並列に配置された二柱体間の相互干渉渦流れ*
(静止設置の場合)横井 嘉文*¹, 平尾 恵子*²The Interaction Vortex Flow Around a Pair of
Parallel Arranged Bluff Cylinders
(In the Case of Stationary Setting)Yoshifumi YOKOI*³ and Keiko HIRAO^{*3} Department of Mechanical Engineering, The National Defense Academy,
1-10-20 Hashirimizu, Yokosuka-shi, Kanagawa, 239-8686 Japan

In this study, the interaction vortex flow features around a pair of parallel arranged bluff cylinders were observed by visualizing water flow experiment at the range of the gap ratio $G/d=0 \sim 3$. It was obtained that the result of established wind tunnel test and the result of this water tank test agreed about the characteristics of vortex shedding when varying the distance of circular cylinder gap. The flow pattern and vortex shedding frequency of another type bluff cylinder (triangular and square cylinder) were also investigated. As a result of the experiment, it was shown that the flow pattern of wake flow was divided into three kinds (coupled vortex streets, biased gap flow and single vortex street) regardless of the cylinder section shape and the cylinder size. Then, the region of the appearance of flow pattern was shown about each case. In the case where two each other independent vortex streets were formed, three typical flow patterns of vortex formation (in-phase coupled vortex streets, out-of-phase coupled vortex streets and complication coupled vortex streets) were observed. It was known that three configuration of vortex formation appear intermittently and alternatively.

Key Words: Vortex, Flow Visualization, Two Cylinders, Parallel Arrangement, Strouhal Number

1. 緒 言

流れの中に柱状物体を置くと、その背後に形成される振動流れにより柱状物体が励起される、いわゆる流体関連振動現象が生じる場合がある。構造物の設計において、流体力による振動を見積もることは重要で、工学的にも重要な研究課題として位置付けられている。流れの中に存在する構造物として、高層建築物、艦船のマスト、多脚煙突、送電線、熱交換器などの管群、海洋油田プラットフォームの脚構造物などが挙げられる。これらの構造物や構要素の基本的形状は、円柱、三角柱、四角柱であり、単独で存在する場合よりも複数で存在する場合が多い。複数の柱状物体の相互干渉を伴う変動流体力や渦流れを明解にすることは、工学上重要な課題であるとともに、流体関連振動現象の系統的把握のための基礎資料として意義深いことである。

機械・土木・建築など諸分野の実用的問題に関連して、構造物の代表的形状である円柱を流れに対して直

角に二つ配置した場合の渦流れについて、古くから多くの研究が行われている。しかしながら、流れの中にある二円柱の代表配列の一つである並列配置に関する研究は直列配置に比較して少なく、いくつかの例⁽¹⁾⁻⁽⁷⁾を散見するにすぎないのが現状である。また、円柱に比べて四角柱や三角柱などを用いた並列二柱体まわりの流れや、断面の異なる並列二柱体まわりの流れについての研究はさらに数が少ないのが現状であり、工学的基礎資料としての蓄積が望まれているものである。

本研究では、並列に配置された同径(断面形状と投影幅が同じ)、異径(断面形状は同じ、投影幅は異なる)および異形断面の二柱体によって生じる相互干渉流れについて、間隔比 G/d (G は二柱体間の距離、 d は柱体の投影幅)を変化させて水流可視化実験を行い、間隔比 G/d に対するフローパターンや各柱体からの渦放出周波数特性などの調査を行った。その結果、それぞれの二柱体の組合せにおいて、相互干渉する間隔比の範囲、基本的フローパターン、フローパターンの間欠的な入れ換わりなどを明らかにした。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置概略 実験装置は、えい航水槽、回流水槽、可視化装置および記録装置などから構成され

