

助成番号 0801

塩化ナトリウム水溶液を含む多孔材料のマイクロ波併用過熱水蒸気乾燥 に関する研究

伊與田 浩志¹, 西村 伸也¹, 今駒 博信²¹大阪市立大学大学院工学研究科, ²神戸大学大学院工学研究科

概要 低環境負荷ならびに材料の高品位化を目的とした大気圧の過熱水蒸気の利用が進む中、近年、加熱調理のための過熱水蒸気(高湿度空気を含む)とマイクロ波による加熱を併用できるオーブンが販売されている。一方、食品等には、水溶性の溶質が含まれていることが多いが、マイクロ波併用の過熱水蒸気乾燥における塩水溶液を含む材料乾燥の間の、熱・物質移動現象や乾燥機構に関する基礎的な検討はこれまでほとんど報告されていなかった。

そこで本研究では、過熱水蒸気および高湿度気流中におかれた9 wt% 塩化ナトリウム水溶液を含む直径30 mmの球形の耐火断熱レンガを試料とし、乾燥中の材料の温度、水分量変化の連続測定をおこなった。さらに、乾燥中における熱と物質収支、乾燥時間、エネルギー効率等に与える、マイクロ波ならびに気流に含まれる過熱水蒸気量の影響について、蒸留水を含ませた試料の場合と比較しながら検討を加えた。実験条件は、気流流速1 m/s、気流温度160°C、マイクロ波は360秒から720秒までの360秒間照射した。

その結果、過熱水蒸気中で水を含ませた試料を乾燥する場合、材料温度は乾燥開始直後に凝縮により100°Cまで急速に上昇し、さらにマイクロ波照射直後に110°C以上まで一時的に上昇した後、マイクロ波照射中の約360秒間に液滴落下と水分蒸発による含水率の急速な低下とともに、温度も100°C付近まで低下することがわかった。一方、塩水溶液を含ませた試料では、マイクロ波照射中、照射後も約102°Cを保ちながら含水率の低下を続けた。また、塩水溶液を含ませた試料の場合、過熱水蒸気のみ、マイクロ波照射時の液滴落下が見られたが、その量は、水を含ませた材料よりも少なかった。さらに、短時間の照射でも乾燥時間短縮効果は顕著であり、乾燥排気量の低減による低環境負荷化の可能性が示唆された。

1. 緒言

近年、製塩プロセスにくわえて、食品や種々の工業製品、汚泥等の乾燥の際には、①エネルギーの高効率化(省エネルギー化)、②環境負荷(排気, 排水)の低減、③乾燥時間の短縮(人件費削減を含む)、④乾燥後の製品の高品位化・高機能化が求められている。また、被乾燥物の中に含まれる水は塩化ナトリウムなど水溶性の溶質が含まれていることが多く、この溶質の挙動が乾燥速度や乾燥後の品質に影響を与えることも少なくない。一般的な空気を用いた乾燥においては、既に塩化ナトリウム水溶液を含む粘土^[1]や砂層^{[2][3]}を試料とした研究の報告がなされている。このような中で、著者らは、環境負荷低減の可

能性がある乾燥方法として、大気圧下での密閉式の過熱水蒸気や高湿度空気を乾燥熱風として用いた乾燥方法^[4]、ならびに同方法による塩化ナトリウム水溶液を含む材料の乾燥^{[5][6]}についての検討を進めてきた。

一方、近年、家庭用調理器としても過熱水蒸気(高湿度空気を含む)とマイクロ波加熱を併用することができるオーブンが販売されており、乾燥装置においても高湿度空気中での実施例が報告されている。しかしながら、マイクロ波併用の過熱水蒸気乾燥法において、塩を含む材料に対しての乾燥中の熱・物質移動現象や乾燥機構に関する基礎的な検討はほとんど行われていないのが現状である。そこで本研究では、過熱水蒸気および高湿度気流中にお

2.2 試料と実験方法

Table 1 に、モデル試料として用いた市販の耐火断熱レンガ試料(JIS R2611, B-1, 空隙率約 70%)の主な性質を示す。試料は直径 30 mm の球形に、内径約 25 mm の金属パイプの端面を利用して **Fig. 2 (a)** のように成型した。試料の細孔径分布(水銀圧入法により測定)を **Fig. 2 (b)** に示す。平均細孔径 d_p は約 1 μm である。試料に水溶液を含ませる際は、試料を密閉可能な容器に入れて容器内を真空引きし、その後、蒸留水または濃度 9 wt% の塩化ナトリウム水溶液を容器内に送り込んだ。蒸留水を含ませた試料全体の初期の平均含水率 X_0 (乾量基準) は、約 1.2 kg-water / kg-solid であった。その後、再び小さな密閉容器に入れ、試料温度を約 20°C に調整した。

実験時は、庫内を十分に予熱した後、パイレックスガラス内に調製した試料を電子天秤から吊り下げ設置した。

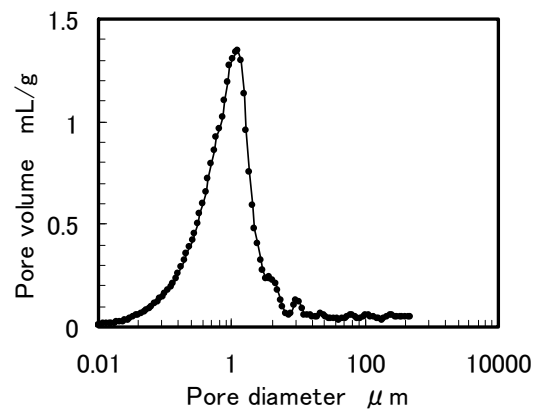
試料の質量測定時は、電子天秤にて 1 秒ごとに測定し、測定結果をもとに含水率変化、落下液滴質量、乾燥特性曲線を求めた。温度測定時は、ファイバーセンサ(株式会社計器, FS100, 耐熱温度 260°C, 感温部直径 1.2 mm, 長さ 4.0 mm)を、試料表面から中心部分まで差し込み、これを材料温度と定義して、1 秒ごとに測定・記録した。なお、マイクロ波を照射しない条件において、校正済みの熱電対を用いて校正し、100°C 以下では、誤差は 1°C 以内であった。乾燥後の試料表面近傍の塩化ナトリウムの残存量は、球状の試料表面から全面を試料作成時に用いたパイプにより平均 0.5 mm 削り、所定量の水に加えて十分に攪拌した後、上澄み液を塩分計(株式会社アタゴ製, ES-421)で測定した値から求めた。マイクロ波加熱に必要な消費電力は、マイクロ波印加時の電子レンジの電源の電流量の増加分から約 0.8 kW であった。

