

側壁境界条件およびアスペクト比が静止円柱の表面変動圧力に与える影響

Effects of the aspect ratio and of the side wall boundary conditions on
fluctuating surface pressure of a single fixed circular cylinder

野田 稔, 徳島大学, 徳島市南常三島 2-1, E-mail:noda@ce.tokushima-u.ac.jp
大西 慎也, 徳島大学, 徳島市南常三島 2-1, E-mail:c501431027@tokushima-u.ac.jp
長尾 文明, 徳島大学, 徳島市南常三島 2-1, E-mail:fumi@ce.tokushima-u.ac.jp
Minoru Noda, Tokushima Univ., 2-1 Minamijosanjima, Tokushima
Shinya Onishi, Tokushima Univ., 2-1 Minamijosanjima, Tokushima
Fumiaki Nagao, Tokushima Univ., 2-1 Minamijosanjima, Tokushima

In this study, three dimensional fluid field around a single fixed circular cylinder was calculated by Large Eddy Simulation, and the structure of fluctuating surface pressure acting on a fixed circular cylinder was investigated. Simultaneously, effects of the aspect ratio and of boundary condition of side wall for CFD on fluctuating surface pressure acting on a fixed circular cylinder were examined. As results of this study, it was found that spatial correlation for axial direction was controlled by the aspect ratio and the boundary condition of side wall.

1. はじめに

円柱部材は構造物にとって基本的な部材であり、電線や斜張橋ケーブル等のように細長い部材(アスペクト比が大きい)として使用されていることが特徴として挙げられる。しかし、例に挙げたような細長い部材において、風に曝された部材表面から周期的に流れが剥離し、カルマン渦を形成することで部材表面に周期的な圧力変動が生じ、部材が振動する等の事例がある。その振動現象は渦励振としてよく知られており、部材の制振対策や耐風安定性のためには、流れの剥離に伴う部材表面変動圧力の空間相関やその変動圧力の組織構造を知る必要があり、本研究では数値流体解析(以下 CFD と表記)を用いることにより両者の検討を行った。

ところで、近年の計算機器の発達により、風工学において円柱等のような基本的な断面を持つ部材の耐風安定性を照査する際に、CFD を使用するようになってきた。CFD の利点としては、風洞実験では困難な、速度場と圧力場の同時観測や、部材表面圧力の多点同時観測が可能等が挙げられ、将来的にも風工学において CFD は更に重要なものとなることが予想される。しかし、CFD を使用した部材の耐風安定性の照査の問題として、計算機の制約よりモデル化した部材のアスペクト比や側壁境界が実際の部材や風洞実験と異なることにより、それらが解に与える影響が問題となっている。本研究の対象とする円柱部材の CFD における一般的なモデル化手法として、部材のアスペクト比を 1~3 程度に設定し、側壁境界に周期境界条件を課す手法が行われるが、上述の円柱部材の特徴であるアスペクト比が大きいことや、実際には存在しない側壁境界の存在により上記のモデル化を行って得られる部材表面変動圧力の空間相関および変動圧力の組織構造が正しく求められているのかの疑問が生じる。既往の研究¹⁾²⁾により、CFD におけるモデルのアスペクト比および側壁境界が空力係数や流れ場に与える影響につ

いての検討が行われているが、表面変動圧力の空間相関および変動圧力の組織構造に与える影響についての検討例は少ない。

以上を踏まえ本研究では、CFD を用い円柱部材におけるアスペクト比および側壁境界が、表面変動圧力の空間相関および変動圧力の組織構造に与える影響についての検討を行ったものである。

2. 解析および実験概要

本節では、本研究で行った CFD の概要について述べていく。また、CFD による解析結果がどの程度実際の円柱部材における表面変動圧力の空間相関および組織構造を表現できているのかを検討する必要があり、今回解析と平行して行った圧力測定実験の概要についてもここに記す。

