

## 多数の巨礫を含んだ土石流と堰堤の3次元シミュレーション

東京工業大学 ○青木 尊之

東京工業大学 下畑 和希

九州大学 渡辺 勢也

日本原子力研究開発機構 Yos Sitompul

東京工業大学 Shen Dawei

### 1 はじめに

近年、豪雨や台風などの線状降水帯による土石流の発生による災害が急増している。土石流に対する最も有効な防災対策は、谷筋に設置する砂防堰堤である。日本は島国であるため、非常に多くの土石流危険渓流があるが、急峻な河川の直下に民家が広がっていることも多く、過去に災害が起こった箇所に優先的に砂防堰堤が設置されているのが現状であり、防災対策は十分とは言い難い。さまざまな砂防堰堤が建設されてきたが、その構造は経験的な知見によるものが多く、流体力学や土質力学の観点から十分に設計されていない。

一方、これまでの土石流の流動解析は殆どが粗いメッシュで全体の流れを1次元の浅水波モデルに基づいて行う計算が殆どであり、2次元解析は数メートル格子を用いた限定的な範囲での計算しか行われていない。実際には土石流はさまざまなサイズの礫や流木が含まれていて、特に巨礫が土石流の流動に対してどのような影響を与えるかなどは未解明である。巨礫を止めるのに有効な透過型堰堤の鋼材間隔を検討するためにも、多数の巨礫を含んだ土石流と堰堤の3次元シミュレーションを行うことが必要である。

個々の礫を解像しつつ、全体の土石流の流れに対して堰堤の有効性を検証する計算を行うには、かなり大きな計算資源が必要となり、GPUを多数搭載するスパコンを利用する。

### 2 土石流の計算手法

土石流は飽和状態の水分を含んだ土砂であり、本研究では、さまざまな径の礫が含まれた泥流として扱う。あるサイズ以下の礫は泥流モデルに含め、それ以上のサイズの礫を孤立した固体として扱う。礫は他の礫や

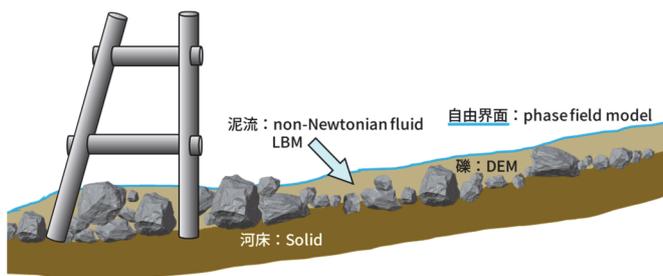


図1 土石流の計算モデル

堰堤の鋼材、河床材料と固体-固体の衝突を行うとする。礫を含む固体は全て剛体として扱い、変形や破壊しないものとする。空気は土石流に与える影響が小さいため、その流れは計算せず、泥流表面に大気圧だけを与え、土石流に対し自由表面を含む流れとして扱う。

(a) 流体計算: Navier-Stokes 方程式を直接離散化して解くのではなく、位相空間の速度分布関数を限られた速度成分を持つ疑似粒子として計算する格子ボルツマン法を用いる。Cumulant 型の衝突項を用いることで、激しい流れに対しても安定で高精度な計算ができる。

(b) AMR (Adaptive Mesh Refinement) 法:

2~3cm の格子サイズを用いて、100 スケールの計算領域を対象とする場合、均一格子を用いると1方向に5,000メッシュが必要となり、3次元計算は超大規模計算となってしまふ。そこで、高い空間解像度が必要な自由界面近傍、礫や構造物の周囲、河床近傍にのみ動的に高解像度格子を割り当てる AMR (Adaptive Mesh Refinement) 法を用いる。複数の計算ノードを用いる場合には、モートン曲線などの空間重点曲線を用いて格子を辿り、均等な格子数になるように切断し、計算負荷がバランスするように動的に領域分割を行う。

直交格子を用いて計算を行うため、礫や河床、堰堤構造物のような複雑な形状に対して、Interpolated Bounce Back 法による2次精度の境界条件を与える。

