

助成番号 0602

## 塩水溶液を含む多孔質材料の気流乾燥における水蒸気の高度利用研究

伊與田 浩志, 西村 伸也

大阪市立大学大学院工学研究科

**概要** 近年、環境負荷低減ならびに高効率化のため、乾燥装置や食品加工装置の密閉化が求められている。その際、乾燥熱風は循環利用するために水蒸気を多く含む空気となる。また、調理の分野では古くから水蒸気が巧みに利用されており、また、高湿度条件の極限となる過熱水蒸気は、乾燥や食品加工の分野での利用も注目されている。

一方、塩などの水溶性の溶質を含む材料を気流中で乾燥する際、材料表面からの水分蒸発に伴って材料内部から溶液の流れとともに溶質が表面に移動、あるいは材料表面への析出が起きる。しかしながら、空気から過熱水蒸気にいたる広範囲な気流の温度や湿度条件が、乾燥や加熱に伴う材料内部での塩の移動、あるいは表面での結晶の析出状態に与える影響は調べられていない。

本研究では、水、あるいは90 g/Lの塩化ナトリウム水溶液を、平均粒子径400  $\mu\text{m}$  および110  $\mu\text{m}$  のガラスビーズ充填層に含浸させたものを試料とし、気流温度80 $^{\circ}\text{C}$ ~220 $^{\circ}\text{C}$ 、湿度は気流の湿球温度をパラメータとして32 $^{\circ}\text{C}$ ~100 $^{\circ}\text{C}$  (過熱水蒸気)で乾燥実験をおこなうことにより、乾燥後の材料内の塩分の分布と表面での食塩の析出状態、ならびに乾燥中の温度変化、質量変化を連続的に測定することで乾燥特性を調べた。

その結果、気流温度によらず、試料表面に析出する塩は気流湿度が高いほど偏在化することが示された(下図)。また、水のみを含ませた場合は、蒸発速度が一定となる定率乾燥区間がみられ、気流湿度が高いほどその区間での材料温度が高く乾燥時間も長くなった。一方、塩化ナトリウム水溶液を含ませた場合には、気流温度が160 $^{\circ}\text{C}$ では、湿球温度が46 $^{\circ}\text{C}$ よりも60 $^{\circ}\text{C}$ の方が限界含水率は低く、定率乾燥区間が長くなることで乾燥時間も短くなることがわかった。これらのことから、高湿度空気の高度利用による乾燥後の塩の分布制御、乾燥時間の短縮、ひいては装置の高効率、低環境負荷化の可能性が示唆された。

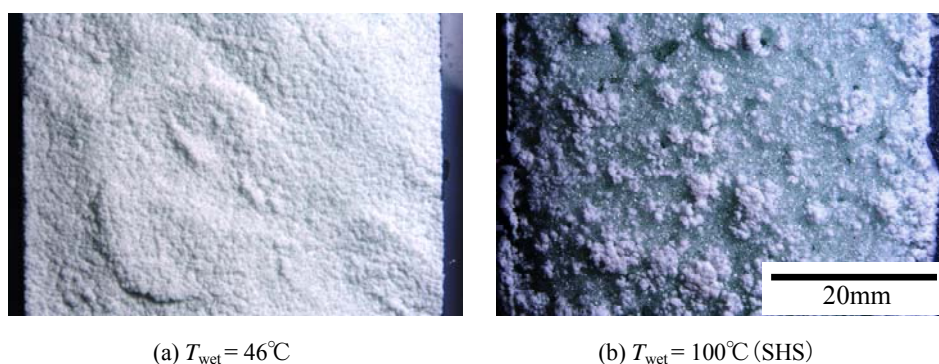


Fig. Photos of sample surface after drying.  
(Containing NaCl aqueous solution,  $T_{\text{dry}} = 220^{\circ}\text{C}$ ,  $d_p = 400 \mu\text{m}$ )

## 1. 緒言

乾燥装置や食品加工装置には環境負荷低減ならびに高効率化が強く求められている。その方法の一つとして、装置を密閉化して乾燥熱風を再循環して利用する方法があり、その熱風は、被処理物からの水分の蒸発により水蒸気が多く含まれた高湿度状態となる。したがって、被処理

物には、高湿度空気を直接接触させることで乾燥等の処理がなされる。一方、調理の分野では古くから水蒸気が巧みに利用されており、近年では、高湿度条件の極限となる大気圧近傍の過熱水蒸気の利用も注目されている<sup>(1)</sup>。

ところで、食塩などの水溶性の溶質を含む材料を気流中で乾燥する際、材料表面からの水分蒸発に伴って、溶

質は溶液の流れとともに材料内部から表面に移動、あるいは材料表面に析出する。しかしながら、これまで、通常の空気から過熱水蒸気にいたる広範囲な気流の湿度条件(水蒸気と空気の分圧比)が、乾燥や加熱に伴う材料内部での塩の移動、あるいは表面への結晶の析出状態に与える詳細な影響は調べられていない。乾燥中の材料内の水溶性成分の移動や表面への溶質析出は、乾燥後の材料の品質に大きな影響を与えると同時に、乾燥時間、ひいては乾燥におけるエネルギー効率にも影響を及ぼす可能性がある。

このような背景のもと、本研究は、過熱水蒸気あるいは通常の室内空気比べて多くの水蒸気を含む高湿度空気の直接接触による材料の加熱あるいは乾燥技術、塩水溶液を含む材料の乾燥・加工後の製品品質の向上、加工プロセスの高効率化ならびに完全密閉形式で環境負荷の小さな装置の設計技術の確立を目的としている。本報告では、その基礎研究として塩化ナトリウム水溶液を含浸させた多孔材料を試料として、加熱に伴う材料内部での塩の移動や表面への析出状態、乾燥特性や乾燥時間に与える気流中の水蒸気の存在割合(湿度)の影響、さらには気流温度、材料細孔径の影響についても調べた。また、

