

静止円柱の表面変動圧力の空間相関および組織構造特性

Spatial correlation and structure of fluctuating pressure acting on a single fixed circular cylinder

野田稔†, 大西慎也*, 細見玄武**, 長尾文明***

Minoru Noda, Shinya Onishi, Genbu Hosomi, Fumiaki Nagao

† 工博, 徳島大学准教授, 大学院ソシオサイエンス研究部 (〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1)

* 徳島大学大学院, 先端科学教育部知的力学システム工学専攻 (〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1)

** 徳島大学, 工学部建設工学科 (〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1)

*** 工博, 徳島大学教授, 大学院ソシオサイエンス研究部 (〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1)

In this study, the structure of fluctuating surface pressure acting on a fixed circular cylinder was investigated by wind tunnel tests and computational fluid dynamics. Examinations of effects of the aspect ratio of the model gives to fluctuating surface pressure acting on a fixed circular cylinder also were carried out. Moreover, effect of boundary conditions of side walls for CFD on fluctuating surface pressure on a fixed circular cylinder were investigated. As results of this study, it was found that the spacial correlation of fluctuating pressure on a fixed circular cylinder was affected by aspect ratio of the model. POD nalysis indicated that the fluctuating surface pressure acting on a circular cylinder had symmetric and asymmetric mode shapes along the cylinder axis.

Key Words: circular cylinder, aspect ratio, coherence

キーワード: 円柱, アスペクト比, コヒーレンス

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, 斜張橋ケーブルや電線のように細長い部材として使用される例が多い。しかし, 例に挙げたような部材においては, 部材の持つ構造剛性および減衰が小さいことから, 風によって部材が不安定な状態になる事例が多数報告されている。風により部材が不安定な状態になる原因の1つとして, 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によって部材表面に周期的な圧力変動が生じることが挙げられる。このカルマン渦放出による表面圧力変動は部材が短い場合は完全相関な変動と考えられるが, 部材長さが長い場合にはスパン方向に完全相関な変動とは考えられず, また, その変動構造は複雑であると考えられる。そのため, 長い部材や長大構造物の風荷重の算定には圧力変動の空間相関の把握が必要であり, 吊橋等の長大橋の橋桁のガスト応答を予測する上で変動空気力の空間相関は重要な要素の1つであることから, 矩形断面における既往の研究は数多く^{1)~4)}, 数値流

体解析 (以下 CFD と表記) を用いた検討⁵⁾も行われている。一方, 円柱断面における既往の研究として, 溝田ら⁶⁾, 岡島ら⁷⁾により, 広範囲のレイノルズ数域における静止単独円柱における空力係数, ストローハル数, 流れのパターン等の検討は数多く行われている。また, 円柱部材における軸方向の表面変動圧力の空間相関に関連する研究としては, Baroudi⁸⁾が円柱模型の部材軸方向の変動風速の空間相関を求め, 変動風速の相関長さが円柱直径の3.5~6.0倍程度であることを示したが, 円柱断面部材の表面変動圧力の空間相関および組織変動構造に関する検討は, 空力係数やストローハル数に関する検討に比べて少なく, 矩形断面のものに比べても検討例は少ない。円柱部材の耐風安定性のためにも, 円柱部材の渦励振には部材から周期的に放出されるカルマン渦による表面変動圧力が重要であることから, 自身から放出されるカルマン渦に起因する表面変動圧力の部材軸方向の空間相関および組織構造を検討する必要がある。また, 圧力変動構造の部材長さの検討と類似した検討として, 部材のアスペクト比が圧力変動構造に与える影響について

† 連絡著者 /Corresponding author

E-mail:noda @ ce.tokushima-u.ac.jp

も検討が必要であるとする。その理由として、部材の耐風安定性を照査するために風洞実験が行われるが、実験条件および設備の制限上使用する模型は実際の部材を幾何学的に縮小するのではなく、部分剛体模型として円柱部材の場合直径と部材長さで縮尺が異なるような設定を行い、模型と実際とでアスペクト比が異なるような状態で耐風安定性について検討を行う。この場合、風洞実験で使用する模型の方がアスペクト比が小さいため、その模型で実際の部材の圧力変動の空間相関および変動構造を正しく表すことができているかの疑問が生じる。以上に述べたように、模型のアスペクト比が圧力変動の空間相関および変動構造に与える影響に関する検討は不十分であるため、アスペクト比がそれらに与える影響についても検討を行う必要がある。

また、近年の計算機の発達により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を使用する機会が急速に増えてきた。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、計算機の制約によって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、それらの計算条件が解に与える影響が問題となっている。本研究で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は、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の大きさが計算上で再現されないことから、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。モデル化に関する既往の研究⁹⁾¹⁰⁾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と考える。

以上を踏まえ本研究では、円柱模型の圧力測定実験と数値流体解析を用い、円柱部材の表面圧力変動構造およびPOD解析によりカルマン渦放出による表面圧力変動の組織構造についての検討と、円柱模型のアスペクト比を変えることによって、アスペクト比がそれらに与える影響についての検討を行ない、CFDにおいては圧力測定実験結果との比較により、CFDにおける円柱のアスペクト比および側壁境界条件が上記の両者に与える影響についての検討を行ったものである。

2. 実験概要および解析概要

2.1 圧力測定実験

圧力測定実験には、図-1(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。使用した模型は図-1(b)に示すように、直径 $D=50\text{mm}$ 、長さ $L=940\text{mm}$ の亚克力

