

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

Enhancement of Water Desorption from Zeolite by Microwave Irradiation

渡辺藤雄¹, 齋竹基仁², 窪田光宏², 松田仁樹²

F. Watanabe¹, M. Saitake², M. Kubota² and H. Matsuda²

Abstract For effective regeneration of the adsorbent used in a desiccant humidity conditioner, the possibility of microwave irradiation for desorption of water from zeolite was studied.

To investigate the effect of microwave irradiation on the water desorption rate from zeolite (0.69 mm), experiments were conducted in a N₂ flow type adsorption column equipped with a microwave irradiator. Desorption of water from zeolite by microwave heating under conditions of N₂ gas of 30°C with relative humidity 40%, gas flow rate of 0.053 m/s and microwave power of 200-800 W was compared with that for hot-air heating at 47°C. The following results were obtained.

1. The amount of water desorbed from zeolite was 1.6-2.0 times larger by microwave heating than by hot-air heating. This amount corresponded to that obtained by hot-air heating at 10-16°C higher than the zeolite bed temperature. It was found that the desorption amount with microwave irradiation was larger than that with hot-air heating, regardless of microwave power.
2. Maximum desorption rate was about 5 times faster by microwave heating at 800 W than that by hot-air heating.
3. Desorption rate with microwave irradiation increased with microwave power, and it decreased linearly with the increase in water adsorption ratio in zeolite.

1. 緒言

民生活動空間における快適環境の向上、産業界における品質管理の高度化などの要求が高まる中で、湿度調整の重要性が認識され、環境調和型の効率的な湿度調整技術の確立が強く望まれている。この中で吸着現象を利用したデシカント調湿システムは、上記の要求を満たす有力な湿度調整技術に位置づけられ、既にハニカムロータ方式の調湿機が一部実用化されている (Fuji and Katsumi, 2005)。

デシカント調湿システムは吸着材が持つ水蒸気の吸・脱着能力を利用し、環境温度条件下で空気中の水蒸気を吸着濃縮後、これを加熱脱着させて所用空間の加湿を行う、あるいは水蒸気の吸着により得られた乾燥空気を用いて除湿を行うシステムである。一般に、脱着操作における吸着材の加熱では、太陽熱、ヒーター加熱などにより生成した温風を熱源とする間接加熱が行われている。しかし、この間接加熱法は吸着材の加熱速度が遅く、かつ被加熱物質以外への熱損失が大きいため、脱着率の低下に伴う装置の大型化ならびにエネルギー消費量の増大を招いている。この問題は調湿機のみならず類似システムのデシカント空調機分野においても同様に指摘され、吸・脱着操作の最適化などによる効率化の検討がなさ

れているが、いまだ本質的な解決策には至っていない (Kodama *et al.*, 2005; Hamamoto *et al.*, 2004; Harshe *et al.*, 2005)。

上記課題に対する方策の一つに、吸着材の加熱熱源としてマイクロ波照射を利用する手法が考えられる。マイクロ波は被加熱物質の直接加熱が可能であるとともに、マイクロ波の吸収特性の違いに応じた物質の選択加熱効果を持つ。また、間接加熱に比べ迅速加熱が可能であるなどの特長も有する。これまでに、吸着材の再生については、VOCや有機化合物などが吸着した活性炭やゼオライトに対するマイクロ波照射の応用が報告されている (Anja *et al.*, 2004; Benchanaa *et al.*, 1989; Hashisho *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2005)。吸着式デシカントシステムに関しては、Ogushi and Nagae (2005) がゼオライト Na-X/Ca-X へのマイクロ波の繰り返し照射に伴う水蒸気吸着容量の低下を示すとともに、市販調湿剤であるCaCl₂ との性能比較を行っている。一方、著者らはクロードシステムでのゼオライト/水蒸気系吸着ヒートポンプ (AHP) における脱着に、従来からの温水 (熱源) 加熱に加えてマイクロ波を併用したシステムの提案、検討を行ってきた。この結果、80°Cの温水供給下では、400 W のマイクロ波を併用した加熱脱着で熱源加熱に比べて最大 2.8 倍の脱着率の向上を

