

GPUスパコンを用いた大規模シミュレーションによる 1,000本の流木を含んだ流れに対する不透過型砂防堰堤 に付設された捕捉工の有効性検証

Effectivity Study on a Driftwood Trap Device attached to a Closed Dam by using a Large-scale Flow Simulation with 1,000 pieces of driftwood on a GPU supercomputer

青木 尊之¹⁾, Dawei Shen²⁾, 渡辺 勢也³⁾

Takayuki Aoki, Dawei Shen 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) 博(工) 東京科学大学 博士後期課程修了

3) 博(工) 九州大学 応用力学研究所 助教

Driftwood disasters often happen and give us severe damages in the town with rivers near mountain areas. We have developed a code for 3-D simulations with free-surface flow including a lot of pieces of driftwood and solid structures of closed dam, driftwood trap device and river bed. The code is based on the cumulant Lattice Boltzmann Method (LBM) coupled with the discrete element method (DEM). The free-surface is described by solving the conservative Allen-Cahn equation of the phase-field model. We have implemented an octree Adaptive Mesh Refinement (AMR) method to assign high-resolution mesh around driftwood and near structures and the computational efficiency has been greatly improved. The simulations have been executed on supercomputers equipped with multiple GPUs.

For a real closed dam with a driftwood trap device, we examine flows including 1,000 pieces of driftwood with several parameters. It is found that the number of trapped driftwoods strongly depends on the driftwood length and more than 90% driftwood is captured when the length is greater than 75% of the trap device gap. We can show the driftwood distribution under the water and the angle to the water surface is smaller for longer driftwood. We have successfully simulated free-surface flows including driftwood and understood the process of driftwood trapping.

Key Words : Free-surface flow simulation, Cumulant LBM, AMR, Driftwood trap, Porosity

1. はじめに

流木は土石流災害の被害を助長することが大きな問題となっており、流木対策が必須と考えられている。平成初期から今日まで流木対策は、不透過型砂防堰堤の前部に流木捕捉工を設置することが専らであったが、閉塞タイプの透過型が土石流対策と流木対策を兼用できることから、土石流対策は原則として鋼製透過型砂防堰堤が採用されるようになった。しかし、既設の不透過型砂防堰堤は流木捕捉機能が不足していることから、これらの施設にも流木捕捉機能を付加する必要が出てきた。そこで、本堤の水通し部上流に設置する流木捕捉工が開発されている。当初の計画及び設計を変更することなく既設の不透過型砂防堰堤に流木捕捉機能を付加できることから、今後の流木対策として活用が期待される。不透過型砂防堰堤に設置された流木捕捉工の有効性を1,000本の流木を含んだ3次元大規模シミュレーションで検証する。

2. 計算手法

本研究では、不透過型堰堤に取り付けられた流木捕捉工と河床を含めた堰堤構造物を境界条件と

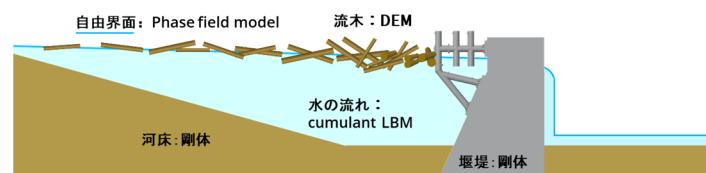


図-1 流木捕捉シミュレーションのモデル

し、多数の流木を含んだ水の流れの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。流木、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、流木同士の衝突および流木と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 流体計算手法

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手法である。Cumulant型衝突モデルの格子ボルツマン法(cLBM)は、当初提案された 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節し計算する。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、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。