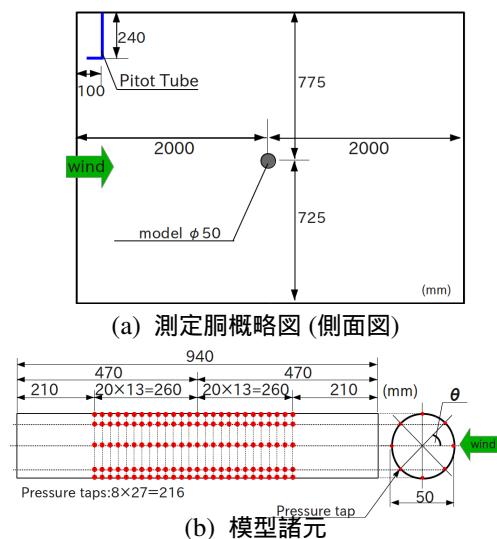


図-1 実験状況概略図

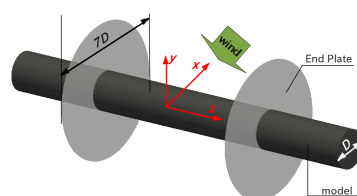


図-2 模型端板取り付け状況

製の円柱であり、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。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。模型は風洞側面に設けた導流板によって両端を支持しており、その時の模型のアスペクト比は18.8である。また、今回は模型のアスペクト比が軸方向の圧力変動に与える影響を検討するため、図-2に示すように模型に厚さ1.5mm、直径350mm(7D)の亚克力製の端版を設置することで擬似的にアスペクト比を小さくした。今回検討したアスペクト比としては、18.8(端板なし)、10.8、8.4、7.2、6.0、3.6の検討を行った。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4~10m/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。

2.2 圧力変動の諸統計量および周波数特性

圧力測定結果として、風速 $U=10\text{m/s}$ 、アスペクト比18.8における、模型上面の時間平均圧力係数、変動圧力係数分布を図-3(a),(b)に、図-4(a),(b),(c)に模型中央($z/D=0$)の $\theta=90^\circ$ における圧力変動の時系列とパワースペクトル(周波数解像度: $\Delta f D/U=0.005$ 、約40周期分による検討)と今回検討したレイノルズ数におけるストローハル数を示す。圧力係数の算出に当たっては、ピ

ト管の動圧で除すことにより求めた．図-3 より，平均・変動風圧係数分布はほぼ一様性を保っていることが確認される．また図-4(a) より周期的な圧力変動も確認され，図-4(b) に示す圧力変動のスペクトルより，そのピークが $fD/U = 0.195$ で確認され，円柱のストローハル数 (無次元周波数 $fD/U=0.2$) 相当の卓越周波数が確認される．また，図-4(c) より今回検討したレイノルズ数においてストローハル数がほぼ $fD/U=0.2$ であることが確認される．

3. 数値流体解析 (CFD) 概略

本研究の CFD においては非圧縮性流体を前提とし，支配方程式として以下に示す非圧縮性流体における連続式とナビエ・ストークス方程式を，時間と空間に離散化して解析を行った．

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2)$$

ここで u_i は i 方向の速度成分， p は圧力， ρ は流体密度， μ は流体の粘性係数である．

本研究で設定した解析領域を図-5 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 4 通りの解析を行った．全ての解析モデルにおいて円柱直径 $D=0.1\text{m}$ である．検討した解析モデルは，一般的なモデル化手法⁹⁾¹¹⁾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 壁条件にしたもの (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 $10D$ ，側壁境界を周期境界と slip 壁条件としたもの (以下 $10D$ -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，表-1 に示す通りである．解析は数値流体解析ソフトウェアの 1 つである OpenFOAM¹²⁾で行い，非圧縮性流体を前提に，標準 Smagorinsky (スマゴリンスキー定数 $C_S=0.167$) 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，動粘性係数を $\nu = 5.0 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ と設定し，各ケース共に流れ場のレイノルズ数は 2.0×10^4 とした．定常状態と判断した 30s(300) ~ 70s(700) の間を 20 個おきに 100Hz で表面圧力のサンブ

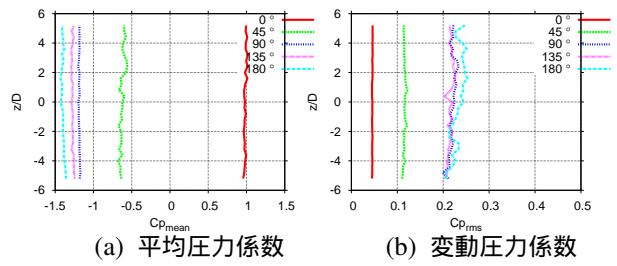
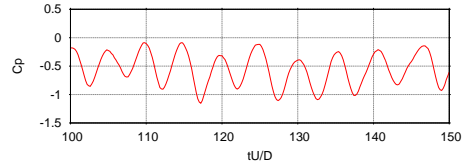
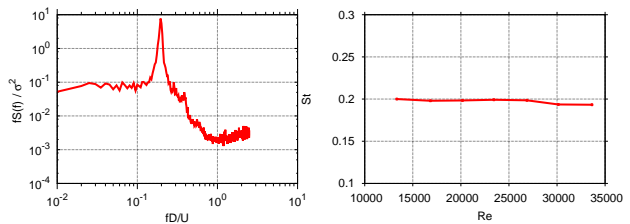


図-3 平均・変動圧力分布



(a) 圧力係数の時系列



(b) パワースペクトル (c) ストローハル数
図-4 圧力変動の時系列および周波数特性
($U=10\text{m/s}, z/D=0, \theta=90^\circ$)

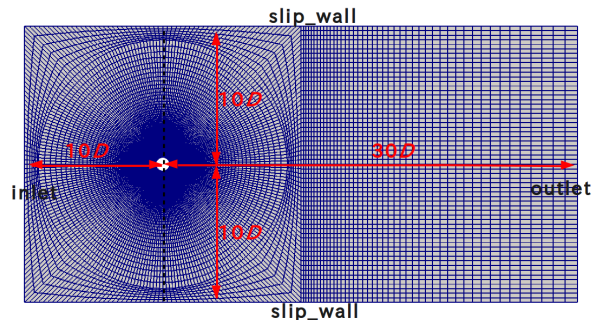


図-5 解析領域

表-1 部材軸方向分割条件

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

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， $10D$ -cyclic,slip が 28,800 点である．

ここで，各ケースおよび圧力測定実験より得られたアスペクト比 18.8，風速 $U=10\text{m/s}$ の部材中央断面における周方向の平均圧力係数分布を既往の研究¹³⁾と共に図-6 に示し，部材全体に作用する平均抗力係数 \bar{C}_D ，変動抗力 C'_D ，変動揚力係数 C'_L の諸空力係数の統計量を表-2 に示す．図-6 より，CFD における全てのケースにおいて亜臨界領域における円柱周方向の平均圧力係数分布を再現できている．表-2 より CFD の結果に関しては平均値はほぼ同じであるが， $10D$ -slip の変動抗力を除いて変

