

國立交通大學

土木工程學系
碩士論文

雙穴蝕氣泡破裂流場交互作用之試驗研究

Experimental Study on Interaction of Two Collapsed
Cavitation Bubbles

研 究 生：邱于軒

指導教授：葉克家 博士

中華民國一〇二年九月

雙穴蝕氣泡破裂流場交互作用之試驗研究

Experimental Study on Interaction of Two Collapsed Cavitation Bubbles

研究生：邱于軒

Student：Yu-Hsuan Chiu

指導教授：葉克家

Advisor：Keh-Chia Yeh

國立交通大學



A Thesis

Submitted to Department of Civil Engineering
National Chiao Tung University
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master of Science
in
Civil Engineering
September 2013
Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇二年九月

雙穴蝕氣泡破裂流場交互作用之試驗研究

研究生：邱于軒

指導教授：葉克家 博士

國立交通大學土木工程學系

摘要

本研究利用二組 L 型透明圓管放置於 U 型平台上旋轉，個別產生單一穴蝕氣泡，並將其中一顆氣泡藉由連通管移至另一試管之特定位置上。藉由調整兩顆氣泡間的距離，並使用壓力震波將試管內二顆氣泡震破，藉此分析二顆氣泡的破裂行為，在氣泡破裂後會於氣泡中間形成液體帶狀區，形成低流速、高壓力情況。

本研究使用高速攝影機，以每秒 8000 到 10000 張連續拍攝氣泡破裂過程的影像並做分析，分析各種不同間距氣泡破裂流場交互作用的特性。並應用質點影像測速法，進行流場交互作用的演變過程量測與細部速度場量測。根據 PIV 計算結果顯示，此液體帶狀區如輻射狀往周邊散開，不但影響破裂後的流場運動，同時也產生二氣泡之間的流體紊亂情況。氣泡受壓力震波後，氣泡之間的壓力波相互影響而導致流場紊亂，流場紊亂處有 Rayleigh-Taylor 不穩定、Kelvin-Helmholtz 不穩定和 Richtmyer-Meshkov 不穩定現象發生。

實驗結果發現，距離參數 γ 值越小，壓力場之變化對氣泡外觀、推力及交互作用愈明顯。當 γ 值遠大於氣泡半徑時，二氣泡間破裂現象不互相牽引，等同於單一氣泡運動的過程。此外，二氣泡破裂的複雜現象可清楚展示與分析。

關鍵字：雙氣泡、穴蝕、質點影像測速法、交互作用

Experimental Study on Interaction of Two Collapsed Cavitation Bubbles

Student: Yu-Hsuan Chiu

Advisor: Keh-Chia Yeh

Department of Civil Engineering
National Chiao Tung University

Abstract

In this study, two cavitation bubbles were generated by rotating a U-tube filled with water. Cavitation bubbles are generated separately in two different L-tubes. One of the cavitation bubbles was then moved to a specific stand-off distance from the other bubble through a connection tube. Adjusting these two bubbles to the desired stand-off distance, a pressure pulse was then triggered to induce the bubble collapse flow. After the bubble collapsed, a liquid zone with low velocity and high pressure was produced.

A high speed camera, recording 8000 to 10000 frames per second, was adopted to take the sequential images of the bubble collapse flows in this study. The characteristics of the interaction of the bubble collapse flows were analyzed based on the recorded sequential images. The detailed velocity fields of the interactions of the collapsed bubble flows were measured by particle image velocity (PIV) method. According to PIV measurements, results revealed that the formed liquid zone propagated radially. The movement of the liquid zone not only influences the motion of the flow field, but also produces disturbed flow between the bubbles. After the pressure imposed on the bubbles, the effect of the interaction of the pressure waves between two bubbles led to the disturbed flow field, resulted in the Kelvin-Helmholtz, Richtmyer-Meshkov and Rayleigh-Taylor instabilities.

Experimental results showed that the effect of changes in the pressure field on the bubble appearance, thrust and interactions increased as the distance parameter γ value decreased. While the distance parameter γ value was much larger than the radius of the bubble, the bubble collapsing phenomenon would not be affected by the drag of each bubble. The phenomenon was equivalent to the motion process of a single bubble. In addition, the complex phenomena of the collapsing flows of two cavitation bubbles were presented and analyzed clearly.

Keywords : *two bubbles, cavitation, PIV, interaction*

謝誌

本文承蒙恩師葉教授克家之細心指導與諄諄教誨，於做事方法與態度、分析與獨立解決問題能力之培養及邏輯思考的訓練讓學生受益良多。並於日常生活中，受到恩師與師母的關心與照顧，謹此獻上最誠摯之謝忱。

感謝國立海洋大學趙教授勝裕及國立交通大學環境與水環境研究中心研究員楊博士昇學細心斧正與建議，使本論文更臻完善；並感謝國立台灣大學工科系蔡教授武廷；國立交通大學土木系楊教授錦釗、張教授良正、張教授憲國及機械系崔教授燕勇、傅教授武雄、徐教授瑞坤在課業上的教導，讓學生受益良多。

研究所期間，非常感謝土木系河川輸砂研究室楊博士昇學、紹唐學長頃囊相授、盡心盡力指導。感謝仲達、仁凱、東洲、唯泰、信富、韋豪、家榮學長；彥瑜、岱玲學姐及機械系仕文學長學業及研究上的幫助與鼓勵。感謝研究室同學健賓、威辰和水利海洋組全體同學及機械系同學保杰、俊龍、崑哲，這兩年因為認識了你們，使研究生生活更加充實。感謝專題生育嫻，讓我有機會教導妳實驗和共同討論，讓我對實驗更加熟練。感謝學弟志鴻、大原、鈞凱、高思、冠翰在生活中的互相幫忙。感謝東吳大學外文系吳欣羽同學及中華大學機械系吳教授泓瑜在英文摘要上的協助。感謝長洛儀器公司昀憲經理熱心指導高速攝影機的安裝過程及使用流程，讓我在實驗上更加如雲流水。感謝助理念樺；土木系辦怡君、宜芳、容君、秀琪在行政業務上的幫忙。

最衷心感謝的是含辛茹苦，撫育、陪伴我成長的父(國桂)、母(美容)與妹(于珈)，由於您們的扶持與栽培，使我有往前邁進的動力，即使從小在求學過程不是這麼的順利，但您們還是永遠在我後面為我加油打氣，並感謝女友俐婕及女友的家人對我的關懷、支持與鼓勵，這份榮耀是屬於您們的。謝謝所有關心我的師長們、朋友們、同學們，沒有您們在我成長的路上鞭策我，也不會有今日的于軒，真的謝謝您們。

邱于軒 謹銘於國立交通大學河川輸砂研究室 102.09

目錄

摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
謝誌.....	III
目錄.....	IV
圖目錄.....	VIII
表目錄.....	XIV
符號說明.....	XV
第一章 導論.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	1
1.3 文獻回顧.....	2
1.3.1 氣泡相關研究.....	2
1.3.2 雙氣泡相互作用研究.....	7
1.3.3 穴蝕類型分類研究.....	9
1.3.4 汽液二相流的水流型式研究.....	11
1.3.5 質點影像測速法之研究.....	13
1.4 研究方法.....	15
1.5 本文組織.....	15
第二章 基礎理論.....	19
2.1 穴蝕理論.....	19
2.1.1 穴蝕定義.....	19

2.1.2 穴蝕數.....	19
2.1.3 穴蝕汽化核.....	20
2.1.4 穴蝕作用.....	20
2.2 穴蝕氣泡生成理論.....	20
2.2.1 壓力差理論.....	20
2.2.2 離心力理論.....	21
2.3 氣泡動力學基礎理論.....	21
2.3.1 氣泡動力學假設.....	21
2.3.2 Rayleigh-Plesset 方程式.....	22
2.3.3 氣泡能量守恆.....	24
2.3.4 穴蝕氣泡破裂時間.....	24
2.4 質點影像測速法及影像分析.....	25
2.4.1 質點影像測速法.....	25
2.4.2 影像處理.....	25
2.4.3 質點影像分析理論.....	26
2.4.4 PIV 影像計算之誤差.....	31
2.5 流體中之不穩定現象.....	33
2.5.1 Rayleigh–Taylor instability.....	33
2.5.2 Richtmyer–Meshkov instability.....	33
2.5.3 Kelvin–Helmholtz instability.....	34
第三章 試驗儀器與佈置規劃.....	45
3.1 試驗模型.....	45
3.2 氣泡生成系統.....	45
3.3 光學設備系統.....	46
3.4 質點追蹤粒子.....	47

3.5 訊號控制系統	47
3.6 壓力脈衝系統	48
3.7 影像系統	48
3.7.1 影像擷取系統	48
3.7.2 影像分析系統	49
3.8 試驗設計	49
3.9 試驗程序	50
第四章 試驗結果與分析	61
4.1 氣泡周圍之流場變化及渦度變化	61
4.1.1 氣泡周圍之流場變化	61
4.1.2 氣泡周圍之渦度變化	61
4.2 氣泡中之液體噴流現象	62
4.3 試驗結果定性分析	63
4.3.1 $\gamma \approx 2$ 雙氣泡破裂交互作用之分析	63
4.3.2 $\gamma \approx 3$ 雙氣泡破裂交互作用之分析	65
4.3.3 $\gamma \approx 4$ 雙氣泡破裂交互作用之分析	67
4.3.4 $\gamma \approx 5$ 雙氣泡破裂交互作用之分析	68
4.3.5 $\gamma \approx 6$ 雙氣泡破裂交互作用之分析	70
4.3.6 $\gamma > 6$ 雙氣泡破裂交互作用之分析	71
4.3.7 小結	73
4.4 試驗結果定量分析	73
4.4.1 壓力場分析	73
4.4.2 渦度場分析	74
4.4.3 速度場分析	76
4.4.4 小結	77

第五章 結論與建議	173
5.1 結論	173
5.2 建議	174
參考文獻	176
附錄一 KELVIN–HELMHOLTZ INSTABILITY 定理	180



圖目錄

圖 1.1 穴蝕氣泡形成方法的分類(LAUTERBORN,1996).....	17
圖 1.2 垂直流型式示意圖(ROUHANI & SOHAL, 1983).....	17
圖 1.3 水平流型式示意圖(ESCARAMAIA ET AL. ,2005).....	18
圖 2.1 不同半徑處之壓力分佈示意圖	35
圖 2.2 氣泡內外相關位置示意圖	35
圖 2.3 PIV 影像分析法(FUJITA, 1998).....	36
圖 2.4 具時序性影像之質點亮度分佈值	37
圖 2.5 PIV 計算質問窗大小之示意圖	37
圖 2.6 PIV 計算流程圖	38
圖 2.7 互相關係數之最大值為最有可能 M 與 N 位移量之示意圖	39
圖 2.8 質問窗內子畫素修正法之互相關係數值示意圖	39
圖 2.9 不一致流速向量 (右下部分).....	40
圖 2.10 去除不一致流速向量	40
圖 2.11 RMS 誤差之示意圖	40
圖 2.12 偏差誤差之示意圖	41
圖 2.13 方均根誤差量	41
圖 2.14 偏移誤差量	41
圖 2.15 兩種不同流體的運動，上層速度往右移動、下層往左移動	42
圖 2.16 為圖 2.15 之 PIV 計算結果，於交界面處產生流體交互作用	42
圖 2.17 為圖 2.16 於 288PX 位置處之質點位移速度分佈	43
圖 2.18 不同流體間之重力或慣性力相互作用下產生	43
圖 2.19 不同流體間震波與界面相互作用下產生	44
圖 2.20 不同流體間之剪應力相互作用下產生	44

圖 3.1 試驗模型.....	52
圖 3.2 試驗模型放置轉軸中心位置圖	52
圖 3.3 U 型旋轉實驗裝置.....	53
圖 3.4 直流無刷馬達	53
圖 3.5 伺服驅動器.....	54
圖 3.6 U 型旋轉實驗裝置示意圖.....	54
圖 3.7 試驗儀器佈置圖	55
圖 3.8 IDT 公司 LED 燈源	55
圖 3.9 ARGON 雷射	56
圖 3.10 雷射光束通過聚光凸透鏡與透明圓柱棒形成之水平光頁	56
圖 3.11 TSI 公司之中空玻璃球(GLASS BEADS-HOLLOW).....	57
圖 3.12 壓力感應器	57
圖 3.13 NI-6221 訊號處理卡	58
圖 3.14 壓力脈衝系統	58
圖 3.15 IDT NXT8-S2 高速攝影機	59
圖 3.16 IDT NXT8-S2 高速攝影機系統	59
圖 3.17 試驗示意圖	60
圖 3.18 影像及壓力變化記錄於電腦	60
圖 4.1 距離參數 $\Gamma \approx 2$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆破之過程	79
圖 4.2 距離參數 $\Gamma \approx 2$ 之雙穴蝕氣泡左破右不破之過程	80
圖 4.3 距離參數 $\Gamma \approx 2$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆不破之過程	81
圖 4.4 距離參數 $\Gamma \approx 3$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆破之過程	82
圖 4.5 距離參數 $\Gamma \approx 3$ 之雙穴蝕氣泡左破右不破之過程	83
圖 4.6 距離參數 $\Gamma \approx 3$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆不破之過程	84
圖 4.7 距離參數 $\Gamma \approx 4$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆破之過程	85

圖 4.8 距離參數 $\Gamma \approx 4$ 之雙穴蝕氣泡左破右不破之過程	86
圖 4.9 距離參數 $\Gamma \approx 4$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆不破之過程	87
圖 4.10 距離參數 $\Gamma \approx 5$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆破之過程	88
圖 4.11 距離參數 $\Gamma \approx 5$ 之雙穴蝕氣泡左破右不破之過程	89
圖 4.12 距離參數 $\Gamma \approx 5$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆不破之過程	90
圖 4.13 距離參數 $\Gamma \approx 6$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆破之過程	91
圖 4.14 距離參數 $\Gamma \approx 6$ 之雙穴蝕氣泡左破右不破之過程	92
圖 4.15 距離參數 $\Gamma \approx 6$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆不破之過程	93
圖 4.16 距離參數 $\Gamma > 6$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆破之過程	94
圖 4.17 距離參數 $\Gamma > 6$ 之雙穴蝕氣泡左破右不破之過程	95
圖 4.18 距離參數 $\Gamma > 6$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆不破之過程	96
圖 4.19 距離參數 $\Gamma \approx 2$ 管內兩顆皆破之壓力波強度變化關係	97
圖 4.20 距離參數 $\Gamma \approx 2$ 管內左破右不破之壓力波強度變化關係	97
圖 4.21 距離參數 $\Gamma \approx 2$ 管內兩顆皆不破之壓力波強度變化關係	98
圖 4.22 距離參數 $\Gamma \approx 3$ 管內兩顆皆破之壓力波強度變化關係	98
圖 4.23 距離參數 $\Gamma \approx 3$ 管內左破右不破之壓力波強度變化關係	99
圖 4.24 距離參數 $\Gamma \approx 3$ 管內兩顆皆不破之壓力波強度變化關係	99
圖 4.25 距離參數 $\Gamma \approx 4$ 管內兩顆皆破之壓力波強度變化關係	100
圖 4.26 距離參數 $\Gamma \approx 4$ 管內左破右不破之壓力波強度變化關係	100
圖 4.27 距離參數 $\Gamma \approx 4$ 管內兩顆皆不破之壓力波強度變化關係	101
圖 4.28 距離參數 $\Gamma \approx 5$ 管內兩顆皆破之壓力波強度變化關係	101
圖 4.29 距離參數 $\Gamma \approx 5$ 管內左破右不破之壓力波強度變化關係	102
圖 4.30 距離參數 $\Gamma \approx 5$ 管內兩顆皆不破之壓力波強度變化關係	102
圖 4.31 距離參數 $\Gamma \approx 6$ 管內兩顆皆破之壓力波強度變化關係	103
圖 4.32 距離參數 $\Gamma \approx 6$ 管內左破右不破之壓力波強度變化關係	103

圖 4.33 距離參數 $\Gamma \approx 6$ 管內兩顆皆不破之壓力波強度變化關係	104
圖 4.34 距離參數 $\Gamma > 6$ 管內兩顆皆破之壓力波強度變化關係	104
圖 4.35 距離參數 $\Gamma > 6$ 管內左破右不破之壓力波強度變化關係	105
圖 4.36 距離參數 $\Gamma > 6$ 管內左破右不破之壓力波強度變化關係	105
圖 4.37 壓力場比較圖	106
圖 4.38 距離參數 $\Gamma \approx 2$ 兩顆皆破之速度流場	108
圖 4.39 為圖 4.38 第 01 張 PIV 影像之渦度圖	108
圖 4.40 距離參數 $\Gamma \approx 2$ 左破右不破之速度流場	110
圖 4.41 為圖 4.40 第 04 張 PIV 影像之渦度圖	110
圖 4.42 距離參數 $\Gamma \approx 2$ 兩顆皆不破之速度流場	112
圖 4.43 為圖 4.42 第 04 張 PIV 影像之渦度圖	112
圖 4.44 距離參數 $\Gamma \approx 3$ 兩顆皆破之速度流場	114
圖 4.45 為圖 4.44 第 04 張 PIV 影像之渦度圖	114
圖 4.46 距離參數 $\Gamma \approx 3$ 左破右不破之速度流場	116
圖 4.47 為圖 4.46 第 06 張 PIV 影像之渦度圖	116
圖 4.48 距離參數 $\Gamma \approx 3$ 兩顆皆不破之速度流場	118
圖 4.49 為圖 4.48 第 03 張 PIV 影像之渦度圖	118
圖 4.50 距離參數 $\Gamma \approx 4$ 兩顆皆破之速度流場	120
圖 4.51 為圖 4.50 第 03 張 PIV 影像之渦度圖	120
圖 4.52 距離參數 $\Gamma \approx 4$ 左破右不破之速度流場	122
圖 4.53 為圖 4.52 第 03 張 PIV 影像之渦度圖	122
圖 4.54 距離參數 $\Gamma \approx 4$ 兩顆皆不破之速度流場	124
圖 4.55 為圖 4.54 第 06 張 PIV 影像之渦度圖	124
圖 4.56 距離參數 $\Gamma \approx 5$ 兩顆皆破之速度流場	126
圖 4.57 為圖 4.56 第 06 張 PIV 影像之渦度圖	126

圖 4.58 距離參數 $\Gamma \approx 5$ 左破右不破之速度流場	128
圖 4.59 為圖 4.58 第 07 張 PIV 影像之渦度圖	128
圖 4.60 距離參數 $\Gamma \approx 5$ 兩顆皆不破之速度流場	130
圖 4.61 為圖 4.60 第 05 張 PIV 影像之渦度圖	130
圖 4.62 距離參數 $\Gamma \approx 6$ 兩顆皆破之速度流場	132
圖 4.63 為圖 4.62 第 06 張 PIV 影像之渦度圖	132
圖 4.64 距離參數 $\Gamma \approx 6$ 左破右不破之速度流場	134
圖 4.65 為圖 4.64 第 07 張 PIV 影像之渦度圖	134
圖 4.66 距離參數 $\Gamma \approx 6$ 兩顆皆不破之速度流場	136
圖 4.67 為圖 4.66 第 07 張 PIV 影像之渦度圖	136
圖 4.68 距離參數 $\Gamma > 6$ 兩顆皆破之速度流場	138
圖 4.69 為圖 4.68 第 07 張 PIV 影像之渦度圖	138
圖 4.70 距離參數 $\Gamma > 6$ 左破右不破之速度流場	140
圖 4.71 為圖 4.70 第 07 張 PIV 影像之渦度圖	140
圖 4.72 距離參數 $\Gamma > 6$ 兩顆皆不破之速度流場	142
圖 4.73 為圖 4.72 第 01 張 PIV 影像之渦度圖	142
圖 4.74 距離參數 $\Gamma \approx 2$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆破之速度變化歷線	143
圖 4.75 距離參數 $\Gamma \approx 2$ 之雙穴蝕氣泡左破右不破之速度變化歷線	143
圖 4.76 距離參數 $\Gamma \approx 2$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆不破之速度變化歷線	144
圖 4.77 距離參數 $\Gamma \approx 3$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆破之速度變化歷線	144
圖 4.78 距離參數 $\Gamma \approx 3$ 之雙穴蝕氣泡左破右不破之速度變化歷線	145
圖 4.79 距離參數 $\Gamma \approx 3$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆不破之速度變化歷線	145
圖 4.80 距離參數 $\Gamma \approx 4$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆破之速度變化歷線	146
圖 4.81 距離參數 $\Gamma \approx 4$ 之雙穴蝕氣泡左破右不破之速度變化歷線	146
圖 4.82 距離參數 $\Gamma \approx 4$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆不破之速度變化歷線	147

圖 4.83 距離參數 $\Gamma \approx 5$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆破之速度變化歷線.....	147
圖 4.84 距離參數 $\Gamma \approx 5$ 之雙穴蝕氣泡左破右不破之速度變化歷線.....	148
圖 4.85 距離參數 $\Gamma \approx 5$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆不破之速度變化歷線.....	148
圖 4.86 距離參數 $\Gamma \approx 6$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆破之速度變化歷線.....	149
圖 4.87 距離參數 $\Gamma \approx 6$ 之雙穴蝕氣泡左破右不破之速度變化歷線.....	149
圖 4.88 距離參數 $\Gamma \approx 6$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆不破之速度變化歷線.....	150
圖 4.89 距離參數 $\Gamma > 6$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆破之速度變化歷線.....	150
圖 4.90 距離參數 $\Gamma > 6$ 之雙穴蝕氣泡左破右不破之速度變化歷線.....	151
圖 4.91 距離參數 $\Gamma > 6$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆不破之速度變化歷線.....	151
圖 4.92 距離參數 $\Gamma \approx 2$ 時不同破裂現象之渦度值分佈.....	152
圖 4.93 距離參數 $\Gamma \approx 3$ 時不同破裂現象之渦度值分佈.....	152
圖 4.94 距離參數 $\Gamma \approx 4$ 時不同破裂現象之渦度值分佈.....	153
圖 4.95 距離參數 $\Gamma \approx 5$ 時不同破裂現象之渦度值分佈.....	153
圖 4.96 距離參數 $\Gamma \approx 6$ 時不同破裂現象之渦度值分佈.....	154
圖 4.97 距離參數 $\Gamma > 6$ 時不同破裂現象之渦度值分佈.....	154

表目錄

表 4.1 距離參數 $\Gamma \approx 2$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆破之速度與壓力關係.....	155
表 4.2 距離參數 $\Gamma \approx 2$ 之雙穴蝕氣泡左破右不破之速度與壓力關係.....	156
表 4.3 距離參數 $\Gamma \approx 2$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆不破之速度與壓力關係.....	157
表 4.4 距離參數 $\Gamma \approx 3$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆破之速度與壓力關係.....	158
表 4.5 距離參數 $\Gamma \approx 3$ 之雙穴蝕氣泡左破右不破之速度與壓力關係.....	159
表 4.6 距離參數 $\Gamma \approx 3$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆不破之速度與壓力關係.....	160
表 4.7 距離參數 $\Gamma \approx 4$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆破之速度與壓力關係.....	161
表 4.8 距離參數 $\Gamma \approx 4$ 之雙穴蝕氣泡左破右不破之速度與壓力關係.....	162
表 4.9 距離參數 $\Gamma \approx 4$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆不破之速度與壓力關係.....	163
表 4.10 距離參數 $\Gamma \approx 5$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆破之速度與壓力關係.....	164
表 4.11 距離參數 $\Gamma \approx 5$ 之雙穴蝕氣泡左破右不破之速度與壓力關係.....	165
表 4.12 距離參數 $\Gamma \approx 5$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆不破之速度與壓力關係.....	166
表 4.13 距離參數 $\Gamma \approx 6$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆破之速度與壓力關係.....	167
表 4.14 距離參數 $\Gamma \approx 6$ 之雙穴蝕氣泡左破右不破之速度與壓力關係.....	168
表 4.15 距離參數 $\Gamma \approx 6$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆不破之速度與壓力關係.....	169
表 4.16 距離參數 $\Gamma > 6$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆破之速度與壓力關係.....	170
表 4.17 距離參數 $\Gamma > 6$ 之雙穴蝕氣泡左破右不破之速度與壓力關係.....	171
表 4.18 距離參數 $\Gamma > 6$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆不破之速度與壓力關係.....	172

符號說明

u : 氣泡外之速度

R_0 : 氣泡初始半徑

R_{\max} : 氣泡半徑

K : 穴蝕數

L : 特性尺寸

S : 液體表面張力

D_0 : 敏感度

r : 氣泡表面外之某一點至氣泡中心點距離

t : 時間

P_0 : 液體壓力

P_∞ : 遠處之液體壓力

P_v : 液體蒸氣壓

g : 重力加速度

Re : 雷諾數

Ma : 馬赫數

\dot{R} : 氣泡交界面速度

\ddot{R} : 對氣泡交界面速度微分

Δh : 水位差

t_{rr} : 正向應力

d_i : 質問窗之位移量

d_m : 質問窗位移平均值

d_b : 偏移誤差



d_a : 已知真實位移值

Ω : 渦度

τ : 氣泡破裂時間特徵

σ : 表面張力

μ : 黏滯係數

γ_g : 氣體比熱

ω : 旋轉角速度

ρ : 流體的質量密度

ε_m : m 在 i 方向質問窗內質點之平均位移量與實際值間之校正差值

ε_n : n 在 j 方向質問窗內質點之平均位移量與實際值間之校正差值

Vel : 周邊速度向量值之絕對差值

θ_i : $u(k,l)$ 與 $v(k,l)$ 之夾角

ψ : 質問窗位移量與平均值位移差之平方總和

$val(k, l)$: 判別有效之向量值

$\Phi_{cross}(m, n)$: 最大值作為判定 m 與 n 位移量

$\bar{C}_{nor}(m, n)$: 影像質問窗比對之互相關係數

第一章 導論

1.1 研究動機

流場中的流體，因流場中的幾何形狀改變，致使流速增加、壓力降低，當壓力降至趨近於當時溫度之水蒸氣壓時，水中的氣體將逐漸釋出，產生穴蝕氣泡。這些氣泡隨著流體運動至高壓區，受到高壓擠壓而破裂，產生穴蝕(cavitation)現象。

氣泡動力學至今已經有一百多年的研究歷史，但是國內外水工結構物的穴蝕現象仍時常發生。這主要歸納於兩個原因：一是壩越來越高，通過水工結構物的流速越來越高，原有防止穴蝕現象的經驗不夠使用；二是對於穴蝕現象還缺乏足夠準確的認識。在水利工程方面，穴蝕現象除了發生在水工結構物外，輸送系統中包含水力發電機組、輸水管路、水輪機等皆有機會發生，除了造成固體邊界上之結構破壞外，還會降低機械運作之效率，為必須面對的一大問題。

氣泡破裂所引發的流場變化在工程及研究領域上，都扮演著重要的角色。這些液體中微小的氣泡能產生如此大的破壞力，導致結構物的損毀，確實引發人們的好奇，因此吾人也非常有興趣於探討氣泡間破裂的流動行為。

1.2 研究目的

過去相關研究發現，穴蝕氣泡破裂會產生中心噴流、震波，當氣泡於鄰近固體邊界處破裂，則可能會產生逆向噴流。穴蝕氣泡破裂所產生之流場，甚為複雜且因其體積小、破裂時間短、形成之位置不固定，且會隨水流運動，使穴蝕氣泡破裂流場之量測不易。

一般而言，形成於水中的穴蝕氣泡為數眾多，氣泡破裂的流場會彼

此互相影響，但對於穴蝕氣泡破裂互相影響機制之研究，大部分為數值分析並著重於壓力場的探討；至於穴蝕氣泡破裂流場交互作用的特性與演變過程，則少有相關的試驗研究成果。有鑑於此，吾人以旋轉 U 形管產生兩顆氣泡，藉由調整兩顆氣泡間的距離，並以壓力波擊破氣泡，以影像處理技巧，進行穴蝕氣泡破裂流場交互作用特性研究。本研究分為定性及定量探討兩部分，定性部分以高速攝影機擷取壓力波擊破雙穴蝕氣泡的連續影像，分析各種不同間距下氣泡破裂交互作用流場之特性。定量部分則應用質點影像測速法，在瞭解流場特性後，選取需仔細分析的範圍，進行交互作用流場的演變過程量測與細部速度場量測。本研究藉由影像分析方法，瞭解不同間距下雙氣泡破裂流場之特性及變化，以期能提供穴蝕氣泡破裂交互作用流場的特性與演變過程等具學術價值的實驗結果。



1.3 文獻回顧

Lauterborn (1996)歸納出五種穴蝕氣泡特性，其中，水流(fluid flow)穴蝕氣泡與聲波(sound)穴蝕氣泡由張力(tension)所造成，而熱(heat)穴蝕氣泡、光(light)穴蝕氣泡與質點(particles)穴蝕氣泡由能量聚焦所造成，如圖 1.1 所示。針對穴蝕氣泡相關文獻說明如下。

1.3.1 氣泡相關研究

(1)Rayleigh-Plesset 方程式理論

Rayleigh (1917)研究高速螺槳受穴蝕氣泡侵蝕之現象，提出氣泡破裂會產生高速噴流，損壞固體表面。該研究亦發展出圓球狀氣泡破裂動力理論。後續許多學者依據 Rayleigh 圓球狀氣泡破裂動力理論進行相關研究。

Plesset (1949)更進一步考慮流體黏滯性與表面張力之影響而推導出 Rayleigh-Plesset 方程式如下：

A.圓球座標非旋轉流之質量守恆方程式：

$$u(r,t) = \frac{R^2}{r^2} \frac{dR}{dt} \quad (1-1)$$

B.動量守恆方程式：

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{1}{\rho} \left[\left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma_g} + p_\infty - \frac{2\sigma}{R} - 4 \frac{\mu}{R} \frac{dR}{dt} \right] \quad (1-2)$$

式中各項代表意義如下，

$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2$ ：氣泡運動之慣性力；

$\frac{1}{\rho} \left[\left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma_g} + p_\infty \right]$ ：氣泡運動壓力變化；

$\frac{2\sigma}{\rho R}$ ：氣泡表面張力；

$\frac{4\mu}{\rho R} \frac{dR}{dt}$ ：氣泡表面黏滯剪應力。

上二式中， $u(r,t)$ 為氣泡外之速度； $\frac{dR}{dt}$ 為氣泡表面之速度； R_0 為氣泡初始半徑； R 為氣泡半徑； r 為氣泡表面外之某一點至氣泡中心點距離； t 為時間； σ 為表面張力； μ 為黏滯係數； P_0 為液體壓力； P_∞ 為遠處之液體壓力； γ_g 為氣體比熱(ratio of the specific heat of the gas)。

(2) 穴蝕氣泡產生之研究

Lauterborn (1996)歸納出穴蝕氣泡特性，包含張力及能量聚焦兩大部分，而大部分的穴蝕氣泡產生都由這兩大部分延伸出去的。

Harrison (1952)利用水下火花放電方式(spark discharge)，於水中放置二個電擊端，並在兩端輸入高壓電，讓中間水離子形成電漿，藉由電漿

產生之高溫瞬間使水汽化而產生穴蝕氣泡。

Benjamin & Ellis (1966) 以電擊方式產生穴蝕氣泡，但此方法有電擊干擾氣泡破裂流場的缺點，故不常使用。Lauterborn (1969) 於離心機使試驗管內之蒸餾水進行水柱撕裂強度之研究進而產生穴蝕氣泡。

Lauterborn (1972) 以脈衝雷射聚焦方式產生穴蝕氣泡，其原理係將雷射能量聚焦於液體中一點，產生之氣泡屬於較為穩定，氣泡周邊流場不易受到干擾，氣泡大小直徑約 1.5mm。

Ciaravino et al. (1981) 以音波方式產生穴蝕氣泡，一般係利用超音波 (ultrasonic) 於水柱中產生駐波，在駐波附近使水中壓力降至蒸汽壓力以下，進而產生穴蝕氣泡。Okuyama (2004) 以多晶矽為加熱器浸入去離子水，藉由改變脈衝功率 (Pulse power) 與脈衝長度 (Pulse width)，使氣泡成長，產生穴蝕氣泡。Escobar-Vargas (2009) 利用不同加熱電壓，使加熱器周圍產生氣泡。

(3) 穴蝕氣泡破裂之研究

Tomita et al. (1990) 雷射聚焦產生的穴蝕氣泡，會隨著雷射聚焦停止供應熱源產生氣泡破裂。Philipp et al. (1993) 注射針筒注入氣泡於液體中，以碎石機 (lithotripter) 產生的震波擊破氣泡、其局部壓力可高達 94Mpa。Sankin et al. (2005) 以碎石機產生 39Mpa 的壓力波，擊破由雷射產生的氣泡，量測氣泡破裂與震波交互作用之流場。

(4) 氣泡破裂產生之壓力研究

Rayleigh (1917) 首先提出壓力變化理論分析，氣泡破裂時壓力非常高 (約 10,000 大氣壓力)，因而氣泡破裂後會形成震波往外傳遞。

Harrison (1952) 於實驗中發現，因壓力震波往外傳遞，在固體邊界附近的氣泡破裂會產生噪音。Vogel & Lauterborn (1988) 則發現氣泡破裂之

壓力脈衝波與氣泡距離固體邊界的大小有密切關係，且此脈衝波會產生一系列的震波。

劉海軍(2003)通過數值計算非線性諧振的氣泡外圍流場中的 Navier-Stokes 方程，求出穴蝕氣泡外圍壓力分佈，數值計算發現當氣泡處於壓縮相，那些半徑比較大的氣泡，其外圍緊鄰氣泡壁處出現負壓區，這將使氣泡在這段時間處於力的不穩定平衡點。

Lindau & Lauterborn (2003)、Sankin et al. (2005)在實驗中利用高速攝影機與投影技術結合於影像中均有出現。而在量測氣泡破裂所產生之震波強度，一般採用 hydrophone 壓力量測儀器，儀器靈敏度需要在 1ns 以下之精度，方可量測到壓力震波強度。

Sankin et al. (2005)之研究結果，雷射聚焦所產生之直徑約 1.5mm 之氣泡，其破裂所產生震波約在 $2\mu s$ (時間)內發生，其震波強度可高達 39MPa，隨後強度遞減。

(5) 氣泡破裂產生之噴流研究

Kornfeld & Suvorov (1944)認為氣泡在固體邊界附近破裂時，氣泡會先變形為非球形，且會產生一噴流(jet flow)。Naude & Ellis (1961)在實驗中證實氣泡在固體邊界附近破裂時會先變形為非球形，且會產生一噴流(jet flow)。Plesset & Chapman (1971)數值計算結果，亦顯示若固體邊界位於氣泡右端，則此噴流會於氣泡左端形成，且會穿越氣泡而抵達氣泡右端的氣泡表面。

Benjamin & Ellis (1966)探討氣泡破裂對固體界面的破壞，認為可能是氣泡破裂所產生的噴流破壞固體界面。Philipp & Lauterborn (1998)探討氣泡破裂引起的破壞行為。近代研究發現此噴流對氣泡破裂流場之動力學研究有很重要的影響。

(6) 氣泡破裂過程中之高速攝影取像研究

因穴蝕氣泡破裂時間短，為了清楚捕捉其破裂時的影像，需使用到每秒拍攝數千張至數百萬張影像之高速攝影機，以記錄、分析穴蝕氣泡破裂流場的特性。

Kodama & Tomita (2000) 使用 Imacon 790 高速攝影機最快可達到每秒 50 萬張影像，量測氣泡破裂過程與產生震波的影像。Lindau & Lauterborn (2003) 使用 Imacon 486 高速攝影機最快可達到每秒 1 千萬張影像，測量氣泡破裂過程之逆向噴流與噴濺研究。Sankin et al. (2005) 使用 Imacon 200 高速攝影機最快可達到每秒 2 百萬張影像，量測氣泡破裂過程與氣泡破裂時間，並搭配氣泡破裂之壓力量測。

(7) 氣泡破裂過程中之質點影像測速法之研究

Vogel & Lauterborn (1998) 利用質點影像測速法 (particle image velocimetry, PIV) 進行氣泡破裂過程之速度流場量測，只能概略量測氣泡破裂的外圍流場。

Lawson et al. (1999) 則應用 PIV 法量測置於水下、直徑約為 80mm 之橡皮材質氣球破裂的外圍流場，並與數值計算結果比較，雖獲得一致結果，但其流場與穴蝕氣泡破裂流場的特性相去甚遠。

Jaw et al. (2007) 則於肥皂泡內填充煙霧質點，應用 PIV 法成功量測得氣泡破裂在不同階段的流場特性。Yang (2009) 實驗證實逆向噴流為氣泡的一部份，且逆向噴流形成過程與滯流環形成有關，當滯流環於固體邊界上形成後，導致逆向噴流之形成與發展。

(8) 氣泡所造成之問題

Escameia et al. (2005) 整理氣泡存在於管路內所產生之問題包含：

1. 氣泡的存在會減少管路的通水斷面而影響流量。

2. 氣泡的存在會改變管路內的流場以及管壁的剪力。
3. 氣泡的存在會與管路內的壓力波互相影響，造成氣泡的變形，且會造成壓力激增。
4. 氣泡的存在會導致管路內流場中斷導致不穩定液面。
5. 氣泡的存在會影響過濾的成效。
6. 氣泡的存在會降低泵與渦輪機的效率。
7. 氣泡的存在會導致管路產生滿管與部分滿管的現象，此會引起液面震盪。
8. 氣泡的存在對儀器而言，會產生錯誤讀數。

綜合以上問題，氣泡之存在對於管路內流體不論在定性或定量上均造成變化，此差異對於工程而言，輕者可能造成工程師無法掌握壓力變化之範圍，訂出最佳設計條件，嚴重者會導致導水管路破壞或縮短水力機械(抽水機或發電機)等之使用壽命，不僅需修繕毀損之處，亦使供水中斷。

1.3.2 雙氣泡相互作用研究

氣泡與氣泡間會有交互作用的現象發生，以下是有關氣泡間的成長動態與相互作用下之相關文獻。

Tomita et al. (1990)利用雷射加熱，在水中同時產生直徑兩厘米的氣泡，以探討氣泡與氣泡間之相互作用。他們發現氣泡間的動態會受到氣泡尺寸與間隔距離之影響。在雙氣泡破裂時觀測到兩球形壓力波自氣泡核處迅速釋放出來，也證實了氣泡核破裂時會釋放高壓的推論。此外，當兩氣泡在崩潰縮小階段，會因流體動力中的吸引作用，使氣泡有朝低壓處偏移的情形。

Blake et al. (1993)利用雷射聚焦產生二顆氣泡，以高速攝影探討二顆

相近、一大一小氣泡於不同位置上的破裂行為，試驗結果顯示二顆氣泡在破裂過程中會有不同形狀變形，但由於影像較為模糊，不易清楚得知二顆氣泡間是如何相互影響。

Sadot et al. (1998)由實驗與數值模擬中得到氣泡相互作用過程中，會產生 Richtmyer-Meshkov 不穩定現象及 Rayleigh-Taylor 不穩定現象。

Shoji et al. (2003)利用雷射加熱矽材料，以探討核間的相互作用與氣泡脫離頻率。歸納出有三個重要的相互作用：1.氣泡結合作用-氣泡水平與傾斜方向的結合；2.熱作用-氣泡核間熱能的相互影響；3.流體動力之作用-氣泡間流體動力的相互影響。

Nasand Tryggvason (2003)利用數值模擬研究兩種不同流體粒子的熱力學毛細現象，發現氣泡的相互作用變形與雷諾數(Re)和馬赫數(Ma)並無直接之關係，僅取決於溫度和表面張力。

因氣泡破裂時會產生很大的瞬時壓力，造成流體機械裝置的穴蝕破壞並產生噪聲和劇烈振動，蒲中奇等人(2004)研究雙氣泡的破裂過程，在 Lighthill 方程的基礎上提出流體中氣泡輻射噪聲的理論模型，並通過數值計算分析氣泡間的相互作用對氣泡破裂的影響及氣泡破裂時穴蝕產生噪音的聲壓規律。

Futakawa (2007)利用數值模型進行負壓下的穴蝕與氣泡動態行為研究，並得到穴蝕氣泡在液體中的狀態因穴蝕氣泡的交互作用與氣泡壓力有相關性。

張鵬利等人(2008)建立聲場作用下兩氣泡泡壁的運動方程，得出雙氣泡的共振頻率，振動半徑。由頻率方程、振動半徑及聲壓方程可看出兩氣泡之運動情況與單氣泡者有著明顯不同。共振頻率、共振振幅及聲壓與兩氣泡之間間距有關。在簡化條件下，運用 Matlab 語言對共振頻率、共振振幅及空化噪聲聲壓進行了數值求解，發現共振頻率和共振振幅隨

氣泡間距的增大而增大，空化噪聲聲壓隨距離增大先增大後減小。

Vaz and Cox (2005)利用兩玻璃平板，將氣泡放入模型中，控制玻璃平板，探討兩氣泡間的交互作用以及與玻璃表面氣液共存的不同性質。Bremond et al. (2006)利用雷射聚焦的方式，於顯微鏡下產生二維氣泡，研究兩個二維氣泡在不同距離條件下，氣泡形成時的相互影響與固體邊界影響，有助於氣泡於固體介面附近之氣泡控制。Pedro et al. (2009)亦利用雷射聚焦方式，於顯微鏡下產生二維氣泡，研究兩個二維氣泡在不同距離下，氣泡破裂的交互作用影響。當兩氣泡相距小於某一特定距離時，兩氣泡的臨接面會由圓弧曲面變形為直線平面。

Chen (2012)研究兩個等尺度氣泡膨脹過程，發現氣泡相互干擾抑制其膨脹速度。而對於兩個不等尺度氣泡的膨脹，小氣泡最終潰滅，而大氣泡相對於相同初始條件情況下的單氣泡而言，其膨脹速度有所提高。此外，模擬獲得小氣泡的生存時間較原預測的要短。其原因可能是因為大氣泡在膨脹過程中發生了變形。小氣泡的運動過程對干擾更加敏感，其生存時間與兩氣泡間的距離成正比。

由上述文獻回顧可知，氣泡因為變化較快，時間短，因此影像要清楚，但前人研究中，影像皆較不清楚，大部分皆為使用雷射光所產生，

1.3.3 穴蝕類型分類研究

Knapp et al. (1970)根據穴蝕的發生條件及其主要物理特性，將穴蝕分為四種類型，即游移型穴蝕、固定型穴蝕、旋渦型穴蝕和振蕩型穴蝕。

(1) 游移型穴蝕

游移型穴蝕是由在液體中移動、孤立的瞬態氣泡或氣泡群組成的穴蝕現象，這些氣泡是在液體中生成並隨著液體一起流動的。氣泡在流動中隨著流場壓力的變化膨脹、收縮、破裂。游移的瞬態氣泡，可以沿固

體邊壁的低壓點初生或在液體內部移動的旋渦的核心部位出現。這種穴蝕的特徵是穴蝕隨液體的流動而移動。氣泡的形狀基本呈球形，其最小尺寸為 $2.86 \times 10^{-9} \text{cm}$ 。氣泡的尺寸沿著流動方向變化，氣泡在進入低壓區以後，氣泡開始發育並逐漸長大，氣泡尺寸達到一定數值後，由於泡內壓力大於外壓力，氣泡就再一次反向膨脹。一般氣泡初生以後要經過 2~3 次膨脹和收縮循環才潰滅消失，在氣泡中間的周圍有脈動壓力存在。

(2) 固定型穴蝕

固定型穴蝕是一種相對穩定的穴蝕形式，穴蝕初生以後，形成在邊界上的空腔，固定氣泡的表面有時還可以觀察到強烈的壓力，並在固定氣泡的表面，有許多小型的瞬態氣泡掠過，固定氣泡的長度與繞流體的幾何尺寸、表面粗糙度、液體的物理性質、以及流場中的壓力、速度的分布有關。固定氣泡並不穩定，當氣泡長度發展到一定程度，流場中的壓力梯度達到一定數值時，緊靠導流體的液體流速將降低到零，緊接著就會出現向上游移動的回注水流，氣泡將逐漸脫離固體邊界而隨著水流漂移，稍後將在同一位置觀察到第二個和第三個氣泡出現。

(3) 旋渦型穴蝕

多出現在水泵、水輪機的出口處、螺旋槳的葉梢以及流體的尾部、淹沒射流的界面上。這種穴蝕也是不穩定、瞬息多變的。當其中心的絕對壓力降低到液體的汽化壓力以下時，就會產生旋渦穴蝕。由於旋渦的不穩定將引起壓力脈動，此脈動壓力將危及機器的穩定運行。

(4) 振蕩型穴蝕

造成氣泡生長、破裂的作用力係液體中一系列連續的高強度、高頻率的壓力脈動。脈動壓力場的存在，是這種穴蝕的重要特徵。

1.3.4 汽液二相流的水流型式研究

常見的水流輸送方式就是用管路，於管路系統中，空氣與水的相對比例會造成不同的水流型式，這些型式通常會與管路的傾斜程度有關。Falvey (1980)和 Rouhani and Sohal (1983)等人整理出不同的流動型式並定義之，主要分垂直流況型式、水平流況型式以及傾斜流況型式三種。

(1) 垂直流況型式：

相較於水平流型式而言屬軸對稱，示意圖如圖 1.2，其相關描述如下：

1. 氣泡流(Bubble flow)：氣泡以球型或類似球型的型態分布於直徑小的導管中，且僅有少量氣泡混和於水流中。
2. 堵塞流(Plug flow)：當氣泡的直徑約佔導管直徑之一半時，其流況會從氣泡流轉變為堵塞流。
3. 團狀流(Slug flow)：氣泡互相結合成較大體積，幾乎占據了導管斷面，且其長度為導管直徑的數倍。
4. 波浪狀流(Churn flow)：氣泡體積逐漸擴大而形成連續區域，此時管壁仍有波浪狀液體，因為氣泡的速度只能使液體反覆產生波浪狀，不能將其連續往上帶動。
5. 環狀流(Annular flow)：氣泡的剪應力足以使管壁上的液體保持規則之形狀而連續向上流動。
6. 霧狀流(Spray flow)：氣泡的體積和剪應力非常大，使得液體體積變得很小，僅能分散於氣體中形成薄霧狀的流動。

(2) 水平流況型式部分：

在一般情況下，水平流況型式大多數為非對稱模式，係因在不同密

度流體的重力影響，形成在垂直方向分層的趨勢，亦即液體佔據下部管道及氣泡盤據上部的傾向。示意圖如圖 1.3，其相關描述如下：

1. 氣泡流(Bubble flow)：氣泡位於導管上邊壁，此時氣泡與水的流速幾乎相同。若液體的流速或大於氣泡的流速時，氣泡會於水中分散，則稱之為氣泡流。
2. 堵塞流(Plug flow)：當流速加大時，氣泡會合併成一間歇性流，主要會沿著導管的上壁流動。
3. 分層平滑流(Stratified smooth flow)：有一明顯的橫向界面分離水與空氣的流動，此現象通常發生於流速較低的情況。
4. 分層浪型流(Stratified wavy flow)：當流速增加時，其分層的界面會產生波浪狀的漣漪。
5. 團狀流(Slug flow)：氣泡互相結合成較大體積，幾乎占據了導管斷面，且氣泡之流速大於液體流速。
6. 環狀流(Annular flow)：氣泡的剪應力已足以使管壁上的液體保持規則之環狀。
7. 霧狀流(Spray flow)：氣泡的體積和剪應力已非常大，使得液體體積變得很小，僅能分散於氣體中形成薄霧狀的流動。

(3) 傾斜流況型式部分：

其傾斜流流動型式的狀態與垂直流型式類似，故不再贅述。

由上述文獻回顧可知，要了解氣泡破裂時氣泡內部與周圍環境的流場變化是相當不容易的。氣泡破裂流場量測受到的限制可歸納為以下兩點：(1)水中氣泡的產生與擊破控制是相當不容易的；(2)水中氣泡體積小，氣泡破裂的過程極為短暫，不易擷取得高解析度的瞬間序列影像。

1.3.5 質點影像測速法之研究

(1) 非侵入式流速量測技術發展

在傳統流場量測方法中，通常採用熱線(hot-wire)及皮托管(pitot tube)等量測儀器進行單點量測，且為侵入式量測系統。侵入式必須置入探頭至流場內感應，因而影響流場本身之結構而造成誤差，且在有迴流行為之流場中，有時無法準確反映實際流速。定量影像(quantitative image)測速法為一普遍之光學量測技術，對於流場之觀測更為容易，且為一非侵入式技術。近二十幾年來，由於相機與圖像處理技術的迅速發展，流場量測技術也已逐漸由單點侵入式發展為二、三維非侵入式觀測，定量影像測速法對於觀察流場有很好的貢獻。

定量影像測速法所要觀察的有流場速度、流場渦度、雷諾應力、紊流消散。定量影像測速法類型主要分為三種，一種為流體中放入不連續的質點；另一為放入連續質點(染料之類)；最後一種為未加入任何物質。第二種及第三種為觀察流場密度或溫度之變化，來分析整體流場之速度。主要有四種基本操作方法，如全像攝影、立體影像(多相機)、單一相機之景深及光束通過流場等，其中光束通過流場之量測方式包含雷射光斑測速法(laser speckle velocimetry，簡稱LSV)、質點影像測速法(particle image velocimetry，簡稱PIV)、質點軌跡測速法(particle tracking velocimetry，簡稱PTV)與質點條紋測速法(particle streak velocimetry，簡稱PSV)等光學量測方法。質點影像測速法(PIV)量測方式在近十多年來被廣泛應用於流場量測，且PIV技術在圖形辨識與影像處理流程方面較成熟，對於真實流場中的流況亦有較佳的觀察成果。

隨著科技的發展及前人的經驗，PIV由初期的定性觀測進步到定量量測。PIV系統運作係將雷射光產生之二維光頁照射入流場，並於流場中加入不連續的質點(追蹤粒子)，經高速攝影機將瞬時數位影像擷取後儲存

於電腦之中，以初始時刻和時間間距內所擷取的影像，進行交互相關函數分析，以呈現更精確之影像。利用快速傅立葉轉換(FFT)頻域의交互相關函數，於已知的時間間距，分析計算影像內質點的位移量，即可得到流場內各個位置之瞬時速度量值，並繪出整體流場速度向量圖。構成整個PIV的要素為(1)適當的質點顆粒(2)足夠強度的雷射光源(3)足夠解析度的高速攝影機。因此，於PIV量測技術過程分為兩個主要部份，一為實驗的佈置部分，包含光頁照射、灑入質點與影像擷取儲存；另一為PIV分析部份，此部份為應用圖形辨識與影像處理，使用觀察區域之自動與交互相關計算出平均位移，此演算法通常依賴交互協方差函數，協方差一般為利用快速傅立葉轉換來計算，以便得知流場速度向量分佈與其他資訊。

(2) 影像分析演算發展

對於影像分析方面，利用質問窗(interrogation window)為基礎的互相關演算法(cross-correlation algorithm)廣泛使用在 PIV 的計算方面，亦針對相關函數法之演算加以修正，如 Keane and Adrian (1990)、Adrian (1991)、Willert and Gharib (1991)、Westerweel et al. (1996)、Liang et al. (2002)、Thomas et al. (2005)、Theunissen et al. (2007)、Goubergrits et al. (2009)，利用時序性單一曝光之兩張影像，於相同位置，利用相同的質問窗演算位移量(displacement)，其相關函數法如下式所示：

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

上式中， $\Phi(m, n)$ 為相關函數之摺合積分； $g_1(i, j)$ 與 $g_2(i, j)$ 為時序性影像灰白色之亮度值分佈； $M \times N$ (pixels)為質問窗大小； i 與 j 為兩張影像比對之初始位置； m 及 n 分別為 i 方向及 j 方向之位移量。在進行相關函數計算時使用快速傅立葉轉換(fast Fourier transform, FFT)演算法計算之。

(3) 誤差分析

Westerweel (1994)提出 PIV 量測數值資料誤差可分為量測錯誤之數值或計算錯誤產生之不合理速度向量值與帶有不確定因素之誤差的量測數值兩類。Nogueira (1997)對於前者進行研究，探討如何判斷數值資料的正確性，並對不合理之向量進行修正。Huang (1997)研究 PIV 影像計算的誤差，歸納出二個主要之計算誤差，分別為方均根誤差 (root-mean-square)與偏移誤差(bias error)，並對此二誤差作量化探討。

1.4 研究方法

本研究為探討雙穴蝕氣泡破裂後交互作用影響之物理現象，利用高速攝影技術擷取影像後以質點影像測速法分析流場並利用壓力計進行壓力量測。本研究以穴蝕氣泡為主要研究對象，因此穴蝕氣泡係以流體動力方式產生，由可控制轉速之馬達與 U 型平台、圓柱試管構成，試管內加入自來水，藉由控制馬達產生旋轉離心力，使試體內產生張力作用，使 U 型平台旋轉中心之試管內水壓力低於蒸汽壓力，而產生單一穴蝕氣泡，再利用連通管原理，將兩顆氣泡移至同一試管中進行試驗。本研究藉由壓力脈衝系統所產生不同的壓力震波強度，去擊破兩顆穴蝕氣泡，並改變兩顆氣泡之球心距離，觀察其現象並以 PIV 量測其流場特性。

1.5 本文組織

本研究利用高速攝影技術及 PIV 量測技術，應用於雙氣泡破裂流場交互作用特性分析研究，分為兩大方向進行討論，一為穴蝕氣泡破裂量測之定性討論，另一為質點影像測速法分析穴蝕氣泡破裂過程之流場定量討論。本文組織架構分為五章，茲將各章節之主要內容扼要敘述如下：第一章：導論，為本文之研究動機與研究目的，簡述實驗研究方法以及

本研究組織架構。相關文獻之回顧，對於穴蝕氣泡、質點影像測速法相關研究作一整理。

第二章：基礎理論，分就穴蝕理論及分類、穴蝕氣泡生成理論、氣泡動力學基礎理論、質點影像測速法之影像分析理論及相關物理現象作一描述與整理。

第三章：試驗儀器與佈置規劃，分別就試驗儀器(包含氣泡生成系統、光學設備系統、質點追蹤粒子、訊號控制系統、壓力脈衝系統、影像系統、試驗模型)與試驗相關規劃及程序作一說明。

第四章：說明雙顆穴蝕氣泡受不同脈衝壓力撞擊後之相互影響結果分析，

探討不同 $\gamma = \frac{d}{R_{\max}} = \frac{\text{氣泡球心距}}{\text{氣泡半徑}}$ 距離參數之定性破裂物理現象，以及

質點影像測速法之定量流場量測。

第五章：結論及建議，歸納本研究中所得到之結果，提出建議與未來研究之方向。



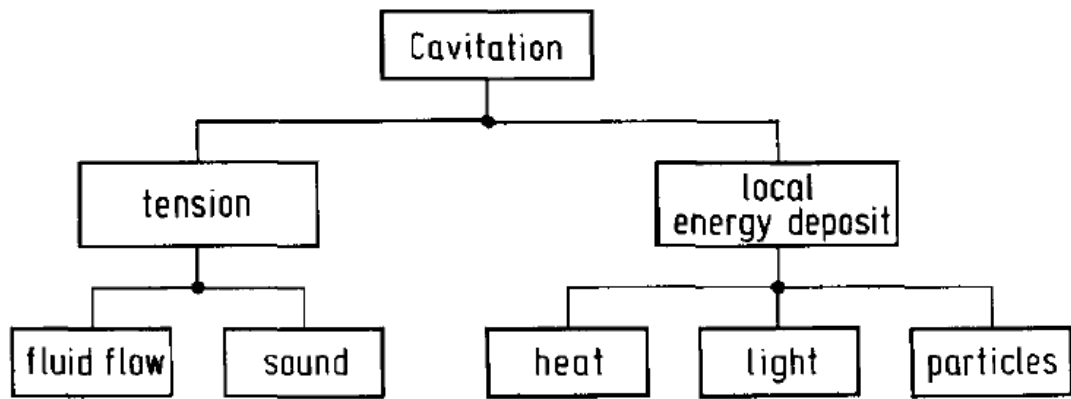


圖 1.1 穴蝕氣泡形成方法的分類(Lauterborn,1996)

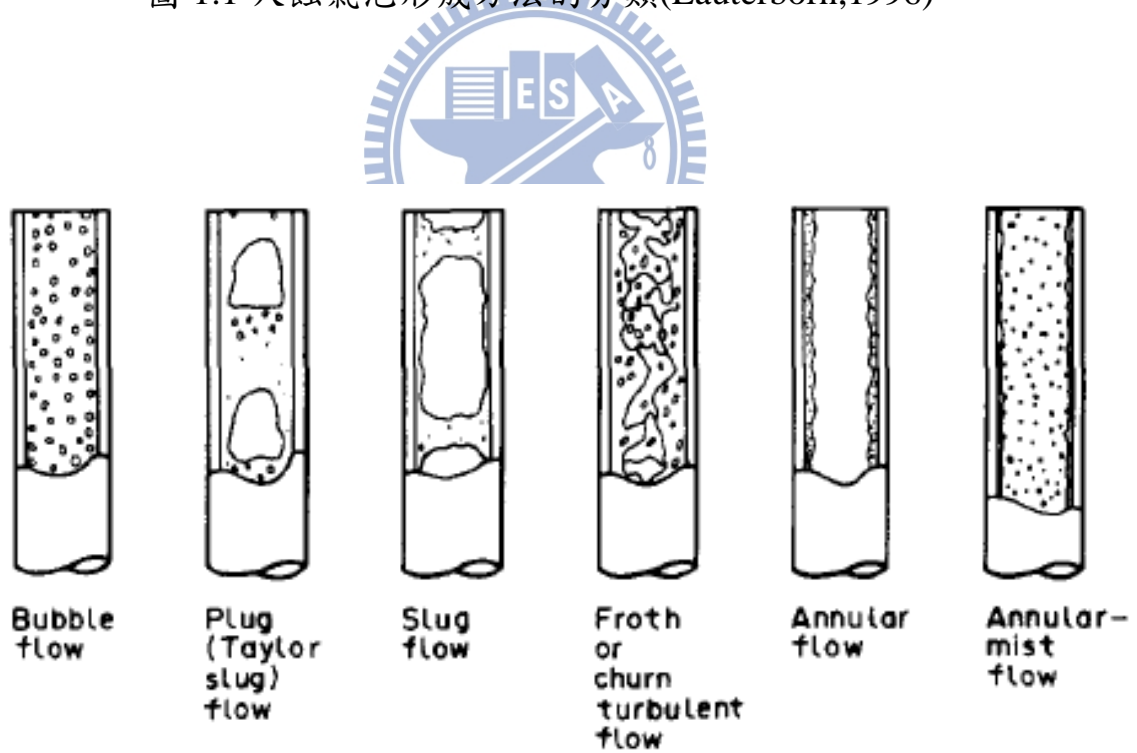


圖 1.2 垂直流型式示意圖(Rouhani & Sohal, 1983)

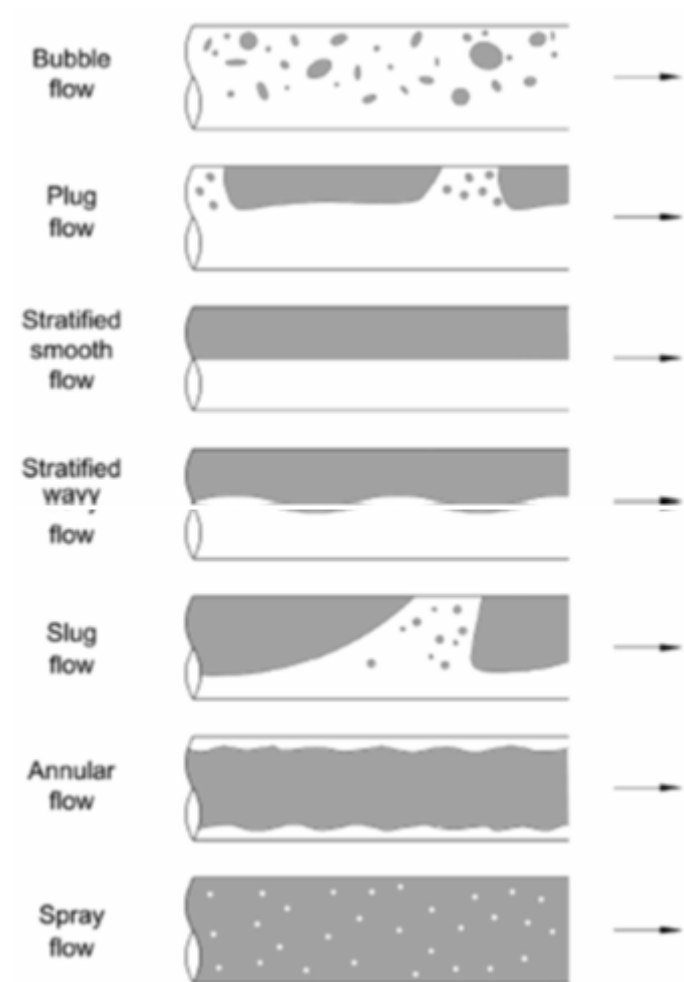


圖 1.3 水平流型式示意圖(Escameia et al. ,2005)

第二章 基礎理論

2.1 穴蝕理論

2.1.1 穴蝕定義

流體流動過程中常因速度變化產生局部之低壓區。若低壓區之壓力等於或低於該流體之飽和蒸汽壓力時，該流體將由液相轉為汽相，產生部分汽化。由此產生之氣袋將隨雷諾數之增加而擴大，因受壓力而破滅，汽相破滅後再轉回液相，然而立即又生成，此種氣袋生與滅之間頻率甚高，此一高頻率之壓力變化，導致破壞其流體邊界之固體表面的過程及現象稱為穴蝕。

2.1.2 穴蝕數

黏性流體之運動具有兩種不同的模式，一種稱為層流(laminar flow)，另一種稱為紊流(turbulent flow)，兩種模式的發生條件可用 Reynolds 數來判斷，其定義為 $Re=VL\rho/\mu$ ，其中 V 表示流體的特性速度(characteristic velocity)； L 表示特性尺寸(characteristic dimension)；而 ρ 及 μ 各表示流體的質量密度及黏性係數。同樣地，流體流經一物體時，有時會產生氣袋(cavitation pocket)。產生氣袋與否亦有一參數(parameter)可供判斷，此參數即被稱為穴蝕數(cavitation number)，其定義為 $K=(p_0-p_v)/(pv_0^2/2)$ ，其中 p_0 表示某參考點的絕對靜壓力(absolute static pressure)， p_v 表示流體的蒸氣壓(vapor pressure)； v_0 表示流體相對於參考點的速度。若令 $K_i=(p_0-p)/(pv^2/2)$ ，其中 p 表物體上某一點的壓力， $K < K_i$ 時，該點不會有穴蝕現象發生， $K \geq K_i$ 時，該點便會發生穴蝕。

2.1.3 穴蝕汽化核

穴蝕汽化核認為自然界的液體中含有不可溶解的汽體，通常其直徑約在微米量級，此氣泡被稱為汽化核。汽化核存在改變了液體的結構，降低了液體的抗壓力度。當壓力降低至飽和汽化壓力附近時，液體的連續性被破壞，汽核逐漸膨脹成為可見的氣泡(bubble)。氣泡隨液體流動，如果壓力繼續降低則氣泡體積逐漸變大。當到達高壓區時，氣泡逐漸縮小直至破裂。氣泡破裂時產生壓力波的散射，從氣泡中心傳遞到邊界上，使固體邊界形成許多凹坑。根據相關資料介紹，穴蝕氣泡破裂產生的瞬間壓力可達約 10,000 個標準大氣壓；另一說法則為氣泡破裂時發生變形，促使了流速很大的微型射流，射流瞬間穿過氣泡內部；當潰散距離邊界很近時，射流射向固體邊界造成衝擊破壞。

2.1.4 穴蝕作用

因於高速水流中易挾帶氣泡，在結構物線型變化處所造成之流速減緩且有分離現象，致使局部區域壓力高，導致水中氣泡破裂，進而對管路表面產生衝擊力，造成局部破壞，稱之為穴蝕作用。穴蝕作用的發生總體來說是有利的，往往帶來一系列的實際問題，如水利設備特性改變、性能下降、穴蝕破壞、振動和噪音等。

2.2 穴蝕氣泡生成理論

2.2.1 壓力差理論

在本試驗中，將試驗試管放置於 U 型平台上，試管內注入自來水於適當之高程，並確保初始管內無氣體存在，且試管垂直肘處之液體表面與空氣接觸以保持大氣壓力，因此，試管內轉軸中心處之初始壓力 p_0 為靜水壓力：

$$p_0 = p_{atm} + \rho g \Delta h \quad (2-1)$$

式中， g 為重力加速度； Δh 為水位差。

2.2.2 離心力理論

當 U 型平台旋轉後，試管內之液體受到旋轉離心力之影響，不同半徑處之壓力將呈拋物線形分佈，如圖 2.1 所示。垂直肘處液面雖有些許高度變化，但仍與空氣接觸而保持大氣壓力。垂直肘自由液面與轉軸中心處則有 $p_{0\omega}$ 的壓力。

$$p_{0\omega} = p_{atm} + \rho g \Delta h - \frac{1}{2} \rho r^2 \omega^2 \quad (2-2)$$

試驗前先行量測液體溫度，推算出該溫度下之蒸汽壓力，並據以推算所需之旋轉角速度 ω 。當 ω 逐漸增加，試管內轉軸中心處的壓力逐漸降低至當時水溫的水蒸氣壓附近時，可於轉軸中心處附近形成穴蝕氣泡。

2.3 氣泡動力學基礎理論

一般所謂的氣泡動力學(bubble dynamics)可有兩種分類：一種為氣泡內部的氣體幾乎完全由氣泡周圍液體的蒸汽所組成，另一種為氣泡內部所含有的大部分氣體為永久不變的，前者通常為液體沸騰氣泡的研究，至於後者通常可在一些工業製程的過程中發生，例如單孔成泡的氣泡動力學研究，或固液氣三相的氣泡槽研究即屬於後者。

2.3.1 氣泡動力學假設

- (1) 液體為不可壓縮且非牛頓黏性流體。
- (2) 忽略氣泡重力作用。
- (3) 氣泡內氣體為穩定、內力可忽略，且不具熱傳導與化學反應。
- (4) 氣泡內壓力為飽和蒸汽壓力。

氣泡內外相關位置示意圖如圖 2.2 所示，於氣泡內外之質量守恒，其氣泡交界面速度 $u(R,t) = \dot{R} = dR/dt$ ，由黏性流體之動力黏滯力 μ 於交界面之正向應力（normal stress）：

$$t_{rr}(R,t) = -p(R,t) + 2\mu \left. \frac{\partial u}{\partial r} \right|_{r=R} \quad (2-3)$$

氣泡內部之平衡正向應力：

$$-t_{rr}(R,t) = p_v + p_g(t) - \frac{2S}{R} \quad (2-4)$$

p_g 為氣泡內壓部分，其瞬間氣壓力與初始壓力 p_{g0} 關係式：

$$p_g(t) = p_{g0} \left[\frac{R_0}{R(t)} \right]^{3\gamma_g} \quad (2-5)$$

其中， γ_g 為氣體熱含量比值。

因此，穴蝕氣泡交界面之壓力為

$$p(R,t) = p_v + p_{g0} \left[\frac{R_0}{R(t)} \right]^{3\gamma_g} - \frac{2S}{R} + 2\mu \left. \frac{\partial u}{\partial r} \right|_{r=R} \quad (2-6)$$

距離氣泡遠處，假設為靜止，即 $u(\infty,t) \rightarrow 0$ ，壓力 $p(\infty,t)$ 可由 $p_\infty(t)$ 代表，

且為假設已知。而於初始時（下標為 0）於 $R(0) = R_0$

$$p_{\infty 0} = p_{g0} + p_v - \frac{2S}{R_0} \quad (2-7)$$

2.3.2 Rayleigh-Plesset 方程式

於不可壓縮流與非旋轉流情況，質量守恒方程式為 $\text{div} \bar{V} = 0$ ：

$$u(r,t) = \dot{R} \frac{R^2}{r^2} \quad (2-8)$$

於特殊情況下，黏滯項於 Navier-Stoke equation 為 0，即為非黏流之動量方程式：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (2-9)$$

其中，

$$\frac{\partial u(r,t)}{\partial t} = \ddot{R} \frac{R^2}{r^2} \quad (2-10)$$

$$\frac{\partial u(r,t)}{\partial r} = -2\dot{R} \frac{R^2}{r^3} + 2\dot{R}/R \quad (2-11)$$

帶入(2-9)式

$$\ddot{R} \frac{R^2}{r^2} + 2\dot{R}^2 \left[\frac{R}{r^2} - \frac{R^4}{r^5} \right] = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (2-12)$$

並對(2-10 式)積分 r

$$\ddot{R} \frac{R^2}{r} + 2\dot{R}^2 \left[\frac{R}{r} - \frac{R^4}{4r^4} \right] = \frac{p(r,t) - p_{\infty}(t)}{\rho} \quad (2-13)$$

此方程式與 Bernoulli 非黏性、非穩態流相同。於氣泡交界面 $r=R$ 處，

$$\frac{p(r,t) - p_{\infty}(t)}{\rho} = R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 \quad (2-14)$$

最後，壓力在交界面上

$$\left. \frac{\partial u}{\partial r} \right|_{r=R} = -2\frac{\dot{R}}{R} \quad (2-15)$$

整理(2-6)式與(2-15)式得

$$p(R,t) = \rho \left(R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 \right) = p_v - p_{\infty} + p_{g0} \left[\frac{R_0}{R} \right]^{3\gamma} - \frac{2S}{R} - 4\mu \frac{\dot{R}}{R} \quad (2-16)$$

在 $p_{\infty}(t)$ 已知之情況下，(2-16)式可決定氣泡半徑發展大小與壓力場之變化。於非黏流之流體，最後一項可忽略。

根據(2-16)式可求解氣泡破裂問題。在許多情況下，內力和黏滯力不是很重要，而表面張力一般為氣泡破裂的重要因素。

2.3.3 氣泡能量守恆

由式(2-16)移項後，式(2-17)為氣泡能量守恆之表示式，

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{p(r,t) - p_\infty(t)}{\rho} = \frac{1}{2\dot{R}R^2} \frac{d}{dt}[R^2 \dot{R}^3] \quad (2-17)$$

並由式 (2-16) 之 Rayleigh-Plesset equation 轉換為下式：

$$\frac{d}{dt}(2\pi\rho\dot{R}^2 R^3) = [p_v + p_{g0}(\frac{R_0}{R})^{3\gamma} - p_\infty(t)]4\pi R^2 \dot{R} - 8\pi S R \dot{R} + 16\pi\mu R \dot{R}^2 \quad (2-18)$$

等號左項為流體動力能量變化，等號右邊第一項為壓力作用在流體能量，第二、三項為表面作用能量變化與黏滯能量消散(dissipation rate due to viscosity)。

2.3.4 穴蝕氣泡破裂時間

- (1) 假設在不考慮黏滯效應、不可壓縮氣體與表面張力條件下，初始 $t=0$ 情況，氣泡 $p_{\infty 0} > p_v$ ，氣泡破裂特徵時間 τ 稱為 Rayleigh-Plesset time。但它無法證明氣泡破裂成功範圍與真實氣泡破裂之物理變化，假如表面張力沒有忽略的話，破裂可能有輕微加速度存在。

- (2) 氣泡交界面速度

根據上述假設，由式(2-16)及積分式(2-17)可得，

$$\rho \dot{R}^2 R^3 = -\frac{2}{3}(p_\infty - p_v)(R^3 - R_0^3) \quad (2-19)$$

在破裂過程速度為負值

$$\frac{dR}{dt} = -\sqrt{\frac{2}{3} \frac{(p_\infty - p_v)}{\rho} \left(\frac{R_0^3}{R^3} - 1\right)} \quad (2-20)$$

