

直列 2 円柱の流力振動に関する 3 次元数値解析

Three-dimensional analysis for flow-induced vibrations of two tandem circular cylinders

○小川千明¹, 近藤典夫²*Chiaki Ogawa¹, Norio Kondo²

We present numerical results for flow-induced vibration of two tandem circular cylinders. Computational model of two tandem circular cylinders are mounted in the flow direction of the portion of the riser tube. By performing a three-dimensional numerical analysis of fluid flow, we first show the in-line and cross-flow vibrations of the cylinders. Next, we denote pressure fluctuation acting on the surface of the two cylinders.

1. はじめに

一様流れの中に存在する柱体に働く流体力を把握することは海洋構造物の設計において重要である。石油掘削プラントのライザー管やプラントの柱脚では流れの中に複数柱体が存在する。それは単独の柱体と比べ、それぞれの柱体構造物の周りに生じる流れの特性が干渉し合い複雑な流れになることが報告されている^[1]。

本論文では、ライザー管の一部を流れ方向に対して直列に配置した 2 円柱でモデル化を行い、3 次元数値解析をすることで、そのインラインとクロスフロー方向の挙動と表面の圧力変動、また周辺の流れの干渉特性について解明し、その現象を捉えることを目的とする。

2. 基礎方程式

流体の運動は 3 次元ナビエ・ストークス方程式、流体の非圧縮性を示す連続方程式で表され、無次元化された式を以下に示す。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i u_{i,j} = -p \delta_{ij} + \frac{1}{\text{Re}} u_{i,j,j} \quad (1)$$

$$u_{i,i} = 0 \quad (2)$$

u_i は無次元流速, p は無次元圧力, Re はレイノルズ数を表す。

ダンパーとバネで支えられた 2 円柱の振動方程式は以下のようなになる。

$$\frac{d^2 X_i}{dt^2} + \frac{4\pi h}{Ur} \frac{dX_i}{dt} + \left(\frac{2\pi}{Ur}\right)^2 X_i = \frac{1}{2\chi} C_{Di} \quad (3)$$

$$\frac{d^2 Y_i}{dt^2} + \frac{4\pi h}{Ur} \frac{dY_i}{dt} + \left(\frac{2\pi}{Ur}\right)^2 Y_i = \frac{1}{2\chi} C_{Li} \quad (4)$$

ここで X_i と Y_i は無次元変位, $i=1$ のとき上流円柱, $i=2$ のとき下流円柱を示す。 C_{Di} は抗力係数, C_{Li} は揚力係数, t は無次元時間, Ur は換算速度, h は減衰定数, χ は質量比を示す。代表長さを円柱の直径 D とし, $X_i = \bar{X}_i / D$, $Y_i = \bar{Y}_i / D$ である。

3. 数値解析

モデル化した直列 2 円柱を Fig.1 に示す。2 円柱の中心間距離を S , 直径を D , 高さを H で与え, 左側遠方より一様な流速 U_0 を与える。 F_D は抗力, F_L は揚力を示す。本計算では, レイノルズ数 $\text{Re} = 2.0 \times 10^4$, スクルートン数 $\text{Sc} = 1.0$, 質量比 $\chi = 12.0$ とする。また, 流体計算の時間数値積分には陰解法の 1 つであるクランク・ニコルソン法, 円柱の振動方程式には線形加速度法を適用する。

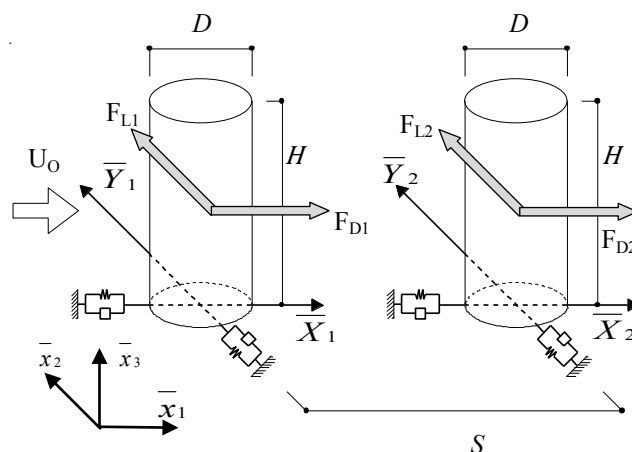


Fig.1 A computational model of two tandem circular cylinders

本論文の解析では間隔を $S/D = 6$ に固定し, 換算速度を $Ur = 1.5, 1.7, 2.0, 2.3, 3.0, 3.4, 4.0$ の 7 通り計算した。

換算速度 Ur と無次元変位の振幅 X_{amp} , Y_{amp} , 平均値 X_{mean} , Y_{mean} , 標準偏差 X_{sd} , Y_{sd} の関係を Figs.2, 3 に示す. この範囲の換算速度では流れ U_0 と同一方向のインライン振動が卓越することがわかっている [1].

Figs.4, 5 に円柱静止状態, $Ur=2.3$, $Ur=3.4$ 時の上流・下流側円柱表面の平均圧力係数 C_p をそれぞれ示す.

Fig.6 は, $Ur = 3.4$ の 2 円柱周りの渦度を等高線で示した. 赤く示されている箇所は左回り, 青く示されている箇所は右回りの渦である.

