

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*

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、関係する課題との関係
本研究では、移動境界流れを対象として、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構造連成を実現する手法などの開発を進めている。そして、超弾性体粒子の集中現象、回転気液二相流の界面共振現象について調べている。

2. 具体的な利用内容、計算方法

本研究での HBW2 の利用内容は、擬塑性流体中を振動する球周り流れを数値計算するものである。抵抗低減に対する粘性、対流の影響を明らかにするため、境界適合する直交曲線座標系で基礎方程式を記述し、圧力方程式を直接解法(直交展開法・TDMA 法)により求解している。

3. 結果

振動球周りの擬塑性流体の流れを対象として数値計算を行った。計算対象の概略を Fig. 1 に示す。質量・運動量の保存式は以下のように書き表される。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad \rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} - \mathbf{e}_x V) \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}, \quad \text{ここ}$$

で、 $\mathbf{u}$ は速度ベクトル、 ρ は密度、 $V = V_0(1 + A \sin \omega t)$ は球重心速度の x 方向成分、 p は圧力、 $\boldsymbol{\tau}$ は粘性応力である。粘度はべき乗則モデルに従うものとして、以下の関係式を扱う。

$$\boldsymbol{\tau} = 2\mu \mathbf{S}, \quad \mu = K \dot{\gamma}^{n-1}, \quad \dot{\gamma} = \sqrt{2\mathbf{S} \cdot \mathbf{S}}, \quad \mathbf{S} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T),$$

ここで、 μ は粘度、 $\mathbf{S}$ はひずみ速度、 K は consistency factor、 $\dot{\gamma}$ はずり速度である。本研究では、粒子半径 a 、密度 ρ 、並進速度 V_0 を代表値

(計算ではいずれも1) とし、無次元数であるレイノルズ数を $Re = 2^n / K$ と定義した。現象を記述する無次元パラメータは、 Re 、振幅 A 、べき乗指数 n 、無次元角振動数 ω である。本研究では、高角振動数で振動する球形気泡や固体球を対象として、抗力に対する Re, A, n の影響を調査した。

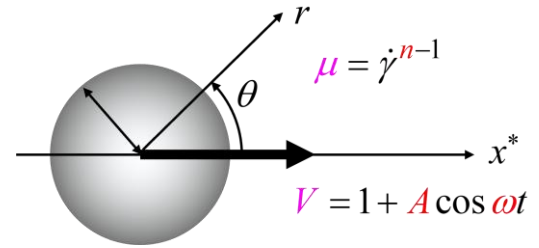
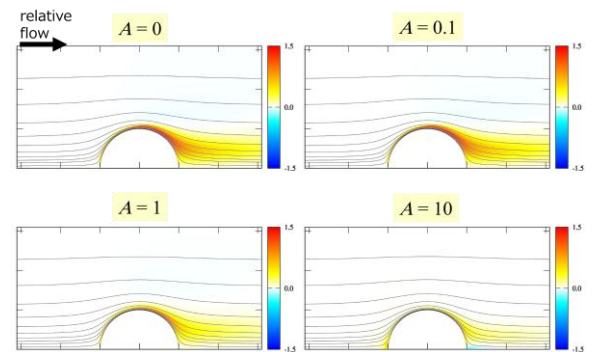


Fig. 1 計算対象の概略

球形粒子周りの流れについて、時間平均した流線・渦度分布を Fig. 2 に示す。図より、振幅 A が大きくなると、球後方の渦度の大きさが小さくなることを確認できる。Fig. 3 に、球形気泡に作用する抗力 D と振幅 A の関係を示す。図より、(i) 対流の影響により抗力が大きくなること、(ii) 準定常モデルによって D vs. A の大局が捕捉できることが確認できる。

Fig. 2 時間平均した球形気泡周りの流線・渦度分布 ($Re = 100, n = 0.25, \omega = 10^2$)

