

ゼオライト/水系の温風・マイクロ波併用低湿度空気脱着 Effects of Microwave Irradiation on Zeolite-based Water-vapor Desorption for Using Lower Humidity Air

渡辺藤雄[†], 架谷昌信^{††}, 小林敬幸^{†††}

Fujio WATANABE[†], Masaobu HASATANI^{††}, Noriyuki KOBAYASHI^{†††}

Abstract The author has proposed a hybrid air-conditioner employing both heat and microwave irradiation for achieving greater compactness and higher output of a desiccant air-conditioner. In this research, the effectiveness of this system has been evaluated for promoting desorption of adsorbed water using microwave irradiation and heating under two conditions: air with the same humidity as that in the adsorption process (Case-1) and air with humidity lower than that in the adsorption process (Case-2). This evaluation was done using the desorbability and desorption rate as indicators. In the experiment, measurements were taken of hot air temperature due to the zeolite-filled layer (50–100°C), microwave intensity (30–100 W), and temperature in the filled layer and humidity at the intake and outlet of the layer, in the desorption process under three types of initial conditions for adsorbed amount. The results are given below. 1) The heat balances for Case-1 and Case-2 can be evaluated using the same technique. 2) The desorption time and thermal efficiency of the system with combined use of microwaves, taking the hot air system desorbability in Case-2 as a reference standard, are respectively a minimum of 0.3 times and a maximum of 1.3 times the values in the hot air system. This suggests that, compared to conventional hot air heating type desiccant air conditioners, it is possible to increase the amount of treated air by 1.25 times, and reduce the adsorption rotor cross-sectional area by 0.8 times. 3) Adoption of microwaves will contribute to efficient, high-level desorption.

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、冷凍操作が行われる。この調湿性能、冷凍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。この中で脱着速度は、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

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。

この課題に対して、著者らは脱着過程へマイクロ波を導入した新たなマイクロ波併用型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、他の被加熱物質にくら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。そのため、脱着率、脱着速度の向上が期待でき、補助熱源としてマイクロ波を利用するデシカント空調機では供給エネルギー源の低減、ならびに装置のコンパクト化が可能になると期待される。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

† 愛知工業大学 総合技術研究所 (豊田市)

†† 愛知工業大学 工学部 機械学科 (豊田市)

††† 名古屋大学大学院工学研究科 (名古屋市)

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¹⁾と小さく、水の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^{2,3)}、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⁴⁾などが示された。シリカゲルでは、シラノール基が多いほどマイクロ波照射による発熱量が大きく、平衡脱着量は初期吸着量の増大に比例すること⁵⁾、初期脱着速度はマイクロ波照射強度に比例すること⁶⁾などが報告されている。

著者らは、これまで吸着過程と同一湿度条件下での温風・マイクロ波併用加熱によるゼオライトの水蒸気脱着を検討し、温風・マイクロ波併用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本系の脱着速度は吸着率の減少に伴って減少すること⁷⁾、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⁸⁾を報告している。また、ゼオライト充填層の水蒸気脱着における熱収支計算を行い、温風・マイクロ波併用加熱脱着における脱着エネルギー消費率は温風加熱脱着の最大1.7倍となることを示した⁹⁾。

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用空気がしばしば採用される。この方式で供給される脱着用空気は外気湿度以下、吸着過程で製造された低湿度空気以上の湿度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とマイクロ波加熱による脱着が併起し、これまでの一連の研究^{4,6)}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、温風・マイクロ波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。1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、温風・マイクロ波併用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、前報⁹⁾の吸着過程と同一の湿度条件下の脱着実験から新たに脱着率、脱着速度を算出し本実験条件下の結果との比較を行った。

2. 実験

2.1 吸着材

吸着材には前報⁹⁾で使用したゼオライト DF-9(13X 型、平均粒子径 230 μ m、平均細孔径 0.8nm(ユニオン昭和(株))を使用した。本試料について、前報の 30 $^{\circ}$ C、45 $^{\circ}$ C の結果に加えて新たに 15 $^{\circ}$ C で測定した吸着等温線の測定結果を Fig.1 に示す。温度条件によらず本ゼオライトは I 型の水蒸気吸着等温線を示し、吸・脱着のヒステリシスは小さい。平衡吸着量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、 $p/p_0=0.90$ 基準の吸着量(q_a)は 15, 30, 40 $^{\circ}$ C でそれぞれ 0.349, 0.347 および 0.335 kg/kg となる。これらの吸着等温線に次式(1)に示す Clausius-Clapeyron 式を適用して 15, 30 $^{\circ}$ C および 30, 45 $^{\circ}$ C について吸着量ごとの吸着熱(ΔH_{ads})および脱着熱(ΔH_{des})を計算し、Table 1 にはそれぞれ平均温度((15+30)/2=22.5 $^{\circ}$ C, (30+45)/2=37.5 $^{\circ}$ C)の値として示した。

