

工学博士論文

ハニカム型吸着エレメントの
開発と空調システムへの応用

熊本大学大学院自然科学研究科
博士課程 物質・生命科学専攻

岡野 浩志

2001年 9月

**Development of Honeycomb-type
Adsorbing Elements and their
Application to Air-conditioning System**

**A thesis Submitted to Graduate School of
Science and Technology Kumamoto University
for the Degree of Doctor of Engineering**

HIROSHI OKANO

Kumamoto University

Kumamoto, JAPAN

September 2001

まえがき

空気

空箱、空き家、空を切る、空回り、いずれも空の文字は何も無いことを表している。有ることがあまりにも当たり前で、存在がほとんど意識されない空気。しかし生物にとって最も大切なもので、空気がなければ生物はひと時も生きてはいけない。

現在の地球上の空気

46 億年前 地球の誕生 この頃の大気はほとんどが二酸化炭素で、他には窒素や水蒸気が含まれているだけであったといわれている。

35 億年前 原始生物の中から突然変異によって酸素を放出する新しいタイプの生物が出現した。

31 億年前 大気中には現在の 20 万倍もの二酸化炭素が含まれていたが、この頃二酸化炭素を石灰岩に変える生物が現れ、二酸化炭素は地層中に石灰岩として大量に固定、蓄積されて行った。

25 億年前 生物が放出した酸素は、最初膨大な量の鉄の酸化、沈殿に消費されていきその沈殿場所が現在の鉄鉱床となって残ったと言われている。

20 億年前 鉄の酸化沈殿が終わりに近づくにつれ、徐々に酸素が大気中に供給されていった。酸化鉄の堆積は 18 億年頃前に終わったといわれている。

4億年前 現在と同じ 21%の酸素が、大気中に存在するようになったのはこの頃といわれている。

そして酸素を取り込み、有機物を酸化してエネルギーとする、様々な生物が生まれ進化していった。つまり空気は、地球上に発生した小さな生物によって長い年月をかけて作られてきたといえる。しかしそのためには水の存在も不可欠の要素で、地球の気温が水（氷、水、蒸気）の働きによって生物にとって望ましい温度範囲に保たれたという幸運も重なっている。

空気の量

地球の直径 6,378km、対流圏の高さは 12,000m で、雲があるのは 10,000m 位までである。空気の濃さは高度 5,000m ごとに半分になり、10,000m では 4分の1になるといわれている。私は以前家族で富士山に登った事がある。富士山の高さは 3,776m で、これから計算すると空気の濃さは平地の約 3分の2 となり、平地の 1.5 倍の呼吸をしなくてはならないことになる。実際に頂上付近では、10m 歩く毎に休みながら深呼吸をしての繰り返しでやっと登り、空気の薄さを実感したものである。また戦時中、高度一万メートル（10km）で爆撃にくる B-29 爆撃機（与圧室装備）を迎撃する戦闘機のパイロットは、空気の薄さで意識がもうろうとなったり、気絶したりすることを防止するため、酸素ボンベは必需品であったといわれている。

人が日常生活している高度ということになれば、理化学辞典によるとヒマラヤ山脈の中国領に標高 4,300m の怕里という所があり、おおよそこの辺りが限界であろうか。

空気の層の厚さはどれほどになるのか計算してみた。例えば地球を直径 50cm の球とすると、対流圏の厚さは 0.8mm にしかならな

い。人が生活できる限界ということになれば僅か 0.33mm しかなく、紙 2～3 枚分の厚さほどしかないことになる。

我々の使命

我々は現在の人口、活動規模からすれば限り有る空気の中で呼吸し、有機物を燃やしてエネルギーを得て、生存しているということになる。我々はこの限り有る、生物にとって最も大切な資源『空気』を今後より一層大切に使うていかななくてはならない。今や人類全体がその技術を必要としており、ハニカム型吸着エレメントの技術はそれに応えられる重要な技術の一つであると確信している。

本研究論文の特徴

空気は密度が低いために含有する水分等の微量成分の分離に際しては高速大量の処理が必要となる。しかも空気は安価な物質であるため分離技術の真価が問われるのはまさにこの分野である。本研究はハニカム構造と称する無数の小透孔からなる吸着エレメントを新規な方法で合成し、その高い吸着性と熱交換能を活用して高性能の全熱交換器および空気除湿機を開発するとともに、脱フロン・非電力型デシカント空調を含めてエネルギーの効率的利用と省エネルギーを指向する空調システムへの応用について研究したものである。気体の分離精製に使われるハニカム型吸着エレメントの構造上の特徴は、広い表面積を有しながら通気抵抗が低く、軽量でありながら構造体としての十分な強度を有していることにある。この特徴を活かすことにより、0.1 秒という短い滞留時間で熱および水分を高速交換することを可能とし、あわせて大容量処理に適した空気処理装置の工業化を実現させた点が、本研究の工業技術上の特徴である。

論文の構成

本学位論文は6章から構成されている。第1章では、全熱交換、除湿、VOC除去などの物質移動操作の概要とハニカム型吸着エレメントの特徴について述べ、本研究の目的を明らかにしている。

第2章では全熱交換器すなわちエンタルピー交換器の開発について述べている。これは室内と屋外の間で顕熱と潜熱を同時に交換して、換気に伴う熱損失を効率よく回収する装置であるが、アルミシートに吸着剤のシリカゲル微粒子をコーティングしてハニカムエレメントを機能化する方法を開発し、顕熱交換効率、潜熱交換効率およびエンタルピー交換効率を詳細に検討している。多孔質体への水蒸気吸着に基づく本方法は、電解液への吸収に基づく従来機の本質的な欠点を解決し、高湿度外気への全熱交換器の適用を可能にするものである。

第3章では、全熱交換器の潜在的な問題点であった臭気移行の解決法について述べている。これは換気工程で水蒸気とともに吸着された臭気物質が給気工程で脱着されることにより、室内に臭気物質が蓄積される異常現象であるが、気象条件によって偶発的に発生するこの臭気移行問題はアルミナ系吸着剤、ゼオライト系吸着剤などの多孔性吸着剤では解決出来なかった問題である。様々な吸着剤を検討した結果、適度の吸湿性を有するが臭気成分を吸着しにくいというイオン交換樹脂の特性を見出し、これを吸湿剤として製作したハニカム型全熱交換器の開発により異臭発生問題が根本的に解決されることを、種々の臭気物質の移行速度を実験的に検討することにより明らかにしている。

第4章では、温度スイング吸着の原理で作動する吸着式除湿機の製法と性能について述べている。ハニカム状に成型した多孔質マトリックス内でシリカゲルを合成するという独創的な方法を考案して、バインダーを使用することなく、シリカゲル自身で結合したハ

ニカム型吸着エレメントを開発し、飛躍的に向上した除湿性能を検討している。次章で述べるデシカント空調システム用に開発した低温再生型ハニカム吸着ローターの除湿性能の特徴を検討している。

第5章では、ハニカム吸着式除湿機及び顕熱交換器を組み合わせで開発したデシカント空調システムの性能について述べている。デシカント空調システムは太陽熱や低温排熱をエネルギー源として駆動する、脱フロン・非電力型冷房システムであるが、この章では特にマイクロガスタービン発電の排熱を利用したデシカント空調システムの実証試験に基づいて、コジェネレーションシステムの効率向上を吸着ローターおよびシステム構成の双方から検討している。

第6章では、本研究のまとめを行い今後の展望を示している。

本論文は、私が現在の勤務先(株)西部技研に1977年に入社以来、ハニカム型吸着エレメント製品の研究開発、あるいはハニカム型吸着エレメントの生産にかかわった約4分の1世紀に渡る経験をもとにして、隈智恵子社長の援助と開発部員の方々の協力も得て、1998年より熊本大学の広瀬先生他にご指導いただきながらまとめたものである。

2001年9月

岡野 浩志

目 次

第1章 ハニカム型吸着エレメント	1
1.1 ハニカム型吸着エレメントの特徴	1
1.2 ハニカム型吸着エレメントの応用例	4
1.2.1 全熱交換器	4
1.2.2 ハニカム吸着式除湿機	9
1.2.3 有機溶剤除去濃縮装置	12
1.2.4 ハニカムフィルター	12
1.3 ハニカム型吸着エレメント製品を組み合わせたシステム	12
第2章 回転型全熱交換器用吸着ローターの開発と実験的研究	16
2.1 緒言	16
2.2 全熱交換器の原理	16
2.3 研究開発の背景	18
2.4 アルミ製吸着式全熱交換ローターの製法	18
2.4.1 ハニカム材料の選定	18
2.4.2 シート材料に吸湿性を付加する方法	19
2.5 熱交換性能試験	20
2.5.1 性能試験方法	24
2.5.2 顕熱交換器の実測効率と理論計算値の比較	24
2.5.3 全熱交換器の効率試験結果	28
2.5.4 空気条件による熱交換効率の変化	31
2.6 結 言	35
使用記号	37
文 献	38

第3章	イオン交換樹脂を吸湿材として使用した臭気移行の少ない新規な全熱交換器	39
3.1	緒言	39
3.2	全熱交換器による異臭クレーム発生の原因	39
3.3	シリカゲルとイオン交換樹脂の吸湿の違いについて	41
3.3.1	シリカゲルの臭気吸着	41
3.3.2	吸収剤(吸湿性の塩)の臭気吸着	41
3.3.3	イオン交換樹脂の吸湿性と臭気吸着	41
3.4	イオン交換樹脂とシリカゲルの臭気吸着性比較試験	45
3.4.1	静的臭気吸着性比較試験	45
3.4.2	試験方法	52
3.4.3	試験結果及び考察	52
3.5	全熱交換性能試験	52
3.5.1	性能試験装置	52
3.5.2	全熱交換性能試験方法及び結果	52
3.6	臭気移行試験	55
3.6.1	臭気移行	55
3.6.2	臭気移行試験方法	55
3.6.3	試験結果及び考察	57
3.7	結言	67
	使用記号	68
	文献	69
第4章	ハニカム吸着式除湿ローター	70
4.1	緒言	70
4.2	乾式除湿ローター	72
4.3	ハニカムローター除湿機の原理と構造	73
4.4	ハニカム吸着式除湿ローターの製法	76
4.4.1	ハニカム吸着式除湿ローターの製法	76

4.4.2	メタルシリケートハニカムの合成	82
4.4.3	メタルシリケートローター改良高性能化の歴史	87
4.5	デシカント空調用除湿ローター	87
4.5.1	デシカント空調	87
4.5.2	デシカント空調用除湿機	91
4.5.3	各種ハニカム吸着式ローターの製法	91
4.5.4	各種試験用ハニカム吸着式ローターの平衡吸着量	93
4.5.5	除湿性能試験	95
4.5.6	除湿性能試験結果	95
4.5.7	結果の分析及び考察	99
4.6	結 言	101
	使用記号	103
	文 献	104

第5章	マイクロガスタービン排熱利用に最適な吸着式デシカント空調システムの検討	105
5.1	緒 言	105
5.2	従来式デシカント空調システム	105
5.3	除湿ローター及び効率の良い再生方法の検討	108
5.3.1	従来式の問題点	108
5.3.2	除湿機の効率的運転方法の検討	109
5.4	顕熱除去ユニットの検討	113
5.4.1	回転型顕熱交換器と直交流型顕熱交換器	113
5.4.2	間接式気化冷却器 気化冷却+顕熱交換	114
5.4.3	顕熱除去ユニットとしての総合冷却効率	118
5.5	新デシカント空調システム	122
5.6	結 言	127
	使用記号	131
	文 献	132

第6章 総括	133
謝辞	136
英文要旨	137

第1章 ハニカム型吸着エレメント

1.1 ハニカム型吸着エレメントの特徴

ハニカム型吸着エレメントの構造上の特徴は、広い表面積を有しながら通気抵抗が低く、軽量でありながら構造体としての十分な強度を有していることである。この特徴を活かすことにより、0.1秒という短い滞留時間で熱および水分を高速交換することを可能とし、あわせて大容量処理に適した空気処理装置の工業化を実現することができる。つまりハニカムに空気を通過させることにより、短時間で空気を大きく変化させることができる。例えば湿った空気を瞬時に乾かしたり湿らせたり、あるいは加熱したり冷やしたりすることができる。また空気中に含まれる成分を瞬時に分離したり、臭気を分解したりすることができるなど短時間で大量の空気を処理するのに適した特徴を備えている。

図1-1に現在主に加工生産しているハニカムエレメントの種類を示す。一般空調機器にはAS-31前後が多く採用され、ハニカムフィルター用途のうち高性能が要求されるものはAS-22~26が、低圧力損失が要求されるものにはAS-50~63が比較的多く採用されている。

図1-2にハニカムエレメントの圧力損失を示す。この図の圧力損失は代表的な値で、同じハニカムサイズであっても、使用するシート材の厚みや山高さによって圧力損失は変化する。またハニカムエレメントの特徴として、ハニカム内を通過する流体は層流で流れるため圧力損失は低く、風速のほぼ1乗に比例する。図1-2において僅かに曲線になっているのは、ハニカムの入口、出口抵抗の影響（風速の2乗に比例して上昇する）が出ているためと考えられる。ハニカムサイズAS-31の場合、計算によると風速14m/s位までは層流で、それ以上の風速になれば乱流域になる。乱流域では圧

	AS-18	AS-20	AS-22	AS-24	AS-26	AS-31	AS-42	AS-50	AS-63	AS-70	AS-85	
P	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	3.4	4.2	5.0	6.3	7.0	8.5	mm
H	—	0.85	0.95	1.10	1.50	2.10	2.50	3.00	3.50	4.50	5.20	mm
表面積	6,100	5,400	4,800	4,200	3,500	2,400	2,000	1,700	1,400	1,100	900	m ² /m ²
セル数	900	750	620	500	320	190	120	80	56	40	30	セル/インチ ²

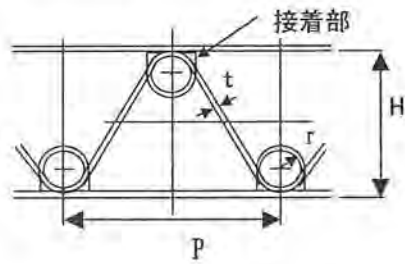
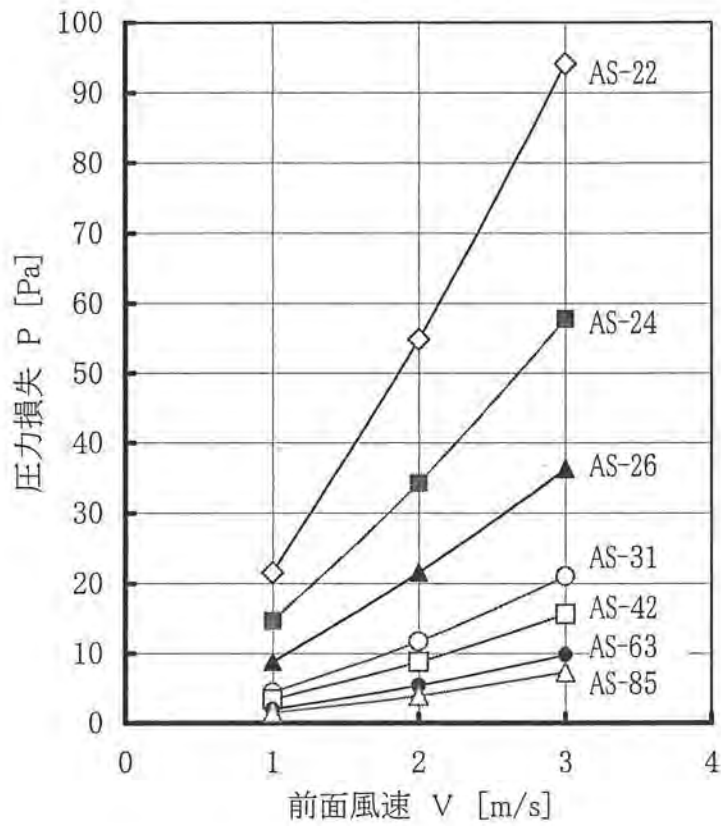


図1-1 ハニカム元素の種類及び形状



層長 15mm 紙厚さ 0.15mm (活性炭ペーパー)
 測定 室温(22~27°C)

図1-2 ハニカムエレメントの圧力損失例

力損失は風速の 2 乗に比例して上昇する。通常ハニカム型吸着エレメントは、1～5 m/s の層流風速域で使用されている。

図 1-3 は空気処理装置で採用されている吸着塔に充填使用される吸着剤の粒状ペレットと、ハニカム型吸着エレメントの吸・脱着性の比較をした図で、吸・脱着に関与する部分が吸着剤表面からの深さと時間に関係するとして、ある単位時間においてハニカム型吸着エレメントではエレメントの全部分が吸・脱着（斜線部）しているのに対し、球状ペレットでは表面近くのごく一部しか吸・脱着（斜線部）していないといえる。さらに図 1-4 で比較するように、ハニカム型吸着エレメントは球状ペレットの 10 分の 1 程度の圧力損失しかなく、ハニカム型吸着エレメントが大容量の空気処理装置に適している理由が以上のことから理解できる。

1.2 ハニカム吸着型エレメントの応用例

ハニカム型吸着エレメントを空気処理装置に応用する技術上の難しさの一つはハニカム型エレメントに機能を持たせる方法で、吸着剤などの機能材をパルプなどと混ぜて抄紙加工するか、シート材料に機能材をコーティングしたのちハニカム形状に加工する方法、あるいはハニカム形状に加工した後、機能材を含浸担持して取り込む方法などがある。また機能性を持たせた材料は加工が難しくなる場合が多く、特殊な加工方法や加工機械の開発、あるいは機能材の研究改良等も必要である。次にハニカム型吸着エレメントの応用例を紹介する。

1.2.1 全熱交換器

全熱交換器は空調換気の際、還気と取り入れる外気の間で顕熱と潜熱を同時に熱交換回収する省エネルギー機器で、直交流型（図 1-5）と回転蓄熱型（写真 1-1）がある。直交流型は互いに独立し

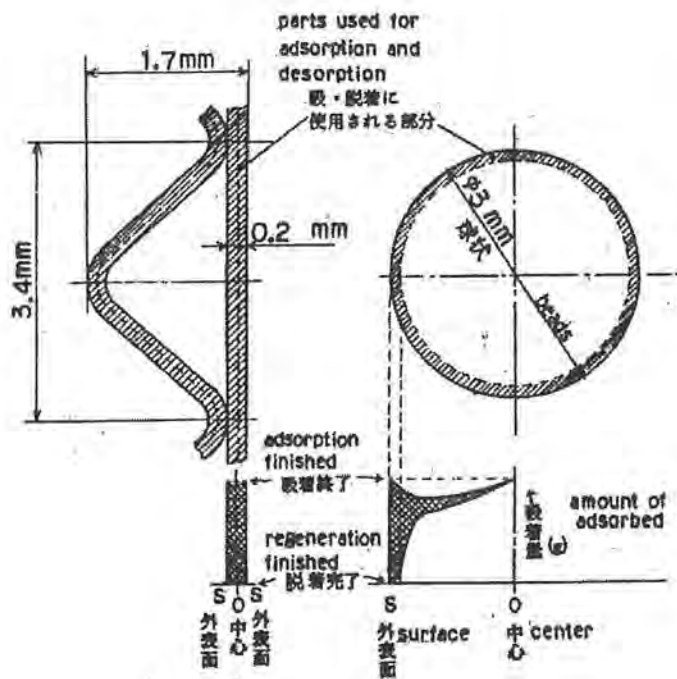


図1-3 ハニカム型吸着元素と球状吸着体の比較

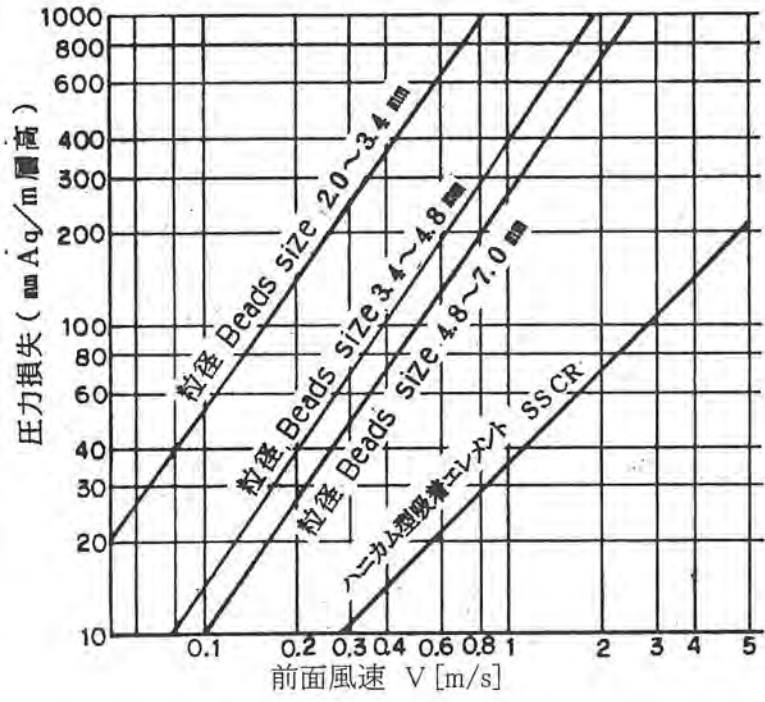


图1-4 压力损失比较图

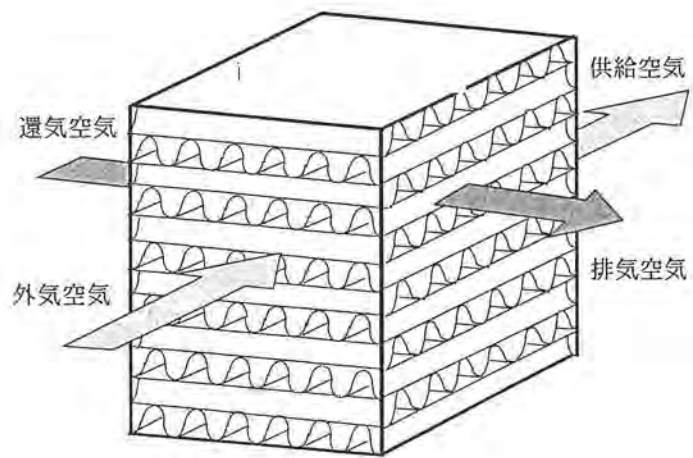


圖1-5 直交流型熱交換器

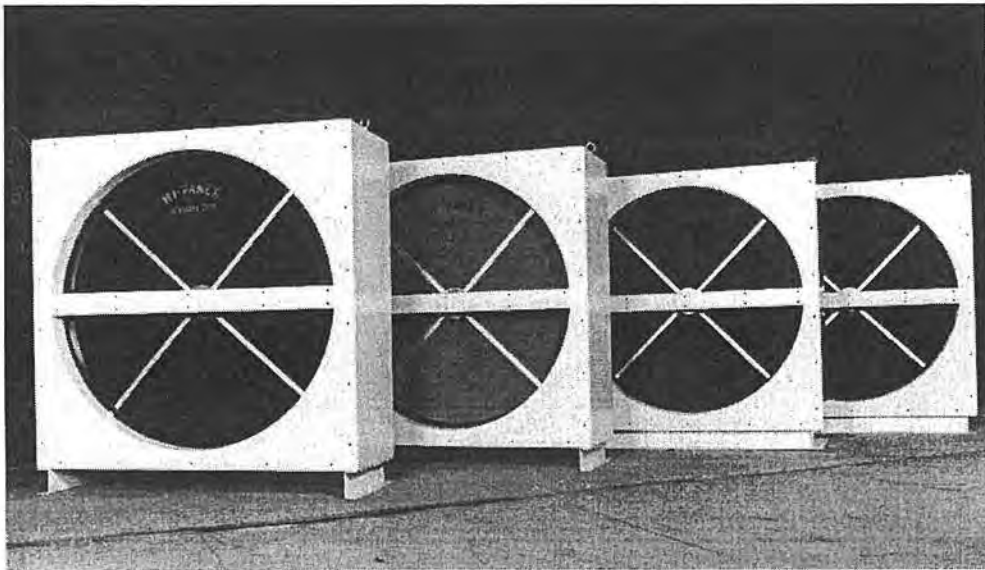


写真1-1 回転蓄熱型熱交換器カセット

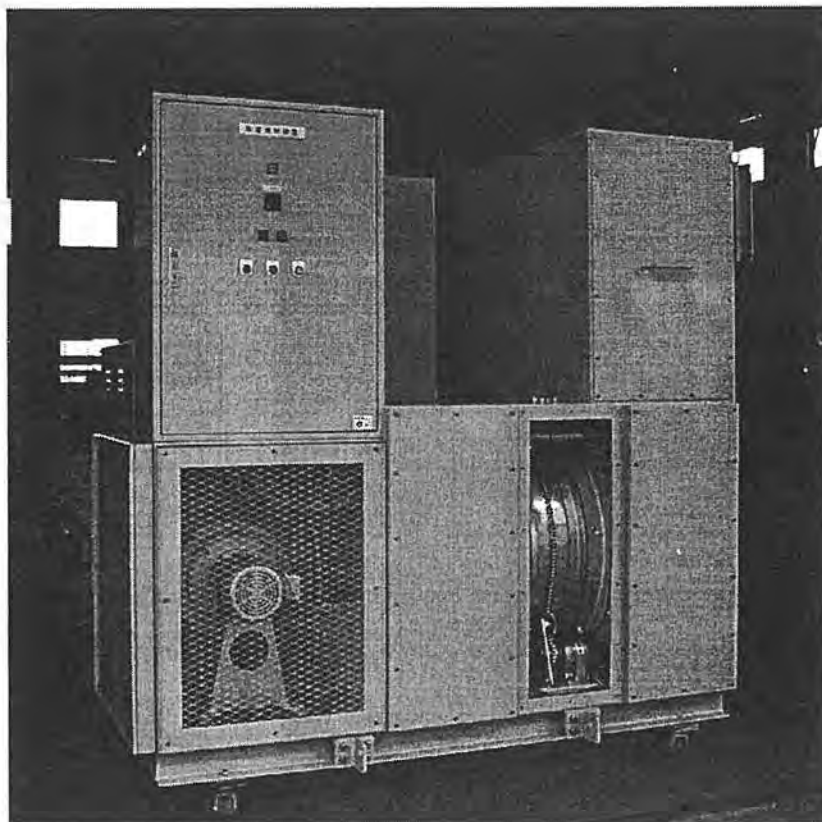
た2つの流路を交互に積み重ねた構造をしており、2つの空気流は混ざり合うことなくライナー（平面シート）を介して伝熱熱交換する。ライナーを透湿性の材料で構成すると、潜熱交換機能をもった全熱交換器になる。本論文の第2章では回転型全熱交換器を取り上げ、潜熱交換機能を付加するために多孔質ハニカムに吸湿性の塩を含浸した従来式的全熱交換器が、高湿度に弱いという欠点を解決するため、アルミニウムシートに吸着剤のシリカゲル微粒子をコーティングしてハニカムエレメントを機能化する方法を開発し、高耐久性のアルミニウム製吸着式全熱交換器を研究開発したことについて述べる。

第3章ではアルミニウム製吸着式全熱交換器の潜在的な問題であった臭気の吸着蓄積および、放出による臭気発生問題の解決に取り組み、吸湿性がありながら臭気成分を吸着しにくいというイオン交換樹脂の特異な吸着性を応用して臭気問題を根本的に解決した新規な全熱交換器について述べる。

1.2.2 ハニカム吸着式除湿機

ハニカム吸着式除湿機（写真1-2）はシリカゲルなどの吸着剤で構成されたハニカムに空気を通すことにより、ハニカムで湿気を吸着除去して乾燥空気を供給する装置で、吸着除去した湿気は脱着ゾーンで熱風により脱着再生する。

第4章では吸収剤を使用した従来式ハニカム除湿機の欠点を解決するために吸着式のハニカムローターの製法を研究し、ハニカム状に成型した多孔質マトリックス内でシリカゲルを合成するという独創的な方法を考案し、バインダを使用することなく、シリカゲル自身でハニカム状に結合したハニカム状シリカゲルエレメントを研究開発し、除湿性能について試験検討した。



ローター $\phi 770 \times 200\text{mm}$
露点: D.P. -20°C
風量: $3600\text{m}^3/\text{H}$
環境試験室用

写真1-2 ハニカム吸着式除湿機ユニット

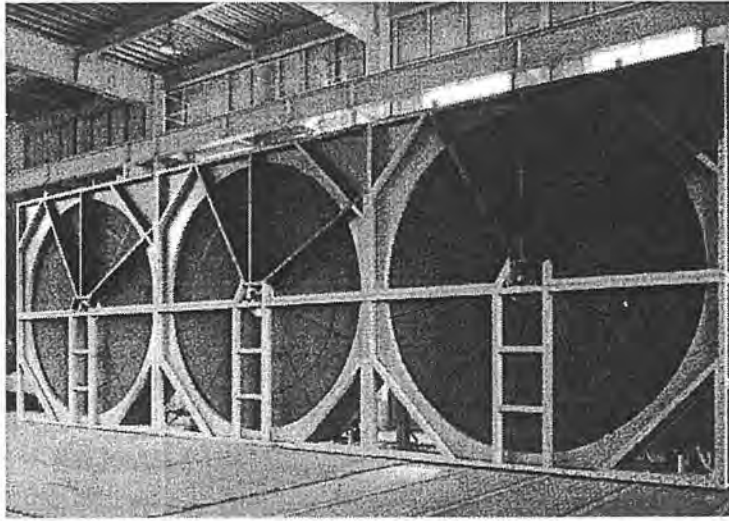


写真1-3 有機溶剤除去濃縮カセット

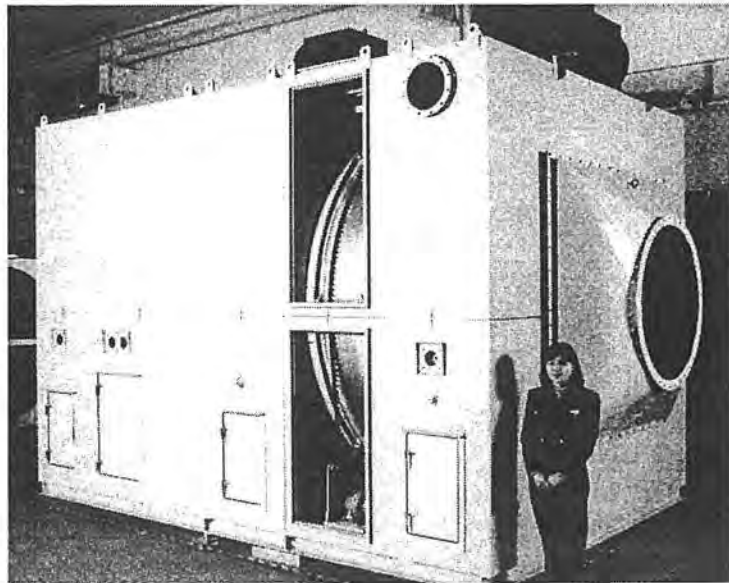


写真1-4 有機溶剤除去濃縮ユニット

1. 2. 3 有機溶剤除去濃縮装置

有機溶剤除去濃縮装置（写真1-3、1-4）の基本的な構造、原理はハニカム吸着式除湿機と同じであるが、水分は殆ど吸着せずに有機溶剤を強力に吸着する特殊な疎水性合成ゼオライトを担持したハニカムローターを使用する。塗装工場などから排気される有機溶剤蒸気を含んだ空気をハニカムローターに通すと、有機溶剤はハニカムに吸着除去され浄化された空気が排気される。吸着した有機溶剤は再生ゾーンで熱風によって10倍程度に濃縮されて脱着され、燃焼法などで無害化処理される。