動量は側壁境界を slip 壁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 10D にしたケースは変動抗力、変動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。実験結果の平均抗力係数が既往の値 ($\bar{C}_D = 1.2$) と比較して大きくなった理由としては、現時点ではその理由は明らかではない。2.7D-cyclic と 10D-slip における円柱部材全体に作用する揚力係数の時系列と全ケースの変動揚力のパワースペクトル (周波数解像度: $\Delta f D/U = 0.025$) を図-7(a),(b) に示す。図-7(a) より、2.7D-cyclic と 10D-slip 共に安定的な揚力変動が確認される。図-7(b) より変動揚力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。

4. 軸方向の圧力変動の空間相関

カルマン渦のような周期的な変動の空間相関を表す際、以下に示す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を求め、模型中央断面の変動揚力を基準とし、中央断面と各断面との変動揚力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。

$$R_{coh}(f) = \frac{|S_{ij}(f)|}{\sqrt{S_i(f)S_j(f)}} \quad (3)$$

ここで、 $S_{ij}(f)$ は i 点と j 点のクロススペクトルであり、 $S_i(f)$ と $S_j(f)$ はそれぞれ i 点と j 点のパワースペクトルである。また、カルマン渦による圧力変動の部材軸方向の空間相関はガウス関数によって近似できると考え、空間相関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 を求めることができる。

$$R_{coh}(z) = \exp(-kz^2) \quad (4)$$

ここで、 k は decay factor である。

$$L_c = \int_0^\infty \exp(-kz^2) dz = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{k}} \quad (5)$$

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、40 個のアンサンブル平均

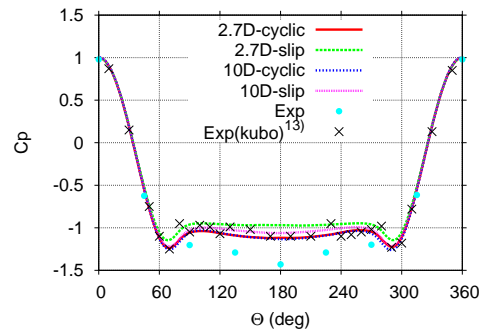
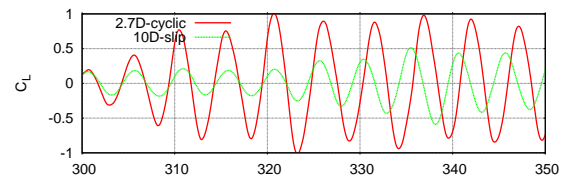


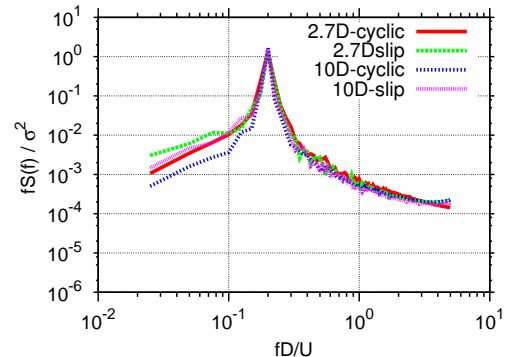
図-6 平均圧力係数分布 ($z/D = 0$)

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-cyclic | 1.174 | 0.053 | 0.256 |
| 10D-slip | 1.119 | 0.059 | 0.167 |
| Exp | 1.321 | 0.079 | 0.217 |



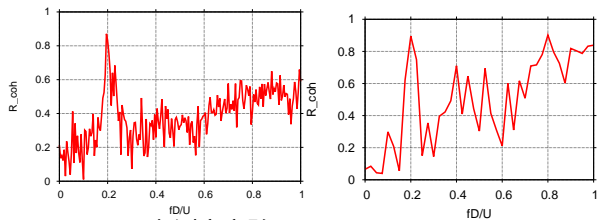
(a) 円柱部材全体の揚力係数の時系列 (2.7D-cyclic, 10D-slip)



(b) 円柱部材全体の変動揚力のパワースペクトル

図-7 円柱部材全体の変動揚力特性

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 個に分け、10 個のクロススペクトルのアンサンブル平均より求めた。図-8 に一例として圧力測定実験結果および 10D-slip における変動揚力のルートコヒーレンスを示す。また、部材軸方向のルートコヒーレンス分布の算出に関して、圧力測定実験においては変動揚力のパワースペクトルのピーク周波数を中心に周波数分解能前後 1 成分のルートコヒーレンスの平均値を使用し、CFD においては変動揚力のピーク周波数のルートコヒーレンスの値を使用した。圧力測定実験より求めた変動揚力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



(a) 圧力測定実験 (b) 10D-slip($\Delta z = 2D$)
 (アスペクト比 18.8, $U=10\text{m/s}, \Delta z = 2D$)
 図-8 変動揚力のルートコヒーレンス

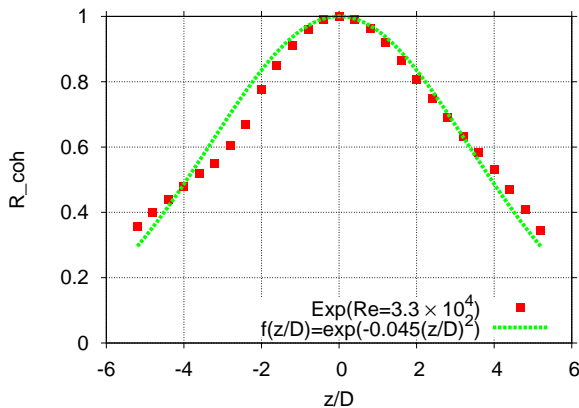
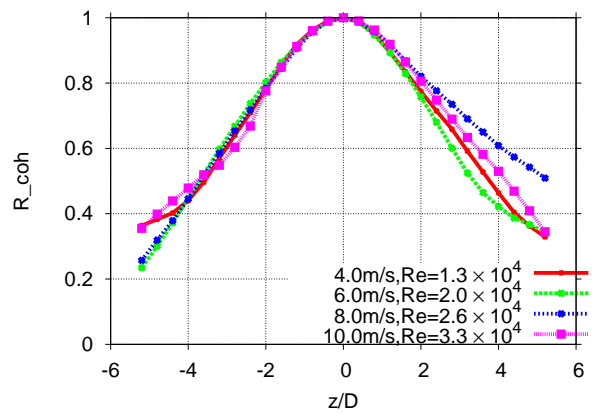


