2508 三次元気泡流動層中において形成される自発構造

Spontaneous structures formed in three-dimensional bubbling gas-fluidized bed

○学 簀本 恵三 (大阪大学) 正 辻 拓也 (大阪大学)
正 田中 敏嗣 (大阪大学)

Keizo YABUMOTO, Takuya TSUJI, Toshitsugu TANAKA

Department of Mechanical Engineering, Osaka University,
2-1 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-5871

Key Words: Bubbling Fluidized Bed, Fluidization, DEM-CFD Coupling Scheme, Spontaneous Structure Formation

1. 研究背景・目的

気泡流動層はコーティング、造粒、乾燥、燃焼などの様々な工業プロセスにおいて用いられている。層内における気泡の形成は、流れ特性に大きく影響を及ぼし、この種の装置の最適設計を行うには、気泡の形状やその形成メカニズムを理解することが重要である。

本研究では、川口ら¹⁾により提案された DEM-CFD (“Discrete Element Method”-“Computational Fluid Dynamics”) カップリングモデルを用いた数値解析により、三次元流動層内の固気両相の流動状態について観察を行った。この種の計算は、計算負荷の問題から、これまで 100 万個オーダー以上の粒子を含む三次元流動層には適応されていなかったが、並列計算を導入することにより、大規模三次元流動層の数値シミュレーションを可能にした。開発した計算コードを用いて、今回は特に、大規模気泡流動層内部において気泡群が自発的に形成する構造に注目し、装置のスケールアップに伴う流動状態の変化を観察した。

2. 支配方程式と計算モデル

流体運動の支配方程式は、Anderson&Jackson²⁾によって導かれた局所平均量に対する連続の式と運動方程式である。固気相間の運動量交換は、two-way coupling としている。流体計算は SIMPLE 法に基づいており、行列の解法には Xi ら³⁾が考案した PSOR 法を用いることにより並列計算の効率化を行った。

粒子については、並進および回転運動を取り扱っており、流体力、重力および粒子-粒子間、粒子-壁面間の接触力を考慮している¹⁾。接触力に関しては、DEM モデルを用いており、接触点における作用力はバネ、ダッシュポットおよび摩擦スライダを用いて表現される¹⁾。

計算体系は鉛直の矩形領域であり、主流と平行な方向に領域分割し、並列計算を行うことで大規模化および高速化を実現している⁴⁾。

3. 計算条件と結果

計算条件を Table 1, 2 に示す。空気と直径 4mm の球形アルミニウム粒子を想定している。粒子の初期配置は規則配列である。気体は矩形容器の底面から空塔速度 2.6m/s にて一様流入させるものとする。初期粒子層高はすべての場合において同じであるが、層断面積を順次拡大している。Case C は Case A の 8² 倍の断面積を持ち粒子数 450 万個の大規模計算となっている。

Fig. 1 に十分に発達し流動化した状態での層中央断面にお

ける空隙率分布を示す。粒子層内で空隙率の高い領域が気泡に相当する。層断面積が最も小さい Case A の場合、スラッシングが生じているが、一方、Case B, C では複数の気泡が発生し相互作用している様子が分かる。今回行った計算条件では、気泡サイズに対して初期粒子層高が低いため、気泡の合体や崩壊過程はあまり観察されなかった。

Fig. 2 に水平方向断面における空隙率の時間平均分布図を示す。紙面の都合上、Case C の場合のみ示す。観察面は容器底面から 0.15m の位置である。この図より、空隙率分布は層内において一様ではなく、特有の空間構造を有していることが分かる。

Fig. 3 に鉛直方向中央断面での粒子速度と空隙率の時間平均分布図を示す。Case A の場合、循環構造は一つしか存在しないが、Case B, C では複数の循環構造が存在することが分かる。後者の場合に注目すると、壁面付近から領域中央に向かって下降流、上昇流が交互に現れている。いずれの場合も壁近傍では下降流となっている。また、粒子速度と空隙率分布には明らかな相関があり、下降流が発生している場所では空隙率が低く、上昇流が発生している場所では空隙率が高い。これは選択的な気泡群の発生や通過により、上昇流が誘起されていることを示している。本研究は数値計算であり、理想的な一様流入条件を与えているにもかかわらずこのような空隙率分布の偏りが自発的に形成されることは大変興味深い。容器壁の影響が流動層中心に向けて伝播したものであると考えられる。

Table 1: Domain size

Case	A	B	C
Number of particles	8×10^4	2×10^6	4.5×10^6
Calculation domain [m]	$0.15 \times 0.15 \times 0.8$	$0.8 \times 0.8 \times 0.8$	$1.2 \times 1.2 \times 0.8$
Number of grid	$15 \times 15 \times 40$	$80 \times 80 \times 40$	$120 \times 120 \times 40$

Table 2: Calculation parameters

Particle diameter	4.0mm
Particle density	2700 kg/m^3
Normal spring constant	800N/m
Tangential spring constant	200N/m
Coefficient of restitution	0.9
Coefficient of friction	0.3
Initial bed height	0.2m
Gas density	1.205 kg/m^3
Gas viscosity	$1.81 \times 10^{-5} \text{ Pa s}$
Gas inlet velocity	2.6m/s
Time step	$2.0 \times 10^{-4} \text{ s}$

Table 3: Rough estimation of largest bubble size

Case	A	B	C
vertical length, V mm	247	140	168
horizontal length, H mm	145	182	210
Aspect ratio, V/H	1.70	0.77	0.80

層中心断面における空隙率の時系列画像から最大の気泡サイズを見積もった結果を Table 3 に示す。Case B に比べると Case C のほうが垂直、水平方向共に若干大きいものの、容器の大きさに依存した気泡サイズの変化は、それほど明らかではなかった。気泡サイズは初期粒子層高により固有の大きさが与えられ、Case A のように計算領域が気泡に比べ小さい場合を除くと、水平方向断面積にはあまり依存性しないと考えられる。ここでの検討は、最大気泡に対してのみ行ったものであり、より正確な検討が必要である。

4. まとめ

DEM-CFD カップリング計算により三次元気泡流動層のスケールアップに伴う流動層内部構造の変化を観察した。全てのケースにおいて気泡の発生が確認された。容器断面積が最も小さい Case A ではスラグ流に近い形態となったが、Case B, C では気泡群による自発的な構造形成が確認された。

空隙率と粒子速度の時間平均分布図から、気体流入速度分布が一樣であっても、気泡の発生は層内の空間位置に対して選択的に起こることが確認された。これは壁面の影響が層全体に伝播したものであると考えられる。

空隙率を示したスナップショットから最大気泡サイズを見積もった。Case A を除いて、Case B, C ではそれほど大きな差はなかった。このことから気泡サイズの領域水平方向面積に対する依存性は小さいと考えられる。

参考文献

- [1] 川口, 田中, 辻, 機論(B), **58**-551 (1992), 2119-2125.
- [2] Anderson, T.B. and Jackson, R., I&EC Fundamentals, **6**-4 (1967), 527-539.

- [3] Xie, D. and Adams, L., SIAM J. Sci. Comput., **20** (1999), 2261-2281.
- [4] 辻, 中村, 藪本, 田中, 粉体工学会誌, **44**-3 (2007), 173-179

Fig. 1 Snapshot of voidage distribution (vertical plane)

Fig. 2 Time-averaged volume fraction in Case C (horizontal plane)

Fig.3 Time-averaged volume fraction and particle velocity distributions at the bed center