2-2 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

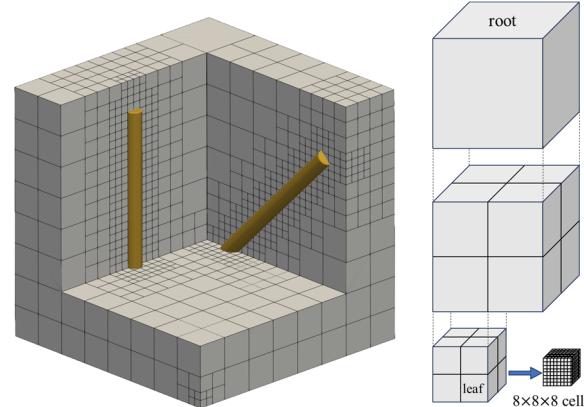


図-2 八分木アルゴリズムに基づいた AMR 法

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。

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、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]。

2-3 個別要素法による衝突により受ける力の計算

流木、流木捕捉工、河床を含めた堰堤構造物は全て剛体として扱い、流木以外は固定されているとする。流木同士の衝突および流木と鋼材や河床を含めた堰堤構造物との衝突の計算には個別要素法を用いる。流木、流木捕捉工、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。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、接触している位

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。

2-4 流木の並進・回転運動の計算

流木は周囲の水からの流体力と、他の流木や河床を含んだ堰堤構造物との衝突による力を表面で受ける。これらの力を総和し、重心に対して x 、 y 、 z 成分で流木の質量に対する運動方程式を 2 段 2 次精度のルンゲクッタ法で時間積分することで、流木の並進運動を計算する。また、流木の表面の受ける力の位置も分かるので、重心に対して回転のトルクを計算することができる。それらを総和することにより、流木の慣性モーメントを与えることで、回転運動を計算することができる[3]。

3. 不透過型砂防堰堤に設置された流木捕捉工のシミュレーション

3-1 シミュレーションの設定

実際とほぼ同じ形状の不透過型堰堤の上流側に直付けされた流木捕捉工の流木捕捉の詳細な過程や堰上げをシミュレーションで明らかにする。図-3に水路の形状と寸法を示す。堰堤の堆砂敷は満砂状態にあるとし、堰堤の直前の10mは水平に設定し、その上流域の35mを勾配1/20とした。結果に大きく影響しない範囲でシミュレーションの所要時間を短縮させるためである。水路の川幅を16.4mとし、比較的小型の不透過型堰堤を想定している。堰堤を通過した流れは 8.5 m 下に設定した流出境界条件から放出されるため、上流に影響を与えない。左右には 5m の高さの壁を設定し、左右岸から溢れることはない。堰堤の水通しの底幅を7mとし、川幅に対して約1/2となっている。堰堤に付設される流木捕捉工の構造を図-4に示す。部材の直径が 0.4 m、中心間距離は 12.0 m

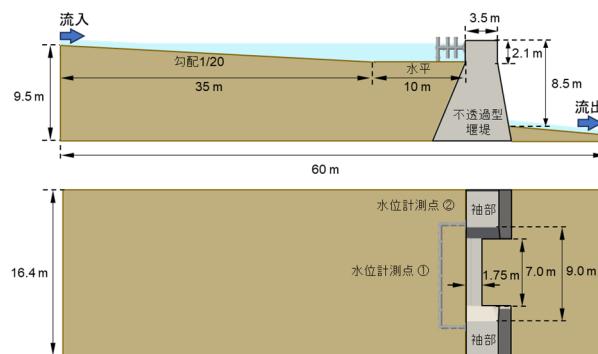


図-3 シミュレーションに用いる堰堤と河床モデル
で開口部の長さは 1.6 m とした。満砂を仮定しているため、河床より上に部材が 2.5 m 露出している。水通しを囲むように堰堤に直付けされている。

