

プロジェクト名(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\*

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. 本プロジェクトの研究の背景、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、(iii) 大量の分散体が含む流れを効率よく扱う手法の開発を進めている。そして、気泡を含む傾斜容器の壁での液膜形成、回転体気液二相流の熱輸送と流動様式の関係性を調べている。

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) 傾斜容器内における軽量粒子群が誘起する転波列の形成、(ii) 回転円筒に駆動される気液二相流の熱輸送を数値計算するものである。

(i)では、傾斜平板付近での粒子群・液相の成層化と、それに伴う密度流不安定を調べるため、大量の軽量粒子を含む液体を計算対象とする。個々の粒子を Lagrange 的に追跡し、固定された座標系で平均化方程式として固液混合体の保存則を扱う Euler-Lagrange 型の粒子流動モデルを用いる。

(ii) では、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。

3. 結果

(i)では、傾斜容器内における軽量粒子群が誘起する非定常流動を対象として数値計算を行った。解析対象の座標系、幾何形状、粒子分布を Fig. 1 に示す。高さ 200 mm,

幅 40 mm の二次元矩形領域の高さ方向を  $x$  軸、幅方向を  $y$  軸とし、重力は  $x$  軸と傾斜角  $\beta$  をなすように設定し、 $0^\circ \leq \beta \leq 70^\circ$  の範囲で変化させた。粒子体積率、粒子径をパラメータとし、それぞれ、 $2 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-2}$ ,  $40 \mu\text{m} \sim 90 \mu\text{m}$  の範囲で変化させた。また矩形領域の  $x, y$  方向長さの比は 5:1 とし、5 条件の寸法 (40mm  $\times$  8mm, 50mm  $\times$  10mm, 100mm  $\times$  20mm, 200mm  $\times$  40mm, 300mm  $\times$  60mm) で計算を行った。様々なパラメータに対する計算結果を Fig. 2 に示す。

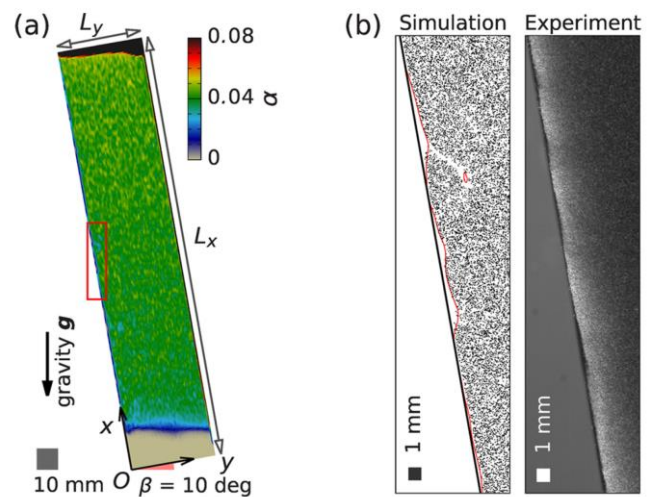


Fig. 1 解析対象の座標系、幾何形状、粒子分布

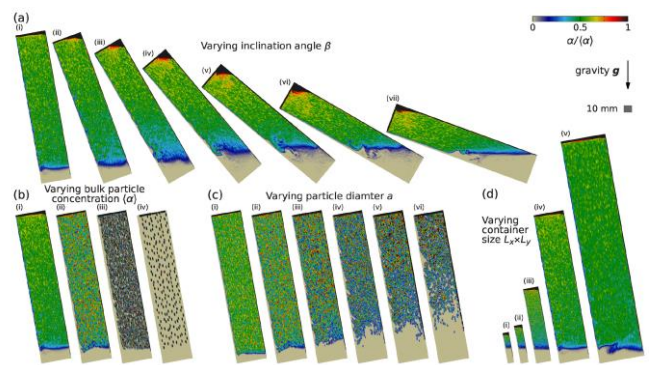


Fig. 2 様々なパラメータに対する計算結果

Fig. 3 に flow stability diagram を示す。Fig. 3(a)は変動速度の大きさを描いたものである。粒子体積率が高く、傾斜角  $\beta$  が小さい場合に液膜流れが不安定化することがわか

った。Fig. 3(b)はフルード数  $Fr$  と界面解像度パラメータ  $H$  の関係を描いたものである。 $Fr$  がある臨界値以上、 $H$  がある臨界値以下の条件で流動が不安定化することがわかった。