実験結果をもとに、気流から材料への熱伝達や乾燥機構に与える塩の影響についても考察した。

## 2. 実験装置と方法

### 2.1 実験装置

実験に用いた装置の概要を図1に示す。乾燥熱風は、ブロワから送られる室内空気およびボイラから発生した蒸気を混合し、スーパーヒータで加熱することで所定の湿度、温度となるように調整する。所定の条件となった乾燥熱風は、整流部通過後にテストセクションに供給する。本装置により、室内空気から過熱水蒸気に至る広い範囲の湿度条件、ならびに 80°C~250°Cの気流温度条件で乾燥実験が可能である。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。湿度測定は、気流温度の測定箇所であれたガーゼを巻いた熱電対の温度を測定し、その温度を近似的に湿球温度  $T_{wet}$  として扱った。流速は、体積流量計で計測された温度と流量より、テストセクション部での断面平均流速を求め、すべての実験条件で 1 m/sとした。実験時には、図2に示すトレーに試料であるガラスビーズを表面まで入れ、側面と下面を断熱材で覆った後、テストセクション下側から電子天秤上に設置し

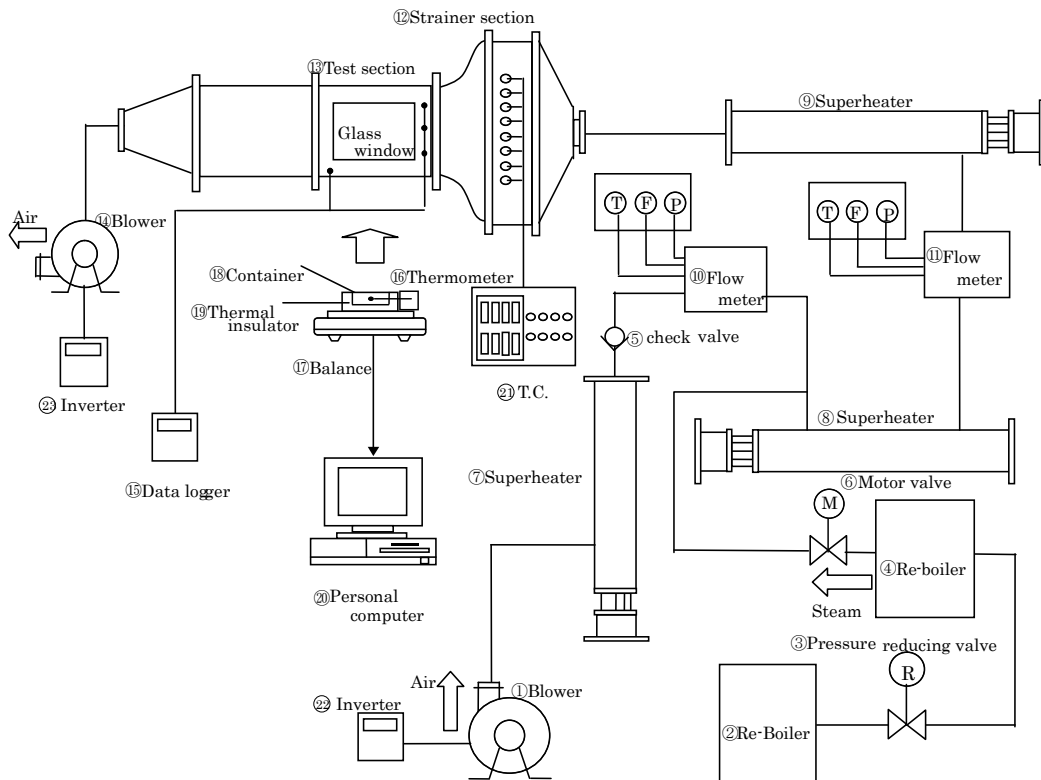


Fig. 1 Experimental apparatus.

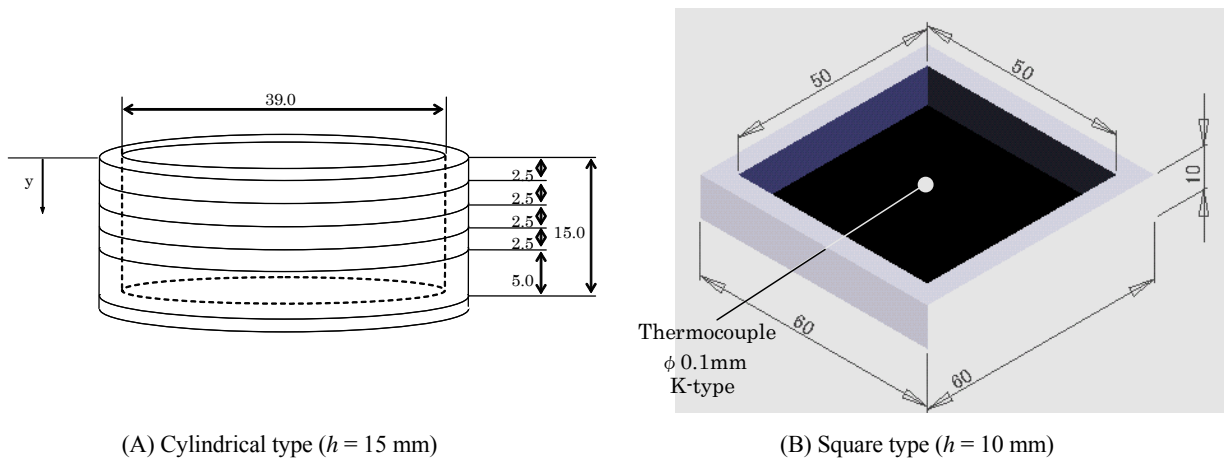


Fig. 2 Outline of tray

た。その際、テストセクション底部と試料表面の高さを一致させ、試料表面のみが乾燥熱風にさらされるようにした。また、テストセクションは断熱性をもたせるために二重のピアレックスガラスとなっており、乾燥中の材料の表面状態の観察が可能である。

