

jh190054-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 - 液膜・泡沫への適用 -

青木 尊之 (東京工業大学)

### 概要

水と空気が混合する気液二相流において様々な液膜が形成されるが、大きいものは 10cm 以上にもなり、厚さは  $\mu\text{m}$  オーダーと非常に薄いのが特徴的である。液膜のダイナミクスの数値解析には、気液界面の近傍に高解像度計算格子を動的に割り当てる適合格子細分化 AMR (Adaptive Mesh Refinement) 法の導入が必須と言える。日常的に良く目にするように、不純物を含んだ溶液では水面に浮いた気泡の上面を囲む液膜は安定な場合が多く、界面活性剤や溶液の粘弾性的性質が液膜の安定化に寄与していると考えられる。FENE-CR モデルに基づいた粘弾性を考慮した非ニュートン性の気液二相流計算を行ったが、計算した範囲のパラメータでは粘弾性が液膜の安定化に余り寄与しなかった。一方、非イオン性の界面活性剤の濃度を輸送方程式で解き気液界面における表面張力分布を考慮した結果は、界面活性剤濃度が十分高ければ、濃度差マランゴニ効果が重力による薄膜化に抗して、液膜を安定化する結果を得た。さらに、多数の気泡が上昇することにより泡沫が形成される過程に対し、マルチ・フェーズフィールド法を導入することで比較的低解像度でも計算できることを見出した。

### 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

#### (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

#### (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 (日本原子力研究開発機構): 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

渡辺 勢也 (九州大学): GPU カーネルのチューニング

長谷川 雄太 (日本原子力研究開発機構): 階層的メモリ管理の実装

松下 真太郎 (東工大): 弱圧縮性流体計算手法の改良、音速低減と AMR 実装

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  
他、9 名

### 2. 研究の目的と意義

流体力学において、気液二相流は多くの未解決の問題を含む分野として認識されている。特に水と空気が激しく入り混じる高レイノルズ数の気液二相流では界面が大きく変形するため、その数値解析は気液界面近傍を高い解像度で計算する必要がある。しかし、現状の数値解析は同じ物理条件において計算格子を細かくすると新たな水滴や気泡が発生し、数値計算の解の収束性が十分に満たされていない。

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、係数行列の非ゼロ要素に密度が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、この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 億格子点以上の高解像度気液二相流解析は非常に困難である。そこで、全く新し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がどうし

も必要であり、それを従来は解析が困難とされてきた気液二相流の問題に適用して実証することが望まれる。

液膜や泡沫は気液二相流解析の中で最も解析が困難な課題である。本研究における液膜は壁を伝わる液体の膜ではなく、表面が全て気体と接する液体自由膜のことを指しており、以下では液体自由膜を液膜と呼ぶことにする。Navier-Stokes 方程式に基づいた液膜・泡沫の数値シミュレーションはこれまで誰も達成できていなく、昨年度に開発した数値計算手法を用いて大規模な液膜・泡沫の数値シミュレーションを実現することにより、数値流体力学の新たな展開の道を切り開くことを目的とする。

これまで小規模な液膜形成のシミュレーションを行ってきたが、液膜が非常に早く破れてしまう結果になった。そこで AMR 法により界面近傍により高い格子解像度の設定、表面張力計算手法の抜本的な改善、非ニュートン性の粘弾性流体モデルの導入、界面活性剤の輸送を考慮した液膜・泡沫のシミュレーションを行う。流体の表面張力、粘性、非ニュートン性の物性値と、流速や流体の供給などの流れ場の条件によって液膜の生成や広がりが大きく異なり、どのようなメカニズムで準安定な液膜が形成され、どのような条件で不安定になり破れるのかを理解する。さらに、水面に浮かんだ単一の気泡ではなく、泡沫の生成・消滅の過程を伴いながら全体としてどのような流動特性を持つのかと言った流体力学的課題の解明に向けたマクロなスケールでの液膜や泡沫の生成・消滅の大規模数値シミュレーションを行うことを 2019 年度の研究目的とする。

### 3. 当拠点公募型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た。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た。

### 4. 前年度までに得られた研究成果の概要

昨年度は、時間積分を半陰解法から完全陽解法への変更 (ポアソン方程式を解かずに) を行い、細分化格子を気液界面に適合 (AMR 法) することにより大幅な格子点の削減 (1/100 以下) 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を開発した。

GPU は単体プロセッサとして演算性能が高く、HBM2 などの高帯域メモリが使えるため、流体計算には非常に適している。一方で CUDA プログラミングによるコード開発において、動的なメモリ確保・解放に対して API を用いると非常に効率が低下し、AMR コードの GPU 実装は非現実的となってしまう。そこで、アプリケーション内でメモリプールを用意し、アプリケーション側でリーフのメモリ管理を行い、リーフの細分化と粗大化に対して API による動的なメモリ確保・解放を行わず、メモリプール内でのポインタの移動を行った。その結果、メモリプールのデ・フラグメンテーションまでアプリケーションで行うことになるが、リーフの細分化と粗大化のオーバーヘッドがほぼ無くなり、メモリプールの再確保などの頻度を非常に低く抑えることができ、実行性能に殆ど影響しない実装を行うことができた。