図-9 変動揚力のルートコヒーレンス分布
 および近似曲線 ($U=10\text{m/s}$, アスペクト比 18.8)

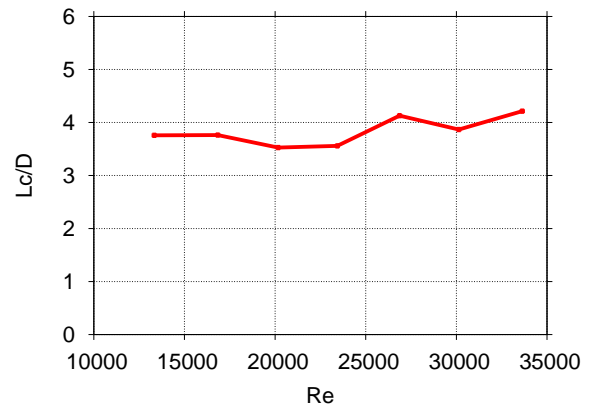
を図-9 に示す．実験より得られるルートコヒーレンス分布形状は釣鐘状であり，ガウス関数と良い近似が得られることが分かる．円柱において，比較的流れが安定的な亜臨界領域のレイノルズ数域においても，カルマン渦の3次元性により軸方向の変動揚力係数は完全相関ではないことが確認される．以降は，圧力測定実験によりルートコヒーレンス分布を求め，それをガウス関数に近似させ相関スケールを求めることで空間相関の定量的な評価を行う．

4.1 風洞実験による風速 (レイノルズ数) 依存性の検討

始めに，円柱の空力係数およびストローハル数がほぼ一定である亜臨界領域におけるレイノルズ数域において，自身から放出されるカルマン渦に起因する変動圧力の空間相関はどの程度変化するかをの検討を行う．各風速 (レイノルズ数) における変動揚力の部材軸方向のルートコヒーレンス分布および相関スケール L_c を図-10 に示す．図-10(a) より，異なる風速におけるルートコヒーレンスの分布形状に大きな差異は確認されない．しかし，図-10(b) の相関スケールに関しては，風速の増加に伴って微増する傾向があり，今回検討した最大の風速 $U=10\text{m/s}$ で，相関長さ L_c は $4.2D$ 程度である．Baroudi⁸⁾ の円柱の部材軸方向の変動風速測定の結果においても，風速の増加に伴って部材軸方向の空間相関が大きくなる傾向が示されており，本研究の部材軸方向の揚力係数の空間相関においても同様の傾向が得られている．



(a) ルートコヒーレンス分布



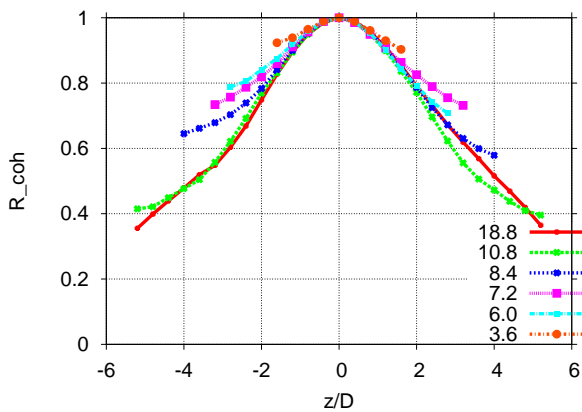
(b) 相関スケール

図-10 変動揚力の空間相関に対するレイノルズ数の影響 (アスペクト比 18.8)

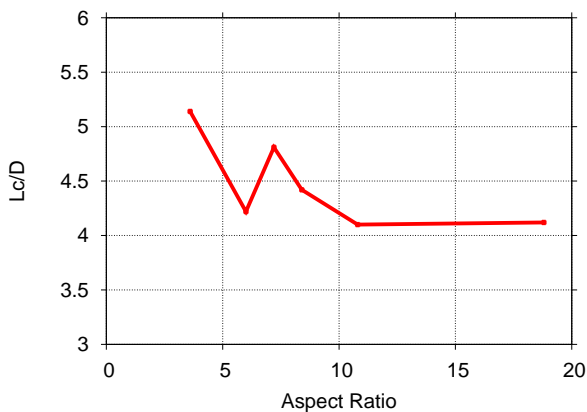
しかし，風速の増加に伴い相関スケール L_c が大きく変化しなかった理由としては，今回検討したレイノルズ数域が上述の円柱断面において比較的安定的な亜臨界領域における検討を行ったためであると考えられる．従って，レイノルズ数によって空力係数やストローハル数が大きく変化せず，変動揚力の部材軸方向の空間相関も変化しなかったと考えられる．以上より今後は，より広い範囲にわたるレイノルズ数域における検討を行う必要があると考える．

4.2 風洞実験によるアスペクト比の影響

図-11 に模型のアスペクト比毎の変動揚力の部材軸方向のルートコヒーレンス分布と各アスペクト比における相関スケール L_c を示す．大きな傾向として，アスペクト比を小さくす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事が分かる．しかし，部材軸方向のルートコヒーレンス分布および相関スケール L_c の値を比較しても，アスペクト比 18.8 と約半分のアスペクト比である 10.8 では両者に大きな差異は見られない．その理由として，アスペクト比 10.8 では図-2 で示した設置する端板の間隔がカルマン渦による部材軸方向の変動揚力の相関スケール L_c より広いことが挙げられる．アスペクト比 10.8 の場合，端板間の間隔は $10.8D$ であり模