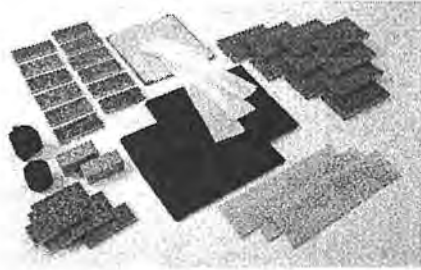
1. 2. 4 ハニカムフィルター

ハニカム型吸着エレメントの応用例としてハニカムフィルターがある（写真1-5）。活性炭で構成したハニカムフィルターは脱臭フィルター、オゾン分解フィルターなどに使用される。プラスチックフィルムやアルミニウムシートで構成したハニカムエレメントは、エアカーテン用整流格子として、冷蔵ショーケースの冷氣流出防止目的に使用される。不織布で構成したハニカムフィルターでは、静電気で花粉や粉塵を吸着除去するエアコン用集塵フィルターの製品例がある。他には活性炭や無機繊維で構成したハニカムエレメントに薬品を添着して、空気中の微量な化学物質を除去するケミカルフィルターの製品例などがある。

ハニカム型吸着エレメントは組み合わせる素材、構成、加工方法によって今後も様々な分野の製品に応用される可能性を秘めている。

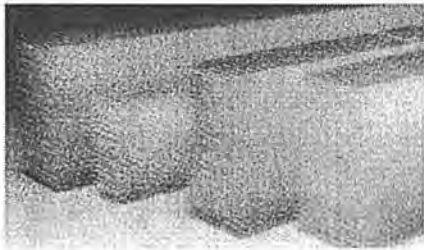
1. 3 ハニカム型吸着エレメント製品を組み合わせたシステム

ハニカム型吸着エレメントの応用製品を組み合わせたシステムとしてデシカント空調システムがある（図1-6）。デシカント空調



脱臭用エレメント(特殊シート)
化学反応及び酵素によって臭気を分解
するハニカムエレメント

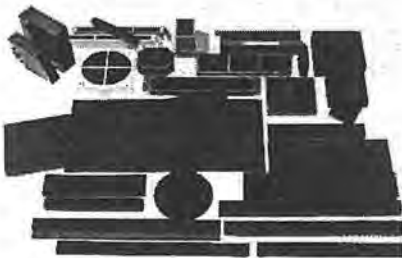
静電フィルター



整流格子

用途: 冷凍冷蔵ショーケース用エアーカーテン
産業用整流格子etc

材料: ポリプロピレン、アルミ、ステンレスetc



脱臭エレメント

オゾン分解エレメント

エアーフィルター

写真1-5 ハニカムフィルター製品

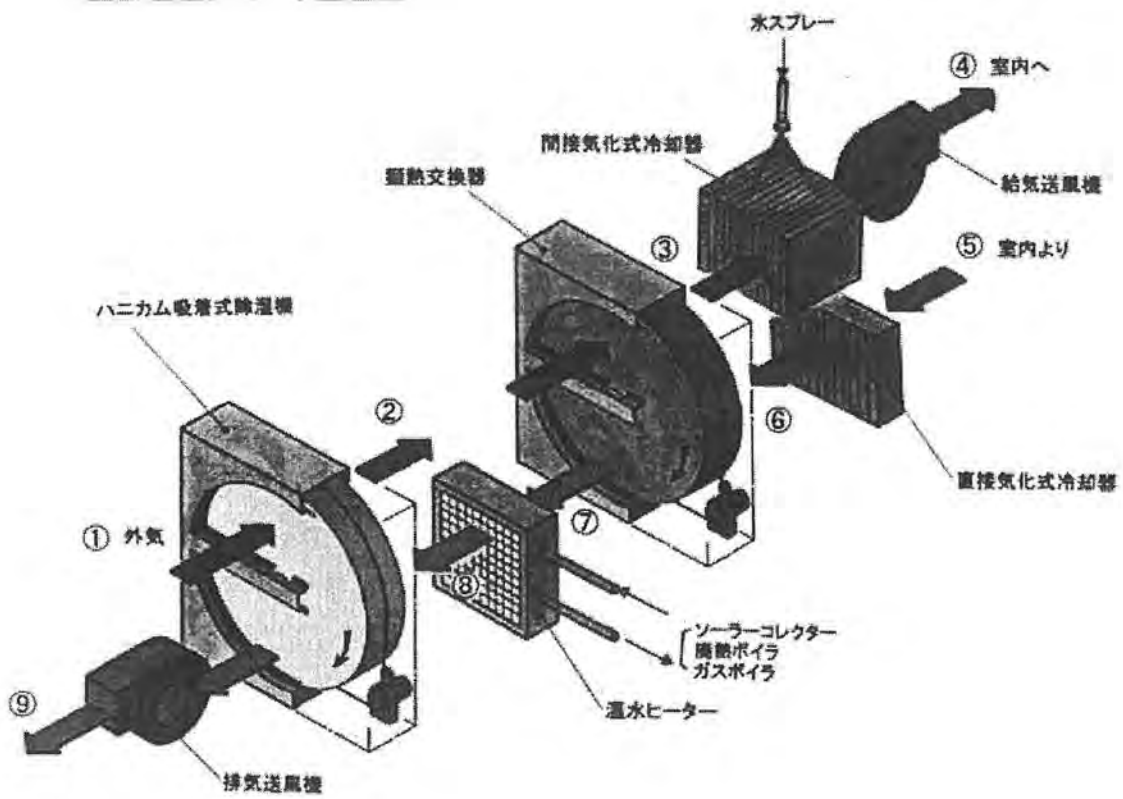


図1-6 デシカント空調システム

システムは太陽熱や低温排熱をエネルギー源として、ハニカム除湿機と顕熱交換器及び水の気化冷却器を組み合わせるシステムで、20年程前から各国で試験研究され最近徐々に採用実績も増えてつつある。近年、電力自由化の動きに伴い各種自家発電装置の排熱を利用したコージェネレーションシステムが検討されているが、年間を通して高効率で運転するためには排熱の有効利用が課題となっており、その排熱を効率的に利用できるシステムとしてデシカント空調システムが注目されている。第5章ではマイクロガスタービン発電機の排熱を利用することに適したデシカント空調システムを検討した。

第2章 回転型全熱交換器用吸着ローターの開発と実験的研究

2.1 緒言

全熱交換器は、ビルなどの空調換気に使用される顕熱と潜熱を同時に熱交換回収する省エネルギー装置である。初期に開発された全熱交換器は、アスベストペーパー製のハニカムローターに潜熱交換剤として塩化リチウムを含浸したものであったが、アスベストの発ガン性問題や、塩化リチウムを使用しているために高湿度時に塩化リチウムが流出して性能低下したり、周辺機器を腐食する塩害が発生したりするなどの問題があった。これらの問題を解決するために、本来顕熱交換機能しかないアルミニウムシートに固体吸着剤を担持して潜熱交換機能を付加する方法を研究し、全熱交換性能の優れたアルミニウム製の全熱交換器を実用化することに成功した。

2.2 全熱交換器の原理

全熱交換器（図2-1）は、ビル等の空調換気によって失われるエネルギーの顕熱（温度）と同時に潜熱（湿度）も交換回収する回転蓄熱型熱交換器で、特に冷房負荷の半分以上を潜熱負荷が占める東南アジアの夏期において、高い省エネルギー効果を発揮することが出来る。例えば夏期の場合、取り入れた外気がハニカムローターを通過する間に、外気に含まれる顕熱と潜熱がローター内に蓄えられ、外気は冷却減湿されたあと室内に給気される。一方汚れてはいるが冷たく湿度の低い室内空気はローターを通過するときに、ローターに蓄えられていた外気の顕熱と潜熱を受け取って暖かく湿った空気となって排気される。冬期の場合は暖気と冷気の位置が入れ替わるが、同様の作用で熱交換する。その場合は室内の換気によっ

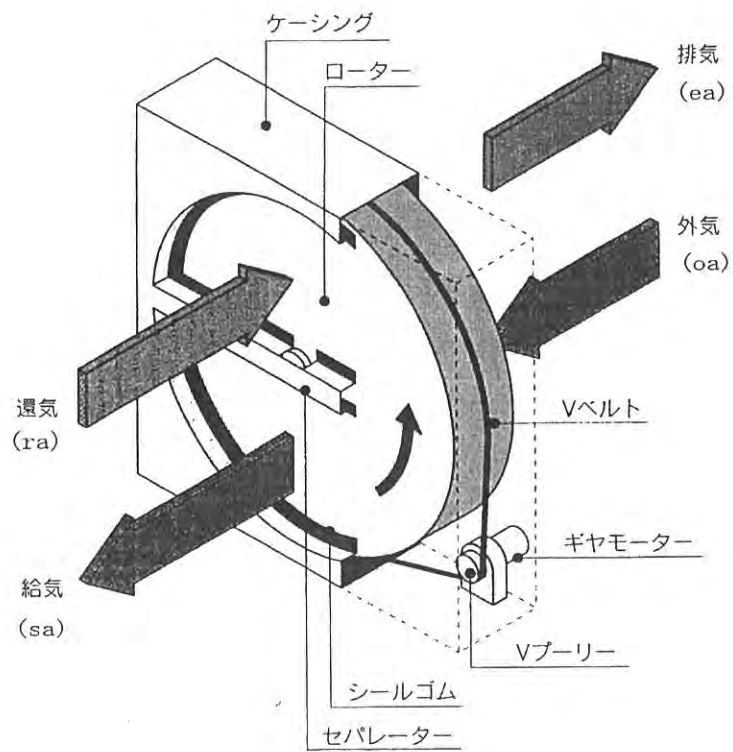


図 2 - 1 全熱交換器カセット図

て失われる顕熱と共に潜熱（湿気）も回収し、室内が極度に乾燥することを防止することができる。全熱交換器を使用することによって、換気によって失われるエネルギーの70～80%を回収することができ、冷暖房負荷を削減することができる。

2.3 研究開発の背景

全熱交換器は、1953年頃スウェーデンで発明され¹⁾、優れた省エネルギー効果が認められて全世界に普及していった。国内においても西部技研等数社が国産化し、当初は基本特許に類似した製法、材料を使用していたが以下のような改善点の有ることが分かった。

- ① 1978年頃より全熱交換器の主材料であるアスベストに発がん性のあることが分かり、アスベストを使用しないローター開発の必要性が生じた。
- ② 潜熱交換機能を持たせるためハニカムエレメントに塩化リチウムを含浸していたが、高湿度時に塩化リチウムが過剰に吸湿して流出し、性能の劣化をきたしたり、周辺機器を腐食させたりする等、東南アジア、日本のような高湿度地域では使い辛いという欠点があった。
- ③ パチンコ店、遊技場等喫煙あるいは粉塵の多い場所では、それらによって汚染されるため使用できなかった。そのような所にも使える、洗浄可能なローターができないかというニーズがあった。

このような背景をふまえ、過酷な環境でもトラブル無く使用できる全熱交換器用ローターを研究開発した。

2.4 アルミ製吸着式全熱交換ローターの製法

2.4.1 ハニカム材料の選定

熱交換器用シート材料としてアルミニウムやステンレスの金属シートおよび各種プラスチックフィルムを候補として選び、顕熱交換器ローターを試作して性能試験を行った。その結果については2.5.2で詳細を述べるが、顕熱交換性能の点からはいずれも使用可能であることを確認し、最終的にはコスト、量産性、難燃化性等を考慮してアルミニウムシートを選定した。

2.4.2 シート材料に吸湿性を付加する方法

全熱交換器は顕熱のみならず潜熱（湿度）も蓄熱交換する機能が重要であるが、ハニカムローターに潜熱交換機能を付加する方法として従来は多孔質のハニカムに吸湿性の塩を含浸する方法が採られていたが、過剰吸湿によるトラブルの発生と、洗浄できないという欠点のため根本的に採用できない方法である。そのためシート材料に、洗浄しても流失することの無い吸湿層を作る方法を以下検討した。

- ① アルミニウム製のハニカムを薬品処理して腐食させ、その表面に吸湿性の層をつくる方法²⁾。
 - ② シリカゲル等の固体吸着剤パウダーをバインダーに混ぜ込み、シート材料にコーティング、コルゲート加工してローター化する方法。
 - ③ ローター化した後で吸着剤パウダーを分散させたバインダー液中に浸漬して、付着させる方法。
 - ④ シート材料にバインダー層をコーティングしながら表面に吸着剤微粒子を接着コーティングし、その後コルゲート加工してローター化する方法³⁾。
- ①の方法では材料がアルミニウムに限定され、吸湿層が本質的にアルミ化合物しかできないことや、吸湿層の付着強度、対腐食性等について問題がある。②、③の方法では、共に色々な種類のハニカム材料や吸着剤を選択できるが、吸着剤の表面がバインダーによって

覆われるため、吸湿性能が阻害され潜熱交換性能が悪くなる傾向がある。また、潜熱交換性能向上のためにバインダー量を少なくすると付着強度が弱くなり脱落しやすくなるという問題がある。

以上の検討により、シート材料に吸湿性を持たせる方法として本研究では④の方法を考案し、**図 2-2**のような吸着剤コーティング装置を製作した。この装置でシート材料にバインダー層をコーティングしながらシリカゲル微粒子等の吸着剤を吹き付けて塗布し、さらにそのシートをコルゲート加工、巻きつけてアルミニウム製全熱交換器ローターを試作した³⁾。吸着剤の粒子径は、大きいと後工程での脱落が多くなりまた小さいと塗布量が少なくなるため、テストの結果 100~300 メッシュに決定した。吸着剤の塗布量は多いほど潜熱交換効率が向上するが、20g/m²以上あれば十分である事が分かり 20~30g/m²に決定した。この方法によれば、**図 2-3**のように吸着剤粒子は接着層に半ば埋まり込んだように強固に接着され、バインダーによる吸湿性能への悪影響もなく、また粒子が突出しているため通過空気との接触面積が広く高い潜熱交換性能を得ることができると考えられる。

2.5 熱交換性能試験

熱交換器材料としての適性確認のためアルミニウム製、ステンレス製、プラスチック製の顕熱交換器用ローターを試作し、それぞれのローターについて熱交換性能試験を行い比較した。

さらに 2.4.2 の検討による吸着剤塗布加工法によるアルミニウムシートで試作した全熱交換器用ローターについて熱交換性能試験を行い、前述の顕熱交換器用ローターとの比較を行った。また、難燃紙に塩化リチウムを含浸した従来式的全熱交換器用ローターについても熱交換性能試験を行い比較した。**表 2-1** は本研究で試作した各種試験用熱交換ローターの仕様一覧表である。

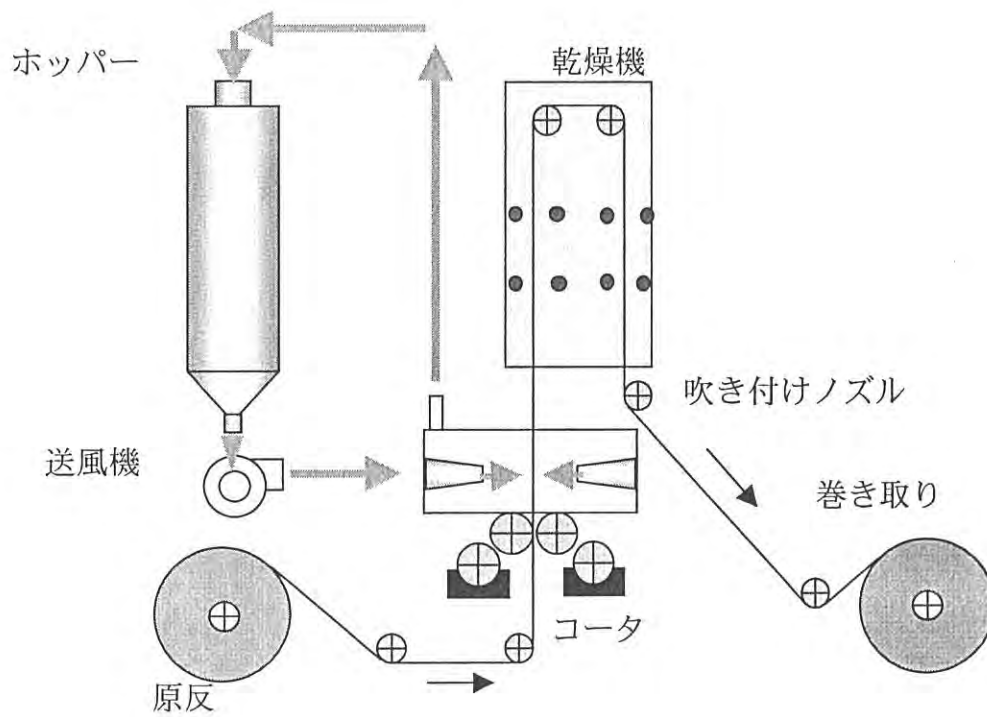


図 2-2 吸着剤コーティング装置

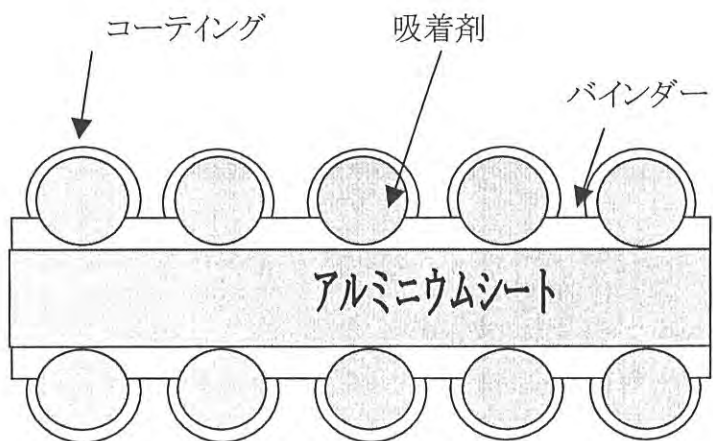


図2-3 ハニカムシート拡大図

表 2 - 1 各種試験用熱交換器ローターの仕様

	ローター種類	材 質	総厚さ t mm	ピッチ P mm	高さ H mm	ローター幅 mm	回転数 N rpm	吸湿剤	伝熱面積 a m ² / m ³	開口率 ε	相当直径 d mm	密度 ρ kg/m ³
①	全熱交換器	アルミニウム	0.080	2.60	1.35	60	20	シカゲル	2643	0.801	1.212	170
②	"	アルミニウム	0.080	4.10	1.44	230	16	シカゲル	2160	0.844	1.563	146
③	"	アルミニウム	0.080	4.10	1.80	200	16	シカゲル	2121	0.870	1.641	122
④	"	アルミニウム	0.080	6.35	3.40	200	16	シカゲル	1169	0.919	3.142	69
⑤	"	難燃紙	0.185	3.31	1.95	200	8	LiCl	1867	0.729	1.561	147
⑥	"	難燃紙	0.185	4.06	2.05	200	8	LiCl	1737	0.758	1.746	133
⑦	顕熱交換器	PVC	0.060	3.31	2.00	230	10	—	2121	0.910	1.715	106
⑧	"	PP	0.060	3.40	2.35	200	16	—	1836	0.920	2.004	58
⑨	"	SUS430	0.050	3.30	1.30	200	8	—	2900	0.893	1.232	685
⑩	"	SUS430	0.050	3.75	1.70	200	8	—	2364	0.918	1.552	542
⑪	"	アルミニウム	0.060	4.10	2.07	250	8	—	1948	0.908	1.864	187
⑫	"	SUS304	0.100	4.20	1.98	250	8	—	1964	0.869	1.77	930

2. 5. 1 性能試験方法

図 2-4 の風洞試験装置において熱交換性能を試験測定した。試験条件は風洞試験装置を設置した室内と空気調整室内とで温・湿度差を付けることで夏または冬の空調条件を設定した。風量及び静圧損失は管内オリフィス及び精密微差圧計（柴田科学製 MP-200）により測定した。温度及び湿度についてはエース鋭感湿度計（エース研究所製 AKL 型、DRLK ペンシル型センサ）を使用した。顕熱交換効率 E_t 、全熱交換効率 E_i 、潜熱交換効率 E_x の各値は式（2-1）～（2-6）を用いて求めた。

顕熱交換効率

$$E_t(sa) = (T_{sa} - T_{oa}) / (T_{ra} - T_{oa}) \quad \dots\dots (2-1)$$

$$E_t(ea) = (T_{ra} - T_{ea}) / (T_{ra} - T_{oa}) \quad \dots\dots (2-2)$$

全熱交換効率

$$E_i(sa) = (I_{sa} - I_{oa}) / (I_{ra} - I_{oa}) \quad \dots\dots (2-3)$$

$$E_i(ea) = (I_{ra} - I_{ea}) / (I_{ra} - I_{oa}) \quad \dots\dots (2-4)$$

潜熱交換効率

$$E_x(sa) = (X_{sa} - X_{oa}) / (X_{ra} - X_{oa}) \quad \dots\dots (2-5)$$

$$E_x(ea) = (X_{ra} - X_{ea}) / (X_{ra} - X_{oa}) \quad \dots\dots (2-6)$$

熱交換効率には給気側（sa）効率と排気側（ea）効率があるが、対象とする全熱交換器は給気側の効率が重要で、以後効率は給気側効率で取り扱うこととする。

2. 5. 2 顕熱交換器の実測効率と理論計算値の比較

図 2-5 に示すハニカムの形状に対し伝熱面積 a [m^2/m^3]、開口率 ε 、相当直径 d [mm]、ハニカム密度等を計算し、Lambertson⁴⁾の基礎理論計算より顕熱交換効率の計算値（1）を求めた。図 2-6、図 2-7 はアルミニウム製顕熱交換器の実測値と計算値（1）

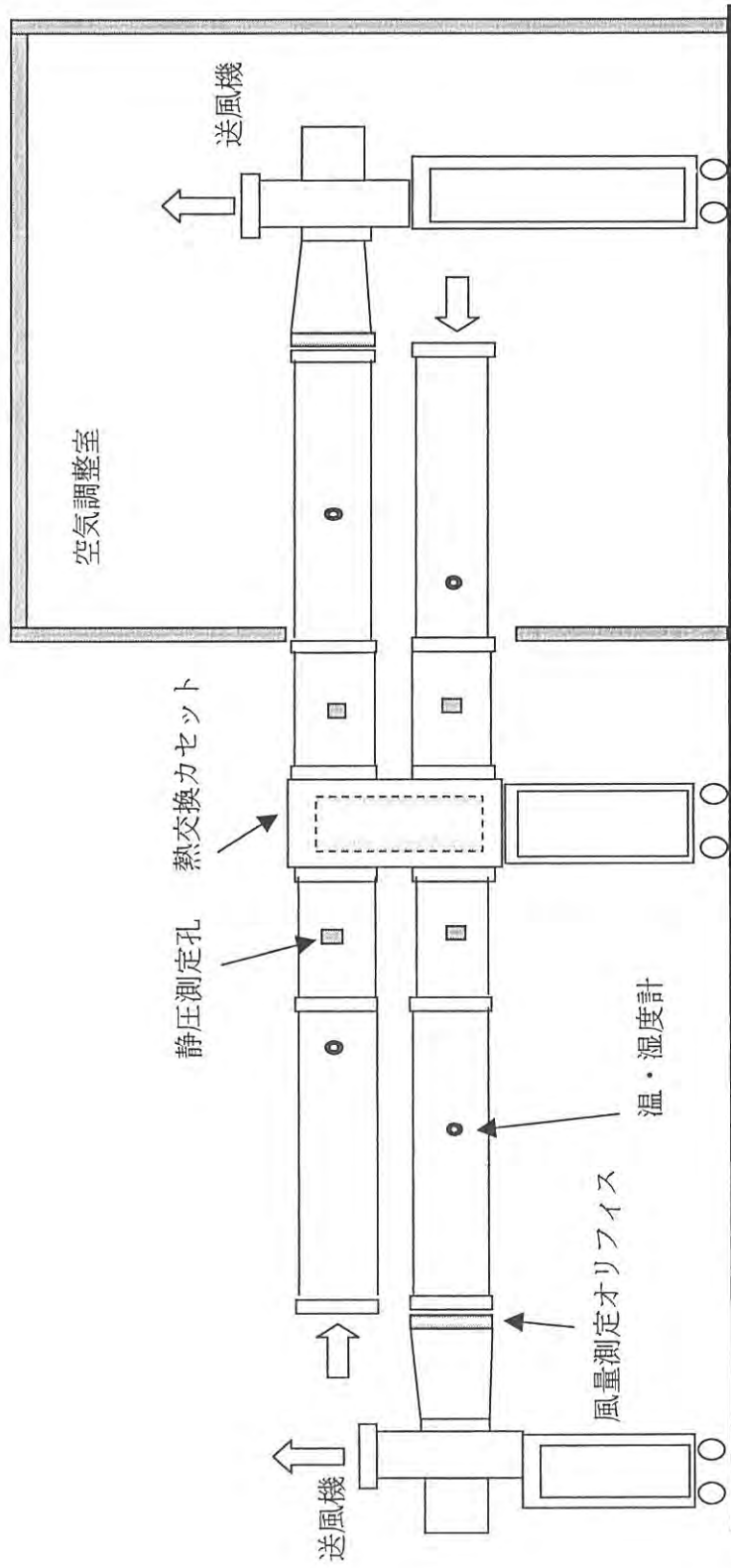


図 2-4 熱交換器性能試験設備

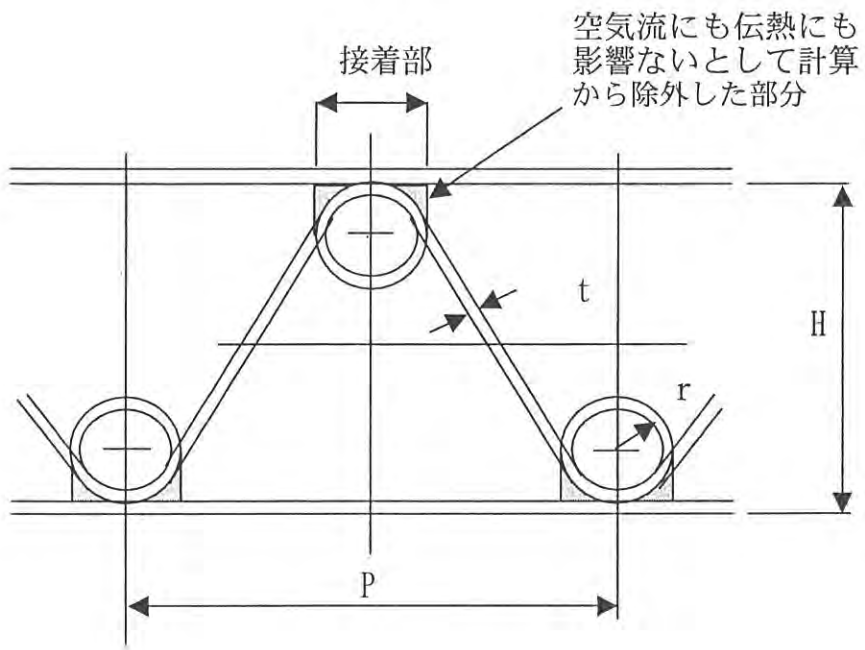


図 2 - 5 ハニカム形状

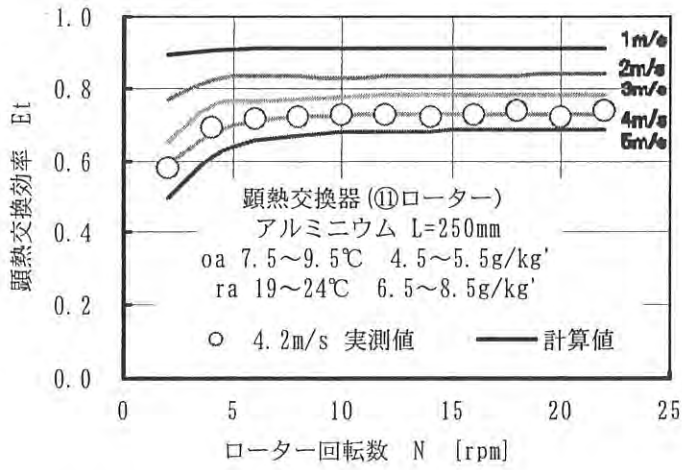


図 2 - 6 顕熱交換効率と回転数

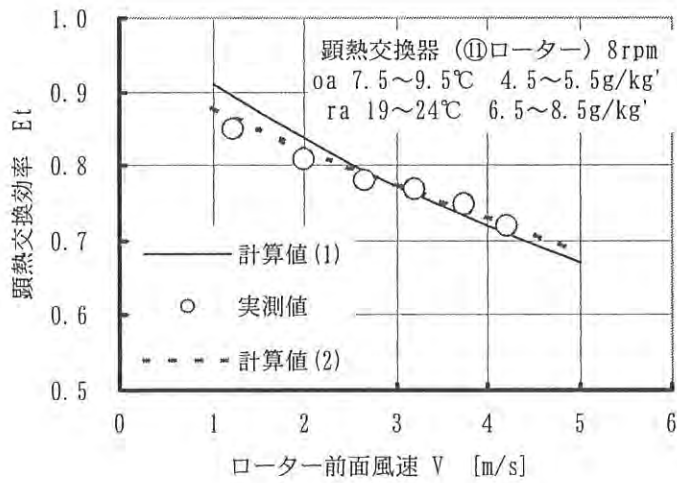


図 2 - 7 ローター前面風速と顕熱交換効率

を比較したものである。図 2-6 に示すようにローター前面風速 4.2m/s におけるローター回転数と顕熱交換効率の関係は実測値と計算値の間で比較的よく一致している。図 2-7 のローター前面風速と顕熱交換効率の関係においては、ローター前面風速 2.5m/s 以上の高風速においては計算値(1)と実測値はよく一致しているものの、2.5m/s 以下の低風速側においては実測値は計算値(1)の下方にずれる。これは Lambertson の理論計算方法では、蓄熱体中の熱伝導が流体の流れ方向及び蓄熱体の回転方向にはゼロとして計算されているためと思われる。Bahnke and Howard⁵⁾ は蓄熱体中の熱伝導を考慮した理論計算を行っており、これにより求めた理論効率計算値(2)を図 2-7 の破線で示す。その結果 Lambertson による理論計算値より実測値に近い計算値が得られた。

図 2-8、図 2-9 にステンレス製(SUS304)顕熱交換器の熱交換性能実測値と理論計算値を比較した。ステンレス製の場合は全風速域において実測値と計算値(1)はよく一致しており、これはアルミニウムの熱伝導度(230W/m・K)に比べ、ステンレスの熱伝導度(16W/m・K)がかなり小さいためと推測される。これは蓄熱体中の熱伝導をゼロとした計算値(1)と、熱伝導を考慮した計算値(2)との差が少ないことから裏付けられる。難燃紙製、及び PVA、PP 等プラスチック製ローターにおいても実測値と計算値(1)は良く一致している。

2.5.3 全熱交換器の効率試験結果

顕熱交換器ローターの試験結果より、吸着剤を塗布加工したアルミニウムシート製全熱交換器ローターを試作し、試験した。ローターの回転数と熱交換効率の試験結果を図 2-10、図 2-11 に示す。図 2-10 は低風速域の 2.7m/s、図 2-11 は高風速域 4.5m/s のデータであるが、高風速域での効率は顕熱交換効率よりも全熱交換効率、さらに潜熱交換効率がより大きく影響を