(1) 数値流体解析(CFD)概要

本研究で設定した解析領域を Fig.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)および側壁境界の異なる 6 通りの解析を行った。検討した解析モデルは、一般的なモデル化手法に沿った部材長さ $2.7D$ 、側壁境界を周期境界条件としたもの(以下 $2.7D$ -cyclic と表記)、上記の側壁境界を slip 条件にしたもの(以下 $2.7D$ -slip と表記)、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 $5D$ 、 $10D$ 、側壁境界を周期境界と slip 条件としたもの(以下 $5D$ -cyclic, $5D$ -slip, $10D$ -cyclic, $10D$ -slip と表記)の解析を行った。各ケースの円柱部材の分割条件は、Tab.1 に示す通り、各ケース共に流れ場のレイノルズ数は 2.0×10^4 とした。解析は数値流体解析ソフトウェアの 1 つである OpenFOAM³⁾で行い、非圧縮性流体を前提に、標準 Smagorinsky を LES サブグリッドスケールモデルとして適用し、PISO 法による非定常計算を行った。離散化スキームとして、時間項には 1 次精度陽的オイ

ラー法を，圧力項と移流項および拡散項には 2 次精度の中心差分を適用した．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，5D-cyclic,slip が 14,400 点，10D-cyclic,slip が 28,800 点である．

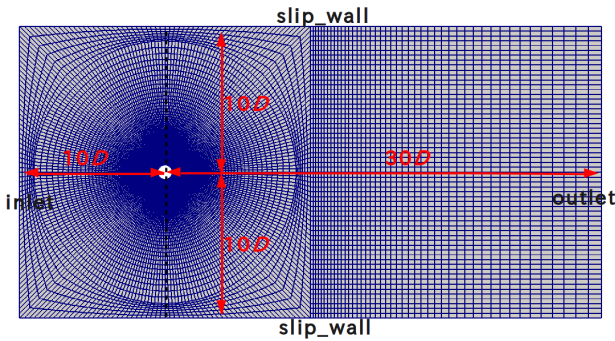


Fig.1 Numerical grid

Tab.1 Number of grid circumferential and along z-axis

Case	周分割数	軸方向分割数 (Δz)
2.7D-cyclic,slip	240	90(0.03D)
5D-cyclic,slip	240	60(0.083D)
10D-cyclic,slip	240	120(0.083D)

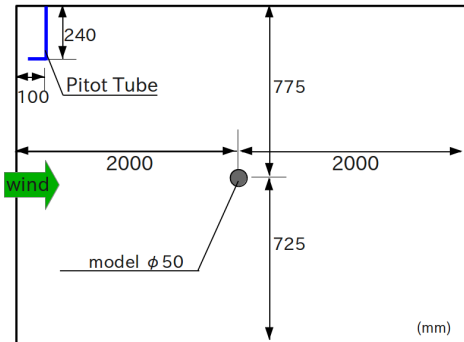
(2) 圧力測定実験概要

圧力測定実験には，Fig.2(a) に示すような幅 1.0m × 高さ 1.5m × 長さ 4.0m の測定胴を有する閉断面押し込み室内循環型風洞を使用した．使用した模型は Fig.2(b) に示すように，直径 $D=50\text{mm}$ ，長さ $L=940\text{mm}$ のアクリル製の円柱 (アスペクト比 18.8) であり，軸方向に 20mm 間隔で周方向に等間隔に 8 点の圧力孔を設置した断面を 27 断面設けた．模型は風洞側壁に設けた導流板によって両端を支持されている．圧力測定には 240 点同時観測が可能なマルチ圧力センサーを使用し，模型の圧力孔と圧力計とは内径 1.5mm のビニールチューブによって接続し，サンプリング周波数 1kHz で 40 秒間の測定を行った．圧力測定における基準圧としては，模型より上流 1,900mm，上方 535mm に設置したピトー管の静圧を基準圧とした．検討した風速は 4,5,6,7,8,9,10m/s ($Re = 1.3 \times 10^4 \sim 3.3 \times 10^4$) であり，円柱のレイノルズ数領域としては亜臨界領域での検討を行った．今回 CFD の結果と比較する実験データは同じレイノルズ数である風速 6m/s ($Re = 2.0 \times 10^4$) を使用する．