### 5. 今年度の研究成果の詳細

#### 5.1 AMR 法による無重力下の液膜計算

昨年度に開発した AMR 法による弱圧縮性気液二相流シミュレーションを GPU 実装したコードを無重力下の液膜現象に適用し、表面張力が液膜崩壊に与える影響を調べた。初期の直径  $D = 8 \text{ mm}$ 、液膜厚さ  $2 \text{ mm}$  の半球状の界面を設定した 3 次元シャボン玉形成シミュレーションを実施した。流入境界は空間的にポアズイユ流れ、時間的に  $t = 0.01$  秒まで  $0 \text{ m/s}$  から  $0.25 \text{ m/s}$  に加速さ

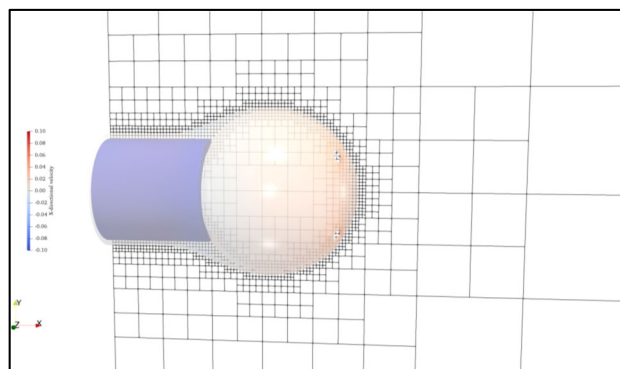


図1 シャボン玉の3次元シミュレーション

せている。最も細かい格子幅が 0.07825 mm となる計算(図 1)を実行し、均一格子の場合には 4096×2048×2048 格子相当となるが、それでも解像度不足のため数値計算が原因で液膜が長時間維持できないことが明らかになった。

2 次元 AMR コードによる高解像度化を行い必要な格子解像度を調べた。最小格子幅 0.0390 mm では途中で液膜が破断したが、最小格子幅 0.0195 mm を用いた計算 (均一の場合に 8192<sup>2</sup> 格子相当)

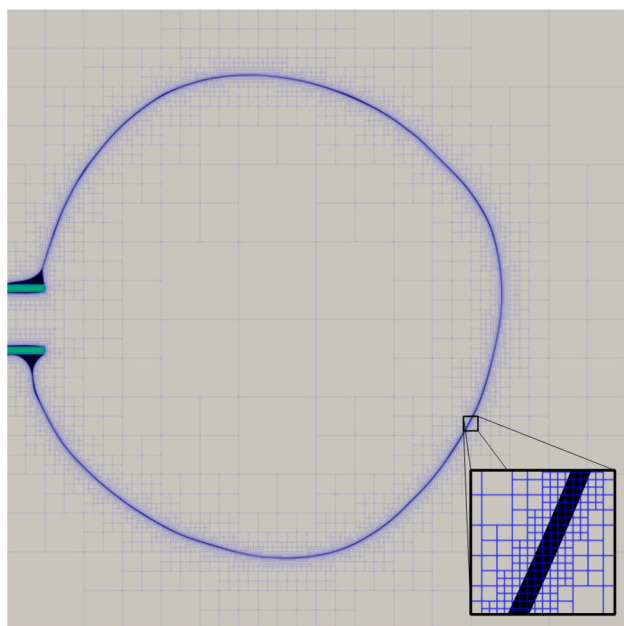


図 2 シャボン玉の 2 次元シミュレーション

では  $t = 5.0 \text{ sec}$  まで計算し、図 2 のように直径 12.5cm (液膜は 117 $\mu\text{m}$ ) までシャボン玉を膨らませることができた。 $t = 5.0 \text{ sec}$  で崩壊した訳ではなく、十分な格子解像度があればさらに薄い液膜を含む流れの計算ができることが明らかになった。

## 5. 2 表面張力 (曲率) 計算法の改良

CSF(Continuous Surface Force)モデルでは、密度スケールされた Heaviside 関数もしくは Phase field 変数  $\phi$  の勾配と、レベルセット関数  $\psi$  から計算される曲率が用いられるが、薄い液膜ではレベルセット関数の谷に当たる部分が界面近くに存在するため曲率計算の精度が著しく低下し、非物理的な液膜崩壊の一因となる (図 3)。そこで  $\psi$  の符号付き距離関数としての性質を評価する指標関数  $Q$  を以下のように導入する。

