

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*、堀口 祐憲*、米澤 宏一*、大久保 秀彦*、平山 裕*、
 岩坪 史弥*、中 亮介*、鍋島 清悟*

所属 : *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

混相流体や回転体などの移動境界流れは、通常、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、マイクロバブルの生成機構解明や、回転機械の性能予測など、工学分野、医療分野での応用を見据えた数値解析を行っている。

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) 薄型マイクロチャンネルにおけるマイクロバブル生成シミュレーション、(ii) 回転体によって駆動される気液二相流のシミュレーションである。

(i) では、流れ場を Hele-Shaw 近似に従うポテンシャル流れとみなし、流路壁と気液界面に離散点を配置し、境界要素法により速度ポテンシャルの Laplace 方程式を数値的に解く。本研究では、Darcy 則に時間微分項と対流項を加えた Euler-Darcy の式を運動方程式に用いる。そして、界面での Laplace 則が成り立つように、気液界面上の要素点位置を更新する。基礎式は、一定要素を用いて離散化する。五点公式による界面分布の平滑化、三次スプライン法を用いた要素間隔の均一化により、数値安定性や解の正確性を高めている。

(ii) では、二相流のシミュレーションで、しばしば用いられる一方程式の定式にならない、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。基礎式は有限差分法に基づき、スタaggered 格子上で離散化し、空間微分は二次精度中心差分で近似する。時間進行の計算アルゴリズムは SMAC 法にならない、BiCG 法を用いて圧力方程式を解き、速度を更新する。このとき、BDI 法を組み合わせることで、離散化した連続の式が流体・剛体の全領域で成り立つように定式化を行なう。計算コードは、OpenMP・MPI ハイブリッド並列化し、領域分割に関わる処理にはミドルウェア V-Sphere を用いている。

3. 結果

(i) では、気相・液相の 2 つの入口流路と、気液相が合流し下流へと流れていく出口流路からなる T 字型マイクロチャンネルを対象として計算を行なった。計算例を図 1 に示す。低流速 ($U = 1\text{m/s}$) の結果 (図 1(a)) を見ると、液相の流れにより、初期界面分布に対して、界面は全体的に気相側に押し出される。図中の合流部右上では、圧力が局所的に低下するため、界面が液相側に引っ張られ、下流へと伸びていく。この押し出し・引っ張りの競合によって、合流部右上で形成する界面・壁面間のネック部分が、どんどん狭まり、最終的につぶれることにより、気泡生成に至る。界面の押し出し・引っ張りの現れ方は、流速 U に応じて異なる。流速を $U = 2\text{m/s}$ に上げると (図 1(b))、引っ張り効果よりも、押し出し効果が相対的に強くなるため、界面が下流へと十分に伸びていく前にネック部分がつぶれ、小さな気泡が生成する。さらに流速を $U = 3\text{m/s}$ に上げると (図 1(c))、引っ張り効果が現れる前に、界面全体が気相側に押し出されてしまい、気泡生成に至らない。図 1(a) (b) (c) より、ある流量を超えると気泡生成が起きなくなる「気泡生成限界」があることが確認できる。

U の条件を増やして計算を行い、結果を整理すると、図 1(d)に示すような生成気泡面積 A と U の関係が得られる。 U が大きいほど A は低下し、気泡生成限界で最小値をとる。本研究では、この限界条件での A , U を、それぞれ、生成限界面積、生成限界速度と定義し、capillary 数や Weber 数などの無次元数をパラメータとして、分析を進めている。

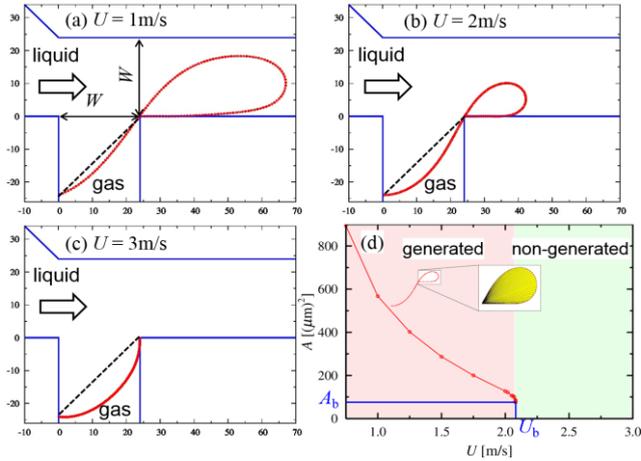


図 1 T 字型マイクロチャネル内の気液界面分布 (a), (b), (c) と、生成気泡面積と液流速の関係 (d)

(ii)での計算例として、穴空き円板の回転によって駆動されるオイル・空気流れを対象とする数値シミュレーションについて説明する。円板には 7 つの穴が空いており、反時計周りに回転する。円板、オイル、空気は、密閉された円筒容器の内にある。図 2 に示すように、円板の回転に応じて、オイル・空気界面が移動し、また、円板に空いた穴により、気泡の混入が促進されることが確認できる。本研究では、オイル分布と円板回転数の関係について、可視化実験との比較や、円板に作用するトルクの計測結果との比較を行い計算手法の検証を行なっている。また、さらなる応用問題に対応するため、より複雑な幾何形状を扱う計算手法の開発を進めている。



図 2 穴空きディスクの回転によって駆動されるオイル・空気流れのスナップショット

4. 今後の計画・展望

来年度は、研究を継続・発展させるために、HOKUSAI を用いて今年度と同様の計算を進めていく予定である。さらに、空気潤滑法による乱流摩擦抵抗低減の機構解明を目指し、気液二相乱流の大規模数値シミュレーションを実施する予定である。

平成 27 年度 利用研究成果リスト

【国際会議などの予稿集、proceeding】

Sugiyama, K., Niho, T., Takagi, S. and Fukui, R., A fixed-mesh approach for predicting gas-liquid flows driven by rotating objects, 13th Asian International Conference on Fluid Machinery, AICFM13-110, (2015.9), Tokyo.

【国際会議、学会などでの口頭発表】

大久保 秀彦, 杉山 和靖, 薄型マイクロチャネルにおける微細気泡生成の数値解析, 混相流シンポジウム 2015, (2015.8) 高知.

大久保 秀彦, 杉山 和靖, 薄型マイクロチャネルにおける微細気泡生成機構, 日本機械学会第 93 期流体工学部門講演会, (2015.11) 東京.

Sugiyama, K., Numerical study on the turbulence modification by large particles in homogeneous shear flows, Transition Control in Dispersed Flows, (2016.1) Brest, France.