* 原稿受付 2007年11月22日。

^{*1} 正員、防衛大学校システム工学群機械工学科(〒239-8686 横須賀市走水1-10-20)。^{*2} 学生員、防衛大学校理工学研究科。

E-mail: yokoi@nda.ac.jp

ている。実験を行うに当たって、フローパターンの観測と渦放出周波数の計測はおもにえい航水槽を用いて行い、得られた現象の確認や記録撮影は回流水槽を用いて行った。えい航水槽は長さ6 m、幅0.4 m、深さ0.5 mのガラス壁面の貯水部本体とレール部、えい航台車および2本のタイミングベルトを用いた駆動装置から構成されている。台車をえい航する際に生じる振動の伝ばを極力小さく策するため、貯水部とレール部は別体となっている。回流水槽は容積4 m³の2インペラ方式垂直循環型の水槽であり、水流起生部、整流部、観測部および四つのコーナ部から構成されている。観測部は開口部を有する長さ2 m、幅0.8 m、水深0.4 mであり、両側壁と底部に長さ1.5 m、幅0.4 mのガラス製観測窓を設けている。観測部の開口部縁には直動レールが一組設けられ観測台車が設置されている。観測部における時間平均の流速分布は均一で0.4 m/sの平均流速に対して±1.5%以内であった。供試柱体はその設置間隔が任意に変えられる仕組みとともにえい航台車や観測台車上に搭載されている。可視化装置は500 Wのハロゲンライトであり、えい航水槽ではガラス壁面部に4台、回流水槽では観測部に2台設けられている。記録装置は工業用3 CCDカラービデオカメラとビデオ録画・再生装置から成る。

2.2 供試柱体について 供試柱体の長さは600 mmで断面形状は円形、正方形、正三角形である。円柱は外径8, 16, 25, 32 mm(25 mm円柱はアクリル製、その他はアルミニウム製)の4種類で表面にφ1 mmのトレーサ浸出孔(25 mm円柱は4箇所で個別浸出が可能、その他は2箇所)が端部より230 mmの位置に設けられている。正方形柱は一辺が9, 15, 20 mmの3種類でアルミニウム製で表面にφ1 mmのトレーサ浸出孔が端部より230 mmの位置に2箇所設けられている。正三角柱は底辺が20 mmでアルミニウム製でトレーサ浸出孔は設けられていない。

供試柱体のレイアウトは実験の便宜上、流れに対し

て左側に太い柱体、右側に細い柱体を配置しそれぞれ第1柱体および第2柱体と定義した。並列二柱体の配置図を図1に示す。ここで G は柱体配置間隔、 P は柱体中心距離、 d は太いほうの柱体(第1柱体)の投影幅である。

2.3 流れの可視化について 流れの可視化手法はトレーサインクによる注入流脈法を用いた。円柱および四角柱では、柱体表面に設けた浸出孔よりトレーサを浸出させた。三角柱では、上流側に細管を設け細管よりトレーサを浸出させた。トレーサインクはおもにローダミン B、記録撮影では染色用顔料[ダイロン社製カラーファン; ターコイズ(青)、蛍光ピンク]を用いた。

2.4 実験パラメータについて 実験パラメータは、柱状物体の断面形状とその大きさ、柱状物体間の距離(間隔) G である。柱状物体の断面形状は円形、正方形、正三角形であり、向きを変化させた場合を含めて5種類[円形、平面四角形、尖頭四角(ダイヤ)形、平面三角形、尖頭三角形]であり、柱状物体の大きさは円形では4種類(直径8, 16, 25, 32 mm)、正方形では3種類(一辺長9, 15, 20 mm)、三角形では1種類(底辺長20 mm)の合計8種類である。同径(同じ断面形状で同じ投影幅)の場合、異径(同じ断面形状で異なる投影幅)の場合および異形(異なる断面形状)の場合について、2本の柱体を組合せて行った。ここで実験流速は各水槽で流れの可視化が行いやすい流速を選定し、えい航水槽実験におけるえい航速度は0.045 m/s、回流水槽実験における計測部流速は0.085 m/sとした。

2.5 実験方法 えい航水槽を用いた実験では水位を400 mmとして、えい航駆動装置のコントローラを操作し目標となる台車えい航速度の設定を行う。柱体を台車に設置し柱体間隔を決定して十分水が静止した後台車えい航を行う。台車えい航時にトレーサを浸出させ水面下150 mmの位置にて流れの可視化を行い、流れのようすをビデオカメラで撮影し、ビデオテープに録画を行う。回流水槽を用いた実験では水位を400 mmとして、回流水槽運転制御盤に運転条件を入力し計測部の流速を設定する。柱体間隔の設定を行い、トレーサを浸出させ水面下150 mmの位置にて流れの可視化を行い、流れのようすをビデオカメラで撮影し、ビデオテープに録画を行う。ここで、柱体から放出される渦の周波数は、モニタ画面上で各柱体について、柱体背後1.5 d ~3 d の範囲で任意に定める観測位置(ただし、柱体両側から放出されるはく離せん断層が渦巻き上がって形成される渦巻が両方とも観測

