

マイクロ波・温風併用加熱脱着の熱・物質移動解析

[研究代表者] 渡辺藤雄 (総合技術研究所)
[共同研究者] 架谷昌信 (工学部機械学科)

研究成果の概要

デシカント空調機の高性能化を目的として提案したマイクロ波・温風併給デシカント空調機システムについて、デシカント空調機システムの吸着ローター部を想定したゼオライト充填層における水蒸気脱着の熱・物質移動現象を理論的に検討し、実験結果との比較によるマイクロ波・温風併用加熱脱着の有効性の検討を行った。吸着材充填層内温度分布、脱着量の経時変化の解析結果はそれらの実験結果と比較的良好な一致を示し、実験的考察が理論的に裏付けされた。また、温風加熱脱着に対するマイクロ波・温風併用加熱脱着の理論的平均熱効率比は温風温度および空気湿度の低下に伴って大きくなり最大約1.4倍になることを認めた。

研究分野：エネルギー変換工学

キーワード：デシカント空調機、マイクロ波、吸着、脱着、低温排熱、ゼオライト

1. 研究開始当初の背景

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。この方式では空気処理量を確保するため、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のローター断面基準面積比を大きくする必要がある。そのためローター単位容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腔率、吸着材充填密度はそれぞれ0.7以上および10kg/m³程

度以下となり、吸着ローターの容積は同能力を利用する吸着式ヒートポンプ用吸着器容積の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形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、新たに吸着水の脱着にマイクロ波加熱を導入したマイクロ波・温風併用加熱型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、マイクロ波・温風併用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処理空気量の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⁾。そこで本研究ではマイクロ波・温風併用加熱型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、

Kakiuchi らを中心とする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⁵⁾, 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-Z02 に比べて FAM-Z05 はより低温で再生できることを報告した⁷⁾. 著者らは, 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, Shimooka ら⁷⁾ 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, Kubota ら¹⁰⁾ は 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を報告した. 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⁾, Miyazaki ら¹⁸⁾ はマイクロ波加熱による再生過程の解析を行い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を報告している. しかし, 著者らが提案したマイクロ波・温風併用加熱型吸着器の熱・物質移動に関する取り組みはほとんどなされていない.

2. 研究の目的

本研究では, マイクロ波・温風併用加熱脱着の熱・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 段階として前報⁴⁾ の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.

3. マイクロ波・温風併給脱着の熱・物質移動モデル

前報⁴⁾ のマイクロ波・温風併用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の概略を Fig. 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

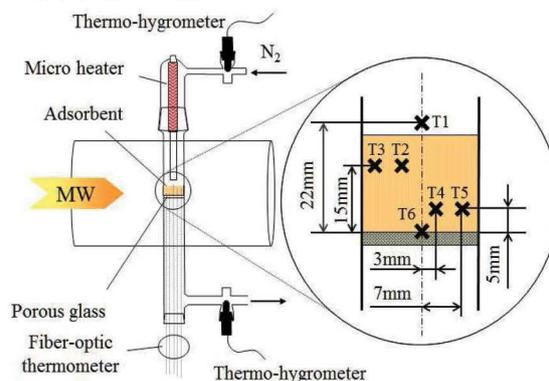


Fig. 1 Schematic diagram of adsorption column

Table 1 Specifications of the adsorption unit and adsorbent

Adsorbent	Zeolite 13X
Packed bed thickness, Z_c	20mm
Packed bed radius, R_c	10mm
Particle radius, r_p	156 μ m
Frequency of microwave, f	2450MHz

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. 1 の吸着材充填層部における脱着過程の熱・物質移動モデルを Fig. 2 に示す. 脱着エネルギーとして充填層入口の温風(Q_{gas})および充填層側面からのマイクロ波(Q_{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_{des})に消費されるとともに, 一部は反応管側面から放熱(Q_{side})され, 残余のエネルギー(Q_{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 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・温風併用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樣である.
4. 吸着材粒子内の温度は一樣である.
5. 総括物質移動速度は吸着材粒子内の拡散速度

で支配される。

6. 吸着材粒子内の水蒸気移動は表面拡散で表現できる。
7. 充填層部のマイクロ波電界強度は一樣である。
8. 充填層軸方向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

$$\rho_B C_{p,B} \frac{\partial T}{\partial \theta} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T}{\partial R} \right) - u C_{p,G} \rho_G \frac{\partial T}{\partial Z} + P + \rho_A \Delta H \frac{\partial \bar{q}}{\partial \theta} \quad (1)$$

