

多数の巨礫・流木を含んだ土石流の3次元シミュレーション

A 3-D Debris Flow Simulation including a lot of Large Rocks and Driftwoods

青木 尊之¹⁾, 下畠 和希²⁾, 渡辺 勢也³⁾

Takayuki Aoki, Kazuki Shimohata and Seiya Watanabe

1) 博(理) 東京科学大学 特任教授 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1, E-mail: taoki@scrc.iir.isct.ac.jp)

2) 修(工) 東京科学大学 修士課程修了

3) 博(工) 九州大学 応用力学研究所 助教

Debris flow is one of natural disasters giving severe damages to human lives. We have developed a simulation code for debris flow consisting a liquid and 1,000 pieces of solid rocks. A non-Newtonian Bingham model is applied to the liquid flow. The computation is based on cumulant Lattice Boltzmann Method, AMR for GPU supercomputers. The rocks are modeled by rigid bodies and the collisions are computed by DEM using small particles. It is found that large-size rocks of 2m length are accelerated even if the river bed is strongly bumpy and running at the top of the debris flow. On the other hand, small-size rocks are easily trapped with the bumpy bed. When driftwoods are included in the debris flow, they enhance the trapping effect by unclosed dikes.

Key Words :Debris flow, Cumulant LBM, DEM, GPU, AMR, Non-Newtonian, Bingham

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や河川氾濫による災害が急増している。2014年8月20日に広島市安佐南区では豪雨による多数の斜面崩壊が発生し土石流は住宅地に達し、大きな災害を引き起こした。数メートルを超える巨礫がいくつもあり、また多数の流木も確認できる。斜面が崩壊すると様々な粒径の礫を含んだ土石流が谷筋に流れ込み、河川を下って市街地などの平野部へ向かう。山肌の樹木も流木となって下流へ流下すると、狭い橋脚間や河道部に詰まって土石流や洪水の氾濫を助長し、橋梁を流失させたり周辺の家屋や人命・道路・鉄道に甚大な損害を与えていた。

土石流および流木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、急峻な河川の直下に民家が広がっていて非常に多くの土石流危険渓流があるが、過去に災害が起った箇所に優先的に砂防堰堤が設置され、防災対策は十分とは言えない。また、砂防堰堤にはさまざまな種類があるが、その構造は経験的な知見に基づいており、流体力学や土質力学の観点からは設計されていない。また、これまでの土石流の流動解析は殆どが粗い格子で全体の流れを1次元の浅水波モデルに基づいて計算するだけであり、2次元解析は数メートル格子を用いた限定期間の計算しか行われていない。巨礫を含んだ3次元の土石流計算などは報告されていない。

2. 計算手法

本研究では、多数の巨礫と流木を含んだ土石流の

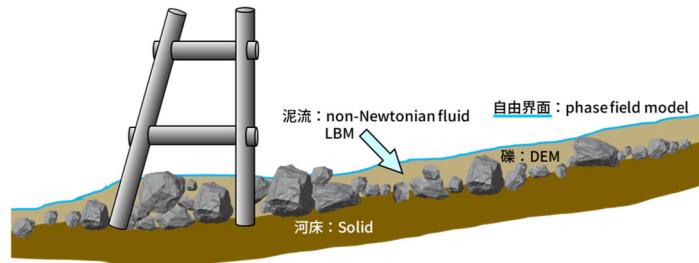


図-1 巨礫を含む土石流シミュレーションのモデル

3次元シミュレーションを行う。図-1で示すように、流れは固体の移動境界条件と自由界面を含む計算となり、流れに対して格子ボルツマン法を用いる。巨礫、捕捉工の部材、河床を含めた堰堤構造物を剛体として扱い、巨礫や流木同士の衝突および堰堤構造物の部材や河床との衝突の計算には個別要素法を用いる。本研究の3次元シミュレーションは計算負荷がかなり大きいため、スパコンに搭載される複数GPUを用いてシミュレーションを実行する。

2.1 土石流のモデル化

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。例えば40cm以下のサイズ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。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。

