

圧力安定化粒子法による水柱崩壊シミュレーション

日大生産工 (院) ○林 侑希 日大生産工 豊谷 純
日大生産工 角田 和彦

1 はじめに

数値解析の1つである粒子法は大変形問題、自由表面追跡への適用に優れている¹⁾。しかしながら、圧力計算を解く際、計算が不安定になることが問題視されている²⁾。これまで、圧力を安定に解くため、様々な重み関数や圧力ポアソン方程式の高精度化が提案されてきた²⁾³⁾。そこで本稿ではニューラルネットで用いられるシグモイド関数⁴⁾から双曲線関数を導出し、重み関数に適用させ、解析の精度を図る。また、数値振動を抑制する方法として、圧力補間粒子の半減を行う方法が考案されている³⁾。しかし、この方法は粒子間距離が変化すると、探索半径を変える必要がある。そのため、探索半径の違いによる解挙動への影響を検討することが重要である。

そこで本研究では、2次元水柱崩壊の問題に対し、MPS法を用いて、対数型重み関数、双曲線関数を利用した重み関数との比較検証、また圧力補間粒子の半減する方法の検討を行うことを目的とする。

2 MPS法

MPS法では微分方程式に現れる勾配、発散、ラプラシアン等に対して、それぞれ粒子間相互作用モデルを用意し、これらを用いて微分方程式の離散化を行う¹⁾。本研究では、式(1)の従来の重み関数、式(2)の対数型重み関数、式(3)の双曲線重み関数での比較を行い、検討を行う。

$$w(r) = \begin{cases} \frac{r_e}{r} - 1 & (0 \leq r < r_e) \\ 0 & (r_e \leq r) \end{cases} \quad (1)$$

$$w(r) = \begin{cases} \log \frac{r_e}{r} & (0 \leq r < r_e) \\ 0 & (r_e \leq r) \end{cases} \quad (2)$$

$$w(r) = \begin{cases} \operatorname{sech}^2 \frac{4r}{r_e} & (0 \leq r < r_e) \\ 0 & (r_e \leq r) \end{cases} \quad (3)$$

ただし、 r は粒子間距離、 r_e は影響半径である(図1参照)。

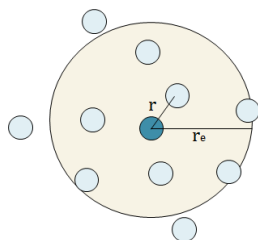


図1. 粒子間相互作用

3 圧力補間粒子の半減

有限要素法では、数値振動を抑制する方法として流速の補間に対し、圧力の補間関数を1次下げの方法が用いられている。この手法を粒子法に応用するため、圧力を求める際の粒子間探索半径を半分に行われている³⁾(図2)。

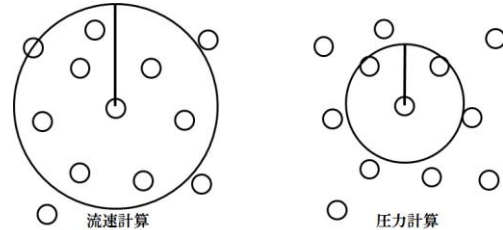


図2. 圧力補間粒子の半減

4 数値計算例

本研究では、対数型重み関数、双曲線重み関数の検証、また圧力補間粒子の半減する方法の検証を図るため、自由表面流れを扱う代表的なベンチマークの1つとして知られる水柱崩壊モデル(図3)を使用し、検討を行う。また、水柱底面(赤丸の部分)の圧力挙動を調べ、圧力場の安定性を確認する。

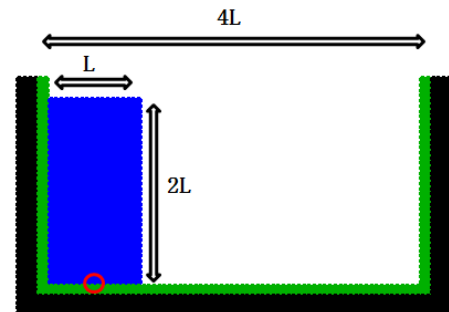


図3. 水柱崩壊モデル (総粒子数: 1632)

図3に水柱崩壊シミュレーションの結果(左: 0.1秒, 右: 0.3秒)を示す。上から、標準重み関数、対数型重み関数、双曲線重み関数で行った結果である。また図4に、水柱底面における圧力振動の時系列を示す。横軸が時間、縦軸が圧力値である。崩壊した際、圧力は水柱の底面に集中するはずだが、双曲線重み関数は、標準重み関数、対数型重み関数と比べ、圧力が高まる場所が異なっている(0.1秒)。しかし、崩壊後の壁との衝突では、圧力値が対数型重み関数よりも定まっている(0.3秒)。また、水柱底面の圧力の挙動では、他の重み関数と比べ、対数型重み関数は振動が小さくなっており、圧力のほとんどが2,000Pa以下に留まっている。