1 愛知工業大学 総合技術研究所 (豊田市)

2 名古屋大学 (名古屋市)

認め、この向上がマイクロ波による直接加熱に起因すると推論した (Suenaga *et al.*, 2003)。具体的には、マイクロ波の特徴である、i) マイクロ波は固体内に直接進入すること、ii) マイクロ波による加熱されやすさは物質の誘電損失係数に比例するが、水のこの値がゼオライトの約 49 倍と大きいこと (Price *et al.*, 1995; Koshijima *et al.*, 2004) が原因となり、マイクロ波が吸着材固体内の吸着水に選択的に作用し、吸着水を直接加熱した結果として脱着率の向上につながったと考えた。吸着式デシカント調湿システムにおいてもマイクロ波照射により、クローズド式と同様の効果が発揮させることが期待できる。しかし、この検討は十分に行われていない状況にある。

上記の観点から、本研究では温風・マイクロ波併用加熱方式のデシカント式調湿システムを提案し、第一段階としてマイクロ波照射による脱着率向上の効果を明らかにすることを目的とした検討を行った。具体的には、実稼働の吸着式調湿システムで使用されているゼオライトとシリカゲルのうち、本報ではゼオライトを取り上げ、マイクロ波照射型流通式吸着装置を用いてゼオライトからの吸着水の脱着実験を行い、吸着平衡論的、速度論的観点から脱着率を指標とするマイクロ波照射効果の検討を行った。

2. 実験装置および方法

2.2 吸着材

吸着材としてゼオライト (粒子径: 0.38-1.0 mm, OXYSIV-5, ユニオン昭和 (株)) を用いた。Figure 1 に BELSORP18 (日本ベル (株)) により測定した OXYSIV-5 の水蒸気吸・脱着等温線を示す。本図より、OXYSIV-5 の場合、RH=5%以下の低相対湿度域において急激に吸着が進行し、その後は徐々に吸着量が増加している。また、ヒステリシスループが小さく、等温線には吸着温度依存性が見られることが分かる。

2.2 実験方法

Figure 2 に本実験で使用したマイクロ波照射型流通式吸着装置の概略図を示す。本装置はマイクロ波発生装置 ((株) IDX)、流通式吸着管、マイクロ波吸収体、蒸発器により構成される。また、装置全体は断熱壁で囲まれ、所定の一定温度 (15-45°C) に保たれる構造になっている。

マイクロ波は 2.45 GHz で発振され、矩形導波管 (TE01 モード) を経て、直径 110 mm の円筒形導波管 (TE11 モード) を通り、マイクロ波吸収体に吸収される。流通式吸着管は円形導波管の断面中心部、入口より 140 mm の位置に垂直に設置した。吸着管の設置位置は、あらかじめ測定した導波管内のマイクロ波の電界強度が最大となった位置である。吸着管の出入口にはそれぞれ温湿度計 (PosiTector DPM, DeFelsko Corp.) が設置されており、測定温度・湿度差から流通空気の水蒸気濃度差を求め、これに基づいて吸着量およ

び脱着量を算出した。吸着材層の中心部には光ファイバー温度計 (AMOTH FL-2000, 安立計器 (株)) が挿入されており、この温度を吸着材層の代表温度とした。

実験は、約 0.5 g (吸着材層厚み: 約 2.5 mm) のゼオライト (OXYSIV-5) を吸着管中央部に装填した後、前処理として吸着管を 350°C で加熱保持し、純度 99.99% の窒素ガスを十分に流すことにより吸着材の乾燥を行った。吸着過程では室温 30°C の条件下で 14.9°C に調整した蒸発器に窒素ガスを流速 $u=0.053$ m/s で流通させ相対湿度 40% の湿潤窒素とし、吸着管に流通させて吸着操作を行った。脱着過程では吸着過程と同条件の湿潤窒素を吸着管内に流通させたままマイクロ波を照射する方法と、ヒーター加熱により所定温度に調整した湿潤空気を流通させる方法により脱着を行った。なお、実験パラメータとしてはマイクロ波出力を 200-800 W に変化させた。

