

彩色質點影像測速法於浸沒植生渠道流場之試驗研究

研究生：林宣汝

指導教授：葉克家

國立交通大學土木工程學研究所

摘要

水流流經植生所產生之流場變化極為複雜，於天然河川中，由於植生種類更為多樣性，不確定性之物理量更多，植生部分包括根莖直徑、高度與植生間距等因素，因此，本研究將針對水流通過低莖植生表面之水流現象進行研究，並利用非入侵式彩色質點影像測速法(color particle image velocimetry，簡稱 CPIV)之量測方法進行通過植生表面之流場觀測研究，了解植生渠道流場之流速變化。並利用攝影機(CCD)擷取流體影像，進而影像分析，以獲得流場之速度向量分佈與相關之物理量分析，從其中得知渠道植生表面對水流之相關影響。

本研究以兩種不同底床模型進行試驗，分別為光滑平板及水草莫絲，後者之植生高度約為 1.5cm。入流量分別為 60、80、100(L/min)，上游水深分別為 5 及 6cm，共 12 組試驗案例，比較兩不同底床渠道，植生渠道因底床受到植生影響，通水斷面束縮進而影響流速變化與曼寧 n 值之差異。此外，根據試驗結果可明顯看出植生渠道因受植生阻力影響，而能量損失率變大，尤其當流量增加或者水深降低時，能量損失率也隨之變大，其底床平板渠道之能量損失平均為 9.81%，植生渠道之能量損失平均為 11.81%，因此，在低莖植生表面之研究中，植生表面不僅會造成水流於近植生表面之流場之改變，亦有消能之功效，對於渠道的穩定有相當之幫助。

Experimental Study on Flow Field of Submerged Vegetation Channel Using Color Particle Image Velocimetry Method

Student: Hsuan-Ju Lin

Advisor : Keh-Chia Yeh

Institute of Civil Engineering
National Chiao Tung University

Abstract

Flows through vegetations have extremely complicated variation and are affected by the diameter, height, and spacing of the vegetated stems. Hence, this study tries to understand the phenomenon of varied flow velocities passing the submerged vegetations, using the non-intrusive color particle image velocimetry method (CPIV) to measure the vertical 2-D flow field. The CCD takes the instantaneous images of vegetated channel flow field and makes analysis of the images to obtain the distribution of velocity vectors and the related physical properties in the flow field.

The experiment in this study is constructed under two types of bed materials: one is a smooth flat panel and the other is a vegetated one with a height of 1.5 cm. These two types of bed materials are compared with twelve sets of experimental cases. The flow discharges in the experiment are controlled with levels of 60, 80, and 100 (l/min) with flow depths of 5 and 6 cm in the upstream boundary conditions. From the results, the average energy loss is 11.81% in the case of vegetated bed and 9.81% in the bed with smooth flat panel. Energy loss is accelerated with increasing discharge or decreasing depth. The surface of the vegetation could change the flow field and dissipate energy.

誌 謝

本文承蒙恩師 葉教授克家兩年來悉心指導與諄諄教誨，得以順利完成學業。就讀研究所兩年期間，恩師對於做事方法與態度、分析問題、獨立解決問題能力之培養、邏輯思考的訓練、論文寫作的技巧等，用心指導讓學生受益良多。並於日常生活中，受到許多關心與照顧，僅此獻上最誠摯之謝忱。

文稿初成，承蒙成功大學蔡教授長泰、國網中心蔡主任惠峰不吝斧正，並建議許多寶貴意見，使得本文更加完整，僅致衷心之謝忱。

研究所期間，非常感謝博士班楊昇學學長頃囊相授、盡心盡力的指導，也感謝林恩添、蔡東霖、謝德勇、洪夢祺、吳祥禎、張胤隆學長給予課業上的指導，曉萍學姐及益家、峰志、俊毅、燦仲、環宇學長不僅在課業的提攜也在生活中幫忙與鼓勵，最要好的研究室同學欣瑜、弘偉、仲達、力瑋、浩榮及水利、海洋組全體同學因為有你們研究生活才會如此豐富，以及感謝學弟妹們的幫忙與參與，這兩年因為認識了你們而研究生活更加豐富、快樂。

最重要感謝的是含辛茹苦、撫育我成長的父母與家人，由於你們的扶持與栽培，使我有往前邁進的動力，還有一路上鼓支持我、陪伴我的朋友們，大葉同學阿幸、意為、建棠、尹雯，中央大學的土寶們、轉聯會的朋友們，高中同學欣燁、淑雯，國中同學信賢，以及欣儀、大波蘿、耀沂、涵如、佩君、耕志，這份榮耀是屬於你們的。

謹將本文獻給關心我的家人師長、朋友，以及所有的同學們。

目錄

中文摘要	I
英文摘要	II
誌謝	III
目錄	IV
表目錄.....	VII
圖目錄.....	VIII
第一章 導論	1
1-1 研究動機	1
1-2 研究目的	2
1-3 文獻回顧	3
1-3-1 質點影像測速法	3
1-3-2 植生渠道流場相關研究	8
1-4 研究方法	13
1-5 本文組織	14
第二章 試驗之儀器佈置	15
2-1 光學設備系統	15
2-2 訊號控制系統	16
2-3 影像系統	17

2-4	試驗渠槽	17
2-5	試驗模型	17
2-6	顯影質點	18
2-7	實驗程序	18
第三章 CPIV 法影像原理與分析流程		21
3-1	CPIV 影像前處理	21
3-2	程式運算分析	21
3-3	CPIV 法之誤差來源	27
3-4	有限質問窗尺寸所致誤差	30
第四章 光滑底床與植生底床之渠道試驗		32
4-1	渠道水流穩定測試	32
4-1-1	實驗結果分析	32
4-2	光滑底床與植生底床渠道流場試驗	33
4-2-1	實驗結果分析	33
	一、實驗案例結果說明	33
	二、不同底床下流速分佈之比較	37
	三、探討於不同底床下之水流阻力	38
	四、比較不同底床下之能量損失.....	39
第五章 結論與建議		41

5-1 結論	41
5-2 建議	42
參考文獻	44



表目錄

表 4-1	實驗案例表	48
表 4-2	各案例取像之視窗大小	48
表 4-3	光滑平板底床之實驗結果	49
表 4-4	植生底床之實驗結果	49
表 4-5	不同底床下之水流阻力	50
表 4-6	不同底床渠道下之能量損失	50



圖目錄

圖 1-1	固定質問窗演算技巧.....	51
圖 1-2	img 影像質點的尋找範圍加大.....	51
圖 1-3	動態校正質問窗示意圖.....	51
圖 2-1	儀器架設示意圖.....	52
圖 2-2	Agrun 雷射.....	52
圖 2-3	PCAOM 所分出來之藍光及綠光示意圖.....	53
圖 2-4	多彩聲光調變器 (PCAOM).....	53
圖 2-5	旋轉八面鏡.....	54
圖 2-6	PCI-6601 訊號控制卡.....	54
圖 2-7	自製降壓電路版.....	55
圖 2-8	實驗渠槽.....	55
圖 2-9	光滑底床渠道 I.....	56
圖 2-10	光滑底床渠道 II.....	56
圖 2-11	莫絲水草底床.....	57
圖 2-12	植生底床渠道.....	57
圖 2-13	光滑底床俯視圖與側視圖 (案例 1-6, $Q=60\sim 100\text{L}/\text{min}$)	58
圖 2-14	植生渠道俯視圖與側視圖 (案例 7-12, $Q=60\sim 100\text{L}/\text{min}$)	58

圖 3-1 影像計算分析之流程示意圖	59
圖 3-2 上圖為原圖，左下為分離之藍色影像圖檔， 右下為綠色影像圖檔.....	60
圖 3-3 藍、綠影像亮度分佈示意圖	60
圖 3-4 imb、img 比對的方式.....	61
圖 3-5 將綠色點位移(m,n)後與藍色點重疊(matching)的情況	61
圖 3-6 互相關計算所得之 C(m,n)分佈示意圖	61
圖 3-7 不一致流速向量圖(右下角虛線框處)	62
圖 3-8 去除不一致流速向量圖(右下角虛線框處).....	62
圖 3-9 經過補圖後之流速向量圖(右下角虛線框處).....	62
圖 3-10 RMS 誤差之示意圖.....	63
圖 3-11 偏差誤差之示意圖	63
圖 3-12 已知位移量 4 與 5 畫素之計算結果.....	63
圖 3-13 偏移誤差分佈	64
圖 3-14 隨機誤差分佈	64
圖 3-15 質問窗內質點尋找方式之示意圖	65
圖 4-1 流場穩定測試位置圖	66
圖 4-2 流場原圖 (Q=60L/min, y=6cm)	66
圖 4-3 速度向量分佈圖 (Q=60L/min, y=6cm)	67

圖 4-4	$\ln(y)$ 與 V/V^* 之關係	67
圖 4-5	案例 1 光滑底床之流場原圖 ($d=5\text{cm}$ 、 $Q=60\text{L/min}$)	68
圖 4-6	案例 1 光滑底床之速度向量分佈圖 ($d=5\text{cm}$ 、 $Q=60\text{L/min}$)	68
圖 4-7	案例 1 光滑底床之流線圖 ($d=5\text{cm}$ 、 $Q=60\text{L/min}$)	69
圖 4-8	案例 1 光滑底床之渦度場圖 ($d=5\text{cm}$ 、 $Q=60\text{L/min}$)	69
圖 4-9	案例 2 光滑底床之流場原圖 ($d=5\text{cm}$ 、 $Q=80\text{L/min}$)	70
圖 4-10	案例 2 光滑底床之速度向量分佈圖 ($d=5\text{cm}$ 、 $Q=80\text{L/min}$)	70
圖 4-11	案例 2 光滑底床之流線圖 ($d=5\text{cm}$ 、 $Q=80\text{L/min}$)	71
圖 4-12	案例 2 光滑底床之渦度場圖 ($d=5\text{cm}$ 、 $Q=80\text{L/min}$)	71
圖 4-13	案例 3 光滑底床之流場原圖 ($d=5\text{cm}$ 、 $Q=100\text{L/min}$)	72
圖 4-14	案例 3 光滑底床之速度向量分佈圖 ($d=5\text{cm}$ 、 $Q=100\text{L/min}$)	72
圖 4-15	案例 3 光滑底床之流線圖 ($d=5\text{cm}$ 、 $Q=100\text{L/min}$)	73
圖 4-16	案例 3 光滑底床之渦度場圖 ($d=5\text{cm}$ 、 $Q=100\text{L/min}$)	73
圖 4-17	案例 4 光滑底床之流場原圖 ($d=6\text{cm}$ 、 $Q=60\text{L/min}$)	74
圖 4-18	案例 4 光滑底床之流速向量分佈圖 ($d=6\text{cm}$ 、 $Q=60\text{L/min}$)	74
圖 4-19	案例 4 光滑底床之流線圖 ($d=6\text{cm}$ 、 $Q=60\text{L/min}$)	75
圖 4-20	案例 4 光滑底床之渦度場圖 ($d=6\text{cm}$ 、 $Q=60\text{L/min}$)	75

圖 4-21	案例 5 光滑底床之流場原圖 (d=6cm、Q=80L/min)	.....76
圖 4-22	案例 5 光滑底床之流速向量分佈圖 (d=6cm、Q=80L/min)	.....76
圖 4-23	案例 5 光滑底床之流線圖 (d=6cm、Q=80L/min)	.....77
圖 4-24	案例 5 光滑底床之渦度場圖 (d=6cm、Q=80L/min)	.....77
圖 4-25	案例 6 光滑底床之流場原圖 (d=6cm、Q=100L/min)	.....78
圖 4-26	案例 6 光滑底床之流速向量分佈圖 (d=6cm、Q=100L/min)	.....78
圖 4-27	案例 6 光滑底床之流線圖 (d=6cm、Q=100L/min)	.....79
圖 4-28	案例 6 光滑底床之渦度場圖 (d=6cm、Q=100L/min)	.....79
圖 4-29	案例 7 植生底床之流場原圖 (d=5cm、Q=60L/min)	.....80
圖 4-30	案例 7 植生底床之速度向量分佈圖 (d=5cm、Q=60L/min)	.....80
圖 4-31	案例 7 植生底床之流線圖 (d=5cm、Q=60L/min)	.....81
圖 4-32	案例 7 植生底床之渦度場圖 (d=5cm、Q=60L/min)	.....81
圖 4-33	案例 8 植生底床之流場原圖 (d=5cm、Q=80L/min)	.....82
圖 4-34	案例 8 植生底床之速度向量分佈圖 (d=5cm、Q=80L/min)	.....82
圖 4-35	案例 8 植生底床之流線圖 (d=5cm、Q=80L/min)	.....83
圖 4-36	案例 8 植生底床之渦度場圖 (d=5cm、Q=80L/min)	.....83
圖 4-37	案例 9 植生底床之流場原圖 (d=5cm、Q=100L/min)	.....84

圖 4-38	案例 9 植生底床之流速向量分佈圖 (d=5cm、Q=100L/min)	84
圖 4-39	案例 9 植生底床之流線圖 (d=5cm、Q=100L/min)	85
圖 4-40	案例 9 植生底床之渦度場圖 (d=5cm、Q=100L/min)	85
圖 4-41	案例 10 植生底床之流場原圖 (d=6cm、Q=60L/min)	86
圖 4-42	案例 10 植生底床之速度向量分佈圖 (d=6cm、Q=60L/min)	86
圖 4-43	案例 10 植生底床之流線圖 (d=6cm、Q=60L/min)	87
圖 4-44	案例 10 植生底床之渦度場圖 (d=6cm、Q=60L/min)	87
圖 4-45	案例 11 植生底床之流場原圖 (d=6cm、Q=80L/min)	88
圖 4-46	案例 11 植生底床之速度向量分佈圖 (d=6cm、Q=80L/min)	88
圖 4-47	案例 11 植生底床之流線圖 (d=6cm、Q=80L/min)	89
圖 4-48	案例 11 植生底床之渦度場圖 (d=6cm、Q=80L/min)	89
圖 4-49	案例 12 植生底床之流場原圖 (d=6cm、Q=100L/min)	90
圖 4-50	案例 12 植生底床之速度向量分佈圖 (d=6cm、Q=100L/min)	90
圖 4-51	案例 12 植生底床之流線圖 (d=6cm、Q=100L/min)	91
圖 4-52	案例 12 植生底床之渦度場圖 (d=6cm、Q=100L/min)	91
圖 4-53	水深 6cm 之光滑底床渠道流速剖面圖	92
圖 4-54	水深 6cm 之植生渠道流速剖面圖	92

圖 4-55	不同底床下之流速剖面圖 ($y=6\text{cm}, Q=60\text{L}/\text{min}$)	93
圖 4-56	探討不同底床下之阻力位置示意圖	93
圖 4-57	光滑底床下之阻力與流速關係圖	94
圖 4-58	植生底床下之阻力與流速關係圖	94
圖 4-59	探討能量損失示意圖	95
圖 4-60	不同底床、流量及水深下之能量損失圖	95



第一章 導論

1-1 研究動機

過去河川治理方法大多以河道疏浚、堤防修建、防砂壩、潛壩、丁壩、固床工及擋土設施等主要為工程取向，以硬碰硬方法試改變其水流狀況，其成效因地而異，以頭前溪中正橋下游固床工而言，保護住中正橋之橋樑基礎，卻造成下游底床下刷，造成十幾公尺之河道落差而形成小瀑布，且運用材料皆以混凝土為主，只考慮到安全性及耐久性，犧牲水域生態的考量，久而久之，對河川水域棲地生態環境造成嚴重的衝擊與破壞。近年來於河川治理理念更融合生態之考量，將防洪安全、河川生態、水域環境營造及相關水域等因素一併考量，此外，對於河川水域與堤防之間的高灘地或生態緩衝區之整治考量，亦是河川生態之重點之一。因此，生態環境保護之課題亦受到重視，而有新興工法—「生態工法」的產生。生態工法係「基於對生態系統之深切認知與落實生物多樣性保育及永續發展，而採取以生態為基礎、安全為導向的工程方法，以減輕對自然環境造成的傷害。」以河川整治為例，種植適當的植生取代水泥消波塊亦可達到消能、減緩流速之效果，便是運用植生以達到地表保護、減緩水流流速之例子。

關於植生水理分析相關之研究，大多著重於植生對於水流阻力影響方面來探討。然而有關植生對水流流速變化影響之研究，由於水流

受到植生擾動，當流量大時，近植生處之速度變化劇烈，若利用過去傳統方法如皮托管、熱線、熱膜侵入式流速量測，不僅量測困難且影響了流場整個結構與量測誤差，即使後來發展非侵入式的雷射都卜勒(LDV)測速儀，對於流場量測研究可以藉由大筆數之統計數量進行平均得知其速度值，但量測範圍侷限於單點，且方向為水流方向，因此本研究採用彩色質點影像測速法，應用於植生渠道全域流場變化之觀測，此非侵入式之量測技術，可以準確的計算流場速度向量，進行流場研究，亦可探討其水流通過植生表面之流場結構，以供後續相關水利工程實務參考與設計使用。

1-2 研究目的

本研究係以高灘地之低莖植生，如伏鋪在地表面之草本或籐本植物為研究對象，研究植生表面對水流所造成之相關影響。而在近植生處流場變化迥異，較為複雜，而使用傳統量測方法不僅量測困難且影響了流場整個結構，因此，藉由 CPIV 法量測技術於實驗室內進行水流通過植生表面之試驗。主要探討於光滑底床與植生表面底床水流通過之流場之變化研究，並進一步探討其流速剖面之差異、藉由通過植生之水面坡降差，推估其研究植生種類之表面曼寧糙度 n 值、植生表面阻力之影響，及能量衰減推估，根據研究所分析結果可供相關工程實務之參考與使用。

1-3 文獻回顧

1-3-1 質點影像測速法

一、非入侵式流速量測技術發展

於非入侵式之流速量測技術方面，從早期單點量測流速值，如 laser Doppler velocimetry (LDV)；近十幾年來已發展二維、三維非入侵式如質點影像測速法 (particle image velocimetry 簡稱 PIV (Adrian, 1991) 及數位質點影像測速法 (digital particle image velocimetry, 簡稱 DPIV; Willert and Gharib 1991)、彩色質點影像測速法 (color particle image velocimetry, 簡稱 CPIV 法; Jaw and Wu, 2000)、Voronoi 影像法(Capart et al., 2002) 進行流場量測。綜合上述之方法可歸內為兩大類型：一為單一影像多重曝光之方法，另一為連續影像單一曝光法。

1. 單一影像多重曝光法：其優點係於單張影像利用自相關函數法 (auto-correlation method) 得到質點位移量，再藉由曝光時間可得到質點之位移速度；其缺點為速度向量不易辨識，如 PIV 法。
2. 連續影像單一曝光法：其優點為可利用兩張具有時間差之影像，利用互相關函數法 (cross-correlation method) 或快速傅利葉轉換方法 (FFT) 得到速度向量；其限制為兩張具有時間差之質點位移不宜太大。為解決此限制需有更快速之攝影機或 CCD，以每

秒數百張速度擷取影像，除了經費提高外，也降低影像畫質，如 DPIV 法。

二、影像分析演算發展

而於影像分析方面，以質問窗為基礎的互相關演算方法 (cross-correlation algorithm) 被廣泛地使用在 DPIV 的計算方面，亦針對相關函數法之演算加以修正，如 Keane and Adrian(1990)、Adrian (1991)、Willert and Gharib (1991)、Heckmann et al. (1994)、Westerweel et al. (1996)，且利用時序性單一曝光的影像利用相同的質問窗演算位移量 (displacement)，其相關函數法如下式所示：

$$\Phi(m, n) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g_1(i, j) \cdot g_2(i+m, j+n) \quad (1-1)$$

其中， $\Phi(m, n)$ 為相關函數之摺合積分； $g_1(i, j)$ 與 $g_2(i, j)$ 為時序性影像亮度值分佈； M 與 N 為質問窗大小； i 及 j 為兩張影像比對之初始位置； m 及 n 為 i 方向及 j 方向之位移量。


而在 CPIV 法分析上係藉由彩色質點影像之訊號區分為兩組不同顏色之訊號，如藍、綠亮度分佈值之影像訊號，採用互相關函數法 (cross correlation function) 進行分析，得到質問窗 (interrogation windows) 內質點之位移量 (Willert and Gharib 1991)，其方程式如下：

$$\Phi_{ij}(m, n) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [img(i, j)] \cdot [img(i-m, j-n)] \quad (1-2)$$

其中, imb 及 img 分別為藍色及綠色亮度分佈值之影像訊號; $\Phi_{ij}(m,n)$ 為互相關函數值, 其最大值為質點之最可能位移量; i 及 j 為兩張影像比對之初始位置, $M*N$ 為質問窗大小(單位: pixel), m 及 n 為 imb 及 img 橫軸及縱軸之位移量, 因此 $(i-m, j-n)$ 為 img 與 imb 相配(matching)的位置。

而在影像分析上利用質問窗的設定方法可分為以下三種, 分別為固定質問窗演算 (correlation-based interrogation)、質問窗追蹤演算 (correlation-based tracking algorithm) 與動態校正質問窗 (dynamic-adjusting interrogation), 茲說明如下:

1. 固定質問窗演算:



如圖 1-1 所示, 此法早期為 Willert and Gharib (1991) 所應用, 在此方法中, 由於固定質問窗大小, 使得影像在計算時容易造成質點離開計算質問窗現象 (out-of-pattern effect), 如圖 1-1 中之 B、C 及 D 等位置, 所保留在質問窗之位置 A 有效質點會減少, 可能導致質問窗內之質點配對誤差, 這種現象可能對質點位移之量測比實際質點位移小 (Freek et al. 1996; Gui et al. 2000), 造成量測誤差。根據 Gui et al. (2001) 利用 FFT (fast Fourier transform) 的固定質問窗大小之相關函數計算, 會有較大的計算誤差產生之缺點, 此情況在計算平均流速、Reynold 剪應力及紊流流量下增加量測之不確定因素。針對此現象提

出改善方法，如 Willert (1996)、Cowen and Monismith (1997)、Westerweel et al. (1997)、Scarano and Riethmuller (1999) 利用質問窗的相對位置 (discrete offset) 位移一固定量與方向，降低質點離開質問窗現象，並對此配對誤差問題提出質問窗動態位移方法 (window shift technique)，進行質問窗之影像追蹤比對 (image pattern tracking)，以降低質點脫離現象與計算誤差。此外，亦利用迭代演算 (iterative algorithms) 如 Gui et al. (2000) 利用數位遮蔽方法 (digital mask technique) 降低固定質問窗演算法之偏差量。

2. 質問窗追蹤演算：

如圖 1-2 所示，此法為將 img 質問窗尋找範圍加大，放大為 $M+2M$ 的大小 (Huang et al. 1993)，直接計算 imb 與 img 質問窗最有可能位移量，可降低質點離開計算質問窗現象，但此法會增長計算所需時間。

3. 動態校正質問窗：

為了降低在計算中質點的流失與質問窗內多峰值的產生，將質問窗設為可移動式，以尋找質問窗內之質點，進行動態比對方式，稱為動態校正質問窗。如圖 1-3 所示，尋找 imb 影像之質問窗內有效質點數目，若有效質點數比設定門檻值大，則作為該質問窗的大小，再利用相關函數法計算與 img 質問窗範圍內質點最相關位置，而求得位移量 (Jaw et al., 2000)。此方法可降低質點離開質問窗現象以及流體剪應

力、紊流所產生速度差異及量測之不確定因素。

其他相關計算方法，如將式 (1.1) 改為式 (1.3) 有助於電腦計算的速度，其判斷位移 (m,n) 的方法均利用 $\Phi(m,n)$ 最大值為質問窗之位移量。

$$\Phi(m, n) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [g_1(i, j) - \bar{g}_1] \cdot [g_2(i + m, j + n) - \bar{g}_2] \quad (1-3)$$

此外，Gui and Merzkirch (2000) 提出最小平方差法 (minimum quadratic difference method)，係利用質問窗內之亮度值進行相減，以求得位移量，其方法如下：

$$g_1 = \{g_{M,N}^1\} = \begin{Bmatrix} g_{1,1}^1, g_{2,1}^1, \dots, g_{M,1}^1 \\ g_{1,2}^1, g_{2,2}^1, \dots, g_{M,2}^1 \\ \dots \\ g_{1,N}^1, g_{2,N}^1, \dots, g_{M,N}^1 \end{Bmatrix} \quad (1-4)$$

$$g_2 = \{g_{M,N}^2\} = \begin{Bmatrix} g_{1,1}^2, g_{2,1}^2, \dots, g_{M,1}^2 \\ g_{1,2}^2, g_{2,2}^2, \dots, g_{M,2}^2 \\ \dots \\ g_{1,N}^2, g_{2,N}^2, \dots, g_{M,N}^2 \end{Bmatrix} \quad (1-5)$$

$$|g_1 - g_2| = \sqrt{\sum_{M=1}^M \sum_{N=1}^N (g_{M,N}^1 - g_{M,N}^2)} \equiv \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [g_1(i, j) - g_2(i + m, j + n)]} \quad (1-6)$$

$$D(m, n) = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [g_1(i, j) - g_2(i + m, j + n)]^2 \quad (1-7)$$

其中， g_1 與 g_2 為時序性之影像亮度值之矩陣分佈；M 與 N 為質問窗的邊長；m 與 n 為位移量， $D(m,n)$ 為最小平方差值。此方法亦可利用 $D(m,n)$ 最小值判別 g_1 與 g_2 影像吻合度 (pattern-matching)，進而求得

位移量。

三、誤差分析

1. Westerweel (1994)指出二維 PIV 量測數值資料之誤差可分為兩類：一為量測錯誤的實驗數值或因演算錯誤而產生不合理的速度量值；二為正確的量測數值帶有不確定因素之誤差。
2. Nogueira et al. (1997)針對量測錯誤的數值或因演算錯誤而產生不合理的速度向量值，進而研究如何判斷數值資料的正確性，並對不合理之向量加以修正。
3. Huang et al. (1997)研究 DPIV 影像計算的誤差，而歸納出二個主要計算誤差為方均根誤差(root-mean-square)及偏移誤差(bias error)，並將此二誤差做量化探討。

1-3-2 植生渠道流場相關研究

在植生流場渠道相關研究方面，由於水流阻力主要來自於植生之形狀阻力，因此，國內外的文獻大多探討植生阻力影響流場流況，而水流阻力方面，通常以阻力係數來探討，如：

Chezy's 公式 (1775)

$$C = \frac{V}{\sqrt{RS_f}} \quad (1-8)$$

Manning 公式

$$n = \frac{R^{2/3} S_f^{1/2}}{V} \quad (1-9)$$

Darcy-Weisbach f (1855)

$$f = \frac{8gRS_f}{V^2} \quad (1-10)$$

式 (1-9) 至 (1-11) 之間關係如下：

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = \frac{1}{n} \frac{R^{1/6}}{\sqrt{g}} = \frac{\sqrt{8}}{\sqrt{f}} = \frac{V}{V_*} \quad (1-11)$$

其中， V 為平均流速； R 為水力半徑； S_f 為能量坡降； V_* 為剪力流速。

可由式 (1-11) 發現流速分佈為阻力作用時所產生之一種現象。

德國學者 Prandtl (1925) 提出摻混長度理論 (Mixing-length theory)，而後 von Karman (1934) 將摻混長度模式應用於紊流邊界層方面，推得平均速度之分佈為

$$\frac{V(z)}{V_*} = \frac{1}{\kappa} \ln z + A \quad (1-12)$$

其中， A 為積分常數； κ 為正比常數介於 0.4~0.41，此常數現稱為馮卡門常數 (von Karman constant)。

Chow (1959) 綜合許多專家研究成果，指出植生高度、植生排列密度、分佈情形及植生種類均會影響水流阻力。

Li and Shen (1973) 以圓柱體模型模擬植珠，改變不同植珠排列佈置，研究非浸沒植生之水流阻力。實驗結果顯示植珠不同的排列佈置影響流量甚鉅。

Petryk and Bosmajian (1975) 應用動量方程式推導水深不及植生高時之植生阻力公式，

$$\tau_0 = \frac{F_D}{a} = C_d \left(\frac{A_p}{a} \right) \rho \frac{V^2}{2} \quad (1-13)$$

其中， τ_0 為底床剪應力 ($\tau_0 = \rho V_*^2$)； F_D 為植生阻力； a 為底床之植生分佈面積； C_d 為阻力係數； A_p 為植生投影面積； ρ 為水之質量密度； V 為渠道平均流速；。

除了以上早期對於水流阻力之研究外，而近幾年之水流阻力相關文獻如下：

Donget et al. (2001) 利用風洞實驗，量測在植生下之風速剖面圖，並以質量守恆方法估算位移高度 (displacement height)，並且探討阻力係數 (drag coefficients)、粗糙長度 (roughness length)、植生高度及植生密度之間關係。結果可得知阻力係數 (C_D) 與粗糙長度 (Z_0) 之間關係為

$$\ln Z_0 = 4.4414 - 0.4467 C_D^{-0.5} \quad (1-14)$$

Choi and Kang (2004) 應用 Reynolds stress model (RMS) 模擬植生渠道流況，分別針對水深漫過植生高度及部分浸淹植生高情形下進行模擬，並與實際量測值及其他模式做準確度比較，且擴充模式用運於植生渠道懸浮載之推估。

Kirby et al. (2005) 試驗三種 Bluegrass、Centipede、Zoysia 不同

真實矮草類植生，於水深不及植生高、水流雷諾數小於 10000 以下，根據 (Kirby, 2003) 所提出植生之曼寧 n 值計算公式，探討試驗植生之曼寧 n 值及雷諾數 R_e 之關係，迴歸其關係式，如下：

$$n = 0.0116(VR)^{-0.5449} \quad (\text{Bluegrass}) \quad (1-15)$$

$$n = 0.0055(VR)^{-0.6469} \quad (\text{Centipede}) \quad (1-16)$$

$$n = 0.0043(VR)^{-0.7276} \quad (\text{Zoysia}) \quad (1-17)$$

其中， n 為曼寧 n 值； $R_e = \frac{VR}{\nu}$ 為水流雷諾數。

黃于軒 (2005) 應用彩色質點影像測速法 (CPIV 法) 對植生渠道流場進行量測，以圓柱狀之聚稀系樹脂為植生模型，改變不同植生排列密度、上游入流量以探討植生密度對流速剖面與曼寧 n 值之影響。其結果發現，植生特徵體積比越小時，速度增加率也越小；而植生特徵體積比越大時，曼寧 n 值也越大。其關係式為：

$$n = 0.004e^{19.89m'} \quad (1-18)$$

其中， n 為曼寧 n 值； m' 為特徵體積比，定義為單位水體積中含有植株體積之比值，為一無因次量。

Armanini et al. (2006) 利用儀器量測水流漫過及部分浸淹單枝柳木之水流阻力，根據 (Petryk and Bosmajian, 1975) 之阻力公式。其結果發現水深不及植生高 ($0 < \frac{h}{h_p} < 1$) 之阻力與流速平方呈一線性關係；而水深漫過植生高 ($\frac{h}{h_p} > 1$) 時，則阻力與流速呈一線性關係。

另外實驗亦發現，樹葉阻力佔植生總阻力約為 40%。

Musleh and Cruise (2006) 利用鋼硬不彎曲竿子於淺灘水槽的流場中，於不同入流量中，改變不同模型直徑、側向間距及縱向間距進行試驗。其結果為水深及流速對水流阻力有很大之影響，摩擦因子隨著水深只有微小非線性增加，但隨著增加速度而非線性減少。另外，摩擦因子 f 與其他參數（水深 (y)、植株直徑 (d)、植株側向 (r) 與縱向間距 (l)) 之關係式，如下：

$$f = 1.021 \left(\frac{y}{d} \right)^{2.2265} \quad (d=1.90\text{cm}) \quad (1-19)$$

$$f = 224.06 \left(\frac{y}{l} \right)^{2.4034} \quad (l=20.32\text{cm}) \quad (1-20)$$

$$f = 10.905 \left(\frac{y}{r} \right)^{1.9057} \quad (r=7.62\text{cm}) \quad (1-21)$$

而密度因子與摩擦因子 f 及曼寧 n 值為線性關係，其關係式如下：

$$f = 66.46 \left(\frac{A}{a} \right) - 0.2942 \quad (1-22)$$

$$n = 1.2375 \left(\frac{A}{a} \right) + 0.0422 \quad (1-23)$$

其中， $\frac{A}{a}$ 為密度因子。

當水流流經植生渠道，近植生處流場變化迥異，較為複雜，因此本研究主要探討於不同底床下之水流流場變化、流速剖面差異、推估其曼寧 n 值以及植生之阻力與消能能力。雖已有許多植生相關研究探討阻力，但大多都以數值模擬或者侵入式儀器量測，對於所得之實驗

結果，前者為為理想狀態下，後者易造成實驗誤差過大，與非侵入式儀器量測比較其準確性大為降低，因此，利用非侵入彩色質點影像測速法（CPIV 法）來進行渠道試驗，分析其速度場、渦度場，以提供後人於實驗或數值模擬之參考。

1-4 研究方法

在本研究中，研究方法主要分為兩個部分，第一部份為試驗部分，第二部分為影像分析計算。

第一部分(試驗部分):雷射光源係由 Argon 之氬氖雷射為藍(488 nm)、綠(514 nm)混合光，雷射光路徑中加入二凸透鏡將光源聚光，使雷射光源不致衰退，經聚光後，直射至多彩聲光調變器 (polychromatic acousto-optic modulator, PCAOM)，藉由不同之電壓將藍綠混合光給於區分藍光及綠光後，再射至旋轉八面鏡形成雷射光頁。流體影像擷取部分則由 SONY DXC-9000 型之 CCD 攝影機擷取通過雷射光頁下之質點，質點曝光數可經由快門 (1/5 至 1/4000 秒) 所決定。在渠道佈置部分，於長 1 公尺，高及寬都為 0.2 公尺之三面透明壓克力水槽裡放置光滑平板、植生兩種不同底床模型，並改變不同入流量及上游水深，進行水流渠道流場之研究。

