of elements S(a) and Z(b), and SEM images of elements S(c) and Z(d).

Table 3-1 Specification of elements S and Z.

	height (mm)	width (mm)	thickness (mm)	density (g/cm <sup>3</sup> )
element S	1.8	3.4	0.19	0.21
element Z	1.7	3.3	0.10	0.30



Schematic drawing of element structure



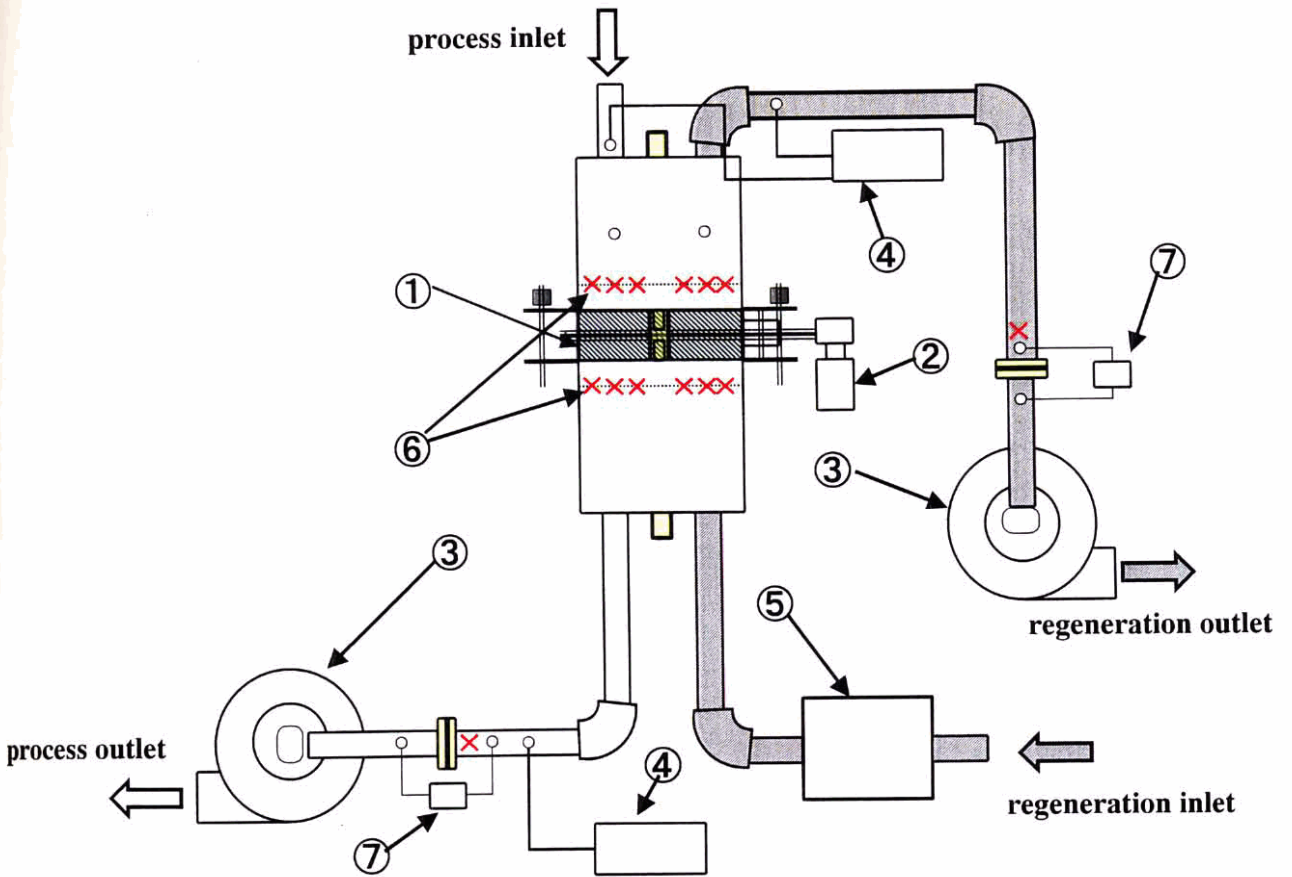


Fig.3-2 Illustration of experimental apparatus.

- ①: Desiccant element, ②: Geared motor, ③: Fan,  
 ④: Dew point meter, ⑤: Heater, ⑥: Thermocouple,  
 ⑦: Differential pressure gauge.

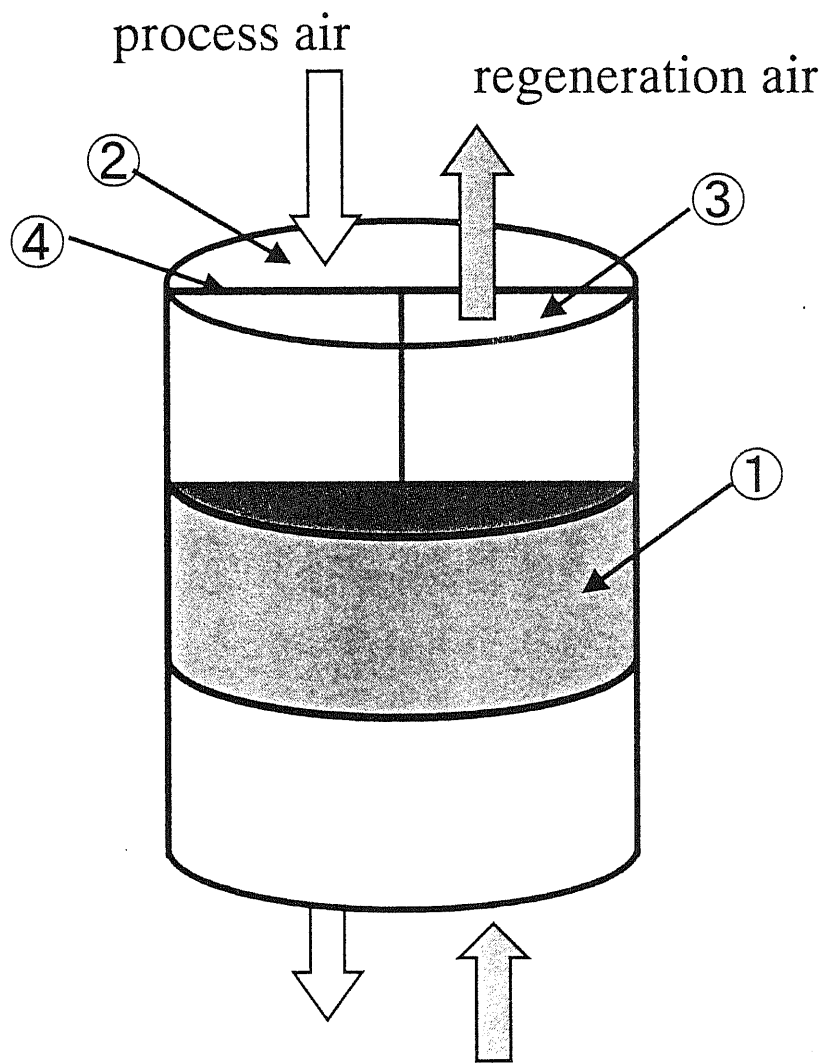


Fig.3-3 Illustration of dehumidification system.

①: Desiccant element, ②: Dehumidification zone,  
 ③: Regeneration zone, ④: Partition board.

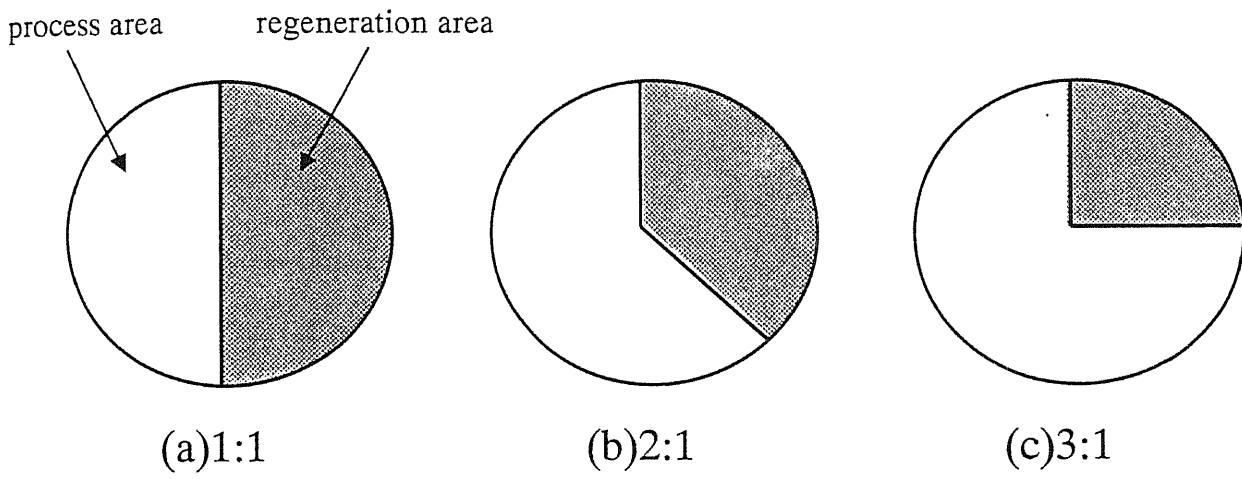


Fig.3-4 Division ratio of regeneration and process areas.

Table 3-2 Details of experimental conditions.

parameter	condition and element size
①regeneration temperature (°C)	70, 80, 90
②air flow rate of regeneration (m/s)	0.5, 1, 1.5
③ratio(process:regeneration)	3:1, 2:1, 1:1
④air flow rate of process (m/s)	0.5, 1, 1.5
⑤rotation speed (rph)	5, 10, 20, 30, 40
⑥Size of element (mm)	Φ300 × (50t, 100t, 150t)

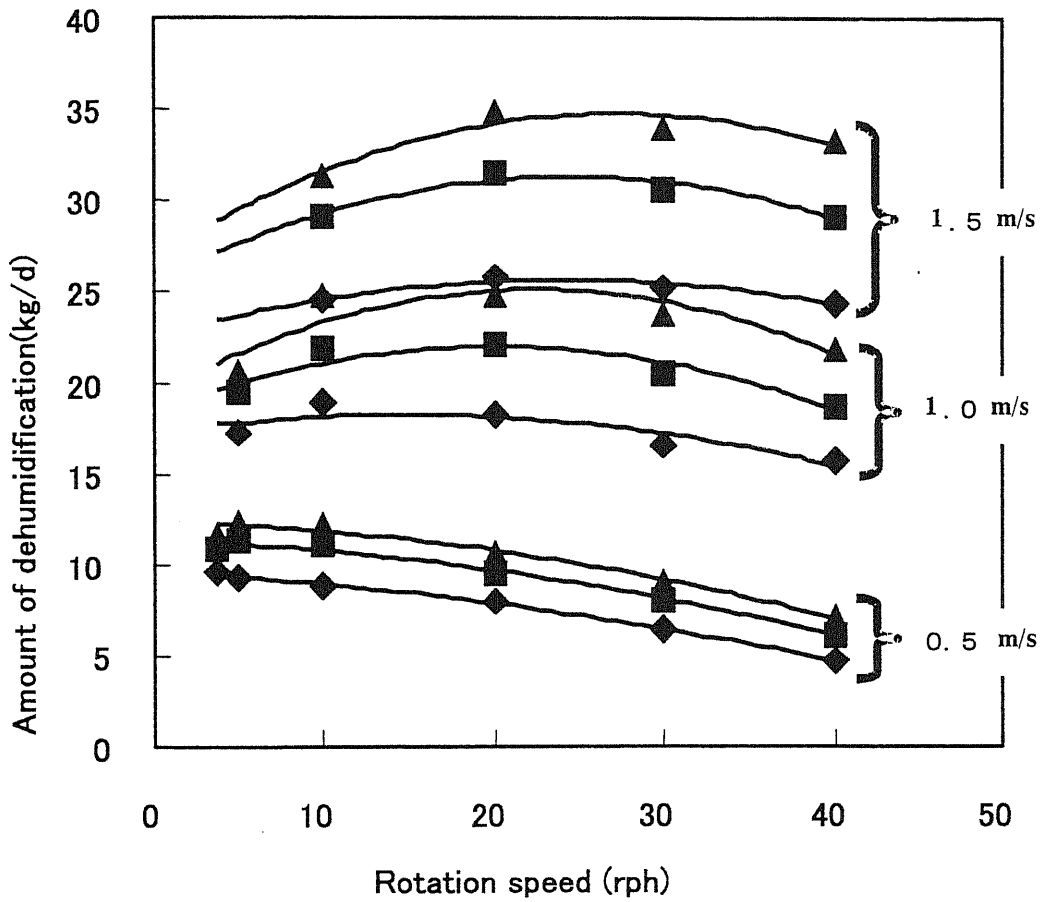


Fig.3-5 Effects of rotation speed and air flow rate on dehumidification (element height:150mm, division ratio=1:1).

Regeneration temperature ▲ : 90°C, ■ : 80°C, ◆ : 70°C.

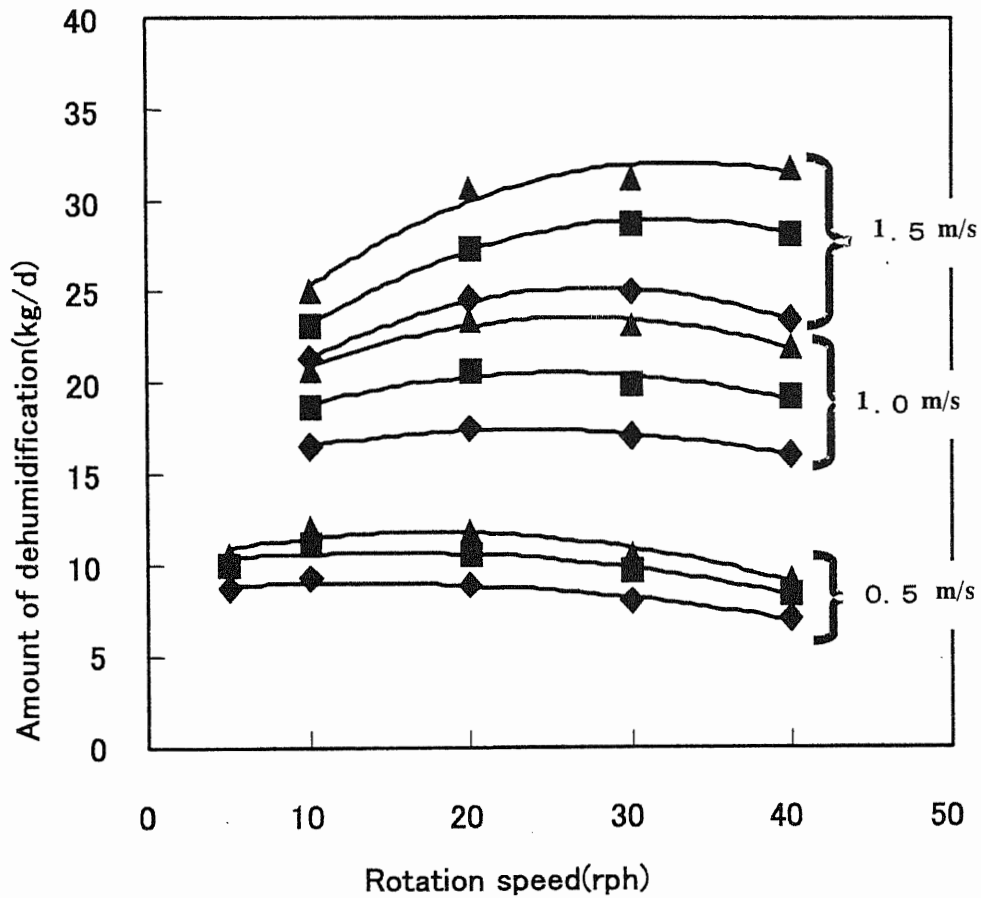


Fig.3-6 Effects of rotation speed and air flow rate on dehumidification (element height:100mm, division ratio=1:1).

Regeneration temperature ▲ :90°C, ■ :80°C, ◆ :70°C.

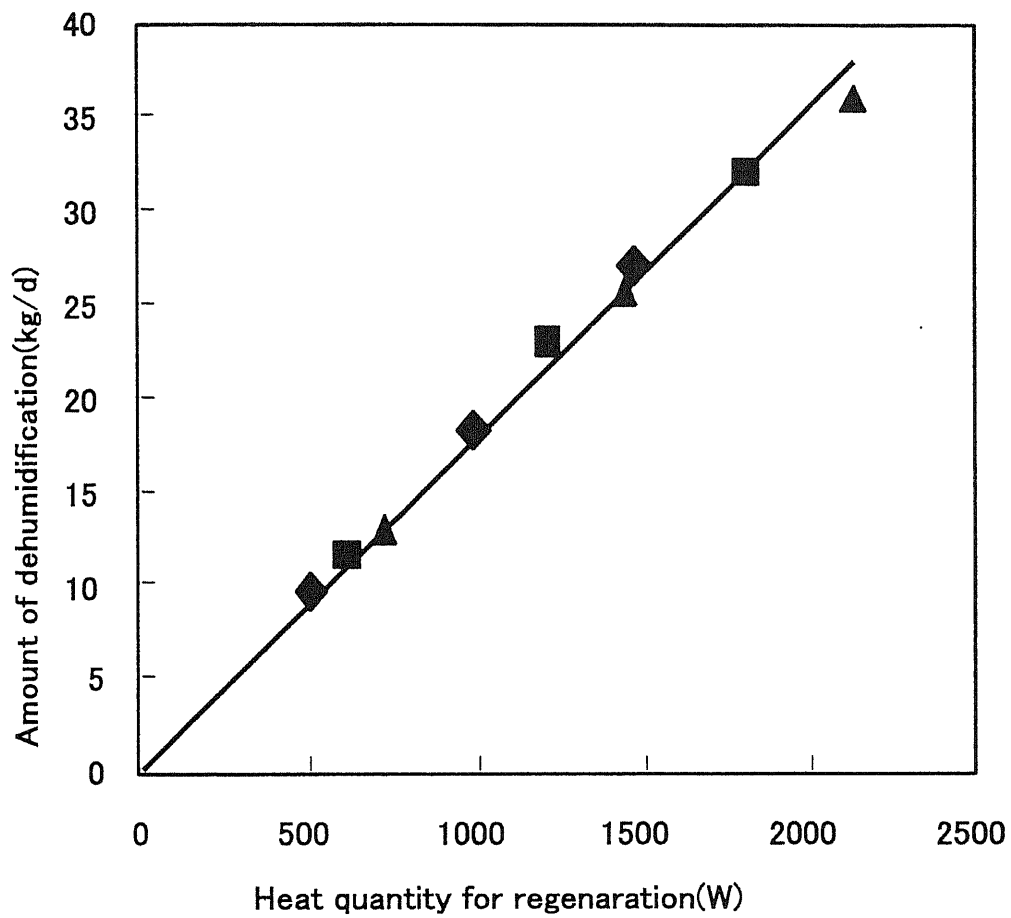


Fig.3-7 Relationship between heat quantity of regeneration and amount of dehumidification (division ratio=1:1).

Regeneration temperature ▲ : 90°C, ■ : 80°C, ◆ : 70°C.

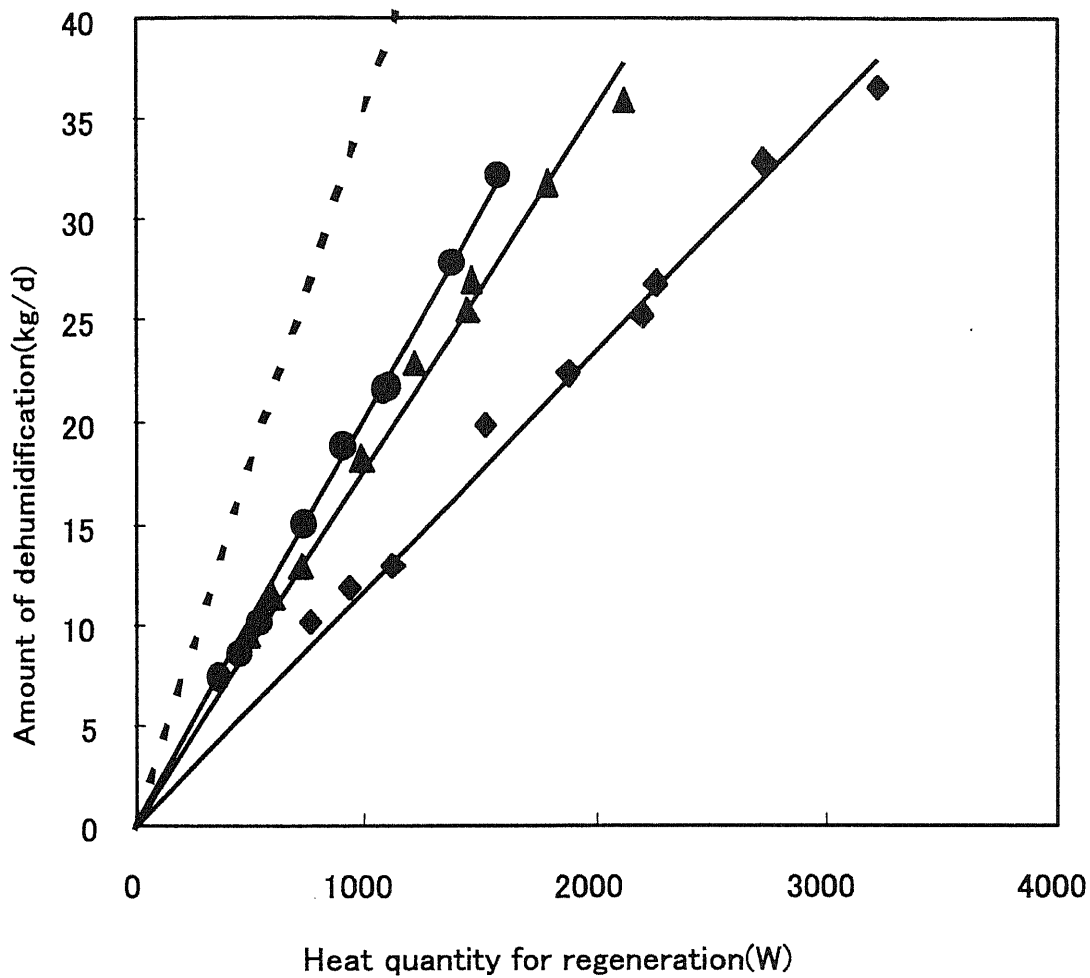


Fig.3-8 Relationship between heat quantity for regeneration and amount of dehumidification.

division ratio ● : 3:1, ▲ : 2:1, ◆ : 1:1,  
 --- : Evaporation heat of water.



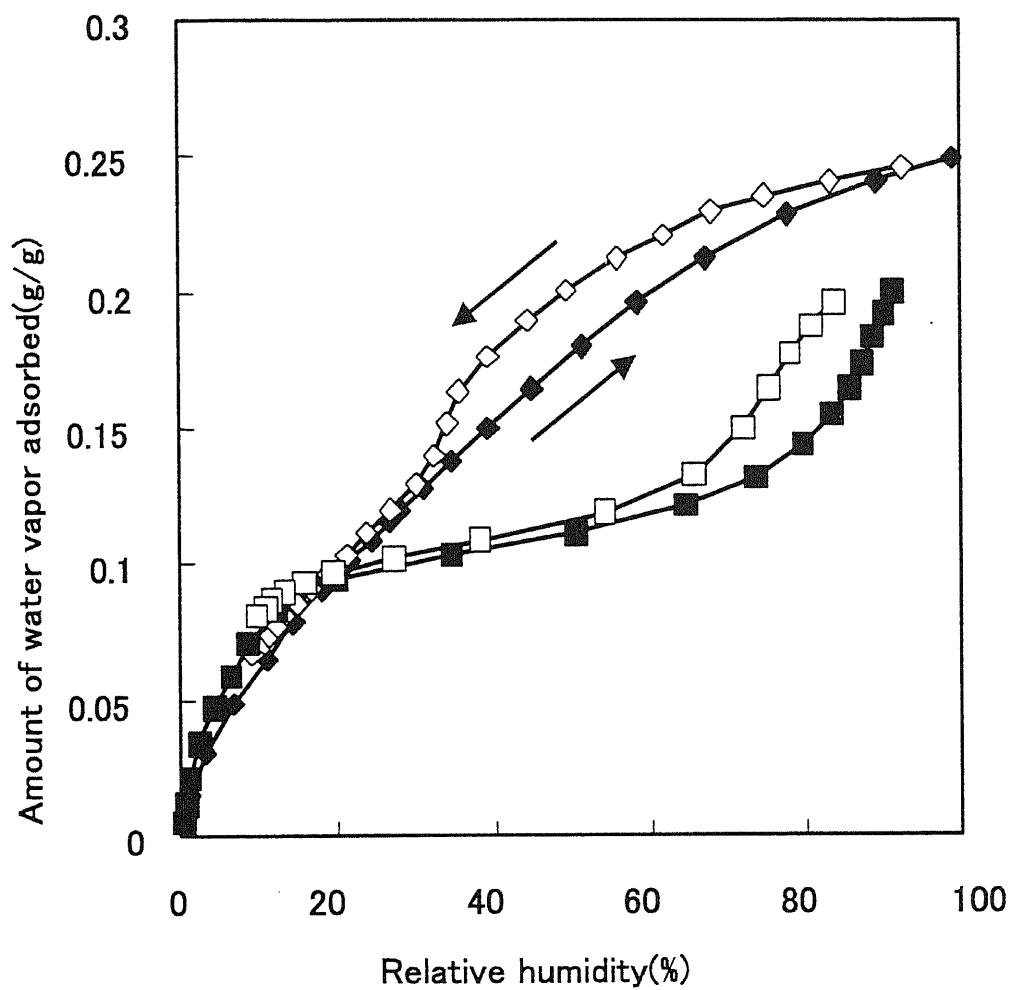


Fig.3-9 Water vapor adsorption-desorption isotherms on elements S and Z.

