

回転振動する円柱周りの流れの数値シミュレーション

日大生産工(院) ○木元 貴之 日大生産工 沖田 浩平

1. 緒言

近年, 航空需要の高まりに伴い世界中で航空機の運航が増加している. しかし乱気流により巡航中の航空機が揺れることで乗客や乗員が怪我をするという事例も増加している. これを防ぐために乱気流中における航空機の揺れ抑制が必要であり, 流れの制御が求められている.

流れの制御の例として空気抵抗低減のために自動車にはヴォルテックスジェネレータという流れを制御するための装置がついている. また, 航空機においてもフラップと呼ばれる装置がついており様々なところで流れの制御が用いられている.

本研究では, 流れの制御の基礎研究として円柱周りの流れを対象に, 円柱の揚力変動を低減する手法について数値シミュレーションを用いた検討を行った. 円柱を回転振動させることによって流れを制御した場合の揚力変動や円柱後流の流れの様子について報告する.

2. 円柱周りの流れ

一様流中に円柱が置かれているとき, その円柱後流では一様流速 U と代表長さ L としたレイノルズ数 Re により大きく異なった流れになる. レイノルズ数は粘性のある流体の流れを支配する無次元数であり慣性力と粘性力の比である. ここでの代表長さは円柱の直径であり, 動粘性係数を ν とするとレイノルズ数は以下の式で表される.

$$Re = \frac{Ud}{\nu} \quad (1)$$

$Re < 6$ の流れの場合では理想流体との場合と同じで流れは円柱に沿って流れていく. $6 < Re < 40$ の場合では円柱表面のある位置においては離が生じ円柱後流に一对の定常な渦が発生する. この渦を双子渦と呼び, 円柱の表面を流れていた流線が壁面から離れ円柱後方に逆流を伴う縦貫領域が発生する状態のことを流れのはく離という. $40 < Re$ の流れでは双子渦は安定に存在することができず交互に円柱からはく離していき渦を生じさせ振動流が発生する. この時にはく離した流れでは, 円柱後流の下流において一定間隔を保った千鳥状の

列を形成する. この渦列のことをカルマン渦列という.

3. 計算手法(PISO法)

本研究ではオープンソースの数値流体解析ツールボックスであるOpenFOAM(v2306)を用いた. 流体解析を行う際には, 解きたい問題に合わせてソルバーという計算プログラムを選択する必要がある. 今回は作動流体を非圧縮性流体とし, 非定常の解析を行ったためPは注目しているセルの中心点で N は隣接セルの中心点, f は注目セルと隣接セルが共有する面の中心点であり, これらにおける値を P , N , f という添え字で表すこととする.

ここで ρ は密度, u は速度, t を時間, A を係

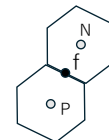


Fig.1 セル

数と定義し連続の式を(2)で表す.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (2)$$

運動方程式を半離散化する.

$$A_P u_P + \sum A_N u_N = -\nabla p \quad (3)$$

OpenFOAMでは右辺=0の形で表され, 以下のように表す.

$$Au = H \quad (4)$$

したがって運動方程式は以下の式となる.

$$Au = H - \nabla p \quad (5)$$

(4)式を連続の式に代入すると

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\frac{\rho}{A} H - \frac{\rho}{A} \nabla p \right) = 0 \quad (6)$$

非圧縮性流体の場合は、右辺の時間微分項が省かれるため以下の式となる。

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{A} \nabla p \right) = \nabla \cdot \left(\frac{H}{A} \right) \quad (7)$$

PISO法は(3)式の運動方程式を解き、仮の速度を求め圧力方程式または(6)式を解くことで圧力を求め、(5)式を速度の式にして計算することで速度の更新をしていく。これらの計算を指定した回数繰り返し必要な時間ステップ分を行う。

4. 解析領域と流れ場

Fig.2に示した領域のX軸方向に6d, Y軸方向に3dの領域の中に中心が(0,0), 直径0.01mmの円が入っている。解析は2次元で行い、入り口の境界条件と出口境界条件ではX軸方向に一樣な流速を $2.0 \times 10^{-2} \text{m/s}$ として解析を行った。このほかの物性値として動粘性係数は $1.0 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ である。また、回転運動する円柱のでは原点を基準として解析領域に対して垂直な軸周りを回転するように振幅を180度として角加速度を 0.314rad/s とした。表1に解析