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

ΔH_{des} は ΔH_{ads} より大きく ΔH_{ads} の最大 1.1 倍となること、および ΔH_{ads} , ΔH_{des} とも吸着量の増加に伴ってやや小さくなる傾向にあること、温度上昇に伴って約 1.4 倍になることが認められる。なお、10 回のマイクロ波照射吸・脱着を行った試料においても吸着等温線の形状および ΔH_{ads} , ΔH_{des} 値に大きな変化は観察されなかった。

2.2 実験装置および方法

脱着実験装置は前報⁹⁾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 に示すように流通式吸着管(吸着材充填量: 5.0g(30 $^{\circ}$ 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。

実験は以下の手順で行った。1) あらかじめ所定温度(30 $^{\circ}$ 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, 吸着管出入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(安立計器製, FL-2000)および吸着管の入口, 出口に付設した湿度計(PosiTector DPM(DeFelsko Corp.)), 測定精度 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$, $\pm 3\%RH$)により測定した。

実験は以下の条件で行った。

- 初期吸着量: $q_i=0.310, 0.318, 0.330$ 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: $T_g=55, 75, 100^{\circ}\text{C}$
- マイクロ波強度: $M_w=30\text{W}, 50\text{W}, 100\text{W}$
- 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)

3. 結果および考察

本稿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, 前報⁸⁾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報と同様の熱収支評価を行った。つぎに, 前報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, 以下では前報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

$q_i=0.318\text{kg/kg}$ 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_d/q_i)の経時変化を Fig. 3 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(θ_e)の q_d/q_i 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。

$q_i=0.318\text{kg/kg}$ 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用(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. 4 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

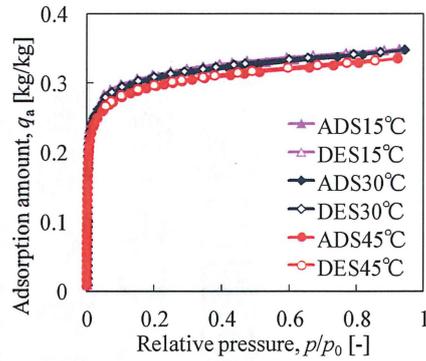


Fig.1 Adsorption/desorption isotherms for zeolite

Table 1 Adsorption/desorption heats

q_a [kg/kg]	Average temperature			
	22.5°C		37.5°C	
	ΔH_{ads} [kJ/kg]	ΔH_{des} [kJ/kg]	ΔH_{ads} [kJ/kg]	ΔH_{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

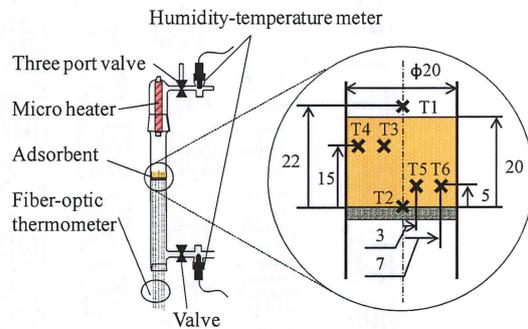


Fig.2 Schematic diagram of the adsorption column

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, 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, 脱着率は脱着開始後から急激に増大することなどの 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_{des}), 充填層排出熱量(Q_{out})および充填層側面放熱量(Q_{side})基準の熱収支計算を行った。その結果を Fig. 5 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などは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。これは加熱脱着に低湿度空気供給による濃度差脱着が加わったためと考えられる。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後と比較すると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. 6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。