Fig.1 Coordinate system and definition of symbols

できる位置とする)を通過する渦の個数と渦の計数に要した時間を計測することにより求めた。なお記録撮影時の流れの可視化における配色は、第1柱体はターコイズ(青)、第2柱体は蛍光ピンクとした。また、トレーサインクの個別浸出が可能な25 mm 円柱においては左側をターコイズ(青)、右側を蛍光ピンクとした。

3. 実験結果および考察

3.1 同径の場合について 本可視化計測手法の妥当性を検証するため、並列に配置された直径の等しい二つの円柱の場合について、間隔比 G/d を変化させて実験を行い、既存の実験結果⁽¹⁾⁽²⁾と比較を行うものとする。並列二円柱背後の渦流れにおけるストローハル数 $St(=f \cdot d/U)$ (f は渦放出周波数, d は柱体投影幅, U は流速)は間隔比 G/d によって変化し, $G/d > 1$ の領域では単独円柱の場合と変わらず, $0.5 < G/d < 1$ の領域ではストローハル数の値は二つ存在し, $G/d < 0.5$ の領域では単独円柱の場合の半分の値となることが知られている。図2は外径16 mm および25 mm の円柱を用いて、水流可視化観測実験を行った結果(図中, ○●△▲印)を既存の風洞計測実験結果(図中, 実験および破線)とともに示したものである。本実験結果は既存の実験結果と良好な一致を示すことが見てとれる。ここで、水槽実験のレイノルズ数 $Re(=U \cdot d/\nu=700, 1000)$, ν は動粘度)と風洞実験のレイノルズ数 Re (Spivack⁽¹⁾; $Re=1.4 \sim 9.8 \times 10^4$, Bearman & Wadcock⁽²⁾; $Re=2.5 \times 10^4$)は2オーダーほど異なっている。これらの事柄より、円柱相互の干渉領域はおおよそ $1 \times 10^2 \sim 1 \times 10^5$ の範囲でレイノルズ数に依存しないことが推察され、可視化による渦放出周波数計測手法の高い妥当性がうかがい知れる。並列二円柱後流のフローパターンは、間隔比 G/d が $G/d=1$ を

Fig. 2 Strouhal number in terms of gap ratio G/d in the case of circular cylinder

境として、二円柱が相互に干渉し後流形成を行う領域 ($G/d < 1$) と二円柱が独立的に交互渦列を形成する領域 ($G/d > 1$) に大別される。近傍後流に着目すると前者の領域ではさらに二分され、間隔比 G/d が $G/d=0.5$ を境として、2本の円柱があたかも単一の円柱が放出したとされる渦として扱われる複合単独渦流れと二円柱間のすきま部の流れに明確な偏り現象が見られる片寄り流れが生じることが知られている。また、後者の領域では互いに独立した二列の渦列が生じ、渦の

