

十字流式移動層を用いた吸着剤蓄熱システム Cross-Flow Type Moving Bed Dryer for Heat Storage System

都市人間環境学専攻 王 荀

Civil, Human and Environmental Science and Engineering Course Xun WANG

Key Words : heat storage system, cross-flow, moving bed

1. はじめに

2017年度日本の産業分野のエネルギー消費量は5547 PJであり、産業分野における排熱は非常に多く年間1000 PJ以上に達し、このうち150℃以下の低温排熱は440 PJである。一方、150℃以下の熱需要は合計1097 PJであり、産業分野の様々な業界の100℃未満の乾燥や加温や工場空調などで使われている。150℃以下の排熱を再利用すれば、4割ほどをカバーできる。しかし、需要地と離れていることが多く、熱利用が進んでいないことから、蓄熱剤を使った熱輸送システムが考えられている。

これまで排熱発生施設において潜熱蓄熱剤PCM (Phase Change Material)¹⁾や吸着剤²⁾を使った熱回収を行い、蓄熱剤をトラックで熱需要地まで輸送して熱を利用する輸送システムの実用化試験が行われている。しかし、熱回収も熱発生もバッチ式となることから、補助熱源としての位置付けとなっている。連続的な熱発生を可能とするために速やかに蓄熱可能なシステムの開発が望まれている。

潜熱蓄熱は放熱が避けられないため、一旦乾燥すれば長期保存が可能な吸着剤蓄熱について検討することにした。本研究では向流接触式の移動層乾燥試験を基に十字流式伝導加熱併用移動層乾燥装置を作製し、蓄熱剤の熱風乾燥実験を40℃と70℃の2つの温度で行った。さらにヒーターを装置内部に設置することによって伝導加熱併用による乾燥の加速効果も実験的に検討した。さらに、熱物質収支に基づいたシミュレーションにより、さらに高温における十字流式移動層の乾燥特徴を明らかにした結果について報告する。

2. 移動層連続乾燥システムの概要

(1) 向流式移動層

Fig. 1 (a) では向流式移動層による吸着剤乾燥の特徴を模式的に示している。吸着剤は上部から供給され、下降中に下部から供給された熱風により乾燥が進行する。乾燥の進行により、空気と吸着剤の温度が下がり相対湿度が上がる。その結果、乾燥帯上部の吸着剤粒子が吸湿することもある。また、伝熱加熱を併用した場合も、粒子を円滑に下降させるためには伝熱管を密に配置できない。粒子間の熱移動は遅いため、伝導加熱併

用の効果は少ないと考えられる。

(2) 十字流式移動層

Fig. 1 (b) に示す十字流式移動層乾燥では熱風は横から供給される。そのため、伝熱管を千鳥配列等により密に配置でき、伝導加熱効果を装置全体に行き渡らせることが可能である。また、層を薄くすることで蒸発水分の再吸着を防ぐことも可能となる。

以上のことから、本研究では十字流式移動層乾燥を対象とする。

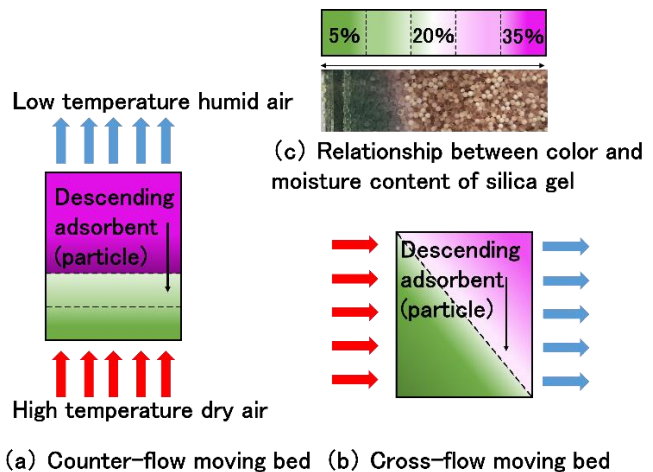


Fig. 1 characteristics of moving bed

3. 実験装置と実験方法

吸着剤乾燥実験に用いた十字流式移動層の写真と概略図をFig. 2 に示す。供給する熱風の温度は40℃と70℃で、絶対湿度は1 g/kg・DAである。70℃の乾燥を行うために装置内面をシリコンシートで覆い、断熱性を増した。

