空気分散器の圧力損失が流動層内流動におよぼす影響について (DEM解析と実験の比較)

Effects of pressure drop of distributor on particle motion in fluidized bed
(Comparison of DEM analysis and experiment)

○学 水島祐之輔(阪大院) 正 川口寿裕(阪大工)
正 田中敏嗣(阪大工) 正 辻裕(阪大工)

Yunosuke MIZUSHIMA, Osaka University, Yamada-oka2-1, Suita, Osaka.

Toshihiro KAWAGUCHI, Osaka University.

Toshitsugu TANAKA, Osaka University.

Yutaka TSUJI, Osaka University.

Abstract In the present study effects of pressure drop of a distributor on particle motion in fluidized beds are studied empirically and numerically. The Discrete Element Method (DEM) is employed to calculate the motion of individual particle. The predicted pressure drop of the distributor required to achieve uniform flows agreed well with previous empirical findings.

Key words : Fluidized bed, Numerical Simulation, Discrete Element Method, Distributor

1. 緒言

流動層は固気間の接触効率の高さ、および気泡の吹き抜けによる熱物質移動の良好さを利用して工業的に広く用いられている。粒子層下部には流入気流を均一に分散させる目的で分散器が取り付けられるが、その性能は粒子流動パターンに大きく影響する。このため分散器に関して多くの実験的研究が行われてきた。一般的には、粒子層の圧力損失に対して分散器の圧力損失が20~40%程度あれば気体がほぼ均一に粒子層に流入することが知られている⁽¹⁾。

一方でDEM⁽²⁾をはじめとする過去の流動層の数値解析では気流流入条件として一様流入などの理想的な条件が与えられ、分散器の圧力損失に着目した報告例はない。そこで本報では2次元流動層に対してDEM計算と実験を行い、分散器の圧力損失が流動層内流動に及ぼす影響について調べた。

2. シミュレーション

流動層内の流れの計算にはAndersonとJackson⁽³⁾により導かれた局所相平均量に対する基礎式を用いた。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\varepsilon u_j) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\varepsilon u_i u_j) = -\frac{\varepsilon}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial x_i} + f_{pi} \quad (2)$$

ここで ε , u , p 及び ρ_f はそれぞれ空隙率、流体速度、流体圧力及び流体密度である。また f_{pi} は粒子との相互作用でおよぼされる単位質量あたりの力であり、Ergunの式⁽⁵⁾とWenとYuの式⁽⁶⁾をもとにして与えている。式(1), (2)をSIMPLE法⁽⁴⁾を用いた数値解析により解くことで流れ場が求められる。

粒子運動は、接触力をDEMでモデル化し、個々の粒子運動を離散的に追跡した。計算領域をFig.1に示す。分散器は粒子が均一に充填された充填層とし、充填層内の流れも式(1), (2)を解くことで求めた。充填層の粒径を0.2mmとし、空隙率を変化させることで分散器の圧力損失を調整した。本研究における分散器条件をTable1、計算条件をTable2に示す。

Table 1 Distributor conditions

Particle diameter	[mm]	0.2
Distributor height	[mm]	50
Void fraction of distributor	[-]	0.52-1.0

Fig.1 Calculation domain

Table 2 Calculation conditions

superficial gas velocity	[m/s]	0.5
gas density	[kg/m ³]	1.205
gas viscosity	[pa·s]	1.81x10 ⁻⁵
particle diameter	[mm]	0.6
particle density	[kg/m ³]	2520
number of particles	[-]	91368
bed height	[mm]	200
bed width	[mm]	150

3. 実験

Fig.2に実験で用いた流動層の概略図を示す。ブロウから送り込まれる空気は層流流量計で流量を測定され、分散器で整流され層内に流入する。分散器としては繊維を用いており、繊維の種類を変えることで圧力損失を制御した。層内の流動状態を高速度カメラにより撮影した。本実験における条件をTable3に示す。

Table 3 Experimental conditions

Mean particle diameter	[mm]	0.65
Mean particle density	[kg/m ³]	2520
Superficial gas velocity	[m/s]	0.5

Fig.2 Schematic of fluidized bed section

4.結果と考察

分散器の圧力損失を p_d 、流動化状態での粒子層の圧力損失を p_b とする。このとき、無次元化圧力損失 p^* を次式で定義する。

$$p^* = \frac{p_d}{p_b} \quad (3)$$

実験における粒子流動の代表的なスナップショットをFig.3に示す。分散器の圧力損失が小さいときには気泡が偏って発生し、圧力損失が十分大きい場合には粒子層全体にわたって気泡が発生している様子が観察された。

