

國立臺灣大學工學院工程科學及海洋工程學系

碩士論文

Department of Engineering Science and Ocean Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

應用條件平均法擷取海洋混合層中朗繆爾環流

之流場結構

Using Conditional Averaging Methods to Educe

Flow Structure of Langmuir Circulation

in a Oceanic Mixing Layer

翁立南

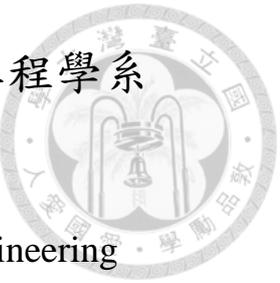
Li-Nan Weng

指導教授：蔡武廷 博士

Advisor: Wu-Ting Tsai, Ph.D.

中華民國 109 年 7 月

July 2020





國立臺灣大學碩士學位論文  
口試委員會審定書

應用條件平均法擷取海洋混合層中朗繆爾環流之流場  
結構

Using Conditional Averaging Methods to Educe Flow  
Structure of Langmuir Circulation in a Oceanic Mixing  
Layer

本論文係翁立南君（學號 R07525004）在國立臺灣大學工程科學  
及海洋工程學系完成之碩士學位論文，於民國109年7月16日承下  
列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：



（指導教授）

羅弘岳



周逸倫

翁立南

系主任

江敦坤

## 致謝



在進入台灣大學就讀碩士班的這兩年，有別於之前的大學生活，有著非常不同的體驗，也非常感謝有眾人在一旁協助著我成長。進入環境物理實驗室這兩年，最感謝的是我的指導教授蔡武廷老師，老師就如孔子因材施教，帶領著懵懂無知的我熟悉實驗室的研究方向，加強基礎科學，並且使我對於做研究的態度慢慢改進，拋開先前的不嚴謹的態度，學習把問題解決，如何在報告的時候有好的呈現，謝謝蔡老師對我有如此的耐心，這兩年對我來說非常充實。感謝口試委員周逸儒老師，陳世楠老師，羅弘岳老師以及詹益齊老師，給了我的碩士論文有許多寶貴的建議，也感謝各位老師抽空閱讀我的論文。特別感謝冠鴻學長和世明學長，從我毫無頭緒之時，慢慢帶領著我摸索碩士論文的方向，耐心的跟我討論，並且在每一次的報告都給了我許多建議，使我在碩二能逐漸架構出論文的方向，到現在得以完成論文。感謝巧婷學姐在我碩一時，給了我修課方面許多幫忙，使我能面對困難重重的流體力學和數值方法。感謝我的同學時棟和緯心，一開始我從別的學校進來這邊有許多的不適應，許多課程也都跟不上，能力也不足，謝謝你們如此的照顧我和幫助我，在我焦慮之時你們是我強大的後盾，從你們身上學到了許多事情。感謝學弟子韋和禮安，在我報告的時候能給出很實用的回饋。感謝與我一起北上念書的昱閔時常聽我抱怨和訴苦，雖然我們不同研究所，但謝謝你的支持。感謝以前一起在中山大學打拼的大學長俊宏，在我跌跌撞撞的兩年中，總是能說出許多心靈雞湯，使我重新思考和振作，對我來說你就是一座燈塔，也謝謝你在假期時常來找我。最後謝謝我的家人大力支持我念碩士班，使我能夠繼續增進自己。

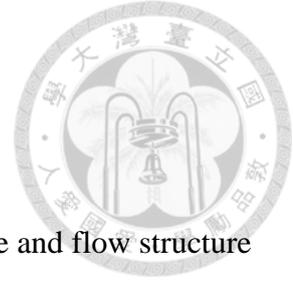
## 摘要



本研究運用不同的條件平均法分析由大渦模擬產出的數值資料，觀察朗繆爾環流造成的近水面條痕結構以及流場結構。首先使用影像處理方法分析近水面的流場，藉由影像切割以及影像增強法擷取條痕結構，為進行條件平均的主要依據。因使用影像處理法會有主觀性的問題產生，故嘗試了另一種類型的條件平均法，概念為根據設立的判斷準則，尋找流場中的特定物理事件，其方法包括象限分析及 Variable-Interval Space-Average，簡稱 VISA 取樣法。綜觀不同條件平均法的結果，大部分能清楚觀察到朗繆爾環流造成的流場結構，若該方法具有區域性的特質，則能夠擷取到流場中強度較低的結構。為了進一步探討不同強度的朗繆爾環流，使用 VISA 取樣法分析漩渦力強度不同的數值模擬資料，觀察漩渦力對朗繆爾環流造成的影響。

關鍵字: 條件平均、朗繆爾環流、條痕結構、流場結構、影像處理、象限分析、VISA 取樣法、漩渦力

# Abstract



In this thesis, the characteristics of near surface streaky structure and flow structure of Langmuir circulation of numerical data output by Large Eddy Simulation are analyzed using different conditional averaging methods. At first, image processing techniques are employed to analyze near surface images. Streak structures which are the foundation of conditional averaging is caught by image segmentation and image enhancement. Using image processing method would produce some subjectivity, so we tried another conditional averaging method including quadrant analysis and Variable-Interval Space-Average sampling technique (VISA). The concept is to find the certain physical events basing on detection criterion. According to the results of different conditional averaging methods, most results could capture structures caused by Langmuir circulation. If the methods contain local features, some smaller structures could be educed. Finally, we use VISA sampling technique to observe other numerical data with different vortex force to discuss different intensity of Langmuir circulation .

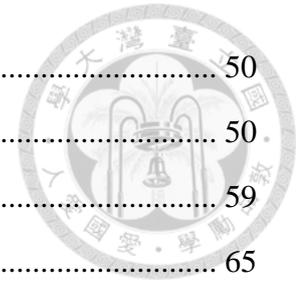
Keywords: conditional averaging, Langmuir circulation, streak structure, flow structure, image processing, quadrant analysis, VISA, vortex force

# 目錄



口試委員會審定書 .....	i
致謝 .....	ii
摘要 .....	iii
Abstract.....	iv
目錄 .....	v
圖目錄 .....	vii
表目錄 .....	xiv
第一章 前言 .....	1
1.1 朗繆爾環流(Langmuir Circulation).....	1
1.1.1 朗繆爾環流的發現.....	1
1.1.2 朗繆爾環流的觀測.....	3
1.2 研究動機及論文架構 .....	5
第二章 數值模擬資料 .....	6
2.1 大渦模擬(Large-Eddy Simulation) .....	6
2.2 數值資料 .....	8
第三章 利用影像處理方法進行條件平均 .....	13
3.1 研究回顧: 近水面條痕結構 .....	13
3.2 條件平均法 .....	19
3.3 設立門檻值進行影像切割 .....	22
3.4 大津演算法 .....	28
3.5 影像增強 .....	31
3.5.1 伽瑪校正(Gamma Correction) .....	31
3.5.2 直方圖等化(Histogram Equalization, HE).....	38
3.5.3 自適應直方圖等化(Adaptive Histogram Equalization, AHE) .....	44

第四章 尋找流場中特定的物理事件並進行條件平均 .....	50
4.1 象限分析(Quadrant Analysis) .....	50
4.2 VISA 取樣法 (Variable-Interval Space-Averaging) .....	59
4.3 VISA 取樣法之延伸: 區域標準差的使用 .....	65
第五章 探討朗繆爾環流的結構 .....	71
5.1 不同條件平均法結果之歸納 .....	71
5.2 漩渦力強度不同的朗繆爾環流結構 .....	73
5.2.1 朗繆爾環流之強度及文獻回顧 .....	73
5.2.2 使用不同條件的模擬資料進行分析 .....	75
第六章 結論 .....	88
參考文獻 .....	90





## 圖目錄

- 圖 1.1: 朗繆爾環流示意圖。此圖有兩對朗繆爾環流，每一對皆由一個順時針旋轉的漩渦和逆時針旋轉的漩渦組成，兩個漩渦的中間為輻合區，能夠觀察到此處的垂直方向速度為向下，且在海表面形成條痕。 ..... 2
- 圖 2.1: 水下 2 m 之影像，圖(a)為 $u'$ ，圖(b)為 $v'$ ，圖(c)為 $w'$ ，圖(d)為 $c'$ ，其中 $c'$ 的影像，條痕結構非常明顯，而 $u'$ 和 $w'$ 的訊號偏弱。 ..... 9
- 圖 2.2: 水下 6 m 之影像，圖(a)為 $u'$ ，圖(b)為 $v'$ ，圖(c)為 $w'$ ，圖(d)為 $c'$ ，在此深度， $w'$ 的訊號強，影像中的條痕結構明顯。 ..... 10
- 圖 2.3: 水下 10 m 之影像，圖(a)為 $u'$ ，圖(b)為 $v'$ ，圖(c)為 $w'$ ，圖(d)為 $c'$ ，其中 $u'$ 的訊號有明顯增加，其他參數的訊號皆有明顯減弱。 ..... 11
- 圖 2.4: 水下 15 m 之影像，圖(a)為 $u'$ ，圖(b)為 $v'$ ，圖(c)為 $w'$ ，圖(d)為 $c'$ ， $u'$ 在此層的訊號依然有一定強度，其他參數的影像皆無法看出明顯的結構。 ..... 12
- 圖 3.1: 使用水下 2 m 之 $c' = 0.007$ 的數值定義影像中的條痕範圍，並且疊圖在水下 2 m 之各方向速度的影像上，速度單位為 m/s，黑色線的部份為等值線 $c' = 0.007$ 。【原圖來源: 陳(2015)】 ..... 15
- 圖 3.2: 水下 2 m  $c'$ 之區域極大值的分布，黑色的點為區域極大值。圖(a)為原始的區域極大值，即影像中所有的區域極大值，圖(b)為使用 4 m 的高斯濾波進行篩選，圖(c)為使用 8 m 的高斯濾波進行篩選。【原圖來源: 陳(2015)】 .... 16
- 圖 3.3: 水下 6.2 m 之 $w'$ 影像。在 Kukulka et al. (2010)中使用水下 6.2 m 之 $w'$ 影像來定義朗繆爾環流造成的近水面條痕，經由影像中的色階觀察，紅色的區域大致上能夠定義為條痕，其數值大約小於此影像負的兩倍標準差 $-0.04$ ，故設置條件 $w' < -0.04$  m/s來篩選影像中有哪些點符合條痕的門檻。【原圖來源: Kukulka et al. (2010)】 ..... 17

圖 3.4: 選取特定的區域極大值，繪製其 y-z 平面影像的結果。使用圖 3.2 的結果，選取特定的區域極大值，進行該點位的水下影像繪製，觀察其速度場的結構，而影像呈現的結果無法看出一致性的結構，而挑選不同的區域極大值，影像呈現的結果也不同。【原圖來源: 陳(2015)】 .....	18
圖 3.5: 條件平均後的 $u'$ 之 y-z 平面影像。由圖 3.4 的結果，經由門檻值篩選出哪些點屬於條痕，將這些點的水下影像進行條件平均，由 $u'$ 的 y-z 平面影像能夠看出朗繆爾環流造成的強流結構。【原圖來源: Kukulka et al. (2010)】 .....	20
圖 3.6: 條件平均後，水下速度場的影像。經由條件平均的進行後，水下流場的影像，包括 $u'$ 、 $v'$ 及 $w'$ ，能夠清楚看出朗繆爾環流造成的結構，與圖 3.5 有著明顯的差異性。【原圖來源: 陳(2015)】 .....	21
圖 3.7: 使用水下 2 m 之 $c'$ 進行影像切割以及取點。圖(a)為 $c'$ 的原始影像，圖(b)為經由使用標準差當做門檻值，進行影像二值化的結果，白色為目標群，即為條痕結構，黑色為背景群，即濃度數值較低的網格點，圖(c)為利用條痕結構的判斷準則進行影像修正後的二值化結果，圖(d)為經由取點準則，取出要做條件平均的點，即為圖上的黑點。 .....	24
圖 3.8: 為使用圖 3.7(d)進行條件平均後的結果，圖(a)為 $u'$ ，能夠觀察到有強流的存在，圖(b)為 $v'$ ，能夠觀察到輻合區的形成，圖(c)為 $w'$ ，能夠觀察到強烈的下沉流。 .....	25
圖 3.9: 使用水下 6 m 之 $w'$ 進行影像切割以及取點。圖(a)為 $w'$ 的原始影像，圖(b)為經由使用標準差當作門檻值，進行影像二值化的結果，白色為目標群，即為條痕結構，黑色為背景群，即濃度數值較低的網格點，圖(c)為利用條痕結構的判斷準則進行影像修正後的二值化結果，圖(d)為經由取點準則，取出要做條件平均的點，即為圖上的黑點。 .....	26
圖 3.10: 為使用圖 3.9(d)進行條件平均後的結果，其結果與圖 3.8 相似，圖(a)為 $u'$ ，圖(b)為 $v'$ ，圖(c)為 $w'$ 。 .....	27

- 圖 3.11: 大津演算法的操作。圖(a)為大津演算法的示意圖，利用自動化的過程在灰階中選出最佳門檻值，圖(b)為利用大津演算法得出的門檻值，進行影像切割的結果，無法看出流場中的主要條痕結構，效果不佳。..... 30
- 圖 3.12: 伽瑪校正之乘冪轉換曲線。若 $\gamma < 1$ ，原先影像較弱且範圍較窄的部分，經由乘冪轉換後，會輸出成範圍較寬的範圍，增強原先影像中強度較低的數值；若 $\gamma > 1$ ，則會有相反的效果，增強原先影像中強度較高的數值；若 $\gamma = 1$ ，則輸入和輸出的影像相同。..... 33
- 圖 3.13: 水下 2 m 之 $c'$ 影像進行伽瑪校正轉換後的直方圖，橫軸為強度，縱軸為機率密度。圖(a)為使用 $\gamma = 1$ 進行伽瑪校正的結果，即為原圖的直方圖分布，圖(b)為使用 $\gamma = 0.5$ 之伽瑪校正的結果，能夠觀察到直方圖往右側移動，突顯影像中強度低的區域，影像整體變亮，圖(c)為使用 $\gamma = 2$ 之伽瑪校正的結果，能夠觀察到直方圖往左側移動，突顯影像中強度高的區域，影像整體變暗。..... 34
- 圖 3.14: 水下 2 m 之 $c'$ 影像進行伽瑪校正轉換後的影像。圖(a)為使用 $\gamma = 1$ 進行伽瑪校正的結果，即為原圖，圖(b)為使用 $\gamma = 0.5$ 之伽瑪校正的結果，影像整體變亮，圖(c)為使用 $\gamma = 2$ 之伽瑪校正的結果，影像整體變暗。..... 35
- 圖 3.15: 水下 2 m 之 $c'$ 影像進行不同指數的伽瑪校正結果(左側圖)以及使用大津演算法進行影像切割的結果(右側圖)。圖(a)及圖(b)為 $\gamma = 1$ ，圖(c)及圖(d)為 $\gamma = 2$ ，圖(e)及圖(f)為 $\gamma = 4$ 。..... 36
- 圖 3.16: 使用水下 2 m 之 $c'$ 影像進行  $\gamma = 4$ 之伽瑪校正後，依照條痕辨識準則以及取點準則進行條件平均的結果。圖(a)為 $u'$ ，圖(b)為 $v'$ ，圖(c)為 $w'$ 。..... 37
- 圖 3.17: 使用水下 2 m 之 $c'$ 影像進行直方圖等化表示圖。圖(a)為直方圖等化的函數轉換曲線，圖(b)為輸入影像，即原圖之直方圖分布，圖(c)為輸出影像之直方圖分布，能夠觀察到直方圖的變化，在亮部與暗部的對比度皆提升。.... 40



圖 3.18: 水下 2 m 之  $c'$  影像的原圖以及直方圖等化後的比較。圖(a)原圖，圖(b)為原圖進行大津演算法得出的二值化影像，圖(c)為原圖進行直方圖等化，能夠觀察到，比起原圖，影像的對比度整體加強，圖(d)為原圖進行直方圖等化後，進行大津演算法得出的二值化影像，其結果與原圖進行大津演算法之結果差異不大。..... 41

圖 3.19: 水下 2 m 之  $c'$  影像進行直方圖等化後(左)，再進行不同指數的伽瑪校正(右)，圖(a)和圖(b)為原圖進行直方圖等化和影像切割結果，圖(c)和(d)為原圖進行直方圖等化後進行  $\gamma = 2$  之伽瑪校正和影像切割結果，圖(e)和(f)為原圖進行直方圖等化後進行  $\gamma = 4$  之伽瑪校正和影像切割結果。..... 42

圖 3.20: 未進行直方圖等化與進行直方圖等化之條件平均結果的比較，其中使用伽瑪校正  $\gamma = 4$  之結果。圖(a)和(b)為  $u'$ ，前者未使用直方圖等化，後者有使用直方圖等化，圖(c)和(d)為  $v'$ ，前者未使用直方圖等化，後者有使用直方圖等化，圖(e)和(f)為  $w'$ ，前者未使用直方圖等化，後者有使用直方圖等化，能夠看出兩者的結果相似，幾乎難看出差異。..... 43

圖 3.21: 自適應直方圖等化示意圖。白色框為選取的矩形範圍，在內部進行直方圖等化，矩形中心點為要進行調整的數值，而影像中每一個網格點都會經過此過程，矩形會滑移整張影像..... 46

圖 3.22: 水下 2 m 之  $c'$  影像進行不同矩形範圍的自適應直方圖等化(左)以及其二值化影像結果(右)。圖(a)和(b)為  $11 \times 11$ ，圖(c)和(d)的矩形範圍為  $21 \times 21$ ，圖(e)和(f)的矩形範圍為  $31 \times 31$ ，由三種不同的矩形範圍能夠觀察到矩形範圍越小，區域性的突顯愈顯著。..... 47

圖 3.23: 水下 2 m 之  $c'$  影像進行矩形範圍  $31 \times 31$  之自適應直方圖等化，並進行不同指數的伽瑪校正(左)以及其二值化結果(右)。圖(a)和(b)為  $\gamma = 1$ ，圖(c)和圖(d)為  $\gamma = 2$ ，圖(e)和圖(f)為  $\gamma = 4$  ..... 48



圖 3.24: 水下 2 m 之  $c'$  影像進行矩形範圍  $31 \times 31$  之自適應直方圖等化，並進行的  $\gamma = 2$  (左) 和  $\gamma = 4$  (右) 之伽瑪較正的條件平均結果。圖 (a) 和 (b) 為  $u'$ ，圖 (c) 和 (d) 為  $v'$ ，圖 (e) 和 (f) 為  $w'$ ，能夠觀察到因使用  $\gamma = 2$  和  $\gamma = 4$  之伽瑪校正的條痕結構的擷取不同，造成條件平均的結果也會有所差異。..... 49

圖 4.1: 使用水下 2 m 影像進行象限分析。圖 (a) 水下 2 m  $u'$  影像，圖 (b) 水下 2 m  $w'$  影像，圖 (c) 水下 2 m  $u'w'$  影像，圖 (d) 使用  $k = 1$  進行象限分析之影像二值化結果，圖 (e) 使用  $k = 2$  進行象限分析之影像二值化結果。..... 53

圖 4.2: 使用水下 2 m 影像進行象限分析之條件平均結果，左側為  $k = 1$  之結果，右側為  $k = 2$  之結果，圖 (a) 和 (b) 為  $u'$ ，圖 (c) 和圖 (d) 為  $v'$ ，圖 (e) 和 (f) 為  $w'$ 。 . 54

圖 4.3: 使用水下 6 m 影像進行象限分析。圖 (a) 水下 6 m  $u'$  影像，圖 (b) 水下 6 m  $w'$  影像，圖 (c) 水下 6 m  $u'w'$  影像，圖 (d) 使用  $k = 1$  進行象限分析之影像二值化結果，圖 (e) 使用  $k = 2$  進行象限分析之影像二值化結果。..... 55

圖 4.4: 使用水下 6 m 影像進行象限分析之條件平均結果，左側為  $k = 1$  之結果，右側為  $k = 2$  之結果，圖 (a) 和 (b) 為  $u'$ ，圖 (c) 和圖 (d) 為  $v'$ ，圖 (e) 和 (f) 為  $w'$ 。 . 56

圖 4.5: 使用水下 10 m 影像進行象限分析。圖 (a) 水下 10 m  $u'$  影像，圖 (b) 水下 10 m  $w'$  影像，圖 (c) 水下 10 m  $u'w'$  影像，圖 (d) 使用  $k = 1$  進行象限分析之影像二值化結果，圖 (e) 使用  $k = 2$  進行象限分析之影像二值化結果。..... 57

圖 4.6: 使用水下 10 m 影像進行象限分析之條件平均結果，左側為  $k = 1$  之結果，右側為  $k = 2$  之結果，圖 (a) 和 (b) 為  $u'$ ，圖 (c) 和圖 (d) 為  $v'$ ，圖 (e) 和 (f) 為  $w'$ 。..... 58

圖 4.7: 利用不同參數進行 VISA 之影像二值化結果。圖 (a) 及圖 (b) 為水下 6 m 之  $u'$  影像及其使用 VISA 之二值化結果，圖 (c) 及圖 (d) 為水下 6 m 之  $w'$  影像及其使用 VISA 之二值化結果，圖 (e) 及圖 (f) 為水下 2 m 之  $c'$  影像及其使用 VISA 之二值化結果。..... 61

圖 4.8: 使用水下 6 m 之 $u'$ 影像進行條件平均之結果，其門檻值係數使用 $k = 1$ 。 圖(a)為 $u'$ ，圖(b)為 $v'$ ，圖(c)為 $w'$ 。.....	62
圖 4.9: 使用水下 6 m 之 $w'$ 影像進行條件平均之結果，其門檻值係數使用 $k = 1$ 。 圖(a)為 $u'$ ，圖(b)為 $v'$ ，圖(c)為 $w'$ 。.....	63
圖 4.10: 使用水下 2 m 之 $c'$ 影像進行條件平均之結果，其門檻值係數使用 $k = 1$ 。 圖(a)為 $u'$ ，圖(b)為 $v'$ ，圖(c)為 $w'$ 。.....	64
圖 4.11: 利用不同參數進行結構擷取之影像二值化結果。圖(a)及圖(b)為水下 6 m 之 $u'$ 影像及其二值化結果，圖(c)及圖(d)為水下 6 m 之 $w'$ 影像及其二值化結果，圖(e)及圖(f)為水下 2 m 之 $c'$ 影像及其二值化結果。.....	67
圖 4.12: 使用水下 6 m 之 $u'$ 影像進行條件平均之結果，其門檻值係數使用 $k = 1$ 。 圖(a)為 $u'$ ，圖(b)為 $v'$ ，圖(c)為 $w'$ .....	68
圖 4.13: 使用水下 6 m 之 $w'$ 影像進行條件平均之結果，其門檻值係數使用 $k = 1$ 。 圖(a)為 $u'$ ，圖(b)為 $v'$ ，圖(c)為 $w'$ 。.....	69
圖 4.14: 使用水下 2 m 之 $c'$ 影像進行條件平均之結果，其門檻值係數使用 $k = 1$ 。 圖(a)為 $u'$ ，圖(b)為 $v'$ ，圖(c)為 $w'$ 。.....	70
圖 5.1: 朗繆爾環流造成的近水面結構(圖左側)以及剪切力造成的近水面結構(圖右側)之比較，以垂直速度 $w'$ 當作使用參數，能夠觀察朗繆爾環流會造成明顯的條痕結構，而剪切力的效應並不會在近水面造成明顯的結構。【原圖來源: 圖(a)取自 Noh et al. (2006)】【原圖來源: 圖(b)取自 Kululka et al. (2010)】【原圖來源: 圖(c)取自 Li et al. (2015)】.....	74
圖 5.2: 使用陳(2015)中 6 個不同條件的模擬資料，繪製出水下 2 m 之 $c'$ 影像。圖(a)為 case D，圖(b)為 case P，圖(c)為 case S1，圖(d)為 case S2，圖(e)為 case W1，圖(f)為 case W2。.....	79

圖 5.3: 使用陳(2015)中 6 個不同條件的模擬資料，繪製出水下 6 m 之 $w'$ 影像。圖 (a)為 case D，圖(b)為 case P，圖(c)為 case S1，圖(d)為 case S2，圖(e)為 case W1，圖(f)為 case W2。.....	80
圖 5.4: 6 種模擬資料的平均速度垂直剖面。圖(a)為 case D，圖(b)為 case P，圖(c) 為 case S1，圖(d)為 case S2，圖(e)為 case W1，圖(f)為 case W2。.....	81
圖 5.5: 使用水下 2 m 的 $c'$ 進行 VISA 條件平均法之結果，左側圖為 case D 的結 果，右側圖為 case P 的結果，圖(a)及圖(b)為 $u'$ ，圖(c)及圖(d)為 $v'$ ，圖(e)及圖 (f)為 $w'$ 。.....	82
圖 5.6: 使用水下 6 m 的 $w'$ 進行 VISA 條件平均法之結果，左側圖為 case D 的結 果，右側圖為 case P 的結果，圖(a)及圖(b)為 $u'$ ，圖(c)及圖(d)為 $v'$ ，圖(e)及圖 (f)為 $w'$ 。.....	83
圖 5.7: 使用水下 2 m 的 $c'$ 進行 VISA 條件平均法之結果，左側圖為 case S1 的結 果，右側圖為 case S2 的結果，圖(a)及圖(b)為 $u'$ ，圖(c)及圖(d)為 $v'$ ，圖(e)及 圖(f)為 $w'$ 。.....	84
圖 5.8: 使用水下 6 m 的 $w'$ 進行 VISA 條件平均法之結果，左側圖為 case S1 的結 果，右側圖為 case S2 的結果，圖(a)及圖(b)為 $u'$ ，圖(c)及圖(d)為 $v'$ ，圖(e)及 圖(f)為 $w'$ 。.....	85
圖 5.9: 使用水下 2 m 的 $c'$ 進行 VISA 條件平均法之結果，左側圖為 case W1 的結 果，右側圖為 case W2 的結果，圖(a)及圖(b)為 $u'$ ，圖(c)及圖(d)為 $v'$ ，圖(e)及 圖(f)為 $w'$ 。.....	86
圖 5.10: 使用水下 6 m 的 $w'$ 進行 VISA 條件平均法之結果，左側圖為 case W1 的 結果，右側圖為 case W2 的結果，圖(a)及圖(b)為 $u'$ ，圖(c)及圖(d)為 $v'$ ，圖(e) 及圖(f)為 $w'$ 。.....	87

## 表目錄



表 5.1: 陳(2015)中，不同條件下的模擬資料。【原表來源: 陳(2015)】 ..... 77



# 第一章 前言

## 1.1 朗繆爾環流(Langmuir Circulation)

### 1.1.1 朗繆爾環流的發現

朗繆爾環流為風浪的交互作用下，形成的海洋現象，在海洋表面會形成沿風向的條痕，在早期航海員即發現在海上有著因風而對稱的條痕結構，並稱其為“windrows”，Langmuir (1938)為首次有學者對此現象進行深入觀察以及實驗，在1927年，作者於馬尾藻海(Sargasso Sea)航海時發現海面上聚集著大量的海藻，且形成一條一條的平行線，其間距無規則性，大約為100 m至200 m間，作者稱這些平行線為條痕(streaks)，其方向大致上沿著風向，長度大致上為500 m，當風向改變的時候，條痕的方向也會逐漸改變成與風向相同，作者也對航行觀察到的現象進行假設，海草之間沒有凝聚力，故應有其他的機制造成海草在海表面上聚集在一起，因此假設是因為海表面有著輻合區(convergence zone)，而在條痕的兩側分別有著旋轉方向相反的漩渦存在，一個為順時針旋轉，另一個為逆時針旋轉。爾後作者在1928-1929年間，在喬治湖(Lake George)中進行多組實驗，觀察風吹產生的流，並且發現，在風與波浪的作用下，會在海中形成反對稱的漩渦，此現象即為朗繆爾環流，其典型結構為一對反對稱的漩渦，而這對漩渦之間為輻合區，在海面上會形成明顯的條痕，且該處有著強烈的下沉流(downwelling)，如圖 1.1。

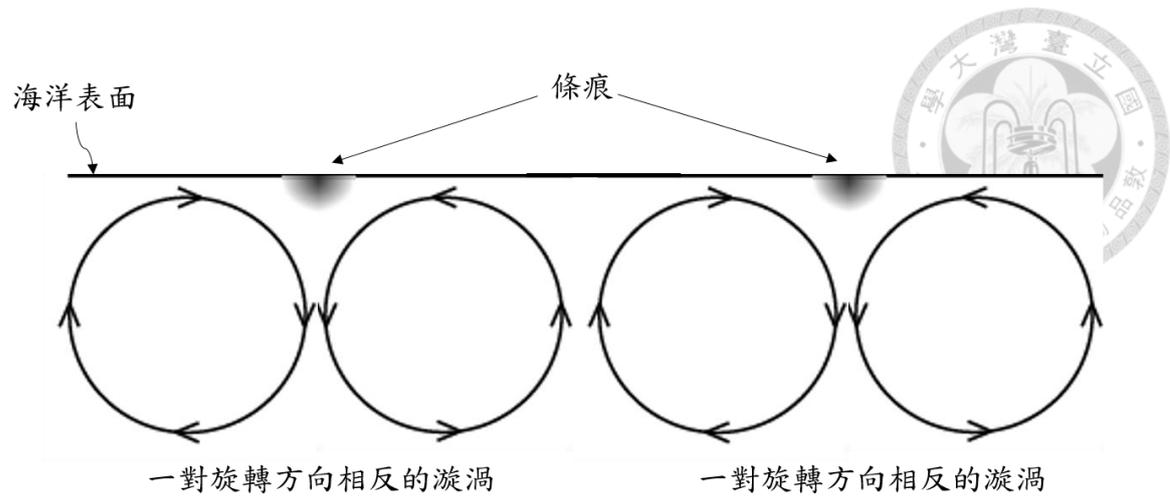
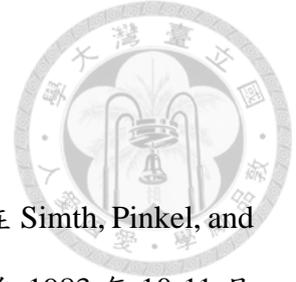


圖 1.1: 朗繆爾環流示意圖。此圖有兩對朗繆爾環流，每一對皆由一個順時針旋轉的漩渦和逆時針旋轉的漩渦組成，兩個漩渦的中間為輻合區，能夠觀察到此處的垂直方向速度為向下，且在海表面形成條痕。



### 1.1.2 朗繆爾環流的觀測

在過去數十年中，有許多文獻在描述朗繆爾環流的結構，在 Smith, Pinkel, and Weller (1987) 探討朗繆爾環流造成的速度結構，其使用的資料來自 1983 年 10-11 月在加州沿岸的海洋混合層觀測實驗- MILDEX (Mixed Layer Dynamics Experiment)，在平台架設聲納，觀察近表面混合層的流場結構(flow structure)，而在流速的觀測中，使用海流剖面儀(Profiling current meters)- VCMCs，並在不同的深度進行此儀器的架設，得到不同深度的流速，經由流速的觀測，觀察到強烈的下沉流(downwind-directed jet)，且與海洋表面的輻合區的位置吻合，清楚觀察到朗繆爾環流的結構。Zedel and Farmer (1991) 以海洋表層的泡沫分布(bubble clods)為觀測重點，以側掃聲納(sidescan sonar)以及回聲系統進行記錄，而這些帶狀分布的泡沫正是朗繆爾環流造成的結構，寬度大約為 3-5 m，長度能達 100 m，而在此篇文獻中也討論到條痕的分布，以條痕間距當作分布的代表，觀察結果發現，間距會隨著風速而改變，當風速小於 5 m/s 時，條痕間距大約為 5 m，當風速達 10 m 時，條痕間距能達到 10 m，Smith (1992) 也有提到朗繆爾環流的條痕間距會隨著風速的增加而成長，其初始的風速為 8 m/s，條痕間距為 16 m，當風速增加到 13 m/s，一小時後，條痕間距成長為 40 m。

除了關於朗繆爾環流特徵的觀測，也有與其他海洋觀測連結的研究，例如在 Thorpe et al. (2003) 中，提到了紊流的動能消散率與朗繆爾環流的關聯性，經由儀器的量測，發現在朗繆爾環流造成的泡沫條痕中，有著高數值的紊流動能消散率，因垂直混合的效應，提高了動能消散率。朗繆爾環流是維持海洋混合層的重要效應之一，因有著強烈的垂直混合，也有文獻在探討朗繆爾環流形成的條痕與混合層之間的關聯，例如 Smith (1992)，在海洋研究計畫 “SWAPP” (Surface Wave Process Program) 中，使用聲納系統進行量測，在風速增加的期間觀測混合層深度以及海表

面的條痕間距，其結果顯示在風速增加時，混合層深度急遽由 10 m 增加至 25 m，而條痕間距也與混合層有著 2 倍的關係。

朗繆爾環流造成的效應，也與海洋的生態工程有所相關，Yang, Chamecki and Meneveau (2014)結合了海洋汙染以及海洋現象，主要講述當深水區的油井噴發時，在海中會與混合層以及朗繆爾環流進行交互作用，造成油的稀釋，且油汙也會形成條痕而擴散，此研究對於海洋汙染的模式建立有非常大的幫助。

除了海洋現場觀測之外，也能使用數值模式進行朗繆爾環流的探討，其中大渦模擬(Large Eddy Simulation, LES)為最常使用的模式之一，因為這個模式非常適合進行上層海洋的模擬，能夠探討許多海洋中的反應以及作用，也很適合進行海洋中的暴風事件的模擬，觀察在強烈的風暴下，上層海洋會有哪些變化，例如在 Kukulka et al. (2009)進行海洋實測以及大渦模擬的結果比較，而模式的結果也有利於探討朗繆爾環流的結構，並且補足海洋實測因天氣狀況而無法量測的缺失，而在 Kukulka et al. (2010)則探討了真實暴風事件下，海洋混合層急速加深的情形，使用了 SWAPP 的實測資料進行模式的建立，由模式資料得出的海洋近表面影像，能夠清楚看出朗繆爾環流造成的條痕，且經由條件平均等統計方法後，能夠得出朗繆爾環流造成的速度場結構，故大渦模擬對於朗繆爾環流的研究扮演著非常重要的角色。



## 1.2 研究動機及論文架構

當朗繆爾環流發生時，會在海洋表面造成明顯的沿風向條痕，且會在水面下造成強烈的垂直混合運動，為維持海洋混合層的重要機制，因此觀察朗繆爾環流造成的條痕結構以及水面下的結構能夠更進一步了解朗繆爾環流的特性。

