

國立交通大學機械工程學系

碩士論文

矽膠材料被動式微流體混合裝置之設計與性能分析

Design and Performance Analysis for a Passive

Micro-fluidic Mixer of PDMS



研究 生：賴俞任

指 導 教 授：林振德

中華民國九十四年七月

# 矽膠材料被動式微流體混合裝置之設計與性能分析

研究生：賴俞任

指導教授：林振德

## 摘要

在一些生化反應中，微混合器的重要性在於混合的好壞決定了整個反應系統效率之優劣，因為不完全的混合會嚴重地影響要完成的反應。在微小尺度下，流體會以層流的方式流動，因此很難達到混合。在此，我們提出一個新型的混沌混合器，利用微機電系統製程技術及配合聚二甲基矽氧烷(PDMS)製作出結構簡單，並能增加混合效率之被動式微混合器。此混合器利用上下交叉型阻礙物、X型溝槽及X型阻礙物之結構，使得流體在低雷諾數時能產生混沌移流並探討三種混合器在不同雷諾數下對於混合效果的影響。通常來說，混沌移流可以靠著改變特殊的流道形狀或輸入外力而產生；本研究中並配合CFD-ACE(U) Modules 軟體模擬分析，模擬結果與實驗結果相互比較。針對本研究中設計製作之微混合器，實驗的結果顯示上下交叉型混合器具有最好的混合效果，其在雷諾數為 50 時，混合指標可以達到 82%。

# Design and Performance Analysis for a Passive Micro-fluidic Mixer of PDMS

Student : Yu-Jin Lai      Advisor : Prof. Jenn-Der Lin

## Abstract

The importance of micromixers for microreaction technology demands some well-founded knowledge on the mixing behavior of these devices, since the flow in a micro-channel is laminar which makes mixing quite a difficult task to complete. In this study, we present a new chaotic mixer. In experiment, MEMS fabricated passive micro-mixers with cross obstacles, X-type grooves, and X-type obstacles by polydimethylsiloxane (PDMS) micro-mixer are considered, which lead to chaotic advection at low Reynolds number and also enhance fluids mixing. The influence of various Reynolds number to the three micromixers on the mixing efficiency is examined. Generally, chaotic advection can be generated by special geometries or induced by an external force. In addition to the experiment, CFD-ACE(U) Modules Software for simulating analysis on the mixing process is also performed and compared to experiment. Experimental results show that cross obstacles micro-mixer has great mixing efficiency and the mixing index will increase 82% when the Reynolds number is about 50.

## 誌謝

這篇論文能夠完成，首先我要感謝林振德老師在這段期間的指導，老師對於實驗與模擬觀念上適切的引導，幫助我在進行論文研究時能夠有清晰的思路，此外老師也教導我們以較為嚴謹的邏輯來處理論文的每一個環結，這樣的訓練相信對於將來在處理問題時的會有很大的幫助，在此謝謝老師。

感謝口試委員吳志陽教授、陳寒濤教授、陳志臣教授以及楊鏡堂教授對於論文上的指正及建議，尤其感謝陳志堅學長在模擬上的幫助，使得論文能夠順利完成。



我非常珍惜在交大的每一個日子，感謝學長涂文福、陳止善、賴志銘、黃永賢、張志通與潘柏霖對於我的照顧，還有昱宏、本權、自皓在平時的互相打氣，還有學弟懋勳、豐庭你們的幫忙，雖然相處的時間短暫，但沒有你們就沒有這樣一段值得回味的實驗室時光，謝謝大家。

最後感謝家人及好友的支持與鼓勵，讓我能夠無後顧之憂地專心於學業；最後，僅以本論文獻給所有關心我的人。

# 目錄

中文摘要 .....	i
英文摘要 .....	ii
致謝 .....	iii
目錄 .....	iv
表目錄 .....	vi
圖目錄 .....	vii
符號表 .....	xii
<b>第一章 緒論.....</b>	<b>1</b>
1.1 簡介.....	1
1.2 微混合器之相關研究.....	3
1.3 研究目的.....	7
<b>第二章 實驗設計與製程.....</b>	<b>8</b>
2.1 實驗設計.....	9
2.2 光罩底片之繪製及製作.....	9
2.3 母模製作.....	10
2.4 PDMS 翻模與晶片接合.....	11
2.5 實驗設備.....	13
2.6 實驗項目 .....	14
<b>第三章 理論模擬與數值分析.....</b>	<b>16</b>

3.1	物理模式.....	16
3.2	數值方法.....	19
3.3	網格測試.....	20
<b>第四章</b>	<b>結果與討論.....</b>	<b>22</b>
4.1	實驗結果.....	22
4.2	模擬結果.....	24
<b>第五章</b>	<b>結論.....</b>	<b>28</b>
<b>參考文獻</b>	<b>.....</b>	<b>29</b>
<b>表</b>	<b>.....</b>	<b>31</b>
<b>圖</b>	<b>.....</b>	<b>32</b>



# 表目錄

表 3-1 網格測試結果 ..... 31

表 4-1 四種流道在不同雷諾數下與入口跟出口的壓力差之關

係 ..... 31



# 圖目錄

圖 1-1 Vibhu [3]等人設計的聲波混合器.....	32
圖 1-2 (a)為 Lee 等人[4]所提出的利用脈衝流而造成壓力擾動之混合器的架構 (b)經過週期性的壓力擾動後，流體混合情形.....	32
圖 1-3 Oddy [5] 等人設計出的電場非穩態混合器.....	33
圖 1-4 Suzuki 和 Ho[7]所提出的利用磁制動的微混合器.....	33
圖 1-5 Cho 等人[8]利用 EWOD 操控液滴的設計.....	33
圖 1-6 Branebjerg[9]等人利用特殊結構的流道形狀所設計出之微混合器.....	34
圖 1-7 Schwesinger 等人[10]利用特殊管道形狀設計之微混合器.....	34
圖 1-8 Veenstra 等人[11]所設計出的中間段流道截面積縮小之微混合器.....	35
圖 1-9 Liu 等人[12]設計出的蛇形 3-D 結構之微混合器.....	35
圖 1-10 (a)為 Stroock[15]等人設計流道中帶有非直線凹槽的被動式微混合器(b)由螢光染料表現出工作流體流經不同距離對混合情形.....	36
圖 1-11 Johnson 等人[16]設計凹槽流道.....	37

圖 1-12 Park 等人[17]利用 PDMS 為材料，作出一個特殊的幾何 形狀流道.....	37
圖 2-1 Y 型直管之光罩設計全圖及局部放大圖.....	38
圖 2-2 X 型凹槽之光罩設計全圖及局部放大圖.....	39
圖 2-3 X 型阻礙物之光罩設計全圖.....	40
圖 2-4 上下交叉型被動式微混合器之光罩設計全圖及局部放 大圖.....	41
圖 2-5 SU-8 母模製程示意圖.....	42
圖 2-6 自動化光阻塗佈及顯影系統(Tracker).....	43
圖 2-7 光罩對準曝光系統(Mask aligner).....	43
圖 2-8 抽真空設備.....	44
圖 2-9 烘箱.....	44
圖 2-10 反應式離子蝕刻機(Reactive Ion Etching).....	44
圖 2-11 PDMS 翻模製程示意圖.....	45
圖 2-12 Y 型結構 SEM 圖.....	46
圖 2-13 凹型結構 SEM 圖.....	46
圖 2-14 凸型結構 SEM 圖.....	47
圖 2-15 交叉型結構 SEM 圖.....	47
圖 2-16 實驗設備架構示意圖.....	48
圖 2-17 可程式注射幫浦.....	48

圖 2-18 顯微實驗平台與高速攝影機.....	49
圖 3-1 流道幾何形狀示意圖.....	50
圖 3-2 Y 型直管、凹型、凸型之側視圖.....	52
圖 3-3 CFD-RC 求解過程.....	52
圖 4-1 Y 型直管流道， $Re=0.05$ 時流體的流動混合現象.....	53
圖 4-2 Y 型直管流道， $Re=0.1$ 時流體的流動混合現象.....	54
圖 4-3 Y 型直管流道， $Re=1$ 時流體的流動混合現象.....	55
圖 4-4 Y 型直管流道， $Re=10$ 時流體的流動混合現象.....	56
圖 4-5 Y 型直管流道， $Re=50$ 時流體的流動混合現象.....	57
圖 4-6 凹型流道， $Re=0.05$ 時流體的流動混合現象.....	58
圖 4-7 凹型流道， $Re=0.1$ 時流體的流動混合現象.....	59
圖 4-8 凹型流道， $Re=1$ 時流體的流動混合現象.....	60
圖 4-9 凹型流道， $Re=10$ 時流體的流動混合現象.....	61
圖 4-10 凹型流道， $Re=50$ 時流體的流動混合現象.....	62
圖 4-11 凸型流道，不同 $Re$ 時流體的流動現象.....	63
圖 4-12 凸型流道， $Re=10$ 時流體的流動混合現象.....	64
圖 4-13 上下交叉型流道， $Re=0.05$ 時流體的流動混合現象...	65
圖 4-14 上下交叉型流道， $Re=0.1$ 時流體的流動混合現象.....	66
圖 4-15 上下交叉型流道， $Re=1$ 時流體的流動混合現象.....	67
圖 4-16 上下交叉型流道， $Re=10$ 時流體的流動混合現象.....	68

圖 4-17 上下交叉型流道， $Re=50$ 時流體的流動混合現象.....	69
圖 4-18 上下交叉型、凹型、Y 型直管在不同雷諾數下與出口混合指標的關係.....	70
圖 4-19 Y 型流道在 $Re=10$ 下之濃度分佈圖.....	71
圖 4-20 凹型流道在 $Re=10$ 下之濃度分佈圖.....	71
圖 4-21 凸型流道在 $Re=10$ 下之濃度分佈圖.....	72
圖 4-22 上下交叉型流道在 $Re=10$ 下之濃度分佈圖.....	72
圖 4-23 Y 型直管在不同雷諾數下，不同位置與混合指標的關係.....	73
圖 4-24 凹型流道模擬上視圖.....	73
圖 4-25 凹型在不同雷諾數下，不同位置與混合指標的關係...	74
圖 4-26 凸型在不同雷諾數下，不同位置與混合指標的關係...	74
圖 4-27 上下交叉型在不同雷諾數下，不同位置與混合指標的關係.....	75
圖 4-28 $Re=50$ 時，液體經過上下阻礙物時的速度向量示意圖	76
圖 4-29 上下交叉型 $Re=50$ 下游各截面濃度分佈圖.....	77
圖 4-30 雷諾數為 0.05 的條件下，凹型、凸型、上下交叉型、Y 型直管與混合指標的關係.....	81
圖 4-31 雷諾數為 0.1 的條件下，凹型、凸型、上下交叉型、Y 型直管與混合指標的關係.....	81

圖 4-32 雷諾數為 1 的條件下，凹型、凸型、上下交叉型、Y 型直管與混合指標的關係.....	82
圖 4-33 雷諾數為 10 的條件下，凹型、凸型、上下交叉型、Y 型直管與混合指標的關係.....	82
圖 4-34 雷諾數為 50 的條件下，凹型、凸型、上下交叉型、Y 型直管與混合指標的關係.....	83
圖 4-35 四種流道在不同雷諾數與出口截面混合指標之關係...	83
圖 4-36 上下交叉型不同排列組合示意圖(A) 2 循環(B) 4 循環 (C) 8 循環(D)全循環.....	84
圖 4-37 上下交叉型(4 循環)在不同雷諾數下，不同位置與混合指標的關係.....	85
圖 4-38 上下交叉型(8 循環)在不同雷諾數下，不同位置與混合指標的關係.....	85
圖 4-39 上下交叉型(全循環)在不同雷諾數下，不同位置與混合指標的關係.....	86
圖 4-40 上下交叉型不同排列組合下，不同雷諾數與出口混合指標的關係.....	86
圖 4-41 雷諾數 50 時(A) 2 循環(B)全循環之流體流動現象.....	87

## 符號表

D	擴散係數
$D_i$	灰度差之方均根值
g	物體重力
$I$	單位張量
$I_i$	灰度資料點的數值
$I_{p.m.}$	完全混合的灰度值
N	灰度資料點的個數
p	靜態壓力
Re	雷諾數
$S_M$	動量方程式之源項
$S_\phi$	擴散方程式之源項
t	時間
v	速度向量
w	瓦數
$\rho$	密度
$\tau^=$	應力張量
$\psi$	數量



下標

i 資料點

p.m. perfect mix 完全混合



# 第一章 緒論

## 1.1 簡介

在談到微尺度之前，必須先了解什麼是微機電系統(micro-electro-mechanical systems, MEMS)[1]。MEMS 這個名詞是在1979 年鹽湖城(Salt Lake City)由一群約八十位熱心者所組成的微遙控機器人專題討論會(Micro-Tele-Operated Robotics)之中所採用的。微機電系統[2]是一種結合機械、電子、材料、控制、物理、生醫、化學、光學等多重技術整合的研發領域，其特色為兼具微小化、可量產之新製造技術，不僅可以有效協助製造業改善製程，使產品提高品質、性能與可靠度，進而提高附加價值，同時可降低製造成本及能源消耗。



傳統大型的醫療檢測儀器設備所需要的檢體與試劑量較多，花費檢驗時間較長，相對之下所浪費的醫療廢棄物也較多。因此微縮實驗室晶片(Lab on a Chip, LOC)或微全分析系統(Micro-Total Analysis System, μ-TAS)的概念正是利用微機電系統製造技術將實驗設備及分析平台的尺寸大量的縮減，以獲得下列三個優點：

- (1)微裝置用來觀察及分析傳統大尺寸系統無法觀察的現象，如：劇烈化學反應之微細現象、生物 DNA 的化學變化。
- (2)能更有效利用微小尺寸的現象，如熱傳或質量傳遞來凸顯微構件之優點。

(3)由於元件的微小化使得系統不再受空間限制，利用微機電技術可大量製造，提高檢驗效率，縮短檢驗時間，同時也大量節省了檢驗成本。

而在尺寸縮小的過程中，可以發現與體積跟質量有關的效應(body force)，重力、磁力會變的相當小，相較之下，和表面積有關的效應(surface force)表面張力、摩擦力便主宰著微流體流動的現象，且流體在微流道中，連續體的假設可能並不完全適用，也因此Navier-stoke 方程式必須做修正才能成立。這些特殊現象便造就了往後微尺度系統的獨特性。



LOC 除了元件的縮小化外，更重要的是縮短分析和試劑反應的時間及減少樣品的消耗來增加反應效率，還能有效降低人工操作的實驗誤差、提高系統穩定性。在一些生化反應中，如聚合酶連鎖反應(Polymerase Chain Reaction,PCR)或去氧核糖核酸(Deoxyribonucleic Acids,DNA)雜交(Hybridization)等，其生物分子的混合好壞更決定了整個系統效率之優劣。因為不完全的混合會嚴重的影響要完成的反應。因此微混合器就成了一個關鍵的次系統，其被廣泛地應用在分析化學、生物科技、製藥或流場觀測等方面。而一個好的微混合器用簡單的微機電系統技術製造，可快速且均勻地混合極少量的樣品。

## 1.2 微混合器之相關研究

就微流體而言，有效及快速的混合是必須的。從巨觀來看，不同的流體可以很容易的利用紊流(turbulent flow)與分子間擴散(molecular diffusion)效應來達到混合，但在尺寸微小化之後，因流體速度慢，特徵長度小，因此雷諾數普遍小於一百( $Re < 100$ )的情形下，當流體受到阻礙物干擾後會回復原來受干擾前的流場形態，流體的黏滯力將流動產生的擾動減弱。若將互溶的兩種溶液經由注射幫浦注入T或Y型的微流道中，流道中的兩種溶液極可能以層次分明地流動並具有明顯的分界線而不會有混合的現象。因此如何利用特殊的幾何結構去造成擾動以達到增加兩液體的接觸面積，減少擴散的時間，便是當前設計混合器中極為關鍵的課題。談到微混合器，一般可依其驅動的方式分為兩種，分別為主動式(Active)混合器和被動式(Passive)混合器。主動式混合器是指藉著像放置移動式元件的方式，施加某種型態的主動控制或能量於流場中，以產生週期性或非週期性的擾動，增加混合的效果；驅動的方式包括電力、壓力差、超音波和磁力等。2000年，Vibbu等人[3]利用壓電材料設計出一聲波混合區，來混合工作流體，其結構圖如圖1-1所示。此結構為一環狀扇形之聲波振動器(fresnel annular sector actuator，FASA)，利用此聲波制動器於工作流體中產生強大的側向聲波推力在焦平面上，可使流體分子不斷碰撞

移動，以達成混合。2001 年，Lee 等人[4]提出的微混合器，他們利用流場中產生脈衝流，給予不同的時序，造成流場中壓力的擾動，以達到混合的效果，其結構如圖 1-2 所示。2001 年，Oddy 等人[5]在工作流體流動方向兩側給予電場進而產生磁力，利用磁力影響流體的橫向速度以達到混合的效果，其結構圖如圖 1-3 所示。2000 年，Yang 等人[6]在  $6\text{mm} \times 6\text{mm} \times 60\mu\text{m}$  的混合區中，底部被覆一層  $150\mu\text{m}$  厚度的壓電陶瓷材料，產生  $60\text{kHz}$  的方形波，同樣以超音波震動的方式，完成流體的混合。2002 年，Suzuki 和 Ho[7]研究出來的微混合器中，先將導線嵌進底材中並且置於微管道的下方，在導線上施加有時序變化的電流，進而可以改變微管道中的磁場，在微流道中的工作流體為帶有磁性粒子的生醫流體。如圖 1-4 所示，當施加電流時，這些磁性粒子會受到磁場的作用而被吸引或是排斥，藉由磁性粒子的移動，來幫助流場之混合，當混合結束後，這些磁性粒子再藉由外加強力的磁場將之分離出來。2002 年，Cho 等人[8]利用電壓改變液滴的表面張力，進而產生移動、混合與分離的動作，如圖 1-5 所示。

被動式混合器是指驅動流場流動的幫浦除外，僅靠微流道之幾何形狀或尺寸的改變，來縮短分子擴散距離及增加流體間的接觸面積。1996 年，Branejerg 等人[9]利用多階多層版(multi-stage multi-layer lamination)將兩流體反覆的切割及混合，每一階段的分層都使流體每

層厚度減半，用此方法可使液體接觸面積增加，更減少擴散距離，結構如圖 1-6 所示。1996 年，Schwesinger 等人[10]是利用將兩種不同液體相疊加的觀念，其結構如圖 1-7 所示，兩流體不斷的左右上下分流以增加液體間的接觸面積，增加液體間的相互擴散。1999 年，Veenstra 等人[11]流道設計將中間段截面積縮小，其結構如圖 1-8 所示，兩流體流入流道後，流經中間段會因流道變窄，而形成很大一壓力降，流體也會因漸縮而增加分子的擴散作用而達成混合。2000 年，Liu 等人[12]利用一三維 S(serpentine)型流道，使雷諾數在 6 到 70 的流場產生混沌移流(Chaotic Advection)，觀察兩種液體的混合效果，發現混合機制除了擴散之外還有幾何形狀對流體的攪拌，並比較直型管及方形波管的結果，來顯示三維 S 型流道的優勢，其結構如圖 1-9 所示。2000 年，Jo 等人[13]分析利用半導體材料所做出的微結構需要較高的成本，他們因此利用一軟性材料 polydimethylsiloxane (PDMS) 做為結構的材料，而所做出的微混合器有較低的成本，其結構為 3D 彎曲流道，目的為產生一側向速度以增加混合面積。2001 年，Gobby 等人[14]利用電腦模擬出 T 型結構的混合情形，由電腦模擬可看出大部分的 T 型混合器其混合效果不盡理想。2002 年，Stroock 等人[15]在微流道上設計類似螺旋槍膛線一般的交錯式人字型(staggered Herringbone)的凹槽，並與平滑流道及斜線凹槽比較，顯示其混沌移

流對混合效果的加強，其結構如圖 1-10(a)所示。由圖 1-10(b)可知其結構對混合時間的影響。2002 年，Johnson 等人[16]利用雷射在流道前段部分蝕刻出三至四道刻痕，近似 3D 的斜線型凹槽結構增加混合效果，並利用統計分析的方法探討混合成效與參數之間的關係，如圖 1-11 所示。2002 年，Wang 等人[17]在流道中放置圓形阻擋物使得流體產生對流效應增加混合效果，結果顯示不對稱的排列比增加圓形阻礙物的數量更能提升混合效果。2004 年，Park 等人[18]利用 PDMS 為材料，製作出一個特殊的幾何形狀流道，目的是為了使流體產生旋轉的作用，4mm 流道長度達到 70%的混合效果，其結構如圖 1-12 所示。



由文獻可以知道，主動式的微混合器，最主要是利用聲波、超音波、壓力梯度、電場、或是可移動的粒子給予流場一外加的能量或是力，進而促使分子間的擴散速度增加，而被動式的微混合器單純只靠結構的設計與溝槽的設計，其結構的設計有蛇型、T 型、螺旋型，溝槽的設計則有人型與斜線型，這些設計都是為了增加流體間的接觸面積與造成流體側向速度以達成混合。主動式和被動式混合器各有應用的範疇，若比較其優缺點，一般來說主動式混合器能達到較佳的混合效果，但在製作時卻繁複困難，且常有使用後不易清洗的壞處。被動式混合器雖然效果較差，但具有容易製造且操作簡便的優勢。因此，

被動式微混合器還是有其發展性。

### 1.3 研究目的

由文獻回顧來看，這幾年關於混合器的研究主要以微機電製程之設計為主，達到高效率之混合器往往需要多道複雜的製程與高額的成本，因此本實驗的目的在於設計出一種構造簡單，容易製造且能增加混合效率之被動式微流體混合裝置。也由於 PDMS 具有良好的粘著特性，利用兩層疊合的方式製作出想要的流道結構。本研究中設計出三種被動式微流體元件，分別探討凹型、凸型及上下交叉型結構對於增加混合效果能力的優劣程度以及在不同雷諾數(Re)下對於混合效果的影響，再將現象與 CFD-ACE(U)Modules 模擬軟體所得之結果做比較。



## 第二章 實驗設計與製程

本文實驗目的在於觀察並分析不同流道設計造成之混沌現象，其對於兩種互溶液體在不同流道外型內的相互混合流動現象之影響，進而歸納出互相影響混合之主要參數。在此，我們對於混沌現象的概念做一簡單敘述，所謂混沌移流(Chaotic Advection or Lagrangian Chaos)[19], [20]表示在一個簡單規則的流場下產生混沌的粒子軌線；由動態系統理論得知，當一流場為二維暫態或三維(暫態或穩態)，混沌的粒子運動便可發生。當其發生時通常表示液體界面快速的扭曲和拉長，這將可增加流體的接觸面積及減少擴散距離，進而達到增加混合的效果。但這種效應和紊流產生的效應是不同的，這純粹是由於流場本身時間和空間的特性所造成，而非紊流中流體的高應變率(Rates-of-Strain)所造成的。對於部分分子生物而言，紊流產生的剪應力會造成破壞進而影響其基本特性。

除了流體本身的擴散效應(diffusion)提供液體產生混合的機制外，混沌現象在低雷諾數的質量傳遞過程中也同樣佔有重要的地位。在大尺寸下利用混沌移流來達到混合的方法在 Ottino[21]書裡作了詳盡的研究，其基本的概念為改變流道的外型使得流體產生碎裂(splitting)、伸展(stretching)、摺疊(folding)、瓦解(break up)。通常來說，混沌移流可以靠著改變特殊的流道形狀或輸入外力而產生。

## 2.1 實驗設計

基於以上對於混沌移流的基本概念，為了要從實驗中觀察並探討三維流場中因混沌移流造成液體混合之情形，藉由實驗設計，我們將探討互溶兩種液體經由三種不同的設計，在不同的雷諾數下，使其可能產生混沌移流之現象，並藉由操作此裝置的過程中，了解液體在遇到不同幾何形狀流道下產生之效應所造成的流動現象。

本實驗研究中，我們利用微機電技術，製作出被動式微混合器。而此微混合器的製作大致分為兩個過程：光罩與母模的製作，PDMS 翻模與晶片接合。

## 2.2 光罩底片之繪製及製作

本實驗所設計的光罩，由 AutoCAD 軟體繪出的圖檔，再將此圖檔送至台灣港件光罩底片公司，利用高解析度的印表機，將所需要的圖案印製在透明塑膠片上，作為在微影(photolithography)製程中曝光時的光罩，最小線寬為  $20\mu\text{m}$ ，符合本實驗的要求。本實驗光罩設計圖形如圖 2-1 至 2-4 所示。主流道長度為 4cm。圖 2-1 上圖為整個 Y 型直管流道光罩設計圖，左邊為兩入口，右邊為出口。而每個出入口皆放大為直徑 2mm 寬的圓，主要原因是便於日後方便將注射針頭插入作為注水區。圖 2-2 為 X 型凹槽之光罩設計全圖及局部放大圖。凹型混合器是利用一層 Y 型流道疊合另一層為 X 型凹槽而成。圖 2-3

為 X 型阻礙物之光罩設計全圖。凸型混合器則是利用一層 Y 型流道疊合另一層為 X 型阻礙物而成。圖 2-4 為上下交叉型被動式微混合器之光罩設計全圖及局部放大圖。這裡要注意的是，本研究利用兩層 PDMS 的接合以達到所要的結構設計，因此在製作上下交叉型結構時，需考慮到正反面的問題，利用左右顛倒的光罩設計，方可達到兩面接合且上下交叉的結構。

## 2.3 母模製作

本實驗所使用母模其製作過程如圖 2-5 所示，是以半導體製程技術為基礎；選用之晶圓為(4 吋、<100>)，其中 4 吋代表晶圓直徑，而<100>代表結晶面之密勒指標。本研究中，我們選用 SU-8 負光阻塗佈在晶圓上，由於負光阻曝光時，光罩上透明的部分在顯影後會留下來，而被擋住的部分會溶於顯影劑中，因此就光罩設計的圖案來看，母模上的 SU-8 結構會是凸起來的結構。製作母模之步驟說明如下：

1. 依照 RCA-Clean 程序，將晶圓清洗乾淨。
2. 將流道之形狀利用 AutoCAD 繪製成光罩。
3. 放入自動化光阻塗佈及顯影系統(Tracker)內，如圖 2-6，旋塗光阻劑 SU-8 50 ，按照所需要的高度  $15 \mu\text{m}$ 、 $45 \mu\text{m}$  來點選參數。
4. 將塗佈完 SU-8 負光阻之晶圓放入光罩對準曝光系統(Mask

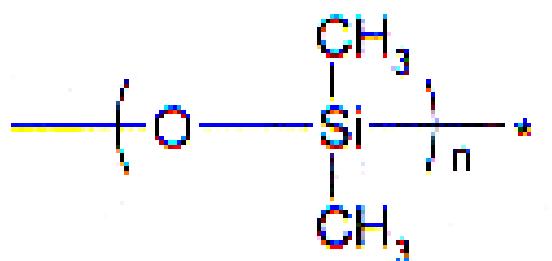
5. 軟烤(soft-bake)
6. 曝光(expose)
7. 曝後烤(post exposure bake)
8. 顯影(develop)，清洗殘留的顯影劑，母模製程完成。

本研究相關 SU-8 母模的製作皆在南區國家奈米元件實驗室完成。

## 2.4 PDMS 翻模與晶片接合

PDMS(polydimethylsiloxane)稱為聚二甲基矽氧烷，是矽氧烷類聚合物的一種，俗稱矽酮樹脂(silicone)，在近年來成為微尺度元件的製作極重要的材料，原因在於製作過程簡單，元件可重複性製作，材質同時具有堅韌、透明、符合光學檢測技術，且非極性，可應用在水溶液及生物樣品的實驗及檢測上。此外，只需在表面做電漿(plasma)氧化處理，便可以和其他表面進行接合。此接合方法對於製程上增加了很大的便利性。