2.2 Cumulant 型格子ボルツマン法 (LBM)

流体計算に対し、Cumulant型衝突項を導入した格子ボルツマン法を用いる。速度分布関数からCumulant統計量に変換してからCollisionステップを計算する。初期に提案されたSRT (Single Relaxation Time) モデルと比べると計算の精度と安定性に優れ、高レイノルズ数流れの計算に適している。乱流などに対して格子解像度が不足した場合には、Cumulant型衝突項から生じる数値粘性が性質の良いLES (Large-eddy Simulation) の渦粘性の役割を果たしている。

河川などのスケールの大きい流れでは、大気（空気）が水の流れに与える影響は小さい。大気の流体運動を解かず、自由界面（水面）を含んだ水の流体運動のみを解けば現象を十分表現できる。自由界面を記述するために、フェーズフィールド法の保存形Allen-Cahn方程式を流体と同じ格子ボルツマン法のD3Q27モデルを用いて計算する。フェーズフィールド変数 ϕ は気体（空気）に対して $\phi = 0$ 、液体（水）に対して $\phi = 1$ とし、自由界面 $0 < \phi < 1$ に対して界面幅が $3\Delta x$ 程度（ Δx はセル幅）になるようにパラメータを調整し計算する。自由界面近傍を計算する際に、計算していない空気側の速度分布関数も必要になる。そこで、符号付距離関数であるレベルセット関数 ψ を導入する。自由界面で $\psi = 0$ とし、液体側を界面から正の距離、気体側では負の距離で表す。レベルセット関数を元に、Velocity Extension法により液体側の分布関数を気体側に外挿する。

物体を表現するために、自由界面の識別とは別のレベルセット関数を用いる。物体表面を $\psi = 0$ とし、物体近傍にレベルセット関数を構築することで、格子点上の速度分布関数と物体との交差判定が容易になる。物体は剛体と仮定するため、岩石や流木のレベルセット関数は回転や並進を伴うが、それに合わせてレベルセット関数も平行移動や回転の座標変換を行うだけで再初期化は行わない。

任意形状の物体表面でノンスリップ境界条件を設定するために、速度分布関数の 26 方向と物体表面とが交差する点で 2 次精度の境界条件が満たされる Interpolated Bounce Back 法を用いる。交差する位置はレベルセット関数を補間して容易に求めることができ、その点で速度分布関数が逆方向に Bounce Back する。物体表面で逆方向に Bounce Back した速度分布関数を用いることにより、反作用として物体が流体から受ける力を Momentum Exchange 法により容易に求めることができる。

2.3 Adaptive Mesh Refinement (AMR) 法

高解像度格子（細かいセル）を用いるほど、流れを精度よく計算でき、物体形状を精度よく捉えることができる。しかし、セルのサイズを $1/2$ にするとセル数は 8 倍となり時間刻みも $1/2$ となるため、16 倍の計算量が必要になる。一方、本研究において高解像度格子が必要になるのは、

複雑な物体形状を記述したり境界層を計算したりするために物体近傍に限定される。計算領域全体を直交等間隔格子で計算すると膨大な計算コストになるが、物体近傍にのみ高解像度格子を配置すると劇的に計算を効率化できる。

図-2 の八分木 (Octree) アルゴリズムに基づいて再帰的に格子を細分化し、任意の領域に高解像度格子を割り当てる AMR (Adaptive Mesh Refinement) 法を導入する[1]。流体計算を行うのは、リーフと呼ばれる木 (Tree) 構造の末端である。最初はルートに 1 個のリーフを割り当てる。細分化により 8 個の子リーフが生成され、元のリーフは親リーフとなり流体計算を行わず、Tree の管理だけを行うようになる。これを繰り返し、必要な解像度まで格子を細分化する。図-3 は、斜面を転がる巨礫に対し、表面近傍に高解像度格子を動的に配置し、巨礫の形状を精度よく表現するとともに、流体との相互作用の計算精度も向上させている。

