

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

子計畫五：潛體含帆罩之流場量測解析(2/3)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC92-2611-E-002-012-

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系暨研究所

計畫主持人：丁肇隆

共同主持人：蔡進發

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 5 月 26 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告
 期中進度報告

潛艦關鍵技術之基礎研究—子計畫五

“潛艦含帆罩之流場量測分析(2/3)”

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 92-2611-E-002-012-

執行期間：92年 08月 01日至 93年 07月 31日

計畫主持人：丁肇隆 副教授

共同主持人：蔡進發 教授

計畫參與人員：郭庭瑋

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：國立台灣大學工程科學及海洋工程學系

中華民國 93年 05月 26日

摘要

本實驗之目的在於應用粒子影像速度儀 (Particle Imaging Velocimetry, P.I.V.) 系統, 拍攝探討在水洞中之均勻流分別通過圓柱模型時, 模型與平板交接處所產生之界面渦旋 (Juncture Vortex), 並應用相關運算 (Cross-correlation) 原理之演算法及類神經網路 (neural network) 辨識運動質點之方法分析實驗拍攝影像, 藉此得到在界面渦旋處之瞬時速度向量場及渦度場, 並藉由本實驗之研究探討, 使能更瞭解圓柱模型所產生之界面處流場特性及物理現象。

一. 緒論

當均勻流通過一置有物體之流場中, 於上游處將產生一層流或紊流邊界層, 一複雜垂直流場產生於交接之區域。由於縱向及垂直向壓力梯度的相加成效應, 且分別還有物體阻礙及在邊界層處動量不足的影響, 最後分離且形成一或更多的渦旋, 此渦旋會逐漸分佈於物體周圍及發展延伸至下游處, 而此種分離且捲起形成渦旋的物理現象就是著名的馬蹄型渦流系統。而這些鏈帶渦旋的存在會影響局部剪應力、熱傳輸、拖曳、噪音及更改機翼的抬升力等特性, 這些現象常見於真實環境, 例如在船及航空器的設計、渦輪機、潛艇的帆罩、大樓及橋墩等處。甚至也會因為簡單的幾何配置而產生非常複雜的三維渦流。雖然界面渦旋系統已經有幾個理論及概念上的分析研究, 但界面渦旋系統仍然是一般最常被用於做數值模擬計算、實驗量測及影像可視化技術應用的對象。而實驗上針對當均勻流通過圓柱時, 圓柱後方之 vortex street 中交替之渦流散逸 (vortex shedding) 導致在橫斷面流向的方向上, 有一很大的變動壓力產生, 進而引起結構物震動、噪音產生、或共振現象的發生等, 在某些情況下, 更可能引起結構物的破壞, 導致嚴重的損失, 而此種情況相當類似於河道中橋墩底床周圍受到渦流場之掏刷 (scouring), 造成橋墩基礎裸露, 引起基礎結構的破壞及不穩定, 因此此類實驗在實際工程應用上有其實用參考價值, 所以研究其流場的穩定性分析就顯得格外重要。當均勻流通過物體模型時, 在圓柱前方形成之馬蹄型渦旋 (horseshoe vortex) 對於物體模型本身也會產生相當的影響, 其複雜性的流況, 在實驗量測上極具困難性, 因此本實驗藉由應用粒子速度儀系統, 觀測物體模型前與平板交接處所產生之流場變化, 藉此對界面渦旋 (juncture vortex) 進行相關量測之研究。

二. 文獻回顧

界面渦旋問題常見於幾個工程實例上, 如接近翼形體 (wind-body) 接合點 (juncture) 處之旋轉流結構 (Visbal, 1991)、接近超高大樓的基部受到風場影響與移動中潛艇的帆罩受水流之影響等。因此本文針對過去文獻研究此類流場之相關研究探討、實驗量測技術及方法作一整理及回顧。

Roper (1967) 用氫泡法 (hydrogen bubble method) 研究在雷諾數 (Re) 範圍在 2740~3180 時圓柱附近的流況時, 並觀察到馬蹄型渦旋的週期變化之特性。Baker, C.J. (1979) 在風洞中使用煙線可視化 (smoke flow visualization) 之技巧, 量測馬蹄型渦旋之生成過程, 當煙絲線進入渦旋時, 藉由拍攝支相片與相片不同之煙線位移位置的變動量, 除上時間間距, 進而求出速度, 並且以此法對層流時馬蹄型渦旋之速度分佈做了詳細的研究與分類, 根據實驗中所觀察到穩定馬蹄型渦旋 (steady horseshoe vortex) 之流線的變化型式, 將之分類為: 二渦系統、四渦系統與六渦系統等三種, 其渦數隨著雷諾數的增加而增加。並與 Schwind, R. (1962) 由實驗所分類出之五種歷程 (regime) 做比較。

Dargahi (1989) 利用氣泡流可視化 (Bubble flow visualization) 方法, 在雷諾數從 20000 至 39000 範圍內, 量測分析出在圓柱前主要之流況, 渦流系統在上游分離區至少有五個渦所組成, 其以半週期發散且其影像上觀察形狀相似馬蹄型, 發現其為近似半週期性變化之馬蹄型渦旋。而其渦旋數目由雷諾數決定, 且渦旋系統不受圓柱後方渦旋散逸 (vortex shedding) 所影響。在其研究中強調圓柱前的邊界層必須克服一個由於圓柱而產生之強大壓力梯度, 此壓力梯度導致入流之分離, 在分離區之渦旋系統是以馬蹄型式延伸發展。並以定床實驗模擬, 目的在找出好的流體可視化方式以量測圓柱附近的渦旋系統動力情況與馬蹄型渦旋和尾跡渦旋 (wake vortices) 的交互作用情況。

