13117

粒子群乾燥挙動の数値シミュレーションモデル開発

Development of Numerical Model
for Drying Behavior of Particles

研究代表者 Research leader: 辻 拓也 Takuya TSUJI

大阪大学大学院工学研究科 准教授

Graduate School of Engineering, Osaka University, Associate Professor

E-mail: tak@mech.eng.osaka-u.ac.jp

抄録

流動層は、乾燥や燃焼、ガス化といった熱物質輸送に関連したプロセスにおいて、広く用いられている。層内におけるこれらの輸送現象を実験的に計測することは容易ではなく、数値シミュレーションに基づいた層内固二相流れに対する理解促進が重要である。本研究では、現在流動層シミュレーションに広く用いられている DEM-CFD メゾスコピックモデル上において、熱物質輸送の取り扱いを可能とする拡張を行った。特に流動層中における湿潤粒子群の乾燥過程に着目し、これ表現できる計算モデルの開発を行った。シリカゲル粒子を試験試料として行った粒子乾燥実験と提案モデルによる計算の結果を比較することにより、当モデルが湿潤粒子の乾燥過程を概ね定量的に表現可能であることを示した。

ABSTRACT

Fluidized bed is widely used in the processes related to heat and mass transfers such as drying, combustion and gasification. It is not trivial to observe these transport phenomena occurring inside of the beds experimentally and the promotion of our understandings on internal transport processes by numerical simulation is important. In the present study, extension of DEM-CFD mesoscopic model to be able to consider heat and mass transfers was conducted. We especially focused on drying process of wet particles in hot fluidized bed. By comparing the results of drying experiment using wet Silica-gel particles and the proposed model, validity of the model was successfully demonstrated; the proposed model enables quantitative prediction of the drying process with acceptable level.

研 究 目 的

流動層は、乾燥や燃焼、ガス化といった熱物質輸送に関連したプロセスにおいても広く用い

られているが、層内におけるこれらの輸送現象を実験的に計測することは容易ではなく、数値シミュレーションに基づいた層内固二相流れの理解促進が重要である。

流動層の数値シミュレーションについては、多体粒子間の接触力を表現可能な DEM（離散要素法）と、空間平均化された流体の支配方程式に基づく CFD（数値流体力学）を組み合わせた DEM-CFD メゾスコピック法^[1]が現在広く用いられている。その拡張として、熱輸送を考慮したモデルも提案されている^{[2],[3]}。物質輸送に関するモデルも考案されているが、現状において十分な検討がなされているとは言い難い。本研究では、DEM-CFD メゾスコピックモデルにおいて、熱物質輸送の取り扱いを可能とする拡張を試みた。本研究ではその中でも特に固体粒子群の流動層中における乾燥過程に着目し、湿潤粒子群の乾燥過程を表現出来る DEM-CFD モデルの開発を試みた。また、含水させたシリカゲル粒子を用いて行った粒子乾燥実験の結果と比較することにより、提案モデルの精度検証も行った。

研究成果の概要

本研究では、熱物質輸送を考慮できる DEM-CFD モデルの開発に加えて、ベンチスケール熱流動層における湿潤シリカゲル粒子を用いた乾燥実験と計算モデルの結果を比較することにより、その精度について検討を行った。

計算モデルの提案

1) 流体モデル

流体運動の基礎式は、局所相平均した連続の式、運動方程式、エネルギー方程式、化学種の保存式、そして状態方程式である。

2) 粒子乾燥モデル

粒子間および粒子－壁面間の接触力は、柔軟粒子モデルの1つである DEM を用いて与えた。弾性反発力は、変形量に比例する反発力を与え

Fig. 1 Wet core model

る線形ばねモデルを用いた。粒子は単一粒径で完全球形であるとし、粒子内部の温度分布は一樣であると仮定した。流動層内の伝熱機構としては、櫻井ら^[3]と同様に、粒子－流体間の対流伝熱、粒子－粒子間の接触伝熱、そして乱流による熱拡散の影響を考慮した。

一般に、シリカゲルなどの多孔質粒子の乾燥過程は、個々の粒子内部の水分分布の経時変化を考慮しなければならないため、非常に複雑であり、かつこれを直接計算することは大変計算負荷が大きい。多数の粒子を取り扱う必要がある流動層計算においては、極力計算負荷の低いモデルとすることが望まれる。本研究では、Li & Mason^[4]が提案したモデルをベースとして、さらに乾燥速度の含水率依存性を考慮することとした。このモデルでは、Fig.1 に示すように、粒子中央部に水分で満たされた液核（wet core）が形成され、液核表面から外殻の細孔を抜けて蒸発すると考える。この際乾燥速度は、式（1）で表される。

m_{wi} , d_p , d_i , ε_s , D_{gv} , R , T_p , M_v , p , p_{vi} , p_{vp} はそれぞれ、粒子の水分量、直径、含水核の直径、多孔質体の空隙率、水蒸気の拡散係数、一般気体定数、粒子温度、水のモル質量、粒子周りでの気体の圧力、含水核の水蒸気分圧、粒子表面での水蒸気分圧である。 w , w_e , w_c はそれぞれ粒子の含水率、平衡含水率、限界含水率である。本研究では、限界含水率は液核の直径が粒径と等しくなる時の含水率を用いた。また、物質輸送係数 h_m は次式で示されるシャー

$$\left(\frac{1}{d_p} - \frac{1}{d_{wc}} \right) \frac{dm_{wi}}{dt} = \frac{2\pi\varepsilon_s M_w D_{gv} p}{RT_p} \ln \left(\frac{p - p_{vi}}{p - (RT_p/h_m \pi d_p^2 M_w)(dm_{wi}/dt) - p_{vg}(T_p/T_g)} \right) \left(\frac{w - w_e}{w_c - w_e} \right) \quad (1)$$

