

課題名 (タイトル) :

移動境界流れの数値シミュレーションに関する研究開発
 Research and Development for Moving Boundary Flows

利用者氏名 :

○杉山 和靖*
 渡村 友昭*
 岩坪 史弥*
 中 亮介*
 鍋島 清悟*
 小山 幹*
 菅尾 志信*
 樫田 凌汰*

理研での所属研究室名 :

*情報基盤センター 計算工学応用開発ユニット

1. 本課題の研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

移動境界流れの中でも混相流体は、スケールの多重性を内包し、挙動が複雑であることから、現象の本質を理解するには数値シミュレーションが有用である。シミュレーションの活用には、個別の現象を包括的に、正確に捉える計算手法が必要である。本課題では、移動境界をシャープに捕捉し、界面での境界条件を精度良く記述する手法の開発を進めている。また、気泡・壁面間の流体力学的相互作用や、気泡添加による壁面せん断応力の変化について調査を行っている。

2. 具体的な利用内容、計算方法

本研究での HOKUSAI の利用内容は、(i) 平板接近気泡の界面動力学と液膜排水に関する数値解析、(ii) 単一気泡を含む振動流における壁面せん断応力の変化である。

(i) では、固定された平板と、それに垂直に接近する単一気泡の間に形成される液膜、および、気液界面を計算対象とする。非圧縮性粘性流体の運動量輸送式、界面活性剤の移流拡散方程式、界面濃度の反応移流拡散方程式を直交曲線座標系格子上で、有限差分法で離散化する。

(ii) では、二相流のシミュレーションで、一方程式の定式にならない、気液の移動境界問題を扱う。

Volume-Of-Fluid (VOF) 法を用いて、気液界面を扱う。VOF 関数の移流には MTHINC 法を用いることで、界面をシャープに捕捉する。基礎式は有限差分法で離散化する。

3. 結果

(i) では、壁面への界面接近速度や活性剤の界面形状への影響を調べた。図 1 は、接近速度を固定した場合の、気液界面形状の時間発展を示す。初期において凸 (pimple) 形状であった気液界面が、壁面接近に伴い $t^* = 0.06$ 時点で、凹 (dimple) 形状に変化している様子を確認できる。その後 $t^* = 0.06$ から $t^* = 0.10$ までの間において、dimple 形状になった気液界面が表面張力により pimple 形状に回復する様子が見られる。

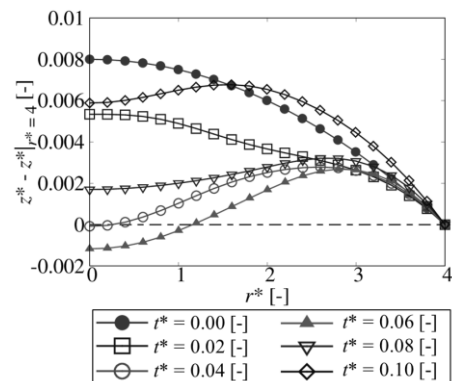


図 1 気液界面形状 (一定接近速度)

図 2 は、界面活性剤の有無に依る気液界面形状の差異を示す。接近速度が大きく界面活性剤濃度が添加さ

れた条件 (with surfactant) では気泡先端部分で気液界面が凹んだ dimple 形状になりやすい傾向が確認できる。なお界面活性剤の増加に伴い, dimple の深さは増加する。過去の実験で見られた傾向と定性的に一致し, マランゴニ応力による界面の形状変化を再現できる。

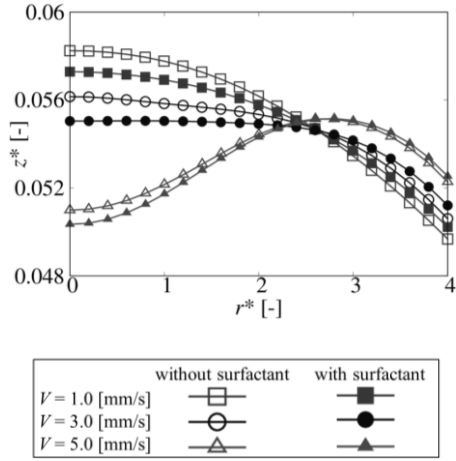


図 2 気液界面形状 (界面活性剤の影響)

界面活性剤添加による気泡-平板間の合体抑制効果を考察するために, マランゴニ数 Ma を変化させ, 壁面での反発力について調査した。図 3 に, 界面活性剤無添加の場合に対する壁面反発力増加率とマランゴニ数の関係を表す。図 3 より $Ma < O(10^5)$ ではべき乗指数 $n = 0.9$ に従って壁面反発力が増加する傾向が経験的に得られる。これにより界面活性剤の気液界面への吸着飽和濃度増加に伴う気泡-平板間の合体抑制効果の上昇が確認された。一方 $Ma > O(10^6)$ では, 壁面反発力がある一定値に収束する。このことから, 粘性力に対するマランゴニ応力増加によって, 気液界面はいずれの場所でも一様に no-slip 化していると考えられる。

