

円柱の流力振動に関する数値解析

Numerical Computation for Hydrodynamic Vibrations of a circular cylinder

○深作勇人¹, 近藤典夫²*Yuto Fukasaku¹, Norio Kondou²

Abstract: We present numerical results for flow-induced vibrations of a circular cylinder which is mounted in a smooth flow. The circular cylinder is assumed by a rigid body and is supported by a damper-spring system. Then, a computational model of the circular cylinder is treated as a system of two degrees of freedom. Low mass ratio between the cylinder and fluid is set in this computation. The Navier-Stokes equations in a flow field are discretized by a third-order upwind FEM.

1. はじめに

地上や海洋に建造される構造物では風や海流の流れによって渦励振が生じることは知られている。現在までに様々なスクルートン数に対する流力振動の研究が行われてきた。円柱構造物の渦励振は臨界換算速度から急激に大きくなり、最大振幅を維持したあとで急激に振幅は小さくなる。この時、渦の放出振動数と構造物の振動数が一致するロックイン現象が現れる。

本論文では、単一円柱構造物においてスクルートン数が小さい場合を対象にして、インラインとクロスフロー振動に焦点を当てて流力振動性状を捉える。円柱の振動は1質点2自由度モデルとしている。

流体計算には有限要素法を適用し、時間積分にはクランク・ニコルソン法を、円柱の時間積分には線形化速度法を適用する。

2. 基本式

流体計算は3次元ナビエ・ストークス方程式と連続方程式で行い、無次元表示で以下のように表される。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i u_{i,j} = \sigma_{ij,j} \quad (1)$$

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \frac{1}{\text{Re}}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (2)$$

$$u_{i,i} = 0 \quad (3)$$

ここで、 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。

また、円柱は1質点2自由度もでるので、円柱に作用する外力は抗力と揚力のみを対象とする。更に円柱の振動方程式の外力項は抗力係数 C_D と揚力係

数 C_L になるように無次元化し換算速度 U_r を計算パラメータになる形として流れと直交方向を式で表すと

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{4\pi h}{U_r} \frac{dx}{dt} + \left(\frac{2\pi}{U_r}\right)^2 x = \frac{1}{2\chi} C_D \quad (4)$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{4\pi h}{U_r} \frac{dy}{dt} + \left(\frac{2\pi}{U_r}\right)^2 y = \frac{1}{2\chi} C_L \quad (5)$$

となる。ここで x と y は流れ方向、 h は減衰定数、 χ は円柱と流体の質量比である。

3. 数値解析

本論文では単一円柱の計算モデルを Fig.1 に示す。円柱はばねとダンパーで支持されており、インライン(x)方向とクロスフロー(y)方向への振動を想定している。また流体では左側遠方より一様速度 U を与える。

計算パラメータとして $\text{Re}=10000$, $\chi=8.0$, $h=0.002$ に設定し、その結果、スクルートン数 $\text{Sc}=0.2$ となる。