## 2.2 試料と実験条件

多孔質材料のモデル試料としてガラスビーズ充填層を用い、蒸留水または濃度 90 g/L の塩化ナトリウム水溶液を含ませたものを試料とした。ガラスビーズの平均粒子径は、110  $\mu\text{m}$ , 400  $\mu\text{m}$  とした(アズワン製ソーダガラス, B-01, B-04)。それぞれの粒子径での充填層平均細孔径  $d_p$  は約 40  $\mu\text{m}$ , 135  $\mu\text{m}$ (水銀圧入法により測定)であった。試料全体の平均含水率  $X$ (乾量基準)は、約 0.2 kg-water/kg-solid(空隙がほぼ溶液で満たされる程度)とした。

試料を入れるトレーとして、図2(A)(B)に示すように二種類のものを用いた。図2の(A)のトレーは、内径 39 mm, 深さ 15 mm で、表面から 2.5 mm ずつ 4 層、底部のみ 5 mm の 5 層に分割でき、乾燥後のガラスビーズ充填層内に残存する食塩の量を調べる際に用いた。乾燥後の溶質分布は、試料をトレーと共に各層に分割し、食塩の付着したガラスビーズを層ごとに所定量の水に加えて十分に攪拌後、上澄み液を塩分計(ES-421, (株)アタゴ製)で測定し

た値から求めた。なお、濃度分布測定実験の際の条件は、気流温度 160 $^{\circ}\text{C}$ 、湿球温度 46 $^{\circ}\text{C}$ , 62 $^{\circ}\text{C}$ , 78 $^{\circ}\text{C}$ , ガラスビーズ直径 400  $\mu\text{m}$ , 110  $\mu\text{m}$  とした。

図2(B)のトレーは、一辺が 50 mm, 深さ 10 mm の正方形のポリカーボネート製で、表面観察ならびに温度・質量変化測定の際に用いた。乾燥中の試料質量は電子天秤により 1 秒ごとに測定し、測定結果をもとに含水率変化、乾燥特性曲線を求めた。同時に、容器側面から線径 0.1 mm の熱電対を、試料表面から深さ 0.5 mm の中心部分まで差し込み、これを表面温度と定義して、記録機能を有する温度計により 4 秒ごとに測定した。乾燥後の塩化ナトリウム水溶液を含ませた試料は、表面に析出する塩化ナトリウムの結晶の状態を調べるために写真撮影を行った。表1に温度と質量測定、ならびに表面観察の際の実験条件を示す。なお、乾燥開始時の試料温度は約 26~30 $^{\circ}\text{C}$ に調整した。

## 2.3 過熱水蒸気領域を含む湿球温度・乾球温度・水蒸気分圧の関係

室内用の簡易な乾・湿球温度計は、ぬれたガーゼの定常蒸発時の温度(近似的な湿球温度)と乾球温度により、相対湿度を測定する方法が広く用いられている。しかし、低流速場では、温度・濃度・速度場が相互に影響を与え

Table 1 Experiment conditions

Containing solution	Gas temperature $T_{\text{gas}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Gas velocity $U_{\text{gas}}$ (m/s)	Wet-bulb temperature $T_{\text{wet}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Glass beads mean diameter $d_p$ ( $\mu\text{m}$ )
Water NaCl (90g/L)	80	1.0	(a) 32, (b) 47	400
	160		(c) 46, (d) 60, (e) 80 (j) 46, (k) 60, (l) 80	400 110
	220		(f) 52, (g) 60, (h) 80, (i) 100	400

る可能性があることや、ふく射伝熱の影響を受け易くなることから、本方法により湿球温度を正確に測定するには、流速がおおよそ 5 m/s 以上で、ふく射伝熱の無い場で測定することが必要とされている<sup>(2)</sup>。本実験での測定は、流速が 1 m/s で、装置壁面はステンレスとパイレックスガラスで、ふく射の影響も否定できない状態である。しかし、本実験での低湿度(室内空気)条件では、アスマン通風計(JIS Z 8806 に準拠)で測定した室内空気湿度から求められる断熱冷却温度と 3°C 程度の誤差で、また、過熱水蒸気では沸点の 100°C と 0.5°C 程度の誤差で一致することから、測定された温度を近似的に湿球温度として扱った。また、湿球温度は一般に断熱冷却温度と近似できることから<sup>(3)</sup>、以下の方法で測定された値から気流の水蒸気分圧ならびに露点温度の推算をおこなうことができる。

まず、測定された温度(断熱冷却温度とする)  $T'$  より、その温度での水の蒸発潜熱  $\gamma'$ 、飽和空気の水蒸気分圧  $P'_{\text{steam}}$  (Antoine's equation<sup>(4)</sup>)、乾き空気 1 kg あたりに含まれる水蒸気の質量  $m'_{\text{steam}}$  は、それぞれ(1)~(3)式で示される。

$$\gamma' = \gamma_0 + (C_{P_{\text{steam}}} - C_{P_{\text{water}}})T' \quad (1)$$

$$P'_{\text{steam}} = 10^{\left(\frac{7.07406 - \frac{1657.46}{227.02 + T'}}{1}\right)} \quad (2)$$

$$m'_{\text{steam}} = \frac{P'_{\text{steam}} m_{\text{air}} M_{\text{steam}}}{(P_{\text{total}} - P'_{\text{steam}}) M_{\text{air}}} \quad (3)$$

