

課題番号 jh180035-NAH

界面に適合する AMR 法を用いた非圧縮性気液二相流の完全陽解法計算と GPU 実装

青木 尊之 (東京工業大学)

概要 様々な分野で必要とされている非圧縮性気液二相流解析において、ポアソン方程式を解かない完全陽解法と界面に細かい格子を適合させる AMR 法の導入により、エクサスケールまで見通せる高解像度計算手法の開発を目指す。流体にわずかな圧縮性を許容する弱圧縮性流体解析手法と Phase Field 法の保存形 Allen-Cahn 方程式による界面捕獲手法を組み合わせる。圧縮性 Navier-Stokes 方程式にフラクショナル・ステップ法を適用し、オイラー方程式に特性線解法を適用することで、演算効率の高いセミ・ラグランジュ法を適用することができる。非圧縮性領域として十分近似可能な低マッハ数領域に対し、音速を時間ごとに調節して低減させることにより、計算の時間刻み幅を大幅に広げることができる。本計算手法を使った計算は、種々のベンチマーク問題において非圧縮性ソルバーおよび実験と良好な一致を得ており、非圧縮性領域の気液二相流計算へ十分な精度で適用可能であることが明らかになった。約 1.2 億格子を用いた均一格子によるダム崩壊計算を行い、非常に激しい流動を含む現象に対しても安定に計算可能であることを確認した。AMR 法による気液界面への細分化格子の適合には 8 分木を用い、実際の計算格子を乗せた末端のリーフには $8 \times 8 \times 8$ などの計算格子を割り当て、GPU 実装における実行性能を向上させている。単位一 GPU によるスプーンに衝突する水の流れ計算を行い、界面近傍に 1024^3 相当の細かい格子を適合させ、薄い液膜形成の現象をシミュレーションすることができた。

また、弱圧縮性解析手法を等温過程の Navier-Stokes 方程式を直接解く手法も試した。ベンチマークに対して良好な結果を得ることができ、高レイノルズ数の砕波を伴うダム崩壊問題も 10 億格子程度まで安定して計算できることを確かめることができた。格子配置がスタッガード格子となるため、AMR コードのコアとなる部分の新たに書き直しを行った。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

九州大学・情報基盤研究開発センター

渡辺 勢也 (東工大) : GPU カーネルのチューニング

長谷川 雄太 (東工大) : 階層的メモリ管理実装

(2) 共同研究分野

■ 超大規模数値計算系応用分野

□ 超大規模データ処理系応用分野

□ 超大容量ネットワーク技術分野

□ 超大規模情報システム関連研究分野

松下 真太郎 (東工大) : 圧縮性流体計算手法の改良、音速低減と気液二相の状態方程式

外丸 慎之介 (東工大) : ジョブ実行とデータ処理・Paraview による可視化

(3) 参加研究者の役割分担

青木 尊之 (東工大) : 研究総括および計算手法から GPU 実装に至る詳細な指示

白崎 実 (横国大) : 気液界面における表面張力項の離散化と液膜安定性

小野寺 直幸 (JAEA) : ノード間通信の最適化、Temporal Blocking

杉原 健太 (東工大) : 固体衝突の物性パラメータ設定

2. 研究の目的と意義

水と空気が入り混じるような気液二相流は、流体力学において未解決の問題を多く含む分野として認識されている。その数値解析結果は、計算格子を細かくすると新たな水滴や気泡が生じ、数値計算の解の収束性が十分に満たされていない。しかし、格子幅を $1/2$ にすると、均一格子を用いた 3 次元計算では格子点数が 8 倍、安定性の制限から時間刻みを $1/2$ にしなければならず、陽的な解法であっても 16 倍の計算資源が必要になる。また、非圧縮性流体解析では、一般に非圧縮性条件を満足させるために圧力のポアソン方程式を線形行列解法で解き、その圧力に

より速度を修正する半陰解法が用いられている。水と空気のような気液二相流では、密度比が 1000 倍近くになり、密度が係数行列の非ゼロ要素に含まれるため極めて悪条件の疎行列となる。大規模になると、疎行列計算はマルチグリッド法などの前処理を用いても反復計算の収束性が非常に悪化し、半陰解法を用いた手法では、100 億点以上の高解像度気液二相流計算は絶望的と言える。それにも関わらず、液体燃料の噴射、オイル攪拌、燃料電池内の排水など、様々な分野で高解像度気液二相流解析は必要とされている。

本研究では、①計算手法の半陰解法から完全陽解法への転換（ポアソン方程式を解かない）、②細分化格子を気液界面に適合する（AMR 法）ことによる大幅な計算格子数の低減（1/100 以下）、③セミ・ラグランジュ法を導入することによる演算密度の向上、④方向分離解法で Temporal Blocking によるデータ移動の低減を行い、エクサスケールまで見通せる気液二相流の大規模計算手法の開発と実証を目的とする。これらを、エクサフロップスのスパコンの候補である NVIDIA の GPU を用いたスパコンで実装し、検証を行う。GPU はメモリ構造が CPU の場合と大きく異なり、メモリ階層が多くアドレスが固定されているために AMR 法の実装は困難とされている。本研究では、アプリ側で GPU のメモリの管理まで行うことにより、これまで計算されることがない液膜等の大規模な気液二相流計算の実現を目指す。

