

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\*  
佐々木 悠汰\*  
吉岡 亮\*  
木南 直之\*  
小林 憲司\*

理研における所属研究室名:

\*情報システム本部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

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・磁気連成を実現する手法、(iii) 大量の分散体を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、流体のレオロジー特性の変調による流動制御効果、誘導加熱に対する攪拌効果、気泡を含む傾斜容器の壁での液膜形成、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) 加振を伴う擬塑性流体中の抵抗低減、(ii) 回転誘導加熱に対する加熱増強、(iii) 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、(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、粘度がべき乗則に従う擬塑性流体において、振動を伴いながら並進運動する球周りの流れを計算対象とする。球に作用する流体力を正確に評価するため基礎方程式を、球座標系で記述し、有限差分法で離散化する。

(ii) では、板を挿入した回転円筒容器内の液体金属に磁場を照射し、板の挿入による発熱促進効果についてパラメータ調査を行う。回転を伴う磁気流体を扱うため、非慣性系で質量保存式、ローレンツ力を考慮した運動方程式、磁束

ポテンシャルの輸送式を記述し、板と容器壁に境界適合するよう離散化する。

(iii) では、傾斜平板付近での粒子群・液相の成層化と、それに伴う重力流不安定についてパラメータ調査を行う。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固液混合体の保存則を扱う Euler-Lagrange 型の手法を採用する。

(iv) 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、球周りの流れを対象として数値計算を行った。解析モデルを Fig. 1 に示す。無限流体中に半径  $a^*$  の球形粒子が存在する。流体の密度  $\rho^*$  は一定であり、粘度  $\mu^*$  はべき乗則に従い、ひずみ速度の大きさ  $\dot{\gamma}$  と指数  $n$  の関数として与えられる。ひずみ速度の増加に伴い粘度が低下する性質(シアニング性)を仮定すると、指数は  $0 < n < 1$  の範囲に制限される。球は  $x^*$  方向に速度  $V^* = V_0^*(1 + A \sin \omega^* t^*)$  で運動し、流れを誘起する。流体の圧縮性と、流体運動の対流による非線形性が無視できるものとして、系は連続の式と非定常 Stokes 方程式に従うものとする。

基礎方程式を軸対称球座標系で記述し、有限差分法により数値的に解く。空間の微分は二次精度中心差分法、時間進行は二次精度 Crank-Nicolson 法に従う。粘性項の空

間の差分・補間に関しては、エネルギーの保存性を保証するため、 $(\nabla \mathbf{u}) : \boldsymbol{\tau} = \nabla \cdot (\mathbf{u} \cdot \boldsymbol{\tau}) - \mathbf{u} \cdot (\nabla \cdot \boldsymbol{\tau})$  (ここで  $\mathbf{u}$  は、速度と  $\boldsymbol{\tau}$  は粘性応力) の関係が満たされるように定式化している。計算アルゴリズムは、SMAC 法に基づき、離散化された圧力のポアソン方程式の求解には、直接解法を適用した。

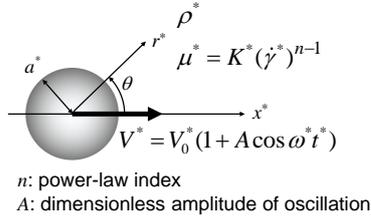


Fig. 1 べき乗則流体中における振動を伴う球。

様々な指数  $n$  に対して、球に働く抗力  $D$  と無次元振幅  $A$  の関係を Fig. 2 に示す。ここで、 $D$  は、球に働く流体力の時間平均値であり、図中の  $D_0$  は振動のない条件での抗力に相当する。図中の記号は計算結果、実線は対数プロットにおける傾きが  $n-1$  の曲線である。図より、振幅が大きい条件では、抗力に  $D/D_0 \propto A^{n-1}$  の関係が成り立つことが確認できる。加振によりシアシンギング性を発現させることにより、並進運動の抵抗低減に至る仕組みと、その効果に関して、本数値計算により明らかになった。

