

固気流動層と固液流動層 - 2次元粉体流の数値解析 -

市来 健吾^{a),b)} & 早川 尚男^{b)}

^{a)} 東北大学理学部

^{b)} 京都大学人間・環境学研究科

粉体流動層とは: 粉体流動層とは、典型的には、容器の中に粉を詰めて、容器の底から空気や水などの流体を流した時の、粒子と流体からなる混相流の系である。流入する流体には空気や水が典型的に用いられる。流動層には多くの流動状態-固定状態、一樣状態、気泡状態、スラグ状態、チャンネル状態、輸送状態-がある。流動層の種類(粒子の大きさ、密度、流体の種類、等)により、系は特定の流動状態を相変化していく。流動層の流動形態による分類は例えば Geldart などにより試みられている。本研究の目的は、この多様な流動層の統一的な記述が可能かどうかということ念頭に、流動層を支配する基本的なメカニズムを考察する事である。

シミュレーションモデル: コロイド粒子系の運動方程式は、粒子の慣性が無視できるので、

$$0 = -R \cdot (U - u^\infty) + F_g. \quad (1)$$

R は resistance matrix で、流体による相互作用を表し、粒子の配置に依存する量である。 U, u^∞, F_g はそれぞれ粒子速度、流体の流入速度、重力を表す。この系は流体力学的相互作用に含まれる lubrication 効果により、粒子の接触(衝突)は生じない。(1) 式に単純に粒子慣性を導入すると、

$$St \frac{d}{dt} U = -R \cdot (U - u^\infty) + F_g + F_c. \quad (2)$$

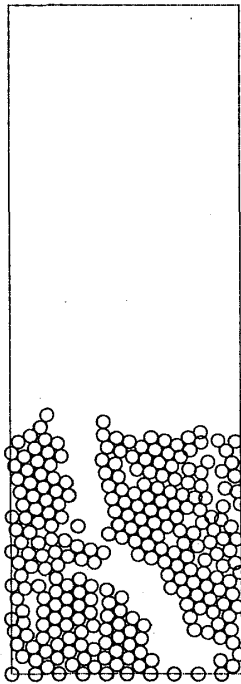
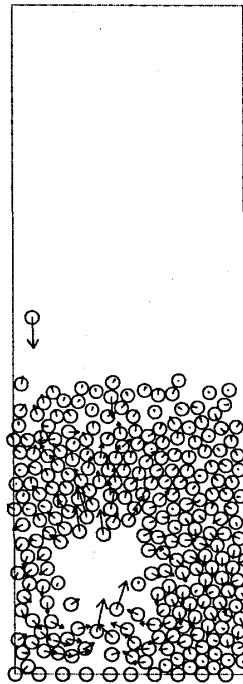
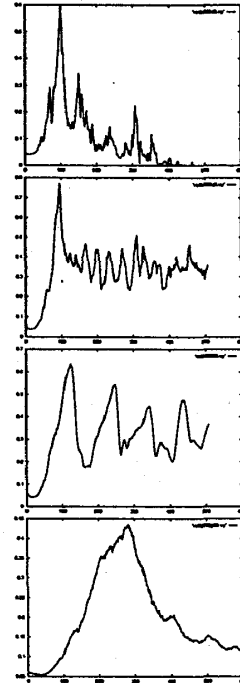
となる。ここで $St = mV/6\pi\mu a^2$ は Stokes 数である。しかし、 R に含まれる lubrication 効果の特異性(抵抗の発散)によりこの系でも粒子の衝突は生じない。つまり、コロイドと定性的に同じ振舞を示す。しかし、実際の流動層では粒子の衝突は頻繁に生じている。ここで我々は粒子の運動方程式を以下のように書く。

$$\bar{St} \frac{d}{dt} U = -(U - u^\infty) + R^{-1} \cdot F_g + F_c. \quad (3)$$

この式は R に含まれる特異性を打ち消すように人為的に St を繰り込んだものである。その意味で $\bar{St}$ は繰り込まれた Stokes 数(有効 Stokes 数)である。現実の系では、粒子表面の乱れ(細かな凹凸)や粒子間隔が非常に狭くなった時の流体層の連続体的記述の破綻など、lubrication の発散が生じないようなメカニズムがあるため、実際にこの特異性は効かないと考えられる。

計算結果: $\bar{St}$ 変化による系の振舞いの違いを見る。粒子半径が $10\mu\text{m}$ 、質量がガラス程度の粒子に対して Stokes 数を見積もると流体が水の場合 $St = 1.8 \times 10^{-3}$ 、空気の場合 $St = 9.3$ となる。有効 Stokes 数 $\bar{St}$ の見積もりは、lubrication の発散が抑制される機構に依存する為一般的には出来ていないが、固液流動層では小さく、固気流動層では大きくなることは明らかである。今回は $\bar{St}$ を 0 ~ 100 の間でシミュレーションを行なった。シミュレーションのスナップショットを、 $\bar{St} = 0$ の時と $\bar{St} = 10$ の時についてそれぞれ図 1 と図 2 に示す。 $\bar{St} = 10$ の場合、きれいな気泡が観測されるが、 $\bar{St} = 0$ の場合、流体の流れる流路が形成され、粒子は静止してしまう。

次に $\bar{St}$ 変化による粒子速度の分散の振舞いを見る(図 3)。 $\bar{St} = 0$ の場合、分散(～粒子の運動エネルギー)がゼロに減衰してしまうのに対し、 $\bar{St} \neq 0$ の場合はある定常値の回りに振動している様子がわかる。この振動のピークは気泡の存在に対応している。

図 1: $\bar{S}t = 0$ 図 2: $\bar{S}t = 0$ 図 3: 縦軸は粒子速度の分散、横軸は時間。図は上から $\bar{S}t = 0, 1, 10, 100$.

まとめと課題: 今回のシミュレーションから、有効 Stokes 数 $\bar{S}t$ を変化させることで、チャンネル流（非気泡流動）と気泡流動の2つの状態が観測された。この二つの状態は粒子速度の分散（～粒子の運動エネルギー）がゼロに減衰するか、ある定常値の回りに留まるかの違いであることが分かった。

気泡流動状態のシミュレーション結果から、気泡の生成周期は $\bar{S}t$ の増加に従って大きくなるが、 u^∞ の変化にはそれほど敏感ではないことが分かった。

我々の系には2つのコントロールパラメータ-有効 Stokes 数 $\bar{S}t$ と流体の流入速度 u^∞ -があるが、これらのパラメータと、シミュレーションで観測される粒子速度の分散、気泡の生成周期、などの依存性を定量的に調べることで、有効 Stokes 数の見積もり、また非気泡流動-気泡流動の転移の生じるパラメータ点の数値的、理論的見積もりが今後の課題である。

参考文献

- J. F. Davidson and R. Clift and D. Harrison, “*Fluidization*”, Academic Press, London. (1985)
 D. Gidaspow, “*Multiphase Flow and Fluidization*”, Academic Press, London. (1994)
 J. F. Brady and G. Bossis, Annu. Rev. Fluid Mech. **20** pp.111–157, (1988).
 K. Ichiki and H. Hayakawa, Phys. Rev. E **52** pp.658–670, (1995).