本研究參考前人對於朗繆爾環流的特性研究，並且使用陳(2015)中的數值模擬資料進行條痕結構的辨識，利用辨識結果更進一步對水下結構進行觀察，以探討朗繆爾環流的特性，以下為論文的安排：在第二章說明陳(2015)中產生的數值模擬資料，於 2.1 節介紹使用的模式-大渦模擬 (Large Eddy Simulation)，於 2.2 節介紹模擬產出的數值資料，說明有哪些參數以及資料的基本資訊。

第三章主要介紹利用影像處理方法進行近水面辨識條痕結構以及條件平均法，於 3.1 節中進行相關的文獻回顧，其內容包含朗繆爾環流的條痕以及條件平均的使用，於 3.2 節說明如何進行條件平均，於 3.3 節說明利用門檻值進行影像切割，擷取出條痕結構，於 3.4 節說明自動化取得門檻值的方法-大津演算法，於 3.5 節說明影像對比度增強的相關方法，其中分為 3 小節，於 3.5.1 說明伽瑪校正 (Gamma correction)，3.5.2 節說明直方圖等化(Histogram equalization)，3.5.3 節說明自適應直方圖等化 (Adaptive histogram equalization)。

第四章介紹如何運用流場的物理特性進行事件的尋找，並且進行條件平均，於 4.1 節說明象限分析法 (Quadrant analysis)，於 4.2 節說明 VISA 取樣法 (Variable-interval space-average)，於 4.3 節進行 VISA 取樣法的延伸：區域標準差的使用。

第五章將進行條件平均法的歸納以及更進一步的應用，於 5.1 節進行條件平均法的結果整理以及歸納比較，於 5.2 節進行朗繆爾環流更進一步的探討，首先於 5.2.1 節進行文獻回顧，了解不同條件下朗繆爾環流的強度，於 5.2.2 節中使用陳(2015)中其他條件的模擬資料進行不同強度的朗繆爾環流的觀察。

第六章為結論。

## 第二章 數值模擬資料



本研究將使用陳(2015)中的數值資料來進行分析，模擬的觀測事件為 1991 年 11 月 24 日發生的真實風暴事件，其地點位在喬治亞海峽北部 (northern Georgia Strait)，近鮑威爾河口 (estuary of Powell River)，確切的經緯度為  $49^{\circ}50'N$ ， $124^{\circ}48'W$ ，在此章中將介紹陳(2015)中使用的大渦模擬以及產出的數值模擬資料。

### 2.1 大渦模擬(Large-Eddy Simulation)

三維的大渦模擬數值模式，主要進行上層海洋 (upper ocean surface layer) 的模擬，在陳(2015)中根據 Moeng (1984) 建立了大渦模擬模式，其主要目標是進行 Craik-Leibovich (C-L) 動量方程式的求解，利用 Boussinesq 近似法解出速度場  $\mathbf{v}$ ，並且利用純量的傳輸方程式解出溫度  $\theta$  以及鹽度  $S$ ，其方程式如下：

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla \bar{p} + \frac{\rho''}{\rho_0} g \hat{\mathbf{z}} + \mathbf{u}_s \times (f \hat{\mathbf{z}} + \boldsymbol{\omega}) + \text{SGS} \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + (\mathbf{v} + \mathbf{u}_s) \cdot \nabla \theta = \text{SGS} \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + (\mathbf{v} + \mathbf{u}_s) \cdot \nabla S = \text{SGS} \quad (2.3)$$

連續方程式如下：

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (2.4)$$

速度場對應到坐標軸  $(x, y, z)$  可由  $\mathbf{v} = (u, v, w)$  表示，方向分別為順風向 (downwind)、跨風向 (crosswind) 以及向下 (downward)。 $\rho''$  為與參考密度  $\rho_0 = 1022.8 \text{ kg m}^{-3}$  之間的差異，因密度的數值會取決於鹽度以及密度，其線性關係如下：

$$\rho = \rho_0 [1 - \alpha(\theta - \theta_0) + \beta(S - S_0)] \quad (2.5)$$



其中參考溫度 $\theta_0 = 9^\circ C$ ，參考鹽度 $S_0 = 29.1 \text{ psu}$ ，溫度擴張係數 $\alpha = 1.7 \times 10^{-4} K^{-1}$ ，鹽度收縮係數 $\beta = 7.6 \times 10^{-4} \text{ psu}^{-1}$ 。 $\tilde{p}$ 為廣義的壓力(generalized pressure)，其定義如下：

$$\tilde{p} = \frac{p}{\rho_0} + \frac{1}{2}|\mathbf{v} + \mathbf{u}_s|^2 - \frac{1}{2}|\mathbf{u}_s|^2 \quad (2.6)$$

其中  $p$  為壓力。重力加速度 $g = 9.81 \text{ m s}^{-1}$ ，科氏參數 (Coriolis parameter)使用  $f = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ，因應觀測地點位於中緯度。在式 2.1、式 2.2 及式 2.3 中的 SGS 項為次網格尺度應力 (sub-grid scale stress)，其原因為紊流應力 (turbulent stress)的影響尺度小於一個網格的大小，故稱之為次網格。

在 C-L 動量方程式中，藉由參數化漩渦力，表示出表面波浪 (surface wave)與底部大氣邊界層的流體 (underlying planetary boundary layer flow)之交互作用，此項為方程式中的 $\mathbf{u}_s \times (f\hat{z} + \boldsymbol{\omega})$ ，其中 $\boldsymbol{\omega} = \nabla \times \mathbf{v}$ ，稱為渦度， $\mathbf{u}_s$ 為史托克漂移速度 (Stokes drift velocity)，而漩渦項 $\mathbf{u}_s \times \boldsymbol{\omega}$ 主導著朗繆爾環流的形成機制，以下為史托克漂移速度：

$$\mathbf{u}_s = a^2 \sigma k e^{-2kz} \hat{x} \quad (2.7)$$

其中  $a$  為波的有效振幅或 $\frac{1}{4}$ 倍的顯著波高， $2k$  為指數的增長率， $k$  為波數 (wavenumber)， $\sigma$ 為有效的波角頻率 (effective wave angular frequency)，根據深水波的頻散關係，得出 $\sigma = (gk)^{1/2}$ ，由以上參數可知，不同數值的振幅，波數，會對於朗繆爾環流造成影響，在 5.2 節會對於不同強度的朗繆爾環流進行更進一步的分析。



## 2.2 數值資料

本節將說明此研究使用的數值資料。陳(2015)根據真實暴風事件的觀測資料以及大渦模擬的使用，得到了模擬海洋的數值資料，在模式進行發展之後，使用的模擬時段為發生風暴當日的 0400 PST 至 1500 PST，得出的參數包含沿流向流速  $u$ 、跨流向流速  $v$ 、垂直流速  $w$ 、溫度  $t$ 、鹽度  $s$  以及虛擬濃度  $c$  (passive tracer 之濃度)，其數值模擬的空間，在  $x$  方向及  $y$  方向皆有 200 個網格點，每一公尺一個網格，在  $z$  方向有 120 個網格點，每 0.5 m 一個網格點，故整個模擬資料的範圍以體積的形式表示為  $200\text{ m} \times 200\text{ m} \times 60\text{ m}$ 。在時段上的選用，陳(2015)中主要以 1400 PST 各參數的影像當作研究的主要依據，故在此研究中也將以 1400 PST 的影像為主，並配合不同深度的選用，來進行後續的研究。在繪製各參數時，會先扣掉各層的平均值，在進行繪製，即為 fluctuation 的概念，扣掉各層平均值後，得到的參數包括沿流向速度的 fluctuation ( $u'$ )，跨流向速度的 fluctuation ( $v'$ )，垂直方向速度 ( $w'$ )，以及虛擬濃度的 fluctuation ( $c'$ )。由圖 2.1、圖 2.2、圖 2.3、圖 2.4 呈現 1400 PST 之  $u'$ 、 $v'$ 、 $w'$  和  $c'$  在水下 2 m、6 m、10 m、15 m 的  $x$ - $y$  平面影像圖，由影像的初步觀察，能夠發現水下 2 m 的影像中， $c'$  的條痕結構最為明顯， $u'$  與  $w'$  的訊號偏弱，如圖 2.1 所示。在水下 6 m 的影像中，能夠發現  $w'$  在此深度的訊號強，條痕結構較明顯， $u'$  的訊號雖有增強，但條痕結構仍然較不突出，如圖 2.2 所示。水下 10 m 的影像中能夠看出各參數的訊號皆變弱，唯獨  $u'$  的訊號變強，如圖 2.3 所示，甚至到了 15 m 時，其他參數幾乎看不出明顯的結構， $u'$  的訊號在此層仍有加強，如圖 2.4 所示。藉由觀察不同深度和不同參數的影像圖，能夠對於後續朗繆爾環流結構的研究，立下基礎。

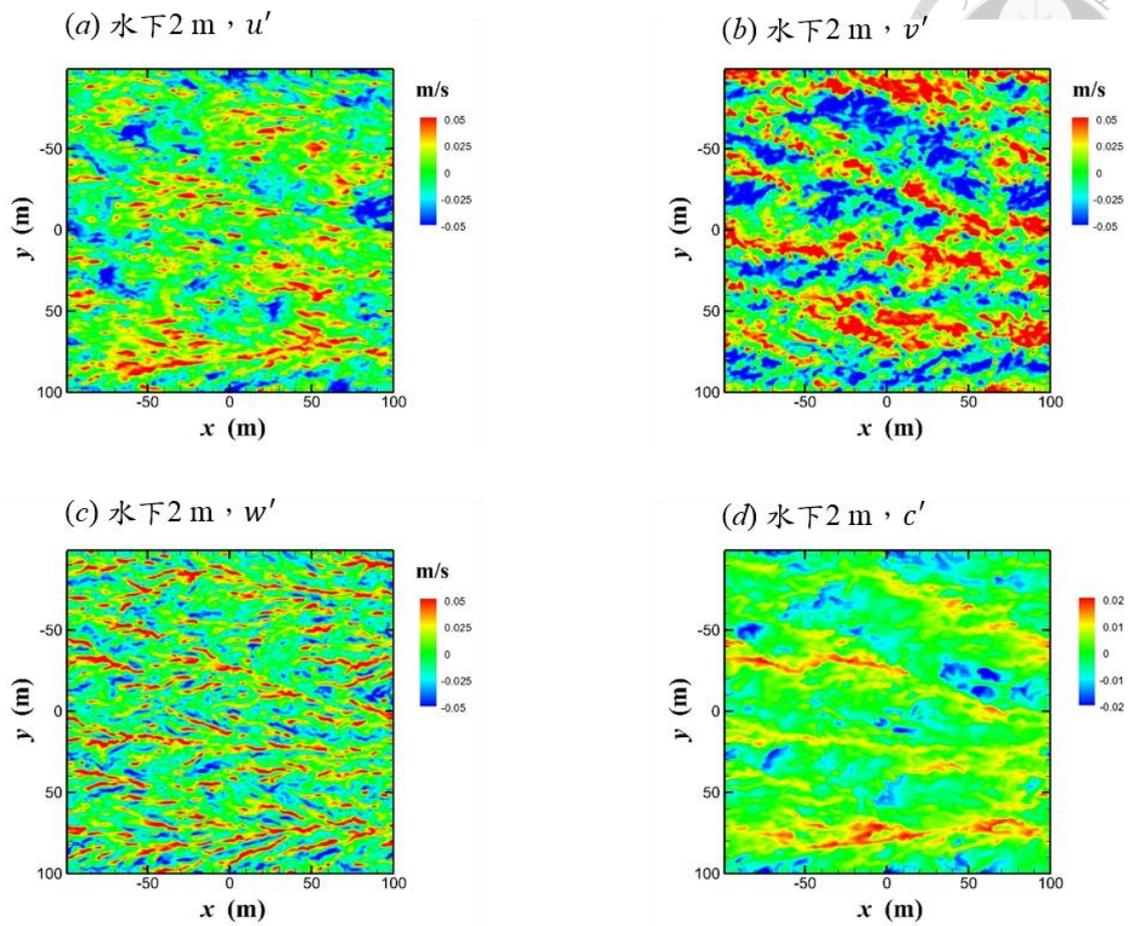
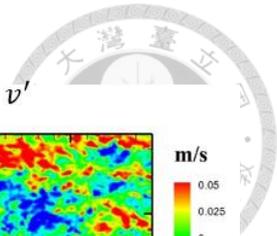


圖 2.1: 水下 2 m 之影像，圖(a)為 $u'$ ，圖(b)為 $v'$ ，圖(c)為 $w'$ ，圖(d)為 $c'$ ，其中 $c'$ 的影像，條痕結構非常明顯，而 $u'$ 和 $w'$ 的訊號偏弱。

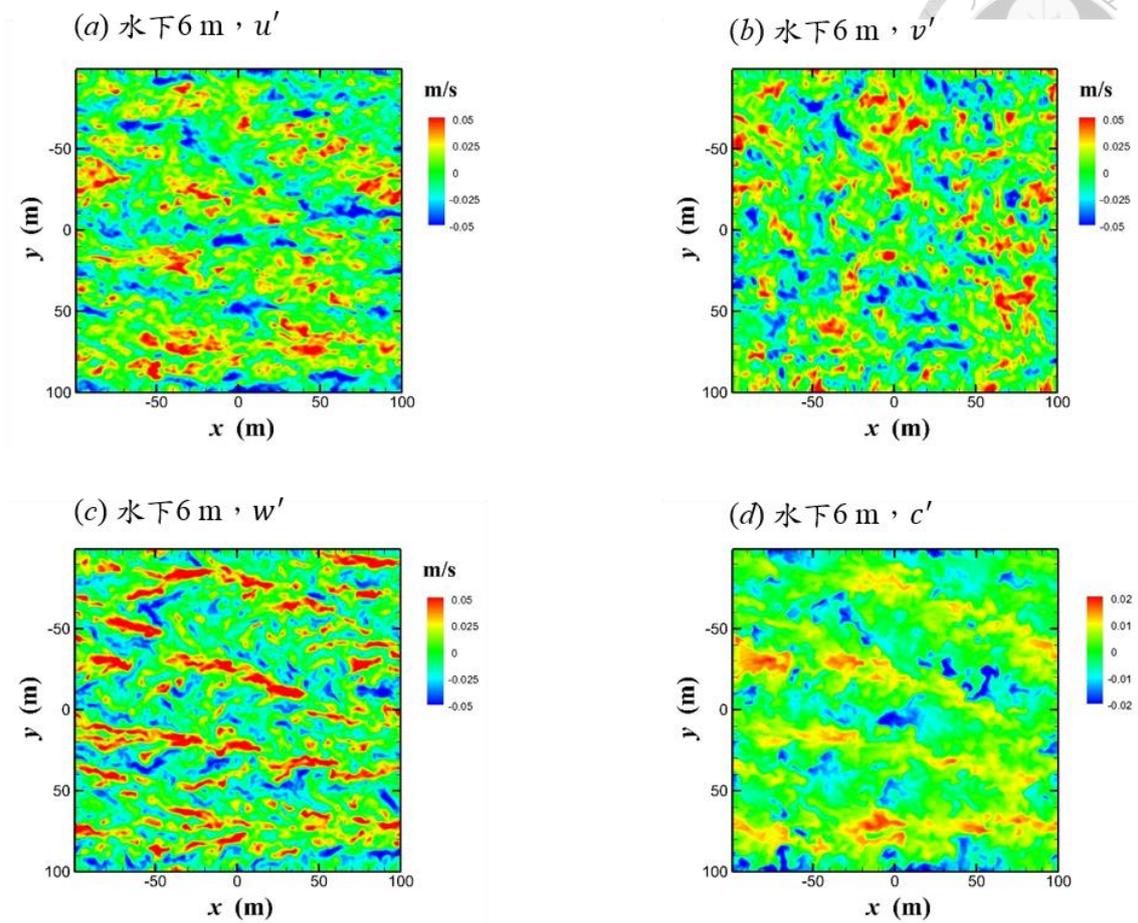


圖 2.2: 水下 6 m 之影像，圖(a)為 $u'$ ，圖(b)為 $v'$ ，圖(c)為 $w'$ ，圖(d)為 $c'$ ，在此深度， $w'$ 的訊號強，影像中的條痕結構明顯。

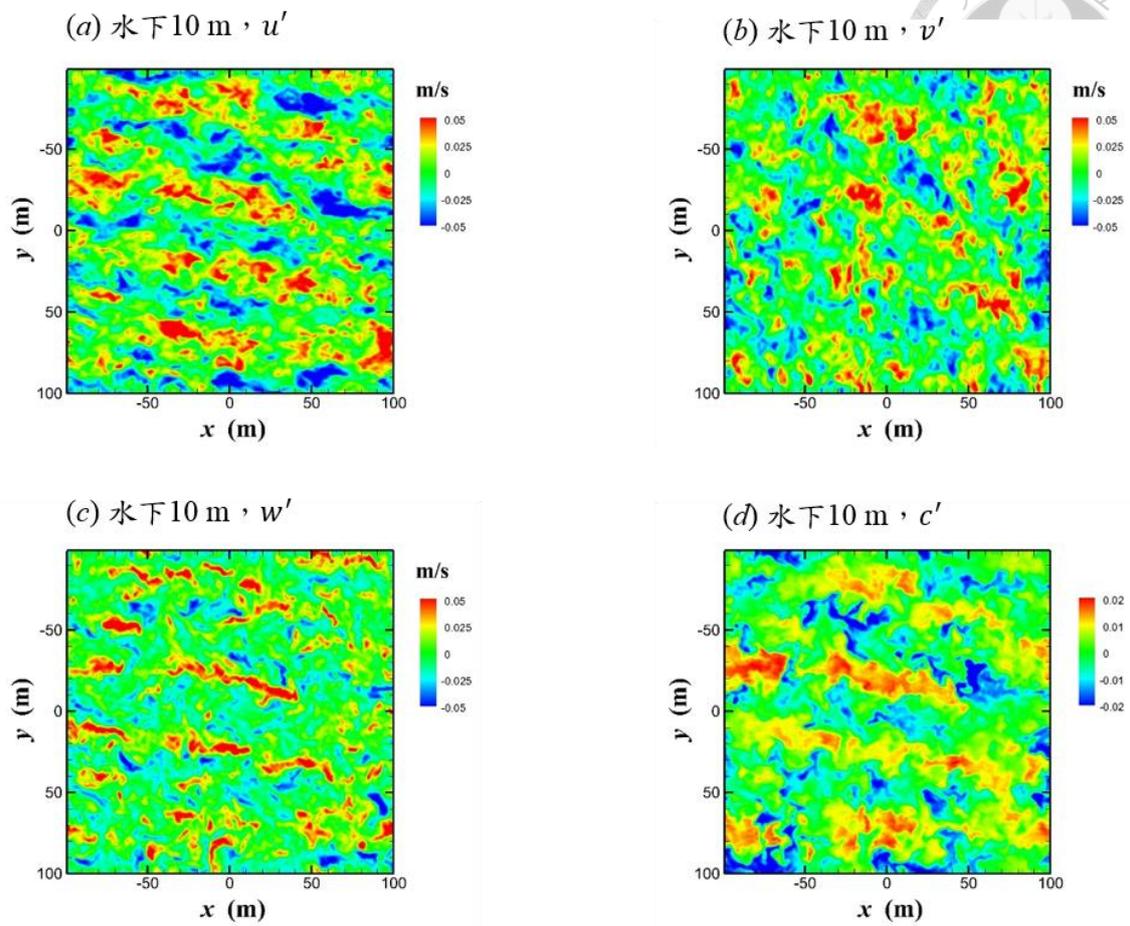


圖 2.3: 水下 10 m 之影像，圖(a)為 $u'$ ，圖(b)為 $v'$ ，圖(c)為 $w'$ ，圖(d)為 $c'$ ，其中 $u'$ 的訊號有明顯增加，其他參數的訊號皆有明顯減弱。

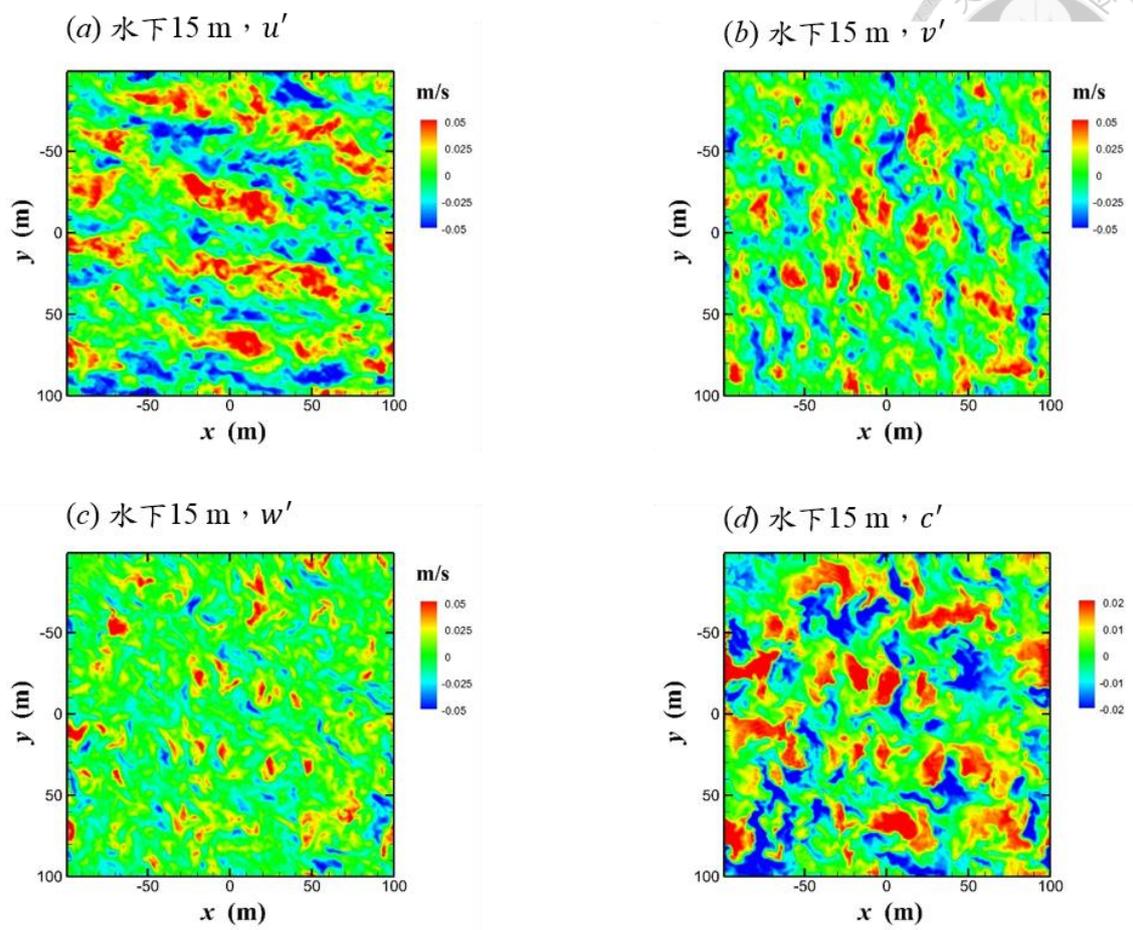
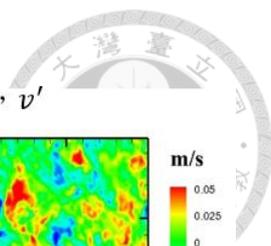


圖 2.4: 水下 15 m 之影像，圖(a)為 $u'$ ，圖(b)為 $v'$ ，圖(c)為 $w'$ ，圖(d)為 $c'$ ， $u'$ 在此層的訊號依然有一定強度，其他參數的影像皆無法看出明顯的結構。



### 第三章 利用影像處理方法進行條件平均

本章將分析陳(2015)中大渦模擬產出的數值資料，由初步的近水面影像能夠觀察到條痕結構得存在，為擷取朗繆爾環流的流場結構之重要依據，故擷取出近水面流場的條痕結構為首要目標。由進水面的流場影像，能夠對條痕的形狀以及分布有初步的了解，故期望透過影像處理的方式，將條痕結構與其他區域分開，以利後續的探討。在此章將使用影像處理的相關方法，擷取出朗繆爾環流造成的條痕結構，並且根據這些結構進一步去擷取水下的流場結構。

#### 3.1 研究回顧：近水面條痕結構

根據陳(2015)大渦模擬得出的資料，繪出各參數的近水面影像，能夠觀察到流場中有尺度不同的條痕結構，其中朗繆爾環流造成的條痕最為明顯。在陳(2015)中繪製出各參數水下 2 m，時間為 1400 PST 的影像，以觀察近水面流場的條痕結構，包括  $u'$ ， $v'$ ， $w'$ ， $c'$ 。在近水面影像中，條痕結構以  $c'$  的影像呈現最為明顯，等值線  $c' = 0.007$  大致上能夠定義出影像中的條痕，為了觀察條痕在不同方向的速度中有哪些特性，故將等值線疊圖在速度場的影像上，如圖 3.1。經由  $c' = 0.007$  等值線疊圖的觀察，由  $u'$  影像呈現的高速區，可以得知有顯著的 jet 產生，即為朗繆爾環流造成的條痕；由  $v'$  影像所呈現的分布，可以觀察到輻合區的存在；由  $w'$  的影像所呈現的高速區域，可以觀察到顯著的下沉流事件，在此定義下沉的速度為正值，往上的速度為負值。觀察其他深度的影像可以發現條痕結構有所不同，且各個物理量的影像變化也不同，例如  $w'$  的條痕結構在 6 m 時最為明顯； $u'$  在近表層時的條痕結構最不明顯，隨著深度增加條痕結構愈來愈明顯，大約到了 15 m 時最明顯。

為了探討流場中條痕的結構，需將影像中的條痕進行辨識，在陳(2015)中以水下 2 m 之  $c'$  影像來定義條痕，標準為影像中  $y$  方向的區域極大值，但得到的點數量

過多，如圖 3.2 (a)，無法觀察流場中的條痕結構，故將  $c'$  的影像進行高斯濾波 (Gaussian filter)，去除數值過小的點，最後得出的區域極大值能夠看出流場中條痕的位置，如圖 3.2 (b)、(c)。Kukulka et al. (2010) 使用大渦模擬的數值資料進行朗繆爾環流的研究，其中水下 6.2 m 之  $w'$  的影像能夠清楚觀察到朗繆爾環流造成的高速條痕，藉由影像中色階的觀察，條痕的速度數值大致上會小於  $w'$  負的兩倍標準差 -0.04 m/s，故設立此數值為定義條痕的門檻值，如圖 3.3。在陳(2015)中也以  $c' = 0.007$  做為能代表條痕輪廓的數值，概念類似於使用門檻值來定義條痕。

在完成條痕辨識後，可以根據篩選出的區域極大值，觀察水面下的流場結構。陳(2015)中，選取特定的區域極大值，截取其水面下的流場進行初步觀察，然而選取不同的區域極大值，其水下結構無法看出一致性，如圖 3.4。為了解決結構不一致的問題，參考 Kukulka et al. (2010) 的條件平均法，將在 3.2 節進行說明。

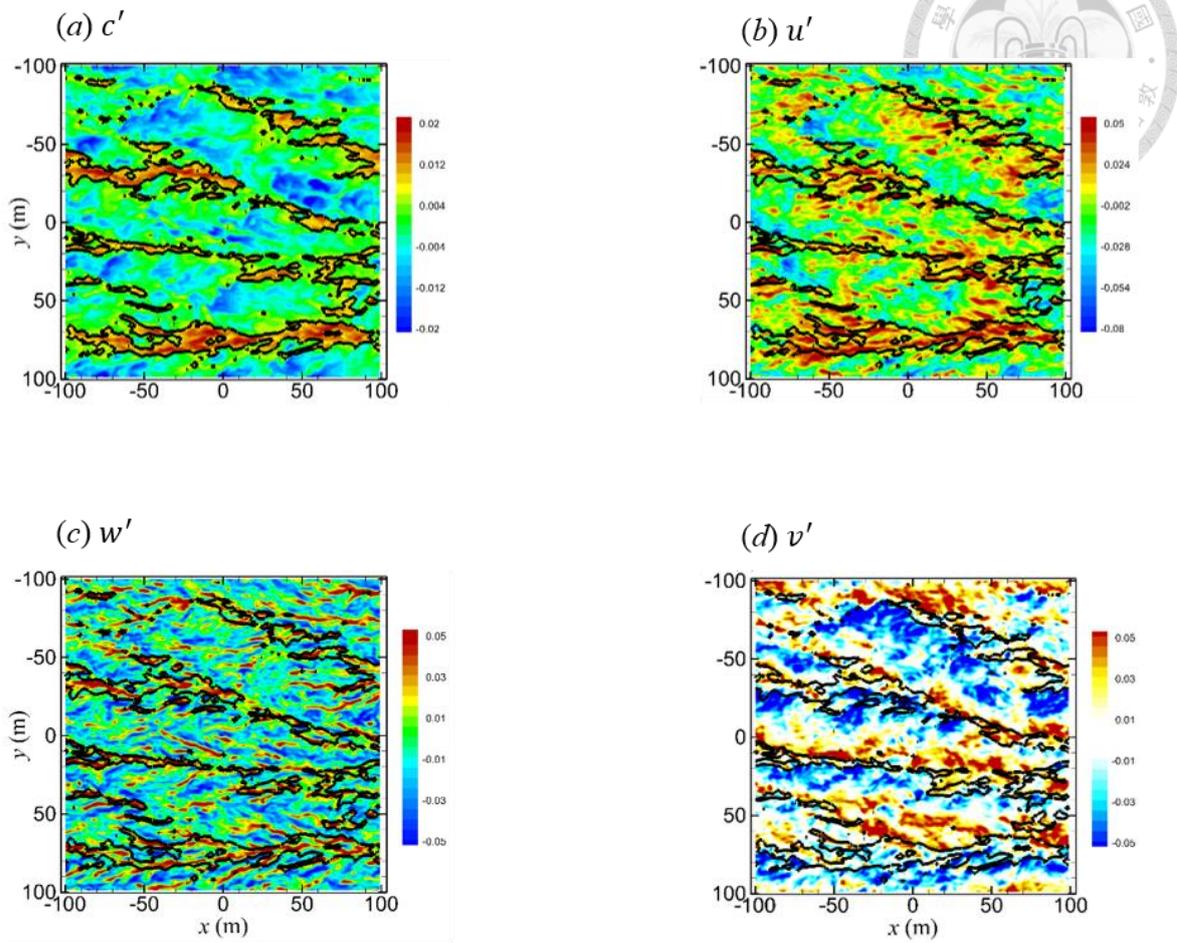


圖 3.1: 使用水下 2 m 之  $c' = 0.007$  的數值定義影像中的條痕範圍，並且疊圖在水下 2 m 之各方向速度的影像上，速度單位為 m/s，黑色線的部分為等值線  $c' = 0.007$ 。【原圖來源: 陳(2015)】

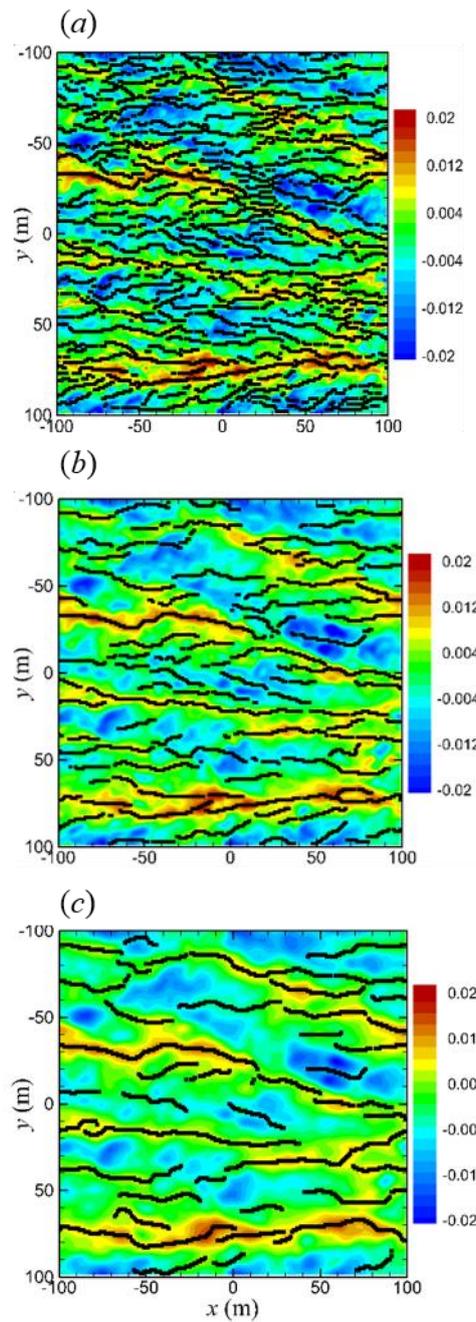


圖 3.2: 水下 2 m  $c'$  之區域極大值的分布，黑色的點為區域極大值。圖(a)為原始的區域極大值，即影像中所有的區域極大值，圖(b)為使用 4 m 的高斯濾波進行篩選，圖(c)為使用 8 m 的高斯濾波進行篩選。【原圖來源: 陳(2015)】