第二部分 (影像分析部分): 利用影像轉檔程式及影像分析與計算程式，將攝影機所擷取之影像進行演算分析並做一完整之結果分

析。

1-5 本文組織

本研究採用彩色質點影像測速法 (CPIV 法)，應用於植生渠道流場變化之觀測。全文共分為六章，茲簡述章節內容如下：

第一章為本文之研究動機、研究目的，並簡述實驗研究方法以及本研究組織架構。相關文獻之回顧，對於 PIV 法及植生流場相關研究做一整理探討。

第二章為本實驗之儀器設備裝置，其包含儀器設備（光學設備系統、訊號控制系統、影像系統、實驗渠槽、實驗模型）。

第三章為 CPIV 法原理與影像處理分析流程（處理方法及程式運算）之說明。

第四章為流場穩定試驗之結果分析，驗證取像位置為已發展區域。以及光滑底床與植生底床渠道流場試驗之結果分析，並歸納不同底床下之曼寧 n 值、水流阻力與能量損失之間的關係。

第五章為結論及建議，歸納陳述本研究所得之結果，並提出建議未來可研究之方向。

第二章 試驗之儀器佈置

試驗儀器及模型材料可分為光學設備系統、訊號控制系統、影像系統、試驗渠槽、試驗模型、顯影質點六部分如圖 2-1 所示，為實驗佈置相關位置，其各儀器介紹與實驗操作程序，茲說明如下：

2-1 光學設備系統

在本試驗中光學設備系統包括 ARGUN 雷射、聚光凸透鏡、多彩聲光調變器 (PCAOM) 及旋轉八面鏡四個部分，茲說明如下：

1. ARGUN 雷射：如圖 2-2 所示，雷射光源為 7 瓦之氬氖雷射，ARGUN

雷射混合光束，經由反射鏡及凸透鏡將雷射光束射至多彩聲光調變器 (PCAOM) 可分離為藍色光束及綠色光束，如圖 2-3 所示，其綠光為 1.4 瓦 (波長為 514nm)，藍光則為 1.3 瓦 (波長為 418nm)，

在經由旋轉八面鏡，形成一藍一綠間隔之光頁。

2. 聚光凸透鏡：由於雷射光束經由反射鏡及光束路徑之影響而減弱了雷射光強度，因此，利用兩片聚光凸透鏡，將雷射光束聚集後射至多彩聲光調變器 (PCAOM) 切光，使雷射光束不至於減弱。

3. 多彩聲光調變器 (PCAOM)：如圖 2-4 所示，PCAOM (Polychromatic acousto-optic modulator)，主要將 ARGON 雷射分為藍光及綠光，其應用二氧化碲 (TeO_2) 之材料製成，隨著外在電壓之大小不同而改變晶體的排列方式，使特定波長之光束通過，且輸入此元件之電

壓必須小於 5.0V，如此才能達到實驗所需之切換藍、綠光束功能。

4.旋轉八面鏡：如圖 2-5 所示，由八面鏡之變速控制器驅動，其馬達採用磁浮式，轉速頻率相當穩定，並配合光頁之頻率調整快慢，其轉速可由內部及外部控制，內部控制主要是固定轉速進行試驗，而外部控制為訊號產生器控制，配合同步訊號控制器一起操作使用，以達到同步功能。

2-2 訊號控制系統

訊號控制系統部份由同步訊號控制器及示波器兩種儀器配合，其功能主要控制 PCAOM 切換藍綠光的頻率，切換頻率是否合適是決定結果優劣的關鍵，儀器茲說明如下：

1.訊號控制器：此部分為利用 NI (National Instruments)公司所製之 PCI-6601 訊號控制卡如圖 2-6，控制 PCAOM 之切換頻率，此卡安裝於 PC 上，可穩定送出四道頻率，訊號可分為進入及輸出，進入之部分由控制卡透過軟體產生一穩定之訊號，再將此訊號送至 PCAOM 切換藍綠光束，但由於 PCAOM 可以承受之電壓為 5.0V，而由 PCI-6601 所產生之訊號為 5.8V，因此必須再透過自製的電路板降壓如圖 2-7，方可達到合適的訊號。

2.示波器：其功能主要顯示由訊號產生器所輸出至同步訊號控制器內部訊號之穩定性，包括了波形穩定性、脈衝電壓（類比訊號）之穩

定性、頻譜顯示及週期之監視功能，以確定訊號在同步處理中。

2-3 影像系統

此系統主要由數位攝影機(3-CCD, 3-chip charge coupled device)及影像擷取卡兩部分所組成，茲說明如下：

1. 數位攝影機：此試驗使用 SONY DXC-9000 數位攝影機，為藍、綠、紅三顏色之固態感光面，各有 680(H)×480(V)個畫素，各畫素有 0-255 之亮度值。且攝影機備有電子快門，可調整影像之曝光時間，另外也含其他影像之功能鍵。
2. 影像擷取卡：利用影像擷取卡可將攝影機擷取之影像即時顯示於電腦螢幕上，但此卡本身不具備任何記憶體，因此須配合電腦上之記憶體。另外影像之擷取張數可記錄至電腦之硬碟儲存空間，即可擷取影像之連續畫面。

2-4 試驗渠槽

循環水槽長 3 公尺、寬 0.2 公尺、高 0.2 公尺，渠槽兩側及底床三面採用透明壓克力板以利流場可視化實驗之進行，如圖 2-8 所示。另外於試驗渠槽雷射光照射另一面以黑色壁報紙覆蓋為背景，其目的為了加強影像畫面對比度及阻截雷射光散射。

2-5 試驗模型

本研究是以兩種不同底床模型進行試驗，分別為光滑平板及水草

莫絲。第一個試驗案例是以光滑渠道無植生情況，如圖 2-9、2-10 所示；第二個試驗案例為真實植生渠道情況，使用植生為水草莫絲，約為 1.5cm 高，如圖 2-11、2-12 所示。為了防止雷射光發生散射，則使用黑色壓克力板並將植株黏於壓克力板上，再將其放置實驗渠槽上。

2-6 顯影質點

顯影質點顆粒混合水注入循環水槽內，其顯影質點密度為 1.1 g/cm^3 及粒徑小於 $75\mu\text{m}$ ，雷射光經由旋轉八面鏡形成一雷射光頁，質點於雷射光頁下顯現出光點樣，於影像中佔據面積約 3 至 5 個畫素。

2-7 實驗程序

實驗程序分為四大部分，第一部份為試驗模型之佈置，第二部份為雷射光之啟動及雷射光束之路徑設置，第三部份為操作同步訊號控制器，使訊號能穩定輸出，並控制 PCAOM 切換光束，第四部份為操控數位攝影機 CCD 並擷取影像，以茲說明如下：

一、試驗模型之佈置

1. 將試驗底床模型放入試驗渠槽內，上游處放置一整流模型，並調整坡度為 0.001。
2. 將水注入試驗渠槽中，上游水深分別調控為 5 及 6cm，開啟抽水馬達控制流量，入流量分別控制為 60、80、100 (L/min)，共 12 組實驗案例，並使流場趨於穩定狀態，實驗案例表如表 2-1 所示。

3. 將顯影質點顆粒混合水注入循環水槽內，質點於雷射光頁下顯現出光點樣。

二、雷射光之啟動及雷射光束之路徑設置

1. 先將雷射冷卻水開啟，使雷射冷卻水水壓能穩定流量進入，將雷射開啟。等待雷射光輸出約 1 分鐘後，先將雷射功率微調增加至 1 瓦以適合調整雷射光束路徑。
2. 利用三個反射鏡及兩個凸透鏡將雷射光束導引至試驗斷面並聚光射至多彩聲光調變器 (PCAOM)，於 PCAOM 處將光束分為藍、綠兩光，再射至旋轉八面鏡於水中橫切面形成藍綠相間之光頁。
3. 在調控 PCAOM 方面，微調分光過程中會出現零階 (zero order) 及一階 (first order) 光束，微調時雷射光強度依然為 1 瓦，並選用強度較強的一階光束作為試驗所需要之光束。
4. 旋轉八面鏡之轉速控制部分，電流轉至 40 毫安培，利用粗調及微調將八面鏡調至試驗時所需之轉數，所需之轉數為切換頻率之 1/8 倍，以達到與同步訊號控制器同步之效果。

三、同步訊號控制器之調控

由 PCI-6601 卡調控同步訊號，此卡可穩定送出四道頻率，在此只使用中間兩控制鈕操控 PCAOM 儀器之藍、綠光切換，其切換頻率之部分由電腦內之軟體控制並輸出至控制卡中。如本實驗訊號輸送頻

率為 250Hz，即完成一次藍、綠切換時間差為 1/500 秒。

四、影像之擷取

利用 CCD 攝影機擷取經過雷射光頁下之質點影像，取像位置距上游處 60cm 處，如圖 2-13、2-14 所示。所擷取之影像為 640*480 畫素之彩色數位影像，其攝影機電子快門速度為 1/125(m/sec)。



第三章 CPIV 法影像原理與分析流程

楊昇學 (2002) 流體影像擷取後，進行影像訊號處理其流程可分為影像前處理及影像分析部分，其流程如圖 3-1 所示，其相關步驟茲說明如下：

3-1 CPIV 影像前處理

在 CPIV 影像之初步處理過程，首先將所擷取之數位影像檔進行處理，利用 Matlab 影像轉檔程式將影像原始之二維 RGB 亮度訊號值轉為 ASCII 檔，並將影像區分為藍色 (*imb*) 及綠色 (*img*) 之實數格式兩個檔案儲存，如圖 3-2 與圖 3-3，其亮度值範圍為 0-255 (0 為最暗，255 為最亮)，再進行影像分析及相關函數計算。

3-2 程式運算分析

原始影像經程式初步前處理後，影像數位訊號已成為整數格式，接著進行基本條件之設定，如圖 3-1 中，將設定條件放置於 `wale.in` 檔中，開始計算前，先將影像劃分為數個小區塊 (*small pattern*)，這些小區塊稱為質問窗 (*interrogating window*)，並以質問窗為影像計算處理基準，其質問窗之劃分及設定步驟如下：

1. 決定藍、綠影像訊號之順序。
2. 設定影像分析範圍：由於影像邊界處之亮度低較不清楚，因此，先去除不清楚的部分，設定清晰部分為影像分析範圍。

3. 設定影像質問窗大小：主要視影像品質及流場速度而定，一般採 20~32 個畫素範圍之間。
4. 設定質問窗移動大小：一般為質問窗大小之一半。
5. 設定質問窗之最大位移量：視影像品質而定，須小於質問窗之大小，一般採 10 個畫素。
6. 再以質問窗為計算單位，進行影像質點位移量之比對。

以上步驟方法將質問窗劃分設定完後，則進入程式計算部分，其所應用理論如下：

一、互相關函數法 (cross correlation)

依照影像訊號亮度值及設定質問窗大小進行影像分析，其步驟如下：



1. 由圖 3-4 所示之 *imb* 藍色影像訊號值為基礎，設定質問窗大小並且決定其形心位置點。
2. 由圖 3-4 所示之 *img* 綠色影像訊號值為影像訊號值位移與 *imb* 進行比對，並決定其影像質點之位移量，如圖 3-5 所示。位移量係利用互相關函數法摺積計算之，其最大值視為最有可能之位移量 (m, n)，此位移量即代表該質問窗之平均位移量，如圖 3-6 所示。

分離之互相關函數 (discrete cross correlation function) 計算，其定義為：

$$C_{ij}(m,n) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [imb(i,j)] \cdot [img(i-m, j-n)] \quad (3-1)$$

其中， $C_{ij}(m,n)$ 為摺合積分值，其最大值作為判定 m 與 n 位移量； imb 及 img 分別為藍、綠影像之亮度分佈值； i 及 j 為兩張影像比對之初始位置， m 及 n 為 imb 及 img 橫軸及縱軸之位移量，因此 $(i-m, j-n)$ 為 img 與 imb 相配(matching)的位置。

二、影像演算法-常態化互相關係數法 (NCC 法)

於常態化互相關係數法(Normalized Cross Correlation coefficient, NCC 法)中，直接設定質問窗大小與可比對之最大範圍，不受 2 的指數影響、質點密度分佈可設定有效質點數作為質問窗內之代表訊號，並避開影像訊號失真之困擾。並可針對計算所得之相關程度(介於 0 與 1 之間)進行決定，並取相關係數值之最大值，做為質問窗之位移量，其分析方程式如下：

$$\overline{C}_{ij}(m,n) = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [imb(i,j) - \overline{imb}] [img(i-m, j-n) - \overline{img}]}{\sqrt{\sigma_1(i,j) \sigma_2(i,j)}} \quad (3-2)$$

$$\sigma_1 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [imb(i,j) - \overline{imb}]^2 \quad (3-3)$$

$$\sigma_2 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [img(i-m, j-n) - \overline{img}]^2 \quad (3-4)$$

$$\overline{imb} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N imb(i,j) \quad (3-5)$$

$$\overline{img} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N img(i-m, j-n) \quad (3-6)$$

其中， \overline{imb} 為 imb 影像畫素之平均值， \overline{img} 為 img 影像畫素之平均值； m 與 n 為質問窗內之位移量； M 及 N 分別為質問窗在 i 方向及 j 方向大小。

質問窗內之數位影像訊號經由 NCC 法計算得出質問窗之平均位移量，再利用 $\overline{C_{ij}}(m,n)$ 判定質問窗內之相關程度是否可代表該質問窗之位移量，因此針對此 $\overline{C_{ij}}(m,n)$ 加以設定，如 $\overline{C_{ij}}(m,n) \geq 0.7$ ，則可判定此質問窗內之位移量為有效平均位移量。

三、子畫素之修正

由於在互相關函數計算時以整數畫素做運算，當質點位於兩個整數畫素間 $(i, i+1)$ ，質點在位移判斷上會有 ± 0.5 個畫素位移誤差值，為了降低位移誤差值，利用子畫素修正方法，增加計算之準確性，精確的算出位移量。其中修正方法有很多種，如高斯曲線子畫素修正法 (Gaussian curve-fitting)、拋物線子畫素修正法 (parabolic curve-fitting)、形心子畫素修正法 (centroid method) 子畫素修正、多次迭代方法、連續性質問窗動態技術、中央差分影像校正法、多項式差分法等方法來降低位移誤差值。以上修正方法中，以高斯曲線子畫素修正法使用較為普遍，由於從影像分析中所得之質點強度分佈較接近高斯分佈，因此，根據兩張影像之質點分佈，經由高斯曲線修正計算後之結果亦為高斯分佈。所以在子畫素修正法中利用高斯修正法較為

合理。

其差分演算法是利用鄰近之質問窗所得之相關係數值作為差分修正，演算式如下：

$$x = x_0 + \frac{\log \bar{C}(x_0 - 1, y_0) - \log \bar{C}(x_0 + 1, y_0)}{2 \left[\log \bar{C}(x_0 - 1, y_0) + \log \bar{C}(x_0 + 1, y_0) - 2 \log \bar{C}(x_0, y_0) \right]} \quad (3-7)$$

$$y = y_0 + \frac{\log \bar{C}(x_0, y_0 - 1) - \log \bar{C}(x_0, y_0 + 1)}{2 \left[\log \bar{C}(x_0, y_0 - 1) + \log \bar{C}(x_0, y_0 + 1) - 2 \log \bar{C}(x_0, y_0) \right]} \quad (3-8)$$

其中， x_0 與 y_0 為質問窗峰值所得之整數位移， x 與 y 為子畫素修正後之位移。

四、不一致資料去除與資料補遺

經高斯曲線子畫素修正法進行分析後，在影像計算過程中，質點與質點的比對過程，有時會發生誤判，而產生不一致向量之結果，如圖 3-7 所示，因此須將這些不一致之速度向量值去除，如圖 3-8 所示，並且將去除後之位置資料補圖。以下就資料判別、去除方法與修補步驟分別說明：

1. 速度值之判別：

$$Vel = \frac{\sum_{i=1}^8 |v_i - v_0|}{\sum_{i=0}^8 |v_i|} \quad (3-9)$$

$$v_i(k, l) = \sqrt{u(k, l)^2 + v(k, l)^2}, \quad (i=0, 1, \dots, 8) \quad (3-10)$$

其中， Vel 為周邊速度向量值之絕對差值，其容忍範圍約 20-35% (Nogueira et al. 1997)； v_0 為預待速度判斷； $v_i(k,l)$ ($i=1,\dots,8$) 為 v_0 周邊八個速度向量之平均速度； k 及 l 為質問窗位置； $u(k,l)$ 與 $v(k,l)$ 為質問窗水平速度與垂直速度。

2. 向量角度判別：

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^8 |\theta_i - \theta_0|}{\sum_{i=0}^8 |\theta_i|} \quad (3-11)$$

$$\theta_i = \tan^{-1} \frac{v(k,l)}{u(k,l)} + 360^0 \quad (3-12)$$

其中， θ_i ($i=0,1\dots8$) 為 $u(k,l)$ 與 $v(k,l)$ 之夾角，加 360^0 為確保 θ_i 為正值。

3. 有效資料之判別 (data validation)

$$val(k,l) = \sqrt{Vel^2 + \theta^2} \quad (3-13)$$

其中， val 為判別有效之向量值。

4. 在 val 設一有效標準值，判別 v_i 是否為有效值，根據前人(Jaw and Chen, 2000; Jaw et al., 2001; Nogueira et al., 1997)建議，依不同影像條件，設 val 值於 25-35% 以內為有效向量值。

5. 根據此方法重複 1 至 4 點，判別有效速度向量值，將有效之速度向量留下，並將不一致速度向量去除，如圖 3-8 所示。

經過以上判別後，將不一致速度向量資料去除，而此時被去除速度向量的地方為空白，因此須將所去除之向量值予以修補，利用數值

差分方式於周邊有效之向量值修補空白處之向量；若影像中同一空白區域處未超過設定值，則予以差分補圖，反之則不加修補，如圖 3-9 所示。

3-3 CPIV 法之誤差來源

影像計算之誤差約可分為以下三大類型：一、質問窗內質點的脫離或配對錯誤；二、隨機誤差 (random error) 或方均根誤差 (root-mean-square)；三、系統誤差 (systematic error) 或偏移誤差 (bias error)，茲說明如下：

一、質問窗內質點的脫離或配對錯誤：

假使 imb 藍色影像訊號質問窗較小時，而 img 綠色影像訊號質問窗與 imb 藍色影像訊號質問窗比對過程中可能因質點位移較大或離開量測位置，而造成位移量的誤差，其產生這些誤差之原因可能為流速過快、速度梯度過大、三維流場的變化使質點離開觀測位置。

為了降低質問窗內質點的脫離與配對錯誤所造成的位移誤差，可設定 imb 及 img 兩不同影像訊號之質問窗大小，如後續動態校正質問窗 (dynamic-adjusting interrogation) 方法為降低誤差方法之一。

二、隨機誤差或方均根誤差：

隨機誤差係由隨機性之因素所造成，誤差來源可能由於質點的比重與分佈密度、流體三維運動劇烈、速度梯度或剪力場較大、擷取影

像之背景雜訊影響等因素，為了降低所造成之誤差，因此增加實驗量測次數。此類誤差亦稱為精確誤差（precision error），其分散程度的大小則取決於測量值之標準差（standard deviation）或 RMS 誤差，如圖 3-10 所示。其公式如下：

$$d_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i \quad (3-14)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d_i - d_m)^2} \quad (3-15)$$

其中， d_i 為質問窗之位移量， d_m 為質問窗之位移平均值，RMS 誤差（ σ ）為質問窗位移量與平均值位移差之平方總和。

三、系統誤差或偏移誤差：

系統誤差來自於一些已知因素，如外在環境因素（溫度、電壓或 CCD 影像擷取、儲存傳輸過程）、人為操作不熟悉或設計原理有失誤造成系統偏差，此類誤差不含有隨機分佈之誤差，其偏差量有一致性，此類偏差可經由修正方法降低其誤差量，因此系統誤差亦稱為偏移誤差（bias error）。而於影像分析計算過程中，偏移誤差與互相關函數法之峰度值鎖定（peak-locking）有關，主要係因質問窗計算所得之峰度值（最有可能之位移值）與質問窗內之真實位移值無法完全的吻合。其定義偏移誤差（ d_b ）可利用已知之真實位移值（ d_a ），如位移 0 畫素（zero particle image displacement）或位移大於 1 畫素，與質問窗內計算所得之平均值（ d_m ）之差，如圖 3-11 所示，其公式如

下：

$$d_b = d_m - d_a \quad (3-16)$$

本研究利用十組影像，其位移量分別為已知之 0 至 9 畫素進行模擬(Liang et al. 2002)，此外亦進行隨機誤差分析，以確定影像分析方法適用於流場分析，其結果如下：

(1) 影像大小為 640*480 畫素、質問窗為 25×25 畫素大小，NCC 係數設為 ≥ 0.7 、分別利用高斯子畫素修正法、val 設為 0.3，計算結果如圖 3-12 所示，為位移 4 與 5 畫素之計算結果。並測試十張不同影像，其統計分析結果在 x 方向之方均根 (σ) 平均為 0.0155、平均偏差量 (d_b) 約為 0.001；y 方向方均根平均為 0.02、平均偏差量 (d_b) 約為 0.0002。

(2) 相同條件下，已知 1 至 9 畫素之位移量，分別利用不同子畫素修正法進行計算，所得結果如圖 3-13 與圖 3-14 所示，為計算之方均根誤差與偏差 (mean-bias) 誤差之結果。

由圖 3-13 與圖 3-14 果顯示，計算偏差值接近於整數畫素位置上，且偏移誤差相對於隨機誤差相差一個級數 (order)，因此，於計算誤差上主要誤差量來自於隨機誤差，誤差值約為 0.02，且偏差量對計算誤差影響不大。

3-4 有限質問窗尺寸所致誤差

有限質問窗尺寸之 PIV 法在準確性與空間解析度上須尋求一個適當的平衡點。較小的質問窗可提供較高的空間解析度，但所包含的資訊較少且較易受影響而產生計算誤差。當質點的位移增加時，若 image1(藍色)與 image2(綠色)影像之質問窗為相同大小，則保留在 image2(綠色)上質問窗之有效質點會減少，係因部分質點離開計算之有效區塊，可能導致質問窗內之質點配對誤差。早期 Keane and Adrain (1993)、Willert (1996)、Cowen and Monismith (1997)、Westerweel et al. (1997) 對此配對誤差問題提出質問窗動態位移 (window shift technique) 以解決質點脫離現象。此方法係將 image1(藍色)質問窗大小固定，於 image2(綠色)設定之質問窗放大兩倍，進行等質問窗之影像追蹤比對 (image pattern tracking)，可降低質點脫離現象與計算誤差。此方法解決質點脫離現象之問題時，如質問窗的質點追蹤比對未針對質點數量進行限制，則於質點密度高時容易產生多峰值之計算誤差現象，因此，對質問窗內之質點應有所限制，可有效地降低計算誤差。

為了降低在計算中質點的流失與質問窗內多峰值的產生，將質問窗設為可移動式，以尋找質問窗內之質點，進行動態比對方式，稱為動態校正質問窗。此方法可避免質問窗內之質點脫離現象、以及峰值

鎖定效應 (peak locking effects) 之誤差，並可降低質問窗內質點密度較高時多峰值所產生之誤差，其演算步驟如下：

1. 質問窗內質點的尋找方式如圖 3-15 所示，由每一個質問窗中心，以所設定的動態質問窗，如以 $9(H) \times 9(V)$ 之小質問窗內進行質點數比對，若質問窗內之質點數超過所設定之門檻值，則該質問窗即以 9×9 之尺寸進行相關函數運算，並做出位移量之判斷；
2. 若質問窗內之質點數低於所設定之門檻值，則該小質問窗須再往外增大，如 $13(H) \times 13(V)$ 、 $17(H) \times 17(V)$ ，直至質問窗擴大至與原設定質問窗相同大小為止。因此，動態校正質問窗可改善質問窗在質點分佈較密時，影像計算所造成之誤差量。



第四章 光滑底床與植生底床之渠道試驗

4-1 渠道水流穩定測試

本章研究重點在於水流剖面速度受到底床邊界層效應之影響及取像位置之區域是否為完全發展段。因此，進行水流通過試驗渠道之穩定測試，以瞭解水流進至觀測渠段為完全發展之渠段。

4-1-1 實驗結果分析

此階段主要量測水流通過試驗渠道時，由於邊界層與自由液面之影響所造成之速度剖面變化，因此，實驗時將以固定流量穩定地進入試驗觀察渠段，並固定其水深變化，其相關設定：上游水深為 6cm、入流量為 60L/min，渠槽坡降為 0.001，擷取影像位置為距離渠道入口 60cm 處，藉由 CCD 擷取影像，如圖 4-1 所示，並進行影像分析，其所得結果如圖 4-2~4-4 所示。分別為原始影像、速度向量分佈、速度剖面：

- 1.由圖 4-3、4-4 速度向量分佈圖、 $\ln(y)$ 與 V/V^* 關係圖所示，可看出近壁區中平均速度分佈符合對數定律 (Log-law)。
- 2.根據以上結果分析，當水深 6cm、流量 60L/min 時，近壁區中平均速度分佈符合對數定律 (Log-law)，因此，可以假設此區域為完全發展段。而本研究主要實驗之控制條件於水深為 5 及 6cm，流量為 60、80、100L/min，在流速較快時，本區域亦為完全發展段。

4-2 光滑底床與植生底床渠道流場試驗

為瞭解水流通過植生底床所造成之水流變化影響，於研究設計上利用兩組不同底床表面進行研究，分別為光滑底床與植生底床渠道試驗。並藉由改變上游入流量及上游水深，以探討於不同底床下水流流場之變化影響及水深與流速之關係，藉由試驗結果探討其植生之阻力及水流能量損耗率。

4-2-1 實驗結果分析

由於近植生處之流場瞬息變化，不能單只利用一張影像去評斷整個流場流況，因此，本研究進行時均化（time average）平均 30 約張影像而計算出平均流速分佈及渦流分佈，此外，為了解植生流場中渦流分佈情形，本文利用中央差分的方式計算空間中各點之渦度進行分析，渦度場之定義為 $2\omega = \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)$ ，代表速度向量 u, v 之速度梯度總和，由定義可知，渦度值越大則速度梯度總和越大，速度變化也越劇烈。

一、實驗案例結果說明

如表 4-1、4-2 所示，分別為實驗案例 1~12 之控制條件及各擷取影像之視窗大小。其中，實驗案例 1~3 為光滑底床渠道，上游水深為 5 cm，入流量分別為 60、80、100L/min，取像大小為 5.97cm×4.48cm；實驗案例 4~6 為光滑底床渠道，上游水深為 6 cm，入流量分別為 60、

80、100L/min，取像大小為 7.44cm×5.58cm；實驗案例 7~9 為植生底床渠道，植生高度約為 1.5 cm，上游水深為 5 cm，入流量分別為 60、80、100L/min，取像大小為 4.69cm×3.52cm；實驗案例 10~12 為植生底床渠道，植生高度約為 1.5 cm，上游水深為 6 cm，入流量分別為 60、80、100L/min，取像大小為 6.19cm×4.64cm；經由影像分析及時均化計算結果，其結果如圖 4-5 至圖 4-52 所示，分別為不同水深、流量及底床渠道下之流場原始圖、流場分佈向量圖、流場流線圖及渦度場圖。以下將此結果分別進行比較。

1. 案例 1 及案例 7（水深 5cm，流量 60L/min）

如圖 4-5 及圖 4-29 所示，分別為光滑底床及植生底床之流場原圖，比較兩不同底床明顯看出於植生底床渠道因受到植生影響，植生處之流場較為紊亂，顯影質點運動方向隨著植生擺動而改變其流動方向，而於光滑底床中之顯影質點移動方向平行於底床流動。如圖 4-7 及圖 4-31 所示，為流場流線圖，比較兩不同底床明顯可看出植生底床因受到植生擾動，顯影質點穿越植生間空隙處，質點運動方向從植生處位置裡向上流動，流線呈上揚現象。

2. 案例 2 及案例 8（水深 5cm，流量 80L/min）

如圖 4-9 及 4-33 所示，分別為光滑底床及植生底床之流場原圖，比較兩不同底床明顯看出於隨著流量增加，植生底床渠道亦受到植生

影響，植生處之流場較為紊亂。如圖 4-11 及 4-35 所示，為流場流線圖，比較兩不同底床明顯可看出植生底床因底部受到植生擾動，流線往植生處位置向上流動。

3. 案例 3 及 案例 9 (水深 5cm，流量 100L/min)

如圖 4-13 及 4-37 所示，分別為光滑底床及植生底床之流場原圖，比較兩不同底床明顯看出於流量增加時，植生底床渠道亦受到植生影響，植生處之流場較為紊亂，而於光滑底床之流場較為穩定，顯影質點移動方向平行於底床流動。如圖 4-15 及 4-39 所示，為流場流線圖，比較兩不同底床明顯可看出流量增加時，植生底床亦底床受到植生擾動，顯影質點之運動方向，於植生內向上流動，流線呈上揚現象。



4. 案例 4 及 案例 10 (水深 6cm，流量 60L/min)

如圖 4-17 及 4-41 所示，分別為光滑底床及植生底床之流場原圖，比較兩不同底床明顯看出植生底床渠道亦受到植生影響，植生處之流場較為紊亂，顯影質點移動方向隨著植生擺動而改變其流動方向，而於光滑底床中之顯影質點移動方向平行於底床流動。如圖 4-19 及 4-43 所示，為流場流線圖，比較兩不同底床明顯可看出植生底床因受到植生擾動，顯影質點之運動方向，於植生內向上流動，流線呈上揚現象。

5. 案例 5 及案例 11 (水深 6 cm, 流量 80L/min)

如圖 4-21 及 4-45 所示, 分別為光滑底床及植生底床之流場原圖, 比較兩不同底床明顯看出於流量增加時, 植生底床渠道亦受到植生影響, 植生處之流場較為紊亂, 顯影質點移動方向隨著植生擺動而改變其流動方向, 而於光滑底床中之顯影質點移動方向平行於底床流動。如圖 4-23 及 4-47 所示, 為流場流線圖, 比較兩不同底床明顯可看出植生底床因底部受到植生擾動, 顯影質點穿越植生, 質點運動方向從植生處內往上流動, 流線呈上揚現象。

6. 案例 6 及案例 12 (水深 6 cm, 流量 100L/min)

如圖 4-25 及 4-49 所示, 分別為光滑底床及植生底床之流場原圖, 比較兩不同底床明顯看出於流量增加時, 植生底床渠道亦受到植生影響, 植生處之流場較為紊亂, 顯影質點移動方向隨著植生擺動而改變其流動方向, 而於光滑底床中之顯影質點移動方向平行於底床流動。如圖 4-27 及 4-51 所示, 為流場流線圖, 比較兩不同底床明顯可看出植生底床因受到底部植生擾動, 質點運動方向往植生處內位置向上流動, 流線呈上揚現象。

根據以上結果, 明顯看出流場受植生底床擾動的影響, 底床部分流場較為紊亂, 然而植生上方之流況趨於穩定狀態, 流線震盪幅度不大。

二、不同底床下流速分佈之比較

1.光滑平板渠道

由圖 4-53 所示，為水深 6 cm 之光滑平板渠道於不同流量下之流速剖面情形，可看出水流流經光滑平板渠道，雖然增加流量，流速也亦增加，但流速剖面線趨勢極為相似。而水深越大時，流速增加幅度卻並不大，斷面流速趨於一穩定狀態。其各案例結果彙整記錄於表 4-3 中，流量為 60、80、100L/min 之斷面平均流速分別為 5.74、10.80、16.34cm/s。

2.植生底床渠道

由圖 5-54 所示，為水深 6 cm 之植生渠道於不同流量下之流速剖面情形，明顯看出不同流量下，植生以下之流速緩慢，流速大約維持在 1~5cm/s。當流量增加時，位於植生以上的區域，因渠道受植生阻礙影響，通水斷面束縮，而流速增大。其各案例結果彙整記錄於表 4-4 中，植生上方處之流速於流量為 60、80、100L/min 下分別為 4.0、4.9、7.7cm/s。

3.比較光滑平板底床與植生底床之差異

由圖 4-55 所示，比較光滑底床與植生底床的流速剖面圖，可看出植生底床下植生區域的流速較為光滑底床流速緩慢，但水流經植生上方區域後，因通水斷面束縮，開始比光滑底床的斷面流速快。

根據以上結果，水流經植生底床渠道，因受到植生阻力的影響，通水斷面束縮，使得植生上方區域流速增快，而植生區域的流速相對的減緩，因此，植生底床具有減緩流速的能力。

三、探討於不同底床下之水流阻力

1. 與曼寧 n 值之關係

於不同底床渠道下，植生渠道因底床受到植生影響，通水斷面束縮進而影響流速變化，曼寧 n 值也隨之變化，以下利用曼寧公式來求解，就水深、流速與曼寧 n 值間關係來探討：

$$V_1 = \frac{1}{n} R_1^{\frac{2}{3}} S_{f1}^{\frac{1}{2}} \quad (4-1)$$

$$V_2 = \frac{1}{n} R_2^{\frac{2}{3}} S_{f2}^{\frac{1}{2}} \quad (4-2)$$

其中， V_1 、 V_2 分別為光滑底床、植生底床之斷面平均流速； R_1 、 R_2 分別為光滑底床、植生底床渠道之水力半徑； S_{f1} 、 S_{f2} 分別為光滑底床、植生底床之能量坡降。

經上述計算分析，結果如表 4-3、4-4，可發現當水深越高時，曼寧 n 值則越大，另外，植生底床之曼寧 n 值亦大於光滑平板。其光滑底床曼寧 n 值變化不大，大約為 0.01，植生底床之曼寧 n 值約為 0.03。