氣泡破裂半徑趨近於 0，數值積分方程式計算半徑 $R(t)$ 為時間函數，氣泡破裂時間特徵或 Rayleigh-Plesset time 為

$$\tau = \sqrt{\frac{3}{2} \frac{\rho}{p_{\infty} - p_v}} \int_0^{R_0} \frac{dR}{\sqrt{\left(\frac{R_0^3}{R^3} - 1\right)}} \cong 0.91468 R_0 \sqrt{\frac{\rho}{p_{\infty} - p_v}} \quad (2-21)$$

其中，定值 0.91468 為近似 $\sqrt{\frac{\pi}{6} \frac{\Gamma(5/6)}{\Gamma(4/3)}}$ ， Γ 為 gamma function。

按此理論計算所得出的結果，與試驗觀察相當接近，所以 Rayleigh-Plesset 方程式一直被廣泛應用。

2.4 質點影像測速法及影像分析

2.4.1 質點影像測速法

質點影像測速法是利用影像中流場內的標示物來估算位移量，其最基本的條件是選擇適當的追蹤質點，不僅要夠分布均勻以表現出流場的特性，而且尺寸大小需足以提供攝影機解析。將影像劃分成若干個子分析區域(interrogation area，簡稱IA)，每個IA的速度向量是由間隔 Δt 時間的連續影像之位移量所決定。最後，在影像中的速度向量場是對分析區域內的每個IA重複做相關計算分析的結果。

當流場中追蹤質點的密度偏高時，利用一群質點計算位移量，必須假設在 Δt 時間內質點之間的相對位置沒有變化。將連續的影像(每張只曝光一次)兩兩做互相關分析，找出一群質點的相關性。PIV影像分析法之步驟如圖2.3，其優點是可以確定流場中速度向量的方向及大小，意即可將流場可視化及定量化。

2.4.2 影像處理

PIV 法是以兩張具有時序性之質點影像進行其位移分析，影像大小可依量測範圍之大小進行設定，如 1600×1200 畫素或 960×480 畫素組合，每一位置之畫素(pixel)均有一亮度值代表，其範圍為 0 至 255 亮度強度值，

如此整張影像即有完整亮度分佈。實驗時將顯影質點均勻分佈於水中，有質點位置之亮度值，在光源的作用下，其亮度值會比沒有質點的亮度值高，有質點亮度位置之亮度值分佈，如圖 2.4 所示，為具有時序性影像轉換後，其質點亮度空間分佈值情況，藉由此特性進行質點位移之估算。

2.4.3 質點影像分析理論

將質點影像亮度值數位化後，依照計算的範圍設定質問窗 (interrogation window) 大小 $M \times N$ ，將兩張影像切割成許多區塊，如圖 2.5 所示，並依相關位置個別進行位移演算，計算完成後再進行計算準確性判別，最後經由精確度演算，即可求得質點影像之質點位移與速度向量。其相關分析步驟，如圖 2.6 所示，演算過程及方法說明如下。

(1) 質點位移估算：

本研究之質點位移估算使用互相關函數法 (cross correlation method)，其演算方法建立在兩張具有時序性之影像資料，將其質問窗內影像亮度值分佈轉換為訊號後，利用互相關函數法求得其質問窗內之最大值作為判斷依據。

$$\Phi_{cross}(m,n) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [image1(i,j)] \bullet [image2(i-m, j-n)] \quad (2-22)$$

其中，

1. $\Phi_{cross}(m,n)$ 之最大值作為判定 m 與 n 位移量；
2. image1 與 image2 為具有時序性影像亮度分佈值；
3. M 與 N 為質問窗大小；
4. i 方向及 j 方向之影像初始位置；
5. m 及 n 為 i 方向及 j 方向質問窗內質點之平均位移量。

為有效降低計算時間與提高準確性，將互相關函數法轉為常態化互

相關函數法（normalized cross-correlation function）進行演算，其方程式如下：

$$\bar{C}_{nor}(m, n) = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [image1(i, j) - \overline{image1}] [image2(i - m, j - n) - \overline{image2}]}{\sqrt{\sigma_1(i, j) \sigma_2(i, j)}} \quad (2-23)$$

$$\sigma_1 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (image1(i, j) - \overline{image1})^2 \quad (2-24)$$

$$\sigma_2 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [image2(i - m, j - n) - \overline{image2}]^2 \quad (2-25)$$

$$\overline{image1} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N image1(i, j) \quad (2-26)$$

$$\overline{image2} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N image2(i - m, j - n) \quad (2-27)$$

其中， $\bar{C}_{nor}(m, n)$ 為影像質問窗比對(pattern matching)之互相關係數，其值介於 0 與 1 之間，並定義最大值作為最有可能 m 與 n 之位移量，如圖 2.7 所示； $\overline{image1}$ 與 $\overline{image2}$ 為質問窗內亮度分佈之平均值。

在演算常態化互相關函數法過程方面，一般常用的兩種演算技術。其一為快速傅立葉演算法(FFT)，為具有時序之影像，利用質點空間分佈(spatial domain)與頻率分佈(frequency domain)關係

，進行位移演算，求得質點影像之位移量(Willert and Gharib, 1991)；另一種為直接演算常態化互相關係數法(normalized cross-correlation coefficient) (Fincham and Spedding, 1997; Huang et al., 1997; Huang, 1998)，係利用質點空間分佈與時序性之影像，直接進行位移演算，求得常態化互相關係數 $\bar{C}_{nor}(m, n)$ 而得知影像間質點之位移量。

在計算速度上，FFT 演算法快於直接演算法，但 FFT 演算法對影像中之質點密度分佈與質問窗大小相當敏感，直接影響在計算之速度上；一般以 2^k 的指數設定質問窗大小， k 值介於 4 至 7 間之整數。而直接演算

法可以依實際需求進行質問窗設定，不受 2^k 的影響。在演算精準度上，直接演算法高於 FFT 演算法。在計算時間上，FFT 演算法所需時間短於直接演算法。兩種方法共同點，為 m 與 n 演算結果均為整數，因此，在演算後的精確度均需再進一步修正，其修正方法一般稱為子畫素修正。

(2) 子畫素之修正：

互相關函數演算結果於質問窗內之位移量為整數，此情況與實際影像位移可能存在 ± 0.5 畫素之差距，為增加計算上之準確度，利用子畫素修正方法以提升準確性。質點實際位移量 m_r 與 n_r 分別於 i 與 j 方向表示如下：

$$m_r = m + \varepsilon_m, \quad -0.5 \leq \varepsilon_m \leq 0.5 \quad (2-28)$$

$$n_r = n + \varepsilon_n, \quad -0.5 \leq \varepsilon_n \leq 0.5 \quad (2-29)$$

其中， m 與 n 為 $\bar{C}_{cor}(m, n)$ 演算結果決定； ε_m 及 ε_n 分別為 m 與 n 在 i 與 j 方向質問窗內質點之平均位移量與實際值間之校正差值。修正 ε_m 及 ε_n 之方法有很多種，如高斯曲線子畫素修正法(Gaussian curve-fitting)、拋物線子畫素修正法(parabolic curve-fitting)、形心子畫素修正法(centroid method)等方法來降低位移誤差值，各修正法之說明如下，而圖 2.8 為各修正法所使用之參數位置示意圖。

1. 高斯曲線修正法(Willert and Gharib, 1991；Huang, 1997)

$$\varepsilon_m = \frac{\ln \bar{C}_{cor}(m-1, n) - \ln \bar{C}_{cor}(m+1, n)}{2[\ln \bar{C}_{cor}(m-1, n) + \ln \bar{C}_{cor}(m+1, n) - 2 \ln \bar{C}_{cor}(m, n)]} \quad (2-30)$$

$$\varepsilon_n = \frac{\ln \bar{C}_{cor}(m, n-1) - \ln \bar{C}_{cor}(m, n+1)}{2[\ln \bar{C}_{cor}(m, n-1) + \ln \bar{C}_{cor}(m, n+1) - 2 \ln \bar{C}_{cor}(m, n)]} \quad (2-31)$$

其中， $m+1$ 、 $m-1$ 、 $n+1$ 及 $n-1$ 分別為質問窗內峰值之前 1、後 1、左 1 及右 1 畫素之 \bar{C}_{cor} 。

2. 形心法(Willert and Gharib, 1991)

$$\varepsilon_m = \frac{\overline{C}_{cor}(m+1, n) - \overline{C}_{cor}(m-1, n)}{\overline{C}_{cor}(m+1, n) + \overline{C}_{cor}(m, n) + \overline{C}_{cor}(m-1, n)} \quad (2-32)$$

$$\varepsilon_n = \frac{\overline{C}_{cor}(m, n+1) - \overline{C}_{cor}(m, n-1)}{\overline{C}_{cor}(m, n+1) + \overline{C}_{cor}(m, n) + \overline{C}_{cor}(m, n-1)} \quad (2-33)$$

3.拋物線法(Willert and Gharib, 1991)

$$\varepsilon_m = \frac{\overline{C}_{cor}(m-1, n) - \overline{C}_{cor}(m+1, n)}{2(\overline{C}_{cor}(m-1, n) - 2\overline{C}_{cor}(m, n) + \overline{C}_{cor}(m+1, n))} \quad (2-34)$$

$$\varepsilon_n = \frac{\overline{C}_{cor}(m, n-1) - \overline{C}_{cor}(m, n+1)}{2(\overline{C}_{cor}(m, n-1) - 2\overline{C}_{cor}(m, n) + \overline{C}_{cor}(m, n+1))} \quad (2-35)$$

上述修正方法中，以高斯曲線子畫素修正法使用較為普遍。由於從影像分析中所得之質點強度分佈較接近高斯分佈，根據兩張影像之質點分佈，經由高斯曲線修正計算後之結果亦為高斯分佈。所以在子畫素修正法中利用高斯修正法較為合理。

(3) 不一致資料去除與資料補遺：

經過常態化互相關函數法演算與子畫素修正後，可知質問窗內已有質點的 m 與 n 位移量，此位移量須跟鄰近的質問窗演算結果進行比較，以去除錯誤與不一致資料，如圖 2.9 所示，於圖下方出現不一致資料，需進行去除。

Keane and Adrian (1990)以敏感度 D_0 為判別基準，其定義為質問窗內之常態化互相關函數法之最大峰值除以第二大峰值之比值：

$$D_0 = \frac{\overline{C}_{nor1st}}{\overline{C}_{nor2nd}} \quad (2-36)$$

其中， \overline{C}_{nor1st} 與 \overline{C}_{nor2nd} 分別為常態化互相關函數法之最大與第二大峰值，如 $D_0 > 1.3$ 之向量位移為有效向量，此 D_0 值可根據影像品質進行適當之調整。此敏感度之基準亦可用在雜訊比過濾(singal-to-noise ratio, snr)，將不一致資料先行去除。

Westerweel (1994)對於 PIV 去除不一致資料方法提出局部平均過濾 (local mean filter)，當質點位移量除以時間後，即可得到質問窗內之速度向量。於整體流場中鎖定個別速度向量，且比照周圍八個向量，計算範圍為 3×3 質問窗，當該向量相較於周圍之向量較為不一樣，例如兩倍大時，可以發現此區域可能至少有一個質問窗內之速度向量為可移除，其資料判斷方法步驟說明如下：

1. 速度值之判別：

$$Vel = \frac{\sum_{i=1}^8 |v_i - v_0|}{\sum_{i=0}^8 |v_i|} \quad (2-37)$$

$$v_i(k, l) = \sqrt{u(k, l)^2 + v(k, l)^2}, i=0, 1, \dots, 8 \quad (2-38)$$

上二式中， Vel 為由周邊之速度向量值之絕對差值； k 及 l 為質問窗位置； $u(k, l)$ 與 $v(k, l)$ 為質問窗水平速度與垂直速度； v_0 為速度判斷值； $v_i(k, l) (i=1, \dots, 8)$ 為 v_0 周邊之平均速度。Nogueira et al. (1997)對 Vel 值之容忍範圍約 20-35%。

2. 向量角度判別：

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^8 |\theta_i - \theta_0|}{\sum_{i=0}^8 |\theta_i|} \quad (2-39)$$

$$\theta_i = \tan^{-1} \frac{v(k, l)}{u(k, l)} + 360^\circ \quad (2-40)$$

其中， $\theta_i (i=0, 1, \dots, 8)$ 為 $u(k, l)$ 與 $v(k, l)$ 之夾角；加上 360° 以確保夾角為正值。

3. 有效資料之判別 (data validation)：

$$val(k, l) = \sqrt{Vel^2 + \theta^2} \quad (2-41)$$

其中， $val(k, l)$ 為判別有效之向量值。

為了判別 v_i 之有效值，對 val 設一有效標準值，Jaw and Wu (2000) 建議可根據不同影像條件，設 val 在 25 至 35% 以內為有效向量值。重複上述方法，判斷有效流速向量值，保留有效之流速向量，並將不一致資料去除，如圖 2.10 所示。

2.4.4 PIV 影像計算之誤差

影像計算誤差約可分為以下三大類型：(1)質問窗內質點的脫離或配對錯誤；(2)隨機誤差(random error)或方均根誤差(root-mean-square)；(3)系統誤差(systematic error)或偏移誤差(bias error)。茲說明如下：

(1) 質問窗內質點的脫離或配對錯誤：

造成位移量的誤差，兩張影像在質問窗之互相關係數法計算時，可能因質點位移較大或質點離開光頁，造成演算時配對錯誤。產生此誤差主要原因可能為流速過快、速度梯度過大或三維流場的效應使質點離開觀測位置。此類誤差可經由不一致資料處理過程，去除錯誤之位移量。

(2) 隨機誤差(方均根誤差)：

隨機誤差係由隨機性之因素所造成，誤差來源可能由於質點的比重與分佈密度、流體三維運動劇烈、速度梯度或剪力場較大、擷取影像之背景雜訊影響等因素，為了降低所造成之誤差，可增加實驗量測次數。此類誤差亦稱為精確誤差(precision error)，其分散程度的大小則取決於測量值之標準差(standard deviation)或RMS 誤差，如圖2.11所示。其公式如下：

$$d_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i \quad (2-42)$$

$$\psi = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d_i - d_m)^2} \quad (2-43)$$

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

(3) 系統誤差(偏移誤差)：

系統誤差來自於一些已知因素，如外在環境因素(溫度、電壓或 CCD 影像擷取、儲存傳輸過程)、人為操作不熟悉或設計原理有失誤而造成系統偏差。此類誤差不含有隨機分佈之誤差，其偏差量有一致性，可經由修正方法降低其誤差量，因此系統誤差亦稱為偏移誤差(bias error)。於影像分析計算過程中，偏移誤差與互相關函數法之峰度值鎖定(peak-locking)有關，主要係因質問窗計算所得之峰度值(最有可能之位移值)與質問窗內之真實位移值無法完全吻合。偏移誤差(d_b)為已知之真實位移值(d_a)，如位移 0 畫素(zero particle image displacement)或位移大於 1 畫素，與質問窗內計算所得之平均值(d_m)之差，如圖 2.12 所示，其公式如下：

$$d_b = d_m - d_a \quad (2-44)$$

本研究利用 35 組影像，其位移量為已知條件下進行模擬(Liang et al., 2002)，此外亦進行隨機誤差分析，以確定影像分析方法適用於流場分析，模擬影像大小為 420×128 畫素、質問窗為 32×32 畫素，利用高斯子畫素修正法，計算結果如圖 2.13 與圖 2.14 所示，當已知位移量較大之情況下，其隨機誤差與偏移誤差逐漸偏大。此兩種誤差的估算與已知位移量之比較，相差二個級數，因此，可假設於 PIV 計算上的誤差於位移量分析時影響不大。

圖 2.15 為國際上對 PIV 計算方法提供之標準圖，影像大小為 472×488 畫素，為兩種不同流體的運動，其中，上層速度往右移動、下層往左移動，於交界面附近產生邊界層作用，其計算結果如圖 2.16 所示，並將位於圖上水平方向 288 畫素處之計算結果進行分析，如圖 2.17 所示，可清楚顯示出上下兩層流體之質點位移速度與交界面附近之位移速度分佈。

選用此組標準圖主要原因，在於測試 PIV 方法，在兩種不同流體下之流體交界面之運動特性，如速度梯度與渦流現象。

2.5 流體中之不穩定現象

在氣體與液體混合之二相流中，其流動結構頗為複雜。液體與氣體間界面可能存在三種不穩定性，一為重力或慣性力之 Rayleigh-Taylor 不穩定性，二為紊動或震波與界面相互作用之 Richtmyer-Meshkov 不穩定性，三為各相界面間的切向速度差或流向之剪應力相互作用之 Kelvin-Helmholtz (K-H) 不穩定性。以下就三種不穩定性做一說明。

2.5.1 Rayleigh–Taylor instability

Rayleigh-Taylor instability 是指兩層密度不同的流體如圖 2.18 所示，將其中之一疊置在另一個之上，不穩定性就發生在兩層流體之間的界面。最早是 1883 年，Rayleigh 研究兩層靜置的流體，受重力影響的穩定性。其後則是 1950 年，Taylor 研究加速度在兩層流體的穩定性中所占的角色。平面的 Rayleigh-Taylor instability 是在界面上全面發生，但環狀的情況則有可能只是部分區域發生。在穩定時，外力與圓柱的轉速成拋物線關係。表面張力是使系統趨向穩定的因素，外力則是不穩定的因素。

2.5.2 Richtmyer–Meshkov instability

對於脈衝雷射與密度界面相互干擾產生不穩定後導致混合增加的問題，如圖 2.19 所示，早在 60 年代就由 Richtmyer 提出。他發現當脈衝雷射波掃過密度界面後，界面上的小擾動會隨著時間的增長而增長。Meshkov (1969) 對此進行了實驗驗證。因此，該問題被稱為 Richtmyer-Meshkov (R-M) 不穩定問題。脈衝雷射作用導致界面兩邊流體混合增加的機制可應用於增加航空發動機的燃料與空氣的混合以提高效

率；而對界面不穩定機制的研究則有助於增加雷射控制熱核聚變的瞭解。

2.5.3 Kelvin-Helmholtz instability

Kelvin-Helmholtz instability 的產生是由兩種不同流場特性，如密度不連續或壓力不連續之流體相交會時，於交界面會形成一個剪力層，如圖 2.20 所示。當兩不同流體以不同速度流動時會在剪力層上形成波動的產生，而在兩流體相交會的剪力層上，波峰與波谷的地方會受到兩種流體不相同速度的流動牽引，產生旋轉的效應而形成 Kelvin-Helmholtz instability。

在管流中液體摻雜氣體流動，氣體流動可能造成局部阻塞，在此流動結構下，受氣泡阻塞的比率可能造成較大的壓力與速度梯度變化。在流速較低之情況下(氣泡不易被帶走)，在管流底部或近邊界之流體速度可能因氣泡滯留於某部位而呈現局部速度為負值，如局部迴流現象。在較高流速之情況下，水流能帶動氣泡往前移動，由於各相流之間的剪應力作用，流體間的不穩定性現象逐漸產生渦流、紊流現象，使得不同流相因加速度差異產生不穩定性。

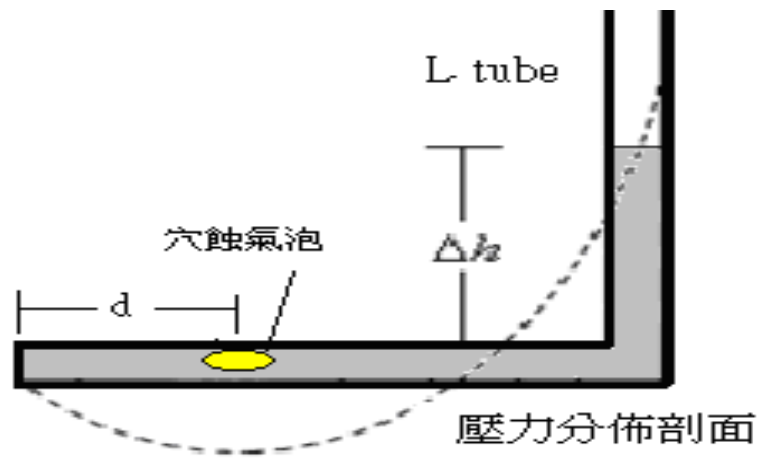


圖 2.1 不同半徑處之壓力分佈示意圖

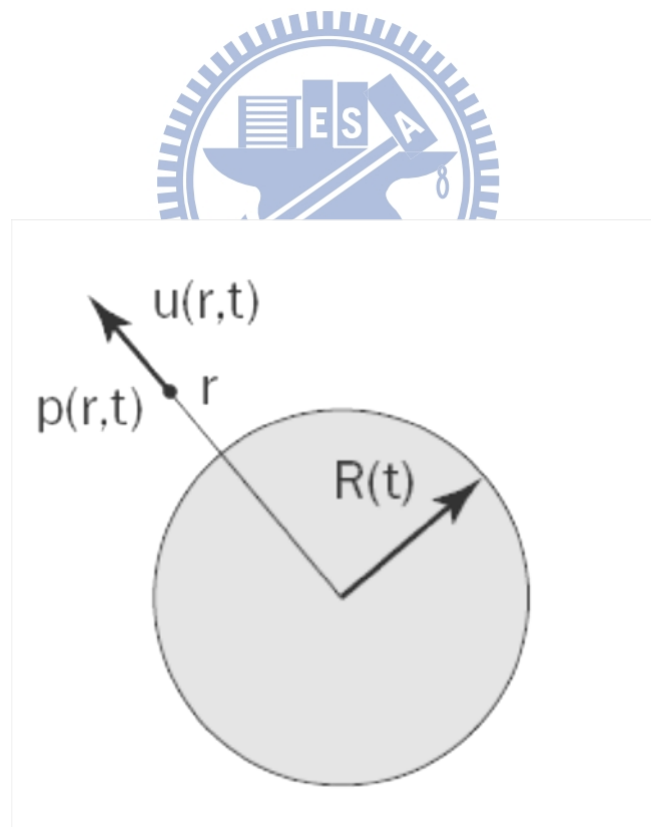


圖 2.2 氣泡內外相關位置示意圖

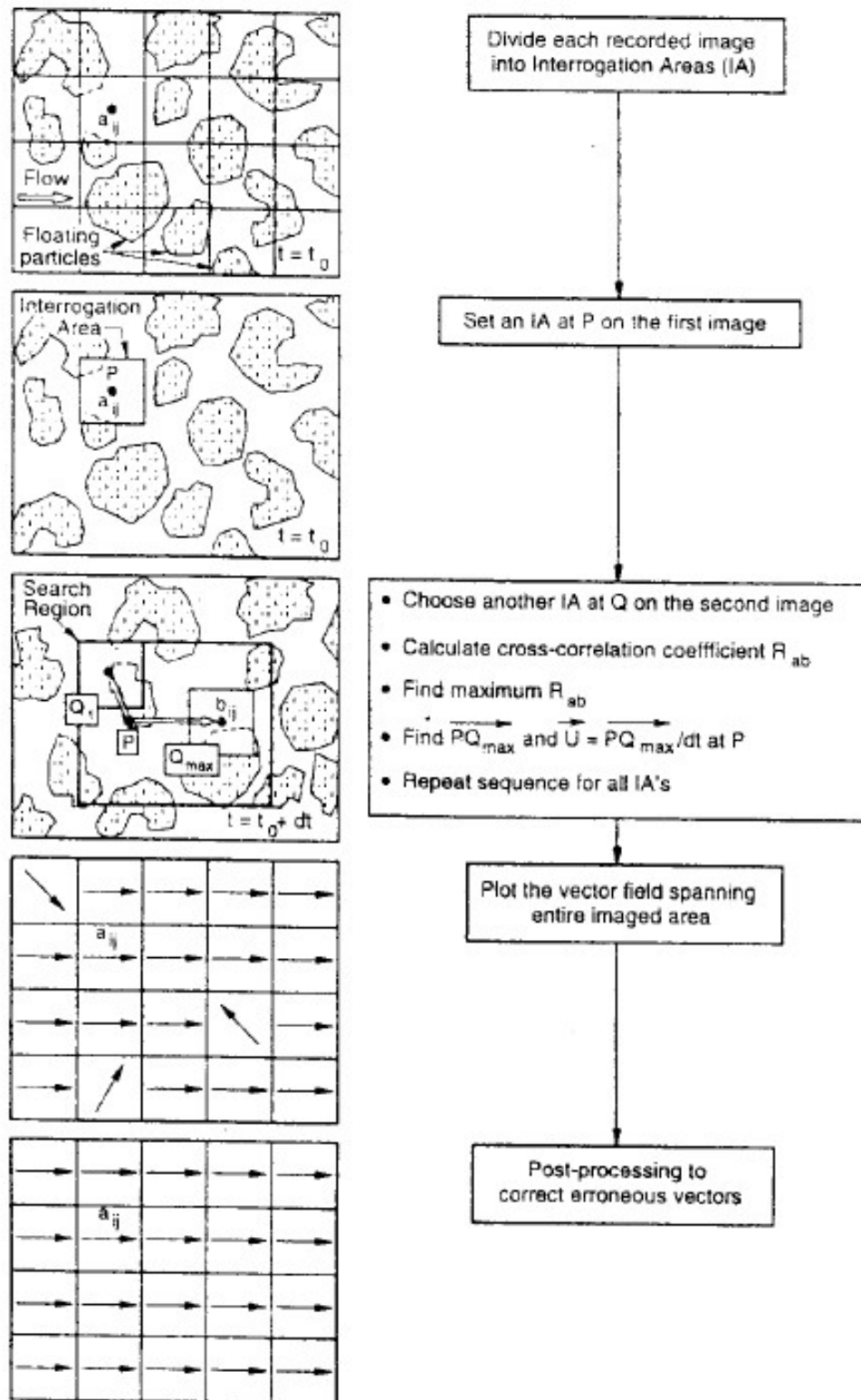


圖 2.3 PIV 影像分析法(Fujita, 1998)

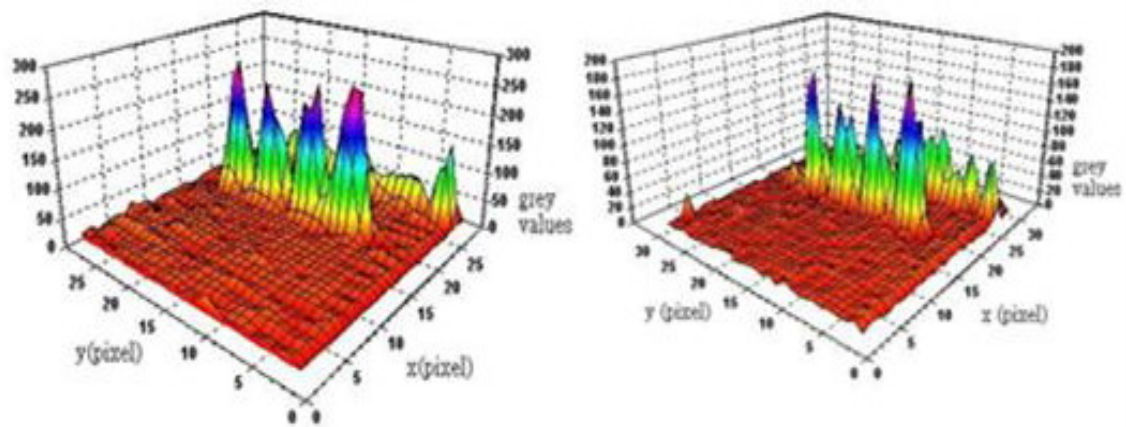


圖 2.4 具時序性影像之質點亮度分佈值

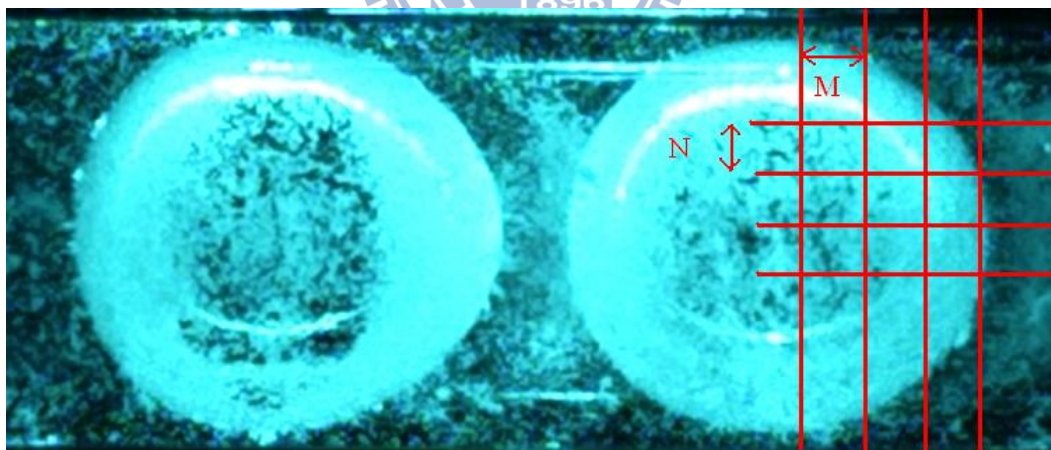


圖 2.5 PIV 計算質問窗大小之示意圖

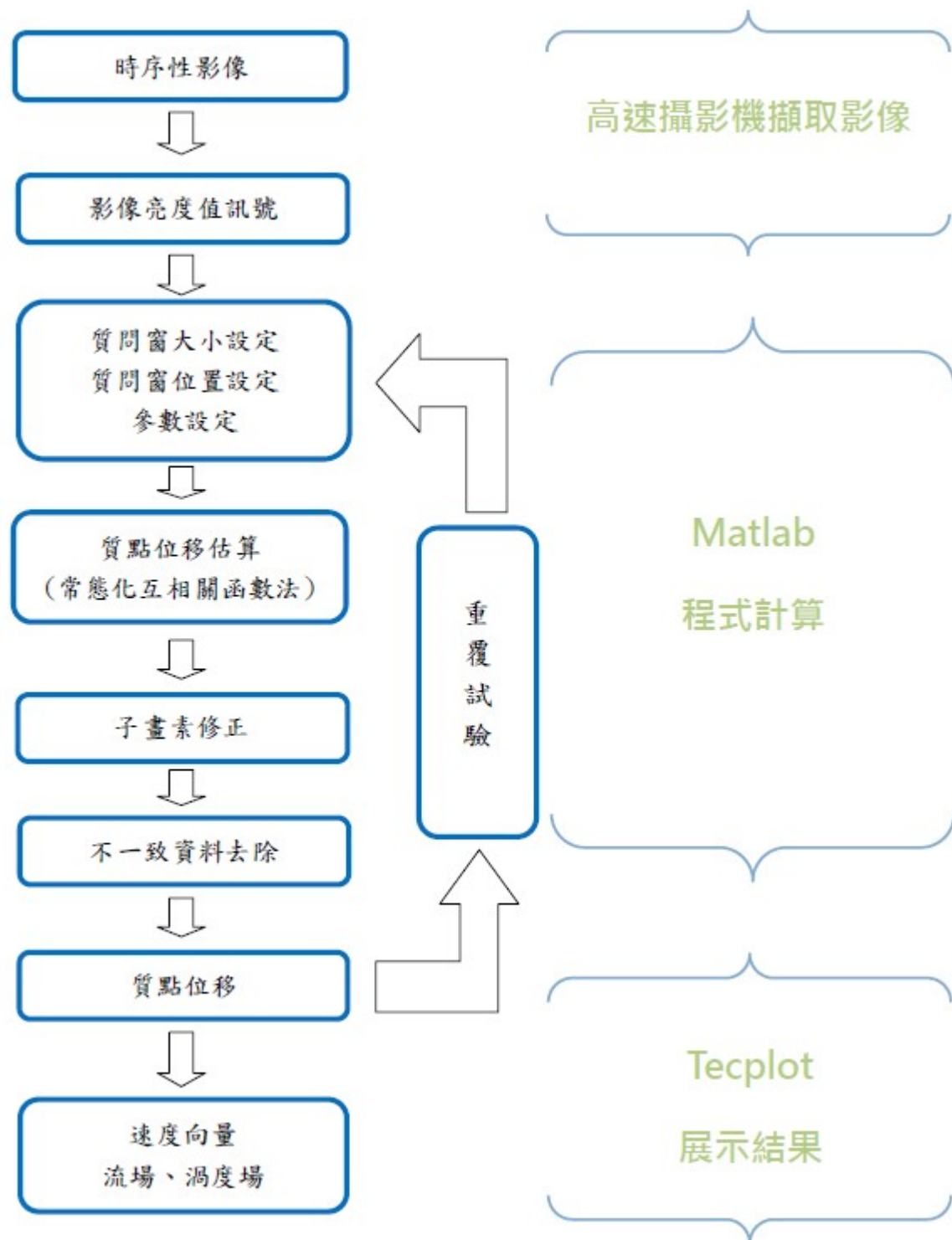


圖 2.6 PIV 計算流程圖

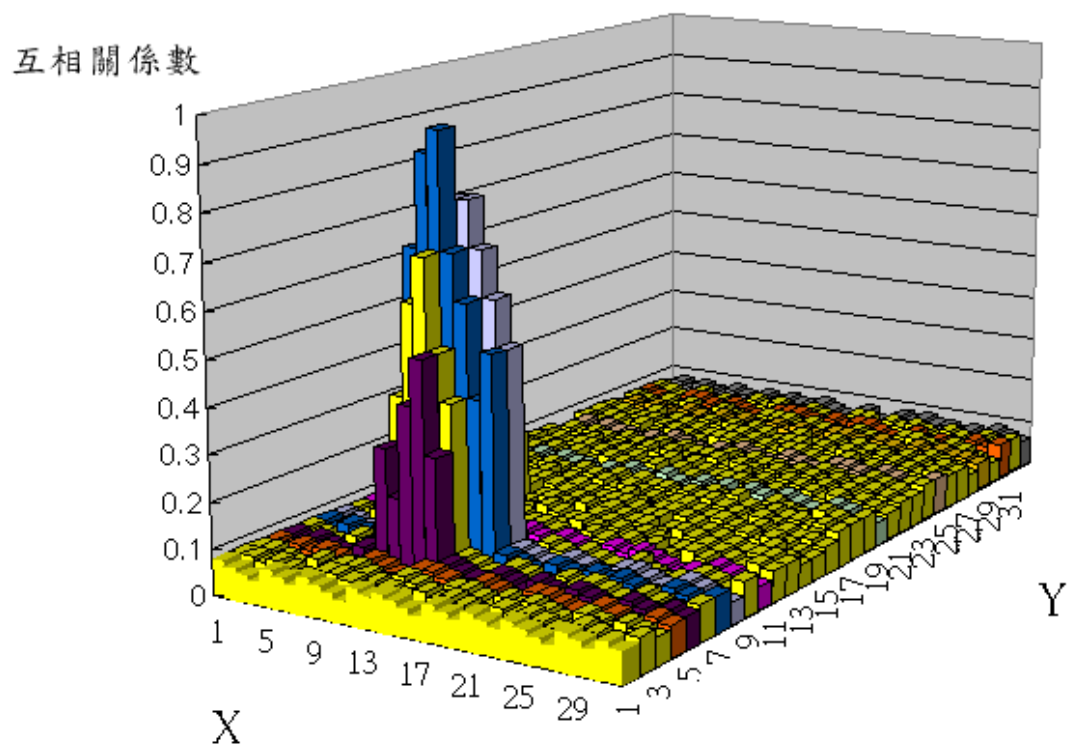


圖 2.7 互相關係數之最大值為最有可能 m 與 n 位移量之示意圖

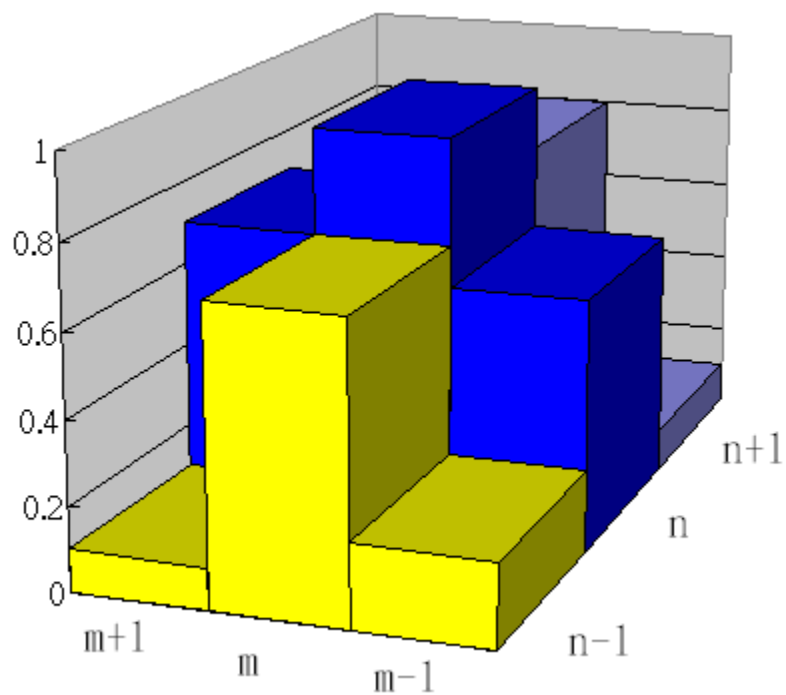


圖 2.8 質問窗內子畫素修正法之互相關係數值示意圖

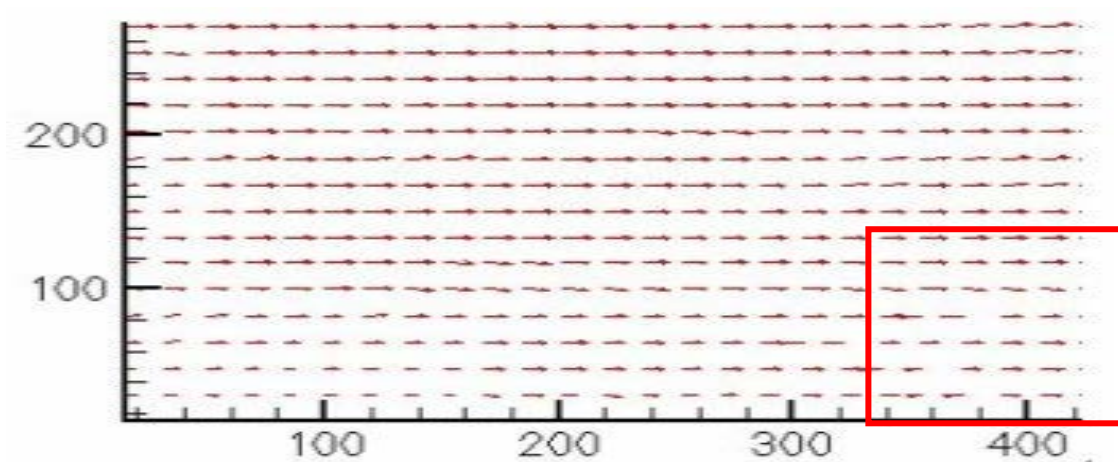


圖 2.9 不一致流速向量（右下部分）

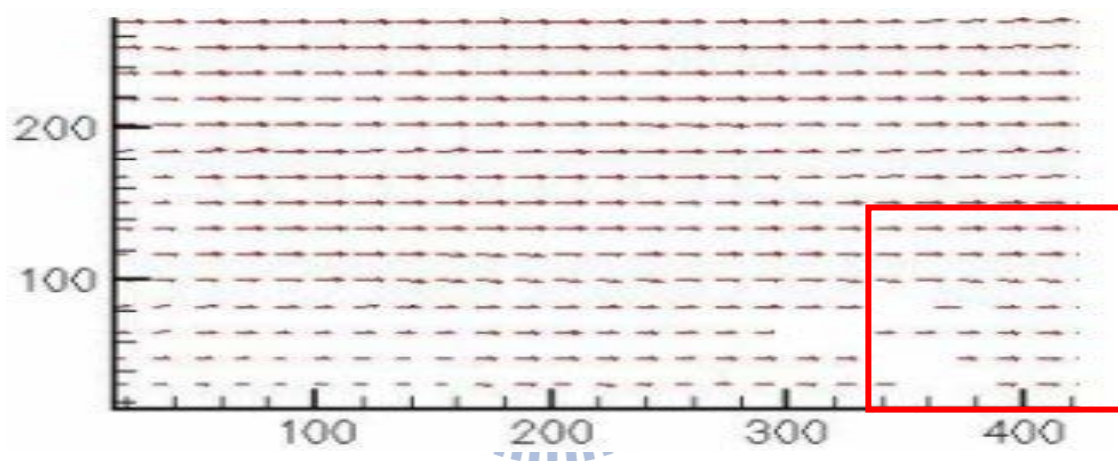


圖 2.10 去除不一致流速向量

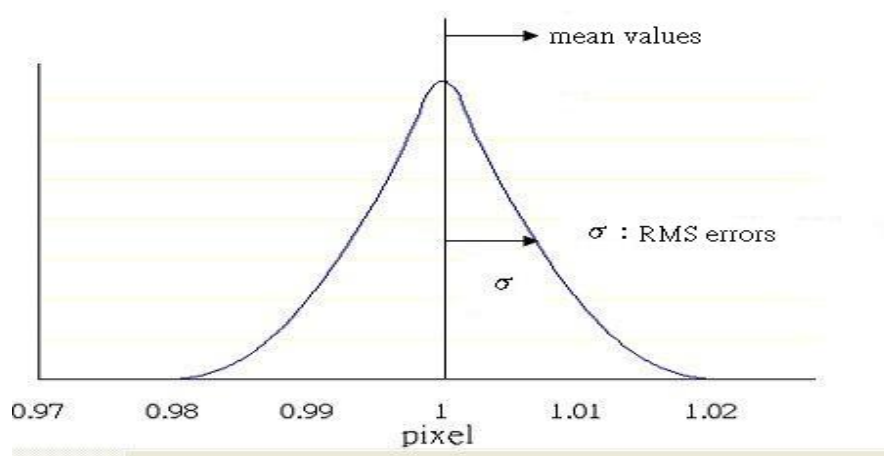


圖 2.11 RMS 誤差之示意圖

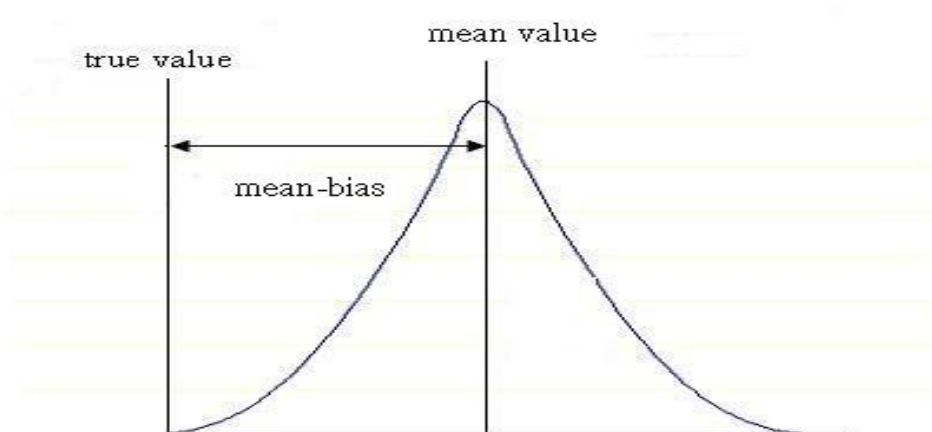


圖 2.12 偏差誤差之示意圖

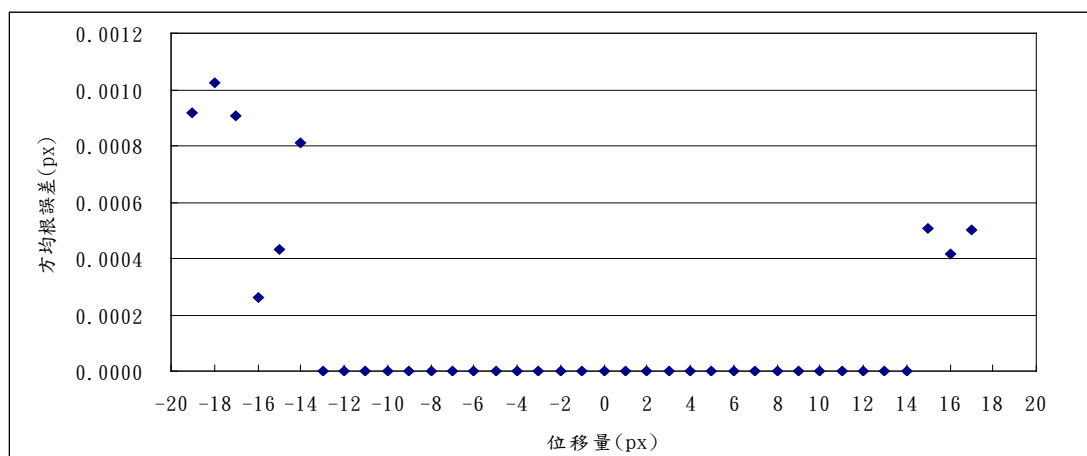


圖 2.13 方均根誤差量

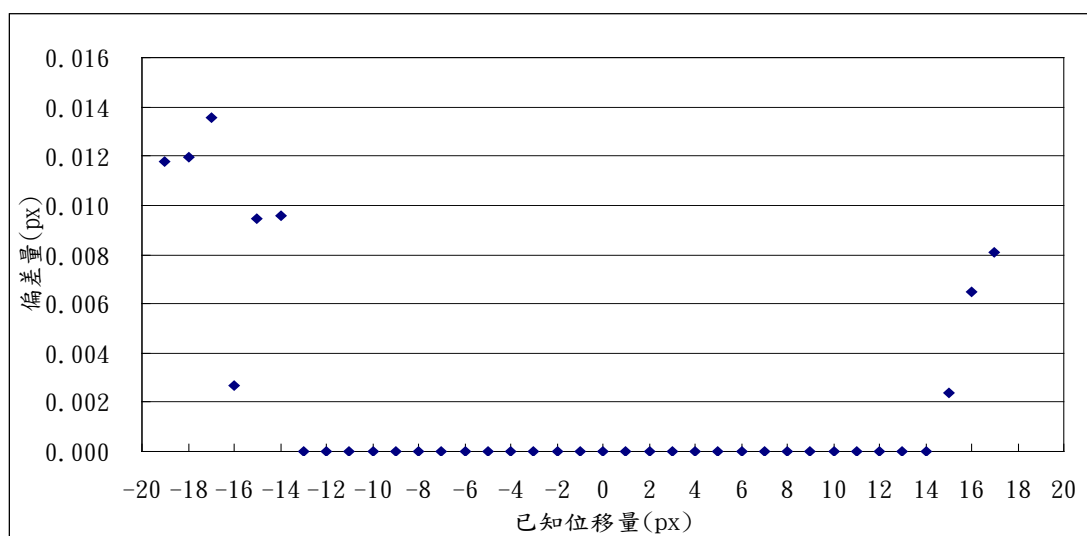


圖 2.14 偏移誤差量

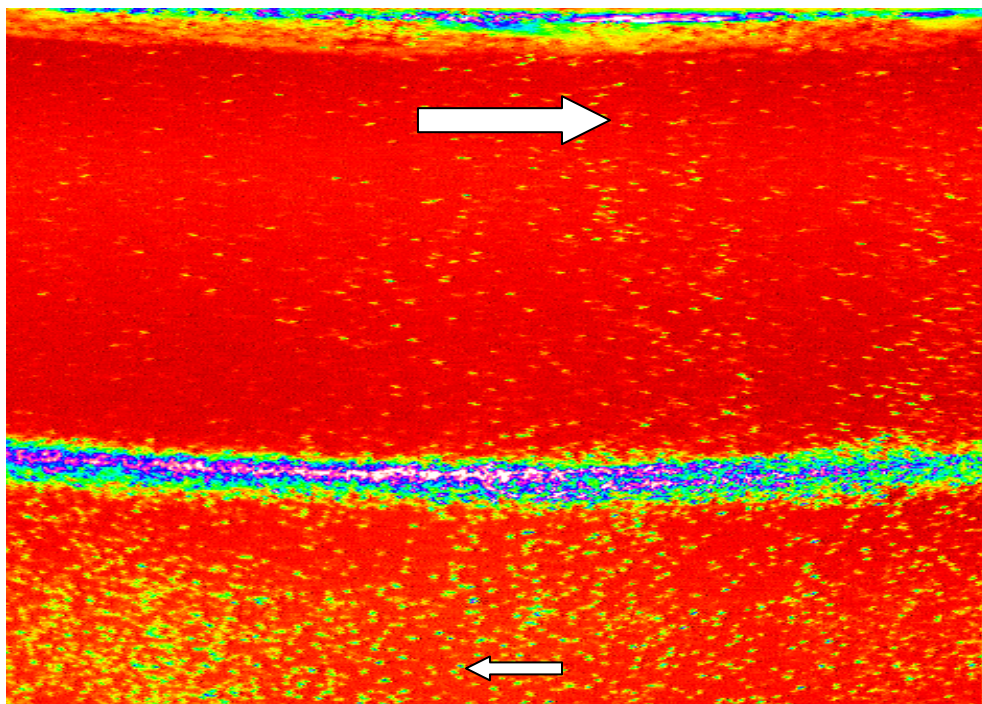


圖 2.15 兩種不同流體的運動，上層速度往右移動、下層往左移動

(資料來源：<http://www.math.uio.no/~jks/matpiv>)

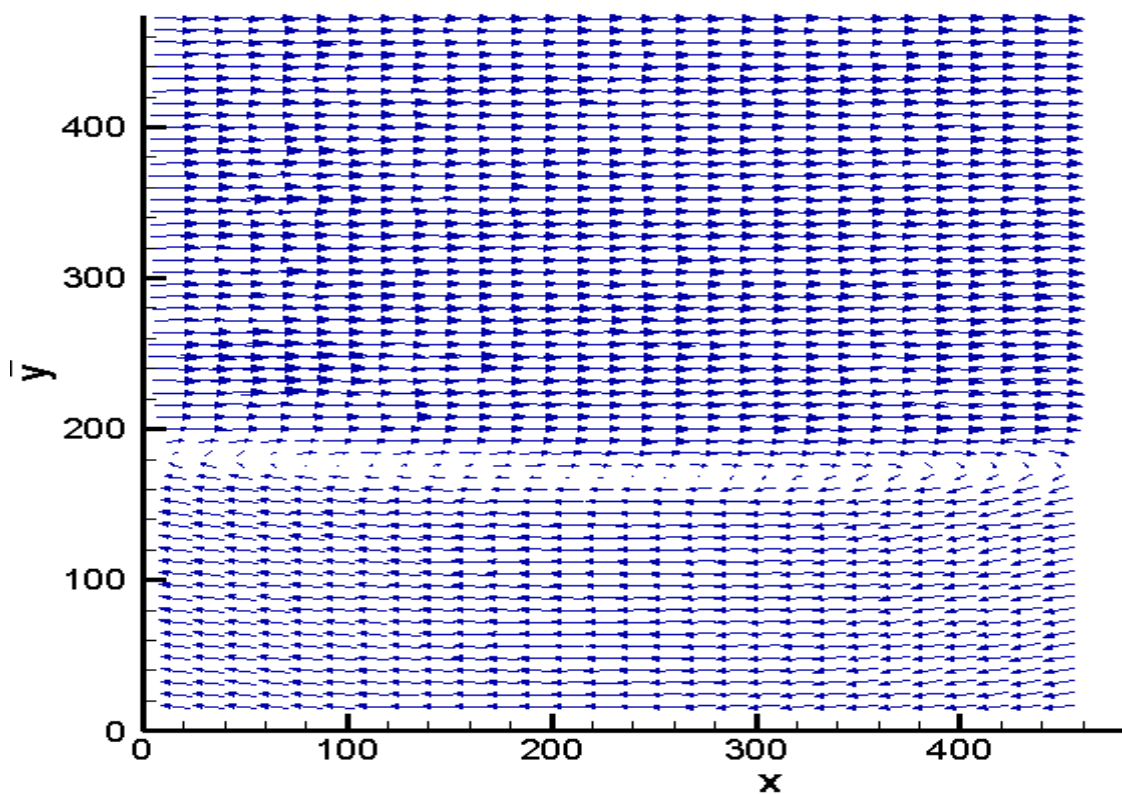


圖 2.16 為圖 2.15 之 PIV 計算結果，於交界面處產生流體交互作用

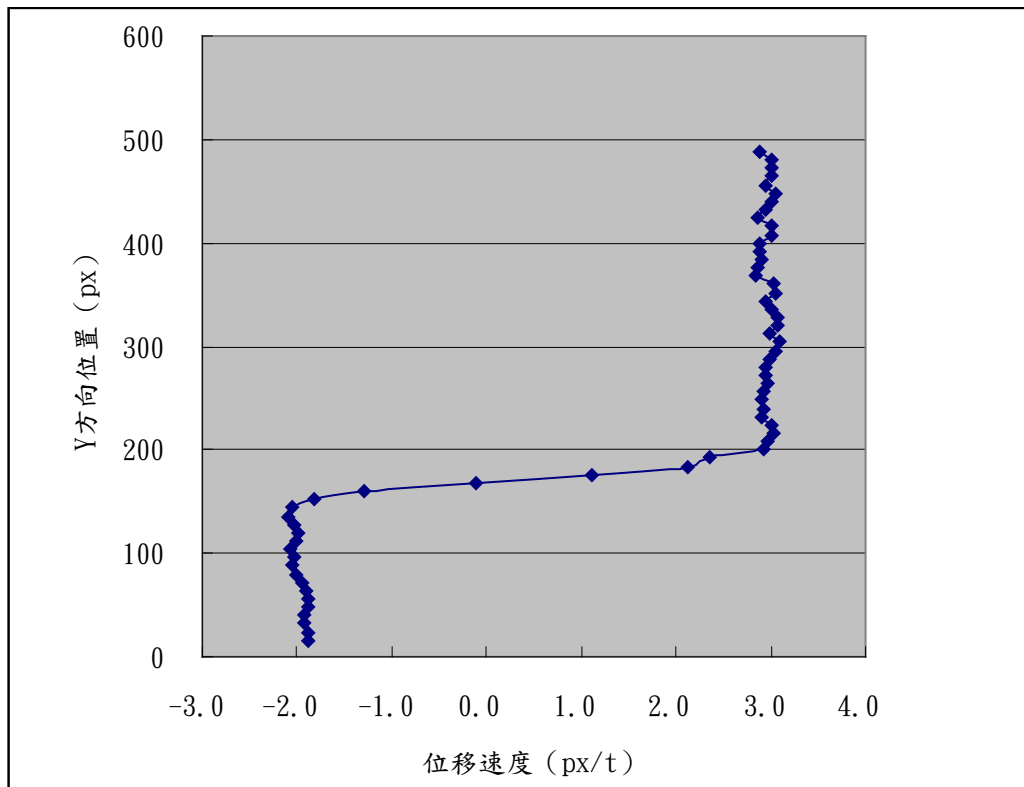


圖 2.17 為圖 2.16 於 288px 位置處之質點位移速度分佈

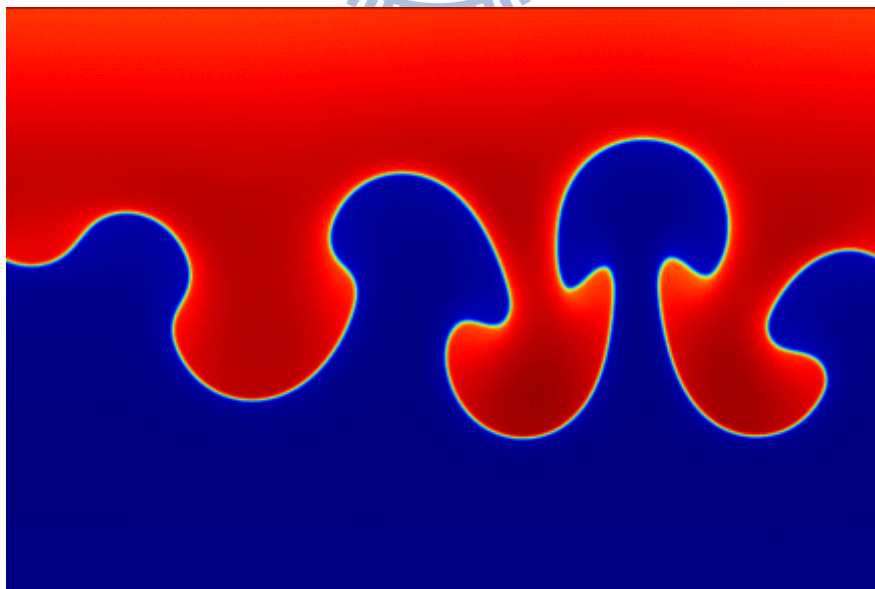


圖 2.18 不同流體間之重力或慣性力相互作用下產生
Rayleigh-Taylor 不穩定性

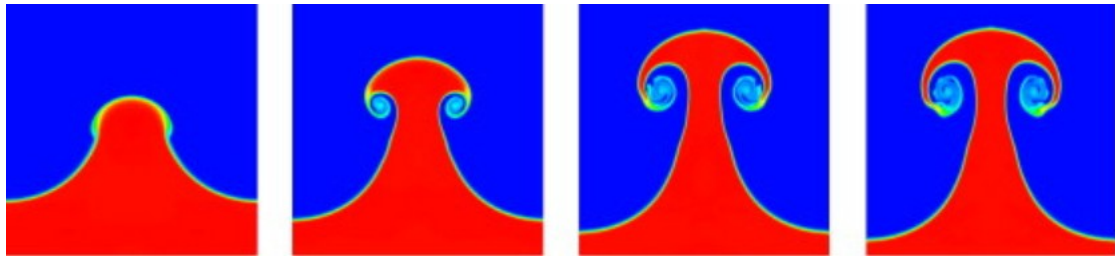


圖 2.19 不同流體間震波與界面相互作用下產生
Richtmyer-Meshkov 不穩定性

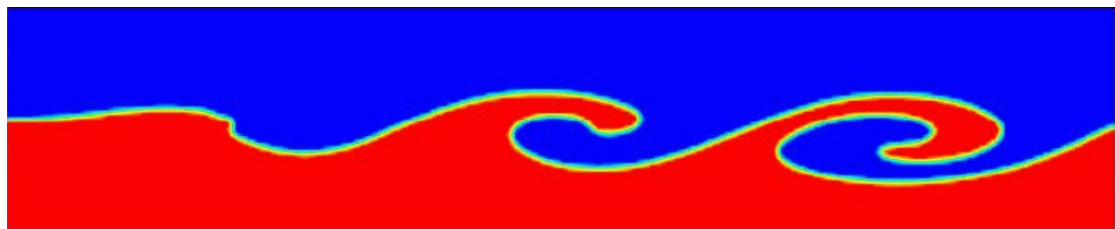


圖 2.20 不同流體間之剪應力相互作用下產生
Kelvin-Helmholtz 不穩定性

第三章 試驗儀器與佈置規劃

本試驗儀器分為七大部分，分別為試驗模型、氣泡生成系統、光學設備系統、質點追蹤粒子、訊號控制系統、壓力脈衝系統、影像系統其詳細內容敘述於 3.1 至 3.7 節。試驗設計及程序部分詳見 3.8 及 3.9 節。

3.1 試驗模型

本研究所採用的模型為壓克力材質製作，厚度均為 0.2cm，模型中間試管為透明壓克力圓柱管，內徑為 5.0 mm、外徑為 8.0 mm，如圖 3.1 所示，試管之一端接壓力感應器，另一端黏接上一 PVC 材質、內徑亦為 5 mm 之連接軟管。將軟管延伸至 U 型旋轉平台的轉臂上，並固定於垂直肘上，模型放置於 U 型平台後再進行旋轉，可產生球狀體穴蝕氣泡。U 型平台旋轉時，最低壓力處將發生於旋轉軸上，如圖 3.2 所示，因此，試驗模型需跨越轉軸中心位置，以利穴蝕氣泡之形成。而所產生之穴蝕氣泡藉由連通管移至模型試管之特定位置上，使試驗模型試管中有兩顆穴蝕氣泡。

3.2 氣泡生成系統

本試驗產生氣泡之 U 型旋轉實驗裝置，如圖 3.3 所示。實驗儀器架設在防震光學桌上，包含：U 型旋轉平台、電力無刷馬達、伺服驅動器。相關儀器規格如下：

- (1) U 型旋轉平台：為厚度 20 mm 之壓克力板製成、旋轉半徑 250 mm、總長度 500 mm，垂直肘高度 150 mm，中心位置固定於無刷馬達轉軸上。
- (2) 直流無刷馬達：為可控制轉速之馬達，旋轉速率最快可達每分鐘

2,000 轉，具有短時間內減速與停止之功能，如圖 3.4 所示。本試驗轉速約 180 轉至 200 轉間即可產生氣泡。

- (3) 伺服驅動器：使用利電電機科技公司(LEEDAN)之 ESD-V 系列之伺服驅動器，如圖 3.5 所示，使用 AC 220V 之電流，使驅動器帶動無刷馬達。

3.3 光學設備系統

光學設備系統包含輔助光源、ARGON LASER、聚光凸透鏡三個部分，茲說明如下：

- (1) 輔助光源：定性分析時，使用 IDT 公司之 LED 燈源做為光學依據，分別為兩個 60 瓦的 LED 燈源，如圖 3.8 所示。
- (2) ARGON LASER：定量分析時，使用 Spectra-Physics 公司之型號 stabilite 2017 之離子氣體 ARGON LASER 做質點影像測速法，如圖 3.9。藉由雷射光束沿途及與透明圓柱棒形成之水平光頁，於管內佈置顯影質點，以輔助瞭解流體運動之特性，如圖 3.10 所示。
- (3) 聚光凸透鏡：由於雷射光束經過反射鏡時，其強度會減弱，因此利用聚光凸透鏡，將光束聚集，使雷射光功率不至於減弱，如圖 3.10 所示。

此外，光頁通過透明試管時，會產生折射與反射現象，使攝影時產生折射與失真現象。因此，於試管外圍設置可裝水容器，並注入水使其滿過試管，可降低攝影之折射與失真現象。另控制光頁厚度為 1.5mm 為最清晰，藉由高速攝影機進行錄製氣泡破裂過程之影像，取得錄製之影像資料後，將影像資料轉檔成一般數位影像，並利用佈置於液體中之質點，藉以探討氣泡破裂時之流場變化特性。

3.4 質點追蹤粒子

為清楚觀察流場，本研究於試管中放入質點追蹤粒子。反射光線的顆粒被稱為追蹤粒子(tracer particle)或植入粒子(seeding particle)。由於 PIV 所量測到的是粒子速度，並非流體速度，因此如何控制追蹤粒子使其能真實代表流場速度是進行 PIV 量測首要工作。

本試驗選用 TSI 公司之中空玻璃球(glass beads-hollow)作為顯影質點，如圖 3.11，全名為 Sphericul Hollow Glass Spheres，質點尺寸為 8-12 μm ，密度約為 1.05 至 1.15 g/cm^3 間。

3.5 訊號控制系統

同步訊號控制系統部分主要由壓力感應器及訊號處理卡所組合而成，其功能說明如下：

- (1) 壓力感應器(圖 3.12)：為量測氣泡破裂之壓力變化，利用 Kulite XTL-190 壓力感應器配合 NATIONAL INSTRUMENTS (NI) -6221 Analog I/O 卡，輸出 10V 電壓與接收 0~1.0V 訊號，壓力量測最高可達每秒 150,000 筆資料，加以記錄存檔，即可分析氣泡破裂時之壓力變化。
- (2) NI-6221 訊號處理卡(圖 3.13)：用於整合高速攝影機訊號輸出、Kulite XTL-190 壓力感應器觸發訊號，使影像資料與壓力資料之關係藉由訊號之同步觸發得以同步進行。其方法為根據高速攝影機於擷取每一張影像之同時，經由相機外接觸發訊號接頭送出 3.2V 之驅動電壓，經由同軸纜線傳送電壓到 NI-6221 之訊號輸入端，經由此 I/O 卡觸發壓力感測器，擷取資料存檔。當攝影機停止取像，壓力感測器亦停止擷取壓力資料。因此，每一張影像可對應到壓力感應器之量測壓力值，以利分辨所擷取影像與壓力變

化，繼而進行相關分析。

3.6 壓力脈衝系統

此系統為提供實驗時之壓力源，壓力的大小與氣泡撞擊的結果有相當大的關係。其系統如圖 3.14 所示，包含衝擊彈簧、衝擊活塞、壓力觸發器、機械手臂四項所組成，分別敘述如下。

- (1) 衝擊彈簧：用以產生震波進入球狀體氣泡試驗試管。
- (2) 衝擊活塞：經由衝擊彈簧的撞擊後，將壓力波傳遞進試管中。
- (3) 壓力觸發器：控制衝擊彈簧之儀器，以免彈簧無預警衝擊。
- (4) 機械手臂：用以控制壓力觸發器之縮回。

3.7 影像系統

此系統主要分為影像擷取系統與影像分析系統：影像擷取系統包含高速攝影機與影像擷取軟體兩部分組成；影像分析系統包含 Matlab 軟體及 Tecplot 軟體兩部分。

3.7.1 影像擷取系統

- (1) IDT NXT8-S2 高速攝影機(圖 3.15)：為氣泡破裂過程中之影像擷取，此攝影機是以高速擷取影像並進行錄製，其擷取速度根據影像擷取範圍大小設定，以 $1600px \times 400px$ 與 $1400px \times 400px$ 之影像解析度，每秒最快擷取分別為 8,000 與 10,000 張影像，傳送至電腦存檔並進行影像分析，使用時整套連接系統如圖 3.16 所示。
- (2) 影像擷取軟體：使用 IDT 公司之 Motion Studio 軟體可將攝影機擷取之影像即時顯示於電腦螢幕上，再利用影像軟體 ACDSee 擷取出圖片。且擷取之影像可儲存於電腦上之硬碟空間，適用於連續畫面之擷取。

3.7.2 影像分析系統

- (1) Matlab軟體：使用Matlab軟體，將實驗時所取得的每組具有時序性的質點影像圖檔(jpg格式)讀入之後，可將質點影像圖檔上每個位置的質點所代表的灰階值(灰階值的範圍為0~255)經Matlab程式轉換後取得，並將原來的質點影響圖檔轉換成ASCII格式的檔案儲存。
- (2) Tecplot軟體：Tecplot為一專業繪圖軟體，透過Tecplot的多種繪圖功能，可以將由Fortran程式所計算出來的流場資料讀入，而呈現流場速度向量與流線分部等各種圖形，另Tecplot還可對流場的整體速度向量作統計與平均。

3.8 試驗設計

本研究利用二組 L 形壓克力圓管並注入自來水，同時旋轉 U 型平台使轉軸中心壓力降低至蒸汽壓力，個別產生單一穴蝕氣泡，藉由連通管將一氣泡移至另一管內特定位置上，使二顆穴蝕氣泡於同一圓管內，並於圓管中調整氣泡間的距離參數 γ ($\gamma = \frac{d}{R_{\max}}$ 、 d 為雙氣泡球心距、 R_{\max} 為氣泡半徑)，進行六種不同球心距離之距離參數分別為 2、3、4、5、6 及 >6 的雙氣泡破裂流場試驗，氣泡位置示意圖如圖 3.17 所示。

試驗時分別採用不同強度壓力波擊破氣泡，在各距離參數下，使用三種不同強度的壓力波，觀察兩顆皆破、一顆破一顆不破及兩顆皆不破的試驗，探討不同壓力波下雙氣泡破裂交互作用之定性現象觀察及定量 PIV 流場之量測分析。

3.9 試驗程序

步驟一：穴蝕氣泡的產生(圖 3.6)

- (1) 將氣泡試驗試管充滿水後，放置並固定於 U 型旋轉平台上。
- (2) 將 PVC 軟管延伸至 U 型旋轉平台的轉臂上，並固定於垂直肘上。
- (3) 控制垂直肘水位高，產生穴蝕氣泡所需旋轉角速度與垂直肘水位高 Δh 有關，因此要避免 Δh 太大，造成需要的轉速太高(由公式

$$p_{0\omega} = p_{atm} + \rho g \Delta h - \frac{1}{2} \rho r^2 \omega^2)。$$

- (4) 調整直流無刷馬達，增加 U 型旋轉平台之轉速，約 180~200 轉時即可轉出單一穴蝕氣泡。
- (5) 利用連通管原理，將個別旋轉出的單一穴蝕氣泡移至同一試管內，使同一試管內有雙氣泡的存在。

步驟二：壓力震波的產生(圖 3.7)

- (1) 將氣泡試驗試管放置到試驗平台上，並將一端接上壓力感應器，另一端 PVC 軟管則放上活塞與衝擊彈簧端相連接。
- (2) 將機械手臂伸長與衝擊彈簧接觸。
- (3) 利用機械手臂控制壓力觸發器，使衝擊彈簧瞬間打在活塞上。
- (4) 活塞初始位置與自由液面接觸，試管受彈簧衝擊後會產生瞬間水流速度以及壓力震波。
- (5) 管內穴蝕氣泡因壓力震波而壓縮、破裂。

步驟三：影像取像與壓力控制

- (1) 定性分析時，實驗前將光源打開，以增加拍攝明亮度；定量分析時則使用雷射光源，並於光頁前加聚光鏡，穩定雷射光源。
- (2) 將高速攝影機打開後，由電腦軟體 Motion Studio 控制高速攝影機。

- (3) 利用 Motion Studio 軟體擷取所要分析的影像。
- (4) 不同長度的衝擊彈簧所產生的壓力波會不同，利用壓力感測器記錄壓力變化(每秒 150,000 筆資料)。
- (5) 實驗過程中同時操作兩台電腦記錄影像與壓力變化，並存於電腦硬碟中，如圖 3.18 所示。

步驟四：影像分析與壓力分析

- (1) 將實驗所得的影像及壓力資料從電腦硬碟中取出。
- (2) 定性分析時利用 ACDSee 軟體慢速播放，以利分析其氣泡經壓力波撞擊交互作用過程所產生的現象。
- (3) 定量分析時利用 Matlab 程式去分析影像得到其流場變化。
- (4) 壓力分析則由壓力感應器所記錄之壓力量測值進行單位轉換與分析。
- (5) 經由處理與分析後，可得知氣泡破裂過程時影像與交互作用過程中之壓力變化。





