くいちがい配列された下流側円柱の変動流体力*
(上流側円柱の振動の影響)

森 谷 優**, 坂 本 弘 志**

Fluctuating Fluid Forces of Downstream Circular Cylinder
in Staggered Arrangement
(Effect of Oscillating Upstream Cylinder)

Masaru MORIYA and Hiroshi SAKAMOTO

The staggered arrangement of two circular cylinders is likely to occur very often in engineering application. In a previous paper, it has been reported that, even for the small oscillating amplitude of an upstream cylinder, the time-mean flow around the downstream cylinder was greatly affected in some particular arrangements. The present study is concerned with the effects of the fluctuating fluid forces and the fluctuating pressure acting on the downstream cylinder. Measurements are mainly made on the r. s. m. values of the surface-pressure fluctuation and the fluctuating fluid forces of the downstream cylinder.

Key Words: Flow Measurement, Staggered Arrangement, Oscillating Cylinder, Fluctuating Pressure and Forces

1. 緒 言

くいちがい配列された2円柱は、工学的に最も数多く遭遇する問題であり、円柱が振動する場合の流れ場は、實際上想定されなければならない。前報⁽¹⁾において、一様流中にくいちがいに2円柱を設置した場合上流側円柱が流れ方向と直角にわずかな振幅で振動することによって、下流側円柱周辺の時間平均流れが大きく影響を受けることを明らかにした。時間平均流れが変化することは、下流側円柱の変動流体力にも影響を及ぼすことが十分に推察される。変動流体力は、その対象物体の固有振動によっては共振を誘起し、繰返し荷重としても作用することから物体の疲労問題と関連して重要な課題といえる。したがって、上流側円柱の振動に基づく下流側円柱の変動流体力の特性を明らかにしておく必要がある。

本研究は、上流側円柱が振動することによって受ける、下流側円柱の変動流体力の変化を、下流側円柱周辺の時間平均流れに大きく影響する配列を中心に、明らかにしたものである。

2. 実験装置および方法

本実験に用いた実験装置および方法は、既報⁽²⁾と同一であるので、以下にその概略のみを示す。実験には断面 0.5×0.5 m、長さ 2.5 m のく形状試験部をもつ低速環流型風洞を用いた。測定部での主流速度 U_∞ は 20 m/s であり、このときの乱れ強さ $[(\overline{u'^2})^{1/2}/U_\infty]$ 、 u' : 流れ方向速度変動は、約 0.4 % である。供試円柱は、直径 d が 49 mm で風洞との拘束比は、9.8 % である。円柱直径を基準流さとした場合のレイノルズ数は、 6.53×10^4 である。円柱表面に作用する変動圧力は、半導体圧力変換器によって測定し、変動流体力は既報⁽³⁾で示した変動流体力測定円柱によって測定した。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。

円柱の振動は、電磁式振動装置 (EMIC 製, F-650-C) によって強制振動させた。加振器 (EMIC 製, 901-F 形) は、加振力 75 kg で、周波数は、5~5 kHz の範囲で連続的に変化させることができる。加振時の振動状態は、振動計 (EMIC 製, 508 形, DM-005 形ピックアップ) を用いて測定した。振動計からの出力波形は、極めて正確な正弦波となっている。上流側円柱の振動振幅 a (半振幅) は、円柱直径との振幅比が最大で約 2

* 昭和 61 年 9 月 28 日 北海道支部第 28 回講演会において講演、原稿受付 昭和 60 年 10 月 7 日。

** 正員、北見工業大学 (〒090 北見市公園町 165)。

%の場合もあるが、ほとんどが1%前後で極めて小さい。

3. 実験結果および考察

2円柱の配列、座標系および記号の定義は、図1に示すが前報⁽¹⁾と同一である。上流側円柱の振動は、静止時の渦放出周波数を中心に加振しているが、円柱の加振周波数の影響を調べる場合は、比較的幅広い周波数範囲で加振周波数を変化させて実験を行っている。

3.1 円柱表面の変動圧力 図2～5は、下流側円柱表面の変動圧力のRMS値分布を示す。RMS値分布は、図1で示した下流側円柱の上半分を正、下半分を負の角度で示してある。それは上流側円柱の微小な振動によって上流側円柱の静止時の下流側円柱の変動圧力と比べて極めて大きく変化しているのが認められる。 $1/d=2.5$, $h/d=0.25$ の静止時の渦放出周波数、すなわちストローハル数は、 $S_h=0.37$ である。 $S_h(=f_h \cdot d/U_\infty, f_h$: 上流側円柱の加振周波数)が0.372の場合、 $\theta=-50^\circ$ 近傍が大きな値を示している。図2には、3.2節でも述べるが、 $S_h=0.27$ 近傍で比較的大きな変動揚力が観測されたことから $S_h=0.274$ についても

