

國立臺灣大學工學院應用力學研究所

碩士論文

Institute of Applied Mechanics

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

利用LIF感溫技術量測渦環在逆溫層之速度及溫度場

Simultaneous Measurement of Temperature and Velocity by LIF
and Its Application to The Vortex Rings in The Inversion Layer



指導教授：朱錦洲 博士
郭志禹 博士

Advisor : Chin-Chou Chu, Ph.D.
Chih-Yu Kuo, Ph.D.

中華民國 97 年 7 月

July, 2008

誌謝

首先感謝朱錦洲老師在教會生活與心靈上的照顧與提攜、張建成老師在論文上的指導與提問，郭志禹老師在儀器、理論應用許多想法上的討論與指點迷津，以及家裡父母兄妹不遺餘力在生活與心靈上的支持，堂哥黃渝豪與其朋友鄭國政在流量計與PLC設計上提供協助與幫忙，附近加工廠的叔叔與伯伯們在器材上的幫忙，省去了許多昂貴儀器上的開支，與中興獸醫學院老師在材料上的建議。

金工廠的李師傅、水電的林師傅在加工與儀器修復上的建議，所辦的黃先生、李小姐、許小姐在許多上事務的幫忙，讓行政流程更加順利，甚是感謝。

實驗室的學長姐們，世霖學長在PIV與CCD上的意見與生活上的照應，健誌學長在影像處理與PTV上的教導與討論，政達學長在宿舍時的照料，春斐學長學巧克男孩的唯妙唯肖總是帶給人歡樂，世迪學長讓我了解客家人吃苦耐勞的天性，耿豪學長在實驗和許多日常生活上的小建議，譽升學長讓我真是認識了另外一種不同的生活方式，一仁學長與怡君學姐在液晶與色彩學上的解惑，長志學長在閱讀文章與實驗架設上的指教，世華學長在LabView上的入門，繼鋒學長在Matlab整理數據上的小小指點。

實驗室的同學們，家杰在隔板上的設計有如醍醐灌頂般天外飛來一筆，奕哲、俊為、慶川、裕昇，這兩年走來在作業、考試、論文、生活上的相互幫忙與照應，感謝書豪、家瑋、宇洋學弟們在口試時的大力幫忙。

至於其他無名英雄就不一一細數了，感謝您們的存在與幫忙，都是我人生中成長的不可或缺的一份子，在此致上我最深摯的感謝。

摘要

本實驗利用會隨溫度造成亮度上變化的螢光染料(Rhodamine B、Rhodamine 110)，在不影響原流場結構的前提下，利用雷射螢光測溫法(Laser Induced Fluorescence)和質點顯像測速儀(Particle Image Velocimetry)觀測渦環進入溫層後從主動混合到被動混合的變化與影響。

本文內容詳細介紹此技術之原理、實驗設備架設、校準及實驗方法建立，並將此技術應用於溫層中渦環的流場量測。在此分別就保持一固定動量之渦環在均勻環境與逆溫層環境中，分析其溫度、速度與渦度等物理量之分佈與變化情形，並驗證此量測技術之實用性，最後再使用數值分析軟體Comsol Multiphysics探討驗證此渦環流場的物理現象。

關鍵字：渦環、逆溫層、雷射螢光顯影技術(LIF)、質點顯像測速儀(PIV)、數值分析



Abstract

This experiment utilizes the fluorescent dyes (Rhodamine B 、 Rhodamine 110) that shine with their intensity proportional to its temperature. Combining the use of laser-induced fluorescence (LIF) and particle image velocimetry (PIV), we are able to measure the fluid flow without disturbing the flow. On the dissertation, we use the technique to measure the transient phenomena of a vortex ring moving in a thermally inversion ambient.

The principle of the LIF technology, experimental set-up, and calibration are detailed. We measured vortex rings with a fixed momentum in both thermally homogeneous and thermally inverse ambients for comparison. Use this technology in combining with PIV for the present topic of interest is proven feasible, in additional, Numerical analysis using commercial software Comsol Multiphysics is also performed.

Key word : Vortex Ring, Temperature Inversion Layer, Laser Induced Fluorescence

(LIF), Particle Image Velocimetry (PIV), Comsol Multiphysics

目錄

誌謝.....	I
摘要.....	II
Abstract.....	III
目錄.....	IV
圖目錄.....	V
符號表.....	VII
第一章 緒論.....	1
1.1 全文概述.....	1
1.2 研究動機與目的.....	2
1.3 文獻回顧.....	3
第二章 理論分析與實驗規劃.....	6
2.1 理論分析.....	6
2.2 雷射螢光顯影測溫技術概述.....	11
2.3 粒子影像測速儀(Particle Image Velocimetry , PIV) [36].....	17
2.4 有限元素分析法數值軟體 Comsol Multiphysics	17
第三章 實驗設備及實驗方法.....	19
3.1 實驗設備.....	19
3.2 實驗方法.....	21
3.3 數值模擬(Numerical Simulation)	24
第四章 結果與討論.....	27
4.1 流量計流速曲線率定.....	27
4.2 染料背景校正與驗證.....	27
4.3 均勻流場之渦環 [3,21].....	29
4.4 逆溫層流場之渦環.....	29
4.5 數值模擬.....	30
第五章 結論與未來展望.....	32
5.1 結論.....	32
5.2 未來展望.....	32
參考文獻.....	70

圖目錄

圖(1-1) 涡環正擊固體平板及自由液面的定量分析 [3].....	33
圖(1-2) 對稱圓形負浮力射流在線性密度分層鹽水中的紊流流動特性 [13].....	34
圖(1-3) 涡環在線性密度分層下的流動特性 [14].....	35
圖(1-4) LIF 實驗溫度場與數值模擬溫度場比較 [4].....	36
圖(1-5) RhB 螢光強度與溫度在無因次化下之校正曲線斜率 [17].....	36
圖(2-2) 強的負浮昇射流之流動示意圖.....	37
圖(2-3) 弱的負浮昇射流之流動示意圖.....	37
圖(2-4) 密度分層下的浮昇射流.....	38
圖(2-5) Jablonski Energy Diagram [37]	39
圖(2-6) 螢光分子的吸收與釋放光譜圖 [37]	39
圖(2-7) Rhodamine B 化學結構	40
圖(2-8) Rhodamine 110 化學結構	40
圖(2-9) Rhodamine B 的吸收(左)與釋放光譜(右).....	41
圖(2-10) Rhodamine 110 的吸收(左)與釋放光譜(右).....	41
圖(2-11) Rhodamine B 在 30、40、50、60、70 度下的亮度變化 [12].....	42
圖(2-12) Rhodamine B 與 Rhodamine 110 隨溫度改變的亮度圖 [16]	42
圖(2-13) 在單一染料下，LIF 結合 PIV 之溫度速度場量測 [15]	43
圖(2-14) 兩種螢光染料之 LIF 溫度場量測 [16].....	43
圖(2-15) LIF two color 影像處理流程圖 [5].....	44
圖(2-16) 低通濾波(LowPass Filter)示意圖	44
圖(2-17) 中值濾波(Median Filter)示意圖	44
圖(2-18) AVT GUPPY F-080C RGB 波段.....	45
圖(2-19) AVT GUPPY F-080C B/W 黑白波段	45
圖(3-1) 水槽、渦環產生機構.....	46
圖(3-2) 空壓機、調壓閥、速控閥、氣壓缸、手動閥、注射筒.....	46
圖(3-3) SPX 低速流量計、三菱 FX2N PLC	47
圖(3-4) 低溫恆溫水槽、加熱板.....	47
圖(3-5) NI-9211 溫度擷取裝置、TES-1319A 溫度計	47
圖(3-6) Stabilite 2017 氩離子雷射	48

圖(3-7) 螢光染料(Rhodamine B、Rhodamine 110)、PSP-5 塑膠顆粒	48
圖(3-8) AVT GUPPY F-080C CCD 彩色攝影機.....	49
圖(3-9) 高解析度 RGB 3CCD 彩色攝影機、FITC/TRITC 雙波段濾鏡.....	49
圖(3-10) FITC 雙波段濾鏡與兩種染料之發散光譜	49
圖(3-11) 實驗設備配置圖.....	50
圖(3-12) Comsol 模擬建模尺寸	51
圖(4-1) 總流量 9c.c.歷時 1.34 秒之流量流速時程圖	52
圖(4-2) 總流量 10c.c.歷時 1.45 秒之流量流速時程圖	53
圖(4-3) 總流量 11c.c.歷時 1.54 秒之流量流速時程圖	54
圖(4-4) 雷射光強度 42.5 amps 下 RhB 染料於溫度 27.5、40、50、60 之校正圖	55
圖(4-5) 雷射光強度 30 amps 下 RhB 染料於溫度 27.5、40、50、60 之校正圖	55
圖(4-6) RhB 染料在溫度 27.5、40、50、60 之亮度圖	56
圖(4-7) RhB 染料在溫度 27.5、40、50、60 之正規化亮度圖	56
圖(4-8) 二色染料在溫度 30、40、50 之 R/G-溫度圖	57
圖(4-9) 涡環在均勻渦環流場下之時序變化圖(from t = 0 sec , 間隔 1s)	58
圖(4-10) 因背景亮度與實驗時雷射切頁偏差造成之誤差.....	59
圖(4-11) 因背景亮度顆粒數過多造成溫度分析粗糙.....	60
圖(4-12) LIF(two-color with 3CCD)之溫度分析圖	61
圖(4-13) 涡環在逆溫層下之時序變化圖(from t = 0 sec , 間隔 1s)	62
圖(4-14) 涡環在逆溫層下之溫度分佈圖(from t = 0 sec , 間隔 1s)	63
圖(4-15) 以 sin 函數趨近取代流速曲線圖	64
圖(4-16) 數值模擬時程圖(0~5.5 秒，間隔 0.5 秒).....	65
圖(4-17) 數值模擬時程圖(6~11.5 秒，間隔 0.5 秒).....	66
圖(4-18) 數值模擬時程圖(12~17.5 秒，間隔 0.5 秒).....	67
圖(5-1) 逆溫層渦環之定性、速度、渦度、溫度場.....	69

符號表

Γ ：環流量 (Circulation)

E ：渦焓 (Enstrophy)

V ：起始流速

D ：排放口直徑

g ：重力加速度

ρ_0 ：排放流體密度

ρ_a ：周圍流體密度

Fr_d ：密度福祿數(Densimetric Froude number)

M_o ：動量通量

B_o ：浮力通量

L_M ：射流/浮流長度尺度

I_e ：雷射入射光強度

C ：染料濃度

ϕ ：量子效率

ε ：吸收效率

$\frac{\lambda_e}{\lambda_f}$ ：染料分子從激發態到基態所散失之能量

u ：速度向量

p ：壓力

F ：流體作用力

ρ ：流體密度

η ：動態黏性

∇ ：向量微分運算子

C_p ：熱容

Q ：熱源

k_c ：熱傳導係數



β ：體膨脹係數

3CCD : 3-Chip Charge Coupled Device

CCD : Charge Coupled Device

LIF : Laser-Induced Fluorescence , 雷射誘導螢光測溫法

PIV : Particle Image Velocimetry , 質點影像測速儀

PSP : Polymer Seeding Particle , 塑膠顆粒

RGB : Red, Green, Blue color space , 紅綠藍色彩空間

TC : Thermo-couple , 热電偶

TLC : Thermochromic Liquid Crystal , 液晶感溫粒子



第一章 緒論

1.1 全文概述

本文以實驗與數值模擬渦環在逆溫層中之現象，實驗中在水槽底板以恆溫循環水槽冷卻和在水槽上層以加熱板加熱，並使用溫控器來達到溫度控制目的，來模擬大氣中之逆溫層，水槽為一內外兩層之容器來，其目的為達到保溫效果，確保內層實驗環境的穩定性，並使用一氣動式活塞與流量監控系統，使其定量地通過渦環產生機構產生一渦環，觀察其在溫層中的變化。以上皆以水為工作流體，使用雷射螢光測溫法量測渦環在逆溫層環境中從主動混合到被動混合過程中溫度與速度的流動特性，並配合數值模擬來驗證其定性與定量化的進展情形。

本文中所使用的實驗方法有兩種，分別為定性觀察渦環行為的螢光染料施放法，以及定量觀察可同時量測溫度與速度場之雷射螢光測溫法，觀察渦環在逆溫層與均勻環境下的流動情形與結構。

首先以螢光染料施放法作定性實驗，將出口以下先注滿染料溶液後，使隔板關閉，水槽注滿清水，待溫度環境穩定之後，打開隔板，啟動氣壓缸推動注射筒產生渦環，並以雷射光透過鏡組產生一垂直切頁，激發螢光染料觀察其結構變化。

而流場中之速度及溫度場是以雷射螢光測溫法(Laser-Induced Fluorescence, LIF)量測，乃藉由兩種對於溫度不同敏感度之螢光染料與塑膠顆粒，來得到流場之溫度場與速度場。

於水槽內層及出口以下銜接之水管與注射筒施放特定濃度比例之之螢光染料與適量之塑膠顆粒(Polymer Seeding Particle, PSP)作為追蹤粒子，水槽外層為清水以清楚觀察容器內之流場情形，也是等待環境穩定之後，啟動開關，並使用單一波長488奈米雷射光以切頁方式激發流場欲觀察之二維平面，再以彩色CCD擷取即時影像，並將各影像像素之RGB(Red、Green、Blue)值分別作處理。

在溫度影像之處理上，依單一染料與雙種染料混合使用方法上之不同，配合實驗前校正之 I_{norm} -溫度曲線(One-color)與 R/G-溫度曲線(Two-color)，得到流場之溫度分佈圖；另外，綠色波段(One-color)或藍色波段(Two-color)兩張連續影像中塑膠顆粒的位移可透過PIV軟體FlowManager，得到該流場之速度場。

最後，將實驗中溫度與流量監控裝置中所得到的數據，結合有限元素分析軟體 Comsol Multiphysics，設定搭配實驗條件之邊界條件，模擬渦環在逆溫層與均勻環境中之流動特性。

本文共分為五個章節，第一章為緒論，內容包括研究動機與目的、及文獻回顧；第二章為理論分析，包含浮昇射流的介紹，及數值模擬方面所使用的統禦方程式與邊界設定，及雷射螢光顯影技術的原理與說明；第三章介紹實驗上的架設規劃、實驗步驟與設備規格；第四章為實驗與模擬結果的分析比對並探討其背後的物理意義；第五章為結論及未來展望。

1.2 研究動機與目的

浮力射流在自然界和工業界中隨處可見，在射流流體與環境流體屬於相同相態下，當密度大的流體被朝上射入密度小的環境流體中時，在負浮力的作用下，射流在環境流體中的上升速度逐漸減緩，會浮昇至一平衡高度後停止向上的運動而向水平方向擴散，並向外伸展與向下回落。在整個過程中射流不斷與周圍的流體進行不同程度的混合，從一開始的主動混合至平衡高度前的被動混合，形成十分複雜的流動現象。同樣的流動現象也會發生在密度較小的射流向射入密度較大的接收流體中的情形。

流體的密度差可能來自濃度的不同，或者來自溫度的不同，也可由兩者共同產生。例如，通風系統中空氣的加熱或冷卻、火山的溶岩漿穴、煙囪之煙流、放流之污水、大氣中不同雲層中的混合……等等。

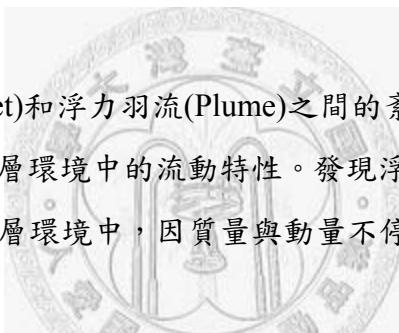
為觀察浮力射流在線性密度層中，發展過程時動量與能量的變化，需要選用適當的量測方法。在過去的研究中，許多學者利用液晶感溫粒子(Thermochromic Liquid Crystal, TLC)的特性，並搭配使用質點顯像測速儀(Particle Image Velocimetry, PIV)，成功地同時量測在自然對流流場中的速度與溫度場，但是卻因液晶色彩特性，溫度使用範圍難以超出10度以上。

為改良溫度範圍上使用的限制，本文使用雷射螢光顯影技術(Laser Induced Fluorescence, LIF)，並與質點顯像測速儀(Particle Image Velocimetry, PIV)作結合，同時量測溫度場與速度場，再使用Comsol Multiphysics有限元素分析軟體模擬流場，來探討流場中浮力與重力之間的相互作用。

1.3 文獻回顧

1.3.1 現象討論

1993 年，Chu C. C., Wang C. T. and Hsieh C. S.利用 LIPA 大區域速度量測法，對渦環正擊固體平板及自由液面作定量上的分析。分別對主渦環、次渦環與邊界層作大區域的速度與渦度的量測，並計算個別與整個流場的環流量和渦焓(entropy)得到渦環在自由前行、伸展、反彈等階段的定量分析。其實驗中觀察主渦環在撞擊平板的過程中會有邊界層的產生，邊界層內的流體最初受到主渦環的推擠，而有加速的現象，到最後因沿著徑方向的流通面積變大而漸漸的減速時，會在邊界上產生逆向的壓力梯度，使得邊界層產生非定常分離現象。隨著主渦環接近平板並沿著徑方向伸展時，邊界層會分離同時生成次渦環，最後主渦環會因和次渦環交互作用而有渦心遠離的反彈現象，如圖(1-1)所示。



Morton研究介於射流(Jet)和浮力羽流(Plume)之間的紊亂強制射流(Turbulent Force Plume)在均勻環境與線性分層環境中的流動特性。發現浮力羽流在均勻環境中會無限制地往上上升，而在線性分層環境中，因質量與動量不停與周圍環境釋放混合，而停至在一平衡高度 Y_m 。

Turner J. S.利用矩形水槽注滿清水，在水槽中置放一垂直向上噴嘴，使高濃度鹽水由噴嘴向上噴出形成負浮昇射流，再對射流的浮昇高度加以量測。並根據實驗數據，依照動量與浮力定義出最大平衡高度 $Z_m=CM^{3/4}B^{-1/2}$ 。

Campbell and Turner利用實驗和相似理論研究了在開放的和封閉的容器內軸對稱圓形負浮力射流和二維平面負浮力射流的宏觀流動特性，進一步驗證了標訂關係 Z_m 的正確性。

Lynn J. Bloomfield and Ross C. Kerr利用實驗與數值模擬研究軸對稱圓形負浮力射流與線源型負浮力射流在線性密度分層鹽水中的紊流流動特性，並發現其與在均勻環境下之紊流流動特性有相當大的差別，圖(1-2)。

Orlandi P. , Egermann P. and Hopfinger E. J.用鹽水與清水混合技術製造一線性密度分層，將一渦環產生機構將渦環由上往下噴射，利用實驗紋影技術觀察密度上之變化，搭配數值模擬驗証在此線性密度分層下的流動特性，圖(1-3)。

Wenxian Lin and S. W. Armfield 利用直接數值模擬(Direct numerical simulation)弱的負浮力射流，包含了軸對稱圓形射流和平面射流在均勻和線性分層流體環境中的流動特性。

韓會玲、李煒、槐文信、曾玉紅……等人利用混合有限分析法(HFAM)、重整化網格(RNG)、 $k-\epsilon$ 紊流模型等方法，模擬研究在靜止環境、流動環境、橫流中各種類型的浮力射流(水平射流、垂直射流、傾斜射流、正浮力射流、負浮力射流……等)。

李安桂論述了空氣射流、浮力尾流和浮力射流的相同、相異性和解法特點，歸納分析現有的實驗資料。

1.3.2 流場感溫技術

Coolen M. C. J. , Kieft R. N. , Rindt C. C. M. and van Steenhoven A. A. 使用單一螢光染料(RhB)，搭配Nd:YAG脈衝雷射與CCD同步Trigger擷取影像，減少因雷射光3%左右之能量振幅所帶來之影響，並將染料濃度調至 $10^{-7}M$ 以下可將重複激發(re-emission)所帶來之誤差忽略，與探討壁面陰影處對實驗所帶來的溫度場分析之影響，與數值作比較，圖(1-4)。

Seuntiens H. J. , Kieft R. N. , Rindt C. C. M. and van Steenhoven A. A. 使用單一螢光染料(RhB)觀察一加熱圓柱在拖曳水槽中溫度分佈流況，而影像後處理方式在溫度穩定下之流場，對雷射光不穩定與亮度不均勻之因素作一系列之校正，並驗証了 Sakakibara and Adrian R. J. 之理論，也就是RhB螢光強度與溫度在無因次化下之校正曲線斜率皆為相同，準確率 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ (95%可信度)，圖(1-5)。

Sakakibara J. and Adrian R. J. 使用兩台黑白CCD搭配濾鏡之組合，將兩種螢光染料(RhB、Rh110)激發波長分開擷取，因兩台CCD的角度擷取不同，所以在影像處理上作座標上之校正，並探討雷射瓦數與染料濃度比例的影響，將其應用在一熱對流流場，與溫度計實際溫度作誤差分析。

Funatani S. , Fujisawa N. and Ikeda H. 利用彩色3CCD光譜波段的概念將兩種螢光染料(RhB、Rh110)之激發波段，使用R、G、B三片感光CCD分開擷取，省去了溫度感測上雷射光亮度不均勻誤差之校正。並將LIF結合PIV同時量測紊亂羽流之溫度場與速度場，比較兩種螢光染料之密度比與顯影粒子數量對此技術的影響作一整理與討論。

黃真理、李玉梁、余常昭……等人對螢光素鈉進行光譜分析，分別研究濃度、激光功率、溫度、酸鹼值和濾鏡……等因素對其螢光強度之影響，並將其應用在射流流場上，量測流場之濃度變化，並與相關文獻作比較。

黃一仁將液晶顯像技術應用於具溫度效應之渦環流場，分別觀察不同雷諾數下之冷渦環進入暖水域，熱渦環進入冷水域，及渦環進入同溫水域的比較與對照。

林怡君以液晶顯像技術模擬自然界中渦漩具背景渦度並存在溫度效應下的行為表現，觀察渦漩進入溫度效應區前、中、後三區域的垂直方向流場，並分別比較熱渦漩、冷渦漩、常溫渦漩之路徑變化。



第二章 理論分析與實驗規劃

2.1 理論分析

2.1.1 涡環 [3,21]

為了能對渦環流場有初步的認識，先將所需探討的物理量意義及其關係式推導加以說明，在此探討幾個重要的物理量：

(1) 涡環雷諾數

$$Re = \frac{VD}{\nu}$$

其中 V 為渦環核心在穩定自由前進時的初始速度(約距渦環產生器兩倍直徑的位置)， D 為渦環產生器之直徑長， ν 為動力黏滯係數。

(2) 環流量 (Circulation)

流場的環流量定義為流場流速在一封閉曲線內之環積分，可表示為：

$$\Gamma = \int_c \vec{u} \cdot d\vec{l}$$

由 Stokes 定理可將上式改寫為封閉曲線內所為成之渦度通量：

$$\Gamma = \int_{\Omega} \bar{\omega} \cdot d\bar{A}$$

(3) 涡焓 (Enstrophy)

$$E = \int_{\Omega} \frac{1}{2} \omega^2 dV$$

為渦度平方的體積分，其中 Ω 為流場所涵蓋的區域，此物理量可視為流場中渦漩活動力的重要指標，我們進一步考慮渦焓隨時間的變化率

$$\frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{\Omega} \frac{1}{2} \omega^2 dV = \int \omega (\omega \cdot \nabla u) dV + \frac{1}{Re} \int_{\Omega} \nabla \frac{\omega^2}{2} \cdot \bar{n} dl - \frac{1}{Re} \int_{\Omega} \nabla \omega \cdot \nabla \omega dV$$

由於本文所研究係二維流場，因此上式等號右邊第一項可不考慮

$$\frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{\Omega} \frac{1}{2} \omega^2 dV = \frac{1}{Re} \int_{\Omega} \nabla \frac{\omega^2}{2} \cdot \bar{n} dl - \frac{1}{Re} \int_{\Omega} \nabla \omega \cdot \nabla \omega dV$$

上式中的物理意義：等號右邊第一項為邊界渦焓通量，及邊界效應對流場渦焓的貢獻，此項對渦焓的變化率為正的貢獻，第二項為流場渦度梯度對渦焓的影響，此項

對渦焰變化率為負的貢獻。

在此定義一些實驗參數：在圖(2-1)中，渦環自由前進的速度為 U ，渦漩切線速度為 u ，兩渦心相距為 d ，對任一渦漩而言：

在 A 點速度： $V_A = u - U$

在 B 點速度： $V_B = u + U$

其中 V_A 、 V_B 可由下述分析方法求得

$$U = \frac{V_B - V_A}{2}$$

$$u = \frac{V_B + V_A}{2}$$

渦漩切線速度與渦心前進速度同向，有疊加的效果而渦漩切線速度與渦心前進速度反向，有相減的效果。因此可計算其環流量 Γ 、與雷諾數 Re ：

$$\Gamma = 2\pi U d$$

$$Re = \frac{\Gamma}{v} = \frac{2\pi U d}{v} = 2\pi Re_d$$

2.1.2 射流、浮流、浮力射流 [6,11,19,22]