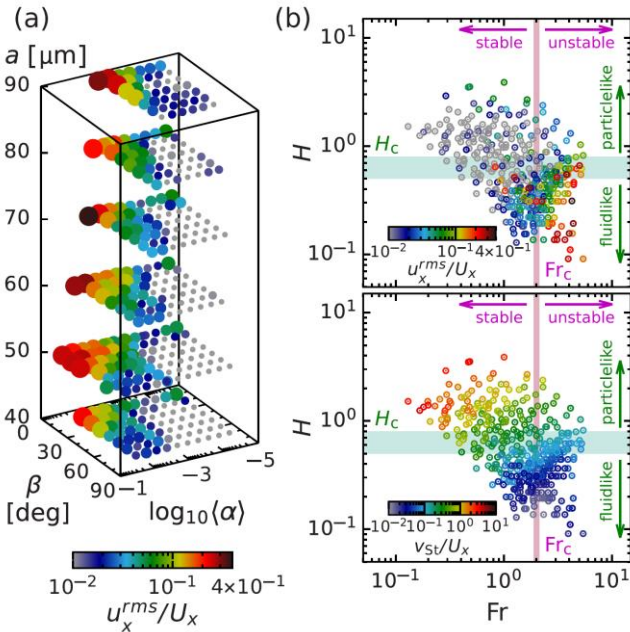


Fig. 3 Flow stability diagram. (a) 変動速度，粒子体積率，傾斜角  $\beta$ ，粒子直径  $a$  の関係。色と丸記号の寸歩は変動速度の強度を表す。(b) フルード数  $Fr$  と界面解像度パラメータ  $H$  の関係。上パネルは変動速度，下パネルはストークス速度の大きさを表す。

(ii)では、円筒内において回転体が駆動する二相熱流動を対象として数値計算を行なった。計算領域は二次元で、静止円筒容器に回転体が配置され、容器と回転体間に流体が満たされている。静止壁を低温壁、回転体を高温壁とする。回転体は反時計回りに角速度  $\Omega$  で回転する。計算は、固定直交格子上で離散化し、気液界面の捕捉には VOF 法を適用している。また、剛体・液体の運動を一方程式で記述する BDI 法を適用している。本研究で用いる熱は完全なパンプスカラーとし、流れ場に及ぼす影響を無視する。回転体の形状の効果を調査するために 3 種類(円盤、アスタリスク型、長板)の回転体を用いた。Fig. 4 に長板を回転体とした場合の流動様式、温度分布、熱流束分布を示す。回転速度に対する流動様式変化は、定性的に 4 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。温度分布 (Fig. 4(b))は、気液二相が攪拌されることにより、かき乱された分布となり、熱流束分布 (Fig. 4(c)) は、オイル分布 (Fig. 4(a)) と照らし合わせると、液相で大きな値となる。

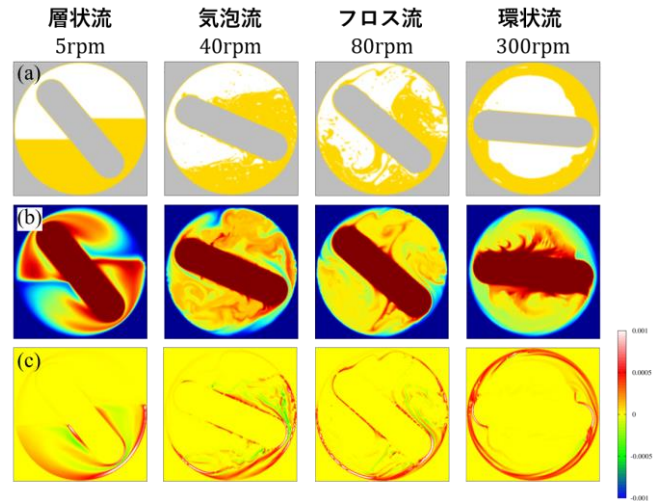


Fig. 4 各流動様式における(a) オイル分布, (b) 温度分布, (c) 熱流束分布。

Fig. 5 に二相状態の回転速度に対する(a) ヌッセルト数  $Nu$  (熱伝達の大きさを指標), (b) 回転体の液相接触割合  $F_{rot}$  を示す。先行研究では、トルクと  $\Omega$  の関係について、層状流から気泡流へ遷移する過程で  $T$  が極大をとることを見出した。これは回転体下部の液相に気泡が流入することで運動量伝達が妨げられ、トルクが減少するためである。それに対し、Fig. 5 より  $Nu$  は気泡流からフロス流へ遷移する過程で極大をとる。この極大は、熱容量の低い気体が壁面に介在し、熱容量の高い液体が断続的に分布すると熱が伝わりにくくなることに起因する。