C.V. Seal, C.R. Smith, and D. Rockwell (1997) 利用 P.I.V 系統, 對水槽內鈍體與平板界面處之流況做渦度場研究, 並用氫泡可視化 (Hydrogen bubble visualization) 方法觀察出非穩態之層流渦旋系統。對於渦旋系統形成過程, 分類出主要渦旋 (primary vortex)、接觸到圓柱與平板間交接處所產生之角落渦旋 (corner vortex) 與過渡時期之轉變渦旋 (translating vortex)。

W.H. Graf and B. Yulistiyanto (1998) 在開放式水道中, 利用聲學都卜勒速度儀 (Acoustic Doppler Velocity Profiler) 量測, 在圓柱前方對稱面與水流流動方向呈不同夾角 α 的情況之下, 入流在三個分量之瞬間速度、速度場及渦度場。速度向量部分, 在 $\alpha=0^\circ$ 時, 入流方向之分量隨著靠近圓柱而漸減, 但分佈更為均勻, 且在靠近底部之處有逆流 (flow reversal) 狀況產生, 此時水流流入一由障礙物 (圓柱) 所產生的逆壓力梯度區, 使平板底層入

流在分離點開始分離，且沿著剪力層向上傳遞，在此剪力層之下，圓柱底部產生一順時針渦漩，另外，由圓柱上方向下方流動之流體，亦挹注形成順時針渦漩，此即為馬蹄型渦漩。渦漩場部分，則使用中央有限差分法（centre finite-difference scheme），由量測出之徑向和垂直向速度算出渦度，進而得到渦度場。

F. Ballio, C. Bettoni and S. Franzetti (1998) 以數值分析方式對層流及紊流馬蹄型渦流的時間平均特性進行研究。分析對稱物體置於層流及紊流前之界面渦漩的運動及動力的時間平均特性，其中於紊流時，在對稱面上的渦流系統規模僅相依於物體的幾何；於層流系統時，則與雷諾數及入流邊界層厚度有其關聯性。文中並針對數種物體模型探究其置於層流及紊流流場中物體模型的幾何特性及流體參數之間的相關性。

三. 實驗設備與步驟

3-1 實驗設備

本實驗所使用之水槽為位於台灣大學工程科學及海洋工程研究所空蝕實驗室內 Kempf & Remmers 之 K23 型循環式低速空化水槽。水槽之測試段 (test section) 為長度 125 cm，斷面為 43 cm x 43 cm 的正方形斷面，漸縮段之收縮比為 2.85:1，測試段之可觀測區長為 110 cm、寬為 20 cm，且測試段最高流速約可達 4 m/sec。而使用之雷射為 COHERENT INNOVA 90 與高速攝影機為 PHOTRON Super Fastcam 10K/10KC，全螢幕之像素解析度為 512 pixels × 480 pixels。光學透鏡組主要用於將雷射光導入測試區並產生雷射光頁，主要包括反射鏡數個，一球面鏡與一圓柱透鏡，反射鏡用於將雷射光束導入水槽量測區中，而焦距為 500 mm 球面鏡用於聚焦避免光頁厚度過厚而產生三維效應之量測，圓柱透鏡則採用規格分別為焦距 6.57 mm 及焦距 12.7mm 兩種。水中追跡所使用之懸浮顆粒之平均尺寸為 20~30 μm，最大尺寸為 50 μm，此顆粒皆不會與流體發生化學變化。此顆粒粒子密度為密度為 1.02 g/cm³，其密度較接近流體密度，能更有效當作流體粒子使用。

3-2 實驗步驟

利用 P.I.V. 系統量測流場，其影像拍攝及分析之實驗過程如下：

- (1) 啟動雷射產生雷射光頁，均勻灑入懸浮粒子、
- (2) 設定拍攝畫面之實際大小及拍攝速度、
- (3) 開啟並調整水槽內之水流速度、
- (4) 利用高速攝影機進行取像、
- (5) 再經由高速攝影機之處理器將影像下載至電腦、
- (6) 透過粒子影像處理、軟體分析流場、確認分析結果。

四. 影像分析及處理

P.I.V. 系統主要分為兩部分：1. 硬體部分 (如實驗設備所述)、2. 軟體部分主要包含有辨識影像中粒子運動軌跡、計算速度及渦度之相關軟體。以下針對軟體部分之分析方法及過程作一簡單介紹：

(1) 質點辨識

主要是運用影像中懸浮粒子反射雷射光之關係，其所在位置之灰階值較環境為高，且粒子邊界會有較大之灰階梯度等特性來找尋粒子位置。在此舉一例子，四張連續影像經質點辨識得到 X-Y 座標，如圖 5-1 所示。

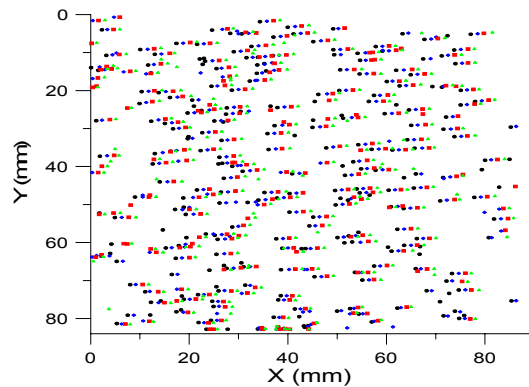


圖 5-1 四張連續影像中之粒子經質點辨識抓取得其 X-Y 座標，四張影像之粒子依序以 ● ◆ ■ ▲ 作代表。

(2) 瞬時速度向量場

經過影像辨識後，得知影像中每個質點的位置，若要求得每一粒子之瞬時速度向量，則必須找出每個粒子在下一瞬間影像 (即下張影像) 中所出現之相關位置，如何判斷影像在連續影像中的相關位置，本文利用相關運算 (cross-correlation) 原理之演算法與類神經網路之分析法，進行找尋每四張連續影像中粒子之運動位置，進而得到其瞬時速度向量場。