3.2 脱着率および熱効率

Figures 3, 4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_d/q_i 値が異なった。Figs. 7, 8にCase-1およびCase-2の実験条件ごとの q_d/q_i 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_d/q_i 値はマイクロ波の有無によらずCase-1のそれより大きい。例えば $T_g=55^\circ\text{C}$ を基準に見るとCase-2の温風系、50Wマイクロ波併用系の q_d/q_i 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_d/q_i 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_i によらず q_d/q_i 値は M_w の増大に伴って大きくなる。iv) q_i の増大に伴って q_d/q_i 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

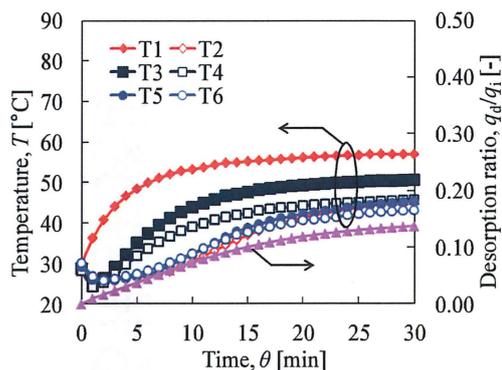


Fig.3 Temperature and desorption ratio in the hot air experiment ($T_g=55^\circ\text{C}$, $q_i=0.318\text{kg/kg}$)

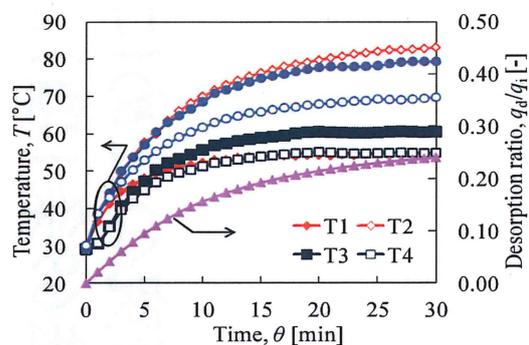


Fig.4 Temperature and desorption ratio in the microwave experiment ($T_g=55^\circ\text{C}$, $M_w=50\text{W}$, $q_i=0.318\text{kg/kg}$)

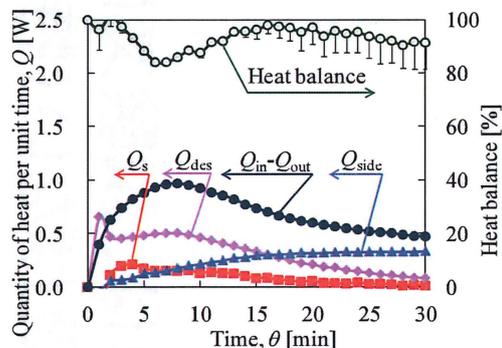


Fig.5 Heat consumption and heat balance for the hot air experiment ($T_g=55^\circ\text{C}$, $q_i=0.318\text{kg/kg}$)

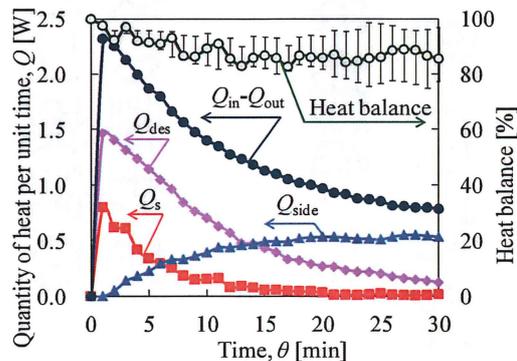


Fig.6 Heat consumption and heat balance for the microwave experiment ($T_g=55^\circ\text{C}$, $M_w=50\text{W}$, $q_i=0.318\text{kg/kg}$)

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 $q_{d,e}/q_i$ 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_i 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_i の増大に伴って $q_{d,e}/q_i$ 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, Figs. 3, 4 の結果を以下のように再整理した。具体的には, Fig. 1 の 30°C の脱着等温線に着目し, $(p/p_0)_{30^\circ\text{C}}$ に対する $p_{30^\circ\text{C}}$, $q_{30^\circ\text{C}}$ を求める。つぎに Table 1 を用いて 30°C と入口温風到達温度の平均温度に相当する ΔH_{des} 値を外挿計算し, これらの値を式 (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 p/p_0 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_i の差を理論温風脱着量 $q_t (=q_i - q_{\text{RH}})$ とし, 実測の時間 θ における脱着量 ($q_{d,\theta}$) を q_t で除した $q_{d,\theta}/q_t$ 値を求め, M_w ごとの θ と $q_{d,\theta}/q_t$ 値の関係を求めた。Figures 9, 10 に Case-1 および Case-2 について $T_g=55^\circ\text{C}$, $q_i=0.318\text{kg/kg}$ 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 $q_{d,\theta}/q_t$ 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 θ_e の $q_{d,\theta}/q_t$ 値と同値に到達するマイクロ波併用系の所要時間 θ_i , ならびに Case-1 と同様の手法により次式 (2) および (3) から算出される充填層の θ_e 間の平均熱効率 η_e および時間 θ_i までの平均熱効率 η_{θ_i} を Table 2 に示した。