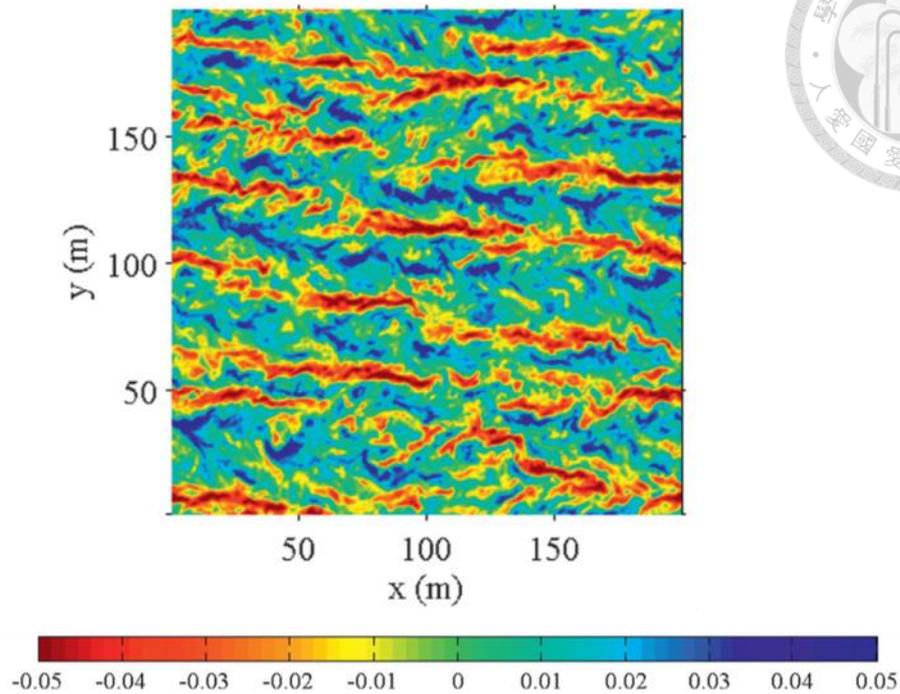


圖 3.3: 水下 6.2 m 之  $w'$  影像。在 Kukulka et al. (2010) 中使用水下 6.2 m 之  $w'$  影像來定義朗繆爾環流造成的近水面條痕，經由影像中的色階觀察，紅色的區域大致上能夠定義為條痕，其數值大約小於此影像負的兩倍標準差  $-0.04$ ，故設置條件  $w' < -0.04$  m/s 來篩選影像中有哪些點符合條痕的門檻。【原圖來源: Kukulka et al. (2010)】

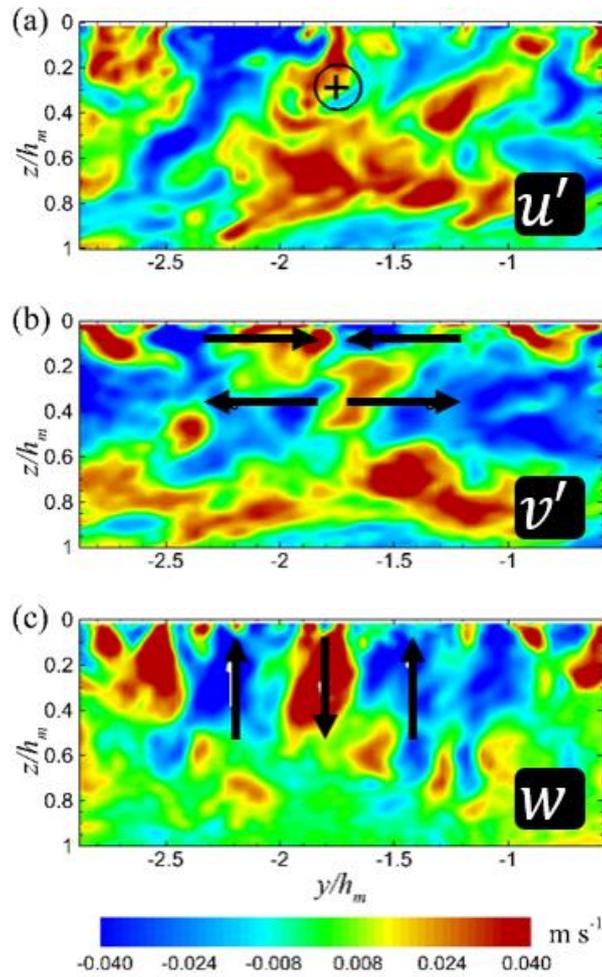


圖 3.4: 選取特定的區域極大值，繪製其  $y$ - $z$  平面影像的結果。使用圖 3.2 的結果，選取特定的區域極大值，進行該點位的水下影像繪製，觀察其速度場的結構，而影像呈現的結果無法看出一致性的結構，而挑選不同的區域極大值，影像呈現的結果也不同。【原圖來源: 陳(2015)】



## 3.2 條件平均法

為了探討朗繆爾環流在水面下的結構，需由近水面影像中所定義的條痕來觀察水面下的流場分布，初步的做法為選取影像中能夠代表條痕的區域極大值，由此點向下擷取水面下的數值模擬資料，繪出水面下的流場影像(包含 $u'$ 、 $v'$ 及 $w'$ )。但經由選取不同的區域極大值進行水下速度場影像的繪製，得出的結果無法看出一致性的結構，每張影像的差異性極大，在 Kukulka et al. (2010)中提到，因紊流場的結構分布混亂，故選取近水面影像中的特定位置觀察水下速度場影像，並無法一致性的結構。為了改善結構混亂不一致的問題，Kukulka et al. (2010)中提出了條件平均法，概念為設立條件，在近水面影像中找出符合條件的點，將這些點代表的水下影像加總後，進行平均，得出新的結果，其公式如下：

$$\{Q\}(y, z, t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q(x^i, y - y^i, z, t) \quad (3.1)$$

$Q$  代表特定的物理量， $\{Q\}(y, z, t)$ 代表條件平均過後的結果， $Q(x^i, y - y^i, z, t)$ 代表某個符合條件的點之水面下的影像，即為  $y$ - $z$  平面，以 $y^i$ 為中心向  $y$  方向以及  $z$  方向擴展，取出影像。Kukulka et al. (2010) 以垂直方向速度 $w'$ 的水下 6.2 m 的影像當作依據，並設立條件 $w' < -0.04$  m/s (大約等於此影像的兩倍標準差) 當作門檻值，符合條件的點即代表下沉流事件，將所有符合此條件的點之水下影像加總後得出的結果能夠明顯看出朗繆爾環流造成的流場結構，在 $u'$ 條件平均後的影像可以看出在 0-20 m 有強流 (jet) 存在，如圖 3.5。陳(2015)參考 Kukulka et al. (2010)的條件平均法，在設立條件並進行條件平均後， $u'$ 、 $v'$ 及 $w'$ 的影像皆能看出由朗繆爾環流造成的流場結構，如圖 3.6。此章節將使用影像處理方法進行條痕辨識，並參考 Kukulka et al. (2010)的條件平均法進行水下影像的繪製，觀察朗繆爾環流造成的流場結構。

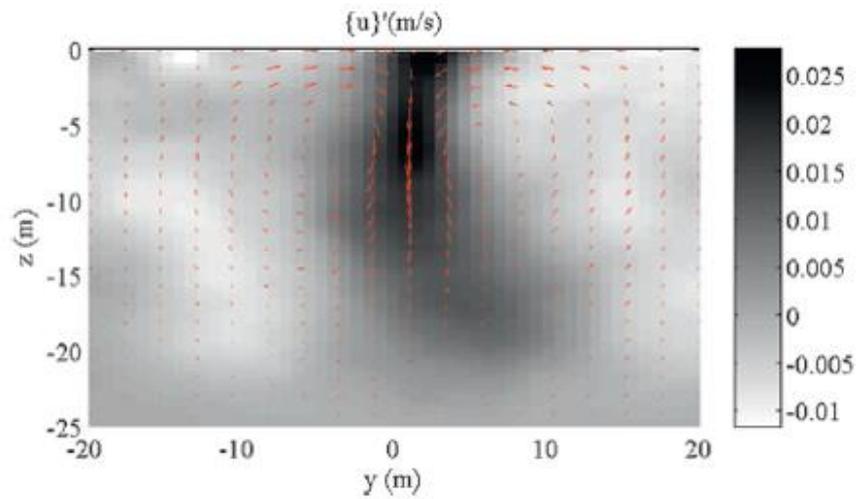


圖 3.5: 條件平均後的 $u'$ 之  $y$ - $z$  平面影像。由圖 3.4 的結果，經由門檻值篩選出哪些點屬於條痕，將這些點的水下影像進行條件平均，由 $u'$ 的  $y$ - $z$  平面影像能夠看出朗繆爾環流造成的強流結構。【原圖來源: Kukulka et al. (2010)】

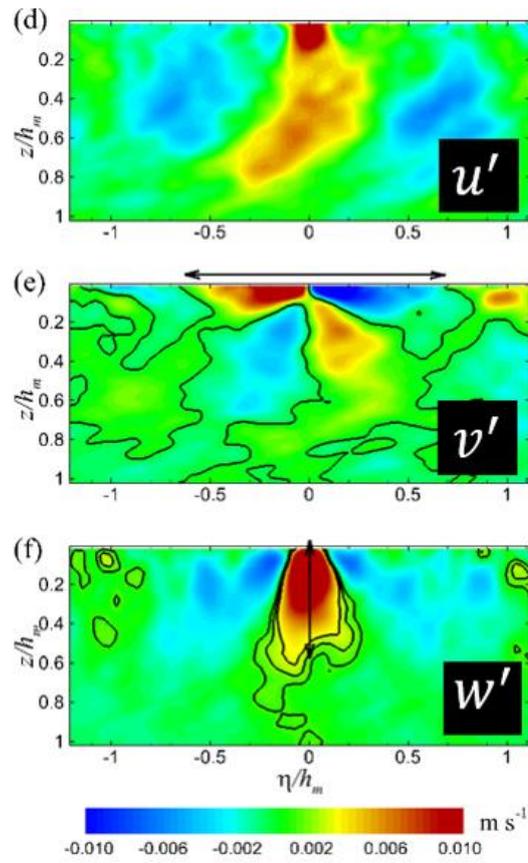


圖 3.6: 條件平均後，水下速度場的影像。經由條件平均的進行後，水下流場的影像，包括 $u'$ 、 $v'$ 及 $w'$ ，能夠清楚看出朗繆爾環流造成的結構，與圖 3.5 有著明顯的差異性。【原圖來源: 陳(2015)】



### 3.3 設立門檻值進行影像切割

在此節中，期望透過影像處理的方法，進行條痕結構的辨識，並且擷取出條痕結構，當做進行條件平均的依據，而初步的想法為區分出流場中的條痕以及背景，藉由門檻值的設立進行影像切割，將影像二值化，白色的部分為目標群，黑色部份為背景群。Kukulka et al. (2010) 中，由水下 6.2 m 之垂直方向速度  $w'$  的影像觀察條痕，經由影像中的色階觀察，得知條痕的數值大致上會小於影像負的兩倍標準差，即  $w' < -0.04$  m/s。

首先使用水下 2 m 之  $c'$  影像進行分析，依照影像色調的觀察，大致上能將主要條痕區分出來，如圖 3.7 (a)，而陳(2015)中藉由影像色階的觀察，使用了  $c' = 0.007$  當作定義條痕輪廓的數值，與此張影像一倍標準差 0.0071 的值接近，故在此部分使用 0.0071 當作門檻值，進行影像二值化的轉換，輸入的影像為  $f(x, y)$ ，輸出的影像為  $g(x, y)$ ，以下為二值化影像的表示， $t$  為門檻值：

$$g(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{if } f(x, y) > t \\ 0, & \text{if } f(x, y) \leq t \end{cases} \quad (3.2)$$

經由二值化後的影像，能夠明顯看出主要條痕被區分出，如圖 3.7 (b)。但在二值化影像中仍有些許長度極短的條痕或是區塊存在，為了使選取要進行條件平均的點時能夠更精確，需進行影像的修正，將過小的點去除，故參考劉鴻煜(2018)條痕辨識法，設置條痕長度的限制，將過於細小的條痕去除，在此設計辨識條痕的準則：

1. 若兩個網格點之間距小於等於  $\sqrt{2}$  (即  $\sqrt{2}$  倍的網格長度)，則該兩點位為同一群組，即屬於同一條痕。
2. 將所有網格點進行的分群後，進行條痕長度的篩選，在經由二值化的影像觀察後，決定設置條痕長度需大於等於 5 m，若小於 5 m 則將此群組的條痕結構去除，在二值化影像中轉換成背景值，即轉換為黑色。
3. 在條痕之中會有一些細小的缺空處，為了避免之後進行條件平均時，取點上出

現不精確，會將這些細小的空缺處在影像中轉換成白色，使條痕的完整性增加。經由影像修正後，得出了新的二值化影像，如圖 3.7(c)，白色的部分即為定義的條痕，也是進行條件平均的依據。

進行條件平均時，並不是每一個符合條件的點位都需要取，因同一區域的點位代表的結構是相同的，故只需要取出一點當作代表，在此設立條件平均的取點準則：

1. 每 10 m 取一條計算截線，即  $x = 0$ 、 $\pm 10$ 、 $x = \pm 20 \dots$ 、 $x = \pm 100$ 。
2. 若條痕通過計算截線，則取出其中的最大值當作代表點位。

取點結果如圖 3.7(d)。經由上述的準則取點後，進行條件平均得出  $u'$ 、 $v'$  及  $w'$  之  $y$ - $z$  平面影像，能夠清楚看出朗繆爾環流造成的流場結構，由  $u'$  的影像可以看出  $x$  方向有著強流(jet)的存在，如圖 3.8(a)；由  $v'$  的影像可以看出朗繆爾環流的流向，在表層形成輻合區，如圖 3.8(b)；由  $w'$  的影響可以看出下沉流的現象，如圖 3.8(c)。經由設立門檻值進行條痕辨識以及條件平均，能看出近水面影像中的主要條痕造成的流場結構。除了使用  $c'$  的水下 2 m 影像當作定義條痕結構的依據，也嘗試使用  $w'$  的影像，而挑選深度為水下 6 m，因  $w'$  在此深度的訊號較強，其結果與  $c'$  的結果相似，因此深度的  $w'$  影像也能明顯看出主要條痕的分布，而經由門檻值將影像切割的結果也將主要的大條痕與背景區分出，如圖 3.9，故條件平均的結果差異不大，條件平均結果如圖 3.10。

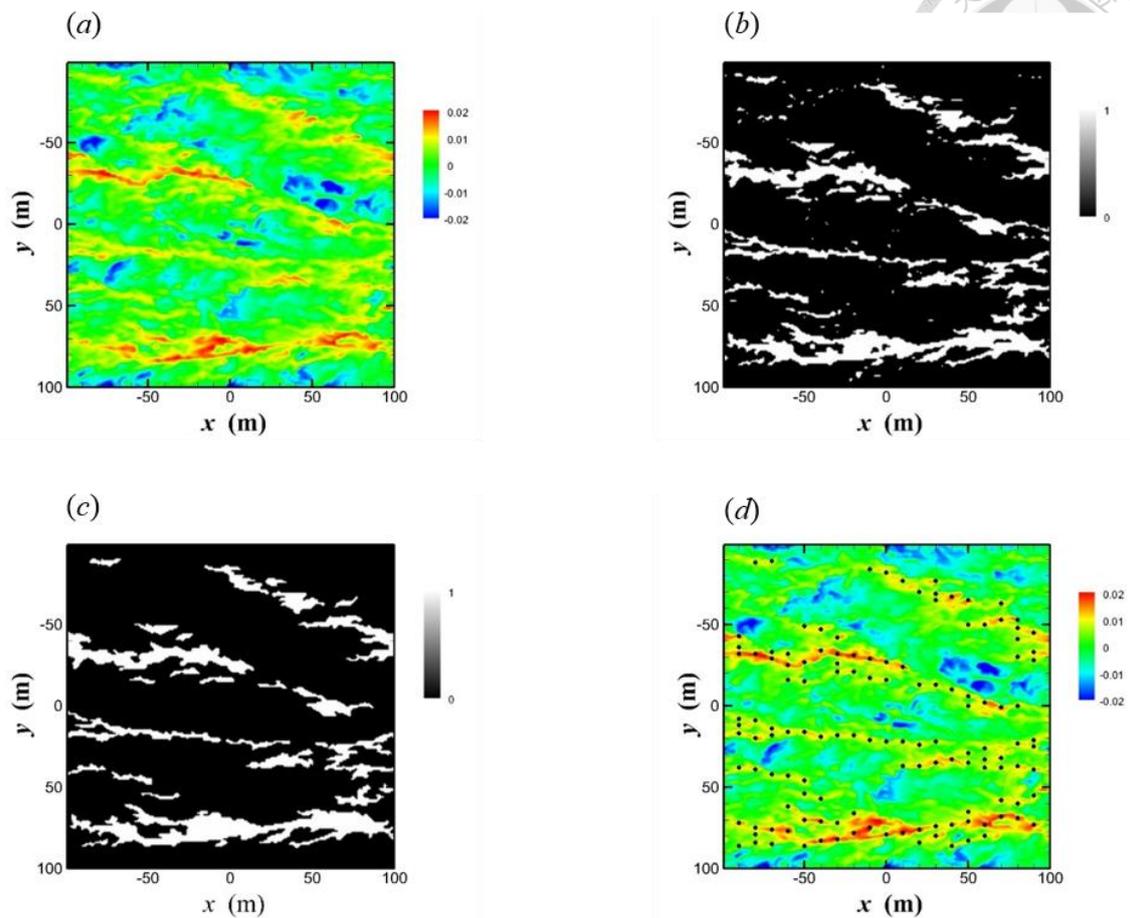


圖 3.7: 使用水下 2 m 之  $c'$  進行影像切割以及取點。圖(a)為  $c'$  的原始影像，圖(b)為經由使用標準差當做門檻值，進行影像二值化的結果，白色為目標群，即為條痕結構，黑色為背景群，即濃度數值較低的網格點，圖(c)為利用條痕結構的判斷準則進行影像修正後的二值化結果，圖(d)為經由取點準則，取出要做條件平均的點，即為圖上的黑點。

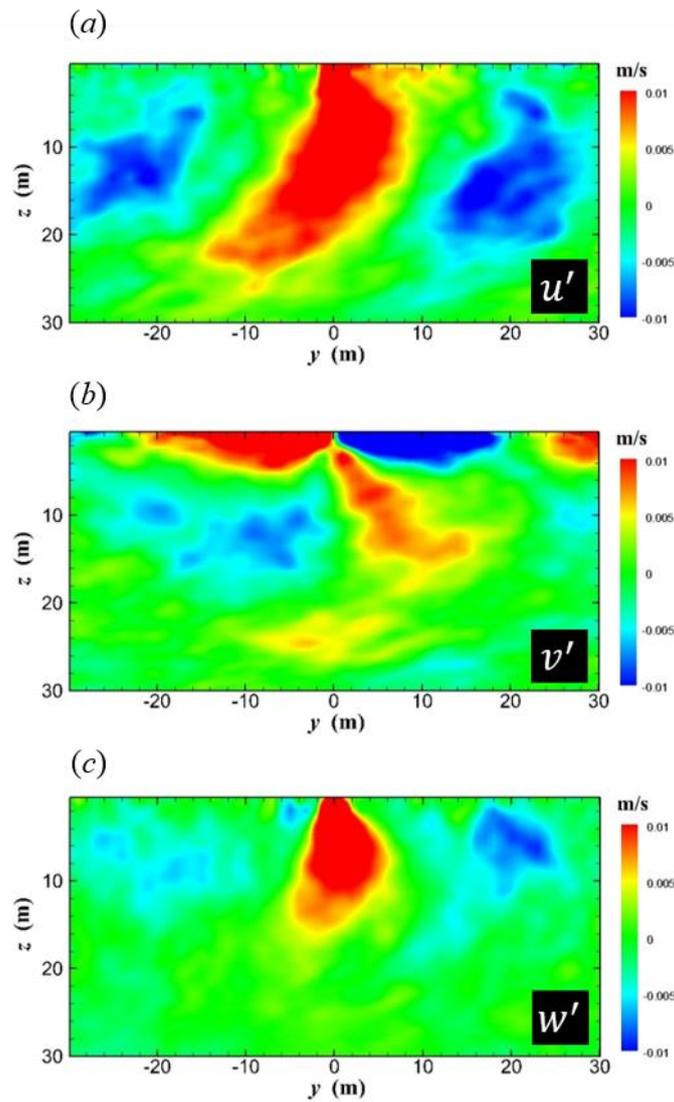


圖 3.8: 為使用圖 3.7(d)進行條件平均後的結果，圖(a)為 $u'$ ，能夠觀察到有強流的存在，圖(b)為 $v'$ ，能夠觀察到輻合區的形成，圖(c)為 $w'$ ，能夠觀察到強烈的下沉流。

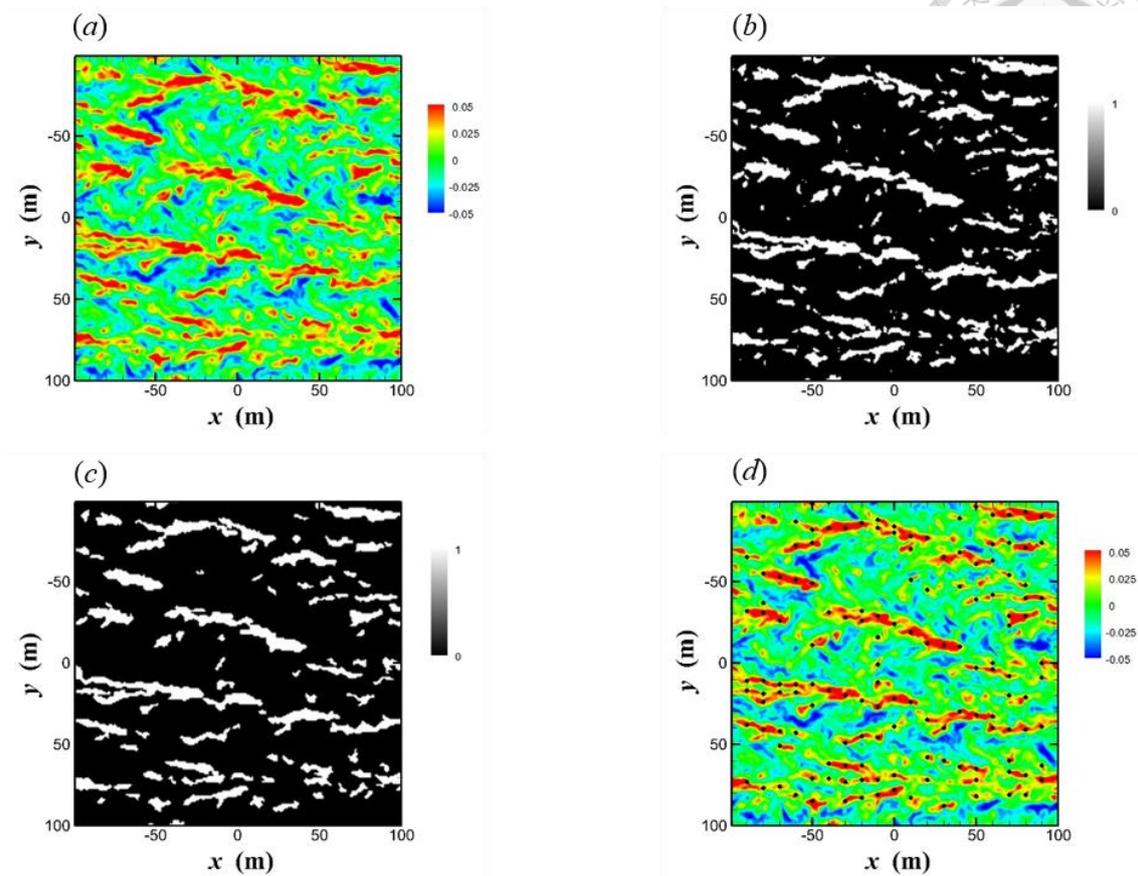


圖 3.9: 使用水下 6 m 之  $w'$  進行影像切割以及取點。圖(a)為  $w'$  的原始影像，圖(b)為經由使用標準差當作門檻值，進行影像二值化的結果，白色為目標群，即為條痕結構，黑色為背景群，即濃度數值較低的網格點，圖(c)為利用條痕結構的判斷準則進行影像修正後的二值化結果，圖(d)為經由取點準則，取出要做條件平均的點，即為圖上的黑點。

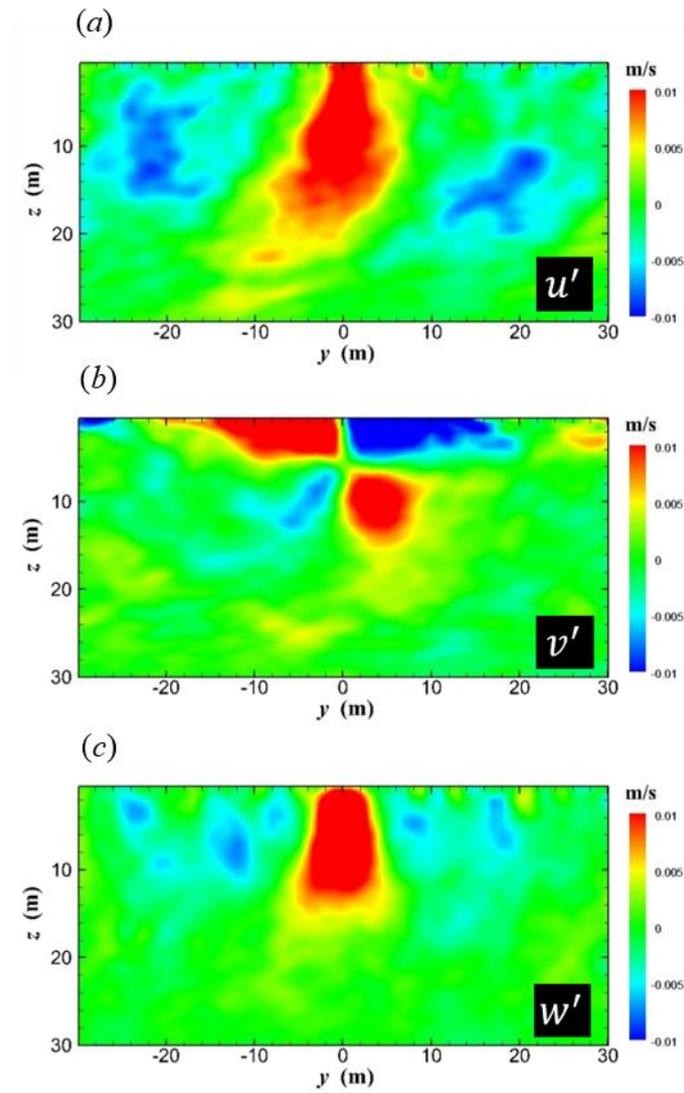


圖 3.10: 為使用圖 3.9(d)進行條件平均後的結果，其結果與圖 3.8 相似，圖(a)為  $u'$ ，圖(b)為  $v'$ ，圖(c)為  $w'$ 。



### 3.4 大津演算法

在 3.3 節中使用了門檻值進行影像切割，雖然大致上能區分影像中的條痕，但主要根據人為主觀的判定，並無一定的準則，在此章節中嘗試使用較客觀的方法來決定門檻值，將影像二值化。Otsu (1979) 提出大津演算法，能夠使用統計式的計算方法得出影像中的最佳門檻值，使門檻值的選取過程更加的客觀，毋須經由人眼主觀判定，後續將介紹此方法的概念以及演算方式。以一張灰階影像為例進行大津演算法的說明，假設此張影像的尺寸為  $M \times N$ ，影像的灰階值範圍為  $[0, 1, \dots, L-1]$ ，經由上述的影像基本資訊能夠得知每一個灰階值在此影像出現的次數，即灰階值  $i$  在影像中出現  $n_i$  次，進而能計算出各個灰階值在影像中出現的機率，其表示如下：

$$P(i) = \frac{n_i}{M \times N}, i = 0, 1, \dots, L-1 \quad (3.3)$$

藉由每個灰階值在影像中出現的機率可以計算出影像的平均灰階值：

$$\mu_T = \sum_{i=0}^{L-1} i \times P(i) \quad (3.4)$$

藉由設立一個門檻值  $t$ ，將這張影像的灰階值分為背景群  $C_0$  以及目標群  $C_1$ ， $C_0$  的灰階值範圍為  $[0, 1, \dots, t]$ ， $C_1$  的灰階值範圍為  $[t+1, \dots, L-1]$ ，在此研究中，近水面影像呈現的條痕即是目標群。由背景群  $C_0$  以即目標群  $C_1$  的灰階值範圍能夠得出這兩群分別在影像中出現的機率：

$$P_0 = \sum_{i=0}^t P(i) \quad (3.5)$$

$$P_1 = \sum_{i=t+1}^{L-1} P(i) \quad (3.6)$$

此兩群的機率相加即為影像中每一個灰階值出現機率的加總：

$$P_0 + P_1 = 1 \quad (3.7)$$



由背景群 $C_0$ 以及目標群 $C_1$ 的出現機率能夠分別計算出平均值:

$$\mu_0 = \sum_{i=0}^t \frac{i \times P(i)}{P_0} \quad (3.8)$$

$$\mu_1 = \sum_{i=t+1}^{L-1} \frac{i \times P(i)}{P_1} \quad (3.8)$$

大津演算法的概念為，利用統計的方法，得出一個門檻值，此門檻值能夠將背景群以及目標群分得最開，而在統計上能夠代表兩群之間的變異程度的參數為群間變異數 $\sigma_B^2$  (between-class variance):

$$\sigma_B^2 = P_0(\mu_0 - \mu_T)^2 + P_1(\mu_1 - \mu_T)^2 \quad (3.9)$$

故藉由以上影像的各項統計資訊，能夠計算出 $\sigma_B^2$ ，當 $\sigma_B^2$ 為最大值時，代表能夠將背景群以及目標群分的最開，此時的門檻值即為最佳門檻值，圖 3.11 (a)為示意圖。

在 3.3 節中，使用 1400 PST，水下 2 m 的  $c'$  影像，並且使用標準差來當作門檻值，在此章節中嘗試使用大津演算法來得出最佳的門檻值，將影像二值化，但得出的結果不如預期，影像中多數的點位皆通過大津演算法得出的門檻值，二值化的結果幾乎無法看出條痕結構，如圖 3.11 (b)。造成此結果的原因有可能為，條痕結構的數值與背景值的數值差異不夠明顯，故經由影像切割後，除了條痕結構在目標群中，也有許多其他點位被歸類在目標群，只有虛擬濃度極低的點位被區分在背景群，而此結果進行條件平均並無意義，因無法有效辨識條痕，在利用截線取點時也會非常不精確，故需要對此影像二值化的結果進行修正。為了改善影大津演算法的結果，將嘗試使用影像增強法進行改善，使條痕結構的數值與周遭的差異更大，此部分將在 3.5 節進行說明。

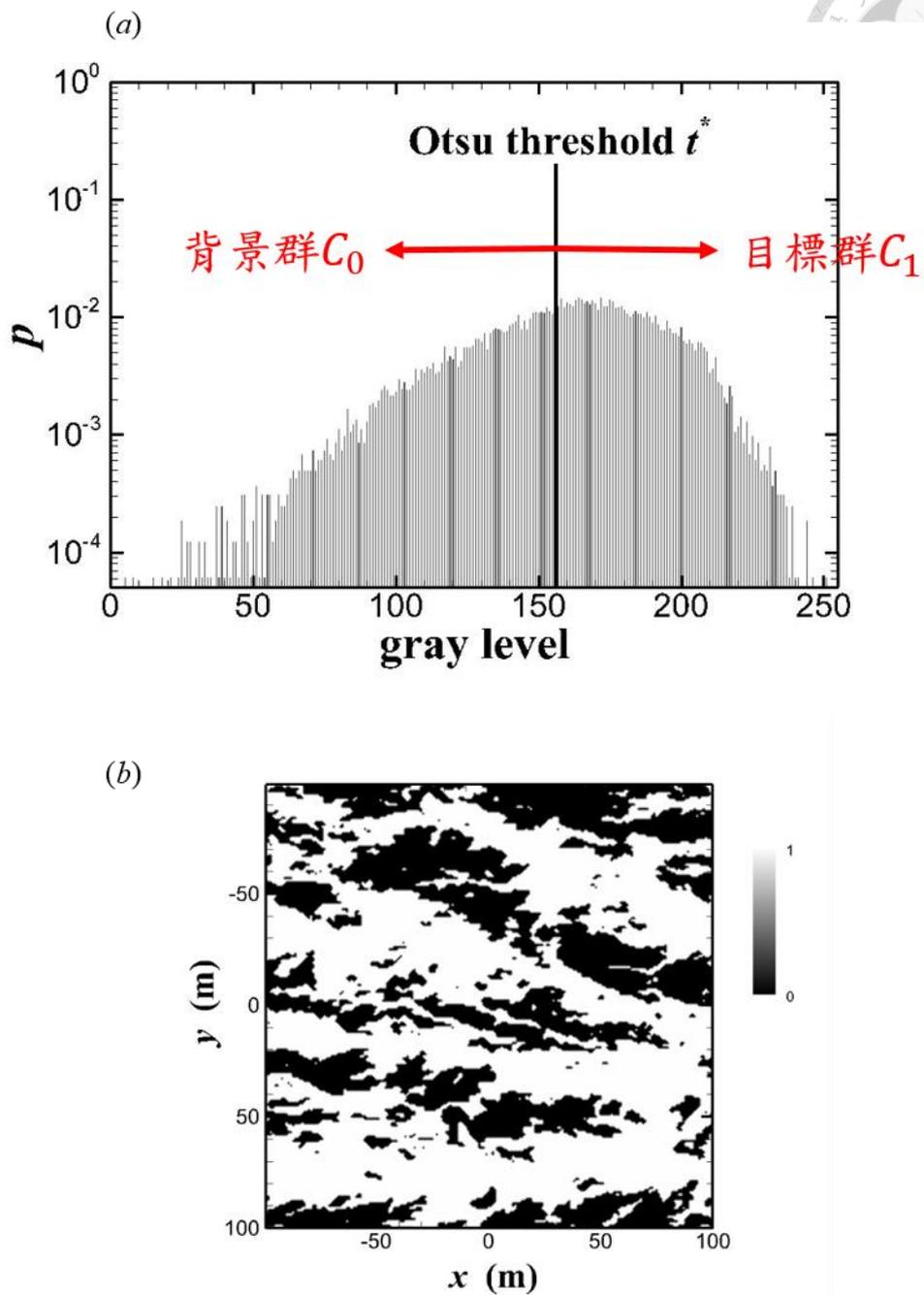
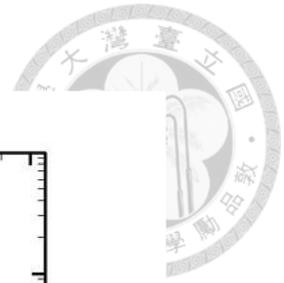


圖 3.11: 大津演算法的操作。圖(a)為大津演算法的示意圖，利用自動化的過程在灰階中選出最佳門檻值，圖(b)為利用大津演算法得出的門檻值，進行影像切割的結果，無法看出流場中的主要條痕結構，效果不佳。