Table 1. Property of sample porous material

Containing liquid	Pure water	NaCl aqueous solution (9 wt%)
Initial moisture content X_0 (kg-water/kg-solid)	1.24 \pm 0.04	1.07 \pm 0.03
Mass of containing water m_{w0} (g)	10.0 \pm 0.1	9.8 \pm 0.1
Diameter D (mm)	30 \pm 0.1	
Initial temperature T_{m0} (°C)	20	
Porosity (-)	70%	
Specific heat C_{ps} (J/(g·K))	0.5	
Type (JIS R2611)	B-1	
Dry weight m_s (g)	8.1 \pm 0.2	



(a) Photo of porous sphere



(b) Pore size distribution

Fig. 2. Sample material (B-1)

Table 2. Experimental conditions

Gas temperature $T_{\text{gas}}(^{\circ}\text{C})$	Gas velocity $U_{\text{gas}}(\text{m/s})$	Containing liquid	Wet-bulb temperature $T_{\text{wet}}(^{\circ}\text{C})$ (Moller fraction)	Microwave (360-720 sec) 500 W (Set value)	Labels
160	1.0	Pure water	47 (2%)	None	HA
				Irradiation	HA+MW
		NaCl aqueous solution (9 wt%)	80 (44%)	None	HHA
				Irradiation	HHA+MW
			100 (100%)	None	SHS
				Irradiation	SHS+MW

2.3 実験条件

Table 2 に実験条件を示す。実験条件としての気流温度 T_{gas} はテストセクション上流側中心部の温度とした。また、気流は室内の空気をそのまま加熱したもの ($T_{\text{wet}} = 47^{\circ}\text{C}$, HA)、ボイラからの蒸気をそのまま加熱し、空気の混合のない過熱水蒸気 ($T_{\text{wet}} = 100^{\circ}\text{C}$, SHS)、さらに、室内空気と過熱水蒸気を混合した高湿度空気 ($T_{\text{wet}} = 80^{\circ}\text{C}$, HHA) の三種類とした。なお、湿球温度は、気流温度の測定箇所での濡れたガーゼを巻いた熱電対の実測値を用いた。流速は試料の無い状態でのパイレックスガラスパイプ内の断面平均流速が 1 m/s となるように、ブロワのインバータあるいはボイラの印加電力を制御した。マイクロ波の照射は、基礎研究としての解析を行い易くするため、定率乾燥区間の始まり付近に相当する、加熱開始後 360 秒から 720 秒までの 360 秒間とした。

3. 結果と考察

3.1 質量変化と表面温度変化

3.1.1 空気中で乾燥した場合

まず、室内空気を乾燥熱風とした場合について、Fig. 3 (a) には試料に水を含ませた場合の温度 (○●) と含水率 (△▲) の変化を、Fig. 3 (b) には試料に食塩水を含ませた場合の結果をそれぞれ示す。また、両図の白抜き記号は、マイクロ波を印加しない場合、黒は印加した場合の結果である。

Fig. 3 (a) の水を含ませた試料でマイクロ波を照射しない条件では、600 秒から 1,500 秒付近まで、温度ならびに、含水率の減少速度がほぼ一定となる定率乾燥区間が見られる。このときの温度は、約 46°C であり、湿球温度とほぼ

等しい値となっている。その後、温度が上昇し、2,500 秒付近で再び 73°C で一時的に温度上昇が緩やかになるが、3,200 秒付近で水分がほぼ 0 となるあたりから、再び急速に温度が上昇し、気流の乾球温度に近づいた。マイクロ波を照射する条件では、360 秒の照射直後に 104°C 付近まで急速に温度が上昇した後に、徐々に 100°C 付近まで低下し、さらに 720 秒でマイクロ波の照射を停止した後、再び温度は湿球温度付近まで低下した。マイクロ波を照射している間は、含水率が急激に低下し、このとき目視観察から水分が試料からしみ出し、液滴として落下する現象が見られた。マイクロ波を照射している 360 秒間で、初期の水分の約 60% が減少する結果となった。また、含水率が 0.05 になるまでの乾燥時間は約 32% 短縮された。

一方、Fig. 3 (b) の食塩水を含ませた試料の場合、Fig. 3 (a) のマイクロ波を照射しない場合と結果を比較すると、明確な定率乾燥区間は観察されず、また、温度は湿球温度付近で一定になることなく、 100°C 付近まで上昇を続けることがわかる。その後、2,000 秒から 3,400 秒まで、約 100°C を維持しているが、含水率の低下がすすむと、再び温度が低下する減少が見られた。温度が 100°C まで上昇する原因として、表面近傍に食塩水が析出し、表面近傍の細孔内が飽和した塩水溶液で満たされた細孔が存在すると共に、結晶により細孔が閉じられ、材料内部から外部への蒸気の移動抵抗が増大したためと考えられる。その後、さらに乾燥が進み、表面近傍の含水率が低下すると、一部の細孔が開いて、再び内部から外部への蒸気流路ができ、水蒸気の移動抵抗が減少することにより、わずかな温度低下がみられたと考えられる。同条件でマイクロ波を照射すると、水の場合とは異なり、温度は 100°C 付

