

橋脚周辺部における流れのパターンについて

宇 民 正

FLOW PATTERN AROUND CYLINDRICAL PIERS

By *Tadashi* UTAMI

Synopsis

The vortex system which occurs at the upstream side of cylindrical piers is investigated experimentally under subcritical flow condition with flat channel bed. The scale and distribution of vortex, the velocity variation in vortex, the flow direction and the supplying source of water to vortex are examined. Flow phenomena being three dimensional and turbulent, difficult is the measurement. But the method using two cameras and a stereotop is shown to be useful for measuring these phenomena.

1. 概 説

流れの中に設置された構造物の周辺の洗掘現象あるいは流れが構造物に作用する力を問題にするにあたり、流れの局所的な機構を明らかにする必要がある。流れの局所的な機構については、それを統一的な観点から説明することはなされてないのが現状である。それは局所的な現象が三次元的であり、また時間的変動やともなうことが多く、そのことがひいては測定による現象把握あるいは解析を困難にしているためである。

本報告では平滑水路床に円形断面橋脚を設置し、その周辺に生じる流れの挙動をできるだけ正確に把握することに焦点をおき、今後の現象解析への一段階とした。また流速ベクトルの三次元的な測定方法において一つの手がかりを得た。

2. 観 測 方 法

三次元的でかつ時間的な変動をとともなう流れの挙動についてはその観測方法がまず問題である。ここでは立体写真観測をとり入れた Flow visualization 法について述べる。その概要を Fig. 1 に示す。

(i) トレーサーについて

Flow visualization 法においてはトレーサー材料と、その流体中への挿入法がとくに問題である。Cl-Benzene と *n*-Hexane はともに水に不溶であり、その混合液に螢光塗料を混じて密度を水のそれに等しくしたものを水中に細管で注入すると、直径 0.5 mm~5 mm の粒子状になる。これをトレーサーとして用いた。局所的な現象は測定器を挿入することにより変化することがあり、このことが局所流の測定を困難にしている一因である。Flow visu-

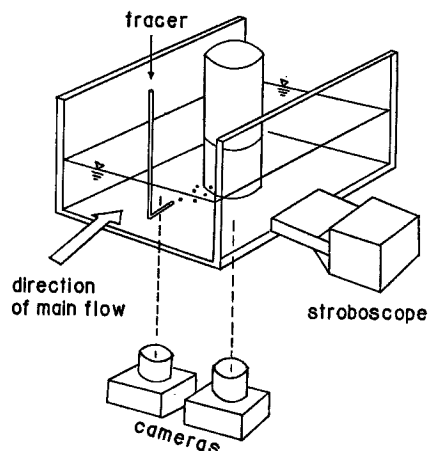


Fig. 1 General view of three-dimensional flow measurement.

alization 法では注入器具は小さなものでよく、しかも局所的な現象が発生している場所から離して置くことができるので、現象を乱すことが少ない。注入された粒子の流れへの追従性については、粒子の密度が水のそれに等しいかどうか、粒子の大きさと測定しようとする現象のスケールとの大小関係、および注入速度と流速との差が問題となる。しかしいまの場合には、前二者は問題がないように設定されており、また注入場所が測定場所から十分隔っているため、測定場所では粒子は流れにほぼ追従すると考えられる。

(ii) 立体写真観測法について

流れの中に注入された粒子をストロボ照明の下に互に 20 cm 隔った 2 台のカメラで立体撮影し、粒子の像の三次元的な位置をステレオトプで読みとった。光が水路壁中と水中とを通過することによる粒子像の偏位を概算すると、

$$\frac{b}{l} = \frac{\sqrt{1-\sin^2 i}}{\sqrt{1-\sin^2 i} - \sqrt{(a\mu_b)^2 - \sin^2 i}} \left(\frac{x}{l} \frac{\sqrt{(a\mu_b)^2 - \sin^2 i}}{\sqrt{1-\sin^2 i}} - \frac{\sqrt{(a\mu_c)^2 - \sin^2 i}}{\sqrt{(a\mu_c)^2 - \sin^2 i}} \right)$$

となる。ただし、 $a\mu_b$ は媒質 A に対する媒質 B の屈折率であり、 $a\mu_c$ および $b\mu_c$ についても同様である。また i は入射角、 l は実際の粒子位置、 x は粒子像の位置であり、おのおのは Fig. 2 に示す通りである。

(iii) 立体写真観測法の精度について

立体写真観測の誤差の原因としては、(1) アクリル板の凹凸、(2) 写真機のレンズの歪み、(3) 写真機設置の際の位置と方向のずれ、(4) フィルムの凹凸および収縮、(5) 印画紙に焼付けの際のレンズの歪み、(6) 印画紙の収縮などがあり、一がい精度何%以内とはいえない。そこでここでは流れの観測と同じ条件の下で水中に標的を置き、それを先に述べた立体写真解析法をそのまま用いて解析し、誤差の目安を得た。その結果が Fig. 3 である。図において円に囲まれた数字は、標的の水路床からの高さについて、実際の値とそれをステレオトプで読みとった後に上式で修正した値との差であり、長方形で囲まれた数字は、標的の間の距離について、実際の値とステレオトプによる解析値との差である。この図から、写真図面の周辺部においては誤差は大きい、中心部の誤差は 1 mm 以内であり、十分実用に供しうることがわかる。すなわち三級図化機、ストロボ照明、小型写真機、35 mm フィルムという組合せでも、観測目的と使用方法によっては利用価値があるといえる。

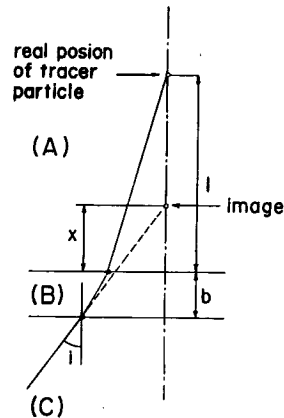


Fig. 2 definition sketch.