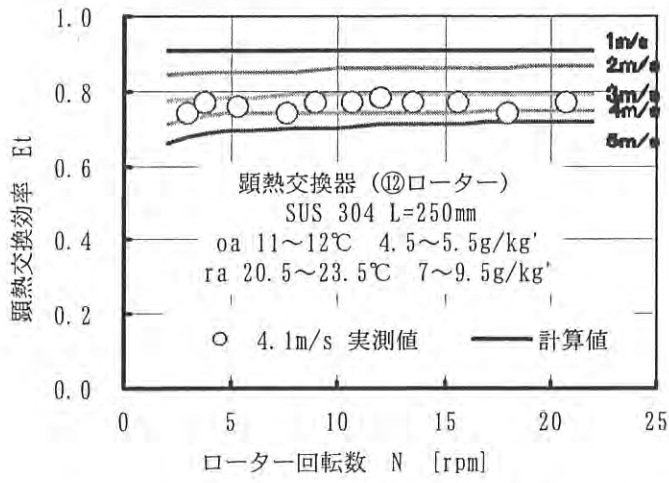


図 2 - 8 ローター回転数と顕熱交換効率

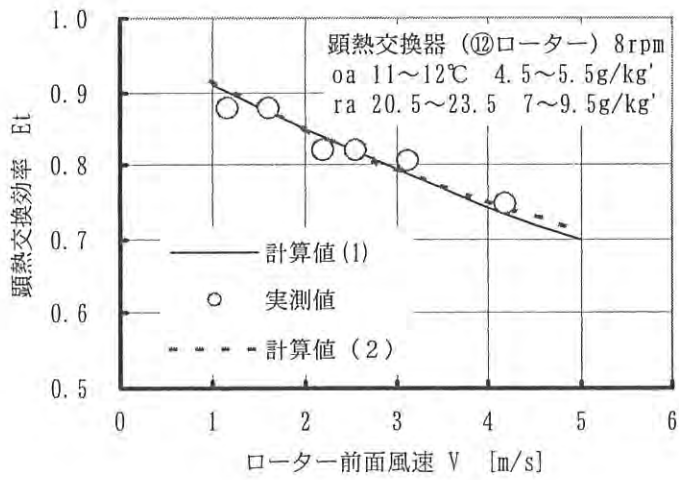


図 2 - 9 ローター前面風速と顕熱交換効率

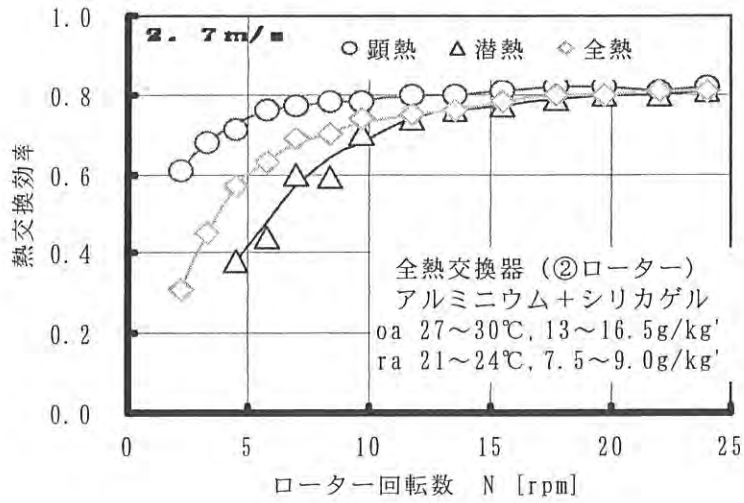


図 2 - 1 0 全熱交換器のローター回転数と熱交換効率 (2.7m/s)

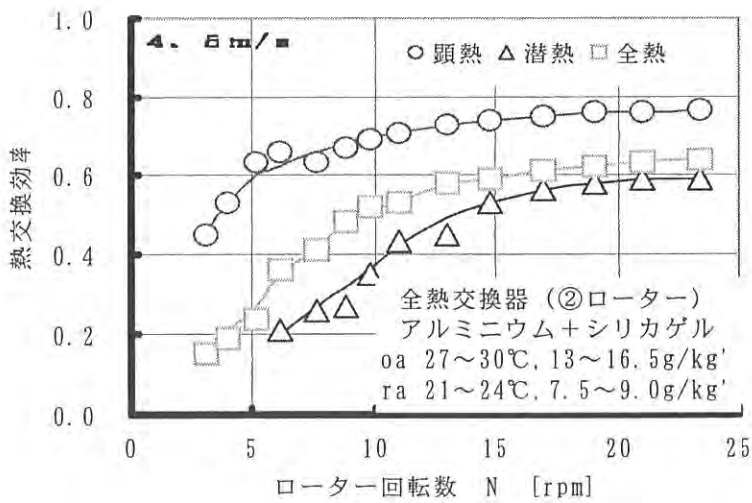


図 2 - 1 1 全熱交換器のローター回転数と熱交換効率 (4.5m/s)

受けて低下していることが分かる。2.7m/s ではローター一回転数 16rpm で顕熱、全熱、潜熱交換効率ともにほぼ等しくなっているが、4.5m/s ではローター一回転数を 24rpm まで上げてても顕熱交換効率と全熱、潜熱交換効率は大きく離れている。ローター一回転数を速くするほど熱交換性能は向上するが徐々に飽和する傾向にあり、16rpm 以上に速く回転させてもそれ程熱交換効率は向上していない。この試作ローターにおいては、装置の強度、耐久性、駆動エネルギーを考慮して 16rpm 前後が実用的な最適回転数であるといえる。

図 2 - 1 2 はその各種試験用熱交換ローターによる顕熱交換効率の実測値を Lambertson の理論計算による総括熱移動単位数 (NTU) θ の図にプロットしたもので、実測値と比較的よく一致している。計算値より少し外れたものもあるが、前項で述べた蓄熱体内部での熱伝導の影響によるものと理由付けられる。

2. 5. 4 空気条件による熱交換効率の変化

全熱交換器の熱交換効率は、使用される空気条件によって変化する。このため、空気条件を変化させて熱交換性能への影響を測定し評価した。その結果を図 2 - 1 3 に示す。ここで横軸に用いている過飽和水蒸気量 X_e は次のように定義する。すなわち、図 2 - 1 4 において高温高湿度側 ra より水平に延長した線と、低温低湿度側 oa から垂直に上に延長した線の交点 a から垂直線と飽和線との交点 b までの絶対湿度の差を X_e で表している。言いかえるとこれは ra 点の空気を、そのまま oa 点の温度まで冷却した場合に、過飽和になるはずの水蒸気量を表している。図 2 - 1 3 のような傾向が見られる理由として次のように考えられる。まず X_e がマイナスのときには潜熱負荷は少なく、ローターの潜熱交換容量には余裕があるため潜熱交換効率は高くなり、顕熱交換効率

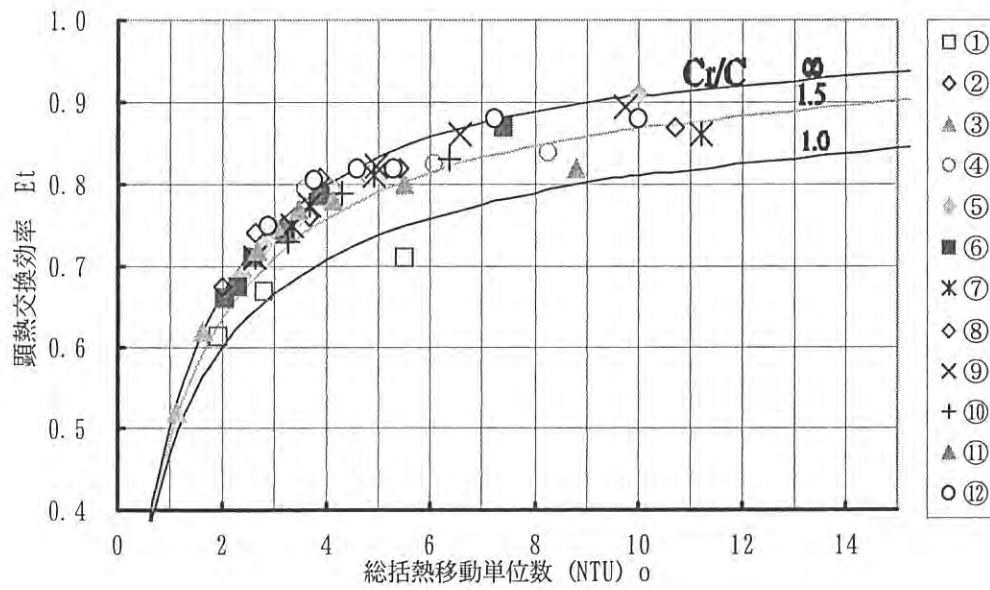


図 2 - 1 2 各種試験用熱交換ローターの効率と総括熱移動単位数 (NTU) θ

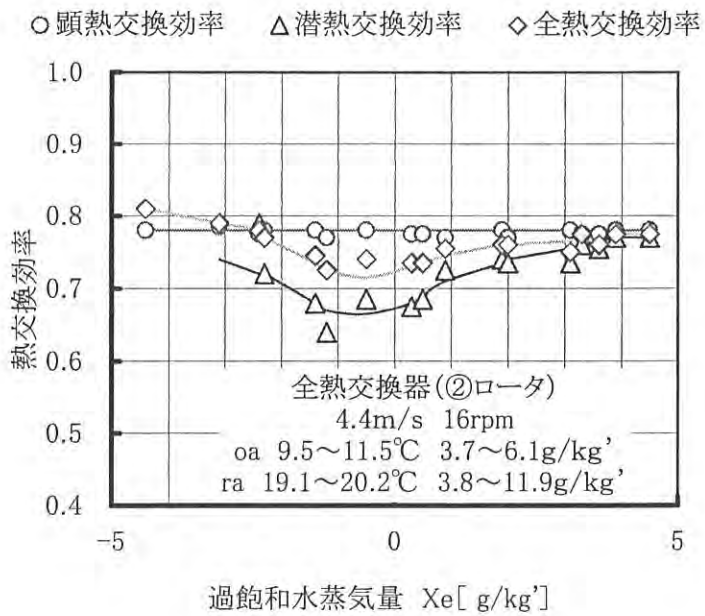


図 2 - 1 3 空気状態による熱交換効率の変化

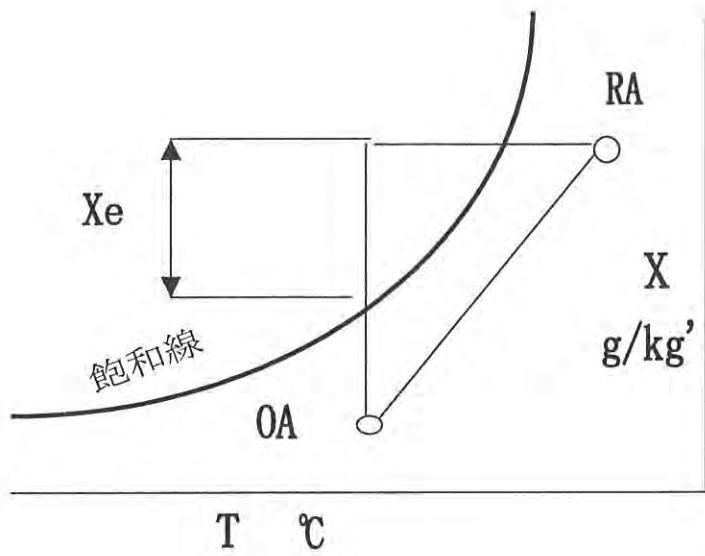


図 2 - 1 4 過飽和水蒸気量 X_e [g/kg'] 説明図

にはほぼ等しくなる。次に Xe が増加していくにつれて潜熱負荷が増加するため、除々に潜熱交換容量は不足し潜熱交換効率が低下する。さらに Xe が増加していくと熱交換器通過中の空気の相対湿度はかなり高くなり、吸着剤による吸着量にプラスして水蒸気の凝縮現象も起こり、結果的に潜熱交換容量は向上、潜熱交換効率は顕熱交換効率に近づくものと考えられる。

2. 6 結 言

塩化リチウム等液体吸収剤を潜熱交換剤として含浸した初期の全熱交換器の欠点を解消するため、固体吸着剤を使用した全熱交換器を実用化する研究開発を行い、以下の結果を得た。

- 1) 固体吸着剤をシート材料にコーティングする方法により、液体吸収剤を含浸した従来式に替わる全熱交換器用ローターを実用化することができた。
- 2) 回転式熱交換器用シート材料としては金属、プラスチック、紙等種々の材料が使用可能であり、熱交換性能にはシート材料の熱伝導度は特に影響しない。しかし 2m/s 以下の低風速域においては熱伝導度が大きくなると熱交換性能が低下することが分かった。
- 3) 熱伝導度の小さい材料で作した熱交換器については、Lambertson⁴⁾による理論計算方法で計算値と実測値は比較的良く合うが、熱伝導度の大きい材料で作した熱交換器では低風速側で実測値との差異が生じる。しかし材料中での熱伝導を考慮した Banke and Howard⁵⁾らの理論計算によるとほぼ実測値と同じ計算値が得られることが分かった。
- 4) 顕熱交換効率和潜熱交換効率は低風速域ではほぼ等しいが、高風速域になるに従い潜熱交換効率は低下し、顕熱交換効率との開きが大きくなる傾向がある。
- 5) 顕熱交換効率は空気条件の影響を受けないが、潜

熱交換効率は空気条件の影響を受けて変化することが分かった。

使用記号

a	: 伝熱面積	[m ² / m ³]
d	: 相当直径	[mm]
E _t	: 顕熱交換効率	[-]
E _i	: 全熱交換効率	[-]
E _x	: 潜熱交換効率	[-]
H	: コルゲート高さ	[mm]
I	: エンタルピー	[kJ / kg']
L	: ローター幅	[mm]
N	: ローター回転数	[rpm]
NTU	: 伝熱単位数	[-]
p	: ハニカムピッチ	[mm]
r	: ハニカム先端アール	[mm]
T	: 温度	[°C]
t	: シート材料の総厚さ	[mm]
V	: ローター前面風速	[m / s]
X	: 絶対湿度	[g / kg']
X _e	: 過飽和水蒸気量	[g / kg']
ε	: 開口率	[-]
ρ	: ハニカムエレメント密度	[kg / m ³]

添字

ea	: 排気側
o	: オーバーオール
oa	: 外気側
ra	: 還気側
sa	: 給気側

文 献

- 1) カール・ゲオルグムンターズ：特公昭 3 1 - 4 0
8 6
- 2) オブ・ストリンドバーグ、エリック・ランゲル：
特公昭 6 0 - 1 5 8 7 9
- 3) 隈・原田・田中・岡野：特公昭 6 2 - 1 9 3 0 2
- 4) Lambertson, T. J. : " Performance Factor of a
Periodic-Flow Heat Exchanger" . Trans. ASME,
vol. 80 (1958) , pp. 586 ~ 592 .
- 5) G. D. Bahnke, C. P. Howard, " The Effect of
Longitudinal Heat Conduction on Periodic-Flow
Heat Exchanger Performance" Journal of
Engineering for Power, Trans. ASME (1964) , pp. 105
~ 120

第3章 イオン交換樹脂を吸湿材として使用した 臭気移行の少ない新規な全熱交換器

3.1 緒言

全熱交換器はビル、工場等の換気によって失われるエネルギーを回収再利用する省エネルギー装置で、顕熱（温度）と共に潜熱（湿気）も交換回収できるため省エネルギー効果が高く、各国で色々なタイプが製品化されている。しかし潜熱（湿気）交換機能を持たせるためにシリカゲル、アルミナ、合成ゼオライト等の吸湿材が使用されていたが、その吸湿剤が湿気と共に臭気成分も吸着する性質があり、臭気が吸着移行したり、吸着蓄積した臭気が外気湿度の上昇時に置換吸着現象により脱着されて給気側に放出されたりして、異臭発生クレームになることがあった。発生率としては0.1～0.4%程度とわずかながら、一旦発生すると著しい不快感により深刻な問題となるが多かった。この問題を解決するために様々な吸湿剤の特性を研究し、イオン交換樹脂を吸湿材として使用することによって、臭気の吸着移行の少ない新規な全熱交換器を開発製品化することに成功した。

3.2 全熱交換器による異臭クレーム発生の原因

全熱交換器等で異臭が発生する原因は次のように考えられる。（図3-1参照）

- ① 室内で発生した臭気が、全熱交換器を通過して排気される際に吸着剤（シリカゲル等）に吸着・蓄積される。特に新築ビルでは、建材等から様々な臭気や溶剤等が発生する。
- ② 春先や梅雨時等外気の湿度が急に高くなった場合、吸着剤への水蒸気吸着量が増えて臭気が追い出される、いわゆる置換吸着現象で室内側に臭気が放出される。または加湿器が臭気発生源になることも有った。
- ③ 全熱交換器は、水蒸気と共に臭気も吸着移行させやすく、一旦室内側

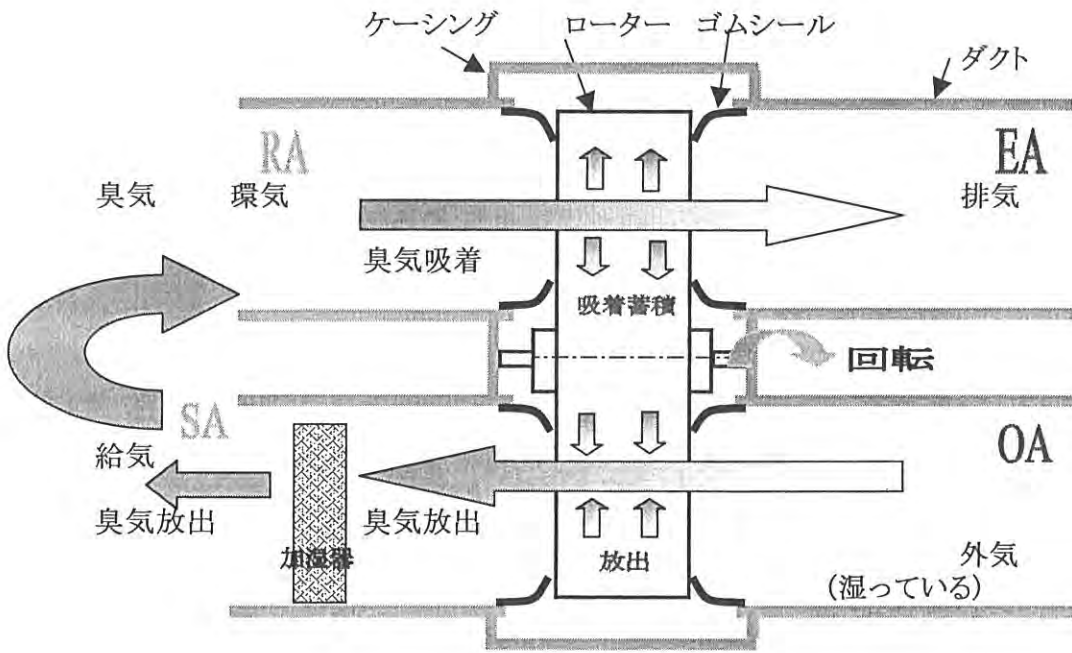


図 3-1 異臭クレーム発生原因説明図

に放出された臭気は還気・排気側から給気側に移行して室内側に戻るため、臭気がいつまでも排出されずに臭う。

3.3 シリカゲルとイオン交換樹脂の吸湿の違いについて

3.3.1 シリカゲルの臭気吸着

シリカゲルの吸着現象は大別してシラノール基(Si-OH)によるものと(図3-2)、毛細管吸着(図3-3)によるものがある。シラノール基は水蒸気吸着性が非常に強いが、水以外の臭気もよく吸着する。又毛細管吸着による場合も水溶性の臭気であれば吸着した水蒸気に溶けて吸着され、又非水溶性の臭気であれば細孔内の比較的親水性の弱い部分に吸着される。したがってシリカゲルなど細孔を有する吸着剤では臭気の吸着蓄積・移行は避けられないと考えられる。

3.3.2 吸収剤(吸湿性の塩)の臭気吸着

難燃紙ローターに吸湿剤の塩化リチウムを含浸したタイプは、シラノール基や吸着に関与するような細孔を持たないが、セルロース、パルプ等が繊維表面に水酸基(OH基)を多量に持っているためシラノール基のように水素結合により臭気を吸着する。また塩化リチウムは相対湿度11%RH以上では吸湿した水に溶けて塩溶液の状態が存在し、水溶性臭気であればその溶液に溶解して吸収・移行を生じると考えられる。

3.3.3 イオン交換樹脂の吸湿性と臭気吸着

本研究に用いたイオン交換樹脂はスチレンジビニルベンゼン系の強酸性陽イオン交換樹脂で、図3-4に示すイオン交換樹脂の構造イメージ図のように、スチレン基体をジビニルベンゼンで架橋した構造になっており、樹脂内部に固定イオンとしてスルホン酸基(-SO₃H)と、対イオンとしてナトリウム等(Na⁺)とを有している⁷⁾。イオン交換樹脂の、吸湿現象はイオンの水和力と浸透圧によって生ずると言われており、シリカゲ

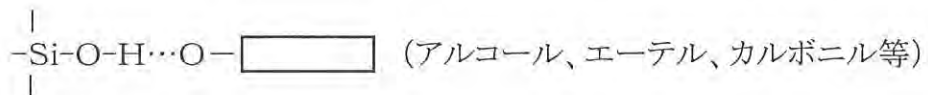
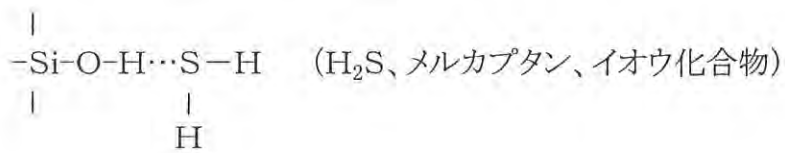
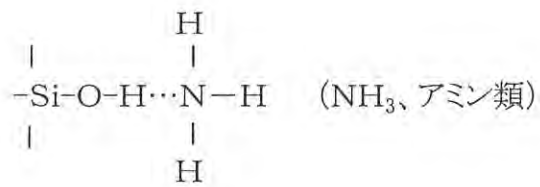
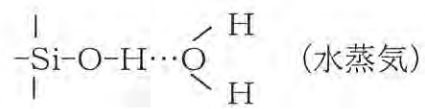
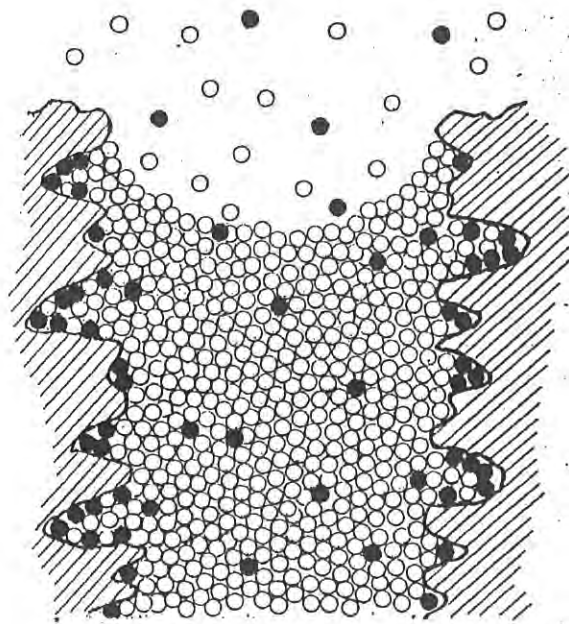


図3-2 シラノール基 Si-OH による吸着原理図



○ Water molecule
● Odor molecule

図3-3 細孔への吸着イメージ図

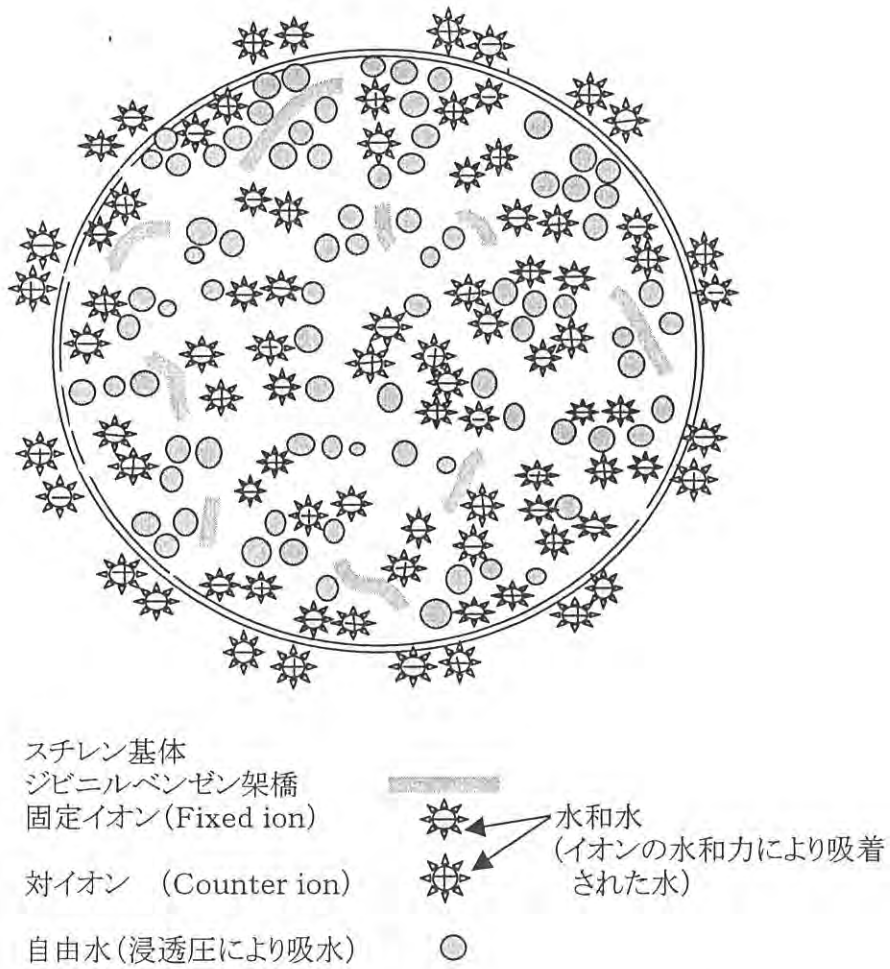


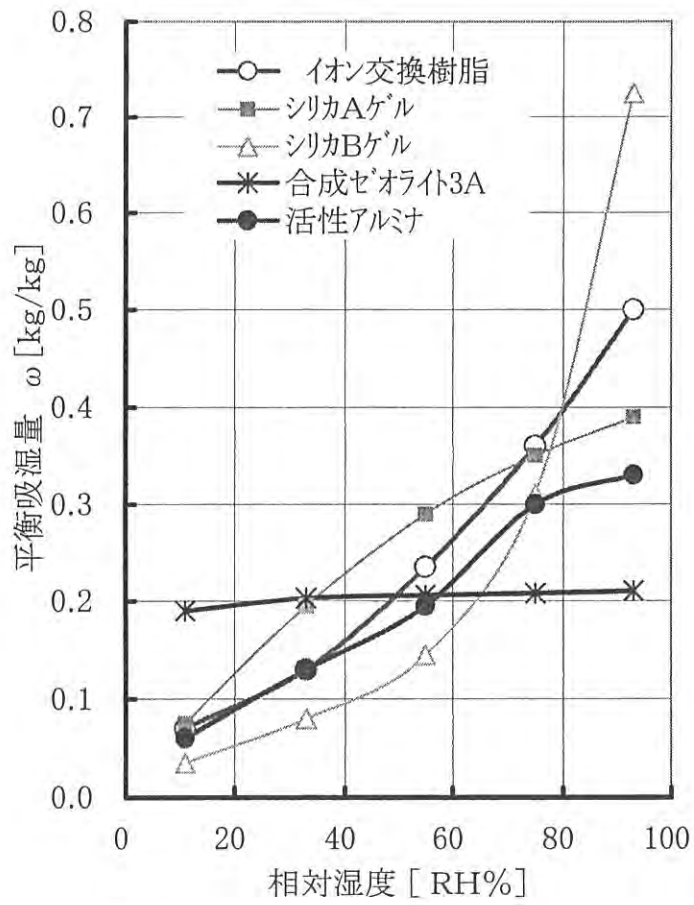
図3-4 イオン交換樹脂の構造イメージ図⁷⁾

ルのA型とB型の中間の吸湿特性を持っている(図3-5)。又、相対湿度の変化によって水蒸気は容易に吸脱着する(図3-6)。図3-7に陽イオン交換樹脂の対イオンをイオン交換した場合の、対イオンの種類による吸湿特性の変化を比較した。対イオンによる吸湿特性の変化は高湿度側ほど顕著である。また Na^+ 、 Li^+ イオン等が Ca^+ イオンの場合と比べて吸湿容量が多いという結果になっているが、これは小径のイオンほど水和イオンの径が大きくなるためである。イオン交換樹脂が臭気を吸着しにくい理由は以下のように考えられる。イオン交換樹脂は乾燥状態では細孔はなく、吸湿したときにその取込まれた水分によって満たされた空隙が生ずるが、水蒸気以外の成分を吸着するような開放された空間は生じない。又イオン交換樹脂は高分子電解質であり、吸湿力は水和力と浸透圧によって生じ、塩化リチウム等の吸収剤と同様の原理によって吸湿すると考えられる。しかしそれら吸収剤と異なり、イオン交換樹脂は飽和状態まで吸湿しても吸湿した水に溶けて液体状になることはない。又、樹脂の内部は図3-8のように架橋の収縮力(膨潤圧)と、膨張力としてはたらく水和力及び浸透圧とバランスしており、内部圧力と外部の水蒸気圧との差によって吸・放湿すると考えられる⁵⁾。従って樹脂の内部は図3-9のように開放状態の吸収剤溶液よりかなり高い圧力に保たれている⁶⁾と考えられ、水溶性の臭気成分であってもこの内部圧力のために樹脂内部の水にとけこみにくく、従って移行しにくいと考えられる。図3-10は架橋度の異なる樹脂の吸湿特性を比較したが、架橋度の少ない樹脂ほど高湿度側での吸湿量が多く、架橋による収縮力が吸湿性に影響していることがわかる。以上の検討の結果をまとめ、表3-1に一般的な各種吸湿材とイオン交換樹脂の吸着特性上の比較を示す。