ナビエ・ストークス方程式の数値積分には陰解法の1つであるクランク・ニコルソン法を適用し、円柱の振動方程式には線形加速度法を用いて、流体力と円柱の振動計算を行う。

Fig.2 に示す $U_r=2.3$ で振動している円柱の周りの流れを過度表示で示す。Fig.3~5 は $U_r=1.5, 2.3, 3.3$ のとき

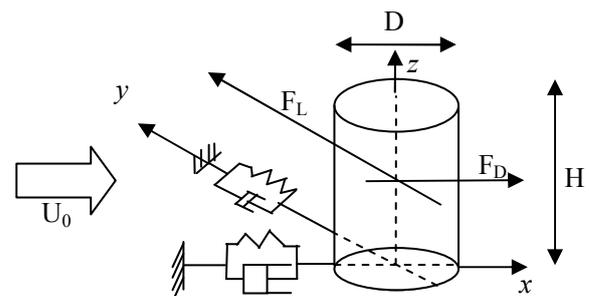


Fig.1 A computational model of a circular cylinder

の円柱の振動振幅に関する時刻歴曲線を示している。
Fig. 6 は最大振幅 x_{amp} 及び標準偏差 x_{sd} を実験結果とともに示す。

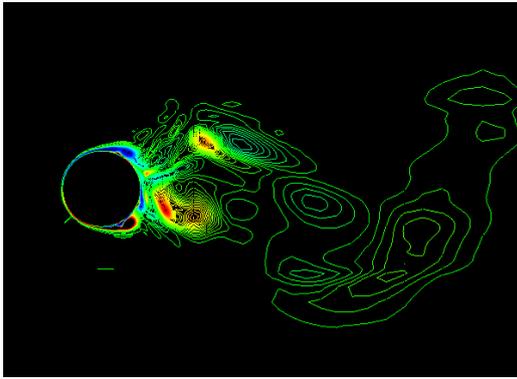


Fig.2 Instantaneous vorticity, $Ur=2.3$

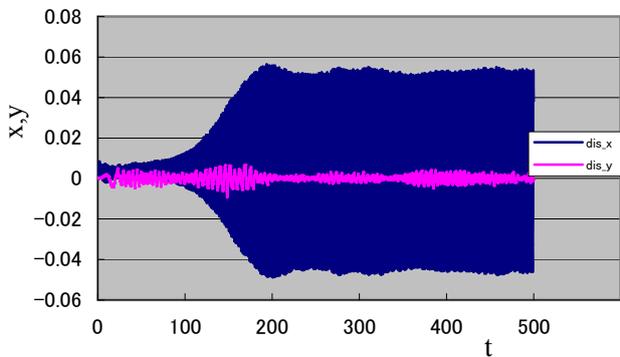


Fig.3 Time histories of x and y , $Urt=1.5$

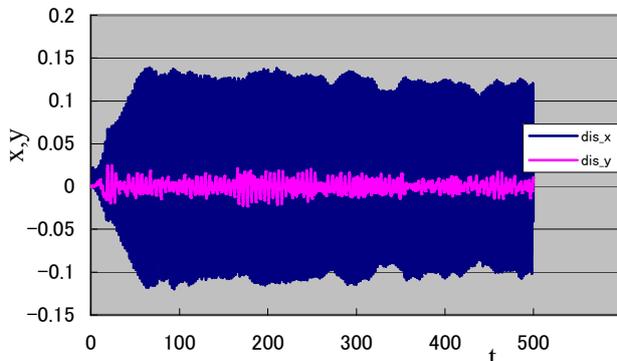


Fig.4 Time histories of x and y , $Urt=2.3$

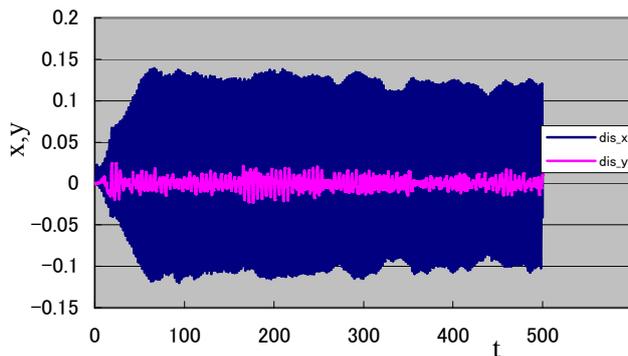


Fig.5 Time histories of x and y , $Urt=3.3$

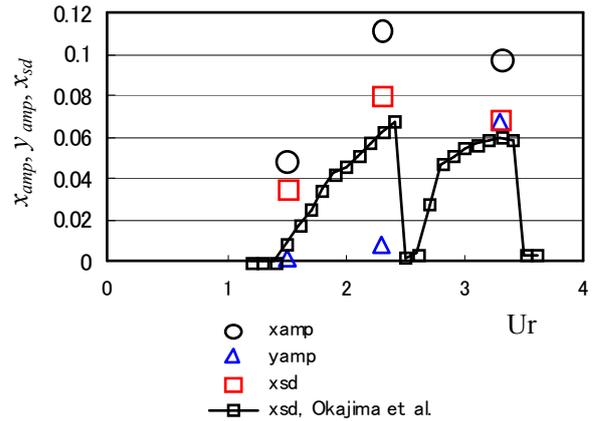


Fig.6 Vibration amplitudes, x_{amp} , y_{amp} and x_{sd}

4. 考察

Fig.2 に、 $Ur = 2.3$ のときにインライン振動している円柱の周りの流れを示しているが、対称渦の発生過程にある。

Figs.3,4,5 は円柱の振動の時刻歴曲線を表す。Fig.3 は $Ur=1.5$ のときの結果であるが、この換算速度では $t=100$ のときはインライン振動振幅がクロスフロー振幅より若干大きい程度だが、そこから急激に差は大きくなり $t=200$ で最大の差になる。 $t=200$ 以降の時間ではインライン振動振幅とクロスフロー振幅の差はほぼ一定になる。

Figs.4,5 は $t=0$ から $t=70$ くらいまでにインライン振動振幅とクロスフロー振幅の差は急激に大きくなってきている。 $t=70$ 以降はその差は共にほぼ一定になっている。本研究の円柱の振動では臨界換算速度は $Ur=5$ なので、これを過ぎるとクロスフロー振動振幅は大きくなることが過去の研究で分かっている。本研究はそれ以下で行っているのでインライン振動が卓越している。

Fig.6 は最大振幅 x_{amp} を Okajima らの実験結果とともに示したものである。 x_{sd} はインライン振動振幅の標準偏差である。Okajima らの実験ではスクリーン数 $Sc=0.8$ となっており本結果と僅かなズレはあるが換算速度の増加によるクロスフロー振幅の変化の様子は実験結果と同じような傾向を示していることが分かる。

以上の結果から、本数値計算は円柱の振動性状を的確に捉えられていることが確かめられた。

5. 参考文献

- [1] 岡島：円柱及び矩形柱の流れ方向流力振動特性，日本機械学会論文集（B編）65 巻 635 号（1997-7）、2196-2203.