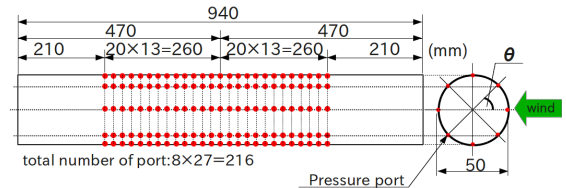
(3) 諸空力係数特性

ここで，CFD における各ケースおよび圧力測定実験より得られた風速 $U=6\text{m/s}$ の部材全体に作用する平均抗力係数 \bar{C}_D ，変動抗力係数 C'_D ，変動揚力係数 C'_L の諸空力係数の統計量を Tab.2 に示す．Tab.2 より CFD の結果に関しては平均値はほぼ同じであるが，変動量は 10D-slip の変動抗力係数を除いて側壁境界を slip 条件にしたものの方が小さい．これは，部材端に周期境界を課したことにより 2 次元性の強いカルマン渦の形成が

影響したのではないかと考えられる．実験結果と比較すると，部材長さを 5D,10D にしたケースにおいて変動抗力，揚力係数の値の再現性が高い．これは部材軸方向の解析領域を確保することで，部材からのカルマン渦放出の 3 次元性を表すことが出来たことが考えられる．円柱部材全体に作用する揚力係数のパワースペクトルを Fig.3 に示す．変動揚力係数のパワースペクトルに関しては，円柱の亜臨界レイノルズ数領域におけるストローハル数 (無次元周波数 $fD/U=0.2$) 相当の卓越周波数が確認されることから，各ケースおよび圧力測定実験の円柱模型から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．



(a) Measurement section



(b) Model specifications

Fig.2 Experimental situation schematic

Tab.2 Aerodynamics coefficient statistics

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
5D-cyclic	1.167	0.084	0.270
5D-slip	1.220	0.055	0.182
10D-cyclic	1.174	0.053	0.256
10D-slip	1.119	0.059	0.167
exp	1.280	0.074	0.257

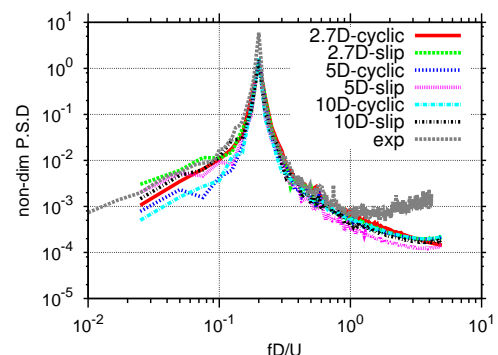


Fig.3 P.S.D. of lift coefficient

3. 軸方向の変動圧力の空間相関

カルマン渦のような周期的な変動の空間相関特性を表す際には、周波数領域における 2 点間の相関を表すルートコヒーレンスが用いられる。本研究では各断面に設けた周方向の圧力孔より測定された圧力を周方向で積分を行うことで揚力係数を求め、CFD および圧力測定実験共に円柱中央断面の揚力係数を基準とし、中央断面と各断面との揚力係数のクロススペクトルを求めストローハル成分の部材軸方向のルートコヒーレンス分布を求めていく。

$$\text{root-coh}(f) = \frac{|S_{ij}(f)|}{\sqrt{S_i(f)S_j(f)}} \quad (1)$$

また、カルマン渦による変動揚力の部材軸方向のルートコヒーレンス分布はガウス関数によって近似できると考え、空間相関特性の定量的な評価として近似したガウス関数を積分した相関スケール L_c を求める。

$$\text{root-coh}(r) = \exp(-kr^2) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} L_c &= \int_0^\infty \exp(-kr^2) dr \\ &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{k}} \end{aligned} \quad (3)$$

