くいちがい配列された下流側円柱の変動流体力*

森 谷 優**, 坂 本 弘 志**

Fluctuating Pressures and Forces Acting on Downstream
Cylinder in Staggered Arrangement

by Masaru MORIYA and Hiroshi SAKAMOTO

This paper presents the phase-averaged fluctuating pressures and phase-averaged drag and lift forces acting on the downstream cylinder of two staggered circular cylinders. Phase relationship between the fluctuating lift force and the fluctuating pressure on the downstream cylinder is revealed. The phase of the fluctuating lift force acting on the downstream cylinder is triggered by the arrival of vortices shed from the upstream cylinder. The phase difference between the fluctuating lift forces of two cylinders is found to be proportional to the distance between their centres.

Key Words: Flow Measurement, Staggered Arrangement, Interference, Phase Average, Fluctuating Drag and Lift

1. 緒 言

近接した2円柱状構造物において、下流側に位置する円柱が上流側円柱の後流励振によって不安定な振動の生ずることが報告されている^{(1)~(5)}。Cooper-Wadlaw⁽¹⁾は、下流側送電線の振動を、宮田ら⁽²⁾は、下流側円柱の円振動現象について、その不安定振動の発生について報告している。また、著者ら⁽⁶⁾は、前報において、くいちがい配列された2円柱の下流側円柱に作用する変動流体力の大きさを実験的に明らかにしたが、不安定振動現象を解明するうえには、円柱に作用する変動流体力の発生機構を明らかにすることも、また重要な課題である。したがって、円柱に作用する振動を大きく支配している周期的うず放出に基づく変動流体力に着目して、基礎的資料を蓄積しておく必要がある。阪田ら⁽⁷⁾によって、直列配列された2円柱の変動流体力の様子が報告されているが、より複雑な干渉を伴ったくいちがい配列された円柱の変動流体力は、ほとんど報告されていない。

本報では、くいちがい配列された2円柱の下流側に

位置する円柱の変動圧力の位相平均および変動流体力の挙動を提示し、その変動揚力と円柱表面の各位置での圧力変動との位相関係について調べた。また、上下2円柱の変動揚力の位相差と配列状態についても明らかにしている。さらに、これらに基づいて、下流側円柱の変動流体力を支配する機構についても考察した。

2. 実験装置および方法

本実験に用いた実験装置は、前報⁽⁶⁾のものと同一であるので、その概略のみを示す。実験に用いた風洞は、断面0.5 m×0.5 m、長さ2.5 mのく形状試験部をもつ低速環流形風洞である。測定部での主流速度 U_∞ は、20 m/sであり、この時の主流の乱れ強さは、約0.4%である。供試円柱は、直径 d が49 mmで風洞壁との拘束比は、9.8%である。

2円柱に作用する変動流体力は、前報⁽⁶⁾で試作した変動流体力測定装置と、既報⁽⁸⁾の円柱表面に作用する変動圧力の条件付き抽出法との二つから測定した。上流側に変動流体力測定用円柱を設置し、下流側円柱の変動圧力と同時に測定することによって、上下2円柱の変動揚力の位相関係を調べた。本実験に用いた条件付き抽出法の基準信号は、下流側円柱表面の適当な角位置での変動圧力を信号とした。その角位置は、放出

* 昭和60年4月1日 第62期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和59年7月14日。

** 正員、北見工業大学 (〒090 北見市公園町165)。

うずに基づく周期性を明確に表す位置を試行錯誤的に決定した。変動流体力測定用円柱は、受感部のアスペクト比 s/d (s : 受感部長さ, d : 円柱の直径) は, 0.92 で, 感度方向の固有振動数は, 960 Hz である。また, 測定結果に対する風洞壁の拘束効果の補正は, 行っていない。

3. 実験結果および考察

くいちがい配列された2円柱の座標系および記号の定義は, 図1に示す。下流側円柱に作用する流体力は, 図中に示す方向を正としてある。円柱直径を基準長さとした場合のレイノルズ数は, 6.53×10^4 である。

本実験は, 主に, 前報⁽⁶⁾で明らかにした $l/d=3.0 \sim 3.5$, $h/d=1.0$ 近傍を中心に行った。また, 2円柱から明確にうず放出が確認できる範囲で実験してある。

