

マイクロ波・温風加熱を用いた  
水蒸気脱着の高度化に関する研究

伊藤 聖也



# 目次

## 序章

1. 本研究の背景-----	2
1.1 世界のエネルギー消費動向と環境問題-----	2
1.2 我が国の省エネルギー対策-----	4
2. マイクロ波・温風ハイブリッドデシカント空調機-----	8
2.1 デシカント空調機の原理と特徴-----	8
2.2 マイクロ波加熱の利用-----	11
2.3 デシカント空調機へのマイクロ波加熱導入により予測される効果と課題-----	14
3. 本研究の目的および概要-----	16
記号-----	18
参考文献-----	19

## 第1章 ゼオライト充填層におけるマイクロ波・温風加熱脱着の熱移動挙動

1. 緒言-----	24
2. 実験試料-----	25
3. 実験装置および方法-----	28
4. 結果および考察-----	31
4.1 充填層温度および脱着挙動-----	31
4.2 充填層内熱消費量の算出方法-----	36
4.3 マイクロ波照射効果-----	39
5. 結言-----	44
記号-----	45
参考文献-----	47

## 第2章 低湿度空気を用いたゼオライト充填層水蒸気脱着のマイクロ波・温風加熱効果

1. 緒言-----	50
2. 実験-----	51

3. 結果および考察	53
3.1 脱着挙動と熱収支	53
3.2 脱着率および熱効率	57
3.3 脱着速度	63
4. 結言	66
記号	67
参考文献	68

### 第3章 マイクロ波・温風加熱による水蒸気脱着の熱・物質移動に関する理論的解析

1. 緒言	70
2. マイクロ波・温風加熱脱着の熱・移動モデル	71
3. 結果および考察	77
3.1 充填層内の温度分布, 吸着量分布	83
3.2 マイクロ波・温風加熱脱着の有効性	86
4. 結言	91
記号	92
参考文献	94

### 終章

1. 本研究で得られた結果	98
2. 今後の展望	99
参考文献	101

謝辞	103
----	-----

論文目録	105
------	-----

## 序章

## 1. 本研究の背景

### 1.1 世界のエネルギー消費動向と環境問題

我々人類がエネルギーを利用・消費することは、快適な生活を営む上で必要不可欠であり、経済の発展と密接に関係している。Fig. 1 に世界地域別の一次エネルギー消費量の推移 [1]を示す。世界全体のエネルギー消費量は年々増大しており、特にアジア圏での消費量増大が顕著である。国別で見ると、中国が 2009 年にアメリカを抜いて世界第 1 位の一次エネルギー消費大国になり、インドも 2015 年に世界第 3 位のエネルギー消費国となった[1]。このように近年は、BRICS(Brazil, Russia, India, China and South Africa)を代表とする経済発展が著しい国々においてエネルギー消費量が増大している。一方で、これまで G7(Group of Seven)をはじめとした先進国と呼ばれる国々のエネルギー消費量の増加割合は近年鈍化傾向にある。しかし、新興国は今後も経済発展を遂げることが予測され、世界全体のエネルギー消費量が増加すると考えられる。

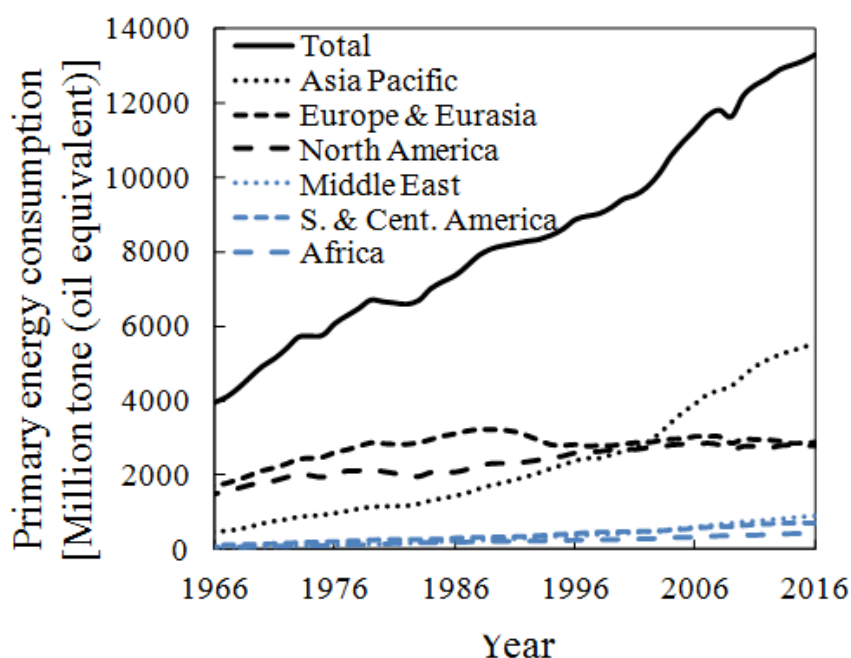


Fig. 1 Primary energy consumption of the world

エネルギー利用は、前述の通り経済発展に深く関係するが、その一方で安定的なエネルギー資源の確保やエネルギー利用に伴う環境汚染問題とも関係している。世界のエネルギー消費に占めるエネルギー種の割合は、石油 33.2%、石炭 28.1%、天然ガス 24.1%であり[1]、化石燃料の占める割合が非常に大きい。化石燃料の埋蔵量および可採年数については、採掘技術と探索技術の進歩や推算方法の違い等で変化があるが、2016年現在の可採年数は石油 50.6年、石炭 153年、天然ガス 52.5年とされており[1]、エネルギー源として強く依存する化石燃料が有限であることを人類は見過ごすことができない。また、化石燃料消費がもたらす環境汚染もたびたび問題となり、エネルギー利用時に排出される二酸化炭素、亜硫酸ガス、窒素酸化物、硫黄酸化物等が喘息をはじめとする呼吸器疾患、酸性雨、地球温暖化による各種問題を引き起こす人為的な要因となっている。中でも二酸化炭素を含む温室効果ガスによるものとされる気候変動が世界各地で顕在化している。気候変動に関する政府間パネル(Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC)によると 1901年から 2012年にかけて地球上のほぼ全域で地上の気温が上昇している[2]。さらに IPCC は温室効果ガス排出の抑制について追加的努力がない場合(ベースラインシナリオ)、2100年頃の世界平均気温が 1986-2005年平均に対して 1.4-4.8°C 上昇する可能性[3]を指摘し警鐘を鳴らした。

環境保全と経済活動はトレードオフの関係になることが多く、上記をはじめとした各種問題について対策を講じなければ、将来人類が自らの活動を制限せざるを得ないことは明らかである。そのため、我々人類は環境保全と経済発展の両立が可能な技術を開発することが重要な使命といえる。

## 1.2 我が国の省エネルギー対策

前項に世界のエネルギー消費の動向を述べた。日本の一次エネルギー国内供給構成の推移[4-5]を Fig. 2 に示す。我が国は世界第 5 位の一次エネルギー消費国[1]であり、エネルギー消費大国といえる。しかし、Fig. 2 に示すように、2011 年 3 月以降は東日本大震災による福島第一原子力発電所事故により 1980 年以降に割合を増やしてきた原子力発電がほぼゼロまで低下した。これにより、2000 年以降原子力を国産エネルギーとした場合、20%前後で推移していたエネルギー自給率は、6-8%程度となり過去最低水準まで低下した[6] (Fig. 3)。すなわち、エネルギー資源の大半を海外からの輸入に頼らざるを得ず、必然的にエネルギー輸出国の社会情勢等の影響を受けやすくなる。

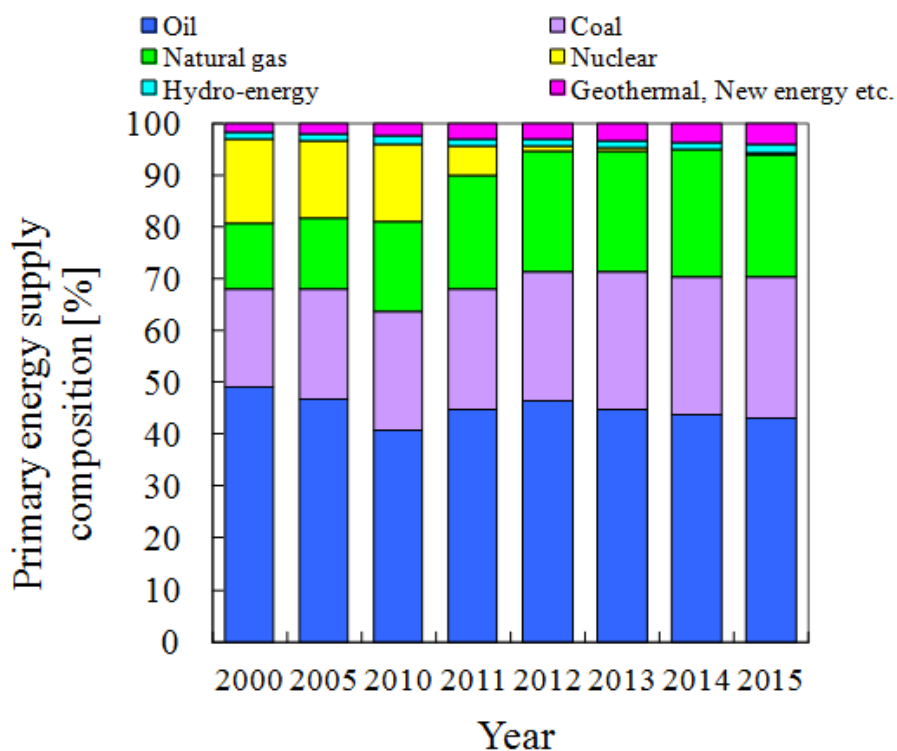


Fig. 2 Primary energy supply composition in Japan



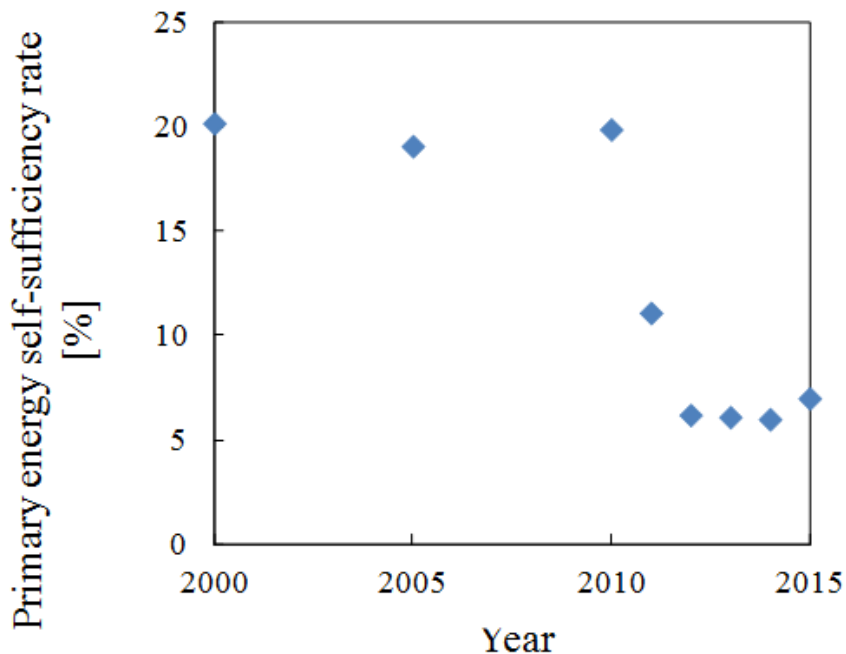


Fig. 3 Primary energy self-sufficiency rate in Japan

日本政府は、エネルギーセキュリティの観点から、太陽光、水力、風力、地熱、バイオマスなど再生可能エネルギーの導入により自給率の改善を目指している[7]が、これらのエネルギーはエネルギー密度が低い、自然条件により出力が大きく変動する等の課題が存在する。経済効率性を考慮する場合、再生可能エネルギーを化石燃料の代替として使用するためには大幅な技術的ブレークスルーが必要である。上記観点より、一次エネルギー資源の最適利用を行うことが当面の有効な方針といえる。

我が国は積極的に省エネルギー技術開発を行い、Fig. 4[8]に示すように GDP 当たりのエネルギー効率は世界的にみても高く、実質 GDP 当たりのエネルギー消費量は世界平均の 1/2 以下である。また、我が国の一次エネルギー供給に対する最終エネルギー消費割合は 68% 程度[9]である。損失エネルギーの中では、事業用発電および自家発電での発電損失が全体の 78%を占めており、発電プロセス投入量の 58%が排熱として放出されている[9]。

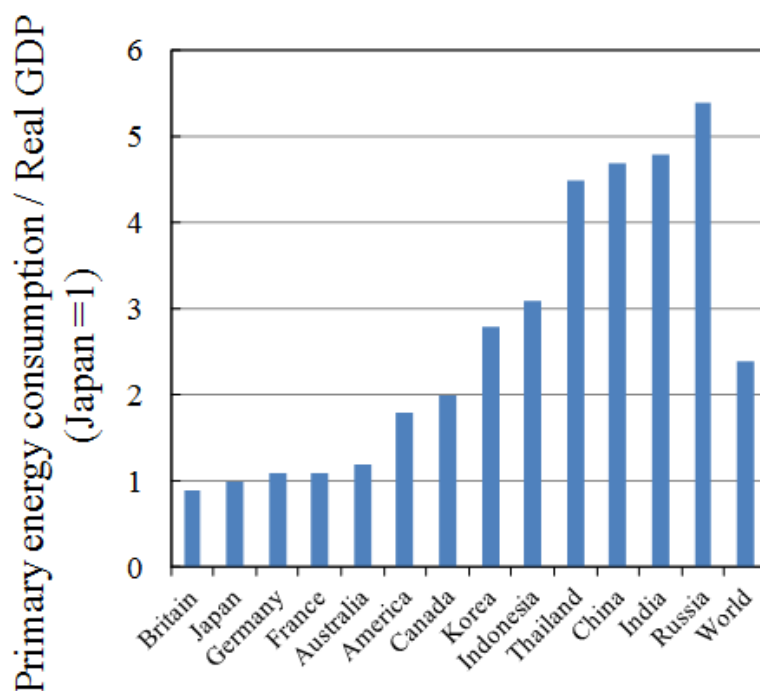


Fig. 4 Primary energy consumption as a percentage of GDP

我が国では熱エネルギーのカスケード利用を行い、一次エネルギーの利用率を高めてきた。省エネルギー対策として、1998年6月の省エネ法(エネルギーの使用の合理化に関する法律)改正以後、乗用自動車、冷蔵庫、エアコンディショナー、テレビ、照明器具など31機器(2013年現在)に対してトップランナー方式[10]を適用し、エネルギー消費効率の改善が図られた。しかし、機器単体での効率向上には限界があり、排熱および未利用熱の利用により効率向上を図る機器の開発が有効な方策である。さらに、排熱は一般的に温度レベルが低下するほど未利用のまま大気中に廃棄される量が多くなる[11]ため、更なるエネルギーの高効率利用のためには、廃棄されている100°C以下の低温排熱を有効利用することが重要である。

省エネ法では、年間1500kL(原油換算値)以上のエネルギーを使用している事業者に対して、エネルギー消費原単位の推移等の報告を義務付けている。その中で、直近5年間におけるエネルギー消費原単位を削減できていない事業者は全体の37%程度存在している[12]。この原因として、業務部門では空調負荷の増加を理由としたものが26%と最も多く、空調

の高性能化を検討することは省エネルギー促進に寄与する。また、空気温湿度制御は、住環境における快適性だけでなく、食品加工・貯蔵、リチウムイオン電池製造等における製品の品質維持等での乾燥空気の需要増大に伴い重要性が増加しており[13-16]、省エネルギーかつ高性能となる多種多様な温湿度調整技術の開発が急務である。

そこで本研究では 100°C 以下の低温熱が利用可能で温湿度調整ができるデシカント空調機に着目した。

## 2. マイクロ波・温風加熱ハイブリッドデシカント空調機

### 2.1 デシカント空調機の原理と特徴

前節までに、低温熱エネルギー利用可能な機器開発の重要性および空調の重要性を述べた。上記を満たす機器として吸着現象を利用したデシカント空調機が挙げられる。デシカント空調は熱駆動型のオープンサイクル空調で、吸着材により水分を除去(潜熱処理)し、冷却することにより水分を凝縮分離(顕熱処理)する従来の蒸気圧縮式ヒートポンプとは調湿方法が異なる。

2ローター式デシカント空調機の概略図を Fig. 5 に示す。デシカント空調機は主としてデシカントローター、顕熱交換ローター、加熱器、冷却器で構成されている。除湿・冷房運転時の空気の状態変化を Fig. 6 の空気線図上に示す。なお、Fig. 5 と Fig. 6 の空気状態変化の数字は対応している。外気①は再生済みのデシカントローターに送られ、水蒸気が吸着される。この際の吸着熱により高温・低湿度空気②になる。空気②は顕熱交換ローターによって吸着熱を除去され③、その後冷却器による温調がなされて空調空間へ給気される④。一方、還気流路では温湿度が上昇した空気⑤が顕熱交換ローターにより熱交換される⑥。その後、加熱器により加熱され再生空気となる⑦。再生空気⑦はデシカントローター内の吸着材を脱着再生し排気⑧される。なお、①→②、⑦→⑧は吸着熱が水の蒸発潜熱よりも大きいことやローターの熱容量により断熱除湿および断熱加湿とはならず、除湿(吸着)時はエンタルピーが増加、再生(脱着)時はエンタルピーが減少する。また、再生空気⑦の相対湿度はデシカントシステムの除湿限界となる。これは吸着材に平衡吸着量が存在することによる。

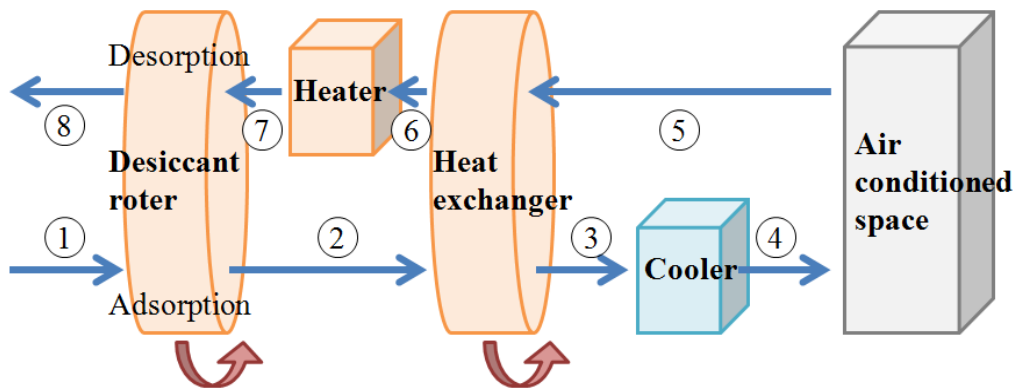


Fig. 5 Schematic diagram of desiccant cooling systems

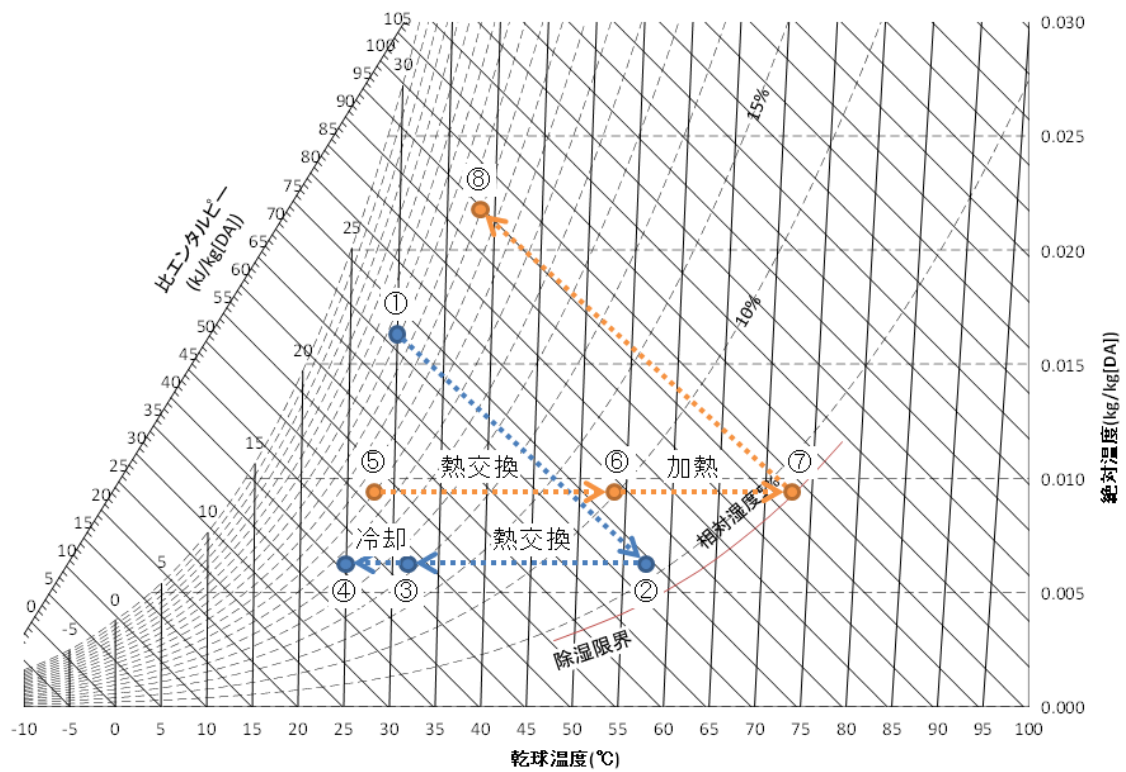


Fig. 6 The air state variation of desiccant cooling systems

上記した仕組みにより構成されるデシカント空調機は以下の特徴を有する[17]. I) 従来の圧縮式ヒートポンプのように過度に冷却して再加熱する必要が無く、顕熱除去の冷却だけでよい II) 100°C 程度の低温熱源での操作が可能である. III) 温度と湿度を独立して制御することができる. IV) 稼動時に副生成物が生成しない. V) 吸着材として使用されるゼオライト, シリカゲル, 活性炭ならびに吸着質となる水はいずれも無害物質である. 以上より, デシカント空調機は安全性の高い低温熱エネルギー利用可能な機器として極めて有望である.

これまでに国内外でデシカント空調機の高性能化開発研究が行われている. その研究として主に①使用吸着材の高性能化[18,19], ②吸脱着速度促進のための熱交換型吸着器改善[20], ③ローター直列多段化による高効率化[21], ④システムの合理化による高効率化[22]が行われている. しかし, 本システムは利用温度レベルの低さに起因する脱着速度の低下が課題であり, 必要性能確保のためには装置の大型化が避けられない. そのため, デシカント空調機の普及は一部にとどまっている.

上記課題解決のためには脱着過程での高速脱着, 単位体積当たりの脱着量増大および脱着熱エネルギー効率の向上を可能とする新たな水蒸気脱着の高度化技術開発が必要である. 従来, 吸着水の脱着には加熱空気(温風)を用いることが一般的である. 温風加熱は間接加熱(流通空気を通じて吸着水を加熱する方法)であり, 被加熱物質以外への熱損失が大きい. これに対して次節では高度脱着手段として, 直接加熱であるマイクロ波加熱を用いること考える.

## 2.2 マイクロ波加熱の利用

マイクロ波は厳密な定義はないが、一般的に波長が cm 単位で、周波数が 1GHz(1000MHz) から 30GHz の電磁波を指す[23]. マイクロ波を用いた実験的検討は 1920-30 年代にかけてベル研究所(G. Southworth ら)が行ったものが初めてといわれており[24], 主にレーダー用途での研究が行われていた. マイクロ波による加熱は 1945 年のアメリカのレイセオン社の技術者により発見され, 1947 年にマイクロ波オーブンが発売されている[25]. 以降工業用マイクロ波加熱装置や家庭用電子レンジが開発され広く普及するようになった.

マイクロ波は, 金属に当たると完全に反射されるが, 非金属である誘電体にマイクロ波が照射された場合, 誘電体の特性に応じて大部分が内部へ浸透する. Fig. 7 にマイクロ波電界下の分子の動きを示す. (a)のように電界が与えられていない場合, 誘電体を構成している分子(永久双極子)は電気的に中性である. そこにマイクロ波により電界が与えられると, 電界の向きにより Fig. 7 (b), (c)のように永久双極子は周期に応じて変位・分極する. 永久双極子がマイクロ波の周期に追従できなくなると, 分子間で回転や振動に伴う摩擦熱が発生し, 誘電体が発熱する. また, 誘電体内の発熱量はマイクロ波の周波数( $f$  [Hz]), 損失係数( $\epsilon_r \tan \delta$  [-])に比例する[26]. この中で損失係数は, Table 1 に示すように誘電体によって大きく異なり[27], 水が加熱されやすいことがわかる. さらに水の損失係数の周波数特性を Fig. 8 に示す. 自由水の場合, マイクロ波周波数域において損失係数の最大値が存在する[28]. 束縛水の損失係数はマイクロ波周波数域よりもやや低い領域で最大値が存在するが, マイクロ波周波数域でも有効な値を持っている.

