第 II 部門　　**IB 法を用いた振動円柱周辺流動場の数値計算**

大阪市立大学工学部　学生員　○石川　智景
大阪市立大学大学院工学研究科　学生員　竹岡　佑介
大阪市立大学大学院工学研究科　正会員　重松　孝昌

1. 研究背景および研究目的

複数の物体が近接して流体中を運動する時，それぞれの運動が流体運動を介して互いの運動に影響を及ぼす．このような現象を境界条件を厳密に満足させて解くことは容易ではない．本研究では比較的簡便かつ高精度に流体物体間相互作用力を考慮することができる Immersed Boundary 法 (IB 法) を用い，境界条件を厳密に満足させて移動物体周辺流動場の計算が可能な数値モデルを構築した．

2. 計算方法

本研究では，すべての計算領域内において，次式で示される非圧縮粘性流体の基礎方程式を解いている．

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)\,\mathbf{u} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu \Delta \mathbf{u} + \mathbf{F} \tag{2}$$

ここに，ρ は流体密度，$\mathbf{u}$ は流速，p は圧力，ν は動粘性係数である．$\mathbf{F}$ は流体物体間の相互作用力を表し，本研究では，Silva ら [1] によって提案された PVM を用いて，次式で求められる強制力 f_k の反作用力から求めた．

$$f_k = \frac{u_{bk} - u_k}{\Delta t} + (u_{bk} \cdot \nabla) u_{bk} + -\nu \nabla^2 u_{bk} + \nabla p_k \tag{3}$$

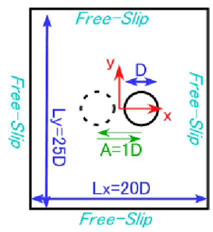
ここに，u_{bk} は物体表面に設定した Lagrange 点の移動速度，u_k, p_k はそれぞれ Lagrange 点上の流速および圧力を表す．**式 (3)** は Lagrange 点において，境界条件を満足するように Navier-Stokes 方程式中の外力を求めることを意味しており，f_k の算定において物体表面の移動速度および物体表面における流速を直接与えて流動場を計算するので，境界条件を厳密に満足していると言える．

3. 単一振動円柱周辺流動場の計算結果

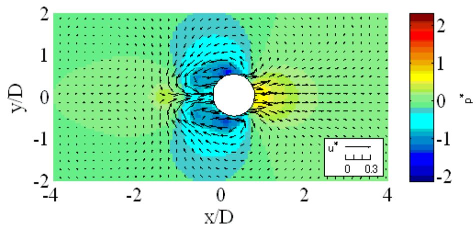
図-1 に示すように，計算領域の中心を原点として水平 2 次元座標を設定し，直径 D の円柱の中心座標を次式で与え，静水中で振動させた．

$$x = A\cos(\omega t) \qquad y = 0 \tag{4}$$

ここに，A は振動振幅，ω は角振動数，t は時間を表す．本研究では，$A = D$, $\omega = 1.0$ として円柱を振動させた場合の計算を行った．Dutsch ら [2] は単一振動円柱周辺流動場を Re 数と KC 数によって分類しているが，この条件下では，$KC = 2\pi A/D = 6.28$, $Re = u_m D/\nu = 100$ ($u_m = A\omega$ は円柱の最大移動速度) である (**図-4**)．計算に先立って，計算領域および計算格子幅が計算結果に及ぼす影響について検討し，計算領域は幅 $L_x = 20D$，高さ $L_y = 25D$，直交格子幅 Δ は $D/\Delta = 15$ とした．計算で得られた無次元流速ベクトル $u^* = u/u_m$ および無次元圧力 $p^* = p/0.5\rho u_m{}^2$ の分布を**図-2**，**図-3** に示す．無次元時刻 $t^* = tu_m/D \leq 100$ 程度 (**図-2**) では x 軸を対称軸とする流動場が形成されたが，その後，流動場は徐々に対称性が崩れ，$t^* \geq 150$ では**図-3** に示すような非対称な流動場となった．$t^* \leq 100$ では円柱上下に一対の剥離が発生し，これによって一対の渦が形成された．一方，$t^* \geq 150$ の場合には円柱の下端の剥離からのみ渦が発達し，x 軸に対して非対称な流動が形成された．Dutsch ら [2] は**図-4** の A 群では上下対称流，D 群では上下非対称流，そして両者の境界付近では上下対象流から非対称流に遷移すると述べており，本計算結果はこれに一致している．

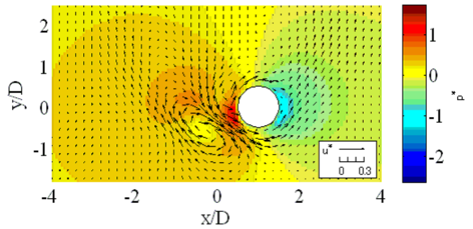


図– 1　計算条件



図– 2　単一振動円柱周辺流動場 $t^* \leq 100$

Chikage ISHIKAWA, Yusuke TAKEOKA and Takaaki SHIGEMATSU　E-Mail：shige@urban.eng.osaka-cu.ac.jp



