



論文



静止並列2円柱の表面変動圧力の空間組織構造

Spatial Structure of Fluctuating Pressure Acting on Fixed Tandem Circular Cylinders

野田 稔^{*1} 大西慎也^{*2} 細見玄武^{*3} 長尾文明^{*4}
Minoru NODA, Shinya ONISHI, Gembu HOSOMI, Fumiaki NAGAO

SUMMARY

In this study, the structure of fluctuating surface pressure acting on a single fixed circular cylinder and a downstream circular cylinder of tandem circular cylinders were investigated by wind tunnel tests. Effects of the distance between the tandem circular cylinders on fluctuating surface pressure acting on a downstream circular cylinder of fixed tandem circular cylinders were investigated. As results of this study, it was found that the spatial correlation of fluctuating pressure on a downstream circular cylinder was affected by distance between the tandem circular cylinders. Furthermore, POD Analysis indicated that the structure of fluctuating surface pressure acting on a single fixed circular cylinder and downstream circular cylinder were different.

key words: circular cylinder, tandem circular cylinders, coherence, POD analysis

1. はじめに

円柱部材は斜張橋ケーブルや吊橋のハンガーロープに使用されるように細長い部材として使用されていることが特徴である。しかし、斜張橋や吊橋自体の規模の増大と共にケーブルが長くなり、ケーブルの持つ構造剛性や振動減衰等が小さくなることで、ケーブルが風によって振動することが問題となっている¹⁻³⁾。風によるケーブル

振動の種類として、風に曝された円柱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円柱表面に周期的な圧力変動が生じ、それが励振力となり生じる渦励振や、斜張橋や吊橋において小口径のケーブルを並列配置することによって風上側ケーブルが形成する後流の影響により風下側ケーブルに大きな励振力を生じることで発生する、ウェイクギャロッピングおよびウェイクイ

*1 徳島大学大学院 理工学研究部 准教授

Associate Professor, Graduate School of Science and Technology, Tokushima University

*2 本州四国連絡高速道路株式会社 (研究当時: 徳島大学先端技術科学教育部大学院生)

Honshu-Shikoku Bridge Expressway Company Limited

(At the time of a study: Graduate Student, Graduate School of Tokushima University)

*3 株式会社長大 (研究当時: 徳島大学工学部学生)

Chodai Company Limited (At the time of a study: Student, Faculty of Engineering Tokushima University)

*4 徳島大学大学院 理工学研究部 教授

Professor, Graduate School of Science and Technology, Tokushima University

(原稿受理年月日: 2016年1月25日, 採用決定年月日: 2016年4月6日)

ンデューストフラッター等があり、これらはケーブルの疲労破壊を引き起こす等の悪影響が考えられ、早急な対策が求められている。そのため、ケーブルの制振対策や耐風安定性の向上のためにも、より精緻に円柱に作用する空気力の理解を進めようとする、単独円柱および並列 2 円柱における下流側円柱の表面圧力変動のスペン方向の空間相関やその空間組織構造を知る必要がある。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や空間組織構造は重要な要素の 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い⁴⁻⁷⁾。一方、単独円柱および並列 2 円柱における広い範囲のレイノルズ数に対する空力係数やストローハル数および流れのパターンに関する既往の研究⁸⁻¹¹⁾は数多く行われているものの、円柱における軸方向の表面変動圧力の空間相関に関する研究としては、Baroudi¹²⁾が円柱模型の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は直径の 3.5-6.0 倍程度であることが示されているものの、矩形断面と比べて円形断面に対する表面変動圧力の空間相関やその空間組織構造に関する検討例は非常に少なく、並列 2 円柱における検討はさらに少ないと考えられる。

そのため、本研究では、風洞実験により、静止単独円柱および並列 2 円柱の下流側円柱における表面変動圧力の軸方向の空間相関および空間組織構造について検討を行い、円柱の耐風設計における、適切な風荷重の算定およびケーブル振動の発生機構の解明、有効な制振対策の考案の基礎となることを目的とする。

2. 圧力測定実験概要

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 の測定洞を有する閉断面押込式室内循環型風洞を使用した。使用した模型は図 1(b)に示すような、直径 $D=50\text{mm}$ 、長さ 940mm のアクリル製の円柱（アスペクト比 18.8）であり、本研究の目的である円柱表面全体にわたって圧力が計測できるように、軸方向に 20mm 間隔に配置した各圧力測定断面に周方向に等間隔に 8 点の圧力孔を設けた。模型は風洞側壁に設置した導流板によって両端を支持し、単独円柱の実験では円柱模型のみを設置し、並列 2 円柱の実験では模型上流方向 S の位置に同直径のアクリル製円柱を設置した。今回並列 2 円柱の圧力測定実験において検討した中心間距離は $S=2D, 3D, 4D, 6D, 10D$ である。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。