PDMS 的單位結構如下圖所示：



以下我們就 PDMS 翻模製程步驟加以說明：

1. 用丙酮、甲醇及去離子水將待接合之玻璃及 SU-8 母模清洗。
2. 將 PDMS 以 A 劑(單體)：B 劑(固化劑)=10：1 重量比調配好，  
加以攪拌 10 min，使其充分混合。
3. 將調配好之 PDMS 放置於抽真空設備中抽氣 20 min，如圖 2-8，  
使氣泡消失。
4. 將透明且融熔狀態的 PDMS 淋在已清洗完畢之 SU-8 微流道結構  
上，以便做翻模。
5. 將淋上PDMS的微流道結構拿去烘箱  $90^{\circ}\text{C}$ ，1hr。加熱，使其固化，  
如圖 2-9。  

6. 加熱完後，將固化的 PDMS 輕輕從母模上翻起，裁剪出適當的大  
小。
7. 將有微流道結構的 PDMS 與清洗過的玻璃，放入反應式離子蝕刻  
機(Reactive Ion Etching)，反應參數設定：功率為 75W、反應時間為  
15sec，經由氧電漿處理。如圖 2-10 所示。氧漿處理完後，將具  
有微結構之 PDMS 與玻璃做接合。
8. 因本實驗需製造出三維流道，因此我們需要做兩層 PDMS，將  
PDMS 與玻璃作接合的動作，再與另一層 PDMS 做接合對準的動  
作。

9. 接合後的微流道在經過插注射針管、塗 AB 膠固定出入口。

此即為整個 PDMS 微混合器製作流程，如圖 2-11 所示。

上述第 8 點為本實驗的關鍵所在，由於在小尺寸下，因此要將兩片精確對準且順利接合有著較大的困難。首先處理前先將PDMS表面清洗乾淨，而其對準接合的方法是利用氧電漿處裡後的兩片PDMS，以D.I. water作為微調的介質，再透過顯微鏡做對準的依據，以手動的方式將PDMS移動至設定的位置，爾後再小心地將對準好的結構放入烘箱 80°C，90min烤乾以達到接合的效果。若接合的不好，在往後的量測上會遇到爆管的問題，而成為實驗的關鍵所在。

另外，如圖 2-12 至 2-15 所示者為 PDMS 在 SEM 下所拍攝的圖片，可看出 PDMS 在側面上具有良好的垂直度。

## 2.5 實驗設備

本實驗之實驗設備基本架構及實際設備照片如圖 2-16 至圖 2-18 所示。液體經由注射幫浦(KD Scientific, Programmable Syringe Pump)加壓注入微流道中，利用顯微鏡及高速攝影系統(IDT,X-Stream High-Speed Cameras, XS-4)，將影像以圖檔的方式擷取並藉由 USB 2.0(480Mb/sec)光纖輸出且儲存於電腦硬碟中，爾後經由軟體(MyImgProg)找出圖檔中所反映的灰度(intensity)藉此作為量化的依據。

本實驗定義混合指標為：

$$\text{混合指標(Mixing index)} = 1 - \frac{D_i}{I_{p.m.}}$$

其中  $D_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_i - I_{p.m.})^2}$

取其流道區域的N個資料點， $I_i$ 為第i個像數(pixel)的灰度，而 $I_{p.m.}$ (perfect mix)則為完全混合的灰度，N為整個視窗的像數。當完全混合時，整個視窗的I皆為 $I_{p.m.}$ ，因此 $D_i$ 為零，再經由混合係數(Mixing index)的定義可得知，混合指標等於 1。同理，當完全不混合時，混合指標為 0。利用此定義方式可判斷出具有深淺顏色變化的混合效果。實驗中所使用的可程式注射幫浦(syringe pump)，為雙管注射幫浦，其體積流率的操作範圍介於  $0.5 \mu\text{l}/\text{min}$  到  $500 \mu\text{l}/\text{min}$  之間，搭配容量 1ml、5ml 之針筒，依實驗中所需之流量作為選用規格之標準。

擷取影像之顯微鏡與高速攝影機，其解析度為  $512 \times 512$ ，可依影像擷取和操作條件(畫面大小、曝光時間)來做調整，並內建 4GB 記憶體以供存取。

## 2.6 實驗項目

本實驗之目的在於藉由觀測及分析液體在不同設計下，不同雷諾數 (Re)下的為流道內混合之現象。不同種類液體之表面張力與密度不同，造成微流道流動現象的相異。因此，我們選用最容易取得且性

質相近的水與墨水當作工作流體。為了清楚地了解雷諾數(Re)與流動混合現象之關係，設定不同的雷諾數加以探討，特徵長度則選用等效水力直徑(Hydraulic diameter)，並以體積流率除以入口流道之截面積計算入口之速度。以主流道上不同的雷諾數作間隔，在入口處及下游1cm、2cm、3cm、及出口處拍攝靜態照片以作為濃度分析的判定標準。



### 第三章 理論模擬與數值分析

本研究中，混合器流道的設計上，選用典型的Y型流道為基礎的流道外型。Y型混合器為簡單的Y字流道，兩側為入口通道，兩入口夾角為 $60^{\circ}$ 。微流道為寬 $750\mu\text{m}$ ，高 $45\mu\text{m}$ 的矩形通道，模擬長度為 $1.8\text{cm}$ 。

本研究是利用改變流道形狀來增加渾沌移流的產生以增加混合效率。作法是在主流道上加入X型的溝槽及阻礙物和上下交叉的X型阻礙物，當流體進入主流道中時會因為結構的變化而產生流體接觸面的分隔與扭曲，進而增加流體間的接觸面積，提供微流道中液體混合的作用。流道設計上分為三種結構：凹型混合器、凸型混合器及上下交叉型混合器。圖3-1為凹型、凸型、上下交叉型幾何形狀示意圖；凹型與凸型混合器為Y型流道疊合另一層高或深 $15\mu\text{m}$ 的X型溝槽與阻礙物。凹型內的溝槽、凸型及上下交叉型的阻礙物皆為 $100\mu\text{m}$ 寬，與通道左右距離為 $25\mu\text{m}$ ，且間距為 $40\mu\text{m}$ 。上下交叉型則為兩層 $45\mu\text{m}$ 的高度疊合而成，以4個X為一組週期重複而成。圖3-2為Y型、凹型、凸型之側視圖。

#### 3.1 物理模式

數值模擬微探討液體的混合，為了運算的簡化，有以下的假設：

1. 流體為牛頓流體,
2. 流體為不可壓縮流體,
3. 忽略重力、磁力與溫度

場的影響, 4. 流體性質如密度、擴散係數為定值, 5. 兩流體進行混合只有濃度變化, 無化學反應, 6. 管壁與流體之間無滑動現象存在。

依據以上的假設, 微型混合器內之統御方程式包含質量守恆方程式(Continuity Equation), 動量守恆方程式(Momentum Equation)以及物種擴散方程式(Diffusion Equation)。

### 1. 連續方程式(Continuity Equation)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (3-1)$$

### 2. 動量方程式(Momentum Equation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla \cdot p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + S_M \quad (3-2)$$

### 3. 擴散方程式(Diffusion Equation)

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \phi) = \nabla \cdot (D \nabla \phi) + S_\phi \quad (3-3)$$

其中

$\rho$ : 密度,  $t$ : 時間,  $v$ : 速度向量,  $g$ : 物體重力,  $p$ : 靜態壓力,  $S_M$  、 $S_\phi$ : 源項(Source Term),  $\bar{\tau}$ : 應力張量;  $\bar{\tau} = \mu[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I]$ ,  $I$ : 單位張量(Unit Tensor),  $\phi$ : 數量(User Scalar),  $D$ : 擴散係數。

本研究中, 我們考慮流場為穩態, 則統御方程式可改為:

### 1. 連續方程式(Continuity Equation)

$$\nabla \cdot (\vec{v}) = 0 \quad (3-4)$$

### 2. 動量方程式(Momentum Equation)

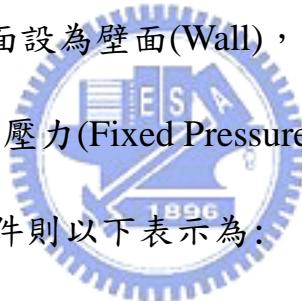
$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla \cdot p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \bar{g} \quad (3-5)$$

### 3. 擴散方程式(Diffusion Equation)

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} \phi) = \nabla \cdot (D \nabla \phi) \quad (3-6)$$

邊界條件如下：

在流道入口垂直方向兩端設定進口流速，分別為高度  $45 \mu\text{m}$  的 Y 型、凹型、凸型流道：0.00025、0.0005、0.005、0.05、0.25 m/s 及高度為  $90 \mu\text{m}$  的上下交叉型流道進口流速為：0.0001320825、0.000264165、0.00264165、0.0264165、0.1320825 m/s，x 方向端面設定為出口，其餘表面設為壁面(Wall)，並假設流體在壁面的速度為 0。出口端設定為固定壓力(Fixed Pressure)，其值與大氣壓力相同。  
 $\phi$  (Scalar)模組的邊界條件則以下表示為：



$$a(D \frac{\partial \phi}{\partial n})_B + b\phi_B = c$$

在此設定  $a=0, b=1, c=0$  及  $a=0, b=1, c=1$  為兩入口設定參數，代表 Y 型流道的兩側入口，一側注入水，另一側為墨水，在中心位置會合後往 X 方向流動。

模擬結果判定：

流體進入流道之後，經過不同結構的設計，產生截面液體濃度上的改變。以主流道起點為開始，在不同位置截面上取出水的濃度分佈作為量化的標準，並定義出混合指標(Mixing index)：

$$\text{混合指標(Mixing index)} = 1 - \frac{D_i}{I_{p.m.}} \quad (3.4)$$

其中  $D_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_i - I_{p.m.})^2}$  (3.5)

$N$ 代表截面上資料點的數目， $I_i$ 表示資料點上的濃度，由於兩側分別以 0 跟 1 的濃度流入液體，因此設定  $I_{p.m.}$ (perfect mix)為 0.5 表示達到完全混合的狀態。利用公式(3.4)轉換，當混合指標為 0%時，表示沒有混合效果；當混合指標為 100%，則代表完全混合。

### 3.2 數值方法

數值模擬的計算乃藉由商用軟體CFDRC ( Version 2003 , CFD Research Corporation , Huntsville , AL ) 的CFD-ACE+™模組，以有限體積法進行三維的微流道混合數值模擬；此軟體專為模擬微流體流動、熱傳等現象所設計，計算過程如 3-3 圖所示，操作步驟如下：

- 軟體前處理器 CFD-GEOM：以內部之繪圖軟體繪製出微流體裝置之形狀及構造，在此選用結構性網格(Structured grid)，由於網格數(cell)大小直接影響到模擬的正確性及運算時間，為了減少計算時間及電腦硬體本身對於運算網格數數目的限制下，因此控制混合器網格數目數量約在 860000~930000 個。  
模擬流道長度為 1.8cm。接著定義邊界性質，如出入口、壁面等，完成後匯出檔案給 CFD-ACE-GUI 處理器讀取。

2. CFD-ACE-GUI 處理器：給定流體性質如密度、黏滯係數，選用水為模擬之流體。邊界條件我們給定為入口垂直面不同的流速，此入口流速為體積流率除以截面積所得之平均速度，擴散係數設定為  $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ，收斂標準為  $10^{-5}$ ，進行穩態(Steady-State)之運算，最後再將初始條件、疊代次數及其他參數設定完成後即開始進行模擬。

3. CFD-VIEW 後處理器：將模擬結果濃度分佈、壓力與速度場加以呈現。在求解壓力場與速度場時，則利用 SIMPLEC 法。

### 3.3 網格測試

網格的密度影響模擬結果的正確性，因此挑選適當的網格數目相當重要。本數值模擬以 Y 型直管為例，在雷諾數為 0.05 時，討論網格疏密與結果的影響。分別測試 80x1800、86x1900、90x2000 三種，如下表所示：

	主流道平面 格點數	總網 格數	格點間距 ( $\mu\text{m}$ )
網格測試 A	80x1800	724425	$\Delta x=9.49 \Delta y=9.87 \Delta z=9$
網格測試 B	86x1900	824040	$\Delta x=8.82 \Delta y=9.35 \Delta z=9$
網格測試 C	90x2000	908600	$\Delta x=8.42 \Delta y=8.88 \Delta z=9$

測試結果如表 3-1 所示，在網格測試 C 時，Mixing index 趨於平緩。

因此以此疏密程度來做其他流道的標準。

由於軟體的限制，因此在模擬混合器的入口處部分，我們省略入口長度所造成的入口效應。考慮拉長入口長度拉長為  $480 \mu\text{m}$ ，雷諾數為 50 的上下交叉型混合器，其出口混合指標值與未考慮入口效應相比相差 0.44%，顯示入口效應並未對於本模擬結果造成影響。



## 第四章 結果與討論

本研究分別就微流體混合裝置的混合結果做兩部分的分析，第一個部份針對實驗的結果，探討在相同雷諾數下，微流體經過不同的結構設計下的微流道，產生混沌效應對於混合的影響。第二部分則利用透過 CFD-RC 計算軟體，能了解微流體在微流道中的流動現象，進而了解增加混合的因素，再與實驗結果相互討論。

### 4.1 實驗結果

首先，我們固定相同深度與寬度之 Y 型直管、凹型以及凸型三種不同流道結構的微流體混合裝置，入口流道的寬度與深度分別為  $750\mu\text{m}$ 、 $45\mu\text{m}$ 。流體在 Y 型直管的微流道中以層次分明地流動，圖 4-1 至圖 4-5 為  $\text{Re}=0.05, 0.1, 1, 10$  以及 50 下五個觀測區所拍攝下的靜態照片，由圖中我們可以發現當雷諾數降低時，表示流體速度減小，墨水與水的交界面慢慢產生混合，這是由於在低雷諾數下，流體分子間擴散時間增加，利用分子間擴散而提升混合效果。

接著探討在 Y 型直管內加入高度相同的凹型溝槽以及凸型阻礙物對於混合的影響。流體在通過凹槽時，由圖 4-6 可以看到墨水與水的交界面產生波浪狀的接觸，這顯示了當流體進入並通過凹槽時，X 型的溝槽設計會產生側向的速度，進而增加混合的效果。而從圖 4-6 到圖 4-10 則顯示了在不同雷諾數下，流體經過凹型混合器的流動現

象。由圖上可知，凹型混合器在低雷諾數具有最好的混合效果，但整體來說，凹槽所產生的側向速度對於增加混合效果有限。

流體在通過凸型混合器時，產生如圖 4-11 的特殊流動現象，圖中黑色的墨水會流入 X 型阻礙物的上方，並隨著雷諾數的增加而拉長此現象發生的距離。推測原因為：流體隨著行徑的距離增加，所受的阻力也隨之增加，注射幫浦所給予的驅動力無法克服持續增加的阻力，因此產生流體的扭曲現象。而由圖 4-12 為  $Re=10$  時五個觀測點所拍攝的流體流動現象，我們可以看到從(2)圖之後發現，黑色部分明顯的產生顏色變淡的現象，在經過多次的實驗嘗試，如增加兩層接合的效果及精確地對準兩層結構，此現象仍存在。因此在實驗部份將不予以討論凸型結構其對於混合效果的影響。

被動式微混合裝置其混合機制，最重要在於增加工作流體的接觸面積。因此設計在流道中放置上下交叉的阻礙物，利用流道本身的結構使得流場不斷分流、會流、不斷的增加接觸面積，而達到混合的效果。最後討論具有上下兩層交叉的結構阻礙物製作出的上下交叉型混合器，在上下交叉型部分可由圖 4-13 至 4-17 所示，上下交叉型混合裝置對於液體在相同雷諾數時相對於 Y 型直管與凹型有明顯的改善，但在雷諾數為 0.1 時墨水分子向水擴散的效果卻沒有比兩側的雷諾數為 0.05 與 1 時來的好，而在雷諾數為 50 時將可以達到 82% 的混

合指標值。推論在低雷諾數時，流體的擴散效應產生幫助混合的機制，而當雷諾數增加時，流體經過上下交叉型結構導致混沌現象產生來增加混合。

若以相同雷諾數來討論 Y 型直管、凹型及上下交叉型混合裝置的混合效果，由圖 4-18 所示，無論雷諾數由 0.05 變化到 50 都明顯表示出上下交叉型所造成的混沌移流現象促使兩液體混合的效果皆比 Y 型直管或是凹型高出許多。

## 4.2 模擬結果

模擬的結果由 CFD-VIEW 後處理器讀出，由主流道起點截面、中間段截面以及出口截面讀出液體濃度分布圖。圖 4-19 表示 Y 型直管流道在  $Re=10$  下之濃度分佈圖；圖 4-20 表示凹型流道在  $Re=10$  下之濃度分佈圖；圖 4-21 表示凸型流道在  $Re=10$  下之濃度分佈圖；圖 4-22 表示上下交叉型流道在  $Re=10$  下之濃度分佈圖。

由圖 4-19 數值模擬結果顯示，Y 型直管的混合效果僅靠液體濃度差的擴散現象而成，並沒有其他設計對流體造成擾動來增加混合。圖 4-23 為 Y 型直管在不同雷諾數下，不同位置與混合指標的關係。我們可以看出隨著液體行徑距離的增加，混合指標也隨之慢慢增加；圖中也顯示了隨著液體雷諾數的降低，混合效果增加，這與實驗的趨勢是相同的。

圖 4-24 為凹型流道模擬上視圖，液體在經過凹槽時會給予側向的速度來增加混合的效果，因此從模擬圖中，我們也同樣發現液體接觸面的波浪型變化。由圖 4-25 數值模擬結果顯示，當雷諾數為 0.05 時，混合效果最佳，此與實驗相同；但其餘雷諾數則有不同的優劣程度區分。

凸型流道內的 X 型阻礙物提供了液體不同的阻力，液體在通過阻礙物時會產生擠壓效果，增加液體間接觸面積以提升混合效率。由圖 4-26 數值模擬結果顯示，在雷諾數增加的情形下，其混合效果卻是越差。

接下來我們討論上下交叉型設計，由圖 4-27 數值模擬結果顯示，雷諾數為 50 時，混合效果最佳，顯示當流速較大時，液體進入管中會在較短的時間內接觸，提供流體間有較短的擴散距離，因此有著較佳的混合效果，這與實驗得到的趨勢是相同的。而在其餘雷諾數下，也具有不錯的混合效果。由圖 4-28 所示，我們可以發現液體在經過上下交叉的阻礙物時，速度向量產生扭曲的現象。由圖 4-29 為上下交叉型  $Re=50$  下游各截面濃度分佈圖所示，(1)圖代表液體由藍色與粉紅色經過 Y 型的入口相遇而形成綠色的接觸面。經由(2)(3)圖可以發現液體在經過對稱的上下交叉阻礙物時，產生伸展(stretching)的作用。在經過不對稱的交叉結構後，由圖(4)(5)顯示液

體更產生翻滾以及摺疊(folding)的作用。藉由不同斷面的濃度分布，了解液體在經過上下交叉的阻礙物下，產生伸展(stretching)以及摺疊(folding)的作用，產生了混沌移流現象，進而達到最佳的混合效果。

圖 4-30、4-31、4-32、4-33 及 4-34 分別代表雷諾數為 0.05、0.1、1、10 及 50 的條件下，凹型、凸型、上下交叉型、Y 型直管與混合指標的關係。由圖中我們可以發現混合效果為上下交叉型優於凹型優於凸型優於 Y 型直管。若不考慮凸型的實驗結果，此與實驗得到的趨勢是相同的。圖 4-35 整理四種流道在不同雷諾數下與出口截面混合指標之關係。表 4-1 則整理四種流道在不同雷諾數下與入口跟出口的壓力差之關係。



最後，我們將探討在不同雷諾數下，不同排列組合的阻礙物而成的上下交叉型混合器對於混合效果的影響。上下交叉型混合器為上下疊合而成的 X 型結構，圖 4-36 顯示上層的結構在不同排列組合下的示意圖，分別為 2 循環、4 循環、8 循環和全循環。圖 4-37 至圖 4-39 表示 4 循環、8 循環和全循環在不同雷諾數下，不同位置與混合指標的關係。由圖 4-40 的數值模擬結果顯示，全循環此排列組合具有最佳的混合效果，其優劣順序為全循環優於 8 循環優於 4 循環優於 2 循環。在雷諾數為 0.05 及 0.1 時，不同排列組合下的混合指標差距不大；而當雷諾數為 1 以上時，不同排列組合下的混合指標差距增大。

圖 4-41 為雷諾數 50 時(A)2 循環(B)全循環之流體流動現象，我們可以看到(B)圖中顯示右側流體在經過全循環的微結構之後，偏移至主流道的中央，造成較大的擾動現象進而增加流體接觸面積而達到混合。



## 第五章 結論

本論文利用微機電系統的製造技術，設計並製作出一製程簡單的 Y 型結構之微混合裝置，對此混合裝置，單純靠著改變特殊的流道形狀，使其能在流場中產生混沌移流作用將液體介面快速地扭曲和拉長，進而加速混合。文中探討四種的流道形狀，Y 型直管、凹型、凸型及上下交叉型對於水和墨水混合效果的影響。實驗結果顯示，Y 型直管隨著雷諾數降低，分子間擴散時間增加，混合效果提升。流體進入凹型時，X 型的溝槽設計會產生側向的速度進而增加混合的效果，但整體來說，提升效果有限。凸型混合器則由於幾何結構產生的阻力，使得流體產生特殊的流動現象。效果最佳的上下交叉型混合器，在雷諾數為 0.1 時墨水分子向水擴散的效果沒有比兩側的雷諾數為 0.05 與 1 時來的好，而在雷諾數為 50 時將可以達到 82% 的混合指標值。且無論雷諾數由 0.05 變化到 50 都明顯表示出上下交叉型所造成的混沌移流現象促使兩液體混合的效果皆比 Y 型直管或是凹型高出許多。

然而透過 CFD-RC 計算軟體，提供了微流體在微管道中的流動現象。模擬結果顯示全循環排列組合下的上下交叉型混合器具有更好的混合效果；模擬的趨勢與實驗得到的結果大部分是相同的。但是模擬的各項條件為理想狀態，而實際的混合效果仍須從實驗中驗證。

## 參考文獻

- [1] 李世鴻, *微機電系統工程*,五南圖書出版公司, 2003.
- [2] T. R. Hsu, MEMS and Microsystems, design and manufacture McGraw-Hill , 2002.
- [3] V.Y.Vibhu , E. Zang, and K.Sok, “Novel acoustic- wave micromixer,” Proc. MEMS’00, 13th IEEE Int. Workshop Micro Electromechanical System (Miyazaci, Japan) , pp.668–673, 2000.
- [4] Y.K Lee, J. Deval, P. Tabeling, and C.M. Ho, “Chaotic mixing in electrokinetically and pressure driven micro flows,” Proc. MEMS’01 14<sup>th</sup> IEEE Int.Workshop Micro Electromecanical System (Interlaken, Switzerland), pp.483-486, 2001.
- [5] M.H. Oddy, J.G. Santiago, and J.C. Mikkelsen, “Electrokinetic instability micromixing,” Analytical Chemistry, Vol. 73, No. 24, pp.5822-5832, 2001.
- [6] Z. Yang, H. Goto, M. Matsumoto, and R. Maeda, “Ultrasonic micromixer for microfluidic systems,” Sensors Actuators A Vol.93, pp.266-272, 2001.
- [7] H. Suzuki, and C.M. Ho, “A magnetic force driven chaotic micro-mixer,” Proceedings of the IEEE 15<sup>th</sup> Annual Workshop of MEMS, pp.40-43, 2002.
- [8] S. K. Cho, S.K. Fan, H. Moon, and C.J. Kim, “Toward digital microfluidic circuits: creating, transporting, cutting and merging liquid droplets by electrowetting-based actuation”, IEEE Conf. Micro Electro Mechanical Systems (MEMS ’02), Las Vegas, NV, pp.32-52, 2002.
- [9] J. Branebjerg, P. Ghatelain, J.P. Krog, and C.R. Nielsen, “Fast mixing by lamination,” Proceedings of IEEE MEMS Symposium, pp. 441-446, 1996.
- [10] N. Schxesinger, T. Frank, and H. Wurmus, “A modular microfluid system with an integrated micromixer,” J. Micromech. Microeng., Vol.6, pp. 99-102, 1996.
- [11] T.T. Veenstra, T.S.J. Lammerink, M.C. Elwenspoek and A. van den Berg, “Characterization method for a new diffusion mixer applicable in micro flow injection analysis systems,” J. Micromech. Microeng. , Vol.9, pp.199-202, 1999.
- [12] R.H. Liu, M.A. Stremler, K.V. Sharp, M.G. Olsen, J.G. Santiago, R. J.

- Adrian, H. Aref, and D.J. Beebe, “Passive Mixing in a three-dimensional serpentine microchannel,” Journal of Microelectromech. Syst., Vol.9, No.2, pp.190-197, 2000.
- [13] B.H. Jo, L.M.V. Lerberghe, K.M. Motsegood, and D.J. Beebe, “Three-dimensional micro-Channel fabrication in polydimethylsiloxane (PDMS) elastomer,” Journal of Microelectromech. Syst., Vol.9, pp.76-81, 2000.
- [14] D. Gobby, P. Angeli and A. Gavrilidis, “Mixing characteristics of T-type microfluidic mixers,” J. Micromech. Microeng., Vol.11, pp. 126-132, 2001.
- [15] A.D. Stroock, S.K.W. Dertinger, A. Ajdari, I. Mezic, H.A. Stone, and G.M. Whitesides, “Chaotic mixer for microchannels,” Science, Vol. 295 , pp.647-651, 2002.
- [16] T.J. Johnson, David Ross, and L.E. Locascio “Rapid microfluidic mixing” ANAL. Chem., Vol.74, pp.45-51, 2002.
- [17] H. Wang, P. Iovenitti, E. Harvey, and S. Masood “Optimizing layout of obstacles for enhanced mixing microchannels”,Smart Mater. Struct., Vol.11, pp.662-667, 2002.
- [18] S.J. Park, J.K. Kim, J.Park, S.Chung, C.Chung, and J.K.Chang “Rapid three-dimensional passive rotation micromixer using the breakup process” J.Micromech.Microeng., Vol.14, pp.6-14, 2004.
- [19] H.Aref, “Stirring by chaotic advection”, J.Fluid Mech., vol.143, pp.1-21, 1984.
- [20] P. Dutta, and R.Chevray, “Enhancement of mixing by chaotic advection with Diffusion”Experiment Thermal and Fluid Science, Vol.11, pp.1-12, 1995.
- [21] J.M. Ottino , The kinematics of mixing : stretching,chaos, and transport, Cambridge, New York :Cambridge University Press, 1989.