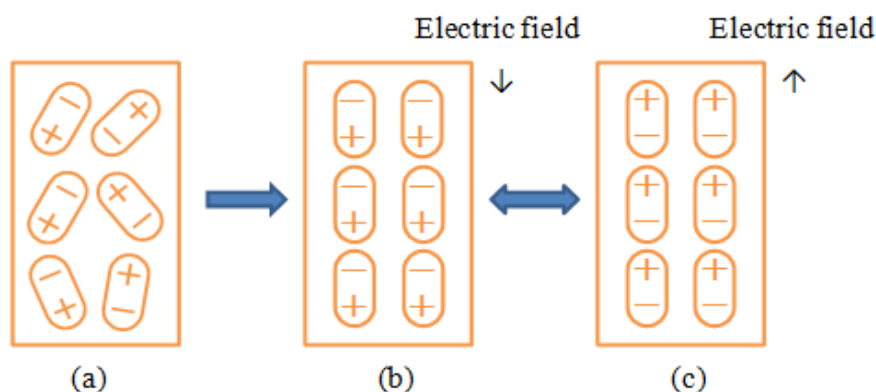


Fig. 7 Molecular motion under the microwave electric field

Table 1 Dielectric loss factor (2.45GHz)

Material	$\epsilon_r \tan \delta \times 10^{-4} [-]$
Ice (-13°C)	28
Water (25°C)	123,000
Water (55°C)	46,200
Water (85°C)	31,000
Polyethylene	5.2
Teflon	4
Paper	1,600
Glass	500
Ceramics	850
Zeolite	2,500

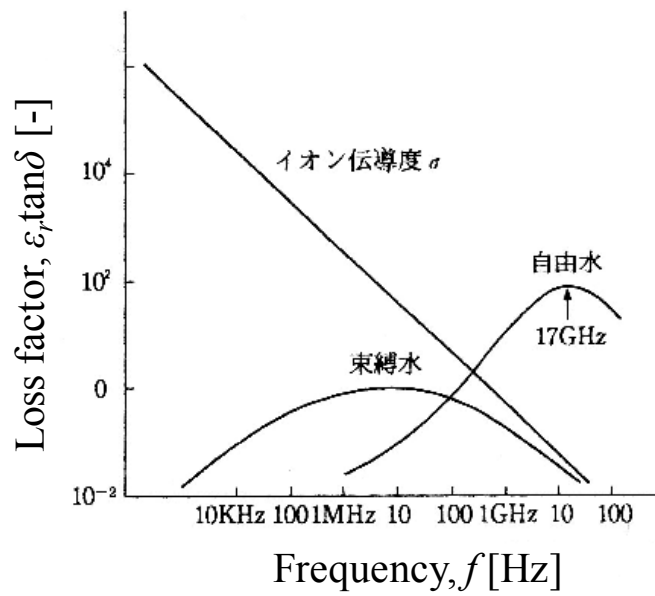


Fig. 8 Frequency dependence of water loss factor [28]



マイクロ波が誘電体照射されると、吸収されて発熱するが、それとともにマイクロ波は減衰していく。マイクロ波電力密度が半減するまでの深さ  $D$  (半減深度)は次式で表される[26].

$$D = \frac{3.32 \times 10^7}{f \sqrt{\epsilon_r} \tan \delta} \quad (1)$$

上式より、半減深度は周波数、比誘電率および誘電損失角に反比例している。そのため、損失係数が大きく、厚い物質を内部まで加熱する場合には周波数を低く設定することが有利である。現在、我が国で通信以外に用いられているマイクロ波加熱の周波数(ISM 周波数帯)は 2.45GHz, 5.8GHz, 24.125GHz である[29]。ISM 周波数帯以外の周波数は電界強度の許容値が厳しく規制されているため、使用(漏洩)には注意が必要となる。したがって本研究では電力半減深度を考慮して、マイクロ波周波数を 2.45GHz とした。

一般的なヒーター加熱等の間接加熱方法と比較した場合におけるマイクロ波加熱の特長を以下に挙げる[30].

1. 熱伝導によらないため、内部まで短時間で加熱可能(直接加熱)
2. 加熱効率がよい  
(間接加熱方法では被加熱物以外も熱せられるため、エネルギーロスが大きくなる)
3. 目的物を選択的に加熱可能(水に対して効果大)
4. 電界強度が一定であれば均一に加熱可能
5. 加熱電力(加熱温度)の制御が容易
6. 騒音、熱気、排ガスを生じないため、作業環境が清潔

以上に述べた特性より、デシカント空調機の脱着過程にマイクロ波加熱を導入することは、高速脱着、脱着量増大および脱着効率向上に対して有望な手段であると考えられる。

### 2.3 デシカント空調機へのマイクロ波加熱導入により予測される効果と課題

本研究では、デシカント空調機の高出力化のためにマイクロ波・温風ハイブリッドデシカント空調機を提案した。

マイクロ波加熱をデシカント空調機に導入するにあたり、前述したマイクロ波加熱の特長の中で、特に①被加熱物質に対する直接加熱効果および②水に対する選択加熱特性に着目した。この効果により、周囲の空気および装置の加熱が抑制され、かつ吸着水を含む吸着材を選択加熱することができる。さらに、Fig. 9 に示すように吸着水に対しても選択加熱効果が現れる場合、更なる脱着促進が可能になる。そのため、マイクロ波加熱と温風加熱を組み合わせることにより、脱着の高度化(高速脱着, 脱着量増大, 脱着効率向上)加えて低温排熱利用時における空調機体積の小型化が期待できる。

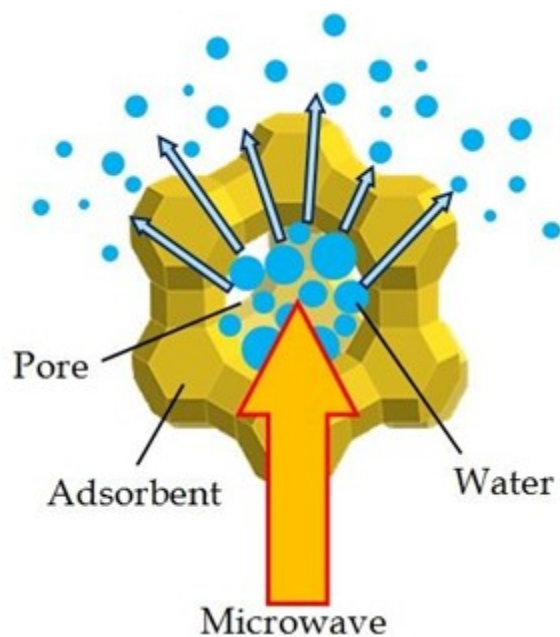


Fig. 9 Imaginative diagram of desorption by microwave selective heating

一方、マイクロ波をデシカント空調機に適用するにあたり、次の課題が挙げられる。

- A) マイクロ波加熱の有効性の評価
- B) マイクロ波照射による吸着材の均一加熱方法の確立

課題 A)では、マイクロ波照射強度、マイクロ波照射時間、水蒸気吸着量などの諸因子が

脱着速度および脱着効率に与える影響を定量的に把握する必要がある。課題 B) では、マイクロ波照射場における定在波の発生、被加熱物加熱容器固有の電界強度分布の形成、マイクロ波の被加熱物内部への吸収による減衰等の不均一加熱となりうる原因を考慮する必要がある。

デシカント空調機へのマイクロ波加熱の適用に関して、これまでにいくつかの検討が行われている。マイクロ波加熱単独による検討として、ゼオライトおよびシリカゲルを対象とした繰返しマイクロ波加熱後の吸・脱着性能評価[31-33]や、デシカントローター、充填層等のデシカントユニットに対するマイクロ波加熱の検討が行われ、マイクロ波加熱は脱着開始直後が効果的であること[34]、初期脱着速度はマイクロ波照射強度に比例すること[35]、脱水速度と吸収エネルギーが比例すること[36]、マイクロ波照射タイミングが除湿量の増大のためには重要となること[37]などが実験的に報告されている。また、解析による検討も行われており、宮崎らは固定床型デシカントユニットについてシミュレーションを行い、新たな解析モデルを提案してモデルの妥当性を確認した[34,38]。本研究で提案したマイクロ波・温風加熱のハイブリッド方式についての検討も一部行われている。温風・マイクロ波併用加熱を行うことで、デシカントユニット内部温度の不均一性が緩和されることに伴い初期再生速度が向上すること[39]、マイクロ波加熱を併用することで温風熱源温度が低減化されること[40,41]が示された。しかし、脱着効率について着目した研究例は無く、温風熱源温度、マイクロ波出力の効果的な組合せおよびマイクロ波・温風加熱が効果的な空気湿度、マイクロ波加熱時間等の条件については明らかとなっていない。

本提案のハイブリッドデシカント空調機の実用化のためにはマイクロ波・温風加熱時の熱・物質移動挙動を解明することが重要であると考えられる。そこで、本研究では、脱着量、脱着速度に加えて充填層消費熱エネルギー基準の脱着効率(熱効率)についてマイクロ波効果を定量的に把握する実験および理論的検討を行った。

### 3. 本研究の目的および概要

本研究ではマイクロ波照射型ハイブリッドデシカント空調機について、供給空気の露点温度、除湿空気量等の様々な要求に対して必要能力を満たしつつ低装置体積とする設計(合理的設計)の基準を確立することを最終目的とした。100°C以下の低温熱エネルギーを有効利用可能なデシカント空調機を高性能化することで、エネルギーの有効利用が推進され、化石燃料の使用量低減ならびに環境保全に寄与できると考える。

最終目的達成に向けた具体的な検討項目として i) 脱着過程に及ぼすマイクロ波加熱効果の把握, ii) マイクロ波加熱効果の定量化方法の確立, iii) マイクロ波照射の最適化, iv) 吸着器の合理的設計・実稼働による性能評価が挙げられる。そこで本研究では、2.3で述べた課題 A)について着目し、項目 i), ii)および iii)の一部について検討を行った。

以下に各章の目的と概要について述べる。

第1章では、脱着過程に及ぼすマイクロ波照射効果の把握およびマイクロ波照射効果の定量化方法の確立を目的とする実験的検討を行った。具体的には、流通式ゼオライト充填層において、吸・脱着過程同一空気湿度条件下の温風加熱およびマイクロ波・温風加熱による水蒸気脱着実験を温風温度およびマイクロ波照射強度を変化させて行い、ゼオライト充填層の熱収支計算結果に基づく熱移動挙動の定量的把握ならびに脱着促進効果について実験的に検討した。

第2章では、第1章の検討をさらに一歩進め、吸着過程より低湿度の空気を用いた条件下でのマイクロ波照射効果を実験的に検討した。具体的には、流通式ゼオライト充填層における吸着過程で供給する空気湿度以下の空気供給による脱着実験を初期吸着量、温風温度、マイクロ波強度を変化させて行い、脱着率と熱効率、脱着速度を指標とするマイクロ波照射効果を検討した。この検討では吸着過程と同一の湿度条件下との相異を明らかにするため、前章の吸着過程と同一湿度条件下の脱着実験結果と本実験条件下の結果の比較を行った。

第3章では、マイクロ波照射の最適化への第一歩として、マイクロ波・温風加熱脱着の熱・物質移動のモデル化と動的解析を行い理論的に検討した。具体的には、第1章で検討したゼオライト充填層型吸着器に着目し、脱着過程における熱・物質移動のシミュレーシ

ョンモデルを構築した。また、モデルの妥当性に基づいてマイクロ波強度、温風温度、空気湿度が脱着性能に及ぼす影響を検討した。

終章では、一連の研究を行った結果得られた成果をまとめた。また、本研究の最終目的であるマイクロ波・温風ハイブリッドデシカント空調機の合理的設計基準を確立し、本デシカント空調機を広く普及させるために検討すべき課題を挙げ、今後の展望を述べた。

## 記号

$D$	半減深度	m
$f$	周波数	Hz
$\tan\delta$	誘電体損失角	-
$\epsilon_r$	比誘電率	-

## 参考文献

- [1] BP Global, Statical Review of World Energy 2017
- [2] IPCC 第5次評価報告書第1作業部会報告書 概要, p 7, 気象庁
- [3] IPCC 第5次評価報告書統合報告書(本文), pp. 30-33, 環境省
- [4] エネルギー白書 2016, pp144-145, 資源エネルギー庁
- [5] Energy Policies of IEA Countries - Japan Review 2016 - Japanese version, IEA, pp. 17-20 (2016)
- [6] エネルギー白書 2017, p. 140, 資源エネルギー庁
- [7] 長期エネルギー需給見通し, 平成 27 年 7 月, pp. 4-5, 経済産業省
- [8] エネルギー白書 2017, pp. 137-138, 資源エネルギー庁
- [9] エネルギー白書 2017, p. 136, 資源エネルギー庁
- [10] トップランナー制度, 2015 年 3 月版, 資源エネルギー庁
- [11] Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U. S. Industry, BCS, pp. 54-55, (2008)
- [12] 省エネルギー政策の動向, 資源エネルギー庁
- [13] 稲葉英男, 革新的高機能収着剤による高度ヒートサイクルの展開, 日本機会学会誌, 987, 104, p. 86 (2001)
- [14] 吉田一輝, 高田啓介, 鈴木元, 梅野良枝, 奥田誠一, 上田憲治, 低温再生型デシカント除湿機と温水ヒートポンプを用いた新たなデシカント空調システムの提案 : (第 1 報) 低温再生システムにおける再生熱源の要件, 空気調和・衛生工学会大会学術講演会論文集, pp. 2149-2152 (2011)
- [15] Lewis G.Harriman III, The Dehumidification Handbook, 2nd Edition, Munters Corporation (2002)
- [16] 空気調和・衛生設備の知識 (改訂 3 版), オーム社, pp. 32-33 (2010)
- [17] 低温排熱利用機器調査研究会 : デシカント空調システム—究極の調湿システムを目指して—, 日本工業出版, p7 (2006)
- [18] 新規高性能吸着材の開発 プロジェクト評価(事後)報告書, 産業構造審議会産業技術

分科会評価小委員会 (2009)

- [19] 鈴木正哉, 前田雅喜, 犬飼恵一, 高性能吸着剤ハスクレイ® の開発—粘土系ナノ粒子による省エネシステム用吸着剤の開発展開—, *Synthesiology*, 9, 3, pp. 154-164 (2016)
- [20] 窪田光宏, 柴田翔子, 松田仁樹, 直交流熱交換器型吸着器を用いたデシカント調湿システムの水蒸気吸着特性, *日本冷凍空調学会論文集*, 30, 3, pp.213-220 (2013)
- [21] A. Kodama, M. Kumita, H. Asano and T. Asada, Double-Stage Dehumidification in a Two-Rotor Desiccant Cooling Process Equipped with a Multi-Divided Adsorbent Rotor, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, pp. 930-936 (2009)
- [22] 大坂侑吾, 児玉昭雄, 2011 年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, A212 (2011)
- [23] 岡田文明, マイクロ波工学—基礎と応用—, 学献社, pp. 4-5 (1993)
- [24] 渡邊三知夫, 極超短波の二三の研究に就いて, *日本数学物理学会誌*, 17, pp.315-328 (1943)
- [25] 佐々木英男, マイクロ波加熱技術の歴史, *エレクトロヒート*, 204, p. 26 (2015)
- [26] 柴田長吉郎, 工業用マイクロ波応用技術, 電気書院, p. 8 (1986)
- [27] 越島哲夫, マイクロ波加熱技術集成, NTS Inc., p. 9 (2004)
- [28] 越島哲夫, マイクロ波加熱技術集成, NTS Inc., pp. 9-10 (2004)
- [29] 柴田長吉郎, 工業用マイクロ波応用技術, 電気書院, p. 6 (1986)
- [30] 柴田長吉郎, 工業用マイクロ波応用技術, 電気書院, pp. 15-16 (1986)
- [31] T. Ohgushi and M. Nagae, Quick activation of optimized zeolites with microwave heating and utilization of zeolites for reusable desiccant, *Journal of Porous Materials*, 10, 2, pp. 139-143 (2003)
- [32] T. Ohgushi and M. Nagae, Durability of zeolite against repeated activation treatments with microwave heating, *Journal of Porous Materials*, 12, 4, pp. 265-271 (2005)
- [33] 平成 19 年度～平成 21 年度成果報告書 ノンフロン型省エネ冷凍空調システム開発, 新エネルギー・産業技術総合開発機構, pp. 45-52 (2010)
- [34] 宮崎隆彦, 秋澤淳, 上田祐樹, 進藤伸二, 神戸正純, 高塚威, 固定床型デシカント換気空調機の開発 第 2 報: 蓄熱ユニットを備えたデシカント換気空調システムの吸着材再生方式に関する検討, *日本冷凍空調学会論文集*, 26, 2, pp.533-542 (2009)



- [35] M. Kubota, T. Hanada, S. Yabe, D. Kuchar and H. Matsuda, Water desorption behavior of desiccant rotor under microwave irradiation, *Applied Thermal Engineering*, 31, pp.1482-1486 (2011)
- [36] I. Polaert, A. Ledoux, L. Estel, R. Huyghe and M. Thomas, Microwave assisted regeneration of zeolite, *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 5, A117 (2007)
- [37] 神戸正純, 高塚威, 石沢敏彦, 三浦邦夫, 2008 年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, A123 (2008)
- [38] 平成 19 年度～平成 21 年度成果報告書 ノンフロン型省エネ冷凍空調システム開発, 新エネルギー・産業技術総合開発機構, pp. 30-40 (2010)
- [39] 花田卓弥, 窪田光宏, 松田仁樹, マイクロ波・温風併用加熱を用いたシリカゲル系デシカントユニットの再生特性, *日本冷凍空調学会論文集*, 28, 3, pp.193-200 (2011)
- [40] 齋竹基仁, 窪田光宏, 渡辺藤雄, 松田仁樹, マイクロ波照射によるゼオライトからの吸着水の脱着促進, *化学工学論文集*, 33, 1, pp. 53-57 (2007)
- [41] 渡辺藤雄, 炭谷一樹, 柏木強志, 高木智也, 黄宏宇, 架谷昌信, 小林敬幸, 各種ゼオライトからの水蒸気脱着に及ぼすマイクロ波照射の影響, *化学工学論文集*, 35, 5, pp. 431-435 (2009)



第1章 ゼオライト充填層における  
マイクロ波・温風加熱脱着の熱移動挙動

## 1. 緒言

デシカント空調システムは100°C以下の低温熱源で稼動する低温排熱利用機器に位置づけられる。本システムでは吸着材が有する水蒸気の吸・脱着能力を利用して調湿操作が行われる。この調湿性能は吸着材の吸着特性および与えられた相対湿度、温度条件下での吸・脱着速度および吸・脱着に伴う発・吸熱の除熱・加熱速度に支配される。序章でも述べたように、一般的な脱着過程では排熱供給もしくはヒーターによる間接加熱方式が採用されるため加熱速度が遅く、被加熱物質以外への熱損失が大きいことを原因とする脱着速度の低下が避けられず、装置の大型化ならびにエネルギー消費量の増大が余儀なくされる。この問題を解決するために、これまでにデシカント空調における吸脱着過程の最適化の方法[1-3]が検討されてきたが、根本的な解決には至っていない。

この課題に対して、著者らは脱着過程へマイクロ波加熱を導入した新たなマイクロ波・温風ハイブリッドデシカント空調機システムを提案している。マイクロ波加熱は主に周波数2450MHzの電磁波による加熱方式のため被加熱物質に対する直接かつ迅速加熱が可能、他の被加熱物質に比べて水の誘電損失係数が大きく、水を選択的に加熱できる特徴を有する。これに加えて、マイクロ波加熱では、多孔質材料の内部温度は表面温度よりも高いこと[4]、マイクロ波は均一加熱に効果的であり[5]、製品の品質を維持すること[6]ができることも指摘されている。したがって、水蒸気の脱着過程でマイクロ波加熱を導入することは、脱着率、脱着速度の向上につながると考えられ、補助熱源としてマイクロ波加熱を利用するデシカント空調機では供給エネルギーの低減、ならびに装置のコンパクト化が期待される。なお、マイクロ波と同様の電磁波を用いる加熱方式には、1MHz-300MHzの誘電加熱、50Hz-500kHzの誘導加熱があるが、これらの電磁波による水の誘電損失係数を比較すると、マイクロ波に比べてそれぞれ1/100および1/1000程度[7]と小さく、水を選択加熱性が乏しい。

デシカント空調機システムを対象とする吸着材のマイクロ波加熱脱着に関するいくつかの検討が行われている。ゼオライトについて、Na-X/Ca-X混合ゼオライト系が十分な吸着性能を維持すること[8,9]、マイクロ波照射効果は脱着初期において大きく、高速脱着のためには脱着開始直後のマイクロ波照射が効果的であること[10]などが示された。シリカゲルでは、シラノール基数が多いほどマイクロ波吸収量が大きく、平衡脱着量は初期吸着量の増大に

比例すること[11]，初期脱着速度はマイクロ波照射強度に比例すること[12]などが報告されている。さらに吸着過程と同一湿度条件下でのマイクロ波・温風加熱によるゼオライト充填層の水蒸気脱着において，齋竹ら[13]は温風・マイクロ波加熱脱着では温風加熱脱着に比べて脱着量基準で1.6-2.0倍の過剰脱着効果があり，この効果は脱着初期において顕著であることおよび脱着速度は吸着率の増大に伴って増大すること，渡辺ら[14]は脱着速度は細孔径の大きいゼオライトにおいて大きくなることを指摘しており，これらの一連の検討によりマイクロ波照射によって脱着の高速化が確認された。しかし，マイクロ波の効果的な照射方法はいまだ明らかになっていない。

本研究では脱着過程に及ぼすマイクロ波照射効果の把握およびマイクロ波照射効果の定量化方法の確立を目的とし，脱着量，脱着速度に及ぼすマイクロ波加熱の影響を実験的に検討した。具体的には，ゼオライト充填層において，温風温度およびマイクロ波照射強度を変化させた水蒸気脱着実験を行い，マイクロ波加熱条件下のゼオライト充填層の熱収支計算結果に基づく熱移動挙動の定量的把握ならびに脱着促進効果について検討した。

## 2. 実験試料

吸着材試料として，クリーンルーム等に用いられる低露点空気需要が増大していることに鑑み，低湿度で吸着量が多いゼオライトに着目した。本研究では，特に吸着量が多いゼオライト 13X(平均粒子径 230 $\mu\text{m}$ ，平均細孔直径 0.8mm)(ユニオン昭和(株)製)を用いた。

Fig. 1-1 に高精度蒸気吸着量測定装置(BELSORP-aqua3, MicrotracBEL 製)を用いて異なる3温度(吸着温度 15 $^{\circ}\text{C}$ ，30 $^{\circ}\text{C}$  および 45 $^{\circ}\text{C}$ )で測定したゼオライトの水蒸気吸脱着等温線を示す。本ゼオライトでは温度条件によらず，吸着等温線は相対湿度 10%以下の低相対圧域で急峻な立ち上がりを示し，その後は緩やかな増大を示す。また吸脱着のヒステリシスは小さい。吸着量( $q_a$ )は測定された相対圧( $p/p_0$ )範囲で温度上昇に伴って小さくなり， $p/p_0 = 0.90$  基準の  $q_a$  は 15，30，45 $^{\circ}\text{C}$  でそれぞれ 0.349，0.347 および 0.335kg/kg となる。

上記の結果を用いて，次式(1-1)に示す Clausius-Clapeyron の式[15]を適用して 15，30 $^{\circ}\text{C}$  および 30，45 $^{\circ}\text{C}$  について  $q_a$  基準の吸着熱( $\Delta H_{\text{ads}}$ )および脱着熱( $\Delta H_{\text{des}}$ )を計算し，Table 1-1 には 2 温度の平均温度( $(15+30)/2 = 22.5^{\circ}\text{C}$ ， $(30+45)/2 = 37.5^{\circ}\text{C}$ )の値として示した。

$$\Delta H = \frac{\frac{R}{M_m} \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)}{\left(\frac{1}{T_1 + 273.15} - \frac{1}{T_2 + 273.15}\right)} \quad (1-1)$$

Table 1-1 より, 吸着温度および  $q_a$  によらず  $\Delta H_{\text{des}}$  は  $\Delta H_{\text{ads}}$  より大きく,  $\Delta H_{\text{ads}}$  の最大 1.1 倍となる. 吸着温度上昇に伴って  $q_a$  基準の  $\Delta H_{\text{des}}$  および  $\Delta H_{\text{ads}}$  はともに増大し, 37.5°C における  $\Delta H_{\text{des}}$ ,  $\Delta H_{\text{ads}}$  は 22.5°C のそれに比べて共に最大 1.4 倍となることが認められる. なお, 10 回のマイクロ波照射加熱による吸・脱着を行った試料においても吸脱着等温線の形状および  $\Delta H_{\text{ads}}$ ,  $\Delta H_{\text{des}}$  値に大きな変化は観察されなかった.

