

波動中圓柱附近後渦流之實驗研究

周宗仁* 張家棣**

摘 要

本文針對圓柱受波動作用引起後渦流之特性和影響進行研究。首先，以實驗方法探討單一圓柱後渦流之渦型與Keulegan-Carpenter數、Reynolds數兩者之關係，另外並探討雙根圓柱之間的干擾現象對後渦流之影響。

其次，經由波壓力實驗，討論因渦流而引起圓柱周圍波壓力局部減小之現象。

一、前 言

一般作用於海中小口徑圓柱上的力，可分為兩個互相垂直的分量，一個是平行於波浪進行方向的力，稱為主流方向力(In-Line Force)，另一個則是由於在圓柱兩側之渦流交互形成(Formation)與移動(Shedding)所引起之橫向力(Transverse Force)，當橫向力的頻率和圓柱的自然振頻一致時，因共振現象，會使得圓柱發生疲乏(Fatigue)破壞，故渦流對結構物安全性之影響程度不可忽視。

以往的學者，對圓柱受到流(Flow)作用時所形成之後渦流，已經做過很多的研究。但是，圓柱受波動作用和受到流作用有兩點基本的不同，其一是波動中水粒子作往復的週期運動，水粒子速度大小不但會隨著時間變化，而且方向也會改變；其次是波動中水粒子除了有水平方向運動外，還有垂直方向之運動，故當圓柱受波動作用時，後渦流之特性和受到流作用時會有所不同。

為了研究圓柱受波動作用引起後渦流之特性和影響，本文首先經由實驗探討 $(K.C.)_m$ 數範圍在3.0~6.6間， Rem 數範圍在330~1510間之單一圓柱後方之渦流(其中 $(K.C.)_m$ 數和 Rem 數分別是採用進行波的最大水平水粒子速度 U_m 計算所得之Keulegan-Carpenter數和Reynolds數)，討論後渦流之渦型與 $(K.C.)_m$ 數、 Rem 數兩者之關係，經由實驗結果顯示，渦型主要隨 $(K.C.)_m$ 數而定， Rem 數之影響較小；另外並探討兩圓柱的干擾現象對後渦流渦型之影響。

* 國立臺灣海洋學院河海工程學系教授，工學博士。

** 國立臺灣海洋學院河海工程研究所畢業，工學碩士。

其次，經由波壓實驗，探討因渦流的形成和移動對單一圓柱波壓分佈之影響，並討論無因次波壓值與 Rem 數、波形尖銳度 δ 、 $(K.C.)_m$ 數間之關係；當雙根圓柱之距離為三倍直徑時，因彼此間的干擾現象，使得圓柱左右兩側之波壓分佈變的很不對稱。

二、實驗設備與儀器

本實驗係於國立臺灣海洋學院海港工程試驗館之斷面水槽進行，該水槽長30公尺、寬1.2公尺、高1公尺，造波機為拍拉式規則造波機，造波之週期範圍為0.8秒~14秒。模型由直徑3公分之不銹鋼圓柱體與用來固定圓柱體，面積為60公分×60公分，厚度為1.2公分之底部鋼板兩部份構成。

後渦流渦型之觀察係採用氫氣泡發生器，其原理是在水中張拉金屬細線當作陰極，通電後，流經陰極之水流受電解後，發生氫氣泡列，再使用相機及連拍器(Motor Drive)以4張/秒的速度拍攝氫氣泡列之行走軌跡，就可以很清楚的了解圓柱體附近流體之流型(Flow Pattern)，金屬細線一般均使用白金線，直徑僅0.05 mm，故不會擾亂水流。又波壓轉置器係採用高感度超小型壓力計，最大測定範圍為 0.2 kg/cm^2 。

三、座標系與實驗方法

本實驗之座標系定義於圖1(a)和(b)。在進行後渦流之實驗時，水深採用40公分，實驗模型與儀器之配置如圖2，波高計和圓柱在同一個斷面上，故兩者之間無相位差，波高計除了測定波高之外，另一個作用是決定每一張照片所代表的波浪相位值(t/T)；另外，在圓柱背後靜水面下5公分處，水平張拉20公分長之白金線一條。

在波壓分佈之實驗時，水深仍採用40公分，實驗模型與儀器之配置如圖3，與圓柱在同一斷面上之2號波高計有兩個作用，其一是測定波高，其二是決定波浪相位值(t/T)分別等於0.0, 0.25, 0.5, 0.75時之波壓力。波壓轉置器安裝在圓柱上，位於靜水面下5公分之A圓孔處，圓柱之波壓分佈每 10° 測定一次。

四、圓柱後渦流之實驗條件與結果分析

4.1 實驗條件

表1列出圓柱後渦流之實驗條件。其中 T 是週期， H 是波高，波長 L 與圓柱直徑 D 的比值 L/D 在181~592間， $(K.C.)_m$ 和 Rem 分別是採用進行波的最大水平水粒子速度 U_m 計算所得之

Keulegan-Carpenter 數和 Reynolds 數，

$$(K.C.)_m = \frac{U_m T}{D} = \frac{\pi H}{D} \frac{\cosh k(z+h)}{\sinh kh} \dots\dots\dots (1)$$

$$Rem = \frac{U_m D}{\nu} = \frac{1}{\nu} \times \frac{\pi H D}{T} \frac{\cosh k(z+h)}{\sinh kh} \dots\dots\dots (2)$$

其中 $K = \frac{2\pi}{L}$

$z = -5$ 公分

$h = 40$ 公分

$\nu =$ 水之運動粘滯係數 (Kinematic Coefficient of Viscosity) 約等於 0.01141 cm^2/sec 。

4. 2 單一圓柱後渦流之實驗結果與分析

1 實驗結果

依據實驗結果顯示，在本研究之實驗範圍內，圓柱後渦流之渦型 (Vortex Pattern) 大致可分未成長對稱渦型、弱不對稱渦街型、強不對稱渦街型等三種型式。為說明方便起見，將圓柱的前方、後方、左側、右側標示於照片 1。

① 未成長對稱渦型：

當 $(K.C.)_m$ 數在 $3.0 \sim 3.8$ 間， Rem 數在 $330 \sim 820$ 間時，例如照片 2 所示 $T = 8.0$ sec.， $H = 0.5$ cm， $(K.C.)_m = 3.3$ ， $Rem = 330$ 之情況時，隨著 t/T 值的增加，在圓柱背後沿圓柱表面處，會有一對不明顯之對稱渦發生，左側渦之方向為逆時針，右側渦是順時針，但是此時因為渦對之渦旋強度較弱，故在尚未完全形成前，即受水粒子水平速度方向逆轉 (Reversal) 之影響，向着圓柱的前方逆轉而無法完全成長，故稱為未成長對稱渦型。(其他波浪條件時之變化情況請參照文獻(6))。

② 弱不對稱渦街型：

當 $(K.C.)_m$ 數在 $4.1 \sim 5.3$ 間， Rem 數在 $520 \sim 1150$ 間時，例如照片 3 所示 $T = 8.0$ sec.， $H = 0.8$ cm， $(K.C.)_m = 5.3$ ， $Rem = 520$ 之情況時，圓柱的後方和圓柱背後沿圓柱表面處幾乎同時發生渦對而形成渦街，圓柱後方之渦對其左側渦方向為順時針，右側渦方向為逆時針；沿圓柱表面形成的渦對正好相反，其左側渦方向為逆時針，右側渦方向為順時針。因為渦對的渦旋強度和尺寸 (Scale) 不同，故稱為弱不對稱渦街型。

③ 強不對稱渦街型：

當 $(K.C.)_m$ 數在 $6.0 \sim 6.6$ 間， Rem 數在 $520 \sim 1510$ 間，例如照片 4 所示 $T = 9.0$ sec.， $H = 0.8$ cm， $(K.C.)_m = 6.0$ ， $Rem = 520$ 之情況時，首先，在圓柱的左側發生一個順時針渦