$$Q(x) = |1 - |\nabla\psi(x)||$$

$Q$ がある基準値 (例えば 0.05) より大きい場合、隣接点のうち最も  $Q$  が小さくなる点の曲率を採用す

ることで、図 4 のように表面張力計算に大きな誤差が入ることを防ぎ、数値的な液膜崩壊の一因を排除することができた。

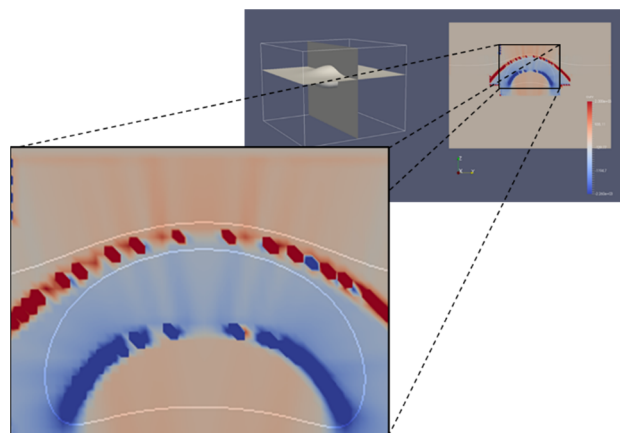


図 3 液膜内部の大きな曲率誤差

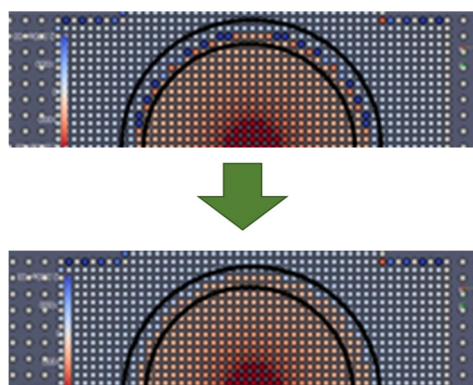


図 4 曲率計算の改良. 改良前の曲率 (左) と改良後の曲率 (右).

## 5. 3 FENE-CR モデルによる粘弾性流体解析

FENE-CR モデルに基づいた粘弾性流体モデルを導入し、2 次元気泡上昇に対してベンチマークテストをよく再現する結果を得た。さらに 3 次元 AMR コードへの拡張と GPU 実装を完了させ、検証問題として、粘弾性液滴が床へ衝突する問題を計算した。Figueiredo et.al (2014) の結果をよく再現する結果を得た (図 5 および図 6)。FENE-CR モデルを二相流計算に適用する場合、分散相側で 1、気相側で 0 を持つ指標関数を用いて粘性応力項が分散相側のみで有効となるように処理してきたが、激しい流動を含むような流れでは気相側の粘弾性応力テンソルが非常に大きくなり計算が不安定になる。そこで、FENE-CR モデルの時間発展方程式を分散相側のみで解き、気相側に外挿することで計算の安定性を向上させ、複雑なトポロジー変化

を含む流れへの適用性を向上させた。

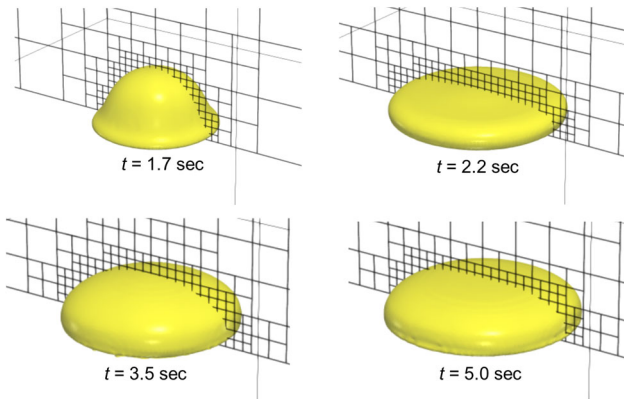


図 5 粘弾性液滴の床への衝突

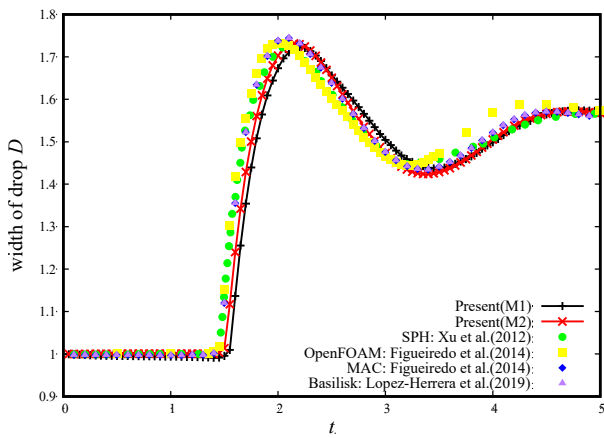


図 6 床面における液滴直径の時刻変化

#### 5.4 粘弾性流体中を上昇して液膜を形成する気泡上昇

粘弾性モデルを導入した非ニュートン性流体中の気泡上昇計算は、条件によっては気泡が気液界面に到達して生成された液膜の崩壊が、ニュートン性流体よりも遅れる結果が得られ、粘弾性効果が液膜安定化に寄与する場合があることを確かめた (図 7)。しかし、年度の後半に種々の計算条件を用いて計算を行っていくうちに、初期気泡の位置や粘弾性パラメータによって粘弾性流体中に生じる液膜は、ニュートン性流体中の液膜より早く