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

物質収支式

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

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

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

初期条件および境界条件

$$\theta = 0$$

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

$$0 \leq r \leq r_c; ; q = q_{\text{initial}} \quad (7)$$

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

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

$$R = R_c; \lambda \frac{\partial T}{\partial Z} = h(T - T_{\text{outside H}}) \quad (10)$$

$$\frac{\partial C}{\partial Z} = 0$$

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

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

ここで、 C [kg/m³], h [W/(m²·K)]および q [kg/kg]は水蒸気濃度、熱伝達係数および吸着量である。添え字の

A, B, G, out および W はそれぞれ吸着材, 充填層, 反応管外部および水蒸気を示す。

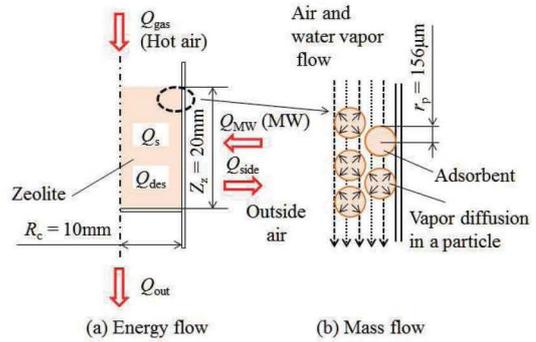


Fig. 2 Schematic diagram of energy and mass flow for packed bed

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 2 に示す。また、解析に使用した諸値を Table 3 に示す。

脱着熱 ΔH は前報⁴⁾ で示した値を用いた。拡散係数 D_A は、あらかじ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。

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

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。

$$Nu = 0.0387(GrPr)^{1/4} \quad (14)$$

ここで、 Nu , Gr , Pr はそれぞれ Nusselt 数, Grashof

Table 2 Analysis conditions for heat/mass transfer in the packed bed

Initial temperature, T_{initial}	30 °C
Relative humidity (30°C), ϕ	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 The values used in the analysis

Desorption heat, ΔH	3900 kJ/kg
Diffusion coefficient, D_A	$1.8 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$
Effective thermal conductivity, λ	0.08 W/(m·K)
Porosity of packed bed, ε	0.646
Specific heat of adsorbent, C_{pA}	758 J/(kg·K)
Density of adsorbent, ρ	1132 kg/m ³

数および Prandtl 数である。

吸着材粒子表面と本体流体間の物質移動係数 (k_F [1/s])は次式から求めた²²⁾,

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

ここで, Sc , Re は Schmidt 数および Reynolds 数である。

また, マイクロ波投入量 P [W/m³]は前報⁴⁾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, 以下の式で算出した。

$$P = \frac{5}{9} f E^2 \varepsilon_r \tan \delta \cdot 10^{-10} \quad (16)$$

ここで, ε_r [-], $\tan \delta$ [-]は物質の誘電率および誘電正接, f [Hz]は周波数である。 $\varepsilon_r \tan \delta$ は損失係数でありゼオライトで 0.25, 水で 12.3-3.1(25-85°C)²³⁾である。

4. 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前報⁴⁾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 ($\phi=40\%$ 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・温風併用加熱条件下 (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 および Fig. 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_{des}), 充填層側面放熱量 (Q_{side})および全熱収支の結果を実験結果と併せて Figs. 5, 6 に示す。以下に充填層における各消費熱量の算出式を示す。

$$Q_s = (M_w C_{pw} + M_z C_{pz}) \frac{dT_p}{d\theta} \quad (17)$$

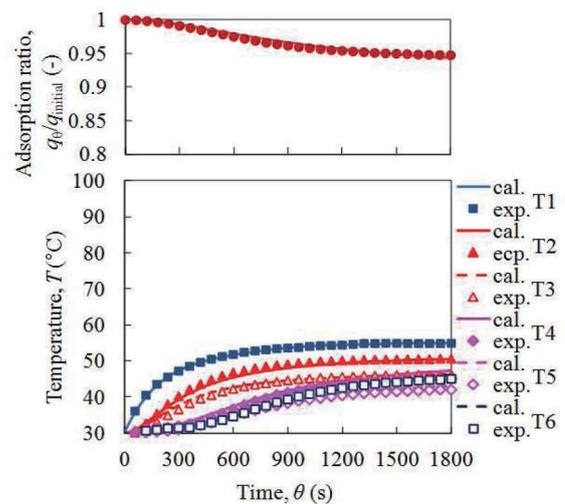


Fig. 3 Temperature and adsorption ratio changes at $T_G = 55^\circ\text{C}$ and $\phi = 40\%$ (Case 1)

