



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

風浪表面熱圖像的條痕結構辨識與間距特性探討

Eduction and Analyses of Streaky Structure on
Thermographic Images of Laboratory Wind Waves

古孟巧

Meng-Chiao Ku

指導教授：蔡武廷 博士

Advisor: Wu-Ting Tsai, Ph.D.

中華民國 104 年 12 月

December, 2015

致謝



碩士班生涯中，很感謝蔡武廷老師細心指導，看見老師對研究的嚴謹態度、做事情要實在，甚至那股正義感的呈現，就是一個最佳的學習典範與目標，這兩年間，朝著這方向前進；過程中，學會很多但偶爾在研究上遇到挫折時，老師則會分享一些生活案例，後來漸漸覺得老師不僅在研究上很厲害，在生活中更是一位很風趣的人。感謝口試委員王兆璋老師、戴璽恆老師、張恆華老師給予的建議與指導。感謝世明學長、冠鴻學長細心指導課業、研究，甚至在生活中，也常常解答疑難雜症如同小叮噠的百寶袋一般。感謝同學、學弟妹以及身邊所遇到的人，有你們的共同參與，生活變得更加不同。感謝慧玲老師當初推薦我進蔡老師實驗室，真的如進寶庫般，收穫滿滿。感謝兆璋老師時常關心我研究、生活狀況，不時督促我不要只顧著玩耍，要做正事。最後要感謝我的家人一路上給我的支持與鼓勵。



中文摘要

風浪表面因水下流場的渦流結構而形成與風場同向且間距相近的條痕結構，條痕區域的溫度因熱量的傳輸方向而改變，當熱自水體傳輸至空氣時，條痕區域的溫度較周邊低，而於熱圖像形成低溫條痕。本研究發展一影像辨識法，以自動擷取實驗室風浪表面熱圖像的條痕結構，進而分析條痕間距的特性。我們先以「經驗模態分解法」濾除熱圖像中因熱輻射轉換至電訊號過程所產生的短波雜訊，並透過辨識熱圖像中跨流向上的相對低溫點位，運用適當點位連結範圍將點位連結而形成條痕，進一步分析跨流向上條痕間距的分佈統計特性。結果顯示條痕間距之機率密度分佈近似於對數常態分佈，且與無滑移邊界的結果相似；無因次化之平均條痕間距隨風速增大而愈大，然而於無滑移邊界流場之結果則趨於一定值 ($\bar{\lambda}^+ = 100$)。

關鍵字：風浪、紅外線影像、經驗模態分解法、特徵條痕、紊流邊界層、對數常態分佈

英文摘要



Thermal streaky structures can be observed on wind-wave surface. They are induced by the underlying coherent eddies in parallel with the wind. The temperature in these streaks is lower than that in the surrounding area when the heat flux is upward from the water to the air, and vice versa. Cold streaky structures, therefore, are observed on infrared thermographic images. In this study, an image recognition method is developed to automatically capture these streaky structure on thermographic images of laboratory wind waves. The method of empirical mode decomposition is first applied to filter out the short-length noises in the thermographic images. The local temperature minima in the spanwise direction are then identified. A streak passing a local temperature minimum is formed by connecting the neighboring downstream/upstream local temperature minima within a chosen radius. Spanwise spacings between the neighboring streaks can then be calculated and analyzed. It is found that the probability density distribution of the streak spacing is close to lognormal distribution, similar to the streaks observed next to a no-slip wall. The non-dimensional mean streak spacing based on friction length, however, increases with the friction wind speed. This is different from the flow next to a no-slip wall in which the non-dimensional mean streak spacing approximates 100 friction unit.

Keywords : wind wave 、 infrared images 、 empirical mode decomposition 、 characteristic streak 、 turbulent boundary layer 、 streak spacing 、 logarithmic-normal distribution



目錄

致謝	I
中文摘要	II
英文摘要	III
目錄	IV
圖目錄	V
表目錄	XIII
第一章、 前言	1
1.1 無滑移紊流邊界層條痕結構	1
1.2 水面紊流邊界層條痕結構	6
1.3 研究動機與章節概述	14
第二章、 風浪水槽實驗	16
第三章、 自動辨識條痕結構	21
3.1 研究回顧：水面影像之條痕結構	21
3.2 雜訊去除 (noise removal)	35
3.2.1 直方圖	35
3.2.2 經驗模態分解法	37
3.3 自動辨識步驟	52
第四章、 條痕間距特性探討	69
4.1 統計條痕間距分佈	69
4.2 點位連結範圍造成條痕間距計算的影響	76
4.3 與他人結果進行比較	79
第五章、 結論與建議	86
參考文獻	88



圖目錄

- 圖 1.1：大自然中，紊流流場反應在水面所形成的結構影像。氣泡與雜質聚集形成條痕結構，其特性為平行於風向（黃色箭頭）且與波的行徑方向相同（綠色線為波峰處）。（來源：<http://www.ldeo.columbia.edu/~ant/Langmuir.html>).. 4
- 圖 1.2：條痕可視化圖。鉑線放置於平行水槽且接近底部位置，跨流方向截取寬度 $\Delta z^+ = 100$ ，流場的雷諾數 $Re_\theta = 740$ 。流體運動由左至右，影像左邊為氫氣泡產生處（鉑線），跨流向實際影像為 10.4 公分。氫氣泡隨著流場運動，聚集形成條痕。（來源：Smith 等 (1983))..... 5
- 圖 1.3：真實實驗水面條痕演化的現象。實驗風速 5 m/s，風向由左至右，影像尺寸為 85cm × 57cm。一開始，先將微小粒子灑入水面，其粒子會聚集在高速區域而形成條痕；經過一段時間後，條痕結構會由整齊至崩壞。圖 a 由風驅動水面 21.5 秒後產生的影像，依序間隔 0.5 秒拍攝一張影像。（來源：Melville 等 (1998))..... 8
- 圖 1.4：模擬質點至入流場後的瞬時分佈狀況。模擬風速 5 m/s，紀錄將灑入質點後，質點隨時間的分佈情形（圖 a 至圖 f），初期質點會散佈在整個水面（圖 a 及圖 b），不易觀測條痕分佈，經過一段時間後，質點排列則較規則排列（圖 c 及圖 d）。接下來轉為條痕排列混亂，因質點過度聚集所致，不易判斷條痕（圖 e 及圖 f）。（來源：Tsai 等 (2005)) 9
- 圖 1.5：以紅外線影像觀測實驗風速 3 m/s 的水面結構。影像以灰階圖表示水面溫度高低。溫度較低偏向深色；溫度較高則偏向淺色。圖 a 為 *cool-skin case*，形成低溫條痕。圖 b 則為 *warm-skin case*，形成高溫條痕。（來源：Smith 等 (2007)) 10
- 圖 1.6：不同風速驅動水面所形成的條痕結構。影像尺寸為 85cm × 57cm，風向為由左至右。圖 a、圖 b 及圖 c 分別為風速 3 m/s、4 m/s 及 5 m/s，以不同風速觀察微小粒子聚集在高速區域形成之條痕。發現當風速愈大時，條痕結構愈緊密。（來源：Melville 等 (1998)) 11
- 圖 1.7：風速對應沿流向流速與溫度分佈關係。流向由左至右。圖 a 至圖 c 為流速，高速偏向紅色，低速則偏向藍色；圖 d 至圖 f 為溫度分佈，高溫偏向紅色，低溫則偏向藍色。圖 a 與圖 d 為風速 5 m/s，圖 b 與圖 e 為風速 4 m/s，圖 c 與圖 f 為風速 3 m/s。（來源：Tsai 等 (2005))..... 12

- 圖 1.8：不同摩擦速度的熱圖像。風向由左至右，以風扇驅動環狀水槽之水面的實驗，並紀錄水面溫度分佈的影像。影像以灰階圖表示溫度高低，溫度較低偏向深色；溫度較高則偏向淺色。紅色長條圖為影像中平均條痕間距長度，藍色長條圖為無滑移邊界紊流邊界層之有因次平均條痕間距的理論值。圖 a、圖 b、圖 c 及圖 d 的摩擦速度 u^* 分別為 0.14 cm/s、0.29 cm/s、0.34 cm/s 及 0.77 cm/s。(來源：Schnieders 等 (2013))..... 13
- 圖 2.1：海德堡大學環境物理學院的 Aeolotron 環狀風浪水槽。(來源：<http://sopran.pangaea.de/news/theoceanintheaeolotronfinalsopranlaboratoryexperiment>)..... 18
- 圖 2.2：不同實驗風速的熱圖像。溫度較低偏向藍色；溫度較高則偏向紅色。圖 a 至圖 e 為風速由低到高，分別為 1.8 m/s、2.5 m/s、3.3 m/s、4.5 m/s 與 6.2 m/s。圖 a、圖 b 與圖 c 為低風速之熱圖像，其條痕結構分佈較為明顯；圖 d 與圖 e 為高風速之熱圖像，水面溫度分佈較為紊亂。於風速 6.2 m/s 時，其流場已有碎波產生。..... 19
- 圖 2.3：風速 (wind velocity) 與摩擦速度 (friction velocity) 的關係圖。當風速愈大時，摩擦速度愈大。本研究分析五個風速分別為 1.8 m/s、2.5 m/s、3.3 m/s、4.5 m/s 與 6.2 m/s，所對應之摩擦速度分別為 0.2 cm/s、0.29 cm/s、0.47 cm/s、0.76 cm/s 與 1.3 cm/s。..... 20
- 圖 3.1：沿流向流速在跨流向上瞬時頻譜分佈及平均頻譜分佈圖例。圖 a 為六張沿流向流速在跨流向上瞬時頻譜分佈，每張圖中曲線最高峰值對應周長，表示流場瞬時速度分佈中最可能的週期 (即條痕間距)。圖 b 為一段時間中所有瞬時頻譜的平均分佈。左圖為將頻譜分佈曲線峰值所對應的週期長度依適當帶寬累計次數之直方圖，次數最高的週期長度則可能為平均條痕間距；右圖則將所有頻譜分佈曲線疊加後平均，其平均曲線之峰值所對應的週期長度，則代表該段時間內可能的平均條痕間距。(來源：Kline 等(1967))..... 27
- 圖 3.2：風速 5m/s 在沿流向流速的頻譜分佈圖。實線為利用整個水面計算截線上的平均流速計算取得頻譜分佈函數；虛線為利用單一截線上的平均流速計算取得頻譜分佈函數。圖 a 與圖 b 皆為平均取樣 10 個時間點的樣本平均頻譜分佈；圖 c 與圖 d 皆為平均取樣 60 個時間點的樣本平均頻譜分佈。同時段中，頻譜分佈曲線趨勢相同，且在不同的樣本數趨勢仍為一致。推測在任何時段，此風速計算出的頻譜分佈中，最小峰值約於 $z^+ = 220$ (約 2.8cm) 處。(來源：溫國暉 (2004))..... 28
- 圖 3.3：條痕辨識示意圖。條痕 a，條痕貫穿計算截線且其長度超過 $\Delta x^+ = 100$ ，符合準則；條痕 b，其長度短於 $\Delta x^+ = 100$ ，不符合準則；條痕 c，其長度超過 $\Delta x^+ = 100$ ，但未貫穿計算截線，不符合準則；條痕 d 與條痕 e，兩條條痕皆貫穿計算截線且其長度超過 $\Delta x^+ = 100$ ，雖然兩條痕很接近，但沒有設限最小間距，因此兩條痕皆分別記錄。(來源：溫國暉(2004))..... 29

- 圖 3.4：計算條痕出現位置的透明記錄板。鉑線放置於接近水槽底部的位置，流場的雷諾數 $Re_\theta = 1490$ 。橫軸為每一張影像時間的變化 $\Delta t = 0.833\text{ s}$ 。每一條直線為每一張影像的計算截線，每條直線上的短橫線為該張影像中條痕通過計算截線所標記的位置。(來源：Smith & Metzler (1983))..... 30
- 圖 3.5：追跡質點散佈位置與沿流向流速 u 等值區塊比較圖。風向由左至右，等值區塊數值為沿流向流速與模擬特徵速度的比值。圖 a、圖 b 與圖 c 分別模擬風速為 5m/s 、 4m/s 與 3m/s ，條痕位置與水面沿流向流速的高速位置相吻合。(來源：溫國暉 (2004))..... 31
- 圖 3.6：追跡質點散佈位置與跨流向流速 w 等值區塊比較圖。風向由左至右。等值區塊數值為跨流向流速與模擬特徵速度的比值，正值偏向紅色，負值則偏向藍色。圖 a、圖 b 與圖 c 分別模擬風速為 5m/s 、 4m/s 與 3m/s ，條痕位置與水面跨流向流速等值區塊較無關聯。(來源：溫國暉 (2004))..... 32
- 圖 3.7：沿流向流速於跨流向上的相對最高速點位。圖 a 為沿流向流速相對最高速點位分佈圖。模擬風速為 5m/s ，風向由左至右，取樣時間 $t = 6.3\text{ s}$ ；圖中的每一個點位 (黑點) 皆為沿流向流速在跨流向上相對最高速位置。圖 b 為三張沿流向流速在跨流向上的速度分佈圖。由左至右分別在 $x = -5.0\text{ cm}$ 、 $x = 0.0\text{ cm}$ 及 $x = 5.0\text{ cm}$ 的位置 (圖 a 中的三條截線)，在波峰處則為沿流向流速在跨流向上相對最高速的位置 (黑點)。(來源：溫國暉 (2004))..... 33
- 圖 3.8：模擬風速 5m/s ，以沿流向流速相對最高速點位進行自動辨識的點位示意圖。風向由左至右，取樣時刻 $t = 6.3\text{ s}$ 。圖 a 為該時刻水面上所有相對最高速點位分佈情況。圖 b 為程式所辨識出的條痕，每一顏色代表不同條痕。(來源：溫國暉 (2004))..... 34
- 圖 3.9：實驗數據與相對低溫點位的對照圖。圖 a 為原始量測數據圖。其數據中存在許多胡椒式雜訊 (紅圈內)。圖 b 為原始數據與相對低溫點位之疊合圖。其將熱圖像中，以溫度在跨流向上的相對低溫點 (黑點) 標示在圖 a 中，發現相對低點位佈滿整個影像，無法清楚觀測低溫條痕出現位置，其主要為嚴重雜訊干擾所致。..... 39
- 圖 3.10：水面溫度分佈圖。橫軸為水面溫度值分佈範圍 0 至 1 中，分成 3000 個類組，每一組距約 0.00033。縱軸為次數。褐色直方圖為水面溫度值分佈情形，發現數值主要集中於 0.28 至 0.30 間。黑線、紅線、藍線以及綠線分別為累計個數 5、10、15 及 20 個以下，以此作為去除離異值的門檻。圖 a、圖 b、圖 c、圖 d 以及圖 e 分別為 $u^* = 0.20\text{ cm/s}$ 、 $u^* = 0.29\text{ cm/s}$ 、 $u^* = 0.47\text{ cm/s}$ 、 $u^* = 0.76\text{ cm/s}$ 以及 $u^* = 1.3\text{ cm/s}$ 。..... 40

圖 3.11：利用 EMD 對 data 作分解。圖 a：黑線為欲分析資料，藍線為利用 EMD 分離出第一個 IMF (即模態 1)，紅線為取出模態 1 後，其餘模態的總合，而此資料僅為兩種模態組合，又稱為殘餘值 (即為資料趨勢)。圖 b 為包絡線值尋找方式。黑線為圖 a 所使用資料，藍色與紅色方框為區域的極大值與極小值，藍色與紅色虛線為區域極大值與極小值應用 cubic spline 建立的曲線，稱為包絡線，綠線為兩條包絡線的平均值。圖 c 為分離出模態 1 的過程。黑線為第一次進行圖 b 的計算方式後，將資料扣除包絡線的平均值，取得最高頻資料。藍虛線、紅虛線與綠線即為圖 b 所說明，重複上述步驟直到兩條包絡線的平均值為零，則完成模態 1 的分離。..... 41

圖 3.12：摩擦速度 $u^* = 0.20 \text{ cm/s}$ ，雜訊去除前後的差異。應用 EMD 分離出熱圖像中模態 1 與模態 2 後的結果，並於其沿流向的三個位置 (即 $x = 15.56\text{cm}$ 、 $x = 23.34\text{cm}$ 、 $x = 31.12\text{cm}$) 於跨流向的溫度分佈圖。圖 a 為原始資料。圖 b 為分離出模態 1 後的資料。圖 c 為分離出模態 1 與模態 2 後的資料。當分離出模態 1 與模態 2 後，更清楚觀察其數據的趨勢。..... 42

圖 3.13：摩擦速度 $u^* = 0.29 \text{ cm/s}$ ，雜訊去除前後的差異。應用 EMD 分離出熱圖像中模態 1 與模態 2 後的結果，並於其沿流向的三個位置 (即 $x = 15.56\text{cm}$ 、 $x = 23.34\text{cm}$ 、 $x = 31.12\text{cm}$) 於跨流向的溫度分佈圖。圖 a 為原始資料。圖 b 為分離出模態 1 後的資料。圖 c 為分離出模態 1 與模態 2 後的資料。當分離出模態 1 與模態 2 後，更清楚觀察其數據的趨勢。..... 43

圖 3.14：摩擦速度 $u^* = 0.47 \text{ cm/s}$ ，雜訊去除前後的差異。應用 EMD 分離出熱圖像中模態 1 與模態 2 後的結果，並於其沿流向的三個位置 (即 $x = 15.56\text{cm}$ 、 $x = 23.34\text{cm}$ 、 $x = 31.12\text{cm}$) 於跨流向的溫度分佈圖。圖 a 為原始資料。圖 b 為分離出模態 1 後的資料。圖 c 為分離出模態 1 與模態 2 後的資料。當分離出模態 1 與模態 2 後，更清楚觀察其數據的趨勢。..... 44

圖 3.15：摩擦速度 $u^* = 0.76 \text{ cm/s}$ ，雜訊去除前後的差異。應用 EMD 分離出熱圖像中模態 1 與模態 2 後的結果，並於其沿流向的三個位置 (即 $x = 15.56\text{cm}$ 、 $x = 23.34\text{cm}$ 、 $x = 31.12\text{cm}$) 於跨流向的溫度分佈圖。圖 a 為原始資料。圖 b 為分離出模態 1 後的資料。圖 c 為分離出模態 1 與模態 2 後的資料。當分離出模態 1 與模態 2 後，更清楚觀察其數據的趨勢。..... 45

圖 3.16：摩擦速度 $u^* = 1.3 \text{ cm/s}$ ，雜訊去除前後的差異。應用 EMD 分離出熱圖像中模態 1 與模態 2 後的結果，並於其沿流向的三個位置 (即 $x = 15.56\text{cm}$ 、 $x = 23.34\text{cm}$ 、 $x = 31.12\text{cm}$) 於跨流向的溫度分佈圖。圖 a 為原始資料。圖 b 為分離出模態 1 後的資料。圖 c 為分離出模態 1 與模態 2 後的資料。當分離出模態 1 與模態 2 後，更清楚觀察其數據的趨勢。..... 46

- 圖 3.17：摩擦速度 $u^* = 0.2 \text{ cm/s}$ ，雜訊去除前後所辨識出跨流向上的相對低溫點位之結果。圖 a、圖 b 與圖 c 分別為原始熱圖像、取出模態 1 後的熱圖像以及取出模態 1 和模態 2 後的熱圖像，並依序辨識出跨流向上的相對低溫點位分別對應圖 d、圖 e 與圖 f。當去除模態 1 與模態 2 後，其相對低溫點位分佈可以明顯觀察到條痕結構。..... 47
- 圖 3.18：摩擦速度 $u^* = 0.29 \text{ cm/s}$ ，雜訊去除前後所辨識出跨流向上的相對低溫點位之結果。圖 a、圖 b 與圖 c 分別為原始熱圖像、取出模態 1 後的熱圖像以及取出模態 1 和模態 2 後的熱圖像，並依序辨識出跨流向上的相對低溫點位分別對應圖 d、圖 e 與圖 f。當去除模態 1 與模態 2 後，其相對低溫點位分佈可以明顯觀察到條痕結構。..... 48
- 圖 3.19：摩擦速度 $u^* = 0.47 \text{ cm/s}$ ，雜訊去除前後所辨識出跨流向上的相對低溫點位之結果。圖 a、圖 b 與圖 c 分別為原始熱圖像、取出模態 1 後的熱圖像以及取出模態 1 和模態 2 後的熱圖像，並依序辨識出跨流向上的相對低溫點位分別對應圖 d、圖 e 與圖 f。當去除模態 1 與模態 2 後，其相對低溫點位分佈可以明顯觀察到條痕結構。..... 49
- 圖 3.20：摩擦速度 $u^* = 0.76 \text{ cm/s}$ ，雜訊去除前後所辨識出跨流向上的相對低溫點位之結果。圖 a、圖 b 與圖 c 分別為原始熱圖像、取出模態 1 後的熱圖像以及取出模態 1 和模態 2 後的熱圖像，並依序辨識出跨流向上的相對低溫點位分別對應圖 d、圖 e 與圖 f。當去除模態 1 與模態 2 後，其相對低溫點位分佈可以明顯觀察到條痕結構。..... 50
- 圖 3.21：摩擦速度 $u^* = 1.3 \text{ cm/s}$ ，雜訊去除前後所辨識出跨流向上的相對低溫點位之結果。圖 a、圖 b 與圖 c 分別為原始熱圖像、取出模態 1 後的熱圖像以及取出模態 1 和模態 2 後的熱圖像，並依序辨識出跨流向上的相對低溫點位分別對應圖 d、圖 e 與圖 f。當去除模態 1 與模態 2 後，其相對低溫點位分佈可以明顯觀察到條痕結構。..... 51
- 圖 3.22：溫度相對低溫點位分佈之示意圖。流向由左至右，摩擦速度為 0.2 cm/s 。圖 a：小黑點為溫度在跨流向上相對低溫點位。圖 b 為三張溫度在跨流向上的相對低溫點位，由左至右分別對應圖 a 中 $x = 19.45 \text{ cm}$ 、 $x = 23.34 \text{ cm}$ 及 $x = 27.23 \text{ cm}$ 三處截線，圖中溫度分佈曲線上的波谷（跨流向上相對最小值）位置，即是圖 a 中三條計算截線上的黑點位置。..... 56
- 圖 3.23：熱圖像中，跨流向上相對低溫點位分佈圖。圖 a 為摩擦速度 $u^* = 0.2 \text{ cm/s}$ 的溫度分佈（以灰階顏色表示）與跨流向上相對低溫點位（以紅點表示）的疊合圖。圖 b 為跨流向上相對低溫點位（以紅點表示）示意圖。.. 57
- 圖 3.24：自動辨識流程示意圖。小圓點皆為熱圖像中溫度在跨流向上的相對低溫點位。圖 a 為熱圖像中的相對低溫點位。圖 b 則將點位結連結成同一族群。圖中粉紅、綠、藍、褐色分別為四個不同的族群。圖 c 為條痕成立的準則。同一族群是否符合長度標準（雙箭頭）、是否貫穿計算截線（紅線），即為計算上下由兩側皆有同族點位分佈。..... 58

