管内固気二相流の数値実験*
(第2報, 垂直上昇管における粒子間衝突の影響)田代博之*¹, 富田侑嗣*²A Numerical Simulation for Gas-Solid Two-Phase Flow
(Part 2, Influence of the Collision between
Particles on the Vertical Upward Flow)

Hiroyuki TASHIRO and Yuji TOMITA

A numerical simulation of a gas-solid two-phase flow in a vertical upward pipe is made to examine the influence of collision between particles by using the same probability model which was proposed in the previous paper. We use coarse particles of uniform size as well as heterogeneous size and assume the velocity profile of air as uniform or 1/7th power law. The results show that the collision between particles promotes the particle dispersion both in the axial and radial direction of the pipe.

Key Words: Multiphase Flow, Numerical Analysis, Pipe Flow, Gas-Solid Flow, Collision between Particles, Particle Distribution

1. 緒 言

前報⁽¹⁾では, 粒子間衝突を確率的に処理する固気二相流の数値実験モデルを提案し, 粗大粒子について水平管内における数値実験を行った。その結果, 粒子間衝突は衝突粒子対の相対速度が大きい場合, 粒子挙動に影響を与え, 粒子浮遊の原因の一つになりうるということがわかった。

一方, 垂直上昇管内固気二相流についてはこれまで粒子挙動の数値シミュレーションにはあまり関心が払われてきていない。しかし, たとえば, 粒径や比重の異なる粒子群の上向きの輸送では, 個々の粒子の上昇速度は異なってくるであろう。この場合, 相対的に考えれば粒径や比重の大きな粒子群の間げきを小さな粒子が輸送されることになり, 粒子と壁との衝突はいうまでもなく, 粒子間衝突も無視することができないといえる。さらに粗大粒子の固気二相流では, 半径方向の力として乱れによるもの, あるいは速度分布, 自転に

よるものは小さいとされている⁽²⁾ので, 粒子の半径方向の分散の要因として, 粒子間衝突や壁との衝突が重要になると考えられる。そこで本研究では前報で提案した数値実験モデルを使用して, 粗大粒子の上昇管内固気二相流において粒子間衝突の粒子挙動に与える影響を調べる。

2. 計 算 方 法

2・1 基礎式 本計算における粒子は気流の乱れに影響されない粗大球形粒子とし, 粒子に作用する力は流体抵抗と重力のみとする。粒子運動は質点運動を基本とし, 管軸上向きに z 軸, 水平面内に x, y 軸をとって, 粒子の運動方程式を次のように与える。

$$\ddot{x} = -\frac{3}{4} C_D \frac{\rho V_r}{\sigma d} \dot{x} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\ddot{y} = -\frac{3}{4} C_D \frac{\rho V_r}{\sigma d} \dot{y} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\ddot{z} = \frac{3}{4} C_D \frac{\rho V_r}{\sigma d} (U_a - \dot{z}) - g \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで, C_D : 抵抗係数, ρ : 空気密度, σ : 粒子密度, d : 粒径, g : 重力の加速度, V_r : 粒子の気流に対する相対速度で $\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + (U_a - \dot{z})^2}$, U_a : 気流の z 方向速度, $(\dot{})$: () の時間微分。ただし, 気流は非圧縮

* 平成2年3月10日 中国四国支部第28期総会講演会において講演, 原稿受付 平成元年7月3日。

*¹ 正員, 久留米工業大学工学部 (〒830 久留米市上津町 2228-66)。

*² 正員, 九州工業大学工学部 (〒804 北九州市戸畑区仙水町 1-1)。

性とするが、その断面速度分布として均一分布と1/7乗則分布について検討する。

2.2 粒子間衝突 前報と同じく本計算での衝突判断は、互いに離れていく粒子対を除き、 i, j 粒子が衝突するまでの時間 τ 内で j 粒子に対する i 粒子の相対速度 v_{ij} は変化しないと仮定する (時間 τ は粒子軌跡のシミュレーション結果が一定になる計算時間ステップよりも小さいとき衝突が生じたとし、時間 τ がそれ以上の場合は衝突はないとしている。一定になる計算時間ステップは気流速度などによって変化するので、 τ も変化するが本計算条件では $\tau < 0.001$ s となった。)。したがって図1において i 粒子が j 粒子に衝突する確率は、 $\overline{O_i A}$ を半径とする半球面の表面積に対する斜線球面の表面積の比