Table.1 Analysis Conditions

Analysis Dimension	2D flow
Fluid Velocity	$2.0 \times 10^{-2} \text{m/s}$
Reynolds Number	2.0×10^2
Kinematic Viscosity	1.0×10^{-5}

条件を示す。

5. 結果と考察

Fig.2とFig.3では静止円柱と回転振動した円柱の揚力係数Clの値の時間に対する変化である。Fig.2の静止した円柱では時間に対して揚力係数の値の変動が大きくなっている。Fig.3の回転運動する円柱では揚力係数の振幅が静止した円柱が小さくなっていることが確認できた。これより、角加速度や振幅を変えることで揚力係数の変動を変えることができる。

6. 結言

円柱と回転振動をする円柱周りの流れについて解析を行うことができ、回転運動をしたときとの揚力係数の変動を確認できた。講演では、円柱と回転運動する円柱周りの流れについて両者を比較し考察を行った結果を揚力変動などの観点からグラフ等を用いて説明を行う。

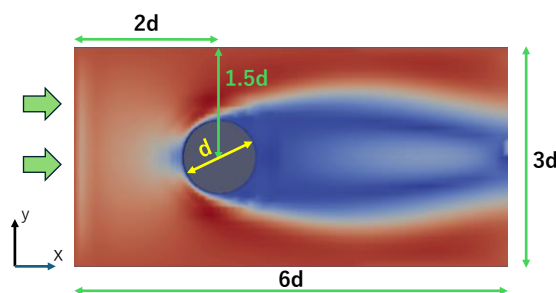


Fig.1 解析領域

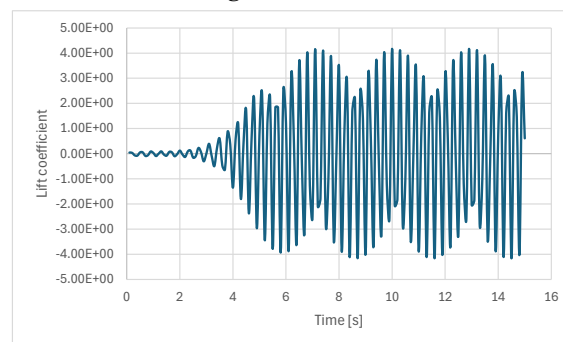


Fig.2 静止した円柱の揚力係数の変動

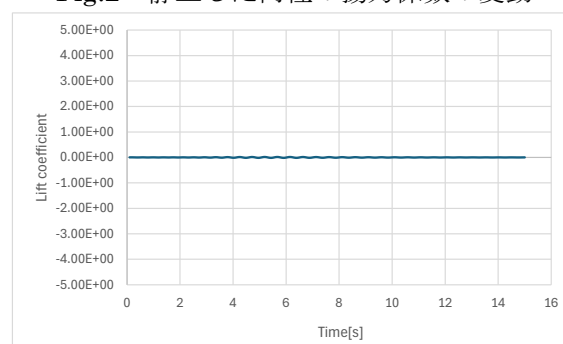


Fig.3 回転振動する円柱の揚力係数の変動

参考文献

- 1) pisoFoamによる2次元円柱周りの流れの解析(修正版) 第24回OpenCAE勉強会(岐阜) 2024年月日閲覧,
http://opencae.gifu-nct.ac.jp/pukiwiki/index.php?plugin=attach&refer=%C2%E8%A3%B2%A3%B4%B2%F3%CA%D9%B6%AF%B2%F1%A1%A7H250810&openfile=2Dflow_around_cylinder_with_pisoFoam_rev.pdf
- 2) 春日 悠, 今野 雅, 「OpenFOAM」による熱移動と流れの数値流体解析, 一般社団法人, 森北出版株式会社 2016年
- 3) 鈴木 康方, 関谷 直樹, 彭 國義, 松島 均, 沖田 浩平, 機械系コアテキストシリーズ 「流体力学」, コロナ社 2018年