(a) ルートコヒーレンス分布



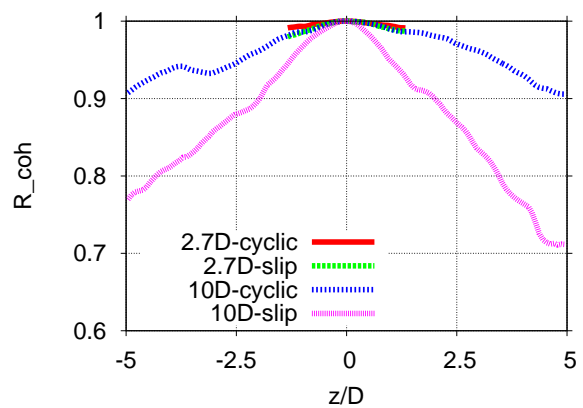
(b) 相関スケール

図-11 変動揚力の空間相関に対する
アスペクト比の影響 ($U=10\text{m/s}$)

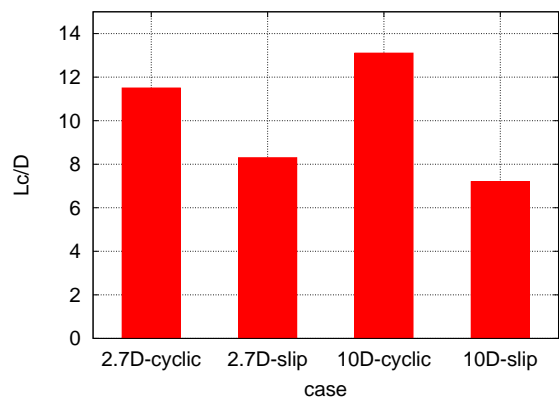
型中央から各端板の距離は $5.4D$ であり、端板を取り付けていないアスペクト比 18.8 における軸方向の変動揚力の最も大きい相関スケール $L_c=4.2D$ の値よりも大きい。従って、軸方向の変動揚力の相関スケール L_c よりも端板の間隔が大きいので、端板が与える軸方向の圧力変動に対する拘束の影響が小さく、両側に端板を取り付けているにも拘らず、端板を取り付けていない結果との間に大きな差異が生じなかったのではないかと考えられる。以上より、模型のアスペクト比を小さくすることで部材軸方向の圧力変動の空間相関は大きくなるが、模型のアスペクト比をカルマン渦の空間相関スケールの 2 倍程度確保できれば、模型のアスペクト比が軸方向の圧力変動の空間相関に対する影響は小さいのではないかと考える。

4.3 CFD による検討

部材中央を基準とした変動揚力の部材軸方向のルートコヒーレンス分布を図-12 に示す。図-12(a) に示すように、各ケースの分布性状を比較すると、2.7D-cyclic,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-cyclic においても変動揚力の部材軸方向のルートコヒーレンスが 0.9 を保つように、アスペクト比を確保しないケースや側壁境界に周期境界を与えたケースにおい



(a) ルートコヒーレンス分布



(b) 相関スケール

図-12 変動揚力の空間相関に対する
部材長さおよび側壁境界の影響

て変動揚力の部材軸方向の空間相関が大きいことが確認される。一方、10D-slip においては他のケースと比較して圧力測定実験で得られた変動揚力の部材軸方向のルートコヒーレンス分布を再現できている。図-12(b) の相関スケール L_c を比較しても、アスペクト比が小さい 2.7D のケースの相関スケール L_c は大きく、また、同一アスペクト比において側壁境界に周期境界を与えたケースの方が L_c が大きいことも確認される。従って、CFD における円柱部材のアスペクト比および側壁境界は表面変動圧力の空間相関に影響を与えることが分かる。アスペクト比に関しては前述の圧力測定実験で述べたように、アスペクト比が小さいことで側壁境界の影響を受けることで表面変動圧力の 2 次元性が強まることが考えられる。側壁境界の周期境界が与える影響については、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、部材軸方向の表面変動圧力の空間相関が大きくなったと考えられる。しかし、比較的圧力測定実験の再現性の高い 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、圧力測定実験の側壁は固定壁であるのに対し、10D-slip の側壁境界は slip 境界を与えたことが原因であると考えられる。今後は側壁

境界に固定壁境界を与える等の、CFDにおける側壁境界の与える影響の検討を行う必要がある。

5. カルマン渦放出による表面圧力の組織変動構造

円柱表面の周方向および軸方向の圧力孔より測定された圧力に対して、田村⁴⁾の方法に従い POD 解析を行った。ここでは POD 解析により、カルマン渦の放出に伴う円柱表面圧力の組織変動構造の検討を行う。

5.1 組織的変動圧力構造 (風洞実験)

風速 $U=10\text{m/s}$ 、アスペクト比 18.8 における円柱表面変動圧力に対して POD 解析を行った結果を図-13 に示す。図-13(a)~(j) の縦軸は部材軸方向 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。図-13(k)~(l) には各モードの基準座標のパワースペクトルを示す。また (k)~(l) の縦軸は任意である。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。また、高次のモードほど、部材軸方向の節の数が増え、円柱上部と下部で対称および逆対称のモード形が確認される。これらの変動モードに対しても対応する基準座標のパワースペクトルがそれぞれ $fD/U=0.2, 0.4$ 付近で卓越を持つことから、カルマン渦放出に起因する表面圧力変動であることが考えられ、これらの高次の変動モードは円柱部材の部材軸方向におけるカルマン渦放出の非一樣性を表していると考えられる。また、高次モードの中には $fD/U=0.2, 0.4$ の両方付近に基準座標のパワースペクトルのピークを持つものが確認され、揚力と抗力両方に寄与する変動構造が存在することが確認される。以上より、円柱表面圧力変動に対して POD 解析を行うことにより、円柱部材表面変動圧力の組織構造が明らかとなった。

5.2 組織的変動構造に対するアスペクト比の影響 (風洞実験)

図-14 に、風速 $U=10\text{m/s}$ 、アスペクト比 7.2, 3.6 の円柱表面変動圧力に対して POD 解析を行った結果を示す。得られたモード形は、アスペクト比 3.6 の 5 次モードを除いて端板を取り付けていないアスペクト比 18.8 と比較しても大きく変わらないことが確認された。これは他のアスペクト比のモード形に対しても同様であり、カルマン渦の放出による表面変動圧力構造はアスペクト比に依存しないと考えられる。しかし、図-15 に示したアスペクト比毎の各モードの累積寄与率より、アスペクト比を小さくすることによって部材軸方向に一樣な変動モードである 1 次、2 次モードまでの累積寄与率が大きくな