主流部での、乾き空気 1 kg あたりに含まれる水蒸気質量(絶対湿度)は(1)~(3)で求めた値と、断熱冷却温度の導出式を変形することにより(4)式で、水蒸気分圧は(5)式でそれぞれ求まる。

$$m_{\text{steam}} = \frac{\gamma' m'_{\text{steam}} - (T_{\text{dry}} - T') C_{P_{\text{air}}} m_{\text{air}}}{\gamma' + (T_{\text{dry}} - T') C_{P_{\text{steam}}}} \quad (4)$$

$$P_{\text{steam}} = \frac{m_{\text{steam}} M_{\text{air}}}{m_{\text{steam}} M_{\text{air}} + m_{\text{air}} M_{\text{steam}}} P_{\text{total}} \quad (5)$$

さらに、主流部での露点温度は式(2)を変形して、次式で求めることができる。

$$T_{\text{dew}} = \left( \frac{1657.46}{7.07406 - \log P_{\text{steam}}} - 227.02 \right) \quad (6)$$

ここで、水蒸気、空気、水の定圧比熱ならびに 0°C での水の蒸発潜熱は、それぞれ  $C_{P_{\text{steam}}}=1.846$  kJ/(kgK)、

$C_{P_{\text{air}}}=1.005$  kJ/(kgK)、 $C_{P_{\text{water}}}=4.186$  kJ/(kgK)、 $\gamma_0=2501$  kJ/kg、また、水蒸気および乾き空気の分子量、テストセクション内の圧力(大気圧)をそれぞれ  $M_{\text{steam}}=0.01802$  kg/mol、 $M_{\text{air}}=0.02897$  kg/mol、 $P_{\text{total}}=101.3$  kPa とした<sup>(5)</sup>。

上記方法により、気流温度と水蒸気分圧を横軸、縦軸とした図表上に本実験条件(主流部)を黒点で示したものを、図3に示す。

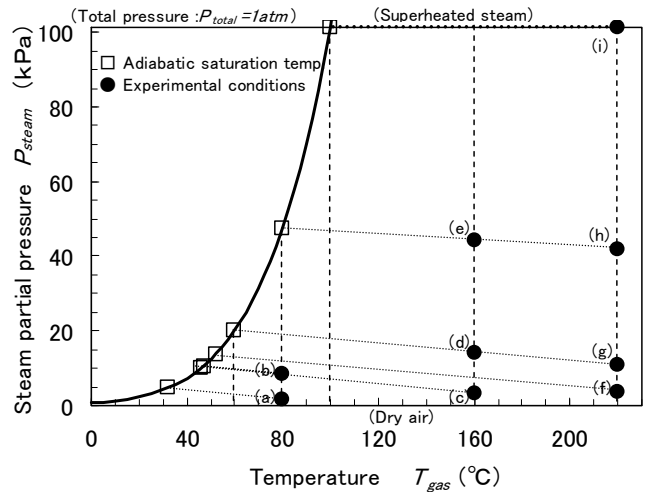


Fig. 3 Experimental conditions shown on gas temperature – steam partial pressure chart

### 3. 結果と考察

#### 3.1 乾燥後の塩化ナトリウムの析出(粒子径・湿球温度の影響)

まず、トレー(B)を用いた乾燥後の試料表面の写真観察結果を図4に示す。すべての条件で表面に塩化ナトリウムが析出した。各気流温度で、最も低湿度(室内空気)条件である (a), (c), (f) では、表面全体に結晶が密に析出し白色となっていることがわかる。一方、気流湿度が高くなると、どの気流温度条件においても、結晶の表面への析出が局在化した。さらに、過熱水蒸気条件となる (i) では、結晶の局在化が進むと共に、図中の Cross section of (i) に示すように、ガラスビーズと共に表面が盛り上がる現象が観察された。試料表面での塩結晶の存在は、乾燥中の材料内部および気流側境膜での水分あるいは水蒸気移動、気流から材料への対流伝熱に影響を及ぼすと考えられる。そこで、図4の写真を画像処理することにより、ガラスビーズ充填層表面全体の面積に対する、結晶によって覆われている見かけの面積の比を求めた結果を図5に示す。気流温度が 80°C の場合、通常空気の湿度とほぼ等しい  $T_{\text{wet}} = 32^\circ\text{C}$  では結晶析出面積は 100%となるが、 $T_{\text{wet}} = 47^\circ\text{C}$  で

は水蒸気分圧で7 kPa程度水蒸気が増えるだけにもかかわらず、析出面積比は大きく低下した。これらのことから、気流温度によらず、湿度が高い場合は、結晶で覆われた部分の面積比が小さくなり、その結果、ガラスビーズ表面が直接気流にさらされている面積も多くなると推察される。つぎに、トレー(A)を用いて、 $d_p = 110, 400 \mu\text{m}$ において、

塩水溶液を含ませた試料の乾燥後における塩分布を図6に示す。縦軸の溶質濃度  $C/C_{initial}$  は各層の体積に対する塩の質量を乾燥前の値で規格化したものである。図より、ガラスビーズ粒径および湿球温度に関わらず、表面あるいは表面層にほとんどが析出し、表面以外には0.1程度とほとんど存在しなかった。これは、材料内部で毛管吸引力