$$\eta_e = \sum_{\theta_i=0}^{\theta_e} \left(\frac{Q_{\text{des}}}{Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}}} \right)_{\theta_i} \quad (2)$$

$$\eta_{\theta_i} = \sum_{\theta_i=0}^{\theta_i} \left(\frac{Q_{\text{des}}}{Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}}} \right)_{\theta_i} \quad (3)$$

Figures 9, 10 より以下がわかる。v) $q_{d,\theta}/q_t$ 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) θ_e におけるマイクロ波併用系の $q_{d,\theta}/q_t$ 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, $M_w \geq 50\text{W}$ では 1 以上となる。つぎに, Table 2 より以下がわかる。vii) マイクロ波併用系の θ_i 値は Case-1, Case-2 と同様に温風系の 1/10-4/5 である。viii) η_e 値は, Case-1 に比べて Case-2 において大きい。ix) Case-1 では $M_w=30\text{W}$ の場合を除いて T_g , M_w によらず, η_e 値はほぼ同値である。Case-2

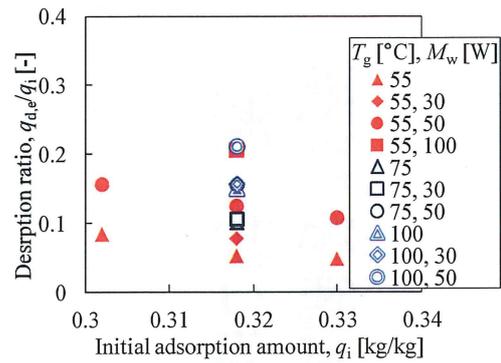


Fig.7 Relationship between $q_{d,e}/q_i$ and q_i for Case-1

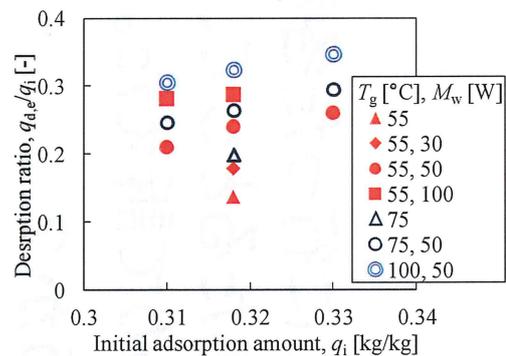


Fig.8 Relationship between $q_{d,e}/q_i$ and q_i for Case-2

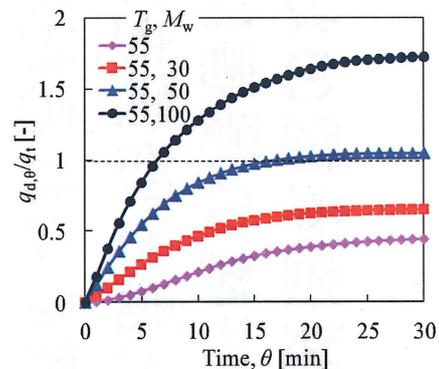


Fig.9 Relationship between $q_{d,\theta}/q_t$ and θ for Case-1

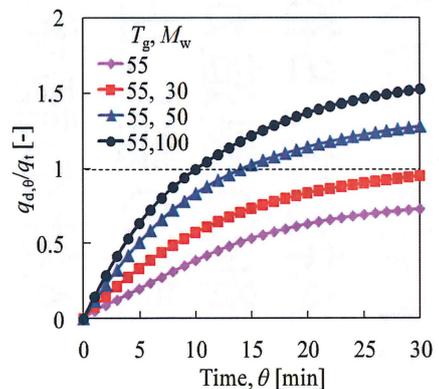


Fig.10 Relationship between $q_{d,\theta}/q_t$ and θ for Case-2

Table 2 Experimental conditions and results

	Humidity of desorption air	Initial adsorption amount	Desorption temperature	Intensity of micro-wave	Time	Efficiency defined by Eq. (1)	Efficiency defined by Eq. (2)
						η_e [-]	$\eta_{\theta i}$ [-]
	RH [%](30°C)	q_i [kg/kg]	T_g [°C]	M_w [W]	θ_i [s]		
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