3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

研究代表者のグループはこれまで大規模計算（HPC 分野）で多くの実績があり、GPU コンピューティングの研究を牽引してきた。本共同研究の体制は、気液二相流の計算で先進的な研究を進めている横浜国立大学の研究者、陽解法である格子ボルツマン法で自由界面の大規模計算を進めてきた日本原子力研究開発機構の研究者らで構成されている。特に表面張力が卓越する液膜などでの扱いで多くの議論ができると期待している。JHPCN の枠組みを使い、HPC 分野の研究者と計算力学分野の研究者が連携することで初めて GPU スパコンを用いた実問題の大規模二相流シミュレーションを達成することができる。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

新規採択課題なので該当しない。

5. 今年度の研究成果の詳細

5.1 節から 5.8 節までの内容が 2018 年度の前半に実施した研究であり、5.9 節から 5.12 節までが後半に実施した内容である。

5.1 完全陽解法による気液二相流計算手法の開発

これまでは非圧縮性流体として計算されてきた低

マッハ数領域の流れに対し、圧縮性 Navier-Stokes 方程式をフラクショナル・ステップ法で分離して計算する。オイラー方程式による速度の時間発展を \mathbf{u}^{**} 、重力による速度変化を $\Delta \mathbf{u}_{grav}$ 、粘性による速度変化を $\Delta \mathbf{u}_{visc}$ 、表面張力による速度変化を $\Delta \mathbf{u}_{sf}$ として、 $n+1$ ステップ目の速度は

$$\mathbf{u}^{n+1} = \mathbf{u}^{**} + \Delta \mathbf{u}_{grav} + \Delta \mathbf{u}_{visc} + \Delta \mathbf{u}_{sf}$$

として計算する。分離された各式に対し、方向分離法を適用し、1次元の式に帰着させる。方向分離法によって \mathbf{u}^{**} の解法に特性線解法を導入でき、演算効率の高いセミ・ラグランジュ法を適用する。 $\Delta \mathbf{u}_{visc}$ は非圧縮ニュートン流体に対する粘性応力テンソルを空間 2 次精度中心差分で評価し、 $\Delta \mathbf{u}_{sf}$ は Yokoi による Levelset based density-scaled balanced Continuous Surface Force モデルを用いて 2 次中心差分法で評価する。

気液界面の捕獲には Phase Field 法の保存形 Allen-Cahn 方程式を解く。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\phi) = \bar{\gamma} \left(\epsilon \nabla \cdot (\nabla \phi) - \nabla \cdot (\phi(1-\phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|}) \right)$$

ϕ は各時刻における流れ場の気相および液相の空間分布を表す指標関数で、 $\bar{\gamma}$ は易動度に関するパラメータ、 ϵ は界面幅に関するパラメータである。広く用いられている VOF 法と異なる点として、移流方程式のみを解くのではなく右辺の拡散・逆拡散の効果を持つ項を計算することによって長時間積分を行っても界面幅を一定に保つことができる。加えて、Phase Field 法とカップリングさせたレベルセット法を用いて幾何計算を高精度化する。界面からの符号付距離関数であるレベルセット関数を格子細分化の基準としても用いる。レベルセット関数 ψ は毎ステップ移流させ、数百ステップ毎に再初期化計算を行う。再初期化計算の初期値 ψ_0 を Phase Field 変数から計算することでカップリングを行う。

$$\psi_0 = \epsilon \log \frac{\phi}{1-\phi}$$

AMR 法の細分化基準にレベルセット関数を用いる場合、界面からある程度離れた領域までレベルセット関数を与える必要がある。そのために再初期化計算のステップ数を増やすと計算コストが増大してしまう。そこで、上式を界面のごく近傍のみで計算し、それ以外の領域は移流されたレベルセット関数を再初期化計算の初期値として 10 ステップ程度再初期化計算を行う。これにより再初期化計算のステップ数を削減しながら界面近傍は Phase Field 変数とカップリングされたレベルセット関数となり、界面近傍以外には細分化に必要なレベルセット関数の情報が残る。

5.2 界面に適合する AMR 法の実装

気液二相流解析は界面近傍の格子解像度が重要で

あり、界面から離れた領域ではそれほど高い解像度は必要ない。木構造に基づく再帰的な格子細分化により、高解像度が必要な領域に細かい格子を割り当てる。2次元の場合、1回の格子細分化で元の領域が

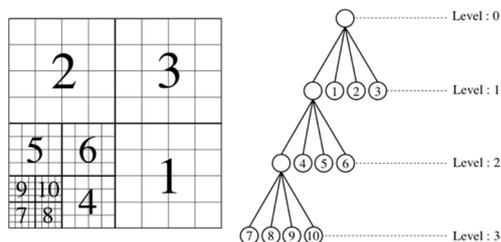


図 1 木構造に基づく格子細分化

4 つに分割され、木構造の末端であるリーフは 4 つ生成されることになる (図 1)。3次元の場合は 8 つに分割され、リーフは 8 個生成される。GPU 計算ではメモリ・アクセスを効率的に行うために、リーフに $8 \times 8 \times 8$ などの比較的多数の格子を割り当て、局所的なメモリの連続性と CUDA の 1 ブロック当たりの Thread 数を確保する。

解像度の異なる (細分化のレベル差が異なる) をまたぐ格子点参照や動的に格子を細分化・合一する際に、粗い格子から細かい格子および細かい格子から粗い格子への値の補間が必要となる。流体方程式はノード・センター上で計算し、保存形 Allen-Cahn 方程式は保存形マルチ・モーメント法で計算する。ノード・センター上での補間はリーフ内で閉じることができ、2次精度となる。保存形マルチ・モーメント法では点値の他に各軸方向の線積分値、面積分値を定義しそれぞれの時間発展が解かれる。2次元では図 2 に示すように x 方向、 y 方向それぞれに対する細分化を行い各段階の補間値構築には 2 次多項式形の保存形 IDO 法で計算する。