$$SR = 1.0 - \cos \alpha \quad \cdots \cdots \cdots (4)$$

で与えられる。ここで、一様乱数 R を使用して

$SR > R$: 衝突あり

$SR < R$: 衝突なし

とする。ここで R_i, R_j は、それぞれ i, j 粒子の半径とする。ただし、 i, j 粒子が管軸に平行に運動している場合は衝突判断を次のように修正する。すなわち上述の仮定を満足し、かつ管横断面に投影した両粒子の中心間距離が両粒子の半径の和よりも小さい場合には衝突ありとする。衝突ありと判断された粒子対の中で衝突までの時間 τ が最小である粒子対をみつけ、そして τ だけ時間を進め、全粒子の位置と速度を求める。衝突粒子対がみつからない場合は、平均自由時間よりも小さい時間間隔 Δt だけ時間を進め、同様に全粒子の位置と速度を求める。ただし、粒子間衝突をすると判断された粒子対の少なくとも一方が時間 τ 内に管壁と衝突する場合は粒子間衝突はしないとする。

時間 τ と Δt は以下のように与える。

τ は図1において i, j 粒子の衝突までの距離 L_{ij} を i, j 粒子の相対速度 v_{ij} で割った値とする。ただし、 L_{ij}

図1 粒子間衝突

は互いの球面上の衝突位置によって $\overline{O_i A} \sim \overline{O_i B}$ まで変化するので一様乱数を用い次式で与える。

$$L_{ij} = \overline{O_i B} + R \times (\overline{O_i A} - \overline{O_i B}) \quad \cdots \cdots \cdots (5)$$

したがって、 τ は次式で与えられる。

$$\tau = L_{ij} / v_{ij} \quad \cdots \cdots \cdots (6)$$

平均自由時間は、条件によって異なるが、ここでは重力の向きが主流方向と逆向きであるということから管内での粒子分布は一様と仮定して求める。そして、この値の $1/K$ (K : 任意の1以上の正数) を微小時間間隔 Δt とする。粒子の平均速度を $\bar{v}$ 、粒子間の平均相対速度を $\bar{v}_{ij}$ とするとき、粒子速度がマクスウェル・ボルツマン分布に従えば $\bar{v}_{ij} = \sqrt{2} \bar{v}$ である。また一般に $\bar{v} < U_a$ であるので、これらを考慮して Δt を最終的に

$$\Delta t = \frac{1}{K} \cdot \frac{d^*}{6\sqrt{2} c U_a} \quad \cdots \cdots \cdots (7)$$

とおく。ここで、 d^* は均一粒径粒子では $d^* = d$ 、不均一粒径粒子では異径粒子の平均体積からもとめた平均粒径、 c は粒子の体積濃度である。これは上方に向かって減少するので Δt として粒子投入直後の値を共通に使用して問題ないといえる。ただし、 U_a は気流速度分布に1/7乗則を使用する場合はその最大値とする。

なお、粒子上の衝突位置は一様乱数によって与える。また、粒子と管壁との衝突には、辻らの異常反発モデル⁽³⁾⁽⁴⁾を使用する。

3. 計算結果および考察

本計算では、輸送管内径は40.0 mmとする。粒子密度は 923 kg/m^3 とし、均一粒径粒子群では $d = 3.0$ mm、不均一粒径粒子群では $d = 4.0, 3.5, 3.0, 2.5, 2.0$ mmの5種類の粒径粒子が均等に混合したものとした。計算時間ステップは、式(7)の K を1として気流速度 (1/7乗則分布ではその最大値) が 23.0 m/s で均一粒径粒子では $\Delta t = 5.693 \times 10^{-4} \text{ s}$ 、不均一粒径粒子では $\Delta t = 5.137 \times 10^{-4} \text{ s}$ となった。粒子は、1 s間に、120回、1回に5個の割合 (不均一粒径粒子の場合は個数で同じ割合) で管横断面の中心から半径10.0 mm以内に一様乱数を使用してランダムに分散させて供給 (供給量は均一粒径粒子では $G_s = 7.83 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$ 、不均一粒径粒子では $G_s = 9.13 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$) し、管軸方向に 1.0 m/s の一定初速度を与える。このようにしたのは、管横断面全体から粒子を供給すると、半径方向への分散に及ぼす粒子間衝突の効果がわかりにくくなるからである。空気密度は 1.205 kg/m^3 、動粘度は $1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ とした。粒子間衝突の反発係数は0.9、管壁との異常反発モデルのデータは辻ら⁽³⁾と同じとした。

