

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\*  
木南 直之\*  
小林 憲司\*

理研における所属研究室名:

\*光量子工学研究センター 画像情報処理研究チーム

### 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

本研究では、移動境界流れとして、気液二相流や回転体駆動流れを対象として、数値シミュレーションにより現象の本質を理解することを目指している。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、(i) 界面での境界条件を精度良く記述する手法、(ii) 境界移動を伴う流体・剛体連成を実現する手法の開発を進めている。そして、気液界面間の流体力学的相互作用、回転体気液二相流の流動様式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) 接近気液界面と液膜排水、(iv) 回転円筒に駆動される気液二相流の流動様式を数値計算するものである。

(i) では、一方程式の定式にならない、正方/立方メッシュを用いて固気液の移動境界問題を扱う。Volume-Of-Fluid (VOF)法, Boundary Data Immersion (BDI)法を用いて、それぞれ、気・液、流体・剛体の界面を扱う。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。2次元コードには OpenMP によるスレッド並列化を、3次元コードに OpenMP と MPI 並列によるハイブリッド並列化を施している。

(ii)では、接近する気液界面間に形成される液膜の排出を計算対象とする。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離散化する。コンパイル時に自動並列オプションを付すことで、スレッド並列化したプログラムを実行している。

### 3. 結果

(i)では、マランゴニ効果が二気泡の合一抑制へ与える影響を調べた。解析領域と境界適合格子の概略を Fig. 1 に示す。境界面に対して一定速度  $V$  で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。計算対象は軸対称系とする。境界上面の速度に自由滑り条件を課し、上面境界において対称とすることで、二気泡が接近するモデルを考える。支配方程式は、非圧縮性の連続の式、Navier-Stokes 方程式、液相部ならびに界面上の界面活性剤濃度の輸送式である。気液界面は自由変形界面とし、界面法線方向のラプラス則、界面接線方向のマランゴニ応力とせん断応力の釣り合いから界面形状が決まる。境界適合格子を用いることで、界面と界面近傍との間における界面活性剤の吸着脱離過程、及び表面張力勾配に起因するマランゴニ効果を十分高い解像度で捉える。

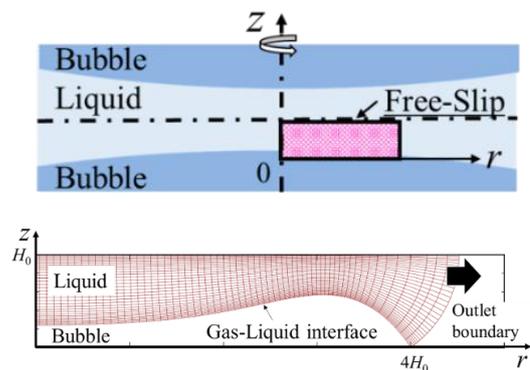


Fig. 1 解析領域と境界適合格子

Fig.2 に、レイノルズ数  $Re = 50$ 、無次元時刻  $t^* = 0.5$  における、界面活性剤の有無での比較を示す。Fig. 2(a) より、気泡界面は界面活性剤の有無に関わらず、慣性の影響により Dimple 形状を形成する。Fig. 2(b) より、バリアリム部における顕著な液膜の薄肉化は、界面活性剤の添加により抑制される。これは、界面の Dimple 化に伴い、Fig. 2(d) の

吸着濃度勾配が誘起されることで、バリアリム部において Fig. 2(e) のマランゴニ応力が液膜排水を抑制する向きに最も発達するためである。それに伴って、Fig. 2(c) に示すように、同箇所での局所的な圧力低下が抑制される。Dimple 形状を有した気泡の合一は、最小膜厚となるバリアリム部より発生する。これより、マランゴニ応力によるバリアリム部の変位抑制効果は、気泡の合一抑制に十分寄与することが示唆される。

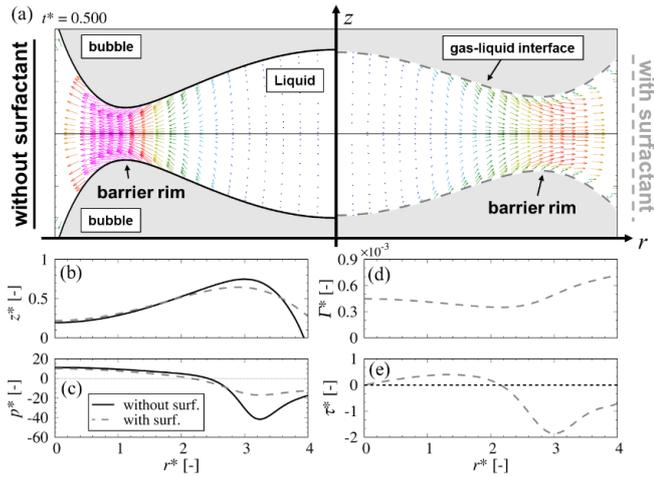


Fig. 2 界面活性剤の有無による種々の差異;(a) 気液界面および液膜内の流れ場の空間分布;(b) 界面形状;(c) 界面上での圧力分布;(d) 吸着濃度分布;(e) マランゴニ応力分布。