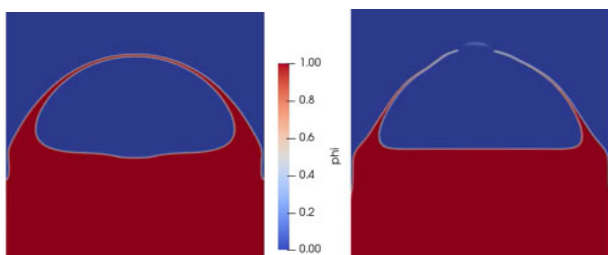


図 7 水面に到達した気泡が形成する液膜。  
(左) 粘弾性流体, (右) ニュートン流体

崩壊する場合もあり、粘弾性的性質が一概に液膜安定化に寄与しているとは言えないことが分かった。流体の粘弾性的性質自体が液膜安定化に与える影響を調べるために、緩和時間と代表時間の比であるデボラ数  $De$  と FENE モデルで非線形バネとしてモデル化される高分子鎖の最大バネ長さと平衡バネ長さの比を表すパラメータ  $L$  を変化させ、各パラメータが液膜安定化に与える影響を調べた。 $De$  が大きいとき流体は弾性的性質がより支配的となり、 $L$  が小さい時は微小な変化に対して大きな復元力が働く。計算領域  $0.02 \times 0.04$  m 中に直径  $d = 8.0$  mm の気泡の中心座標を  $(0.01, 0.01)$  m となるように配置し、 $y = 0.02$  m に設定した水面に向かって気泡が上昇する設定で計算を行った。実際の重力の元で、水と空気の物性値を用いた。 $L = 10$  と固定し、 $De$  数を変化させて安定性を調べた。図 8 に示す通り、 $De = 10$  の場合は、 $De = 5$  と比較

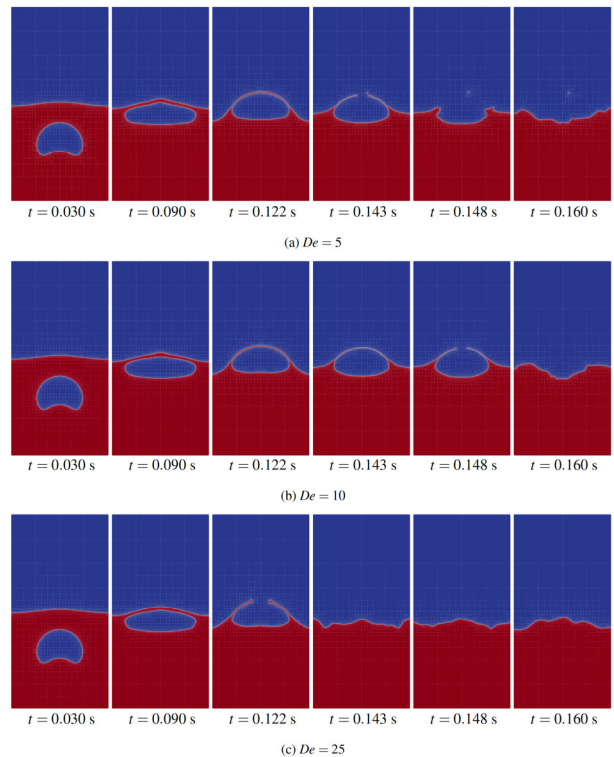


図 8  $De$  数が液膜安定化に与える影響

して若干液膜崩壊が遅れているが、 $De = 25$  の場合は逆に液膜崩壊が早まっている。この理由は、液体中の流動も粘弾性効果によって抑制され液膜自体の変形が収まり、重力がより早い段階で支配的になった結果、薄膜化が早く進んだためと考えられる。次に  $De = 5$  と固定し、 $L$  を変化させて安定性を検証した。図 9 に示すように、 $L = 2$  の方が  $L = 5$  より液膜崩壊がわずかに遅くなる結果が得られた。以上から、液膜崩壊の原因が気泡の大変形ではなく重力による薄膜化の場合、FENE-CR モデル

で表現できる粘弾性効果のみでは液膜が十分に安定化しないという結果になった。変形に対する抑制効果があることを確認できたため、表面張力の影響が小さい系で気泡の大変形が液膜崩壊の要因となるような場合には、粘弾性が崩壊を抑制できる可能性がある。また、パラメータ  $L$  を小さくすることによって液膜崩壊時に復元力が強く働き、液膜崩壊を若干遅らせる効果を持つことも分かった。

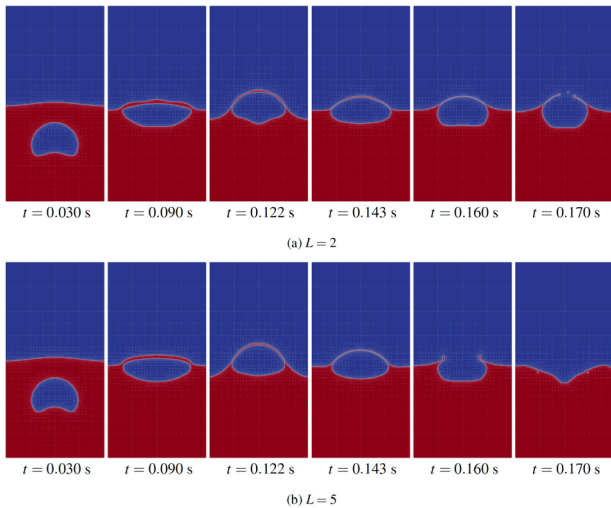


図9  $L$ が液膜安定化に与える影響

### 5.5 吸着・脱離特性を考慮した界面活性剤輸送方程式と濃度差マランゴニ効果の導入

重力下で形成された液膜は、重力によって薄膜化が進行しいずれ崩壊する。実際に見られるような長時間の液膜安定維持を数値計算上で再現するためには、重力による薄膜化に対抗しうる逆向きの力が働いている。洗剤などの界面活性剤が添加されると起泡が促進され気泡を覆う液膜が長時間維持される。界面活性剤の濃度に応じた表面張力の低下効果および界面上の法線方向での表面張力勾配に応じたマランゴニ効果による液膜の安定化を調べた。