3.4 イオン交換樹脂とシリカゲルの臭気吸着性比較試験

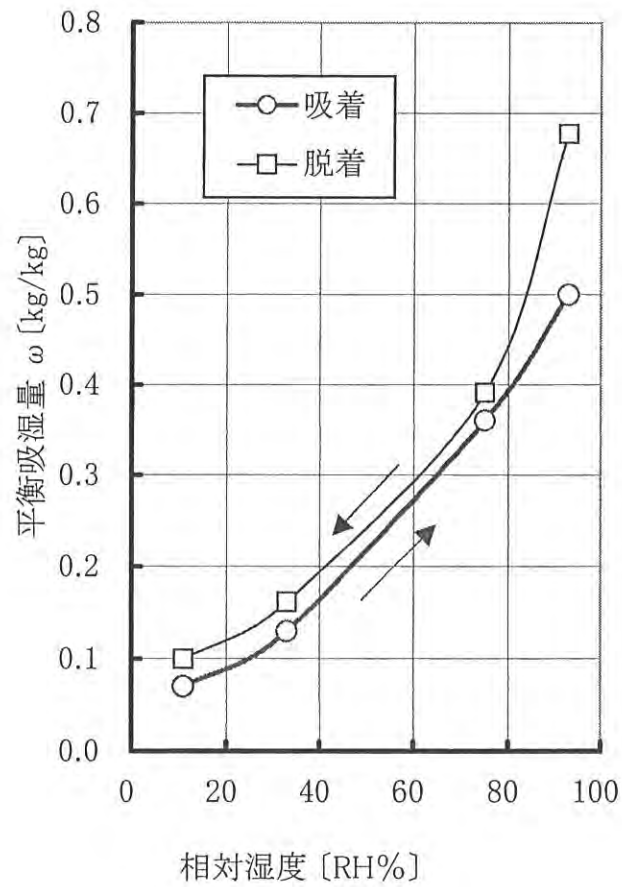
3.4.1 静的臭気吸着性比較試験

従来、全熱交換器ローターに吸湿材として使用されていたシリカゲルと、



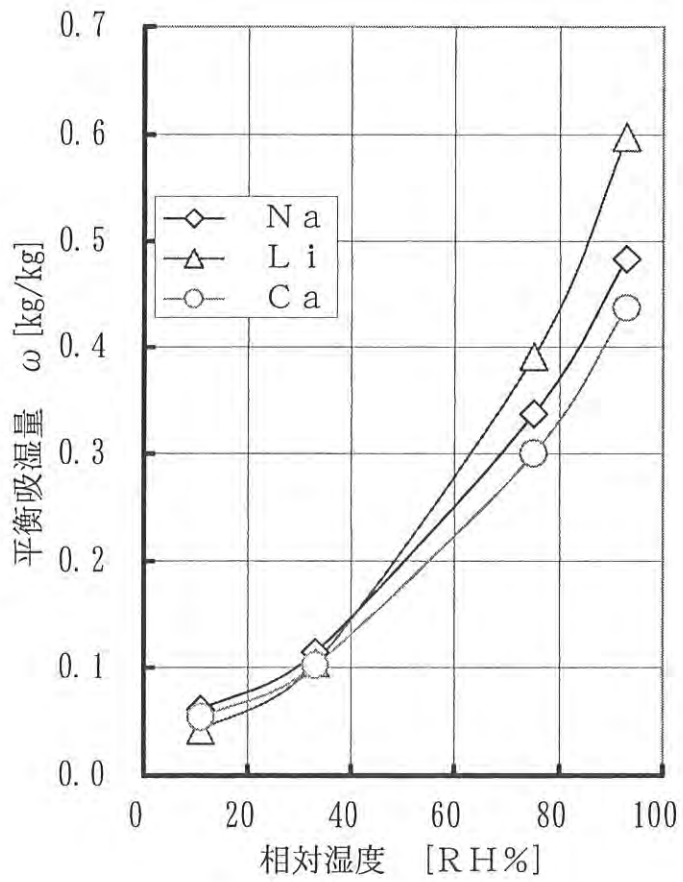
測定 室温(23~27°C)

図3-5 各種吸着剤の平衡吸湿量



測定 室温(23~27°C)、飽和塩法により測定

図3-6 イオン交換樹脂の吸湿・放湿特性



測定 室温(23~27°C)、飽和塩法により測定

図3-7 対イオンによる吸湿量の変化

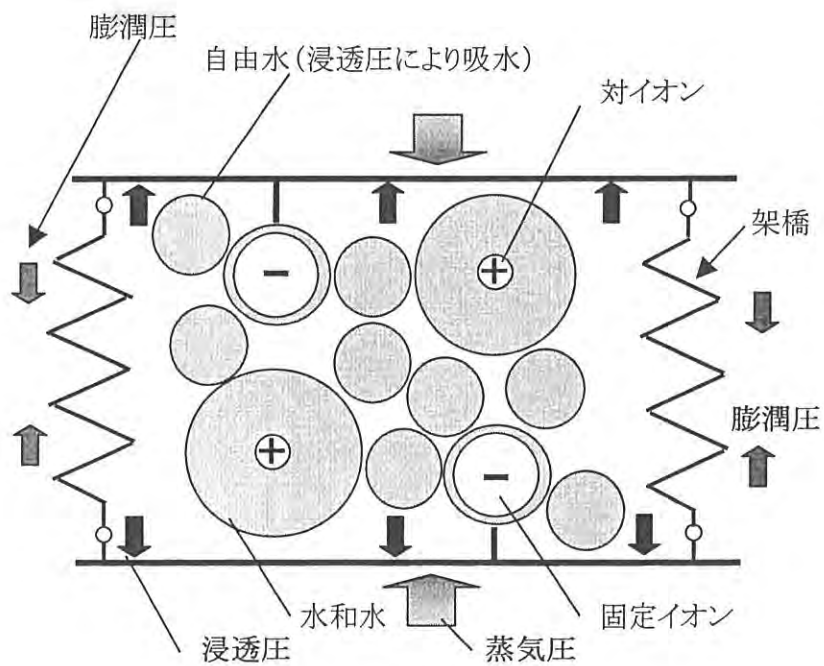


図3-8 イオン交換樹脂の圧力バランス説明図⁵⁾

W.Buser, P.Graf and W.F.Grutter; *Chimia*, 9, 73 (1955)

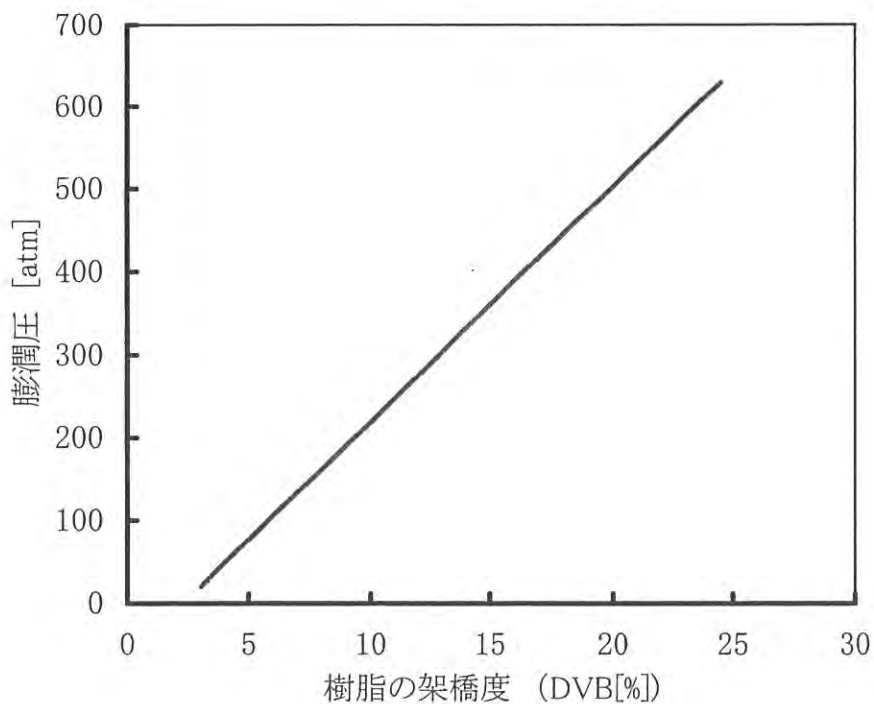
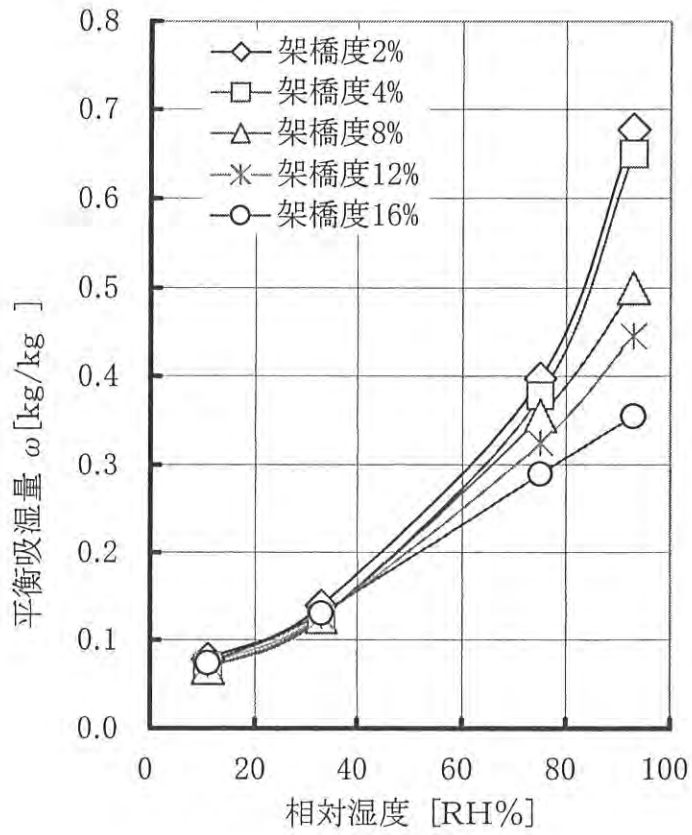


図3-9 強酸性陽イオン交換樹脂の架橋度と膨潤圧⁶⁾

F.Helfferich; "Ionexchange" McGraw-Hill Book Company, Inc. (1962)



測定 室温(23~27°C)、飽和塩法により測定

図3-10 イオン交換樹脂の架橋度と吸湿性

表3-1 イオン交換樹脂とその他の吸着材の比較

	イオン交換樹脂	シリカゲル、ゼオライト、アルミナ
細孔構造	細孔無し(ゲル型)	細孔を有する
吸湿原理	水和力及び浸透圧で吸湿 膨潤圧(収縮力)に抗して吸湿し、周囲蒸気圧とバランスし蒸気圧の変化で吸・放湿する	毛細管吸着 シラノール基吸着 ファンデルワース吸着 静電気力吸着
臭気吸着防止原理	吸湿力(膨張)と膨潤圧(収縮)により生ずる内部圧力により水以外の臭気成分が排除される	合成ゼオライトは分子篩作用を有するが、分子径の小さい臭気には効果無く、吸着する
臭気吸着	臭気吸着ほとんど無し	臭気吸着あり

イオン交換樹脂を用いて、イソプロピルアルコール（以下IPA）の静的吸着容量を測定比較した。

3.4.2 試験方法

各サンプルを恒温槽（オープン）110℃2時間乾燥後、デシケーターに入れ真空ポンプで真空にする。27℃の恒温恒湿室にて前記デシケーターに飽和状態になるまでIPAを注入後、さらに乾燥空気を送り込んで2時間吸着飽和させる。各サンプルを取り出して重量を測定し、IPAの吸着量を算出する。

3.4.3 試験結果及び考察

試験結果を表3-2に示す。シリカゲルとイオン交換樹脂のIPA吸着量に明らかな差が見られ、イオン交換樹脂でも架橋度の高いもの程IPA吸着量が少ない傾向のあることが分かった。この試験結果からも、イオン交換樹脂はシリカゲルよりも臭気成分を吸着し難いということがいえる。

3.5 全熱交換性能試験

3.5.1 性能試験装置

試験装置の概略図を図3-11に示す。試験装置のローターシールはエアリークの少ない軟質ゴムシートによる接触式シールである。またハニカムの空隙に含まれた排気がローターの回転によって給気側に移行する現象を防止するために排気セパレーターを取り付けた仕様で、試験に当たってはセパレーターが有効に働くように各部の運転静圧を適正に保つように調整を行う。

3.5.2 全熱交換性能試験方法及び結果

全熱交換性能を従来のシリカゲルタイプとイオン交換樹脂タイプとで比較試験を行った。試験方法はJRA (The Japan Refrigeration and Air

表3-2 イソプロピルアルコール吸着量比較

吸着剤	IPA 吸着量
イオン交換樹脂(架橋度4%)	3.63%
イオン交換樹脂(架橋度8%)	3.44%
イオン交換樹脂(架橋度12%)	3.06%
シリカゲル A型	19.33%
シリカゲル B型	16.65%

測定 室温(27°C)

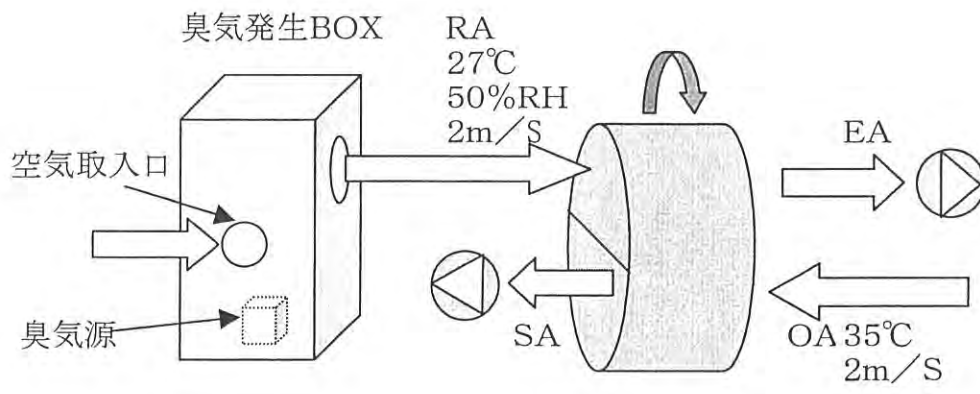


図3-11 試験装置概略図

Conditioning Industry Association) 規格に準拠して行った。熱交換効率計算は式(3-1)により計算した。

$$\text{全熱交換効率} = (I_{sa} - I_{oa}) / (I_{ra} - I_{oa}) \times 100\% \quad \dots\dots\dots (3-1)$$

I_{sa} : 給気エンタルピー

I_{oa} : 外気エンタルピー

I_{ra} : 還気エンタルピー

全熱交換性能試験結果を図3-12に示す。イオン交換樹脂タイプはシリカゲルタイプとほぼ同等の全熱交換性能を有していることが確認された。

3.6 臭気移行試験

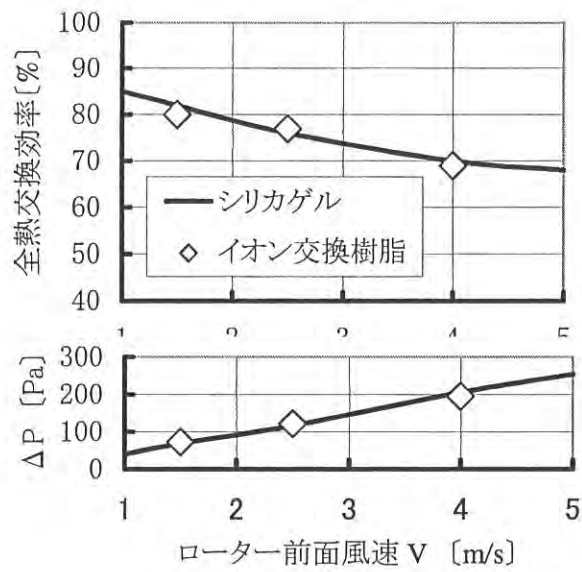
3.6.1 臭気移行

臭気移行とは、臭気を含んだ還気と新鮮な外気とを、熱交換するときに、全熱交換ローターが湿気と共に臭気も吸着して移行させ、給気側に再放出する現象である。この臭気移行現象を調べるため、従来のシリカゲルを吸湿材として使用したローターとイオン交換樹脂を使用したローターとをそれぞれ試験機に組み込み、実際に臭気を発生させて臭気移行に関する試験を行い比較した。

3.6.2 臭気移行試験方法

試験の手順としては、試験装置を立上げ排気側、吸気側の空気条件及び風速を設定し、定常運転になったところで臭気発生ボックスにて臭気を発生させ、各部の臭気濃度を測定し、式(3-2)によって臭気移行率を求める。

$$\text{臭気移行率} = (C_{sa} - C_{oa}) / (C_{ra} - C_{oa}) \times 100\% \quad \dots\dots\dots (3-2)$$



OA:35°C 60%RH RA:27°C 50%RH
 ローター幅 $L=200\text{mm}$ 回転数 $N=16\text{rpm}$

図3-12 全熱交換効率と圧力損失

C _{sa} :給気側臭気濃度	[ppm]
C _{oa} :外気側臭気濃度	[ppm]
C _{ra} :還気側臭気濃度	[ppm]

試験条件は、室内側は 27℃ RH60%で一定にする。外気側は気温 30℃一定で、相対湿度を 50, 60, 70, 80%と変化させた場合及び前面風速を変化させた場合の試験を行った。又外気側湿度を一定にして、温度を変化させた場合の臭気移行率への影響についても試験比較を行った。

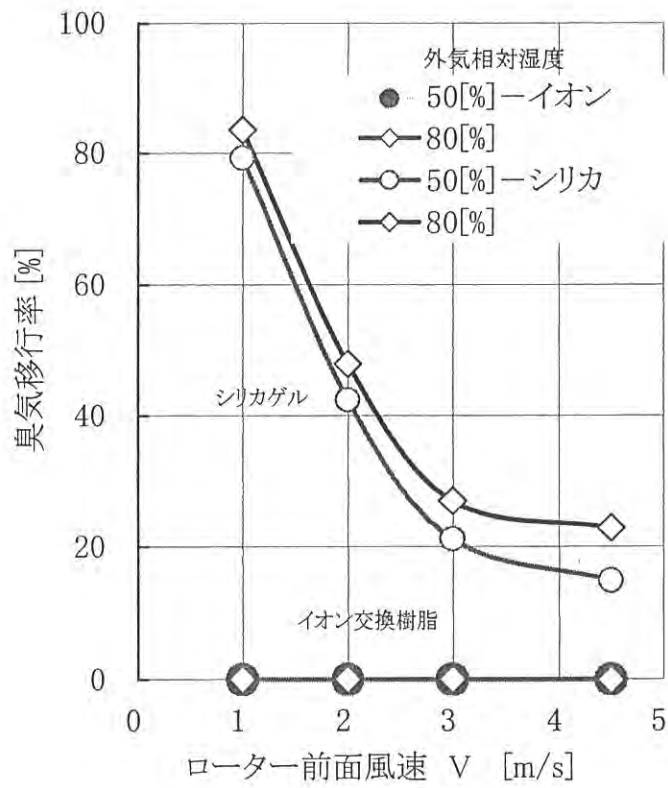
3.6.3 試験結果及び考察

(1) 有機溶剤臭気の移行率

図3-13に親水性有機溶剤であるIPAの臭気移行率を、図3-14に疎水性有機溶剤であるトルエンの臭気移行率を示す。シリカゲル製の場合何れの臭気も吸着移行し、全熱交換効率と同じように臭気移行率も風速の影響を受け、風速の増加に伴って移行率も減少する傾向がある。イオン交換樹脂製の場合は給気側での臭気濃度は検知限界以下で、前面風速に関係なく臭気移行率はほぼゼロ%であった。図3-15に有機溶剤濃度（IPA）と臭気移行率の関係を示す。濃度 200ppm まで試験を実施したが、この範囲では濃度によって移行率は変化せず、ほぼゼロ%であった。表3-3に他の有機溶剤臭気成分についても移行率を調べた結果を示す。イオン交換樹脂製では、測定した有機溶剤についてはすべて検知限界以下で移行率はほぼゼロ%であることがわかった。

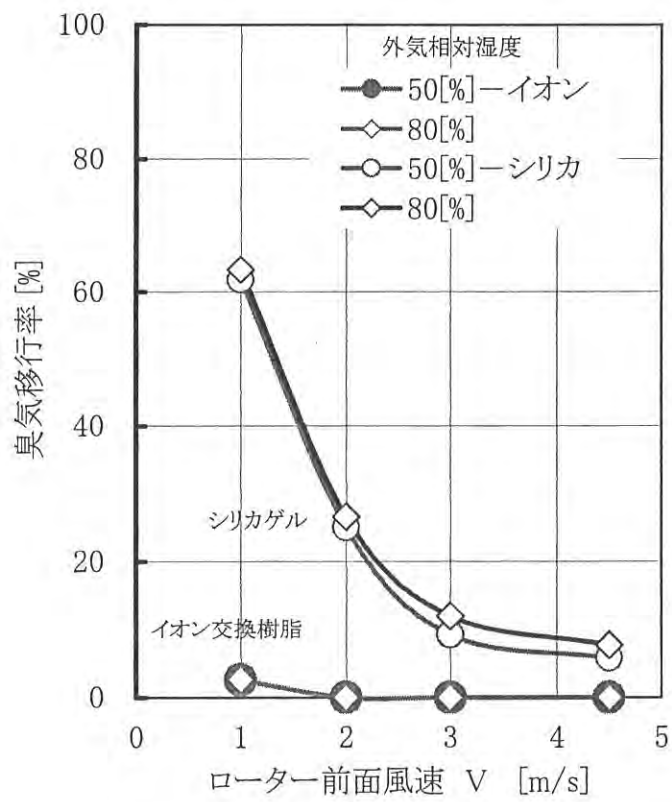
(2) アンモニア臭気移行率

悪臭の代表物質の一つであるアンモニアについても臭気移行率を調べたが、有機溶剤以上に吸着移行を生じやすい事が分かった。(図3-16)その理由としては、アンモニアが水溶性の臭気であることと、分子径が水の分子径 2.8Åより小さい 2.4Åなので小さな細孔にも容易に出入りできる物質であることが上げられる。図3-17にローター前面風速と臭気移



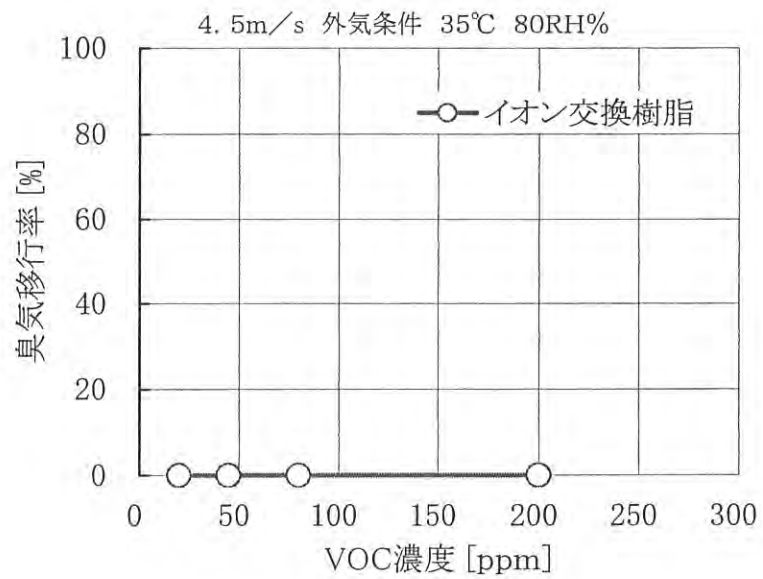
OA:30°C RA:27°C 50%RH
 ローター幅 L=200mm 回転数 N=16rpm

図3-13 IPA臭気移行率



OA:30°C RA:27°C 50%RH
 ローター幅 L=200mm 回転数 N=16rpm

図3-14 トルエン臭気移行率



ローター前面風速V=4.5m/s OA:35°C 80%RH RA:27°C 50%RH
 ローター幅 L=200mm 回転数 N=16rpm

図3-15 IPA入口濃度と移行率の関係

表3-3 有機溶剤移行率

溶剤名	試験濃度	移行率 [%]
IPA	20ppm	ND
	45ppm	ND
	80ppm	ND
	200ppm	ND
エタノール	70ppm	ND
メタノール	40ppm	ND
アセトン	45ppm	ND
MEK	40ppm	ND
トルエン	40ppm	ND
キシレン	30ppm	ND
スチレン	50ppm	ND
エチルアセテート	180ppm	ND
ブチルアセテート	33ppm	ND

※試験風速 4.5m/s

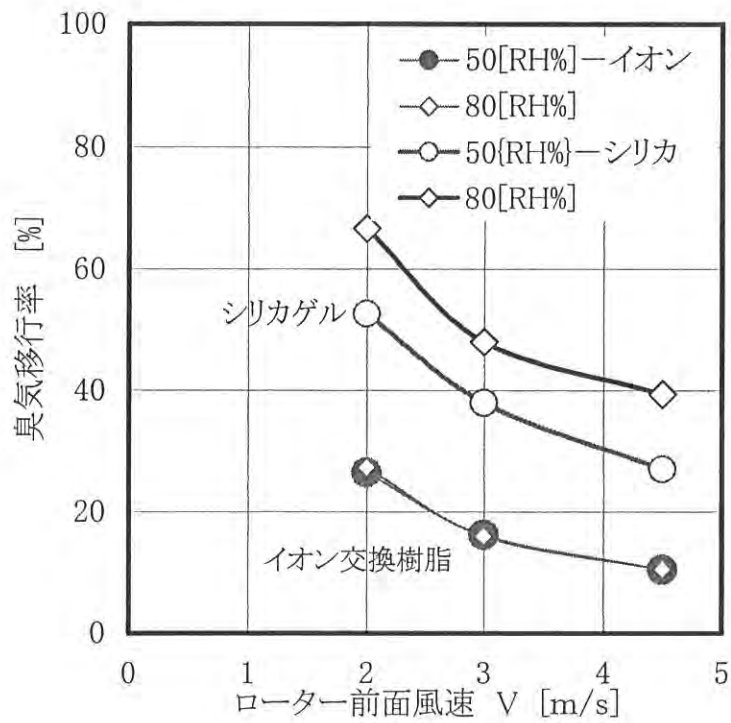
※ローター幅 L=200mm 回転数 N=16rpm

※OA:25°C 50~80%RH RA:27°C 50%RH

※排気セパレーター付き

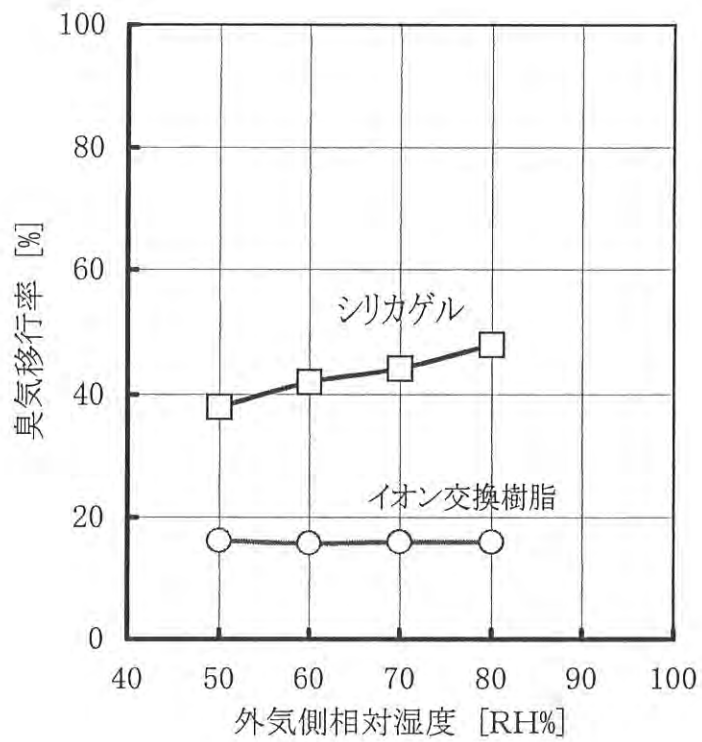
※ND:検出限界(0.5ppm)以下

※計測器 ガスクロマトグラフ



OA:30°C RA:27°C 50RH
 ローター幅 L=200mm 回転数 N=16rpm

図3-16 アンモニア臭気移行率



OA:30°C RA:27°C 50%RH
 ローター前面風速 V=3m/s
 ローター幅 L=200mm 回転数 N=16rpm

図3-17 外気側相対湿度と臭気移行率

行率の関係、及び外気側相対湿度の影響を示す。

①シリカゲルを使用したローターのアンモニア臭気移行率については外気側相対湿度の影響を受け、相対湿度が高いほど移行率も高くなるが、これは外気側から入ってくる湿度が高いほどより多くの置換吸着現象(水蒸気が優先して吸着し、代りに臭気を追い出す)が起これるためと理由付けられる。イオン交換樹脂を使用したローターのアンモニア臭気移行率は、外気側相対湿度の影響をほとんど受けず、置換吸着現象は起きていないと考えられる。

②アンモニア臭気移行率は風速が早くなるほど減少する傾向に有り、イオン交換樹脂を使用したローターの方が減少率が大きい。例えばシリカゲルを使用したローターは風速の $-1/2$ 乗に比例する傾向があるのに対して、イオン交換樹脂使用ローターでは風速の -1 乗に比例して減少する傾向がある。

③イオン交換樹脂を使用したローターは、シリカゲルを使用したローターよりアンモニア臭気移行率はかなり少なく、全熱交換器の汎用風速域 3m/s 以上では、シリカゲル使用ローター臭気移行率の $1/3\sim 1/4$ でしかない。

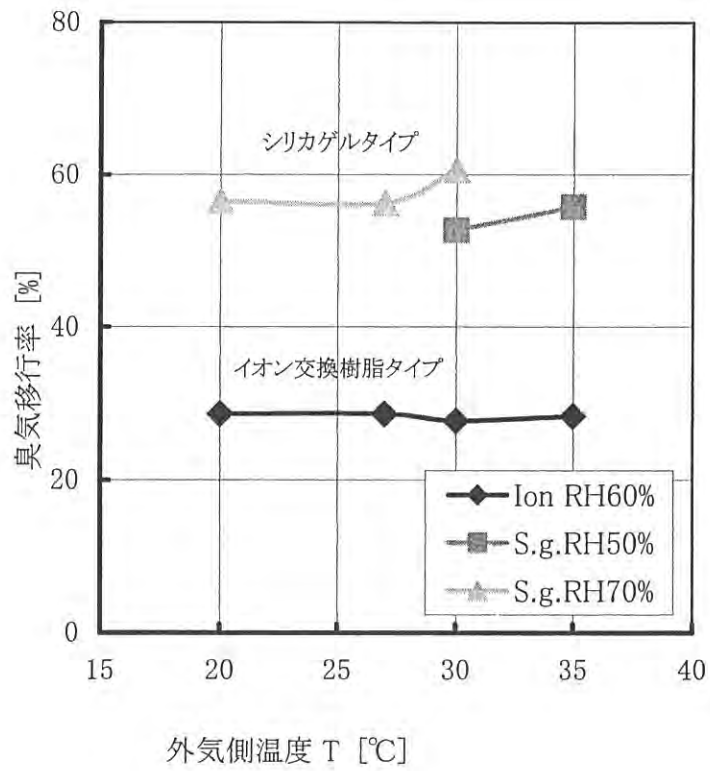
④図 3-18 に外気側温度とアンモニア臭気移行率の関係を示す。

臭気移行率は、シリカゲルタイプ、イオン交換樹脂タイプ共に外気側温度の影響を受けないことが分かった。

(3) 各種吸着剤を使用したローターとの比較

表 3-4 にシリカゲル A 型、同 B 型、塩化リチウム、合成ゼオライト等各種吸湿材を使用して試作したローターでのアンモニア臭気移行率を試験比較した結果を示す。

各種吸湿材を使用したローターのアンモニア臭気移行率を比較すると、シリカゲル B 型 > 塩化リチウムタイプ > シリカゲル A 型 > 合成ゼオライト (3A) > イオン交換樹脂 の順になる。細孔を有する吸湿材においては、細孔径が大きく吸湿力の弱い吸湿材ほど臭気移行率が大きいことが分かった。合成ゼオライト (3A) については分子篩効果が期待できるが、アンモニアの場合は分子径が水の分子径よりも小さいためその効果が出ず、臭気移行



