

開水路流れに設置された橋脚周辺の水理特性について (2)

今 本 博 健・大 年 邦 雄

HYDRAULIC CHARACTERISTICS AROUND PIER IN AN OPEN CHANNEL FLOW (2)

By *Hirotake* IMAMOTO and *Kunio* OHTOSHI

Synopsis

This paper concerns with an experimental investigation of the hydraulic characteristics of the flow behind two circular cylinders arranged laterally. The study deals with the flow field near cylinders. The vortex shedding properties are analyzed on the basis of the data obtained by the propeller flowmeter, and the characteristics of vortex shedding process in relation to the spacing between two cylinders are investigated from various viewpoint. The instantaneous streamline pattern is also described by the use of flow visualization technique.

1. 緒 論

十分発達した開水路乱流中に円柱を設置すると、円柱周辺の流れは剝離を伴う複雑な三次元挙動を呈し、接近流の乱流構造とは著しく異なる水理特性を示す。すなわち、円柱前面に形成される下降流および馬蹄渦、また円柱側面より離脱する渦によって後流域に形成されるカルマン渦などのスケールの大きな渦構造によって特徴づけられる。

本研究は前報¹⁾に引続き、流れを横切るように配置された二円柱橋脚を対象として、二円柱近傍の後流渦の特性に及ぼす干渉効果について実験的に検討したものである。

複数物体周辺の流れ場では、それらの物体の配置や近接の程度によって各物体の後流が複雑に干渉し、各物体より離脱する渦の特性は単一物体の場合とは著しく異なる。

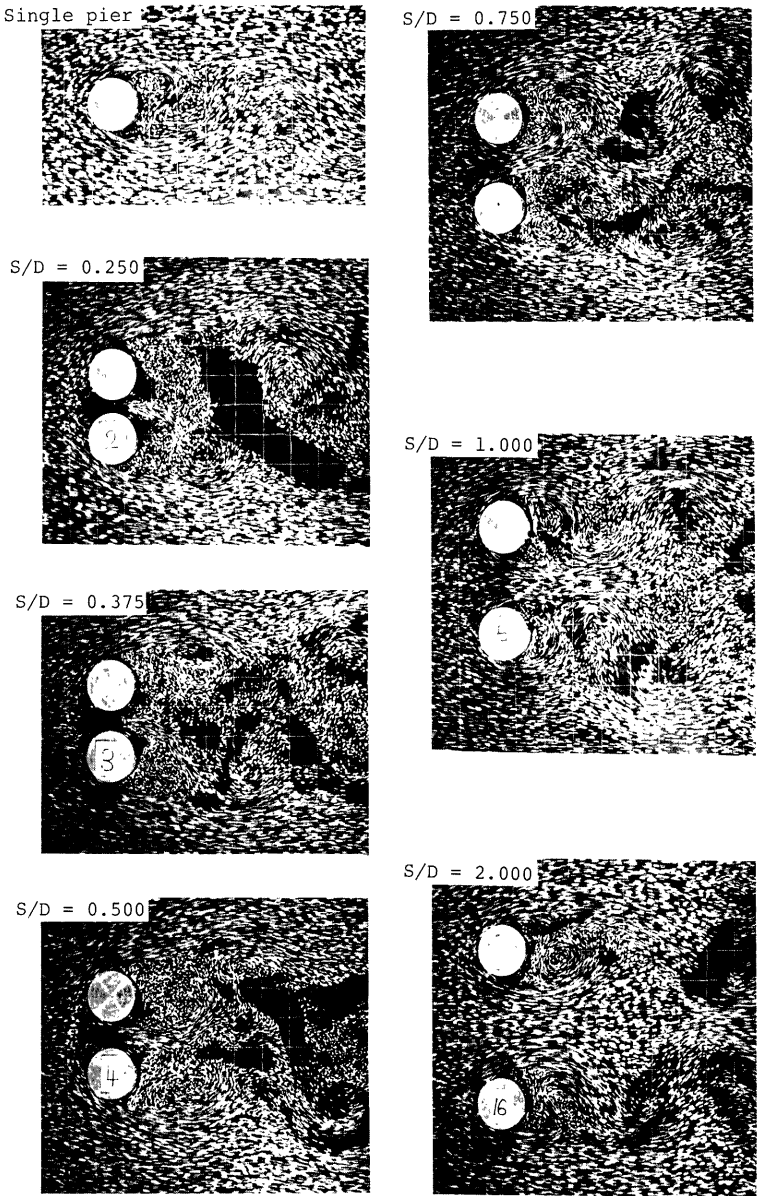
多円柱周辺の流れに関する従来の研究は少ないようであるが、流れをポテンシャル流として各円柱に働く流体力を取扱ったものと、後流渦列の干渉現象を実験的に取扱ったものとに大別される²⁾。