熱風は左から供給し、右から低温湿潤空気が排出される。シリカゲルは貯蔵タンクから供給され、出口に設置した振動フィーダーにより0.027 mm/sの速度で排出される。S₁~S₈は温湿度センサーで空気の温湿度変化を測定する。P₁~P₆は粒子のサンプリング孔で実験終了後に粒子をサンプルして含水率を測定する。オレンジ色の長方形は固定層と同様、伝熱管を模擬したヒーターで伝導加熱併用乾燥の検討に用いた。

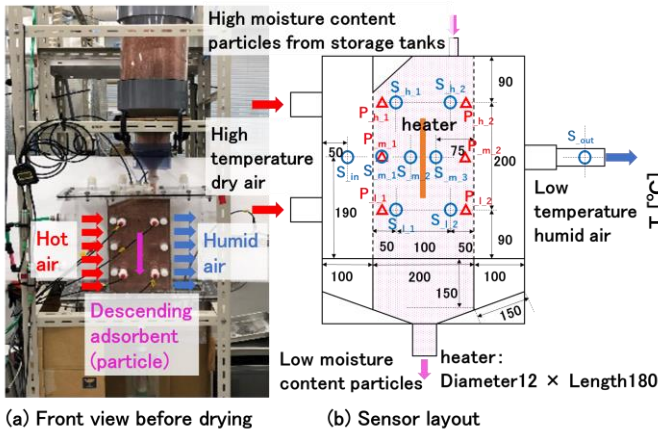


Fig. 2 Cross-flow moving bed drying experimental system

4. 実験結果と考察

(1) 40 °Cと70 °Cの熱風の乾燥

Fig. 3 に示すように、熱風温度が40 °Cの時、絶対湿度は約10 g/kg · DAになり、熱風温度が70 °Cの時、絶対湿度は約20 g/kg · DAと乾燥が進んでいる。

また、計算により、40 °Cの乾燥で、熱風が持っている熱量が43 kJ/kg · DA、水蒸気が持ち出す蒸発潜熱量が24 kJ/kg · DAである。70 °Cの乾燥で、熱風が持っている熱量が75 kJ/kg · DA、水蒸気蒸発の蒸発潜熱量が54 kJ/kg · DAである。この差は熱損失と粒子の昇温に使われたものと考えられる。

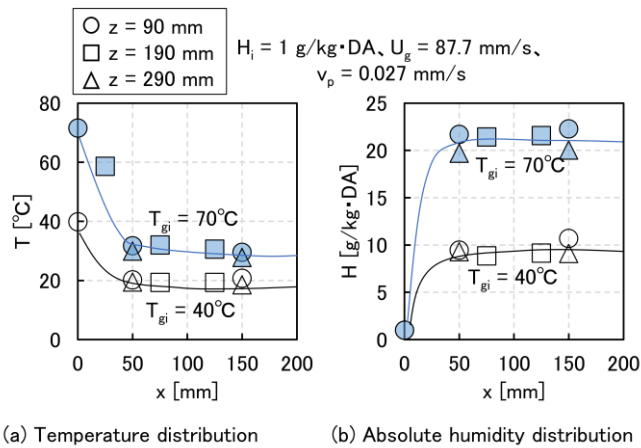


Fig. 3 Drying test results at 40 °C and 70 °C

(2) 40 °C熱風とヒーターの乾燥

Fig. 4 に示すように、40 °Cの熱風と144 wのヒーター（外径12 mm×長さ180 mm）併用の乾燥の場合、伝導加熱量 $Q = 6.7 \text{ J/(s} \cdot \text{cm}^2)$ 、熱風加熱量 $0.5 \text{ J/(s} \cdot \text{cm}^2)$ である。（風量200 L/min : 4 g/s）ヒーター直後の絶対湿度は熱風だけの乾燥の約10 g/kg · DAから90 g/kg · DAになった。

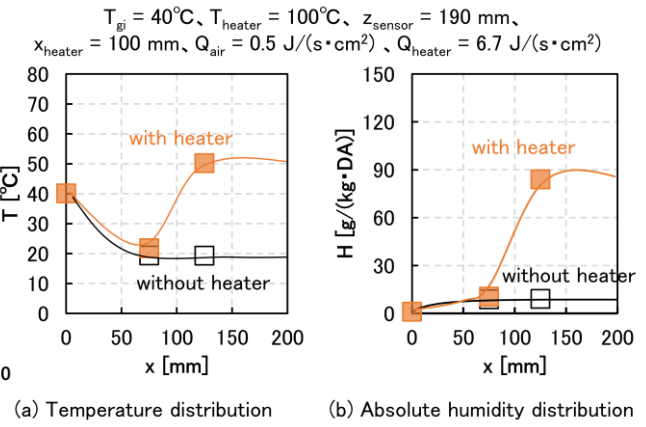


Fig. 4 Hot air drying at 40 °C with heater (4 hours)

