G118

CFD-DEMによる微粒子懸濁液の粘度特性の検討

(同大研究開発推進機構) ○ (正) 清水 雅樹*・(同大工)(学) 谷口 俊・(JAMSTEC)(正) 西浦 泰介
(同大工)(正) 下坂 厚子・(正) 白川 善幸・(正) 日高 重助

[緒言] 固体粒子懸濁液の粘度推算式は，希薄懸濁液に対するEinsteinの式 [1] の提案以降，高濃度への拡張や凝集状態を考慮した様々な粘度推算式が提案され，実測値とも定量的に合致するようになっている．しかし，懸濁液の粘度は，その濃度はもちろん，粒子形状，凝集構造，粒子間相互作用，粒子特性や流動構造に依存し，まだこれらの因子と粘度との関係が十分明らかでない．そこで，複雑な固体粒子懸濁液の流動挙動の定量的評価のために流体-粒子間相互作用を可能な限り現実的に取り入れ，短時間での粘度評価を可能にする数値シミュレーションに取り組んでいる．ここでは，剛体球分散系における粘度の計算値と既存の粘度式との比較，流れの安定性が粒子径に依存することについて報告する．また，一般的な粘度測定では壁摩擦力が用いられるが，壁面近傍には粒子径程度の厚みの境界層が生じる．粘度式の導出では壁効果が考慮されていないので，測定値と粘度式とが直接比較可能であることは自明でない．しかし，粒子径が粘度に及ぼす効果は，$\mu_r O(\frac{a}{L})$ (μ_r:相対粘度，a:粒子半径，L:チャネル高さ) の微少量であり，特に低濃度の場合は $\mu_r O(\frac{a}{L}(\mu_r-1))$ の2次の微少量であり壁効果が無視できることを講演時に取り上げる．

[数値計算] 平面クエット系を考える．流体運動は非圧縮Navier-Stokes方程式に従うとし，壁面では粘着境界条件，流れ方向とスパン方向には，周期境界条件を用いる．

$$\nabla\cdot\boldsymbol{u}=0$$
$$\frac{\partial\boldsymbol{u}}{\partial t}+(\boldsymbol{u}\cdot\nabla)\boldsymbol{u}=-\nabla p+\frac{1}{Re}\Delta\boldsymbol{u}+\boldsymbol{f}$$
$$\boldsymbol{u}(x,y,z=\pm1)=\pm\boldsymbol{e}_x$$
$$\boldsymbol{u}(x+L_x,y+L_y,z)=\boldsymbol{u}(x,y,z)$$

ここで，$Re\equiv LU/\nu$(ν:動粘性係数) である．粒子-流体の境界は体積力型埋め込み境界法 [2] を用いるため，仮想的な外力 $\boldsymbol{f}$ を考慮する．

$$\boldsymbol{f}^n\equiv\alpha\frac{\boldsymbol{v}^{n+1}-\boldsymbol{u}^{n+\mathrm{f}}}{\Delta t}$$
$$\boldsymbol{u}^{n+1}=\boldsymbol{u}^{n+\mathrm{f}}+\boldsymbol{f}^n\Delta t=(1-\alpha)\boldsymbol{u}^{n+\mathrm{f}}+\alpha\boldsymbol{v}^{n+1}$$

ここで，$\boldsymbol{u}^{n+\mathrm{f}}$ は時刻 n から粒子の存在を無視して1ステップ時間積分した値である．α は格子内を粒子が占める体積率である [2]．粘性項にはCrank-Nicolson法を用いて陰的に，非線型項には2次のAdams-Bashforth法を用いて陽的に時間積分する．圧力のPoisson方程式は周期方向に高速フーリエ変換を用いることで直接解けるため，流体部分のDoループは，最大で $O(n^3)$ の演算量である．粒子の運動方程式と角運動方程式はそれぞれ，

$$\frac{d\boldsymbol{v}}{dt}=\frac{3}{4\pi}\frac{1}{M}\int_V(-\boldsymbol{f})\mathrm{d}V$$
$$\frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt}=\frac{15}{8\pi}\frac{1}{MR^2}\int_V\boldsymbol{r}\times(-\boldsymbol{f})\mathrm{d}V$$

となる．$M\equiv\rho/\rho_{\mathrm{f}}$ は比重，$R\equiv a/L$ である．これらは，2次のAdams-Bashforth法を用いて時間積分する．

[結果] 粒子の存在による粘度の増加は，見かけの Re 数を減少させ流れを安定化させる．一方，粒子の存在は流れに撹乱を与えるという意味では，不安定化の効果をもつ．図1に粒子径が異なる2つの系での流れの様子を示す．左は乱流状態で，右は層流を保っている．図2に粘度の体積率依存性を示す．高濃度におけるEinsteinの粘度式からのずれを，見かけの体積率の増加によるものと仮定し，見かけの体積率を $f(\phi)\phi$ とおく．f を ϕ の1次まで展開したもので良好な，粘度式の修正が可能である．

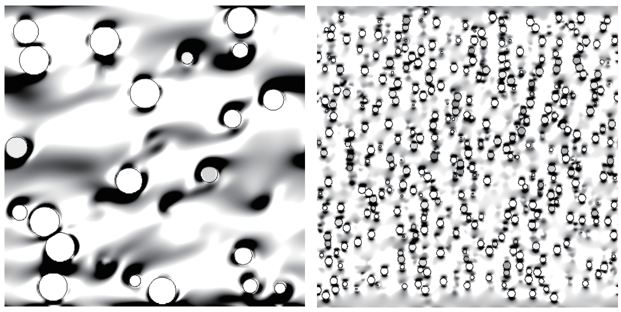

図1：xz 断面内の粒子と渦度の分布．$Re=1000, M=2.5$．左:$R=0.1$，右:$R=0.025$．粒子の体積率 $\phi\simeq0.1$．

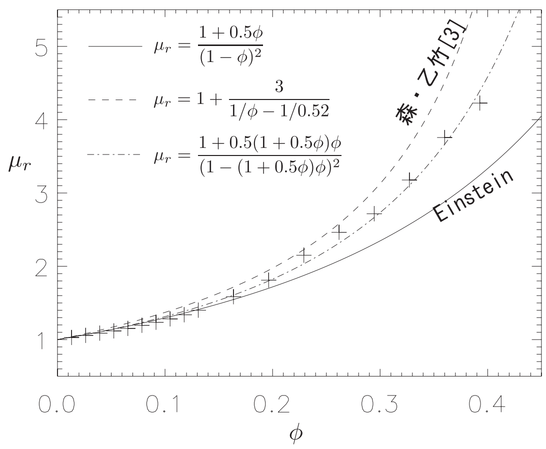

図2：粘度の体積率依存性.

[参考文献]
[1] A. Einstein, Ann. Phys., **19**, pp.289, (1906)
[2] 結城ら, 数値流体力学シンポジウム, **19**, A1-2, (2005)
[3] 森・乙竹, 化学工学, **20**, pp.488, (1956)

**E-mail: mashimiz@mail.doshisha.ac.jp*