OA:30°C RA:27°C 50%RH
 ローター幅 L=200mm 回転数 N=16rpm

図3-18 外気側温度と臭気移行率

表3-4 吸湿材の種類による臭気移行率比較

ローターの種類	アンモニア移行率
アルミ+A型シリカゲル製	43%前後
アルミ+B型シリカゲル製	80%前後
難燃紙+塩化リチウム製	60%前後
アルミ+合成ゼオライト製	30%前後
アルミ+イオン交換樹脂製	17%前後

※試験条件 3m/s JRA夏条件

率が比較的高くなったものと考えられる。塩化リチウムを使用したものでは、多孔質基材そのものが有する吸着性と、2.3.2でのべたように塩化リチウムは相対湿度 11%RH以上では吸湿した水に溶けて水溶液になっているため、その水溶液に親水性の臭気が溶け込むことにより臭気移行を生ずるものと思われる。

3.7 結 言

イオン交換樹脂を吸湿材として使用したニュータイプの全熱交換器は、従来のシリカゲル、塩化リチウム、合成ゼオライト等、様々なタイプの吸湿材を使用した全熱交換器のどのタイプよりも臭気移行率が少ないことが証明された。この全熱交換器は 1998 年 7 月より日本国内にて販売開始、又 1999 年 5 月より韓国に、1999 年 8 月よりヨーロッパ向けにも輸出を開始し、好評を得ている。2001 年 6 月までに大小合わせて約 11,000 台以上の販売実績があるが、臭気に関する問題は皆無である。また、今まで全熱交換器の採用は無理とされていた場所、例えば有機溶剤の多く発生する工場、または臭気の発生しやすい病院施設などにも問題なく採用できる全熱交換器を開発商品化したことで、今後より多くの省エネルギーに貢献できるものと期待される。

使用記号

C	: 臭気濃度	[ppm]
I	: エンタルピー	[kJ/kg’]
ΔP	: 静圧損失	[pa]
ω	: 平衡吸湿量	[kg/kg]

添 字

ea	: 排気側
oa	: 外気側
ra	: 還気側
sa	: 給気側

文 献

- 1) Hiroshi Okano, Ryuji Kuramitsu, Tsutomu Hirose “New Adsorptive Total Heat Exchangers Using Ion Exchange Resin” [イオン交換樹脂を使用した新規な吸着式全熱交換器] Proceedings of the Fifth International Symposium on Separation Technology Between Korea and Japan pp. 618~621 平成11年8月
- 2) 岡野 浩志、田中 宏史、船戸 浩史、石原 周 “イオン交換樹脂製全熱交換器の臭気移行に関する実験的研究と数値解析の検討” 第34回空気調和・冷凍連合講演会 講演論文集 133~136 頁平成12年4月
- 3) 岡野 浩志、船戸 浩史、広瀬 勉、田中 宏史 “イオン交換樹脂製全熱交換器の有機溶剤臭気移行に関する実験的研究” 空気調和・衛生工学会 平成12年度学術講演会 講演論文集第三号、1441~1444 頁平成12年9月発行
- 4) Hiroshi Okano, Hiroshi Tanaka, Tsutomu Hirose, Hiroshi Funato, Shu Ishihara “A Novel Total Heat Exchanger with Little Odor Transfer Using Ion Exchange Resin as a Desiccant” [イオン交換樹脂を吸湿剤として使用した臭気移行の少ない新規な全熱交換器] ASHRAE Transactions Vol. 107, NO. 2 平成13年10~11月
- 5) W. Buser, P. Graf and W. F. Grutter ; *Chimia*, 9, 73 (1955)
- 6) F. Helfferich ; ” Ion Exchange” McGraw-Hill Book Company, Inc. (1962)
- 7) 三菱化学株式会社 “イオン交換樹脂・合成吸着剤マニュアル I 基礎編”

第4章 ハニカム吸着式除湿ローター

4.1 緒言

水分は常に身の回りに存在し、人間（生物）にとっては不可欠のものであるが、錆び、かびなど各種物質の劣化、変質を促進するなど有り難くない面も併せ持っている。そのため防錆、防かび、乾燥、貯蔵、変質防止、品質管理、省エネなどの目的で様々な方法によって除湿が行われている^{1) 2)}。除湿方式は、基本原理的には大別して表4-1のように4つの方式に分けられる。以下各種除湿方式の比較をする。

- ① 冷却式は空気を冷却することによって水蒸気を露点温度以下で凝縮分離するもので、最も一般的な方法である。原理的に凝縮水が結霜または凍結するため5℃以下の低露点温度の除湿には向いていない。
- ② 圧縮式は空気を圧縮することによって水蒸気分圧を増加させ、水分の飽和点をこえさせ凝縮分離する方式である。この方式は運転費が大きいため、そのまま圧縮空気として使用される場合以外は用いられない。
- ③ 吸収式は吸湿性の強い液体吸収剤を使用して除湿する方式で、大容量が可能、殺菌性があるなどの特徴がある反面、吸収剤として使用している吸湿性の塩溶液（塩化リチウム、塩化カルシウムなど）が腐食性を持っているため、装置全体を高価な耐蝕材料で作らなければならないことや、吸収剤がキャリオバ（飛散）した場合周辺の付属機器を腐蝕するなどの欠点を持っている。また、アスベスト紙など多孔質ペーパーで成形したハニカムローターに吸収剤を含浸して、そのハニカムに空気を通すことによって除湿する方式もある。この方式

表4-1 各種除湿方式の比較一覧表

方式	構造	最低湿度	長所	短所
冷却式	直膨コイル	5°C D. P. 5.4g/kg'	設備費小、低温可能	低露点不可
	ブラインクーラー	3°C D. P. 4.7g/kg'	制御容易	低露点不可
	2搭切替式	-10°C D. P. 1.6g/kg'	ホットガスデフロスト可能	バッチ式、複雑
	冷水ワッシャ	7°C D. P. 6.2g/kg'	大容量に適	水の汚れ キャリオーバー
圧縮式	圧縮、冷却併用	-20°C D. P. 0.6g/kg'	構造簡単	運転費大
吸収式	冷却コイル スプレー式	-30°C D. P. 0.23g/kg' 230ppm	大容量可能、制御容易 低い再生温度 殺菌作用	耐蝕材料必要 キャリオーバー対策必要
	空冷エアワッシャ	10°C D. P. 7.6g/kg'	冷凍機不要 省エネ	低露点不可
	乾式	-50°C D. P. 0.024g/kg' 24ppm	保守簡単 小型軽量 低圧損、大風量可能	休止中の潮解対策必要 高湿度空気吸込み不可 キャリオーバー対策必要
吸着式	2搭切替式	-60°C D. P. 0.0066g/kg' 6.6ppm	低露点可能	再生に高温熱源必要 大容量困難 設備費大
	回転床式	-40°C D. P. 0.008g/kg'	連続して低露点可能	大容量困難 設備費大
	3搭切替式	-70°C D. P. 0.0016g/kg' 1.6ppm	切替ショック少ない 超低露点可能	バッチ式、複雑 大容量困難 装置大型、設備費大
	ハニカムローター 吸着式	-80°C D. P. 0.0003g/kg' 0.3ppm	保守簡単、小形軽量 低圧損、大風量可能 超低露点可能	

は吸収剤を液体で使用する湿式に対し、見た目乾いた状態で使用するため日本では乾式除湿機と呼ばれている。

- ④ 吸着式はシリカゲルなどの固体吸着剤の粒を詰めた塔または回転筒に処理空気を通過させて除湿を行うもので、低露点温度（ $-40\sim-70^{\circ}\text{C DP}$ ）まで除湿できるという特徴がある。しかし圧力損失が高く大容量が困難で、容量のわりに大型となり設備費が高くなるなどの欠点がある。

本章のテーマであるハニカム吸着式除湿機は、形状的には吸収式の乾式除湿機と同じであるが、基本原理は吸着式である。

4.2 乾式除湿ローター

乾式除湿機の基本特許は、40年程前スウェーデンのカーラムンタースによって発明された。当時の製品はアスベストペーパーに吸収剤である塩化リチウムを含浸したもので、吸収剤をハニカムに含浸し乾いた状態で運転する原理であるため、日本ではカサバー式など液体吸収剤を使用する湿式に対して、乾式除湿機と呼ばれていた。㈱西部技研では25年程前に同様な乾式除湿ローターを開発したが、塩化リチウムを使用しているために生ずる様々なトラブル、クレームを経験した。

(1) 塩化リチウムによるトラブル

- ① 高湿度時に過剰吸湿して液状になった塩化リチウムが流出して周辺機器を腐蝕させる。
- ② 過剰吸湿による塩化リチウムの流失や、塩化リチウムが毛細管現象により再生空気入口側に偏ることにより、除湿性能が劣化する。
- ③ 塩化リチウムが再生入口側に偏って濃縮されると、濃縮された塩化リチウムがマクロ孔内で結晶化⇔溶解を繰り返すことに

よりハニカム材を破壊し使用不能になる。

(2) 不燃性でないために発生する焼損トラブル

ハニカムローターは、鉱物であるアスベスト繊維を主体とするアスベストペーパーを用いていたが、ペーパー化の過程で 10% 前後含まれる有機物のためにヒーターの過熱や温度ムラにより焼損するというクレームを経験した。アスベストペーパーは 10% 程度有機物を含んでいても難燃性であるが、ハニカム状態に加工すればその形状から生じる断熱性（熱がこもる）と通気性（酸素が十分に供給される）によって可燃性になり、ヒーターの過熱によって 200℃ 前後から生じる有機物の酸化反応により発熱し、その熱によりさらに酸化反応が促進されついには着火温度に至り焼損する（写真 4-1）ことが分かった。この教訓から、除湿ローターを完全不燃性にするために、ハニカム材料が熱劣化しない温度に維持しながら有機物を焼成除去する技術を確立した。

またその当時アスベスト繊維の発ガン性が指摘され、アスベスト繊維を全く含まない材料に切り替えなければならないという課題も同時に発生した。

以上のような苦い教訓および市場ニーズに対応するため、塩化リチウムを全く使用しない（乾式ではない）新規で実用的なシリカゲル吸着式ハニカムローターを、1984 年に世界で初めて開発商品化することに成功した。

4.3 ハニカムローター除湿機の原理と構造

ハニカムローター除湿機の構造は、図 4-1 のようにハニカムローターをケーシング内に収納し、ギヤドモーターによる外周ドライブ方式で低速回転させている。ケーシングは処理ゾーンと再生ゾー

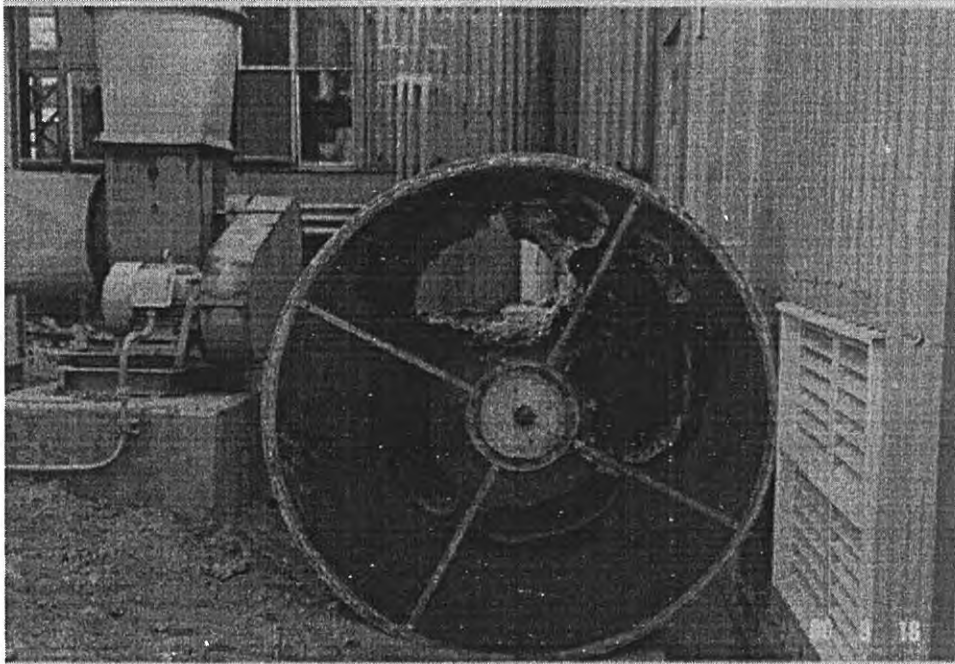


写真4-1A 電気ヒーターの温度ムラにより焼損したハニカムローター
再生空気出口側

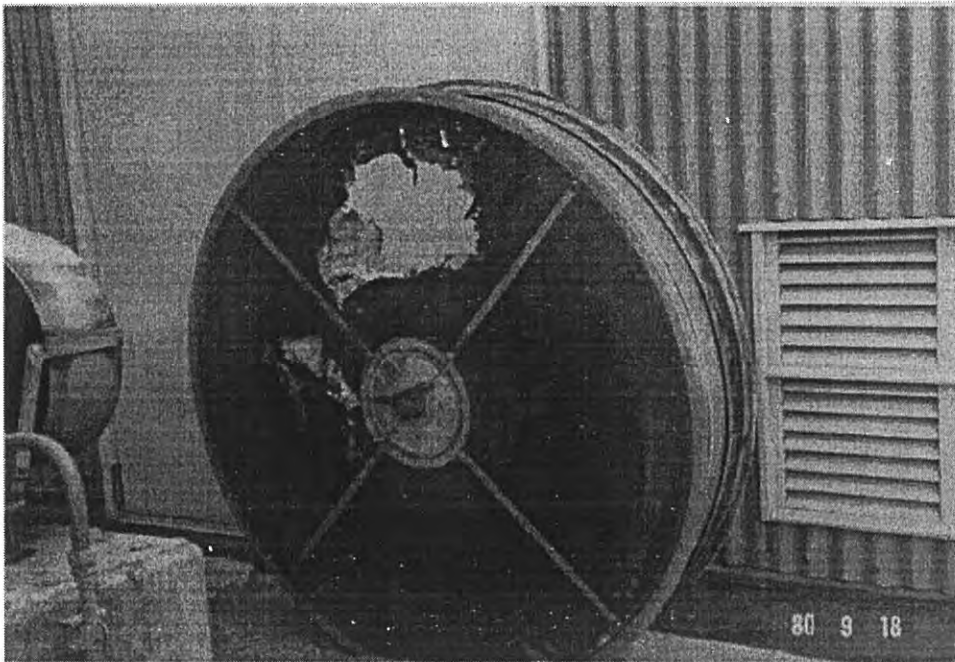


写真4-1B 電気ヒーターの温度ムラにより焼損したハニカムローター
再生空気入口側

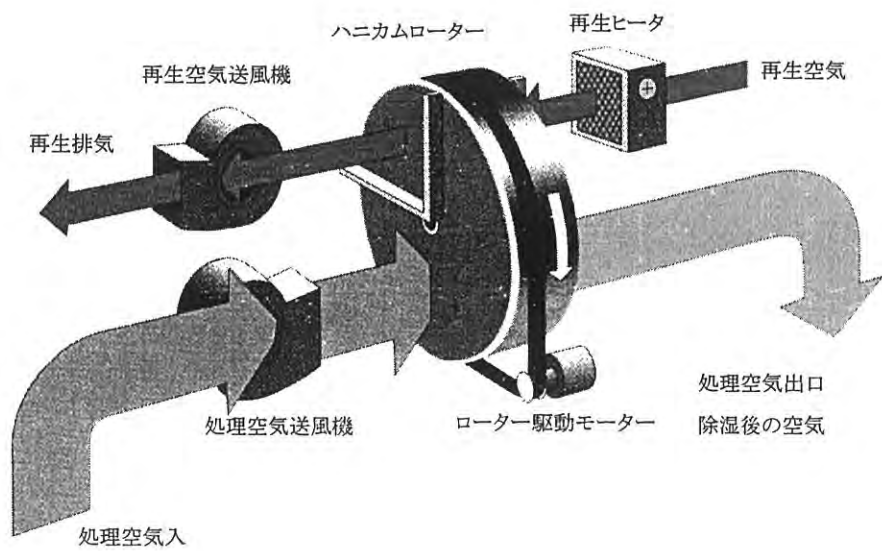


図4-1 ハニカムローター除湿機の構造

ンとに分割シールしており、処理空気は送風機によって処理ゾーンより回転中のハニカムローター内へ導かれ、ハニカムを通過する間に湿気をハニカムに吸着除湿され、乾燥空気となって供給される。

一方湿気を吸着して湿ったハニカム部分はローターの回転によって再生ゾーンへ移動し、加熱空気の通風によって湿気を脱着再生され、再び処理ゾーンに移動する。この連続サイクルにより、常に安定した乾燥空気を供給することができる。尚処理空気出口（乾燥空気）の湿度は再生空気の温度をコントロールすることによって容易に調整できる。図4-1は標準的な除湿フローで、この他にも使用目的、用途によって様々なフローが考案採用されている。例えば図4-2上図は太陽熱や低温排熱などの低温熱源を利用して除湿機を駆動するためのフローで、再生温度が低いことによる再生エネルギーの不足分を、再生風量を増して補うために再生ゾーンを大きくとっている。図4-2下図は低露点空気を得る目的で採用されるフローで、再生ゾーンから処理ゾーンに移った直後の、高温であるため吸着力の弱いハニカム部分をパージして、十分に除湿された空気のみを製品空気として取り出すフローである。

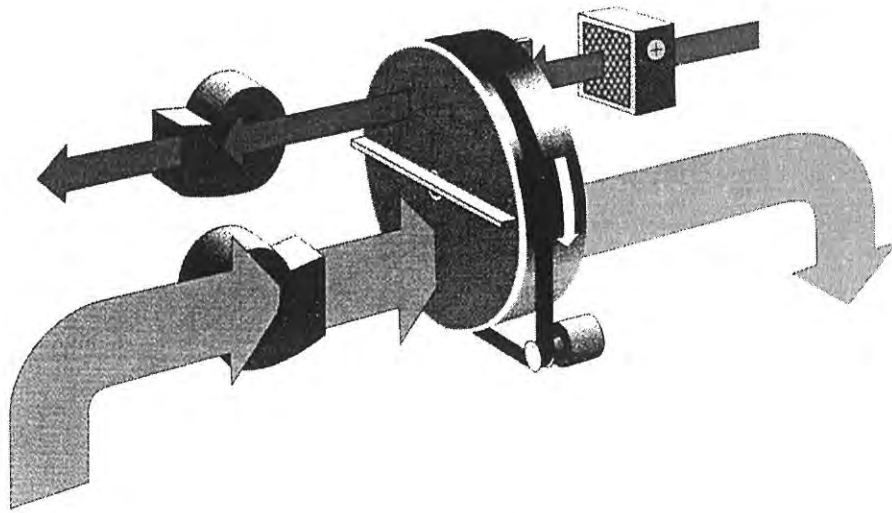
4.4 ハニカム吸着式除湿ローターの製法

4.4.1 ハニカム吸着式除湿ローターの製法³⁾⁴⁾

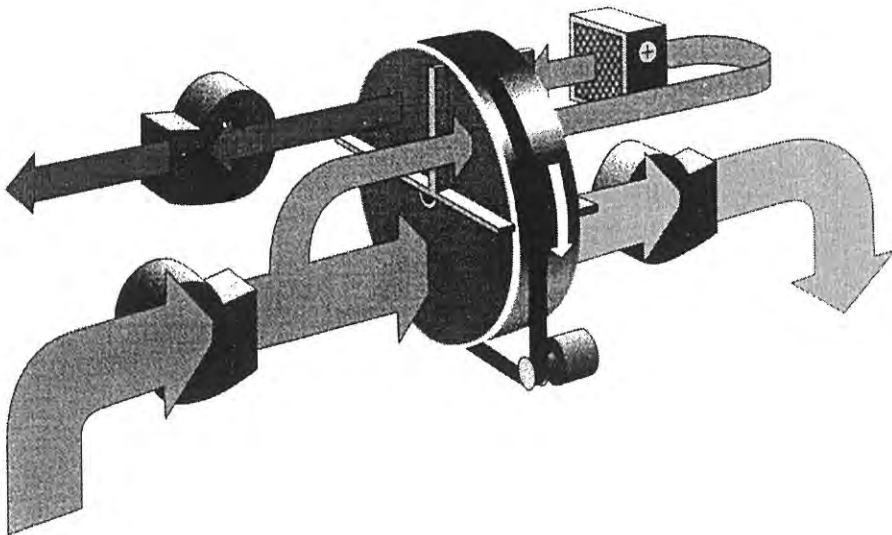
ハニカム吸着式ローターの製造工程を図4-3に示す。それぞれの工程の概要について以下説明する。

① 段加工工程

段加工機で無機繊維紙をコルゲート状に段加工する。段加工するときの接着剤は、後工程で焼成しても強度を維持できるものでなくてはならないため、専用の無機接着剤を開発使用している。



低温再生除湿フロー



低露点除湿型フロー

図4-2 除湿フローの例

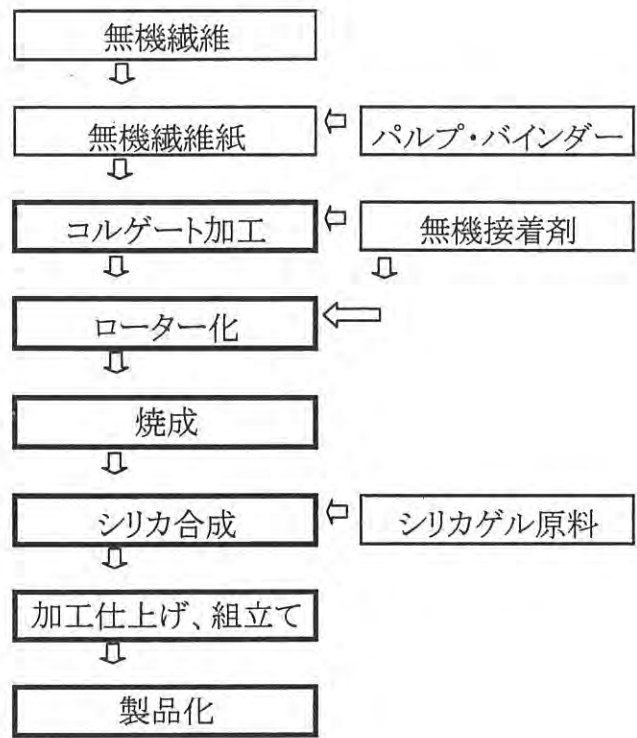


図4-3 ハニカム吸着式除湿機の
製造工程図

② 巻きつけ工程

段加工品を、無機接着剤を用いてローター状に巻きつけ加工する。

③ 焼成工程

除湿ローターを完全不燃性にするために、ハニカムローターの形状強度を維持しながら有機物及び炭化物を焼成除去する工程である。ハニカムローター内の有機物を加熱熱分解して炭化物に変え、さらに加熱して炭化物を酸化除去する。

(図 4-4)。4.2でも述べたが、ハニカム構造体は熱がこもりやすく酸素が十分に供給される構造であるため燃えやすく、セラミック繊維が熱劣化しない燃焼温度に制御しながら焼成しなければならない。そのための特殊な焼成炉を開発した。

④ 化学処理工程 (メタルシリケート合成)

①～③の工程で成形したハニカムをマトリックスとし、これに数種類の化学薬品を使用、マトリックス内で反応重合させることによりメタルシリケート (金属イオンを含んだ高性能シリカゲル) ハニカムを合成する。このハニカムを構成するバインダーそのものが吸着剤になる製法は、世界ではじめて成功した特許製法である。

⑤ ローター組立て加工

さらにこのハニカムを加工仕上げして、組立てることによってハニカム吸着式ローターが完成する。

以上のような工程でハニカム吸着式ローターを製作する。写真 4-2 はメタルシリケート合成前のガラス繊維ペーパーの SEM 写真で、このペーパー内でメタルシリケートを合成することにより写真 4-3 のように無機繊維を強化マトリックスとしたメタルシリケートハニカムが出来上がる。メタルシリケートはそれ自身で化学

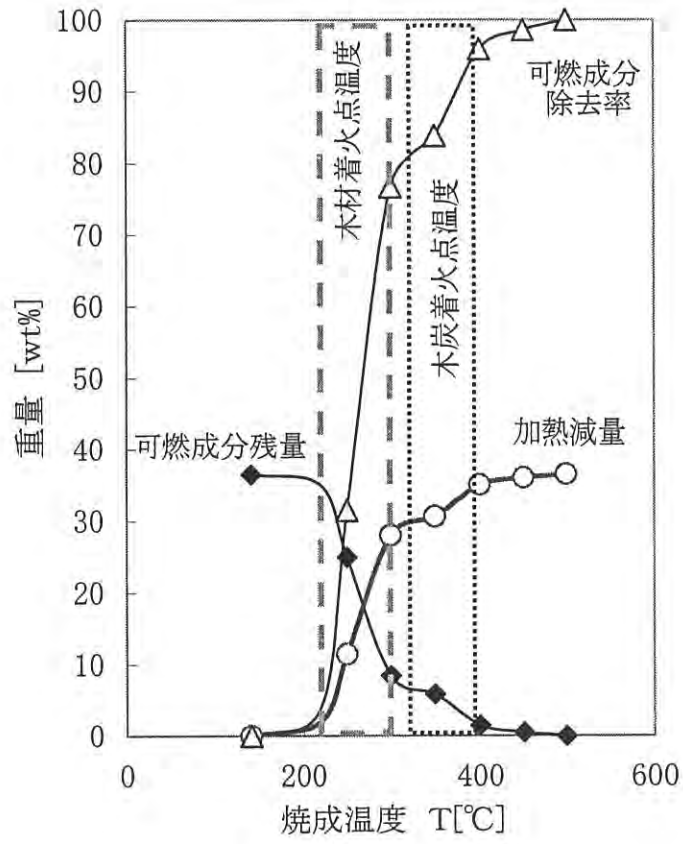


図4-4 セラミック繊維紙の焼成温度による重量変化測定例

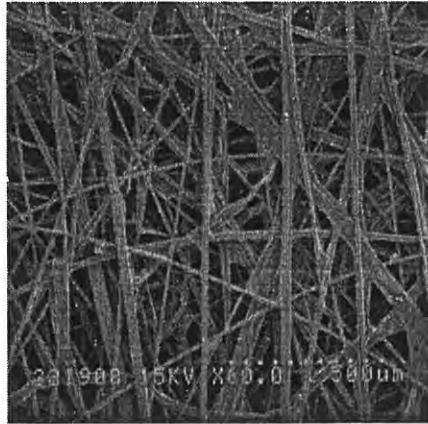


写真4-2 メタルシリケート合成前
SEM写真

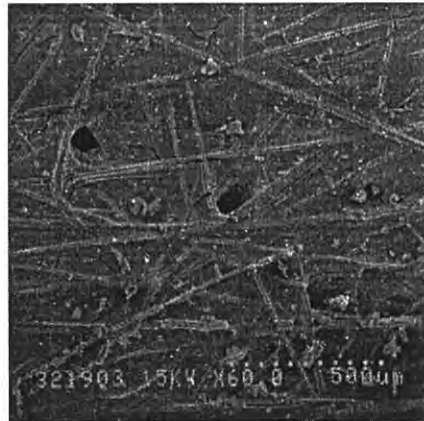


写真4-3 メタルシリケート合成後
SEM写真

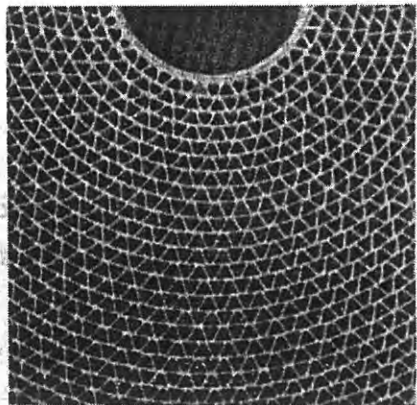


写真4-4 ハニカムの形状写真

的に合成結合しており、吸着性能を阻害するようなバインダー等は全く使用していないので、メタルシリケートの吸着性能は100%発揮される(写真4-4)。図4-5は代表的な市販吸着剤とハニカム合成結合されたメタルシリケート(基材除く)の水分吸着特性を比較しているが、メタルシリケートはシリカゲルA型に似た吸着特性である。図4-6は基材を含むメタルシリケートハニカムの吸着等温線である。吸着量はほぼ相対湿度に比例するが、温度が70℃程度に高くなると温度の影響を受け、同じ相対湿度でも吸着量が少なくなる傾向がある。

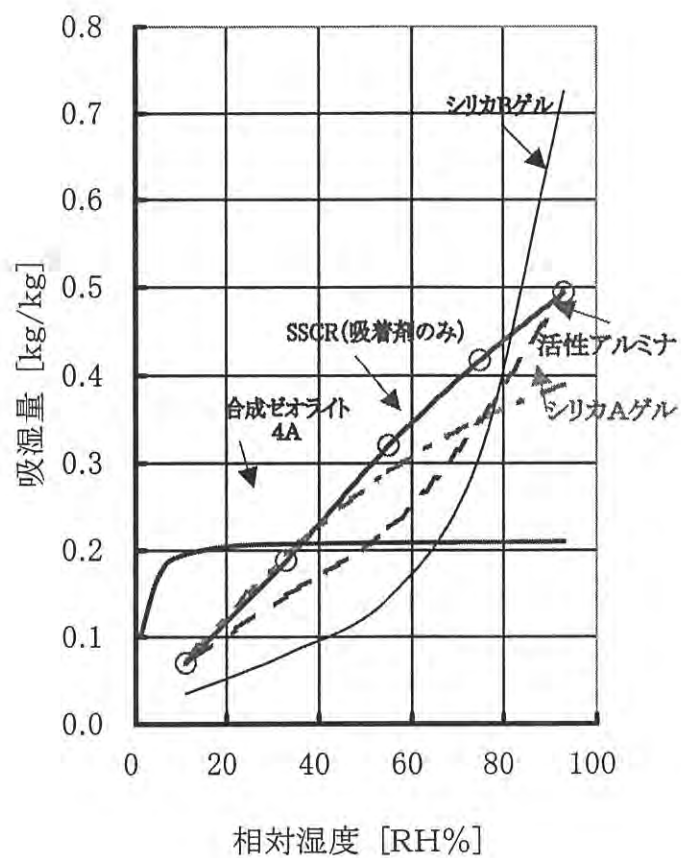
4.4.2 メタルシリケートハニカムの合成(一般的な方法との違い)

(1) 一般的なシリカゲルの合成方法

一般的なシリカゲルの合成方法は図4-7に示すように珪酸ナトリウム溶液と酸溶液を混合攪拌し、ゾル状態を経てゲル化し、合成されたヒドロゲルを水洗乾燥させることによって製品化されている。