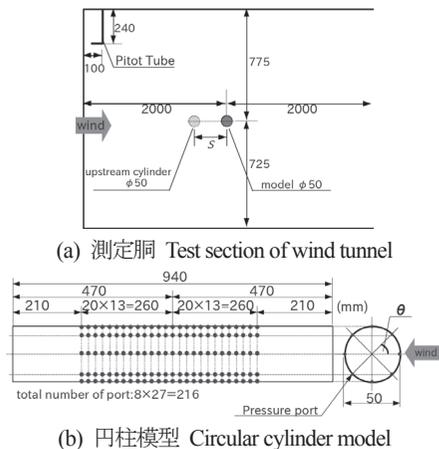


図 1 実験概略図

Fig. 1 General view of wind tunnel test configuration

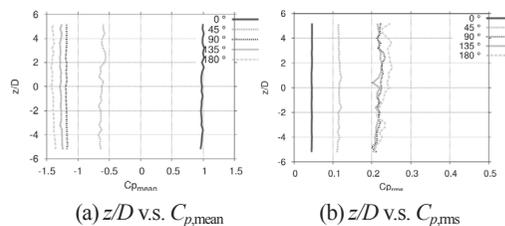


図 2 平均・変動圧力係数分布

Fig. 2 Distributions of mean and RMS pressure

圧力測定における基準圧として、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。検討風速 U は 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10m/s ($Re=1.3 \times 10^4 \sim 3.3 \times 10^4$) であり、単独円柱のレイノルズ数領域としては亜臨界領域に対応している。圧力測定結果として、風速 $U=10\text{m/s}$ における単独円柱の模型上面の時間平均圧力係数、変動圧力係数分布を図 2 に示す。圧力係数の算出に当たっては、ピトー管の動圧で除すことにより求めた。図 2 より、平均・変動圧力係数分布は軸方向にほぼ一様性を保っていることが確認できる。

3. 空気力およびストローハル数特性

この節では、今回検討した風速（レイノルズ数）において並列 2 円柱における下流側円柱に作用する空気力およびストローハル数特性についての検討を行う。

3. 1 空気力の諸統計量

図 3 に今回検討した静止単独円柱と並列 2 円柱における下流側円柱(以降、下流側円柱と表記)の平均抗力係数 $C_{D,mean}$ (図 3(a))、変動抗力係数 $C_{D,rms}$ (図 3(b))、変動揚力係数 $C_{L,rms}$ (図 3(c))のレイノルズ数による変化を示し、図 3(d)

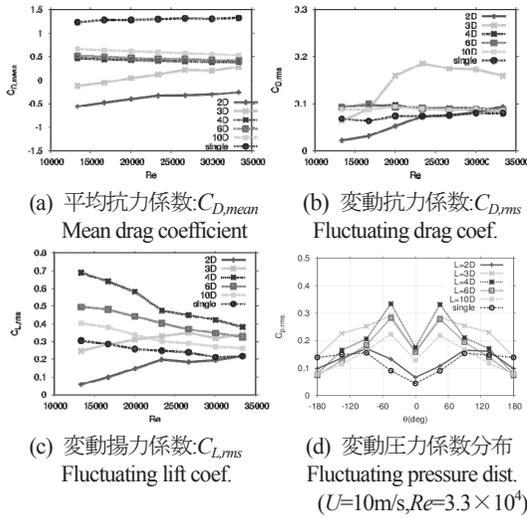


図3 円柱全体に作用する空気力係数の諸統計量

Fig. 3 Aerodynamic forces coefficients acting on the whole downstream circular cylinder

に風速 $U=10\text{m/s}(Re=3.3 \times 10^4)$ における圧力模型の各断面でアンサンブル平均を行った円柱周方向の変動圧力係数 $C_{p,rms}$ 分布を示す。上記の前者3つの空気力係数の求め方は、圧力模型の各断面の圧力孔より測定された圧力を周方向で積分を行い、円柱全体に作用する主流方向の力の時間平均および変動の標準偏差に対してピトー管の動圧と円柱模型の主流方向への投影面積で除して無次元化したものが、平均抗力係数 $C_{D,mean}$ 、変動抗力係数 $C_{D,rms}$ であり、円柱全体に作用する主流直交方向の力の変動の標準偏差を無次元化したものが、変動揚力係数 $C_{L,rms}$ である。大きな傾向として静止単独円柱および中心間距離 $4D$ 以上の下流側円柱の平均抗力係数 $C_{D,mean}$ 、変動抗力係数 $C_{D,rms}$ 、はレイノルズ数の増加に対してほとんど変化しておらず、 $3D$ 以下の下流側円柱においてはレイノルズ数の増加に伴って増加していることが確認できる。変動揚力係数 $C_{L,rms}$ に関しては、静止単独円柱および中心間距離 $4D$ 以上の下流側円柱ではレイノルズ数の増加に対して減少する傾向を示し、中心間距離 $3D$ 以下の下流側円柱においては逆にレイノルズ数の増加と共に増加する傾向を示す。図3(a)における中心間距離 $3D$ の下流側円柱の平均抗力係数より、 $3D$ の平均抗力係数はレイノルズ数 2.0×10^4 以下では負の値を示していたものが、 2.0×10^4 以上で正の値に転じ、同時に変動抗力係数の急増していることが分かる。これは、前者では上流側円柱からの剥離流が円柱間に流れ込まないのに対して、後者では上流側円柱からの剥離流が円柱間に流れ込むことで外部流が下流側円柱に衝突するためと考えられる。井上らの研究¹³⁾より、中

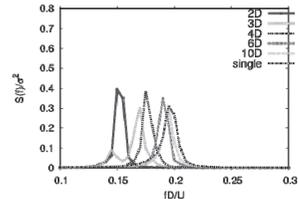
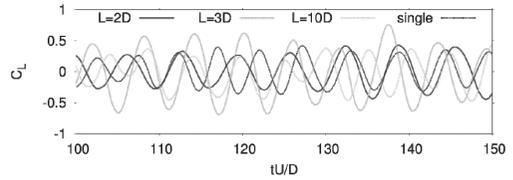