- 圖 3.25：點位連結範圍的定義與標準之示意圖。小圓點為跨流向上相對低溫點位。圖 a 為點位連結範圍的定義。以點位連結範圍 d 為半徑，該圓內 (紅圓) 所涵蓋的全部相對低溫點位，視為同一族群之點位。圖 b 為計算相對低溫點位的距離。選定熱圖像中沿流向上某一處作為計算位置 (紅線)，計算該處兩兩相對低溫點位之距離 λ_p ；選取數張影像，依上述方式計算相對低溫點之平均間距 $\bar{\lambda}_p$ 和間距標準差 σ_p 。..... 59
- 圖 3.26：點位連結範圍示意圖。小圓點皆為跨流向上相對低溫點位，紅線為計算截線。藍、黑圓分別為不同族群；一個圓中含有兩種顏色即表示屬於兩個族群；虛線圓為以點位連結範圍 d 為半徑，該圓內所涵蓋的全部相對低溫點位，視為同一族群之點位。圖 a：當 d 較大時，運用自動辨識系統後，則會判斷出兩種族群，但僅有起始點相異 (藍、黑圓)，其餘族群則為相同點位 (兩種顏色的圓)。圖 b：當 d 較小時，運用自動辨識系統後，則僅辨識出一種族群 (黑圓)。由此可知點位連結範圍大小會影響偵測出的族群數多寡。 60
- 圖 3.27：相對低溫點族群分類示意圖。橘色箭頭為辨識條痕的方向，紅線為計算截線，小圓皆為相對低溫點，藍色圓為族群分類的起始點 (即為條痕代表位置)，紅色虛線圓為以點位連結範圍 d 為半徑，該圓內所涵蓋的全部相對低溫點位，視為同一族群之點位。紅框小圓為此回判斷的中心點，黑框圓為點位連結範圍內可能成為下一回判斷的中心點，黃色圓為下一回判斷中心點 (最接近前一個族群的點位)。圖 a：以計算截線上相對低溫點作為分族群的起始點，尋找小於等於點位連結範圍的最近之下游點位，作為新點位。圖 b：持續往下游尋找，直到中心點搜尋不到該條件下的新點位，則該族群的下游點位已分組完畢。..... 61
- 圖 3.28：判斷相同距離之點位族群示意圖。橘色箭頭為辨識條痕的方向，紅線為計算截線，小圓皆為相對低溫點，藍色圓為條痕代表位置之點位，紅色虛線圓為以點位連結範圍 d 為半徑，該圓內所涵蓋的全部相對低溫點位，視為同一族群之點位，紅框小圓為此回判斷的中心點，黑框圓為點位連結範圍內可能成為下一回判斷的中心點，黃色圓為下一回判斷中心點 (最接近前一個族群的點位)。圖 a：選擇中心點的下游位置作為新點位。圖 b：選擇高於中心點跨流向上的新點位。圖 c：選擇在跨流向上距離中心點之沿流向最近的位置作為新點位。..... 62
- 圖 3.29：條痕辨識準則示意圖。紅線為計算截線，小圓皆為相對低溫點，藍色圓為條痕代表位置之點位，綠框圓為未分組的組群，綠圓為同組的族群，黑色箭頭為族群長度標準。若同一族群通過計算截線且其長度符合 $x^+ > 100$ 之標準，則成為條痕。圖 a：族群貫穿計算截線且族群沿流向長度 $x^+ > 100$ ，此族群符合條痕成立準則。圖 b：族群沿流向長度 $x^+ > 100$ ，但未貫穿計算截線，因此不符合條痕準則。圖 c：族群貫穿計算截線，但沿流向長度 $x^+ < 100$ ，不符條痕準則。..... 63

- 圖 3.30： $u^* = 0.2 \text{ cm/s}$ 在不同連結範圍的自動辨識結果。流場由左至右，影像尺寸為 $39.8336 \text{ cm} \times 49.792 \text{ cm}$ 。熱圖像以灰階圖表示水面溫度高低，溫度較低偏向深色；溫度較高則偏向淺色。紅色為辨識條痕之結果，黃點為條痕代表位置，藍線為計算截線。圖 a、圖 b 及圖 c 分別以 $\bar{\lambda}_p - 1.0\sigma_p$ 、 $\bar{\lambda}_p - 1.25\sigma_p$ 及 $\bar{\lambda}_p - 1.5\sigma_p$ 作為點位連結範圍。..... 64
- 圖 3.31： $u^* = 0.29 \text{ cm/s}$ 在不同連結範圍的自動辨識結果。流場由左至右，影像尺寸為 $39.8336 \text{ cm} \times 49.792 \text{ cm}$ 。熱圖像以灰階圖表示水面溫度高低，溫度較低偏向深色；溫度較高則偏向淺色。紅色為辨識條痕之結果，黃點為條痕代表位置，藍線為計算截線。圖 a、圖 b 及圖 c 分別以 $\bar{\lambda}_p - 1.0\sigma_p$ 、 $\bar{\lambda}_p - 1.25\sigma_p$ 及 $\bar{\lambda}_p - 1.5\sigma_p$ 作為點位連結範圍。..... 65
- 圖 3.32： $u^* = 0.47 \text{ cm/s}$ 在不同連結範圍的自動辨識結果。流場由左至右，影像尺寸為 $39.8336 \text{ cm} \times 49.792 \text{ cm}$ 。熱圖像以灰階圖表示水面溫度高低，溫度較低偏向深色；溫度較高則偏向淺色。紅色為辨識條痕之結果，黃點為條痕代表位置，藍線為計算截線。圖 a、圖 b 及圖 c 分別以 $\bar{\lambda}_p - 1.0\sigma_p$ 、 $\bar{\lambda}_p - 1.25\sigma_p$ 及 $\bar{\lambda}_p - 1.5\sigma_p$ 作為點位連結範圍。..... 66
- 圖 3.33： $u^* = 0.76 \text{ cm/s}$ 在不同連結範圍的自動辨識結果。流場由左至右，影像尺寸為 $39.8336 \text{ cm} \times 49.792 \text{ cm}$ 。熱圖像以灰階圖表示水面溫度高低，溫度較低偏向深色；溫度較高則偏向淺色。紅色為辨識條痕之結果，黃點為條痕代表位置，藍線為計算截線。圖 a、圖 b 及圖 c 分別以 $\bar{\lambda}_p - 1.0\sigma_p$ 、 $\bar{\lambda}_p - 1.25\sigma_p$ 及 $\bar{\lambda}_p - 1.5\sigma_p$ 作為點位連結範圍。..... 67
- 圖 3.34： $u^* = 1.3 \text{ cm/s}$ 在不同分組範圍的自動辨識結果。流場由左至右，影像尺寸為 $39.8336 \text{ cm} \times 49.792 \text{ cm}$ 。熱圖像以灰階圖表示水面溫度高低，溫度較低偏向深色；溫度較高則偏向淺色。紅色為辨識條痕之結果，黃點為條痕代表位置，藍線為計算截線。圖 a、圖 b 及圖 c 分別以 $\bar{\lambda}_p - 1.0\sigma_p$ 、 $\bar{\lambda}_p - 1.25\sigma_p$ 及 $\bar{\lambda}_p - 1.5\sigma_p$ 作為點位連結範圍。..... 68
- 圖 4.1：無滑移紊流邊界層之對數常態度分佈曲線與條痕間距機率密度直方圖的疊合圖。鉑線放置於接近水槽底部的位置：(a) 流場的雷諾數 $Re_\theta = 1490$ ，條痕間距總數 $n = 437$ (b) 流場的雷諾數 $Re_\theta = 5830$ ，條痕間距總數 $n = 411$ 。(來源：Smith & Metzler (1983))..... 71
- 圖 4.2：水面紊流邊界層之對數常態度分佈曲線與條痕間距機率密度直方圖的疊合圖。模擬風速為 5 m/s ，圖 a、b 取樣時段分別為 $t = 5.4\text{s} \sim 8.1\text{s}$ 及 $t = 9.4\text{s} \sim 12.1\text{s}$ 。圖中每 100 個牆面單位約等於 1.28cm ；條痕間距機率密度分佈的統計寬帶為 $\Delta\lambda^+ = 20$ ，曲線為對數常態機率密度分佈曲線。(來源：溫國暉(2004))..... 72

圖 4.3：水面紊流邊界層之對數常態度分佈曲線與條痕間距機率密度直方圖的疊合圖。點位連結範圍為相對低溫點之平均間距扣除 1 倍間距標準差 (即 $\bar{\lambda}_p - 1.0\sigma_p$)，圖 a、圖 b、圖 c、圖 d 與圖 e 分別為 $u^* = 0.2 \text{ cm/s}$ 、 $u^* = 0.29 \text{ cm/s}$ 、 $u^* = 0.47 \text{ cm/s}$ 、 $u^* = 0.76 \text{ cm/s}$ 及 $u^* = 1.3 \text{ cm/s}$ 。條痕間距機率密度分佈的統計寬帶為 0.1556cm，曲線為對數常態機率密度分佈曲線。..... 73

圖 4.4：水面紊流邊界層之對數常態度分佈曲線與條痕間距機率密度直方圖的疊合圖。點位連結範圍為相對低溫點之平均間距扣除 1.25 倍間距標準差 (即 $\bar{\lambda}_p - 1.25\sigma_p$)，圖 a、圖 b、圖 c、圖 d 及圖 e 分別為 $u^* = 0.2 \text{ cm/s}$ 、 $u^* = 0.29 \text{ cm/s}$ 、 $u^* = 0.47 \text{ cm/s}$ 、 $u^* = 0.76 \text{ cm/s}$ 及 $u^* = 1.3 \text{ cm/s}$ 。條痕間距機率密度分佈的統計寬帶為 0.1556cm，曲線為對數常態機率密度分佈曲線。..... 74

圖 4.5：水面紊流邊界層之對數常態度分佈曲線與條痕間距機率密度直方圖的疊合圖。點位連結範圍為相對低溫點之平均間距扣除 1.5 倍間距標準差 (即 $\bar{\lambda}_p - 1.5\sigma_p$)，圖 a、圖 b、圖 c、圖 d 及圖 e 分別為 $u^* = 0.2 \text{ cm/s}$ 、 $u^* = 0.29 \text{ cm/s}$ 、 $u^* = 0.47 \text{ cm/s}$ 、 $u^* = 0.76 \text{ cm/s}$ 及 $u^* = 1.3 \text{ cm/s}$ 。條痕間距機率密度分佈的統計寬帶為 0.1556cm，曲線為對數常態機率密度分佈曲線。..... 75

圖 4.6：平均條痕間距與摩擦速度之關係圖。黑線為無滑移紊流邊界層中，平均條痕間距的理論值 (約為 $\bar{\lambda}^+ = 100$ ， $\bar{\lambda}_{theo} = 100\nu/u^*$)。橘色、綠色及黑色方形圖為本研究結果，其點位連結範圍關係如下： $\bar{\lambda}_p - 1.0\sigma_p$ 、 $\bar{\lambda}_p - 1.25\sigma_p$ 及 $\bar{\lambda}_p - 1.5\sigma_p$ 。菱形、藍色三角形、加號與紅點皆為運用 Schnieders 等 (2013) 影像處理技術的分析結果。橘色三角形、倒三角形與黑星星分別為 Scott 等 (2008)、Tsai 等 (2005) 及 Melville 等 (1998) 不同分析方法之結果。圖 a 縱軸為公分與圖 b 縱軸為無因次化長度。..... 82



表目錄

表 2.1：風速對應摩擦速度 (friction velocity)。	17
表 3.1：離異點的界定標準。	36
表 3.2：自動辨識與人工辨識單張影像之結果。	55
表 4.1：不同摩擦速度於溫度在跨流向上相對低溫點進行自動辨識，所得條痕間距統計資料。	78
表 4.2：本研究以點位連結範圍 $(\bar{\lambda}_p - 1.0\sigma_p)$ 分析之結果。	83
表 4.3：本研究以點位連結範圍 $(\bar{\lambda}_p - 1.25\sigma_p)$ 分析之結果。	83
表 4.4：本研究以點位連結範圍 $(\bar{\lambda}_p - 1.5\sigma_p)$ 分析之結果。	83
表 4.5：Schnieders 等 (2013) 中，分析 Aeolotron 2012 數據之結果。	83
表 4.6：Schnieders 等 (2013) 中，分析 Aeolotron 2011 數據之結果。	84
表 4.7：Schnieders 等 (2013) 中，分析 ASIST, cool skin 數據之結果。	84
表 4.8：Schnieders 等 (2013) 中，分析 WRL 數據之結果。	84
表 4.9：Scott 等 (2008) 中，分析實驗數據之結果。	85
表 4.10：Tsai 等 (2005) 中，分析數值模擬數據之結果。	85
表 4.11：Melville 等 (1998) 中，分析實驗數據之結果。	85



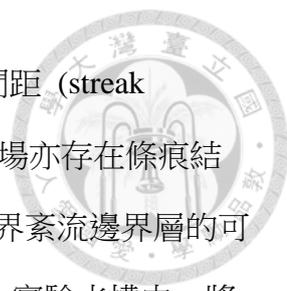
第一章、前言

海洋對氣候變化扮演重要的角色：調節全球氣候的功用，主要因水比熱大且潛熱大。從小尺度觀察當地表受太陽照射後，大氣溫度會快速上升，而水之特性致使海洋溫度較大氣低。反觀大尺度之全球溫度變化，雖海洋具調節氣候的能力，但發現氣體含量的變動會影響全球氣候的變遷。科學家對全球氣候變化之研究，顯示吸收長波能量的溫室氣體濃度，如二氧化碳、甲烷等，逐年攀升造成全球平均溫度上升，導致全球暖化、冰山融化、氣候異常等現象，若氣候變遷速度太急劇，當超過海洋調節的負荷量時，將造成嚴重的後果。

海洋與大氣為造成氣候變遷的重要因子之一，且兩者間具有複合之機制，將海洋與大氣緊密相連。透過溫度與氣體濃度之差異，氣體和能量會於氣海交界面相互交換，從正確估算氣體與能量的轉換則能夠較準確地預測氣候變化，並於此變動量中，或許能進一步推測海洋的運動情形及其可能之機制。然而此交界面為自由運動液面，至今儀器仍較難以直接量測變動液面的能量、氣體通量之實地量測，但其液面存在某一規律之結構（圖 1.1）。因此，運用數值模擬、水面流場速度變化、水面之紅外線影像（surface infrared images）等較現代的技術輔助，觀測流場邊界層的溫度或速度分佈現象與其流場之特性，未來能進一步直接或間接地估算氣體通量，得以更精確地進行氣候之預測。

1.1 無滑移紊流邊界層條痕結構

早期觀測流場邊界層的特性多半以探討無滑移邊界紊流邊界層為主，起初學者大都認為紊流流場為複雜、毫無規則可遵循，然而經研究後發現其流場中存在規則的結構分佈。Ferrell 等（1955）藉由清水沖入充滿染色水體的管流中，發現沿流向（streamwise）接近牆面區域（near-wall region）留下一條條細長的染劑，主要受到黏滯效應影響，使得存留在接近牆面的有色水體往流速較慢的區域聚集，



稱為低速條痕 (low-speed streak)，而條痕之間的距離稱為橫斷間距 (streak spacing)。Kline 等 (1967) 以不同壓力梯度之條件下，觀察到流場亦存在條痕結構。而 Smith 等 (1983) 與 Ferrell 等 (1955) 同樣做了無滑移邊界紊流邊界層的可視化實驗，利用氫氣泡實驗技術，先將均勻穩定的水流持續注入實驗水槽中，將鉑線放置於平行水槽且接近底部位置，並於水槽底部設置一個照明設備，接著選用特定的放電頻率，當鉑線通電後，可清楚觀測鉑線產生白色亮點的氫氣泡，而水槽上方架設以每秒拍攝 120 張影像的高速照相機記錄氫氣泡之運動方向及結構，亦發現氫氣泡於沿流向排列，形成數條氫氣泡之條痕，如圖 1.2 所示。

Runstadler 等 (1963) 首次將無滑移邊界紊流邊界層流場之條痕結構進行有系統的統計並量化其間距。往後研究更發現，條痕間距的統計具有某一特性：於沿流方向延伸的低速條痕在跨流方向之平均條痕間距 $\bar{\lambda}$ ，透過黏滯尺度 (ν/u^* ， ν 為水體運動的黏滯係數 (kinematic viscosity)， u^* 為摩擦速度 ($u^* = \sqrt{\tau_0/\rho}$) 與速度單位相同，其中 τ_0 為風剪驅動水面所產生的剪應力 (shear stress)， ρ 則為水體密度) 進行無因次化 ($\bar{\lambda}^+ = \bar{\lambda}u^*/\nu$) 後，其平均間距 $\bar{\lambda}^+ = 100 \pm 20$ 之範圍。很多研究學者依不同可視化實驗及分析方法證實於無滑移邊界紊流邊界層中，其平均條痕間距趨於一定值。Kline 等 (1967) 則運用頻譜分析量化條痕並計算條痕間距。Smith 等 (1983) 擬定有系統的辨識準則及客觀的記錄條痕方式，有效的計算條痕間距；此外，發現可視化實驗之氫氣泡線放置於接近水槽底部，其實驗雷諾數由小 ($Re_\theta \geq 740$) 至大 ($Re_\theta < 5830$)，所計算出的平均條痕間距符合上述統計特性，許多研究結果亦有一致性的結果。

往後很多不同實驗方法或者分析方式皆證實，在無滑移紊流邊界層中，接近邊界底部會產生低速條痕且條痕於跨流向上的平均條痕間距約為一定值： $\bar{\lambda}^+ = 100$ ；此外，Nakagawa 等 (1981) 提出於無滑移紊流邊界層中，跨流向上的條痕間距分佈具有對數常態分佈特性，Smith 等 (1983) 運用相同的統計方式，其條痕

間距機率密分佈與對數常態機率密度分佈為相吻合，成為其流場指標性的特性之一。



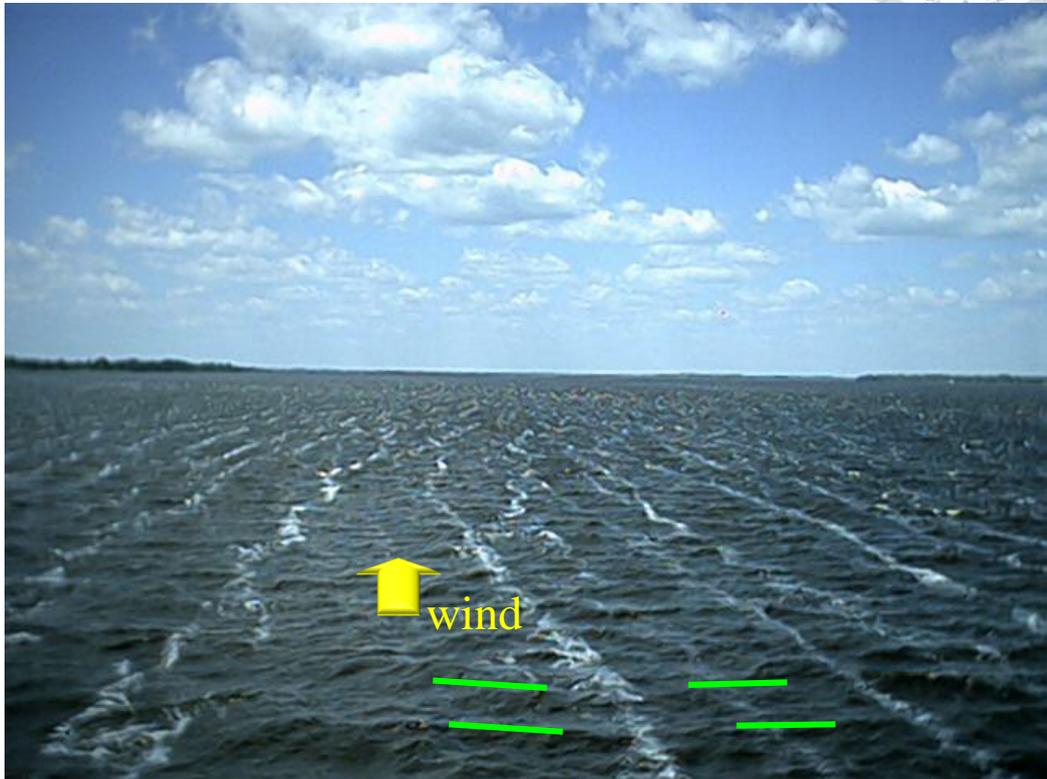


圖 1.1：大自然中，紊流流場反應在水面所形成的結構影像。氣泡與雜質聚集形成條痕結構，其特性為平行於風向（黃色箭頭）且與波的行徑方向相同（綠色線為波峰處）。（來源：<http://www.ldeo.columbia.edu/~ant/Langmuir.html>）

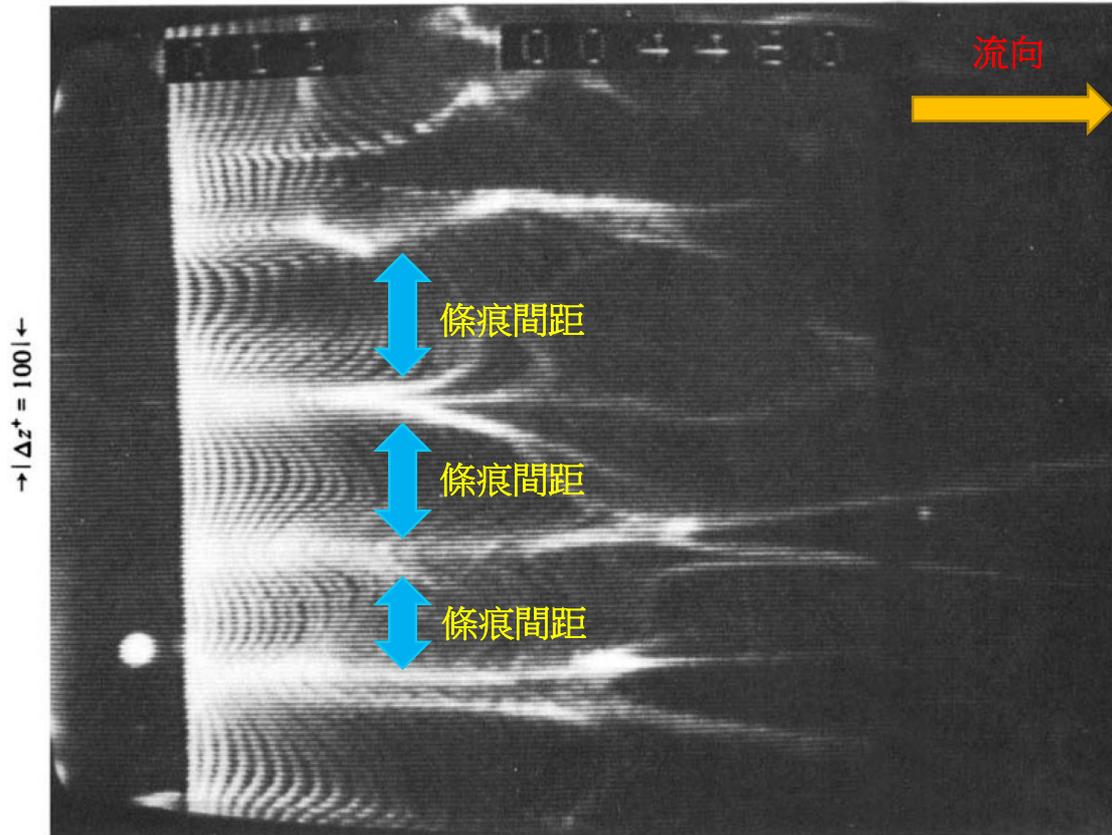


圖 1.2：條痕可視化圖。鉑線放置於平行水槽且接近底部位置，跨流方向截取寬度 $\Delta z^+ = 100$ ，流場的雷諾數 $Re_\theta = 740$ 。流體運動由左至右，影像左邊為氫氣泡產生處（鉑線），跨流向實際影像為 10.4 公分。氫氣泡隨著流場運動，聚集形成條痕。（來源：Smith 等 (1983)）



1.2 水面紊流邊界層條痕結構

水面紊流邊界層與牆面紊流邊界層類似，均為邊界層，其附近的流體會受限於邊界層的特性而運動。然而，牆面紊流邊界層為無滑移邊界條件 (no-slip boundary condition)，水面紊流邊界層則為自由滑移邊界條件 (free slip boundary condition)，流場的特性亦因此而不同。水面紊流邊界層亦有相關研究，如 Woodcock (1941) 開始研究水面小尺度運動，當風驅動水面時，移動速度較快的水分子會排列成線且平行於風吹方向。自然界中，Gemrich 等 (1992) 和 Kenny (1993) 從事可視化實驗亦觀測到此現象，而水面產生移動速度較快的水分子排列成結構，稱為高速條痕 (high-speed streak)。Melville 等 (1998) 記錄一開始，將微小粒子灑入實驗水槽，並經過一段時間後的情況，觀察到粒子從緊密排列至排列規則平行於風向 (即聚集於高速的區域)，最後因粒子過度聚集造成排列混亂；由於風驅動水面致使條痕結構排列會由規則至崩壞現象 (圖 1.3)。Tsai 等 (2005) 運用數值模擬技術，模擬 Melville 等 (1998) 的實驗流場，發現兩者皆於紊流水面存在高速條痕的分佈，如圖 1.4(c) 與圖 1.4(d) 所示，從實驗與模擬比對一致的情況下，或許未來對於模擬大尺度能更準確，以供於相關研究學者、氣候專家等作為參考。

風剪驅動水體不僅能運用可視化技術，觀察粒子在流場中運動狀態、數值模擬等方式，估算水氣交界處質能轉換的通量；隨著儀器進步，研究學者開始應用高解析度的紅外線攝影機偵測水表溫度的分佈進行觀測。從觀測溫度變化中，Smith 等 (2007) 依熱量傳遞之方向可分成兩種情況：一種為 *cool-skin case*，熱量傳遞方向由海洋至空氣，造成海表面溫度下降，使得較冷的水分子開始往下成沉，導致流場不穩定，而從影像中觀測到水面溫度高低相間，如圖 1.5(a) 淺色為高溫且較寬，深色為低溫且較窄 (即為水面的條痕)；另一種為 *warm-skin case*，熱量傳遞由空氣至海洋，造成海表溫度上升，而溫度較高的水分子仍在海表，致使流