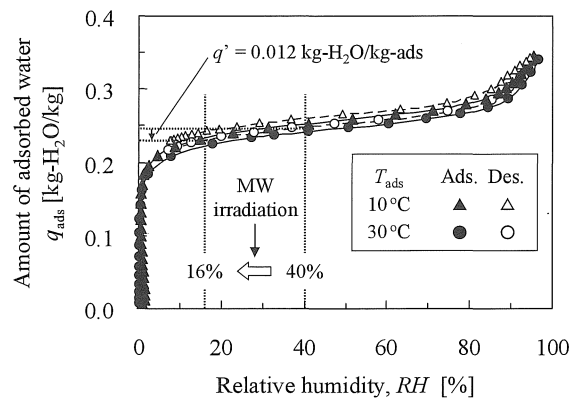


Fig. 1 Adsorption isotherms of water vapor on zeolite at 10 and 30°C

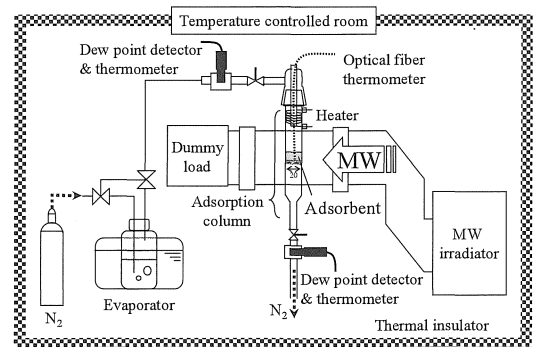


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

3. 実験結果および考察

3.1 吸着およびマイクロ波脱着の熱・物質移動挙動

Figure 3(a) に吸着管入口窒素温度 30°C、相対湿度 40%、流速 0.053 m/s における吸着過程での水蒸気吸着量 (q_{ads} : Δ)、吸着材層温度 (*), 流通窒素出口温度 (+) を示す。併せて、吸着時と同一の空気条件でマイクロ波を出力 800 W で照射した際の脱着過程 (Figure 3(b)) における脱着量 (q_{MW}) 基準

吸着率 ($1 \cdot q_{MW}/q_E$: ●) および吸着材層温度 (T_{MW} : *)、流通窒素出口温度 (+) の経時変化も示す。

吸着過程の場合、水蒸気吸着量 (Δ) は吸着開始とともに増加し、約 30 min を経て吸着量変化が認められなくなる。この時の吸着量は、Figure 1 の $RHF=40\%$ における吸着量 ($q_E=0.242$ kg-H₂O/kg-zeolite) とほぼ一致していることから、本条件下の吸着平衡に到達したとみなせる。一方、吸着材層温度 (*) は吸着熱の発生に伴い急激に上昇し、吸着開始 1 min 未満で 58°C まで上昇した後、30 min 程度で初期温度の 30°C に回復している。また、窒素の出口温度は実験期間中を通して入口温度である 30°C 付近で推移している。

脱着過程の場合、 $q_E=0.242$ kg-H₂O/kg-zeolite を基準とした吸着率 ($1 \cdot q_{MW}/q_E$: ●) はマイクロ波照射開始から時間の経過に伴って減少し、開始 5 min 後の $1 \cdot q_{MW}/q_E$ 値は 0.89 となり、20 min 経過後で 0.87 (実測の脱着量 $q_{MW}=0.032$ kg-H₂O/kg-zeolite) となった。一方、吸着材層温度 (*) はマイクロ波照射開始直後から徐々に上昇し、開始 5 min 後で約 46°C、20 min 経過後でおおよそ 47°C となる。本結果は吸着操作と同一の 30°C、 $RHF=40\%$ の窒素を供給する条件下で、マイクロ波照射により脱着が進行したことを示している。そこで次節では、この脱着の進行の要因について詳細に検討する。なお、吸着材層の温度が初期温度より高い温度を示すのは、本実験条件下では吸着水を含む吸着材のマイクロ波吸収に伴う発熱量に比べて、吸着水の脱着に伴う吸熱量および流通ガスによる除熱量が小さいことに起因する。