(3) 流場渦度及環流量分析

由上述所得到的流場速度向量，經由中央有限差分法內插處理後，再使用計算渦度值及環流量之方程式 (1)、(2)

$$w = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (1)$$

$$\Gamma = \iint_A (\nabla \times \vec{v}) \cdot \vec{n} dA = \iint_A w \cdot \vec{n} dA \quad (2)$$

在計算上以集點法原理算出流場之渦度值及環流量，由此就可以得到此區域內之流場渦度值分佈及環流量。

表 5-1 實驗條件

實驗模型	Uo (m/sec)	Re	拍攝速度(fps)	畫面之實際面積大小
圓柱	0.35	19,300	30 125 250 500	4.3 cm x 4.0 cm 4.3 cm x 2.0 cm 9 cm x 8.4 cm
	0.50	27,600		
	0.65	35,900		
	0.80	44,200		

五. 實驗結果與討論

本文將高速攝影機之鏡頭中心置於距圓柱中心 225mm(X=200mm)處，並以 250fps 之拍攝速度進行影像紀錄，再經由上述之影像分析方法得到影像上懸浮粒子之速度大小，取影像中心點之速度剖面圖作為其實驗設定之速度值，本實驗根據實驗儀器之限度設定之入流速度 U_o 為 0.35 m/sec、0.50 m/sec、0.65 m/sec 及 0.80 m/sec 等四個不同速度，並將其入流速度及採用之拍攝格式之設定整理如表 5-1 所示。

在入流端穩定度量測上分別對兩個區域進行拍攝影像分析，拍攝影像實際尺寸大小為 90 mm x 84 mm。區域 1：影像為縱剖面流場，其影像中心座標分別為 X = -100 mm、Z = 74 mm，區域 2：影像為橫剖面流場，其影像中心座標分別為 X = -120 mm、Z = 50 mm；本實驗就此兩區域內固定 5 個點取其速度作為其時間序列，如圖 3-4 及圖 3-5 所示針為影像中心點之入流端處觀察，可得知入流端之流場速度相當穩定。

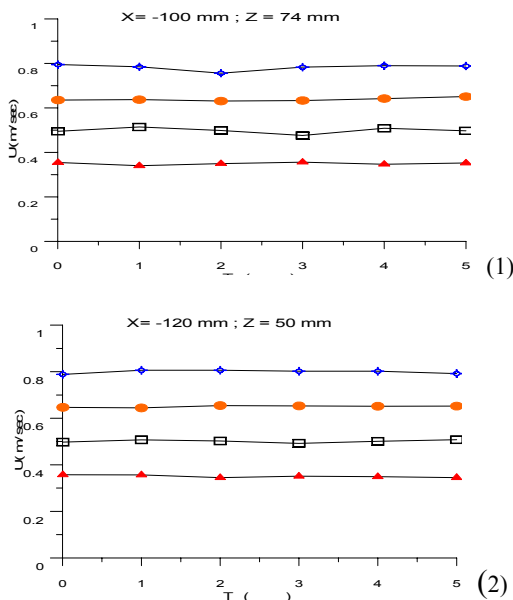


圖 5-2 (1)縱剖面及(2)橫剖面處所量測到之入流端時間序列；

▲ Uo=0.35 m/sec；□ Uo=0.50 m/sec；
● Uo=0.65 m/sec；◇ Uo=0.80 m/sec。

本實驗在渦流流場之定性描述採用 Darghi(1989)所發表之文獻作為參考如圖 5-3 所示，向下流在圓柱的停滯表面上從表面分離且產生一微小的逆時針方向（相對於示性流方向）旋轉的渦，在此定義為 vortex 1 (V1)。流在由較低邊界層部分捲起進入順時針旋轉的渦為 vortex 2 (V2)，其所形成之實際情形與鄰近渦總是以相反方向旋轉，再者由於 vortex 2 的帶動形成逆時針旋轉之 vortex 3 (V3)，一不穩定現象發生在上游端處，其尺寸上繼續成長且最後發展進入第四個渦旋以順時針方向旋轉，繼 vortex 4 (V5) 形成之後，第五個渦旋在上游處發展且接近 vortex 4。Vortex 5 (V5) 似乎是初始不穩定下相互作用下的一個產物且射流的形成是由於在 vortex 2 之下的瘦小邊界層加速所造成，而 vortex 5 是以反時針方向旋轉。

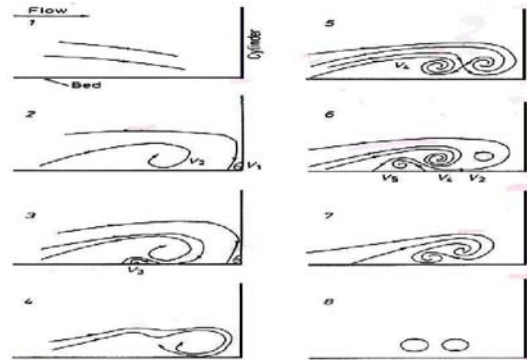


圖 5-3 從 Darghi(1989)所發表文獻中擷錄；在 Re=20,000 時，於圓柱上游對稱平面之紊流渦流系統所做之定性描繪。

本實驗於水洞中以最慢之拍攝速度 30fps 拍攝圓柱模型接面渦旋處之流況，由影像中觀察得到一明顯的渦旋系統產生於圓柱與平板之交接處，如圖 5-4(a)至(d)，再從一系列實驗所拍攝到之連續影像中觀察，水流流入一由圓柱所產生的逆壓力梯度區，使平板底層入流在入流端之分離點開始分離，且沿著逆壓力梯度區(剪力層)向上傳遞，而在逆壓力梯度區(剪力層)之內，受到逆壓力梯度的影響，出現有逆流之現象，並且在圓柱基部也出現流分離現象及流捲起現象，因而產生一明顯之順時針渦旋，連帶得產生一系列渦旋系統。

