

粉粒体モデルによる密集状態シミュレーション

増田, 匠
東京大学工学系研究科航空宇宙工学専攻

西成, 活裕
東京大学先端科学技術研究センター | (独) 科学技術振興機構さきがけ

<https://doi.org/10.15017/23412>

出版情報：応用力学研究所研究集会報告. 22A0-S8 (28), pp.188-191, 2011-03. 九州大学応用力学研究
所
バージョン：
権利関係：



応用力学研究所研究集会報告 No.22AO-S8

「非線形波動研究の新たな展開 — 現象とモデル化 —」 (研究代表者 笥 三郎)

共催 九州大学グローバル COE プログラム

「マス・フォア・インダストリ教育研究拠点」

Reports of RIAM Symposium No.22AO-S8

Development in Nonlinear Wave: Phenomena and Modeling

Proceedings of a symposium held at Chikushi Campus, Kyushu University,
Kasuga, Fukuoka, Japan, October 28 - 30, 2010

Co-organized by

Kyushu University Global COE Program

Education and Research Hub for Mathematics - for - Industry

Article No. 28 (pp. 188 - 191)

粉粒体モデルによる密集状態シミュレーション

増田 匠 (MASUDA Takumi), 西成 活裕 (NISHINARI Katsuhiko)

(Received 18 January 2011)



Research Institute for Applied Mechanics
Kyushu University
March, 2011

粉粒体モデルによる密集状態シミュレーション

東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻

増田匠 (MASUDA Takumi)

東京大学先端科学技術研究センター, (独) 科学技術振興機構さきがけ

西成活裕 (NISHINARI Katsuhiko)

概要 本研究では, 狭い出口付近の粉粒体の挙動を実験により観察し, 離散要素法によるシミュレーションを行った. 粉粒体が狭い出口から退出するとき, アーチ状の構造が形成され流れが止まる現象が確認されている. この現象は人の群集にも見られる. そこで, 将来的に人の群集と粉粒体を比較することを目的に本研究では粒子同士が重ならない粉粒体を対象とする.

1 はじめに

粉粒体とは細かい粒子の集合体である. 砂山のように積み上げてある程度形を保つこともできるが, 個々の粒子は他の粒子と結合されているわけではないので, 粒子の再配置が容易に起こり, 全体としては流体に近い挙動を起こすこともある.

たとえば, 小麦粉は細かい粒子の集まりであり粉粒体とみなすことができる. 小麦粉の入った容器を傾けると, 上層部が崩れて流れ出るが, 下層部の粒子は動かない. また, 土は土粒子の集合体であり, 通常は固体のように振舞うが, 土石流のように流体に近い挙動も起こしうる. このように, 粉粒体は身近にありながらも複雑な運動をするものである.

粉粒体特有の現象の一つとして, 流体に近い挙動の粒子が突然固体のように振舞うときがある. 粒径と比べてそれほど大きくない出口から粉粒体が流出するとき, 出口付近の粒子同士がアーチ状に配置してしまい, 結果的に粉粒体の流出がとまる現象である. アーチ状の配置は粉粒体を加振することで取り除くことができるが, 流れているうちに再びアーチ形状が形成され出口を塞ぐことがある.

近年では, このような挙動を交通流や人の群集運動と比較して研究することがある. 通常の流体では, 一箇所に集中する流れであってもスムーズな状態から自然に止まることはないが, 粉粒体や人の群集では渋滞状態になりうるからである.

本研究では, 将来的に群集運動と比較することを踏まえて, 粒子同士が重ならないような状態の粉粒体の挙動を, 実験とシミュレーションにより観察した. 実験では, 勾配のついた容器に加振器で刺激を与えて, 粒子が流出する様子を捉えた. シミュレーションでは, 実験と同様の条件で計算し, その精度を確認した.

2 実験装置

実験では, 円錐を縦に半分にした形状の容器に重ならず並んだ粉粒体が狭い出口から流出する際の挙動を, 高速度カメラによって真上から撮影する. なお, 出口が狭いときには, 粒子がアーチ状に並び, 流れが止まってしまう. 粒子を再配置させアーチ状の構造を破壊するために, 加振器によって容器ごと粒子に振動を加える. 与える振動は, 周波数と加速度で決定する.