◆ : Adsorption(element S), ◇ : Desorption(element S),  
 ■ : Adsorption(element Z), □ : Desorption(element Z).

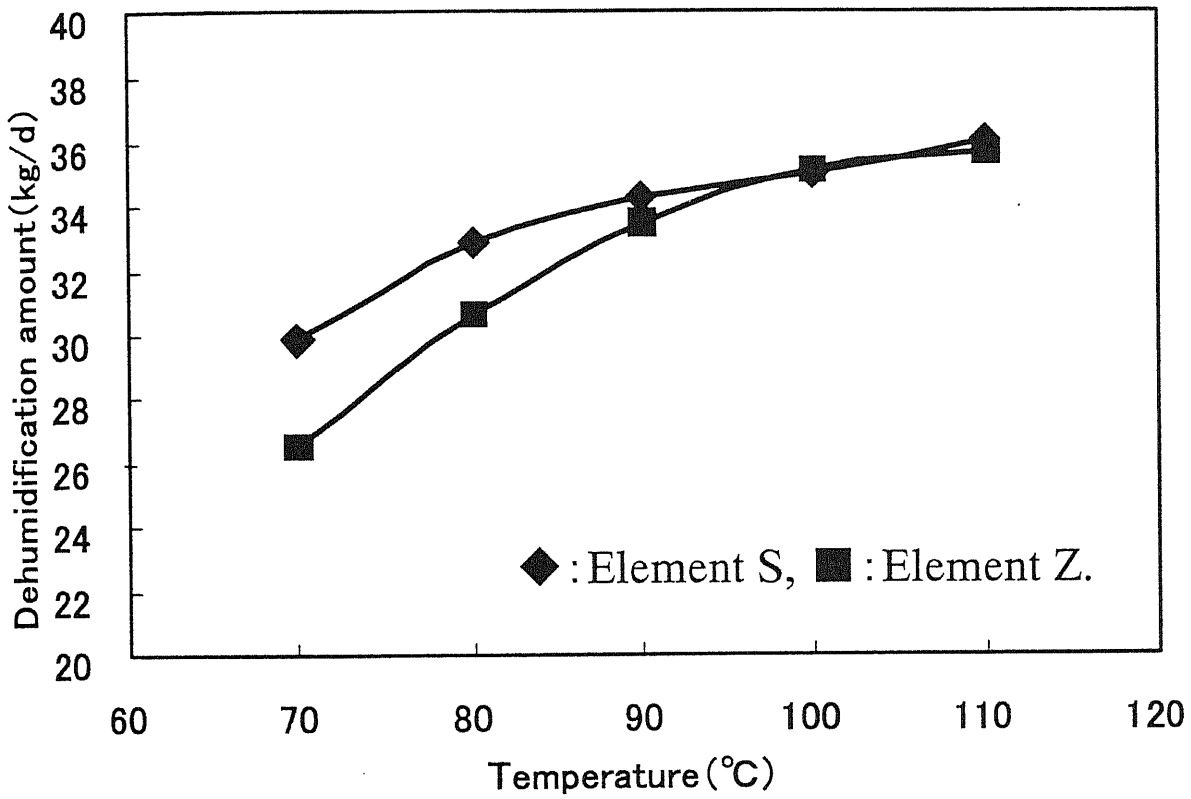


Fig.3-10 Comparison of dehumidification amount at various regeneration temperatures.

## 第4章 除湿エレメント用シートの調製とその除湿性能

### 4.1 緒 言

第3章では、シリカゲル、ゼオライトを主体とした市販の除湿エレメントについて、回転式で対向流型の測定装置を用いて、低温あるいは低熱量で高い除湿性能を得るためのパラメータを種々検討した。その結果、除湿エレメントの処理と再生の面積比および除湿と再生の風速が同じで最適回転数となる条件においては、再生熱量と除湿量は、原点を通る直線関係が成立することを見出した。また、面積比は除湿に対して再生の面積が小さいほど低熱量で除湿できることなどを明らかにした。

ところで、除湿エレメントを構成する材料としては、シリカゲル、ゼオライトや活性炭などの吸着剤、吸着剤を担持する基材やバインダーなどが挙げられるが、除湿エレメントの作製方法に関しては、ほとんど報告されていない。パルプを用いて、無機材料を担持する抄紙化技術は開発されているが、各メーカーが独自に開発<sup>1,2)</sup>し製造ノウハウとして蓄積されており、吸着剤をシート化する方法や除湿エレメントの製造方法については公開されていないのが実情である。

土屋らの報告<sup>3)</sup>によれば、パルプなどの有機質繊維を配合せずに無機系繊維を用いてシート化する技術も開発されており、また、ハニカム状に成形してディッピングにより吸着剤を担持する方法も開発されている。しかし、除湿エレメントを成形する場合には、吸着剤の他に基材やバインダーなどが必要であり、調製方法によっても除湿性能に影響を与える可能性があるが、その点に関しては不明な点が多く、明らかにされていないのが現状である。

このような背景から、本章においては第2章で評価したA型シリカゲルを用い、パルプやその他の繊維で除湿シートを作製し、水の吸着特性や比表面積の評価を行い、実用化の検討を行った。また、除湿エレメントの調製方法による吸着剤の吸着特性および除湿性能に及ぼす影響について検討することを目的とした。

## 4.2 実験方法

### 4.2.1 除湿エレメントの調製方法

除湿エレメントの調製方法として大別すると2つあり、その方法を図 4-1 の(a) (b)に示す。(a)に示した方法は、基材としてはパルプなどを用い、水中にパルプ、吸着剤、バインダーなどを分散させ、抄紙化工程で吸着剤をパルプなどに担持することで、除湿シートを作製し、そのシートをコルゲート加工した後、素子化して除湿エレメントを作製する方法である。また、この方法は有機系バインダーや無機系バインダーなどを用いなくてもパルプに担持させることもできるため、吸着剤の特性を低下させずに基材に担持することができる。しかし、物理的な担持のため、多量の吸着剤を担持させることができないことや基材がパルプであるため 100℃以上の高温では劣化するなどの欠点も有していることを付記しておきたい。

(b)に示した方法は、セラミック繊維およびパルプなどと吸着剤、バインダーを水中に分散させ、吸着剤とバインダーを用いて担持した基材を抄紙化する。その抄紙化した基材を焼成することで、パルプや有機系バインダーを焼き飛ばし、最終的にセラミック繊維に吸着剤を担持させた基材を得ることができる。もちろん、焼成する前に基材をコルゲート加工して除湿エレメントとしての形状を保つ必要がある。従って、バインダーの量や種類を選定することで多量の吸着剤を担持することができ、また、高温でも劣化することがない。しかし、バインダーが吸着剤の表面を覆うことがあり、吸着剤の吸着特性を低下させる可能性がある。

本章では、低温（100℃以下）再生を目指していることと、選定した吸着剤の吸着特性をなるべく低下させずに利用するために、(a)の方法を採用して除湿エレメントを作製した。吸着剤は、第2章で吸着特性の評価検討を行い、有効吸着量が大きいことが確認されたことと耐久性などを考慮して、A型シリカゲル（富士シリシア化学製）（比表面積 783m<sup>2</sup>/g）を用いた。また、吸着剤のキャリアとして、針葉樹から調製した Narrow Brief Kraft Pulp、ポリエステル繊維および SiO<sub>2</sub>・Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> からなるセラミック繊維を用いた。

この 1~10 $\mu\text{m}$  のシリカゲルとパルプなどを水に分散させた分散溶液から丸網抄紙機で抄紙化し、厚さ 0.07~0.25mm の除湿シートを作製した。抄紙工程で約 60 $^{\circ}\text{C}$  に乾燥させ、ロール状に巻き取ったものから必要面積を切り取って実験に供じた。吸着剤とパルプの配合割合を重量パーセントで 30:70, 50:50, 70:30, 80:20 とした。さらに、パルプにポリエステル繊維あるいはセラミック繊維を加え、吸着剤、パルプ、ポリエステル繊維の配合割合を 70:20:10 および吸着剤：パルプ：セラミック繊維を 70:20:10 としたものを作製した。なお、これらのシート坪量は 150g/m<sup>2</sup> とした。調製した抄紙を表 4-1 にまとめて示す。表中の No.3 および No.6 の SEM 写真を図 4-2 に示す。両方の画像ともシリカゲルの細かい粒子がパルプおよびパルプとセラミック繊維に絡み合って保持されているのが観察できた。パルプの太い幹繊維からささくれた複数の細かい繊維が粒子に絡んで保持していると考えられる。この除湿シートにおいて、シリカゲルの担持重量比が 70% 以下のものは、粒子が脱落することはなかった。

#### 4.2.2 除湿シートの水蒸気吸着特性および比表面積の測定

除湿シートの吸着特性を把握するために、全試料 (No.1~No.6) について 298K における水蒸気の吸着等温線を測定した。測定装置は、日本ベル(株)製の BELSORP18 を用いた。約 0.2g の各基材を試料ガラス管内に投入して、真空脱気しながら 150 $^{\circ}\text{C}$  で 5 時間前処理したものを出発試料とした。また、試料 No.3, No.4, No.5, No.6 に関しては 77K における窒素の吸着等温線を測定し、BET の比表面積を算出した。

#### 4.2.3 除湿エレメントの水蒸気吸着速度の測定

除湿エレメントの吸着速度を測定するために、作製した抄紙の中でサンプル No.3 および No.6 を選択してピッチ 3.4mm、高さ 1.8mm のコルゲート形状に加工し、92mm $\times$ 92mm で厚さ 20mm のエレメントを作製した。

吸着速度は、図 4-3 に示す通風カラム装置を作製し、この中に除湿エレメントを設置し、25 $^{\circ}\text{C}$ 、65%RH に調整した空気を送風機により 51m<sup>3</sup>/h の風量で通風させ、重量の

経時変化を測定した。

#### 4.2.4 除湿エレメントの除湿性能

除湿エレメントの除湿性能を評価するための回転式で対向流型の測定装置の概要を図4-4に示す。設置された除湿エレメントは、直径270mm、厚み20mmであり、処理（除湿）及び再生部に各ゾーンを円周方向に区分けし、ギアモーターで任意の回転数で駆動させることができる構造になっている。処理ゾーンと再生ゾーンの面積比は、3:1とした。各ゾーンにはそれぞれ専用のファンを設け、各ゾーンの風量はファンの吸い込み側に設けたノズルの動圧を微差圧計（フクダ製、DG-960）で測定した。再生側には、400Wのヒーターを設け、加湿機およびプレヒーターを用いて、20℃、60%RHの空気を50℃、100%RHの状態に調整した。絶対湿度は露点計（Edge tech(株)製、2001DF）で測定した。

装置全体を恒温恒湿室内に設置し、この室内で設定温湿度に調整した空気を処理空気および加熱する前の再生空気として用いた。除湿された空気、および再生後の高温多湿になった空気は、装置から距離を置いた場所に排気した。なお、恒温恒湿室内の温湿度は、温湿度測定装置（大西熱学製、DW-4）でモニタリングした。

除湿エレメントは、構造上の問題に起因する空気の漏れをできるかぎり防止するために水平に設置するとともに、仕切り板で除湿エレメントをはさみ、仕切り板と接触させながらモーターで3.7～40rphの範囲で回転数を変化させた。

除湿ゾーンの入口と出口の絶対湿度および風量から、下式により各除湿エレメントの除湿量を算出した。なお、比容積は空気線図から算出した。

$$\text{除湿量 } D \text{ (kg/day)} = (X_i - X_o) \times Q / \gamma \times 1440$$

ここで、 $X_i$  は入口の絶対湿度(kg/kg-dryair)、 $X_o$  は出口の絶対湿度(kg/kg-dryair)、 $Q$  は風量( $\text{m}^3/\text{min}$ )、 $\gamma$  は比容積( $\text{m}^3/\text{kg-dryair}$ )である。なお、上式中の1440(min/day)の値は日を分に換算した値である。

## 4.3 結果および考察

### 4.3.1 水蒸気の吸着等温線および比表面積

図 4-5 に試料 No.1, No.2, No.3, No.5 および No.6 の水蒸気の吸着等温線を示した。参考までにシリカゲルとパルプの吸着等温線も示した。また、セラミック繊維およびポリエステル繊維については、ほとんど水蒸気の吸着性能を示さなかったため、図示は省略した。

パルプを基材とした場合は、シリカゲルの配合割合が高くなるに従って、高い吸着性能を示した。また、パルプの一部をポリエステル繊維とした試料 No.5 は、シリカゲルが 70% 配合されているにもかかわらず No.3 と比較して低い吸着量となった。これは、抄紙化の際に 100℃ のプレス乾燥によって熔融温度が約 70℃ であるポリエステル繊維が溶けてシリカゲル表面を覆ったためと考えられる。それに対して、パルプの一部をセラミック繊維で置き換えた試料 No.6 では、吸着量の低下が見られなかった。これは、セラミック繊維がポリエステル繊維のようにプレス乾燥程度の熱では溶けないためシリカゲル表面に及ぼす影響がなかったためと考えられる。

シリカゲルおよびパルプの各水の吸着量と各除湿シートにおける配合割合から、各試料の吸着量を理論的に算出した。80RH% 時の水の吸着量をもとに、理論的に算出した値と実測結果と比較した結果を表 4-2 に示す。また、第 2 章および第 3 章で測定した市販のシリカゲルの除湿エレメント U-SSCR (西部技研製、以下エレメント S) も表中に記載した。表 4-2 からわかるように、シリカゲルとパルプのみで作製したものは、シリカゲルの割合が大きいほど計算値より水蒸気の吸着量が低下する傾向が見られる。これは、パルプ自体がシリカゲルの水の吸着性能に影響を与えていることを示している。パルプの割合が大きいほど計算値に近づくのは、パルプ自体の水の吸着量が比較的高く、パルプによって部分的に表面が塞がれシリカゲルの性能が低下しても見掛け上その影響を受けにくいためと考えられる。本章ではバインダーを用いずに除湿シートを調製したが、吸着剤の脱落などが懸念されることはなかった。このことはパルプのささくれた細

い繊維が吸着剤の保持剤の役割を果たしている。ポリエステル繊維を含んだ No.6 の吸着量は、理論的計算値と比べ明らかに低い値であった。このことは、ポリエステル繊維がシリカゲルの表面を閉塞していると考えられる。なお、SEM 画像でもその影響は確認できなかった。

表 4-3 に試料 No.3~No.6 の比表面積の測定結果を示す。これらの結果から各繊維の表面積を無視して、担持したシリカゲル重量当たりの BET 比表面積を計算し、担持したシリカゲルの比表面積 ( $783\text{m}^2/\text{g}$ ) との比についても表中に記載した。

図 4-5 において、シリカゲルの配合割合が 70% の No.3 は、高い水蒸気の吸着量を示しているが、BET 比表面積の値は  $246\text{m}^2/\text{g}$  と低い。これに対してシリカゲル配合割合を 80% まで増やした試料 No.4 の比表面積は  $476\text{m}^2/\text{g}$  であり、70% の試料 No.3 の約 1.9 倍と飛躍的に向上することが分かった。これは、パルプがシリカゲルの表面を覆うなどの影響があることを示唆するものと思われる。また、ポリエステル繊維を加えた試料 No.5 は、比表面積の値が  $320\text{m}^2/\text{g}$  で非常に低い値となり、より強く影響を受けていることが認められる。試料 No.3 と No.5 において、パルプおよびポリエステル繊維が水の吸着量よりも比表面積の方が強く影響を受けていることがわかる。しかし、パルプの一部をセラミック繊維に代えた試料 No.6 では、水蒸気の吸着量と比表面積に及ぼす影響度はほぼ同じ程度とみなすことができる。この要因としては大きく 2 つ考えられる。1 点目は、パルプのみで担持した No.4 (シリカゲル:パルプ=80:20) の水の吸着量が非常に高いことでもわかるように、セラミック繊維を加えたことでシリカゲルに対するパルプの割合が少なり、パルプのシリカゲルに対する影響が少なくなったことである。2 点目は、No.3 と No.6 の SEM 写真を図 4-2 に示すが、セラミック繊維はパルプに比べて繊維径が細い。パルプだけの場合、シリカゲルの粒子を大きく包み込み、そのためパルプによる細孔を塞ぐ影響が大きい。セラミック繊維を混合することで、シリカゲル粒子をセラミック繊維で分断したものをパルプで包み込み、シリカゲル粒子同士に物理的な間隙が生まれ、吸着量や比表面積の影響を受けにくいと考えられる。

ところで、比表面積よりも水蒸気の吸着量の方が影響を受けにくい点に関しては、パ



ルプを担持剤として用いた場合、パルプがシリカゲルの表面を覆うことで、比表面積が大きく低下する。しかし、パルプ表面には通常親水性の官能基が存在しているため、この官能基を伝わって、水の分子がシリカゲルの細孔の中に徐々に浸入するため、水蒸気の吸着量に対する影響は少ない結果になるものと推測される。

### 4.3.2 吸着速度

本章では、水蒸気の吸着量が高い試料 No.3 と No.6 について、図 4-3 に示す固定式の測定装置を用いて、実際の水蒸気の吸着速度を測定した。比較のためにエレメント S についても同様の測定を行った。その結果を図 4-6 に示す。表 4-2 から No.3, No.6 およびエレメント S の水蒸気の吸着量は 0.230~0.235g/g でありほぼ同等であるが、経過時間毎の水蒸気の吸着量を比較すると、No.3 は、吸着開始から 2~8 分の時間帯で若干ではあるがエレメント S より下回り吸着速度が遅い結果であったが、No.6 とエレメント S はほぼ同じ吸着曲線を示した。No.3 はエレメント S と比較して比表面積が約半分に低下している。この結果より、水蒸気の平衡吸着量が同等であっても比表面積の低下は、吸着速度を低下させる要因になると判断される。これは、比表面積が大きいほど水分子が吸着剤内部に拡散しやすいと考えられる。

### 4.3.3 除湿性能

実際の除湿性能を測定するために、試料 No.3 と No.6 を除湿エレメントに加工し、図 4-4 に示す装置を用いて、20℃、60%RH の条件で除湿性能を測定した。その結果、エレメント S および No.3 の除湿性能は、各々 6.1, 5.3kg-H<sub>2</sub>O/day で、除湿性能の比は、エレメント S:No.3=1:0.87 であった。図 4-6 に示す吸着の立ち上がりが低いことが除湿性能の低下に関係しているものと考えられる。

No.6 については上記の実験条件とは異なり、プレヒーターと加湿器を用いずに除湿性能を測定し、エレメント S と比較した結果、エレメント S および No.6 の除湿性能は、各々 3.3, 3.1kg-H<sub>2</sub>O/day で、除湿性能の比は、エレメント S:No.6=1:0.94 であり、ほ

ば同等の除湿性能を得た。

したがって、除湿性能を向上させるためには、水蒸気の吸着量と吸着速度に関連する比表面積の高い材料を用いることと、その材料の特性を低下させない担持剤や除湿シートの作製方法を検討する必要がある。また、除湿エレメントとして加工しやすい方法かどうかとも考慮する必要がある。例えば、試料 No.5 (シリカゲル：パルプ=80:20) については、吸着速度や除湿性能の評価を行わなかったが、除湿エレメントに加工する際に、きれいにカット加工ができないという問題があった。No.5 のカット面の断面図を図 4-7 に示す。パルプが毛羽状に立ち上がるため、除湿エレメントに加工した時に空気抵抗が大きくなることや、その面から担持した吸着剤が脱落する可能性もある。また、セラミック繊維などの配合比を高くすると、コルゲート加工した場合にシート表面にひび割れが生じ、そのためシートが断裂するということもある。したがって、除湿エレメントの加工面と上述の吸着特性の両面を考慮して担持剤とその配合比を選択する必要がある。

#### 4.3.4 除湿エレメントの実用化の検討

試料 No.6 は、4.3.2 で水蒸気の吸着量および吸着速度に関して、市販のエレメント S とほぼ同等性能であることを示し、4.3.3 では除湿性能も同等であることを確認した。この試料 No.6 を用いて、実用化の検討を行った。まず No.6 の平板状のシートとコルゲーション状に加工したシートを交互に重ねて巻取り、円筒状のロータを形成させ、そのロータを設定した厚みでカットした後、形状を保護する枠体にいれて、最終的に除湿エレメントを作製した。但し、実用化においては、除湿エレメント自体の強度も重要であり、平板のシートとコルゲーション状のシートを接着することが必要である。しかし、接着した部分は接着剤で覆われることにより部分的に除湿性能が低下するため、接着する部分を最小限にする必要がある。種々検討した結果、コルゲーション状の山の部分に 2 山連続して接着剤を塗布し、次の 3 山は塗布せず、その後の 2 山連続で接着剤を塗布することで、エレメントの強度を保ちつつ、除湿性能の低下を最小限に留めることができることが判明した。構造面については、コルゲーションのピッチおよび高さは同等として、

図 4-8 に示す  $w$  の寸法について、主に形状の検討を行った。当初試作した段階での  $w$  は 0.36mm としたが、0.21mm にすることで、エレメントの強度を維持しつつ高い除湿性能を得ることが判明した。図 4-9 にエレメント ( $w=0.36$ ) およびエレメント ( $w=0.21$ ) の外観図を示すが、外観上はほとんど変わらない。直径 300mm で厚み 100mm、 $w=0.36$  のエレメントおよび  $w=0.21$  のエレメントを作製し、処理と再生の面積比を 3:1、処理空気は 20℃、60%RH、再生温度 60℃、風速 1.5m/s の条件における除湿性能を評価した。また、比較としてエレメント S の除湿性能も測定した。結果を図 4-10 に示す。最適回転数における各エレメントの除湿性能は、 $w=0.36$  のエレメントは 14.8 kg-H<sub>2</sub>O/day、 $w=0.21$  のエレメントは 16.0 kg-H<sub>2</sub>O/day、エレメント S は 12.7 kg-H<sub>2</sub>O/day の値であった。 $w$  を 0.36mm から 0.21mm にすることで、除湿性能が約 8% 向上する結果となり、 $w=0.21$  のエレメントの除湿性能は、市販のエレメント S と比較して約 26% 向上した。 $w$  は接着剤を塗布する幅であるため、小さいほど除湿性能が向上すると考えられるが、小さすぎると強度が保てないことから、 $w=0.21$  が最適な値と判断された。

## 4.4 結 論

低温再生可能なエレメントを作製するために、吸着剤としてシリカゲルを用いて除湿シートを作製し、最適な配合割合を水蒸気の吸着等温線と比表面積から判定することを試みた。さらに実際のエレメントの除湿性能を把握するため固定式の実験装置を用いて吸着量と吸着速度を測定し、回転式の実験装置を用いて実運転における除湿性能を評価した。得られた知見と主な結果は下記の通りである。

- (1) 基材のパルプに対してシリカゲルの配合割合が増加するほど吸着性能が高くなることが判明した。シリカゲル配合割合が70%のものに比べて80%のシートでは比表面積が約1.9倍と飛躍的に向上するが、配合割合が70%を超えるとシートとしての強度が低下しコルゲート加工時に割れが発生したり断裂する恐れがあるため、70%以上の高配合シートはバインダー等で補強する必要があった。
- (2) シリカゲルのつなぎとなる基材（繊維）の種類によってシートの比表面積が異なる。ポリエステル繊維ではプレス乾燥時の熱によって熔融するためパルプ繊維よりシリカゲルの表面積を低下させることが明らかになった。また、セラミック繊維はパルプ繊維ほどシリカゲルの表面積を低下させないが、セラミック繊維はパルプ繊維ほど柔軟性が無いため添加量に限度が生じた。
- (3) 除湿エレメントの除湿性能には抄紙段階での配合割合と比表面積が大きく起因することが確認された。高吸着量・高表面積の吸着剤、吸着剤と基材（繊維）の配合割合、基材の種類などをさらに検討すれば除湿性能がさらに見込めることが示唆された。
- (4) シリカゲル配合割合70%、パルプ繊維配合割合20%、セラミック繊維配合割合10%の除湿シートを用いて、除湿エレメントの実用化の検討を行った。製造面では接着剤の塗布の方法について、構造面ではコルゲーションの形状を最適化することで、市販のものより除湿性能が約26%向上させることができた。

## 参考文献

- 1) 特開昭 63-175619
- 2) 特開平 1-11142
- 3) 土屋孝次, 臼田登一, 本田勝喜, 高田誠, 笠原清実: 岐阜県紙業試験場業務報告,  
(1983).