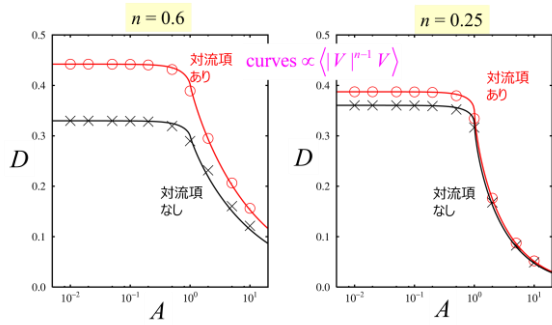


Fig. 3 球形気泡に作用する抗力 D と振幅 A の関係 ($Re = 100, \omega = 10^2$)

固体球周りの流れについて、時間平均した流線・渦度分布を Fig. 4, Fig. 5 に示す。図より、振幅 A が大きくなると、球後方の渦構造が小さくなることが確認できる。Fig. 6 に、固体球に作用する抗力 D と振幅 A の関係を示す。図より、渦構造が強固に存在する弱い擬塑性の条件 ($n = 0.6$) では、抗力における対流影響によって、 D vs. A の分布と準定常モデルとの有意差が認められる。それに対して強い加振によって渦構造が弱まる強い擬塑性の条件 ($n = 0.25$) では、 D vs. A の分布と準定常モデルとの整合性が確認できる。

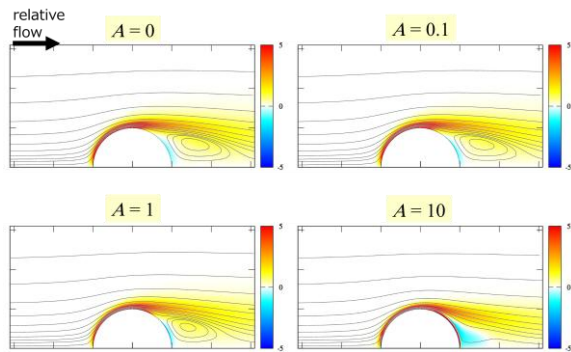


Fig. 4 時間平均した固体球周りの流線・渦度分布 ($Re = 100, n = 0.6, \omega = 10^2$)

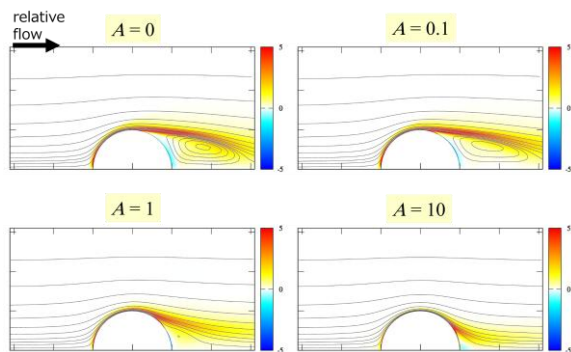


Fig. 5 時間平均した固体球周りの流線・渦度分布 ($Re = 100, n = 0.25, \omega = 10^2$)

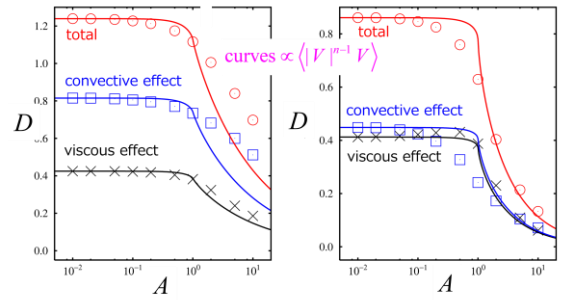


Fig. 6 固体球に作用する抗力 D と振幅 A の関係 ($Re = 100, \omega = 10^2$)

4. 今後の計画・展望

今後も、弾性体粒子の集中現象、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。

2024 年度 利用研究成果リスト

【口頭発表】

杉山 和靖, 擬塑性流体中を振動する球形気泡の抵抗低減に対する慣性の影響, 日本流体力学会年会 2024, 3FH210-14-02 (2024.9).

杉山 和靖, 擬塑性流体中における振動球の抵抗低減に対する慣性影響, 第 38 回数値流体力学シンポジウム, OS1-2-3-03 (2024.12).