場穩定，水面溫度亦是高低相間，與 *cool-skin case* 不同的是水面條痕為高溫處，如圖 1.5(b)。實驗研究主要以 *cool-skin case* 為主，如 Handler 等 (2001)、Scott 等 (2008)、Handler 等 (2012) 和 Schnieders 等 (2013)。

Gemrich 等 (1992) 發現條痕大部分出現於風速 2 m/s、3 m/s 或者更高風速，而 Melville 等 (1998) 分別以不同風速驅動水面，透過觀測粒子排列成條痕的結構變化，發現當風速愈大時，條痕結構愈緊密排列 (圖 1.6)。從數值模擬方面亦觀測到相同現象，Tsai 等 (2005) 設定不同風速驅動水面流場，分別記錄水面速度與溫度分佈情形，由圖 1.7 清楚顯現當風速愈大，高速條痕數量較多，其排列間距較窄，而從溫度影像中，高速條痕位置相對於低溫處，表示此模擬屬於 *cool-skin case* 且水面流速及溫度分佈皆能顯現出相同的條痕結構。至今欲由溫度觀測風剪驅動水面紊流流場時，普遍運用紅外線照像機進行紀錄，Schnieders 等 (2013) 量測結果如圖 1.8 所示，摩擦速度較低時 (即風速愈小)，條痕數較少且易於使用肉眼分辨條痕出現位置；摩擦速度愈高，條痕數量明顯增多，若摩擦速度高至水面產生碎波時，則較難應用肉眼確切辨別出影像中條痕，如 Melville 等 (1998)、Tsai 等 (2005) 皆有相同特性。藉此了解不論在無滑移紊流邊界層或者風剪驅動水面紊流邊界層，兩者具有類似的特性。

自科學家開始關注於風剪驅動水面產生紊流流場之條痕結構，以各種實驗技術、數值模擬方式觀測其變化情形，如追跡質點 (Melville 等 (1998) 與 Tsai 等 (2005))、水面流速 (Melville 等 (1998) 和 Tsai 等 (2005))、水面溫度 (Smith 等 (2007)、Scott 等 (2008) 與 Schnieders 等 (2013))等方式；並運用數種的分析方法，定量條痕結構及歸納出於自由液面紊流的特性，如傅立葉分析 (Handler 等 (2001, 2012))、統計分析 (Handler 等 (2011)) 等，水面條痕間距分佈皆為對數常態分佈，透過其條痕結構特性亦較能準確評估研究方向與探討相關的物理機制，盼未來能更準確計算海氣交換的通量並預測氣候變化。

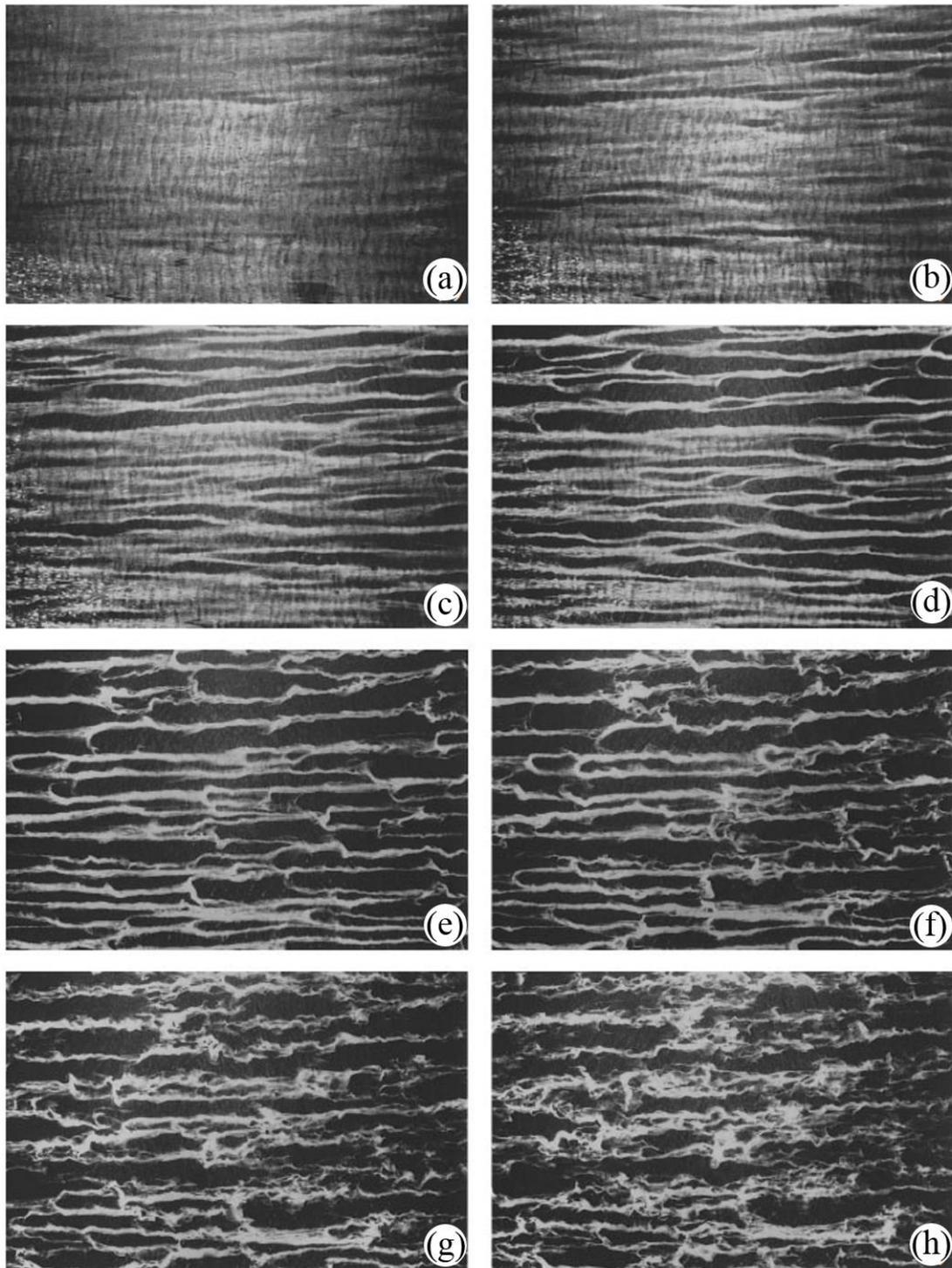
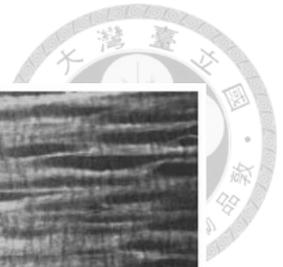


圖 1.3：真實實驗水面條痕演化的現象。實驗風速 5 m/s，風向由左至右，影像尺寸為 85cm × 57cm。一開始，先將微小粒子灑入水面，其粒子會聚集在高速區域而形成條痕；經過一段時間後，條痕結構會由整齊至崩壞。圖 a 由風驅動水面 21.5 秒後產生的影像，依序間隔 0.5 秒拍攝一張影像。(來源：Melville 等 (1998))

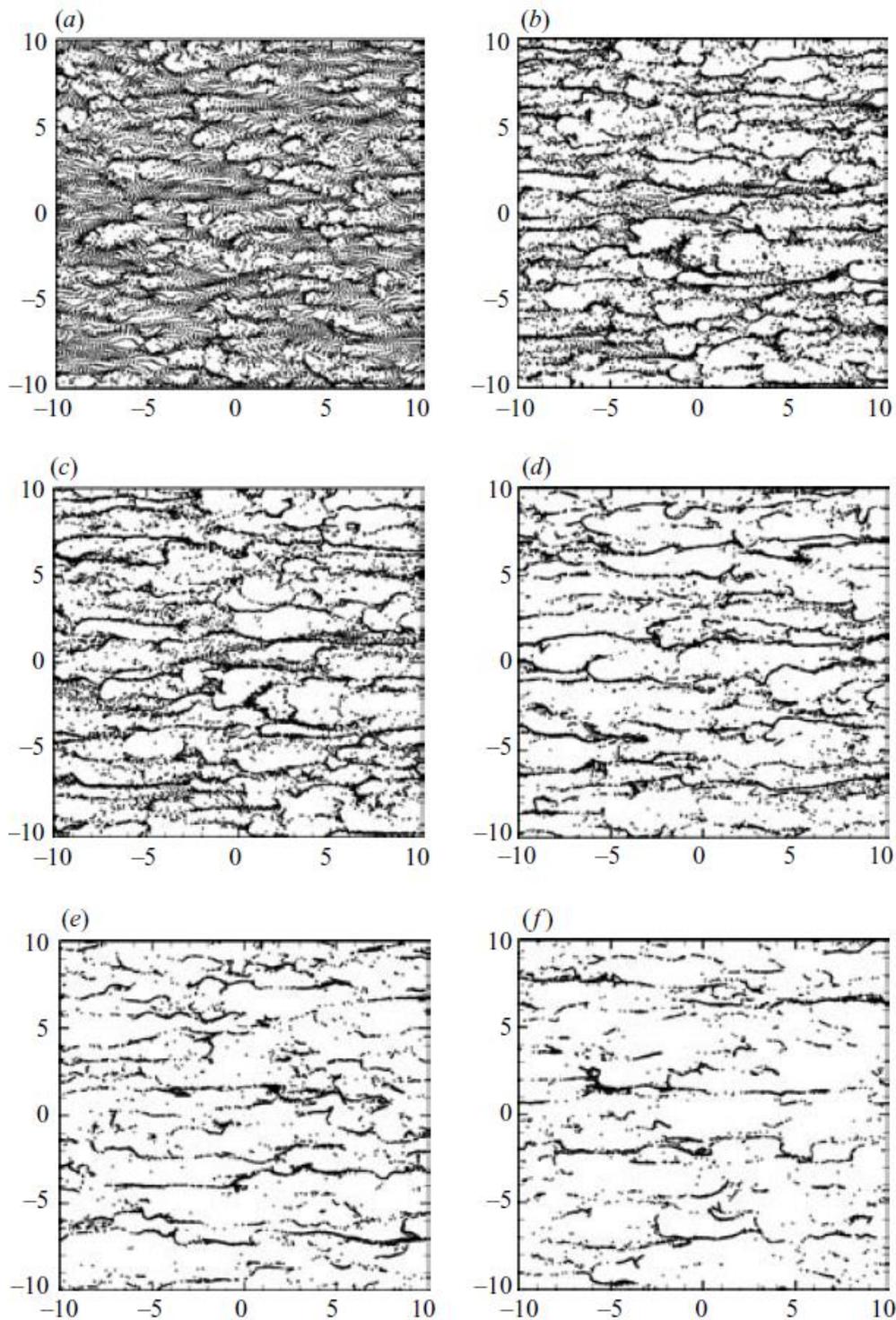
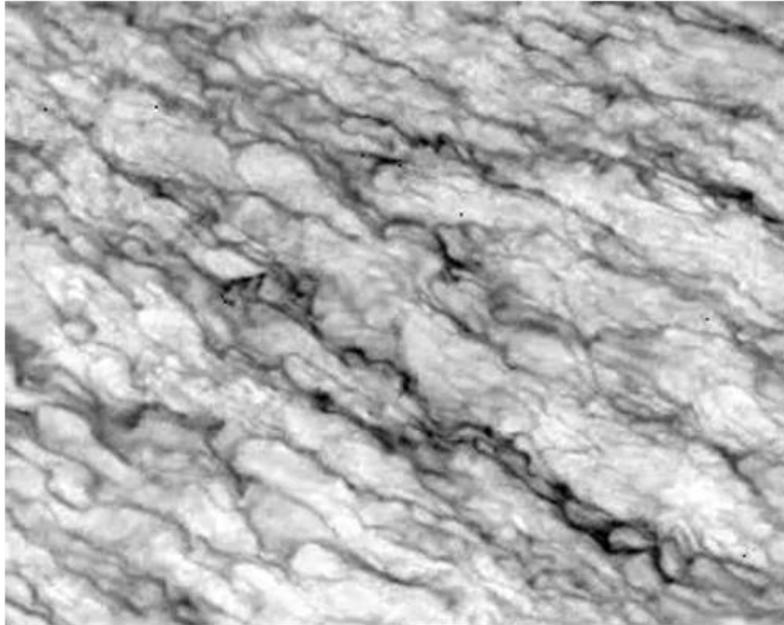


圖 1.4：模擬質點至入流場後的瞬時分佈狀況。模擬風速 5 m/s，紀錄將灑入質點後，質點隨時間的分佈情形（圖 a 至圖 f），初期質點會散佈在整個水面（圖 a 及圖 b），不易觀測條痕分佈，經過一段時間後，質點排列則較規則排列（圖 c 及圖 d）。接下來轉為條痕排列混亂，因質點過度聚集所致，不易判斷條痕（圖 e 及圖 f）。(來源：Tsai 等 (2005))

(a)

Wind direction



(b)

Wind direction

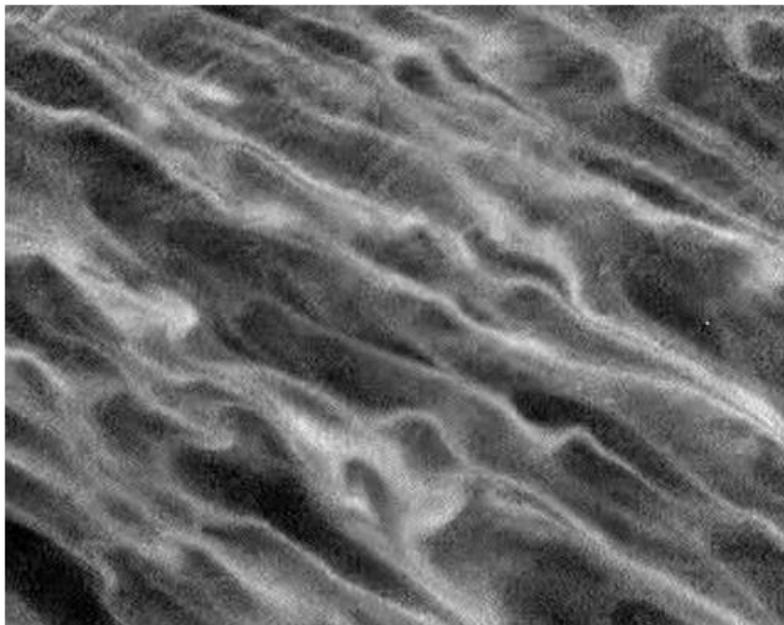


圖 1.5：以紅外線影像觀測實驗風速 3 m/s 的水面結構。影像以灰階圖表示水面溫度高低。溫度較低偏向深色；溫度較高則偏向淺色。圖 a 為 *cool-skin case*，形成低溫條痕。圖 b 則為 *warm-skin case*，形成高溫條痕。(來源：Smith 等 (2007))

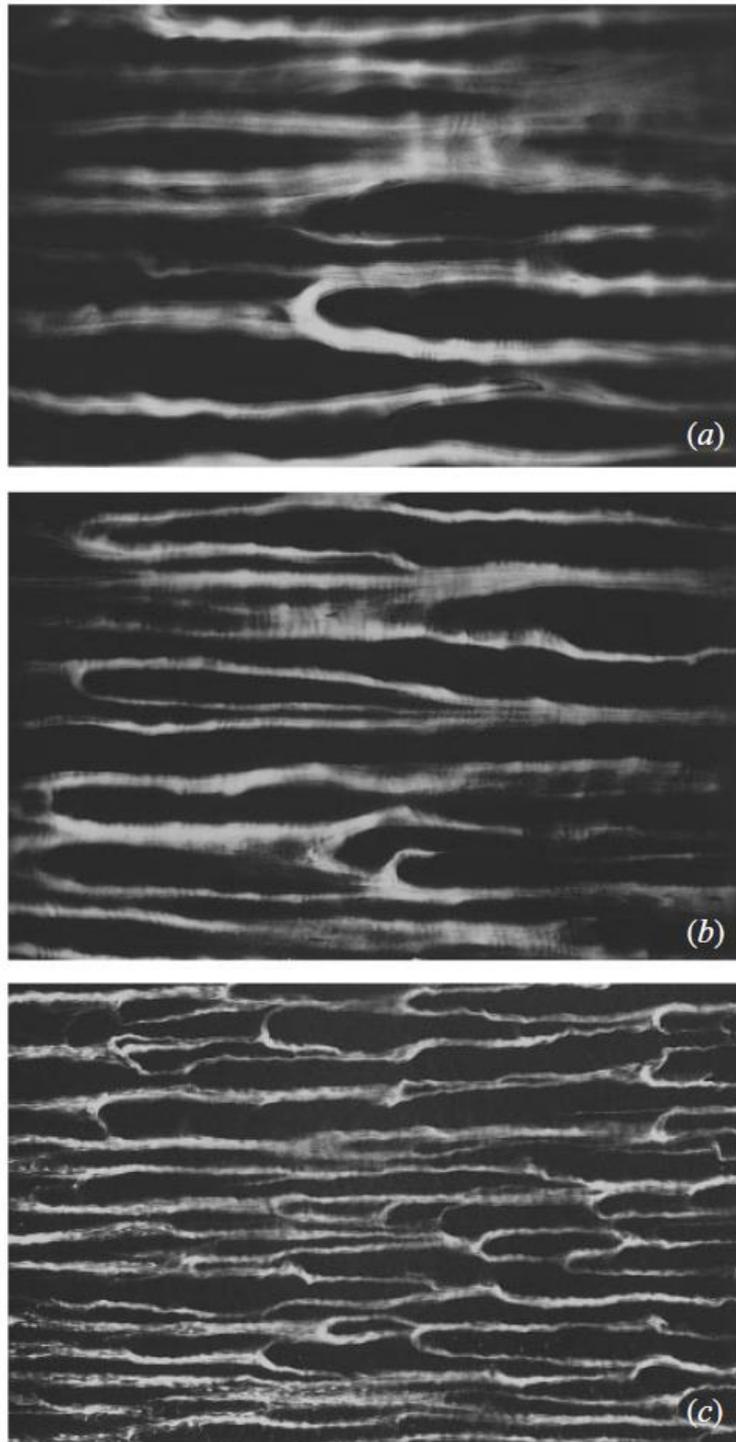


圖 1.6：不同風速驅動水面所形成的條痕結構。影像尺寸為 $85\text{cm} \times 57\text{cm}$ ，風向為由左至右。圖 a、圖 b 及圖 c 分別為風速 3 m/s 、 4 m/s 及 5 m/s ，以不同風速觀察微小粒子聚集在高速區域形成之條痕。發現當風速愈大時，條痕結構愈緊密。
(來源：Melville 等 (1998))

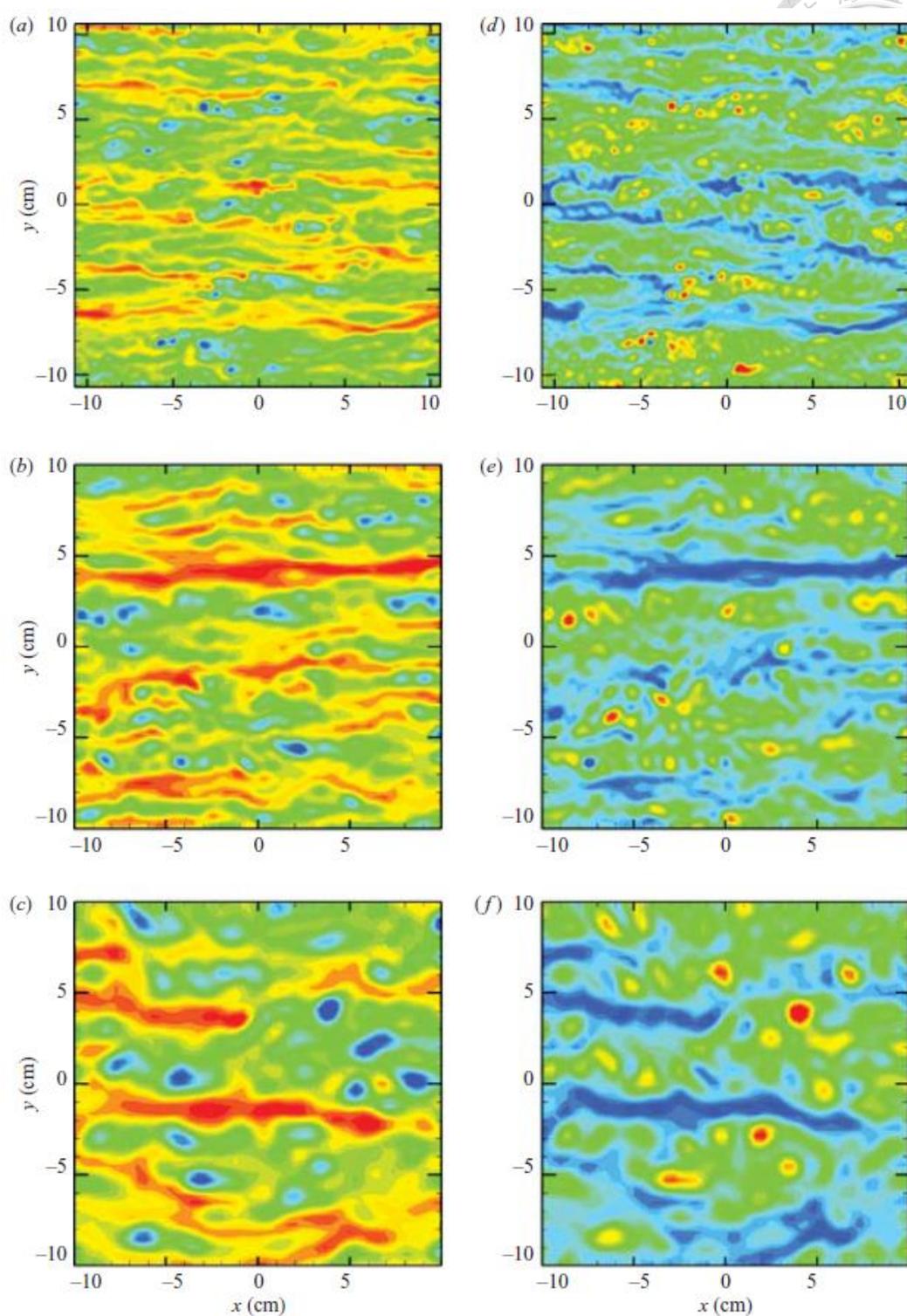
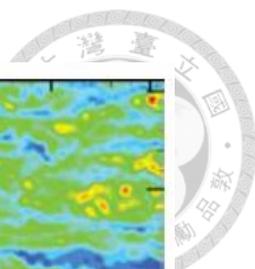


圖 1.7：風速對應沿流向流速與溫度分佈關係。流向由左至右。圖 a 至圖 c 為流速，高速偏向紅色，低速則偏向藍色；圖 d 至圖 f 為溫度分佈，高溫偏向紅色，低溫則偏向藍色。圖 a 與圖 d 為風速 5 m/s，圖 b 與圖 e 為風速 4 m/s，圖 c 與圖 f 為風速 3 m/s。(來源：Tsai 等 (2005))