(a) Single vortex street $G/d=0.2$

(b) Biased gap flow $G/d=0.6$

(c) In-phase coupled vortex streets $G/d=1.0$

(d) Out-of-phase coupled vortex streets $G/d=3.0$

Fig. 3 Representative flow patterns

配置位相のタイミングにより二対の渦列が対称配列 (in-phase) と非対称配列 (out of phase) に間欠的に入れ替わっていることが知られている。図3はそれぞれ間隔比 G/d における流れの様子を示したものであり、流の特徴をよく再現していることが見てとれる。ただし、片寄り流れの方向が第1円柱側に向いている場合が撮影されたものであるため、図2に示されている結果と各円柱の渦放出周波数の高低関係は逆になっている。図3(a)は間隔比 G/d が $G/d=0.2$ の状態であり、円柱のすきまを通過する流れは第1円柱右側と第2円柱左側より生じるはく離せん断流をまとめて流下させ、第1円柱左側のはく離せん断流と合体して反時計まわりの渦巻を形成している。一方、第2円柱右側のはく離せん断流は単独で時計まわりの渦巻を形成して、2本の円柱があたかも単一の円柱が放出したとされる渦として扱われる複合単独渦流れとなるようすが示されている。図3(b)は間隔比 G/d が $G/d=0.6$ の状態であり、円柱のすきまを通過する流れは第1円柱側に偏って流れているのが見てとれる。おのおのの円柱背後に生じる淀み領域の長さは異なり、はく離せん断層は個別に巻き上がり流下して支配的渦列(第2円柱側)に従属的渦列(第1円柱側)が合体するよう

が示されている。淀み領域が長いほうでは後流幅は広がり、渦巻き上がりの周期は長くなる。淀み領域が短いほうでは後流幅は狭まり、渦巻き上がりの周期は短くなる。その結果、一つの間隔比において二つのストローハル数が得られることになる。図3(c), (d)は間隔比 G/d が $G/d>1.0$ の状態(G/d はそれぞれ1.0と3.0)であり、おのおのの円柱より交互渦列(カルマン渦列)が形成されている。ここで、二つの円柱背後に生じた交互渦列における渦の配置関係が図3(c)と(d)では異なることが見てとれる。すなわち、図3(c)においては流れに対して二対の渦列が対称であり、(d)においては流れに対して二対の渦列が平行(非対称)に存在しているようすが示されている。なお、これらのフローパターンの出現は間隔比 G/d によって特定される固有のものではない。対称、非対称の入れ替わりが間欠的に生じるものであり、その入れ替わりの頻度については3・4節にて後述する。

後流の干渉は、はく離後のはく離せん断層がもたらす現象であるため、柱体の幾何学的形状の違いに起因するものではないが、はく離点の固定または非固定といったはく離点における状況の違いは、はく離角度やはく離速度、渦放出循環量の大きさ、物体の背圧などに対して大きく影響する。このことは、形成されるはく離せん断層の状況に大きな影響を及ぼすため干渉の状況が変化するものと考えられる。それゆえ、円柱のようなはく離点の移動を伴う柱体とは異なり四角柱や三角柱のようなはく離点が固定された柱体における相互干渉を調査することは、本研究の最も興味あることの一つである。図4は平面四角柱と尖頭四角柱の実験結果を示したものである。2種類の大きさの柱体(15 mmと20 mm)を用いて実験を行っているが、柱体の大きさによる実験結果の異なりは見られない。図5は平面三角柱と尖頭三角柱の実験結果を示したものである。なおそれぞれの図において、円柱の場合の実験結果を比較時の基準となるよう実線および破線で示している。四角柱や三角柱の場合も円柱の場合と同様にストローハル数 St は間隔比 G/d によって変化することが見てとれる。すなわち、ストローハル数の値が単独時と変わらない領域(以下説明の便宜上、第1領域と呼ぶ)、相互干渉のためストローハル数の値が二つ存在する領域(以下説明の便宜上、第2領域と呼ぶ)、ストローハル数の値が単独時の半分となる領域(以下説明の便宜上、第3領域と呼ぶ)が存在する。しかしながら、各領域の出現する範囲は柱体の断面形状によって異なることが見てとれる。図6はこれらの結果をまとめたものであり、図中の斜線部が相互干渉領域を示

Fig. 4 Strouhal number in terms of gap ratio G/d in the case of (a) flat face square cylinder and (b) sharp square cylinder

している。はく離点が固定されている場合のほうがはく離点が移動する場合より相互干渉する範囲が広がっている。相互干渉する範囲が最も広いものは尖頭三角柱の場合であり、第2領域の範囲も最大となっていることが明らかになった。

