

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、回転体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 HOKUSAI の利用内容は、(i) ダクト内流れにおける超弾性体粒子の動力学、(ii) 回転体に駆動される気液二相流動を数値計算するものである。

(i)では、超弾性体粒子の集中現象を調べるため、圧力駆動の管内流と超弾性体粒子の変形・並進運動を流体構造連成問題として扱う。固定された座標系で基礎方程式を記述する完全オイラー型の計算手法を用いる。

(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、正方形断面を有する矩形ダクト内流れにおける粒子の変形・並進運動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。計算領域は寸法 $L_x = L_y = L_z = 1$ の立方体とする。粒子は横弾性係数 G のネオフック体とし、平衡状態で直径 $d = 0.22 L_y$ の球形とする。パラメータは、粒子の初期位置 y_0, z_0 と G である。数値計算の精度と安定性を考慮して、クーラン数 CFL を適宜定めた。

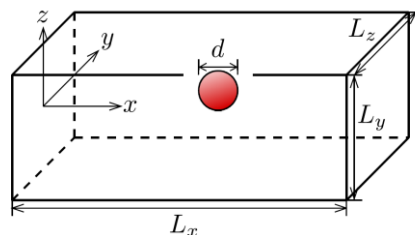
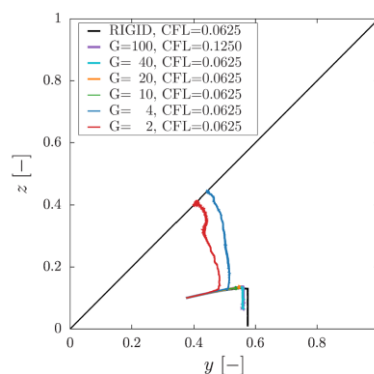


Fig. 1 解析対象の座標系, 幾何形状

計算結果の例を Fig. 2 に示す。初期位置が $(y_0, z_0) = (0.375, 0.1)$ 場合 (Fig. 2(a)), 剛体球は y 軸上へと集束する。超弾性体の場合も、横弾性係数が大きな $G = 10 - 100$ の条件では y 軸付近へと集束する。それに対して、柔軟な粒子 ($G = 2, 4$)の平衡位置は対角線上に集束する。初期位置が $(y_0, z_0) = (0.75, 0.375)$ の場合 (Fig. 2(b))は、剛体球と超弾性体のどちらも対角線上へと集束し、その平衡位置は G が小さいほど原点へと近づく。初期位置 $(y_0, z_0) = (0.6875, 0.0625)$ の場合 (Fig. 2(c)), $G = 2$ 以外の粒子は y 軸側に集束するのに対して、 $G = 2$ の粒子は、 y 軸付近に停滞した後、変形の影響により安定な平衡位置である対角線上へと移動する。超弾性体の安定な平衡位置は、対角線上と y 軸付近の 2 つ存在することがわかった。

(a) $(y_0, z_0) = (0.375, 0.1)$

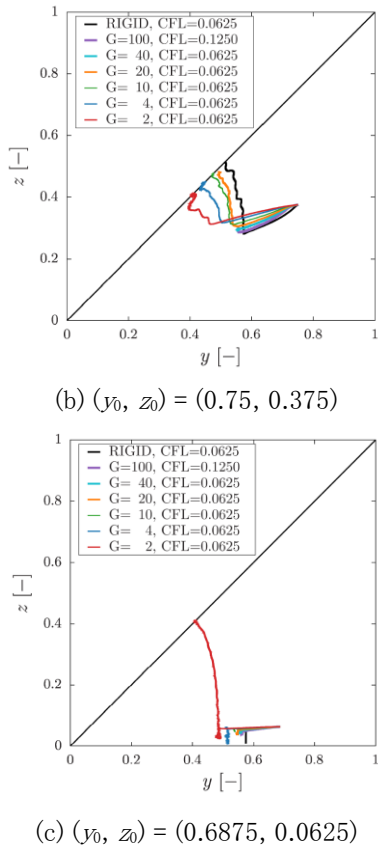


Fig.2 超弾性体と剛体球の軌跡 (重心の y, z 座標)

(ii)では、円筒内において回転体が駆動する気液二相流を対象として数値計算を行なった。計算領域は三次元で、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。回転体は反時計回りに角速度 Ω 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。回転体の形状は角の丸まった長板である。パラメータは、液相動粘度 ν と Ω である。Fig. 3 に示すように、本研究では、気液が上下二層に分離する層状流となる低角速度の系を計算対象とした。

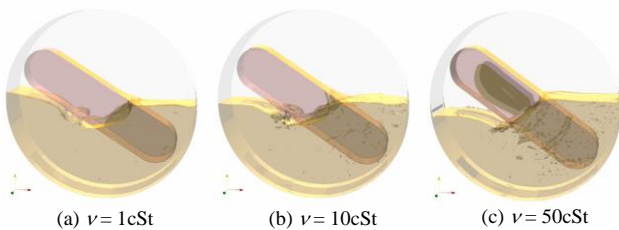


Fig. 3 回転体とオイル分布 ($D = 20 \text{ mm}, \Omega = 50 \text{ rpm}$)

Fig. 4 に、非常に低い角速度 ($\Omega = 6 \text{ rpm}$)での回転体に作用するトルク T と姿勢角 θ (長板の長軸と水平面とのなす角度) の関係を示す。図中の実線は、トルクが浮力支

配と仮定したときの理論解、記号は本数値シミュレーション結果である。両者は良く一致することから、本数値計算手法の妥当性が確認できる。

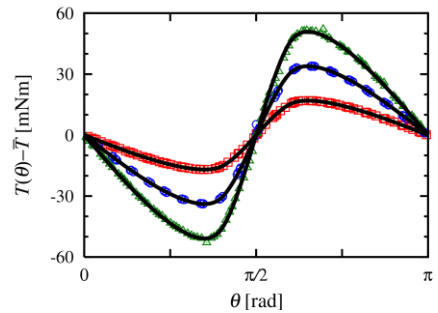


Fig. 4 トルクの姿勢角依存性 ($\nu = 1\text{cSt}$)

Fig. 5 に、トルク T と角速度 Ω の関係を示す。図中の記号 \times は実験計測結果、記号 \circ は本数値シミュレーション結果である。両者は良く一致することから、本数値計算手法の妥当性が確認できる。動粘度が低い場合、 T - Ω 分布は $\Omega = 25, 50 \text{ (rpm)}$ 付近で極大化する。これらの角速度は、それぞれ、気液界面の固有角振動数の 1 倍、2 倍に相当する。したがって、Fig. 5 の T - Ω 分布は、界面波動の共振がトルクの極大をもたらすことを示唆する。

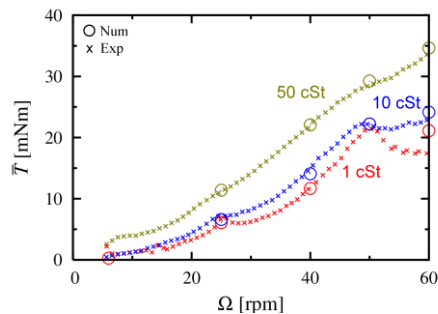


Fig. 5 トルクと回転数の関係

4. 今後の計画・展望

来年度も、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。

2022年度 利用研究成果リスト
なし