圖 3.1 試驗模型

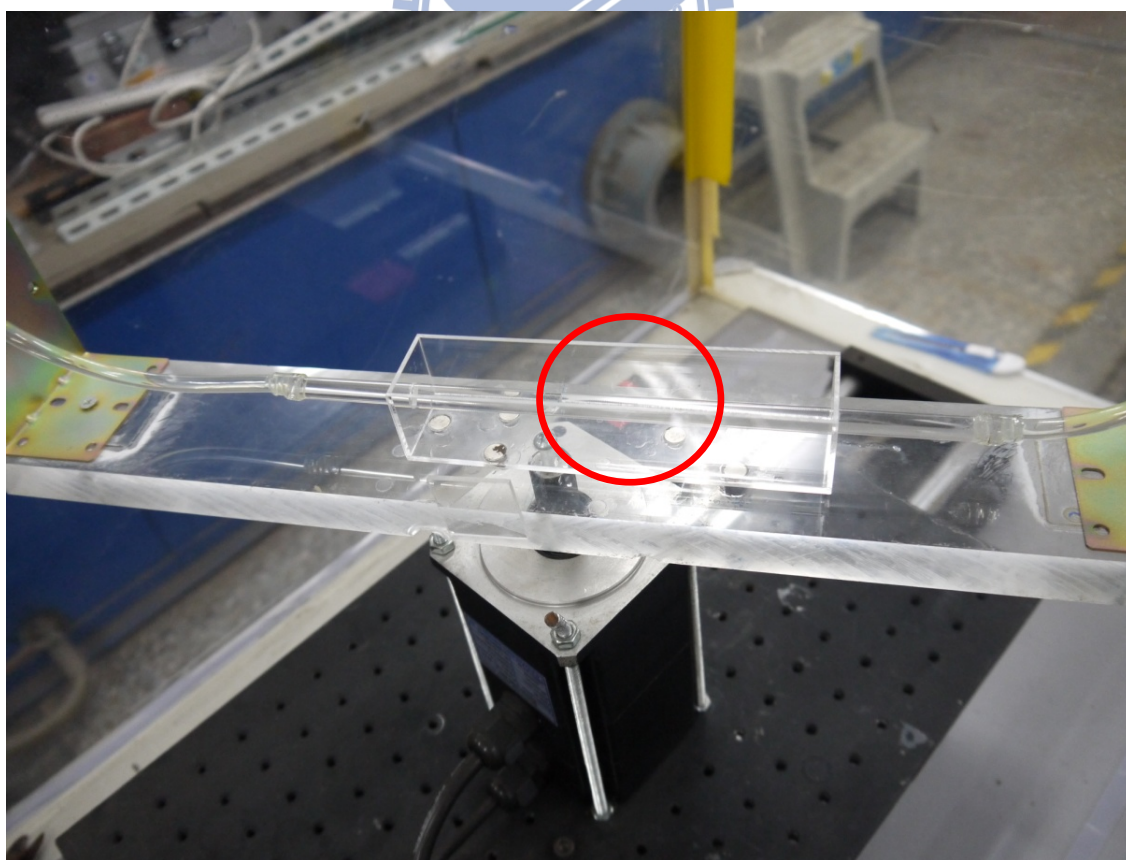


圖 3.2 試驗模型放置轉軸中心位置圖

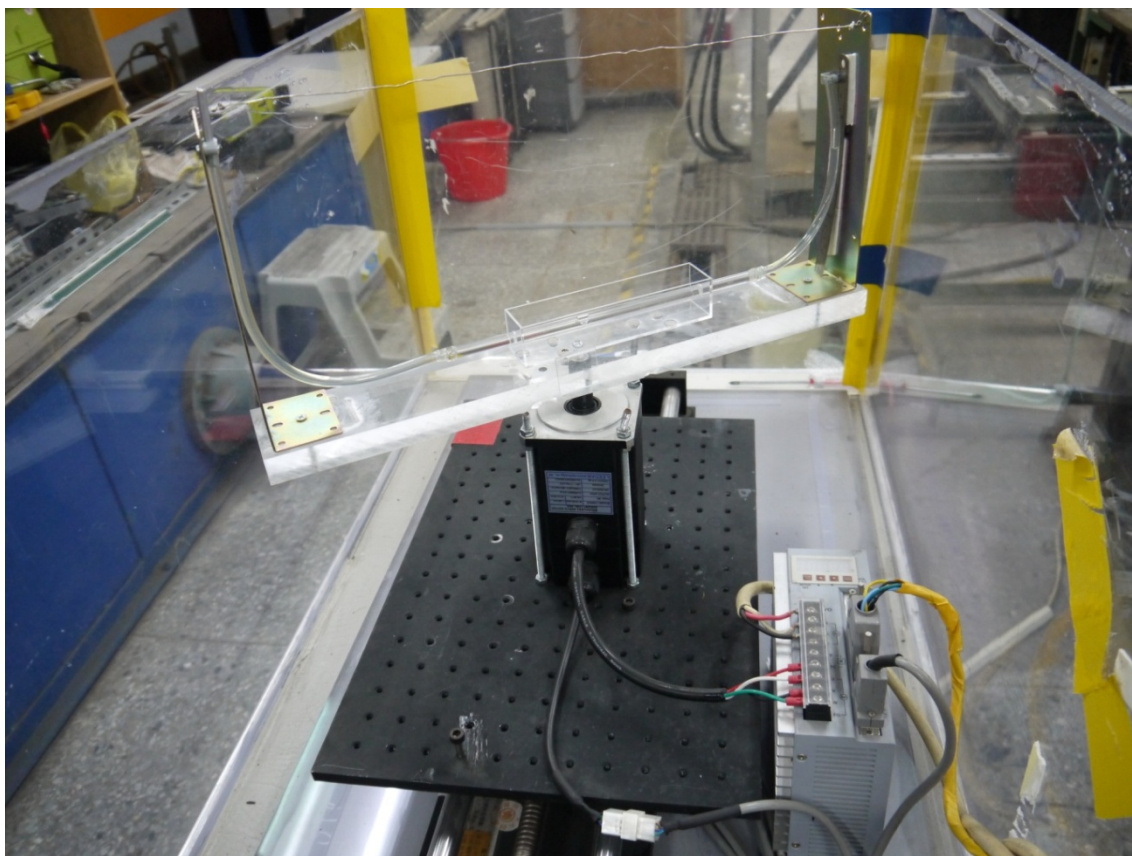


圖 3.3 U 型旋轉實驗裝置

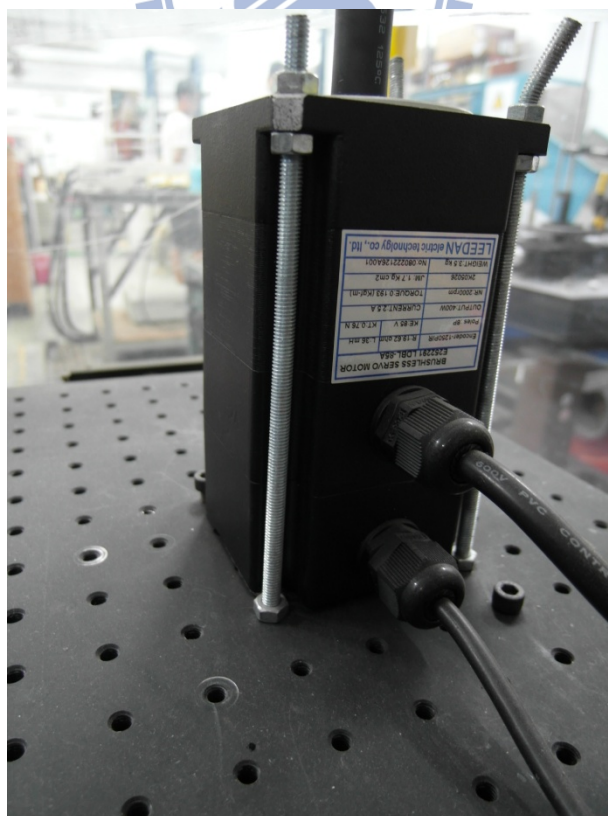


圖 3.4 直流無刷馬達



圖 3.5 伺服驅動器

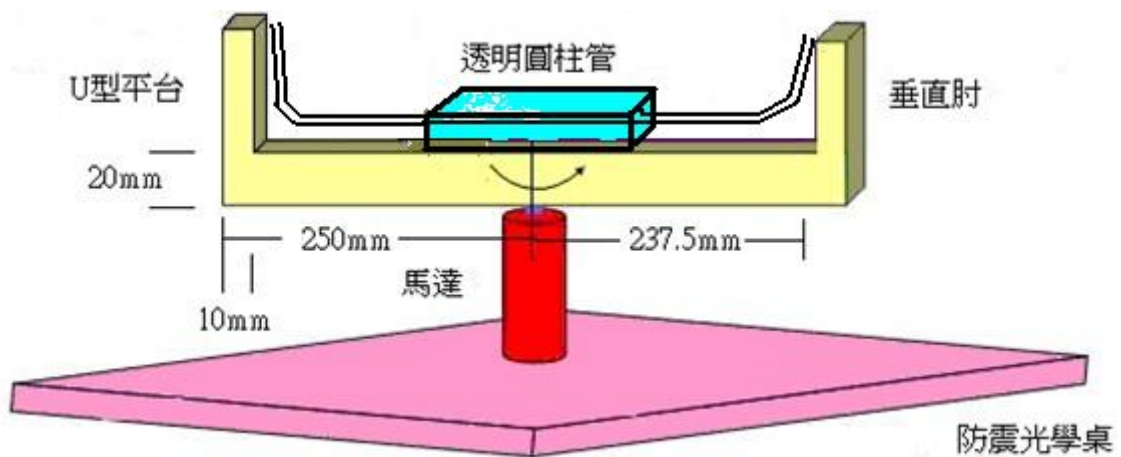


圖 3.6 U 型旋轉實驗裝置示意圖

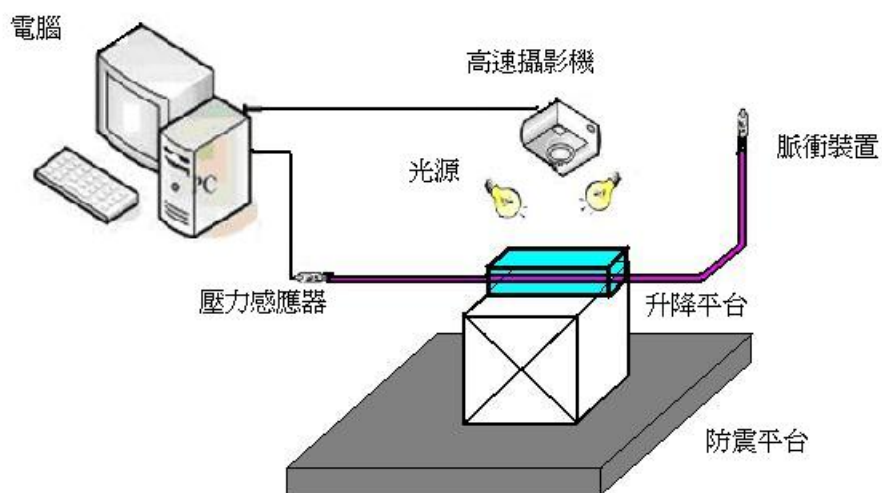


圖 3.7 試驗儀器佈置圖



圖 3.8 IDT 公司 LED 燈源



圖 3.9 ARGON 雷射

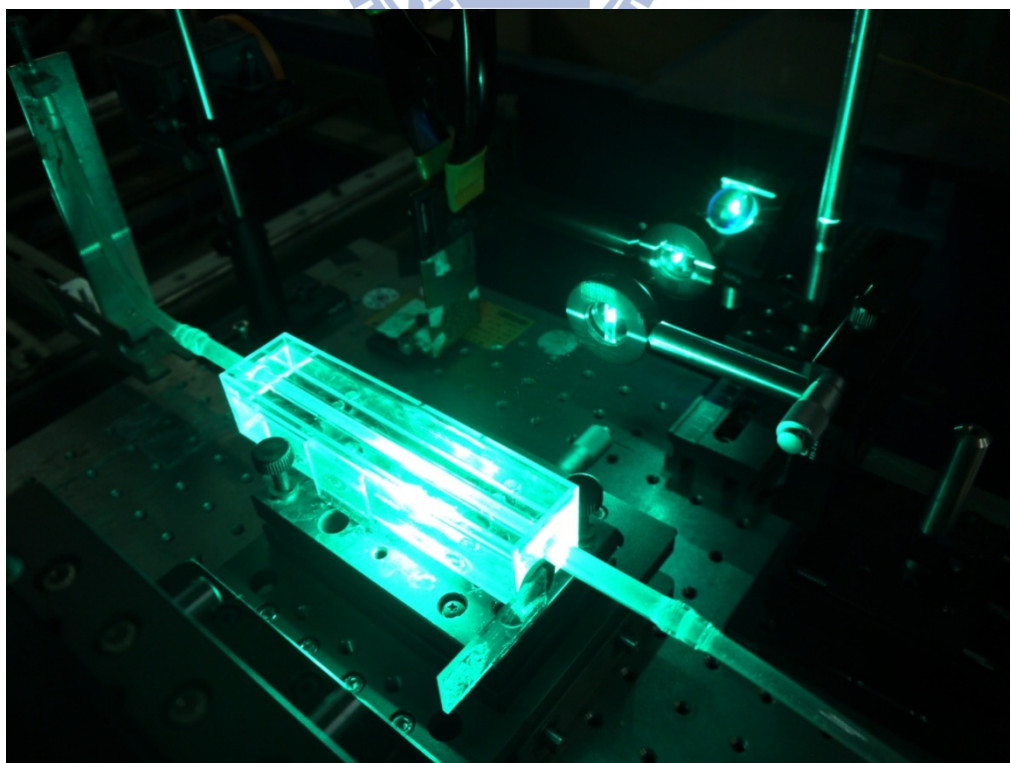


圖 3.10 雷射光束通過聚光凸透鏡與透明圓柱棒形成之水平光頁

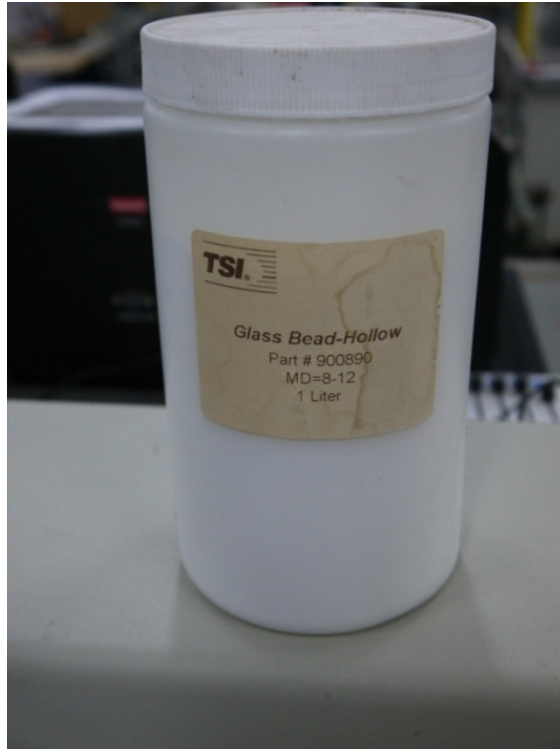


圖 3.11 TSI 公司之中空玻璃球(glass beads-hollow)



圖 3.12 壓力感應器

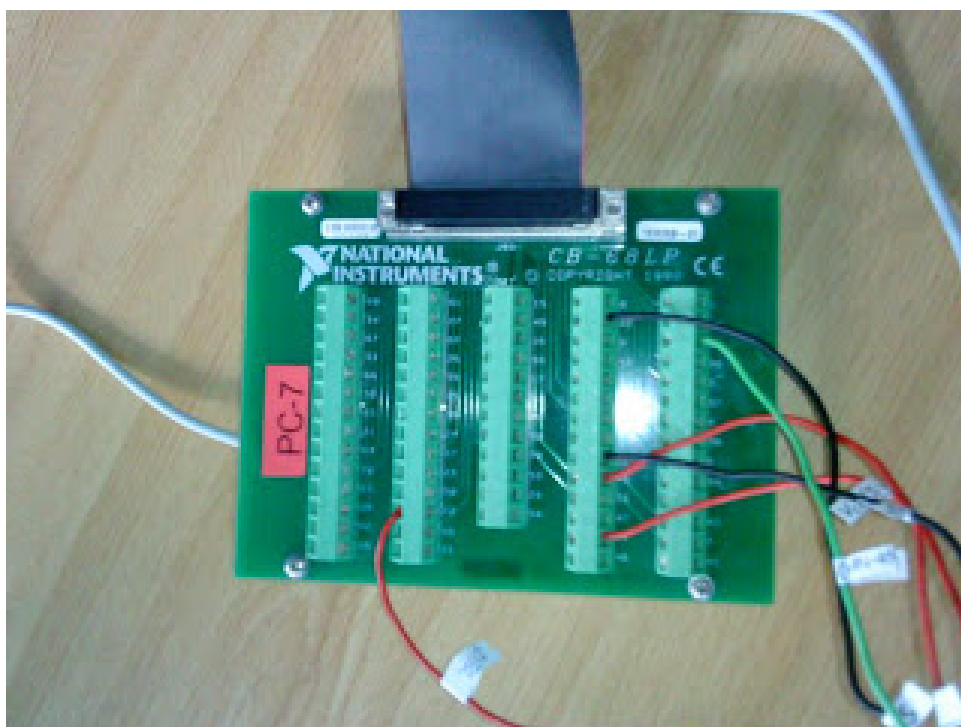


圖 3.13 NI-6221 訊號處理卡

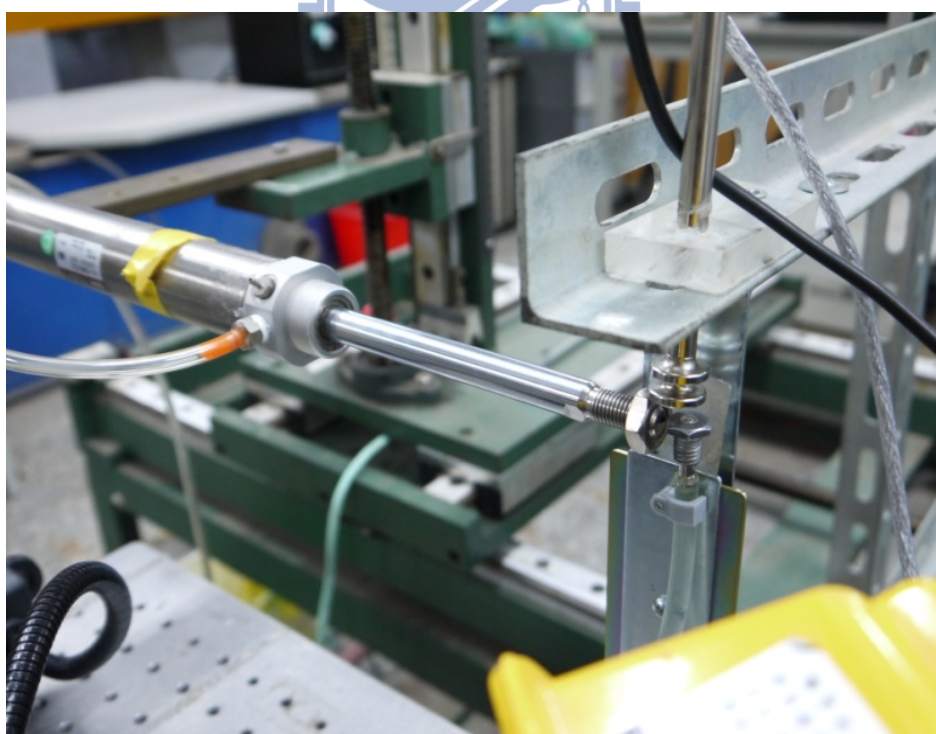


圖 3.14 壓力脈衝系統



圖 3.15 IDT NXT8-S2 高速攝影機

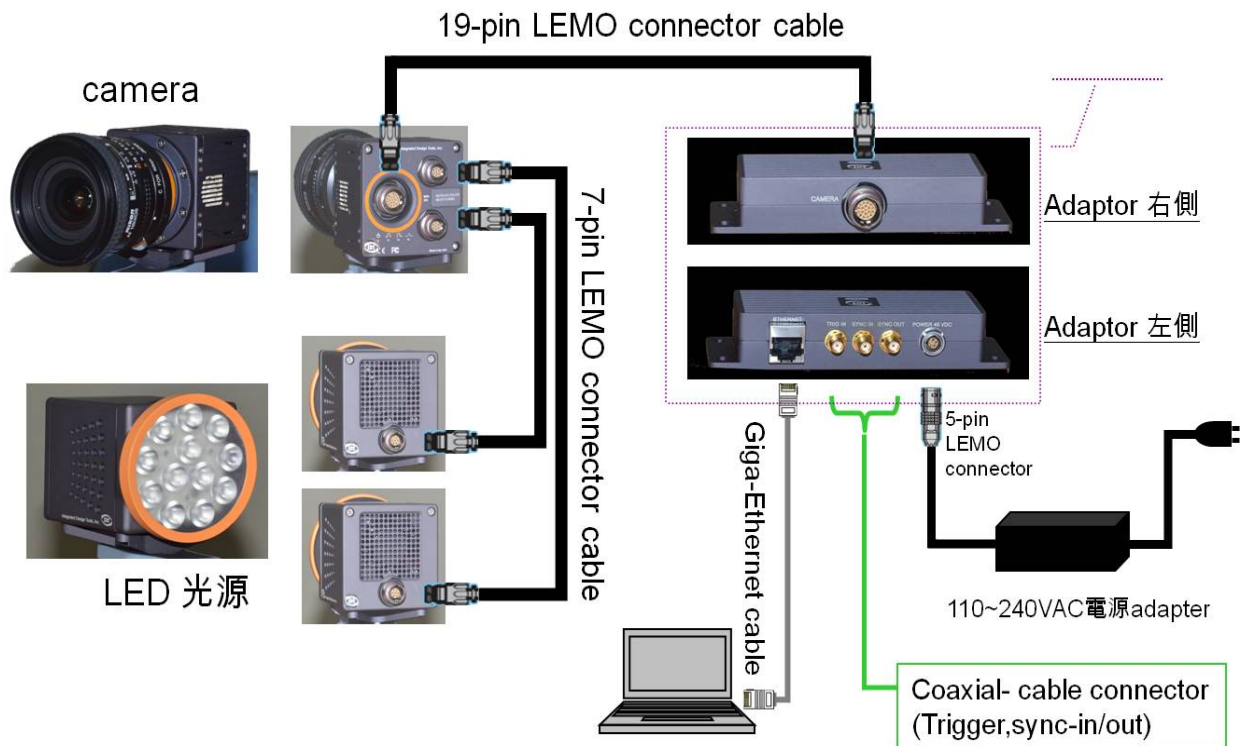


圖 3.16 IDT NXT8-S2 高速攝影機系統

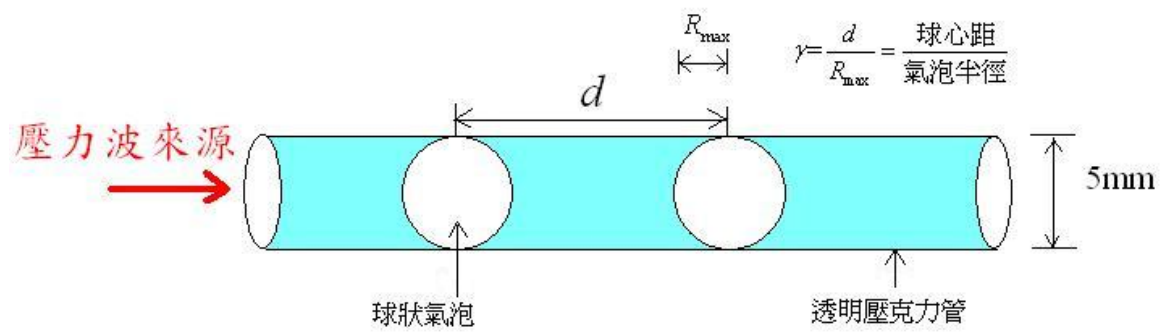


圖 3.17 試驗示意圖

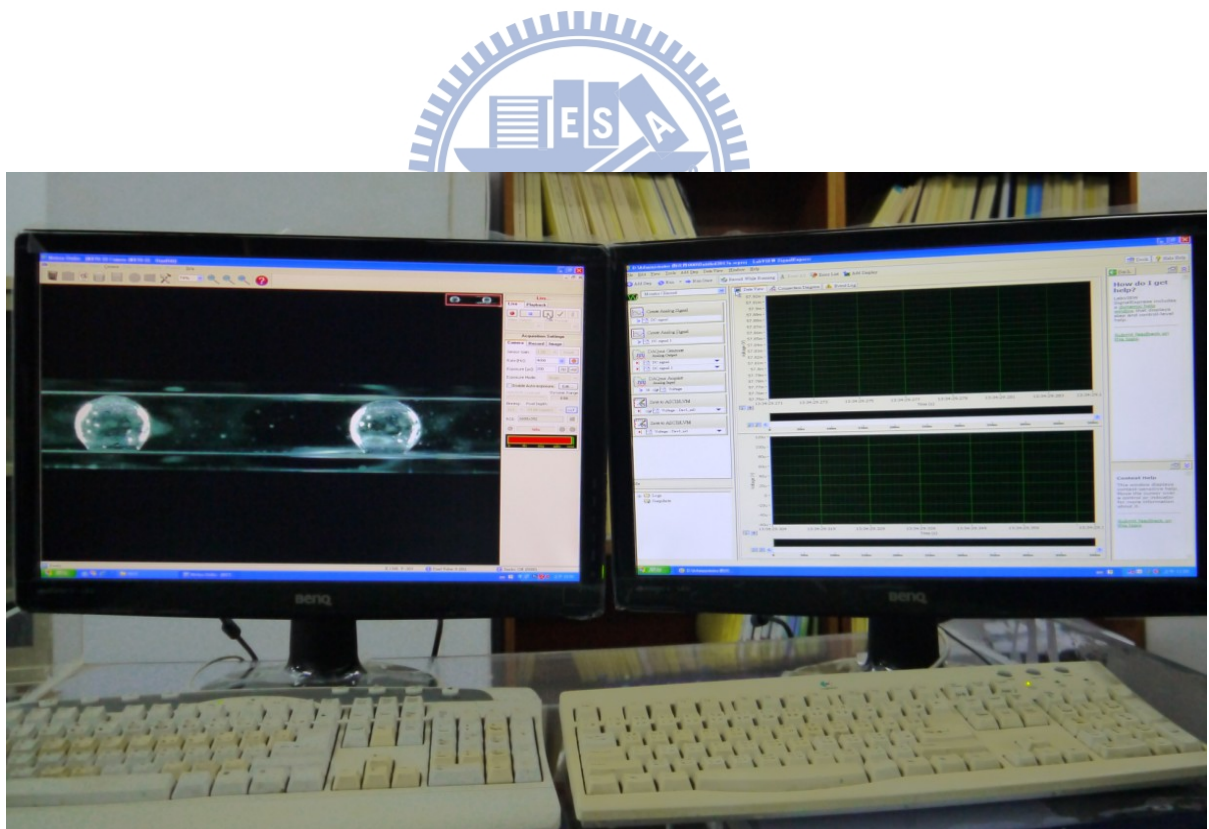


圖 3.18 影像及壓力變化記錄於電腦

第四章 試驗結果與分析

本研究分為不同壓力震波下雙氣泡破裂交互作用流場可視化之定性分析(詳見 4.3 節)與 PIV 之定量量測(詳見 4.4 節)分析兩部分，探討六種不同球心距離之距離參數 $\gamma = \frac{d}{R_{\max}}$ ，分別為 2、3、4、5、6 及 >6 的雙氣泡破裂流場試驗。試驗分別採用不同強度壓力波擊破氣泡，在各距離參數下，使用三種不同大小的壓力波，觀察兩顆皆破、左顆破右顆不破及兩顆皆不破的試驗，試驗結果說明如下。

4.1 氣泡周圍之流場變化及渦度變化

4.1.1 氣泡周圍之流場變化

流體流經固體表面時其固體面上的平均速度應為零(即固體表面上的無滑移特性 no-slip condition)，其特性伴隨著流體本身的黏滯性，在臨近固體表面處將產生與流體慣性力(inertia forces)方向相反的剪應力，此一逆向剪應力使得鄰近固體表面之流體速度減慢。流場變化速度場和渦度場詳見 4.4 節的說明。

4.1.2 氣泡周圍之渦度變化

渦度理論是以渦度的觀念來描述流體行為之理論。在流體力學中，若以 \mathbf{V} 代表速度向量，則渦度為 \mathbf{V} 之旋度，即 $\nabla \times \mathbf{V}$ ，仍是一個向量；若把轉動的流體粒子視為固體粒子，則渦度為該流體粒子轉動速度之兩倍量。一般而言，在含粘性影響之渦度不為零的流場，常以旋流場(rotational flow field)稱之，相對的，若渦度為零，則稱為非旋流場

(irrotational flow field)。在一個流場中，若將粘性的影響（包括速度分佈、紊流等）視為分佈在空間的小渦旋(vortex)彼此影響所造成之結果，即是渦度理論之應用。渦度 Ω 定義為 $\frac{1}{2}(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y})$ ，代表 X 方向與 Y 方向速度分量 u 、 v 於空間上之速度變化，渦度之絕對值越大，速度梯度越大，其速度變化也越劇烈。渦度為正值時，表示該流體出現逆時針轉動；反之，渦度為負值時則為順時針轉動。

4.2 氣泡中之液體噴流現象

當壓力波由左往右擠壓氣泡表面，首先氣泡變形、內凹，氣泡表面開始受到壓力波之影響至產生氣泡內凹陷變形。氣泡內凹的同時，液體往氣泡內凹發展之方向移動，並填充液體於氣泡中心軸而形成液體噴流，且壓力往中心軸集中，累積能量於氣泡內，氣泡累積能量並加快其內凹速度，氣泡左側表面逐漸往右側表面靠近，繼而接觸、重疊。氣泡表面重疊後，增強其對液體噴流的抵抗能力，液體噴流乃於凹槽內累積能量。

當液體噴流累積足夠能量後，繼續往右推進，突破重疊後的氣泡表面，最後使氣泡破裂。氣泡受壓變形所形成之液體噴流形式，亦因壓力震波的強度而有所差異。強度愈強，變形速度愈快，所形成之液體噴流形狀亦有所差異，根據多次重複試驗之結果顯示，氣泡表面在受壓、變形之過程中產生液體噴流之現象，從受壓力震波開始影響時，左側氣泡本身初始並未直接往右移動，而是氣泡開始變形。左側氣泡中央軸之左側表面，最快接觸到壓力震波之影響，開始出現變形現象，緊接著氣泡表面受到表面張力影響，保護氣泡不直接被震波擊破，而往氣泡中央軸變形，被壓縮變形的同時，氣泡亦內凹累積能量於氣泡內，逐漸使氣泡達到釋放能量並突破氣泡表面。右側氣泡起初也是由左側傳遞之壓力使氣泡向右內凹，但無左側氣泡明顯，由不同的壓力波可影響氣泡最後是

否會破裂，若壓力震波小於氣泡表面的表面張力時，則氣泡不會被震波擊破。

若在管流中液體摻雜氣體流動，氣體流動可能造成局部流段阻塞，在此流動結構下，受氣泡阻塞的比率可能造成較大的壓力與速度梯度變化。在流速較低之情況下（氣泡不易被帶走），在管流底部或近邊界之流體速度可能因氣泡滯留於某部位而呈現局部速度為負值，如速度局部迴流現象。在較高流速之情況下，水流能帶動氣泡往前移動，由於各相流之間的剪應力作用，使得不同流相因加速度差異產生不穩定性，此不穩定性稱為 K-H 不穩定性。因此，Kelvin 速度環量守恆定理和 Helmholtz 之渦量守恆定理（請參閱附錄一），為研究不同流體密度與流速交界面運動提供了重要的理論基礎。而氣泡破裂過程符合上述不同流體密度與流速交界面運動之流動關係。

4.3 試驗結果定性分析

以高速攝影機攝取壓力波擊破位於不同間距雙穴蝕氣泡的連續影像，影像時間間距為 1/8000 秒，分析各種不同間距氣泡破裂流場交互作用的特性。

4.3.1 $\gamma \approx 2$ 雙氣泡破裂交互作用之分析

此情況之氣泡間的球心距為兩倍氣泡半徑，也就是兩顆氣泡表面是緊鄰的狀態，分別就不同之壓力震波去擊破氣泡，氣泡受壓變化情形與氣泡破裂相互作用過程之物理現象進行比較與討論如下：

(1)兩顆皆破：雙氣泡受壓力變化情形與氣泡破裂相互作用過程，如圖 4.1 所示，峰值為 186kpa 的壓力震波由左往右傳入，氣泡受壓後，左側氣泡開始變形、內凹，並出現液體噴流，而右側氣泡受壓後變為半圓球形狀，因受左側氣泡傳遞的壓力，使右側也有噴流的出現，如第 01 行

至第 03 行影像所示。左側氣泡會產生往圓心對稱內凹，累積能量於被壓縮之氣泡內，且和液體噴流繼續往右前進，變成圓錐狀並產生左邊氣泡的破裂，如第 04 行至第 05 行影像所示。左側氣泡破裂後分離成上下兩邊，繼續被右側氣泡拉往右邊，最終右側氣泡也衝破重疊的氣泡表面，氣泡間互相牽引時，左側氣泡有空洞的出現，如第 06 行至第 10 行影像所示。圖 4.19 為 $\gamma \approx 2$ 管內兩顆皆破之壓力波強度變化關係；壓力波強度 186kpa，隨後之拉張力波強度為 41kpa，脈衝歷時 4.63ms，氣泡受壓力變形達到最大時發生於圖 4.1 之第 05 行第二張影像，為左側氣泡第一次破裂之後，隨後壓力逐漸降低至拉張力波強度並趨於穩定。

(2)左破右不破：雙氣泡受壓力變化情形與氣泡破裂相互作用過程，如圖 4.2 所示，峰值為 121kpa 的壓力震波由左往右傳入，氣泡受壓後，左側氣泡開始變形、內凹，一樣有液體噴流的出現，因為此現象壓力波較為低，故右側氣泡雖因受壓後變為半圓球形狀，但無較明顯的液體噴流出現，如第 01 行至第 04 行影像所示。左側氣泡內凹後，累積之能量和液體噴流繼續往右前進，右側氣泡因左側壓力傳遞，使得氣泡壓成較為扁平的橢圓形，如第 05 行至第 07 行影像所示。左側氣泡破裂後分離成上下兩邊被右側吸引，而右側氣泡被左側氣泡的能量往左拉回，球狀形的現象往左前進至雙氣泡穩定靜止不動，如第 08 行至第 10 行影像所示。圖 4.20 為 $\gamma \approx 2$ 管內左破右不破之壓力波強度變化關係；壓力波強度 121kpa，隨後之拉張力波強度為 50kpa，脈衝歷時 2.55ms，由於互相拉扯的關係，由圖 4.20 可發現壓力曲線上下震盪直到 26ms 後壓力逐漸降低並趨於穩定。

(3)兩顆皆不破：雙氣泡受壓力變化情形與氣泡破裂相互作用過程，如圖 4.3 所示，峰值為 64.5kpa 的壓力震波由左往右傳入，左側氣泡因為此壓力波低於表面張力，因此在尚未產生內凹及出現液體噴流時，就先

被右側氣泡拉入，而當液體噴流出現時，使右側氣泡也向內凹，如第 01 行至第 03 行影像所示。左側氣泡分離為上下兩邊，往右前進，因為壓力波較為弱，所以左側氣泡不會破裂，但會受右側氣泡的牽引，使得左側氣泡形成一個開口朝右的凹字狀，右側氣泡則為開口朝左的凸字狀，如第 04 行至第 06 行影像所示。而在兩側互相牽引作用後使得氣泡回復至穩定的狀態，但已不是如起初的圓球狀，如第 07 行至第 10 行影像所示。圖 4.21 為 $\gamma \approx 2$ 管內兩顆皆不破之壓力波強度變化關係；壓力波強度 65.6kpa，隨後之拉張力波強度為 34.5kpa，脈衝歷時 2.28ms，由於壓力波較小，氣泡間互相拉扯後，由圖 4.21 可發現壓力曲線的震盪並不是很劇烈。

4.3.2 $\gamma \approx 3$ 雙氣泡破裂交互作用之分析

此情況之氣泡間的球心距為三倍氣泡半徑，也就是兩顆氣泡表面為相距約一倍氣泡半徑的狀態，分別就不同之壓力震波去擊破氣泡，氣泡受壓變化情形與氣泡破裂相互作用過程之物理現象進行比較與討論如下：

(1)兩顆皆破：雙氣泡受壓力變化情形與氣泡破裂相互作用過程，如圖 4.4 所示，峰值為 184kpa 的壓力震波由左往右傳入，左側氣泡受壓後開始變形內凹並出現液體噴流，並在第 03 行第三張影像時出現 Kelvin-Helmholtz 渦流，而右側的氣泡直到第 02 行第三張時才有液體噴流的出現，且為半圓球狀的氣泡，過程如第 01 行至第 03 行影像所示。左側氣泡的渦流受壓力波的關係繼續往右前進，且有一顆小顆的氣泡分離被右側氣泡吸引如第 05 行第一張影像，而本身的主結構則被分離成上下兩部分被右側氣泡所吸引，右側氣泡在第 05 行第二張影像時也出現蕈狀雲與 Kelvin-Helmholtz 渦流，過程如第 04 行至第 05 行影像所示。左側氣泡被右側氣泡的牽引結果形成上下兩側的長型氣泡繼續前進，右側

氣泡的左表面因左側氣泡的吸引而形成凸字狀朝左邊、而右邊表面亦形成小氣泡且脫離，互相影響後趨於穩定，過程如第 06 行至第 10 行影像所示。圖 4.22 為 $\gamma \approx 3$ 管內兩顆皆破之壓力波強度變化關係；壓力波強度 184kpa，隨後之拉張力波強度為 48kpa，脈衝歷時 5.97ms，若擊破氣泡的壓力波較強，則可能分離出小氣泡。

(2)左破右不破：雙氣泡受壓力變化情形與氣泡破裂相互作用過程，如圖 4.5 所示，峰值為 112kpa 的壓力震波由左往右傳入，氣泡受壓後，左側氣泡開始變形、內凹，一樣有液體噴流的出現，右側氣泡的液體噴流較不明顯，且內凹情形無左側明顯，如第 01 行至第 04 行影像所示。左側氣泡破裂時形成蕈狀雲但隨即則被右側氣泡拉成類似立體的梯形狀，而右側氣泡因壓力波小於其表面的張力，雖然氣泡表面會重疊但無法衝破其表面，如第 05 行至第 07 行影像所示。左側氣泡受右側氣泡的牽引，慢慢趨近於橢圓形狀，而右側氣泡則形成一個向右的凸字狀，如第 08 行至第 10 行影像所示。圖 4.23 為 $\gamma \approx 3$ 管內左破右不破之壓力波強度變化關係；壓力波強度 112kpa，隨後之拉張力波強度為 70kpa，脈衝歷時 5.24ms，過程中於 70kpa 後壓力就逐漸下降至 58kpa 左右，並趨於穩定。

(3)兩顆皆不破：雙氣泡受壓力變化情形與氣泡破裂相互作用過程，如圖 4.6 所示，峰值為 62.5kpa 的壓力震波由左往右傳入，氣泡受壓後，左側氣泡開始變形、內凹，一樣有液體噴流的出現，但因壓力波遠小於表面張力，因此氣泡無破裂的現象發生，而右側氣泡則連液體噴流都沒有出現，但因受壓力波的影響被擠壓成半圓球狀，如第 01 行至第 03 行影像所示。左側氣泡受壓後受右側氣泡的影響形成向右的凸字狀，而右側的氣泡因左側的吸引而成半圓球狀向左，如第 04 行至第 06 行影像所示。兩氣泡在壓力波不強的狀態下，很快各自趨於穩定，如第 07 行至第

10 行影像所示。圖 4.24 為 $\gamma \approx 3$ 管內兩顆皆不破之壓力波強度變化關係；壓力波強度 62.5kpa，隨後之拉張力波強度為 37kpa，脈衝歷時 3.33ms，在 3ms 到 10ms 時，因互相的牽引使得壓力曲線呈現微微的震盪。

4.3.3 $\gamma \approx 4$ 雙氣泡破裂交互作用之分析

此情況之氣泡間的球心距為四倍氣泡半徑，也就是兩顆氣泡表面為相距約兩倍氣泡半徑的狀態，分別就不同之壓力震波去擊破氣泡，氣泡受壓變化情形與氣泡破裂相互作用過程之物理現象進行比較與討論如下：

(1)兩顆皆破：雙氣泡受壓力變化情形與氣泡破裂相互作用過程，如圖 4.7 所示，峰值為 171kpa 的壓力震波由左往右傳入，氣泡受壓後，左側氣泡開始變形、內凹，並有液體噴流的出現，氣泡有微微的向右移動，如第 01 行至第 03 行影像所示。當左側氣泡表面無法承受壓力時變成圓錐體狀，氣泡破裂後則由中心軸分成上下兩邊被右側氣泡牽引向右，而右側氣泡亦生成液體噴流，壓力波影響破裂後形成凸字狀向右，如第 04 行至第 06 行影像所示。左側氣泡分成上下後繼續被右側氣泡牽引，右側氣泡尾端由於慣性力的影響使得尾端氣泡被拉成似十字型的氣泡，慢慢分成上下兩邊，在互相作用後兩側都拉成長條形的不規則狀，如第 07 行至第 10 行影像所示。圖 4.25 為 $\gamma \approx 4$ 管內兩顆皆破之壓力波強度變化關係；壓力波強度 171kpa，隨後之拉張力波強度為 58kpa，脈衝歷時 3.06ms。

(2)左破右不破：雙氣泡受壓力變化情形與氣泡破裂相互作用過程，如圖 4.8 所示，峰值為 107.5kpa 的壓力震波由左往右傳入，氣泡受壓後，左側氣泡開始變形、內凹，有液體噴流的出現，右側氣泡則形成半圓球狀的形狀，如第 01 行至第 02 行影像所示。左側氣泡破裂後形成蕈狀雲，但隨即被右側氣泡牽引變成扁平狀的向右凸字形，右側氣泡則被壓成較

扁帶有液體噴流的氣泡、但因左側氣泡的影響而成向左的凸字狀，如第 03 行至第 05 行影像所示。在互相牽引後，兩側氣泡變成橢圓形狀後再趨於穩定成圓形氣泡，如第 06 行至第 10 行影像所示。圖 4.26 為 $\gamma \approx 4$ 管內左破右不破之壓力波強度變化關係；壓力波強度 107.5kpa，隨後之拉張力波強度為 28kpa，脈衝歷時 3.95ms。

(3)兩顆皆不破：雙氣泡受壓力變化情形與氣泡破裂相互作用過程，如圖 4.9 所示，峰值為 62.5kpa 的壓力震波由左往右傳入，氣泡受壓後，左側氣泡開始變形並形成半圓球狀的狀態，右側也因為壓力波的影響而成向右前進的半圓球狀，如第 01 行至第 04 行影像所示。右側氣泡有抵抗的作用力，因此左側氣泡被壓成較為扁平的狀態，而因相互作用下，兩側氣泡都形成向左的半圓球狀，如第 05 行至第 10 行影像所示。因為此狀態的壓力波較為低，因此連液體噴流都無出現於氣泡中。圖 4.27 為 $\gamma \approx 4$ 管內兩顆皆不破之壓力波強度變化關係；壓力波強度 62.5kpa，隨後之拉張力波強度為 34kpa，脈衝歷時 2.19ms。

4.3.4 $\gamma \approx 5$ 雙氣泡破裂交互作用之分析

此情況之氣泡間的球心距為五倍氣泡半徑，也就是兩顆氣泡表面為相距約三倍氣泡半徑的狀態，分別就不同之壓力震波去擊破氣泡，氣泡受壓變化情形與氣泡破裂相互作用過程之物理現象進行比較與討論如下：

(1)兩顆皆破：雙氣泡受壓力變化情形與氣泡破裂相互作用過程，如圖 4.10 所示，峰值為 139kpa 的壓力震波由左往右傳入，氣泡受壓後，左側氣泡開始變形、內凹，並有液體噴流的出現，右側氣泡有微微的液體噴流出現，並形成半圓球狀的氣泡且微微的向右移動，如第 01 行至第 03 行影像所示。左側氣泡破裂時先形成蕈狀雲，之後受右側氣泡的影響變成圓錐狀往前移動，開口處形成似剪刀狀的現象，而右側氣泡也因液

體噴流衝破氣泡表面造成氣泡破裂，如第 04 行至第 07 行影像所示。因壓力波度較大使得兩顆氣泡都破裂，兩顆氣泡都有一往左拉的力量，使氣泡有一逆向的液體噴流出現，兩氣泡在互相作用後都形成類似十字狀的形狀，而左側的氣泡則較扁平，如第 08 行至第 10 行影像所示。圖 4.28 為 $\gamma \approx 5$ 管內兩顆皆破之壓力波強度變化關係；壓力波強度 139kpa，隨後之拉張力波強度為 57kpa，脈衝歷時 4.10ms。

(2)左破右不破：雙氣泡受壓力變化情形與氣泡破裂相互作用過程，如圖 4.11 所示，峰值為 100kpa 的壓力震波由左往右傳入，氣泡受壓後，左側氣泡開始變形、內凹，並有液體噴流的出現，右側氣泡因為受左側的壓力使得有微微的液體噴流出現，並無左側的明顯，如第 01 行至第 03 行影像所示。左側的氣泡內凹後，於氣泡間累積足夠的能量，繼續往右推進，且衝破氣泡表面的壓力，使得左側氣泡往右噴出形成葦狀雲噴流，且有一顆小的氣泡分離出來，而右側的氣泡則被壓縮成類似八字狀的氣泡，如第 04 行至第 07 行影像所示。左側氣泡繼續前進形成上下兩層的狀態，且有一反作用力，形成方向往左的噴流，右側則因壓力波壓縮並受到左側氣泡的拉扯形成向左的凸字狀，如第 08 行至第 10 行影像所示。圖 4.29 為 $\gamma \approx 5$ 管內左破右不破之壓力波強度變化關係；壓力波強度 100kpa，隨後之拉張力波強度為 50kpa，脈衝歷時 4.57ms。

(3)兩顆皆不破：雙氣泡受壓力變化情形與氣泡破裂相互作用過程，如圖 4.12 所示，峰值為 57.6kpa 的壓力震波由左往右傳入，氣泡受壓後，左側氣泡開始變形、內凹，有微微的液體噴流出現，右側氣泡則形成半圓球狀的氣泡形狀，如第 01 行至第 04 行影像所示。左側的液體噴流繼續往前，但因右側亦有一作用力，因此左側的氣泡前緣有被擠壓的現象，右側的氣泡則形成半圓球狀，如第 05 行至第 07 行影像所示。因壓力波較低，左側形成一凸字狀向左的氣泡，至趨於穩定，如第 08 行至第 10

行影像所示。圖 4.30 為 $\gamma \approx 5$ 管內兩顆皆不破之壓力波強度變化關係；壓力波強度 57.6kpa，隨後之拉張力波強度為 37kpa，脈衝歷時 3.33ms。

4.3.5 $\gamma \approx 6$ 雙氣泡破裂交互作用之分析

此情況之氣泡間的球心距為六倍氣泡半徑，也就是兩顆氣泡表面為相距約四倍氣泡半徑的狀態，分別就不同之壓力震波去擊破氣泡，氣泡受壓變化情形與氣泡破裂相互作用過程之物理現象進行比較與討論如下：

(1)兩顆皆破：雙氣泡受壓力變化情形與氣泡破裂相互作用過程，如圖 4.13 所示，峰值為 115kpa 的壓力震波由左往右傳入，氣泡受壓後，左側氣泡開始變形、內凹，並有液體噴流的出現，右側氣泡也有液體噴流的出現，氣泡有微微的向右移動，如第 01 行至第 03 行影像所示。當左側氣泡表面無法承受壓力時，往右噴出蕈狀雲的噴流後變成圓錐體狀，氣泡破裂後則由中心軸分成上下兩邊被右側氣泡牽引向右，而右側氣泡亦生成液體噴流，壓力波影響破裂後形成凸字狀向右，且氣泡前緣有一顆小氣泡的分離，如第 04 行至第 07 行影像所示。左側氣泡分成上下後繼續被右側氣泡牽引，右側氣泡尾端由於慣性力的影響使得尾端氣泡被拉成似十字型的氣泡，慢慢分成上下兩邊，在互相作用後兩側都拉成長條形的不規則狀，如第 08 行至第 10 行影像所示。圖 4.31 為 $\gamma \approx 6$ 管內兩顆皆破之壓力波強度變化關係；壓力波強度 115kpa，隨後之拉張力波強度為 42kpa，脈衝歷時 5.08ms。

(2)左破右不破：雙氣泡受壓力變化情形與氣泡破裂相互作用過程，如圖 4.14 所示，峰值為 84.6kpa 的壓力震波由左往右傳入，氣泡受壓後，左側氣泡開始變形、內凹，並有液體噴流的出現，右側氣泡只有微微的內凹，如第 01 行至第 04 行影像所示。當左側氣泡內凹後，表面無法承受液體噴流的壓力時突破其表面，破裂後形成凸字狀向右，如第 05 行至

第 07 行影像所示。左側氣泡繼續被右側氣泡牽引後形成菱形狀對稱於中心軸，右側氣泡也因左側氣泡的牽引往左移動，如第 08 行至第 10 行影像所示。圖 4.32 為 $\gamma \approx 6$ 管內左破右不破之壓力波強度變化關係；壓力波強度 84.6kpa，隨後之拉張力波強度為 42kpa，脈衝歷時 5.52ms。

(3)兩顆皆不破：雙氣泡受壓力變化情形與氣泡破裂相互作用過程，如圖 4.15 所示，峰值為 47 kpa 的壓力震波由左往右傳入，氣泡受壓後，左側氣泡開始變形、內凹，並沒有明顯液體噴流的出現，氣泡有微微的向右移動，如第 01 行至第 04 行影像所示。左側氣泡因受壓力震波的影響開始有液體噴流出現，並形成一為向左的凹字狀氣泡，右側氣泡則只有微微的變形，如第 05 行至第 07 行影像所示。左側氣泡因受右側氣泡的牽引由凹字狀氣泡變成凸字狀氣泡，而右側氣泡則趨於穩定，如第 08 行至第 10 行影像所示。圖 4.33 為 $\gamma \approx 6$ 管內兩顆皆不破之壓力波強度變化關係；壓力波強度 47kpa，隨後之拉張力波強度為 26kpa，脈衝歷時 4.17ms。

4.3.6 $\gamma > 6$ 雙氣泡破裂交互作用之分析

此情況之氣泡間的球心距為遠大於六倍氣泡半徑，也就是兩顆氣泡表面為相距遠大於四倍氣泡半徑的狀態，分別就不同之壓力震波去擊破氣泡，氣泡受壓變化情形與氣泡破裂相互作用過程之物理現象進行比較與討論如下：

(1)兩顆皆破：雙氣泡受壓力變化情形與氣泡破裂相互作用過程，如圖 4.16 所示，峰值為 83.2kpa 的壓力震波由左往右傳入，氣泡受壓後，左側氣泡開始變形、內凹，並有液體噴流的出現，右側氣泡亦有液體噴流的出現，氣泡有微微的向右移動，如第 01 行至第 03 行影像所示。當左側氣泡內凹後，因氣泡表面無法承受液體噴流的壓力，使得氣泡衝破氣泡表面形成一蕈狀雲噴流氣泡與渦流，右側則亦向右破裂形成蕈狀雲

噴流氣泡，如第 04 行至第 07 行影像所示。左側氣泡破裂後繼續向右前進，和右側一樣破裂後先形成凸字狀再拉長趨於穩定，如第 08 行至第 10 行影像所示。圖 4.34 為 $\gamma > 6$ 管內兩顆皆破之壓力波強度變化關係；壓力波強度 81kpa，隨後之拉張力波強度為 41kpa，脈衝歷時 5.54ms。

(2)左破右不破：雙氣泡受壓力變化情形與氣泡破裂相互作用過程，如圖 4.17 所示，峰值為 48kpa 的壓力震波由左往右傳入，氣泡受壓後，左側氣泡開始變形、內凹，並有液體噴流的出現，右側氣泡亦有液體噴流的出現，如第 01 行至第 03 行影像所示。當左側氣泡內凹後，因氣泡表面無法承受液體噴流的壓力，使得氣泡衝破氣泡表面形成一葦狀雲噴流氣泡與渦流，並有一顆小氣泡分離，右側氣泡內凹後液體噴流則小於氣泡表面壓力，沒有破裂，如第 04 行至第 07 行影像所示。左側氣泡在小氣泡分離後，主結構則趨於穩定，形成橢圓形的氣泡，右側因為沒有破裂，氣泡中的液體噴流也向左拉回而減弱，趨於穩定，如第 08 行至第 10 行影像所示。圖 4.35 為 $\gamma > 6$ 管內左破右不破之壓力波強度變化關係；壓力波強度 48kpa，隨後之拉張力波強度為 21kpa，脈衝歷時 2.73ms。

(3)兩顆皆不破：雙氣泡受壓力變化情形與氣泡破裂相互作用過程，如圖 4.18 所示，峰值為 43.4kpa 的壓力震波由左往右傳入，氣泡受壓後，左側氣泡開始變形、內凹，有液體噴流出現，右側氣泡亦產生變形、內凹，並有微微的液體噴流出現，如第 01 行至第 04 行影像所示。而所受的壓力波較為薄弱，因此兩顆氣泡形成液體噴流後，因為遠小於氣泡表面的張力，故兩顆氣泡都只有外形上的壓縮，並無破裂，如第 05 行至第 07 行影像所示。壓力震盪後，兩顆氣泡趨於穩定，因距離較遠，不會受到互相拉扯的作用，如第 08 行至第 10 行影像所示。圖 4.36 為 $\gamma > 6$ 管內兩顆皆不破之壓力波強度變化關係；壓力波強度 43.4kpa，隨後之拉張力波強度為 19kpa，脈衝歷時 3.45ms。

4.3.7 小結

- (1) 由定性分析結果中發現， γ 值越小，兩顆氣泡交互作用愈明顯。
- (2) $\gamma > 6$ 後，其氣泡破裂不會互相影響，且左側破裂後不會分離成上下兩邊。
- (3) 由壓力變化曲線中可得知，兩顆皆破的現象中其壓力峰值至拉張力波強度的下降幅度最為明顯。
- (4) 由壓力變化曲線中可得知，壓力波越大，則液體噴流較快出現，總體的作用時間從壓力波開始進入到趨近於穩定的過程也是最短。
- (5) γ 在趨近於 2~6 時兩顆氣泡均破情況下，左邊氣泡破裂現象均有左右撕裂現象，大於 6 之後，與單一氣泡破裂相似，就無此現象

4.4 試驗結果定量分析

雙穴蝕氣泡破裂之運動過程一般無法使用入侵式量測儀器直接測量，可藉由非入侵式之 PIV 技術進行量測，本研究影像時間間距為 1/10000 秒，進行流場交互作用的演變過程量測與細部速度場與渦度場量測。氣泡試驗時分別採用不同強度壓力波擊破氣泡，且壓力震波之寬度大於氣泡的直徑，均勻震波傳送至試管內壓縮氣泡，使氣泡變形與破裂，分就壓力場、渦度場及速度場試驗結果說明如下：

4.4.1 壓力場分析

本試驗前，先將試管裝入自來水，管內並無氣泡，先做壓力測試，得到約 36(kpa)~38(kpa)。本試驗分別採用不同強度壓力波擊破氣泡，在各距離參數下，使用三種不同大小的壓力波，觀察兩顆皆破、左破右不破及兩顆皆不破的試驗，我們從實驗數據中得到相關性，由圖 4.19 至圖

4.36 中可得到各試驗中之壓力波峰值及相關性：

- (1)在距離參數 $\gamma \approx 2$ 時，兩顆皆破為 186(kpa)、左破右不破為 121(kpa)、兩顆皆不破為 65.6(kpa)。
- (2)在距離參數 $\gamma \approx 3$ 時，兩顆皆破為 184(kpa)、左破右不破為 112(kpa)、兩顆皆不破為 62.5(kpa)。
- (3)在距離參數 $\gamma \approx 4$ 時，兩顆皆破為 171(kpa)、左破右不破為 107.5(kpa)、兩顆皆不破為 62.5(kpa)。
- (4)在距離參數 $\gamma \approx 5$ 時，兩顆皆破為 139(kpa)、左破右不破為 100(kpa)、兩顆皆不破為 57.6(kpa)。
- (5)在距離參數 $\gamma \approx 6$ 時，兩顆皆破為 115(kpa)、左破右不破為 84.6(kpa)、兩顆皆不破為 47(kpa)。
- (6)在距離參數 $\gamma > 6$ 時，兩顆皆破為 81(kpa)、左破右不破為 48(kpa)、兩顆皆不破為 43.4(kpa)。

我們由以上數據可歸納出，當距離參數越小時，無論是使兩顆皆破、左破右不破還是兩顆皆不破的現象中，要使氣泡破裂的壓力峰值相對越大。在同一距離參數的情形中，我們也可由數據得到兩顆皆破、左破右不破和兩顆皆不破的使氣泡破裂的壓力峰值也是逐漸遞減，如圖 4.37 所示。

4.4.2 渦度場分析

在六種不同距離參數之條件下，壓力波由試管左側傳入，有一股噴流由左側傳向右側。我們可由實驗結果之渦度圖得知，渦度場會以中心軸呈現上下對稱，並在氣泡破裂處發生較為明顯。

- (1) 在距離參數 $\gamma \approx 2$ 時，兩顆皆破正渦度之最大值為 0.014(1/s)、負渦度之最小值為-0.012(1/s)；左破右不破正渦度之最大值為 0.009(1/s)、負渦度之最小值為-0.008(1/s)；兩顆皆不破正渦度之最大值為 0.006(1/s)、

負渦度之最小值為-0.006(1/s)。

- (2) 在距離參數 $\gamma \approx 3$ 時，兩顆皆破正渦度之最大值為 0.012(1/s)、負渦度之最小值為-0.014(1/s)；左破右不破正渦度之最大值為 0.006(1/s)、負渦度之最小值為-0.006(1/s)；兩顆皆不破正渦度之最大值為 0.005(1/s)、負渦度之最小值為-0.006(1/s)。
- (3) 在距離參數 $\gamma \approx 4$ 時，兩顆皆破正渦度之最大值為 0.007(1/s)、負渦度之最小值為-0.007(1/s)；左破右不破正渦度之最大值為 0.007(1/s)、負渦度之最小值為-0.007(1/s)；兩顆皆不破正渦度之最大值為 0.004(1/s)、負渦度之最小值為-0.006(1/s)。
- (4) 在距離參數 $\gamma \approx 5$ 時，兩顆皆破正渦度之最大值為 0.008(1/s)、負渦度之最小值為-0.008(1/s)；左破右不破正渦度之最大值為 0.006(1/s)、負渦度之最小值為-0.006(1/s)；兩顆皆不破正渦度之最大值為 0.005(1/s)、負渦度之最小值為-0.005(1/s)。
- (5) 在距離參數 $\gamma \approx 6$ 時，兩顆皆破正渦度之最大值為 0.01(1/s)、負渦度之最小值為-0.025(1/s)；左破右不破正渦度之最大值為 0.005(1/s)、負渦度之最小值為-0.007(1/s)；兩顆皆不破正渦度之最大值為 0.0035(1/s)、負渦度之最小值為-0.0035(1/s)。
- (6) 在距離參數 $\gamma > 6$ 時，兩顆皆破正渦度之最大值為 0.025(1/s)、負渦度之最小值為-0.025(1/s)；左破右不破正渦度之最大值為 0.012(1/s)、負渦度之最小值為-0.012(1/s)；兩顆皆不破正渦度之最大值為 0.003(1/s)、負渦度之最小值為-0.0025(1/s)。

我們由以上數據可歸納出，距離參數越小，其渦度場之變化越劇烈，由於交互作用較為強烈，因此較明顯。在同一距離參數的情形中，兩顆皆破的渦度場變化最為劇烈，左破右不破的渦度場為其次，變化較小的是兩顆皆不破的流場。且由圖 4.92 至圖 4.97 可清楚看見呈現之遞減趨

勢。

4.4.3 速度場分析

本研究為不穩定之流況，為了瞭解氣泡間破裂時互相影響之速度變化，因此由速度量測可得到一些結果，雙氣泡破裂過程之運動流場，藉由 PIV 法計算流場得以呈現，如圖 4.38 至圖 4.72 所示。因氣泡破裂呈現上下對稱的現象，故本試驗取中心軸上之點位來取得速度大小，分別取 1.左側氣泡的左緣、2.兩氣泡球心距之中心點、3.右側氣泡的右緣，由實驗數據可歸納出，左側氣泡前端之速度變化皆會大於右側氣泡尾端之速度變化，我們為了探討氣泡間交互作用之影響，因此選定氣泡球心距之中心點速度變化做為比較，在不同距離參數下之速度變化及試驗結果說明如下：

- (1) 在距離參數 $\gamma \approx 2$ 時，氣泡兩顆皆破之中心點最大速度在 3ms 時為 32.96(cm/s)，第二峰值在 5.5ms 為 26.71(cm/s)；左破右不破之中心點最大速度在 1ms 為 13.11(cm/s)，第二峰值在 6.5ms 時為 10.58(cm/s)；兩顆皆不破之中心點最大速度在 5ms 時為 11.67(cm/s)，第二峰值在 8.5ms 時為 8.02(cm/s)。
- (2) 在距離參數 $\gamma \approx 3$ 時，氣泡兩顆皆破之中心點最大速度在 1.5ms 時為 37.61(cm/s)，第二峰值在 6ms 為 50.25(cm/s)；左破右不破之中心點最大速度在 4ms 為 26.25(cm/s)，第二峰值在 10ms 時為 5.18(cm/s)；兩顆皆不破之中心點最大速度在 3ms 時為 24.63(cm/s)，第二峰值在 6ms 時為 21.05(cm/s)。
- (3) 在距離參數 $\gamma \approx 4$ 時，氣泡兩顆皆破之中心點最大速度在 2.5ms 時為 37.15(cm/s)，第二峰值在 6ms 為 10.21(cm/s)；左破右不破之中心點最大速度在 1.5ms 為 26.54(cm/s)，第二峰值在 4ms 時為 19.21(cm/s)；兩顆皆不破之中心點最大速度在 1ms 時為 17.74(cm/s)，第二峰值在

6 ms 時為 6.02(cm/s)。

- (4) 在距離參數 $\gamma \approx 5$ 時，氣泡兩顆皆破之中心點最大速度在 2ms 時為 53.47(cm/s)，第二峰值在 6.5ms 為 22.84(cm/s)；左破右不破之中心點最大速度在 2ms 為 19.43(cm/s)，第二峰值在 4ms 時為 12.98(cm/s)；兩顆皆不破之中心點最大速度在 1ms 時為 6.95(cm/s)，第二峰值在 3ms 時為 4.14(cm/s)。
- (5) 在距離參數 $\gamma \approx 6$ 時，氣泡兩顆皆破之中心點最大速度在 5.5ms 時為 50.42(cm/s)，第二峰值在 6.5ms 為 46.59(cm/s)；左破右不破之中心點最大速度在 3ms 為 5.82(cm/s)，第二峰值在 7ms 時為 5.4(cm/s)；兩顆皆不破之中心點最大速度在 1.5ms 時為 6.42(cm/s)，第二峰值在 7.5ms 時為 5.45(cm/s)。
- (6) 在距離參數 $\gamma > 6$ 時，氣泡兩顆皆破之中心點最大速度在 4.5ms 時為 50.5(cm/s)，第二峰值在 7ms 為 41.68(cm/s)；左破右不破之中心點最大速度在 1.5ms 為 14.38(cm/s)，第二峰值在 5ms 時為 6.45(cm/s)；兩顆皆不破之中心點最大速度在 4.5ms 時為 12.59(cm/s)，第二峰值在 6.5ms 時為 5.29(cm/s)。

各距離參數不同情形下，詳細之速度變化關係列於表 4.1 至表 4.18，本研究是取壓力波由開始至峰值後，再下降至拉張力波期間內的速度變化，在此區間內本研究發現會有兩個速度峰值的出現，且第一個峰值大於第二個速度峰值，代表在其中速度變化時，會有互相牽引的現象。我們並可從圖 4.74 至圖 4.91 歸納出，兩顆皆破的現象其速度變化是相對較大的，左破右不破為其次，兩顆皆不破的現象是速度變化較小的。

4.4.4 小結

- (1) 液體噴流產生後之帶狀區，會以輻射方式向周邊流體炸開。
- (2) 兩顆皆破的流場中，其速度差較明顯；距離參數越小，交互作

用強烈，速度變化也較大。

- (3) 渦度場呈現沿中心軸對稱，上下相反方向之渦流，距離參數越小，其渦度場之變化越劇烈，由於交互作用較為強烈，因此較明顯。
- (4) 流場紊亂處有三種不同的不穩定現象產生，起初壓力波進入時有 Rayleigh-Taylor 不穩定的現象，蕈狀雲渦流產生後會有 Kelvin-Helmholtz 不穩定的現象，氣泡間在交互作用時會產生 Richtmyer-Meshkov 不穩定現象導致流場紊亂。
- (5) 距離參數越小時，無論是使兩顆皆破、左破右不破還是兩顆皆不破的現象中，要使氣泡破裂的壓力峰值相對越大。





圖 4.1 距離參數 $\gamma \approx 2$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆破之過程；最大壓力波強度為 186 kpa，
 影像時間間距 1/8000 秒，影像大小為 24.0 mm × 6.0mm，氣泡半徑為 2.5 mm。
 (文中影像每張間隔 3/8000 秒)

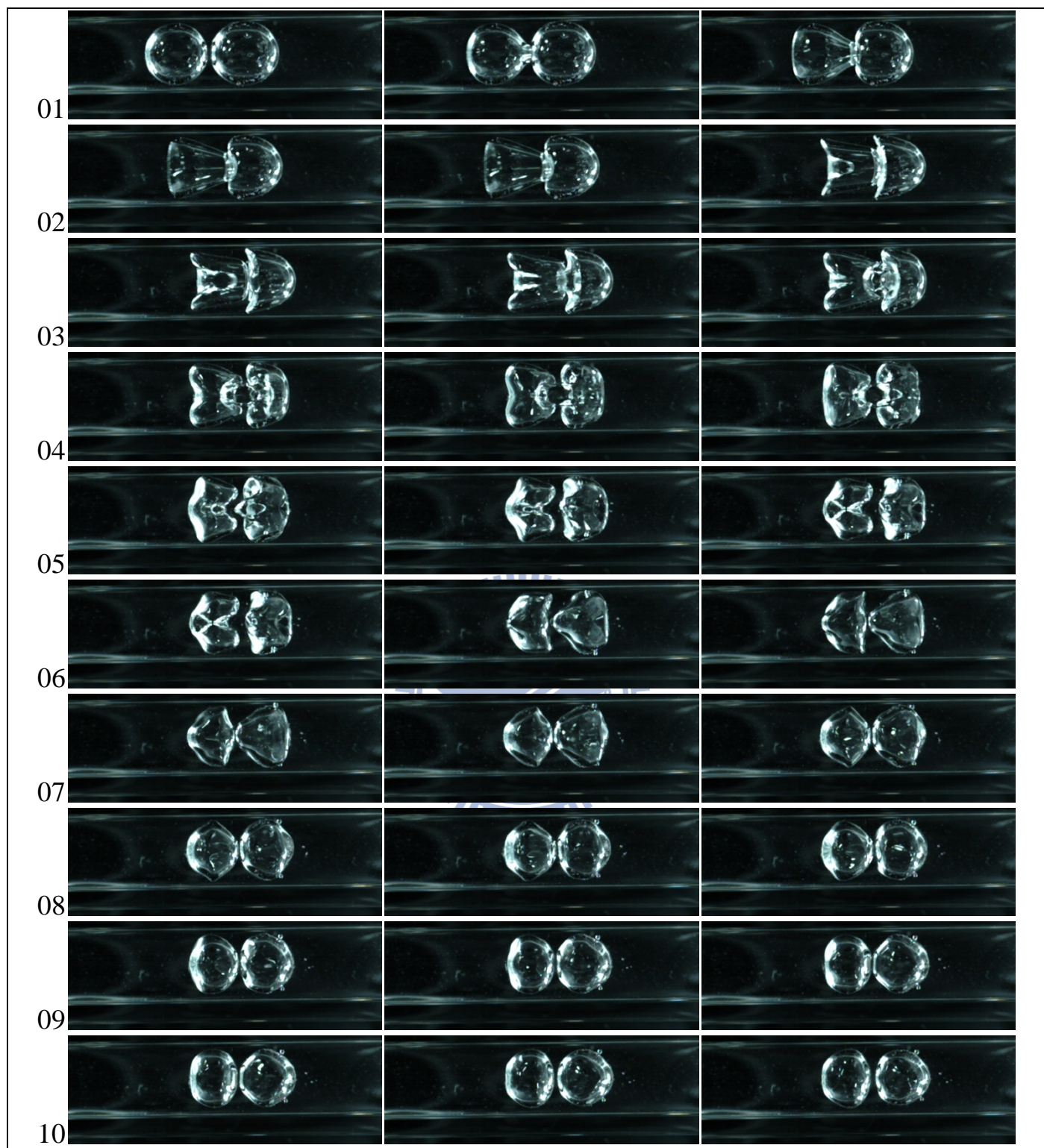


圖 4.2 距離參數 $\gamma \approx 2$ 之雙穴蝕氣泡左破右不破之過程；最大壓力波強度為 121 kpa，
影像時間間距 1/8000 秒，影像大小為 24.0 mm × 6.0mm，氣泡半徑為 2.5 mm。
(文中影像每張間隔 3/8000 秒)

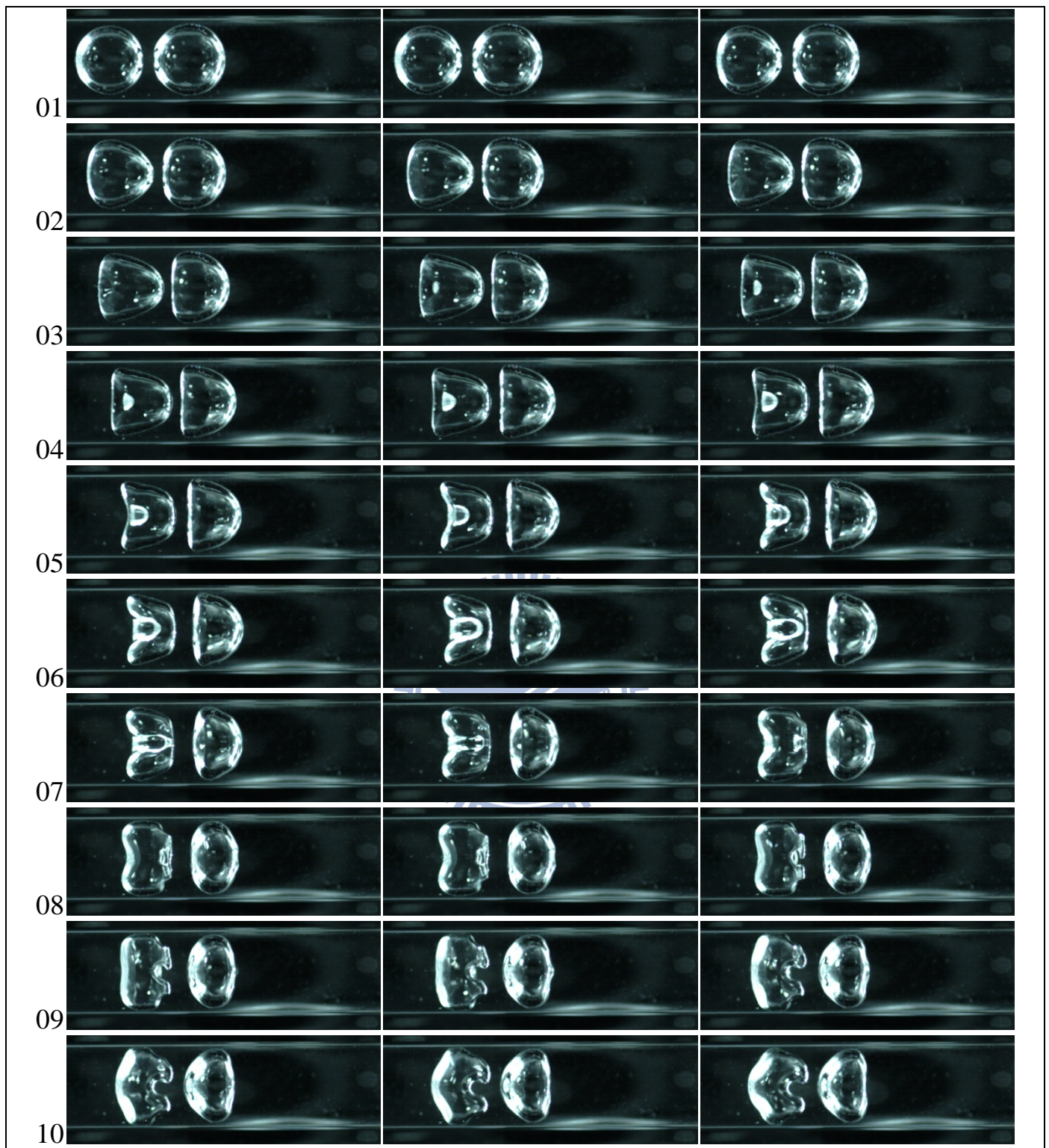


圖 4.3 距離參數 $\gamma \approx 2$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆不破之過程；最大壓力波強度為 65.6 kpa，
 影像時間間距 1/8000 秒，影像大小為 24.0 mm × 6.0mm，氣泡半徑為 2.5 mm。
 (文中影像每張間隔 3/8000 秒)