3・2 異径の場合について 固有渦放出周波数の異なる柱体間の相互干渉渦流れを調査することは、本研究の最も興味あることのひとつである。一般に柱体の断面形状によりストローハル数 St は異なり、例えば円柱の場合 St は $St=0.2$ 、平面四角柱の場合 St は $St=0.14$ であることが知られている。ストローハル数 St は $St=f \cdot d/U$ で定義されるため、同じ断面形状でも大きさが異なると大きさに対応した周波数で渦が放出される。それゆえ、まず断面形状が同じで大きさの異なる異径の場合について二柱体からの相互干渉渦流れの実験を行った。図7は円柱の場合について、間隔比 G/d とストローハル数 St の関係を既存の並列同径二円柱の結果とともに示したものである。ここで、ストローハル数の算出ではおのおのの円柱の直径を用い、間隔比の算出では太いほうの円柱の直径を用いている。ストローハル数は同径の場合と同様に間隔

比によって特徴ある変化を示した。間隔比が $1.5 < G/d < 3$ の範囲では第1円柱(太いほう)と第2円柱(細いほう)の渦放出特性は同じで、二対の渦流れは相互に干渉していないことが見てとれる。一方、間隔比 G/d がおよそ1.5あたりから間隔比 G/d の値が小さくなるにつれて、相互干渉によりそれぞれの円柱からの渦放出特性は異なり、第1円柱では渦放出周波数は減少し、第2円柱では渦放出周波数は増加する傾向にあることが見てとれる。この傾向は円柱外径比 d_2/d_1 によって固有の性質があり、円柱外径比 d_2/d_1 が小さくなると二つの円柱のストローハル数の値の差が小さくなるが見えてとれる。図8は直径の異なる二つの円柱(第1円柱は32mm、第2円柱は8mm、円柱外径比 $d_2/d_1=0.25$)からの渦放出のようすを間隔比 G/d を変化させて示したものである。図8(a)は間隔比 G/d が $G/d=0.16$ の状態であり、複合単独流れとなるようすが示されている。図8(b)と(c)は間隔比 G/d がそれぞれ $G/d=0.3$ 、 0.6 の状態であり、円柱のすきまを通過する流れが第2円柱側(細いほう)に偏って流れる片寄り流れを示しており、円柱のすきまが増大すると片寄り流れの偏り具合が少なくなることが見てとれる。図8(d)は間隔比 G/d が $G/d=2.5$ の状態であり、おのおのの円柱より独立した渦列が形成されているようすが示されている。図9は柱体幅の異なる

(a)

(b)

Fig. 5 Strouhal number in terms of gap ratio G/d in the case of (a) flat face triangular cylinder and (b) sharp triangular cylinder

Shape	Region					
Sharp triangular cylinder	③	②	①			
Flat face triangular cylinder	③	②	①			
Flat face square cylinder	③	②	①			
Sharp square cylinder	③	②	①			
Circular cylinder	③	②	①			
	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5

G/d

Fig. 6 Distribution of flow pattern. (1) coupled flow streets, (2) biased gap flow, (3) single vortex street

Fig. 7 Strouhal number in terms of gap ratio G/d in the case of unequal diameter circular cylinder

二つの四角柱 ($d_1=20$ mm, $d_2=15$ mm および 9 mm) を用いて間隔比 G/d を変化させて行った平面四角柱と尖頭四角柱の実験結果を同じ幅同士の場合と比較して示したものである。柱体幅の比は $d_2/d_1=0.75$ および 0.45 の二とおりではあるが、四角柱の場合は柱体幅の差異を与えても渦放出特性は複合単独渦流れとなる領域を除いてあまり変化がないことが見てとれる。