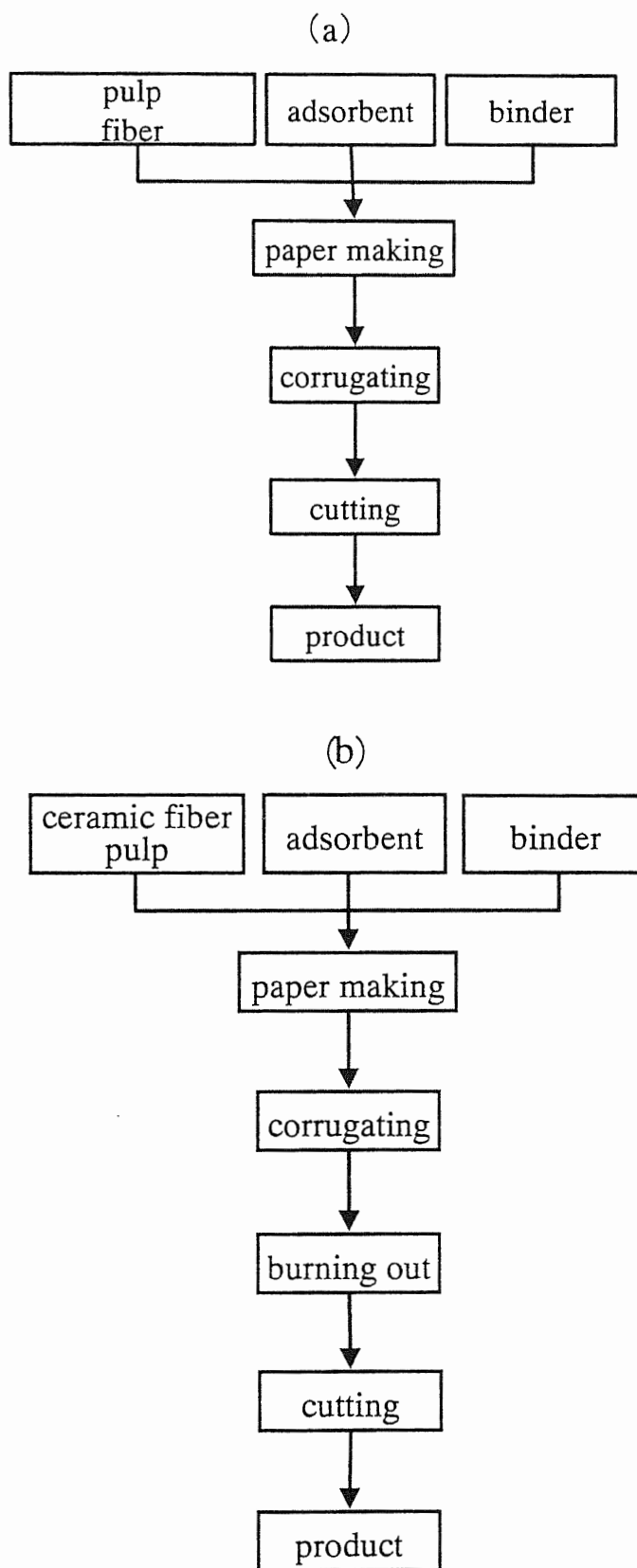
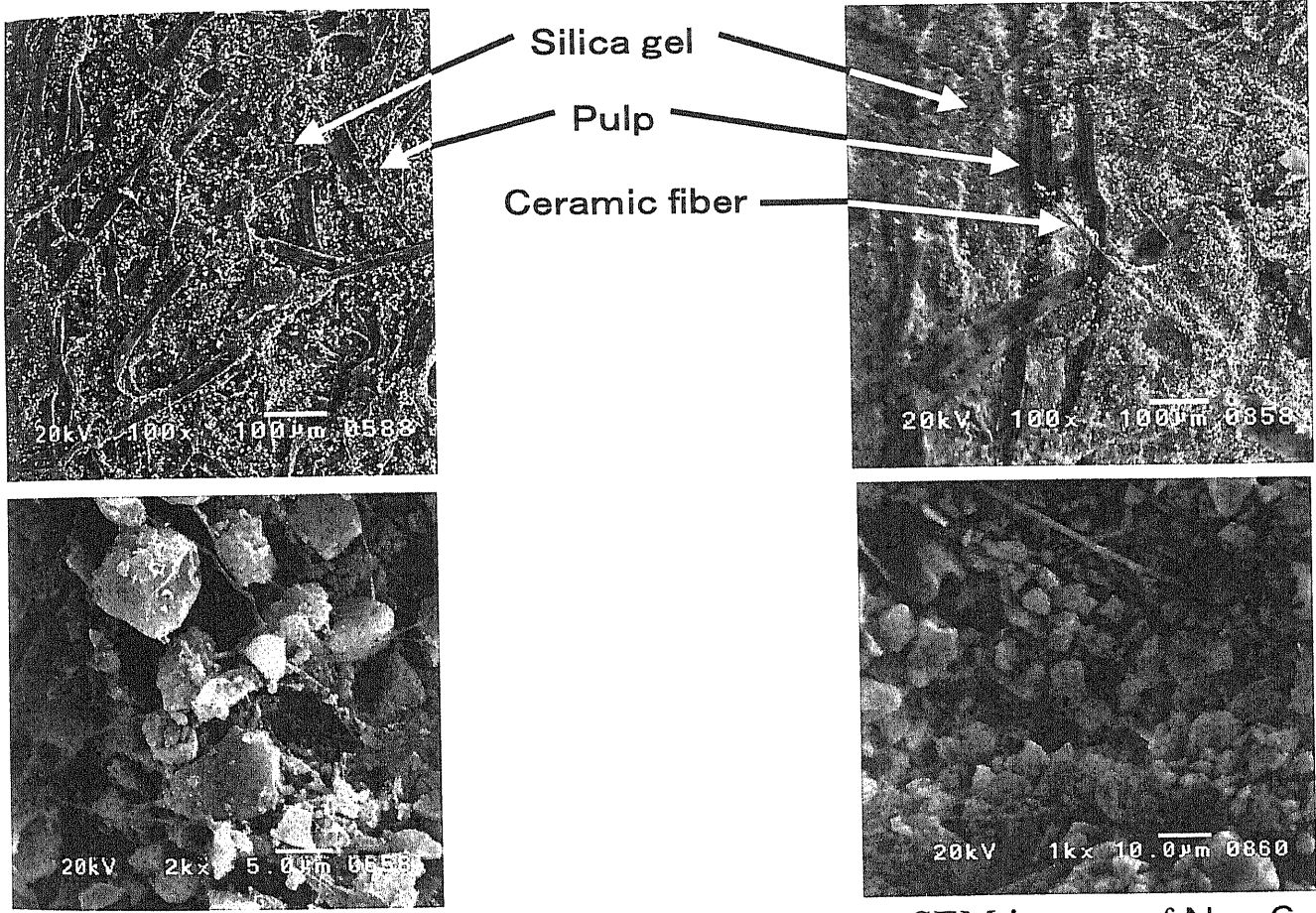


Fig.4-1 Preparation method of dehumidifier elements.

Table 4-1 Composition of Dehumidifier sheets.

Sample No.	Materials	Contents (wt%)	Weight (g/m <sup>2</sup> )
1	Silica gel	30	150
	pulp	70	
2	Silica gel	50	150
	pulp	50	
3	Silica gel	70	150
	pulp	30	
4	Silica gel	80	150
	pulp	20	
5	Silica gel	70	150
	pulp	20	
	Polyester fiber	10	
6	Silica gel	70	150
	pulp	20	
	Ceramic fiber	10	



SEM images of No. 3.

SEM images of No. 6.

Fig.4-2 SEM photographs of dehumidifier sheets.



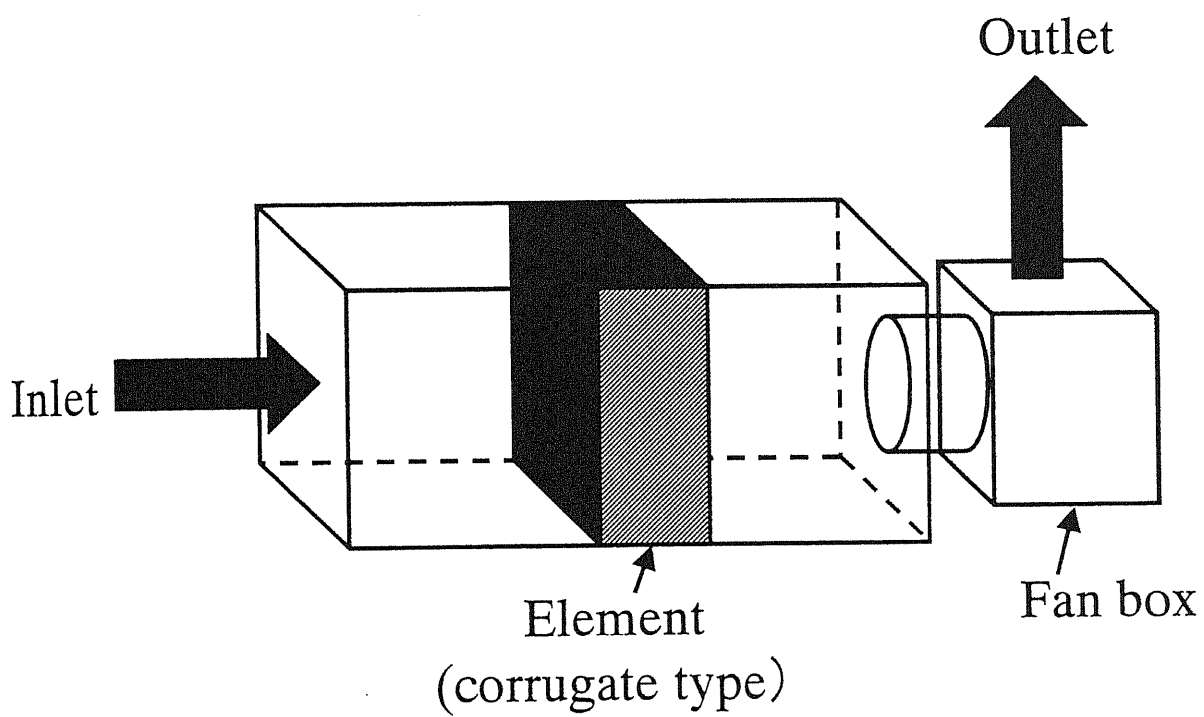


Fig.4-3 Experimental apparatus for measurement of water vapor adsorption rate.

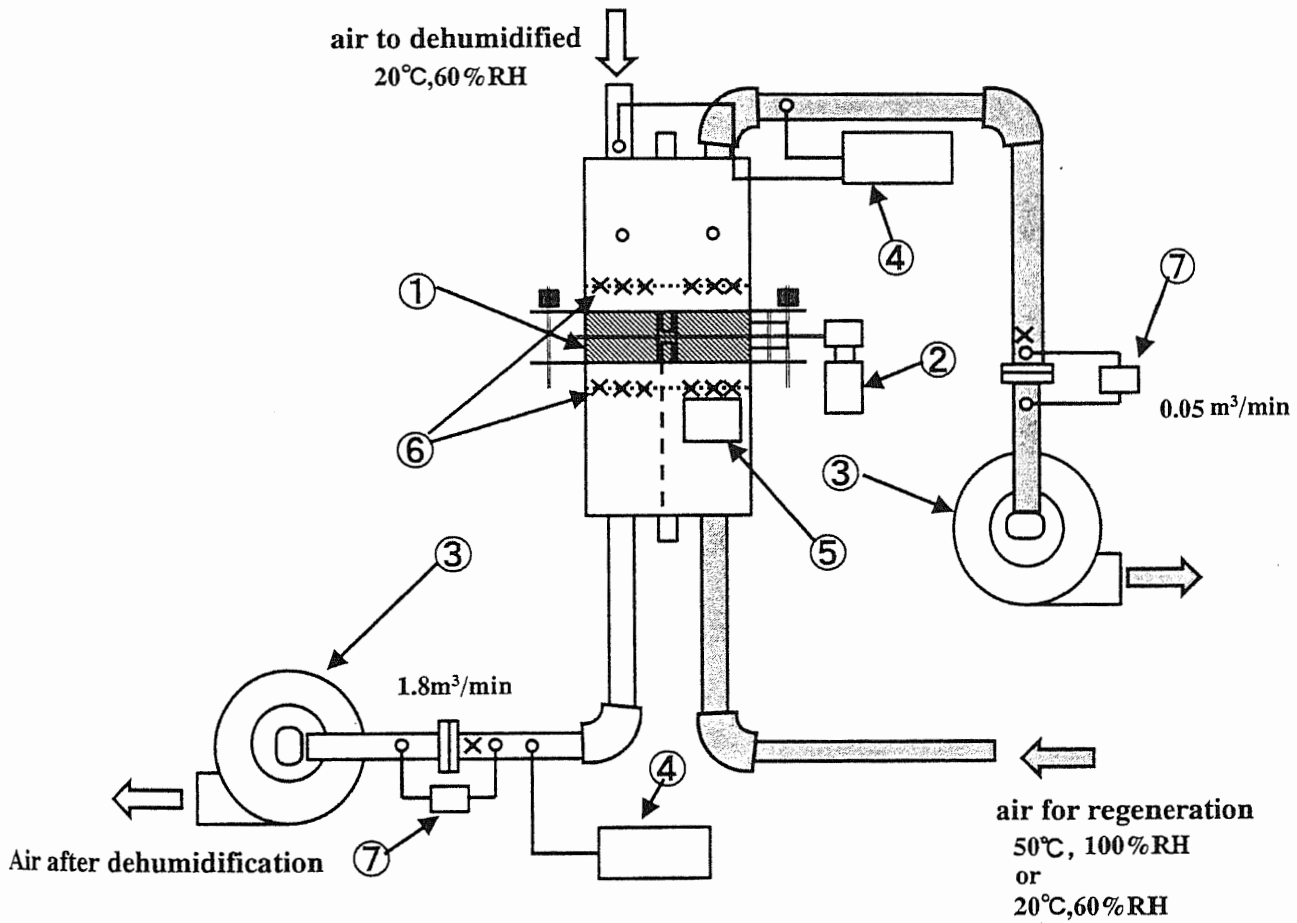


Fig.4-4 Experimental apparatus for evaluation of dehumidification performance.

- ①: Desiccant element, ②: Geared motor, ③: Fan,
- ④: Dew point meter, ⑤: 400W-Heater, ⑥: Thermocouple,
- ⑦: Differential pressure gauge.

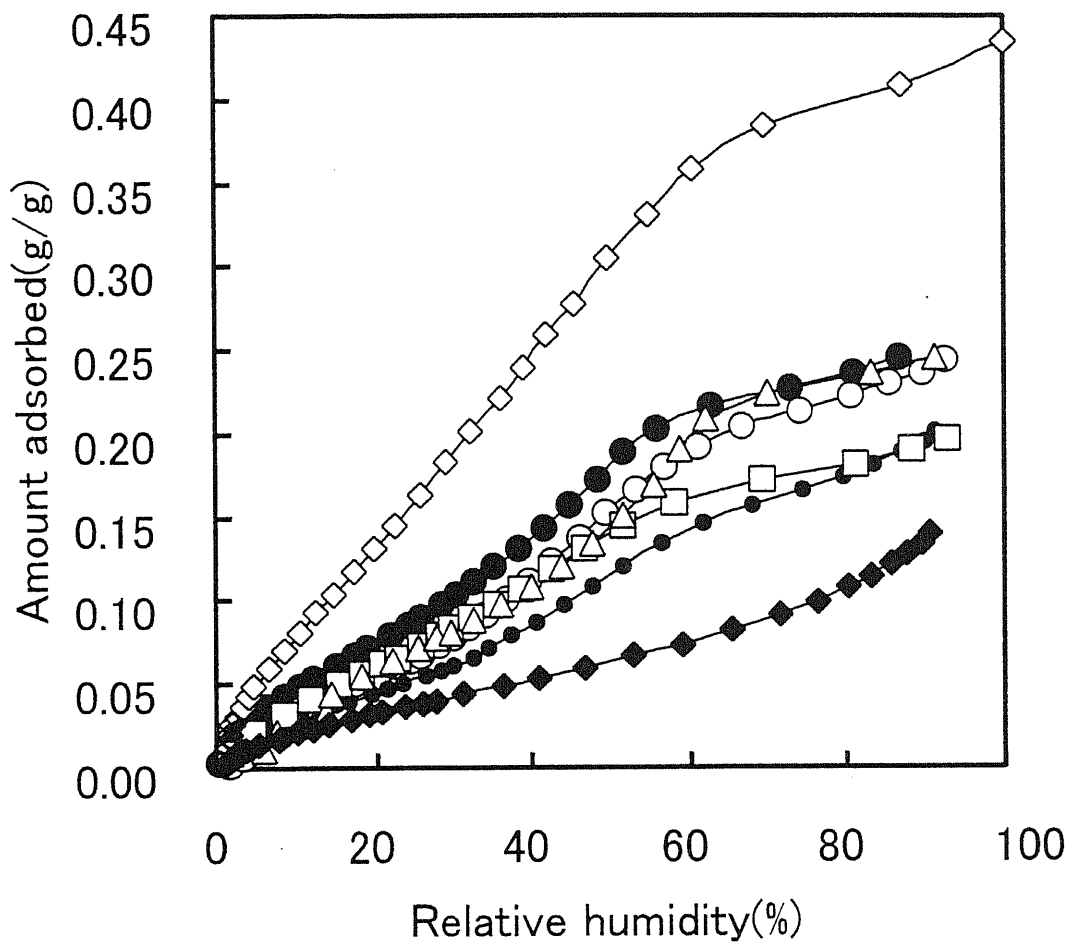


Fig.4-5 Water vapor adsorption isotherms of various dehumidifier sheets.

●:No.1, ○:No.2, ●:No.3, □:No.5, △:No.6,  
◇:silica gel, ◆:pulp.

Table 4-2 Water vapor amount of adsorption of dehumidifier sheets at the point of 80%RH.

Sample No.	Materials	Contents (wt%)	①Numerous values Amount adsorbed (g/g-sheet 80%RH)	②Observed values Amount adsorbed (g/g-sheet 80%RH)	Ratio ②/①
—	Silica gel	100	0.40	0.40	1.0
	pulp	0			
—	Silica gel	0	0.107	0.107	1.0
	pulp	100			
1	Silica gel	30	0.195	0.175	0.897
	pulp	70			
2	Silica gel	50	0.254	0.222	0.874
	pulp	50			
3	Silica gel	70	0.312	0.235	0.753
	pulp	30			
5	Silica gel	70	0.301	0.181	0.601
	pulp	20			
	Polyester fiber	10			
6	Silica gel	70	0.301	0.230	0.764
	pulp	20			
	Ceramic fiber	10			
Element S	Silica gel, etc	—	—	0.230	—

Table 4-3 BET surface area of adsorption of dehumidifier sheets.

Sample No.	Materials	Contents (wt%)	Observed values BET Surface area (m <sup>2</sup> /g-sheet)	①Numerous values BET Surface area (m <sup>2</sup> /g-silica gel)	Ratio ①/783
—	Silica gel	100	783	783	1.0
	pulp	0			
3	Silica gel	70	246	351	0.448
	pulp	30			
4	Silica gel	80	476	595	0.760
	pulp	20			
5	Silica gel	70	320	457	0.584
	pulp	20			
	Polyester fiber	10			
6	Silica gel	70	452	646	0.825
	pulp	20			
	Ceramic fiber	10			
Element S	Silica gel, etc.	—	467	—	—

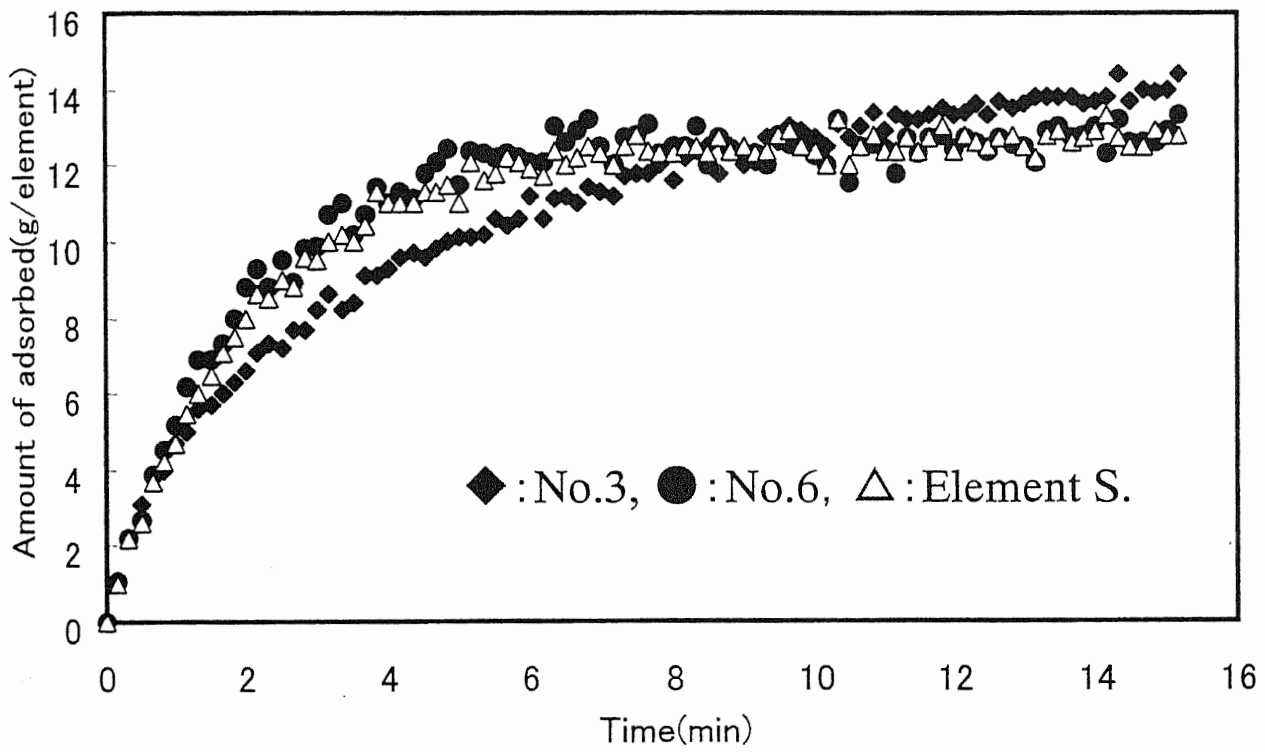


Fig.4-6 Water vapor adsorption rates of elements.

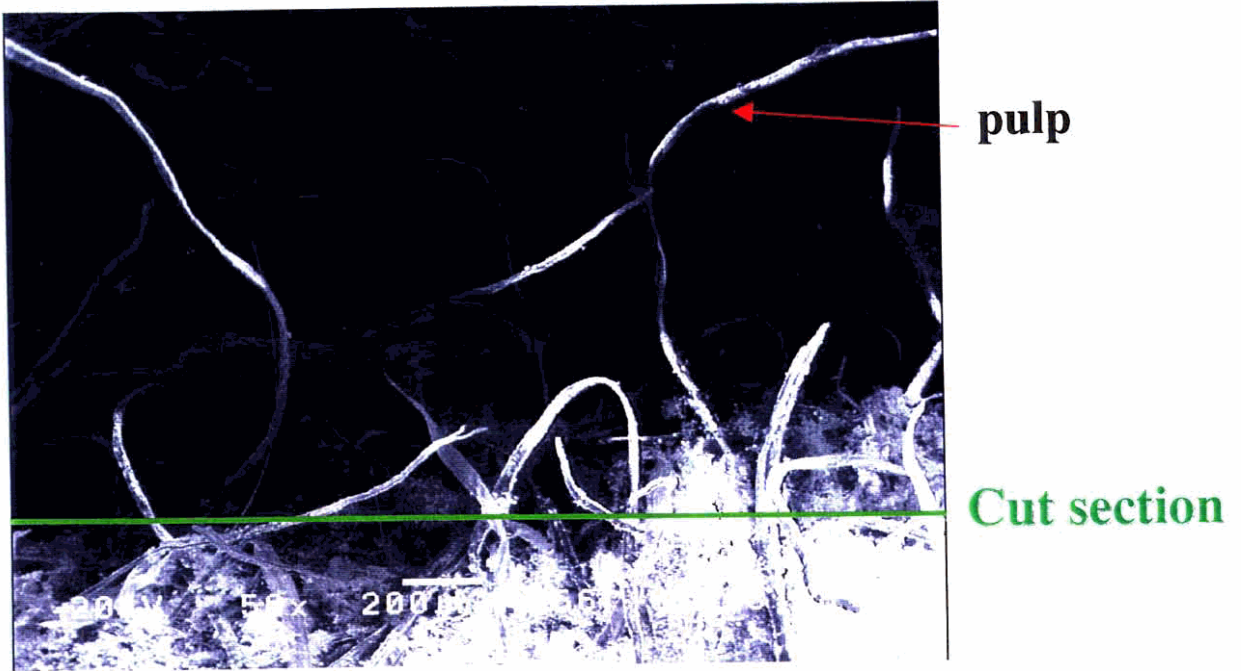


Fig.4-7 Cross section of No.5 element.