2. 不同底床下阻力與速度之間關係

於流場渠道中，如圖 4-56 所示，一控制容積中的流體在 x 方向所受到的總力為

$$\sum F_x = \rho Q(v + \Delta v - v) \quad (5-3)$$

其渠道邊壁之剪應力 (τ_0) 計算如下：

$$-\gamma \Delta h A + \tau_0 P \Delta x = \rho A v \Delta v \quad (4-4)$$

$$\tau_0 = \gamma \frac{\Delta h}{\Delta x} \frac{A}{P} + \frac{\gamma}{g} \frac{A}{P} v \frac{\Delta v}{\Delta x} = \gamma R \frac{d}{dx} \left(h + \frac{v^2}{2g} \right) \quad (4-5)$$

$$\tau_0 = \gamma R S_f \quad (4-6)$$

其中， R 為水力半徑， S_f 為能量坡降。

如表 4-5、圖 4-57 及圖 4-58 所示經上述計算分析後之結果，與理論阻力公式比較阻力與速度之關係，因此，將無植生底床與植生底床之阻力與速度迴歸其關係，於光滑平板下，水流阻力與速度呈一線性關係，其相關係數 R 值達 0.789，如圖 4-57 所示；於植生渠道下，植生阻力與速度平方呈一線性關係，其 R 值達 0.897，屬高度相關，如圖 5-58 所示。

四、比較不同底床下之能量損失

於不同底床渠道下，水流流經植生渠道因受到植生阻力影響，造成能量損失。因此，以下就能量方程式 (energy equation) 來探討不同底床下之能量損失，如圖 4-59 所示：

$$H = Z_1 + y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_L$$

其中， Z_1 、 Z_2 分別為斷面 1、2 之底床高程； y_1 、 y_2 分別為斷面 1、2 之水深高度； V_1 、 V_2 分別為斷面 1、2 之平均流速； h_L 為總水頭

損失。

如表 4-6、圖 4-60 所示經上述計算分析後之結果，比較水流流經光滑平板渠道與植生渠道之能量損失，明顯看出植生渠道因受植生阻力影響，而能量損失變大，尤其當流量增加或者水深增加時，能量損失也隨之變大，其底床平板渠道之能量損失平均為 9.81%，植生渠道之能量損失平均為 11.81%。另外，由圖 4-60 中可發現光滑平板底床與植生底床於水深 5 cm 時能量損失幅度大於水深 6 cm。



第五章 結論與建議

5-1 結論

本研究應用彩色質點影像測速法(CPIV 法)進行植生渠道流場試驗，改變上游水深（5 及 6cm）及入流量（60、80、100L/min）以探討於不同底床下（光滑平板底床、植生底床）對流速剖面、曼寧 n 值、植生阻力及能量損失率之影響。綜合實驗結果分析，茲敘述如下：

1. 當水深 6cm、流量 60L/min 慢速流時，近壁區中平均速度分佈符合對數定律（Log-law），因此此區域已為完全發展段。
2. 根據實驗光滑底床及植生底床之流場原圖，比較兩不同底床明顯看出於植生底床渠道因受到植生影響，植生處之流場較為紊亂，顯影質點移動方向隨著植生擺動而改變其流動方向，而於光滑底床中之顯影質點移動方向平行於底床流動。
3. 根據實驗光滑底床與植生底床之流場流線圖，比較兩不同底床明顯可看出植生底床因受到植生擾動，流線往植生處位置向上流動，底部植生處之流場也較為紊亂而植生上方之流況趨於穩定狀態，流線震盪幅度不大。
4. 水流經植生底床渠道，因受到植生阻力的影響，通水斷面束縮，使得植生上方區域流速增快，而植生區域的流速相對的減緩。因此，植生底床有減緩渠流速的能力。

- 5.當水深越高時，曼寧 n 值則越大，另外，植生底床之曼寧 n 值亦大於光滑平板。其光滑底床曼寧 n 值變化不大，大約為 0.01，植生底床之曼寧 n 值約為 0.03。
- 6.將無植生底床與植生底床之阻力與速度迴歸其關係，於光滑平板下，水流阻力與速度呈一線性關係，其相關係數 R 值達 0.789；於植生渠道下，植生阻力與速度呈一線性關係，其相關係數 R 值達 0.90，屬高度相關，如圖 4-57 與 4-58 所示。
- 7.比較水流流經光滑平板渠道與植生渠道之能量損失，明顯看出植生渠道因受植生阻力影響，而能量損失變大，尤其當流量增加或者水深增加時，能量損失也隨之變大，其底床平板渠道之能量損失平均為 9.81%，植生渠道之能量損失平均為 11.81%。此外，光滑平板底床與植生底床於水深 5cm 時能量損失幅度大於水深 6cm 者。

5-2 建議

1. 本研究之實驗渠槽屬於小型渠槽，實驗條件、實驗模型都受到限制，因此，建議可擴大實驗渠槽的範圍。
2. 本實驗以慕絲水草為植生模型，往後可選擇河床護岸植生或保護渠道之植生來進行試驗研究。
3. 本研究之案例設計均為水深漫過植生高度，將來可朝向水深不及植生高度進行試驗研究。

4. 本實驗之 CPIV 法為二維量測方法，但實際植生渠道流場為三維流況，故對側向流況變化無法量測，建議未來可利用三維量測技術，以呈現真實三維流況變化。



參考文獻

1. Adrian, R. J. (1991), "Particle image techniques for experimental fluid mechanics", *Annual Review of Fluid Mechanics*, 23, 261-304.
2. Armanini, A., Righetti, M., Grisenti, P. (2006), "Direct measurement of vegetation resistance in prototype scale", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 43, No.5, pp. 481-487.
3. Capart, H., Young, D. L., and Zech, Y. (2002), "Voronoi imaging methods for the measurement of granular flows", *Experiments in Fluids*, 32, 121-135.
4. Carollo, F.G., Ferro, V., and Termini, D. (2005), "Flow Resistance Law in Channels with Flexible Submerged Vegetation", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 131, No. 7.
4. Cowen, E. A. and Monismith, S. G. (1997), "A hybrid digital particle tracking velocimetry technique", *Experiments in Fluids*, 22, 199-211.
5. Fincham, A. M. and Spedding, G. R. (1997), "Low cost high resolution DPIV for measurement of turbulent fluid flow", *Experiments in Fluids*, 23, 449-462.
6. Fincham, A. M. and Delerce, G. (2000), "Advanced optimization of correlation imaging velocimetry algorithm", *Experiments in Fluids*, (suppl.), s13-s22.
7. Forliti, D. J., Strykowski, P. J., and Debatin, K. (2000), "Bias and precision errors of digital particle image velocimetry", *Experiments in Fluids*, 28, 436-447.
8. Freek, C., Wu, K. A., and Hentschel, W. (1996), "A novel diode laser PIV/PTV system for investigation of intake flows in engines", 8th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon.
9. Gogineni, S., Goss, L., Pestian, D., and River, R. (1998), "Two-color digital PIV employing a single CCD camera", *Experiments in Fluids*, 25, 320-328.
10. Gui, L. and Merzkirch, W. (1998), "Generating arbitrarily sized interrogation windows for correlation-based analysis of particle image velocimetry recordings", *Experiments in Fluids*, 24, 66-69.
11. Gui, L., Merzkirch, W., and Fei, R. (2000), "A digital mask technique for reducing the Bias error of the correlation-based PIV interrogation algorithm", *Experiments in Fluids*, 29, 30-35.
12. Gui L, Merzkirch W. (2000), "A comparative study of the MQD method and several correlation-based PIV evaluation algorithms", *Exp Fluids*, 28, 36-44.
13. Gui, L., Longo, J., and Stern, F. (2001), "Biases of PIV measurement of turbulent flow and the masked correlation-based interrogation algorithm", *Exp. Fluids*, 30, 27-35.
14. Hesselink, L. (1988), "Digital image processing in flow visualization", *Annual*

Review of Fluid Mechanics, 20, 421-485.

15. He, Z. H., Sutton, M. A., Ranson, W. F., and Peters, W. H. (1984), "Two dimensional velocity measurements by use of digital speckle correlation techniques", *Experimental Mechanics*, 7, 117-121.
16. Huang, H. T., Fiedler, H. E., and Wang, J. J. (1993), "Limitation and improvement of PIV. I. Limitation of conventional techniques due to deformation of particle image patterns", *Exp. Fluids*, 15, 168-174.
17. Huang, H.T., Fiedler, H. E., and Wang, J. J. (1993), " Limitation and improvement of PIV. II. Particle image distortion, a novel technique", *Exp. Fluids*, 15, 263-273.
18. Huang, H., Dabiri, D., and Gharib, M. (1997), "On error of digital particle image velocimetry", *Meas. Sci. Technol.*, 8, 1427-1440.
19. Huang, H. T. (1998), "An extension of digital PIV-processing to double-exposed images", *Exp. Fluids*, 24, 367-372.
20. Hyun, B. S. (2003), "Assessment of PIV to measure mean velocity and turbulence in open-channel flow", *Experiments in Fluids*, 35, 262-267.
21. James, C. S. and Birkhead, A. L. (2004), "Flow Resistance of Emergent Vegetation", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 42, 390-398.
23. Jaw, S. Y. and Chen, J. P. (2000), "Development of Color Particle Image Velocimetry and It's Application in Rotating Flow", 9th Inter. Symp. On Flow Visualization, 152, 1-10.
24. Jaw, S. Y. and Wu, J. L. (2000), "Alternating Color Image Anemometry and It's Application", *Journal of Flow Visualization and Image Processing*, 7, 189-205.
25. Jaw, S. Y., Haik, Y., and Chen, J. P. (2001), "Visualization of magnetic micro-sphere mixing in biological fluid flow using color PIV", *Mechanics and Material Conference*, San Diego, U.S.A. 27-29.
26. Jordanova, A. A. and James, C. S. (2003), "Experimental Study of Bed Load Transport through Emergent Vegetation", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.129, No. 6.
26. Keane, R. D. and Adrian, R. J. (1990), "Optimization of particle image velocimeters, Part I : Double pulsed systems", *Meas. Sci. Technol.* 1, 1202-1215.
27. Kirby, J. T., Durrans, S. R., Pitt, R. and Johnson, P. D. (2005), "Hydraulic Resistance in Grass Swales Designed for Small Flow Conveyance", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 131, No. 1.
28. Landreth, C. C. and Adrian, R. J. (1988), "Electrooptical image shifting for particle image velocimetry", *Applied Optics*, 27, 4216-4220.
29. Liang, D. F. and Jiang, C. B. (2002), "A combination correlation-based interrogation and tracking algorithm for digital PIV evaluation", *Experiments in Fluids*, 33, 684-695.

30. Lourenco, L. and Krothapalli, A. (1995), "On the accuracy of velocity and vorticity measurements with PIV", *Exp. Fluids*, 18, 421-428.
31. Marzouk, Y. M. and Hart, D. P. (1998), "Asymmetric autocorrelation function to resolve directional ambiguity in PIV images", *Exp. Fluids*, 25, 401-408.
32. Meynart, R. (1980), "Asymmetric autocorrelation function to resolve directional ambiguity in PIV images", *Exp. Fluids*, 19, 1385-1386.
33. Musleh, F.A. and Cruise, J. F. (2006), "Functional Relationships of Resistance in Wide Flood Plains with Rigid Unsubmerged Vegetation", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 132, No. 2.
34. Nogueira, J. Lecuona, A., and Rodriguez, P. A. (1997), "Data validation, false vectors correction and derived magnitudes calculation on PIV data", *Meas. Science and Technology*, 8, 1493-1501.
35. Rehm, J. E. and Clemens, N. T. (1999), "An improved method for enhancing the resolution of conventional double-exposure single frame particle velocimetry", *Experiments in Fluids*, 26, 497-504.
36. Reynold, G. A., Short, M., and Whiffen, M. C. (1985), "Automated reduction of instantaneous flow field images", *Optical Engineering*, 24, 475-479.
37. Rosenfeld, A. and Kak, A. C. (1976), "Digital picture processing", 1, Academic Press, New York.
38. Scarano, F. and Riethmuller, M. L. (1999), "Iterative multigrid approach in PIV image processing with discrete window offset", *Experiments in Fluids*.
39. Scarano, F. and Riethmuller, M. L. (2000), "Advances in iterative multigrid PIV image processing", *Exp. Fluids*, 29, 51-60.
40. Stanislas, M., Okamoto, K. and Kahler, C. (2003), "Main results of the First International PIV Challenge", *Meas. Science and Technology*, R63-R89.
41. Stone, B. M. and Shen, H. T. (2002), "Hydraulic resistance of flow in Channels with cylindrical roughness", *Journal of Hydraulic Engineering*, 128, 500-506.
42. Choi, Sung-Uk and Kang, H. (2004), "Reynolds stress modeling of vegetated open-channel flows", *Journal of Hydraulic Research*, 42, 3-11.
43. Vogel, A. and Lauterborn, W. (1988), "Time resolved particle velocimetry used in the investigation of cavitation bubble dynamics", *Applied Optics*, 27, 1869-1876.
44. Westerweel, J. (1994), "Efficient detection of spurious vectors in particle image velocimetry data", *Experiments in Fluids*, 16, 236-247.
45. Westerweel, J., Draad, A., Hooft, J., and Oord, J. (1996), "Measurement of fully-developed turbulent pipe flow with digital particle image velocimetry", *Exp. Fluids*, 20, 165-177.
46. Westweel, J. (1997), "Fundamentals of digital particle image velocimetry", *Meas. Sci. Technology*, 8, 1379-1392.

47. Westerweel, J., Dabiri, D. and Gharib, M. (1997), "The effect of a discrete window offset on the accuracy of cross-correlation analysis of digital PIV recordings", *Exp. Fluids*, 23, 20–8.
48. Willert, C. E. and Gharib, M. (1991), "Digital particle image velocimetry", *Exp. Fluids*, 10, 181-193.
49. Willert, C. E. (1996), "The fully digital evaluation of photographic PIV recordings", *Appl Sci Res*, 56, 79–102.
50. Wu, Fu-Chun, Shen, Hsieh-Wen and Chou, Yi-Ju (1999), "Variation of Roughness Coefficients for Unsubmerged and Submerged Vegetation", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, No. 9.
50. Dong, Z. B., Gao, S. Y., and Fryrear, D. W. (2001), "Drag coefficients, roughness length and zero-plane displacement height as disturbed by artificial standing vegetation", *Journal of Arid Environments*, 49, 485-505.
51. 游新福、黃宏斌 (1992), "植生渠道阻力係數之研究", *台灣水利*, 第 40 卷, 第 4 期, 50-59。
52. 黃明興(1993), "植生倒伏對水流阻力影響之研究", 國立台灣大學農業工程學研究所碩士論文。
53. 楊昇學(2002), "彩色質點影像測速法於瞬間潰壩流場之試驗研究", 國立交通大學土木工程研究所碩士論文。
54. 黃于軒(2005), "彩色質點影像測速法於植生渠道流場之試驗研究", 國立交通大學土木工程研究所碩士論文。

表 4-1 實驗案例表

案例	入流量 (L/min)	上游水深 (cm)	上游流速 (cm/s)	雷諾數	上游福祿數 (Fr)
光滑平板底床					
1	60	5	10.00	4980	0.14
2	80		13.33	6640	0.19
3	100		16.67	8300	0.24
4	60	6	8.33	4980	0.11
5	80		11.11	6640	0.14
6	100		13.89	8300	0.18
植生底床					
7	60	5	10.00	4980	0.14
8	80		13.33	6640	0.19
9	100		16.67	8300	0.24
10	60	6	8.33	4980	0.11
11	80		11.11	6640	0.14
12	100		13.89	8300	0.18

L：特徵長度，在此定義為上游水深 (cm)

表 4-2 各案例取像之視窗大小

試驗方法	試驗底床	實驗案例	水深(cm)	視窗大小 (cm)
	光滑底床		6	8×6
CPIV	光滑底床	1~3	5	5.97×4.48
		4~6	6	7.44×5.58
	植生底床	7~9	5	4.69×3.52
		10~12	6	6.19×4.64

表 4-3 光滑平板底床之實驗結果

案例	入流量 (L/min)	上游 水深 (cm)	能量坡降 S_f	量測斷面平 均流速(cm)	曼寧 n	下游 Fr
光滑平板底床						
1	60	5	0.0029	11.57	0.011	0.17
2	80		0.0036	13.26	0.010	0.19
3	100		0.0042	16.91	0.008	0.25
4	60	6	0.0019	5.74	0.018	0.08
5	80		0.0023	10.80	0.011	0.14
6	100		0.0029	16.34	0.008	0.22

表 4-4 植生底床之實驗結果

案 例	入流量 (L/min)	上游 水深 (cm)	能量坡降 S_f	植生上方處 流速 (cm/s)	水深 3 公分處 之流速 (cm/s)	曼寧 n
植生底床						
7	60	5	0.0052	6.71	9.25	0.026
8	80		0.0095	7.41	13.49	0.025
9	100		0.0109	9.88	20.18	0.020
10	60	6	0.0048	3.95	7.92	0.037
11	80		0.0055	4.92	13.31	0.032
12	100		0.0063	7.73	16.76	0.022

表 4-5 不同底床下之水流阻力

案例	流量 (L/min)	上游水位 (cm)	底床剪應力 (N/m ²)	阻力 (N)
光滑平板底床				
1	60	5	0.951	0.012
2	80	5	1.189	0.015
3	100	5	1.379	0.017
4	60	6	0.695	0.009
5	80	6	0.856	0.011
6	100	6	1.070	0.013
植生底床				
7	60	5	2.085	0.026
8	80	5	2.424	0.030
9	100	5	2.764	0.034
10	60	6	1.451	0.018
11	80	6	1.683	0.021
12	100	6	1.915	0.024

表 4-6 不同底床渠道下之能量損失

案例	流量 (L/min)	上游水位 (cm)	斷面 1、2 間能 量損失(cm)	x=0 及 x=60 處之 總水頭損失(cm)	平均佔總能量損 失百分比(%)
光滑平板底床					
1	60	5	0.024	0.20	9.01
2	80	5	0.029	0.25	
3	100	5	0.034	0.29	
4	60	6	0.012	0.13	
5	80	6	0.014	0.16	
6	100	6	0.018	0.20	
植生底床					
7	60	5	0.051	0.43	11.81
8	80	5	0.059	0.50	
9	100	5	0.067	0.57	
10	60	6	0.023	0.25	
11	80	6	0.026	0.29	
12	100	6	0.030	0.33	

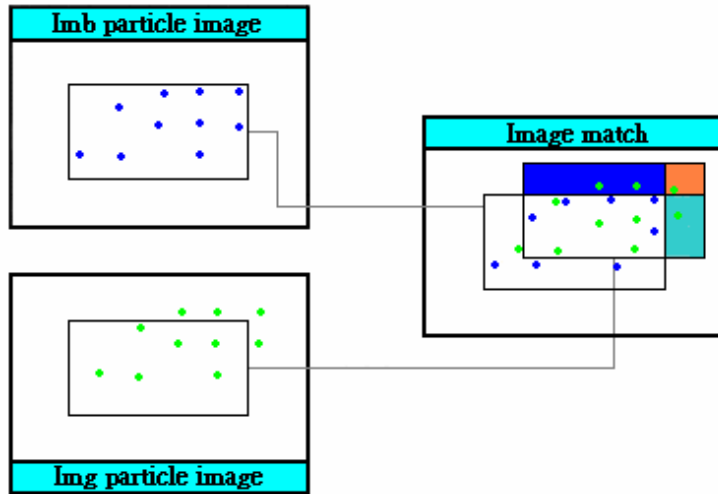


圖 1-1 固定質問窗演算技巧

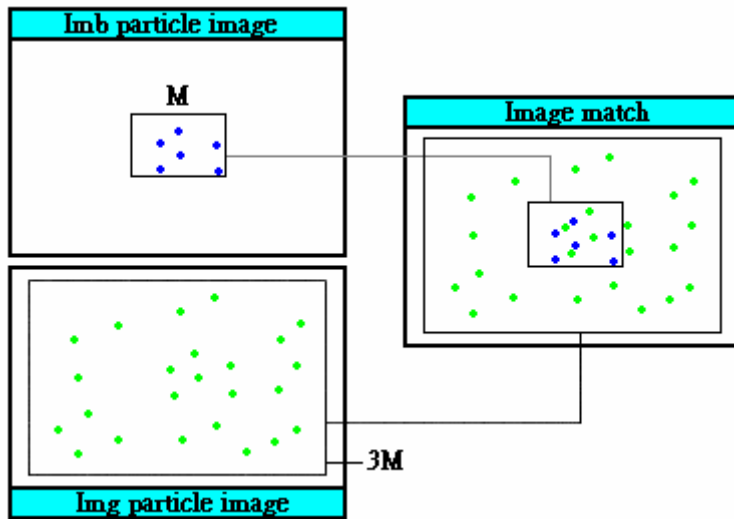


圖 1-2 img 影像質點的尋找範圍加大

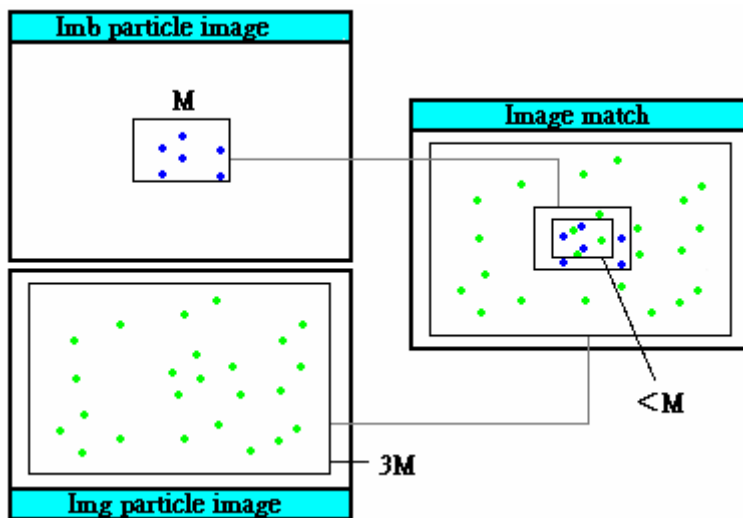


圖 1-3 動態校正質問窗示意圖

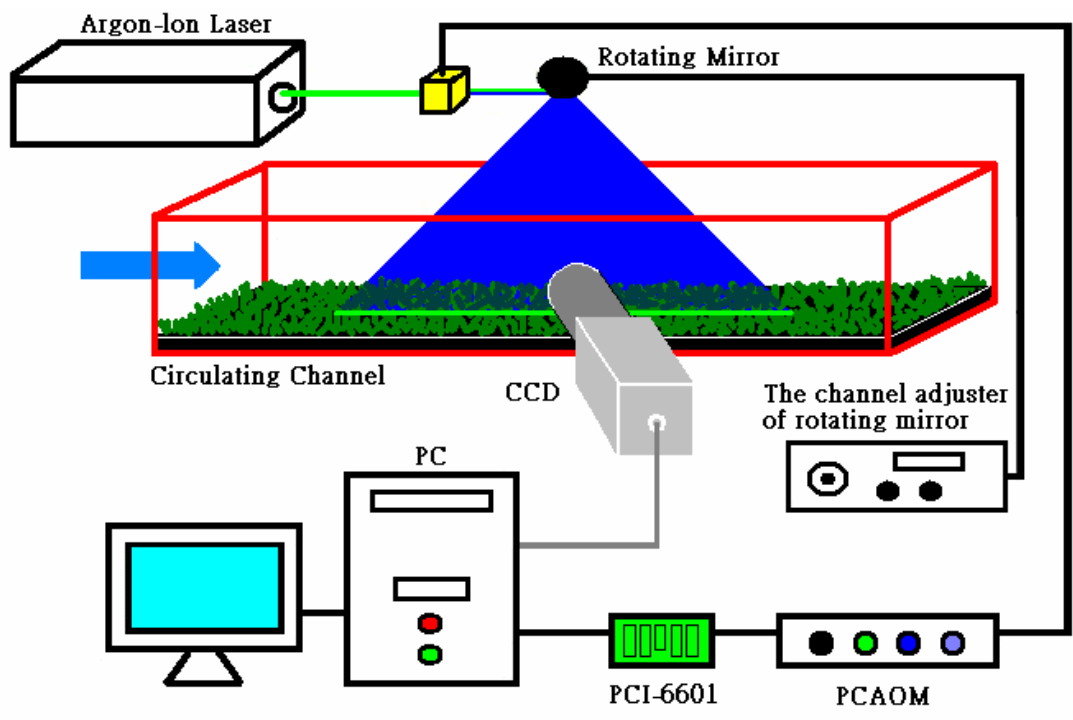


圖 2-1 儀器架設示意圖



圖 2-2 Agrun 雷射

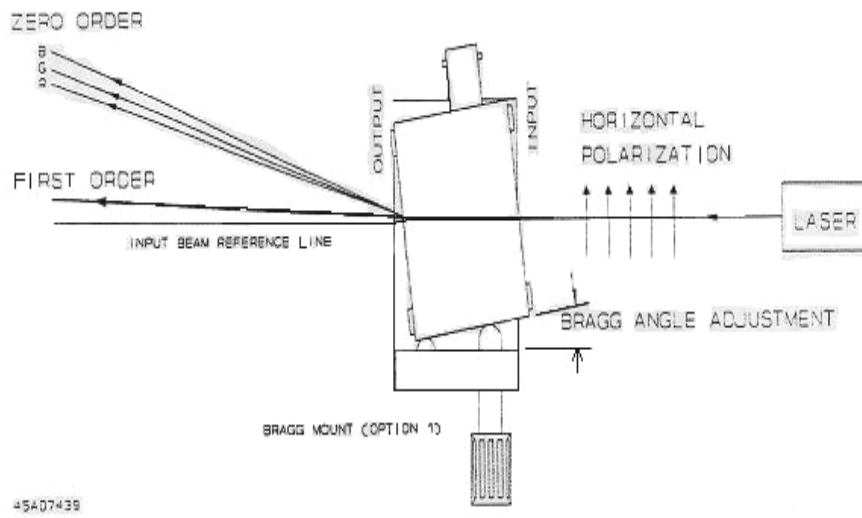


圖 2-3 PCAOM 所分出來之藍光及綠光示意圖



圖 2-4 多彩聲光調變器 (PCAOM)