，渦隨着水粒子的運動向圓柱後方移動，稍後，圓柱的右側發生一個逆時針渦，渦也會向着後方移動；當左右兩側先後發生渦之後，圓柱背後沿圓柱表面處逐漸形成一對不對稱渦，先發生的左側渦方向是逆時針，後發生的右側渦方向是順時針，因為渦從圓柱左右兩側交互間隔地發生，並且先後發生的渦，其渦旋強度和尺寸也不同，故稱為強不對稱渦街型。

2 結果分析

圖4、圖5、圖6分別表示未成長對稱渦型、弱不對稱渦街型、強不對稱渦街型之成長過程示意圖。（虛線表示未成長的渦）

圖7表示進行波之 $(K.C.)_m$ 數、 Rem 數和圓柱後渦流的渦型之關係。由圖可知，當 $(K.C.)_m$ 數一定時，即使 Rem 數不同，其渦型不會改變，但對同一 Rem 數，若其 $(K.C.)_m$ 數不同，則其渦型亦隨之改變，即渦型主要隨 $(K.C.)_m$ 數而定， Rem 數之影響較小。

弱不對稱渦街型和強不對稱渦街型在外表上與圓柱受到定常流作用時所產生之卡門渦街（Karman Vortex Street）非常相似，但是在本實驗中發現一重要之不同點，即圓柱後方之渦對，其左側渦為順時針，右側渦為逆時針，而沿圓柱表面的渦對，其左側渦為逆時針，右側渦為順時針；而在卡門渦街裡，圓柱左側的渦均為逆時針，反之，圓柱右側的渦均為順時針。這個不同點可能是因為波動時水粒子作往返的週期運動所致。

4.3 雙根圓柱後渦流之實驗結果與分析

1 實驗結果

當圓柱為兩根時，根據實驗結果顯示，無法如單一圓柱時可將渦型分類，故只對不同間距時說明其流況，並綜合分析其結果，以期說明圓柱間之相互作用。為了說明方便起見，將左、右圓柱的前方、後方、內側、外側等，標示於照片5。

當圓柱間距為二倍直徑時，如照片6所示 $T = 3.4 \text{ sec.}$ ， $H = 2.3 \text{ cm}$ ， $(K.C.)_m = 6.5$ ， $Rem = 1510$ 之情況時，因圓柱之間的干擾現象明顯，故在兩根圓柱後方的內側先發生一對尺寸較大的對稱渦或不對稱渦，該渦對的左側渦方向是順時針，右側渦方向是逆時針；在這個渦對向後方移動一段距離之後，才在圓柱外側沿兩圓柱的表面逐漸形成尺寸較小的渦。

當圓柱間距為三倍直徑時，如照片7所示 $T = 4.0 \text{ sec.}$ ， $H = 2.0 \text{ cm}$ ， $(K.C.)_m = 6.6$ ， $Rem = 1310$ 之情況等，圓柱之間的干擾現象仍很明顯，但是，所有的渦型均有一個共同點，即兩根圓柱背後之內側所形成的渦，其尺寸均比外側所形成的渦大。

當圓柱間距增加至五倍直徑時，例如照片8所示 $T = 8.0 \text{ sec.}$ ， $H = 0.8 \text{ cm}$ ， $(K.C.)_m = 5.3$ ， $Rem = 520$ 之情況時（只拍攝右圓柱附近之流況），兩圓柱之間的氬氣泡列已不再混亂，表示圓柱間的干擾現象已不明顯，故若只對右圓柱或左圓柱而言，其後渦流之渦型與單一圓柱時相類似。

2 結果分析

圖8、圖9、圖10分別是表示雙根圓柱間距為二倍、三倍、五倍直徑時，後渦流之成長過程示意圖。

由以上結果顯示，當圓柱間距為二倍或三倍直徑時，因為彼此間的干擾現象明顯，使得圓柱附近的流體速度分佈變動很大，導致 $(K.C.)_m$ 數也發生很大的變化，故渦的尺寸和渦型均與單一圓柱有很大的差異，這可能會引起更大的橫向力。但是，當圓柱間距增至五倍直徑時，因彼此的干擾現象已不明顯，故其後流之渦型與單一圓柱相類似。

五、圓柱表面波壓分佈之實驗條件與結果分析

5.1 實驗條件

表 2 列出圓柱表面波壓分佈之實驗條件，波長與圓柱直徑的比值 L/D 在 40 ~ 145 間。

5.2 單根圓柱波壓分佈實驗之結果分析

1 實驗結果

圖 11 ~ 圖 14 是單根圓柱受波浪作用時，相位分別等於 0.0, 0.25, 0.5, 0.75 時的波壓分佈圖，橫座標是圓柱的角度值 θ ，縱座標是總壓力 P (動水壓 + 靜水壓) 之無因次值 $\frac{P}{\rho g H}$ (其中 ρ 是水之密度， g 是重力加速度)。

2 結果分析

由實驗結果顯示，當波峯 ($t/T = 0.25$) 或波谷 ($t/T = 0.75$) 到達時，圓柱前方 ($\theta = 360^\circ$) 和後方 ($\theta = 180^\circ$) 附近之波壓力較大，而側面之波壓力有減小的趨勢。波峯到達時，最大波壓出現在 $330^\circ \sim 360^\circ$ 間和 $180^\circ \sim 200^\circ$ 間，最小波壓出現在 $220^\circ \sim 290^\circ$ 間；波谷到達時，最大波壓出現在 $310^\circ \sim 360^\circ$ 間和 $180^\circ \sim 200^\circ$ 間，最小波壓出現在 $200^\circ \sim 280^\circ$ 間。另外，當波形經過靜水面時 (即 $t/T = 0.0$ 和 $t/T = 0.5$) 兩個相位之波壓值並不相等，而且隨着角度的不同，大小也會改變。

上述當波峯或波谷到達時，圓柱側面會發生顯著的波壓力減小現象，主要是因為速度水頭的增大所致，這個現象與相位分別等於 0.0, 0.5 時波壓值的差異，可能和渦的形成、移動、逆轉有很大的關係。

圖 15 ~ 圖 20 分別表示 θ 等於 180° 、 270° 、 360° 時的無因次波壓值與 Rem 數、波形尖銳度 $\delta (= \frac{H}{L})$ 之關係。經由最小平方方法分析，求得波峯相位 (虛線) 和波谷相位 (實線) 之無因次波壓值隨着 Rem 數的增加，均呈線型的遞減，其關係式如下：

$$\frac{P}{\rho g H} = C_0 + C_1 Rem$$

如圖 15 ~ 圖 17；另外，隨着 δ 的增加，均呈拋物線型的遞減，其關係式如下：

$$\frac{P}{\rho g H} = C_0' + C_1' \delta + C_2' \delta^2 \dots \dots \dots (4)$$

如圖 18 ~ 圖 20。

圖 21 是 θ 等於 360° 時，波峯相位之無因次波壓值與 $(K.C.)_m$ 數之關係，由圖顯示，兩者之間的關係很難找出。

5.3 雙根圓柱波壓分佈實驗之結果分析

1 實驗結果

圖 22 ~ 圖 25 是左圓柱的波壓分佈，從 $10^\circ \sim 360^\circ$ ，每 10° 測定一次，圓柱間距是三倍直徑。

2 結果分析

經由實驗結果顯示，當雙根圓柱間距為三倍直徑時，因受到圓柱間的干擾現象影響，故圓柱內側 ($180^\circ \sim 360^\circ$) 的波壓分佈與單一圓柱不同，並且圓柱內側和外側 ($0^\circ \sim 180^\circ$) 兩者之波壓分佈呈現不對稱現象。當波峯 ($t/T = 0.25$) 或波谷 ($t/T = 0.75$) 到達時，圓柱內側之波壓減小程度比圓柱外側明顯，這可能是因為圓柱內側的干擾比外側明顯，使得內側的水粒子速度水頭比外側大，故壓力水頭較小。這種干擾現象在 4.3 節曾敘述過，當圓柱距離三倍直徑時，圓柱的背面會形成不對稱渦對，並且內側渦的尺寸均比外側渦大。

