

MPS 法の土石流流動解析への適用可能性

京都大学大学院農学研究科 ○阿部孝章, 水山高久
立命館大学理工学部 里深好文

1. 緒言

我が国は環太平洋造山帯に属し、急峻な地形が発達している。雨期には山地部などで度々土砂災害が発生しており、中でも土石流は人々の暮らしに大きな被害を及ぼす。そのため、土石流の流動機構を解明するための解析手法の開発が社会的な課題となっている。

流体力学の数値解析手法には、大きく分けて解析対象を格子に分割する格子法と、格子を用いない粒子法の二つがあり、格子法を用いて領域が大きく歪む計算などを行う場合、計算コストが大幅に増えるなどの問題があった。一方粒子法は、格子法では困難であった急変流場・構造物周囲の流れ解析などへの適用性から昨今注目を浴びてきている。砂防の分野でも、粒子法は漂流木の集積、巨礫が砂防ダムを閉塞する過程や構造物周囲の土石流流れなど複雑水理現象への適用が期待される。そこで本研究では、流体運動の鉛直二次元場解析手法として、粒子法の一つである MPS(Moving Particle Semi-implicit) 法を用いた。MPS 法の流体-剛体連成解析モデルによって水と流木の相互運動、石礫を含んだ場合の水の流体運動シミュレーションを行い、土石流流動解析手法として、MPS 法の適用可能性の検討を行った。

2. 流体解析モデル

本研究で用いる MPS 法の計算機構の詳細は越塚¹⁾にて解説されているので、ここでは概要のみを述べる。MPS 法においては基礎式である Navier-Stokes 方程式の圧力項及び粘性項に含まれる微分演算子が独自の粒子間相互作用モデルによって離散化される。各計算点は粒子とみなされ、Lagrange 的な解析が行われる。本研究で用いた各種の解析コードは、文献 1) に付属する 2 次元流体解析コード mps.c* に改良を加えた物である。

まず、一般的な水流解析の例として、水が階段状流路を流下する過程のシミュレーションを行った。時間間隔 1 秒ごとの計算結果を Fig.1 に示す。この結果を見ると、タンク状領域に水柱として存在していた水粒子の一部は $t = 1.00 \text{ sec}$ の段階で既に流路の下端、奥側の固定壁に衝突している様子が確認される。これは、流出口の角度と階段状流路の勾配があまり変わらないため、勢いよく吹き出した水粒子が階段面とほとんど干渉することなく流下したためと考えられる。そして $t = 2.00 \text{ sec}$ においては流路下端の固定壁にぶつかった粒子群による反射波の形成が確認できる。更にこの反射波が流下していく水粒子と衝突し、干渉波を形成している様子もみられる ($t = 3.00 \text{ sec}$ ~ $t = 5.00 \text{ sec}$)。

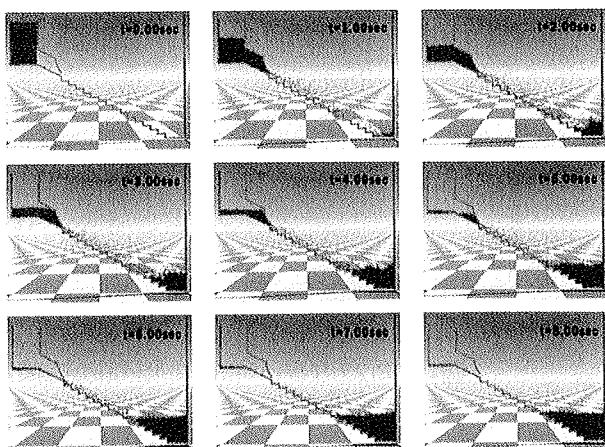


Fig.1: 水が階段上を流下する過程のシミュレーション

*著作権保有者：東京大学大学院工学系研究科システム量子工学専攻 越塚誠一

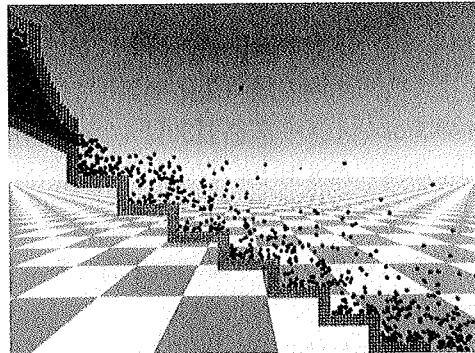


Fig.2: $t = 4.00 \text{ sec}$ での水流出口付近の拡大図

$t = 4.00 \text{ sec}$ における水流出口付近の拡大図を Fig.2 に示す。MPS 法の長所は、界面の大変形や流体の分裂・合体といった流体解析にも安定して適用できる点にある。Fig.2 を見てもわかるように本シミュレーションについても、水粒子が階段面と衝突・反発を繰り返しながら流下していく様子が良好に再現されている。