界面活性剤は、水に溶けた際のイオン化に応じてイオン性と非イオン性に大別できる。極性を持つイオン性界面活性剤は、吸着表面と界面活性剤のイオンの符号に応じて挙動が複雑となる。非イオン性界面活性剤は親水性部分がイオン化しないため、電解質の影響を受けにくい特性を持ち、その使いやすさから近年よく利用されている。極性を持たない非イオン性界面活性剤の界面活性剤による表面張力係数の変化は Langmuir モデルでよく記述できることが実験においても示されているため、本研究では非イオン性活性剤を扱う。溶液中

の界面活性剤濃度  $F$  と界面上における界面活性剤濃度  $f$  の輸送方程式は、移流・拡散および吸着・脱離効果をモデル化した以下の式を解く。

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla F = D_F \nabla^2 F + j \delta(\psi)$$

$$\frac{Df}{Dt} - \mathbf{u} \cdot \nabla_s f (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) (\nabla_s \mathbf{n}) = -\nabla_s \cdot (f \mathbf{u}) + D_f \nabla_s^2 f + j$$

ここで  $D_F, D_f$  は拡散係数、 $\nabla_s = (\mathbf{I} - \mathbf{n} \otimes \mathbf{n}) \nabla$ 、 $\mathbf{n}$  は界面の法線ベクトルである。 $\delta(\psi)$  は有限幅のデルタ関数であり、 $j$  は溶液中と界面上の濃度を吸着・脱離特性を考慮して橋渡しする項で、Langmuir モデルを用いて以下のように表せる。

$$j = k_{ad} F (f_{lim} - f) - k_{def} f$$

ここで、 $k_{ad}$  は吸着速度係数、 $f_{lim}$  は飽和濃度、 $k_{de}$  は脱離速度係数である。本研究では気液界面は拡散界面として陰的に表されているため、界面上の濃度方程式を陽に解くことはできない。そこで、 $\mathbf{n} \cdot \nabla f = 0$  となるような分布を界面近傍に生成する。溶液中の濃度  $F$  は気相側からの影響を受けないように、液相側の値を気相側に外挿する。活性剤濃度による表面張力係数の変化は以下の Langmuir の状態方程式で表す。

$$\sigma(f) = \sigma_0 \left[ 1 + \frac{RT f_{lim}}{\sigma_0} \ln \left( 1 - \frac{f}{f_{lim}} \right) \right]$$

上式をそのまま用いると濃度が飽和濃度に近づいた際に計算が不安定になるので、 $f = \min(f, 0.95f)$  などと上限を設けて表面張力係数を計算する。マランゴニ効果は

$$F_{marangoni} = \nabla_s \sigma(f) \delta(\psi)$$

から計算することで流体計算に反映させる。

### 5.6 界面活性剤溶液中を上昇する気泡の抗力計算

界面活性剤を付与した液相中を上昇する単一気泡を計算し、実験および数値計算の結果と比較する。1-ペンタノール水溶液中を上昇する気泡の直径を  $d = 0.35, 0.45, 0.75$  mm と変化させ、上昇速度から抗力係数を算出した。液相および気相はそれぞれ水と空気の値を用い、1-ペンタノールを  $0.69 \text{ mol/m}^3$  混入させた水溶液中を気泡が上昇する計算で得られた抗力係数を図 10 にプロットした。既往研究の実験および解適合格子を用いた数値計算の結果とよく一致しており、界面活性剤の吸着脱離を考慮した気液二相

流計算の妥当性を検証することができた。

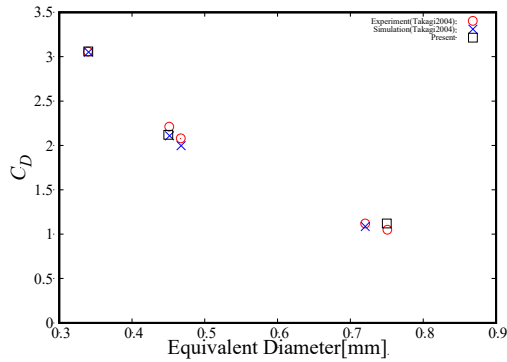


図 10 1-ペンタノール水溶液中を上昇する気泡の抗力係数

### 5.7 水面に到達して形成した液膜の界面活性剤による安定維持

5.4 節と同様の初期条件を用いて界面活性剤が液膜安定化に与える影響を調べた。非イオン性の界面活性剤として、Triton X-100 の物性値を用いた。初期のバルク中の界面活性剤濃度  $F_0$  を変更する