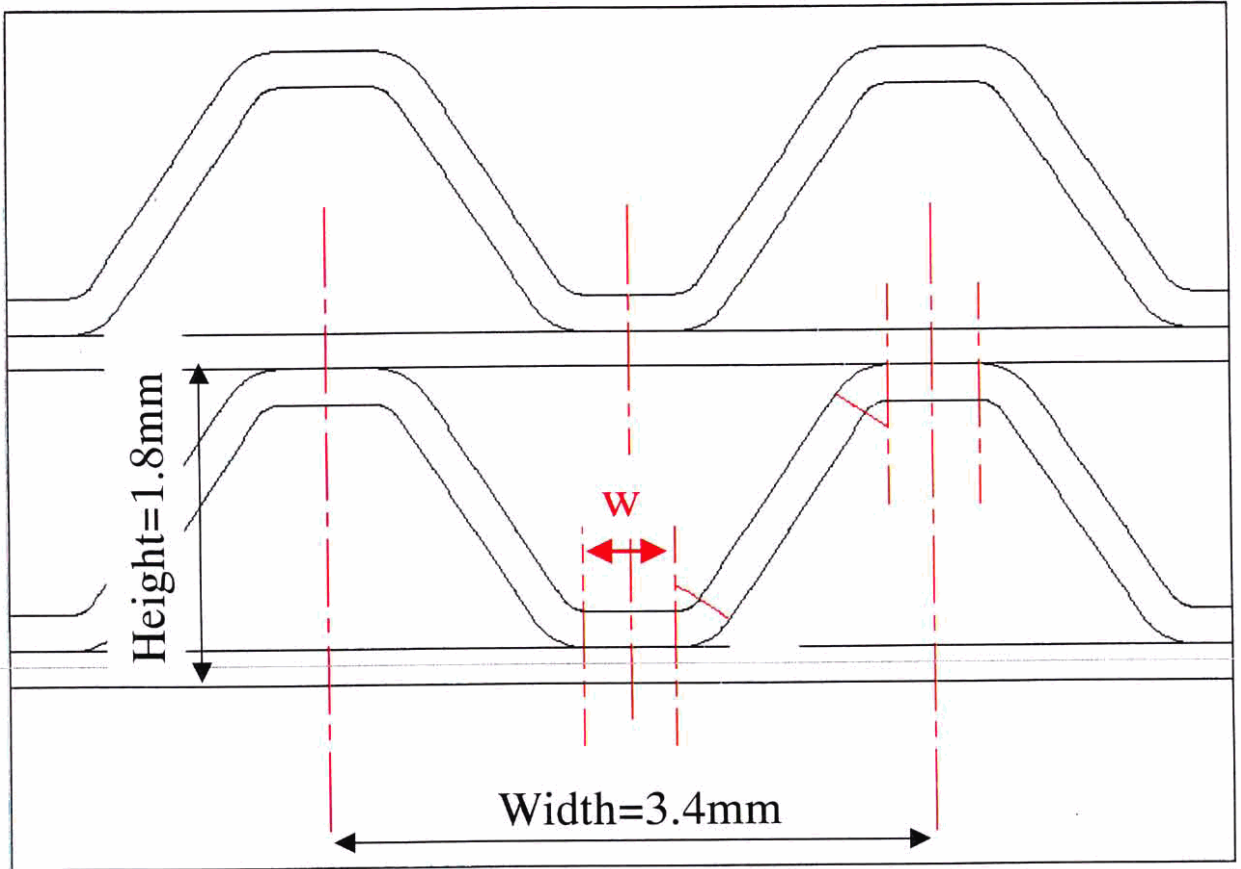
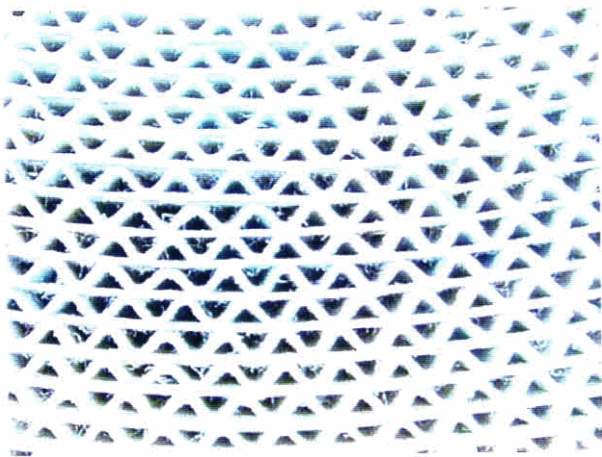
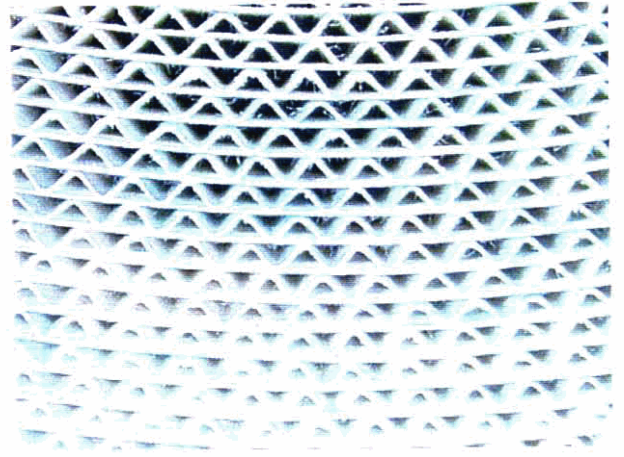


Fig.4-8 Schematic drawing of element structure.





Element ( $w=0.36$ )



Element ( $w=0.21$ )

Fig.4-9 Photographs of desiccant elements.

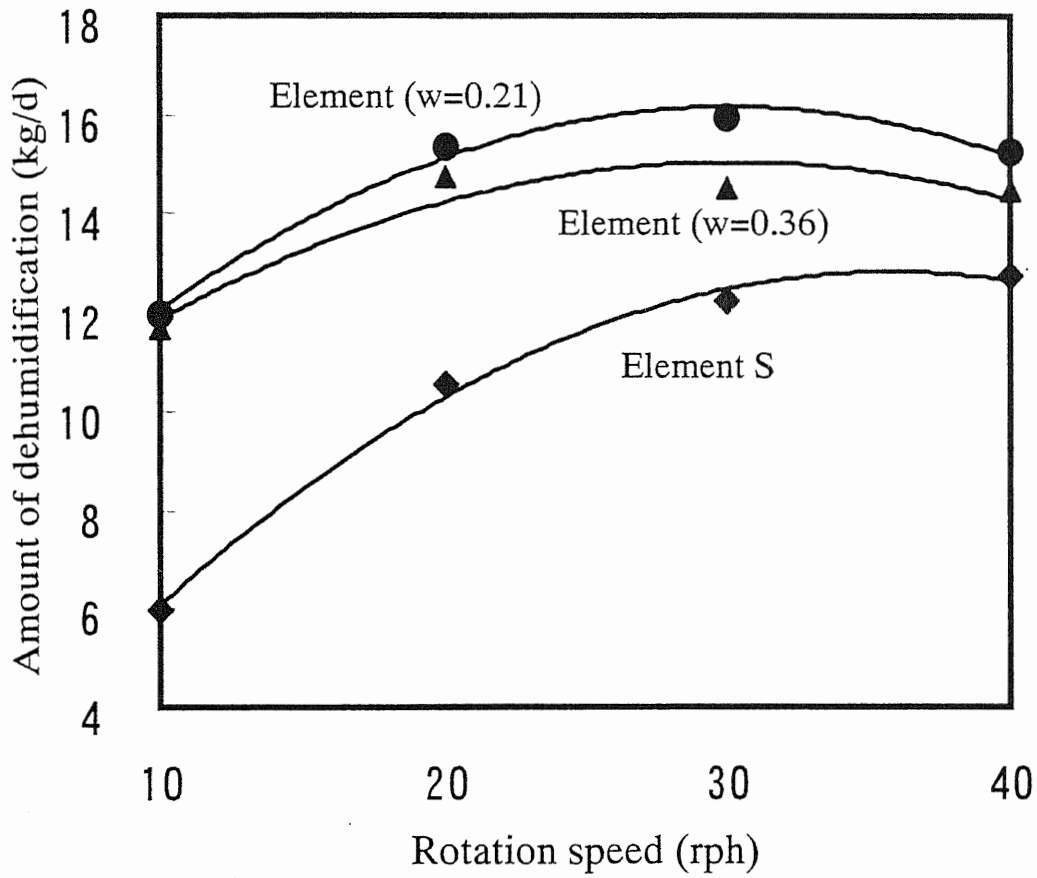


Fig.4-10 dehumidification performances of element (w=0.36), element (w=0.21) and element S.

## 第5章 除湿エレメントの性能評価に関する シミュレーションの検討

### 5.1 緒 言

第3章において、シリカゲル、ゼオライトを主体とした市販の除湿エレメントについて、回転式で対向流型の測定装置を用いて、低温あるいは低熱量で高い除湿性能を得るためのパラメータを種々検討した。その結果、除湿エレメントの処理と再生の面積比および処理と再生の風速が同じで最適回転数となる条件においては、再生熱量と除湿量は、原点を通る直線関係が成立することを見出した。また、面積比は処理に対して再生の面積が小さいほど低熱量で除湿できることなどを明らかにした。また、第4章において、除湿シートの調製方法について検討し、パルプ繊維とセラミック繊維を用いて調製することで、吸着剤の吸着特性を維持した除湿エレメントの実用化を行った。

ところで、デシカント空調機器などに応用する目的で、除湿エレメントのシステム化に必要なパラメータは、風速、処理と再生の面積比、再生温度や回転数など非常に多く、目的の仕様に応じた最適なパラメータを決定<sup>1, 2)</sup>するためには多くの実験を必要とする。また、除湿材料によって吸着性能や総括移動容量係数などの特性が異なるため、除湿材料ごとに最適なパラメータを決定し、除湿性能を比較することが必要であり、多くの時間と労力を要するのが実情である。各種パラメータを用いて、除湿性能をシミュレーションで計算する試みも行われているが<sup>3, 4)</sup>、しかし、除湿材料の特性からパラメータを決定する段階には至っていない。

このような背景から、本章においてはシステム上のパラメータだけでなく、除湿材料の特性も含めて除湿性能を解析・予測することと、材料の吸着特性からシステムとしての除湿性能が評価でき、かつ除湿エレメントとシステムの設計など実用上有効なツールを開発することを目的としてシミュレーションの検討を行った。

## 5.2 数値解析

### 5.2.1 共通記号

AV	: 充填層単位体積当たりの粒子表面積 [ $\text{m}^2/\text{m}^3$ ]
C	: 絶対湿度 [ $\text{kgH}_2\text{O} / \text{m}^3\text{dryair}$ ]
cS	: 吸着剤と平衡の絶対湿度 [ $\text{kg H}_2\text{O} / \text{m}^3\text{dryair}$ ]
KF	: 総括移動容量係数 [ $\text{m}/\text{s}$ ]
t	: 時間 [ $\text{sec}$ ]
u	: 風速 [ $\text{m}/\text{s}$ ]
q	: 吸着量 [ $\text{kg}/\text{kg}$ ]
z	: エレメント長さ [ $\text{m}$ ]
$\beta$	: 吸着係数 ( $=q_0/c_0$ ) ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )
$\varepsilon$	: 空隙率 [—]
$\gamma$	: 充填密度 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

#### 添字

n	: 分割数
o	: 初期状態
PAST	: $\Delta T$ 時間前の値を示す

## 5.2.2 基礎方程式

本章で展開する数値解析は、圧カスイング吸着方式 (Pressure Swing Adsorption, PSA) の吸着理論で報告<sup>5)</sup>されている基礎式を基にして、熱スイング吸着方式 (Thermal Swing Adsorption, TSA) に適用できるように改良を加えたものである。なお、文字、記号等は前記の共通記号にまとめて示した。

### (1) 等温固定層吸着の基礎式<sup>6, 7)</sup>

物質収支式は (1) 式のように表される。

$$u \partial c / \partial z + \varepsilon \partial c / \partial t + \gamma \partial q / \partial t = 0 \quad (1)$$

吸着速度式と吸着平衡式は、それぞれ (2), (3) 式で表現される。但し、吸着平衡式は実測した材料の吸着等温線を曲線近似で表したものである。

$$\gamma \partial q / \partial t = K F A V (c - c S) \quad (2)$$

$$q = f(c S) \quad (3)$$

### (2) 無次元化

等温系では、吸着平衡を表す  $\beta \gamma$  が一定であり無次元化が可能であるため、以下のように取り扱うことにした。

$$Z = z / u \cdot K F A V$$

$$T = (t - \varepsilon z / u) \cdot K F A V / \beta \gamma$$

$$C = c / c_0, \quad C S = c S / c_0, \quad Q = q / q_0$$

したがって、基礎式の (1), (2) 式は次のように表される。

$$\partial C / \partial Z + \partial Q / \partial T = 0 \quad (4)$$

$$\partial Q / \partial T = C - CS \quad (5)$$

### 5.2.3 基礎式の差分化

基礎式を差分化し、数値解析を行った。以下にその手順を示す。まず(4)式を差分すると、(6)式を得る。

$$Q_n = \Delta T / 2 \times (C_n - CS_n) + \Delta T / 2 \times (CPAST_n - CSPAST_n) + QPAST_n \quad (6)$$

また、(5)式を差分すると(7)式になる。

$$C_n = \Delta Z / (\Delta Z + 2) \times (CSPAST_n + CSPAST_{n-1}) + (2 - \Delta Z) / (\Delta Z + 2) \times CPAST_{n-1} \quad (7)$$

ここで、 $T + \Delta T$ 時間にすると、(8)式のようになる。

$$CPAST_n = \Delta Z / (\Delta Z + 2) \times (CS_n + CS_{n-1}) + (2 - \Delta Z) / (\Delta Z + 2) \times C_{n-1} \quad (8)$$

ここで、(8)式を(6)式に代入して、整理すれば(9)式を得る。

$$\begin{aligned} & \times (\Delta Z / (\Delta Z + 2) \times CS_{n-1} + (2 - \Delta Z) / (\Delta Z + 2) \\ & \times C_{n-1} + CPAST_n - CSPAST_n) + QPAST_n \quad (9) \end{aligned}$$

(9) 式中のQとCS以外は既知の値かあるいは初期の設定値である。本式の解析には(3)式と(9)式を用いて収束するまで反復計算を行って、解を求めた。

なお、本章で用いた除湿エレメントはコルゲート状に加工されたものであり、本法における解析モデルを図5-1に示す。TSAの場合、回転式のシステムを用いることが多いため、プログラムは固定式と回転式の両方を解析できるものとし、回転式の場合に数値解析を行うための分割を図5-2に示す。吸着および脱着時の数値解析の流れを図5-3に示す。

## 5.3 実験方法

### 5.3.1 除湿エレメントの水蒸気の吸着特性評価

除湿エレメントは、2種類の市販品（西部技研(株)製）を用意し比較検討を行った。一つは、シリカゲルを主体とした材料で、コルゲート状に成形された製品名U-SSCR（以下エレメントSと略す）で、もう一つはゼオライトを主体した材料で、同様にコルゲート状に成形された製品名SZTCR（以下エレメントZと略す）である。なお、各除湿エレメントのコルゲートの寸法と密度を表5-1に示し、かつ、その高さ、厚み、幅に関するモデルを表中に示した。

各除湿エレメントの除湿特性を把握するために、水蒸気の吸着等温線を日本ベル(株)製の吸着装置BELSORP18を用いて25℃で測定した。なお、除湿エレメントを約0.2g切り出し、試料ガラス管内に投入して、真空脱気しながら150℃で5時間前処理したものを出発試料とした。

### 5.3.2 除湿エレメントの総括移動係数の算出

水蒸気の総括移動係数を測定するために、図5-4に示す通風カラム装置を作製し、この中に除湿エレメントを直径100mm、厚さ10mmの大きさに切り出したものを設置し、25℃、湿度65%RHに調整した空気を送風機により51m<sup>3</sup>/hの風量で通風させ、重量の

経時変化を測定した。なお、測定装置全体の重量が平衡状態になるまで電子天秤で測定し、下式から総括移動係数  $KFAV$  を算出した。

$$\gamma(dq/dt) = KFAV(c - cS) \quad (10)$$

$$\beta = q/cS \quad (11)$$

(10), (11) 式より,

$$\ln(\beta c - q) = -(1/\beta \gamma) KFAV \cdot t + \ln(\beta c) \quad (12)$$

ここで  $\beta$  は、除湿する空気の湿度  $c=65\%RH$  における吸着量  $q$  を実測の吸着等温線から求めて算出した。エレメント S および Z について求めた  $\beta$  の値は、それぞれ 13.8, 8.7 ( $m^3/kg$ )であった。

(12) 式は横軸に経過時間  $t(sec)$  をとり、縦軸に  $\ln(\beta c - q)$  をとってプロットすれば、直線関係となり、その傾きから総括移動係数  $KFAV$  が算出できることを示している。エレメント S を用いた場合の重量変化の測定結果を図 5-5 に示す。図のデータには多少のバラツキが生じているが、これはファンによる振動が原因と考えられる。図中の曲線は最小二乗法で求めた吸着量と時間の関係である。図 5-6 はこの曲線を基に、吸着量  $q$  を  $\beta c - q$  に変換し、その時間変化を調べたものである。図 5-5 においては良い直線性を示しており、(12) 式が成立していることを支持している。なお、(10) 式は厚み方向を考慮しないときに成り立つ式である。流入した空気の厚み方向における湿度変化を少なくするために、流れ方向の厚みをできるだけ薄くした方が  $KFAV$  をより正確に算出できるが、重量変化を測定するためある程度の厚みが必要であるので、本章では 10mm の厚みとした。エレメント Z についての図示は省略するが、エレメント S および Z について求めた  $KFAV$  の値は、それぞれ 66.7 および 28.7(1/s)であった。



### 5.3.3 吸着・再生実験

#### (1)吸着実験

図5-4の測定装置に、直径100mm、厚み50mmの各除湿エレメントを設置して25℃、65%RHに設定した恒温恒湿室内で、風量51m<sup>3</sup>/hにおける重量変化を2分間測定した。なお、吸着時間および再生時間については、実際の回転式で使用されている時間に近く、しかも数値解析結果と照合しやすくするために2分間の測定とした。

#### (2)再生実験

上記(1)の吸着試験直後の測定装置全体を70℃、7%RHに設定した恒温恒湿槽内へ速やかに移動させ、吸着時と同様の風量51m<sup>3</sup>/hの条件下における重量変化を測定した。なお、ここでは低熱量での再生を意識して再生温度を70℃とした。電子天秤は70℃では使用できないため、電子天秤を恒温恒湿槽の外に設置した状態で、測定装置全体の重量を測定できる架台を作製することで、重量変化を測定できるようにした。

#### (3)吸着・再生繰り返し実験

測定装置を上記(1)、(2)の条件、即ち25℃、65%RHおよび70℃、7%RHに調整した恒温恒湿槽内に交互に設置して空気を通すことで除湿エレメントの吸着・再生を繰り返した。

## 5.4 結果および考察

除湿エレメントの除湿性能を評価する場合、通常回転式の実験装置を用いて行われることが多い。これは平衡に達した除湿空気、再生空気全体の温湿度あるいは露点温度を正確に測定することで、除湿性能を正確に測定するためである。しかし、数値解析の結果と照合させるためには、除湿エレメントの各部分における吹き出し側の湿度変化を測定することが必要であり、現時点の湿度センサーの仕様で刻々と変化する湿度を測定することは極めて困難であった。そこで、本実験では固定式で吸着・再生を交互に行い、その除湿エレメントの重量変化を測定することで、数値解析結果との整合性を検討する

こととした。

なお、今回開発した数値解析ソフトは固定式と回転式を選択でき、回転式の場合には除湿エレメントの直径、厚み、処理と再生の面積比および回転数を設定することで、同様の計算が可能である。

#### 5.4.1 吸着・再生繰り返し時の重量変化および数値解析結果

エレメント S および Z の吸着・再生を繰り返した時の重量変化と数値解析による結果を、それぞれ図 5-7 と図 5-8 に示す。これらの結果は、吸着・再生を 6 回程度繰り返し、除湿量がほぼ安定したところでの値を実測値としてプロットしたものである。数値解析の結果では、計算開始後 3~4 回でほぼサイクルが安定するという違いはあったが、安定した状態のサイクルの曲線形状（時間毎の重量）、およびサイクルの高さ（1 サイクルの除湿量）は、ほぼ数値解析計算結果と合致した。この実測値と計算値の差は、エレメント S が 8%、エレメント Z が 18% であり、数値解析の妥当性が確認されたものと判断できる。

なお、実測においては、エレメントの厚み方向の微小部分における重量変化を知ることとはできないため、エレメント全体の重量変化を測定し、図 5-2 に示したようにエレメントの厚み方向でモデル的に均等に分割し、その分割された  $\Delta z$  毎に重量変化を求めて、その合計をエレメントの重量として数値解析を行った。

#### 5.4.2 除湿エレメントの吸脱着特性と除湿性能評価

上述したエレメント S および Z の吸着・再生のサイクル実験結果を示した図 5-7 および図 5-8 において、吸着時の吸着量と再生時のそれとの差が除湿量に相当し、その差が大きいほど（単位サイクル当たり）除湿量が大きいことを意味している。除湿量は、温湿度、風量、サイクル数などのシステム上のパラメータによって変わるため、条件によっては除湿性能が逆転することもある。従って、今回の実験結果だけでは材料の優劣を一義的に決めることができないが、単位サイクル当たりの除湿量から判断して、エレ

メント Z よりエレメント S の方が高い除湿性能を示すことが判明した。このことは、後述する水の吸着等温線の型に深く関係するものと考えられる。

図 5-9 に、エレメント S および Z の 25℃における水蒸気の吸脱着等温線を示す。なお、エレメント S の水蒸気の吸脱着等温線は第 3 章においても測定したが、本章の遂行にあたり、エレメント Z とともに再度測定し直した。性能評価における条件は、吸着時の湿度が 65%RH であり、再生時の湿度が 7%RH であるので、その差が最大除湿量となることを意味する。

一般に、シリカゲルの再生温度は 150~180℃が適切な温度と言われており、ゼオライトはそれより高く 200~350℃と言われている<sup>8)</sup>。ゼオライトを用いれば低露点空気が得られることが知られているが、図 5-9 の水蒸気の吸脱着等温線でも分かるように、低湿部で急激な立ち上がりを示していることからこのことが理解される。しかし反面脱着は容易ではなく再生空気の湿度を極端に低湿度にしないと十分な除湿量を得ることができないことが欠点となる。

一方シリカゲルの脱着は、ゼオライトに比べて比較的容易であることが分かる。また、等温線は直線型であり上述の設定条件における吸脱着時の落差は、ゼオライトに比べてはるかに大きく最大除湿量も大きい。なお、本章では低熱量での再生という意味で 70℃を選択した。図 5-9 に示す水の吸脱着等温線は 25℃のものであり、70℃では測定していないが、児玉らの実験<sup>9)</sup> や第 2 章で記述したように、相対湿度と吸着量の関係である水蒸気の吸着等温線の形がほぼ変わらないものとされている。したがって、シリカゲル主体のエレメント S の方が有利であることは十分に予想され、この意味において図 5-7 と図 5-8 の結果は妥当なものと考えられる。いずれにしても、図 5-7 および図 5-8 の実測と数値解析の比較から明らかなように、開発した数値解析より材料の特性を基にしたシステムの除湿性能を評価できることが確認された。

### 5.4.3 回転型除湿装置への適用結果

第3章において、回転式で測定したエレメント S の除湿性能と今回開発した数値解析の結果を図 5-10 および図 5-11 に示した。図 5-10 は、エレメント厚みが 150mm、面積比 3:1、回転数が 5rph 時の風速と除湿性能との関係であり、図 5-11 は、同条件で、回転数が 10rph の場合の関係を示したものである。ほぼ実測値と計算結果とが合致しており、回転式に対してもシミュレーションが良好な結果を示すことが確認できる。但し、図 5-10 および図 5-11 とも、実測値が低い値を示す傾向があり、風速が高いほどその差がおおきくなっている。また、回転数が高いほど実測値との差がやや大きくなっている。これは、風速および回転数が高いほど、再生された空気が処理出口へ逆流する割合が大きくなるためと考えている。

### 5.4.4 デシカント空調システムへの応用

除湿エレメントの除湿性能を予測するソフトから、さらにデシカント空調機の冷房能力などを予測するプログラムを開発した。このプログラムのメインモニターを図 5-12 に示す。システムの構成を任意に選択することができ、除湿エレメントの直径、厚み、面積比や処理および再生の空気条件などを入力し、プログラムで計算させると、システムの各部の温湿度が計算結果として出力され、室内への供給空気の温度から冷房能力も計算結果として得ることができる。但し、加湿器による湿度、潜熱・全熱交換器の効率については一定として計算している。このプログラムによって、システムの構成の違いによる冷房能力差、設定した冷房能力を得るために必要な除湿エレメントの直径、厚みおよび風量などを計算で求めることができるため、デシカント空調システムの設計を行うための概略の仕様を得ることができる。図 5-13 に示したデシカント空調機の構成において、除湿エレメントはエレメント S を用い、処理と再生の風量が同一であり、面積比が 1:1 の時で、冷房能力 1kW を得る場合の計算で求めた風量と除湿エレメントの直径、厚さと再生熱量との関係を図 5-14 示す。このグラフより、例えば、再生熱量を 2kW、除湿エレメントの厚みを 300mm、顕熱交換率 75%として、必要な除湿エレメントの直

径および風量を求める場合には、必要入力 2kW の線と顕熱交換率 75% の線との交点を求め、その交点から上方にロータ厚み 300mm で顕熱交換率 75% の曲線との交点を求めれば、その交点の左の軸にあるロータの直径 1480mm が求まる。また、前記の顕熱交換率 75% との交点から下の軸から風量  $320\text{m}^3/\text{h}$  が求まる。同様に顕熱交換率 85% の場合は、ロータ厚み 300mm で顕熱交換率 85% の曲線から求めることができる。このプログラムには、装置に関わる特性である例えば空気の漏れ量などを考慮しておらず、また、顕熱交換率などを一定として計算しているために実際の装置を製作し、性能などを測定した時は若干計算値とは異なることが予想されるが、大まかな仕様を得るためには極めて有効なツールとなるものと結論される。

## 5.5 結 論

本章では、熱スイング吸着（Thermal Swing Adsorption, TSA）による除湿エレクトの除湿性能を予測する数値解析方法を開発し、実測値との整合性の検討を行った。その結果、除湿エレメント（シリカゲル主体、ゼオライト主体）を用いた除湿性能実験とシミュレーションによる吸着量の時間変化、並びに除湿性能はよい一致を示すことが確認された。また固定式のみならず、回転式実験装置でも良い一致を示すことが認められた。除湿エレメントの除湿性能を評価する場合、多大な実験で最適回転数などを求めた上で除湿能力を評価する必要があったが、この数値解析を用いることで除湿エレメントの吸着特性から除湿性能を予測でき、デシカント空調機器および除湿機に最適な除湿エレメントの選定やシステムとしてのパラメータを決定することができる。

また、この数値解析を利用して、デシカント空調機の冷房能力や各構成部材における空気状態を計算できるプログラムも開発した。このプログラムによって、デシカント空調機の概略の仕様まで計算で得ることができることが確認されたことから、システム設計などを行うための実用上有効なツールになるものと結論された。

## 参考文献

- 1) A. Kodama, M. Goto, T. Hirose, T. Kuma: Journal of Chemical Engineering of Japan, 26[5], 530-535(1993).
- 2) A. Kodama, M. Goto, T. Hirose and T. Kuma; Journal of Chemical Engineering of Japan, 28[1], 19-24(1995).
- 3) 田中宏史, 白石啓一, 宮武修: 九州大学生産科学研究所報告, 80, 39-49(1986).
- 4) 田中宏史, 白石啓一, 宮武修: 日本伝熱シンポジウム講演論文集, 373-375(1986).
- 5) 川井利長編: 圧カスイング吸着技術集成, 工業技術会, (1986) .
- 6) 化学工学会編: 化学工学便覧, 丸善株式会社, (1999) .
- 7) 末高透: 臭気の研究, 25 [6], 383-388(1994).
- 8) 山田興一, 浜野誠一: 化学装置, 8, 34-39(1982).
- 9) A. Kodama, M. Goto, T. Hirose and T. Kuma; J.Solar Energy Engineering, 120, 45-50(1998).