では $T_g=55^\circ\text{C}$, $q_i=0.330\text{kg/kg}$, $M_w=50\text{W}$ の場合を除いてマイクロ波併用系の η_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 η_e 値より大きい。xi)Case-2 の η_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 $T_g=55^\circ\text{C}$, $q_i=0.318\text{kg/kg}$ では温風系に比べてマイクロ波併用系の θ_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。因みに, 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, $M_w=50\text{W}$ の条件下で空気処理量の 1.25 倍の増大, もしくは同一空気処理量のもとでは約 20%のローター断面積の縮小につながる試算される。また, $M_w \geq 50\text{W}$ で $q_{d,\theta}/q_i \geq 1$ 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, θ_e 基準では熱効率はやや低下するものの, θ_e 基準の温風系の出口空気湿度が 30°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°C , $RH=1.1\%$ となる。温風系の $\eta_e=0.46$ と同等の $\eta_{\theta i}$ 値に相当する $q_{d,\theta}/q_i$ を用いて推算しても 30°C , $RH=1.2\%$

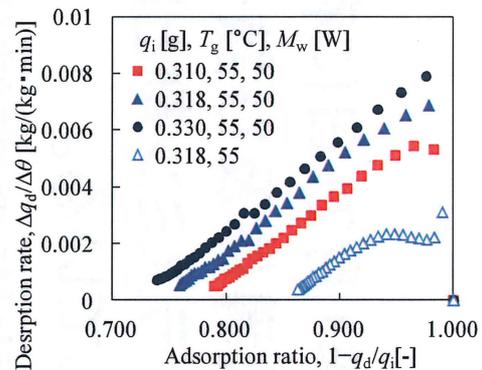


Fig.11 Desorption rate for Case-2

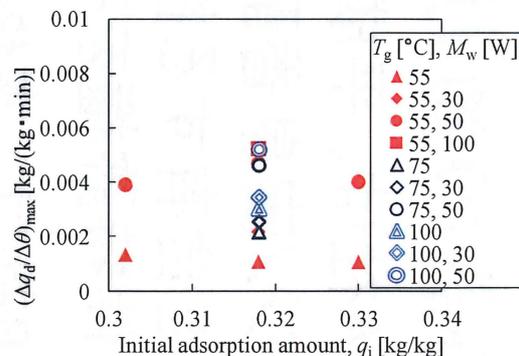


Fig.12 Relationship between $(\Delta q_d/\Delta\theta)_{\max}$ and q_i for Case-1

縮小につながると試算される。また、 $M_w \geq 50W$ で $q_{d,\theta}/q_t \geq 1$ 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、 θ_e 基準では熱効率はやや低下するものの、 θ_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 η_{th} 値に相当する $q_{d,\theta}/q_t$ を用いて推算しても $30^\circ C$ 、 $RH=1.2\%$ となる。つぎに、xi)は Q_s および $Q_{in}-Q_{out}$ の増大による、vii)は次節で脱着速度と関連させて考察を行う。

3.3 脱着速度

Figures 3, 4 で示した脱着率 q_d/q_i の経時変化より、脱着速度 $(\Delta q_d/\Delta \theta)$ を脱着経過単位時間 $(\Delta \theta)$ 当たりの脱着量差 (Δq_d) として求め、吸着率 $(1-q_d/q_i)$ に対して整理した図を Fig. 11 に示す。マイクロ波併用系の $\Delta q_d/\Delta \theta$ 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、Case-1 の温風系ではそれぞれ $1-q_d/q_i=0.98$ 付近で最大となりその後減少する。Case-2 では $1-q_d/q_i=0.99$ 付近での最大ピークと、その後やや減少した後の $1-q_d/q_i=0.94$ 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 $(\Delta q_d/\Delta \theta)_{max}$ が異なった。そこで、Fig. 12, Fig. 13 に Case-1 および Case-2 の T_g 、 M_w に対する q_i と $(\Delta q_d/\Delta \theta)_{max}$ の関係を示す。なお、Case-2 の2ピークは Fig. 2 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. 13 には第2ピークを $(\Delta q_d/\Delta \theta)_{max}$ 値として示した。