図4 円柱全体に作用する変動揚力の時系列および周波数特性

Fig. 4 P.S.D and time series of fluctuating lift acting on the whole cylinder

心間距離 $3D$ における下流側円柱の応答特性としてレイノルズ数 2.0×10^4 程度で下流側円柱に吹流し(下流側円柱が静的な空気力を受けることで無風時の円柱位置から主流方向に移動すること)と鉛直倍振幅 $2D$ 以上の振動が生じており、本研究はそれに対応するものであると考えられる。また、中心間距離 $3D$ における下流側円柱において変動抗力係数 $C_{D,rms}$ の値が他のものよりも大きい。しかし、図3(d)の変動圧力係数分布より、中心間距離 $3D$ の下流側円柱の周方向の変動圧力係数分布は全体的に他の円柱よりも大きい、図3(b)の $U=10\text{m/s}(Re=3.3 \times 10^4)$ における変動抗力係数 $C_{D,rms}$ のように、他の条件の約2倍に及ぶほど大きくはない。この原因については後述する表面変動圧力の空間相関で述べる。

中心間距離 $3D$ の結果から分かるように、中心間距離が小さい場合($S=2D, 3D$)、レイノルズ数の増加と共に上流側円柱の剥離形態が変化することで、下流側円柱の空力係数の特性に影響を与えている。一方、中心間距離が大きい場合($S=4D, 6D, 10D$)は、下流側円柱の存在が上流側円柱の剥離性状へ影響を及ぼさないため、レイノルズ数の変化により下流側円柱の空気力係数の特性が大きく変化しないと考えられる。しかし、今回検討した下流側円柱の変動揚力係数は中心間距離 $2D$ の下流側円柱を除いて単独円柱のものよりも大きく、上流側円柱からの剥離流により下流側円柱には大きな変動揚力が作用していることが分かる。

3. 2 変動揚力の周波数特性

図4に風速 $U=10\text{m/s}(Re=3.3 \times 10^4)$ における単独円柱および下流側円柱の揚力係数の時系列波形および、円柱全体に作用する変動揚力のパワースペクトルを示す。図4(a)の無次元時間 tU/D と揚力係数 C_L より、静止単独円柱および下流側円柱には周期的な揚力変動が確認できる。また、大きな傾向としては、図4(b)の変動揚力のパワースペクトル $fS(f)/\sigma^2$ と無次元周波数 fD/U より、中心間距離が小さいほど変動揚力のパワースペクトルのピーク周波数が小さくなっており、この並列2円柱におけるピーク周波数の低下は既往の研究^{10,11)}においても指摘されており、本研究の結果はそれを踏襲するものであると考えられる。さらに、変動揚力のピーク周波数は、中心間距離の増加と共に単独円柱のピーク周波数である $fD/U=0.2$ に近づいており、前述の空力係数特性と同様に中心間距離を大きくすることで下流側円柱の特性が単独円柱に近づいているものと考えられる。

4. 円柱表面変動圧力の空間相関の検討

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に積分することで変動揚力および変動抗力を求めた。そして、変動揚力は前章の図4(b)に示されるように、その変動に卓越した振動数を持つことから、円柱中央断面を基準とし、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それぞれのストローハル数成分における軸方向のルートコヒーレンス分布を次式により求めた。

$$R_{-coh} = \frac{|S_{ij}(f_{st})|}{\sqrt{S_i(f_{st})S_j(f_{st})}} \quad (1)$$

ここで f_{st} はカルマン渦放出周波数(ストローハル成分)であり、 $S_{ij}(f_{st})$ は i 点と j 点のストローハル数成分のクロススペクトルであり、 $S_i(f_{st})$ と $S_j(f_{st})$ は其々 i 点と j 点のストローハル数成分のパワースペクトルである。

図5に変動抗力のパワースペクトルを示す。また、図5(b)は各ケースの比較をし易いように縦軸を平行移動したものである。図5(a)より、変動抗力は変動揚力と比較して低周波数領域にパワーが偏っており、これは平均値を中心とした揺らぎのような変動であると考えられる。また、図5(b)より、下流側円柱に作用する変動抗力においては高周波数に2つの卓越成分が存在する。以上より、変動抗力においては変動揚力のように特定の周波数のルートコヒーレンスを求めることにより軸方向の空間

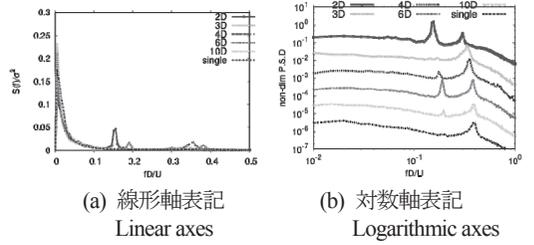


図5 変動抗力のパワースペクトル($Re=3.3 \times 10^4$)

Fig. 5 P.S.D of fluctuating drag ($Re=3.3 \times 10^4$)

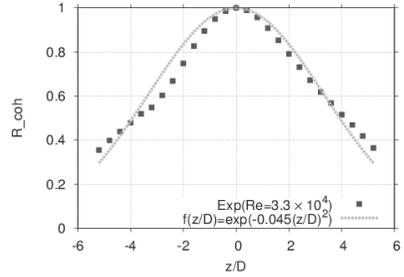


図6 変動揚力のルートコヒーレンス分布および近似曲線($Re=3.3 \times 10^4$)

Fig. 6 Root coherence distribution of the fluctuating lift and approximate curve ($Re=3.3 \times 10^4$)