### 3.5 影像增強

在此節中，將使用空間域的影像增強方法，對整張影像進行對比度的增強，嘗試將影像中的條痕結構與周遭的差異加大，期望經由影像對比對增強後，使用大津演算法進行影像切割的結果能將條痕結構擷取出。在影像增強的方法中，會分為全域性以及區域性，3.5.1 節及 3.5.2 節為全域性的方法，分別為伽瑪校正以及直方圖等化，3.5.3 節為區域性的方法，自適應直方圖等化。

#### 3.5.1 伽瑪校正(Gamma Correction)

伽瑪校正為一全域性的影像對比度增強法，其方法為對影像中的每一個點位進行乘冪轉換，假設輸入影像為 $f(x,y)$ ，轉換後輸出的影像為 $g(x,y)$ ，其表示如下：

$$g = cf^{\gamma} \quad (3.10)$$

由式 3.10 可得  $c$  與  $\gamma$  為主要調動的參數，在一般的情況下  $c = 1$ ，故  $\gamma$  的數值為主要控制影像對比度的因子，由乘冪曲線能夠得知  $\gamma$  的數值與影像轉換之關聯性，如圖 3.12 所示。如圖 3.13 所示，當  $\gamma < 1$  時，原本影像中強度較弱且範圍狹窄的部份經乘冪轉換後，輸出成範圍較寬的部份，而原本影像中強度較強的部份，輸出後的範圍變狹窄，由直方圖可以觀察到整體分布右移動，故加強了原先影像強度較弱區域的對比度，影像的亮度整體提升；當  $\gamma = 1$  時，輸出的影像與原先的影像相同；當  $\gamma > 1$  時，原先影像中較強的部份經由乘冪轉換，輸出成範圍較寬的部份，其效果會與  $\gamma < 1$  相反，直方圖的分部整體會往左，故加強了原先影像強度較強區域的對比度，影像整體變暗，而在此研究中，條痕屬於影像中高強度的區域，故需使用  $\gamma > 1$  的乘冪轉換來進行伽瑪校正。以下將對 1400 PST，水下 2 m 之  $c'$  影像進行伽瑪校正，使用了  $\gamma = 0.5$ 、 $\gamma = 2$  及  $\gamma = 4$  來進行伽瑪校正，如圖 3.14，並使用大津演算法得出最佳門檻值，進行影像切割，而  $\gamma = 0.5$  的影像二值化結果主要為對照組，因加強的區域強度較弱，故無法突顯條痕結構； $\gamma = 2$  的影像二值化結果

有明顯比 3.4 節直接使用大津演算法更能夠突顯條痕結構，但突顯程度不夠強，使二值化影像中的白色條痕區域過粗，與原圖有所落差，故須提高  $\gamma$  的數值使對比度上升； $\gamma = 4$  的二值化影像結果，能夠清楚的將條痕以及背景被區分出，如圖 3.15，故此結果較適合進行條件平均，而條件平均的結果與 3.3 節的結果相似，如圖 3.16，皆能明顯看出朗繆爾環流造成的流場結構。

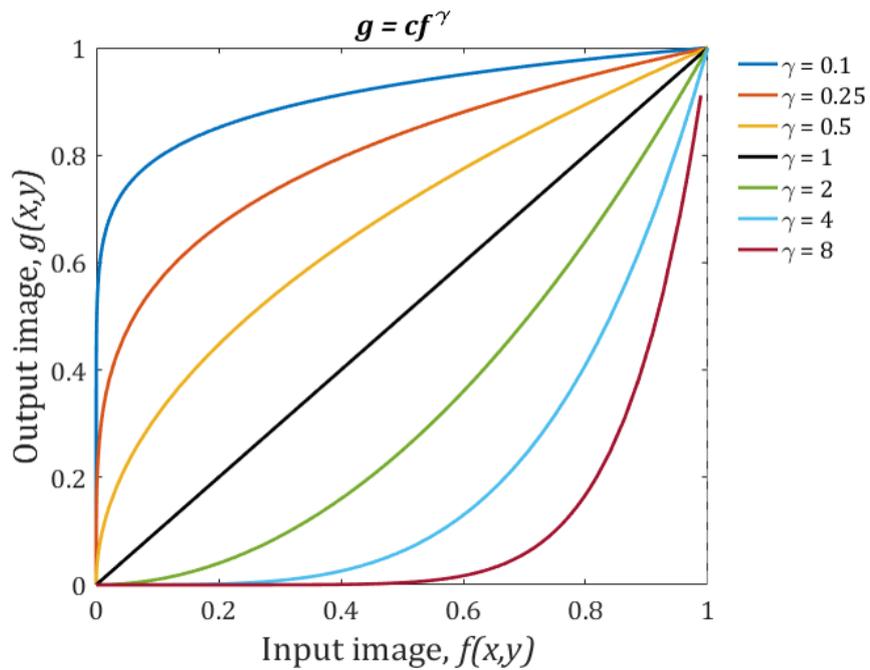


圖 3.12: 伽瑪校正之乘冪轉換曲線。若 $\gamma < 1$ ，原先影像較弱且範圍較窄的部分，經由乘冪轉換後，會輸出成範圍較寬的範圍，增強原先影像中強度較低的數值；若 $\gamma > 1$ ，則會有相反的效果，增強原先影像中強度較高的數值；若 $\gamma = 1$ ，則輸入和輸出的影像相同。

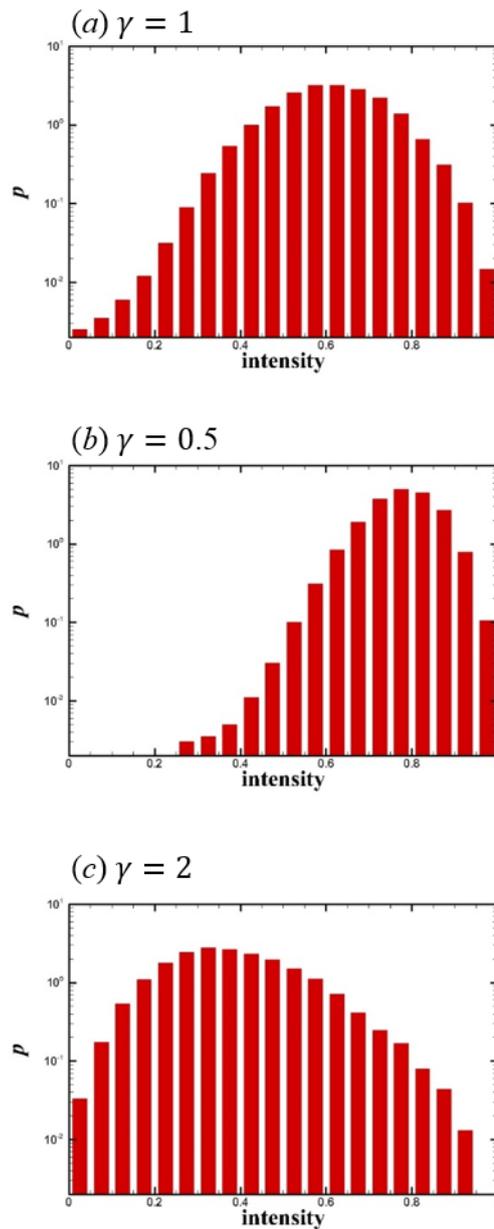


圖 3.13: 水下 2 m 之  $c'$  影像進行伽瑪校正轉換後的直方圖，橫軸為強度，縱軸為機率密度。圖(a)為使用  $\gamma = 1$  進行伽瑪校正的結果，即為原圖的直方圖分布，圖(b)為使用  $\gamma = 0.5$  之伽瑪校正的結果，能夠觀察到直方圖往右側移動，突顯影像中強度低的區域，影像整體變亮，圖(c)為使用  $\gamma = 2$  之伽瑪校正的結果，能夠觀察到直方圖往左側移動，突顯影像中強度高的區域，影像整體變暗。

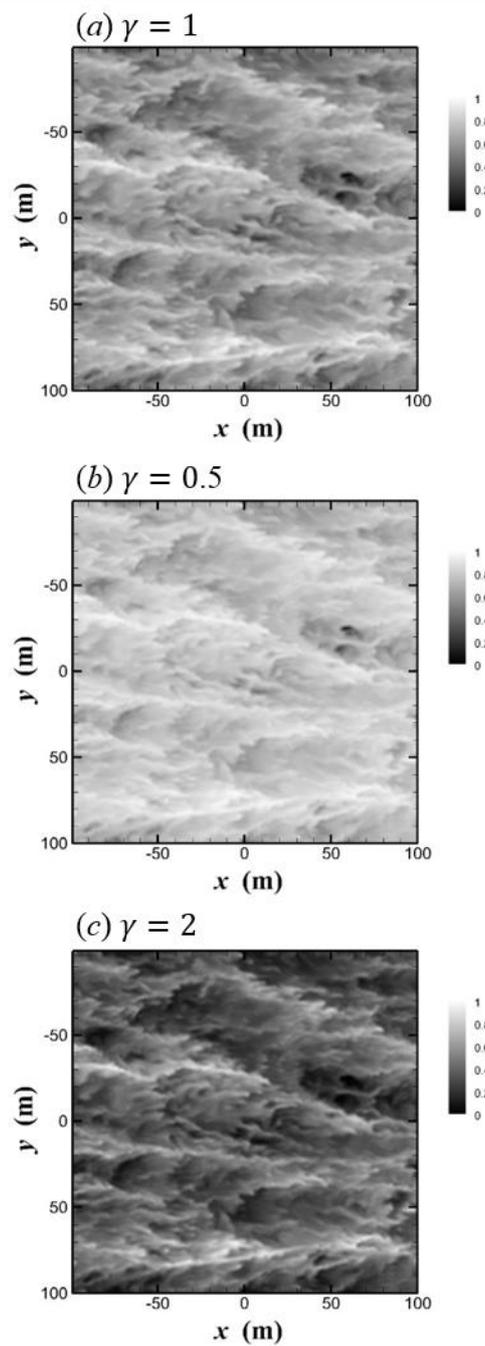


圖 3.14: 水下 2 m 之  $c'$  影像進行伽瑪校正轉換後的影像。圖(a)為使用  $\gamma = 1$  進行伽瑪校正的結果，即為原圖，圖(b) 為使用  $\gamma = 0.5$  之伽瑪校正的結果，影像整體變亮，圖(c)為使用  $\gamma = 2$  之伽瑪校正的結果，影像整體變暗。

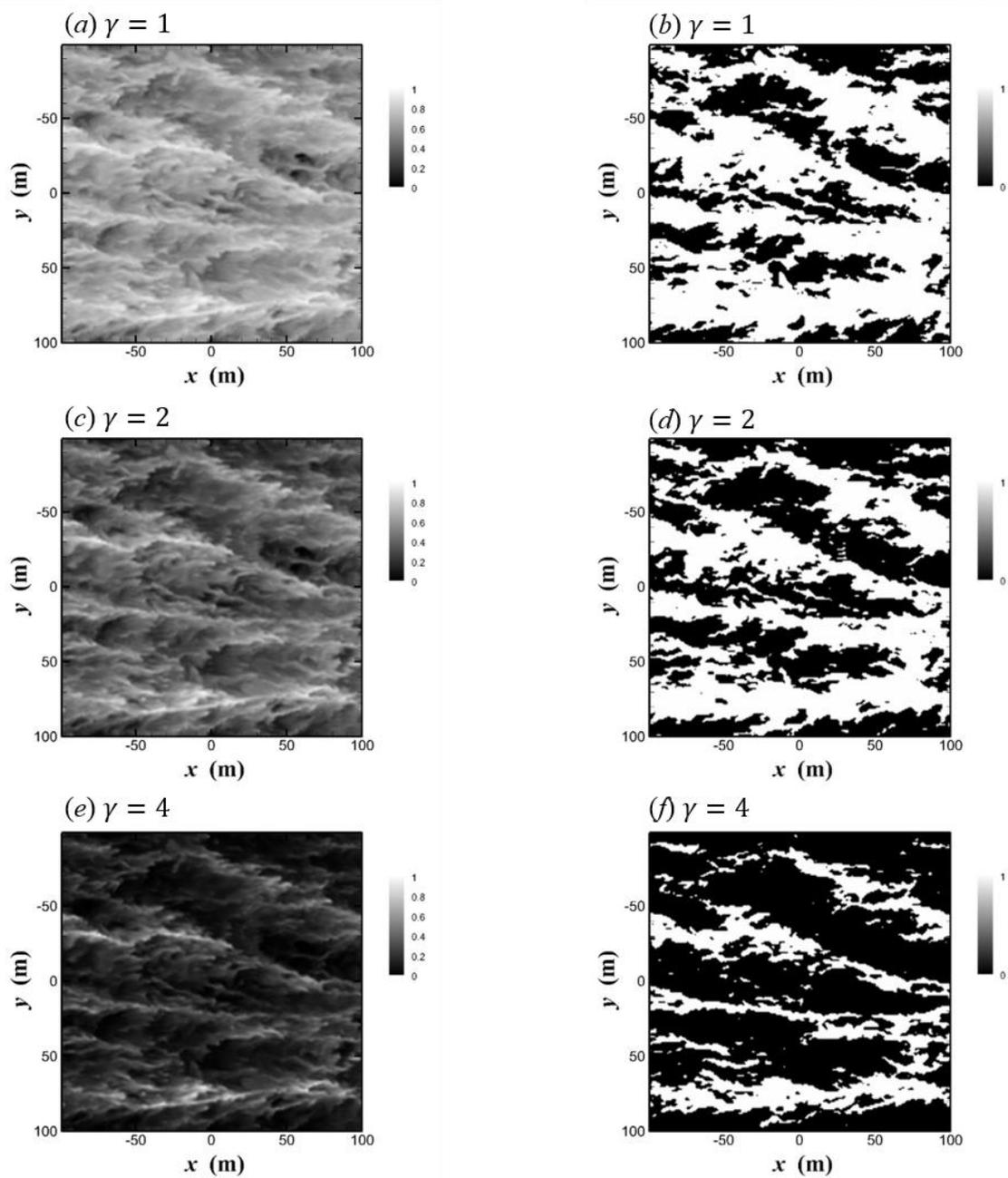


圖 3.15: 水下 2 m 之  $c'$  影像進行不同指數的伽瑪校正結果(左側圖)以及使用大津演算法進行影像切割的結果(右側圖)。圖(a)及圖(b)為  $\gamma = 1$ ，圖(c)及圖(d)為  $\gamma = 2$ ，圖(e)及圖(f)為  $\gamma = 4$ 。

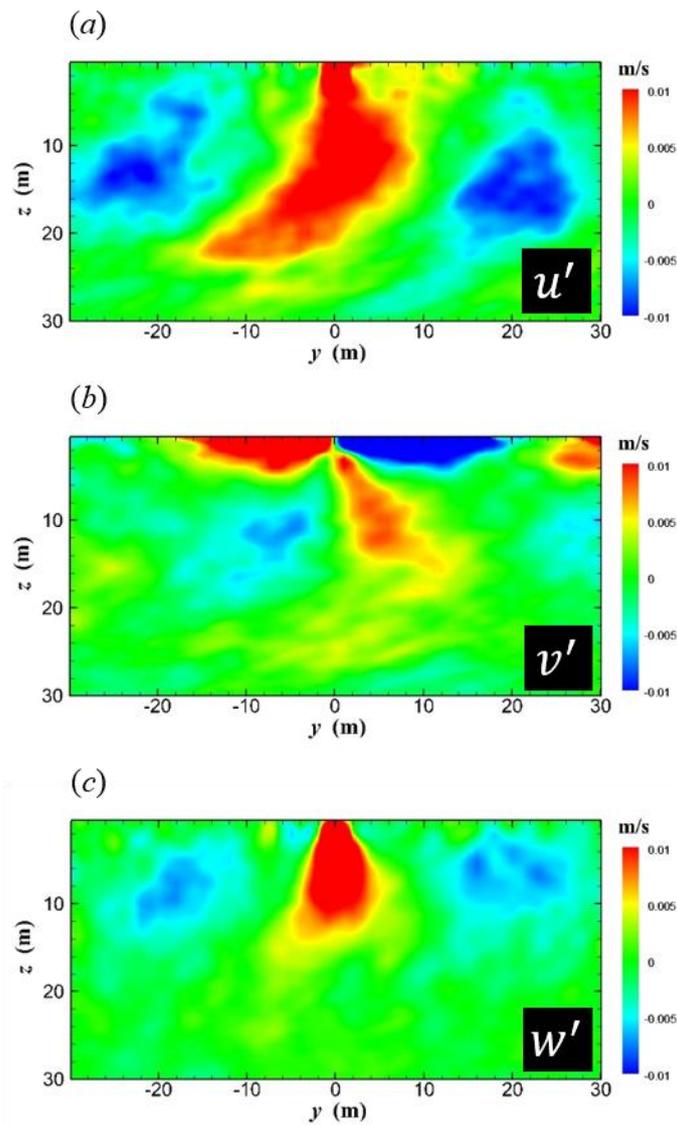


圖 3.16: 使用水下 2 m 之  $c'$  影像進行  $\gamma = 4$  之伽瑪校正後，依照條痕辨識準則以及取點準則進行條件平均的結果。圖(a)為  $u'$ ，圖(b)為  $v'$ ，圖(c)為  $w'$ 。



### 3.5.2 直方圖等化(Histogram Equalization, HE)

在 3.5.1 節中使用了伽瑪校正突顯影像中的條痕結構，並利用大津演算法進行影像切割，影像中的主要條痕大致上有被區分出，但使用伽瑪校正會使影像的亮暗度有明顯的改變，例如使用  $\gamma = 4$  進行伽瑪校正後的影像，雖然能夠使條痕結構在影像中突出，但也因乘冪轉換的關係導致影像整體變暗，有可能會導致一些強度不夠強的條痕結構無法呈現在影像中，因與周遭的點位強度差異不夠，若要改善此問題，除了提升條痕結構的對比度，也需提升影像整體的對比度，使影像中的亮的部份以及暗的部份皆能被突顯，在此節中要介紹的影像增強法為直方圖等化。

直方圖等化為全域性的影像增強方法，其概念為對原始影像的直方圖進行轉換，原圖的直方圖會有明顯的峰值存在，直方圖等化的目的為使影像的直方圖分布較均衡，如圖 3.17，而其轉換使用到的函數為累積密度函數 (cumulative distribution function, CDF)，以下將表示直方圖等化的轉換，假設輸入的影像為  $f(x, y)$ ，轉換後輸出的影像為  $g(x, y)$ ，影像灰階值對應的機率值則使用式 3.3 中所定義的  $P(i)$ :

$$P(i) = \frac{n_i}{M \times N}, i = 0, 1, \dots, L - 1 \quad (3.3)$$

其轉換函數如下:

$$g_k = T[f_k] = \sum_{i=1}^k P(i), k = 0, 1, \dots, L - 1 \quad (3.11)$$

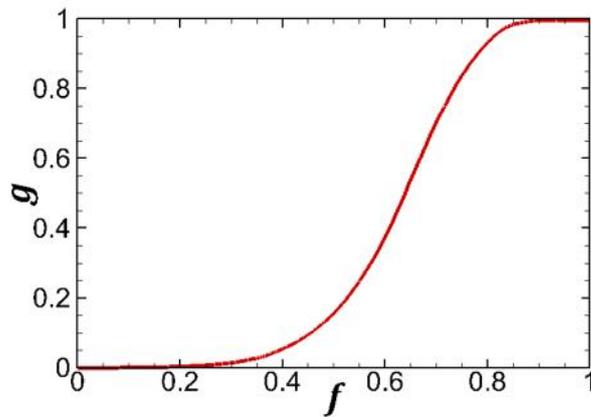
以下將對水下 2 m 之  $c'$  影像進行直方圖等化，並且使用伽瑪校正突顯直方圖等化後影像中的條痕結構。由原圖直接進行直方圖等化的結果，可以看出影像中的亮部及暗部的對比度皆有提升，肉眼能夠更清楚看出影像中的條痕結構，但使用大津演算法進行二值化的結果與沒進行直方圖等化時的結果幾乎相同，如圖 3.18，而使用直方圖等化以及伽瑪校正的影像二值化結果，也與 3.3 節中的結果幾乎相同，如圖 3.19，故進行條件平均的結果，大致上也會和未進行直方圖等化的結果相似，如圖

3.20，在此得知，雖然直方圖等化能使影像整體的對比度提升，但仍不足以使大津演算法的結果有明顯的改變，影像仍須透過伽瑪校正提升條痕結構的對比度，才能有效的使用大津演算法進行影像切割。

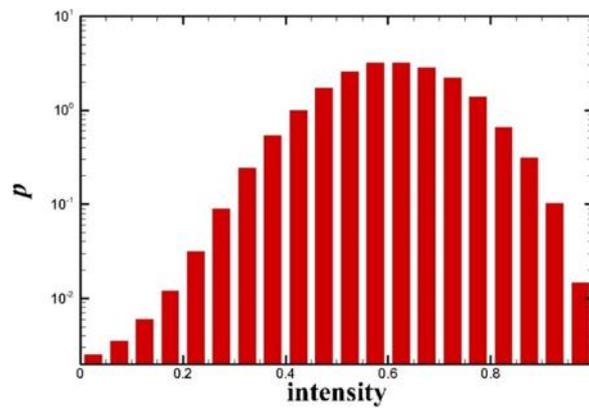




(a) 輸入影像和輸出影像之間的轉換曲線



(b) 輸入影像之直方圖分布



(c) 輸出影像之直方圖分布

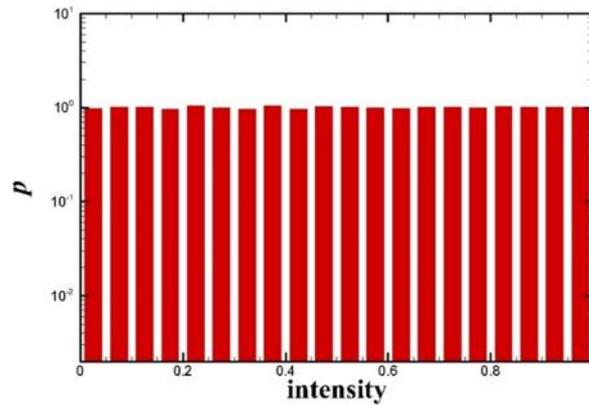


圖 3.17: 使用水下 2 m 之  $c'$  影像進行直方圖等化表示圖。圖(a)為直方圖等化的函數轉換曲線，圖(b)為輸入影像，即原圖之直方圖分布，圖(c)為輸出影像之直方圖分布，能夠觀察到直方圖的變化，在亮部與暗部的對比度皆提升。

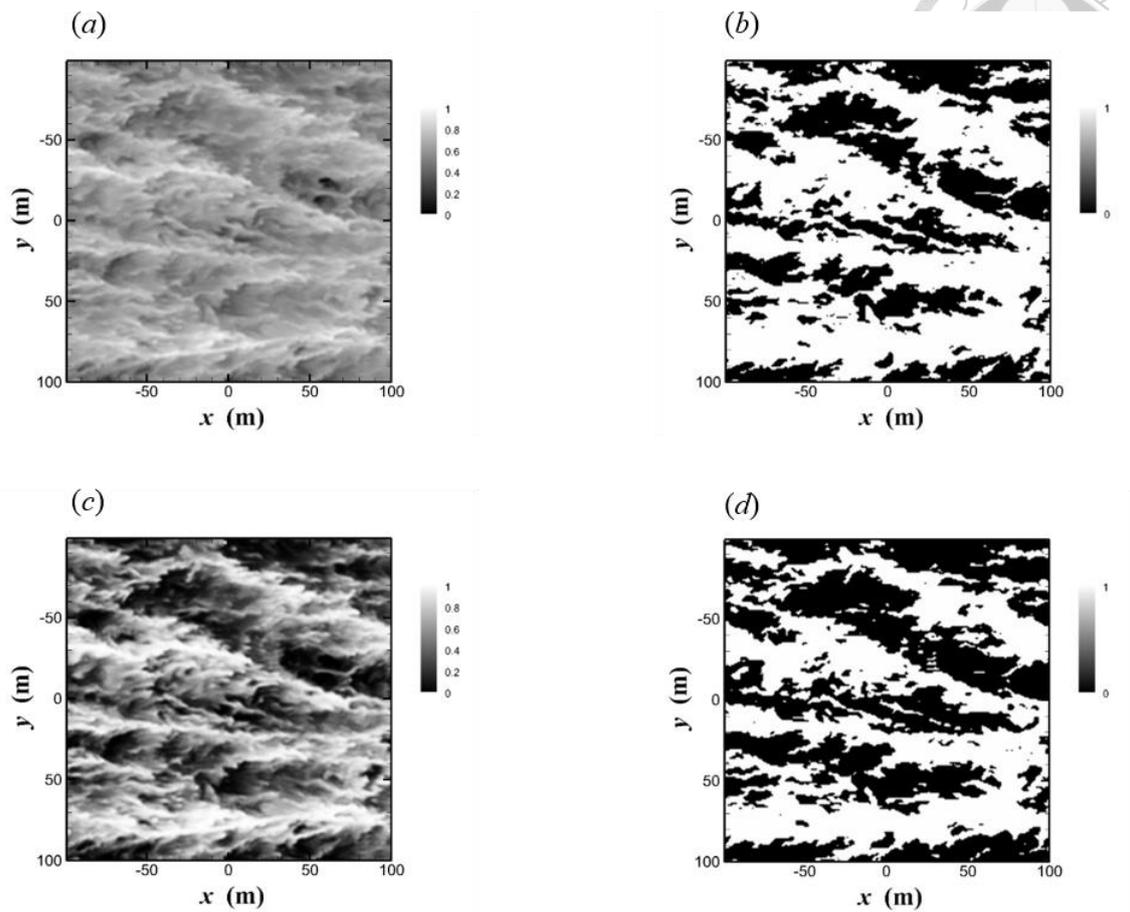


圖 3.18: 水下 2 m 之  $c'$  影像的原圖以及直方圖等化後的比較。圖(a)原圖，圖(b)為原圖進行大津演算法得出的二值化影像，圖(c)為原圖進行直方圖等化，能夠觀察到，比起原圖，影像的對比度整體加強，圖(d)為原圖進行直方圖等化後，進行大津演算法得出的二值化影像，其結果與原圖進行大津演算法之結果差異不大。

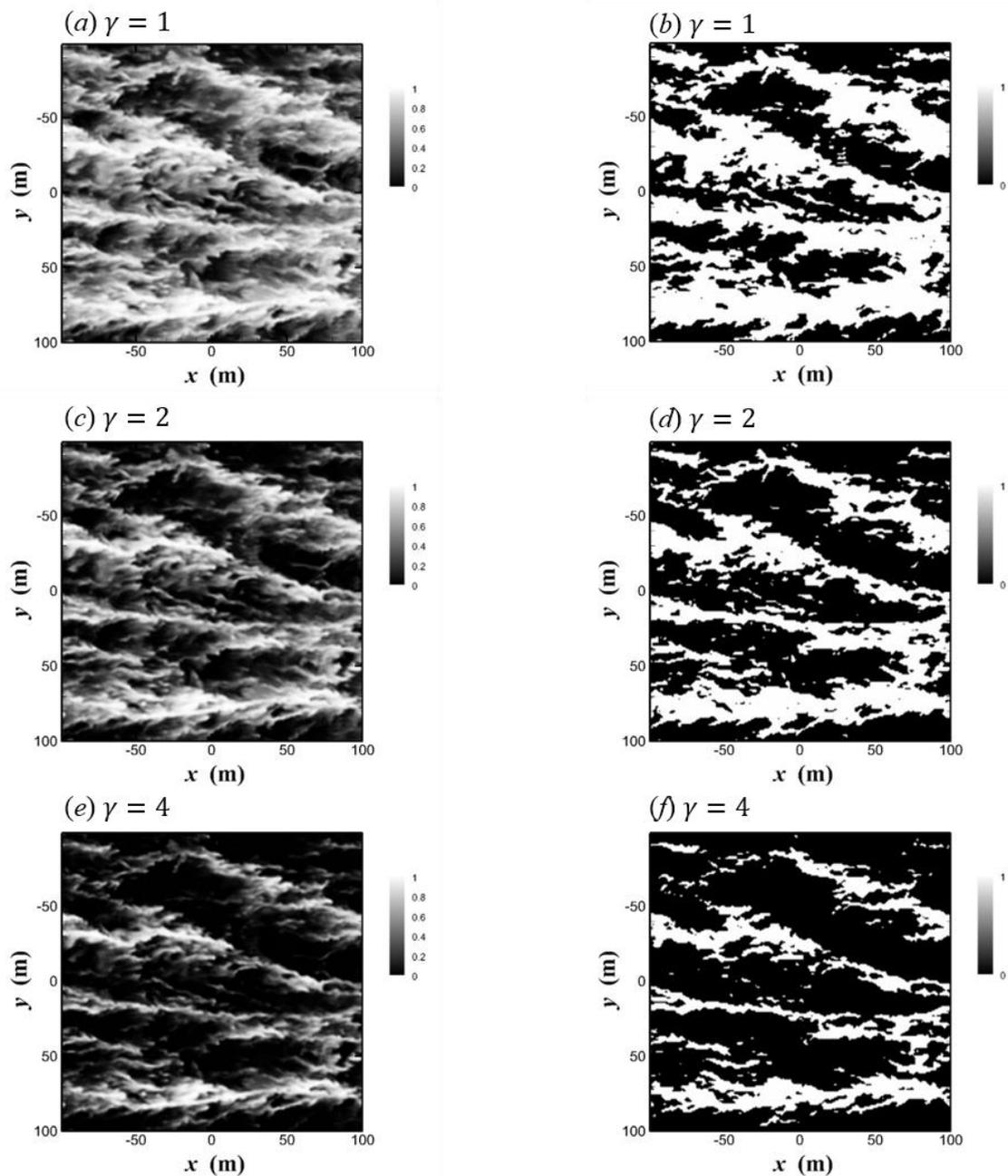


圖 3.19: 水下 2 m 之  $c'$  影像進行直方圖等化後(左)，再進行不同指數的伽瑪校正(右)，圖(a)和圖(b)為原圖進行直方圖等化和影像切割結果，圖(c)和(d)為原圖進行直方圖等化後進行  $\gamma = 2$  之伽瑪校正和影像切割結果，圖(e)和(f)為原圖進行直方圖等化後進行  $\gamma = 4$  之伽瑪校正和影像切割結果。

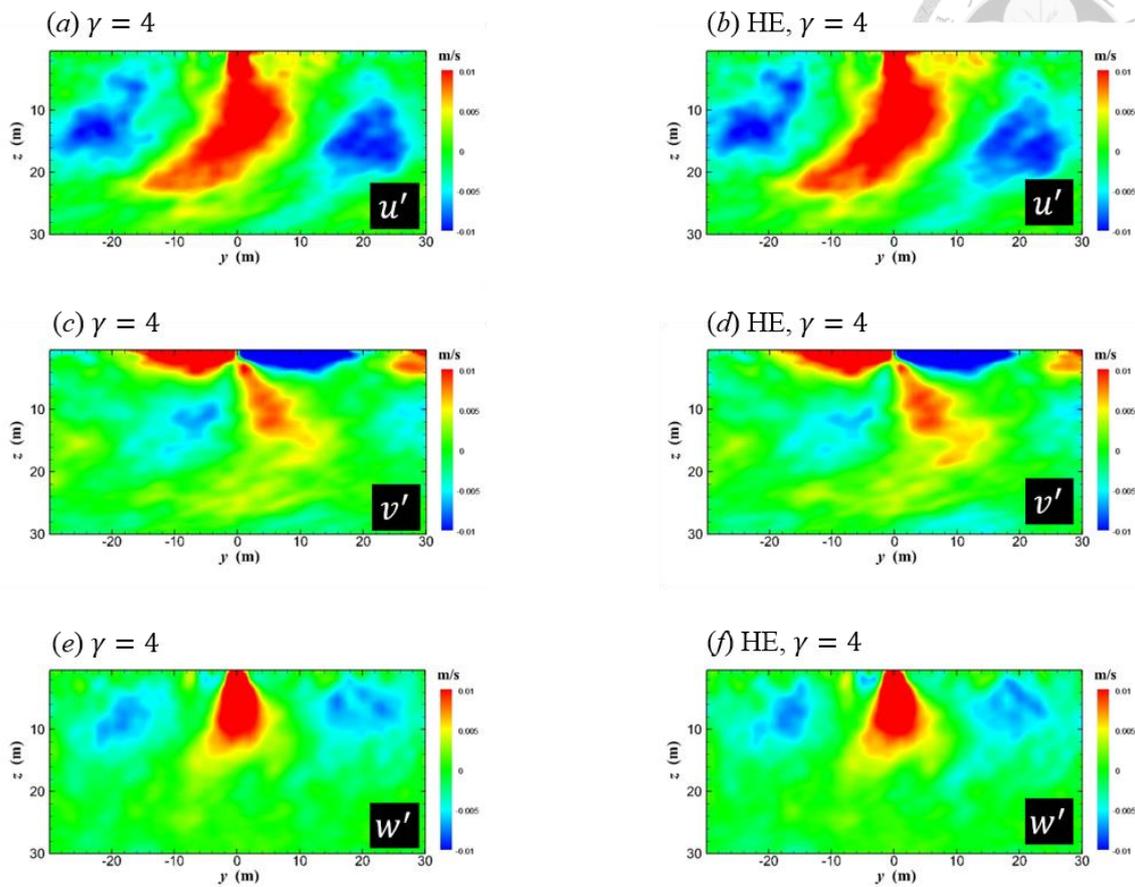


圖 3.20: 未進行直方圖等化與進行直方圖等化之條件平均結果的比較，其中使用伽瑪校正  $\gamma = 4$  之結果。圖(a)和(b)為  $u'$ ，前者未使用直方圖等化，後者有使用直方圖等化，圖(c)和(d)為  $v'$ ，前者未使用直方圖等化，後者有使用直方圖等化，圖(e)和(f)為  $w'$ ，前者未使用直方圖等化，後者有使用直方圖等化，能夠看出兩者的結果相似，幾乎難看出差異。



### 3.5.3 自適應直方圖等化(Adaptive Histogram Equalization, AHE)

使用全域性影像增強法，包括伽瑪校正以及直方圖等化，能夠將流場中的主要條痕結構擷取出，但有可能會使強度稍弱，尺度及訊號較小的結構被忽略，故在此節期望透過區域性的影像處理法，使較小的結構也能突顯出來，並且進一步去比較主要條痕結構和尺度較小的結構，在強度上的差異此，使用的方法為自適應直方圖等化，為一區域性的影像加強法，與 3.5.2 節介紹的直方圖等化有所不同。以下介紹自適應直方圖等化的進行方式，首先選取一個矩形範圍，在矩形內部進行直方圖等化，並取矩形中心點的數值當作結果，由此可知此方法是針對矩形範圍的中心點，而影像中的每一個點位皆會進行自適應直方圖等化，故選取的矩形需滑移整張影像，如圖 3.21。

