

液滴落下の粒子法解析

日大生産工 ○椎名 秀昌 日大生産工(院) 林 侑希
日大生産工 角田 和彦

1 はじめに

粒子法は連続体の挙動を有限個の粒子によって表し、粒子の運動によって連続体の挙動を計算するシミュレーション手法である。今回の研究では粒子法の一つであるMPS法¹⁾を用いて解析を行う。また今回解析する液滴落下はインクジェットプリンタのヘッドノズルなどの工学的な応用やミルククラウンなどの自然現象にも関わりの深い現象である。

本研究では、ミルククラウン現象を実現するために、MPS法を用いて3次元液滴落下シミュレーションを行い、ミルククラウンを観測できるか検証することを目的とする。

2 支配方程式

非圧縮性流体の支配方程式は次式で表せる。

$$\frac{D\rho}{Dt}=0$$

・ナビエ・ストークス方程式

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \nu\nabla^2\mathbf{u} + \mathbf{g} + \frac{1}{\rho}\sigma\kappa\mathbf{n} \quad (2)$$

式(1),(2)の左辺はラグランジュ微分であり、式(2)の右辺の第1項は圧力項、第2項は粘性項、第3項は重力項、第4項は表面張力項である。本研究ではCSFモデルを用いて表面張力を追加している²⁾。また $\mathbf{u}$:速度ベクトル、 ρ :密度、 P :圧力、 ν :動粘性係数、 σ :表面張力係数、 κ :曲率、 δ :デルタ関数、 $\mathbf{n}$:垂直な単位ベクトルを表す。

3 MPS法

MPS法¹⁾では勾配や発散などの微分演算子に対応する粒子間相互作用モデルを用いて連続体の支配方程式を離散化したものである。

粒子間相互作用モデルでは重み関数²⁾を導入し粒子間の相互作用を計算する。重み関数にはいくつかの関数が提案されているが、今回は式(3)の対数関数を用いる。

$$w(r) = \begin{cases} \log \frac{r_e}{r} & (0 \leq r < r_e) \\ 0 & (r_e \leq r) \end{cases} \quad (3)$$

ただし、 r は粒子間距離、 r_e は影響半径である(図1参照)。

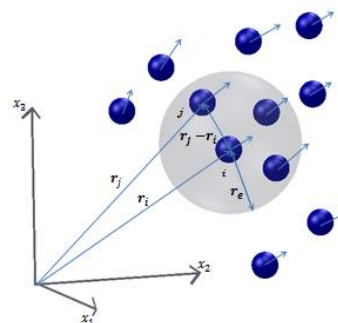


図1 重み関数

以下に示す式(4)は勾配モデル、式(5)はラプラシアンモデル、式(6)はラプラシアンモデルについての統計的な分散の増加を解析解と一致させるための係数である。

$$\langle \nabla \phi \rangle = \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} \left[\frac{\phi_j - \phi_i}{|r_j - r_i|^2} (r_j - r_i) w(|r_j - r_i|) \right] \quad (4)$$

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle = \frac{2d}{\lambda n^0} \sum_{j \neq i} [(\phi_j - \phi_i) w(|r_j - r_i|)] \quad (5)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{j \neq i} |r_j - r_i|^2 w(|r_j - r_i|)}{\sum_{j \neq i} w(|r_j - r_i|)} \quad (6)$$

4 数値計算例

本研究では、3次元解析モデルとして、液滴の落下モデルに対して解析を行う。液滴落下は、ある一定の高さから液滴を下の水面に落下させるものである。液滴が水面に落下した際の挙動についての検証を行う。図2は、液滴落下の初期状態でPOV-Rayにより、可視化したものである。また表1に粒子数等の各諸量を示す。

表1.計算条件

総粒子数	131998
粒子間距離	0.008m
密度	1,000kg/m ³
重力加速度	9.8m/s ²
動粘性係数	1.0 × 10 ⁻⁴ m ² /s
表面張力係数	0.05mN/m