図1 座標系および記号の定義

3.1 変動圧力の位相平均 変動圧力の位相平均は, 既報⁽⁸⁾と同様にして条件付き抽出法によって算定し, 基準信号は, 円柱表面の変動圧力としてある。図2は, $l/d=3.5$ の $h/d=0.5, 1.0, 1.5$ での周期的うず放出の一周期を等間隔に分割して各位相ごとに放射線上に示してある。図2には変動圧力の位相平均値 $\langle C_p \rangle$ を, 正の場合は, 円から内側に, 負の場合は, 円から外側に向かって書いてある。さらに, 図2中の矢印は, 変動圧力の各位相での変動力のベクトル量として表示したものである。変動力は, 次式のように定義したものである。

$$\langle C_D, C_L \rangle = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \langle C_p \rangle \cdot \cos \theta, \sin \theta d\theta \quad \dots\dots\dots (1)$$

$l/d=3.5$ の $h/d=0.5$ において, 上流側円柱から放出されるうずが衝突することによって $\theta=320, 30^\circ$ で正の大きな変動圧力を示している。これに対して, $h/d=1.5$ になると, 上流側円柱から放出されるうずの衝突による局所的な大きな正の変動圧力がなくなる。 $\theta=270^\circ$ を中心に幅広い角度にわたって同位相の変動圧力となっている。

3.2 変動流体力の挙動 一様流中の二次元円柱に作用する変動流体力の軌跡は, 変動抗力が変動揚力の2倍の周波数をもつ「8」の字をえがくことが知られている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。図3は, 周期的うず放出に基づく条件付き抽出法から算定した下流側円柱の変動抗力・揚力線図を $l/d=2.5 \sim 4.0$ について示したものである。上流側円柱の干渉によって下流側円柱の変動力は, 単独円

図2 変動圧力の位相平均値

柱のものと大きく異なっている。図3に $l/d=3.5$, $h/d=0.5$ の変動流体力が示されているが、一様流中の単独円柱と同様に「8」の字をえがいている。「8」の字の傾きが、くいちがい配列による流れの非対称性に起因するものであることは、直観的にもよく理解できる。 $l/d=4.0$ の $h/d=0.125$ の場合もわずかに傾いているのが認められる。 $l/d=3.0$ の $h/d=0.735$ の変動力の軌跡は、単一の閉曲線で、なおかつ長軸方向の傾きが大きい。これは、上流側円柱からの放し出すが衝突および跳躍することによって、下流側円柱の変動流体力が傾きの方向に大きく作用していると解釈できる。 $l/d=3.0\sim 4.0$ の $h/d=1.5$ の変動抗力・揚力線図は、「D」の字をえがいているが、傾いていない。図2の変動圧力の位相平均圧力分布からも推察されるように、 $\theta=90^\circ$ 側の圧力が正ならば、 $\theta=270^\circ$ 側の幅広い

角度にわたって圧力が負となり、大きな揺動した流れの中にあるような圧力分布となっている。すなわち、 $h/d=1.5$ においては、流れと垂直方向の大きなうねりに支配される非回転流れ場と考えることができる。 $l/d=2.5$, $h/d=0.735\sim 1.5$ の変動力は、全体的に小さく、円およびだ円状の閉曲線となっており、長軸方向の傾きは、他の場合と逆になっている。この逆の傾きは、上流側円柱からの離せん断層が下流側円柱の後方で巻き込むことに起因しているものと思われる。 $l/d=3.5$, $h/d=0.735$ の変動力線図は、「8」の字から単一の閉曲線に変化する中間の線図になっている。本実験範囲のくいちがい比 $h/d\leq 0.5$ では、下流側円柱の変動抗力・揚力線図は、「8」の字をえがくが、上流側円柱の片側の放し出すに強く支配される場合は、単一の閉曲線となっている。図3には示していないが、 $l/d=2.0$, $h/d=1.5$ の変動力は、上流側円柱の影響を受けず、ほとんど単独円柱のものと同様となっている。