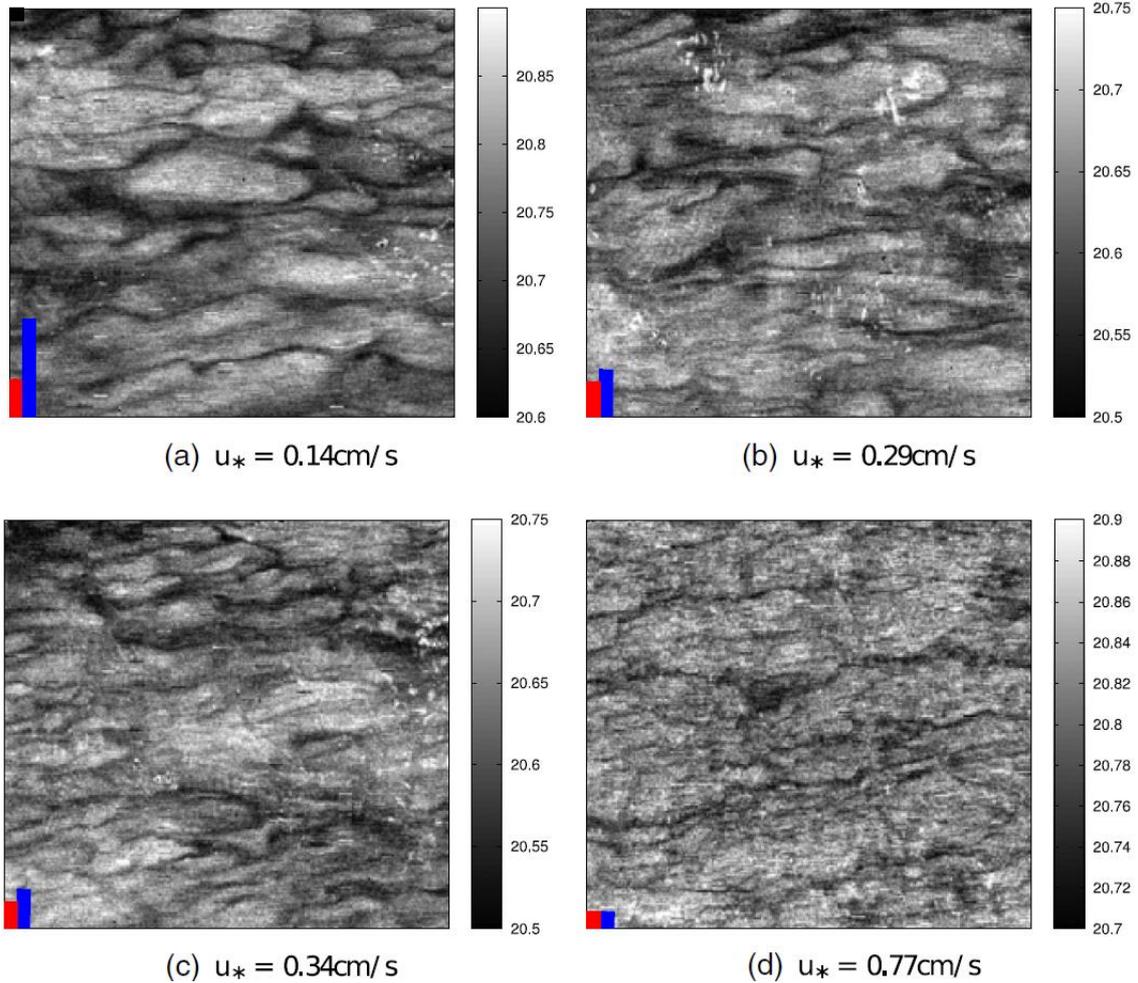


圖 1.8：不同摩擦速度的熱圖像。風向由左至右，以風扇驅動環狀水槽之水面的實驗，並紀錄水面溫度分佈的影像。影像以灰階圖表示溫度高低，溫度較低偏向深色；溫度較高則偏向淺色。紅色長條圖為影像中平均條痕間距長度，藍色長條圖為無滑移邊界紊流邊界層之有因次平均條痕間距的理論值。圖 a、圖 b、圖 c 及圖 d 的摩擦速度 u^* 分別為 0.14 cm/s 、 0.29 cm/s 、 0.34 cm/s 及 0.77 cm/s 。
(來源：Schnieders 等 (2013))



1.3 研究動機與章節概述

一般人對於紊流的認知是雜亂無章，毫無規則。從 1.1 節以及 1.2 節中，說明在紊流邊界層中，藉由可視化影像，觀察到水面紊流具有規則性的條痕結構，並量化條痕結構，歸納出特性。

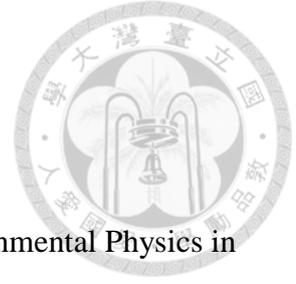
分析紊流邊界層不僅限於特定一種方式，而最容易觀測的是可視化影像，如將追跡質點、染劑等應用於實驗中，可直接觀測顯示劑隨著流體運動，產生之條痕結構。最初研究風剪驅動水面紊流邊界層時，以可視化實驗觀測至顯示劑平行於水流方向且聚集成細長條痕結構，透過質點影像測速儀測得顯示劑聚集於高速位置，藉此了解水面流速分佈為高低相間；由計算條痕之間的距離（即條痕間距），進而統計其間距的特性與探討其生成機制。隨著儀器推陳出新，可觀測因水面能量傳遞所產生之條痕結構，並歸納條痕間距之特徵。

針對風驅動水面產生之紊流流場，溫國暉 (2004) 應用數值模擬，觀測流場速度變化，並運用 Kline 等 (1967) 之頻譜分析法、具物理特性的辨識方法；Smith 等 (1983) 人工辨識方法，為了減少消耗大量人力和時間，以及避免受到主觀意識的影響，以 Smith 等 (1983) 辨識準則，撰寫自動辨識方法，分析數值模擬水面紊流邊界層的條痕結構與特性；相同的分析準則，無法完全套用於紅外線影像紀錄的實驗流場，主要因實驗數據會受記錄儀器、人為等因素，產生雜訊，進而造成數據不如模擬數據般容易分析。因此，為了提高辨識的準確性，不僅減緩雜訊之干擾並擬定較嚴謹的判斷準則，以降低外在因素造成的影響，並與 Schnieders 等 (2013) 應用分類演算法 (Classification Algorithm)，其中包含影像處理 (Image Processing) 與機器學習為基礎的演算 (machine learning-based algorithm)，主要以表面熱圖像的特性進行切割 (Segmentation)，分析同筆數據的結果進行討論，最後比較其他科學家對於風剪驅動水面紊流邊界層的分析結果並探討其差異性。



論文敘述安排如下：第二章說明如何實驗數據來源並闡述其特性。第三章回顧溫國暉 (2004) 分析數值模擬之數據所運用的辨識方法，然而發現本研究所分析的實驗數據中存在許多雜訊干擾，導致無法直接應用溫國暉 (2004) 的方法進行分析。因此，先將實驗數據中的雜訊去除後，接著以較嚴謹的準則進行自動辨識。於 3.1 節中說明溫國暉 (2004) 參照 Kline 等 (1967)、Smith 等 (1983) 的辨識方法並自行撰寫程式進行自動辨識，比較方法優劣。於 3.2 節中說明實驗數據無法直接辨識的原因，並以兩種雜訊去除方式，如 3.2.1 節直方圖與 3.2.2 節經驗模態分解法，降低其造成的影響。於 3.3 節詳細闡述自動辨識步驟並討論辨識結果準確性。

第四章說明如何統計條痕間距並探討條痕間距特性。於 4.1 節回顧 Smith 等 (1983) 使用得統計條痕間距分佈。於 4.2 節則探討點位連結範圍造成條痕間距計算的影響。於 4.3 節與他人的結果進行比較。第五章為結論與建議。



第二章、風浪水槽實驗

實驗數據取自海德堡大學環境物理學院 (Institute for environmental Physics in Heidelberg, IUP) 的 Aeolotron 環狀風浪水槽量測結果 (圖 2.1)。環狀水槽主要特色為當流場發展完全時，流場於連續時間與空間上的變化不大，所以在水槽中任何位置進行觀測皆不受風吹距離影響，但仍會因水槽的幾何形狀而於流場中產生離心流及波場運動。

水槽的直徑為 10m、圓周長為 27m、寬為 61cm 和高為 2.3m，實驗水深約 $1.0 \pm 0.01\text{m}$ ，實驗水道的寬為 61cm、高為 2.3m。水槽上方相對位置處架設風扇並以適當風速 (約 1 m/s 到 6 m/s) 驅動水面，避免波浪運動受到水深影響，接著在水面上方 1.3m 處設置紅外線照相機。當流場發展完全時，並以每秒紀錄 60 筆特定水面熱輻射轉換成相對溫度值。

本研究以 *cool-skin case* 為主，藉由控制實驗環境的相對溼度於固定常數 (~60%)，得以滿足熱量傳遞方向由水面至空氣 (即為觀測低溫條痕)，並增設一些實驗裝置降低外在因素產生的熱通量，例如：避免水道與外界氣體接觸，如關閉門，則可減少潛熱通量 (latent heat flux) 轉換；並於水道的兩側隔一層 9cm 厚的聚苯乙烯，降低顯熱通量 (sensible heat flux) 變化；水道牆面上覆蓋鋁箔紙，將輻射熱通量 (radiant heat flux) 降至最低，得以更精確紀錄水面輻射熱之變化。

以紅外線照相機 (IRCAM Velox 327k M) 紀錄水面溫度隨時間的變化，其透過水面輻射熱能量，經由電訊號轉換成溫度分佈值或者相對溫度值，此種形式記錄則稱為被動式熱圖像 (passive thermography)，圖像解析度 $512 \times 640\text{px}$ ，空間解析 $0.0778 \pm 0.0006\text{ cm/px}$ ；拍攝頻率 60Hz，實驗量測 20 分鐘紀錄 50 個序列，一個序列為 1000 張影像 (~16s)，本研究分析 5 種不同風速，每種風速皆分析 4 個序列 (共 4000 圖像)。熱圖像中流場運動方向由左至右。 x 方向為沿流向 (streamwise)； z 方向為跨流向 (spanwise)。圖 2.2 分別為 5 種風速 (摩擦速度) 的

熱圖像，當溫度愈低時，偏向藍色；反之則偏向紅色。風速較低時，熱圖像中清楚觀測到低溫條痕結構（如實驗風速 1.8 m/s、2.5 m/s 與 3.3 m/s）；當於高風速時，水面溫度結構紊亂，不易觀測到條痕結構（如實驗風速 4.5 m/s）；當風速達到一定程度時，流場中有碎波的產生，辨識條痕結構則變得更加困難（如實驗風速 6.2 m/s）。為了方便與他人結果進行比較，以下內容皆以摩擦速度表示，從表 2.1 與圖 2.3 中得知，風速與摩擦速度呈現正相關。

表 2.1：風速對應摩擦速度 (friction velocity)。

風速 (m/s)	1.8	2.5	3.3	4.5	6.2
摩擦速度 (cm/s)	0.20	0.29	0.47	0.76	1.3

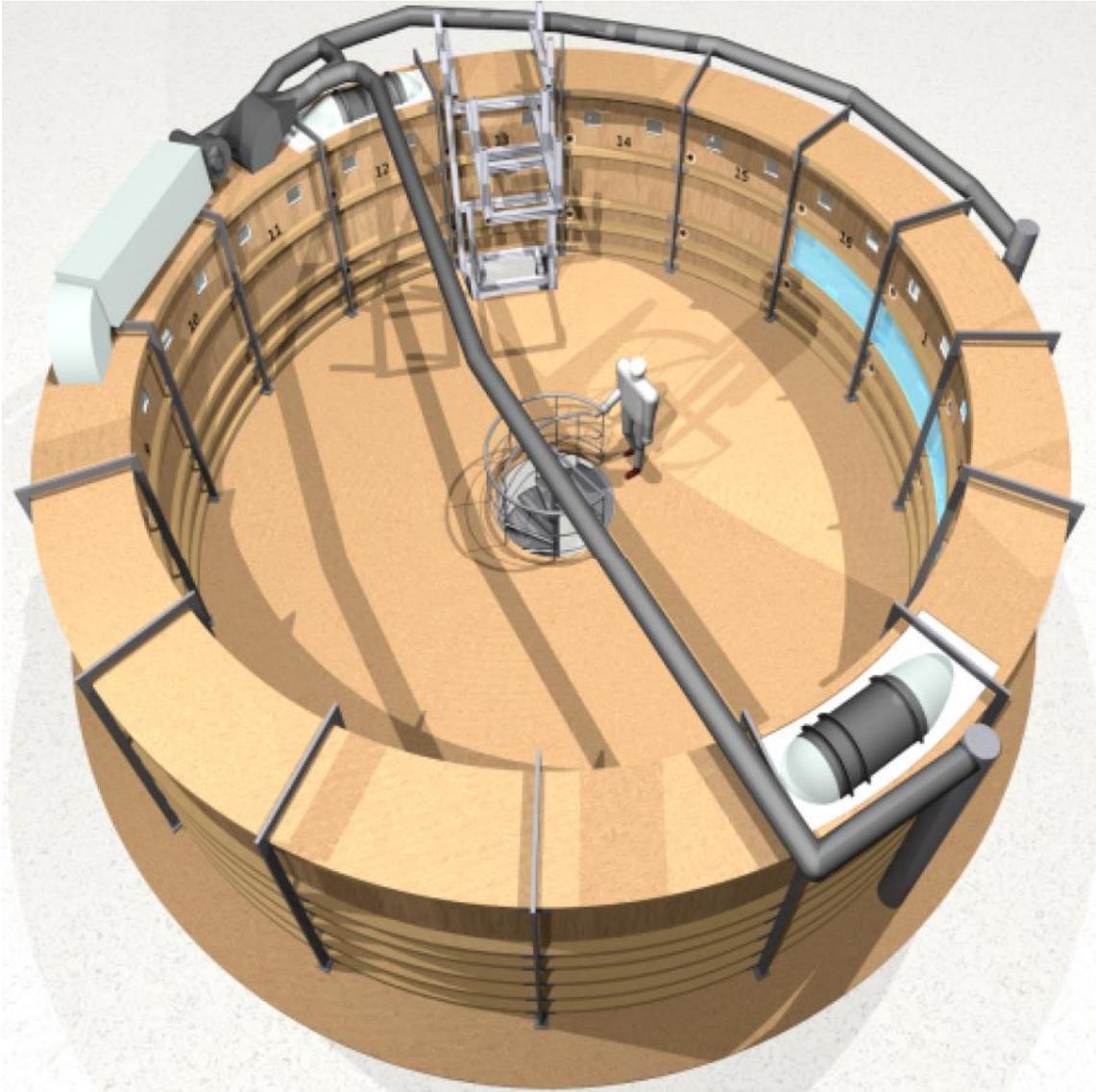


圖 2.1：海德堡大學環境物理學院的 Aeolotron 環狀風浪水槽。(來源：
<http://sopran.pangaea.de/news/theoceanintheaeolotronfinalsopranlaboratoryexperiment>)

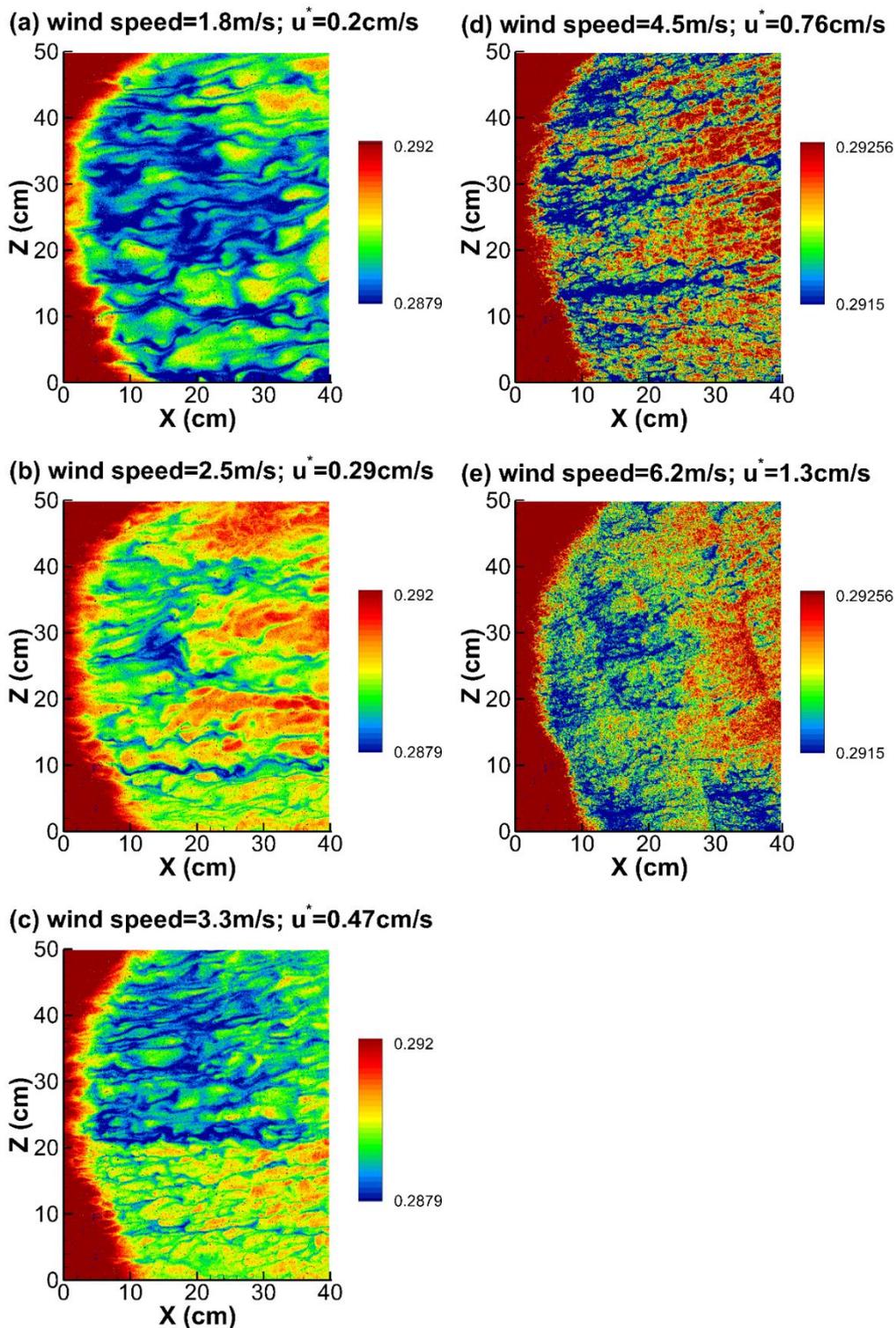


圖 2.2：不同實驗風速的熱圖像。溫度較低偏向藍色；溫度較高則偏向紅色。圖 a 至圖 e 為風速由低到高，分別為 1.8 m/s、2.5 m/s、3.3 m/s、4.5 m/s 與 6.2 m/s。圖 a、圖 b 與圖 c 為低風速之熱圖像，其條痕結構分佈較為明顯；圖 d 與圖 e 為高風速之熱圖像，水面溫度分佈較為紊亂。於風速 6.2 m/s 時，其流場已有碎波產生。

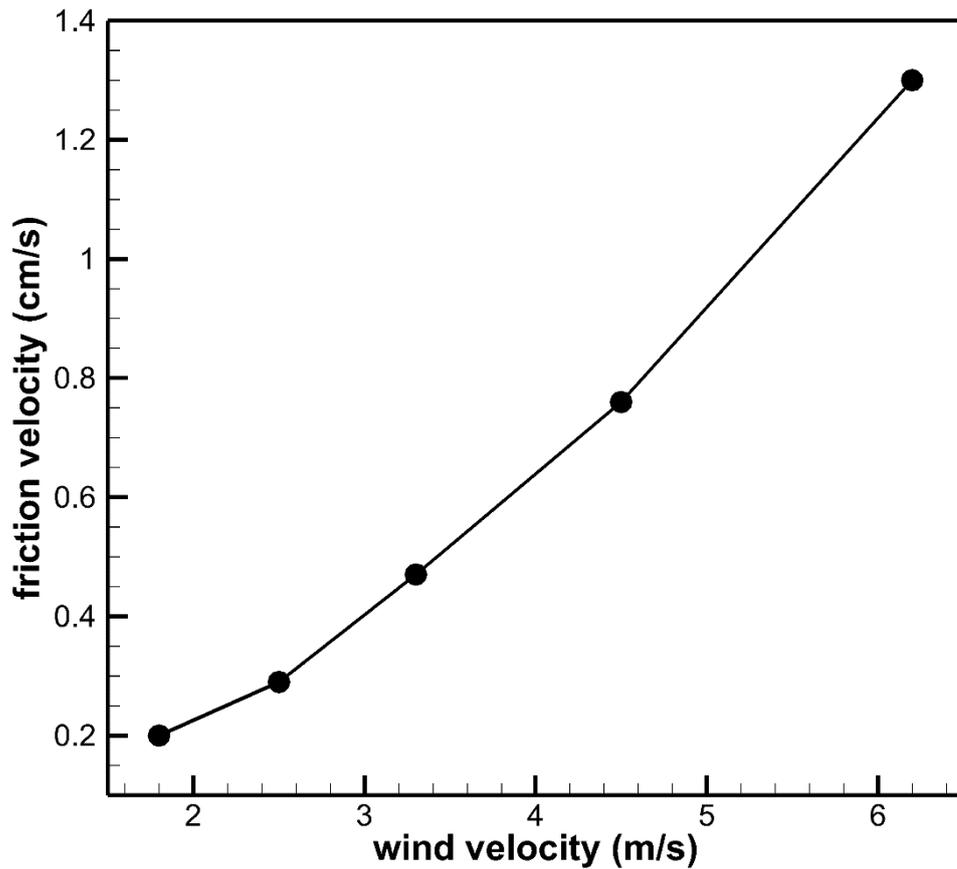


圖 2.3：風速 (wind velocity) 與摩擦速度 (friction velocity) 的關係圖。當風速愈大時，摩擦速度愈大。本研究分析五個風速分別為 1.8 m/s、2.5 m/s、3.3 m/s、4.5 m/s 與 6.2 m/s，所對應之摩擦速度分別為 0.2 cm/s、0.29 cm/s、0.47 cm/s、0.76 cm/s 與 1.3 cm/s。



第三章、自動辨識條痕結構

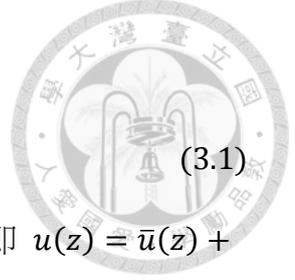
欲探討條痕結構之間距特性，首先須辨識影像中的條痕結構，而學者對於無滑移紊流邊界層或者風剪驅動水面紊流邊界層之流場，開發許多辨識條痕結構的方法。溫國暉 (2004) 歸納幾種辨識方法，如引用 Kline 等 (1967) 與 Smith 等 (1983) 辨識無滑移紊流邊界層中流場結構的方法，應用於數值模擬之水面流場；此外，以 Smith 等 (1983) 之條痕辨識準則，撰寫電腦程式進行自動化辨識；並比較不同辨識方法對其結果之優劣後，發現以沿流向 (x 方向) 流速在跨流向 (z 方向) 上相對最高速點位進行條痕自動辨識，最能夠代表此流場中的條痕結構之結果。由於實驗數據較數值模擬之數據混亂，可能受到實驗儀器或者人為等因素產生雜訊干擾，嚴重影響判斷結果，導致無法直接應用溫國暉 (2004) 的自動辨識方法。為了提高準確性，首先需進行雜訊去除，接著增加條痕辨識準則，降低誤判的情形。

3.1 研究回顧：水面影像之條痕結構

溫國暉 (2004) 應用 Tsai (2001) 的數值模擬數據，探討風剪驅動水面紊流邊界層之條痕結構與特性，並詳述辨識條痕準則與步驟。

Tsai (1998) 引入 Melville 等 (1998) 真實水槽實驗的物理參數，發展數值模式 (即求解流場時，未使用任何紊流模式參數化尺度小於離散網格的流場運動)。而模擬水體水面為自由液面 (free surface)，底部為自由滑移邊界 (free-slip boundary)，不影響水面流場的深度，故視為無限水深；並在模擬水體水面上加入固定風剪力驅動水面，產生紊流，則為 Tsai (2001) 的數值模擬數據。

Kline 等 (1967) 以氫氣泡技術觀測無滑移邊界紊流邊界層的結構，並使用頻譜分析推算條痕間距。頻譜分析為利用某一量測時間 (時間 t 固定)，計算氫氣泡產生線上沿流向速度 u 在跨流向 z 上的自相關函數 R_{11} (autocorrelation



function) :

$$R_{11}(z_0) = \frac{\int u'(z)u'(z + z_0)dz}{\int u'(z)^2 dz} \quad , \quad (3.1)$$

其中 $u'(z)$ 為沿流向速度的瞬時擾動在跨流向上的分佈函數，即 $u(z) = \bar{u}(z) + u'(z)$ ， $u(z)$ 為利用實驗水槽固定深度，平行於跨流向的氫氣泡產生線測得；而 $\bar{u}(z)$ 則是沿流向流速在跨流向上的瞬時平均。將函數 R_{11} 利用下式進行的傅立葉級數轉換，求得頻譜分析函數 $\hat{U}(l)$ ：

$$\hat{U}(l) = \int_0^{\infty} R_{11} \cos\left(2\pi \frac{z_0}{l}\right) dz_0 \quad , \quad (3.2)$$