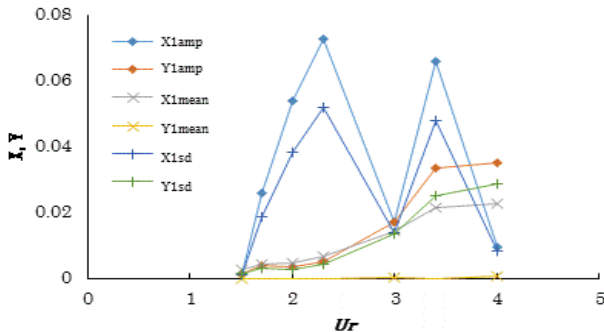


Fig.2 Vibration amplitudes of the upstream circular cylinder

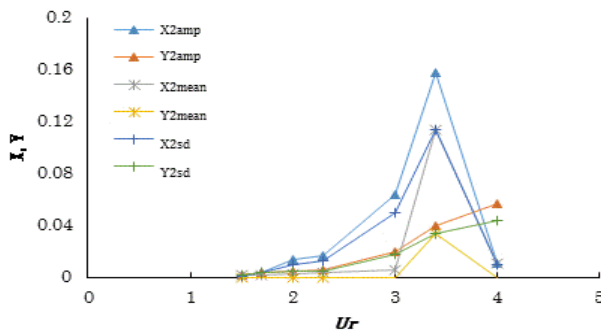


Fig.3 Vibration amplitudes of the downstream circular cylinder

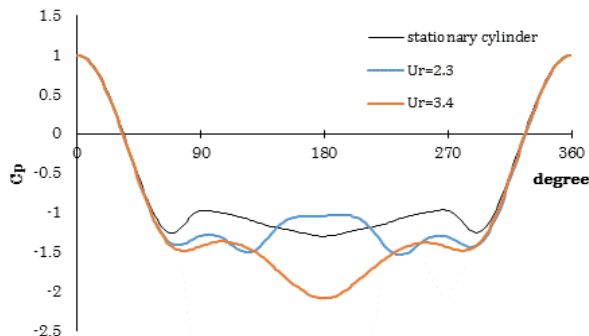


Fig.4 Mean pressure coefficient of the upstream circular cylinder

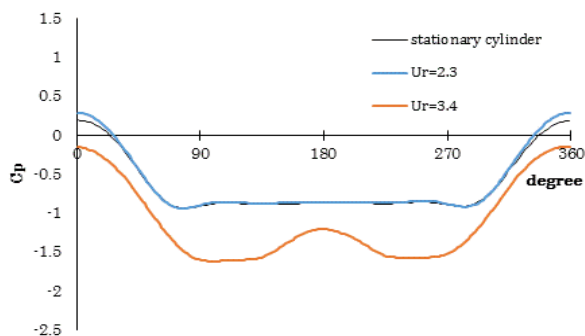


Fig.5 Mean pressure coefficient of the downstream circular cylinder

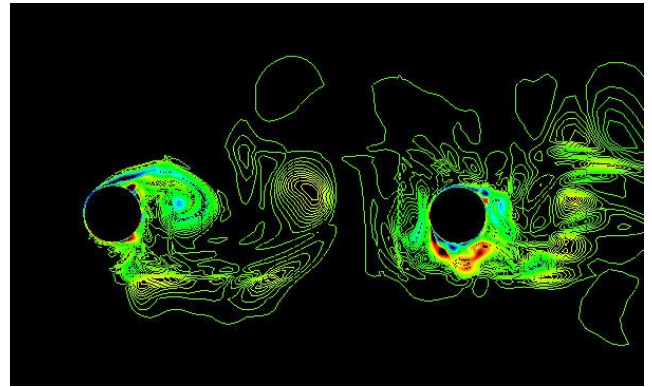


Fig.6 Instantaneous vorticity, $Ur=3.4$

4. 考察

Figs.2, 3 から, 本論文で計算を行った換算速度 Ur の値では, 上流側円柱で $Ur=2.3$ と $Ur=3.4$ のとき, 卓越したインライン振動となることがわかった. それぞれ第一励振, 第二励振である.

Figs.4, 5 は, その最大変位時の平均圧力係数 C_p を示したものである. 静止状態と換算速度 $Ur=2.3$, 3.4 の平均圧力係数 C_p を比較すると, 上流側円柱では $60^\circ \sim 300^\circ$ の範囲の C_p は大きな負圧になっている. 下流側円柱は $Ur=2.3$ は静止状態の円柱の C_p とほぼ同じ分布だが, $Ur=3.4$ は全体が負に大きくなっている. このことから, $Ur=3.4$ のとき, 上流下流側両方の円柱には静止状態より大きな圧力が作用していることがわかる.

$Ur=3.4$ の 2 円柱の周辺の流れについて渦度で示した Fig.6 から, 円柱後方に渦が発生している様子がわかる. 上流側円柱で発生した渦は下流側円柱に衝突し, 下流側円柱の後方も渦の発生が見られる.

以上の結果より, 間隔 $S/D=6$ の直列 2 円柱の振動特性について捉えることができた.

5. 参考文献

- [1] 岡島厚, 安井聡, 木村繁男, 木綿隆弘: 直列 2 円柱の流れ方向流力振動に関する研究, 日本機械学会論文集 (B 編) 73 巻 726 号, P,34-42, 2007 年
- [2] 五十嵐保: 直列 2 円柱まわりの流れ特性, 日本機械学会論文集 (B 編) 50 巻 451 号, P,594-601 (昭 59-3)
- [3] 森谷優, Md.Mahbub ALAM, 高井和紀, 坂本弘志: 直列配置された近接 2 円柱の変動流体力特性, 日本機械学会論文集 (B 編) 68 巻 669 号, P,1400-1406, 2002 年
- [4] A.KHALAK AND C.H.K.WILLIAMSON: MOTIONS, AND MODE TRANSITIONS IN VORTEX-INDUCED VIBRATIONS AT LOW MASS-DAMPING, Journal of Fluids and Structures (1999) 13, 813-851