

数値流体解析における静止円柱の表面圧力の変動特性

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

電線や斜張橋ケーブル等のように細長い円柱部材において、剛性や構造減衰が小さいことから時折風に対して不安定になる事例が多く報告されている。また円柱のような曲面を持つ部材は、風による表面圧力変動が複雑であることが良く知られており、円柱部材を今後も安全に使用していくためには円柱部材表面圧力の変動構造を知ることは大変重要である。そこで、本研究では風洞実験では実施することが難しい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⁾を行うと同時に、部材軸方向の揚力係数のコヒーレンスを求め、静止単独円柱の表面圧力変動特性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り、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3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た部材長さ2.7D、部材端境界を周期境界条件としたもの(以下2.7D-cyclicと表記)、2つ目は1つ目のモデルの部材端境界をslip壁条件としたもの(以下2.7D-slipと表記)、3つ目はより複雑な三次元的な流れ場の状態を表現できるように、部材長さ10D、部材端境界をslip壁条件としたもの(以下10D-slipと表記)の解析を行った。各ケースの部材軸方向の分割条件は、表-1に示す通り、各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の1つであるOpenFOAM²⁾を用い、非圧縮性流体を前提の支配方程式に、標準SmagorinskyのLESを適用し、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: $\Delta t U/D = 0.005$)とし、定常状態と判断した30s(300)~70s(700)の間を100Hzで表面圧力のサンプリングを行った。各ケースの円柱表面測点数は、2.7D-cyclic,slipが21,600点、10D-slipが28,800点であり、それらの時系列データを使用してPOD解析を行った。一方、部材軸方向のコヒーレンス特性については、各ケースの部材中央断面を基準にz離れた断面の揚力の卓越周波数のコヒーレンスを求めた。コヒーレンスを求める際には、4,000個の時系列データを400個に分け、10個のクロススペクトルのアンサンブル平均を行った。

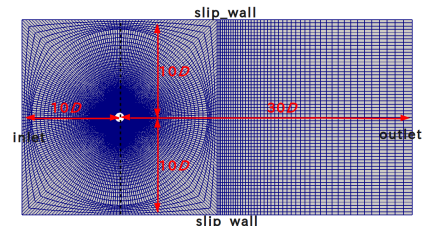


図-1 解析空間

表-1 部材軸方向分割条件

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

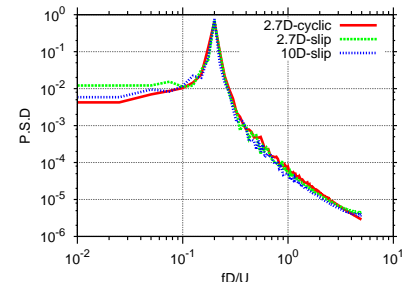


図-2 揚力係数パワースペクトル

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
2.7D-slip	1.046	0.040	0.101
10D-slip	1.119	0.059	0.167

3. 組織的変動構造に関する考察

(1) 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、平均抗力係数 \bar{C}_D 、変動抗力、揚力係数 C'_D 、 C'_L 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、各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、変動量は部材端境界をslip壁条件にしたものの方が小さい。これは、部材端境界の違いによる影響であると考えられる。諸空力係数の統計量および周波数特性だけでは各ケースの差異に対する情報が乏しいため、次に本研究の主旨であるPOD解析による円柱表面圧力変動の組織構造および部材軸方向の揚力係数のコヒーレンス特性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3ケース各々の寄与率及び累積寄与率を図-3に、紙面の都合上2.7D-slipの

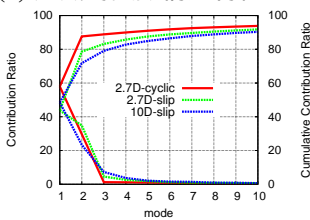


図-3 寄与率及び累積寄与率

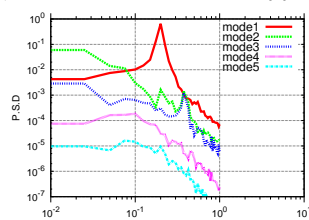


図-4 2.7D-cyclic 基準座標 P.S.D

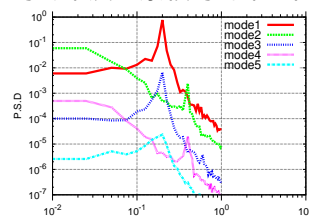


図-5 10-slip 基準座標 P.S.D

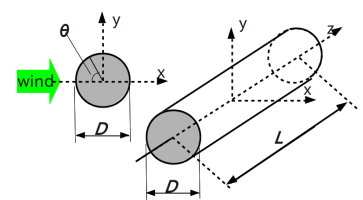


図-6 座標系

キーワード POD 解析, 数値流体力学, コヒーレンス
 〒770-8506 徳島県徳島市南常三島2-1 徳島大学 TEL/FAX:088-656-7323

モード形が5次モードまで10D-slip とほぼ同じであるため、2.7D-cyclic, 10D-slip のモード形の基準座標のパワースペクトルを図-4, 図-5 に示す。図-3 より、各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、2.7D-slip では79.8%, 10D-slip では71.8%と両モードの全変動に対する寄与が小さく、部材端境界と部材長さの影響を受けていることが分かる。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。また、紙面の都合上2.7D-slip は3, 4次モードのみを示す。また、縦座標はモード形を比較しやすいように部材長さ L で基準化を行なっていることに注意してもらいたい。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次モードは各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2.7D-slip と10D-slip には対称, 逆対称モードが存在し、紙面の都合上5次モードまでしか掲載していないが、10D-slip では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された。また、10D-slip の3, 4次モードは $fD/U=0.2, 0.4$ で基準座標のパワースペクトルの卓越を持つことから、部材からのカルマン渦放出は部材軸方向に一樣ではないと考えられる。2.7D-cyclic で逆対称モードが存在しない理由として、部材端境界にcyclic条件を課すことで流れ場が対称となるよう拘束されたため対称な変動モードしか表せられず、対称なモード形である1, 2次モードの寄与率が大きくなったのではないかと考えられる。従って、円柱表面変動圧力の組織構造は部材端境界および部材長さの影響を強く受けることが分かった。