3.3 変動揚力と変動圧力の関係 下流側円柱に作用する変動圧力は、まず、上流側円柱からの放し出すが到達することによってピーク値をもち、さらに、下流側円柱からうず放しが行われることによってピーク値をもつ。それら変動圧力のピーク値が生ずる角度をそれぞれ θ_1 , θ_2 とした。このような流れ状態を模式的に示したのが図4である。 θ_1 , θ_2 と l/d の関係を示したのが図5である。 θ_1 は h/d によって異なるが、 l

図3 変動抗力・揚力線図

図4 流れの模式図

図5 θ_1 , θ_2 と l/d の関係

d にかかわらずほぼ一定となっている。 θ_2 は、 $h/d=0.5$ の場合、 $l/d=3.0\sim 3.5$ で大きくなっているが、 $h/d=1.5$ では $l/d=2.5\sim 3.0$ で減少している。

次に、変動揚力に対し、円柱表面のいかなる角位置での圧力が強く影響するかを調べた。図6は、下流側円柱の変動揚力と変動圧力の位相の差を示したものである。図6中の φ_1 、 φ_2 、 φ_3 は、次のように定義した。

$$\varphi_1 = \varphi_{\langle c_l \rangle \min} - \varphi_{\langle c_p 270 \rangle \max} \quad \cdots \cdots (2)$$

$$\varphi_2 = \varphi_{\langle c_l \rangle \min} - \varphi_{\langle c_p A \rangle \max} \quad \cdots \cdots (3)$$

(a)

(b)

図6 変動圧力と変動揚力の位相差

$$\varphi_3 = \varphi_{\langle c_l \rangle \min} - \varphi_{\langle c_p D \rangle \max} \quad \cdots \cdots (4)$$

$\varphi_{\langle c_l \rangle \min}$ は、変動揚力が最小値となる位相である。

$\varphi_{\langle c_p 270 \rangle \max}$ 、 $\varphi_{\langle c_p A \rangle \max}$ 、 $\varphi_{\langle c_p D \rangle \max}$ は、図4に示すようにそれぞれ $\theta=270^\circ$ 、 θ_1 、 θ_2 での変動圧力の位相平均が最大値を示す位相を表している。 $h/d=0.735\sim 1.5$ の範囲では、全体的に下流側円柱の変動揚力は、上流側円柱からの放し出すの到達による大きな変動圧力の位相と一致している。前報⁽⁶⁾において、 $l/d=3.0\sim 3.5$ の $h/d=1.0$ 近傍で変動揚力が比較的大きいことを示したが、この領域において、 φ_1 および φ_2 にほとんど位相差がない。くいちがい比がある程度大きくなり、 $h/d \geq 0.735$ になると、上流側円柱の片側から巻き込んだ大きなうずが下流側円柱に到達することによって、 $\theta=270^\circ$ を含む広い角度にわたって同位相の変動圧力をもたらす。このような変動圧力の位相によって変動揚力が支配されているものと思われる。阪田ら⁽⁷⁾は、直列2円柱の下流側円柱からのうず放出が上流側円柱からの放し出すの到達に強く支配されていることを明らかにしたが、本実験においても、くいちがい比がある程度大きくなると同様のことがいえる。

3.4 2円柱の変動揚力の位相差 上流および下流側円柱から共に周期的うず放出が認められる範囲において、両円柱の変動揚力の位相関係について調べた。変動揚力の位相差は、両円柱の変動揚力を算定す

図7 2円柱の変動揚力の位相差

図 8 2 円柱の変動揚力波形

る場合、同一の基準信号で位相平均を行うことによって求められる。図 7 は、その位相差と配列状態の関係を示したものである。前報⁽⁹⁾において、直列配列された 2 円柱の変動揚力の位相差が l/d に対して直線的に変化することを明らかにした。図 7 に破線で示してある。くいちがい配列の場合も本実験範囲内において、ほぼ直線的に変化している。 $h/d=0.125$ の時の直線のこう配は、直列の場合と同様であるが、 $h/d=0.5 \sim 1.5$ ではわずかにこう配が異なっている。くいちがい比にかかわらず、 $l/d=3.5 \sim 4.0$ の範囲で 2 円柱の変動揚力の位相差がほぼ 2π である。以上のことから、下流側円柱の変動揚力は、上流側円柱からの放しうずに支配され、 $l/d=3.5 \sim 4.0$ の時の 2 円柱周辺の流れは、上流側円柱のうず放しうずに同期した流れと考えられる。