圖 2-5 旋轉八面鏡



圖 2-6 PCI-6601 訊號控制卡

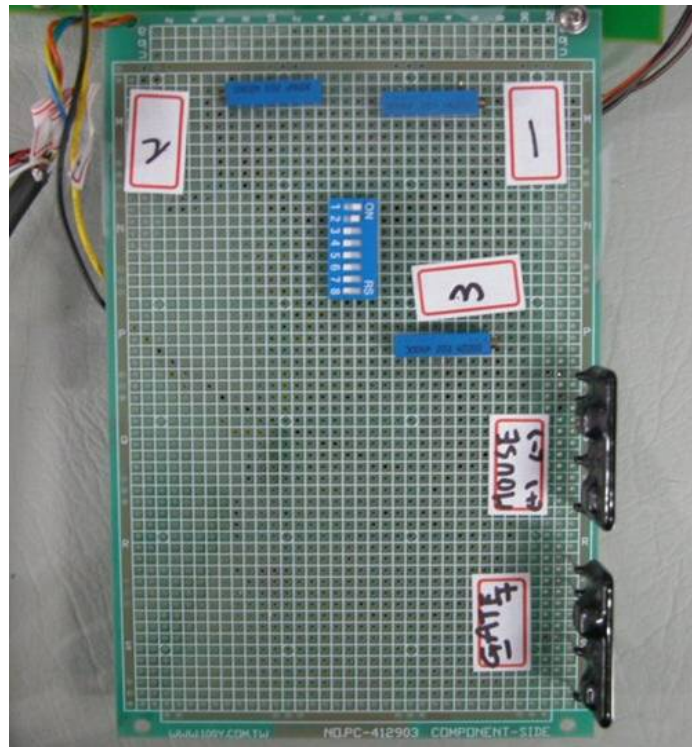


圖 2-7 自製降壓電路版



圖 2-8 實驗渠槽



圖 2-9 光滑底床渠道 I



圖 2-10 光滑底床渠道 II

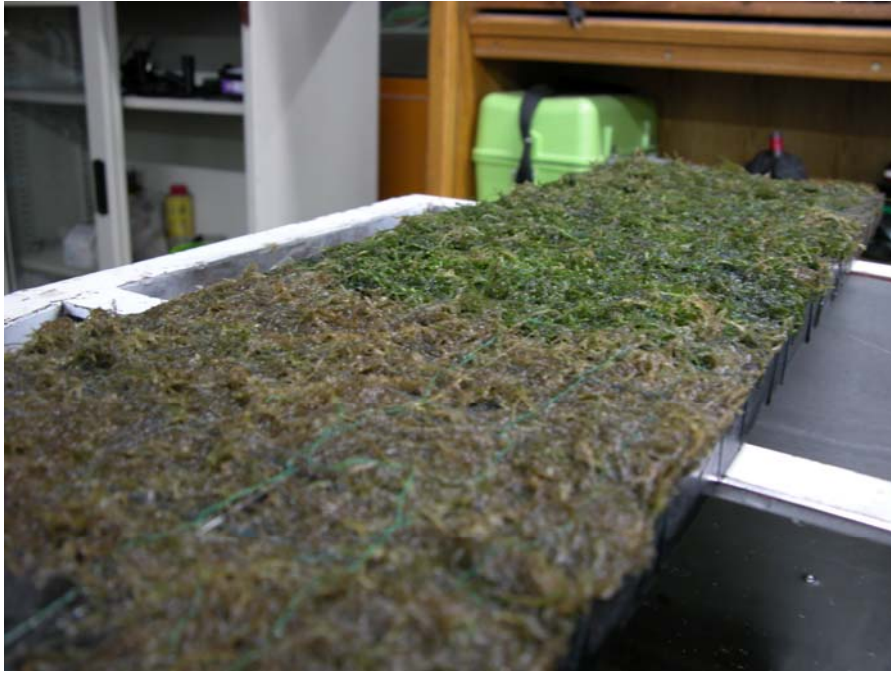


圖 2-11 莫絲水草底床



圖 2-12 植生底床渠道

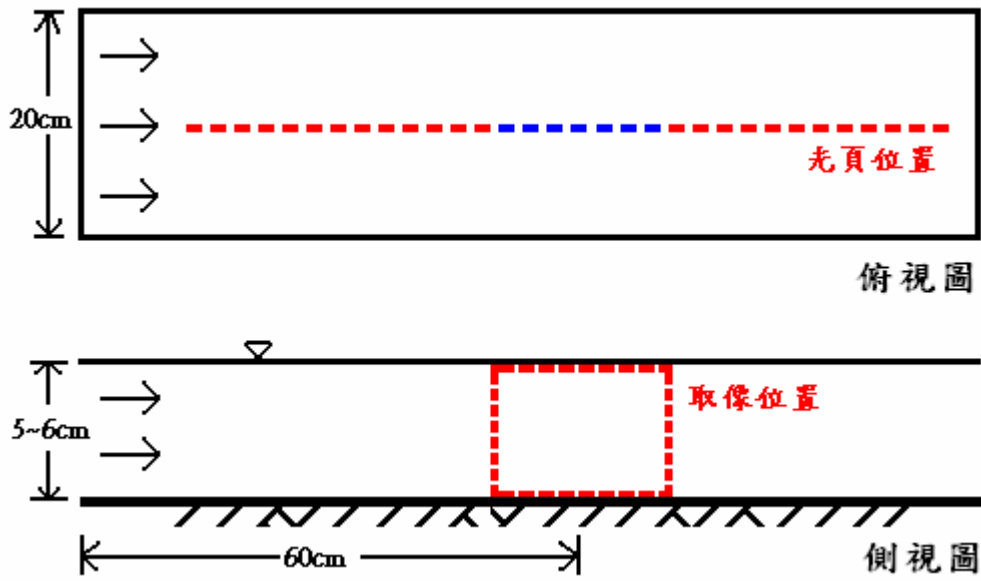


圖 2-13 光滑底床俯視圖與側視圖（案例 1-6， $Q=60\sim 100\text{L}/\text{min}$ ）

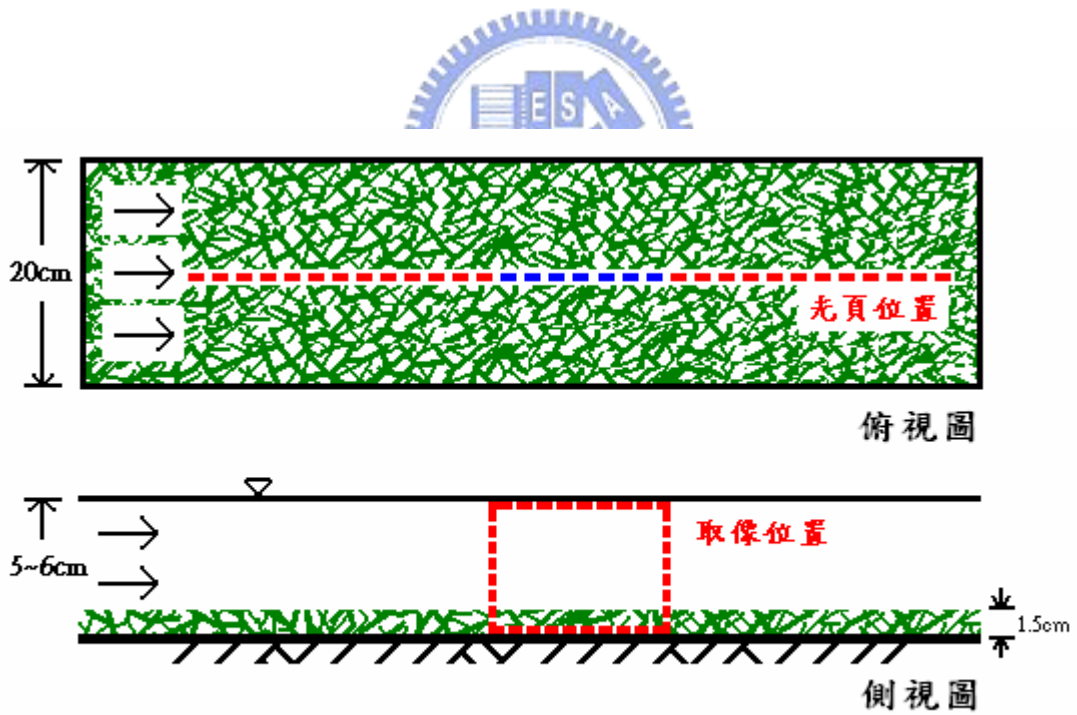


圖 2-14 植生渠道俯視圖與側視圖（案例 7-12， $Q=60\sim 100\text{L}/\text{min}$ ）

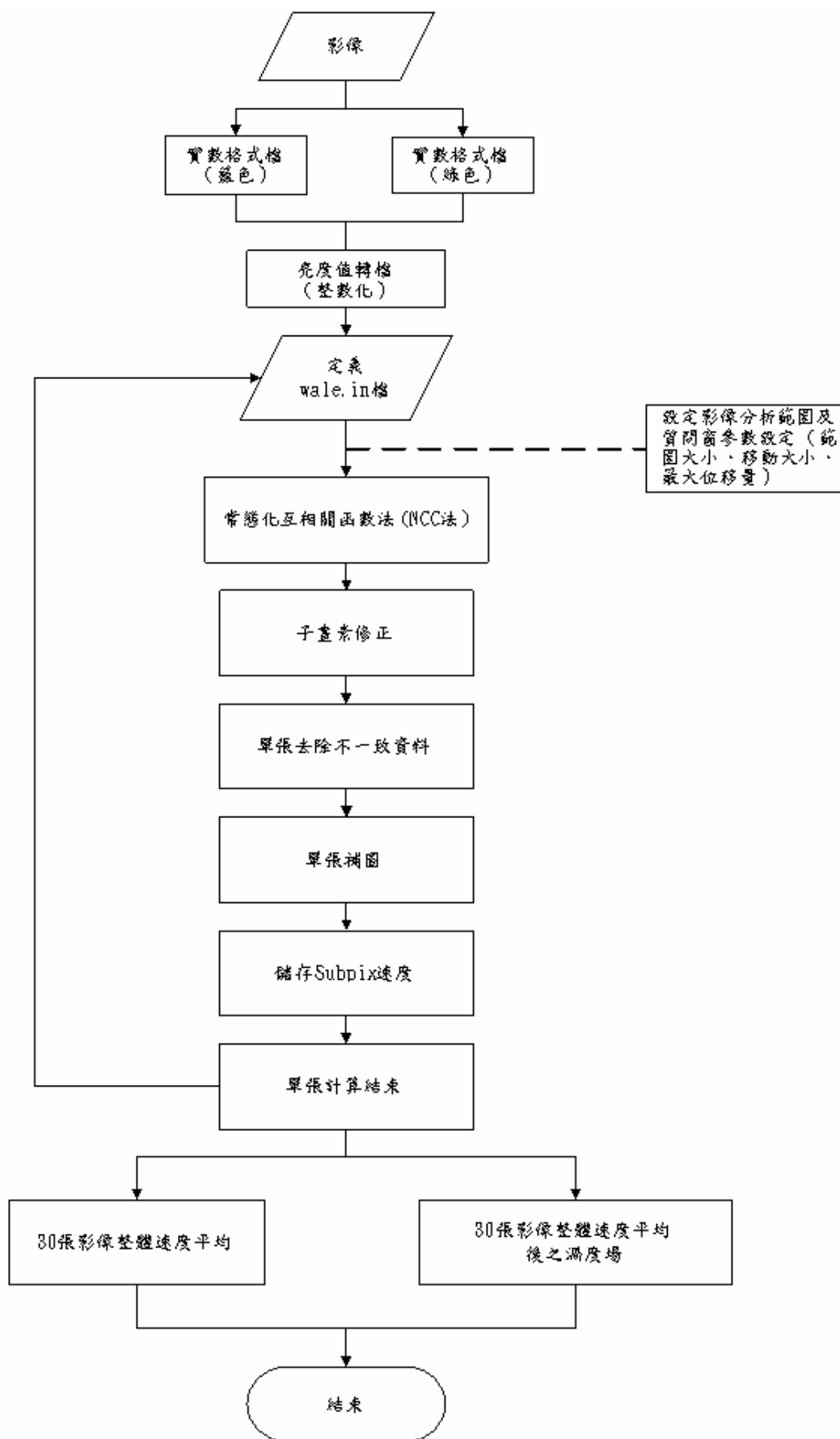


圖 3-1 影像計算分析之流程示意圖

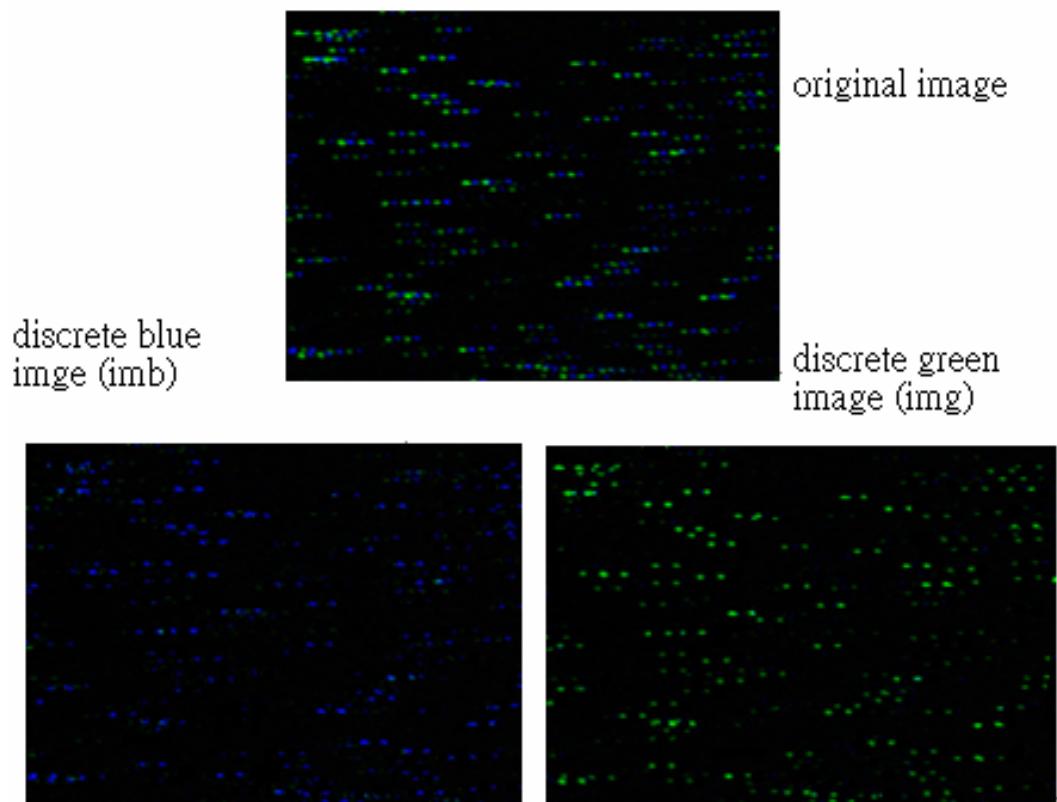


圖 3-2 上圖為原圖，左下為分離之藍色影像圖檔，右下為綠色影像圖檔

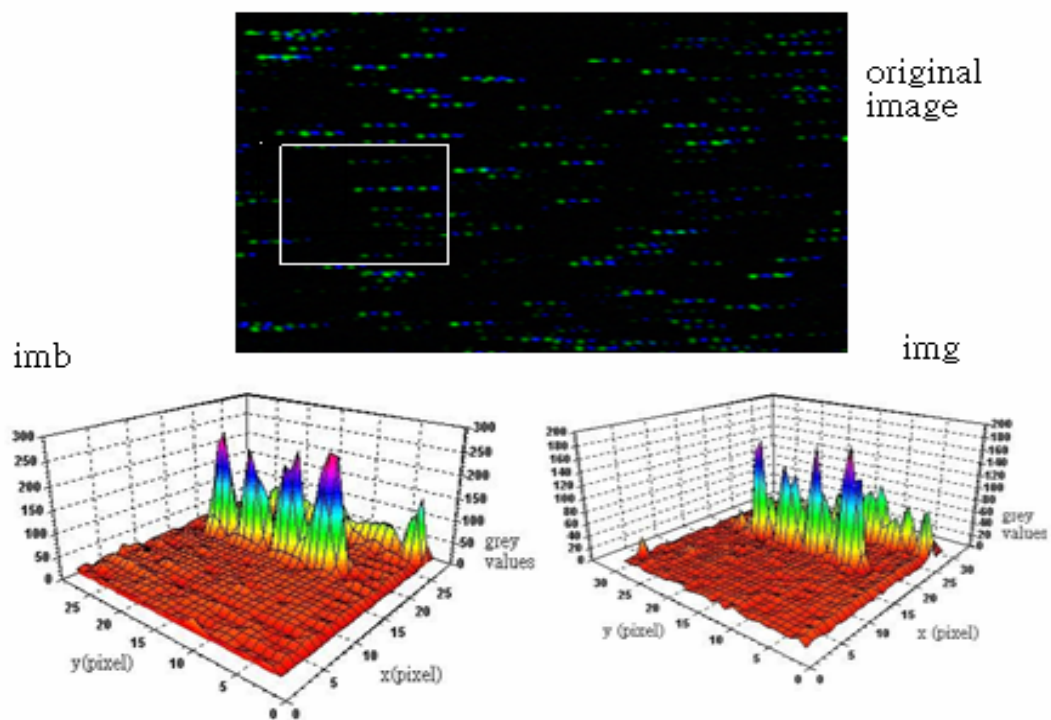


圖 3-3 藍、綠影像亮度分佈示意圖

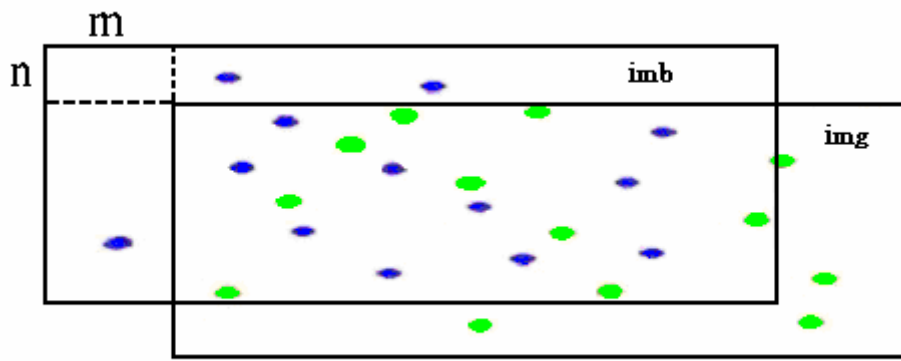


圖 3-4 imb、img 比對的方式

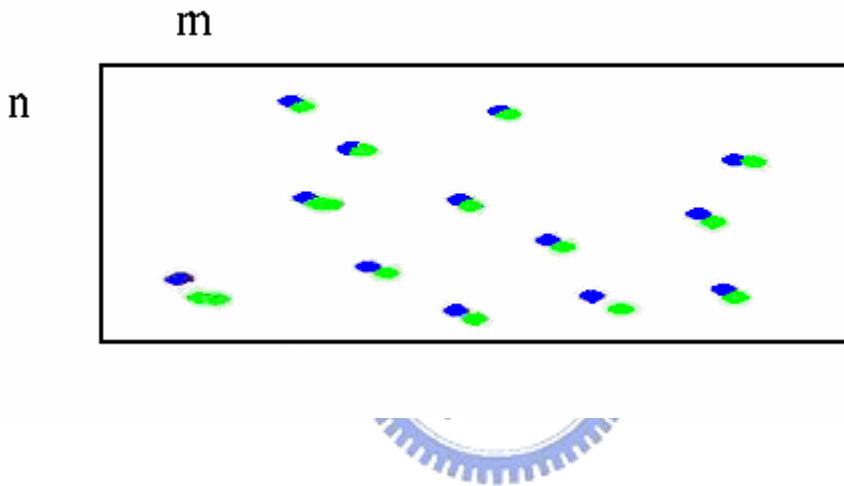


圖 3-5 將綠色點位移(m,n)後與藍色點重疊(matching)的情況

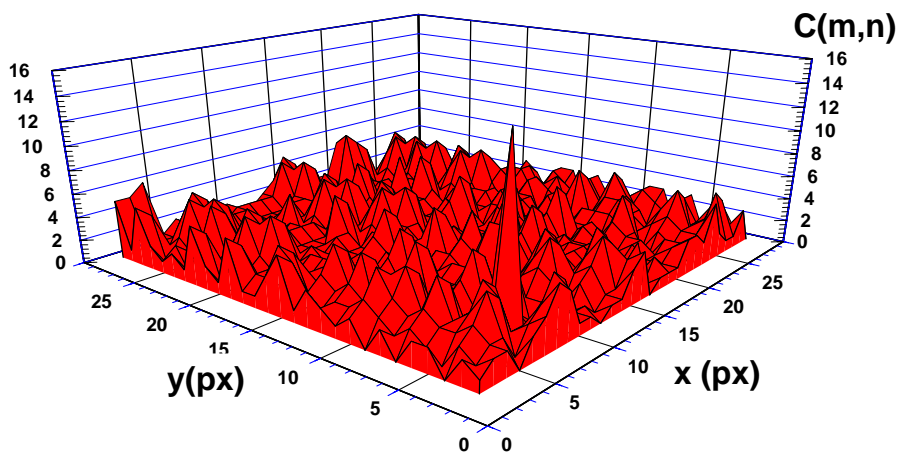


圖 3-6 互相關計算所得之 $C(m,n)$ 分佈示意圖

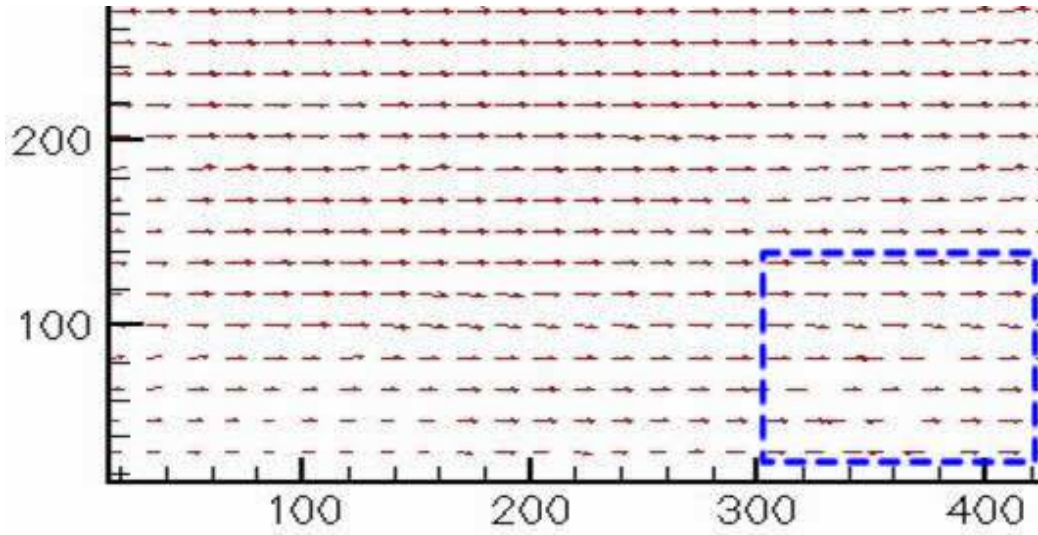


圖 3-7 不一致流速向量圖(右下角虛線框處)

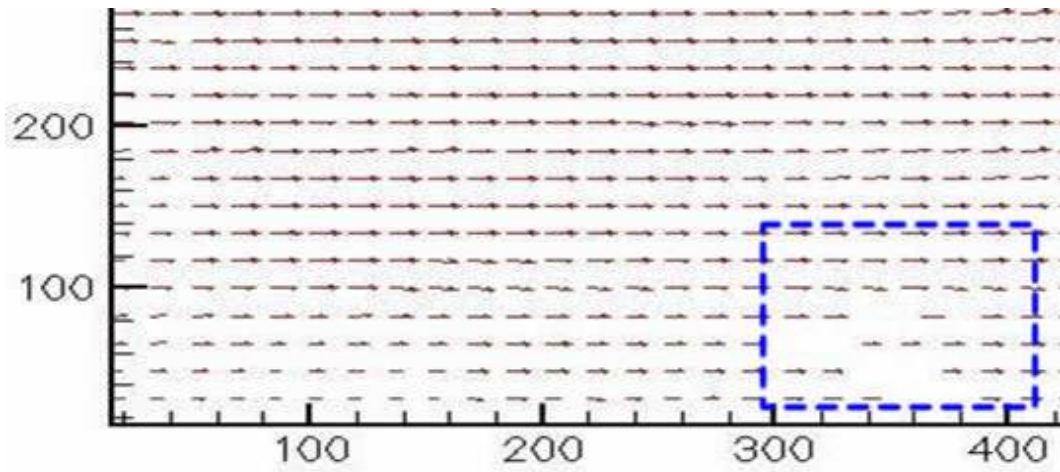


圖 3-8 去除不一致流速向量圖(右下角虛線框處)

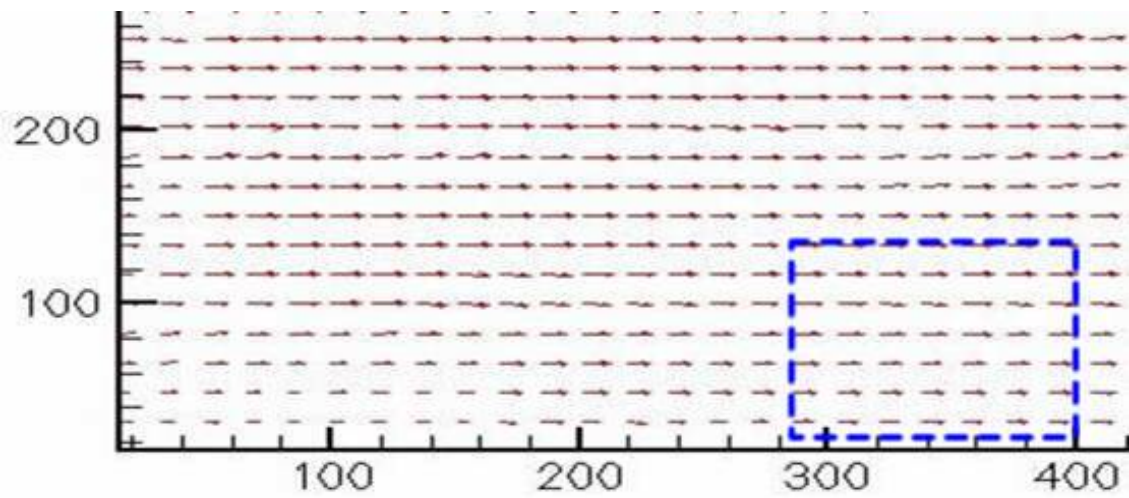


圖 3-9 經過補圖後之流速向量圖(右下角虛線框處)

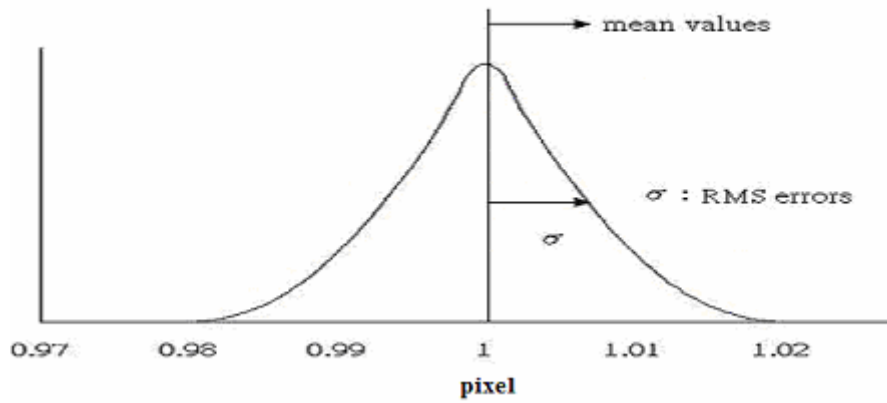


圖 3-10 RMS 誤差之示意圖

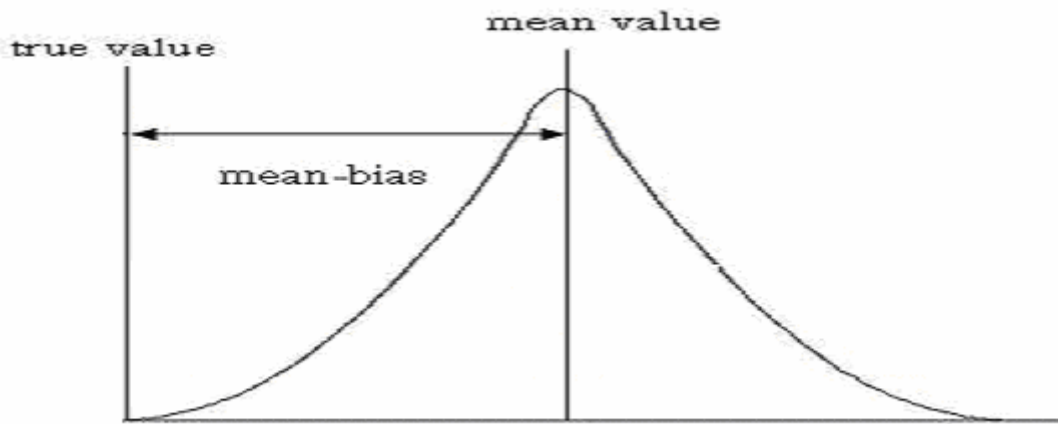


圖 3-11 偏差誤差之示意圖

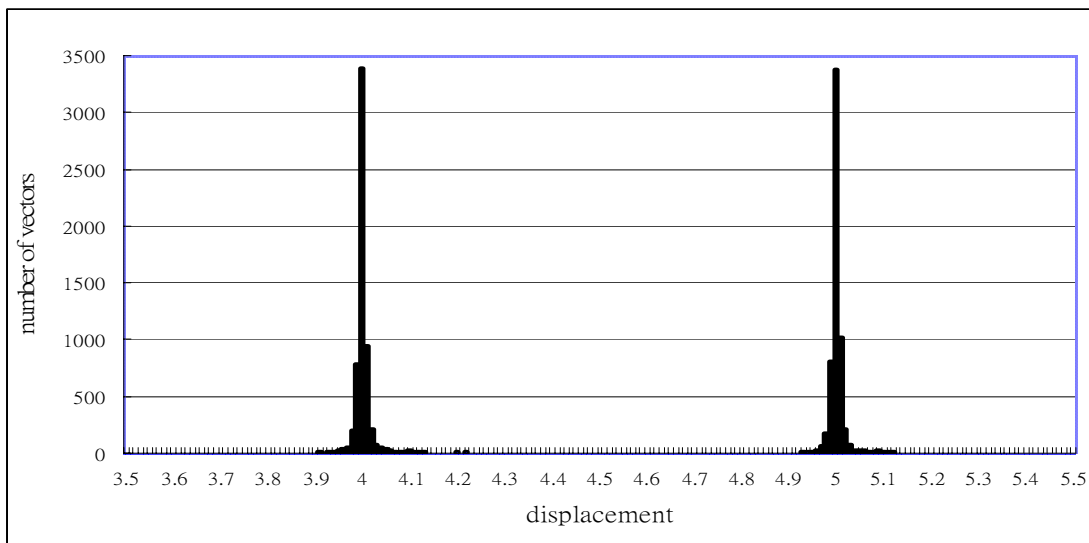


圖 3-12 已知位移量 4 與 5 畫素之計算結果

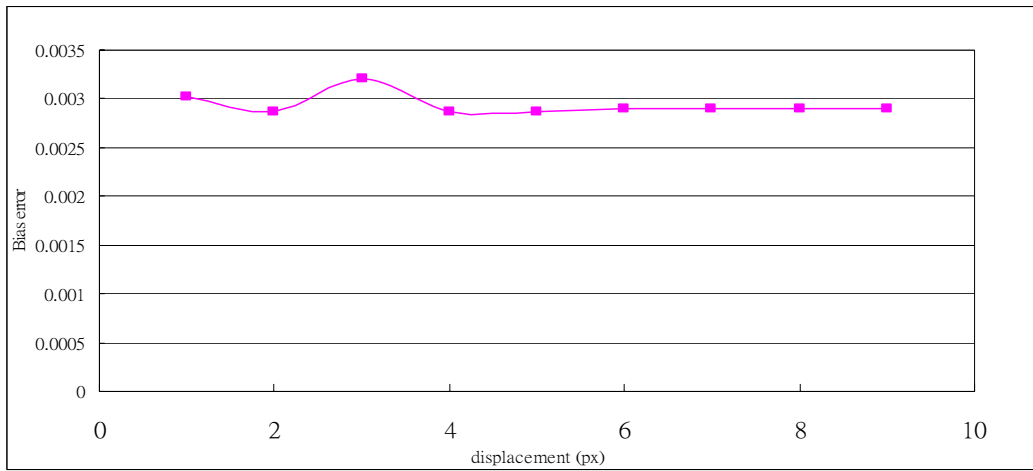


圖 3-13 偏移誤差分佈

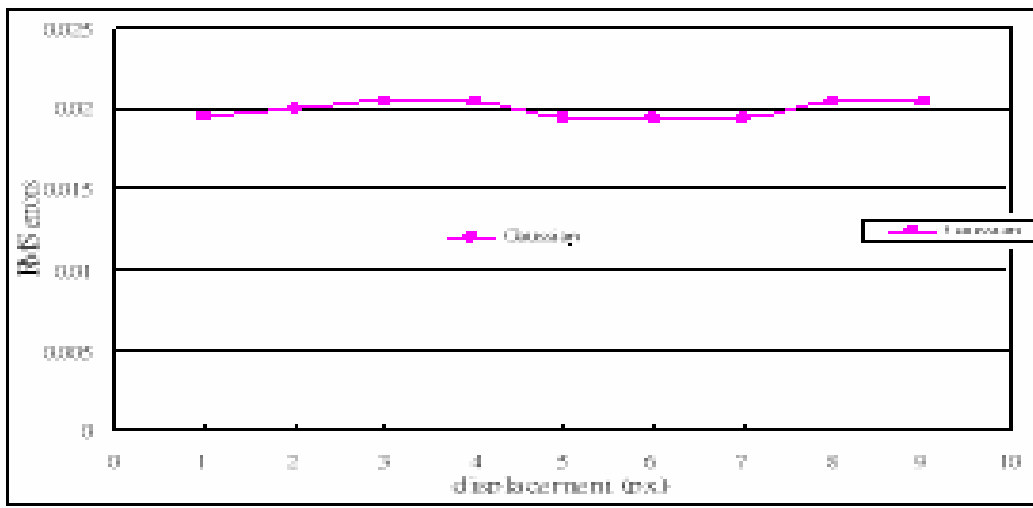


圖 3-14 隨機誤差分佈

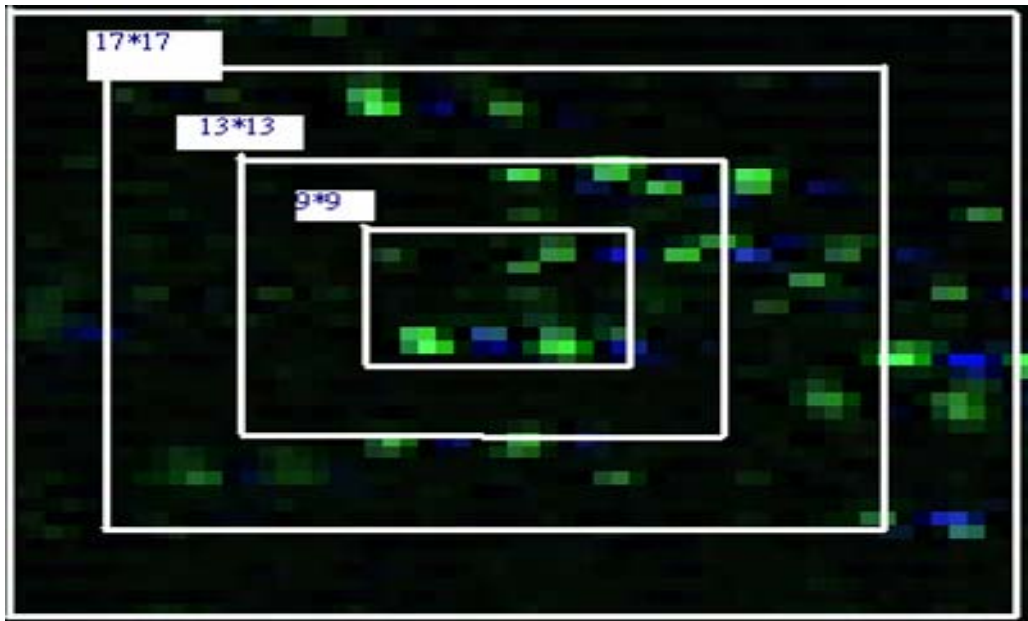


圖 3-15 質問窗内質點尋找方式之示意圖



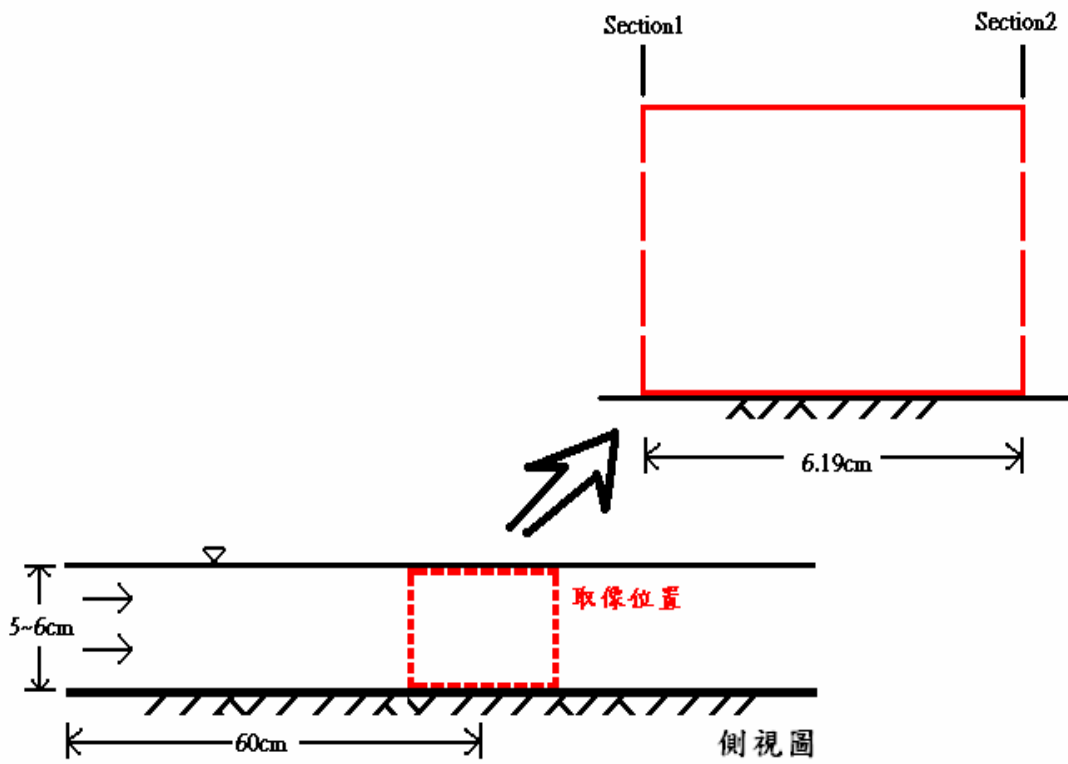


圖 4-1 流場穩定測試位置圖

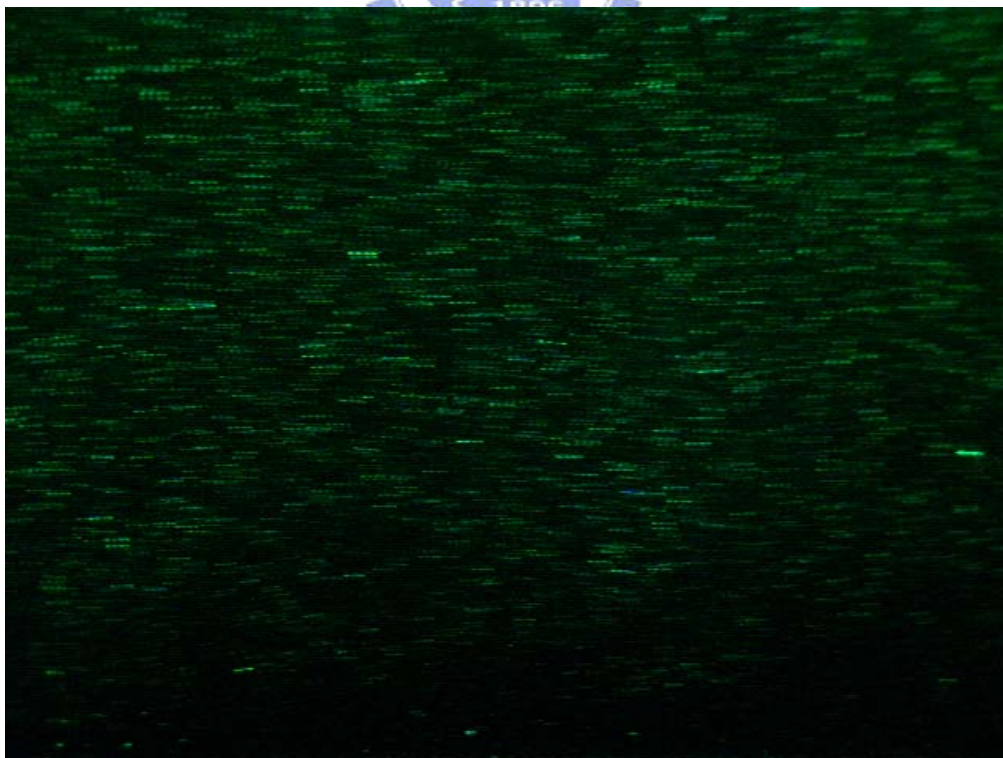


圖 4-2 流場原圖 (Q=60L/min, y=6cm)