流入流量を $49.2 \text{ m}^3/\text{s}$ とし、上流端から水深 1.5 m

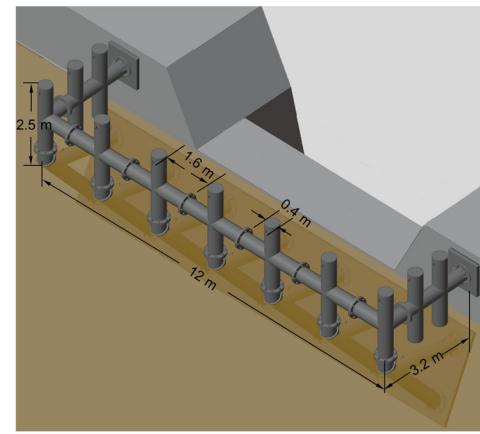


図-4 不透過型砂防堰堤に設置された流木捕捉工

で流速 2.0 m/s で流入させる。流木は斜面域の上流部（流速が約 2.6 m/s の領域）の空中から落下させるように投入している。流木の直径は 20 cm と 16 cm の 2 種類で、1000 本または 500 本を投入する。さまざまな流木長 ($0.5 \text{ m} \sim 1.8 \text{ m}$) に対する捕捉を調べた。流木の質量密度は自然木を想定して 850 kg/m^3 とした。水の密度を 1000 kg/m^3 、動粘度を $1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ とし、実際と同じ値を用いている。

シミュレーションで用いる AMR の最小セル幅を 3.5 cm とした。 16 cm の流木径に対して 4.56 セルしか割り当てていないが、十分な計算精度があることを確認している。もし均一格子で計算する場合は 512×1 、 664×512 セルとなるが、AMR 法を用いることで計算負荷もメモリ使用量も約 $1/4$ になっている。格子ボルツマン法による流体計算の時間刻みは最小セルに対して $\Delta t_{LBM} = 2.1 \times 10^{-4} \text{ s}$ である。固体同士の衝突計算に用いる微小球形粒子は、堰堤構造物と河床に合計 11,668,273 個用い、流木にはサイズに応じて 200~568 個を割り当てる。個別要素法の計算の時間刻みを Δt_{LBM} の $1/10$ 、粒子間反発係数を 0.25、ポアソン比は 0.33、摩擦係数は 0.3 としている。水の流れに対してノンスリップ境界条件としている。河床は満砂しているので移動床であるが、3 分程度の短時間の解析であるため固定床としている。計算時間は、NVIDIA H100 GPU を 8 個使って実時間 194.88 s (928,000 ステップ) の計算に約 160 時間を要した。

3-2 流木捕捉における流木径の影響

捕捉に対して流木径の違いの影響を調べるために、流木長を 1.8 m とし、直径が 20 cm と 16 cm の流木を 1000 本流す計算を Case 0 と Case 1 として実行した。流木捕捉工の部材間距離 1.6 m に対し、流木の方が長いため、捕捉され易い条件となっている。5.6 秒毎に 100 本の流木を投入し、水面では平均 $0.54 \text{ 本}/\text{m}^2$ で流木が堰堤に向かって流れる。上流の境界から流入を開始してから約 80 秒で流れがほぼ定常になり、そこから流木の投下を開始した。Case 0、Case 1

とも最初の流木が 92 秒後に捕捉工に到達し、194 秒までにはほぼ定常状態になっている。Case 1 では投入された 1000 本の内の 977 本が捕捉された。流木径が 20 cm (Case 0) の場合と 16 cm (Case 1) の場合に対し、投入した 100 本毎の流木に対する流出率を図-5 に示す。それぞれ最初の 100 本のうち 83 本と 84 本が捕捉され、それ以降に投入された流木はほぼ捕捉されている。予想に反して細い流木径 16 cm の方が僅かに捕捉されているが、流木径が 20 cm と 16 cm の違いは 1 本差であり、優位な差とは言えない。

流木は 5.6 秒毎に 100 本投入されており、捕捉工中央での堰上げ水深

堰上げの時間変化を図-6 に示す。Case 0、Case 1 とも捕捉される流木が時間とともに増え閉塞が進行するため、流木が捕捉されている領域で堰上げが進む。投入した 1000 本の流木が捕捉工に到達した 185 秒以降は一定の水位になっている。最終的な水位は流木径が 16 cm の方が僅かに高い。図-7 に Case 0 と Case 1 の最終的な捕捉状態における中央断面画像を示す。