按照流體運動的原動力可分成三種種類：射流(Jet)、浮力羽流(Plume)、浮力射流或強制羽流(Forced Plume、Buoyant Jet)。

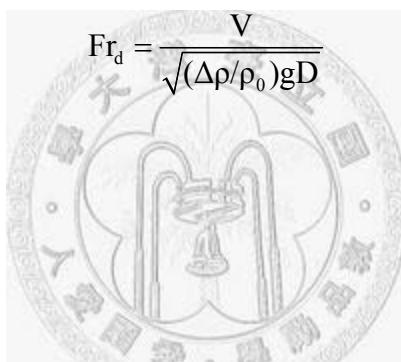
當流體受推擠自密閉空間中噴射而出，所產生的流體運動稱為射流或噴流。若流體本身之動量很小，但其密度與周遭流體相較之下為輕，此流體便會受到一浮力，稱為浮流或羽流，譬如核子彈爆炸的蕈狀雲、燃燒所引起的煙流等。若流體兼具起始動量與密度差異，流體的混合則會受流體本身之動力與浮力的雙重影響，則稱為浮昇射流或強制浮流，譬如煙囪之排放、污水之放流等。

第一類射流以出流的動量作為原動力，在整個運動過程中都以這個動量作為主要的動力來源，且過程中密度保持不變，稱為純射流(Jet)，等溫送風或等密度之射流皆為此種類型，在圓型射流和平面射流方面，其空氣動力學特性已有較清楚的研究與驗證，對於該射流之內部結構、紊流參數、相關系數都進行不少的實驗與模擬。

第二類流動的因素起源於密度、濃度、溫度的不同與改變，以浮力作為動力來源，在流動的過程中密度不斷地發生變化，這類流動稱之為浮力尾流(Plume)或浮力羽流(Buoyant Plume, Buoyant wake)，像散熱器之表面，空氣受熱膨脹，密度變小而上升，形成對流流動等皆為此種形式。

第三類的原動力便包括以上兩種：出流動量和浮力，當射流的起始密度小於或大於周圍環境流體之密度時，其流體本身的原動力既來自外力(幫浦、壓縮機)之推動，也受到浮力之作用。而此類型又分為正向浮力射流(熱→冷)：射流密度小於周圍流體密度，負向浮力射流(冷→熱)：射流密度大於周圍流體密度，例如非等溫送風(冷態、熱態射流)等，都是典型的浮力射流(Buoyant Jet)。

這三種的分類可由密度福祿數(Densimetric Froude number)來表示

$$Fr_d = \frac{V}{\sqrt{(\Delta\rho/\rho_0)gD}}$$


其中

V：起始流速

D：排放口直徑

g：重力加速度

$\Delta\rho = |\rho_0 - \rho_a|$ ：排放流體密度 ρ_0 與周圍流體密度之差異

故此密度福祿數為速度動量與浮力動量之比，因純射流之密度差為 $\Delta\rho = 0$ ，所以 $Fr_d \rightarrow \infty$ ；而浮力羽流的起始速度 $U \approx 0$ ，所以 $Fr_d \rightarrow 0$ ，而浮昇射流 Fr_d 則是介於 0 到 ∞ 之間， $0 < Fr_d < \infty$ 。

而流體依照排放口形狀可分為兩類：

- (1) 圓管射流(Round jet)：在無橫流之影響下，射流會向圓管之中心軸四方散開，因此為軸對稱之關係，屬於二維流場，分析時可採用圓柱標系統。
- (2) 平面射流(Plane jet)：排放口為長條狀之狹縫(Slot)，一樣在無橫流之影響下，會向兩側散開，對稱於出口之中心線。若排放口之長度遠大於寬度，亦可視為二維流場，可以採用卡式座標來分析。

同樣地，若以周圍流體環境做為區分，大約可分成四個種類，分別為：

- (1) 均均靜態環境 (Homogenous Environments) 、
- (2) 均勻橫流環境 (Homogenous Environments with Crossflows) 、
- (3) 線性密度分層靜態環境 (Density-Stratified Environments) 、
- (4) 線性密度分層橫流環境 (Density-Stratified Environments with Crossflows) 。

浮昇射流兼具起始動量與密度差異，流體之混合受到動量與浮力之雙重影響，在整個過程中射流不斷與周圍的流體進行積捲混合，此種流動特性主要受雷諾數(Reynolds number)，密度福祿數(Densimetric Froude number)，普朗特數(Prantle number)，流體的分層度Sp(Stratification parameter)……等參數之影響。

其中雷諾數(Reynolds number)與普朗特數(Prantle number)的定義式為

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu}$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{C_p \mu}{\kappa}$$

這裡的符號分別代表為，

ρ ：流體密度

V ：流體初始平均速度

D ：排放口的直徑

μ ：絕對黏度或動力黏度，absolute or dynamic viscosity，kg/m · s

ν ：運動黏度，kinematic viscosity， $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ ，m²/s

α ：熱擴散係數，thermal diffusivity， $\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$ ，m²/s

C_p ：比熱，Heat capacity，J/(kg · K)

k ：熱傳導係數，Thermal Conductivity，W/(m · K)

前面所提到之Fr_d數是用來衡量排放口處的慣性力與浮力相對大小之物理量，可以將其定義為

$$Fr_d = \left(\frac{M_0 V}{B_0 D} \right)^{1/2}$$

其中的M₀與B₀分別為射流的比動量通量(specific momentum flux)與比浮力通量

(specific buoyancy flux)。

若排放口處的速度為均勻之情況下，以圓管射流為例，其起始動量 M_0 ：

$$M_0 = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot V^2$$

其中D為出口直徑，V為初始平均速度。

而浮力通量 B_0 ：

$$B_0 = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot V \cdot \frac{\Delta \rho g}{\rho_0}$$

將起始動量 M_0 與浮力通量 B_0 代入後，這樣兩者均可由一開始的 Fr_d 密度福祿數(Densimetric Froude number)來作計算。

$$Fr_d = \frac{V}{\sqrt{(\Delta \rho / \rho_0) g D}}$$

如果排放處的動量的影響大於負浮力之影響，即 $Fr_d > 1$ ，此種射流被稱之為強的負浮力射流(Strong fountain)，而此種射流進入環境流體很快就會成為紊流，如圖(2-2)所示，為強的負浮昇射流之流動特性示意圖。如果排放口處動量影響小於或等同於負浮力之影響，即 $Fr_d \leq 1$ ，被稱為弱的負浮力射流(weak fountain)，在往上、往下、與旁邊的流動方向上無明顯之分界，如圖(2-3)。

在此學者定義一個射流/浮流長度尺度(Jet/Plume scale)，利用長度尺度來區分浮昇射流在不同階段之情形：

$$L_M = \frac{M_0^{3/4}}{B_0^{1/2}}$$

當射流/浮流長度尺度 $L_M \rightarrow \infty$ ，表示為射流之流況；當 $L_M \rightarrow 0$ 時，代表為浮力羽流之流況；當 $0 < L_M < \infty$ 時，代表為浮昇射流之流況。在出口附近，浮昇射流為動量所主控，接近射流之狀態；在一段距離之外，流體的動量已經消散之周圍流體，換成浮力所主控，接近浮流之狀態。

若周遭流體分布屬於穩定密度分層靜止之狀態，則浮昇射流會浮昇至一平衡高度而向水平方向擴散，如圖(2-4)所示。如果假設環境流體之分層是呈現線性分佈的，並遵從Boussinesq假設，不考慮密度變化對慣性力之影響，僅考慮密度差異對浮力之影

響，而密度分層度的層化強度可由以下浮力頻率(Buoyancy frequency)來作示意：

$$N_f = -\frac{g}{\rho_a(0)} \frac{\partial \rho}{\partial z}$$

這裡的 $\rho_a(0)$ 和 ρ 分別為環境流體在排放口處($z = 0$)與環境流體之密度。

2.2 雷射螢光顯影測溫技術概述

2.2.1 螢光簡介

物質可允許存在的能量狀態稱之為能階，當光子的能量剛好符合物質原子或分子的能階時，光子就可以被吸收而使得該物質原子或分子進入較高的能階，並藉由放出光子而回到較低的能階。

當一個分子被特定波長的光線激發後，會吸收能量進入激發狀態(excitation status)，然後再釋放能量而進入非激發狀態(ground status)，在釋放能量的過程中會產生光線，即稱為螢光。由於在能量的吸收及釋放過程中會耗損能量來還原至非激發狀態時，故釋放出光的能量為小於原來吸收的能量，因此發出的波長長於激發光的波長。

而Jablonski能階圖，圖(2-5)便是用以說明分子吸收與釋放能量藉以不同機制在電子能階中的行為表現。

而螢光是分子吸收了某種顏色的光且同時輻射出另一顏色的光的現象($S_1 \rightarrow S_0$)，如圖(2-6)所示。

2.2.2 螢光染料(Rhodamine B、Rhodamine 110)之選擇與簡介 [31~33]

在LIF(Laser-Induced fluorescence)量測溫度場前，作為指示劑的螢光物質選擇須考慮以下因素。

- (1) 根據吸收波長來作選擇，相互搭配，不同的螢光物質有不同的吸收波長，應盡量使吸收光譜的峰值與作為激發染料之雷射光接近。
- (2) 可溶於一般普通自來水或去離子水，且其水溶液呈現無色或淺色，不影響雷射或螢光之穿透性。
- (3) 具有較高之量子產率和適中之吸光系數。量子產率高，所激發出來的螢光亮度

較高，對於在檢測上較為方便；而吸光系數太大，會使得雷射光所能穿透的光程太短，局限所能量測之流場範圍。

(4) 對外界的某些自然條件敏感度要小，不然因實驗現場條件的變化使得實驗結果容易失去參考性，如果使用LIF技術在量測溫度場上，則需選擇溫度敏感度較高的物質，而只單純反應雷射光強度的使用上，則選擇溫度敏感度較低的物質，作為校正基準之用。

(5) 對人體無害，如無致癌作用。因螢光染料帶有毒性，若使用者時常接觸染劑溶液，需配帶手套等防護用品。

任何螢光物質都具有兩種特徵光譜：吸收光譜與發散光譜。

吸收光譜(也可稱激發光譜)，是用一強度不變之全波段白光通過測量螢光體，偵測發光通量隨波長變化而獲得之光譜，它反映了不同波長之激發雷射光所引起染料之螢光效率大小，因此可根據該螢光物質之吸收光譜來決定適當之激發波長。

發散光譜，是指在波長與強度保持不變的激發光下，讓螢光物質所產生之螢光通過單色波段檢測器上，檢測各種波長下相對應之螢光強度，然後得到一發射波長對應螢光強度關係曲線光譜圖。

薔薇紅(Rhodamine B)為鹼性紅螢光染料，外觀為綠色晶體或微紅紫色粉末，易溶於水和醇，微溶於酸和鹼，分子式為 $C_{28}H_{31}N_2O_3Cl$ ，在許多生物實驗上多被拿來當做染色劑；其吸收波長峰值約為554奈米，經雷射激發後發散波長峰值約為575奈米，而其溶液因隨溫度上升而使得亮度下降($2.3\% K^{-1}$)的特性，在此實驗中使用作為流場溫度感應之用。

若丹明110(Rhodamine 110)為流式細胞儀(flow cytometry)常用來偵測細胞內成份變化之螢光物質 (fluorochromes) 之一，其吸收波長峰值約為496奈米，經雷射激發後發散波長峰值約為520奈米，而其溶液因隨溫度亮度改變相當小的特性($0.13\% K^{-1}$)，在實驗中可以改善亮度所帶來之誤差。

圖(2-7)~(2-10)為Rhodamine B及Rhodamine 110的化學結構和吸收與釋放波長光譜圖，以及圖(2-11) Lopez Arbeloa (1981)，和圖(2-12) Sakakibara J. and Adrian R. J. (1999)和……等人所作染料之亮度校正圖。

2.2.3 雷射激發螢光顯影技術(One-color) [4,17]

雷射激發螢光(Laser Induced Fluorescence，簡稱LIF)顯影技術是一種新的流動顯示和流動測量方法，自1990年Nakajima等人便一直發展，不僅可以定性的顯示流體的結構特性，並與影像處理技術結合，進行定量上溫度場、速度場的測量。可以說，LIF技術從用於流動顯示開始，歷經了定性到定量，從氣體到水體，從線測量到面測量等不同的發展過程，逐步改進與完善。

其染料的釋放光強度根據Bindhu(1996)所定義

$$I = I_e C \phi \varepsilon \frac{\lambda_e}{\lambda_f}$$

其中

I_e 為雷射入射光強度($\text{W} \times \text{m}^{-2}$)，

C 為染料濃度($\text{mol} \times \text{m}^{-3}$)，

ϕ 為量子效率($\text{mol} \times \text{m}^{-3}$)，

ε 為吸收效率，

$\frac{\lambda_e}{\lambda_f}$ 為染料分子從激發態到基態所散失之能量。



而在實驗中，如果染料濃度固定，如式子裡所示，螢光強度將正比於雷射光強度，不過因為雷射光散射之問題，所以整個流場之強度不甚均勻，但如文獻回顧裡所提及的，Rhodamine B染料在不同強度的雷射光激發下，會有不同的反應螢光強度，但隨著溫度的下降斜率近乎相同($\pm 1.5^\circ\text{C}$ ，95%可信度)，如文獻回顧所述，圖(1-5)，所以只要選擇一基準溫度的亮度值，將整個流場之螢光作正規化之動作，之後依校正之後的溫度曲線，即可得到整個流場之溫度場。

其正規化亮度可由下列式子得出

$$I_{norm}(x, y) = I_{norm}(T_{ref}) \frac{I(x, y, T) - I_{off}(x, y)}{I_{ref}(x, y, T_{ref}) - I_{off}(x, y)}$$

其中

$I_{norm}(T_{ref})$ 為在 T_{ref} 下正規化後之亮度溫度曲線，

$I_{off}(x, y)$ 為在無任何光源下所拍攝到之亮度圖，其亮度約為 $I(x, y, T)$ 之 1%。

之後將整個流場的亮度值代回正規化後的亮度溫度曲線圖(I-Tem curve)即可得到整個流場之溫度分佈

$$I_{norm}(x, y) \times T(I_{norm}) = T(x, y)$$

為證明雷射光能量不穩定與散射之問題，會使用分光技術將雷射光分為兩道，一道為切頁流場，一道為可偵測雷射能量之感測器(pyroelectrical head)，作為亮度上校正之用，此時將正規化亮度的式子可由下式取代

$$I'_{norm}(x, y) := I_{norm}(x, y) \frac{E_{p,ref}}{E_{p,exp}}$$

其中

$E_{p,ref}$ 為雷射之平均能量下之參考值，

$E_{p,exp}$ 為實驗中所偵測之能量大小。

由文獻中所量到之亮度變化，可得證脈衝雷射有 $\pm 4\%$ 之能量變化，因此需將流場中作相對應之校正處理。

此時利用流場中溫度分佈均勻，也就是在實驗中溫度不改變之區域者，此時上式可由下式取代作為修正

$$I'_{norm}(x, y) := I_{norm}(x, y) \frac{\bar{I}_{ref}}{\bar{I}_{exp}}$$

其中

\bar{I}_{ref} 為均勻溫度區域平均亮度之參考值，

\bar{I}_{exp} 為實驗中均勻溫度區域之平均亮度。

這節所講述的只是在只有螢光染料感測溫度情形下所作之修正，一來會選擇波長大於 532 奈米之濾鏡，消除 488 奈米之激發雷射光對流場溫度感測之影響，並只觀察 Rhodamine B 的發散波段，如圖(2-11)所示，不過因此雷射光波長便無法被偵測到，所以還是限於溫度場上之量測。

在使用單一染料的情況下要同時量取速度場，就得如 Sakakibara J., K. Hishida K.

and Maeda M. (1997)所述，使用兩臺CCD，一臺加裝濾鏡作為溫度場之用，一臺不加裝濾鏡作為速度場之用，同步擷取影像，因兩臺CCD位置角度之關係，如圖(2-13)，再作相對應之處理。

2.2.4 雷射激發螢光顯影技術(Two-color) [5,16]

J. Sakakibara and R. J. Adrian (1999)為改善使用一種感溫螢光顏料(RhB)因雷射消散、減弱或波動(以脈衝雷射而言，約有 $\pm 3\%$ 的變動)所造成之影響，而改使用兩種對於溫度敏感度不同的染料(RhB、Rh110)來作為流場的感溫方法，如圖(2-12)，可以避免掉只使用一種感溫染料時，雷射光強度改變所造成之影響。

其染料的釋放光強度可由下列式子定義

$$I = I_0 C \phi \varepsilon$$

其中 I_0 為雷射入射光強度， C 為染料濃度， ϕ 為量子效率， ε 為吸收效率。

因此，染料Rhodamine B和染料Rhodamine 110便可以下式表示

$$\frac{I_B}{I_{110}} = \frac{I_0 C_B \phi_B \varepsilon_B}{I_0 C_{110} \phi_{110} \varepsilon_{110}} = \frac{C_B \phi_B \varepsilon_B}{C_{110} \phi_{110} \varepsilon_{110}}$$

由上式看出，兩者的比例與雷射的入射光強度並無任何相依性，並且染料濃度比在容器中為固定，而在吸收效率上在溫度的影響上並無太大變化，因此溫度的影響主要取決於染料的量子效率上，所以流體的溫度便可由兩者的亮度比得知。

在實驗溫度的量測上，需將兩種染料的激發光波段使用濾鏡分開，以免波段重疊影響其準確性，不過因使用兩臺黑白CCD分光分開擷取，如圖(2-14)所示，有影像座標上之錯位問題，需以最小平方法作位置上之校正，而該使用方法在1997年Soloff也有相關討論與細節。

不過以上兩種染料所使用之方法，也還是只限於溫度場之分析，於是 Funatani S. , Fujisawa N. and Ikeda H. (2004)直接使用彩色3CCD搭配特殊波段之濾鏡拍攝流場之影像，其波段選擇在文獻裡為 R : 575 nm to 640 nm, G : 490 nm to 575 nm, B : 400 nm to 485 nm，再依波段分為 R、G、B 三張影像作如圖(2-15)之處理程序，省去了需有一基準溫度下之亮度圖、座標校正與雷射光散射之問題，而且也同時量得了速度場。

2.2.4.1 濾波(Filter)

由於LIF影像技術結合PIV同時得到溫度與速度場，必須在工作流體裡同時加入螢光染料與塑膠顆粒，但在雷射光的激發下，顆粒的亮點會影響G波段影像上的分析，此時便需要對影像再作濾波上的處理，以得到R/G完整的溫度場訊息。

(1) 低通濾波(LowPass Filter)

為去除顆粒亮點所帶來的誤差，將顆粒亮點區塊的不連續性視為錯誤的高頻雜訊，並利用一般的低通濾波器來濾除這些被視為錯誤的高頻部分，進而將溫度區域的部分平滑化。

當影像偵測到有異常數值的區塊，在捨去該影像資料後，再根據未捨去的資料以平均區塊邊緣之值並補回空缺位置下的影像資料，藉以平滑化其影像資料的不連續性，達到減輕顆粒亮點所帶來的誤差，圖(2-16)。



(2) 中值濾波(Median Filter)

最原始的標準中值濾波器(Standard Median Filter)是由J.W. Jukey在1971年所提出，中值濾波的處理方式是將一個大小長寬皆為特定的視窗，對視窗中資料大小做排序，然後取中間值做為濾波後結果。假如區塊的邊緣無值可採用，此時可使用對稱模式填上邊緣值，之後將所有資料大小做排序，取中間值即可，圖(2-17)。

2.2.5 雷射激發螢光顯影技術(One-color with Color CCD)

綜合2.2.3與2.2.4之章節的特性所述，結合使用AVT GUPPY F-080C彩色CCD擷取影像R、G、B波段分離，圖(2-18)，與單一染料Rhodamine B發散波段之概念，圖(2-11)，將作為速度場追蹤之塑膠顆粒擷取至G波段，而作為溫度場分析之R波段，如2.2.3章節所述，在有一基準溫度下之亮度背景下，作一系列之修正。如此，便可同時量得溫度場與速度場，如果只量溫度場的話，可改用黑白模式，其模式下感測範圍如圖(2-19)，並搭配大於532奈米之高通濾鏡即可。

2.3 粒子影像測速儀(Particle Image Velocimetry, PIV) [36]

將彩色攝影機所擷取到的影像，匯入至影像處理軟體(Flow manager)，其分析的方法為將照片分成許多小區域，對分析區域(Interrogation Area)上之顯影粒子作統計上的分析，並在分析的方法上選用交錯相關函數運算（cross-correlation），主要使用在兩張連續影像照片之流場情形。

在分析之時，再利用快速傅利葉轉換（Fast Fourier Transforms）做函數之分析以加快函數之運算，其方法為將兩組影像平面分割為許多分析區域(Interrogation area)，先求出兩組影像平面中各分析區域的亮點函數（Intensity function），後再依各個位置依序相乘，接下來在用快速傅利葉之逆轉換（Fast-Fourier Transform Inverse），求得其分析區域內的平均交錯相關函數之值，來換算成位移，在除以兩張照片的時間差，以換得分析區域內之平均速度。

2.4 有限元素分析法數值軟體 Comsol Multiphysics

2.4.1 COMSOL Multiphysics 簡介

COMSOL Multiphysics是一套針對於能以偏微分方程式(PDEs)描述之各種數學、物理與工程問題，或者是在一般真實問題中，多種現象耦合之情形，也就是多重物理量(Multiphysics)問題，以有限元素法(Finite Element Method, FEM)進行分析的電腦輔助工程分析軟體(Computer Aided Engineering, CAE)，其處理耦合問題的數目是沒有限制的(可任意耦合熱、磁、應力、流、固、電化學……等)。

具簡單易用之圖形介面(GUI)，不必編寫複雜之程式語言即能在很短之時間之完成分析工作，使用者更能專注於問題本身而非程式之撰寫。該軟體具開放式之程式架構與MATLAB整合之能力，使其有強大之擴充能力。

2.4.2 COMSOL Multiphysics模型定義

首先之考量為建模需依據實驗條件之實際尺寸而建，但有些時候為簡化問題，則可以假設實驗情況都在對稱的情況下，來達到減小問題的複雜性與減少計算上的時

間。

在軟體裡建模，需使用以下兩個模組：流體流動之不可壓縮流 Navier-Stokes 之應用模組，及熱傳之對流與傳導應用模組，此多重物理之耦合可直接在此應用模組之物理性設定輸入所需參數即可。

在此模組，此方程式經由 F 與 Q 項耦合，首先增加自由對流到動量平衡使用布式近似法(Boussineq approximation)，此近似值抬在 Z 軸上抬升了流體之浮力變數，忽略了流體密度隨溫度之變化，此浮力輸入 F 項在不可壓縮流 Navier-Stokes 方程式之 F_y 項。

在此同時，熱方程式必須說明速度場，使用對流與傳導應用模組，可直接輸入速度分量於不可壓縮 Navier-Stokes 方程式來定義速度場來自熱對流傳導。



第三章 實驗設備及實驗方法

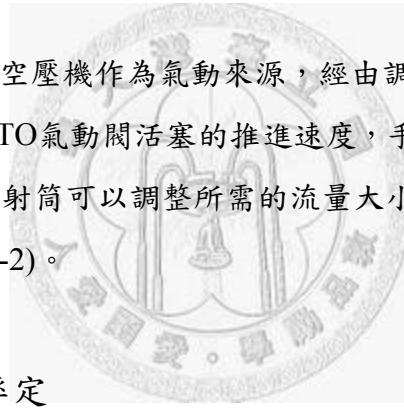
3.1 實驗設備

3.1.1 水槽、渦環產生機構

實驗水槽由0.5公分厚之壓克力內外層黏製而成(圖3-1)，外層為保持內層溫度恆定而設計，其內層長寬皆為28公分，外層長寬皆為30公分，高為28公分，底部設有一孔口朝上之渦環產生器，並設有一隔板開關。利用鋼架架高水槽，使水管可由底部連接至氣動式活塞系統，渦環產生器以壓克力圓管為材質，內徑為2公分、外徑為2.4公分，且出口處有一斜切角度。

