

平板に垂直ですきまをもつ 直列2円柱まわりの流れ*

奥井健一^{*1}, 三上房男^{*2}, 山根隆一郎^{*3}

Flow around Two Circular Cylinders in Tandem Arrangement at Various Spacings on a Flat Plate

Ken-ichi OKUI, Fusao MIKAMI and Ryuichiro YAMANE

The flow around two semi-infinite circular cylinders of the same diameter in the tandem arrangement at various spacings on a flat plate has been investigated experimentally. The cylinders were aligned with the axis normal to both the flat plate and the free stream. The time-mean surface pressures on the cylinders and the frequency of the vortex shedding in the direction of the cylinder axis were measured. The flow patterns on the cylinder were visualized using an oil-film technique and the flow visualization around the cylinders was performed by the liquid-parafine-mist technique. The flow patterns near the end of the cylinder were essentially different from two-dimensional flow. The flow passing along the end surface of the upstream cylinder became oscillating flow at the frequency lower than that of Karman vortex.

Key Words: Three-dimensional Flow, Wake, Flow Visualization, Vortex, Two-Circular Cylinders, Tandem Arrangement, Experimental Study

1. 緒 言

流れの中に垂直におかれた二次元物体まわりの流れ^{(1)~(6)}および壁面から直立し、物体先端が流れの中にある有限長物体まわりの三次元流れに関して、多くの研究がなされている^{(7)~(9)}。また、複数の物体が流れの中にいろいろな配列状態でおかれた場合の流れについての研究も行われている。この一例として、流れ方向に直列配置された二次元2円柱まわりの流れについての報告がある^{(10)~(12)}。これらの研究によれば、2円柱の中心間隔と直径の比 s/d が 3.5~3.8 で2円柱まわりの流れが大きく変わり、これに対応して2円柱に働く抗力や後流うず放出周波数が急変する跳躍現象の起こることが知られている。

これらの研究は二次元円柱および有限長円柱まわりの流れであり、平面壁に垂直な円柱の自由端が壁面とすきまを有する場合の三次元流れについての研究は、著者らが単円柱および並列2円柱の場合について報告

しているにすぎない⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。この流れは、壁面付近の熱線風速計のプロブサポートまわりの流れや電子素子の冷却問題などに関連し、また流体力学的にも意義ある問題と考える。

本研究では、主流に垂直でかつ平板とすきまを有して設置された直列2円柱まわりの流れで、特に跳躍現象前後の流れを調べるため、円柱表面圧力、うず放出周波数、後流速度などの測定および流れの可視化を行い、平板とのすきまが流れに及ぼす影響を実験的に調べた。

2. 主要記号

$$C_p: \text{圧力係数} = (P - P_0) / (1/2)\rho U_0^2$$

$$C_{Dy}: \text{局所抗力係数} = (1/2) \int_0^{2\pi} C_p \cdot \cos\phi d\phi$$

d : 円柱直径

f : 円柱の後流うず放出周波数

H : 円柱自由端と平板とのすきま

P : 円柱表面圧力

P_0 : 主流の静圧

$$Re: \text{レイノルズ数} = U_0 d / \nu$$

s : 2円柱の中心間距離

$$St: \text{ストローハル数} = fd / U_0$$

* 原稿受付 平成2年10月4日。

^{*1} 正員、富山大学工学部 (〒930 富山市五福3190)。

^{*2} 正員、富山職業訓練短期大学校 (〒937 魚津市川縁1289-1)。

^{*3} 正員、東京工業大学工学部 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)。

- U_0 : 主流速度
- ρ : 流体の密度
- ν : 流体の動粘性係数

3. 実験装置および方法

本研究で用いた風洞は既報⁽¹⁾で示した測定断面が250×150 mmの吹出し形風洞と図1に示すような130×150 mmの測定断面をもつ吸い込形風洞を使用した。前者は主として円柱まわりの圧力分布を、後者はストローハル数分布の測定に用いられた。これらの風洞の測定部は可視化実験もできるように透明アクリル樹脂板で作られている。供試2円柱は同径($\phi 17.5$ または $\phi 8.0$ の黄銅管)で図2に示すように配置されており、2円柱が平板と同じすきまを有している。円柱と風洞の大きさの比(閉そく比)は最大0.07であったが、実験結果には補正を加えていない。座標原点は上流側円柱端面の中心にとられた。