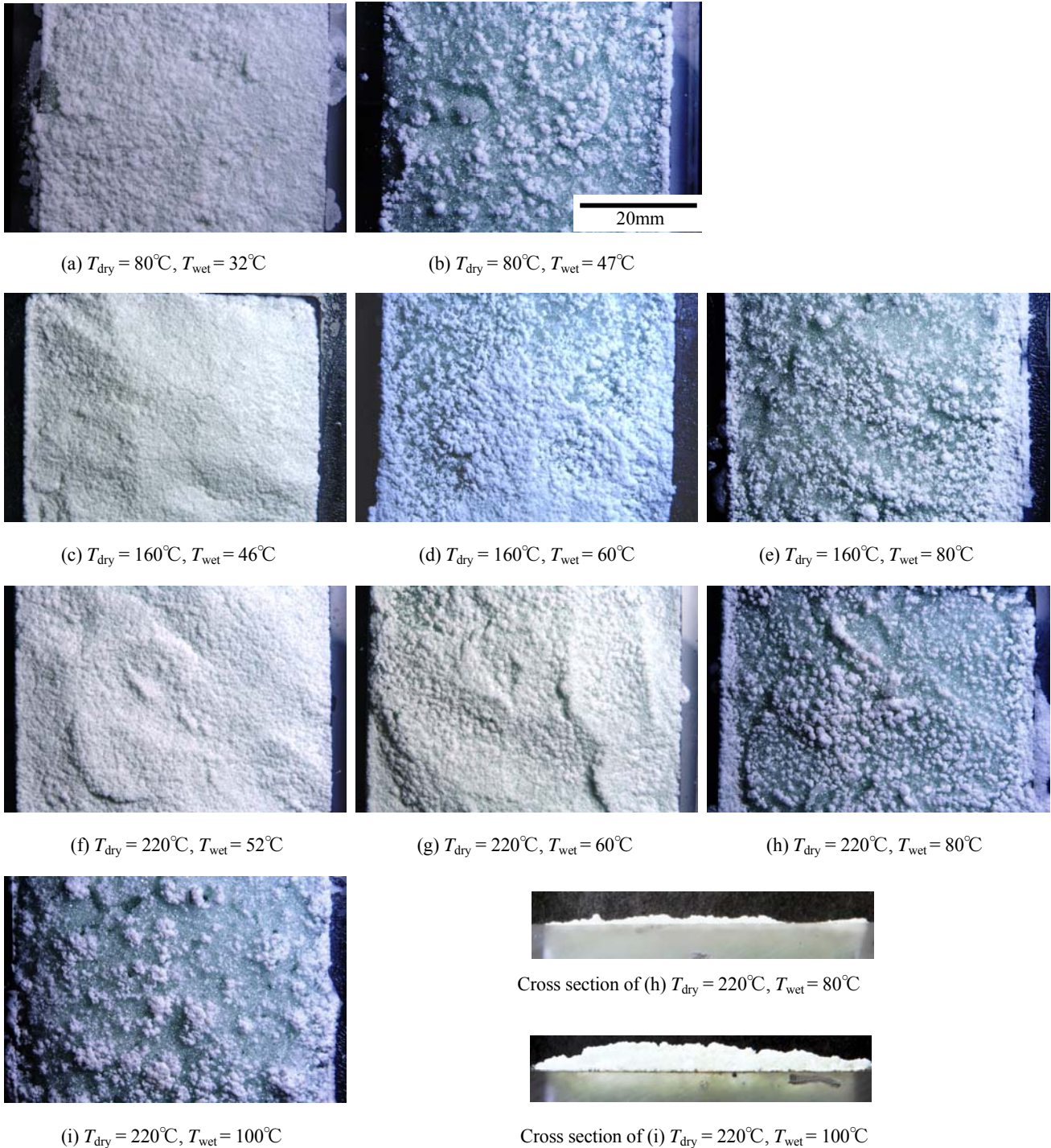


Fig. 4 Photos of sample surface after drying (NaCl aqueous solution,  $d_p = 400 \mu\text{m}$ )

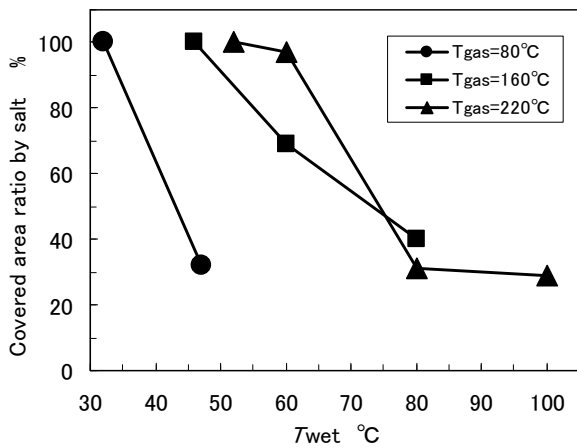


Fig. 5 Covered area ratio of sample surface by crystallized salt.

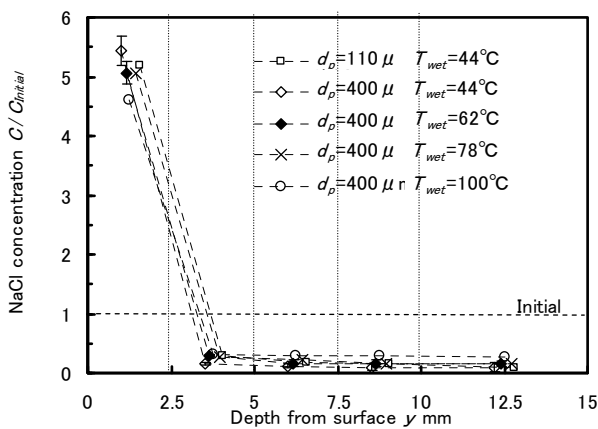


Fig. 6 Distributions of salt contained glass bead packed beds after drying.