3.1.2 氣動式活塞系統

主要使用Kinglet 1.5HP空壓機作為氣動來源，經由調壓閥來調整推動的力道，而速控閥可控制德國公司FESTO氣動閥活塞的推進速度，手動閥相當於一開關，來決定氣壓缸的進與退，可調式注射筒可以調整所需的流量大小，以上一整個系統便可決定實驗所需的動量大小，圖(3-2)。



3.1.3 流量監控裝置與率定

為監控入口的流速變化，採用美國DNH 3/8"SPX低流速流量計，含透明壓克力外蓋可做可視流量指示，搭配寶石軸承來量測極低的流速，量測範圍為0.27L/M~13.9L/M，6~24VDC脈波輸出搭配FT420顯示器提供瞬間流量與累積流量，並使用AO55，4~20mA傳訊器，傳送至三菱PLC作即時流量紀錄，圖(3-3)。

流量計率定處理步驟：

- (1) 依流量調整注射筒大小。
- (2) 將顯示器總流量歸零，並啟動活塞式系統讓水通過流量計。
- (3) 觀察顯示器的總流量，紀錄之。
- (4) 重複(2)、(3)步驟。
- (5) 將流速時程變化與總流量結果繪出一率定曲線。

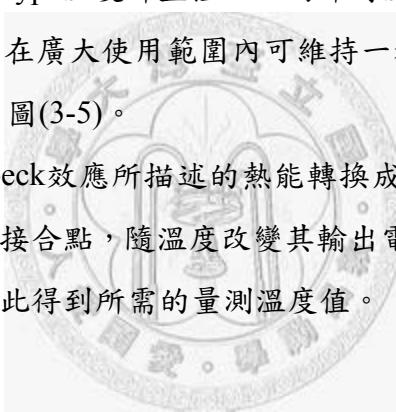
3.1.4 溫層產生及溫度控制設備

為使溫度達到控制且穩定，採用低溫恆溫水槽與加熱板來控溫，低溫恆溫水槽型號為D-606、D-610，溫度範圍為-20°C~100°C，藉由鋁板與鋁管傳導，用來控制底板與入口溫度；上層加熱為正泰電熱公司所訂制，規格為110V，1100W之加熱板，圖(3-4)。

3.1.5 溫度感測裝置

為觀察溫層是否達到穩定，採用4-channel NI-9211溫度擷取裝置，並配合Labview控制程式即時監控溫層的溫度變化，適用範圍在0°C~1372°C之間，精確度±0.4°C；另外，使用型號TES-1319A K-Type溫度計監控入口的即時溫度，採用K-Type熱電偶測溫棒，其感溫體為NiCr合金，在廣大使用範圍內可維持一穩定的電阻-溫度關係，有效解析度為0.1°C，靈敏度高，圖(3-5)。

熱電偶原理是根據Seebeck效應所描述的熱能轉換成以電流型式表現的電能，藉由兩條不同類金屬導線構成接合點，隨溫度改變其輸出電壓，經唯一的多項式對應出溫度與輸出電壓間關係，以此得到所需的量測溫度值。



3.1.6 雷射光源

實驗上所使用之雷射為美國Spectra-Physics公司的氰離子雷射(Argon Ion Laser)，型號為Stabilite 2017，其最大安全輸出功率為6瓦，可調整的波長範圍為454.5~514.5奈米之間，雷射光束的截面直徑為1.4公厘，本次實驗選用單一波長488奈米的雷射波長激發螢光染料，圖(3-6)。

3.1.7 流場顯影染料與粒子

雷射螢光顯影技術以螢光染料(Rhodamine B、Rhodamine 110)作為流場溫度顯示，並搭配PSP(Polymer Seeding Particle)為流場追蹤粒子，此為Dantec Dynamics公司所生產之塑膠顆粒，實驗選用型號PSP-5，直徑約為1~10微米之間，是為避免顆粒過大而影響雷射螢光顯影技術造成溫度分析上的誤差，其密度為 1.03 g/cm^3 與水相當，

因此可懸浮於水中，作為流場顯影之用，圖(3-7)。

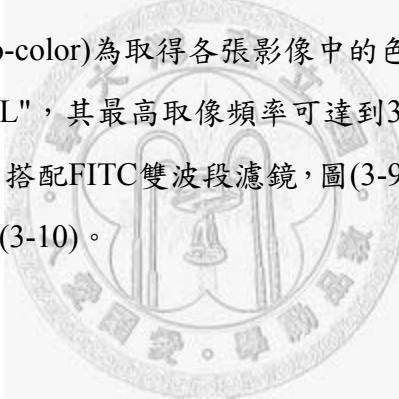
3.1.8 影像擷取裝置

(1) 單一染料方法影像擷取裝置

單一染料雷射螢光技術(One-color)主要觀看的是亮度值上的變化，可使用黑白灰階與彩色RGB兩種形式，但為同時量測溫度場與速度場，所以採用彩色模式以符合需求，本實驗使用AVT GUPPY的彩色CCD，型號為"F-080C"，其最高取像頻率可達到30fps，搭配軟體"Avt smartview"控制CCD及設定相關參數，圖(3-8)。

(2) 二色染料方法影像擷取裝置

二色雷射螢光技術(Two-color)為取得各張影像中的色彩值，本實驗使用HITACHI的3CCD，型號為"HV-F31CL"，其最高取像頻率可達到30fps，並以軟體"XCAPLTD"控制3CCD及設定相關參數，搭配FITC雙波段濾鏡，圖(3-9)，可以得到段落分明地RGB三個波段之彩色影像，如圖(3-10)。



3.2 實驗方法

3.2.1 螢光染料施放法—定性

染料施放法用以定性觀察渦環現象，螢光染料可當作食用染料般使用在流場上觀察現象，但螢光染料有別於一般的食用染料，必須以雷射切頁將其螢光激發出來，才能呈現出流場二維的內部結構，且因螢光染料有毒，使用上必須更加小心。

(1) 均勻流場渦環定性量測

調配適當的染料濃度後，將出口至注射筒間充滿染料液體，水槽注滿清水，水溫為室溫，調整注射筒的流量與氣壓缸的推進速度，固定一動量後，開啟氣壓缸推動注射器產生渦環，以雷射光來激發染料，呈現渦環的內部結構。

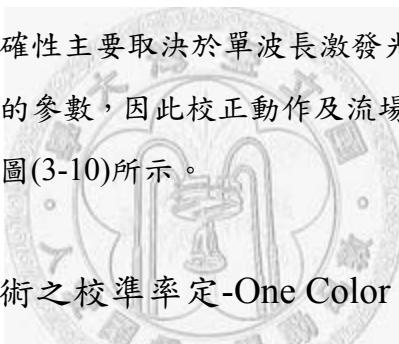
(2) 逆溫層流場渦環定性量測

一開始程序同上小節，但得先關閉隔板，並開啟恆溫循環水槽使機構達到設計溫度，時間約8~12小時，當逆溫層20~60°C與25°C的入口溫度達到穩定後，此時打開隔板，開啟氣壓缸推動注射器產生渦環，使其通過溫度梯度為40°C的逆溫層，啟動攝影機開始記錄，帶有染料之渦環即開始移動，觀察其對於渦環的影響，待渦環至一特定高度後開始落下，即完成實驗。

染料施放法儀器設備架設簡易，對於流場現象定性觀測清楚明瞭，為更進一步探討其於定量上的表現，得以雷射螢光測溫法來達成。

3.2.2 雷射螢光顯影技術—定量

雷射螢光顯影技術的準確性主要取決於單波長激發光源、濾鏡的波段、顯影顆粒的大小及影像處理中值濾波的參數，因此校正動作及流場實驗時需選取適當的條件來搭配實驗，實驗設備配置如圖(3-10)所示。



3.2.2.1 雷射螢光顯影技術之校準率定-One Color with color CCD

實驗裝置架設，如上節所述，而當實驗裝置架設完畢後，即可開始進行校準，在同步記錄溫度值與相對應之影像時，以觸發方式控制AVT GUPPY CCD彩色攝影機拍攝，藉由熱電偶所傳送之即時溫度，同步擷取影像，記錄當時溫度與對應影像，以利後續處理。

之後再開啟氬離子雷射，使用單一波長488奈米雷射光激發染料與塑膠顆粒，且因螢光有光衰性，所以在校正的期間，需先讓溫度達到穩定後，才以雷射光激發，在逆溫層流場渦環定量量測時也亦同。

此時可在同溫下使用不同強度之雷射光照射流場，將兩個所得到之亮度溫度曲線(I_{norm} -Tem Curve)作正規化之動作，來驗證文獻裡染料之特性。

由於單一螢光染料亮度在每個位置的亮度值皆為不同，且又無第二種染料作為基準之用，所以實驗前需有一基準溫度亮度背景，在開始逆溫層之加熱與冷卻。

3.2.2.2 雷射螢光顯影技術之校準率定-Two Color

也是一樣如同上小節同步記錄溫度值與相對應之影像時，以觸發方式控制裝有 FITC濾鏡之HITACHI 3CCD拍攝，藉由熱電偶所傳送之即時溫度，同步擷取影像，記錄當時溫度與對應影像。

由於螢光染料亮度隨溫度變化小，故溫度改變量需較大，即溫度梯度大，本實驗校準過程中，染料濃度比例需固定，並利用電湯匙使其溫度上升，每達到特定溫度，便攪拌水槽並靜候使其溫度穩定，再截取該溫度影像，但為了同時得到流場的速度場，所以需在工作流體中置入適量的微小懸浮塑膠顆粒。

之後再開啟氬離子雷射，使用單一波長488奈米雷射光激發染料與塑膠顆粒，在同步記錄溫度與擷取影像後，選取所要計算的區域上，也就是熱電偶週遭的正方形區塊計算，並將此區塊之影像值以RGB值輸出，分成R、G、B三張影像，之後的處理如2.2.3節所陳述之程序先將R與G兩張影像做相除的動作，但因顆粒亮點的存在會影響其溫度場影像，所以需使用中值濾波(Median Filter)消除顆粒亮點所帶來的溫度場雜訊，如此便可畫出R/G-溫度圖(R/G-T curve)。

(1) 均勻流場渦環定量測

本實驗欲觀察均勻流場下渦環的速度及溫度場，在水槽中只需置放適量的塑膠顆粒，因為在均勻流場下，並無溫度上的變化，只需觀察流場的速度場即可。此時將雷射光經過一透鏡組，使雷射光形成一光頁，之後調整雷射切頁至所要觀察的流場範圍，渦環對稱軸的子午面(meridian plane)上，而懸浮於流場中塑膠顆粒，在經過雷射光頁之照明下，反射出顆粒亮點，將整個流場型態顯現出來。

(2) 逆溫層流場渦環定量測

本實驗欲觀察在逆溫層下渦環的速度及溫度場，釋放螢光染料與塑膠顆粒於流場之中，適當攪拌使均勻懸浮於工作流體中，於水槽內放置熱電偶以隨時監測溫層溫度，經8~12小時待溫層穩定後，開啟雷射光源，調整波長為單一波長488奈米，射入一鏡組鏡頭，將雷射光束以切頁方式輸出，並做適當的遮蔽避免額外的光進入流場，

將隔板開起，並啟動使渦環產生，以彩色攝影機同時擷取影像。

影像擷取完成後，以“MATLAB”後處理輸出RGB色彩值，經校正曲線轉換成對應的溫度，得到流場之溫度分佈圖；而速度場則採用PIV軟體Flowmanager做分析，適當參數調整計算可得速度場及溫度場逐時的變化，後置得流場速度、及溫度圖。

3.3 數值模擬(Numerical Simulation)

3.3.1 統禦方程式

因為本實驗模型牽涉超過一種物理性質，所以是個多重物理模型，包含了流體動力學之不可壓縮Navier-Stokes方程式與能量方程式一起作用，這裡有4個未知變數(獨立變數)：

*速度分量， u 和 v

*壓力， p

*溫度， T

不可壓縮Navier-Stokes方程式由動量方程式、質量不變與不可壓縮狀態，這些方程式可表示為：



$$\begin{cases} \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = -\nabla p + \eta \nabla^2 u + F \\ \nabla \cdot u = 0 \end{cases}$$

方程式有以下之變數：

- u 為速度；
- p 為壓力；
- F 為流體作用力；
- ρ 為流體密度；
- η 為動態黏性；
- ∇ 為向量微分運算子；

熱方程式能量不滅方程式能量改變相等於熱源減去分散之熱流擴散：

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T + \rho C_p T u) = Q$$

C_p 代表流體之熱容， ρ 為流體密度。括號內之敘述表示熱流向量， Q 表示熱源項，熱流向量包含擴散及對流之項目，後者與速度 u 成比例，此速度來自不可壓縮之 Navier-Stokes 方程式。

3.3.2 繪圖與參數

為符合真實的實驗條件，本實驗便使用 2D 軸對稱(2D-Axisymmetric)模型來模擬圓形射流出口之情形，尺寸如圖(3-12)所示。

在功能表 Options → Constants 裡輸入下列之參數，以利後面邊界條件之代入。

Property	Name	Value
流體密度(Fluid Density)	rho	1000 kg/m ³
動黏滯系數(Dynamic viscosity)	mu	1e-3 Pa · s
熱容(Heat capacity)	Cp	4.2e3 J/(kg · K)
熱傳導係數(Thermal Conductivity)	kappa	0.6 W/(m · K)
體膨脹係數(Volume expansion coefficient)	beta	0.25e-3 / K
重力加速度(Acceleration of gravity)	g	9.81 m/s ²
入口速度(Inlet velocity)	Vin	流量計曲線
入口溫度(Inlet temperature)	Tin	298 K
液面溫度(Upper Surface temperature)	Tu	333 K
底層溫度(Bottom temperature)	Tb	293 K

3.3.3 邊界條件設定

設定 Incompressible Navier-Stokes 模組之邊界條件，點選 Physics → Subdomain Setting，設定整體環境之初始條件，流體密度 ρ ：1000 kg/m³，動力黏度 η ：0.001 Pa · s，浮力變數 F_z ： $\rho g \beta(T-Tb) = 1000 * 9.81 * 0.00025 * (T-293)$ N/m³，容器壓力分佈 $P(z) = 101325 + 1000 * 9.81 * (z-0.25)$ Pa。

點選 Physics → Boundary Setting，開啟邊界設定對話框，將流量計所得之流量隨時間變化之曲線除以渦環產生器入口截面積大小，轉換成速度隨時間之變化量，代入

入口速度之邊界①，因為軸對稱模型，給定邊界②條件為 Axial Symmetric，而將自由液面③設定為出口邊界，其他邊界條件皆為 wall、no slip 即可。

而在設定 Convection and Conduction 模組之邊界條件方面，一樣點選 Physics → Subdomain Setting。為求計算方便，一開始便設定內部為一穩定逆溫層，不在模擬加熱冷卻造成一逆溫層之過程，設定為 $T(z) = 293 + 40*(z/0.25)$ K，給予一 20°C 至 60°C 跨距 40°C 之逆溫層。設定內部流體之參數，熱傳導係數 $\kappa = 0.6$ W/(m · K)，熱容 $C_p = 4200$ J/(kg · K)，而在速度 \mathbf{u} 方面，輸入來自 Navier-Stokes 方程式 u 和 v ，因其對流之項目與速度 u 成比例。

而在 Physics → Boundary Setting 方面，入口邊界①設定為 $T_{in} = 298$ K，底板溫度邊界④設定為 $T_b = 293$ K，自由液面邊界③溫度 $T_u = 333$ K，其餘皆為絕熱 Thermal Insulation 狀態即可。

3.3.4 網格與解答

點選 Mesh → Mesh parameters，在 Global 視窗內定之網格設定，因條件不同點選所需的網格疏密與形狀，點選 Remesh，完成之後點選求解器 Solver Parameters，因本實驗為非線性暫態，所以使用非線性解答器 Transient，設定所需運算之時間點與間隔，點選 solve 開始執行運算。



第四章 結果與討論

本文以實驗與數值模擬渦環在穩定溫度分層(上熱下冷)中之現象，在動量大約固定地情況下使渦環產生於一逆溫層當中，觀察其在溫層中的流況變化，並與在均勻環境流體中之比較。以下就染料施放法作定性上之觀察，以及使用雷射螢光測溫法量測渦環定量地觀察渦環逆溫層環境中從主動混合(動量所支配)到被動混合(浮力所支配)的過程中溫度與速度的流動特性，並配合數值模擬來驗證其定性與定量化的進展情形。

4.1 流量計流速曲線率定

為確保每次實驗的動量盡量保持固定與配合數值模擬排放口上的邊界流速設定，使用PLC將流量計的訊號以每秒100個數據點傳回電腦中。在此選定諸多實驗裡三組流量計時程變化圖，並將其流量時程圖轉換成流速時程圖，以及趨勢線所得到之公式代入邊界條件，以符合數值模擬上條件之輸入。

圖(4-1)~圖(4-3)為總流量9 c.c.~11 c.c.之間流量流速時程圖，由圖可看出，流速呈現一階梯式的上升與下降，或許是流量計的轉輪與PLC訊號線間的輸入輸出之頻率不同或轉輪裡有異物所造成。因其趨勢線多項式為六階，在輸入上有限制，所以為輸入模擬之邊界條件方便，將以sin或cos函數之曲線趨近該流速曲線。

4.2 染料背景校正與驗證

4.2.1 單一染料校正

為證實感溫染料之理論，在同濃度不同強度下，染料隨著溫度的曲線圖，其正規化後所下降之曲線是否相同，作以下之校正動作。固定水槽之位置，調整光頁位置及彩色CCD之位置與視窗大小，保持兩者之垂直，將單點量測溫度計放置於影像量測區域之正中央，以此即時溫度值作為流場溫度對照。因螢光染料隨溫度改變之亮度不似液晶般改變 0.1°C 即有明顯顏色之改變，所以以水溫27.5、40、50、60度作為量測點，方便觀察其亮度上之變化，取影像中溫度計附近約 20×20 正方形像素大小為校正區域，取其平均亮度大小。

圖(4-4)~圖(4-5)為染料同濃度下不同雷射光強度：30 amps, 42.5 amps下之溫度校正圖，圖(4-6)為同濃度不同雷射光強度下，溫度計附近平均亮度隨溫度改變之曲線，並令其基準在27.5°C對其作正規化之動作，得圖(4-7)，由圖可看出此趨勢相當接近，其兩條趨勢線所得之公式分別為

$$(紅圓 42.5 \text{ amps}) \quad I = -0.016 T + 1.434$$

$$(藍叉 30 \text{ amps}) \quad I = -0.016 T + 1.408$$

如此便驗證此染料之可使用性，符合Sakakibara and Adrian R. J.之理論，也就是RhB螢光強度與溫度在正規化下之校正曲線斜率皆為相同，準確率±0.1°C(95%可信度)。

因為在拍攝流場的時候，其雷射切頁的角度、方位不同或陰影處而造成整個流場之亮度不均勻之現象，但在一背景亮度下，取其每固定位置的亮度上比例變化，便可使用此特性，得知整個流場之溫度分佈圖。

4.2.2 二色染料校正

在二色染料之校正上，因其染料不同溫度敏感度之特性：RhB染料因溫度上升而下降亮度，Rh110染料幾乎不隨溫度而改變，可作為一校正基準值之用，就如同公式裡所表示

$$\frac{I_B}{I_{110}} = \frac{I_0 C_B \phi_B \varepsilon_B}{I_0 C_{110} \phi_{110} \varepsilon_{110}} = \frac{C_B \phi_B \varepsilon_B}{C_{110} \phi_{110} \varepsilon_{110}}$$

消除了入射雷射光 I_0 的不穩定因素，其溫度校正曲線只決定於該兩種染料的濃度比、量子效率，吸收效率上的不同。且在Sakakibara J. and Adrian R. J. (1999)裡使用去離子水實驗染料吸收效率 ε 與溫度的關係只有0.05% K⁻¹，所以只要在染料濃度固定之情況下，利用RhB染料之量子效率隨溫度的改變量2% K⁻¹與Rh110染料量子效率隨溫度之改變量相當小的特性，所校正得之R/G值便可得到該流場之溫度分佈，不需要一背景亮度作為校正之用。

圖(4-8)為濃度比約為RhB : Rh110 = 5 : 1下之溫度校正圖，可看出從低溫橘色到越高溫因紅色亮度下降而逐漸偏向綠色。

4.3 均匀流場之渦環 [3,21]

因其為均匀流場，故在溫度上不會有任何之變化，所以只在排放口與水管之間置放染料，而在水槽裡置滿清水，以清楚觀察現象，在方法上使用基本的雷射切頁顯影法，激發螢光染料觀察其行徑與變化，在不改變流量大小、推動速度，也就是動量固定之情況下，之後再與逆溫層與數值模擬作一比較，圖(4-9)為渦環在 $Re \approx 1010$ ， $Pr \approx 6.14$ ，密度分層強度 $N_f = 0$ 下之均匀渦環流場下之時序變化圖。

其螢光染料的顯影可看出如Chu C. C., Wang C. T. and Hsieh C. S. (1993)文獻裡所述，當渦環由渦環產生器產生後，會以軸對稱的形式逐漸往自由液面上升，在渦環自由前進期間，外緣會不斷地引入外圍流體，使渦環體積不段的增加。在靠近自由液面時，渦環前進速度會逐漸的減弱，且渦環在貼近自由液面的前緣會開始變形，不再維持原先圓對稱，而形成一端較扁的橢圓形。此時，渦心與渦心的距離逐漸被拉大，顯示渦漩已開始伸展，兩渦心分別貼著液面往離對稱軸的徑向前進。受到邊界層的影響下，離對稱軸前進的渦會產生遠離液面的反彈現象，且主渦環前緣的染料會逐漸被帶開而產生反方向運動的次渦環，兩渦環開始以逆時鐘方向旋轉。

4.4 逆溫層流場之渦環

為拍攝渦環在逆溫層之變化，需有一背景亮度作為溫度校正上使用，所以在拍攝時的狀況要盡量與背景亮度時所呈現之狀態一模一樣，將雷射切頁的角度與強度、水槽位置、攝影機位置、加熱板擺放位置……等實驗條件盡量保持固定，才不會造成分析上的誤差。

放入適當之染料與塑膠顆粒，以同時量得溫度場與速度場，在比例上的選擇需慎重，不然彼此的結果都會相互影響，比如塑膠顆粒過多，雖然得到了速度場，但也使得溫度場分佈相當零碎，如圖(4-10)；或者實驗條件跑掉，如雷射光切頁位置的改變，造成整體流場每個位置亮度上的改變，讓溫度場分析上的分佈比例錯位，如圖(4-11)，雖然在一開始分析來看，其溫度分佈圖似乎只是偏斜而已，但代入20~60°C的Colorbar後，左下部分之溫度呈現一大片溫度偏低的狀態，可見其誤差相當地大，這些都是實驗上需改進與探討的。

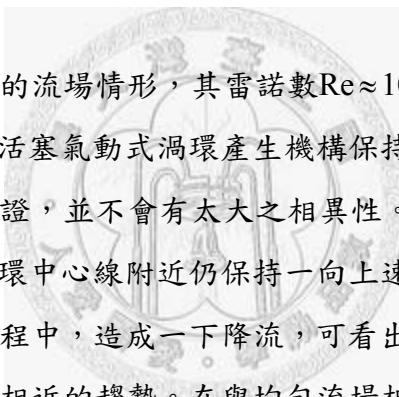
如果使用兩種不同感溫特性之染料時，將可省卻以上之細節，就如同2.2.4節裡的公式所述，將激發雷射光不穩定之因素消去，並搭配適當的濾鏡範圍，擷取兩種染料的發散波長之亮度變化，只要染料均勻混合，將實驗前校正之R/G-溫度曲線代入，便可在同一張影像中獲得溫度分佈圖，雖然因濾鏡的效果，使得光的亮度下降，視覺上較為暗淡，但在色彩上的解析上更易辨識與清楚，如圖(4-12)。因3CCD儀器問題，下半部有小小偏紅，此溫度分佈已失真，但上半部仍有其參考性，此部分是為了講述量測方法(Two-color with 3CCD)之可行性。

圖(4-13)~圖(4-14)為渦環在逆溫層下之溫度時序分佈圖，此乃以4.2節中所校正之溫度亮度背景與 I_{norm} -溫度曲線，因拍攝背景亮度與真正實驗時保持了實驗儀器位置光頁……等條件之穩定，所分析出來的溫層較有漸層與穩定，以上為各方法之比較與實驗上所需注意的地方。

以上為渦環在逆溫層下的流場情形，其雷諾數 $Re \approx 1010$ ，普朗特數 $Pr \approx 6.14$ 與均勻環境之參數大約相同，因活塞氣動式渦環產生機構保持實驗條件不變，從流量計所得之流速時程圖數據便可驗證，並不會有太大之相異性。

