

並列円柱のウェイクエクサイテイションに対する表面粗度の影響

徳島大学大学院 学生会員 ○井上 真尋 徳島大学 正会員 野田 稔
 コーナン建設株式会社 非会員 谷 義彰 徳島大学 フェロー 長尾 文明

1. はじめに

並列円柱の空力振動現象の1つとしてウェイクエクサイテイションが知られており、過去の研究によって応答のレイノルズ数依存性が指摘されている。しかし、ウェイクエクサイテイションの振動メカニズムは未だに不明瞭な点が多く、明確にされていないのが現状である。そこで本研究では、ウェイクエクサイテイションの発生の主要因と考えられる円柱後流に焦点を置き実験を行った。並列円柱の下流側円柱を2自由度ばね支持による応答実験に加えて、円柱周りの流速の測定を行い、並列円柱の下流側円柱の応答に対する円柱の後流性状の影響を検討した。また、円柱に表面粗度を付加することで見かけのレイノルズ数を変化させ、それぞれの条件での応答の変化や円柱周りの流れ場の変化を観測した。

2. 実験概要

(1) **2自由度応答実験** 模型の配置状況を図-1に示す。並列円柱の直径 $D=42\text{mm}$ とし、2円柱の中心間距離が無風時に $L=3D(126\text{mm})$ となる位置に配置して応答実験を行った。このとき、鉛直応答変位 Y 、水平応答変位 X 、吹流し距離 l (静的な空気力を受けることで下流側円柱の中立軸が移動した距離) を測定した。下流側円柱は振動数 f を鉛直、水平方向共に 2.2Hz とし、対数減衰率 δ を 0.007 (スクルトン数: $Sc = 2m\delta/\rho D^2 = 16.4$) に設定して実験を行った。実験は円柱の表面が滑面の状態 (smooth)、図-2に示すような粗度の小さいメッシュA(meshA)、または粗度の大きいメッシュB(meshB)を上流側円柱に巻きつけ、表面粗度を付加した状態の3パターンの条件について行った。

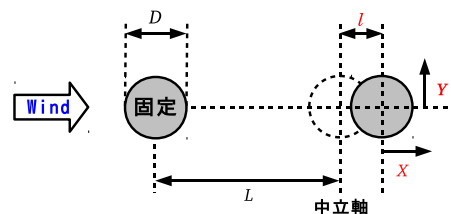


図-1 模型配置

(2) **円柱後流の測定** I型熱線プローブによって、基準風速が $U_0=1,2,3,4,5,6,9\text{m/s}$ の時の単独静止円柱後流の風速測定を行った。測定は円柱の中心点から水平距離 $x=1D\sim5D$ の各断面において $y=3D\sim-3D$ の範囲で行った。なお、風速データのサンプリング周波数は 1kHz 、サンプリング数は 20000 個 (評価時間: 20s) である。こちらも、上記の3パターンの条件で実験を行った。

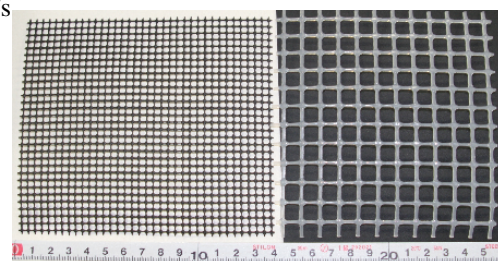


図-2 使用したメッシュ
 (メッシュA(左)、メッシュB(右))