3.2 マイクロ波による脱着促進効果

3.2.1 過剰脱着効果
マイクロ波脱着の有効性を定量的に評価するために Figure 3(b)の縦軸を脱着率 (q/q_E) に改めた図を Figure 4 に示す。なお、ここでは次の 3 通りの脱着率を定義した。すなわち、Figure 3(b)で示したマイクロ波照射による脱着量 (q_{MW}) 基準の脱着率 (●)、仮想温度脱着量 (q) を基準とする脱着率 (○)、温風脱着量 (q_{HA}) を基準とする脱着率 (◇) である。

このうち、温風脱着量 (q_{HA}) は、Figure 3(b)のマイクロ波照射による脱着時の吸着材層最高到達温度が 47°C であったことに準拠して、30°C、 $RHF=40\%$ の窒素ガスを吸着管上部に設置したヒーターにより 47°C に加熱して供給した場合の脱着量である。また、仮想温度脱着量 (q) はマイクロ波照射に伴う吸着材層の温度上昇により生じる吸着水の脱着における理論脱着量である。本実験では、吸・脱着過程を通して 30°C、 $RHF=40\%$ (絶対湿度 0.0106 kg-H₂O/kg-DA) の窒素ガスが供給されており、実験期間中を通して供給空気の水蒸気分圧 (p_{H_2O}) は変化しない。この条件下、脱着操作においてマイクロ波照射を行うと吸着材層温度が上昇する (Figure 4 参照)。ここで、実験時の相対湿度 RH は次に示す Eq. (1) で与えられることから、吸着材層の温度が上昇すると相対湿度が低下する。

$$RH = (p_{H_2O}/p_s \text{ at temp. of Zeolite bed}) \times 100 \quad (1)$$

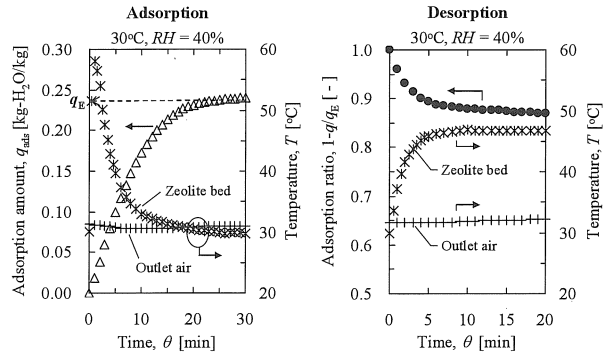


Fig. 3 Adsorption and desorption characteristics of zeolite when microwave was irradiated during desorption process

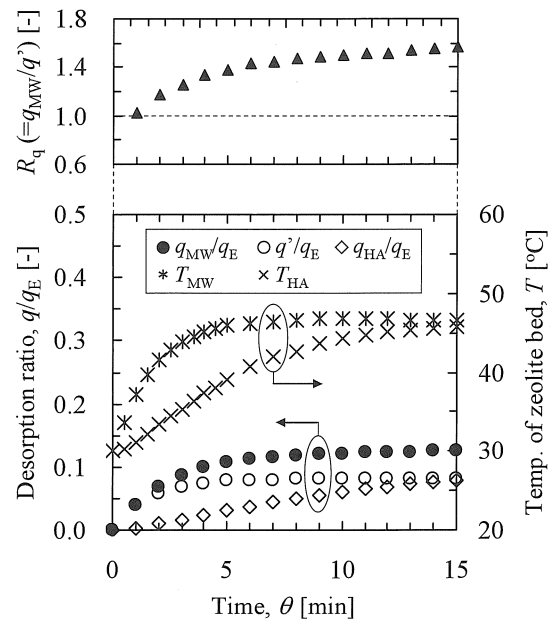


Fig. 4 Comparison of desorption ratio and temperature rise of zeolite bed between MW heating and hot-air heating