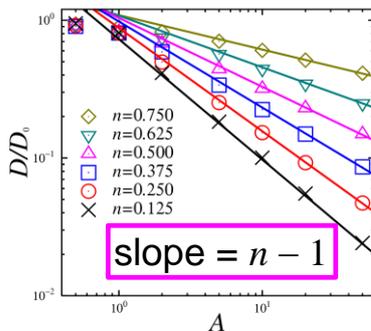


Fig. 2 無次元抗力  $D/D_0$  と無次元振幅  $A$  の関係。

(ii)では、回転誘導加熱に対する攪拌板による加熱促進効果のパラメータ調査を進めた。Fig. 3 に本計算の解析領域と座標系を示す。本研究では、一様磁場  $B$  において角速度  $\Omega$  で回転する半径  $R$  の円筒容器に金属流体を充填させた領域を計算対象とする。挿入する板の長さを円筒の半径  $R$  で無次元化した長さ  $L^*$ 、枚数を  $N_p$  とする。なお、図は  $L = 1, N_p = 1$  に相当する。レイノルズ数、磁気レイノルズ数は、それぞれ、 $Re = 10000, Rm = 10$  に固定した。磁場の強さを表すハルトマン数  $Ha$  と  $L^*, N_p$  を変化させ、総ジュール発熱量やトルクの大きさ、流速分布を解析する。

Fig. 4 に板を挿入しない場合と、長さ  $L^* = 1$ 、枚数  $N_p = 1$  の板を挿入した場合における  $Ha$  を変化させたときの円筒

容器内の総ジュール発熱量  $Q$  と  $Ha$  の関係を示す。図中の直線は、速度場が剛体回転的である場合の総発熱量を表す。図より、 $Ha$  の増加に伴い、板のない場合に対する発熱量の増加量が大きく、剛体回転の発熱量に近づくことが分かる。板がない場合は  $Ha$  の増加に伴い静止する内部流体の領域が半径方向に拡大するが、板を挿入することで円筒容器の速度が誘起されるためである。

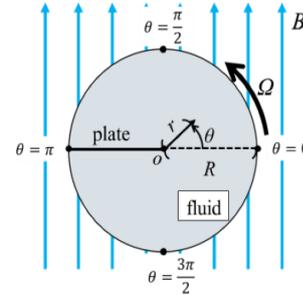


Fig. 3 回転誘導加熱シミュレーションの模式図。

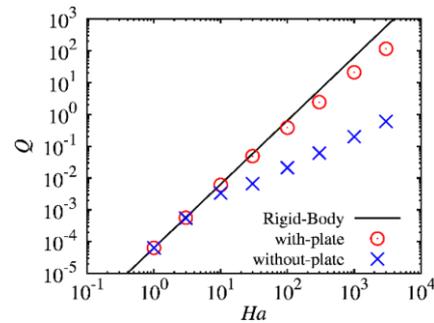


Fig. 4 総ジュール発熱量  $Q$  とハルトマン数  $Ha$  の関係。

Fig. 5 に、 $Ha = 10^2$  の条件での圧力、速度ベクトル、局所ジュール発熱の空間分布を示す。板挿入により内部流体に速度が増加する。板の前後に圧力差が生まれ、流れの剥離が生じ、その後流において、高速領域が形成する。その結果、円筒の縁近傍だけでなく、円筒内部においてより広く発熱が促進する。

Fig. 6 に、総発熱量  $Q$  に対する板枚数  $N_p$ 、および、板長さ  $L^*$  の影響について示す。黒色、灰色の棒線は、それぞれ、速度場が剛体回転的である場合を表す。ここで、板は円筒外周から半径方向に長さを持ち、周方向に等間隔に配置した。Fig. 6 (a) より、 $N_p$  の増加に伴い  $Q$  が増加する。これは、板により流体が攪拌され、速度が誘起される内部流体の領域が周方向に拡大するためである。Fig. 6 (b) より、 $L^*$  の増大に伴い、 $Q$  は単調増加するのでは、 $Q$  が極大値を示すことが確認できる。本研究で対象とした条件では、板長さが  $L^* = 0.5$  程度で、板挿入による加熱増強効果を最大化する。これは板が長いほど、円筒縁から半径方向に速度を誘起する領域が拡大する傾向にあるものの、ある程度の長さ