図 8 は、配列状態が $l/d=2.0$ 、 $h/d=1.5$ の 2 円柱に作用する変動揚力波形で、下流側円柱の一周期のうず放出に基づいて示したものである。図 8 の縦軸は、位相を比較するためにスケールを変えてある。上流側円柱の変動揚力の周波数が下流側のものと比較してちょうど 2 倍で、両円柱の変動揚力は、きわめて周期的である。上下 2 円柱の変動揚力のストローハル数は、0.32 と 0.16 である。この配列時の下流側円柱の平均圧力分布および変動圧力の RMS 値分布において、上流側円柱の干渉効果は、ほとんど認められなかった。また、3・3 節で述べたように、下流側円柱の変動流体力

の挙動は、ほとんど単独円柱のものと同一であった。すなわち、この配列においては下流側円柱の存在により上流側円柱周辺の流れが大きく干渉を受けていることを示唆している。

4. 結 言

本論文では、くいちがい配列された 2 円柱の上流側円柱の干渉を伴った下流側円柱の変動流体力に関して基礎的資料を得た。とくに、変動流体力の挙動および発生機構について調べた。得られた結果を要約すると次のとおりである。

(1) 下流側円柱の変動抗力・揚力線図を求め、変動流体力の挙動および上流側円柱の干渉効果がある程度明らかとなった。

(2) 円柱表面の変動圧力と変動揚力との位相関係から、下流側円柱の変動揚力を支配する流れ機構が明らかとなった。

(3) $l/d=3.5$ 、 $h/d=1.0$ 近傍で大きな変動揚力を示すのは、下流側円柱のうず放出が上流側円柱のうず放出に同期することに起因することがわかった。

(4) 上下 2 円柱の変動揚力の位相差は、本実験範囲内において、直線的に変化する。

最後に、一連の研究に対し終始懇篤なご指導を賜った北海道大学工学部・木谷勝教授に深く感謝申し上げます。また、実験装置の製作にご協力いただいた本学技官・小畑芳弘氏、阿部清氏に謝意を表します。

文 献

- (1) Cooper, K. R. and Wardlaw, R. L., *Proc. 3rd Int Conf. Wind Effect Build. Struct.*, Tokyo, Japan, (1971), 647.
- (2) 真下・宮田・小栗, 土木学会第 34 回年次学術講演会概要集, 第 1 部, (昭 54), 557.
- (3) 斎藤・ほか 2 名, 土木学会第 32 回年次学術講演会概要集, 第 1 部, (昭 52), 219.
- (4) 宇都宮・鎌倉, 土木学会論文集, No. 336 号(昭 58), 1.
- (5) 岡島, 土木学会第 30 回年次学術講演会概要集, 第 1 部, (昭 50), 435.
- (6) 森谷・坂本, 機講論, No. 832-3(昭 58-10), 14.
- (7) 阪田・木谷, 機論, 49-447, B (昭 59), 2618.
- (8) 森谷・ほか 3 名, 機論, 49-443, B(昭 58), 1364.
- (9) 森谷・ほか 2 名, 機論, 50-452, B(昭 59)951.

討 論

〔質問〕 五十嵐 保〔防衛大学校〕

(1) このような複雑な流れ場は l/d , h/d の値によってはレイノルズ数の影響が顕著と思われる。貴実験結果の適用レイノルズ数の範囲についてご教示願いたい。

(2) うず放出に関して周期性の明確な場合、不明確な場合などがあると思うが、 l/d - h/d 線図上に示していただけるとありがたい。

〔回答〕 (1) 実験は、1種類のレイノルズ数で

行っているため、本実験から適用レイノルズ数の範囲を明示することはできない。

(2) 近接した2円柱の両円柱から明確にうず放出が認められない配列は、本実験範囲において、 $l/d=2.0, 2.5$ の $h/d=0.125, 0.25, 0.5$ の範囲である。また、直列配列の $l/d=3.0$ においては、上流側円柱からの周期的うず放出が弱かった。このように両円柱から明確なうず放出の認められない範囲が限られていることから l/d - h/d 線図で示すことを省略させていただく。