表 3-1 網格測試結果

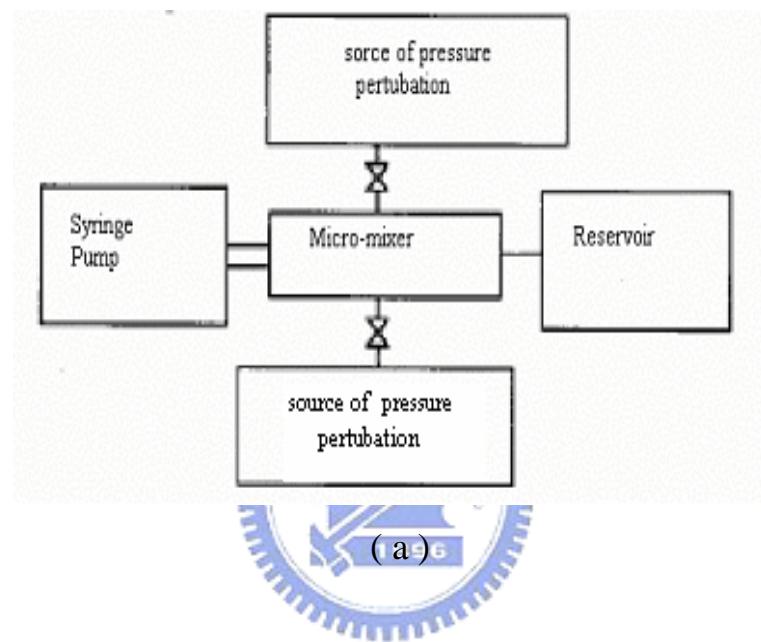
混合指標(Mixing index)			
	x=0. 064952 cm	x=0. 95095 cm	x=1. 842 cm
網格測試 A	10.49%	36.16%	53.79%
網格測試 B	10.33%	36.09%	53.71%
網格測試 C	10.23%	36.04%	53.68%

表 4-1 四種流道在不同雷諾數下與入口跟出口的壓力差之關係

$\Delta P$ (N/m <sup>2</sup> )					
	Re=0. 05	Re=0. 1	Re=1	Re=10	Re=50
Y型 直管	44. 5	89	890. 5	8918. 6	44958. 6
凹型	36. 5	73. 1	731. 8	7419. 9	38889. 1
凸型	72. 5	145. 1	1452. 9	14777. 6	78714. 9
上下 交叉型	18. 9	38. 2	383. 7	4000. 7	23847. 6



圖 1-1 Vibhu 等人[3]設計的聲波混合器



(b)

圖 1-2 (a)為 Lee 等人[4]所提出的利用脈衝流而造成壓力擾動之混合器的架構 (b)經過週期性的壓力擾動後，流體混合情形

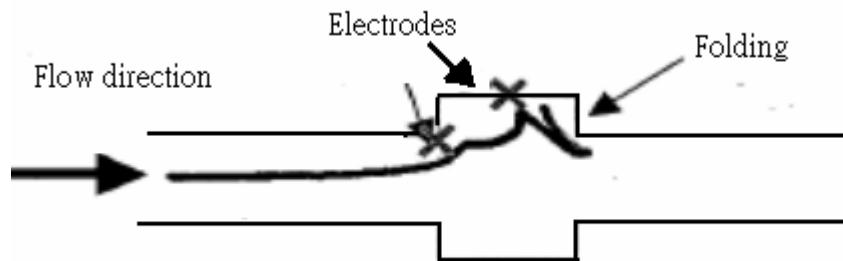


圖 1-3 為 Oddy [5] 等人設計出的電場非穩態混合器

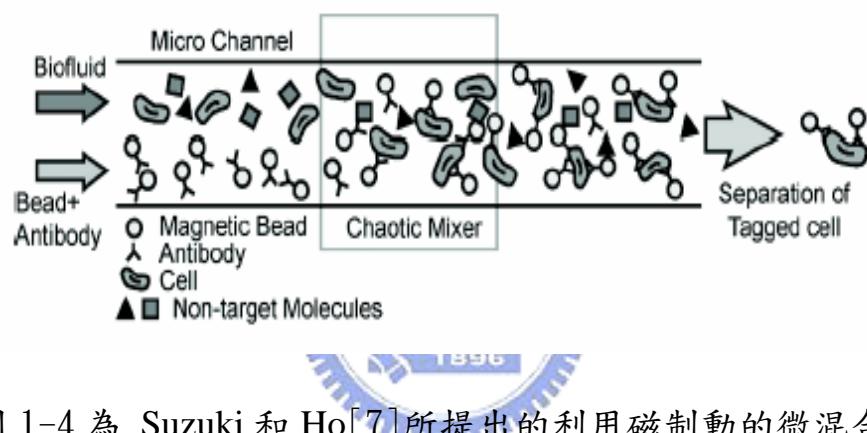


圖 1-4 為 Suzuki 和 Ho[7] 所提出的利用磁制動的微混合器

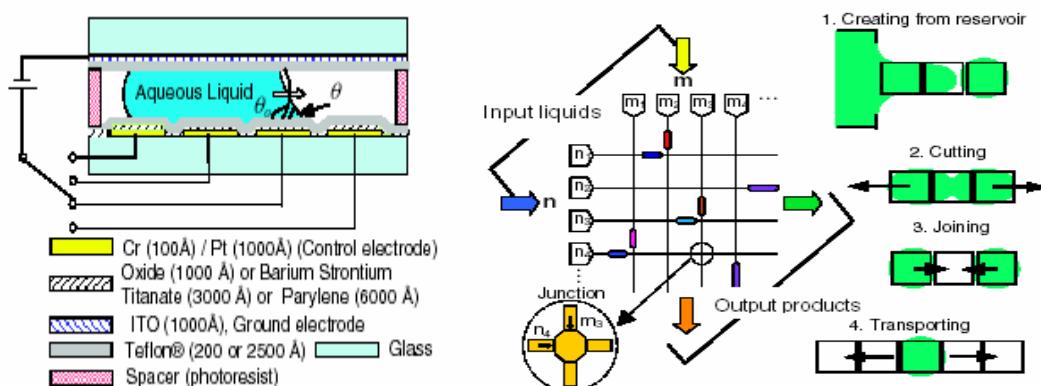


圖 1-5 Cho 等人[8]利用 EWOD 操控液滴的設計

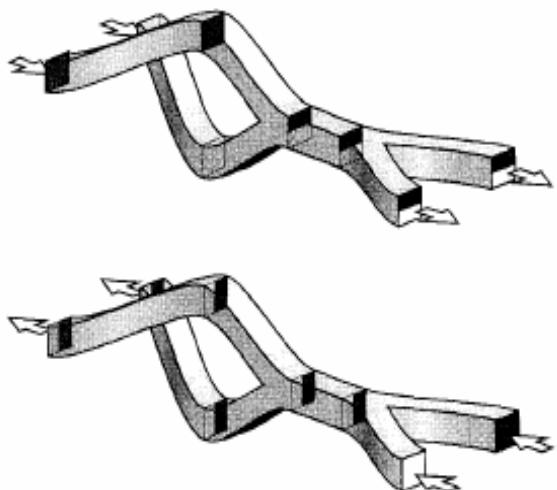


圖 1-6 Branebjerg[9]等人利用特殊結構的  
流道形狀所設計出之微混合器

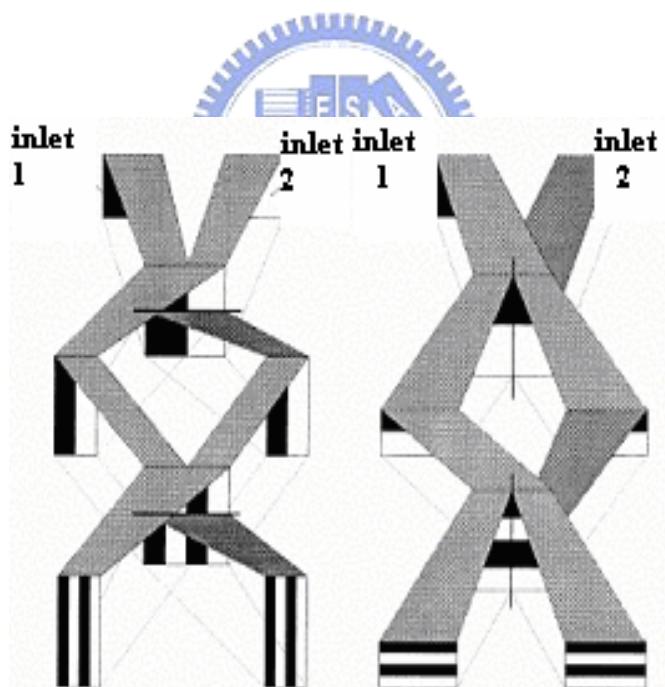


圖 1-7 Schwesinger 等人[10]利用特殊管道形狀設計之微混合器

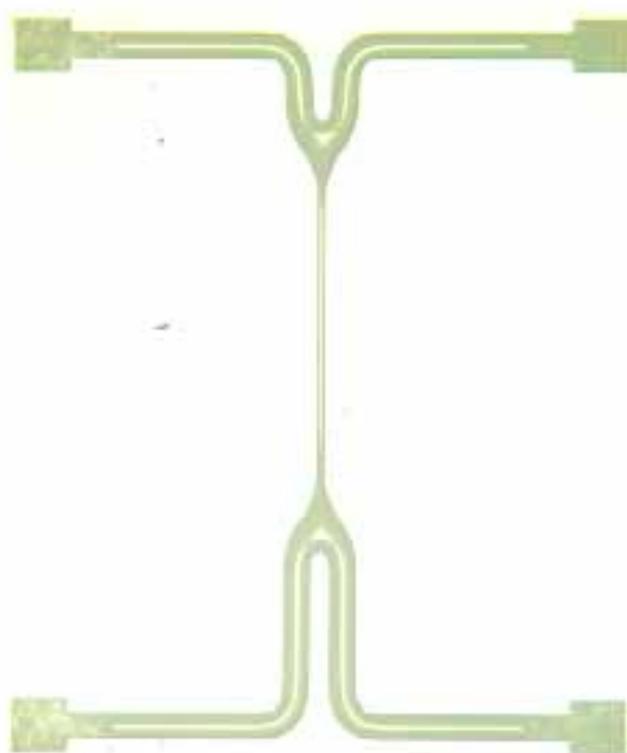


圖 1-8 Veenstra 等人[11]所設計出的  
中間段流道截面積縮小之微混合器

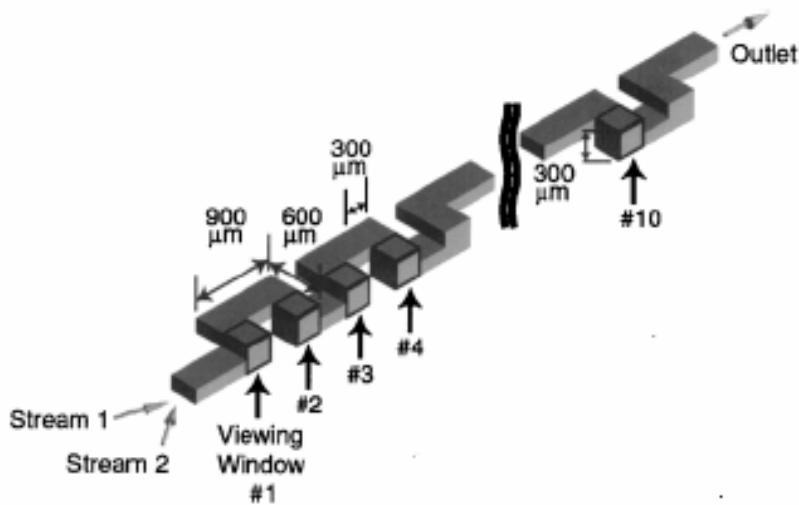
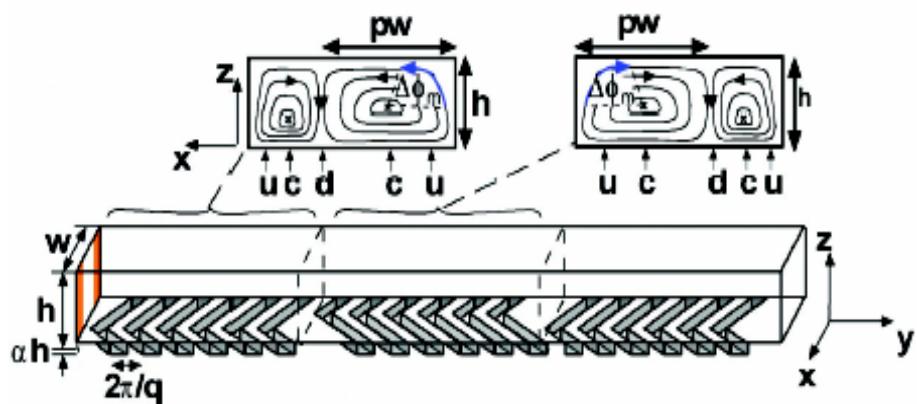
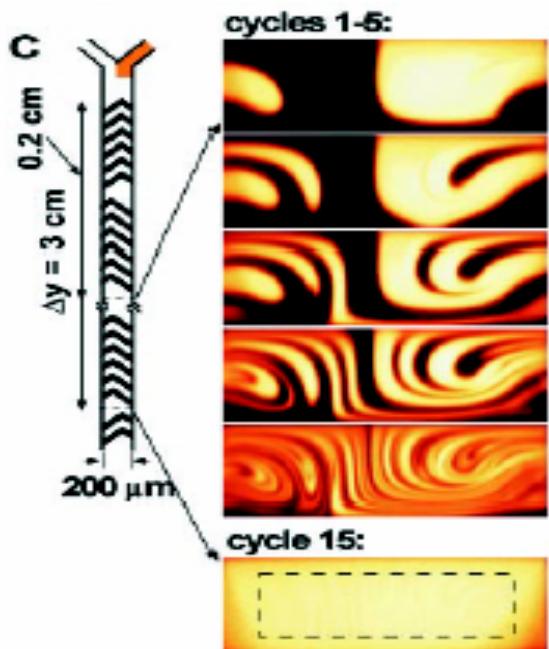


圖 1-9 Liu 等人[12]設計出的蛇形 3-D 結構之微混合器



( a )



( b )

圖 1-10 (a)為 Stroock 等人[15]設計流道中帶有非直線凹槽的被動式微混合器 (b)由螢光染料表現出工作流體流經不同距離對混合情形

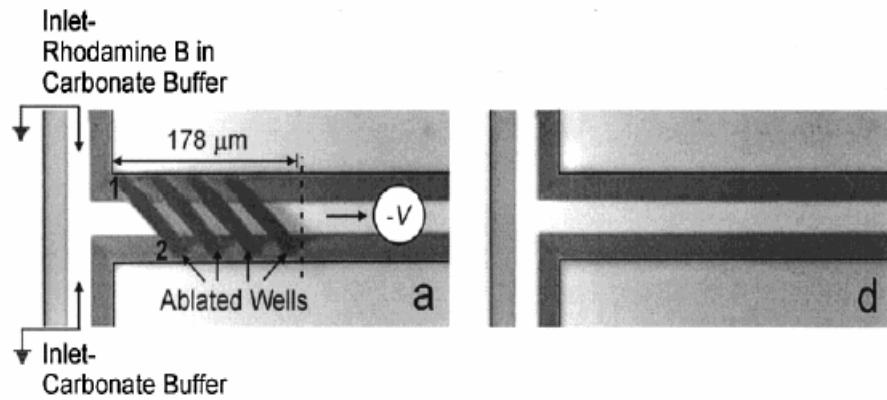


圖 1-11 Johnson 等人[16]設計凹槽流道

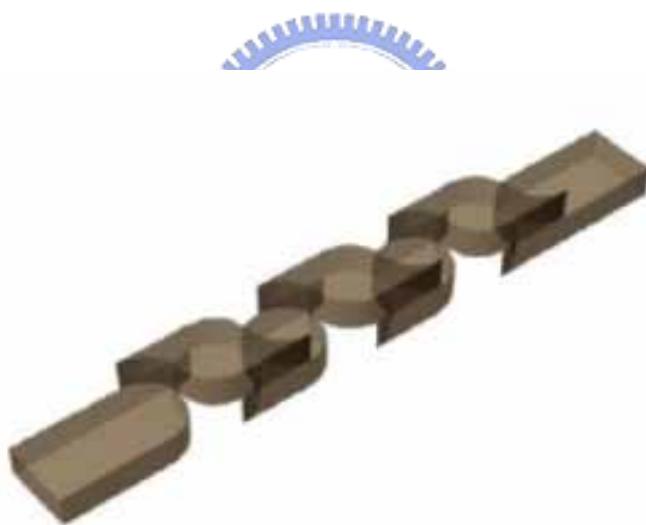


圖 1-12 Park 等人[17]利用 PDMS 為材料，  
作出一個特殊的幾何形狀流道

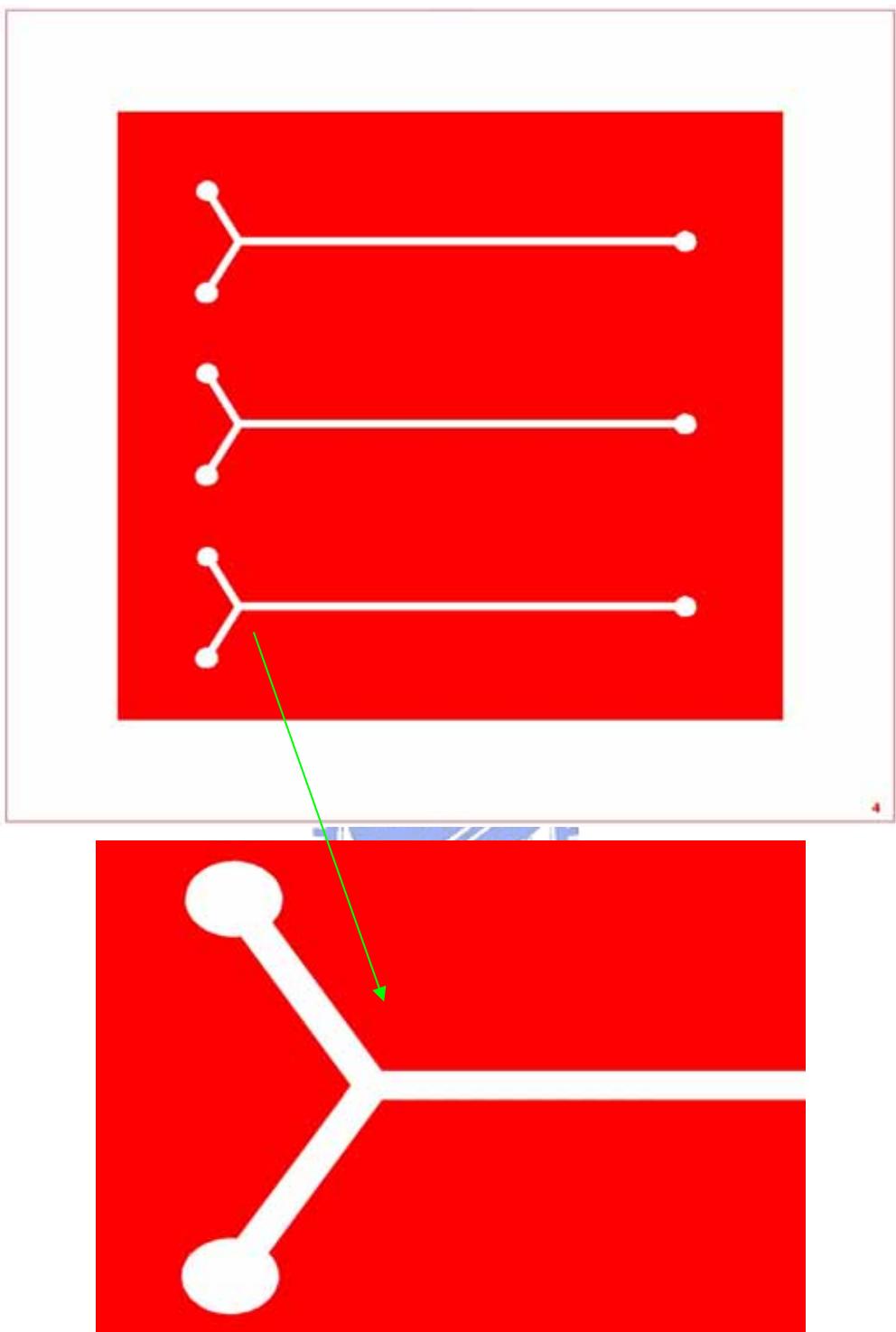


圖 2-1 Y 型直管之光罩設計全圖及局部放大圖

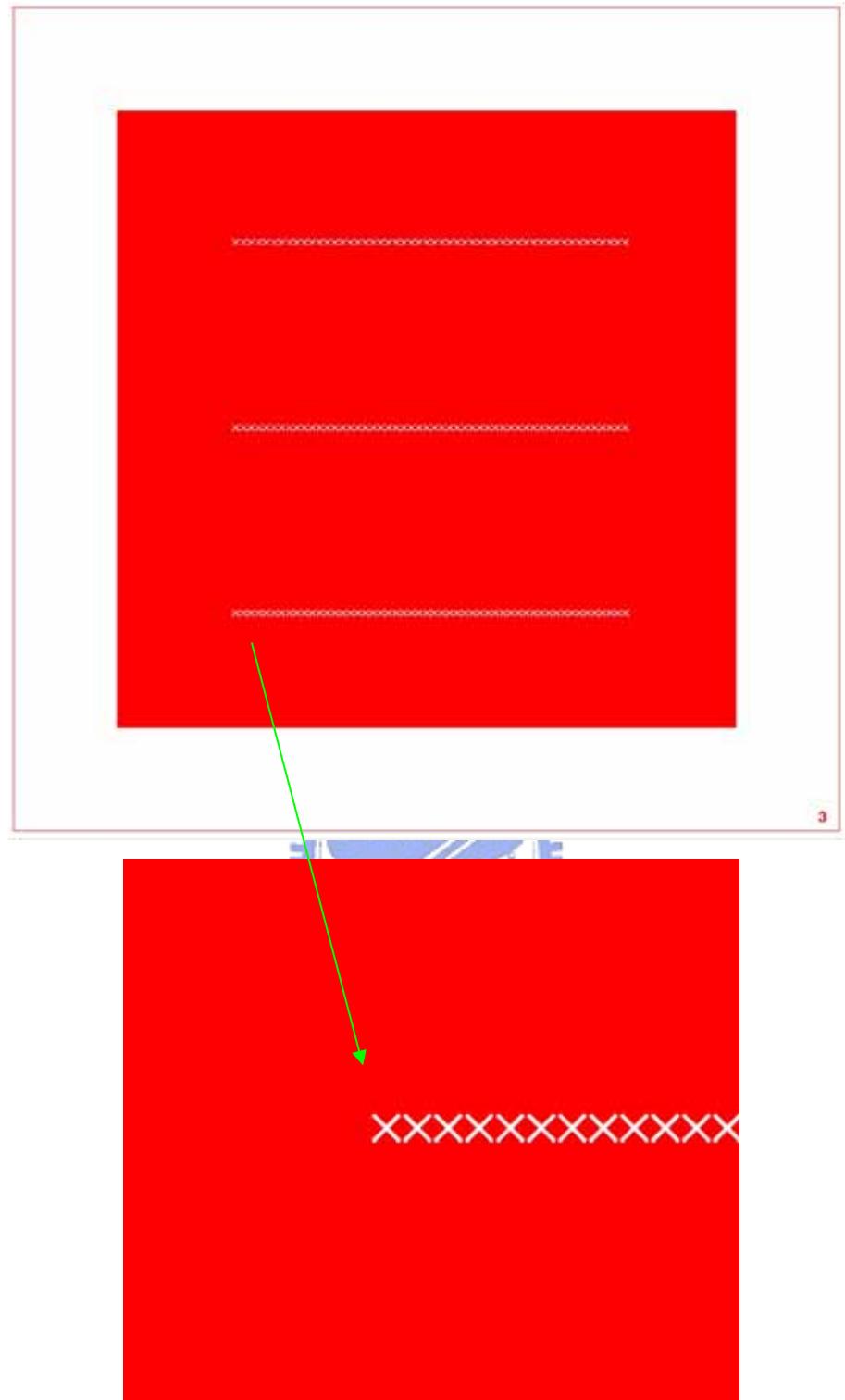


圖 2-2 X 型凹槽之光罩設計全圖及局部放大圖

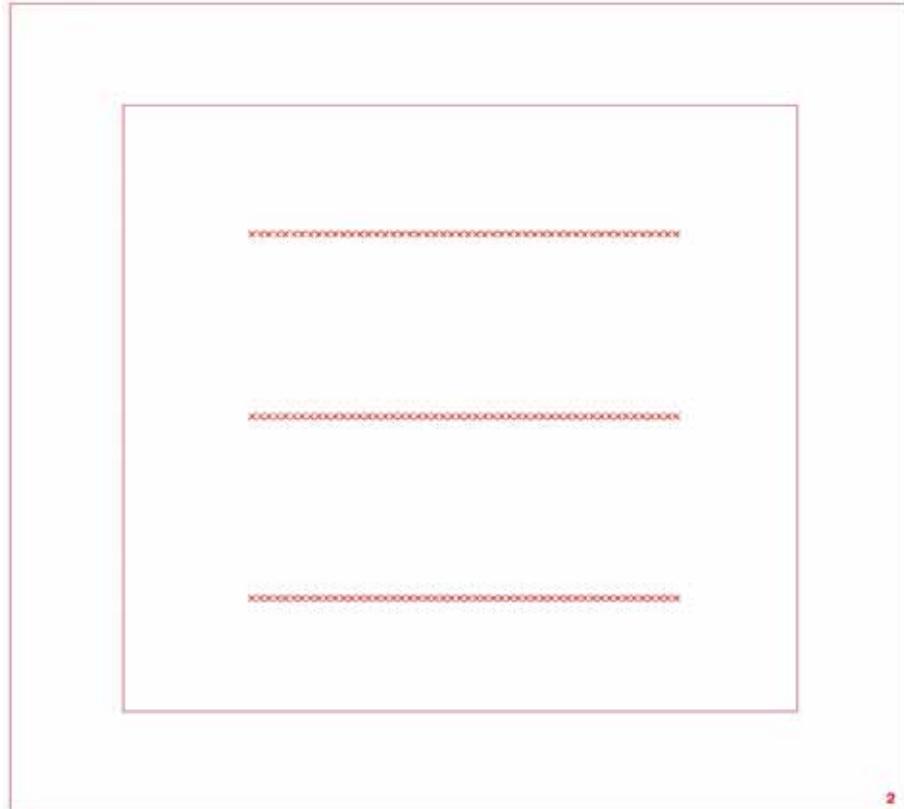


圖 2-3 X 型阻礙物之光罩設計全圖

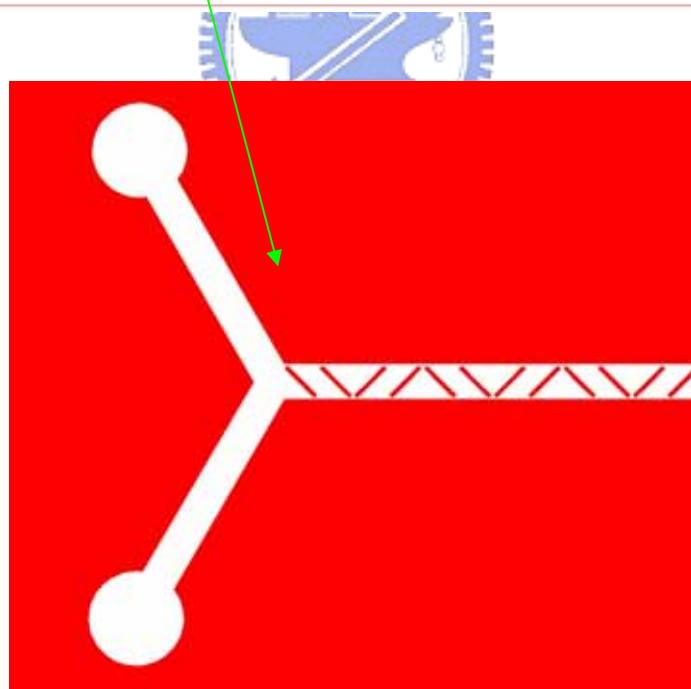
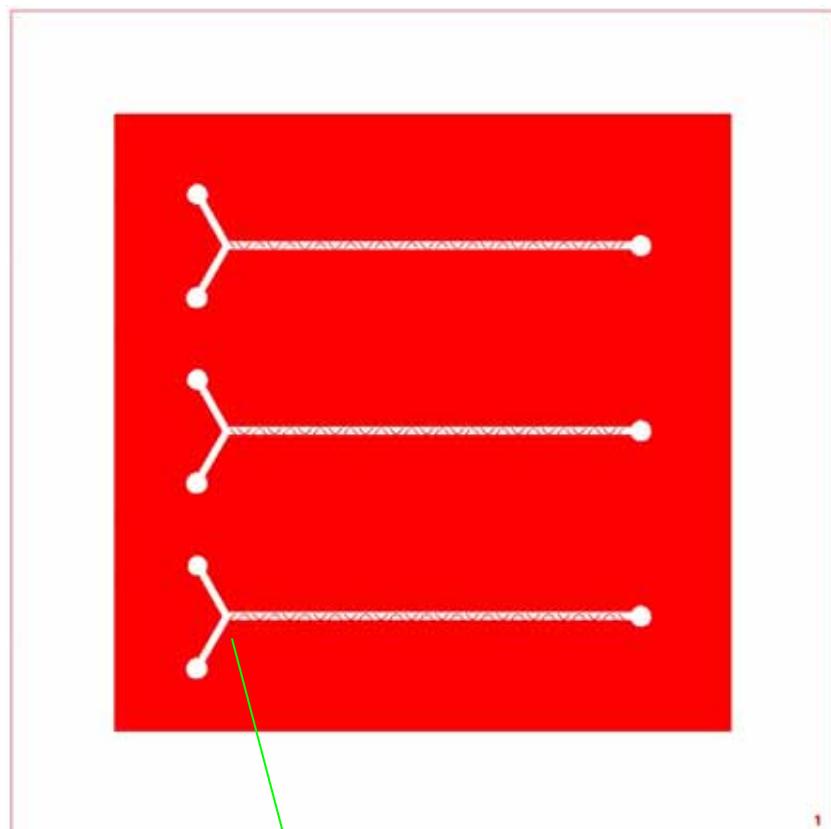