ルートコヒーレンスを求める際に、クロススペクトルのアンサンブル平均を行う必要があり、圧力測定はサンプリング周波数 1kHz で 40 秒間の測定を行うことから、1 秒間のデータを 1 セットとして 40 個のアンサンブル平均を行った。CFD の結果に対するルートコヒーレンスは、得られる 4,000 個の時系列データを 400 個毎に分け、10 個のクロススペクトルのアンサンブル平均により求めた。圧力測定実験より求めた揚力係数の卓越周波数であるストローハル成分の部材軸方向のコヒーレンス分布に対して、ガウス関数を近似させたものを Fig.4 に示す。実験より得られるルートコヒーレンス分布形状は釣鐘状であり、ガウス関数と良い近似が得られることが分かる。以降は、圧力測定実験によりルートコヒーレンス分布を求め、それをガウス関数に近似させ相関スケールを求めることで空間相関の定量的な評価を行う。

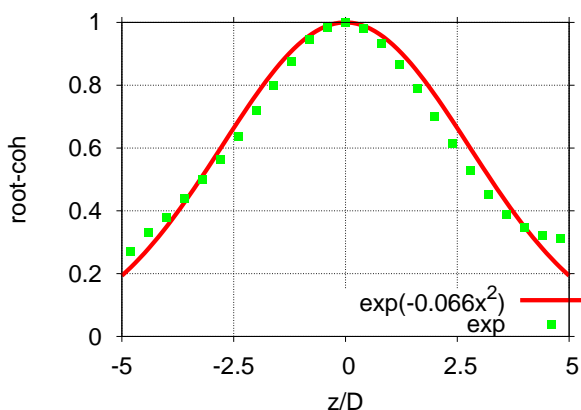
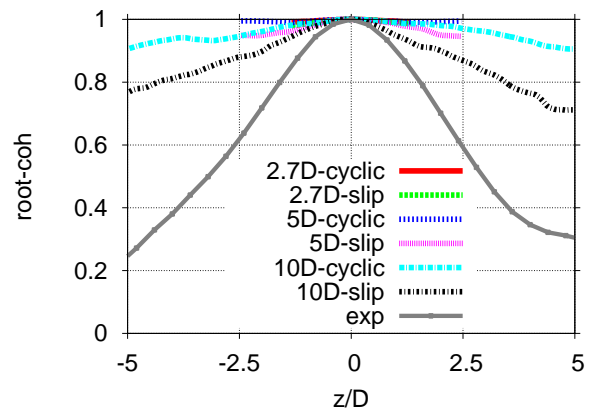
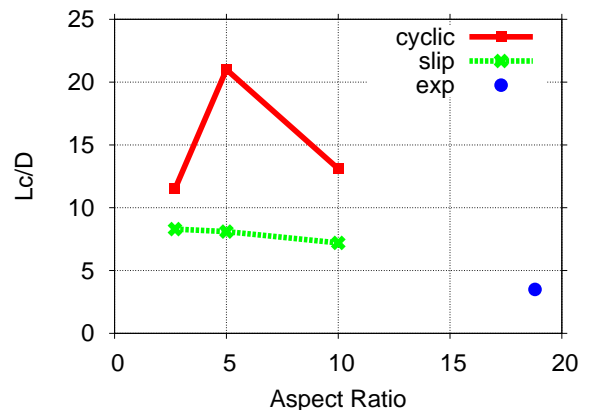