其中 l 為波長，即表示沿流向流速函數 $u(z)$ 在空間上的週期長度。圖 3.1(a) 為典型頻譜分佈圖例，每張圖中曲線最高峰值對應周長，表示流場瞬時流速分佈中最可能的週期，換言之，則是該瞬時流場條痕結構之最可能間距。圖 3.1(b) 計算一段時間中，將其頻譜分佈曲線峰值所對應的週期長度依適當帶寬累計次數之直方圖，次數最高的週期長度則最可能為平均條痕間距（左圖）；將一段時間中，所有頻譜分佈曲線疊加後平均，其平均曲線峰值所對應的週期長度，則代表為該段時間內最可能的平均條痕間距（右圖）。

溫國暉 (2004) 以風速 5 m/s 數值模擬資料，依 Kline 等 (1967) 提出頻譜分析的演算方法與步驟，推算條痕間距。圖 3.2 取單一截線上的流速分佈或者多個截線上的流速分佈進行分析，其曲線波動趨勢大致相同，僅有頻譜分佈函數 $\hat{U}(l)$ 略有差異。頻譜分佈函數曲線中，發現有分佈數個波峰，即表示模擬流場水面的沿流向速度，在跨流向上有數個代表周長，且周長間消長行為非常顯著。風速 3 m/s 時，亦有數個代表週期，但強度皆弱，盡可能從中選取強度最強的作為代表週期，亦即條痕間距。

利用頻譜分析推算風剪趨動水面紊流邊界層中高速條痕間距，發現相當紊亂，如產生數個代表週期，不若 Kline 等 (1967) 對無滑移邊界紊流邊界層分析結果單純。原因可能是：第一，風剪驅動水面紊流邊界層不會達到穩態，所以在非穩態

狀況下進行頻譜分析，其結果自然紊亂；第二，模擬水面流場寬度太短，可能不足以應用在沿流向流速在跨流向上的週期消長，造成在頻譜分佈函數 $\hat{U}(l)$ 中十分顯著；第三，風剪驅動水面造成紊流邊界層生成機制較為複雜，導致無法應用沿流向流速在跨流向上的分佈週期推算條痕間距。

接著引用 Smith 等 (1983) 以直接分析的方式，即人工辨識法，藉由紊流流場具有視覺上的特殊結構，進行流場影像辨識條痕。運用可視化技術觀測無滑移邊界紊流流場結構、擬定有系統的辨識準則及客觀的記錄條痕方式。首先從拍攝的流場影像中，挑選條痕結構清楚的連續時段進行取樣，且該時段內每張影像時間間隔約 0.833s (約 5/6s)，約挑選 45-60 張影像作為判讀相片組。為了方便判讀，每張判讀照片依實際影像尺寸進行適當比例放大，再從放大比例，計算出條痕實際長度即可。

判讀照片中，主要選定於氫氣泡線下游 $\Delta x^+ = 50$ 處作為計算條痕通過位置，稱為計算截線，並遵循辨識條痕的三個原則 (圖 3.3)：

- 1、沿流向條痕長度 $\Delta x^+ = 100$ 。
- 2、條痕必須通過計算截線。
- 3、當兩條條痕靠得很近時，各別計算；當兩條條痕重疊時，僅計算一條。

以人工方式判讀條痕，首先取得一張透明記錄板，當條痕同時符合原則 1 和 2 時，條痕予以紀錄時，依循著記錄板上相同時間位置的線疊合影像中計算截線上所判斷的條痕位置 (第一條線疊合時間序列上第一張圖；第二條線則疊合第二張影像，以此類推)，並將條痕出現位置用短橫線標記在記錄板上 (圖 3.4)。由於人工判讀可能會受到主觀判斷影響，所以由三位不同辨識者各別判讀相同資料，當結果有一者不符合時，則進行討論直至三位辨識者有相同的判讀結果為止。

應用於模擬風剪驅動水面紊流邊界層之流場時，對應不同特性的影像資料，增修 Smith 等 (1983) 判斷準則得以使辨識結果更符合常理。以追跡質點模擬真實流場結構，而從時變分佈影像觀察，發現追跡質點聚合成的條痕長度較長，將



沿流向最短條痕長度限制增加為 $\Delta x^+ = 150$ ；此外，判讀條痕通過計算截線時，常有多點相交情況，因此增設一條準則，若有多點相交的情況發生，則取中點為條痕代表位置，不論是判讀水底或水面皆可使用此方法，並以圖像特性增設或修改判斷準則，能更準確的紀錄條痕位置。

人工辨識方法會消耗大量人力、時間，甚至因人為主觀意識，影響結果的客觀性。因此，為了克服上述缺點，發展自動辨識採用電腦程式，以「點位」資料與辨識準則進行邏輯判斷辨識條痕。自動辨識條痕系統會依循如下的步驟，辨識是出符合準則的條痕：

- 1、讀取整個水面資料點位，供判別各點位所屬族群。
- 2、兩點位間之距離若小於等於 $\sqrt{2}$ 倍計算網格邊寬，則兩點位視為同族群。
- 3、將全部點位分族群後，計算每一族群在沿流向上分佈長度 Δx^+ ；若族群分佈長度大於 150 個牆面單位 (即 $\Delta x^+ \geq 150$)，則視該族群為一條沿流向充分延伸的條痕。
- 4、條痕通過計算截線，意即計算截線上下游兩側均有同族群點位分佈；若同族群在計算截線上有點位分佈，則分別以下述兩種準則代表條痕通過位置：
 - (a) 若條痕貫穿計算截線，且在計算截線上無點位分佈，則取上下由最接近計算截線的點位為代表點位；若同側最接近計算點位多於兩點，則取最遠的兩點位的中點作為代表點位；取上下游代表點位連線與計算截線的交點則為條痕代表位置。
 - (b) 如條痕在計算截線上僅有一個點位分佈，則取該點位作為條痕代表位置；若條痕在計算截線上有一個點位以上，則選取截線上最遠兩點位的中點，作為條痕代表位置。
- 5、記錄且輸出計算截線上條痕代表位置，以供計算條痕間距。

應用沿流向流速的高速區塊點位 (高速區塊定義為平均沿流向流速 \bar{u} 加上一

倍標準差 σ_u) 進行自動辨識，發現結果與人工辨識趨於一致，但辨識結果的不確定性來自「高速區」本身的定義，當高速區流速標準較低時，條痕連結變成塊狀，條痕數下降；當高速區流速標準較高，通過的計算網格點位變少，雖條痕不會變成塊狀，但會變得短而稀疏，因此，較難客觀定義高速區塊。

自動辨識方法面臨的問題為無法客觀定義高速區塊，造成辨識結果的不確定性。Tsai (2001) 提及數值模擬水面確實具有條痕結構，而溫國暉 (2004) 藉此觀測流速於跨流方向上的現象：模擬水面沿流向流速在跨流方向上，具有高低流速區域交替的特殊結構，而質點多在高速區聚合成條痕；相較跨流向流速等值區塊在流場中的分佈則較為散亂，不具特殊結構且與條痕生成位置無明顯關連性 (圖 3.5 與圖 3.6)。由上述結果，再加上觀察追跡質點動態演化影像，發現質點在流場中會慢慢靠近沿流向流速的高速區域，進而聚集為條痕；因此，推判追跡質點會往沿流向流速相對快的地方運動。以模擬風速 5 m/s 為例，先找出每一跨流向計算網格線上沿流向流速在跨流向的相對高速點位進行觀察，圖 3.7(a) 標示出沿流向流速相對最高速點位分佈圖。圖 3.7(b) 為三張沿流向流速在跨流向上速度分佈，分別對應圖 3.7(a) 三條計算截線位置 (即 $x = -5\text{cm}$ 、 $x = 0\text{cm}$ 、 $x = 5\text{cm}$)，速度分佈曲線上的波峰 (圖中的黑點) 則為沿流向流速在跨流向上的相對最高速的點位。欲觀測條痕結構與程式辨識結果的吻合性，遂將沿流向流速在跨流向上的相對最高速的點位分佈圖與自動辨識結果比較 (圖 3.8)，發現兩者相吻合且能清楚辨識出不同點位族群，因此，以沿流向流速在跨流向上的相對最高速的點位分佈能清楚觀察紊流流場之條痕結構。

從溫國暉 (2004) 使用三種辨識方法，第一，運用 Kline 等 (1967) 提出的頻譜分析法，可能因受限於模擬水面的計算寬度、風剪驅動水面紊流邊界層不會達到穩態及風剪驅動水面造成紊流邊界層生成機制較為複雜，導致頻譜分析函數無法收斂，難以得到具代表性的條痕平均間距。第二，以 Smith 等 (1983) 的人工辨識方法時，既耗時又費力，結果甚至會受到人為主觀意識影響。第三，自動辨

識方式能有效克服人工辨識的缺陷，但程式辨識時所面臨的問題為無法客觀定義高速區塊；最後仍選擇自動辨識方法，但主要以辨識沿流向流速在跨流向上的相對最高速點位，不僅較第一、二種方法有效率且能克服上述所面臨的問題。



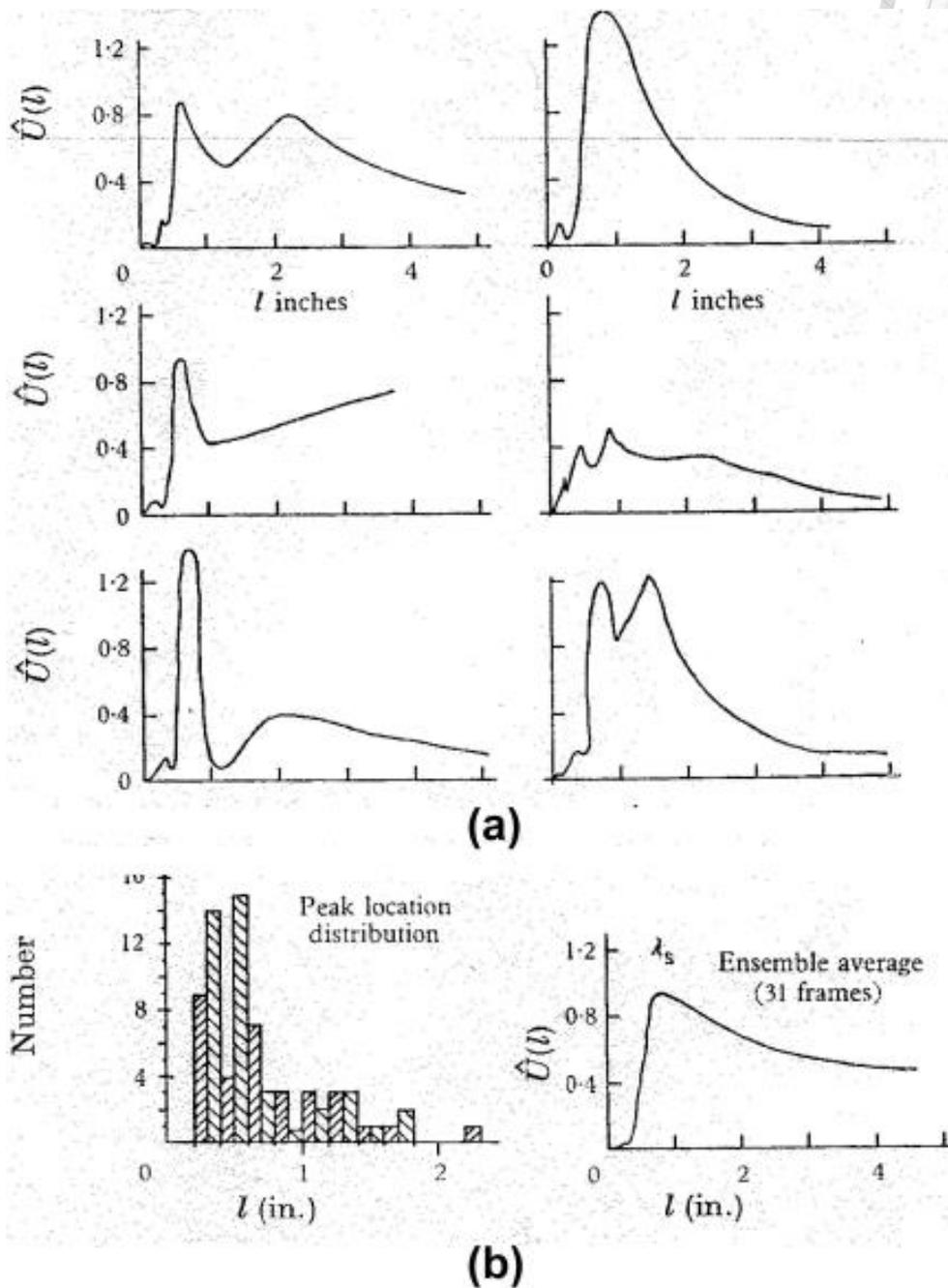


圖 3.1：沿流向流速在跨流向上瞬時頻譜分佈及平均頻譜分佈圖例。圖 a 為六張沿流向流速在跨流向上瞬時頻譜分佈，每張圖中曲線最高峰值對應周長，表示流場瞬時速度分佈中最可能的週期（即條痕間距）。圖 b 為一段時間中所有瞬時頻譜的平均分佈。左圖為將頻譜分佈曲線峰值所對應的週期長度依適當帶寬累計次數之直方圖，次數最高的週期長度則可能為平均條痕間距；右圖則將所有頻譜分佈曲線疊加後平均，其平均曲線之峰值所對應的週期長度，則代表該段時間內可能的平均條痕間距。(來源：Kline 等(1967))

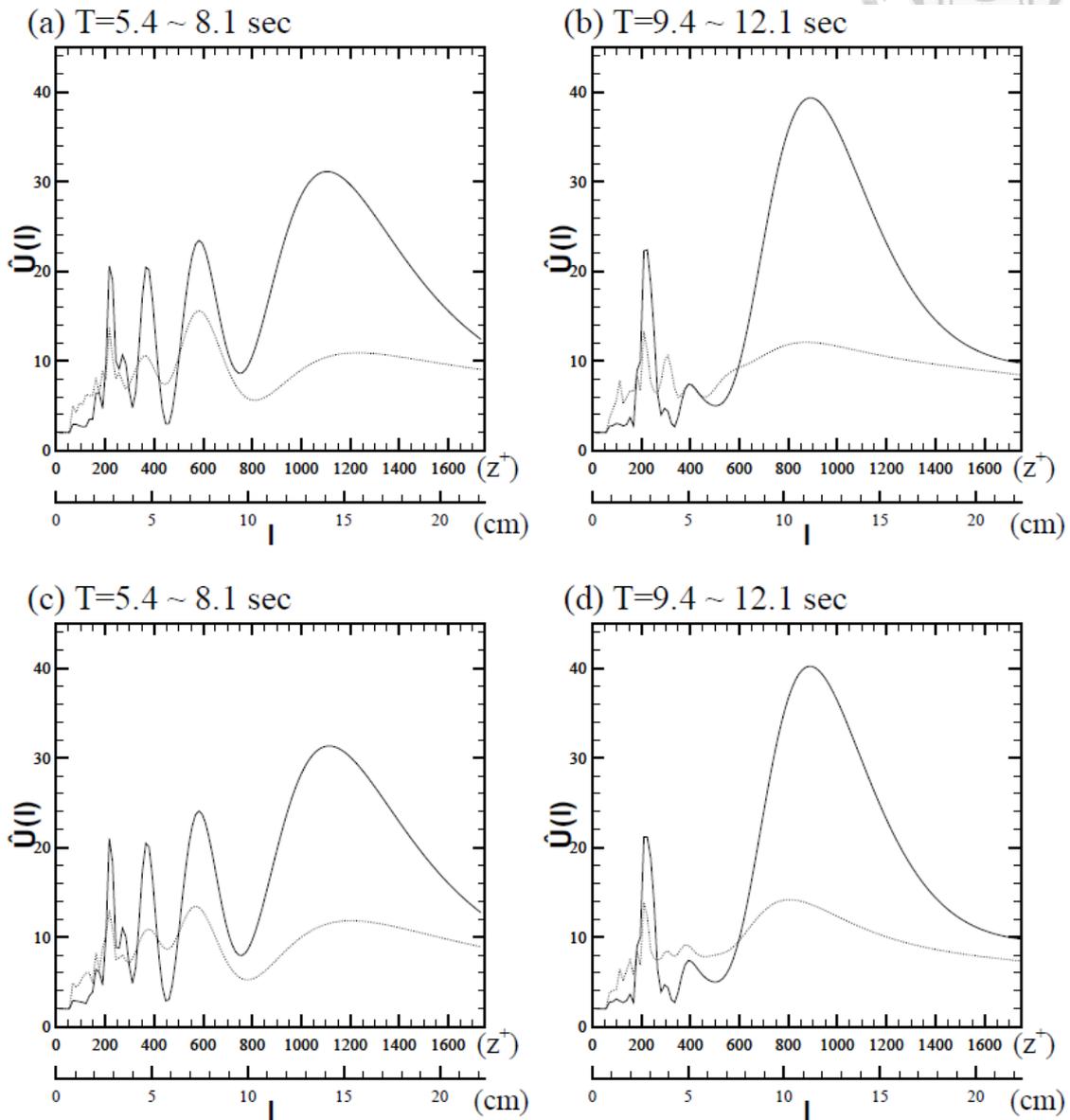
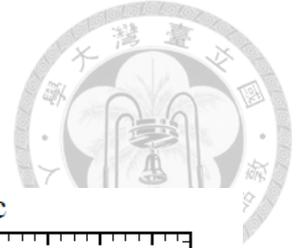


圖 3.2：風速 5m/s 在沿流向流速的頻譜分佈圖。實線為利用整個水面計算截線上的平均流速計算取得頻譜分佈函數；虛線為利用單一截線上的平均流速計算取得頻譜分佈函數。圖 a 與圖 b 皆為平均取樣 10 個時間點的樣本平均頻譜分佈；圖 c 與圖 d 皆為平均取樣 60 個時間點的樣本平均頻譜分佈。同時段中，頻譜分佈曲線趨勢相同，且在不同的樣本數趨勢仍為一致。推測在任何時段，此風速計算出的頻譜分佈中，最小峰值約於 $z^+ = 220$ (約 2.8cm) 處。(來源：溫國暉 (2004))

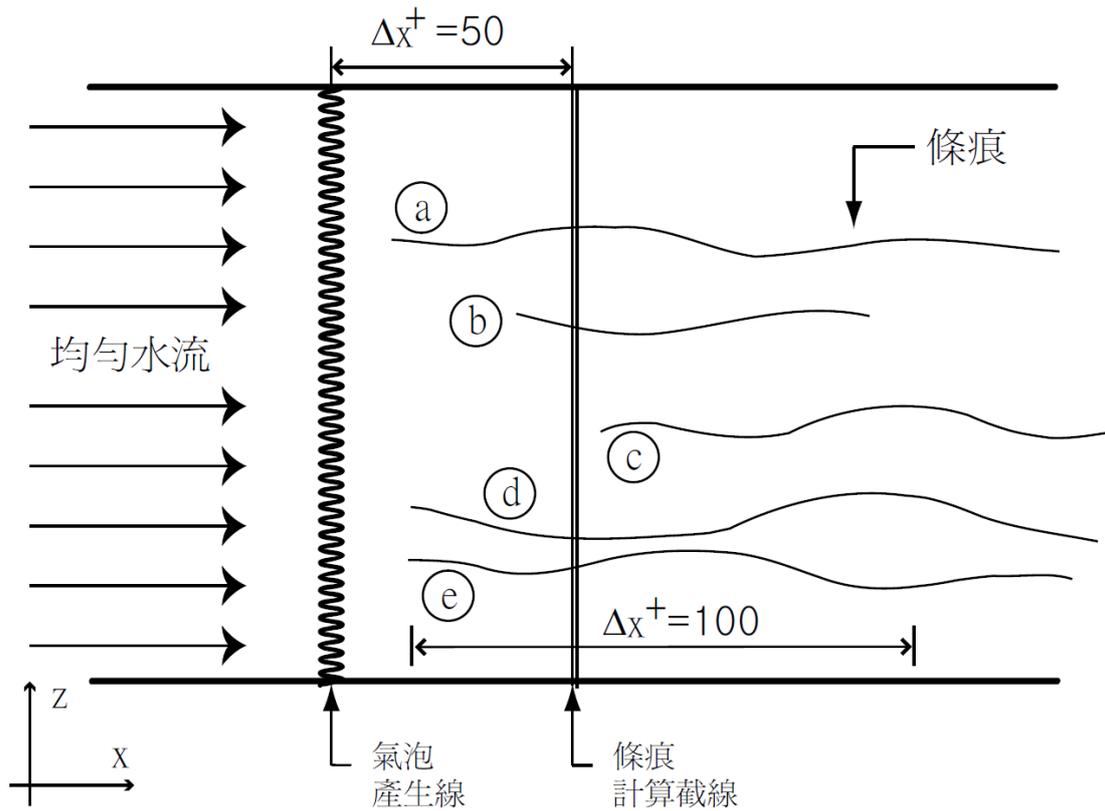


圖 3.3：條痕辨識示意圖。條痕 a，條痕貫穿計算截線且其長度超過 $\Delta x^+ = 100$ ，符合準則；條痕 b，其長度短於 $\Delta x^+ = 100$ ，不符合準則；條痕 c，其長度超過 $\Delta x^+ = 100$ ，但未貫穿計算截線，不符合準則；條痕 d 與條痕 e，兩條痕條皆貫穿計算截線且其長度超過 $\Delta x^+ = 100$ ，雖然兩條痕很接近，但沒有設限最小間距，因此兩條痕皆分別記錄。(來源：溫國暉(2004))

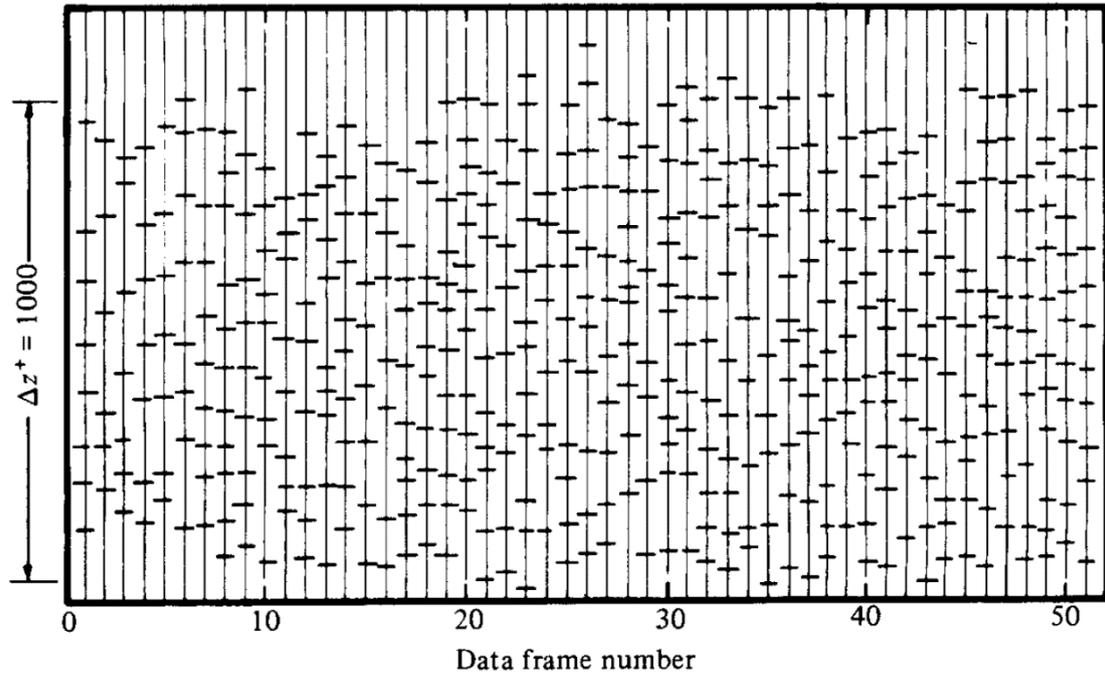


圖 3.4：計算條痕出現位置的透明記錄板。鉑線放置於接近水槽底部的位置，流場的雷諾數 $Re_\theta = 1490$ 。橫軸為每一張影像時間的變化 $\Delta t = 0.833 \text{ s}$ 。每一條直線為每一張影像的計算截線，每條直線上的短橫線為該張影像中條痕通過計算截線所標記的位置。(來源：Smith & Metzler (1983))