3.3 異形の場合について 断面の形状と大きさの異なる柱体を組合わせて、間隔比 G/d を変えて相

互干渉渦流れの実験を行った。ここで、間隔比 G/d の算出では大きいほうの柱体の投影幅の値を用いた。図 10 は円柱を基本断面として平面四角柱(投影幅は 15 mm と 20 mm)、尖頭四角柱(投影幅は 21.21 mm と 28.28 mm)、平面三角柱(投影幅は 20 mm)、尖頭三角柱(投影幅は 20 mm)を組合わせたときの、間隔比 G/d とストローハル数 St の関係を示したものである。図 10 (a) は外径 32 mm, (b) は外径 25 mm, (c) は外径 16 mm, (d) は外径 8 mm の円柱についての渦放出特性であり、比較のため同径二円柱の場合の実験結果を実線と破線で示している。図中の凡例の略号はそれぞれ、C. C. は円柱, F. S. は平面四角柱, S. S. は尖頭四角柱, F. T. は平面三角柱, S. T. は尖頭三角柱を意味する。間隔比 G/d に対するストローハル数 St の変化は同径二円柱の場合よりも異径二円柱の場合に近く、相互干渉領域は広がっていることが見てとれる。干渉領域における渦放出周波数の変化は、異径円柱の組合せの場合に見られたように組合せ相手の投影幅より自身の投影幅が十分大きな場合は間隔比の減少とともに渦放出周波数は減少し、十分小さな場合は間隔比の減少とともに渦放出周波数は増加する傾向がある。同程度の投影幅の場合は、相手方の断

(a) Single vortex street $G/d=0.16$

(b) Biased gap flow $G/d=0.3$

(c) Biased gap flow $G/d=0.6$

(d) Coupled vortex streets $G/d=2.5$

Fig. 8 Representative flow patterns in the case of 32 mm and 8 mm combination

Fig. 9 Strouhal number in terms of gap ratio G/d in the case of (a) flat face square cylinder and (b) sharp square cylinder

(a) $d=32$ mm (b) $d=25$ mm (c) $d=16$ mm (d) $d=8$ mmFig. 10 Strouhal number in terms of gap ratio G/d in the case of circular cylinder (a) $d=15$ mm (b) $d=20$ mmFig. 11 Strouhal number in terms of gap ratio G/d in the case of flat face square cylinder (a) $d=15$ mm (b) $d=20$ mmFig. 12 Strouhal number in terms of gap ratio G/d in the case of sharp square cylinder

面形状によってその傾向は異なり、円柱直径に対する各角柱の投影幅の比がおよそ0.8より間隔比の減少とともに渦放出周波数は増加する傾向が見てとれる。図11は平面四角柱に各種断面形状と大きさを組合わせて、間隔比 G/d とストローハル数 St の関係を示したものであり、比較のため同じ幅(同径)の場合(図中×印)も示している。ここで、図11(a)は四角柱幅が15 mm、(b)は四角柱幅が20 mm の場合である。相互

干渉領域の範囲が同じ幅の場合と比較して広がっていることが見てとれる。図12は尖頭四角柱に各種断面形状と大きさを組合わせて、間隔比 G/d とストローハル数 St の関係を示したものであり、比較のため同じ幅の場合(図中×印)も示している。ここで、図12(a)は一辺15 mmの正方形柱が45°傾いた投影幅21.21 mm、(b)は一辺20 mmの正方形柱が45°傾いた投影幅28.28 mm の場合である。平面四角柱の場合と同様に、相互干渉領域の範囲が同じ幅の場合と比較して広がっていることが見てとれる。図13は正三角柱に各種断面形状と大きさを組合わせて、間隔比

Fig. 13 Strouhal number in terms of gap ratio G/d in the case of (a) flat face triangular cylinder and (b) sharp triangular cylinder

Fig. 14 Exposition of vortex formation behind two cylinders, $s=0$: in-phase case, $s=l/2$: out-of-phase case, $s<l/4$ or $s>3l/4$: un-known case

Fig. 15 Appearance of three typical flow pattern at various gap ratio

G/d とストローハル数 St の関係を示したものであり、比較のため同じ投影幅の場合(図中×印)も示している。図 13(a)は平面三角柱、(b)は尖頭三角柱の場合である。相互干渉領域の範囲はあまり変わらないことが見てとれる。すなわち、はく離点が固定されている四角柱や三角柱からの渦放出は、はく離点が移動する円柱と比較して、もう片方からの柱体からの渦放出による自身の渦放出に対する際立った影響は見られないが、相手の柱体によって間隔比 G/d に対するストローハル数 St の関係はそれぞれ異なることが見てとれる。断面形状や大きさの異なる異径柱の組合せにおける二柱体後流のフローパターンは同径、異径二柱体の場合と同様に間隔比 G/d により変化する。間隔比 G/d が大きくなるにつれて、複合単独渦放出、片寄り流れによる渦流れ、それぞれの柱体から独立した渦放出へと変遷したが、それぞれの領域の範囲は組合せ相手の柱体によって異なった。