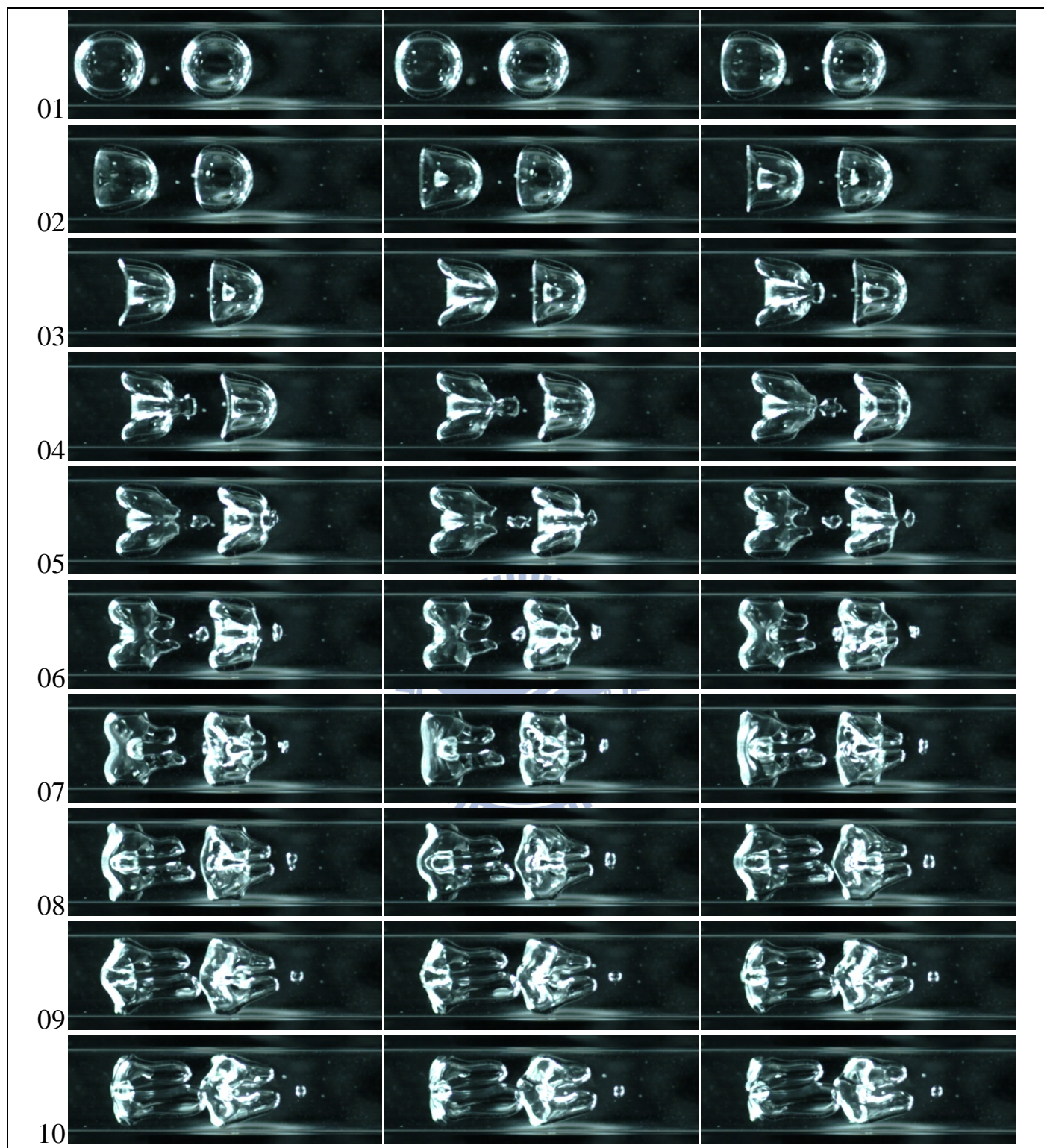


圖 4.4 距離參數 $\gamma \approx 3$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆破之過程；最大壓力波強度為 184 kpa，影像時間間距 1/8000 秒，影像大小為 24.0 mm × 6.0mm，氣泡半徑為 2.5 mm。
(文中影像每張間隔 3/8000 秒)

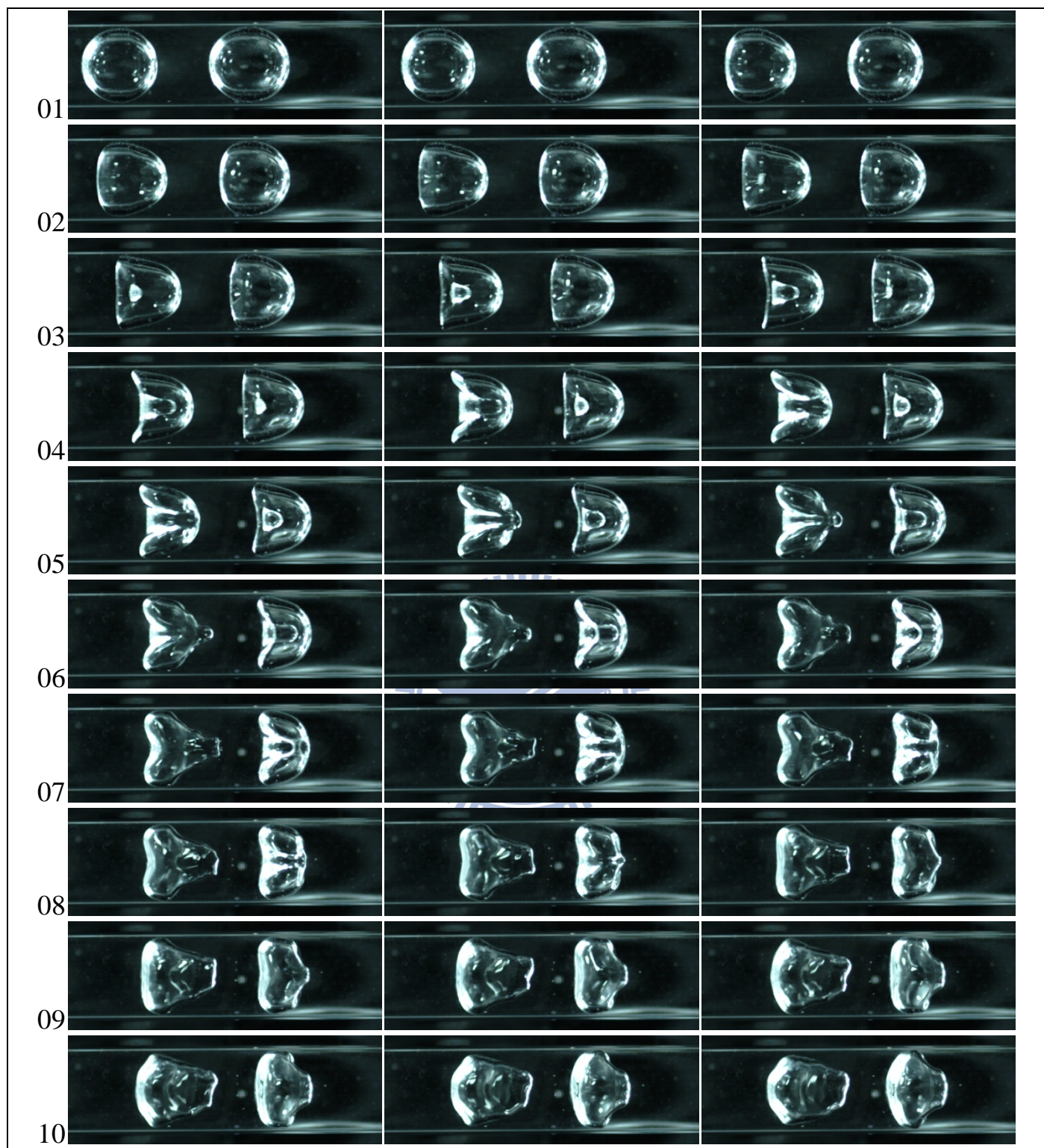


圖 4.5 距離參數 $\gamma \approx 3$ 之雙穴蝕氣泡左破右不破之過程；最大壓力波強度為 112 kpa，影像時間間距 1/8000 秒，影像大小為 24.0 mm × 6.0mm，氣泡半徑為 2.5 mm。
(文中影像每張間隔 3/8000 秒)

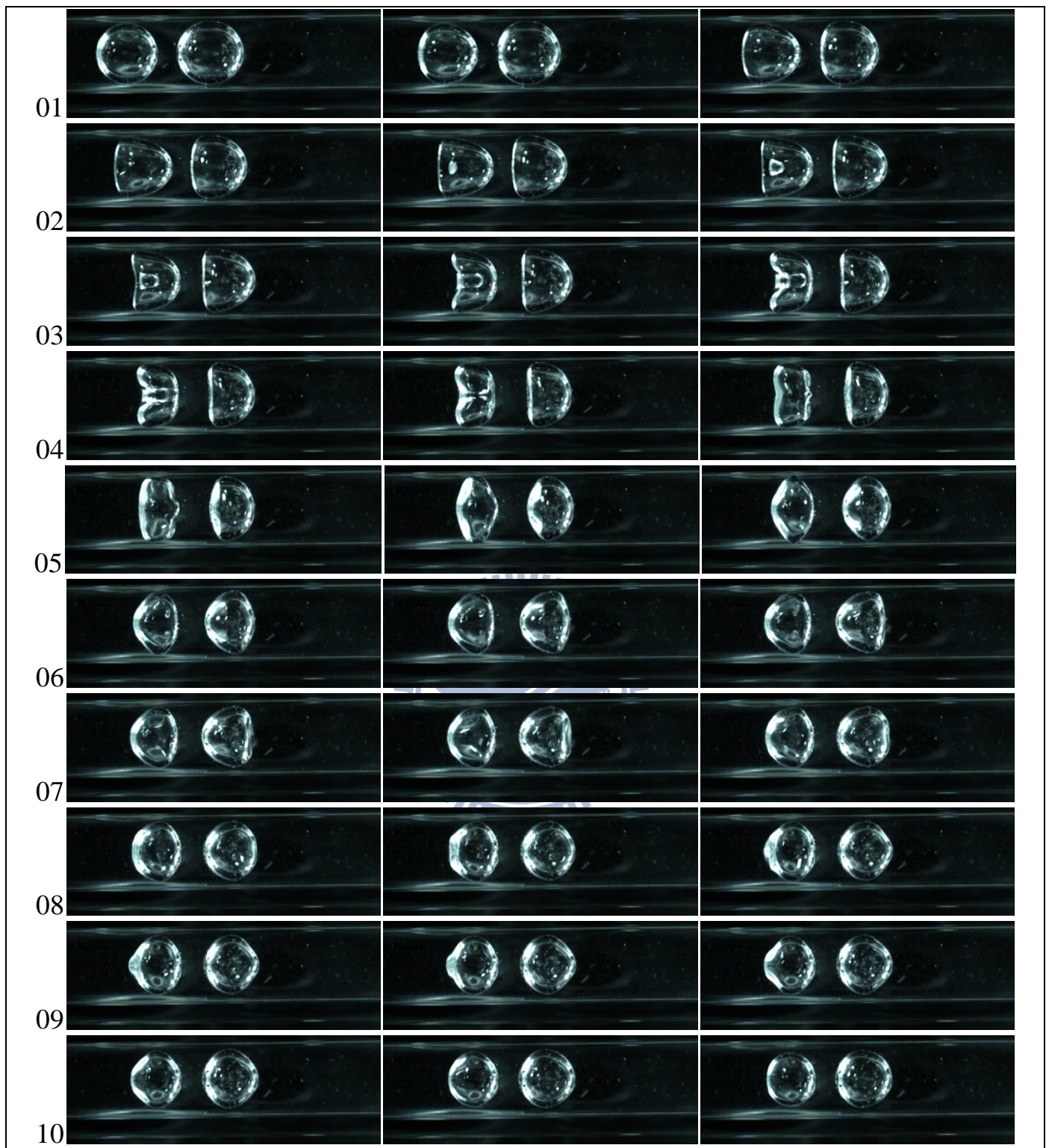


圖 4.6 距離參數 $\gamma \approx 3$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆不破之過程；最大壓力波強度為 62.5 kpa，影像時間間距 1/8000 秒，影像大小為 24.0 mm × 6.0mm，氣泡半徑為 2.5 mm。
(文中影像每張間隔 3/8000 秒)

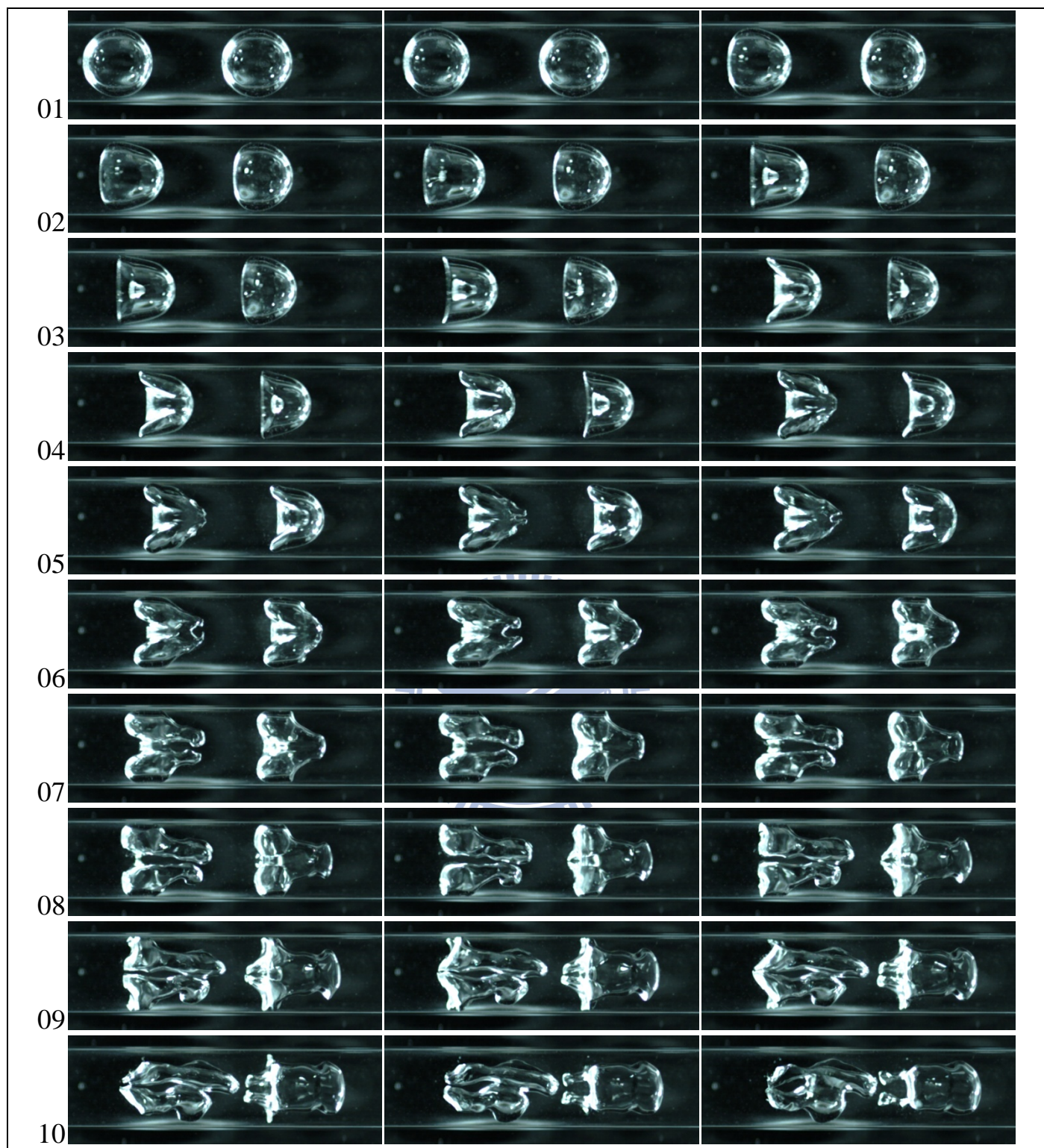


圖 4.7 距離參數 $\gamma \approx 4$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆破之過程；最大壓力波強度為 171 kpa，影像時間間距 1/8000 秒，影像大小為 24.0 mm × 6.0mm，氣泡半徑為 2.5 mm。
(文中影像每張間隔 3/8000 秒)

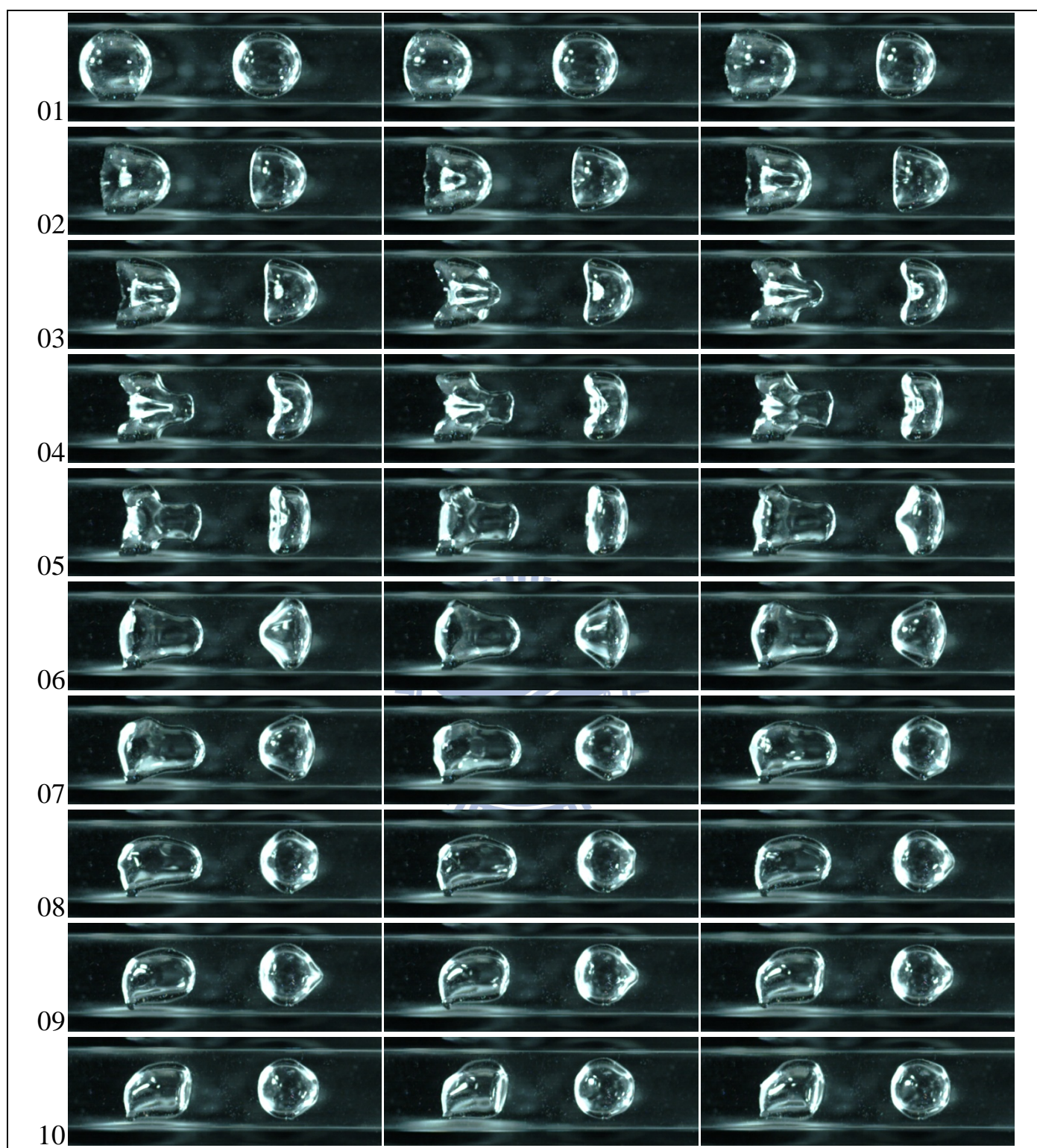


圖 4.8 距離參數 $\gamma \approx 4$ 之雙穴蝕氣泡左破右不破之過程；最大壓力波強度為 107.5 kpa，影像時間間距 1/8000 秒，影像大小為 24.0 mm × 6.0mm，氣泡半徑為 2.5 mm。(文中影像每張間隔 3/8000 秒)



圖 4.9 距離參數 $\gamma \approx 4$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆不破之過程；最大壓力波強度為 62.5 kpa，
影像時間間距 1/8000 秒，影像大小為 24.0 mm × 6.0mm，氣泡半徑為 2.5 mm。
(文中影像每張間隔 3/8000 秒)

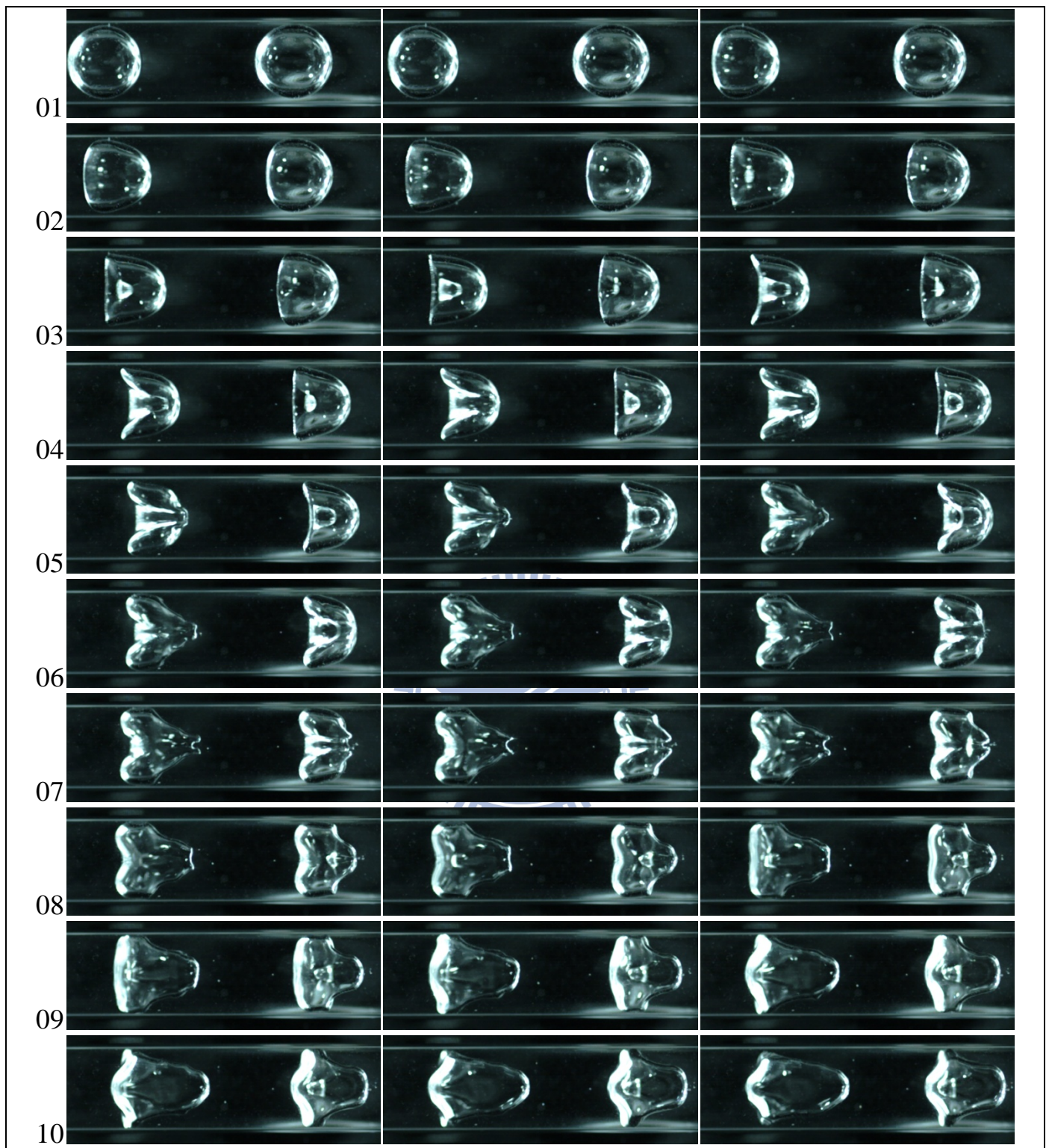


圖 4.10 距離參數 $\gamma \approx 5$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆破之過程；最大壓力波強度為 139 kpa，影像時間間距 1/8000 秒，影像大小為 24.0 mm x 6.0mm，氣泡半徑為 2.5 mm。(文中影像每張間隔 3/8000 秒)

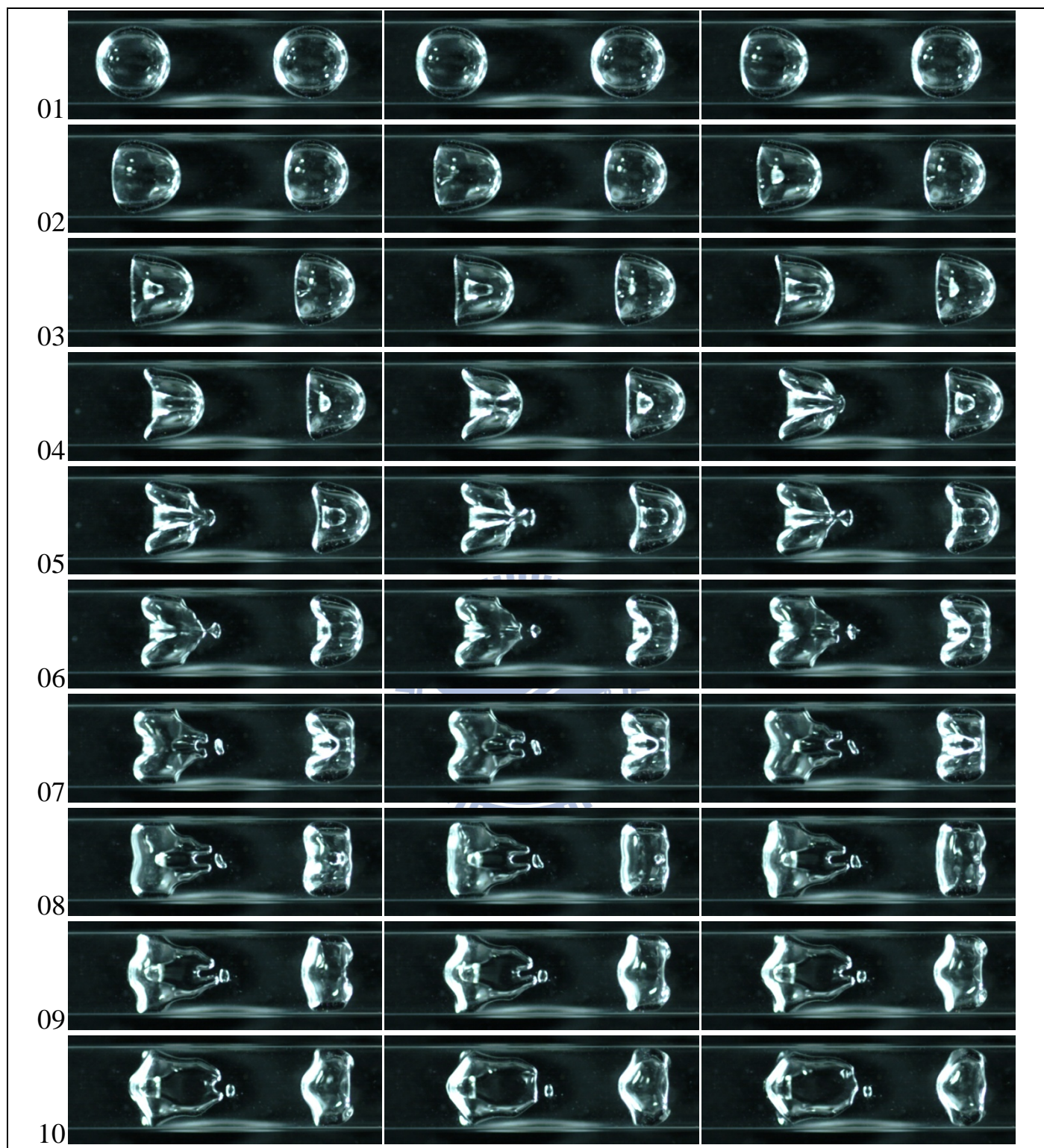


圖 4.11 距離參數 $\gamma \approx 5$ 之雙穴蝕氣泡左破右不破之過程；最大壓力波強度為 100 kpa，影像時間間距 1/8000 秒，影像大小為 24.0 mm × 6.0mm，氣泡半徑為 2.5 mm。(文中影像每張間隔 3/8000 秒)

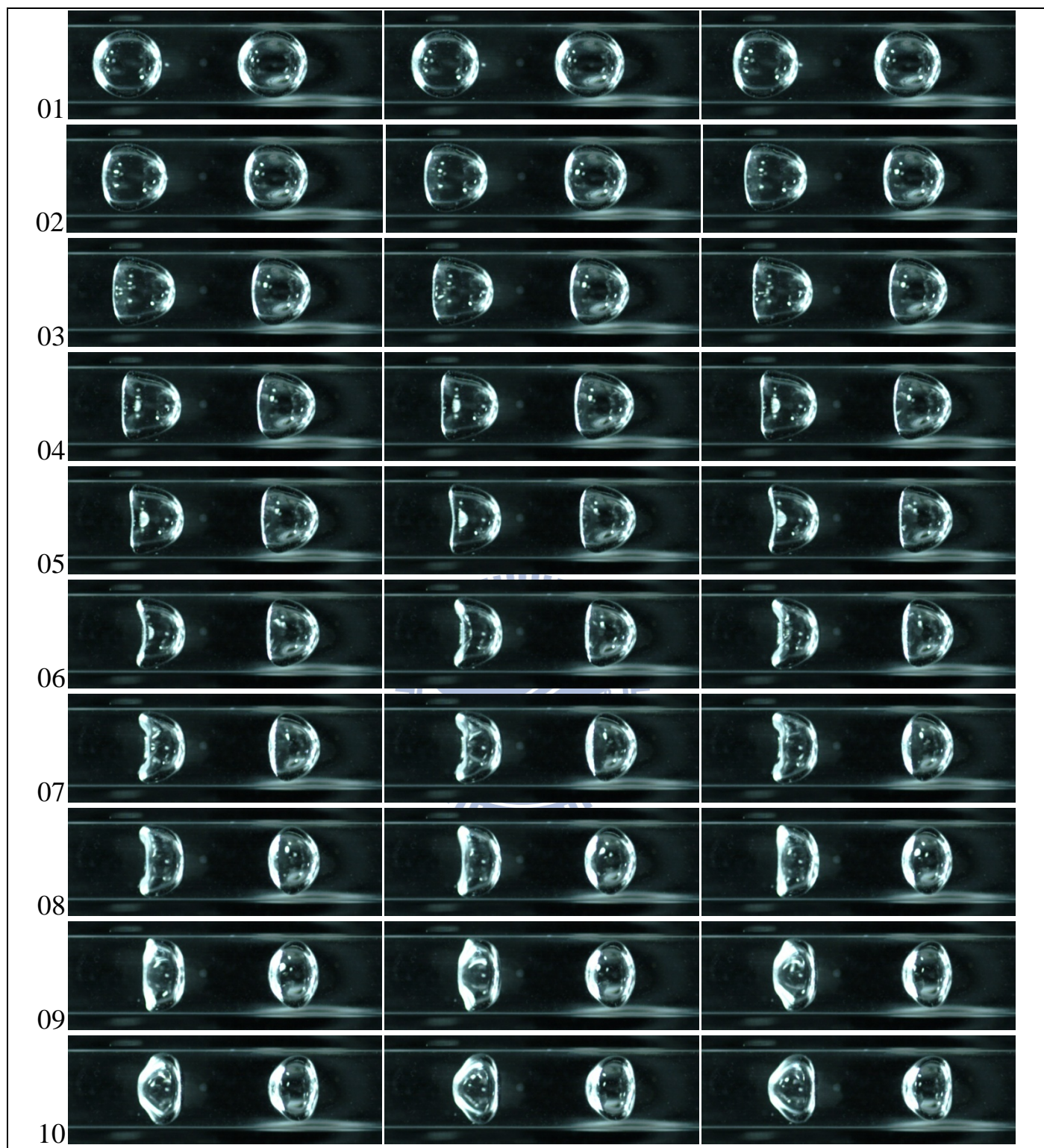


圖 4.12 距離參數 $\gamma \approx 5$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆不破之過程；最大壓力波強度為 57.6 kpa，影像時間間距 1/8000 秒，影像大小為 24.0 mm × 6.0mm，氣泡半徑為 2.5 mm。(文中影像每張間隔 3/8000 秒)



圖 4.13 距離參數 $\gamma \approx 6$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆破之過程；最大壓力波強度為 115 kpa，影像時間間距 1/8000 秒，影像大小為 24.0 mm x 6.0mm，氣泡半徑為 2.5 mm。
(文中影像每張間隔 3/8000 秒)



圖 4.14 距離參數 $\gamma \approx 6$ 之雙穴蝕氣泡左破右不破之過程；最大壓力波強度為 84.6 kpa，影像時間間距 1/8000 秒，影像大小為 24.0 mm × 6.0mm，氣泡半徑為 2.5 mm。(文中影像每張間隔 3/8000 秒)

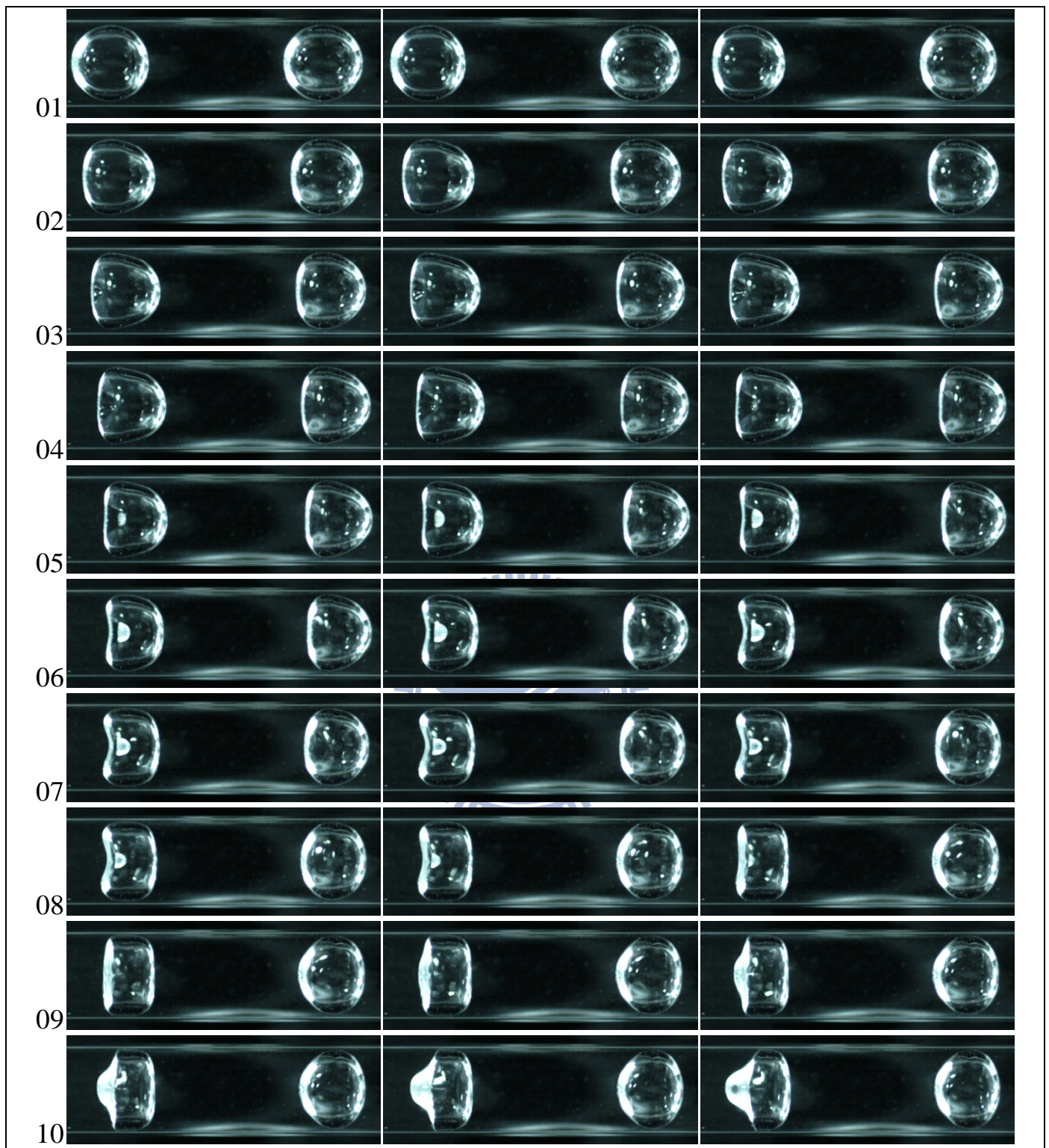


圖 4.15 距離參數 $\gamma \approx 6$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆不破之過程；最大壓力波強度為 47 kpa，影像時間間距 1/8000 秒，影像大小為 24.0 mm x 6.0mm，氣泡半徑為 2.5 mm。
(文中影像每張間隔 3/8000 秒)



圖 4.16 距離參數 $\gamma > 6$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆破之過程；最大壓力波強度為 81 kpa，
 影像時間間距 1/8000 秒，影像大小為 24.0 mm x 6.0mm，氣泡半徑為 2.5 mm。
 (文中影像每張間隔 3/8000 秒)



圖 4.17 距離參數 $\gamma > 6$ 之雙穴蝕氣泡左破右不破之過程；最大壓力波強度為 48 kpa，影像時間間距 1/8000 秒，影像大小為 24.0 mm × 6.0mm，氣泡半徑為 2.5 mm。(文中影像每張間隔 3/8000 秒)



圖 4.18 距離參數 $\gamma > 6$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆不破之過程；最大壓力波強度為 43.4 kpa，影像時間間距 1/8000 秒，影像大小為 24.0 mm × 6.0mm，氣泡半徑為 2.5 mm。(文中影像每張間隔 3/8000 秒)

$\gamma \approx 2$ (兩顆皆破)

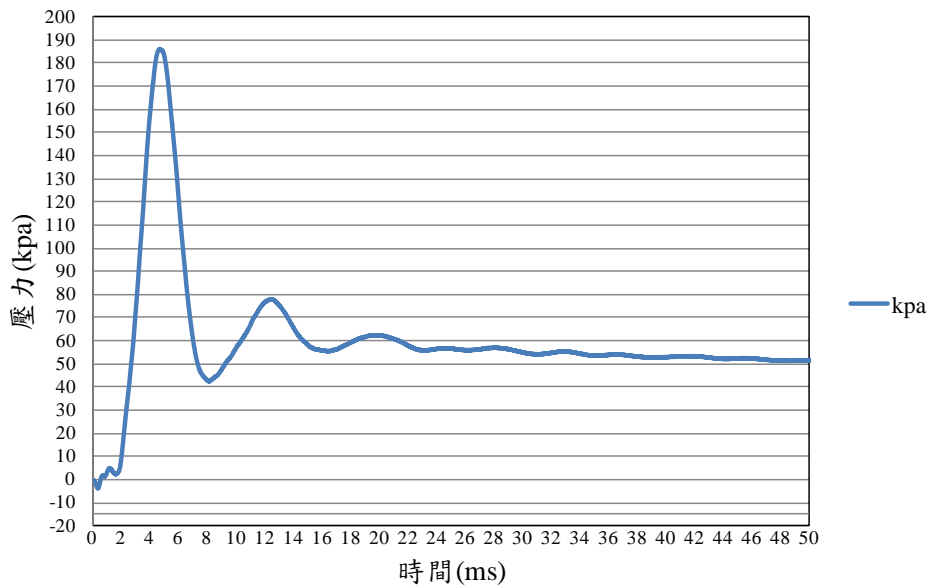


圖 4.19 距離參數 $\gamma \approx 2$ 管內兩顆皆破之壓力波強度變化關係；壓力波強度 186kpa，隨後之拉張力波強度為 41kpa，脈衝歷時 4.63ms。

$\gamma \approx 2$ (左破右不破)

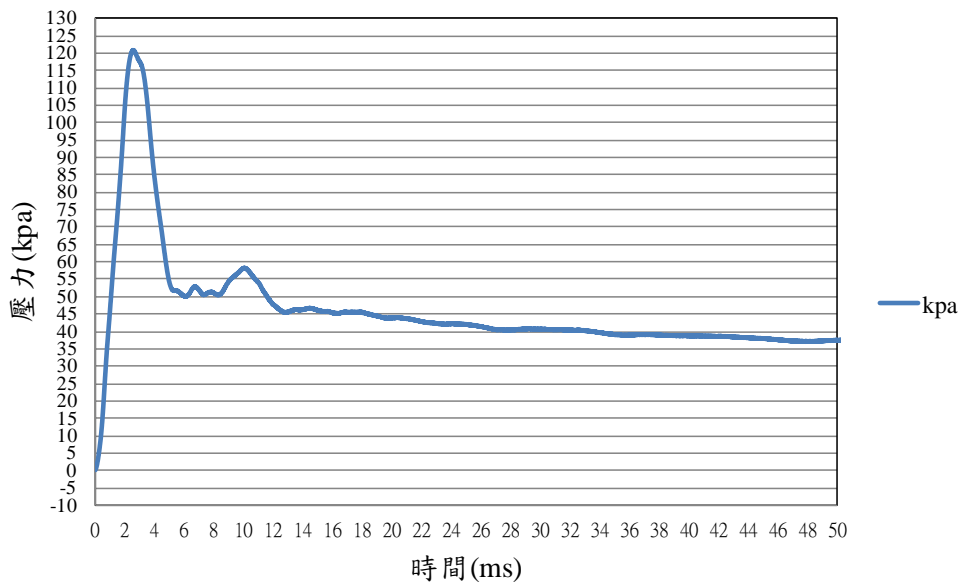


圖 4.20 距離參數 $\gamma \approx 2$ 管內左破右不破之壓力波強度變化關係；壓力波強度 121kpa，隨後之拉張力波強度為 50kpa，脈衝歷時 2.55ms。

$\gamma \approx 2$ (兩顆皆不破)

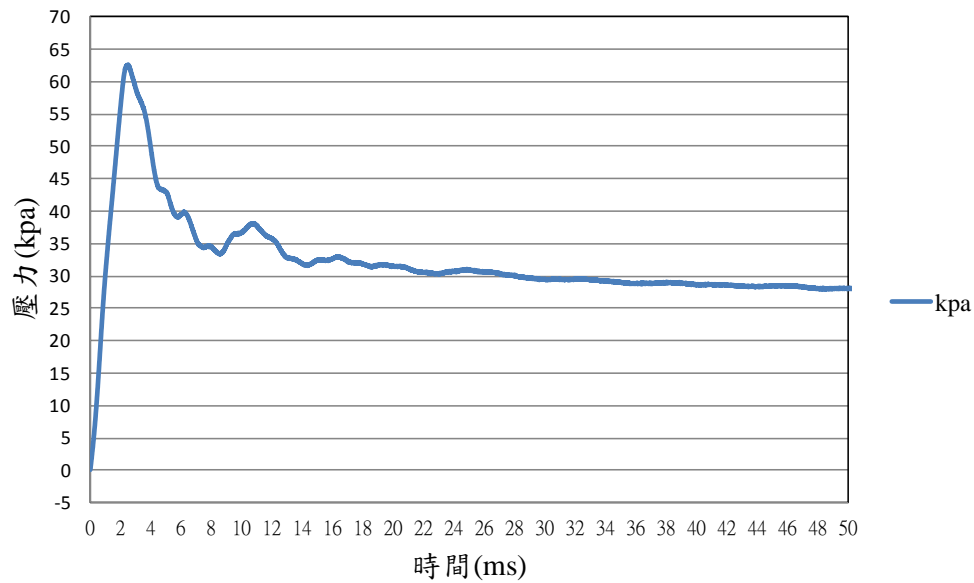


圖 4.21 距離參數 $\gamma \approx 2$ 管內兩顆皆不破之壓力波強度變化關係；壓力波強度 64.5kpa，隨後之拉張力波強度為 34.5kpa，脈衝歷時 2.28ms。

$\gamma \approx 3$ (兩顆皆破)

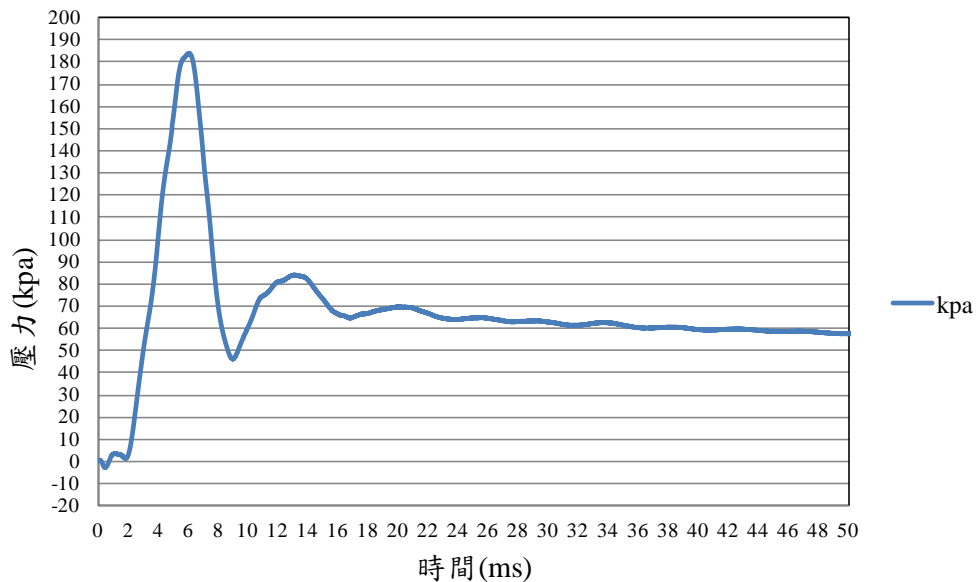


圖 4.22 距離參數 $\gamma \approx 3$ 管內兩顆皆破之壓力波強度變化關係；壓力波強度 184kpa，隨後之拉張力波強度為 48kpa，脈衝歷時 5.97ms。

$\gamma \approx 3$ (左破右不破)

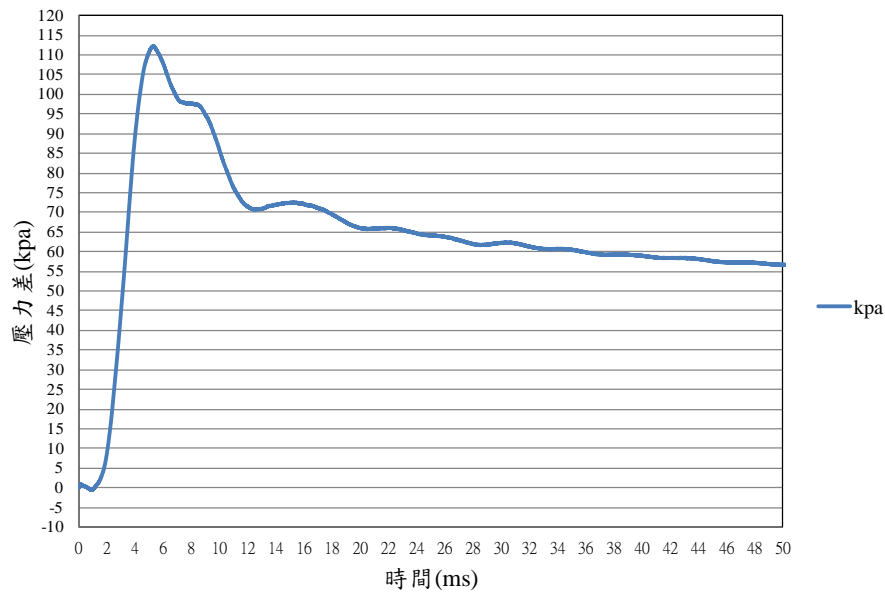


圖 4.23 距離參數 $\gamma \approx 3$ 管內左破右不破之壓力波強度變化關係；壓力波強度 112kpa，隨後之拉張力波強度為 70kpa，脈衝歷時 5.24ms。

$\gamma \approx 3$ (兩顆皆不破)

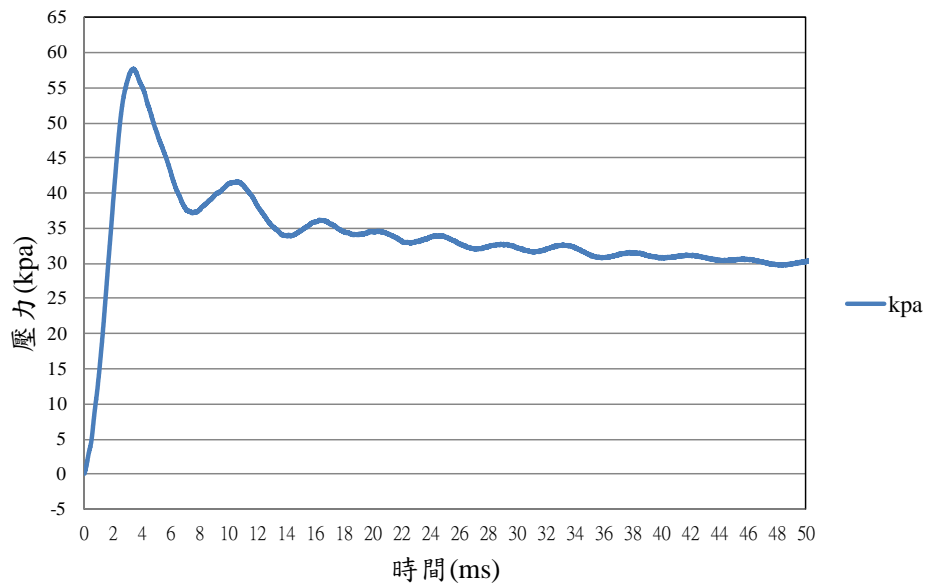


圖 4.24 距離參數 $\gamma \approx 3$ 管內兩顆皆不破之壓力波強度變化關係；壓力波強度 57.6kpa，隨後之拉張力波強度為 37kpa，脈衝歷時 3.33ms。

$\gamma \approx 4$ (兩顆皆破)

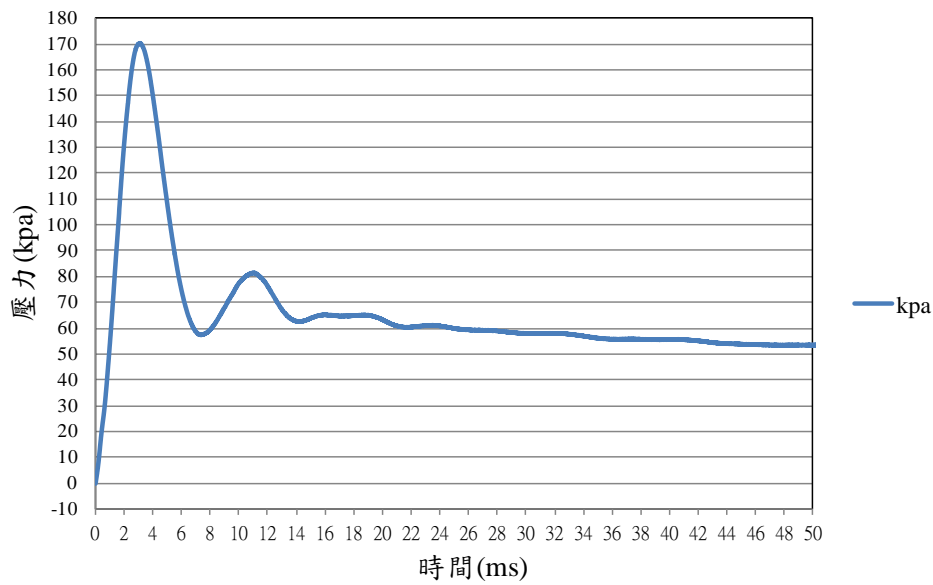


圖 4.25 距離參數 $\gamma \approx 4$ 管內兩顆皆破之壓力波強度變化關係；壓力波強度 171kpa，隨後之拉張力波強度為 58kpa，脈衝歷時 3.06ms。

$\gamma \approx 4$ (左破右不破)

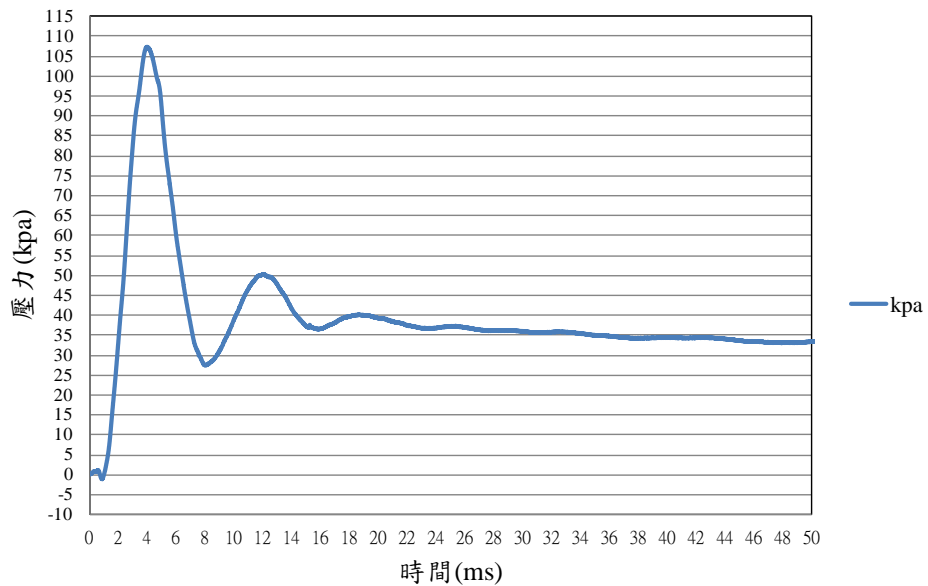


圖 4.26 距離參數 $\gamma \approx 4$ 管內左破右不破之壓力波強度變化關係；壓力波強度 107.5kpa，隨後之拉張力波強度為 28kpa，脈衝歷時 3.95ms。

$\gamma \approx 4$ (兩顆皆不破)

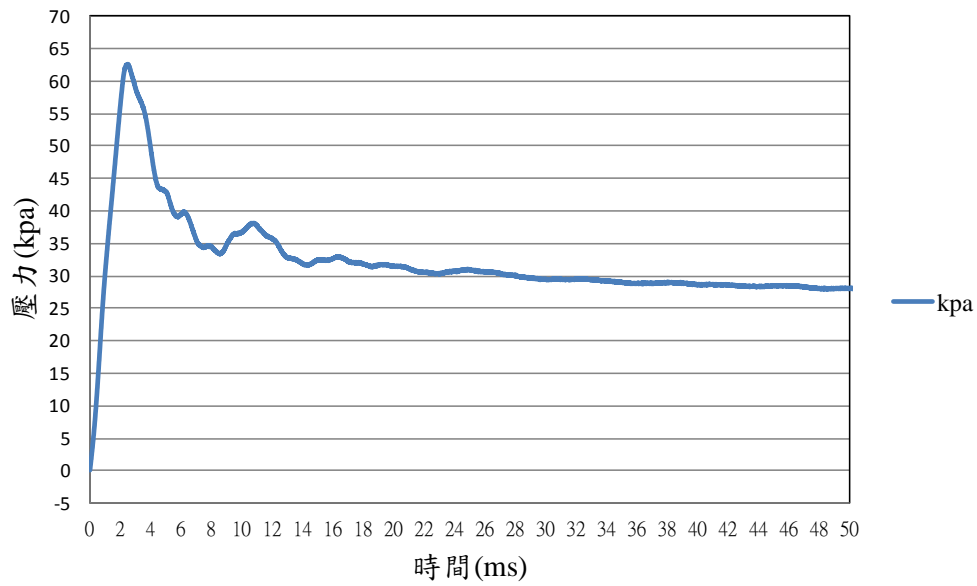


圖 4.27 距離參數 $\gamma \approx 4$ 管內兩顆皆不破之壓力波強度變化關係；壓力波強度 62.5kpa，隨後之拉張力波強度為 34kpa，脈衝歷時 2.19ms。

$\gamma \approx 5$ (兩顆皆破)

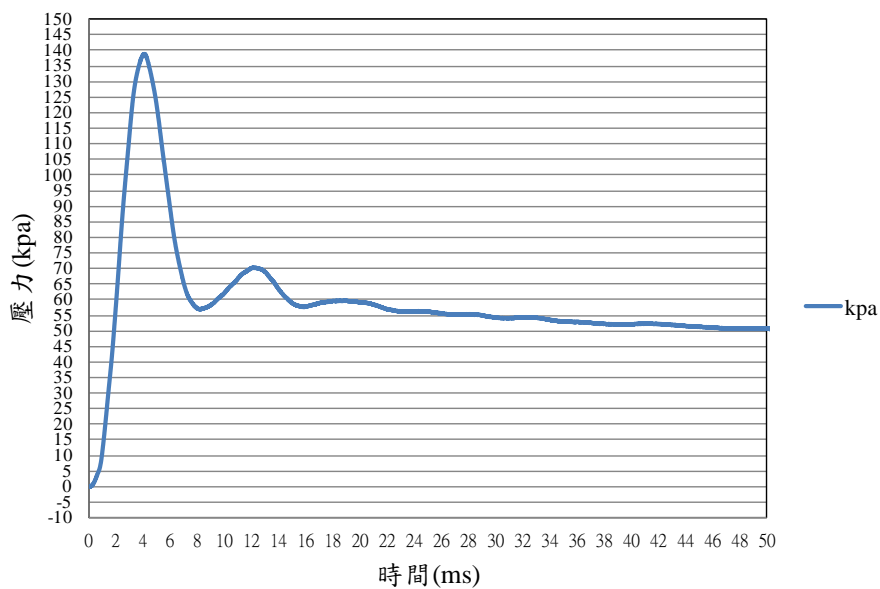


圖 4.28 距離參數 $\gamma \approx 5$ 管內兩顆皆破之壓力波強度變化關係；壓力波強度 139kpa，隨後之拉張力波強度為 57kpa，脈衝歷時 4.10ms。

$\gamma \approx 5$ (左破右不破)

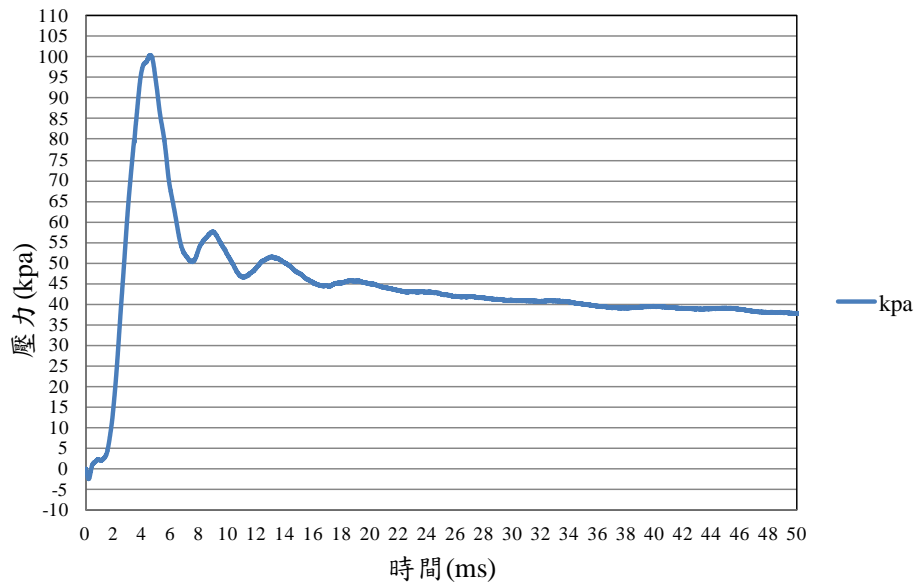


圖 4.29 距離參數 $\gamma \approx 5$ 管內左破右不破之壓力波強度變化關係；壓力波強度 100kpa，隨後之拉張力波強度為 50kpa，脈衝歷時 4.57ms。

$\gamma \approx 5$ (兩顆皆不破)

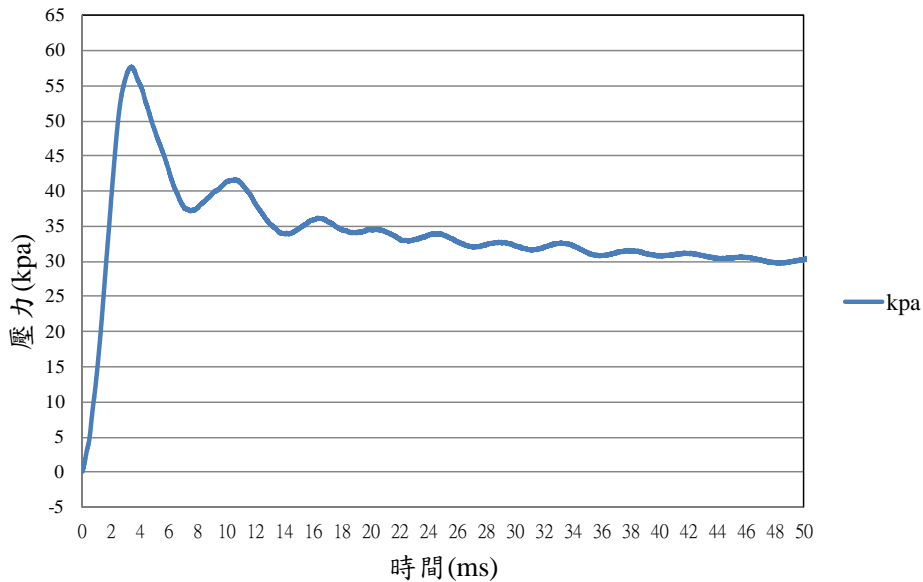


圖 4.30 距離參數 $\gamma \approx 5$ 管內兩顆皆不破之壓力波強度變化關係；壓力波強度 57.6kpa，隨後之拉張力波強度為 37kpa，脈衝歷時 3.33ms。

$\gamma \approx 6$ (兩顆皆破)

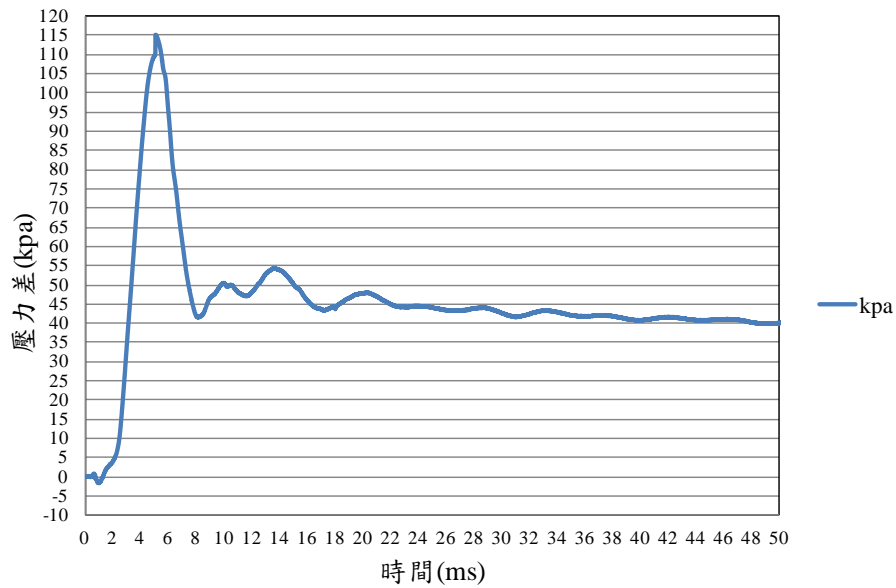


圖 4.31 距離參數 $\gamma \approx 6$ 管內兩顆皆破之壓力波強度變化關係；壓力波強度 115kpa，隨後之拉張力波強度為 42kpa，脈衝歷時 5.08ms。

$\gamma \approx 6$ (左破右不破)

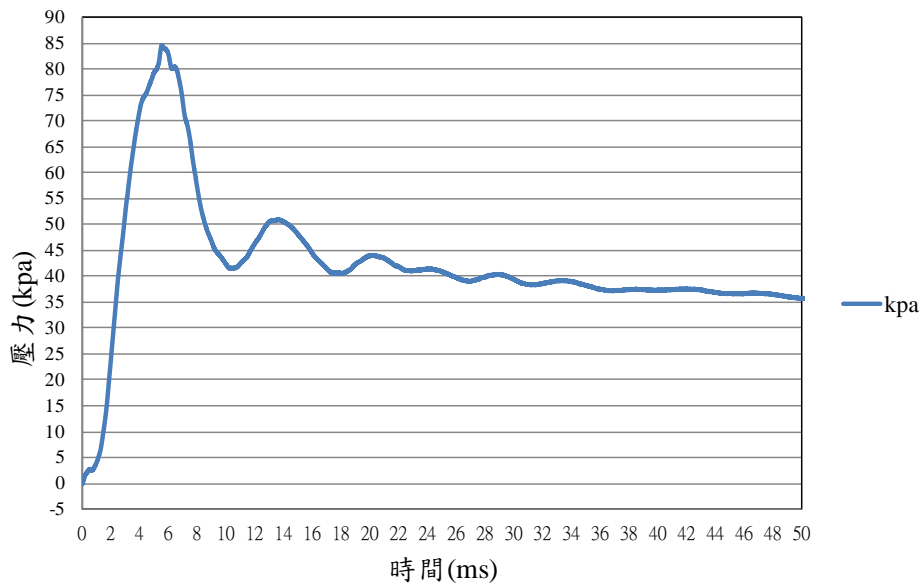


圖 4.32 距離參數 $\gamma \approx 6$ 管內左破右不破之壓力波強度變化關係；壓力波強度 84.6kpa，隨後之拉張力波強度為 42kpa，脈衝歷時 5.52ms。

$\gamma \approx 6$ (兩顆皆不破)

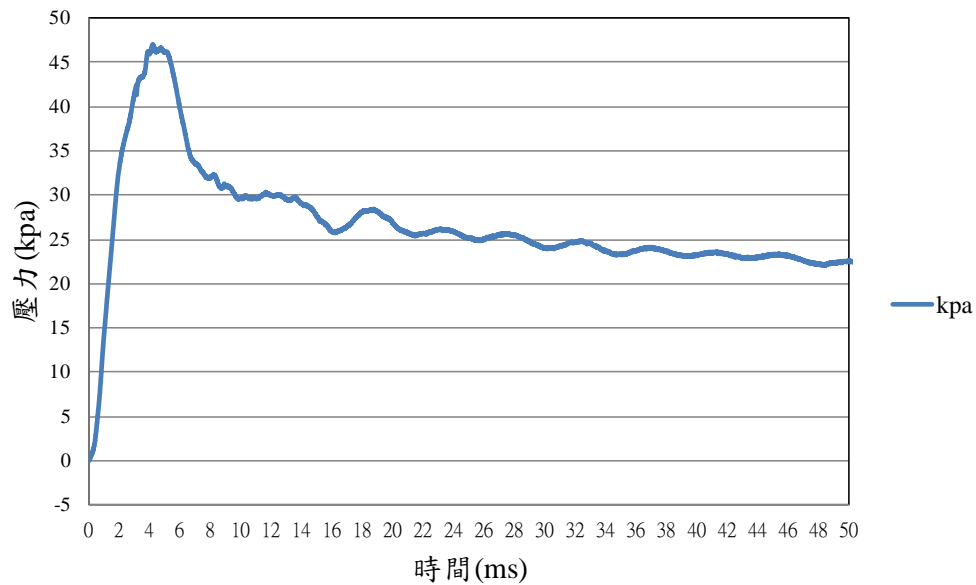


圖 4.33 距離參數 $\gamma \approx 6$ 管內兩顆皆不破之壓力波強度變化關係；壓力波強度 47kpa，隨後之拉張力波強度為 26kpa，脈衝歷時 4.17ms。

$\gamma > 6$ (兩顆皆破)

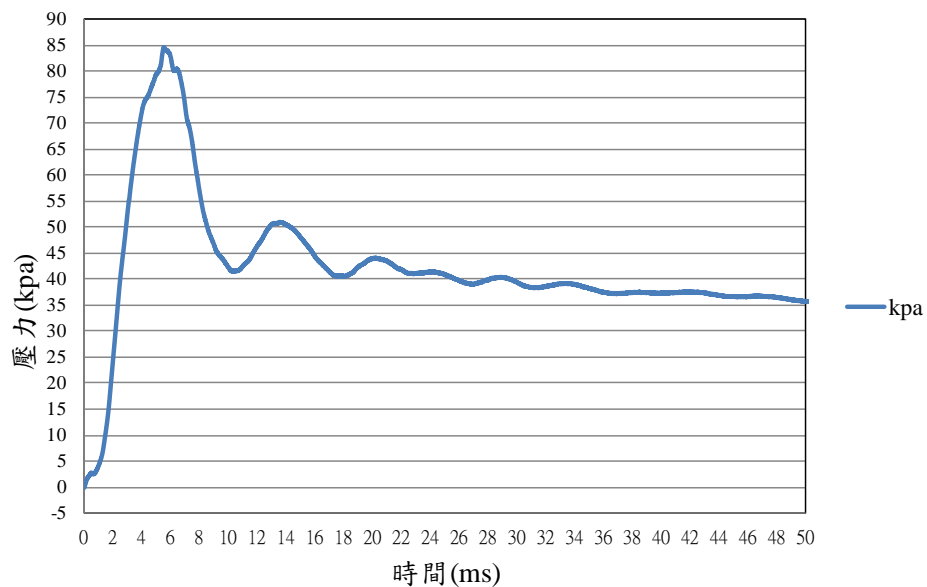


圖 4.34 距離參數 $\gamma > 6$ 管內兩顆皆破之壓力波強度變化關係；壓力波強度 83.2kpa，隨後之拉張力波強度為 41kpa，脈衝歷時 5.54ms。

