

高レイノルズ数流れによる円柱の流体力特性と流体振動に関する 3次元数値シミュレーション

Numerical computation for fluid forces and vortex-induced vibrations of a circular cylinder at the high Reynolds number

○竹下大地¹, 近藤典夫²Daichi Takeshita¹, Norio Kondo²

We present numerical results for fluid forces and vortex-induced vibrations of a circular cylinder which is mounted in super-critical Reynolds number flow. In the flow region, it is well-known that the drag coefficient is very lower than that in the sub-critical Reynolds number region. Then, it is expected that the vortex-induced vibration in the super-critical region is very different in comparison with that in the sub-critical region.

1. はじめに

円柱構造物として扱われている代表的なものに、陸上構造物では、高層ビル群、橋のワイヤー、多脚型煙突、火力・原子力発電における熱交換器等の管群、海洋構造物では、石油採掘等で使われるライザー管、プラントの柱脚部等がある。このような構造物は、直径に対してスパン方向の長さが極端に長いこともあり、剥離渦によって振動しやすくなる。現在までの多くの研究では、レイノルズ数が亜臨界領域の場合がほとんどで、円柱後方の剥離渦が大きくなるために、発生する渦励振振幅は大きなものになる。その一方で、超臨界レイノルズ数域での研究報告は、実験の難しさも手伝って数が少ない。[1]-[3]本研究ではレイノルズ数 Re が 10^6 場合に対して単一円柱の渦励振解析を行い、亜臨界レイノルズ数域の渦励振との相違を明らかにする。この時の円柱モデルは、亜臨界域で想定されたモデルと同じく、1質点2自由度モデルとする。

2. 基礎式

流体運動を支配する非圧縮ナビエ・ストークス方程式を採用し、以下のように与える。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

ここで、 u_i は無次元流速、 t は無次元時間、 f_i は無次元外力、 $x_i (= \bar{x}_i / D)$ は無次元座標、応力 σ_{ij} は

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

で与えられ、 p は無次元圧力、 Re はレイノルズ数を示す。また、圧力のポアソン方程式は、ナビエ・ストークス方程式の発散を取ることで以下のようになる。

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x_i^2} = -\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i}$$

$$\tilde{u}_i = \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - f_i$$

円柱に作用する流体力を抗力係数 C_D と揚力係数 C_L で与え、下記のような無次元の運動方程式を採用する。

$$\frac{d^2 X}{dt^2} + \frac{4\pi h}{Ur} \frac{dX}{dt} + \left(\frac{2\pi}{Ur} \right)^2 X = \frac{1}{2\chi} C_D$$

$$\frac{d^2 Y}{dt^2} + \frac{4\pi h}{Ur} \frac{dY}{dt} + \left(\frac{2\pi}{Ur} \right)^2 Y = \frac{1}{2\chi} C_L$$

ここで、 $X_\alpha (= \bar{X}_\alpha / D)$ と $Y_\alpha (= \bar{Y}_\alpha / D)$ は、イン・ラインとクロス・フロー方向への無次元振動変位、 h は構造減衰定数、換算速度 Ur は

$$Ur = \frac{U_0}{f_n D}$$

で与えられ、円柱と流体の質量比 χ は

$$\chi = \frac{m}{\rho D^2 H}$$

で与えられる。ただし、 U_0 は遠方からの一様な流体速度、 f_n は円柱の固有振動数、 m は円柱の質量、 ρ は流体密度を表す。

3. 数値結果

本研究で解析を行った円柱モデルを Fig.1 に示す。円柱モデルは、 x 軸、 y 軸方向にバネとダンパーで仮想支持された状態に

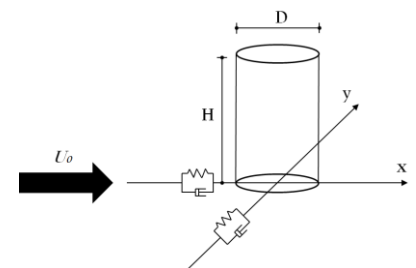


Fig.1 Cylindrical Model

あり、 x と y の両方向に振動する。また x 軸の遠方から一様流速 U_0 を与えている。数値解析では、円柱のスペン比 $H/D=2.5$ に設定し、スクルートン数 $Sc=1.0$ 、レイノルズ数 $Re=10^6$ とした。また $Ur=2.0\sim 5.0$ の範囲での数値解析結果を以下に示す。図中にある x -amp と y -amp は各々 x 軸方向と y 軸方向への円柱振動振幅を表す。