此方法對影像中的每一個點個別進行影像的對比度增強，故預期的結果會比直方圖等化更為細膩，因全域性的影像增強法會無法突顯區域性的結構。矩形的選取範圍大小也會影響結果，矩形的範圍越小，影像增強的效果越強，以下將使用矩形範圍 $11 \times 11$ 、 $21 \times 21$ 、 $31 \times 31$ 來對 $c'$ 之水下 2 m 影像進行自適應直方圖等化，並且配合伽瑪校正來突顯影像中的條痕結構。如圖 3.22，由 $11 \times 11$ 、 $21 \times 21$ 的矩形範圍所進行的自適應直方圖等化的結果，能夠看出影像中區域性的結構皆有明顯被突顯，但與原圖相比之下，有失真的可能性，因許多過小的結構都有被突顯，使整張影像充滿條痕，為了使突顯效果不要過於強烈，需選取範圍更大的矩形，故使用 $31 \times 31$ 的矩形範圍來進行自適應直方圖等化，其結果能夠看出主要的大條痕以及大條痕之間較細小的條痕，但使用此結果進行大津演算法進行影像切割的效果不佳，故仍須使用伽瑪校正進行條痕結構的突顯，如圖 3.23。將伽瑪校正  $\gamma = 2$  以及  $\gamma = 4$  的結果進行條件平均，如圖 3.24，其結果與直方圖等化的結果有所不同，由流場的影像可以看出朗繆爾環流造成的結構較不明顯，其原因為使用自適應直方圖等化除了影像中的主要條痕有被擷取之外，較細小的條痕也被擷取，故進行

條件平均時，主要條痕的結構與細小條痕的結構混雜在一起，使朗繆爾環流造成的流場結構較不明顯。



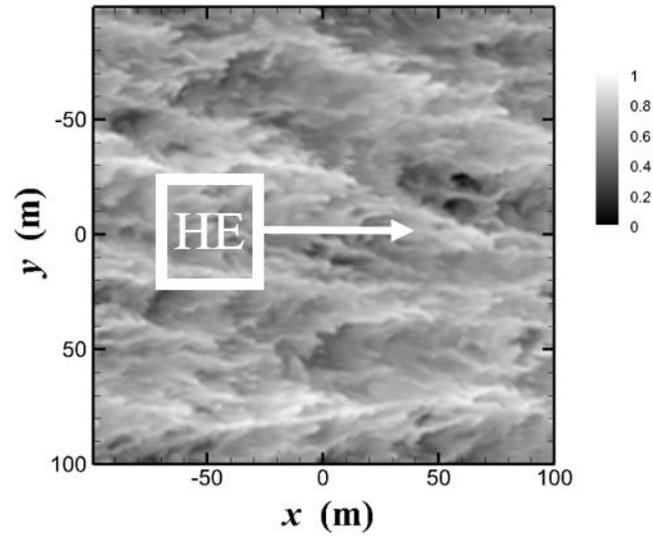


圖 3.21: 自適應直方圖等化示意圖。白色框為選取的矩形範圍，在內部進行直方圖等化，矩形中心點為要進行調整的數值，而影像中每一個網格點都會經過此過程，矩形會滑移整張影像

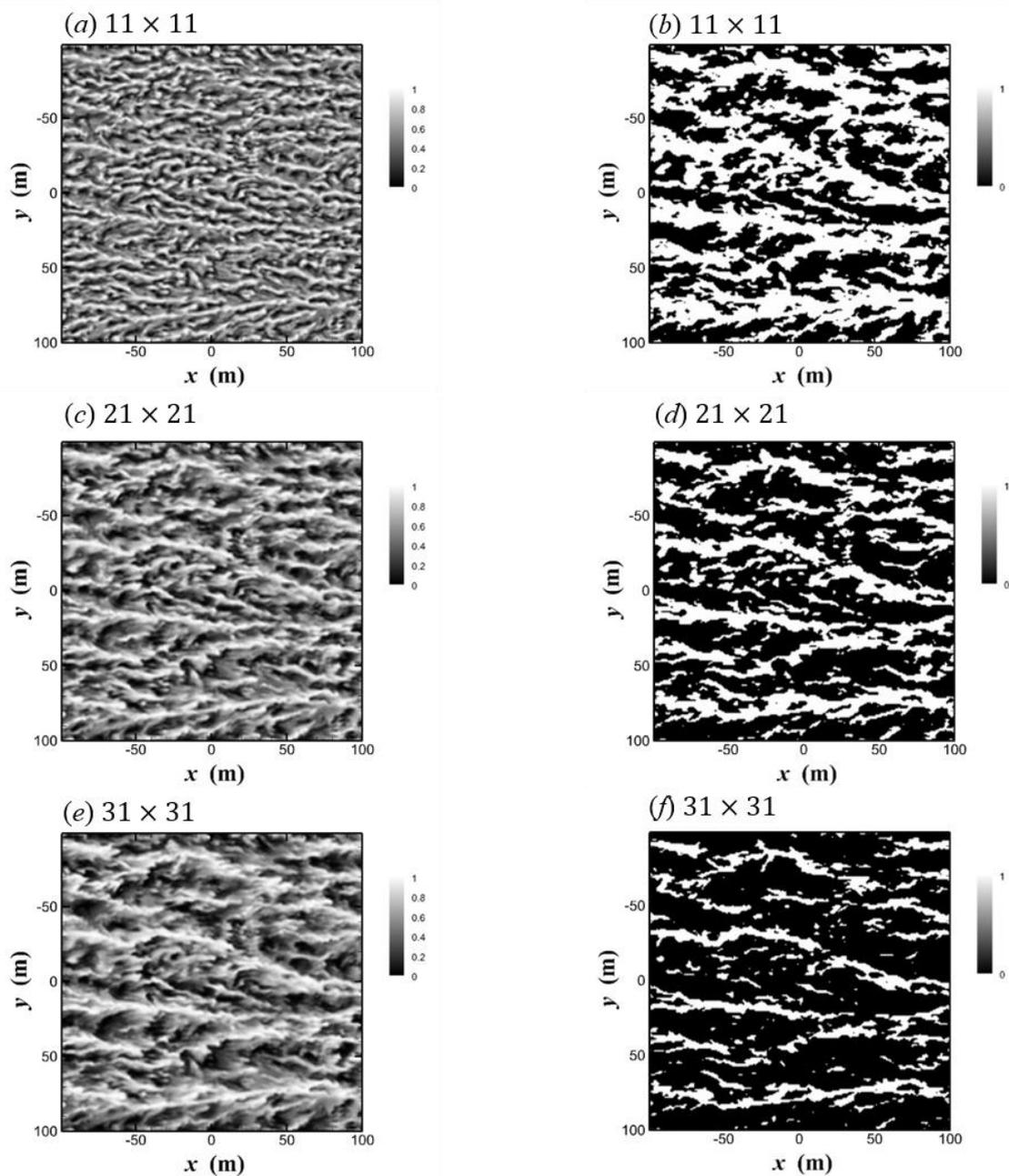


圖 3.22: 水下 2 m 之  $c'$  影像進行不同矩形範圍的自適應直方圖等化(左)以及其二值化影像結果(右)。圖(a)和(b)為  $11 \times 11$ ，圖(c)和(d)的矩形範圍為  $21 \times 21$ ，圖(e)和(f)的矩形範圍為  $31 \times 31$ ，由三種不同的矩形範圍能夠觀察到矩形範圍越小，區域性的突顯愈顯著。

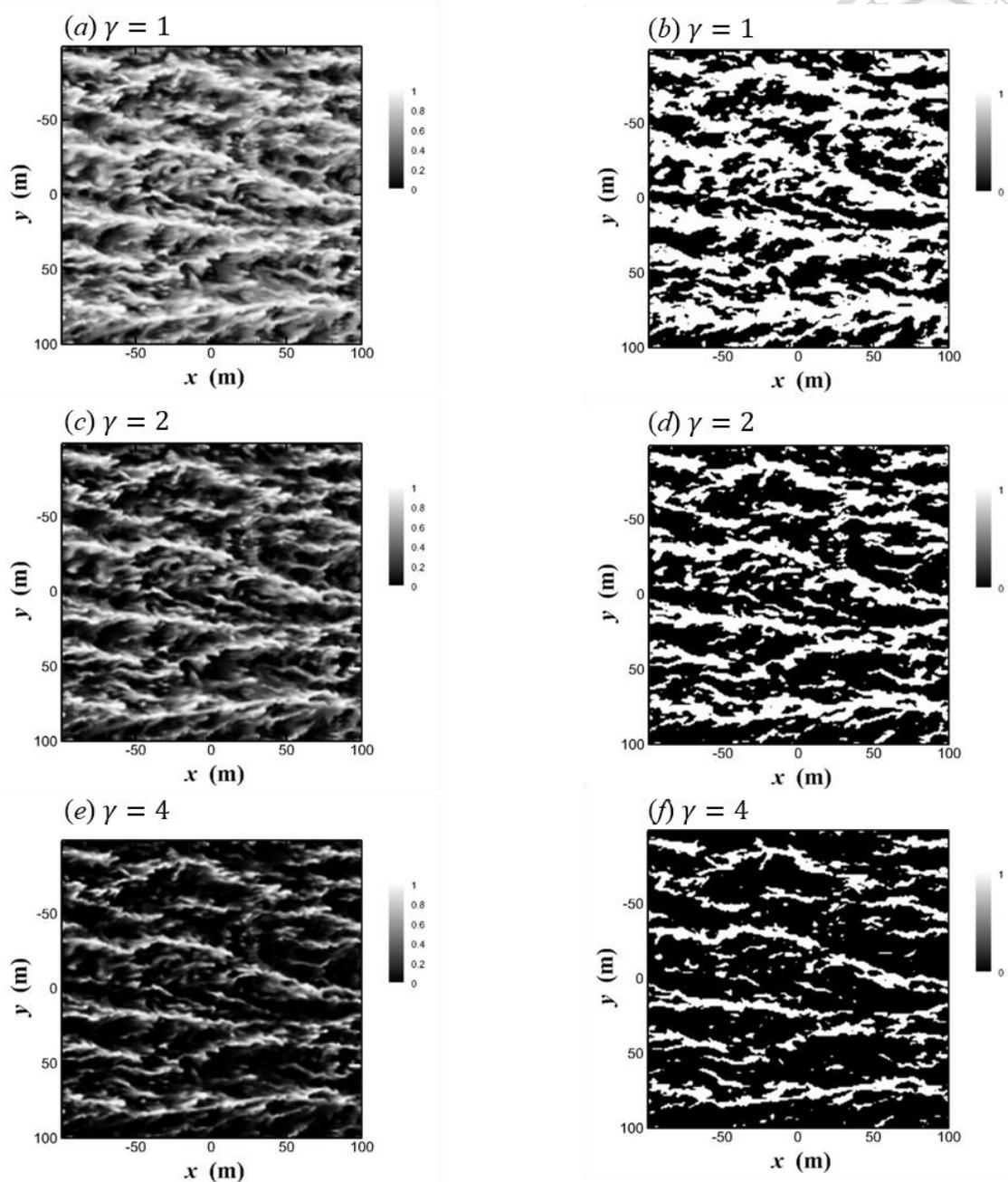


圖 3.23: 水下 2 m 之  $c'$  影像進行矩形範圍  $31 \times 31$  之自適應直方圖等化，並進行不同指數的伽瑪校正(左)以及其二值化結果(右)。圖(a)和(b)為  $\gamma = 1$ ，圖(c)和圖(d)為  $\gamma = 2$ ，圖(e)和圖(f)為  $\gamma = 4$

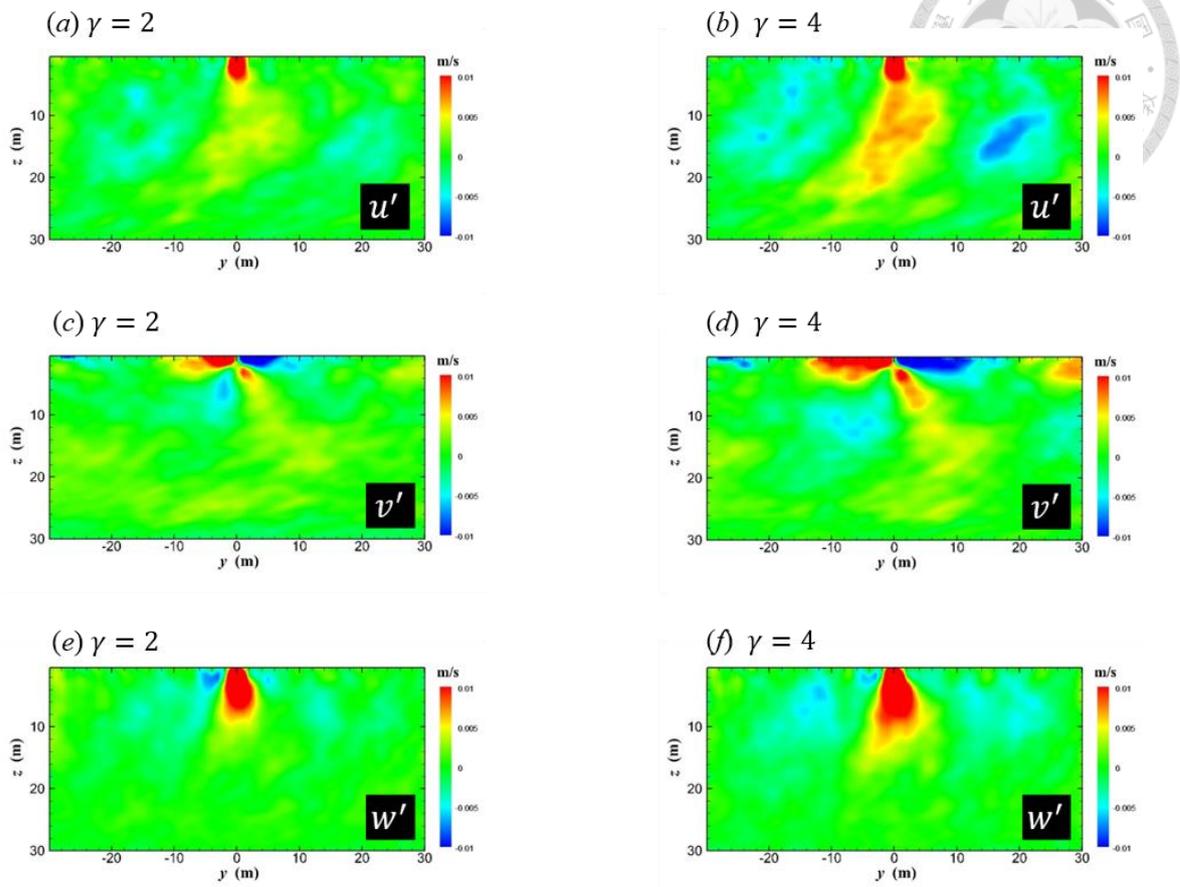


圖 3.24: 水下 2 m 之  $c'$  影像進行矩形範圍  $31 \times 31$  之自適應直方圖等化，並進行的  $\gamma = 2$  (左) 和  $\gamma = 4$  (右) 之伽瑪較正的條件平均結果。圖 (a) 和 (b) 為  $u'$ ，圖 (c) 和 (d) 為  $v'$ ，圖 (e) 和 (f) 為  $w'$ ，能夠觀察到因使用  $\gamma = 2$  和  $\gamma = 4$  之伽瑪校正的條痕結構的擷取不同，造成條件平均的結果也會有所差異。



## 第四章 尋找流場中特定的物理事件並進行條件平均

在第三章以影像處理的方式分析近水面流場的影像，並擷取其條痕結構以及進行條件平均，得出流場結構，但無法避免會受到人為主觀的影響。在本章將參考前人使用的方法，藉由判斷準則的設立，尋找流場中特定的物理事件，嘗試擷取出朗繆爾環流造成的條痕結構，並且進行條件平均觀察水下的流場結構。此系列方法有別於第三章的影像處理方法，能夠拋開對條痕的主觀印象，以流場中我們想去尋找的事件當做條件平均的依據。

### 4.1 象限分析(Quadrant Analysis)

在此節要介紹的方法為象限分析，參考 Willmarth & Lu (1972) 和 Wallace et al. (1972)，關於 turbulence shear flow 的研究。在此兩篇文獻中主要探討在紊流場中的兩種不同事件，分別為”sweeps“ 以及”ejections“。這兩種事件分別有著不同方向的 $u'$ 以及 $w'$ ，sweeps 的速度組合為 $u' < 0, w' > 0$ ；ejections 的速度組合為 $u' > 0, w' < 0$ ，在此可以利用象限的概念將這兩種事件區分，其中 sweeps 屬於第四象限，ejections 屬於第二象限，故可藉由象限的區分來探討流場中不同的事件。除了藉由速度場的正負值不同來區分事件外，也需訂定速度強度的判斷準則，在 Kim and Moin (1986)中，有對於象限分析設立判斷的標準，在 sweeps 事件的判定中，除了需符合 $u' < 0, w' > 0$ ，也使用 x-y 平面的平均值 $\langle u'w' \rangle_{xy}$ 當作判斷準則，其中 $\langle \rangle_{xy}$ 代表該參數在 x-y 平面的平均值，其判斷準則如下：

$$D(x, y, t) = \begin{cases} 1 & \text{if } u' < 0, w' > 0 \text{ \& } \frac{u'w'}{\langle u'w' \rangle_{xy}} > k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.1)$$



$k$  為一門檻值，透過該點位的  $u'w'$  與  $\langle u'w' \rangle_{xy}$  的比較，設立強度大小的門檻， $k$  值的不同會造成通過此條件的點位數量不同，而位在第二象限的 ejections 事件也依照相同概念來設立標準，其判斷準則如下：

$$D(x, y, t) = \begin{cases} 1 & \text{if } u' > 0, w' < 0 \text{ \& } \frac{u'w'}{\langle u'w' \rangle_{xy}} > k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.2)$$

此研究主要是探討朗繆爾環流的結構，由第三章利用影像處理方法進行條件平均的結果，能夠觀察出在  $u'$  流速強烈的地方， $w'$  流速也強烈，即在有顯著條痕之處，會有顯著的下沉流事件，由此觀察能夠設立條件  $u' > 0, w' > 0$ ，屬於第一象限，參考 Kim & Moin (1986) 第二象限以及第四象限的準則設立，在此設置第一象限的判斷準則：

$$D(x, y, t) = \begin{cases} 1 & \text{if } u' > 0, w' > 0 \text{ \& } \frac{u'w'}{\langle u'w' \rangle_{xy}} > k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.3)$$

在此需先行挑選特定的深度進行象限分析，而由於  $u'$  和  $w'$  訊號較強的深度不相同，首先需觀察  $u'$  以及  $w'$  在各層的訊號強度。 $u'$  在水下 2 m 的訊號最弱，如圖 4.1 (a)，影像幾乎無法觀察到條痕結構，而隨著深度的增加， $u'$  訊號的強度逐漸增加，大約在水下 15 m 最顯著，而  $w'$  在水下 6 m 的訊號強度最強，如圖 4.3 (b)，而隨著深度的增加，訊號越來越弱，到了 15 m 幾乎無法觀察到明顯結構，而在此挑選水下 2 m，6 m 以及 10 m 進行象限分析，水下 15 m 因  $u'$  及  $w'$  的訊號強度以及影像的結構相差太多，故不使用，在門檻值  $k$  的部分會使用 1 及 2。在此分析中亦會使用影像二值化的概念，將通過判斷準則的點位以白色表示，未符合判斷準則的點為則以黑色表示，由二值化影像能夠初步觀察到擷取的流場事件，並依照此圖進行條件平均，而在此節中，二值化影像不需再經過修正，完全依照判斷準則找到的事件進行條件平均，不需再加入 3.3 節中較主觀的條痕判斷準則。首先使用  $k = 1$  當作門檻值，對 3 種深度進行象限分析，在水下 2 m 的二值化中，由可以觀察到除了主要條痕上的點位有通過判斷準則，主要條痕周圍的相對細小條痕也有明顯被擷取，如

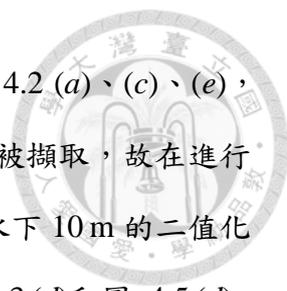


圖 4.1 (d)，而條件平均的結果顯示出流場結構強度較弱，如圖 4.2 (a)、(c)、(e)，主要原因是使用水下 2 m 進行象限分析，使許多較小的結構能被擷取，故在進行條件平均下，會使大結構與小結構混合在一起；水下 6 m 以及水下 10 m 的二值化影像能夠看出被擷取的結構大致上為流場中的主要條痕，如圖 4.3 (d)和圖 4.5 (d)，故條件平均的結果顯現，流場訊號會較強，因為取去做條件平均的點位大部份皆位在主要條痕上，也是朗繆爾環流強度高的區域，如圖 4.4 和圖 4.6 左側。接下來使用  $k = 2$  當作門檻值，而由三種深度的二值化影像可以觀察到，通過門檻值得點位變少，且強度較高，如圖 4.1(e)、圖 4.3(e)，圖 4.5 (e)，故由條件平均的結果能夠觀察到，各方向速度的訊號強度皆比  $k = 1$  的條件平均結果還要強，如圖 4.2 (a)、(c)、(e)和圖 4.4 (a)、(c)、(e)和圖 4.6 (a)、(c)、(e)。

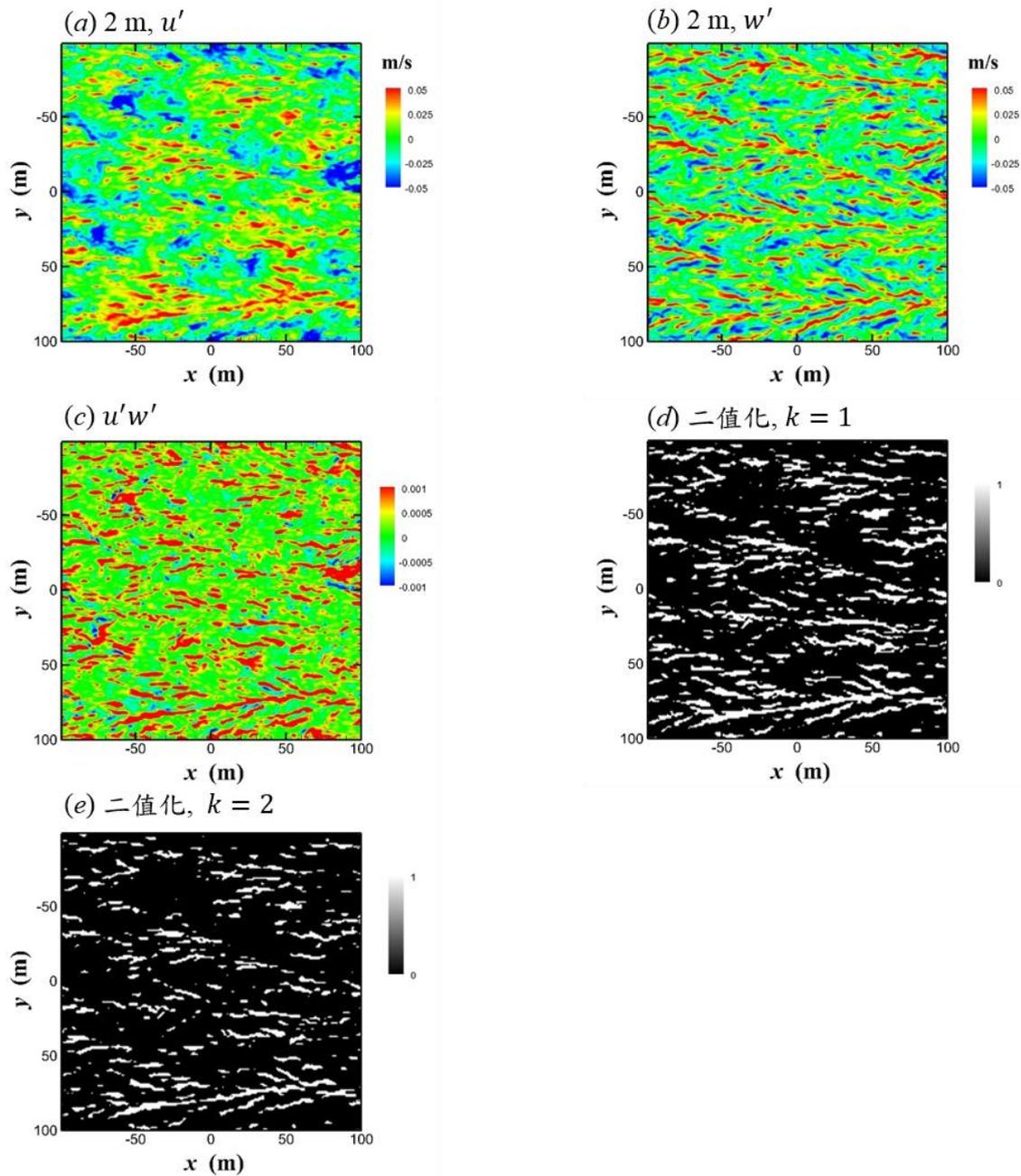


圖 4.1: 使用水下 2 m 影像進行象限分析。圖(a)水下 2 m  $u'$  影像，圖(b)水下 2 m  $w'$  影像，圖(c)水下 2 m  $u'w'$  影像，圖(d)使用  $k = 1$  進行象限分析之影像二值化結果，圖(e)使用  $k = 2$  進行象限分析之影像二值化結果。

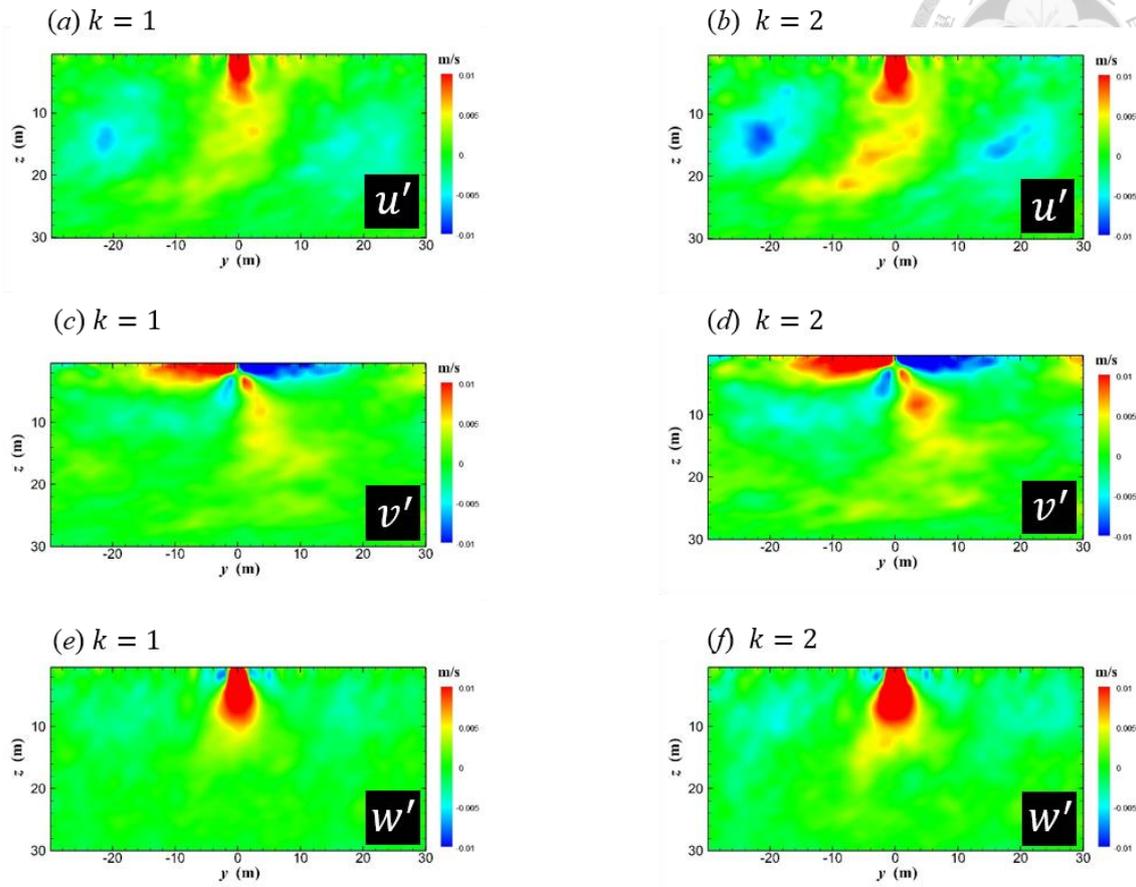
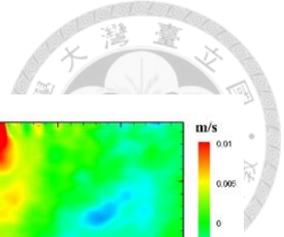


圖 4.2: 使用水下 2 m 影像進行象限分析之條件平均結果，左側為  $k = 1$  之結果，右側為  $k = 2$  之結果，圖(a)和(b)為  $u'$ ，圖(c)和圖(d)為  $v'$ ，圖(e)和(f)為  $w'$ 。

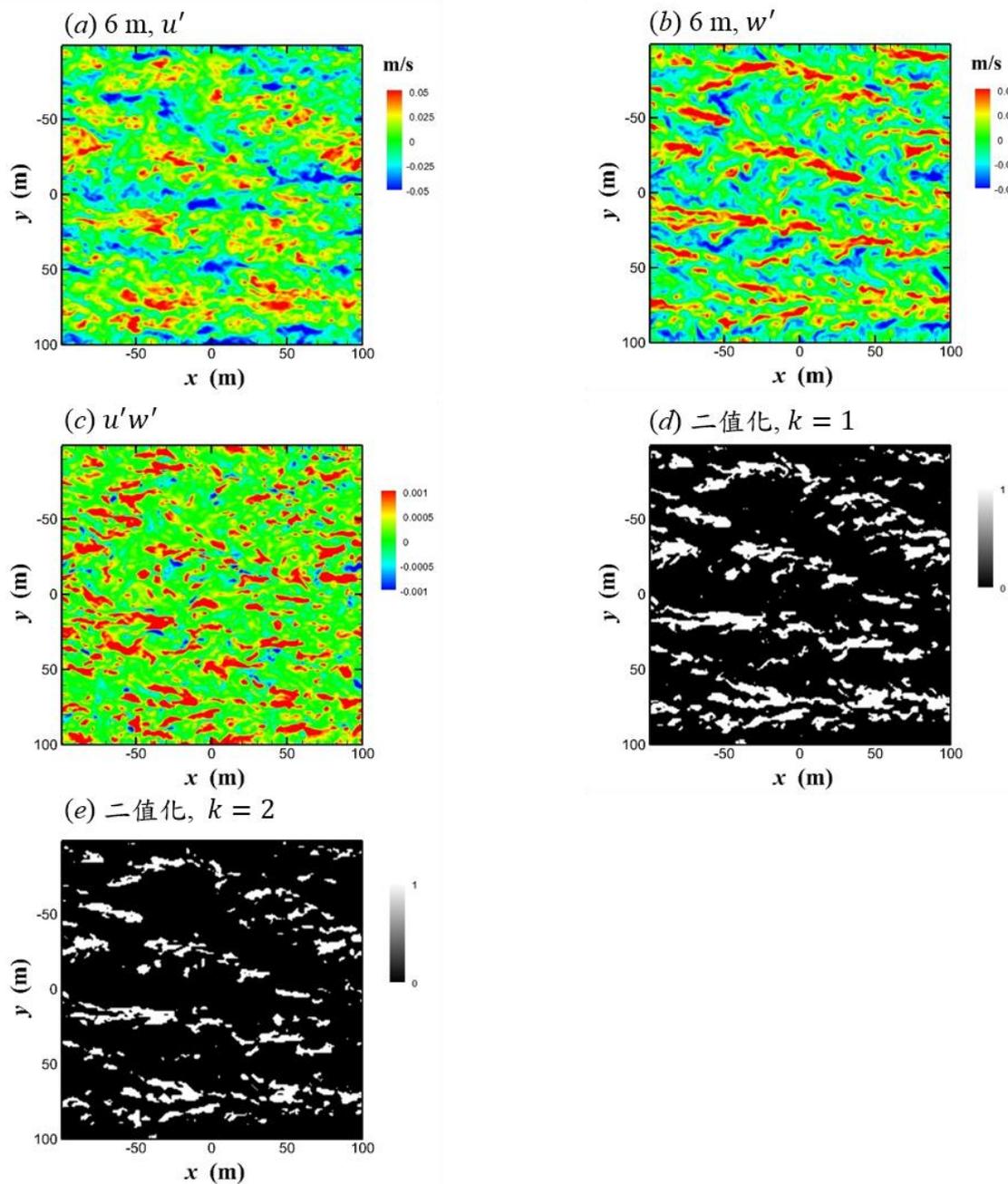


圖 4.3: 使用水下 6 m 影像進行象限分析。圖(a)水下 6 m  $u'$  影像，圖(b)水下 6 m  $w'$  影像，圖(c)水下 6 m  $u'w'$  影像，圖(d)使用  $k = 1$  進行象限分析之影像二值化結果，圖(e)使用  $k = 2$  進行象限分析之影像二值化結果。