により移動可能な自由水状の塩溶液のほとんどが表面付近で蒸発していることを示しており、その主な原因として、塩水溶液の飽和溶解度は、 $30^{\circ}\text{C}$ で  $36.3\text{ g}/100\text{g-water}$ ,

$100^{\circ}\text{C}$ で  $39.8\text{ g}/100\text{g-water}$ <sup>(6)</sup>と温度によって10%ほどしか変化せず、かつ、比較的低濃度で結晶化するためと考えられる。

### 3.3 表面温度変化と乾燥特性曲線

次に、試料に含まれる液体として塩化ナトリウム水溶液の場合と、比較として蒸留水を含ませた試料を用いたときの、乾燥中の温度変化ならびに質量測定結果から求めた含水率変化を図7に示す。また、図8には含水率変化から求めた含水率と蒸発速度との関係を示す乾燥特性曲線を、それぞれ一例として  $d_p = 400\ \mu\text{m}$ , 気流温度  $160^{\circ}\text{C}$  の場合の結果を示す。

図7は、試料平均の乾量基準含水率  $X\text{ kg-water/kg-solid}$  と表面温度  $T_{sf}$  (°C) の時間変化を示している。図7 (A) の水を含ませた場合は、 $T_{wet} = 46^{\circ}\text{C}$  の試料では、 $t = 2000\text{ s}$  付近で  $X = \text{約} 0.04$  となった後に、含水率減少速度が低下し、同時に表面温度が急速に上昇した。すべての湿度条件で表面温度がほぼ一定となる期間(定率乾燥期間)がみられた。また、 $T_{wet} = 60^{\circ}\text{C}$ ,  $80^{\circ}\text{C}$  では、乾燥初期に凝縮による一時的な含水率増加がみられ、初期の温度上昇も急であった。一方、図7 (B) の塩化ナトリウム水溶液を含ませた試料では、乾燥開始後、 $T_{wet} = 46^{\circ}\text{C}$  では、水の場合のような温度がほぼ一定の区間はみられず、ゆるやかに上昇をつづけた。その後、 $60^{\circ}\text{C}$  付近に到達した後に勾配が急になり、わずかな時間(300秒程度)  $100^{\circ}\text{C}$  付近の温度を保った後に、再び上昇し乾燥が終了した。一方、 $T_{wet} = 60^{\circ}\text{C}$ ,  $80^{\circ}\text{C}$  では、水を含ませた場合よりも温度はやや高い値で、水と同様にほぼ一定となる期間がみられた。また、乾燥時間は、 $T_{wet} = 60^{\circ}\text{C}$  のものが最も短かった。

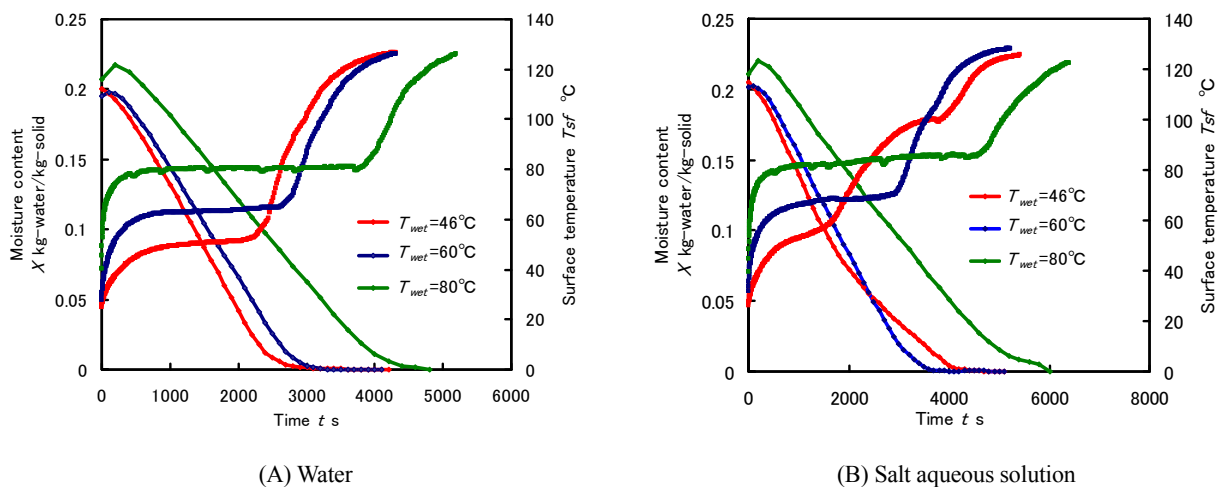


Fig. 7 Effects of wet-bulb temperature on moisture content and material surface temperature changes ( $T_{gas} = 160^{\circ}\text{C}$ )