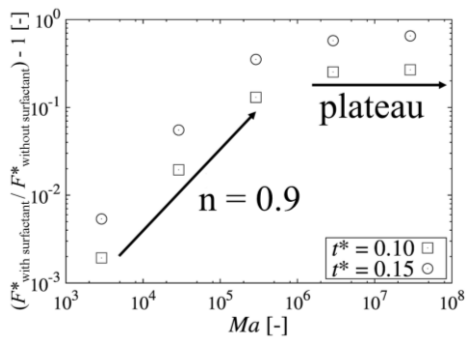


図 3 壁面反発力増加率とマランゴニ数

(ii)では, 単一の気泡を含む平行平板に駆動される振動クエット流れを対象とした数値計算を行った。計

算対象の概略を図 4 に示す。単相条件 (図 4(a)), 二相条件 (図 4(b))の計算を行い, 両者の比較により, せん断応力の変化を調査した。

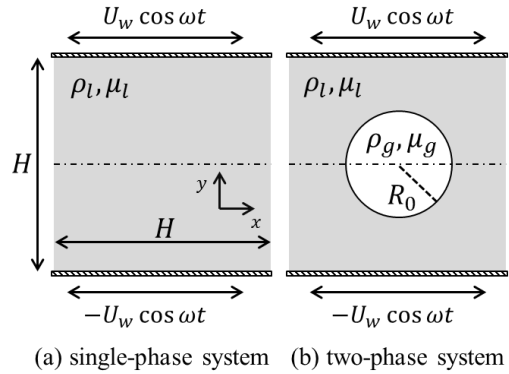


図 4 振動クエット流れの概略図

気泡添加による壁面せん断応力の変化量と振動数の関係を図 5 に示す。横軸は, 壁面の角振動数 ω をモード 2 の固有角振動数 ω_2 (ポテンシャル流れの理論解) で規格化した値である。 $\omega/\omega_2 < O(10^{-1})$ において, 気泡添加により, 壁面せん断応力が増加することがわかる。この振動数の領域では気泡の非定常的な変形が流動場に与える影響が弱く, 気泡の周囲の流れが攪乱し系全体の粘性散逸が増加し, 系全体の運動エネルギーの維持に必要な壁面せん断応力が増加する。 $O(10^0) < \omega/\omega_2$ においては, 気泡が存在しても壁面せん断応力の変化が極めて小さい。一方で, $O(10^{-1}) < \omega/\omega_2 < O(10^0)$ において, 気泡の存在によりせん断応力が低減し, $\omega/\omega_2 = 0.25$ において壁面せん断応力が極小値を示すことが分かる。この特徴的なせん断応力変化の傾向は, どのウェーバー数 We でも共通して現れ, ω/ω_2 で現象を整理できる。

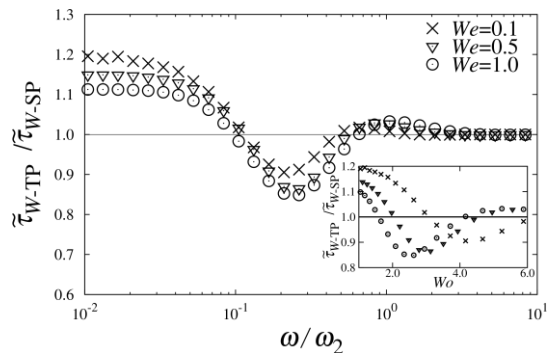


図 5 壁面せん断応力と角振動数

気泡添加により壁面せん断応力が低下する場合 ($\omega/\omega_2 = 0.25$) について, 気泡形状と粘性散逸の空間

分布を図 6 に示す．気泡の長軸方向と短軸方向の領域で粘性散逸が減少することがわかる．この条件では，気相の変位と気泡の変形が一致しているため，気泡の長軸方向と短軸方向の領域で速度勾配が減少し，局所的な粘性散逸が減少すると考えられる．その結果，実効的な粘性が減少し，壁面せん断応力の振幅が減少する．

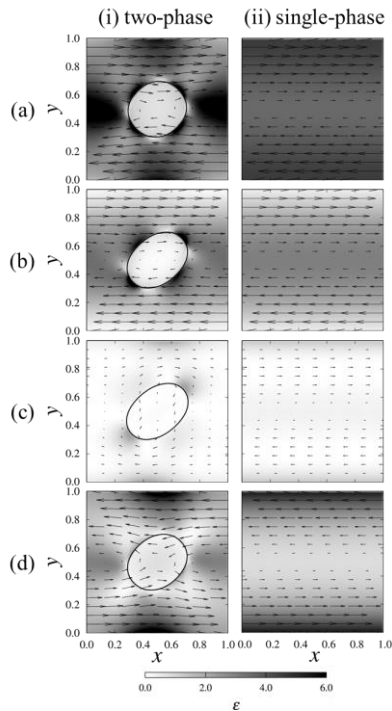


図 6 様々な瞬時ににおける気泡形状とエネルギー散逸率分布 ($\omega/\omega_2 = 0.25$)．

4. 今後の計画・展望

来年度も，空気潤滑法による摩擦抵抗低減の機構解明や，二相状態における熱移動の詳細解析を目指し，気液二相流の数値計算を実施していく予定である．

平成 29 年度 利用研究成果リスト

【論文、学会報告・雑誌などの論文発表】

小山 幹, 杉山 和靖, 渡村 友昭, 岩坪 史弥, 高木 周, 平板接近気泡の界面動力学と液膜排水に関する数値解析, 混相流, (2018.3) Vol. 32 (掲載予定) .

中 亮介, 杉山 和靖, 渡村 友昭, 単一気泡を含む振動流における壁面せん断応力の変形, 混相流シンポジウム 2017 講演論文集, (2017.8) A112.

菅尾 志信, 杉山 和靖, 渡村 友昭, T字型マイクロチャネルを用いた気泡生成における非定常・対流影響, 混相流シンポジウム 2017 講演論文集, (2017.8) F211.

Watamura, T., Sugiyama, K. and Hirayama, Y., On the topological effect of dispersed phase interface on modification of skin frictional drag, Proc. of the 9th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, (2017.10) TFEC9-1391.