

円柱の空力挙動に関する数値シミュレーション

Numerical Simulation for Aerodynamic Behaviors of a Circular Cylinder

近藤典夫, 日本大学, 274-8501 船橋市習志野台 7-24-1,
kondo@ocean.cst.nihon-u.ac.jp
Norio Kondo, Nihon University, 7-24-1 Narashinodai, Funabashi-shi, Chiba 274-8501

<Abstract> We present numerical results for the vortex-induced vibration of a two-dimensional circular cylinder by using a finite element scheme. The circular cylinder is supported by a spring and damping system. The ALE method is applied to the computation of the Navier-Stokes equations, and the third-order upwind scheme is developed based on the Petrov-Galerkin formulation.

1. はじめに

構造物の空力特性に関する研究は、古くから実験的研究によって行われてきたが、最近では数値解析的研究によっても様々な空力特性の現象の解明が行われている。特に構造物の渦励振現象については、構造物の設計に関して多くの重要な問題を含んでいる。

そこで本論文では、一様流れの中に置かれた 2 次元円柱の空力挙動について数値計算結果を示し、本計算手法の有効性を示す。円柱は弾性支持された剛な構造物で、流れ方向と流れ方向に対して直角方向に振動する 1 質点 2 自由度系モデルを仮定している。

流体計算の空間の離散化には ALE 有限要素法を使い、時間数値積分には陰解法を採用する。円柱の振動方程式の時間数値積分には線形加速度法を使う。

2. 基礎方程式

流体に関しては以下のような無次元化したナビエ・ストークス方程式と連続方程式を採用する。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j u_{i,j} = -p_i + \frac{1}{\text{Re}} (u_{i,j} + u_{j,i})_{,j} + f_i \quad (1)$$

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

ここで、 u_i は流速ベクトル、 p は圧力、 Re はレイノルズ数である。また式(1)の計算には ALE 法を適用している。

次に、円柱は Fig.1 に示すように、1 質点 2 自由度系モデルとして以下のような無次元化した振動方程式を考える。

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + \frac{4ph}{v} \frac{\partial x}{\partial t} + \left(\frac{2p}{v}\right)^2 x = \frac{1}{2} \frac{r}{r_e} \frac{4}{p} C_D \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{4ph}{v} \frac{\partial y}{\partial t} + \left(\frac{2p}{v}\right)^2 y = \frac{1}{2} \frac{r}{r_e} \frac{4}{p} C_L \quad (4)$$

x と y は円柱の直径 D で無次元化された変位 ($=X/D$, $=Y/D$)、 h は減衰係数、 ρ_f と ρ_c は流体と円柱の密度、 v は無次元流速 ($=U/(fd)$)、 f は円柱の固有振動数、 U は代表流速、 C_D と C_L は抗力係数と揚力係数を示す。

3. 数値計算例

一様流れの中に置かれた 2 次元円柱の渦励振に関する数値結果を示す。この計算ではレイノルズ数を 10^4 、円柱と流体の質量比 ρ_c/ρ_f を 39.8 、減衰定数 h を 1% で与えた。これのスクラートン数は 5 になる。

ナビエ・ストークス方程式には、ALE 有限要素法⁽²⁾と陰解法による数値時間積分を適用し、数値計算を行った。また、円柱の振動方程式には線形加速度法を適用した。

Fig. 2 に円柱付近のメッシュ図を示す。200 × 40 の要素数である。

Figs. 3, 4 に $v=4-15$ に対する抗力係数 C_D 、揚力係数 C_L 、そして変位 x 、 y の時刻歴曲線を示す。 $v=5$ のときに、時刻歴曲線は不規則な波形を示しているが、これ以外の無次元速度では規則的な波形となっている。

Fig. 5 は各々の無次元風速に対する x 、 y の最大変位を示す。変位 y についてみると、 $v=3, 4, 5$ では、 y の最大変位は次第に大きくなり、 $v=5$ で最大になる。その後、 v が大きくなるにつれて、 y の最大変位は次第に小さくなっていく。また、変位 x においては、 $v=5$ で最大変位は大きくなるが、 $v=5$ を過ぎると最大変位の大きさは小さくなり、さらに v が大きくなると、最大変位の大きさは次第に大きくなっていく。