多円柱周辺のポテンシャル流れの解析については、Dalton and Helfinstine³⁾ によって種々の配列における各円柱に働く流体力が理論的に求められている。

後流渦の干渉状況を実験的に検討したものとして、Spivack⁴⁾ および Bearman and Wadcock⁵⁾ は流れ方向に対して直角に設置された同径の二円柱後流に生じる渦の離脱周波数を熱線流速計を用いて計測した結果、円柱間隔が円柱径よりも小さくなると単円柱とは異なる渦の離脱がみられることを示した。同様な実験結果は石谷ら^{6),7)}、小林⁸⁾ によっても報告されている。これらの実験においては、間隔比 $s/D < 1.0$ において円柱間の流れが時間的に偏流する現象がみられ、石谷・西川⁹⁾ はこの偏流が二次元噴流におけるコアンダ効果によるものと解釈している。

Zdravkovich¹⁰⁾ は、種々に配列された二円柱および三円柱における渦列の干渉現象を流れの可視化法を用いて観察し、主として離脱渦の位相特性に関する検討を加えている。

単円柱における離脱渦については従来より多くの理論的および実験的研究がなされており、その特性はかなり明らかにされているのに対し、多円柱の離脱渦については、渦列の形成過程あるいは相互干渉機構など



($T=1/16$ $F=11$)

Photo 1 Picture of flow patterns in the water surface

に不明の点が多く残されており、今後の検討課題であると考えられる。

2. 実験装置および方法

実験水路は長さ 16 m, 幅 1 m, 深さ 30 cm の長方形断面を有する可変勾配の循環式水路である。使用した円柱は直径 $D=8$ cm, 高さ 10 cm の真ちゅう製であり、水深が流れ方向に一定である区間内の水路中央に **Fig. 1** に示すように設置した。

本実験で対象とした流れのレイノルズ数 Re_D (円柱径に基づく) に対しては、 $D=8$ cm の単円柱の場合、離脱渦のストローハル数はほぼ 0.2 であることが従来の研究により明らかにされており、本実験の場合、離脱周波数 f_s は $f_s \approx 0.5$ Hz 程度の低周波数であることが予測される。したがって渦の離脱を検出する流速計として周波数応答特性の非常に優れたものを用いる必要はないとの判断により、直径 3 mm のプロペラ流速計を使用することとした。この流速計からの出力パルス数および電圧と流速との関係は静水中を既知速度で移動させる方法によって求めた。

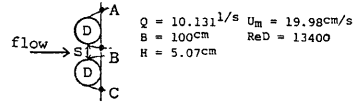


Fig. 1 Arrangement of two circular cylinders and condition of experiment

表面流況の可視化にはアルミ粉末を塗布したパンチ屑をトレーサーとして用い、水路上方約 1.7 m の高さに設置した 35 mm スティルカメラによってトレーサーの挙動を撮影した。露光時間 1/16 秒の撮影を 0.35 秒おきに連続的に行った。なお、ビデオ撮影も併用しトレーサーの向きおよび流況の時間的変化を検知する助けとした。

なお、本研究では二本の直立円柱を流れの横断方向に設置 (以後、横断配列と略記する) した場合の二円柱近傍における水理特性の検討を主目的としているため、後流域におけるカルマン渦列等の相互干渉現象は対象としていない。

3. 横列二円柱周辺の水理特性

3.1 表面流線パターン

Photo 1 は種々の二円柱間隔における表面流況写真の一例を示したものである。横列二円柱においては、その間隔 s が円柱径 D よりも小さいとき ($s/D < 1.0$), 両円柱の間隙流れが左右に偏流する現象が観察される。この偏流は明らかに二円柱近傍後流の相互干渉に起因しており、右または左に向う二つの状態を不規則に繰返す現象であって、後述する渦の離脱特性はこの偏流現象に大きく支配されていると思われる。