振動の周波数と加速度に加え, 粒子の流れを特徴付けるパラメータとして, 容器の勾配と出口の大きさを変化させる. なお, 今回は種類の粒子のみで実験を行うが, 粒子の素材や大きさ, 形状を変化させることで, 人の個性に対応付けられると考えられる.

図 1(a) に高速度カメラと粉粒体と振動器の位置関係を示す．図 1(b) に容器と粉粒体を上面から撮影した様子を示す．

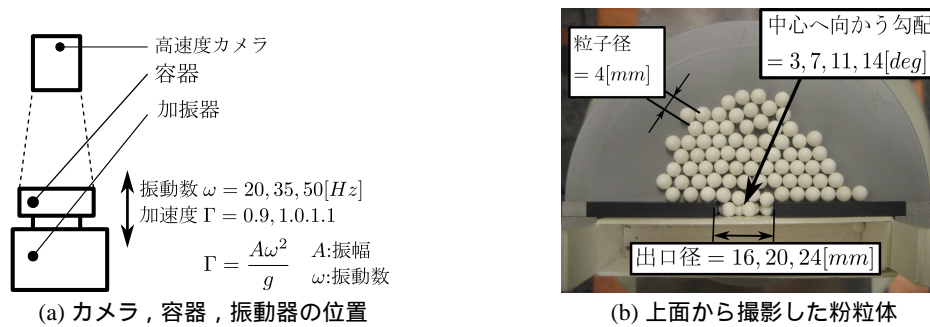


図 1: 実験装置

実験は、容器の勾配 4 種類 (3,7,11,14[deg])、出口径 3 種類 (16,20,24[mm])、加速度 3 種類 (0.9,1.0,1.1)、周波数 3 種類 (20,35,50[Hz]) で、一つの実験条件に対し 5 回ずつ行った。

粉粒体の流出と人の群集の退出口を関連付けると、容器の勾配は人が出口に集まる度合いに対応する。振動の加速度や周波数が高いとき、粉粒体は粒子の配置を頻繁に変えるようになるため、それらは人の群集において個人の前に進もうとするモチベーションに関連するパラメータであると考えられる。

撮影した映像を解析することで、各粒子の xy 座標を得ることができる。図 2 は、横軸に時間を、縦軸に流出した粒子数を示したグラフである。傾きがほぼ 0 になっている部分では、アーチ構造が流れを止めているため時間が経過しても粒子が容器から退出していない。

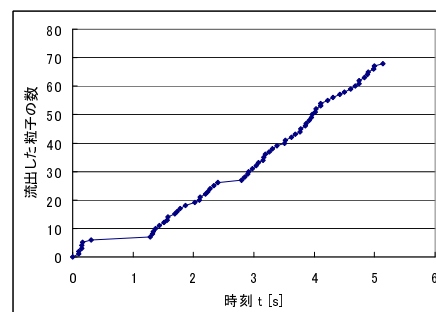


図 2: 流出した粒子と時間の関係

このグラフの傾きを粒径に対する出口の広さで割ったものを、流動係数 Q と定義する。

$$Q = \frac{n}{Td} \quad (2.1)$$

ここで、 n は流出した粒子の数、 T は全粒子が流出するまでの時間、 d は出口径/粒径である。

3 シミュレーション

粉粒体を構成する粒子はニュートンの法則に従うため、周囲の粒子や容器から受ける接触力を得ることができれば、粒子の挙動の軌跡を計算できる。全ての粒子の運動軌跡を得るなら、それが粉粒体の挙動を示すことになる。

離散要素法 (Discrete Element Method, DEM) では, Voigt モデルで接触力を表現する (図 3). Voigt モデルとは, バネとダッシュポットが並列に並んだモデルで, せん断力には上限があり, それを超えると空回りが許容される [2].