當波壓分佈受干擾影響而造成不對稱現象時，可能會引起更顯著的橫向力。

六、結 論

本文以實驗方法，針對圓柱受波動作用引起後渦流之特性和影響進行研究，在本文之實驗範圍內所得之結論分述於下：

- 1 單一圓柱後渦流之渦型，主要隨 $(K.C.)_m$ 數而定， Rem 數之影響較小，當 $(K.C.)_m$ 數在 3.0 ~ 3.8 間，形成未成長對稱渦型，當 $(K.C.)_m$ 數在 4.1 ~ 5.3 和 6.0 ~ 6.6 間，分別形成與定常流中的卡門渦街不完全相同之弱不對稱渦街型和強不對稱渦街型。
- 2 當 L/D 值在 181 ~ 592 間，兩圓柱間距為二倍或三倍直徑時，因圓柱之間的干擾現象明顯，使得渦型與單一圓柱時相異；當圓柱距離增至五倍直徑時，干擾現象已不明顯，故渦型與單一圓柱時相類似。
- 3 單一圓柱受波動作用時，當波峯或波谷到達時，圓柱的前方和後方波壓力較大，而側面之波壓力有減小的趨勢；並且無因次波壓值 $\frac{P}{\rho g H}$ 隨着 Rem 數和波形尖銳度 δ 的增加，分別呈線型和拋物線型的遞減。
- 4 當 L/D 值在 40 ~ 145 間，雙根圓柱間距為三倍直徑時，因彼此的干擾現象，使得圓柱左右兩側之波壓分佈變的很不對稱，這可能會引起更顯著的橫向力。

參 考 文 獻

- 1 Keulegan, G.H., and L.H. Carpenter, "Forces on Cylinders and Plates in an Oscillating Fluid," Journal of Research of the National Bureau of Standards, Vol.60, No.5, pp.423-440, May, 1958.
- 2 Bidde, D.D., "Laboratory Study of Lift Forces on Circular Piles," Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, ASCE, Vol.97, No. WW4, Proc. Paper 8495, pp.595-614, Nov., 1971.
- 3 岩垣雄一・石田 啓：小口径圓柱まわりの波壓分布と後流渦について，第22回海岸工学講演會論文集，pp. 531～537，1975。
- 4 Momchilo M. Zdravkovich and John E. Namork, "Formation and Reversal of Vortices Around Circular Cylinders Subjected to Water Waves," Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, ASCE, Vol.103, No. WW3, pp.378-383, Aug., 1977.
- 5 石田 啓・桑山勝則：圓柱および角柱背後の後流渦に関する實驗的研究，第26回海岸工学講演會論文集，pp. 421～424，1979。
- 6 周宗仁，張家棟：“圓柱受波動影響引起後流之研究”，國立臺灣海洋學院河海工程學系河海研究第16號，1983年6月。

Laboratory Study On Wave-induced Vortex Flows
Behind The Circular Cylinder

by

Dr. C.R. Chou* C.D. Chang**

The objective of this research is to investigate mainly through laboratory experiments the characteristics of vortex behind the circular cylinder under wave actions. We at first examine thoroughly the relationship between vortex patterns and Keulegan-Carpenter number and Reynolds number for single circular cylinder cases. The effects of interference between two circular cylinders on vortex flows are then investigated. Furthermore, based on measurements of wave pressure, some discussion are made on the phenomenon of the local decrease of wave pressure around the circular cylinder resulting from vortex motion.

*Professor, Graduate Institute of Harbour and Ocean Engineering,
National Taiwan College of Marine Science and Technology, Keelung
, Taiwan, R.O.C.

**Previously graduated student, Graduate Institute of Harbour and
Ocean Engineering, National Taiwan College of Marine Science and
Technology, Keelung, Taiwan, R.O.C.

T (sec.)	$\frac{\Omega^2 h}{g}$	H (cm.)	(K. C.) _m	Rem $\times 10^3$	$\frac{H}{l} \times 10^2$
1	2.0	1	9.53	8.06	7.1
		2	7.37	6.23	5.5
		3	5.39	4.56	4.0
2	1.75	1	9.46	8.40	6.9
		2	7.33	6.51	5.3
		3	5.08	4.51	3.7
3	1.49	1	9.55	9.02	6.8
		2	6.77	6.39	4.8
		3	4.48	4.23	3.2
4	1.24	1	8.23	8.37	5.8
		2	6.30	6.40	4.4
		3	4.00	4.07	2.8
5	1.0	1	6.13	6.82	4.2
		2	4.63	5.15	3.2
		3	3.55	3.95	2.5
6	0.75	1	8.00	10.13	5.4
		2	5.48	6.94	3.7
		3	3.75	4.75	2.5
7	0.50	1	6.58	10.04	4.4
		2	5.02	7.66	3.4
		3	3.97	6.06	2.7
8	0.40	1	5.75	9.70	3.8
		2	4.22	7.12	2.8
		3	3.35	5.65	2.2
9	0.30	1	4.13	8.03	2.7
		2	3.11	6.05	2.1
		3	2.00	3.89	1.3

表2：圓柱表面波壓分佈之實驗條件

0	T(sec.)		H(cm)		(K. C.) _m	Rem
	9.0	1	0.8	6.0		
1	8.0	1	0.8	5.3	520	
		2	0.5	3.3		
2	7.0	1	0.91	5.3	590	
		2	0.66	3.8		
3	6.0	1	1.21	6.0	790	
		2	0.9	4.5		
4	5.0	1	1.5	6.2	980	
		2	1.0	4.1		
5	4.0	1	2.0	6.6	1310	
		2	1.45	4.8		
6	3.4	1	2.3	6.5	1510	
		2	1.55	4.4		
7	2.84	1	1.75	4.1	1150	
		2	1.25	3.0		

