

マルチ GPU でスケールする粒子法コードによる大規模な水から土までの統合解析

課題責任者

浅井 光輝 九州大学 工学研究院

浅井 光輝*¹, 森川 ダニエル*², 大崎 春輝*¹

*¹九州大学, *²海洋研究開発機構付加価値情報創生部門数理科学・先端技術研究開発センター

キーワード：粒子法, GPGPU, 並列計算, 水土連成解析, 斜面災害解析

1. 背景・目的

自然災害の被害予測を対象とするには、水(流体)と土(固体)といった物性の異なる物体の両者を扱うロバストな計算技術が必要である。特に、土は平時においては固体としての安定的な挙動を示すものの、災害などの非常時には固体的な振る舞いから流体的な振る舞いへと相変化する。または土と水と融合することで、その力学特性は大きく変化することもある。例えば、土の空隙に水が一定量含まれると土粒子間を強く結びつける粘着力として機能するが、空隙が水で飽和された状態となると逆にこうした粘り強さが無くなる。

土と水の特徴を包含した統合化シミュレーション法として、申請者らは粒子法ベースのマルチフェーズ解析技術を独自に開発することで、固体から流体、また両者の相変化が生じる難解な問題を解くツールを整備してきた。また斜面災害から津波災害までを解析対象として扱うため、解析領域が広範になり、これをできるだけ短時間で解析するために、ノードを跨ぐ多数の GPU 上でスケールする粒子法技術へと発展してきた。この GPU による高速化技術は JAMSTEC に所属する古市幹人・西浦泰らとの共同研究の成果である。

粒子法はこうした相変化を含むダイナミックな現象の数値解析において効果を発揮する解析手法である一方で、解析精度についての議論は少なく、流体解析でいえば差分法・有限体積法、固体解析であれば有限要素法などの実績がある計算手法と比べると精度面で劣ると認識されることが多い。申請者らは、粒子法の中でも Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法に関する研究をこれまで行っており、計算精度を低下する要因解明に長年試みてきた。その成果は、書籍^[1] (明解粒子法, 丸善) から 2022 年にまとめられており、十分に信頼性を保有する粒子法コードを独自開発してきた。すなわち、他の研究グループに対して優れた信頼性の高い粒子法を保有し、またそれを JAMSTEC との共同研究を通して GPU 上で高速化したコードがある。

本研究では、まずは過去の災害事例、大規模津波遡上実験の再現を通して、災害被害予測ツールとしての妥当性を確認する。斜面災害については、熊本地震の旧阿蘇大橋付近で発生した斜面災害の再現を行う。申請者らは解析した実績はあるものの、計算機資源の制約から、空間解像度(粒子法では粒子間隔)を抑えた解析となっていた。そこで、地球シミュレータに搭載されている最新の GPU を

多数使い、それぞれ被害報告、実験結果に収束する数値解析モデルとなっているのかを確認することを目的とする。これは、今後、未曾有の災害被害予測を実施する上で、この妥当性と数値収束性の確認は必要不可欠なプロセスである。

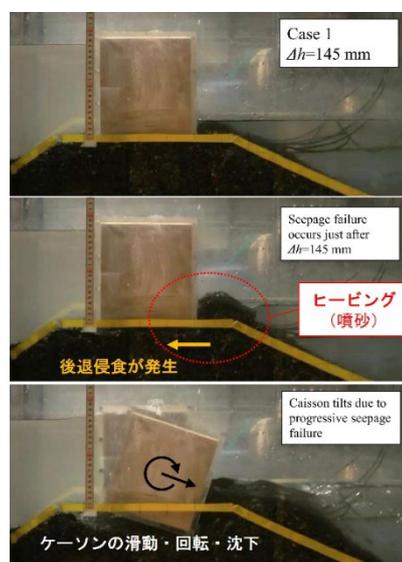


図1 防波堤の浸透崩壊実験

2. SPH-DEMによる水土連成解析法による浸透崩壊解析

東北地方太平洋沖地震の津波によって破綻したケーソン式防波堤における捨石マウンドの浸透崩壊に着目し、SPH-DEM 連成解析による浸透崩壊シミュレーションを実施した。笠間には、宮城県釜石市にある釜石港湾口防波堤に生じた津波被害に着目し、1/100 スケールの縮尺で一連の水理模型実験を行った^[2]。この実験では、港外側と港内側に設けられた一定の水位差によってケーソンブロックに水平力が生じるとともに、捨石マウンド内に浸透流が港内側へと流入する。図1に示す実験時の写真のように、水位差が 14.5cm の時に到達したとき、ケーソンブロックの港内側直下でマウンド材料が噴き上がる噴砂とパイピング破壊が発生した。また、ケーソンブロックの土台である捨石マウンドが侵食されたことにより、ケーソンブロックは不安定となり、壁面に作用する水平力によって滑動・回転・沈下が生じた。