円柱からのうず放出周波数の測定には、定温度形熱線流速計とアナライジングレコーダを使用した。

本実験では、2円柱間隔は跳躍現象の起こる臨界値($s/d=3.5\sim 3.8$)前後における流れを調べる目的から s/d を2.0から4.0の範囲で変化させた。

上流側円柱取付位置における平板の境界層厚、排除厚、運動量厚は主流速度 $U_0=14.8$ m/sの場合、それぞれ2.3, 0.64, 0.27 mmであり、境界層は層流である。

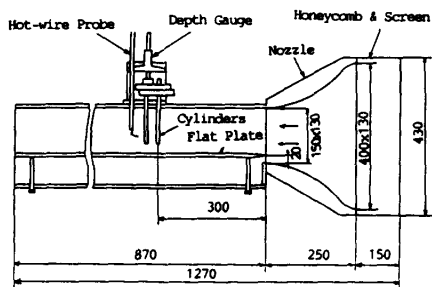


図1 実験装置概略図

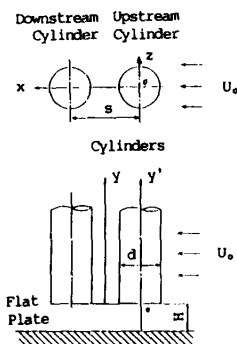
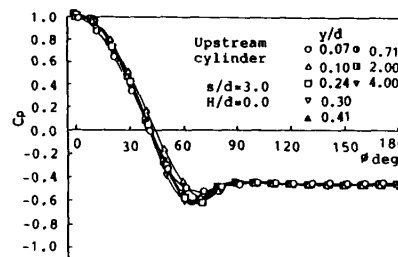


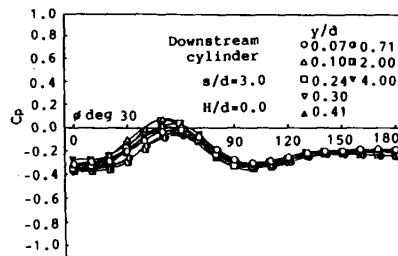
図2 円柱配置図と座標

4. 実験結果および考察

4.1 円柱表面の圧力分布 円柱自由端と平板とのすきまがない場合の上流側および下流側円柱それぞれの表面圧力分布について、一例として2円柱間隔 $s/d=3.0$ の場合を図3に示す。両円柱とも円柱軸方向の測定位置によらず同一分布となり、二次元性を示すとともに、上流側円柱の背圧と下流側円柱の前方岐点($\phi=0$)の圧力はほぼ一致する。流れの二次元性とフローパターンは図4の油膜法を用いた可視化写真によっても見られる。すなわち上流側円柱からはく離せん断流が下流側円柱側面に再付着しており、また上流側のはく離線および下流側の再付着線とはく離線が軸方向に不変であることがわかる。また、Zdravkovich⁽²⁾, 五十嵐⁽¹²⁾によると、この2円柱間隔では、2円柱間の準定常うずが間欠的に後流に放出される領域であるとしている。これは後述のストローハル数分布から説明



(a)



(b)

図3 円柱表面圧力分布 ($H/d=0, Re=3.05 \times 10^4$)



(a) $s/d=2.0$

(b) $s/d=3.0$

図4 円柱表面上のフローパターン(油膜法, $H/d=0$)