捕捉工の直前では、捕捉流木による水中での空隙率が Case 0 と Case 1 でそれぞれ 37.4% と 25.0% であり、流れの方向に空隙率の低い領域 (図-7 の黄色い点線枠内) の通過距離が閉塞度をよく表す評価指標と考え、

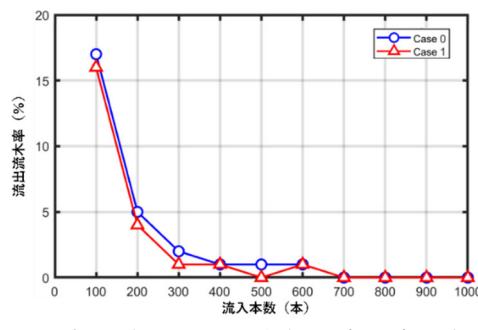


図-5 投入された 100 本毎の流出流木率

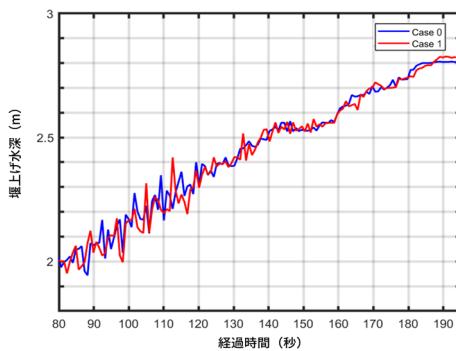


図-6 流木投入からの時間に応じた堰上げ水深

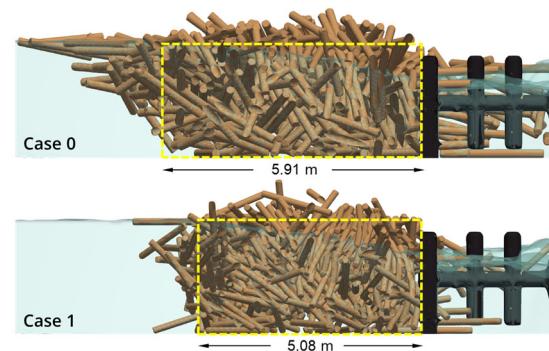


図-7 捕捉工前面の流れ方向の中央断面画像

$$\text{閉塞度} = (1 - \text{空隙率}) \times \text{通過距離} \dots\dots (1)$$

すると、Case 0 と Case 1 の閉塞度は 3.70 と 3.81 で両者は非常に近く、僅かに Case 1 の方が高い。Case 0 の方が通過距離は長いが流木径が大きいために空隙率が高いためである。閉塞度は堰上げ水位とよく相関している。

以上から、流木径の違いは流木捕捉にそれほど敏感ではないと判断し、以降は流木径を 16 cm としてシミュレーションを行う。

3-3 流木長の捕捉への影響

流木捕捉に最も影響すると思われる流木長は、捕捉工の部材間隔 1.6 m より長い 1.8 m (Case 1) (既に 3-2 節で計算済)、部材間隔より短い 1.5 m (Case 2)、1.2 m (Case 3)、0.8 m (Case 4)、0.5 m (Case 5) の場合を計算した。

Case 1 では投入された 1000 本の内の 977 本が捕捉され、そのときの水通しから流出する流れを可視化した画像を図-8 に示す。

図-9 は投入した 1000 本の流木のうち最終的に捕捉された流木 (194 秒後) の分布を表している。流木長が短くなると明らかに捕捉され難くなり、捕捉工前面に溜る捕捉流木エリアは狭くなっている。