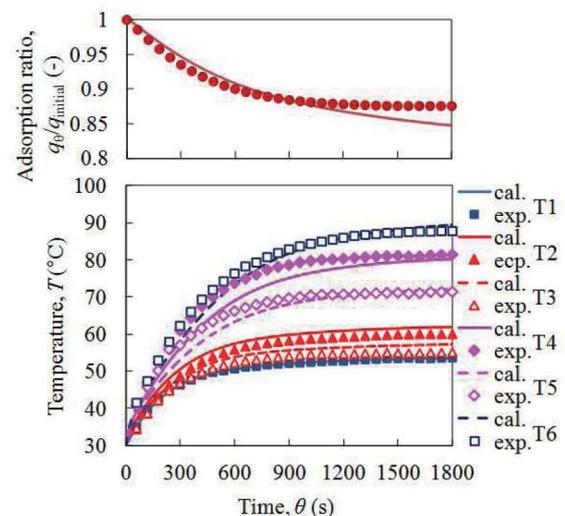


Fig. 4 Temperature and adsorption ratio changes at $T_G = 55^\circ\text{C}$, $\phi = 40\%$ and $M_w = 50\text{W}$ (Case 2)

$$Q_{\text{des}} = M_z \Delta H_{\text{des}} \frac{dq_{\text{des}}}{d\theta} \quad (18)$$

$$Q_{\text{side}} = hA_{\text{wall}} (T_{\text{wall}} - T_{\text{outside}}) \quad (19)$$

Case 1 の吸着率変化, 充填層内温度変化(Fig. 3)の解

析結果は実験結果と良好に一致している. Case 2(Fig. 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(Figs. 5, 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, 前報⁴⁾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. これは脱着量を解析するに当たり 15-45°C までの実測の吸着等温線から得られる

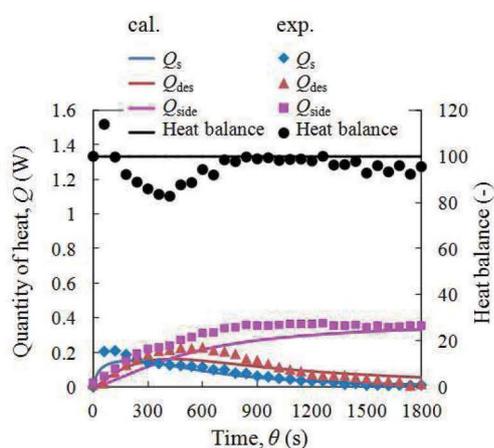


Fig. 5 Changes of heat consumption and heat balance at $T_g = 55^\circ\text{C}$ and $\varphi = 40\%$ (Case 1)

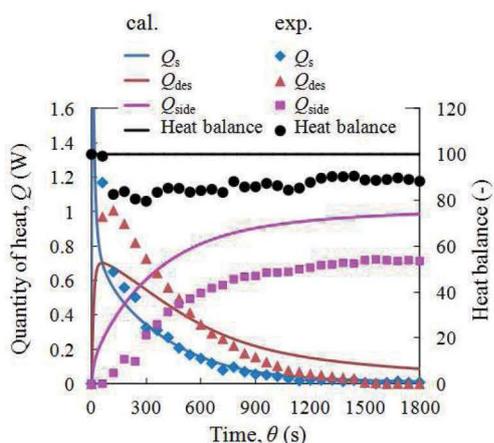


Fig. 6 Changes of heat consumption and heat balance at $T_g = 55^\circ\text{C}$, $\varphi = 40\%$ and $M_w = 50\text{W}$ (Case 2)

Clausius-Clapeyron 式を 45°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, 前報⁴⁾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・温風併用加熱脱着の有効性の検証を行った.

