

自由界面を含む混相流の革新的数値流体シミュレーション
Innovative CFD simulation for multiphase flows including free surfaces

課題番号：19H05613

青木 尊之（AOKI Takayuki）

東京工業大学・学術国際情報センター・教授



研究の概要

自由界面を含む混相流に対し、高性能計算技術を導入する革新的な数値シミュレータを開発し、超大規模計算により 100nm～1km にわたる 3 つの実問題 ①多量の瓦礫や流木を含んだ流れの自然災害、②液膜ダイナミクスおよび泡沫の生成・崩壊、③粒子間の液架橋を直接計算する固気液分散系の低水分スラリーに適用し、流体力学における混相流の新しい知見を得る。

研究分野：数値流体力学

キーワード：混相流、自由界面流れ、非ニュートン性流体、液膜、液架橋、AMR

1. 研究開始当初の背景

流体力学は成熟した学問分野であり、数値流体シミュレーションも発展しているが、混相流は数値シミュレーションが非常に難しい流れである。特に気液界面（本研究では自由界面の中に含める）を伴う流れにおいて、界面での大きな密度勾配と界面変形を伴うために、流体力学的な難しさ、数学的な難しさ、計算技術の難しさが重なり、発展が長く停滞している。離散数学における解の収束性という観点では、格子を細かくして行くと新たな多数の小さい気泡や細かい飛沫が現れ、解の収束性からは程遠い状態にある。

2. 研究の目的

開発する革新的混相流シミュレータを用い、これまで達成することができない次の 3 つのテーマの超大規模な混相流シミュレーション①多量の瓦礫や流木を含んだ流れの斜面災害、②液膜ダイナミクスおよび泡沫の生成・崩壊、③粒子間の液架橋を直接計算する固気液分散系のスラリーを実行し、混相流に対する流体力学の新しい知見を得る。

具体的には、①多量の浮遊物を含んだ混相流の計算精度、浮遊物が構造物等に衝突する際にどのような衝撃が発生するのか、さらに浮遊物が特定の場所にどのように補足されるかを実際の災害の流木の堆積状況や建物被害と比較し、防災への貢献も視野に入れる。②液膜の安定性や多数の気泡が液膜で隔てられた泡沫に対して、界面活性剤の輸送、粘弾性、非ニュートン性の影響を明らかにし、マクロな液膜・泡沫の生成・崩壊過程と流体

力学的特性を解明する。③固気液分散性系において、液架橋が溶媒の接触角や非ニュートン性に依拠してどのようなネットワーク構造を形成し、動的にどのようなマクロな流体力学特性につながるのかを明らかにする。

3. 研究の方法

自由界面を含む非圧縮性（低マッハ数）の混相流に対して、完全陽解法の弱圧縮性流体計算手法を開発し、気液界面および物体近傍に細分化格子を適合させる AMR(Adaptive Mesh Refinement) 法を図 1 のように導入し、

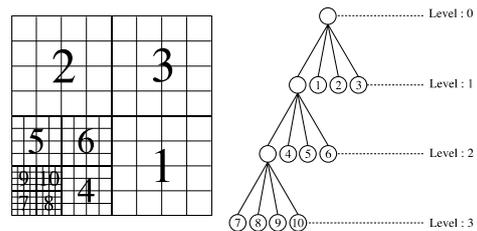


図 1 木構造アルゴリズムに基づいた再帰的格子

計算効率を飛躍的に向上させる。さらに動的負荷分散を導入し大規模計算を可能にした革新的な数値シミュレータを開発する。GPU スパコンでの実行を前提に研究開発を進め、2023-2024 年度は「富岳」の利用も視野に入れる。

4. これまでの成果

①多量の瓦礫や流木を含んだ流れの斜面災害のシミュレーション

安定で高精度なキュムラント型格子ボルツマン法を基に、自由表面を含んだ流体と任

意形状の浮遊物体を含んだ計算のできるコードを開発した。

神戸大学の全長 70m, 幅 6m の巨大水槽で 10cm 角・長さ 1.5m の木材を 10 個配置し、貯水槽からの浸水で押し流す実験と計算の比較を行った。流木の流される速さや集合する様子が非常に良く一致する結果が得られた。また、流木の衝撃力は流体圧力よりも 30 倍以上大きいことが分かった。

八戸工業大学の 15m 水槽では、ポールを模擬防潮林と見立て、貯水槽から放流された 47 本の 2cm 角・長さ 20cm のケミカルウッドが捕捉される実験との比較を行った。ポールの本数が 18 本の場合には約半数が捕捉され、図 2 のように捕捉される角度まで酷似した計算結果が得られた。