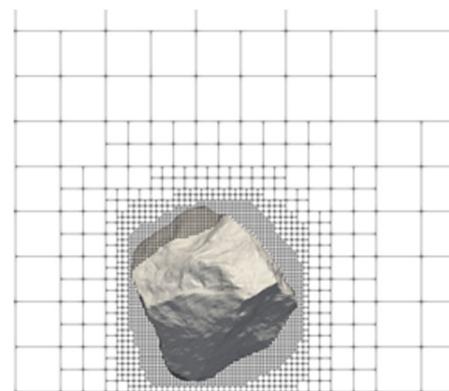


図-3 転がる岩石に適合する AMR 格子

AMR 法を GPU 実装するには、頻繁なメモリの動的確保と解放を避けるために、内部にメモリ・プールを設ける必要がある。また、GPU メモリへの高速なアクセスを維持するために、リーフには $8 \times 8 \times 8$ 程度のセル・ブロックを割り当てる。さらに、複数 GPU を用いるため、図-4 に示すように空間充填曲線（モートン曲線）を用いた動的負荷分散を行っている[2, 3]。

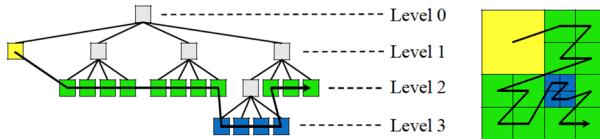


図-4 空間充填曲線を用いた動的領域分割

2.4 個別要素法 (DEM)

岩石、流木、河床を含めた堰堤構造物は全て剛体として扱い、岩石と流木以外は固定されているとする。衝突計算には個別要素法を用いる。岩石、流木、河床を含めた堰堤構造物の表面に微小球形粒子を配置し、効率的な近傍探査法を用いて衝突判定を行う。微小球形粒子の直径 R の大きさで衝突のための形状表現精度が決まる。物体はレベルセット関数で形状が表現されていて、物体内部の $0 \leq \psi \leq R$ の範囲に微小球形粒子を規則正しく配置し剛体連結させている（図-5）。異なる物体を構成する微小球形粒子間の衝突に対して個別要素法の Soft Sphere モデルを用いる。微小球形粒子が衝突している場合、衝突位置と粒子の中心間の方向（法線方向）およびせん断方向（接線方向）に働く力を求めることができる。物体を構成する全ての微小球形粒子に対して衝突判定と力の計算を行う。

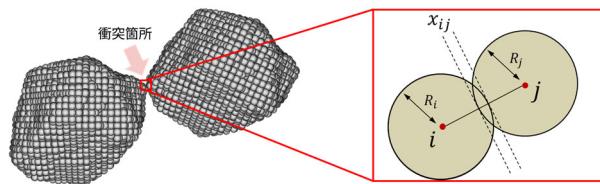


図-5 個別要素法による岩石同士の衝突モデル

2.5 ビンガム流体の泥流モデル

泥流の流動特性として非ニュートン性のビンガム流体モデルを用いる。このモデルは、せん断強度 τ がせん断応力 τ_0 を超えるまでは流動が起こらず、 τ_0 を超えると応力の超過分に比例するせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ が生じ、粘性係数は以下の式により記述される。

$$\eta' = \begin{cases} \eta_0 + \frac{(c + p \tan\theta)}{\dot{\gamma}} & (\eta' \leq \eta_{\max}) \\ \eta_{\max} & (\eta' > \eta_{\max}) \end{cases}$$

ここで、 η_0 は降伏後の粘性係数、 c は粘着力、 p は圧力、 θ は内部摩擦角、 η_{\max} は最大粘性係数である。

泥流モデルの妥当性を検証として、図-6に示すようにスランプテストの検証を行った。最小格子幅を 0.117cm とし、流体はニュートン流体のように平坦化する方向に広がるが、途中から一定の形状を保ったまま速度が低下し最終的に静止する。これは、内部摩擦角 θ の増加に伴い形状の安息角が増加するためであり、既報の結果とよく一致する結果が得られている。この結果と実現象との比較を元にシミュレーションに用いる泥流のパラメータを密度

1500 kg/m^3 、内部摩擦角 7° 、降伏後の粘性係数を $5.0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ と設定した。