(3) 揚力係数の部材軸方向のコヒーレンス特性: 部材中央断面を基準とした揚力係数の部材軸方向のコヒーレンス分布を図-8 に示す。各ケースの分布性状を比較すると、2.7-cyclic, 2.7D-slip では部材軸方向にわたりコヒーレンスがほぼ1を保ち、10D-slip では中央断面から離れるに従ってその値が小さくなるという明確な違いが確認できる。実際の現象において、円柱のような曲面を持つ部材において、カルマン渦放出に伴う揚力係数の部材軸方向のコヒーレンスが部材軸方向に1を保つとは考えられず、10D-slip のような釣鐘状のコヒーレンス分布をすると考えられる。従って、揚力係数のコヒーレンス特性については、部材長さの影響を強く受けることが分かった。

4. おわりに

以上の結果が得られ、CFD において静止円柱の表面圧力の変動特性を正しく表すためにはより実際に近いモデル化が必要だと考えられる。しかし、円柱の表面圧力変動特性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。

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

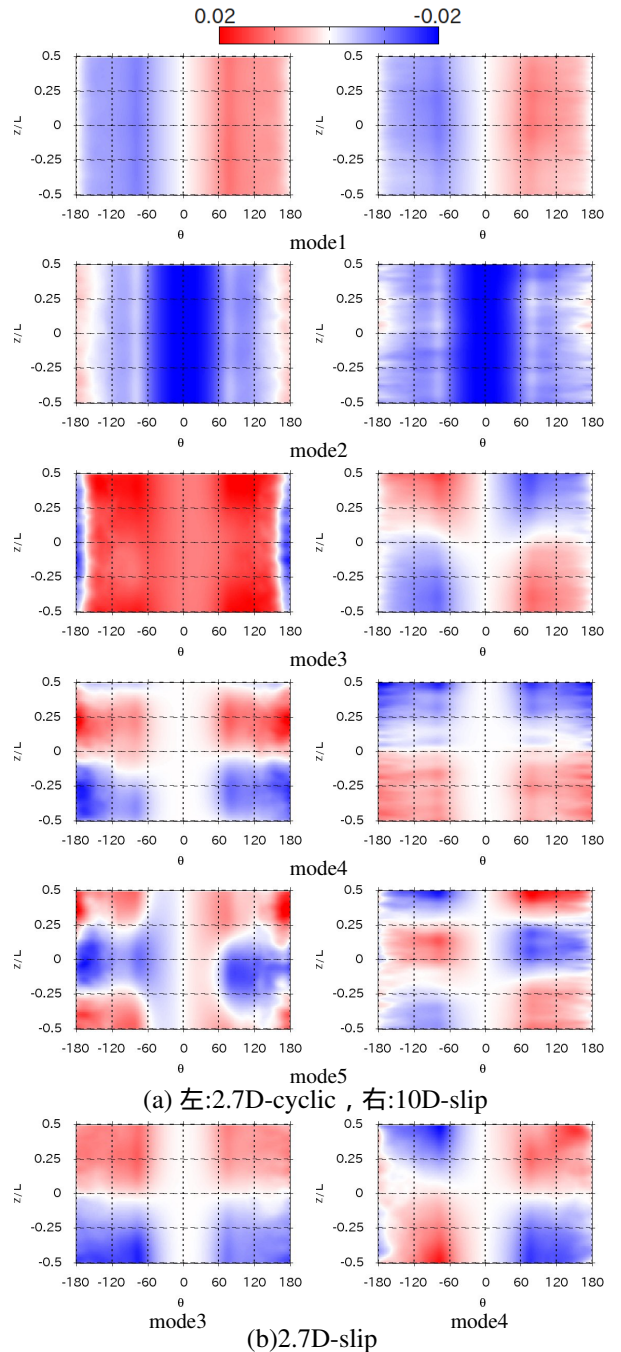


図-7 POD 解析結果

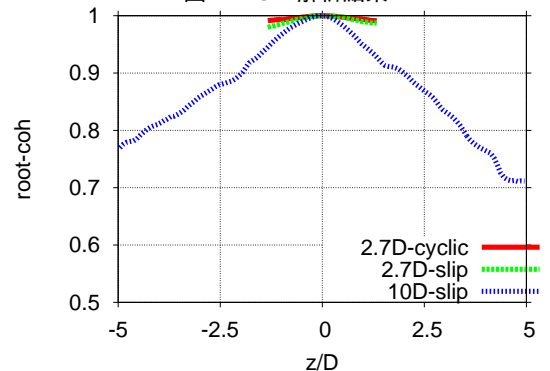


図-8 揚力係数コヒーレンス分布 (部材中央基準)