相関の評価は難しいと考えられる。そこで、変動抗力では中央断面を基準とし、中央断面と各断面との相関係数を次式により求め、軸方向の相関係数分布を求めた。

$$cor = \frac{V_{ij}}{\sqrt{V_i} \sqrt{V_j}} \quad (2)$$

ここで、 V_{ij} は i 点と j 点との共分散、 V_i 、 V_j はそれぞれ i 点と j 点の分散である。ここで得られた、軸方向のルートコヒーレンス分布および相関係数分布は、基準と設定した中央断面から離れるに従ってその値が小さくなる釣鐘型の分布をすると考えられ、空間相関を定量的に評価するために、軸方向のルートコヒーレンス分布および相関係数分布に対してガウス関数を適用したところ、良い一致が得られたことから、それぞれの近似したガウス関数を積分した相関スケール L_{coh} 、 L_{cor} を求めた。

$$\begin{aligned} R_{-coh} &= \exp(-k_{coh} z^2) & cor &= \exp(-k_{cor} z^2) \\ L_{coh} &= \int_0^{\infty} \exp(-k_{coh} z^2) dz & L_{cor} &= \int_0^{\infty} \exp(-k_{cor} z^2) dz \\ &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{k_{coh}}} & &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{k_{cor}}} \end{aligned} \quad (3)$$

$$(4)$$

ここで k_{coh} , k_{cor} はそれぞれルートコヒーレンス, 空間相関係数に対する decay factor である。

ルートコヒーレンスを求める際のクロススペクトルのアンサンブル平均については, 圧力測定をサンプリング周波数 1kHz で 40 秒間実施したことから, 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。また, 軸方向のルートコヒーレンス分布の算出に関して, 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 ($\Delta f/D/U=0.005$) 前後 1 成分のルートコヒーレンスの平均値を使用する。相関係数の算出に関しては 40 秒間の測定データを使用して求めた。

一例として, 単独円柱における圧力測定実験より求めた変動揚力の卓越周波数であるストローハル成分の軸方向のルート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図 6 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。そこで次節では, 圧力測定実験によりルートコヒーレンス分布および相関係数分布を求め, それらに対してガウス関数を近似させ, 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 変動揚力に関する検討

単独円柱および下流側円柱に作用する変動揚力の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_{coh} を図 7 に示す。図 7(a),(b) より, 大きな傾向として変動揚力の空間相関は単独円柱よりも大きいことが確認できる。特に中心間距離 S が比較的小さい $2D$ の下流側円柱においては, レイノルズ数の増加に伴って相関スケール L_{coh} が増加していることが分かる。また同様の傾向がレイノルズ数 $Re=2.0 \times 10^4$ 以下の中心間距離 $3D$ の下流側円柱においても確認できる。上記の両者の共通点としては, 中心間距離 $2D$ およびレイノルズ数 $Re=2.0 \times 10^4$ 以下の中心間距離 $3D$ の下流側円柱において, 前述の図 3(a) に示すように平均抗力係数が負の値を示している。平均抗力係数が負の値を示しているということは, 円柱間に上流側円柱からの剥離流が流れ込まず, 下流側円柱に付着していると考えられ, この上流側円柱からの剥離流の円柱間への流れ込みの有無が変動揚力の軸方向の空間相関に影響を与えていると考えられる。この上流側円柱からの剥離流の流れ込みの有無と, 変動揚力の空間相関に関する詳細は後述の表面変動圧力の空間組織構造の節で検討する。

図 7(b) に示すように中心間距離 S が比較的大きい

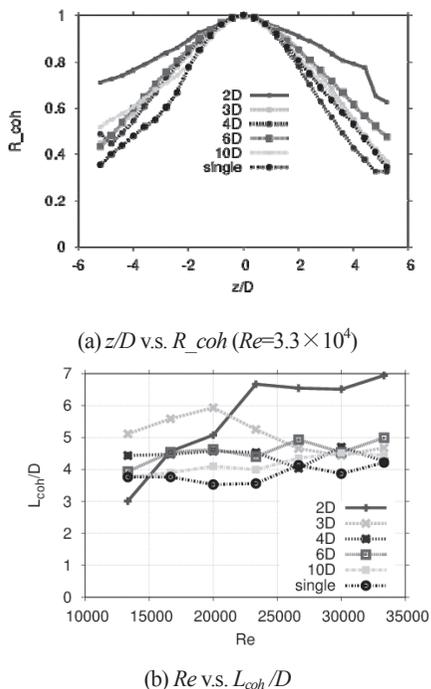


図 7 変動揚力のルートコヒーレンス特性
Fig. 7 The root coherence of the fluctuating lift

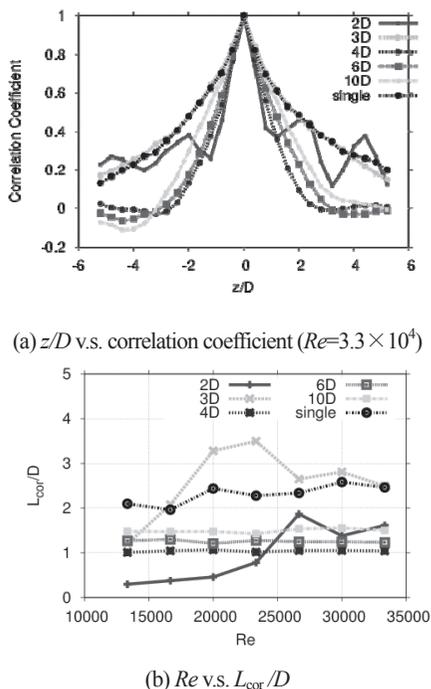


図 8 変動抗力の空間相関特性
Fig. 8 The spatial correlation of the fluctuating drag

($S=4D, 6D, 10D$) の下流側円柱および単独円柱においては、変動揚力の軸方向の相関スケール L_{coh} はレイノルズ数の増加に対して、中心間距離 $2D$ の下流側円柱と比較して明確な傾向は示さない。この中心間距離 $2D$ における相関スケール L_{coh} のレイノルズ数の増加に従って増加する傾向が、前節の中心間距離 $2D$ の下流側円柱の部材全体に作用する変動揚力係数がレイノルズ数の増加に伴って増加することに繋がったと考えられる。また、レイノルズ数 $Re=2.0 \times 10^4$ より大きい中心間距離 $3D$ の下流側円柱においても、変動揚力の相関スケール L_{coh} はレイノルズ数の増加に対する明確な傾向は特に認められない。以上より、並列2円柱の下流側円柱の軸方向の空間相関においては、中心間距離およびレイノルズ数の増加に伴う円柱間への上流側円柱の剥離流の流れ込みの有無によってその特性が異なると考えられる。