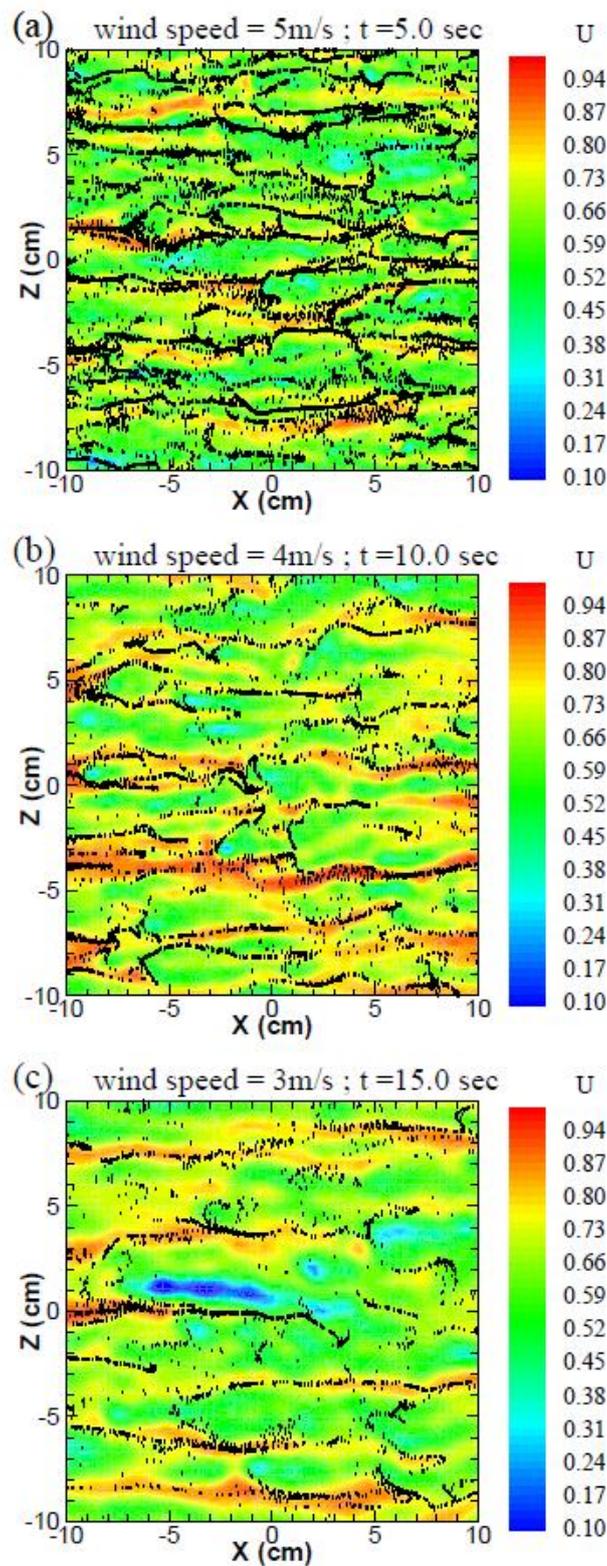


圖 3.5：追跡質點散佈位置與沿流向流速 u 等值區塊比較圖。風向由左至右，等值區塊數值為沿流向流速與模擬特徵速度的比值。圖 a、圖 b 與圖 c 分別模擬風速為 5m/s、4m/s 與 3m/s，條痕位置與水面沿流向流速的高速位置相吻合。(來源：溫國暉 (2004))

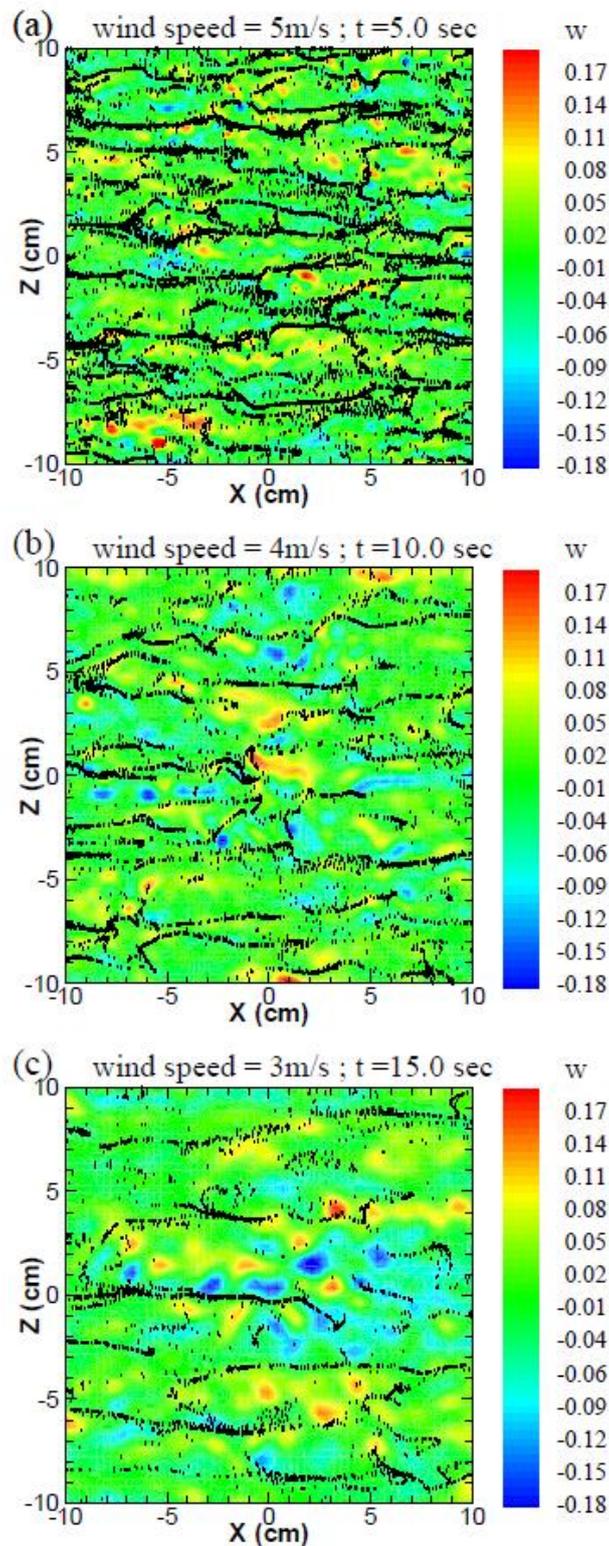
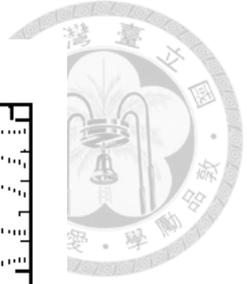
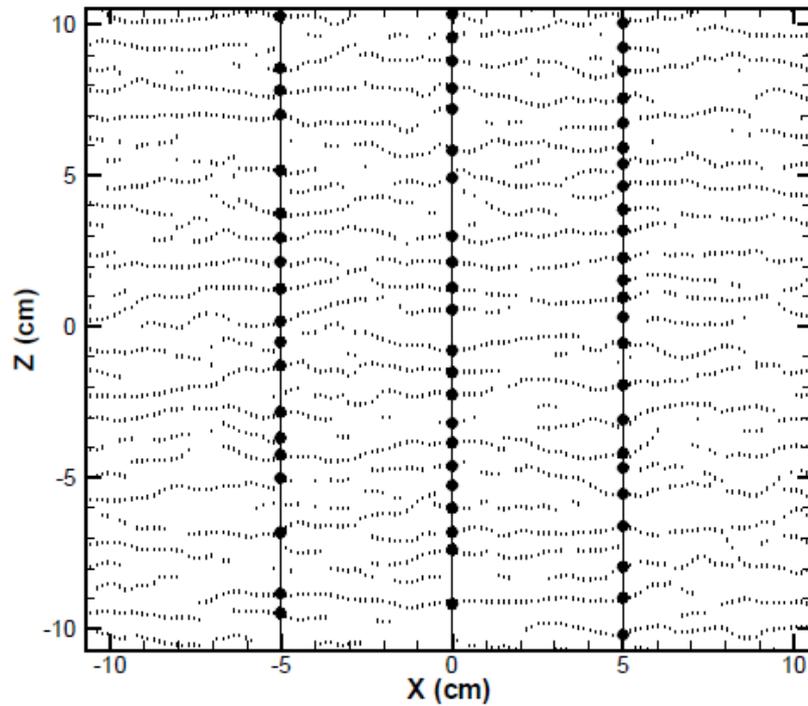


圖 3.6：追跡質點散佈位置與跨流向流速 w 等值區塊比較圖。風向由左至右。等值區塊數值為跨流向流速與模擬特徵速度的比值，正值偏向紅色，負值則偏向藍色。圖 a、圖 b 與圖 c 分別模擬風速為 5m/s、4m/s 與 3m/s，條痕位置與水面跨流向流速等值區塊較無關聯。(來源：溫國暉 (2004))



(a) wind speed = 5m/s ; t = 6.3sec



(b) wind speed = 5m/s ; t = 6.3sec

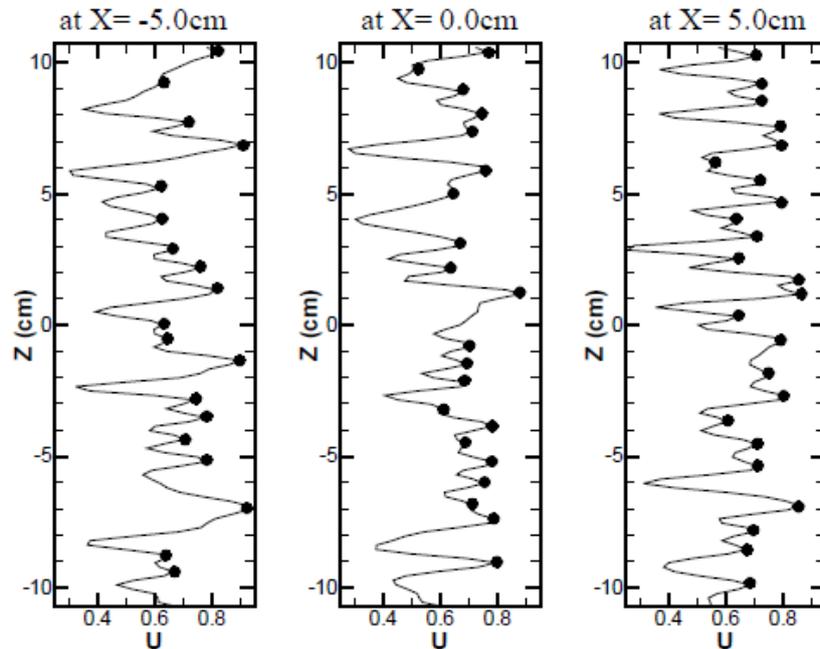


圖 3.7：沿流向流速於跨流向上的相對最高速點位。圖 a 為沿流向流速相對最高速點位分佈圖。模擬風速為 5m/s，風向由左至右，取樣時間 $t = 6.3s$ ；圖中的每一個點位（黑點）皆為沿流向流速在跨流向上相對最高速位置。圖 b 為三張沿流向流速在跨流向上的速度分佈圖。由左至右分別在 $x = -5.0cm$ 、 $x = 0.0cm$ 及 $x = 5.0cm$ 的位置（圖 a 中的三條截線），在波峰處則為沿流向流速在跨流向上相對最高速的位置（黑點）。（來源：溫國暉 (2004)）

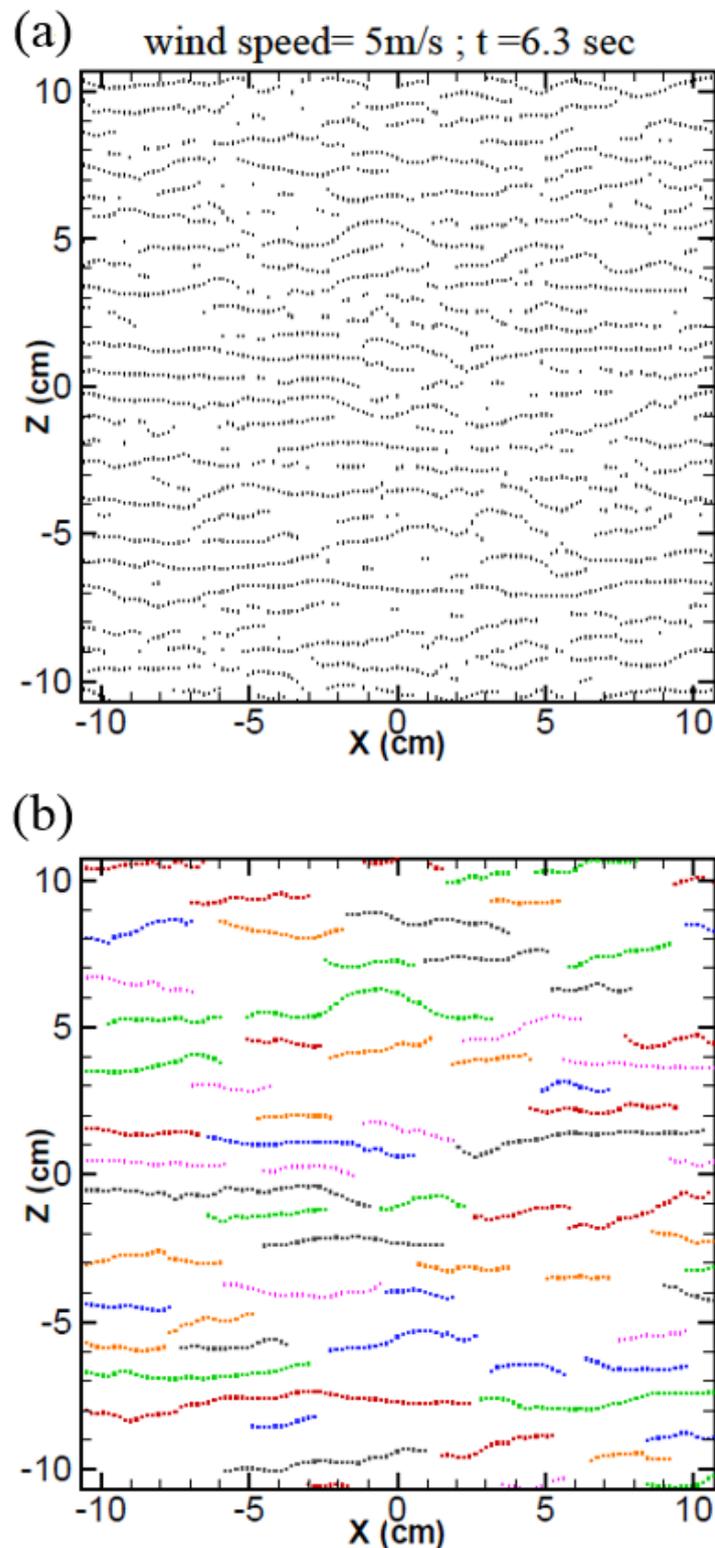
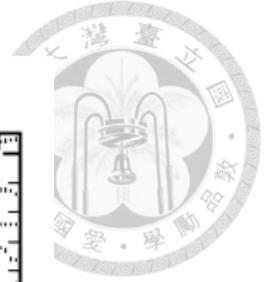


圖 3.8：模擬風速5 m/s，以沿流向流速相對最高速點位進行自動辨識的點位示意圖。風向由左至右，取樣時刻 $t = 6.3s$ 。圖 a 為該時刻水面上所有相對最高速點位分佈情況。圖 b 為程式所辨識出的條痕，每一顏色代表不同條痕。(來源：溫國暉 (2004))



3.2 雜訊去除 (noise removal)

實驗過程中，較難避免受到雜訊干擾。而大部分的雜訊出自於一個序列中，產生快速震盪的高頻資料；以此次分析熱圖像資料為例，可能因實驗裝置（如：紅外線照相機）、人為關係或者在信號傳遞過程中，受到干擾等因素產生雜訊。若以此資料直接進行分析，則會產生誤判的情形（圖 3.9）。因此，利用兩種雜訊去除的方法，降低誤判的機率。一種為直方圖法，挑除影像中的極值，又稱離異值 (outlier) 或是胡椒鹽式雜訊 (salt-and-pepper noise)，如同影像上的亮暗點；另一種則為經驗模態分解法，將影像中的雜訊平滑化 (smoothing)，改善雜訊對影像的影響。

3.2.1 直方圖

應用品質管制 (Quality Control) 的概念，將實驗數據以直方圖 (histogram) 方式加以整理，使之簡單化，方能顯現數據分佈的情況。若數據愈遠離主要分佈的位置，即可能為胡椒式雜訊，如圖 3.9(a)。

實際步驟為將實驗數據區分為若干個類組，並累計出現在各類組內數據的次數，並觀察實驗數據分佈之狀況。本研究之數據極大值與極小值分別為 1 和 0，將該範圍內劃分成 3000 個類組，並取適當的實驗數據之數量，各別統計數據所屬類組之累計量。

觀察欲分析之五種不同摩擦速度的實驗數據分佈，以直方圖（圖 3.10）呈現後，大部分實驗數據聚集在約 0.28 至 0.30 間，因此以累計次數最多的類組為中心，向兩側尋找類組累計個數少於 10 個且最接近中心類組則視為去除胡椒鹽式雜訊的判斷標準，若判定為離異值點位則以周圍相鄰的 8 個點位的平均值進行取代。界定離異值準則以不影響判斷紊流邊界層條痕結構的準確性為主，從選定的標準中發現離異值比例約為 4‰；若類別個數分別以少於 5、10、15、20 個作為

界定標準時，所概括的有效值皆達到 99.5% 以上 (圖 3.10 及表 3.1 所示)，表示其
 界定標準對整體影像分析不造成顯著影響。



表 3.1：離異點的界定標準。

u^* (cm/s)	個數界定範圍內的有效值比例			
	5	10	15	20
0.20	99.693%	99.645%	99.628%	99.614%
0.29	99.693%	99.643%	99.626%	99.607%
0.47	99.691%	99.649%	99.625%	99.611%
0.76	99.695%	99.645%	99.620%	99.591%
1.3	99.681%	99.641%	99.619%	99.590%



3.2.2 經驗模態分解法

針對去除影像雜訊時，優先考量較少主觀判斷的因子，因此應用 Huang 等 (1998) 所發展的經驗模態分解法 (Empirical Mode Decomposition, 簡稱 EMD), 主要應用於分離流場中不同尺度的資料並進行探討。由於 EMD 主要針對一維的資料進行分析，若欲分析二維影像資料 (如本文章探討的熱圖像)，則應用 Long (2005) 所提出的 EMD 進行二維影像分析之方法；沿流向中，將每個切面的擾動分離依序排列成二維影像，從中可觀察分離的資料分佈情形及可能會對影像分析造成的影響，故利用此方法取出高頻擾動資料後，得以提高影像分析結果的準確性。

將原始資料以 EMD 依序分離出高頻到低頻的成份，而分離出的每一頻率稱為本質模態函數 (Intrinsic Mode Function, 簡稱 IMF)，若將每個 IMF 和最後所剩的殘餘值 (residue)，又稱為資料趨勢 (trend)，加總後則為原始資料；如圖 3.11(a) 所示，透過 EMD 將資料 (黑線) 分離出高頻擾動資料 (藍線) 與剩下的資料 (紅線)。簡單表示如下：

$$\text{Data} = \sum_{i=1}^n c_i + \text{residue} \quad (3.3)$$

上式中，Data 為原始資料； $\sum_{i=1}^n c_i$ 表示分離出的本質模態函數 (IMF) 總和；residue 為最後的殘餘值，即不屬於 IMF 的資料之趨勢。以圖 3.11(a) 分離出高頻擾動資料進行說明：將原始資料的區域極值 (local extrema) 構成上下兩條 cubic spline 曲線所形成之包絡線的平均值 (即為資料趨勢)，如圖 3.11(b) 所示。透過原始資料扣除包絡線的平均值後，即移除資料中最大頻率以外的成份，並將資料重複上述步驟直到兩條包絡線的平均值為零，表示兩條包絡線為對稱，此資料則為第一個 IMF，亦為資料中頻率最高的訊號，如圖 3.11(c) 所示。將原始資料扣除第一個 IMF 後，再依上述步驟分離資料中頻率次大的第二個 IMF，依序分離出

頻率由大到小的 IMF。當無法再取出 IMF 時，所剩的殘餘值則為資料之趨勢，又稱單調函數 (monotonic function)。

以此方法濾除熱圖像中，因輻射熱轉換至電訊號過程所產生的短波雜訊。運用 EMD 分離出最小尺度的短波資料為第一個 IMF 又稱模態 1 (mode 1) 與次小尺度的短波資料為第二個 IMF 亦稱作模態 2 (mode 2)。以摩擦速度 $u^* = 0.2 \text{ cm/s}$ 為例，選取熱圖像中，沿流向的三個位置 (即 $x = 15.56\text{cm}$ 、 $x = 23.34\text{cm}$ 、 $x = 31.12\text{cm}$) 於跨流向的溫度分佈圖，觀察去除短波前後的差異；EMD 分離短波雜訊後 (模態 1 與模態 2)，相較於原始資料更能突顯溫度分佈的趨勢 (圖 3.12)，其他摩擦速度亦有相同的結果 (見圖 3.13 至圖 3.16)。進一步將熱圖像中每個跨流向的資料分離出短波雜訊 (模態 1 與模態 2) 後，找出跨流向的相對低溫點位 (圖 3.17)，觀察到更清楚的條痕結構，不同摩擦速度亦有相同呈現 (見圖 3.18 至圖 3.21)。

因此透過分離數個模態並且比對原始影像，評斷出此實驗數據應捨去幾個模態為最適當；本研究取出模態 1 時，其較原始資料容易分析，但條痕結構仍不明顯。若取出模態 1 與模態 2 後，其更能顯現條痕結構，最後以取出兩個模態為最佳，不僅能夠有效地移除雜訊且仍保有影像中主要結構。

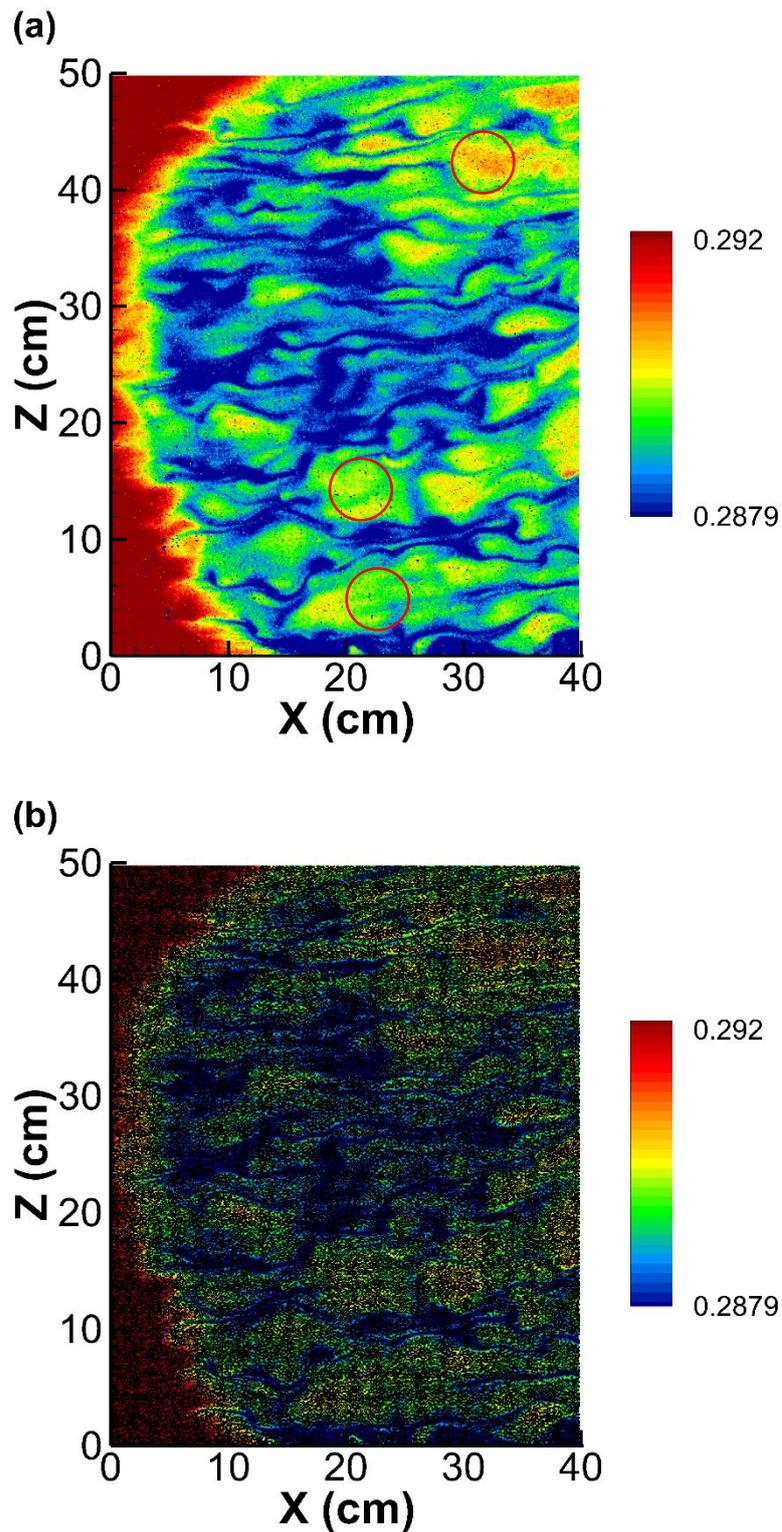


圖 3.9：實驗數據與相對低溫點位的對照圖。圖 a 為原始量測數據圖。其數據中存在許多胡椒式雜訊（紅圈內）。圖 b 為原始數據與相對低溫點位之疊合圖。其將熱圖像中，以溫度在跨流向上的相對低溫點（黑點）標示在圖 a 中，發現相對低溫點位佈滿整個影像，無法清楚觀測低溫條痕出現位置，其主要為嚴重雜訊干擾所致。