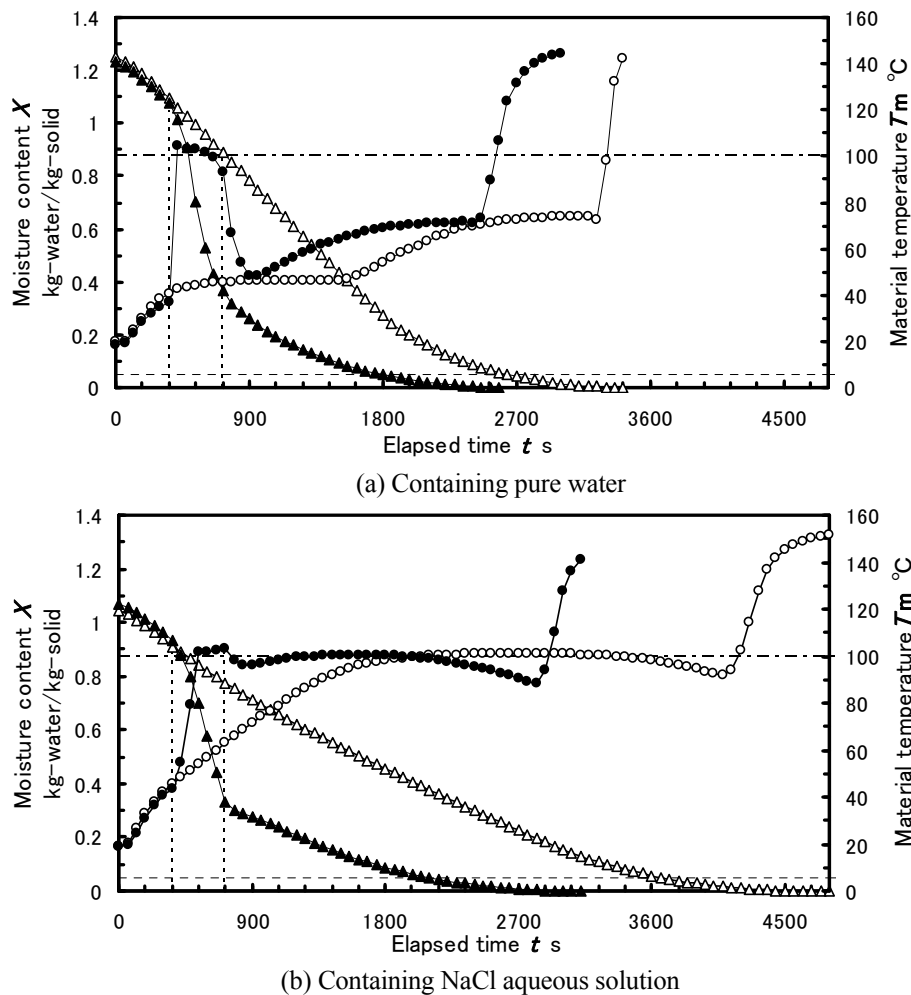


Fig. 3. Moisture content and material temperature changes of sample during drying with hot room air (HA)

近まで上昇し、さらに約 103°C まで徐々に上昇を続けた。マイクロ波照射中の含水率の低下は、水を含む場合と比べると、直線的に減少した。また、マイクロ波の照射を停止した後も、水を含ませた場合と異なり、温度は 10°C 程度しか低下しなかった。

水を含む試料の場合、マイクロ波の誘電率が低いため浸透深さが深くなり(25°C の場合、誘電損失係数 12.3、電力半減深度 9.7 mm ^{[7][8]})、試料の中心付近で加熱が起こりやすく、一部で水の熱膨張あるいは蒸発がおきる。このとき、内部から外部に通じる細孔内には水が充填されているため、水の粘性抵抗により内圧が上がるために、内部の温度が 100°C を超えたと考えられる。その後は、含水率の低下と共に、内部から外部への圧力を緩和するための流路が生まれ、さらに、水の場合は温度が高くなるほどマイクロ波の吸収率が低下することから、徐々に大気圧の沸点(100°C)近傍まで低下した。一方、食塩水の場合は、誘

電率が高く浸透深さが浅いため(25°C , 9 wt% の場合、誘電損失係数 102^[9])、マイクロ波のエネルギーは表面付近で吸収される量が多く、そのため、内部での圧力の上昇は起きにくく、水の場合のように 100°C を大きく超えることはなかった。また材料温度はマイクロ波照射中も徐々に沸点である 100°C を越えて 102°C 付近まで上昇した。これは、水の蒸発に伴う塩濃度の上昇による水分の活量低下によるものと考えられる。

3. 1. 2 過熱水蒸気中で乾燥した場合

Fig. 4 (a) の白丸ならびに白三角で示されるように、過熱水蒸気中では、初期の水蒸気の凝縮により^[10] 100°C まで急速に温度が上昇し、その後、約 100°C で一定を保つ定率乾燥区間が見られた。なお、加熱直後には、試料に水蒸気が凝縮すると共に、凝縮水が落下する現象が観察された。また、空気中での乾燥とは異なり、 100°C を保ったまま含水率がほぼ 0 になり、その後、気流温度に近づいた。

マイクロ波を照射する条件では、空気の場合よりも高い110°C付近まで一旦上昇した後、マイクロ波照射中に約100°Cまで徐々に低下した。

Fig. 4 (b) の食塩を含ませた場合で、マイクロ波を照射しない条件では、空気中での乾燥の場合とは異なり、温度変化は水を含ませたものと比較的近い履歴となった。またマイクロ波の照射直後に顕著な温度上昇は見られなかった。塩水溶液を含む試料の場合は、この過熱水蒸気の条件でのみ液滴の落下が観察された。マイクロ波照射を停止した後の材料温度は、水の場合は約100°C、塩水溶液を含む場合は約102°Cを維持しながら、含水率の低下をつづけた。

3.2 液滴の落下現象

目視観察により、過熱水蒸気の初期の凝縮が起きている過程、ならびに、マイクロ波を照射している間に、試料か

ら液滴が落下する様子が観察された。その際の質量の測定データの一例をそれぞれ Fig. 5 (a) (b) に示す。Fig. 5 (a)では、初期に質量が増加していることがわかる。また、数回、液滴が落下することにより、質量変化が不連続になっている。このとき、100秒付近までは液滴が落下した後も質量増加が見られることから、凝縮が続いていることがわかる。さらに、落下する液滴の質量は、凝縮した水分よりも多いことから、凝縮水と共に試料に初期に含まれていた水分もしみだして落下していることがわかる。この間での不連続に減少した質量を積算し、凝縮過程における落下液滴質量 $m_{\text{drop,cond}}$ を得た。また、Fig. 5 (b) は、マイクロ波照射中の質量変化の詳細である。質量減少には液滴落下と共に、蒸発も大きく寄与していると考えられる。そのため、この間では、質量変化の傾きが図中の一点鎖線の傾きより急な箇所では液滴が落下していると、それぞれの1秒