4. 2 変動抗力に関する検討

単独円柱および下流側円柱に作用する、変動抗力の部材軸方向の空間相関係数分布および相関スケール L_{cor} を図8に示す。図8(a)より、中心間距離 $3D$ の下流側円柱と単独円柱の変動揚力の軸方向の空間相関係数分布の形は同じものが得られており、中心間距離 S が大きい $4, 6, 10D$ における下流側円柱において中央断面との距離が離れるに従って相関係数が急減している。図8(b)の相関スケール L_{cor} に関しては、下流側円柱の変動揚力のものとは異なり、中心間距離 $3D$ における下流側円柱を除いて基本的に単独円柱のものよりも相関スケール L_{cor} が小さい結果が得られた。図8(b)より中心間距離 S が比較的大きい $4, 6, 10D$ においては、中心間距離が大きくなるに従って変動抗力の相関スケールが大きくなる傾向が示されているが、その増加量は少なく、中心間距離 $10D$ における下流側円柱の相関スケールの値は単独円柱のものよりも小さい。前述の中心間距離 $3D$ の下流側円柱の変動抗力が大きい理由としては、上流側円柱からの剥離流によって表面圧力の変動量が大きくなると共に、相関スケール L_{cor} が他の下流側円柱よりも大きいことが理由と考えられる。また、上述の下流側円柱における変動抗力の軸方向の空間相関が小さくなった理由についての詳細は、後述の表面変動圧力の空間組織構造の節で検討する。

5. 表面変動圧力の空間組織構造

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、田村の方法¹⁴⁾に従いPOD解析を行った。ここではPOD解析により、単独静止円柱および並列2円

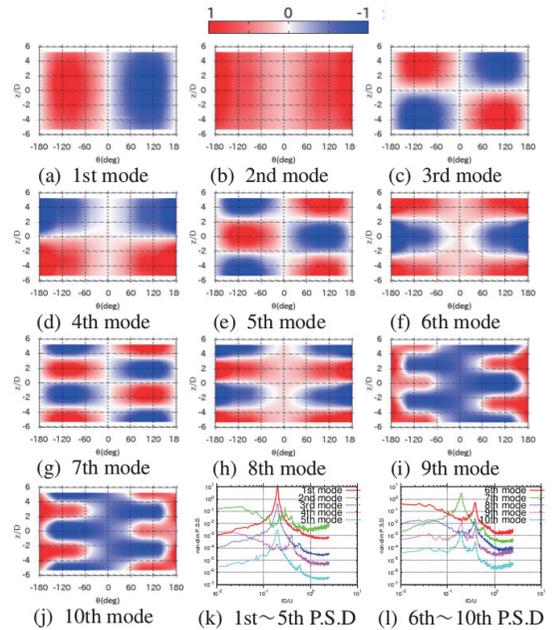


図9 単独円柱表面変動圧力に対するPOD解析結果 ($Re=3.3 \times 10^4$)

Fig. 9 Result of the POD analysis for single circular cylinder ($Re=3.3 \times 10^4$)

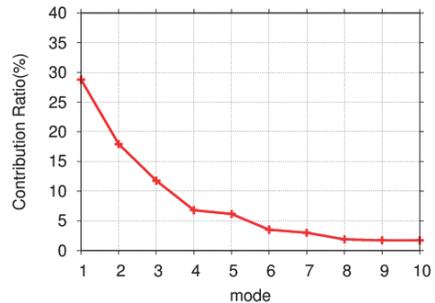


図10 変動モードの寄与率($Re=3.3 \times 10^4$)

Fig. 10 The contribution ratio of the fluctuating mode ($Re=3.3 \times 10^4$)

柱における下流側円柱の表面変動圧力の組織構造の検討を行い、前述の表面変動圧力の空間相関との関係性についても検討を行う。

5. 1 単独円柱の表面変動圧力の空間組織構造

風速 $U=10\text{m/s}$ ($Re=3.3 \times 10^4$) 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9に示し、図10に各変動モードの寄与率を示す。図9(a)~(j)の縦軸は軸方向 z であり模型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 ($\theta=0^\circ$ は淀み点) とし、