3. 実験装置および実験条件

実験水路は幅 40 cm であり、その中央に直径 10 cm の円柱を設置した。円柱の近傍の水路延長約 2 m の区間の水路壁は透明アクリル製であり、それを通して水路の外側から写真観測ができるようになっている。流量は 5.9 l/sec で水路下流端に 8 cm のせきを設けているので、水深は円柱周辺ではほぼ一定で 12.05 cm、平均流速は 12.2 cm/sec、フルード数は 0.111 である。

4. 流れの領域区分

トレーサー溶液の注入口を円柱前面より上流側 10 cm の所におき、その水路床からの高さを数種にわたり変えて、各場合の写真撮影を行なった。その結果を Photo. 1 に示す。これらから円柱前面の水路床近傍に水平な軸をもつ渦が存在することが認められる。多くの写真で観測されたこれらのトレーサー軌跡のうち、水路床のごく近傍のものを同一図面内に描くと Fig. 4 の実線のようになる。この図から水路床近傍の渦領域はさらに 2 種の領域から成立つことが認められる。

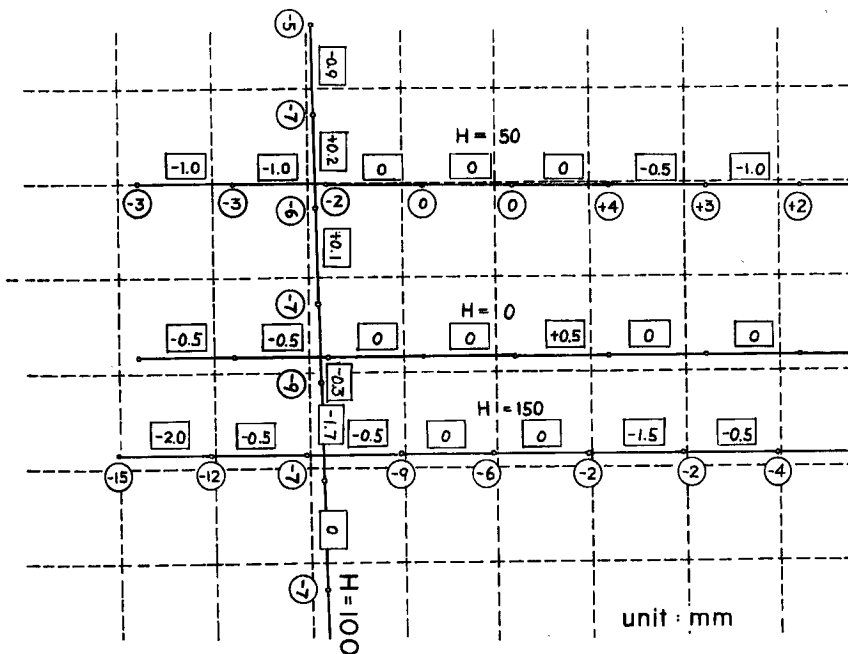


Fig 3 Errors of three dimensional analysis using 35 mm film and stereotop. Numbers in circles are the errors of analysed heights of targets from the channel bed and numbers in rectangles are the errors of analysed distances between targets.

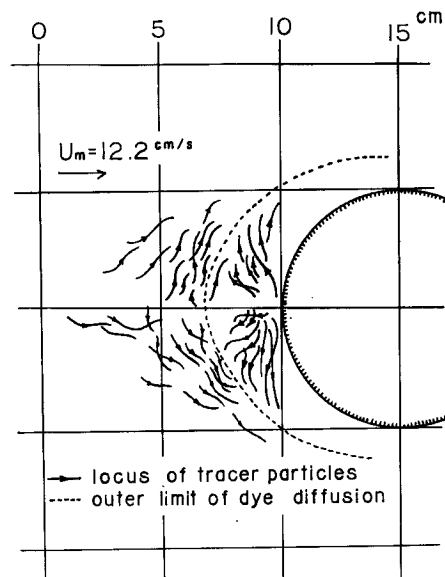


Fig. 4 Loci of tracer particles near the channel bed.