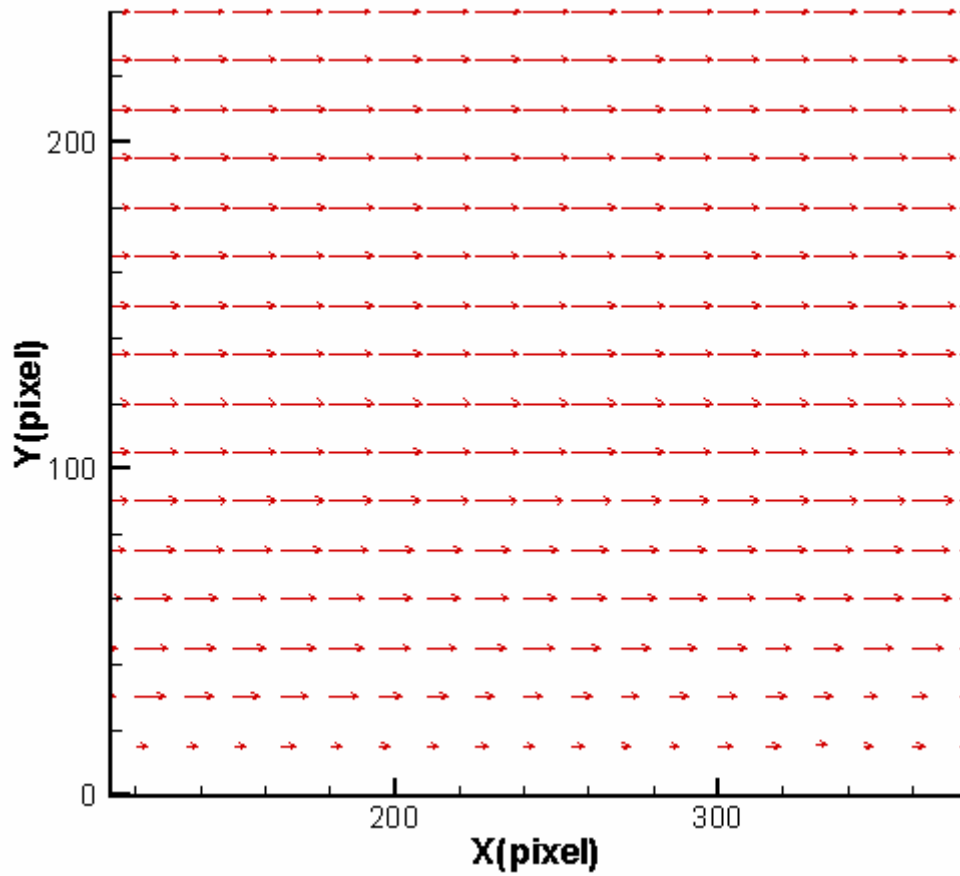


圖 4-3 速度向量分佈圖 (Q=60L/min, y=6cm)

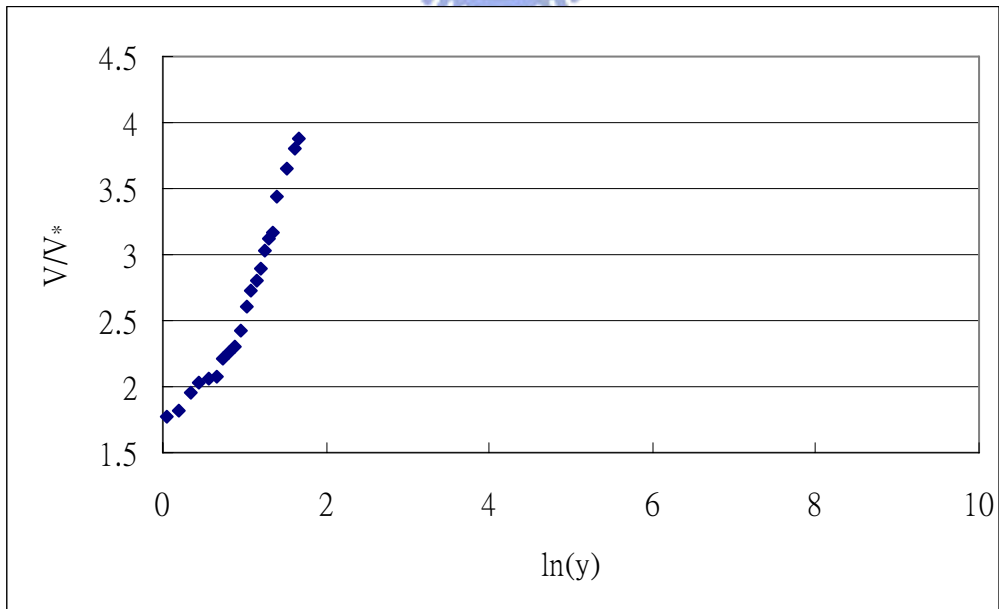


圖 4-4 $\ln(y)$ 與 V/V^* 之關係

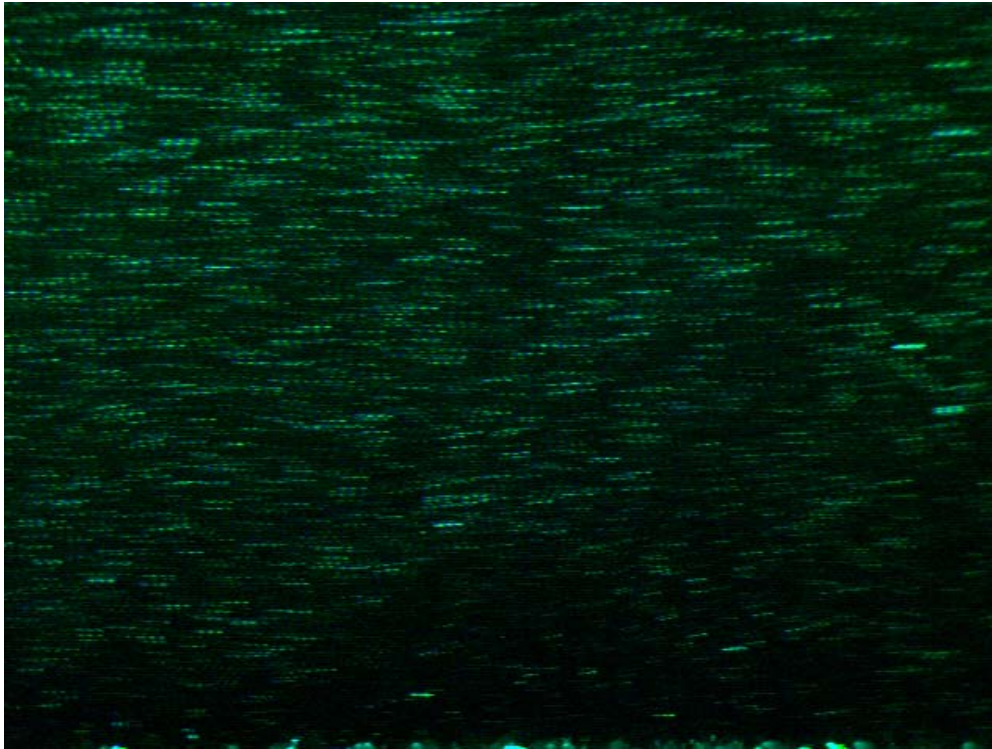


圖 4-5 案例 1 光滑底床之流場原圖 ($d=5\text{cm}$ 、 $Q=60\text{L/min}$)

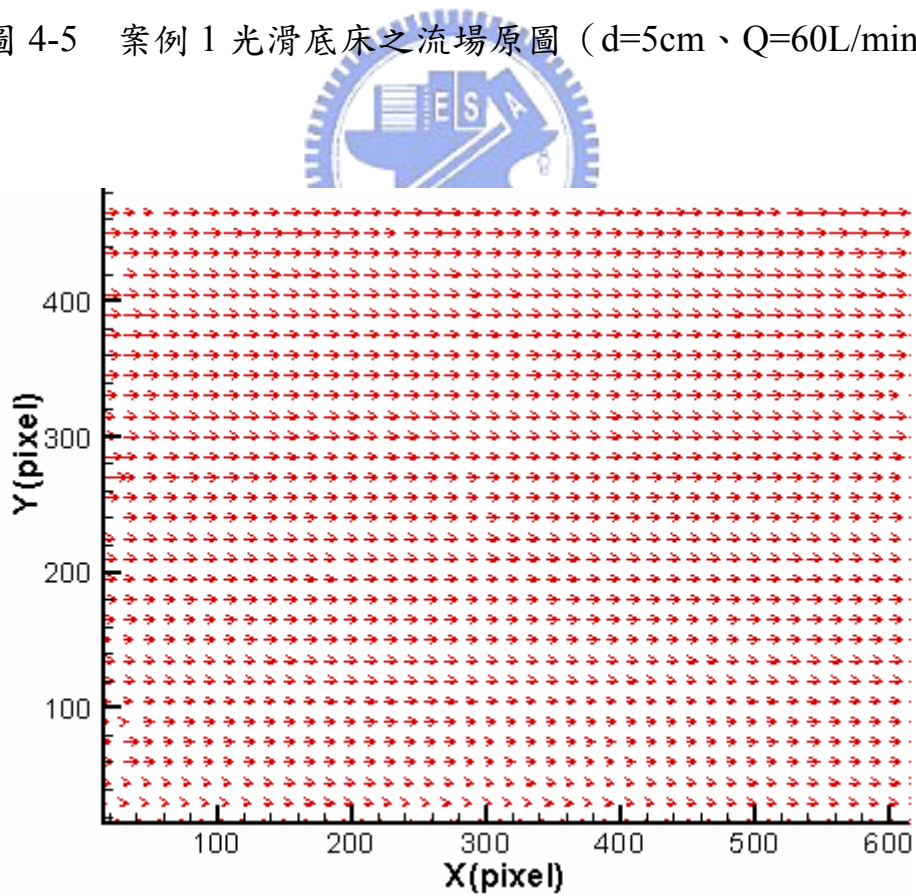


圖 4-6 案例 1 光滑底床之速度向量分佈圖 ($d=5\text{cm}$ 、 $Q=60\text{L/min}$)

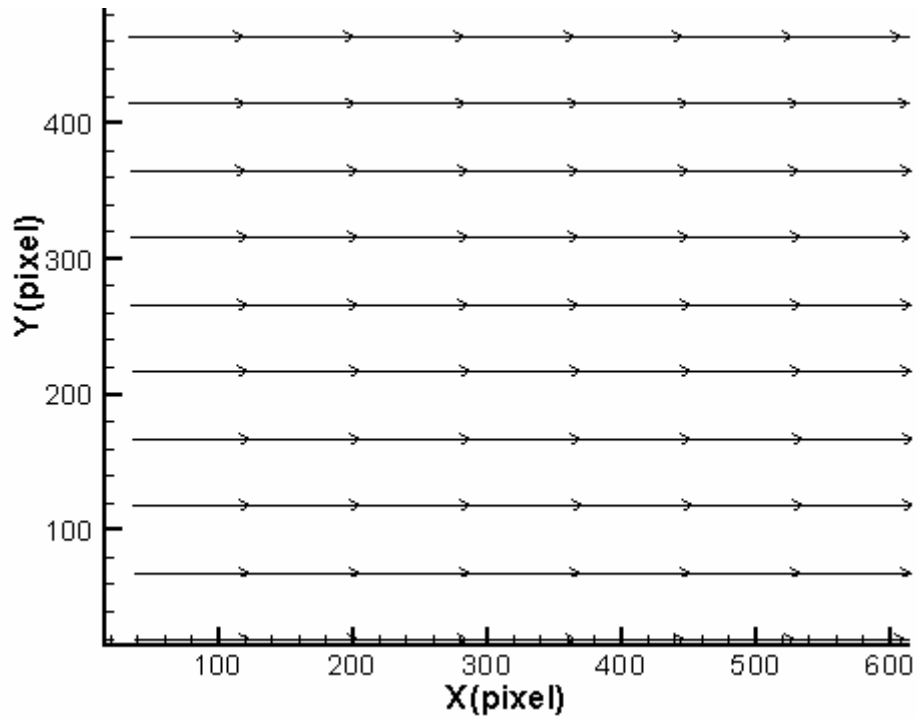


圖 4-7 案例 1 光滑底床之流線圖 (d=5cm、Q=60L/min)

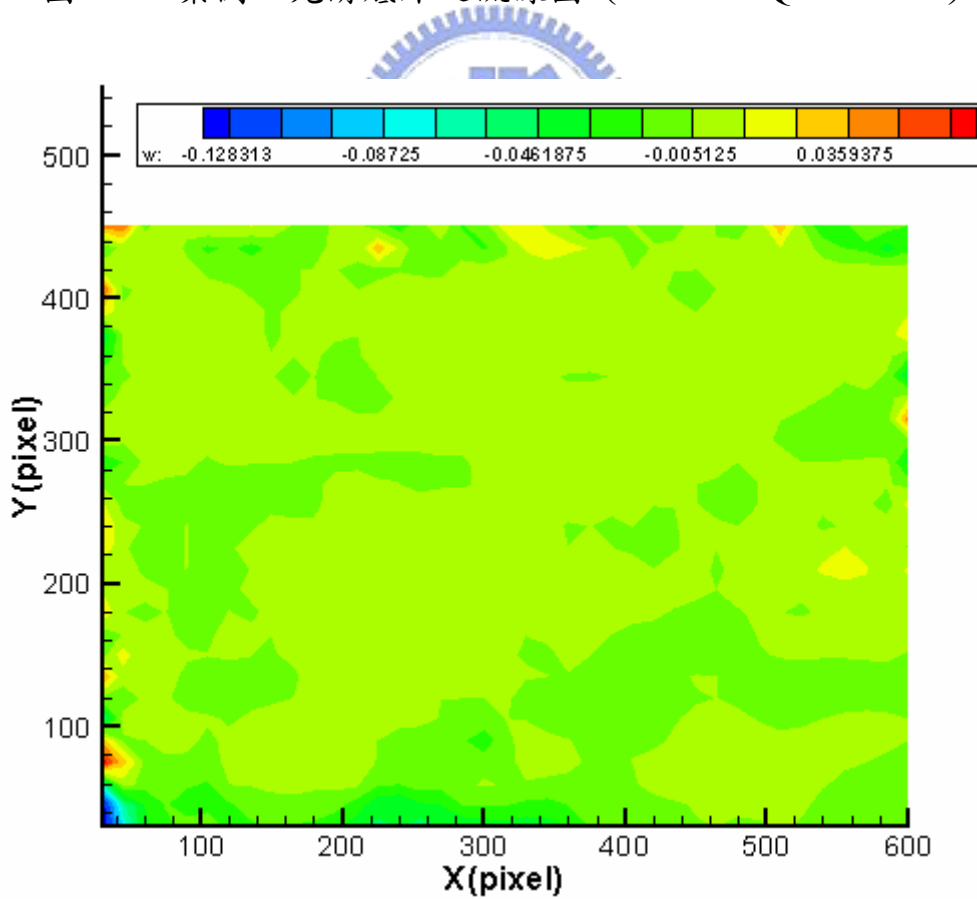


圖 4-8 案例 1 光滑底床之渦度場圖 (d=5cm、Q=60L/min)

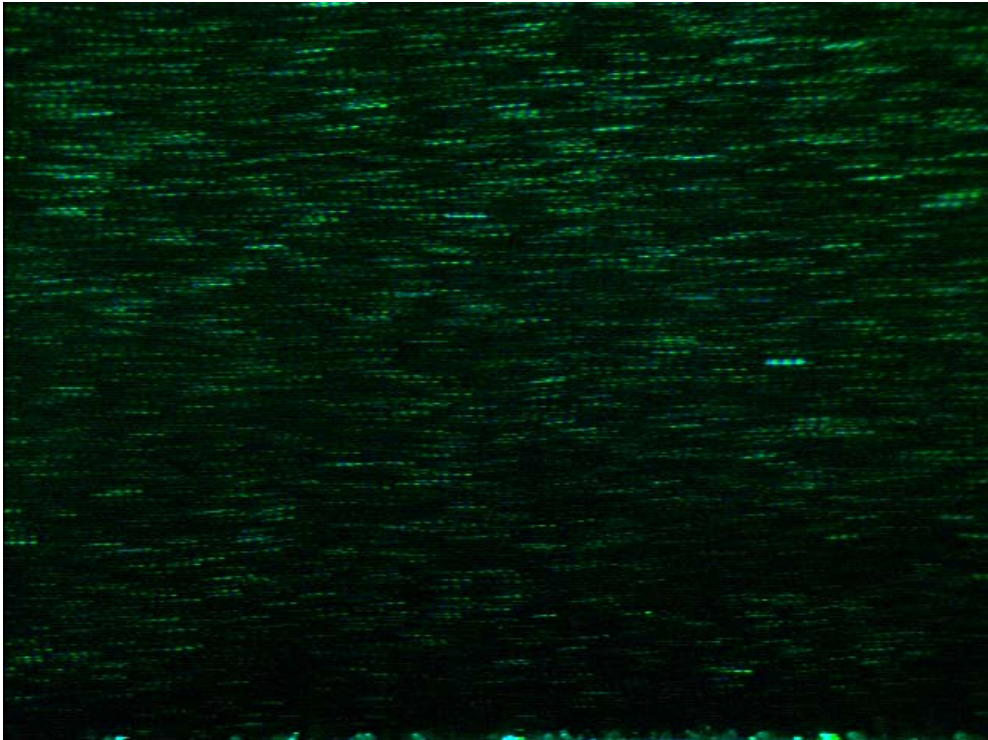


圖 4-9 案例 2 光滑底床之流場原圖 (d=5cm、Q=80L/min)

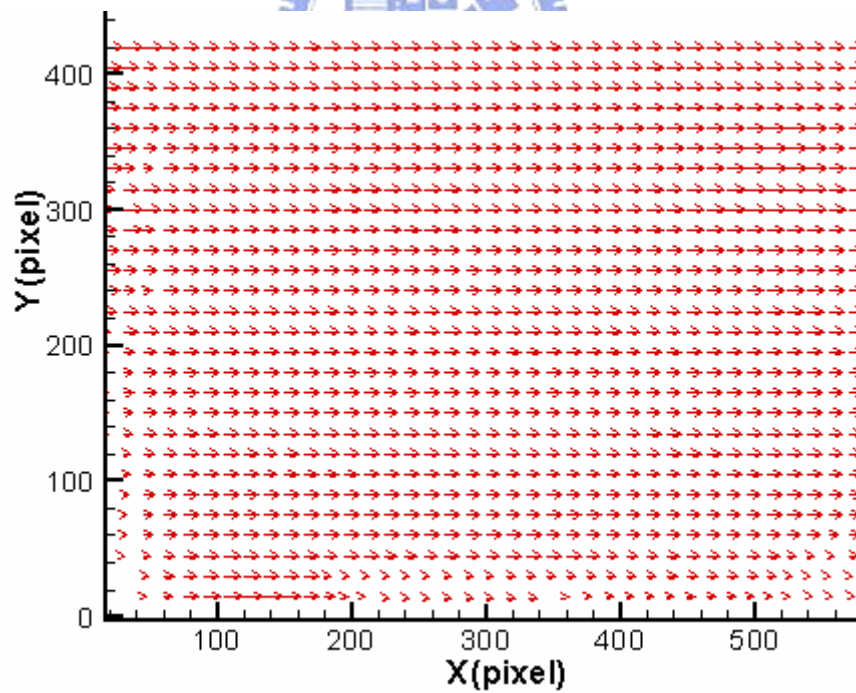


圖 4-10 案例 2 光滑底床之速度向量分佈圖 (d=5cm、Q=80L/min)

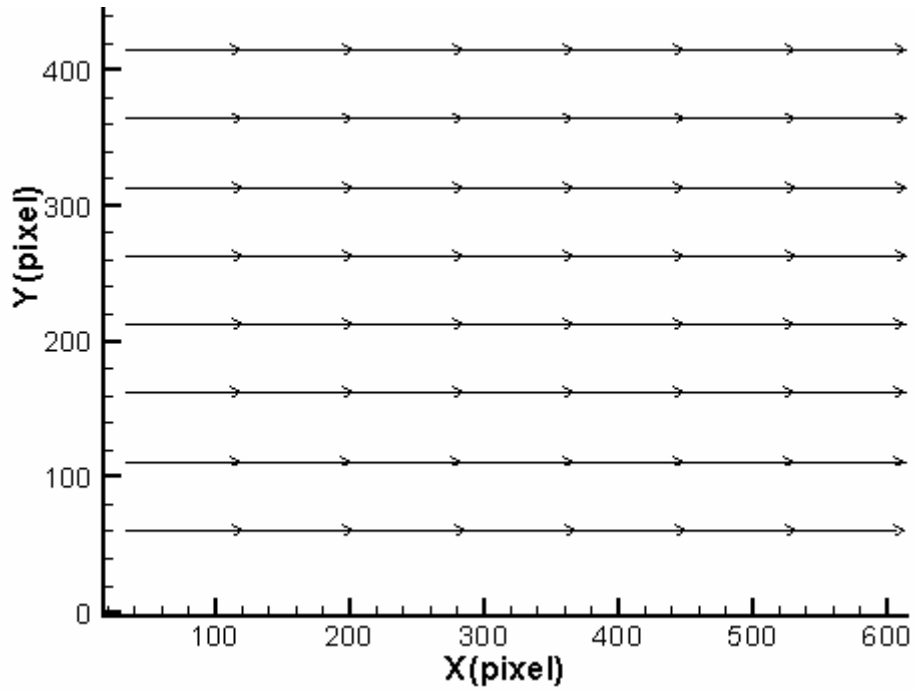


圖 4-11 案例 2 光滑底床之流線圖 (d=5cm、Q=80L/min)

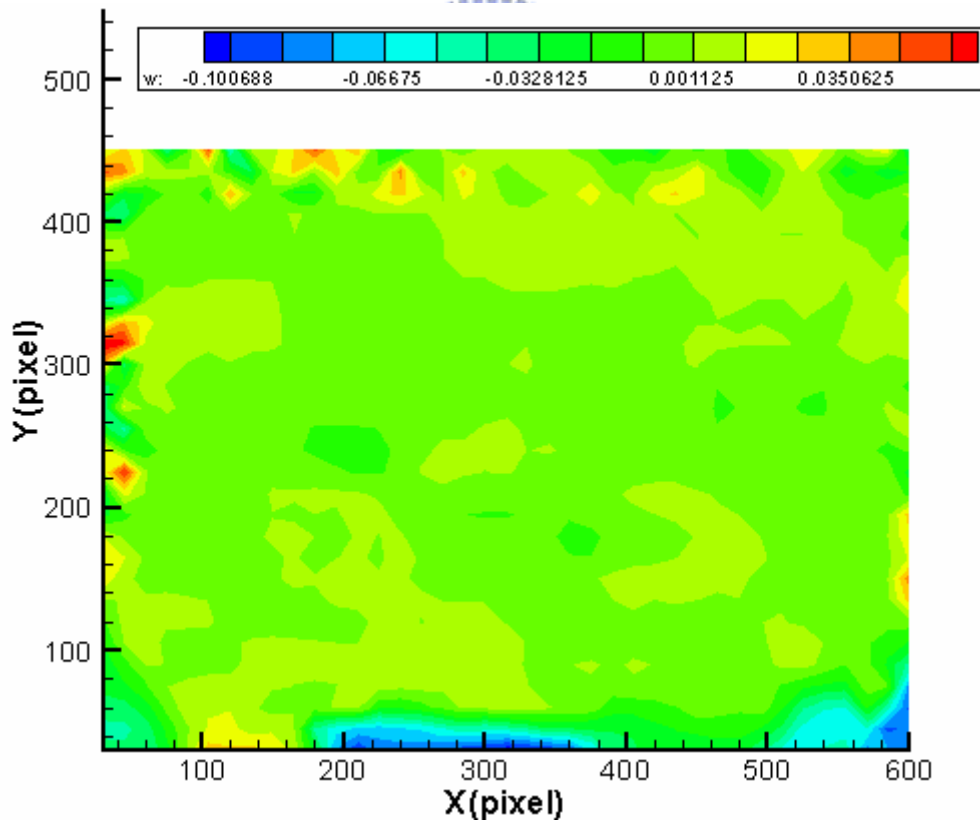


圖 4-12 案例 2 光滑底床之溫度場圖 (d=5cm、Q=80L/min)

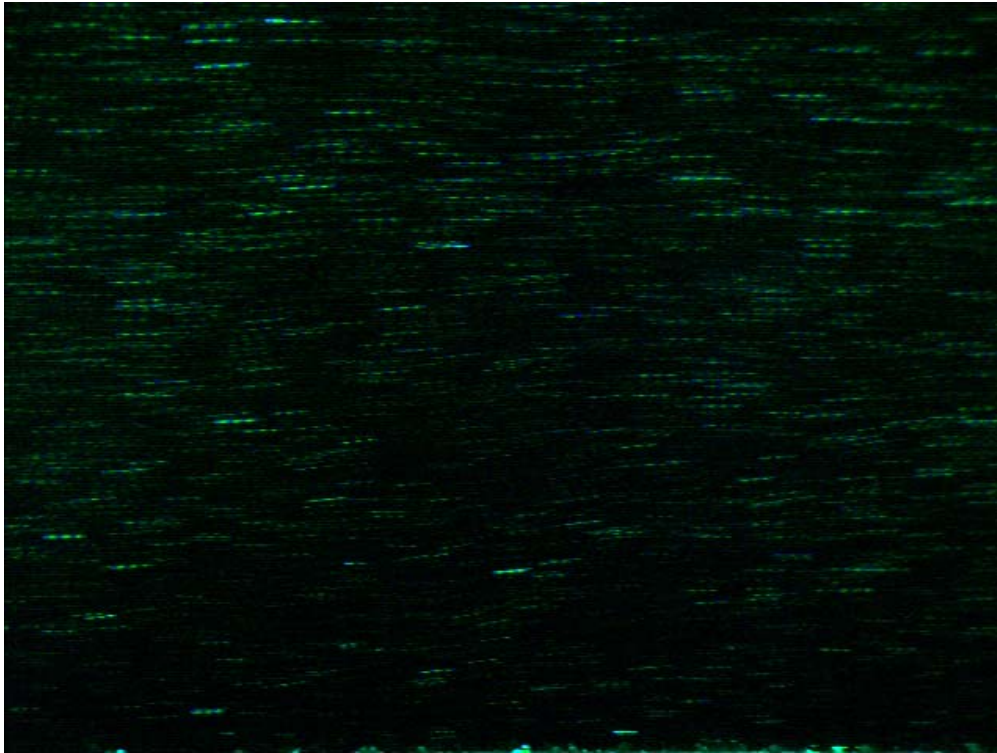


圖 4-13 案例 3 光滑底床之流場原圖 ($d=5\text{cm}$ 、 $Q=100\text{L/min}$)

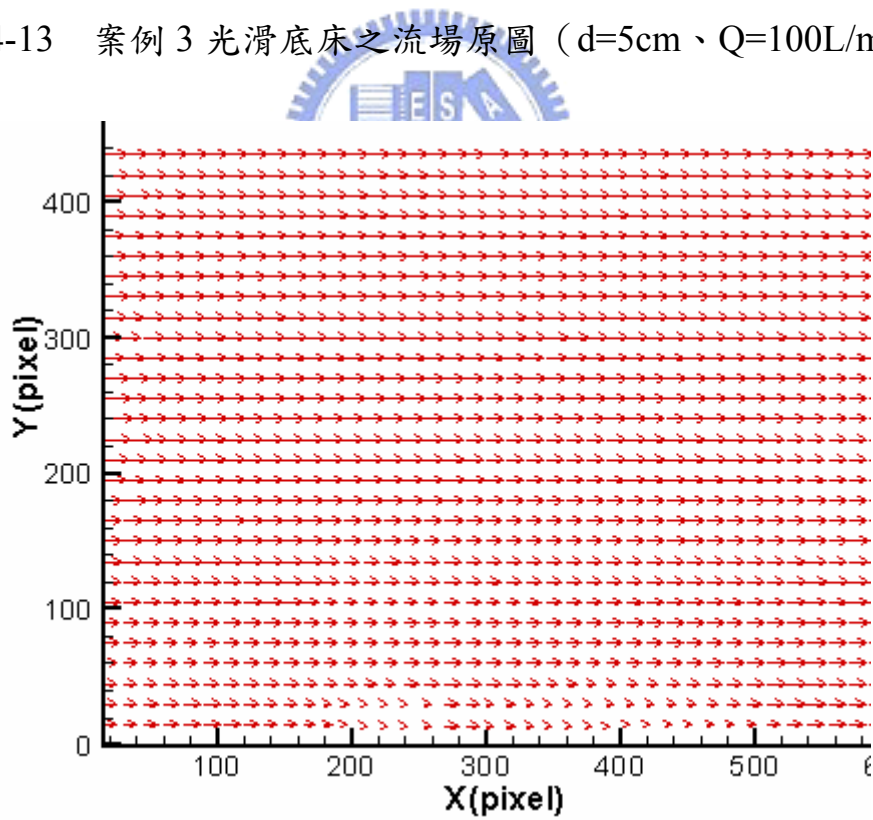


圖 4-14 案例 3 光滑底床之速度向量分佈圖 ($d=5\text{cm}$ 、 $Q=100\text{L/min}$)

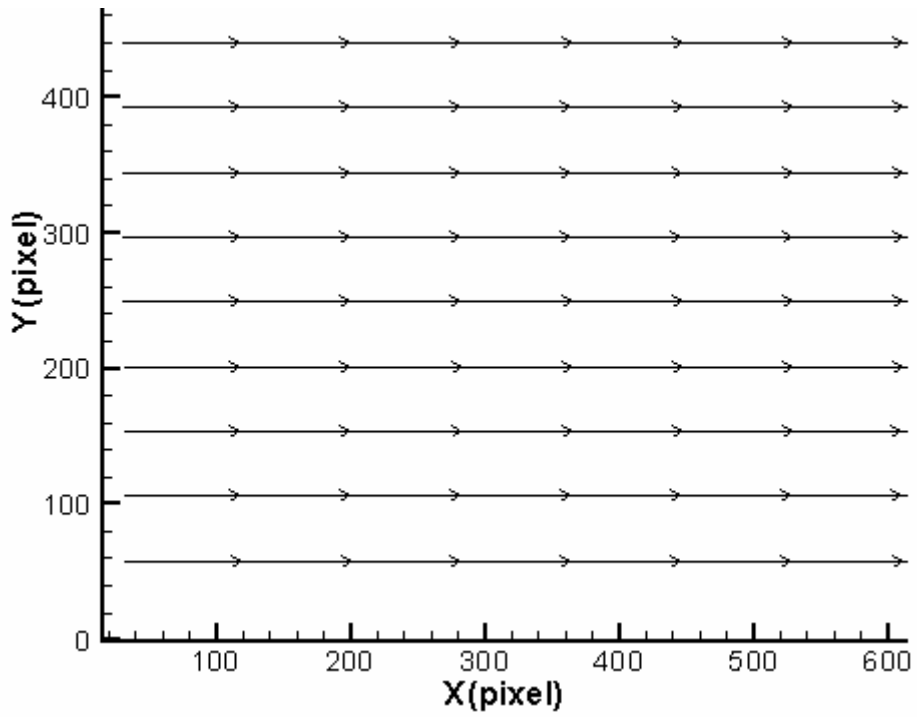


圖 4-15 案例 3 光滑底床之流線圖 (d=5cm、Q=100L/min)

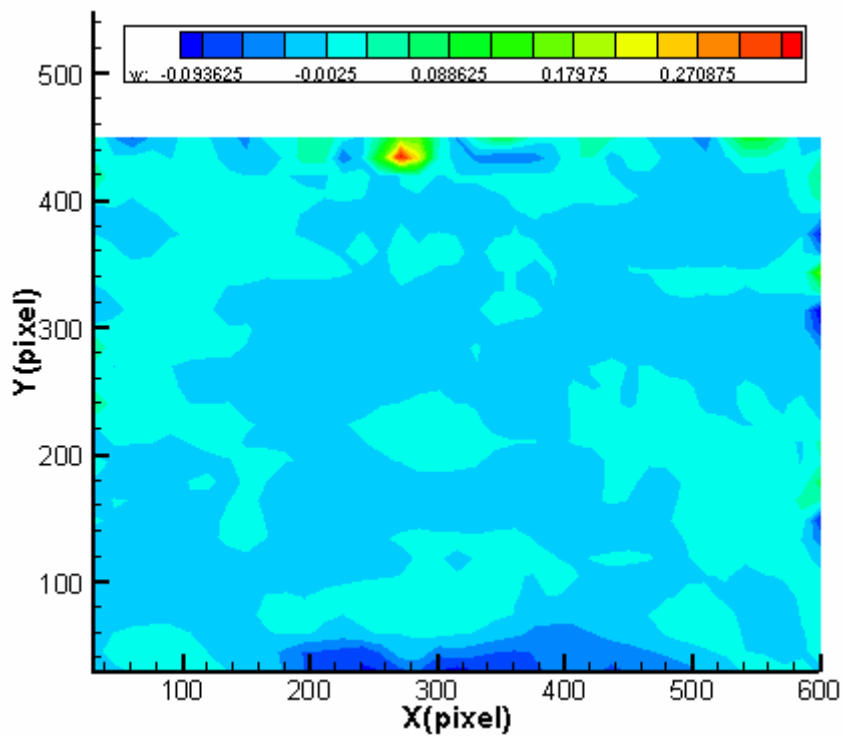


圖 4-16 案例 3 光滑底床之渦度場圖 (d=5cm、Q=100L/min)