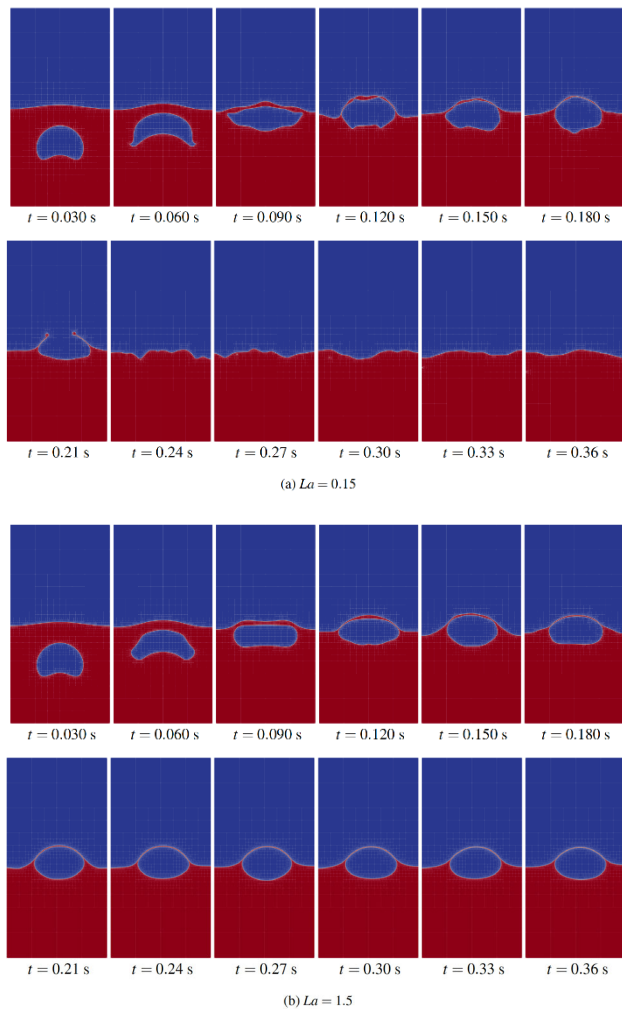


図 11 Triton X-100 水溶液中を上昇する気泡によって形成される液膜計算

ことで吸着のしやすさを表す無次元数であるラングミュア数  $La = F_0 k_{ad} / k_{de}$  の液膜安定化に与える影響を調べた。 $La = 0.15, 1.5$  の結果を図 11 に示す。重力による流動で界面活性剤濃度が輸送され、界面上の界面活性剤濃度が飽和濃度に近い分布を持つとき、 $La$  数が高いと、界面上の界面活性剤濃度勾配から生じる表面張力係数の勾配が大きくなり、結果として図 12 のように強いマランゴニ効果が働くことによって液膜が安定化する結果が得られた。

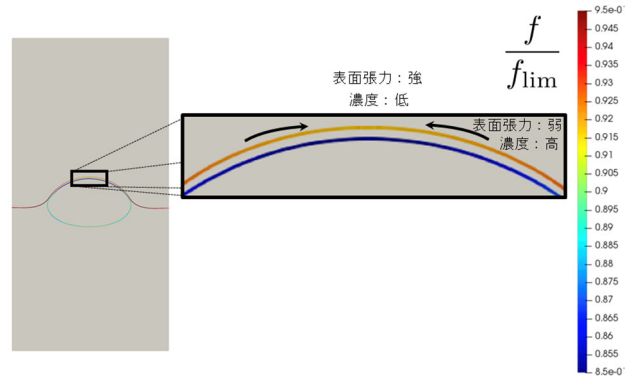


図 12 重力による薄膜化と逆向きのマランゴニ効果による力

### 5.8 攪拌による気泡生成シミュレーション

液体中に混入した気体は液体の流動や表面張力により合体・分裂を起こし、最終的に単独の気泡となることが多い。重力下で気泡は上昇し、5.4 節から 5.7 節に示したように水面に到達し、上面は液膜となる。液膜が安定であれば後続の気泡が追いつき、気泡間の液体は次第に排除され液膜となり、長時間液膜が保持され泡沫が形成される。

液体中に気体を混入させるには様々な方法があるが、実験でも再現しやすい方法として静止した水面近傍に平板を設置し、回転（攪拌）させることにより気体を液体中に混入させた。回転する板に対しては、Immersed Boundary 法を導入し、移動境界問題として計算している。図 13 を見ると、回転が進むにつれて混入する気泡の数は増えるが、水面に到達した気泡はすぐに崩壊してしまう。また水中の気泡どうしても接近すると数値的に合体してしまい、泡沫形成へと至らない。数値計算の解像度や界面活性剤の輸送計算モデルの不完全さの要因が大きいが、このままのアプローチで数 100～数 1000 個以上の気泡からなる 3 次元の泡沫シミュレーションを行うことはかなり困難であると言える。