(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, Fig 4に相当する温度分布

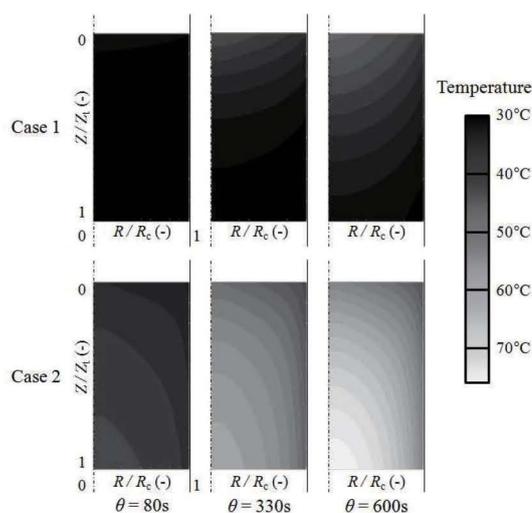


Fig. 7 Temperature distribution in packed bed

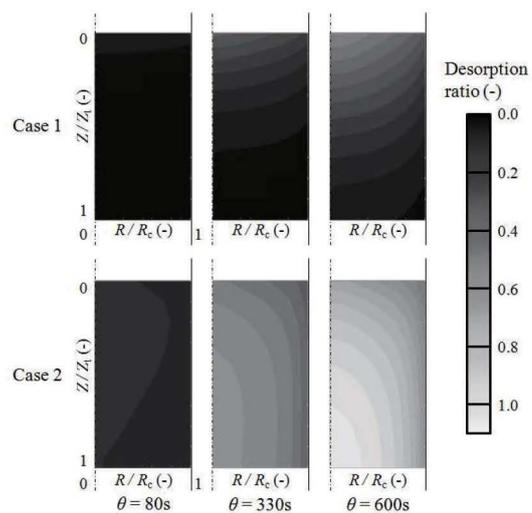


Fig. 8 Desorption ratio distribution in packed bed

および吸着量分布の解析結果をそれぞれ Fig. 7 および Fig. 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, $\theta=600\text{s}$ でも充填層中心部の上部, 下部の脱着量はそれぞれ $\varphi=40\%RH$ における $T_g=30^\circ\text{C}$, $T_g=55^\circ\text{C}$ の平衡吸着量差($q_{30^\circ\text{C},40\%RH}-q_{55^\circ\text{C},40\%RH}=0.04\text{kg/kg}$)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, $\theta=270\text{s}$ 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, $\theta=600\text{s}$ 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.

(2) マイクロ波・温風併用加熱脱着の有効性

マイクロ波・温風併用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 η を指標とする検討を行った.

$$\eta = \frac{Q_{\text{des}, \theta}}{Q_{\text{s}, \theta} + Q_{\text{des}, \theta} + Q_{\text{side}, \theta}} \quad (20)$$

Fig. 9 に, 本解析結果から得られる Case 1, Case 2 の η 値を前報⁴⁾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 η_{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 2 のそれに比べ

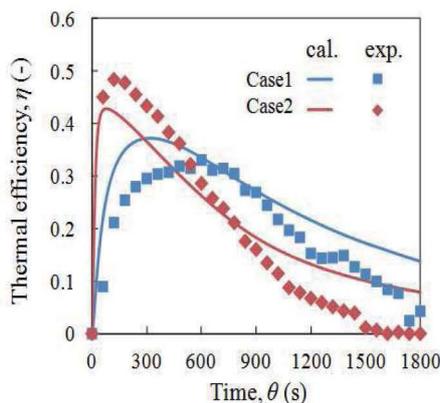
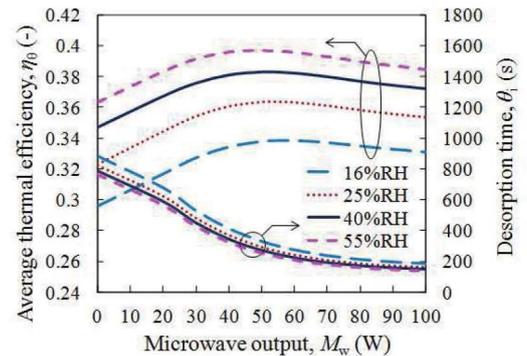