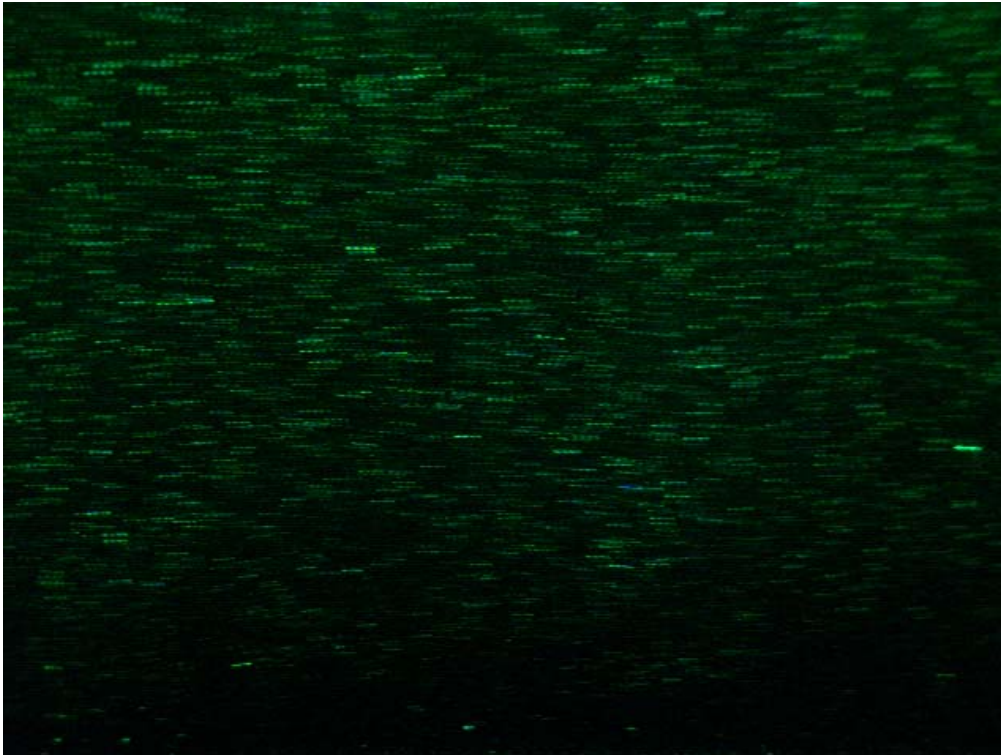


圖 4-17 案例 4 光滑底床之流場原圖 (d=6cm、Q=60L/min)

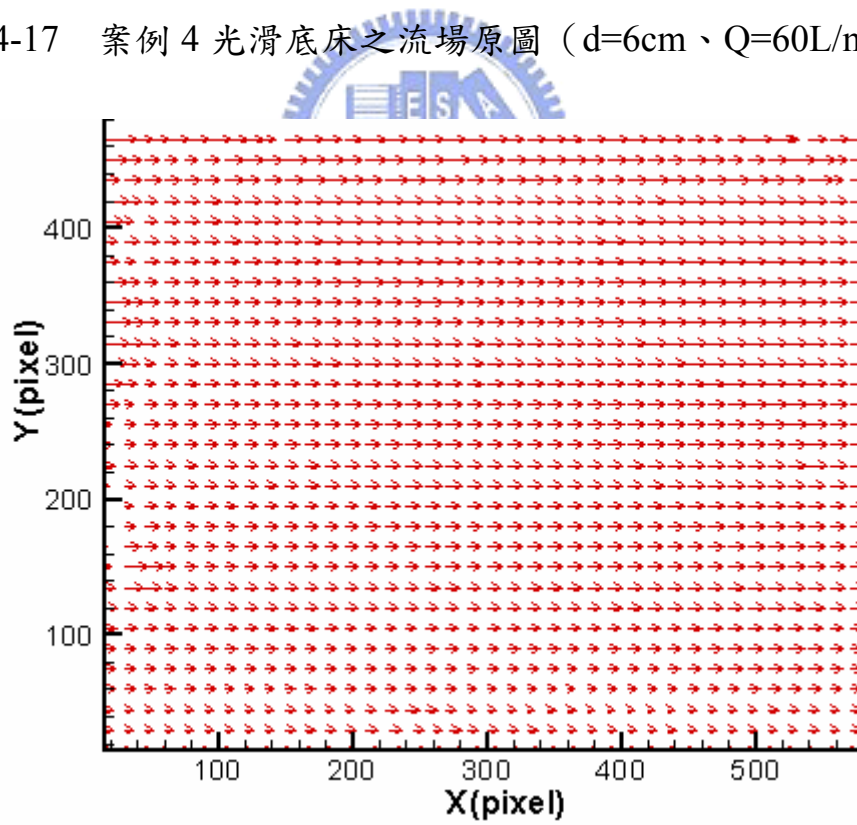


圖 4-18 案例 4 光滑底床之流速向量分佈圖 (d=6cm、Q=60L/min)

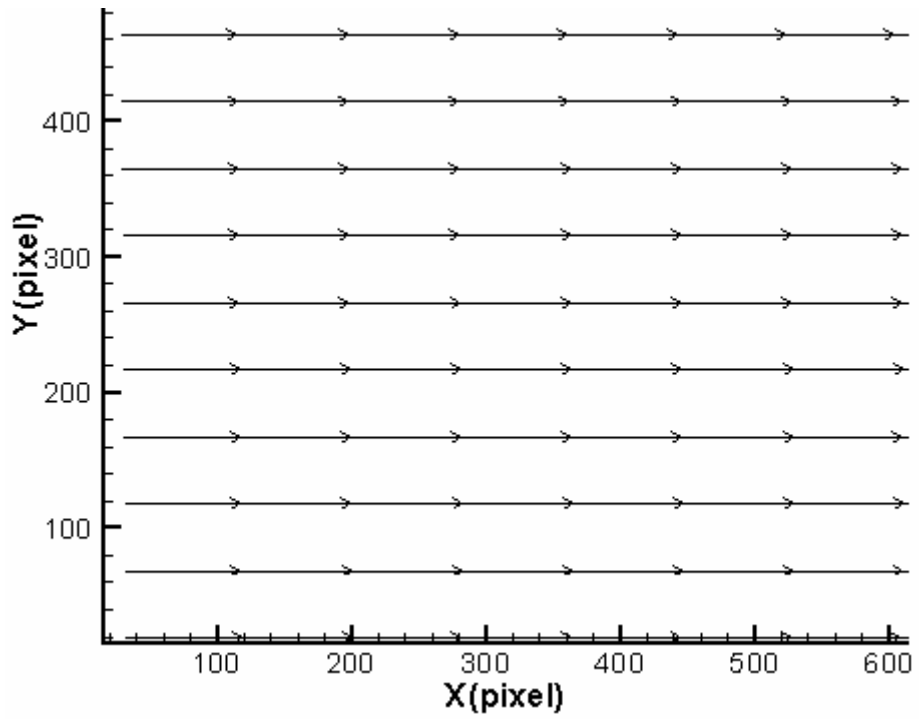


圖 4-19 案例 4 光滑底床之流線圖 (d=6cm、Q=60L/min)

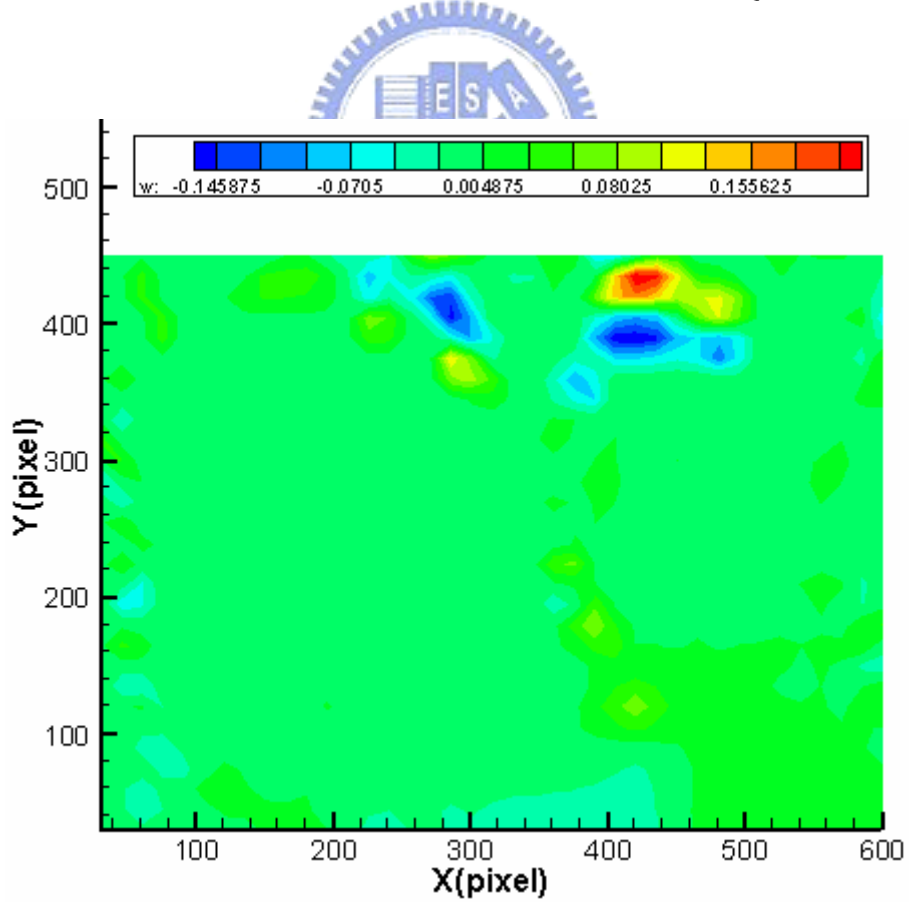


圖 4-20 案例 4 光滑底床之渦度場圖 (d=6cm、Q=60L/min)

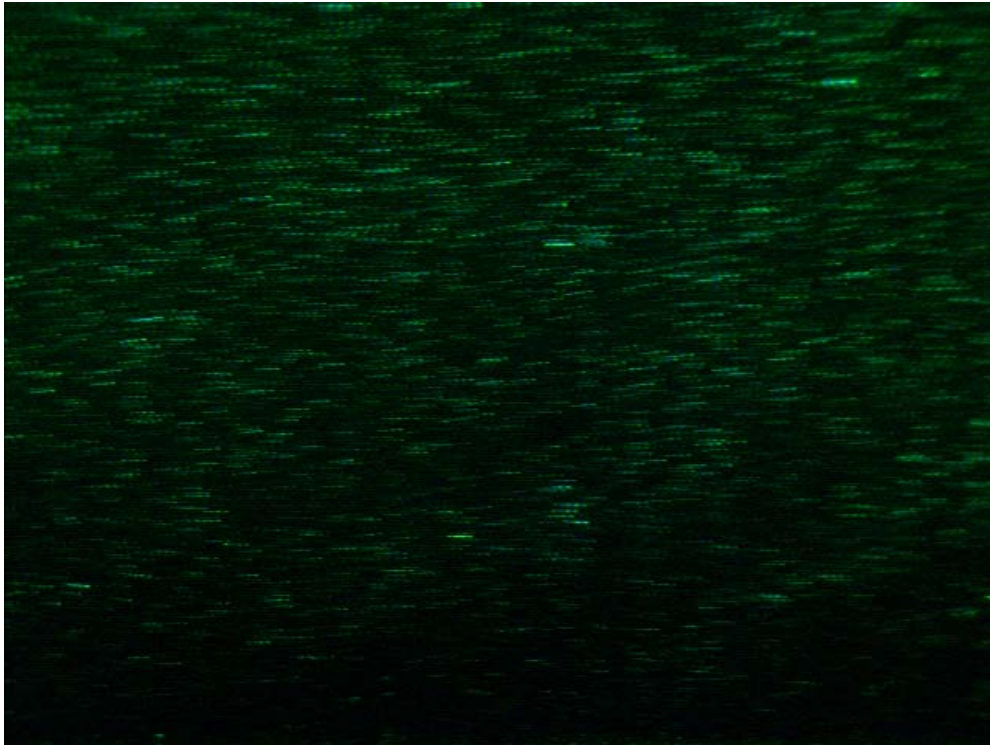


圖 4-21 案例 5 光滑底床之流場原圖 ($d=6\text{cm}$ 、 $Q=80\text{L/min}$)

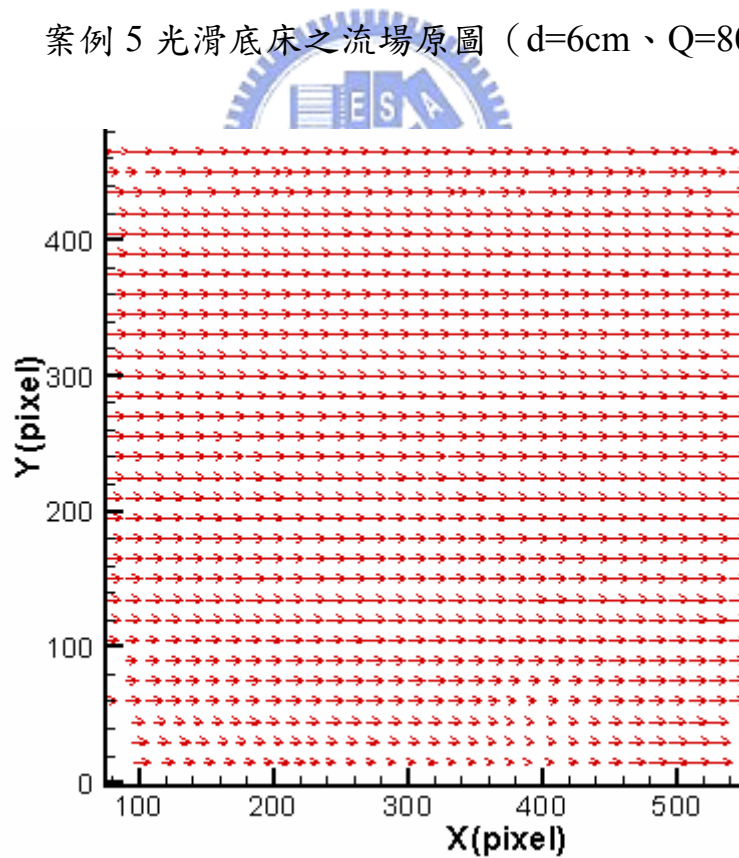


圖 4-22 案例 5 光滑底床之流速向量分佈圖 ($d=6\text{cm}$ 、 $Q=80\text{L/min}$)

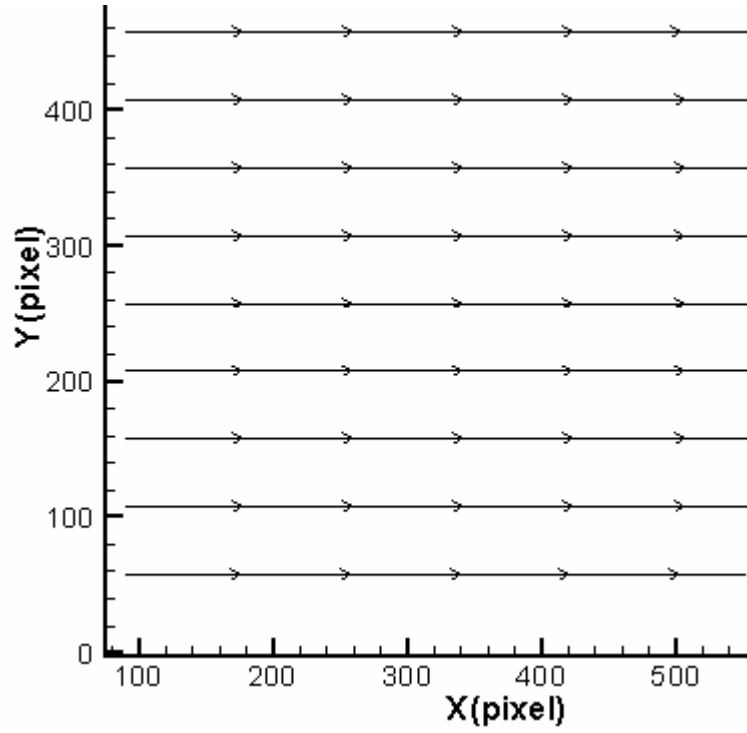


圖 4-23 案例 5 光滑底床之流線圖 (d=6cm、Q=80L/min)

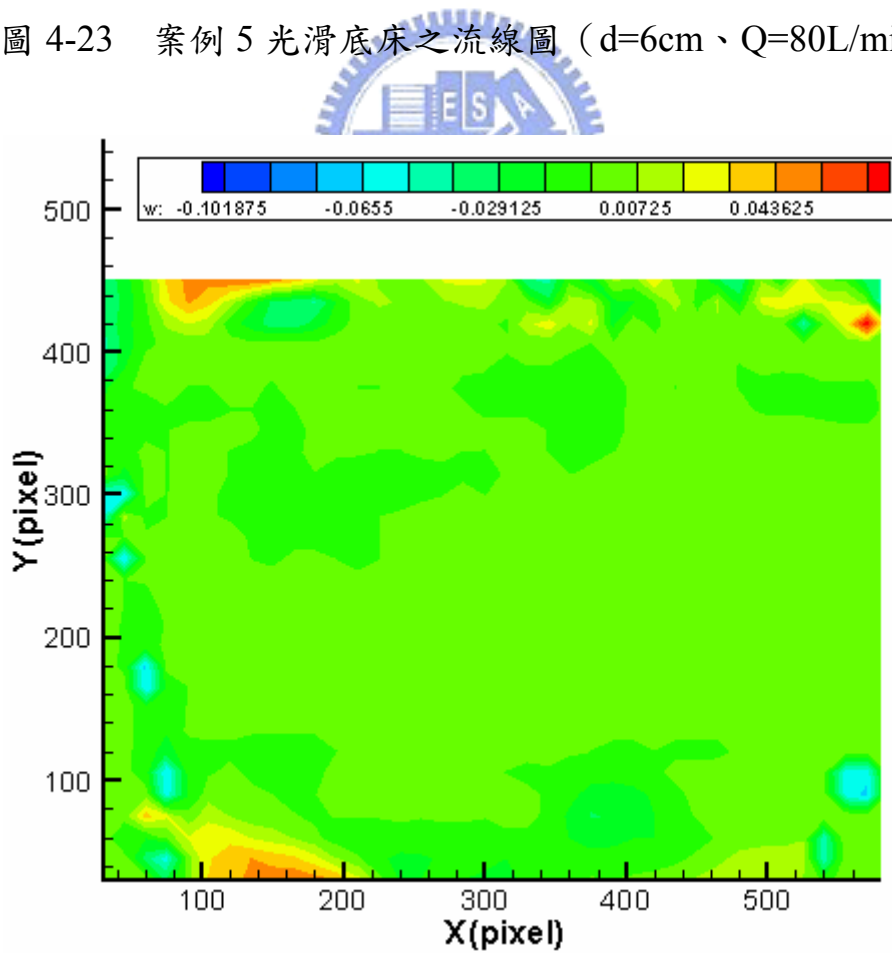


圖 4-24 案例 5 光滑底床之渦度場圖 (d=6cm、Q=80L/min)

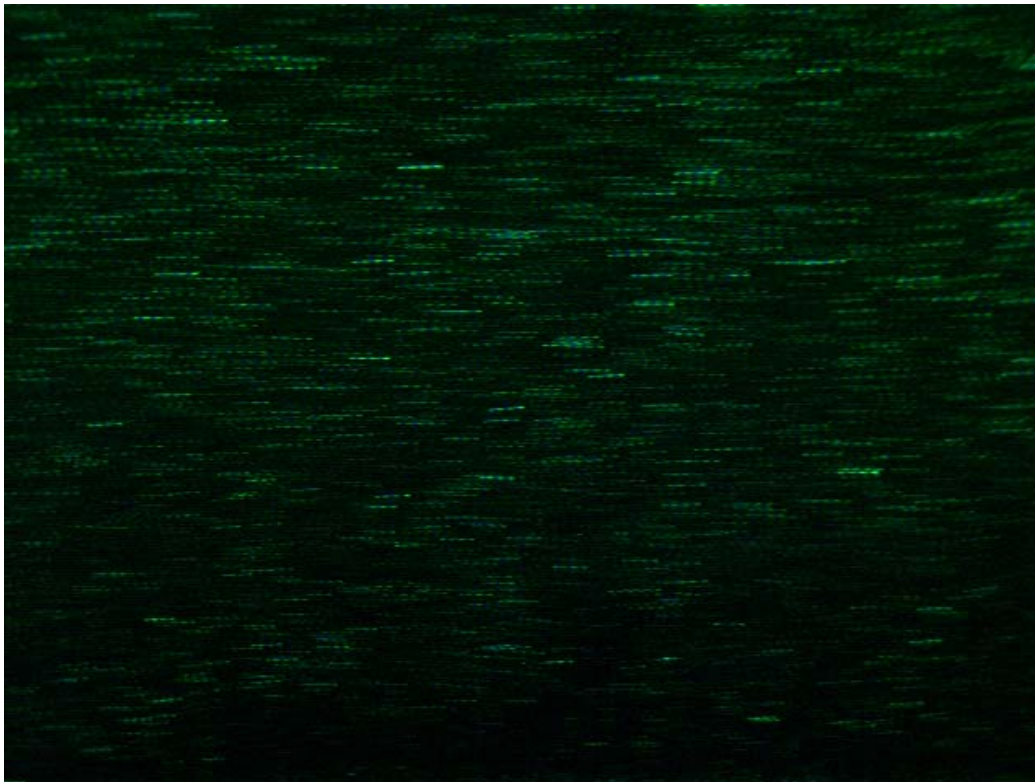


圖 4-25 案例 6 光滑底床之流場原圖 ($d=6\text{cm}$ 、 $Q=100\text{L/min}$)

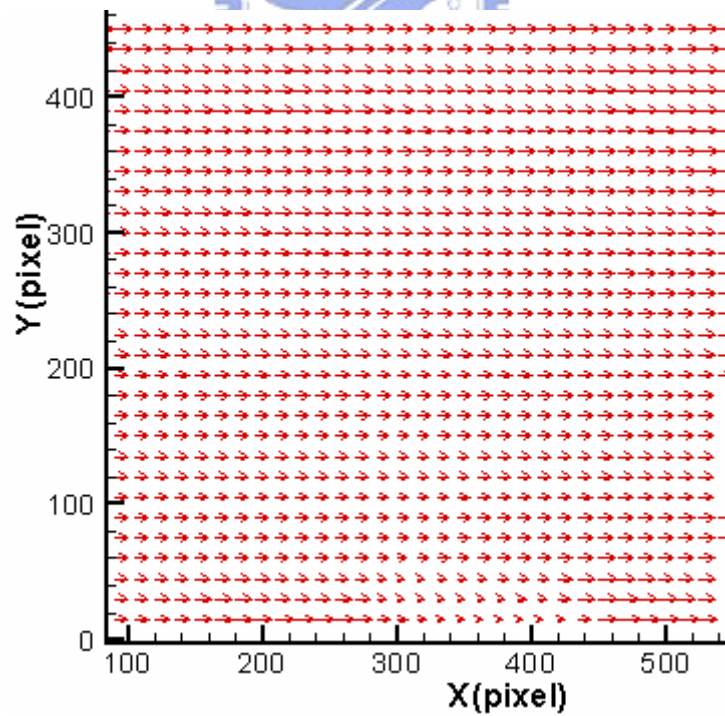


圖 4-26 案例 6 光滑底床之流速向量分佈圖 ($d=6\text{cm}$ 、 $Q=100\text{L/min}$)

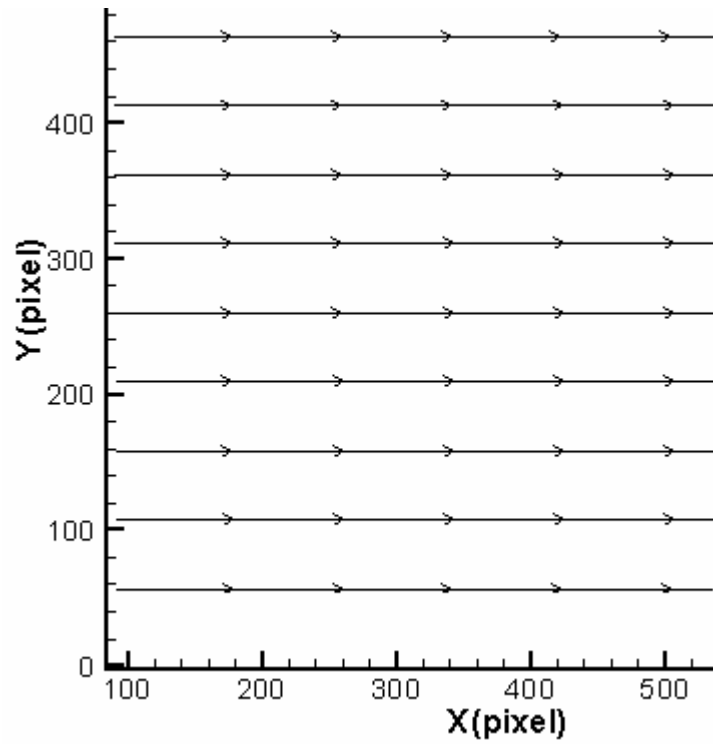


圖 4-27 案例 6 光滑底床之流線圖 (d=6cm、Q=100L/min)

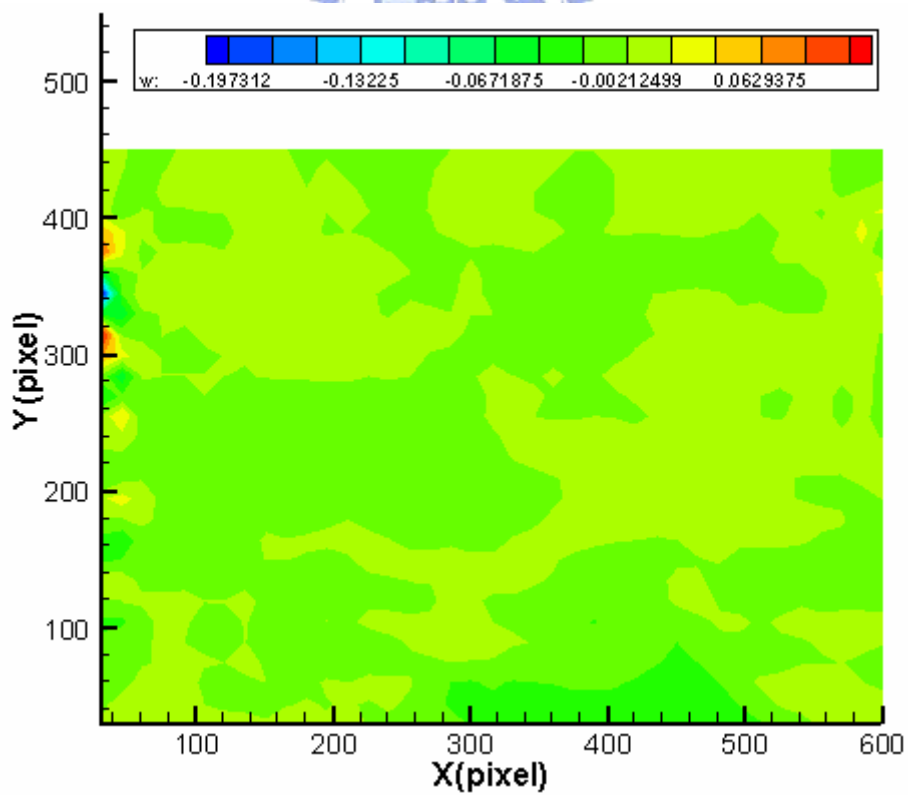


圖 4-28 案例 6 光滑底床之渦度場圖 (d=6cm、Q=100L/min)

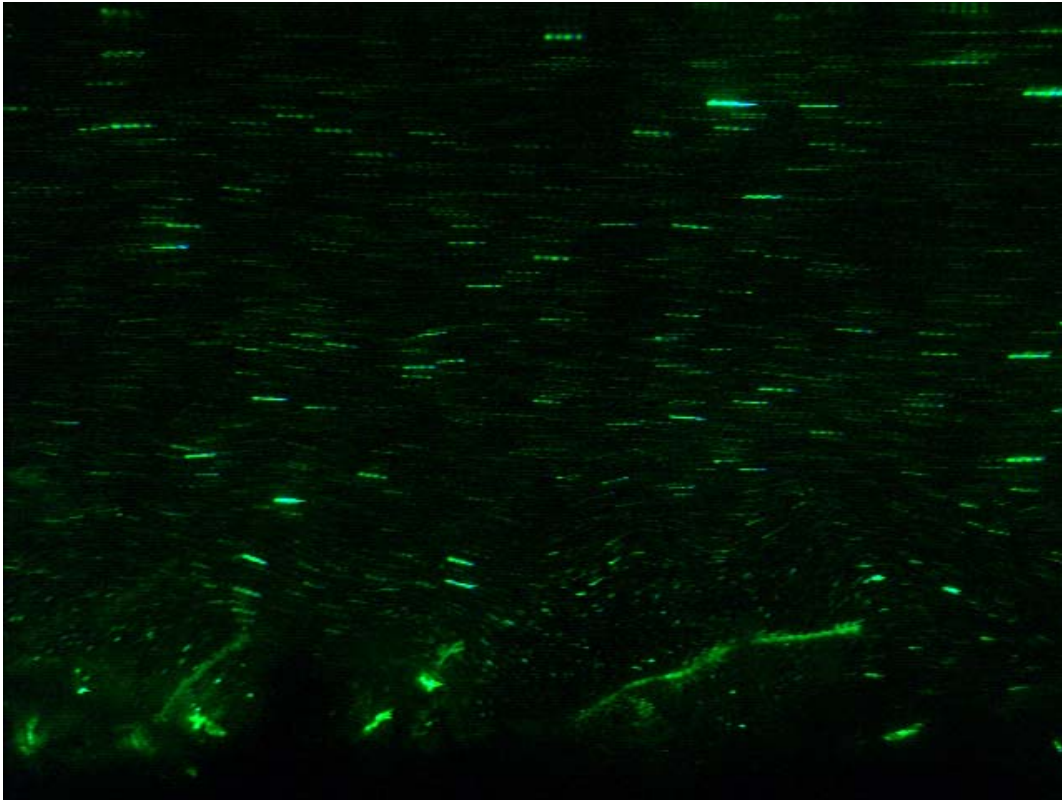


圖 4-29 案例 7 植生底床之流場原圖 (d=5cm、Q=60L/min)

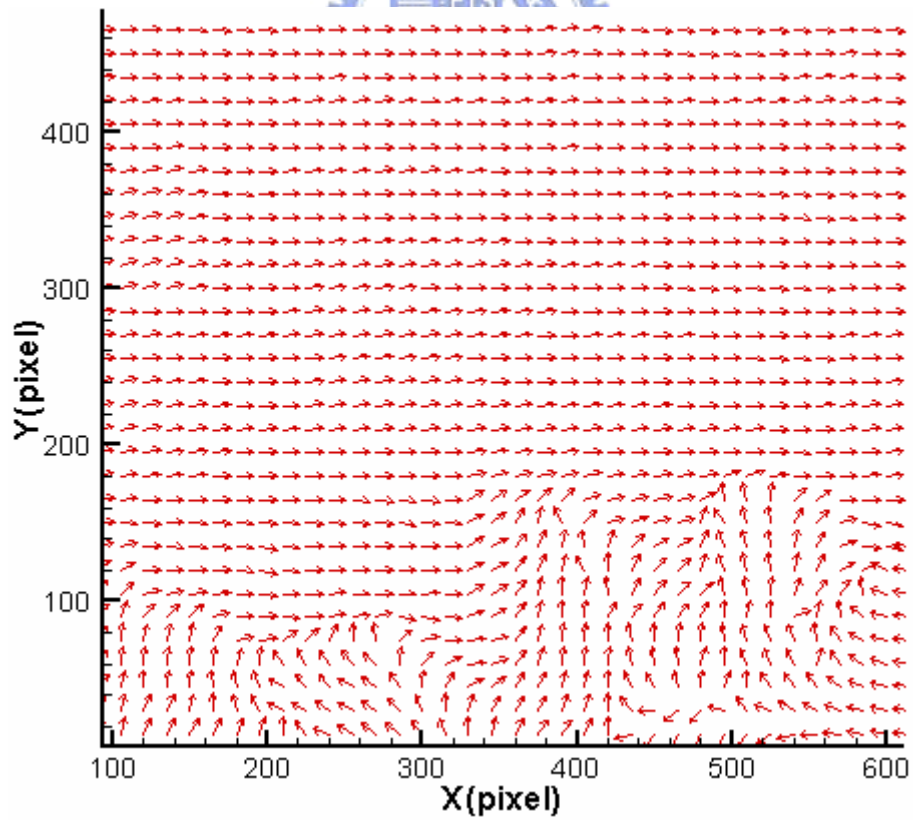


圖 4-30 案例 7 植生底床之速度向量分佈圖 (d=5cm、Q=60L/min)

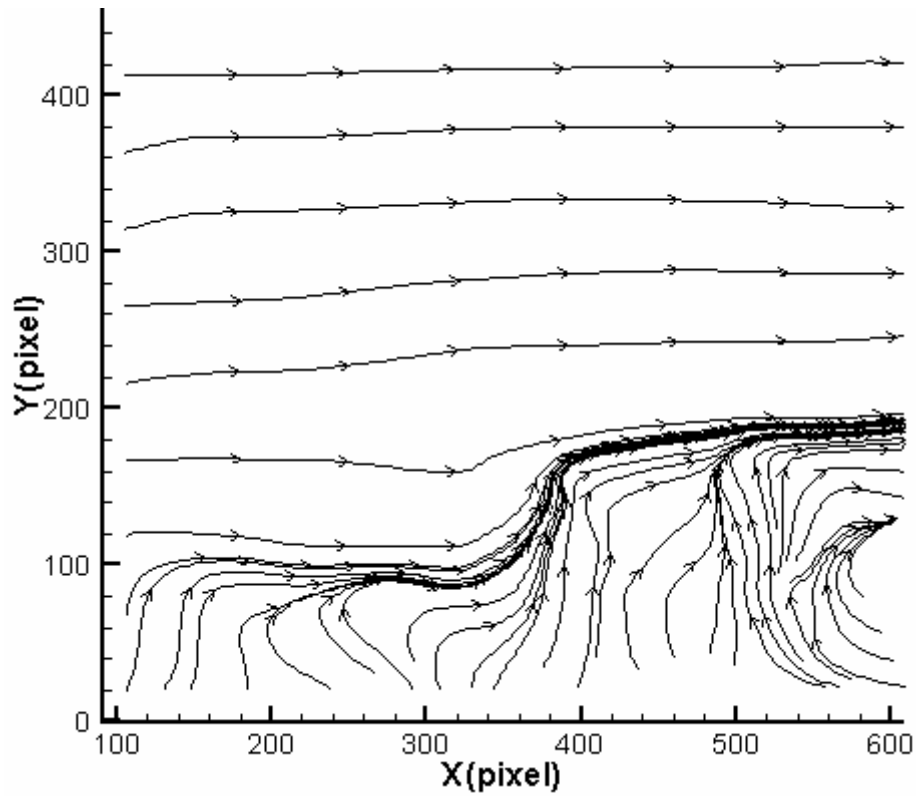


圖 4-31 案例 7 植生底床之流線圖 (d=5cm、Q=60L/min)