いま、上述した偏流が観察される例として $s/D=0.5$ および偏流が殆ど認められない例として $s/D=1.0$ を選び、**Photo 1** に示したトレーサーの軌跡より表面流線パターンを推定した。**Fig. 2~4** は、単円柱、 $s/D=0.5$ および 1.0 に対する表面流線パターンの数例を示したものである。**Fig. 3** の $s/D=0.5$ に着目すると、二

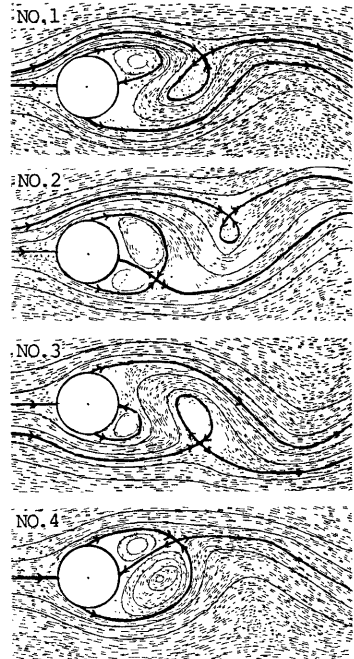
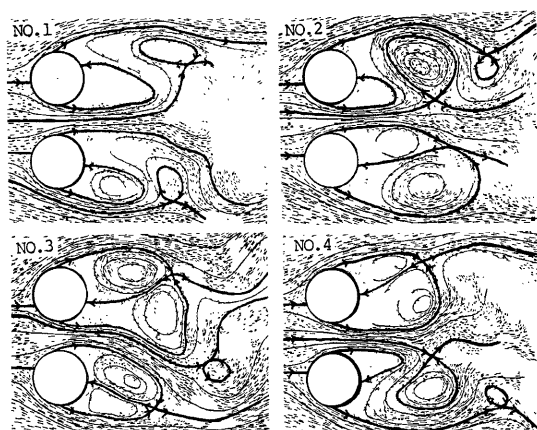
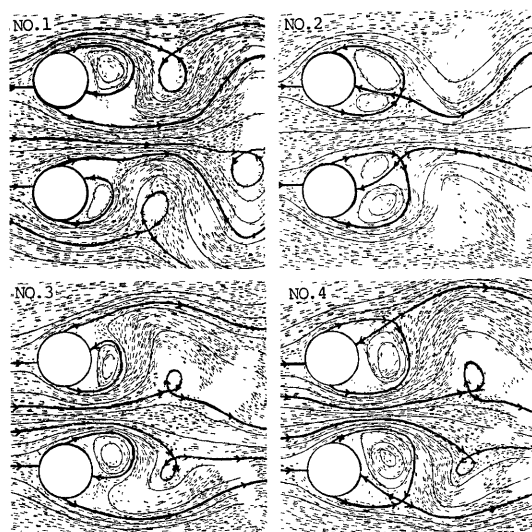


Fig. 2 Instantaneous streamline pattern in the water surface (single cylinder)

Fig. 3 Instantaneous streamline pattern in the water surface ($s/D=0.5$)Fig. 4 Instantaneous streamline pattern in the water surface ($s/D=1.0$)

円柱間隙流れが偏流した方の円柱は活発な渦形成および放出を行うとともに間隙流れが渦と渦との間へ大きな曲率で連行されている。また他方の円柱背後にも明確な渦の形成が認められ、偏流していない側の円柱も自身が放出した渦と渦の間へ間隙流れを連行しようとするために間隙流れの動向に不安定効果を及ぼし、偏流現象が不規則に継続するものと考えられる。一方、 $s/D=1.0$ においては、二円柱の間隙流れが左右に偏流する現象は殆ど見られず、Fig. 4 に示すように両円柱間隙中心線に対してほぼ対称な流線パターンが頻