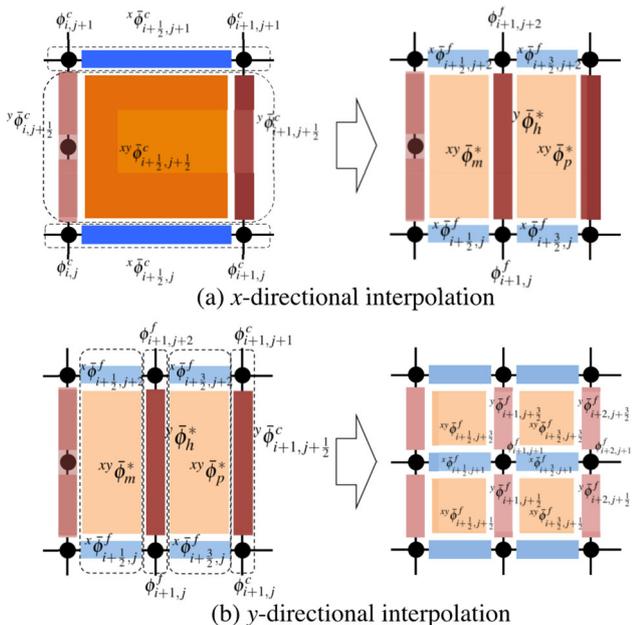


図 2 保存形マルチ・モーメント法の AMR 補間

5.3 均一格子による検証計算

本手法が非圧縮性気液二相流解析へ適用可能であるか検証するため、二次元単一気泡上昇のベンチマーク問題を解いた。物性値および問題設定は非圧縮

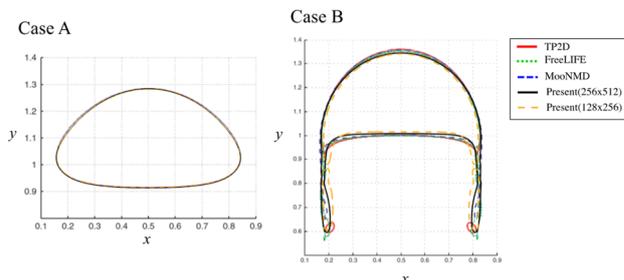


図 3 $t = 3.0$ における気泡形状の比較

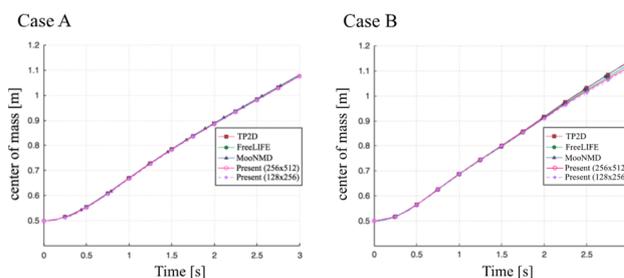


図 4 気泡重心位置の時刻歴

性流体計算と合わせ、格子解像度を 128×256 と 256×512 で計算した。図 3 に示すように、得られた気泡形状は TP2D、FreeLIFE、MooNMD といった種々の非圧縮性ソルバーの結果と良好に一致する結果が得られた。気泡の重心位置の時刻歴についても図 4 に示すようによく一致しており、表面張力を含めた非圧縮性領域の二相流計算を十分な精度で計算できることを確認した。

5.4 濡れた床へ浸水するダム崩壊計算

より具体的な例題として、濡れた床へ浸水するダム崩壊計算を行った。床上に浅い水面を設定すると、浸水する水は砕波を伴いながら非常に激しい流れ場となる。計算領域 $0.72 \times 0.12 \times 0.36$ m に対し、格子数 $576 \times 96 \times 288$ を用い、幅 0.15 m の水柱と 0.018 m の水面を設定し、 20°C の水と空気 の物性値を用いた。非圧縮性流体計算と本研究の弱圧縮性流体計算を同





図 5 濡れた床へ浸水するダム崩壊計算. 非圧縮性流体計算 (上図) と弱圧縮性流体計算 (下図).

2 倍の解像度の格子数 $1152 \times 192 \times 576$ (約 1.2 億格子) を用いて計算した結果を図 6 に示す。計算結果は非常に細かい液滴や気泡まで再現できており、激しい高レイノルズ数流れに対しても高解像度で安定して計算可能であることを確認した。セミ・ラグランジュ移流計算には WENO5 次精度補間関数を用いられていて、計算の安定化に寄与している。

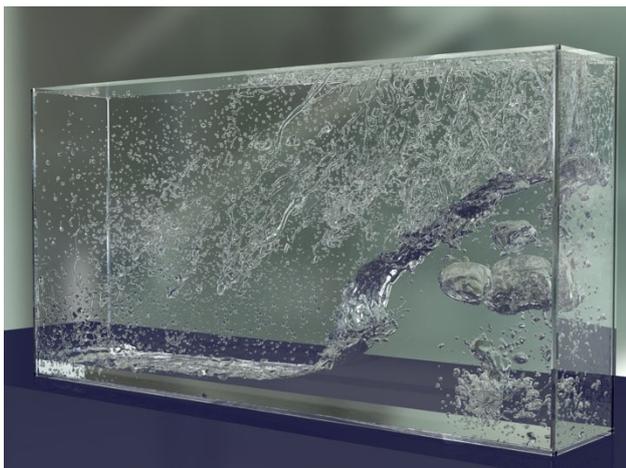


図 6 1.2 億格子を用いた完全陽解法による濡れた床へ浸水するダム崩壊計算

5.5 AMR 法の計算コスト削減効果評価

界面に細かい格子を動的に集める AMR 法を保存形 Allen-Cahn 方程式による界面移流ベンチマーク問題に適用し、まずは CPU 実装で AMR による格子削減効果と高速化効果を評価した。Rider によって提案された Single Vortex 問題を解く。計算領域 $[0, 1] \times [0, 1]$ 中に半径 $R = 0.2$ の円の中心位置が $(0.5, 0.75)$ となるように配置する。与えられた回転速度場によって $t = T/2$ まで界面プロファイルが引き伸ばされ、反転した速度場によって理想的には $t = T$ で初期形状に回復する。本計算では $T=8$ とした。格子解像度はもっとも粗い格子が均一 64×64 格子相当、最も細かい格子は 2048×2048 格子相当になる AMR 格子を用いて計算した(図 7)。均一 2048×2048 を用