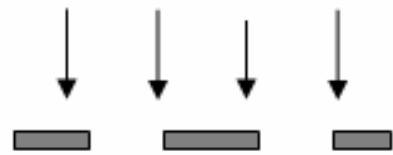
圖 2-4 上下交叉型被動式微混合器之光罩設計全圖及局部放大圖



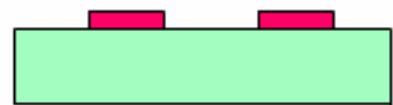
(A)



(B)



(C)



(D)

圖 2-5 為 SU-8 母模製程示意圖 (A)清洗晶圓 (B)塗佈 SU-8 負光阻  
(C)曝光 (D)顯影出微流道形狀

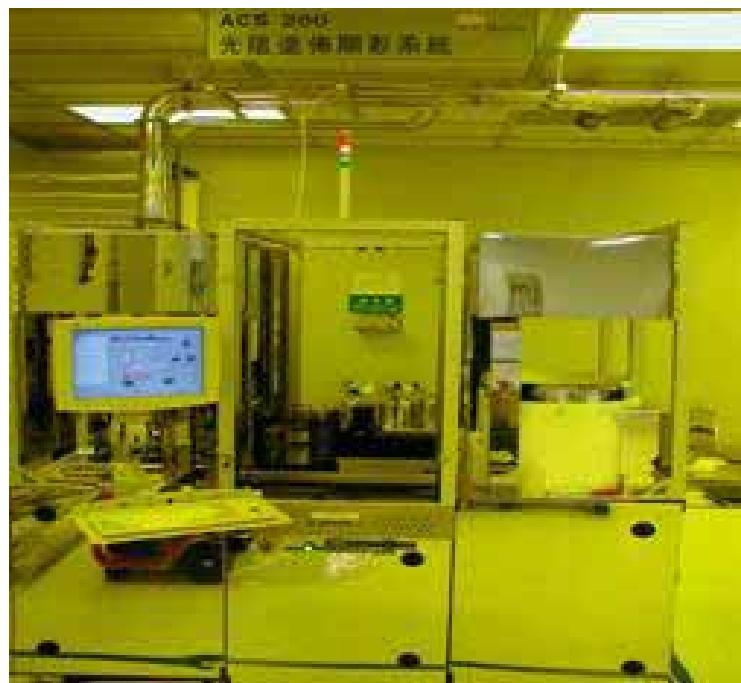


圖 2-6 自動化光阻塗佈及顯影系統(Tracker)



圖 2-7 光罩對準曝光系統(Mask aligner)



圖 2-8 抽真空設備



圖 2-9 烘箱



圖 2-10 反應式離子蝕刻機(Reactive Ion Etching)



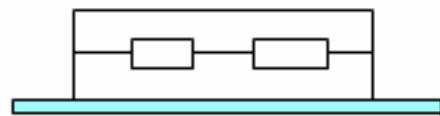
(A)



(B)



(C)



(D)

圖 2-11 為 PDMS 翻模製程示意圖 (A)SU-8 母模 (B) 淋上融溶狀態  
PDMS(C)與清洗後之載玻片進行氧電漿接合，Y 型結構 (D)凹、凸型  
及上下交叉型兩層接合結構。

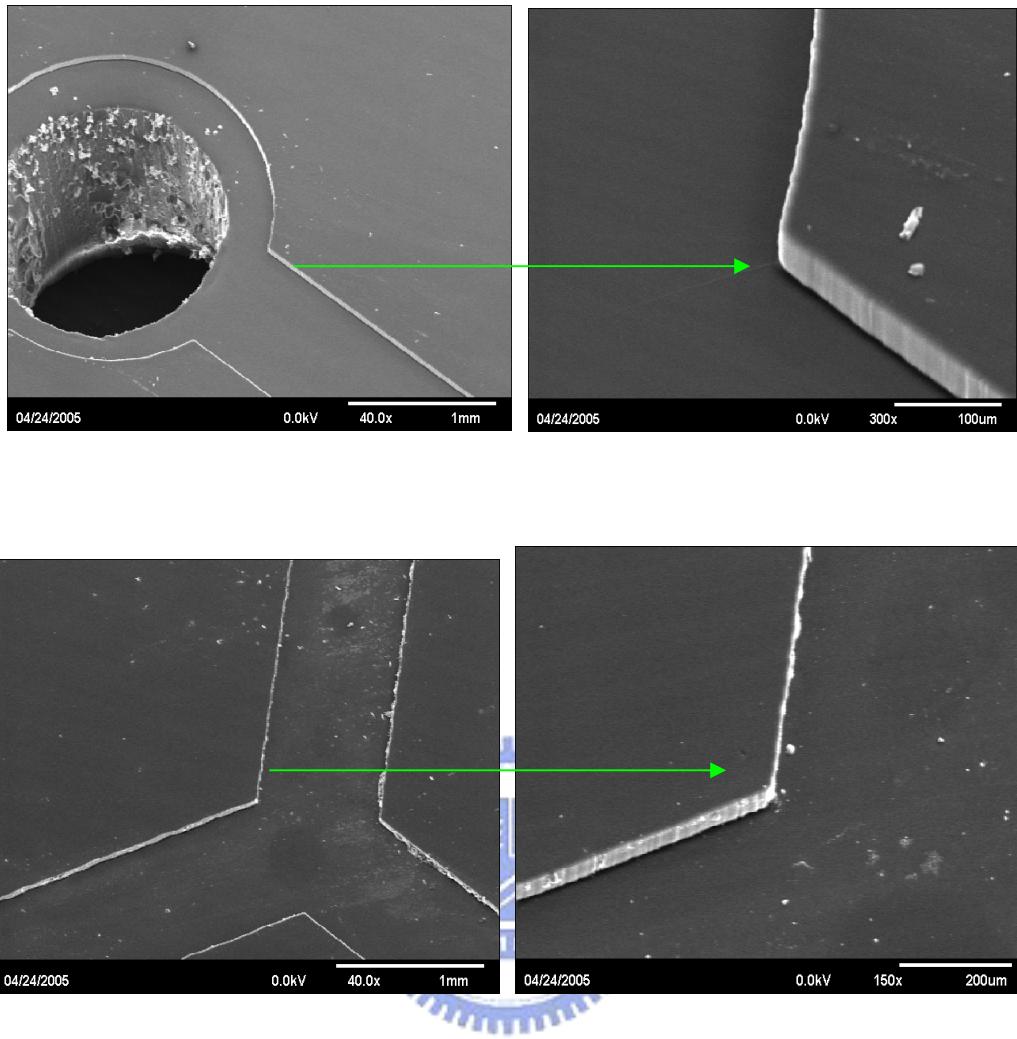


圖 2-12 為 Y 型結構 SEM 圖

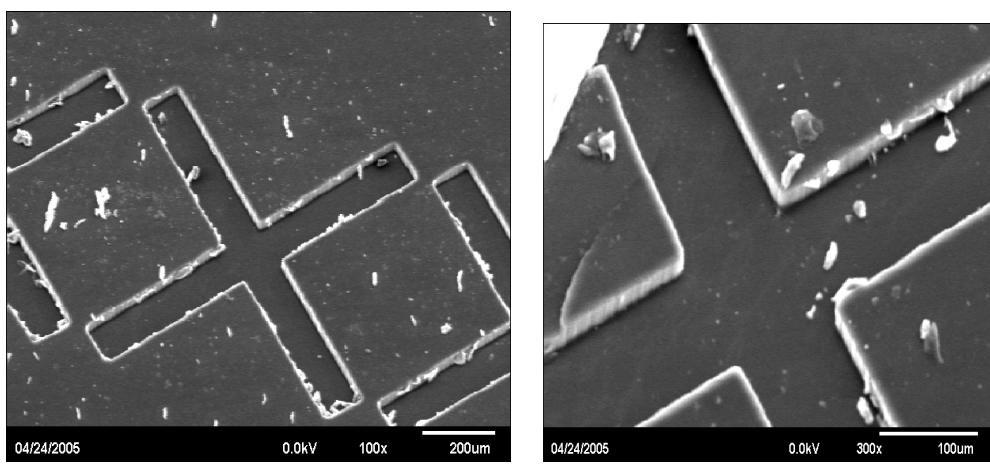


圖 2-13 為凹型結構 SEM 圖

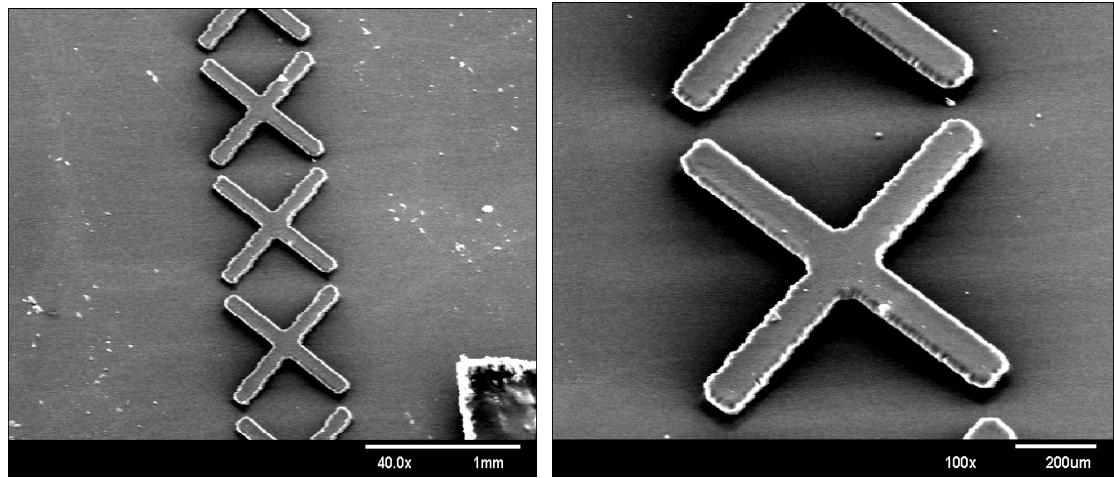


圖 2-14 為凸型結構 SEM 圖

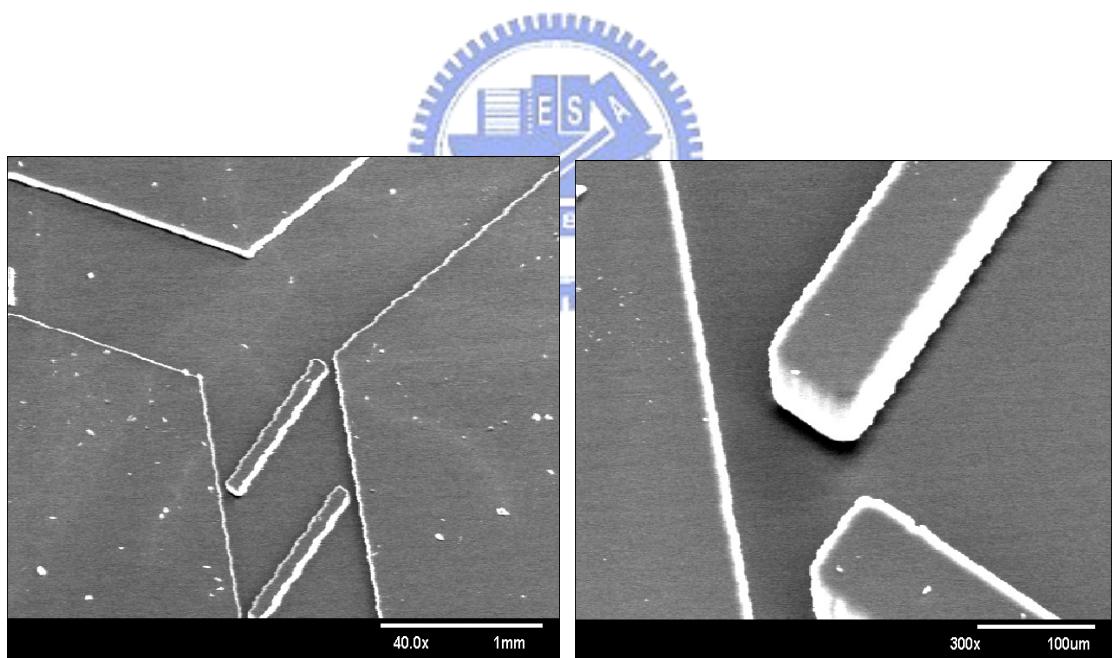


圖 2-15 為交叉型結構 SEM 圖

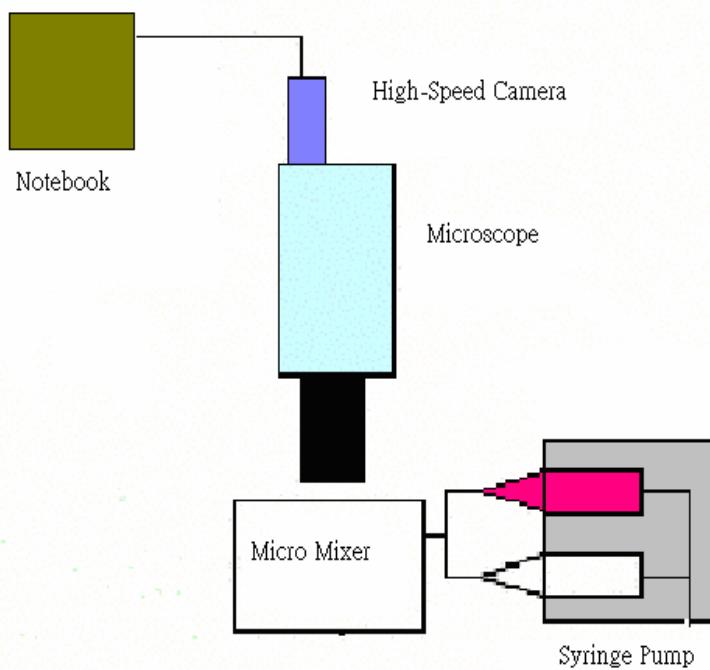


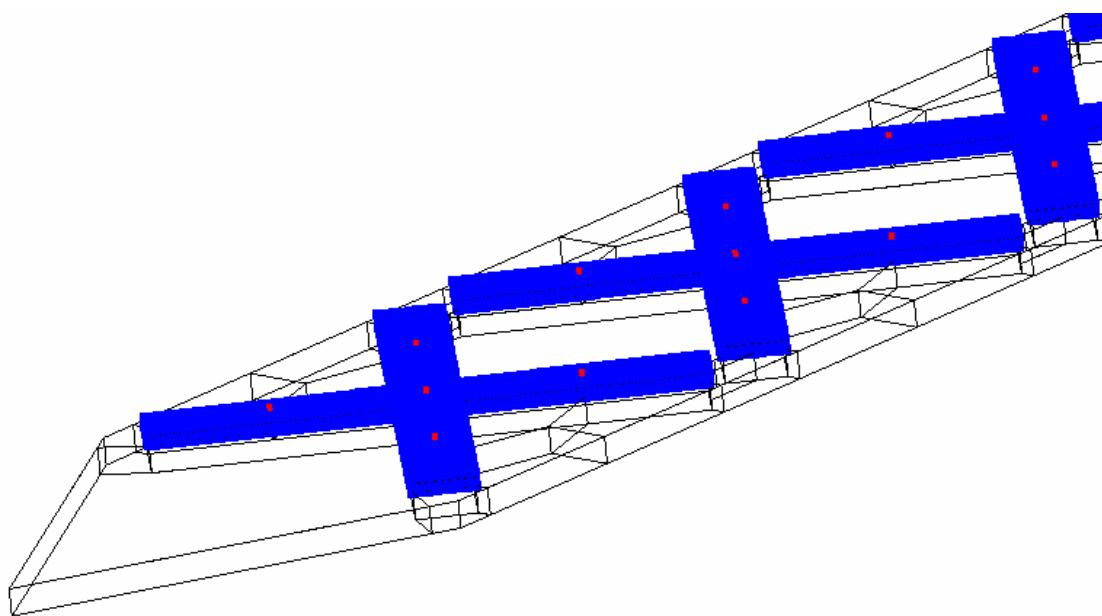
圖 2-16 實驗設備架構示意圖



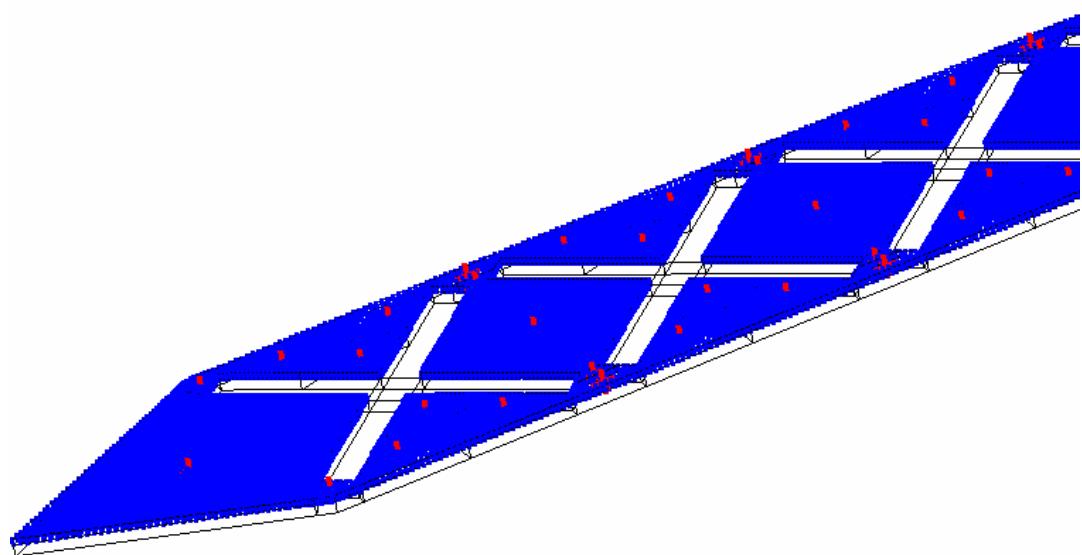
圖 2-17 可程式注射幫浦



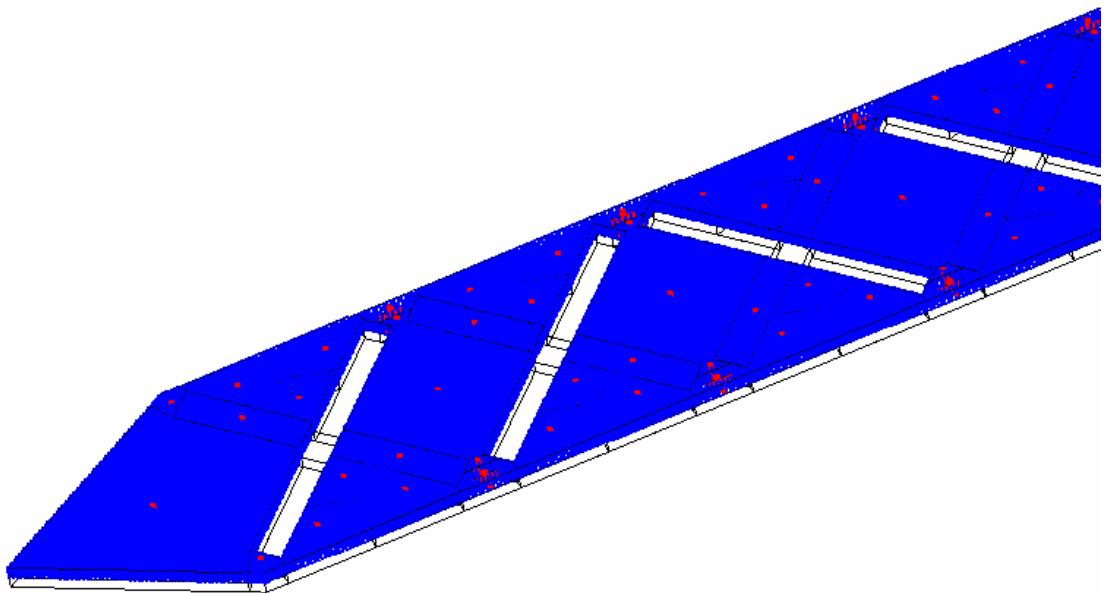
圖 2-18 顯微實驗平台與高速攝影機



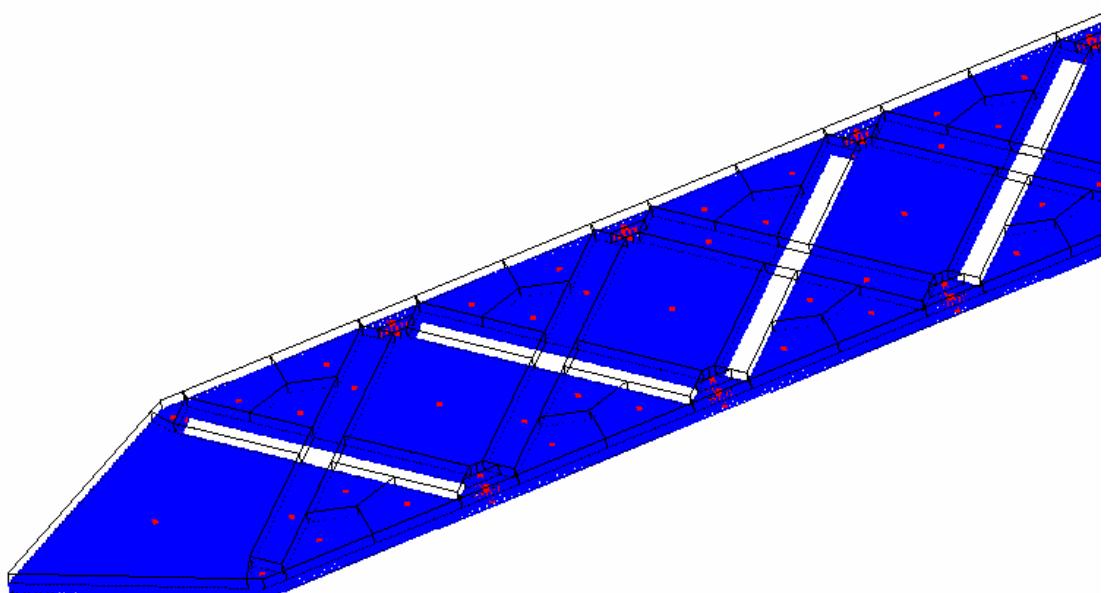
(A)凹型



(B)凸型



(C) 上下交叉型上層結構



(D) 上下交叉型下層結構

圖 3-1 流道幾何形狀示意圖

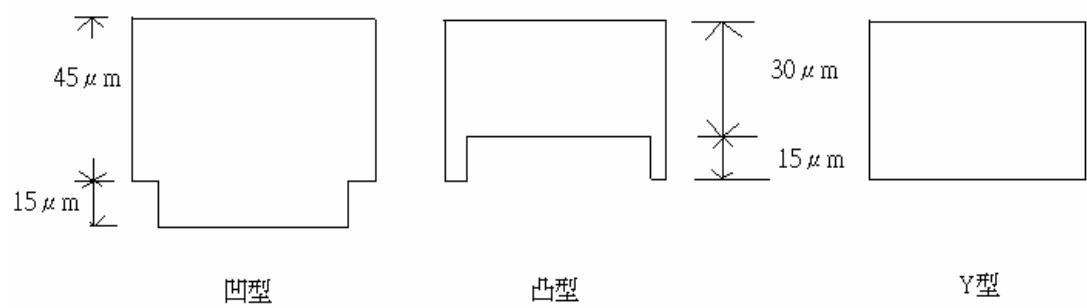


圖 3-2 Y 型直管、凹型、凸型之側視圖

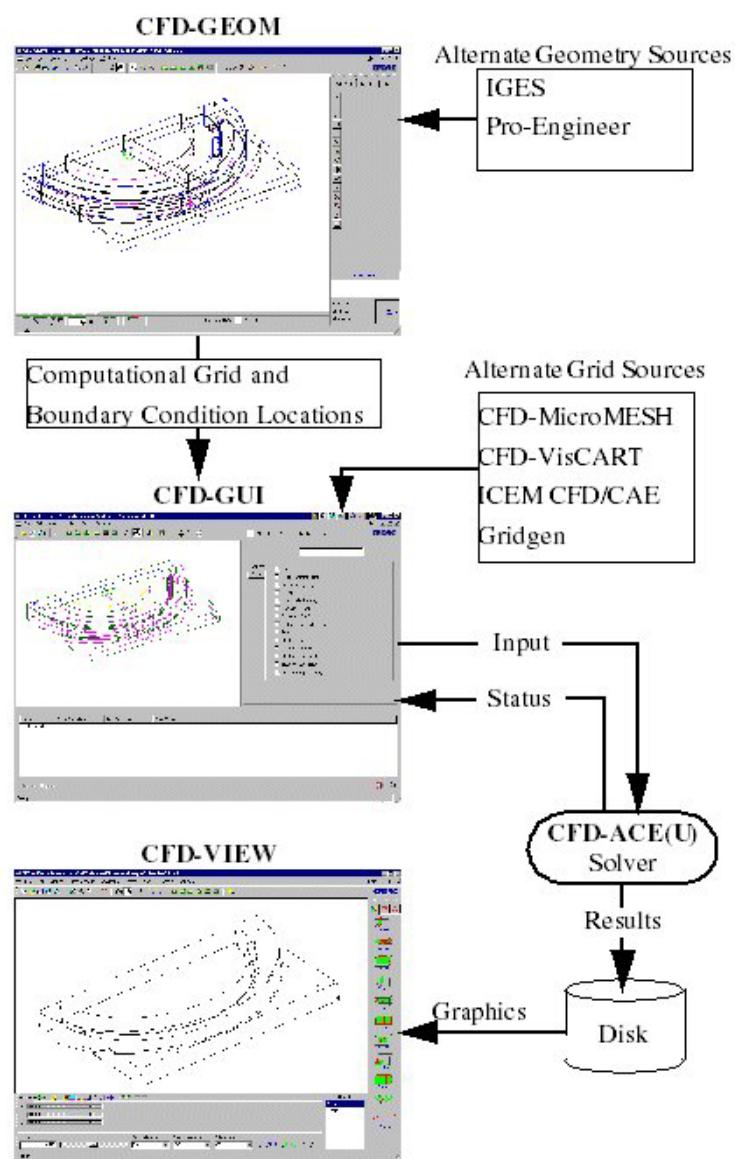


圖 3-3 CFD-RC 求解過程

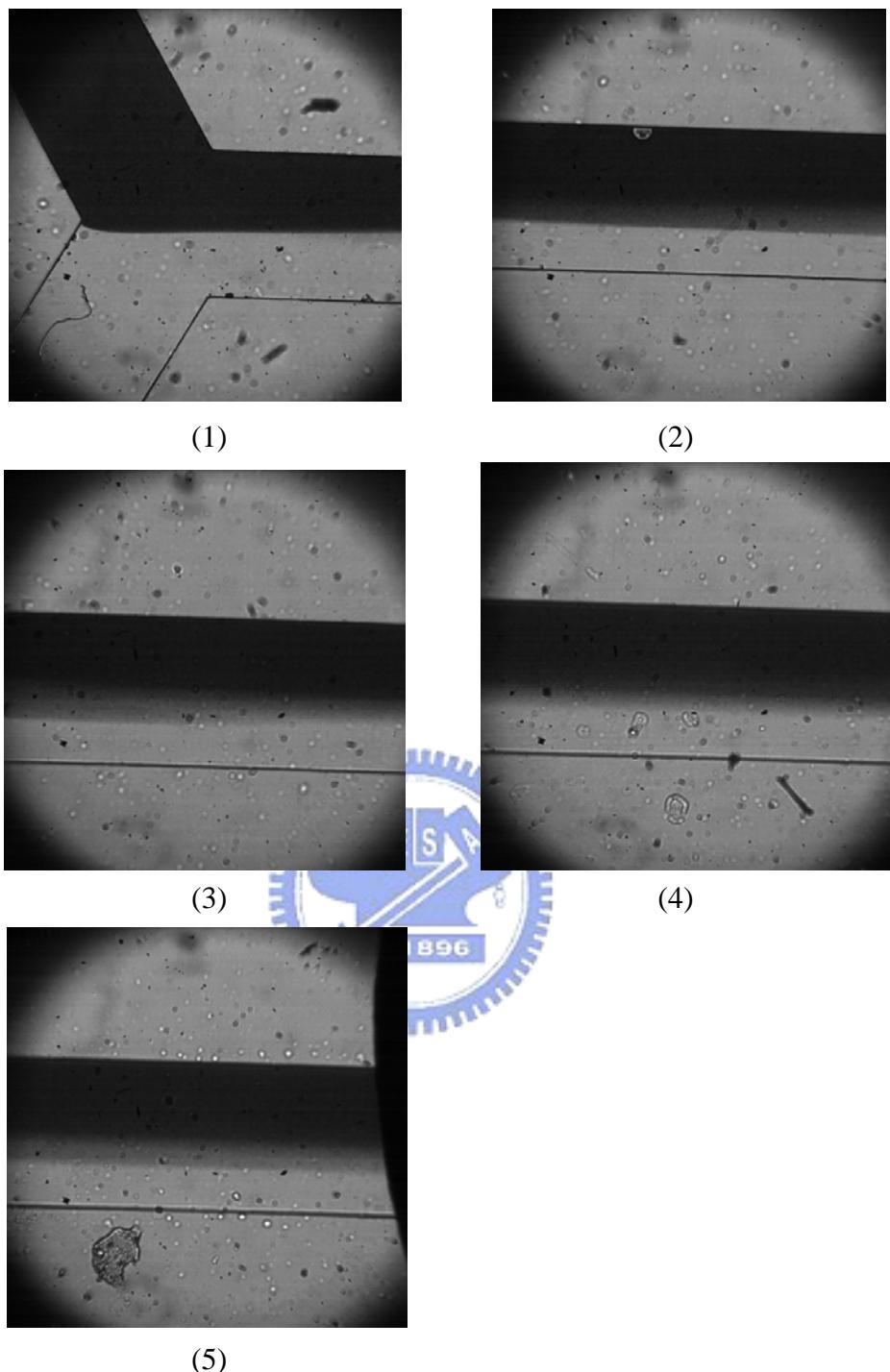
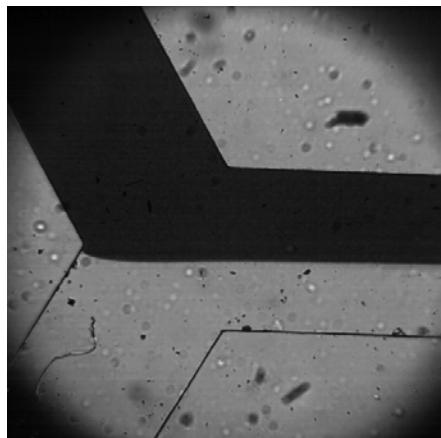
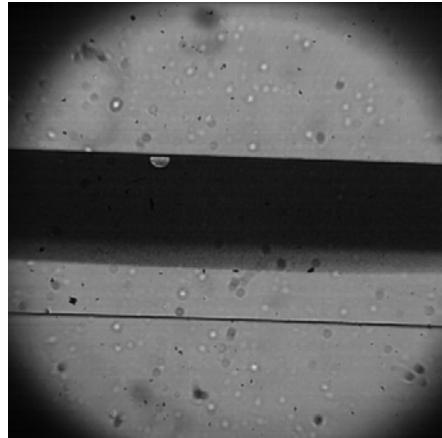