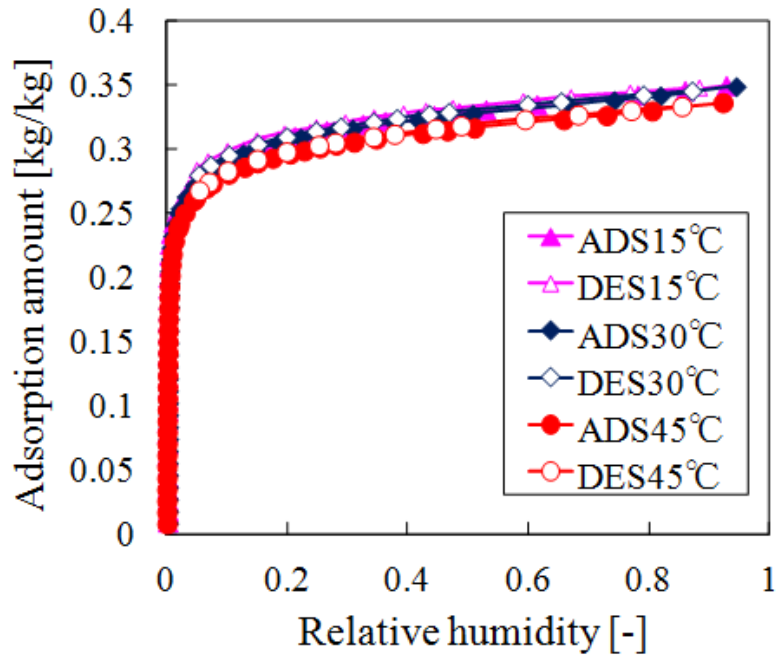


Fig. 1-1 Adsorption/desorption isotherms for zeolite 13X

Table 1-1 Adsorption/desorption heats

$q_a$ [kg/kg]	Average temperature			
	22.5°C		37.5°C	
	$\Delta H_{ads}$ [kJ/kg]	$\Delta H_{des}$ [kJ/kg]	$\Delta H_{ads}$ [kJ/kg]	$\Delta H_{des}$ [kJ/kg]
0.29	2740	3040	3770	3960
0.30	2710	2950	3840	3990
0.31	2720	2850	3860	4020
0.32	2710	2840	3800	3820
0.33	2720	2820	3460	3710

### 3. 実験装置および方法

Fig. 1-2 に脱着実験に用いた装置の概略図を示す。本装置はマイクロ波発生装置，流通式吸着管，水冷式ダミーロード，蒸発器，窒素ガスボンベおよびそれらを繋ぐ配管で構成される。マイクロ波発生装置(IDX 東京電子(株)製)は電源部，マイクロ波発振器(IMG-2501S 型)，アイソレータ(IEF-1201I 型)，接続導波管(IH-2 型)，パワーモニタ(IMM-2501 型)，3 スタブチューナ(ITS-2501 型)，円-矩形導波管で構成されている。マイクロ波はマグネトロン発振器により 2450MHz で発振され，矩形導波管(TE01 モード)，円-矩形導波管(円形：TE11 モード)を経て，円筒形導波管(TE11 モード)を通り，水冷式ダミーロードに吸収される。矩形導波管にはアイソレータ，パワーモニタ，3 スタブチューナが接続されている。なお，以下にアイソレータ，パワーモニタ，3 スタブチューナおよび水冷式ダミーロードの機能を示す。

アイソレータ： 負荷側から導波管内を進行する反射波を磁力により吸収することで反射波によるマグネトロンの破損を防ぐ。

パワーモニタ： 導波管内を通る入射波と反射波の電流値を測定する。

3 スタブチューナ： 整合を行うことにより，導波管内に進入する反射波を打ち消し，導波管内における定在波の発生を防ぐ。

水冷式ダミーロード： 導波管を通過したマイクロ波を吸収することで，反射波の発生によるマグネトロンの破損を防ぐ。

Fig. 1-3 に，ガラス製流通式吸着管(内径 20mm)の概略図を示す。吸着管は，あらかじめ直径 110mm の円筒形導波管内の電界強度分布を測定し，電界強度が最大となる円筒形導波管の入口より 130mm の位置に導波管に対して垂直に設置した。また，吸着管内には吸着材が充填されており(充填高さ 20mm，充填重量 5g(30°C，40%RH 基準)，充填高さ方向の中心部が導波管断面の中心に位置するように設置した。吸着管の出入口には温湿度計(PosiTector DPM, DeFelsko Corp.製)が設置されており，吸着材の吸着量および脱着量は温湿度計の測定値を用いて算出した。ゼオライト充填層の温度は蛍光式光ファイバー温度計(FL-2000, 安立計器(株)製)によって測定を行った。Fig. 1-3 の×印は光ファイバー温度計の挿入位置(入口ガス(T1)，充填層上部中心部(T3)および壁部(T4)，充填層下部中心部(T5)および壁部(T6)，出口ガス(T2))を示す。また，導入する温風温度の調整は，充填層上部に挿入されているマイク



ロヒーターによる供給電力調整により行った。さらに、吸着管外側の温度を一定に保つために断熱材で装置外部を囲い、内部温度を家庭用電気ヒーターにより調節した。

水蒸気脱着実験は以下の手順で行った。

1. 吸着過程として、所定温度に調整を行った蒸発器に窒素ガスを導入・バブリングさせることで湿度調整を行う。
2. このガスを吸着管に流通させることによりゼオライト充填層を吸着平衡に到達させる。
3. 次に脱着過程では、吸着過程で用いた所定湿度のガスをマイクロヒーター加熱により所定温度の温風として供給する。
4. 同時にマイクロ波を供給し、脱着を行わせる。

実験では、脱着開始後の充填層内温度および吸着管出入口の温湿度を測定した。マイクロ波照射加熱効果の比較のために、マイクロ波供給を行わない温風加熱による脱着実験も併せて行った。以下に実験条件を示す。

- 温風温度： 55-100°C
- マイクロ波強度： 30-100W
- 吸着ガス湿度，脱着ガス湿度： 40%RH (30°C) (一定)
- ガス流速： 0.106m/s (一定)
- 初期充填層温度，雰囲気温度： 30°C

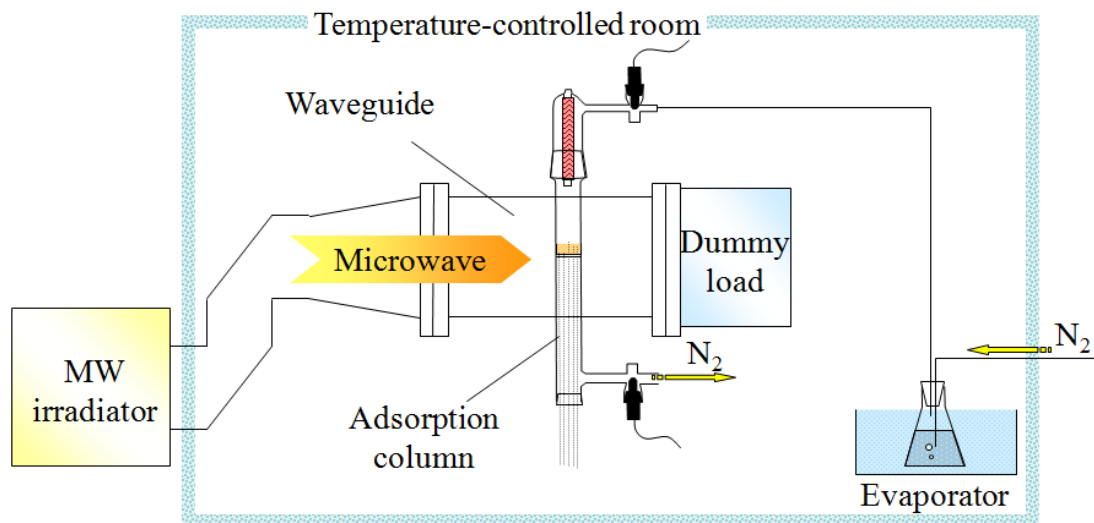


Fig. 1-2 Schematic diagram of experimental apparatus

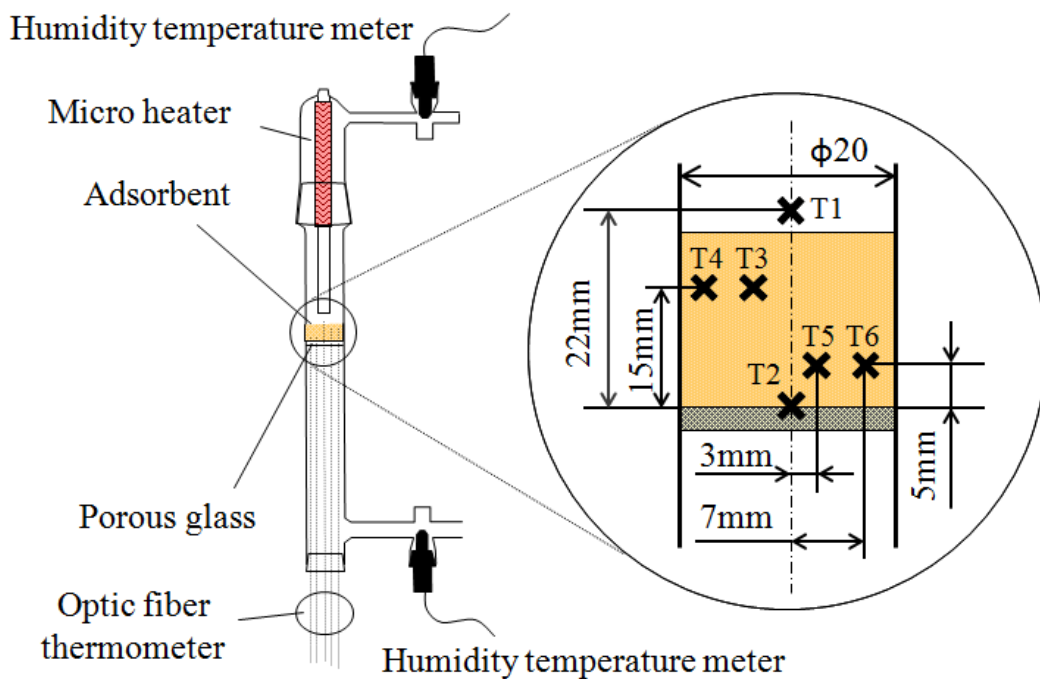


Fig. 1-3 Schematic diagram of adsorption column

## 4.結果および考察

### 4.1 充填層温度および脱着挙動

実験結果の一例として、Fig. 1-4 および Fig. 1-5 にそれぞれ温風加熱脱着実験(充填層入口温風到達温度 55°C)、マイクロ波・温風加熱脱着実験(マイクロ波照射強度 50W+充填層入口温風到達温度 55°C)の充填層内温度および吸着率の経時変化を示す。

Fig. 1-4 の温風加熱脱着実験結果より以下のことがわかる。i) ゼオライト充填層の入口温度は実験開始直後から上昇し、30min 後には初期温度の 55°C に到達する。ii) 充填層内温度は入口温度よりも遅れて上昇する。iii) 実験開始から 30min 後の各測定点における初期温度との差は、充填層高さ方向基準では  $T1 > T3 > T5 > T2$  となり、充填層入口から出口にかけて差が小さくなる。iv) T3 と T4 および T5 と T6 の結果より半径方向には温度分布が存在し、充填層側面からの放熱が確認できる。v) 吸着率は、実験開始 2min 程度までの緩やかな減少を示し、その後充填層内温度の上昇に対応してやや急激な減少を経て再び緩やかに減少する。

Fig. 1-5 のマイクロ波・温風加熱脱着実験より以下のことがわかる。vi) ゼオライト充填層の入口温度は温風温度と同様の挙動を示す。vii) 充填層内温度は全域で加熱開始直後から上昇する。viii) 実験開始から 30min 後の各測定点における初期温度との差は、充填層高さ方向基準では  $T2 > T5 > T3 > T1$  となり、充填層内温度は入口温度以上に到達する。ix) 半径方向には温風加熱と同様に温度分布が存在する。x) 吸着率は、実験開始直後から急激な減少を示した後充填層内温度上昇の鈍化に伴って緩やかに減少する。上記 iv) と ix) の温度上昇挙動の相違は、温風による間接加熱とマイクロ波による直接加熱による。

実験条件ごとに各温度測定点における実験 30min と初期温度との差と実験 30min の吸着率を Table 1-2 に示す。

Table 1-2 より以下のことがわかる。温風加熱では、T1 を大きくすると、T2-T6 の温度差は拡大し、吸着率は減少する。また、この時に温度差はすべて  $T1 > T3 > T4 > T5 > T2 > T6$  となる。マイクロ波・温風加熱では、マイクロ波強度によらず同一入口温風到達温度の温風実験に比べて T2-T6 の温度差が拡大し、吸着率は低下した。マイクロ波・温風加熱について、同一入口温風到達温度基準ではマイクロ波強度の増大に伴い T2-T6 の温度差の拡大

および吸着率の減少が確認された。しかし、充填層内の温度の傾向に差異がみられた。具体的には、55°C+50W および 55°C+100W では T2-T6 の温度が T1 の温度を上回るのに対し、75°C+30W および 100°C+30W では T2-T6 の温度は T1 の温度を下回る。また、その他の条件では一部 T1 の温度を下回る測定点が存在する。これは、T2-T6 の温度が T1 の温度以上になった条件と比較して、その他の条件では温風温度に対してマイクロ波照射強度が相対的に小さくなったことによる。

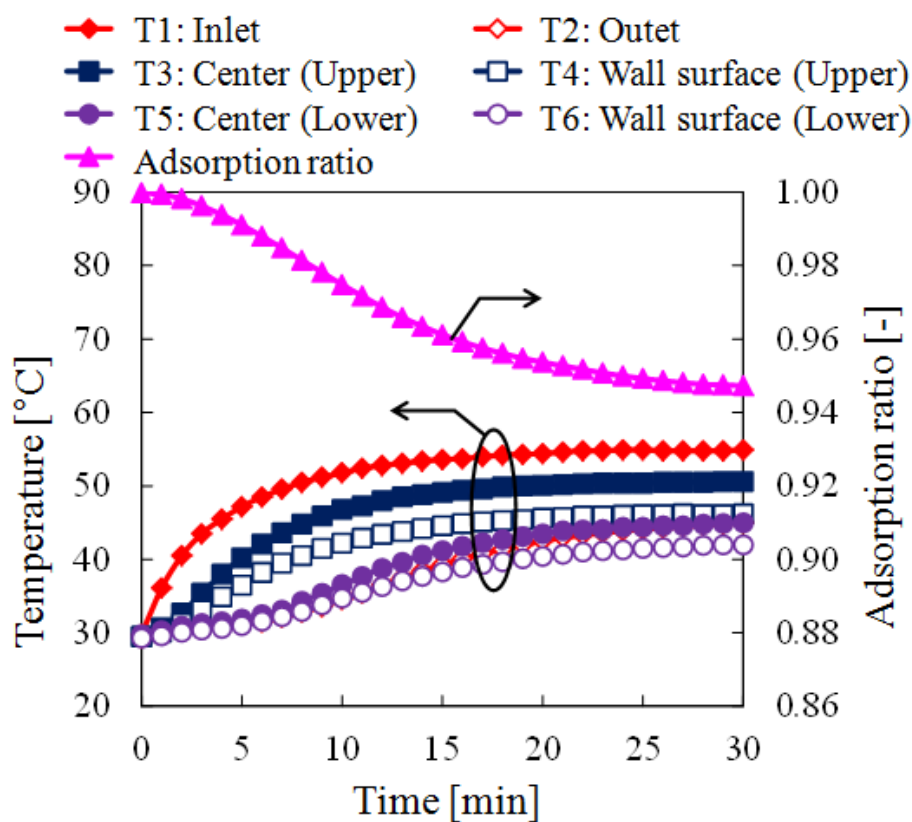


Fig. 1-4 Changes in temperature and adsorption ratio with time (inlet hot air of 55 °C)

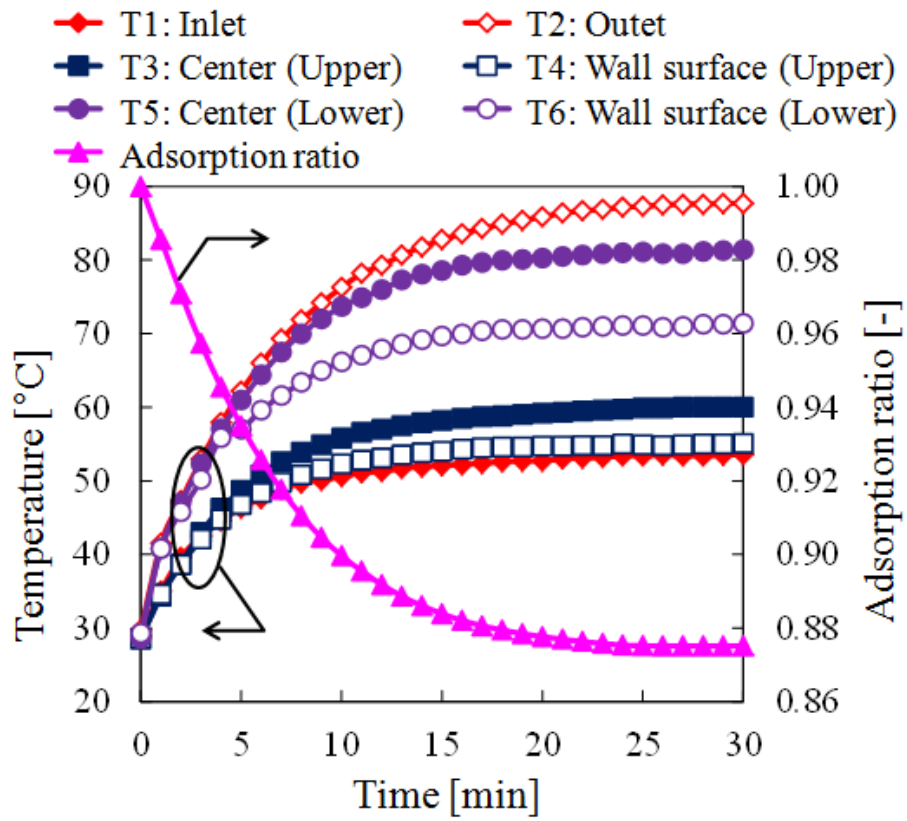


Fig. 1-5 Changes in temperature and adsorption ratio with time (inlet hot air of 55 °C and microwave output of 50 W)

Table 1-2 Adsorption ratio and temperature difference 30 min after the start of the experiment compared with the initial values

		Temperature difference at experiment time of 30 minutes compared with those at the beginning [°C]						Adsorption ratio [-]
		Inlet	Center (upper)	Wall surface (upper)	Center (lower)	Wall surface (lower)	Outlet	
		T1	T3	T4	T5	T6	T2	
Hot air	55°C	25.1	21.1	16.8	15.2	12.4	15.6	0.946
	75°C	45.0	39.8	31.4	29.4	24.1	27.2	0.899
	100°C	68.2	59.3	46.7	43.7	36.3	41.7	0.850
Hot air and microwave	55°C + 30W	23.5	24.7	21.5	32.2	24.6	32.2	0.922
	55°C + 50W	24.7	31.4	26.6	53.6	42.1	58.0	0.875
	55°C + 100W	27.0	42.8	38.2	88.2	68.9	96.4	0.794
	75°C + 30W	46.2	39.6	29.3	41.6	31	41.2	0.894
	75°C + 50W	42.7	45.6	37.1	63.7	48.9	67.0	0.844
	100°C + 30W	70.1	56.7	39.4	53.6	40.8	52.4	0.843
	100°C + 50W	70.6	65.3	51.8	81.7	63.0	83.8	0.788

## 4.2 充填層内熱消費量の算出方法

本実験系の熱移動は Fig. 1-6 のように表現できる。つまり，温風( $Q_{\text{gas}}$ )およびマイクロ波( $Q_{\text{MW}}$ )の熱( $Q_{\text{gas}}+Q_{\text{MW}}=Q_{\text{in}}$ )が充填層に供給され，この熱は吸着材の顕熱( $Q_{\text{s}}$ )，脱着熱( $Q_{\text{des}}$ )，吸着管外部への半径方向の放熱( $Q_{\text{side}}$ )として消費され，溢流熱( $Q_{\text{out}}$ )が排出される。したがって，この熱移動モデルに基づく本実験系の熱収支式は次のように表される。

$$Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}} = Q_{\text{s}} + Q_{\text{des}} + Q_{\text{side}} \quad (1-1)$$

ここで， $Q_{\text{in}}$  はマイクロ波照射の有無により，以下のように定義される。

$$Q_{\text{in}} = Q_{\text{gas}} \quad (\text{温風加熱実験時}) \quad (1-2)$$

$$Q_{\text{in}} = Q_{\text{gas}} + Q_{\text{MW}} \quad (\text{マイクロ波加熱脱着実験時}) \quad (1-3)$$

各熱量は式(1-4)から(1-8)を用いて計算を行った。

$$Q_{\text{gas}} = Q_{\text{out}} = \dot{m}h \quad (1-4)$$

$$Q_{\text{MW}} = \left( \frac{P_{\text{w}} M_{\text{aw}}}{\rho_{\text{w}}} + \frac{P_{\text{z}} M_{\text{z}}}{\rho_{\text{z}}} \right) \quad (1-5)$$

$$Q_{\text{s}} = (M_{\text{aw}} C_{\text{p,aw}} + M_{\text{z}} C_{\text{p,z}}) \frac{dT_{\text{B}}}{d\theta} \quad (1-6)$$

$$Q_{\text{des}} = M_{\text{z}} \Delta H_{\text{des}} \frac{dq_{\text{des}}}{d\theta} \quad (1-7)$$

$$Q_{\text{side}} = \lambda A_{\text{lm}} \left( \frac{T_{\text{center}} - T_{\text{wall}}}{r_{\text{wall}} - r_{\text{center}}} \right) \quad (1-8)$$

さらに， $Q_{\text{MW}}$  の計算に必要なマイクロ波の熱損失は以下の式[16]で算出した。

$$P = \frac{5}{9} f E^2 \varepsilon_r \tan \delta \cdot 10^{-10} \quad (1-9)$$

損失係数( $\varepsilon_r \tan \delta$ )は文献値を使用した。実験装置固有値である電界強度( $E$ )は，水を加熱する



実験を行い、その結果を基に算出した。具体的には、まず、流通式吸着管と同内径の円筒形容器に水を充填し、ゼオライト充填層と同箇所に設置する。実験では、水の損失係数の温度依存性を考慮して実験終了水温を 75°C とし、この水温に到達するまでマイクロ波加熱 (30-100W) を行い、10 秒毎の水温、外気温および実験前後における水の重量について測定を行った。この測定された結果に基づいて、充填水の顕熱量、蒸発潜熱量および放熱量を算出し、その合計を水の受熱量( $P$ )とした。この受熱量を用い(1-9)式より電界強度を算出した。各マイクロ波照射出力において実験的に算出した電界強度を Fig. 1-7 に示す。Fig. 1-7 より、電界強度はマイクロ波出力増加とともに増加する。

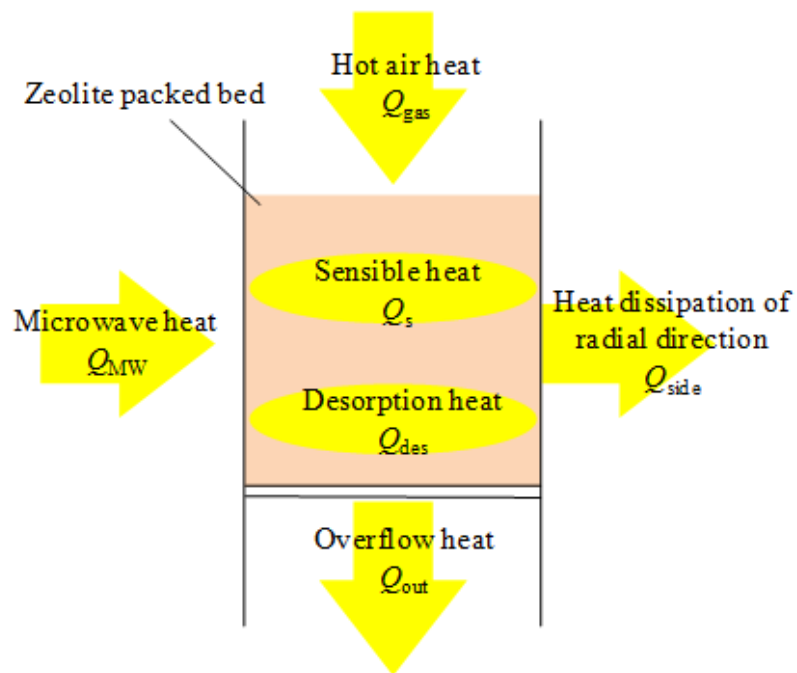


Fig. 1-6 Heat consumption of the zeolite packed bed

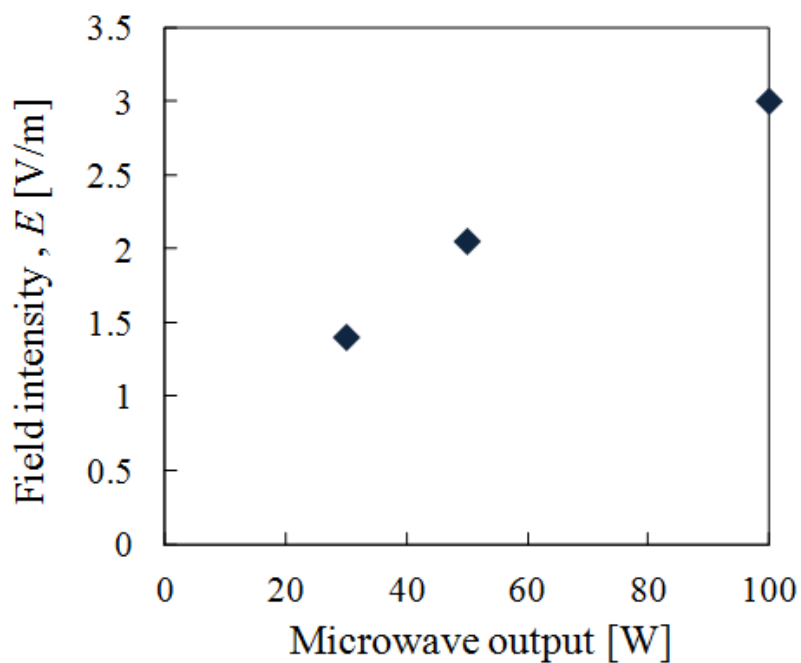


Fig. 1-7 Calculated field intensity versus microwave output

### 4.3 マイクロ波照射効果

Fig. 1-4, Fig. 1-5 に相当する温風加熱脱着実験, マイクロ波・温風加熱脱着実験における各消費熱量と熱収支の算出結果を Fig. 1-8 および Fig. 1-9 に示す.

Fig. 1-8 より以下のことがわかる.  $Q_s$  は実験開始 1-2min で最大値を示しその後緩やかに減少する.  $Q_{des}$  は実験開始約 9min で最大値を示しその後減少する.  $Q_{side}$  は実験開始後から増加し, 実験後半で支配的になる. 熱収支は前半でやや低い値になるが 30min 間の平均熱収支を約 95%となる.

Fig. 1-9 より以下のことがわかる.  $Q_s$  は, 実験開始 1min で最大値を示しその後減少する.  $Q_{des}$  は, 2-3min で最大値を示しその後減少する.  $Q_{side}$  は, 実験開始後から増加し, 実験後半で支配的になる. 熱収支は実験開始約 2min で 80%程度まで低下しその後緩やかに増大するが, 30min 間の平均熱収支は約 86%となる.

つぎに Fig. 1-8 と Fig. 1-9 を比較すると, マイクロ波・温風加熱脱着における  $Q_s$  と  $Q_{des}$  は最大値に到達する時間,  $\theta_{Q_s, \max}$  および  $\theta_{Q_{des}, \max}$  の差  $(\theta_{Q_{des}, \max} - \theta_{Q_s, \max})_{MW}$  は温風加熱脱着におけるそれ  $(\theta_{Q_{des}, \max} - \theta_{Q_s, \max})_{gas}$  より小さい. 具体的には,  $(\theta_{Q_{des}, \max} - \theta_{Q_s, \max})_{MW}$ ,  $(\theta_{Q_{des}, \max} - \theta_{Q_s, \max})_{gas}$  は約 1.5min および 7.5min となる. この結果は, 温風加熱脱着に比べてマイクロ波・温風加熱脱着では加熱初期での脱着熱消費以外の熱消費が小さいことを示している. つまり, 直接加熱方式のマイクロ波の導入が充填層全体の加熱に寄与したと考えられ, マイクロ波・温風加熱脱着では温風加熱脱着より熱損失の低減化につながることを示唆される.