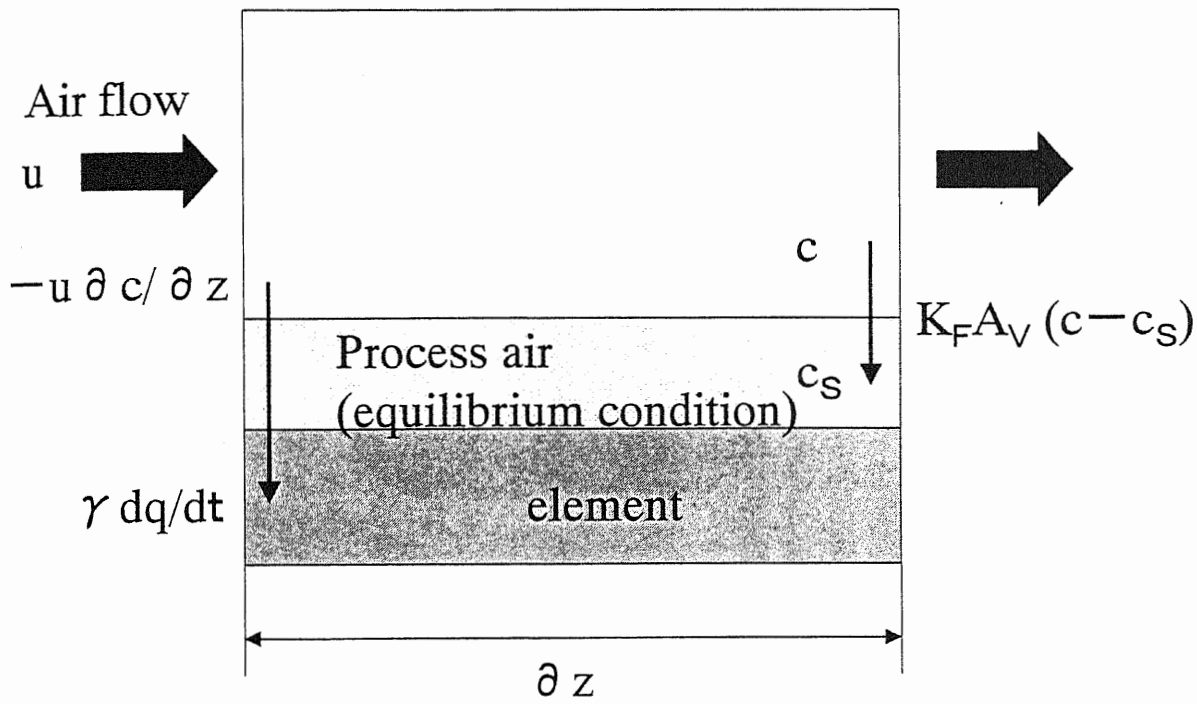


Fig.5-1 Numerical simulation model.



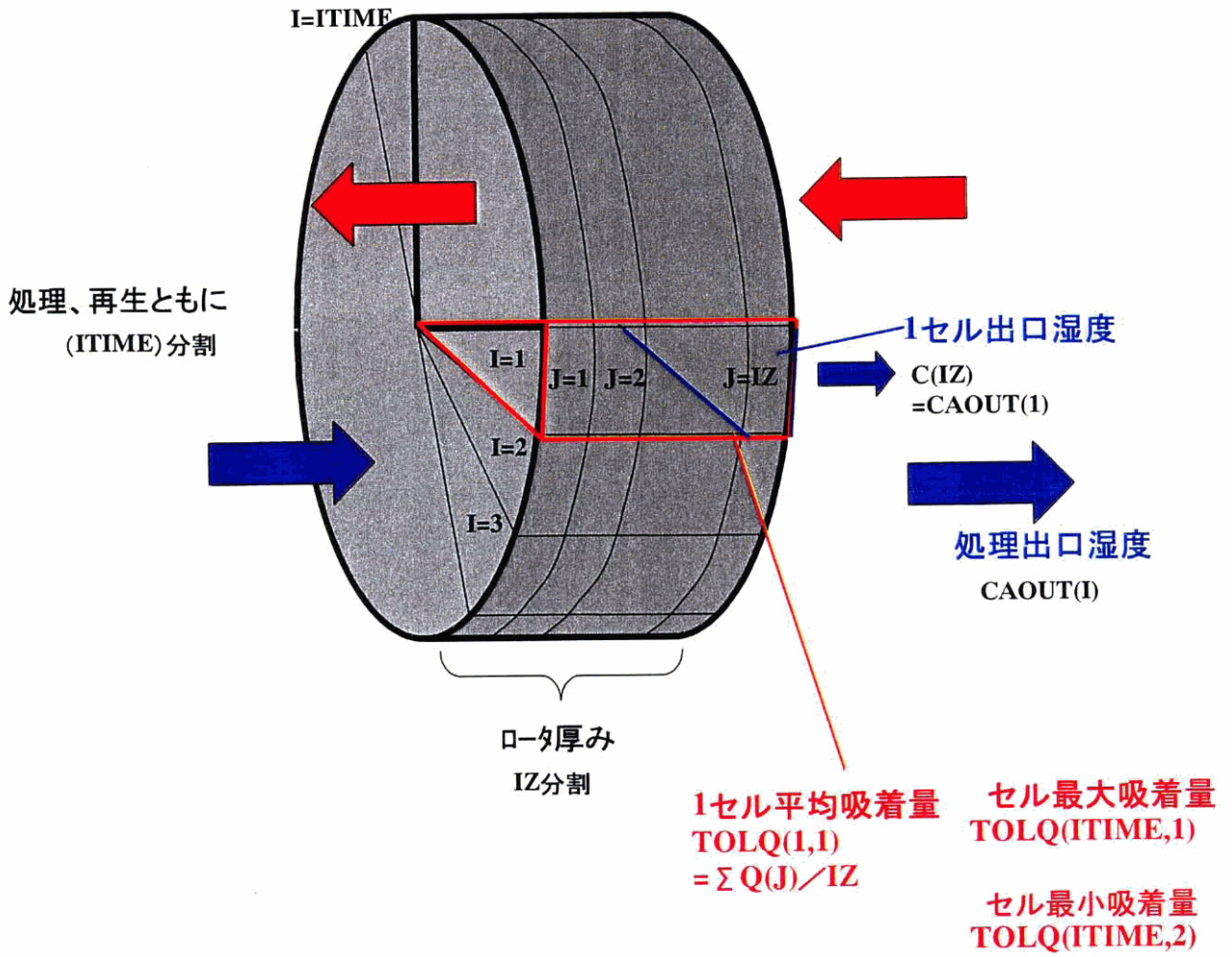


Fig.5-2 Division of numerical simulation.

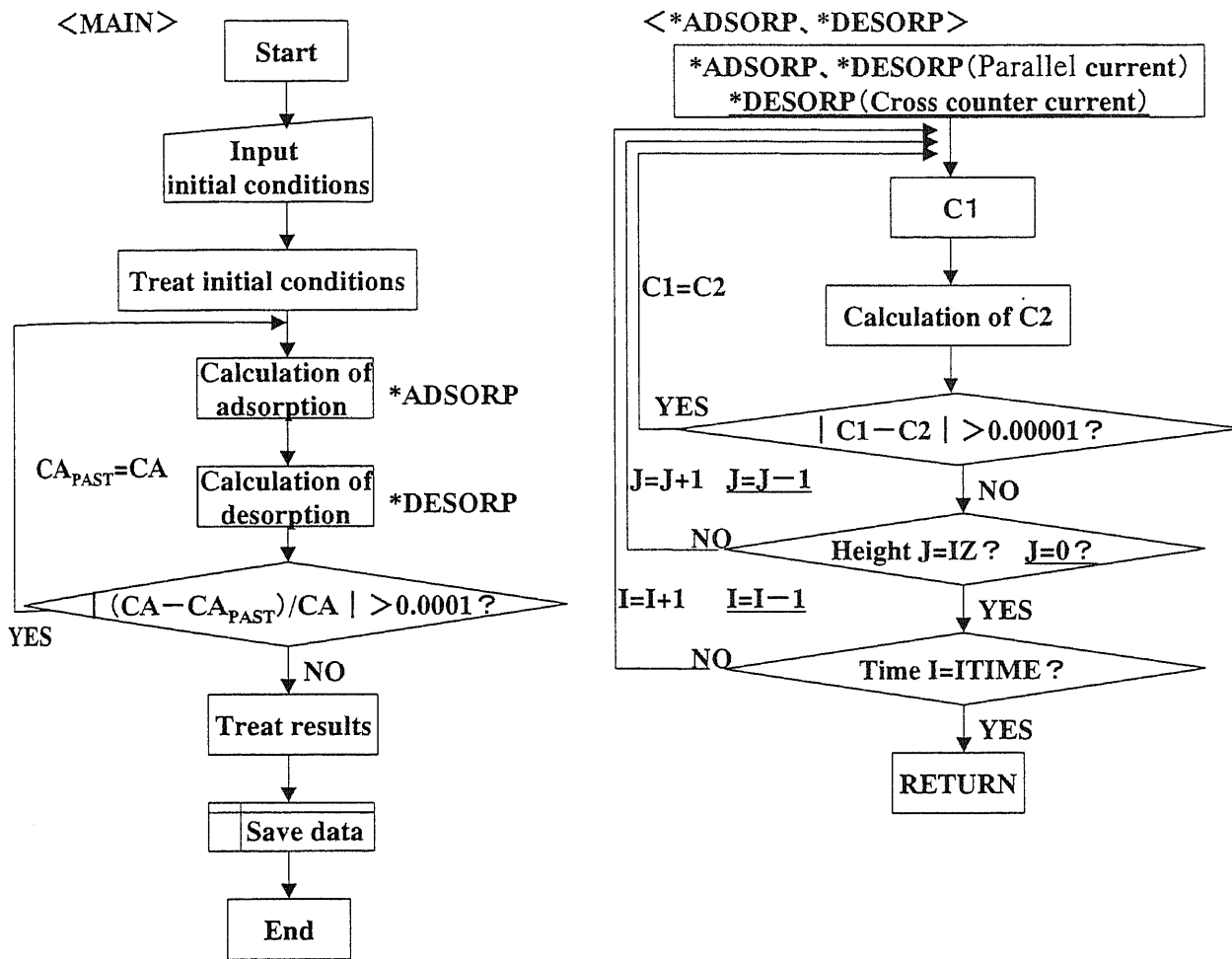
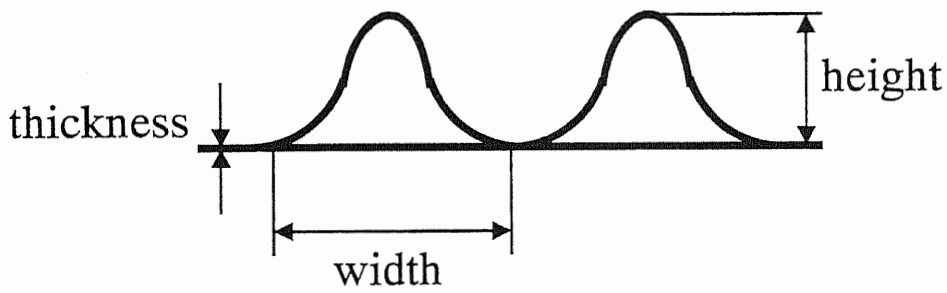


Fig.5-3 Flow chart of Numerical simulation.

Table 5-1 Specification of elements S and Z.

	height (mm)	width (mm)	thickness (mm)	density (g/cm <sup>3</sup> )
element S	1.8	3.4	0.19	0.21
element Z	1.8	3.4	0.19	0.30



Schematic drawing of element structure

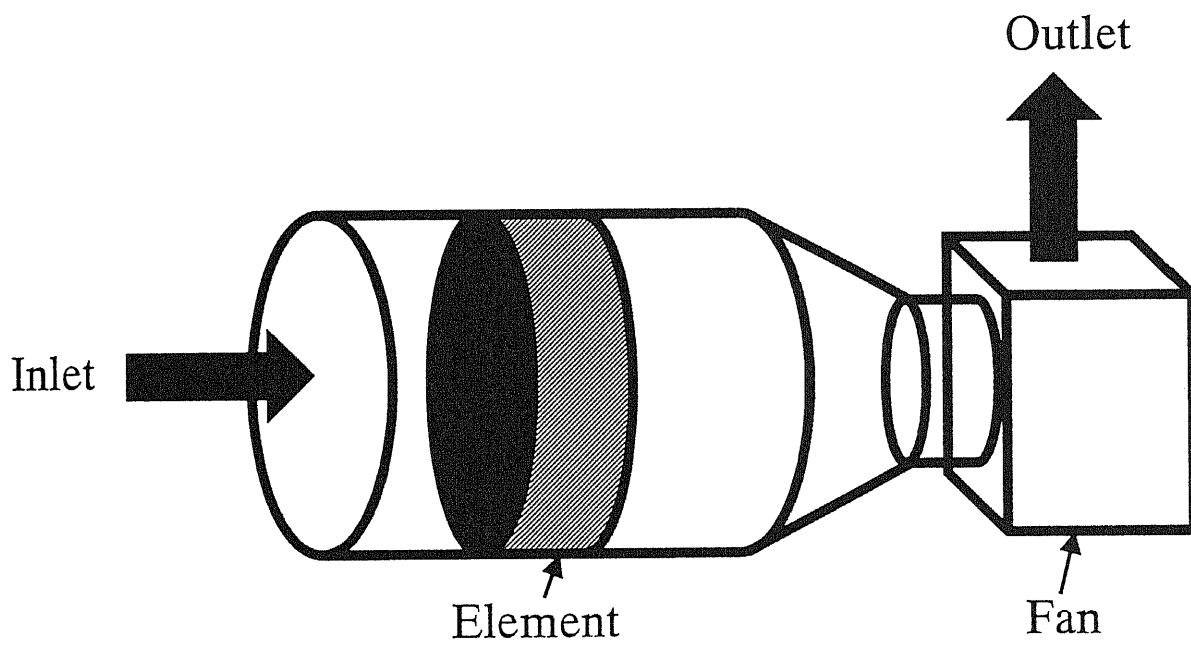


Fig.5-4 Illustration of experimental apparatus for measurement of weight change of elements.

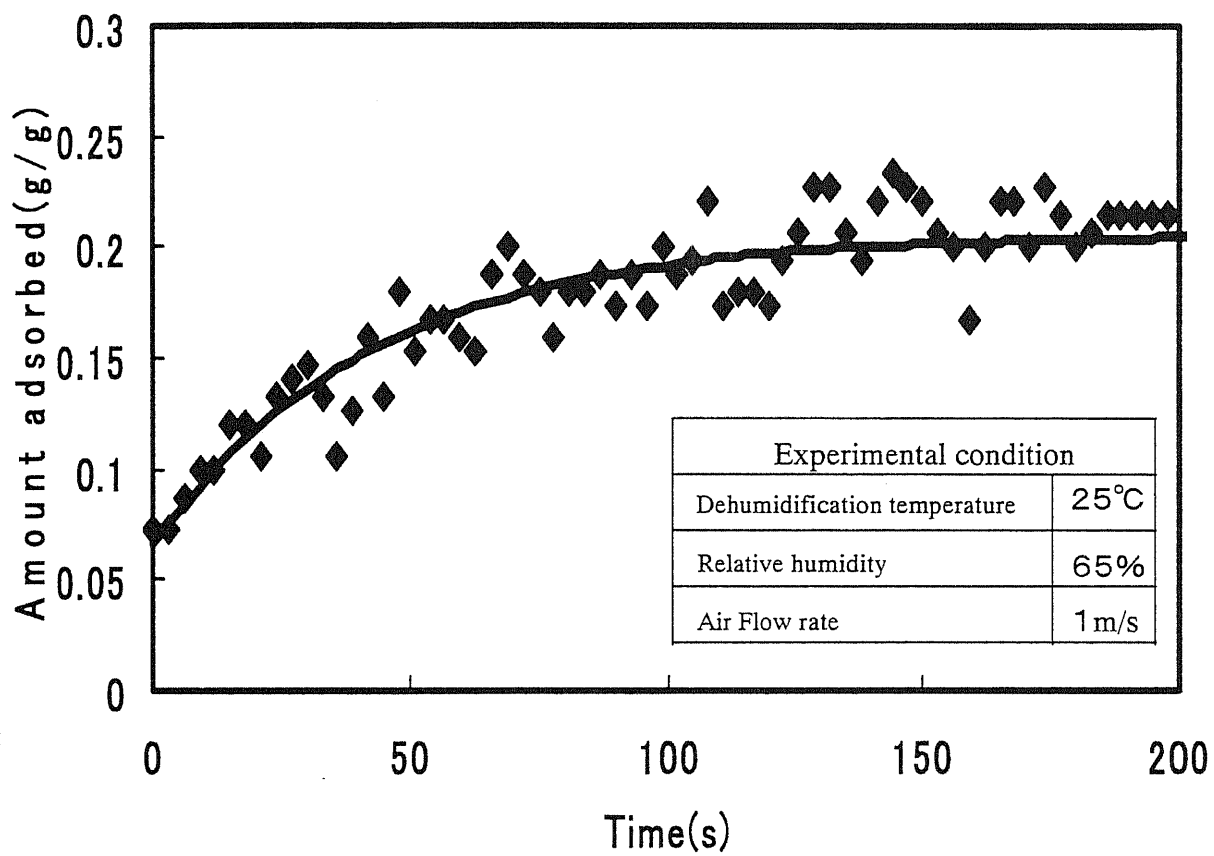


Fig.5-5 Time dependence of amount adsorbed by element S.

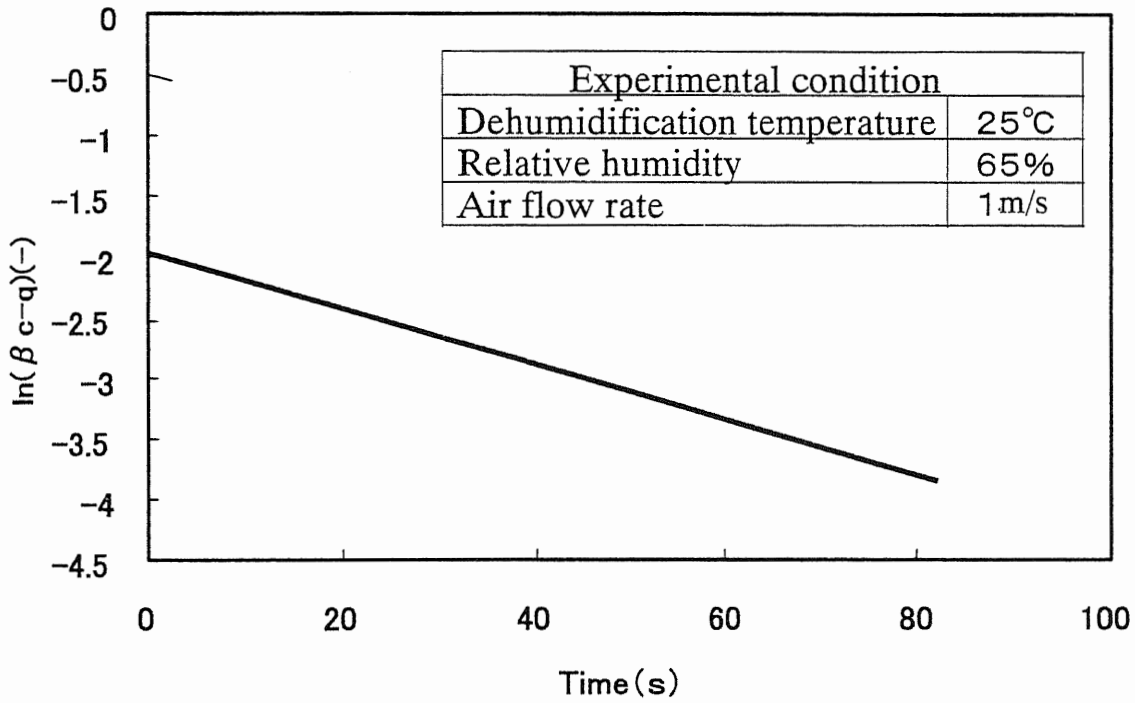


Fig.5-6 Relationship between  $\ln(\beta c-q)$  and adsorption time.

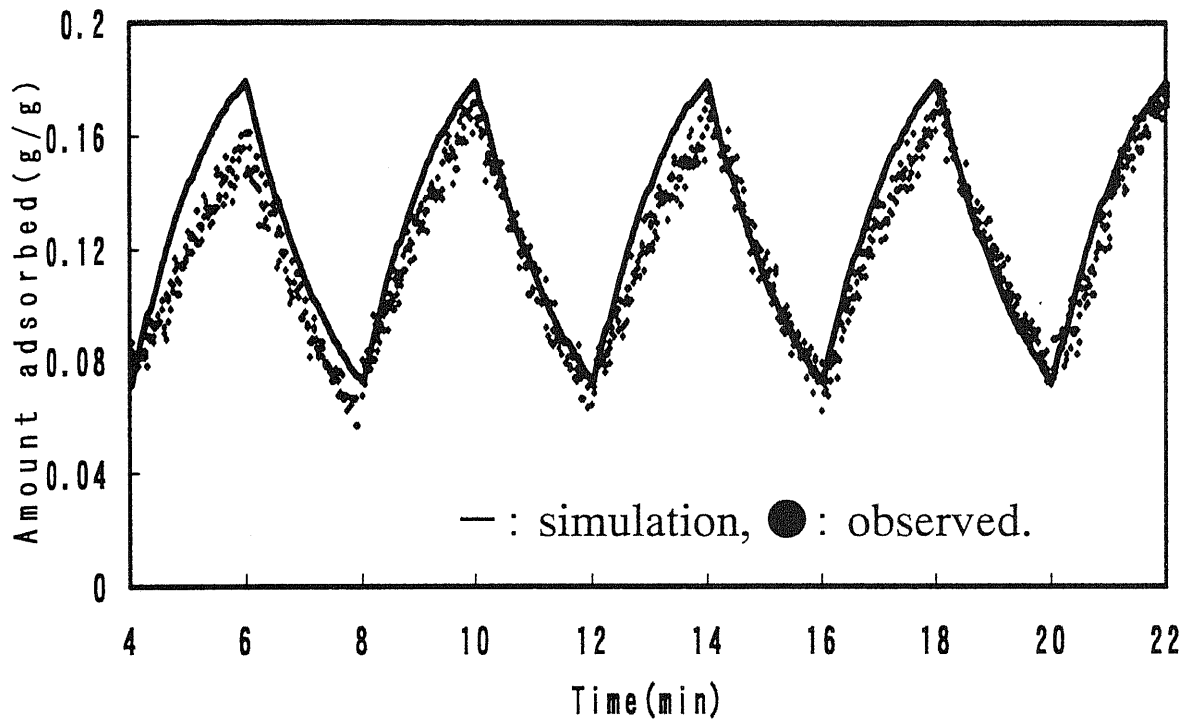


Fig.5-7 Comparison of weight changes of element S with simulation.