在攀升過程中，雖然渦環中心線附近仍保持一向上速度與積捲之動作，但其左右兩側側邊與周圍流體混合過程中，造成一下降流，可看出明顯的上下流動區別，這與強的負浮力射流之示意圖有相近的趨勢。在與均勻流場相比較下，其兩者渦環不同的是，不會像均勻流場下之渦環會無限制地往上攀升，而是動量逐漸地消散於周圍流體中，停滯於某一平衡高度，便開始向下滑落。

而在滑落之過程中，因著動量或環境之不同，其向下滑落過程中發生積捲之現象時間都並不相同，不過其大概的過程皆為渦環慢慢消滅後形成一豎直向下流動之流體，由於向下流體之密度總是比周圍流體密度來得大，在向下、向外伸展的過程中與周圍密度較低向上流動之流體形成渦流。



4.5 數值模擬

使用4.4節實驗時PLC所得到的流量曲線，換算得到該實驗的流速曲線，也就是4.1節圖(4-3)總流量11 c.c.歷時1.54秒的流速曲線，因軟體使用上的限制，使用一 \sin 函

數去趨近該速度曲線，如圖(4-15)所示，其他輸入如2.4、3.3節所述。之後將每秒溫度分佈與速度向量之結果輸出作討論，如圖(4-16)~圖(4-18)。

由圖可看出，0~3秒之間，整體渦環速度上升，渦環周圍流體流速還看不出有明顯地向下回落之現象，在4~5秒之間，因動量逐漸消散渦環周圍逐漸下落，5秒之後因動量不足以支持渦環持續往上攀升，一整個流體豎直地向下墜落，連帶周邊流體一起帶動往下，而在8秒之後，因其周圍流體溫度高密度較低開始往上浮升，而一下一上邊界之間，形成一渦捲現象，與實驗中所觀察有相似之現象，後面數秒皆在溫度平衡中振盪。



第五章 結論與未來展望

5.1 結論

本實驗觀察渦環在逆溫層，穩定溫度分層環境中從主動混合(動量支配)到被動混合(浮力支配)中之流體特性變化。

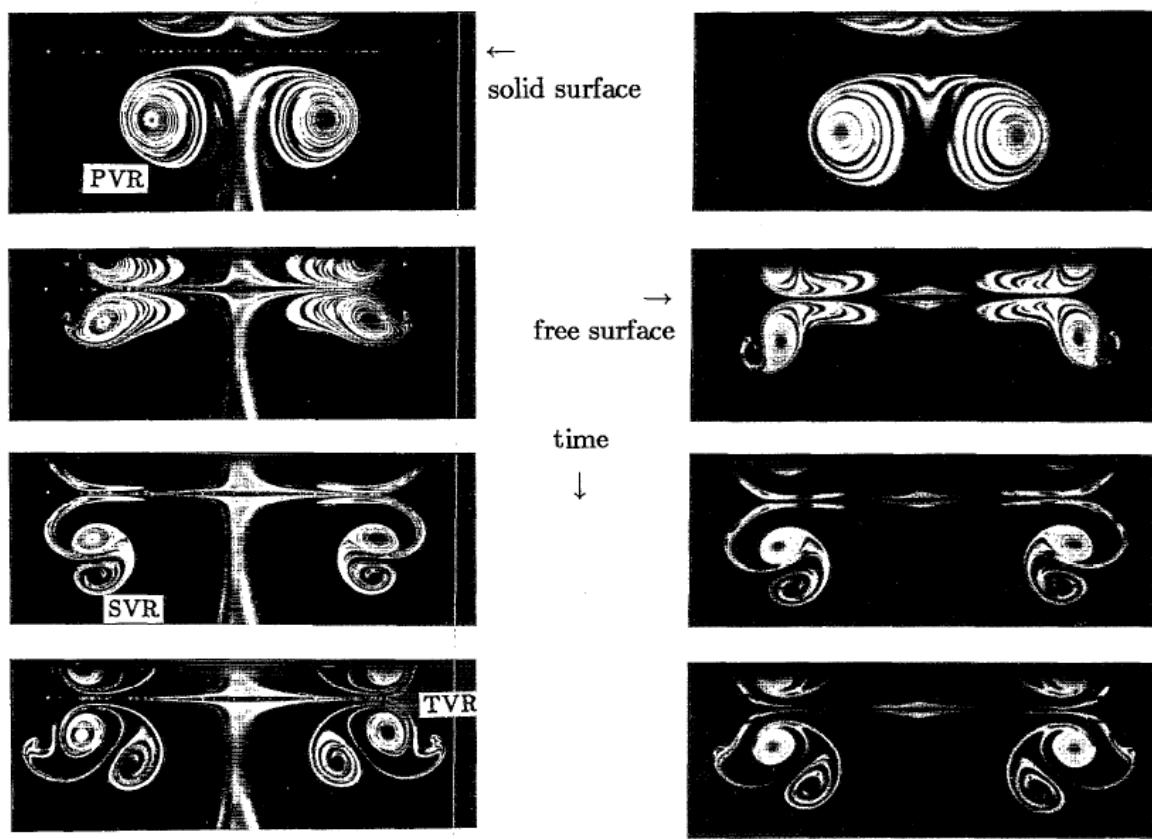
以下就幾點所觀察到之現象與實驗方法上作討論：

1. 涡環在均勻環境流體當中，會無限地往上攀升，直至碰至壁面而反彈，與逆溫層之渦環不同之處，在於逆溫層之渦環會浮昇至一平衡高度後便開始向下滑落，並且與周圍流體因溫度不同而產生的積捲渦漩之現象。
2. 逆溫層下之渦環帶著起始動量往上昇時，都還保有完整之渦環形狀，不過會如圖(2-2)所示般，在上昇過程中，渦環兩側周圍會小部分開始向下滑落，這在後面上昇中從渦環最外側往內側增加，直至約在5~6秒的時候，因動量不足以支持整個渦環往上攀升，而造成該渦環停滯於某一高度後開始向下滑落，在下落過程中，本身流體因溫度較低密度較重，依重力將本身流體與周圍流體一整個往下拉，在跌落之過程裡，因周圍流體溫度較高，往上浮升，這兩個邊界接觸混合，而造成一回捲之現象，如數值模擬圖(4-17)。
3. 雷射誘導螢光測溫法，雖然其工作範圍相當地廣，但仍有其缺憾之處，比如在溫度的精密度上無法像液晶般在某狹窄工作溫度區域般明顯變色；以及在量測速度場的顆粒數目都會與溫度場分析上互相影響，所以即使有相當連續不粗糙的溫度分析圖，但也許因顆粒數目過少而造成速度場上的分析困難，反之亦然。

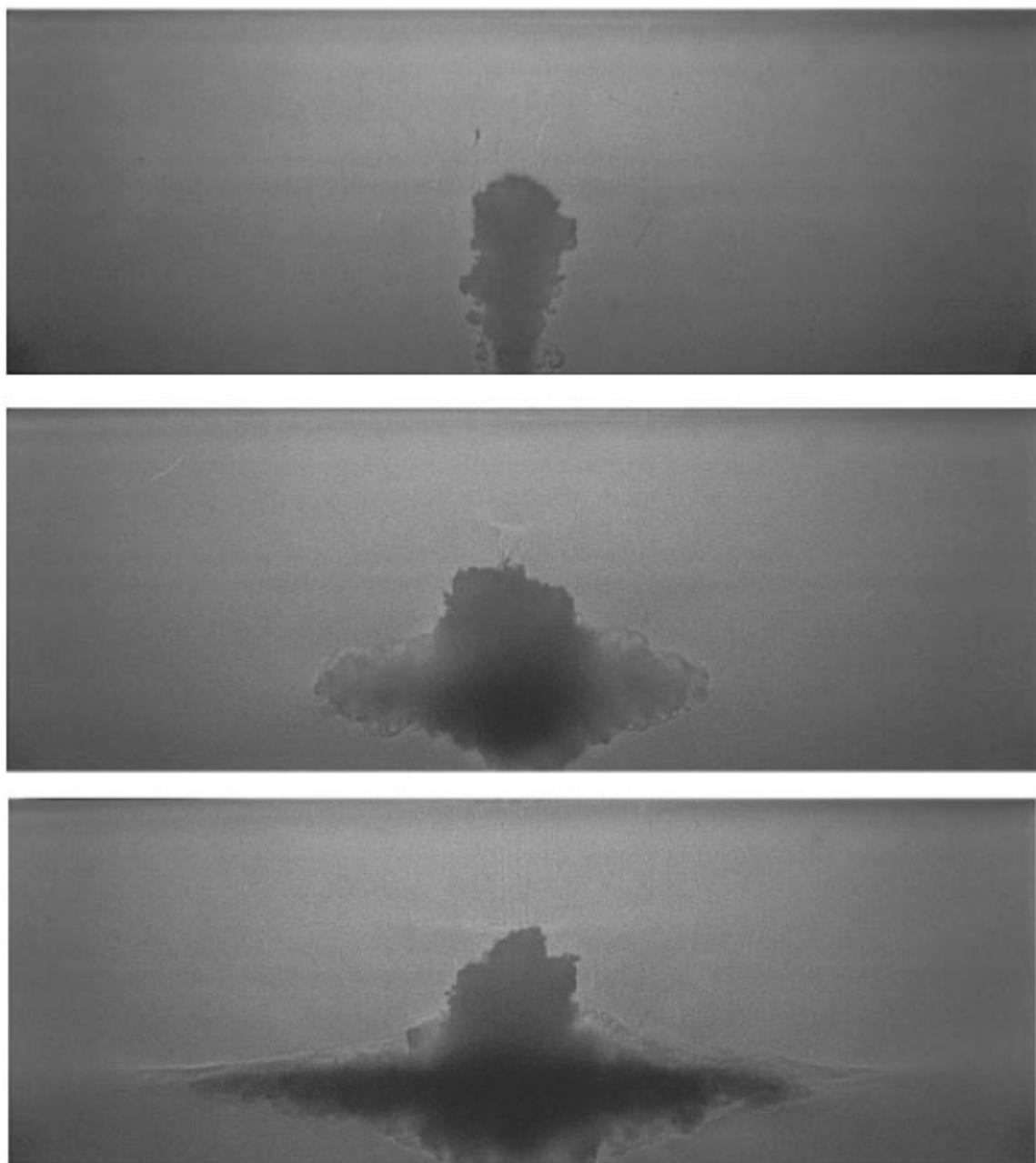
5.2 未來展望

未來在實驗與分析上做以下幾點改進：

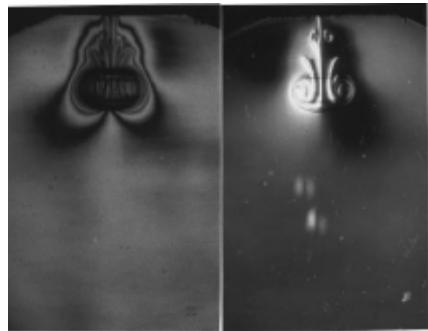
- (1) 找出最佳之染料濃度與顆粒數目配比，既能觀察到所需的溫度分佈資訊，又有適切之顆粒亮點數作為速度場與渦度場分析之用，如圖(5-1)。
- (2) 將所觀察到之現象、實驗數據、數值模擬與物理參數作一整理歸納，並與其他學者結果作一統整比較。



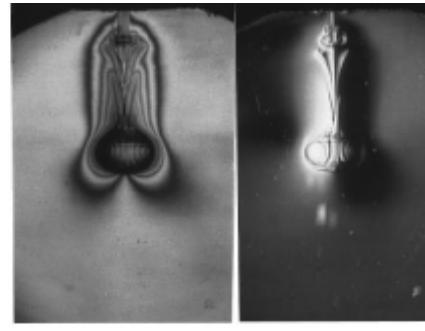
圖(1-1) 涡環正擊固體平板及自由液面的定量分析 [3]



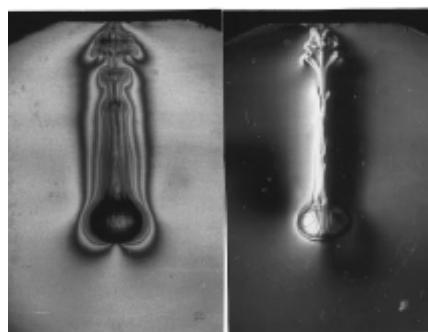
圖(1-2) 對稱圓形負浮力射流在線性密度分層鹽水中的紊流流動特性 [13]



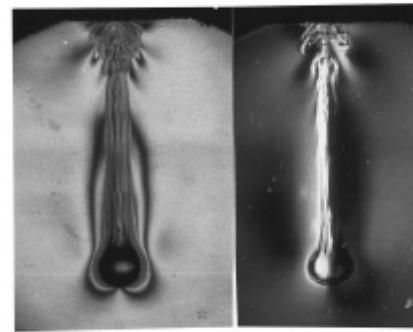
(a)



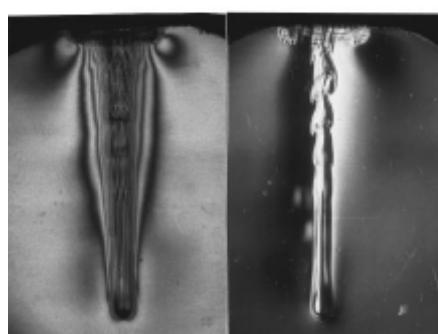
(b)



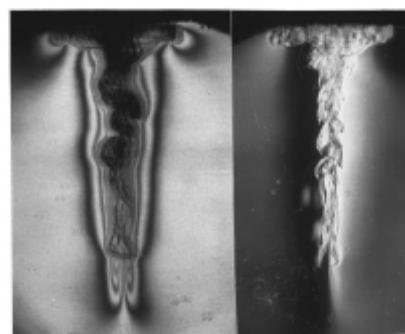
(c)



(d)



(e)



(f)

圖(1-3) 涡環在線性密度分層下的流動特性 [14]

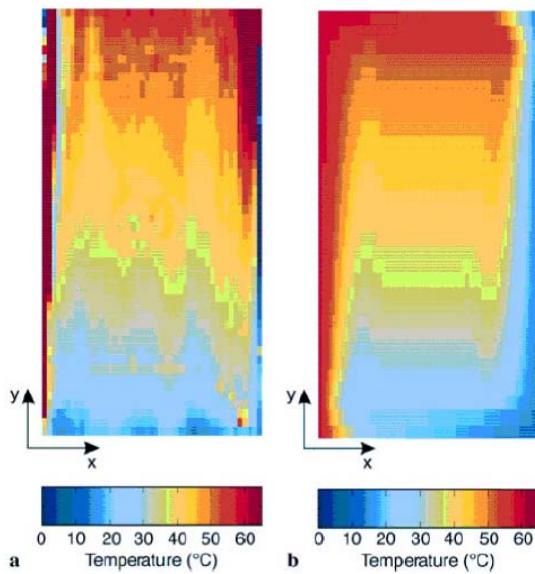


Fig. 5a Measured temperature field; b calculated temperature field

圖(1-4) LIF 實驗溫度場與數值模擬溫度場比較 [4]

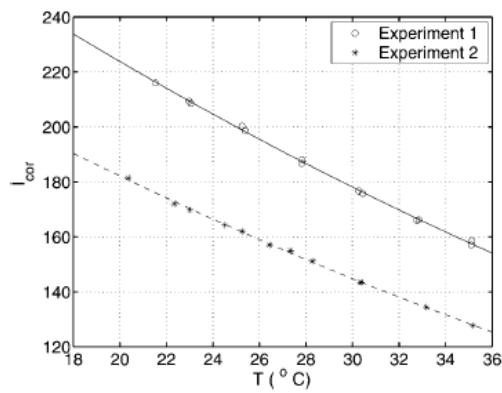


Fig. 3. The corrected fluorescence intensity I_{cor} plotted against temperature T for two calibration experiments

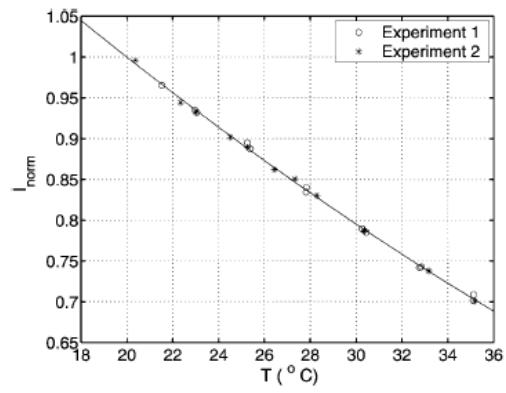
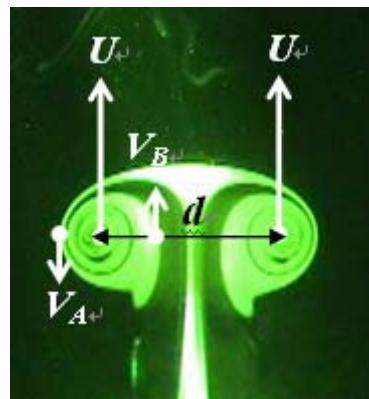
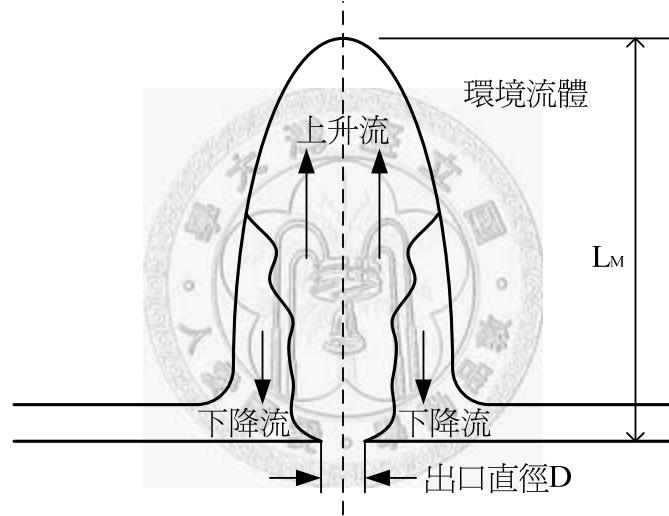


Fig. 4. The relation between the normalized fluorescence intensity I_{norm} and temperature T

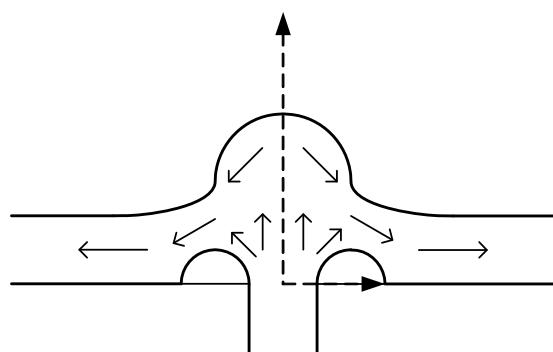
圖(1-5) RhB 螢光強度與溫度在無因次化下之校正曲線斜率 [17]



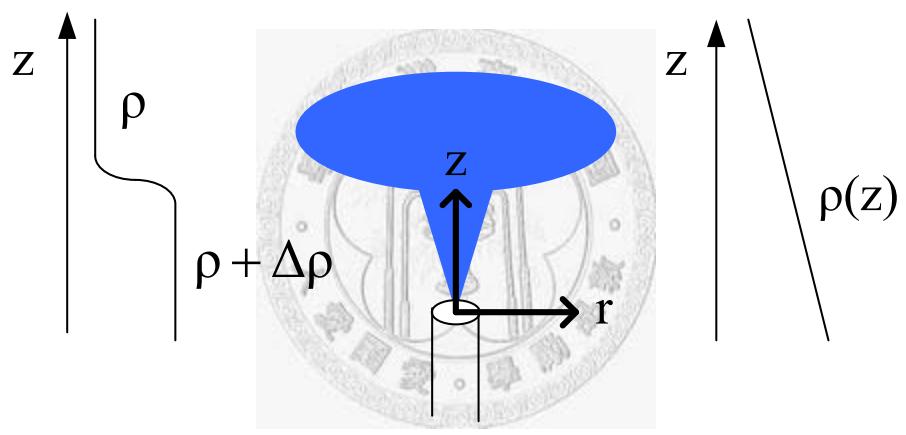
圖(2-1) 涡環參數示意圖



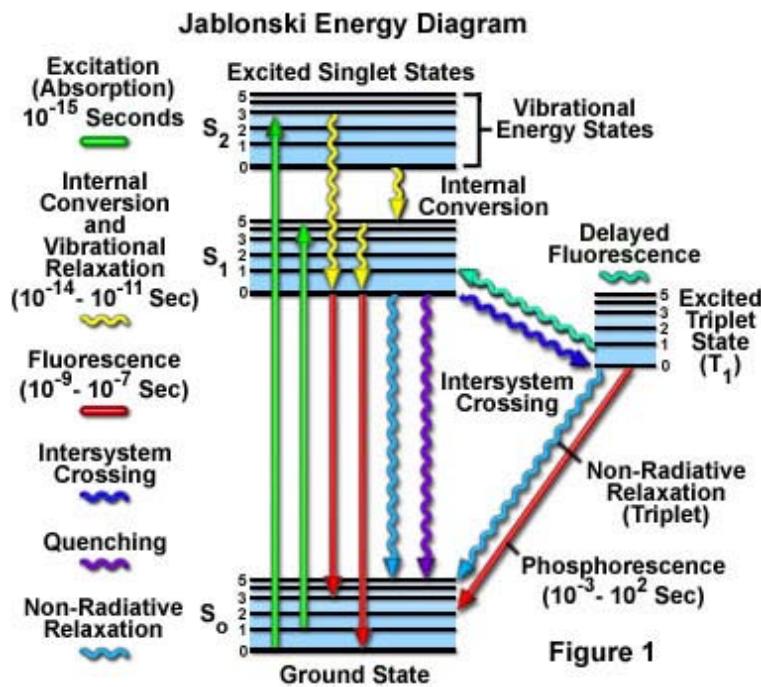
圖(2-2) 強的負浮昇射流之流動示意圖



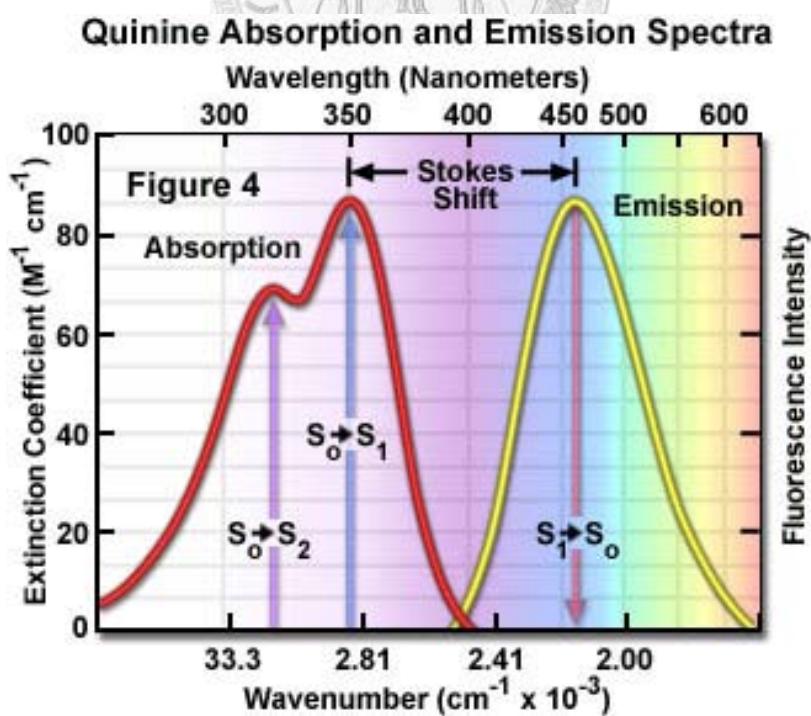
圖(2-3) 弱的負浮昇射流之流動示意圖



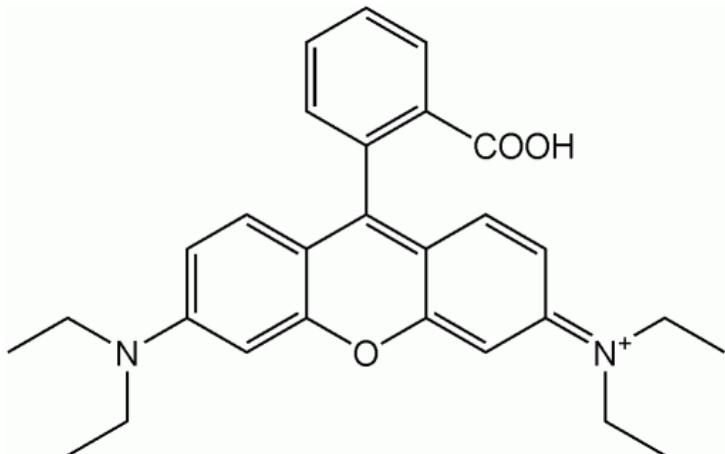
圖(2-4) 密度分層下的浮昇射流



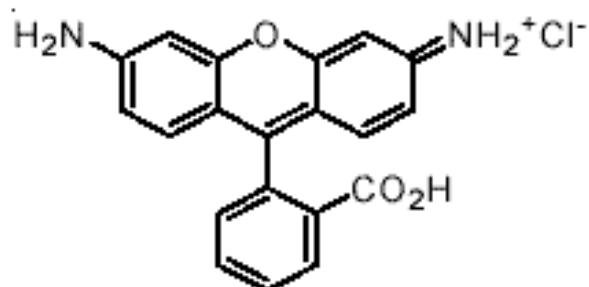
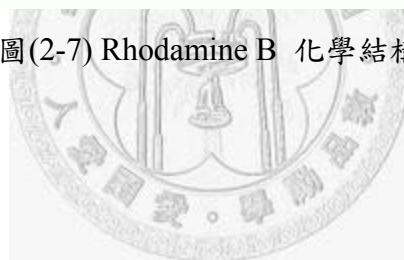
圖(2-5) Jablonski Energy Diagram [37]