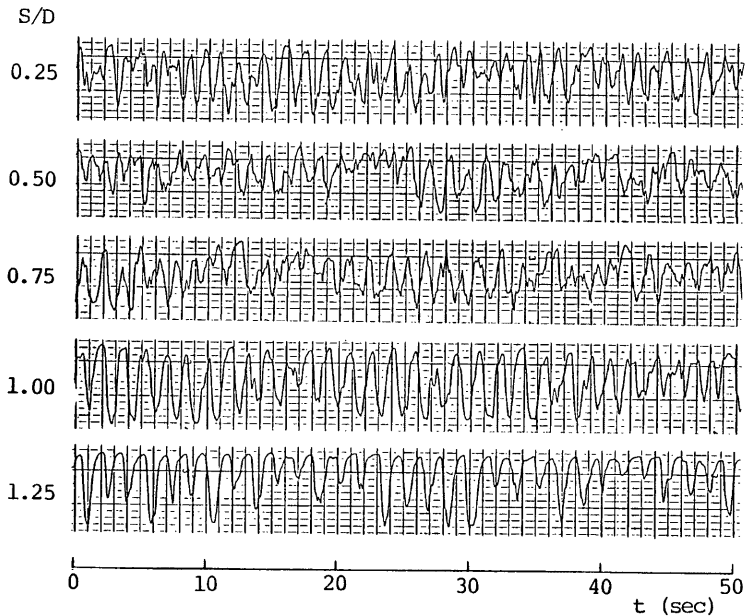


Fig. 5 Propeller flowmeter signals recorded at point A

繁に見られるようになり、両円柱近傍の相互干渉効果が渦の離脱特性に及ぼす影響はかなり弱まったものであると思われる。

3.2 離 脱 渦

Fig. 5 は、点 A (**Fig. 1** 参照) において計測した流速変動記録の一例を示したものである。 $s/D < 1.0$ におけるものは $s/D \geq 1.0$ のものに比し波形の周期が時間的に安定しておらず、前述したように離脱渦の時間間隔が不規則なものとなっていることがわかるが、このことを検討するため同図の流速変動記録より個々の渦離脱の時間間隔 T を求め、 $1/T$ の頻度分布を **Fig. 6** に示した。この図より、 $s/D \geq 1.0$ においては渦離脱時間間隔がその平均値付近に集中しており、渦離脱の周期性はかなり安定であるが、 $s/D = 0.25 \sim 0.75$ においては分布が広範囲に及び規則的周期性は消失して時間的に不規則な渦離脱となっていることがわかる。すなわち、 $s/D = 0.5$ についてみると、 $1/T$ の平均値 0.84 Hz を含む $1/T = 0.75 \sim 0.94 \text{ Hz}$ の範囲に含まれる計測値は全体の 2 割にも満たず、 $1/T > 0.94 \text{ Hz}$ が 3 割強、 $1/T < 0.74 \text{ Hz}$ が 5 割弱も占めている。

次に、二円柱外側および内側における離脱渦の状況を検討するため、外側の点 A および内側の点 B における流速変動時系列データの自己相関係数 $R(\tau)$ を求めて **Fig. 7** および **Fig. 8** に示した。間隔比 $s/D = 1.25$ のものをみると、ラグ τ に対してかなり規則的な周期変動を呈しており、この間隔比における離脱渦は単円柱でのものに類似していることが推察される。一方、 $s/D = 0.25 \sim 0.75$ の点 B では $R(\tau)$ の顕著な周期変動はみられず、二円柱内側での渦離脱は前述の偏流の影響により時間的にかなり不規則であることを示唆している。なお、同一間隔比に対する点 A と B の $R(\tau)$ を比較すると、二円柱外側 A でのものの方が $R(\tau)$ の規則的周期性は卓越している。

上述した離脱渦の周期性に関する検討結果は、**Fig. 9** に示した 1 次元エネルギースペクトルの計算結果からも検証され、 $s/D \geq 1.0$ において卓越周波数がみられるが、 $s/D < 1.0$ では認められない。

