

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、偏心回転円筒内流れを数値計算するものである。低レイノルズ数で自転公転する楕円に作用する弱い力の発生機構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

外円と偏心楕円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。偏心楕円の長軸、短軸長さ  $2R_2, 2R_1$ 、外円と偏心楕円の中心距離  $x_c$  とし、扁平度  $D = \frac{2R_2 - 2R_1}{2R_2 + 2R_1}$ 、偏心率  $e = \frac{x_c}{R_2 - R_1}$

をパラメータとした。楕円は自転・公転し、自転速度、公転速度は  $\Omega$  で等しいものとする。レイノルズ数は、

$$Re = \frac{2\rho\Omega R_1 R_2}{\mu} = 1 \text{ と固定した(ここで、}\rho, \mu\text{は、それぞれ、流体の密度、粘度である)。本研究では、楕円に}$$

作用する弱い lateral force (公転方向に垂直な方向を向く流体力)の発生の仕組みについて調査した。

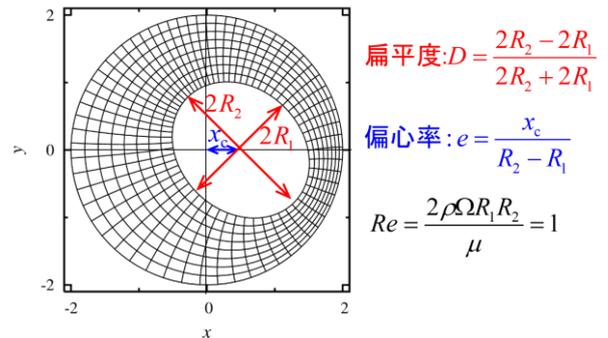


Fig. 1 解析対象の幾何形状とパラメータ

Fig. 2 に扁平度  $D = 0, 0.01$  に対する lateral force ( $F_x$ ) と偏心率  $e$  の関係を示す。回転体が円 ( $D = 0$ ) の場合、 $e < \sim 0.65$  のときに外円中心から離れる力が回転体に作用するのに対して、 $e > \sim 0.65$  のときに外円中心に向かう力が作用する。これより、偏心のない条件 ( $e = 0$ ) では、系は力学的に不安定であり、 $e = \sim 0.65$  の偏心状態のふれ回り運動が力学的に安定となることが確認できる。回転体が楕円 ( $D = 0.01$ ) の場合、円の場合に比べて、外円中心に向かう lateral force が大きくなり、力学的な安定状態となる偏心率が小さく ( $e = \sim 0.35$ ) なる。なお扁平度  $D$  が大きくなるほど、外円中心に向かう lateral force が大きくなることを確認した。ローレンツの相反定理を適用することにより、lateral force  $F_x$  は、以下のように分解することができる。

$$F_x = F_x^{(C)} + F_x^{(S)},$$

ここで、 $F_x^{(C)}, F_x^{(S)}$  は、それぞれ、流体の慣性、回転体の扁平性の貢献分であり、以下のように書き表される。

$$F_x^{(C)} = \int_V \hat{\mathbf{L}}^T : \mathbf{C} \, dV \sim \rho R^3 \Omega^2,$$

$$F_x^{(S)} = \int_V \hat{\mathbf{L}}^T : (-\tilde{\boldsymbol{\tau}}) \, dV \sim D \mu R \Omega,$$

ここで、 $\mathbf{C} = \rho(\mathbf{u} - \mathbf{V})\mathbf{u}$  ( $\mathbf{u}$  は流体速度,  $\mathbf{V}$  は回転系速度) は対流テンソル,  $\tilde{\boldsymbol{\tau}}$  は、同じ境界条件のストークス方程式の解の粘性応力テンソル,  $\mathbf{L}$  は、回転体が  $x$  方向に向かう場合のストークス方程式の解の速度勾配テンソルである。