を超えると、板同士の隙間が小さくなり、流体の動きが制限されるためである。  $L^* = 1$  の場合は流体が4つの領域に分割され、流れが制限されてしまう。従って、発熱量を増加させるためには、単純に円筒中心部で速度が誘起されるような板の延長ではなく、領域全体に速度を誘起するために流体の動きを制限せずに攪拌できるような長さに設定することが重要であることが、本数値計算により明らかになった。

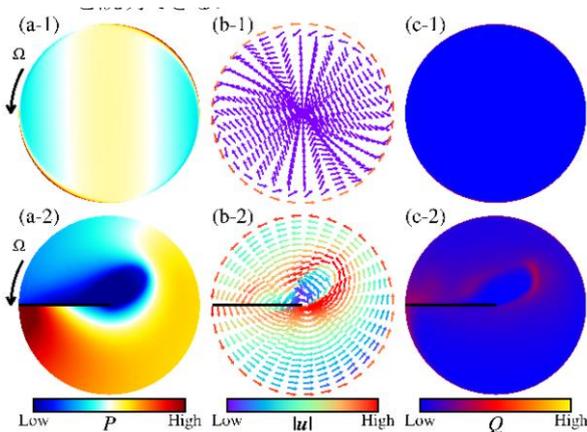


Fig. 5 (a) 圧力, (b) 速度ベクトル, (c) 局所ジュール発熱の空間分布. 上パネルは板無し, 下パネルは板有り.  $Ha = 100$ .

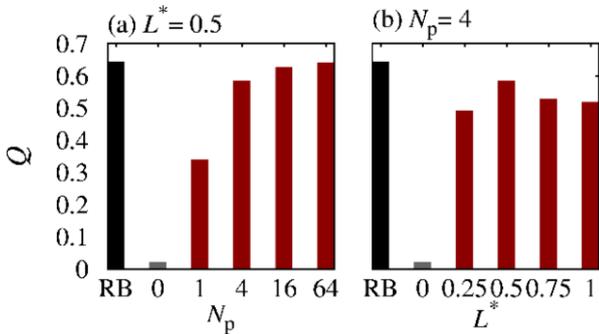


Fig. 6 板挿入による加熱増強効果. (a) 板枚数  $N_p$  の影響, (b) 板長さ  $L^*$  の影響.  $Ha = 100$ .

(iii)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。解析領域の形状および座標系を Fig. 7 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  $x$  軸と角度  $\beta$  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。格子点数はそれぞれの方向に  $256 \times 128$  とした。粒子径は  $50 \mu\text{m}$  とした。計算領域には、奥行方向の厚み  $\Delta z$  を持たせることにより、球形粒子の体積率分布を二次元計算で扱った。

Fig. 8 に、十分に流れが発達したときの局所粒子体積率と容器側壁に沿う液相速度成分  $u_x$  の空間分布を示す。(a), (b) はそれぞれ (a)  $\beta = 0^\circ$ , (b)  $\beta = 10^\circ$  における結果であ

る。鉛直容器内に相当する(a)では、粒子がほぼ一様に分布し、初期空間分布の不均一に由来する速度変動が生じている。傾斜容器内に相当する(b)を見ると、 $y < 5 \text{ mm}$  では局所粒子体積率が低下し、 $y < 35 \text{ mm}$  では局所粒子体積率が増加する。また、傾斜壁近傍では、顕著な下降流と上昇流が形成し、傾斜容器内における粒子の重力分離に伴う循環流、すなわち Boycott 効果が発現する。

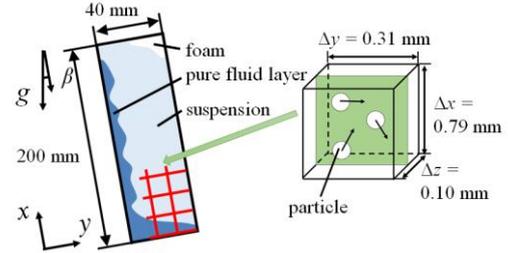


Fig. 7 傾斜容器内に軽量粒子流れの解析領域

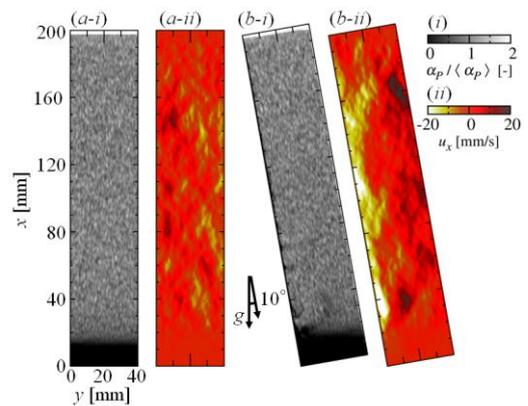


Fig. 8 瞬時の粒子分布と壁面に沿う速度成分.