図1 座標系および記号の定義

図2 変動圧力係数のRMS値分布

示してある。図3の変動圧力のRMS値分布において、次のことが認められた。静止した直列配列2円柱の下流側円柱の変動圧力のRMS値分布において観測されたように、上流側円柱が静止している時の下流側円柱のRMS値分布は、上流側円柱の後流中に下流側円柱が位置する場合の分布と類似しているが、上流側円柱が振動することによって、その分布は下流側円柱が上流側円柱の後流外の場合の分布に類似している。したがって、 $1/d=3.0$, $h/d=0.25$ の下流側円柱周辺の流れは、静止時には上流側円柱の後流中にあるが、上流側円柱が振動することによって後流外にあるような流れ状態に変化すると解釈される。上流側円柱が静止している $1/d=3.0$, $h/d=0.5$ の下流側円柱の変動流体力を測定している時に、時々極めて短時間ではあったが、大きな変動流体力が測定された。また、この時のストローハル数も異なっていた。図4に示すように上流側円柱が静止時の渦放出周波数で振動することによって大きな変動圧力のRMS値の分布となったことは、

図3 変動圧力係数のRMS値分布

図4 変動圧力係数のRMS値分布

上流側円柱の振動がきっかけで、静止時に時々大きな変動流体力が観測された流れ状態に変化したことに起因するものと思われる。また、上流側円柱の静止時に測定された大きな変動流体力を示した場合のストローハル数とも一致することから、静止時に観測されたもう一方の流れに変化したものと思われる。 $l/d=2.5$, $h/d=0.735$ などの配列では下流側円柱表面の角度によって、異なったストローハル数を示す変動圧力が作用することが既報⁽³⁾において報告してある。ここでは、上流側円柱の振動によって、下流側円柱の変動流体力が大きく影響される $l/d=2.5$, $h/d=0.735$ の変動圧力を図 5 に示した。上流側円柱の加振周波数に基づく $S_h=0.314$ の場合が $\theta=-90^\circ$ および 90° 近傍での変動圧力に大きな差異が認められ、変動流体力に対する振動の影響を示唆している。

3.2 変動流体力 これまで、 $l/d=2.5$, $h/d=0.25$ 近傍において、下流側円柱に作用する時間平均揚力が最大値を、時間平均抗力が最小値を示すことが報告されてきた⁽³⁾⁽⁴⁾。この流れ機構を前報⁽¹⁾の油膜模様から調べた結果、下流側円柱の下側で一度はく離れた流れが再付着し、再びはく離することによって起因することを明らかにした。また、この配列において、下流側円柱の

図 5 変動圧力係数の RMS 値分布

図 6 変動流体力と S_h の関係

渦放出周波数で振動させてもその流れ機構は変わらず、より明確な再付着流れが認められた。上流側円柱の加振周波数を変化させた場合の下流側円柱の変動流体力の変化について調べたのが図 6 で、横軸に S_h を縦軸に変動流体力の RMS 値を示してある。 $l/d=2.5$, $h/d=0.25$ の場合の渦放出周波数 S_f は、ほぼ 0.37 である。 $S_h=0.37$ 近傍で変動流体力が大きくなっているのは、上流側円柱の振動との同期現象によるものと考えられる。しかし、 $S_h=0.26\sim0.32$ の範囲で、変動揚力が上流側円柱の静止時の値 ($C_{D(rms)}=0.084$, $C_{L(rms)}=0.115$) より比較的大きく、さらにほぼ一定の値を示している。図 2 に $S_h=0.274$ の時の変動圧力の RMS 値を示してあるが、どのような流れ機構によるものか現在のところ不明である。

図 7 は、 $l/d=3.0$, $h/d=0.25$ の下流側円柱の変動流体力を上流側円柱の加振周波数 S_h に関して示したものである。上流側円柱の振動振幅比 a/d が大きくなれば同期域での変動揚力は、全体的に大きくなっている。変動抗力は、揚力ほど大きな影響を受けないようである。また、比較的幅広い S_h の範囲で振動の影響を受けている。これは、図 8 の上流側円柱の静止時の下流側円柱の変動揚力のパワー・スペクトルの分布からわかるように幅広い渦放出周波数に起因するものと考えられる。