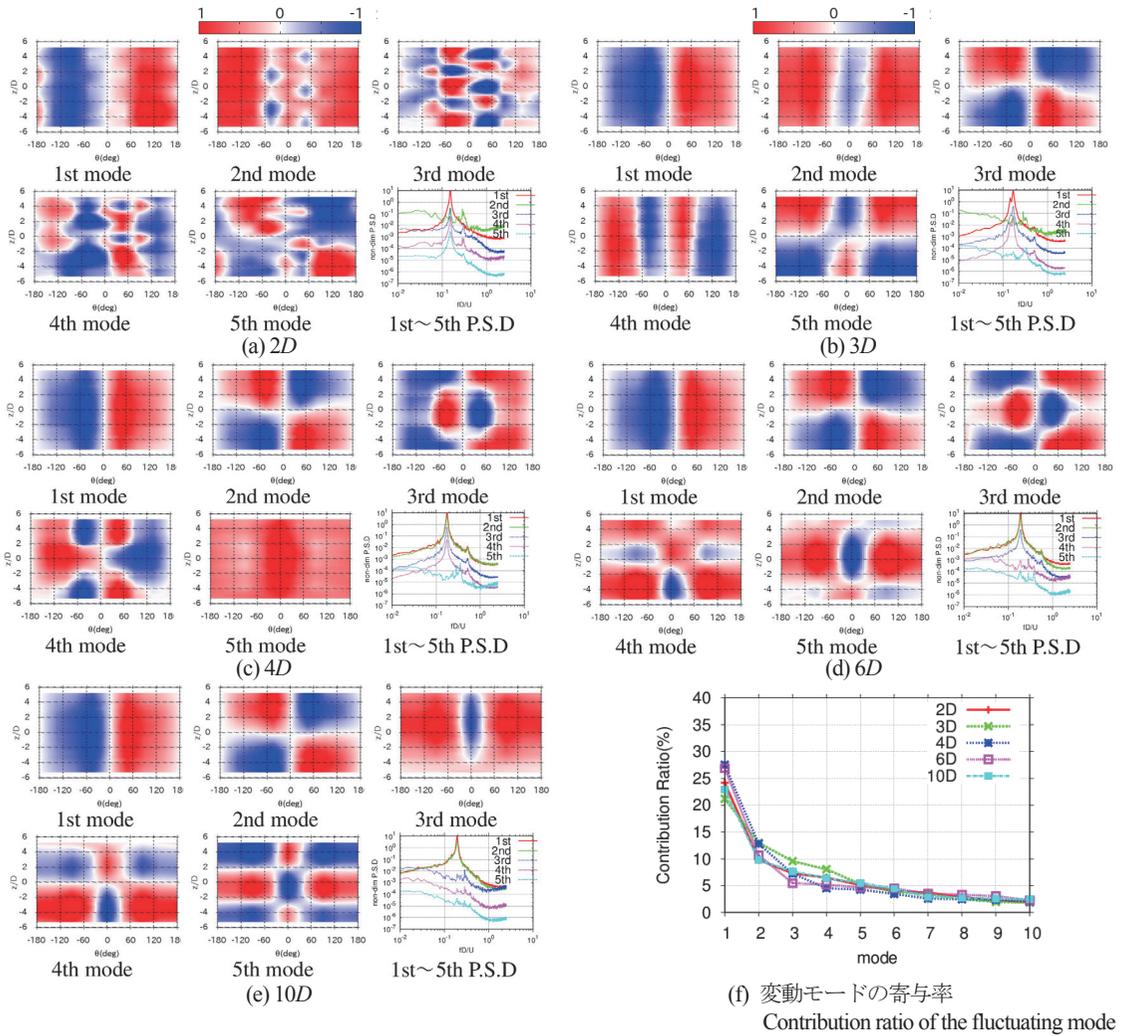


図 11 下流側円柱表面変動圧力に対する POD 解析結果($Re=3.3 \times 10^4$)
Fig. 11 Result of the POD analysis for downstream circular cylinder ($Re=3.3 \times 10^4$)

モード形をカラーマップで表現した。また図 9(k)(l)は各変動モードの基準座標のパワースペクトルであり、縦軸は任意の値である。モード形より、1 次モードと 2 次モードは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、円柱から放出される一樣なカルマン渦による圧力変動であり、1 次モードは揚力変動、2 次モードは抗力変動に対応すると考えられる。また、高次のモードほど、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できる。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其々 $fD/U=0.2, 0.4$ 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

動であり、これらの高次の変動モードは円柱の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、高次モードにおいて基準座標のパワースペクトルに $fD/U=0.2, 0.4$ の両方付近において卓越を持つ変動モードが確認でき、揚力と抗力の両方に寄与する変動と考えられる。図 10 より、軸方向に一樣な変動モードである 1 次、2 次モードの寄与率は全体の約 50%程度であり、一樣流中においても軸方向に一樣な変動が支配的ではあるが、軸方向に大小様々なスケールの変動の寄与率も決して小さいものではない事が確認される。以上より、単独円柱表面圧力変動に対して POD 解析を行うことにより、単独円柱表面変動圧力の空間組織構造が明らかとなった。

5. 2 下流側円柱の表面変動圧力の空間組織構造

風速 $U=10\text{m/s}(Re=3.3\times 10^4)$ における下流側円柱表面変動圧力に対して POD 解析を行った結果を図 11 に示す。図 11(a)~(e) は今回検討した中心間距離 S の下流側円柱の 1 次~5 次の変動モードと基準座標のパワースペクトルであり、図 11(f) は各中心間距離における下流側円柱の変動モードの寄与率を示したものである。今回検討した中心間距離 S における下流側円柱の表面変動圧力の空間構造として、1 次変動モードは単独円柱と同じ軸方向で一般的な変動モードが得られた。しかし、下流側円柱の表面変動圧力の特徴として中心間距離 $2D$ における下流側円柱の結果を除いて、周方向に節を持つような空間構造が得られたことが特徴として挙げられる。周方向に節を持つ変動として、中心間距離 $3D$ における図 11(b) の 2 次、4 次、5 次モードが顕著な例として挙げられるが、他の中心間距離における下流側円柱においても単独円柱では確認されないような周方向に分布を持つ空間構造が確認されている。このような周方向に分布を持つ表面変動圧力の空間構造は単独円柱では見られなかったことから、下流側円柱において見られる周方向に節を持つ表面変動圧力は上流側円柱からの剥離流に起因するものであると考えられる。中心間距離 $2D$ においては今回検討したレイノルズ数域において上流側円柱からの剥離流が円柱間に流れ込んでいないため、2 次変動モード以降に空間組織構造が確認できない、若しくは寄与率が小さいと考えられる。また、周方向に節を持つ変動モードは高次モードに行くに従って、軸方向に節を増やす傾向を示しており、上流側円柱からの剥離流の軸方向における非一様な成分によるものであると考えられる。下流側円柱においては 1 次モードのように単独円柱においても確認された自身から放出されるカルマン渦に起因する変動モードが存在すると共に、上流側円柱からの剥離流に起因する変動モードが存在することが分かった。