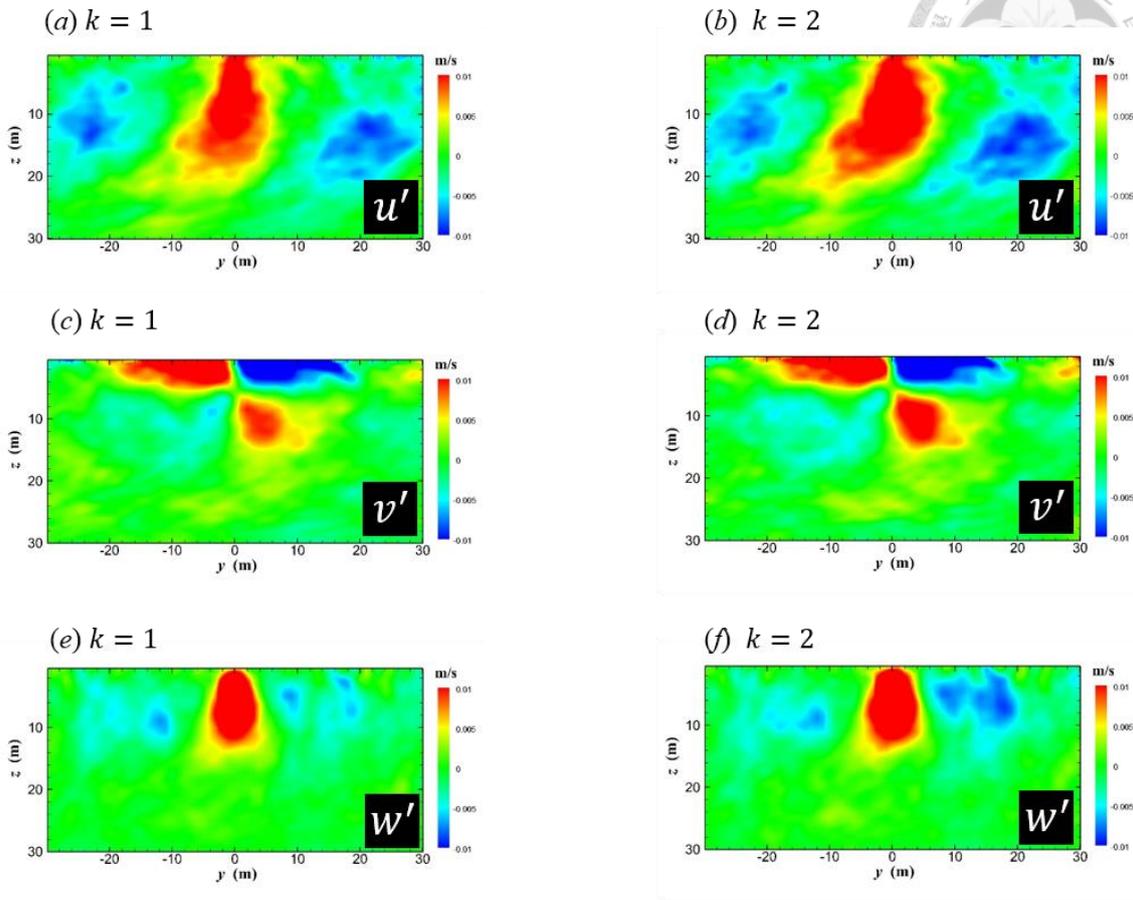
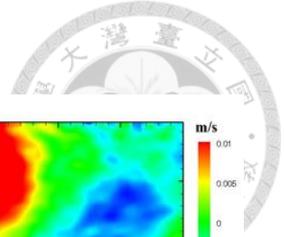


圖 4.4: 使用水下 6 m 影像進行象限分析之條件平均結果，左側為  $k = 1$  之結果，右側為  $k = 2$  之結果，圖(a)和(b)為  $u'$ ，圖(c)和圖(d)為  $v'$ ，圖(e)和(f)為  $w'$ 。

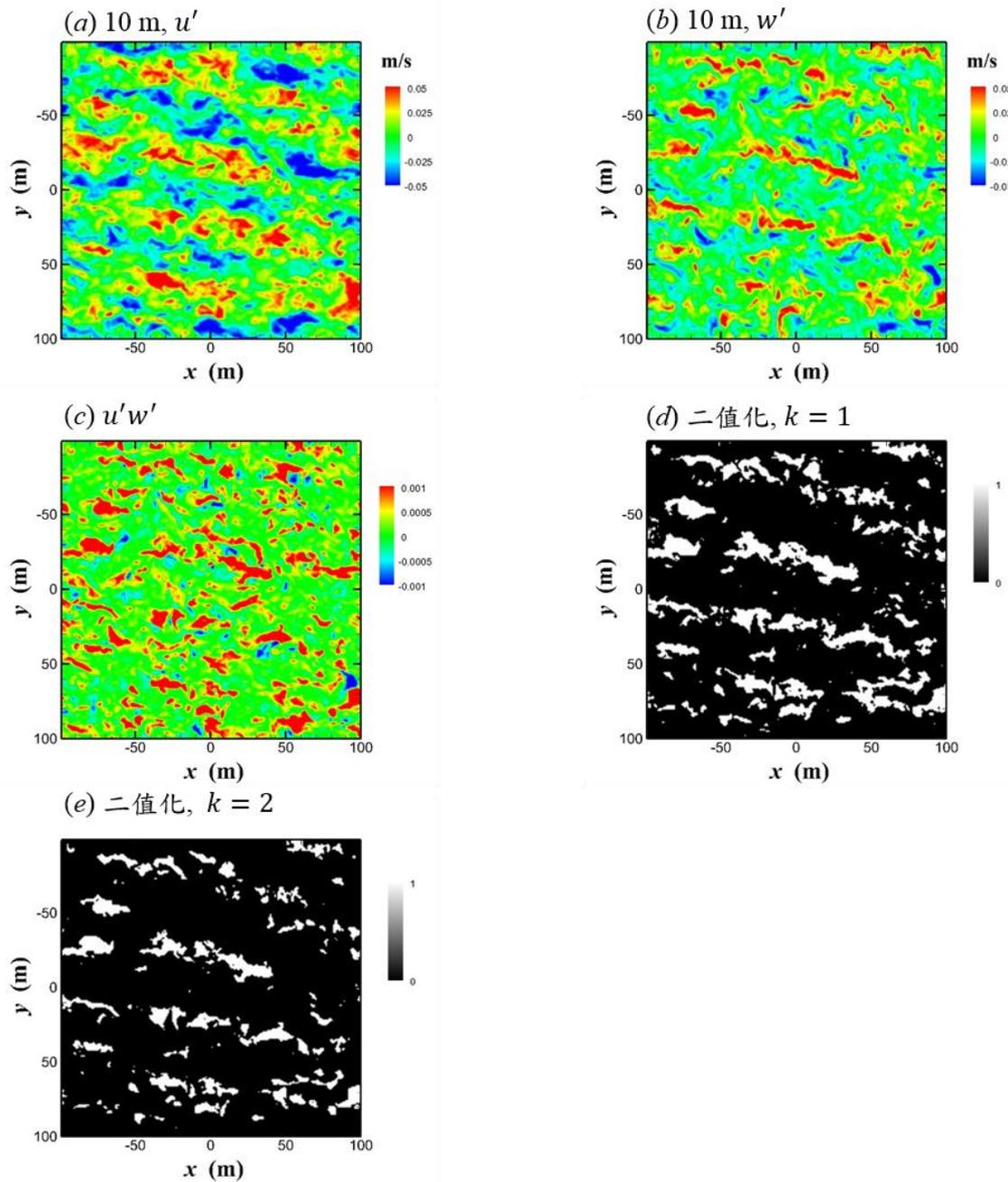


圖 4.5: 使用水下 10 m 影像進行象限分析。圖(a)水下 10 m  $u'$  影像，圖(b)水下 10 m  $w'$  影像，圖(c)水下 10 m  $u'w'$  影像，圖(d)使用  $k = 1$  進行象限分析之影像二值化結果，圖(e)使用  $k = 2$  進行象限分析之影像二值化結果。

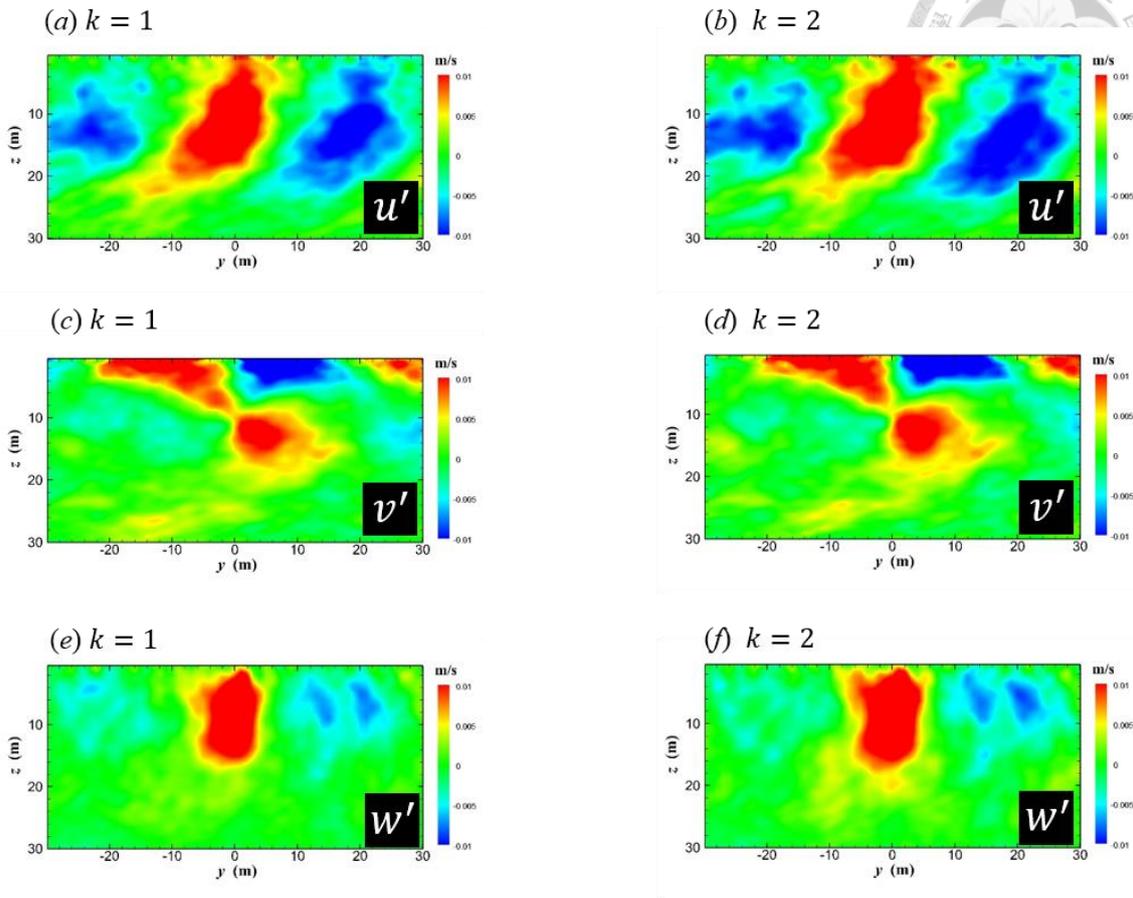
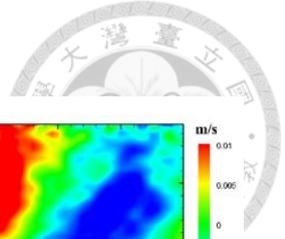


圖 4.6: 使用水下 10 m 影像進行象限分析之條件平均結果，左側為  $k = 1$  之結果，右側為  $k = 2$  之結果，圖(a)和(b)為  $u'$ ，圖(c)和圖(d)為  $v'$ ，圖(e)和(f)為  $w'$ 。



## 4.2 VISA 取樣法 (Variable-Interval Space-Averaging)

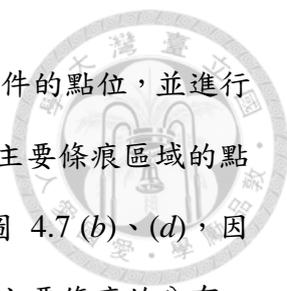
此章節將使用的條件平均法為 Kim(1983)中所提出 variable-interval space-averaging，簡稱 VISA。此方法的目標為，在整個流場中找到出爆衝現象(bursting phenomenon)，利用區域性以及整體性的比較來判斷該點位是否有符合條件，以下介紹此方法的判斷準則，使用參數為 x 方向的速度，首先需設立一個矩形範圍，而選取的範圍需要能容納下流場中的主要條痕結構，以及其周圍區域，以利進行數值上的差異比較。利用選取的範圍來進行特地點位和該區域的比較，而特定点位與矩形範圍區域之間的變異數(variance)定義如下：

$$var = u'^2 - \hat{u}'^2 \quad (4.4)$$

其中  $u'$  為某個特定点位的數值， $\hat{u}'$  為矩形範圍內的  $u'$  平均值，而此變異亦為該點位和該區域的能量差異。在比較完點位與指定區域的差異後，利用得出的變異數與整個流場的平方平均數  $u'_{rms}^2$  (root mean square)，即為整個  $u'$  影像的平方平均數，其判斷準則如下：

$$D(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } var > k \times u'_{rms}^2 \quad \text{and } u' > 0 \\ 0 & \end{cases} \quad (4.5)$$

藉由與  $k$  倍的  $u'_{rms}^2$  進行比較來判定該點是否有符合條件，藉此找出流場中的極端事件，而因已知要尋找的事件為條痕結構，其速度值需為正值，故設立了條件  $u' > 0$ ，避免取到速度值為負的點位。在此研究中，目標為擷取近水面流場的條痕，並且藉由找到的條痕結構當作進行條件平均的依據，進一步探討朗繆爾環流造成的流場結構，而在此使用 VSIA 來找尋水下 6 m 之  $u'$  以及  $w'$  影像中的極端事件，觀察有哪些條痕結構會被擷取出，在此矩形的範圍選擇  $21 \times 21$ ，其原因為，此範圍能夠將條痕以及條痕周圍的區域包含在內，能夠使條痕以及周遭的差異性表現出來，若矩形範圍無法將整個條痕容納下，進行 VISA 有可能無法偵測到符合條件的點位，因整個矩形範圍內差異過小，故選取矩形大小時，需考慮到能不能將想要偵



測的結構容納進選取範圍內。使用 $k = 1$ 進行 VISA，得到符合條件的點位，並進行影像切割，由 $u'$ 以及 $w'$ 的二值化影像，能夠觀察出大多為影像中主要條痕區域的點位能夠符合條件，且 $w'$ 二值化影像呈現的條痕結構較明顯，如圖 4.7 (b)、(d)，因為在水下 6 m， $w'$ 的訊號強度較強，由肉眼就能從原始影像看出主要條痕的分布。經由二值化影像進行取點以及條件平均，其結果皆能明顯看出朗繆爾環流造成的流場結構，且使用 $w'$ 的條件平均結果，訊號強度較 $u'$ 強一點，而整體結果與象限分析的結果也相似，如圖 4.8 和圖 4.9，綜合以上結果，使用 VISA 取樣法進行條件平均，擷取出來的結構為流場中的主要大條痕造成的，相對細小的條痕幾乎無法被擷取出，而由於使用 $k = 2$ 進行 VISA，能符合條件的點過於稀少，故未在此呈現。

使用速度當作進行 VISA 的參數，主要能夠以能量的差異來解釋，並且找尋流場中的紊流事件，而在此將嘗試使用水下 2 m 的 $c'$ 進行延伸，因其影像最能明顯呈現主要的條痕結構，但使用 $c'$ 進行 VISA 的判斷準則時，並無法以能量的觀點進行解釋，需以該點位與周遭的差異性來解釋，而其二值化影像的結果與條件平均的結果，條痕結構以及流場的結構，皆比水下 6 m 的 $u'$ 及 $w'$ 的結果更加明顯，如圖 4.7 (f)和圖 4.10。

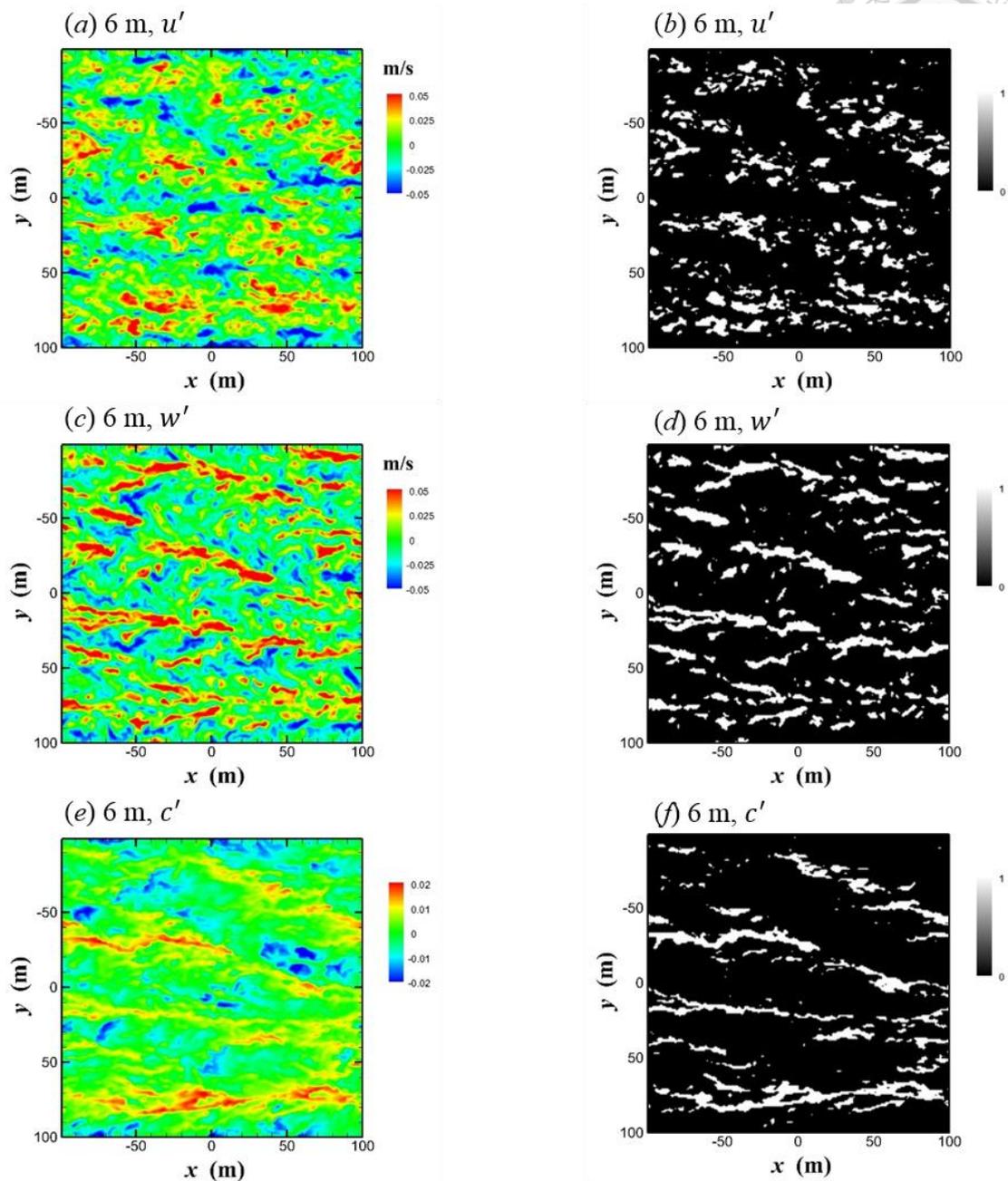


圖 4.7: 利用不同參數進行 VISA 之影像二值化結果。圖(a)及圖(b)為水下 6 m 之  $u'$  影像及其使用 VISA 之二值化結果，圖(c)及圖(d)為水下 6 m 之  $w'$  影像及其使用 VISA 之二值化結果，圖(e)及圖(f)為水下 2 m 之  $c'$  影像及其使用 VISA 之二值化結果。

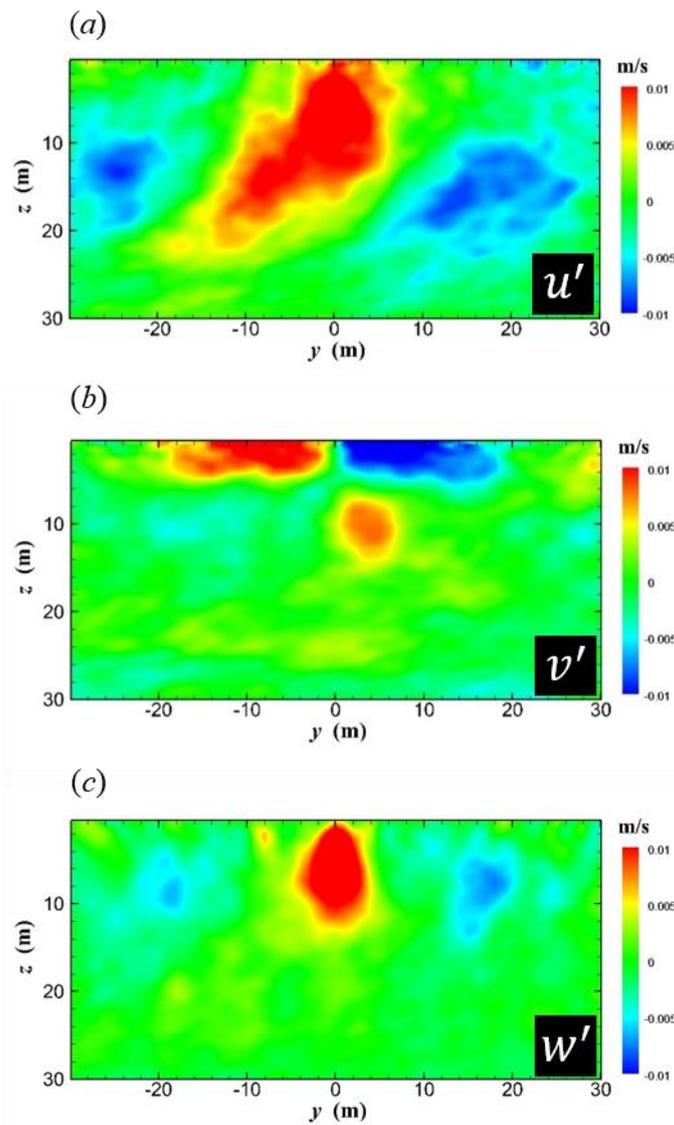


圖 4.8: 使用水下 6 m 之  $u'$  影像進行條件平均之結果，其門檻值係數使用  $k = 1$ 。

圖(a)為  $u'$ ，圖(b)為  $v'$ ，圖(c)為  $w'$ 。

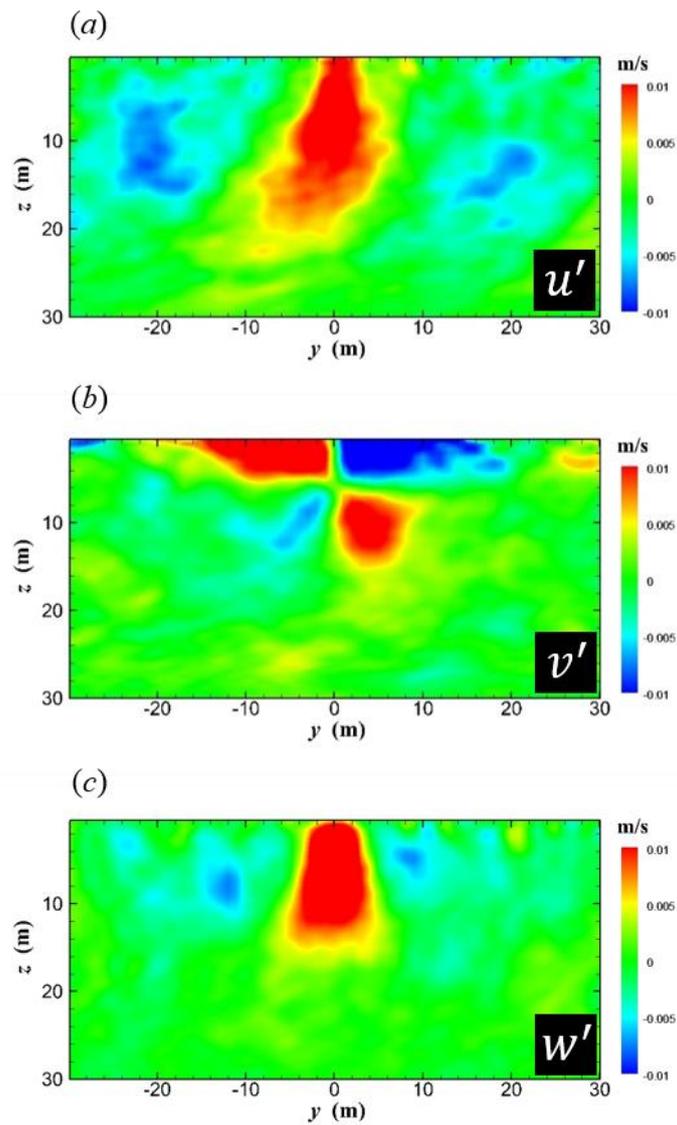


圖 4.9: 使用水下 6 m 之  $w'$  影像進行條件平均之結果，其門檻值係數使用  $k = 1$ 。

圖(a)為  $u'$ ，圖(b)為  $v'$ ，圖(c)為  $w'$ 。

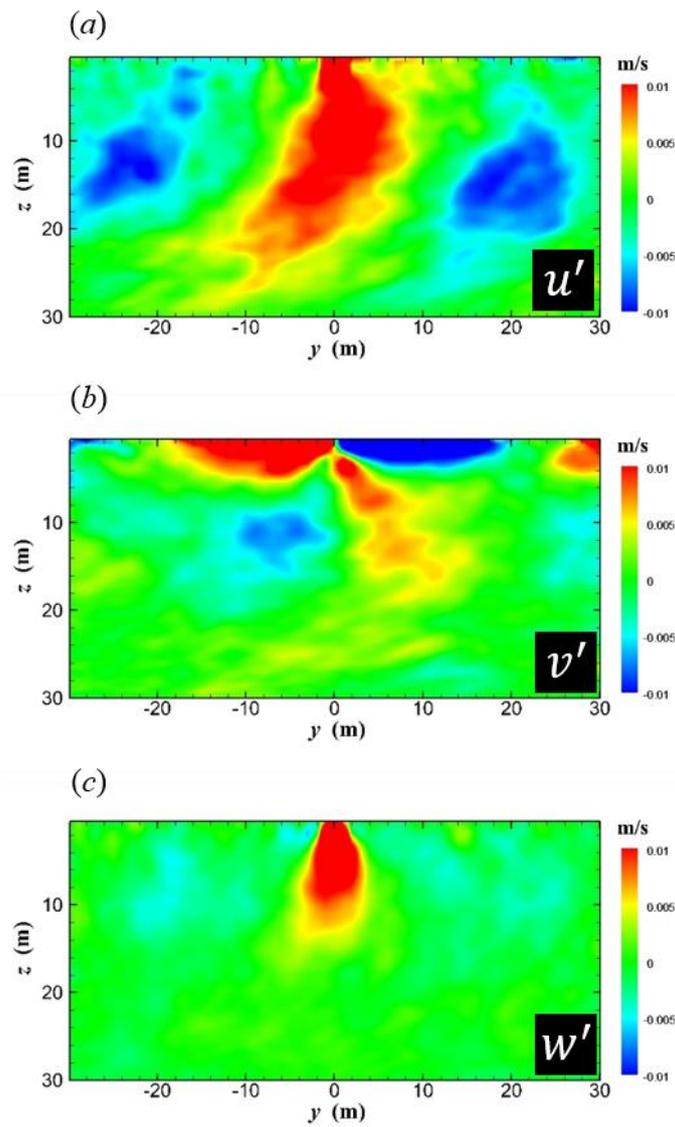


圖 4.10: 使用水下 2 m 之  $c'$  影像進行條件平均之結果，其門檻值係數使用  $k = 1$ 。

圖(a)為  $u'$ ，圖(b)為  $v'$ ，圖(c)為  $w'$ 。



### 4.3 VISA 取樣法之延伸：區域標準差的使用

在 4.2 節中使用 VISA 取樣法，經由區域性以及整體流場的比較，擷取出條痕結構，並且進行條件平均，而擷取出的結構為流場中的主要條痕，在此節中，將使用區域標準差的概念來進行條痕結構的擷取以及條件平均，預期能夠擷取出尺度較小的結構，並與 VISA (Kim, 1983) 擷取出的結構做比較。此方法的概念為純粹利用區域性的比較，來判斷該點位是否符合條件，並無使用 VISA (Kim, 1983) 的概念。以下為區域性比較的概念，首先建立一個矩形範圍，進行區域性的比較，利用矩形中心點的  $u'$  與矩形範圍的  $u'$  平均值進行相減，得出其差異，並且利用其平方後再開根號，讓其值必為正值，以利後續比較，其定義如下：

$$var = \sqrt{(u' - \hat{u}')^2} \quad (4.6)$$

其中  $\hat{u}'$  為矩形範圍的  $u'$  平均值，接著將利用得出的區域性變異 ( $var$ ) 進行後續的比較。在 VISA 條件平均法中，進行完區域性的比較，得出定義的變異數後，會與整個流場，即整張  $x$ - $y$  平面的影像之平方平均數進行比較，屬於區域性以及全域性的比較，而此方法將使用矩形範圍的  $u'$  標準差  $\sigma_{window}$  進行比較，故由此可以確立判斷準則：

$$D(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } var > k \times \sigma_{window} \text{ and } u' > 0 \\ 0 & \end{cases} \quad (4.7)$$

其中  $k$  為常數，藉由使用  $\sigma_{window}$  當作判斷基準來篩選影像中有哪些點位符合，而加入  $u' > 0$  這個條件，是因為已知要尋找的事件速度值為正值。此方法為純區域性的比較，故在預期上，應會有區域性較小的結構被擷取。接下來將利用此方法來進行分析，首先使用為水下 6 m 的  $u'$  影像來進行分析，而判斷準則中的  $k$  值使用 1，矩形範圍與 4.2 節相同，選取  $21 \times 21$ 。將所以點位皆以判斷準則判定是否有符合條件，得出所有符合條件的點位，並且進行影像二值化，將所有符合條件的點位區分出，觀察有哪些條痕結構被擷取出。由二值化影像的結果可以看出有許多細小的



條痕被擷取出，且結構呈現斷續性，在原始影像中大致上還能看出主要條痕的分布，而在二值化影像中幾乎無法看出主要條痕的存在，如圖 4.11 (b)，造成此分析結果的原因為使用區域性標準差當作判斷準則的依據，因通過條件的點位，代表該點位與該區域的差異有達到設定的門檻，故分布在主要條痕中的點位，並不會每一點都符合此判斷準則，因有可能有點位雖然速度的數值大，但與指定區域的差異很小，故不符合條件，而在主要條痕以外的點位也有許多點符合條件而被取出，而呈現許多細小的條痕結構，其原因為雖然這些點位的速度值有可能較低，但與指定範圍的差異卻有大於門檻值，故這些點位會被擷取出，此結果與預期的區域性結果吻合。接著以二值化影像為基準進行條件平均，取點方式與 VISA 取樣法相同，而得出的流場影像，其訊號相對較弱，因有許多細小的條痕加入條件平均，故使用此法得出的條件平均結果並無法真的看出朗繆爾環流造成的條痕結構，而是整個流場中大結構與小結構的結果加總在一起，如圖 4.12。接著使用水下 6 m 的  $w'$  以及水下 2 m 的  $c'$  進行此方法的分析， $w'$  因在 6 m 的訊號較強，故由二值化影像可以看出條痕結構的斷續性較無  $u'$  顯著，而亦有許多較細小的結構被擷取出，如圖 4.11 (d)，故條件平均的結果與  $u'$  相似，流場影像皆呈現較弱的強度，如圖 4.13。水下 2 m  $c'$  影像，相對於水下 6 m 的  $u'$  及  $w'$  影像，條痕結構的呈現是最明顯的，能最清楚看到朗繆爾環流造成的近水面條痕，在先前章節的方法中，例如：影像處理方法，VISA 條件平均法，二值化影像皆能清晰的呈現主要條痕，而使用此法的二值化影像，相較於水下 6 m 的  $u'$  及  $w'$  無法看出主要條痕的位置，水下 2 m 的  $c'$  大致上能夠看出朗繆爾環流造成的條痕位置，但在這些主要條痕之間，仍有許多細小的條痕被擷取出，如圖 4.11 (f)，故條件平均的結果，流場的影像也呈現較弱的強度，如圖 4.14。

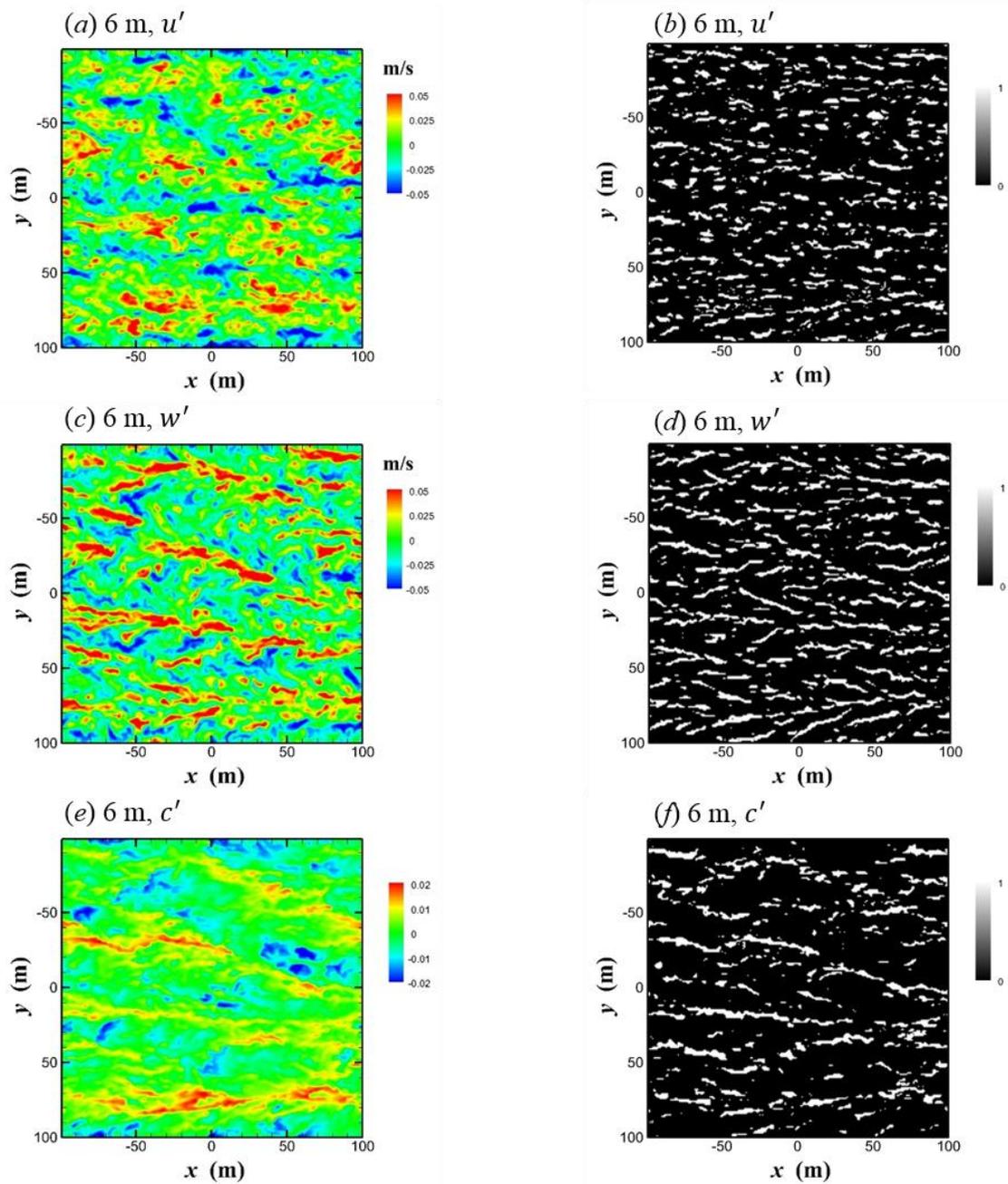


圖 4.11: 利用不同參數進行結構擷取之影像二值化結果。圖(a)及圖(b)為水下 6 m 之  $u'$  影像及其二值化結果，圖(c)及圖(d)為水下 6 m 之  $w'$  影像及其二值化結果，圖(e)及圖(f)為水下 2 m 之  $c'$  影像及其二值化結果。