この結果、Figure 1 において平衡吸着量が減少するため、余剰分が脱着することになる。本報ではこの平衡吸着量差を吸着材層の温度上昇に伴う仮想温度脱着量 (q) として定義した。Figure 5 に示すように、たとえば層温度が 30°C から 47°C に上昇すると相対湿度は 40% から 16% に低下し、Figure 1 の等温線から仮想温度脱着量 (q) は 0.012 kg-H₂O/kg-zeolite となる (実際には後述する Clausius-Clapeyron の式で吸着温度 47°C における等温線を求めた上で q' を算出しているが、Figure 1 では説明の簡略化のために 30°C の等温線のみを用いて示している)。なお、Figure 4 には実験中の各時間における吸着材層温度に対する q' を示してある。この値は、吸着材層の温度上昇に伴う吸着水の脱着が、物質移動抵抗がなく起きた場合の各時間における理想的な脱着量を意味する。したがって、実測のマイクロ波脱着量と仮想温度脱着量の比 $R_q (= q_{MW}/q)$ はマイクロ波による過剰脱着の指標となり、この値が 1 以上ではマイクロ波により吸着材層の温度上昇に起因する脱着以上の過剰脱着が起こったことを

示す。そこで、Figure 4には R_q 値の経時変化も併示した。

また、本評価ではマイクロ波照射による脱着量(q_{MW})と同量の脱着量を温風脱着で得るために必要な温風温度を仮想熱源温度(T^*)として定義した。仮想熱源温度(T^*)は、上述した仮想脱着量 q と逆の算出手順で求められる。すなわち、脱着量(q_{MW})が既知であるため、Figure 1の吸着等温線より q_{MW} が得られる相対湿度 RH が求まる。上述したように実験期間中流通ガスの水蒸気分圧(p_{H_2O})は変化しないことから、Eq. (1)により RH となる飽和蒸気圧が決定され、この値から仮想熱源温度(T^*)が算出される。したがって、 T^* と T_{MW} の差 $T_b(=T^*-T_{MW})$ はマイクロ波脱着の温度効果を示す指標となり、 $T_b > 0$ ではマイクロ波照射による吸着材層の温度上昇以上の温度効果を示したことになる。なお、1.1で述べたようにOXYSIV-5の水蒸気吸着等温線には吸着温度依存性が見られたため、 q および T^* を求める際の吸着等温線としては、Clausius-Clapeyron式を用いて算出した各温度における等温線を用いた。以上定義した R_q 、 T_{MW} 、 T^* 、 T_b の各時間における値をTable 1に一括してまとめた。

Figure 4に示した各脱着量(q_{MW} 、 q 、 q_{HA})基準の脱着率とマイクロ波脱着、温風脱着の吸着材層温度(T_{MW} 、 T_{HA})の経時変化ならびにTable 1より、以下のことが観察される。i) q 基準の脱着率は脱着開始15 min後に q_{HA} 基準のそれとほぼ一致する。ii) 本実験範囲内では q_{MW} 基準の脱着率は q 基準のそれより常に大きく、 R_q 値は1を超える。iii) 温風脱着に比べてマイクロ波脱着の脱着率は大きく、脱着開始15 minの脱着率は温風脱着、マイクロ波脱着でおよそ0.08および0.13である。一方、吸着材層温度に関しては、iv) T_{HA} に比べて T_{MW} の温度上昇が速く、45°Cへの到達時間は T_{MW} 、 T_{HA} でそれぞれ約4 minおよび12 minである。さらに、いずれも実験開始15 min後にはほぼ同一の47°C程度になる。

上記i)の結果は、マイクロ波脱着における仮想脱着量の推算が妥当であることを示している。ii)の結果は、上述したように本系においてマイクロ波照射により吸着材層の温度上昇相当以上の脱着(過剰脱着)が常に起こっていることを示している。具体的に、実験開始5 min経過後の R_q 、 T_b はそれぞれ1.38および13.0°Cの値を示し(Table 1)、その後もこれらの値は増大傾向にある。これはマイクロ波加熱が直接加熱であるため脱着効果が短時間で発揮され、その後もこの効果が持続されたことによると考えられる。iii)は温風による間接加熱に比べてマイクロ波による直接加熱が脱着に有利であることを示す。それは、間接加熱に比べて直接加熱による吸着材への熱供給速度が大きいことによると考えられ、iv)の結果で脱着初期の吸着材層温度上昇が温風脱着よりマイクロ波脱着において大きくなることに符合する。また、本系の脱着時間15 minにおける T^* は61.4°C、 T_b 値は14.7°Cと計算され、マイクロ波照射による吸着材温度上昇相当以上の温度効果が仮想熱源温度基準でも示されたことになる。