3・4 二つの渦列の配列について ストローハル数の値が単独時の値と変わらない第 1 領域において、間隔比 G/d を変化させておのおのの柱体から放出される渦列の配列のようすについて調査を行った。図 14 は渦列の配列のようすを判定するための説明図で、二対の渦列を模式的に示している。渦列の配列のようすの判別は二対の渦列の互いに内側にある渦の配置関係によって判別を行った。すなわち、図中の A 渦と B 渦の間隔 s の値が $s=0$ の場合を対称配列(in-phase)、 $s=l/2$ の場合を非対称配列(out-of-phase)、 $s<l/4$ もしくは $s>3l/4$ の場合を対称配列か非対称配列のどちらとも判別できない状態である混合配列(un-known)とした。図 15 は各柱体ごとに 50 個の渦放出におけるそれら 3 種類の配列状態の存在比率の平均値を示したものである。各柱体において、三つの配列パターンのうち、二つ以上の配列パターンが間欠的に入れ換わって出現していることが見てとれ、平面四角柱の $G/d=2.5\sim 3$ や平面三角柱の $G/d=3$ などの場合に見られるように、条件によっては特定の配列が高い確率で出現することが明らかになった。

4. 結 言

流れに対して並列に配置された同径、異径および異形断面の二柱体から生じる相互干渉の渦流れについて柱体の配置間隔を変化させて渦放出特性の調査を行った結果、以下の事柄を得た。

(1) 同径の場合について、円柱、四角柱、三角柱

についての渦放出特性が示され、相互干渉する領域が最も狭い場合が円柱であり、最も広い場合が尖頭三角柱であることが明らかになったこと。

(2) 異径の場合について、円柱では相互干渉を起こす領域が同径の場合と比較して広くなったこと。四角柱では同径の場合と比較してあまり変化がなかったこと。

(3) 異形の場合について、異径の場合と同様の渦放出特性となるが、組合せの相手によって変化の仕方は異なること。

(4) 柱状物体の断面形状や大小によらず二柱体後流のフローパターンは単独複合渦流れ、片寄り流れ、独立した二列の渦列が生じること。

(5) 独立した二列の渦配置となる領域(第 1 領域)において見られる対称配列(in-phase)、非対称配列(out-of-phase)、混合配列(un-known)の三つの配列のうち、二つ以上の配列パターンが間欠的に入れ換わって出現していること。条件によっては特定の配列が高い確率で出現すること。

文 献

- (1) Spivak, H. M., Vortex Frequency and Flow Pattern in the Wake of Two Parallel Cylinders at Varied Spacings Normal to an Air Stream, *Journal Aeronautical Sciences*, Vol. 13 (1946), pp. 289-297.
- (2) Bearman, P. W. and Wadcock, A. J., The Interaction Between a Pair of Circular Cylinders Normal to a Stream, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 61, Part 3 (1973), pp. 499-511.
- (3) Kobayashi, T., Characteristics of Fluid-Dynamic Forces Acting on Circular or Square Cylinders in Close Proximity, *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 42, No. 357 (1976), pp. 1452-1461.
- (4) Ohumi, K., Imaichi, K. and Tada, E., On Vortex Streets Behind Circular Cylinders in Side-by-Side Arrangement, *Journal of the Visualization Society of Japan*, Vol. 10, Suppl. No. 1 (1990), pp. 35-40.
- (5) Ohumi, K., Visualization Experiment and Numerical Calculation on Two Circular Cylinders in Staggered Arrangement, *Journal of the Visualization Society of Japan*, Vol. 15, Suppl. No. 1 (1995), pp. 217-220.
- (6) Moriya, M. et al., Fluctuating Fluid Forces of Two Circular Cylinders in Parallel Arrangement at Close Spacing, *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 68, No. 676 (2002), pp. 3310-3315.
- (7) Yokoi, Y., Numerical Experiment of Flow Around a Pair of Circular Cylinders Arranged Side by Side Using the Vortex Method, *Scientific and Engineering Reports of the National Defense Academy*, Vol. 42, No. 1 (2004), pp. 131-138.