表1：圓柱後渦流之實驗條件

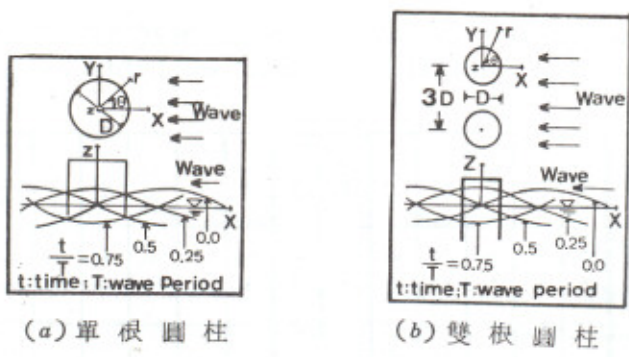


圖 1: 座標系示意圖

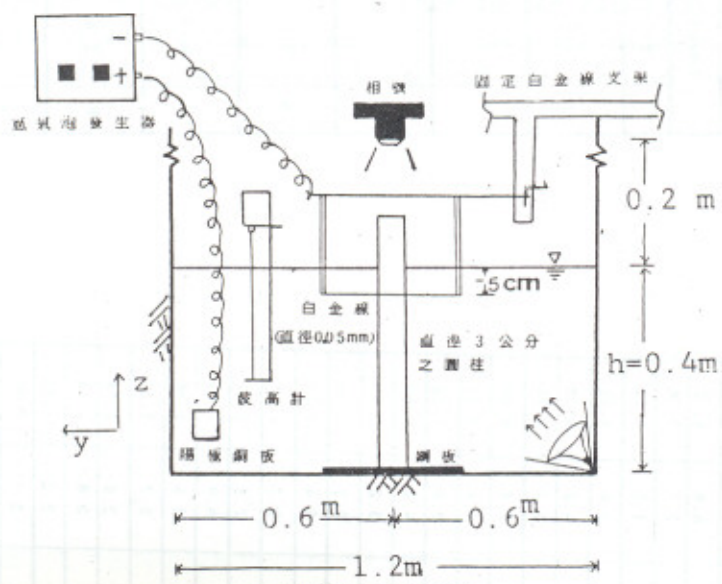


圖 2 圓柱後渦流之水槽配置断面示意圖

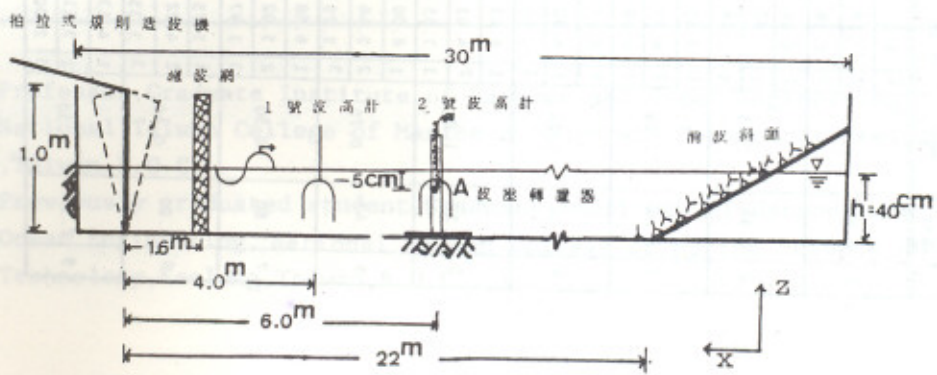


圖 3 圓柱表面波環分佈之水槽配置側視示意圖

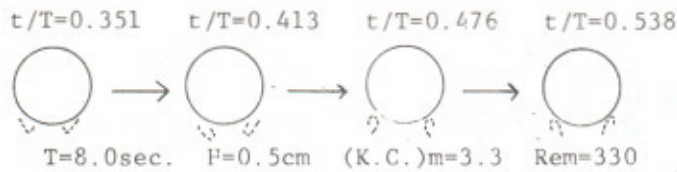


圖4：未成長對稱渦型之成長過程示意圖

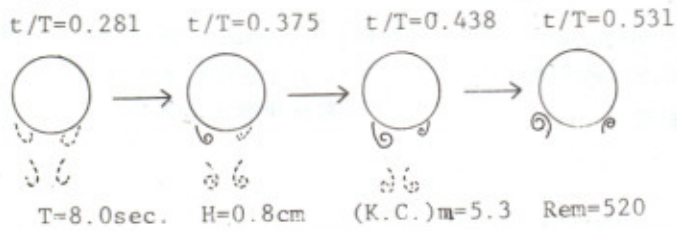


圖5：弱不對稱渦街型之成長過程示意圖

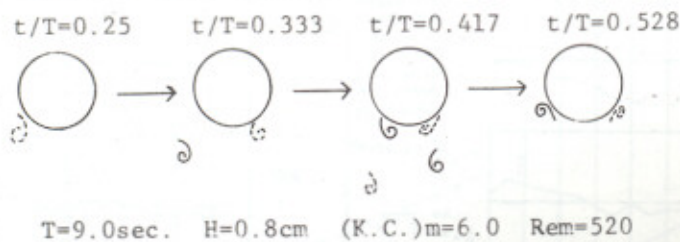


圖6：強不對稱渦街型之成長過程示意圖

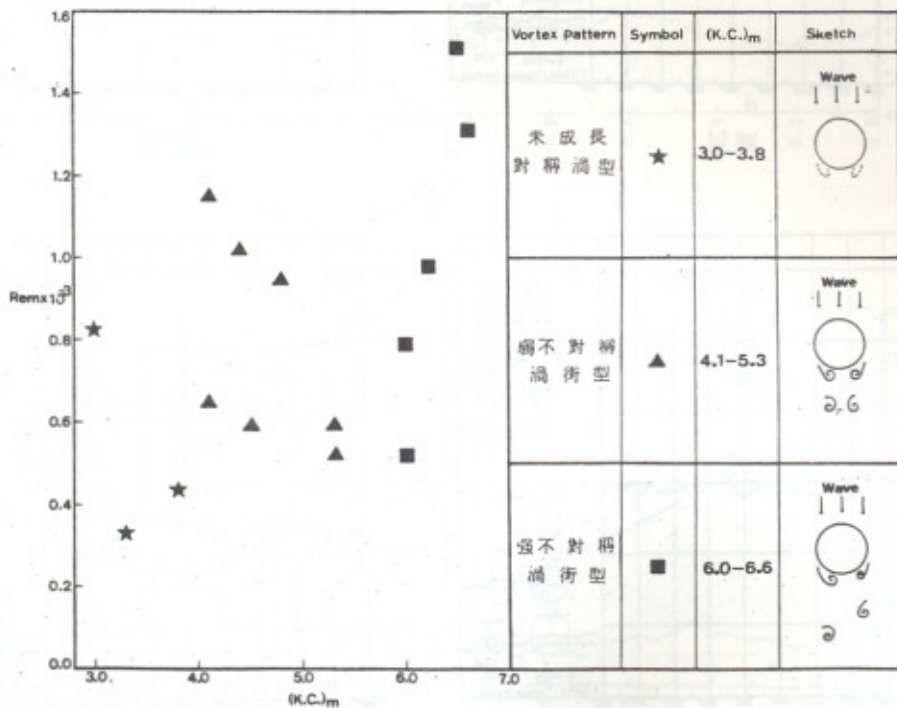


圖7：(K.C.)_m數、Rem數和圓柱後渦流的渦型之關係

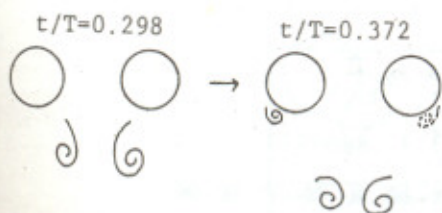