Figure 11 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 $q_{d,\theta}/q_t$ 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。Figures 12, 13 より、マイクロ波併用系の $(\Delta q_d/\Delta \theta)_{max}$ 値は、Case-1, 2 によらず温風系に比べて大きく $T_g=55^\circ C$ 、 $q_i=0.318kg/kg$ 基準では $M_w=50W$ 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報⁶⁾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. 13 より、マイクロ波併用系の $(\Delta q_d/\Delta \theta)_{max}$ 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. 11 で吸着率が大きいほど吸着速度が大きいことと対応している。

4. 結言

低湿度空気脱着条件下(Case-2)の温風・マイクロ波併用

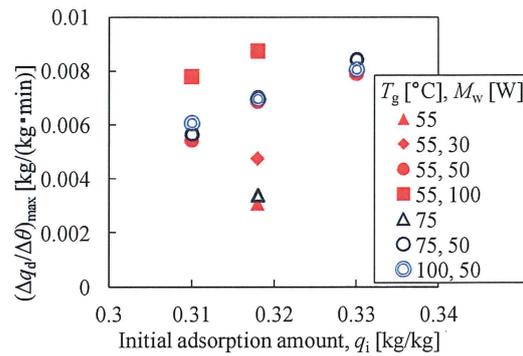


Fig.13 Relationship between $(\Delta q_d/\Delta \theta)_{max}$ and q_i for Case-2

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、処理空気量の増大、もしくは装置容積の低減が可能になることを示唆している。
- 4) マイクロ波の導入は効率的な高度脱着に寄与する。

References

- 1) Koshijima, T., Shibata, C., Toishi, T., Norimoto, K. and Yamada, S., "Microwave Heating Technology Collection", 2004, NTS Inc., Tokyo, pp. 9-10. (in Japanese)
- 2) Ohgushi, T. and Nagae, M., Quick Activation of Optimized Zeolites with Microwave Heating and Utilization of Zeolites for Reusable Desiccant, *Journal of Porous Materials*, 2003, **10** (2), pp. 139-143.
- 3) Ohgushi, T. and Nagae, M., Durability of Zeolite Against Repeated Activation Treatments with Microwave Heating, *Journal of Porous Materials*, 2003, **12** (4), pp. 265-271.
- 4) Miyazaki, T., Akisawa, A., Ueda, Y., Shindoh, S., M. Godo M. and Takatsuka, T., Development of a Ventilation and Air-conditioning System using Fixed Bed Desiccant Units Part 2: Study on the Regeneration Method of the Desiccant Ventilation and Air-conditioning System with a Thermal Storage Device, *Transactions of the Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers*, 2009, **26** (4), pp. 533-542. (in Japanese)
- 5) Kubota, M., Shimada, N., Hanada, T. and Matsuda, H., Proceedings of 2010 JSRAE Annual Conference, Ishikawa (2010), pp. 161-164. (in Japanese)
- 6) Kubota, M., Hanada, T., Yabe, S., Kuchar D. and Matsuda,

- H., Water Desorption Behavior of Desiccant Rotor under Microwave Irradiation, *Applied Thermal Engineering*, 2011, **31** (8-9), pp.1482-1486.
- 7) Saitake, M., Kubota, M., Watanabe F. and Matsuda H., Enhancement of Water Desorption from Zeolite by Microwave Irradiation, *Kagaku kogaku ronbunshu*, 2007, **33** (1), pp. 53-57. (in Japanese)
- 8) Watanabe, F., Sumitani, K., Kashiwagi, T., Takagi, T., Huang, H., Hasatani M. and Kobayashi N., Influence of Microwave Irradiation on Water-vapor Desorption from Zeolites, *Kagaku kogaku ronbunshu*, 2009, **35** (5), pp. 431-435. (in Japanese)
- 9) Ito, S., Huang, H., Watanabe, F., Yuan, H., Hasatani, M. and Kobayashi, N., Heat Transfer during Microwave-Assisted Desorption of Water Vapor from Zeolite Packed Bed, *Drying Technology: An International Journal*, 2012, **30** (5), pp. 1707-1713.