

埋め込み境界法による粒子衝突時の潤滑力の解析

(岡山理大工)○島谷 将平* (岡山理大工)桑木 賢也*

1. 緒言

流動層シミュレーションに対する手法として離散要素法 (DEM) が主流となりつつある。しかし、1 つの計算メッシュサイズが粒子よりも大きいので、粒子スケール以下の潤滑力などの現象は考慮することができない。それらの影響を考慮するためには実験や他の数値解析法などで得られた構成方程式を用いる必要がある。

本研究では離散要素法 (DEM) で直接求めることができない潤滑の効果を検討するため、埋め込み境界 (Immersed Boundary (IB)) 法を用いた数値シミュレーションを行った。

2. 数値解析法と解析条件

本研究は Kajishima ら⁽¹⁾によって提案された体積力型の IB 法を用いている。本数値計算において、時間項は陽解法、慣性項は三次精度風上差分法、粘性項は二次精度中心差分、圧力項は HS-MAC 法を用いて離散化を行った。

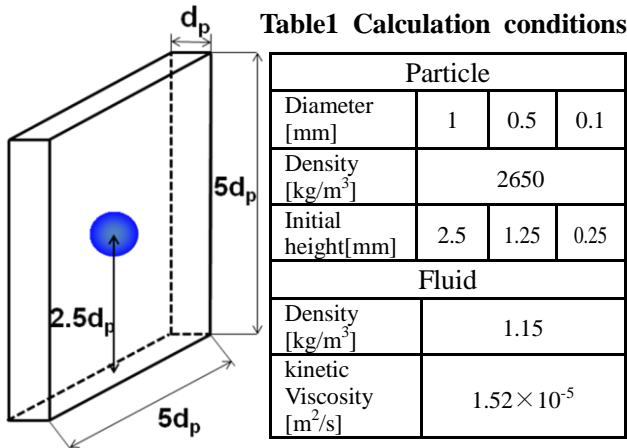


Fig.1 Problem Schematic

解析領域を Fig.1 に解析条件を Table1 に示す。粒子径は 1, 0.5, 0.1mm の 3 通りである。粒子の初期位置は解析領域の中心であり、空気中で自由落下させた場合の粒子にかかる力を解析した。一方、シミュレーション結果と比較を行なうため、粒子の運動方程式の(1)式を解き、シミュレーション結果との比較を行った。ここで、 F_D 、 F_{lub} 、 F_{AM} の値はそれぞれ抗力、潤滑力、付加質量力であり(2)式に示す既存の推算式を用いた。シミュレーションではこの 3 つの力が働いているので、3 つの力を合計した力を比較対象とした。

$$m \frac{dv_p}{dt} = F_D + F_{lub} + F_{AM} - mg \quad (1)$$

$$F_D = C_D \frac{\pi d_p^2}{4} \frac{\rho_f}{2} (u - v_p) |u - v_p| \quad (2)$$

$$F_{lub} = \frac{6\pi\mu v_p d_p}{\delta} \quad (3)$$

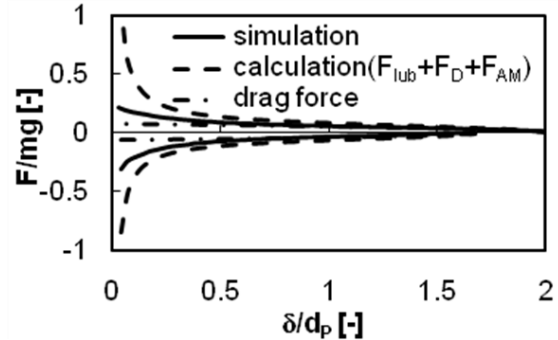
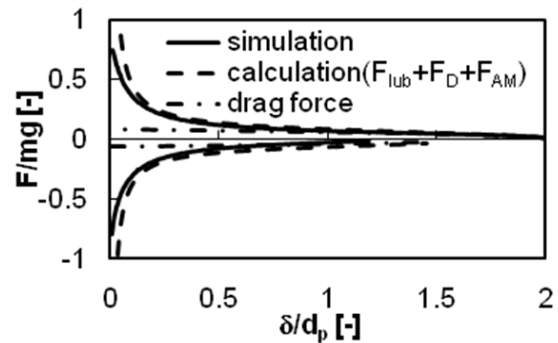
$$F_{AM} = \frac{1}{2} \rho_f \frac{\pi}{6} d_p^3 \left(\frac{du}{dt} - \frac{dv_p}{dt} \right) \quad (4)$$

F_D の式の C_D は(5) の式で求めた。また、(3)式の δ は粒子表面と壁面の距離である。以上の式を解くにあたり、流体の速度は $u=0\text{m/s}$ とした。

$$C_D = \frac{24}{Re} (Re < 5.76), \quad C_D = \frac{10}{Re^{0.5}} (5.76 < Re < 517) \quad (5)$$

3. 解析結果

Fig.2 と Fig.3 は粒子径 $d_p=0.1\text{mm}$ の粒子を自由落下させ、壁面との衝突直前と衝突後に上昇する粒子にかかる力を示したものである。Fig.2 は計算メッシュサイズを $\Delta/d_p=1/10$ 、Fig.3 は $1/20$ である。横軸は粒子隙間を粒径で無次元化、縦軸は粒子にかかる力を粒子にかかる重力で無次元化している。破線は(1)式で計算した推算値を示しており、Fig.2 のシミュレーション結果は推算値と大きな差が生じている。しかし、Fig.3 の方では推算値とほぼ一致していることから、計算メッシュサイズは粒径の $1/20$ 程度にする必要があると考えられる。また、一点鎖線は推算値の中から抗力のみを示した結果である。離散要素法 (DEM) によるシミュレーションでは抗力のみを考慮して計算を行うことが多く、その場合、この差が DEM の誤差として生じると考えられる。

Fig.2 Force acting on falling particle $\Delta/d_p=1/10$ Fig.3 Force acting on falling particle $\Delta/d_p=1/20$

4. 結言

IB 法により粒子衝突時に働く潤滑力の解析を行った。潤滑力の推算式との比較により、比較的良好にシミュレーションすることができることが確認された。また、DEM シミュレーションにおいて潤滑力を考慮しない場合の影響をマクロ的な流体速度を考慮しない場合の粒子の運動方程式から検討を行った。

参考文献

- (1) Kajishima, T., Takiguchi, S., Hamasaki, H. and Miyake, Y., JSME Int. Journal B, 44-4, (2001) pp.526.