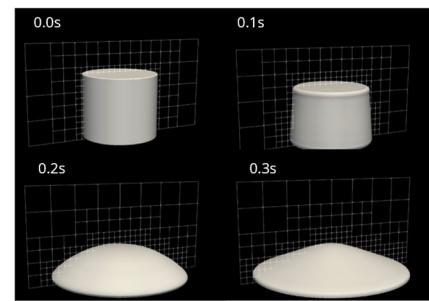


図-6 スランプ試験のシミュレーション結果

3. 透過型砂防堰堤が設置された斜面を下る巨礫を含んだ土石流シミュレーション

3.1 透過型砂防堰堤のモデル

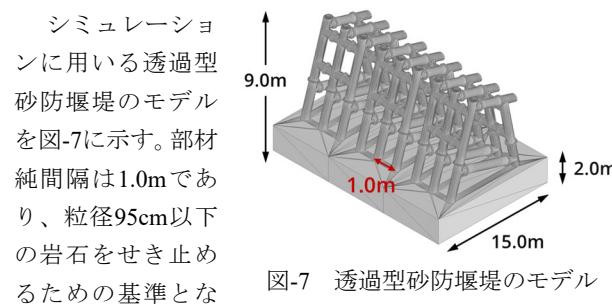


図-7 透過型砂防堰堤のモデル

シミュレーションに用いる透過型砂防堰堤のモデルを図-7に示す。部材純間隔は 1.0m であり、粒径 95cm 以下の岩石をせき止めることを基準とした。

図-8のように土石流の成長域に近い 10° から 15° に流路斜面の傾きを設定し、下流端に透過型砂防堰堤を設置した。

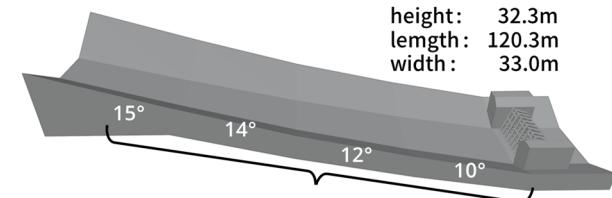


図-8 斜面のモデル

また、実際の斜面には自然の凹凸があり、それを定量的・系統的に表現するために図-9の形状の凹凸を斜面に敷き詰めた。

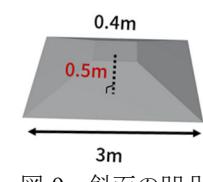


図-9 斜面の凹凸

3.2 岩石モデル

土石流に含まれる 40cm 以下の岩石は泥流に含めて扱い、41cm、52cm、61cm、72cm、79cm の岩石をそれぞれ 200 個、199cm の岩石を 10 個、合計 1,010 個の岩石を固体としてモデル化してシミュレーションに用いた（図-10）。岩石の密度は $2,740 \text{ kg/m}^3$ としている。

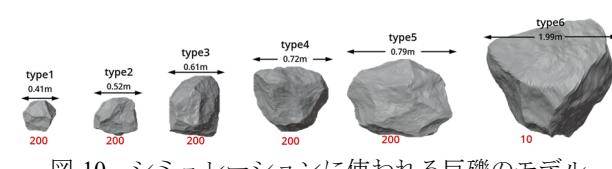


図-10 シミュレーションに使われる巨礫のモデル

3.3 河床の凹凸に応じた土石流の流下シミュレーション

河床に0.3m、1m、1.5mの凹凸を規則的に設定し、下流に部材間隔が1mの透過型堰堤を配置した。図-10の合計1,010個の岩石を含んだ土石流を上流から流し、流下する過程と堰堤での岩石の捕捉を調べた。泥流に対して非ニュートン性のビンガム流体として扱う場合にも、キュムラント型衝突項の格子ボルツマン法を用いている。AMR法により最小4cmの高解像度格子を泥流の自由表面、岩石や構造物の近傍に動的に配置することで、120m×40m×32m（均一格子なら3000×1000×800格子）と大きな計算領域を高効率・高速に計算することができる。図-11は、河床の凹凸が大きくなるにつれ、土石流全体の流下速度が低下し、巨礫に対して摩擦的な作用をしていることが分かる。固体として中では最も小さい41cmの岩石は、河