Experimental condition	
Dehumidification temperature	25°C
Relative humidity	65%
Regeneration temperature	70°C
Air flow rate	1 m/s

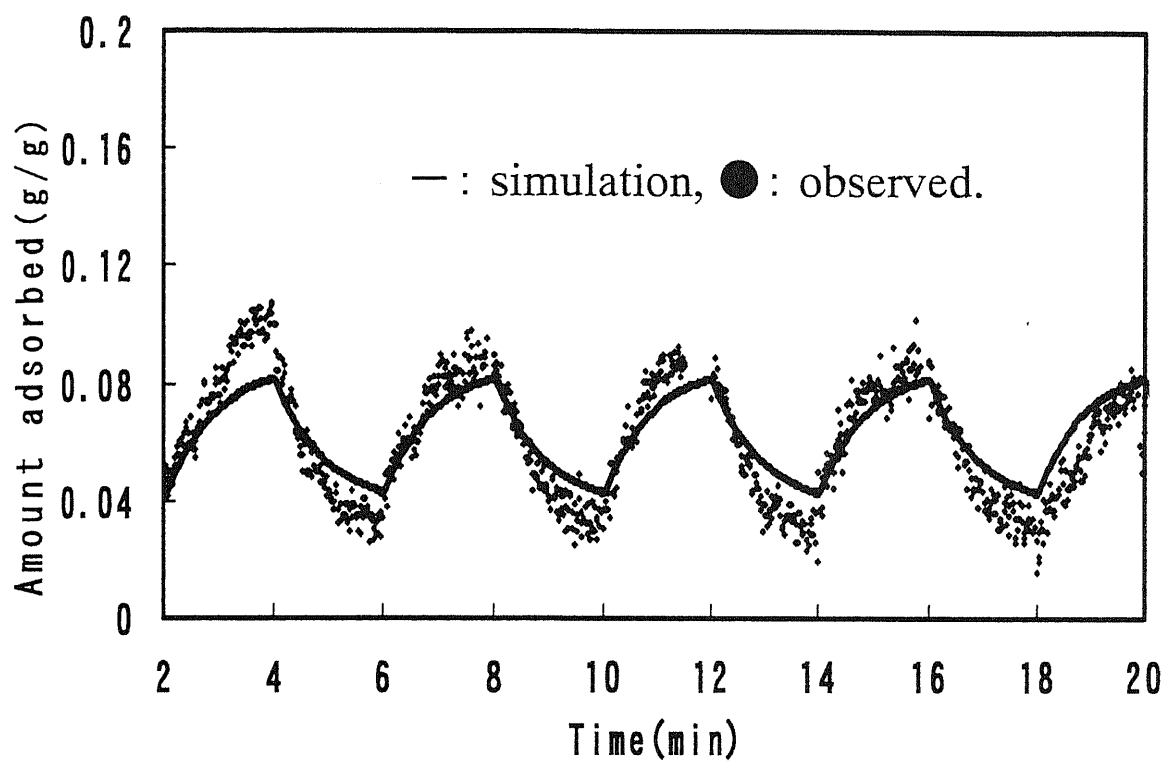


Fig.5-8 Comparison of weight changes of element Z with simulation.

Experimental condition	
Dehumidification temperature	25°C
Relative humidity	65%
Regeneration temperature	70°C
Air flow rate	1 m/s



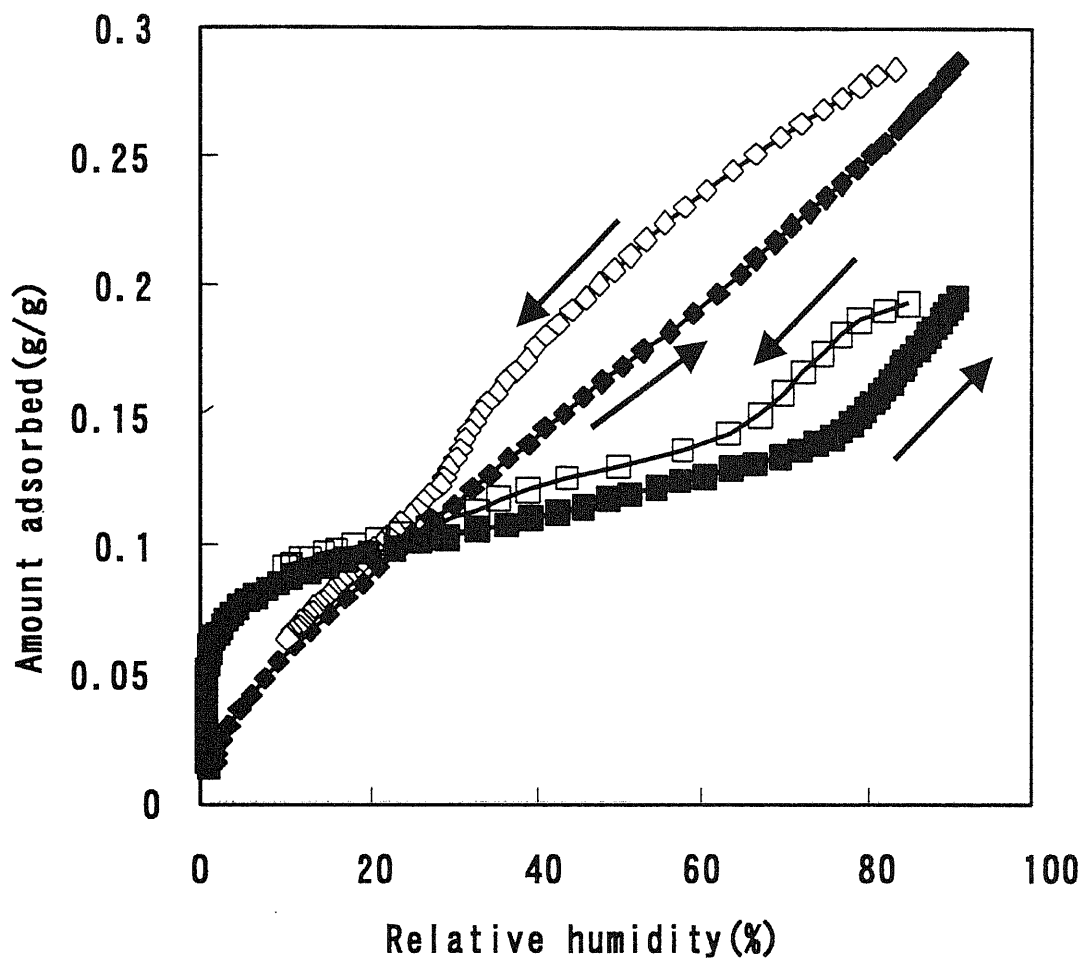


Fig.5-9 Water vapor adsorption-desorption isotherms on elements S and Z at 25°C.

◆ : Adsorption(element S), ◇ : Desorption(element S),  
 ■ : Adsorption(element Z), □ : Desorption(element Z).

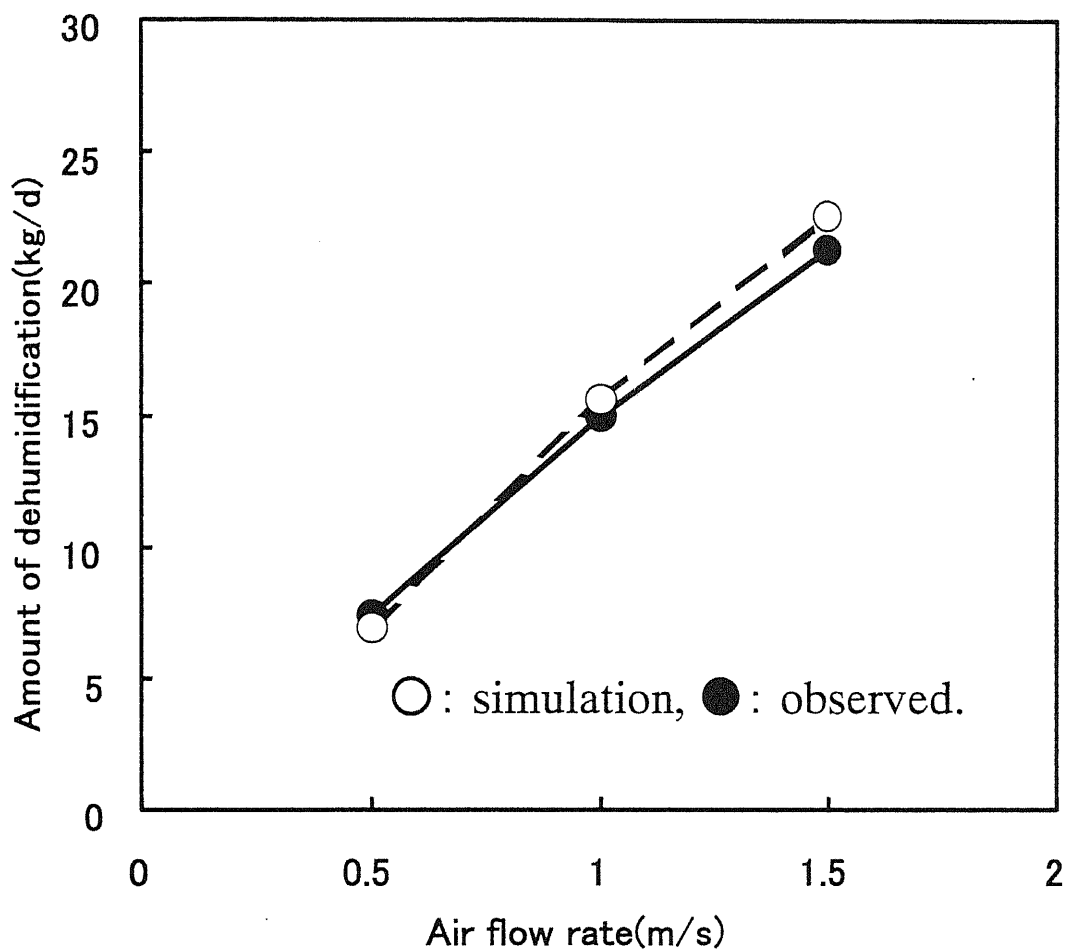


Fig.5-10 Comparison of the amount of dehumidification by simulation with the observed ones on element S at rotation speed of 5rph in rotor system.

Experimental condition	
Dehumidification temperature	27°C
Relative humidity	60%
Regeneration temperature	70°C
Size of element	Φ300 × 150mm
Ratio(process:regeneration)	3:1
Rotation speed	5rph

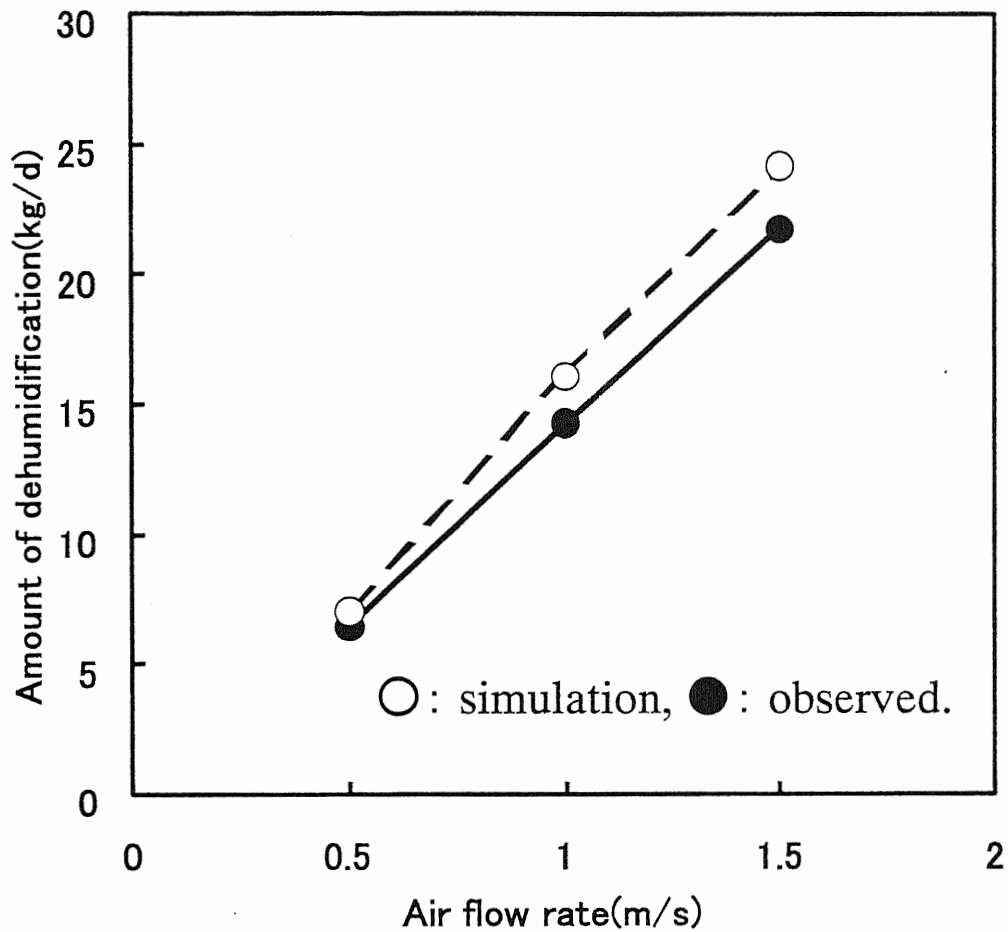


Fig.5-11 Comparison of the amount of dehumidification by simulation with the observed ones on element S at rotation speed of 10rph in rotor system.

Experimental condition	
Dehumidification temperature	27°C
Relative humidity	60%
Regeneration temperature	70°C
Size of element	Φ 300 × 150mm
Ratio(process:regeneration)	3:1
Rotation speed	10rph



Fig.5-12 Main monitor of simulation program for design of desiccant air conditioner.

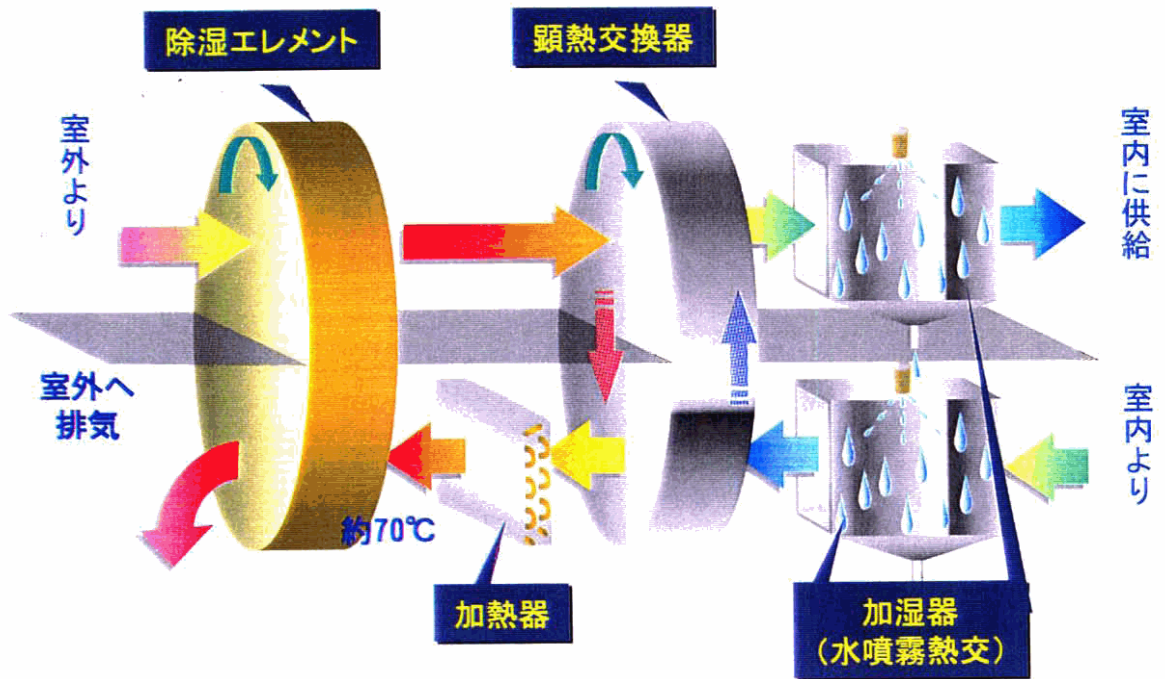


Fig.5-13 Schematic diagram of structure desiccant system.

### 入力から、風量及びロータ径を算出する場合

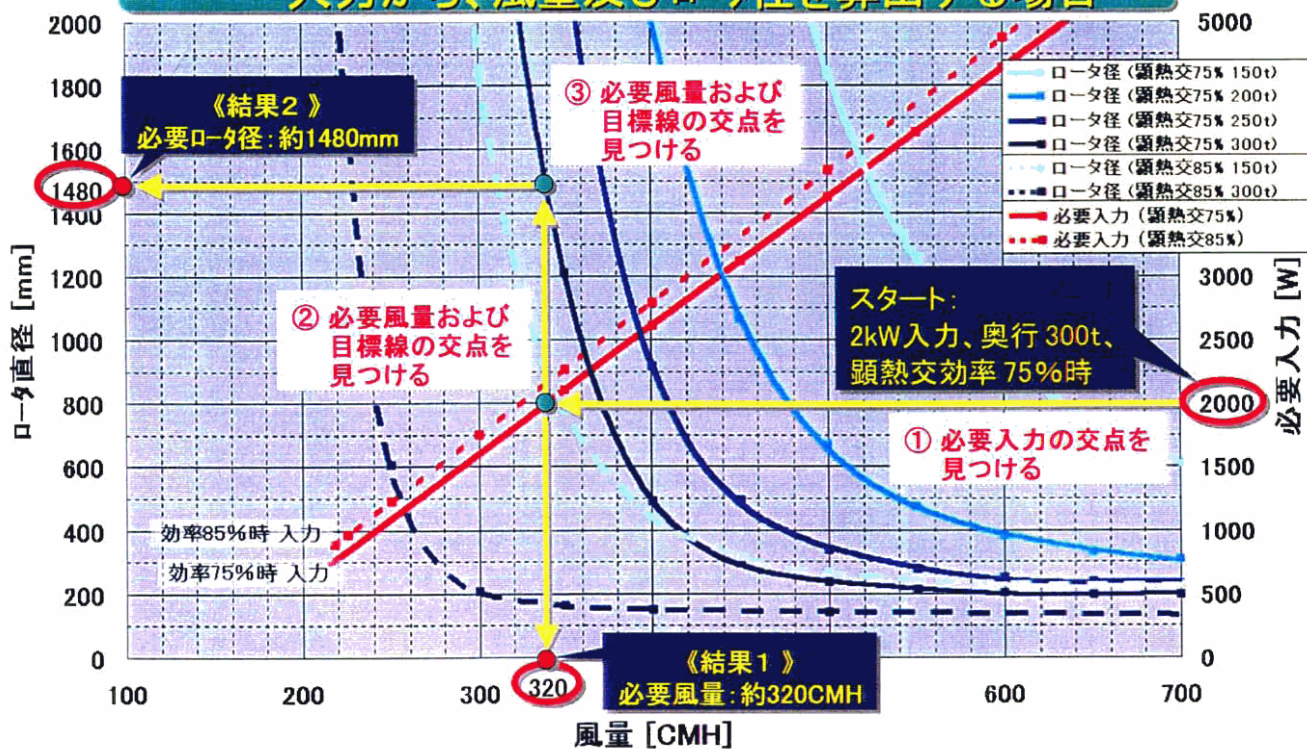


Fig.5-14 Relation air flow rate and diameter of desiccant element for power supply of regeneration.

## 第6章 デシカント除湿機の実用化とその性能評価

### 6.1 緒 言

わが国は、高温多湿の気候であり、特に梅雨の時期は不快であるばかりか、湿気によるカビの増殖や各種工業製品や食品などの保存時に湿ったり、結露による被害などの問題が生じている。除湿装置としては、電子機器や医薬品などの製造工程、低温保管倉庫・美術館などの空調用途から一般の家庭用など各種販売されている。特に第1章で詳細を述べたように家庭用除湿機は室内の除湿だけでなく、衣類の乾燥目的にも使用されている。家庭用除湿機は、冷媒を用いた冷凍サイクル式が主流であったが、最近の環境問題に起因して、フロンを使用しない新しいタイプであるデシカント方式（吸着式）の除湿機も販売され、急速に普及されだしている<sup>1-3)</sup>。

第2章から第5章において、主にデシカント空調機における低温再生でかつ高除湿性能を得るために、除湿エレメントの吸着剤の吸着特性やシステム化における各種パラメータと除湿性能の関係を評価した。また、除湿エレメントの実用化を目指した調製方法を検討し、除湿エレメントの吸着特性からデシカント空調機の除湿性能および冷房能力まで予測するシミュレーションプログラムを開発した。

しかし、デシカント除湿機における除湿エレメントは、除湿エレメントの再生時に放出された水分を室内空気中で冷却、凝縮することで除湿を行うために、できるだけ高温で除湿エレメントを再生する必要がある。したがって、デシカント除湿機の除湿エレメントは、高温であっても低熱量で高い除湿性能を得ることが要望されている。第2章では各種吸着剤について、および第3章では除湿エレメントについてその吸着特性を評価した。その結果、低温再生時にはシリカゲルが、高温再生時にはゼオライトを吸着剤とした除湿エレメントがより低熱量で高除湿性能を得ることを見出した。また、除湿エレメントの処理と再生の面積比において、できるだけ再生の面積を小さくすることによって低熱量で高い除湿性能を得ることを見出した。

本章においては、第2章から第5章までの結果を踏まえて、低熱量でかつ高除湿性能のデシカント除湿機の実用化に関する検討を行った。

## 6.2 デシカント除湿機の構造と除湿原理

デシカント方式は、空気中の水分を除湿エレメントの吸着剤に吸着させ、この除湿エレメントをヒーターなどで加熱することにより吸着した水分を放出させ、脱着した水分を加熱により高温高湿になった再生後の空気を室内空気で冷却して結露させることにより、ドレインとして回収することで除湿を行う方式である。

本章で用いたデシカント除湿機の基本構造を図6-1に示す。除湿エレメントは、処理ゾーンと再生ゾーンに仕切られており、ファンによって室内の湿った空気を処理ゾーンへ送風し、除湿エレメントに空気中の水分を吸着させた後、乾燥空気として室内に供給する。再生ファンによってヒーターで加熱された高温の空気を再生ゾーンへ供給し、吸着した水分を脱着させて除湿エレメントを再生する。除湿エレメントは、駆動モーターによって一定速度で回転しており、除湿エレメントのうち再生された部分は、回転移動することにより処理ゾーンへ送られるために、処理ゾーンでは連続的に水分の吸着が行われる。再生ゾーンにおいて、除湿エレメントから脱着した水分を含んだ空気は熱交換器内のパイプ中に送風され、熱交換器外面に送風される室内空気によって冷却されて結露する。結露した水分は、その自重によりタンクに滴下する構造になっている。このタンクに貯留した1時間当たりの結露水の量が除湿機の除湿性能の指標になる。

図6-2は、デシカント方式において除湿を行う場合の空気の状態変化を湿り空気線図上に概念的に示したものである。実線の矢印はファンにより送風された処理空気の状態変化を示し、破線の矢印は再生ファンにより送風された再生空気の状態変化を示している。室内空気と同じ状態である①の状態の処理空気は、熱交換器において内部を流れる再生空気を冷却する際に顕熱を奪って②の状態となり、除湿エレメントの処理ゾーンにおいて水分が失われて湿度が低下するとともに吸着熱や再生ゾーンで加熱された除湿エ



メントの余熱により温度が上昇して、③の状態となって室内に供給される。一方、閉回路内の再生空気は、再生ヒーターの入り口である④の状態からヒーターで加熱されることで再生温度である⑤の状態になり、再生ゾーンにおいて除湿エレメントから放出される水分が加わり、また気化熱で温度が低下して⑥の状態となって熱交換器内部に供給される。熱交換器では①の処理空気との熱交換が行われ、再生空気は露点温度以下に冷却されて④の状態に戻って循環する。この冷却過程で凝縮した水分が熱交換器パイプ内面に結露し、下方のタンクに貯留される。したがって、デシカント除湿機の除湿性能は、除湿エレメントだけでなく、熱交換器の性能にも依存するため、本章では、デシカント除湿機に使用する熱交換器の性能評価も合わせて行った。

## 6.3 実 験

### 6.3.1 除湿エレメント

除湿エレメントの外観図を図 6-3 に示す。ギアモーターで回転させるために、除湿エレメントの外周にはギアベルトが設けられている。本章では、吸着剤がゼオライト（13X型）であるニチアス製の除湿エレメント（GX7）を用いた。除湿エレメントの大きさは、直径 180mm、厚さ 20mm である。また、再生面積が小さいほど除湿性能が高かったため、処理と再生の面積比は 5:1 とした。この除湿エレメントの物性値は、第 3 章に記載しているので省略する。

### 6.3.2 熱交換器

熱交換器は、プロピレン製の「ターンなし」タイプ、「1ターン」タイプおよび「3ターン」タイプの 3 種類を試作した。その 3 種類の熱交換器に対して、簡易熱流体シミュレーションを用い、内部流れの可視化と、熱交換効率、通風抵抗の簡易評価を行った。その結果を図 6-4 に示す。ターンなしの熱交換効率と通気抵抗をそれぞれ 100% として、他のモデルを相対値で示す。ターン数が増えるに従い、内部流速が増加して熱交換効率

は向上するが、通風抵抗も増加する傾向となった。また、内部流速を上げることにより、内部流れがより均一になることも確認できた。このシミュレーション結果より「3ターン」タイプは通風抵抗が過大となり、必要な再生風量の確保は困難であることが推測できたので、通風抵抗が比較的小さく、且つ、熱交換効率が比較的良好な「1ターン」タイプを選定した。