図-9 に対応した最終捕捉状態の流木を横から見た画像

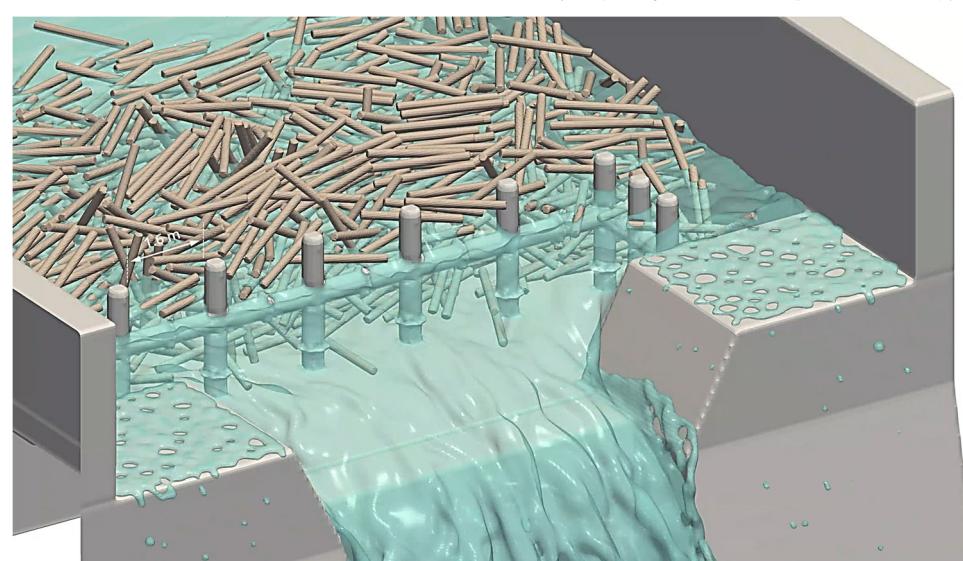


図-8 流木が捕捉された状況のスナップショット (Case 1)

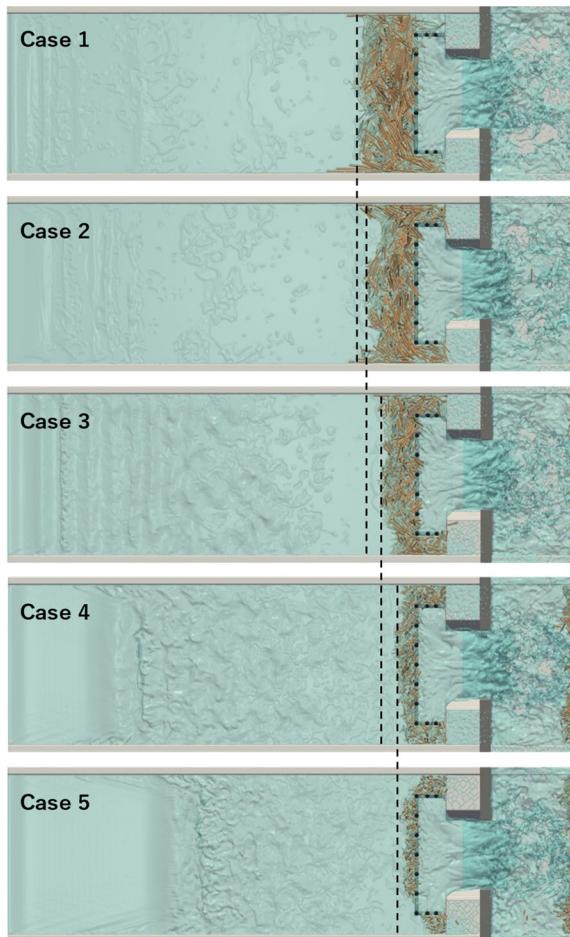


図-9 上から見た最終的に捕捉された流木分布

を図-10に示す。

水中で捕捉されている流木の分布形状が赤色の点線で示すように、流木長が長い方が水面との角度が小さく、短くなるに従って90度に近くなる。流木が水没している場合、質量密度が同じであれば浮力は同じである。捕捉工の水面近くが閉塞し沈み込む流れが発生すると、その流れに対して投影面積に比例した抗力が上向きに働く。流木径が同じであれば流木長が長いほど投影面積が大きくなり沈み難くなる。このため流木長が長い方が水面近くで捕捉される。図-10のCase 4とCase 5では、捕捉されている流木と河床の間にスペースがあり、他と接触していなく流下する可能性のある流木の存在を確認することができる。シミュレーション結果の動画で確認すると、より沈み易い短い流木が河床近くの速い流れに乗って捕捉工を通過していることが分かる。Case 5の場合、流木長がかなり短いため容易に沈み込むことができ、水深の深い方が流れが速く流出し易いため、逆に角度が浅くなっている。