Fig.3 に界面形状について、界面活性剤無添加時と添加時のマランゴニ数  $Ma$  ごとに示す。図より、 $Ma$  の増加に従い、界面活性剤無添加時に対して液膜の薄肉化抑制効果は大きくなることから分かる。Fig.4 に、各時間におけるバリアリム部での液膜の薄肉化抑制率と  $Ma$  の関係を示す。ws は界面活性剤添加時、wos は無添加時を表す。図より、時間経過に伴い薄肉化抑制率は大きくなり、 $t^* = 0.5$  においては、高  $Ma$  で特に顕著な薄肉化の抑制効果を確認できる。

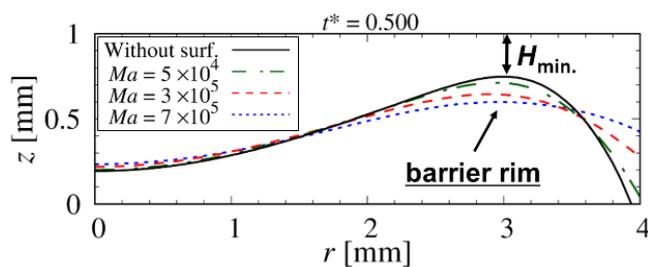


Fig. 3 各マランゴニ数  $Ma$  での界面形状

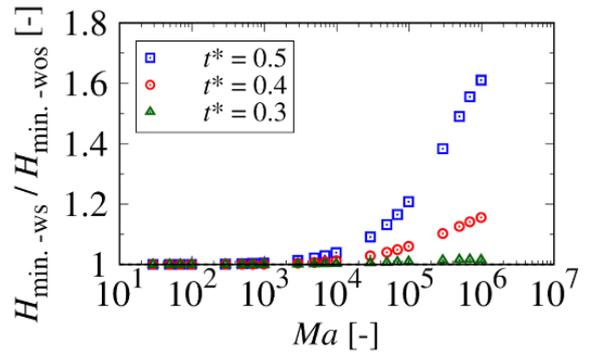


Fig. 4 バリアリム部での薄肉化抑制率とマランゴニ数  $Ma$  の関係

(ii)では、回転体に駆動される気液二相流のトルクを調べ、流動様式を分類した。Fig. 5 に解析領域と座標系を示す。計算領域は、静止壁と回転速度  $\Omega$  の回転体から構成されており、流体は回転体によって駆動される。計算格子として直交正方格子を用いる。流体は非圧縮性流体として扱い、各相に体積率  $\phi$  を定義し、気相体積率を移流させる Volume Of Fluid 法、剛体部分の運動を加味するため Boundary Data Immersion 法を適用する。流体部分の動力学は、連続の式と表面張力を考慮した運動方程式および気相体積率移流式に従う。速度場と圧力場は SMAC 法により更新する。トルク  $T$  は、全計算領域におけるエネルギー散逸率  $\varepsilon$  の体積積分と角速度から求める。回転体の形状効果を調査するために、三種類の回転体を用いた。

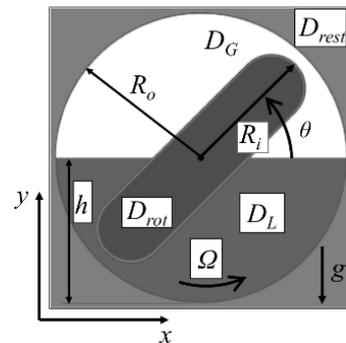


Fig. 5 解析領域と座標系

Fig. 6 に各回転体において、回転速度を変化させた場合の流動様式を示す。図より、回転速度に対する流動様式変化は、定性的に四つに分類される。低回転速度の場合、気液が上下二層に分離し、その境界面が滑らかな層状流となる。 $\Omega = 40$  rpm にすると、回転体が液相を持ち上げ、気泡が巻き込まれることで、液相中に多数の気泡が存在する気泡流となる。 $\Omega = 80$  rpm にすると、液滴が半径方向外側に飛散することで、気液界面が振動し、気体と液体が混合す

るフロス流となる.  $\Omega = 300$  rpm にすると, 液相が半径方向外側に張り付いた環状流となる.

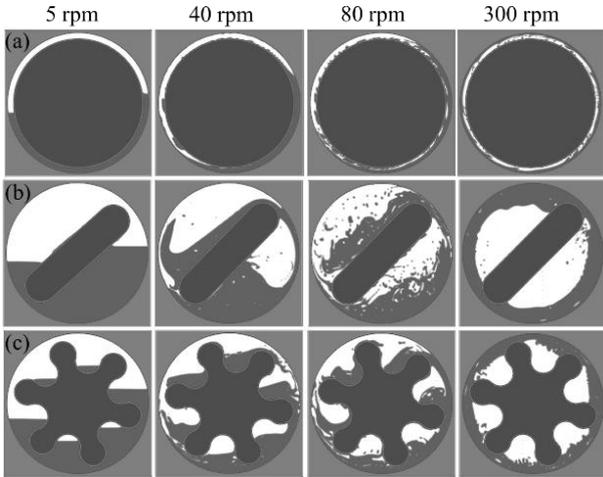


Fig. 6 回転速度を変化させた場合の流動様式 (a) disk, (b) board, (c) asterisk.