前述の表面変動圧力の空間相関に関して、表面変動圧力の軸方向の空間相関は中心間距離 S の影響を受けると述べた。特に中心間距離 $2D$ の下流側円柱における変動揚力の軸方向の空間相関は他の中心間距離の下流側円柱のものよりも空間相関が大きかった。この理由としては、上述したように中心間距離 $2D$ の下流側円柱においては 1 次モード以降の変動モードに他の下流側円柱と比較して、組織的な空間構造が見られない、または、軸方向にスケールの小さい空間構造が存在することが原因と考えられる。また、図 11(f) の変動モードの寄与率より、各変動モードの寄与率は中心間距離 S の影響を受けては

表 1 一次基準座標とのルートコヒーレンス

Table 1 Root coherence between the 1st normal coordinate

| Case | 2nd | 3rd | 4th | 5th |
|-----------|-------|-------|-------|-------|
| $S = 2D$ | - | 0.967 | 0.965 | 0.213 |
| $S = 3D$ | - | 0.243 | 0.978 | - |
| $S = 4D$ | 0.284 | 0.771 | 0.651 | - |
| $S = 6D$ | 0.251 | 0.562 | - | - |
| $S = 10D$ | 0.226 | - | - | - |
| Single | - | 0.288 | - | 0.344 |

おらず、全ての下流側円柱において見られる、揚力変動に対応する軸方向に一般的な変動である 1 次モードの寄与率の差は小さい。しかし、中心間距離 $2D$ の下流側円柱においては軸方向にスケールの小さい空間構造が他の下流側円柱よりも見受けられたことから、軸方向の表面変動圧力の変動のスケールにおいては、中心間距離 $2D$ の下流側円柱の 1 次モードが、他の下流側円柱よりも支配的であることも考えられる。

以上に述べたように、表面変動圧力の空間相関は、軸方向に一般的な変動モードと、軸方向に節を持つ変動モードとの間の影響を受けると考えられるが、図 11(f) に示す変動モードの寄与率だけではそれらの関係を説明するのに不十分であると考えられる。そのため、変動モード間の同期性を見るために、軸方向に一般的な変動モードである 1 次基準座標と軸方向に節を持つ変動モードである 2 次~5 次基準座標とのルートコヒーレンスを求め、それらを表 1 に示す。表のルートコヒーレンスの値は 1 次基準座標と同じ卓越周波数成分を持つ基準座標とのルートコヒーレンスの値を載せており、ルートコヒーレンスの求め方は前章の圧力変動の空間相関を踏襲するものである。表 1 の単独円柱(表中 Single)からも分かるように、円柱全体で一般的な揚力変動を起こす 1 次モードと、軸方向に節を持つ揚力変動を起こす 3 次モードや 5 次モードとのルートコヒーレンスの値は非常に小さく、変動は同期していないことが確認できる。そのため、軸方向に節を持つような表面変動圧力の空間構造は軸方向の表面圧力変動の空間相関を壊す方に働くと考えられる。しかし、中心間距離 $2D, 3D, 4D, 6D$ の下流側円柱においては、上流側円柱からの剥離流に起因する変動モードの基準座標と 1 次モードの基準座標とのルートコヒーレンスの値が大きいことが分かる。特に、中心間距離が比較的小さい $2D, 3D$ の下流側円柱においては、1 次基準座

標とのルートコヒーレンスの値が0.9を超える変動モードが確認されており、円柱全体に様な揚力変動を起こす1次モードと同期している変動モードが存在している。また、中心間距離 $3D$ における下流側円柱の4次変動モードは上流側円柱からの剥離流に起因する周方向に節を持ち、軸方向で一様な変動モードであり、自身から放出されるカルマン渦に起因する1次モードと上流側円柱からの剥離流に起因する変動が同期している。中心間距離が大きくなるに従って、上流側円柱からの剥離流に起因する変動モードと1次モードとのルートコヒーレンスが小さくなる傾向を示しており、中心間距離が大きくなることによって、上流側円柱からの剥離流が流下に伴って三次元性を増すことにより、下流側円柱自身から放出されるカルマン渦に起因する変動と、上流側円柱からの剥離流に起因する変動との同期性が小さくなったのではないかと考えられる。しかし、並列2円柱における下流側円柱においては、自身から放出されるカルマン渦に起因する1次モードと、その変動モードとある一定の寄与率を持つ上流側円柱からの剥離流に起因する変動モードとのルートコヒーレンスが大きいことで、並列2円柱における下流側円柱の変動揚力の軸方向の空間相関が単独円柱のものよりも大きくなったと考えられる。

変動抗力の軸方向の空間相関に関しては、図9に示す単独円柱の2次変動モードや図11(b)の中心間距離 $3D$ の下流側円柱の2次変動モードにおいて、軸方向に一様な抗力変動に対応する変動モードが存在するのに対し、他の中心間距離における下流側円柱においては軸方向に一様な変動抗力に対応する変動モードが見られない。この軸方向に一様な抗力変動に対応する変動モードが確認されない、もしくは寄与率が小さいことが、軸方向の変動抗力の空間相関が小さい原因ではないかと考えられる。