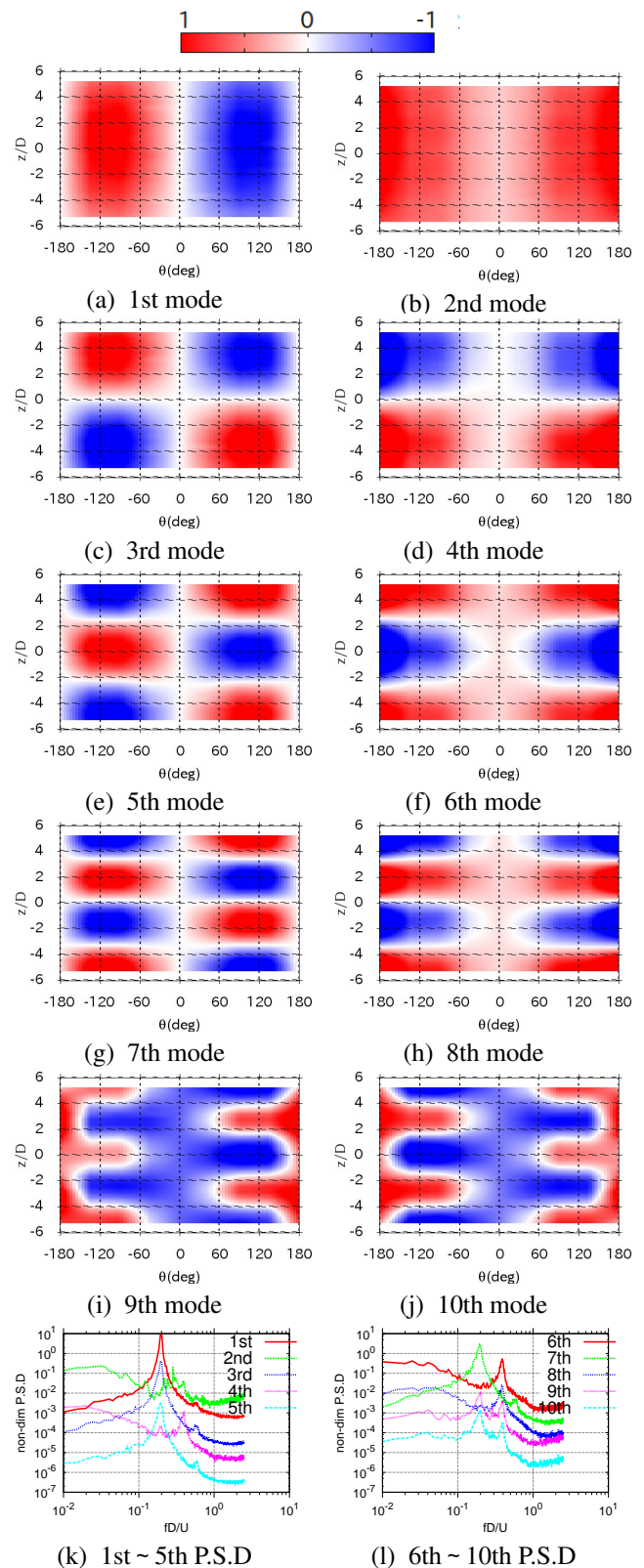
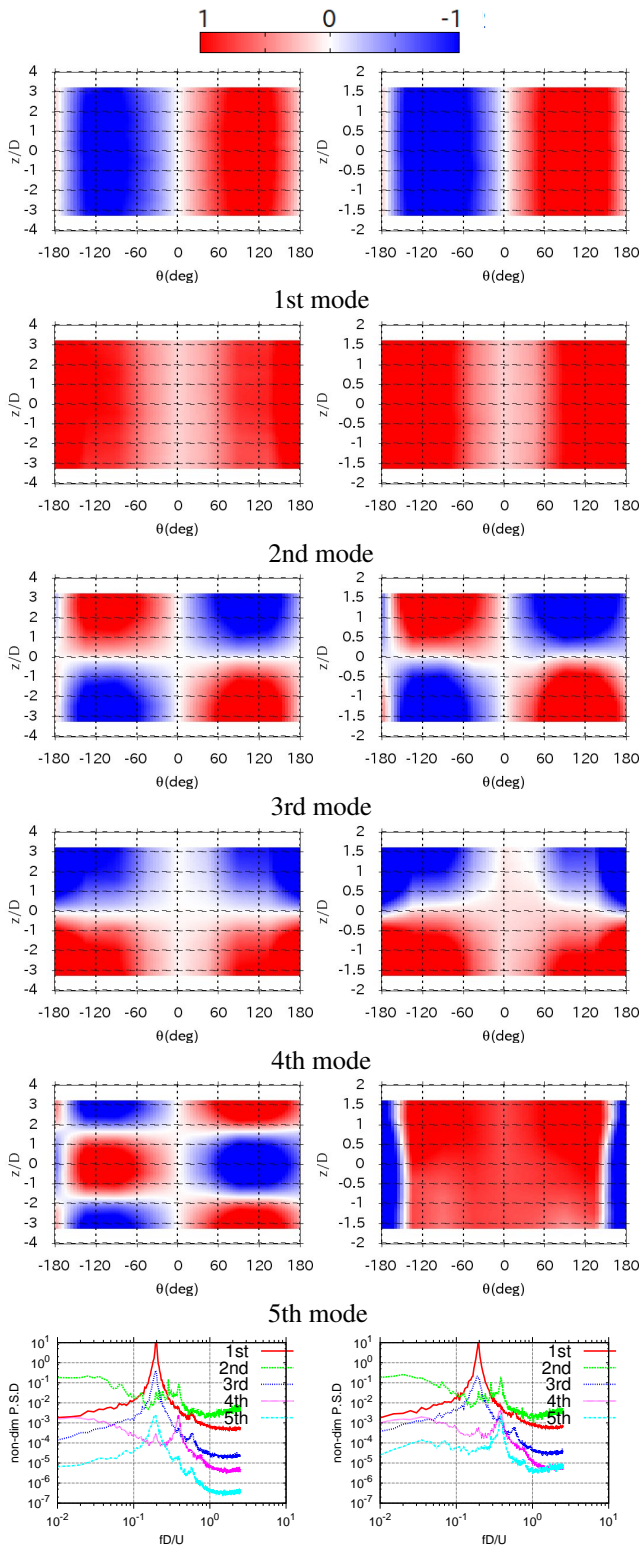


図-13 円柱全体の変動圧力に対する POD 解析結果 ($U=10\text{m/s}$ 、アスペクト比 18.8)

っていることが確認される。前述の軸方向の圧力変動の空間相関には変動モードの寄与率の影響を受けていると考えられ、今後圧力変動の空間相関と組織変動構造に関して更なる検討が必要であると考えられる。



(k) 1st ~ 5th P.S.D. (l) 1st ~ 5th P.S.D.