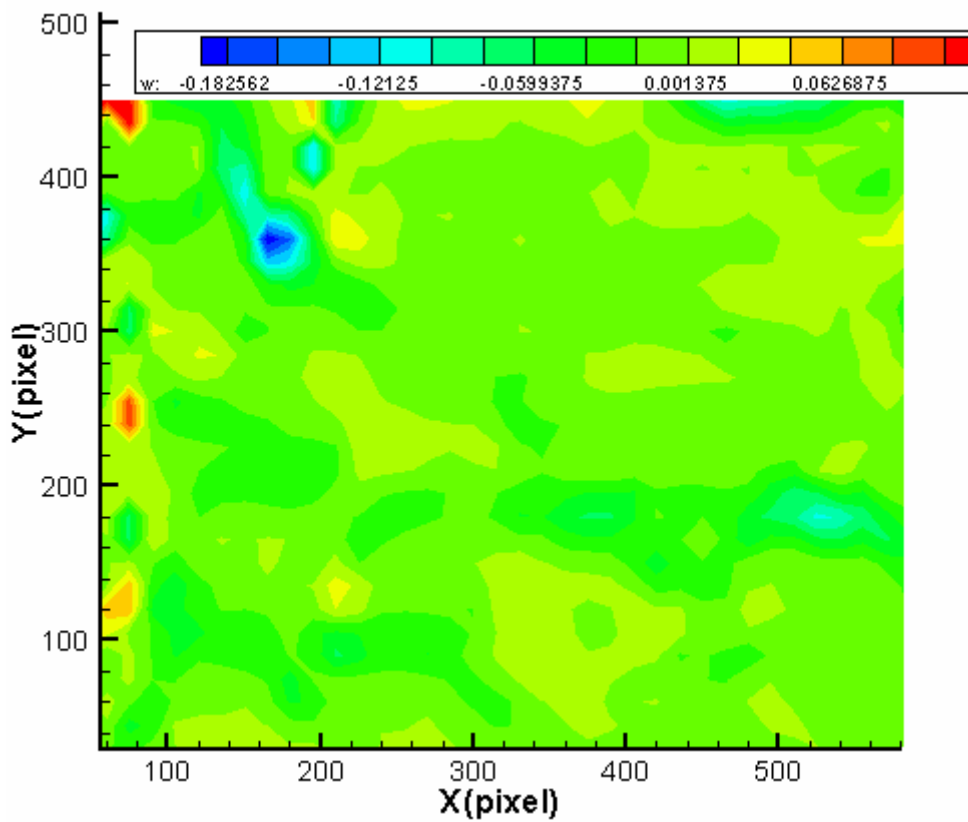


圖 4-32 案例 7 植生底床之渦度場圖 (d=5cm、Q=60L/min)

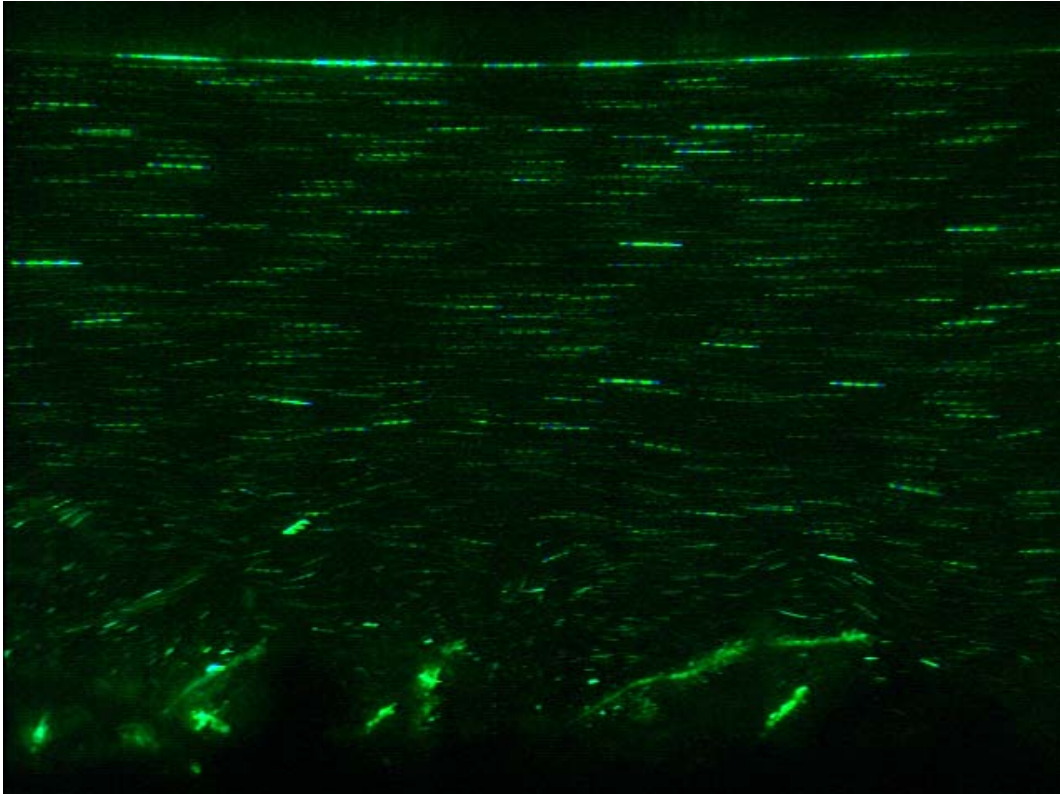


圖 4-33 案例 8 植生底床之流場原圖 ($d=5\text{cm}$ 、 $Q=80\text{L/min}$)

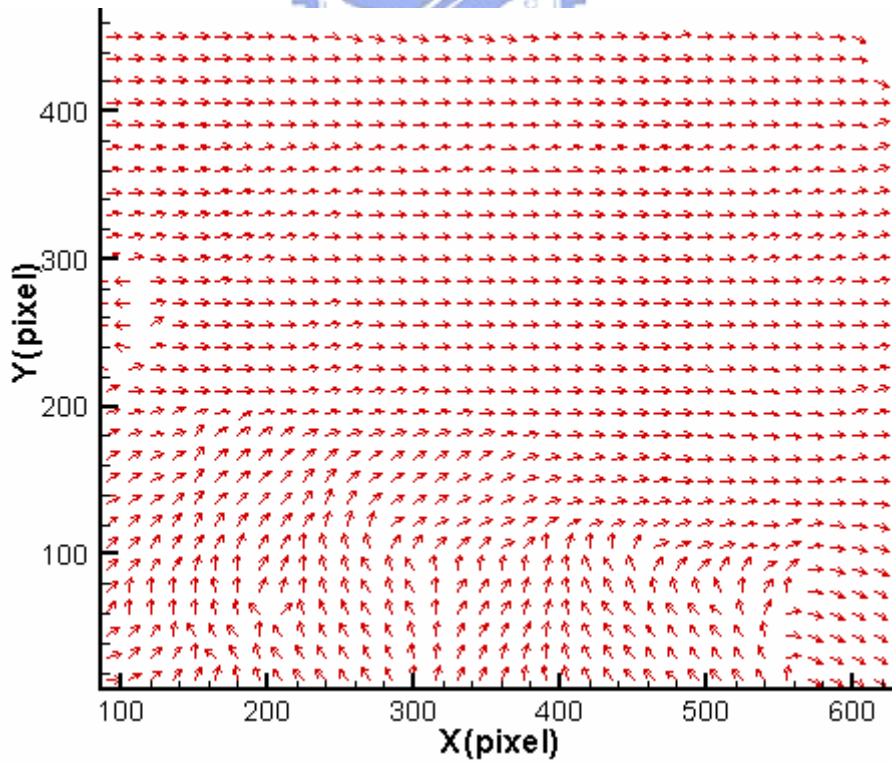


圖 4-34 案例 8 植生底床之速度向量分佈圖 ($d=5\text{cm}$ 、 $Q=80\text{L/min}$)

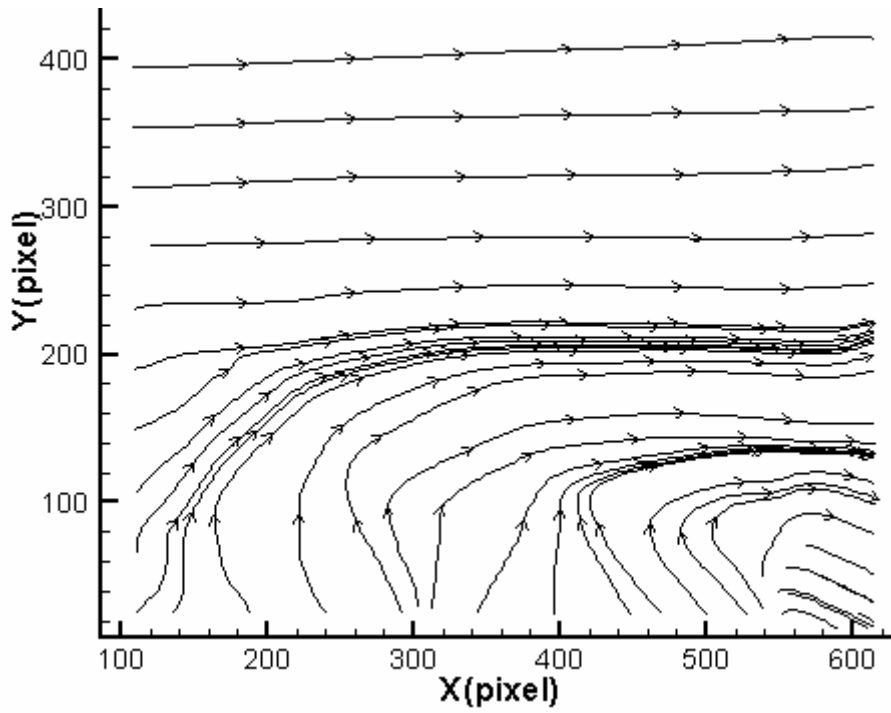


圖 4-35 案例 8 植生底床之流線圖 (d=5cm、Q=80L/min)

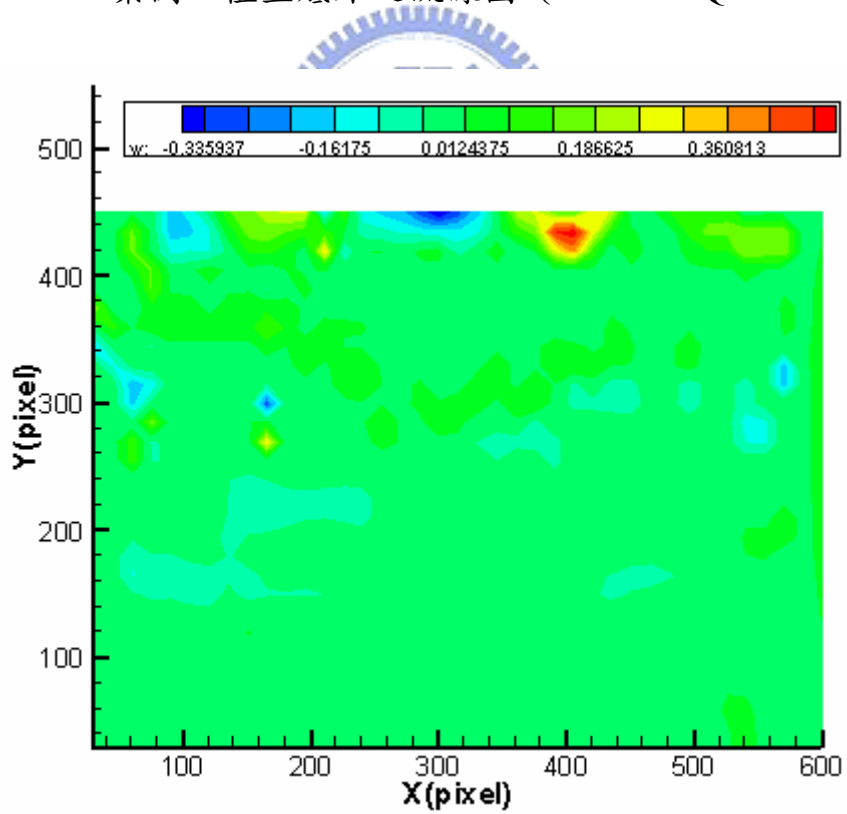


圖 4-36 案例 8 植生底床之渦度場圖 (d=5cm、Q=80L/min)

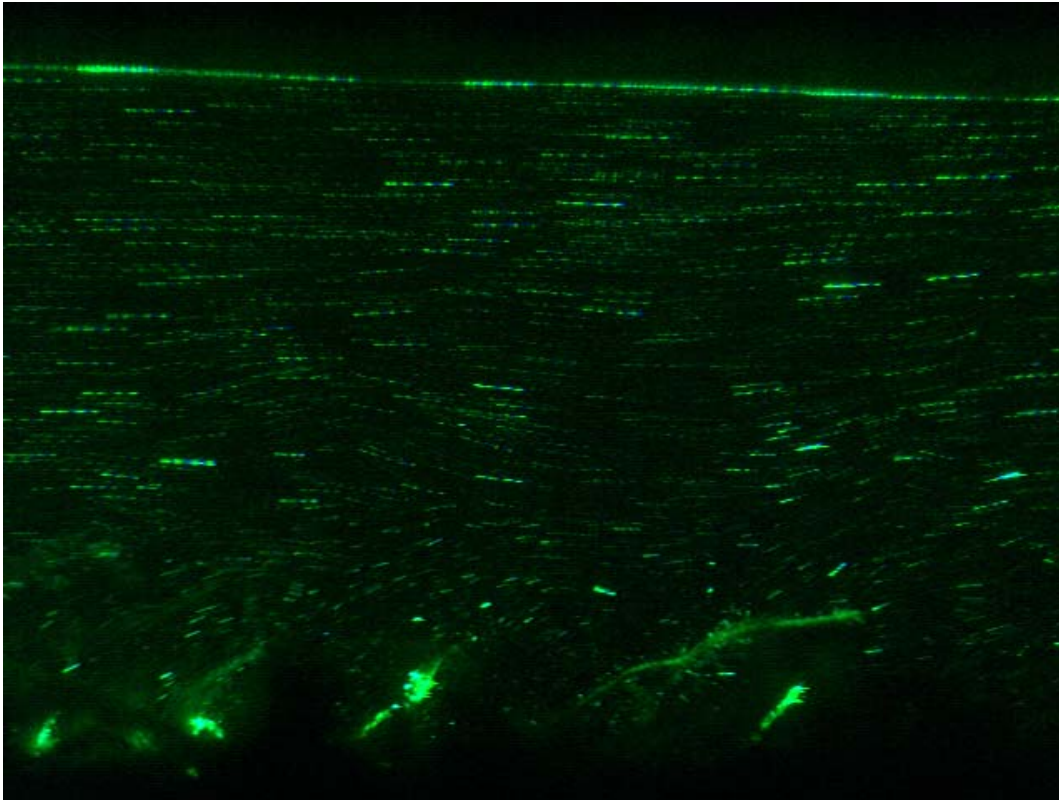


圖 4-37 案例 9 植生底床之流場原圖 ($d=5\text{cm}$ 、 $Q=100\text{L/min}$)

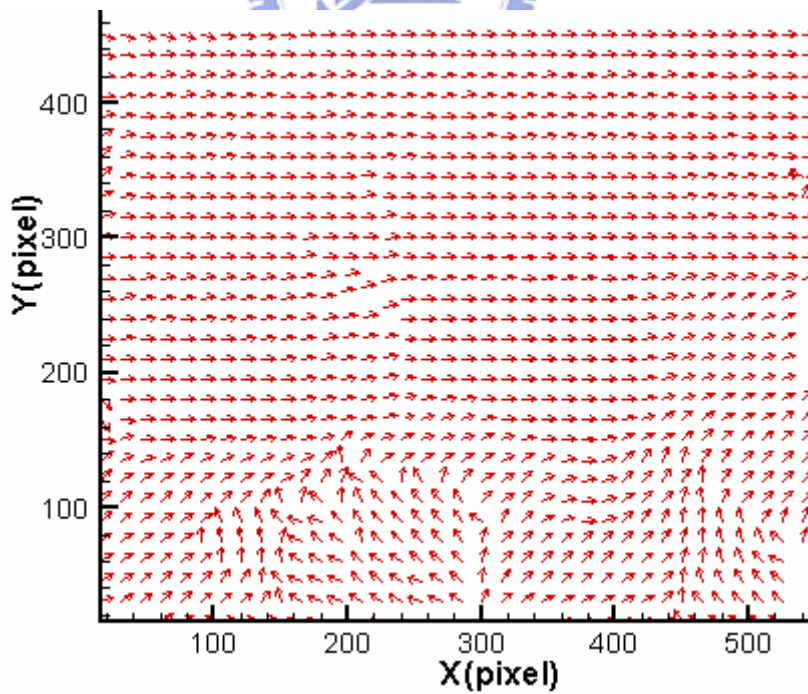


圖 4-38 案例 9 植生底床之流速向量分佈圖 ($d=5\text{cm}$ 、 $Q=100\text{L/min}$)

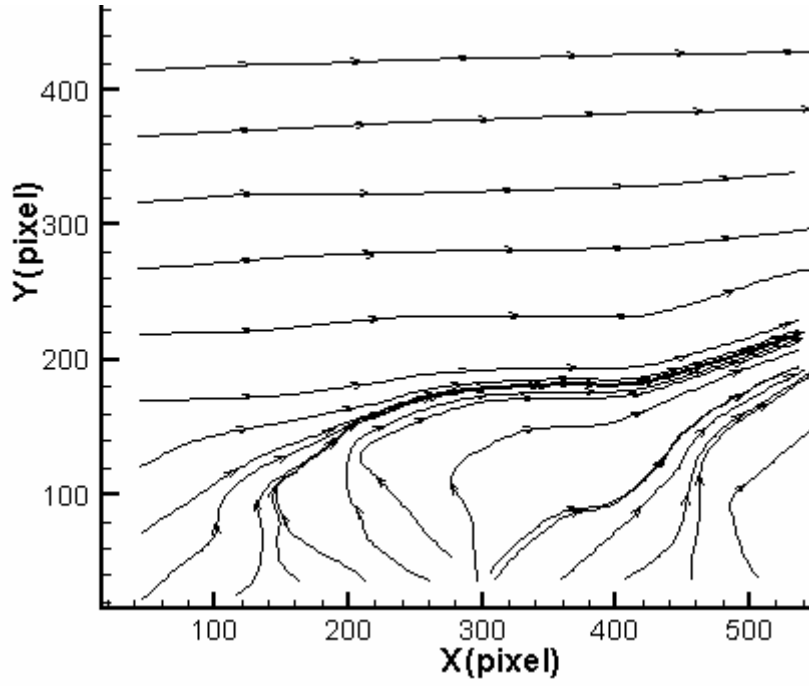


圖 4-39 案例 9 植生底床之流線圖 (d=5cm、Q=100L/min)

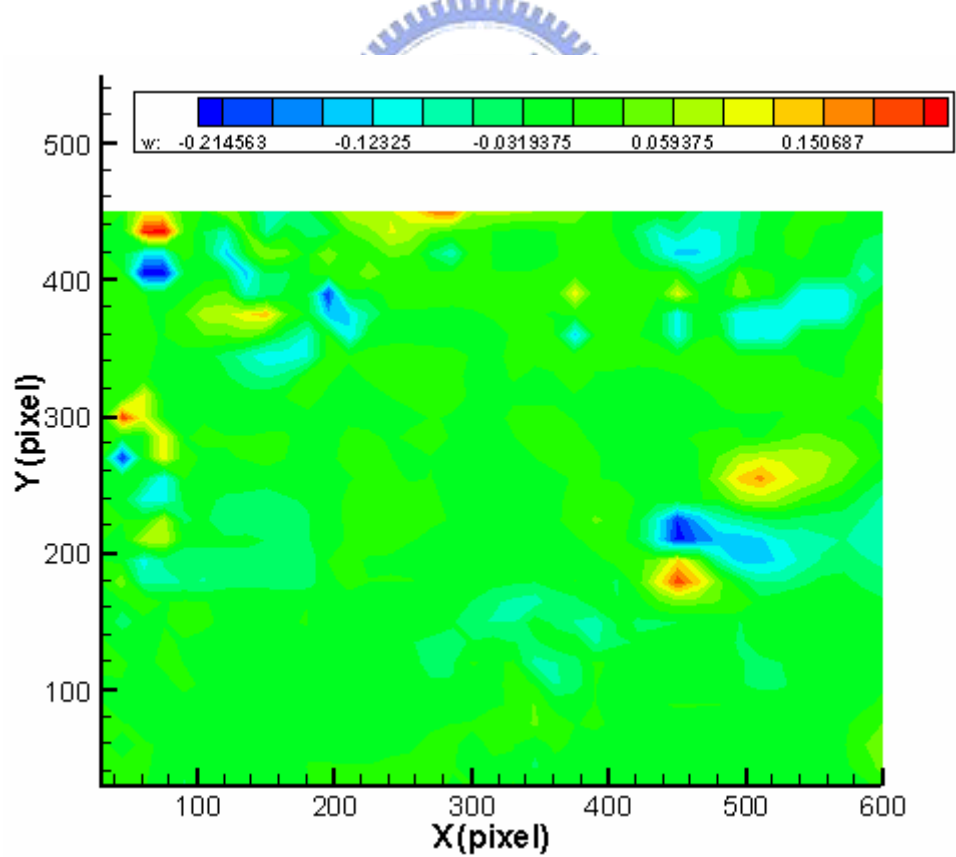


圖 4-40 案例 9 植生底床之渦度場圖 (d=5cm、Q=100L/min)

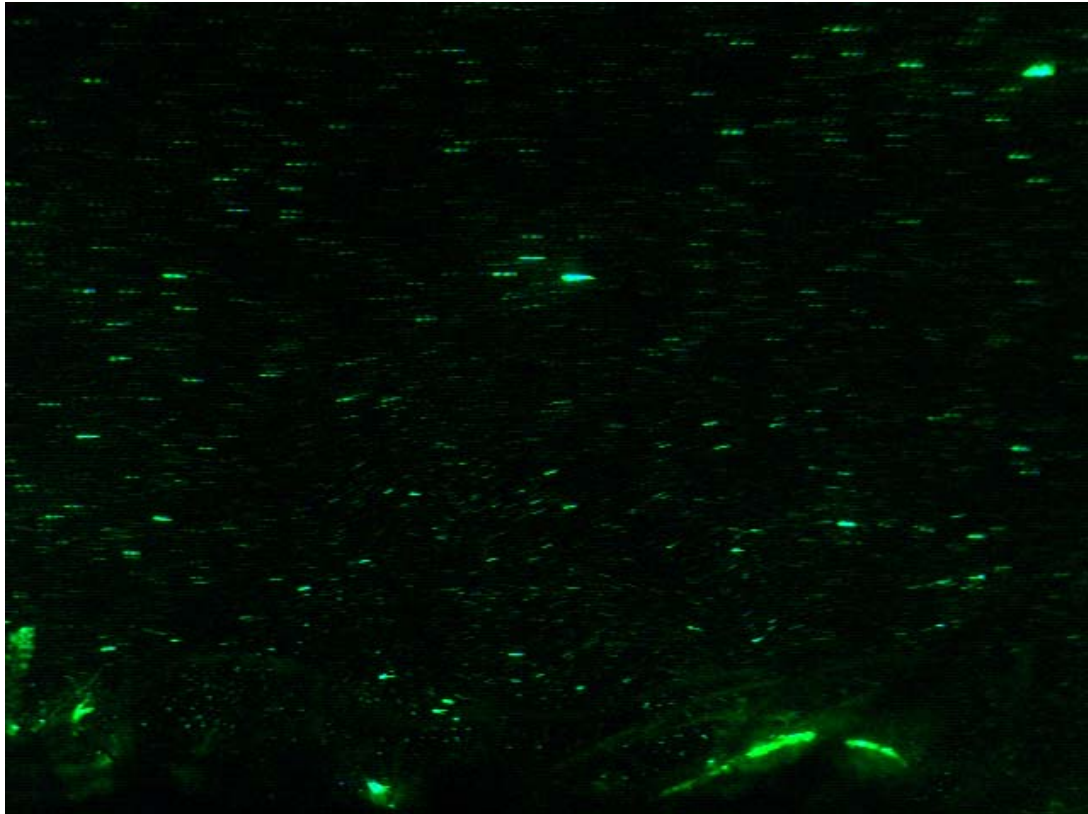


圖 4-41 案例 10 植生底床之流場原圖 ($d=6\text{cm}$ 、 $Q=60\text{L/min}$)

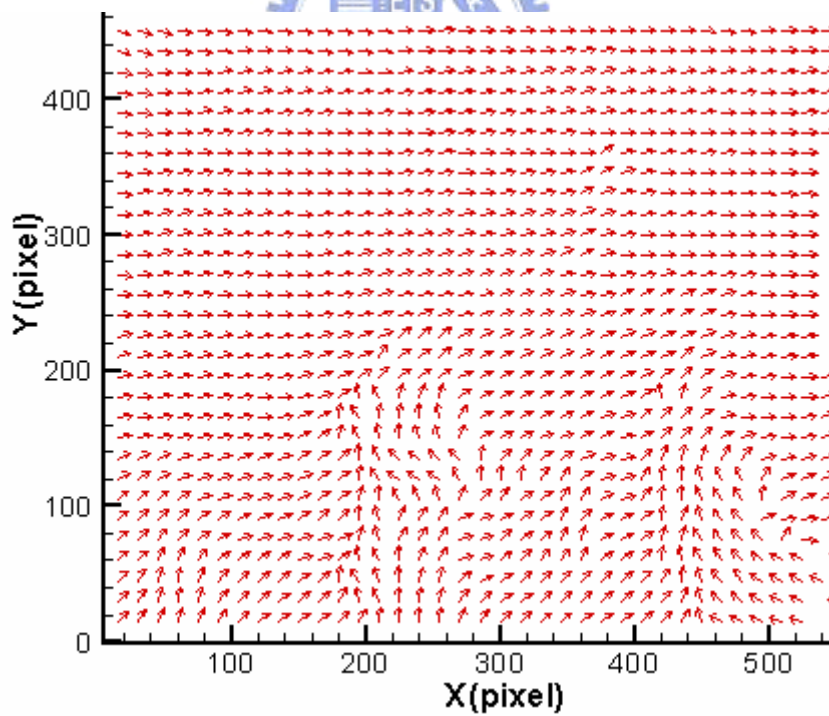


圖 4-42 案例 10 植生底床之速度向量分佈圖 ($d=6\text{cm}$ 、 $Q=60\text{L/min}$)

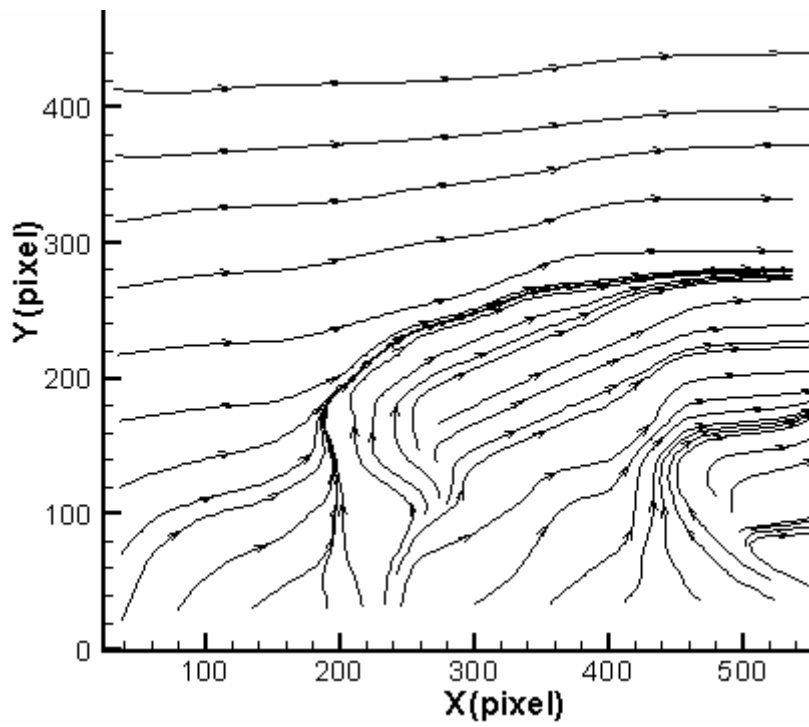


圖 4-43 案例 10 植生底床之流線圖 (d=6cm、Q=60L/min)

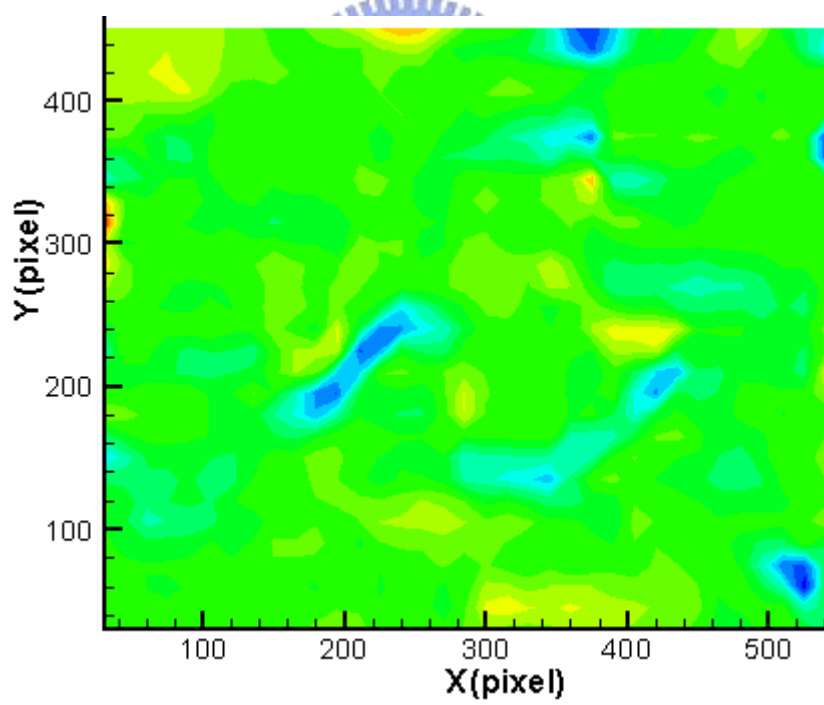


圖 4-44 案例 10 植生底床之渦度場圖 (d=6cm、Q=60L/min)

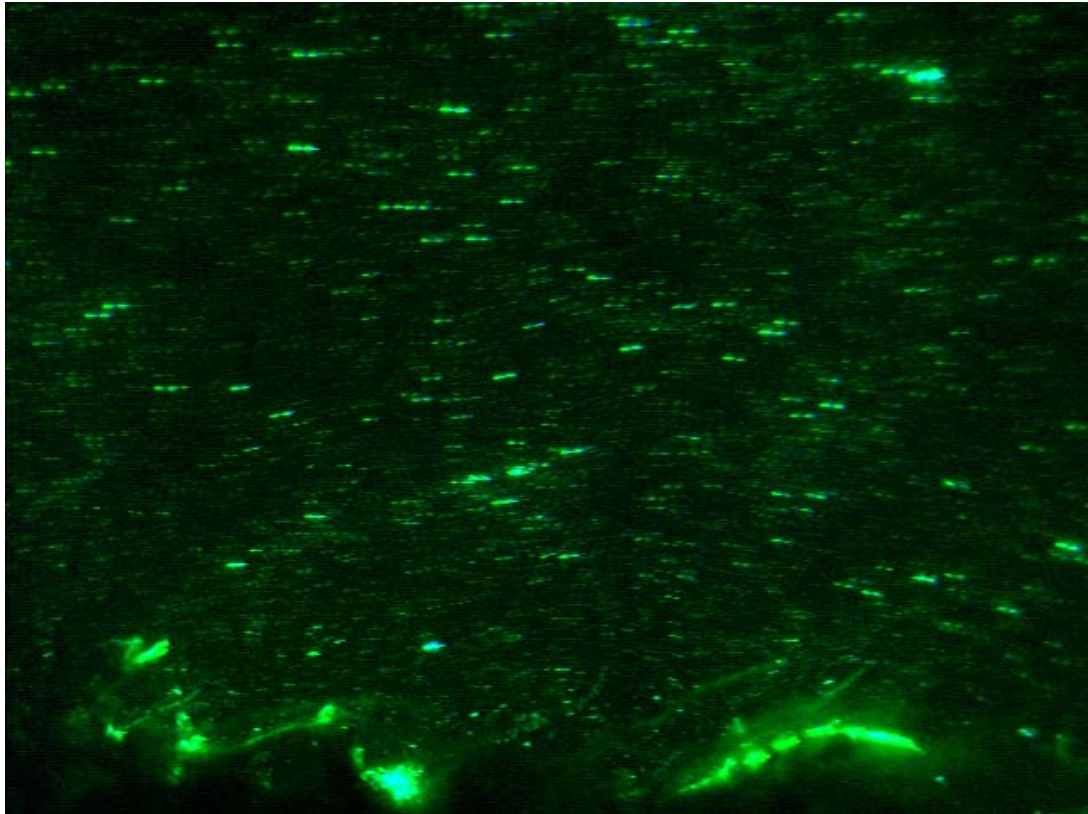


圖 4-45 案例 11 植生底床之流場原圖 ($d=6\text{cm}$ 、 $Q=80\text{L/min}$)