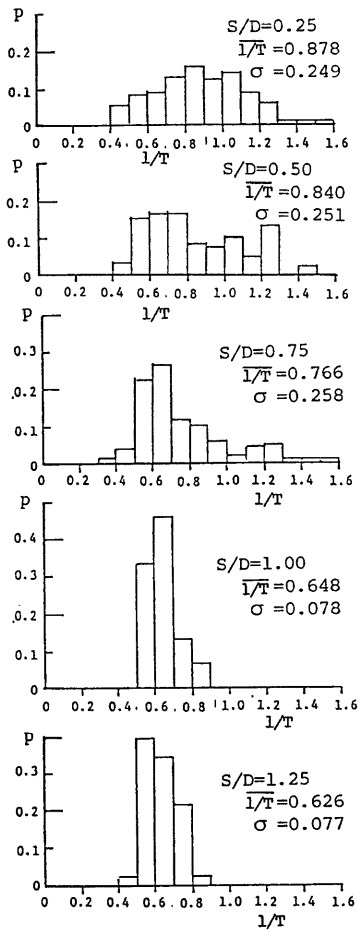


Fig. 6 Histogram of the time interval of vortex shedding

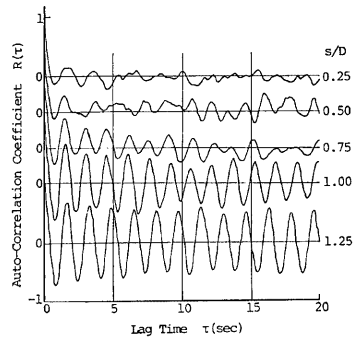


Fig. 7 Auto-correlation function (at outer point A).

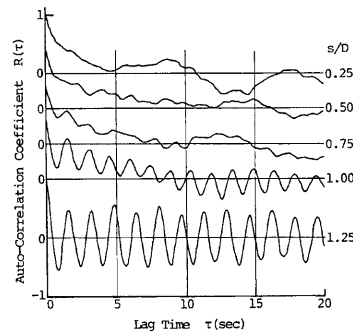


Fig. 8 Auto-correlation function (at inner point B)

以上に示した種々の間隔における横列二円柱からの離脱渦の特性を離脱周波数の観点より検討したものが **Fig. 10** である。図における計測値は **Fig. 6** に示した渦離脱時間間隔の頻度分布より、 $1/T$ の平均値を離脱周波数 f_s としてストローハル数 $S_t = f_s \cdot D/U$ を算定し、 s/D に対して示したものである。なお、図中の○に施した縦線は個々の渦離脱の時間間隔より求めた D/UT の標準偏差 σ として $S_t \pm \sigma$ の範囲を示している。 $s/D=0$ の両円柱を密着させた状態では $S_t=0.10$ であるが、 D を $2D$ として S_t を計算すると $S_t=0.20$ となり、離脱周波数でみかぎり直径が2倍の単円柱と同等である。両円柱の間隔を広げていくと S_t は急激に増大し、 $s/D=0.25$ では $S_t=0.3$ 程度の極大値を示している。また $s/D < 1.0$ における個々の渦離脱の時間間隔は変動が大きく、両円柱の相互干渉効果により極めて不規則である。一方、 $s/D \geq 1.0 \sim$