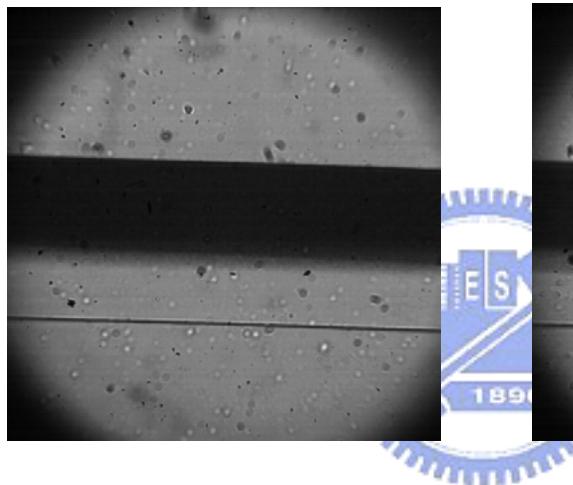
圖 4-1 Y 型直管流道， $Re=0.05$  時流體的流動混合現象



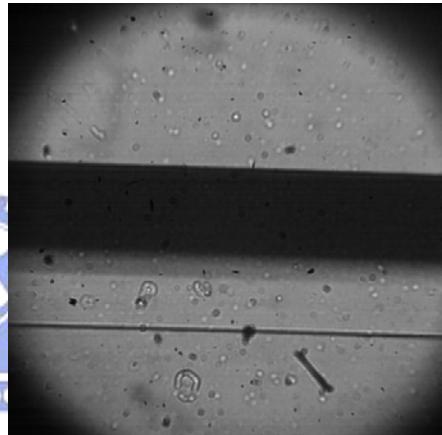
(1)



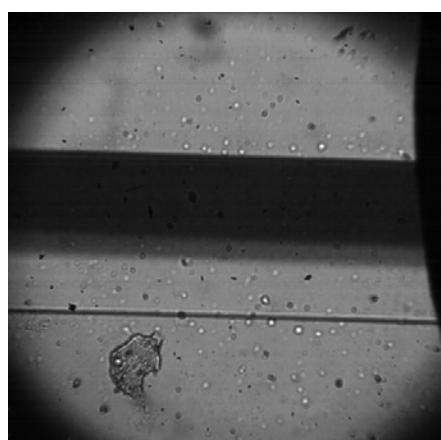
(2)



(3)

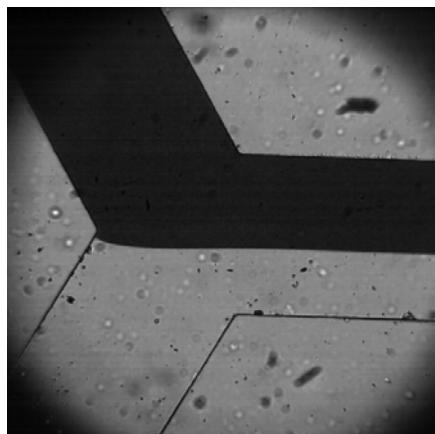


(4)

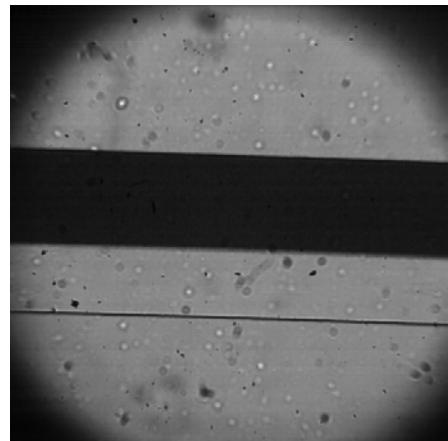


(5)

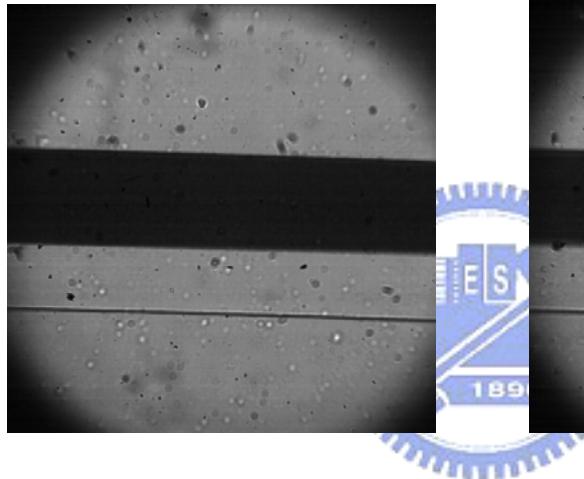
圖 4-2 Y 型直管流道， $Re=0.1$  時流體的流動混合現象



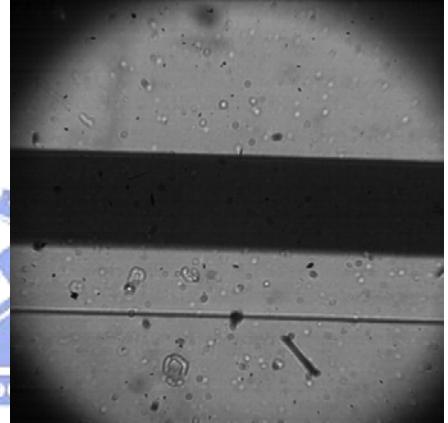
(1)



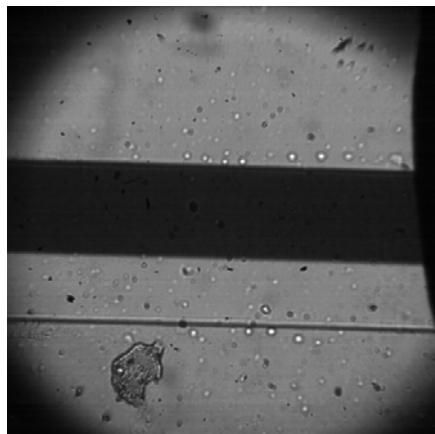
(2)



(3)

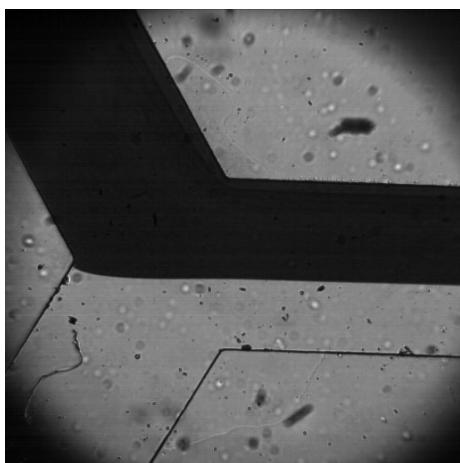


(4)

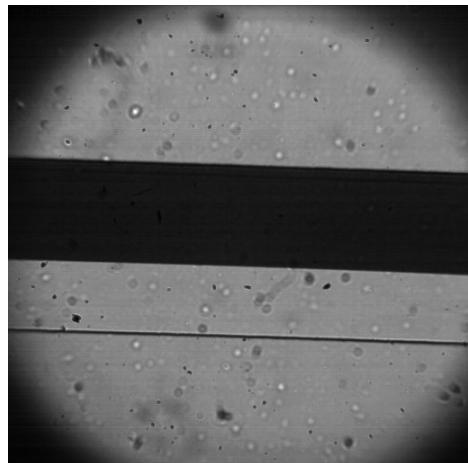


(5)

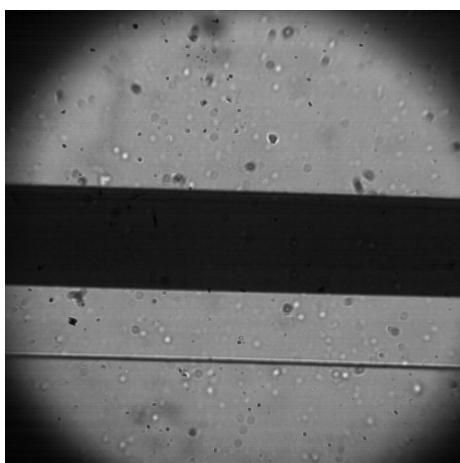
圖 4-3 Y 型直管流道， $Re=1$  時流體的流動混合現象



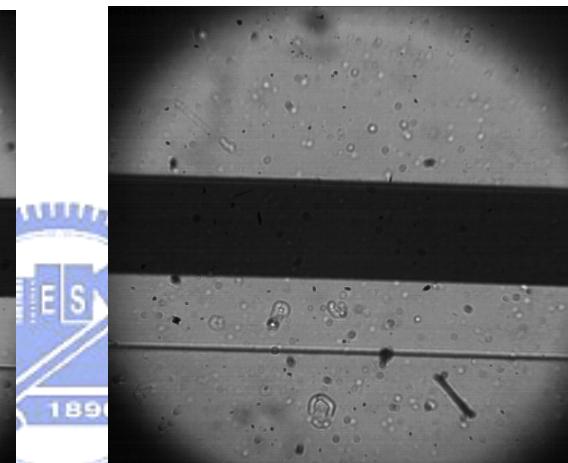
(1)



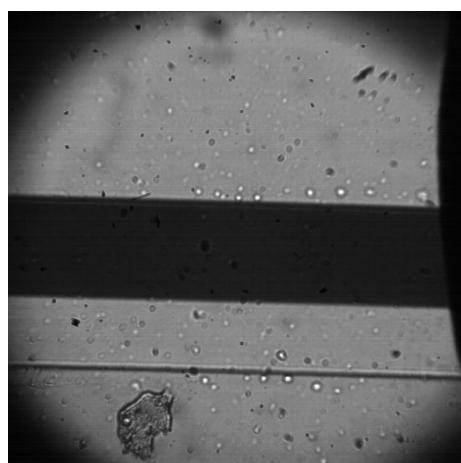
(2)



(3)

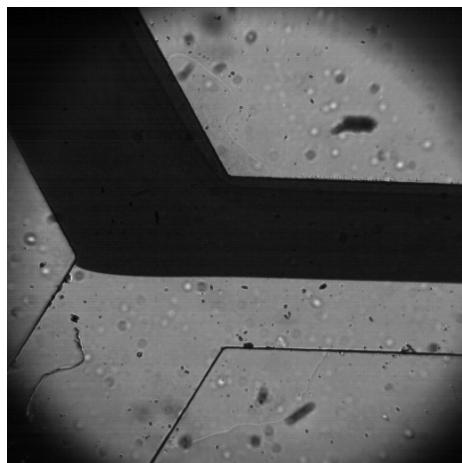


(4)

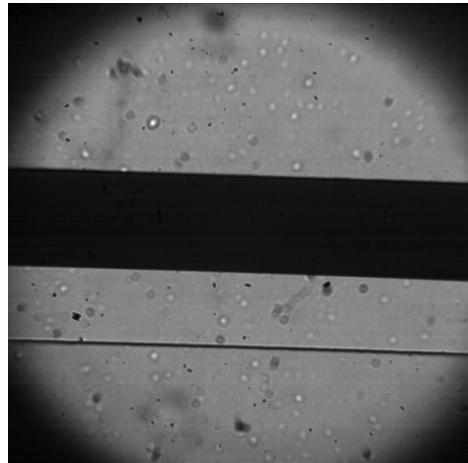


(5)

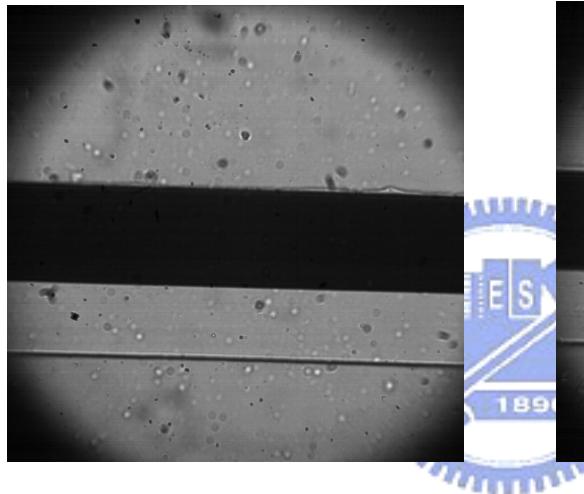
圖 4-4 Y 型直管流道， $Re=10$  時流體的流動混合現象



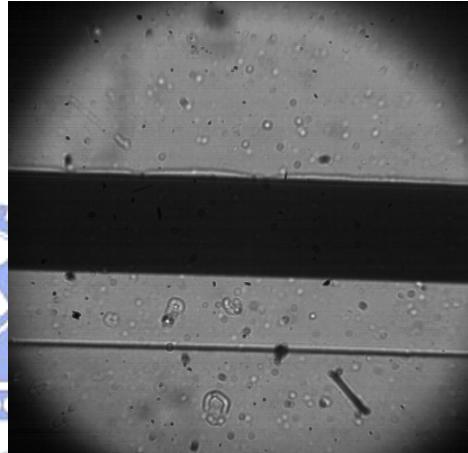
(1)



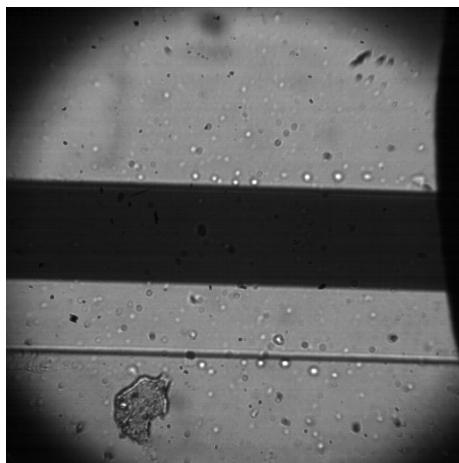
(2)



(3)

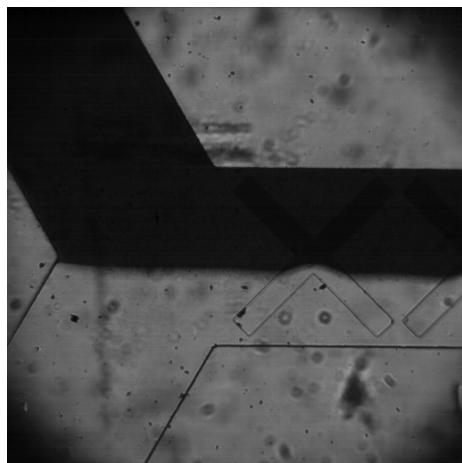


(4)

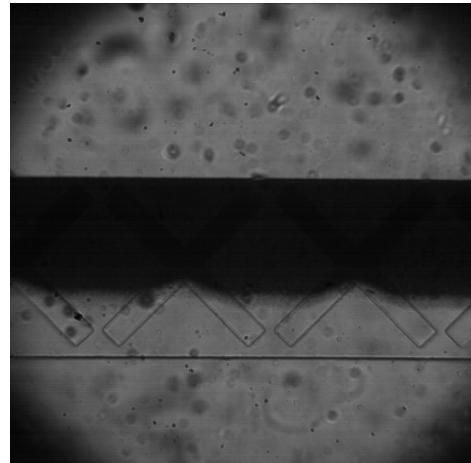


(5)

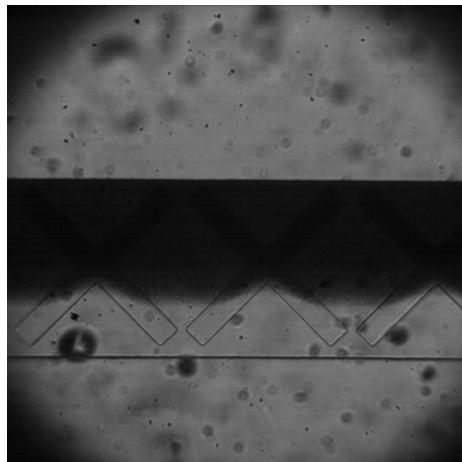
圖 4-5 Y 型直管流道， $Re=50$  時流體的流動混合現象



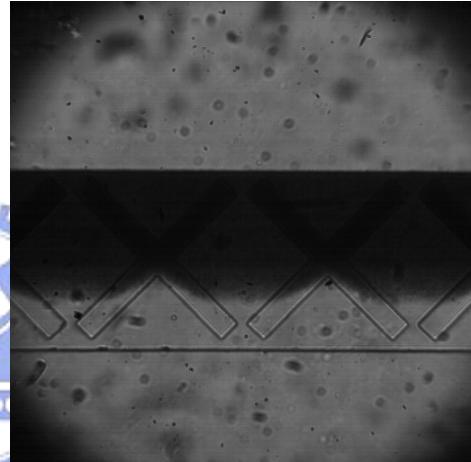
(1)



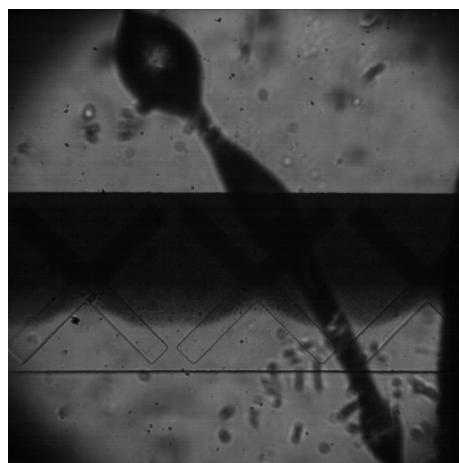
(2)



(3)

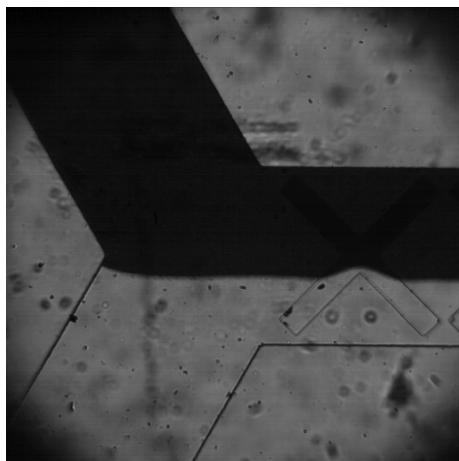


(4)

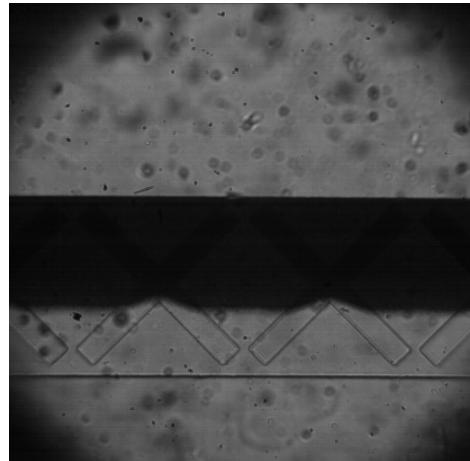


(5)

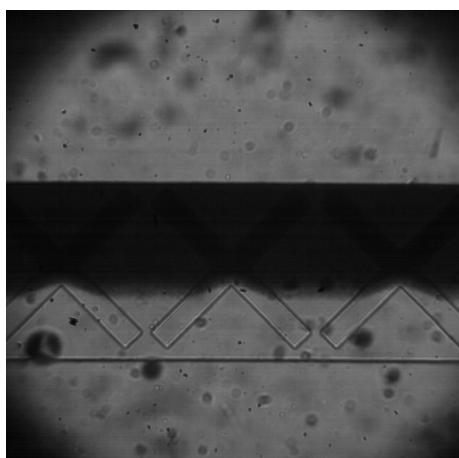
圖 4-6 凹型流道， $Re=0.05$  時流體的流動混合現象



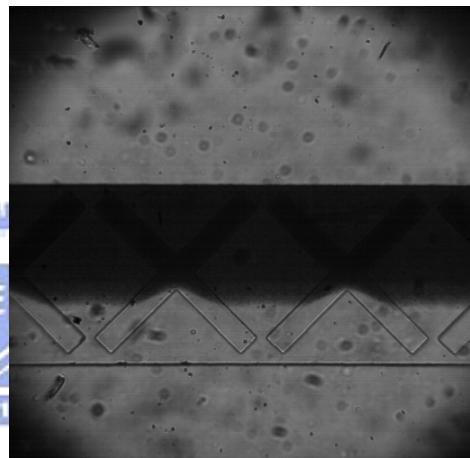
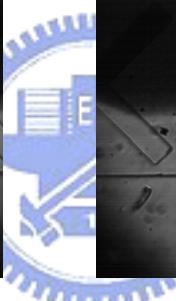
(1)



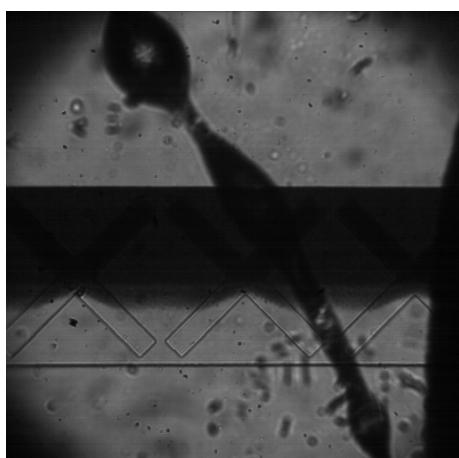
(2)



(3)

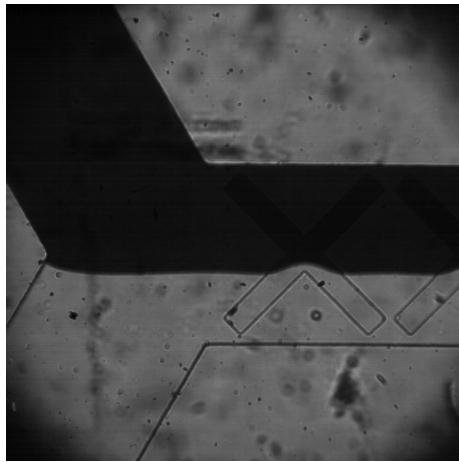


(4)

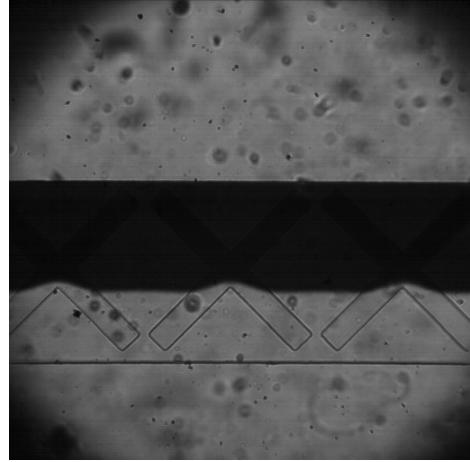


(5)

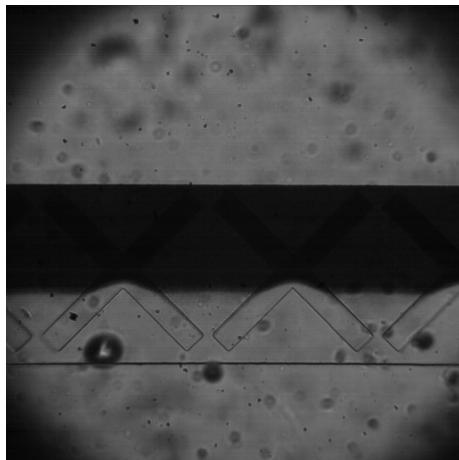
圖 4-7 凸型流道， $Re=0.1$  時流體的流動混合現象



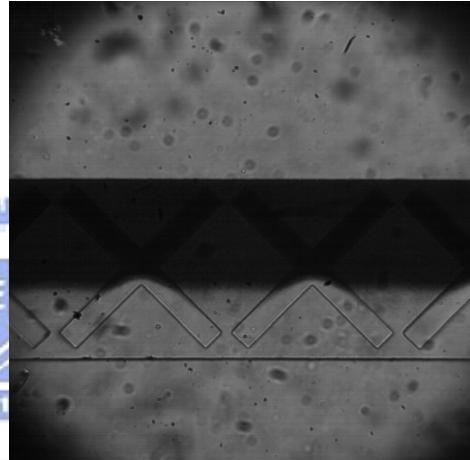
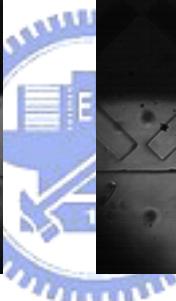
(1)