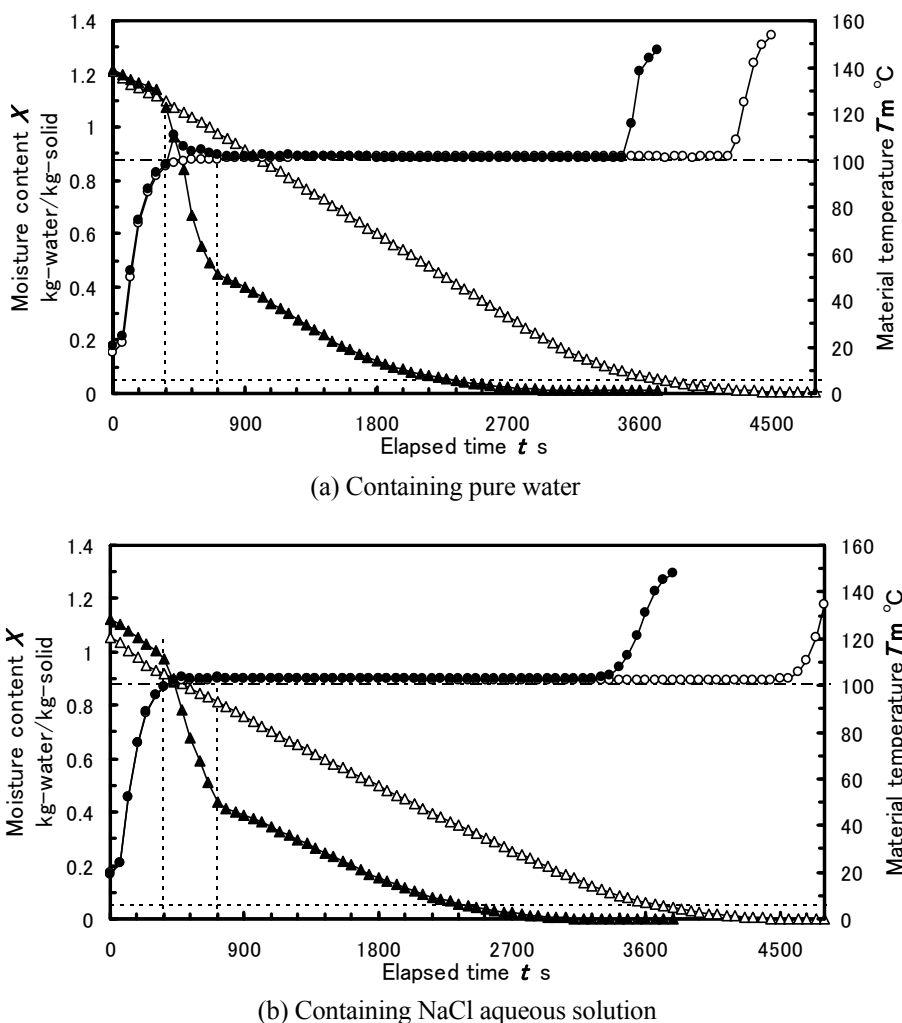


Fig. 4. Moisture content and material temperature changes of sample during drying with superheated steam (SHS)

の間に液滴が落下した質量から、その前後の対流伝熱による蒸発量の勾配分を差し引いた量を落下液滴質量 $m_{\text{drop,MW}}$ とした。

これらの算出結果から、全ての実験条件における初期の凝縮過程ならびにマイクロ波照射中の落下液滴質量 m_{drop} を求めた。Fig. 6 (a) (b)に、水を含ませた場合、食塩水を含ませた場合の結果をそれぞれ示す。

Fig. 6において、凝縮中における液滴の落下液滴質量 $m_{\text{drop,cond}}$ を (a) (b) でそれぞれ比較すると、水をしみこませた場合と食塩水をしみこませた場合で大きな相違はなく、高湿度条件(HHA)で 0.3 g 程度、過熱水蒸気では 0.9 g

程度であり、初期に含まれている水分質量 m_{w0} (約 10 g) に対して、それぞれ 3%、9% 程度であった。また、マイクロ波照射前の現象であるので、マイクロ波の影響はなかった。

一方、マイクロ波照射中の落下液滴質量 $m_{\text{drop,MW}}$ では、水の場合は空気、高湿度、過熱水蒸気の全ての条件で落下が確認され、また、気流の水蒸気の割合が増加するほど、落下量が増える傾向にあり、高湿度、過熱水蒸気では、0.6~0.9 g であった。しかし、食塩水を含ませた場合は、高湿度(HHA)では落下は確認されず、また、過熱水蒸気の場合でも、水の場合に比べて少なかった。