計算結果は最初の粒子群混入から1 s 後 (計算終了時) における全粒子位置によって示す。

3・1 均一粒径粒子群 図2は気流の速度が均一 ($U_a=23.0$ m/s) の場合を示す。本衝突モデルにおいてこの計算条件では、粒子間衝突はないことになるので、衝突を考慮しない計算と同一の結果になる。したがって管軸方向へも半径方向へも粒子が混合、分散されずに輸送されることになる。図3は同じ計算結果を管横断面上に投影した結果を示す。半径方向への粒子の分散が全くみられないことがわかる。

図4は気流速度分布に1/7乗則 (管軸上最大気流速度 $U_a=23.0$ m/s) を使用し、粒子間衝突を考慮しない場合を示す。半径方向の分散はみられないが管軸方向へは粒子がよく混合しているようにみられる。これは管半径位置によって粒子が受ける流体抵抗が異なっていることによる当然の結果である。図5は同じ条件で粒子間衝突を考慮した場合を、また図6は同じ結果を管横断面上に投影した結果を示す。粒子間衝突 (計算開始からの累積の粒子間衝突数 $PN=133$) により半径方向への粒子の分散がみられるが衝突粒子対の速度差があまり大きくないので粒子間衝突がその分散に与える影響はあまり大きくない。

3・2 不均一粒径粒子群 図7は気流速度が均一 ($U_a=23.0$ m/s) で粒子間衝突を考慮しない場合を示す。均一粒径粒子群の場合と同様に粒子間衝突がないので半径方向への粒子の分散はみられない。またこの場合の管軸方向への粒子の広がり5種類の粒子をそれぞれ別々に (本計算では1個ずつ) 混入した場合の

結果を単に重ね合わせたものであり結果として図2のような不自然さがみえなくなっている。図8は同じ条件で粒子間衝突を考慮した場合を、また図9はその結果を管横断面上に投影した結果を示す。図5、6に比べ粒子間衝突数 ($PN=409$) が大きくなり、またその結果、管壁との衝突数も増加し管横断面全体にわたって粒子が分散されていることがわかる。また粒子間衝突によって粒子群全体の輸送距離が若干減少しているようにみられる。

最後に気流速度分布に1/7乗則を使用した場合 (管軸上最大気流速度 $U_a=23.0$ m/s) を示す。図10は粒子間衝突を考慮しない場合を、また図11は粒子間衝突を考慮した場合を示す。この場合も粒子間衝突 ($PN=424$) を考慮することで半径方向への粒子の分散が促進されることがわかる。また気流速度が小さい管周辺部まで粒子が分散されており図7と図8の場合の比較よりもさらに粒子群全体の輸送距離が粒子間衝突によって減少していることがわかる。

図3 管横断面内の粒子分布
(均一速度分布, 均一粒径)

図2 軸断面内の粒子分布 (均一速度分布, 均一粒径)

図4 軸断面内の粒子分布 (粒子間衝突を無視, 1/7乗則速度分布, 均一粒径)

図5 軸断面内の粒子分布 (粒子間衝突を考慮, 1/7乗則速度分布, 均一粒径)

図 6 管横断面内の粒子分布 (粒子間衝突を考慮, 1/7 乗則速度分布, 均一粒径)

図 9 管横断面内の粒子分布 (粒子間衝突を考慮, 均一速度分布, 不均一粒径)

図 7 軸断面内の粒子分布 (粒子間衝突を無視, 均一速度分布, 不均一粒径)

図 8 軸断面内の粒子分布 (粒子間衝突を考慮, 均一速度分布, 不均一粒径)

図 10 軸断面内の粒子分布 (粒子間衝突を無視, 1/7 乗則速度分布, 不均一粒径)

図 11 軸断面内の粒子分布 (粒子間衝突を考慮, 1/7 乗則速度分布, 不均一粒径)

4. 結 論

前報で提案した粒子間衝突を確率的に取扱うモデルを使用し, 垂直上昇管での粗大粒子群の流れの状態を数値シミュレーションした。その結果として,

- (1) 粒子間衝突によって粒子は半径方向への分散, 管軸方向への混合が促進される,
- (2) 粒子間衝突によって粒子群全体の輸送距離が減少する,
- (3) 気流速度分布を均一分布から 1/7 乗則に変え

ると, 粒子の半径方向の分散が促進される。

今後, 本モデルをさらに高濃度の粒子群を混入した場合や長距離輸送の場合のシミュレーションに使用できるように改善し実際の輸送実験の圧力損失との比較検討などを行う予定である。

文 献

- (1) 本論文集 1611 ページ.
- (2) Owen, P. R., *J. Fluid Mech.*, **39**(1969), 407.
- (3) 辻, 空気輸送の基礎, (1984), 45, 養賢堂.
- (4) 辻・森川・田中・中務・中谷, 機論, **53-488**, B(1987), 124.