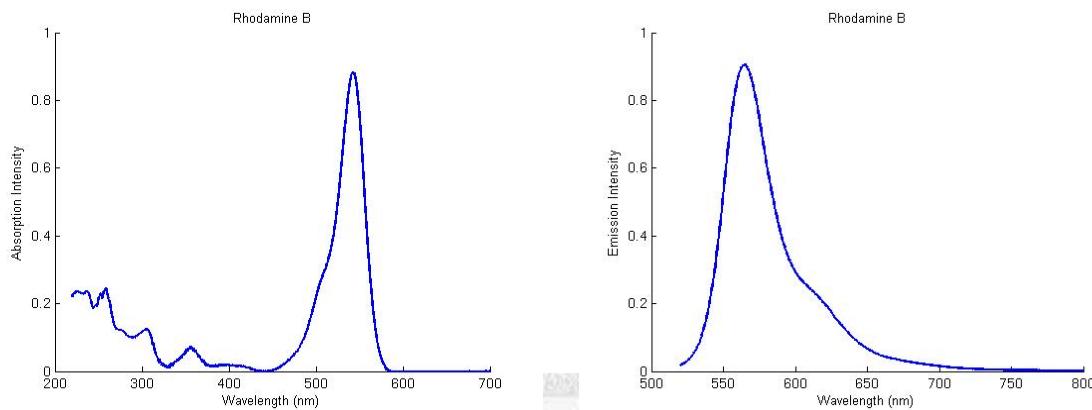
圖(2-6) 螢光分子的吸收與釋放光譜圖 [37]



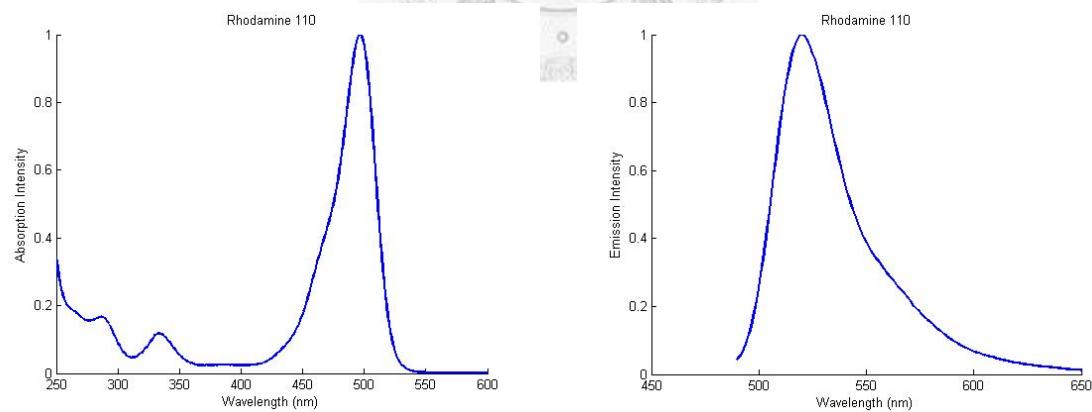
圖(2-7) Rhodamine B 化學結構



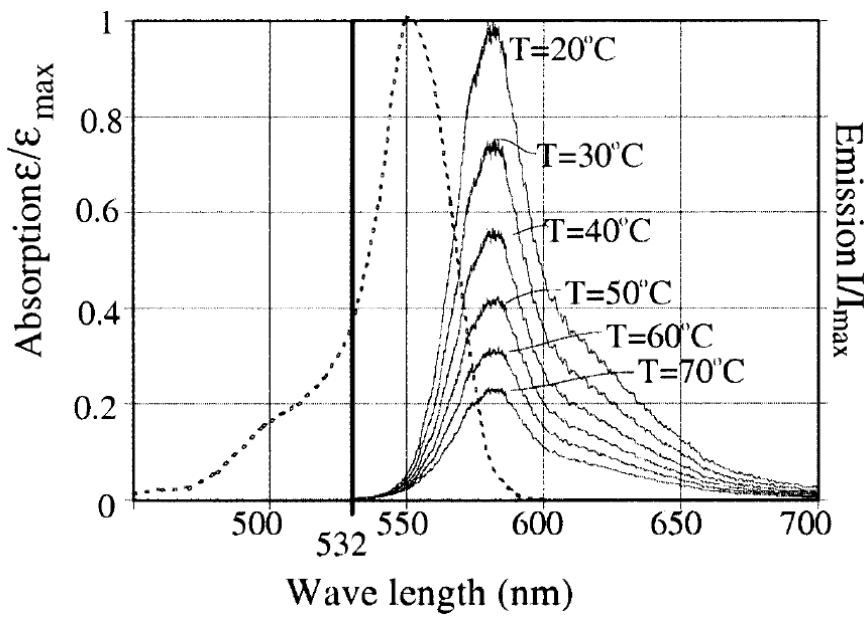
圖(2-8) Rhodamine 110 化學結構



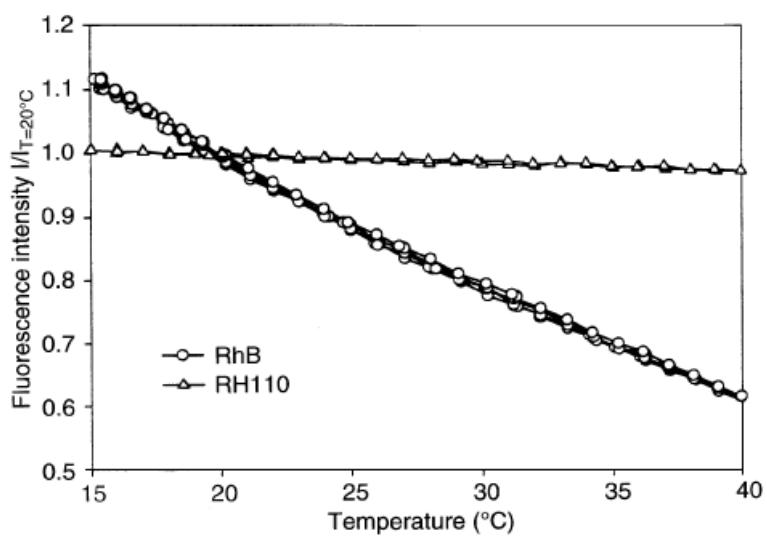
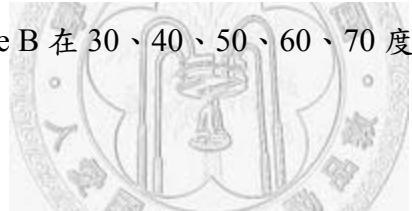
圖(2-9) Rhodamine B 的吸收(左)與釋放光譜(右)



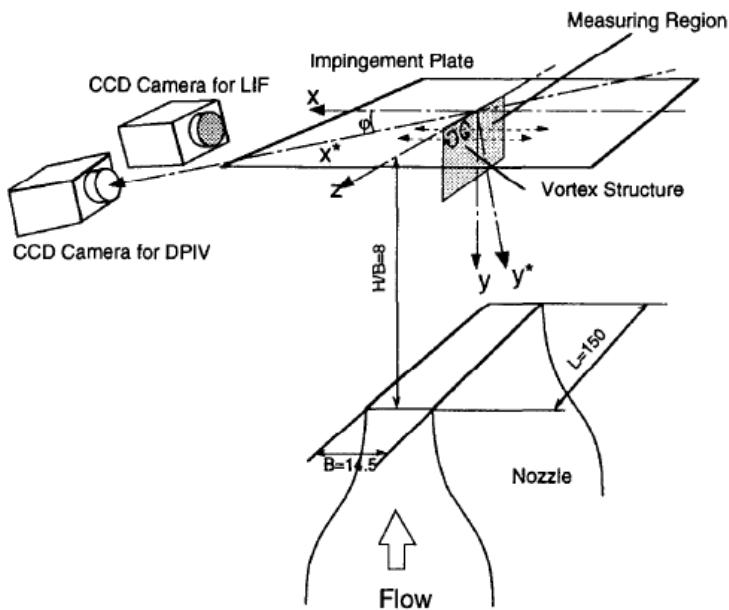
圖(2-10) Rhodamine 110 的吸收(左)與釋放光譜(右)



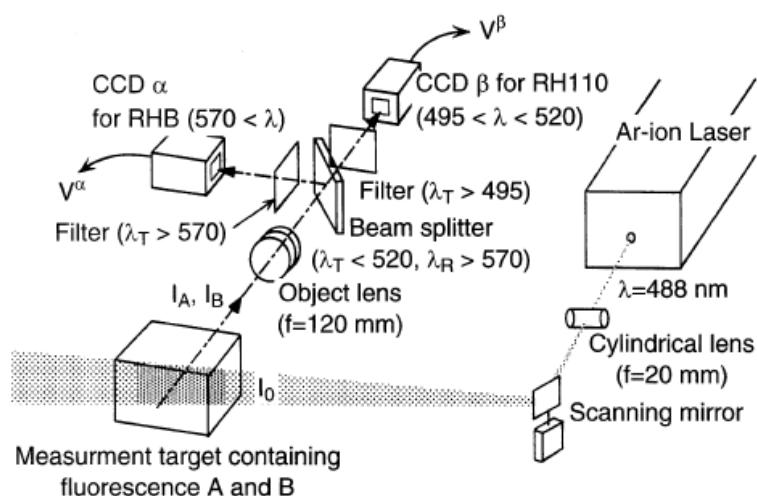
圖(2-11) Rhodamine B 在 30、40、50、60、70 度下的亮度變化 [12]



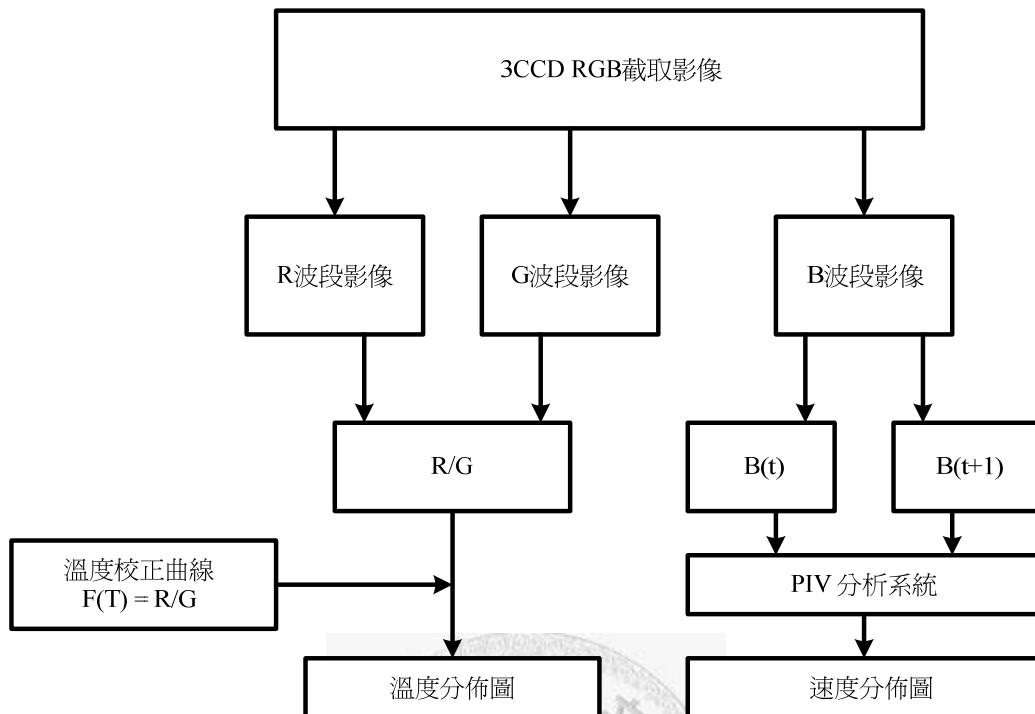
圖(2-12) Rhodamine B 與 Rhodamine 110 隨溫度改變的亮度圖 [16]



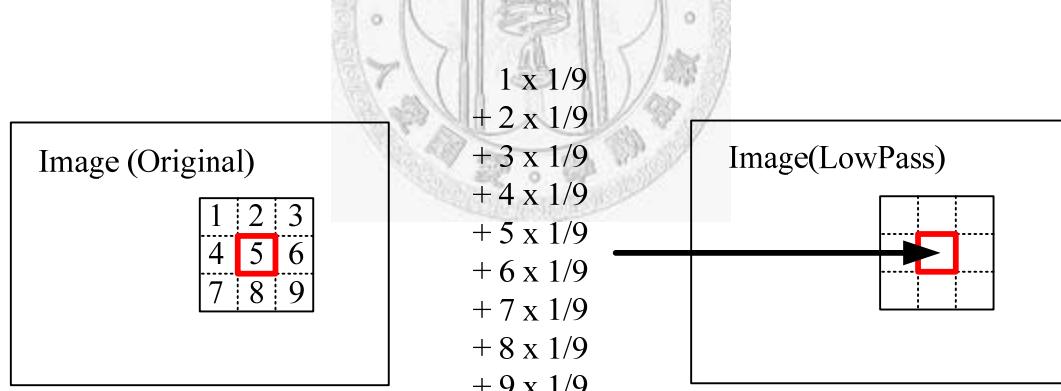
圖(2-13) 在單一染料下，LIF 結合 PIV 之溫度速度場量測 [15]



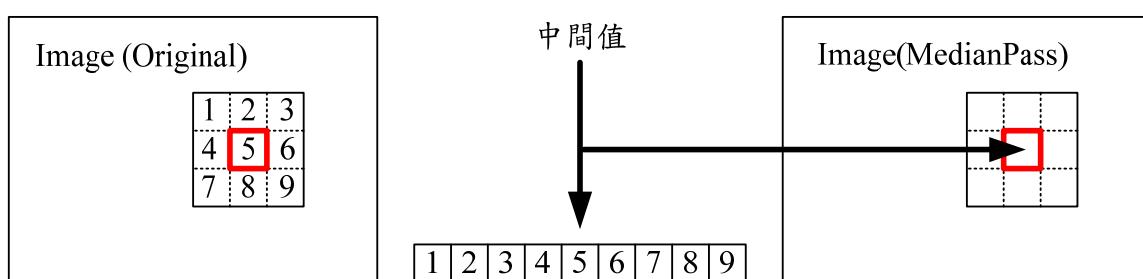
圖(2-14) 兩種螢光染料之 LIF 溫度場量測 [16]



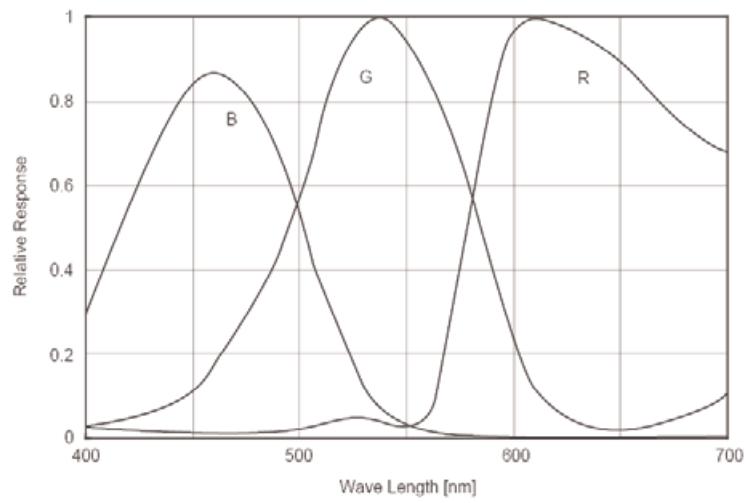
圖(2-15) LIF two color 影像處理流程圖 [5]



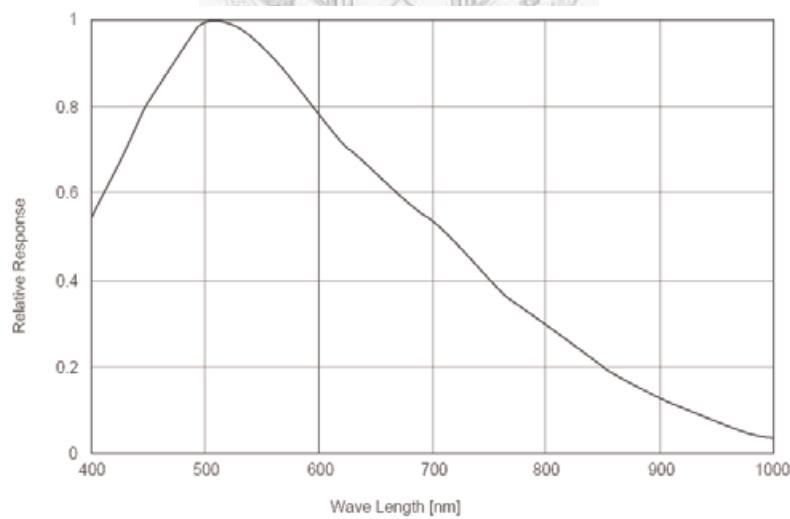
圖(2-16) 低通濾波(LowPass Filter)示意圖



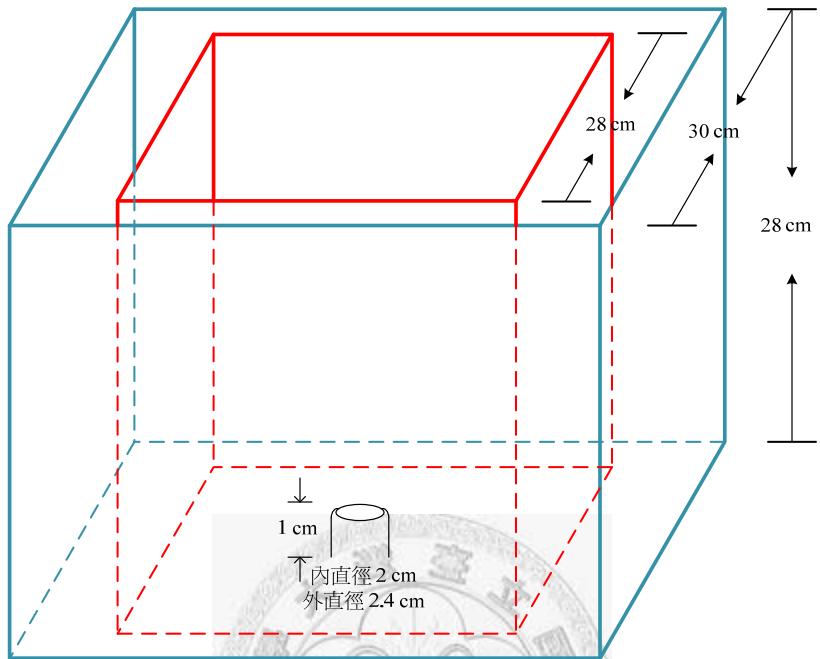
圖(2-17) 中值濾波(Median Filter)示意圖



圖(2-18) AVT GUPPY F-080C RGB 波段



圖(2-19) AVT GUPPY F-080C B/W 黑白波段



圖(3-1) 水槽、渦環產生機構



圖(3-2) 空壓機、調壓閥、速控閥、氣壓缸、手動閥、注射筒



圖(3-3) SPX 低速流量計、三菱 FX2N PLC



圖(3-4) 低溫恆溫水槽、加熱板



圖(3-5) NI-9211 溫度擷取裝置、TES-1319A 溫度計



圖(3-6) Stabilite 2017 氣離子雷射



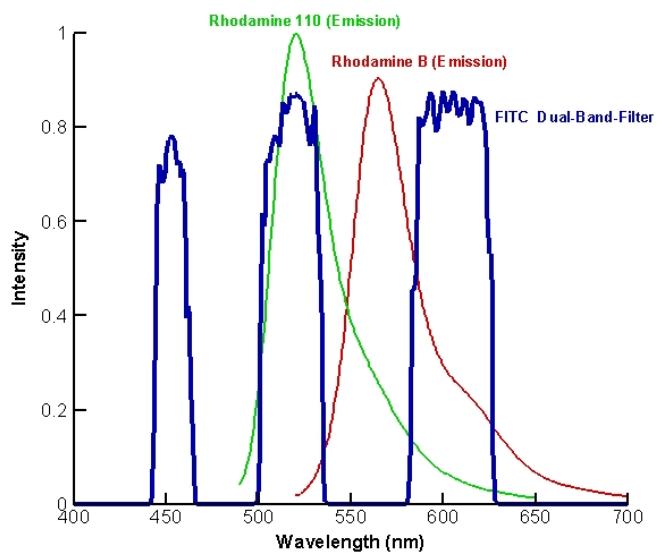
圖(3-7) 螢光染料(Rhodamine B、Rhodamine 110)、PSP-5 塑膠顆粒