Fig. 9 に、無次元速度変動(速度変動の最大値を時間平均した下降流の最大値で規格化した値)とフルード数  $Fr$  (流体の慣性力と重力の比)を関係を示す。図より  $Fr > 2$  において、 $Fr$  の増加に伴い速度変動が増加する。これは、清澄層内部の重力流不安定に伴い転波列が発現し、それが、慣性効果が増すことで、揺らぎが大きくなることを表す。

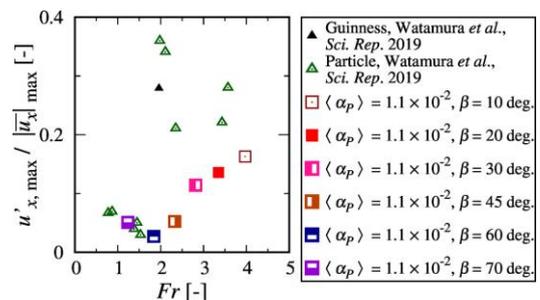


Fig. 9 無次元速度変動とフルード数  $Fr$

Fig. 10 に、次元速度変動と濃度界面の解像度の逆数  $H$  (粒子間平均距離と液膜厚さの比)の関係を示す。図より、

懸濁層が連続的 (fluid-like) に振る舞う領域 ( $H < 0.5$ ) では  $H$  の減少に伴い清澄層の不安定現象が観察され、速度変動強度が増加する。一方、粒子間距離が液膜厚さと同程度 ( $H > 1$ ) 以上になると、懸濁層が離散的 (particle-like) な挙動を示し、清澄層の流動不安定現象が観察されなくなり、速度変動強度が減少する。

以上より、本数値計算により、軽量粒子群が誘起する転波列の発現に 2 つの要因 (重力流不安定性と粒子の集団性) が関与するという実験による先行研究の結論を、演繹的に実証できた。

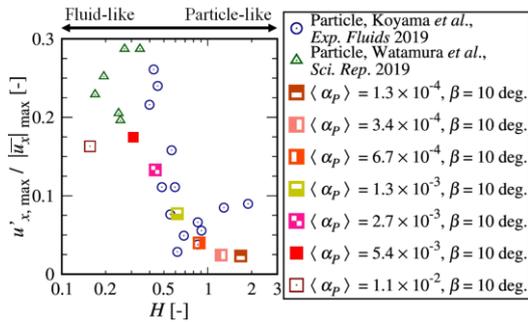


Fig. 10 無次元速度変動と濃度界面の解像度の逆数  $H$

(iv)では、円筒内において回転体駆動の気液二相流動を対象として、数値計算を行い、流動様式を分類した。Fig. 11 に、計算領域の概略図と座標系を示す。計算領域は静止壁と角速度  $\Omega$  で回転する円筒 (回転体) から構成され、流体は回転体によって駆動される。剛体間に液相を半充填 (充填率 50%) させる。

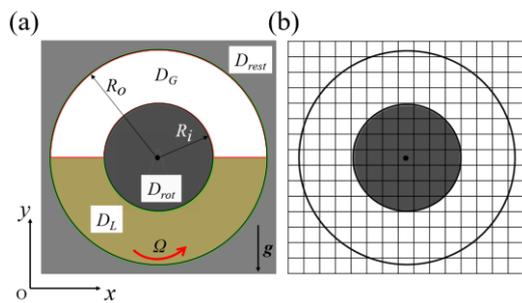


Fig. 11 回転体駆動気液二相流動の計算領域の概略図と座標系

回転体における流動様式を分類するために、回転速度を変化させて計算を行った。Fig. 12 に回転速度を変化させた場合の流動様式を示す。回転速度に応じて流動様式が変化する。