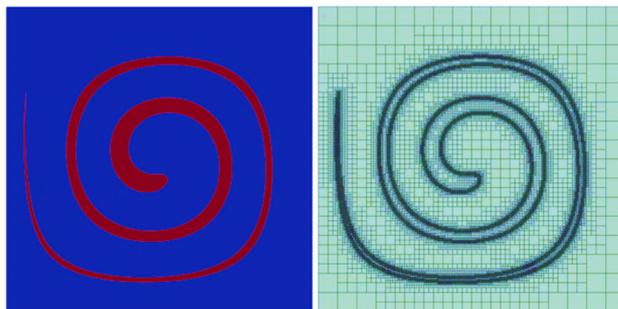


図 7 AMR 法による界面移流のベンチマーク計算 (右図の黒線内の領域には 4×4 の格子)

いた場合と同等の界面プロファイルが得られ、時間平均で $1/12.3$ の格子点数削減、 9.26 倍の計算時間短縮を達成した。

5.6 AMR 法によるシャボン玉の液膜膨張計算

高速化が達成された界面移流の AMR コードを弱圧縮性流体解析手法との組み合わせ、AMR が効果的である液膜を含む流れ計算の一例として、シャボン玉液膜膨張計算を行った。物性値には液相にグリセリン 20%水溶液、気相に空気の値を用い、液膜内側の左壁面に $t = 0.01$ 秒でほぼ $u_{max} = 0.25$ m/s となるようにシグモイド関数形で時刻変化させたポアズイユ流れの気流を流入させた(図 8)。シャボン玉が徐々

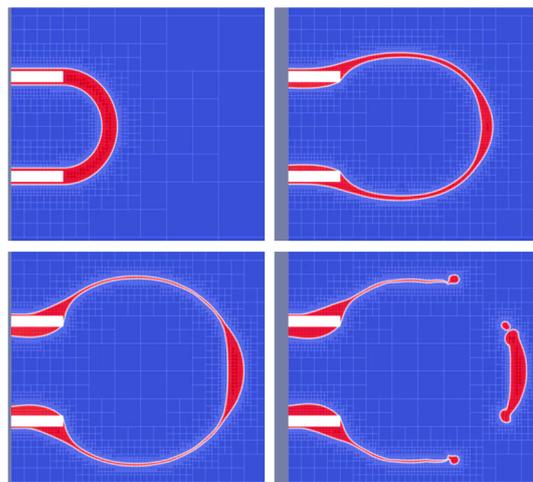


図 8 シャボン玉膨張過程のシミュレーション(20%グリセリン水溶液)

に膨張していく過程が再現されており、シャボン玉内部の気流によって液膜が薄くなる前方から破断する。液膜の安定性には表面張力が大きく影響しており、仮に表面張力を $1/5$ とした計算では図 9 のように、液膜が円形に近づこうとする力が弱まり、より大きな液膜を形成したのちに破断する。シャボン玉形成計算は均一格子による先行研究があり、より高解像度で計算する必要性が指摘されている。AMR 法と完全陽解法を組み合わせた本手法を GPU 実装することにより界面により高解像度を割り当てた計算が可能となり、さらに現実に近いシャボン玉膨張計算が可能になる。

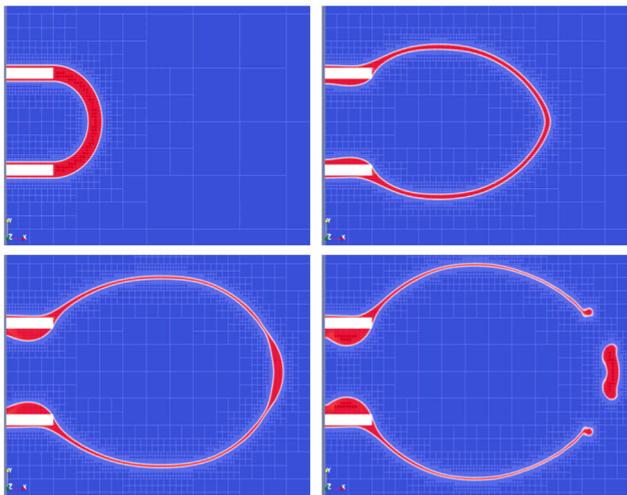


図 9 シャボン玉膨張過程のシミュレーション(表面張力を 1/5 にした計算)