$\gamma > 6$ (左破右不破)

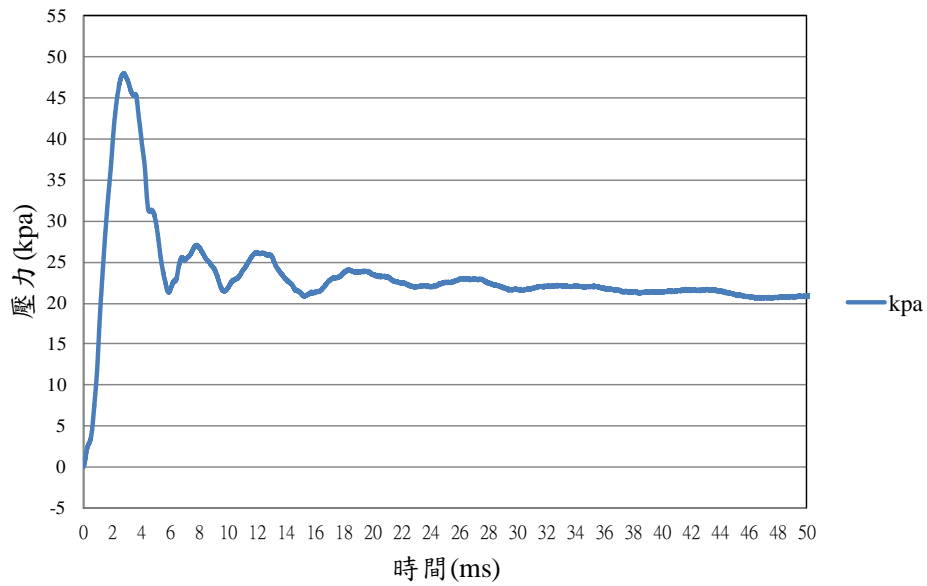


圖 4.35 距離參數 $\gamma > 6$ 管內左破右不破之壓力波強度變化關係；壓力波強度 48kpa，隨後之拉張力波強度為 21kpa，脈衝歷時 2.73ms。

$\gamma > 6$ (兩顆皆不破)

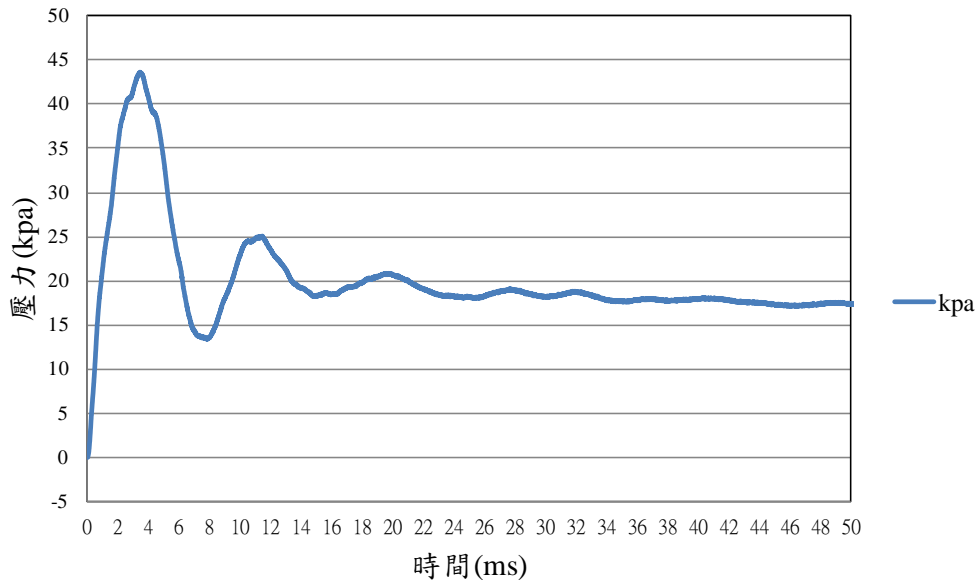


圖 4.36 距離參數 $\gamma > 6$ 管內兩顆皆不破之壓力波強度變化關係；壓力波強度 43.4kpa，隨後之拉張力波強度為 19kpa，脈衝歷時 3.45ms。

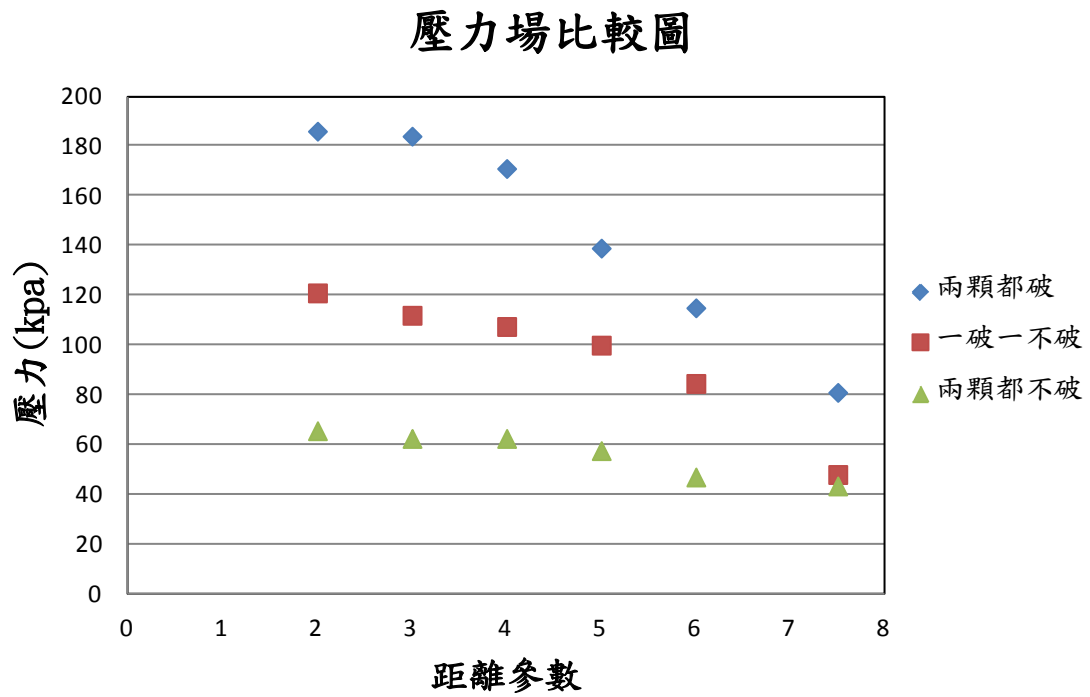
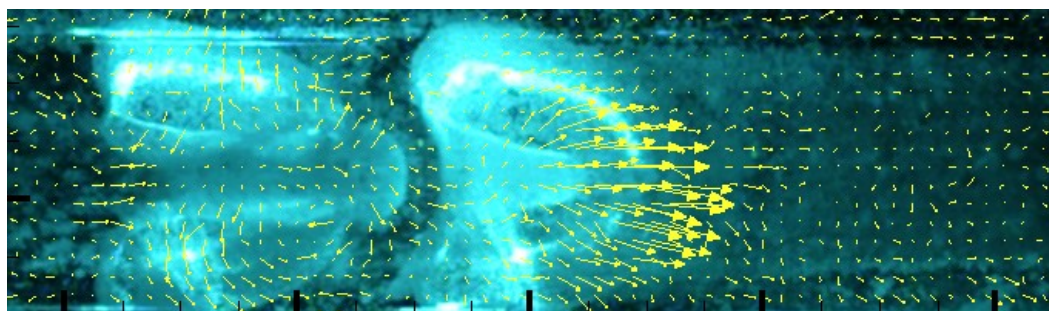


圖 4.37 壓力場比較圖

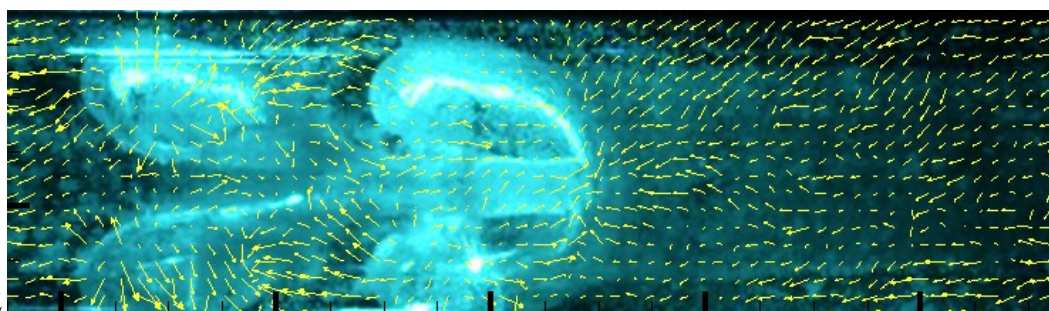


→ 20 cm / s

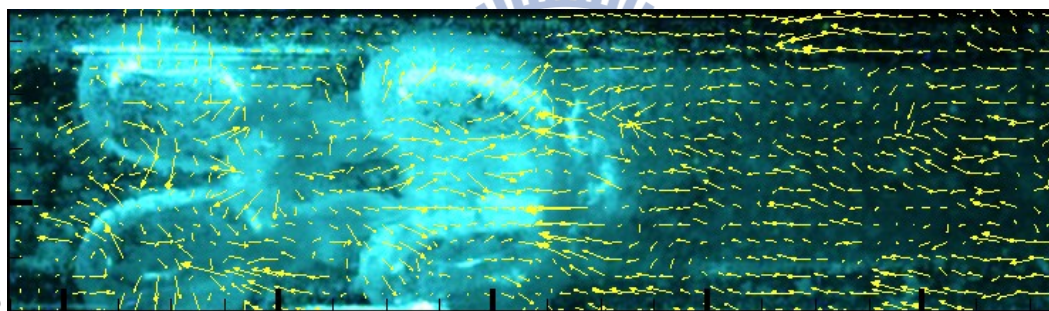
01



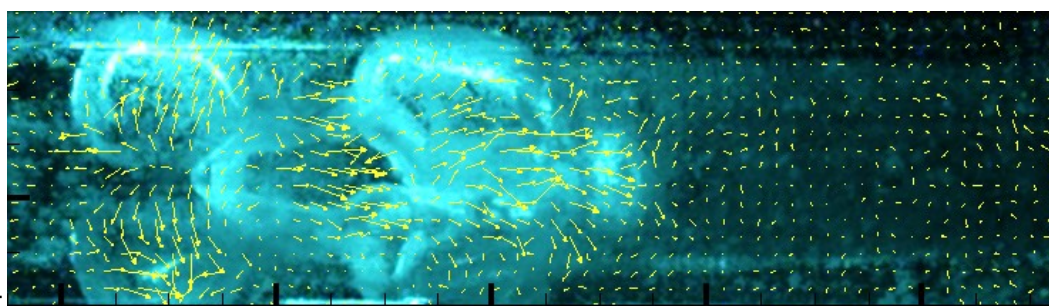
02



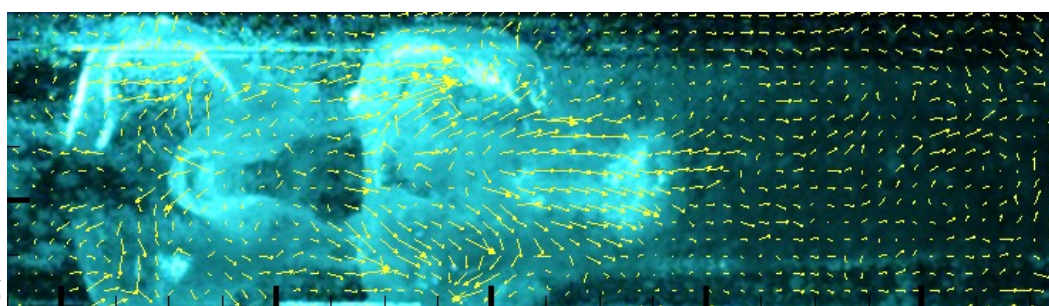
03



04



05



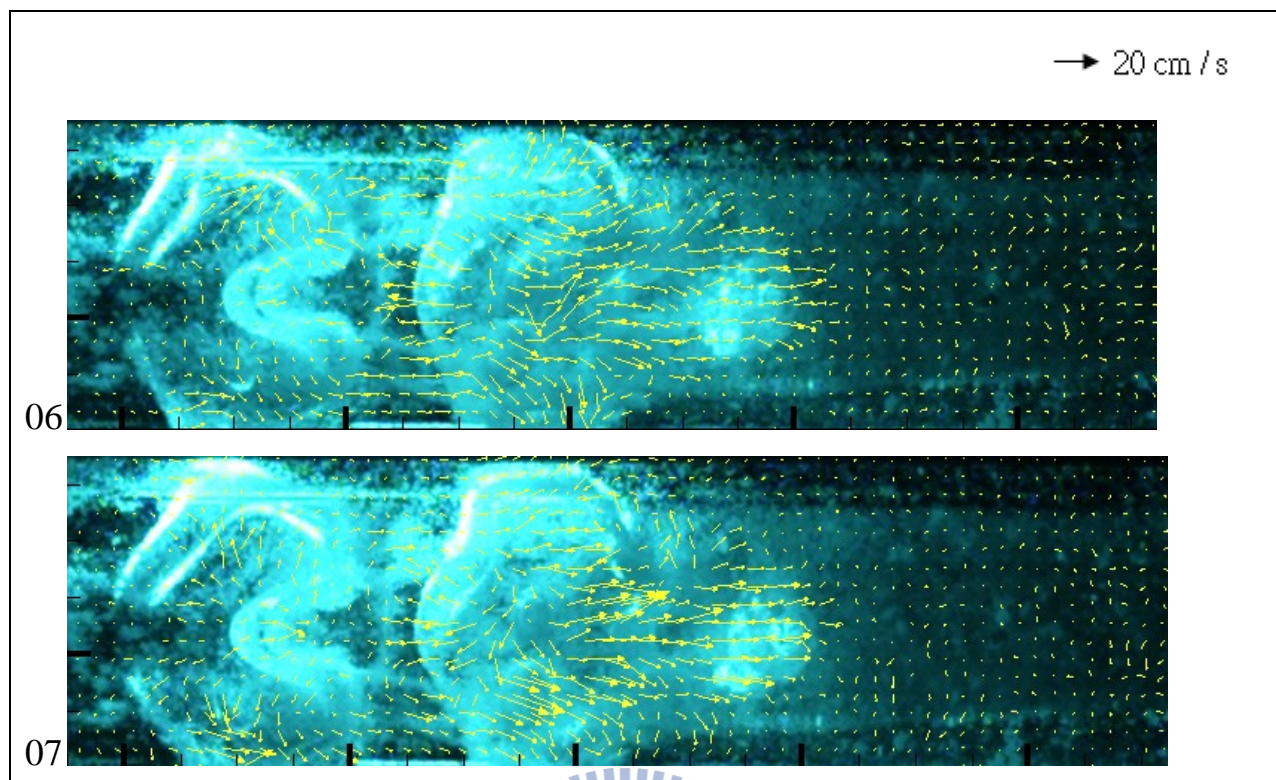


圖 4.38 距離參數 $\gamma \approx 2$ 兩顆皆破之速度流場；影像時間間距 $1/10000$ 秒；
影像大小為 $24.0 \text{ mm} \times 6.0 \text{ mm}$ ；氣泡半徑為 2.5 mm 。
(文中影像每張間隔 $1/1000$ 秒)

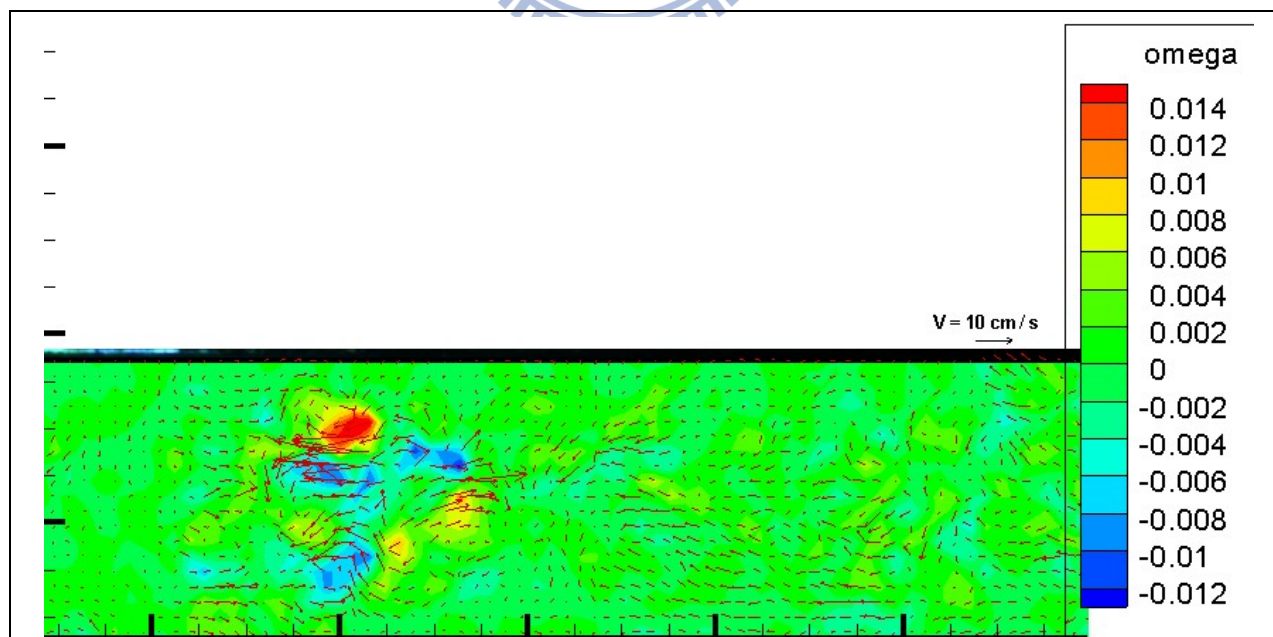
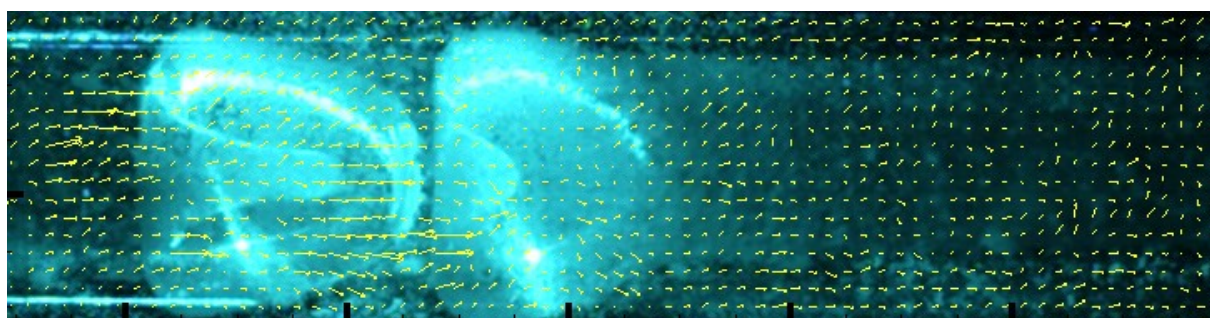


圖 4.39 為圖 4.38 第 01 張 PIV 影像之渦度圖

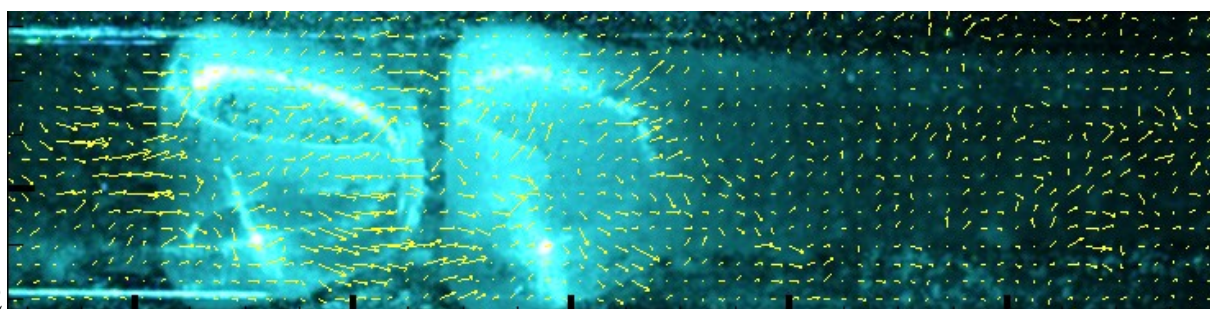
(omega 顏色為渦度強度值分佈)

→ 10 cm / s

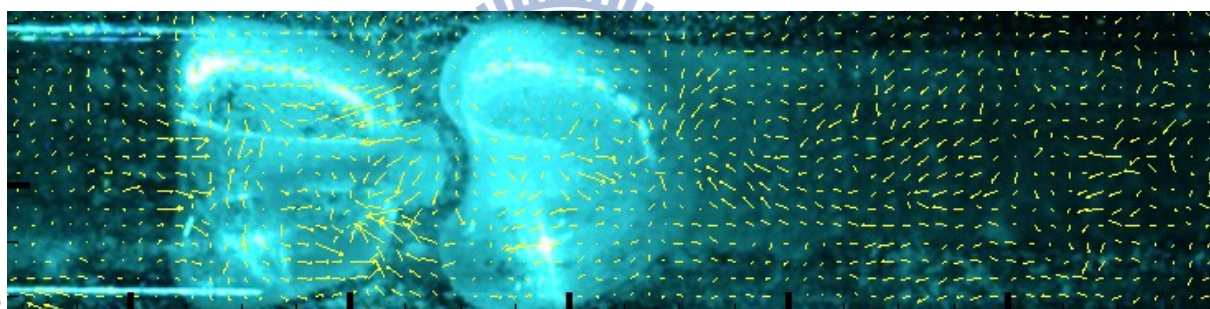
01



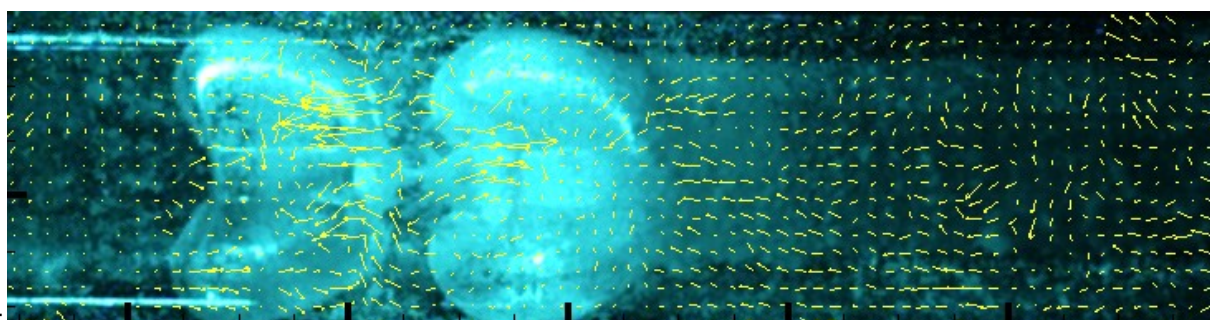
02



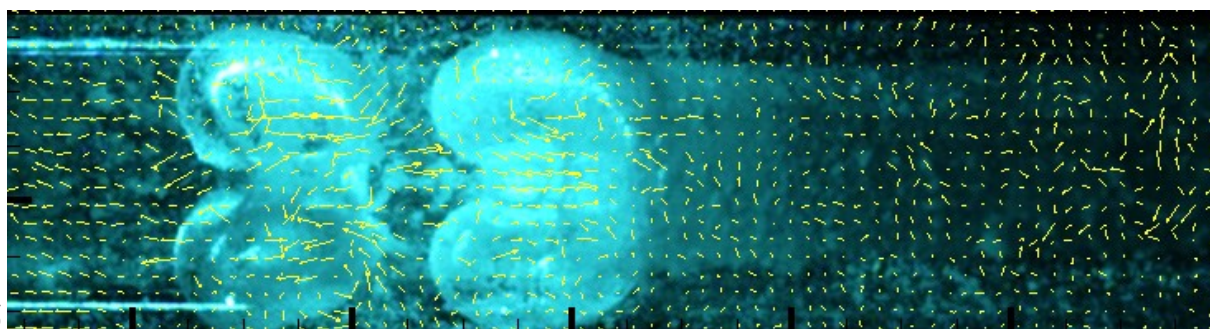
03



04



05



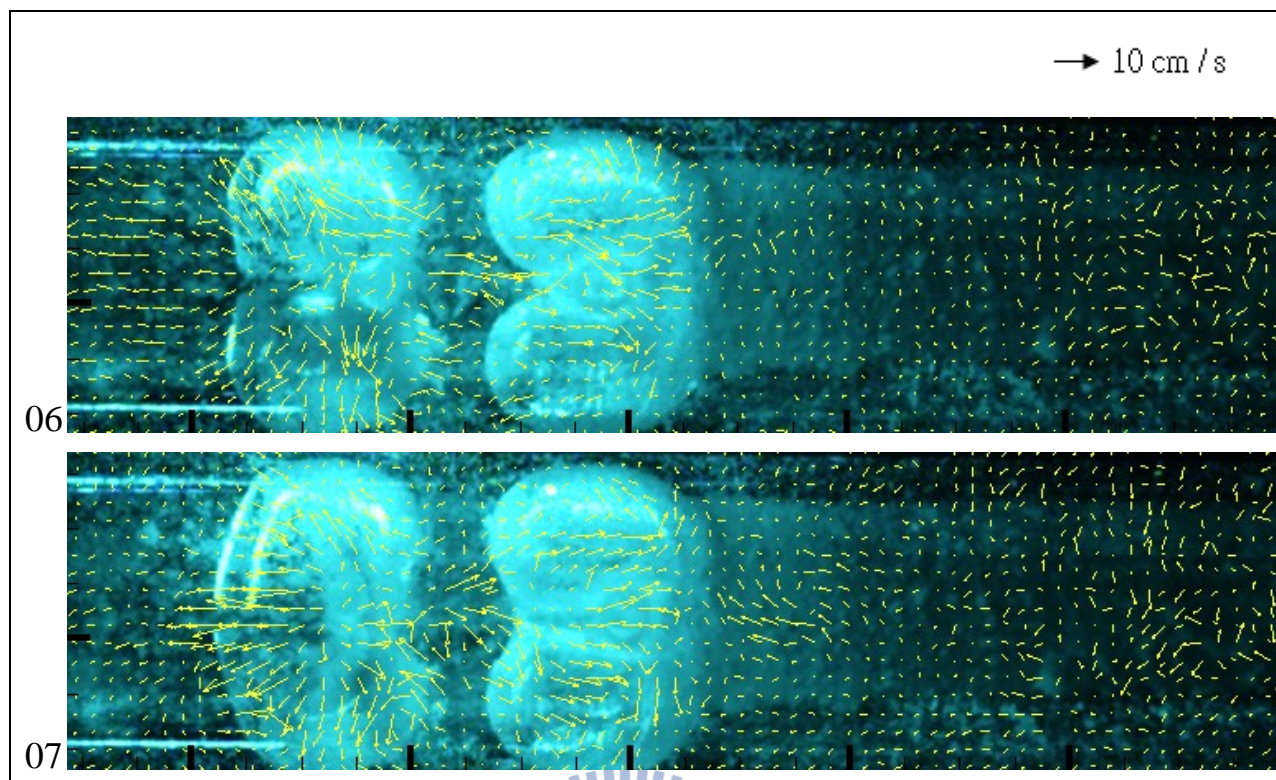


圖 4.40 距離參數 $\gamma \approx 2$ 左破右不破之速度流場；影像時間間距 $1/10000$ 秒；
影像大小為 $24.0 \text{ mm} \times 6.0 \text{ mm}$ ；氣泡半徑為 2.5 mm 。
(文中影像每張間隔 $1/1000$ 秒)

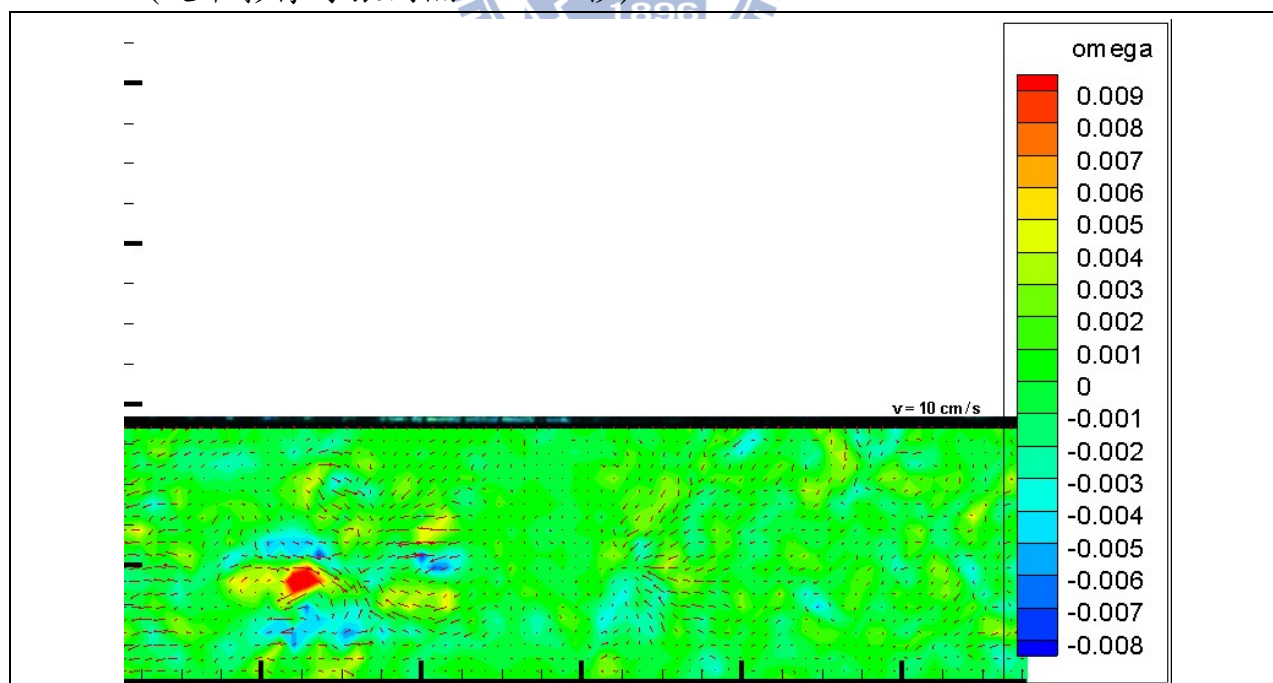
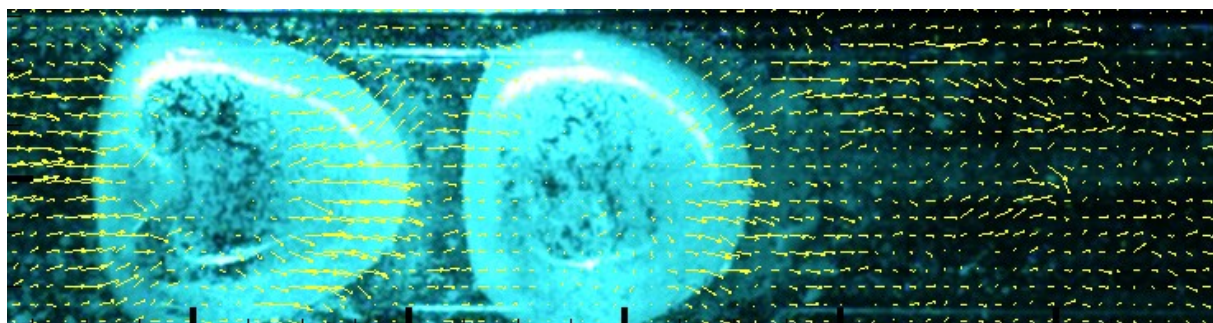


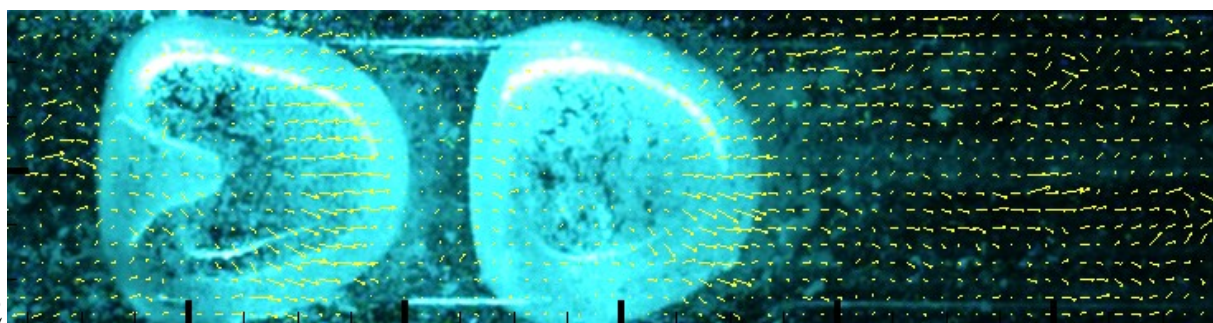
圖 4.41 為圖 4.40 第 04 張 PIV 影像之渦度圖
(ω 顏色為渦度強度值分佈)

→ 20 cm / s

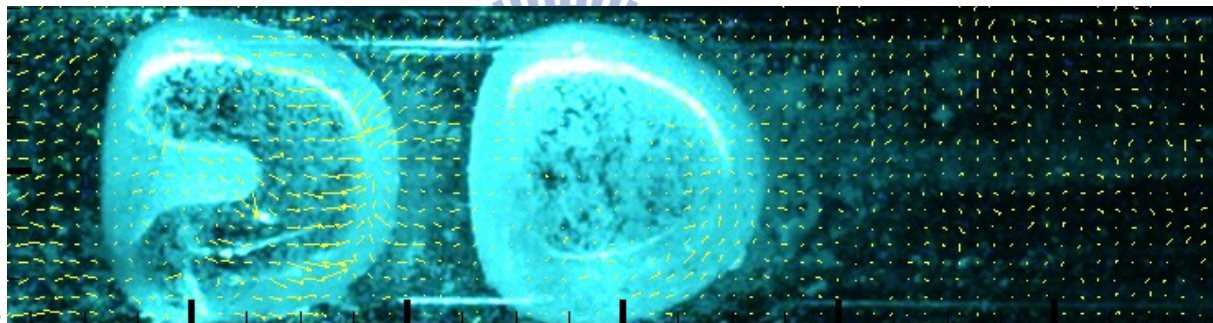
01



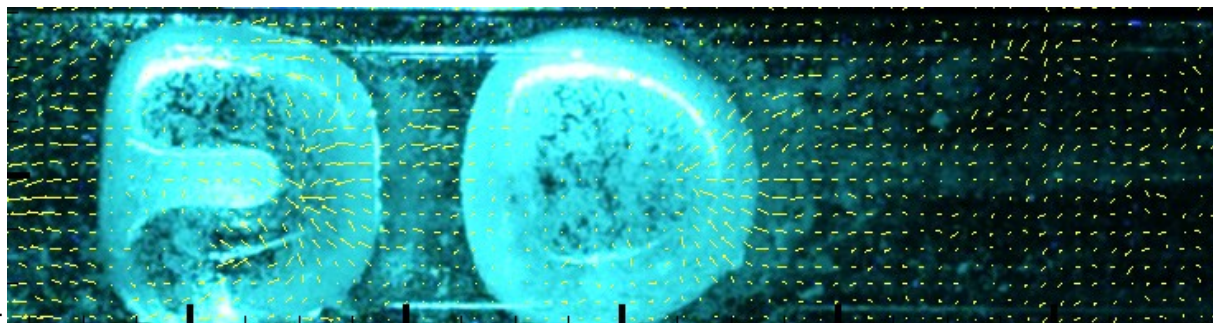
02



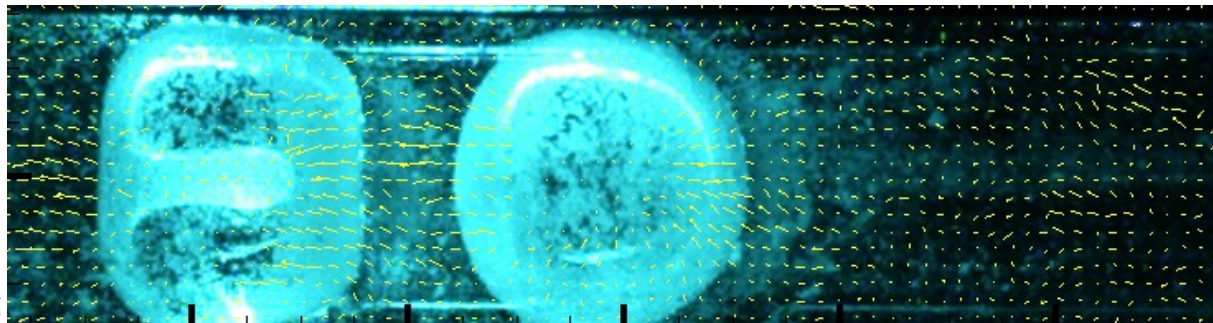
03



04



05



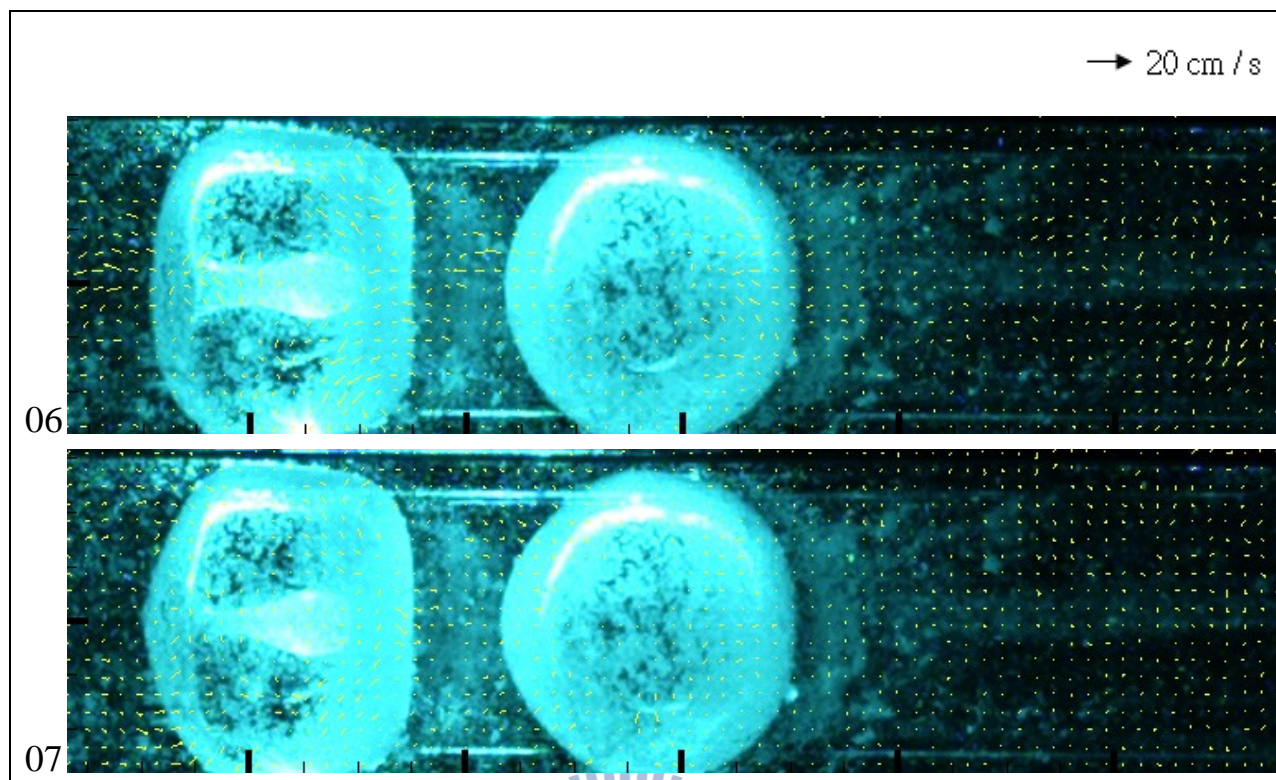


圖 4.42 距離參數 $\gamma \approx 2$ 兩顆皆不破之速度流場；影像時間間距 $1/10000$ 秒；影像大小為 $24.0 \text{ mm} \times 6.0 \text{ mm}$ ；氣泡半徑為 2.5 mm 。
(文中影像每張間隔 $1/1000$ 秒)

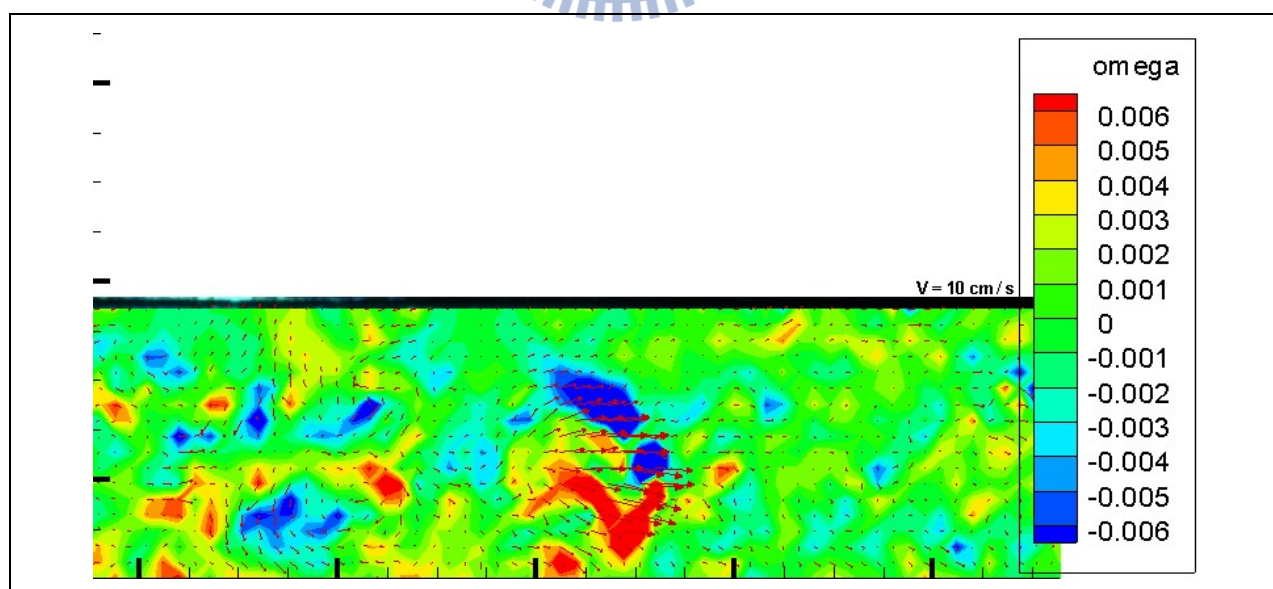
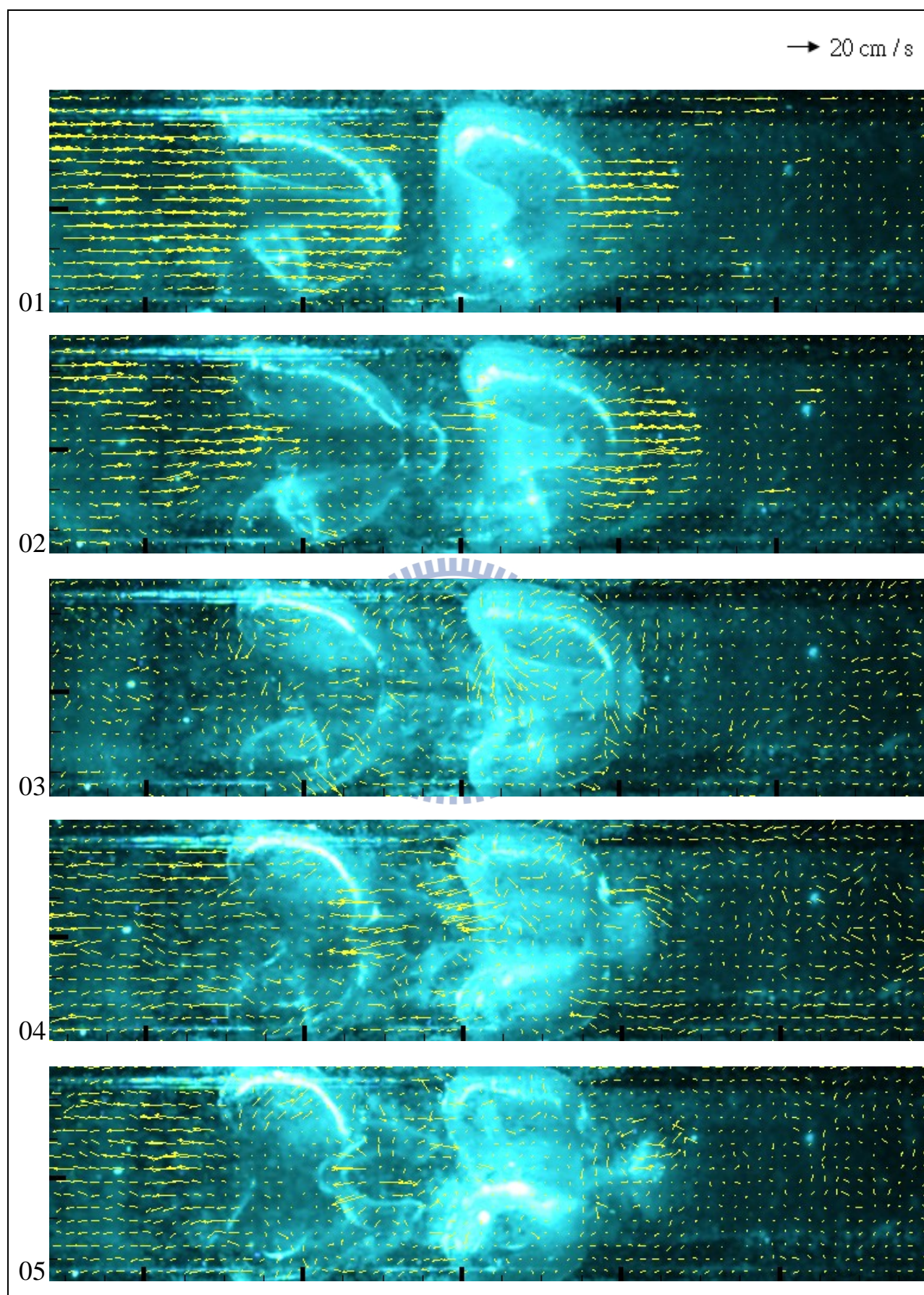


圖 4.43 為圖 4.42 第 04 張 PIV 影像之渦度圖
(omega 顏色為渦度強度值分佈)



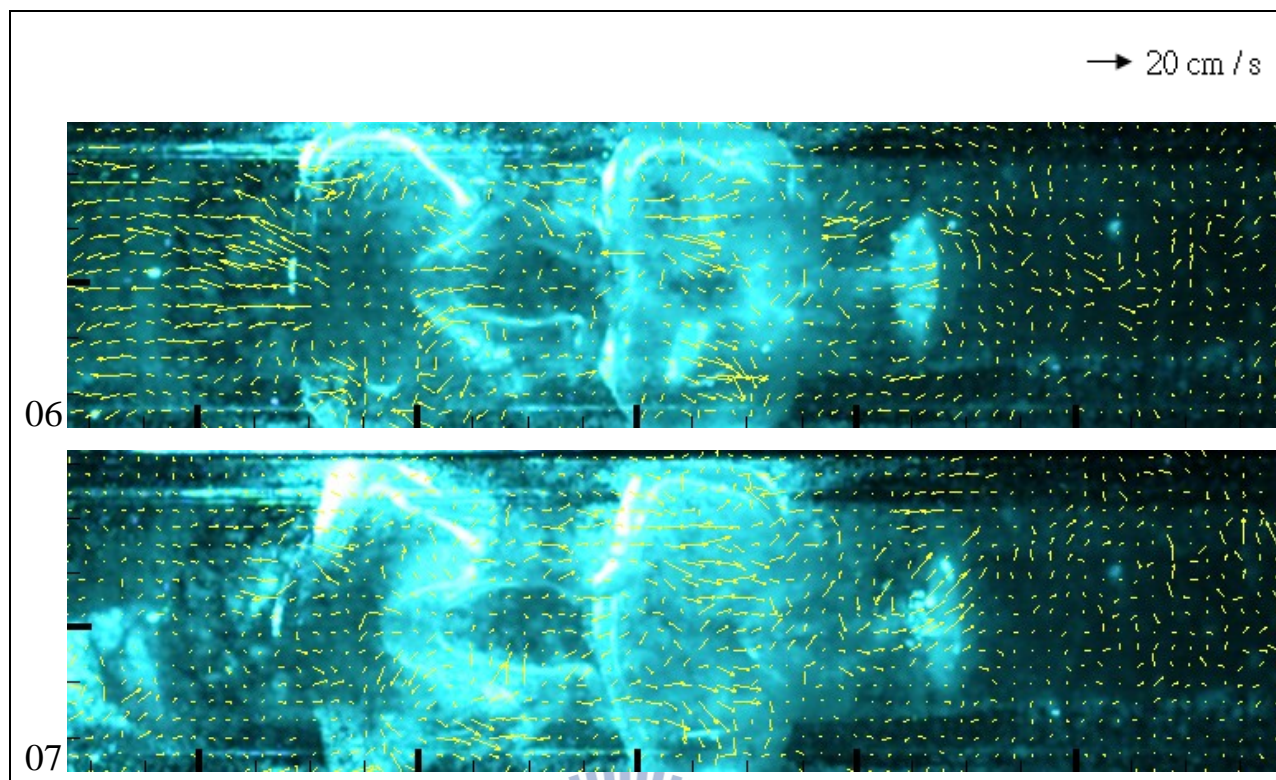


圖 4.44 距離參數 $\gamma \approx 3$ 兩顆皆破之速度流場；影像時間間距 $1 / 10000$ 秒；
影像大小為 $24.0 \text{ mm} \times 6.0 \text{ mm}$ ；氣泡半徑為 2.5 mm 。
(文中影像每張間隔 $1/1000$ 秒)

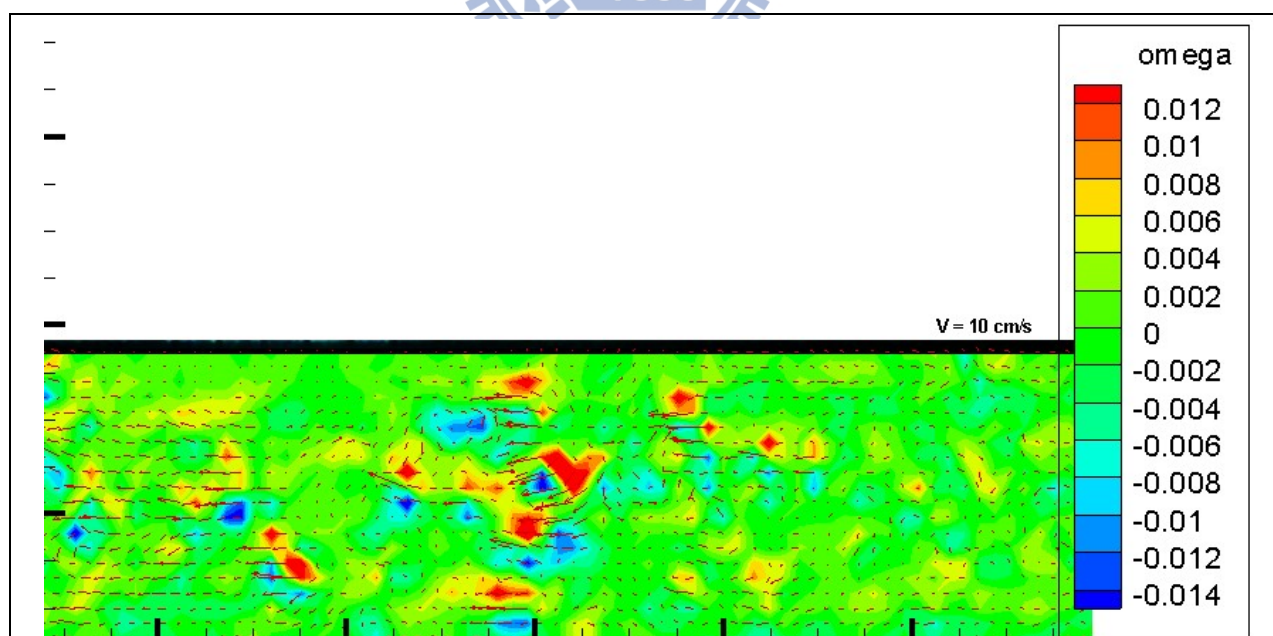
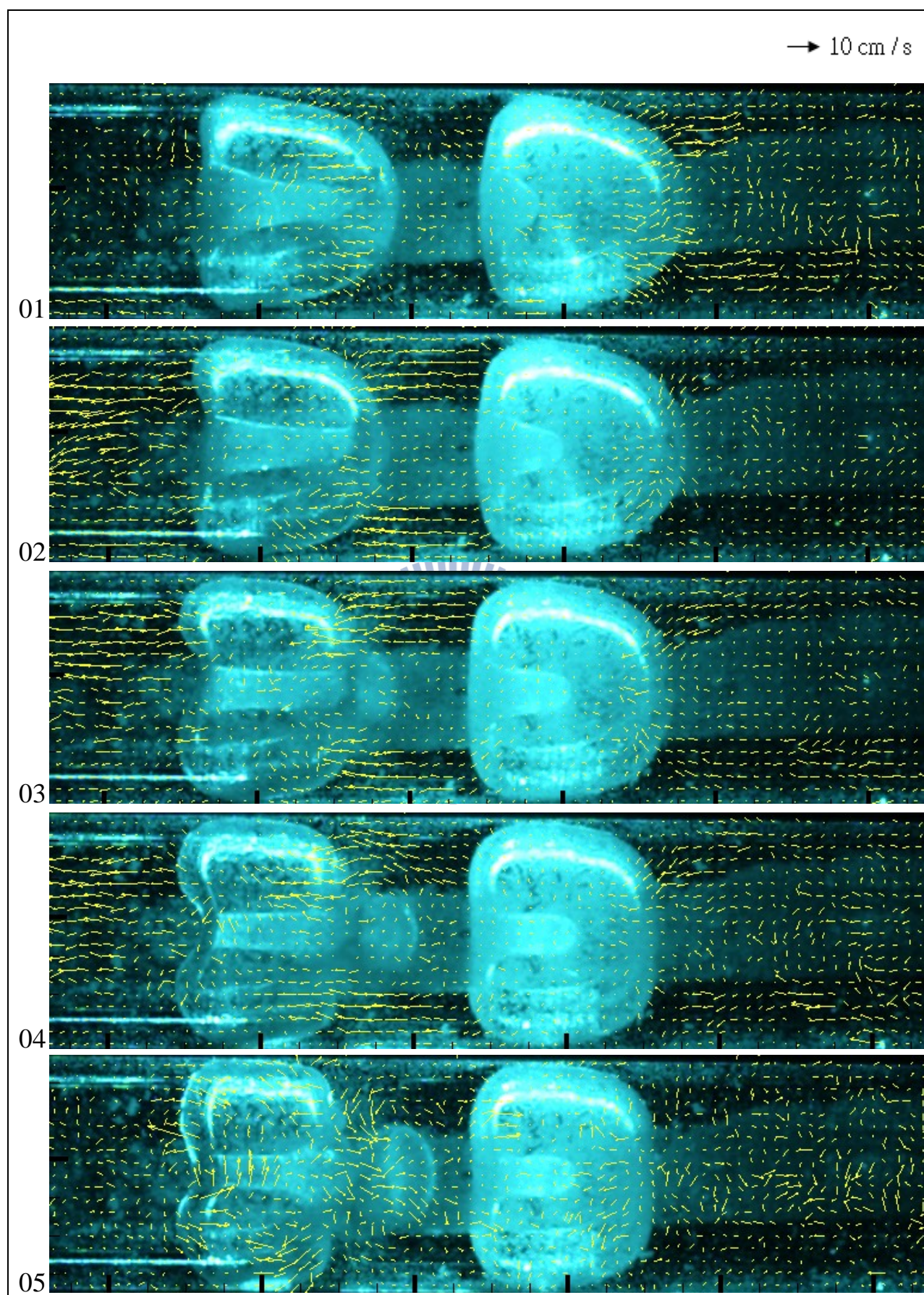


圖 4.45 為圖 4.44 第 04 張 PIV 影像之渦度圖
(ω 顏色為渦度強度值分佈)



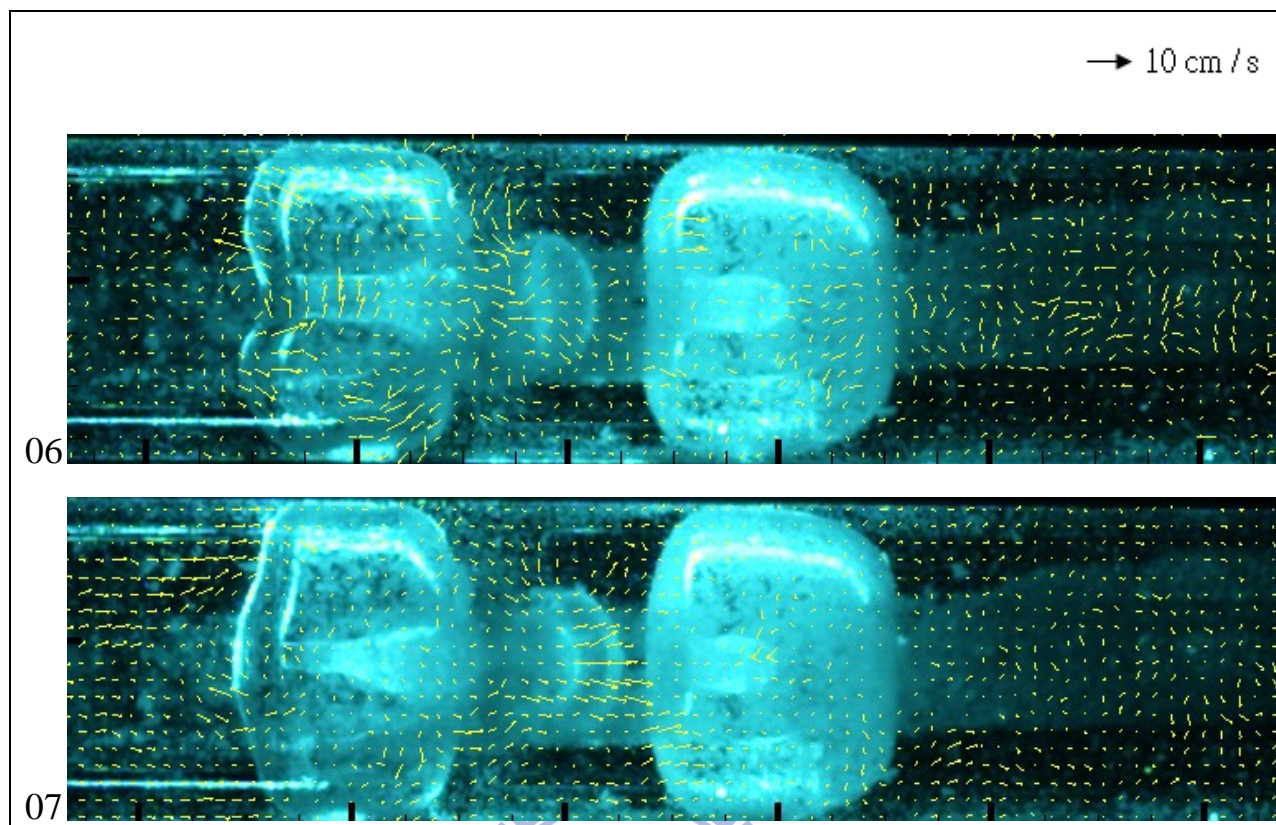


圖 4.46 距離參數 $\gamma \approx 3$ 左破右不破之速度流場；影像時間間距 $1/10000$ 秒；影像大小為 $24.0 \text{ mm} \times 6.0 \text{ mm}$ ；氣泡半徑為 2.5 mm 。
(文中影像每張間隔 $1/1000$ 秒)

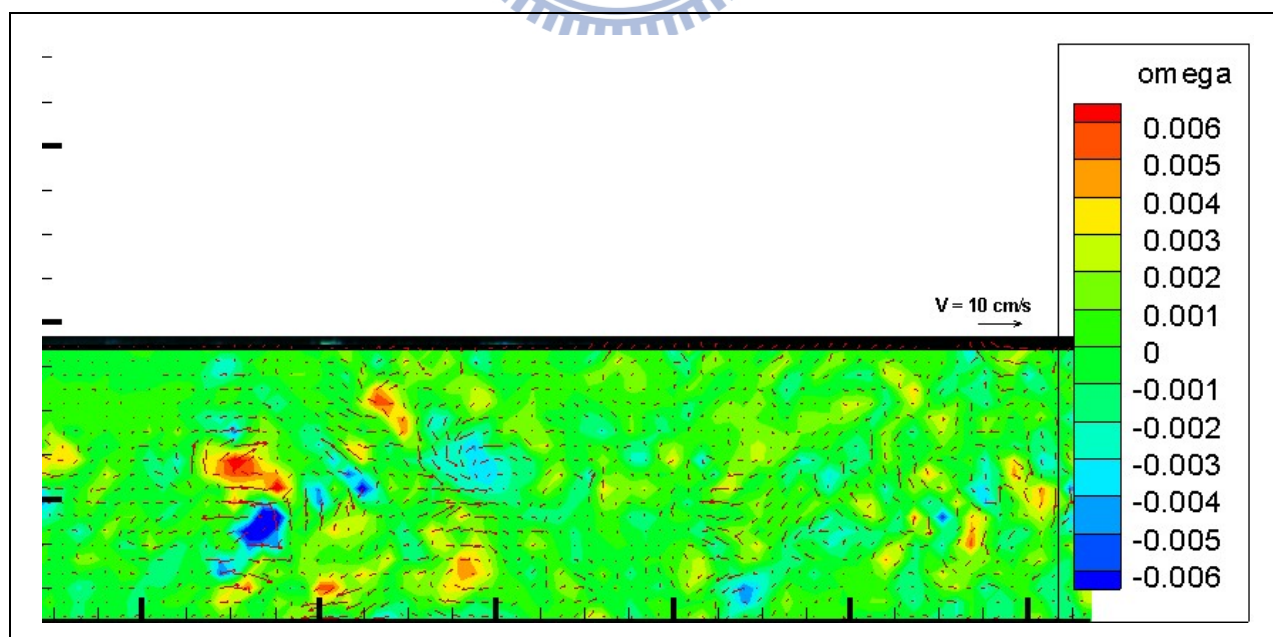
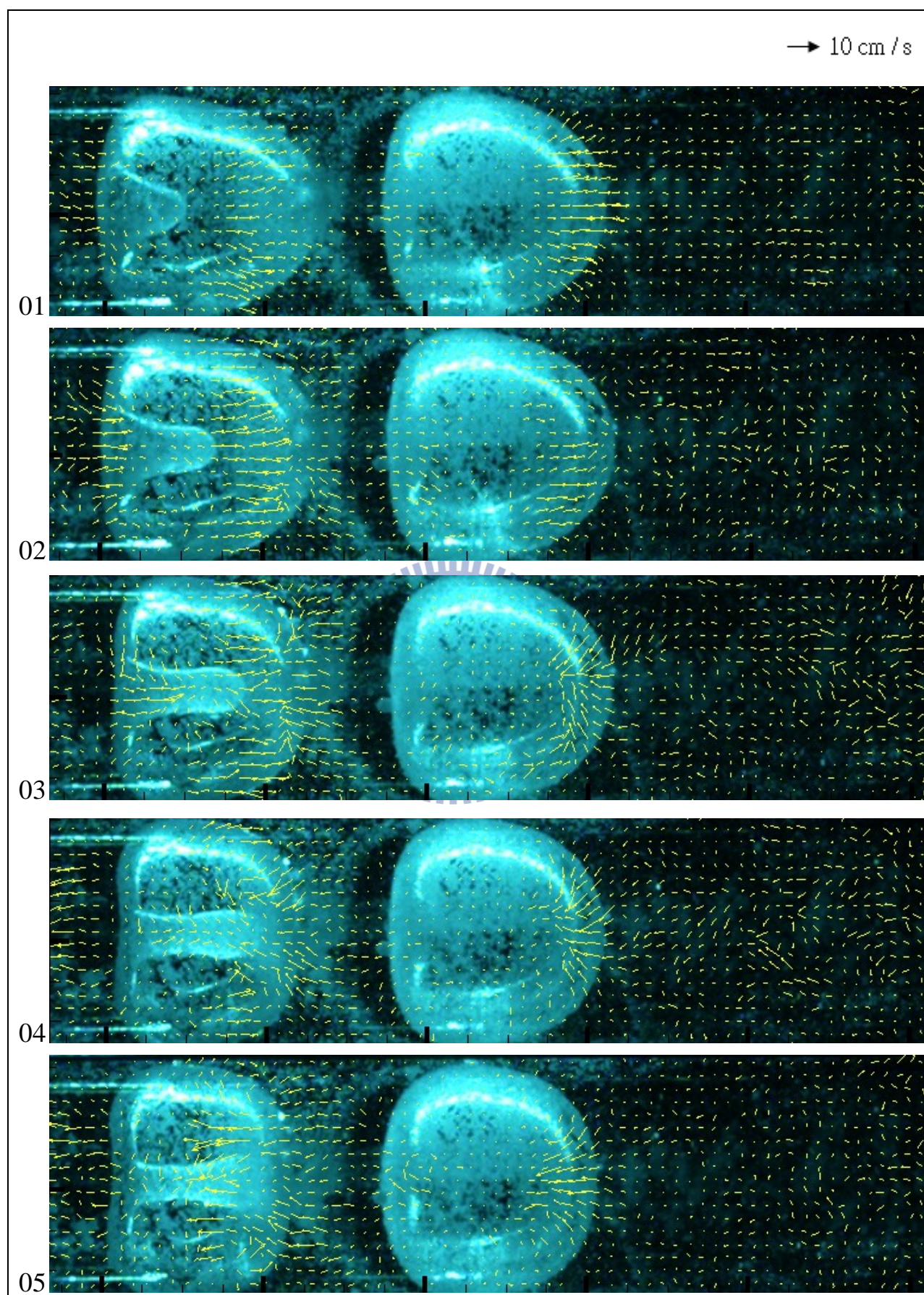


圖 4.47 為圖 4.46 第 06 張 PIV 影像之渦度圖
(omega 顏色為渦度強度值分佈)



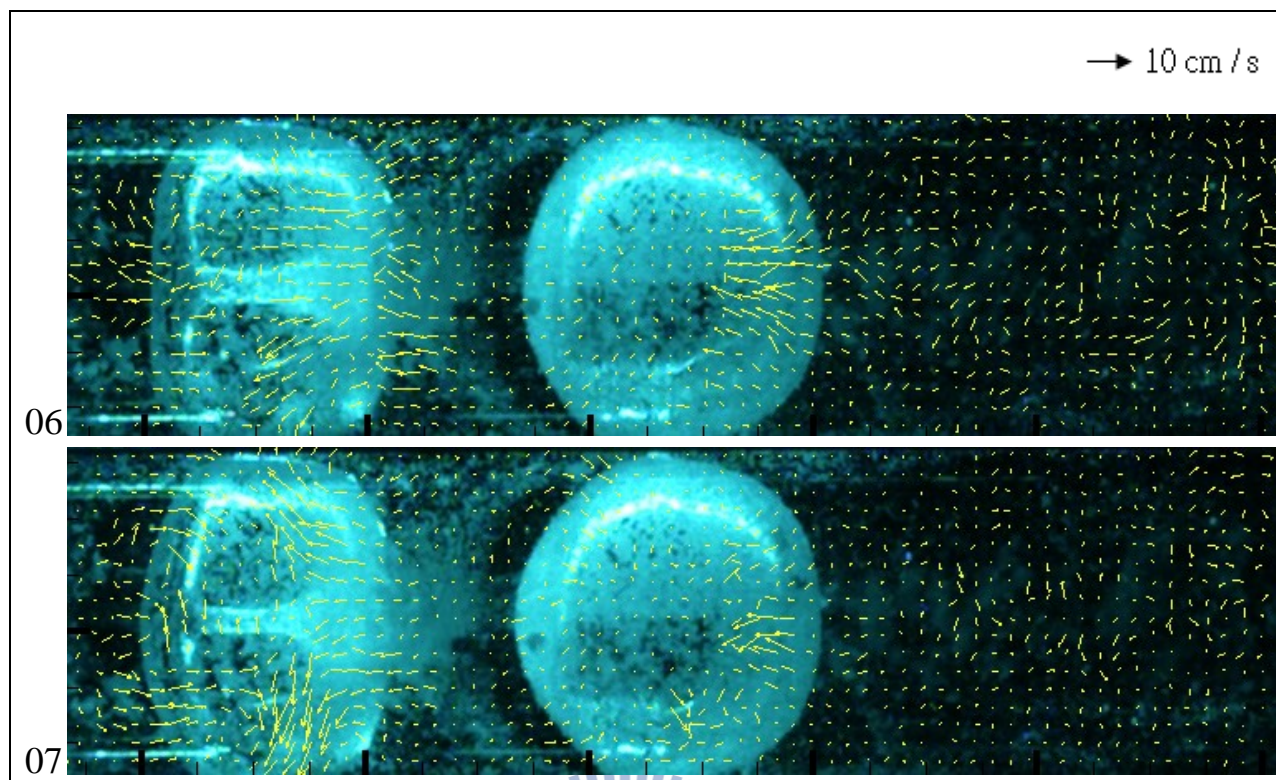


圖 4.48 距離參數 $\gamma \approx 3$ 兩顆皆不破之速度流場；影像時間間距 $1 / 10000$ 秒；

影像大小為 $24.0 \text{ mm} \times 6.0 \text{ mm}$ ；氣泡半徑為 2.5 mm 。

(文中影像每張間隔 $1/1000$ 秒)