### 6.3.3 除湿性能評価

本章で用いたデシカント除湿機を図 6-5 に示す。図 6-5(a)は、「1ターン」タイプの熱交換器を取り付けた部分であり、図示はしていないが、その後方に除湿エレメントが設置させている。図 6-5(b)の状態、恒温恒湿室内に設置した。

予備実験では、処理風量が  $1.9 \text{ m}^3/\text{min}$  で、 $525 \text{ W}$  の再生用ヒーターが最適条件であると判断された。 $27^\circ\text{C}$ 、 $65\% \text{ RH}$  の室内条件で除湿性能を測定し、除湿エレメントの最適回転数と再生風量を評価した。デシカント除湿機を除湿性能が安定するまで約 1 時間運転し、その後、1 時間毎にタンクに貯留した水の重量を測定し、計 3 時間の平均値から 1 日 (24 時間) 当たりの除湿量 ( $\text{kg-water}/\text{日}$ ) を算出し、除湿性能の指標とした。

### 6.3.4 除湿エレメントの耐熱性の評価

除湿エレメントの耐熱性を確認するために、除湿エレメントとその吸着剤である X 型ゼオライトについて、熱分析装置 (Seiko Instrument Inc. EXSTRA6000) を用いて示差熱重量分析 (TG/DTA) を行った。測定条件として、昇温速度は  $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 、温度範囲は室温から  $600^\circ\text{C}$  までとした。また、除湿エレメントの熱劣化の程度を調べるために、除湿エレメントを  $600^\circ\text{C}$  で 72 h 加熱した後、BET 表面積と除湿性能を測定して、熱処理前の値と比較した。なお、RD 型シリカゲルについても、参考のために熱劣化の試験を試みた。比表面積に関しては、BELSORP18 (Japan Bell Co., Ltd.) を用いて窒素の吸着等温線を測定して、BET 表面積を算出した。

## 6.4 結果および考察

### 6.4.1 除湿エレメントの最適回転数

処理風量は  $1.9\text{m}^3/\text{min}$  で、再生風量は  $0.3\text{m}^3/\text{min}$  とし、525Wの再生用ヒーターを用い、除湿エレメントの各回転数における除湿性能を測定した。なお、再生風量  $0.3\text{m}^3/\text{min}$  は、仮の条件として実験を行った。その結果を図 6-6 に示すが、約 0.5rpm が最も高い除湿性能を示していることから、この回転数が最適回転数と判断される。この最適値より速い場合、再生ゾーンで十分に再生されないために処理ゾーンでの水分吸着量が低下して、結果として除湿量が低下する。逆に回転数が遅い場合、再生ゾーンでは十分に再生されるが、処理ゾーンでは除湿エレメントが飽和吸着しており、吸着能力がないにも関わらず処理空気が送風されるために、除湿量が低下することを示している。本システムの条件下、即ち処理風量は  $1.9\text{m}^3/\text{min}$  で、再生風量は  $0.3\text{m}^3/\text{min}$  とし、525Wの再生用ヒーターを用いた条件下では、0.5rpm 時に吸着と再生のバランスが良く、最も高い除湿性能が得られることが分かった。

### 6.4.2 再生空気の最適風量

ヒーターによる再生熱量と除湿エレメントの面積が一定である場合、再生条件の主要因子である風速と再生温度は、再生風量によって決められることになる。つまり、再生風量を多くすると、風速は高くなるが再生温度が低下する。逆に再生風量を少なくすると、再生温度は高くなるが、風速は低下する。処理風量は  $1.9\text{m}^3/\text{min}$  で、除湿エレメントの回転数は 0.5rpm とし、525Wの再生用ヒーターを用いた条件下で、各再生風量における除湿性能を測定した。再生側の風路は閉回路であり、再生空気が循環するようになっているため、再生風量を直接測定することが困難であった。したがって、再生ファンの回転数を変えて、除湿性能を測定し、最終的には再生ファンの回転数から風量を算出した。再生ファンの回転数と除湿量の関係を図 6-7 に示す。再生ファンの回転数が約 2700rpm である時に除湿性能が最も高い値を示した。この回転数における再生風量は、

0.1 m<sup>3</sup>/min であった。

再生風量が 0.1 m<sup>3</sup>/min より少ない時は、再生温度は高くなるが、再生するための空気の供給量が不足し、除湿性能が低下する。再生風量が 0.1 m<sup>3</sup>/min より多い時は、再生温度が十分に高くなり、再生に必要な低湿度にならないため再生が不十分になる。即ち、結果として除湿性能が低下することを意味している。再生風量が 0.1 m<sup>3</sup>/min の時が、最もバランスのとれた条件であると判断された。

### 6.4.3 デシカント除湿機の除湿性能評価

処理風量は 1.9m<sup>3</sup>/min で、525Wの再生用ヒーターを用いて、除湿エレメントの最適回転数は 0.5rpm、最適再生風量は 0.1m<sup>3</sup>/min とした条件下で、除湿性能を測定した結果は、6.3 kg-water/h であった。なお、525W 以下の電力供給下で種々検討を行ったが、電力の低下とともに除湿性能が低下することが確認された。本章においては、6.0 kg-water/h 以上の性能を持たせることを目標とした。この条件を満たす電力は 450W 以上であることが判明した。一般的に、約 7 畳 (18m<sup>2</sup>) の部屋を除湿する場合 6.0 kg-water/日の除湿量が必要であることが示されている。この条件を満たすのに 450W と非常に低消費電力で済むことが確認される結果となった。

### 6.4.4 除湿エレメントの耐熱性

0.1m<sup>3</sup>/min の再生空気を 450W のヒーターで加熱すると、再生空気の温度は約 220℃ まで上昇することが算出される。除湿エレメントのヒーター側の表面は、さらにヒーターの輻射熱も加わり、実測では約 600℃ の高温になる。従って、除湿エレメントの耐熱性は重要な要素である。吸着剤はもちろん基材やバインダーなど除湿エレメントに使われている材料全てが耐熱性に優れていることが要求される。除湿エレメントと使用されている吸着剤であるゼオライトの TG/DTA の結果を図 6-8, 6-9 に示す。除湿エレメントおよびゼオライトとも約 100℃ で水分蒸発に伴う重量減少のみが確認されたが、その他のピークや重量変化は見られなかった。また、除湿エレメントの熱劣化性を確実に

とらえるため、除湿エレメント全体を 600℃の過酷な条件で加熱処理を行った。600℃で 72h 加熱処理後の除湿エレメントの B E T 表面積は 340m<sup>2</sup>/g であり、初期の B E T 表面積が 350m<sup>2</sup>/g に対して、ほとんど変化していないことが確認された。また、除湿性能は初期が 6.6kg-water/日であったのに対し、加熱処理をしたものも全く同じ性能を示すことが確認された。したがって、600℃において、ゼオライトの除湿エレメントの熱劣化はないことが確認された。

シリカゲルの T G / D T A の結果を図 6-10 に示す。水分蒸発のピークの他に、120℃以上において多少の重量減少が見られる。また、初期の B E T 表面積が 783m<sup>2</sup>/g に対して、500℃で 30min 加熱処理した後は 640m<sup>2</sup>/g に低下することが確認された。シリカゲルの親水性シラノール基の縮合脱水が起こると、細孔も変化する<sup>4)</sup>ことが知られている。このことから判断して、シリカゲルは除湿エレメントの吸着剤としては適さないと結論される。

## 6.5 結 論

ゼオライトの除湿エレメントを用いたデシカント除湿機において、より低熱量で高い除湿性能を得るために、除湿エレメントの回転数および再生風量の最適化を検討した。その結果、処理風量が  $1.9 \text{ m}^3/\text{min}$  の時において、再生風量は  $0.1 \text{ m}^3/\text{min}$  であり、かつ除湿エレメントの回転数は  $0.5 \text{ rpm}$  の時に、除湿性能は最大になり、再生熱量が  $450 \text{ W}$  時に  $6.0 \text{ kg-water/日}$  の除湿性能が確認された。また、ゼオライトの除湿エレメントは、 $600^\circ\text{C}$  の温度において熱劣化はなく、デシカント除湿機の除湿エレメントとして適していると判断された。

この研究結果をもとにデシカント除湿機 (F-Y60Z2) (図 6-11)<sup>5)</sup> を開発し、2002 年に発売となった。表 6-1 に開発品 (F-Y60Z2) と従来品 (F-Y06K4) の仕様を示す。同等の除湿能力 ( $5.8 \text{ kg/日}$ ) で、消費電力は  $4.5\%$  減であり、大きさは体積比で  $9\%$  減、重量比は  $16\%$  減の非常にコンパクトでしかも低消費電力のデシカント除湿機として上市できた。発売当時において、この商品は他社の除湿機と比較して最小の大きさであり、しかも低消費電力の商品であり、市場からは「お手軽除湿」の愛称で高い評価を受けた。

## 参考文献

- 1) 出雲政矩, 建築と配管工事, 10, 63-70(1985).
- 2) 糸康孝, ニチアス技術時報, 4, 1-8(1984).
- 3) 信夫善治, ニチアス技術時報, 3, 1-6(1999).
- 4) 吉田弘之監修: 多孔質吸着材ハンドブック, フジ・テクノシステム(2005).
- 5) 勝見佳正, 藤井泰樹, 久保雅大, 永田篤範, 田代義和: 「除湿乾燥機・除湿機の小型化技術」, 2002 松下電器の新技术, 160-164(2003).

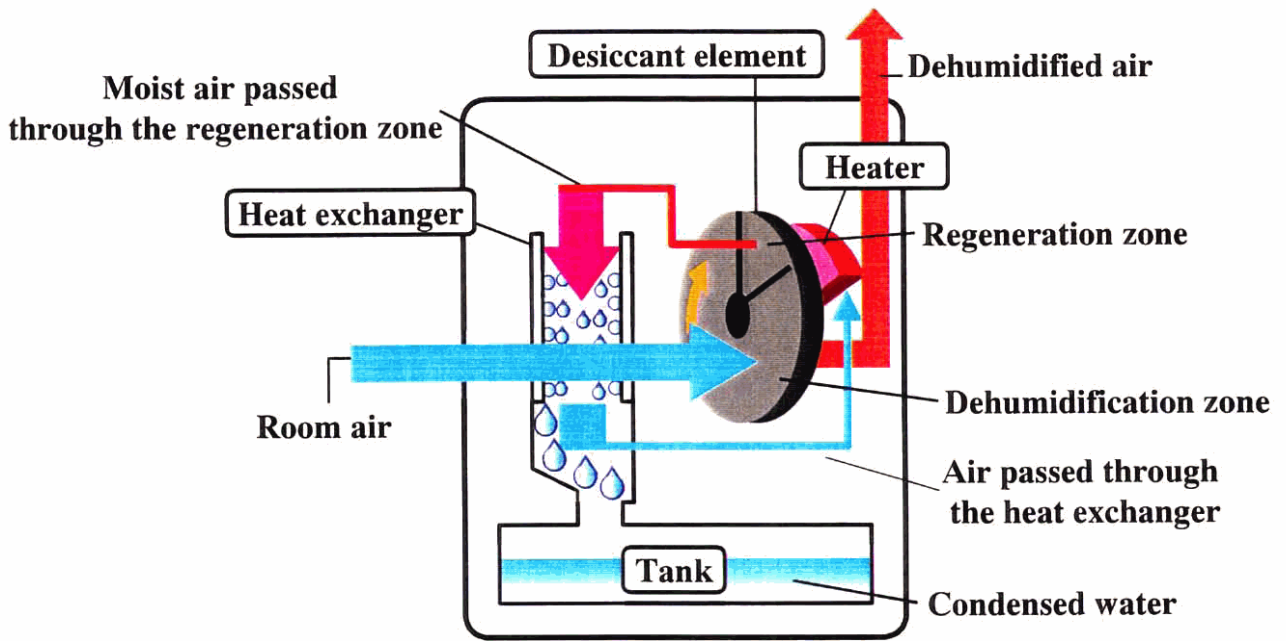


Fig.6-1 Schematic diagram of structure dehumidifier.



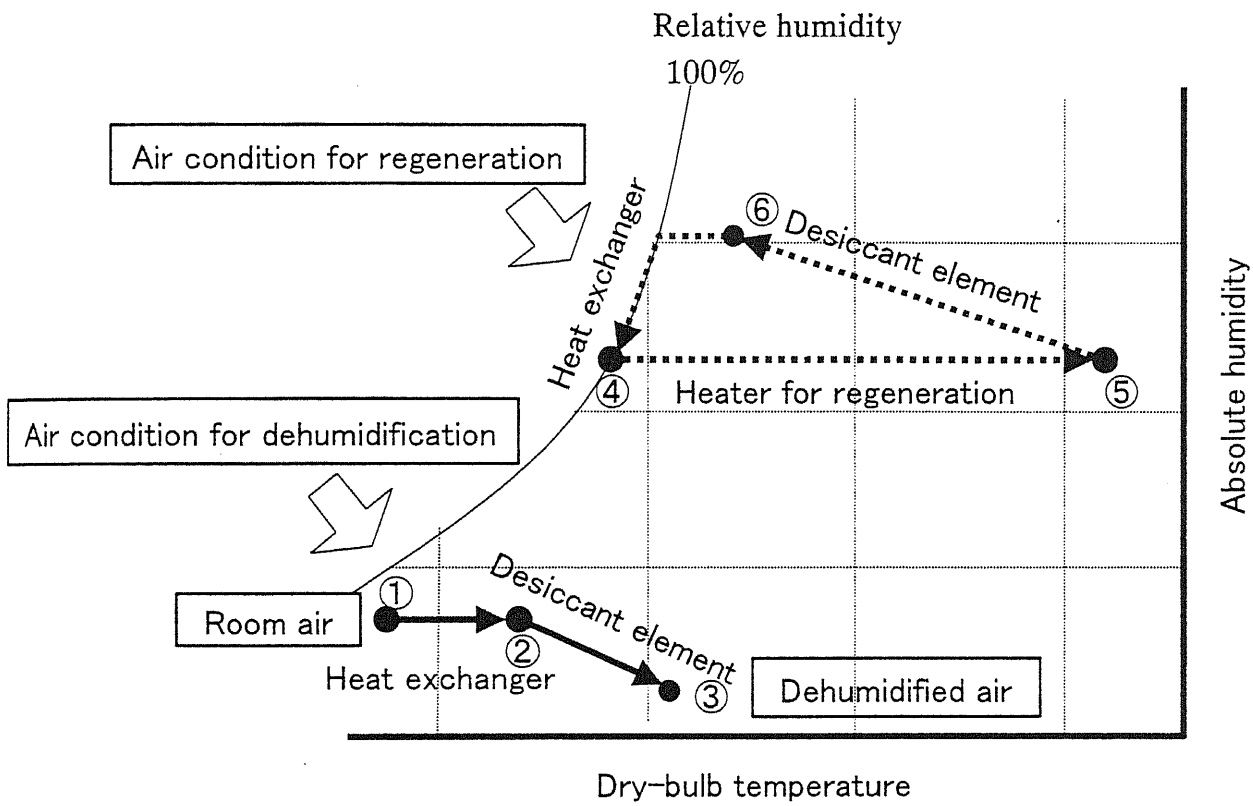


Fig.6-2 Route and history of air being dehumidified and regenerated air on psychrometric chart.

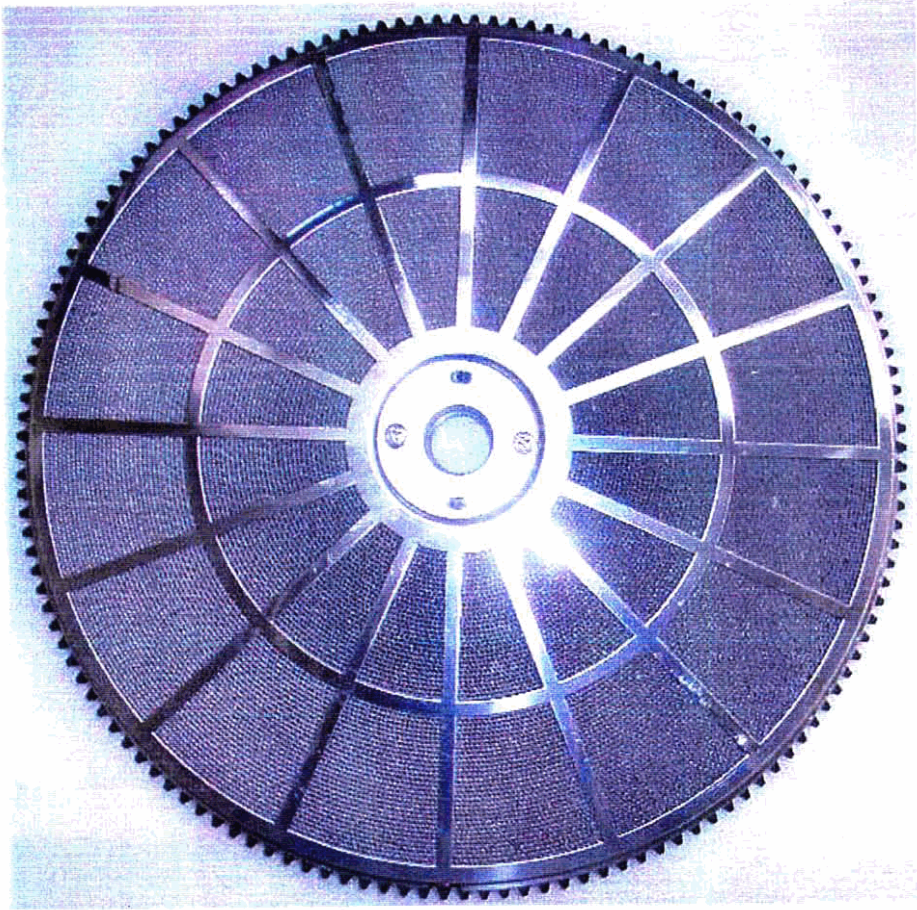


Fig.6-3 Photograph of desiccant element.

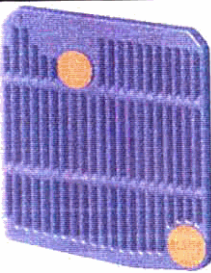
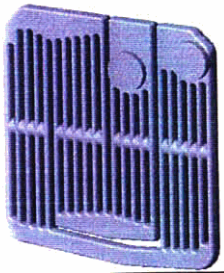
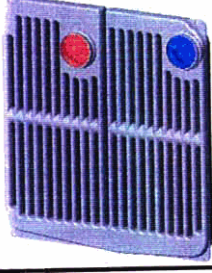
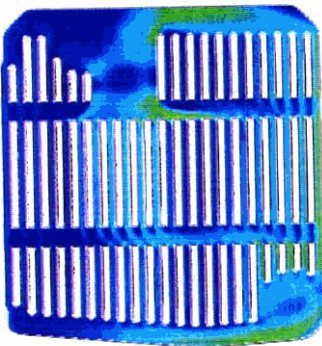
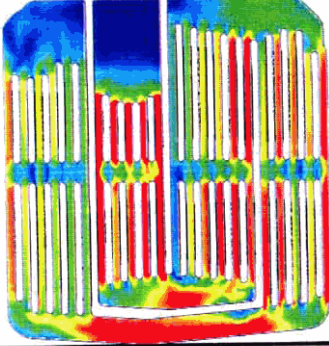
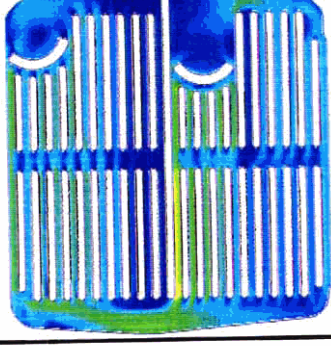
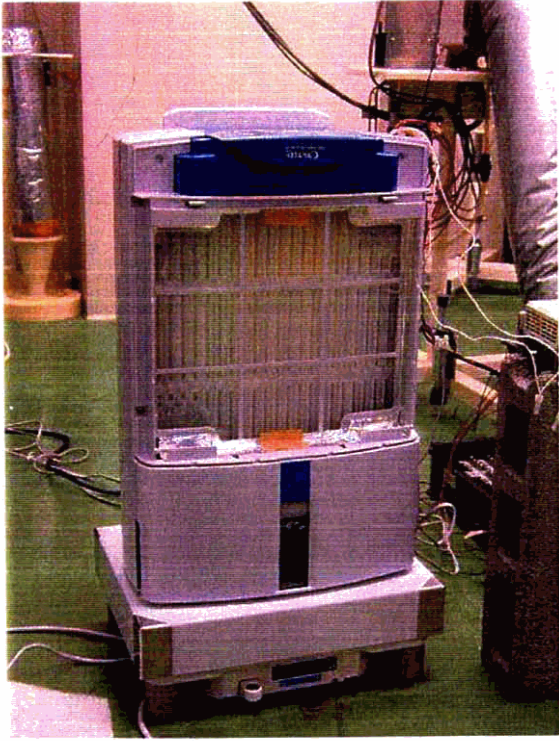
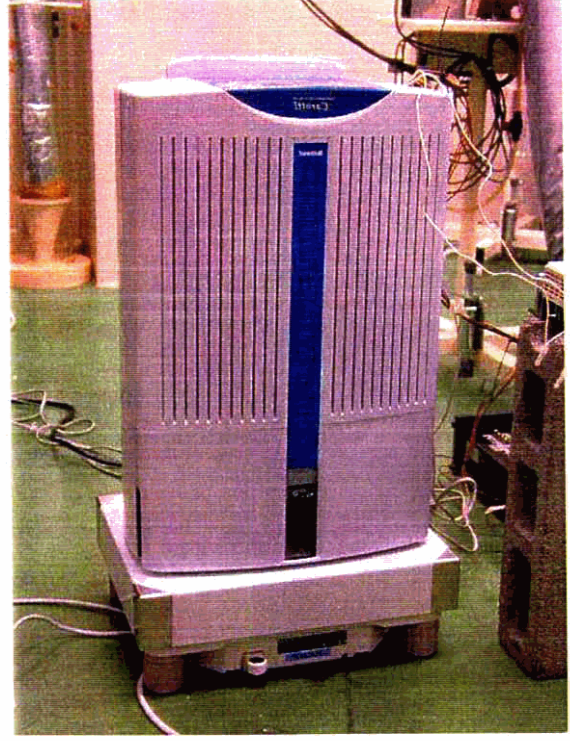
	「ターンなし」タイプ	「3ターン」タイプ	「1ターン」タイプ
モデル			
風速分布 速度 [m/s]			
熱交換率	100%	107%	105%
通風抵抗	100%	1009%	323%

Fig.6-4 Distribution of air flow rate, heat exchange efficiency, and blow resistance on heat exchanger by fluid analysis.



(a)



(b)

Fig.6-5 (a):Photograph of adding heat exchanger on desiccant element. (b):Photograph of desiccant dehumidifier.

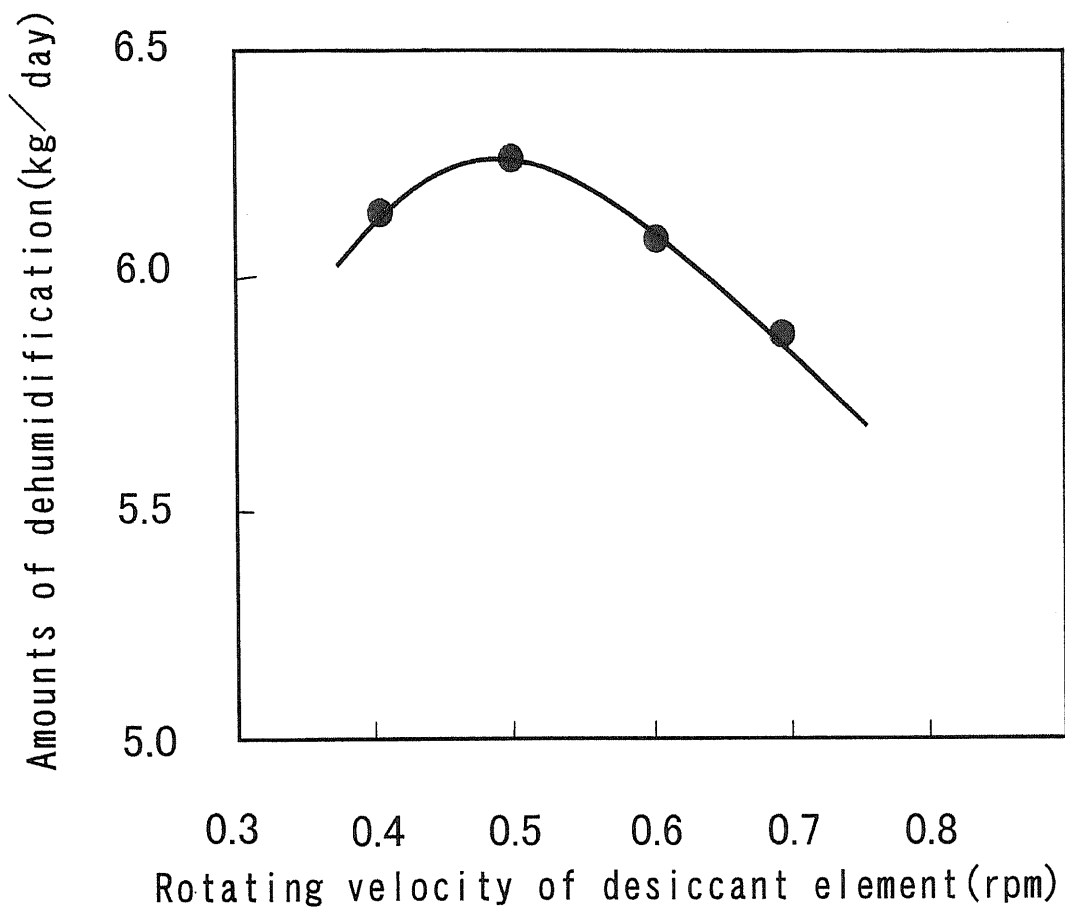


Fig.6-6 Relationship between dehumidification performance and rotating velocity of desiccant element.