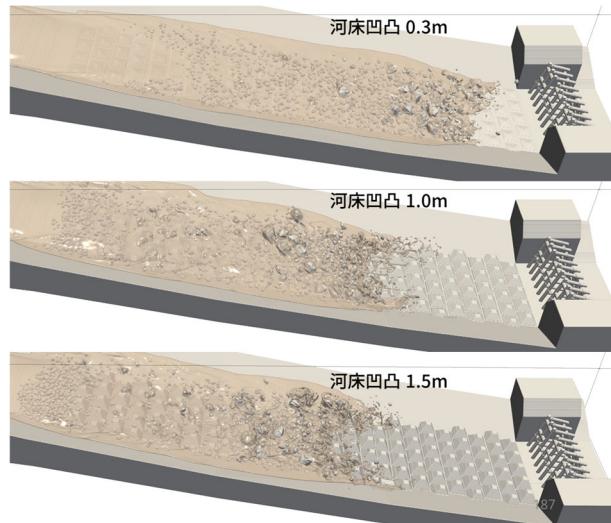


図-11 河床の凹凸が0.3m、1.0m、1.5mの場合の土石流シミュレーション（同時刻のスナップ・ショット）

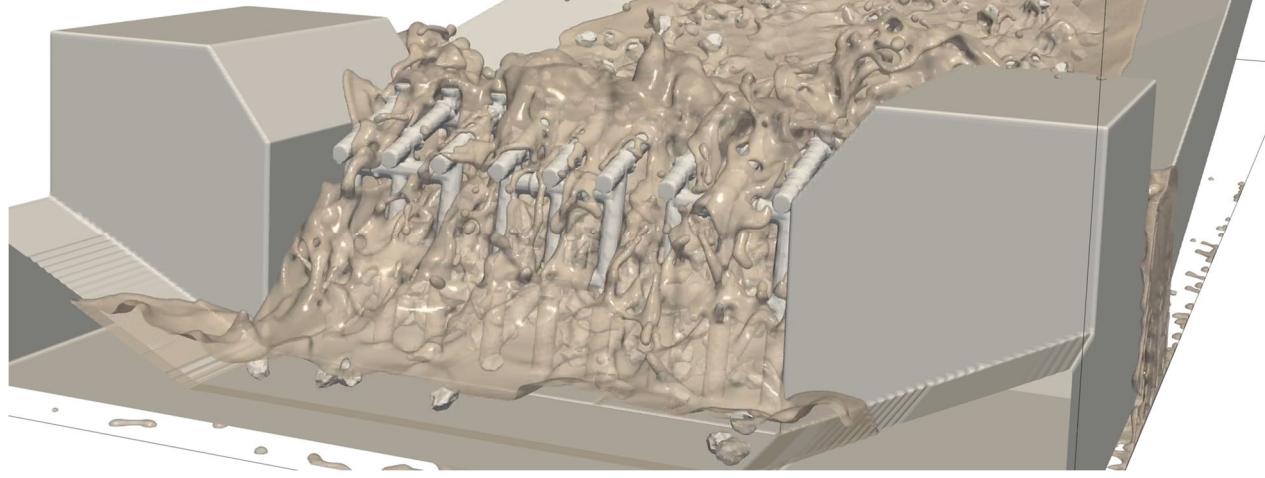


図-12 河床の凹凸が1.5mのときの堰堤を通過する土石流

床の凹凸が大きいほど凹凸の設定が開始されている付近に捕捉されている。また、どの場合も砂防分野でよく知られている巨礫が土石流の先頭を走ることも再現されている。図-12は河床の凹凸が1.5mのときの堰堤を通過する土石流のスナップ・ショットを示している。

図-13は河床の凹凸が0.5mの場合、時刻1.92s、5.76s、9.6s、13.44sにおける各サイズの岩石の速度分布を表している。棒グラフは縦軸が岩石の個数で、横軸は岩石の速度を表している。全てのサイズの岩石について、速度分布のピークが時間と共に右側にシフトしていく、全体とし