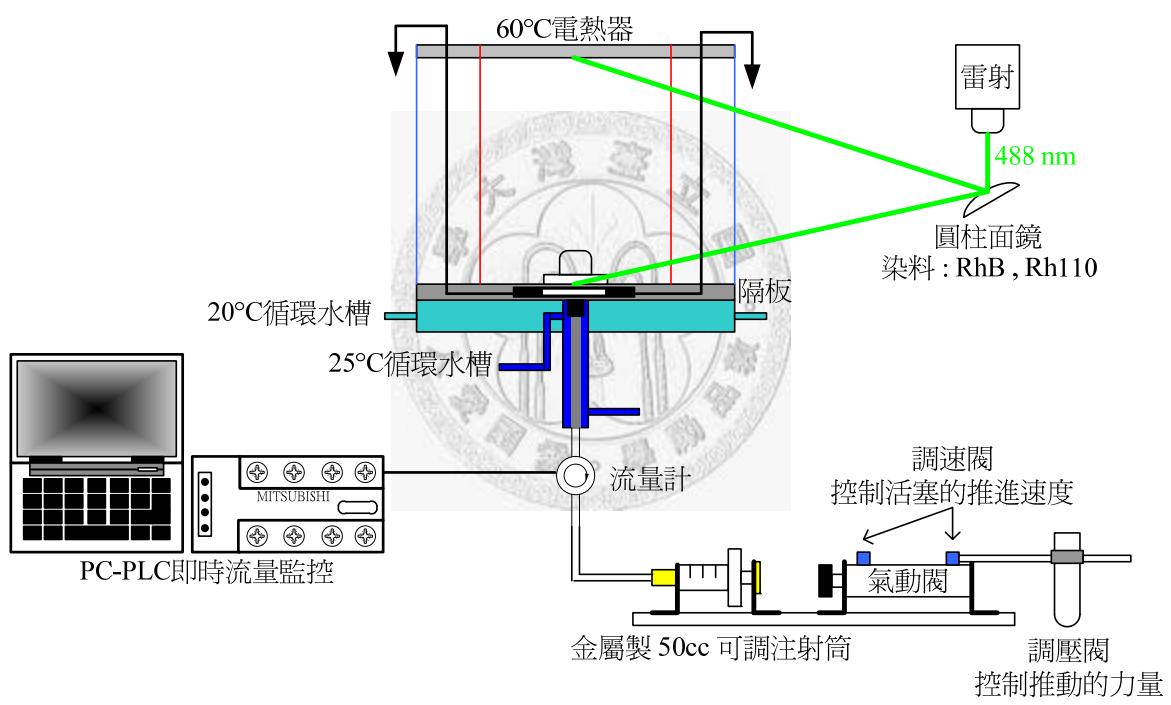
圖(3-8) AVT GUPPY F-080C CCD 彩色攝影機



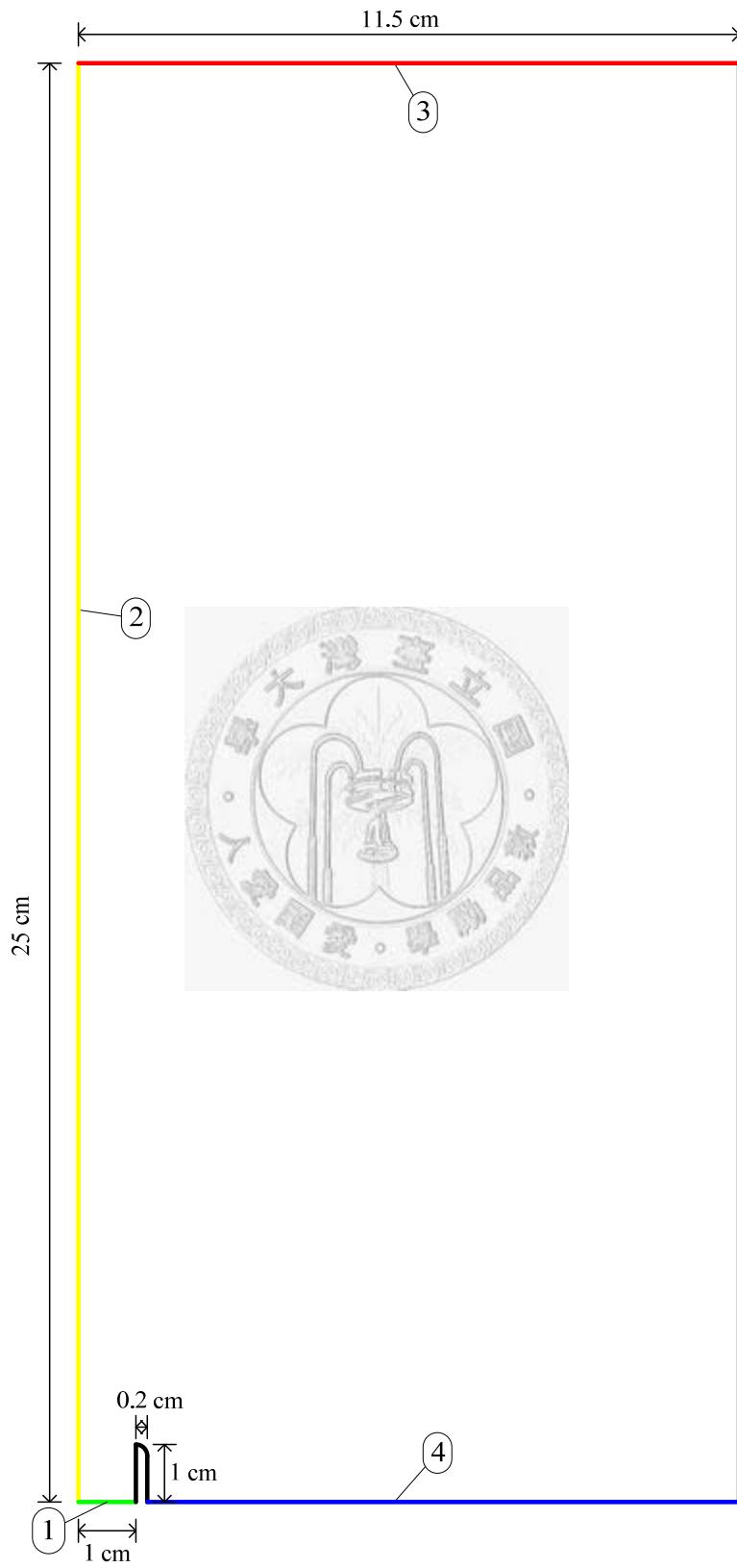
圖(3-9) 高解析度 RGB 3CCD 彩色攝影機、FITC/TRITC 雙波段濾鏡



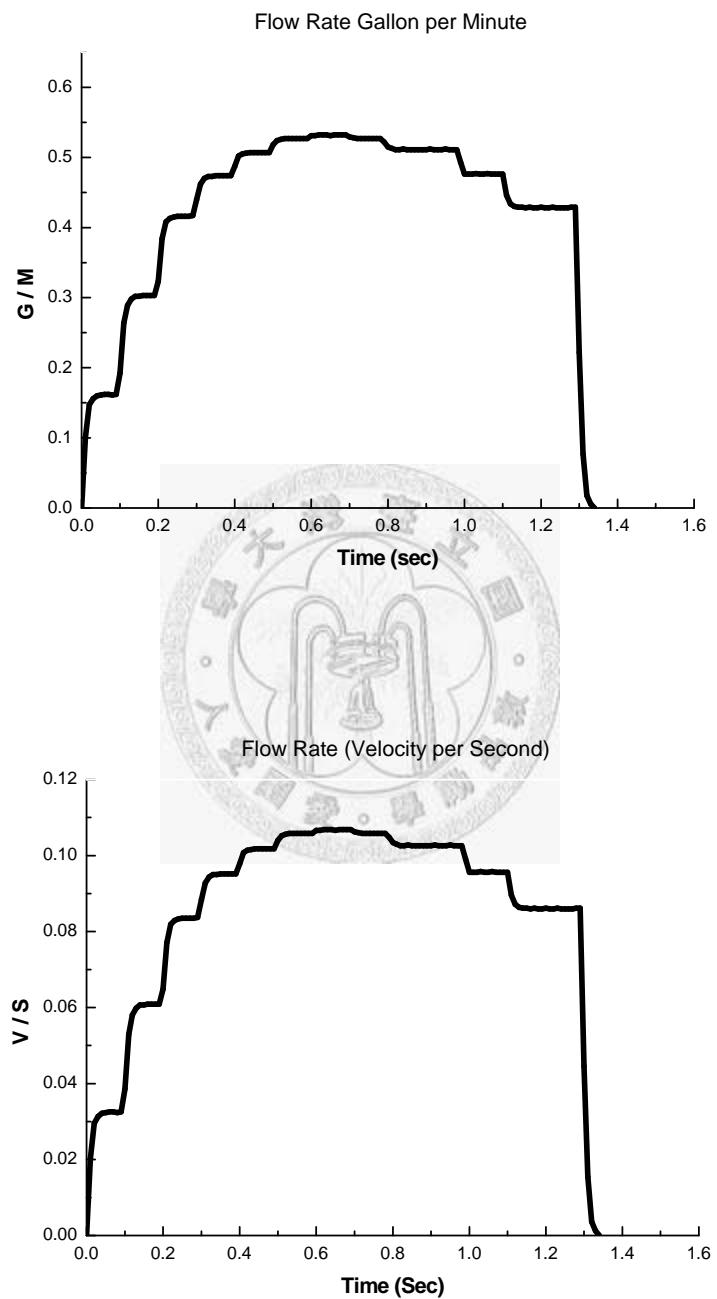
圖(3-10) FITC 雙波段濾鏡與兩種染料之發散光譜



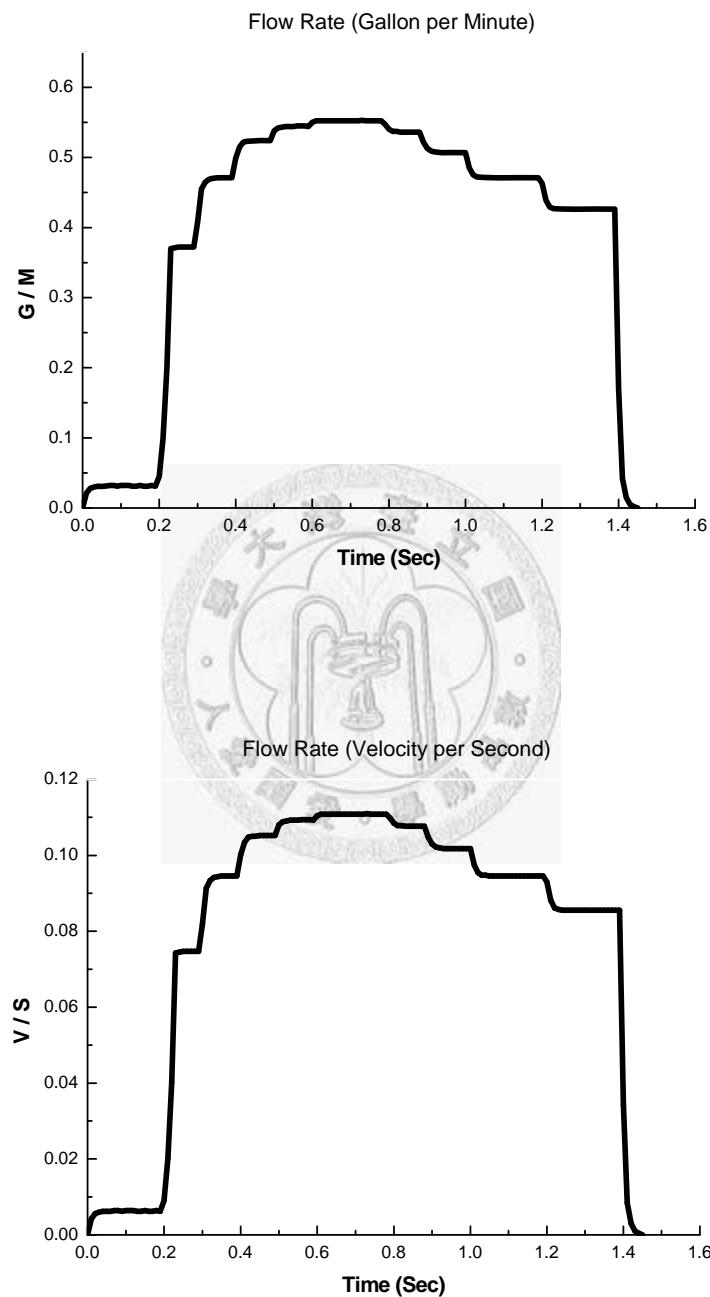
圖(3-11) 實驗設備配置圖



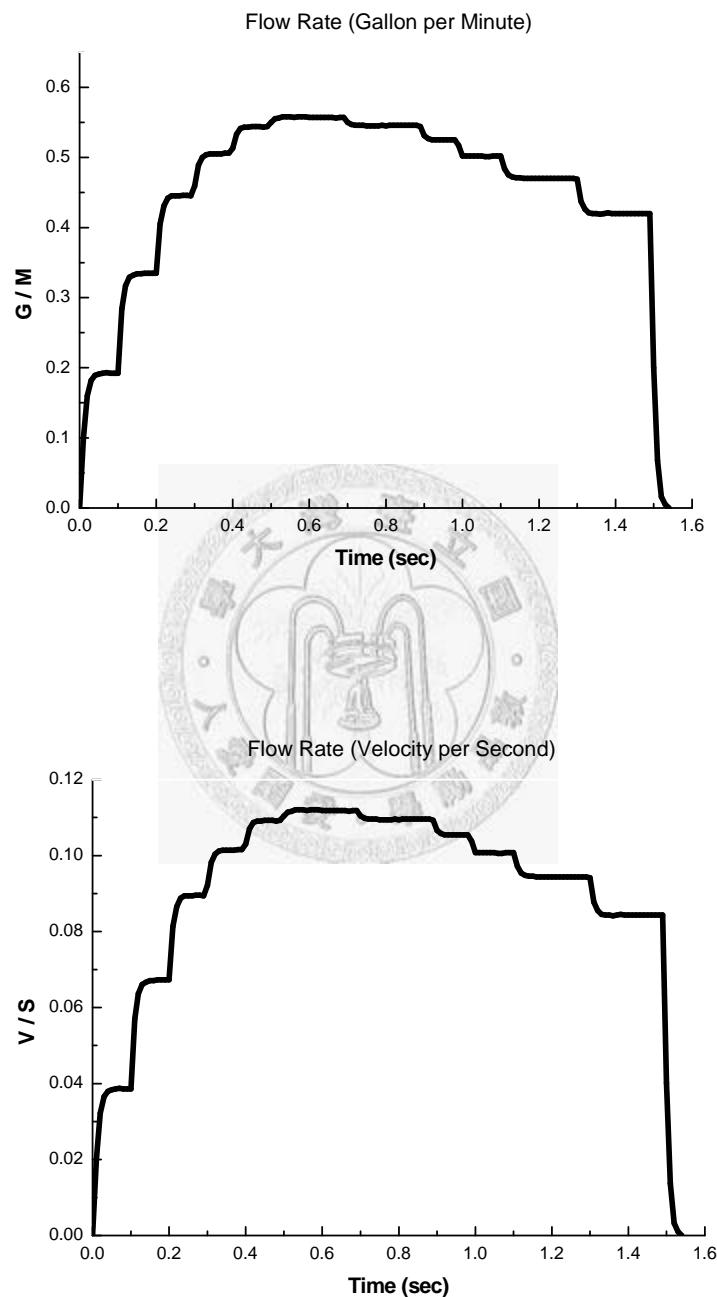
圖(3-12) Comsol 模擬建模尺寸



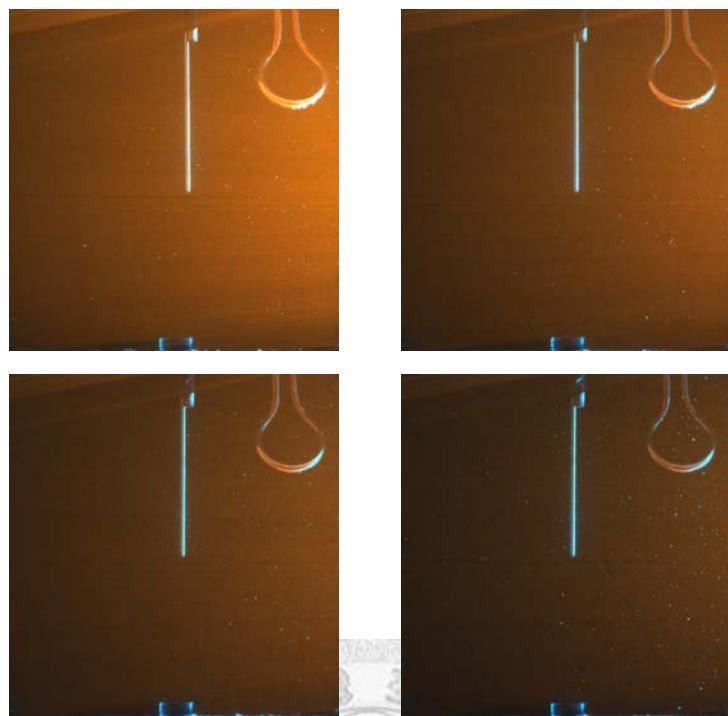
圖(4-1) 總流量 9c.c.歷時 1.34 秒之流量流速時程圖



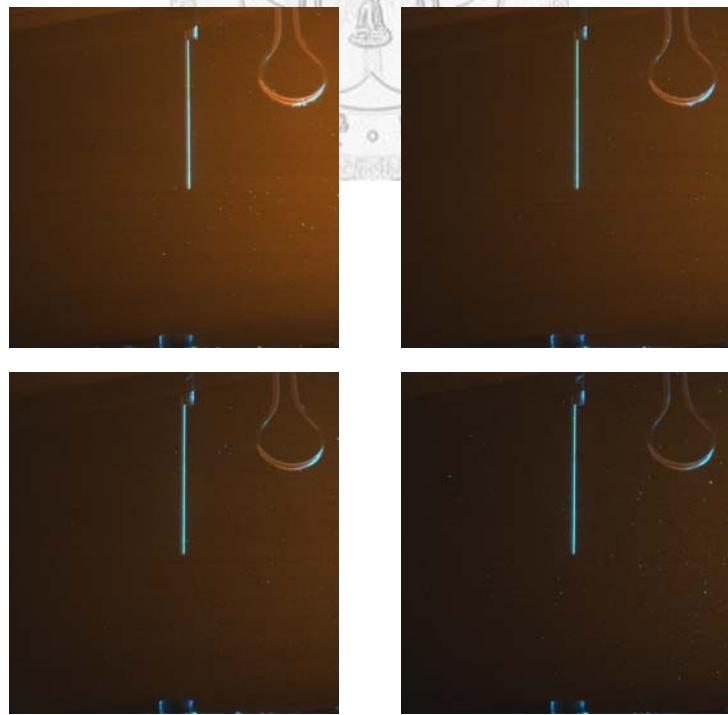
圖(4-2) 總流量 10c.c.歷時 1.45 秒之流量流速時程圖



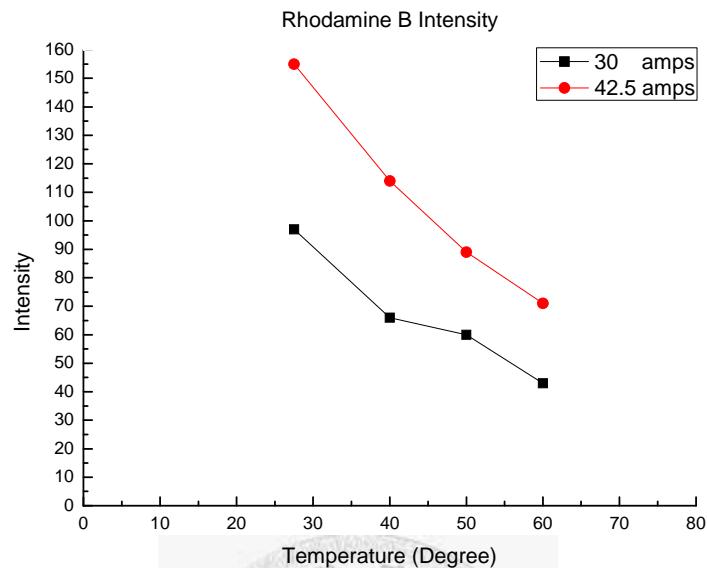
圖(4-3) 總流量11c.c.歷時1.54秒之流量流速時程圖



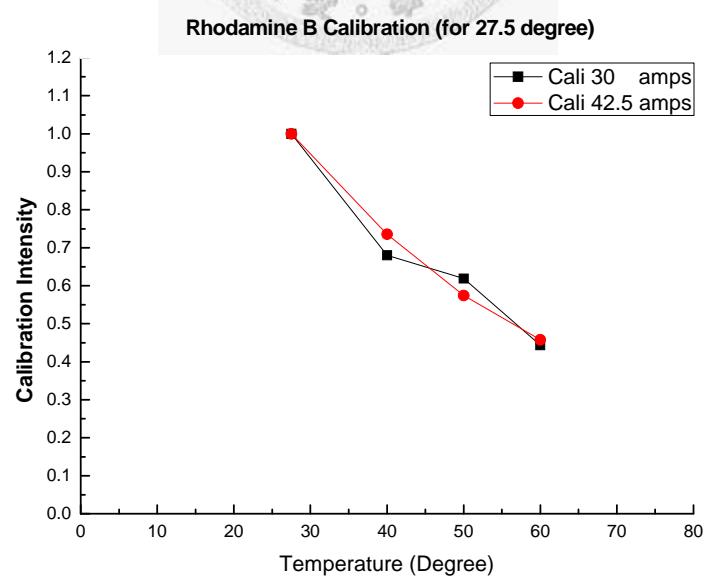
圖(4-4) 雷射光強度 42.5 amps 下 RhB 染料於溫度 27.5(左上)、40(右上)、50(左下)、60(右下)之校正圖



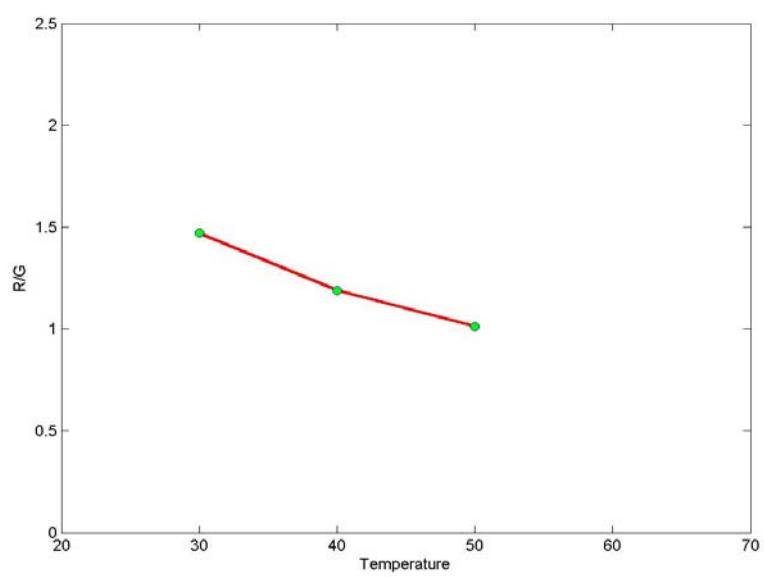
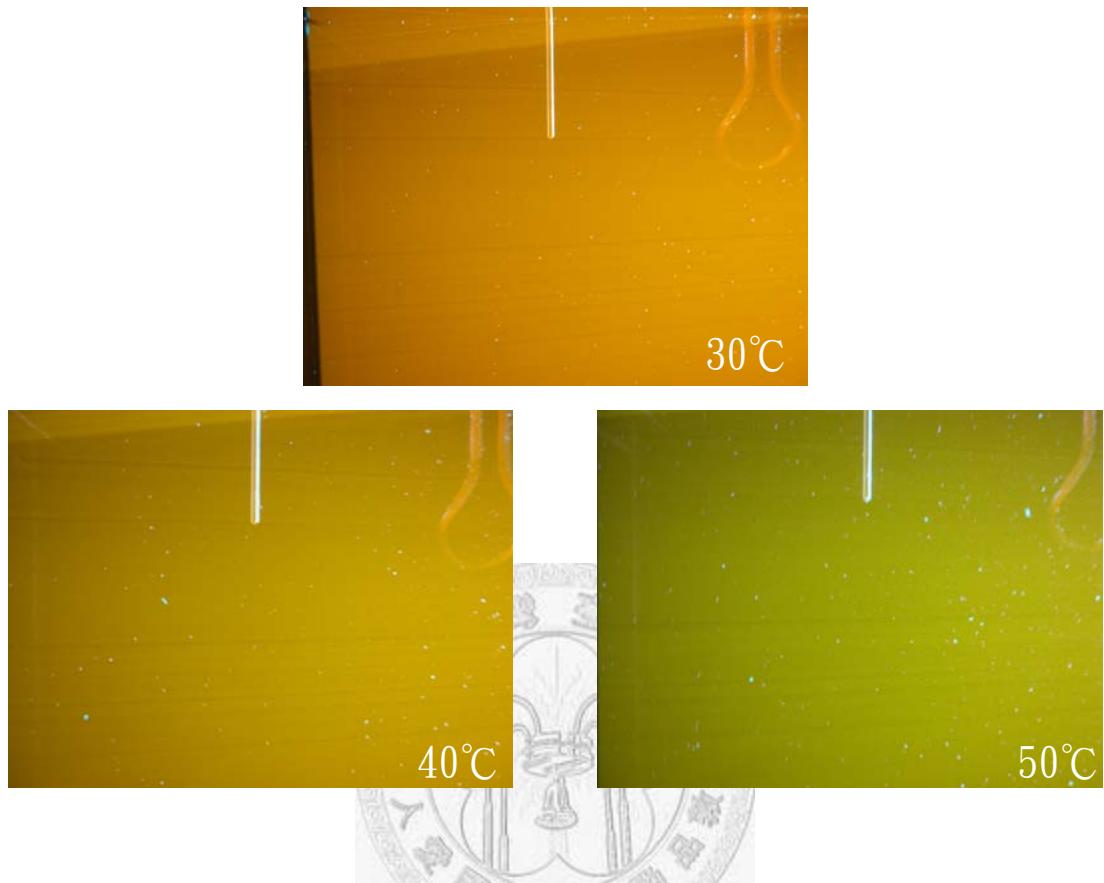
圖(4-5) 雷射光強度 30 amps 下 RhB 染料於溫度 27.5(左上)、40(右上)、50(左下)、60(右下)之校正圖