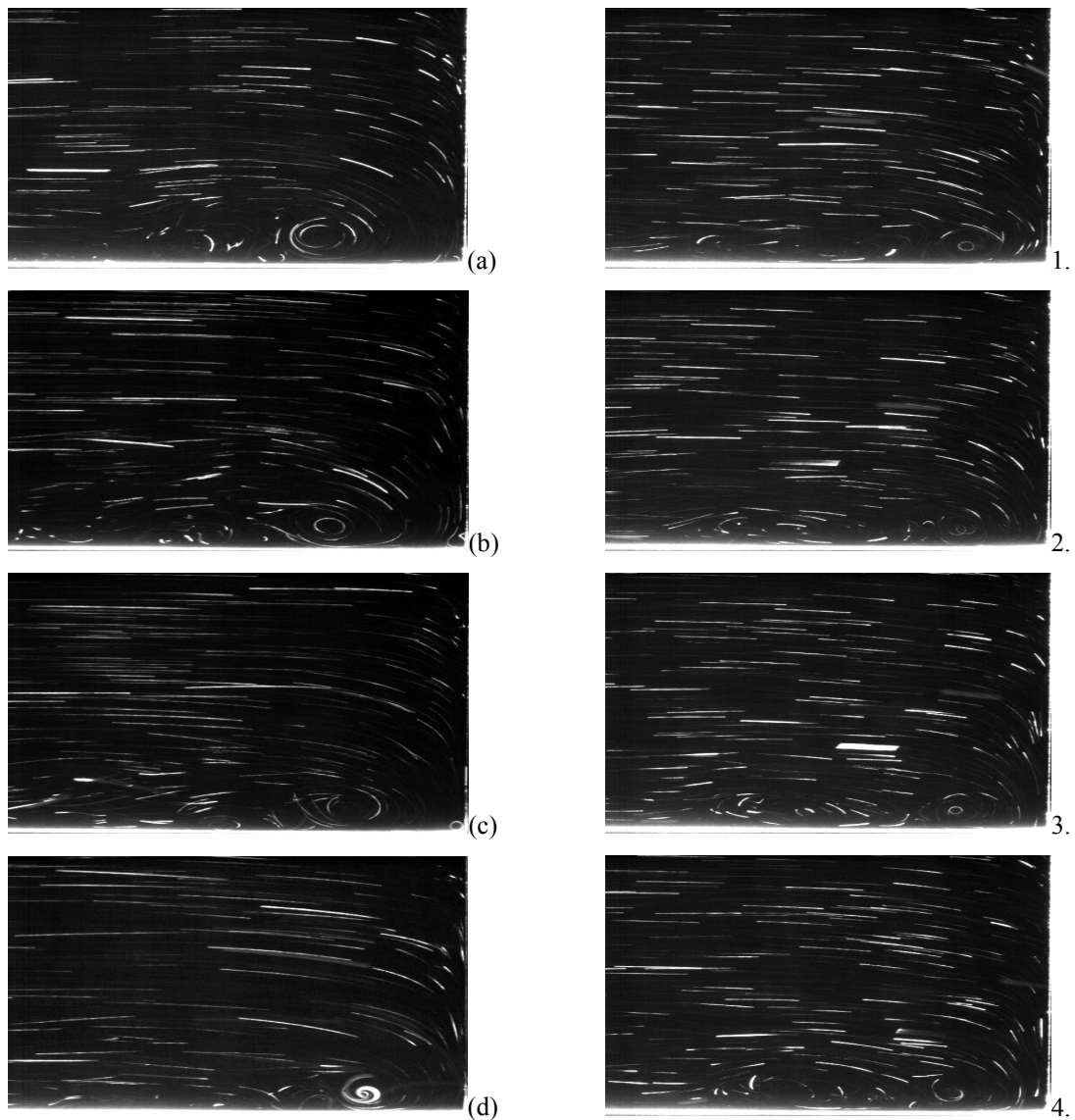


圖 5-4 所示為圓柱模型以 30fps 拍攝，其對應之實際尺寸 4.3 cm x 4 cm，由此觀察圓柱與平板界面處有一更為明顯渦流系統存在，
 (a)Re=19,300、(b)Re=27,600、(c)Re=35,900、
 (d)Re=44,200。

在離圓柱及平板界面處最近處，存在一逆時針旋轉的渦旋 (vortex 1)，其位置上從連續影像觀察似乎不會變動且其在範圍規模遠小於 vortex 2。在連續影像觀測上為了嘗試與 Darghi(1989)所針對 $Re = 20,000$ 之流場描述做近似流場探討，因此採用實驗上與其較接近之 $Re = 19,300$ 的影像，如圖 4-4 所示之連續影像，vortex 2 的捲起帶動了形成 vortex 3，在逆壓區域內持續向上游傳遞，當其被強大之入流反推動捲起形成 vortex 4 為一順時針旋轉渦旋，而其仍會繼續被強大之入流推往圓柱方向，且當 vortex 2 對流至下游，其開始延展 (stretch)，橫斷面面積便開始減小，然後其快速地沿底床移動離開圓柱，之後其移動進入到 vortex 4 彼此消散掉 (此與 Darghi,1989 所提到相符)。