図2に示すように、捨石マウンドとケーソンブロックをすべての DEM 粒子でモデル化し、ISPH-DEM 連成解析

による捨石マウンドの浸透破壊シミュレーションを実施した。この時、DEMによってモデル化された捨石マウンド粒子は非解像型連成モデルによって抗力を受けて運動する。また、ケーソンブロックは解像型連成モデルによって、ケーソン表面に作用する流体圧力を表面積分した流体力が作用して移動するものとした。この ISPH-DEM 連成解析の結果を図 3 に示すが、実験と整合した結果が得られている^[2]。

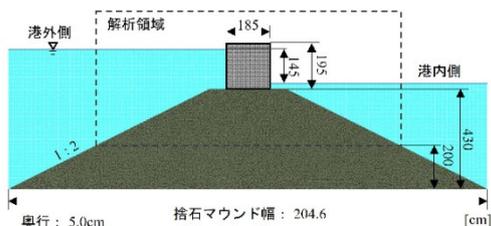


図 2 防波堤の浸透破壊の再現モデル

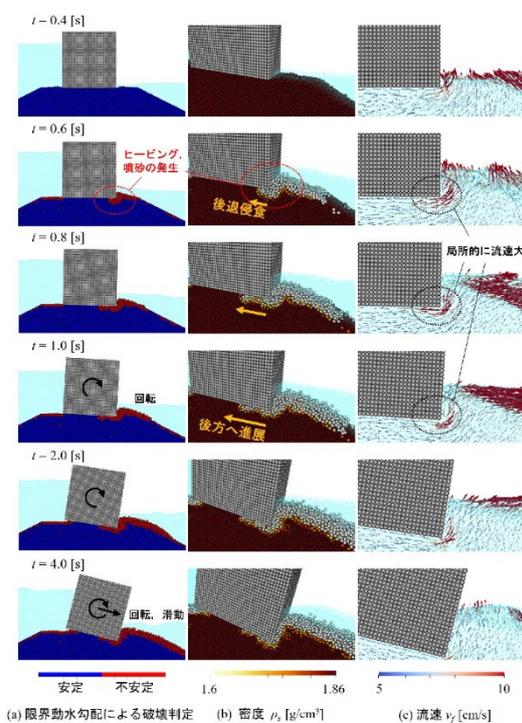


図 3 防波堤の浸透破壊の再現解析結果

3. 相変化モデルによる地震時の土砂災害シミュレーション

地盤が流動化し、再堆積するまでの相変化を含む大変形解析を実施するには、粒子法などのメッシュがない解析手法が有効とされている。固体状態として自立している地盤が流動化し、再び安定化した地盤へと変化する相変化を伴う地盤材料の解析として、ビンガム流体あるいはレオロジーモデルなどの非ニュートン型の流体モデルとして簡易化することが多い。しかしながら、この斜面崩壊は余震時には崩壊は発生せず、本震時に発生したことから、発生箇所から発生後の被害までの予測には、固体

としての地盤から流体化していく過程を解析すべきである。そこで、固体としての地盤から流体化していく過程までを再現するために、弾塑性体の SPH 法から非ニュートン流体 SPH 法へと相変化させる新たな粒子法を開発し、単一ノード内の複数 GPU を使い、阿蘇の斜面崩壊現象を 1m 解像度で解析できるコードを開発し、その内容は Computers and Geotechnics^[3] に掲載された。(図 4 参照)