Fig. 6 は、各々の無次元風速 v に対するストローハル数を示す。Fig. 2 のような要素分割をしたとき、静止時の 2 次元円柱のストローハル数は、数値計算では $\text{St}=0.227$ であるが、 $v < 1.0$ でのストローハル数は、静止時のストローハル数より小さくなっている。

Fig. 7 円柱が下から上へ向かって移動している途中で変位 y が 0 での流速ベクトルを示し、Fig. 8 は円柱が最大の位置に達した時の流速ベクトルを示す。

参考文献

- (1) N. Kondo et al., "Third-Order Upwind Finite Element Simulation of Flow around Two Square Cylinders", *Comp. Fluid Dyn.*, 7, pp143-153, 1996.
- (2) N. Kondo, "Three-Dimensional Finite Element Analysis for Flow around Square Cylinders", *Theoretical and Applied Mechanics*, 50, pp341-349, 2001.
- (3) 田村 "耐風工学における流れ・構造物の連成振動問題" 計算工学, Vol.2, No4, pp.214-225, 1997.
- (4) N. Kondo, "Third-Order Upwind Finite Element Solutions of High Reynolds Number Flows", *Comp. Meth. Apply. Eng.*, 112, pp.227-251, 1994.
- (5) K. Tsuboi et al., "Numerical Simulation of Unsteady Flow Pattern around a Vibrating Circular Cylinder", *AIAA Paper*, 88-0128, 1988.
- (6) C. W. Hirt et al., "An Arbitrary Lagrangian-Eulerian Method for All Flow Speed", *J. Computational Physics*, 14, pp.227-253, 1974.

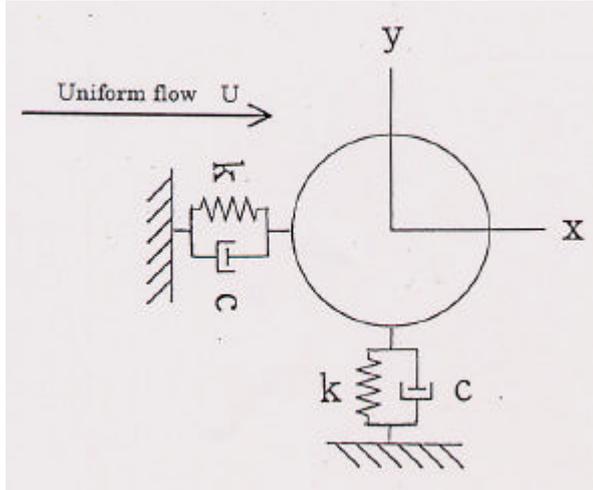


Fig.1 Computational model of a circular cylinder

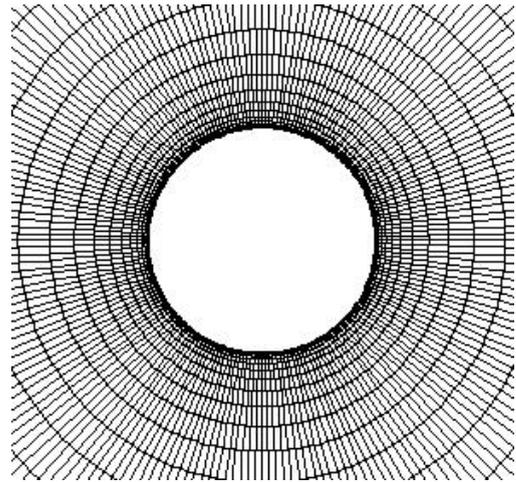
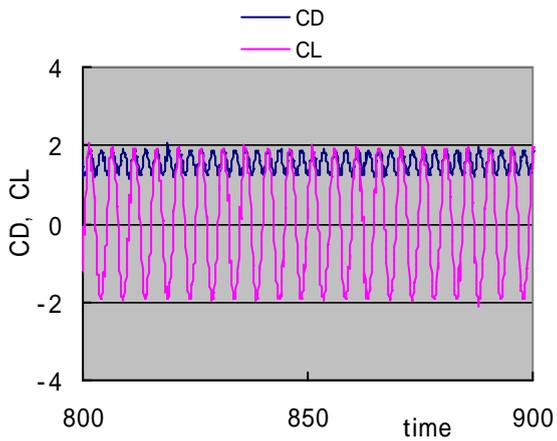
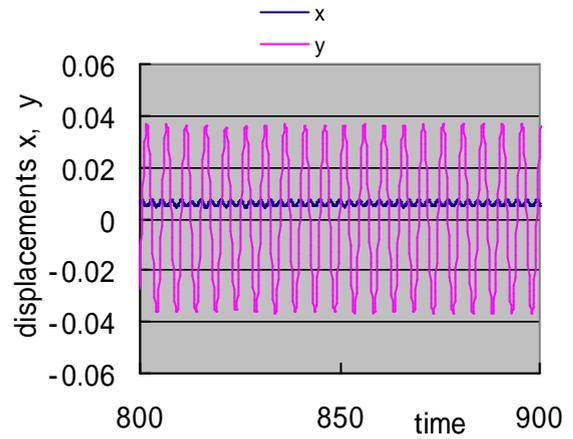