(3) 70 °C熱風とヒーター併用の乾燥

Fig. 5 に示すように、70 °Cの熱風と144 wのヒーター（外径12 mm×長さ180 mm）併用の乾燥の場合、伝導加熱量 $Q = 6.7 \text{ J/(s} \cdot \text{cm}^2)$ 、熱風加熱量 $0.8 \text{ J/(s} \cdot \text{cm}^2)$ である。（風量200 L/min : 4 g/s）ヒーター直後の絶対湿度は熱風だけの乾燥の約20 g/kg · DAから130 g/kg · DAになった。

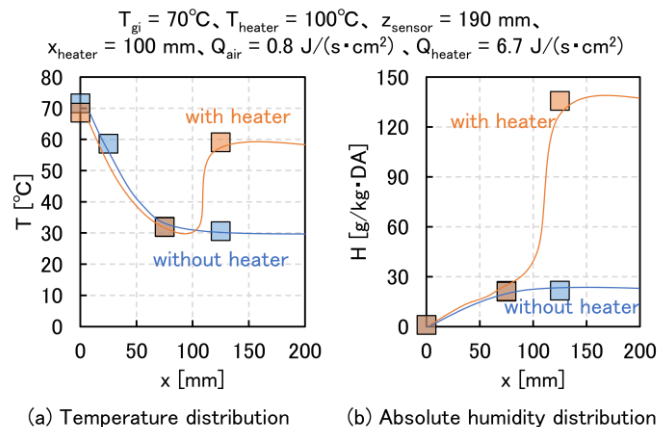
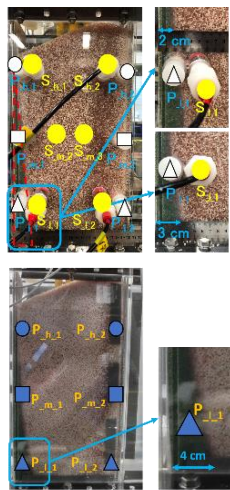


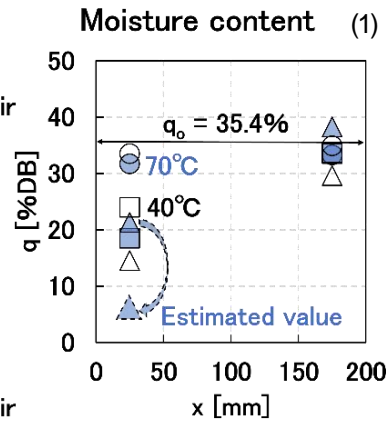
Fig. 5 Hot air drying at 70 °C with heater (4 hours)

(4) 熱風温度の効果（40 °Cと70 °C熱風乾燥）

Fig. 6(a)の写真に示すように、40 °Cと70 °Cの4時間の熱風乾燥後、三角の乾燥帯が現れ、最下部の乾燥帯の幅はそれぞれ30 mmと40 mmであることから、乾燥熱風の温度の上昇により乾燥は速やかに進む。Fig. 6(b)に示すように40 °Cでは $x = 25 \text{ mm}$ の位置において、含水率は約35.4 %から15 %まで下がった。70 °Cでは同様に含水率は約35.4 %から18 %まで下がっている。本来は40 °Cの結果より最下部での含水率は低くなるが、サンプリング時に未乾燥のシリカゲルが混入したものと考えている。



(a) View of the dried adsorbent (green area)



(b) Change in water content

Fig. 6 Expansion of drying area with increase in temperature

(5) ヒーター併用乾燥の効果

Fig. 7は実験結果と次のセッションで紹介するシミュレーション結果からまとめた熱風だけの乾燥結果とヒーター併用時の乾燥結果を示している。横軸は換算した単位時間断面積当たりの供給した熱量で、縦軸はヒーター直後と入口絶対湿度から計算した単位時間断面積当たりの乾燥速度で、青いキーは熱風だけの乾燥で、オレンジのキーはヒーター併用の乾燥で、実線は実験結果で、点線はシミュレーション結果である。この結果から見ると、150℃熱風だけの乾燥と40℃熱風、16 w ヒーター併用の乾燥の速度はほとんど同じである。さらに、伝導加熱併用時の乾燥速度は速くなるということを明らかにする。