(c) 泥流モデル: 非ニュートン性流体としてモデル化する。ここでは、土質力学の知見から、泥流は Bingham 性の Mohr-Coulomb 破壊基準が適用できる流体として、

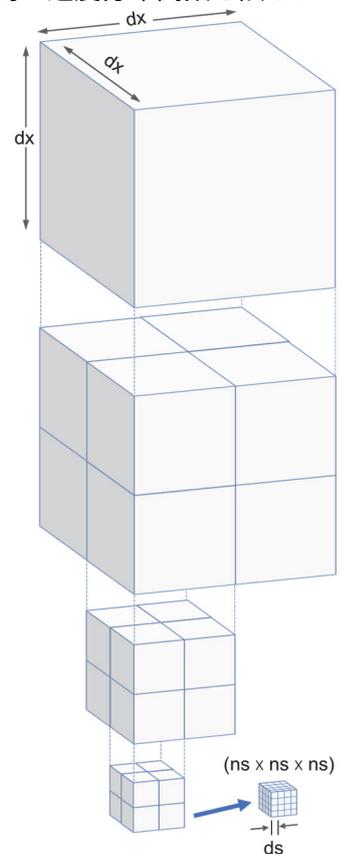


図2 Octree AMR 法

せん断応力  $\tau$  に対して以下の構成式を用いる。

$$\tau = \eta \dot{\gamma} + c + p \cdot \tan \theta$$

ここで  $\dot{\gamma}$  はひずみ速度、 $\eta$  は粘性係数、 $c$  は粘着力、 $\theta$  は内部摩擦角である。実際のスランプ試験と比較し、モデルの妥当性を検証している。

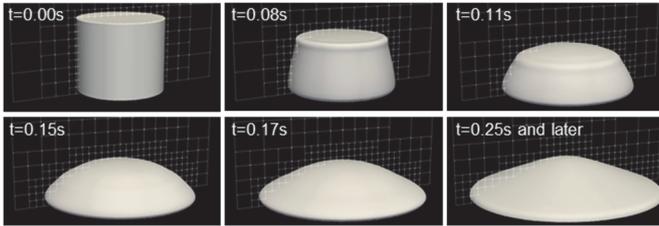


図3 スランプ試験

(d) 礫の運動：礫のさまざまな形状 (STL データ) に対し、図4のようにレベルセット関数 (符号付距離関数) によるモデルと、小さな球形粒子を剛体連結させたモデルの2種類で表現する。

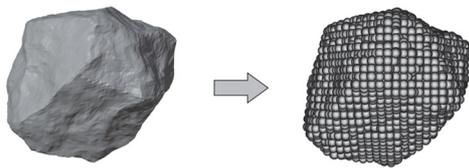


図4 礫形状のモデリング (2種)

礫と礫の衝突、礫と河床や堰堤などの構造物との衝突は Solid Body Dynamics として計算する。礫を構成している小球が受ける力は、個別要素法 (DEM) と同じように接触している他の固体との間のバネ・ダンパーと接線方向摩擦力の入ったモデルで計算される。泥流から受ける力は、レベルセット関数の礫表面に対して Interpolated Bounce Back 法による速度分布関数の反作用を momentum exchange 法により求める。それらを表面で積分することで礫の重心に関する並進運動と回転運動の方程式を解く。