5.7 AMR法による水面で液膜を形成する気泡上昇

液体中を上昇する気泡形状は数値計算によって非常に多くの計算例が存在し、精度よく捉えることができている。しかし我々が日常で目にする界面上で液膜を形成し、安定して液膜を維持し続ける現象を数値計算で再現することは非常に困難である。その理由の一つに有限の格子幅で界面を再現する数値計算で液膜を解像するためには、界面近傍に非常に多くの格子が必要となることが挙げられる。本手法を用いて界面近傍に高解像度格子を割り当てることによって現象の再現を試みる。計算領域 $2 \times 2 \times 1.5$ cm 中に高さ 1.0 cm の液面を設定し、半径 0.25 cm の球状気泡を中心位置 (0.5, 0.5, 0.5) cm となるように配置する。物性値には空気と 20% グリセリン水溶液を用い、最粗格子が均一 64×64 相当、最細格子が $256 \times 256 \times 192$ 相当となる格子細分化を行う。計算結果を図 10 に示す。界面近傍に格子が集まっており、

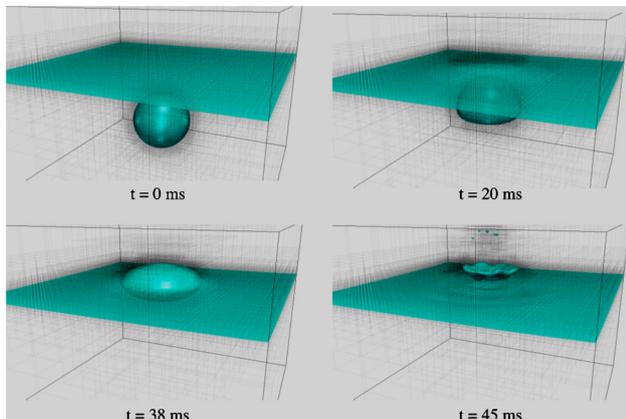


図 10 AMR法と完全陽解法による界面で液膜を形成する気泡上昇計算

均一格子の場合と比べ少ない格子点数で計算することができた。現実世界で見られるような長時間の液膜安定維持には至っておらず、現象の再現のためには粘弾性力等の液膜を安定化させる非ニュートン性流れの考慮と GPU 実装によるさらなる高解像度化が必要である。

5.8 スプーンに衝突する水の流れの計算

水道の蛇口から勢いよく出る水をスプーンに当てると、形状に沿って液膜が形成される。AMR 法と弱圧縮性気液二相流計算を組み合わせた手法を用い、物体近傍および界面近傍に動的に格子を適合させる。物体の格子に沿わない形状に対しては Immersed Boundary Method を用いた。水と空気の物性値を用いて CPU で計算した結果を図 11 に示し、図 12 に単一 GPU による 3 次元計算の結果を示す。GPU 計算ではアドレスが固定されているため、メモリの動的確保と開放を CPU のように高速に行うことができず、`cudaMalloc()` や `cudaFree()` を高い頻度で行うことは致命的となる。そこで、アプリケーション側で GPU のメモリ・プールを用意し、細分化・合一化を管理し、

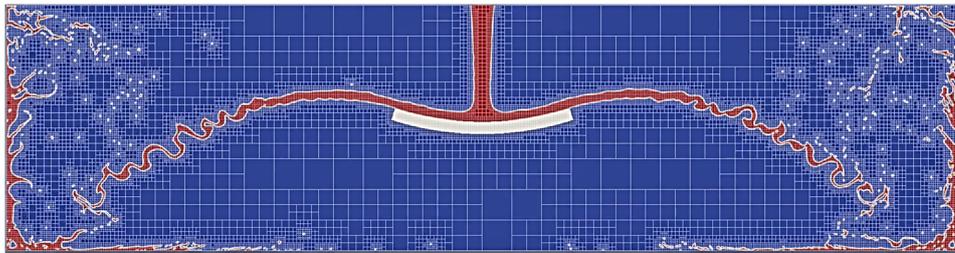


図 11 液膜形成過程の 2 次元 AMR 二相流シミュレーション

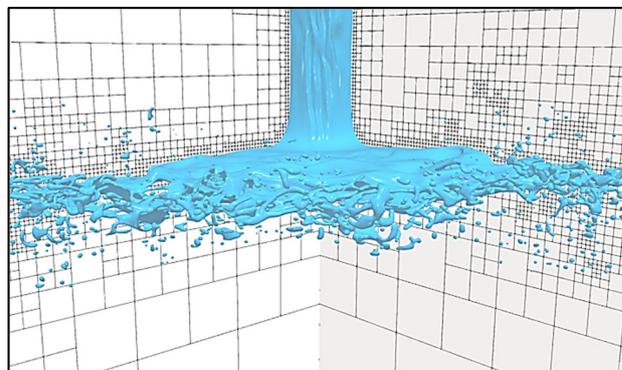
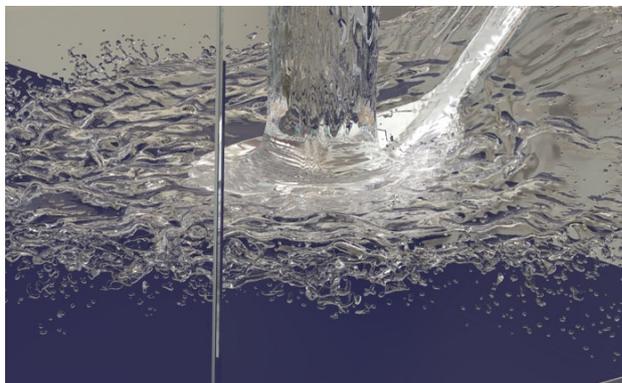


図 12 スプーンに衝突する水の流れの計算：上図 POV-ray による可視化、下図：AMR のリーフ境界線

適当な頻度でデ・フラグメンテーションまで行うことで高速な AMR 法による GPU 計算を実現している。上記実装により、最も細かい格子が 1024³ 相当の解像度となる非常に細かい格子を用いた計算を単一 GPU で実行できた。