上記の Fig. 1-8, Fig. 1-9 の結果は温風温度, マイクロ波出力を変えた他の実験でも同様の傾向を示した. また, 本実験系の熱収支計算値は妥当であると判断した. そこでつぎに, マイクロ波加熱効果を検証するために上記で得られた各消費熱量を基に次式で示す熱効率  $\eta$  (充填層の全熱消費に対する脱着消費熱の割合)を定義し,  $\eta$  値を指標とするマイクロ波導入の有効性について考察を行った.

$$\eta = \frac{Q_{des}}{Q_{in} - Q_{out}} \quad (1-10)$$

Fig. 1-8, Fig. 1-9 の系を例として算出される  $\eta$  値を Fig. 1-10 に示す.  $\eta$  値は温風加熱脱着,

マイクロ波・温風加熱脱着とも実験開始後最大値( $\eta_{\max}$ )を経て減少する。 $\eta$  値のこの傾向は本実験の他の条件下でも同様に観察された。一方で、 $\eta_{\max}$  値、 $\theta_{\eta_{\max}}$  値に到達する時間( $\theta_{\eta_{\max}}$ )は条件により異なることが観察されたのでこれらの値を一括して Table 1-3 に示した。ここで  $\eta_{\max}$  値は脱着過程の熱損失抑制効果を示し、この値が大きいほど供給熱エネルギーが脱着熱として消費されたことを表す。また、 $\theta_{\eta_{\max}}$  値は脱着の高速化の指標となり、この値が小さいほど高速脱着が行われたことを表す。

マイクロ波・温風加熱脱着の  $\eta_{\max}$  値は、温風 75°C+マイクロ波 30W、温風 100°C+マイクロ波 30W の系を除いて温風加熱脱着の 1.1-1.5 倍になること、マイクロ波・温風加熱脱着の  $\theta_{\eta_{\max}}$  は温風加熱脱着のそれより小さく、例えば温風 55°C+マイクロ波 50W では同温度の温風加熱脱着の 1/5 程度となることがわかる。このことは温風加熱脱着に比べてマイクロ波加熱脱着では脱着過程での熱損失を抑制し、かつ高速脱着を可能にすることを示している。なお、温風+マイクロ波 30W の系の  $\eta_{\max}$  値が温風系のそれより下回るのは、低マイクロ波照射出力条件下ではマイクロ波加熱による温度上昇効果が温風加熱による温度上昇効果より小さいことによると考えられる。また、温風温度、マイクロ波出力と  $\eta_{\max}$  値の關係に統一的な相関性を見出すことは現段階ではやや困難であり、この点に関してより広範な条件下で検討を行った結果を後述の第 3 章で示す。

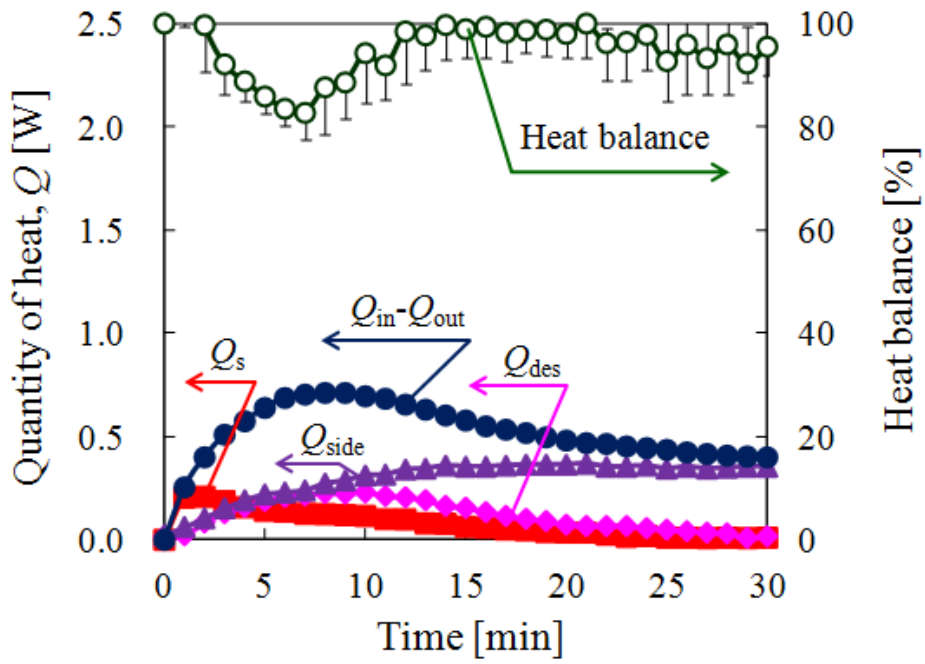


Fig. 1-8 Changes in heat consumption and heat balance (inlet hot air temperature of 55 °C)

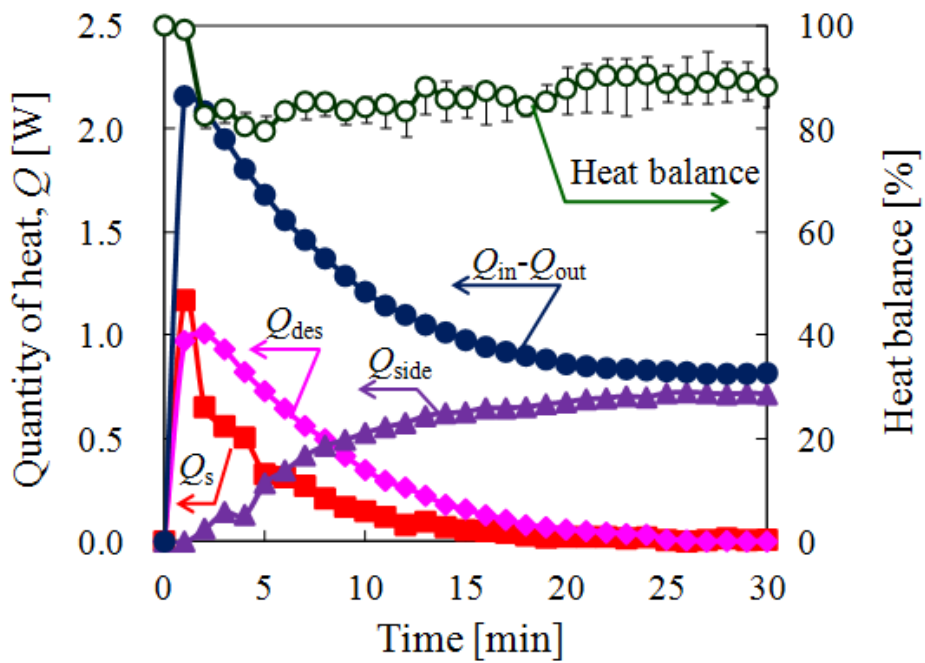


Fig. 1-9 Changes in heat consumption and heat balance (inlet hot air temperature of 55 °C and microwave output of 50 W)

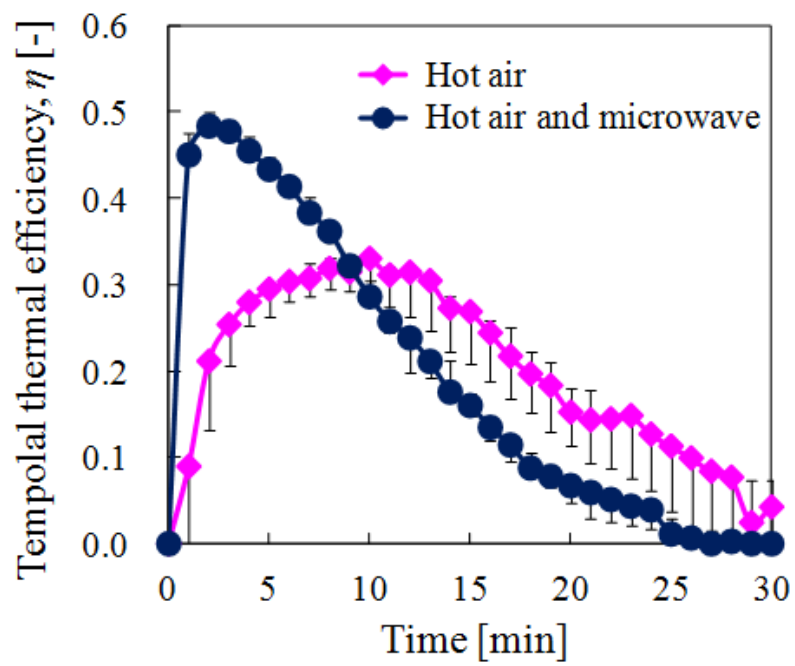


Fig. 1-10 Change in temporal thermal efficiency with time

Table 1-3 Calculation results of  $\eta_{\max}$  and  $\theta_{\eta\max}$

		$\eta_{\max}$ [-]	$\theta_{\eta\max}$ [min]
Hot air	55°C	0.333	10
	75°C	0.384	7
	100°C	0.343	8
Hot air and microwave	55°C + 30W	0.432	3
	55°C + 50W	0.484	2
	55°C + 100W	0.410	3
	75°C + 30W	0.346	2
	75°C + 50W	0.414	3
	100°C + 30W	0.341	3
	100°C + 50W	0.380	3

## 5. 結言

マイクロ波・温風ハイブリッドデシカント空調機の合理的設計基準の確立を最終目的として、ゼオライト充填層におけるマイクロ波・温風加熱水蒸気脱着の熱移動挙動を検討した結果、以下のことが明らかになった。

1. ゼオライト充填層の温度上昇と脱着速度は温風加熱に比べてマイクロ波・温風加熱において速い。そのため、マイクロ波はゼオライト充填層に対しても直接加熱効果を有することが明らかになった。
2. ゼオライト充填層の各熱消費量を計算し、熱効率を指標としてマイクロ波加熱効果を評価した。その結果、マイクロ波加熱脱着効果は脱着初期に効果的であることが示された。



## 記号

$A_{lm}$	対数平均伝熱面積	$m^2$
$C_p$	比熱	$J/(kg \cdot K)$
$E$	電界強度	$V/m$
$f$	周波数	$Hz$
$h$	比エンタルピー	$J/kg$
$M$	質量	$kg$
$M_m$	モル質量	$kg/mol$
$\dot{m}$	質量流量	$kg/s$
$p$	蒸気圧	$Pa$
$P$	マイクロ波投入量	$W/m^3$
$q_{ads}$	吸着量	$kg/kg$
$q_{des}$	脱着量	$kg/kg$
$Q_{des}$	単位時間当たりの脱着熱量	$W$
$Q_{gas}$	単位時間当たりの温風熱量	$W$
$Q_{in}$	単位時間当たりの投入熱量	$W$
$Q_{MW}$	単位時間当たりのマイクロ波加熱量	$W$
$Q_{out}$	単位時間当たりの排出熱量	$W$
$Q_s$	単位時間当たりの顕熱量	$W$
$Q_{side}$	単位時間当たりの側面放熱量	$W$
$r$	半径	$mm$
$R$	気体定数	$J/(K \cdot mol)$
$T$	温度	$^{\circ}C$
$\tan\delta$	誘電体損失角	-
$\Delta H_{ads}$	吸着熱	$kJ/kg$
$\Delta H_{des}$	脱着熱	$kJ/kg$
$\epsilon_r$	比誘電率	-

$\eta$	熱効率	-
$\theta$	時間	s
$\lambda$	有効熱伝導率	W/(m·K)
$\rho$	密度	kg/m <sup>3</sup>

添え字

aw	吸着水
B	充填層
center	ゼオライト充填層中心
max	最大値
wall	ゼオライト充填層壁面
z	ゼオライト

## 参考文献

- [1] Y. Hamamoto, S. Murase, J. Okajima, F. Matsuoka, A. Akisawa and T. Kashiwagi, Analysis of Heat and Mass Transfer in a Desiccant Rotor, Transactions of the Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 21, 1, pp. 63-75 (2004)
- [2] Y. M. Harshe, R. P. Utikar, V. V. Ranade and D. Pahwa, Modeling of rotary desiccant wheels, Chemical Engineering Technology, 28, 12, pp. 1473-1479 (2005)
- [3] A. Kodama, N. Watanabe, T. Hirose, M. Goto and H. Okano, Performance of a multipass honeycomb adsorber regenerated by a direct hot water heating, Adsorption, 11, pp. 603-608 (2005)
- [4] M. Araszkiwicz, A. Koziol, A. Oskwarek and M. Lupinski, Microwave Drying of porous Materials, Drying Technology, 22, 10, pp. 2331-2341 (2004)
- [5] S. J. Kowalski and A. Rybicki, Qualitative Aspects of Convective and Microwave Drying of Saturated Porous Materials, Drying Technology, 22, 5, pp. 1173-1189 (2004)
- [6] A. Lupinska, A. Koziol, M. Araszkiwicz and M. Lupinski, The Changes of Quality in Rapeseeds during Microwave Drying, 27, 7-8, pp. 857-862 (2009)
- [7] 越島哲夫, マイクロ波加熱技術集成, NTS Inc., pp. 9-10 (2004)
- [8] T. Ohgushi and M. Nagae, Quick activation of optimized zeolites with microwave heating and utilization of zeolites for reusable desiccant, Journal of Porous Materials, 10, 2, pp. 139-143 (2003)
- [9] T. Ohgushi and M. Nagae, Durability of zeolite against repeated activation treatments with microwave heating, Journal of Porous Materials, 12, 4, pp. 265-271 (2005)
- [10] 宮崎隆彦, 秋澤淳, 上田祐樹, 進藤伸二, 神戸正純, 高塚威, 固定床型デシカント換気空調機の開発 第2報: 蓄熱ユニットを備えたデシカント換気空調システムの吸着材再生方式に関する検討, 日本冷凍空調学会論文集, 26, 2, pp.533-542 (2009)
- [11] M. Kubota, N. Shimada, T. Hanada and H. Matsuda, Proceedings of 2010 JSRAE Annual Conference, Ishikawa, pp. 161-164 (2010) (in Japanese)
- [12] M. Kubota, T. Hanada, S. Yabe, D. Kuchar and H. Matsuda, Water desorption behavior of

- desiccant rotor under microwave irradiation, *Applied Thermal Engineering*, 31, pp.1482-1486 (2011)
- [13] 齋竹基仁, 窪田光宏, 渡辺藤雄, 松田仁樹, マイクロ波照射によるゼオライトからの吸着水の脱着促進, *化学工学論文集*, 33, 1, pp. 53-57 (2007)
- [14] 渡辺藤雄, 炭谷一樹, 柏木強志, 高木智也, 黄宏宇, 架谷昌信, 小林敬幸, 各種ゼオライトからの水蒸気脱着に及ぼすマイクロ波照射の影響, *化学工学論文集*, 35, 5, pp. 431-435 (2009)
- [15] A. Alvarez-Reyes, J. Acosta-Esquijara, L. Sordo-Martinez and F. Concepcion-Martinez, Experimental Determination and Modeling of Sorption Isotherms of *Erythrina Fusca* Lour Bark, *Drying Technology*, 22, 7, pp. 1755-1765 (2004)
- [16] 柴田長吉郎, *工業用マイクロ波応用技術*, 電気書院, p. 8 (1986)

## 第 2 章 低湿度空気を用いたゼオライト充填層 水蒸気脱着のマイクロ波・温風加熱効果

## 1. 緒言

デシカント空調機システムの高性能化のために、マイクロ波加熱に着目し、マイクロ波・温風ハイブリッドデシカント空調機システムを提案している。これまでに、マイクロ波加熱の有効性を実験的に検証し、前章では、吸着/脱着同一湿度条件下での水蒸気脱着実験を行い、ゼオライト充填層の熱収支計算結果からマイクロ波・温風加熱効果を検討した。その結果、マイクロ波・温風加熱脱着における脱着熱効率 $\eta$ は温風加熱脱着の最大 1.45 倍となることを示した。

一方、実用的なデシカント空調機システムにおける脱着操作では必ずしも吸着過程と同一の湿度条件下で行われるとは限らない。例えば、外気利用のシステムでは吸着過程で製造された低湿度空気を必要空間に送風し調湿を行い、調湿後の空気を供給する脱着方式が主に採用される。この方式で供給される脱着用空気湿度は外気湿度以下かつ吸着過程で製造された低湿度空気以上となることから、吸着材粒子内湿度と吸着材充填粒子間空隙湿度の差を推進力とする脱着が起こるため、前章を含むこれまでの一連の研究[1-3]で行われた吸着過程と同一湿度空気を供給する脱着より、脱着率、脱着速度が向上すると考えられる。しかし、マイクロ波・温風併用実験系での湿度差を推進力とする脱着効果とマイクロ波加熱による脱着効果を分離評価することは現時点ではやや困難である。評価方法のひとつとして、同一湿度空気および低湿度空気条件下の熱効率を指標とするマイクロ波導入効果の有効性評価が考えられるが、これに関する検討は充分になされていない。

本研究では上記に鑑み、マイクロ波・温風加熱によるゼオライト水蒸気脱着の検討をさらに一歩進め、吸着過程より低湿度の空気を用いた条件下のマイクロ波照射効果を実験的に検討した。具体的には、流通式ゼオライト充填層における吸着過程で供給する空気の湿度以下の空気供給による脱着実験を初期吸着量、温風温度、マイクロ波強度を変化させて行い、脱着率と熱効率、脱着速度を指標とするマイクロ波照射効果を検討した。この検討では吸着過程と同一の湿度条件下との相異を明らかにするため、前章の吸着過程と同一湿度条件下の脱着実験結果と本実験条件下の結果の比較を行った。

## 2. 実験

脱着実験装置は前章と同様のマイクロ波照射型流通式吸着装置を一部改良して使用した。具体的には、Fig. 2-1に示すように流通式吸着管(吸着材充填量：5.0g(30°C, RH = 40%基準))の入口，出口にそれぞれ3方バルブおよび2方バルブを新たに設け，吸着過程と脱着過程の流通空気湿度調整を可能とした。

吸着材試料は前章と同様のゼオライト13Xを使用した。

実験は以下の手順で行った。

1. あらかじめ所定温度(30°C)のもとで所定湿度の空気を流通させ吸着平衡に到達させる。
2. 入口，出口バルブを閉じ所定の脱着開始温度に調整する。
3. この間に，入口バルブを大気開放として所定湿度の空気調整を行う。
4. この空気を吸着管に流通させ脱着を行う。

なお，吸着材層の温度，吸着管入り口の湿度はそれぞれFig. 2の吸着材充填部の×印(吸着材充填部上部(T1)，下部(T2)および層内(T3-T6))に挿入した光ファイバー温度計(FL-2000, 安立計器(株)製)および吸着管の入口，出口に付設した湿度計(PosiTector DPM, DeFelsko Corp. 製，測定精度 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ ， $\pm 3\%\text{RH}$ )により測定した。

実験は以下の条件で行った。

- 初期吸着量： $q_{\text{initial}} = 0.310, 0.318, 0.330 \text{ kg/kg}$  (それぞれ，30°C，RH = 25, 40, 55%の平衡吸着量に相当)
- 脱着時の入口温風到達温度： $T_g = 55, 75, 100^{\circ}\text{C}$
- マイクロ波出力： $M_w = 30\text{W}, 50\text{W}, 100\text{W}$
- 脱着空気湿度：30°C，RH = 16%(この湿度に相当する30°Cの平衡吸着量は0.302kg/kgとなる)

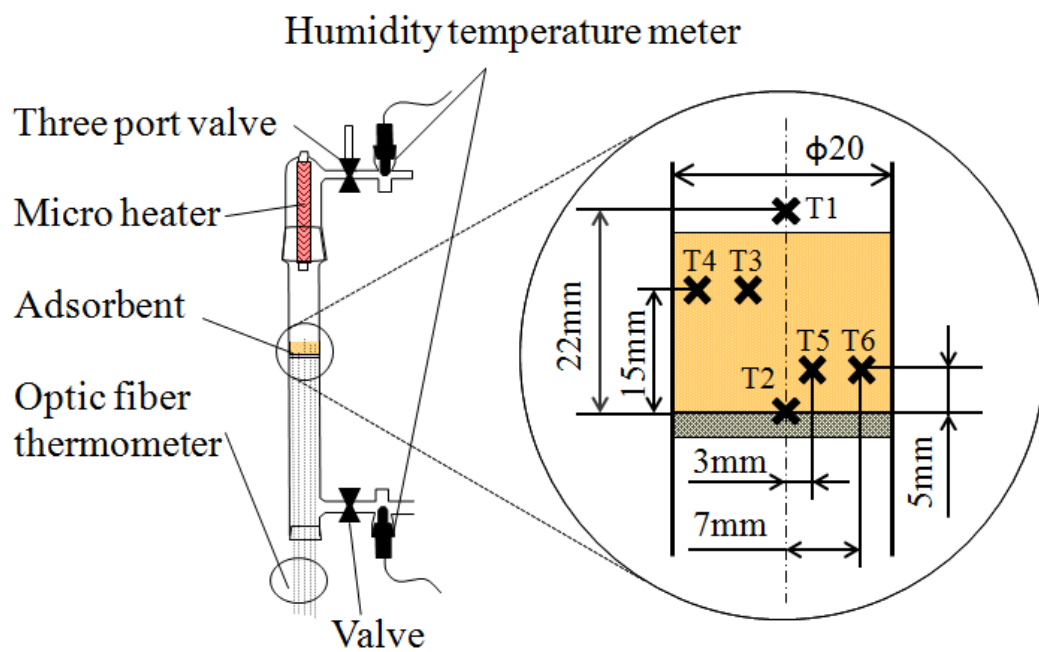


Fig. 2-1 Schematic diagram of adsorption column



### 3.結果および考察

本章では低湿度条件下のマイクロ波照射効果について脱着率，熱効率，脱着速度を指標とし，前章の吸着過程と同一湿度条件下の結果と対比した検討を行った．具体的には，まず本脱着過程に対して前章と同様の熱収支評価を行った．つぎに，前章の結果より新たに脱着率，熱効率，脱着速度を求め，本条件下のそれらとの比較による低湿度条件下のマイクロ波照射効果の検討を行った．なお，以下では前章の吸着過程と同一湿度の脱着過程，本研究の吸着過程より低湿度の脱着過程をそれぞれCase-1およびCase-2と称する．

#### 3.1 脱着挙動と熱収支

$q_{\text{initial}} = 0.318\text{kg/kg}$ の試料について， $T_g = 55^\circ\text{C}$ の温風加熱脱着(以下，温風系と称す)における層内温度( $T1$ - $T6$ )および脱着率( $q_{\text{des}}/q_{\text{initial}}$ )の経時変化をFig. 2-2に示す．層内温度は，脱着初期の8min程度までは初期温度以下となる．また，脱着初期では層内軸方向の温度差が大きく脱着の進行に伴ってその差は小さくなる，層内半径方向に温度差が生じているなどのCase-1と同様の傾向が観察される．脱着初期の温度低下は本系の脱着が吸着過程より低湿度の空気を用いて行われたことによると考えられる．さらに，脱着開始 30min後( $\theta_e$ )の $q_{\text{des,e}}/q_{\text{initial}}$ 値は0.137となり，Case-1の0.053より大きい．このことも低湿度空気を用いたことによると説明される．

$q_{\text{initial}} = 0.318\text{kg/kg}$ の試料について， $T_g = 55^\circ\text{C}$ の温風と $M_w = 50\text{W}$ のマイクロ波の併用加熱(以下，マイクロ波併用系と称す)における上記と同様の結果をFig. 2-3に示す．本系では温風系で観察された脱着初期における充填層温度が初期温度より低くなる現象はほとんど観察されない．また，層内温度は出口温度( $T2$ )より低く，この出口温度は入口温度( $T1$ )より高いこと，温風脱着と同様に充填層半径方向に温度差が生じていること，脱着率は脱着開始後から急激に増大することなどCase-1と同様の傾向が観察される．吸着初期での温度降下が観察されないのは脱着熱相当以上の熱量がマイクロ波により供給されたことによる．

温風系についてCase-1と同様に単位時間当りの充填層供給温風熱量( $Q_{\text{in}} (= Q_{\text{gas}})$ )，吸着材の顕熱量( $Q_s$ )，脱着熱量( $Q_{\text{des}}$ )，充填層排出熱量( $Q_{\text{out}}$ )および充填層側面放熱量( $Q_{\text{side}}$ )基準の熱収支計算を行った．その結果をFig. 2-4に示す．熱収支計算結果は実験範囲内で87%以上の収

支がとれており、本系についてCase-1との比較検討の妥当性が示される。なお、熱収支の残余13%の要因として、2つが考えられる。その1つは試料充填下部における吸着管軸方向の放熱によると考えられる。具体的には、吸着管断面積の熱収支に占める割合は4%程度と概算された。他の1つは湿度計の誤差に起因する。 $Q_{des}$ は脱着開始1min以内に最大となりその後やや減少した後平坦に推移し、10min以降から減少する。これに対してCase-1の $Q_{des}$ は、脱着開始1min程度後に最大を示し、その後漸次減少する。この他 $Q_s$ 、 $Q_{side}$ はそれぞれ脱着開始3min程度で最大となり、その後減少することおよび脱着開始から増大し、全消費熱量に占める割合が大きくなることはCase-1と傾向的に類似している。一方、Case-1と比較して本系の $Q_{des}$ は大きい。例えばこの $Q_{des}$ 値は脱着開始1min後とその後の平坦に推移する脱着開始8min後でそれぞれCase-1の約2.5倍および3.9倍となる。これは低湿度空気を用いたことにより脱着量が増加したためだと考えられる。因みに、Case-2の $Q_{in}-Q_{out}$ の値はCase-1のそれより大きく脱着開始1min後で比較するとCase-1の約1.4倍となることでも裏付けられる。

マイクロ波併用系について、マイクロ波強度相当の熱( $Q_{MW}$ )を考慮( $Q_{in}(=Q_{gas}+Q_{MW})$ )した熱収支計算の結果をFig. 2-5に示す。実験範囲内で83%以上の収支がとれており本系においてもCase-1との比較検討の妥当性が示される。 $Q_{des}$ 、 $Q_s$ 、 $Q_{side}$ の変化はCase-1と傾向的に類似している。また、 $Q_{des}$ 値はCase-1のそれに比べて大きく、その最大値はCase-1の約1.6倍となる。これはマイクロ波加熱脱着に低湿度空気供給による脱着が加わったことによる。なお、現時点では $Q_{des}$ 値に対するマイクロ波加熱脱着寄与率と低湿度空気供給寄与率を分離検討することは困難であるが、後述するようにCase-2の脱着率はCase-1に比べて大きく、本系でも大きなマイクロ波加熱効果の存在が示唆される。そこで次節では、このマイクロ波効果について脱着率、熱効率、脱着速度を指標とする評価を行う。

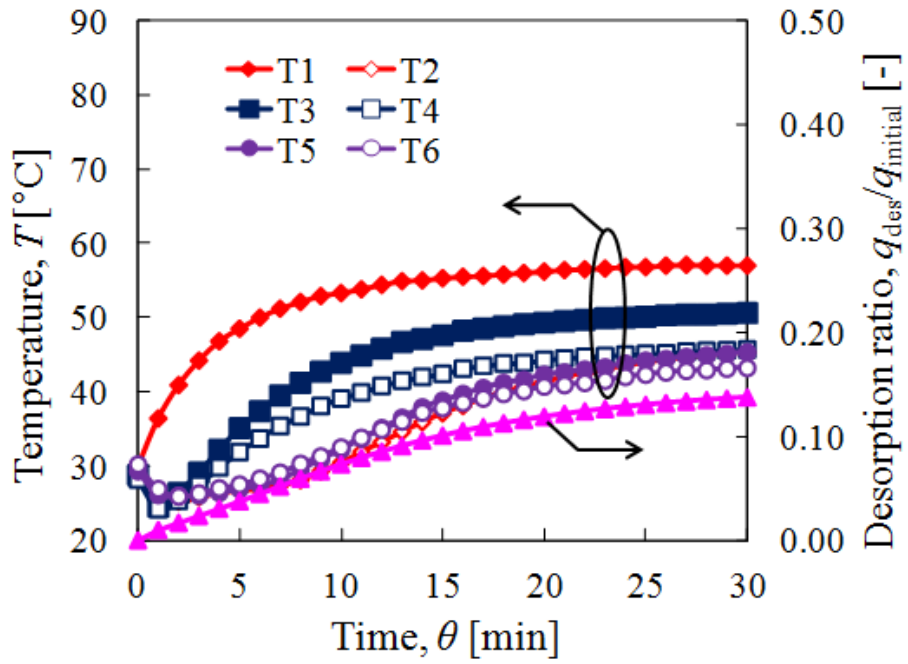


Fig. 2-2 Changes in temperature and desorption ratio with time

( $T_g = 55^\circ\text{C}$ ,  $q_{\text{initial}} = 0.318\text{kg/kg}$ )