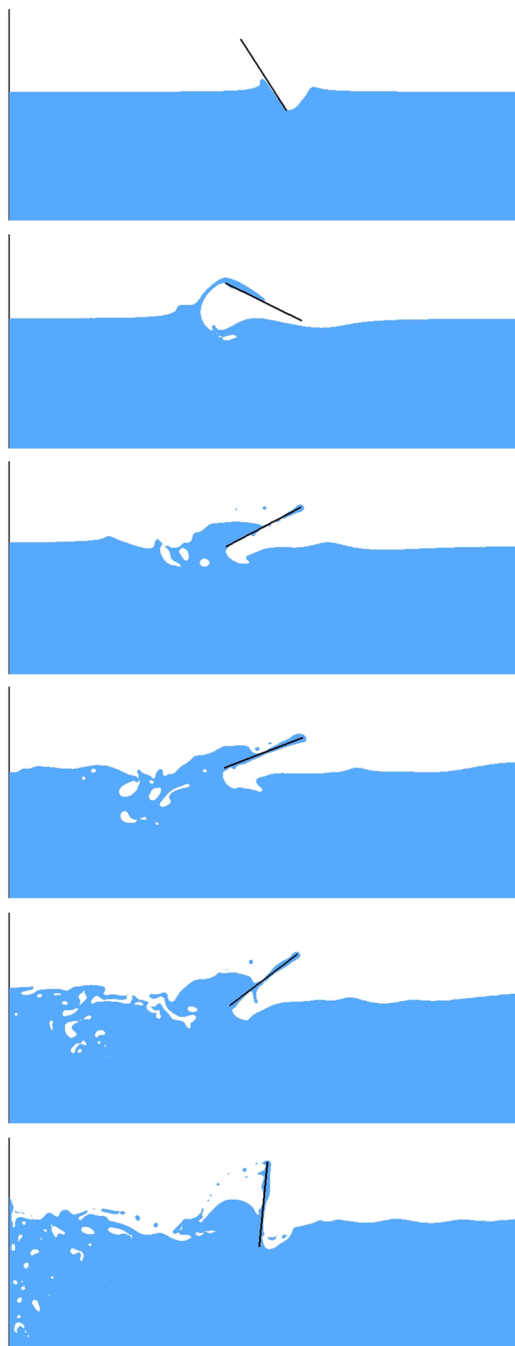


図 13 平板の回転による液体中への気体の混入

### 5.9 マルチ・フェーズフィールド法による泡沫シミュレーション

泡沫は多数の気泡が厚さの薄い液膜で仕切られていて、Navier-Stokes 方程式に基づいた数値計算はその困難さからこれまで皆無であると言ってよい。液体中の不純物は界面活性作用を持つことが多く、泡沫がかなり長時間安定な場合が多いため日常的にもしばしば目にする。泡沫中の液体の体積分率は非常に低く、気体部分の流動性はかなり低いいため、数値計算を行うには高解像度格子を液膜近傍に集める AMR が必須と言える。しかし、それでも 5.8 節で示した通り、気液界面を表現す

るフェーズフィールド変数が単一（液膜の両側の気相が同一変数）の場合、液膜に対して十分な格子解像度が無いと、液膜が数値的に破断（断裂）し気泡が崩壊してしまう。

液膜の内部の流動まで計算するために、材料分野の多結晶粒成長の計算で用いられるマルチ・フェーズフィールド法を導入し、少ない格子で液膜のダイナミクスの 2 次元計算を試みた。これまで単一のフェーズフィールド変数により気相と液相を識別していたのに対し、トポロジー的に分離している気体（気泡）に対して、それぞれ異なるフェーズフィールド変数を用いる。液相はフェーズフィールド変数  $\phi_0$ 、気相に対しては  $\phi_1, \phi_2, \phi_3$  などと独立した気泡の数に合わせて複数のフェーズ

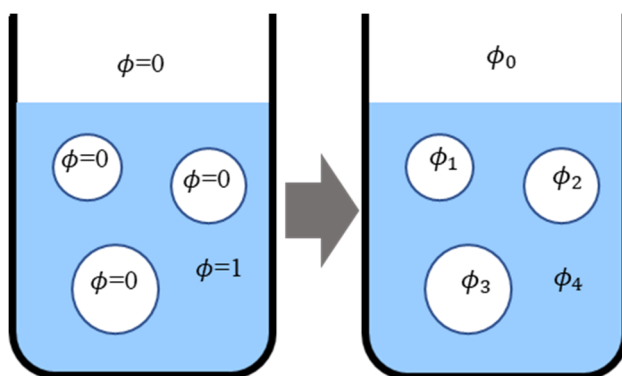


図 14 多数の気泡を含んだ気液二相流モデル。  
 (左) 単一フェーズフィールド法による識別  
 (右) マルチ・フェーズフィールド法による識別

フィールド変数を導入し、その数のフェーズフィールド方程式を解き、流体方程式と連結することにより複数気泡の挙動を計算する。ここでは、弱圧縮性気液二相流計算手法ではなく、二相系格子ボルツマン (LBM) 法にマルチ・フェーズフィールド法を導入し、検証を行った。