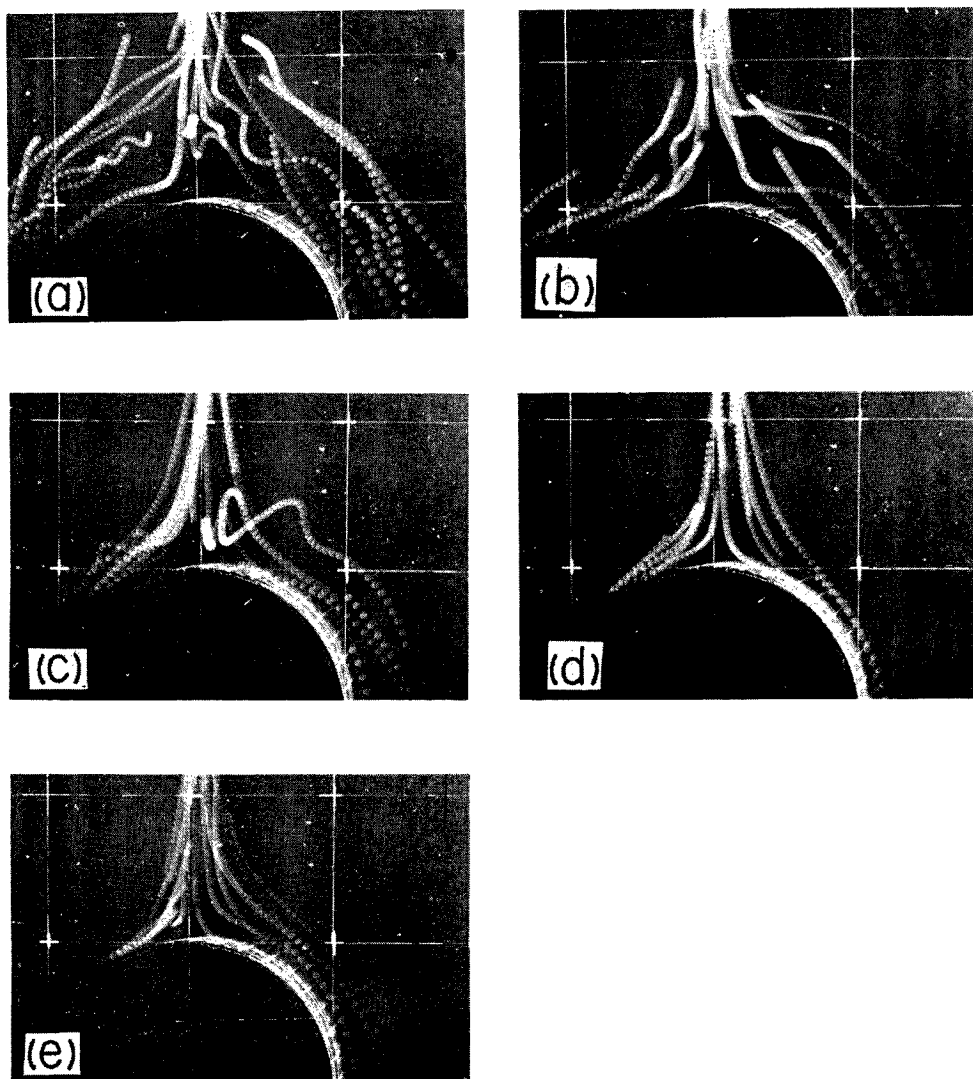


Photo. 1 Loci of tracer particles. Elevation of tracer injection is
(a) : $z=0.5$ cm, (b) : $z=1.0$ cm, (c) : $z=2.0$ cm,
(d) : $z=3.0$ cm, (e) : $z=4.0$ cm.