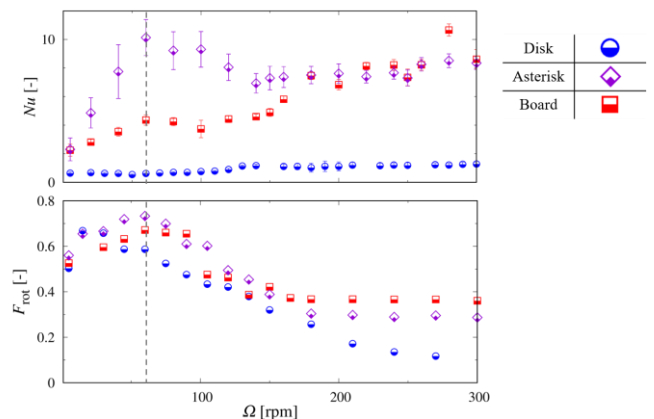


Fig. 5 回転速度に対する無次元熱流束  $Nu$  と回転体の液相接触割合  $F_{rot}$  の比較。

実際の二相冷却を目論む機器では、熱拡散係数に比べて動粘度の大きな高プラントル数 ( $Pr$ ) の液体が使われることが多い。そのため、高  $Pr$  の影響、すなわち、対流熱伝達に着目して数値計算を行った。Fig. 6, Fig. 7 に、それぞれ、アスタリスク、長板を回転体として用いた  $Nu$  と  $Pr$  の関係を示す。Fig. 6(a), Fig. 7(a)より、低回転数 ( $\Omega = 5\text{rpm}$ )の層状流れでは、 $Nu$  対  $Pr$  のスロープは  $1/2$  となる。これは境界層理論と整合する。それに対して、高回転数 ( $\Omega = 300\text{rpm}$ )の環状流れ (Fig. 6(b), Fig. 7(b)) では、回転体、静止壁間の相分離により回転体と容器を接続する液相が分断し、スロープが  $1/2$  よりも大きくなる。

4. 今後の計画・展望

来年度も、軽量粒子群が誘起する転波列の形成、二相流の熱移動、空気潤滑法による摩擦抵抗低減など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。

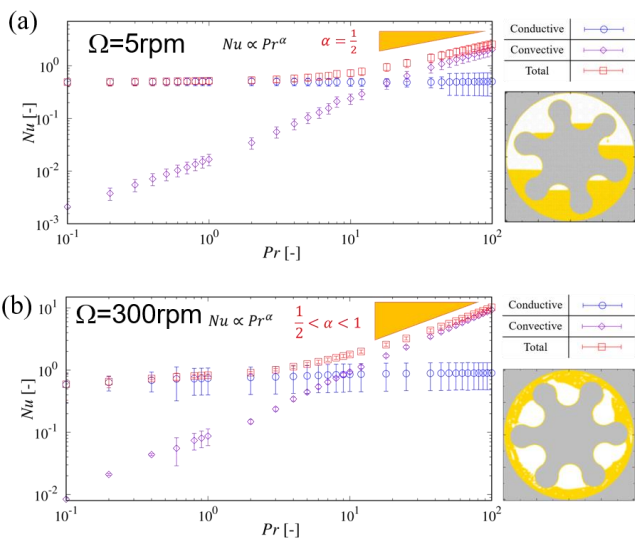


Fig. 6 アスタリスク回転体の  $Nu$  と  $Pr$  の関係. (a)  $\Omega = 5\text{rpm}$  (層状流), (b)  $\Omega = 300\text{rpm}$  (環状流)

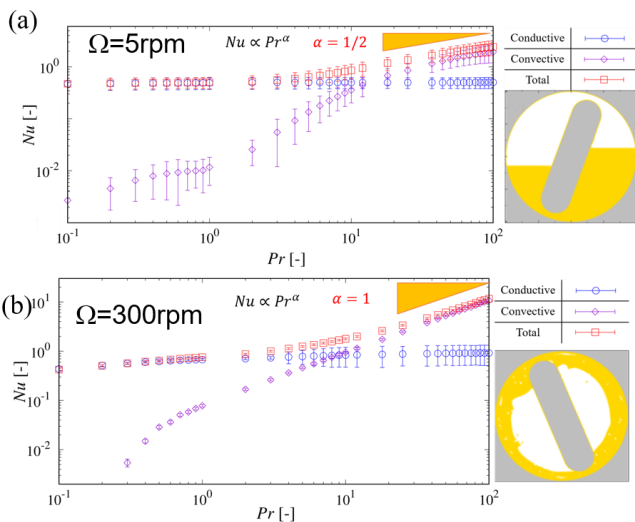


Fig. 7 長板回転体の  $Nu$  と  $Pr$  の関係. (a)  $\Omega = 5\text{rpm}$  (層状流), (b)  $\Omega = 300\text{rpm}$  (環状流)

2021年度 利用研究成果リスト

【雑誌に受理された論文】

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, pp. 109-117 (昨年度の利用報告書締切後に発行).

Watamura, T., Sugiyama, K., Yotsumoto, Y., Suzuki, M. and Wakabayashi, H., Bubble cascade may form not only in stout beers, Physical Review E, (2021.6), Vol. 103, 063103.

【会議の予稿集】

渡村 友昭, 杉山 和靖, 四元 祐子, 鈴木 深保子, 若林英行, 密な気泡懸濁液の希薄限界と連続体近似, 混相流シンポジウム 2021 講演論文集, (2021.8) E0048.

永田 一紗, 杉山 和靖, 回転二重円筒間における軸対称スロッシングに対する履歴効果, 混相流シンポジウム 2021 講演論文, (2021.8) E0043.