上記の結果はマイクロ波出力を変化させた場合も同様に説明されるが、マイクロ波出力によって R_q 値、 T_b 値が異なるため、

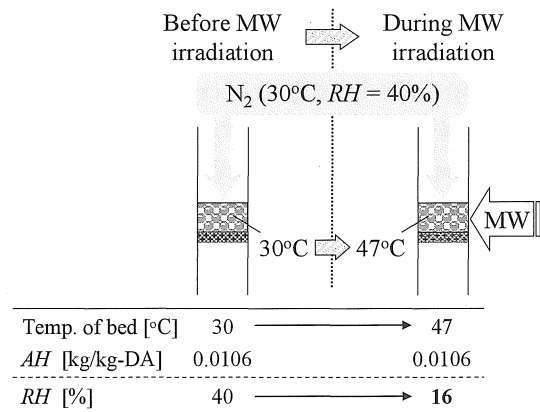


Fig. 5 Change in relative humidity of gas stream with/without MW irradiation

Table 1 Time-change of amount of desorbed water and temperature rise of zeolite bed with microwave irradiation

Time [min]	5	10	15
R_q [-]	1.38	1.49	1.57
T_{MW} [°C]	45.9	46.8	46.7
T^* [°C]	58.9	60.7	61.4
T_b [°C]	13.0	13.9	14.7

Table 2 Effect of MW power on amount of desorbed water and temperature rise of zeolite bed at 15 min

MW [W]	200	400	800
R_q [-]	1.86	1.97	1.57
T_{MW} [°C]	35.2	37.8	46.7
T^* [°C]	45.5	53.4	61.4
T_b [°C]	10.3	15.6	14.7

Table 2に一括して示した。本表より、200 Wの低出力条件下でも過剰脱着が確認される。なお、マイクロ波出力400 Wにおいて R_q 、 T_b は最大値を示し、脱着に付与する最適マイクロ波出力の存在が示唆される。

3.2.2 マイクロ波脱着の脱着速度 Figure 4で示した脱着率(q/q_E)の経時変化より脱着速度($\Delta q/\Delta \theta$)を経過単位時間($\Delta \theta$)当たりの脱着量差(Δq)として求め、吸着率($1-q/q_E$)に対して整理した図をFigure 6に示す。

本図より以下のことが観察される。i) マイクロ波脱着の脱着速度は、吸着率が1.0で最大値(9.4×10^{-3} kg-H₂O/(kg·min))を示した後、吸着率の減少に伴ってほぼ直線的に減少し、 $1-q_{MW}/q_E=0.87$ 付近ではほぼゼロとなる。ii) 温風脱着の $\Delta q/\Delta \theta$ 値は吸着率が1.0から減少するにつれて増大し、 $1-q_{HA}/q_E=0.98$

で最大値 ($1.8 \times 10^3 \text{ kg-H}_2\text{O}/(\text{kg} \cdot \text{min})$) を示した後緩やかに減少し、 $1 - q_{\text{HA}}/q_E = 0.92$ でほぼ脱着平衡に達する。i) の結果はマイクロ波加熱の場合、照射開始後直ちに吸着水が直接加熱されることにより急激な脱着が生じること、およびマイクロ波が吸着材内部まで一様に加熱することが原因であり、その結果、吸着水がもっとも多い脱着初期において脱着速度が最大になったと考えられる。一方、ii) の温風脱着の場合は間接加熱となり、脱着は吸着材および吸着水への熱供給を経て起こる。このため、実験開始から脱着が起こるまでに時間的な遅れが生じ、マイクロ波脱着に比べて吸着率がやや小さい値で脱着速度の最大値が現れたと考えられる。また、マイクロ波脱着における脱着速度の最大値は温風脱着におけるその約 5 倍である。これは、前述したようにマイクロ波による吸着水に対する選択的作用ならびに迅速な加熱に起因すると考えられる。

