管内固気二相流の数値実験*
(第1報, 水平管における粒子間衝突の取扱いに関する一案)田代博之^{*1}, 富田侑嗣^{*2}A Numerical Simulation of a Gas-Solid Two-Phase Flow
(1st Report, A Method of Dealing with the Collision between Particles
in a Horizontal Pipe)

Hiroyuki TASHIRO and Yuji TOMITA

A numerical simulation of a gas-solid two-phase flow in a horizontal pipe was proposed where by a probability model was applied to deal with the collision between particles. Coarse particles of uniform and heterogeneous size were calculated, and the results showed that the collision between particles can contribute to particle suspension in the horizontal pipe flow, especially in the latter case.

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

1. 緒 言

水平流路における固気二相流の粒子挙動の予測法の一つに、粒子間衝突を無視し、単粒子の運動を基準として、その多数回の試行によって得られる個々の粒子運動を重ね合わせて求めるというものがある。その場合、粒子の浮遊運動維持の原因として粒子と壁との衝突モデルに大きな関心が払われている^{(1)~(4)}。しかしながら気流速度が小さいか、あるいは粒子濃度が大きい場合、粒子間衝突を無視するのは合理的ではない。このような流れは実用的にも重要であり、粒子間衝突は粒子の流動様式や圧力損失に大きな影響を与えると考えられる。しかしそれにもかかわらず、これを考慮した研究は少ない⁽⁵⁾。

固気二相流における粒子挙動は実際上再現性がないといえるので個々の粒子挙動、特に粒子間衝突を厳密に取扱うことは容易ではない。そこで本研究では、粒子間衝突を確率的に処理する数値実験モデルを提案す

る。

2. 計 算 方 法

2.1 仮定 本計算における粒子は気流の乱れに影響されないような粗大球粒子とし、気流の管横断面速度分布は均一とする。固気系では粒子の回転の影響は小さいとされているので、今回は回転は考えず、粒子に作用する力は気流による流体抵抗と重力のみとする。さらに、次のような仮定をする。

- (1) 気流は等温、非圧縮性とする。
- (2) 粒子運動は質点運動を基本とする。
- (3) 選出された粒子対が離れて行く場合は粒子間衝突は生じないとする。
- (4) 粒子間衝突の際、球面粒子上の衝突位置は一様乱数によって与える。
- (5) 粒子の管壁との衝突の場合、正常反発のほか粒子は反射角が入射角より大きくなる異常反発を行うとする⁽³⁾。
- (6) 粒子の初期位置は一様乱数によって与え、また一定の初速度(本計算ではすべて2.0 m/s)を与える。

2.2 運動方程式 管軸方向に z 軸、鉛直方向に y 軸、水平方向に x 軸をとれば、粒子の運動方程式は次

* 平成2年3月13日 九州支部第43期総会講演会において講演、原稿受付 平成元年5月31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)。

のようになる。

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

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

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

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 $\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + (U_a - \dot{z})^2}$ 、 $(\cdot)$: $(\quad)$ の時間微分。

2.3 粒子間衝突 本計算での衝突判断は、上述の仮定(3)を考慮すれば、図1において j 粒子に対する i 粒子の相対速度 v_{ij} の方向は $\overline{O_i A}$ を半径とした半球面内となる。ここで i, j 粒子が衝突するまでの時間 τ 内で 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小さい場合に制限し、時間 τ がそれ以上の場合は衝突はしないとしている。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、 τ も変化するようになるが、本計算では $\tau < 0.001$ s となった)と、 v_{ij} が斜線球面内の方向の時 i, j 粒子が衝突することになる。半球面の表面積 S と斜線球面の表面積 S^* との比 SR をとれば

$$SR = S^*/S = 1.0 - \cos \alpha \dots\dots\dots (4)$$

となる。そこで、一様乱数 R に対して

$SR > R$: 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。

混入している粒子すべてに対し、その粒子番号(混入時に順に付けている)の前後それぞれ適当な粒子番号範囲内($\pm S$ 内、本計算では $S=100$)の粒子と上述の衝突判断を行い、衝突までの時間 τ が最小の粒子対

を選出する。衝突があれば τ だけ、また衝突粒子対がみつからなければ平均自由時間よりも小さい時間間隔 Δt だけ時間を進め、 i, j 粒子の衝突位置、反発速度や他のすべての位置や速度を求める。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判断する。

時間 τ と Δt は以下のように求める。

図1において i, j 粒子の衝突までの距離 L_{ij} 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、一様乱数 R を用い、

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

で与える。したがって、 τ は次式で与える。

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

微小時間間隔 Δt に関しては、水平方向の固気二相流における粒子分布は粒子に働く重力の影響のため、気体分子運動論における分子の分布とは異なり、一様とは考えられない。したがって、平均自由時間も局所的に変化すると考えられるので、流れの場全体から与えることは適当でないといえる。そこで、浮遊輸送の管底流の流動様式を参考にして管底から管径の1/4に粒子が一様分布すると仮定して平均自由時間を求め、その値の $1/K$ (K : 任意の1以上の正数)を Δt として使用する。なおこのとき $K > 0.7$ であれば、結果に K の影響はみられなかった。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、粒子の分布が一様であり、速度がマクスウェル・ボルツマン分布に従えば $\bar{v}_{ij} = \sqrt{2}\bar{v}$ であり、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

$$\Delta t = \frac{1}{K} \cdot \frac{d^*}{6\sqrt{2}cU_a} \dots\dots\dots (7)$$

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求めた平均粒径。 c は粒子の体積濃度であり、粒子が管底から管径の1/4の高さまでに分布するとした場合の値を使用する。なお粒子は加速されていくので、 c は下流に向かって減少する。したがって Δt としては粒子投入直後の c の値を共通に使用して問題ないといえる。