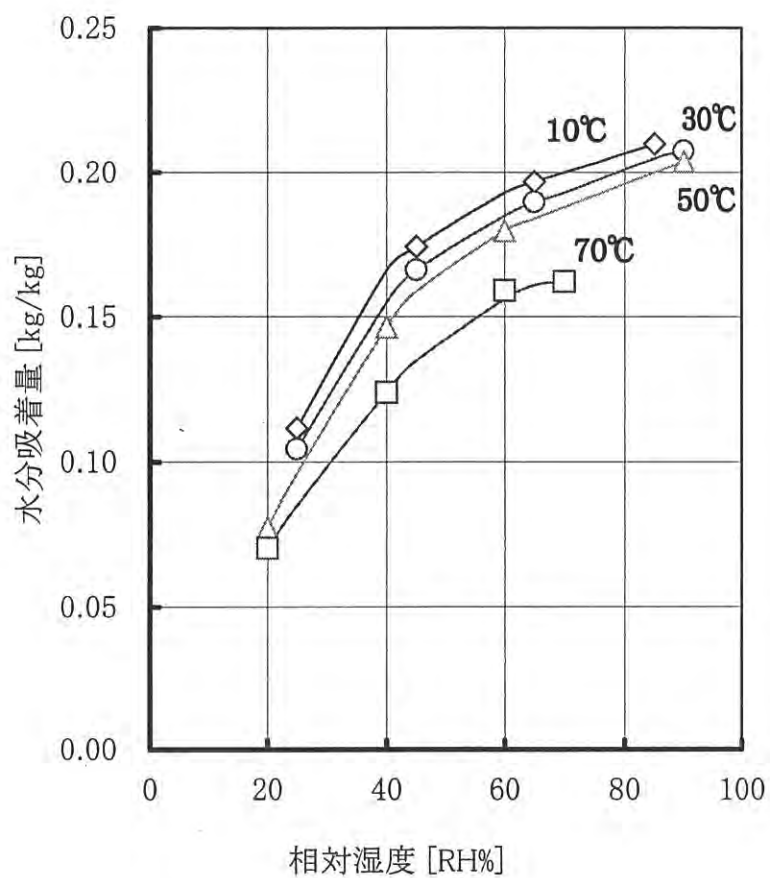
(2) メタルシリケートハニカムの合成方法

メタルシリケートハニカムの製法はメタルシリケートを直接ハニカム状に合成成型する方法で、まずハニカムにシリカゲルの原料である水ガラスを含浸し温風を通風することにより水和水ガラス状になるまで濃縮する。次にそのハニカム材を塩溶液中に浸漬すると水ガラスはまず表面部分から反応ゲル化が始まる。水ガラスは塩溶液との浸透圧の差によって吸水または脱水されて塩溶液の浸透圧とバランスする水ガラス濃度で反応、ゲル化が進んでいく。そのため合成されるシリカゲルは反応前の水ガラスの濃度よりも反応させる塩溶液の濃度に大きく影響を受け、濃度を変えることにより吸着特性の異なったシリカゲルを合成することができる。(図4-8) また反応塩の種類によっても異なった吸湿特性が得られる³⁾(図4-9)。



SSCRのみ室温(23~27℃)飽和塩法で測定
 他はメーカーカタログ、文献より引用

図4-5 各種吸着剤の水分平衡吸着量



恒温恒湿室で測定、供試体SSCR-M

図4-6 ハニカム吸着元素の平衡吸着量

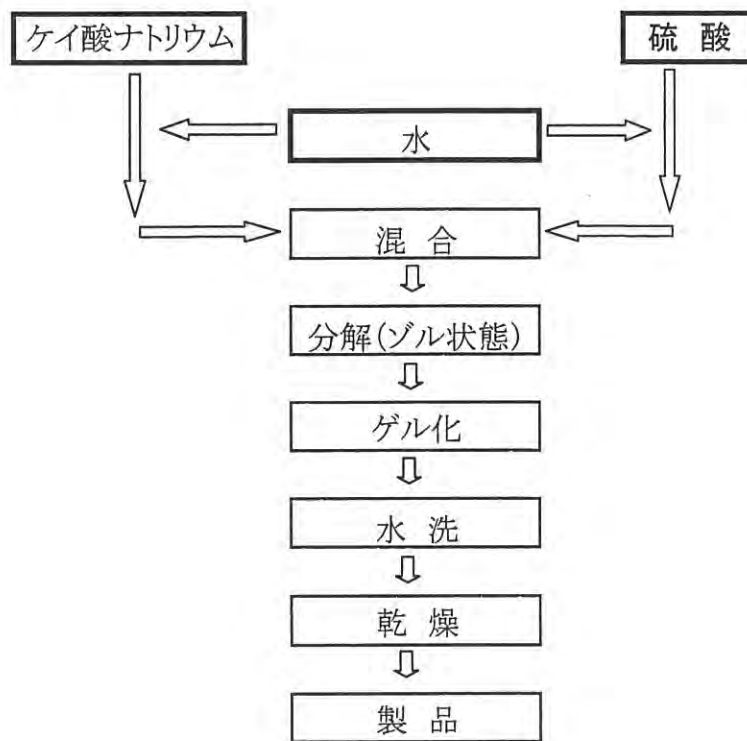
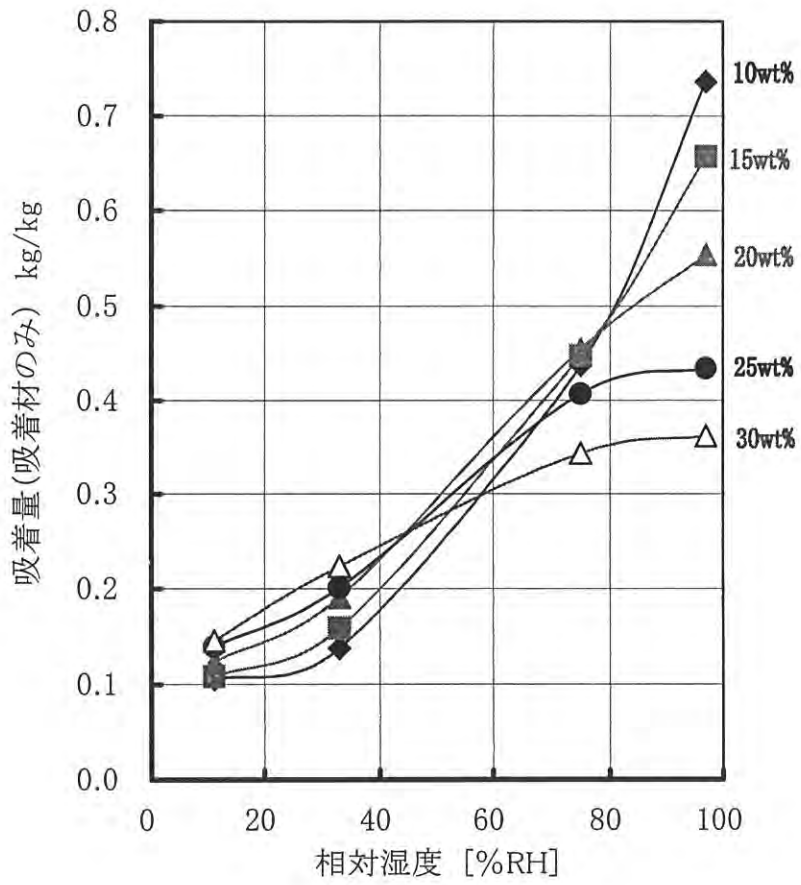


図4-7 一般的なシリカゲルの製造工程図



測定 室温 (23~27°C) 飽和塩法

図4-8 メタルシリケート合成条件による吸着特性変化

4.4.3 メタルシリケートローター改良高性能化の歴史

1984年に開発商品化したハニカム吸着式除湿ローターは、常に材料の最適化、シリカゲルの合成方法などの研究開発改良を重ね、信頼性を高め高性能化してきた。(図4-10)

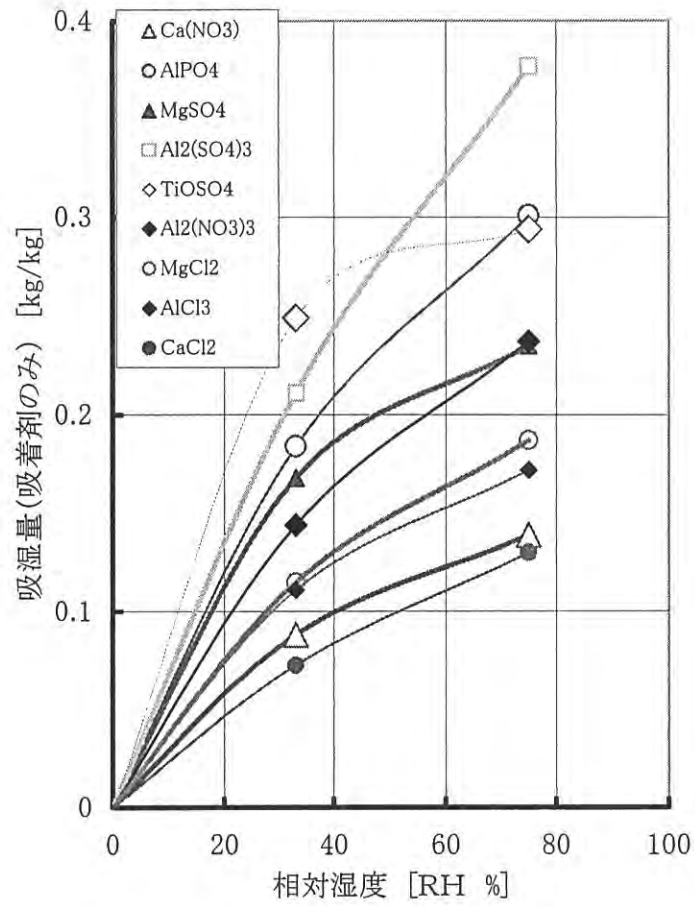
表4-3は各種メタルシリケートローターおよびゼオライトローターの仕様を示す。メタルシリケートローターは使用目的、要求性能によりそれぞれの目的に合ったローターを選定する。一般産業用途では汎用型SSCR-M、高性能が要求される用途にはSSCR-Uを採用する。SSCR-Lは80℃前後の再生温度で使用するデシカント空調用である。低露点仕様及び、高温空気からの除湿用には合成ゼオライト製ローターSZCRシリーズを採用する。

4.5 デシカント空調用除湿ローター⁵⁾⁶⁾

デシカント空調システムは太陽熱や各種排熱をエネルギー源として、ハニカム吸着式除湿ローター(デシカントローター)と顕熱交換器及び水の気化冷却器を組み合わせるシステムである。詳細については5章で説明するが、ここではデシカント空調用に最適な除湿ローターの研究開発について述べる。

4.5.1 デシカント空調

デシカント空調用ハニカム吸着式除湿ローターの特性としては、特に80℃以下の比較的低い再生温度でより高い性能を発揮できることが要求される。本章ではデシカント空調用として最適なハニカム吸着式除湿ローターの吸着特性を明らかにするため、特性の異なったハニカムローターを試作、性能試験し静的吸着特性とデシカント空調用として使用したときの性能との比較検討を行った。



測定 室温(23~27°C) 飽和塩法

図4-9 反応塩の種類による吸湿性能の変化

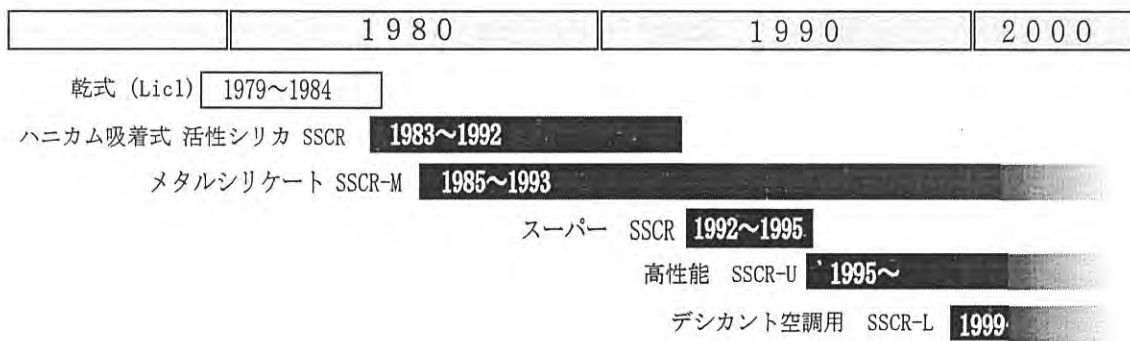


図4-10 SSCRローター改良高性能化の歴史

表4-3 各種吸着式ハニカムローター製品の仕様

	SSCR-M	SSCR-U	SZCR	SSCR-L
用途	除湿	除湿(高性能型)	低露点除湿用	デシカント空調用
基材ペーパー	セラミック繊維紙	セラミック繊維紙	セラミック繊維紙	ガラス繊維紙
接着剤	無機系	無機系	無機系	有機系
吸着材の種類 と担持方法	メタルシリケート 化学合成	メタルシリケート 化学合成	合成ゼオライト 含浸担持	メタルシリケート 化学合成
ハニカムサイズ	AS-31	AS-31	AS-31	AS-42
再生温度	~140℃	~140℃	~200℃	~80℃
耐熱温度	200℃	200℃	240℃	100℃
燃焼性	不燃性 焼成品	不燃性 焼成品	不燃性 焼成品	難燃性 焼成無し
嵩比重	220Kg/m ³	210Kg/m ³	210Kg/m ³	160Kg/m ³

4.5.2 デシカント空調用除湿機

一般に産業用に利用されているハニカム吸着式除湿ローターは、100～140℃の再生温度で、通常再生空気風量1に対して3倍量の空気を除湿処理するように設定使用される。これに対しデシカント空調用では、太陽熱やコージェネシステムからの排熱を利用する目的で、これらの熱源から利用可能な60～80℃程度の低い温度でも再生できるように、再生風量を処理空気とほぼ同量まで増やして運転される。そのため処理/再生ゾーン比は1/1としている。デシカント空調用ハニカム吸着式除湿ローターとしては、60～80℃の低い再生温度条件で、高い除湿能力が要求される。低い温度で再生しやすいということは重要な特性ではあるが、その反面除湿時の吸着熱による被除湿空気の温度上昇によって吸着能力が低下しやすいため、必ずしも性能向上には結びつかないと考えられる。どのような吸着特性のローターがデシカント空調用として適しているか探るため、特性の異なった吸着剤を使用してハニカムローターを試作試験し、比較評価した。

4.5.3 各種ハニカム吸着式ローターの製法

特性の異なる各種吸着剤で試作した試験用ローターの仕様比較表を表4-4に示す。ハニカム吸着式ローターの製法として、4.4で説明したハニカム内で吸着剤を直接合成して担持する方法と、合成された吸着剤パウダーをハニカムに含浸担持する方法の2種類で試作した。

ハニカムの基材、ハニカムの形状サイズはSSCR-Lを除いてすべて同じである。

SSCR-Lはデシカント空調用に低コスト、低圧力損失（圧力損失が高くなると送風動力及び送風機騒音が増加するため一般空調用としては重要）を目的として特別に開発したローターで、ハニカム基材、ハニカム形状サイズとも他のローターと異なっている。

表4-4 異なる特性を持つ様々な吸着剤を用いて作成した試験用
ハニカム吸着ローターの仕様

	SSCR-U	SZR-A	SZR-B	SSCR-L
ハニカム基材	セラミック繊維	セラミック繊維	セラミック繊維	ガラス繊維
ハニカムサイズ	AS-31	AS-31	AS-31	AS-42
コルゲートピッチ [mm]	3.4	3.4	3.4	4.2
コルゲート高さ [mm]	1.8	1.8	1.85	2.3
セル数 [個/in ²]	211	211	205	134
吸着剤の種類	メタルシリケート	合成ゼオライト A	合成ゼオライト B	メタルシリケート
担持方法	合成担持	含浸担持	含浸担持	合成担持
ハニカム嵩比重 [kg/m ³]	208	239	239	137
吸着剤含有率 [wt%]	44.5	39.1	37.1	50.0
吸着剤含有量 [kg/m ³]	92	94	89	69
ローター回転数N [rph](at 2m/s)	20	25	24	30
圧力損失 ΔP [Pa] (at 2m/s)	156	151	182	113

吸着剤の製法は4.4章で述べたメタルシリケート合成法によっている。

SSCR-Uは4.4章で取り上げた一般産業用の高性能吸着式除湿ローターである。

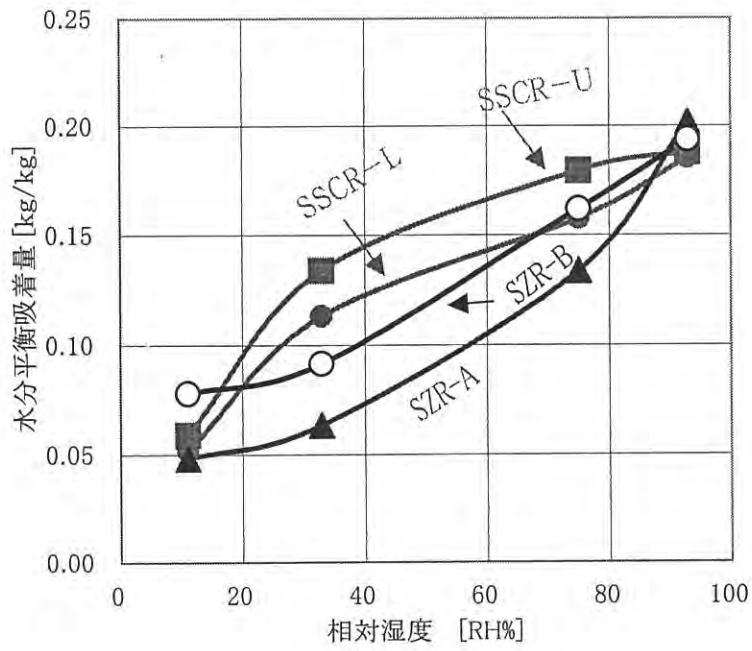
ゼオライト含浸担持ローター（以後SZRと呼ぶ）の製法は、高温焼成工程までは図4-3のメタルシリケートローターと同じ工程で、化学処理工程では吸着剤パウダーと無機系のバインダーで調整したスラリー中にデッピング後、乾燥して吸着剤を含浸する。この方法ではバインダーの種類、使用量によっては吸着剤細孔が閉塞されたり、熱容量の増加により除湿性能に悪影響が出たりすることがあるため、バインダーの選定、スラリーの調整方法が重要になる。試作ローターSZR-A（合成ゼオライトA）、SZR-B（合成ゼオライトB）は、特性の異なる吸着剤を使用しているが試作方法は同じである。

吸着剤の中でも合成ゼオライトは最も吸湿力が強い半面再生しにくいとされているが、今回使用した合成ゼオライトA及びBは100℃前後の比較的低温で再生出来るように改質された特殊な低温再生型合成ゼオライトである。

4.5.4 各種試験用ハニカム吸着式ローターの平衡吸着量

特性の異なる各種吸着剤を用いて試作した試験用ローター（基材、バインダーを含む、エレメント部分）の水蒸気平衡吸着量を比較した。測定方法は、15～20℃の室温にてデシケーターを用いて飽和塩法にて測定した。

図4-11より各種ハニカム吸着式除湿ローターの吸湿特性を比較すると、相対湿度20～40%RHの中間領域ではSSCR-Uの吸湿量が最も多いが、相対湿度15%RH以下の低湿度域ではSZR-Bの吸湿量が多い。



測定 室温(23~27℃)
飽和塩法による

図4-11 ハニカム吸着式除湿ローターの平衡吸着量

4.5.5 除湿性能試験

除湿性能試験は写真4-5のような試験装置を製作して一連の試験を行った(ローター有効径φ300)。各風速は吸い込みノズルを使用して精密微差圧計にてノズル静圧を測定し、風量を求めてローター前面風速を算出した。各湿度はミラー式露点計を使用し、露点温度より絶対湿度を求めた。各温度測定は熱電対を使用した。

4.5.6 除湿性能試験結果

図4-12に各種ハニカム吸着式除湿ローターの除湿性能を比較した。入口空気 $X_{p1} = 7 \text{ g/kg'}$ 以下の低湿度側では、除湿量的には各種吸着剤による差異はそれほどないが $X_{p1} = 10 \text{ g/kg'}$ 以上になると各種吸着剤による除湿性能の差が出てくる。除湿量はSSCR-Uが最も多く、次いでSSCR-L、SZR-A、SZR-Bがほぼ同等で並ぶ。

図4-13において除湿出口空気温度 $T_{p2}^{\circ}\text{C}$ の比較を行った。デシカント空調用途では、除湿出口空気温度は低いほうが望ましい。最も出口温度 $T_{p2}^{\circ}\text{C}$ が低いのはSSCR-Lで、次いでSSCR-U、SZR-Aが同等で並び、SZR-Bの順になる。

図4-14において処理空気を除湿することによるエンタルピー増加量 $\Delta I_p [\text{kJ/kg'}]$ を比較した。

$$\Delta I_p = I_{p2} - I_{p1} \quad [\text{kJ/kg'}] \dots\dots (4-1)$$

エンタルピー増加量の内訳には、ローターの回転によって再生ゾーンから蓄熱して持ち込まれる熱と、吸着熱と凝縮熱の差のエンタルピーが含まれる。(もし吸着熱が凝縮熱に等しければ、潜熱が顕熱に変化するだけで吸着熱による処理空気のエンタルピー増加はゼロになる。)

処理空気を除湿する場合のエンタルピー増加は避けられないが、できるだけ少ないほうがシステム全体の効率を上げることにつながる。エンタルピー増加量 ΔI_p はSSCR-Lが最も少なく、次い

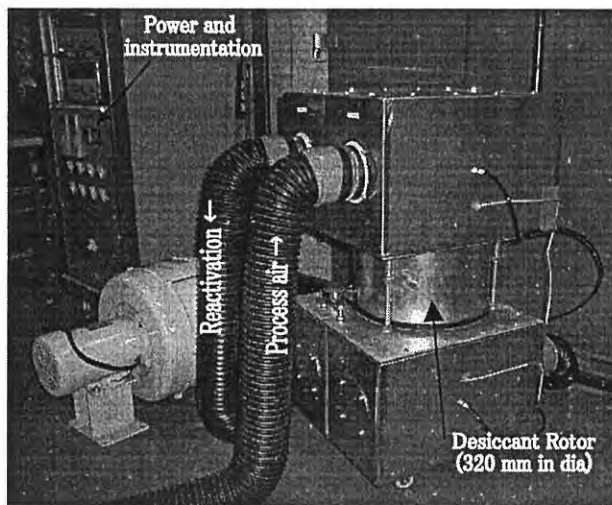


写真4-5 除湿ローター性能試験装置

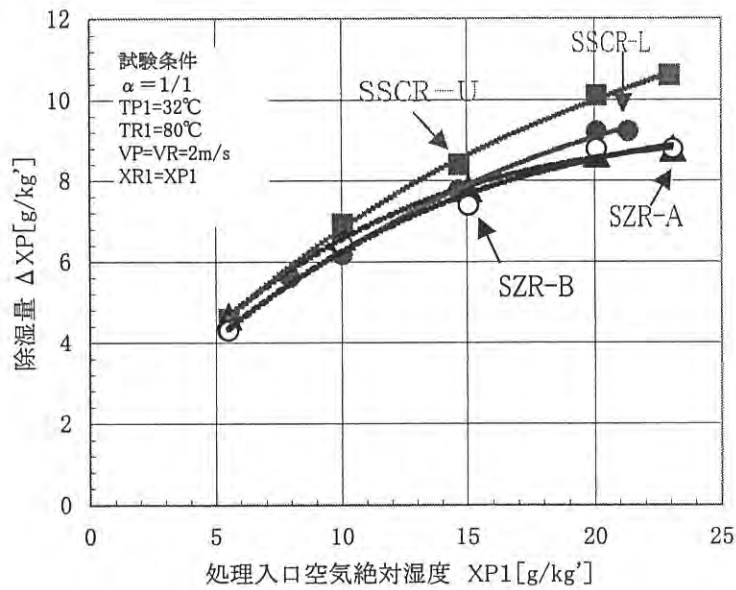


図4-12 処理入口空気湿度による除湿量 ΔX の変化

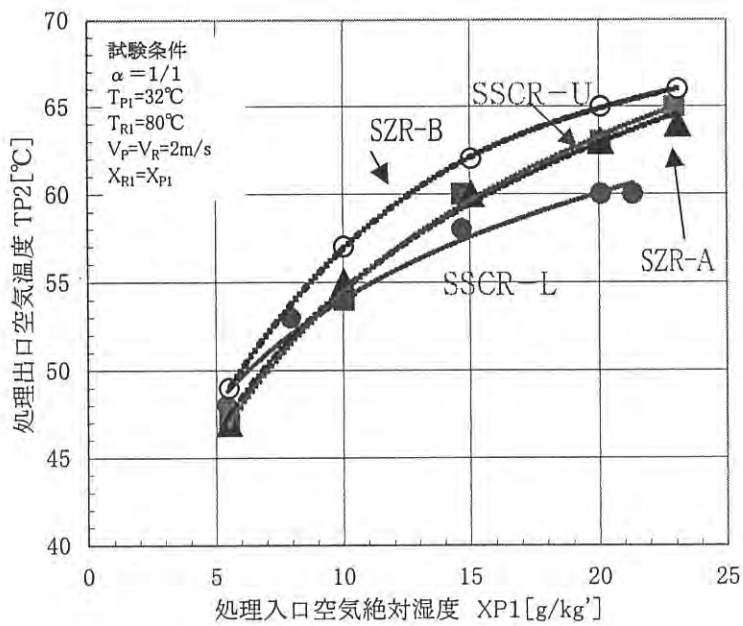
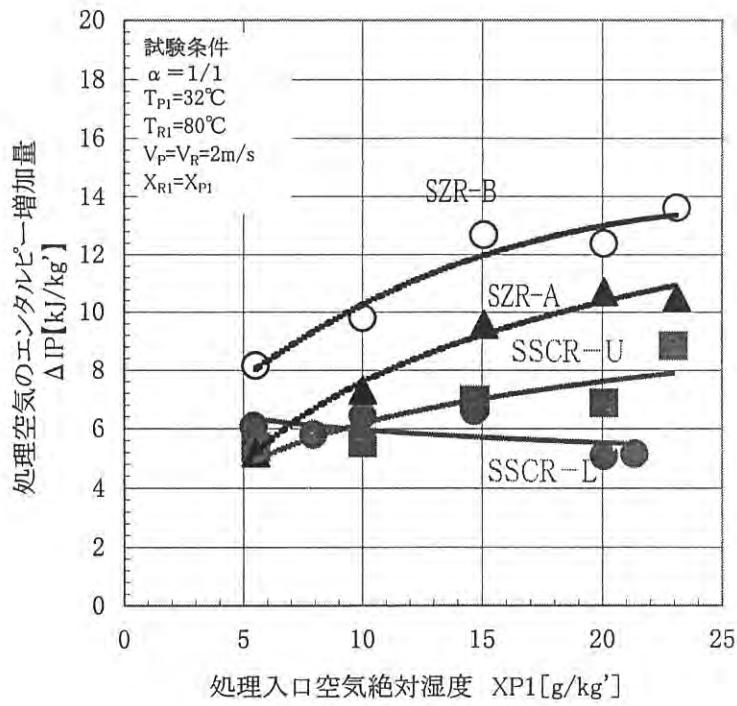


図4-13 処理入口空気湿度による処理出口空気温度の変化



処理空気のエンタルピー増加量
 $\Delta I_P = I_{P2} - I_{P1}$ [kJ/kg']

図4-14 処理空気除湿後のエンタルピー増加

でSSCR-U、SZR-A、SZR-Bの順になる。SZR-A、SZR-B共に処理入口空気湿度 X_{p1} が多くなるに従いエンタルピー増加量 ΔI_p も増加する傾向にある。SSCR-Uも同様の傾向が見られるが増加量は少ない。SSCR-Lでは処理入口湿度が変化しても処理空気のエンタルピー増加量 ΔI_p はほとんど増加しないことが分かった。

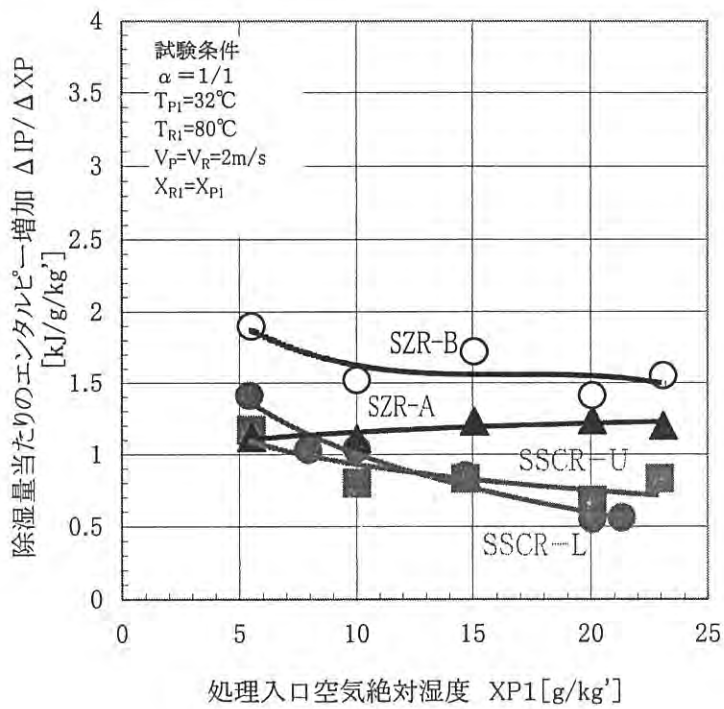
4.5.7 結果の分析及び考察

除湿量が多ければエンタルピー増加量 ΔI_p は多くなり、逆に除湿量が少なければ ΔI_p は少なくなる傾向があり簡単には比較できないため、除湿量当りの処理空気のエンタルピー増加量 $\Delta I_p / \Delta X_p$ 〔kJ/(g/kg')〕を計算比較した(図4-15)。エンタルピー増加量は(4-2)式によって計算した。

$$\Delta I_p / \Delta X_p = (I_{p2} - I_{p1}) / (X_{p1} - X_{p2}) \text{ [kJ / (g/kg')]} \cdots 4 - 2)$$

SSCR-U及びSSCR-Lは、入口湿度 X_{p1} が高くなるに従いエンタルピー増加量 $\Delta I_p / \Delta X_p$ が減少する傾向を示している。この理由は次のように考えられる。吸着力の強い部分と弱い部分の混在する吸着剤の場合、低湿度域(例えば処理空気温度32℃、湿度10g/kg'のとき入口33%RH、出口3~4%RH)での吸着現象は一般的に高い吸着エネルギーが必要なので、吸着剤の表面及び細孔の中でも吸着力の強い部分での吸着が主体となり、結果的に凝縮熱より高い吸着熱が発生すると考えられる。中湿度域(例えば処理空気温度32℃、湿度20g/kg'のとき入口66%RH、出口7~8%RH)での吸着現象は吸着力の弱い部分も吸着に関与し、吸着力の弱い部分では吸着熱も低く凝縮熱に近付くため、全体的にエンタルピー増加量 $\Delta I_p / \Delta X_p$ が少なくなると考えられる。

SZR-A、SZR-BはSSCR-U及びLと異なり広い湿度域においてエンタルピー増加量 $\Delta I_p / \Delta X_p$ がほぼ一定であるが、これは合成ゼオライトA、B共に吸着剤の性質上吸着剤内部の吸着



※除湿量当たりのエンタルピー増加
 $\Delta I_P / \Delta X_P = (I_{P2} - I_{P1}) / (X_{P1} - X_{P2})$ [kJ/kg¹]