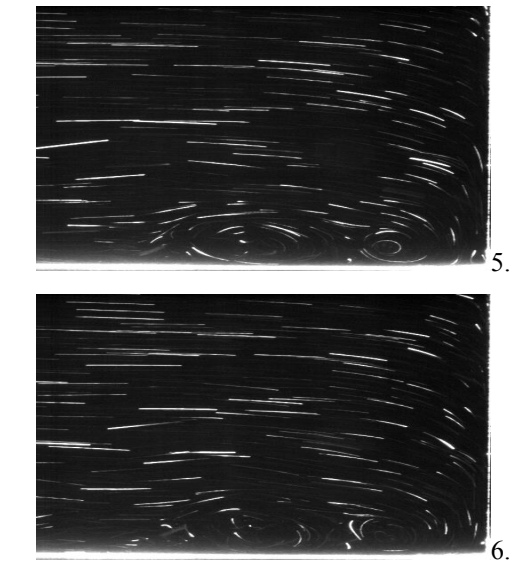
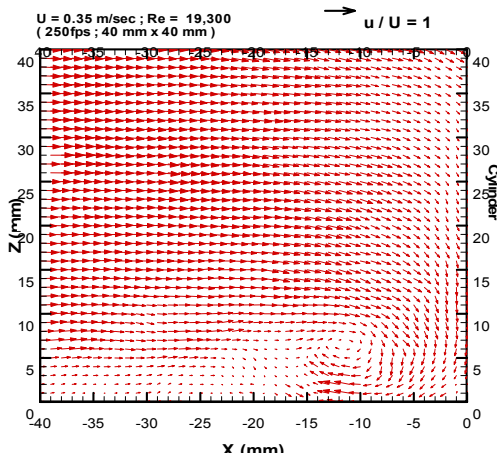


圖 5-5 由 $Re=19,300$ 之連續 6 張影像 (30fps)，於逆壓區域內持續向上游傳遞，當其被強大之入流反推動捲起形成 vortex 4 為一順時針旋轉渦旋。

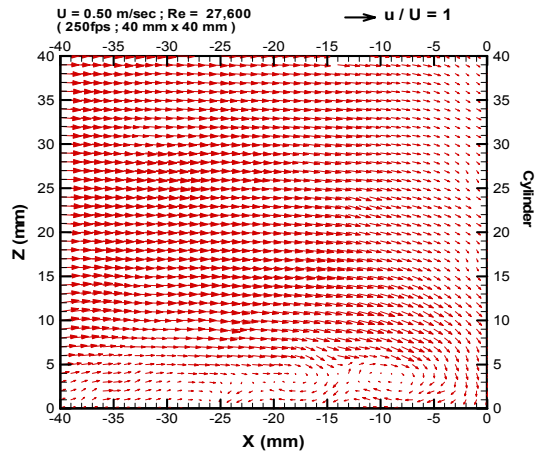
由實驗上可以看出一些定性上之變化，但為了更瞭解流場之特徵及物理現象，因此在拍攝上採用高速攝影機，並針對局部接面渦旋特性進行相關拍攝，為得是要更瞭解接面渦旋流場的瞬時變化情形，再從定量上的觀點來瞭解兩種模型於不同流速下所產生之接面渦旋的變動特性及其相關之影響，就此實驗上針對不同流速需要分別以 250fps 及 500fps 兩種拍攝速度進行拍攝，以此高速的拍攝速度是為了使 P.I.V.法解析接面渦旋流場之速度向量，藉此可以了解到瞬時流場內之速度及方向的變化情形，藉此提供流場中流況的資訊。

經由圖 5-5 為原始影像抓取到之速度向量經過中央有限差分法進行內插，而得到之速度向量場，圖 5-5 內之四張圖分別代表著四種不同之雷諾數之速度向量場，由圖中可以清楚看出在底床至圓柱附近的的速度向量比起上部入流明顯來得小，而且存在於剪力層內之速度向量場相當複雜。當均勻入流在接近圓柱時， u 分量之速度漸減，而 w 分量之速度有漸大之趨勢，由圖上可以清楚得知，遇到圓柱時，流轉到底床處，此時 w 分量之速度增加至最大，類似一道往下灌入之流，當此灌入流遇到底床時則分成兩個方向，產生一個分離點，一往上游方向流動，另一則往下游方向流動，而前者的速度遠大於後者速度，經由觀察後者之流為形成逆時針渦旋 vortex 1 的主要來源；前者之灌入流形成一個道逆流繼續往上游端傳遞，因此形成一逆壓區域，加上此逆流與均勻之入流彼此相抵抗，當傳遞至入流強度大過逆流強度時，會使得這道逆流被反推而向上捲起形成一順時針渦旋 vortex 2；其中存在於 vortex 2 下緣之流，由於 vortex 2 的形成，其橫斷面積縮小，再加上逆流持續的灌入而形成一道射流。因此根據 Darghi(1989)所述這道射流的強度會影響到 vortex 5 的存在，且當 vortex 2 對流至下游，其開始延展 (stretch)，橫斷面積便開始減小，然後其快速地沿底床移動離開圓柱，因此射流會影響著帶動著 vortex 2 快速沿底床遠離圓柱。且由實驗上之觀察可以看出 Darghi(1989)所述之現象，且所得之速度向量場也看出位於 vortex 2 下緣處速度均較周圍流場之速度為大，藉此歸納可以瞭解到在逆壓區的此道射流會對渦流系統有著相當之影響。

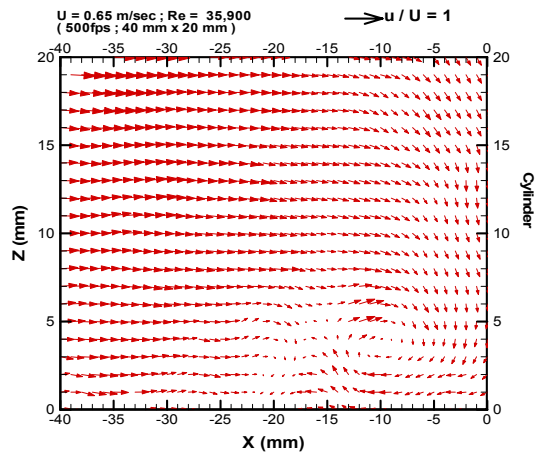
◎ 圓柱模型 $U_0 = 0.35$ m/sec, $Re = 19,300$