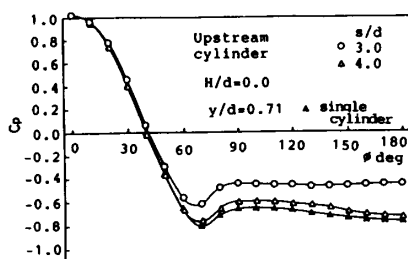
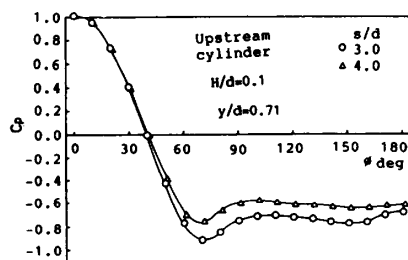
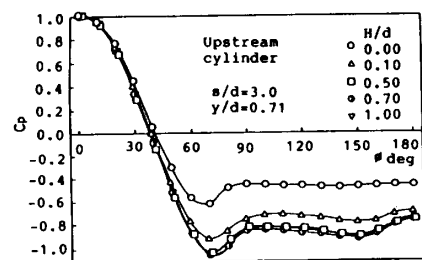
できる。 $s/d=2.0$ の場合〔図4(a)〕も下流側円柱側面に再付着線とはく離線が見られるが $s/d=4.0$ の場合になると下流側円柱側面には再付着しなくなる。図5に $s/d=3.0$ と 4.0 における C_p を単円柱の場合と比べて示す。まず、上流側円柱について見ると、両者で大きく異なる点は背圧で、 $s/d=4.0$ の場合のほうが小さく単円柱の場合に近い。しかし、わずかにすきまを設けると $s/d=3.0$ の場合のほうが大きく変化し、背圧が逆転するとともに $\phi=180^\circ$ に小さな極大値が見られる。一方、下流側円柱について、 C_p が最大値を示す位置は $s/d=3.0$ では円柱側面であるが、 $s/d=4.0$ では $\phi=0$ になることである〔図6(b), (d)〕。これらの結果は従来の二次元直列2円柱の結果と一致する。

次に平板とすきまをもつ場合の一例として $s/d=3.0$ および 4.0 とし、 $y/d=0.71$ における表面圧力分布を図6に、油膜写真を図7に示す。平板とすきまが大きくなるにつれて、上流側円柱の表面圧力が最低となる角度は大きくなっており、また油膜写真からはく離が円柱自由端面に近いほど後退しているのがわかる。すなわち、円柱自由端近くの側面に沿う流れは、円柱側面から端面に向かう二次流れの発生のため斜め下降流となり、また円柱端ほどその角度も大きいのはく離点が後退するものと考えられる。

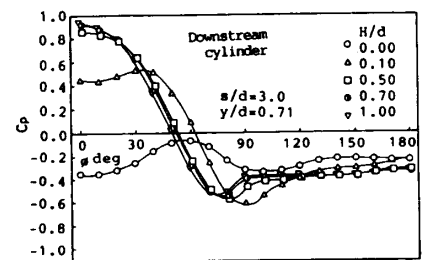
一方、下流側円柱の表面圧力が最大となる位置は、円柱端面に近いほど前方岐点に寄っている。これは油膜写真の再付着位置からもわかる。すなわち $s/d=3.0$ 、 $H/d=0.1$ では円柱自由端の前方岐点を下端とする「V」字形に近い再付着線であるが $s/d=3.0$ 、 $H/d=0.5$ では「Y」字形へと変化する〔図7(c)〕。これにともな

い下流側円柱のはく離線は再付着点の移動と同じ方向に動くため「く」の字形へと変化する。

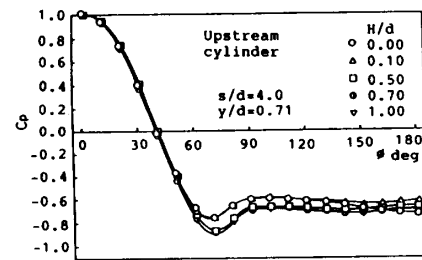
また、平板とすきまをもつ場合、上流側円柱後部($\phi=180^\circ$)の自由端付近に下流側円柱から上流に向かう流れによると考えられるフローパターンが見られる〔図7(b)〕。また、このことは図6(a)において上流側円柱の $\phi=180^\circ$ の位置に二次元流れの場合には現れない圧力ピークが見られ、端面から離れるとなくなることからもうかがえる。このフローパターンは $s/d \leq 3.0$ でかつ $H/d \geq 0.1$ の場合に観察され、円柱間隔が大きいほど、また平板とのすきまが小さいほど弱くなり $H/d=0$ では見られなくなる。すなわち、上流側円柱自

(a) $H/d=0.0$ (b) $H/d=0.1$ 図5 円柱表面圧力分布 ($Re=3.05 \times 10^4$)

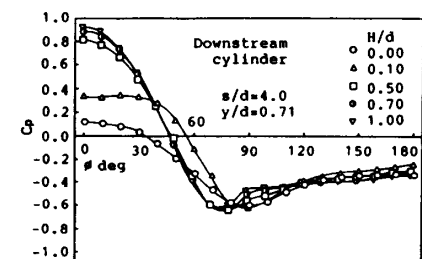
(a)