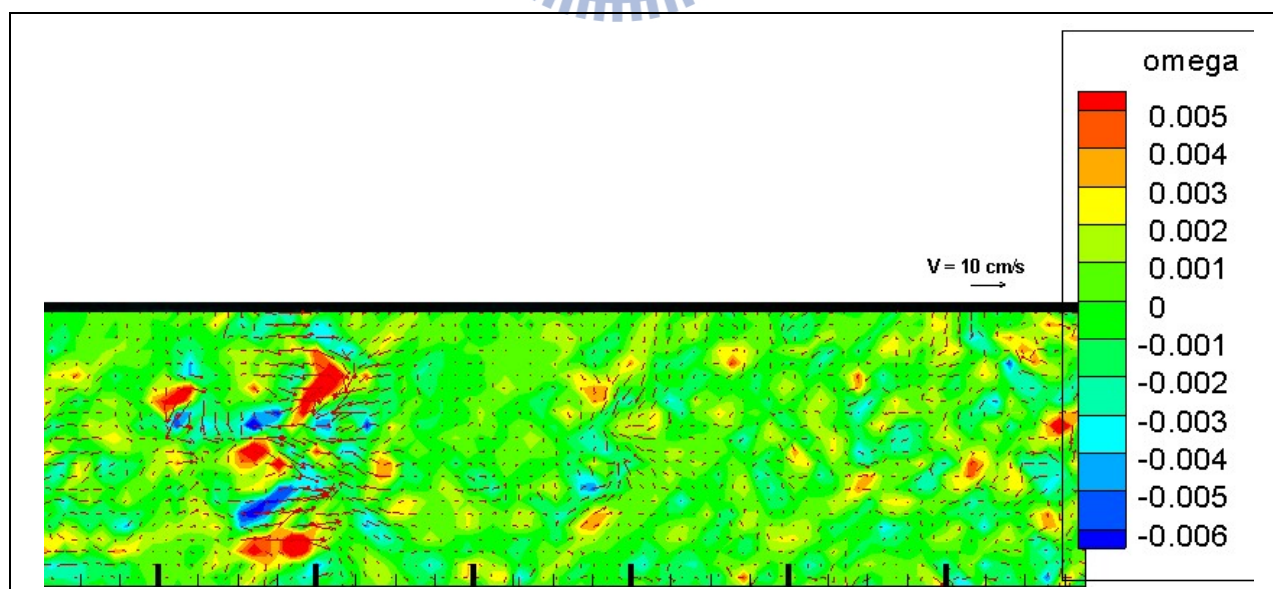
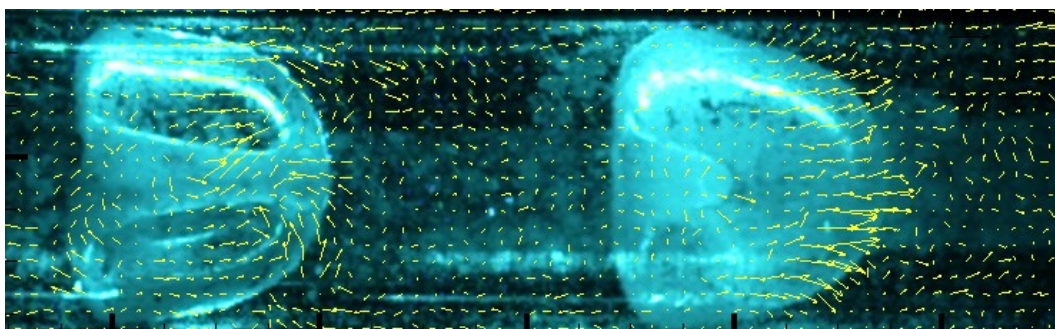


圖 4.49 為圖 4.48 第 03 張 PIV 影像之渦度圖

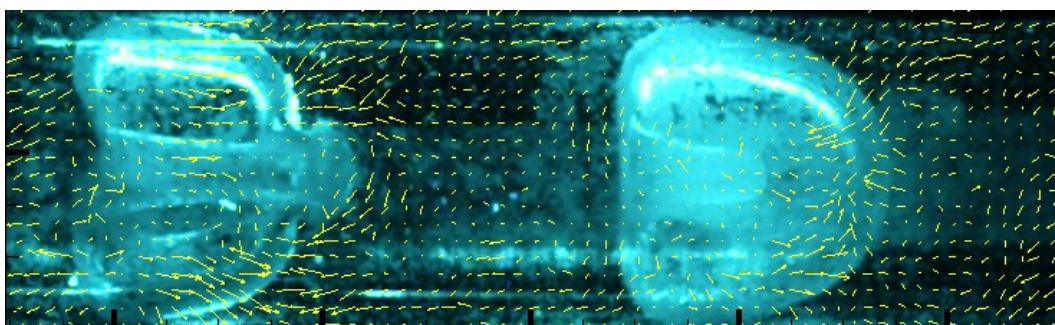
(omega 顏色為渦度強度值分佈)

→ 20 cm / s

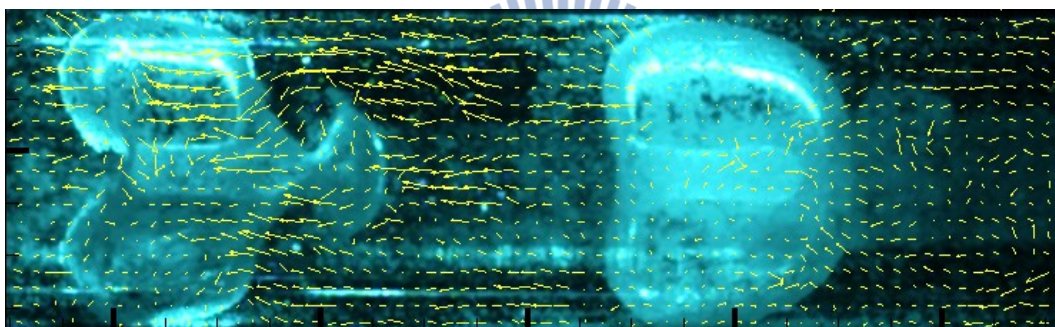
01



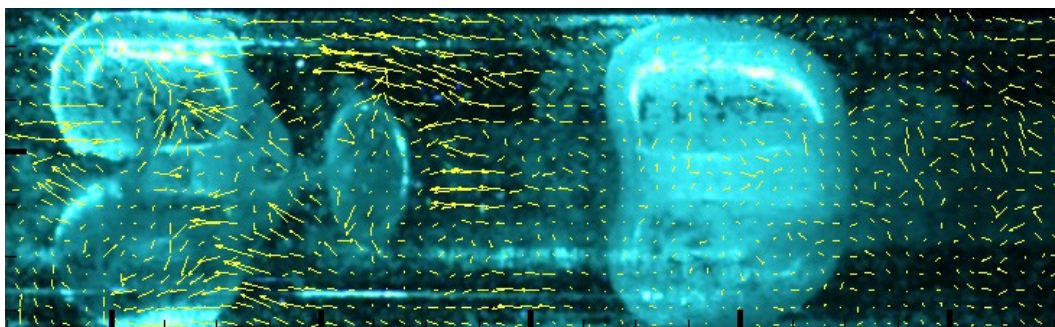
02



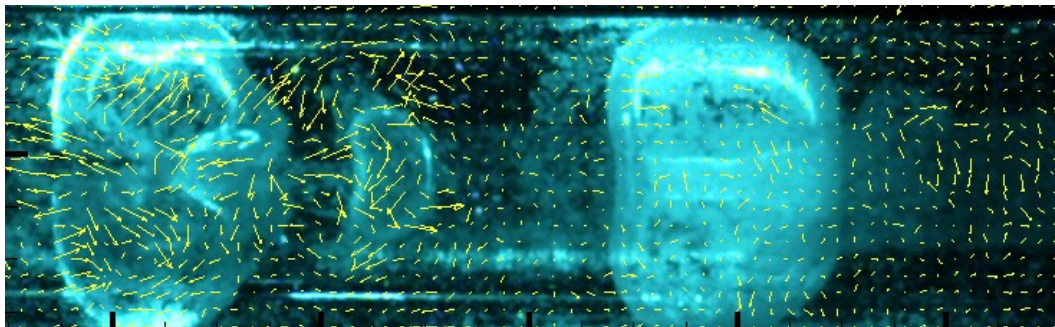
03



04



05



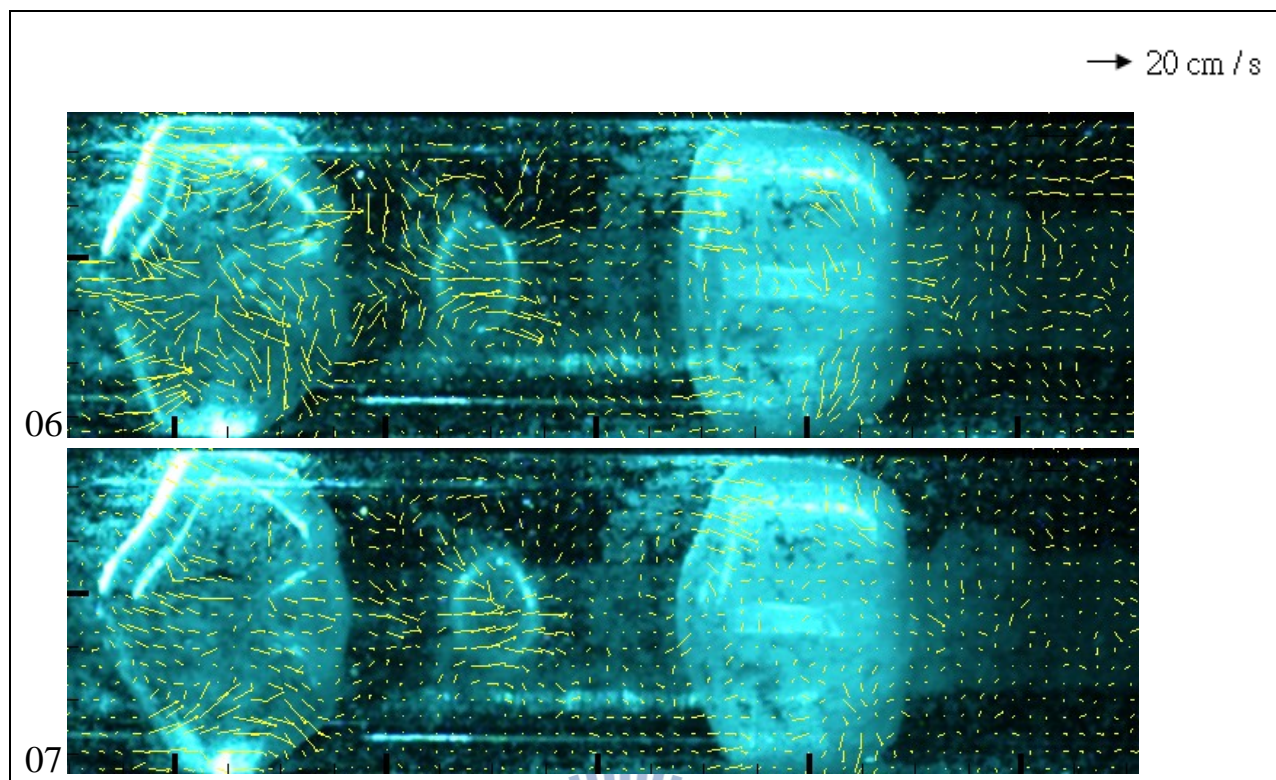


圖 4.50 距離參數 $\gamma \approx 4$ 兩顆皆破之速度流場；影像時間間距 $1/10000$ 秒；
影像大小為 $24.0 \text{ mm} \times 6.0 \text{ mm}$ ；氣泡半徑為 2.5 mm 。
(文中影像每張間隔 $1/1000$ 秒)

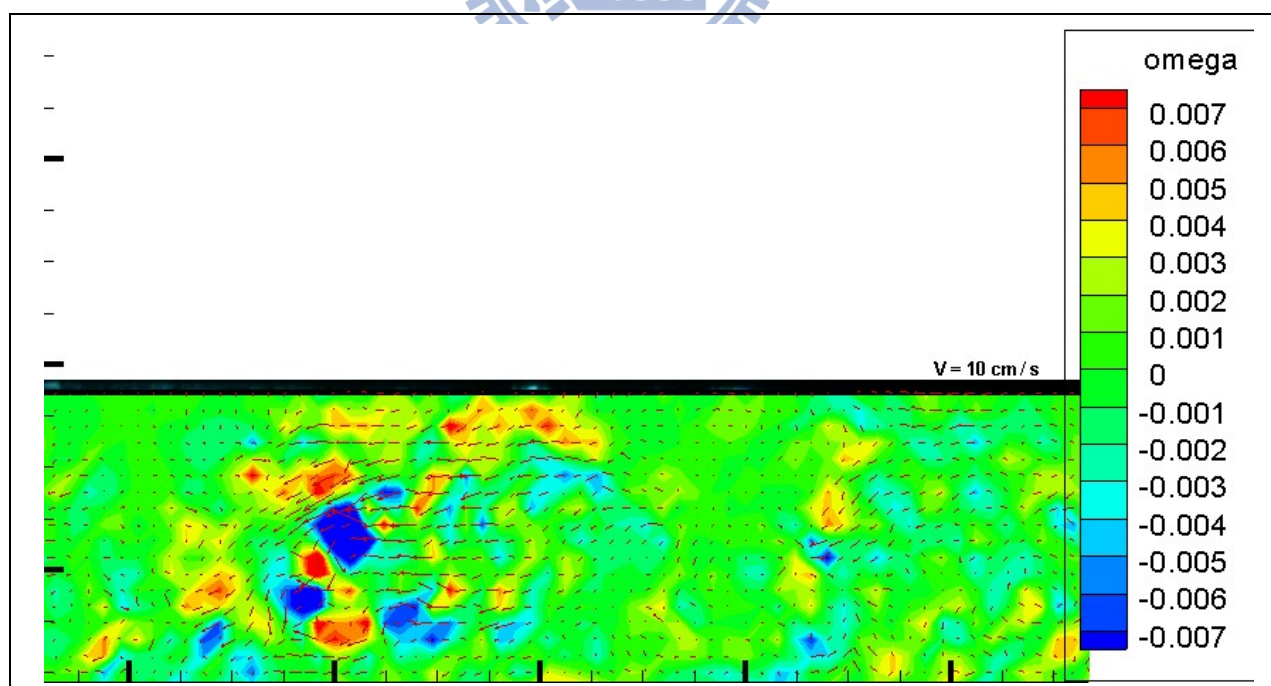
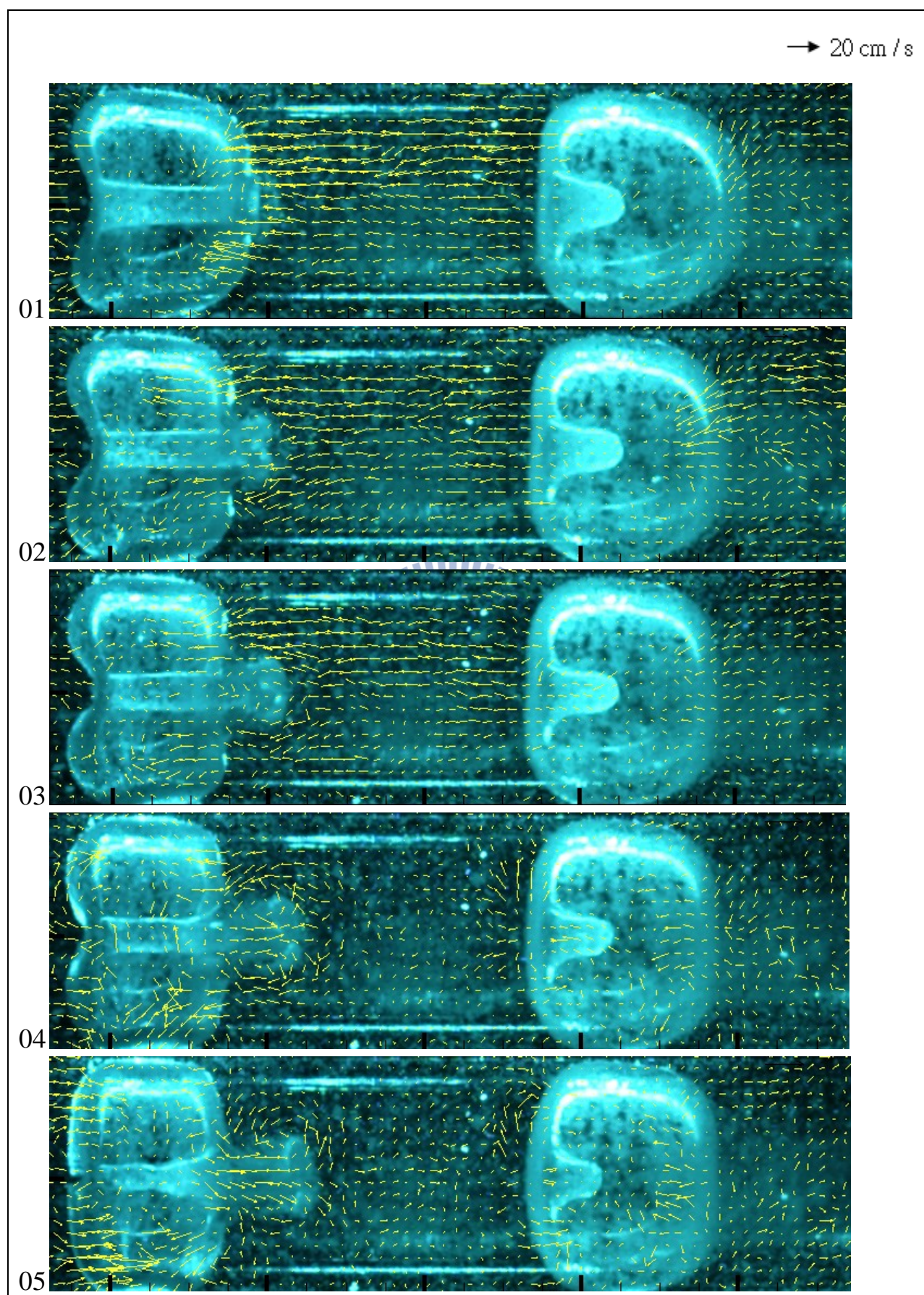


圖 4.51 為圖 4.50 第 03 張 PIV 影像之渦度圖
(omega 顏色為渦度強度值分佈)



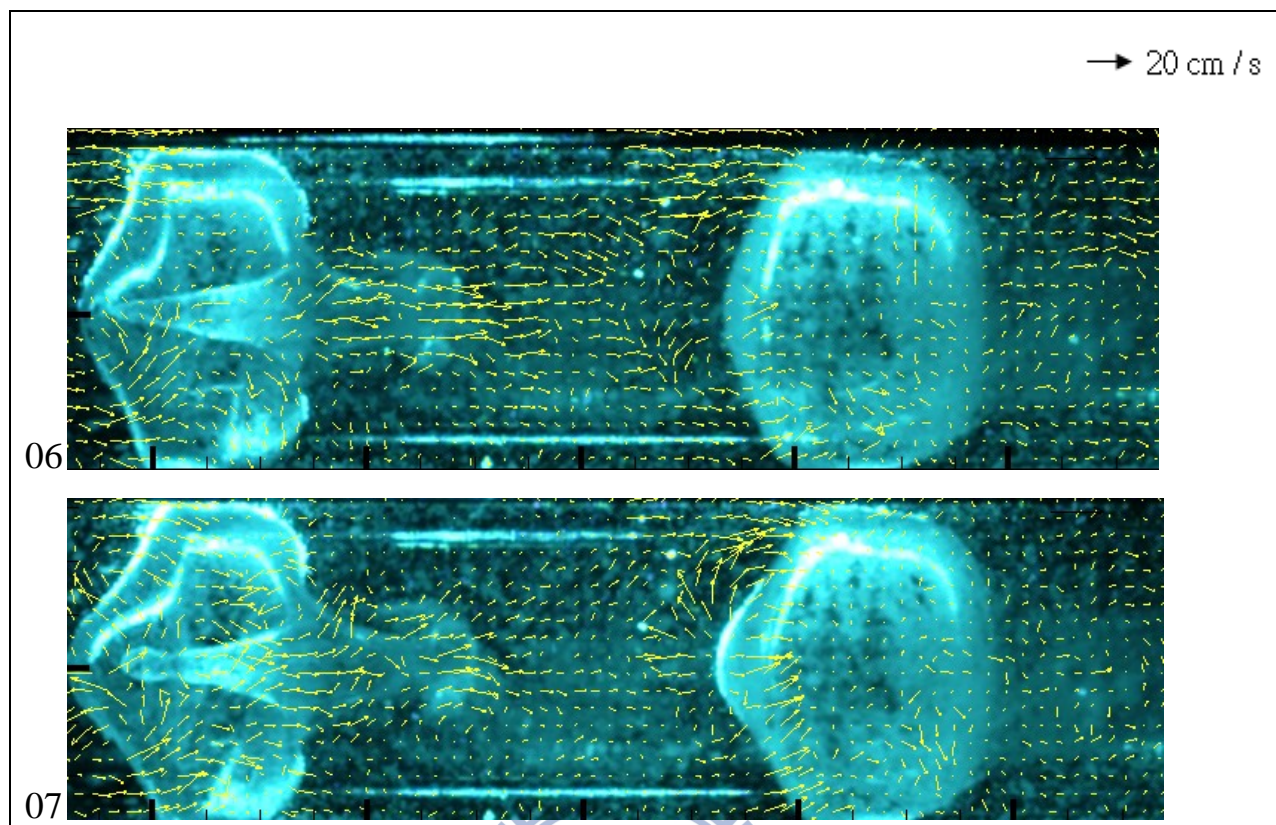


圖 4.52 距離參數 $\gamma \approx 4$ 左破右不破之速度流場；影像時間間距 1 / 10000 秒；影像大小為 24.0 mm \times 6.0mm；氣泡半徑為 2.5 mm。
(文中影像每張間隔 1/1000 秒)

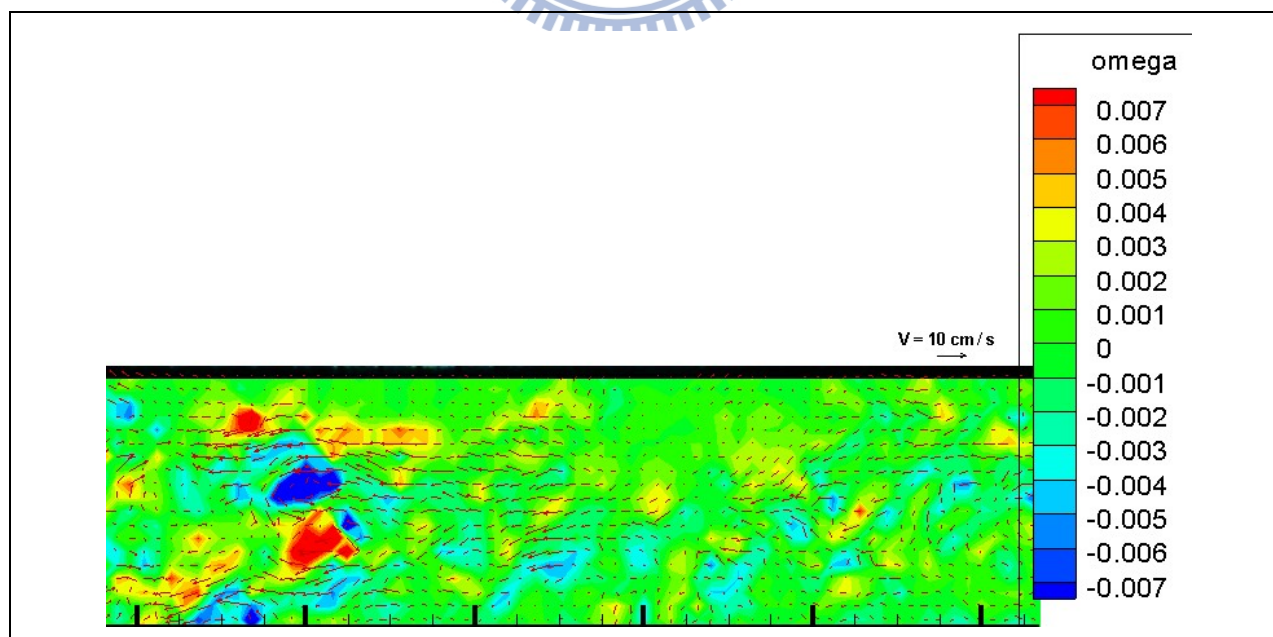
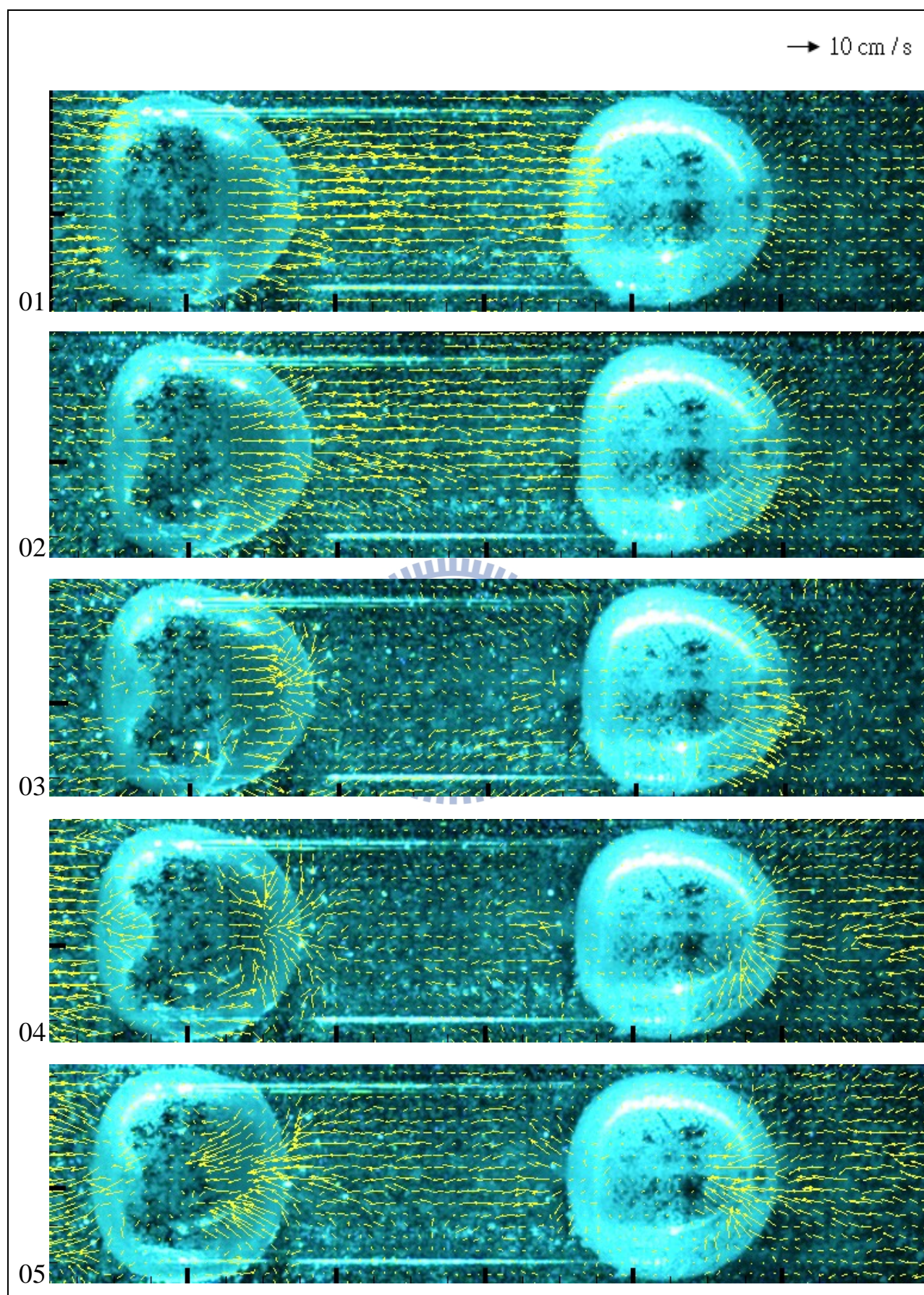


圖 4.53 為圖 4.52 第 03 張 PIV 影像之渦度圖
(ω 顏色為渦度強度值分佈)



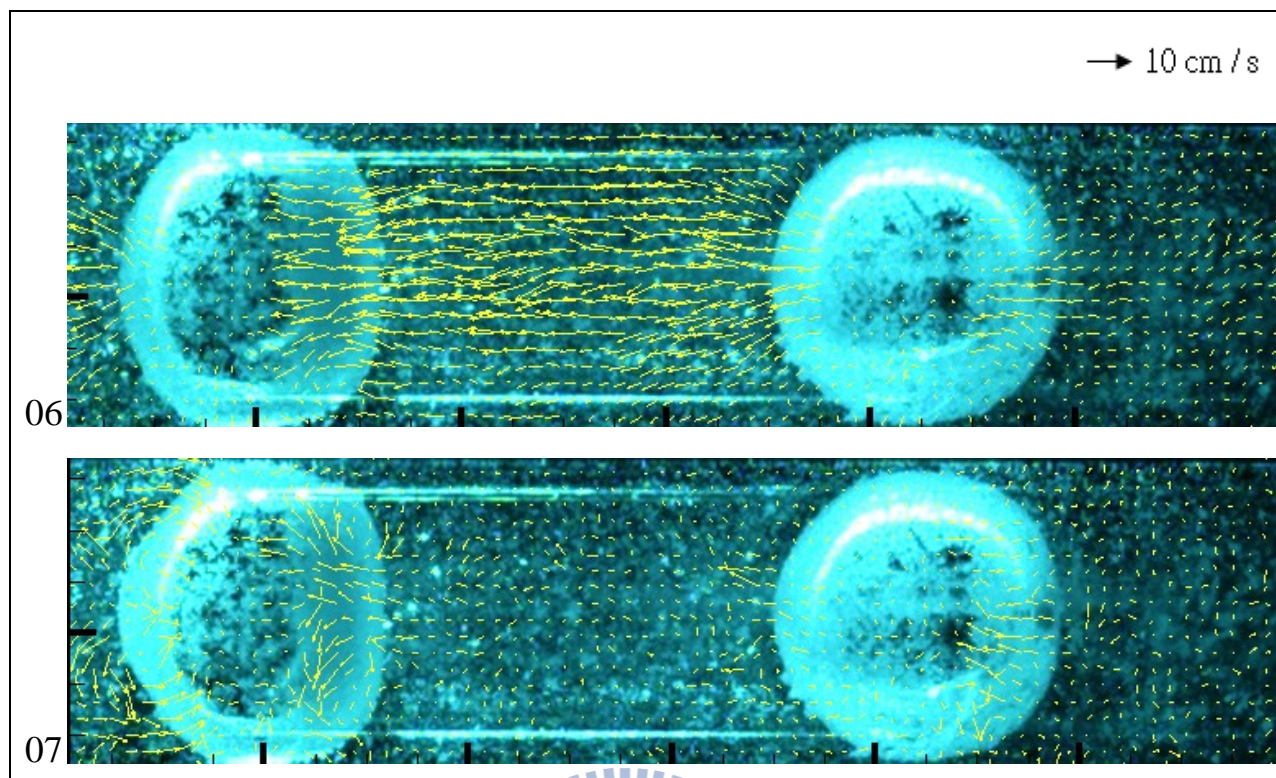


圖 4.54 距離參數 $\gamma \approx 4$ 兩顆皆不破之速度流場；影像時間間距 $1 / 10000$ 秒；影像大小為 $24.0 \text{ mm} \times 6.0 \text{ mm}$ ；氣泡半徑為 2.5 mm 。
(文中影像每張間隔 $1/1000$ 秒)

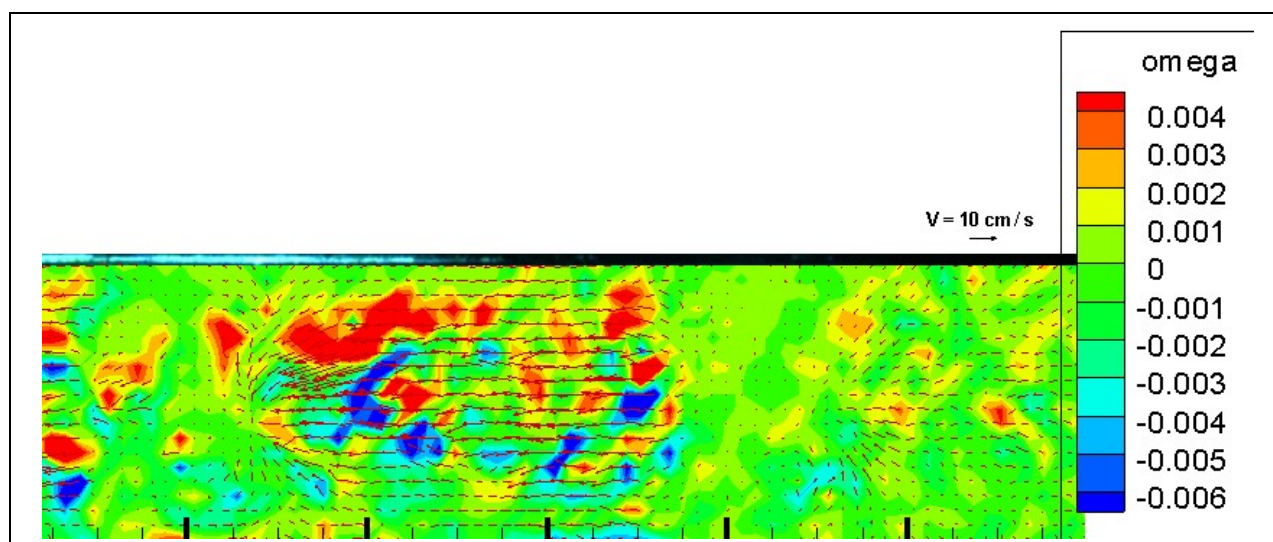
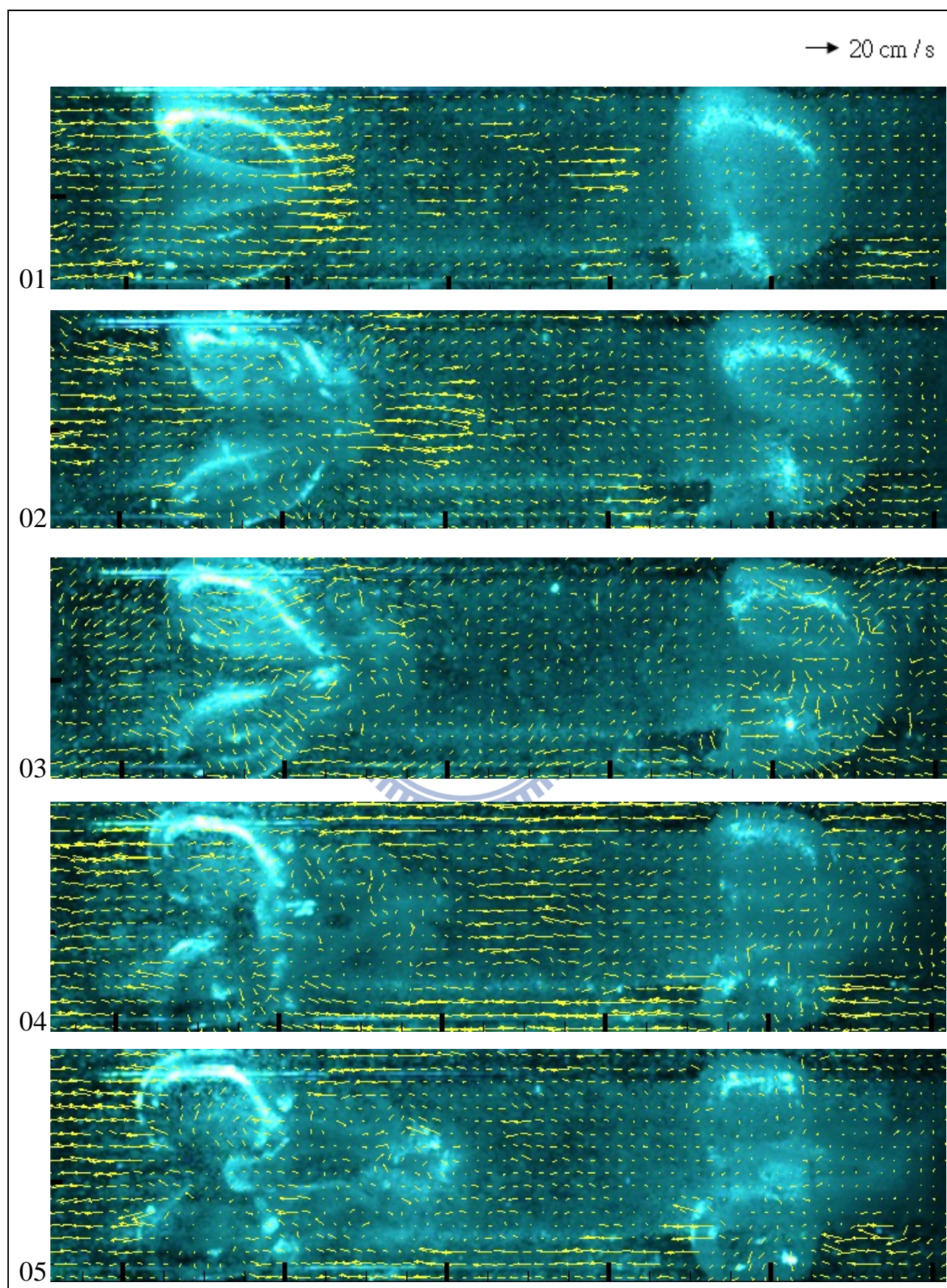


圖 4.55 為圖 4.54 第 06 張 PIV 影像之渦度圖
(omega 顏色為渦度強度值分佈)



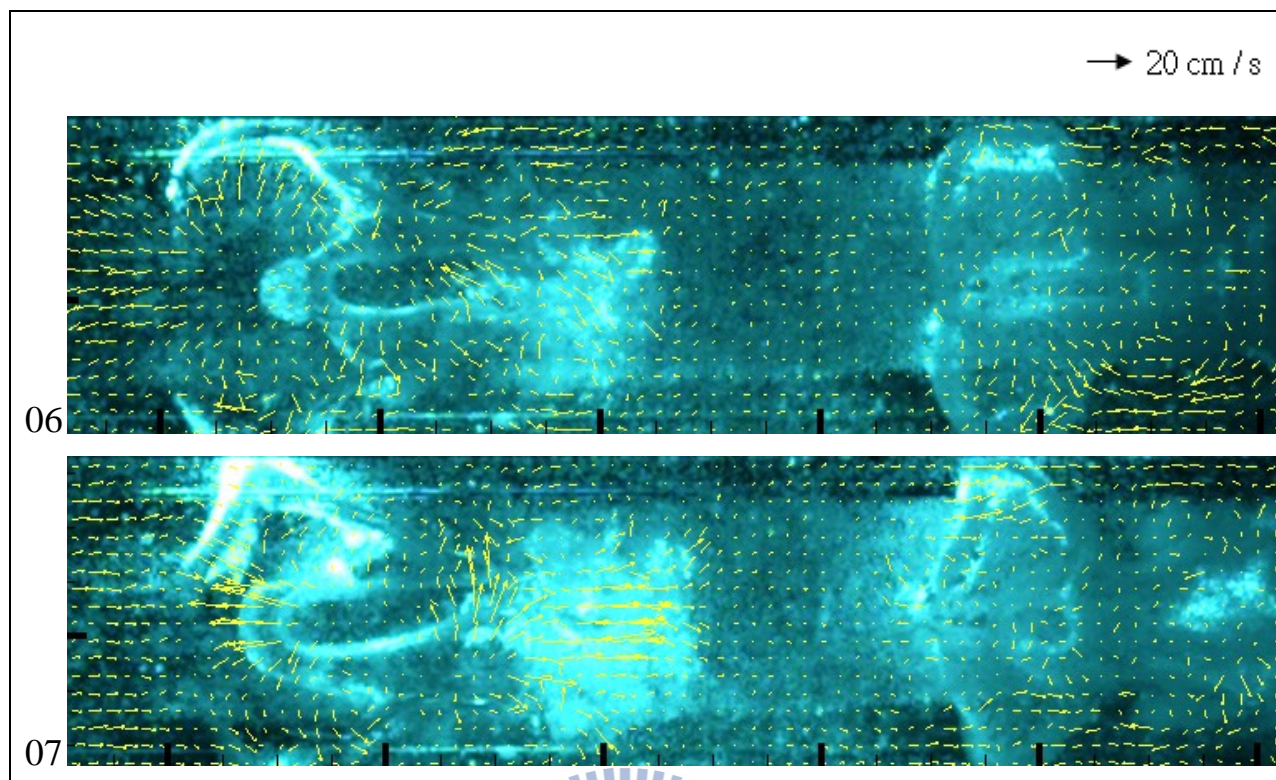


圖 4.56 距離參數 $\gamma \approx 5$ 兩顆皆破之速度流場；影像時間間距 $1/10000$ 秒；
影像大小為 $24.0 \text{ mm} \times 6.0 \text{ mm}$ ；氣泡半徑為 2.5 mm 。
(文中影像每張間隔 $1/1000$ 秒)

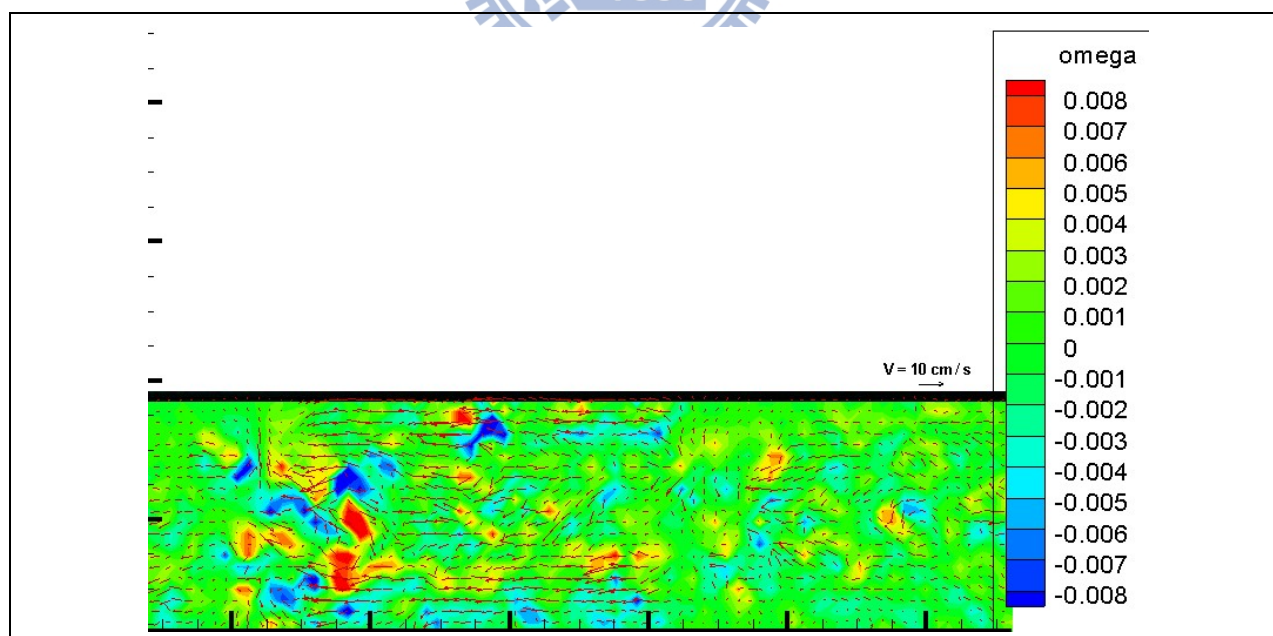
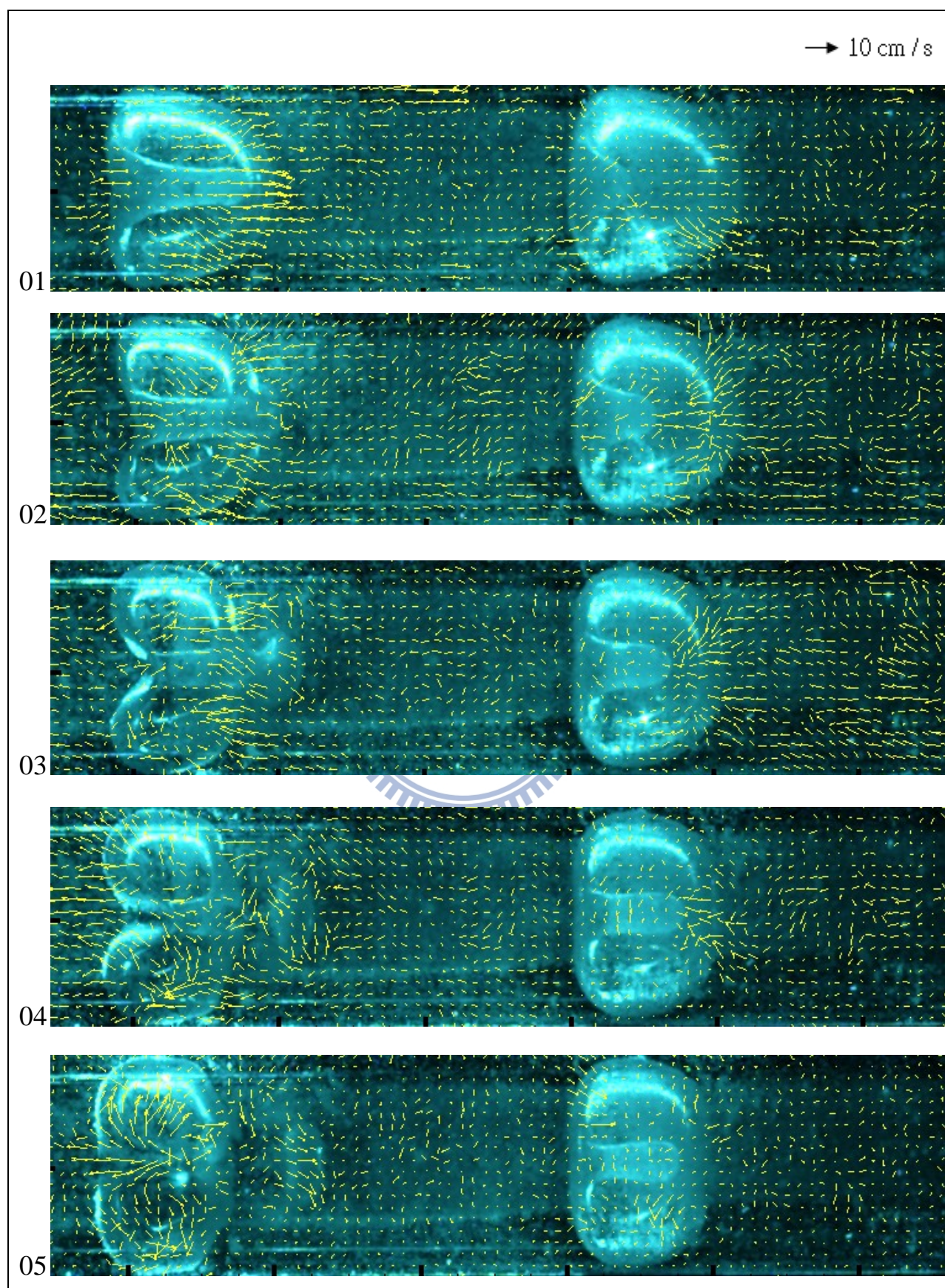


圖 4.57 為圖 4.56 第 06 張 PIV 影像之渦度圖
(ω 顏色為渦度強度值分佈)



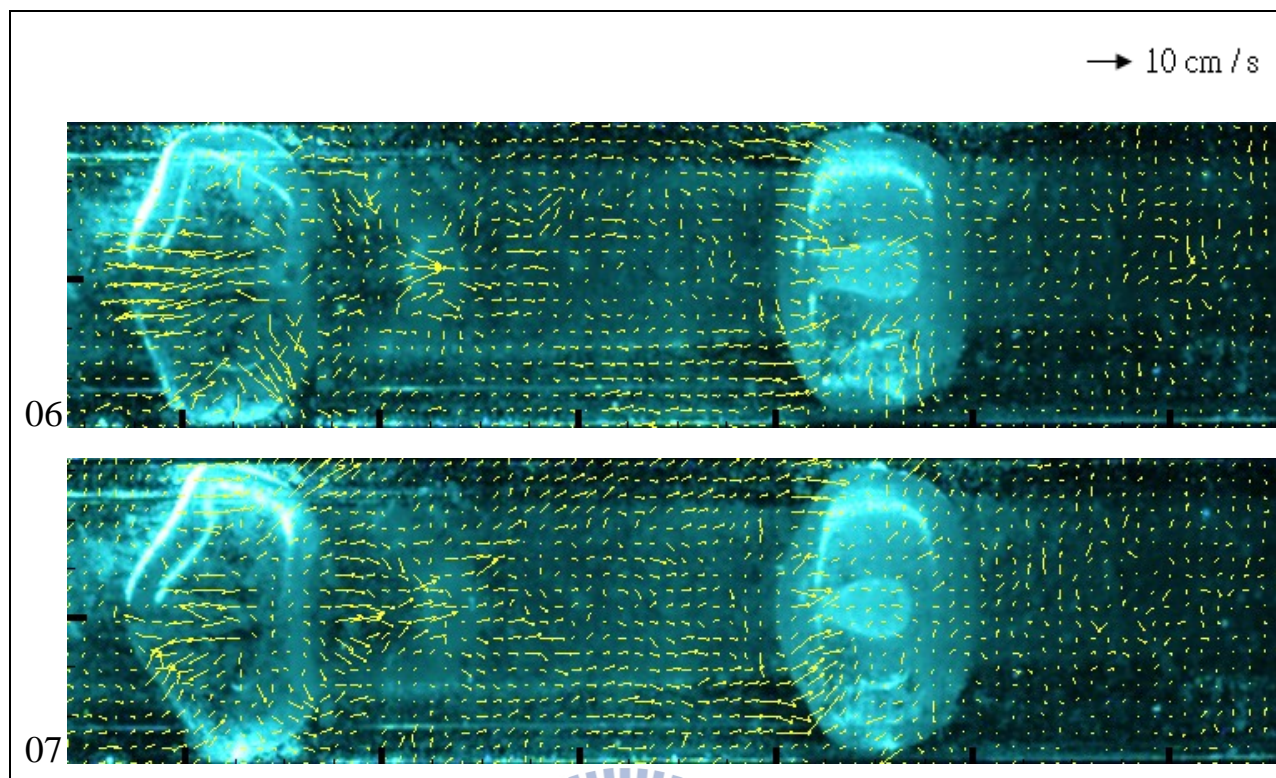


圖 4.58 距離參數 $\gamma \approx 5$ 左破右不破之速度流場；影像時間間距 $1/10000$ 秒；
影像大小為 $24.0 \text{ mm} \times 6.0 \text{ mm}$ ；氣泡半徑為 2.5 mm 。
(文中影像每張間隔 $1/1000$ 秒)

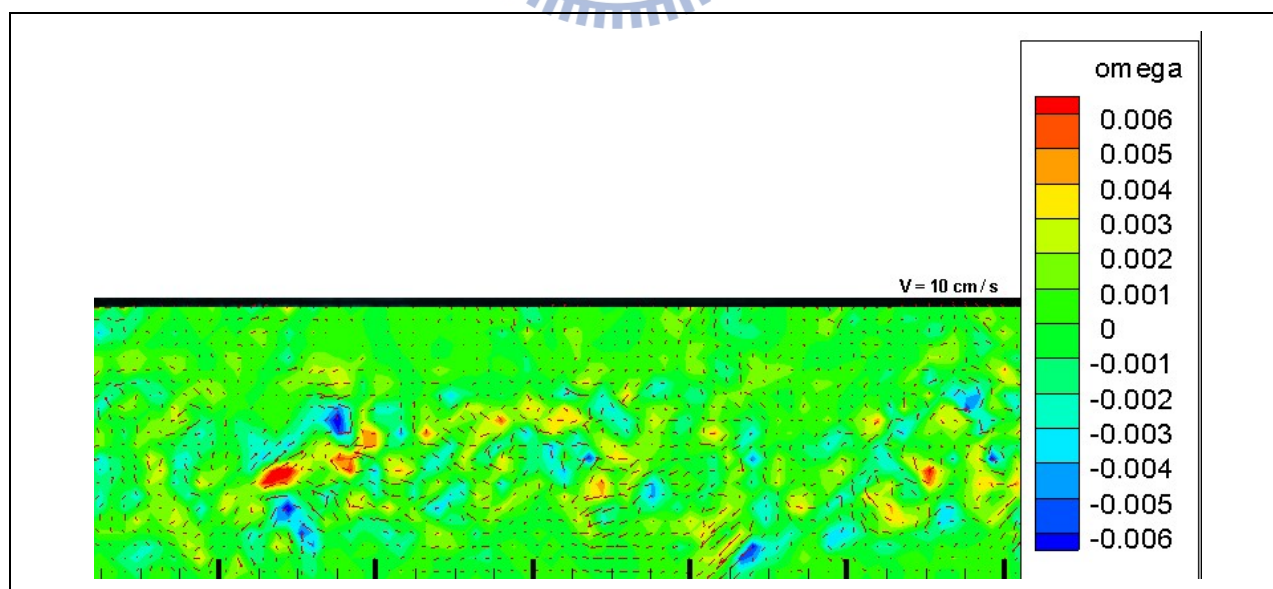
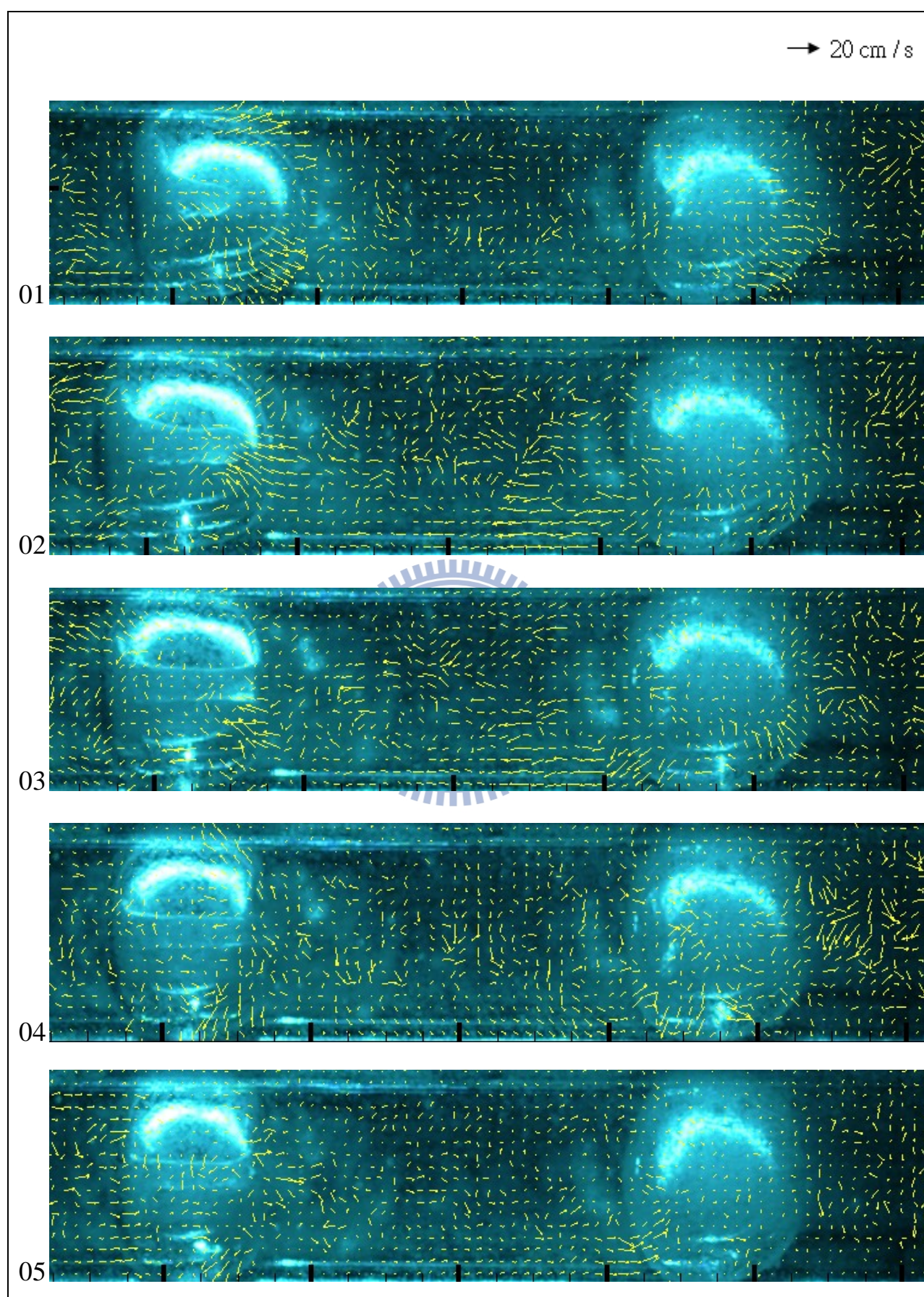


圖 4.59 為圖 4.58 第 07 張 PIV 影像之渦度圖
(omega 顏色為渦度強度值分佈)



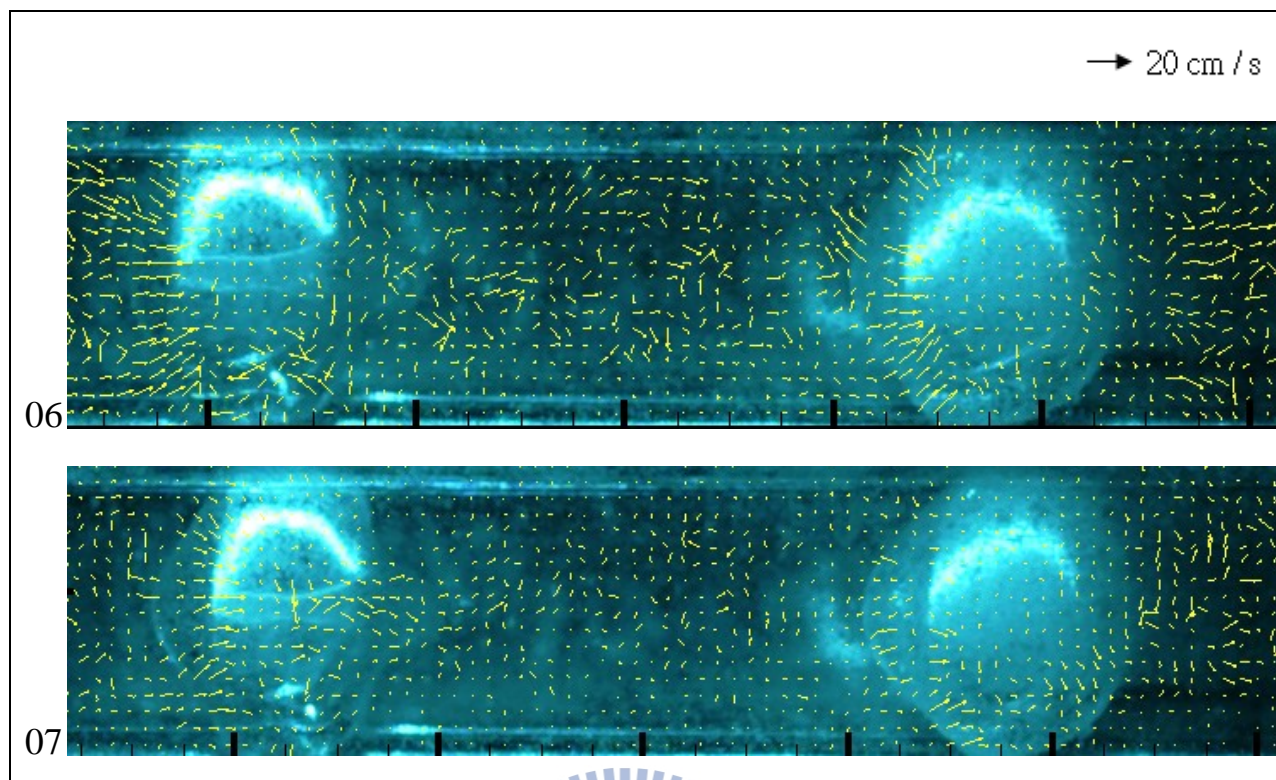


圖 4.60 距離參數 $\gamma \approx 5$ 兩顆皆不破之速度流場；影像時間間距 $1/10000$ 秒；
影像大小為 $24.0 \text{ mm} \times 6.0 \text{ mm}$ ；氣泡半徑為 2.5 mm 。
(文中影像每張間隔 $1/1000$ 秒)

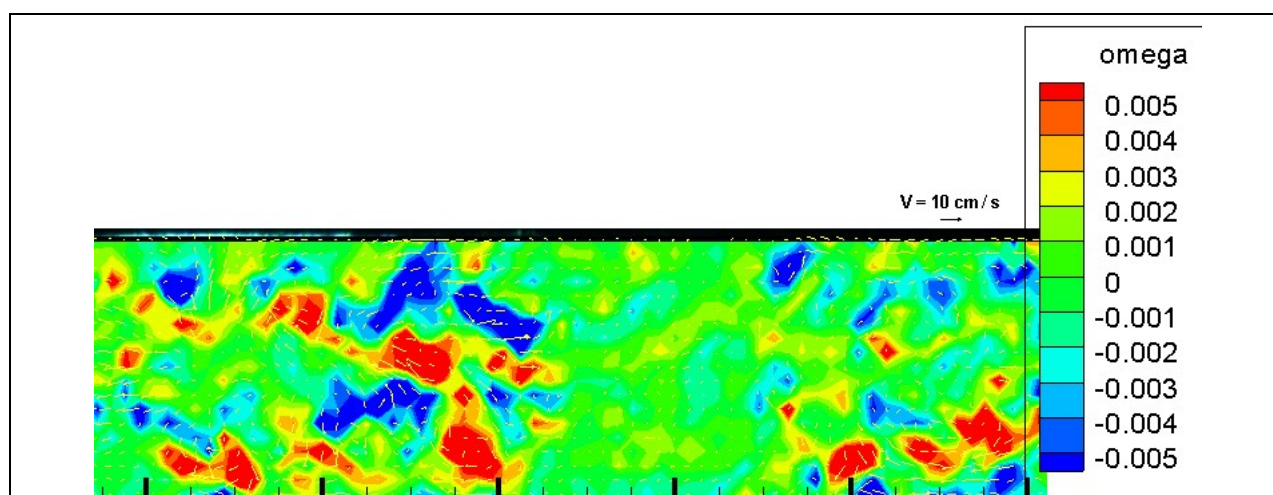
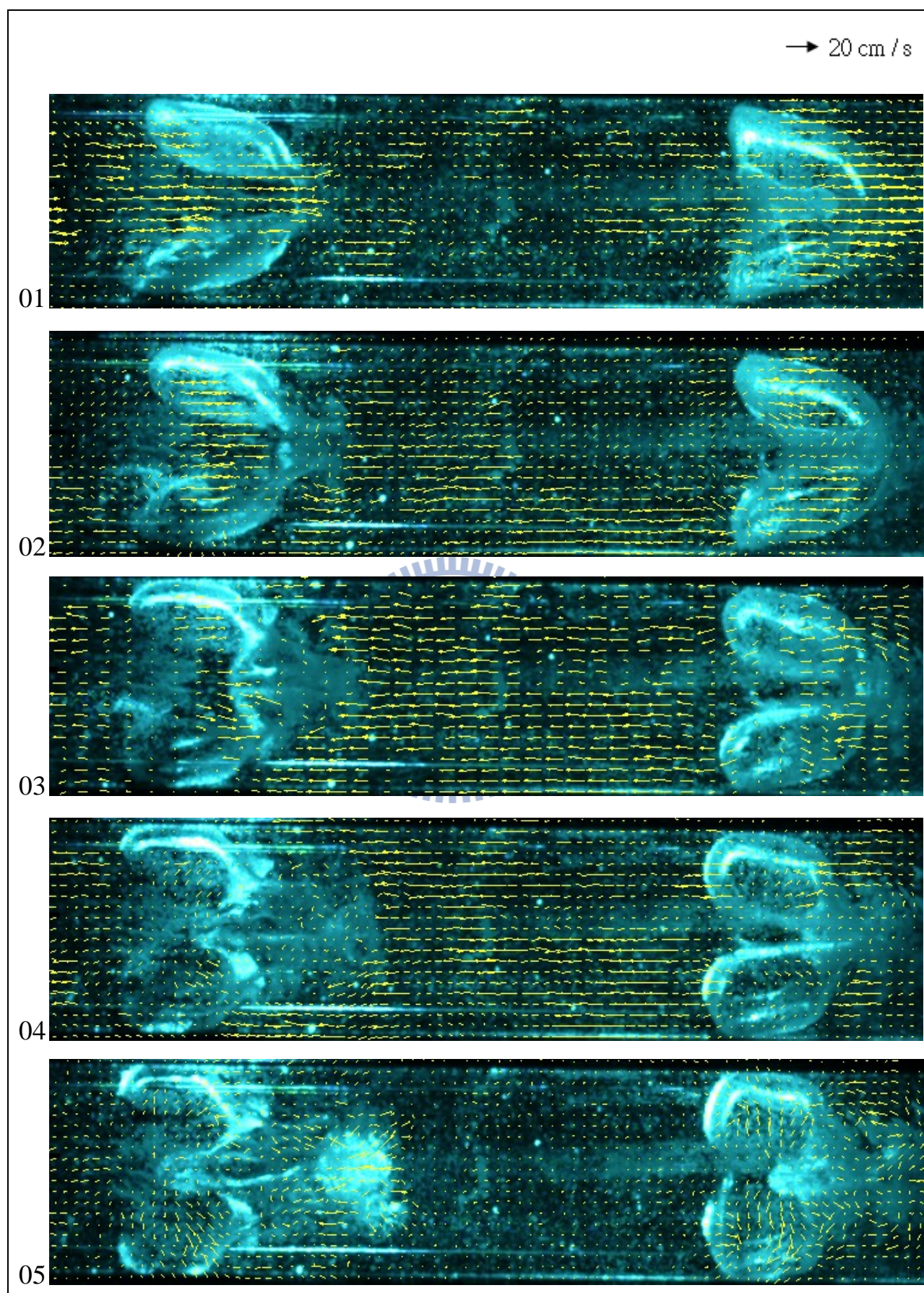


圖 4.61 為圖 4.60 第 05 張 PIV 影像之渦度圖
(omega 顏色為渦度強度值分佈)



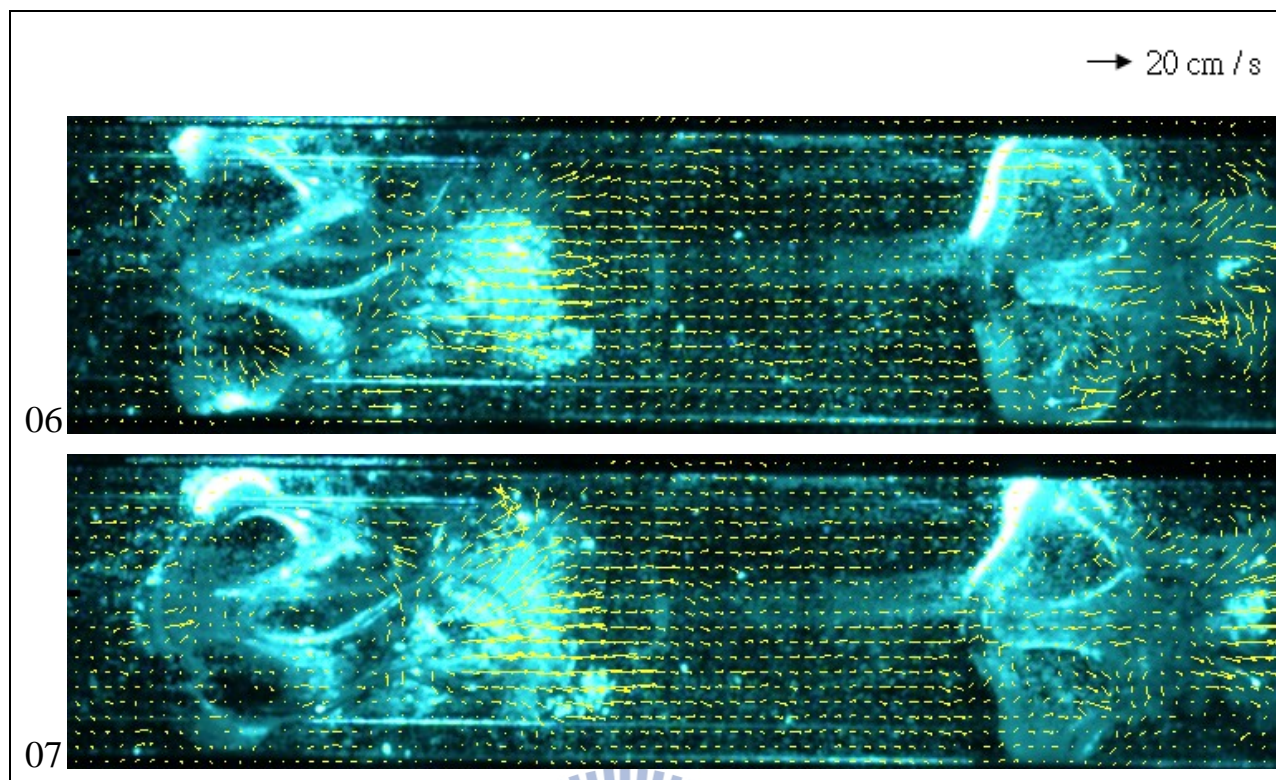


圖 4.62 距離參數 $\gamma \approx 6$ 兩顆皆破之速度流場；影像時間間距 $1 / 10000$ 秒；
影像大小為 $24.0 \text{ mm} \times 6.0 \text{ mm}$ ；氣泡半徑為 2.5 mm 。
(文中影像每張間隔 $1/1000$ 秒)