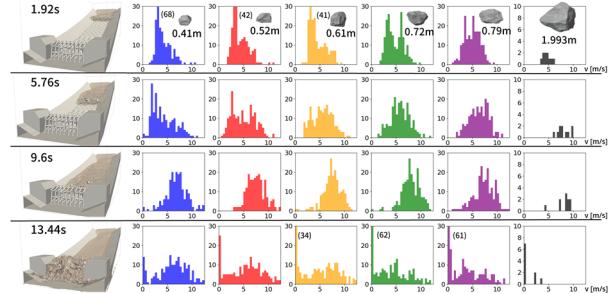


図-13 河床の凹凸が0.5mの場合の時間経過に伴う岩石の速度分布の変化

て加速していることが分かる。時刻13.44sで岩石が堰堤に衝突し、速度分布が左側に移動し、堰堤で岩石が捕捉されていることが分かる。

図-14は河床の凹凸が1.5mの場合、時刻1.92s、5.76s、11.52s、13.44sにおける各サイズの岩石の速度分布を表している。小さい41cm～72cmの岩石は、時間とともに分布が2つに分かれ、河床に捕捉され取り残される岩石と、凹凸を乗り越えて加速する岩石があることが分かる。右側のピークは時刻11.52s以降で余り分布が変わらず、重力に

より加速と河床の凹凸による減速が平衡状態になっていると言える。時刻13.44sでは、河床の凹凸が1.5mとなって流下速度が低下し、サイズが1.99mの岩石以外は堰堤に到達していないことが分かる。

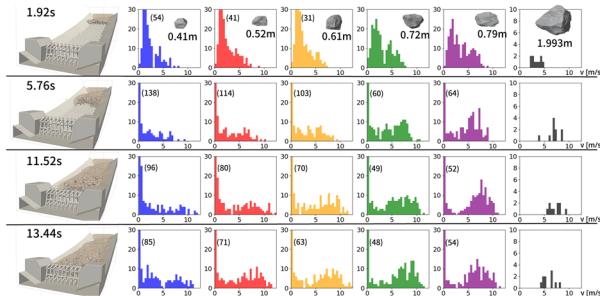


図-14 河床の凹凸が1.5mの場合の時間経過に伴う岩石の速度分布の変化

図-15は、河床の凹凸が0.3m、0.5cm、1m、1.5mの場合に対し、6種類の岩石が土石流の流下とともに加速され堰堤に衝突して減速するまでの平均速度の時間変化を示している（縦軸は速度で、横軸は時間）。河床の凹凸が大きくなるにつれ、小さい岩石は強く減速されたり凹凸の間に捕捉されたりするが、岩石が大きくなると減速を受け難くなり、1.99mの岩石は凹凸の高さによらずに、それを乗り越えて加速されながら流下していることが分かる。

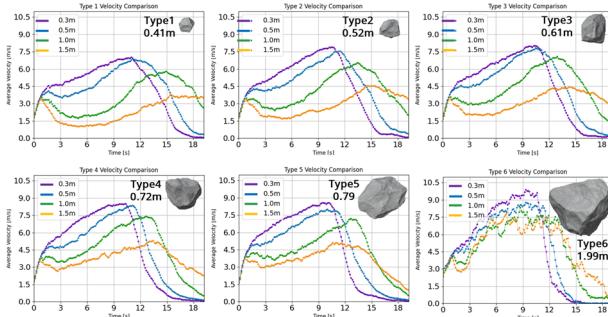
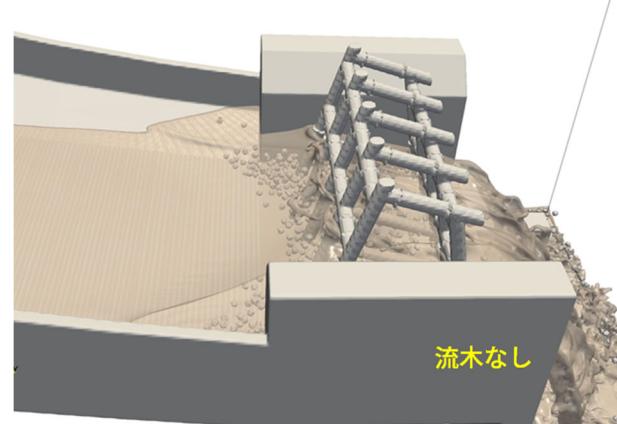