(b)



(c)



(d)

図6 円柱表面圧力分布 ($y/d=0.71$, $Re=3.05 \times 10^4$)

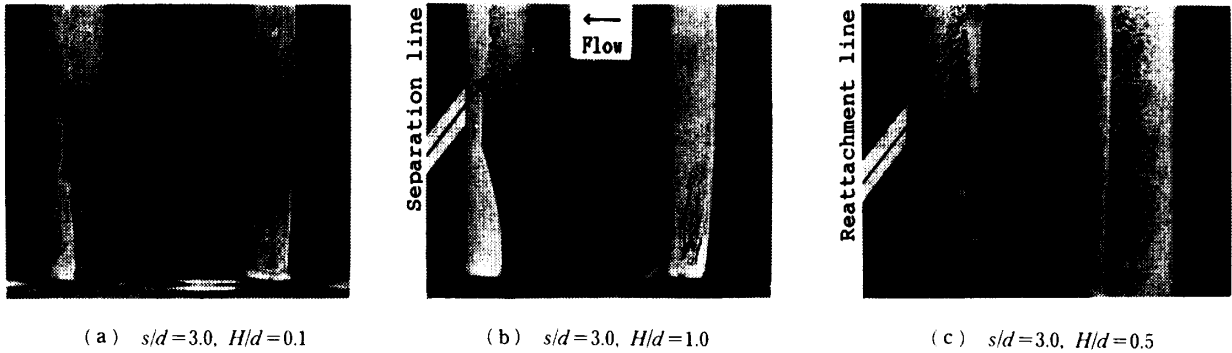


図7 円柱表面上のフローパターン(油膜法)

由端面と平板とのすきまを通る流れと円柱側壁の下降流とによるうずが上流側円柱背後から下流側円柱に衝突し、これが再び上流側円柱に衝突する流れとなっているためと考えられる。

4・2 局所抗力係数 円柱表面圧力を積分して求めた局所抗力係数 C_D を図8に示す。図中に比較のため二次元直列2円柱の結果を併記する。すきまのない場合、円柱軸方向に変化が少ない。また、二次元2円柱の場合と比較すると、上流側円柱において値が小さいもの、下流側円柱においてはよく一致している。

すきまがある場合の上流側円柱について、 $s/d=3.0$ ではすきまの増加にしたがい円柱自由端からの吹上げ流によって端面近くの背圧が大きく減少するため、 C_D が増加する。一方、下流側円柱について円柱端近くの前方岐点($\phi=0$)の圧力が大きくなるため、 C_D はすきまが増えると増大するが、 $H/d \geq 0.5$ になると、すきまの影響がなくなり変化しなくなる。

4・3 うず放出周波数 平板とのすきまが跳躍現象に及ぼす影響を見るため図9(a), (b)にストローハル数の円柱間隔による変化を示す。図9には石谷ら($Re=8 \times 10^3$)の二次元2円柱の場合の結果を併記する。すきまがない場合、カルマンうず放出ストローハル数の円柱間隔による変化は二次元円柱の場合と一致し、跳躍現象も $s=(3.5 \sim 4.0)d$ で発生しており二次元性が保たれていることがわかる。

しかし、すきまが存在すると $s/d=3.5 \sim 4.0$ の間隔では $H/d=0.1$ の場合しか跳躍が起こらず、それ以上のすきまでは $s/d > 4.0$ にならないと跳躍が起こらない。すなわち、平板とすきまを設けると跳躍現象を起こす円柱間隔は大きくなることわかる。

各円柱間隔、各すきまでの2円柱間と2円柱後流における円柱軸方向のストローハル数変化を図10に示す。図11に各円柱間隔、各すきまにおける直列2円柱まわりの流れの可視化写真を示す。