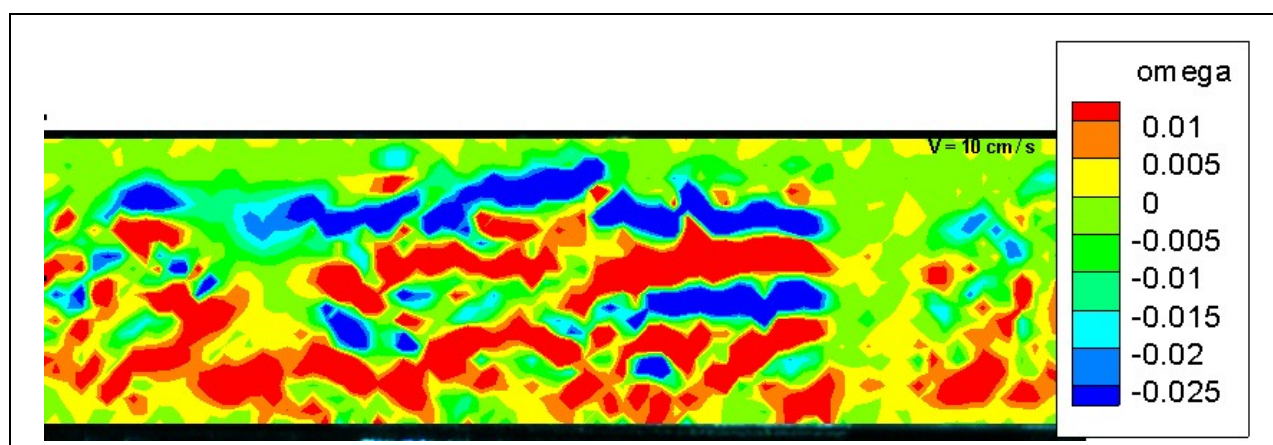
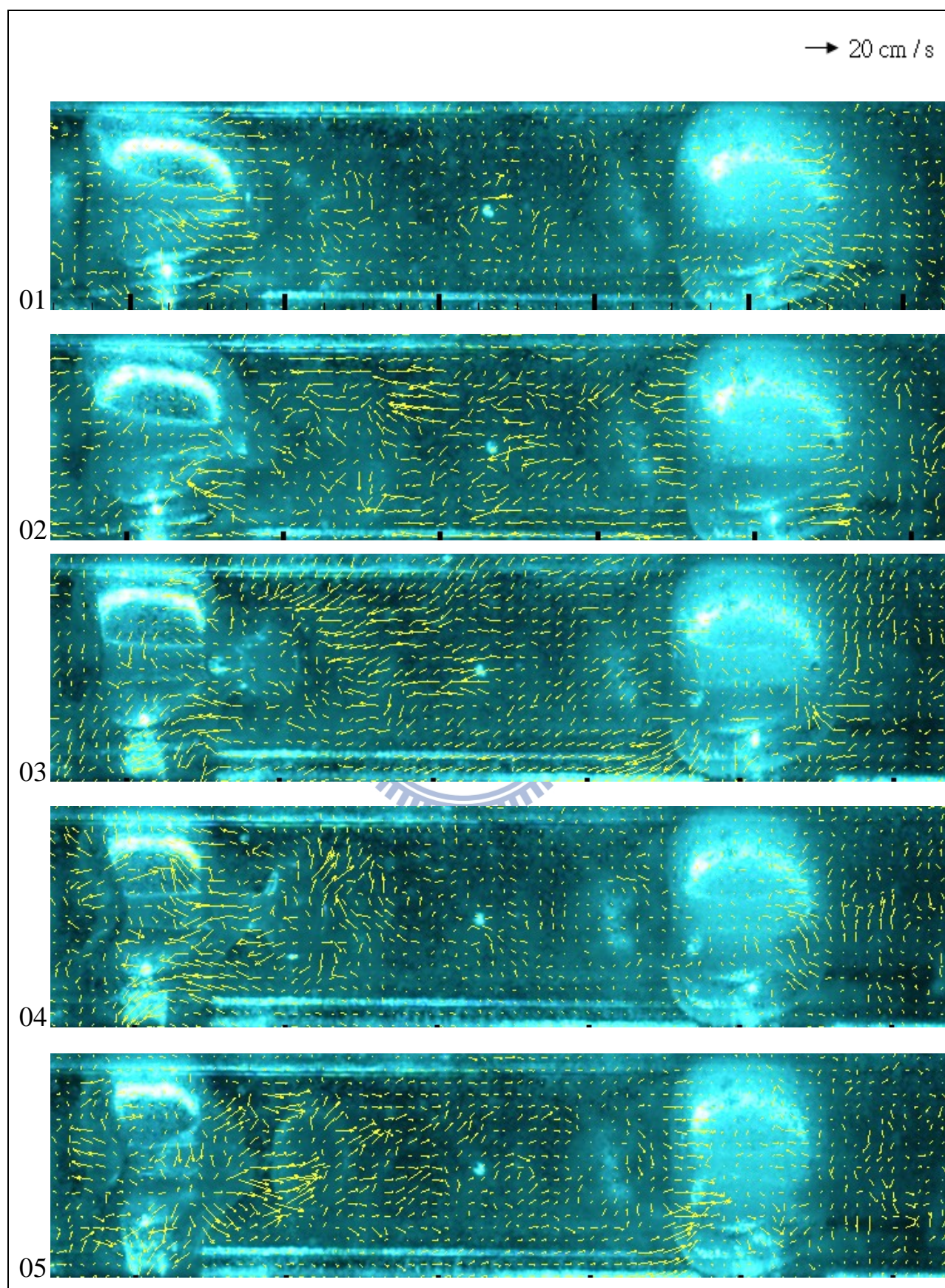


圖 4.63 為圖 4.62 第 06 張 PIV 影像之渦度圖
(omega 顏色為渦度強度值分佈)



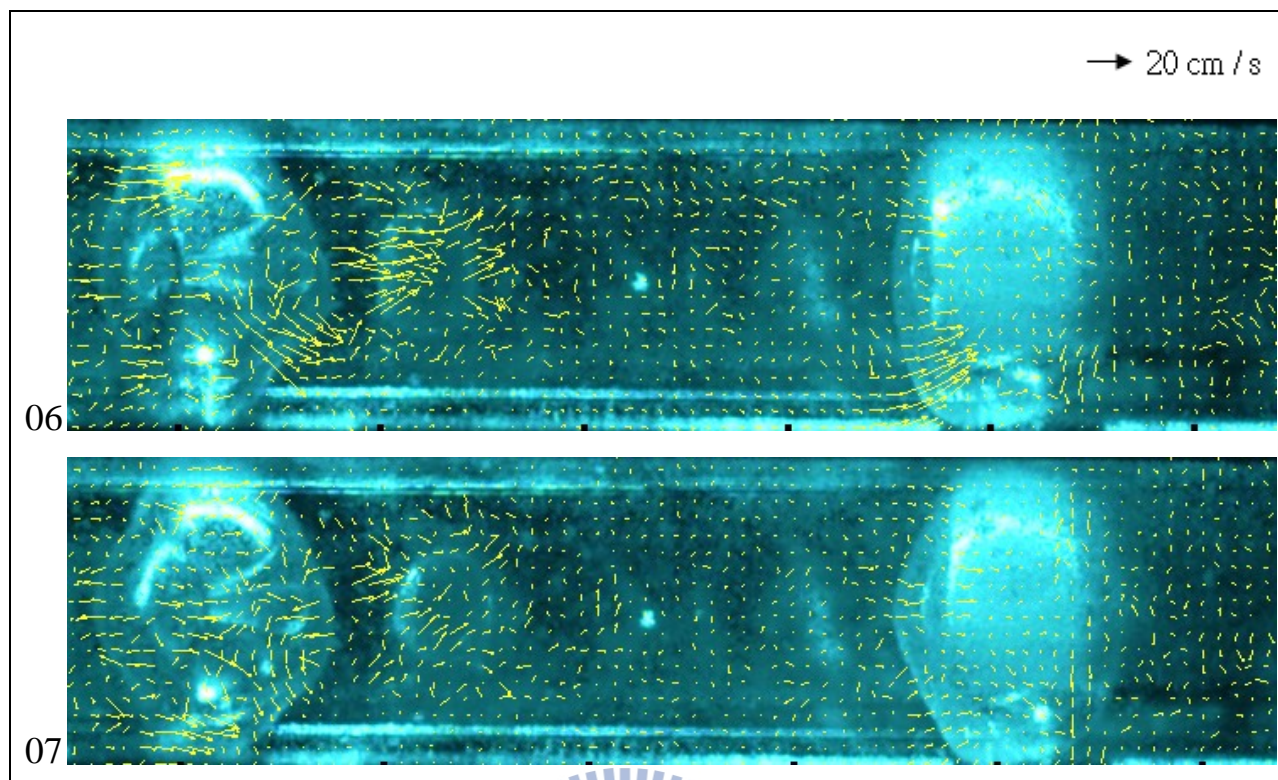


圖 4.64 距離參數 $\gamma \approx 6$ 左破右不破之速度流場；影像時間間距 $1/10000$ 秒；
影像大小為 $24.0 \text{ mm} \times 6.0 \text{ mm}$ ；氣泡半徑為 2.5 mm 。
(文中影像每張間隔 $1/1000$ 秒)

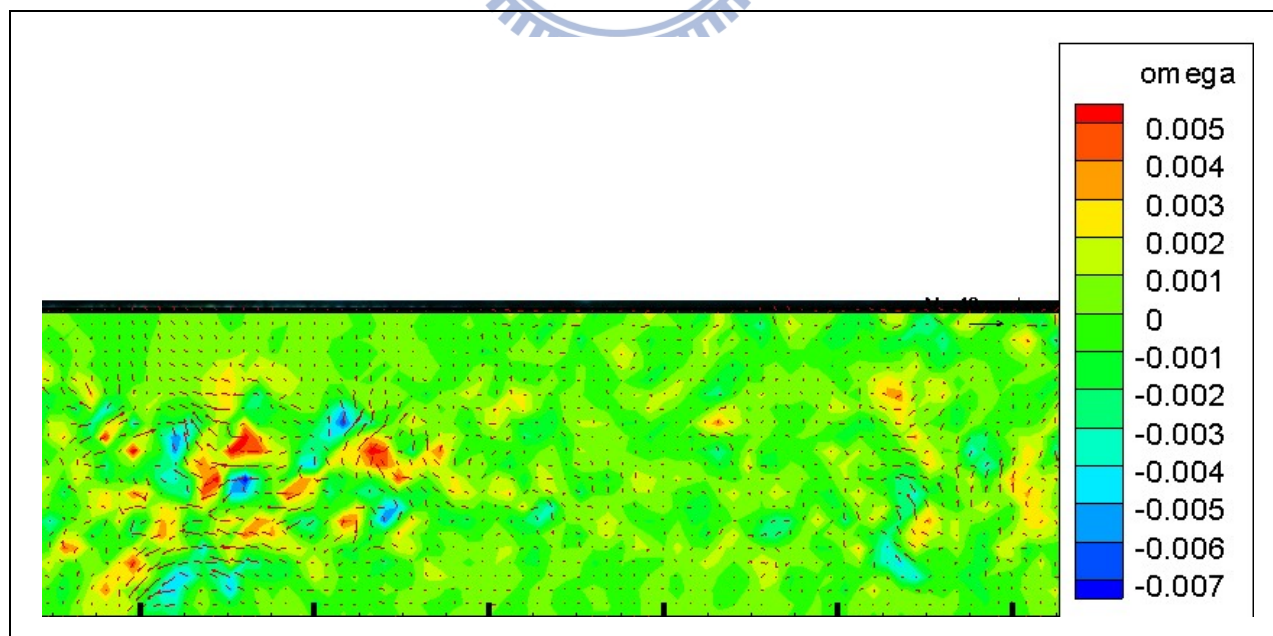
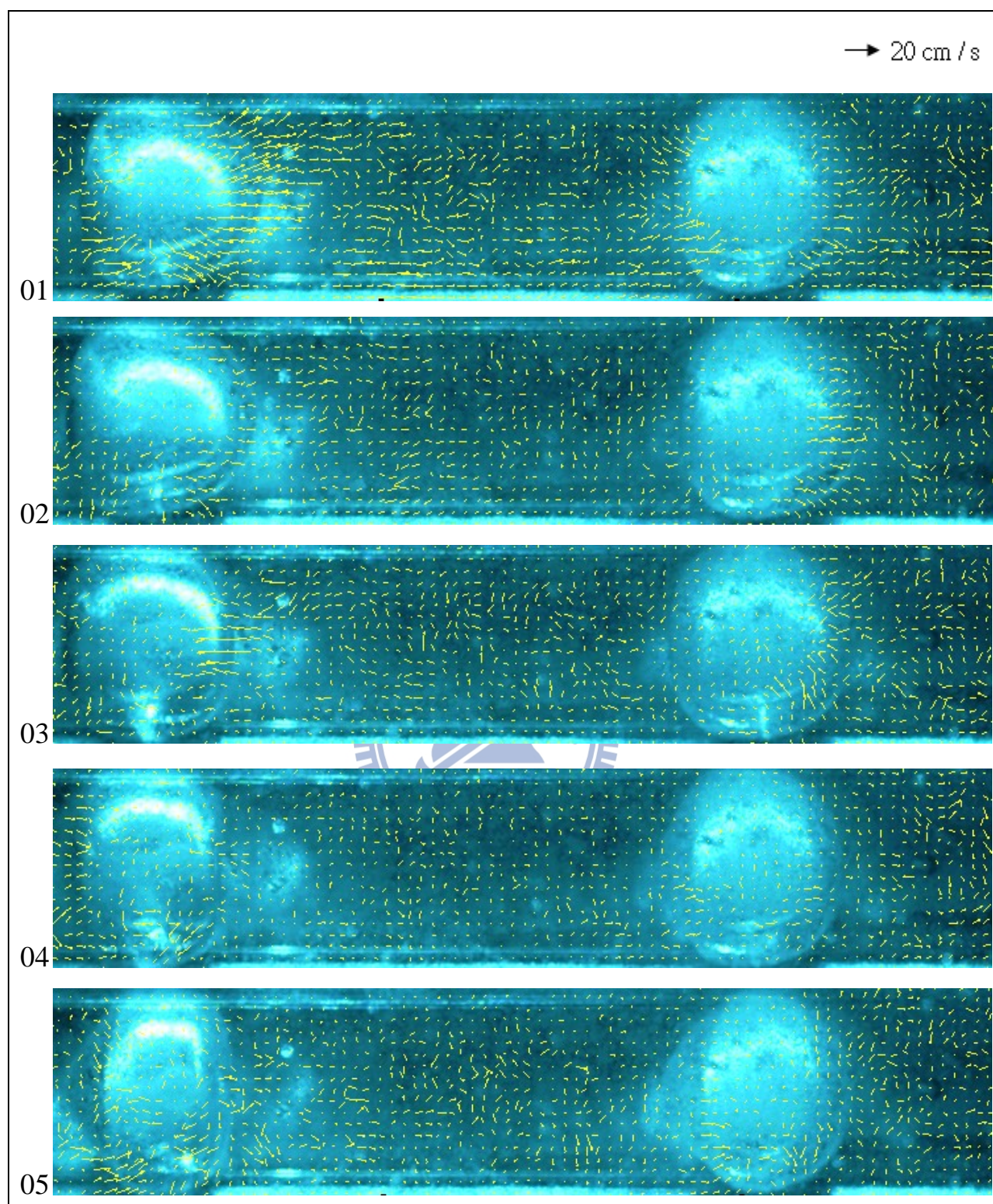


圖 4.65 為圖 4.64 第 07 張 PIV 影像之渦度圖
(ω 顏色為渦度強度值分佈)



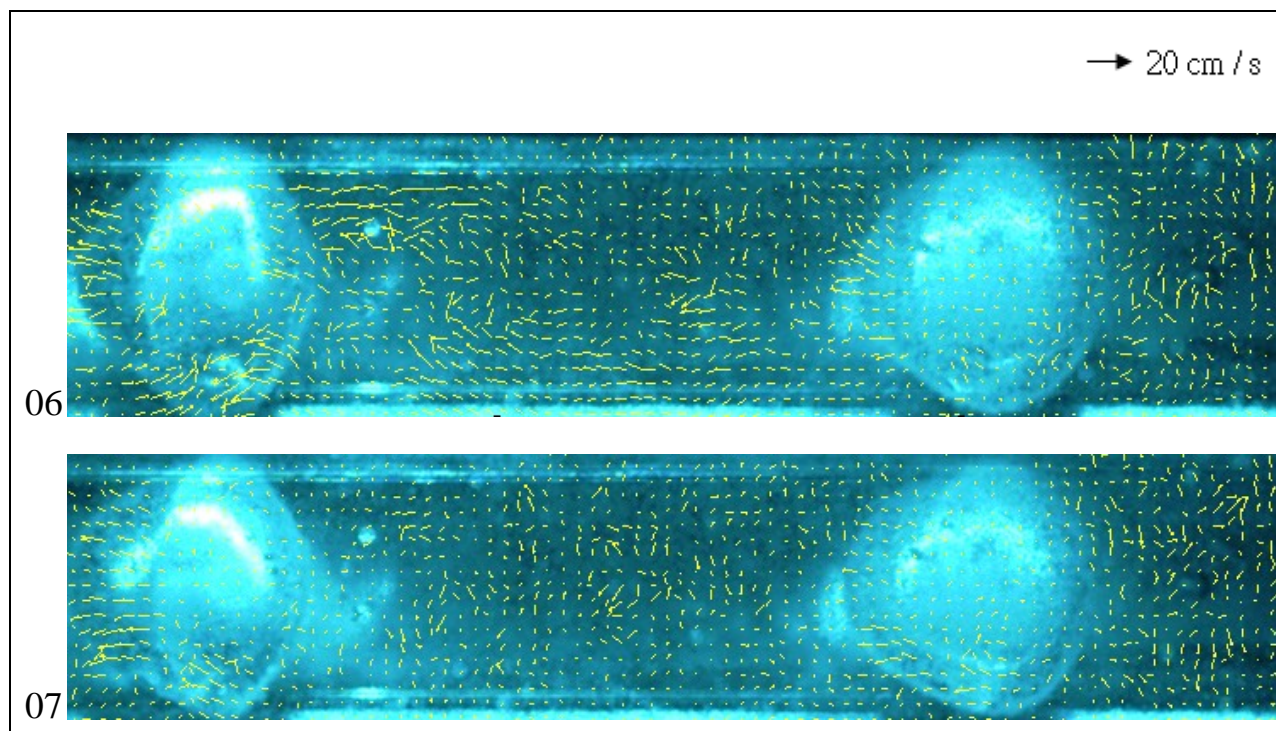


圖 4.66 距離參數 $\gamma \approx 6$ 兩顆皆不破之速度流場；影像時間間距 $1/10000$ 秒；
影像大小為 $24.0 \text{ mm} \times 6.0 \text{ mm}$ ；氣泡半徑為 2.5 mm 。
(文中影像每張間隔 $1/1000$ 秒)

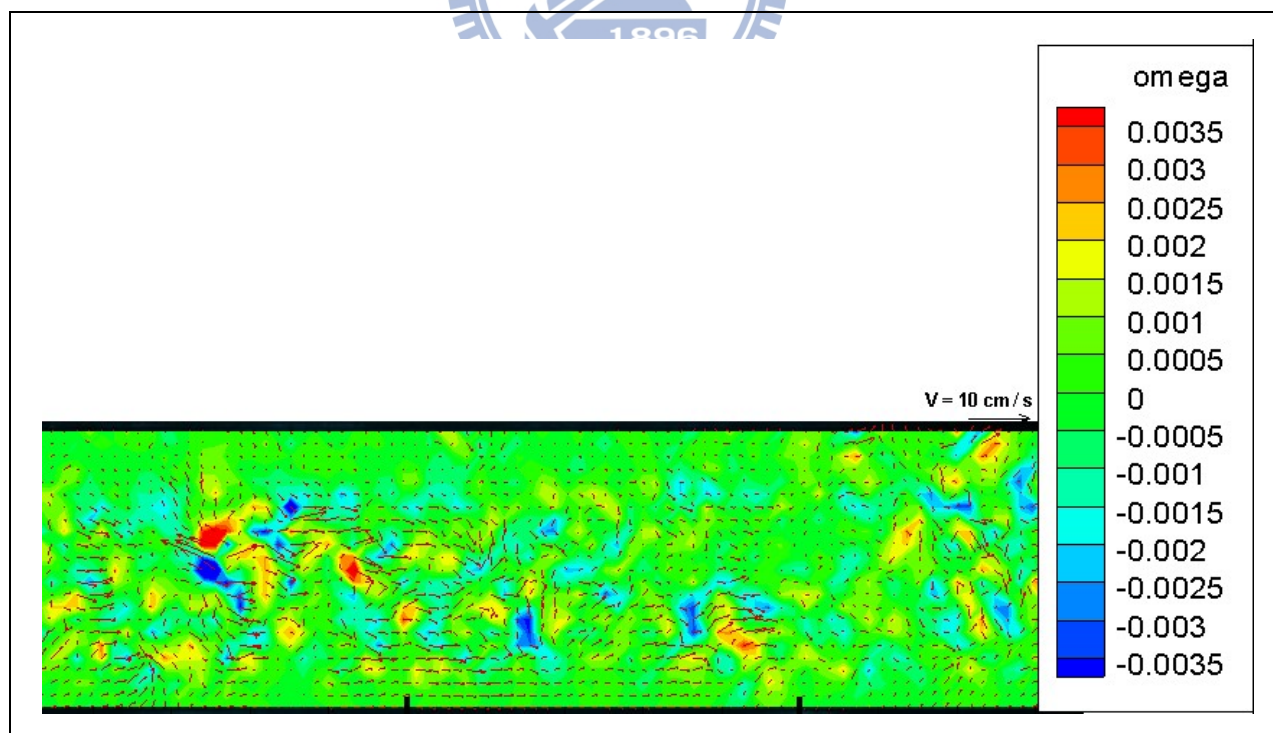
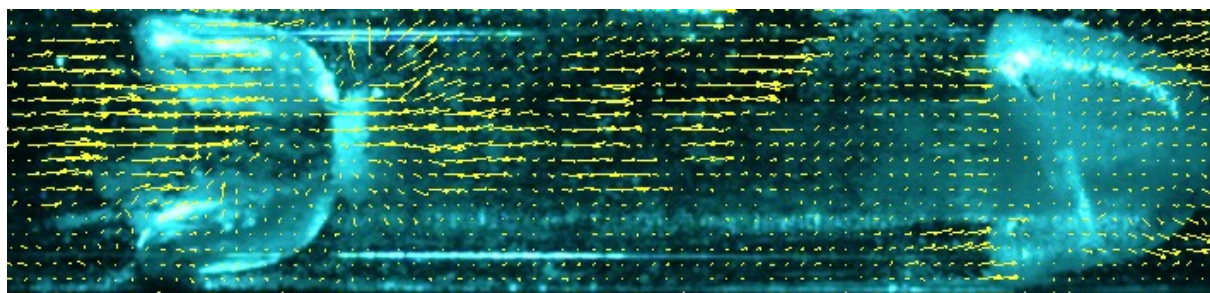


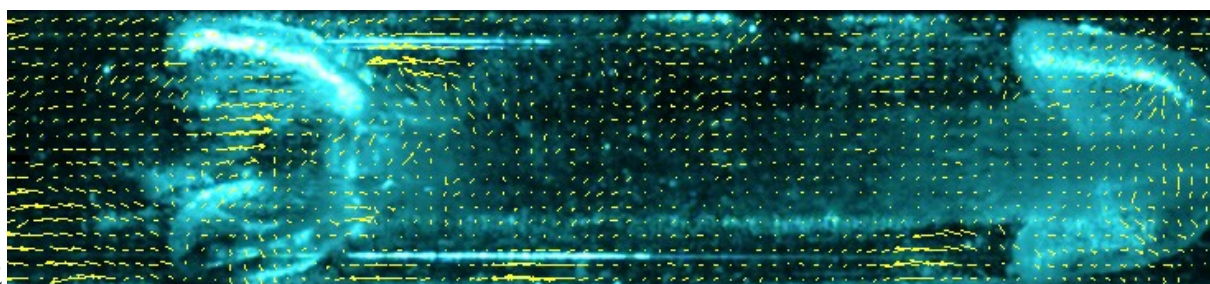
圖 4.67 為圖 4.66 第 07 張 PIV 影像之渦度圖
(omega 顏色為渦度強度值分佈)

→ 10 cm / s

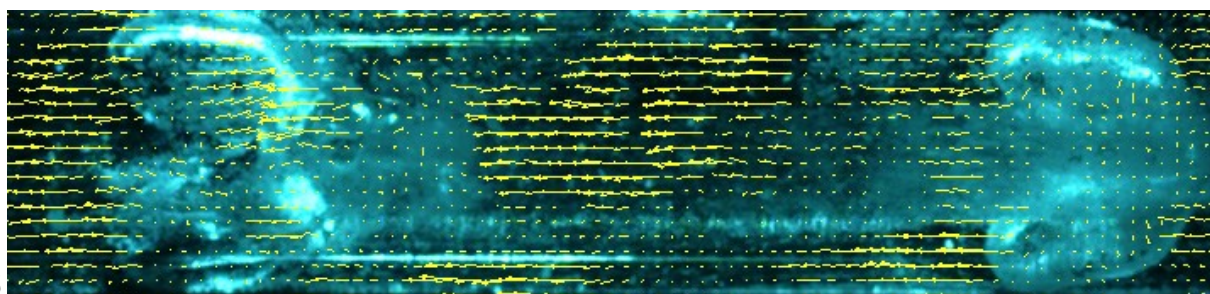
01



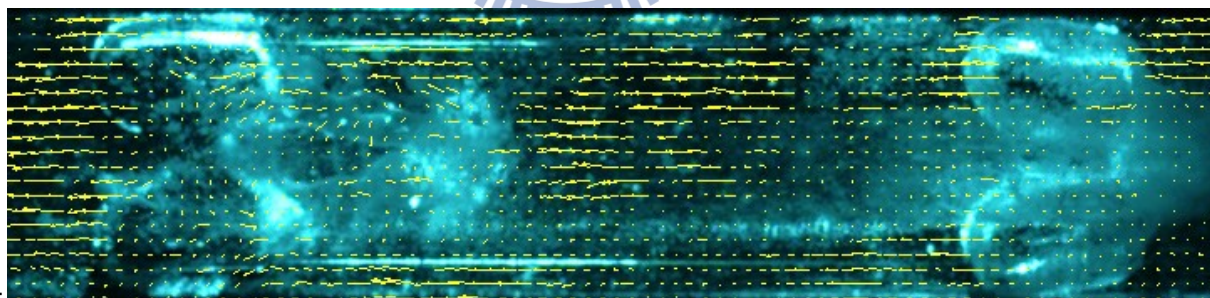
02



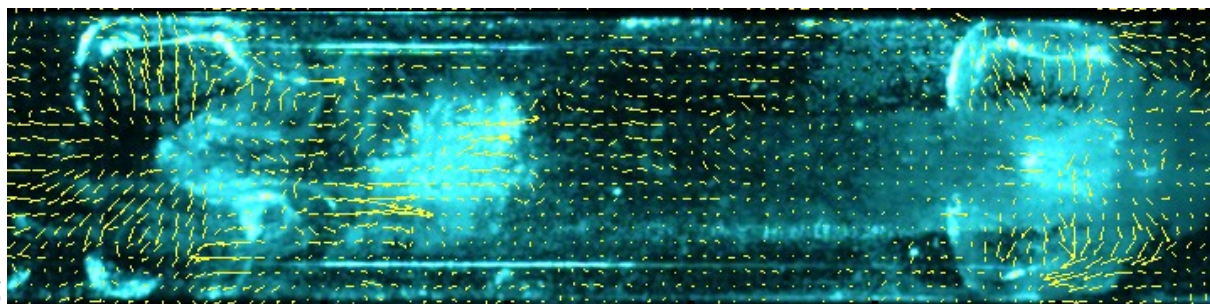
03



04



05



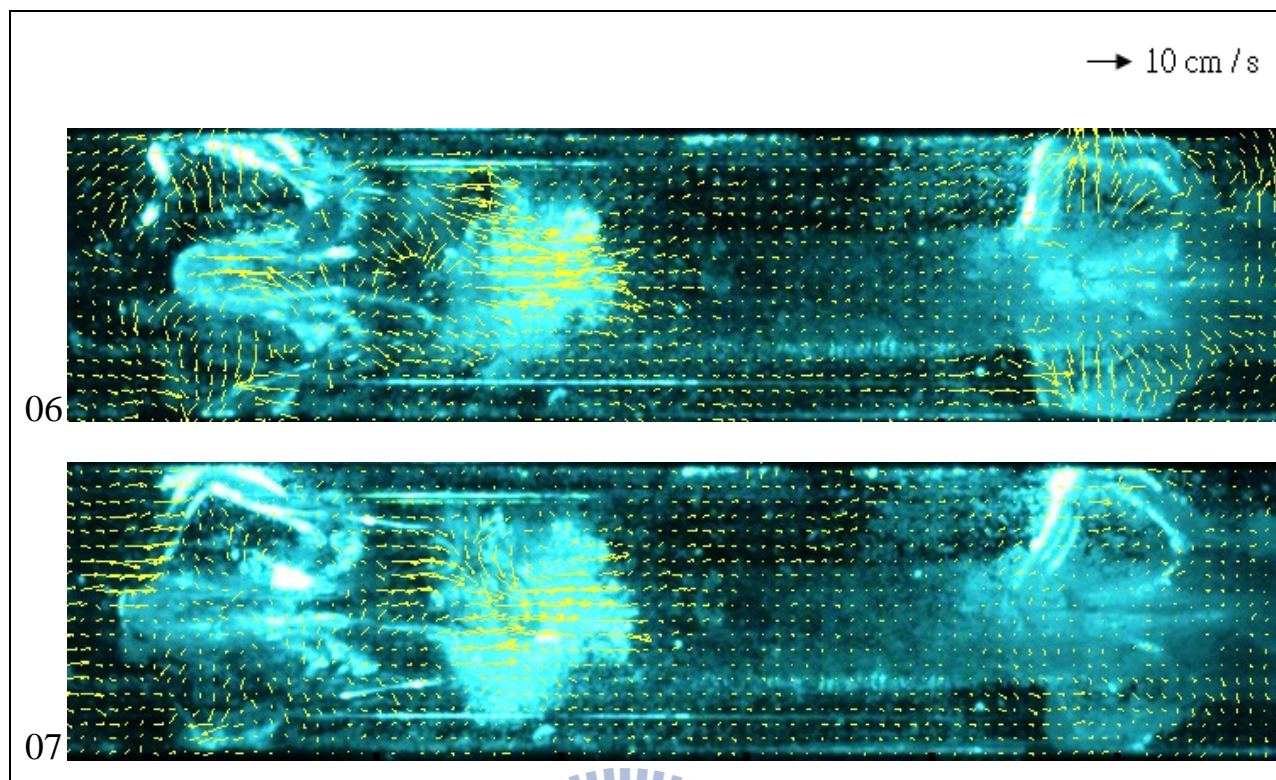


圖 4.68 距離參數 $\gamma > 6$ 兩顆皆破之速度流場；影像時間間距 $1/10000$ 秒；
影像大小為 $24.0 \text{ mm} \times 6.0 \text{ mm}$ ；氣泡半徑為 2.5 mm 。
(文中影像每張間隔 $1/1000$ 秒)

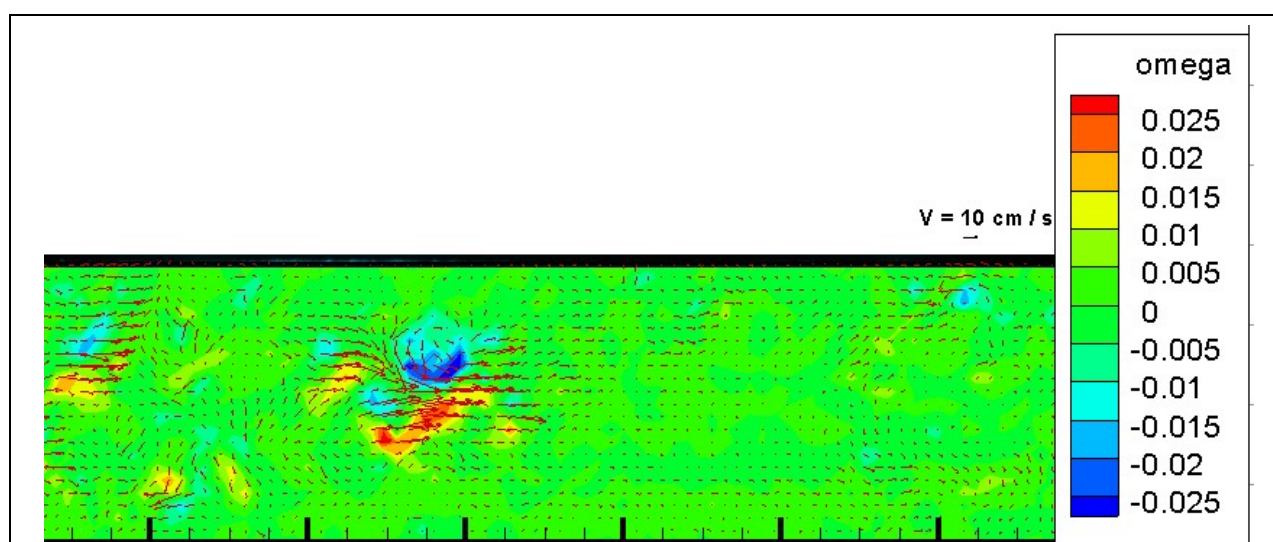
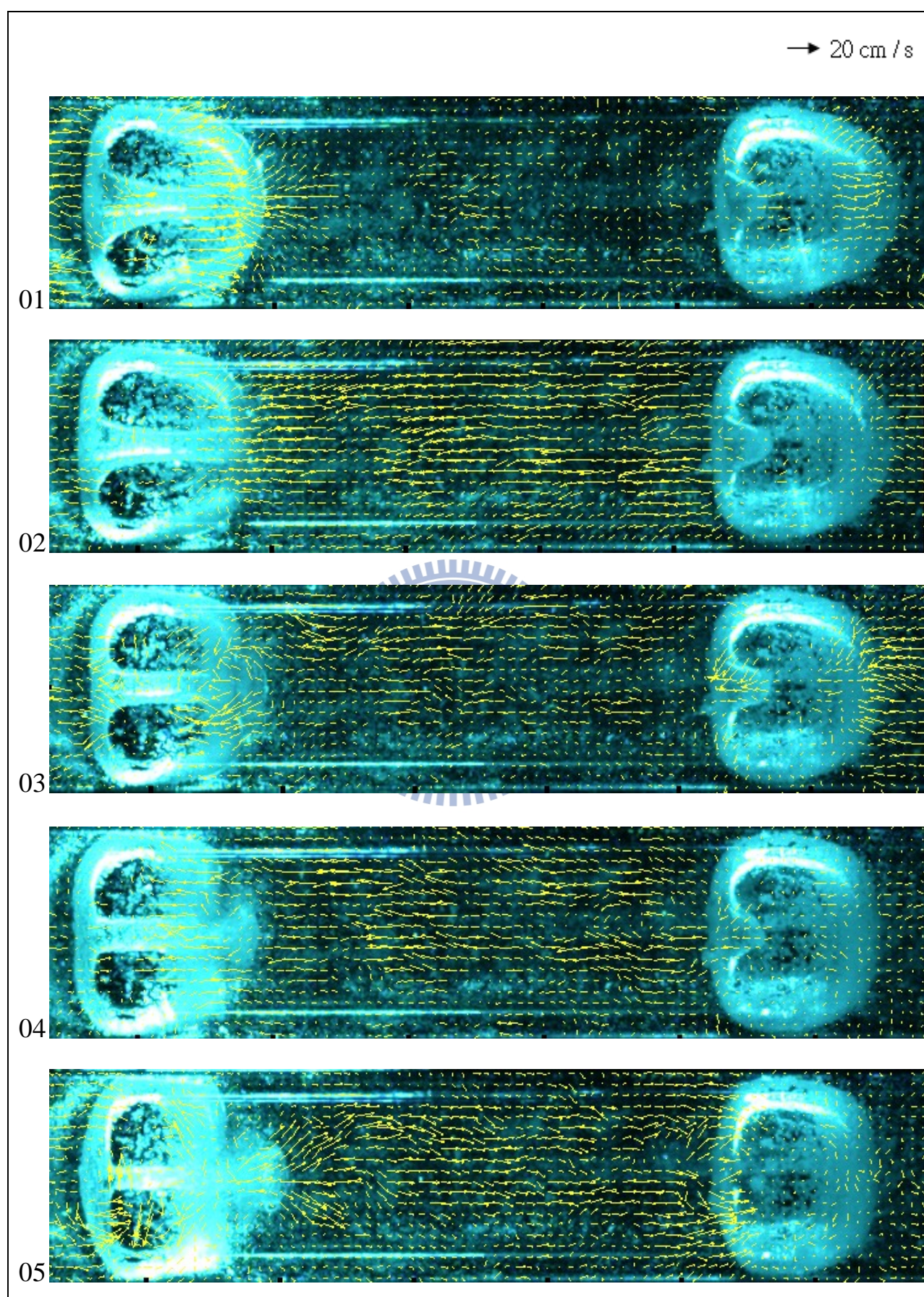


圖 4.69 為圖 4.68 第 07 張 PIV 影像之渦度圖
(ω 顏色為渦度強度值分佈)



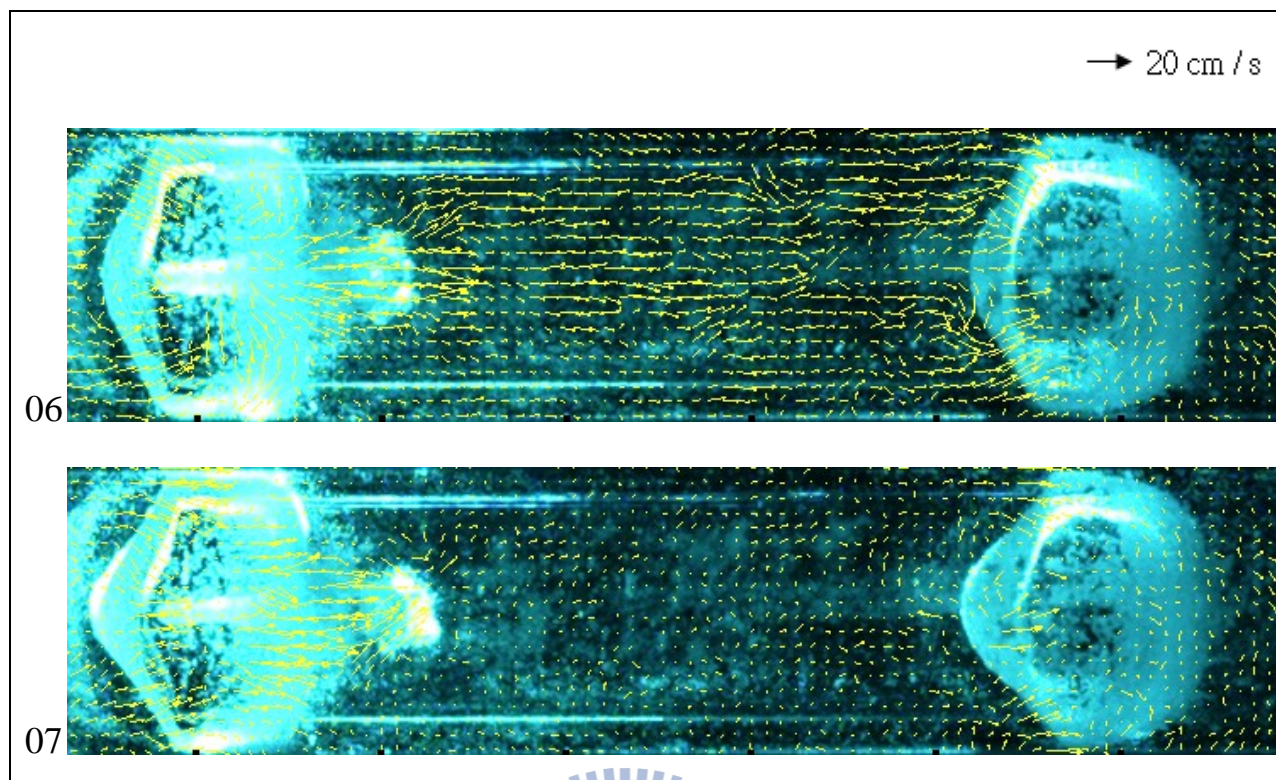


圖 4.70 距離參數 $\gamma > 6$ 左破右不破之速度流場；影像時間間距 1 / 10000 秒；影像大小為 24.0 mm \times 6.0mm；氣泡半徑為 2.5 mm。
(文中影像每張間隔 1/1000 秒)

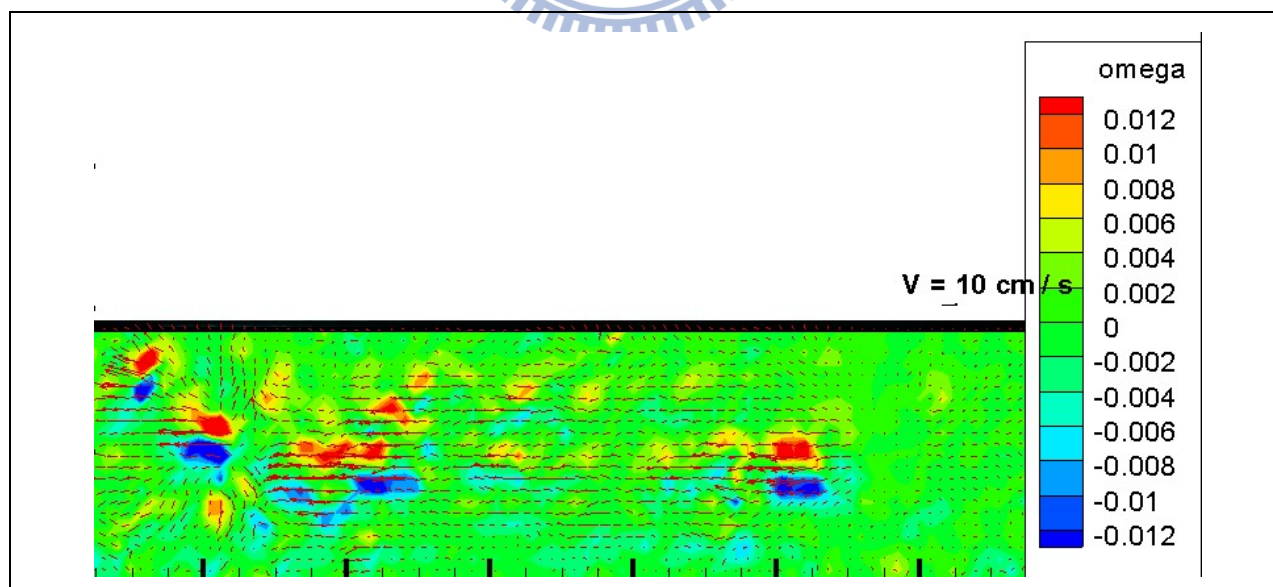
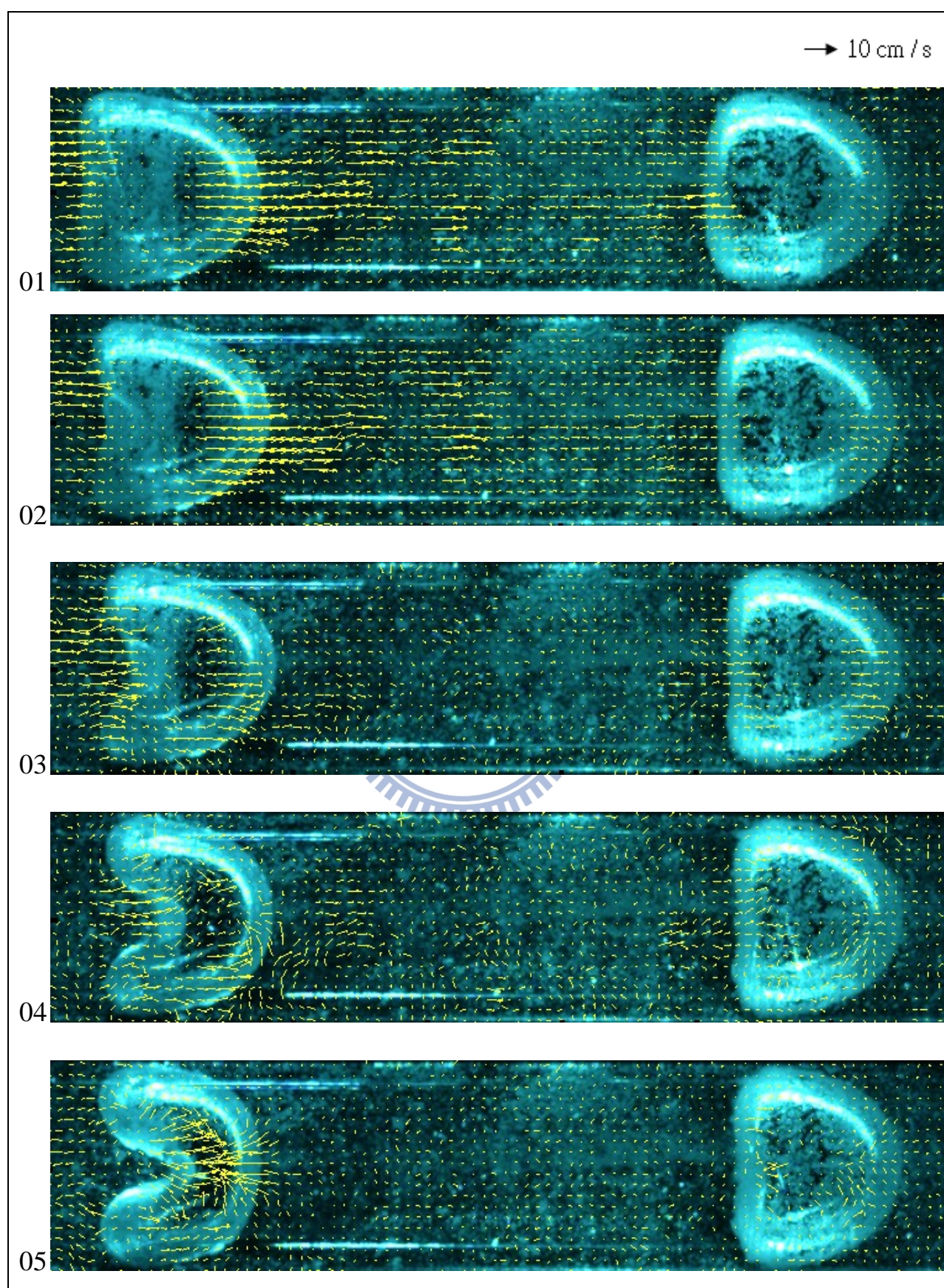


圖 4.71 為圖 4.70 第 07 張 PIV 影像之渦度圖
(omega 顏色為渦度強度值分佈)



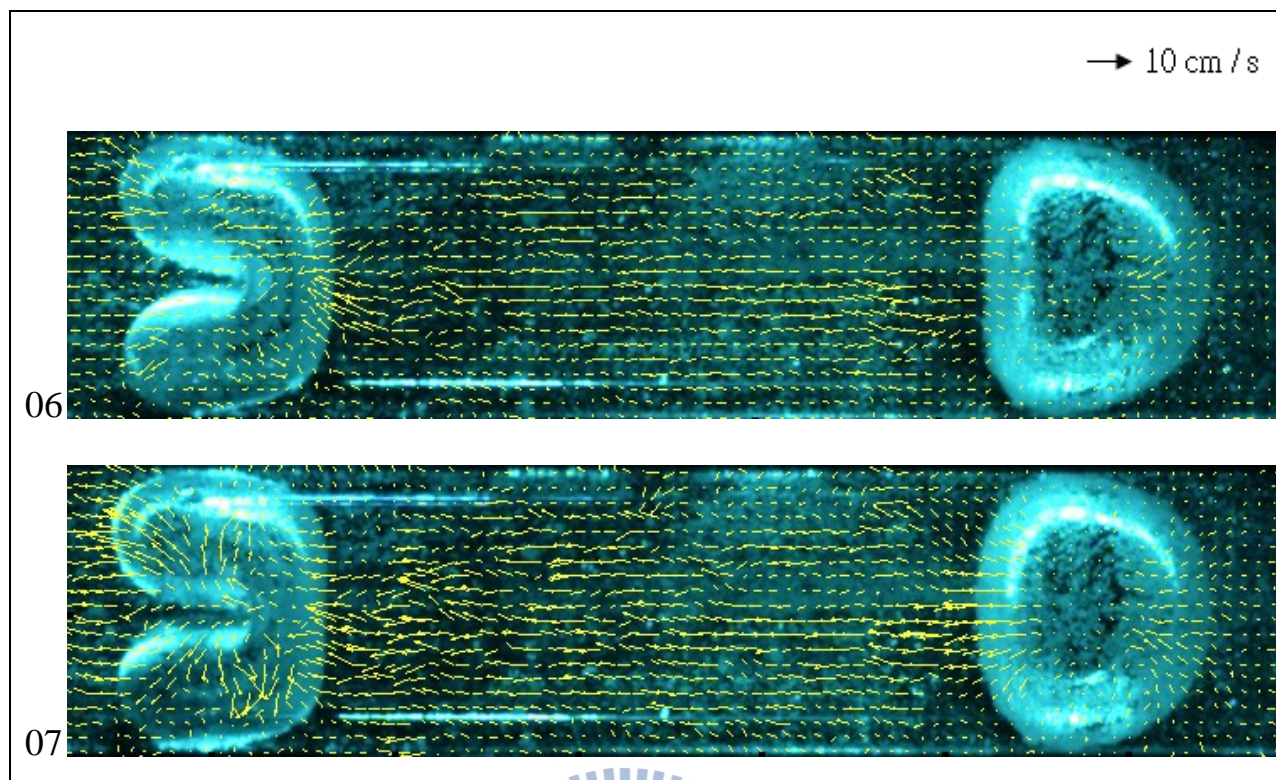


圖 4.72 距離參數 $\gamma > 6$ 兩顆皆不破之速度流場；影像時間間距 $1 / 10000$ 秒；影像大小為 $24.0 \text{ mm} \times 6.0 \text{ mm}$ ；氣泡半徑為 2.5 mm 。
(文中影像每張間隔 $1/1000$ 秒)

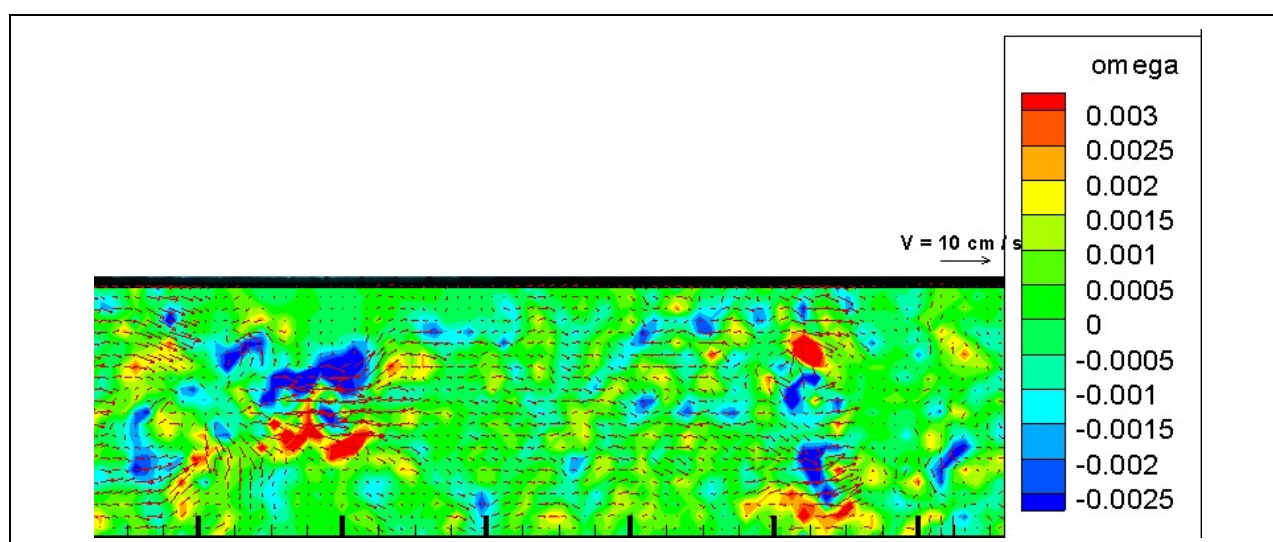


圖 4.73 為圖 4.72 第 01 張 PIV 影像之渦度圖
(omega 顏色為渦度強度值分佈)

$\gamma \approx 2$ (兩顆皆破)

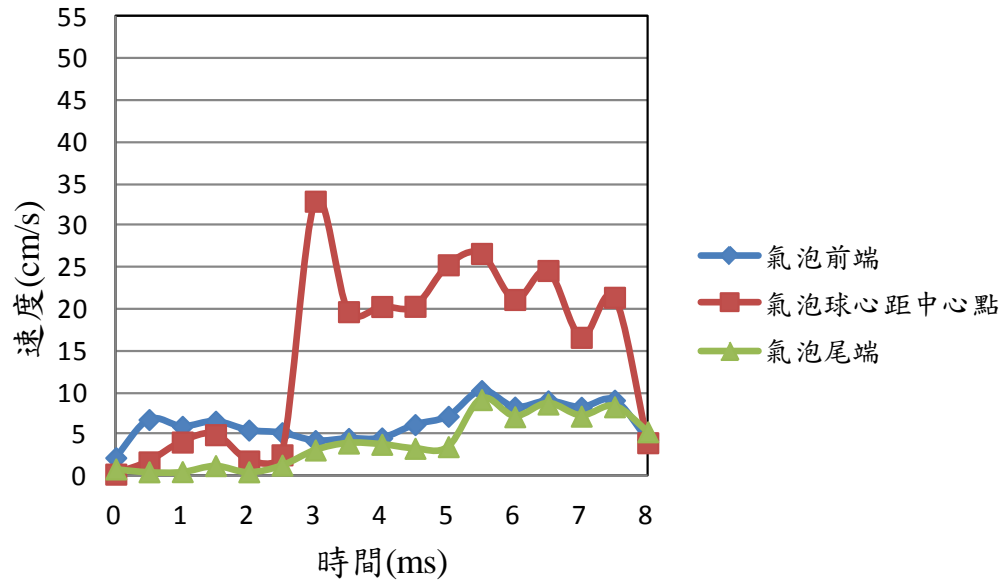


圖 4.74 距離參數 $\gamma \approx 2$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆破之速度變化歷線

$\gamma \approx 2$ (左破右不破)

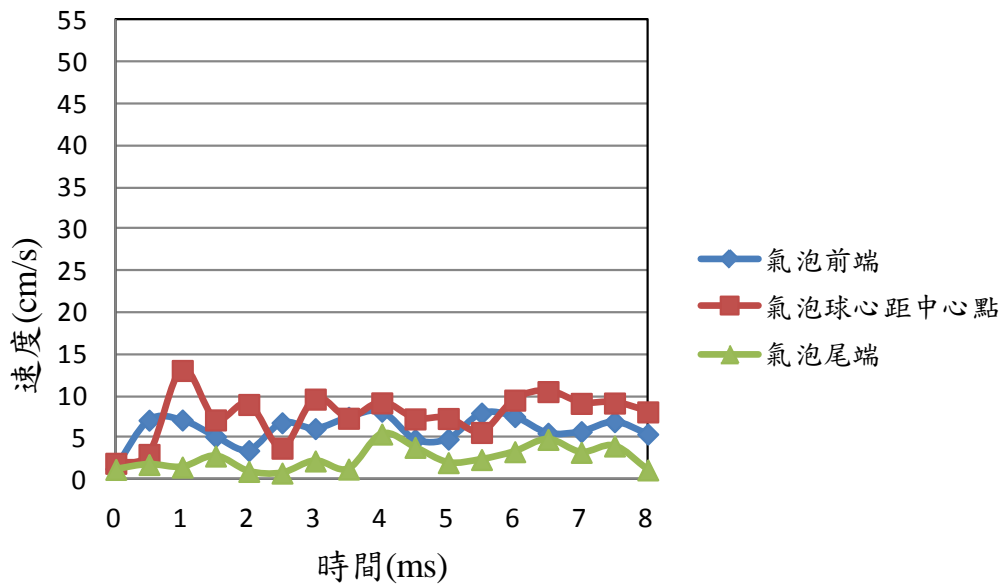


圖 4.75 距離參數 $\gamma \approx 2$ 之雙穴蝕氣泡左破右不破之速度變化歷線

$\gamma \approx 2$ (兩顆皆不破)

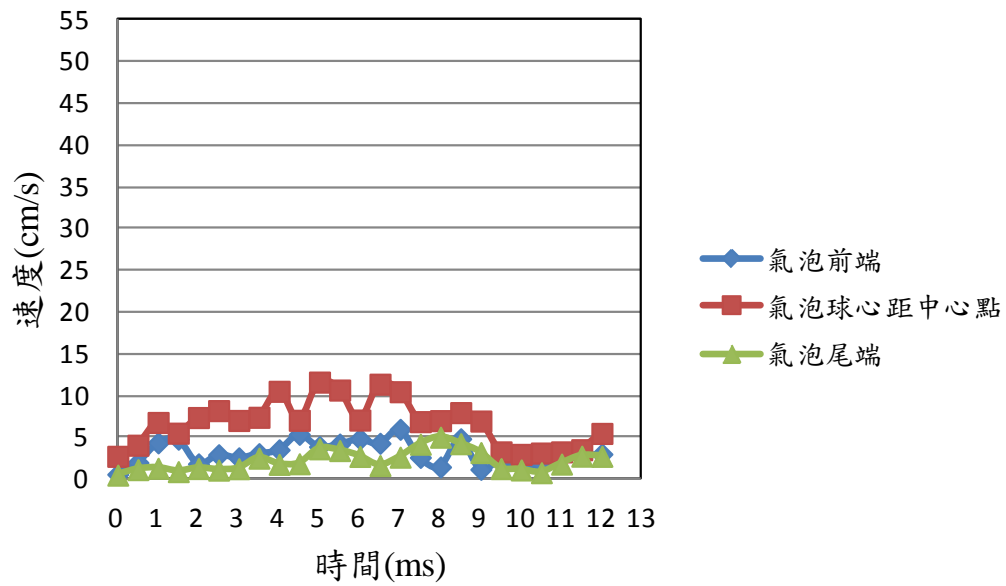


圖 4.76 距離參數 $\gamma \approx 2$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆不破之速度變化歷線



$\gamma \approx 3$ (兩顆皆破)

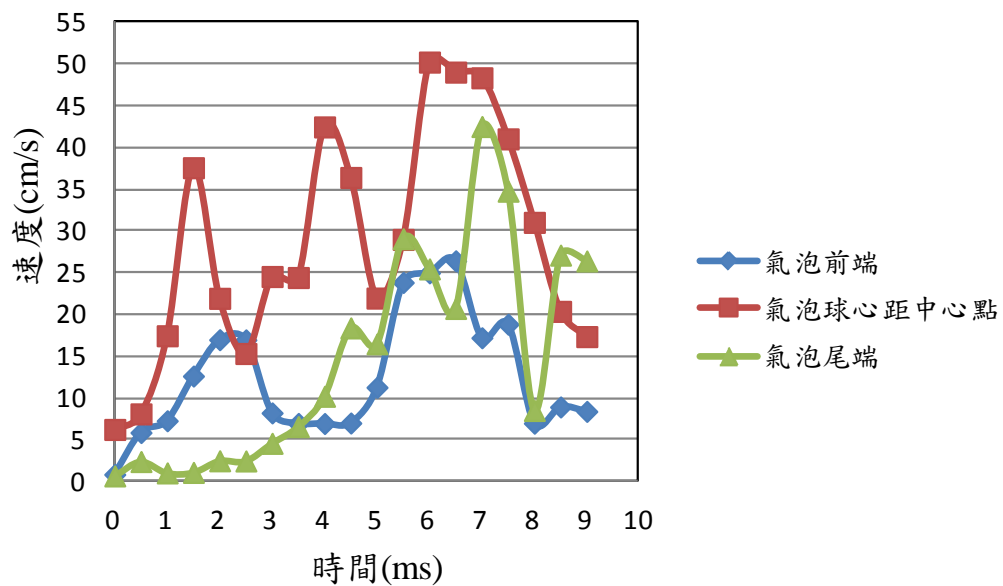


圖 4.77 距離參數 $\gamma \approx 3$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆破之速度變化歷線

$\gamma \approx 3$ (左破右不破)

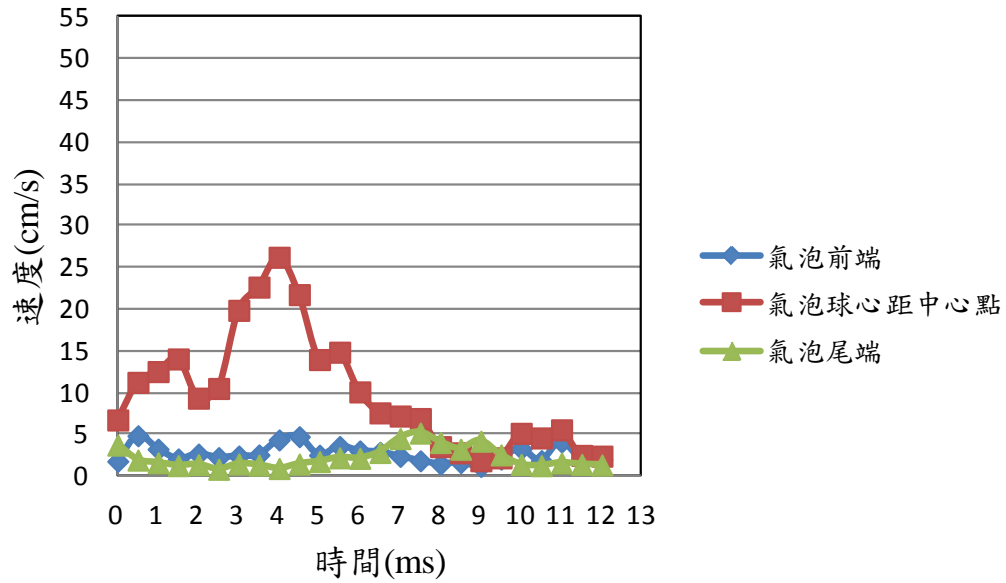


圖 4.78 距離參數 $\gamma \approx 3$ 之雙穴蝕氣泡左破右不破之速度變化歷線

$\gamma \approx 3$ (兩顆皆不破)

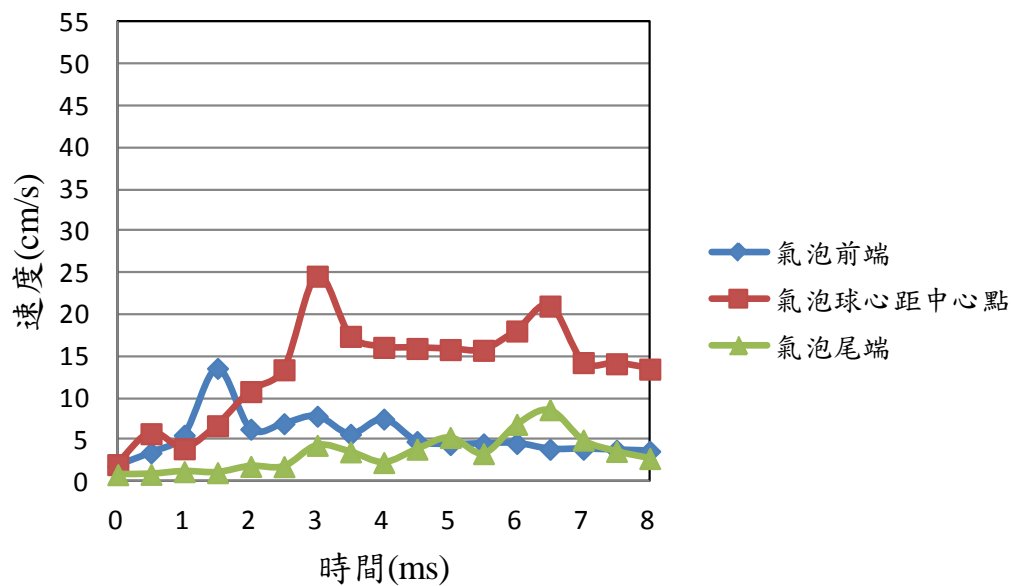


圖 4.79 距離參數 $\gamma \approx 3$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆不破之速度變化歷線

$\gamma \approx 4$ (兩顆皆破)

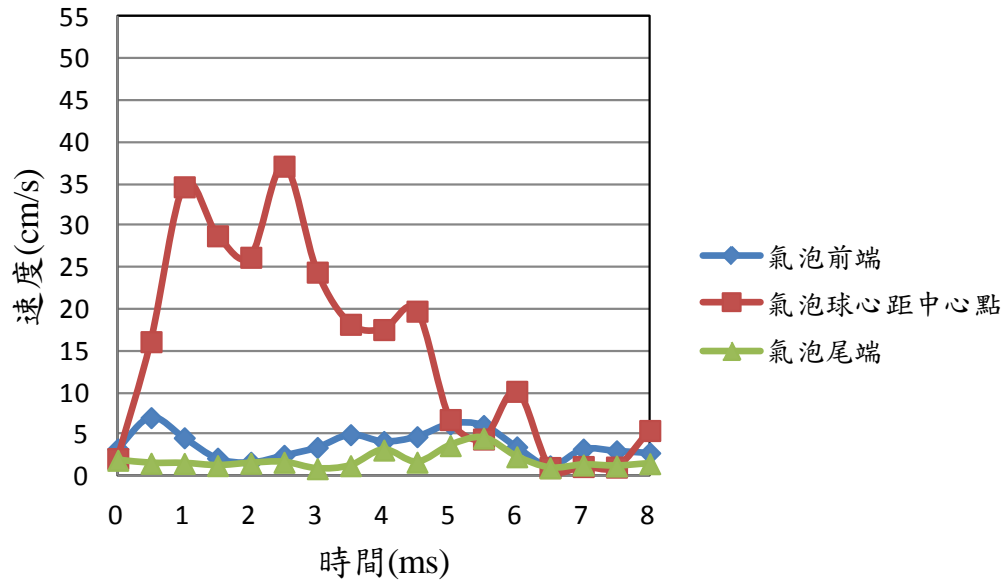


圖 4.80 距離參數 $\gamma \approx 4$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆破之速度變化歷線

$\gamma \approx 4$ (左破右不破)

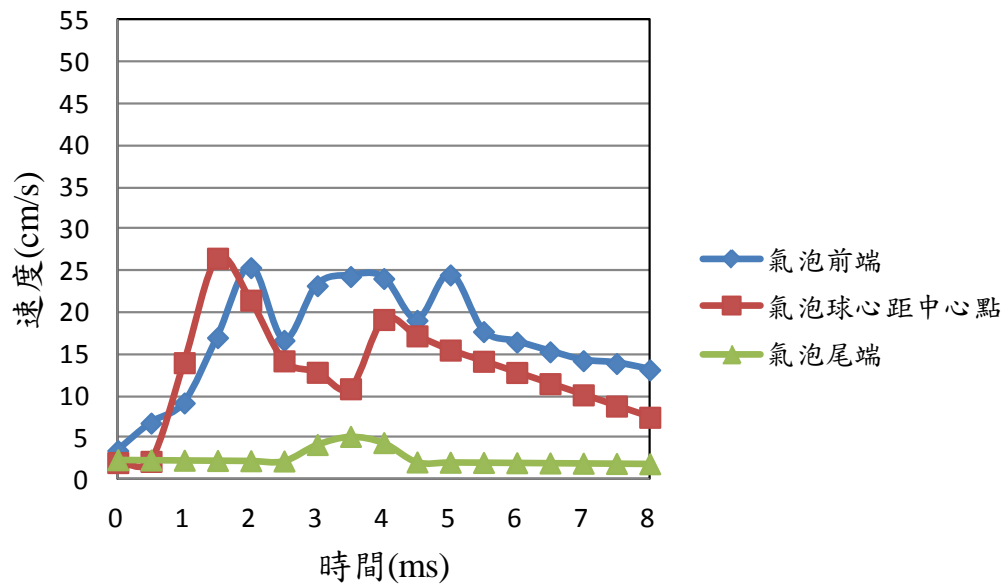


圖 4.81 距離參數 $\gamma \approx 4$ 之雙穴蝕氣泡左破右不破之速度變化歷線

$\gamma \approx 4$ (兩顆皆不破)

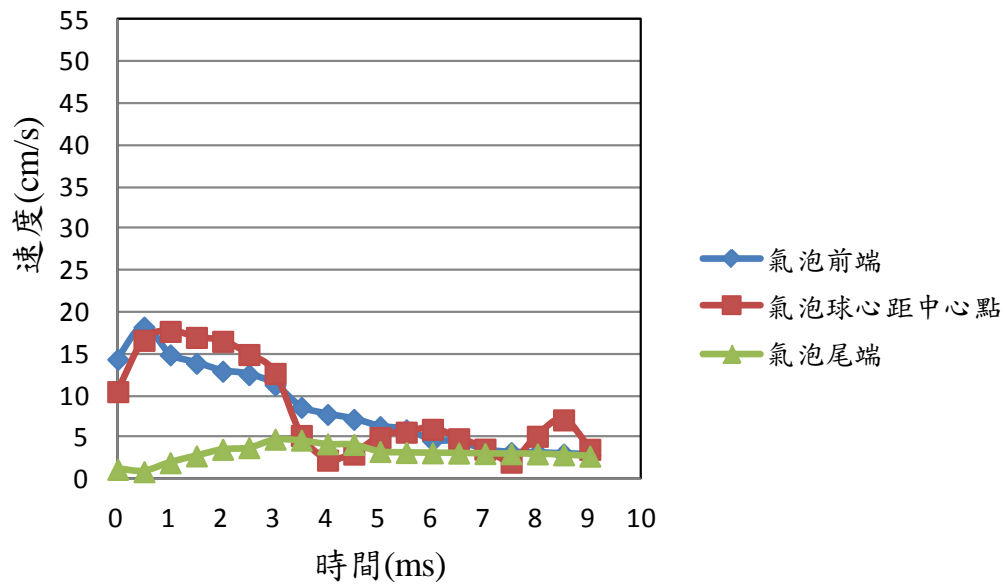


圖 4.82 距離參數 $\gamma \approx 4$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆不破之速度變化歷線

$\gamma \approx 5$ (兩顆皆破)

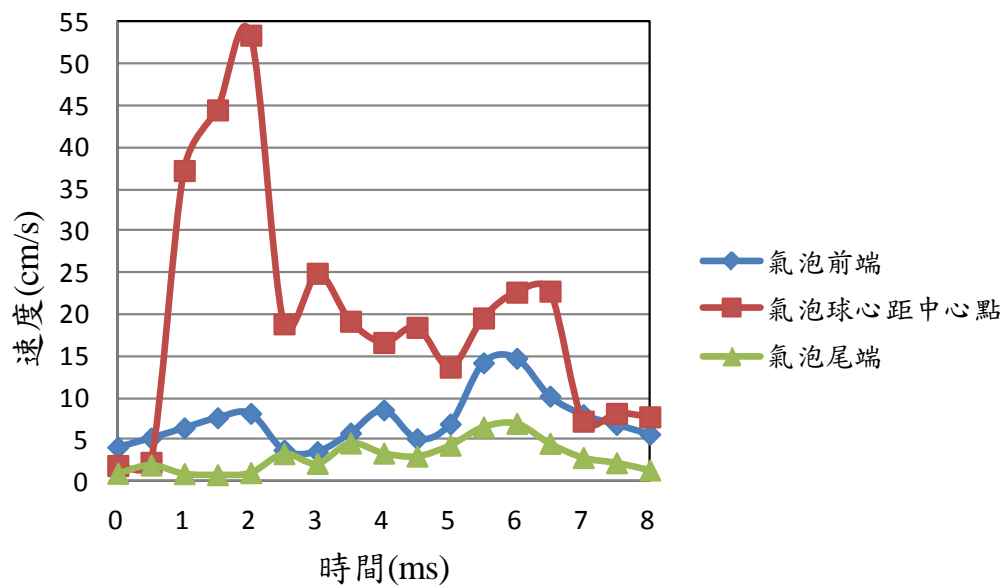


圖 4.83 距離參數 $\gamma \approx 5$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆破之速度變化歷線

$\gamma \approx 5$ (左破右不破)

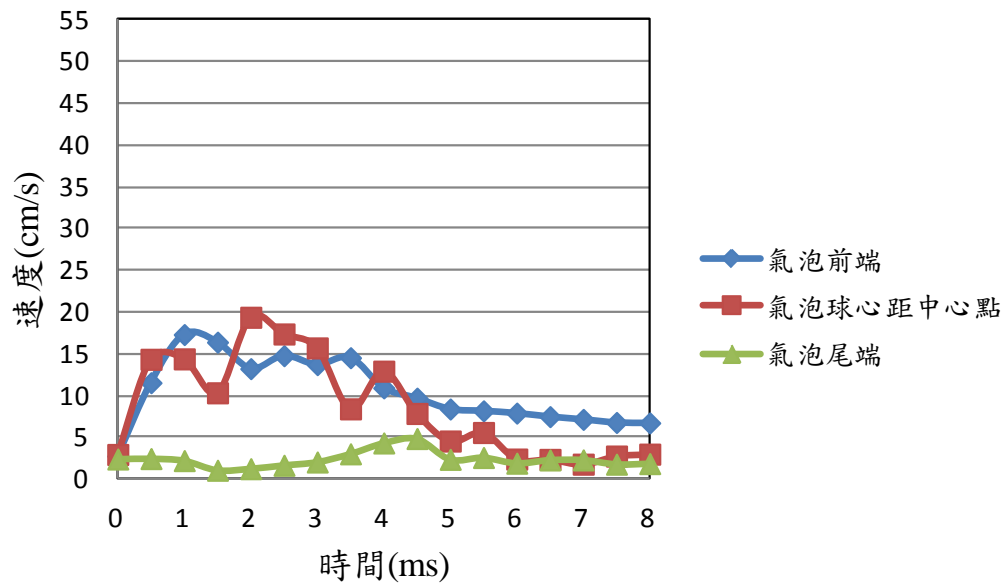


圖 4.84 距離參數 $\gamma \approx 5$ 之雙穴蝕氣泡左破右不破之速度變化歷線

$\gamma \approx 5$ (兩顆皆不破)