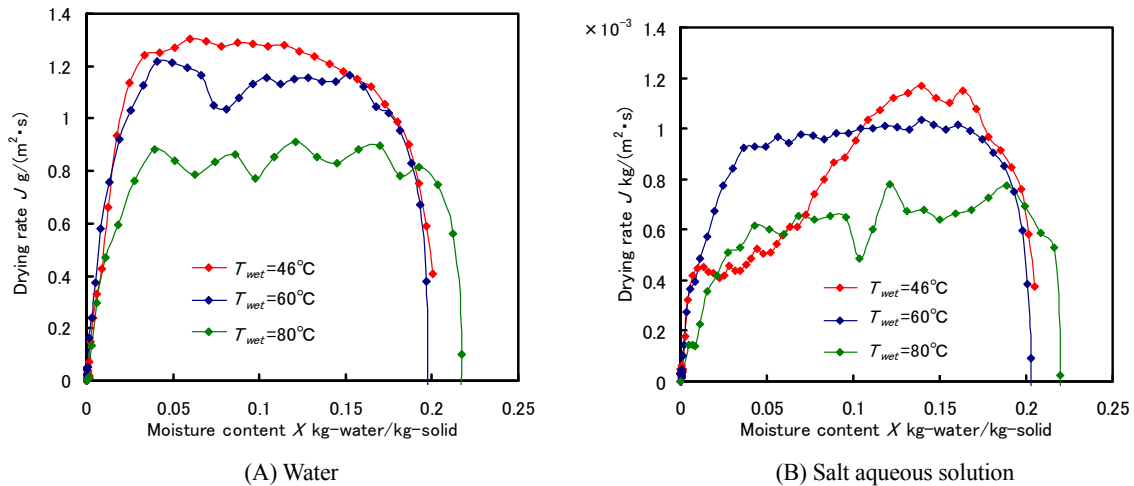


Fig. 8 Effects of wet-bulb temperature on drying characteristic curves ( $T_{\text{gas}} = 160^{\circ}\text{C}$ )

図8(A)は、水をしみこませた場合の乾燥速度曲線で、限界含水率は約0.03~0.05であった。一方、図8(B)に示す塩化ナトリウム水溶液を含ませた試料の場合、 $T_{\text{wet}} = 46^{\circ}\text{C}$ で含水率が0.15付近で乾燥速度は最大となった後に含水率低下と共にすぐに低下した。

その後、含水率0.05付近で再び蒸発速度の低下の少ない区間がみられ、本条件では、乾燥速度は大きく二段階になることがわかった。また、他の気流温度の場合でも、乾燥後に表面がすべて結晶に覆われる条件では同様の結果が得られた。

このような乾燥特性曲線となる理由は、初期では蒸発は試料表面ですすみ、その進行とともに食塩が表面に析出し結晶層が成長する。結晶層の成長に伴って、結晶表面への水分移動抵抗が徐々に増加するため、蒸発速度が低下していく。その後、結晶層の下面付近での蒸発が支配的になると結晶層が伝熱抵抗となり、また層厚さがほぼ一定のために蒸発速度の変化も一時的に小さくなり、これが二段階目の乾燥速度になると推察される。一方、表面が結晶で覆われることの無い  $T_{\text{wet}} = 60, 80^{\circ}\text{C}$  の条件では、熱伝導の比較的良好なガラスビーズが気流にさらされているために見かけの伝熱抵抗が小さくなり、その結果、蒸発速度がほぼ一定になる区間が見られたと考えられる。

次に、それぞれの実験条件での、定率乾燥区間あるいは最大蒸発時における蒸発速度を比較した結果を図9に示す。それぞれの条件で、塩化ナトリウム水溶液を含ませた場合、水を含ませた場合より10~25%ほど小さな値であった。これは、蒸発面では、食塩水がほぼ飽和濃度となっていることから、水の活量低下(およそ0.75)<sup>(7)</sup>に起因する

ものと考えられる。

ところで、表面の析出状態が湿度によって異なる原因を考えると、一般に、急速な蒸発では微小な結晶が析出し、逆にゆっくりとした蒸発では大きな結晶が析出すると予測される。しかし、図9で示すように、各気流温度条件での蒸発速度と、図3あるいは図4に示す結晶の析出状態(結晶析出面積比)の関係は、蒸発速度だけでは説明できない。したがって、湿度に起因する、初期の材料表面への水蒸気の凝縮など、何らかの影響が結晶の析出状態に影響を与えていることが示唆された。

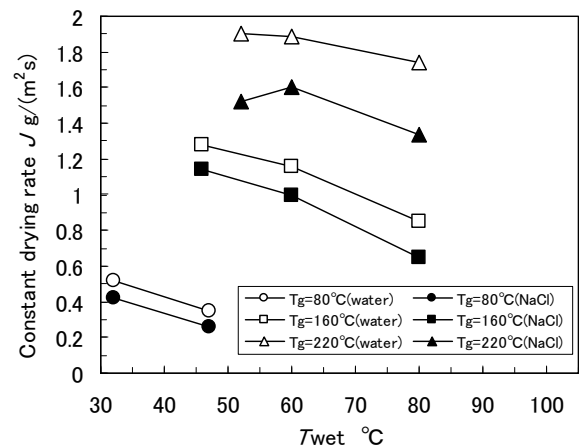


Fig. 9 Comparison of constant drying rates.