圖8 $T=3.4\text{sec}$, $H=2.3\text{cm}$
 $(K.C.)_m=6.5$ $Rem=1510$
 圓柱距離二倍直徑



圖9 $T=4.0\text{sec}$, $H=2.0\text{cm}$
 $(K.C.)_m=6.6$ $Rem=1310$
 圓柱距離三倍直徑



圖10 $T=8.0\text{sec}$, $H=0.8\text{cm}$
 $(K.C.)_m=5.3$ $Rem=520$
 圓柱距離五倍直徑

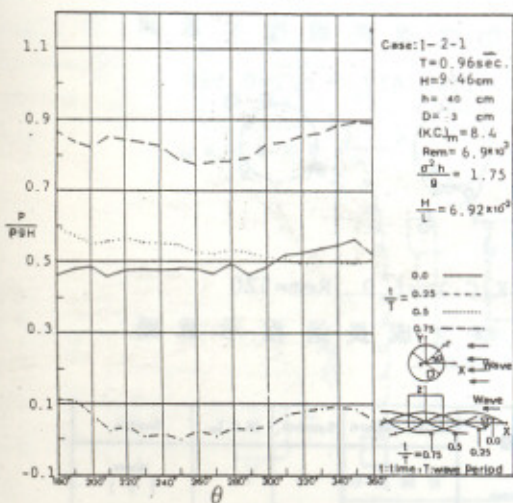


圖11

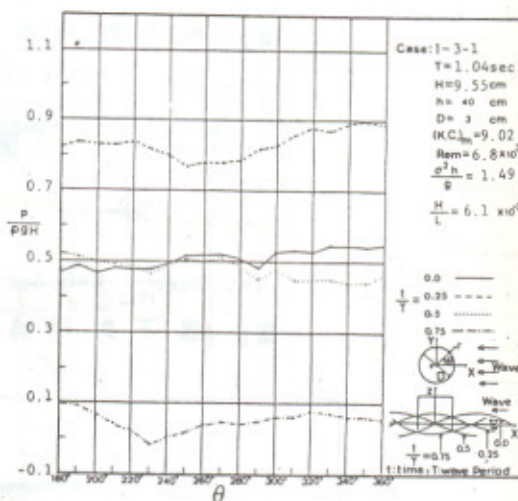


圖12

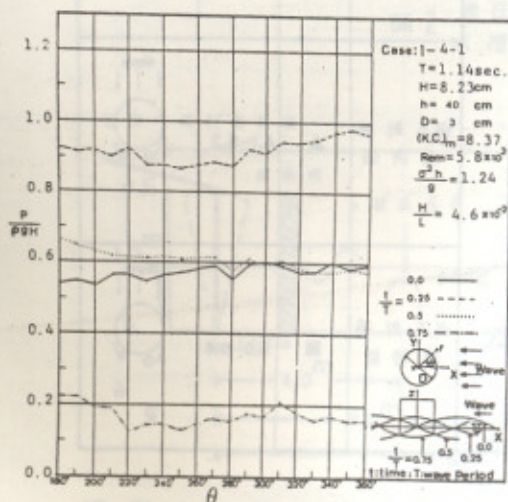


圖13

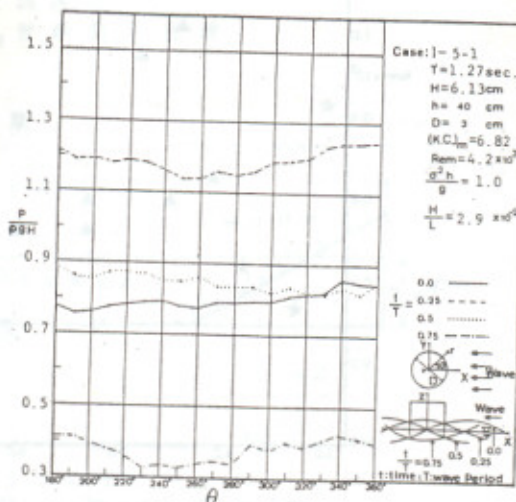


圖14

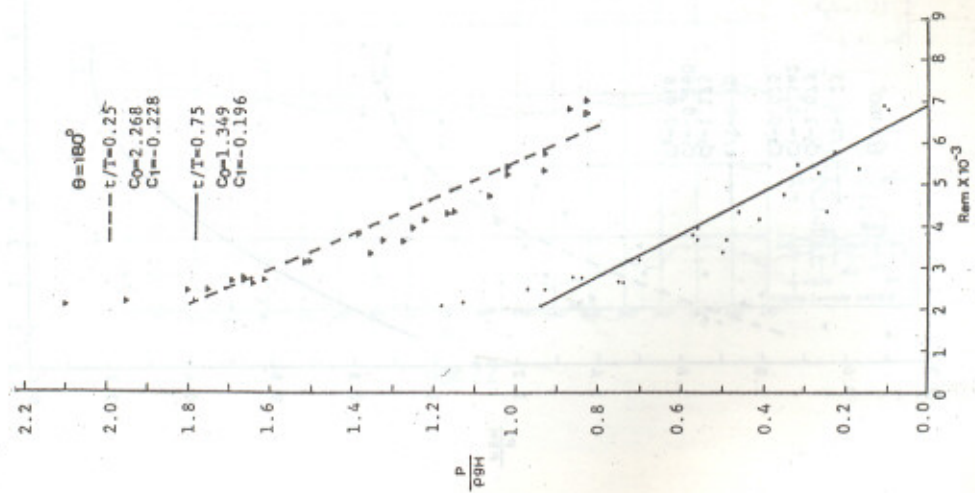


圖 15

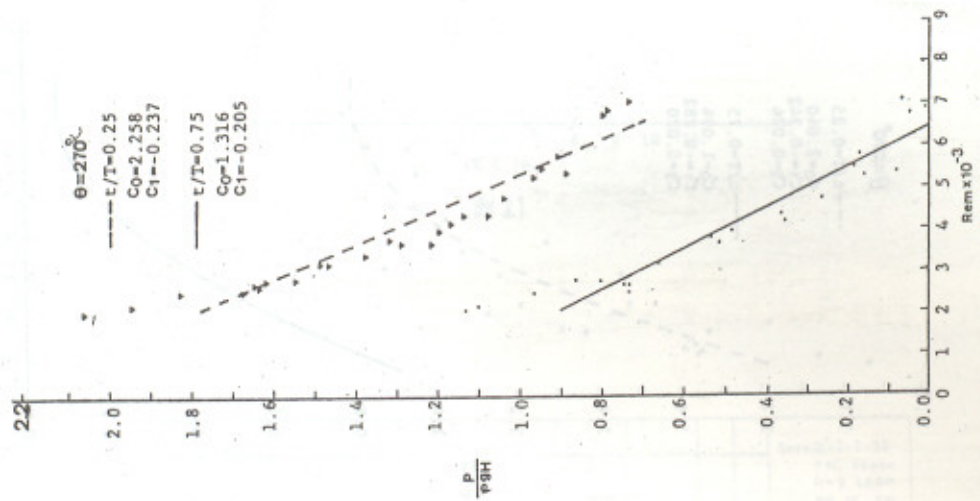