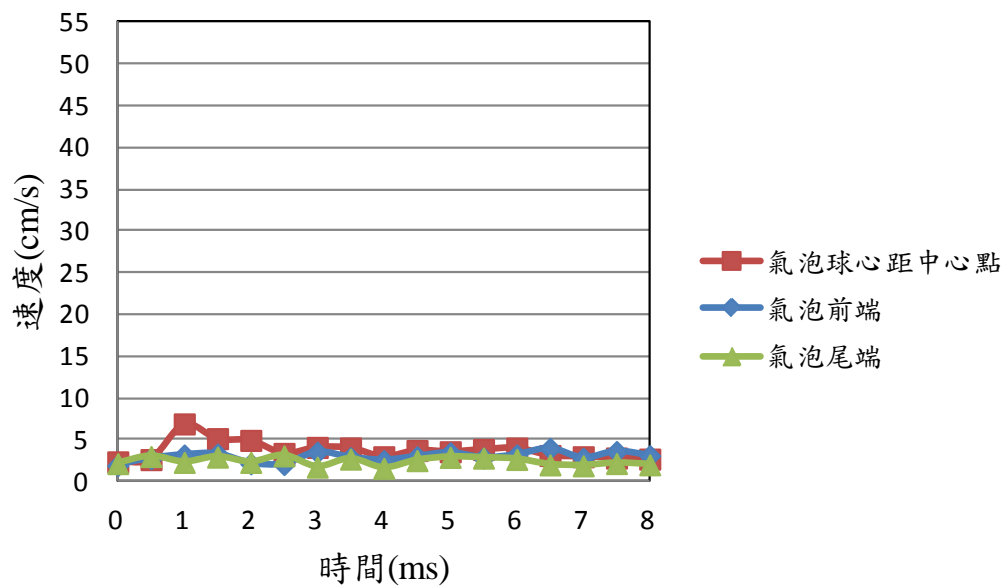


圖 4.85 距離參數 $\gamma \approx 5$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆不破之速度變化歷線

$\gamma \approx 6$ (兩顆皆破)

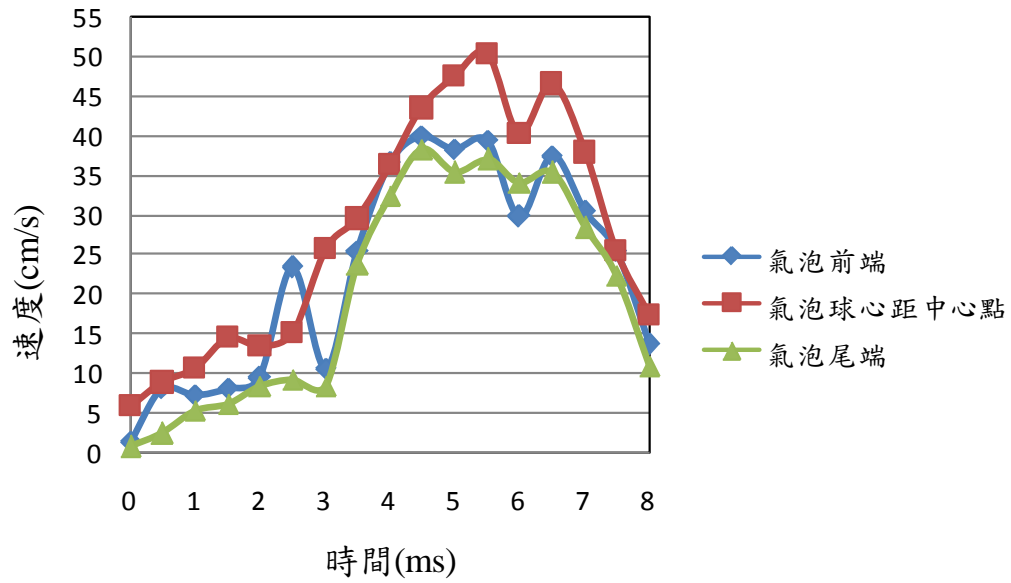


圖 4.86 距離參數 $\gamma \approx 6$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆破之速度變化歷線

$\gamma \approx 6$ (左破右不破)

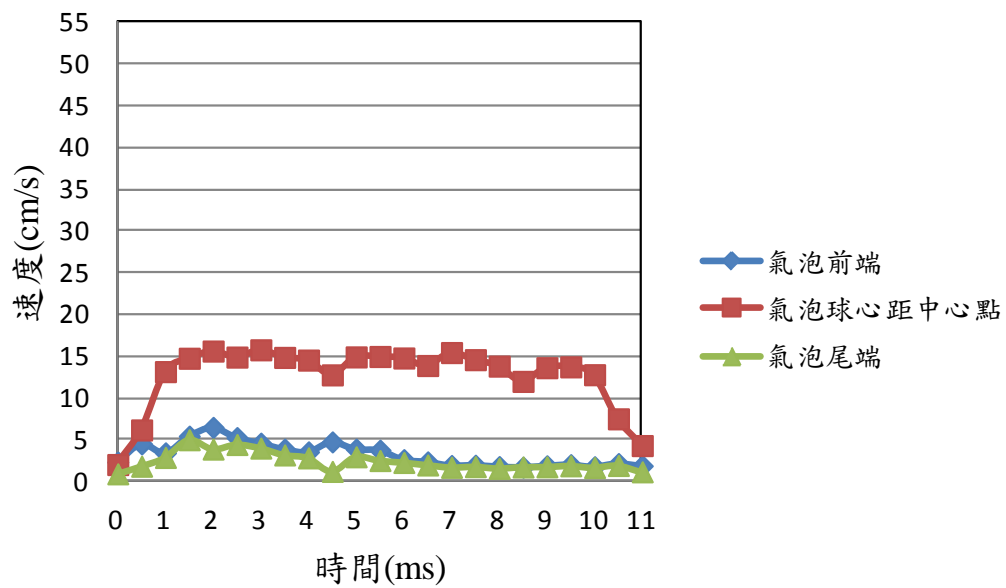


圖 4.87 距離參數 $\gamma \approx 6$ 之雙穴蝕氣泡左破右不破之速度變化歷線

$\gamma \approx 6$ (兩顆皆不破)

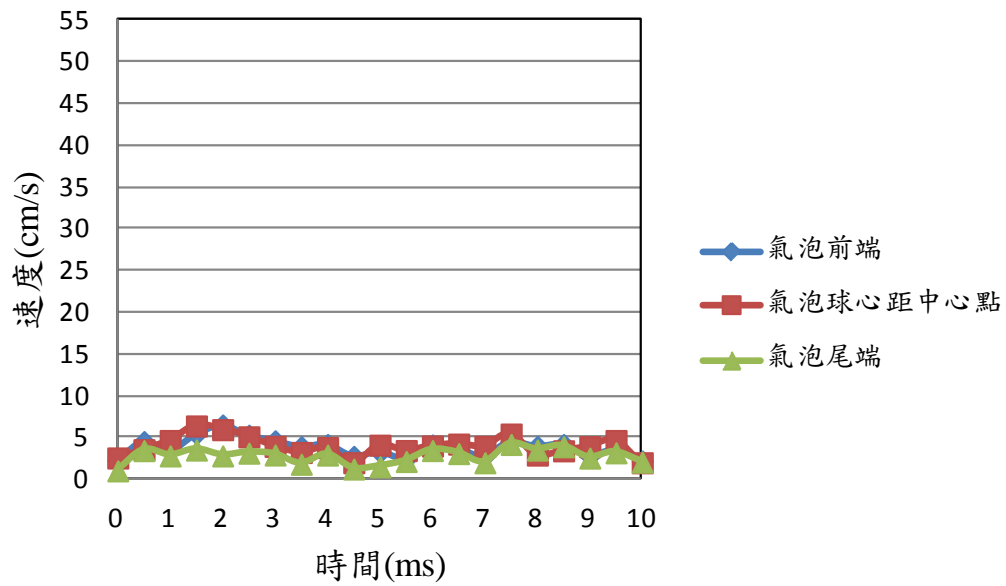


圖 4.88 距離參數 $\gamma \approx 6$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆不破之速度變化歷線



$\gamma > 6$ (兩顆皆破)

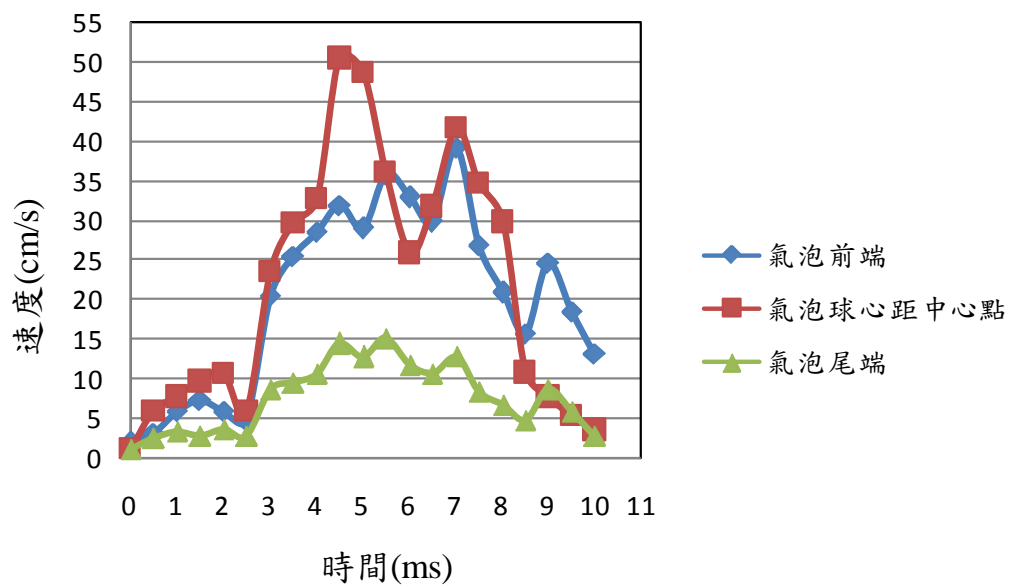


圖 4.89 距離參數 $\gamma > 6$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆破之速度變化歷線

$\gamma > 6$ (左破右不破)

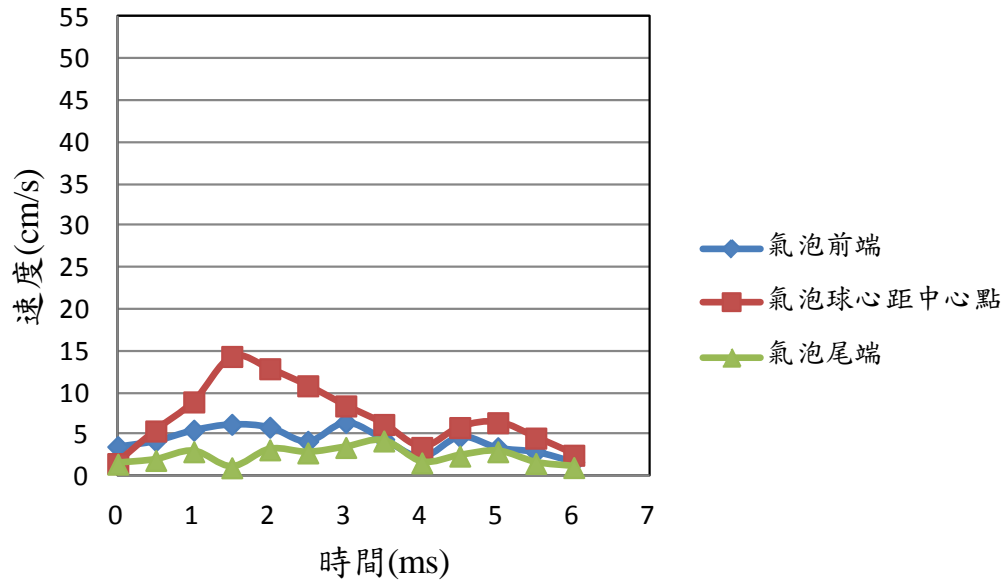


圖 4.90 距離參數 $\gamma > 6$ 之雙穴蝕氣泡左破右不破之速度變化歷線

$\gamma > 6$ (兩顆皆不破)

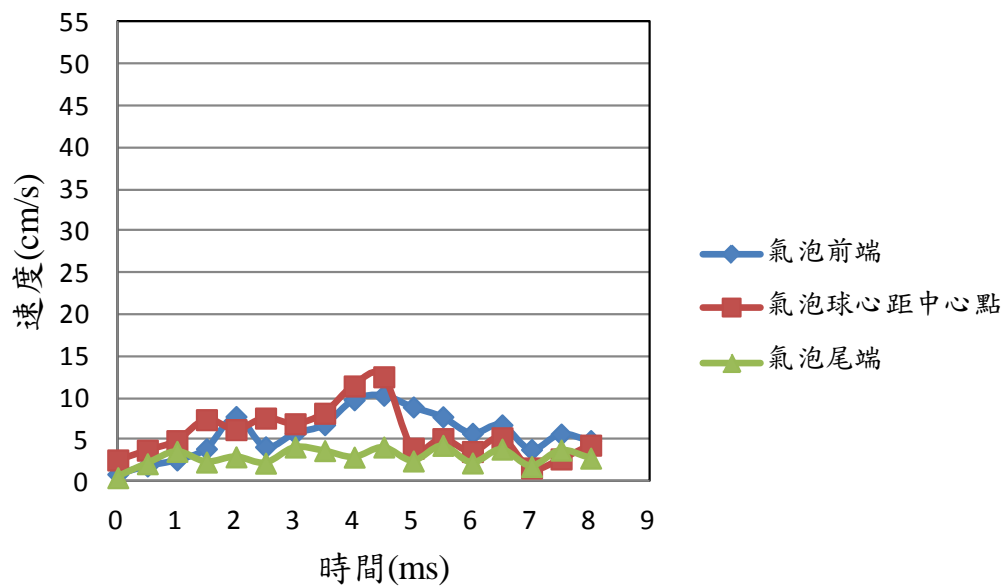


圖 4.91 距離參數 $\gamma > 6$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆不破之速度變化歷線

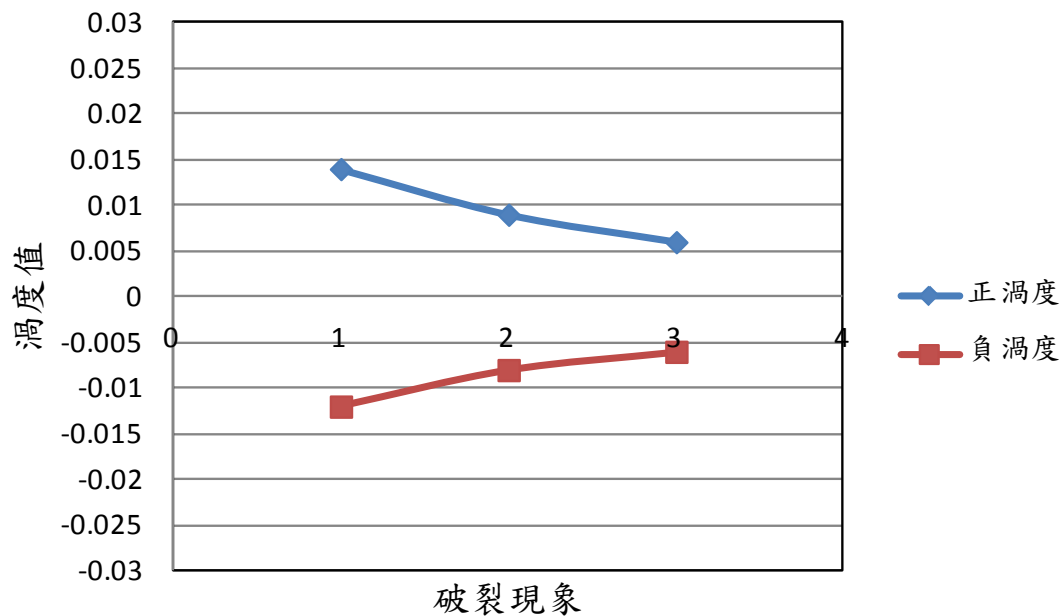


圖 4.92 距離參數 $\gamma \approx 2$ 時不同破裂現象之渦度值分佈
(破裂現象：1 兩顆皆破；2=左破右不破；3=兩顆皆不破)

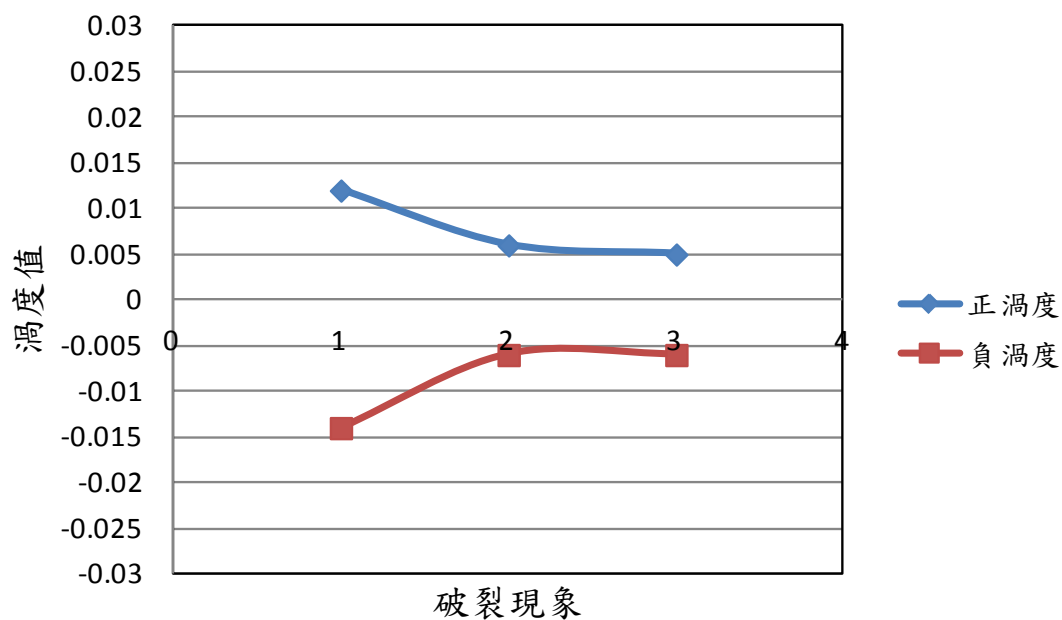


圖 4.93 距離參數 $\gamma \approx 3$ 時不同破裂現象之渦度值分佈
(破裂現象：1 兩顆皆破；2=左破右不破；3=兩顆皆不破)

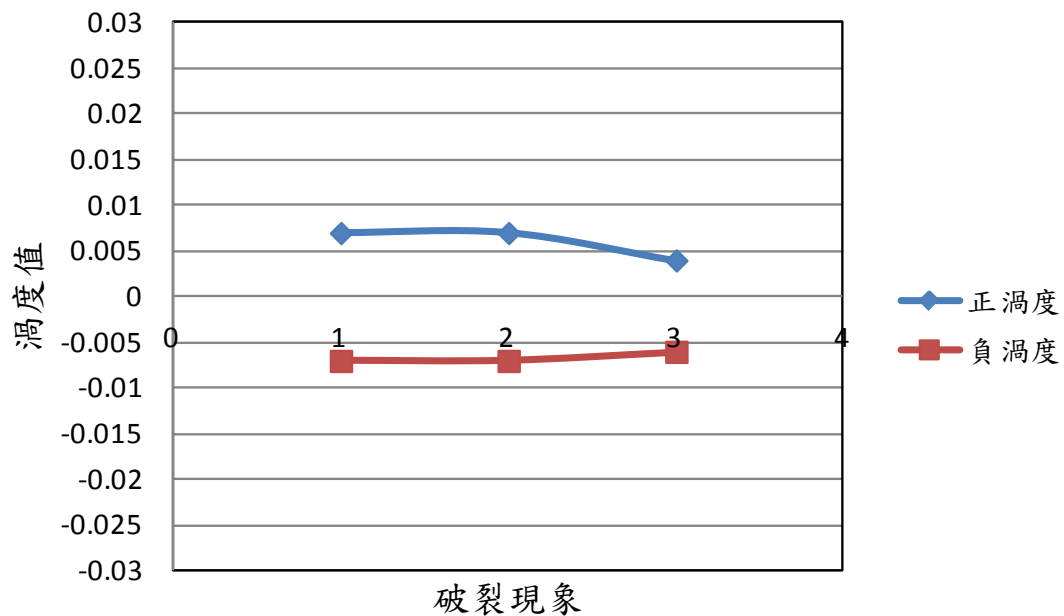


圖 4.94 距離參數 $\gamma \approx 4$ 時不同破裂現象之渦度值分佈
(破裂現象：1 兩顆皆破；2=左破右不破；3=兩顆皆不破)

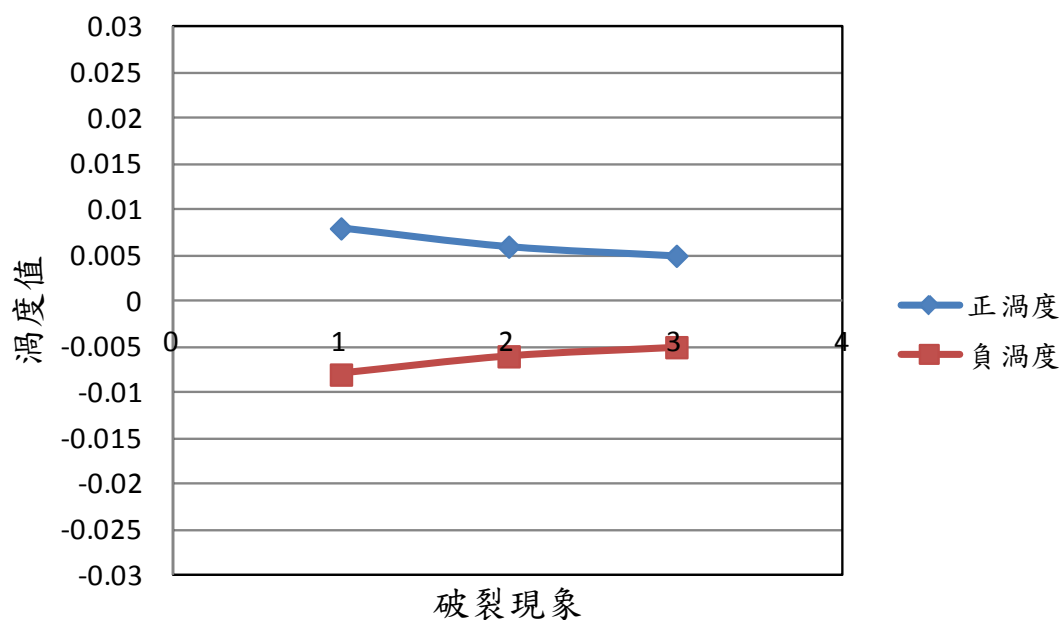


圖 4.95 距離參數 $\gamma \approx 5$ 時不同破裂現象之渦度值分佈
(破裂現象：1 兩顆皆破；2=左破右不破；3=兩顆皆不破)

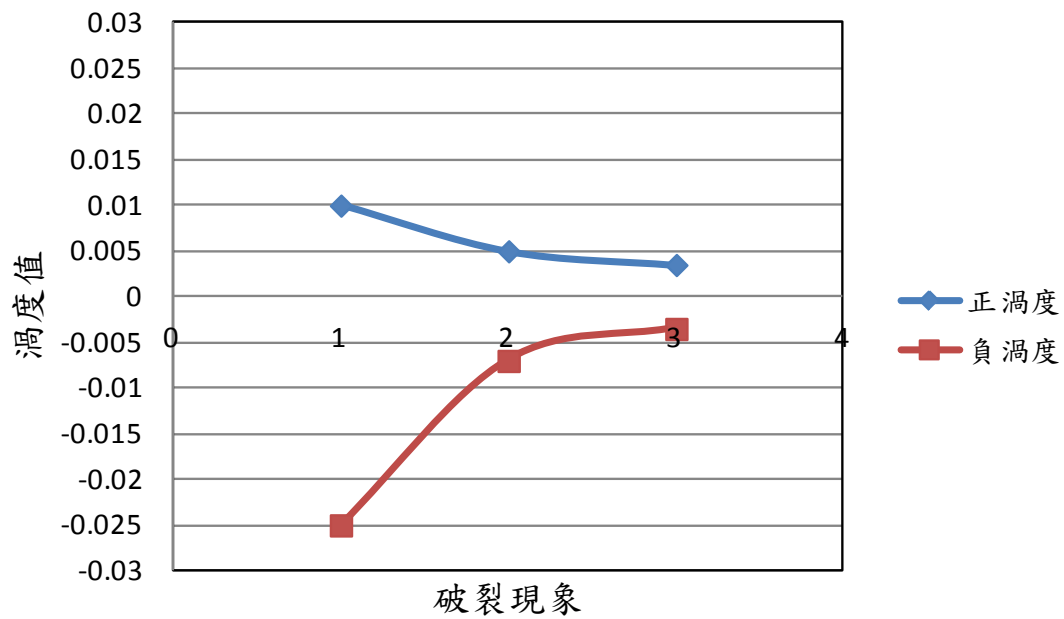


圖 4.96 距離參數 $\gamma \approx 6$ 時不同破裂現象之渦度值分佈
(破裂現象：1 兩顆皆破；2=左破右不破；3=兩顆皆不破)

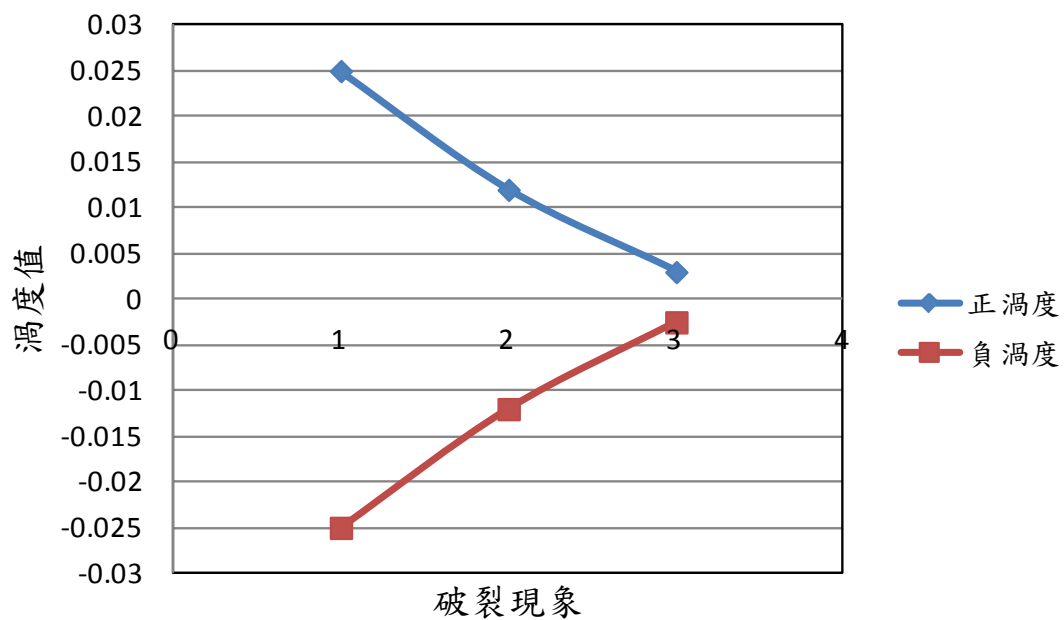


圖 4.97 距離參數 $\gamma > 6$ 時不同破裂現象之渦度值分佈
(破裂現象：1 兩顆皆破；2=左破右不破；3=兩顆皆不破)

表 4.1 距離參數 $\gamma \approx 2$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆破之速度與壓力關係

時間	氣泡前端	氣泡球心距中心點	氣泡尾端	壓力差
(ms)	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)	(kPa)
0	2.27	0.3	0.92	0.00
0.5	6.83	1.76	0.58	-0.17
1	6.02	4.14	0.6	4.00
1.5	6.63	5.02	1.32	2.79
2	5.57	1.87	0.58	11.29
2.5	5.26	2.61	1.38	40.95
3	4.32	32.96	3.19	75.71
3.5	4.57	19.74	4.02	118.31
4	4.63	20.36	3.87	160.30
4.5	6.23	20.38	3.39	185.14
5	7.22	25.35	3.59	182.07
5.5	10.3	26.71	9.22	154.33
6	8.32	21.2	7.17	119.02
6.5	9.07	24.67	8.69	84.37
7	8.3	16.67	7.24	59.32
7.5	9.15	21.46	8.36	46.60
8	4.43	4.06	5.37	42.98

表 4.2 距離參數 $\gamma \approx 2$ 之雙穴蝕氣泡左破右不破之速度與壓力關係

時間	氣泡前端	氣泡球心距中心點	氣泡尾端	壓力差
(ms)	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)	(kPa)
0	1.35	2	1.27	0.00
0.5	7.16	3.06	1.85	16.44
1	7.18	13.11	1.55	46.93
1.5	5.2	7.19	2.87	74.06
2	3.52	9.04	1.03	105.26
2.5	6.85	3.81	0.83	120.72
3	6.15	9.68	2.28	117.37
3.5	7.51	7.39	1.31	105.53
4	8.23	9.23	5.5	83.60
4.5	4.84	7.31	3.91	67.43
5	4.89	7.36	2.08	53.61
5.5	8.01	5.69	2.45	51.59
6	7.59	9.56	3.39	50.00
6.5	5.6	10.58	4.86	52.02
7	5.79	9.17	3.31	51.64
7.5	6.98	9.21	4.07	50.76
8	5.49	8.15	1.21	50.87

表 4.3 距離參數 $\gamma \approx 2$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆不破之速度與壓力關係

時間	氣泡前端	氣泡球心距中心點	氣泡尾端	壓力差
(ms)	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)	(kPa)
0	0.64	2.79	0.54	0.00
0.5	2.04	4.12	1.2	0.00
1	4.4	6.84	1.36	0.05
1.5	4.84	5.56	0.96	0.22
2	1.89	7.43	1.33	0.22
2.5	2.98	8.26	1.14	0.00
3	2.61	7.08	1.31	0.38
3.5	3.11	7.46	2.57	-1.54
4	3.57	10.57	1.83	0.38
4.5	5.42	7.1	1.9	2.90
5	3.95	11.67	3.69	9.32
5.5	4.26	10.72	3.48	20.28
6	4.875	7.129	2.78	34.64
6.5	4.35	11.42	1.69	46.76
7	6.02	10.52	2.69	56.19
7.5	2.66	6.94	4.24	60.52
8	1.52	7.06	5.08	60.63
8.5	4.89	8.02	4.3	60.74
9	1.23	7.01	3.24	59.75
9.5	2.25	3.32	1.32	61.56
10	1.58	3.02	1.16	61.89
10.5	1.89	3.18	0.83	62.61
11	2.95	3.32	1.86	62.44
11.5	2.89	3.58	2.81	62.06
12	3.06	5.53	2.79	62.44

表 4.4 距離參數 $\gamma \approx 3$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆破之速度與壓力關係

時間	氣泡前端	氣泡球心距中心點	氣泡尾端	壓力差
(ms)	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)	(kPa)
0	0.91	6.29	0.73	0.00
0.5	5.92	8.15	2.45	16.44
1	7.33	17.5	1.09	46.93
1.5	12.68	37.61	1.15	74.06
2	17.03	21.98	2.54	105.26
2.5	17.01	15.38	2.52	120.72
3	8.27	24.59	4.63	117.37
3.5	7.01	24.47	6.63	105.53
4	7	42.49	10.26	83.60
4.5	7.06	36.44	18.44	67.43
5	11.33	22.01	16.54	53.61
5.5	23.88	29.03	29.11	51.59
6	25.03	50.25	25.5	50.00
6.5	26.47	49.05	20.77	52.02
7	17.26	48.37	42.54	51.64
7.5	18.88	41.06	34.8	50.76
8	7.04	31.07	8.56	50.87
8.5	8.98	20.42	27.15	50.93
9	8.45	17.4	26.45	54.38

表 4.5 距離參數 $\gamma \approx 3$ 之雙穴蝕氣泡左破右不破之速度與壓力關係

時間	氣泡前端	氣泡球心距中心點	氣泡尾端	壓力差
(ms)	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)	(kPa)
0	1.84	6.78	3.77	0.00
0.5	4.89	11.28	1.98	0.27
1	3.29	12.57	1.65	-0.39
1.5	2.12	14.08	1.32	2.13
2	2.7	9.39	1.44	9.26
2.5	2.28	10.55	0.88	25.49
3	2.47	19.9	1.51	45.61
3.5	2.6	22.68	1.38	68.42
4	4.39	26.25	0.97	90.07
4.5	4.78	21.78	1.5	104.33
5	2.57	14.01	1.8	110.96
5.5	3.61	14.89	2.25	111.23
6	3.08	10.14	2.19	107.56
6.5	2.92	7.63	2.89	102.52
7	2.42	7.25	4.55	98.79
7.5	1.89	6.95	5.21	97.75
8	1.51	3.59	4.09	97.69
8.5	1.68	2.85	3.28	97.20
9	1.21	1.9	4.24	94.57
9.5	2.09	2.25	2.6	90.78
10	3.34	5.18	1.46	85.47
10.5	1.92	4.63	1.31	80.37
11	4.14	5.6	1.63	76.09
11.5	2.16	2.54	1.46	73.08
12	2.05	2.45	1.39	71.38

表 4.6 距離參數 $\gamma \approx 3$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆不破之速度與壓力關係

時間	氣泡前端	氣泡球心距中心點	氣泡尾端	壓力差
(ms)	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)	(kPa)
0	1.9	2.08	0.88	0.00
0.5	3.49	5.78	0.92	7.56
1	5.6	3.98	1.24	17.43
1.5	13.6	6.73	1.12	31.03
2	6.32	10.82	1.87	40.73
2.5	6.98	13.43	1.84	47.09
3	7.87	24.63	4.39	49.23
3.5	5.71	17.43	3.61	50.16
4	7.53	16.11	2.33	50.60
4.5	4.85	15.98	3.93	54.44
5	4.48	15.85	5.33	58.00
5.5	4.56	15.76	3.4	60.30
6	4.61	18.07	6.9	61.62
6.5	3.91	21.05	8.65	59.32
7	3.92	14.29	5.02	55.37
7.5	3.8	14.15	3.66	50.98
8	3.68	13.51	2.81	52.24

表 4.7 距離參數 $\gamma \approx 4$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆破之速度與壓力關係

時間	氣泡前端	氣泡球心距中心點	氣泡尾端	壓力差
(ms)	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)	(kPa)
0	3.32	2.16	1.96	0.00
0.5	7.06	16.15	1.6	23.84
1	4.65	34.68	1.58	54.33
1.5	2.21	28.82	1.32	93.64
2	1.72	26.25	1.6	131.85
2.5	2.55	37.15	1.72	159.48
3	3.49	24.47	0.95	170.22
3.5	5.02	18.23	1.31	165.56
4	4.21	17.6	3.18	149.83
4.5	4.78	19.8	1.73	129.05
5	6.3	6.83	3.71	108.11
5.5	6.12	4.5	4.61	89.47
6	3.56	10.21	2.38	74.50
6.5	1.29	1.09	1.05	64.25
7	3.3	1.21	1.39	58.71
7.5	3.09	1.14	1.27	57.78
8	2.84	5.52	1.55	59.70

表 4.8 距離參數 $\gamma \approx 4$ 之雙穴蝕氣泡左破右不破之速度與壓力關係

時間	氣泡前端	氣泡球心距中心點	氣泡尾端	壓力差
(ms)	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)	(kPa)
0	3.52	2.09	2.43	0.00
0.5	6.81	2.23	2.4	0.93
1	9.22	14.04	2.37	0.49
1.5	17.04	36.54	2.34	14.14
2	25.41	21.52	2.31	35.19
2.5	16.71	14.26	2.28	59.37
3	23.25	12.89	4.25	84.81
3.5	24.35	10.92	5.22	99.28
4	24.11	19.21	4.48	107.34
4.5	19.11	17.25	2.16	101.64
5	24.54	15.55	2.13	89.91
5.5	17.76	14.21	2.1	73.41
6	16.5	12.87	2.07	58.82
6.5	15.34	11.53	2.04	46.82
7	14.28	10.19	2.01	36.78
7.5	13.94	8.85	1.98	30.53
8	13.18	7.51	1.95	27.35

表 4.9 距離參數 $\gamma \approx 4$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆不破之速度與壓力關係

時間	氣泡前端	氣泡球心距中心點	氣泡尾端	壓力差
(ms)	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)	(kPa)
0	14.4	10.53	1.23	0.00
0.5	18.25	16.67	0.95	13.37
1	14.93	17.74	2.02	30.53
1.5	13.92	17.02	2.84	43.52
2	12.97	16.55	3.63	56.25
2.5	12.56	14.97	3.83	62.50
3	11.33	12.71	4.84	58.88
3.5	8.65	5.28	4.73	55.92
4	7.8	2.33	4.29	49.61
4.5	7.21	3.06	4.22	43.58
5	6.34	5.04	3.37	42.92
5.5	5.95	5.68	3.25	39.69
6	4.68	6.02	3.21	39.41
6.5	4.52	4.89	3.18	38.70
7	3.54	3.65	3.12	35.41
7.5	3.24	2.09	3.1	34.37
8	3.18	5.19	3.08	34.42
8.5	3.06	7.15	2.97	33.38
9	2.98	3.63	2.81	34.92

表 4.10 距離參數 $\gamma \approx 5$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆破之速度與壓力關係

時間 (ms)	氣泡前端 (cm/s)	氣泡球心距中心點 (cm/s)	氣泡尾端 (cm/s)	壓力差 (kPa)
0	4.17	1.97	1.05	0.00
0.5	5.26	2.35	2.04	2.52
1	6.48	37.27	1.01	11.84
1.5	7.69	44.53	0.88	33.38
2	8.21	53.47	1.12	58.88
2.5	3.83	18.93	3.4	89.14
3	3.64	24.98	2.23	113.87
3.5	5.86	19.24	4.67	131.68
4	8.625	16.7	3.46	138.54
4.5	5.18	18.51	3.1	133.33
5	6.95	13.75	4.41	121.60
5.5	14.26	19.63	6.59	104.76
6	14.81	22.72	7.02	88.43
6.5	10.27	22.84	4.63	74.34
7	8.06	7.28	2.93	64.80
7.5	6.89	8.21	2.31	59.37
8	5.72	7.8	1.44	57.01

表 4.11 距離參數 $\gamma \approx 5$ 之雙穴蝕氣泡左破右不破之速度與壓力關係

時間	氣泡前端	氣泡球心距中心點	氣泡尾端	壓力差
(ms)	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)	(kPa)
0	2.82	3.01	2.47	0.00
0.5	11.6	14.4	2.52	1.20
1	17.36	14.45	2.28	2.02
1.5	16.45	10.39	1.125	4.22
2	13.28	19.43	1.31	17.27
2.5	14.83	17.43	1.72	41.11
3	13.76	15.76	2.11	65.02
3.5	14.59	8.47	3.09	83.33
4	10.98	12.98	4.39	97.53
4.5	9.75	7.92	4.92	100.16
5	8.45	4.62	2.43	91.77
5.5	8.23	5.64	2.65	79.82
6	7.96	2.46	1.97	66.55
6.5	7.54	2.42	2.36	57.01
7	7.21	1.85	2.36	51.75
7.5	6.84	2.82	1.85	50.11
8	6.79	3.05	1.92	53.88

表 4.12 距離參數 $\gamma \approx 5$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆不破之速度與壓力關係

時間	氣泡前端	氣泡球心距中心點	氣泡尾端	壓力差
(ms)	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)	(kPa)
0	1.98	2.41	2.2	0.00
0.5	2.79	2.68	3.05	4.82
1	3.23	6.95	2.35	13.70
1.5	3.34	5.19	2.98	25.65
2	2.18	4.98	2.35	38.70
2.5	2.09	3.42	3.13	50.43
3	3.56	4.14	1.78	56.08
3.5	2.91	4.07	2.74	57.51
4	2.56	3.02	1.65	55.20
4.5	3.02	3.77	2.56	51.97
5	3.49	3.62	2.95	48.62
5.5	2.87	3.89	2.86	45.94
6	3.24	4.06	2.7	42.87
6.5	4.02	3.17	2.05	39.90
7	2.84	3.02	1.94	37.88
7.5	3.65	2.87	2.21	37.28
8	3.15	2.74	2.06	37.55

表 4.13 距離參數 $\gamma \approx 6$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆破之速度與壓力關係

時間	氣泡前端	氣泡球心距中心點	氣泡尾端	壓力差
(ms)	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)	(kPa)
0	1.5	6.03	0.85	0.00
0.5	8.16	8.94	2.49	0.38
1	7.48	10.84	5.37	-1.59
1.5	8.16	14.59	6.29	1.97
2	9.49	13.48	8.48	4.05
2.5	23.45	15.28	9.3	12.33
3	10.82	25.78	8.59	35.80
3.5	25.49	29.61	23.79	60.25
4	36.59	36.49	32.49	83.93
4.5	40.02	43.58	38.48	103.07
5	38.47	47.6	35.48	109.92
5.5	39.46	50.42	37.14	108.89
6	29.84	40.28	34.15	93.81
6.5	37.56	46.59	35.49	75.23
7	30.48	37.94	28.49	60.20
7.5	25.59	25.49	22.49	48.53
8	13.67	17.47	10.95	41.73

表 4.14 距離參數 $\gamma \approx 6$ 之雙穴蝕氣泡左破右不破之速度與壓力關係

時間	氣泡前端	氣泡球心距中心點	氣泡尾端	壓力差
(ms)	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)	(kPa)
0	2.39	2.09	0.98	0.00
0.5	4.56	6.23	1.89	2.79
1	3.49	13.21	2.94	4.27
1.5	5.49	14.81	5.06	10.96
2	6.54	15.67	3.94	24.61
2.5	5.32	14.95	4.49	40.35
3	4.65	15.82	4.06	52.90
3.5	3.94	14.91	3.24	63.87
4	3.61	14.59	2.89	72.31
4.5	4.8	12.82	1.27	75.82
5	3.94	14.97	3.02	79.49
5.5	3.81	15.02	2.57	84.42
6	2.68	14.84	2.34	82.56
6.5	2.41	13.94	2.04	80.15
7	1.98	15.49	1.76	72.97
7.5	2.01	14.64	1.84	65.84
8	1.85	13.87	1.64	56.68
8.5	1.77	12.04	1.8	50.27
9	1.94	13.68	1.82	46.54
9.5	2.08	13.78	1.94	44.18
10	1.83	12.84	1.73	42.27
10.5	2.21	7.56	1.98	41.61
11	1.94	4.36	1.22	42.70

表 4.15 距離參數 $\gamma \approx 6$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆不破之速度與壓力關係

時間	氣泡前端	氣泡球心距中心點	氣泡尾端	壓力差
(ms)	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)	(kPa)
0	2.31	2.59	1.05	0.00
0.5	4.56	3.58	3.47	13.37
1	3.49	4.68	2.84	30.53
1.5	5.49	6.42	3.54	43.53
2	6.54	5.98	2.84	56.25
2.5	5.32	5.12	3.17	62.50
3	4.65	3.98	2.95	58.88
3.5	3.94	3.25	1.84	55.92
4	4.21	3.84	2.94	49.61
4.5	2.79	2.02	1.27	43.58
5	3.31	4.12	1.54	42.92
5.5	2.49	3.48	2.17	39.69
6	4.15	4.02	3.48	39.41
6.5	3.65	4.25	3.12	38.70
7	2.84	3.98	2.02	35.41
7.5	4.56	5.45	4.21	34.37
8	3.98	2.94	3.54	34.42
8.5	4.21	3.45	3.94	33.38
9	2.86	3.94	2.58	34.92
9.5	3.54	4.68	3.21	36.40
10	2.23	2.02	2.09	36.67

表 4.16 距離參數 $\gamma > 6$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆破之速度與壓力關係

時間	氣泡前端	氣泡球心距中心點	氣泡尾端	壓力差
(ms)	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)	(kPa)
0	1.99	1.22	1.36	0.00
0.5	3.24	5.94	2.61	0.00
1	5.98	7.81	3.48	0.16
1.5	7.48	9.83	2.94	0.22
2	6.01	10.84	3.84	2.30
2.5	4.81	5.97	2.93	12.50
3	20.49	23.64	8.73	58.66
3.5	25.64	29.74	9.64	57.67
4	28.61	32.76	10.81	61.62
4.5	32.01	50.5	14.52	73.84
5	29.07	48.79	12.82	78.56
5.5	35.91	36.18	15.23	76.31
6	32.97	25.97	11.91	68.91
6.5	29.86	31.82	10.85	59.59
7	39.21	41.68	12.94	49.12
7.5	26.86	34.81	8.46	38.65
8	20.94	29.87	6.83	30.42
8.5	15.76	10.94	4.81	21.98
9	24.65	7.81	8.76	16.28
9.5	18.52	5.48	5.95	11.84
10	13.24	3.69	3.02	9.48

表 4.17 距離參數 $\gamma > 6$ 之雙穴蝕氣泡左破右不破之速度與壓力關係

時間	氣泡前端	氣泡球心距中心點	氣泡尾端	壓力差
(ms)	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)	(kPa)
0	3.59	1.56	1.5	0.00
0.5	4.29	5.46	1.94	3.61
1	5.56	8.94	2.98	13.98
1.5	6.26	14.38	1.06	28.50
2	5.91	12.91	3.21	39.30
2.5	4.23	10.87	2.84	46.87
3	6.49	8.46	3.49	47.20
3.5	4.48	6.24	4.27	45.28
4	2.39	3.49	1.65	39.91
4.5	4.81	5.87	2.46	31.30
5	3.46	6.45	2.98	29.77
5.5	2.98	4.61	1.58	23.68
6	1.77	2.56	1.09	21.60

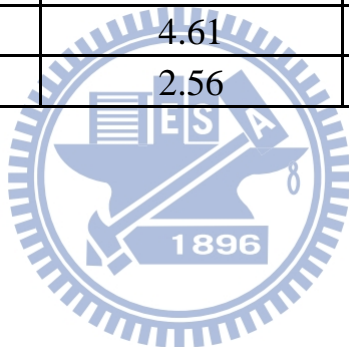


表 4.18 距離參數 $\gamma > 6$ 之雙穴蝕氣泡兩顆皆不破之速度與壓力關係

時間	氣泡前端	氣泡球心距中心點	氣泡尾端	壓力差
(ms)	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)	(kPa)
0	0.95	2.64	0.52	0.00
0.5	1.92	3.81	2.19	10.25
1	2.64	4.95	3.67	21.21
1.5	3.98	7.46	2.39	27.52
2	7.84	6.27	3.01	34.97
2.5	4.21	7.65	2.26	39.69
3	5.84	6.97	4.19	41.61
3.5	6.86	8.23	3.76	43.47
4	9.84	11.49	2.98	40.84
4.5	10.38	12.59	4.19	38.65
5	8.98	4.05	2.52	33.77
5.5	7.81	5.19	4.39	27.08
6	5.83	3.65	2.28	22.20
6.5	6.84	5.29	3.94	17.21
7	3.89	1.68	1.86	14.36
7.5	5.74	2.76	3.82	13.59
8	4.96	4.41	2.86	13.54

第五章 結論與建議

5.1 結論

本研究針對雙氣泡破裂流場交互作用特性進行探討，試驗時以脈衝系統產生壓力震波擊破穴蝕氣泡，分析雙穴蝕氣泡位於不同球心距離處之受壓、破裂流場，以每秒 8,000 與 10,000 張影像的高速攝影機擷取氣泡破裂流場影像，以及利用 PIV 法分析氣泡破裂過程之流場，並分析不同距離參數 ($\gamma = d/R_{\max}$ ， R_{\max} 為氣泡最大半徑； d 為雙氣泡球心之距離) 位置的穴蝕氣泡破裂流場特性，穴蝕氣泡破裂後產生的流場交互作用特性與演變過程，獲致如下結論：

1. 穴蝕氣泡破裂會產生中心噴流、震波。各項試驗案例，均經過多次試驗，以能產生所欲分析流況的最低壓力波強度擊破穴蝕氣泡。在不同距離參數位置、擊破氣泡所需的壓力波強度不同。 γ 值越小，壓力場之變化對氣泡外觀、推力及交互作用愈明顯。當兩顆氣泡球心距 $\gamma > 6$ 時，氣泡破裂現象不會受到互相牽引，等同於單一氣泡運動的過程。
2. 由壓力變化曲線中可得知，兩顆皆破的現象中其壓力峰值至拉張力波強度的下降幅度最為明顯。壓力波越大，則液體噴流較快出現，從壓力波開始進入到趨近於穩定的過程也最短。
3. 渦度場呈現沿中心軸對稱，上下會反方向的呈現渦流，距離參數越小，其渦度場之變化越劇烈。
4. 流場紊亂處有三種不同的不穩定現象產生，起初壓力波進入時有 Rayleigh-Taylor 不穩定的現象，蕈狀雲渦流產生後會有

Kelvin-Helmholtz 不穩定的現象，氣泡間在交互作用時會產生 Richtmyer-Meshkov 不穩定現象。

5. 兩氣泡最初的交互作用於左側氣泡的 K-H 渦流會以輻射方式向周邊流體噴出，使兩氣泡間之交互作用形成類似滯留區域現象，此區域處於低速、高壓情況，此現象使得左側 K-H 渦流發展受阻，加速其氣泡破裂。
6. 距離參數越小時，無論兩顆皆破、左破右不破還是兩顆皆不破，因氣泡間互相牽引，要使氣泡破裂的壓力峰值相對越大。此外， γ 在 2~6 時，兩顆氣泡均破情況下，左邊氣泡破裂現象均有左右撕裂現象。

5.2 建議

穴蝕氣泡破裂所產生的流場，甚為複雜，在實驗過程中有許多變因與現象並未研究，下列建議供未來進一步研究之參考。

1. 本研究之試驗試管為單一管徑，若能有不同管徑之變化，可以比較其相互作用之差異性。本研究為水平試管的探討，未來可以改變試管為傾斜或垂直，探討不同方向上的流場狀況。本研究衝擊彈簧打入方向為上下的垂直走向，因此震波是由垂直方向傳遞至管內，如衝擊彈簧能與內管保持平行，即兩者保持水平方向應會降低管內的壓力消耗；另應注意平台震動的問題，因氣泡非常小，易受外力影響。
2. 本研究在試管末端無固體邊界，後續可加上固體邊界去探討氣泡破裂時在固體邊界上所發生的流場現象。壓力的測定只來自於尾端壓力感測器的量測，如壓力感測器安裝於管壁上，可得到邊壁受壓力情形並得到更多數據，且因更靠近穴蝕氣泡而能量到氣泡破裂造成強大壓力。

3. 在定量實驗上，控制好光頁的厚度及角度以避免PIV影像過度曝光；另質點顆粒數量多寡，是影像清晰度的關鍵，影像解析度高所計算出的相關數據才有使用的價值。可將本研究之PIV量測方法提升為CPIV之量測方法，提供彩色品質更好的影像，進行氣泡破裂過程之瞬間流場、渦度場與壓力場等研究。在PIV演算時，折射產生於氣泡表面附近之亮度帶區域，視為與一般影像亮度值分佈一樣，可用於互相關函數之質點位移分析。改善光頁厚度與顯影質點更細化之搭配，可供PIV在後續研究發展得到改善，以期更能呈現於中央截面上之氣泡破裂過程。



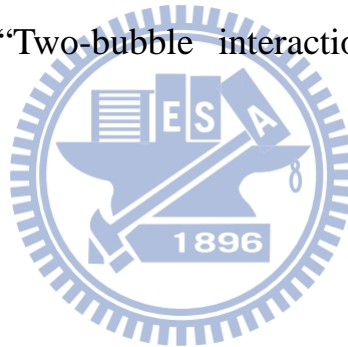
參考文獻

- [1] Benjamin, T. B. and Ellis, A. T. (1966), “The collapse of cavitation bubbles and the pressures thereby produced against solid boundaries”, Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A, Mathematical and Physical Sciences, 260, pp.221-240.
- [2] Blake, J. R., Robinson, P. B., Shima, A. , and Tomita, Y. (1993), “Interaction of two cavitation bubbles with a rigid boundary”, Journal of Fluid Mechanics, 255, pp.707-721.
- [3] Bremond, N. , Arora, M., Ohl, C.D., and Lohse, D. (2005), “Cavitation on surfaces”, J. Phys.: Condens.Matter, 17, pp. 3603-3608.
- [4] Bremond, N. , Arora, M., Dammer, S. M. and Lohse, D. (2006), “Interaction of cavitation bubbles on a wall”, Phys.Fluids, vol.18
- [5] Brennen, Christopher, E. (1995), “Cavitation and bubble dynamics”, USA
- [6] Chen, X.P. (2012), “Dual Bubbles Interaction Simulation by Lattice Boltzmann method”, China.
- [7] Ciaravino, V., Flynn, H. G. , Miller, M. W., and Carstensen, E. L. (1981), “Pulsed enhancement of acoustic cavitation: a postulated model”, Ultrasound in Medicine and Biology, 7, pp.159-166.
- [8] Escameia, M., Lauchlan, C. S., May, R. W. P., Burrows, R., and ahan, C., (2005). “Air in pipelines-a literature review.” Report SR 649, HR Wallingford.
- [9] Falvey, H. (1980), “Air-Water Flow in Hydraulic Structures”, USBR Engineering Monograph No.41, USA.
- [10] Futakawa (2007), “Suppression of cavitation inception by gas bubble injection: A numerical study focusing on bubble-bubble interaction”, PHYSICAL REVIEW E 76, 046309.
- [11] Hammitt, Federick, G., (1980), “Cavitation and multiphase flow phenomena”, USA.
- [12] Harrison, M. (1952), “An experimental study of single bubble cavitation noise”, The Journal of the Acoustical Society of America, 24, pp.776-782.
- [13] Huang, H., Dabiri, D. , and Gharib, M. (1997), “On errors of digital particle image velocimetry.” Meas. Sci. Tech., 8, pp.1427-1440.
- [14] Huang, H. T. (1998), “An extension of digital PIV-processing to double-exposed images”, Experiments in Fluids, 24, pp.367-372.

- [15] Jaw, S. Y. and Wu, J. L. (2000), "Alternating color image anemometry and it's application", *Journal of Flow Visualization and Image Processing*, 7, pp.189-205.
- [16] Jaw, S. Y., Chen, C. J., and Hwang, R. R. (2007), "Flow visualization of bubble collapse flow", *Journal of Visualization*, 10, pp.21-24.
- [17] Knapp. (1970), "Cavitation", USA.
- [18] Keane, R. and Adrian, R. (1990), "Optimization of particle image velocimeters, part I, double pulsed systems", *Measurement Science and Technology*, 1404, pp.1202-1215.
- [19] Keane, R. and Adrian, R. (1991), "Theory of cross-correlation analysis of PIV images", *Applied scientific research*, Vol.49, pp.191-215.
- [20] Kodama, T. and Tomita, Y. (2000), "Cavitation bubble behavior and bubble-shock wave interaction near a gelatin surface as a study of in vivo bubble dynamics", *Applied Physics B*, 70, pp.139-149.
- [21] Kornfeld, M. and Suvorov, L. (1944), "On the destructive action of cavitation", *Journal of Applied Physics*, 15, pp.495-506.
- [22] Lauterborn, W. (1969), "Fotografische Aufnahmen vom Aufreißen einer rotierenden Wassersäule und Zerreißfestigkeitsmessungen an Wasser nach der Zentrifugenmethode: Apparatur und erste Ergebnisse", *Acustica*, 22, pp. 35-47.
- [23] Lauterborn, W. (1972), "High-speed photography of laser-induced breakdown in liquids", *Applied Physics Letters*, 21, pp. 27-29.
- [24] Lauterborn, W. (1974), "Kavitation durch Laserlicht", *Acustica*, 31, pp. 52-78.
- [25] Lauterborn, W. (1980), "Cavitation and Inhomogeneities in Underwater Acoustics", Springer.
- [26] Lawson, N. J., Rudman, A., Guerra, J., and Liow, J. L. (1999), "Experimental and numerical comparisons of the break-up of a large bubble", *Experiments in Fluids*, 26, pp. 524-534.
- [27] Liang, D. F., Jiang, C. B. and Li, Y. L. (2002), "A combination correlation-based interrogation and tracking algorithm for digital PIV evaluation", *Experiment in Fluids*, 33, pp. 684-695.
- [28] Lindau, O. and Lauterborn, W. (2003), "Cinematographic observation of the collapse and rebound of a laser-produced cavitation bubble near a wall", *Journal of Fluid Mechanics*, 479, pp. 327-348.
- [29] Nas, S. and Tryggvason, G. (2003), "Thermocapillary interaction of two bubbles or drops", *International Journal of Multiphase Flow* 29, pp.1117-1135.

- [30] Naude, C. F. and Ellis, A. T. (1961), "On the mechanism of cavitation damage by nonhemispherical cavities collapse in contact with a solid boundary", Transactions of the ASME D: Journal of Basic Engineering, 83, pp.648-656.
- [31] Nogueira, J., Lecuona, A., and Rodriguez, P. A. (1997), "Data validation, false vectors correction and derived magnitudes calculation on PIV data", Meas. Science and Technology, 8, pp.1493-1501.
- [32] Philipp, A., Delius, M., Scheffczyk, C., Vogel, A., and Lauterborn, W. (1993), "Interaction of lithotripter-generated shock waves with air bubbles", The Journal of the Acoustical Society of America, 93, pp.2496-2509.
- [33] Philipp, A. and Lauterborn, W. (1998), "Cavitation erosion by single laser-produced bubbles", Journal of Fluid Mechanics, 361, pp.75-116.
- [34] Plesset, M. S. (1949), "The dynamics of cavitation bubbles", Trans. ASME: Journal of Applied Mechanics, 16, pp.277-282.
- [35] Plesset, M. S. and Chapman, R. B. (1971), "Collapse of an initially spherical vapour cavity in the neighbourhood of a solid boundary", Journal of Fluid Mechanics, 47, pp.283-290.
- [36] Plesset, M. S. and Zwick, S. A. (1952), "A nonsteady heat diffusion problem with spherical symmetry", Journal of Applied Physics, 23, pp.95-98.
- [37] Pu, Z. (2004), "Noise generation during the simultaneous collapse of two bubbles", China.
- [38] Rayleigh, L. (1917), "On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity", Philosophical Magazine, 34, pp.94-98.
- [39] Rouhani, S.Z. and Sohal, M.S. (1983), "Two-phase flow patterns: A review of research results", Progress in Nuclear Energy, 11, pp.219-259.
- [40] Sankin, G. N., Simmons, W. N., Zhu, S. L., and Zhong, P. (2005), "Shock wave interaction with laser-generated single bubbles", Physical Review Letters, 034501-4.
- [41] Smolianski, A. , Haario, H. and Luukka, P. (2005), "Vortex shedding behind a rising bubble and two-bubble coalescence: a numerical approach", Applied Mathematical Modelling , 29, pp.615-632.
- [42] Thomas, M., Misra, S., Kambhamettu, C., and Kirby, J., (2005), "A robust motion estimation algorithm for PIV. Measurement Science Technology", 16, pp.865-877.
- [43] Tomita, Y., Shima, A., and Sato, K., (1990), "Dynamic behavior of two-laser-induced bubbles in water", Appl. Phys. Lett., 57, pp.234-236.

- [44] Vaz, M.F. and Cox, S.J. (2005), “Two-bubble instabilities in quasi two dimensional foams”, *Philisophical Magazine Letters*, vol. 85, Issue 8, pp.415-425.
- [45] Vogel, A. and Lauterborn, W. (1988), “Time-resolved particle image velocimetry used in the investigation of cavitation bubble dynamics”, *Applied Optics*, 29, pp.1869-1876.
- [46] Westerweel, J. (1994), “Efficient detection of spurious vectors in particle images velocimetry data”, *Experiments in Fluids*, 16, pp.236-247.
- [47] Westerweel, J. , Dabiri, D., and Gharib, M. (1997), “The effect of a discrete window offset on the accuracy of cross-correlation analysis of digital PIV recordings”, *Experiments in Fluids*, 23, pp.20-28.
- [48] Yang, S. H., Jaw, S. Y., and Yeh, K. C. (2009), “Single cavitation bubble generation and observation of the bubble collapse flow induced by a pressure wave”, *Experiments in fluids*, 47, pp.343-355.
- [49] Zhang, L. and Shoji, M., (2003), “Nucleation site interaction in pool boiling on the artificial surface” *Int. J. Heat Mass Transf.*, 46, pp.513-522.
- [50] Zhang, P.L. (2008), “Two-bubble interaction under the sound field”, China.



附錄一 Kelvin-Helmholtz instability 定理

由於各相流之間的剪應力作用使得不同流相因加速度差異產生不穩定性，此現象稱為 **Kelvin - Helmholtz** 不穩定流動，產生流體層流流況穩定逐漸轉化為紊流。因此，區分無旋運動和有旋運動是研究無粘流動必須遵循的基本原則，Kelvin 速度環量守恆定理和 Helmholtz 關於渦量守恆的幾個定理，為研究氣-液流動提供了重要的理論基礎。

在流動的水中遇到阻礙物，阻礙物後就會出現漩渦，此漩渦為有渦旋運動的流體團。在向下游移動的過程中，該流體團的渦旋運動性質會受到某些因素的影響而產生變化。因此，建立流線上的速度環量和流體微團的渦度所滿足的動力學方程，其定理說明如下：

1. 速度環量定理-Kelvin 定理

此定理描述一些物理因素能夠影響流體物質之線速度環量，以及以何種形式影響，茲說明如下：

沿任一封閉流體物質線 L 的速度環量 $\Gamma = \oint \vec{V} \cdot d\vec{r}$ ，對於單值速度場，其導數滿足

$$\frac{d\Gamma}{dt} = \oint \frac{d\vec{V}}{dt} \cdot d\vec{r} \quad (1.1)$$

將(1.1)式代至 N—S 方程

$$\frac{d\Gamma}{dt} = \oint_L \frac{d\vec{V}}{dt} \cdot d\vec{r} = \oint_L \vec{F} \cdot d\vec{r} - \oint_L \frac{\nabla P}{\rho} \cdot d\vec{r} + \frac{\mu}{\rho} \oint_L \nabla^2 \vec{V} \cdot d\vec{r} + \frac{\mu}{3\rho} \oint_L \nabla(\nabla \cdot \vec{V}) \cdot d\vec{r} \quad (1.2)$$

由於 $\nabla \cdot \vec{V}$ 是單值函數，因此， $\oint_L \nabla(\nabla \cdot \vec{V}) \cdot d\vec{r} = 0$

$$\frac{d\Gamma}{dt} = \oint_L \vec{F} \cdot d\vec{r} + \oint_L \frac{\nabla P}{\rho} \cdot d\vec{r} + \frac{\mu}{\rho} \oint_L \nabla^2 \vec{V} \cdot d\vec{r} \quad (1.3)$$

分析說明：

(1) 若體力為重力， $\oint_L \vec{F} \cdot d\vec{r} = 0$ ，保守體力不影響流體物質線上的速度環量。

(2) $-\oint_L \frac{\nabla P}{\rho} \cdot d\vec{r} = -\iint_S \nabla \times \left(\frac{\nabla P}{\rho} \right) \cdot d\vec{S} = \iint_S \left(\frac{\nabla \rho \times \nabla P}{\rho^2} \right) \cdot d\vec{S}$ ，若流體正壓， $\rho = \rho(P)$ ，則

$\nabla \rho \times \nabla P = 0$ ，壓力強度梯度力不影響物質線上之速度環量。

(3) 若是理想流體流動，則粘性力項消失。

綜上可知，對理想、正壓流體在有勢力場中的流動而言，閉合流體物質線上之速度環量（渦通量）守恆，稱為 Kelvin 定理

2. 渦度方程和 Helmholtz 方程

渦度之 $N-S$ 方程

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \nabla \left(\frac{V^2}{2} \right) + \vec{\Omega} \times \vec{V} = \vec{F} - \frac{\nabla P}{\rho} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \vec{V} + \frac{\mu}{3\rho} \nabla (\nabla \cdot \vec{V}) \quad (1.4)$$

其中，令 $\vec{f} = \mu \nabla^2 \vec{V} + \frac{\mu}{3} \nabla (\nabla \cdot \vec{V})$ ，對上式兩端同時取旋度得到

$$\frac{\partial \vec{\Omega}}{\partial t} + \nabla \times (\vec{\Omega} \times \vec{V}) = \nabla \times \vec{F} - \nabla \times \left(\frac{\nabla P}{\rho} \right) + \nabla \times \left(\frac{\vec{f}}{\rho} \right) \quad (1.5)$$

其中

$$\nabla \times (\vec{\Omega} \times \vec{V}) = \vec{\Omega} (\nabla \cdot \vec{V}) + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{\Omega} - (\vec{\Omega} \cdot \nabla) \vec{V} - \vec{V} (\nabla \cdot \vec{\Omega}) \quad (1.6)$$

(2.6) 式代至 (2.5) 式

$$\frac{\partial \vec{\Omega}}{\partial t} + [\vec{\Omega} (\nabla \cdot \vec{V}) + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{\Omega} - (\vec{\Omega} \cdot \nabla) \vec{V} - \vec{V} (\nabla \cdot \vec{\Omega})] = \nabla \times \vec{F} - \nabla \times \left(\frac{\nabla P}{\rho} \right) + \nabla \times \left(\frac{\vec{f}}{\rho} \right) \quad (1.7)$$

其中， $\nabla \cdot \vec{\Omega} = 0$ ，最後得到

$$\frac{\partial \vec{\Omega}}{\partial t} + \vec{\Omega} (\nabla \cdot \vec{V}) + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{\Omega} - (\vec{\Omega} \cdot \nabla) \vec{V} = \nabla \times \vec{F} - \nabla \times \left(\frac{\nabla P}{\rho} \right) + \nabla \times \left(\frac{\vec{f}}{\rho} \right) \quad (1.8)$$

以全微分表示：

$$\frac{d\vec{\Omega}}{dt} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{\Omega} - (\vec{\Omega} \cdot \nabla) \vec{V} = \nabla \times \vec{F} - \nabla \times \left(\frac{\nabla P}{\rho} \right) + \nabla \times \left(\frac{\vec{f}}{\rho} \right) \quad (1.9)$$

分析說明：

(1) 若體力為重力，則 $\nabla \times \vec{F} = 0$ ；

(2) $\nabla \times \left(\frac{\nabla P}{\rho}\right) = \frac{1}{\rho^2}(\nabla \rho \times \nabla P)$ ，若流體正壓 $\rho = \rho(P)$ ，則 $\nabla \rho \times \nabla P = 0$ ；對於正壓流

體，壓能函數 $\Pi = \int_{p_0}^p \frac{dP}{\rho}$ ，微分 Π 得到 $\frac{1}{\rho} \nabla P = \nabla \Pi$ ， Π 為單位質量流體所具

有的一種勢能，稱為壓能。

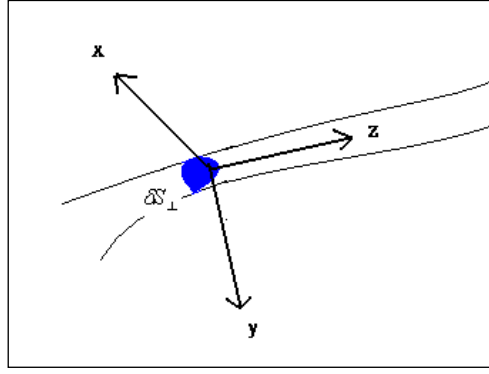
(3) 若流體理想則 $\vec{f} = 0$ ，

若同時滿足以上三個條件則得到 Helmholtz 方程：

$$\frac{d\vec{\Omega}}{dt} + (\vec{V} \cdot \nabla)\vec{\Omega} - (\vec{\Omega} \cdot \nabla)\vec{V} = 0 \quad (1.10)$$

其中， $(\vec{V} \cdot \nabla)\vec{\Omega} - (\vec{\Omega} \cdot \nabla)\vec{V}$ 的意義： t 時刻考慮流體中之微小單元段之細渦管，並且以該渦管之渦度方向 z 軸建立直角坐標，如附圖 1 所示，對該微小單元段有

$$\begin{aligned} (\vec{\Omega} \cdot \nabla)\vec{V} &= \Omega \frac{\partial u}{\partial z} \vec{i} + \Omega \frac{\partial v}{\partial z} \vec{j} + \Omega \frac{\partial w}{\partial z} \vec{k} \\ (\vec{V} \cdot \nabla)\vec{\Omega} &= \Omega \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \vec{k} \\ (\vec{V} \cdot \nabla)\vec{\Omega} - (\vec{\Omega} \cdot \nabla)\vec{V} &= \left(\Omega \frac{\partial u}{\partial z} \vec{i} + \Omega \frac{\partial v}{\partial z} \vec{j} + \Omega \frac{\partial w}{\partial z} \vec{k} \right) - \Omega \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \vec{k} \\ &= \left(\Omega \frac{\partial u}{\partial z} \vec{i} + \Omega \frac{\partial v}{\partial z} \vec{j} \right) - \Omega \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \vec{k} \\ &= \Omega \left(\frac{\partial u}{\partial z} \vec{i} + \frac{\partial v}{\partial z} \vec{j} \right) - \Omega \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \vec{k} \\ &= \Omega \frac{\partial \vec{V}_\perp}{\partial z} - \Omega \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \vec{k} \end{aligned} \quad (1.11)$$



附圖 1 渦管示意圖

其中， \bar{V}_\perp 代表與渦度垂直的速度分量。而 $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$ 以 δS_\perp 代表該微小單元段截面積，得

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{d\delta S_\perp}{\delta S_\perp dt} \quad (1.12)$$

$$(\bar{V} \cdot \nabla) \bar{\Omega} - (\bar{\Omega} \cdot \nabla) \bar{V} = \Omega \left(\frac{\partial \bar{V}_\perp}{\partial z} - \left(\frac{d\delta S_\perp}{\delta S_\perp dt} \right) \bar{k} \right) \quad (1.13)$$

可知 (1.10) 反映渦管橫截面的橫向脹縮。且在不考慮其他外界作用的情況下，流體微團垂直於轉軸的膨脹和收縮，必然引起轉動慣量之的改變，從而改變 $\bar{\Omega}$ 的大小。由於渦管是流體物質管，從 Kelvin 定理可知，在流體理想、正壓、體力有勢能之前提下，渦管強度的守恆。於是 δS_\perp 微小單元段截面積之變化，必然引起 $\bar{\Omega}$ 的變化。對於不可壓縮流體， δS_\perp 的增與減，必對應微小單元段長度的減與增，此現象亦可認為為渦量的變化係由渦管沿軸向的伸縮導致，故稱之為渦管的伸縮效應。而 $\frac{\partial \bar{V}_\perp}{\partial z}$ 的存在必然導致渦管的扭曲，渦管扭曲引起 $\bar{\Omega}$ 方向的改變（出現與原方向垂直的分量）。這種由於渦線取向的改變而使渦度改變的機制稱為渦線的翻轉效應。