円柱間隔の小さい $s/d=2.0 \sim 2.5$ の場合、円柱上部

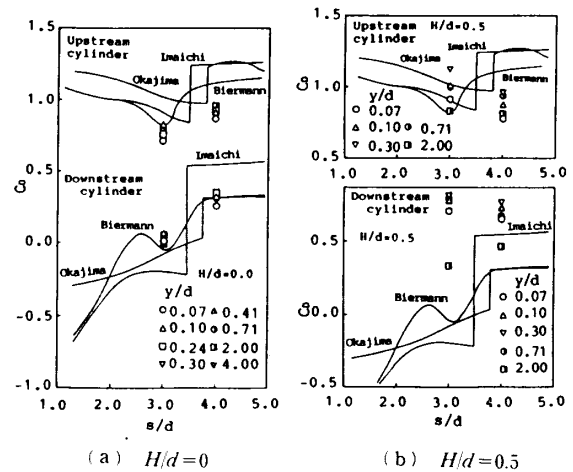


図8 C_D と s/d の関係

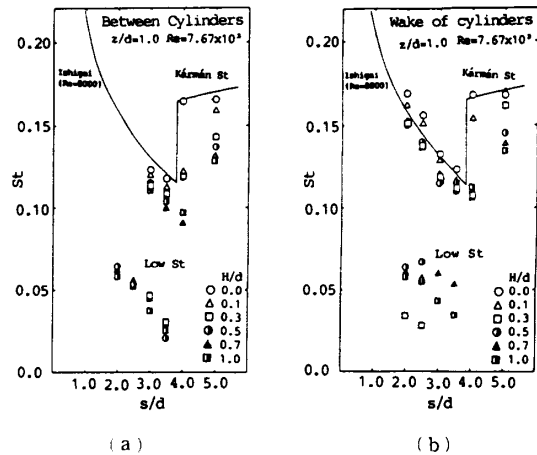


図9 ストローハル数

では上流側円柱側面からはく離せん断流は2円柱間に入り込まず2円柱を取り囲むように流れ、2円柱後流でカルマン渦を形成する。このため2円柱間には卓越周波数は認められず、2円柱後流のみで認められる。

一方、先端付近では円柱側面を斜めに下降した流れがはく離後、円柱背部に巻き上がるため円柱上部とは異なった流れを呈する。すきまが大きくなると〔図10(b)〕、上流側円柱先端で円柱端面下にもぐり込

だ流れが、2円柱間と2円柱後方に交互に吹き上がる振動流となる。これが図10に見られる低ストローハル数が計測された原因であると考えられる。

$s/d=3.0$ の場合、すきまの有無にかかわらず、円柱上部では2円柱間のうずが下流に放出し始めるため、2円柱間でストローハル数が現れたものと考えられ、 $s/d=2.0$ の場合と同様に吹上げ振動流による低ストローハル数が見られる〔図10(d)〕。

$s/d=4.0$ になると上流側円柱側面からはく離せん断流は2円柱間に入り込みカルマン渦を形成し、両円柱の後流でうず放出を始める。この間隔ではすきまが

大きくても吹上げ振動流による低ストローハル数は認められない。図12に低ストローハル数発生位置における熱線出力波形の一例を示す。低ストローハル数を引き起こす吹上げ振動流は流動パラフィンミスト法を用いた可視化で確認することができ、図13はその2種類の流脈線を可視化した写真である。すなわち、円柱間隔 $s/d=3.0$ 以下では2円柱間と2円柱後流の両方に流脈線が確認でき、これらが時間的に交互に繰返し起こっている現象が図12に現れているものと考えられる。しかし、 $s/d=4.0$ では2円柱後流への吹上げ流は確認できず2円柱間のみ認められ、この場合振動