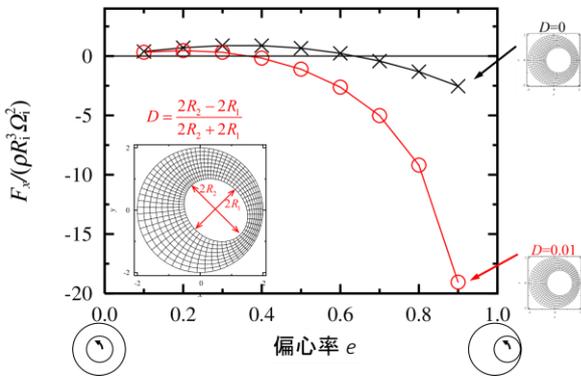


Fig. 2 lateral force と偏心率の関係

ローレンツの相反定理に基づき、 $F_x^{(C)}$  の向きを決める仕組みを分析すると(Fig. 3), 対流テンソルの  $\eta\eta$  方向成分が重要であり, (i)  $e$  が小さい場合には、隙間の広い領域で  $\hat{L}_{\eta\eta} < 0, C_{\eta\eta} < 0$  が成り立ち、 $\hat{L}_{\eta\eta} C_{\eta\eta} > 0$  となるため  $F_x > 0$  となること, (ii)  $e$  が大きい場合には、隙間の狭い領域での  $\hat{L}_{\eta\eta}$  が顕著に大きくなり、 $C_{\eta\eta} (< 0)$  の貢献度が大きくなるため  $F_x < 0$  となることがわかった。

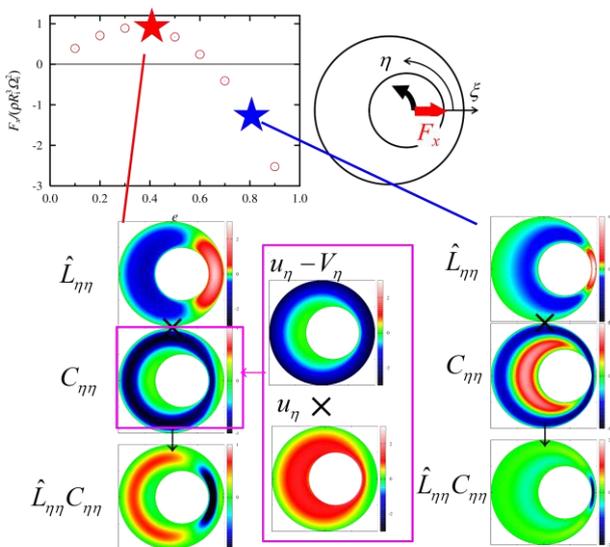


Fig. 3  $F_x^{(C)}$  の向きを決める仕組み

$F_x^{(S)} < 0$  の向きを決める仕組みを分析すると(Fig. 4),  $\xi\eta$  方向成分が重要であり、隙間の狭い領域で  $\hat{L}_{\xi\eta} < 0, -\tilde{\tau}_{\xi\eta} > 0$  が成り立ち、 $-\hat{L}_{\xi\eta} \tilde{\tau}_{\xi\eta} < 0$  となるためであり、潤滑効果と同じ仕組みで、扁平由来の lateral

force が発生することを確認した。

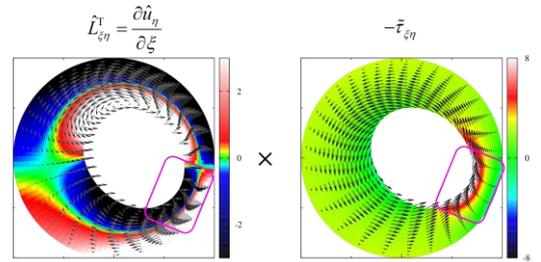


Fig. 4  $F_x^{(S)}$  の向きを決める仕組み

#### 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。

## 2023年度 利用報告書

### 2023年度 利用研究成果リスト

#### 【口頭発表】

杉山和靖, 林真史, 渡村友昭, 偏心回転円筒内流れの弱い力の発生機構, 混相流シンポジウム 2023, 北海道大学, (2023.8).

Sugiyama, K., Drag reduction of a sphere with oscillation in shear-thinning power-law fluid, PoF 25: Flow for future, University of Twente, (2023.10).