また、mps.c では Navier-Stokes 方程式の粘性項が省略されていたが、これを考慮したシミュレーションも実行できるように改良を加えた。Fig.3, Fig.4 に示すのは、粘性の小さい流体と大きい流体がそれぞれ坂道を流下する過程のシミュレーションである。初期の粒子配置は共通なので、Fig.3 にのみ示している。Fig.3 のシミュレーションでは粘性項における動粘性係数を $\nu = 1.00 \times 10^{-6} [\text{m}^2/\text{s}]$ 、Fig.4 では $\nu = 2.00 \times 10^{-3} [\text{m}^2/\text{s}]$ にそれぞれ設定している。粘性が小さい場合には、流体は流下の後固定壁に衝突して反射波を形成するが、波高が高いため巻き碎波が生じている ($t = 2.01 \text{ sec}$)。一方、粘性が大きい場合では流下の勢いは小さく、流体が固定壁に衝突した後に反射波が形成されるがその影響も小さく、流体が平面領域に落ち着くまでにかかる時間も短い。

Fig.5 はこれらのシミュレーションを定量的に比較するために、流体最右端にある粒子の x 座標を 0.03 sec おきにプロットしたものである。右側の固定壁の座標は 5.012 であり、流体右端の粒子が $x = 5.0$ を超えた段階で流体は固定壁に到達したとみなし、その後 5~6 回の計算ステップを踏んだ段階でプロットを終了した。尚、計算領域左端の壁粒子座標は $x = -0.028$ である。Fig.5 のグラフはいずれも単調に増加しているが、粘性が大きい場合には流体の流动性が低下していることが固定壁到達時刻の遅延となって表れている。

3. 流体-剛体連成解析

mps.c を元に作成した流体-剛体連成解析コードでは、流体中の漂流木や土石流に含まれる石礫を、剛体粒子からなる剛体とみなして計算を行った。MPS 法における流体-剛体の連成に関しては Koshizuka et al.²⁾ が単一浮体に対して用いた Passively Moving Solid Model を剛体群にも適用できるよう拡張したものを用いている³⁾。

まず、剛体を考慮した流体解析として、漂流木が水波によって沿岸部の構造物に乗り上げる過程のシミュレーションを行った。水粒子に対し漂流木を構成する粒子の比重は 0.7 とした。初期の粒子配置及びスナップショットを Fig.6 に示す。初期粒子配置における左端の水柱が崩壊してまもなく水波を生じ ($t = 0.50 \text{ sec}$)、漂流木の一部がこれにより構造物に乗り上げる様子が確認された ($t = 1.00 \text{ sec}$)。同じく構造物上に打ち上げられた水粒子と流木は相互に干渉しながら運動を継続するが、 $t = 1.50 \text{ sec}$ では流木が立ち上がるという不自然な挙動がみられた。これは剛体粒子と固定壁を構成する圧力計算壁粒子との相互作用を正しく評価していないことが原因と考えられ

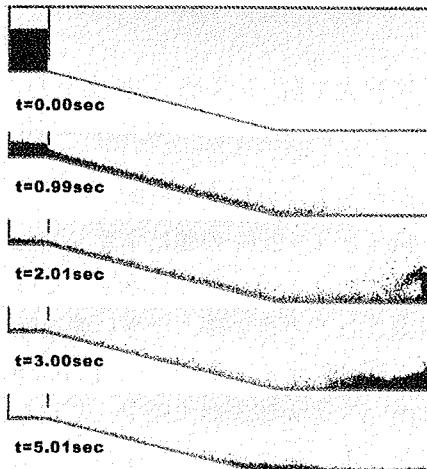


Fig.3: 斜面流下の様子 ($\nu = 1.00 \times 10^{-6} [\text{m}^2/\text{s}]$ の場合)

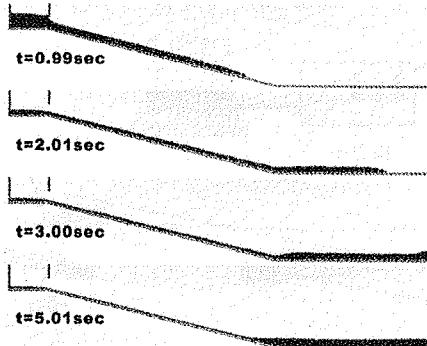


Fig.4: 斜面流下の様子 ($\nu = 2.00 \times 10^{-3} [\text{m}^2/\text{s}]$ の場合)

る。そして立ち上がった流木は画面左方向の速度を得て再び水中に戻り ($t = 3.00 \text{ sec}$)、その後 4 本の流木は水面を浮遊しながら領域全体の流動は落ち着きを取り戻すが、流木が縦向きのまま安定に釣り合うなど実現象とは異なる挙動がみられた ($t = 4.00 \text{ sec}$)。これは剛体全体に加わる浮力が正確に評価されていない為と考えられる。先述の圧力壁との相互作用評価と同様、この取り扱いについての検討が急務であり、今後の課題とする。