5.9 特性線に基づく弱圧縮性解析手法の問題点

特性線に基づく弱圧縮性解析手法では値が全て格子点上(ノード・センター)に配置されており、AMR 適用の際必要となるレベル差補間値が単一のリーフ内で閉じた 2 次精度線形補間で容易に求められる。セミ・ラグランジアン法による離散化で計算の安定性が非常に高いという利点があった。しかし、特性線解法を適用する際に構築する補関数内で密度が変わらないという仮定があり、密度変化を補関数内で考慮することが困難であるということが分かった。これに付随し、以下の 2 つの問題点が明らかになった。①音速をパラメータとして与えることが難しく、理想気体の音速の式を用いなければ高 CFL 数下で安定に計算することが困難である。②気液界面での運動量交換が正しく評価されていない問題に対して密度重み付けした移流項の離散化が困難である。

5.10 弱圧縮性流体解析手法の改良

以下の等温過程の圧縮性 Navier-Stokes 方程式を解く弱圧縮性流体解析手法を新規に開発した。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) p = -\rho C_s^2 \nabla \cdot \mathbf{u}$$

音速 C_s は空間的に一様な値で、低マッハ数領域の計算となるように人工的に与える。試行計算によって上記方程式を安定的に解けるスキームを選択し、移流項には安定性の高い 3 次精度 WENO スキームを用い、その他の微分には 2 次精度中心差分法を用いた。

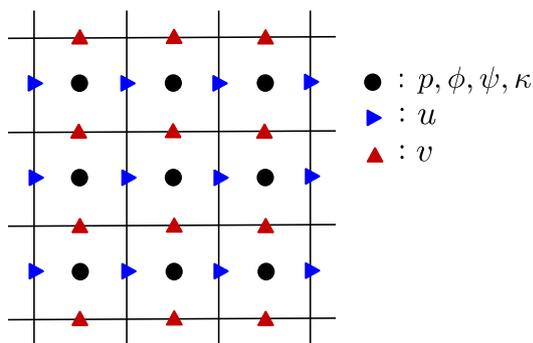


図 13 変数のスタaggerド格子配置

時間積分には 3 次精度 TVD-Runge Kutta 法を用いる。図 13 に示すスタaggerド格子配置を用いることで、圧力と速度のカップリングを改善し、安定性を向上させている。方向分離法を用いていないため、従来手法と比べ AMR 法適用の実装の煩雑さは増し

ているが、検証計算および高レイノルズ数流れに対する安定性、大規模計算に適用可能であるかの検討を行った。

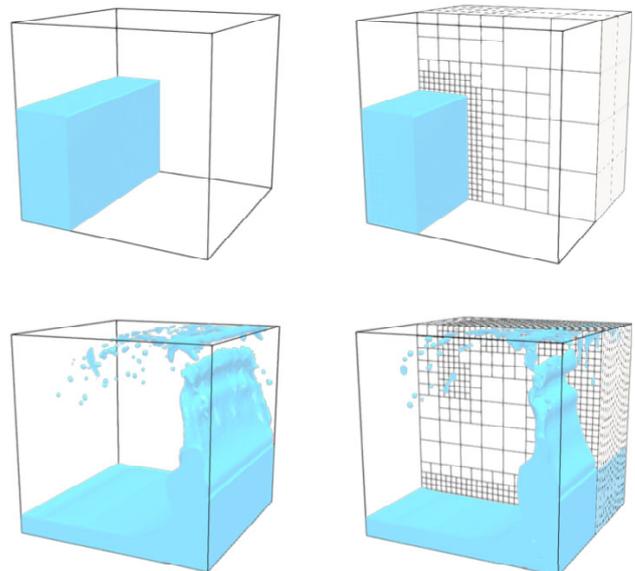
2 次元ダム崩壊計算では、水柱高さ H と床面に置ける水の到達距離 Z が非圧縮性ソルバーの結果および実験結果と良好な一致を得た。表面張力を含む問題として 3 次元気泡上昇問題に対し AMR を適用した GPU コードで解き、特性線に基づく解法および非圧縮性ソルバーの参照結果の気泡形状の特徴をよく捉える結果を得た。表 1 に示す規格化された気泡上昇速度に対応する気泡レイノルズ数も、非圧縮性の結果および実験結果と良好に一致しており、新しい手法と AMR 法を組み合わせたソルバーが非圧縮性領域の気液二相流を十分な精度で計算可能であることを確認した。

表 1 3 次元気泡上昇問題の気泡レイノルズ数

	Grace 実験	Annaland 実験	特性線 本研究	等温過程 本研究
Spherical	1.7	1.6	1.5	1.59
Ellipsoidal	4.6	4.3	4.6	4.89
Skirted	20	18	17.5	20.39
Dimpled	1.5	1.7	1.8	1.76

5.11 3次元ダム崩壊計算によるAMR法と均一格子の比較

気泡上昇計算など比較的ゆるやかな(低レイノルズ数の)流れの計算では、AMR 法を適用した計算と均一格子を用いた場合とはよく一致する。激しい流れ(高レイノルズ数の)計算として 0.1m×0.1m×0.1m の計算領域におけるダム崩壊問題を解き、均一格子の結果と AMR 法を適用した結果を比較した。図 14 に示すように、両者の界面プロファイルはよく一致しており、界面に適合する AMR 法によって界面プロファイルを少ない格子点数でよく捉えられることが確かめられた。