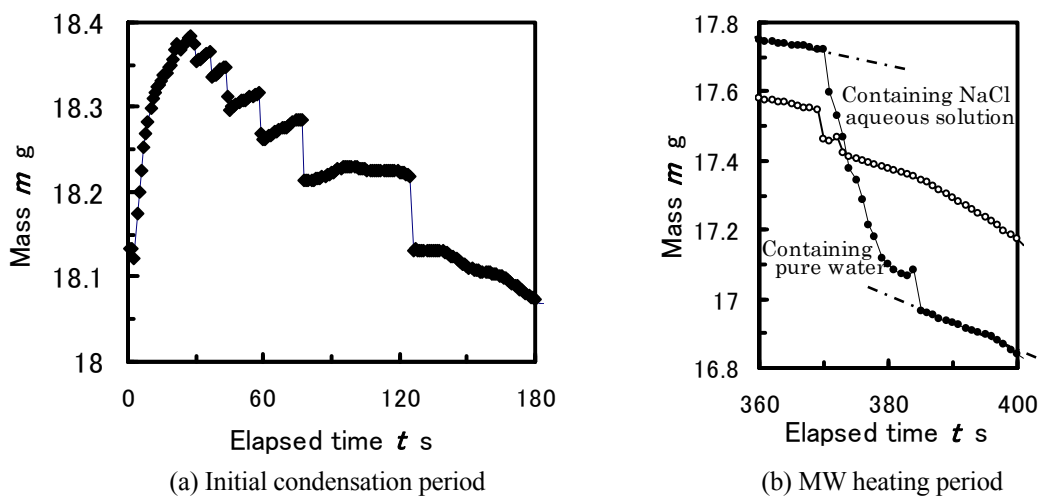


Fig. 5. Details of mass change of superheated steam drying

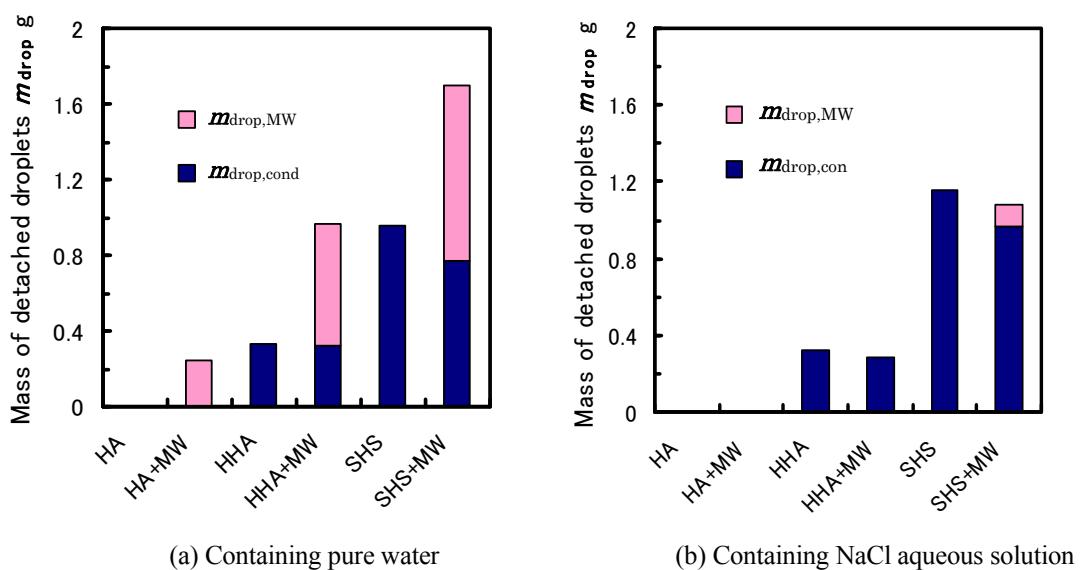


Fig. 6. Total mass of detached droplets during initial condensation and MW heating period

3.3 表面近傍での食塩残存量

乾燥後の試料表面近傍の食塩の量を測定した結果を Fig. 7 に示す。湿度が高いほど、また、マイクロ波を照射する条件ほど、わずかに増加する傾向が見られ、0.3~0.4 g 程度であった。乾燥開始前には、食塩はおよそ 1 g 程度含まれているため、残りの塩は試料内部か落下した水滴に含まれていたと考えられる。凝縮中の落下液滴中には、液滴が初期の水溶液濃度であったとすると、Fig. 7 に示した結果から、その量はおよそ 0.03 から 0.05 g 程度とわずかであり、ほとんどが試料内部に残存していると考えられる。また、既報^[11] で使用した乾燥の数値解析法を用いて、水を含んだ試料での、表面近傍で蒸発する水分量を推算したところ、本実験条件では水分全体の 80% 程度であることがわかった。この結果は、水をしみこませた場合の初期含水率に対する、限界含水率と初期含水率の差の割合は実験値とほぼ一致していた。この間に表面で水が蒸発していたとし、試料内部での水分蒸発する場所が塩水溶液を含む試料の場合にも同じであったとすると、表面近傍では 0.8 g 程度の塩分が残存するはずであるが、塩分量の測定値はその値よりも小さかった。したがって、食塩を含む材料の場合、試料の内部で蒸発する水分量が、水を含む材料の場合よりも多いことが推察された。

3.4 乾燥時間

Fig. 8 に、それぞれの乾燥条件において、水のみをしみこませた場合に含水率 X が 0.05 になるまでの時間、食塩水をしみこませた場合の乾燥時間の増加量、さらに、それぞれの条件でのマイクロ波照射による乾燥時間の短縮

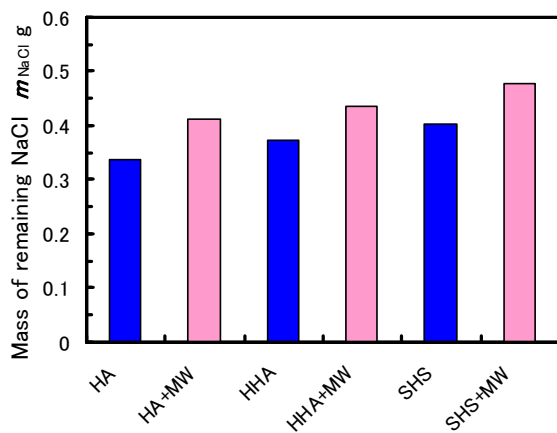


Fig. 7. Mass of remaining NaCl at the surface of 0.5 mm thick layer after drying

率を示す。

Fig. 8 より、低湿度の空気を用いた乾燥時の方が、材料に塩が含まれることによる乾燥の増加時間が大きいことがわかる。一方、過熱水蒸気では、乾燥時間は食塩を含ませてもほとんど変化が無かった。また、食塩を含ませた試料では、HA、HHA、SHS で大きな違いがないことから、気流湿度が乾燥時間に与える影響が小さい結果となった。

マイクロ波を照射による時間短縮効果についてみると、水を含ませた場合では、高湿度の方がマイクロ波による効果がやや大きくなる傾向がみられ、その原因として、Fig. 6 に示したように、落下液滴量が高湿度の方が多いたことが挙げられる。一方、食塩水を含ませた場合、高湿度域(HHA, SHS)で液滴の落下量が少ないこともあり、短縮効果は水を含ませた場合に比べて小さい。また、空気中(HA)では食塩水を含ませることで乾燥時間が大幅に長くなるが、マイクロ波を照射した場合は、液滴の落下が見られなかったものの、42%もの時間短縮効果が得られた。