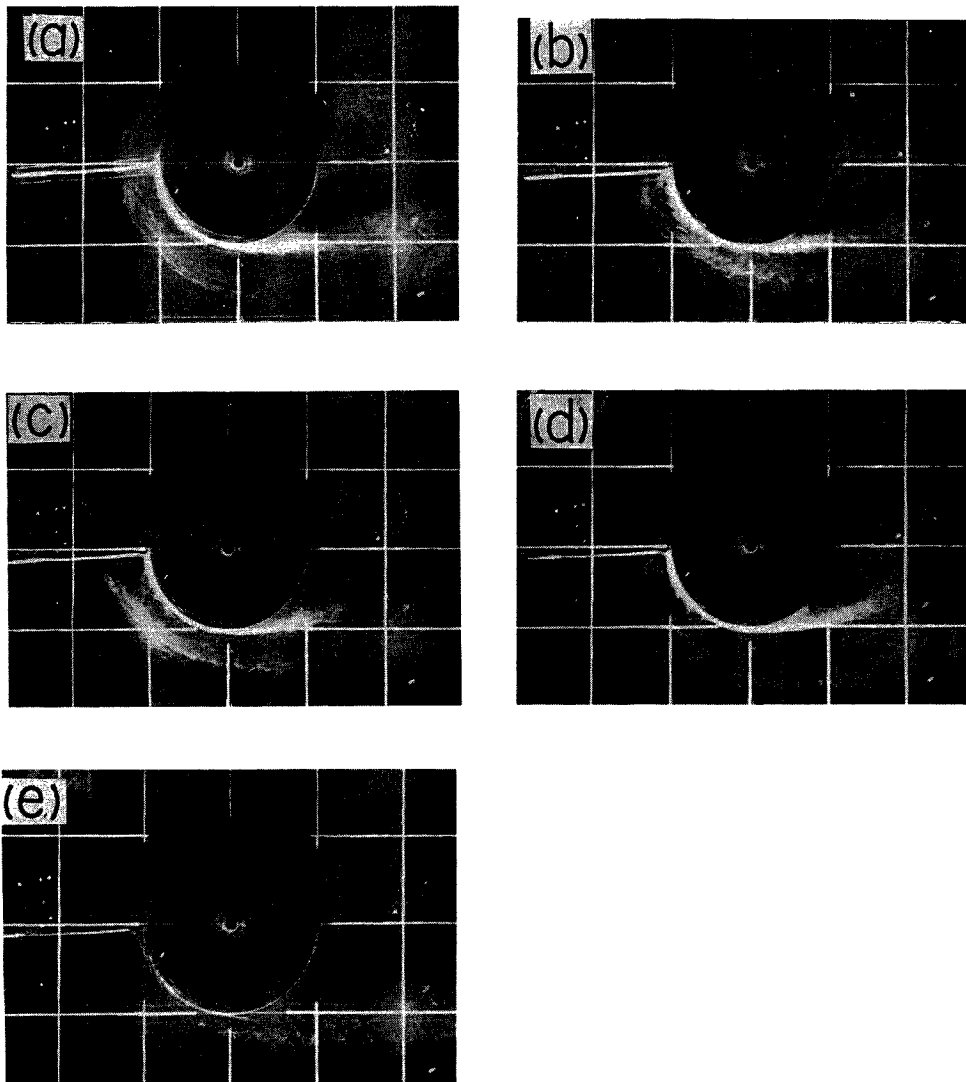


Photo. 2 Extent of dye diffusion injected upstream front of cylinder.
 Elevation of dye injection is
 (a) : $z=0$ cm, (b) : $z=0.5$ cm, (c) : $z=1.0$ cm,
 (d) : $z=2.0$ cm, (e) : $z=3.0$ cm.

また **Photo. 2** は円柱の直前面で水路床からの高さをいろいろと変えて染料を注入したときの染料の拡散状態を示すものである。この写真から、注入口が水路床から隔っている場合は染料は円柱壁面に沿って流下するが、注入口が水路床に近い場合は染料は注入口よりも上流側へ拡散されることがわかる。そして眼による観察によれば、先に述べた水平軸をもつ渦はその軸が円柱壁面から約 1.5 cm 隔って円柱前面をとり囲む形で発生し、発生後数秒間で消えた現われるということをくり返すことがわかった。さらにこの渦の外側にこれより不安定で規模も小さな渦が存在することも認められた。

円柱の上流側の水路床に細砂をまくと、それが流送される過程で水路床のごく近傍の流向を代表するしま模様を描くが、円柱周辺部には砂は達せず空白のまま残る (**Photo. 3 (a)**)。一方、円柱の直上流に砂をおくとそれが周辺部へおしやられ、2～3重の輪模様を描く (**Photo. 3 (b)**)。この輪模様のうち、内側のものは先に示した染料の拡散領域に対応するものであり、また、この拡散領域を **Fig. 4** 中に点線で示してあるが、この線は渦領域をさらに2つの領域に分ける境界線を示したものである。

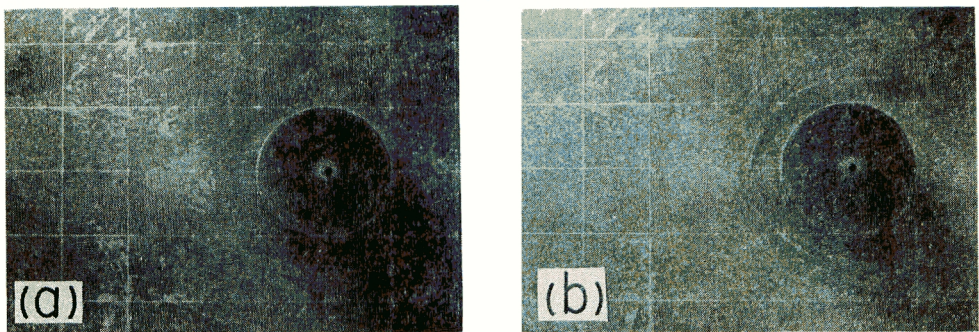


Photo. 3 Pattern of fine sands scattered on the channel bed.

以上3種の実験結果に基づいて、円柱前面の渦領域をさらに2つに分けて考えることにする。第1の領域は水路床面に接して円柱をとり囲む領域で水平方向の幅が約 3 cm のものであり、この領域ではかなり規則的かつ一本の軸をもつ渦が観測される。いま、この領域をA領域とよぶことにする。第2の領域はA領域の外側で水路床に接した領域で、ここではA領域の渦よりスケールの小さな渦が複数箇観測される。この領域をB領域とよぶ。A領域、B領域ともに深さ方向に厚みをもっており、これらの領域の外側では流れはほぼ2次元で近似されるが、この領域をC領域とよぶこととしよう。

5. 渦の強さと大きさ

(i) 渦軸のまわりの回転方向速度成分 v_ϕ について

Fig. 5 は渦内のトレーサの回転直径 $2r$ をその回転周期 T に関係づけたものである。この図からA領域では $2r$ は T にほぼ比例することが認められる。渦軸のまわりの回転方向速度成分 v_ϕ は $2\pi r/T$ で与えられるから、この図からA領域内における渦については v_ϕ は一定でほぼ 7.6 cm/sec であると結論される。さらに、上の結論を検討するために、観測された個々のトレーサ粒子の v_ϕ を円柱前面から測った円柱軸のまわりの回転角度 θ に関係づけたものが **Fig. 6** である。図において線分の両端が示す回転角度の間における平均の v_ϕ が縦軸で示されている。トレーサ粒子の渦軸のまわりの回転直径および回転周期を測定する際の誤差がかなりあると考えられるが、上の結論は近似的に成立つとしてよいだろう。

(ii) 円柱中心軸のまわりの回転方向速度成分 v_θ について

Fig. 7 はトレーサ粒子が円柱中心軸の周囲をまわる角速度と円柱前面から測った円柱中心軸のまわりの回転角度 θ との関係を示す。この図から両領域内の渦の角速度は θ と共に増加する傾向をもつことが認め

Fig. 5 Relation between rotational diameter, $2r$, of tracer particle in vortex and rotational period, T .