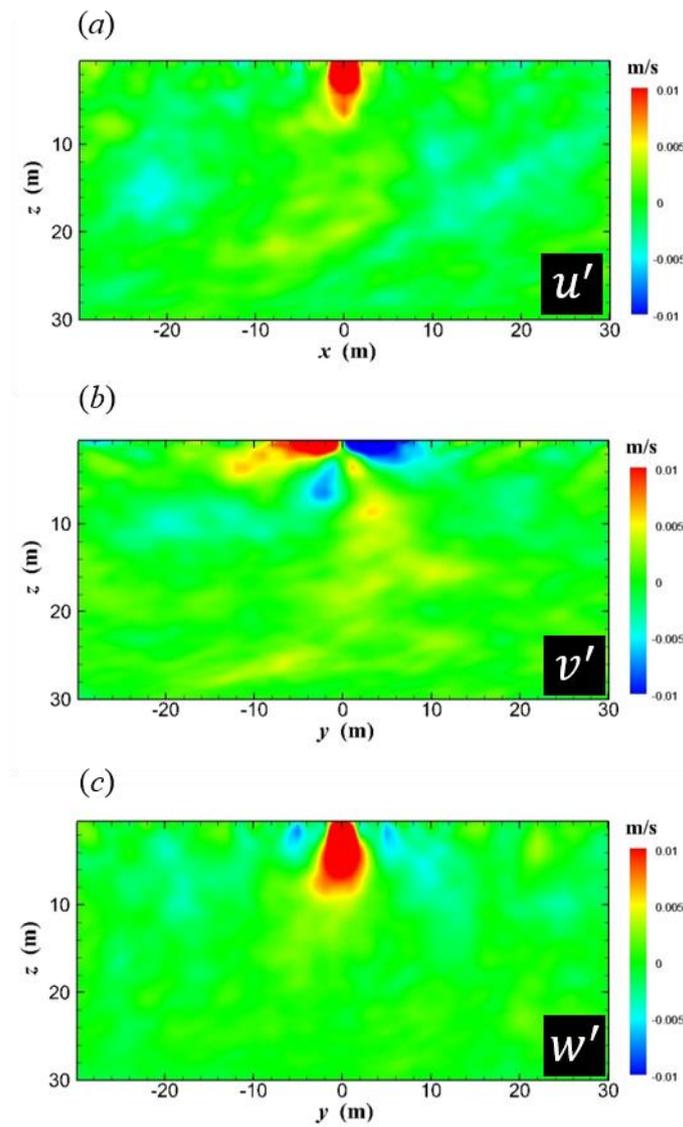


圖 4.12: 使用水下 6 m 之  $u'$  影像進行條件平均之結果，其門檻值係數使用  $k = 1$ 。

圖(a)為  $u'$ ，圖(b)為  $v'$ ，圖(c)為  $w'$

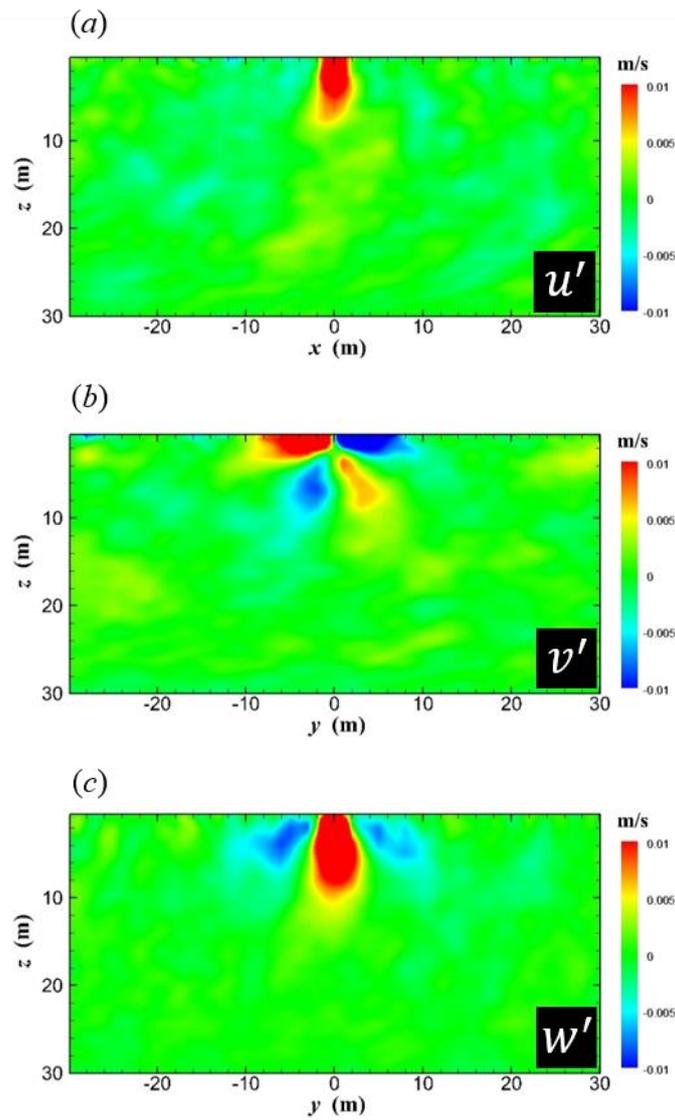


圖 4.13: 使用水下 6 m 之  $w'$  影像進行條件平均之結果，其門檻值係數使用  $k = 1$ 。圖(a)為  $u'$ ，圖(b)為  $v'$ ，圖(c)為  $w'$ 。

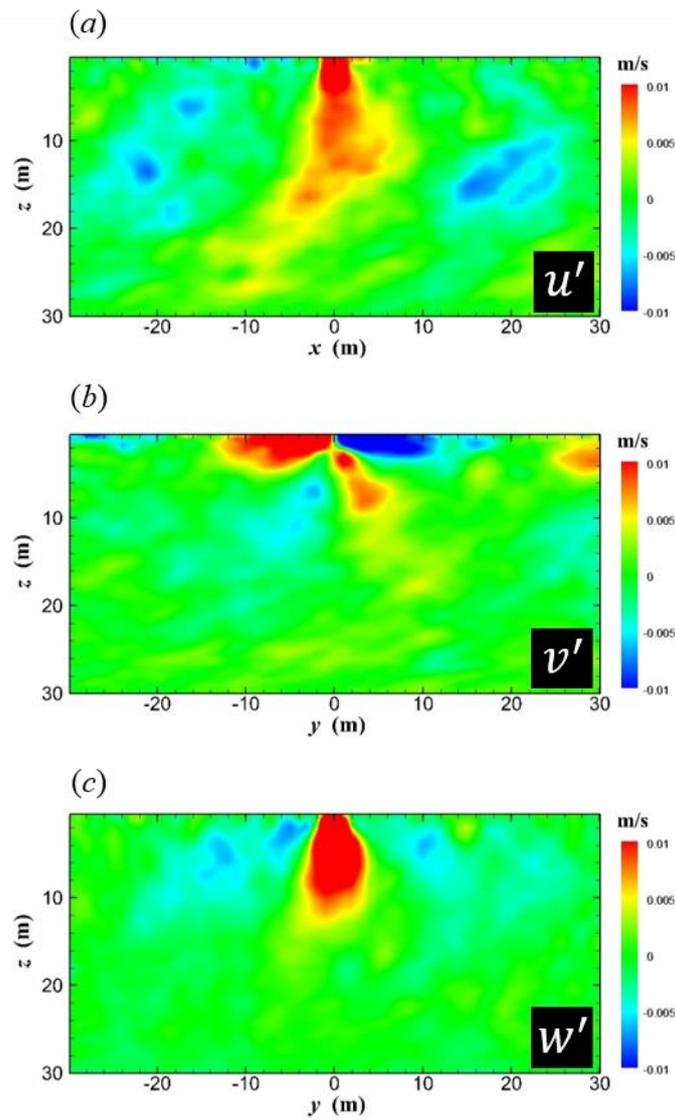


圖 4.14: 使用水下 2 m 之  $c'$  影像進行條件平均之結果，其門檻值係數使用  $k = 1$ 。

圖(a)為  $u'$ ，圖(b)為  $v'$ ，圖(c)為  $w'$ 。

## 第五章 探討朗繆爾環流的結構



在第三章以及第四章使用了不同的條件平均法對大渦模擬的數值資料進行分析，第三章為影像處理方法，第四章為利用流場的物理特性進行條件平均法，而呈現出的結果也有所不同，在 5.1 節中會對不同方法的結果進行比較。此章的第二部分會對於朗繆爾環流的流場結構進行更進一部的探討，在 5.2 節中第一部分會對於控制朗繆爾環流強度的因子進行探討，並且回顧學者的研究；第二部分會使用陳 (2015) 中的不同條件下的模擬資料進行近水面條痕結構的擷取以及條件平均，觀察不同的模擬資料呈現出的流場結構。

### 5.1 不同條件平均法結果之歸納

經由第三章以及第四章的條痕結構擷取以及條件平均結果，可以大致將結果分成兩種類型，第一種為朗繆爾環流造成的流場結構，第二種為朗繆爾環流以及流場中其他較小的結構加總在一起的結果。首先進行第一種結果的歸納，影像處理中的全域性影像增強法，包括伽瑪校正，直方圖等化，並配合大津演算法將影像二值化，其條痕結構辨識的結果，能清楚看到朗繆爾環流造成的近水面條痕，而象限分析法以及 VISA 條件平均法的結果與其相似，象限分析法藉由速度的正負值來區分事件，並且設定判斷準則，利用門檻值將擁有較高強度的事件選取出來，而 VISA 的概念為經由區域性以及全域性的比較，並與象限分析相同，設立判斷準則以及門檻值，找出流場中的突出現象，故此兩種方法，通過條件的點位，通常都會是整個流場中，強度較強的點，二值化影像的結果也清楚呈現出朗繆爾環流在近水面造成的條痕。上述的方法，包括全域性影像增強法，象限分析法以及 VISA，其條件平均的結果， $u'$ 、 $v'$  及  $w'$  的水下影像皆能清楚看出朗繆爾環流造成的流場結構。



以下將進行第二種結果的歸納，包括區域性的影像增強法，自適應直方圖等化以及 VISA 法的改編，使用區域標準差當做流場事件的判斷準則，這兩種方法的共通點為區域性。自適應直方圖等化會根據選取的矩形範圍，在其範圍中進行直方圖等化，故在流場中，只要在該區域相對較強的點位，皆能被突顯出來，二值化影像的結果與全域性影像增強法的結果差異甚大，其影像呈現出非常多的條痕結構，除了朗繆爾環流造成的條痕，也有許多細小的條痕，流場中，大結構或是小結構，都被突顯。而將 VISA 的判斷準則改成區域性的比較，利用區域性標準差來當作判斷準則的方法，其結果與自適應直方圖等化相似，皆能將流場中較細小的結構擷取出，而此兩法的條件平均結果，可以明顯看出訊號與第一類的結果弱上許多，因此兩法擷取出許多較小的結構，故條件平均的結果並無法真正看出朗繆爾環流造成的流場結構，而是朗繆爾環流以及其他流場中細小的結構加總並且平均。故若目標為觀察朗繆爾環流的流場結構，建議使用全域性的條件平均法。

經由上述的結果歸納，能夠得知，影像處理系列的方法以及使用流場物理特性的相關方法，經由結果的比對，會得到相似的結果。使用影像處理法的優點為，可以藉由不同門檻值的設立，以及調整影像增強法相關參數，滿足個人期望的結果，但會失去客觀性，因無法明確說明哪一個門檻值最佳，或是參數要如何設定最好，且在進行影像處理時，其思想基礎就已經建立在朗繆爾環流造成的條痕結構下，例如挑選水下 2 m 的  $c'$  影像，也是因為該影像的條痕結構最清楚，故會造成，為了擷取出某些特定結構而去調整影像處理方法中的參數。相對的，流場物理特性的相關方法，能夠拋開對條痕結構的既定印象，即假設不知道條痕結構的存在，且使用的參數主要為各方向的速度，是最能直接代表流場特性的參數，並且利用判斷準則的設立找出流場中的特定事件，而其判斷準則利用的平均值或標準差，也具有統計性，並非主觀的設定門檻值，其影像二值化的結果與條件平均的結果，能夠和影像處理的結果相似，綜合上述比較，使用流場的物理特性來尋找特定事件，整體較客觀，與影像處理相關方法相比，是較佳的條件平均法。



## 5.2 漩渦力強度不同的朗繆爾環流結構

在第三章以及第四章講述了各種不同的條件平均法，在方法建立之後，期望能進行更進探討朗繆爾環流的結構。本節將進一步分析陳(2015)中不同的模擬資料，觀察朗繆爾環流在不同的條件下，結構會有何不同，在 5.1 節會先說明有哪些因子會使朗繆爾環流的強度改變，並在 5.2 節使用條件平均法進行延伸性的探討，分析不同條件下所產出的模擬資料。

### 5.2.1 朗繆爾環流之強度及文獻回顧

漩渦力 (vortex force) 為觀察朗繆爾環流強度的重要依據，為 C-L 動量方程式 (式 2.1) 的其中一項，該項的表示為  $\mathbf{u}_s \times (f\hat{z} + \omega)$ ，此項的強弱將會影響朗繆爾環流的強度。在前人研究中，有對於不同強度的朗繆爾環流進行比較，以下將進行文獻回顧。在 Noh et al. (2006)、Kukulka et al. (2010) 以及 Li et al. (2015) 中，皆有進行不同的大渦模擬數值資料的比較，一組有漩渦力的效應，一組無漩渦力的效應，皆以垂直方向速度  $w$  當作近水面結構的觀察依據。在有漩渦力效應的模擬資料中，由近水面的影像能夠清楚看到朗繆爾環流造成的狹窄條痕，且方向沿著風向，也是流場中流速較高的下沉流區域；在無漩渦力效應的模擬資料中，主要由垂直剪切 (vertical shear) 來主導流場的結構，並無朗繆爾環流的存在，雖然流場存在著下沉流事件，但流場中的結構整體紊亂，並無法觀察到如果朗繆爾環流一樣的標誌性的結構，整體結構無法組織成明顯的條痕，而這些下沉流區域影響的深度範圍也較淺，經由兩個不同條件的模擬資料比較，能夠更加了解漩渦力對於朗繆爾環流的重要性，如圖 5.1。而關於朗繆爾環流以及剪切這兩種機制，前者為風浪交互作用以及渦旋力的作用下形成，後者只由風的力量形成，而這兩者之間有以下關係，當朗繆爾環流生成時，會產生垂直混合，使垂直剪切的效應下降。

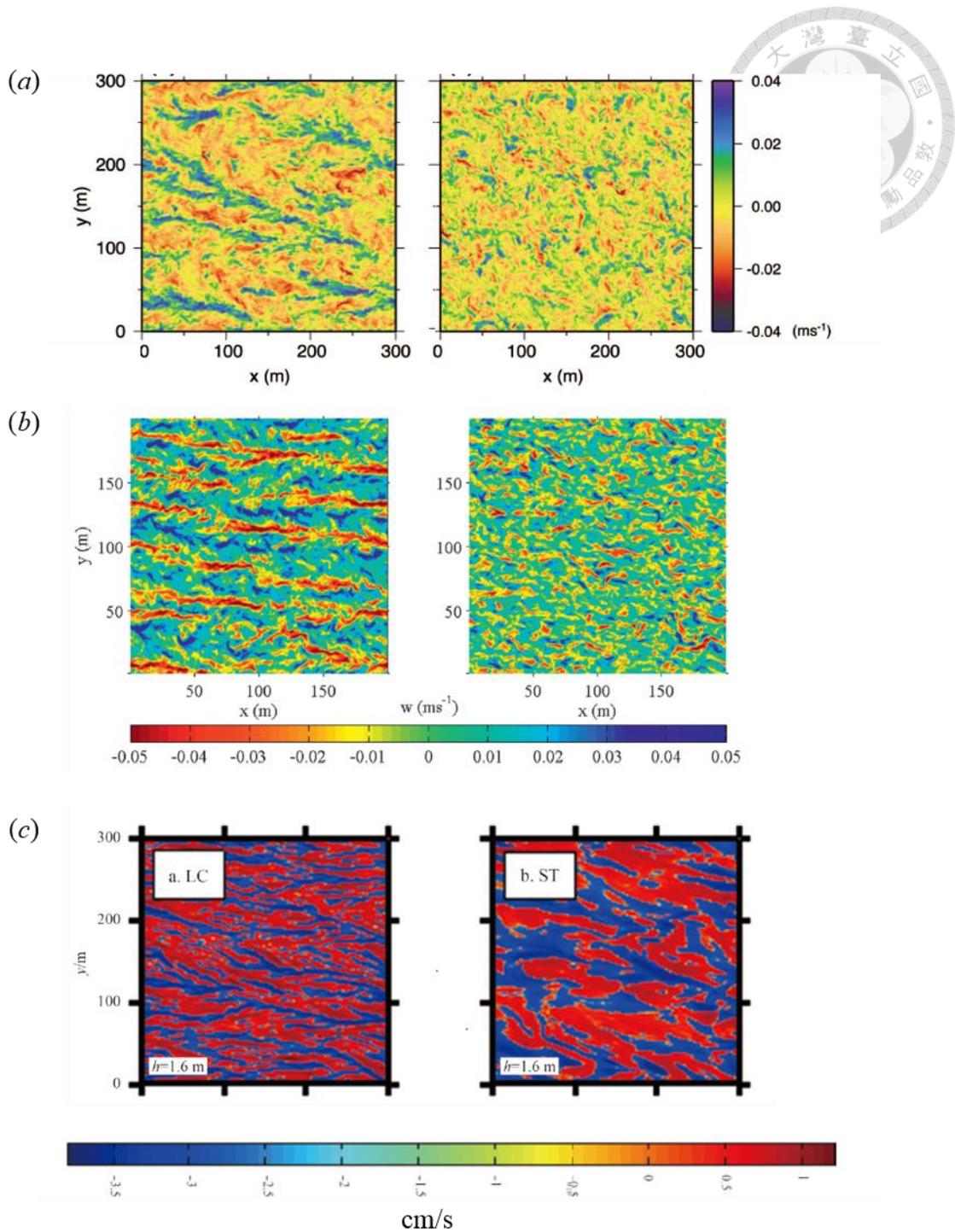


圖 5.1: 朗繆爾環流造成的近水面結構(圖左側)以及剪切力造成的近水面結構(圖右側)之比較，以垂直速度  $w'$  當作使用參數，能夠觀察朗繆爾環流會造成明顯的條痕結構，而剪切力的效應並不會在近水面造成明顯的結構。【原圖來源: 圖(a)取自 Noh et al. (2006)】【原圖來源: 圖(b)取自 Kululka et al. (2010)】【原圖來源: 圖(c)取自 Li et al. (2015)】



## 5.2.2 使用不同條件的模擬資料進行分析

在此節將使用陳(2015)中不同條件的數值模擬資料進行分析(詳見表 5.1)，在第三章以及第四章分析的資料為 case D，而其他的模擬資料，會根據 C-L 動量方程式當中代表漩渦力的項 (vortex force term)， $\mathbf{u}_s \times (f\hat{z} + \omega)$ ，其中  $\mathbf{u}_s$  為 Stokes drift velocity，為主要控制漩渦力的因子，而由第二章能夠得知， $\mathbf{u}_s$  的強度是由波的振幅  $a$  以及表面波的波數  $k = 2\pi/\lambda$  來主導，故藉由改變模擬條件中的振幅以及波數，即能夠調整漩渦力的強度，使朗繆爾環流的強度改變。要使朗繆爾環流的強度上升，需提升漩渦力的強度，可以使振幅提高或是使波長下降；要使朗繆爾環流的強度下降，需降低漩渦力的強度，可以使振幅下降或是波長上升。經由調整振幅以及波數，除了一開始的 case D，能夠得到兩個朗繆爾環流較強的模擬資料 (stronger case)，分別為 case S1 和 case S2，和兩個朗繆爾環流較弱的模擬資料 (weaker case)，分別為 case W1 和 case W2，而在此也模擬了沒有漩渦力的資料，主要生成結構的機制為風的剪應力 (pure shear case)，為 case P。以下將詳述各個模擬資料振幅和波數調整的情形，以及朗繆爾數 (Langmuir number,  $La_t$ ) 的數值大小，其中  $La_t = (u_*/U_s)^{1/2}$ ，為浪與風效應的比值，而當在海表面時 ( $z = 0$ )， $U_s = u_s$ 。在第三章以及第四章分析的資料為 case D，其  $La_t$  為 0.3，而其他條件的模擬資料將以 case D 為基準進行調整。在朗繆爾環流較強的模擬資料中，case S1 以及 case S2 的  $La_t$  皆調整為 0.41，其中 case S1 將振幅增加 37%，case S2 則減少 34% 的波長，而此調整皆使  $\mathbf{u}_s$  的強度變為 case D 的 1.87 倍；在朗繆爾環流較弱的模擬資料中，case W1 及 case W2 的  $La_t$  皆調整為 1.0，其中 case W1 將振幅減少 59%，case W2 則增加波長 227%，而此調整皆使  $\mathbf{u}_s$  的強度變為 case D 的 0.17 倍。

首先要進行近水面影像的觀察，在分析 case D 時，以水下 2 米的  $c'$  影像最能清楚觀察影像中的條痕結構，故在此也利用  $c'$  的影像來對其他條件的模擬資料進行觀察，如圖 5.2。在沒有漩渦力作用的 case P 中，其影像能夠明顯觀察到與 case D



的差異，無法在影像中看出清楚的條痕結構，整體的結構較紊亂，與前人研究中的結果類似。在朗繆爾環流較強的模擬資料中，case S1 的影像中，最上方的條痕，強度有明顯增強，而 case S2 雖與 case D 的條痕結構分布不相同，但由肉眼觀察，並無法看出強度上的提升，皆能清楚觀察到朗繆爾環流造成的條痕。在朗繆爾環流較弱的模擬資料 case W1 和 W2，雖然看出條痕結構，但整體結構較為鬆散，不像 case D、case S1 和 S2，的條痕結構，有著顯著的連續性。

除了使用水下 2 m 之  $c'$  的影像觀察條痕結構，在此也選用水下 6 m 的  $w'$  進行不同條件下模擬資料的近水面影像，如圖 5.3，因  $w'$  大約在水下 6 m 的訊號極強，而使用速度場來觀察結構也較能直接體現出流場的特性。經由觀察， $w'$  影像的條痕結構呈現結果與  $c'$  的結果有所不同，在 case S1 和 S2 中，條痕有比 case D 密集一點，相反的在 case W1 和 W2 中，條痕結構變得非常鬆散，甚至與 case P 的差異甚小，整張影像所呈現的結構，看起來較紊亂很難定義影像中有哪些條痕，在  $c'$  的影像中，雖然結構的強度有偏弱，但尚能看出流場的主要條痕大概在哪些區域，除了近水面條痕結構的觀察，也可以藉由流場平均速度的剖面來驗證朗繆爾環流的效應與剪切力之間的關係，如圖 5.4，首先由 case P 的剖面可以在近水面處看到 6 種資料中最強的垂直剪切，case D、case S1 和 S2 因朗繆爾環流明顯，垂直混合效應大，故幾乎無法看出垂直剪切的效應，而在 case W1 和 W2 中，因朗繆爾環流的強度下降，垂直混合的效應也較低，故在近水面處能夠看到垂直剪切的效應，但強度會比 case P 弱。

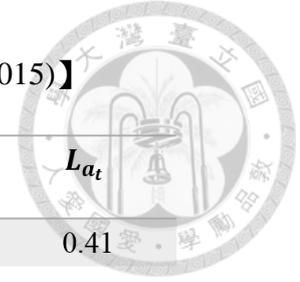
由近水面的影像能夠初步觀察到不同條件下的數值模擬資料會有哪些差異，但無法確切的得知朗繆爾的強度是否有變強，僅能由肉眼觀察條痕的變化去大略推測，故在此需進行條件平均法，觀察各個模擬資料的水下速度場結構，在方法的選用上，使用 VISA 法，門檻值參數  $k$  選用 1。此部分的主軸是觀察不同強度的朗繆爾環流，選用 VISA 法能有效擷取出流場中的主要條痕，較不會有細小或強度較弱的結構被擷取出，也是相對客觀的方法，而在參數上的使用，選擇垂直方向速度



$w'$  以及虛擬濃度  $c'$ ，因此兩個參數在近水面的影像中，呈現出的條痕結構不太相同，故在預期上，條件平均的結果會有所差異，能夠互相比較。在比較不同強度的朗繆爾環流前，先進行 case D 和 case P 的比較，如，圖 5.5 和圖 5.6，在  $c'$  和  $w'$  的條件平均結果中，case P 的  $u'$ 、 $v'$  及  $w'$  的影像呈現出沒有朗繆爾環流影響的結構，整體訊號偏弱，且各方向速度的運動影響到的深度也較淺。在 case S1 和 S2 的比較中，如圖 5.7 和圖 5.8，相同之處是，由  $c'$  影像進行條件平均的結果接呈現較 case D 強的訊號，由  $u'$ 、 $v'$  及  $w'$  的影像觀察到朗繆爾環流造成的流場結構，強度大幅提升，而 S1 的強度又比 S2 來的大，因 S2 的變化因子為降低波長，會使 e-folding rate 上升，進而使 Stokes drift 下降，故 S2 強度的增加不會比 S1 多，而由  $w'$  影像進行條件平均的結果，朗繆爾環流的強度有些微的上升，但明顯成度不及  $c'$  的結果，有可能是因為  $c'$  與  $w'$  的近水面影像，條痕結構差異性大，通過條件平均取出的點也有許多不同之處，而  $c'$  雖取出的點位較少，但其強度皆大。在 case W1 和 case W2 的比較中，如圖 5.9 和圖 5.10，不管由  $c'$  或是  $w'$  的條件平均結果， $u'$ 、 $v'$  及  $w'$  的影像皆呈現比 case D 還要弱的訊號，朗繆爾環流造成的效應減少，影響的深度範圍也變淺，但整體的訊號強度還是會比 case P 強。

表 5.1: 陳(2015)中，不同條件下的模擬資料。【原表來源: 陳(2015)】

case	Amplitude	Wavelength	Surface Stokes drift	e-folding rate	$La_t$
D	$a$	$\lambda$	$U_s$	$2k$	0.41
P	0	N/A	0	N/A	$\infty$
S1	$1.37a$	$\lambda$	$1.87U_s$	$2k$	0.3
S2	$a$	$0.66\lambda$	$1.87U_s$	$3k$	0.3
W1	$0.41a$	$\lambda$	$0.17U_s$	$2k$	1.0
W2	$a$	$3.27\lambda$	$0.17U_s$	$0.61k$	1.0



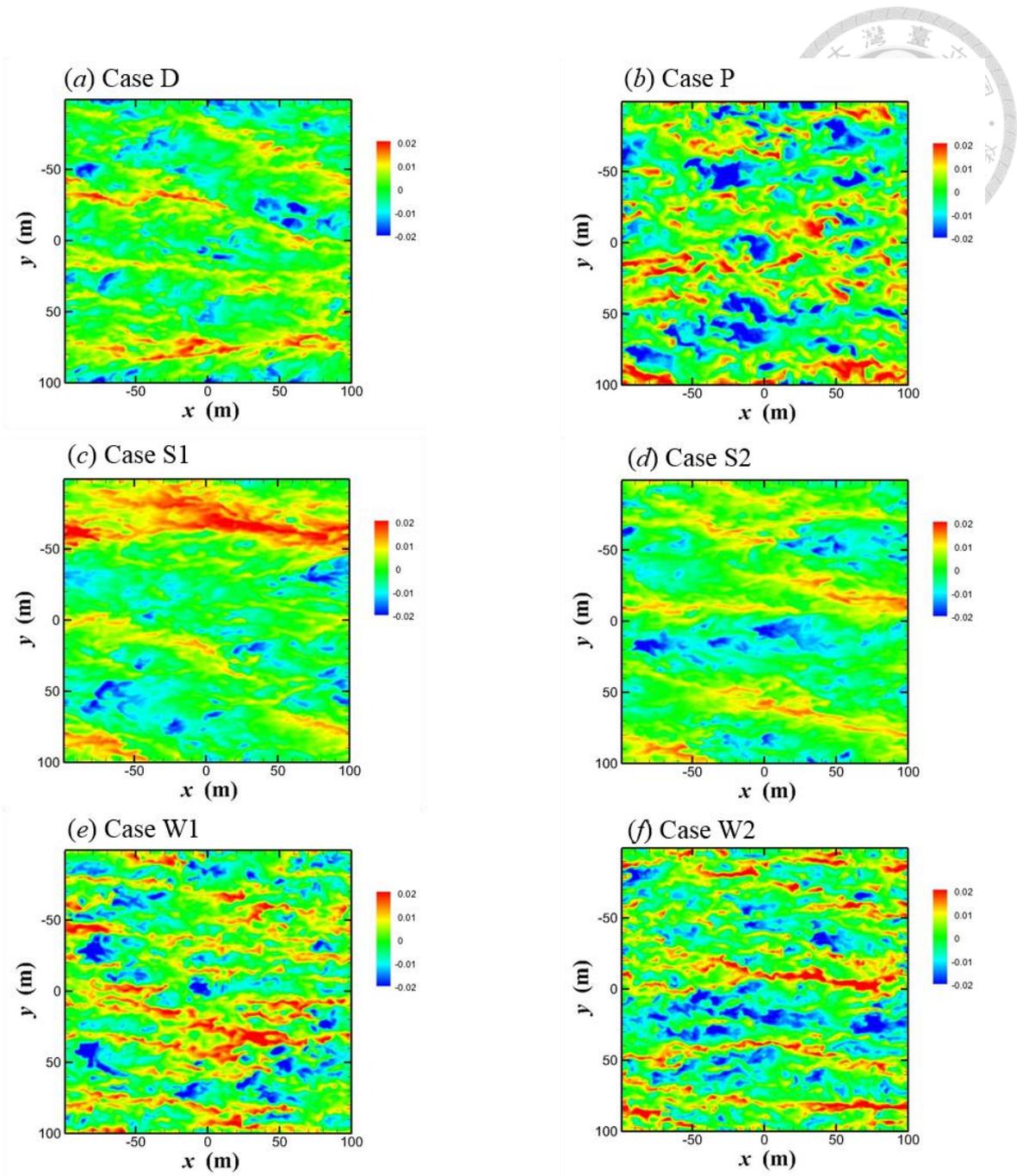


圖 5.2: 使用陳(2015)中 6 個不同條件的模擬資料，繪製出水下 2 m 之  $c'$  影像。圖 (a) 為 case D，圖 (b) 為 case P，圖 (c) 為 case S1，圖 (d) 為 case S2，圖 (e) 為 case W1，圖 (f) 為 case W2。

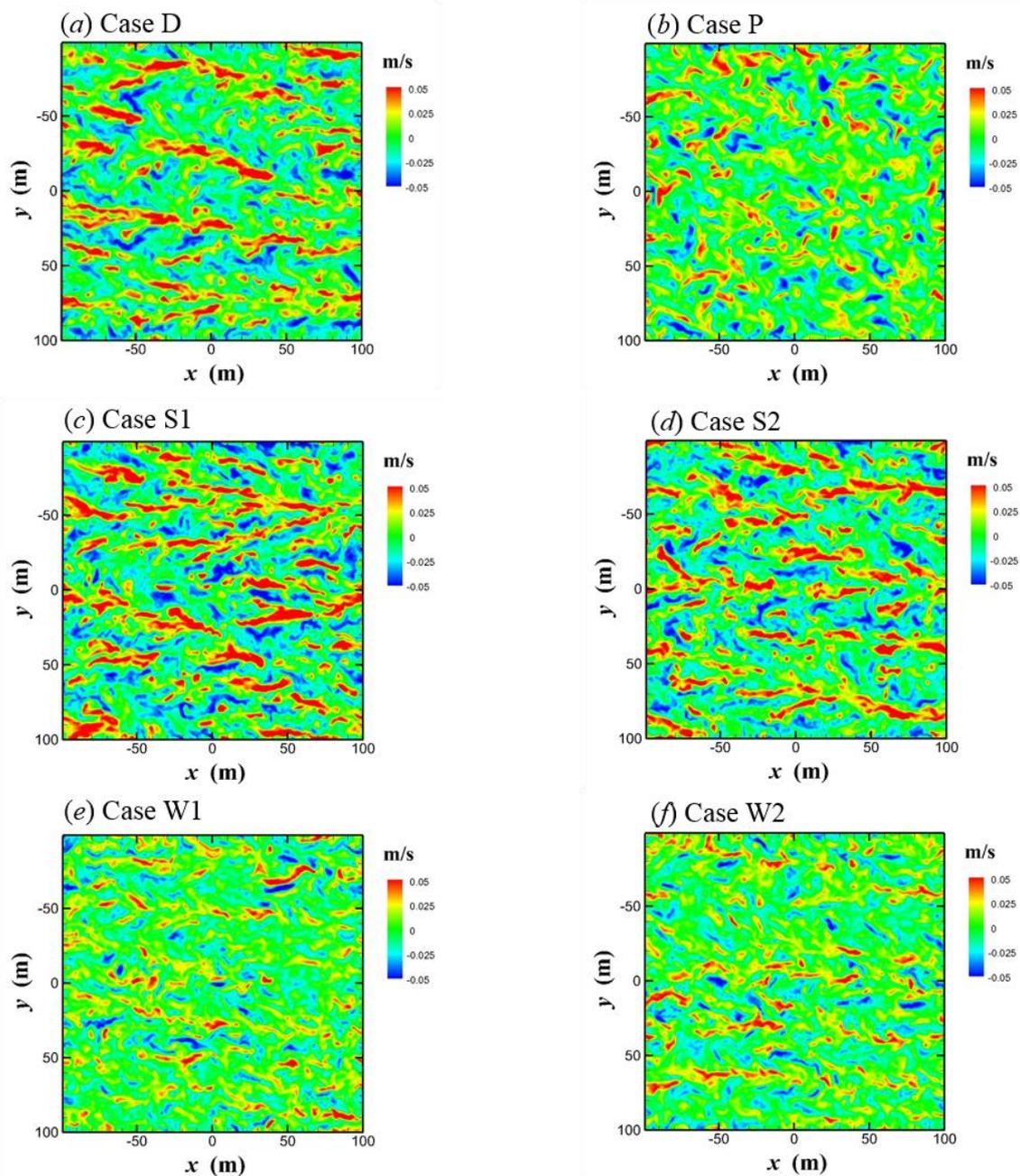


圖 5.3: 使用陳(2015)中 6 個不同條件的模擬資料，繪製出水下 6 m 之  $w'$  影像。圖 (a) 為 case D，圖 (b) 為 case P，圖 (c) 為 case S1，圖 (d) 為 case S2，圖 (e) 為 case W1，圖 (f) 為 case W2。