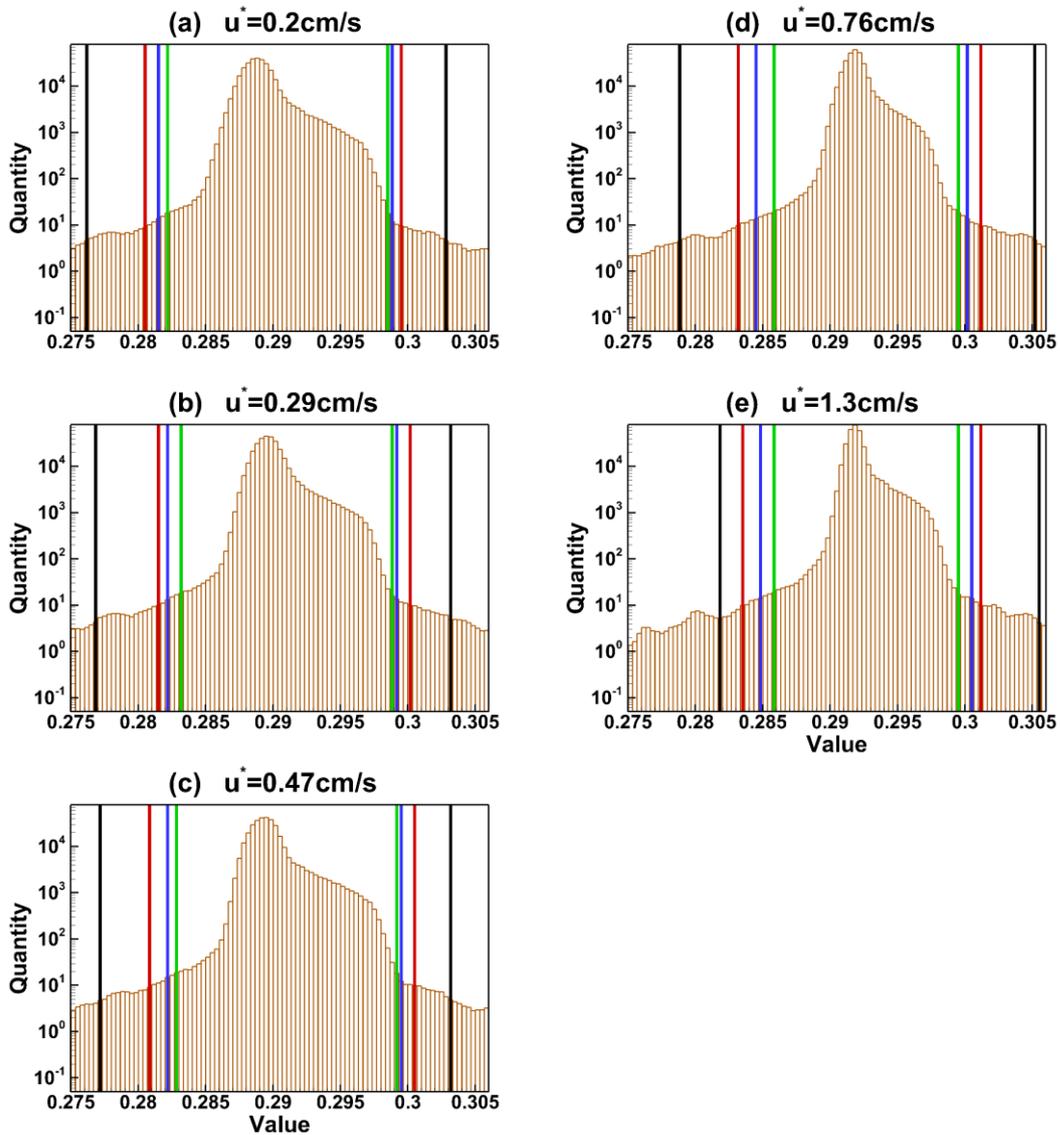
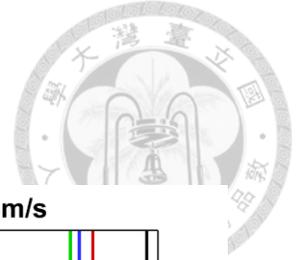


圖 3.10：水面溫度分佈圖。橫軸為水面溫度值分佈範圍 0 至 1 中，分成 3000 個類組，每一組距約 0.00033。縱軸為次數。褐色直方圖為水面溫度值分佈情形，發現數值主要集中於 0.28 至 0.30 間。黑線、紅線、藍線以及綠線分別為累計個數 5、10、15 及 20 個以下，以此作為去除離異值的門檻。圖 a、圖 b、圖 c、圖 d 以及圖 e 分別為 $u^* = 0.20 \text{ cm/s}$ 、 $u^* = 0.29 \text{ cm/s}$ 、 $u^* = 0.47 \text{ cm/s}$ 、 $u^* = 0.76 \text{ cm/s}$ 以及 $u^* = 1.3 \text{ cm/s}$ 。

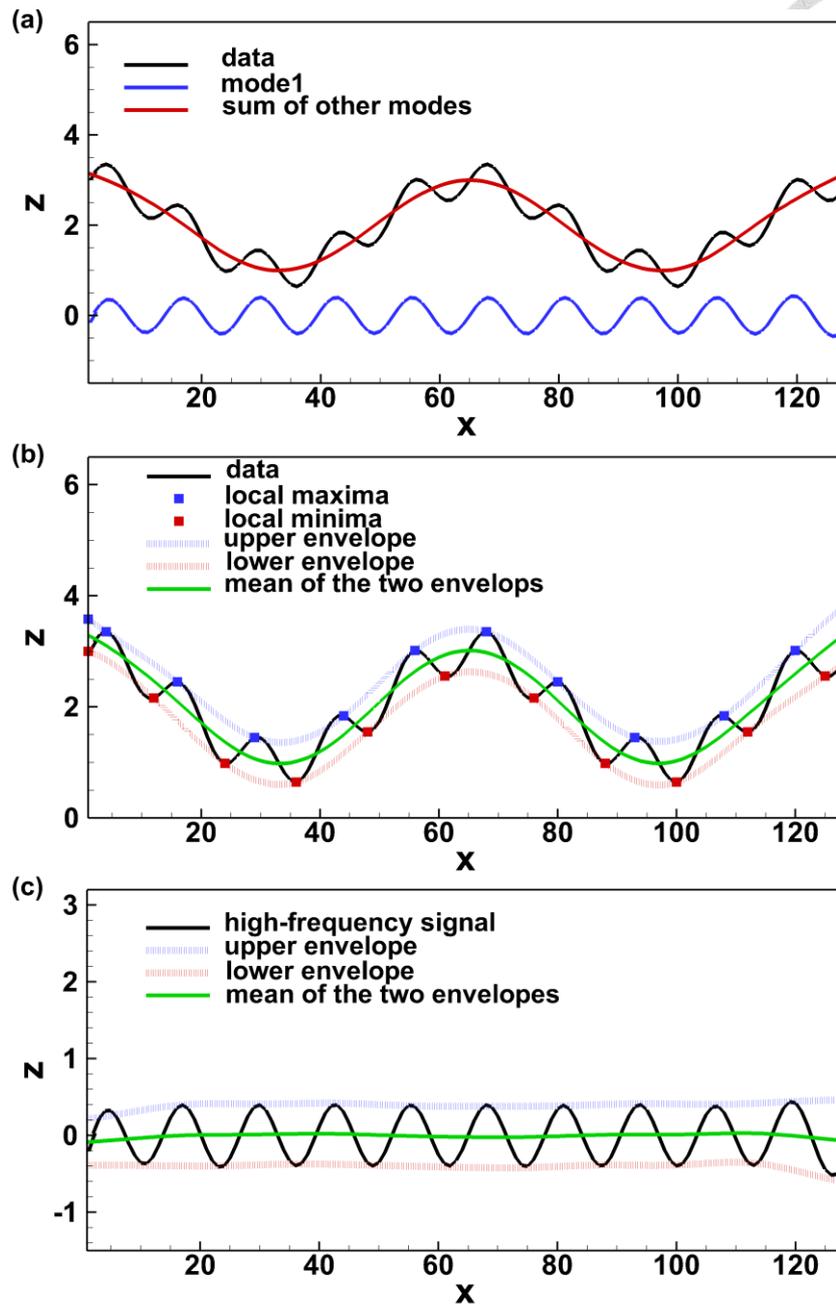
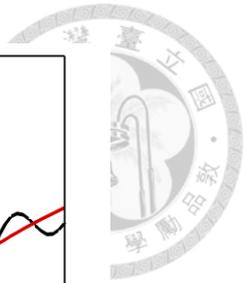


圖 3.11：利用 EMD 對 data 作分解。圖 a：黑線為欲分析資料，藍線為利用 EMD 分離出第一個 IMF (即模態 1)，紅線為取出模態 1 後，其餘模態的總合，而此資料僅為兩種模態組合，又稱為殘餘值 (即為資料趨勢)。圖 b 為包絡線值尋找方式。黑線為圖 a 所使用資料，藍色與紅色方框為區域的極大值與極小值，藍色與紅色虛線為區域極大值與極小值應用 cubic spline 建立的曲線，稱為包絡線，綠線為兩條包絡線的平均值。圖 c 為分離出模態 1 的過程。黑線為第一次進行圖 b 的計算方式後，將資料扣除包絡線的平均值，取得最高頻資料。藍虛線、紅虛線與綠線即為圖 b 所說明，重複上述步驟直到兩條包絡線的平均值為零，則完成模態 1 的分離。

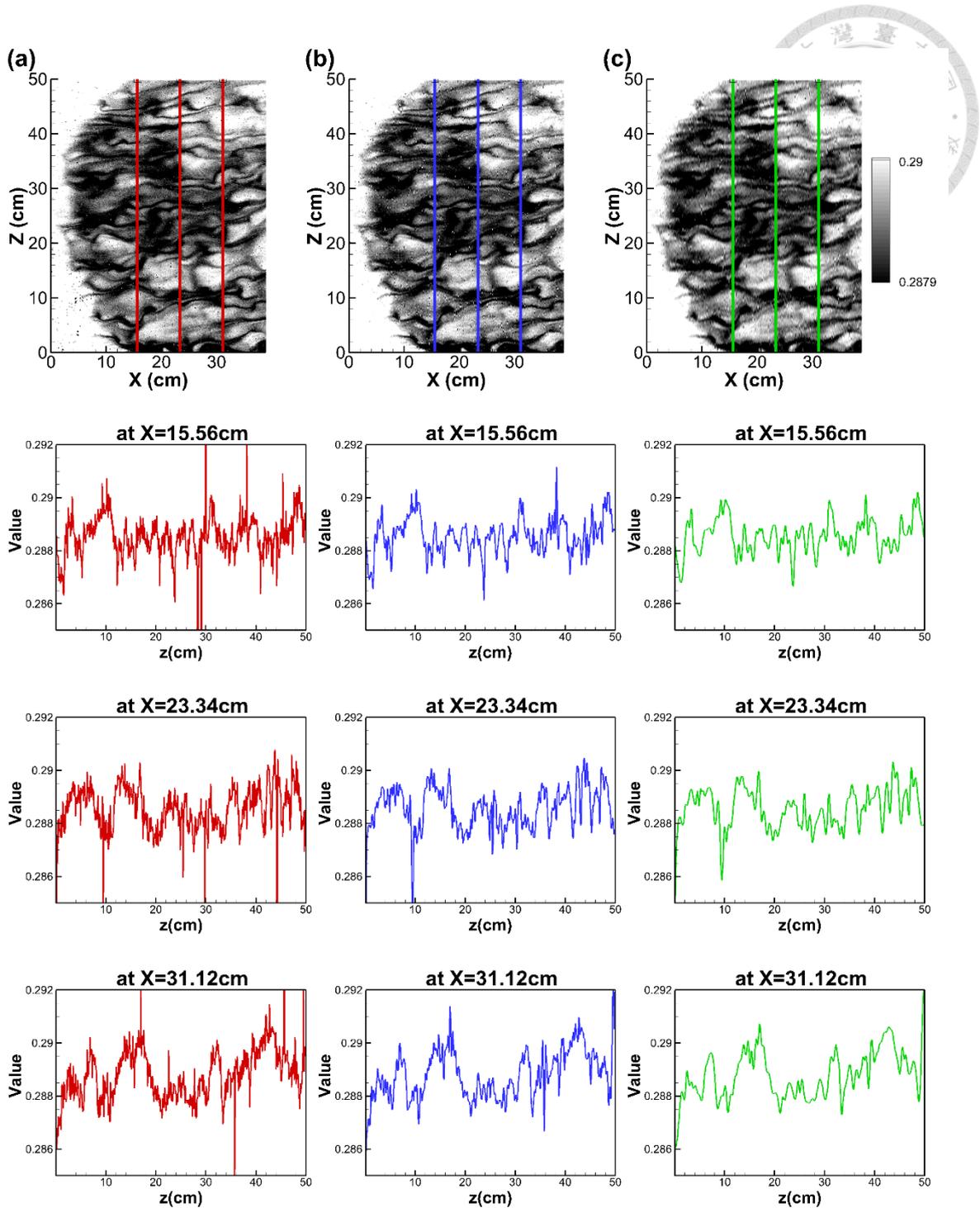


圖 3.12：摩擦速度 $u^* = 0.20 \text{ cm/s}$ ，雜訊去除前後的差異。應用 EMD 分離出熱圖像中模態 1 與模態 2 後的結果，並於其沿流向的三個位置 (即 $x = 15.56\text{cm}$ 、 $x = 23.34\text{cm}$ 、 $x = 31.12\text{cm}$) 於跨流向的溫度分佈圖。圖 a 為原始資料。圖 b 為分離出模態 1 後的資料。圖 c 為分離出模態 1 與模態 2 後的資料。當分離出模態 1 與模態 2 後，更清楚觀察其數據的趨勢。

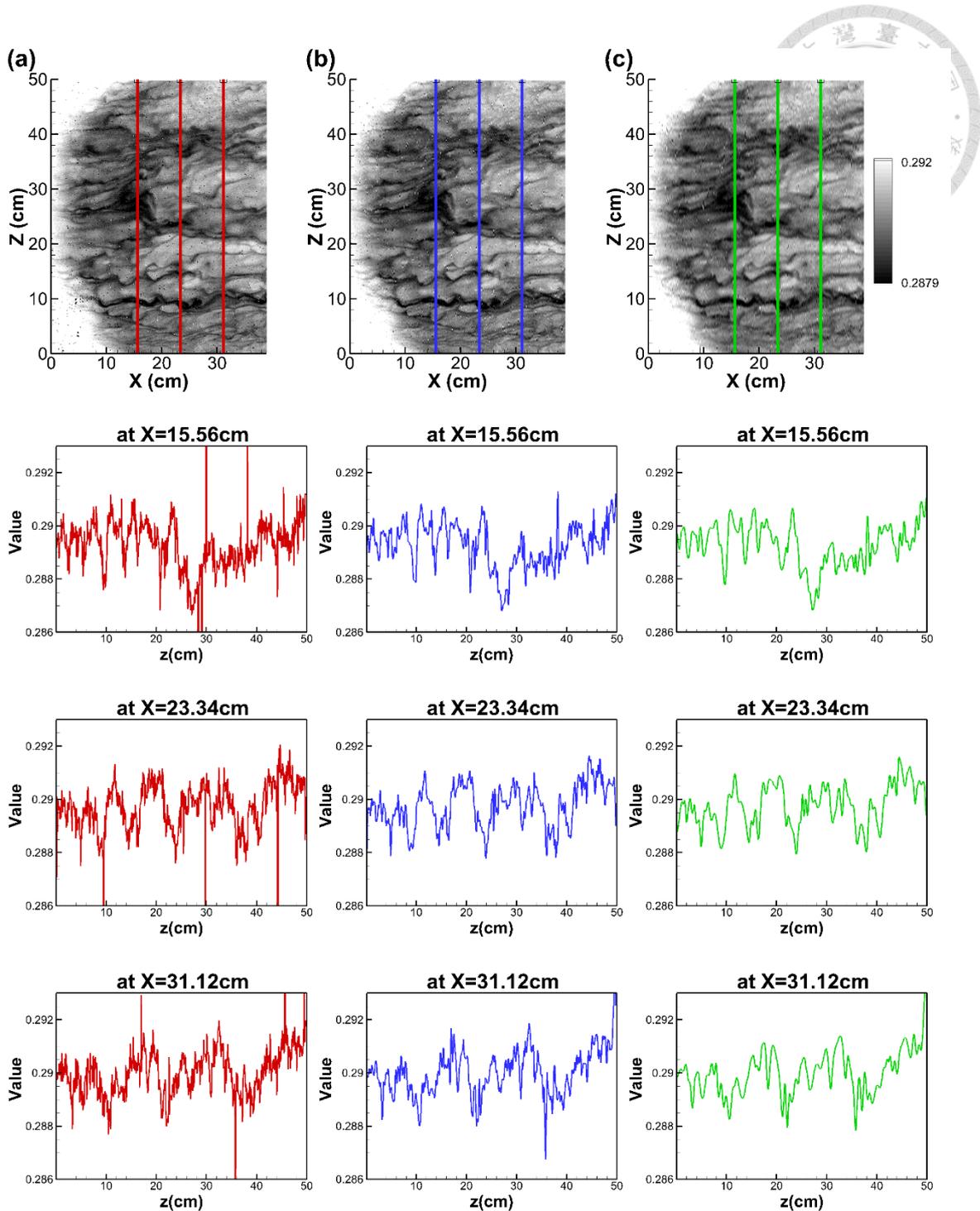


圖 3.13：摩擦速度 $u^* = 0.29 \text{ cm/s}$ ，雜訊去除前後的差異。應用 EMD 分離出熱圖像中模態 1 與模態 2 後的結果，並於其沿流向的三個位置 (即 $x = 15.56\text{cm}$ 、 $x = 23.34\text{cm}$ 、 $x = 31.12\text{cm}$) 於跨流向的溫度分佈圖。圖 a 為原始資料。圖 b 為分離出模態 1 後的資料。圖 c 為分離出模態 1 與模態 2 後的資料。當分離出模態 1 與模態 2 後，更清楚觀察其數據的趨勢。

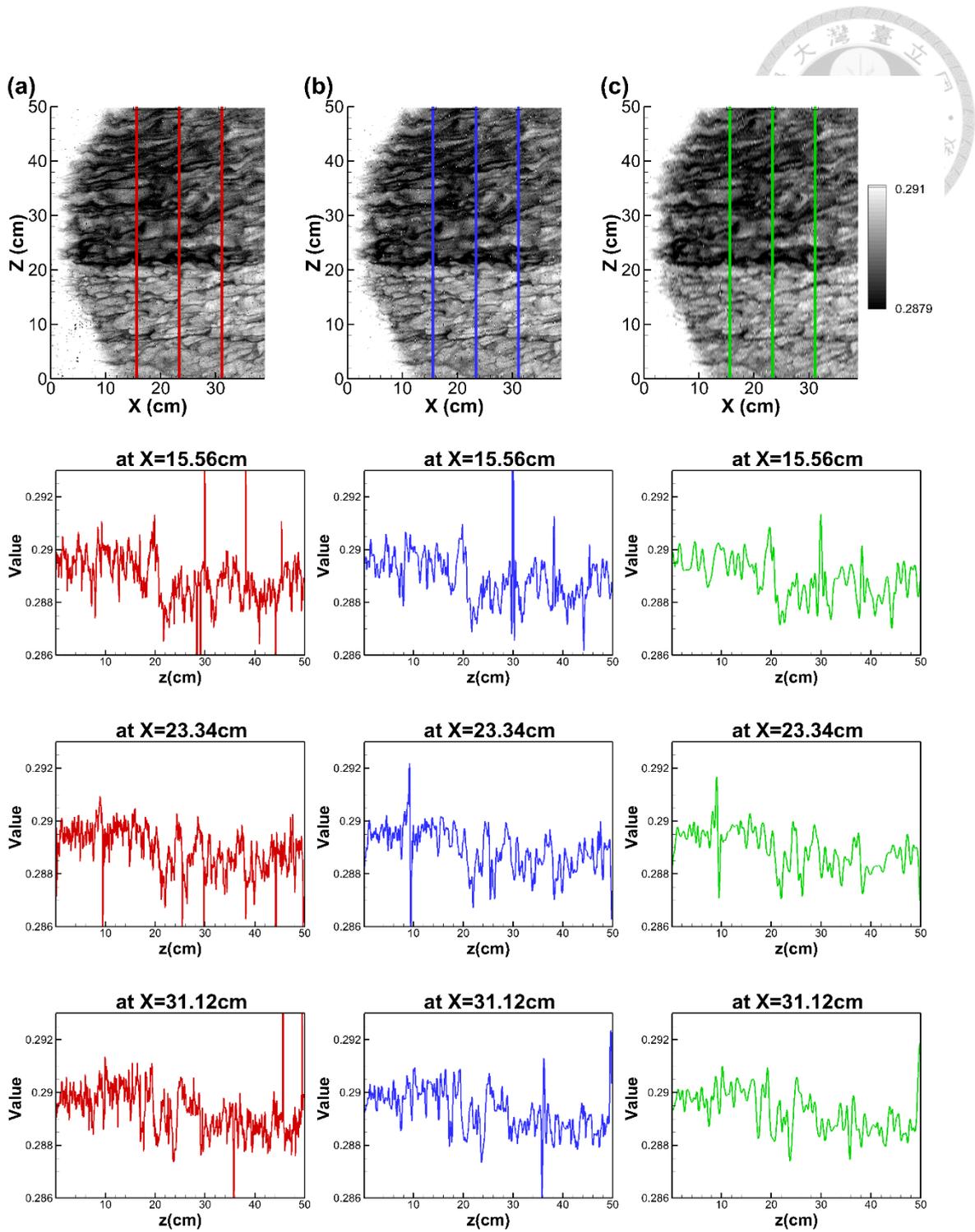


圖 3.14：摩擦速度 $u^* = 0.47\text{ cm/s}$ ，雜訊去除前後的差異。應用 EMD 分離出熱圖像中模態 1 與模態 2 後的結果，並於其沿流向的三個位置 (即 $x = 15.56\text{ cm}$ 、 $x = 23.34\text{ cm}$ 、 $x = 31.12\text{ cm}$) 於跨流向的溫度分佈圖。圖 a 為原始資料。圖 b 為分離出模態 1 後的資料。圖 c 為分離出模態 1 與模態 2 後的資料。當分離出模態 1 與模態 2 後，更清楚觀察其數據的趨勢。