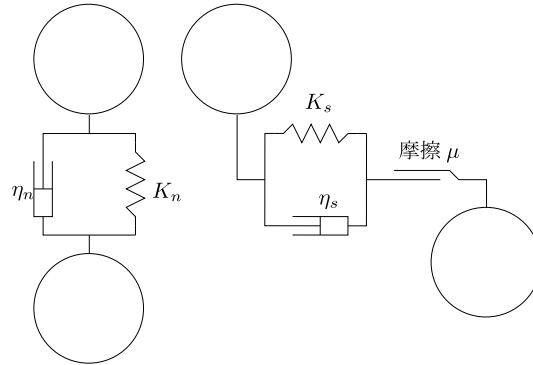


図 3: Voigt モデル

バネ定数 K_n, K_s , ダッシュポットの係数 η_n, η_s は次のように計算できる. r は粒子の半径, E はヤング率, e_b は反発係数である. m は質量である.

$$K_n = \frac{4}{3\pi} \left\{ \frac{1}{\delta_1} + \frac{1}{\delta_2} \right\}^{-1} \sqrt{\frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}} \quad (3.1)$$

$$K_s = \frac{K_n}{2(1+\nu)}, \quad \delta_i = \frac{1-\nu_i^2}{E_i \pi} \quad (3.2)$$

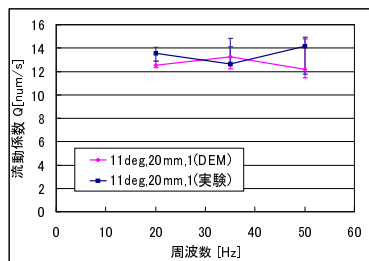
$$\eta_n = 2\sqrt{mK_n} \sqrt{\frac{(\ln e_b)^2}{\pi^2 + (\ln e_b)^2}} \quad (3.3)$$

$$\eta_s = 2\sqrt{mK_s} \sqrt{\frac{(\ln e_b)^2}{\pi^2 + (\ln e_b)^2}} \quad (3.4)$$

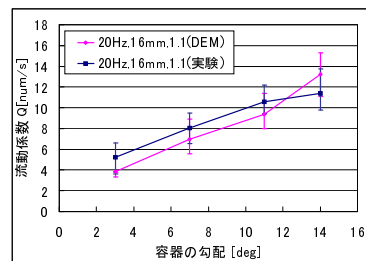
このモデルで 3 次元のシミュレーションを行い, 流動係数を測定した. 計算は決定論的であるが, 粒子の初期位置をランダムに決定するので, 結果にはばらつきが生じる. 実験と比較することを目的に, 同じ実験条件で 5 回ずつ計算を行った.

4 実験とシミュレーションの比較

図 4(a), 図 4(b) に実験とシミュレーションから得た流動係数を示す. 図に示す流動係数は 5 回の実験またはシミュレーションから得た平均値であり, エラーバーは最大値と最小値を表す. 図 4(a) の実験条件は, 容器の勾配 11[deg], 出口径 20[mm], 加速度 1 である. 横軸は振動の周波数, 縦軸は流動係数である. 図 4(a) の実験条件は, 出口径 16[mm], 加速度 1.1, 周波数 20[Hz] である. 横軸は容器の勾配, 縦軸は流動係数である.



(a) 周波数依存性



(b) 勾配依存性

図 4: 流動係数の依存性

図 4(a), 図 4(b) より, 離散要素法から得た流動係数はエラーバーの範囲で実験値と一致することが分かった。

5 結論

狭い出口から流出する粉粒体の挙動を観察するため, 容器の勾配, 出口径, 振動の加速度, 周波数を変化させ実験した。実験と同様の条件で, 離散要素法により粉粒体の流動係数を計算し, 実験値との比較を行った。その結果, シミュレーションの値は, 最大値-最小値の中に収まる精度であることが分かった。

参考文献

- [1] 佐原亨, "粒子振動実験による粉粒体の挙動解析", 東京大学工学系研究科航空宇宙工学専攻 (2010)
- [2] 粉体工学会編, "粉体層の操作とシミュレーション", 日刊工業新聞社