Fig. 13(a) に、静止壁の大きさを固定し、円筒半径比  $\eta$  を変化させたものを示す。また、Fig. 13(b) に、回転体表面速度  $U$  と  $\eta$  の関係を流動様式ごとに示す。図より、 $\eta$  を変化さ

せた際、Fig. 12 で示した 4 つの流動様式が現れる。また、 $0 < \eta < 0.6$  においては、流動様式の遷移が  $U$  によって整理できる。しかし、 $\eta$  が大きい場合、前述した 4 つとは異なる流動様式が確認できる。これは、外円筒に付着した流体が内円筒の回転によって駆動される流体と合体、分裂を繰り返すことが原因である。この場合、流動様式は極めて過渡的となる。また、 $\eta$ 、 $U$  が大きい場合、気液の密度差により液相に働く遠心力が相対的に大きくなり、液相を半径方向外側に輸送する環状流が生じる。

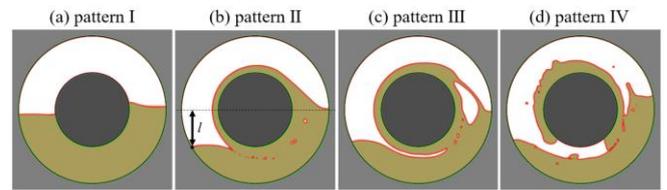


Fig. 12 様々な流動様式。回転数は、(a) 15rpm, (b) 90rpm, (c) 150rpm, (d) 300rpm.

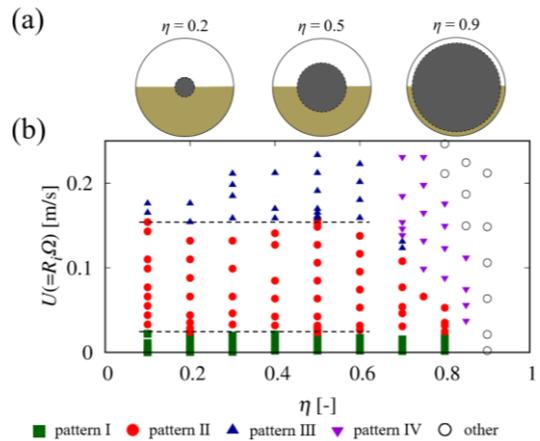


Fig. 13 流動様式に対する幾何影響

#### 4. 今後の計画・展望

来年度も、混相流の熱物質移動、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する予定である。

2019年度 利用研究成果リスト

**【雑誌に受理された論文】**

吉岡 亮, 渡村 友昭, 杉山 和靖, ギネスビールに生じる転波列に関する数値解析, 混相流, (2020.3) Vol. 34 (掲載予定).

木南 直之, 渡村 友昭, 杉山 和靖, 回転円筒に駆動される気液二相流の流動様式, 混相流, (2020.3) Vol. 34 (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の時間発達に関する潤滑理論と直接数値計算, 混相流シンポジウム 2019 講演論文集, (2019.8) A311.

吉岡 亮, 渡村 友昭, 杉山 和靖, ギネスビールの泡が模様を作るために必要な気泡のサイズと量とは, 混相流シンポジウム 2019 講演論文集, (2019.8) C323.

佐々木 悠汰, 渡村 友昭, 杉山 和靖, 古瀬 充穂, 竹村 文男, 回転誘導加熱を促進する板挿入パターン, 日本流体力学会年会 2019 講演論文集, (2019.9) No. 76.

杉山 和靖, Xianping Zhang, 岩室 秀, 渡村 友昭, 加振を伴う擬塑性流体中における移動球の抵抗低減, 日本流体力学会年会 2019 講演論文集, (2019.9) No. 280.

**【口頭発表】**

Zhang, X., Sugiyama, K., Iwamuro, M. and Watamura, T., Drag reduction of a sphere with oscillation in pseudo-plastic fluid, The 72nd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, Seattle, USA, (2019.11), B26.00006.

**【その他(著書、プレスリリースなど)】**

杉山 和靖, ボクセルベースで流体構造の連成シミュレーションを行う, (理化学研究所 中村特別研究室 編, 計算で物事を理解する・予測する, 近代科学社) (2019.12), 第2章, pp. 16-28.