図– 3　単一振動円柱周辺流動場 $t^* \geq 150$

4. 振動二円柱周辺流動場の計算結果次に振動する二円柱周辺流動場の計算を行った．計算条件は振動数，振幅，計算領域，格子幅については単一円柱の場合と同条件とし，円柱の中心間の距離は 1.5D とした．二円柱の中心座標はそれぞれ次式で与えた．

$$x_1 = A\cos(\omega t) \qquad y_1 = -(3/4)D \tag{5}$$

$$x_2 = -A\cos(\omega t) \qquad y_2 = (3/4)D \tag{6}$$

計算で得られた無次元流速ベクトル・無次元圧力の分布を**図-5**～**図-7** に示した．単一円柱では上下対称な流れから非対称な流れへと遷移する様子が見られたのに対し，二円柱の場合では，終始，原点を対称点とする点対称な流動が見られた．また，単一円柱では円柱下端の剥離から渦が発達したのに対し，二円柱では円柱が振動の中心付近を通過する際に円柱間で渦が形成され，円柱が逆方向に移動し始めた時に渦は攪拌され消滅した．

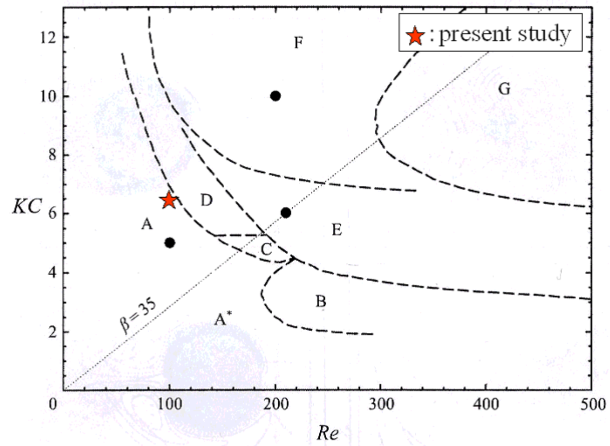
5. 結論

本研究では，IB 法を用いて移動物体に誘起される流れの計算を行った．さらに，同手法を異なる位相で振動する二円柱に適用することによって，複数固体が任意の動きを呈する場合でも計算が可能になった．IB 法を用いることで複雑な格子生成を行うことなく境界条件を厳密に満足させた．単一振動円柱周辺流動場の計算結果は既往の実験結果と良好に一致していることを確認し，本モデルの妥当性を示した．振動二円柱の計算結果については，単一円柱の場合と比較することで違いを明らかにした．

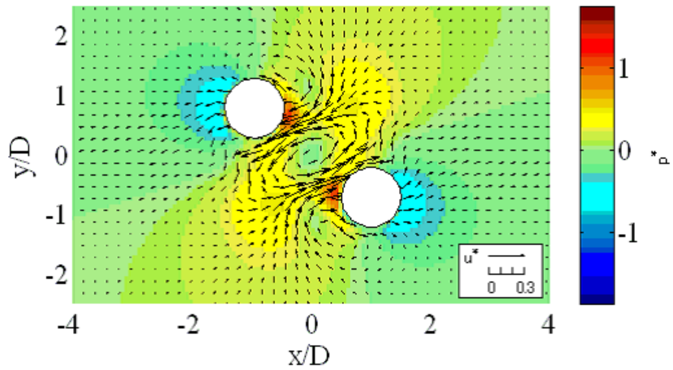
参考文献

1) A. L. F. Lima e Silva, et al : J. Comp. Phys. 189, pp.351-370, 2003.

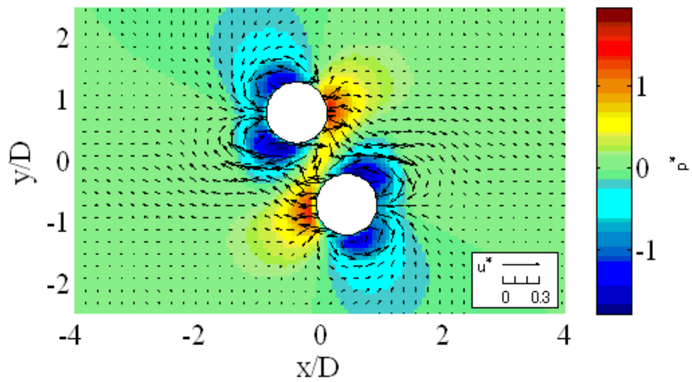
2) H. Dutsch, et al: J. F. M., 360, pp.249-271, 1998.



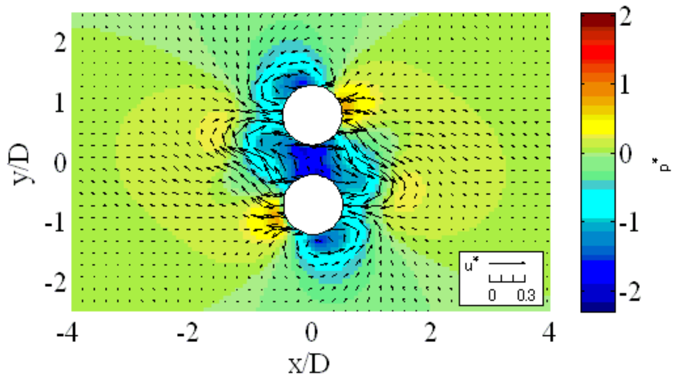
図– 4　Tatsuno & Bearman による流れの分類



図– 5　振動二円柱周辺流動場-1



図– 6　振動二円柱周辺流動場-2



図– 7　振動二円柱周辺流動場-3