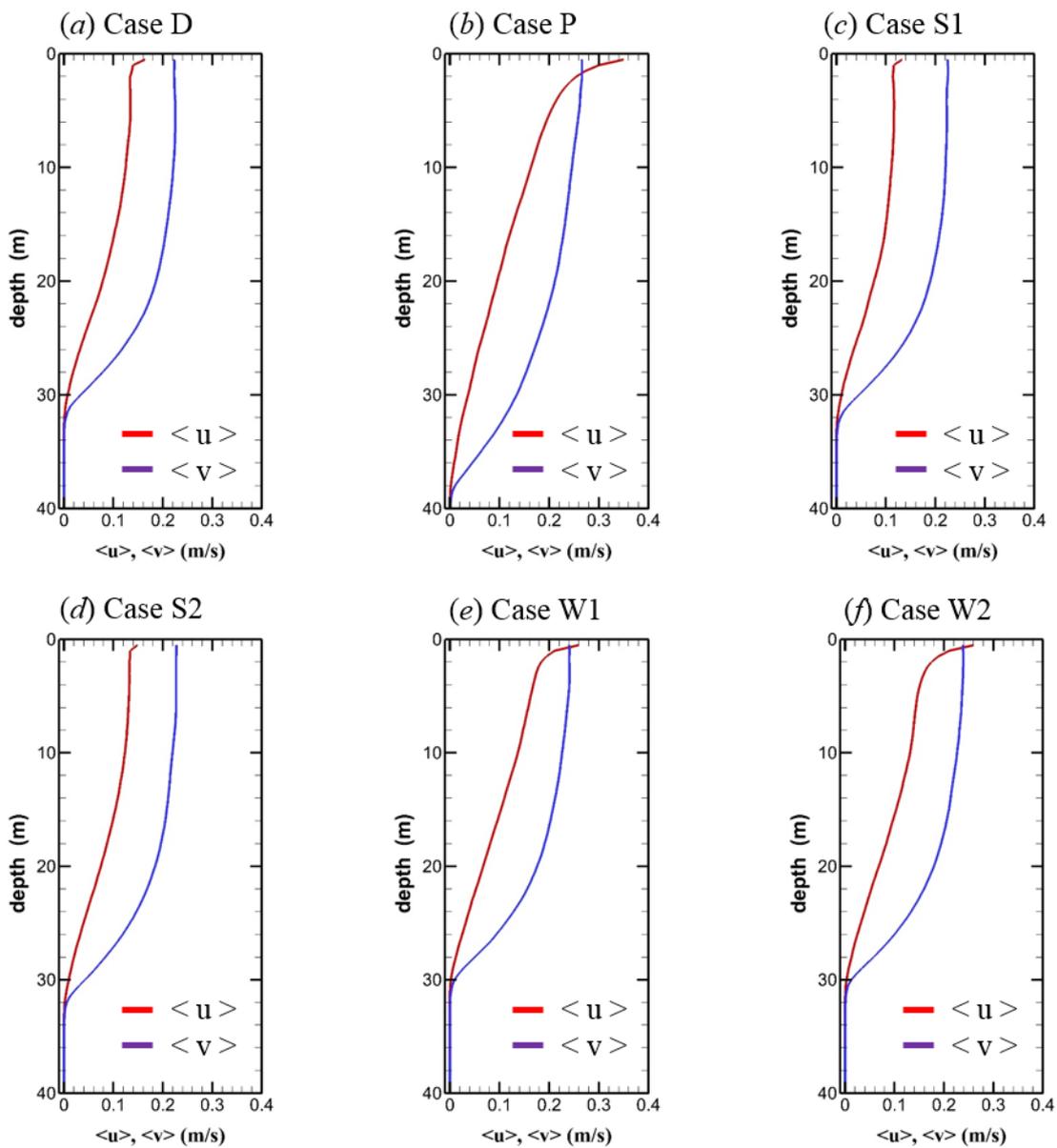


圖 5.4: 6 種模擬資料的平均速度垂直剖面。圖(a)為 case D，圖(b)為 case P，圖(c)為 case S1，圖(d)為 case S2，圖(e)為 case W1，圖(f)為 case W2。

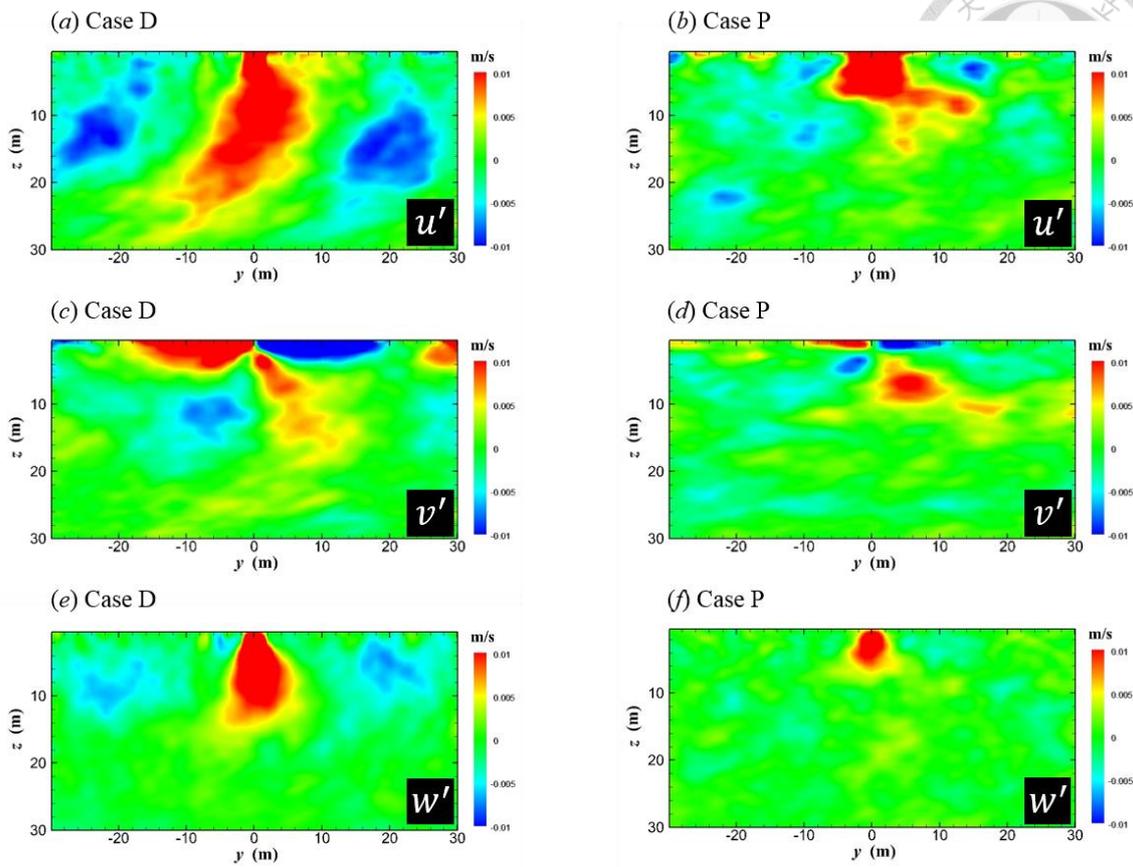


圖 5.5: 使用水下 2 m 的  $c'$  進行 VISA 條件平均法之結果，左側圖為 case D 的結果，右側圖為 case P 的結果，圖(a)及圖(b)為  $u'$ ，圖(c)及圖(d)為  $v'$ ，圖(e)及圖(f)為  $w'$ 。

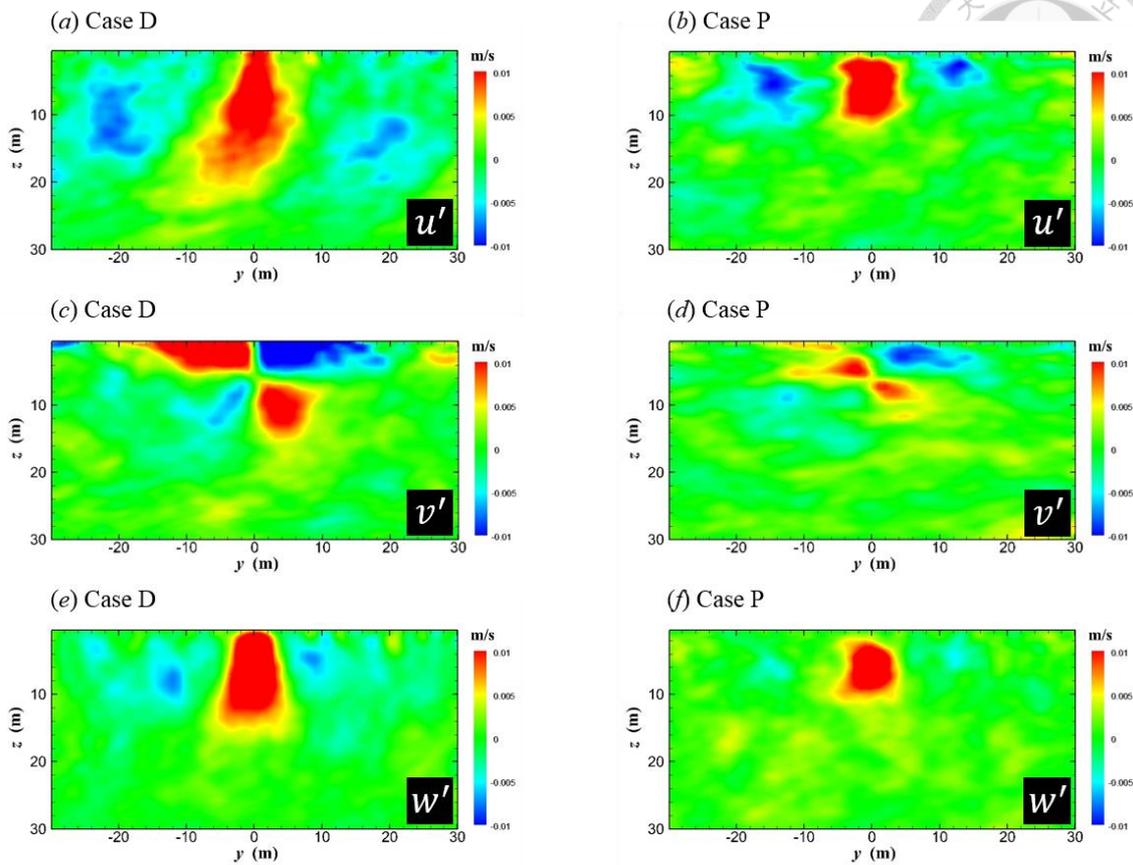


圖 5.6: 使用水下 6 m 的  $w'$  進行 VISA 條件平均法之結果，左側圖為 case D 的結果，右側圖為 case P 的結果，圖(a)及圖(b)為  $u'$ ，圖(c)及圖(d)為  $v'$ ，圖(e)及圖(f)為  $w'$ 。

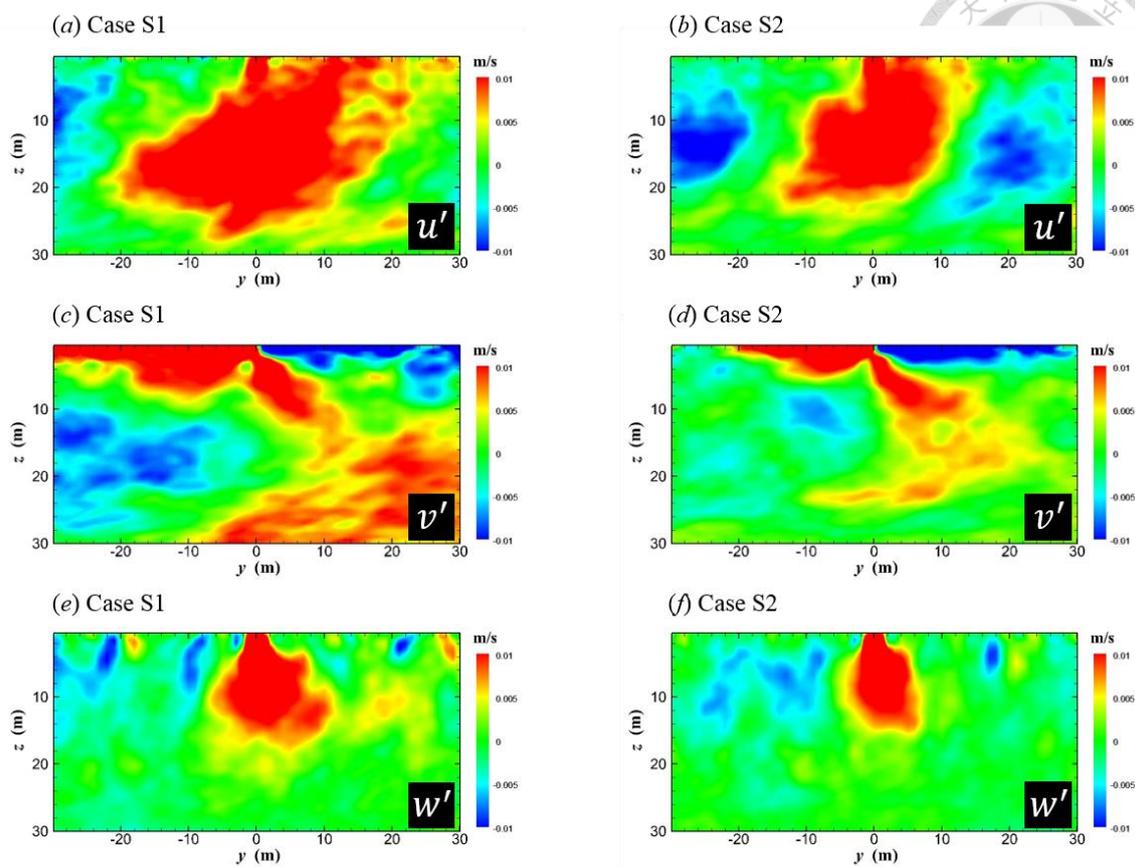


圖 5.7: 使用水下 2 m 的  $c'$  進行 VISA 條件平均法之結果，左側圖為 case S1 的結果，右側圖為 case S2 的結果，圖(a)及圖(b)為  $u'$ ，圖(c)及圖(d)為  $v'$ ，圖(e)及圖(f)為  $w'$ 。

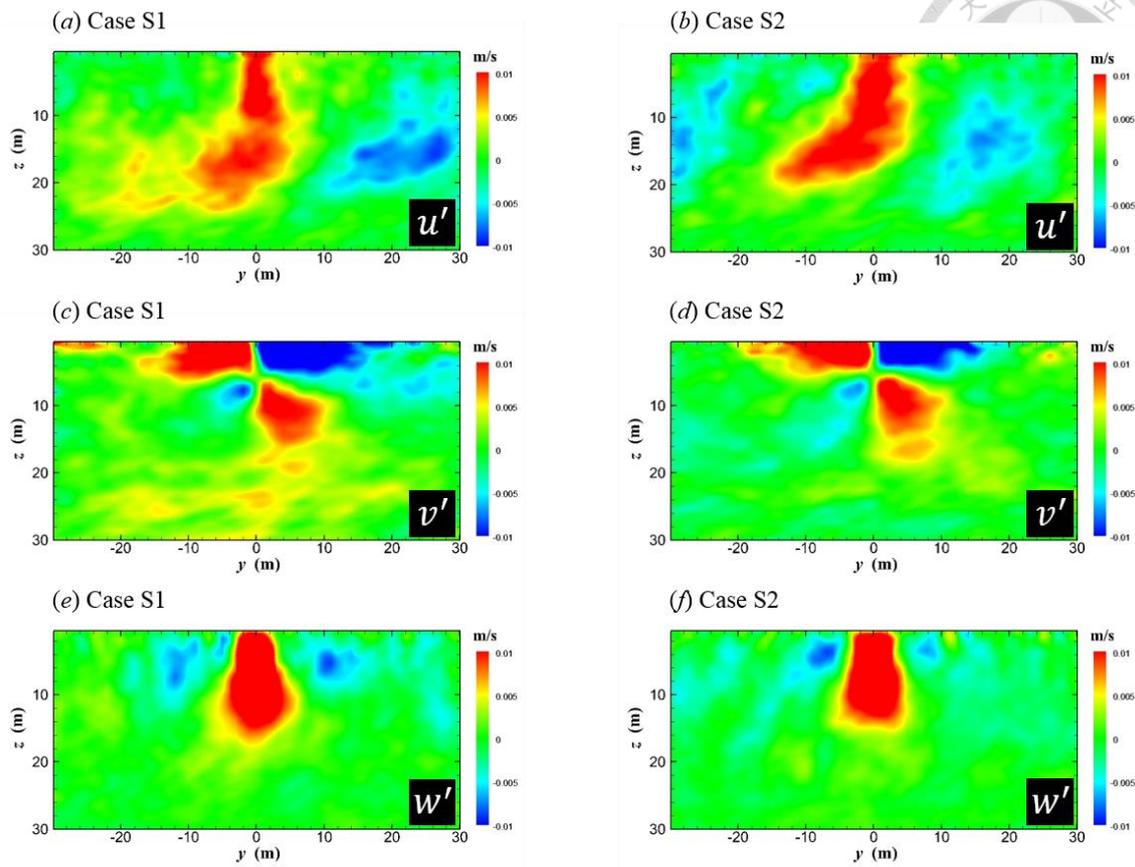


圖 5.8: 使用水下 6 m 的  $w'$  進行 VISA 條件平均法之結果，左側圖為 case S1 的結果，右側圖為 case S2 的結果，圖(a)及圖(b)為  $u'$ ，圖(c)及圖(d)為  $v'$ ，圖(e)及圖(f)為  $w'$ 。

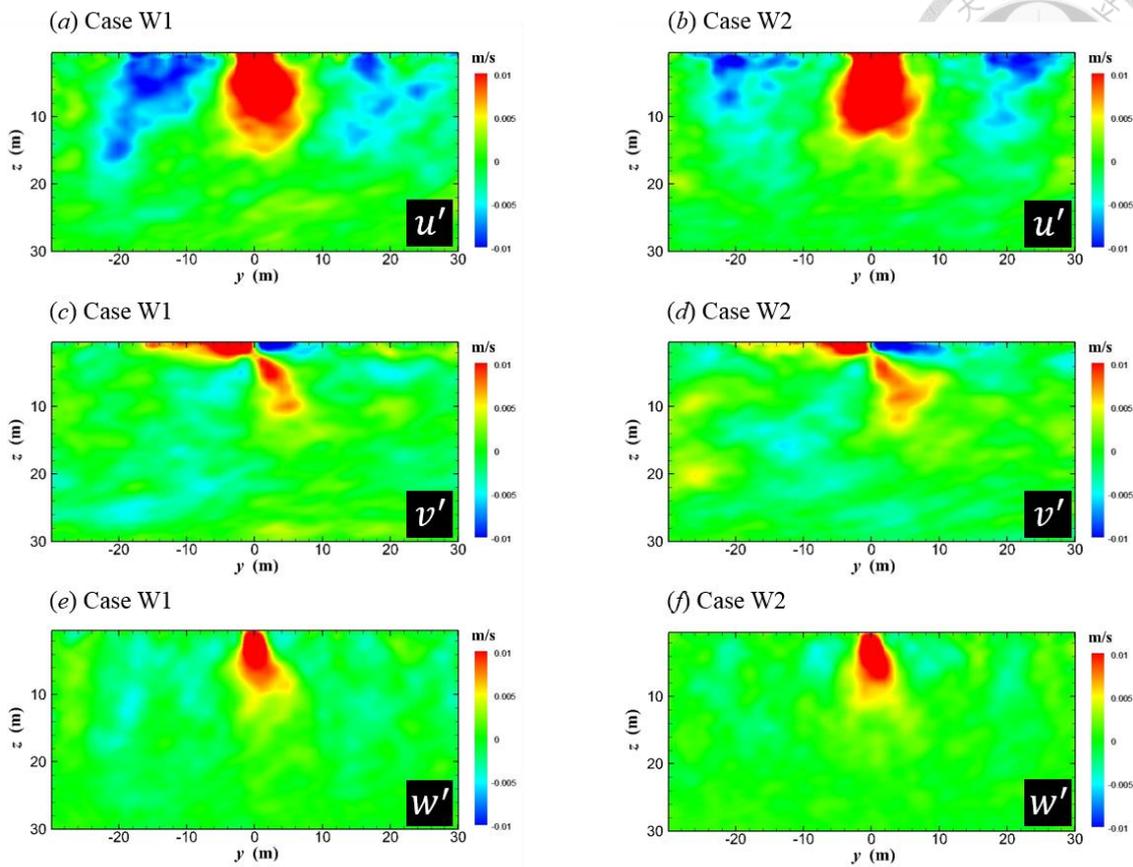


圖 5.9: 使用水下 2 m 的  $c'$  進行 VISA 條件平均法之結果，左側圖為 case W1 的結果，右側圖為 case W2 的結果，圖(a)及圖(b)為  $u'$ ，圖(c)及圖(d)為  $v'$ ，圖(e)及圖(f)為  $w'$ 。

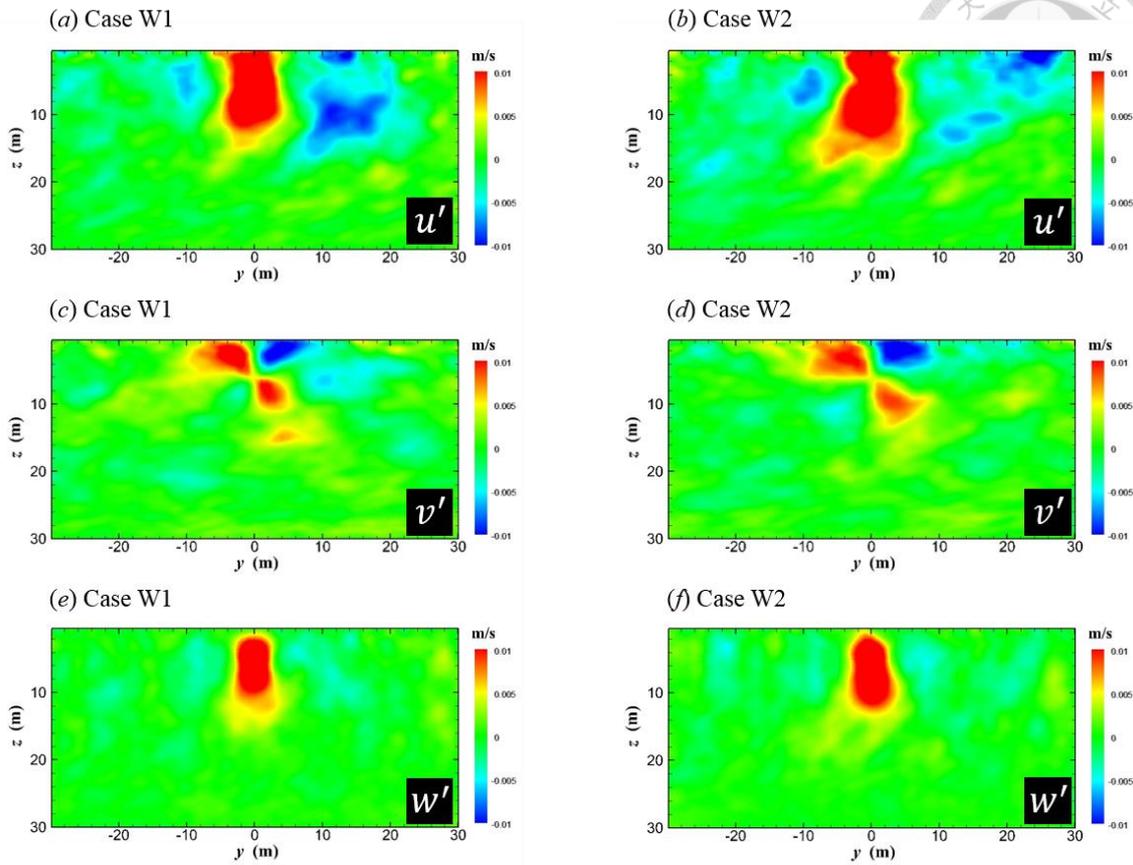
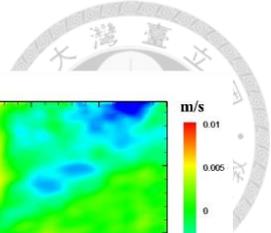


圖 5.10: 使用水下 6 m 的  $w'$  進行 VISA 條件平均法之結果，左側圖為 case W1 的結果，右側圖為 case W2 的結果，圖(a)及圖(b)為  $u'$ ，圖(c)及圖(d)為  $v'$ ，圖(e)及圖(f)為  $w'$ 。

## 第六章 結論



本研究運用不同的條件平均法來進行大渦模擬數值資料的分析，其方法包含影像處理方法以及流場物理特性的運用，包括象限分析，VISA 取樣法，主要的目標為擷取近水面的條痕結構，以及觀察朗繆爾環流造成的水下速度場結構。

由近水面影像的初步觀察，能夠發現因朗繆爾環流的產生，使水面會有條痕結構的產生，為了要觀察這些條痕在水面下會產生哪些結構，必須先將影像中的條痕區分出來，因條痕本身具有高強度數值的特性，例如高濃度以及高流速，故藉由主觀的門檻值設立，便能夠將條痕大致上區分出，但為了使方法的進行過程較客觀，故使用了大津演算法，進行自動化的門檻值設立，並且配合影像處理方法中的影像增強法，包括伽瑪校正，直方圖等化，自適應直方圖等化來進行影像對比度的增強，使條痕在影像中更為突出，而不同的方法也產生不同的效果，在伽瑪校正配合直方圖等化的全域性影像增強，能夠有效突顯影像中的條痕，而  $\gamma = 4$ ，在使用上較為適合，能夠較明確的擷取出條痕結構；自適應直方圖等化為區域性的影像增強法，除了大條痕，流場中許多的細小條痕也被擷取出來。條件平均的結果顯現，伽瑪校正配合直方圖等化的結果能夠展現出朗繆爾環流造成的流場結構，而自適應直方圖等化因有許多訊號較弱的條痕結構加入平均的過程，故其結果顯現出的訊號強度明顯偏弱。

影像處理方法雖然有效擷取出條痕結構，但有失客觀性，故使用流場的物理特性來進行流場中特定事件的尋找，在思維上較客觀，其方法包括象限分析，VSIA 法 (Kim, 1983)，以及區域性比較的 VISA 取樣法。在象限分析以及 VISA 法 (Kim,1983)的分析中，配合判斷準則的設立，能夠有效尋找出流場中的朗繆爾環流的事件，條件平均的結果也能看出朗繆爾環流造成的速度結構，而使用區域標準差當做判斷準則依據的結果，與影像處理方法中的自適應直方圖等化類似，因此方法

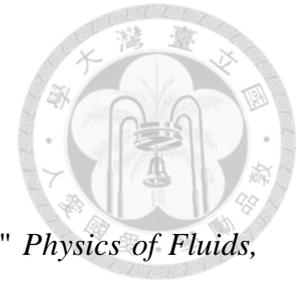


為藉由區域性的比較來進行事件的尋找，故只要在特定區域中，強度相對較高的結構皆能被找出，故也會有許多較細小的條痕結構被擷取出，而條件平均的結果也顯示訊號較弱的流場。綜觀各種不同的條件平均法，若擷取目標為朗繆爾環流造成的結構，建議使用概念為全域性的條件平均法，擷取到的結構會以流場中的主要條痕為主，較小的結構不會被擷取到。

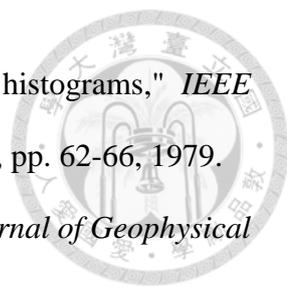
藉由數種條件平均法的使用，能夠有效觀察朗繆爾環流的結構，而不同的漩渦力會造成不同強度的朗繆爾環流，故在此使用 VISA 法來進行不同條件的模擬資料分析。條件平均的結果顯現出，在漩渦力較強的數值資料中(case S1 和 S2)，分析結果顯示，朗繆爾環流的結構也會加大，且近水面條痕結構較為明顯；在較弱漩渦力的數值資料中(case W1 和 W2)，分析結果顯示，朗繆爾環流的結構大幅縮小，且近水面的影像呈現的條痕結構較為鬆散，甚至與純剪切力的數值資料(case P)結果類似。

在此研究中，藉由不同的條件平均法，擷取出的條痕結構也有所不同，也證實了在流場中除了朗繆爾環流造成的條痕結構外，也存在著許多強度較弱的細小條痕，這些細小條痕的水下結構的成因與朗繆爾環流有所不同，期望未來能透過流場結構的分解，例如使用拉普拉斯金字塔法，整體經驗模態分解法，將近水面的影像進行結構的分解，將大結構與小結構分開分析，各別進行條痕結構的擷取以及條件平均。

## 參考文獻



- [1] Kim, J., "On the structure of wall-bounded turbulent flows," *Physics of Fluids*, vol. 26, no. 8, pp. 2088-2097, 1983.
- [2] Kim, J. and Moin, P., "The structure of the vorticity field in turbulent channel flow. Part 2. Study of ensemble-averaged fields," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 162, no. -1, p. 339, 1986.
- [3] Kukulka, T., Plueddemann, A., Trowbridge, J., and Sullivan, P., "Significance of Langmuir circulation in upper ocean mixing: Comparison of observations and simulations," *Geophysical Research Letters*, vol. 36, no. 10, 2009. doi: 10.1029/2009GL037620
- [4] Kukulka, T., Plueddemann, A., Trowbridge, J., and Sullivan, P., "Rapid mixed layer deepening by the combination of Langmuir and shear instabilities: A case study," *Journal of Physical Oceanography*, vol. 40, no. 11, pp. 2381-2400, 2010.
- [5] Langmuir, I., "Surface motion of water induced by wind," *Science (New York, N.Y.)*, vol. 87, no. 2250, p. 119, 1938.
- [6] Li, G., Wang, D., Chen, J., Yao, J., Zeng, L., Shu, Y., and Sui, D., "Contrasting dynamic characteristics of shear turbulence and Langmuir circulation in the surface mixed layer," *Acta Oceanologica Sinica*, vol. 34, no. 5, pp. 1-11, 2015.
- [7] Moeng, C.-H., "A large-eddy-simulation model for the study of planetary boundary-layer turbulence," *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 41, no. 13, pp. 2052-2062, 1984.
- [8] Noh, Y., Kang, I. S., Herold, M., and Raasch, S., "Large eddy simulation of particle settling in the ocean mixed layer," *Physics of Fluids*, vol. 18, no. 8, 2006.

- 
- [9] Otsu, N., "A threshold selection method from gray-level histograms," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 9, no. 1, pp. 62-66, 1979.
- [10] Smith, J. A., "Observed growth of Langmuir circulation," *Journal of Geophysical Research*, vol. 97, no. C4, p. 5651, 1992.
- [11] Smith, J., Pinkel, R., and Weller, R. A., "Velocity structure in the mixed layer during MILDEX," *Journal of Physical Oceanography*, vol. 17, no. 4, pp. 425-439, 1987.
- [12] Thorpe, S., Osborn, T., Jackson, J., Hall, A., and Lueck, R., "Measurements of turbulence in the upper-ocean mixing layer using Autosub," *Journal of Physical Oceanography*, vol. 33, no. 1, pp. 122-145, 2003.
- [13] Wallace, J. M., Eckelmann, H., and Brodkey, R. S., "The wall region in turbulent shear flow," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 54, no. 1, p. 39, 1972.
- [14] Willmarth, W. W. and Lu, S. S., "Structure of the Reynolds stress near the wall," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 55, no. 1, pp. 65-92, 1972.
- [15] Yang, D., Chamecki, M., and Meneveau, C., "Inhibition of oil plume dilution in Langmuir ocean circulation," *Geophysical Research Letters*, vol. 41, no. 5, pp. 1632-1638, 2014.
- [16] Zedel, L. and Farmer, D., "Organized structures in subsurface bubble clouds: Langmuir circulation in the open ocean," *Journal of Geophysical Research*, vol. 96, no. C5, p. 8889, 1991.
- [17] 陳世明,「急速加深之海洋混合層中 Langmuir 環流的流場結構」,博士論文,國立交通大學土木工程學系,2015。
- [18] 劉鴻煜,「運用影像處理技術分析數值模擬風剪驅動紊流場的表面條痕結構」,碩士論文,國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系,2018。