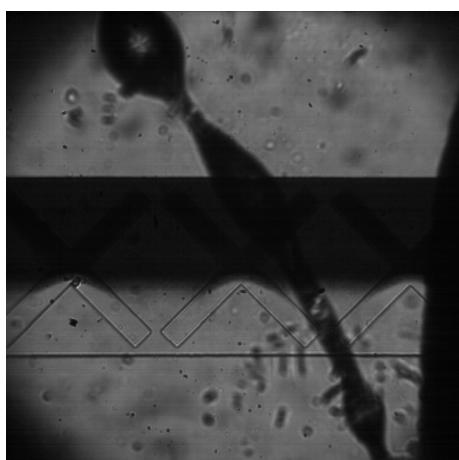
(2)



(3)

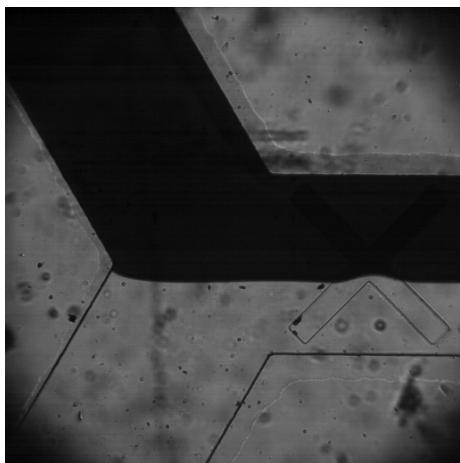


(4)

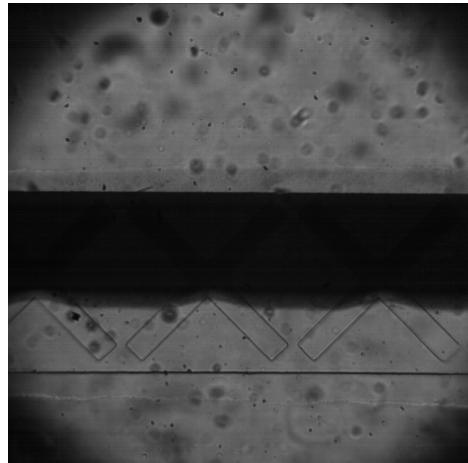


(5)

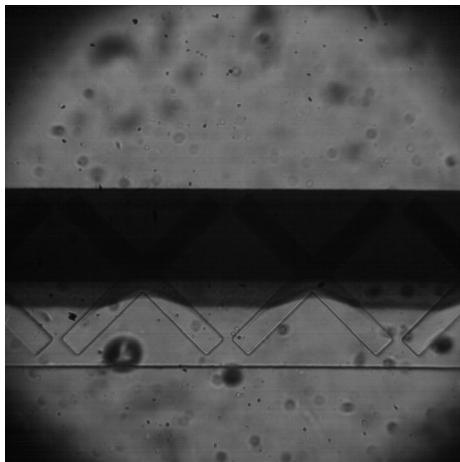
圖 4-8 凸型流道， $Re=1$  時流體的流動混合現象



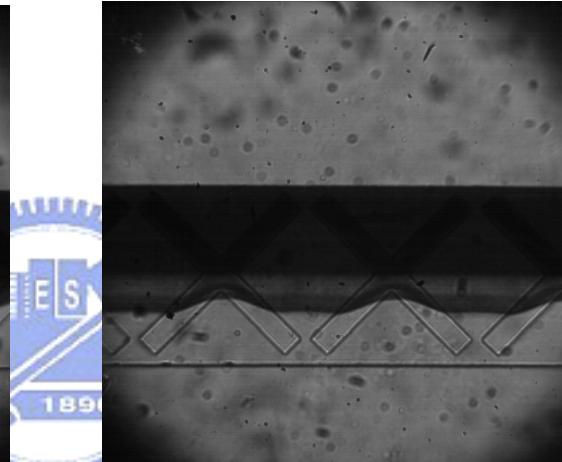
(1)



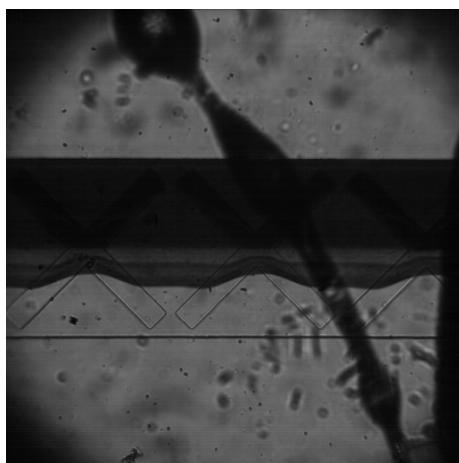
(2)



(3)

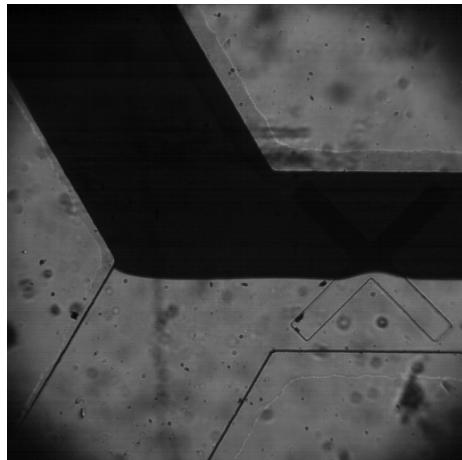


(4)

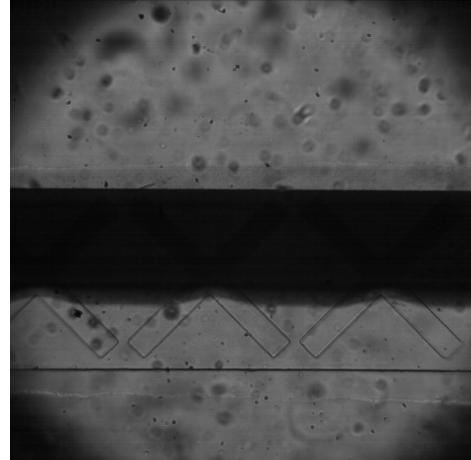


(5)

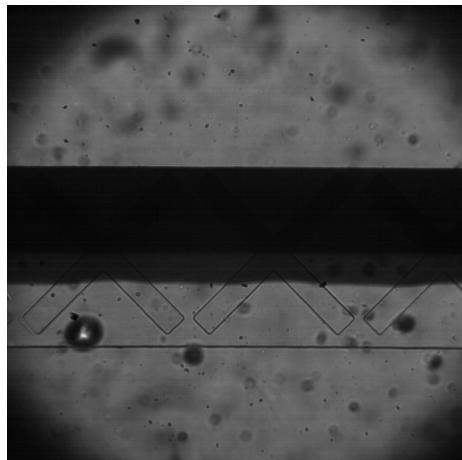
圖 4-9 凸型流道， $Re=10$  時流體的流動混合現象



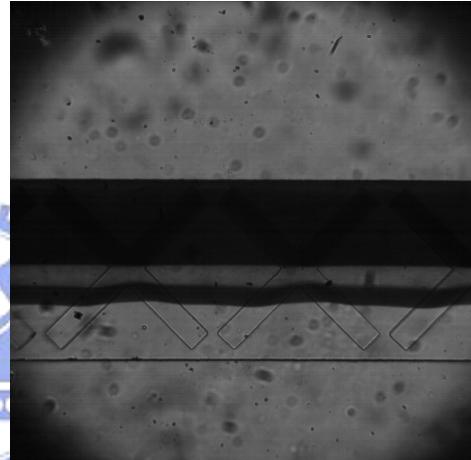
(1)



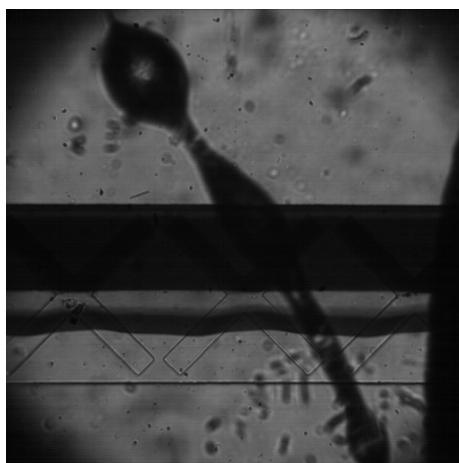
(2)



(3)

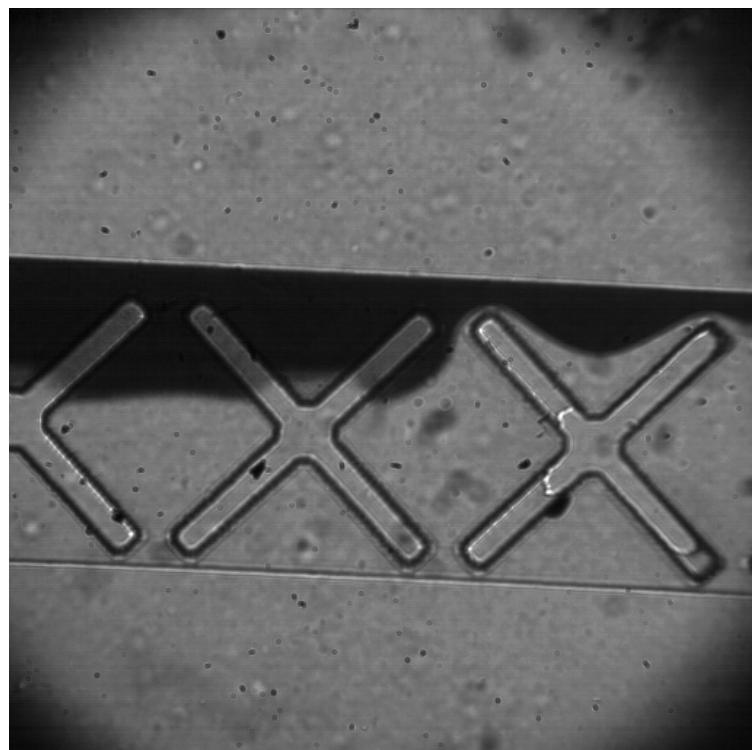


(4)

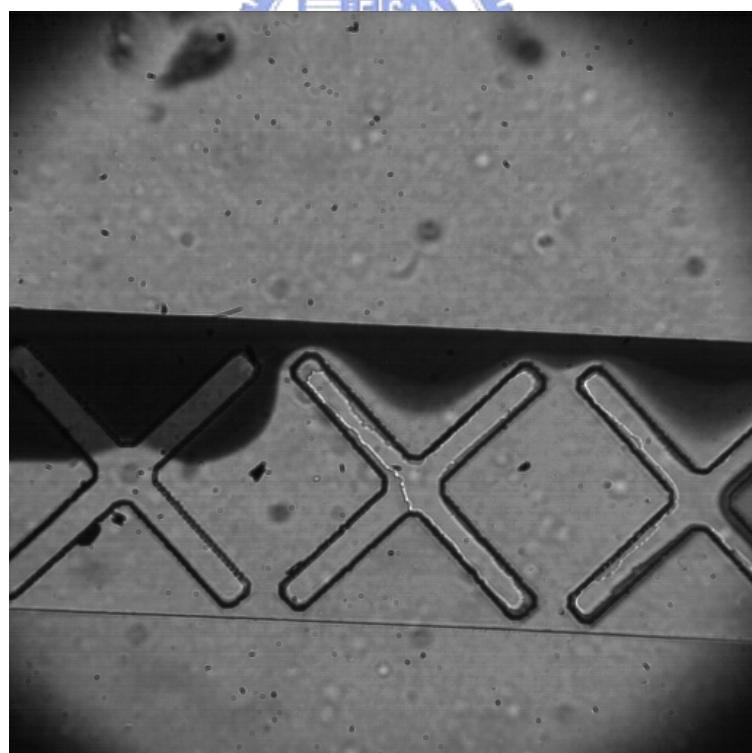


(5)

圖 4-10 凸型流道， $Re=50$  時流體的流動混合現象

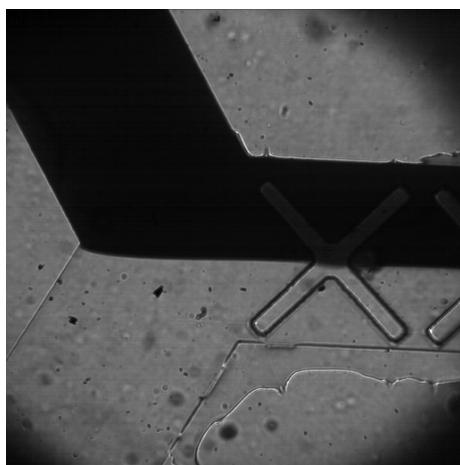


(1)

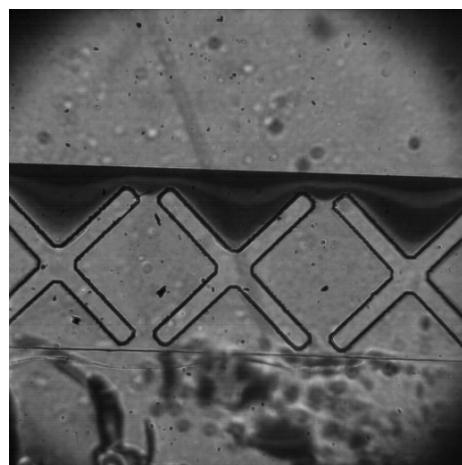


(2)

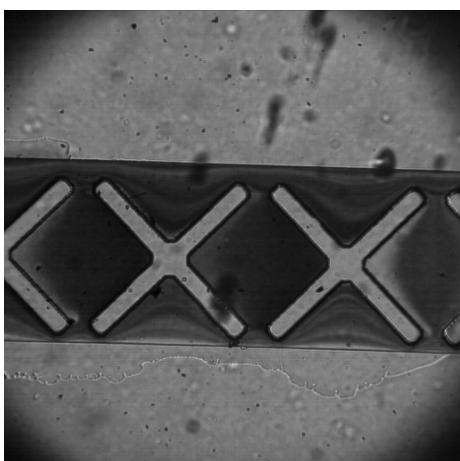
圖 4-11 凸型流道，不同  $Re$  時流體的流動現象



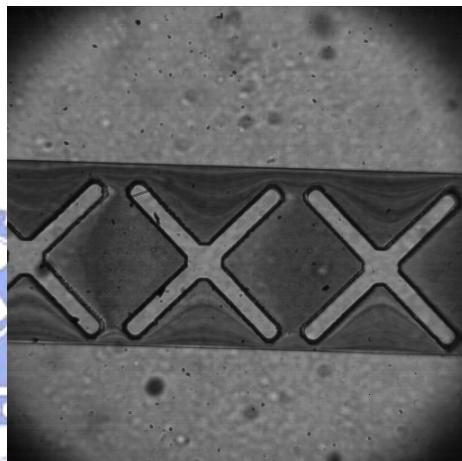
(1)



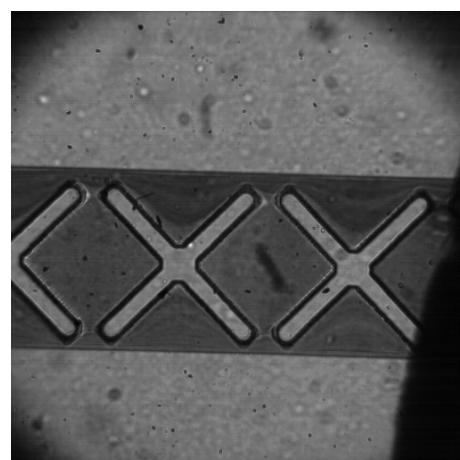
(2)



(3)

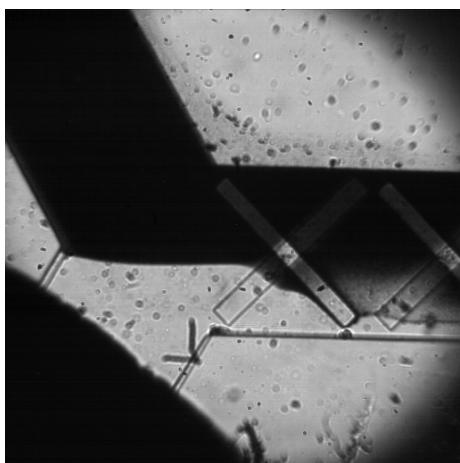


(4)

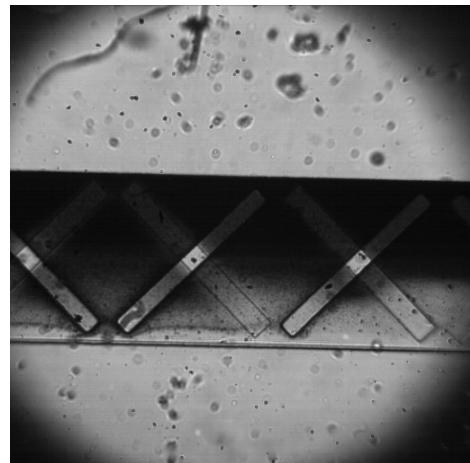


(5)

圖 4-12 凸型流道， $Re=10$  時流體的流動混合現象



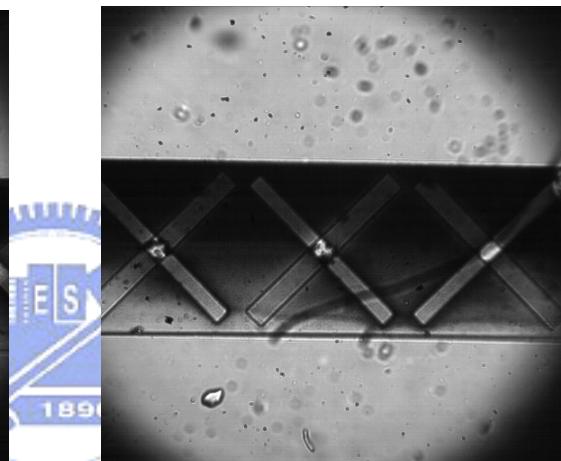
(1)



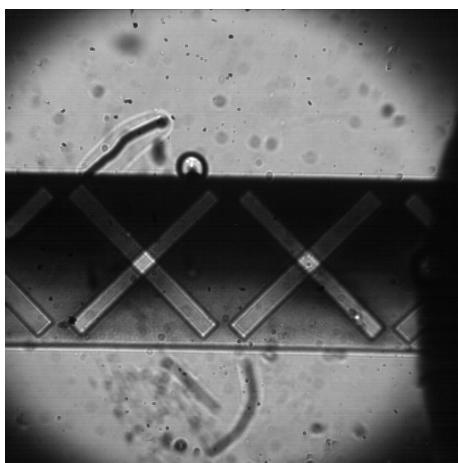
(2)



(3)

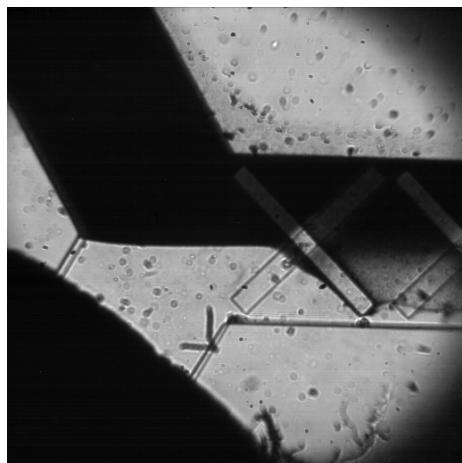


(4)

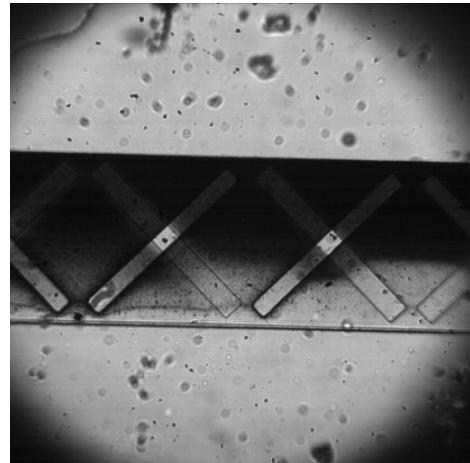


(5)

圖 4-13 上下交叉型流道， $Re=0.05$  時流體的流動混合現象



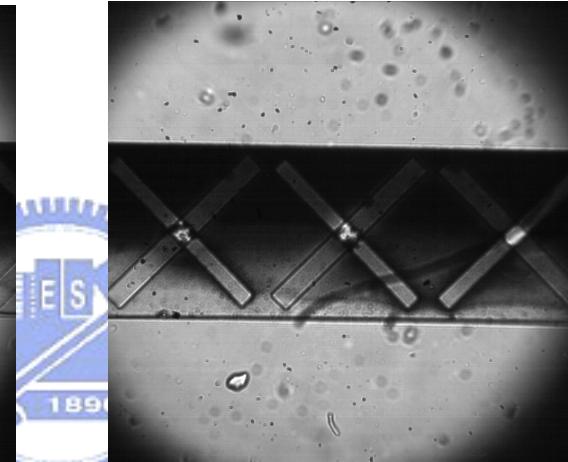
(1)



(2)



(3)

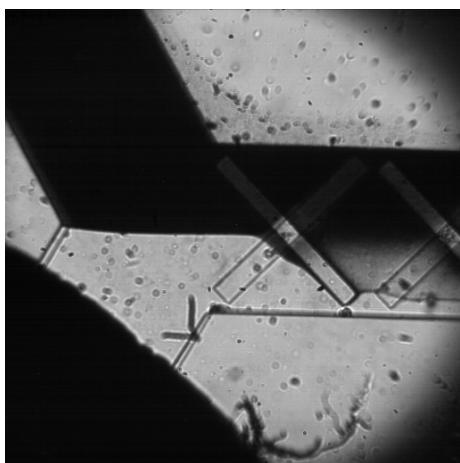


(4)

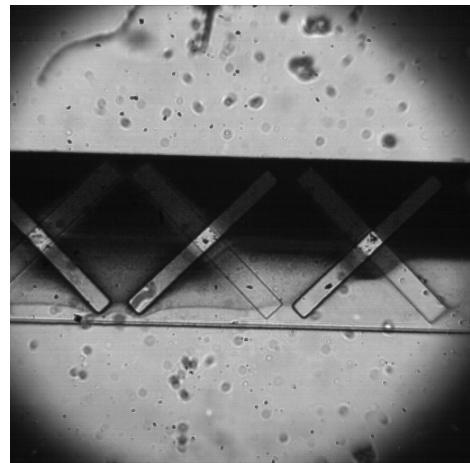


(5)

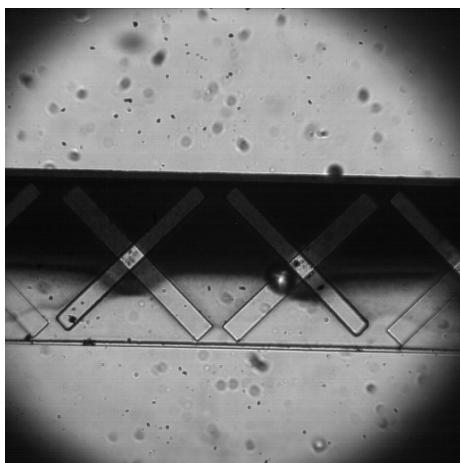
圖 4-14 上下交叉型流道， $Re=0.1$  時流體的流動混合現象



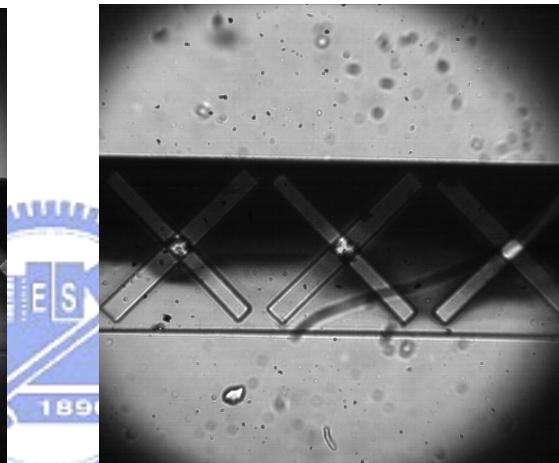
(1)



(2)



(3)

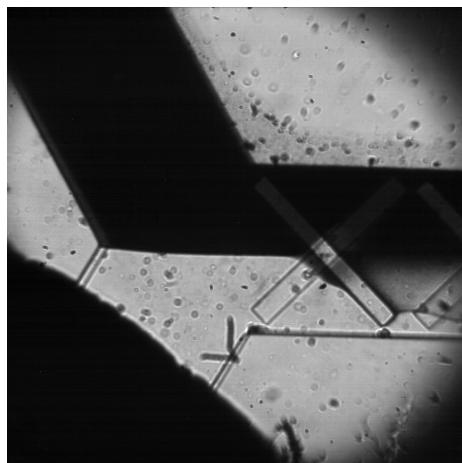


(4)

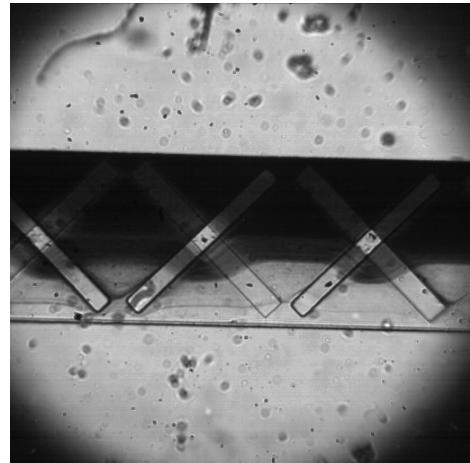


(5)

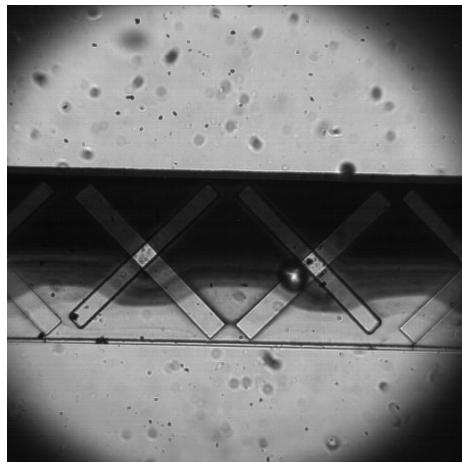
圖 4-15 上下交叉型流道， $Re=1$  時流體的流動混合現象



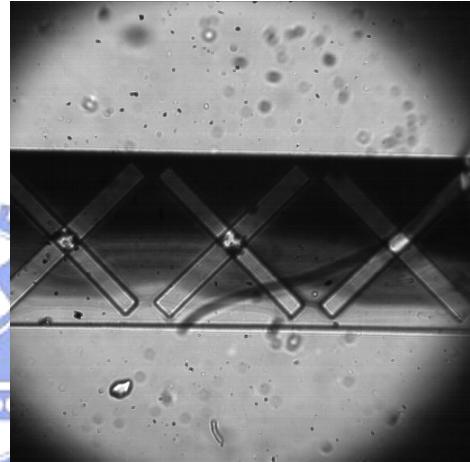
(1)



(2)



(3)

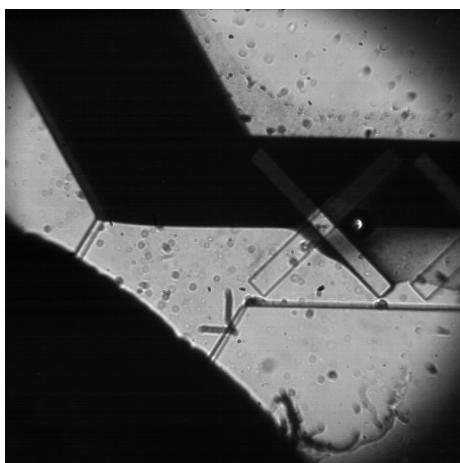


(4)

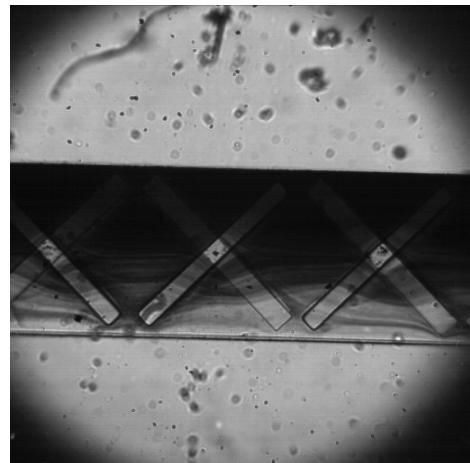


(5)

