

CFD による静止円柱の表面圧力変動特性の検討

徳島大学大学院 学生会員 ○大西 慎也 徳島大学 正会員 野田 稔
 徳島大学 フェロー 長尾 文明

1. はじめに

円柱部材は、土木構造物および建築物において基本的な構造部材として広く使用されている．円柱のような曲面を持つ部材において，風による表面圧力変動は複雑であるとされている．そのため使用されている円柱部材を今後も安全に使用，設計するためにも円柱部材表面の変動構造を知る必要がある．そこで，本研究では風洞実験では難しいとされる円柱表面の変動圧力の多点同時観測が可能な数値流体力学（以下 CFD）を用い，変動圧力に対して POD 解析¹⁾を用いて，円柱表面圧力の組織的な変動構造について検討を行った．

2. 解析概要

解析空間を図-1 に示す．本研究では CFD において円柱表面圧力変動を正しく表せているのかを検討する必要がある，解析領域における部材軸方向 (z 方向) の長さ (L) および部材端境界の異なる 2 通りの解析を行った．1 つ目は一般的なモデル化手法に沿って，部材長さ $2.7D$ ，部材端境界を周期境界条件と設定したもの（以下 2.7D-cyclic と表記），2 つ目はより実際の部材に近いと考えられる，部材長さ $10D$ ，部材端境界を slip 壁条件に設定したもの（以下 10D-slip と表記）の解析を行った．両ケースの部材軸方向の分割条件は，表-1 に示す通り，両ケース共に流れ場のレイノルズ数は 20,000，円柱周方向分割数は 240 分割とした．解析を行う上で数値流体解析ソフトウェア OpenFOAM²⁾を用い，流体は非圧縮性流体，乱流モデルは LES を採用し，PISO 法による非定常計算を行った．流入風速 $U = 1.0\text{m/s}$ ，時間刻み $\Delta t = 0.0005\text{s}$ （無次元時間: $tU/D = 0.005$ ）とし，30s(300) ~ 70s(700) の間を 100Hz で表面圧力のサンプリングを行った．サンプルされる各ケースの円柱表面測点数は，2.7D-cyclic が 21,600 点，10D-slip が 28,800 点であり，それらのデータを使用して POD 解析を行う．

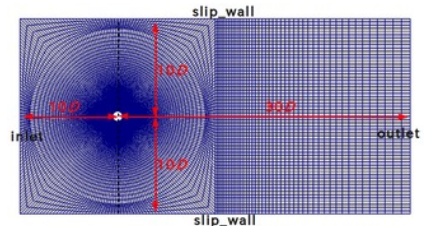


図-1 解析空間

表-1 部材軸方向分割条件

Case	Δz (分割数)
2.7D-cyclic	$0.03D(90)$
10D-slip	$0.083D(120)$

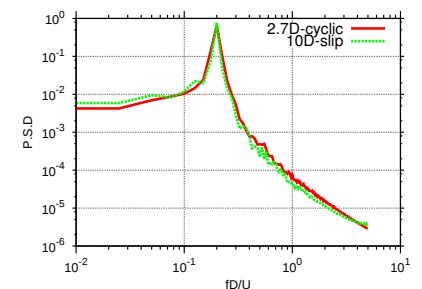


図-2 揚力係数パワースペクトル

表-2 空力係数統計量

Case	$\bar{C}_D$	C'_D	C'_L
2.7D-cyclic	1.161	0.115	0.303
10D-slip	1.119	0.059	0.167

3. 解析結果および組織的変動構造に関する考察

(1) 諸空力係数の統計量および周波数特性

揚力係数のパワースペクトルを図-2，両ケースの諸空力係数の統計量を表-2 に示す．揚力係数のパワースペクトルに関しては， $fD/U = 0.2$ においてピークを持っており，両ケースでは安定的にカルマン渦の放出が行われていることが分かる．表-2 より平均値はほぼ同じであるが，変動量は 10D-slip の方が小さい．これは，部材軸方向の空間が大きいこと，部材軸方向の分割幅が大きい等の影響が考えられる．諸空力係数の統計量および周波数特性だけでは両ケースの決定的な違いを確認できないため，次に POD 解析による円柱表面圧力変動の組織構造について述べていく．