3. 実験結果及び考察

(1) **下流側円柱の応答** 円柱表面が滑面の状態における下流側円柱の鉛直倍振幅を図-3に、吹流し距離を図-4に示す。並列円柱の下流側円柱は2段階の不安定なりミットサイクル (UnstableLC) が伴うハードフラッター型の応答を示した。1段階目の安定なりミットサイクル (1st-StableLC) は倍振幅で $1D$ 程度の振幅が発生するが、風速が増加しても振幅はわずかにしか発達せず、吹流し距離もほぼ 0 であった。この原因としては、自励振動が発生しているが、上流側円柱の死水域内での振動であったためと推測される。2段階目の安定なりミットサイクル (2nd-StableLC) は風速が増加するに連れて振幅が大きくなり、吹流し距離も急激に増加する。これは風速の増加によってギャップフローが発生し、下流側円柱に働く揚力と抗力が増加し、この揚力の増加により円柱の振動方向に空気力が生まれて励振力がさらに増幅され鉛直振幅が大きくなり、外部流によって生じる抗力によって吹流し距離が大きくなったものと考えられる。次に表面粗度を付加したときの応答の変化を図-5に示す。図-5を見ると表面粗度が大きい条件であるほど2段階目の安定なりミットサイクルの発現が早まっていることが確認できる。これは粗度を付加したことで、見かけのレイノルズ数が大きくなり、下流側円柱の応答の発現が低風速域に、即ち、低レイノルズ数域に移行しているためと考えられる。

(2) **円柱周りの流れ場** 応答実験での下流側円柱中心まで距離 $x=3D$ で円柱表面が滑面の条件での円柱後流の風速分布と乱れの強さの測定結果を図-6、図-7に示す。図-6の結果から風速比が1以下の範囲となる幅は、 $y=2D\sim3D$ 程度となっている。ここで図-3を見ると倍振幅 $2Y=2D\sim3D$ という2段階目の安定なりミットサイクルの倍振幅とほぼ一致する。

つまり2段階目の安定なりミットサイクルは、風速比1をまたぐ剥離流の層において、正圧と負圧の差によって励振力を受けて発生する大振幅であると考えられる。

また図-7を見ると、乱れの強さがピークを示す y/D はおよそ+0.5,-0.5の2点であり、倍振幅で1D程度となっている。これを図-3と比較すると、1段階目の安定なりミットサイクルの振幅とほぼ一致する。乱れの強さが最大となる位置にはカルマン渦の中心が通っていることが予想され、加えて、1段階目の安定なりミットサイクルは風速の増加に伴う振幅の増加が見受けられないことから、1段階目の安定なりミットサイクルは、剥離流が形成するカルマン渦によって振幅を拘束されている振動であると考えられる。

次に、実験で得られた風速の時系列データをフーリエ変換することで変動風速のパワースペクトルを算出した。図-8は各 y/D で得られたパワースペクトルを周波数と風速の2乗で無次元化した値であり、本論文では紙面の都合上、円柱表面が滑面で $X=3D, U=6\text{m/s}$ の場合のデータのみ掲載する。これを見ると高周波成分を含む部分と含まない部分が y/D によってはっきり分かれていることが分かる。ここで、高周波成分を含む範囲を後流内、含まない範囲を後流外と考え、その境界になる y/D の値を各 x/D , 各風速でも読み取りその各値から最小二乗法によって次のような近似式が得られた。

$$y/D = \alpha(x/D)^\beta \quad \alpha = 0.586071U^{0.302852} \quad \beta = 0.751736U^{-0.150329} \quad (1)$$

円柱にメッシュA, Bを巻いた条件も同様にして、以下の式が得られる。

$$y/D = \alpha_A(x/D)^{\beta_A} \quad \alpha_A = 0.666269U^{0.191597} \quad \beta_A = 0.800557U^{-0.249313} \quad (2)$$

$$y/D = \alpha_B(x/D)^{\beta_B} \quad \alpha_B = 0.992443U^{-0.0202344} \quad \beta_B = 0.523791U^{0.00407819} \quad (3)$$