なお粒子間衝突は中心間衝突(重心の運動方向が衝突位置における法線と一致する衝突)に限定せず、互いの粒子上の衝突位置も一様乱数を使用しランダムに与える。また粒子と管壁との衝突には、正常反発のほかには辻ら⁽³⁾による仮想壁面の概念による異常反発モデルとそのデータを使用した。

図1 粒子間衝突

図 2 円管内の粒子分布(異常反発のみ考慮, 均一粒径)

図 3 円管内の粒子分布(異常反発および粒子間衝突を考慮, 均一粒径)

図 4 円管内の粒子分布(異常反発のみ考慮, 不均一粒径)

図 5 円管内の粒子分布(異常反発および粒子間衝突を考慮, 不均一粒径)

3. 計算結果および考察

本計算では、管内径 40 mm, 気流速度は 20.0 m/s, 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。粒子密度は 923 kg/m^3 とし, 均一粒径粒子群では $d=3.0 \text{ mm}$, 不均一粒径粒子群では $d=4.0 \text{ mm}$, 3.5 mm , 3.0 mm , 2.5 mm , 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。粒子は 1 秒間に 120 回, 1 回に 5 個の割合で供給断面に一様乱数を使用してランダムに分散させて供給(均一粒径粒子では粒子供給量 $G_s=7.83 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$, 不均一粒径粒子では $G_s=9.13 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$)する。粒子間衝突の反発係数は 0.9 とする。

以下の計算結果は, 式(7)の K を $K=2.0$ (均一粒径粒子の場合 $\Delta t=5.120 \times 10^{-4} \text{ s}$, 不均一粒径粒子の場合 $\Delta t=4.620 \times 10^{-4} \text{ s}$)とした場合を示す。また前述の粒子間衝突判断での S の値の妥当性は確かめている。

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

3.1 均一粒径粒子群 計算結果を軸断面内での

粒子の分布状態によって検討する。図 2 は異常反発のみを考慮した場合を示す。左側が粒子供給端である。管底を滑ることなく輸送されている。図 3 は異常反発と粒子間衝突を考慮した場合(計算開始からの累積の粒子間衝突数 $PN=267$)を示す。粒子間衝突を生じているにもかかわらず異常反発のみを考慮した場合とほとんど差異がみられない。これは粒子間衝突を生じる粒子対の相対速度が非常に小さいことが原因である。 z 方向の分布についても, 粒子間衝突による差異は特にみられない。

3.2 不均一粒径粒子群 図 4 は異常反発のみを考慮した場合を示す。均一粒径粒子群の場合と同じく管底を滑ることなく輸送されている。図 5 は異常反発と粒子間衝突を考慮した場合($PN=353$)を示す。図 4 や均一粒径粒子群の場合とは異なり管上部へ大きく反発している粒子がみられる。この結果は富田らの結果⁽⁵⁾とは異なった傾向を示している。富田らは粒子間衝突が生じれば粒子間の速度変換とエネルギー損失が生じ, その結果粒子と壁との異常反発による浮遊力が弱められ全体的には管底に集まるとしている。しかし

一般に、粒子間衝突を生じる粒子対の相対速度は同一径粒子対よりも異径粒子対のほうが大きいと考えられ、均一粒径粒子群の場合とは異なり、異径粒子対の衝突により管上部へ大きく反発されうると考えられる。つまりこの結果は粒子間衝突によって、両粒子それぞれの運動エネルギーの合計は減少するが衝突によって上下方向速度成分が大きくなりうることを示している。ただし富田らは粒子間衝突はすべて中心間衝突として取扱っており、また異常反発の処理方法も本実験とは若干異なっている。いずれの場合も粒子速度の増加のために粒子間隔は下流に向かって増加しているが、現段階では z 方向の分布状態に粒子間衝突による差異は見出し難い。

4. 結 論

固気二相流において粒子濃度が大きい場合、粒子間

衝突を無視して粒子挙動を予測することは合理的ではないが、これを考慮した研究は少ない。そこで水平管内固気二相流での粒子間衝突を確率的に取扱うモデルによって数値実験を試みた。その結果、粒子間衝突は、特に個々の速度差が大きくなる不均一粒径粒子群の流れにおいてその影響が顕著にみられ、粒子浮遊の原因の一つにもなりうることを示された。

文 献

- (1) Matsumoto, S. and Saito, S., *J. Chem. Eng. Jpn.*, 3-1(1970), 83.
- (2) Matsumoto, S. and Saito, S., *J. Chem. Eng. Jpn.*, 3-2(1970), 223.
- (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.
- (5) 富田・沈, 機論, 52-474, B (1986), 790.