4. おわりに

不透過型堰堤に付設する流木捕捉工の有効性を検証するために、流木を含んだ自由界面流れのシミュレーション・コードを開発した。高精度な計

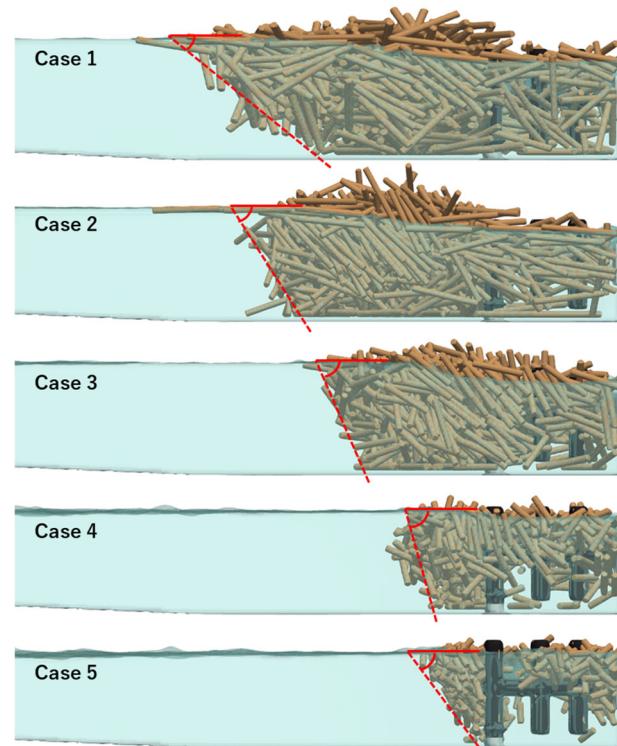


図-10 シミュレーション結果の横からの画像

算を高効率で行うため、動的に物体近傍に細かいセルを配置するAMR法を導入し、GPUで高速計算できるように実装した。

実際の不透過型堰堤と流木捕捉工に対して長さの異なる流木を1000本流してシミュレーションした結果、流木どうしの衝突や流木と部材との衝突による流木の減速、沈み込みなどの流れと流木の詳細な相互作用が計算され、以下のことが明らかになった。

- 1) 流木の捕捉は流木長に強く影響され、長いほど捕捉され易い。部材間隔より短くても3/4以上あればほぼ捕捉される。
- 2) 水中で捕捉されている流木は、流木長が短いほど沈み込み易く流木分布の水面との角度が大きくなる。しかし、流木が短すぎると逆に河床の速い流れに巻き込まれて流下し、角度が小さくなる。
- 3) 流木長が部材間隔より短いときは、流木の数密度が大きい方が捕捉率が高くなる。

本研究により流木の捕捉を精度よくシミュレーションできることが分かった。実際の堰堤や任意の流木捕捉工に対して流木の捕捉を予測できるツールとなるため、今後さまざまな応用が考えられる。今回は単純な形状の流木モデルを用いたが、複雑な形状の自然木も扱うことができ、橋梁での流木による閉塞の解析にも適用できる。また、流木だけでなく同じ枠組みで土石流も計算でき、流木を含んだ土石流に対する堰堤の有効性なども解析可能になると期待できる。

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 のスパコン TSUBAME4.0、名古屋大学・情報基盤センターのスパコン「不老」Type-IIサブシステムを利用させて頂いた。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