Fig. 2 Temperature distribution of particles ($t = 600$ s)

Fig. 3 Moisture content distribution of particles (simulation results)

ウッド数に対する Ranz-Marshall 式より与えた.

$$Sh = \frac{h_m d_p}{D_{gv}} = 2.0 + 0.6(Sc)^{1/3}(Re)^{1/2} \quad (2)$$

ここで, Sc , Re はそれぞれシュミット数, レイノルズ数である.

実験との比較による精度検証

1) 実験条件

本研究では, 横幅 76 mm, 奥行き 21 mm, 高さ 400 mm のベンチスケール流動層を実験に用いた. 含水させた常温のシリカゲル粒子を層内に投入し, 底面中央に設けてある幅 7 mm, 奥行き 21 mm のノズルから 70°C に昇温させた相対湿度 3% の空気を空塔速度 1.0 m/s で流入させることにより, 粒子を流動化させると共に乾燥させた. 実験で使用する粒子の平均粒径は 2.7 mm であり, 見かけ密度は乾燥時で 990 kg/m³ である. 初期の含水率は乾燥時の粒子質量を基準とし, 30 wt% となるように調整した. 計算においても, 実験と同じ質量となるように粒子

数を設定した. 実験においては, 一定時間空気を流入させ, 粒子の質量変化を測定することで, 気流流入時間と含水量の関係を求めた.

2) 結果と考察

Fig. 2 (a) は, 気流流入開始後 600 s 後における実験での粒子の温度分布を赤外線サーモグラフィを用いて撮影したもので, Fig. 2 (b) は同時刻における計算結果である. 実験と計算において粒子挙動や, 温度分布が概ね一致していることが確認できる. Fig. 3 に, 計算で得られたそれぞれ流入開始後 30 s 後, 600 s 後の粒子の含水率分布を示す. 600 s 後の結果より, 層下方側壁面近傍の非流動化領域以外の十分に流動化している粒子については, ほぼ均一に粒子が乾燥していることが確認できる. また, Fig. 2 (b), Fig. 3 (b) より, 粒子の温度上昇と乾燥の進行には相関があることがわかる.

Fig. 4 に層内にある全粒子の平均含水率の時間変化を示す. 実験においては, 流動化開始後, Fig. 4 上に示している計測点に到達した時点で

Fig. 4 Average moisture content change

流動化を停止し含水率の計測を行った。その後、流動化を再開するのではなく、新しい粒子サンプルを用いて初期の状態から実験を開始し、各計測点での計測を繰り返すことにより、実験データを得た。また、実験結果は、三回の試行の平均である。特に乾燥初期の領域(400 s まで)において、提案モデルは実験データを良く表現出来ている。実験、計算ともに乾燥が進み、含

水率が減少するにつれ乾燥速度が低下していることがわかる。実験と比べて計算では、乾燥速度の減少が若干大きくなっている。

まとめ

DEM-CFD モデルに、熱・物質輸送の取り扱いを可能とするための拡張を行い、多孔質粒子の乾燥過程の計算を行った。湿潤シリカゲル粒子を用いた流動層での乾燥実験を行い、開発した計算モデルとの比較を行った結果、実験・計算モデル間で概ね一致した結果が得られた。

参考文献

- [1] 川口ら, 日本機械学会論文集, 58B (1992), 2119–2125.
- [2] Zhou et al., Chemical Engineering Science, 59 (2004), 4205–4215.
- [3] 櫻井ら, 日本機械学会論文集, 75B (2009), 159–166.
- [4] Li and Mason, Drying Technology, 20 (2002), 255–282.

外部発表成果

論文発表

1. Takuya Tsuji, Junpei Fujimoto, Yasuyuki Nishijima and Toshitsugu Tanaka, DEM-CFD mesoscopic model considering heat and mass transfers for particle drying in hot fluidized bed, AIChE Journal (under preparation).

口頭・ポスター発表

1. Jumpe Fujimoto, Yasuyuki Nishijima, Takuya Tsuji and Toshitsugu Tanaka, “A heat and mass transfer model for DEM-CFD particle-drying

simulations”, 7th World Congress on Particle Technology, No. 470 (2014).

2. 藤本, 西嶋, 辻, 田中, “粒子群乾燥過程の DEM-CFD メゾスコピックモデル開発”, 第 20 回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム, No. I-7, (2014).
3. Takuya Tsuji, Jumpei Fujimoto and Toshitsugu Tanaka, “DEM-CFD simulation of particle-drying in fluidized bed”, AIChE2015/IPNF 2015 (2015).
4. Takuya Tsuji, Jumpei Fujimoto and Toshitsugu Tanaka, “DEM-CFD model for particle-drying process in hot fluidized bed”, AIChE annual meeting, No. 254B (2015).