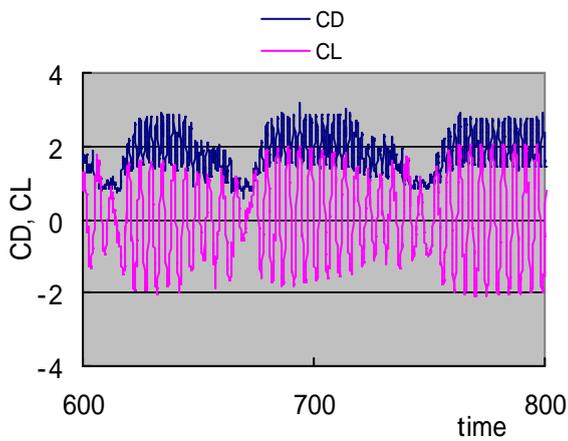
Fig.2 Finite element mesh near a cylinder



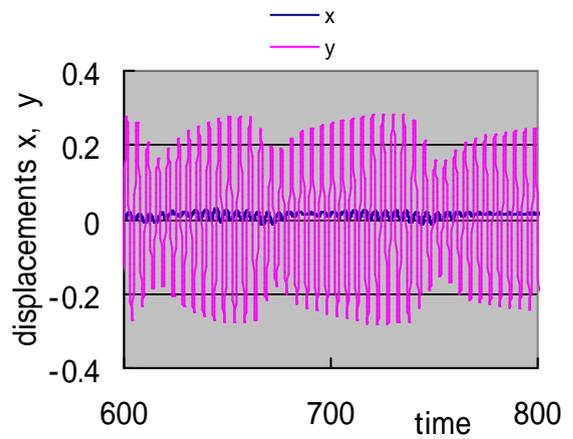
3-1) $v=4$



4-1) $v=4$



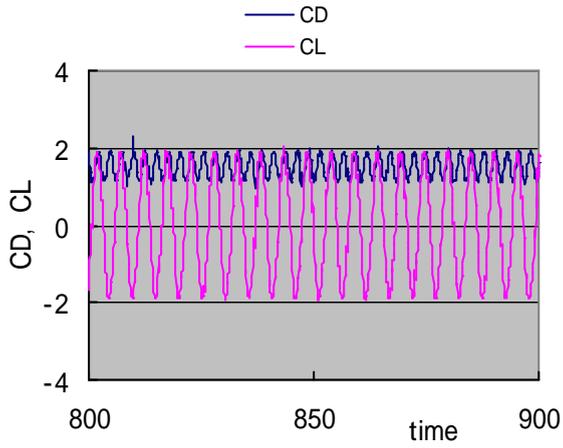
3-2) $v=5$



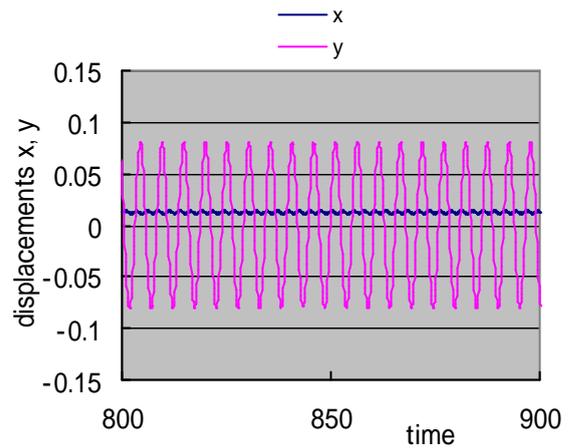
4-2) $v=5$

Fig.3 Time histories of CD and CL at $Re=10000$, $e/h = 39.8$ and $h=1\%$