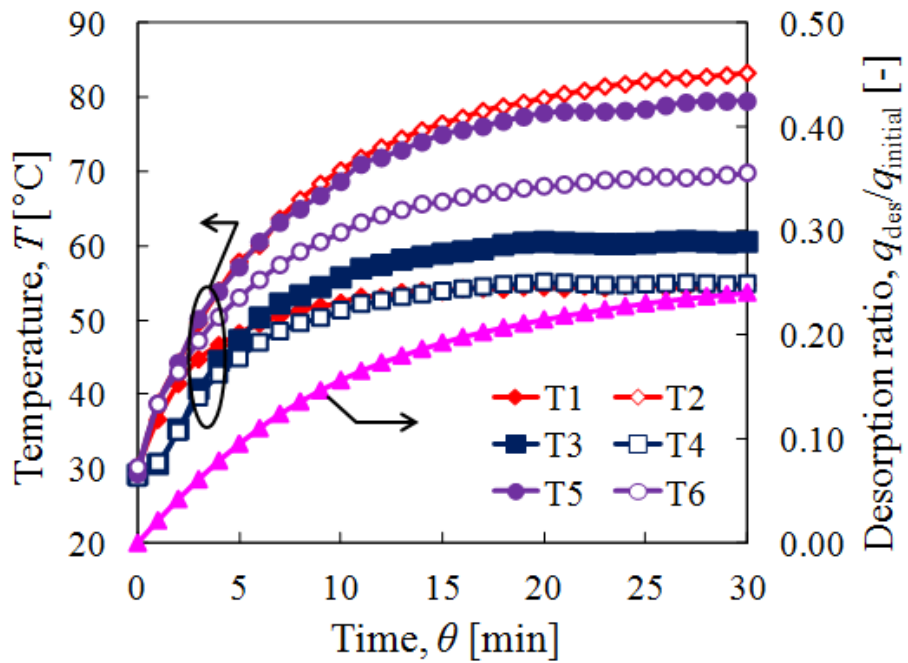


Fig. 2-3 Changes in temperature and desorption ratio with time

( $T_g = 55^\circ\text{C}$ ,  $M_W = 50\text{W}$ ,  $q_{\text{initial}} = 0.318\text{kg/kg}$ )

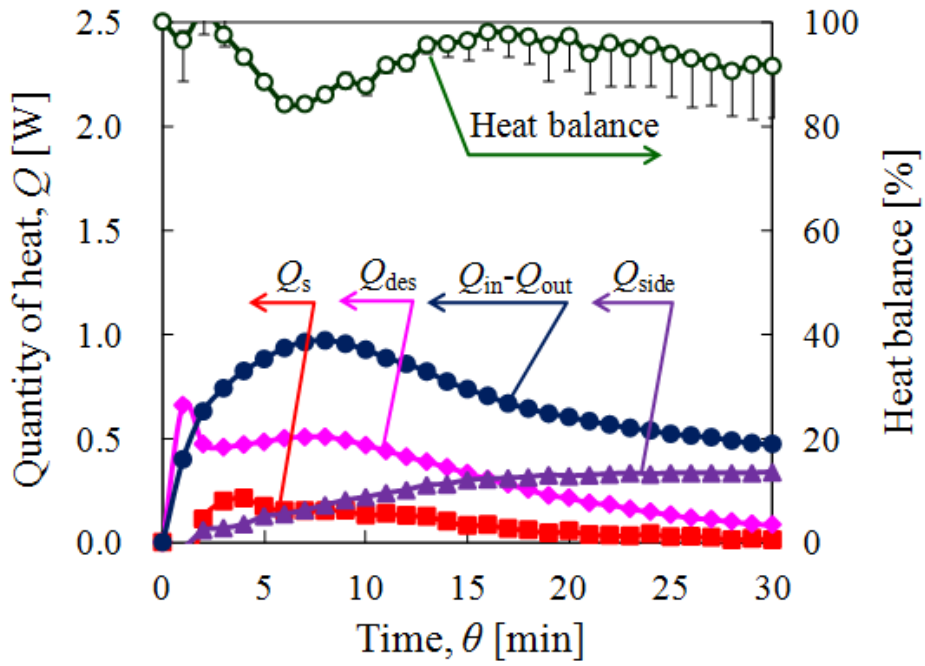


Fig. 2-4 Changes in heat consumption and heat balance for the hot air experiment  
 ( $T_g = 55^\circ\text{C}$ ,  $q_{\text{initial}} = 0.318\text{kg/kg}$ )

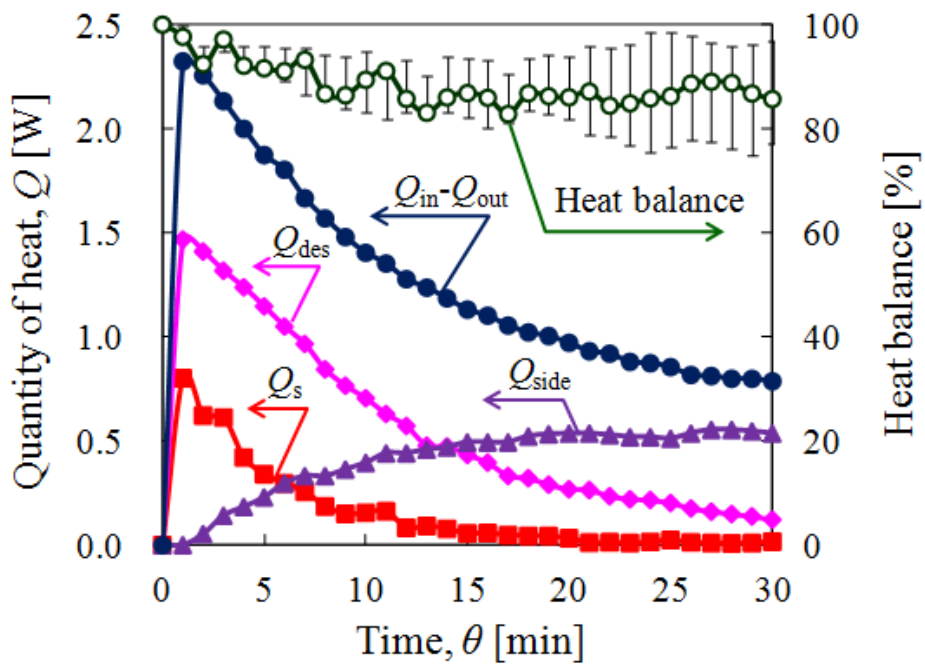


Fig. 2-5 Changes in heat consumption and heat balance for the microwave experiment  
 ( $T_g = 55^\circ\text{C}$ ,  $M_W = 50\text{W}$ ,  $q_{\text{initial}} = 0.318\text{kg/kg}$ )

### 3.2 脱着率および熱効率

Fig. 2-2およびFig. 2-3の結果は他の実験条件下でも同様に観察された。しかし、実験条件によって $q_{des,e}/q_{initial}$ 値が異なった。Fig. 2-6およびFig. 2-7にCase-1およびCase-2の実験条件毎の $q_{des,e}/q_{initial}$ 値を示す。両図より以下がわかる。i) 同一 $T_g$ ,  $M_W$ 条件下ではCase-2の $q_{des,e}/q_{initial}$ 値はマイクロ波加熱の有無によらずCase-1のそれより大きい。例えば $T_g = 55^\circ\text{C}$ を基準とするとCase-2の温風系、50Wマイクロ波併用系の $q_{des,e}/q_{initial}$ 値はCase-1のそれぞれ約3.2倍および1.8倍となる。また、ii)  $q_{des,e}/q_{initial}$ 値はCase-1, Case-2とも温風系に比べてマイクロ波併用系が大きい。iii)  $q_{initial}$ によらず $q_{des,e}/q_{initial}$ 値は $M_W$ の増大に伴って大きくなる。iv)  $q_{initial}$ の増大に伴って $q_{des,e}/q_{initial}$ 値はCase-1, Case-2でそれぞれ減少および増大する。i), ii)の結果は先述の $Q_{des}$ 値の増大とほぼ対応しており、低湿度空気脱着下でのマイクロ波併用の脱着効果が示される。なお、iii)は供給エネルギー量の増大による。iv)のCase-1における $q_{des,e}/q_{initial}$ の減少は、吸着過程と同湿度空気を用いた脱着であるため、 $q_{initial}$ が大きくなると吸着等温線の傾きが小さくなり脱着量が減少することによる。Case-2でも同様の減少が生じるが、Case-2では脱着空気湿度の低下に伴って全脱着量に占めるこの脱着量の割合は小さくなり、結果として $q_{initial}$ の増大に伴って $q_{des,e}/q_{initial}$ 値が増大したと考えられる。

つぎに、上記i), ii)のマイクロ波併用効果をより詳細に検討するため、Fig. 2-2およびFig. 2-3の結果を以下のように再整理した。具体的には、Fig. 1-1の $30^\circ\text{C}$ の脱着等温線に着目し、相対圧に対する蒸気圧と吸着量を求める。つぎにTable 1-1を用いて $30^\circ\text{C}$ と入口温風到達温度の平均温度に相当する脱着熱を外挿計算し、これらの値を式(1-1)のClausius-Clapeyron式に代入して入口温風到達温度基準の脱着等温線を作成し、この等温線の入口温風到達温度相当の相対圧に対する吸着量を求め、これを入口温風到達温度条件下の理論平衡吸着量( $q_{RH}$ )とした。つぎに $q_{RH}$ と初期吸着量 $q_{initial}$ の差を理論温風脱着量 $q_t (= q_{initial} - q_{RH})$ とし、実測の時間 $\theta$ における脱着量( $q_{des,\theta}$ )を $q_t$ で除した $q_{des,\theta}/q_t$ 値を求め、 $M_W$ ごとの $\theta$ と $q_{des,\theta}/q_t$ 値の関係を得た。Fig. 2-8およびFig. 2-9にCase-1およびCase-2について $T_g = 55^\circ\text{C}$ ,  $q_{initial} = 0.318\text{kg/kg}$ の場合を例とするこの関係を示す。本図からもわかるように、 $q_t$ を入口温風温度基準としたため、マイクロ波照射時に充填層温度が入口温風到達温度以上となった場合の $q_{des,\theta}/q_t$ 値は1以上となる。また、この関係は他の実験条件下でも同様に得られたので、各 $T_g$ の温風系における $\theta_e$ の $q_{des,\theta}/q_{initial}$ 値と同値に到達するマイクロ波併用系の所要時間 $\theta_i$ 、ならびにCase-1と同様の手法

により次式(2-1)および(2-2)から算出される充填層の $\theta_e$ 間の平均熱効率 $\eta_e$ および時間 $\theta_i$ までの平均熱効率 $\eta_{\theta_i}$ をTable 2-1に示した.

$$\eta_e = \frac{\sum_{\theta_i=0}^{\theta_e} Q_{des,\theta}}{\sum_{\theta_i=0}^{\theta_e} (Q_{in,\theta} - Q_{out,\theta})} \quad (2-1)$$

$$\eta_{\theta_i} = \frac{\sum_{\theta_i=0}^{\theta_i} Q_{des,\theta}}{\sum_{\theta_i=0}^{\theta_i} (Q_{in,\theta} - Q_{out,\theta})} \quad (2-2)$$

Fig. 2-8およびFig. 2-9より以下がわかる. v)  $q_{des,\theta}/q_t$ は, 温風系, マイクロ波併用系とも時間の経過に伴って増大する. この増大の傾向は脱着初期において大きい. vi)  $\theta_e$ におけるマイクロ波併用系の $q_{des,\theta}/q_t$ は温風系のそれより大きく, マイクロ波併用系では $M_W$ の増大に伴って大きくなり,  $M_W \geq 50W$ では1以上となる. つぎに, Table 2-1より以下がわかる. vii) マイクロ波併用系の $\theta_i$ 値はCase-1, Case-2とも温風系の1/10-4/5である. viii)  $\eta_e$ 値は, Case-1に比べてCase-2において大きい. ix) Case-1では $M_W = 30W$  の場合を除いて $T_g$ ,  $M_W$ によらず,  $\eta_e$ 値はほぼ同値である. Case-2では $T_g = 55^\circ C$ ,  $q_{initial} = 0.330kg/kg$ ,  $M_W = 50W$ の場合を除いてマイクロ波併用系の $\eta_e$ 値は温風系のそれと同値もしくはやや小さい. また, x) マイクロ波併用系の $\eta_{\theta_i}$ 値は条件によらず $\eta_e$ 値より大きい. xi) Case-2の $\eta_e$ 値,  $\eta_{\theta_i}$ 値は $T_g$ ,  $M_W$ の増大とともにやや減少する. vi), vii)の結果は, 温風系に比べてマイクロ波併用系では脱着が効率的に進行することを示している. この効果はとくに脱着初期において大きく, 例えばCase-2の $T_g = 55^\circ C$ ,  $q_{initial} = 0.318kg/kg$ では温風系に比べてマイクロ波併用系の $\theta_i$ ,  $\eta_{\theta_i}$ がそれぞれ0.3倍の減少および1.3倍の増大となり, マイクロ波併用系では温風系以下の脱着消費エネルギーのもとで脱着時間の短縮が可能となることを示している. また, xi)の結果は $Q_s$ および $Q_{in}-Q_{out}$ の増大による. v), viii)は次節で脱着速度と関連させて考察を行う.

因みに, vi), vii)の結果から, ローターを吸着材充填型と想定し, そのうち1/4を脱着部と

したデシカント空調機を、温風脱着による製品空気湿度と同湿度の空気製造を行うマイクロ波併用型デシカント空調機に置き換えるとすれば、 $M_w = 50W$ の条件下で除湿空気量の1.25倍の増大、もしくは同一除湿空気量のもとでは約20%のローター断面積の縮小につながると試算される。また、 $M_w \geq 50W$ で $q_{des,\theta}/q_t \geq 1$ となることはマイクロ波併用による脱着の高度進行を可能にすることを示しており、 $\theta_e$ 基準では熱効率はやや低下するものの、 $\theta_e$ 基準の温風系の出口空気湿度が $30^\circ C$ 、 $RH = 4.0\%$ であるのに対してマイクロ波併用系の出口空気湿度は $30^\circ C$ 、 $RH = 1.1\%$ となる。温風系の $\eta_e = 0.46$ と同等の $\eta_{oi}$ 値に相当する $q_{des,\theta}/q_t$ を用いて推算しても $30^\circ C$ 、 $RH = 1.2\%$ となる。

つぎに、実用的には消費電力量基準の脱着効率が必要となる。本研究で使用したマイクロ波発生装置は、電気エネルギーの一部のみが充填層内に吸収され、残りはダミーロードに流れる水に吸収される仕様となっており、消費電力量基準の比較を行うことが困難である。そこで、マグネトロンの発振効率(74%[4])とマイクロ波吸収効率(84%(電子レンジ(EMO-FM23C, 三洋電機(株)製)により水を加熱することで別途実験的に算出))の積をマイクロ波加熱効率と定義し、その効率を62%と仮定した。この値と実験により求めた充填層消費熱量を用いてマイクロ波照射時に充填層内に投入された電力量を推算した。さらに、温風を作り出すヒーターの加熱効率を100%(充填層消費熱量基準と同一)と仮定した。これらの値を用いて投入電力量基準の平均熱効率( $\eta_w$ )を算出、比較を行った。その結果、同一脱着量では、マイクロ波併用系の $\eta_w$ は温風系に比べて0.7倍-1.0倍程度となる。この中で、Case1の $T_g = 55^\circ C$ 、 $q_{initial} = 0.330kg/kg$ 、 $M_w = 50W$ 条件下では投入電力量基準においても同程度の熱効率で高速脱着が可能であることが試算された。

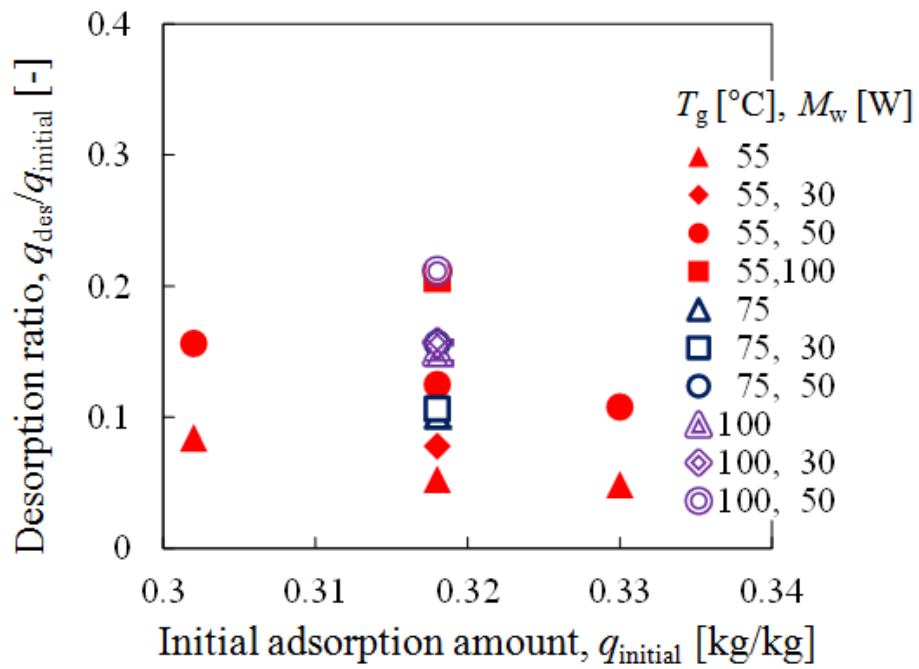


Fig. 2-6 Relationship between  $q_{\text{des},e}/q_{\text{initial}}$  and  $q_{\text{initial}}$  for Case-1

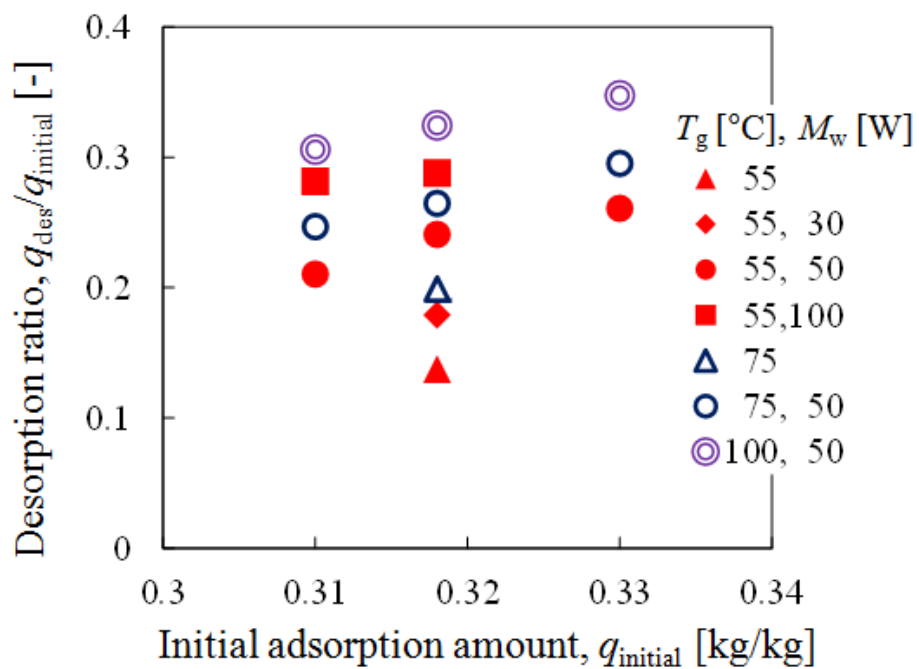


Fig. 2-7 Relationship between  $q_{\text{des},e}/q_{\text{initial}}$  and  $q_{\text{initial}}$  for Case-2



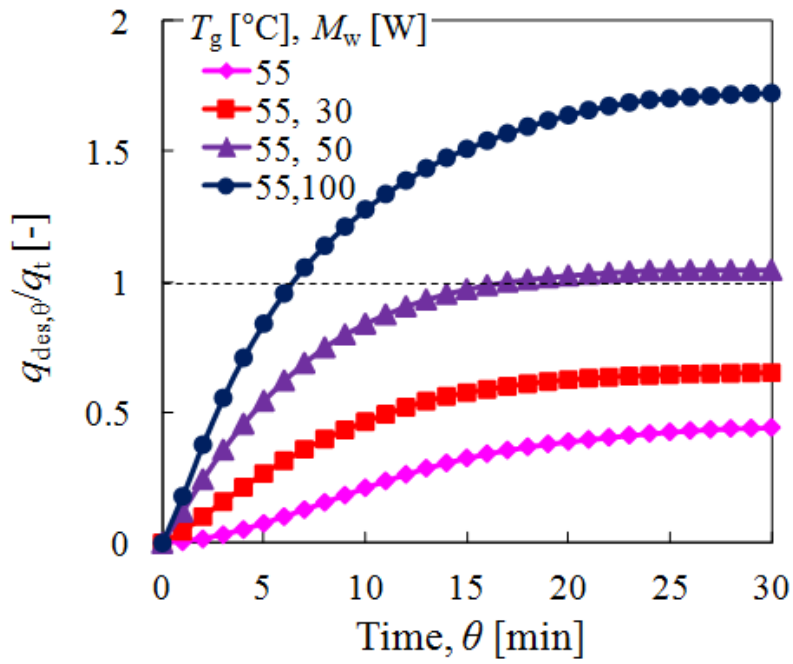


Fig. 2-8 Relationship between  $q_{des,\theta}/q_t$  and  $\theta$  for Case-1

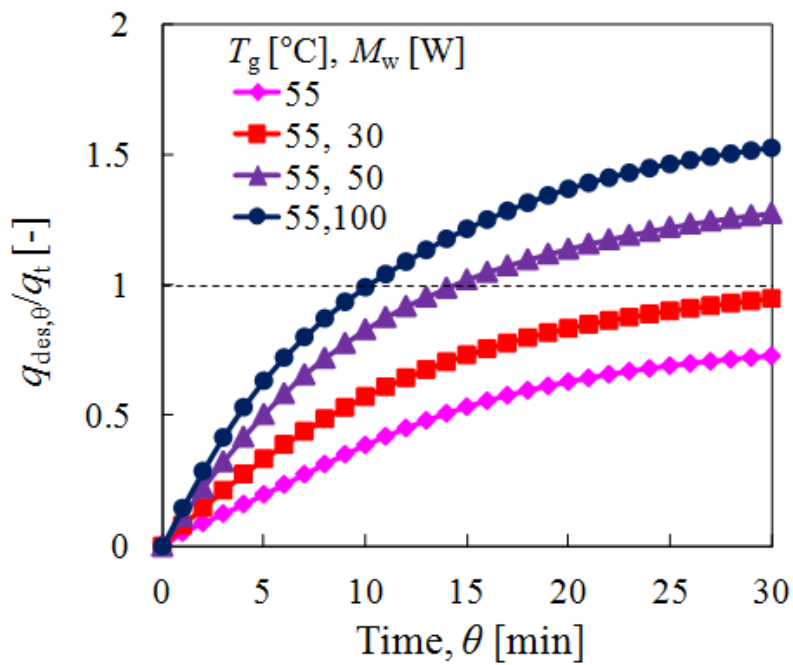


Fig. 2-9 Relationship between  $q_{des,\theta}/q_t$  and  $\theta$  for Case-2

Table 2-1 Experimental conditions and results

	$RH$ [%] (30°C)	$q_{\text{initial}}$ [kg/kg]	$T_g$ [°C]	$M_w$ [W]	$\theta_i$ [s]	$\eta_e$ [-]	$\eta_{\theta_i}$ [-]
Case-1	40	0.318	55	30	10	0.23	0.37
		0.318	55	50	4	0.25	0.47
		0.318	55	100	3	0.25	0.38
		0.318	75	30	22	0.18	0.23
		0.318	75	50	9	0.23	0.37
		0.318	100	30	24	0.19	0.22
		0.318	100	50	12	0.23	0.32
		0.318	55	-	30	0.23	0.23
		0.318	75	-	30	0.25	0.25
		0.318	100	-	30	0.24	0.24
Case-2	16	0.330	55	50	-	0.49	-
		0.318	55	50	9	0.44	0.60
		0.310	55	50	-	0.40	-
		0.330	75	50	-	0.41	-
		0.318	75	50	14	0.35	0.45
		0.310	75	50	-	0.35	-
		0.330	100	50	-	0.38	-
		0.318	100	50	-	0.36	-
		0.310	100	50	-	0.34	-
		0.318	55	30	15	0.46	0.57
		0.318	55	100	7	0.39	0.50
		0.310	55	100	-	0.39	-
		0.318	55	-	30	0.46	0.46
		0.318	75	-	30	0.39	0.39

### 3.3 脱着速度

Fig. 2-2およびFig. 2-3で示した脱着率 $q_{des}/q_{initial}$ の経時変化より、脱着速度( $\Delta q_{des}/\Delta\theta$ )を脱着経過単位時間( $\Delta\theta$ )当たりの脱着量差( $\Delta q_{des}$ )として求め、吸着率( $1-q_{des}/q_{initial}$ )に対して整理した図をFig. 2-10に示す。マイクロ波併用系の $\Delta q_{des}/\Delta\theta$ 値は温風系のそれより大きく、脱着開始直後に最大となり、脱着の進行による吸着率の減少に伴って直線的に減少する。一方、温風系では $1-q_{des}/q_{initial} = 0.99$ 付近での最大ピークと、その後やや減少した後の $1-q_{des}/q_{initial} = 0.94$ 付近の第2ピークを示しさらに減少する。同様の傾向は他の実験条件下でも観察されたが、実験条件により脱着速度の最大値( $\Delta q_{des}/\Delta\theta$ )<sub>max</sub>が異なった。そこで、Fig. 2-11, Fig. 2-12に Case-1およびCase-2の $T_g$ ,  $M_W$ に対する $q_{initial}$ と( $\Delta q_{des}/\Delta\theta$ )<sub>max</sub>の関係を示す。なお、Case-2の2ピークはFig. 2-1で示した層内温度が脱着初期の8min程度まで入口温度以下となることによると説明され、Fig. 2-12には第2ピークを( $\Delta q_{des}/\Delta\theta$ )<sub>max</sub>値として示した。