◎ 圓柱模型 $U_0 = 0.50$ m/sec, $Re = 27,600$



◎ 圓柱模型 $U_0 = 0.65$ m/sec, $Re = 35,900$



◎ 圓柱模型 $U_0 = 0.80$ m/sec, $Re = 44,200$

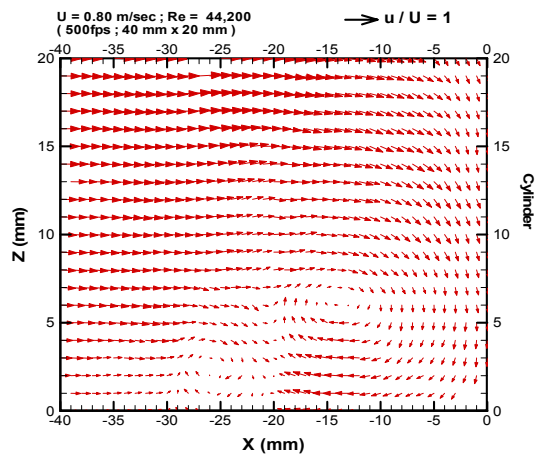


圖 5-6 由上方四圖分別代表於均勻流場中放置圓柱模型所產生之接面渦旋流場。

由圖 5-6 所示為對應圖 5-5 之速度向量圖經集點法計算渦度所得，由圖中負值代表此渦旋為順時針旋轉，相對的正值代表為逆時針旋轉，而由四張不同雷諾數之渦度圖都可發現 vortex 2 的規模大於其他的渦旋，而且渦度值上也比其他渦旋之渦度

值來的高，並且經由四個不同雷諾數之比較可以看出隨著雷諾數的增加渦流系統**錯誤! 尚未定義書籤**。的規模有逐漸變大的趨勢，而且 vortex 2 的最大渦度值也隨著雷諾數的增加而增加。相同地，以集點法計算四個不同雷諾數的環流量，每個雷諾數分別取 10 張連續渦度圖針對區域 3cm X 3cm 之區域進行積分計算而得到如圖 5-8 所示之環流量分佈圖。

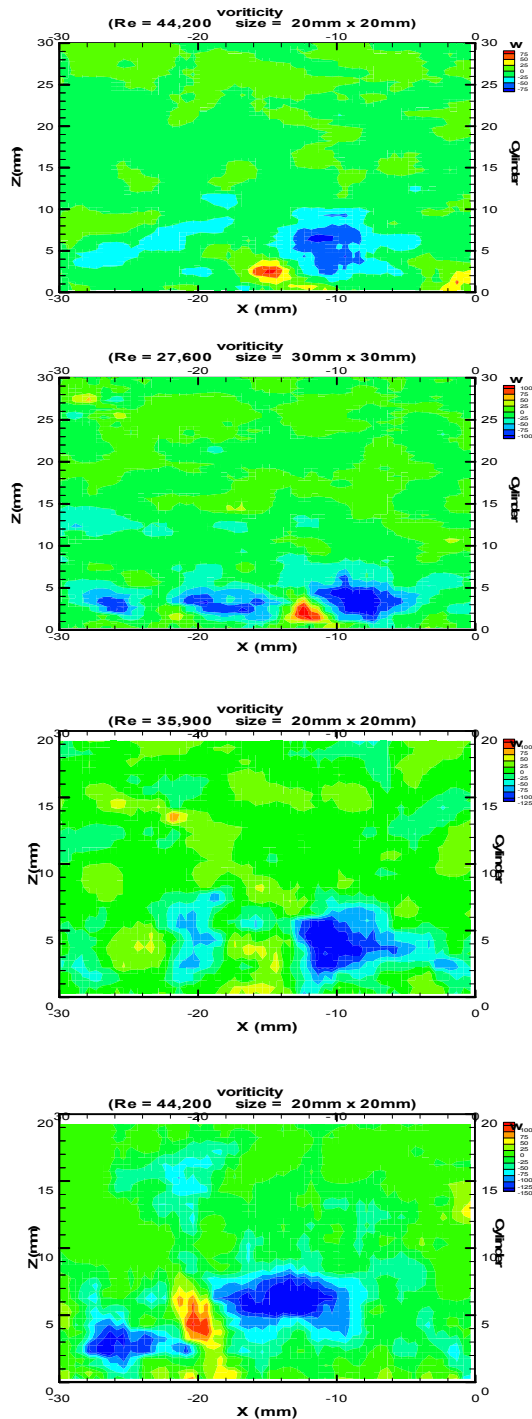


圖 5-7 為圖 5-5 中四圖速度向量場經集點法所計算得到之渦度場。

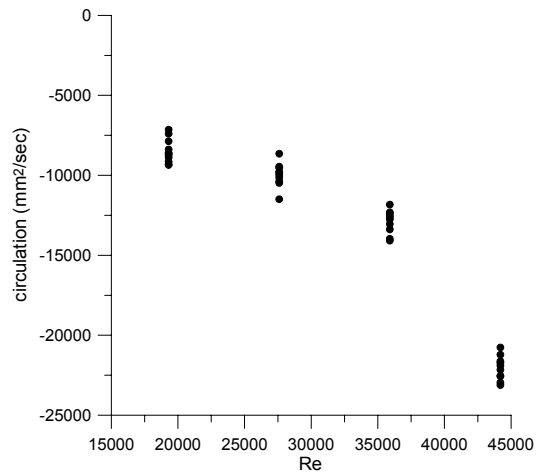
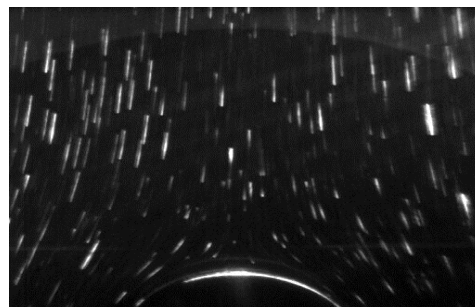