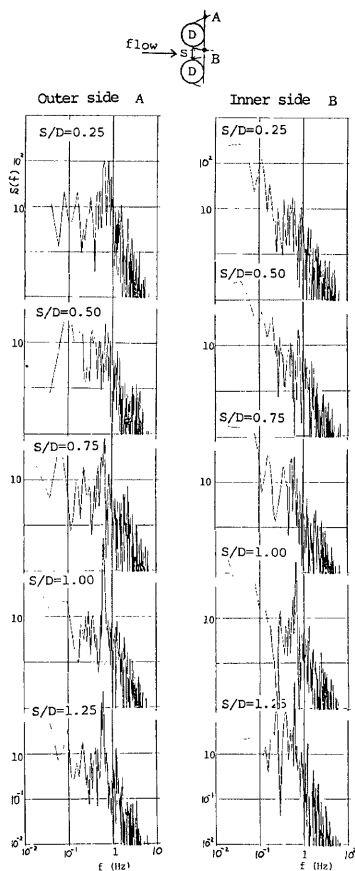


Fig. 9 Energy spectrum

1.25 においては $S/D=0.2$ であり、かつ個々の渦離脱の時間間隔もかなり規則的となって単円柱の場合の離脱特性へと漸近している。

次に、二円柱外側の点 A および内側の点 B における流速変動時系列データの相互相関係数 $C_{ab}(\tau)$ を求め Fig. 11 に示した。同図より $S/D \geq 1.0$ において周期的な相関が認められ、前図に示した離脱周波数とともに単円柱のものと同様な特性を示しているが、 $S/D < 1.0$ におけるものには周期性は殆どなく、前述した間隙流れの影響が追認される。また、 $C_{ab}(\tau=0)$ を S/D に対して示すと Fig. 12 のようであって、 $S/D < 1.0$ では片側円柱からの離脱渦は無相関であることがわかる。

片側円柱から離脱する渦の位相差について検討するため、Fig. 11 に示した $C_{ab}(\tau)$ の $\tau \geq 0$ における第 1 ピーク (図中の矢印) までのラグ $\Delta\tau$ を点 A で計測した平均離脱時間間隔で除した $\phi_s = 2\pi \cdot \Delta\tau / T$ を位相差と定義し、 ϕ_s と S/D の関係を Fig. 13 に示した。図には点 A と点 C に対して同様な操作で求めた位相関係も併示している。 $0 < S/D < 1.0$ における両円柱内側からの渦離脱は、両円柱外側からの渦離脱とその離脱

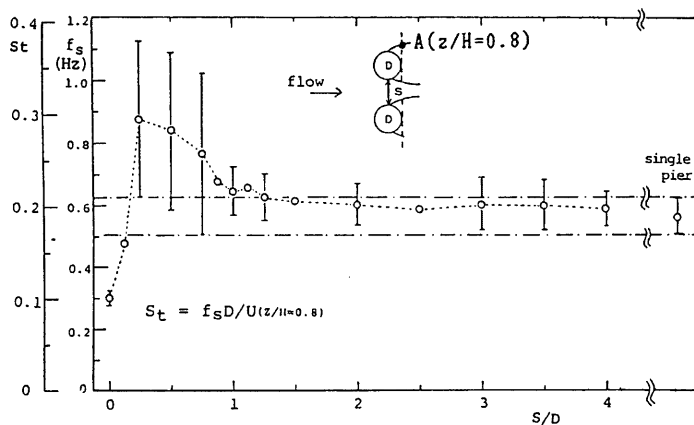
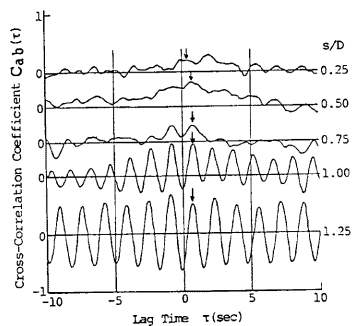
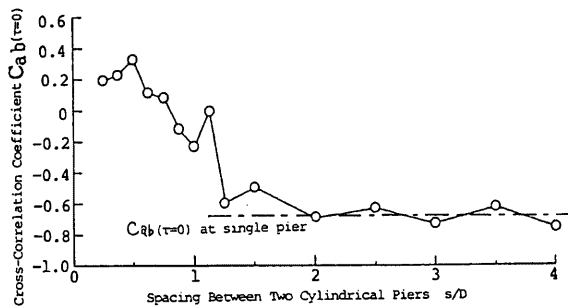
Fig. 10 Variation of Strouhal number St with spacing ratio s/D 