Fig. 2-10で脱着速度が吸着率0.94-1.0付近で最大を示すのはv)で示した $q_{des,\theta}/q_t$ 値が脱着初期で大きいことと対応している。また、温風系に比べてマイクロ波併用系の脱着速度が大きいことはviii)の結果と符合する。Fig. 2-11, Fig. 2-12より、マイクロ波併用系の( $\Delta q_{des}/\Delta\theta$ )<sub>max</sub>値は、Case-1, 2によらず温風系に比べて大きく $T_g = 55^\circ\text{C}$ ,  $q_{initial} = 0.318\text{kg/kg}$ 基準では $M_W = 50\text{W}$ でそれぞれ約4倍および2倍になる。これはマイクロ波による吸着水の選択的作用ならびに迅速加熱効果に起因しているとする前章の指摘が本検討の低湿度脱着条件下でも当てはまることを示している。Case-2のこの効果がCase-1に比べて小さいのは低湿度空気による圧力差を推進力とする脱着効果が含まれていることにより、見かけ上マイクロ波効果が小さくなったことによる。またFig. 2-12より、マイクロ波併用系の( $\Delta q_{des}/\Delta\theta$ )<sub>max</sub>値は初期吸着量の増大に伴って増大することがわかる。これはFig. 2-10で吸着率が大きいほど脱着速度が大きいことと対応している。

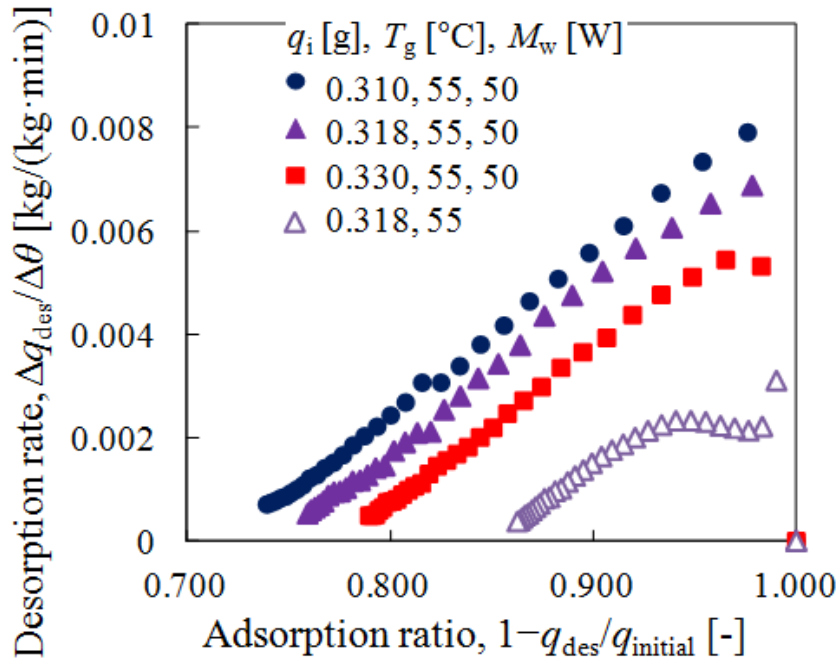


Fig. 2-10 Relationship between desorption rate and adsorption ratio for Case-2

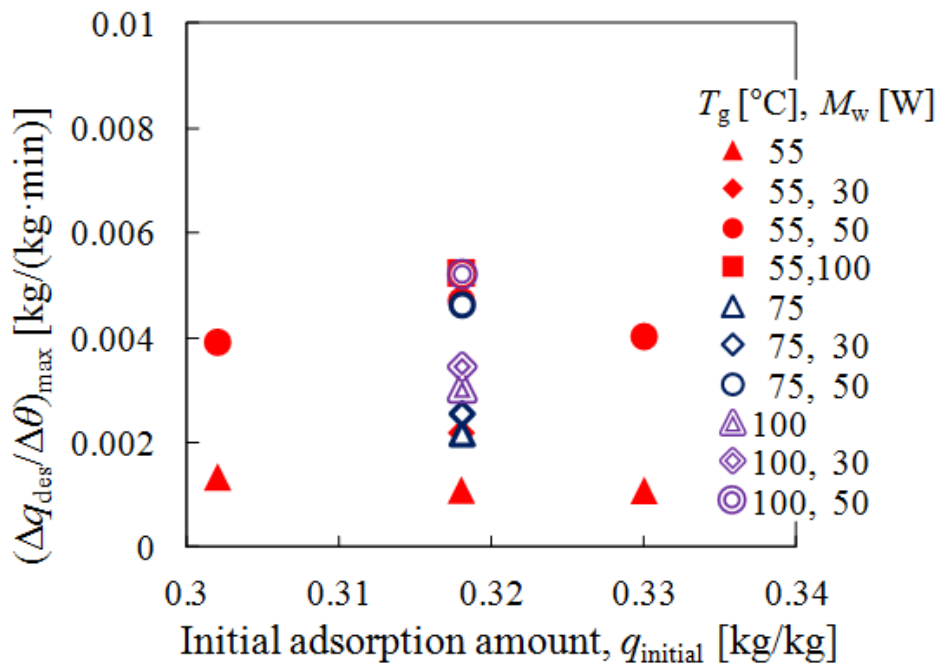


Fig. 2-11 Relationship between  $(\Delta q_{des}/\Delta\theta)_{max}$  and  $q_{initial}$  for Case-1

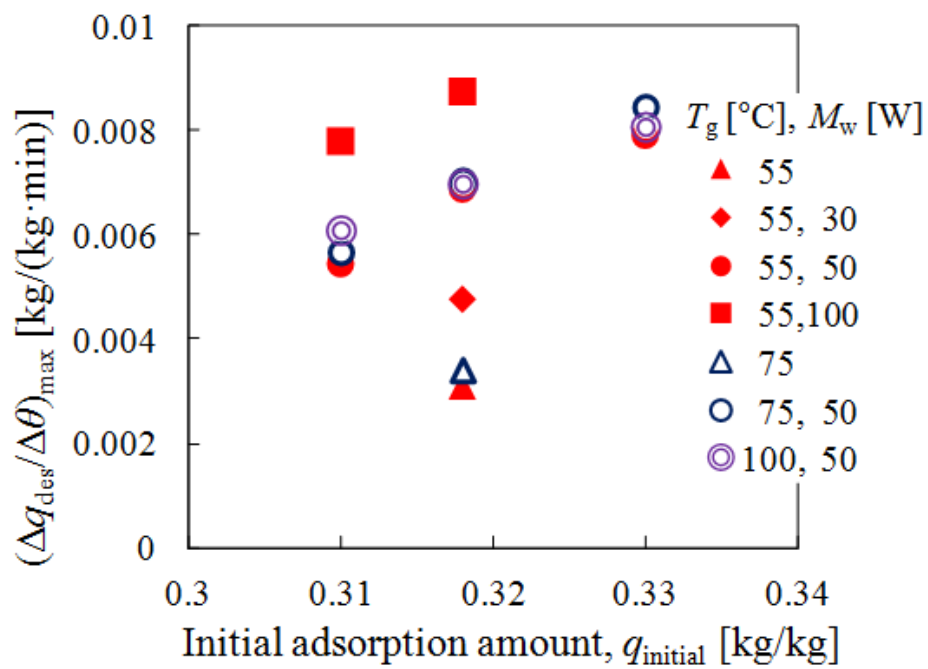


Fig. 2-12 Relationship between  $(\Delta q_{des}/\Delta\theta)_{max}$  and  $q_{initial}$  for Case-2

## 4. 結言

低湿度空気脱着条件下(Case-2)のマイクロ波・温風加熱脱着実験を行い、吸着過程と同湿度空気脱着条件下(Case-1)の実験結果と比較し、本系のマイクロ波照射効果について脱着率、熱効率、脱着速度を指標とする評価を行った。その結果、以下が示された。

1. Case-2の熱収支評価法はCase-1の手法が適用できる。
2. 低湿度空気脱着条件下でも脱着率、脱着速度の向上が認められる。
3. Case-2の温風系脱着率を基準とするマイクロ波併用系の脱着時間、熱効率は温風系のそれぞれ最小0.3倍および最大1.3倍となる。このことは従来の温風系デシカント空調機へのマイクロ波の導入により、除湿空気量の増大、もしくは装置体積の低減が可能になることを示唆している。

## 記号

$M_W$	マイクロ波出力	W
$q_{des}$	脱着量	kg/kg
$q_{initial}$	初期吸着量	kg/kg
$q_{RH}$	理論平衡吸着量	kg/kg
$q_t$	理論温風脱着量	kg/kg
$Q_{des}$	単位時間当たりの脱着熱量	W
$Q_{gas}$	単位時間当たりの温風熱量	W
$Q_{in}$	単位時間当たりの投入熱量	W
$Q_{MW}$	単位時間当たりのマイクロ波加熱量	W
$Q_{out}$	単位時間当たりの排出熱量	W
$Q_s$	単位時間当たりの顕熱量	W
$Q_{side}$	単位時間当たりの側面放熱量	W
$RH$	相対湿度	%
$T$	温度	°C
$T_g$	入口温風到達温度	°C
$\eta$	熱効率	-
$\theta$	時間	s

## 添え字

e 実験 30min 後

## 参考文献

- [1] 齋竹基仁, 窪田光宏, 渡辺藤雄, 松田仁樹, マイクロ波照射によるゼオライトからの吸着水の脱着促進, 化学工学論文集, 33, 1, pp. 53-57 (2007)
- [2] 渡辺藤雄, 炭谷一樹, 柏木強志, 高木智也, 黄宏宇, 架谷昌信, 小林敬幸, 各種ゼオライトからの水蒸気脱着に及ぼすマイクロ波照射の影響, 化学工学論文集, 35, 5, pp. 431-435 (2009)
- [3] S. Ito, H. Huang, F. Watanabe, H. Yuan, M. Hasatani and N. Kobayashi, Heat transfer during microwave-assisted desorption of water vapor from zeolite packed bed, Drying Technology, 30, 15, pp. 1707-1713 (2012)
- [4] 加藤直也, 高効率と負荷安定性の改善とを実現した電子レンジ用マグネトロン 2M403/E4500, 東芝レビュー, 70, 2, pp. 52-55 (2015)



第3章 マイクロ波・温風加熱による  
水蒸気脱着の熱・物質移動に関する理論的解析

## 1. 緒言

前章までに述べてきたように、吸・脱着現象を利用して温度と湿度を独立に制御できるデシカント空調機システムは 100°C 程度以下の低温熱源で稼働可能な低温排熱利用機器に位置付けられ、その高性能化開発が強く望まれている。中でも、デシカント空調機システムの主要構成部となるローター型吸着器(吸着ローター)の高性能化が不可欠とされる。吸着ローターには一般にセラミック繊維ペーパーなどに吸着材を含浸合成したコルゲート状吸着ローター型吸着器が採用されており、ローター断面の一部を吸着ゾーン/他部を脱着ゾーンとしそれぞれのゾーンに外気湿潤空気/戻り乾燥空気を連続流通させ水蒸気の吸着/脱着操作を行わせる方式が採られている。この方式では供給空気量を確保するため、吸着ローターの空気流通長さは一般的に 15-500mm と比較的長く、かつ流通空気抵抗抑制のためにコルゲート部に比べて空気流通部体積を確保する必要がある。そのためローター単位体積あたりの吸着容量が小さく、このことが装置のコンパクト高性能化を阻む要因の一つとされている。因みに、吸着材 60wt%含浸担持セラミック繊維ペーパーハニカム吸着ローターでは空隙率、吸着材充填密度はそれぞれ 0.7 以上および 10kg/m<sup>3</sup> 程度以下となり、吸着ローターの体積は同能力を利用する吸着式ヒートポンプ用吸着器体積の 5 倍以上となると試算される。また、脱着(再生)操作では温風もしくはヒーター加熱法が採用されており、吸着材の加熱速度が遅く、被加熱物質以外への熱損失が大きいことを原因とする脱着速度の低下がローターの大型化ならびにエネルギー消費量の増大を余儀なくしている。これらの観点から、著者らは、吸着水の脱着にマイクロ波加熱を導入したマイクロ波・温風ハイブリッドデシカント空調機システムを提案しその有効性を実験的に検証した。具体的には、前章までも述べたようにマイクロ波・温風加熱脱着では温風加熱脱着に比べて 1.6-2.0 倍の過剰脱着効果があること[1-3]、従来の吸着ローターに比べて除湿空気量の 1.25 倍の増大、もしくはローター断面積の 0.8 倍の低減が可能であることを示唆した[4]。そこで本章ではマイクロ波・温風ハイブリッドデシカント空調機システムの合理的設計指針の確立に向けた検討を行う。

吸着ローターの高性能化開発に関して、1) 使用する吸着材の高性能化および 2) 吸着速度/脱着速度の高速化に関するいくつかの検討が行われている。具体的に、1)は脱着操作湿度

範囲での吸・脱着量差(有効吸着量)の大きい吸着材を開発することにより、垣内らのグループはアルミノフォスフェートからなる機能性吸着材(FAM)[5]を新規開発し、FAM-Z02 では50-70°C の低温再生においてシリカローターの11-22%の除湿性能が向上すること[6]、FAM-Z05 を用いてFAM-Z02 に比べてより低温で再生できること[7]を報告した。また、渡邊らのグループは活性炭細孔内シリカ添着法[8]および活性炭の酸処理法[9]により有効吸着量をシリカゲルの最大3.4倍増大させることを示した。2)では、FAMを伝熱板に塗布した直接加熱/冷却型吸着器により吸着ローター型に比べて高速吸・脱着が可能になること[7]、3種のシリカゲルによるマイクロ波加熱実験でシリカゲルRDが最大のマイクロ波加熱効果を示すこと[10]が報告されている。また、デシカント空調機の温風供給条件下の解析的性能予測についての検討が行われている[11-17]。マイクロ波加熱による解析について、マイクロ波加熱再生と高温空気再生は同程度の性能を有すること[18]が報告されている。しかし、本研究で提案しているマイクロ波・温風ハイブリッドデシカント空調機用吸着器の熱・物質移動に関する取り組みはほとんどなされていない。

本章では、マイクロ波・温風加熱脱着の熱・物質移動のモデル化と動的解析を行った。具体的には、第1段階として前章で検討したゼオライト充填層型吸着器に着目し、脱着過程における熱・物質移動のシミュレーションモデルを構築し、モデルの妥当性に基づいて等湿度吸・脱着過程における空気湿度、温風供給温度、マイクロ波照射強度をパラメータとする脱着性能の検討を行った。

## 2. マイクロ波・温風加熱脱着の熱・物質移動モデル

第1章のマイクロ波・温風加熱水蒸気脱着実験に使用したゼオライト充填層型吸着器を模式的にFig. 3-1に示す。吸着器はガラス製円筒管であり、中央部にゼオライトが充填されている。この吸着器はマイクロ波導波管内にあり、試料充填部は導波管中心部に位置している。脱着用空気は充填層上部のマイクロヒーターで所定温度に加熱され充填部に導入される。試料部の温度は充填層空気入口直上(T1)、充填層内上部半径方向の2点(T2, T3)、充填層内下部半径方向の2点(T4, T5)および充填層空気出口直下(T6)で計測される。空気湿度は吸着管入口および出口で計測される。

Fig. 3-2 に、吸着材充填層での脱着過程の熱・物質移動モデルを示す。脱着エネルギーとして充填層入口の温風( $Q_{\text{gas}}$ )および充填層側面からのマイクロ波( $Q_{\text{MW}}$ ) が吸着材充填部へ供給され、吸着材の顕熱( $Q_s$ )、脱着熱( $Q_{\text{des}}$ )に消費されるとともに、一部は反応管側面から放熱( $Q_{\text{side}}$ )され、残余のエネルギー( $Q_{\text{out}}$ )が充填層下部より流出する。またこの間に、吸着材内の水蒸気は粒子表面方向に移動し本体流れに同伴され充填層下部より流出する。使用した吸着器、吸着材の緒元を Table 3-1 に示す。

本モデルを解析的に解くために次の仮定を設けた。

1. マイクロ波・温風加熱脱着は二次元円筒モデルで表される。
2. 吸着材粒子は均一粒子径の球形粒子である。
3. 充填層微小体積内の温度は一様である。
4. 吸着材粒子内の温度は一様である。
5. 吸着材粒子内の水蒸気移動は表面拡散で表現できる。
6. 充填層部のマイクロ波電界強度は一様である。
7. 充填層の水蒸気濃度差に基づく拡散は無視できる。

上記の仮定の下での本系の脱着過程の熱・物質収支式は以下のように表される。

熱収支式

$$\begin{aligned} & \left\{ \varphi_G C_{p,G} + (1-\varepsilon)\rho C_{p,B} \right\} \frac{\partial T}{\partial \theta} \\ & = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T}{\partial R} \right) - u \rho_G C_{p,G} \frac{\partial T}{\partial Z} + P + \rho \Delta H \frac{\partial \bar{q}}{\partial \theta} \end{aligned} \quad (3-1)$$

$$C_{p,B} = C_{p,A} + q C_{p,aw} \quad (3-2)$$

物質収支式

$$\frac{\partial C}{\partial \theta} = -u \frac{\partial C}{\partial Z} + (1-\varepsilon)\rho \frac{\partial \bar{q}}{\partial \theta} \quad (3-3)$$

$$\frac{\partial q}{\partial \theta} = D_A \left( \frac{\partial^2 q}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial q}{\partial r} \right) \quad (3-4)$$

$$\bar{q} = \frac{3}{r_p^3} \int_0^{r_p} r^2 q dr \quad (3-5)$$

初期条件

$$\theta = 0, 0 \leq Z \leq Z_z, 0 \leq R \leq R_c; T = T_{\text{initial}}, C = C_{\text{initial}} \quad (3-6)$$

$$\theta = 0, 0 \leq r \leq r_p; q = q_{\text{initial}} \quad (3-7)$$

境界条件

$$Z = 0, Z = Z_z; \frac{\partial T}{\partial Z} = 0, \frac{\partial C}{\partial Z} = 0 \quad (3-8)$$

$$R = 0; \frac{\partial T}{\partial Z} = 0, \frac{\partial C}{\partial Z} = 0 \quad (3-9)$$

$$R = R_c; \lambda \frac{\partial T}{\partial Z} = h(T - T_{\text{out}}), \frac{\partial C}{\partial Z} = 0 \quad (3-10)$$

$$r = 0; \frac{\partial q}{\partial r} = 0 \quad (3-11)$$

$$r = r_p; -D_A \rho \frac{\partial q}{\partial r} = k_F a_v (C_s - C) \quad (3-12)$$

以上の微分方程式を前進差分法で計算を行った。なお本計算では、あらかじめ吸着材からの脱着量を仮定する試行錯誤法により真の脱着量を求めた。具体的には、1) 投入した熱が顕熱のみに消費されるとした時の充填層内温度および水蒸気濃度から計算される脱着量を最大脱着量とする。2) 1)の最大脱着量以下の脱着量を仮脱着量として充填層内温度と水蒸気濃度を算出する。つぎに、3) この水蒸気濃度を基準とする粒子内の物質収支式を解いて脱着量を算出し、この脱着量と仮脱着量の差が 1.0%以下になった時の値を真の脱着量として確定する。

充填層内熱・物質移動の解析条件を Table 3-2 に示す。また、解析に使用した諸値を Table 3-3 に示す。ここで、脱着熱  $\Delta H$  は第 1 章で示した値を用いた。拡散係数  $D_A$  は、あらかじめ

め高精度蒸気吸着量測定装置(BELSORP-aqua3, MicrotracBEL 製)によるゼオライト吸着速度の実測値より吸着速度定数( $k_s a_p$ [1/s])を求め、以下の関係式[19]により決定した.

$$k_s a_p = \frac{15D_A}{r_p^2} \quad (3-13)$$

充填層内の有効熱伝導度は、Hirasawa らのゼオライト 13X の実測値[20]を採用した. 反応管側面-雰囲気間熱伝達係数  $h$  は次式[21]で推算した.

$$Nu = 0.0387(GrPr)^{\frac{1}{4}} \quad (3-14)$$

吸着材粒子表面-流体間の境膜物質移動係数  $k_F$ [m/s]は次式で算出した[22].

$$\frac{k_F}{u} Sc^{\frac{2}{3}} = 1.77 \left[ \frac{Re}{(1-\varepsilon)} \right]^{-0.44} \quad (3-15)$$

また、マイクロ波投入量  $P$  は前章までと同様にマイクロ波照射場の電界強度基準の投入量とし、式(1-9)で算出した.

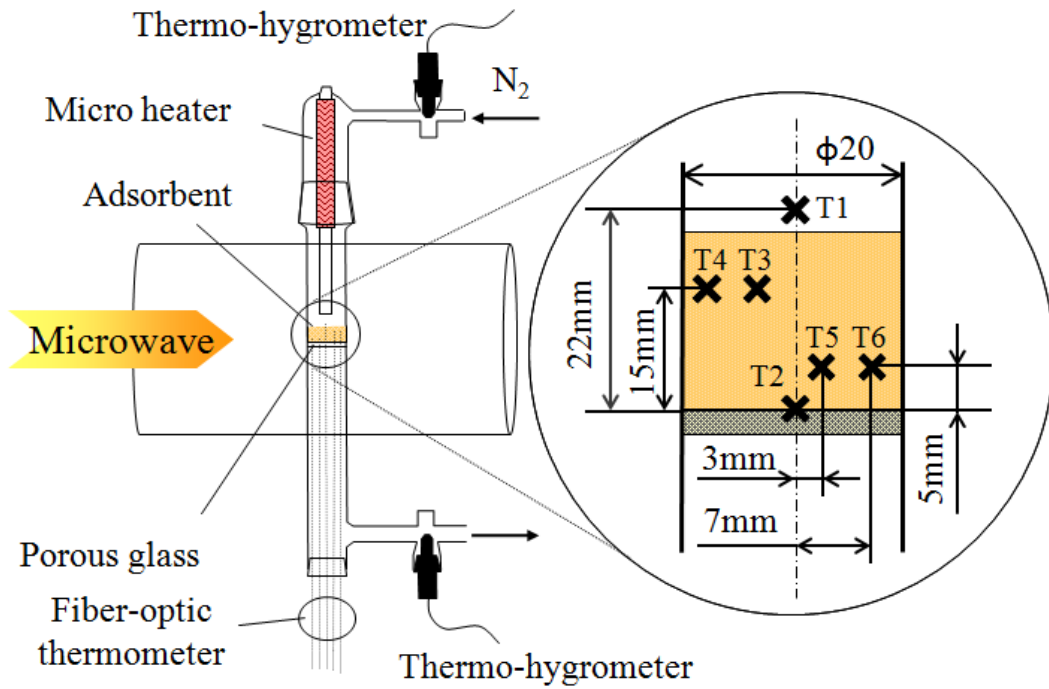


Fig. 3-1 Schematic diagram of adsorption column

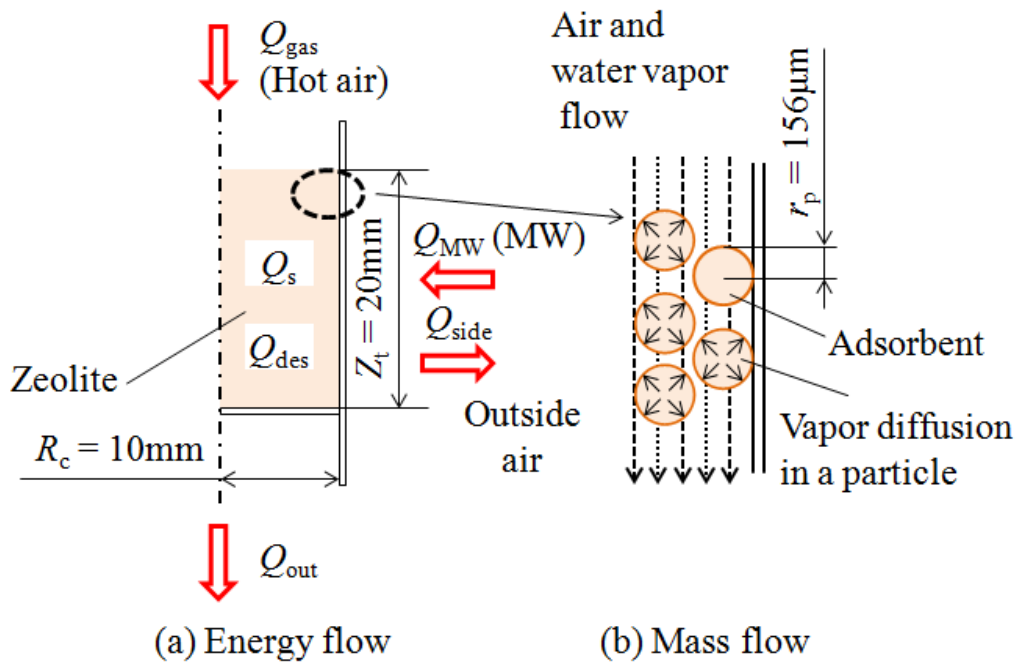


Fig. 3-2 Schematic diagram of energy and mass flow in the packed bed

Table 3-1 Specifications of the adsorption unit and adsorbent

Adsorbent	Zeolite 13X
Packed bed thickness, $Z_t$	20mm
Packed bed radius, $R_c$	10mm
Particle radius, $r_p$	156 $\mu$ m
Frequency of microwave, $f$	2450MHz

Table 3-2 Analysis conditions for heat and mass transfer in the packed bed

Initial temperature, $T_{initial}$	30 °C
Relative humidity (30°C), $\phi$	16-55 %RH
Hot air heating temperature, $T_G$	55-100 °C
Outside temperature, $T_{out}$	30 °C
Microwave intensity, $M_w$	0-100 W
Flow rate (Superficial velocity), $u$	0.106 m/s

Table 3-3 The values used in the analysis

Desorption heat, $\Delta H$	3900 kJ/kg
Diffusion coefficient, $D_A$	$1.8 \times 10^{-11}$ m <sup>2</sup> /s
Effective thermal conductivity, $\lambda$	0.08 W/(m·K)
Porosity of packed bed, $\varepsilon$	0.646
Specific heat of adsorbent, $C_{p,A}$	758 J/(kg·K)
Density of adsorbent, $\rho$	1132 kg/m <sup>3</sup>