式(1)より図-9の様な推定値が得られる。図-9を見ると円柱表面が滑面の時、風速が増加するほど後流の幅が拡大していることが読み取れる。次にメッシュを巻いた条件の推定値も同時にプロットしたグラフを図-10に示す。図-10によるとメッシュを巻いたものは風速の変化による後流幅の増加は見受けられない。また、低風速域では滑面の状態の方がメッシュを巻いた状態よりも後流幅が狭いが、風速3m/s付近を境にメッシュを巻いた状態の方が相対的に後流幅が狭くなる。ここで図-3を見ると粗度が大きい状態の方が2段階目の安定なりミットサイクルの発現が早まっている。これは粗度の大きい状態の方が滑面の状態に比べて後流幅が狭くなったことで、ギャップフローが発生しやすくなり、振動の発現が早められたものと推測される。

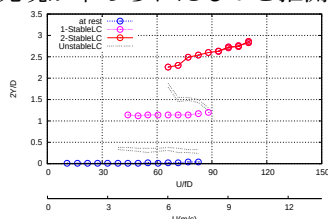


図-3 下流側円柱の鉛直倍振幅 ($f=2.2\text{Hz}, \delta=0.007$)

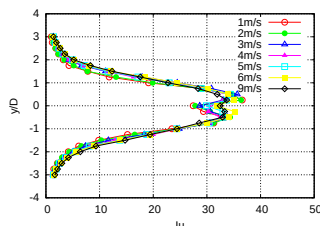


図-7 円柱後流の乱れ強さ ($X=3D$)

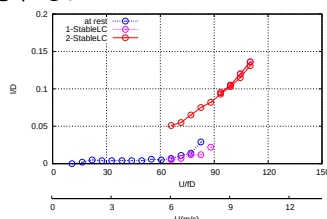


図-4 下流側円柱の吹流し距離 ($f=2.2\text{Hz}, \delta=0.007$)

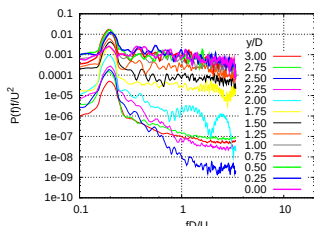


図-8 円柱後流のパワースペクトル ($X=3D, U=6\text{m/s}$)

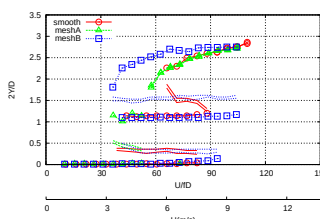


図-5 表面粗度の違いによる下流側円柱の応答変化

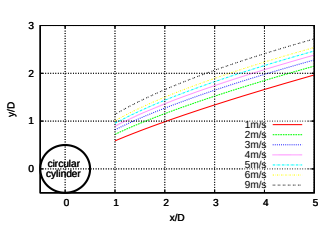


図-9 後流形状の推定

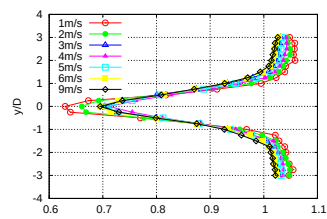


図-6 円柱後流の風速分布 ($X=3D$)

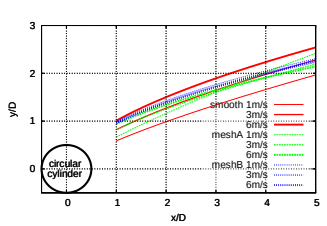


図-10 後流形状の比較

4. おわりに

今回の研究で以上の結果が得られたが、振動のメカニズムと後流の性状の関連性については、推測の域を出ず、詳細な後流の性状を把握するために、流れの可視化を行い、その結果を含めた上でさらに詳しく検討する必要がある。

5. 謝辞

本研究は日本学術振興会平成22年度科学研究費補助金(基本研究(c)#22560480)の助成により行われたことを付記し、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 宇都宮英彦 他, “角柱後流の作用による円柱の空力振動特性に関する研究”, 第17回風工学シンポジウム論文集, pp.309-314, 2002.