図 15 のように計算領域の上半分は気体、下半分に多数の気泡を含んだ液体を配置し、それを初

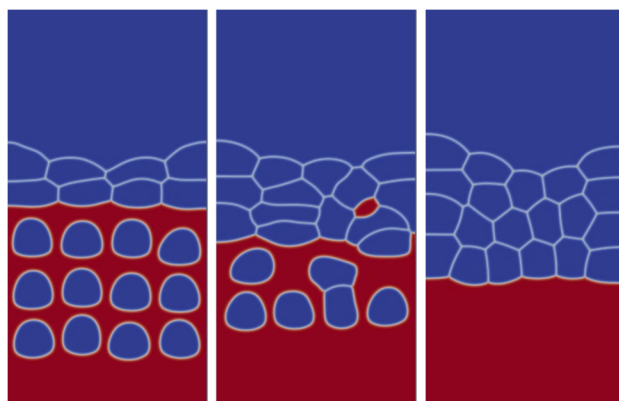


図 15 マルチ・フェーズフィールド法による泡沫形成シミュレーション

期条件として気泡が上昇し、上部が気体のみの層、中間に泡沫層、下部に液体のみの層ができることを確認する。NS-WC 計算と LBM の計算結果との比較を行い、準安定な状態になったとき、エネルギー最小化による安定なパターン形成がされているように見える。

## 6. 今年度の進捗状況と今後の展望

弱圧縮性流体計算手法により気液二相流を計算することが可能になり、気液界面の近傍に高解像度格子を動的に割当てて AMR 法を導入することができるようになった。これを液膜シミュレーションに適用し、単一気泡が形成する液膜については計算できるようになった。非ニュートン性流体として粘弾性の考慮、界面活性剤の輸送を考慮した計算などを行った。複数の気泡から構成される泡沫はかなり困難であることが分かり、新しい計算手法としてマルチ・フェーズフィールド法を導入する方法に期待が持てることが分かった。今年度の研究計画に対しては、全ての項目において十分な達成度と言える。

今後は、マルチ・フェーズフィールド法による泡沫シミュレーションを格子ボルツマン法の代わりに、弱圧縮性流体計算手法に導入し、さらに泡沫を仕切る液膜に AMR 法による高解像度格子を適合させ、大規模計算でスケールするシミュレーション・コードの GPU 実装を進める。

## 7. 研究業績一覧（発表予定も含む）

### (1) 学術論文

- [1-1] S.Matsushita, T.Aoki: Gas-liquid two-phase flows simulation based on weakly compressible scheme with Interface-adapted AMR method (J. Comput. Phys., submitted)
- [1-2] Yos Sitompul, Takayuki Aoki: A Filtered Cumulant Lattice Boltzmann Method for Violent Two-phase Flows, J. Comput. Phys, Vol 390, No.1, pp.93-120, 2019  
<https://doi.org/10.1016/j.jcp.2019.04.019>

### (3) 国際会議発表

- [3-1] S.Matsushita, T.Aoki: A Two-phase Flow Simulation based on Weakly Compressible Assumption with Interface-adapted AMR Method, The 7th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow, Tokyo, Japan, Sep. 6, 2019
- [3-2] Takayuki Aoki: Large-Scale Multiphase Flow Simulations with AMR using Dynamic Load Balance, SIAM Conference on Parallel Processing

for Scientific Computing (PP20), Seattle, US, 2020/2/15

- [3-3] Takayuki Aoki: Weakly Compressible Flow Computations for Incompressible Two phase flows and Fluid Structure Interactions, International Symposium on Novel Computational and Experimental Methods for Complicated Fluid Structure Interactions, 九州大学・応用力学研究所, 2020/1/20
- [3-4] Seiya Watanabe, Takayuki Aoki: Multi-GPU Computing of Free-surface Flows Using Adaptively Mesh-refined LBM, The 7th Asian-Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM 2019), Taipei, Taiwan, 2019/12/20

### (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 法と等温過程に基づく弱圧縮性解法による高解像度気液二相流計算, 第 24 回計算工学講演会, 大宮, 2019 年 5 月 30 日
- [4-2] 松下真太郎, 青木尊之: 界面に適合する AMR 法による液膜シミュレーション, 第 32 回計算力学講演会, 川越, 2019 年 9 月 16 日
- [4-3] 松下真太郎, 青木尊之: 界面に細分化格子を適合する気液二相流の AMR 計算, 日本機械学会・第 21 回複雑流体研究会, 京都, 2019 年 6 月 22 日
- [4-4] 菊田大輔, 青木尊之, 松下真太郎: 動的接触角を考慮した斜面を流れ落ちる液滴のシミュレーション, 日本流体力学会・第 33 回数値流体力学シンポジウム, 2019 年 11 月 29 日
- [4-5] Yos Sitompul, Takayuki Aoki, Tomohiro Takaki: A Study on Turbulent Bubbly Flows using Lattice Boltzmann Methods and Multi-phase Field Model, 日本流体力学会・第 33 回数値流体力学シンポジウム, 2019 年 11 月 29 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: グラフィックスアワード特別賞, 第 24 回計算工学講演会, 大宮, 2019 年 5 月 30 日
- [5-2] 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, 特集記事(注目研究 in CFD32), ながれ, Vol. 38, No. 2, 2019 年 4 月