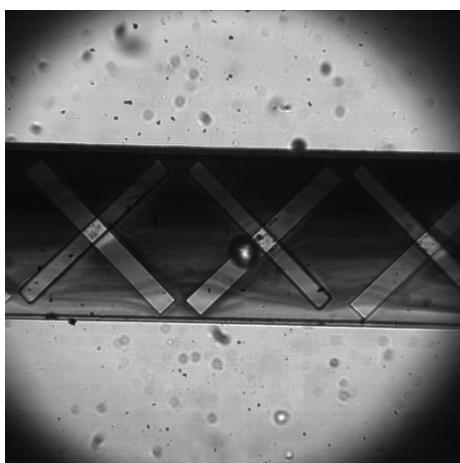
圖 4-16 上下交叉型流道， $Re=10$  時流體的流動混合現象



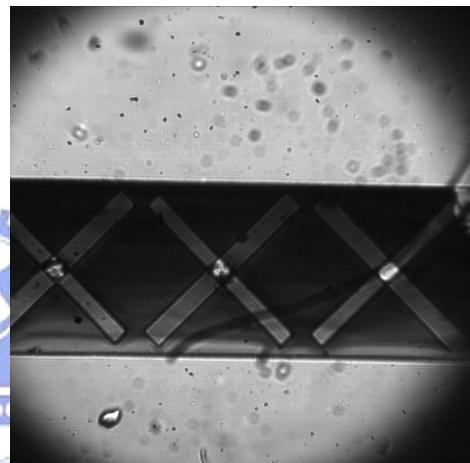
(1)



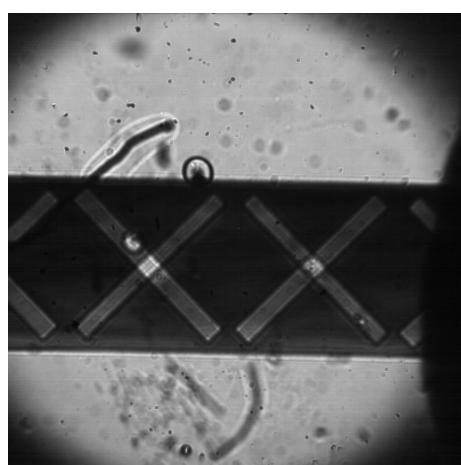
(2)



(3)



(4)



(5)