図-14 円柱全体の変動圧力に対する POD 解析結果
($U=10\text{m/s}$, アスペクト比 左: 7.2, 右: 3.6)

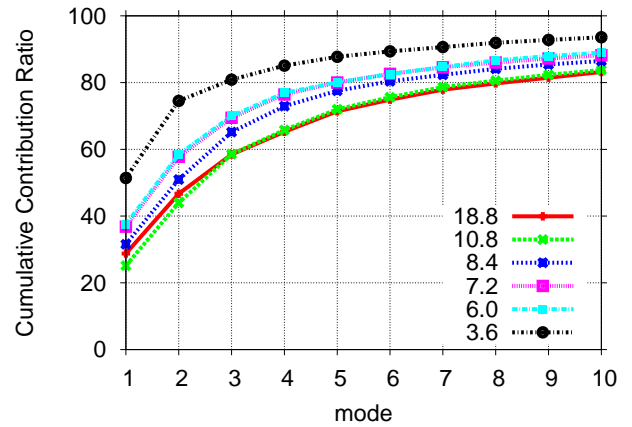


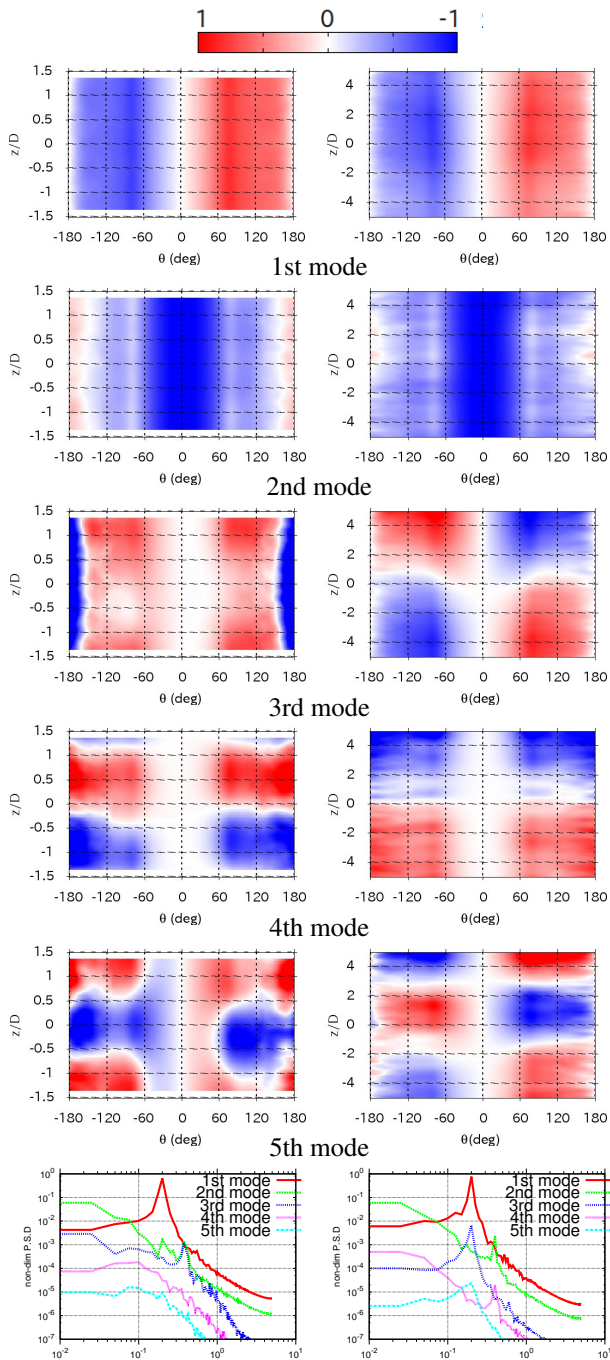
図-15 累積寄与率に対するアスペクト比の影響

5.3 CFD による検討

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図-16 に示す．今回は紙面の都合上，POD 解析の結果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，2.7D-slip と 10D-cyclic は 3 次～5 次モードまでの結果を載せる．全ケースにおいて 1 次，2 次モードは共に，実験結果と同様に部材軸方向に一樣なカルマン渦放出に起因する変動モードが得られたが，3 次モード以降のモード形が異なるものが得られた．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，10D-slip の 3 次モードのような逆対称なモード形が得られなかったことが挙げられ，側壁境界に与えた周期境界により，部材軸方向の圧力変動を部材中央で対称になるように拘束されることで，部材中央で逆対称な変動モードを表し難い事が原因と考えられる．紙面の都合上載せられていないが 10D-slip においては，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・逆対称な変動モードが確認され，実験結果と同様な変動モードが確認された．

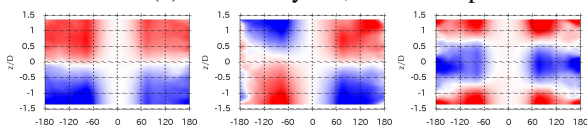
また，図-17 に示す各ケースにおける変動モードの累積寄与率を比較すると，側壁境界に周期境界を与えたケースは部材軸方向に一樣な 1 次モードと 2 次モードまでの累積寄与率が大きくなっている．この理由として，側壁境界に周期境界を与えた結果，側壁境界の全物理量を一致させるように流れ場を拘束することにより，部材軸方向に一樣な変動の寄与率が大きくなったと考えられる．