Fig.4 Root coherence distribution of the lift coefficient and approximate curve

Fig.5 に CFD における各ケースおよび圧力測定実験結果より得られた揚力係数の部材軸方向のルートコヒーレンス分布と相関スケール L_c を示す。Fig.5(a) より、各ケースの分布性状を比較すると、2.7D-cyclic,slip,5D-cyclic では部材軸方向にわたりコヒーレンスがほぼ 1 を保ち、他のケースにおいて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。圧力測定実験の結果より、揚力係数の部材軸方向のルートコヒーレンス分布は中央断面から離れるに従ってその値が小さくなる釣鐘状の形をしており、今回 CFD において検討したケースにおいては 10D-slip が最もその性状を表せられていることが分かる。Fig.5(b) より、同アスペクト比において側壁境界に周期境界を与えたものの方が相関スケール L_c が大きい。従って、側壁境界に周期境界を与えることで部材軸方向の圧力変動の空間相関は大きくなることが分かる。側壁境界に周期境界を与えることで、部材中央で部材軸方向の変動を対称となるように働くことや、その対称性により実質有効な部材軸方向の解析領域が半分になることにより、部材軸方向の空間相関が大きくなったと考えられる。しかし、比較的再現性の高い 10D-slip の結果でも相関スケール L_c が圧力測定実験結果のものよりも大きい。これは、実験模型よりもモデルのアスペクト比が小さいことや、圧力測定実験の側壁は固体壁であるのに対し、10D-slip の側壁境界は slip 境界を与えたこと等が原因であると考えられ、今後更なる検討が必要であると考えられる。



(a) Root coherence distribution of the lift coefficient



(b) Correlation scale: L_c

Fig.5 Comparison of the spatial correlation of the lift coefficient

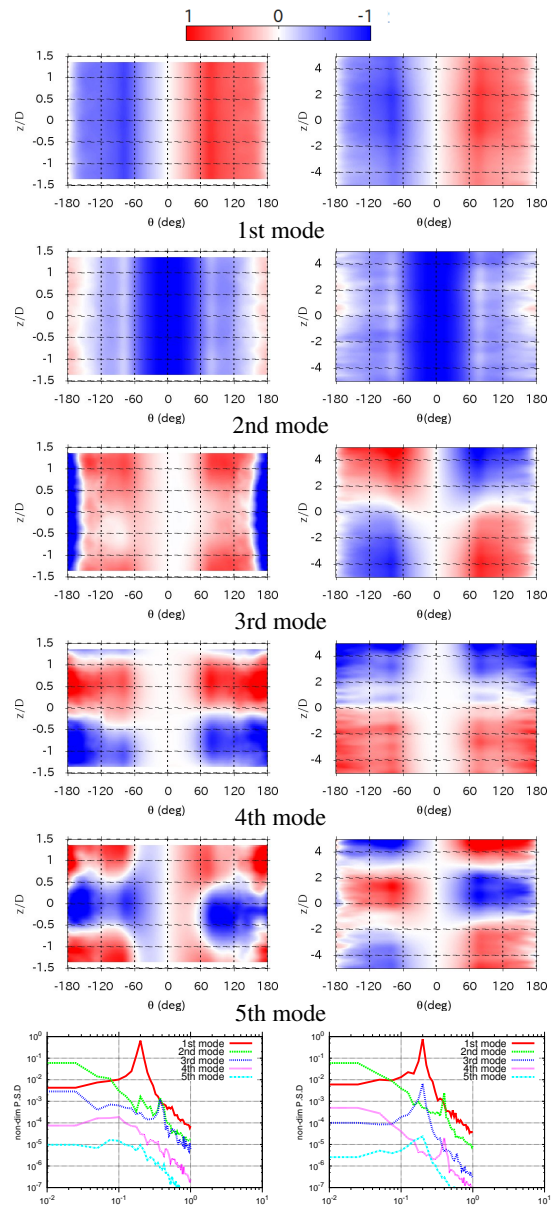
4. カルマン渦放出による表面圧力の組織変動構造

円柱部材全体の表面変動圧力の組織構造の検討には田村⁴⁾の方法に従い、得られた円柱表面圧力変動に対して POD 解析を行った。円柱表面圧力変動に対して POD 解析を行うことにより、カルマン渦の放出に伴う円柱表面圧力の組織変動構造についての検討を行う。