図-15 河床の凹凸が0.3m、0.5cm、1m、1.5mに対し、それぞれのサイズの岩石の平均速度の時間変化

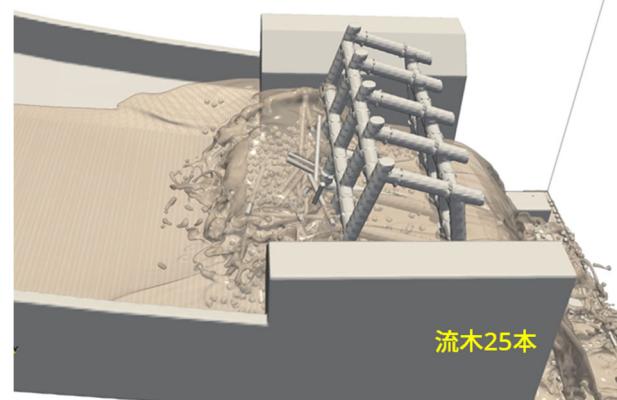
以上から、巨礫は河床の凹凸を乗り越えて加速しながら流下するため土石流の先頭を走り、土石流を駆動しているように見えてしまうが、その運動量も大きく災害の大きな要因となることが分かる。

3.4 巨礫と流木を含んだ土石流シミュレーション

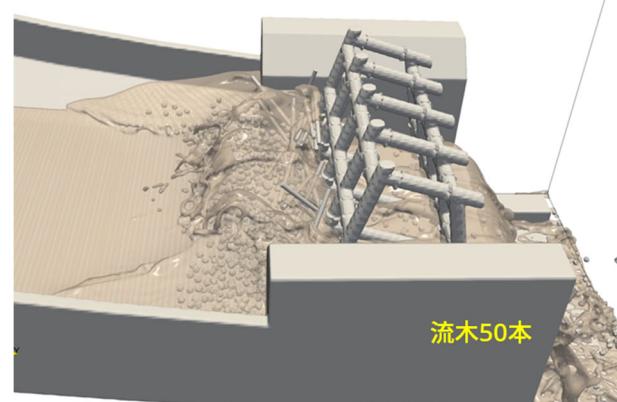
土石流は斜面崩壊する際に岩石だけでなく、流木も含むことも多く、流木も含んだシミュレーションを行った。泥流とともに31cmの岩石を1,000個投入し、堰堤の部材間隔を2mとした。流木は直径20cm、長さ4.0mとし、密度を900kg/m³とし、本数を変えてシミュレーションを行った。26.8 m × 67.2 m × 22.4 m の計算領域に対し、最小格子3cmで計算している。流木径に対して数格子しか割当てていないが、流木シミュレーションにおいて格子解像度依存性の検証で十分妥当な計算結果が得られることが分かっ



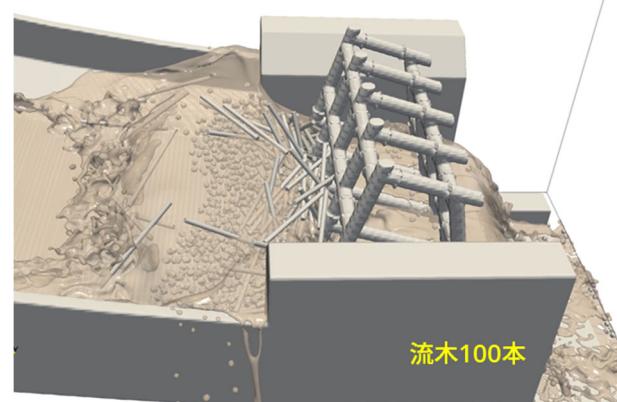
流木なし



流木25本



流木50本



流木100本

図-16 流木の本数が0本、25本、50本、100本のときの堰堤近傍のシミュレーションのスナップ・ショット

ている。流木は変形しないと仮定している。

図-17に土石流に含まれる流木の本数に応じた堰堤を通過する岩石の割合を示す。岩石のサイズは堰堤の部材間隔の1/6以下であるが、目詰まり効果（アーチ構造）により流木を含まない場合でも約60%が堰堤で捕捉される。約40%の岩石が堰堤を通過するが、流木を25本含むだけで通過する岩石は25%に減少し、流木が100本含まれると3%にまでに低下することが明らかになった。