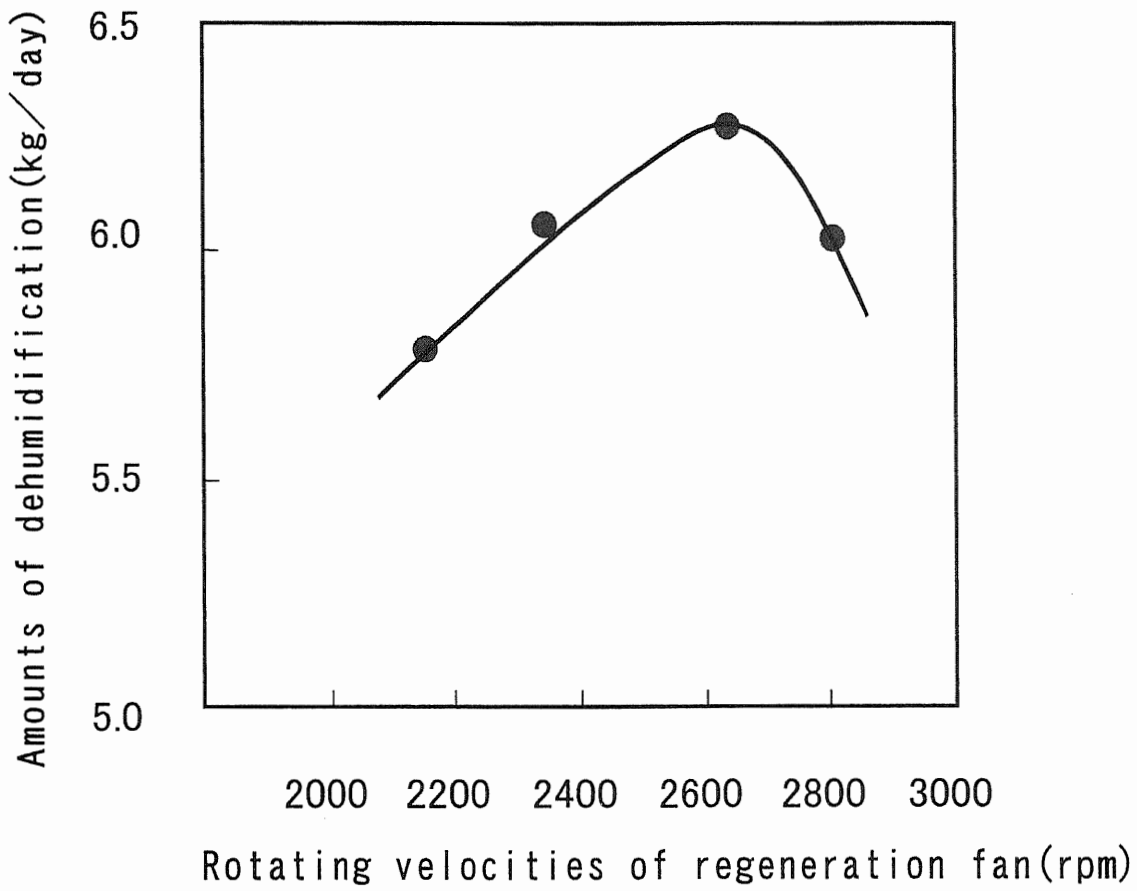


Fig.6-7 Relation between dehumidification performance and rotating velocity of fan.

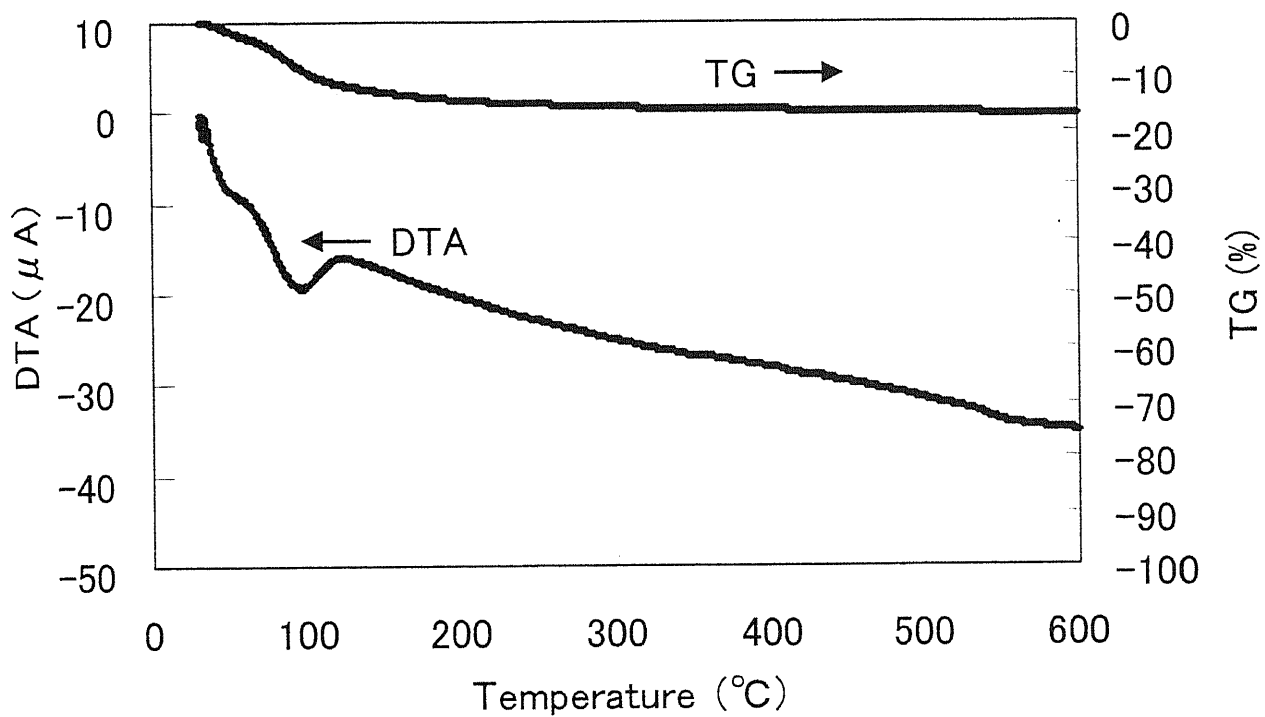


Fig.6-8 Curves of TG and DTA for desiccant element.

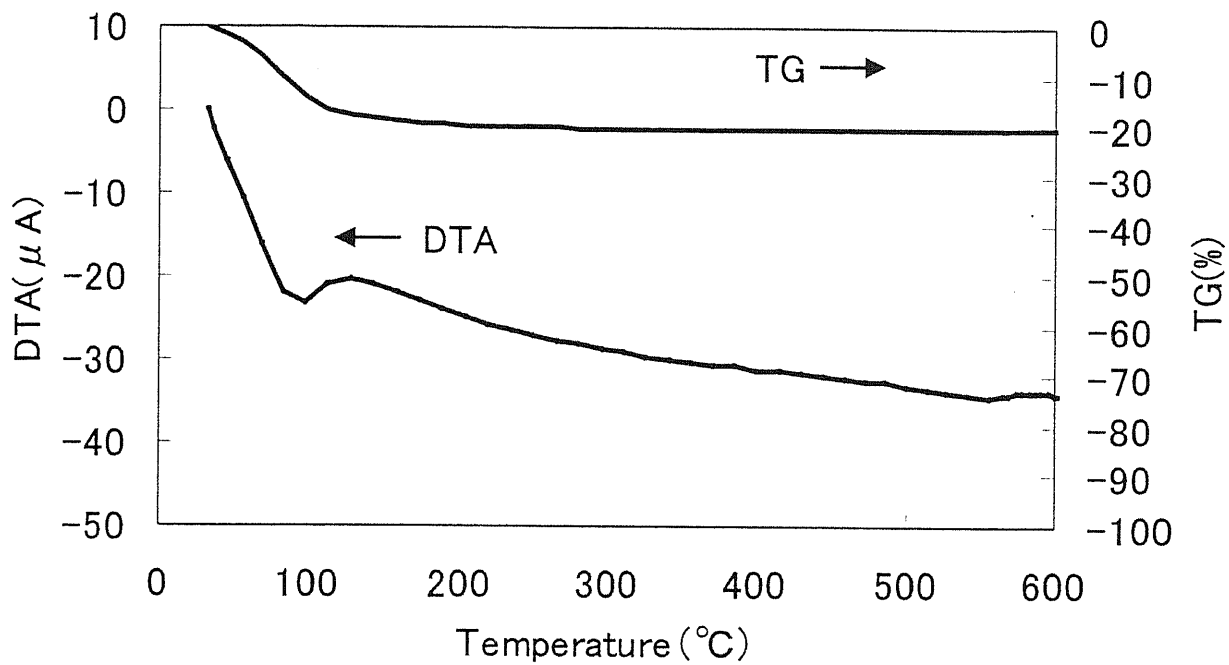


Fig.6-9 Curves of TG and DTA for zeolite.



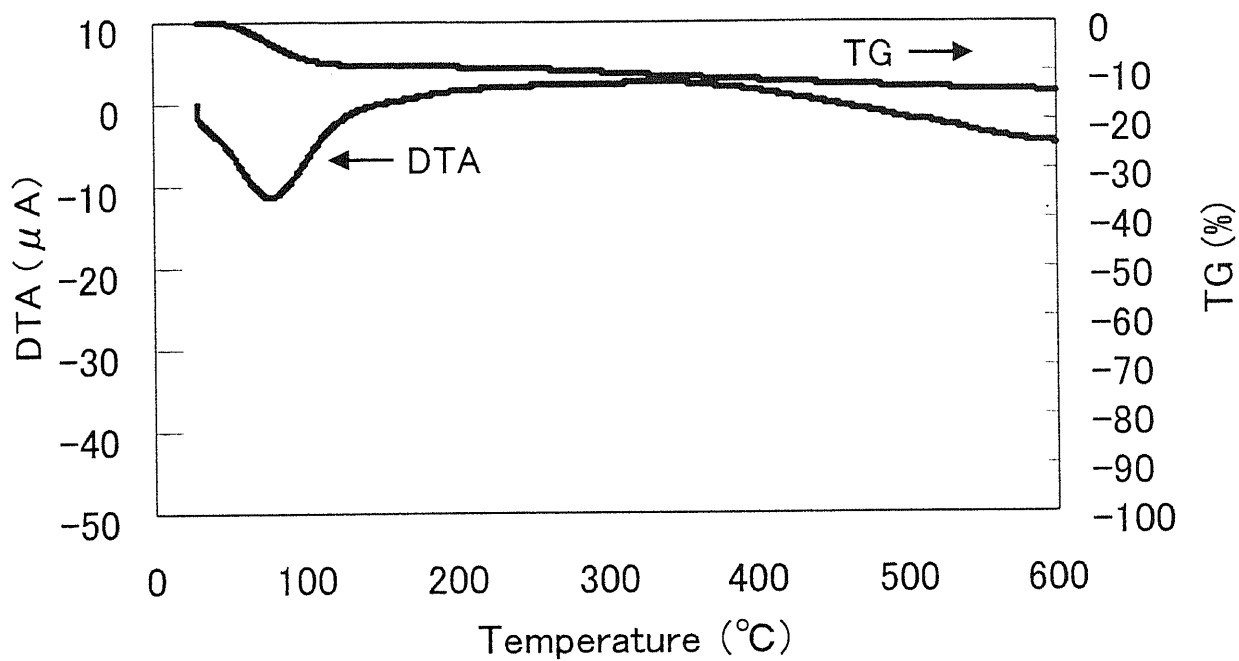


Fig.6-10 Curves of TG and DTA for silica gel.



Fig.6-11 Photograph of desiccant dehumidifier (F-Y60Z2).

Table 6-1 Specification of desiccant dehumidifiers.

	開発品(2002年発売) 品番:F-Y60Z2	従来品(1999年発売) 品番:F-Y06K4
除湿能力 (kg/日)	5.8/6.0 (50/60Hz)	5.8/6.0 (50/60Hz)
消費電力 (W)	540	565
外形寸法 (mm)	500×192×375	515×338×250
質量 (kg)	6.1	7.3

## 第7章 総 括

近年、環境問題を考慮してフロンを使用した冷凍サイクルのエアコンや除湿機などの空調機器から、フロンを使用しない吸着式デシカント空調機器や除湿機の製造に関する研究が盛んに行われ、既に幾種類かの機器が上市されてきている。しかし、デシカント空調機器や除湿機の消費電力は、冷凍サイクル式のものと比較して、多大なエネルギーを必要としており、廃熱レベルの低温あるいはトータル的に低消費電力で再生できる除湿エレメントおよびシステムの開発が実用上の大きな課題となっている。ところで、除湿エレメントに用いられる吸着剤として最適な吸着特性やその吸着特性が除湿性能に与える影響などについては、ほとんど報告されておらず不明な点が多い。また、除湿エレメントに求められる吸着特性は一義的なものではなく、システムとして用いる条件（再生温度、風量など）によって除湿性能が大きく変化する。したがって、低熱量で高除湿性能を得るための最適な条件を経験的に見つけ出し、その範囲で比較することが必要になる。その最適な条件を見つげ出すためには膨大な実験が必要であり、時間と労力を節約しつつ、除湿エレメントの材料特性から最適な条件を探索するためにシミュレーションの検討も必要であることは共通の認識となっている。

以上の背景から本研究は、(1)除湿エレメントに用いる吸着剤の最適な吸着特性の把握、(2)除湿エレメントの吸着特性とシステム化としてのパラメータが除湿性能に与える影響、(3)除湿エレメントを作製するための吸着剤や基材材料および調製方法が吸着特性に与える影響、(4)除湿エレメントの吸着特性から除湿性能を予測するシミュレーションの検討、を通して低温あるいは低熱量で再生できる吸着式デシカント空調機器や除湿機などを設計・開発するための指針を得ることを目的として検討を行った。最後にこれら一連の成果を統合して、デシカント空調機および除湿機の実用化を図った。

本研究論文の概要は以下の通りである。

まず除湿エレメントに用いられる各種吸着剤の吸脱着特性を評価して、吸着時と再生時の吸着量の差である有効吸着量の大きいものが除湿エレメントの吸着剤に適していることを示した。次に市販の除湿エレメントを用いて、システム化のための各種パラメータと除湿性能の関係を詳細に調べ、低熱量で再生するための要因を明らかにした。また、吸着剤だけでなく、パルプやセラミック繊維を用いて除湿シートを調製し、その調製方法と吸着剤などの構成比と吸着特性および除湿性能の関係を明らかにした。さらに膨大な実験を効率的に行うために、除湿エレメントの吸着特性とシステム化のためのパラメータから、除湿性能を予測するためのシミュレーションを検討し、実験値と良く一致することを確認するとともに、除湿エレメントの材料特性からデシカント空調機の仕様を計算するプログラムを開発した。また、これらの評価結果と一連の成果を活用して、低消費電力の除湿機の実用化について検討を行い、デシカント除湿機を開発した。

以下に各章で得られた主な知見、結果および結論を述べて総括とする。

第1章「緒論」では、吸着式デシカント空調機器や除湿エレメントの現状と課題を概説し、本研究の背景と目的を述べた。

第2章「各種吸着剤の水蒸気の吸脱着特性およびその有効吸着量の評価」では、デシカント空調機器の場合、吸着と再生を連続的に繰り返すため、除湿時と再生時の吸着量の差が大きい吸着剤が望ましい。したがって、各種吸着剤の水蒸気平衡吸着等温線に対し、実際の除湿操作の条件である除湿時と再生時の各相対湿度における平衡吸着量の差を有効吸着量と定義し、その量の大きい吸着剤が除湿エレメントの材料として適しているとの判断から各種吸着剤の評価を行った。まず、異なる温度での水蒸気吸着等温線を測定した結果、相対湿度と吸着量の関係は、異なる温度においても一致することが判明したことから、除湿時と再生時の各相対湿度における吸着量の差で吸着剤の性能が評価できることを明らかにした。次に各種吸着剤について水蒸気の平衡吸着等温線を実測し、

低温時（70℃）での再生を視点に、除湿時は 60%RH、再生時は 7%RH として、その条件での有効吸着量を算出した。シリカゲル、ゼオライト、活性炭およびメソポーラスシリケートについて評価した結果、除湿エレメントの吸着剤として有望な、即ち有効吸着量が大きい材料は、A 型シリカゲルと細孔分布を調整した RD 型シリカゲル、および表面にシリカゲルを形成させた活性炭であると結論した。シリカゲルについては細孔径などを調整すること、ゼオライトについては疎水性に改質することや活性炭を親水性に改質することで、さらに低温再生に適した吸着剤にすることができることを示した。また、実際の除湿操作の湿度が異なれば、その条件に適した吸着剤は上記以外になる可能性もあるが、水蒸気の平衡吸着等温線からその条件での有効吸着量を算出することによって、最適な吸着剤を選定することが可能であることを論じた。

第 3 章「除湿エレメントの動的除湿性能」では、市販のシリカゲルおよびゼオライトを主体とした除湿エレメントを用いて、システム化する上で重要な各種パラメータを変えることによる除湿性能の評価を行い、低温あるいは低熱量で高除湿性能を得るための最適な条件を明らかにした。除湿エレメントは厚いほど高い除湿性能を得られ、風速は速いほど高い除湿性能を示すことが判明した。再生熱量の影響に関しては、同一の面積比で除湿と再生の風速が同じ場合、再生温度 70～90℃の範囲では、再生熱量と除湿量との関係は原点を通る直線関係が成立し、再生温度や処理風速に依存せず再生熱量によってのみ除湿量が決まることを明らかにした。面積比を変えても直線関係は成立するが、再生部分の面積が小さいほど除湿効率が向上し、かつより低熱量で再生できることが認められた。これは、再生面積が小さいほどその部分における除湿エレメントの体積が小さく、温度の上昇に使われる熱量が小さくて済むため、結果として除湿効率が向上するものと考察した。したがって、再生面積をできるだけ小さくすれば、低熱量で再生できることが判明した。また、再生熱量を 2 kw に固定して、シリカゲル主体とゼオライト主体の除湿エレメントの除湿性能を比較した場合、高温再生時ではゼオライトの方が、低温再生時ではシリカゲル主体の除湿エレメントが高い除湿性能を示すことが確認された。

吸着等温線の形は、シリカゲル主体の除湿エレメントでは直線型で、ゼオライト主体の除湿エレメントではLangmuir型であるため、ゼオライト主体の除湿エレメントは高温で再生しないと高い除湿性能を得ることが困難であり、低温再生の場合には、シリカゲル主体の除湿エレメントの方が有利であると結論した。

第4章「除湿エレメント用シートの調製とその除湿性能」では、第2章で検討したシリカゲルを吸着剤として、シリカゲルの担持量を30~80%とし、パルプとポリエステル繊維およびセラミック繊維で作製した除湿シートについて吸着特性を調べた。パルプのみでシートに加工したものはシリカゲルの担持量が高いほど、水の平衡吸着量は高くなった。しかし、ポリエステル繊維を配合したものは、同じ担持量でも平衡吸着量は低くなる傾向を示した。この要因はポリエステル繊維がプレス乾燥時の熱で溶けてシリカゲル表面を覆ったためと考察した。セラミック繊維を配合したものは、パルプのみで作製したシートと同じ平衡吸着量を示した。また、シリカゲルの担持量を変化させてパルプのみで作製したものは、シリカゲル担持単位の水の吸着量と比べて比表面積の低下が大きいが、パルプ表面には通常親水性の官能基を有しており、水が徐々にシリカゲルの細孔に入っていくため、水蒸気の吸着量に対する影響が少ないためと結論した。除湿シートを作製する場合は、パルプだけでなくセラミック繊維を混合することで、吸着剤の水蒸気の吸着量および比表面積に与える影響が少ない除湿シートが得られることを明らかにした。除湿エレメントの製造方法において、接着方法およびコルゲーションの形状を最適化することで、現在市販の除湿エレメントよりも除湿性能が約26%も向上する除湿エレメントを作製することができることを示し、実用化に繋がることを論じた。

第5章「除湿エレメントの性能評価に関するシミュレーションの検討」では、圧カスイング吸着方式の吸着理論で報告されている等温固定層吸着の基礎式である物質収支式と吸着速度式および吸着平衡式を無次元化し、熱スイング吸着方式に適用できるように改良した。この数式をもとにbasicのプログラムを作成し、実測値とプログラムで

計算した予測値との比較評価を行った。除湿性能を予測するために、除湿エレメントの特性としては、水蒸気の吸着量だけでなく、吸着速度である総括移動係数についても実験を行って算出した。その結果、シリカゲル主体の除湿エレメントとゼオライト主体の除湿エレメントの吸着・再生を繰り返した時の重量変化の実測値と数値解析した予測値と良く合致し、また固定式実験装置だけでなく、回転式実験装置でも実験値との整合性の良いことが確認されたことから、開発した数値解析用シミュレーションプログラムは妥当であると判定した。さらに、この数値解析を利用して、デシカント空調機器の冷房能力や各構成部材における空気状態を計算できるプログラムも開発し、システム設計などを行うための実用上有効なツールであることを確認した。

第6章「デシカント除湿機の実用化とその性能評価」では、これまでの第2章から第5章までの基礎的な知見を踏まえて、除湿機として実用化のための検討を行った。そのための基礎となる項目として、高除湿性能と低消費電力を得るための除湿エレメントの最適回転数と再生空気の最適風量を求めた。また、除湿エレメントの耐熱性および熱劣化についても評価を行った。その結果、最適回転数は0.5rpm、最適再生風量は $0.1\text{m}^3/\text{min}$ であることが結論された。また、小型化でかつ高い熱交換性能を有する熱交換器の開発を合わせて実施して、デシカント除湿機（F-60Z2）を完成させた経緯を述べた。

第7章「総括」では、本研究で得られた結果をまとめ、総括とした。



## 本研究に引用した著者の学術論文

### A. 査読論文

- (1) 田代義和, 久保雅大, 勝見佳正, 目黒竹司, 米屋勝利: シリカゲル及びゼオライトを基材とした除湿エレメントの材料特性と動的除湿性能, 材料科学, 38[4], 158-165(2001). (第3章)
- (2) 田代義和, 久保雅大, 勝見佳正, 目黒竹司, 米屋勝利: 吸着式デシカント空調の除湿性能評価とそのシミュレーション, 材料科学, 38[4], 166-173(2001). (第5章)
- (3) Y. Tashiro, M. Kubo, Y. Katsumi, T. Meguro, K. Komeya: Assessment of Adsorption-Desorption Characteristics of Adsorbents for Adsorptive Desiccant Cooling System, JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE, 39, 1315-1319(2004). (第2章)
- (4) Y. Tashiro, M. Kubo, Y. Katsumi, T. Meguro, K. Komeya, J. Tatami: Characteristics of Dehumidifier Sheets for an Adsorptive Desiccant Cooling System, Characterization & Control of Interfaces for High Quality Advanced Materials, 199-205(2005). (第4章)
- (5) Y. Tashiro, M. Kubo, Y. Katsumi, T. Meguro, K. Komeya, J. Tatami: An Evaluation of Dehumidification Performance and Heat Resistance of a Desiccant Element Composed of Zeolite for Use as a dehumidifier, Materials Science and Technology, 43[4], (2006年4月に掲載予定). (第6章)

### B. 口頭発表 (国際会議論文)

- (1) Y. Tashiro, M. Kubo, Y. Katsumi, T. Meguro, K. Komeya, J. Tatami: Assessment of Effective Adsorption Amounts of Adsorbents for Adsorptive Desiccant Cooling System, International Conference on the Characterization and Control of Interface for High Quality Advanced Materials 2003, p107(2003).

## 謝 辞

本研究は、横浜国立大学大学院環境情報研究院 目黒竹司教授、米屋勝利教授、多々見純一助教授のご指導のもとで行われたものである。

一連の研究遂行と論文作成に当たり、ご懇篤なるご指導とご教示を賜り、かつ格別なるご高配を賜った目黒竹司教授に心から感謝を申し上げます。

また本学位論文は、目黒竹司教授並びに、大学院環境情報研究院 原孝夫教授、鈴木淳史教授、多々見純一助教授、米屋勝利特任教授、教育人間科学部 堀雅宏教授、大学院工学研究院 奥山邦人教授による予備審査と本審査を経て完成させたものである。適切なるご指導とご助言を賜ったことに深く感謝の意を表す。

本研究の多くの部分は、松下エコシステムズ株式会社（旧社名：松下精工株式会社）の材料開発と商品開発に密接に関係する内容であり、松下エコシステムズ株式会社の多くの関係者のご協力があってこそ本論文が完成したものであり、今後の研究開発に必ず役に立つものと確信している。本研究の遂行にあたり、技術のご支援、ご協力やご討論を賜った松下エコシステムズ株式会社の関係者各位に厚く御礼を申し上げます。

2006年3月1日

田代 義和