3.5 材料の熱・物質収支と形態別伝熱量

始めに、乾燥開始から終了時 ($X = 0.05$) までの物質収支について考える。この期間に蒸発する水分質量を m_{evap} 、気流から凝縮する水分質量 m_{cond} 、落下する水分質量 m_{drop} として、次式 (1) が成立する。

$$m_{w0} = (m_{\text{evap}} - m_{\text{cond}}) + m_{\text{drop}} \quad (1)$$

熱収支については、対流およびふく射、マイクロ波による伝熱量をそれぞれ $Q_{\text{cv+r}}$ 、 Q_{MW} とすると、凝縮による加熱分を右辺に示して、次式 (2) が成り立つ。

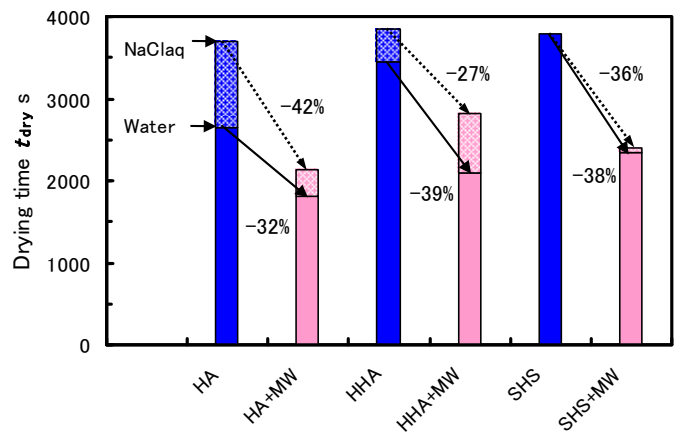


Fig. 8. Comparison of drying time

$$Q_{cv+r} + Q_{MW} = Q_{senc} + (m_{evap} - m_{cond})\gamma \quad (2)$$

左辺第1項は、対流とふく射による伝熱量であり、1秒毎の気流と材料の温度測定値を用いて、次式(3)で推算した。

$$Q_{cv+r} = hA \sum_{t=0}^{t_{dry}} (T_{gas,t} - T_{m,t}) \quad (3)$$

ここで、 h は水を含ませた試料の500秒～1,600秒の間の定率区間の乾燥速度のからもとめた対流とふく射の複合熱伝達係数である。 T_{gas} 、 T_m 、 A 、 Cp 、 γ はそれぞれ、気流温度、材料温度、試料表面積、試料の比熱、100℃での蒸発潜熱である。

Q_{MW} は、マイクロ波の照射期間である実験開始360秒から720秒の間で、落下をのぞいた質量変化量と温度変化量の和から、この間の対流伝熱量を差し引いて次式(4)でもとめた。

$$Q_{MW} = \{Cp_s m_s (T_{m,720} - T_{m,360}) + Cp_{water} \sum_{t=360}^{720} m_{w,t} (T_{m,t} - T_{m,t-1})\} + \{m_{w,360} - m_{w,720} - m_{drop,mw}\} \gamma - hA \sum_{t=360}^{720} (T_{gas,t} - T_{m,t}) \quad (4)$$

液滴の落下がなく、蒸発のみで水分が減少する場合の、乾燥開始から終了時($X = 0.05$)までの試料のエンタルピーの変化量 ΔH は、乾燥初期、乾燥終了時の含水率が等しく、また、乾燥終了時の試料温度が各条件で25℃程度の

差異のために、気流条件によらずほぼ等しい。また、蒸発潜熱の温度依存性は50℃と100℃では約5%であるため、水分質量の変化量 Δm_w の蒸発に必要な潜熱の材料温度による差も無視できるとすると、(1)(2)式から得られる下記(5)式の右辺は全ての条件でほぼ等しくなる。

$$Q_{cv+r} + Q_{MW} + m_{drop} \gamma = \Delta H + \Delta m_w \gamma \quad (5)$$

そこで、(5)式の左辺の各実験条件における内訳について求めた結果を、Fig. 9に示す。また Q_{MW} については、(4)式の右辺第1項の顕熱分を $Q_{MW,senc}$ 、第2項と第3項の和を $Q_{MW,evap}$ として、それぞれ示した。水を含ませた場合と、塩水溶液を含ませた場合それぞれで、合計の値がほぼ等しい(約27kJ, 約25kJ)ことが確認できる。特に、初期の凝縮過程ならびにマイクロ波照射時の液滴の落下量が多い過熱水蒸気乾燥において、落下液滴分の蒸発潜熱が必要なくなるため、水分を低下させるために必要な熱量が減少することになる。また、マイクロ波による加熱量が顕熱に使用される割合は、高湿度空気(HA)の方が大きいことがわかる。

3.6 形態別の伝熱量とエネルギー消費量の低減について

前節では、水分低下に必要な熱量を伝熱形態別に検討したが、本節では、乾燥に必要な熱風を発生させるためのエネルギー量、マイクロ波を発生させるために必要なエネルギー量を、本実験装置での装置構成に基づいて、それぞれ試算した。

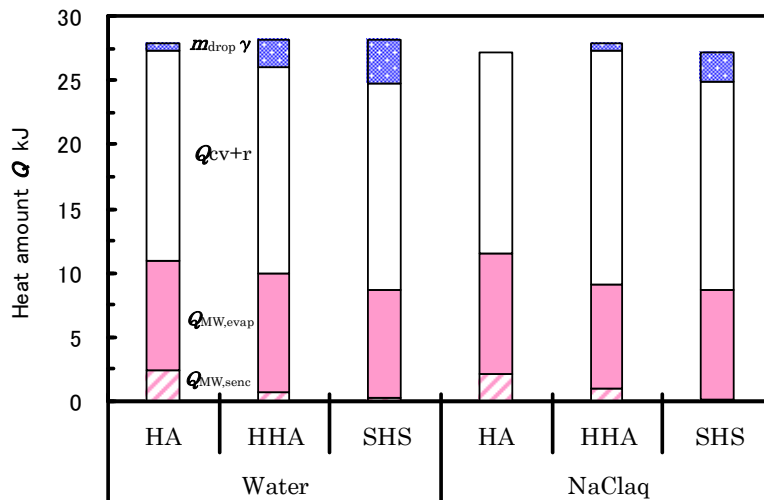


Fig. 9. Amount of heat transfer to the sample during drying with MW irradiation

実験装置での消費エネルギー量の計算は空気の顕熱量 E_{air} 、水(液体)の顕熱量 E_{water} 、水の蒸発潜熱量 E_{evap} 、水蒸気の顕熱量 E_{steam} 、マイクロ照射電力量 E_{MW} の五つに分けて計算を行った。計算式をそれぞれ式 (6)~(10) に示す。計算の条件は、ボイラ内の水とブロワから送られる空気の初期温度は 20°C とし、どちらも 160°C まで昇温させるものとした。また、ボイラ、ヒータの効率は1として計算し、系全体は完全に断熱であるとして放熱量は0とした。