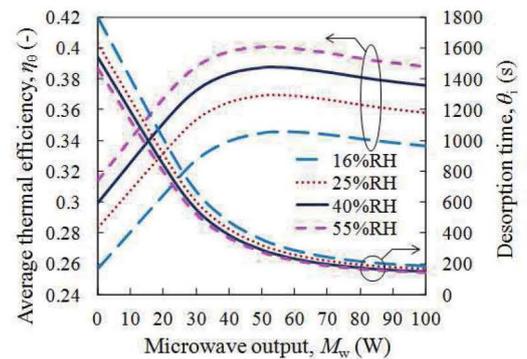
Fig. 9 Change over time of η

て大きい. Case 2 の η_{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 η_{cal} の変化は実験の熱効率 η_{exp} のそれと傾向的に一致しており, マイクロ波・温風併用加熱型デ

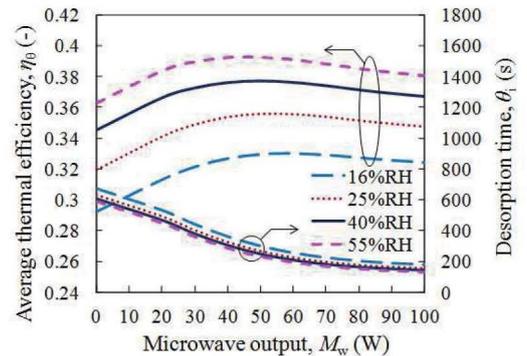
シカント空調機の性能評価に対して η を基準とする検討が可能であることが示唆される. したがって, 以下ではマイクロ波強度, 脱着空気温度, 湿度を変化させた場合の η 値を指標とするマイクロ波・温風併用加熱脱着の有効性を考察する. 具体的には, 次式で定義する等脱着量基準の平均熱効率 η_θ を指標



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



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



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

Fig. 10 Effect of microwave output on η_θ and θ_i

とする比較を行った.

$$\eta_\theta = \frac{\sum_{\theta=0}^{\theta_i} Q_{\text{des}, \theta}}{\sum_{\theta=0}^{\theta_i} (Q_{\text{s}, \theta} + Q_{\text{des}, \theta} + Q_{\text{side}, \theta})} \quad (21)$$

ここで、 θ_i は Case 1 の $\theta=1800s$ における脱着量に等しくなる Case 2 の脱着時間である。なお、Case 1 の $\theta=1800s$ における脱着量は T_g および ϕ 値によって異なるが本検討では簡単化のために Case1 の $T_g=55^\circ C$, $\phi=16\%RH$, $\theta=1800s$ における脱着量(=0.0165kg/kg)を基準として η_θ を算出した。

Figs. 10(a, b, c)に、 $T_g=55-100^\circ C$, $\phi=16-55\%RH(30^\circ C)$ 条件下の η_θ と M_w の関係を示す。図中には θ_i 値を併示した。 η_θ は、1) T_g , ϕ 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 の増大に伴って $M_w=40-60W$ で最大値に到達しその後やや減少する、2) ϕ の増大に伴って増大し、この増大は ϕ の増大にほぼ比例している。3) η_θ が最大となる M_w は ϕ の減少に伴い増大する傾向にある。また θ_i 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 η_θ の最大値 $\eta_{\theta MAX, Case2}$ に着目し、この値を $\eta_{\theta, Case1}$ で除した $\eta_{\theta MAX, Case2}/\eta_{\theta, Case1}$ の比を Fig. 11 に示す。 $\eta_{\theta MAX, Case2}/\eta_{\theta, Case1}$ 値はいずれも 1 以上になり T_g および ϕ の減少に伴って増大する。このことはマイクロ波・温風併用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。

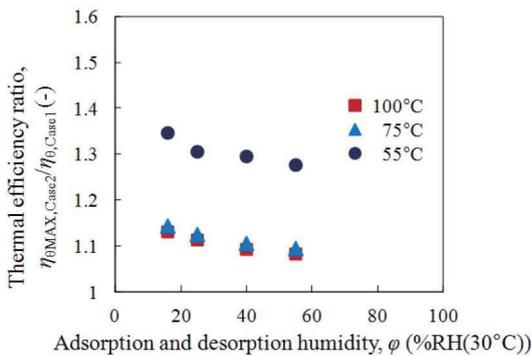


Fig. 11 Relationship between $\eta_{\theta MAX, Case2}/\eta_{\theta, Case1}$ and humidity