なお、図7に示した乾燥終了時の材料到達温度は、主流温度  $160^{\circ}\text{C}$  よりも低く、およそ  $120^{\circ}\text{C}$  となった。その原因は、テストセクション底面からの放熱等により、材料が設置されている部分よりも上流側で、すでに温度境界層が生成しているためと考えられる。一方、乾燥に伴って材料が

ら生じる水蒸気による水蒸気濃度境界層は、試料の上流前縁部から始まる。これらのことから、材料表面での気流状態は、表1および図3に示した気流条件に対し、温度は低く、湿度(水蒸気分圧)はほぼ同値になっていると考えられる。

### 3.4 乾燥時間

図10に、それぞれの実験条件で、含水率が0.02に到達するまでに要した時間を示す。気流温度  $T_{\text{gas}}$  が  $80^{\circ}\text{C}$  の場合は、湿球温度の影響を大きく受け、水、および食塩水を含ませた両方の場合において、高湿度ほど乾燥時間が長くなるのがわかる。一方、 $160^{\circ}\text{C}$  で食塩水を含ませた場合、ガラスビーズ平均直径が  $110\ \mu\text{m}$ ,  $400\ \mu\text{m}$  のどちらの条件でも、 $T_{\text{wet}} = 46^{\circ}\text{C}$  の場合よりも  $T_{\text{wet}} = 60^{\circ}\text{C}$  の乾燥時間の方が短くなるという結果が得られた。なお、それよりも湿度の高い  $T_{\text{wet}} = 80^{\circ}\text{C}$  では、再び乾燥時間は長くなった。また、気流温度  $220^{\circ}\text{C}$  の場合には、乾燥時間に与える湿球温度の影響は他の気流温度条件に比べて小さくなった。

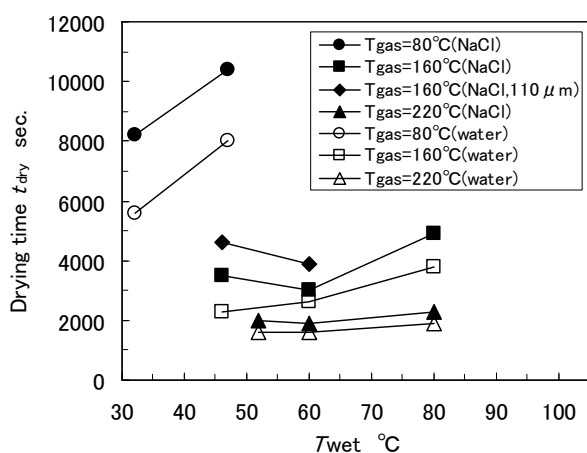


Fig. 10 Comparison of drying time.

## 4. 結言と課題

本実験結果から、ガラスビーズ充填層に塩化ナトリウム

水溶液を含ませた試料を乾燥させた場合、湿度(水蒸気分圧)が高いと、表面に析出される結晶の存在状態が粗く、表面に占める食塩に覆われた部分の面積比が小さくなることがわかった。また、乾燥時間は、水のみがしみこんだ試料の場合とは異なり、高湿度で最も乾燥時間が短くなる気流条件が存在することを明らかにした。

今後の課題として、湿度により結晶の析出状態が異なる原因とメカニズム、熱物質移動のモデル化、最適湿度条件の抽出があげられる。さらに、乾燥中の湿度変化プロセスを検討することにより、品質とエネルギー効率の両面からの最適化研究が重要であると考えられる。これらの研究成果は、塩分を含む材料の加熱や乾燥において、気流中の水蒸気量制御による材料の高機能化ならびに装置の環境負荷低減効果により、塩水溶液を含む材料の乾燥・加工後の製品品質の向上、加工プロセスの高効率化、ひいては完全密閉化式で低環境負荷の装置開発に大きく寄与すると考える。

## 参考文献

- (1) 伊與田浩志, 過熱水蒸気の基礎, 食品工業, 48(14), pp20-28, 光琳 (2005)
- (2) J. M. Coulson, J. F. Richardson, Chemical Engineering Vol., 6<sup>th</sup> Ed., p757, Butterworth Heinemann Ltd., UK (1999).
- (3) 亀井三郎編, 化学機械の理論と計算(第二版), p321, 産業図書株式会社(1975).
- (4) 化学工学便覧, 化学工学会編, p739, 丸善(1999).
- (5) 伝熱工学資料第4版, 日本機械学会編, p355, 日本機械学会(1986).
- (6) 野口駿, 食品と水の科学, p29, 幸書房(1992).
- (7) John A. Troller, J. H. B. Christian, 平田孝, 林徹(訳), 食品と水分活性, p18, 学会出版センター(1981).



No. 0602

## Study on Advanced Utilization of Steam for Drying of Porous Material Containing Salt Aqueous Solution

Hiroyuki IYOTA, Nobuya NISHIMURA

Department of Mechanical and Physical Engineering, Osaka City University

### Summary

Closed drying and/or food processing systems have been required for reducing the effects on the environment and high efficiency. For these systems, heating media has high steam content due to evaporation from the material being treated. Moreover, high humid air and steam have been wielded in the field of cooking. Also the superheated steam at atmospheric pressure has been applied for drying as well as cooking.

During these treatments, when the material containing aqueous solution of NaCl as solute, the solute moves to the surface and forms deposits with the evaporation of contained water. However, the effect of heating media conditions, such as gas temperature and humidity, on these transport phenomena is not clarified.

In this study, the effects of gas (dry-bulb) and wet-bulb temperature of drying media on drying kinetics, characteristics and time were investigated experimentally. Glass bead (mean diameters of 110 and 400  $\mu\text{m}$ ) packed beds which contained pure water or NaCl aqueous solution were used as porous sample material. The material mass and temperature changes were measured and the surface condition changes by salt deposition/crystallization were observed during drying. From these results, depending on wet-bulb temperature, a variety of deposits were formed. When the wet-bulb temperature was lower, the material surface was covered with evenly distributed crystallized salt. In cases where water was contained, the wet-bulb temperature was lower and the drying time was shorter. In cases where NaCl aqueous solution was contained, the drying time in the case of wet-bulb temperature of  $60^{\circ}\text{C}$  was shorter than the case of  $46^{\circ}\text{C}$  due to difference of critical moisture content, at gas temperature of  $160^{\circ}\text{C}$ .