Droplet-folling Analysis by Particle Method

Hidemasa SHIINA, Yuki HAYASHI and Kazuhiko KAKUDA

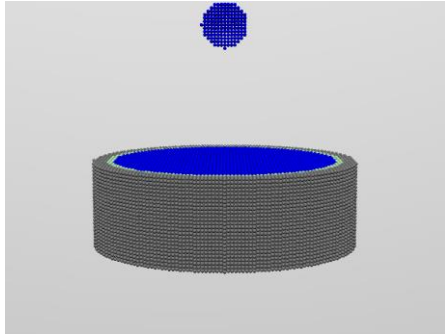
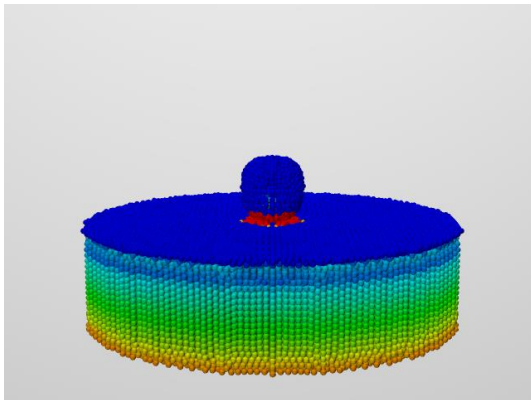


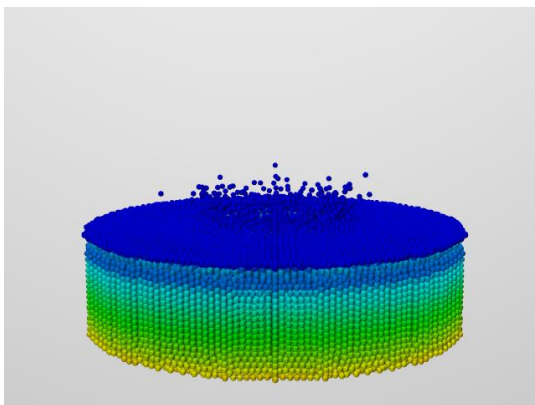
図2. 液滴落下

図3に初期状態からの液体粒子の流動(0.24s, 0.28s, 0.31s, 0.34s)を示す.

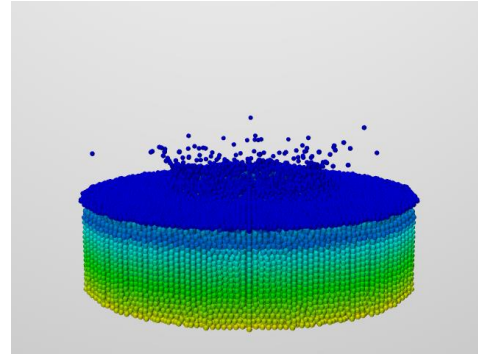
図3(a)のとき, 重力の影響により, 液滴が落下し水面と衝突していることがわかる. またこの時に水面と液滴の間に高い圧力が生じている. 図3(b)では液滴が崩壊し, 外側に弾け始め, 図(c)のとき, 粒子が弾けているのがわかる. また(b)(c)に共通して表面張力を考慮したことにより粒子がまとまっていることが確認できる. このことからミルククラウン現象にみられるクラウンの形成までにはいたらなかったが流体の挙動は近づいてきていることが確認できる.



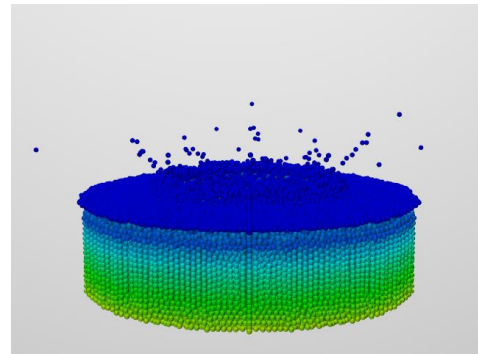
(a) $t=0.24s$



(b) $t=0.28s$



(c) $t=0.31s$



(d) $t=0.34s$

図3 液滴落下シミュレーション

5 おわりに

本研究では, 液滴落下の3次元解析を行い, 挙動の検証を行った. 今回の検証では表面張力により, 粒子同士が引き合うことを確認することが出来た. しかし期待したミルククラウンの発生を実現させることは出来なかった.

今後は今回用いたCSFモデルによる表面張力モデルから粒子間力を用いた表面張力モデルへの改良³⁾, また水面の深さ, 液滴を落とす高さ, 液滴の大きさを変化させることにより, どのような条件でクラウンが発生するか検証していきたい.

「参考文献」

- 1) Koshizuka, S. and Oka, Y.: Moving-Particle Semi-implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid, Nucl. Sci. Eng., 123, 421-434(1996)
- 2) Nomura, K., Koshizuka, S., Oka, Y. and Obata, H.: Numerical Analysis of Droplet Breakup Behavior using Particle Method J. Nucl. Sci. Technol. 38, 1057-1064 (2001)
- 3) 近藤雅裕, 「粒子間力による表面張力モデルの開発」, 日本機械学会第19回計算力学講演会(2006).