CFD によって得られた円柱表面圧力変動に対して POD 解析を行った結果を Fig.6,7 に示し、Fig.8 に圧力測定実験より得られた円柱模型表面圧力変動に対して POD 解析を行った結果を示す。モード形を示した図の座標関係として、縦軸は部材軸方向 z であり模型部材中央を基準とし円柱直径 D で無次元化をしており、横軸は周方向位置 θ とし、モード形をカラーマップで表現した。今回は紙面の都合上、POD 解析によって得られた変動モードに顕著な差が得られた $2.7D$ -cyclic と $10D$ -slip の 5 次モードまでの結果を載せ、全てのケースにおいて 1 次、2 次変動モード形が同じであったことから、Fig.7 の他のケースにおいては 3 次～5 次モードまでの結果を示す。Fig.6 に示すモード形より、1 次モードと 2 次モードは部材軸方向に一樣な変動を表しており、変動モードに対応する基準座標のパワースペクトルがそれぞれ $fD/U=0.2, 0.4$ で卓越することから、部材から放出される一樣なカルマン渦による圧力変動を表していると考えられる。他のケースにおいても同じモード形が得られており、Fig.8 の圧力測定実験の結果からも同じモード形が確認されている。しかし各ケースにおいて 1 次、2 次のモード形は同じ形のものが得られたが、3 次以上のモード形は側壁境界に周期境界と slip 条件を与えたものの中で異なっている。側壁境界に周期境界を与えたケースの大きな特徴として、 $2.7D$ -slip の 4 次モード、 $5D$ -slip、 $10D$ -slip、圧力測定実験結果の 3 次モードのような円柱上下部において逆対象なモード形が得られなかったことが挙げられる。 $2.7D$ -cyclic では 5 次モードまで逆対象モードは確認できず、 $5D$ -cyclic、 $10D$ -cyclic の結果においても部材中央に節を持つような逆対象モードは確認できない。側壁境界に周期境界を与えたケースでは、周期境界により部材間の変動を部材中央で対称になるように拘束されることで、部材中央で逆対象な変動モードが表し難い事が理由と考えられる。また、側壁境界に slip 条件を与えたもののモード形の特徴として、slip 条件を与えた 5 次モードのように部材軸方向に節を持つモード形が得られたことが挙げられる。圧力測定実験においても同様な変動モードが存在しており、紙面の都合上載せられていないが $5D$ -slip、 $10D$ -slip と圧力測定実験の変動モードは、高次のモードに行くに従って部材軸方向に節を増やしていく対称・逆対象な変動モードが確認された。

各ケースおよび圧力測定実験より得られた各変動モードの全体の変動に対する寄与率の累積分布図を Fig.9 に示し、Fig.10 に $2.7D$ -cyclic と圧力測定実験の各変動モードから再合成された円柱表面変動圧力より求めた部材全体に作用する変動揚力係数の寄与率を示す。Fig.9 より、側壁境界に周期境界を与えたケースは部材軸方向に一樣な 1 次モードと 2 次モードまでの累積寄与率が大きくなっている。この理由として、前述の側壁境

界に周期境界を与えたことにより逆対象な変動構造を表し難い分、部材軸方向に一樣な変動が卓越したことにより 1 次、2 次モードの寄与率が大きくなったと考えられる。側壁境界に slip 条件を与えることで 1 次、2 次モードまでの累積寄与率は圧力測定実験の結果に近づくが、それでも CFD より得られた 1 次、2 次モードまでの累積寄与率は実験より得られた累積寄与率より大きい。この原因に関しても、前節の圧力変動の部材軸方向の空間相関で述べたように、圧力測定実験と CFD において設定した側壁境界条件の違いが挙げられる。そのため、カルマン渦放出による表面圧力の組織変動構造に関しても側壁に固体壁条件を与えるなど更なる検討を行う必要があると考える。Fig.10 の各モードの変動揚力係数に対する寄与率より、部材全体に作用する変動揚力係数は 1 次モードの寄与が 95% 以上を占め、各変動モードの全体の部材全体の変動に対する寄与率と部材全体に作用する変動揚力に対する寄与率は異なることが分かった。