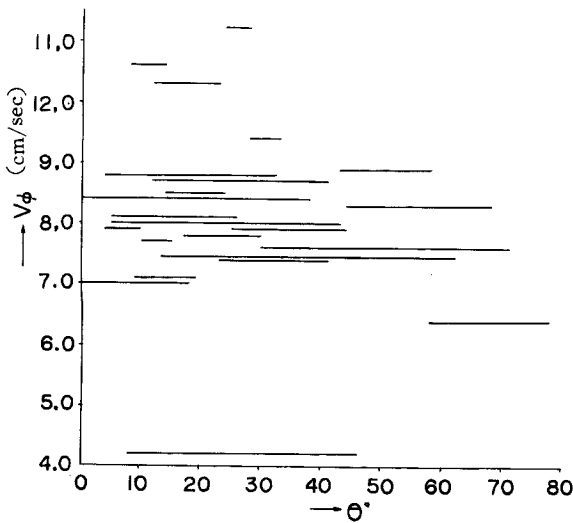
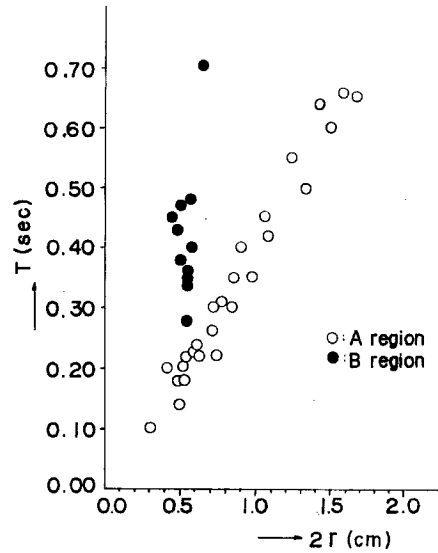
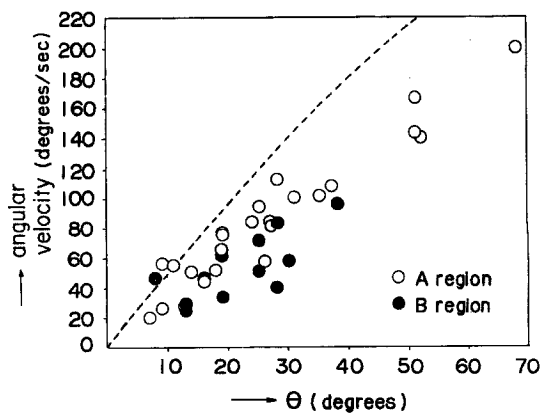
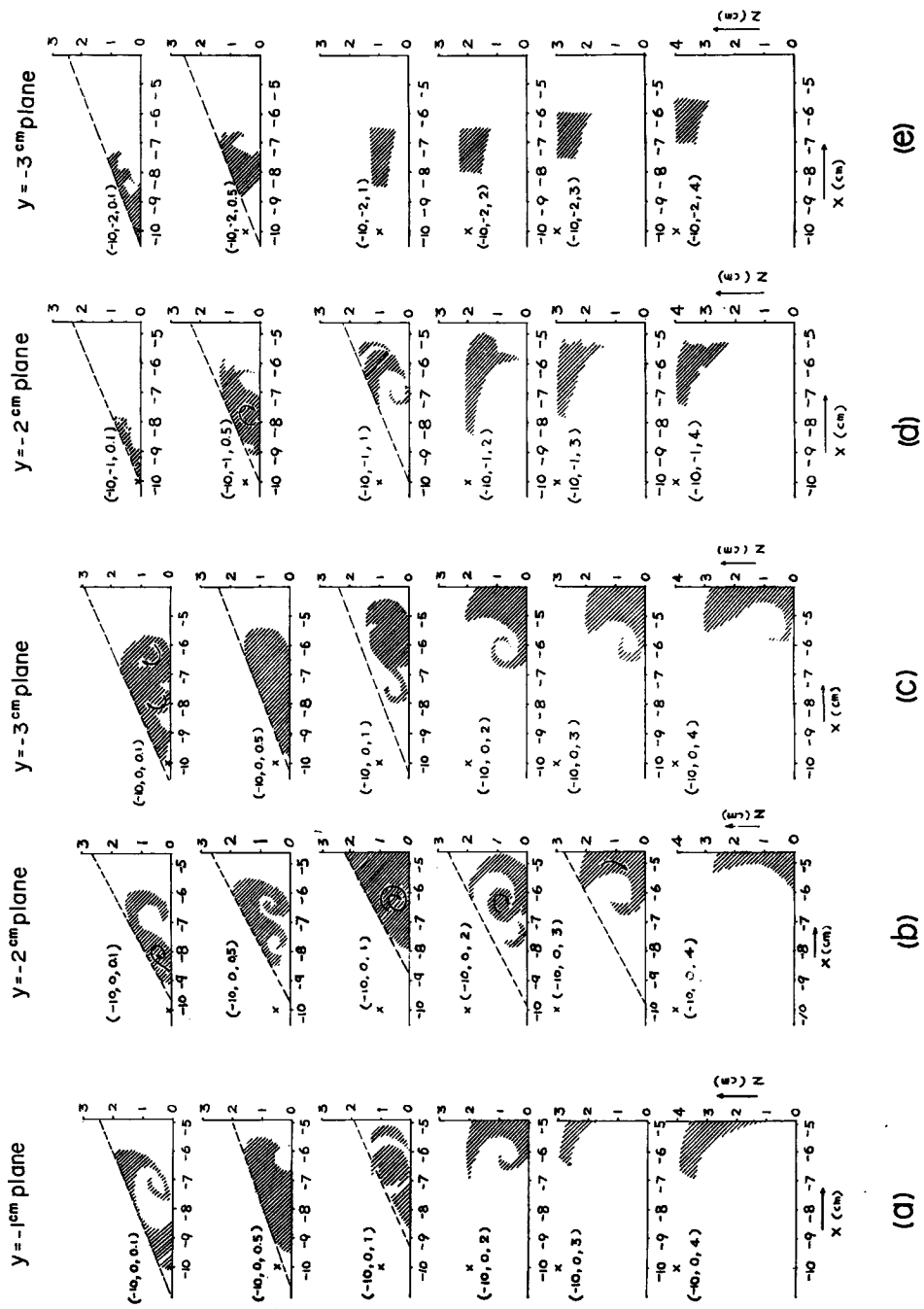