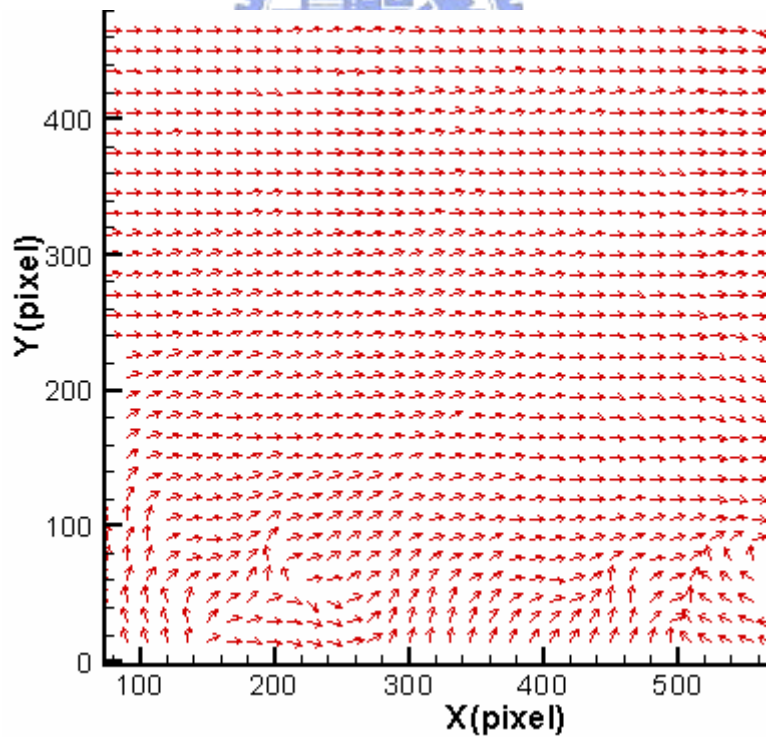


圖 4-46 案例 11 植生底床之速度向量分佈圖 ($d=6\text{cm}$ 、 $Q=80\text{L/min}$)

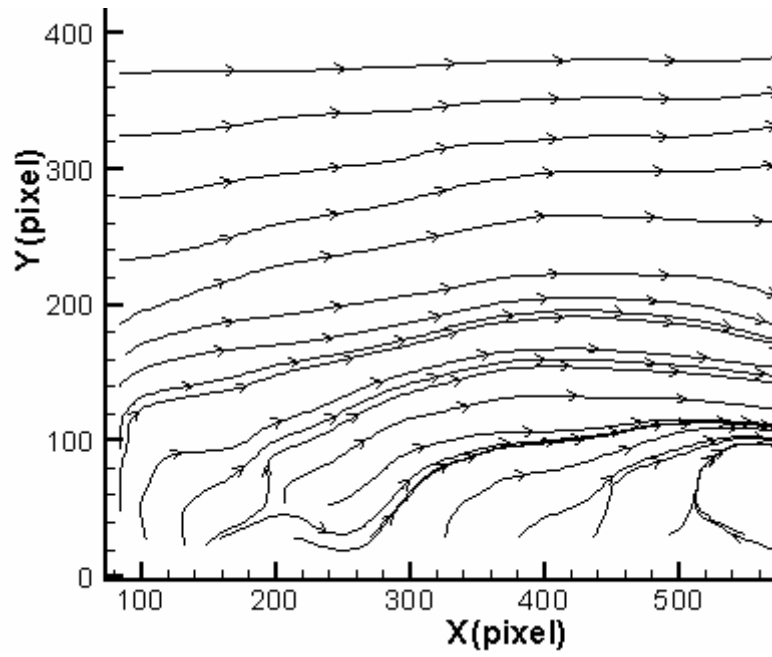


圖 4-47 案例 11 植生底床之流線圖 (d=6cm、Q=80L/min)

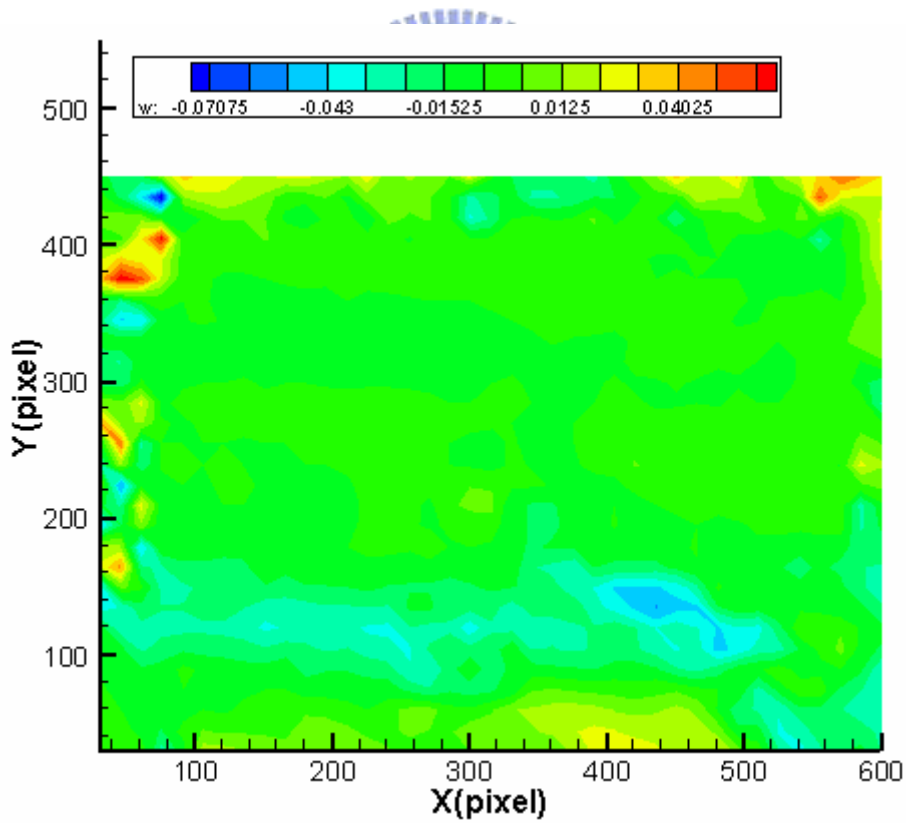


圖 4-48 案例 11 植生底床之渦度場圖 (d=6cm、Q=80L/min)

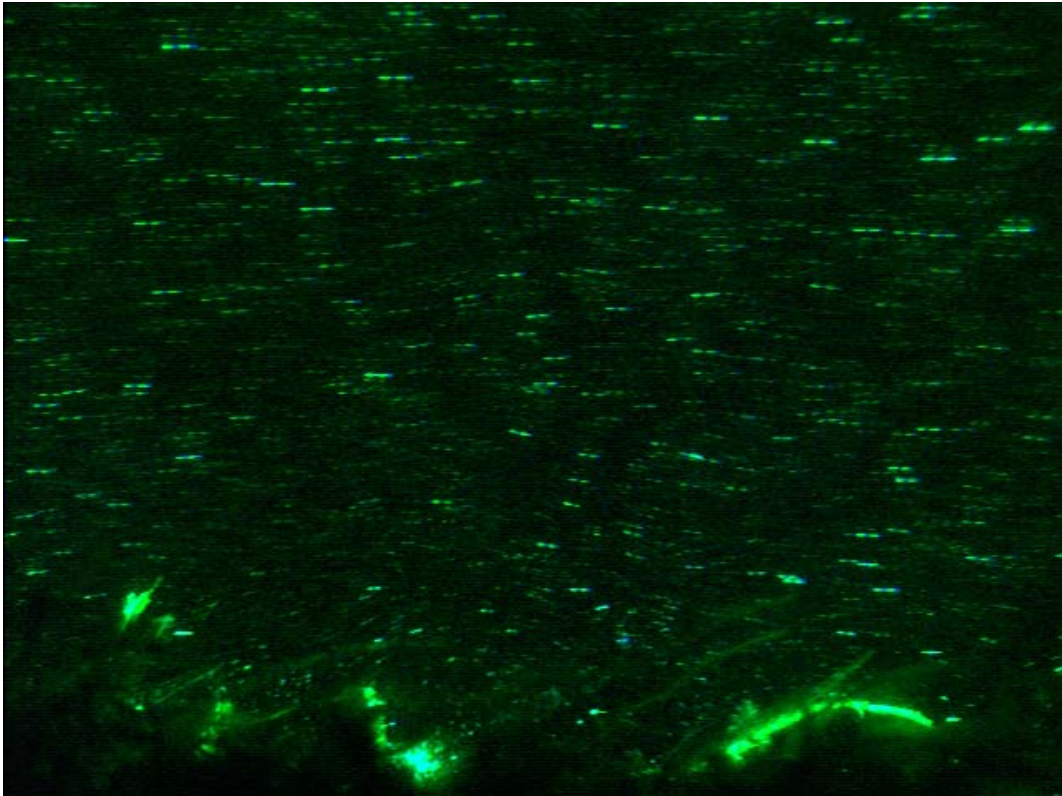


圖 4-49 案例 12 植生底床之流場原圖 (d=6cm、Q=100L/min)

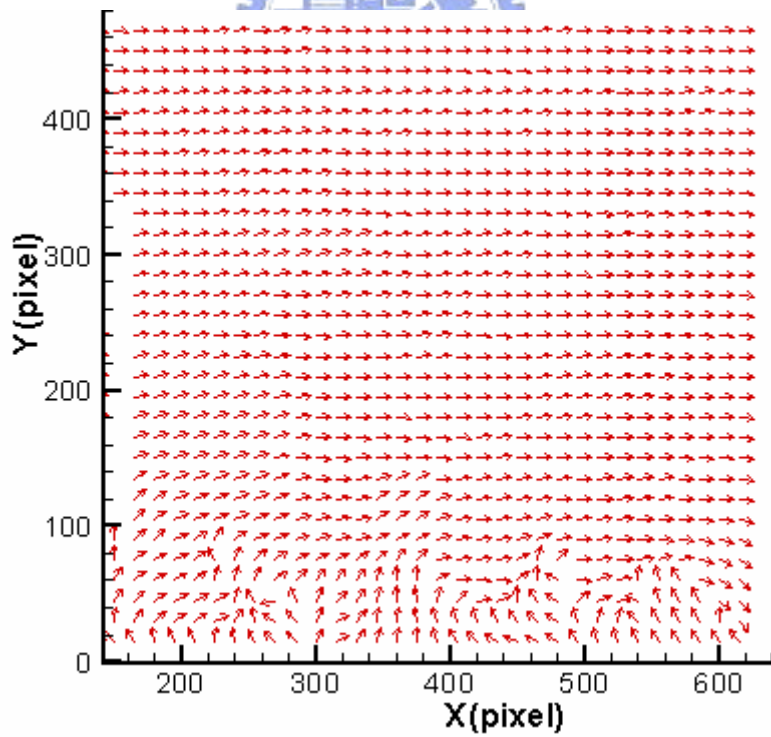


圖 4-50 案例 12 植生底床之速度向量分佈圖(d=6cm、Q=100L/min)

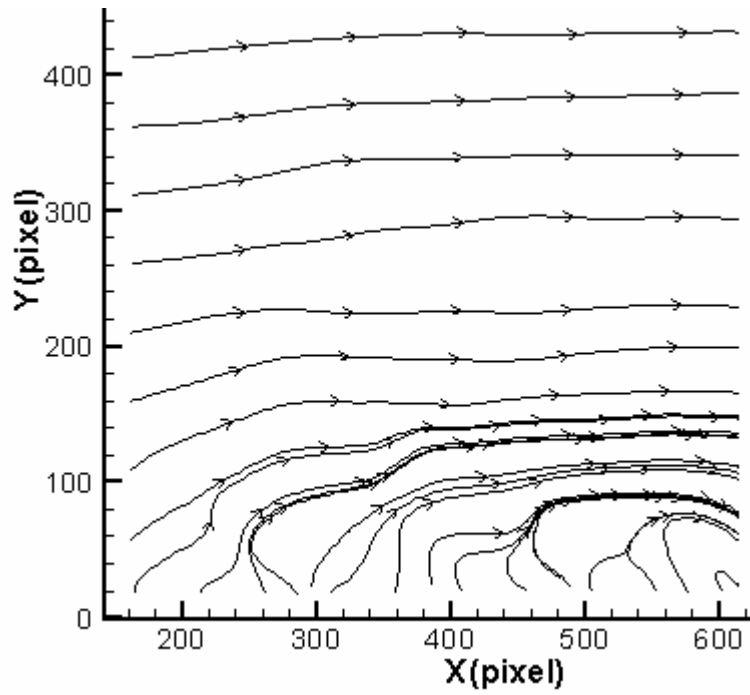


圖 4-51 案例 12 植生底床之流線圖 (d=6cm、Q=100L/min)

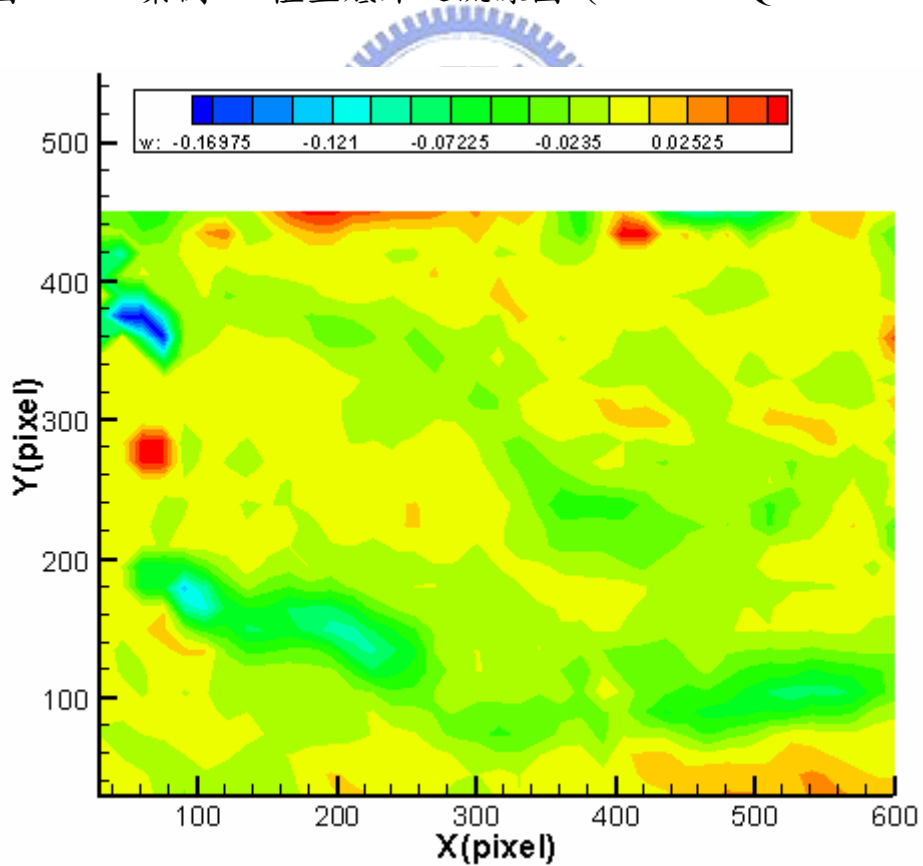


圖 4-52 案例 12 植生底床之渦度場圖 (d=6cm、Q=100L/min)

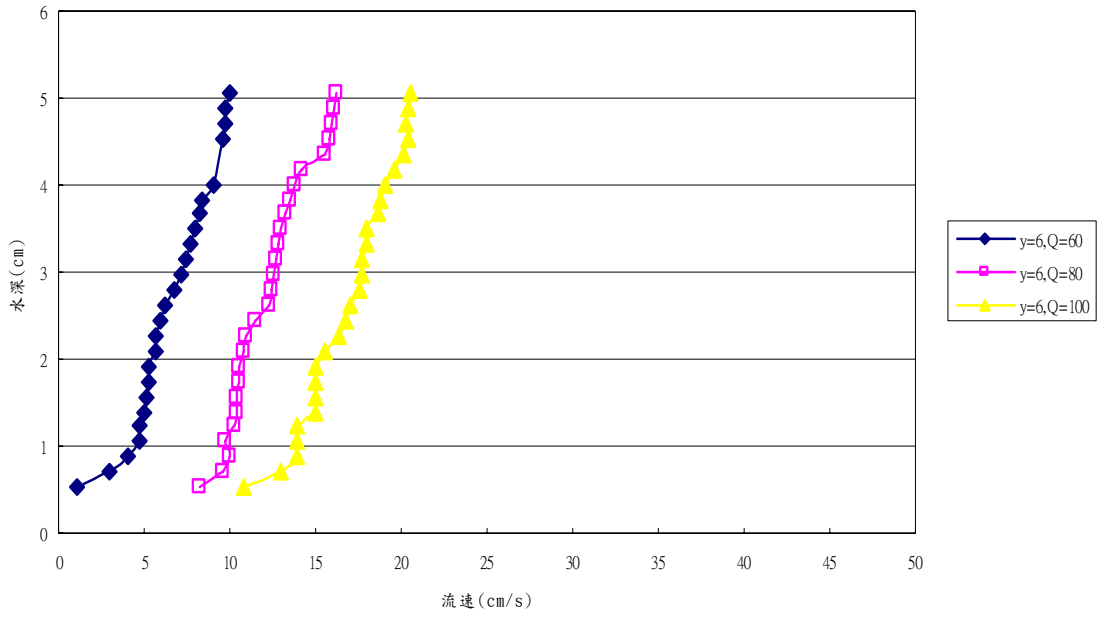


圖 4-53 水深 6cm 之光滑底床渠道流速剖面圖

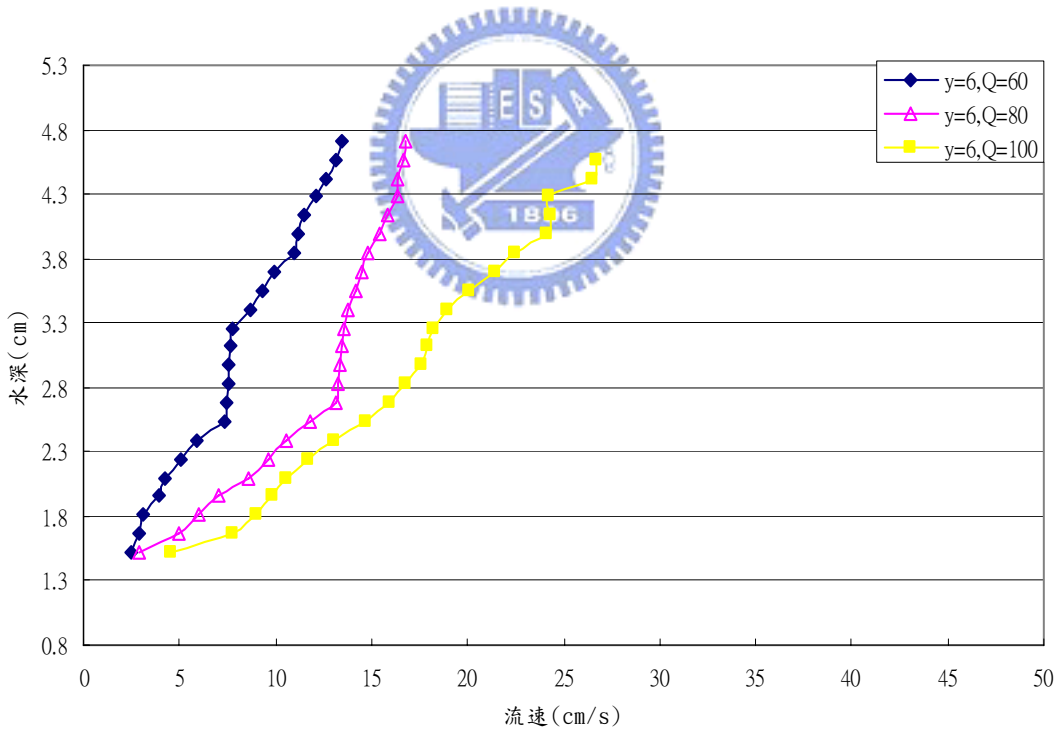


圖 4-54 水深 6cm 之植生渠道流速剖面圖

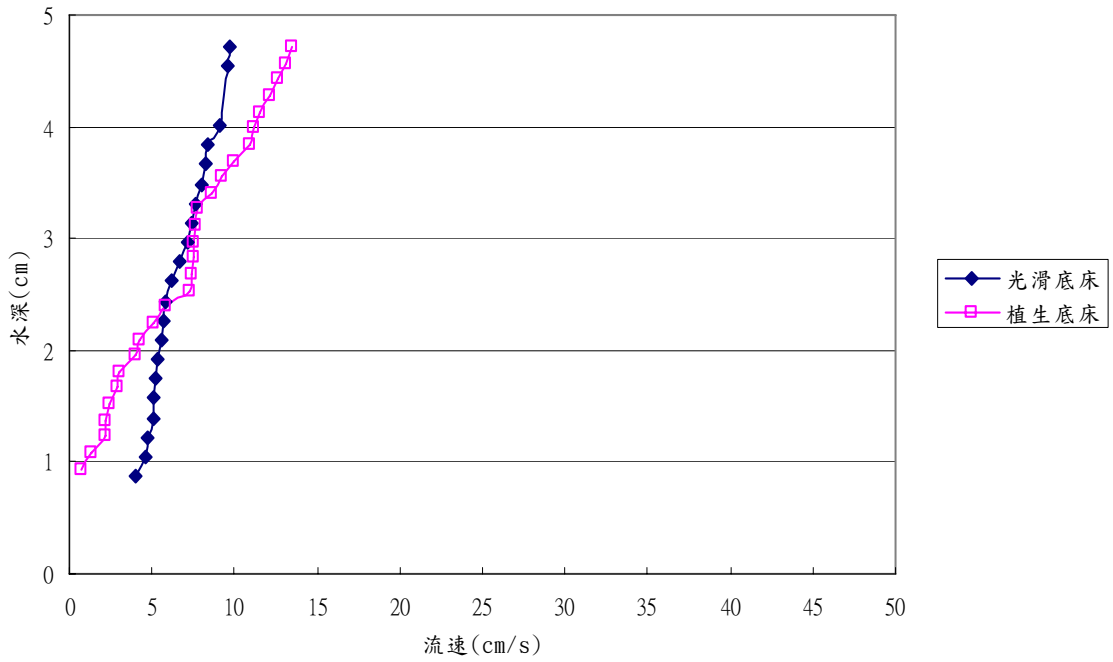


圖 4-55 不同底床下之流速剖面圖 ($y=6\text{cm}, Q=60\text{L/min}$)

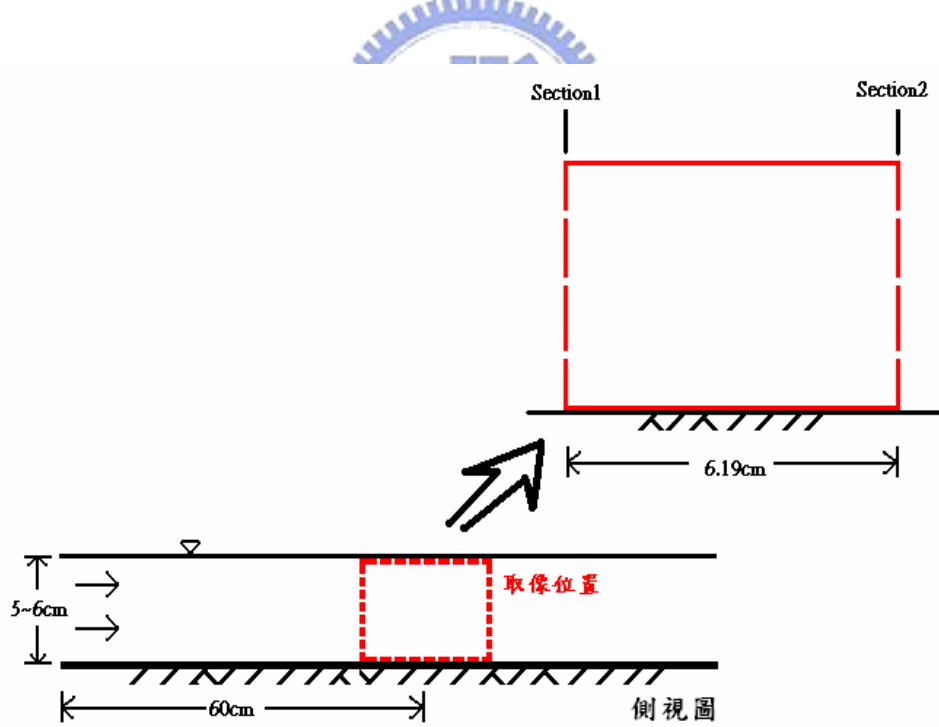


圖 4-56 探討不同底床下之阻力位置示意圖

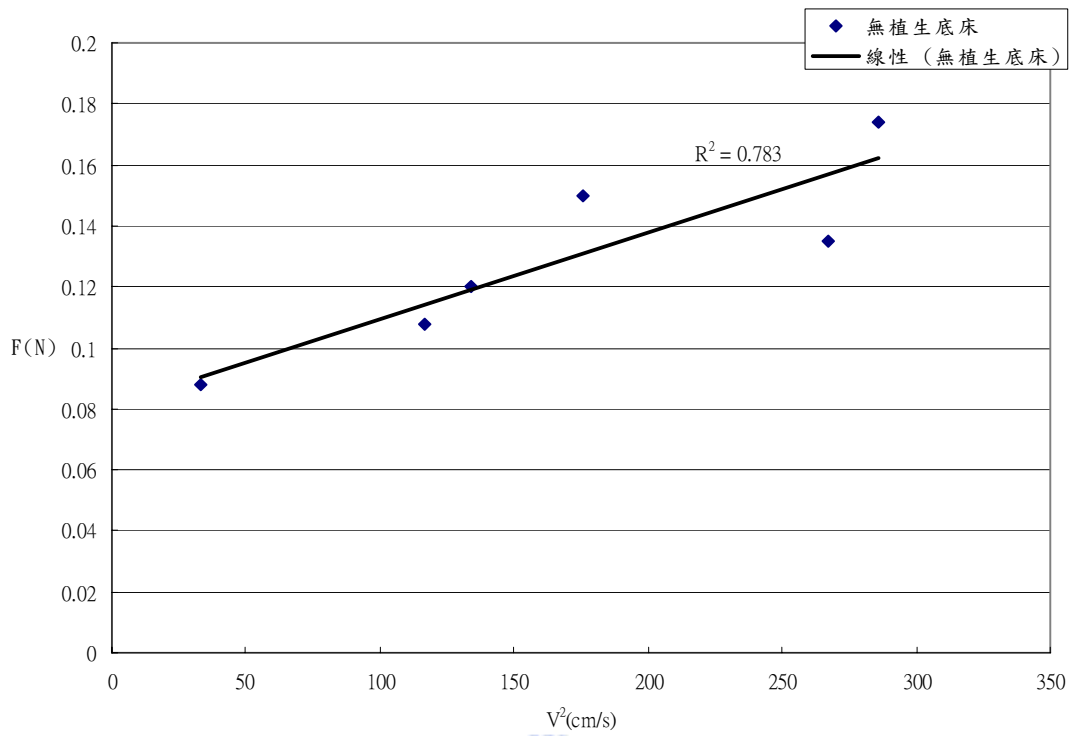


圖 4-57 光滑底床下之阻力與流速關係圖

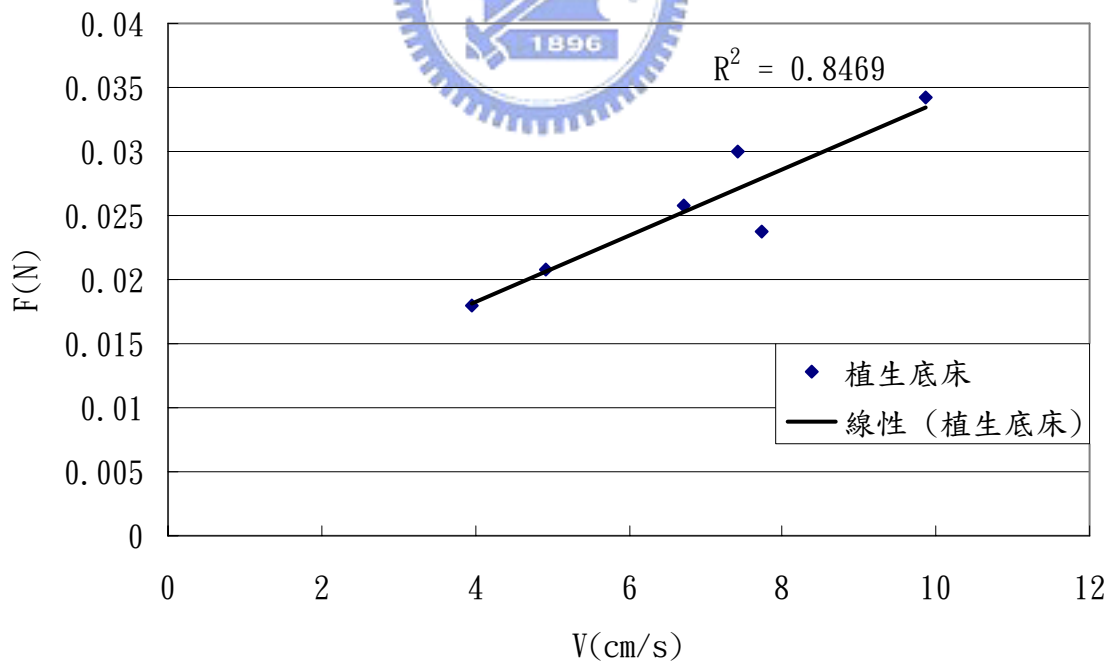


圖 4-58 植生底床下之阻力與流速關係圖

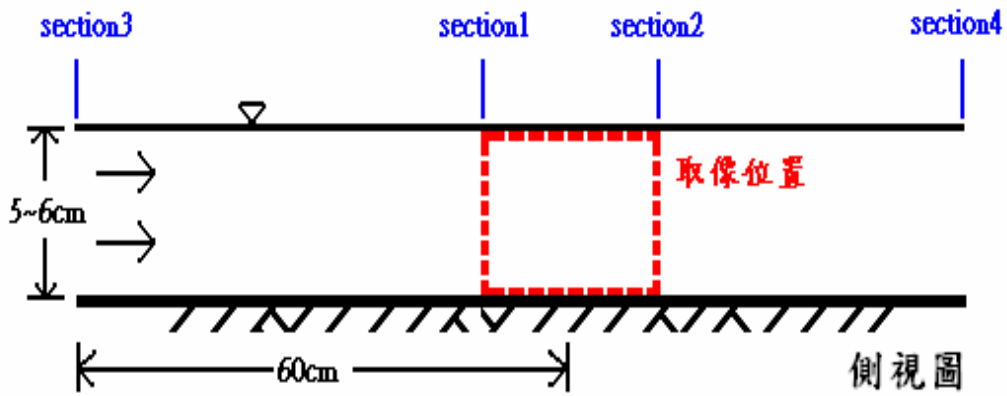


圖 4-59 探討能量損失示意圖

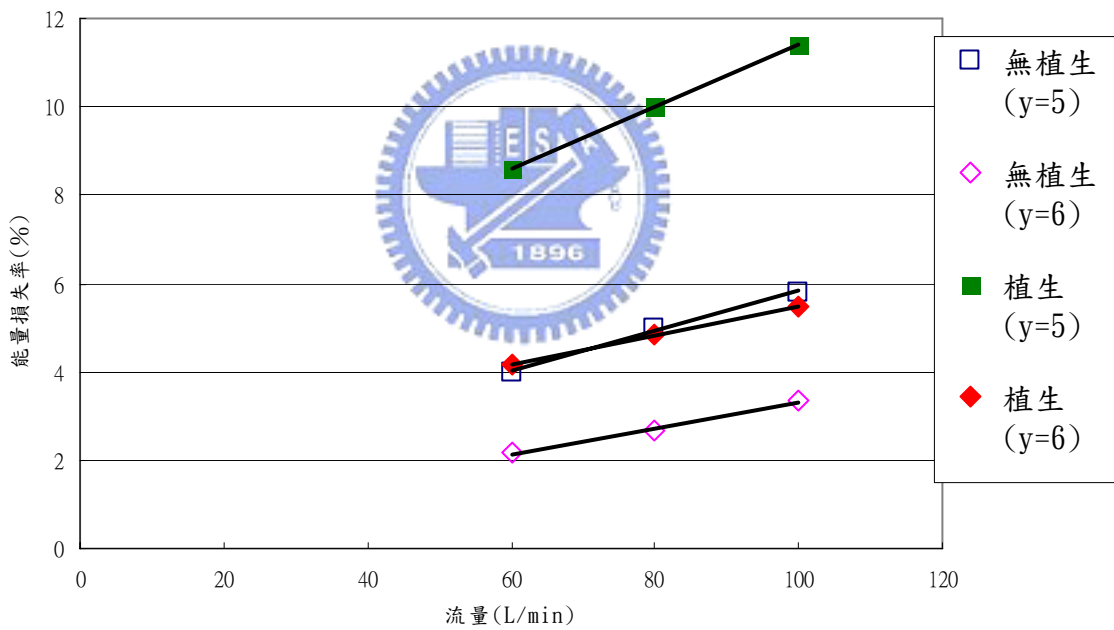


圖 4-60 不同底床、流量及水深下之能量損失圖