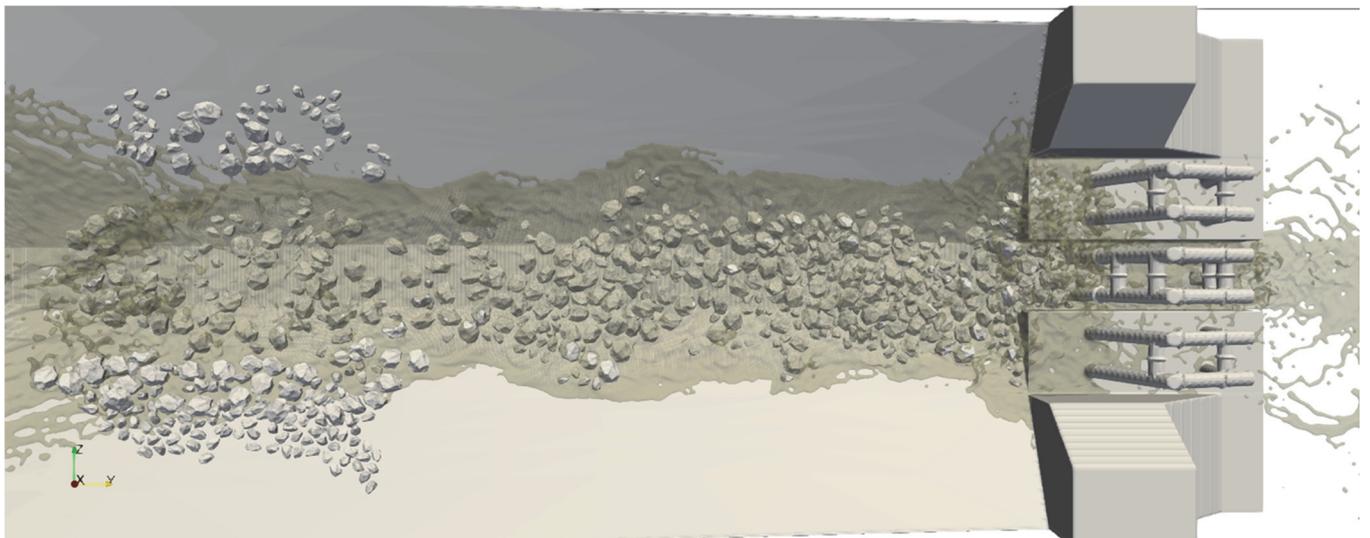


図6 透過型堰堤に流れ込む巨礫を含んだ土石流

(e) GPU コンピューティング：現在のスパコン世界 No.1 の米国 Frontier にも GPU が大量導入されているように、GPU は単体の演算性能・メモリ性能が非常に高い。東京工業大学の TSUBAME4.0 をはじめとして国内にも GPU スパコンは多数導入されていて、それらを利用すれば大規模な 3 次元の土石流シミュレーションを実行することができる。

### 3 試計算

図5に示す透過型堰堤モデルを基に、土石流の試計算を行った。粒径 95cm 以上の礫を止めるために部材純間隔を 1.0m としている。長さ 49.8m、奥行き 20.0m の流路を対象とし、斜面の傾きを上流部で 15°、堰堤付近では 8°~10°に設定している。礫の密度を 2740kg/m<sup>3</sup>とし、粒径 57.3cm と粒径 91.7cm の2種類の礫を 507 個ずつ合計 1,014 個を用いた。AMR 格子の最小格子幅を 3.125cm とし、NVIDIA Tesla V100 GPU を 20 個用い、11 時間で計算した結果を図6に示す。泥流を非ニュートン性流体として計算するときの巨礫の振舞や、堰き止めるために有効な部材間隔などを明らかにする。

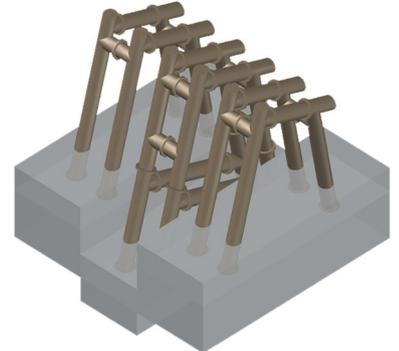


図5 堰堤モデル

### 謝辞

本研究は HPCI 一般課題 hp240034 として進めた研究である。また、科学研究費補助金・基盤研究(S) 課題番号 19H05613 から支援されている。(一財) 砂防・地すべり技術センターの嶋大尚氏と嶋丈示氏に協力頂いた。計算には、東京工業大学・学術国際情報センターの TSUBAME4.0 および名古屋大学・情報基盤センター「不老」Type-II を利用させて頂いた。記して謝意を記す。