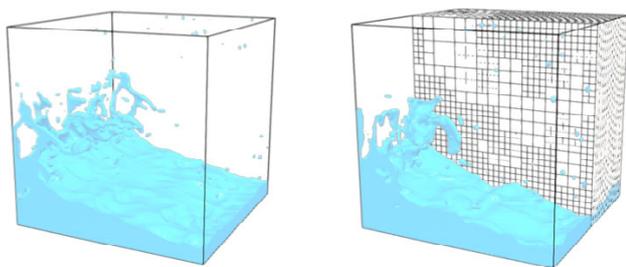


図 14 3次元ダム崩壊問題による AMR 法と均一格子の計算結果の比較($t = 0.0, 0.25, 0.50$ s)、左側：均一格子、右側：AMR 法を適用した結果

5.12 新しい手法を用いた液面で液膜を形成する気泡上昇計算

開発した新しい手法と AMR 法を組み合わせた GPU コードを用いて液面で液膜を形成する気泡上昇計算を試みた。最も細かい格子を均一で用いた場合 $1024 \times 1024 \times 1024$ 格子であり、初期気泡径に対して 307 格子相当の解像度である。気相は空気、液相には 20%グリセリン水溶液を用いており、計算領域は $0.01 \times 0.01 \times 0.02$ m である。気泡が液面に到達後に液膜が非常に薄くなり、粗い格子解像度では液膜を解像し

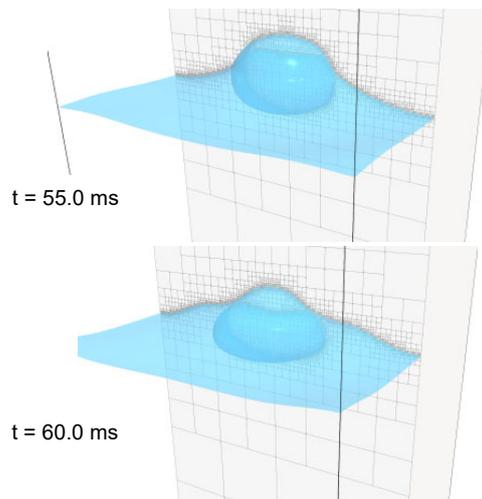
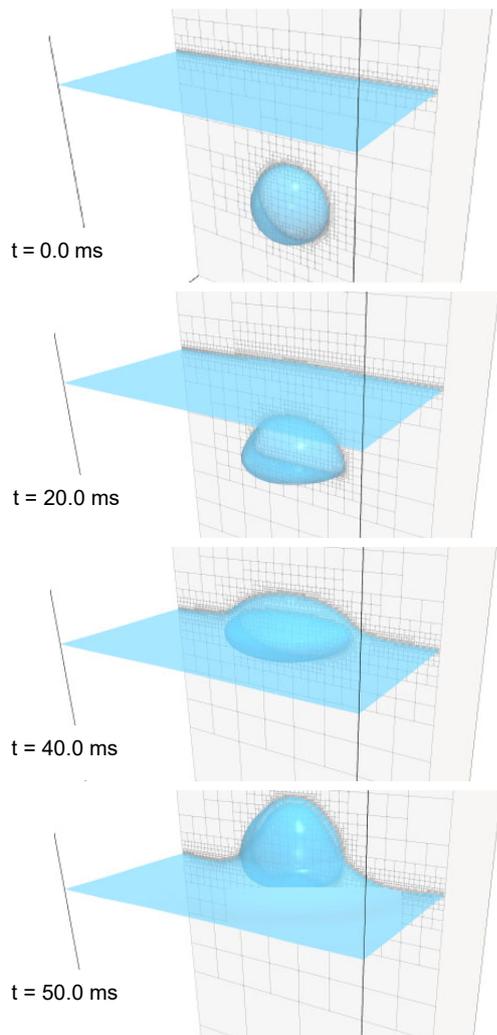


図 15 水面で液膜を形成する気泡上昇計算

きれずに即座に崩壊するが、図 15 のように高解像度を界面近傍に割り当てたことによって液膜の生存時間を向上させ、液面で気泡が跳ね返って下降していく様子を再現することができた。液膜の物理的な崩壊過程を議論するためには非常に多くの格子が必要であることが分かった。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

弱圧縮性解析手法に基づく完全陽解法による気液二相流解析手法を開発し、非圧縮性ソルバーの結果および実験値とよく一致する結果を得た。開発した特性線解法を用いた手法は非圧縮性領域の気液二相流へ十分適用可能であると言える。約 1.2 億格子によるダム崩壊計算を実行し、非常に激しい高解像度の気液二相流計算も安定して実行可能であることが確認された。

AMR 法による格子点数削減効果を界面移流計算で検証し、ベンチマーク問題の一種である Single Vortex 問題で時間平均 1/12.3 の格子点数削減、9.26 倍の計算時間短縮を達成した。AMR 法を流体計算側にも拡張し、AMR 法が特に有効である液膜を含む流れ計算として、シャボン玉膨張過程の計算を行い、薄い液膜の計算を少ない格子点数で実行できた。さらに表面張力によって液膜の破断の仕方に差があることも確認できた。物体を含む液膜計算の例として、スプーンに衝突する水の流れ計算を行い、薄い液膜形成過程を再現することができた。非常に激しい流れ計算においても本手法が適用可能であることが明らかになった。GPU 実装では、メモリの確保・開放もアプリケーション側で管理することで高速な計算が可能になった。最細格子が 1024^3 相当となる計算を実行し、高解像度計算が必要となる薄い液膜を含む流れ計算に成功している。

本研究で提案する弱圧縮性解析手法に基づく完全陽解法による気液二相流解析手法の内容をまとめた論文が、数値計算手法の分野のトップ・ジャーナルである J. Comput. Physics に掲載された。