Fig. 6 Relation between rotational velocity component in vortex, v_ϕ , and angle around cylinder axis, θ .

Fig. 7 Relation between angular velocity, v_θ , of tracer particle around clinder and an angle, θ , around axis of cylinder.





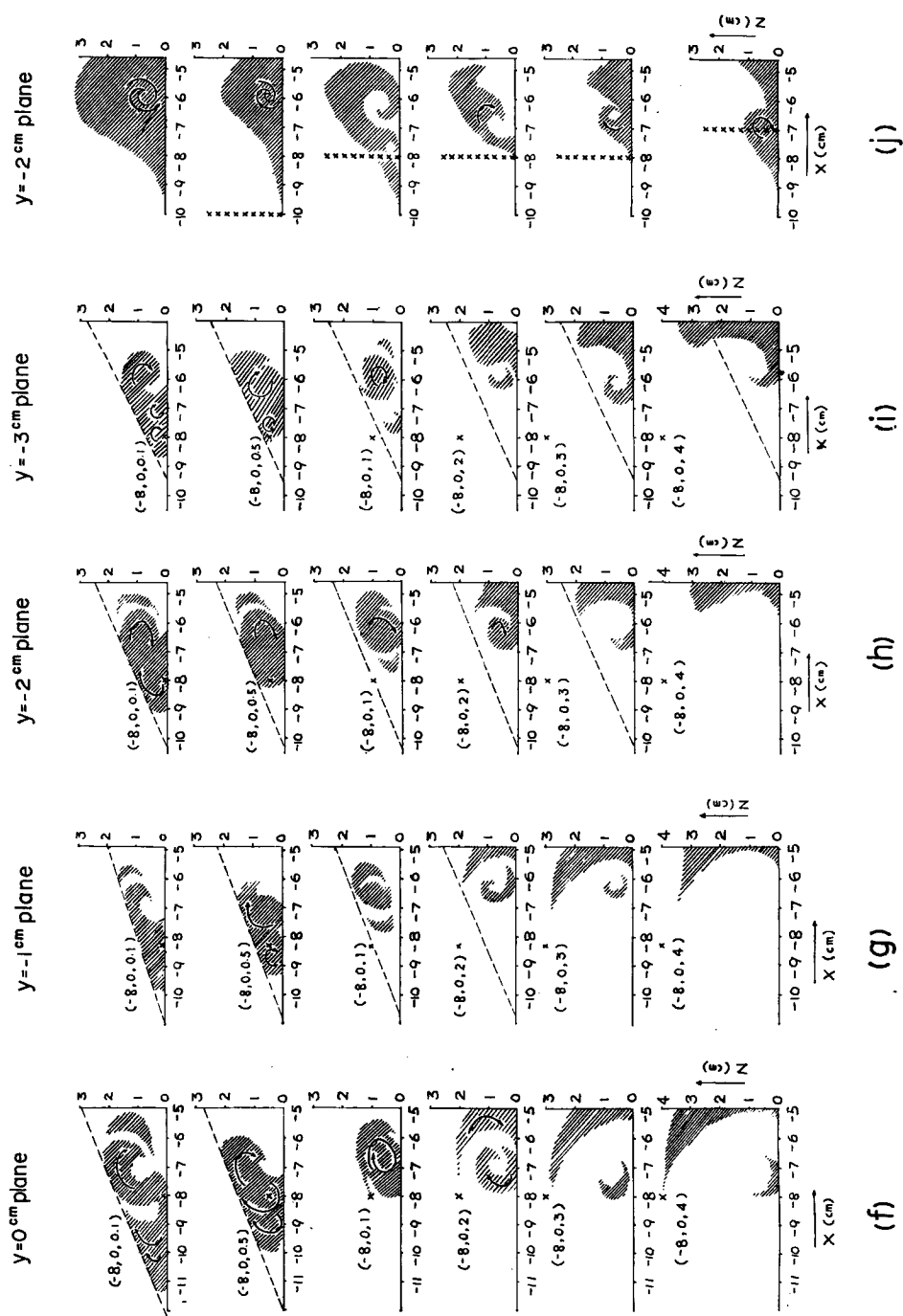


Fig. 8 Mean extend of dye diffusion in various sections. Numbers in bracket shows coordinates of dye injecting point.