$l/d=3.0$, $h/d=0.5$ の上流側円柱の静止時における

図 7 変動流体力と S_h の関係

図 8 変動揚力のパワー・スペクトル

下流側円柱の変動流体力の測定に際し、時々大きな変動流体力が観測されたことは、前節において述べた。図9は、 $l/d=3.0$, $h/d=0.5$ の下流側円柱の変動流体力を S_h に対して示したものである。円柱表面の変動圧力分布からも推察されるように、上流側円柱が静止時の渦放出周波数で上流側円柱を振動させると下流側円柱周辺の流れが大幅に変化し、大きな変動揚力・抗力を発生する。このような大きな流体力への急変は、静止時の渦放出周波数に達する以前に起こっている。一度大きく変化した変動流体力は、本実験範囲内で振動および振幅に依存せずほぼ一定に保持されている。 $a/d=0.58 \times 10^{-2}$ において、 $S_h=0.35$ まで周波数を変化させたが、ほぼ一定の値になっていた。この配列における流れの変化は、上流側円柱の振動の同期現象によるものではない。図10は、 $a/d=0.58 \times 10^{-2}$ の下流側円柱の変動揚力の変動波形を示したもので、 $S_h=0.172$ の波形は、上流側円柱が静止している場合の波形とほとんど同一の波形になっている。一方、上流側円柱の振動によって下流側円柱周辺の流れが大きく変化した場合の $S_h=0.22$ においては、極めて周期的な

図9 変動流体力と S_h の関係

図10 変動揚力波形

振幅の大きな変動揚力波形となっている。

前節にも述べてあるように、 $l/d=2.5$, $h/d=0.735$ の下流側円柱の変動圧力は、上流側円柱の振動に大きく影響された。そこで、変動流体力は、どのように変動しているかを調べるため、上流側円柱が静止時の下流側円柱の変動揚力のパワー・スペクトルの分布を測定したものが図11である。図中には円柱表面のどのような角度に周波数の異なった変動圧力が作用するのかわを示してある。2円柱の配列状態から $S_L=0.312$ は、上流側円柱の渦放出周波数に支配され、 $S_L=0.157$ は、下流側円柱の渦放出周波数に基づくものと思われる。変動揚力は、図に示す2種類の変動圧力のストローハル数で変動しているのが認められる。下流側円柱の変動流体力がいずれの周波数で上流側円柱を振動させたなら影響を受けるかを調べたものが図12である。 $S_h=0.157$ 近傍で上流側円柱を振動させてもほとんど変動流体力に影響なく、 $S_h=0.312$ 近傍で大きな影響が観測された。また、本実験においては2種類の振動振幅比でしか測定を行っていないが、 $a/d=0.58 \times 10^{-2}$ では $S_h=0.312$ 付近でピーク値をもっている。他方、 $a/d=0.87 \times 10^{-2}$ では逆に $S_h=0.31$ 付近で一度比較的小さな変動力を示す分布になっている。このわずかな振動振幅比の差によって変動流体力の分布が異なっ

図11 変動揚力のパワー・スペクトル

図12 変動流体力と S_h の関係

ている。本実験では、この差異はいかなる現象によるか明白ではない。

4. 結 言

前報⁽¹⁾において、上流側円柱の振動振幅が小さくとも配列によって下流側円柱周辺の時間平均流れは大きく影響を受けることを明らかにした。本論文ではさらに、それら配列における下流側円柱の変動流体力の変化を実験的に調べたものである。その得られた結果を要約すると次のとおりである。

(1) 上流側円柱の振動によって時間平均流れが大きく変化する配列において、下流側円柱表面に作用する変動圧力も大きく変化した。

(2) $l/d=3.0$, $h/d=0.25$ の場合、下流側円柱の渦放出と上流側円柱の振動が同期すると、下流側円柱周辺の流れは、上流側円柱の後流外に存在する流れとなる。

(3) $l/d=3.0$, $h/d=0.5$ においては、上流側円柱

の静止時の渦放出周波数よりわずかに小さい加振周波数で上流側円柱を加振すると、下流側円柱の変動流体力は急変し、大きな変動流体力となる。

(4) 上流側円柱の静止時の下流側円柱は、 $l/d=2.5$, $h/d=0.735$ で2種類の周波数によって変動流体力が作用した。また、上流側円柱の渦放出周波数に支配されていると思われる周波数に上流側円柱の振動が同期すると、その影響は顕著となった。

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

文 献

- (1) 森谷・坂本, 機論, 51-471, B (昭 60), 3693.
- (2) 森谷・坂本, 機論, 50-458, B (昭 59), 2527.
- (3) 森谷・坂本, 機論, 51-467, B (昭 60), 2098.
- (4) Zdravkovich, M. M., *Trans. ASME, J. Fluids Eng.*, 99 (1977), 618.