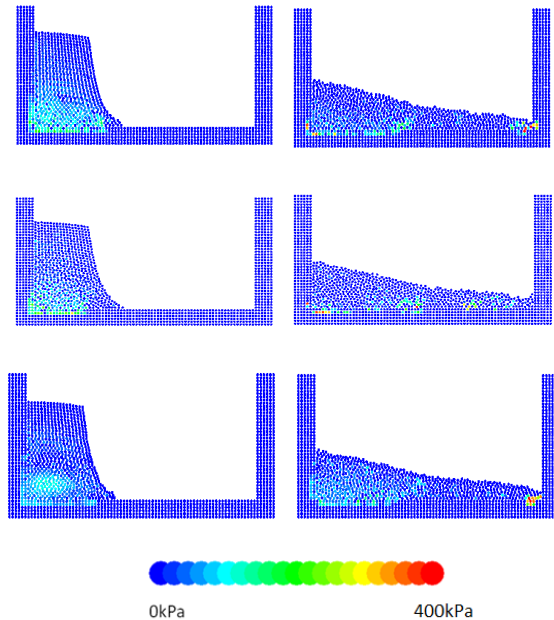


図3. 重み関数の違いによる比較

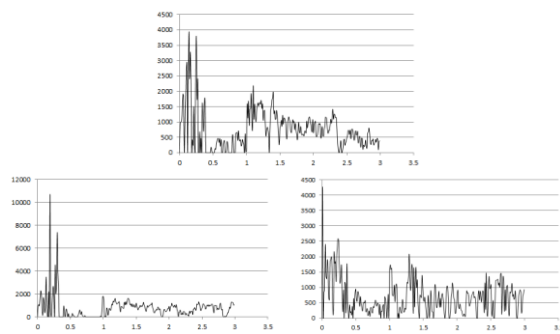


図4. 水柱底面の圧力挙動
(上：標準，左：対数型，右：双曲線型)

図5に標準重み関数，対数型重み関数，双曲線重み関数を用いた解析データとして，それぞれ崩壊した水柱の右先端の長さを測定し，実験値⁵⁾(Scale 1.125と2.25)との比較を示す．

対数型重み関数は標準重み関数と比べ，実験値に近づいている．双曲線重み関数は，標準，対数型重み関数に比べ，スタート時は実験値より離れているが，時間ともに実験値に近づくことが確認できる．

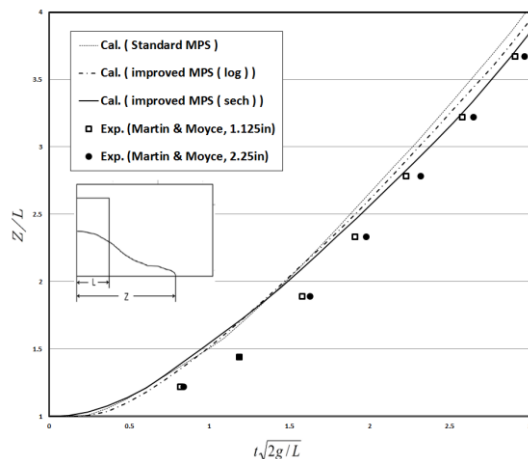


図5. 実験との比較

図6に圧力補間粒子の半減方法を用いて行った解析結果を示す．左が粒子間距離 0.008m (0.2秒, 0.3秒), 右が粒子間距離0.0001m (0.1秒, 0.2秒)で行った結果である．圧力補間粒子の半減は，粒子間距離によっては安定的に解けているが，粒子間距離を変えると計算が不安定になる傾向がある．これを改善するには，適切な探索半径を与える必要があると考えられる．

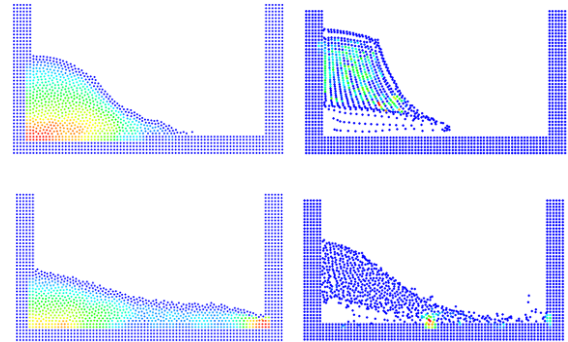


図6. 粒子間距離による比較

5 おわりに

本研究では，2次元水柱崩壊の問題に対し，MPS法を用いて，標準重み関数，対数型重み関数，及び双曲線関数を利用した重み関数との比較検証，また圧力補間粒子の半減する方法の検討を行った．標準重み関数と比べ，対数型重み関数は実験値に近づいた．また，双曲線重み関数は時間が進むにつれ，実験値に近づくことを確認した．圧力補間粒子の半減する方法では粒子間距離が異なるときの解析結果の相違について検証を行った．

今後は，圧力補間粒子の半減方法を用いたとき，異なる粒子間距離においての適切な探索半径を求めたい．

参考文献

- 1) S.Kosizuka and Y.Oka, “Moving-Particle Semi-implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid”, Nuclear Science and Engineering, 123, pp. 421-434, (1996)
- 2) M.Kondo and S.Koshizuka, “Improvement of Stability in Moving Particle Semi-Implicit Method”, Int.J.Numer.Meth.Fluids, vol. 65, pp.638-654, (2011)
- 3) 小原俊介, 角田和彦, 豊谷純, 複雑流れの3次元粒子法シミュレーション及び物理ベースCGに関する研究, 日本大学生産工学研究科修士論文, (2012)
- 4) 角田和彦, ニューラルネットワークの特性関数とその近似関数, 情報処理学会第67回全国大会
- 5) J. C. Martin and W. J. Moyce, An Experimental Study of the Collapse of Liquid Columns on a Rigid Horizontal Plane, The Royal Society, vol. 244, no. 882, pp. 312-324, (1952)