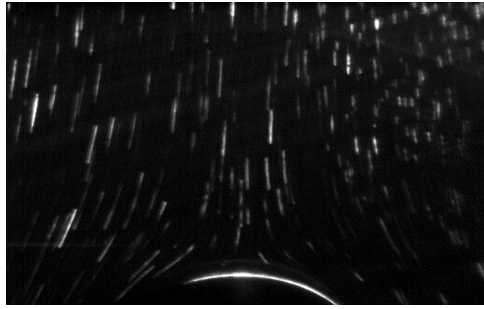
圖 5-8 四個不同雷諾數之環流量分佈關係圖

由觀測流場位於 $Z=5\text{cm}$ 處之橫剖面影像可以發

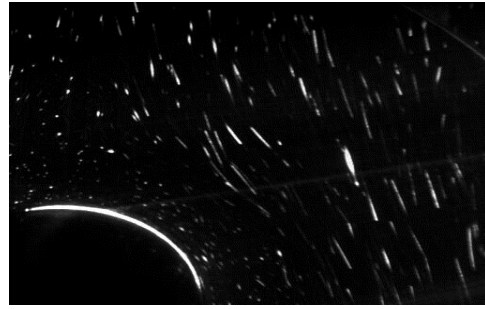
現在入流處流況仍相當穩定，但在接近圓柱時流場產生分離現象，於圓柱對稱面上出現一分離點，影影中的懸浮粒子於分離點處分離，分別從圓柱模型兩側繞過，如圖 5-9 所示；因此實驗上再從 $Z=0.5\text{cm}$ 處之橫剖面影像可以發現此處之流況以不像 $Z=5\text{cm}$ 處之流況，變得相當複雜，從圖 5-10 可以看出此處之流況複雜而無規律性，而且從連續影像上觀察可以看出位於圓柱周圍流況並非只是二維運動，而是相當複雜的三維現象，探究兩位置之流況差異，主要是在於馬蹄型窩流系統存在於 $Z=0.5\text{cm}$ 處，因此觀察到之混亂現象，就是由於渦流系統所造成。藉由此觀測實驗上嘗試於 $Z=0.5\text{cm}$ 及 $Z=1.0\text{cm}$ 兩處之橫剖面抓取其速度向量，如圖 5-11，發現在圓柱幾乎無法得到速度向量，經上述觀察複雜的三維流況在抓取上仍有問題存在。



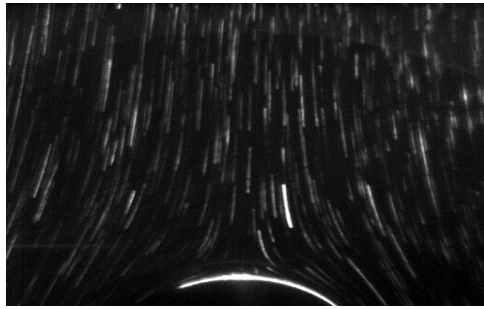
(1)



(2)



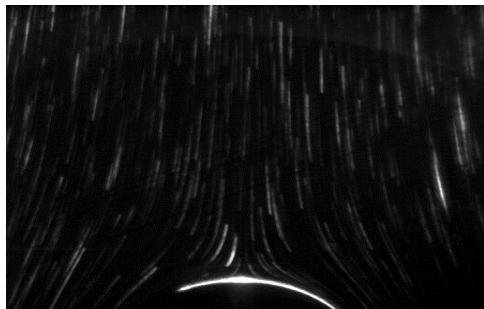
(3)



(3)



(4)

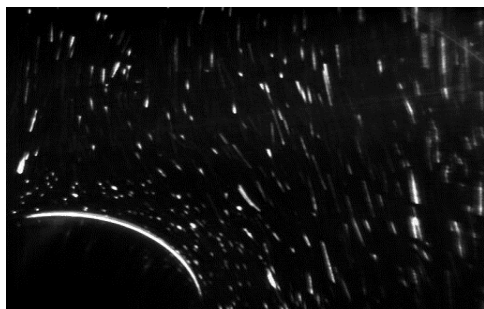


(4)

圖 5-9 所示為圓柱模型以 30fps 拍攝，其對應之實際尺寸 9 cm x 8.4 cm，Z=5 cm 處之俯示流場，(1)Re=19,300、(2)Re=27,600、(3)Re=35,900、(4)Re=44,200。



(1)



(2)

圖 5-10 所示為圓柱模型以 30fps 拍攝，其對應之實際尺寸 9 cm x 8.4 cm，Z=5 cm 處之俯示流場，(1)Re=19,300、(2)Re=27,600、(3)Re=35,900、(4)Re=44,200。

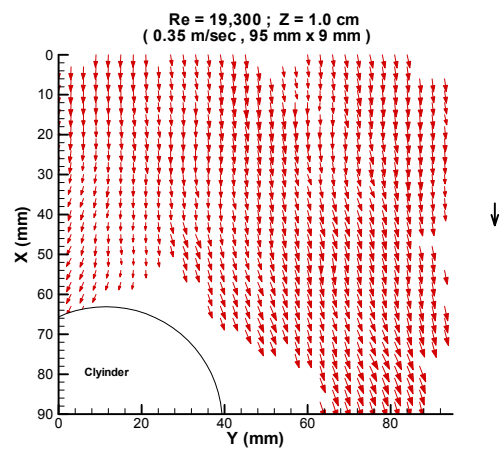
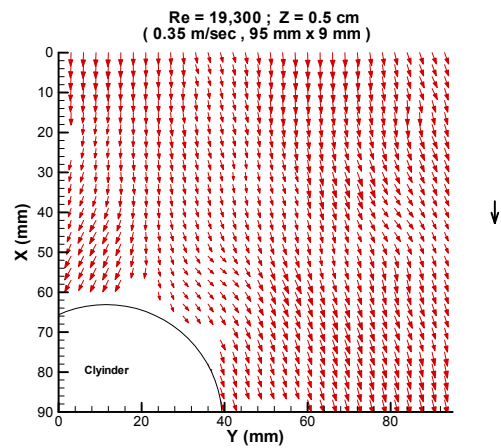