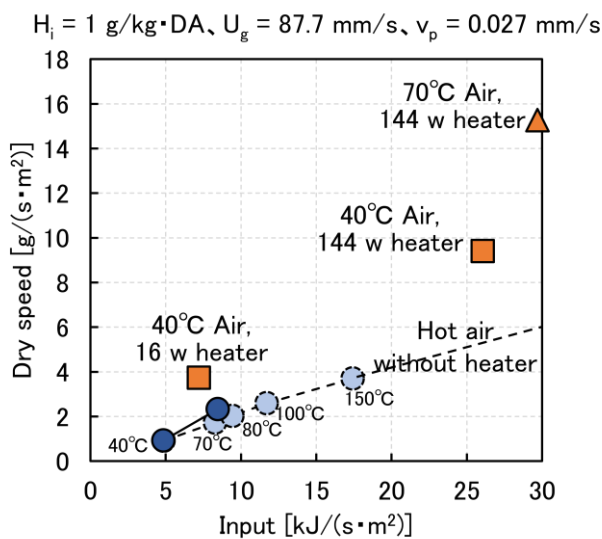
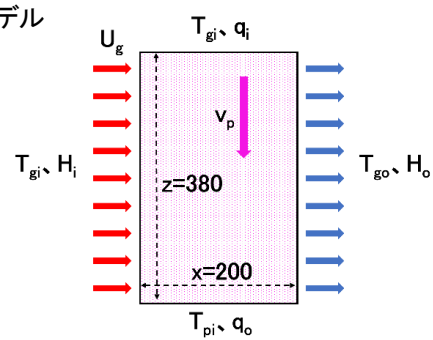


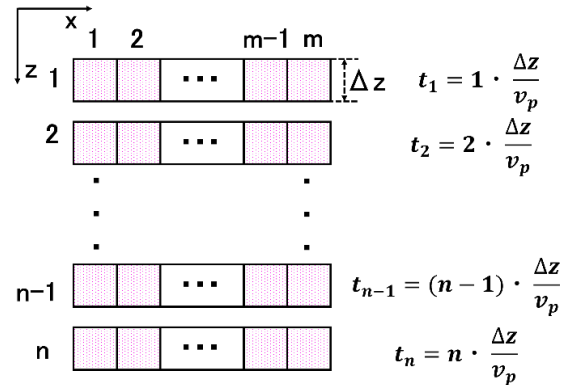
Fig. 7 Effect of drying with heater

5. 十字流式移動層乾燥シミュレーション

(1) モデル



(a) Moving direction of air and adsorbent in cross-flow moving bed



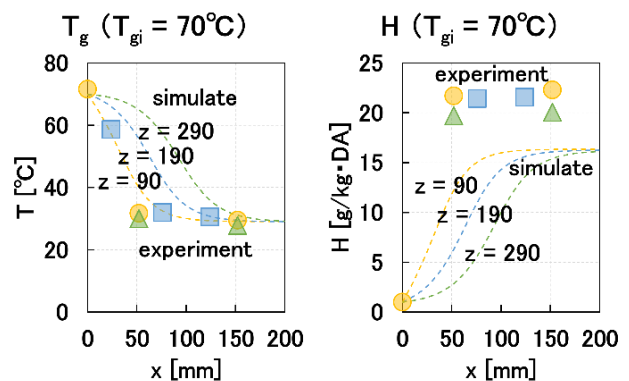
(b) View of cell division

Fig. 8 Simulation model³⁾

本研究では、一次元の熱物質収支シミュレータ³⁾を基に、Fig. 8のような二次元モデルとして十字流式移動層乾燥用に拡張している。移動層内を水平方向m = 50セル、垂直方向n = 20セルの合計1000個に分けて、熱物質収支をたて、各セルの空気温湿度、粒子温度と含水率を算出する。

(2) シミュレーション結果と実験結果の比較

a) 70℃の乾燥



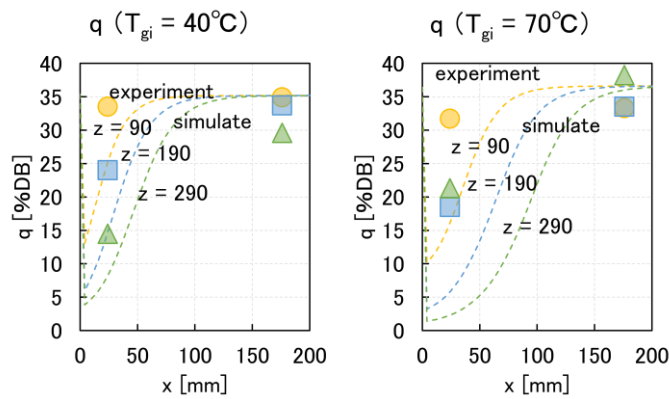
(a) Temperature comparison (b) Absolute humidity comparison