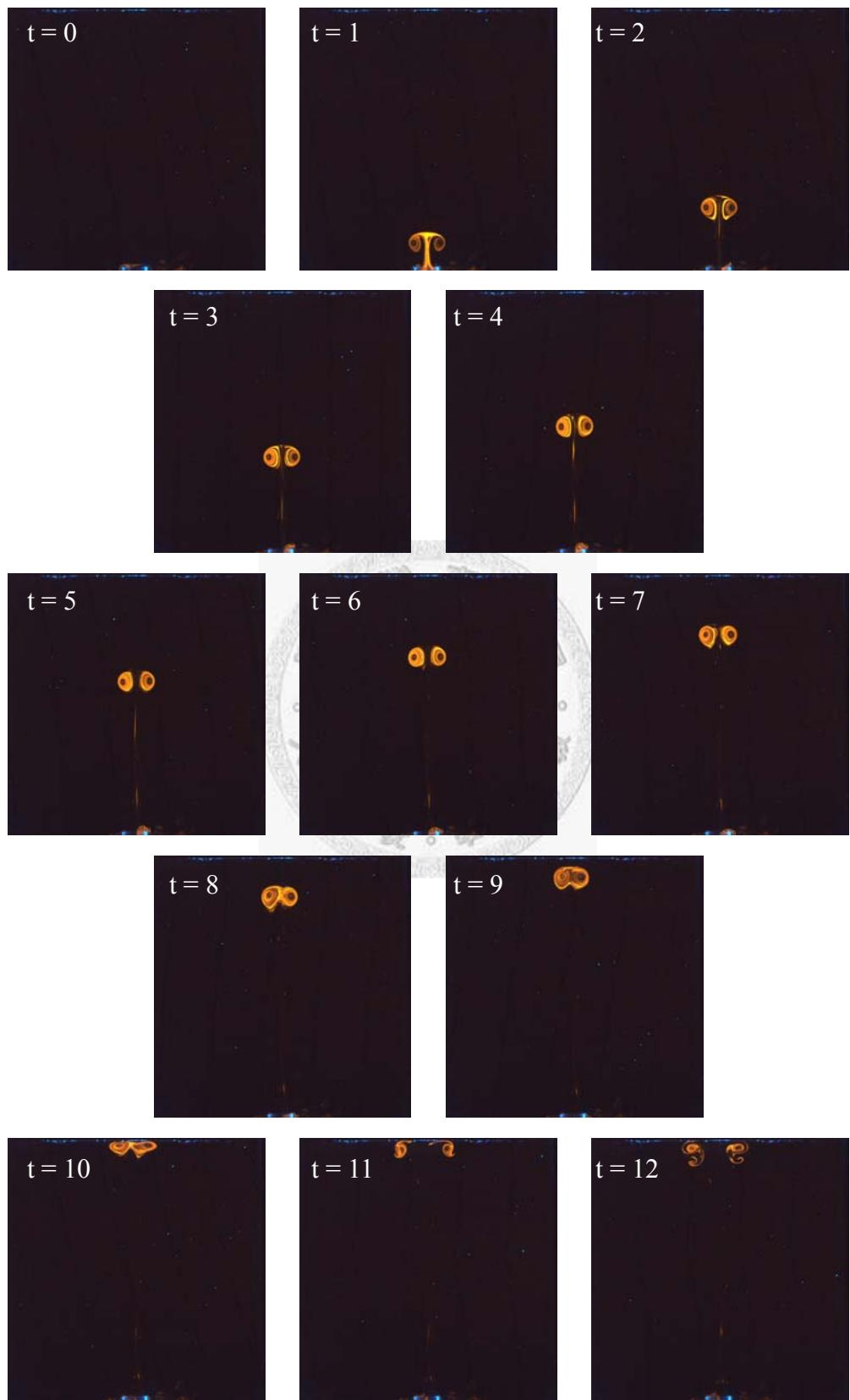
圖(4-6) RhB 染料在溫度 27.5、40、50、60 之亮度圖



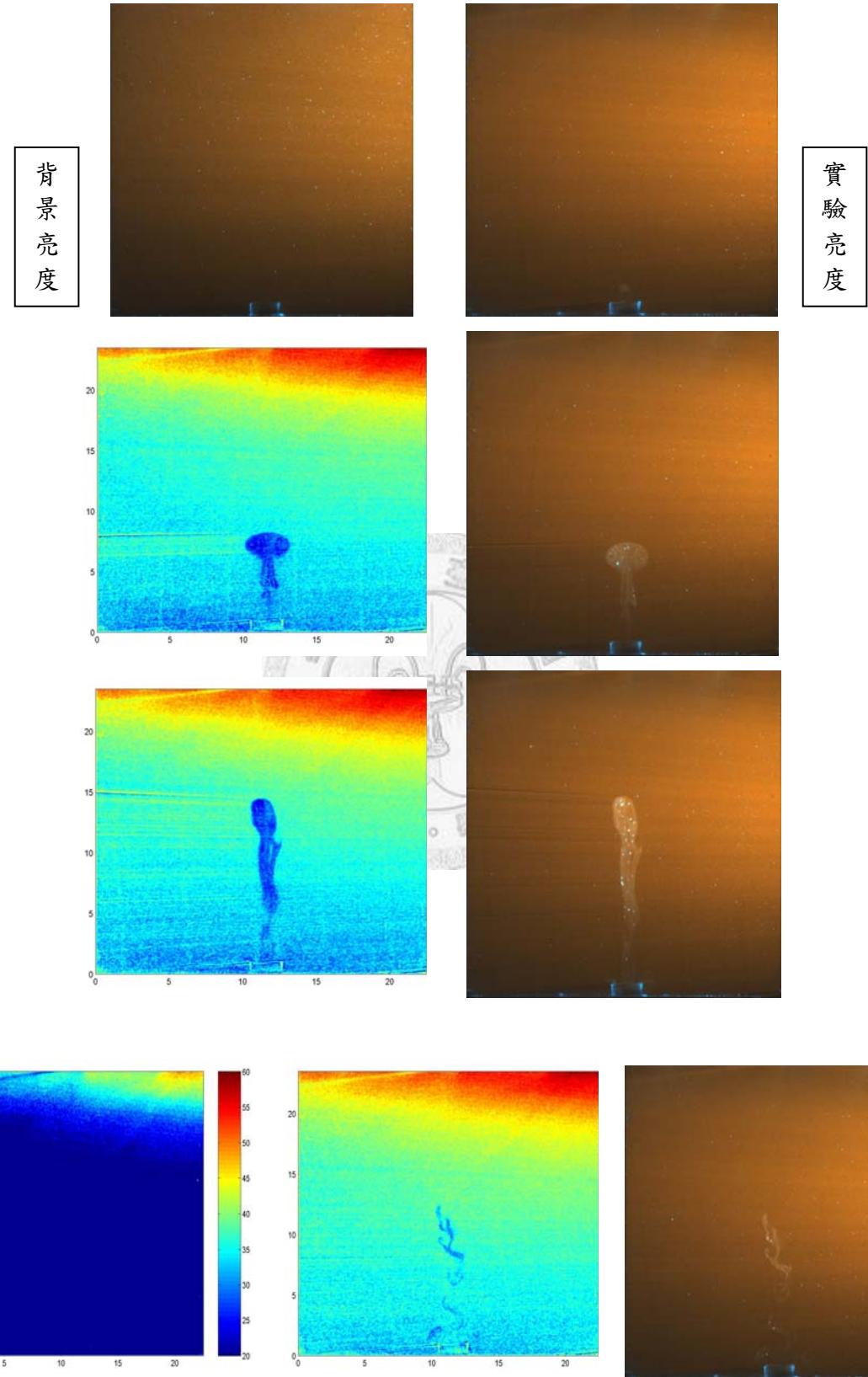
圖(4-7) RhB 染料在溫度 27.5、40、50、60 之正規化亮度圖



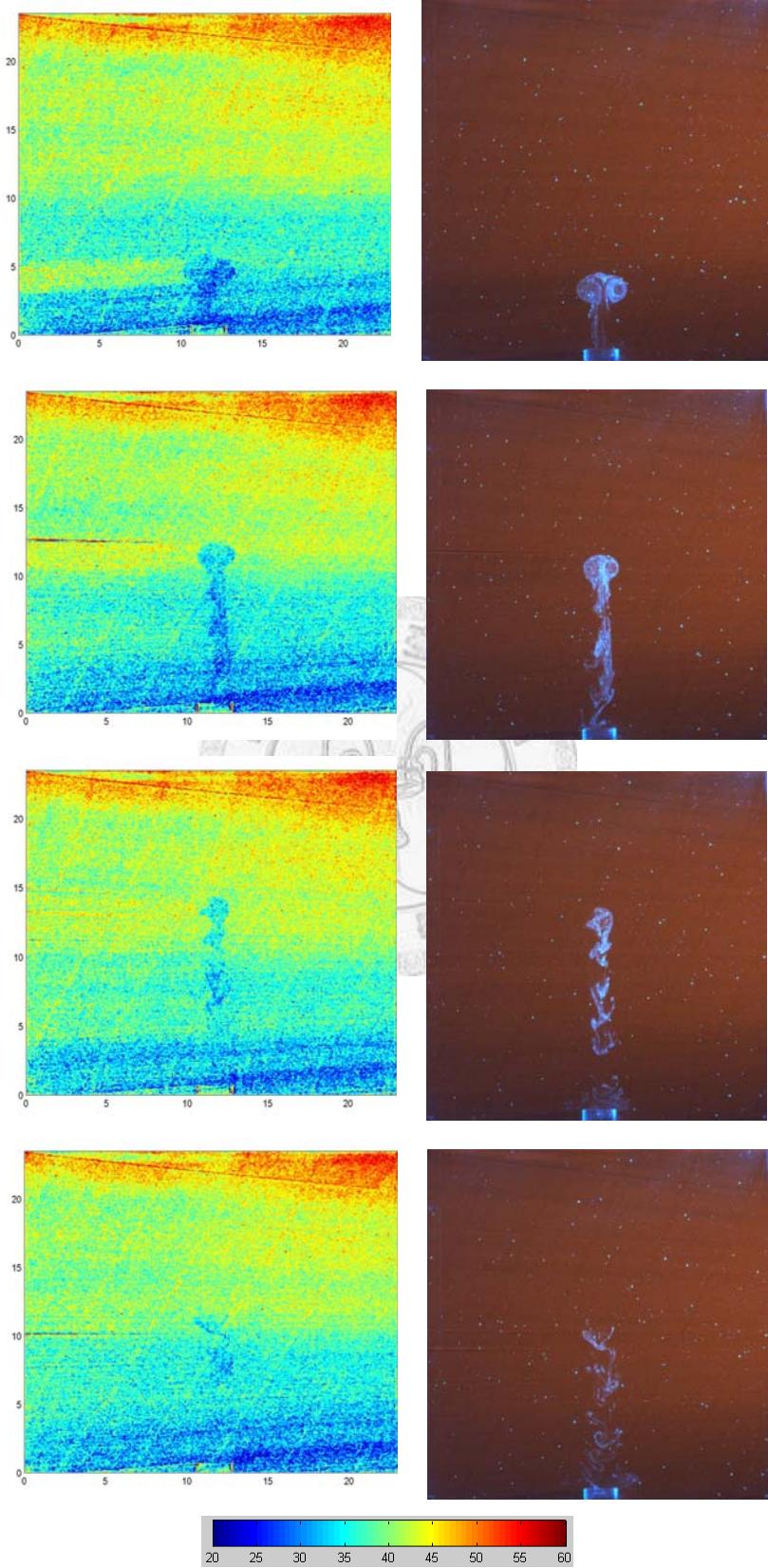
圖(4-8) 二色染料在溫度 30、40、50 之 R/G-溫度圖



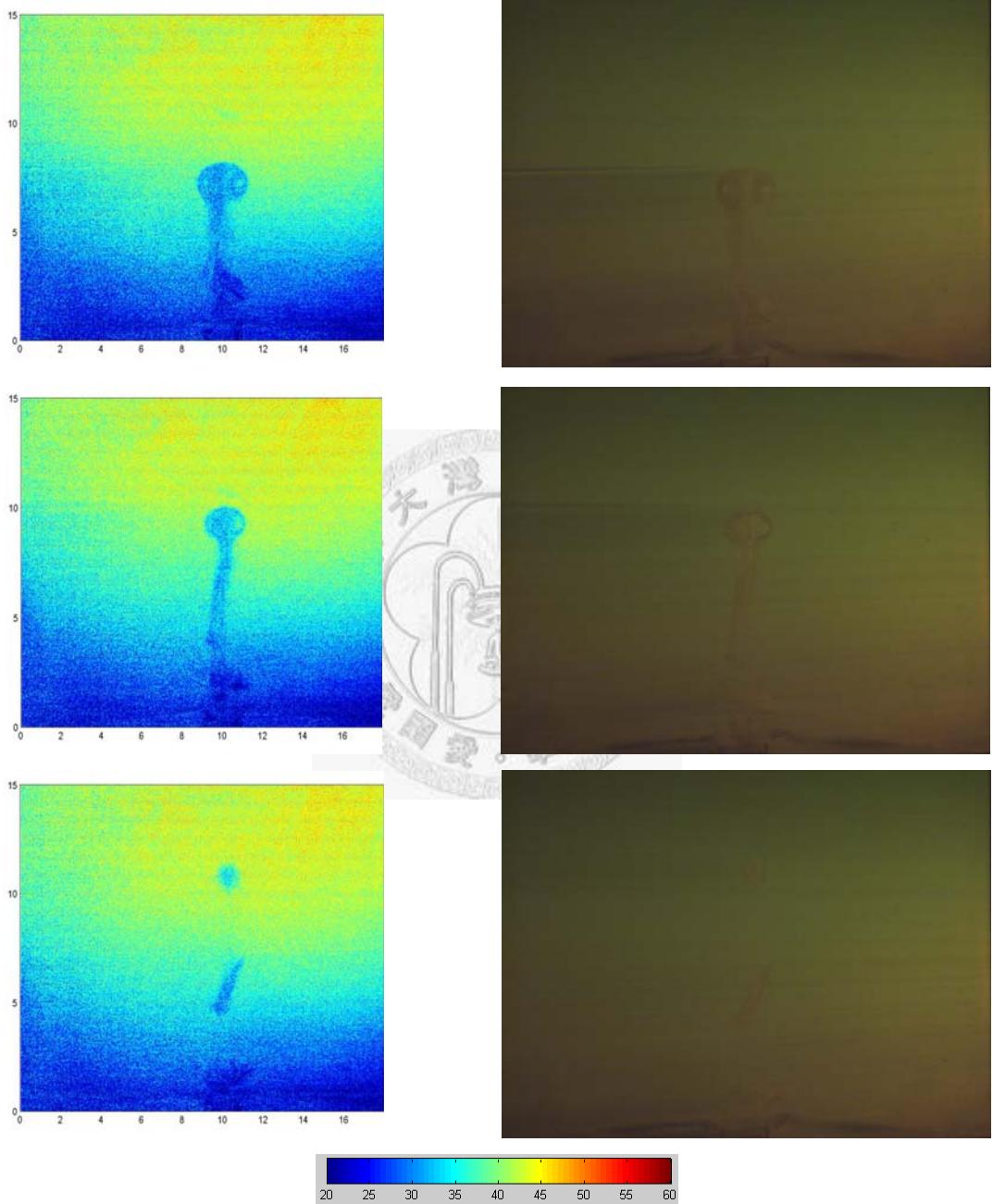
圖(4-9) 涡環在均匀渦環流場下之時序變化圖(from $t = 0$ sec, 間隔 1s)



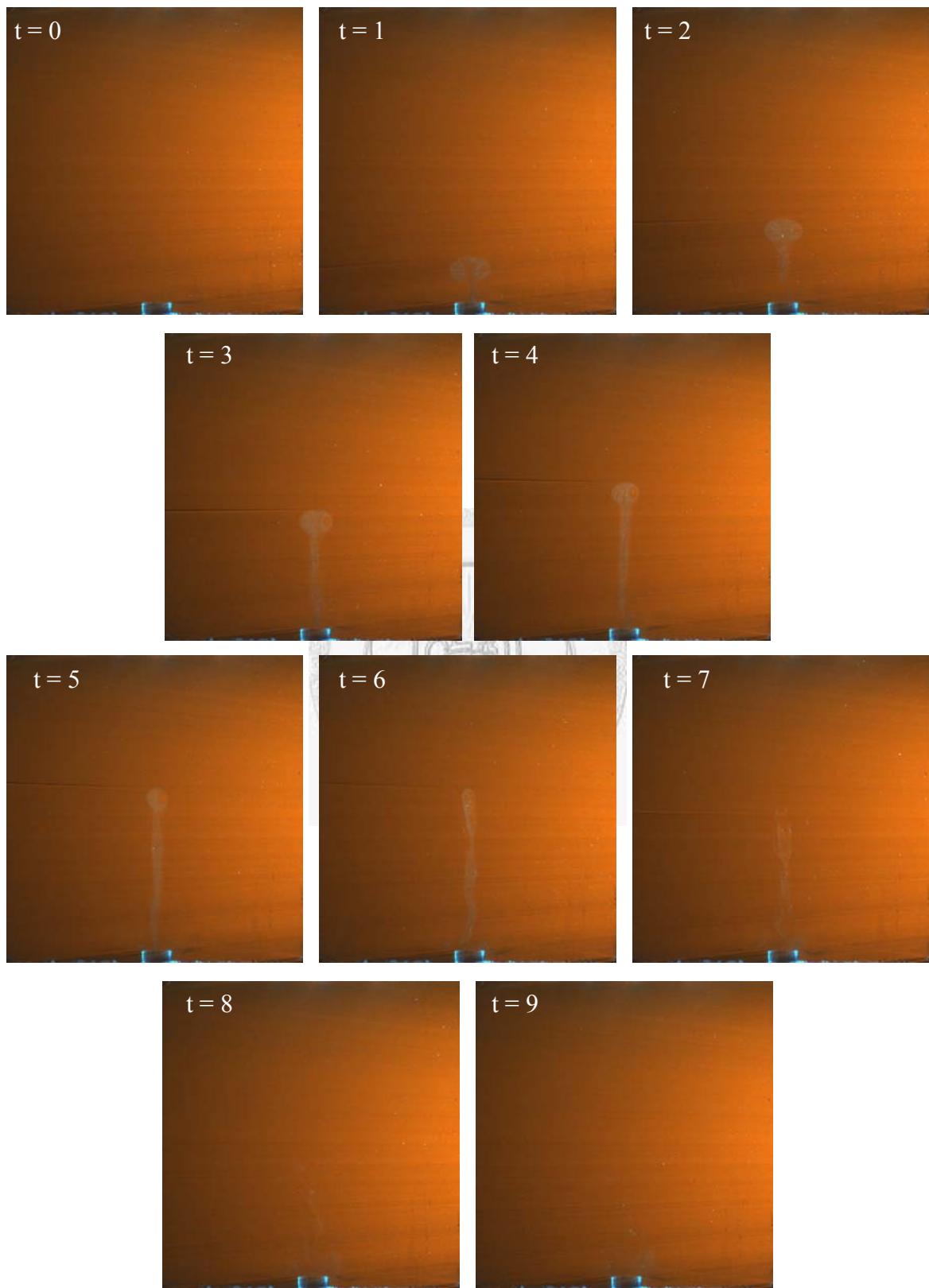
圖(4-10) 因背景亮度與實驗時雷射切頁偏差造成之誤差



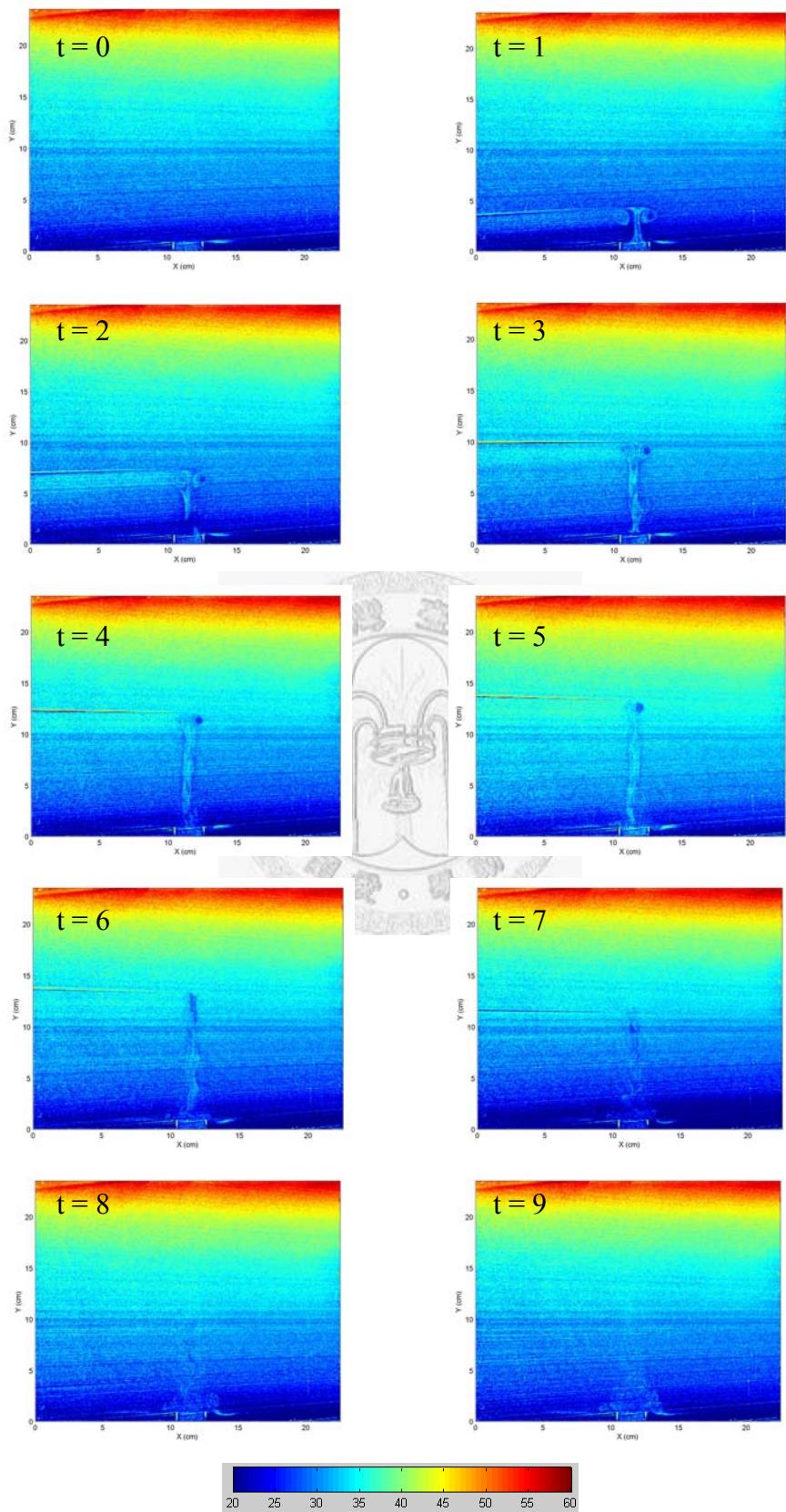
圖(4-11) 因背景亮度顆粒數過多造成溫度分析粗糙



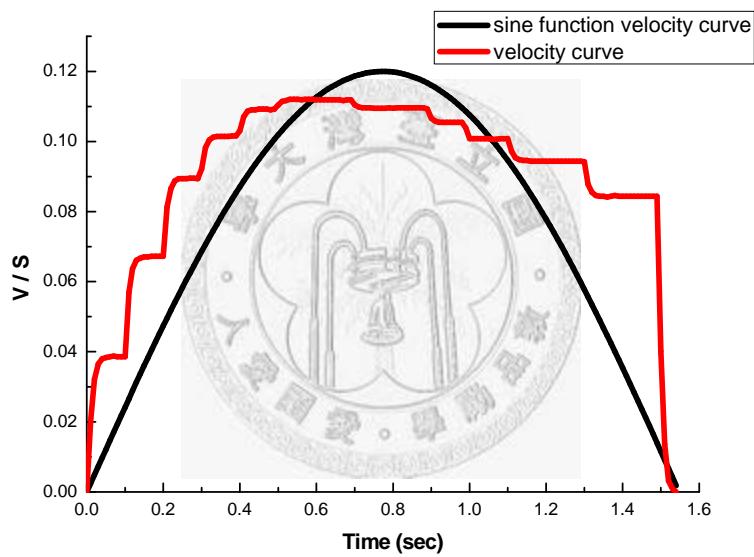
圖(4-12) LIF(two-color with 3CCD)之溫度分析圖



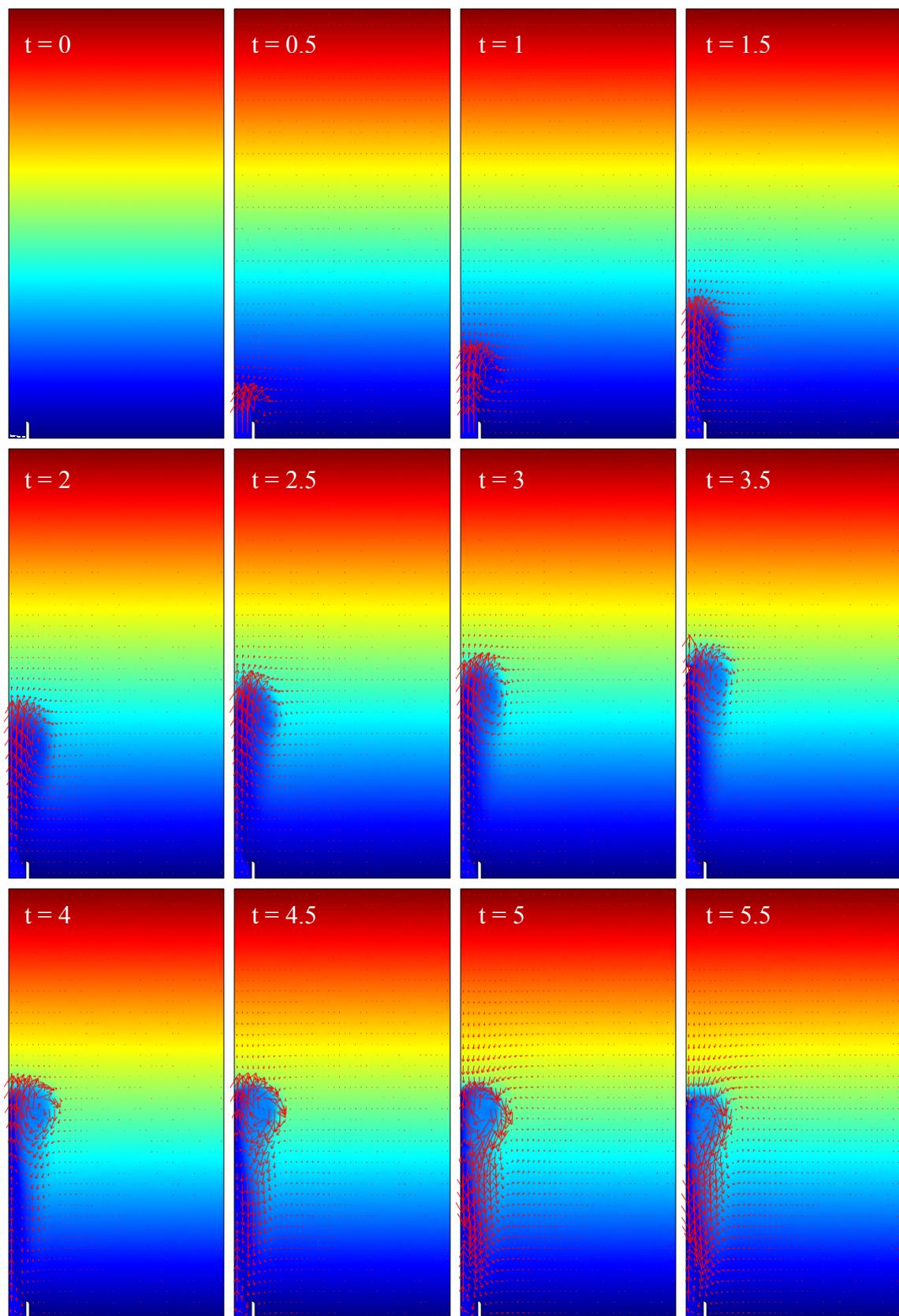
圖(4-13) 涡環在逆溫層下之時序變化圖(from $t = 0$ sec, 間隔 1s)