P.S.D. Normal coordinates (mode1 ~ mode5)
Fig.6 Result of POD analysis by CFD
(left: $2.7D$ -cyclic, right: $10D$ -slip)

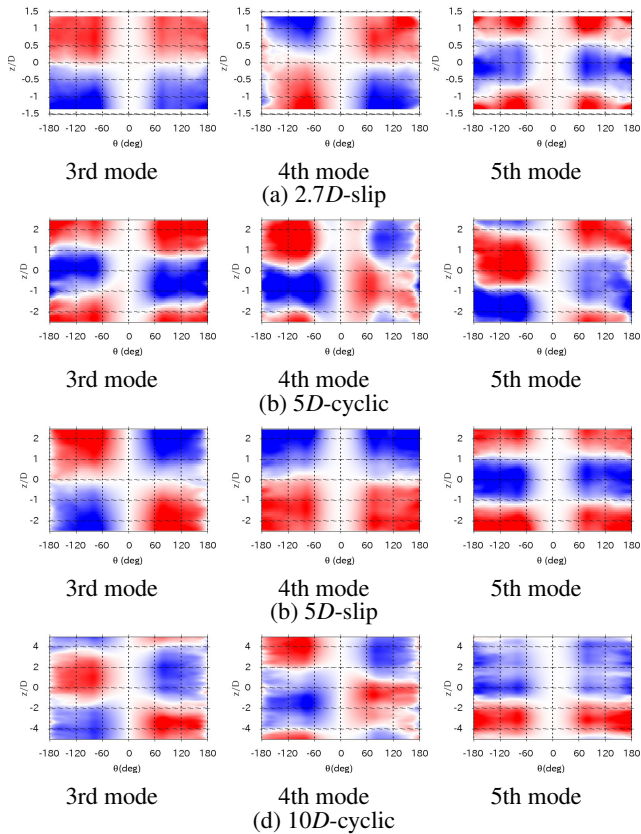


Fig.7 Result of POD analysis by CFD
(2.7D-slip,5D-cyclic,slip,10D-cyclic)