Fig. 9 Comparison of experimental results and simulation when the temperature is 70℃

Fig. 9 (a) 温度分布に示すように、シミュレーション結果も実験結果も層内 $x > 100$ mmの層内温度は約 30°C まで下がった。実験結果と一致している。

Fig. 9 (b) 絶対湿度分布に示すように、シミュレーションの結果は実験値より少し低くなっている。ただ、傾向が一致しているので、パラメーターの修正により、シミュレータの結果は実際と一致するものと考えられる。

b) 40°C と 70°C 乾燥の含水率分布



(a) Moisture content ($T_{gi} = 40^{\circ}\text{C}$) (b) Moisture content ($T_{gi} = 70^{\circ}\text{C}$)

Fig. 10 Comparison of change in moisture content

Fig. 10(a) は 40°C 熱風乾燥の含水率分布の実験とシミュレーション結果の比較を示している。 $x = 25$ mmの位置においてはシミュレーション結果は約35%から10%まで下がり、実験値より低い。 $x = 175$ mmの位置においてはシミュレーション結果はほぼ35%のままで、実験値より高い。

Fig. 10(b) 70°C 熱風乾燥の含水率分布の実験とシミュレーション結果の比較を示している。 $x = 25$ mmの位置においてはシミュレーション結果は約35%から5%まで下がり、実験値より低い。 $x = 175$ mmの位置においてはシミュレーション結果はほぼ35%のままで、実験値と一致している。実測値は未乾燥粒子が混入することによる誤差がある。

40°C と 70°C 熱風乾燥のシミュレーション結果と実験結果の比較により、数値的には一致していないが、傾向は一致している。実験中の誤差及びシミュレーションのパラメーターなどから、本シミュレーションの結果は良く減少を現していると考えられる。

(3) 100°C 以上熱風乾燥の予測

装置は樹脂製ということもあり実験ではできない温度の乾燥特性をシミュレータで検討した。Fig. 11 は 80°C 、 100°C 、 150°C の熱風乾燥を行った時の5%の等含水率線

を示している。熱風温度の上昇に伴い乾燥帯が広くなる。

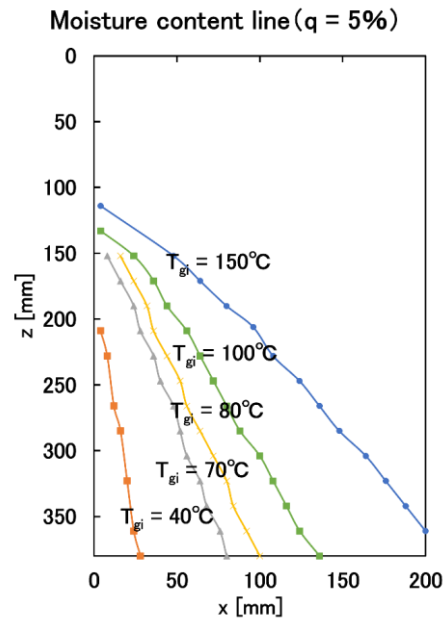


Fig. 12 Expansion of drying area with increase in temperature, $q = 5\%$

6. まとめ

十字流式移動層乾燥実験と2次元のシミュレータを行い、以下のことを明らかにした。

- ・十字流式移動層乾燥では粒子が下降するに従って乾燥領域は広がり、熱風温度の上昇でも乾燥領域は広がる。
- ・作成した2次元のシミュレータは実験結果と傾向が一致している。
- ・伝導加熱併用により乾燥速度が加速される。
- ・向流式移動層を模擬した固定層乾燥試験の説明を省くが、乾燥の傾向は十字流式と同様である。

7. 引用文献

- 1) 千田 武志, “潜熱蓄熱材を用いたオフライン熱輸送システムによる未利用熱の有効活用”, クリーンエネルギー, 21~25 (2020)
- 2) 川上ら, “低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発 (第1報) システムの開発コンセプトと蓄熱材の検討”, 空気調和・衛生工学大会学術講演論文集, 141~144 (2018)
- 3) 賈永淳, 幡野博之, 藤野和也, 第24回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム, “レートキャリア式デシカント空調システムに与えるプレートキャリア構造の影響”, 1-4 (2018)