Fig. 11 Cross-correlation function of outer side point A and inner point B

Fig. 12 Relation between the value of $C_{ab}(\tau=0)$ and spacing ratio s/D

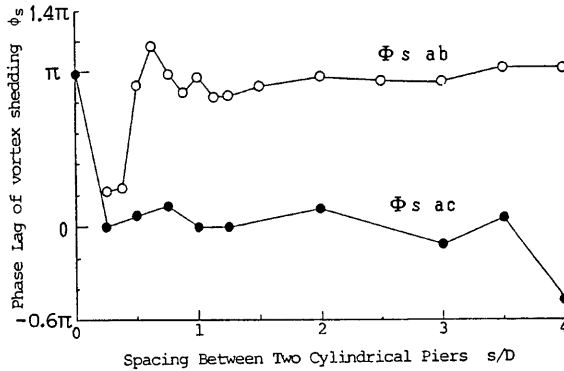


Fig. 13 Relation between the phase lag ϕ_s and spacing ratio s/D

周波数も異なり、前述したように間隙流れの偏流もみられるため、上述の方法で求めた位相差 ϕ_s はさほど意味を持たないと考えられ、ここでは $s/D \geq 1.0$ に対して検討することとする。この範囲の s/D に対しては $\phi_{sab} \cong \pi$ であり、ほぼ単円柱と同様に逆位相で渦が離脱しているとみなされる。一方、両円柱外側については $\phi_{sac} \cong 0$ であり両円柱外側からほぼ同位相の離脱渦の形成されている点が注目されるが、 $s/D > 3.0$ ではそのような傾向は崩れて両円柱はそれぞれ独立した単独の円柱とみなされるようになる。

4. 結 論

本研究は、流れを横切るように設置された二円柱橋脚を対象として、二円柱近傍の後流渦に及ぼす干渉効果について実験的に検討したものであって、得られた主要な成果を要約して列挙し結論とする。

- 1) 二円柱の間隔 s が円柱径 D よりも小さいとき、両円柱の間隙流れが左右に偏流する現象が観察され、この偏流現象が両円柱からの渦の離脱特性を大きく支配している。
- 2) $s/D < 1.0$ のとき、両円柱より離脱する渦の時間間隔は不規則であって渦離脱の卓越周波数は認められない。
- 3) $s/D \geq 1.0 \sim 1.25$ における離脱渦のストローハル数は約0.2であり、かつ個々の渦離脱の時間間隔も規則的で片側円柱からはほぼ逆位相の渦が離脱し、単円柱の場合の離脱特性へと漸近していく。一方、両円柱外側からはほぼ同位相の離脱渦が形成されるが、 $s/D > 3.0$ ではそのような傾向は崩れて両円柱はそれぞれ独立した単独の円柱とみなされるようになる。

本報では、横列二円柱における渦離脱の特性についての実験結果を示したが、今後は上述した間隙流れと個々の渦形成および放出との関係を詳細に検討するとともにカルマン渦列の相互干渉および洗掘場での流況についても検討してゆく予定である。

最後に、本研究の遂行に際し、実験ならびにデータ整理に協力された京都大学学部生江幡光博君に対して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 今本博健・大年邦雄：開水路流れに設置された橋脚周辺の水利特性について(1)、京大防災研年報、第26号 B-2, 1983, pp. 489-501.
- 2) Zdravkovich, M. M.: Review of Flow Interference Between Two Circular Cylinders in Various

- Arrangements, Trans. of the ASME, Jour. of Fluids Engineering, No. 12, 1977, pp. 618-633.
- 3) Dalton, C. and R. A. Helfinstine: Potential Flow Past a Groupe of Circular Cylinders, Trans. of the ASME, Ser. D, 1971, pp. 636-642.
 - 4) Spivack, H M.: Vortex Frequency and Flow Pattern in the wake of Two Barallel Cylinders at Varied Spacings Normal to an Air Stream, Jour. Aer. Sciences, Vol. 13, 1946, pp. 289-297.
 - 5) Bearman, P.W. and A. J. Wadcock: The Interaction Between a Pair of Circular Cylinders Normal to a stream, Jour. Fluid Mech., Vol. 61, part 3, 1973, pp. 499-511.
 - 6) 石谷清幹・西川栄一・西村圭也・長 勝三: 円管群に直交する管外流れの構造に関する研究, 第1報, 機械学会論文集, 37巻304号, 1971, pp. 2319-2326.
 - 7) 石谷清幹・西川栄一: 円管群に直交する管外流れの構造に関する研究, 第2報, 機械学会論文集, 40巻337号, 1974, pp. 2599-2606.
 - 8) 小林敏雄: 近接する円管群・正方形柱群に作用する流体力の研究, 機械学会論文集, 42巻357号, 1976, pp. 1452-1459.
 - 9) Zdravkovich, M. M.: Smoke Observations of the Wake of a Groupe of Three Cylinders at Low Reynolds Number, Jour. Fluid Mech., Vol. 32, part 2, 1968, pp. 339-351.