圖 16

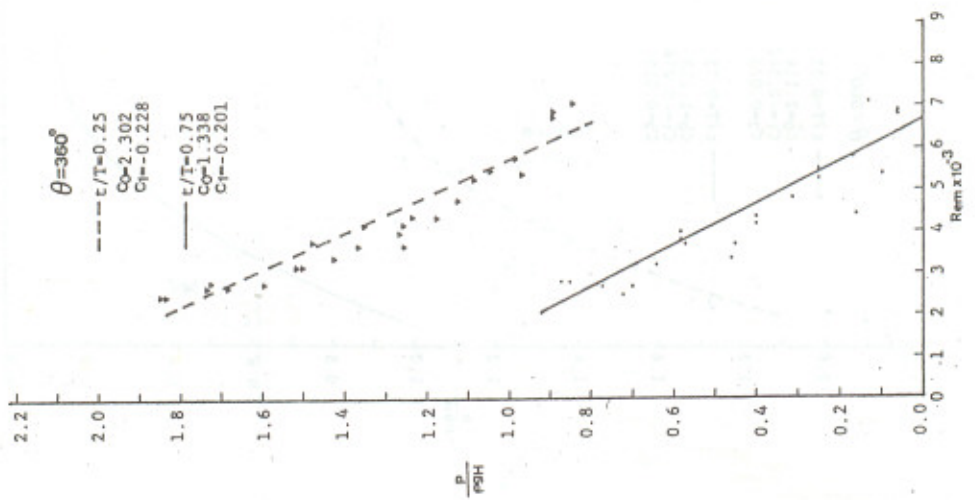


圖 17

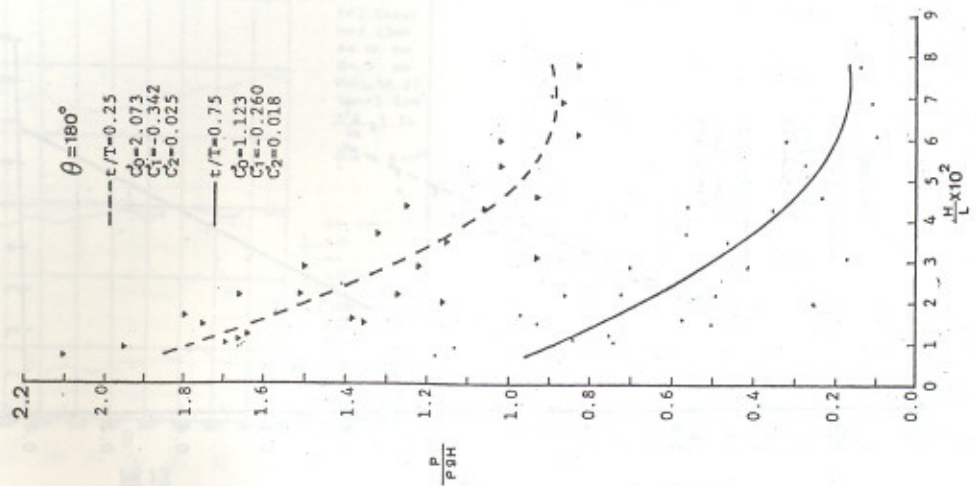


圖 18

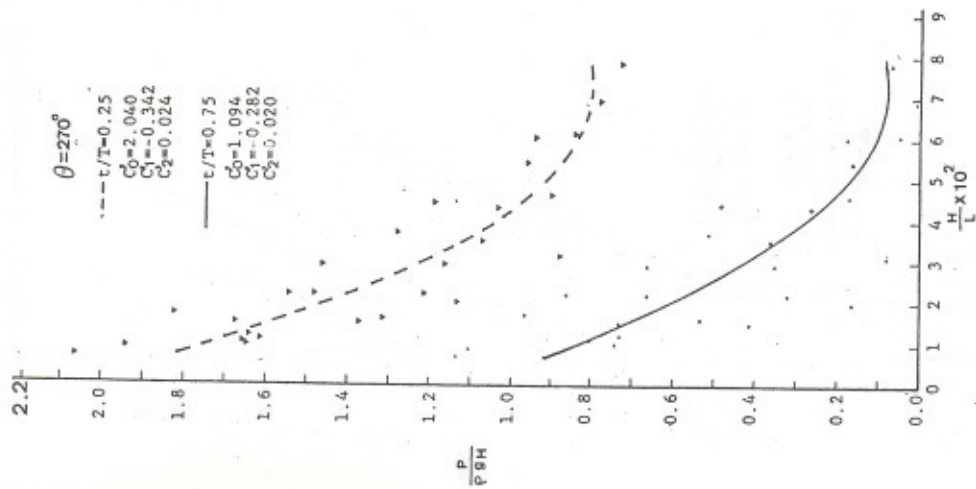


圖 19

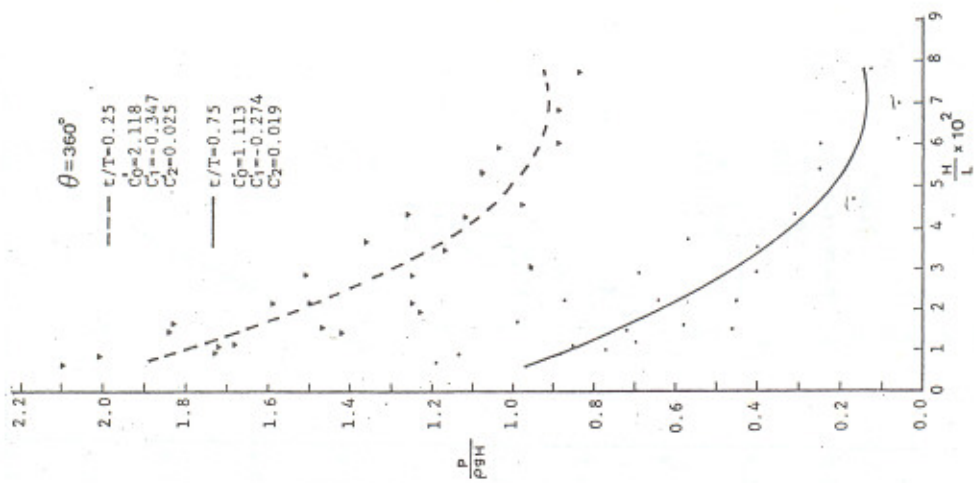


圖 20

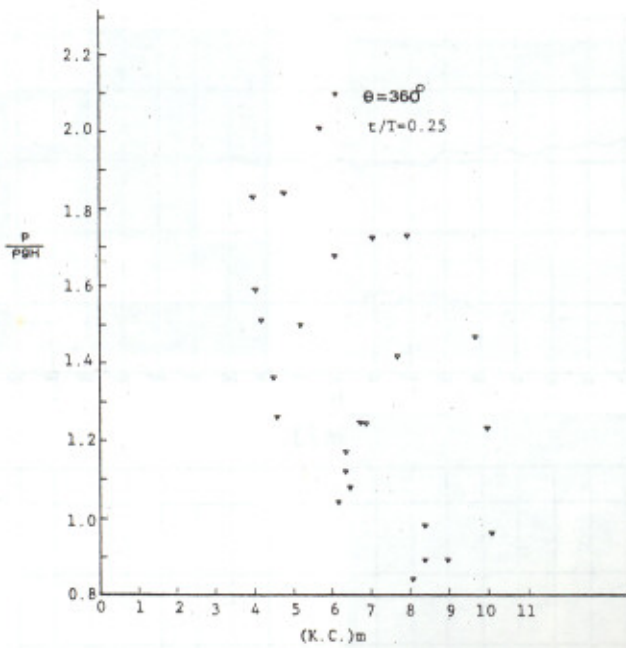


圖 21

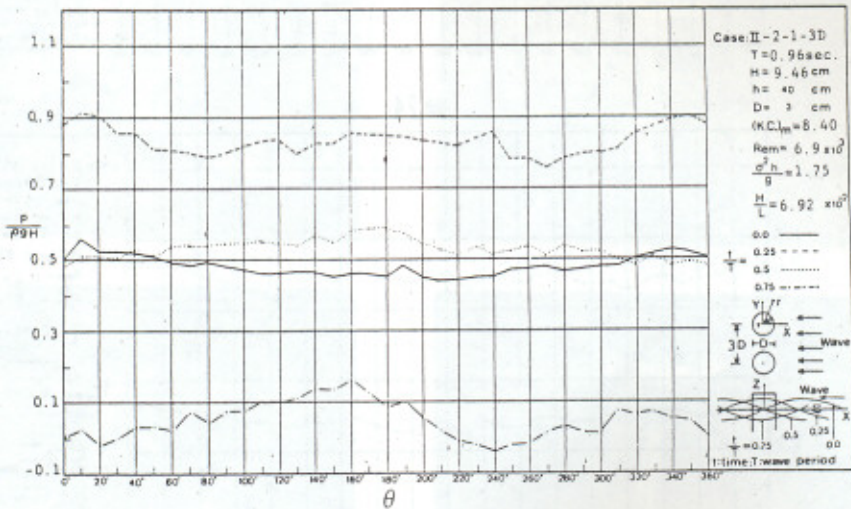


圖 22

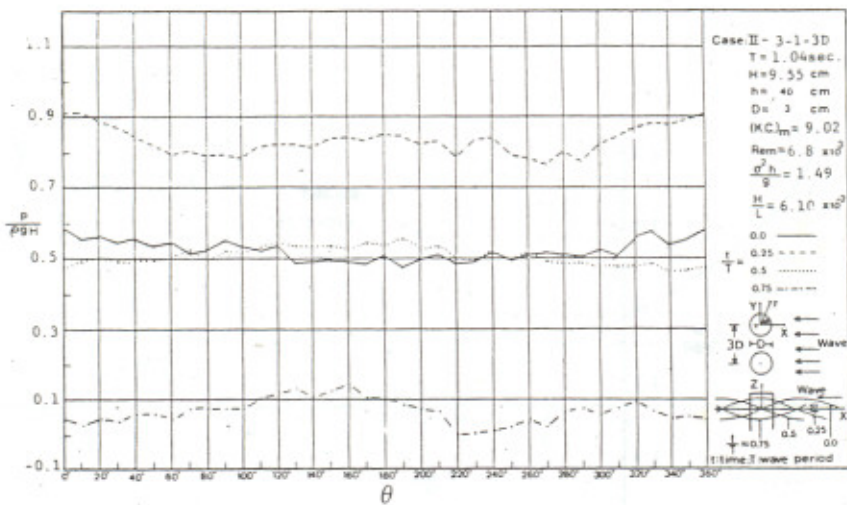


圖 23

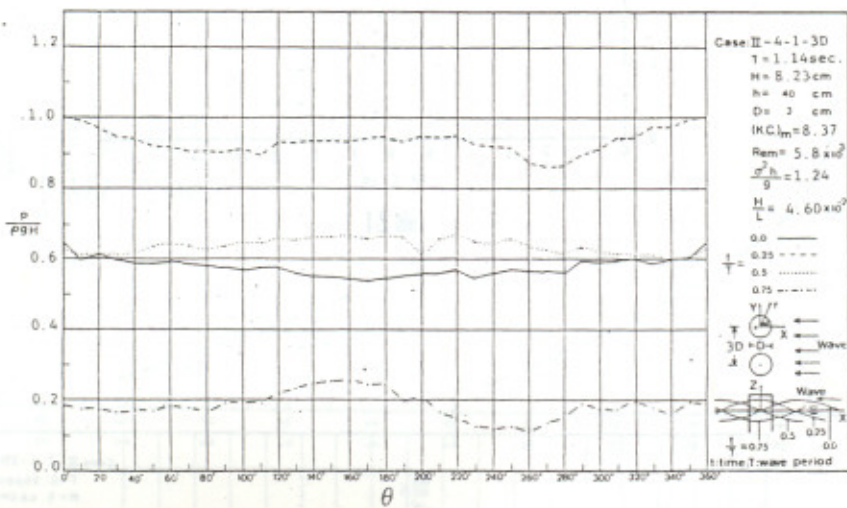


圖 24

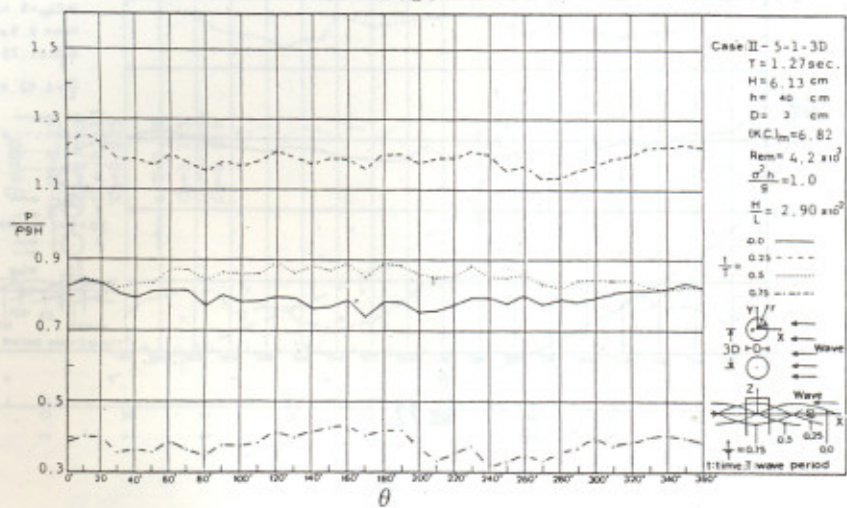
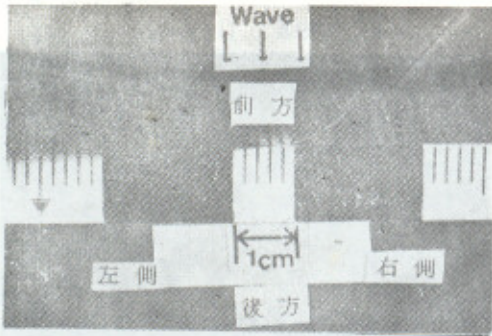