### 3. 結果および考察

前項で示した解析モデルの妥当性を確認するため、脱着量および充填層内温度について第1章の実験結果との比較を行った。

結果の一例として温風温度( $T_g = 30^\circ\text{C}$ )、吸着湿度( $\phi = 40\%\text{RH}$ )条件下で吸着平衡到達後の、 $T_g = 55^\circ\text{C}$ 加熱の条件下(Case 1)、ならびに  $T_g = 55^\circ\text{C}$ 加熱、マイクロ波( $M_w = 50\text{W}$ )照射のマイクロ波・温風加熱条件下(Case 2)での充填層内温度および全吸着率の経時変化をそれぞれ Fig. 3-3 および Fig. 3-4 に示す。また、Case 1, 2 の計算結果に基づいて算出される吸着材の顕熱量( $Q_s$ )、脱着熱量( $Q_{\text{des}}$ )、充填層側面放熱量( $Q_{\text{side}}$ )および全熱収支の結果を実験結果と併せて Fig. 3-5 および Fig. 3-6 に示す。充填層における各消費熱量の算出式を以下に示す。

$$Q_s = (M_A C_{p,A} + M_{aw} C_{p,aw}) \frac{dT}{d\theta} \quad (3-16)$$

$$Q_{\text{des}} = M_A \Delta H \frac{dq_{\text{des}}}{d\theta} \quad (3-17)$$

$$Q_{\text{side}} = hA(T - T_{\text{out}}) \quad (3-18)$$

Case 1 の吸着率変化、充填層内温度変化(Fig. 3-3)の解析結果は実験結果と良好に一致している。Case 2(Fig. 3-4)でも、充填層内温度の解析結果は実験結果とよく一致している。吸着率変化の解析結果も実験結果と傾向的一致を示している。また、各消費熱量、全熱収支の経時変化(Fig. 3-5 および Fig. 3-6)の計算結果も実験結果とほぼ傾向的一致を示している。このことより、本解析法はほぼ妥当であるとみなされる。したがって、第1章の実験結果で述べた温度変化および吸着量変化に関する実験的考察が理論的にも裏付けられると考えられる。なお、Case 2 の吸着量変化の解析結果は加熱開始 1000s 以降で実験結果をやや下回る。これは脱着量の解析に実測の  $15\text{--}45^\circ\text{C}$  までの吸着等温線から得られる Clausius-Clapeyron 式を  $45^\circ\text{C}$  以上の温度にも適用したことによる。

本解析の妥当性は、上記の実験条件を含む第1章の実験条件下でも同様に確認された。このことを踏まえ、以下では、Case 1, Case 2 の充填層内の温度挙動、脱着挙動を考察し、

第 1 章の実験範囲を含む広範な湿度条件下の解析結果を行った結果に基づいて熱効率を指標とするマイクロ波・温風加熱脱着の有効性の検証を行った。

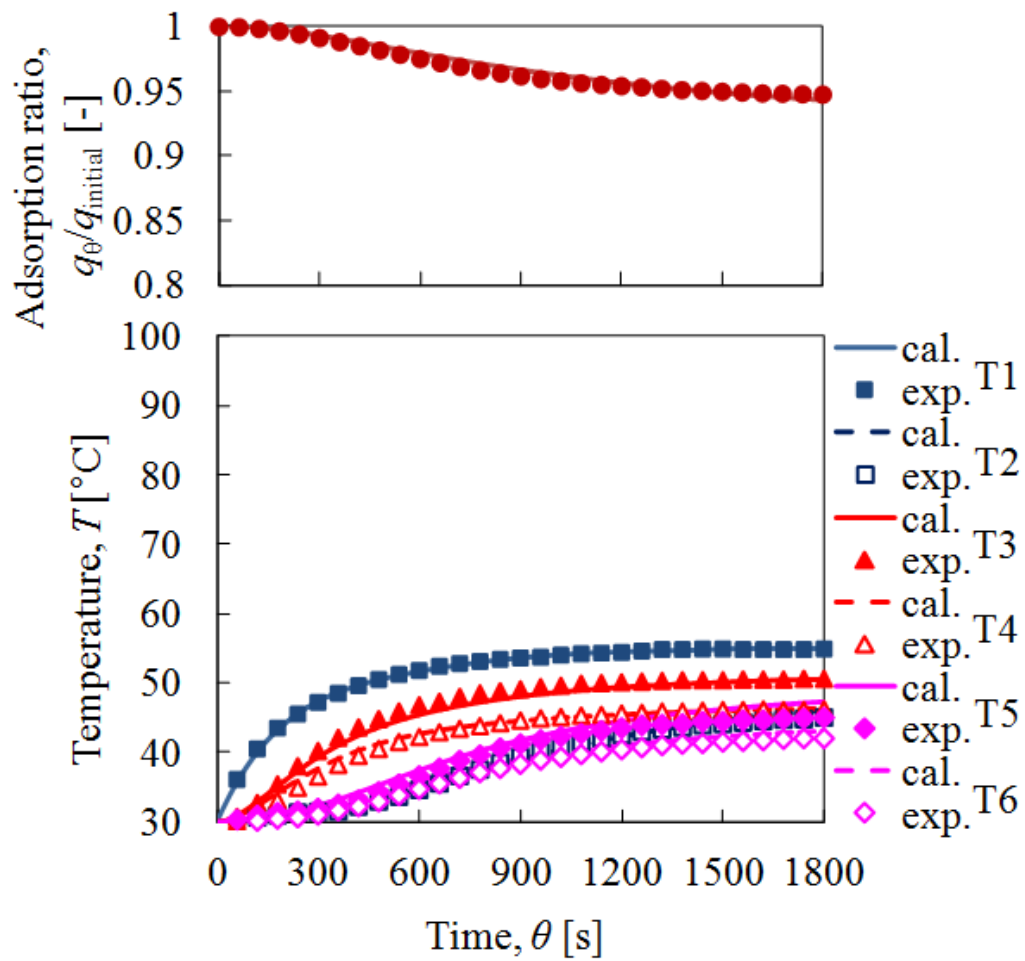


Fig. 3-3 Changes in temperature and adsorption ratio with time at  $T_G = 55^\circ\text{C}$  and  $\phi = 40\%RH$  (Case 1)

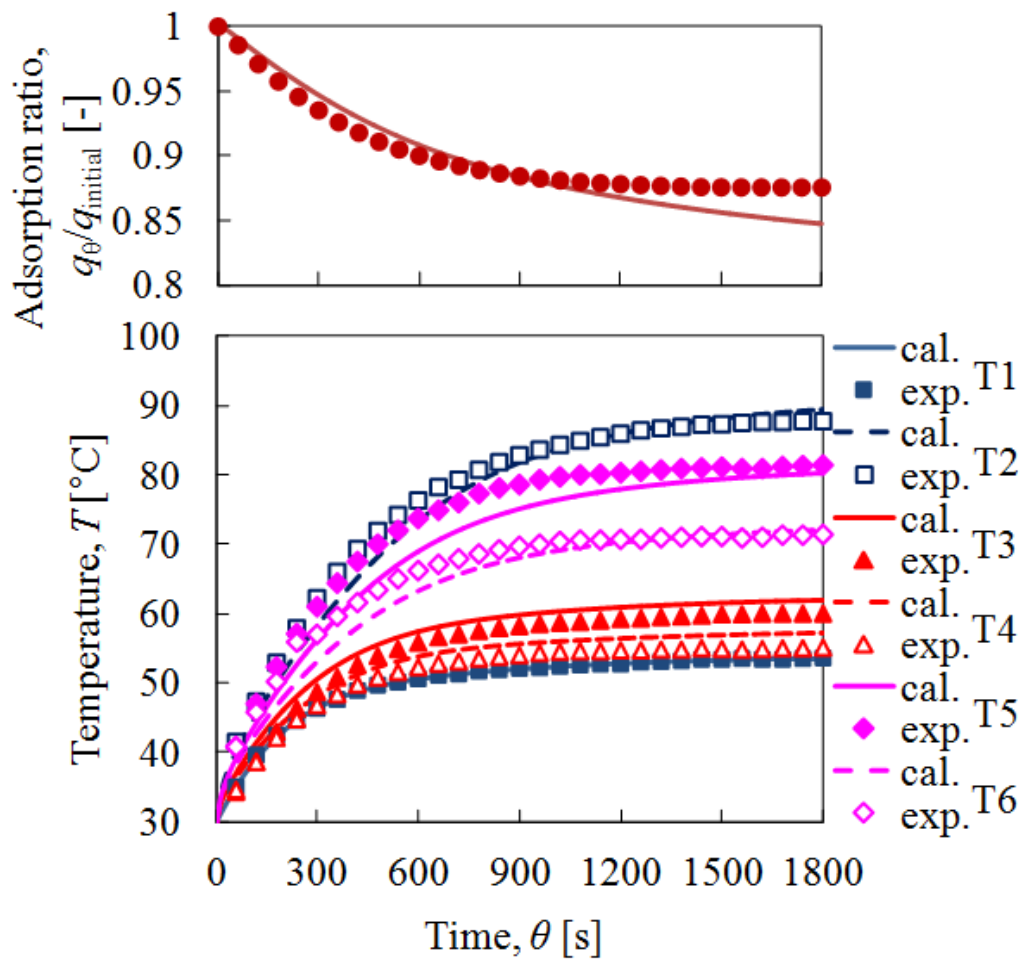


Fig. 3-4 Changes in temperature and adsorption ratio with time at  $T_G = 55^\circ\text{C}$ ,  $\varphi = 40\%RH$  and  $M_w = 50W$  (Case 2)

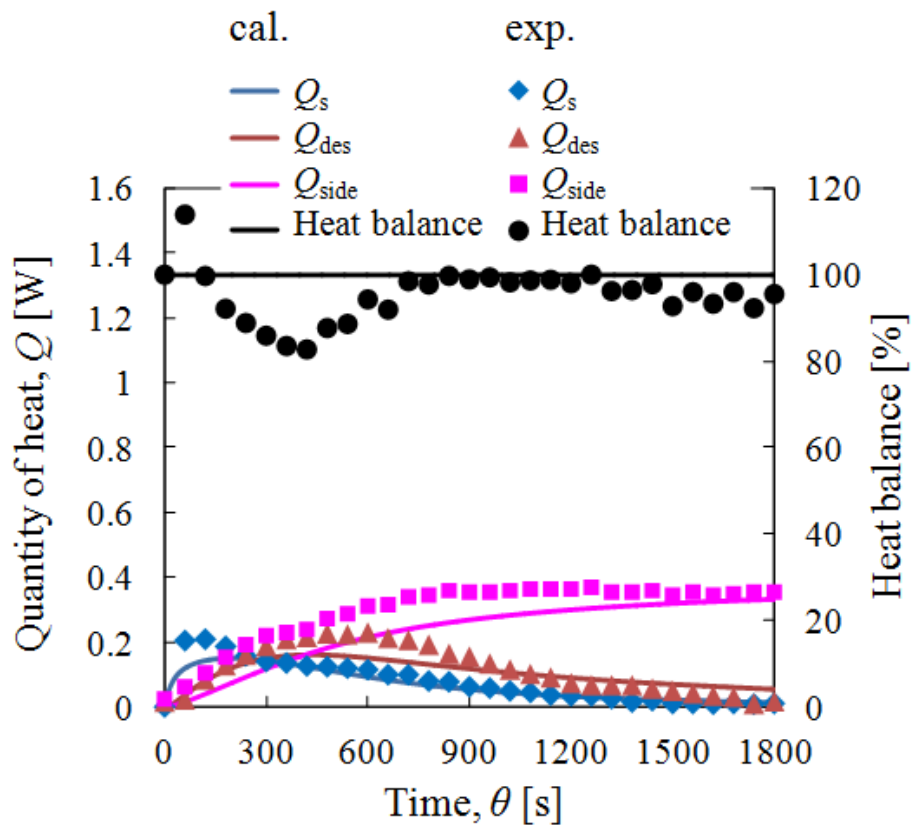


Fig. 3-5 Changes in heat consumption and heat balance at  $T_G = 55^\circ\text{C}$  and  $\varphi = 40\%RH$  (Case 1)

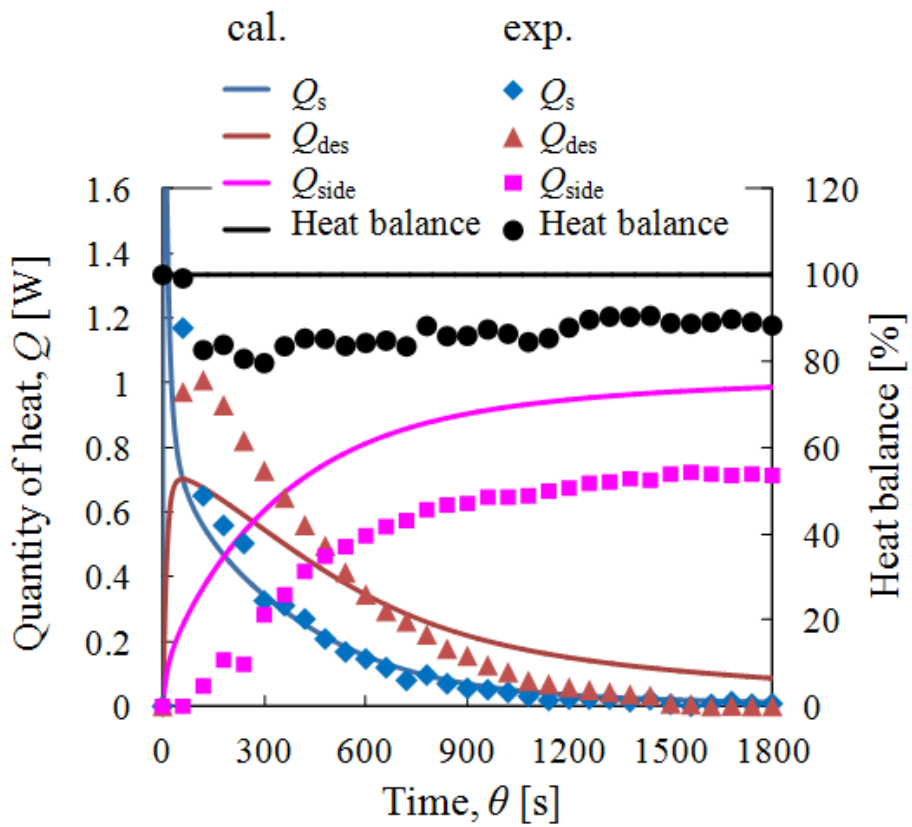


Fig. 3-6 Changes in heat consumption and heat balance at  $T_G = 55^\circ\text{C}$ ,  $\varphi = 40\%\text{RH}$  and  $M_W = 50\text{W}$  (Case 2)

### 3.1 充填層内の温度分布，吸着量分布

Case 1, Case 2 の脱着状態を把握するために吸着量変化が比較的大きい範囲の時間( $\theta = 80s, 300s, 600s$ )における充填層内の Fig. 3-3, Fig. 3-4 に相当する温度分布および脱着率分布の解析結果をそれぞれ Fig. 3-7 および Fig. 3-8 に示す. Case 1 では, 充填層上部および軸方向中心部から時間経過とともに温度上昇し, これに伴って脱着が進行する. しかし,  $\theta = 600s$  でも充填層中心部の上部, 下部の脱着率はそれぞれ  $\phi = 40\%RH$  における  $T_g = 30^\circ C$ ,  $T_g = 55^\circ C$  の平衡吸着量差( $q_{30^\circ C, 40\%RH} - q_{55^\circ C, 40\%RH} = 0.04kg/kg$ )の 50%および 0.0%である. これに対して, Case 2 では, Case 1 に比べて加熱初期から充填層温度は著しく上昇する. この温度上昇は軸方向中心部から進行し,  $\theta = 270s$  の温度測定点 T4 付近では与温風温度以上となる. 脱着率はこの温度上昇に対応しており,  $\theta = 600s$  の充填層下部軸方向中心部では 1 以上となる. つまり, Case 2 ではマイクロ波の供給により層内は速やかに与温風温度に到達し, Case 1 に比べて高速脱着することが示される.

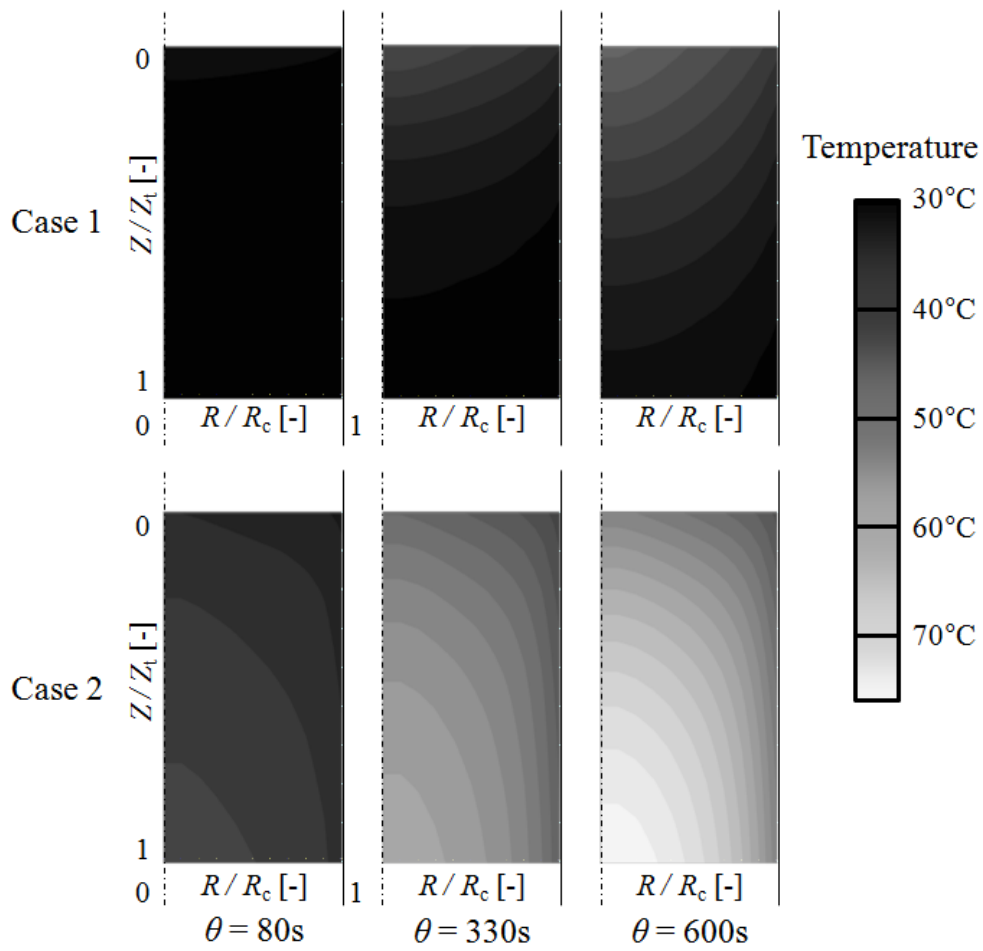


Fig. 3-7 Change in temperature distribution in the packed bed with time



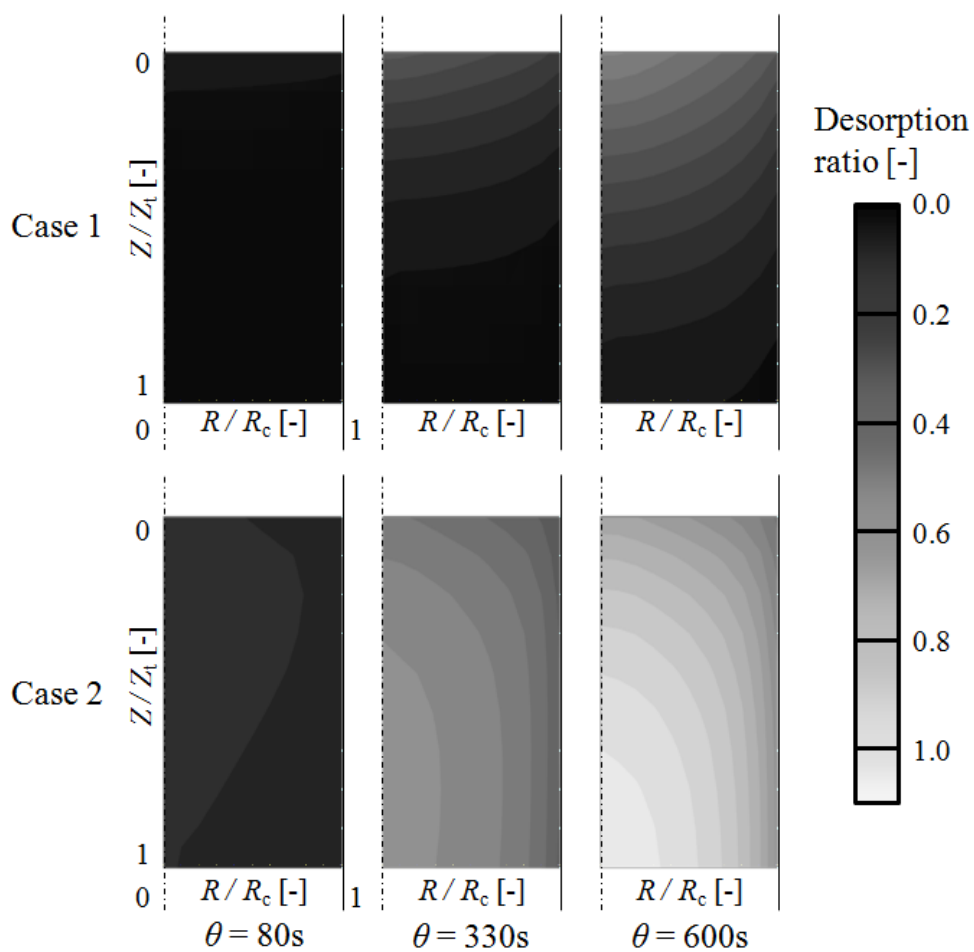


Fig. 3-8 Change in desorption ratio distribution in the packed bed with time

### 3.2 マイクロ波・温風加熱脱着の有効性

マイクロ波・温風加熱脱着の有効性の検証を行うために、次式で定義した脱着熱効率  $\eta$  を指標とする検討を行った。

$$\eta = \frac{Q_{\text{des}}}{Q_s + Q_{\text{des}} + Q_{\text{side}}} \quad (3-19)$$

Fig. 9 に、本解析結果から得られる Case 1, Case 2 の  $\eta$  値を第 1 章の実験結果に基づいて得られた結果と併せて示す。Case 1, Case 2 とも解析の熱効率  $\eta_{\text{cal}}$  は脱着開始とともに増大し、最大熱効率  $\eta_{\text{cal,MAX}}$  を経て減少する。Case 2 の  $\eta_{\text{cal,MAX}}$  への到達時間は Case 1 のそれに比べて短い。Case 2 の  $\eta_{\text{cal,MAX}}$  値は Case 1 のそれに比べて大きい。Case 2 の  $\eta_{\text{cal}}$  は脱着初期から 300s 付近以下では Case 1 のそれより大きく、その後は反転する。これらの  $\eta_{\text{cal}}$  の変化は実験の熱効率  $\eta_{\text{exp}}$  の変化と傾向的に一致しており、マイクロ波・温風加熱型デシカント空調機の性能評価に対して  $\eta$  を基準とする検討が可能であることが示唆される。したがって、以下ではマイクロ波強度、脱着空気の色度、湿度を変化させた場合の  $\eta$  値を指標とするマイクロ波・温風加熱脱着の有効性を考察する。具体的には、次式で定義する等脱着量基準の熱効率  $\eta_{\theta}$  を指標とする比較を行った。

$$\eta_{\theta} = \frac{\sum_{\theta=0}^{\theta_i} Q_{\text{des},\theta}}{\sum_{\theta=0}^{\theta_i} (Q_{s,\theta} + Q_{\text{des},\theta} + Q_{\text{side},\theta})} \quad (3-20)$$

ここで、 $\theta_i$  は Case 1 の  $\theta = 1800\text{s}$  における脱着量に等しくなる Case 2 の脱着時間[s]である。なお、Case 1 の  $\theta = 1800\text{s}$  における脱着量は  $T_g$  および  $\phi$  値によって異なるが、本検討では簡単化のために Case 1 の  $T_g = 55^{\circ}\text{C}$ ,  $\phi = 16\%\text{RH}$ ,  $\theta = 1800\text{s}$  における脱着量(= 0.0165kg/kg)を基準として  $\eta_{\theta}$  を算出した。

Figs. 3-10(a, b, c)に、 $T_g = 55-100^{\circ}\text{C}$ ,  $\phi = 16-55\%\text{RH}(30^{\circ}\text{C})$ 条件下の  $\eta_{\theta}$  と  $M_w$  の関係を示す。図中には  $\theta_i$  値を併示した。 $\eta_{\theta}$  は、1)  $T_g$ ,  $\phi$  によらず、 $M_w > 0$  (Case 2)では  $M_w = 0$ (Case 1)の値より大きく、 $M_w = 40-60\text{W}$  で最大値に到達しその後やや減少する。2)  $\phi$  の増大に伴って増

大し、この増大は  $\varphi$  の増大にほぼ比例している。3)  $\eta_{\theta}$  が最大となる  $M_W$  は  $\varphi$  の減少に伴い増大する傾向にある。また  $\theta_1$  は 4)  $T_g$  の上昇および  $M_W$  の増大に伴い減少する。そこで  $\eta_{\theta}$  の最大値  $\eta_{\theta\text{MAX,Case2}}$  に着目し、この値を  $\eta_{\theta,\text{Case1}}$  で除した  $\eta_{\theta\text{MAX,Case2}}/\eta_{\theta,\text{Case1}}$  値を Fig. 3-11 に示す。 $\eta_{\theta\text{MAX,Case2}}/\eta_{\theta,\text{Case1}}$  値はいずれも 1 以上になり、 $T_g$  および  $\varphi$  の減少に伴って増大する。このことは、マイクロ波・温風加熱脱着は低温の温風利用を可能とし、低吸着量条件下の脱着促進に効果的であることを示唆している。