6. まとめ

風洞を用いた圧力測定実験により、単独円柱および並列2円柱における下流側円柱の表面変動圧力の空間相関および空間組織構造につい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。

円柱表面変動圧力の軸方向の空間相関の検討に関しては、並列2円柱の円柱間の中心間距離を変化させた結果、下流側円柱の表面変動圧力の空間相関は中心間距離の影響を受けることが分かった。変動揚力の軸方向の空間相関は単独円柱よりも下流側円柱の方が大きく、並列2円柱における中心間距離が小さい場合、特に中心間距離 $2D$

における下流側円柱においては、レイノルズ数の増加と共に揚力変動の空間相関が大きくなる傾向を示すと共に、円柱に作用する変動揚力係数も大きくなった。変動抗力の軸方向の空間相関に関しては、中心間距離 $3D$ の下流側円柱を除いて、単独円柱の方が空間相関が大きかった。以上より、下流側円柱の表面変動圧力の空間相関は2円柱間の中心間距離の影響を受け、中心間距離を変化させることによって、円柱間の流れが異なることにより、下流側円柱の表面圧力の空間組織構造が変化し、それが空間相関に影響を与えたと考えられる。

一方、円柱表面変動圧力の空間組織構造の検討に関しては、今回検討した並列2円柱の下流側円柱において、静止単独円柱では見られなかった、周方向に分布を持つ上流側円柱からの剥離流に起因する空間構造が確認できた。また、変動揚力に対応する軸方向に一様な変動モードと軸方向に節を持つ変動モードの基準座標間のルートコヒーレンスを求めた結果、静止単独円柱ではその両者の値は小さかったが、並列2円柱においては両者のルートコヒーレンスの値は大きく、中心間距離が小さいほどその値は大きくなる。そのため、並列2円柱の方が静止単独円柱よりも変動揚力の空間相関が大きく、またその中でも、今回検討した最も中心間距離の小さい $2D$ の下流側円柱の変動揚力の空間相関が大きくなったのではないかと考えられる。一方、下流側円柱の変動抗力の軸方向の空間相関が小さくなった理由としては、中心間距離 $3D$ を除いた下流側円柱においては軸方向に一様な抗力変動に対応する変動モードが確認できない、若しくは寄与率が小さいため、変動抗力の軸方向の空間相関が小さくなったと考えられる。しかし、宮田らの研究¹⁵⁾より、中心間距離が $8\sim 10D$ の並列2円柱における下流側円柱の応答において、主流に対して迎角を持たせた場合、下流側円柱には主流方向に卓越した振動が発生するとされている。そのため、今後は中心間距離が大きい並列2円柱に対して、主流に対して迎角を持たせた場合の下流側円柱の変動抗力の空間相関に関する検討を行う必要があると考える。

以上の結果が得られたが、今後は並列2円柱において主流に対して迎角を持つ場合や、広範囲のレイノルズ数域における流れ、乱流中における検討を行う必要があると考えられる。また、並列2円柱の下流側円柱においては、静止時と振動中では下流側円柱の表面変動圧力構造は異なると考えられるため、今後は振動中における下流側円柱の表面変動圧力の検討を行う必要があると考える。

謝辞

本研究の一部は科研費(2642046000)の助成を受けたものである。ここに記し、謝意を表す。また、本研究は2015年度日本風工学会優秀修士論文賞を受賞したものである。

参考文献

- 1) 山田 郁夫, 楠原 栄樹, 河原 千尋, 「長大橋の動的挙動と振動制御 一動的観測システム計測結果一」, 橋梁と基礎, No. 6, pp. 15-19, (2008)
- 2) 竹口 昌弘, 福永 勲, 「明石海峡大橋並列ハンガーロープのウエイク振動対策」, 日本風工学会誌, Vol. 37 No. 4, pp. 300-306, (2012)
- 3) 秦 健作, 楠原 栄樹, 花井 拓, 「斜張橋ケーブルのウエイクギャロッピング制振対策検討」, 第 18 回風工学シンポジウム, pp. 413-418, (2004)
- 4) B. J. VICKERY, "Fluctuating lift and drag on a long cylinder of square cross-section in smooth an in a turbulent stream", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 25, part 3, pp. 481-494, (1965)
- 5) 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相関に関する研究」, 第 19 回風工学シンポジウム論文集, pp. 501-506, (2006)
- 6) 白土 博通, 松本 勝, 片倉 佑哉, Don 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)
- 7) 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)
- 8) 溝田 武人, 山田 均, 久保 嘉延, 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)
- 9) 岡島 厚, 溝田 武人, 久保 嘉延, 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)
- 10) 五十嵐 保, 「直列 2 円柱まわりの流れ特性(第 1 報)」, 日本機械学会論文集 B 編, 46 巻, 406 号, pp. 1026-1036, (1981)
- 11) 森谷 優, Md. Manhub ALAM, 高井 和紀, 坂本 弘志, 「直列配置された近接 2 円柱の変動流体力特性」, 日本機械学会論文集 B 編, 68 巻, 669 号, pp. 84-90, (2001)
- 12) 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)
- 13) 井上 真尋, 野田 稔, 長尾 文明, 「ウエイクギャロッピングに及ぼす円柱表面粗度の影響」, 「フラッターの制御と利用」に関する第 1 回シンポジウム, pp. 135-139, (2011)
- 14) 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, pp. 33-41, (1995)
- 15) 宮田 利雄, 山田 均, 勝地 弘, 篠原 建太郎, 「並列ケーブルのウエイク振動に関する風洞実験」, 第 16 回風工学シンポジウム論文集, pp. 489-494, (2000)