圖 25

照片 4

$T=8.0\text{sec}$ $H=0.8\text{cm}$



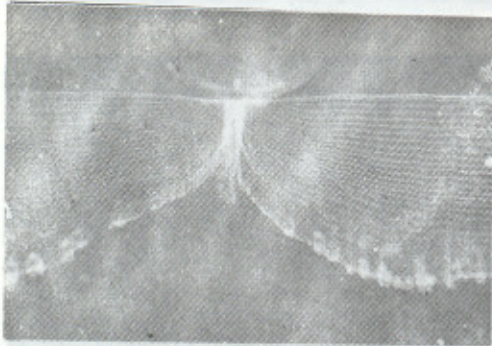
照片 1

單根圓柱位置示意图

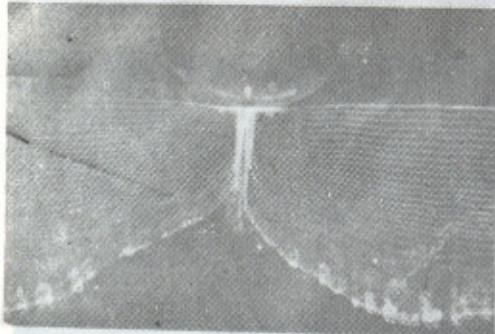
照片 2

$T=8.0\text{sec}$ $H=0.5\text{cm}$

(K.C.) $m=3.3$ $Rem=330$



2-1 $t/T=0.32$

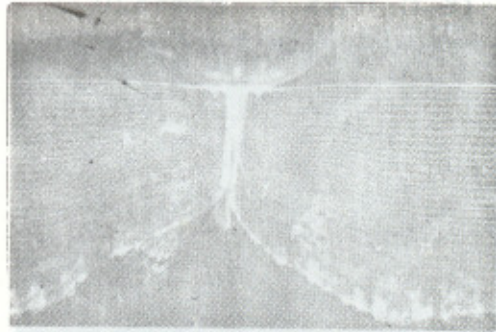


2-2 $t/T=0.351$

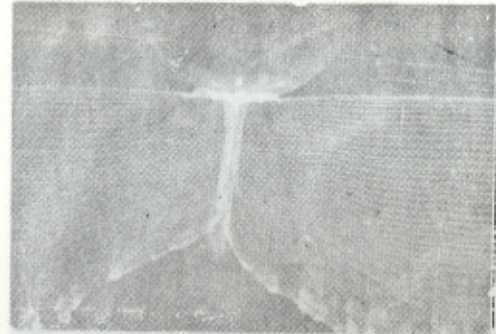
$T=8.0\text{sec}$ $H=0.8\text{cm}$

照片 3

$T=8.0\text{sec}$ $H=0.8\text{cm}$



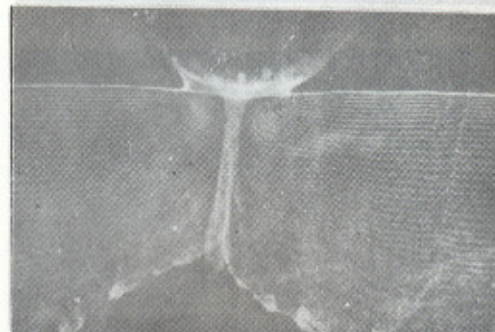
2-3 $t/T=0.382$



2-4 $t/T=0.413$



2-5 $t/T=0.445$



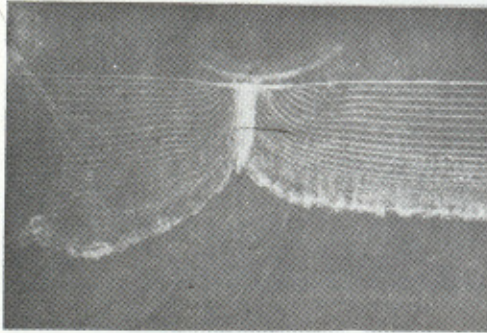
2-6 $t/T=0.476$

$T=8.0\text{sec}$ $H=0.8\text{cm}$

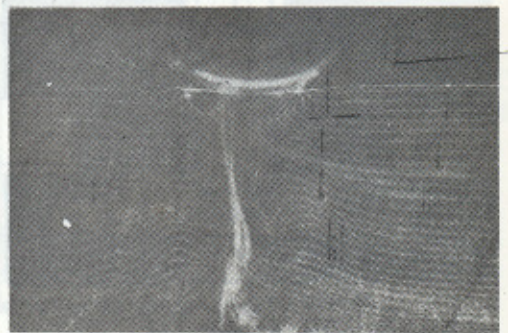
照片 3

T=8.0sec. H=0.8cm

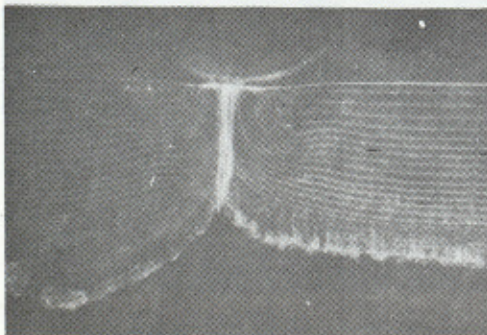
(K.C.)m=5.3 Rem=520



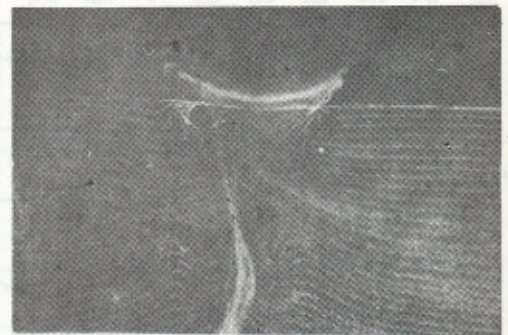
3-1 $t/T=0.219$



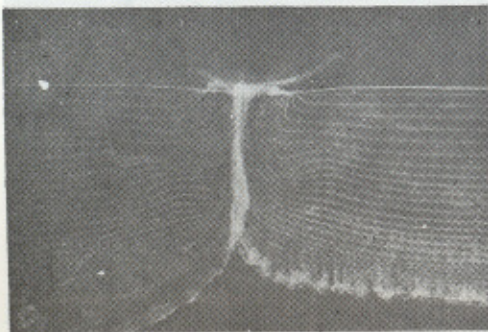
3-5 $t/T=0.344$



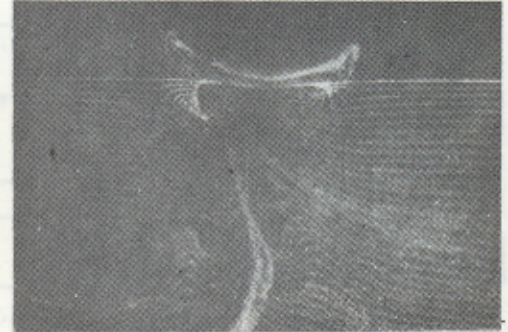
3-2 $t/T=0.250$



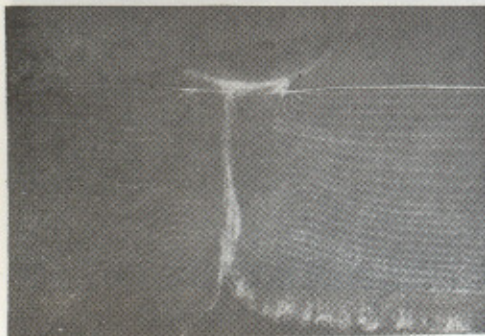
3-6 $t/T=0.375$



3-3 $t/T=0.281$



3-7 $t/T=0.406$



3-4 $t/T=0.313$

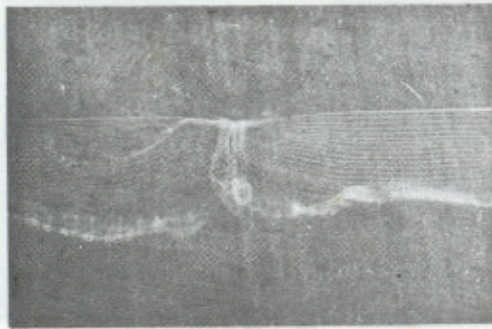