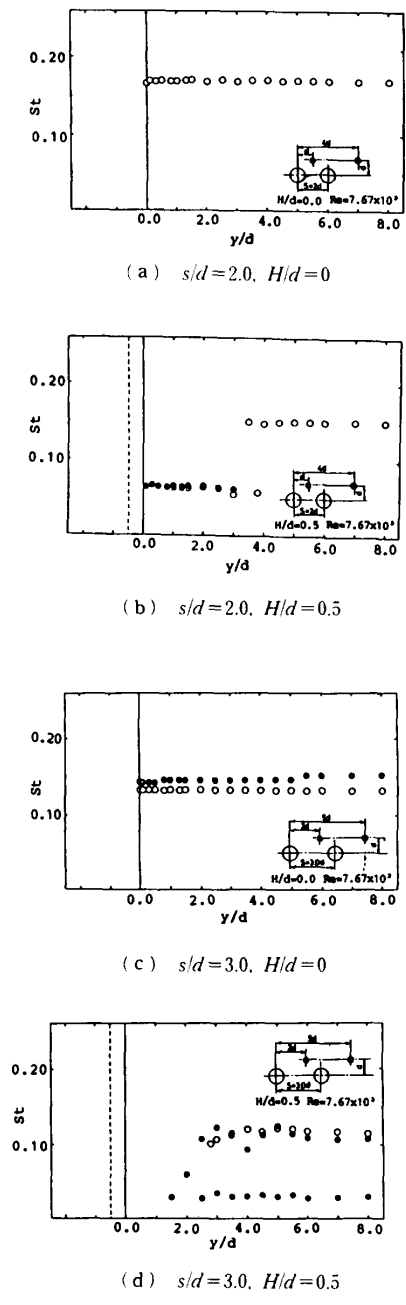


図10 ストローハル数

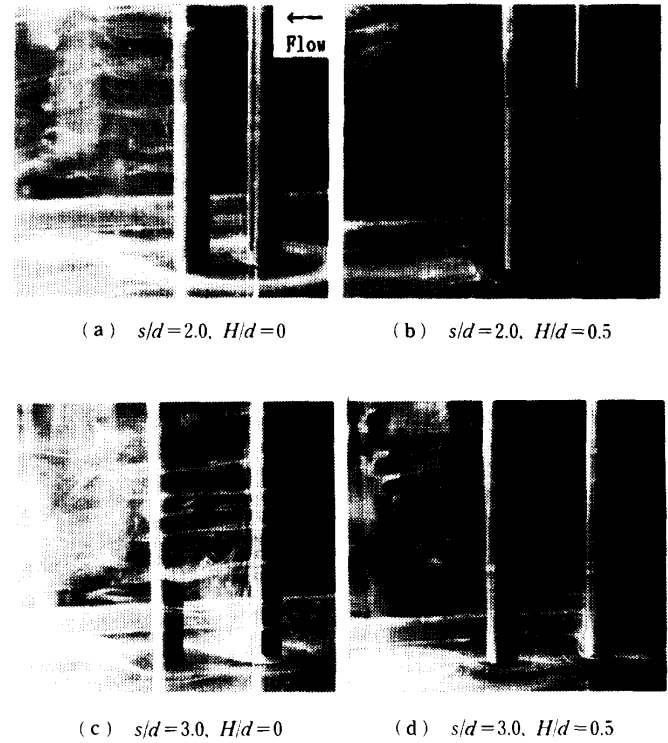


図11 可視化写真(流動パラフィンミスト法)

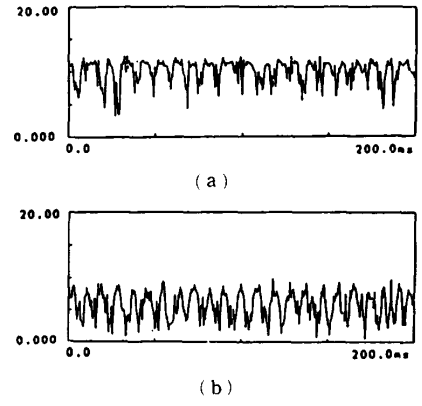
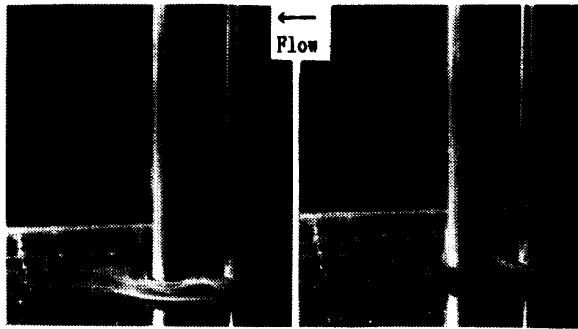


図12 低ストローハル数の熱線出力波形 (周期約9msの波形, $s/d=2.0$, $H/d=1.0$, $y/d=2.0$)

図 13 可視化写真 ($s/d=2.0$, $H/d=1.0$)

流は起こらず、低ストローハル数も測定されない。また、この振動流が発生する間隔の配列状態であっても、すきまが小さい場合に発生しないのは、円柱端面下が狭いため通過する流れは少なく、吹上げ流が弱くなるためであると考えられる。