4. 土石流動解析への適用可能性

土石流計算においては一様粒径を対象としたシミュレーションモデルがこれまで多く開発されているが、例えば透過型砂防ダムの機能評価の際には粒径の情報が必要となる⁴⁾。本研究では、こうした粒径を考慮した土石流計算の基礎的準備として、二粒径の石礫を含んだダムブレーク問題の計算を行った。本シミュレーションは、ダムブレーク問題の水粒子の一部を剛体粒子として組み込み、上述の流体-剛体連成解析モデルを適用したものである。水粒子に対して石礫を構成する剛体粒子の比重を 2.65 とした。また粘性項における動粘性係数は $\nu = 1.00 \times 10^{-6} [\text{m}^2/\text{s}]$ とした。計算結果を Fig.7 に示す。

まず $t = 0.180 \text{ sec}$ では初期状態で層状に配置されていた石礫が流体中で分離している様子が見られる。次に $t = 0.450 \text{ sec}$ では水柱が固定壁に衝突し空中に跳ね上がっているが、一部の石礫もそれに追従して跳ね上がっている。 $t = 0.660 \text{ sec}$ においては流体部分が若干渦を巻きながら左方向に落下するが、石礫も回転運動をしながら水面に落下している。 $t = 0.900 \text{ sec}$ 以降は石礫はほぼ、水底に沈降し、それ以後流体粒子も水面に落ち着くといった様子を見せている。水柱崩壊運動に伴い揺動しながらも、石礫が最終的には水底に落ち着く様子が再現できているが、本モデルでは剛体同士の相互作用を加味していないため、石礫間の衝突の効果を適切に扱うことができない。固相間衝突や固相液相間相互作用のより正確な評価の為には固液混

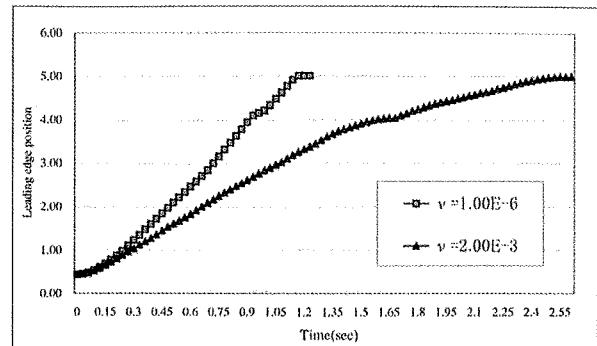


Fig.5: 流体右端粒子の x 座標

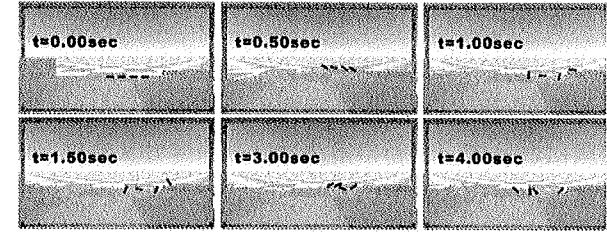


Fig.6: 浮体群のシミュレーション

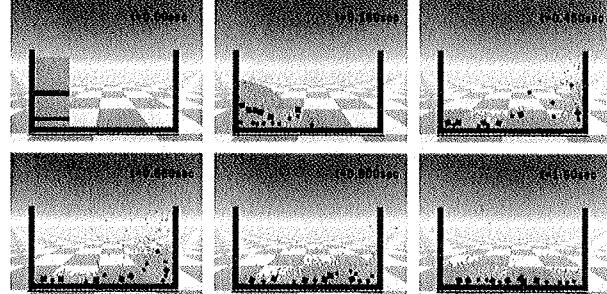


Fig.7: 2 粒径の石礫を含んだダムブレークのシミュレーション

相流型の計算モデルが必須となる。

5. 結言

MPS 法を用いたシミュレーションにより、異粒径の石礫を考慮した完全 Lagrange 型土石流動解析モデルの可能性が一部示された。しかし現在の流体-剛体連成解析モデルは、剛体が流体に対して受動的に運動するという条件の下では一定の再現性を持つものの、固相間衝突や固液相間相互作用が考慮されておらず、石礫間相互作用が卓越するような土石流動解析に用いるのは現段階では難しい。よって本研究の今後の課題として、現在の簡易型流体-剛体連成解析モデルから、固相間、固液相間の相互作用を考慮した固液混相流型 MPS 法への改良、また MPS 法自体の改良点として計算時間の短縮、圧力計算の安定化や計算領域の高解像度化などが挙げられる。

参考文献

- 1) 越塚誠一, 計算力学レクチャーシリーズ 5, 粒子法, 丸善 (2005).
- 2) S. Koshizuka, A. Nobe and Y. Oka, Numerical Analysis of Breaking Waves Using the Moving Particle Semi-implicit Method, International Journal for Numerical Methods in Fluids, **26**, 751-769 (1998).
- 3) H. Gotoh, T. Sakai, Key issues in the particle method for computation of wave breaking, Coastal Engineering Journal, **53**, 171-179 (2006).
- 4) 里深好文, 水山高久, 砂防ダムが設置された領域における土石流の流动・堆積に関する数値計算, 砂防学会誌, Vol.58, No.1, pp.14-19 (2005).