図4-15 処理空気の除湿前後における
 除湿量当たりのエンタルピー増加量

力がほぼ均一であると考えられ、中湿度域においても低湿度域と同じ高い吸着熱を発生しているためと考えられる。

4.6 結 言

- (1) ハニカム状に成型した多孔質マトリックス内でシリカゲルを合成するという独創的な方法を考案して、バインダーを使用することなく、シリカゲル自身で結合したハニカム状エレメントを開発し、性能、耐久性共に飛躍的に向上したハニカム吸着ローターを完成商品化することができた。
- (2) デシカント空調システム用に開発した低温再生型ハニカム吸着ローターの除湿性能の特徴を検討した結果、デシカント空調用ハニカム吸着式除湿ローターの高性能化には、吸着性能と再生の容易さのバランスが重要であり、適度に吸着力の強い部分と吸着力は弱い再生しやすい部分が混在した吸着特性が適していることが分かった。

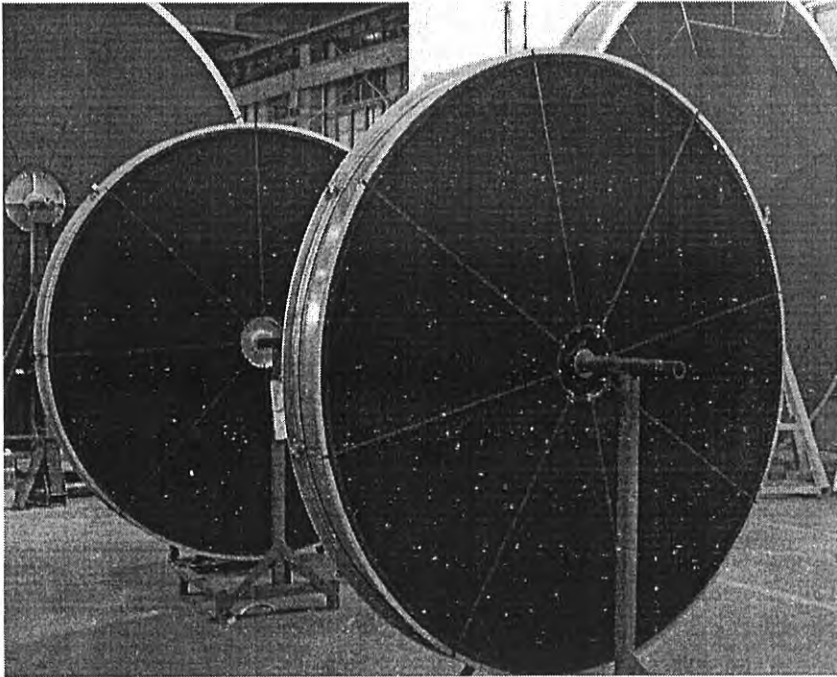


写真4-6 ハニカム吸着式除湿ローター
SSCR-L $\phi 2450\text{mm} \times 200\text{mm}$

使用記号

I	: エンタルピー	[kJ/kg']
N	: ローター回転数	[rph]
T	: 温度	[°C]
V	: 風速	[m/s]
X	: 絶対湿度	[g/kg']
α	: 再生空気比	[-]
ΔI	: エンタルピー増加量	[kJ/kg']
ΔX	: 除湿量	[g/kg']
ΔP	: 圧力損失	[Pa]

添字

P	: 処理空気側
R	: 再生空気側
1	: 入口側
2	: 出口側

文 献

- 1) 岡野 浩志 “ハニカムローター式除湿機について” 日本工業出版『クリーンテクノロジー』第8巻第3号 33～37頁平成10年 3月
- 2) 岡野 浩志 “ハニカム吸着式除湿乾燥機「ドライセーブ」” 日本工業出版『クリーンテクノロジー』第9巻第10号 62～64頁 平成11年10月
- 3) 隈 利実、岡野浩志 特許 2013561 湿気交換用または全熱交換用の吸着型素子の製造法
- 4) 隈 利実、岡野浩志 特許 2579767 超低濃度ガス吸着素子およびガス吸着除去装置
- 5) Hiroshi Okano, Wei-Li Jin, Tsutomu Hirose Ryuji Kuramitsu, Eiji Taguri, Hiromi “ Honeycomb Rotor Adsorption Dehumidifiers for High Efficiency Desiccant Air-Conditioning” (高性能デシカント空調用ハニカム吸着式除湿ローター) Fundamentals of Adsorption Vol.7 平成13年12月発行に掲載
- 6) 岡野 浩志 “吸着式デシカント空調用低温再生型ハニカム除湿ローター” 日本吸着学会 第12回 吸着シンポジウム講演要旨集 11～18頁平成12年 8月

第5章 マイクロガスタービン発電機の排熱を利用した 吸着式デシカント空調システムの検討と実証試験

5.1 緒言

デシカント空調システムは太陽熱や排熱を熱源として、ハニカム除湿機と顕熱交換器及び水による気化冷却器を組み合わせて冷房するシステムで、20年程前から各国で試験研究され最近徐々に使用実績も増えつつある¹⁻³⁾。近年、電力自由化の動きに伴い各種自家発電装置の排熱を利用したコジェネレーションシステムが検討されているが、年間を通して高効率で運転するためには排熱の有効利用が課題となっており、その排熱を効率的に利用できるシステムとしてデシカント空調システムが注目されている。本研究ではマイクロガスタービン発電機の排熱を利用することに適したデシカント空調システムを検討した。

5.2 従来式デシカント空調システム

従来のデシカント空調システムは2ローター式で、**図5-1**のようにハニカム除湿機(デシカントローター)と回転型顕熱交換器、温水ヒーター、気化冷却器との組合せが一般的である。冷房運転の原理は**図5-1**より、まず取り入れた外気中の水分をハニカム除湿機で吸着除去した後(1→2)、その際生じた吸着熱を顕熱交換器で除去(2→3)、さらに気化冷却器で水の蒸発潜熱を利用して空気を冷却して供給する(3→4)。熱源はハニカム型除湿機で吸着除去した水分をシステム外に排出するいわゆる再生工程(7→8→9)のために必要となる。**図5-2**に従来式デシカント空調システ

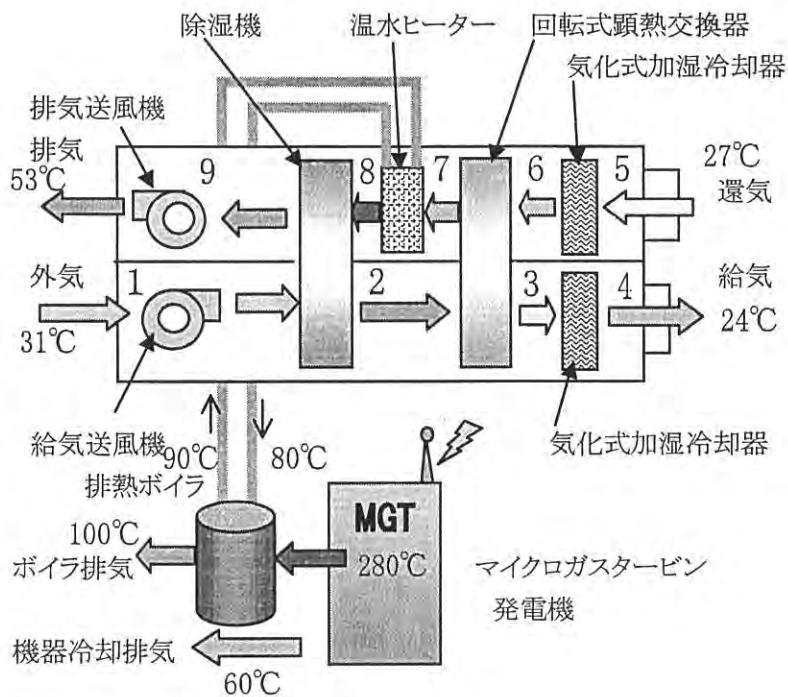


図5-1 MGTと従来式デシカント空調システムの組合せ

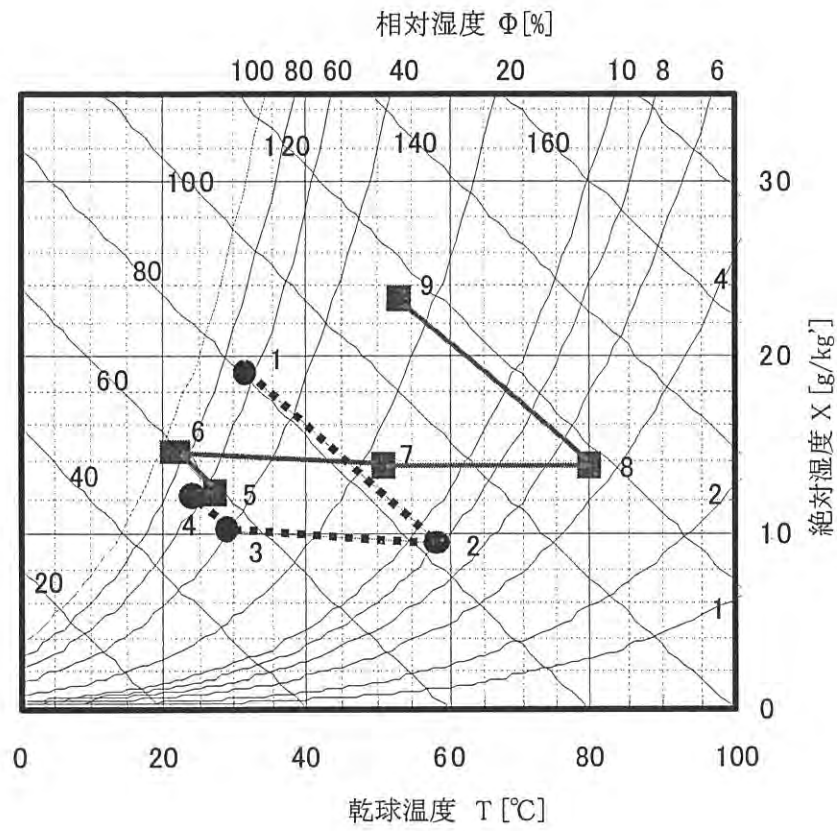


図5-2 従来システム空気線図

ムを運転した場合の、空気状態の変化の一例を空気線図上に示す。

5.3 除湿ローター及び効率の良い再生方法の検討

5.3.1 従来式の問題点

マイクロガスタービン発電機の排熱を利用したデシカント空調システムとして、従来式のシステムをそのまま適用した場合の問題点について検討を行った。まず排熱の効率的利用という点から考えた場合、従来式のデシカント空調システムでは図5-1のように高温排ガス (T_{B1} = 約 280℃) を排熱ボイラに投入して温水を作り、さらにその温水を熱交換器 (温水ヒーター) を介して除湿機の再生空気を加熱する方式のため2台の熱交換器が必要で、熱交換器での熱損失や、イニシャルコストが上昇するという問題がある。実際にマイクロガスタービン発電機実機においては、排熱ボイラから 100℃ (T_{B2}) 前後の排ガスが排気されており、図5-1 図中の温度条件において式(5-1)により温度効率を計算すると排ガスエネルギーの約 27%がムダになっていることが分かった。

$$\eta_t = (T_{B1} - T_{B2}) / (T_{B1} - T_{OA}) \quad (5-1)$$

また従来式のデシカント空調システムでは熱媒体として温水を使用するため、デシカントローターの実際の再生温度は 80℃以下にならざるを得ないという制約も生じる。

本研究で検討したマイクロガスタービン発電機の燃料は天然ガスを使用するが、天然ガスの燃焼ガスを直接再生空気として使用するハニカム除湿機の実績もあることから以上の検討結果も考慮して、マイクロガスタービン発電機の排ガスを直接再生空気として利用することを前提として以下の検討を進めた。

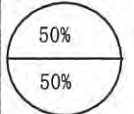
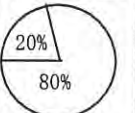
5.3.2 除湿機の効率的運転方法の検討

排ガスを直接再生空気として使用することを前提とした場合に、マイクロガスタービン発電機からの高温排熱（約 280℃）をどのように利用するかがポイントになる。そのために同じ熱量の排ガスをそのまま使用して高い温度で再生する場合と、外気で希釈して温度を下げ、再生空気量を増加させて使用する場合とでどちらの効率が良いか比較検討を行った。デシカント空調に使用可能な代表的な除湿ローター 2 種類の仕様を表 5 - 1 に示す。通常従来式のデシカント空調システムの場合再生温度は 80℃ 前後なので、低温再生フロー専用の SSCR-L ローター（難燃性、低コスト）を採用するが、本研究では前述の理由から高温再生できる SSCR-U ローター（不燃性、高耐熱性）を採用した。表 5 - 2 試験条件一覧表に示すように、有効直径 300mm の除湿ローターにおいて同じ流量の処理空気を供給し、同じ熱量の再生エネルギー（3.7 kW）を投入して除湿する場合の、再生温度（風量）と除湿性能の関係を調べた。同じ投入エネルギーで再生温度を変化させるため、再生風量は表 5 - 2 に示す Q_{R1} のように設定した。試験装置は、比較のため再生ゾーン面積の異なるチャンバーを 3 種類製作し、3 種類とも再生空気の風速が 2m/s になるようにした。図 5 - 3 に示す試験結果より、処理入口湿度 $X_{p1}=13\text{g/kg}'$ 以下の低湿度域では高温再生フローが他のフローより若干除湿性能が良いが、 $X_{p1}=13\text{g/kg}'$ 以上になると標準再生フローの方が性能が良くなることが分かった。この理由は、低湿度域においては再生温度の高いほうがより低い相対湿度で再生できることにより、吸着側ではより低い相対湿度域にまで除湿できるためである。いっぽう、高湿度域になれば再生ゾーンで脱着しなければならない水分量が増加し、脱着空気量の少ない高温再生フローでは脱着空気量が不足して十分に再生できなくなるためと考

表5-1 ローター仕様比較表

	SSCR-L	SSCR-U
用途	デシカント空調用	除湿(高性能型)
基材ペーパー	ガラス繊維紙	セラミック繊維紙
接着剤	有機系	無機系
吸着材の種類 と担持方法	メタルシリケート 化学合成	メタルシリケート 化学合成
ハニカムサイズ	AS-42	AS-31
ハニカムピッチ P [mm]	4.2	3.4
ハニカム高さ H [mm]	2.3	1.8
ハニカムセル数 [個/in]	134	211
再生温度 T_{RI} [°C]	~80	~140
耐熱温度 T [°C]	100	200
燃焼性	難燃性	不燃性
焼成有無	焼成無し	焼成品
嵩比重 ρ [kg/m ³]	160	210
再生面積比	1/1	1/3

表5-2 試験条件一覧表

フロータイプ ゾーン比	低温再生 	標準再生 	高温再生 
再生入力 [kW/h]	3.7		
風量比 Q_{R1}/Q_{P1}	1/1	1/2	1/2.6
再生温度 T_{R1} [°C]	80	130	160
再生風量 Q_{R1} [m ³ /h]	224	112	86
再生風速 V_{R1} [m/s]	2		
処理風量 Q_{P1} [m ³ /h]	224		
処理風速 V_{P1} [m/s]	2	1.33	1.25
ローター回転数 N [rph]	12.6	12.9	12.0
ローター径 D [mm]	320 (有効径300)		
ローター幅 W [mm]	200		
処理入口温度 T_{P1} [°C]	30		
湿度条件 X [g/kg']	処理空気XP1=再生空気XR1		

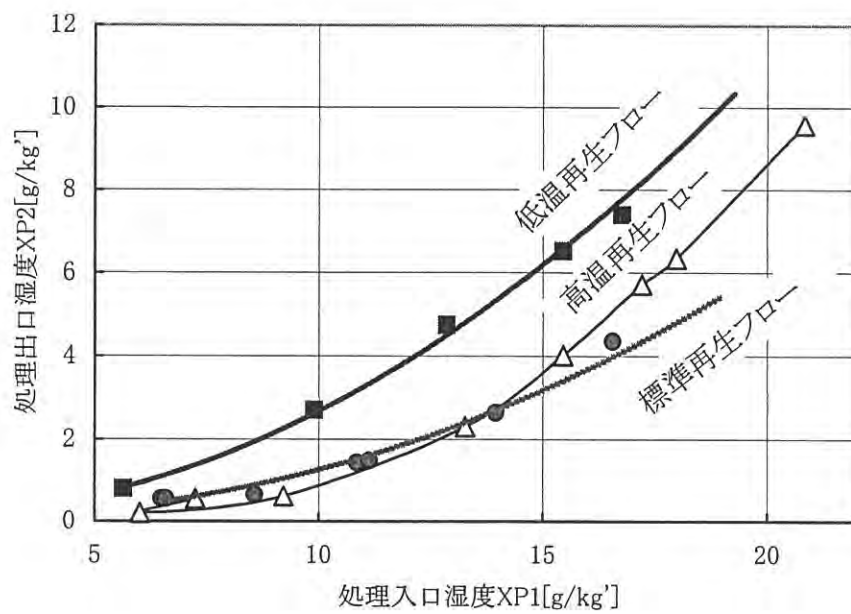


図5-3 再生方法による除湿性能比較(再生熱量一定)

えられる。低温再生フローでは全湿度域に於いて他のフローより除湿性能が低い。この理由は、再生空気の温度が低くなると再生空気の相対湿度が高くなり、再生効率が悪くなるためと考えられる。以上の結果より冷房運転の必要な夏期外気条件における絶対湿度 10g/kg' 以上の湿度域では、高温排ガスを高い温度のまま使用するよりも外気と混合して 140°C 程度の温度に下げ、再生空気量を増やして使用するほうが除湿性能が良くなることが分かった。さらに外気の代わりに、マイクロガスタービン発電機エンクロージャー冷却後の $50\sim 60^\circ\text{C}$ の低温排気を利用することで排熱の利用効率を上げることも考慮した。

5. 4 顕熱除去ユニットの検討

デシカント空調システムを構成する機器の中で潜熱を顕熱に変換する除湿機と同様に、その顕熱を除去する顕熱交換器と気化冷却器もシステム全体の効率を大きく左右する重要な機器である。この章ではデシカント空調システムを構成する顕熱交換器と気化冷却器を総合して顕熱除去ユニットとして取り扱い、その最適化を検討した。

5. 4. 1 回転型顕熱交換器と直交流型顕熱交換器

風洞試験により回転蓄熱型顕熱交換器と直交流型顕熱交換器の熱交換性能の比較を行った。顕熱交換器については 30 kW 級マイクロガスタービン発電機用のデシカント空調システムを想定して、熱交換エレメントの大きさが $750\text{mm}\times 750\text{mm}\times 1050\text{mm}$ の中型性能試験風洞を製作し性能試験を行った。回転型顕熱交換器は、ローター厚

さ（層長）と前面風速が同じであれば熱交換性能はローター径に関係しないので、ローター寸法φ320mm×L200mmの小形試験風洞で性能試験を行い比較した。流路の寸法（ピッチP×高さH）は、前者では長い層長による圧力損失の過大を避けるため、比較的大きなP6.4×H3.5mmとし、後者ではP4.1×H1.67mm（市販品の仕様）とした。

図5-4に示す実験結果より回転型顕熱交換器の方が、熱交換効率が約10%高いことが分かった。圧力損失も回転型顕熱交換器の方が低く、性能的には回転型顕熱交換器の方が優れているといえる。しかし回転型顕熱交換器は、原理的にローターの回転によってハニカムの空隙に入った還気が給気側に持ち込まれ、還気の移行が生じるという欠点がある。

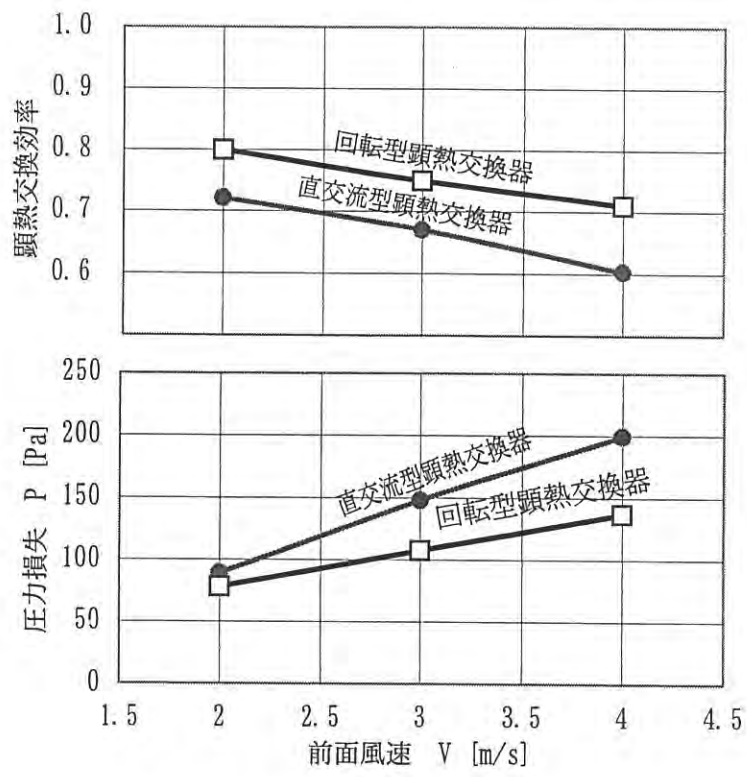
$$Q_t / Q_{sa} = 2 \times L \times N \times v_p / (V_{sa} \times 60) \quad (5-2)$$

移行率を式(5-2)でシミュレーションした結果を図5-5に示す。移行率を少なくするにはパージセクターを設置すればよいが、還気と給気の静圧バランスを調整するという操作が必要となる。

5.4.2 間接式気化冷却器 気化冷却+顕熱交換

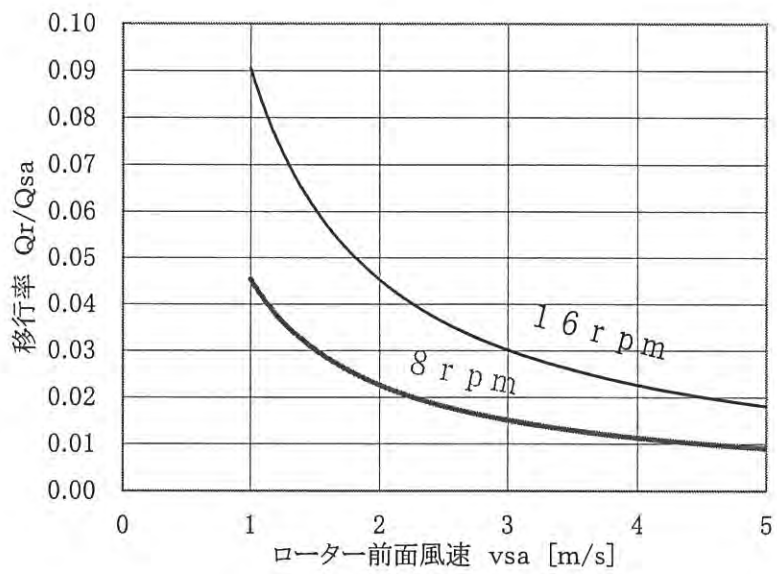
5.4.1では、顕熱交換器としては直交流型は回転型より効率が低いという結果を述べたが、図5-6のように直交流型顕熱交換器のハニカム流路内に水滴を同伴させ、熱交換器内で気化冷却熱交換をおこなう間接気化冷却器として使用することにより、冷却性能を向上させることを検討した。間接気化冷却器への応用は直交流型のような静止型のみ可能で、伝熱面が高温側と低温側に交互に切り替わりながら熱交換する回転型は、原理的に間接気化冷却器には応用できない。

5.4.1の直交流型顕熱交換器に、気化側の流路に水を導入



回轉型顕熱交換器 200mm幅×φ320 P=4.1 H=1.67 アルミニウム製
 直交流型顕熱交換器 750×750 P=6.35 H=3.7 PET製

図5-4 顕熱交換器性能比較



ローター幅 $L=200\text{mm}$

図5-5 回転型熱交換器の空気移行率

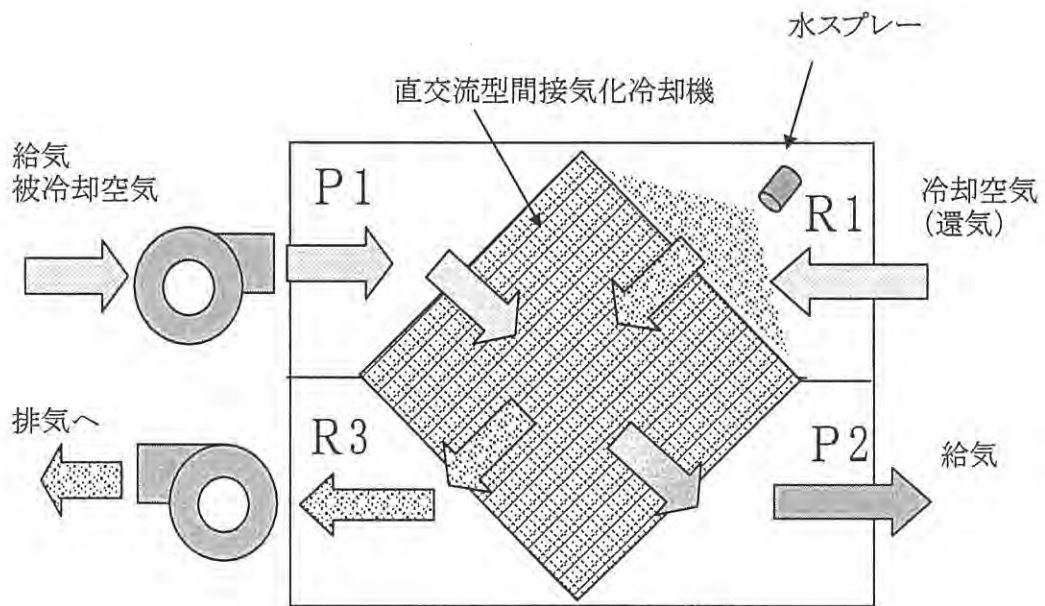


図5-6 直交流型間接気化冷却器

するためのスプレー装置を取り付け、間接気化冷却器として使用した場合の冷却効率について試験した。図 5 - 7 より、顕熱交換器としての効率より、間接気化冷却器として使用した場合の効率が被冷却側で 10%以上向上することが分かった。気化側は顕熱が潜熱に変わるため、見かけ上の顕熱交換効率は低くなっている。このときの静圧損失は、気化側では流路内に水を供給することにより空気の有効流路が狭まるものと思われ圧力損失が若干上昇している。

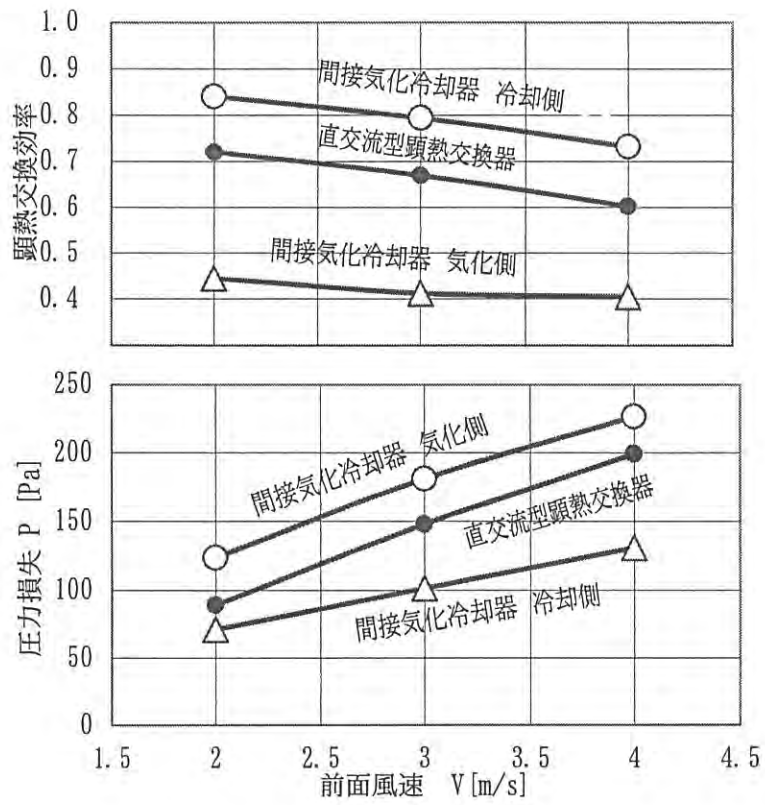
5. 4. 3 顕熱除去ユニットとしての総合冷却効率

デシカント空調システムでは顕熱除去能力を向上させるため、図 5 - 1 あるいは図 5 - 8 のように顕熱交換器と気化式加湿冷却器とを組み合わせる場合が多い。本項ではこの組合せを一体のユニットとして取り扱い、図 5 - 6 の直交流型間接気化冷却器とで総合冷却効率の比較評価を行った。

被冷却 (高温) 側の空気 P1 を冷却 (低温) 側の空気 R1 で冷却する場合の総合冷却効率 η_c は、式 (5 - 3) によりエンタルピー基準で計算した。

$$\eta_c = (I_{P1} - I_{P2}) / (I_{P1} - I_{R2'}) \quad (5 - 3)$$

総合冷却効率の考え方は図 5 - 9 に示すように、冷却 (低温) 側の空気 R1 が 100%気化 (加湿) 冷却されたと仮定したときの冷却 (低温) 側の空気温度を $T_{R2'}$ とし、被冷却側空気 P1 がこの $T_{R2'}$ に等しい温度 $T_{P2'}$ まで冷却された場合の理論的 maximum 除去エンタルピー量 ($I_{P1} - I_{P2'}$) に対する被冷却空気の実際のエンタルピー差 ($I_{P1} - I_{P2}$) を総合冷却効率 η_c としている。効率を顕熱ではなくエンタルピーで計算したのは、回転型顕熱交換器のローター回転による空気 (湿度) 移行も考慮に入れるため、回転型顕熱交換器については、図 5 - 5 における $V = 2\text{m/s}$, $N = 8\text{rpm}$ 相当の移行率 0.022 を加味して計算し