水蒸気、空気、水の定圧比熱ならびに 100°C での水の蒸発潜熱は、それぞれ $C_{p\text{steam}} = 1.98 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 、 $C_{p\text{air}} = 1.01 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 、 $C_{p\text{water}} = 4.19 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 、 $\gamma = 2,257 \text{ kJ}/\text{kg}$ とした。

$$E_{\text{air}} = \{G_{\text{air}} C_{p\text{air}} (T_{\text{gas}} - T_{\text{ini}})\} t_{\text{dry}} \quad (6)$$

$$E_{\text{water}} = \{G_{\text{water}} C_{p\text{water}} (T_{\text{boil}} - T_{\text{ini}})\} t_{\text{dry}} \quad (7)$$

$$E_{\text{evap}} = \gamma G_{\text{steam}} \quad (8)$$

$$E_{\text{steam}} = \{G_{\text{steam}} C_{p\text{steam}} (T_{\text{gas}} - T_{\text{boil}})\} t_{\text{dry}} \quad (9)$$

$$E_{\text{MW}} = 0.8 t_{\text{MW}} \quad (10)$$

ここで、 G_{steam} : 水蒸気の質量流量 (kg/s)、 G_{air} : 空気の質量流量 (kg/s)、 T_{gas} : 気流温度 ($= 160^{\circ}\text{C}$)、 T_{ini} : 水、空気の初期温度 ($= 20^{\circ}\text{C}$)、 T_{boil} : 水の沸点 ($= 100^{\circ}\text{C}$)、 t_{dry} : Fig. 8 で示した各条件での乾燥時間 (s)、 t_{MW} : マイクロ波の照

射時間 ($= 360 \text{ s}$) をそれぞれ表す。式 (10) の 0.8 は測定した消費電力 (kW) である。

計算結果を Fig. 10 に示す。SHS では、水蒸気を発生させるためのエネルギー消費量が非常に大きいことがわかる。また、本実験装置では、排気を循環利用しないために、すべて排気の排熱となる。この点が、開放形の過熱水蒸気乾燥装置の大きな問題になっており、実機では、排熱からの熱回収が必須であることが分かる。従って、本実験では、乾燥時間を短縮することが、そのままエネルギー消費量を削減することになり、マイクロ波加熱により、高湿度空気、あるいは過熱水蒸気乾燥では、大きなエネルギー消費量の削減となった。なお、本実験装置および条件での空気乾燥(HA)では、塩水溶液を含ませた試料ではエネルギー消費量の削減効果が得られたが、水を含ませた場合は、逆にマイクロ波を照射することによりエネルギー消費量の増加がみられた。

4. 結言と課題

乾燥や食品加工への過熱水蒸気の利用技術の確立を目的とし、空気、高湿度空気、過熱水蒸気を乾燥熱風として、塩水溶液を含む多孔質材料のマイクロ波加熱を併用した気流乾燥法について実験的に検討した。さらに、エネルギーと物質の収支を整理、マイクロ波加熱の効果について考察を加えた。

その結果、空気中で水を含ませた試料を乾燥する場合、マイクロ波照射直後に温度は 104°C 以上まで急速に上昇

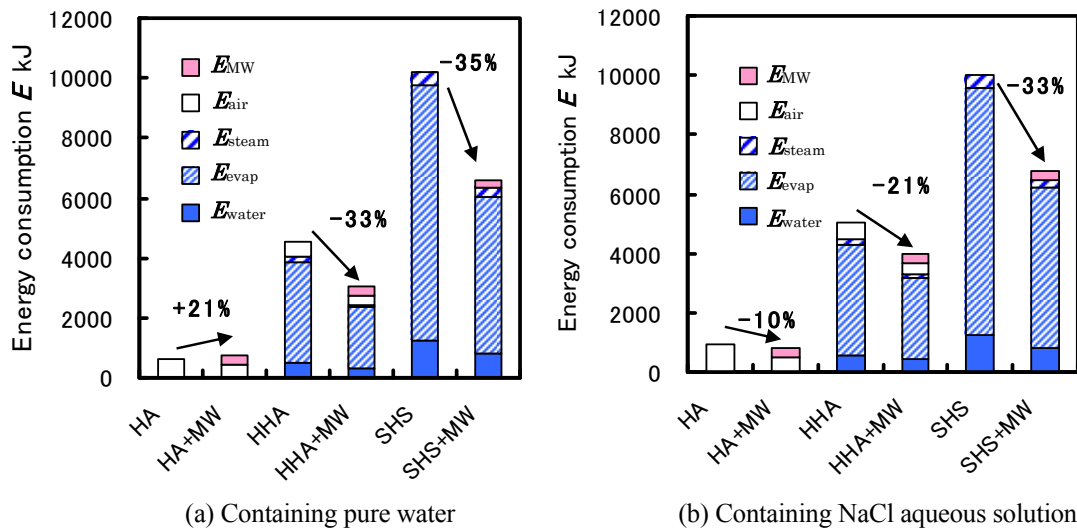


Fig. 10. Energy consumption of the experimental apparatus

し、その後、液滴の落下と水分蒸発により含水率が急速に低下し、同時に、温度も100度付近まで下がることが確かめられた。また、マイクロ波照射後は、湿球温度付近まで速やかに低下することがわかった。一方、塩水溶液を含ませた試料では、マイクロ波照射直後に102℃付近まで上昇し、その後、マイクロ波の照射中に103℃付近まで徐々に温度上昇が進むことがわかった。また、マイクロ波照射後の温度も水の場合とは異なり、高い温度のまま維持された。なお、マイクロ波照射中に試料からの液滴の落下は観察されなかった。