2018 年度の後半では、さらなる大規模計算実現のために、弱圧縮性解析手法を特性線解法に基づく手法から等温過程の Navier-Stokes 方程式を解く手法へ改良を行なった。液相側の流速が非常に大きくなる問題に対して低マッハ数を保ちながら、以前より時間ステップを軽減させることができた。手法の変更を行なったため、再び検証問題を解き、非圧縮性ソルバーおよび実験値とよく一致する結果を得た。界面捕獲手法の計算コスト軽減のために保存形マルチ・モーメント法から有限体積法への変更を行い、界面に適合させる AMR を組み合わせた手法で界面移流ベンチマーク問題を解き、均一格子と同等の界面形状が得られた。計算安定性向上のためにノード・センター格子配置からスタッガード格子配置へ変更が必要となったため、AMR コードのコア部分の書き直しを行った。

今後の予定は、開発された GPU による AMR コードを複数 GPU に対応させる。空間充填曲線に基づいた領域分割法を導入し、AMR 法を適用して初めて可能になる液膜の大規模シミュレーションの実行を目指す。また、FENE-CR モデルによる粘弾性効果も考慮に入れることで、液膜の安定性・破れ方などを明らかにする。密度重み付けされた移流項評価により、界面近傍における運動量評価が改善され、問題の適用範囲が広がったため、気体が液体を駆動する風波や燃料電池内の排水計算等の工学的に興味深い応用計算に本ソルバーの適用を検討する。

GPU 実装による計算の高速化については、GPU の Shared メモリを用いた Temporal Blocking を試している途中で、まだ劇的な高速化は得られていない。デバイスメモリへのアクセスを低減させると共に、スケールアップ向上を図る。

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

- [1-1] Shintaro Matsushita, Takayuki Aoki: A weakly compressible scheme with a diffuse-interface method for low Mach number two-phase flows, *J. Comput. Phys.*, 376(6), pp.838–862, 2019
- [1-2] 松下真太郎, 青木尊之: 木構造に基づいた AMR 法を用いた流束項付きフェーズフィールド方程式のマルチ・モーメント法による解法, *日本計算工学会論文集*, Vol.2018, 2018 年 3 月 27 日
- [1-3] 松下真太郎, 青木尊之: 界面に適合する AMR 法を用いた気液二相流の数値シミュレーション, *混相流*, Vol. 33, No. 1, 2019 年

(3) 国際会議発表

- [3-1] S.Matsushita, T.Aoki: A Two-Phase Flow Simulation Using a Full-Explicit Scheme with Interface-Adapted AMR Method, *Parallel CFD 2018*, Indianapolis, USA, May 15, 2018
- [3-2] S.Matsushita, T.Aoki, Un-Hong Wong: A full-

explicit two-phase flow simulation with interface-adapted AMR method, *ECCOMAS Congress 2018*, Glasgow, UK, Jun 16, 2018

- [3-3] S.Matsushita, T.Aoki: A Fully-explicit Two-phase Flow Simulation Based on Weakly Compressible Assumption with Interface-adapted AMR method, *The 2nd International Conference on Mechanics (ICM 2018)*, jointing conferences of the 12th Asian Computational Fluid Dynamics Conference (ACFD), the 25th National Computational Fluid Dynamics Conference (NCFD) and the 4th Association of Computational Mechanics Taiwan Conference (ACMT), Yilan City, Taiwan, Oct. 17, 2018

(4) 国内会議発表

- [4-1] 松下真太郎, 青木尊之: 界面に適合する AMR 法と弱圧縮性近似に基づく完全陽解法を組み合わせた気液二相流の三次元計算, 第 23 回計算工学講演会, 名古屋, 2018 年 6 月 6 日
- [4-2] 杉原健太, 外丸慎之介, 青木尊之: 回転翼に適合する AMR 重合格子を用いた垂直軸型風車周り流れの GPU 計算, 第 23 回計算工学講演会, 名古屋, 2018 年 6 月 6 日
- [4-3] 松下真太郎, 青木尊之: 界面に適合する AMR 法を用いた液膜の形成と崩壊の数値シミュレーション, *混相流シンポジウム 2018*, 仙台, 2018 年 8 月 9 日
- [4-4] 松下真太郎, 青木尊之: 界面に適合する AMR 法と完全陽解法を用いた液膜形成と崩壊の GPU 計算, 第 32 回数値流体力学シンポジウム, 東京, 2018 年 12 月 13 日

(5) その他 (特許、プレス発表、著書等)

- [5-1] 松下真太郎, 青木尊之: ベストペーパーアワード, 第 23 回計算工学講演会, 名古屋, 2018 年 6 月 6 日
- [5-2] Takayuki Aoki, Shintaro Matsushita, Seiya Watanabe: Explicit CFD solvers for free-surface flows and gas-liquid two-phase flows, *Taiwan-Japan Workshop on Mechanical and Aerospace Engineering*, Taiwan, National Chiao Tung University, Oct 6, 2018
- [5-3] 青木尊之, 松下真太郎: 陽解法による非圧縮性気液二相流の大規模シミュレーション, *特集記事 (解説記事)*, *混相流*, Vol. 32, No. 4, 2018 年
- [5-4] 松下真太郎, 青木尊之: 弱圧縮性流体解析手法に基づく完全陽解法による気液二相流の GPU 計算, *口絵写真*, *混相流*, Vol. 32, No. 4, 2018.
- [5-5] Shintaro Matsushita, Takayuki Aoki, A Full-explicit Two-phase Flow Simulation Based on Weakly Compressible Assumption with Interface-Adapted AMR Method, *Taiwan-Japan CFD workshop*, National Tsing Hua University, Hsinchu, March 8, 2019.