3-8 $t/T=0.438$

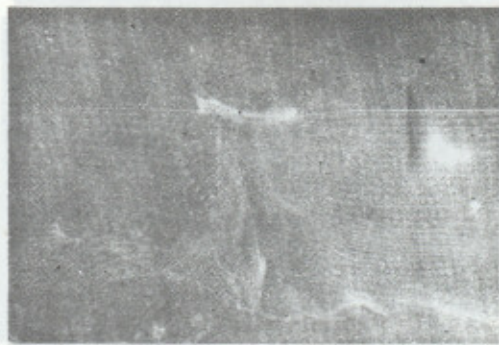
照片 4

T=9.0sec. H=0.8cm

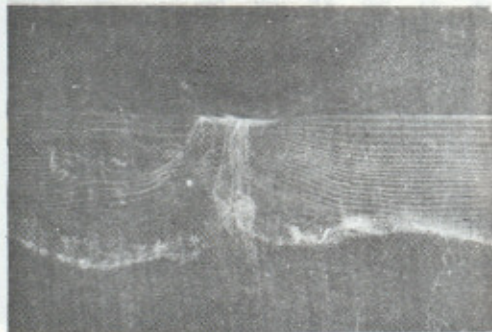
(K.C.)m=6.0 Rem=520



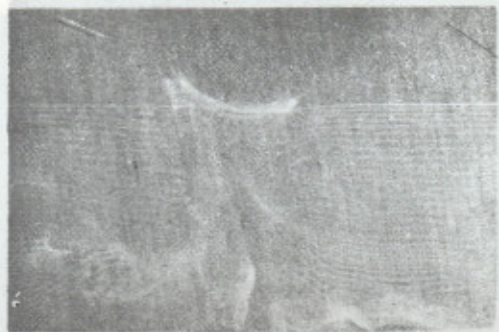
4-1 $t/T=0.250$



4-5 $t/T=0.361$



4-2 $t/T=0.278$



4-6 $t/T=0.389$



4-3 $t/T=0.306$



4-7 $t/T=0.417$



4-4 $t/T=0.333$



4-8 $t/T=0.444$

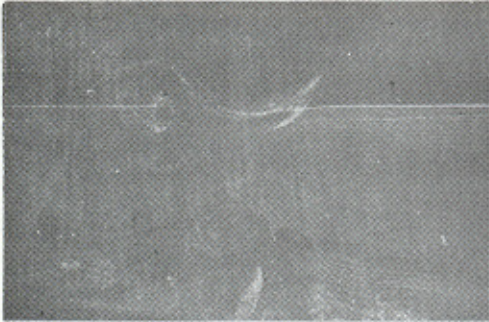
照片 3

$T=8.0\text{sec.}$ $H=0.8\text{cm}$

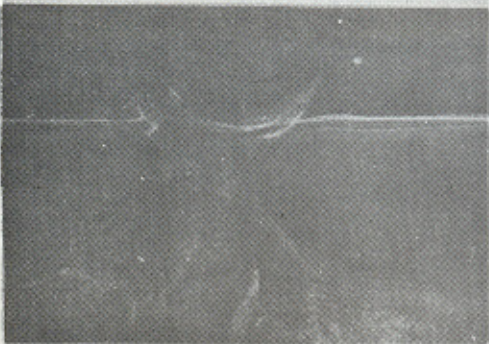
照片 4 (續)



4-9 $t/T=0.472$



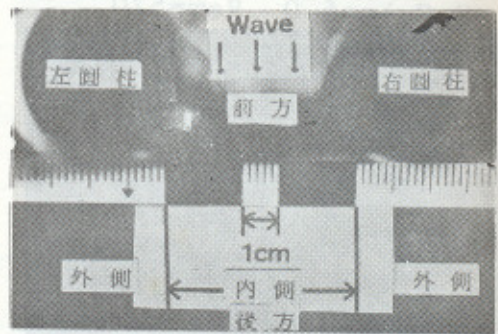
4-10 $t/T=0.5$



4-11 $t/T=0.528$



4-12 $t/T=0.556$



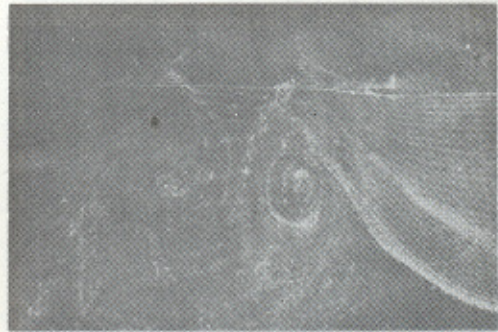
照片 5

雙根圓柱位置示意圖

照片 6

$T=3.4\text{sec.}$ $H=2.3\text{cm}$

(K.C.) $m=6.5$ $Rem=1510$



6-1 $t/T=0.298$



6-2 $t/T=0.372$

照片 7

$T=4.0\text{sec.}$ $H=2.0\text{cm}$

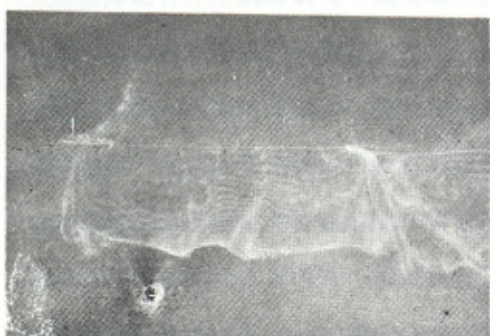
$(K.C.)m=6.6$ $Rem=1310$



7-1 $t/T=0.240$



7-5 $t/T=0.490$



7-2 $t/T=0.3034$



7-6 $t/T=0.553$



7-3 $t/T=0.365$

前 言

照片 8

$T=8.0\text{sec.}$ $H=0.8\text{cm}$

$(K.C.)m=5.3$ $Rem=520$



7-4 $t/T=0.428$



$t/T=0.38$