5. 結言

マイクロ波・温風併用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。その結果、以下の知見を得た。

マイクロ波・温風併用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。

脱着の平均熱効率を指標とするマイクロ波・温風併用加熱脱着の有効性の評価を行い、本併用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。

REFERENCES

- [1] M. Saitake, M. Kubota, F. Watanabe and H. Matsuda, "Enhancement of water desorption from zeolite by microwave irradiation", Kagaku kogaku ronbunshu, vol. 33, No. 1, pp. 53-57(2007)
- [2] F. Watanabe, K. Sumitani, T. Kashiwagi, T. Takagi, H. Huang, M. Hasatani and N. Kobayashi, "Influence of microwave irradiation on water-vapor desorption from zeolites," Kagaku kogaku ronbunshu, Vol. 35, No. 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, Vol. 30, No.5, pp. 1707-1713(2012)
- [4] S. Ito, F. Watanabe, H. Huang, M. Hasatani and N. Kobayashi, "Effects of microwave irradiation on zeolite-based water-vapor desorption for using lower humidity air," Transactions of the Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Vol. 32, No. 1, pp. 11-20(2015)
- [5] H. Kakiuchi, S. Shimooka, M. Iwade, K. Oshima, M. Yamazaki, S. Terada, H. Watanabe and T. Takewaki, "Novel water vapor adsorbent FAM-Z01 and its applicability to an adsorption heat pump," Kagaku kogaku ronbunshu, Vol. 31, No. 5, pp. 361-364(2005)
- [6] K. Oshima, M. Yamazaki, T. Takewaki, H. Kakiuchi and Akio Kodama, "Application of novel FAM adsorbents in a desiccant system," Kagaku kogaku ronbunshu, Vol. 32, No. 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, Vol. 40, No. 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, Vol. 30, No.10, pp. 1193-1198(2010)
- [9] S. Shimooka, M. Yamazaki, T. Takewaki, E. Akashige, F. Ikehata, H. Kakiuchi, F. Watanabe, M. Kubota and H. Matsuda, "Development of hydrophilic active carbon for high performance adsorption heat pump," Kagaku kogaku ronbunshu, Vol. 32, No. 6, pp. 528-534(2006)
- [10] M. Kubota, N. Shimada, H. Matsuda and H. Huang, "Heating and water desorption characteristics of silica gels under microwave irradiation," Transactions of the Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Vol. 32, No. 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, Vol. 42, No.9, pp. 1386-1393(2010)
- [13] Y. Osaka, T. Tsujiguchi and A. Kodama, "Study on the simple model using local mass transfer

- coefficient for the performance prediction of rotary desiccant,” Transactions of the Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Vol. 29, No. 1, pp. 207-215(2012)
- [14] T. Tsujiguchi and A. Kodama, “Optimum operating/design concept for adsorbent desiccant wheel,” Transactions of the Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Vol. 29, No. 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), Vol. 78, No. 686, pp. 341-349(2013)
- [16] Y. Nabeshima, K. Nagano and J. Togawa, “Development of desiccant system using wakkanai siliceous shale -7th report: controlling conditions for variety of air conditions-,” Transactions of the Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Vol. 31, No. 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, Vol. 70, pp. 171-182(2016)
- [18] T. Miyazaki, A. Akisawa, Y. Ueda, S. Shindoh, M. Godo and T. Takatsuka, “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, Vol. 26, No. 4, pp. 533-542(2009)
- [19] The Society of Chemical Engineers, Japan, “Kagakukogakubenran (Handbook of Chemical Engineering),” 4th ed., Maruzen, p. 861(1978)
- [20] Y. Hirasawa, R. Ohta and E. Takegoshi, “A study on effective thermal conductivity of packed bed of adsorbent including water,” Transactions of the Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Vol. 23, No. 2, pp. 113-119(2012)
- [21] M. Hishida and T. Tsuji, “Natural convection heat transfer from a vertical flat plate,” Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. B, Vol. 47, No.424, pp.2314-2323(1981)
- [22] The Society of Chemical Engineers, Japan, “Kagakukogakubenran (Handbook of Chemical Engineering),” 4th ed., Maruzen, p. 864(1978)
- [23] C. Shibata, “Industrial microwave power engineering”, Denkishoin co., Ltd., Tokyo(1986)