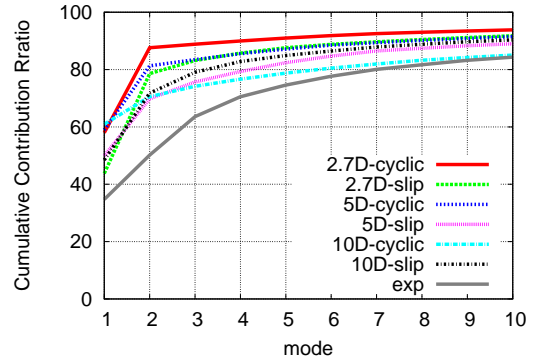


Fig.9 Comparison of the cumulative contribution ratio

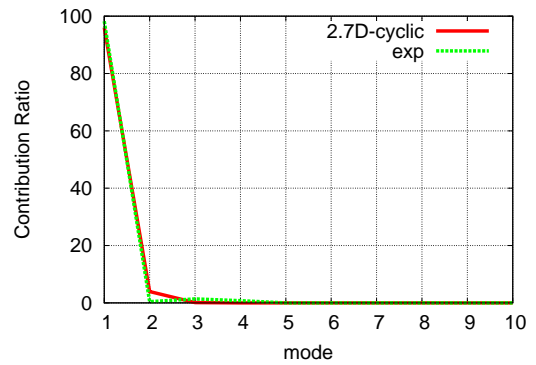


Fig.10 Comparison of the contribution ratio of the lift coefficient

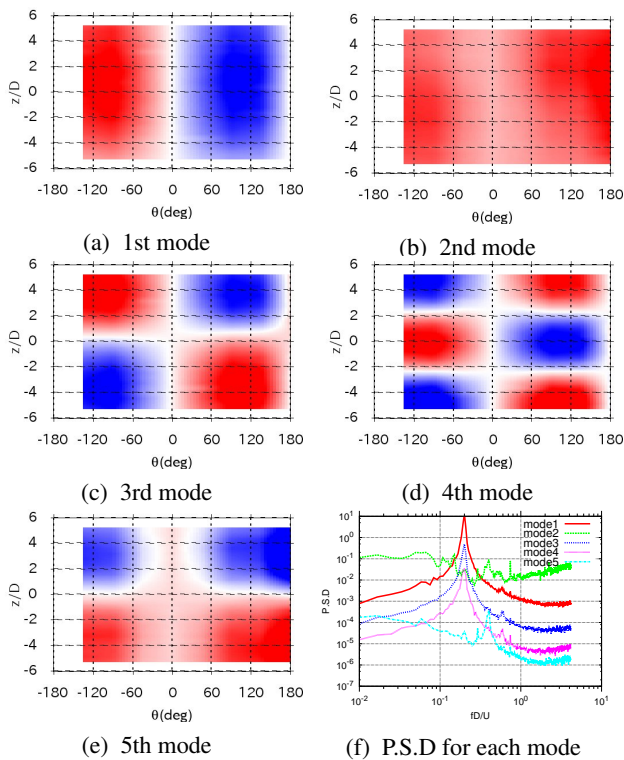


Fig.8 Result of POD analysis for experiment

5. おわりに

円柱表面変動圧力の空間相関および組織変動構造について、CFDにおけるアスペクト比と側壁境界がそれらに与える影響について、圧力測定実験との比較を通じて明らかになったことを以下に記す。

(1) 揚力係数の部材軸方向空間相関

- 揚力係数の部材軸方向の空間相関は、アスペクト比および側壁境界の影響を受ける。
- 実際の円柱部材の揚力係数の部材軸方向の空間相関を表すためには、アスペクト比の確保並びに側壁境界にslip条件か固体壁条件を与える必要がある。

(2) 円柱表面変動圧力の組織変動構造

- 側壁境界に周期境界を与えた場合、圧力測定実験やslip条件で存在する円柱の上下部で逆対象な変動を表すことができない。
- 円柱表面変動圧力の組織構造として、ストローハル成分による変動構造が主であり、CFDのモデル化において側壁境界にslip条件を与えアスペクト比を確保したものは、圧力測定実験と同様な円柱上下縁で対称および逆対象で部材軸方向に節を持つような変動構造が確認された。

以上の結果が得られたが、円柱の表面変動圧力特性について多くの考察をする余地が残っており、今回得られた知見を基に更なる検討を行う必要がある。また今後は、斜張橋ケーブル等に使用例の多い並列2円柱についても検討を進めていきたい。

謝辞

本研究の一部は科研費 (26420460) の助成を受けたものである。ここに記し、謝意を表す。

参考文献

- 1) 丸岡晃, 太田真二, 平野廣和, 川原睦人, " 広範囲な Reynolds 数域での円柱まわりの 2 次元及び 3 次元数値流体解析 " 土木学会

- 論文集, No591, I-43, (1998), pp139-150 .
- 2) 平野廣和, 渡邊茂, 丸岡晃, 佐野健一, " 3 次元数値流体解析における軸方向長さの検討-断面辺長比 4 の矩形断面の場合-" 土木学会論文集, No647, I-51, (2000), pp447-452 .
 - 3) OpenCFD Ltd. , "OpenVFOAM " , <http://www.openfoam.org> . (2011)
 - 4) 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, (1995), pp33-41 .