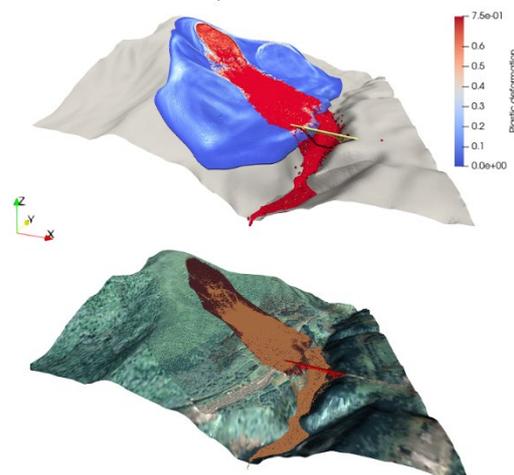


図 4 熊本地震時の阿蘇の斜面崩壊の再現

4. SPH (粒子法) の高精度化

以上の研究成果を通して、特に高粘性流体あるいは半陰解法型の SPH で必要となる 2 階微分の SPH モデルの誤差が避けられず、より高精度な SPH 離散化モデルが必要となった。そこで以下に示す 2 次精度の 1 階微分および 2 階微分モデルを提案し、数値実験を通してその有用性を確認した。関数 ϕ に対する 2 次精度の 2 階微分モデルは次式により与えられる。

$$\langle \mathbf{D}\phi \rangle_i = 2[\mathbf{M}_i]^{-1} \sum_j V_j (\phi_{ij} - \mathbf{x}_{ij} \cdot \langle \nabla\phi \rangle_{i,1}) \tilde{F}_{ij,4} \quad (1)$$

ここで $\langle \nabla\phi \rangle_{i,1}$ は修正勾配モデルと呼ばれる 1 階微分モデルであり、 $[\mathbf{M}_i]$ は 2 次元では 3×3 、3 次元では 6×6 の行列である。詳細は未公表論文の内容なので、詳細は割愛する。本モデルでは、各粒子で、式に示す逆行列を解く必要があるものの、これは全体の粒子法の計算量に比べるとほぼ無視ができる計算量である。

この修正 2 階微分を用い、以下に示す関数の解析微分値と比較して、ラプラシアン計算誤差を評価し、粒子間隔に伴う計算結果の収束性を評価した。

$$\begin{aligned} \phi(x, y) = & 0.75 \exp\left(-\frac{(9x-2)^2}{4} - \frac{(9y-2)^2}{4}\right) \\ & + 0.75 \exp\left(-\frac{(9x+1)^2}{49} - \frac{(9y+1)^2}{10}\right) \\ & + 0.50 \exp\left(-\frac{(9x-7)^2}{4} - \frac{(9y-3)^2}{4}\right) \\ & - 0.20 \exp(-(9x-4)^2 - (9y-7)^2) \\ & (0 \leq x, y \leq 1) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 ε は粒子乱れを示す指標であり、大きくなるほ

ど粒子配置の乱れが大きい状態を表す。図に示す通り、従来法(0th)では粒子配置の乱れがない理想的な状態でも誤差が収束せず、さらに乱れがあるほど、計算結果は発散していく特性があることがわかる。それに対して、提案法(FI)は乱れがある厳しい状況でも良好な収束特性を示した。現在、この高精度モデルについても計算物理学のジャーナルに投稿中である。また本モデルは、GPU コードおよびCPU 並列化にも実装が終わり、今後、その有用性を具体的な大規模流体解析で示している準備が整った。

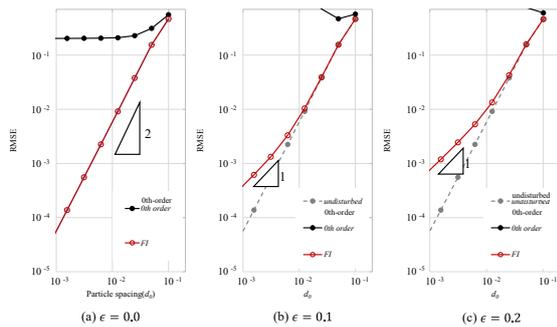


図5 ラプラシアンに従来法(0th)と提案法(FI)の精度比較

謝辞

本プロジェクトを通して、地球シミュレータに搭載されている最新のGPU(NVIDIA製A100)を複数枚利用する環境を利用させていただくことで、当初予定よりも多くの計算成果をあげることができました。この場をもって感謝申し上げます。

文献

- [1] 浅井光輝, 明解 粒子法, 丸善, (2022)
- [2] Kumpei Tsuji, Mitsuteru Asai, Kiyonobu Kasama, Seepagefailure prediction of breakwater using an unresolved ISPH-DEM coupling method enriched with Terzaghi's critical hydraulic gradient, *Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences*, 10:1, <https://doi.org/10.1186/s40323-022-00239-3>, (2023).
- [3] Daniel S. Morikawa, Mitsuteru Asai, A phase-change approach to landslide simulations: Coupling finite strain elastoplastic TLSPH with non-Newtonian IISPH, *Computers and Geotechnics*, Vol.148, (2022)