直交流型顕熱交換器 750×750 P=6.35 H=3.7 アルミニウム
 空気温度 TP1=TR1=24~29℃
 相对湿度 P1=R1=60~69%RH

図5-7 間接気化冷却器の効率

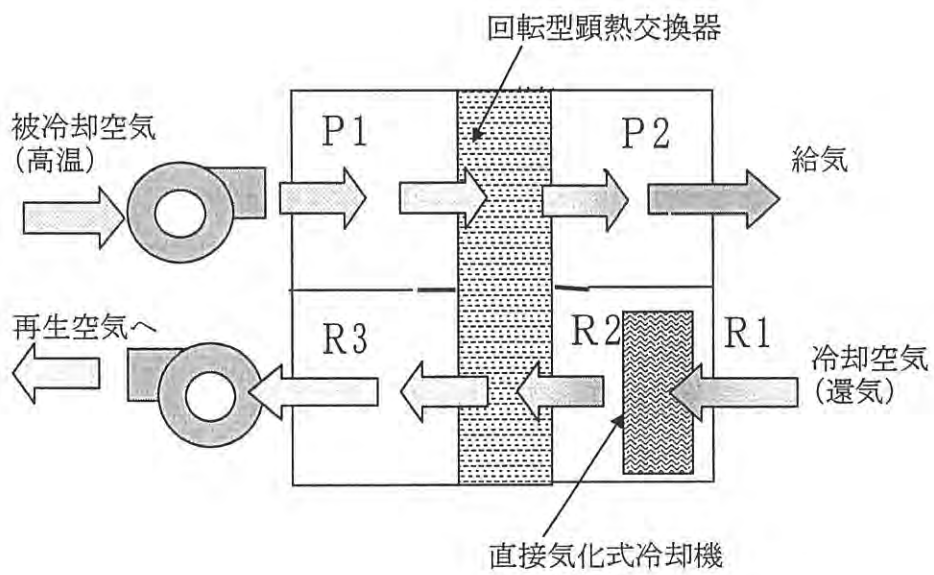


図5-8 回転型顕熱交換器+気化式加湿冷却器

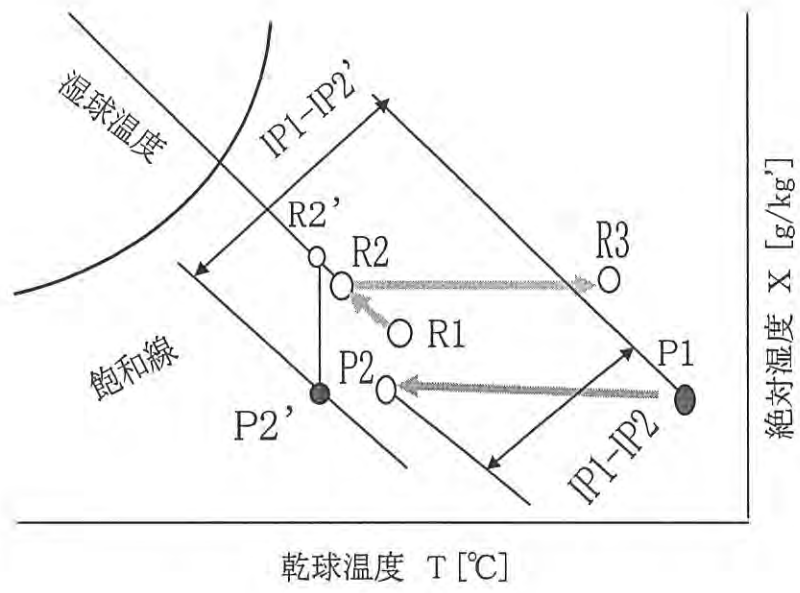


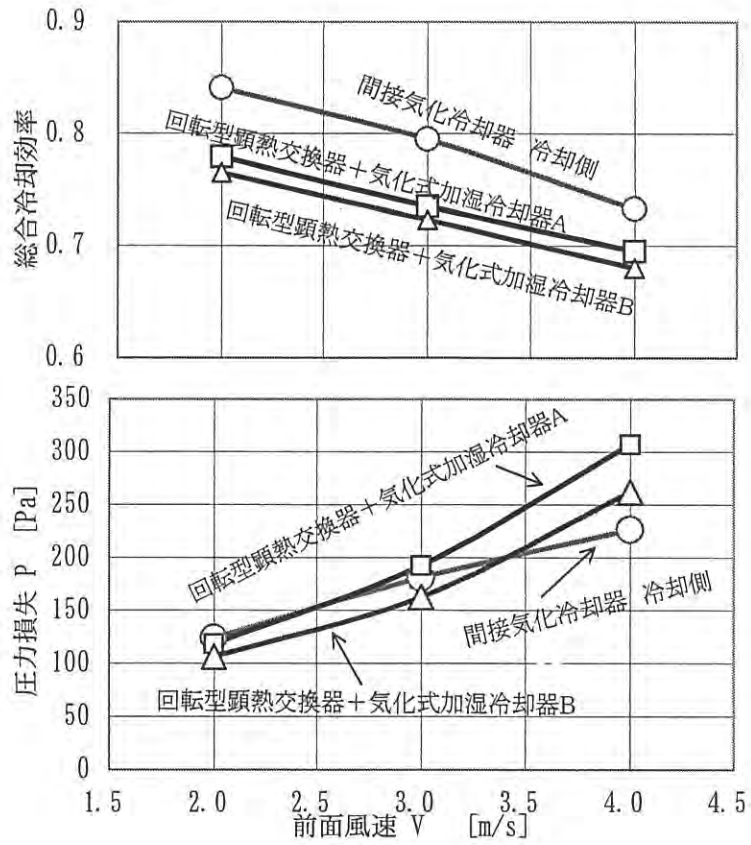
図5-9 総合冷却効率説明図

ている。また気化式加湿冷却器の能力についてはメーカーの資料⁽¹⁾より読み取り、回転型顕熱交換器の実測データと組み合わせて計算した。

総合冷却効率の比較評価結果を図 5 - 1 0 に示すが、直交流型間接気化冷却器の方が 5~7%高い効率が得られることが分かった。このときの圧力損失を圧力損失の高い気化側で比較した場合、前面風速 3m/s までは両方式ともほぼ同等であるが、それ以上の風速では直交流型間接気化冷却器の方が低くなることが分かった。前面風速 2m/s において従来式システムの総合冷却効率約 78%と比較して、直交流型間接気化冷却器では 85%に高効率化できる見込みである。

5.5 新デシカント空調システム

以上の検討の結果、図 5 - 1 1 および図 5 - 1 2 に示す新形式のデシカント空調システムを考案し、30kW 級マイクロガスタービン発電機（米国キャプストーン社製、(株)明電舎パッケージ）と組み合わせた写真 5 - 1 に示す試験装置を制作し、(株)西部技研本社ロビーに設置して実証試験を行った。このシステムでは、マイクロガスタービン発電機の排ガスをハニカム除湿機の再生空気として直接供給すること、および直交流型間接気化冷却器によって除湿後の空気の冷却を行うことが特徴である。それぞれの機器の大きさは、除湿機については 5.3 の検討結果より、マイクロガスタービン発電機から得られる高温排ガスとエンクロージャー冷却低温排気（図 5 - 1 1 参照）を混合して得られる 140℃前後の再生空気量に対して、約 3 倍量の給気流量 5500m³/h を処理する仕様として直径 1220mm の S S C R - U 型ハニカムローターを採用した。間接気化冷却器の寸法は除湿機の寸法とバランスを取って 900×900×1200mm とした。



間接気化冷却器: 750×750mm 段規格AS-63 (P=6.35、H=3.7、t=0.05PET)
 回転型顕熱交換器: 200mm幅 段規格AS-42 (P=4.1、H=1.67、t=0.05アルミ)
 想定空気条件 被冷却側: 59.2℃、7.38g/kg' スプレー側: 26.7℃、11.2g/kg'

図5-10 総合冷却性能比較

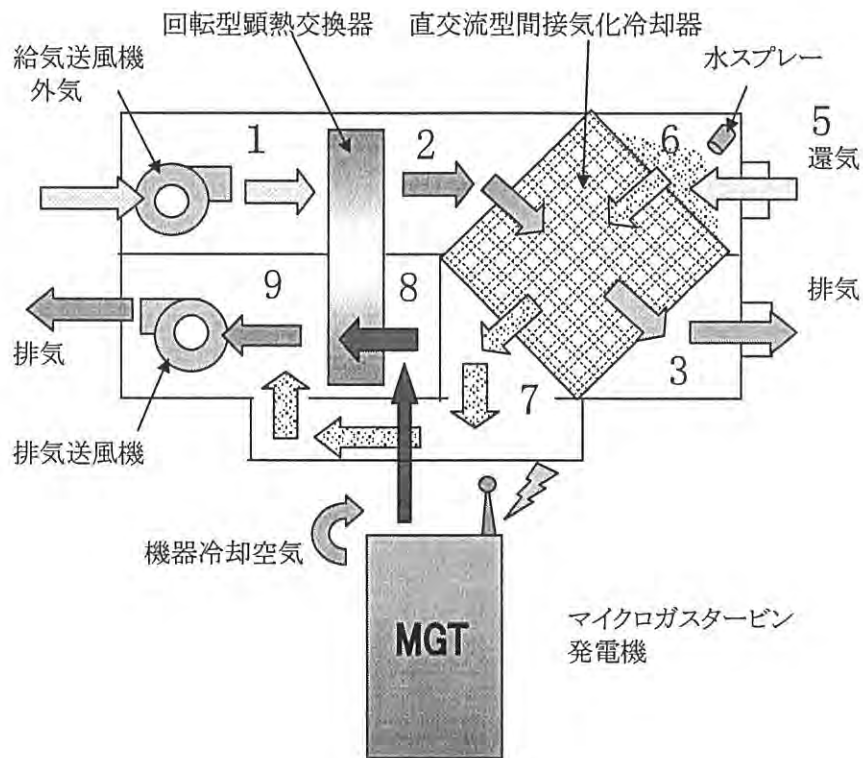


図5-11 MGTと新デシカント空調システムの組合せ

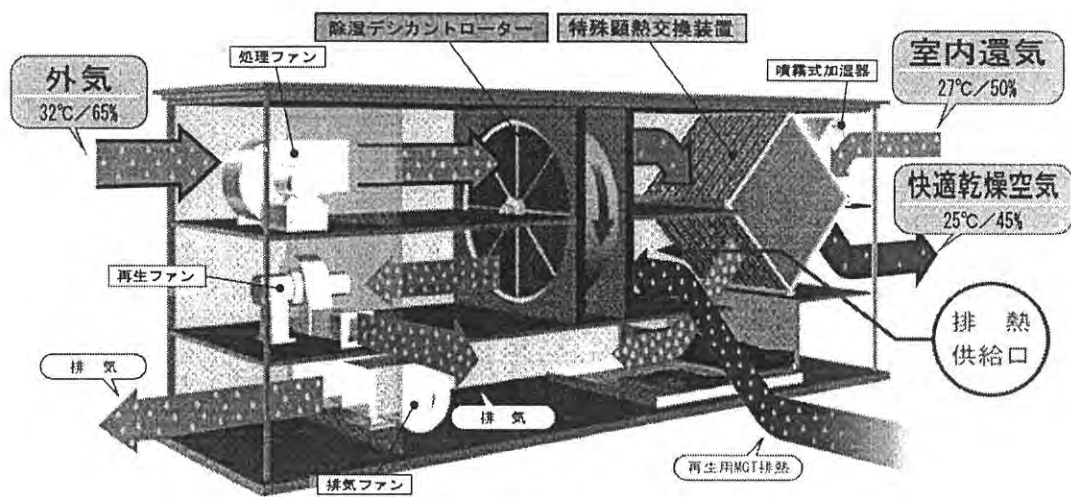


図5-12 新デシカント空調システムのフロー図

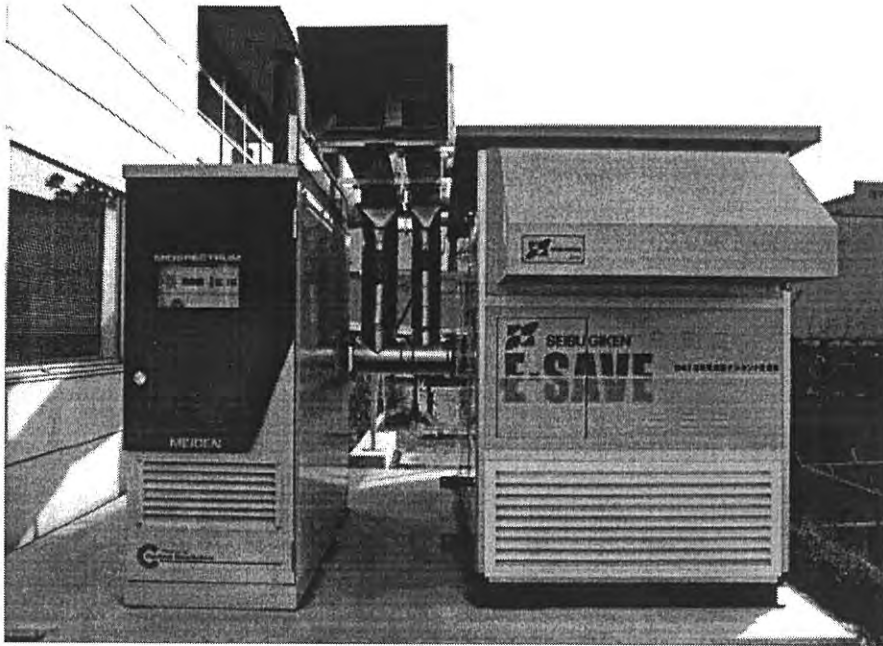


写真5-1 実証試験装置

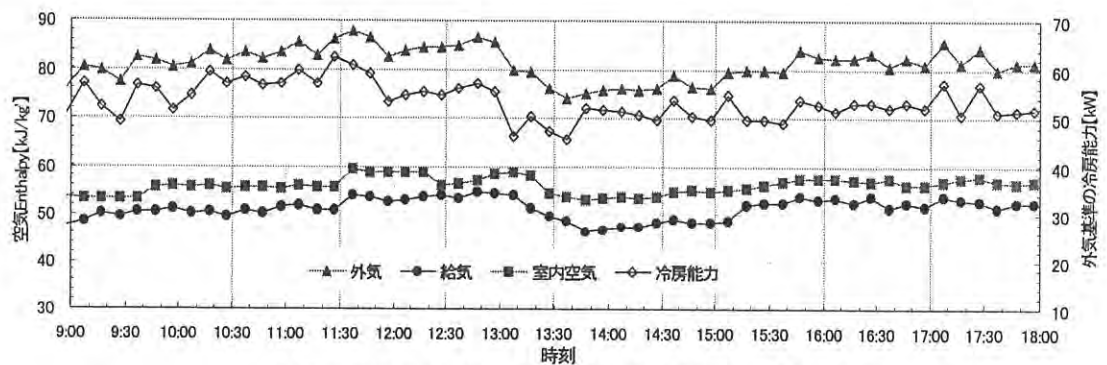
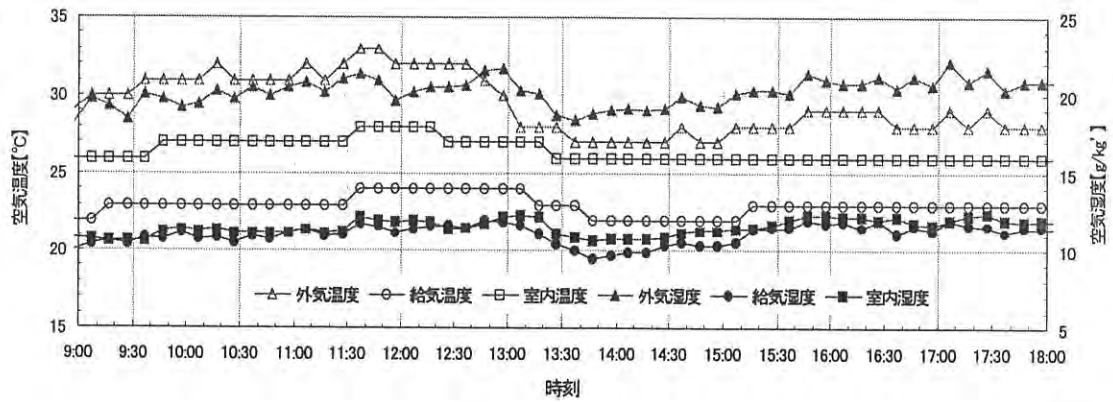
各気候条件下での実証試験結果の例を図5-13（雨天時）および図5-14（晴天時）に示す。この試験装置は全外気空調方式なので、冷房能力CCは式（5-4）によって算出した。

$$CC = G_{SA} \cdot (I_{OA} - I_{SA}) \quad (5-4)$$

図5-13の雨の日は、午前中外気温度が30℃を越え蒸し暑かったが、午後から雨の影響で27~28℃に低下しており、室内への給気温度も外気温度の影響を若干受けて低下している。しかし外気温度の変動27~33℃の6℃差に対し、給気は22~24℃の2℃の差で、給気温度に対する外気温度の影響は緩和される傾向のあることが分かる。図5-14の晴れの日には、午前中の室温は快適な25℃に保たれていたが、午後になって外気温の上昇とともに室温も上昇し、15:30以後は室温が29℃になっている。この原因は外気温度の上昇だけでなく、空調している玄関ロビーの西側全面が総ガラス張り(10m×7m)になっており、そのため午後からの西日を受け、日射による顕熱負荷が急増しているためである。それでもこのときの相対湿度は32~36%の比較的低い値に保たれており（もし必要であれば給気加湿器を稼働させて相対湿度をコントロールすることも可能。）、暑くはあっても蒸し暑くはない状態で、日陰に入れば涼しく感じたことは特記しておきたい。この場合も給気温度は22℃程度に保たれており、システムとしては有効に機能していることがわかる。また何れの場合も50kW前後の冷房能力を示しており、特に図5-13の午前中の高温多湿条件に於いては58kW前後の冷房能力を発揮し、設計能力を達成していることが分かる。

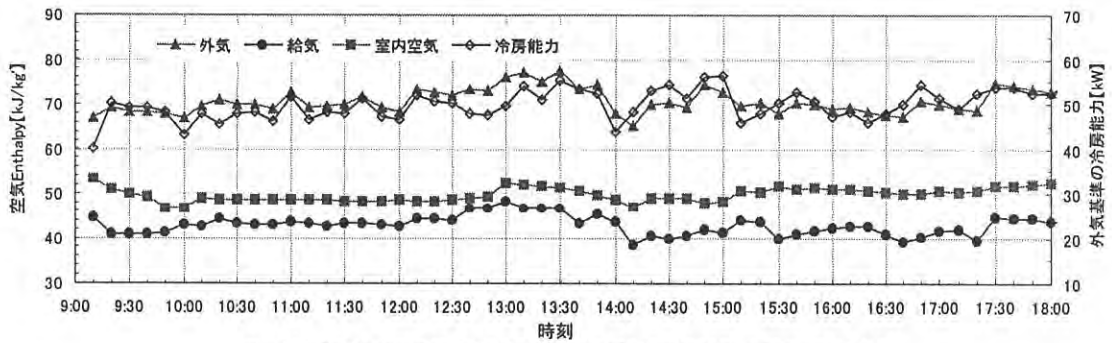
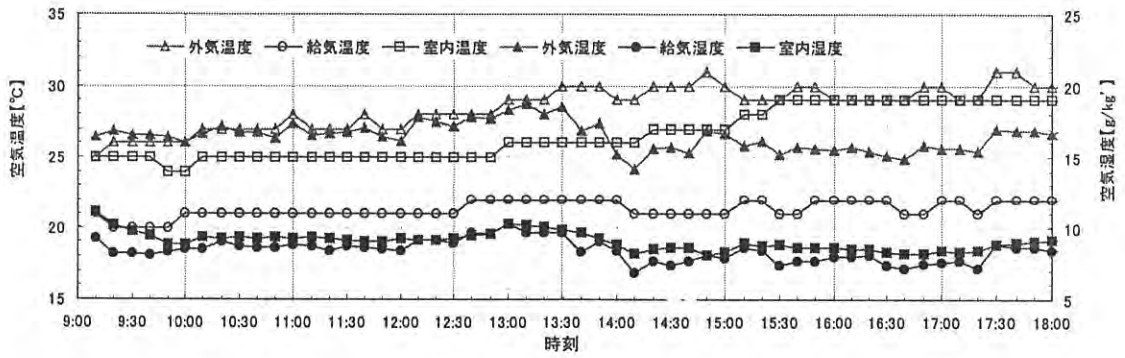
5.6 結 言

マイクロガスタービン発電機に最適なデシカント空調システム



デシカント空調システム冷房性能の経時変化(01年07月05日 天気条件:雨)

図5-13 雨天時のデシカント空調システム運転データ



デシカント空調システム冷房性能の経時変化(01年07月04日 天気条件:晴れ)

図5-14 晴天時のデシカント空調システム運転データ

を検討した結果、以下の結論を得た。

(1) 排ガスの成分がハニカム除湿ローターに対して悪影響がなければ、排ガスを直接再生空気として使用することで総合的な熱効率の向上と、イニシャルコストの低減が図れる。

(2) デシカント空調機の再生熱源としてクリーンな高温排ガスが使用できる場合は、高温排ガスをそのまま用いるよりも排ガスに外気または低温排気を混合増量して、130～140℃の温度域にして使用すると除湿性能が最もよくなることが分かった。

(3) 直交流型間接気化冷却器をデシカント空調システムに適用する検討を行った結果、従来式の回転型顕熱交換器と気化式加湿冷却器との組み合わせよりも高い総合冷却効率を得られることが分かった。

(4) 個別の機器の性能により推定したシステムとしての性能を、実証試験により確認した。

使用記号

CC	: 冷房能力	[W]
CE	: 冷却効率	[J/kg']
G_{SA}	: 給気風量	[kg/s]
I	: 空気エンタルピー	[J/kg']
$I_{P2'}$: 冷却後の理論的最低到達エンタルピー	[J/kg']
L	: ローター幅 (層長)	[m]
N	: ローター回転数	[min ⁻¹]
P	: 空気圧力	[Pa]
Q	: 風量	[m ³ /s] [m ³ /min] [m ³ /h]
q_t/Q_{SA}	: 空気移行率	[-]
q_t	: ローターの回転による空気の移行量	[m ³ /min]
S	: ローター前面面積 (給気側、排気側合計)	[m ²]
T	: 温度	[°C]
V	: 風速	[m/s]
v_p	: ローターハニカムの空隙率	[-]
X	: 絶対湿度	[g/kg']
η_c	: 総合冷却効率	[-]

添字

SA	: 給気
OA	: 外気
RA	: 還気
EA	: 排気
P	: プロセス空気
R	: 再生空気

文 献

- 1) Jin, W., Kodama,A., Goto,M., Hirose,T; “An Adsorptive Desiccant Cooling Using Honeycomb Rotor Dehumidifier,” *J. Chem. Eng. Japan*, 31, 706-713(1998)
- 2)Kodama, A., Goto,M., Hirose,T and Kuma,T; “Performance Evaluation for a Thermal Swing Honeycomb Rotor Adsorber Using a Humidity Chart,” *J. Chem. Eng. Japan*, 28, 19-24(1995)
- 3)Kuma, T., Hirose,T., et al; 1998, “Thermally Regenerative Monolithic Rotor Dehumidifier for Adsorption Cooling System,” *ASME Journal of Solar Energy Engineering*, 120, 45-50(1998)
- 4)岡野浩志, 金 偉力, 広瀬 勉 ; “マイクロガスタービン排熱利用に最適なデシカント空調システムの検討,”第35回 空気調和・冷凍連合講演会講演論文集, 97-100(2001)
- 5)岡野浩志, 広瀬 勉 ; “回転型全熱交換気用吸着ローターの研究,” 空気調和・衛生工学会論文集 ,83, 45-51(2001)

第6章 総括

第1章では、全熱交換、除湿、VOC除去、ハニカムフィルターなどの物質移動操作の概要とハニカム型吸着エレメントの特徴、応用例について述べ、本研究の目的を明らかにした。

第2章では全熱交換器すなわちエンタルピー交換器の開発について述べた。これは空調換気において室内空気と屋外空気の間で顕熱と潜熱を同時に交換して、換気に伴う熱損失を効率よく回収する省エネルギー装置であるが、アルミシートに吸着剤のシリカゲル微粒子をコーティングしてハニカムエレメントを機能化する方法を開発し、顕熱交換効率、潜熱交換効率およびエンタルピー交換効率を詳細に検討した。多孔質体への水蒸気吸着に基づく本方法は、電解液への吸収に基づく従来機の本質的な欠点を解決し、高湿度外気への全熱交換器の適用を可能にするものである。本研究の結果、回転式熱交換器の熱交換効率には熱交換器の材料の熱伝導度はそれほど大きく影響しないが、 2m/s 以下の低風速域において熱伝導度が大きい材料では熱伝導のために逆に熱交換効率の低下が起こり得ること、顕熱交換効率と潜熱交換効率は低風速域ではほぼ等しいが、顕熱交換効率より潜熱交換効率の方が風速の影響を大きく受け低下する傾向があること、顕熱交換効率は空気条件の影響を受けないが、潜熱交換効率は空気条件の影響を受けて変化することなどを明らかにした。

第3章では、全熱交換器の潜在的な問題点であった臭気移行の解決法について述べている。これは換気工程で水蒸気とともに吸着された臭気物質が給気工程で脱着されることにより、室内に臭気物質が蓄積される異常現象であるが、気象条件によって偶発的に発生するこの臭気移行問題はアルミナ系吸着剤、ゼオライト系吸着剤などの多孔性吸着剤では解決出来なかった問題である。様々な吸着剤

を検討した結果、適度の吸湿性を有するが臭気成分を吸着しにくいというイオン交換樹脂の特性に着目し、これを吸湿剤として製作したハニカム型全熱交換器の開発により異臭発生問題が根本的に解決されることを、種々の臭気物質の移行速度を実験的に検討することにより明らかにした。この新しい全熱交換器は今まで全熱交換器の採用は無理とされていた場所、例えば有機溶剤の多く発生する工場、あるいは臭気の発生しやすい病院施設などにも問題なく採用できるため、今後より多くの省エネルギーに貢献できるものと期待される。

第4章では、温度スイング吸着の原理で作動する吸着式除湿機の製法と性能について述べている。ハニカム状に成型した多孔質マトリックス内でシリカゲルを合成するという独創的な方法を考案して、バインダーを使用することなく、シリカゲル自身で結合したハニカム状エレメントを開発し、飛躍的に向上した除湿性能を検討した。

また、次章で述べるデシカント空調システム用に開発した低温再生型ハニカム吸着ローターの除湿性能の特徴について検討した。デシカント空調用ハニカム吸着式除湿ローターの高性能化には、吸着性能と再生の容易さのバランスが重要であり、ゼオライトのような均一な吸着特性よりも、適度に吸着力の強い部分と吸着力は弱いが再生しやすい部分が混在した吸着特性の方が除湿性能も良く、除湿後のエンタルピー上昇も少ないなどデシカント空調用として適していることを明らかにした。

第5章では、ハニカム吸着式除湿機及び顕熱交換器の組み合わせによるデシカント空調システムの性能について述べた。デシカント空調システムは太陽熱や低温排熱をエネルギー源として駆動する脱フロン・非電力型冷房システムであるが、この章では特にマイクロガスタービン発電の排熱を利用したデシカント空調システムの実証試験に基づいて、コージェネレーションシステムの効率向上を吸

着ローターおよびシステム構成の双方から検討した。その結果 排ガスの成分が除湿ローターに対して問題がなければ、直接再生空気として使用することで総合的な熱効率の向上とイニシャルコストの低減が図れること、また高温排ガスをそのまま用いるよりも排ガスに外気を混合増量して、130～140℃の温度域で使用することによって効率が最もよくなることを確認した。さらに直交流型間接気化冷却器をデシカント空調システムに組み合わせる検討を行い、従来式の回転型顕熱交換器と気化式加湿冷却器との組み合わせよりも高い総合冷却効率が得られることを明らかにした。以上個別の機器の性能により推定したシステムとしての性能を、実証試験により確認した。

デシカント空調システム普及のカギは、性能はもちろんのことシステムのコスト低減が絶対条件である。本研究によりマイクロガスタービンの排熱利用に特化したデシカント空調システムを検討し、シンプルな構成で高性能なシステムを実現できる可能性を明らかにした。今後はこの方面での普及を図ると共に、他の排熱源にも応用展開していきたい。

謝 辞

本研究を総合的にまとめるにあたって、熊本大学工学部物質生命化学科教授 広瀬 勉先生から機会を与えていただき、終始懇切丁寧にご指導ご鞭撻をいただき心から感謝いたしております。

私が現在の勤務先(株)西部技研に 1977 年に入社以来、研究開発者としての心構えに始まり、研究開発のイロハ、厳しさから指導、教育していただいた故隈利実前社長に、深く感謝と哀悼の意を表します。

本研究をまとめるにあたって、隈智恵子社長には機会と援助激励を与えていただいたことに深く感謝いたします。

本研究の遂行にあたっては熊本大学城先生、後藤先生には折に振れて御指導いただき、また児玉先生には特に同じ分野の研究をしている関係上、技術的議論、アドバイス等をしていただき有難う御座いました。

本研究をまとめるにあたり金 偉力 (Weili Jin)、船戸浩史両氏には骨身を惜しまぬ協力をしていただき有難うございました。

本研究を遂行するに当たり、多くの現開発部員及び当時の開発部員の方々に協力いただいたことに感謝いたします。

最後に本研究の全般に渡り健康管理に気遣い、協力してくれた家内に感謝いたします。

2001 年 10 月

岡野 浩志

Title: Development of Honeycomb-type Adsorbing Elements and their Application to Air-conditioning System

Name: Hiroshi Okano

ABSTRACT

High-speed and massive processing are needed in separating trace impurities such as water vapor in the air due to the high specific volume of the air. What is more, air is an inexpensive substance and therefore this is the very field where the true worth of separation technique is proved. In the present study, adsorbing elements with numerous minute channels, called honeycomb structure, were synthesized by a novel method. The structural characteristics of a honeycomb-type adsorbing element used for gas separation/refining is that air-passing resistance is low while surface area is large and that it is strong enough as a structure while it is light. A high-efficiency total heat energy exchanger and a high-efficiency dehumidifier were developed taking advantage of high adsorbing ability and heat exchanging ability. The research on them was followed by application to air-conditioning system including de-flon / non-electricity type desiccant air-conditioning, aiming at efficient use of energy and at energy conservation. The present study is characterized from a viewpoint of industrial technique by the fact that development of new honeycomb-type adsorbing elements made it possible to exchange heat and humidity at high speed in a residence time as short as 0.1 sec and thus realized industrialization of an air-treating device suitable for large volume treatment.

Chapter 1 describes outline of mass/heat transfer operation for honeycomb-type adsorbing elements such as total heat energy exchange, dehumidification and VOC (volatile organic compounds) removal to clarify the object of the present study.

Chapter 2 describes development of a total energy neat exchanger, i.e. an enthalpy exchanger which exchanges both sensible heat and latent heat between indoors and outdoors to efficiently recover heat loss in ventilation. Developed was a method to coat an aluminum sheet with fine particles of silica gel to make the honeycomb element adsorbable. Exchange efficiencies were examined in detail for sensible, latent and total(enthalpy) heat. The present method based on water vapor adsorption to porous material remedied essential defects of the conventional devices based on absorption to electrolyte and made application of total heat energy exchangers possible in highly humid air.

Chapter 3 describes a method to prevent the trouble of odor transfer in total heat energy exchangers. The odor transfer happened occasionally depending on the particular weather and was caused by desorption of odor materials having been adsorbed together with water vapor in ventilation process. This problem has not been able to be solved by porous adsorbent such as alumina or zeolite group. Various adsorbents were examined and attention was paid to the characteristic of the ion-exchange resin that has moderate hygroscopicity and yet hardly

adsorbs odor element. Mass transfer rate of various odor materials into ion exchange resin was examined experimentally and the problem of offensive odor generation was thoroughly solved by the development of a honeycomb-type total heat energy exchanger manufactured with the ion exchange resin as adsorbent.

Chapter 4 describes the manufacturing method and performance of an adsorption dehumidifier which operates in the temperature-swing adsorption principle. A unique method to synthesize silica gel in a honeycomb-shaped porous matrix was developed with no binder to improve the dehumidifying performance remarkably. As an extension, a special honeycomb adsorbing rotor with high dehumidifying performance even at a low-temperature regeneration was developed for application to a desiccant air-conditioning system described in the next chapter.

Chapter 5 describes the performance of a desiccant air-conditioning system developed by combining a honeycomb adsorbing-type dehumidifier and a sensible heat exchanger. Desiccant air-conditioning system is de-flon / non-electricity type cooling system operated by solar heat or low temperature waste heat as energy sources. Field tests of desiccant air-conditioning system was carried out using waste heat of a micro gas turbine power generator and the efficiency improvements of co-generation system was examined from both side of an adsorbing rotor and system configuration.

Chapter 6 describes a summary of the present study and shows prospects in future.