流動様式を非軸対称形にも適応した形式で統一的に分類するための定量的な指標として, 静止壁, 回転体に接触する液相割合  $F_{rest}$ ,  $F_{rot}$  を用いる. Fig. 7 に各回転体の, 回転速度に対する時間平均トルク  $T$  と時間平均液相割合  $F_{rest}$ ,  $F_{rot}$  を示す. 図より, 回転速度に対して, トルクは極大値を持つ右肩上がりの傾向を示す. 回転速度に対する  $F_{rest}$ ,  $F_{rot}$  の遷移は各回転体において同様の傾向を示す.  $F_{rest}$ ,  $F_{rot}$  の遷移から長板の流動様式を分類した結果を図の点線で示している. 流動様式は, (I) 層状流, (II) 気泡流, (III) フロス流, (IV) 環状流に対応する. また, 流動様式が遷移する回転速度は, 円盤と比較して, 圧力抵抗が働く長板, アスタリスク型の方が小さい. 液相割合  $F_{rest}$ ,  $F_{rot}$  を用いることで, 非軸対称形の場合にも流動様式を分類することができる.

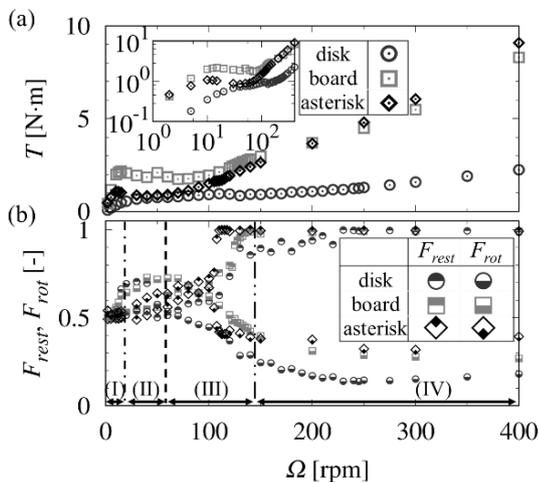


Fig. 7 回転速度に対する(a) 時間平均トルク, (b) 時間平均液相割合

Fig. 8 にアスタリスク型を用い, 種々の物性値, 初期液面高さ  $h$  をパラメータとした場合の回転速度に対するトルク変化を示す. 図の縦軸, 横軸は, それぞれ, 無次元トルク  $G$ , フルード数  $Fr$  に対応する. 図より, トルクは極大値を持つ右肩上がりの分布であり, 回転速度に対するトルク変化は  $Fr$  を用いて整理できることが分かる. なお, 円盤, 長板に対してもパラメータ調査を行った結果, トルク  $T$ , 剛体に接触する液相割合  $F_{rest}$ ,  $F_{rot}$  が  $Fr$  で整理できることを確認しており,  $Fr$  により系内の流動状態が決定する.

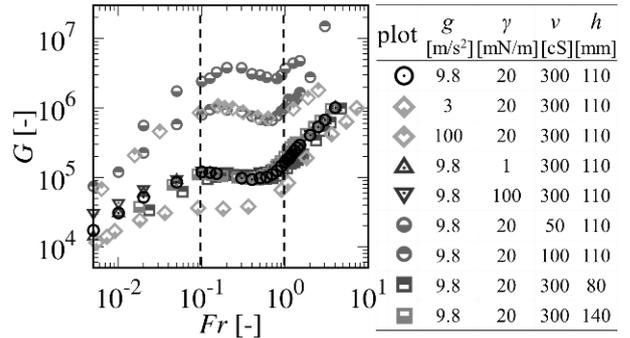


Fig. 8 無次元トルクとフルード数

#### 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, 二相流の熱移動, 回転誘導加熱を対象として, 移動境界流れの数値シミュレーションを実施していく予定である.

2020年度 利用研究成果リスト

**【雑誌に受理された論文】**

Wang, X., Gong, X., Sugiyama, K., Takagi, S. and Huang, H., An immersed boundary method for mass transfer across moving porous interfaces, Journal of Computational Physics, (2020), Vol. 413, 109444.

木南 直之, 渡村 友昭, 杉山 和靖, 回転体に駆動される気液二相流のトルクと流動様式, 混相流, (2021.3) Vol. 35 (掲載予定).

**【会議の予稿集】**

小林 憲司, 渡村 友昭, 杉山 和靖, 濃度マランゴニ効果が界面変形を伴う気泡の合体抑制に与える影響, 混相流シンポジウム 2020 講演論文集, (2020.8) No. 0013.

杉山 和靖, Zhang, X., 渡村 友昭, 擬塑性流体中の移動球に対する加振の影響, 混相流シンポジウム 2020 講演論文集, (2020.8) No. 0105.