Figure 7 はマイクロ波出力が異なる条件 (200, 400, 800 W) における $\Delta q/\Delta \theta$ の値を求め、Figure 6 と同様の整理を行った結果である。本図より以下のことが観察される。i) マイクロ波出力によらず、 $\Delta q/\Delta \theta$ は吸着率 1.0 付近で最大値を示し、その後吸着率の減少に伴ってほぼ直線的に減少する、ii) その最大値はマイクロ波出力 200-800 W の増大に伴って、 $3.7-9.4 \times 10^3 \text{ kg-H}_2\text{O}/(\text{kg} \cdot \text{min})$ と増大傾向を示す iii) 出力 200, 400, 800 W において、それぞれ $1 - q/q_E$ 値が 0.95, 0.93 および 0.88 付近で脱着速度がほぼゼロとなる。i) は、Figure 6 で述べたマイクロ波照射による吸着水の直接加熱効果および内部加熱効果に伴う脱着がマイクロ波出力によらず生じることを示している。ii) は、吸着水の加熱効果がマイクロ波出力に依存することによる。また、iii) の結果は吸着材層温度上昇に起因しており、マイクロ波出力の増大に伴って層温度が上昇したことによるものと考えられる。

結言

本研究ではマイクロ波照射型のデシカント調湿機を提案し、ゼオライト/水蒸気系脱着におけるマイクロ波照射効果を実験的に検討した結果、本実験範囲内で以下の結言を得た。

1. マイクロ波脱着では温風脱着に比べて、脱着量基準で 1.6-2.0 倍の過剰脱着効果があることを認めた。この効果を温度基準で換算すると温風脱着より約 10-16°C 高温で脱着させたことに相当した。また、マイクロ波出力にかかわらず吸着材層温度の上昇分相当以上の脱着が起こった。
2. 800 W のマイクロ波脱着の最大脱着速度は温風脱着の最大脱着速度の 5 倍となった。
3. マイクロ波脱着の場合、脱着速度はマイクロ波出力の増大に伴って増大した。また、脱着速度は吸着率の減少に伴って直線的に減少した。

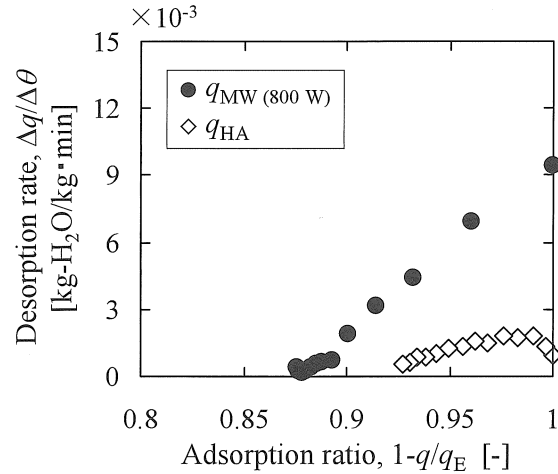


Fig. 6 Relationship between desorption rate and adsorbed ratio: ● microwave heating, ◇ hot-air heating