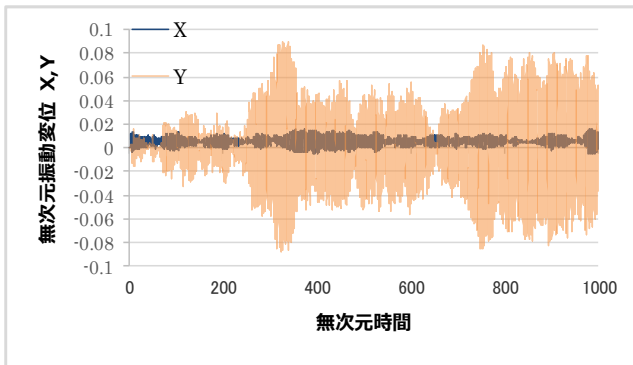


Fig. 2 Time histories of non-dimensional vibration displacements

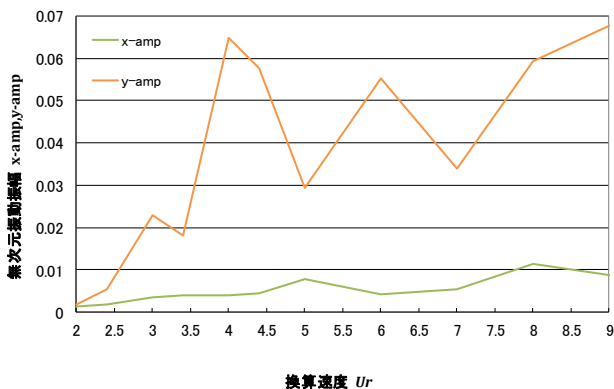


Fig. 3 Vibration amplitudes

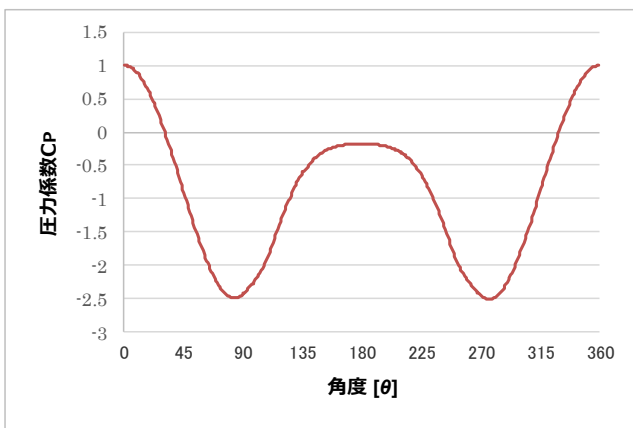


Fig. 4 Pressure coefficients

Fig.2 は、 $Ur=4.0$ での時刻歴曲線を表しており、 x 方向より y 方向の振動変位の大きいことがわかる。さらに、 y 方向の振幅は時刻と共に激しく振動していることがわかる。Fig.3 は、換算速度の変化に対する振動振

幅を示す。 x -amp の変化は見られないのに対し y -amp は $Ur=3.0$ で 0.02 を超え $Ur=4.0$ で大きな振幅に移行する。さらに Ur を大きくして円柱の振動振幅を見ると変動しており、乱流域では振動の激しさが分かる。 $Sc=1.0$ の時、亜臨界レイノルズ数域での渦励振解析では y -amp ≈ 1.0 になるが、 $Re=10^6$ では、 y -amp は極端に小さくなっている。Fig.4 は、 $Ur=4.0$ に対して円柱表面の圧力係数を表している。 C_p の絶対値は $\theta=90$ および $\theta=270$ 付近で最大となり $\theta=180$ 付近では極端に小さくなっていることがわかる。

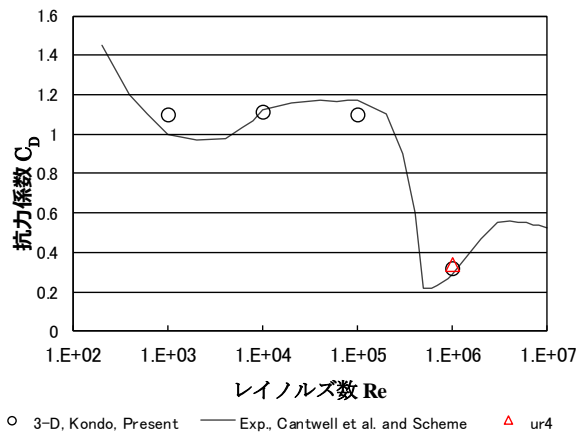


Fig. 5 Drag coefficients

Fig.5 はレイノルズ数に対して抗力係数を表し、○印と実線で表したのが静止円柱の抗力係数である。 $Ur=4.0$ で振動した時の平均抗力係数を△印で表しているが、Fig.2 で見られるように、 y 軸方向の振幅 Y が小さいために、 $Ur=4.0$ に対する抗力係数の値は静止時の場合と一致しており、大きな差は見られない。

4. まとめ

超臨界レイノルズ数域では、臨界レイノルズ数域と比較して抗力係数が極端に小さくなることと、円柱後方で小さな剥離渦のために、円柱の振動そのものは円柱直径の $6\sim 7\%$ 程度までの大きさである事が分かった。このことはあ臨界レイノルズ数域の渦励振における振幅とかなりの相違がある事になる。

5. 参考文献

- [1] 岩村耕司・ほか4名：高レイノルズ数領域における円柱の乱流励振特性，日本機学会論文集，65-635，B編 1999年7月
- [2] 河村勉・ほか4名：超臨界レイノルズ数領域における円柱の渦励起振動，日本機学会論文集，65-635，B編 1999年7月
- [3] Norio Kondo：Third-order upwind finite element solutions of high Reynolds number flows, computer methods in applied mechanics and engineering 112 1994年 227-251