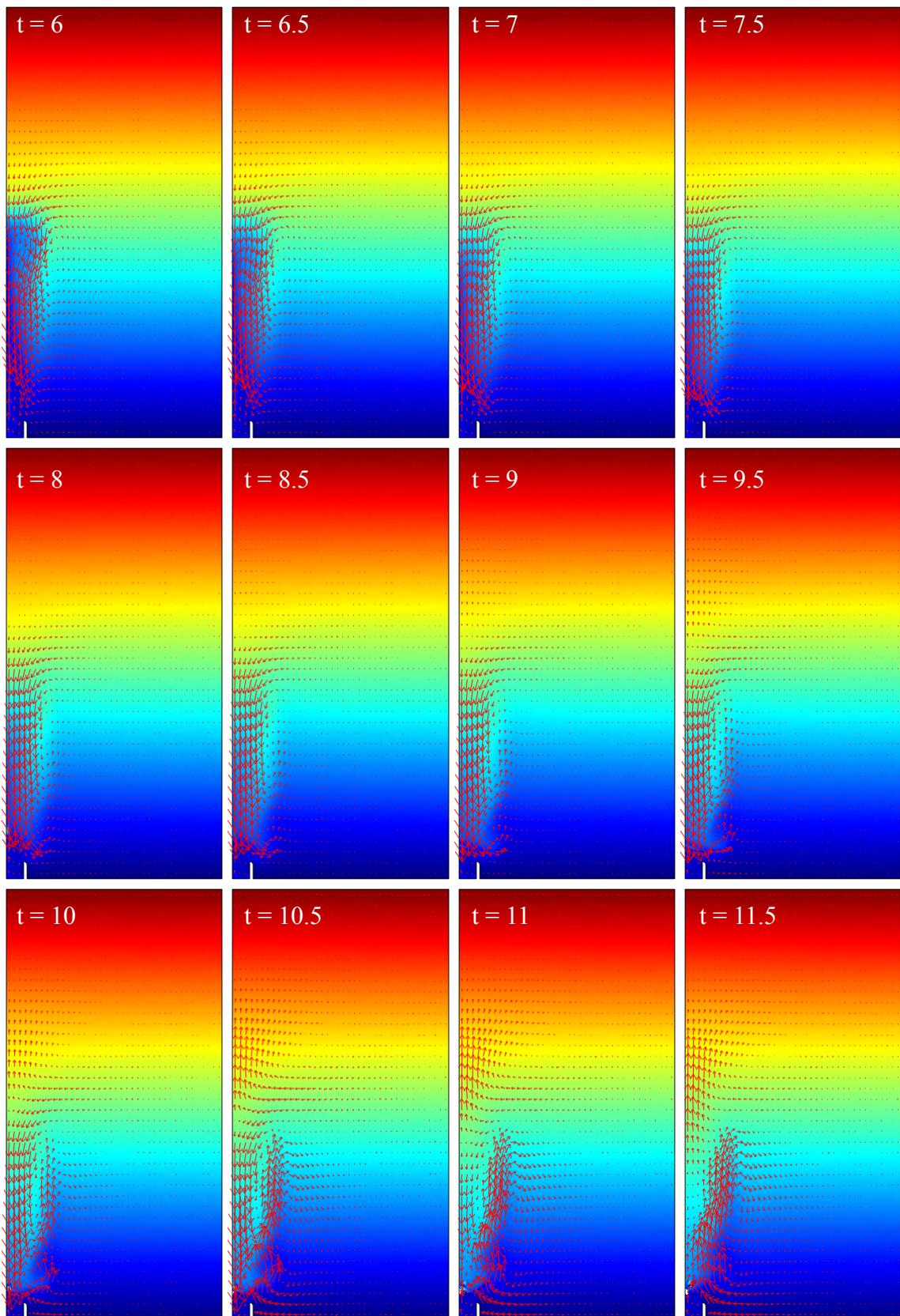
圖(4-14) 涡環在逆溫層下之溫度分佈圖(from $t = 0$ sec, 間隔 1s)



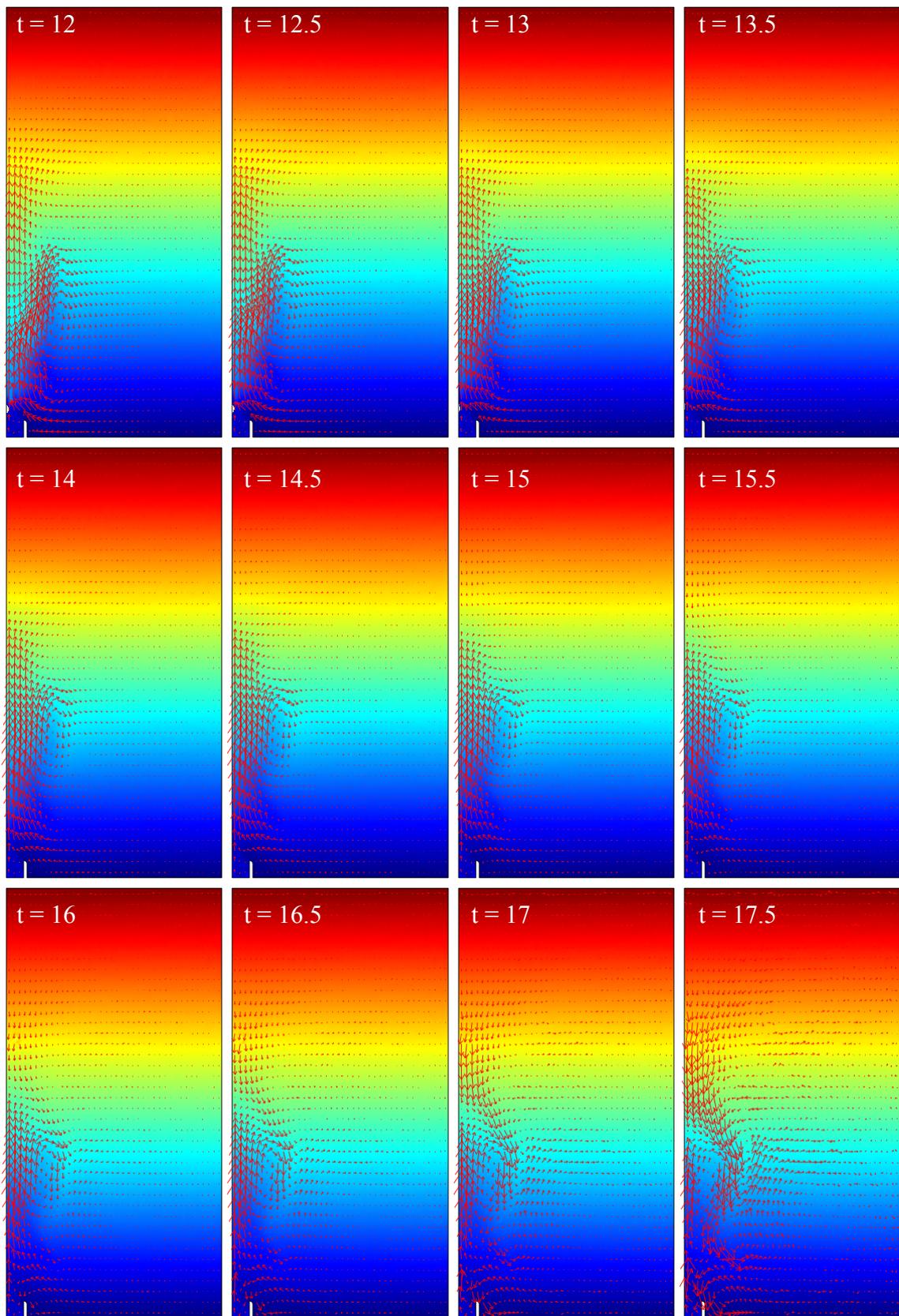
圖(4-15) 以 sin 函數趨近取代流速曲線圖



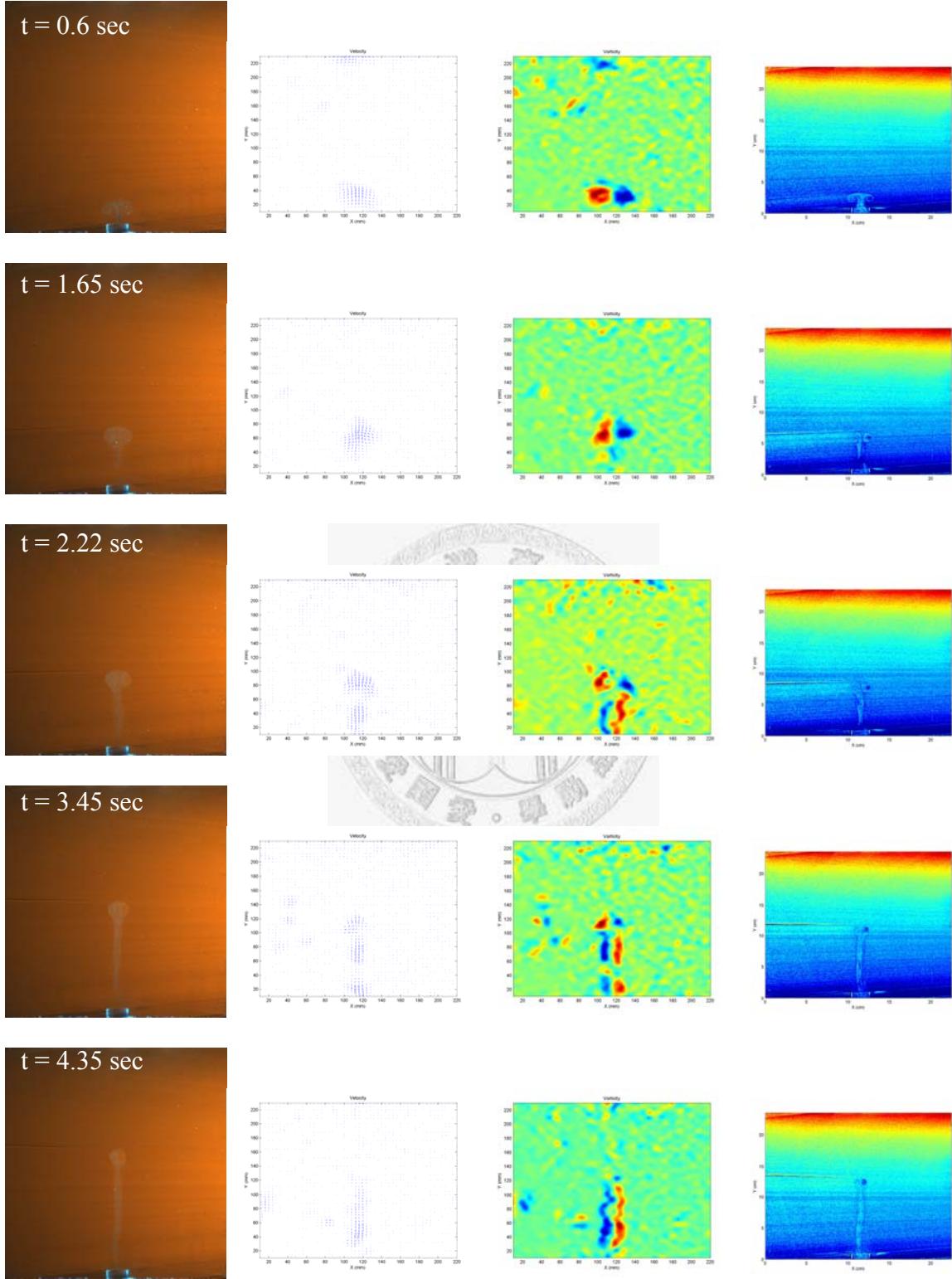
圖(4-16) 數值模擬時程圖(0~5.5秒，間隔0.5秒)

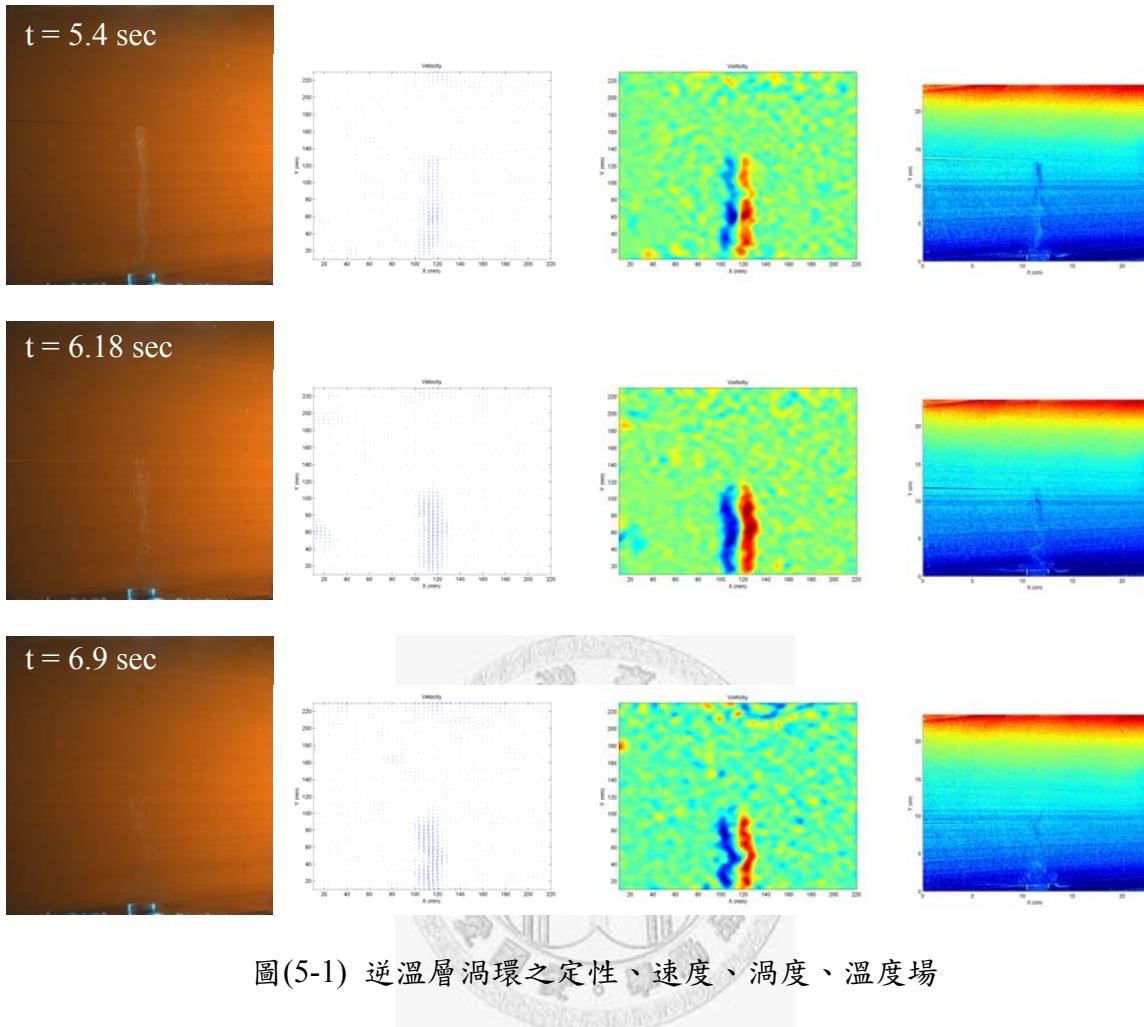


圖(4-17) 數值模擬時程圖(6~11.5秒，間隔0.5秒)



圖(4-18) 數值模擬時程圖(12~17.5秒，間隔0.5秒)





圖(5-1) 逆溫層渦環之定性、速度、渦度、溫度場

參考文獻

- [1] Bindhu CV, Harilal SS, Varier GK, Issac RC, Nampoori VPN, and Vallabhan CPG (1996), Measurement of the absolute fluorescence quantum yield of rhodamine B solution using a dual beam thermal-lens technique, *J. Phy. D.*, v29, pp. 1074-1079
- [2] Chu C. C., Hsieh C. S., Shi S. T., and Wang C. T. (1991), A quantitative study of the flow near surfaces induced by vortex motion, *AIAA*, pp. 91–1816
- [3] Chu C. C., Wang C. T. and Hsieh C. S. (1993), An experimental investigation of vortex motions near surfaces, *Phys. Fluids A.*, v5, pp.662-676
- [4] Coolen M. C. J., Kieft R. N., Rindt C. C. M., van Steenhoven A. A. (1999), Application of 2-D LIF temperature measurements in water using a ND:YAG laser, *Experiments in Fluids*, v27, pp. 420-426
- [5] Funatani S., Fuhisawa N. and Ikeda H. (2004), Simultaneous measurement of temperature and velocity using two-colour LIF combined with PIV with a colour CCD camera and its application to the turbulent, *Meas. Sci. Technol.*, v15, pp. 983-990
- [6] List E. J. (1982), Turbulent Jets and Plumes, *Annual Reviews Fluid Mech.*, v14, pp. 189-212
- [7] Lin Wenzian and Armfield S. W. (2000), Direct simulation of weak axisymmetric fountains in a homogeneous fluid, *J. Fluid Mech.*, v403, pp. 67-88
- [8] Lin Wenzian and Armfield S. W. (2000), Direct simulation of weak laminar plane fountains in a homogeneous fluid, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v43, pp. 3013-3026
- [9] Lin Wenzian and Armfield S. W. (2000), Very weak fountains in a homogenous fluid,

Numerical Heat Transfer, Part A, v38, pp. 377-396

- [10] Lin Wenxian and Armfield S. W. (2002), Weak fountains in a stratified fluid, Physical Review, v66
- [11] Lin Wenxian and Armfield S. W. (2003), The Reynolds and Prandtl number dependence of weak fountains, Computational Mechanics, v31, pp. 379–389
- [12] Lopez Arbela I, Rohatgi-Mukherjee KK (1986), Solvent effects on photophysics of the molecular forms of rhodamine B, Internal conversion mechanism, Chem. Phys. Lett., v129, pp. 607-614
- [13] Lynn J. Bloomfield and Ross C. Kerr (1998), Turbulent fountains in a stratified fluid, J. Fluid Mech., v358, pp. 335-356
- [14] Orlandi P., Egermann P. and Hopfinger E. J. (1998), Vortex rings descending in a stratified fluid, Physics of Fluids, v10
- [15] Sakakibara J., K. Hishida K. and Maeda M. (1997), Vortex structure and heat transfer in the stagnation region of an impinging plane jet (simultaneous measurements of velocity and temperature fields by digital particle image velocimetry and laser-induced fluorescence), Inr. J. Hear Mass Transfer., v40, pp.3163-3176
- [16] Sakakibara J., Adrian R. J. (1999), Whole field measurement of temperature in water using two-color laser induced fluorescence, Experiments in Fluids, v26, pp. 7-15
- [17] Seuntiens H. J., Kieft R. N., Rindt C. C. M., van Steenhoven A. A. (2001), 2D temperature mesurements in the wake of a heated cylinder using LIF, Experiments in Fluids, v31, pp. 588-595
- [18] Soloff S., Adrian R. J., and Liu Z. (1997), Distortion compensation for generalized stereoscopic particle image velocimetry, Meas. Sci. Tech., v8, pp. 1441-1454
- [19] Turner J. S. (1957), Buoyant vortex rings, Series A, Mathematical and Physical

Sciences, v239, pp. 61-75

- [20] Turner J. S. (1960), Intermittent release of smoke from chimneys, Journal Mechanical Engineering Science, v2, pp. 97-100
- [21] 王繼宗，渦環與邊界之交互作用，國立台灣大學博士畢業論文，1993 年
- [22] 朱桂仁，環境流體力學，科技圖書，2003 年
- [23] 李安桂，空氣射流，浮力尾流和浮力射流的統一性，專題研討，第 28 卷第 5 期 1998 年
- [24] 林怡君，利用液晶顯像技術量測斜壓渦漩之速度與溫度場，國立臺灣大學碩士論文，2007 年
- [25] 張瑞裕，兩同軸症狀之渦環流場研究，國立台灣大學碩士畢業論文，1991 年
- [26] 張慶成，二維渦對與柱面交互作用之實驗與數值研究，國立台灣大學碩士畢業論文，1992 年
- [27] 張文智，兩同軸正撞渦環之不穩定性研究，國立台灣大學碩士畢業論文，1992 年
- [28] 林文賢、劉滔，弱的浮力射流進展，水動力學研究與進展，A 輯第 20 卷第 6 期 2005 年 11 月
- [29] 曾玉紅、槐文信，靜止環境中水平圓形浮力射流流動特性研究，華中科技大學學報，第 33 卷第 11 期 2005 年 11 月
- [30] 黃一仁，利用液晶顯像技術量測具溫度差渦環流場之溫度與速度，國立臺灣大學碩士論文，2006 年
- [31] 黃真理、李玉梁、余常昭、宋傳琳，LIF 技術測量濃度場的影響因素分析，實驗力學，第 9 卷第 3 期 1994 年 9 月
- [32] 黃真理、李玉梁、余常昭，PLIF 技術測量濃度場及其二維數字校正，力學學報，第 26 卷第 5 期 1994 年 9 月
- [33] 黃真理、李玉梁、余常昭，平面激光誘導螢光技術測量橫流中射流濃度場的研究，水利學報，第 11 期 1994 年 11 月
- [34] 劉惠裕，渦環撞擊固體邊界之壓力量測，國立台灣大學碩士畢業論文，1993 年

- [35] 劉滔、林文賢，低 Pr 數流體非穩態自然對流流動的標度分析，力學與實戰，第 29 卷第 1 期 2007 年 2 月
- [36] 謝政達，運用 PIV 與 PTV 量測技術於單一渦漩生成之研究，國立臺灣大學碩士論文，2003 年
- [37] <http://www.olympusfluoview.com/index.html>