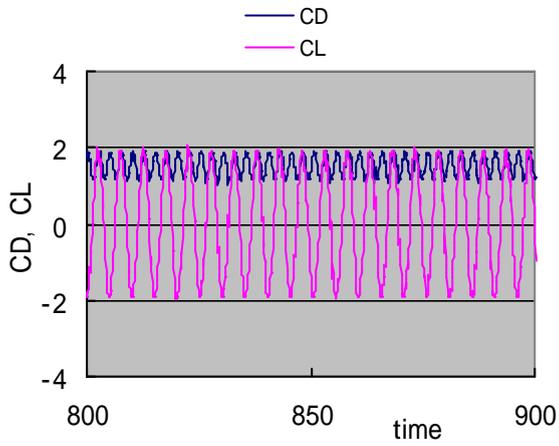
Fig.4 Time histories of displacements x, y at $Re=10000$, $e/h = 39.8$ and $h=1\%$



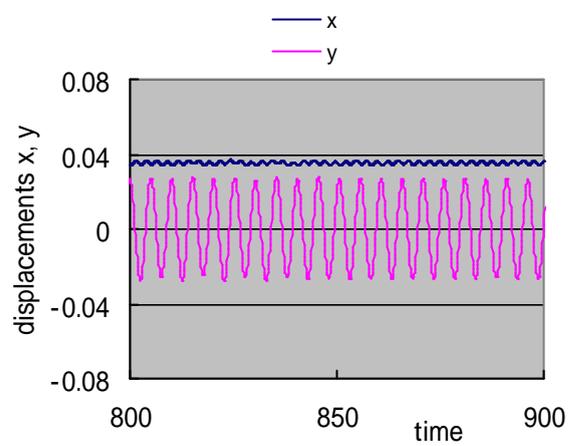
3-3) $v=6$



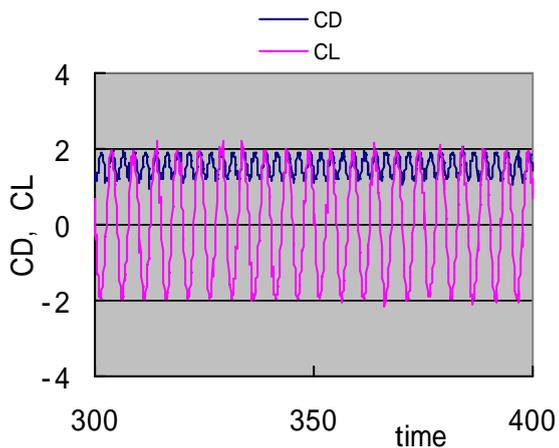
4-3) $v=6$



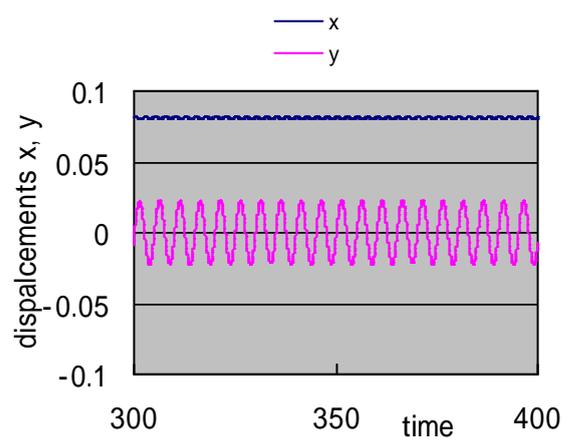
3-4) $v=10$



4-4) $v=10$



3-5) $v=15$



4-5) $v=15$

Fig.3 (Continued)

Fig.4 (Continued)