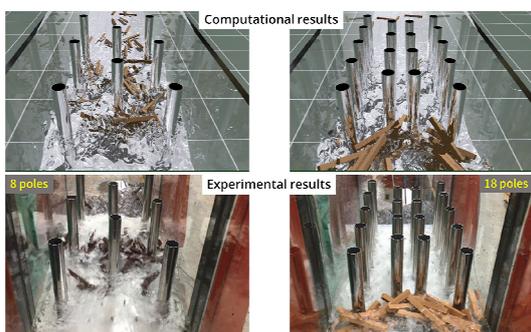


図 2 流木捕捉シミュレーション (上) と実験 (下) の比較

②液膜ダイナミクスおよび泡沫の生成・崩壊シミュレーション

Navier-Stokes 方程式と、低マッハ数近似をもちいた圧力の発展方程式および保存型 Allen-Cahn 方程式を連立して解く弱圧縮性気液二相流計算手法を開発した。シャボン玉の液膜近傍に高解像度格子を動的に配置し、直径 12.5cm のシャボン玉が膜厚 117 μm の液膜が破断しない計算を行うことができた。

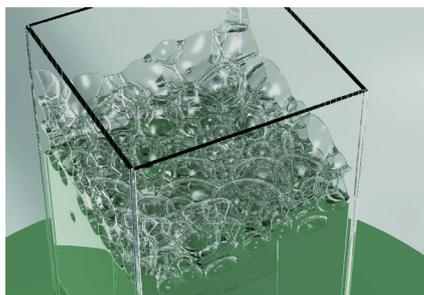


図 3 泡沫形成シミュレーション

マルチ・フェーズフィールド法を導入し、それぞれの気泡に異なるフェーズフィールド変数を割り当て、数値的な気泡の合体を阻止し、水中の多数の気泡が上昇して水面に準安定な泡沫が形成される 3 次元シミュレーションを行うことができた。

③粒子間の液架橋を直接計算するスラリーの固気液分散系シミュレーション

弱圧縮性流体計算手法による気液二相流コードに接触角を精度よく計算できる手法を導入し、固気液三相が接触する境界において、Capillary Force をフェーズフィールド変数から精度よく求める方法を開発した。

複数の粒子から構成される系に水を滴下し、接触角を 30°とした計算では、液滴は落下するとともに 9 つ全ての球に付着して中心の球と各頂点の球の間に液架橋が形成されるが、接触角を 150°とした計算では、液滴は球と反発しあうことから、形状を大きく変形させながら球の間をすり抜けて最終的には液滴は球にトラップされずに、下部に落下するという結果になった。

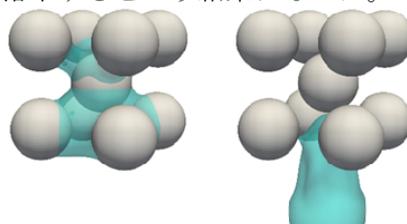


図 4 複数の粒子系への液滴落下. 左は接触角 30°で右は 150°.

5. 今後の計画

①災害が発生した地域 (岩手県岩泉町等) の実地形に対して、被害状況との比較を行う。また、瓦礫や流木により建物等がどのような衝撃を受けるかを評価する。②泡沫における液膜内の流動と物質移動の解析およびマクロな流体特性が現れる大規模シミュレーションを行う。③攪拌等の外力を加えたシミュレーションを行い、液架橋のネットワーク構造がどのように変化するか、マクロな流体特性がどうなるかを明らかにする。

6. これまでの発表論文等

- [1] [Seiya Watanabe](#), [Takayuki Aoki](#): Large-scale flow simulations using lattice Boltzmann method with AMR following free-surface on multiple GPUs, *Comp. Phys. Comm.*, Vol. 264, Jul 2021, 107871.
- [2] Kai Yang, [Takayuki Aoki](#): Weakly compressible Navier-Stokes solver based on evolving pressure projection method for two-phase flow simulations, *J. Comp. Phys.*, Vol. 431, 15 Apr 2021, 110113
- [3] Yos Sitompul, [Takayuki Aoki](#), [Tomohiro Takaki](#): Simulation of turbulent bubbly pipe flow with high density ratio and high reynolds number by using the lattice boltzmann method and a multi-phase field model, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 134, Jan 2021, 103505.
- [4] Yos Sitompul, [Takayuki Aoki](#): A filtered cumulant lattice Boltzmann method for violent two-phase flows, *J. Comp. Phys.*, Vol. 390, 1 Aug 2019, PP. 93-120.
- [5] 青木尊之: HPCI 利用研究課題優秀成果賞 (2019 年度課題)

7. ホームページ等

<http://www.sim.gsic.titech.ac.jp/index-j.html>