過熱水蒸気中で水を含ませた試料を乾燥する場合、材料温度は乾燥開始直後に凝縮により100℃まで急速に上昇し、さらにマイクロ波照射直後に110℃付近まで一時的に上昇した後、マイクロ波照射中の約360秒間に液滴落下と水分蒸発による含水率の急速な低下とともに、温度も100℃付近まで低下することがわかった。一方、塩水溶液を含ませた試料では、マイクロ波照射中、照射後も約102℃を保ちながら含水率の低下を続けた。また、塩水溶液を含ませた試料の場合は、過熱水蒸気のみでマイクロ波照射時の液滴落下が見られたが、その量は、水を含ませた材料よりも少なかった。

また、気流条件、マイクロ波の照射により、落下液滴質量が異なることなどから、乾燥後の試料に残存する塩分量あるいはその分布を制御する可能性を示した。さらに、短時間の照射でも乾燥時間短縮効果は顕著であり、乾燥排気量の低減による低環境負荷化の可能性が示唆された。

なお、本解析はモデルケースであり、被乾燥物の性質や装置構造、マイクロ波の印加条件等によって結果がおおきく異なることが予測されるが、本論文で提案した解析方法、実験ならびに解析結果は、装置構造あるいは過熱水蒸気の利用、乾燥プロセスの最適化のために有用であると考えられる。

参考文献

- (1) K. Wakabayashi; Moving-moisture in the Drying of Clay, J. Chem. Eng. Japan, 28(1), pp.12-18 (1964) (in Japanese)
- (2) R. Toei, S. Hayashi, S. Sawada and T. Fujitani; Liquid Fraction of Moisture Transfer in the Drying Process of Bed of Granular and Powdered Materials, J. Chem. Eng.

- Japan, 29(7), pp.525-532 (1965) (in Japanese)
- (3) P. Schultz and E. U. Schlunder; Convective Drying of Porous Bodies wetted with an alcohol-Water-Salt-Mixture, Proc. of 6th Int. Drying Symp. Vol II, (page)PB63-PB70, Versailles, France (1988)
- (4) T. Nomura and H. Iyota; "Superheated Steam Drying", Kagaku Kougaku, 66, 409-413, (2002) (in Japanese)
- (5) H. Iyota, N. Kinoshita, T. Inoue, N. Nishimura and M. Yoshida; Effect of Steam Concentration in Drying Medium on Convective Drying of Porous Material Containing NaCl Aqueous Solution, Proc. of 16th Int. Drying Symposium, Vol.A, pp152-158, Hyderabad, India (2008)
- (6) H. Iyota, S. Fujita, N. Kinoshita, M. Yoshida and A. Hashimoto; Drying Characteristics of Porous Material Containing Sucrose / NaCl Aqueous Solution at Wide Range of Steam Partial Pressures, Proc. of 3rd International Symposium on Advanced Fluid/Solid Science and Technology in Experimental Mechanics, P1-4-153(on CD-ROM), Tainan, Taiwan (2008)
- (7) T. Koshijima, ed.; "Calculation Method of Microwave Electric Power (in Japanese)" Shibata Chokichirou, Microwave Heating Engineering Book (Maikuroha Gijyutu Syusei), pp.4-13, NTS (1994) (in Japanese)
- (8) A. R. von Hippel ed.; "Tables of Dielectric materials", Dielectric Materials and Applications, p361, The Technology press of M.I.T and Jhon Wiley and Sons Inc., New York, USA (1954)
- (9) S. Murata ed.; "Electrochemistry", Chemical Handbook, Fundamental, 5th ed. (Kagaku Binran Kisohen, 5th ed.), 2, pp557-560 Maruzen, Tokyo, Japan (2004)
- (10) H. Iyota, N. Nishimura and T. Nomura; Reverse Process of Superheated Steam Drying from Condensation to Evaporation, Trans. of JSME, B63-612, pp2764-2770 (1997)
- (11) T. Inoue, H. Iyota, N. Nishimura and T. Nomura; Effects of Dry-bulb and Wet-bulb Temperature on the drying time of spherical porous material in high temperature gas flow, Trans. of JSME, B728-73, pp1068-1076 (2007)

No. 0801

Study on Superheated Steam Drying Combined with Microwave Heating of Porous Material Containing NaCl Aqueous Solution

¹Hiroyuki Iyota, ¹Nobuya Nishimura and ²Hironobu Imakoma

¹Department of Mechanical and Physical Engineering, Osaka City University

²Department of Chemical Science and Engineering, Kobe University

Summary

Materials such as food or chemical products contain water in which some water-soluble solute is dissolved. However, no studies on the superheated drying of materials containing a water-soluble solute combined with microwave heating have been reported thus far.

In this study, a spherical porous material (diameter: 30 mm) containing an NaCl aqueous solution was used as a sample material. The material temperature and moisture changes were measured continuously during drying using hot air, high humid air, and superheated steam as drying media. In addition, the effects of microwave irradiation and the amount of superheated steam in the drying media on the heat and mass balance during drying, drying time, and energy efficiency were investigated. These were also compared with the results for a material containing pure water. The flow velocity and temperature were 1 m/s and 160 °C, respectively, and microwaves were irradiated for 360 s from 360 s to 720 s during the experiment.

In the case of drying a material containing pure water with superheated steam, the material temperature increased to 100 °C by steam condensation before microwave irradiation. Subsequently, the temperature increased to 110 °C immediately, then decreased gradually to 100 °C, and the moisture content also decreased due to water evaporation and detached droplets during microwave irradiation. On the other hand, in the case of the porous material containing the NaCl aqueous solution, the material temperature was maintained virtually constant around 102 °C during and after microwave irradiation. The detached droplets from the material containing the NaCl aqueous solution were observed only in superheated steam, the total mass of the droplets was less than that in the case of the material containing pure water. The microwave irradiation has a significant effect in that it leads to a reduction in the drying time and energy consumption of open-type superheated steam drying.