DEM計算における粒子運動と流体速度の代表的なスナップショットをFig.4に示す。粒子層下部に理想的な一様流入条件を与えた場合、気泡が層全体にわたって発生しているのが確認できる。一方 $p^*=0.0$ のときには層の片側に集中して気流が流入しており、気泡も片側に偏って発生し、また比較的大きなサイズに成長している。 $p^*=0.11$ になると $p^*=0.0$ の場合ほど顕著な偏りは見せなくなる。しかし、層の下部では左右端に気流が集中しており、中心部分では気流の流速は小さい。 $p^*=0.20, 1.03$ になると、流動状態は一様流入条件の場合と類似していることが確認できる。気流も粒子層最下部において著しい偏りはみせなくなる。

次にDEM計算による詳細な解析を行う。解析には発達後の3秒間のデータを用いている。Fig.5に粒子層最下部の流体速度分布のRMS値を示す。Fig.5から $p^*=0.0$ のときは、一様流入条件と比較して流体速度は大きなRMS値を持ち、粒子層最下部で流体速度に分布ができていことが分かる。 p^* が大きくなるにつれて、粒子層最下部での流体速度の分布が小さくなり、一様流入条件の値に近づく。 $p^*=0.20$ 程度で一様流入条件とほぼ同じ値になっていることがわかる。

Fig.6に粒子層最下部の空隙率の横方向の空間変動パワースペクトルを示す。分散器の圧力損失が小さいときには、一様流入条件と比較して大きなパワーを示している。これは、一様流入条件では流体は均一に流入するため、粒子層最下部では気泡が形成されないのに対して、分散器の圧力損失が不十分である場合、流体は偏って流れるため粒子層最下部から気泡となるからである。 $p^*=0.20$ 以上で大きな変化はなくなり、粒子層最下部の空間構造が一様流入条件とほぼ同じ値になる。

続いて粒子層の内部構造について粒子の接触状態から考察を行う。Fig.7に接触力の平均値を、Fig.8に配位数の平均値を示す。Fig.7, Fig.8より分散器の圧力損失が小さい場合、接触力、配位数ともに大きいことが分かる。これはFig.5, Fig.6で示したように、分散器の圧力損失が小さいときには気流が不均一に流入することで粒子流動にも大きな偏りが生じ、その結果として固気間の接触効率の低下を引き起こしていることを示している。接触力と配位数も分散器の圧力損失が十分である場合、一様流入条件とほぼ同じ値に近づいていく。

Fig.3 Snapshots of particle motion (Experiment)

uniform $p^*=0.0$ $p^*=0.11$ $p^*=0.20$ $p^*=1.03$

Fig.4 Snapshots of particle motion and fluid velocity (Simulation)

Fig.5 RMS value of fluid velocity

Fig.6 Power spectra of void fraction

Fig.7 Contact force as a function of p^*

Fig.8 Coordination number as a function of p^*

4.結言

分散器の圧力損失が流動層内流動に与える影響について、実験とDEM計算を行った。実験とDEM計算において流動パターンに対して定性的な一致が得られた。DEM計算において、分散器の圧力損失が粒子層の圧力損失に対して約20%程度以上の大きさで、ほぼ一様流入条件と同じになり、既存の実験的知見とよく一致した。

参考文献

1. 日本粉体工業技術協会編, "流動層ハンドブック", 培風館 258(1999)
2. 例えば, 川口ら, 機論, 58-551, 2119(1992).; Hoomans, B.P.B. et al., *Chem. Eng. Sci.*, 51-1, 99(1996).; Xu, B.H. & Yu, A.B., *Chem. Eng. Sci.*, 52-16, 2785(1997)
3. Anderson T.B. & Jackson R., *I & EC Fundamentals* 6-4, 527(1967)
4. Patankar, S.V. (訳: 水谷・香月), "コンピュータによる熱移動と流れの数値解析", 森北出版(1985)
5. Ergun, S., *Chem. Eng. Prog.*, 46-11, 89(1952)
6. Wen, C.Y. & Yu, Y.H., *Chem. Eng. Prog.*, 6, 100(1966)