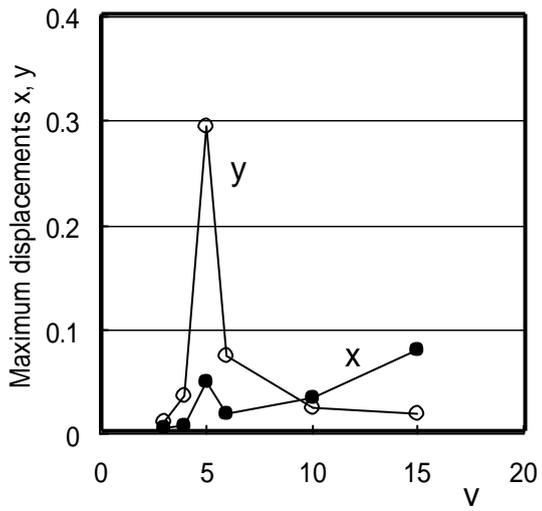


Fig.5 Maximum displacement

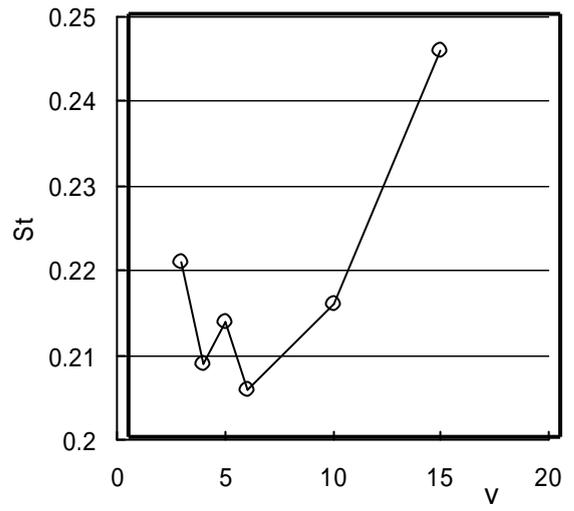


Fig.6 Strouhal number

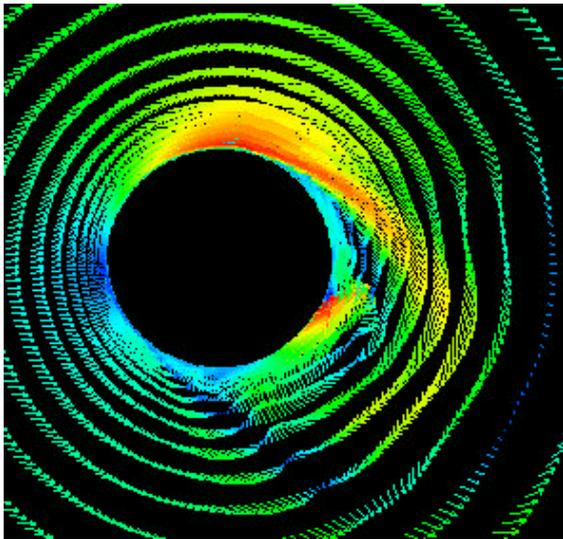


Fig.7 Velocity vectors at v=5 and y=0

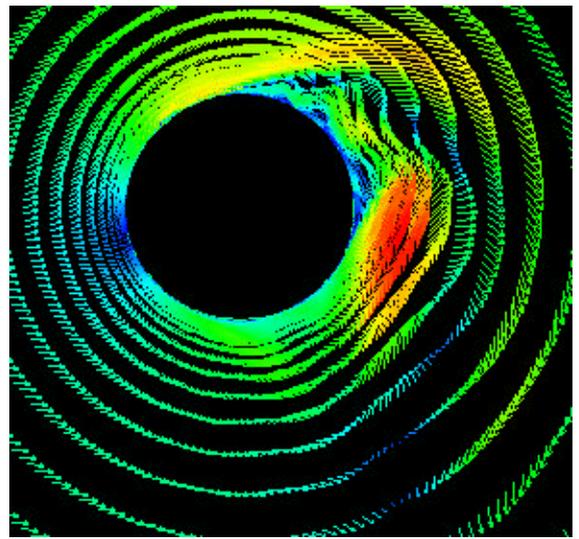


Fig.8 Velocity vectors at v=5 and y=max