以上より，CFD における円柱表面圧力変動の組織構造は解析領域における部材のアスペクト比および側壁境界条件の影響を強く受けることが分かった．特に，側壁境界に周期境界を与えた場合，圧力測定実験で得られた部材軸方向に節を持ち円柱上下部で逆対称な変動モードが確認されなかったことから，側壁境界に周期境界を与えることは適当ではないと考える．

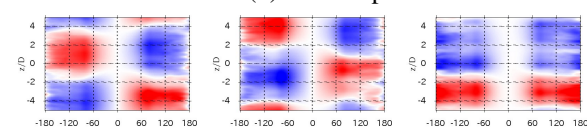


基準座標パワースペクトル (1st~5th)

(a) 左:2.7D-cyclic, 右:10D-slip



(b) 2.7D-slip



(c) 10D-cyclic

図-16 CFD より得られた
円柱表面変動圧力の POD 解析結果

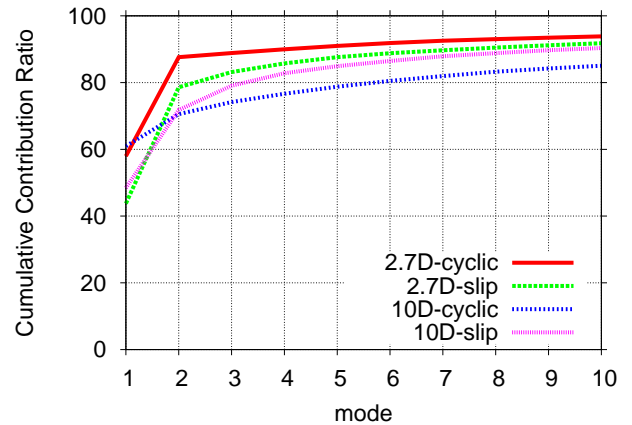


図-17 累積寄与率に対する
アスペクト比と側壁境界の影響

6. 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、圧力測定実験とCFDを通じて検討した結果として明らかになったことを以下に示す。

(1) 変動揚力の部材軸方向空間相関

- 円柱部材軸方向のストローハル成分の相関スケールは亜臨界領域のレイノルズ数域において、レイノルズ数の増加に伴い微増の傾向を示す。
- 模型のアスペクト比は部材軸方向の変動揚力の空間相関に影響を与え、アスペクト比が小さいほど空間相関は大きくなる傾向を示す。しかし、アスペクト比をカルマン渦の空間相関スケールの2倍程度確保できれば、その影響は小さいと考えられる。

(2) 円柱表面変動圧力の組織変動構造

- 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、円柱上部と下部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。
- 模型のアスペクト比を変えた結果、表面変動圧力の組織変動構造に大きな影響は確認されなかったが、アスペクト比を小さくすると部材軸方向に一樣な変動モードの寄与率が大きくなる傾向が示された。表面変動圧力の部材軸方向の空間相関は各変動モードの寄与率の影響を受けると考えられ、今後検討が必要であると考えられる。

(3) CFDによる検討

- 円柱表面変動圧力の空間相関および組織変動構造は、CFDにおける円柱部材のアスペクト比および側壁条件の影響を受けることが分かった。
- アスペクト比を確保しない場合、表面変動圧力は軸方向で完全相関であり、側壁境界に周期境界を与えた場合、側壁境界にslip条件を与えたものよ

りも軸方向の空間相関が大きくなる。

- 側壁境界に周期境界を与えた場合，風洞実験では確認される円柱上下部で逆対象な変動構造が確認されず，側壁境界に slip 境界を与えたものでは確認された。
- 以上より，CFD における円柱部材のモデル化において，部材のアスペクト比の確保および側壁境界に slip 条件および固定壁条件を与える必要がある。

以上の結果が得られたが，今回は円柱における亜臨界レイノルズ数領域での検討を行なっており，今後は高レイノルズ数域における検討や，乱流中における同様の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) B.J.VICKERY : Fluctuating lift and drag on a long cylinder of square cross-section in a smooth and in a turbulent stream, Journal of Fluid Mechanics, Vol 25, part 3, pp.481-494,1965.
- 2) 白土博通, 松本勝, 古川拓郎, 山根健治, Le Thai Hoa, 片

倉佑哉: 変動気流中における矩形断面のガスト空気力の空間構造に関する研究, 第 19 回風工学シンポジウム論文集, pp.501-506, 2006.

- 3) 白土博通, 松本勝, 片倉佑哉, Do Van Bao, 佐藤祐一: カルマン渦強度に着目した構造体に作用する変動空気力の相関特性に関する研究, 第 20 回風工学シンポジウム論文集, pp.501-506, 2008.
- 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, No.65, pp.33-41, 1995.
- 5) 伊藤靖晃, 白土博通, 松本勝, 野澤剛二郎: 一様流中の非定常再付着型矩形柱の変動揚力の空間相関特性, 構造工学論文集, Vol 60A, pp.418-427, 2014.
- 6) 溝田武人, 山田均, 久保善延, 岡島厚, Charles W.KNISELY, 白土博通: 構造基本断面の空力特性 (その 1), 日本風工学会誌, No.36, pp.50-79, 1988.
- 7) 岡島厚, 溝田武人, 久保善延, Charles W.KNISELY, 白土博通: 構造基本断面の空力特性 (その 2), 日本風工学会誌, No.38, pp.57-93, 1989.
- 8) M.Y.el BAROUDI : Measurement of two-point correlations of velocity near a circular cylinder shedding a Karman vortex street, UTIA Tech.Note, no.31, 1960.
- 9) 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, pp.139-150, 1998.
- 10) 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, pp.447-452, 2000.
- 11) 糟谷直樹, 平野廣和, 丸岡晃, 佐野尚次: 数値流体解析を用いた臨海領域における円柱周りの流れの特徴の把握, 構造工学論文集, Vol 60A, pp.410-417, 2014.
- 12) OpenCFD Ltd., OpenVFOAM, <http://www.openfoam.org>, 2011.
- 13) 久保義人, 結城洋一, 石井博典, 畠中真一, 河藤千尋: 実物大供試体を用いた橋梁並列ケーブルのウエイクギャロッピング特性, 構造工学論文集, Vol 58A, pp.518-427, 2012.

(2015 年 9 月 25 日受付)

(2016 年 2 月 1 日受理)