圖 5-11 所示為圓柱模型以 250fps 拍攝，其對應之實際尺寸 9.5 cm x 9 cm，Re=19,300、Z=0.5cm 及 Z=1.0cm 處之速度向量場。

六. 結論與建議

本實驗以 PIV 法，在封閉循環式水槽量測固定底床之圓柱前方及俯視流場變化情形，將其歸納為下述幾點：

1. 以 P.I.V 之方法，得到一瞬時全域之速度向量場，有助於了解此拍攝區內之流場分佈情況，並將其流場量化表示，並進一步保有其解析度縮小影像拍攝之區域，得到更細部之流場的變化特性。
2. 由影像上發現主渦會有不規則之震盪現象存在，從抓取之速度向量圖及渦度圖上也可看出主渦心位置有不規則震盪變動之行為
3. 於接面渦漩之速度向量分佈圖，可以發現在接近底床處有均較高的流速存在，研判可能由於逆流處之橫斷面面積縮小所導致。根據 Darghi(1989)文中所提及此逆流橫斷面之縮小會使得 vortex 2 快速地沿著底床遠離圓柱，且此處之射流與 vortex 5 的形成有關係性。
4. 由四個不同雷諾數之渦度圖都可發現 vortex 2 的規模大於其他的渦漩，而且渦度值上也比其他渦漩之渦度值來的高，並且四個不同雷諾數經比較可以看出隨著雷諾數的增加，渦流系統的規模有逐漸變大的趨勢，而且 vortex 2 的最大渦度值也隨著雷諾數的增加而增加。
5. 由實驗俯拍影像中，觀察到在圓柱模型周圍之環繞區域內，影像分析上有其困難性，主要是由於複雜之流況，影像上之質點的三維運動效應之使然，使得實驗上無法描述清楚質點之運動軌跡，但隨著具底床越高，則三維運動效應越為減少。

參考文獻

1. Agui, J.H. and Andreopoulos, J. "Experimental Investigation of a Three-Dimensional Boundary Layer Flow in the Vicinity of an Upright Wall Mounted Cylinder," *Journal of Fluids Engineering*, December, Vol. 114, pp.566-576, (1992).
2. Baker, C.J. "The laminar horseshoe vortex," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 95, part2, pp.347-367, (1979).
3. Baker, C.J. "The Oscillation of Horseshoe Vortex Systems," *Journal of Fluids Engineering* September, Vol. 113, pp489-495, (1991).
4. Dargahi "The turbulent flow field around a circular cylinder," *Experiments in Fluids* 8, pp.1-12, (1989).
5. Eckerle, W.A. and Awad, J.K. "Effect of Freestream Velocity on the Three-Dimensional Separated Flow Region in Front of a Cylinder," *Journal of Fluids Engineering*, March, Vol. 113, pp37-44, (1991).
6. Ballio, F., Bettoni, C. and Frsnzetti, S., "A Survey of Time-Averaged Characteristics of Laminar and Turbulent Horseshoe Vortices," *Journal of Fluids Engineering*, June, Vol. 120., pp233-242,(1998).
7. Graf, W.H. and Yulistiyanto, B., "Experiments on flow around a cylinder; the velocity and vorticity fields," *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 36, No.4, pp. 637-653, (1998).
8. Hassan, Y.A. and Philip, O.G., "A New Artificial Neural Network Tracking Technique for Particle Image Velocimetry," *Experiments in Fluids*, Vol.23, pp.145-154, (1997).
9. Mason, P.J., and Morton, B.R. "Trailing Vortices in the Wakes of Surface-Mounted Obstacles," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 175, pp. 247-293,(1987).
10. Mohamed Gad-el-Hak and Dennis M. Bushnell "Separation Control: Review," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 113, pp.5-29, (1991).
11. Roger L. Simpson "Junction flows," *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2001, 33, pp. 415-443, (2001).
12. Ronald, J. Adrian "PARTICLE-IMAGING TECHNIQUES FOR EXPERIMENTAL FLUID MECHANICS," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol.23, pp261-304, (1991).
13. Schwind, R. "The three-dimensional boundary layer near a strut," *Gas Turbine Lab. Rep.*, MIT. (1962).
14. Seal, C.V., Smith, C. R., Akin, O., and Rockwell, D., "Quantitative Characteristics of Laminar, Unsteady Necklace Vortex System at a Rectangular Block-Flat Plate Juncture," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 286, pp. 117-135(1995).
15. Seal, C.V., Smith, C. R. and Rockwell, D., "Dynamics of the Vorticity Distribution in Endwall Junctions," *AIAA Journal*, Vol. 35, No. 6, June pp. 1041-1047, (1997).
16. Th. Dracos (Ed.) "Three-Dimensional Velocity and Vorticity Measuring and Image Analysis Techniques," KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, (1996).
17. Tritton, D.J. "Physical Fluid Dynamics", second edition, OXFORD SCIENCE PUBLICATIONS, (1988).
18. Thomas, A. S. W. "The Unsteady Characteristics of Laminar Junction Flows," *The Physics of Fluids*, Vol. 30 (2), pp. 283-285.
19. 曾慶深「應用類神經網路在流場影像質點運動辨識」國立台灣大學工程科學及海洋工程學研究所碩士論文，2002年。
20. 彭修慶「PIV在高速高雷諾數流場量測系統之建立與應用」國立台灣大學工程科學及海洋工程學研究所碩士論文，2002年。