圖 4-17 上下交叉型流道， $Re=50$  時流體的流動混合現象

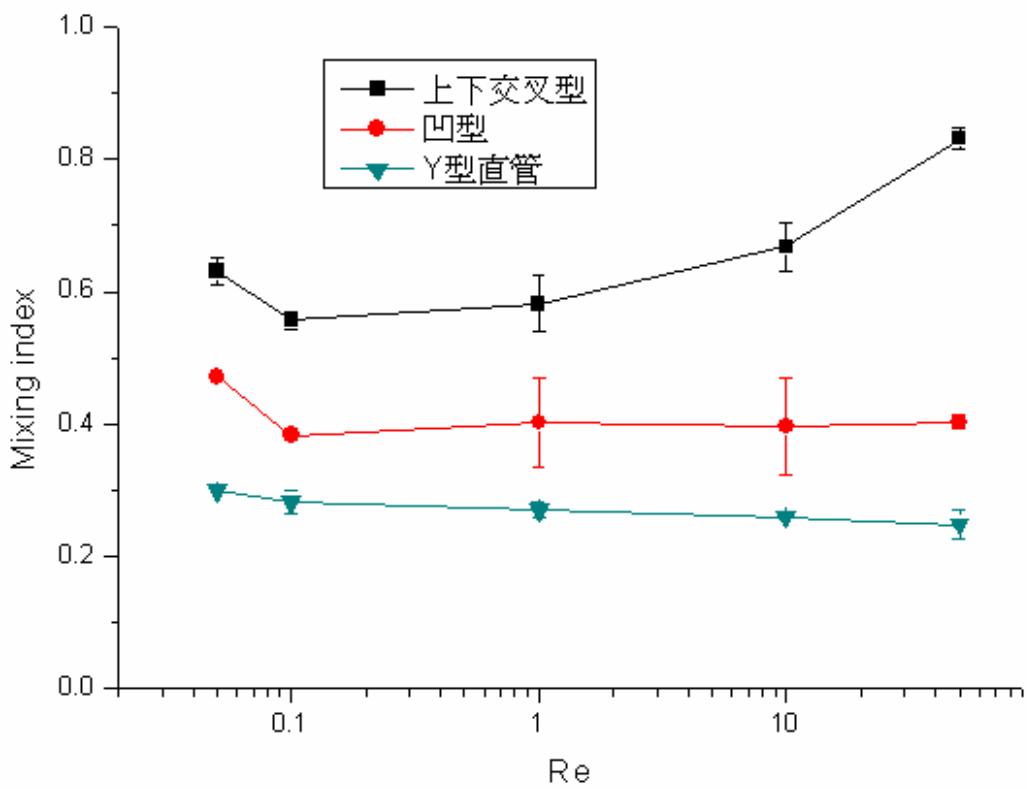


圖 4-18 上下交叉型、凹型、Y型直管在  
不同雷諾數下與出口混合指標的關係

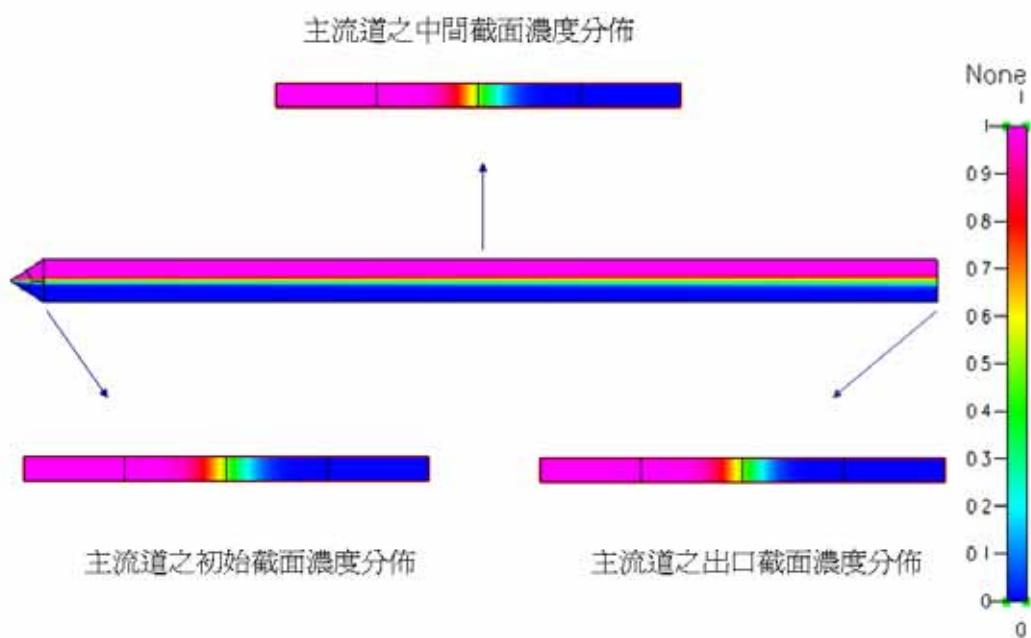


圖 4-19 Y 型直管流道在  $Re=10$  下之濃度分佈圖

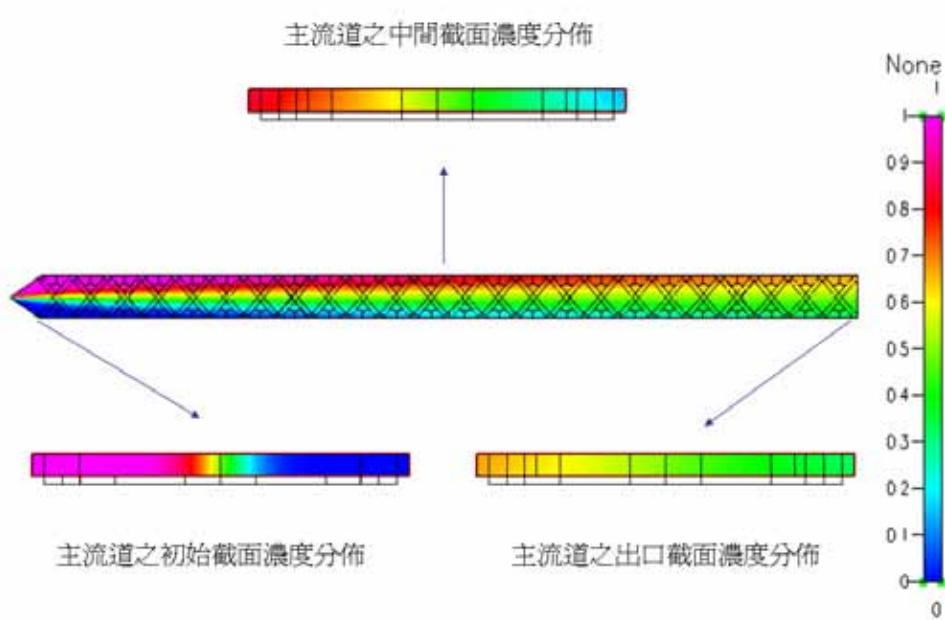


圖 4-20 凸型流道在  $Re=10$  下之濃度分佈圖

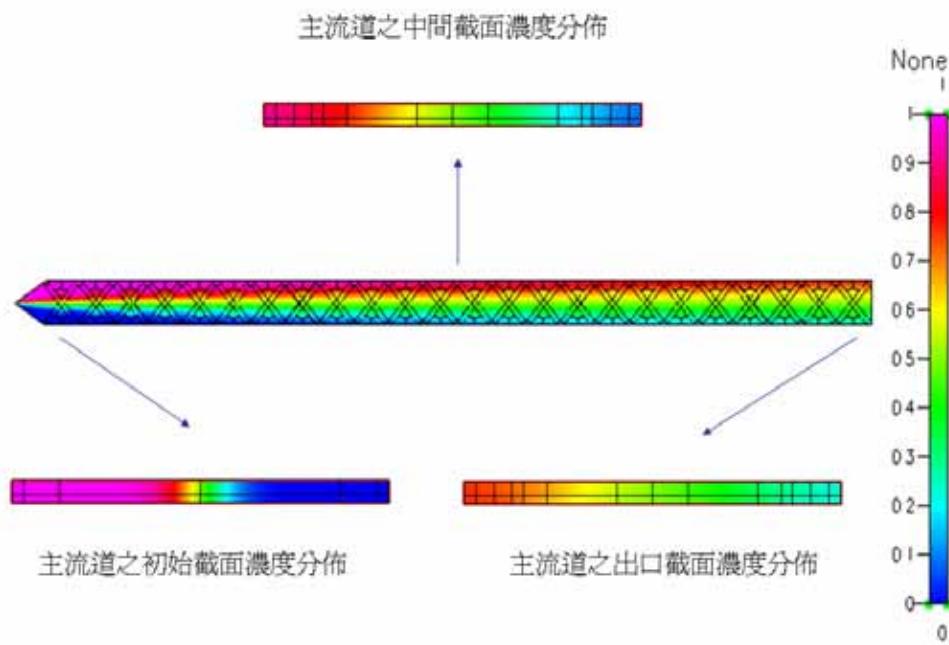


圖 4-21 凸型流道在  $Re=10$  下之濃度分佈圖

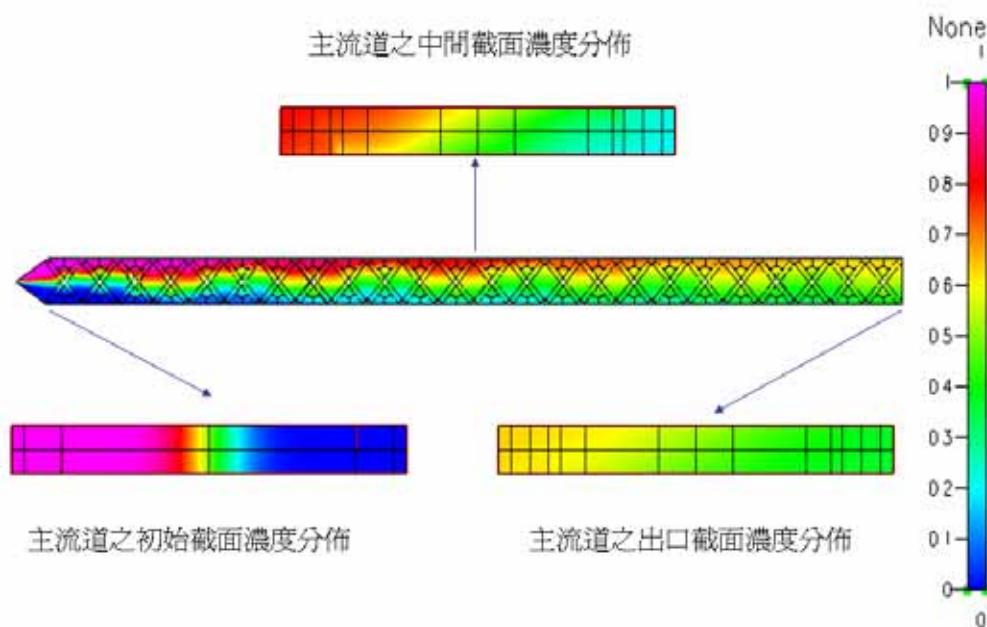


圖 4-22 上下交叉型流道在  $Re=10$  下之濃度分佈圖

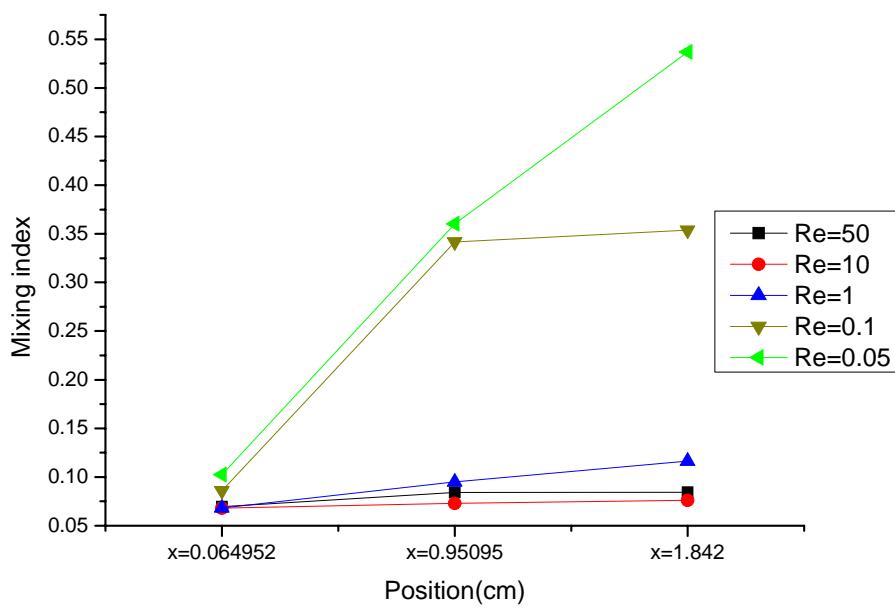


圖 4-23 Y 型直管在不同雷諾數下，不同位置與混合指標的關係

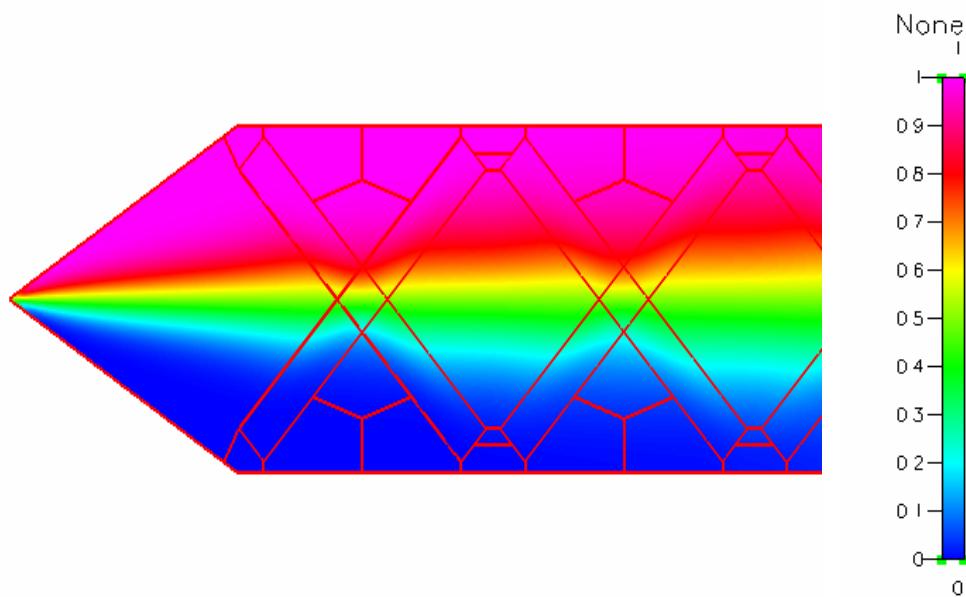


圖 4-24 凸型流道模擬上視圖

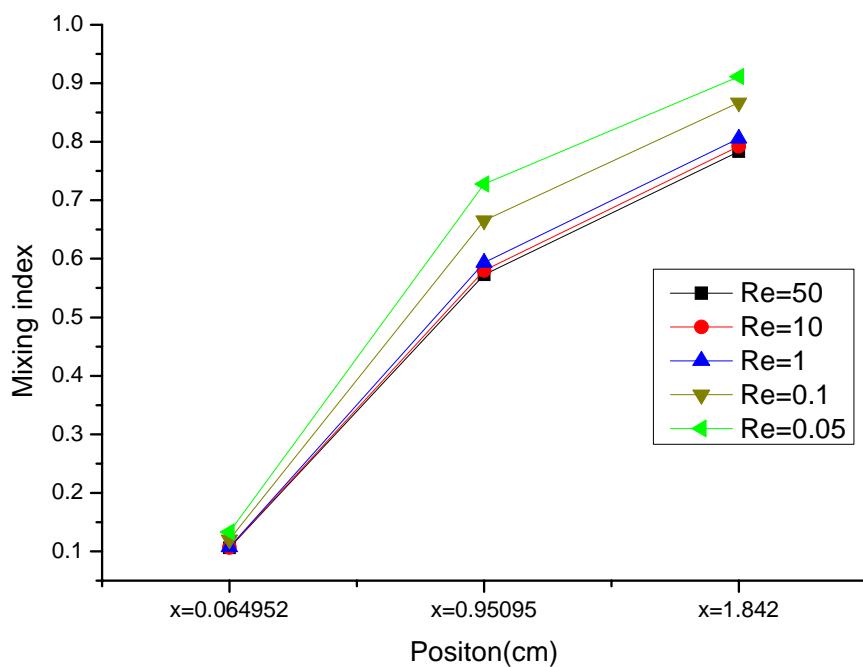


圖 4-25 凹型在不同雷諾數下，不同位置與混合指標的關係

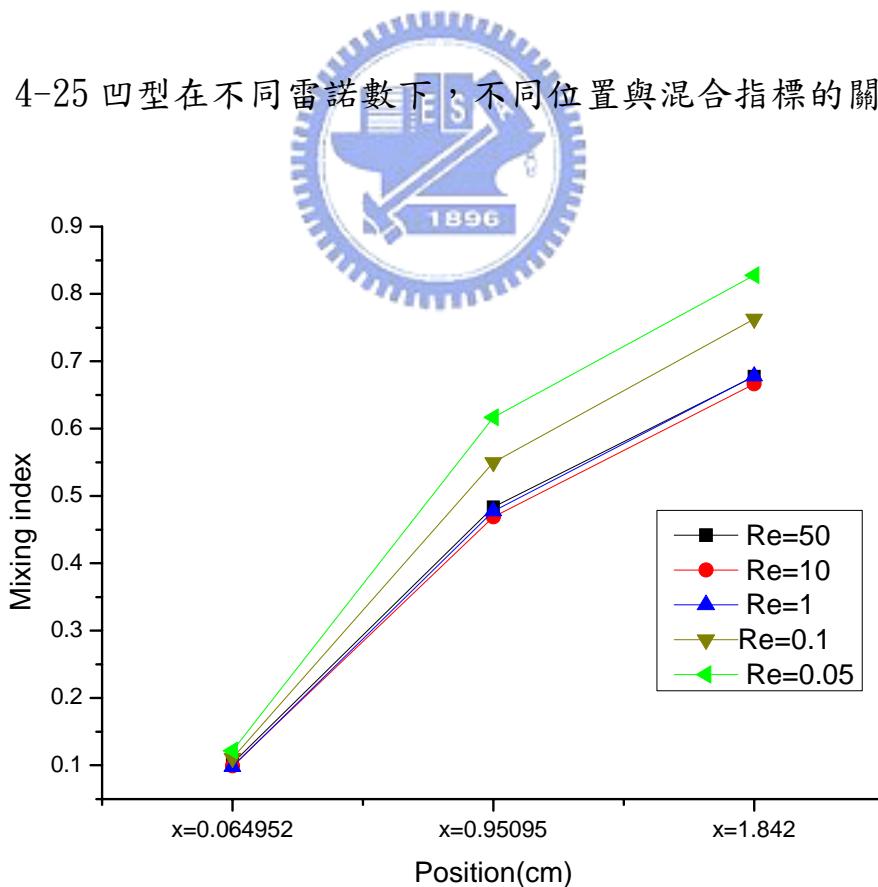


圖 4-26 凸型在不同雷諾數下，不同位置與混合指標的關係

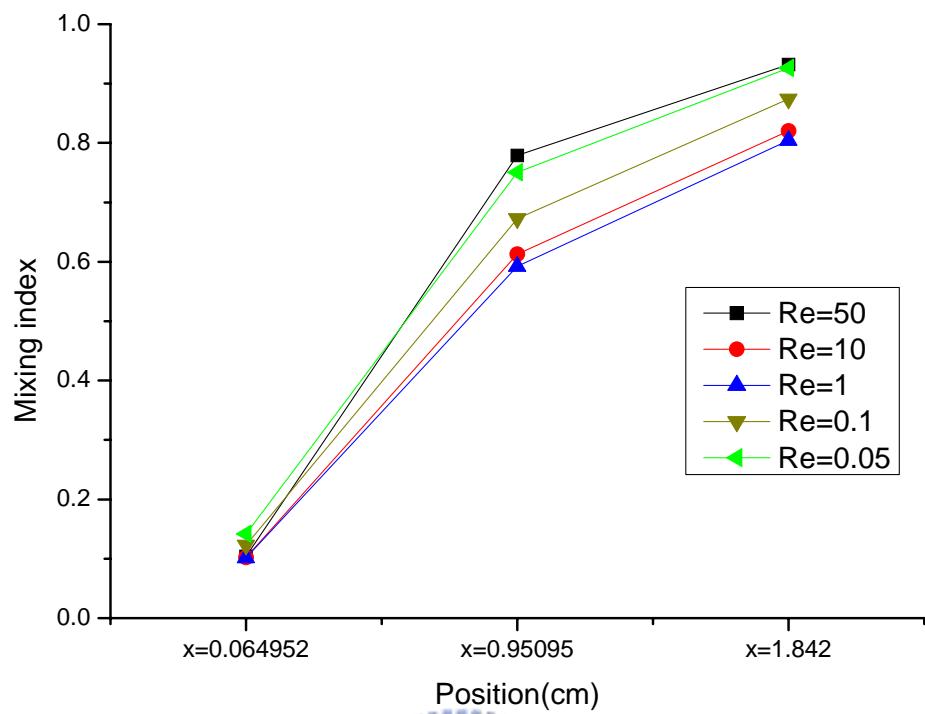


圖 4-27 上下交叉型在不同雷諾數下，不同位置與混合指標的關係



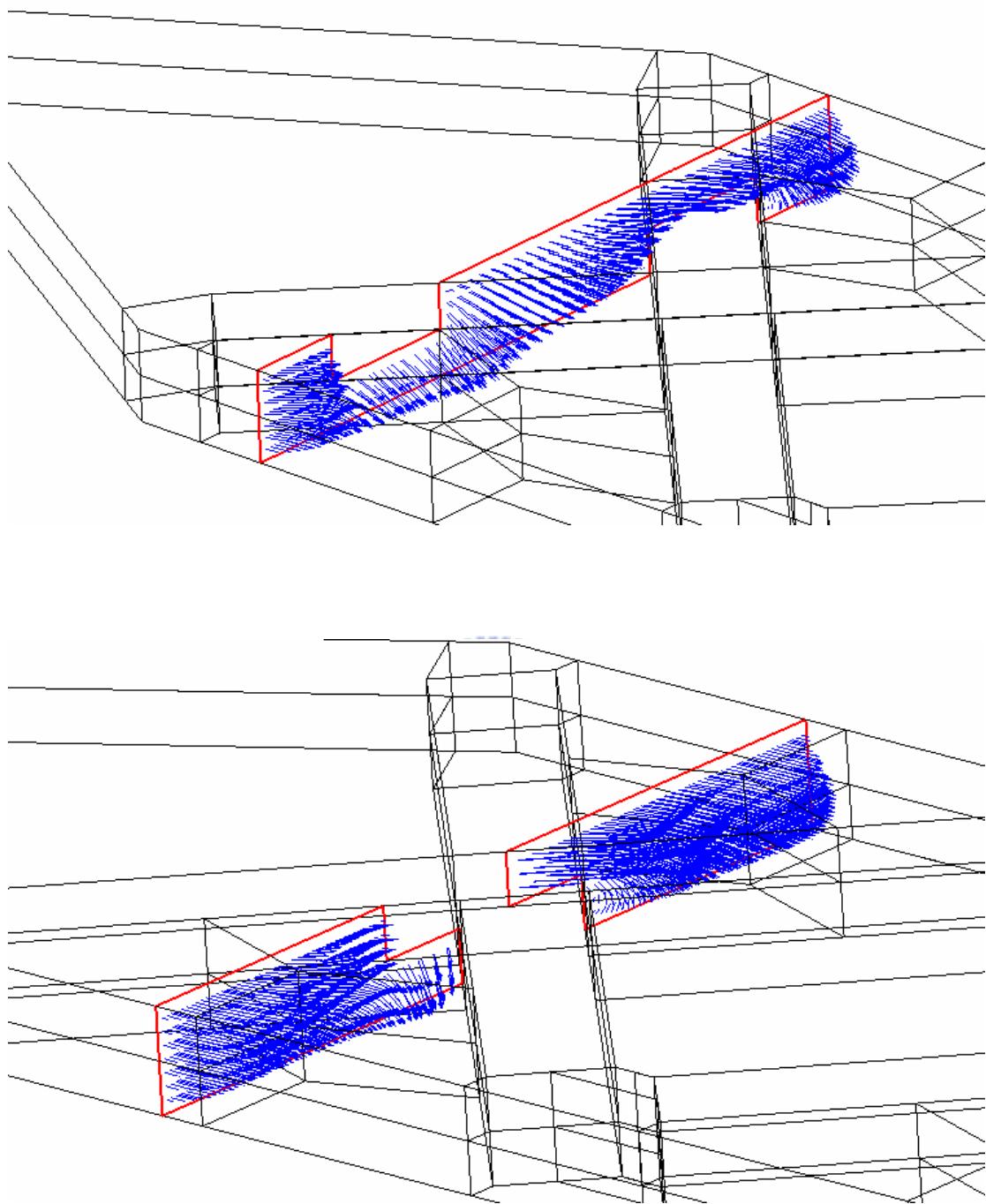


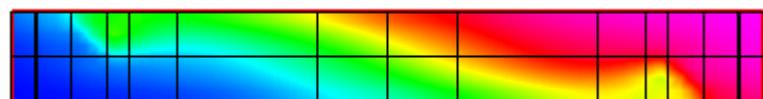
圖 4-28  $Re=50$  時，液體經過上下阻礙物時的速度向量示意圖



(1) 主流道入口截面



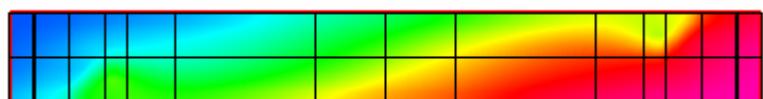
(2) 經過第一個上下交叉阻礙物



(3) 經過第二個上下交叉阻礙物



(4) 經過第三個上下交叉阻礙物



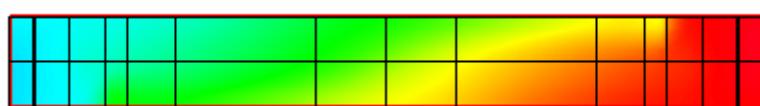
(5) 經過第四個上下交叉阻礙物



(6) 經過第五個上下交叉阻礙物



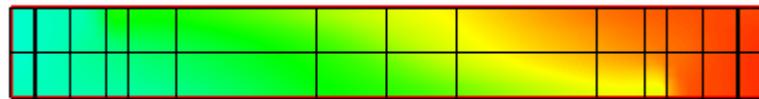
(7) 經過第六個上下交叉阻礙物



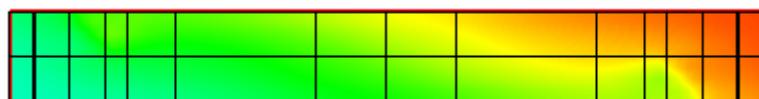
(8) 經過第七個上下交叉阻礙物



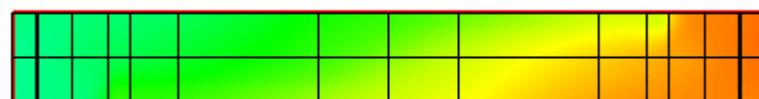
(9) 經過第八個上下交叉阻礙物



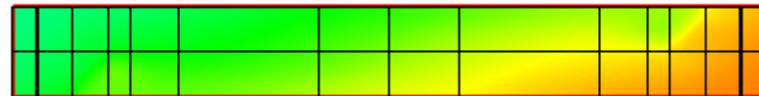
(10) 經過第九個上下交叉阻礙物



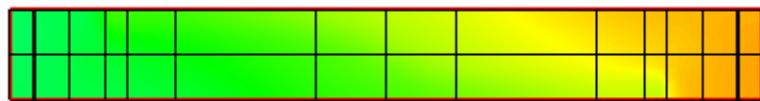
(11) 經過第十個上下交叉阻礙物



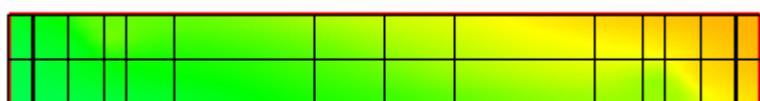
(12) 經過第十一個上下交叉阻礙物



(13) 經過第十二個上下交叉阻礙物



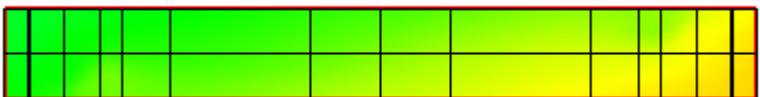
(14) 經過第十三個上下交叉阻礙物



(15) 經過第十四個上下交叉阻礙物



(16) 經過第十五個上下交叉阻礙物



(17) 經過第十六個上下交叉阻礙物

圖 4-29 上下交叉型  $Re=50$  下游各截面濃度分佈圖

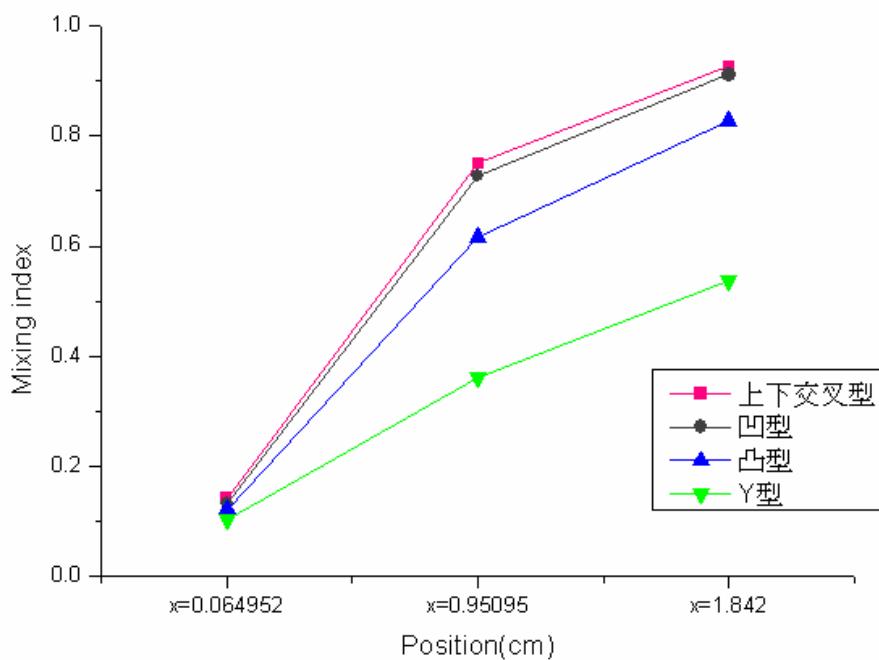


圖 4-30 雷諾數為 0.05 的條件下，凹型、凸型、上下交叉型、Y 型直管與混合指標的關係

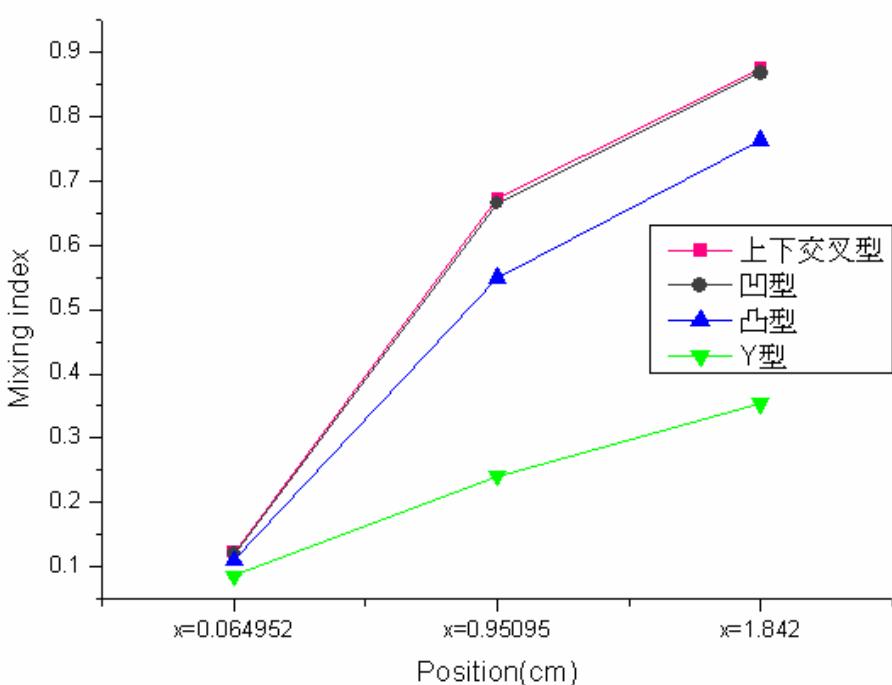


圖 4-31 雷諾數為 0.1 的條件下，凹型、凸型、上下交叉型、Y 型直管與混合指標的關係

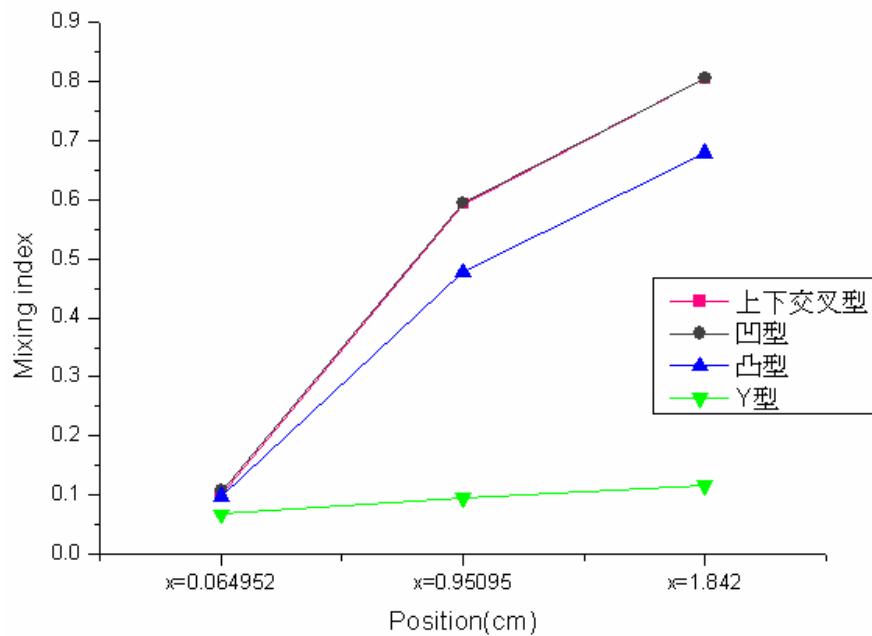


圖 4-32 雷諾數為 1 的條件下，凹型、凸型、上下交叉型、Y 型直管與混合指標的關係

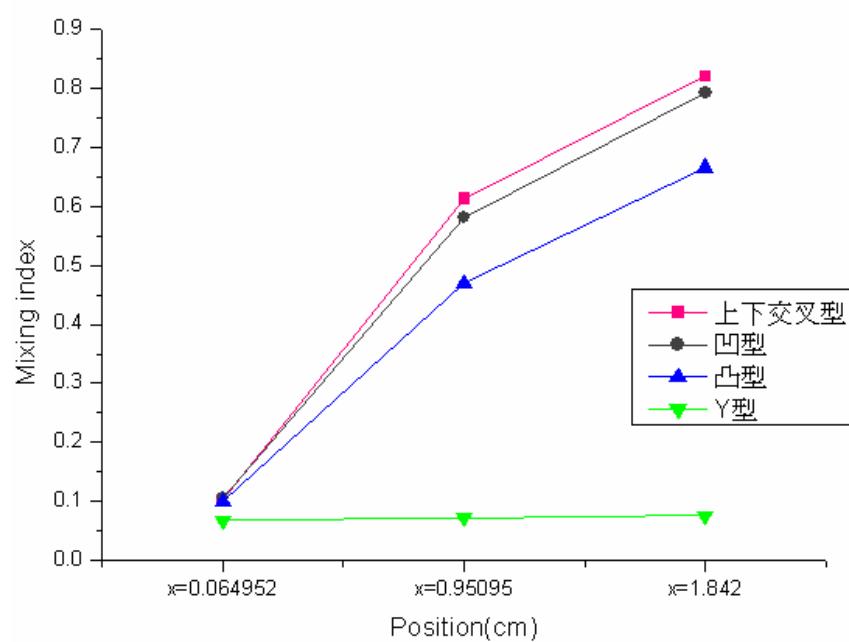


圖 4-33 雷諾數為 10 的條件下，凹型、凸型、上下交叉型、Y 型直管與混合指標的關係

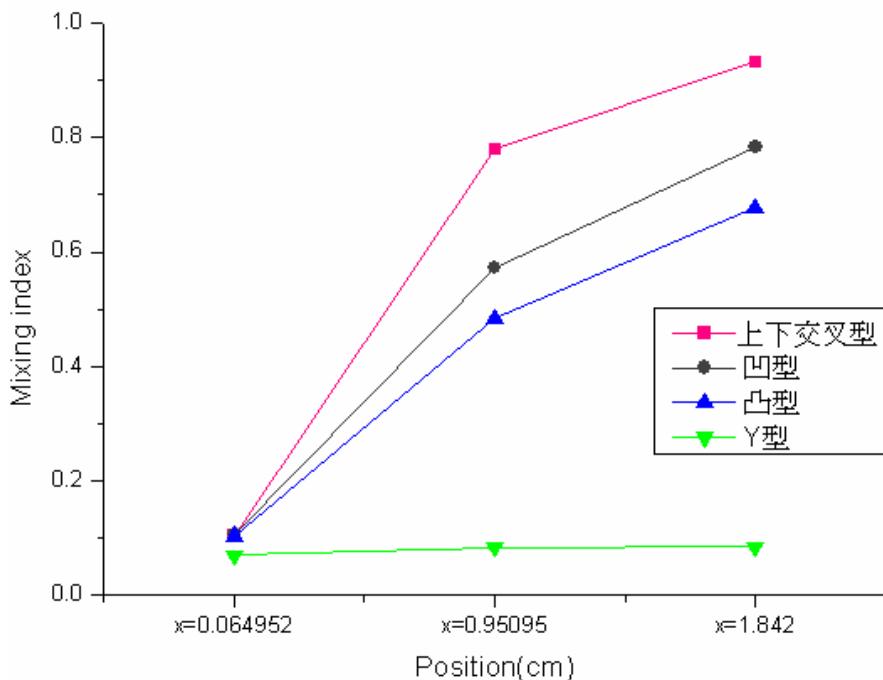


圖 4-34 雷諾數為 50 的條件下，凹型、  
凸型、上下交叉型、Y 型直管與混合指標的關係

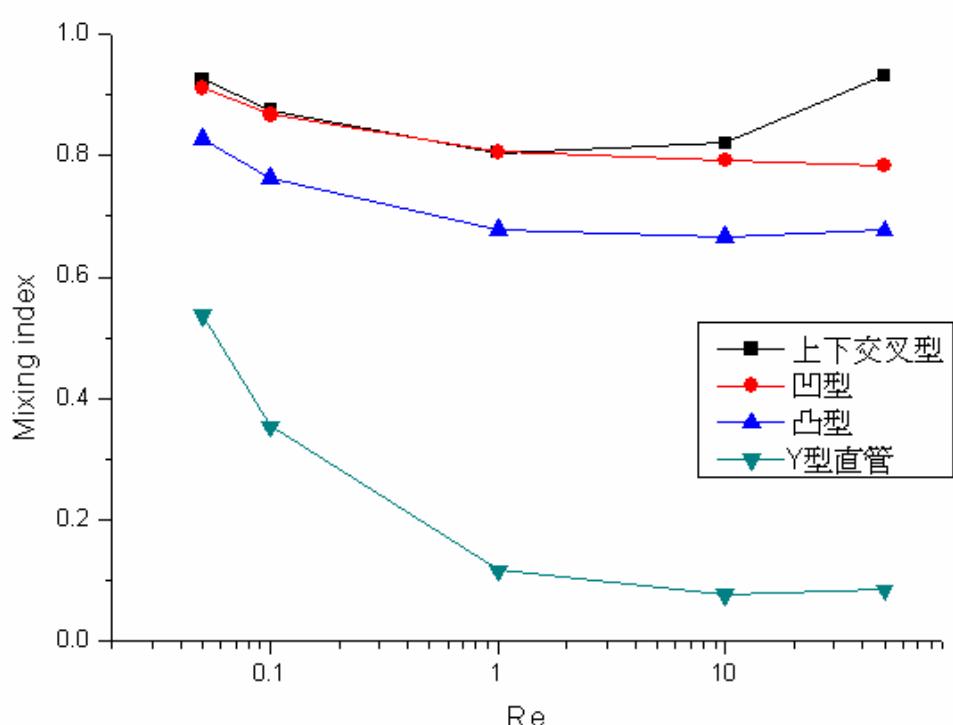
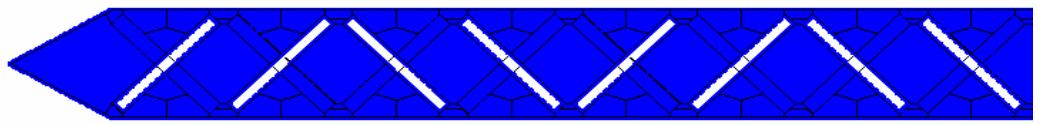
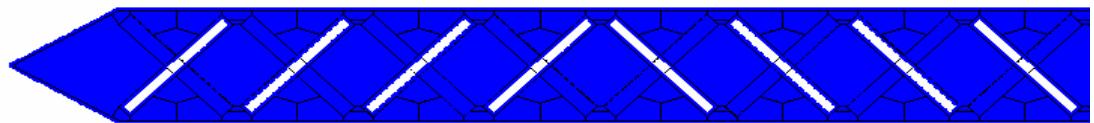


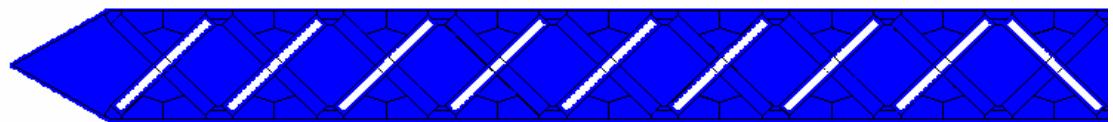
圖 4-35 四種流道在不同雷諾數與出口截面混合指標之關係



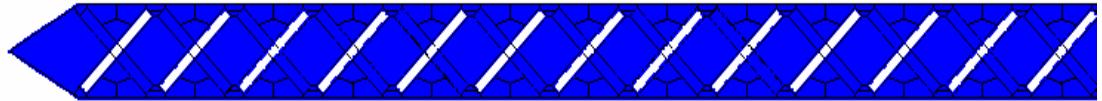
(A)



(B)



(C)



(D)

圖 4-36 上下交叉型不同排列組合示意圖

(A) 2 循環(B) 4 循環(C) 8 循環(D)全循環

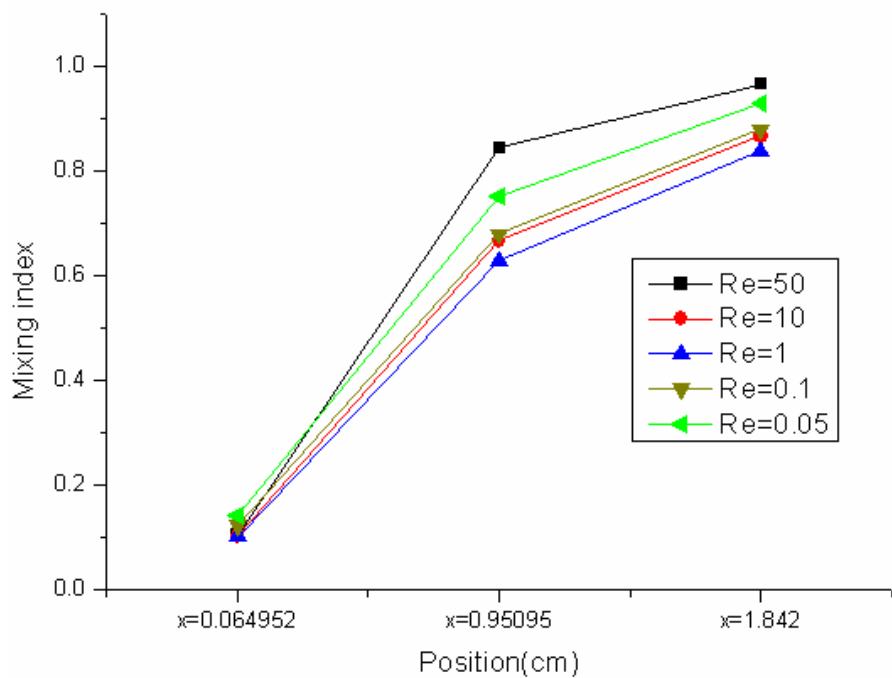


圖 4-37 上下交叉型(4 循環)  
在不同雷諾數下，不同位置與混合指標的關係

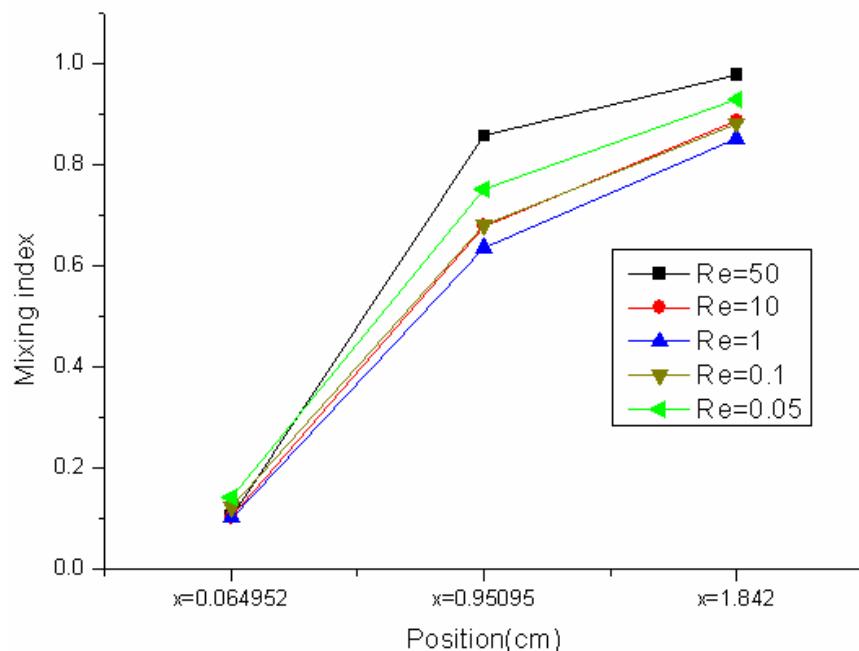


圖 4-38 上下交叉型(8 循環)  
在不同雷諾數下，不同位置與混合指標的關係

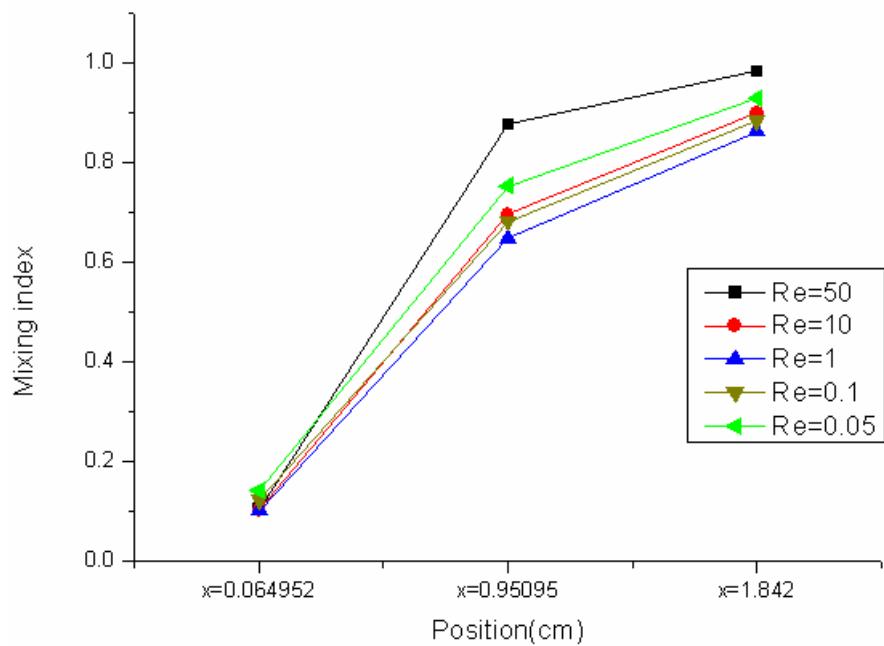


圖 4-39 上下交叉型(全循環)

在不同雷諾數下，不同位置與混合指標的關係

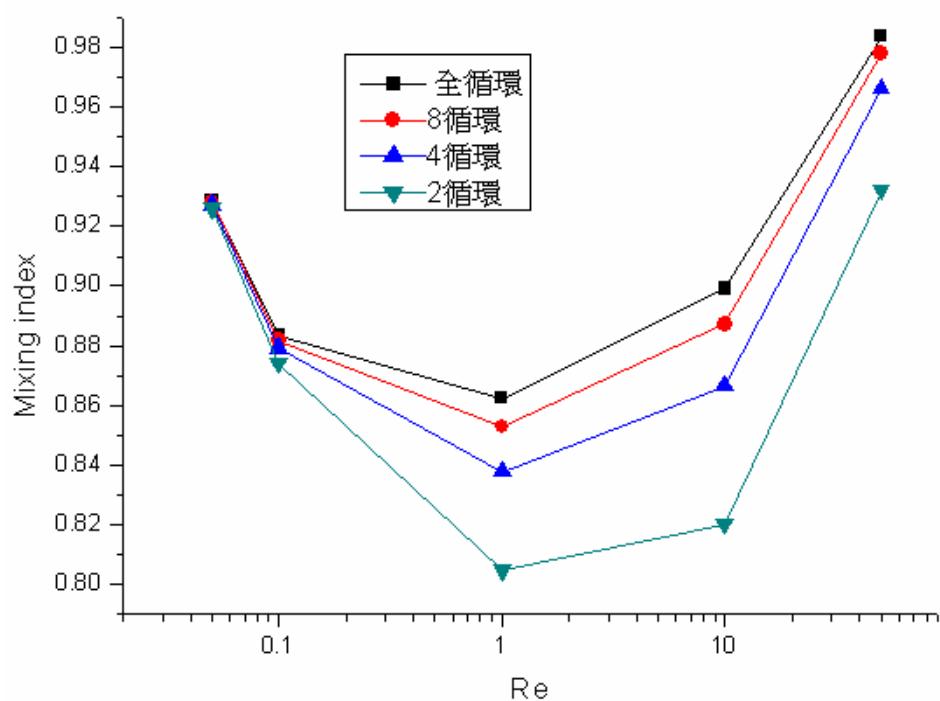
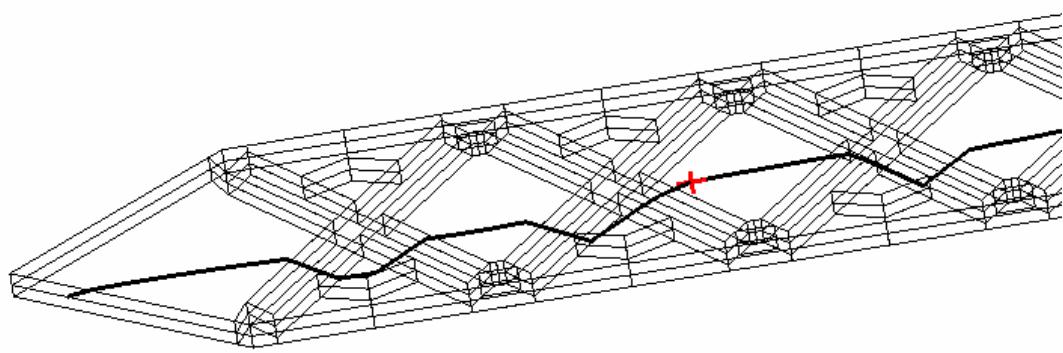
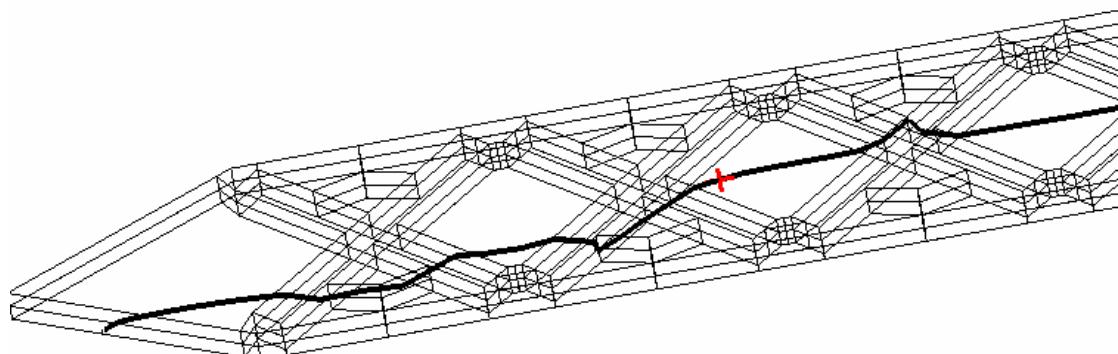


圖 4-40 上下交叉型不同排列組合下，

不同雷諾數與出口混合指標的關係



(A)



(B)

圖 4-41 雷諾數 50 時(A) 2 循環

(B)全循環之流體流動現象