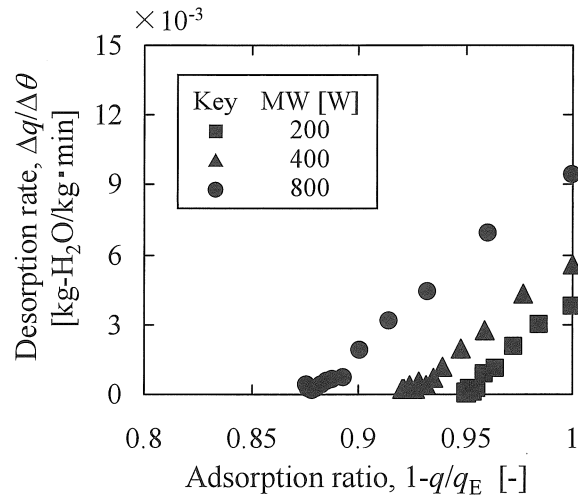


Fig. 7 Effect of microwave power on desorption rate

〔謝辞〕 本研究は、平成 16-17 年度文部科学省科学研究費（萌芽研究）(No. 15710056) の助成によって行われた。ここに記して謝意を表します。

Nomenclature

AH	= absolute humidity	[kg-H ₂ O/kg-DA]
Q	= desorbed amount of water	[kg-H ₂ O/kg-zeolite]
Q_{ads}	= adsorbed amount of water	[kg-H ₂ O/kg-zeolite]
q_E	= equilibrium adsorbed amount	[kg-H ₂ O/kg-zeolite]
q_{HA}	= desorbed amount of water by hot-air heating	[kg-H ₂ O/kg-zeolite]
q_{MW}	= desorbed amount of water by microwave heating	[kg-H ₂ O/kg-zeolite]
q'	= desorbed amount of water calculated from temperature rise of zeolite bed	[kg-H ₂ O/kg-zeolite]

RH	= relative humidity	[%]	
R_q	= ratio of q_{MW} and q'	[-]	
T_D	= $T' - T_{MW}$	[°C]	
T_{HA}	= temperature of zeolite bed during hot-air heating	[°C]	
T_{MW}	= temperature of zeolite bed during microwave irradiation	[°C]	
T'	= temperature of zeolite bed calculated from desorption amount of water	[°C]	
u	= velocity of air	[m/s]	
θ	= time	[minute]	

of Microwave-Regenerated Adsorbent Systems for Recovery of Volatile Organic Compounds," Proceedings of the Microwave and High-Frequency Heating Conference, C4, Cambridge, U.K. (1995)

Suenaga, T., H. Nikzat, M. Kubota, F. Watanabe, N. Kobayashi and M. Hasatani; "Effect of Microwave Irradiation on Vapor Desorption in Zeolite Packed Bed" (in Japanese), Proceedings of the 2003 JSRAE Annual Conference, A103, Tokyo, Japan (2003)

Literature Cited

Ania, C. O., J. A. Menendez, J. B. Parra and J. J. Pis; "Microwave-Induced Regeneration of Activated Carbons Polluted with Phenol. A Comparison with Conventional Thermal Regeneration," *Carbon*, **42**, 1383-1387 (2004)

Benchanaa, M., M. Lallemand, M. H. Simonot-Grange and G. Bertrand; "On Some Thermodynamic and Kinetic Aspects of Desorption from Zeolites under Microwave Irradiation," *Thermochimica Acta*, **152**, 43-51 (1989)

Fujii, Y. and Y. Katsumi; "Desiccant Dehumidifier for Home Use" (in Japanese), *Refrigeration*, **80**, 22-26 (2005)

Hamamoto, Y., S. Murase, J. Okajima, F. Matsuoka, A. Akisawa and T. Kashiwagi; "Analysis of Heat and Mass Transfer in a Desiccant Rotor" (in Japanese), *Trans. of the JSRAE*, **21**, 63-75 (2004)

Harshe, Y. M., R. P. Utikar, V. V. Ranade and D. Pahwa; "Modeling of Rotary Desiccant Wheels," *Chemical Engineering Technology*, **28**, 1473-1479 (2005)

Hashisho, Z., M. Rood and L. Botich; "Microwave-Swing Adsorption to Capture and Recover Vapors from Air Streams with Activated Carbon Fiber Cloth," *Environmental Science & Technology*, **39**, 6851-6859 (2005)

Kim, S.-I., T. Aida and H. Niiyama; "Binary Adsorption of Very Low Concentration Ethylene and Water Vapor on Mordenites and Desorption by Microwave Heating," *Separation and Purification Technology*, **45**, 174-182 (2005)

Kodama, A., N. Watanabe, T. Hirose, M. Goto and H. Okano; "Performance of a Multipass Honeycomb Adsorber Regenerated by a Direct Hot Water Heating," *Adsorption*, **11**, 603-608 (2005)

Koshijima, T., C. Shibata, T. Toishi, K. Norimoto and S. Yamada; Microwave Heating Technology Collection (Maikuroha Kanetsu Gijutsu Shusei), p. 9, NTS Inc. (2004)

Ogushi, T. and M. Nagae; "Durability of Zeolite against Repeated Activation Treatments with Microwave Heating," *Journal of Porous Materials*, **12**, 265-271 (2005)

Price, D. W., P. S. Schmidt and J. H. Davis; "Design Analysis