られる。また図において破線は流れが二次元ポテンシャル流であるとしたとき円柱表面に接する流れの回転角速度を示すものである。この計算においてポテンシャル流の主流流速 U として実際の流れの断面平均流速 12.2 cm/sec を用いたが、水路床付近では流速が小さく U としてもっと小さな値になることを考慮すると円柱軸のまわりの回転角速度は二次元ポテンシャル流を仮定したときのそれにかかなり近いものとなると考えられる。

(iii) 渦の大きさとその空間的分布について

平均的にみて、どれ程の大きさの渦がどのように配置されているかを明らかにするため、円柱の前方に細管を通して染料を注入し、その拡散の状態を観測した。Fig. 8 はある点に注入された染料がその点より下流の各断面で拡散している平均的な領域をスケッチしたものである。ここで座標系としては円柱の中心を原点として水路床に沿って主流流下方向に x 軸、主流横断方向で水平に y 軸、鉛直方向に z 軸をとっている。流れが乱れているため拡散の領域が不安定で、スケッチは必ずしも正確とはいえないが、渦の発生する場所は、平均的に見れば、円柱前面の水路床に接する楔形の領域であり、その領域では上流渦のスケールが小さくなることが認められる。また先に述べたA領域とはこの楔形の領域のうち円柱に近い部分であり、ここでは渦の規模が最も大きくしかも渦の位置も比較的安定しているため、この領域以外の部分と特に識別されるものと判断される。

6. 流 向

Roper¹⁾ は円柱前面の渦について考察しているが、この中で horse shoe vortex と呼ばれているものがA領域における渦に相当するものである。彼はこの渦の回転は剛体的であるとしているが、その場合流向の z 方向変化は Fig. 9 (a) に示すように直線状となる。一方 Johnston²⁾ あるいは Perry ら³⁾ も境界層内の

流速ベクトルを極座標表示すると、その先端は直線状になるとしており、その結果は Roper のものと一致する。渦軸のまわりの回転方向速度成分について著者は先に近似的に一定であるとしたが、その場合の流向の z 方向分布は

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \theta - \tan^{-1} \frac{v_{\phi}(z-a)}{v_0 \sqrt{(z-a)^2 + (r-R)^2}} \quad \dots\dots(1)$$

で与えられ、Fig. 9 (b) に示されるようになる。ここで、 α は流線が x 軸となす角、 v_{ϕ} は渦軸のまわりの回転速度、 v_0 は円柱軸のまわりの回転速度、 θ は円柱軸のまわりの回転角度、 a は渦軸の水路床からの高さ、 R は渦軸の円柱軸からの距離である。

細管を通して染料を流れの中に注入し、その流下方向から流向をよみとった結果を Fig. 10 に示す。この図において、(1) 式から算出した流向 α を、A領域内の測定点について、実測値と比較している。計算に際して v_{ϕ} としては Fig. 5 から読みとった平均値 7.6 cm/sec 、 v_0 としては Fig. 7 から読みとった平均値、 a および R はそれぞれ実測値の 0.8 cm 、 0.65 cm を用いた。この図から底面の近くでは Fig. 9 (b) のモデルが適合することがいえる。

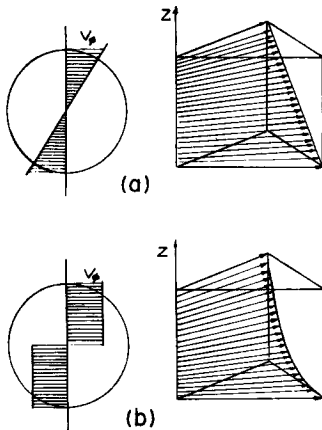


Fig. 9 Model of direction of mean flow.

7. 渦の供給源

渦を構成する流体がどの部分から供給されているかを実験により見てみた。先に述べた染料の拡散実験により、各注入点で注入された染料がどの領域に拡散するかを表にしたものが Table 1 である。この表に基づいて、 $x = -8 \text{ cm}$ 平面および $x = -10 \text{ cm}$ 平面内の各地点で注入された染料が、最終的に到達する領域を図示したものが Fig. 11 である。これらから、A領域の渦を構成する流体は水路の中心面にごく近い部