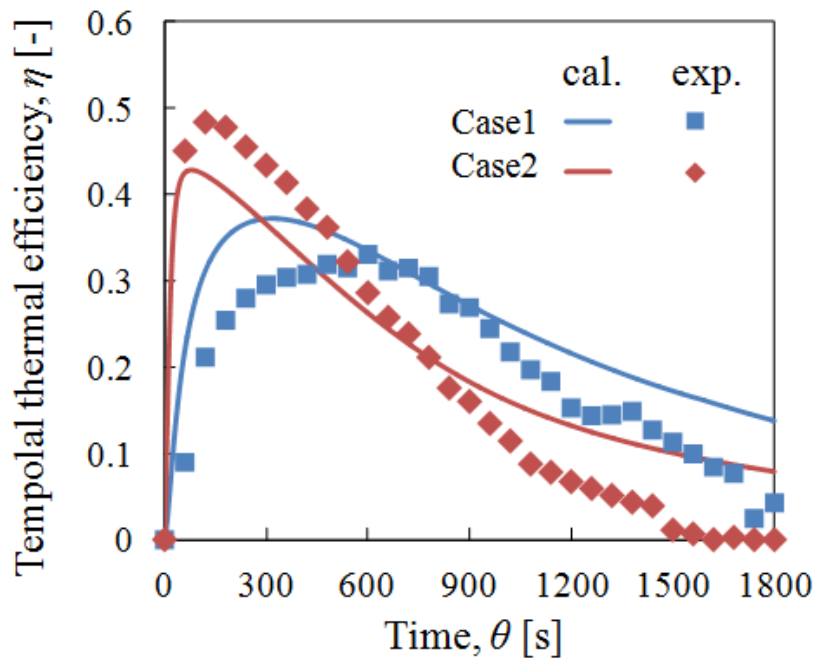
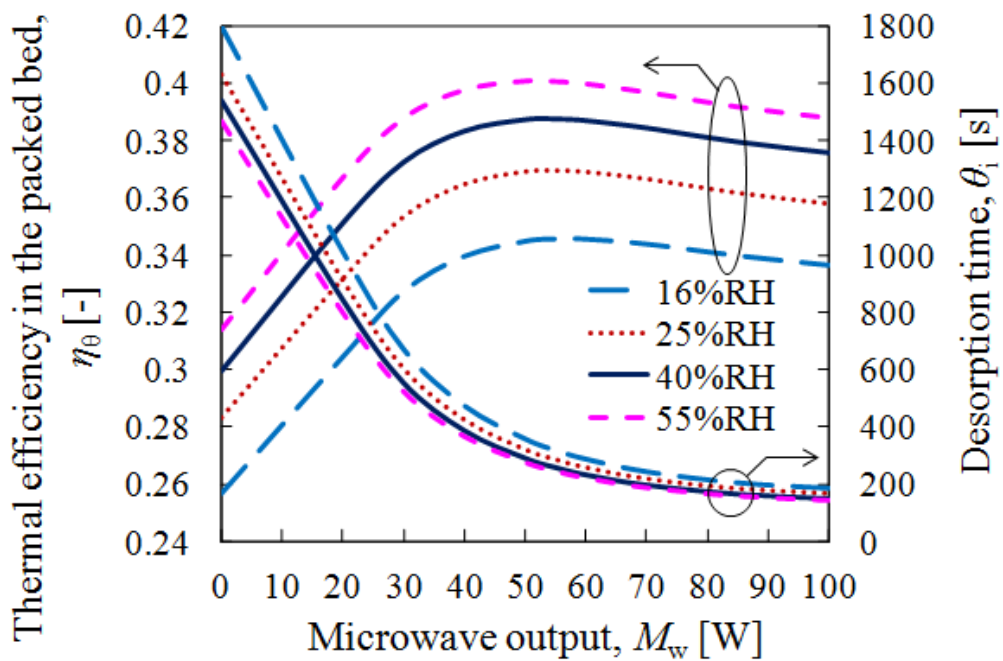
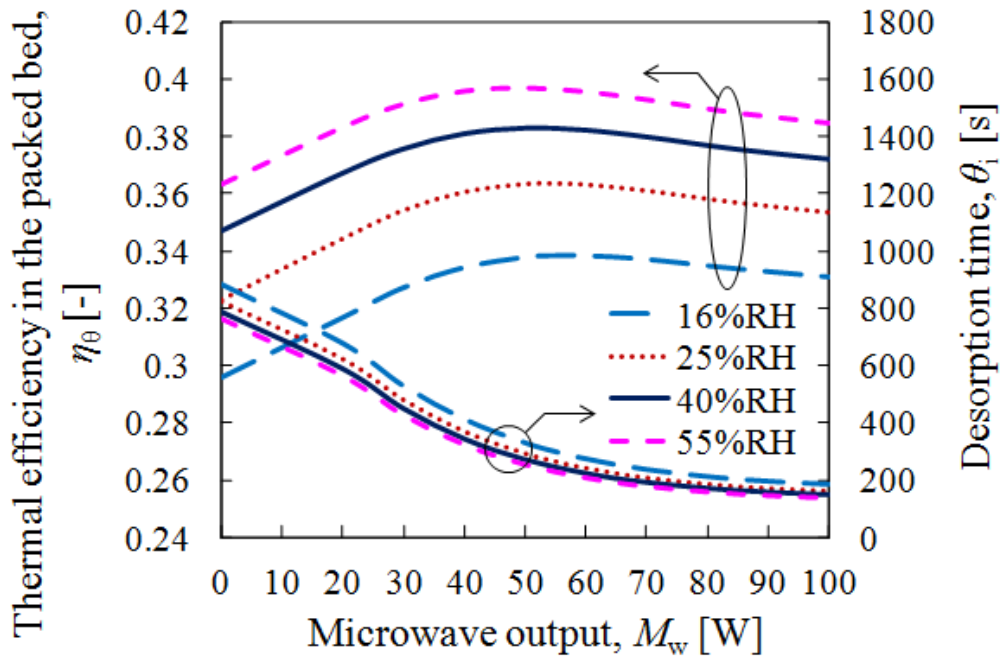


Fig. 3-9 Change in temporal thermal efficiency with time

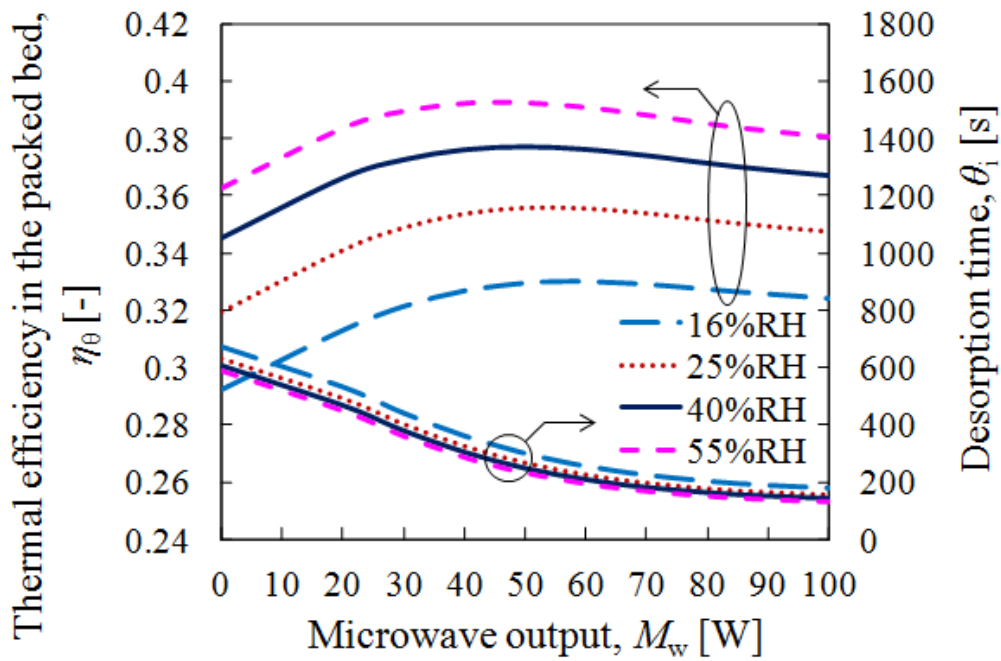


(a)  $T_G = 55^\circ\text{C}$

Fig. 3-10 Effect of microwave output on thermal efficiency in the packed bed and desorption time



(b)  $T_G = 75^\circ\text{C}$



(c)  $T_G = 100^\circ\text{C}$

Fig. 3-10 Effect of microwave output on thermal efficiency in the packed bed and desorption time

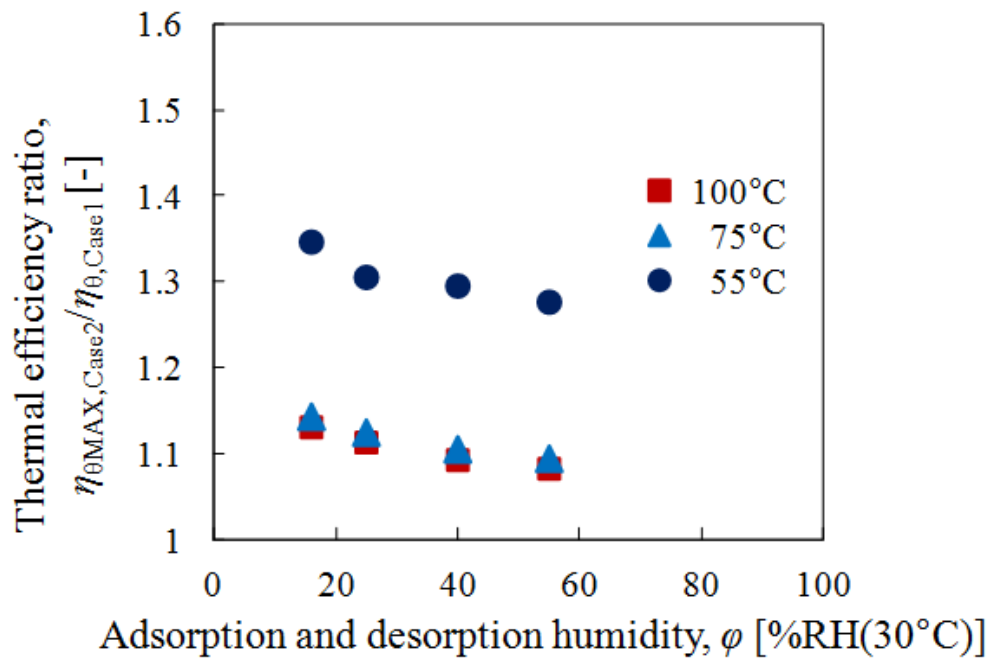


Fig. 3-11 Relationship between thermal efficiency ratio and humidity

#### 4. 結言

マイクロ波・温風加熱型デシカント空調機の合理的設計基準の確立を目的とし、ゼオライト充填層型吸着器について脱着過程の熱・物質移動に関する理論的検討を行った結果、以下の知見を得た。

- 1) マイクロ波・温風加熱脱着の解析モデルを構築した。解析結果と実測結果と比較により本解析の妥当性が示され、温度変化および吸着量変化に関する実験的考察が理論的にも裏付けられた。
- 2) 脱着の平均熱効率を指標とするマイクロ波・温風加熱脱着の有効性の評価を行い、マイクロ波・温風加熱脱着の熱効率は温風加熱脱着より高く、低温熱利用条件下および低吸着量条件下での脱着促進効果が期待できる。

## 記号

$A$	充填層壁表面積	$m^2$
$a_V$	粒子表面積	$m^2$
$C$	水蒸気濃度	$kg/m^3$
$C_s$	表面濃度	$kg/m^3$
$C_p$	比熱	$J/(kg \cdot K)$
$D_A$	拡散係数	$m^2/s$
$Gr$	グラスホフ数	-
$h$	熱伝達率	$W/(m^2 \cdot K)$
$k_F$	境膜物質移動係数	$m/s$
$M$	質量	$kg$
$M_W$	マイクロ波出力	$W$
$Nu$	ヌセルト数	-
$P$	マイクロ波投入量	$W/m^3$
$Pr$	プラントル数	-
$q$	吸着量	$kg/kg$
$q_{des}$	脱着量	$kg/kg$
$Q_{des}$	単位時間当たりの脱着熱量	$W$
$Q_s$	単位時間当たりの顕熱量	$W$
$Q_{side}$	単位時間当たりの側面放熱量	$W$
$r$	粒子半径	$mm$
$R$	充填層半径	$mm$
$Re$	レイノルズ数	-
$Sc$	シュミット数	-
$T$	温度	$^{\circ}C$
$u$	流速	$m/s$
$\Delta H$	脱着熱	$kJ/kg$



$\varepsilon$	空隙率	-
$\eta$	熱効率	-
$\theta$	時間	s
$\lambda$	有効熱伝導率	W/(m·K)
$\rho$	密度	kg/m <sup>3</sup>
$\varphi$	相对湿度	%RH

添え字

A	吸着材
aw	吸着水
B	充填層
G	流体
out	吸着管外

## 参考文献

- [1] 齋竹基仁, 窪田光宏, 渡辺藤雄, 松田仁樹, マイクロ波照射によるゼオライトからの吸着水の脱着促進, 化学工学論文集, 33, 1, pp. 53-57 (2007)
- [2] 渡辺藤雄, 炭谷一樹, 柏木強志, 高木智也, 黄宏宇, 架谷昌信, 小林敬幸, 各種ゼオライトからの水蒸気脱着に及ぼすマイクロ波照射の影響, 化学工学論文集, 35, 5, pp. 431-435 (2009)
- [3] S. Ito, H. Huang, F. Watanabe, H. Yuan, M. Hasatani and N. Kobayashi, Heat transfer during microwave-assisted desorption of water vapor from zeolite packed bed, *Drying Technology*, 30, 15, pp. 1707-1713 (2012)
- [4] 伊藤聖也, 渡邊藤雄, 黄宏宇, 架谷昌信, 小林敬幸, 低湿度空気を用いたゼオライト系水蒸気脱着のマイクロ波照射効果, 日本冷凍空調学会論文集, 32, 1, pp. 11-20 (2015)
- [5] 垣内博行, 下岡里美, 岩出美紀, 大島一典, 山崎正典, 寺田秀, 渡辺展, 武脇隆彦, 新規水蒸気吸着材 FAM-Z01 の基礎特性評価および吸着ヒートポンプへの適応性検討, 化学工学論文集, 31, 5, pp. 361-364 (2005)
- [6] 大島一典, 山崎正典, 武脇隆彦, 垣内博行, 児玉昭雄, 新規吸着材 FAM のデシカントシステムへの応用, 化学工学論文集, 32, 6, pp. 518-523 (2006)
- [7] S. Shimooka, K. Oshima, H. Hidaka, T. Takewaki, H. Kakiuchi, A. Kodama, M. Kubota and H. Matsuda, The evaluation of direct cooling and heating desiccant device coated with FAM, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 40, 13, pp. 1330-1334 (2007)
- [8] H. Huang, T. Oike, F. Watanabe, Y. Osaka, N. Kobayashi and M. Hasatani, Development research on composite adsorbents applied in adsorption heat pump, *Applied Thermal Engineering*, 30, 10, pp. 1193-1198 (2010)
- [9] 下岡里美, 山崎正典, 武脇隆彦, 赤繁悦史, 池畑富美代, 垣内博行, 渡辺藤雄, 窪田光宏, 松田仁樹, 高性能吸着ヒートポンプのための親水性活性炭の開発, 化学工学論文集, 32, 6, pp. 528-534 (2006)
- [10] 窪田光宏, 島田直樹, 松田仁樹, 黄宏宇, マイクロ波照射下におけるシリカゲルの加熱および水蒸気脱着特性, 日本冷凍空調学会論文集, 32, 3, pp. 403-410 (2015)

- [11] T. S. Ge, F. Ziegler and R. Z. Wang, A mathematical model for predicting the performance of a compound desiccant wheel (A model of compound desiccant wheel), *Applied Thermal Engineering*, 30, pp.1005-1015 (2010)
- [12] S. D. Antonellis, C. M. Joppolo and L. Molinaroli, Simulation, performance analysis and optimization of desiccant wheels, *Energy and Buildings*, 42, 9, pp. 1386-1393 (2010)
- [13] 大坂侑吾, 辻口拓也, 児玉昭雄, 局所物質移動係数を用いた簡易モデルによるデシカントローターの性能予測, *日本冷凍空調学会論文集*, 29, 1, pp. 207-215 (2012)
- [14] 辻口拓也, 児玉昭雄, 吸着材デシカントローターの最適操作設計指針, *日本冷凍空調学会論文集*, 29, 1, pp. 107-118 (2012)
- [15] R. Yoshie, F. Yamaguchi, K. Hoshino, Y. Momoi, A. Satake and H. Yoshino, Development of numerical simulation method for predicting dehumidification performance of desiccant rotors, *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, 78, 686, pp. 341-349 (2013)
- [16] 鍋島佑基, 長野克則, 外川純也, 稚内層珪質頁岩を用いたデシカント空調の開発 ー第7報: 外気条件に対する予冷・再生温度の検討ー, *日本冷凍空調学会論文集*, 31, 2, pp. 111-121 (2014)
- [17] S. D. Antonellis, M. Intini, C. M. Joppolo and F. Romano, On the control of desiccant wheels in low temperature drying processes, *International Journal of Refrigeration*, 70, pp. 171-182 (2016)
- [18] 宮崎隆彦, 秋澤淳, 上田祐樹, 進藤伸二, 神戸正純, 高塚威, 固定床型デシカント換気空調機の開発 第2報: 蓄熱ユニットを備えたデシカント換気空調システムの吸着材再生方式に関する検討, *日本冷凍空調学会論文集*, 26, 2, pp.533-542 (2009)
- [19] 化学工学会編, 改訂4版 化学工学便覧, 丸善出版, p. 861 (1978)
- [20] 平澤良男, 太田竜真, 竹越栄俊, 水分吸着粒子充てん層の有効熱伝導率に関する研究, *日本冷凍空調学会論文集*, 23, 2, pp. 113-119 (2012)
- [21] 菱田幹雄, 辻俊博, 垂直平板の自然対流熱伝達, *日本機械学会論文集 B 編*, 47, 424, pp.2314-2323 (1981)
- [22] 化学工学会編, 改訂4版 化学工学便覧, 丸善出版, p. 864 (1978)



## 終章

## 1. 本研究で得られた結果

本研究は経済発展に伴うエネルギー消費量増大，化石燃料使用に伴う環境問題の顕在化といった背景に鑑み，環境保全と経済発展の両立可能な技術の開発を目指した．その中でも，未利用かつ多量に排出されている 100°C 以下の熱エネルギーが有効利用可能な機器として吸着現象を利用したデシカント空調機について着目し，エネルギー有効利用による化石燃料消費量ならびに環境負荷の低減に寄与する機器の設計・開発を目指した．

デシカント空調機の高性能化のために，課題の一つである脱着の高度化(高速脱着，脱着量増大，脱着効率向上)に対して直接加熱であるマイクロ波加熱を用いることを提案し，マイクロ波照射型ハイブリッドデシカント空調機について，供給空気の露点温度，除湿空気量等の様々な要求に対して必要能力を満たしつつ低装置体積とする設計(合理的設計)の基準を確立することを最終目的とした．また，目的達成に向け，マイクロ波・温風加熱併用加熱時の熱・物質移動挙動を解明することが重要であると考え，一連の研究を行った結果を以下にまとめる．

第 1 章では，マイクロ波加熱時の脱着促進効果の把握および熱移動挙動の定量的把握を目的として，ゼオライト充填層において吸着過程と同一湿度条件下でのマイクロ波・温風併用加熱の実験的検討を行った．水蒸気加熱脱着実験により，マイクロ波がゼオライト充填層においても速やかに到達し，吸収されることが確認された．また，実験値を基にゼオライト充填層の各消費熱量を算出し，本実験系の熱移動挙動を明らかにした．さらに，熱効率を指標とした評価により，マイクロ波加熱脱着は脱着初期に効果的であることを示した．

第 2 章では，デシカント空調機システムの脱着操作が吸着過程よりも低湿度空気を用いることを考慮した検討を行った．吸着過程よりも低湿度空気脱着条件下で脱着実験を行うことで，第 1 章で提案したマイクロ波評価手法の確立と吸着過程と同湿度条件下とのマイクロ波加熱効果の相違について評価した．その結果，熱収支評価法が第 1 章と同様に適用可能であること，低湿度空気条件下でも脱着率，脱着速度が向上することを認めた．得られた実験結果を基に試算を行った結果，従来の温風系のデシカント空調機へマイクロ波加熱を導入することにより，除湿空気量の増大もしくは吸・脱着器体積の低減が可能になる

ことを示唆した。

第3章では、マイクロ波・温風併用加熱吸着器の熱・物質移動挙動を把握し、マイクロ波照射方法の最適化を目的とし、その第一歩としてこれまでに実験的に検討したゼオライト充填層について熱・物質移動に関する理論的検討を行った。シミュレーションモデルを構築し、解析結果と実験結果の比較を行った結果、本解析の妥当性が示され、温度変化および吸着量変化に関して行ってきた考察が理論的にも裏付けられた。さらに、平均熱効率を指標としたマイクロ波・温風併用加熱脱着の有効性評価を行った結果、低温熱利用条件および低吸着量条件下でマイクロ波・温風加熱が効果的であることを示した。

## 2. 今後の展望

本論文は、マイクロ波加熱を用いた水蒸気脱着の高度化(高速脱着、脱着量増大、脱着効率向上)に関して、実験および理論的に検討を行い、得られた結果をまとめたものである。マイクロ波加熱を水蒸気脱着に用いることで未利用低温排熱の利用促進に貢献できると確信している。しかし、本研究の最終目的であるマイクロ波・温風併用ハイブリッドデシカント空調機の合理的設計基準を確立し、本デシカント空調機を広く普及させるためには検討すべき課題が存在する。以下に今後解決すべきであると考えられる課題を示す。

### 1) マイクロ波照射効率を含めたエネルギー消費量検討

本論文の一連の研究でマイクロ波加熱時の熱・物質移動挙動について検討したが、その際に使用したマイクロ波投入エネルギーは充填層熱消費量(吸収量)基準で算出している。デシカント空調機の高性能化を行うためには、投入電力量を考慮した詳細検討が重要となる。

マイクロ波加熱効率の向上のためには、マグネトロン発振効率(現状：74%程度[1])やマイクロ波吸収効率(現状：84%程度(電子レンジ(EMO-FM23C, 三洋電機(株)製)により水を加熱することで別途実験的に算出))の向上が必要である。マグネトロン発振効率は理論限界が約78%[2]とされており、わずかではあるが効率向上の見込みは残されている。また、マイクロ波吸収効率について、吸収効率算出には電子レンジを用いたが、調理庫内に存在する受け皿等が存在するため、加熱対象に対して最適化した吸収効率といえない。従って後述の

2)マイクロ波・温風加熱ハイブリッドデシカント空調機用吸着器の設計により向上余地が存

在すると考えられる。さらに機器効率向上以外では、マイクロ波照射時間の最小化(例：再生初期のみ照射)の検討もエネルギー消費量の低減に重要な課題と考えられる。

## 2) マイクロ波・温風加熱ハイブリッドデシカント空調機用吸着器の設計

本論文では、マイクロ波照射場の電界強度が一定にした条件で検討を行い、マイクロ波加熱効果を検討した。また、吸着器については現在デシカント空調機で一般的に用いられるハニカムローターではなく充填層型で検討した。今後、吸着器のスケールアップや形状を変化させることで、マイクロ波の減衰や、再生(脱着)対象にマイクロ波を伝搬する導波管の形状を考慮し、高吸収効率かつ均一加熱可能な吸・脱着器を設計する必要がある。

## 3) 超低露点温度空気製造におけるマイクロ波加熱効果

本論文では、リチウムイオン電池製造等で用いられる露点温度 $-50^{\circ}\text{C}$ 以下のような超低露点温度空気製造時に必要な吸着材再生(脱着)操作については検討していない。超低露点温度空気製造にマイクロ波加熱が有効であると認められれば、本システムの普及につながると考えられる。

最後に、本研究で取り組んだ研究の成果と上記で示した課題の検討を行うことで、今後未利用熱エネルギー有効利用技術の発達、ひいては経済発展と環境保全が両立可能な社会実現への一助となることを願い、終章の結びとする。



## 参考文献

- [1] 加藤直也, 高効率と負荷安定性の改善とを実現した電子レンジ用マグネトロン 2M403/E4500, 東芝レビュー, 70, 2, pp. 52-55 (2015)
- [2] 平成 25 年度エネルギー使用合理化促進基盤整備事業 (機械器具等の基準検討に係る調査) 報告書, 株式会社三菱総合研究所, pp. 46-49 (2014)



## 謝辞

本研究は，名古屋大学工学研究科化学システム工学専攻・小林敬幸准教授の御指導の下に行われたものであります。小林敬幸准教授には終始一貫したご指導を賜りました。ここに衷心より深く御礼申し上げます。

本研究を行うにあたり，愛知工業大学工学部機械学科・架谷昌信特任教授，愛知工業大学総合技術研究所・渡邊藤雄教授には日頃より貴重なご教示とご指導を賜りました。ここに深謝申し上げます。中国科学院広州能源研究所・黄宏宇先生には公私にわたり有益なご指導，ご協力を賜りました。ここに深甚なる謝意を表します。

本論文を作成するにあたり，名古屋大学大学院工学研究科化学システム工学専攻・北英紀教授，名古屋大学大学院工学研究科物質プロセス工学専攻・高見誠一教授，名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻・奥宮正哉教授には有意義なご意見をいただきました。ここに感謝の意を表します。

また，大学院工学研究科化学システム工学専攻窪田光宏先生には実験装置作製およびデータ測定において多岐にわたるご示唆をいただきました。ここに謹んで感謝いたします。

末筆となりましたが，本研究は李軍氏をはじめとする名古屋大学工学部化学・生物工学専攻分子化学工学分野・小林研究室および愛知工業大学工学部機械学科架谷・渡邊研究室の卒業生，在校生の皆様のご協力があつて進められました。ここに心から謝意を表します。

2018年3月

伊藤聖也



論文題目	公表の方法及び時期	著者
I. 学会誌等		
1. Heat Transfer during Microwave-Assisted Desorption of Water Vapor from Zeolite Packed Bed	Drying Technology Vol. 30, No. 15, pp. 1707-1713 (2012)	Seiya ITO Hongyu HUANG Fujio WATANABE Haoran YUAN Masanobu HASATANI Noriyuki KOBAYASHI
2. 低湿度空気を用いたゼオライト系水蒸気脱着のマイクロ波照射効果	日本冷凍空調学会論文集 Vol. 32, No. 1, pp. 11-20 (2015)	伊藤聖也 渡邊藤雄 黄宏宇 架谷昌信 小林敬幸
3. A Theoretical Study of Heat and Mass Transfer in Water Vapor Desorption using Both Microwaves and Hot Air	International Journal of Engineering Research and Technology Vol. 6, No. 4, pp. 732-738 (2017)	Seiya ITO Fujio WATANABE Jun Li Hongyu HUANG Masanobu HASATANI Noriyuki KOBAYASHI

II. 国際会議		
1. Influence of Microwave Irradiation on Water-vapor Desorption Capacity of Zeolites	2010 International Symposium on Next-generation Air Conditioning and Refrigeration Technology, Tokyo, Japan (2010)	Seiya ITO Fujio WATANABE Masanobu HASATANI Hongyu HUANG
2. Research on Microwave Irradiation Effect in Water-vapor Desorption from Zeolites	17th International Drying Symposium, Magdeburg, Germany (2010)	Fujio WATANABE Hongyu HUANG Seiya ITO Masanobu HASATANI Noriyuki KOBAYASHI
3. Heat Transfer Behavior of Microwave Irradiation Water-Vapor Desorption in Zeolite Packed Bed	7th Asia-Pacific Drying Conference, Tianjin, China (2011)	Seiya ITO Hongyu HUANG Fujio WATANABE Masanobu HASATANI Noriyuki KOBAYASHI
III. その他		
1. Microwave Irradiation Effect in Water-vapor Desorption from Zeolites	Microwave Heating, In Tech, pp.335-350 (2011)	Hongyu HUANG Seiya ITO Fujio WATANABE Masanobu HASATANI Noriyuki KOBAYASHI