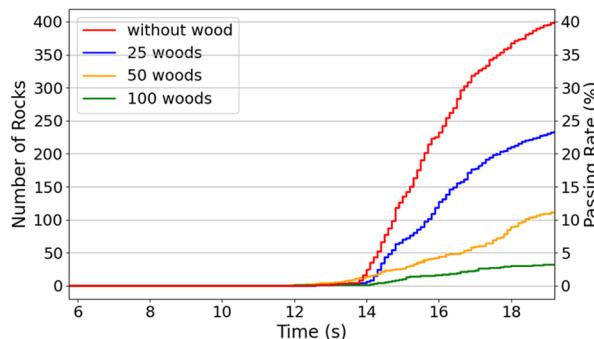


図-17 流木の本数に応じた堰堤を通過する岩石の割合

図-18は土石流に含まれる流木が25本と100本のときの岩石と流木の速度分布の時間変化である。流木は土石流の泥流より密度が小さいため沈降せず、25本と100本のどちらの場合も流木はいつも岩石よりも速い速度で流下し、土石流の先頭を走っている。土石流が堰堤に衝突した後の時刻16.0s（図-18の最右図）では、流木の本数が25本の場合は岩石の一部が堰堤を通過して大きな速度を持つが、100本の場合は殆ど捕捉されて小さな速度になっていることが分かる。

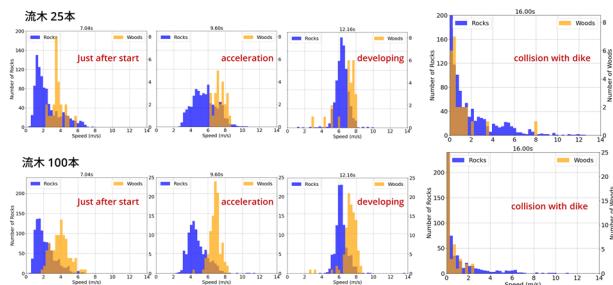


図-18 岩石と流木の速度分布の時間変化

4. おわりに

巨礫を含む土石流に対し、40cm以上の巨礫を固体として扱い、堰堤や河床と衝突しながら斜面を流下するシミュレーションを行った。自由界面を持つビンガム流体を格子ボルツマン法で計算し、AMR法を導入してGPU実装することにより高速・高効率で大規模シミュレーションを実行することができた。

河床の凹凸の影響は大きく、特に数10cm以下のサイズの岩石には減速効果として働くことが分かった。一方、2mの巨礫は凹凸を乗り越え加速され続けるため、絶えず土石流の先頭を走ることが再現できた。

土石流に岩石だけでなく流木も含まれると、堰堤での

捕捉率が大きく上昇することが分かった。流木は変形しないと仮定しているため、今後は流木長を変えたシミュレーションも行う必要がある。

謝 辞

本研究は革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ(HPCI)の一般課題 hp240034「土石流・流木災害に対する砂防堰堤の有効性検証」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 からも支援を頂いた。本研究の計算には、東京科学大学・情報基盤センターのスーパーコン TSUBAME4.0、名古屋大学・情報基盤センターのスーパーコン「不老」Type-II サブシステムを利用して頂いた。記して謝意を記す。

参考文献

- [1] Matsushita, S., Aoki, T.: Gas-liquid two-phase flows simulation based on weakly compressible scheme with interface-adapted AMR method, Journal of Computational Physics, Vol. 445, 110605, 2021
- [2] Watanabe, S., Aoki, T.: Large-scale flow simulations using lattice Boltzmann method with AMR following free-surface on multiple GPUs, Computer Physics Communications, Vol. 264, 107871, 2021
- [3] Watanabe, S., Kawahara, J., Aoki, T., Sugihara, K., Takase, S., Moriguchi, S., Hashimoto, H.: Free-surface flow simulations with floating objects using lattice Boltzmann method, ENGINEERING APPLICATIONS OF COMPUTATIONAL FLUID MECHANICS, Vol.17, NO. 1, 2211143, 2023