次に、図 14 にカルマンうずと吹上げ振動流両ストローハル数のすきまによる変化を示す。円柱上部のカルマンうずのストローハル数は、単円柱の場合と同じように $H/d=0.0\sim 0.3$ の間で下降し、その後一定となり 2 円柱間、2 円柱後流ともほぼ同じ値となる。下降の程度は $s/d=3.5$ までは円柱間隔によらず単円柱の場合とほぼ同じであるが、跳躍後の $s/d=4.0$ になると単円柱の場合よりも大きな下降を示す。

一方、吹上げ振動流を引き起こす低ストローハル数は、2 円柱間においては s/d の増加とともに下降し、すきまによってあまり変化しないのに対し、2 円柱後流では s/d によって変化するのが見られる。

5. 結 言

平板とすきまを有して設置された直列 2 円柱まわりの流れに関し、二次元直列 2 円柱の場合において跳躍現象が起こる間隔 $s/d=3.0\sim 4.0$ を中心として、円柱表面圧力分布と後流うず放出周波数の測定および可視化実験の結果を要約すると以下ようになる。

(1) 平板とすきまのない場合、二次元 2 円柱の結果と同じ円柱間隔で円柱の抗力や後流うず放出周波数に跳躍現象が発生する。しかし平板とすきまを設けると上流側円柱先端からの吹上げ流が跳躍現象を抑制し、跳躍する円柱間隔を大きくする。

(2) 平板とすきまをもつ場合、上流側円柱側面の自由端近傍で、はく離線が斜め下降流のため後退す

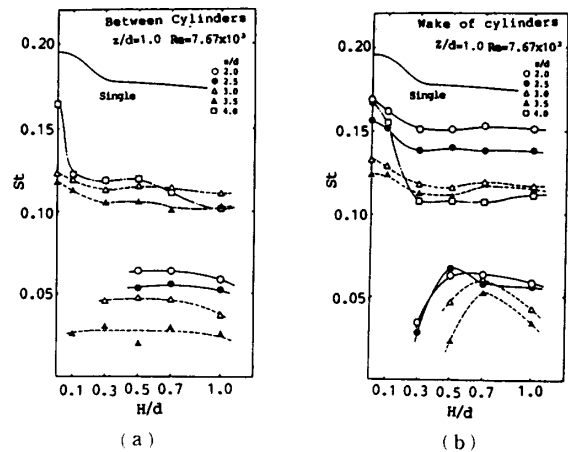


図 14 すきまによるストローハル数の変化

る。このため下流側円柱での再付着線は自由端に近いほど前進し、すきまを大きくするとこの再付着線は「V」字形さらには「Y」字形へと変化する。

(3) 上流側円柱先端からの吹上げ流は、上流側円柱の背圧を大きく下降させ、また下流側円柱での前方岐点圧力を大きくするため、両円柱とも抗力係数が急増する。

(4) すきまが大きくなると上流側円柱端面下にもぐり込んだ流れが両円柱の後方へ交互に振動しながら吹上がる。しかし、2 円柱間隔 $s/d=4.0$ を超えると、この振動流が見られなくなる。

終わりに、実験に協力してくれた当時富山大学院生であった河合正高君と森腰耕司君に謝意を表す。

文 献

- (1) Ohya, Y., Okajima, A. and Hayashi, M., *Encyclo. Fluid Mech.*, 8(1989), 323.
- (2) Zdravkovich, M. M., *Trans. ASME, J. Fluid Eng.*, **99**, 1-4(1977), 618.
- (3) Nishioka, M. and Sato, H., *J. Fluid Mech.*, **65**-1(1974), 97.
- (4) 石谷・ほか 3 名, 機論, **37**-304(1971), 2319.
- (5) 今市・ほか 4 名, 機論, No. 734-5(1973), 104.
- (6) Biermann, D. and Wodcock, A. J., *J. Fluid Mech.*, **61**-3(1973), 499.
- (7) 谷口・ほか 2 名, 機論, **46**-405, B(1980), 802.
- (8) 岡本・八木田, 機論, **38**-313, B(1972), 2259.
- (9) 河村・ほか 4 名, 機論, **50**-450, B(1984), 332.
- (10) 岡島, 機論, **44**-384(1978), 2663.
- (11) 岡島, 機論, **50**-458, B(1984), 2531.
- (12) 五十嵐, 機論, **46**-406, B(1980), 1026.
- (13) 奥井・三上, 機論, **52**-477, B(1986), 2057.
- (14) 奥井・三上, 機論, **55**-515, B(1989), 1806.