(2) 組織的変動構造特性

10 次モードまでの両ケースの各々の寄与率および累積寄与率を図-3 に，モード形の基準座標のパワースペク

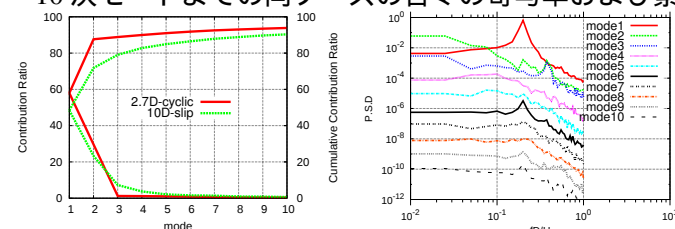


図-3 寄与率および累積寄与率 図-4 2.7D-cyclic 基準座標 P.S.D

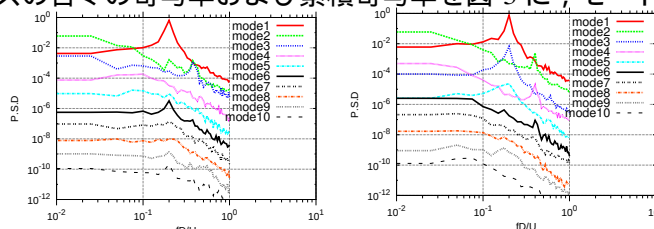


図-5 10-slip 基準座標 P.S.D

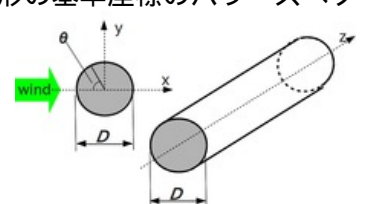


図-6 座標系

トルを図-4, 図-5 に示す。図-3 より, 両ケースの全変動に対する1次, 2次モードの寄与率が高く, 図-4, 図-5 より1次モードの基準座標のパワースペクトルが $fD/U = 0.2$, 2次モードが $fD/U = 0.4$ で卓越することから, 両モードはカルマン渦放出に起因する変動であることが分かる。しかし, 2.7D-cyclic では両モードの累積寄与率が87.5%であるのに対し, 10D-slip では71.8%と両モードの全変動に対する寄与が小さい。また, 寄与率が3番目に大きい3次モードの寄与率に関しても, 2.7D-cyclic では1.54%, 10D-slip では7.27%と2.7D-cyclic に対して5倍程大きい。円柱表面圧力変動に対してPOD解析結果の座標系を図-6, モード形を図-7 に示す。上述したように, カルマン渦放出に起因する変動である1, 2次モード形は両ケースで差は無いが, 3次モード以降のモード形が異なっている。特に10D-slip では円柱上下面で対称, 非対称および高次モードに行くに従って部材軸方向に成分の節が増加していく組織的な変動構造が確認できる。また, 10D-slip の3次, 4次モードはそれぞれ, $fD/U = 0.2, 0.4$ で基準座標のパワースペクトルの卓越が存在することから, 部材からのカルマン渦放出は部材方向で一様ではないことが考えられる。以上をより, 10D-slip 条件での円柱表面圧力変動構造が正しいとすると, 一般的なモデル化手法では円柱本来の変動構造の7割程度しか表すことができていない。これには, 部材端に現実では存在しない境界面の全部物理量を一致させる周期境界条件を課すことや, 解析空間における部材長さが不十分であるため, 2次元的な変動構造が卓越しているということが考えられる。また10D-slip の結果より, 円柱表面圧力変動のモード形より円柱表面圧力変動は円柱上面, 下面で対称・非対称および部材軸方向に節を持つ変動構造を持っていると考えられる。

4. おわりに

今回の研究は, 以上の結果が得られたが, 円柱の表面圧力変動の組織構造について多くの考察をする余地が残っていると同時に, 周辺流れ場の変動構造についても考察を行う必要がある。さらに, 円柱部材は単独よりも複数近接に配置される例が多く, 斜張橋ケーブルや電線のようにケーブルを近接配置することでウェイクギャロッピングと呼ばれる空力振動現象が生じる。従って, 今後は近接配置された2円柱の表面圧力変動構造についても検討を行なう必要がある。

参考文献

- 1) 田村幸雄, 「固有直交関数展開のランダム変動場への応用のすすめ」, 日本風工学会誌, p33-41, (1995)
- 2) OpenCFD Ltd., "OpenVFOAM", <http://www.openfoam.org>, 2011

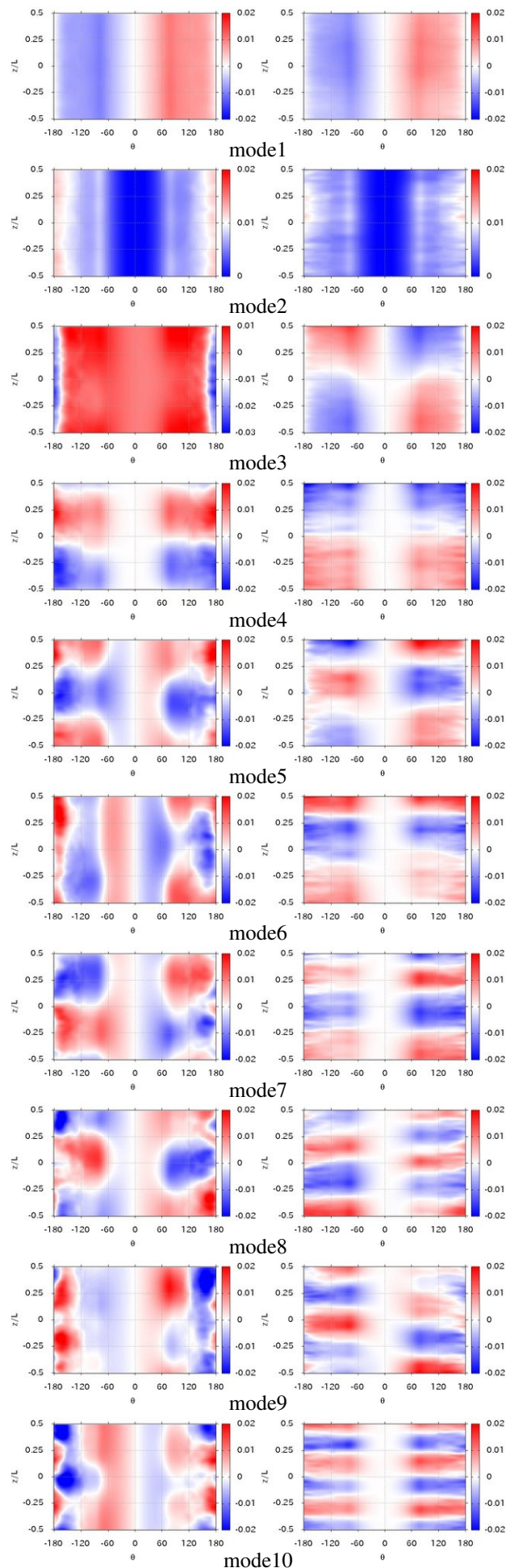


図-7 POD 解析 (左:2.7D-cyclic, 右:10D-slip)