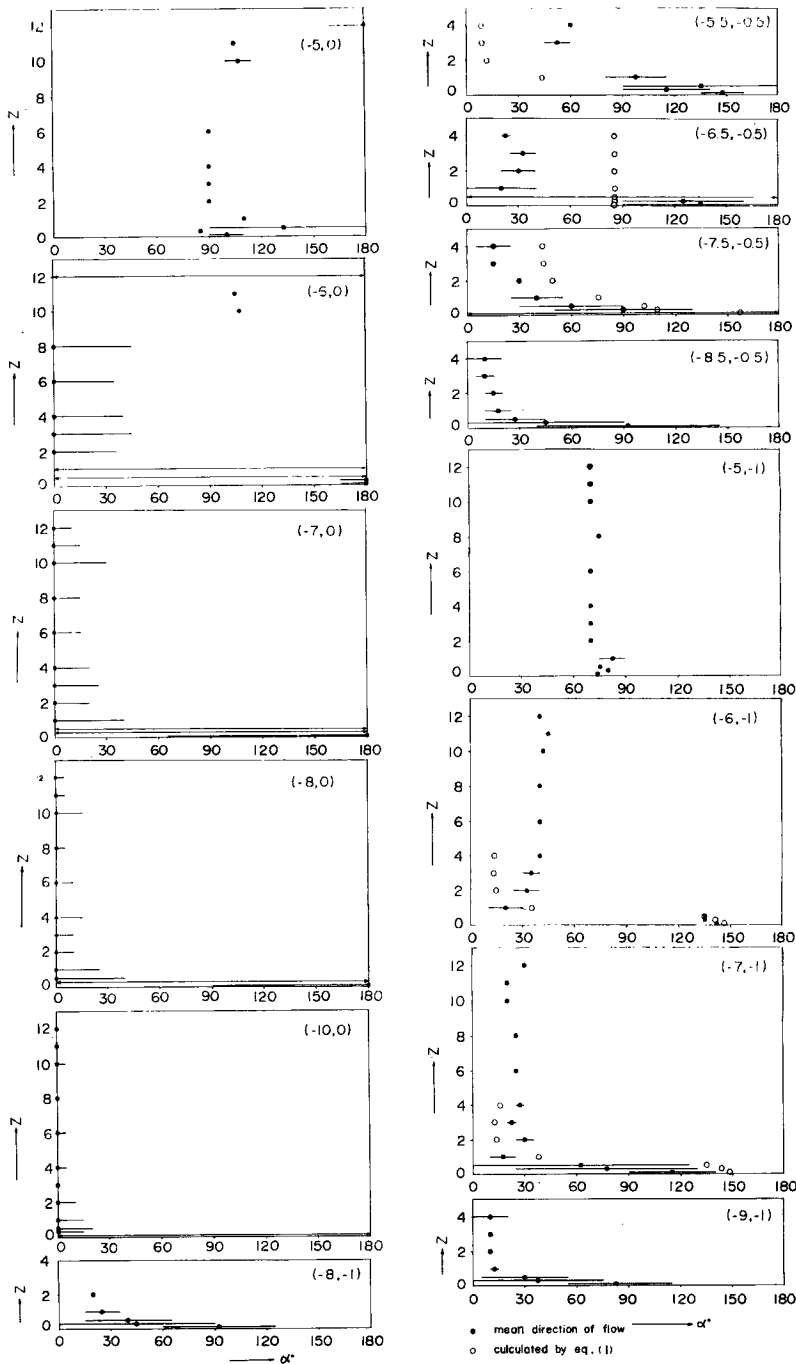


Fig. 10 Direction of mean flow measured by injected dye. Line segment means the extent of fluctuation of flow direction.

Table 1 Region in which dye diffused.

plane of examination (cm)			$y = -1$	$y = -2$	$y = -3$
coordinate of injecting point (cm)					
x	y	z			
-10	0	0.1	B A	B A	B
		0.5	B A	B A	B A
		1.0	B A	B A	B A
		2.0	A	A	A
		3.0	C	A	A
		4.0	C	A	A
-10	-1	0.1		B	
		0.5		B	
		1.0		A	
		2.0		C	
		3.0		C	
		4.0		C	
-10	-2	0.1			B
		0.5			B
		1.0			C
		2.0			C
		3.0			C
		4.0			C

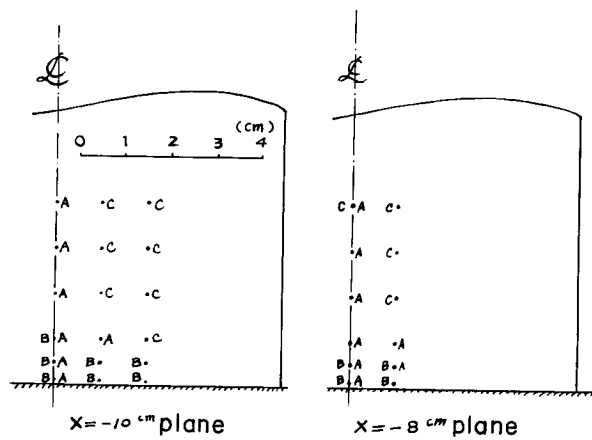


Fig. 11 Final region in which dye diffused.

分から供給されていること、およびB領域の渦を構成する流体は水路床のごく近傍から供給されていることがわかる。

8. 結 語

はじめに立体写真観測法を用いた Flow visualization 法が3次元的な流れの観測に有用であることを示した。

つぎに上の方法その他を用いて、円柱断面橋脚の前面かつ水路床近傍における流れの局所的な機構を実験的に明らかにした。得られた結論のうち主なものをあげると次のようである。

(i) 時間的に平均化された流れはA、BおよびC領域に大分される。(ii) A領域は水平軸をもち、円柱前面をとり囲み、かつ水路床に接する一つの渦を含む領域で、厚さ幅ともに2~3 cmである。B領域は、A領域のさらに外側の水路床に接する部分であり、渦の大きさはA領域内のものより小さく、また円柱から遠ざかる程小さくなる。(iii) A領域内の渦の回転方向は水路床面近傍で円柱から遠ざかる方向であり、その回転速度は渦内ではほぼ一定である。また渦内流体の円柱中心軸のまわりの回転速度は円柱中心軸のまわりの回転角度の増大と共に増加する傾向をもつ。(iv) 円柱前面の平均流線は水路床に近い程曲がり方が大である。(v) A領域の渦を構成する流体は水路の中心面にごく近い部分から供給され、B領域の渦を構成する流体は水路床のごく近傍から供給される。

末筆ですが、立体写真観測法および写真解析において京都大学工学部の森忠次助教授の御指導と御援助をいただいたことにつき、深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Roper, A. T., Schneider, V. R. and Shen, H. W.; Analytical Approach to Local Scour, 12th Proc. of IAHR, vol. 3, Colorado State Univ. USA, 1967, pp. 151—161.
- 2) Johnston, J. P.; On the Three-Dimensional Turbulent Boundary Layer Generated by Secondary Flow, Trans. ASME, Journal of Basic Engineering, Mar. 1960, pp. 233—250.
- 3) Perry, A. E. and Joubert, P. N.; A Three-Dimensional Turbulent Boundary Layer, Journal of Fluid Mechanics, vol. 22, par. 2, 1965, pp. 285—304.