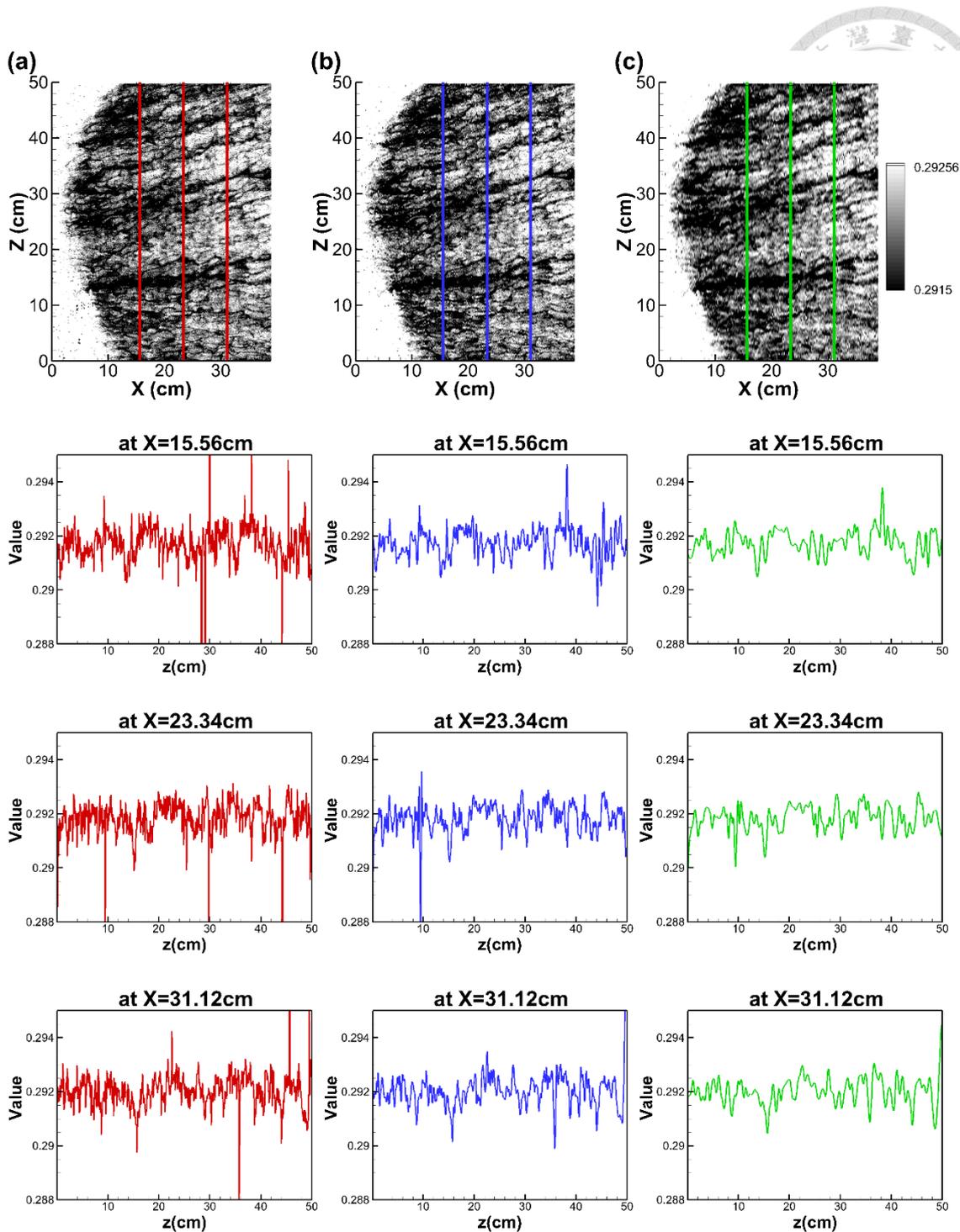


圖 3.15：摩擦速度 $u^* = 0.76 \text{ cm/s}$ ，雜訊去除前後的差異。應用 EMD 分離出熱圖像中模態 1 與模態 2 後的結果，並於其沿流向的三個位置 (即 $x = 15.56 \text{ cm}$ 、 $x = 23.34 \text{ cm}$ 、 $x = 31.12 \text{ cm}$) 於跨流向的溫度分佈圖。圖 a 為原始資料。圖 b 為分離出模態 1 後的資料。圖 c 為分離出模態 1 與模態 2 後的資料。當分離出模態 1 與模態 2 後，更清楚觀察其數據的趨勢。

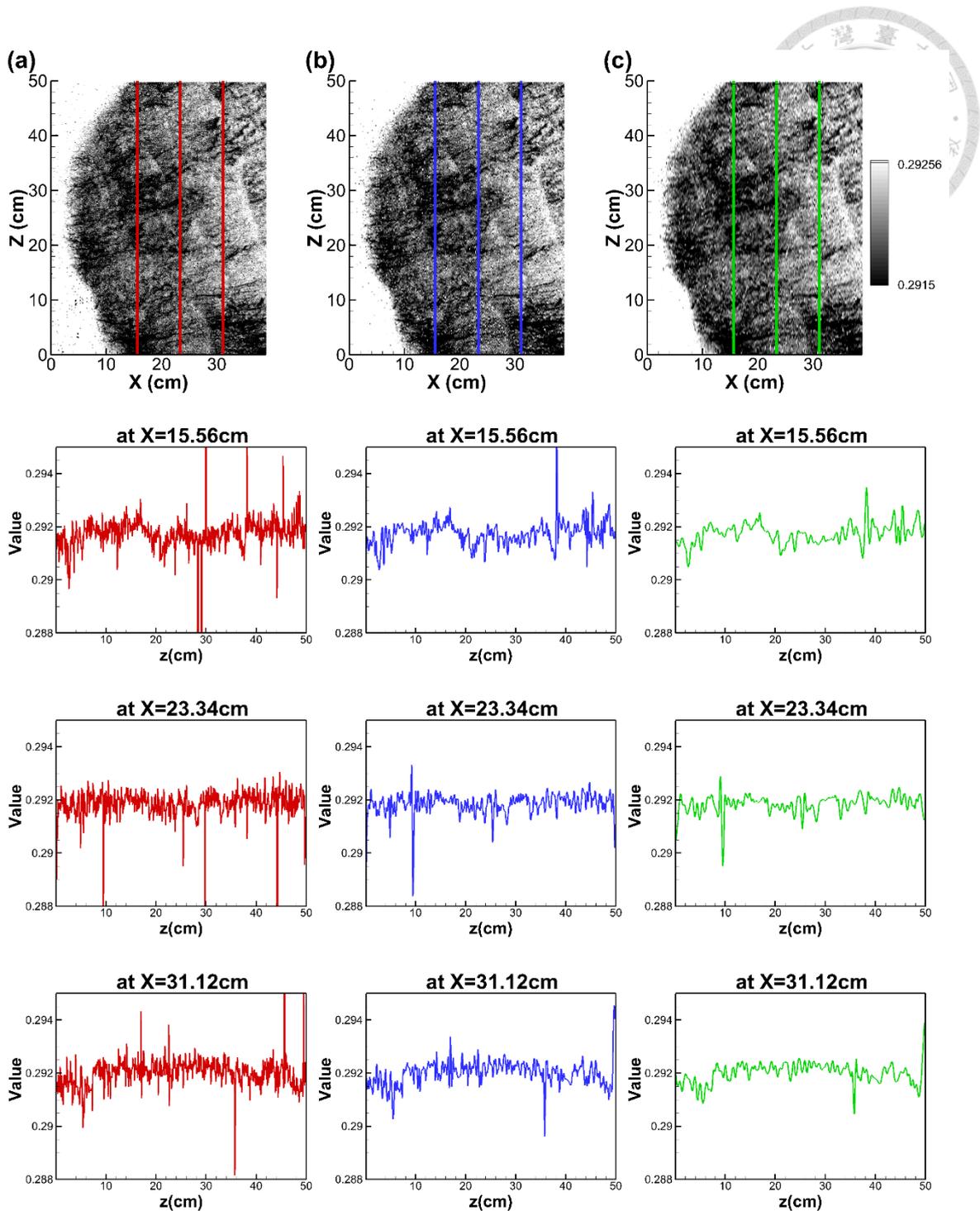


圖 3.16：摩擦速度 $u^* = 1.3 \text{ cm/s}$ ，雜訊去除前後的差異。應用 EMD 分離出熱圖像中模態 1 與模態 2 後的結果，並於其沿流向的三個位置 (即 $x = 15.56\text{cm}$ 、 $x = 23.34\text{cm}$ 、 $x = 31.12\text{cm}$) 於跨流向的溫度分佈圖。圖 a 為原始資料。圖 b 為分離出模態 1 後的資料。圖 c 為分離出模態 1 與模態 2 後的資料。當分離出模態 1 與模態 2 後，更清楚觀察其數據的趨勢。

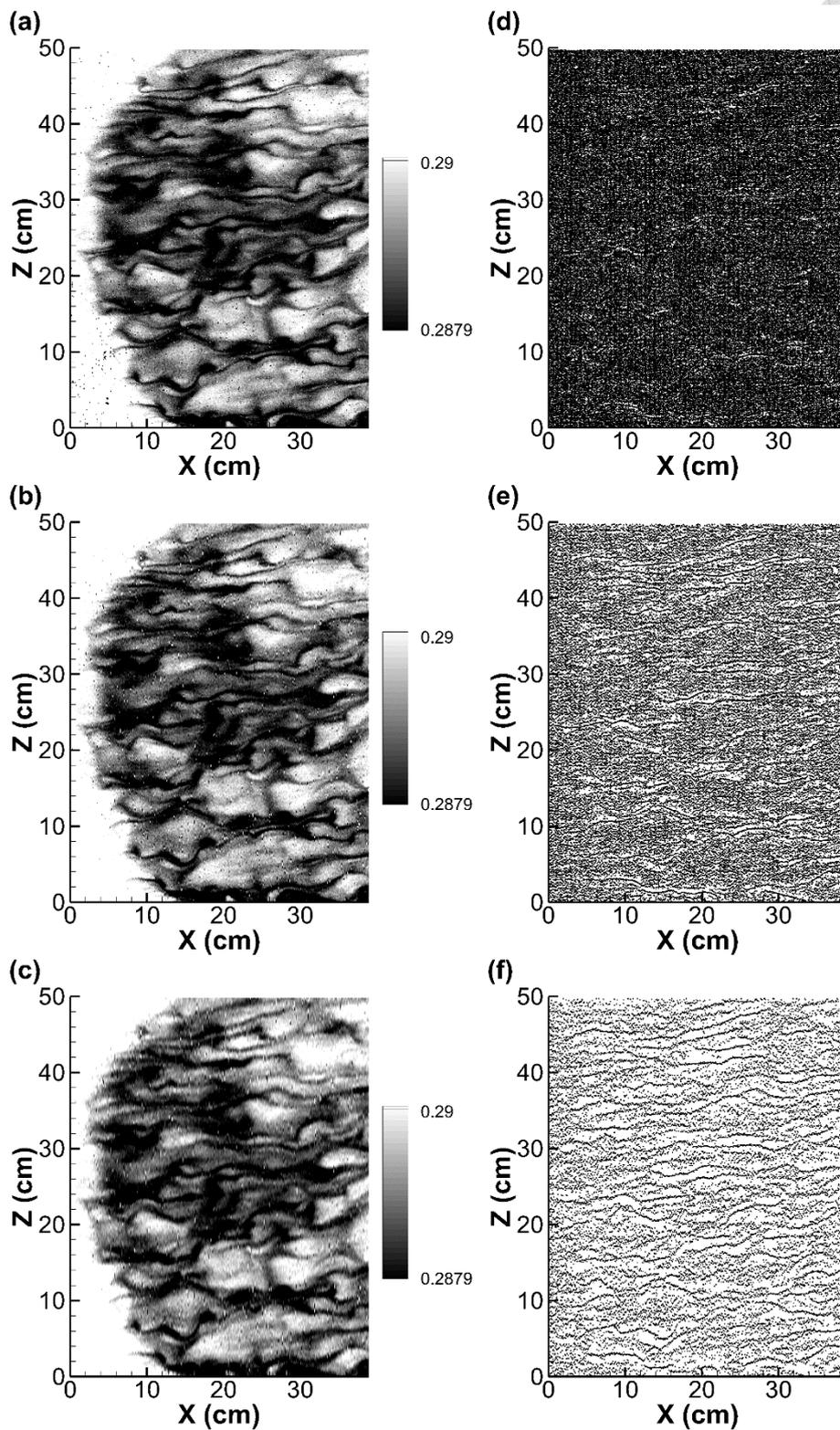


圖 3.17：摩擦速度 $u^* = 0.2 \text{ cm/s}$ ，雜訊去除前後所辨識出跨流向上的相對低溫點位之結果。圖 a、圖 b 與圖 c 分別為原始熱圖像、取出模態 1 後的熱圖像以及取出模態 1 和模態 2 後的熱圖像，並依序辨識出跨流向上的相對低溫點位分別對應圖 d、圖 e 與圖 f。當去除模態 1 與模態 2 後，其相對低溫點位分佈可以明顯觀察到條痕結構。

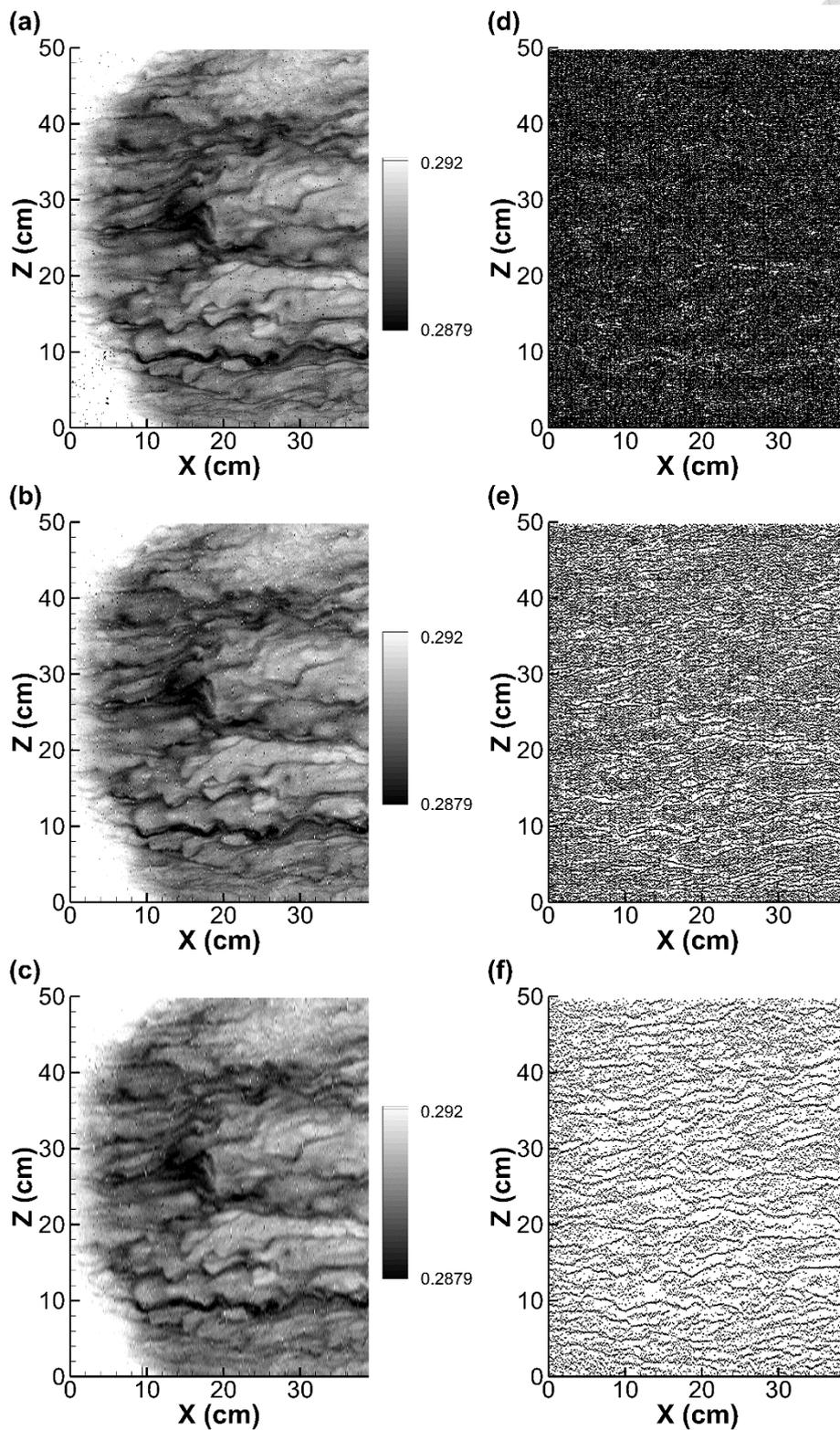


圖 3.18：摩擦速度 $u^* = 0.29 \text{ cm/s}$ ，雜訊去除前後所辨識出跨流向上的相對低溫點位之結果。圖 a、圖 b 與圖 c 分別為原始熱圖像、取出模態 1 後的熱圖像以及取出模態 1 和模態 2 後的熱圖像，並依序辨識出跨流向上的相對低溫點位分別對應圖 d、圖 e 與圖 f。當去除模態 1 與模態 2 後，其相對低溫點位分佈可以明顯觀察到條痕結構。

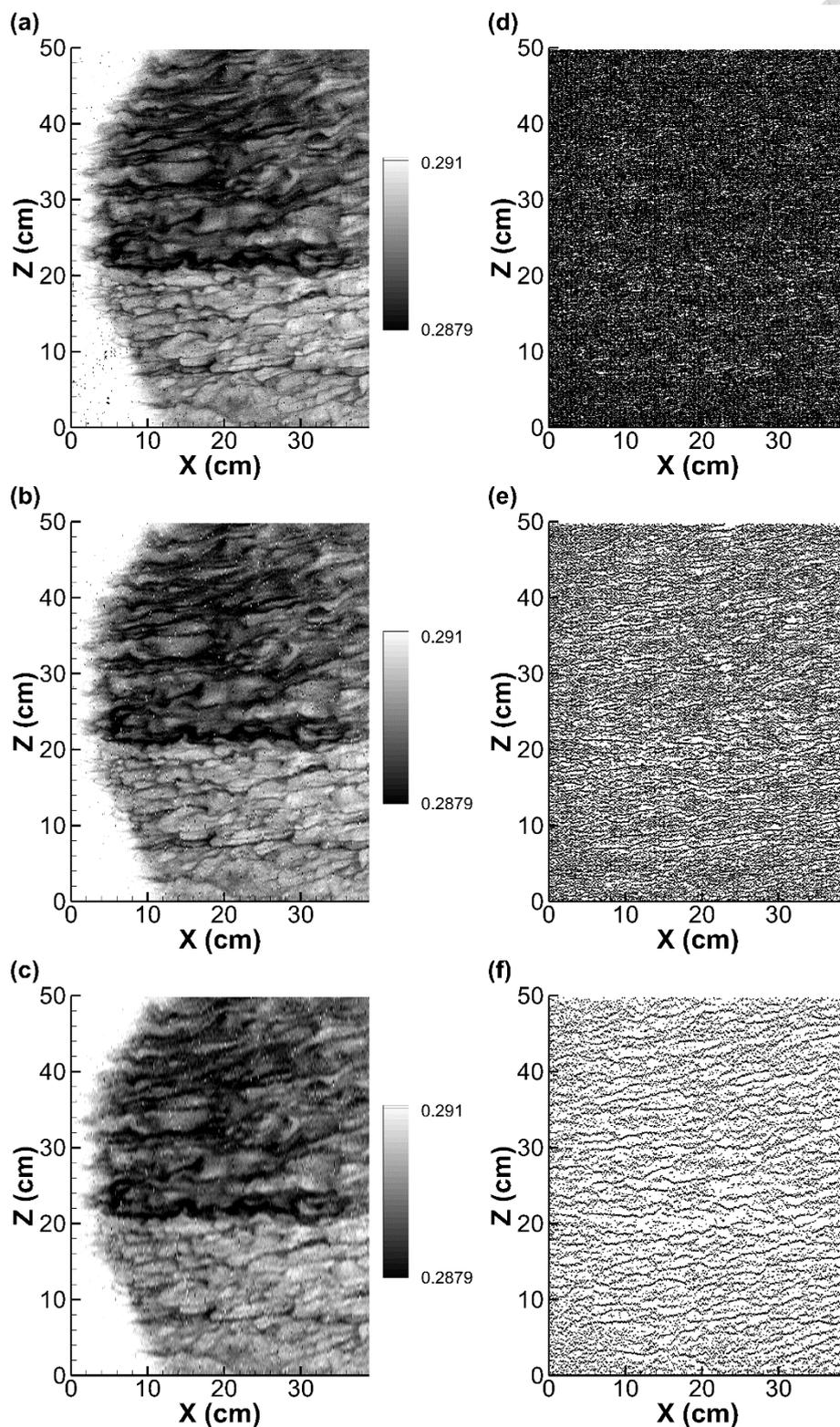


圖 3.19：摩擦速度 $u^* = 0.47 \text{ cm/s}$ ，雜訊去除前後所辨識出跨流向上的相對低溫點位之結果。圖 a、圖 b 與圖 c 分別為原始熱圖像、取出模態 1 後的熱圖像以及取出模態 1 和模態 2 後的熱圖像，並依序辨識出跨流向上的相對低溫點位分別對應圖 d、圖 e 與圖 f。當去除模態 1 與模態 2 後，其相對低溫點位分佈可以明顯觀察到條痕結構。

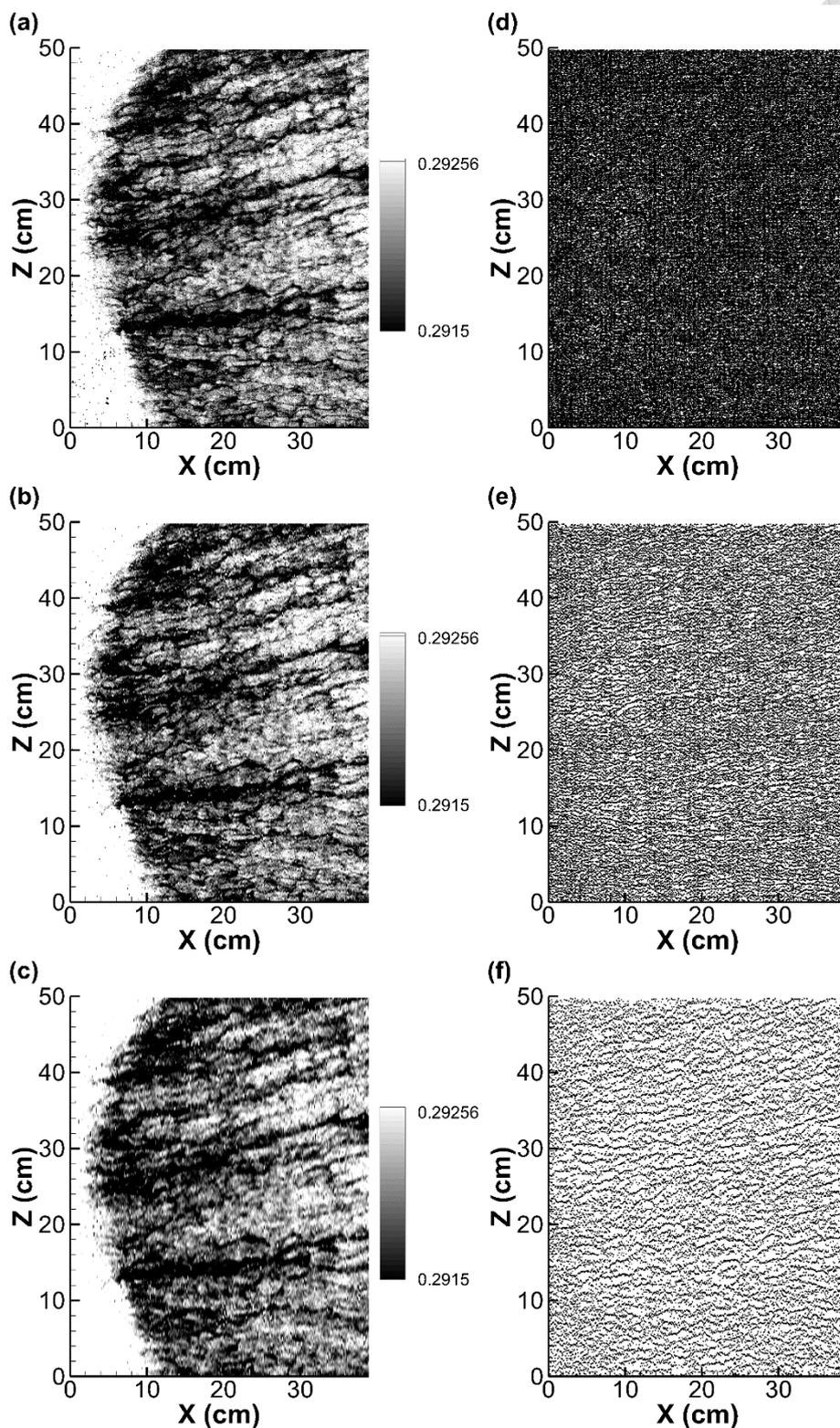


圖 3.20：摩擦速度 $u^* = 0.76 \text{ cm/s}$ ，雜訊去除前後所辨識出跨流向上的相對低溫點位之結果。圖 a、圖 b 與圖 c 分別為原始熱圖像、取出模態 1 後的熱圖像以及取出模態 1 和模態 2 後的熱圖像，並依序辨識出跨流向上的相對低溫點位分別對應圖 d、圖 e 與圖 f。當去除模態 1 與模態 2 後，其相對低溫點位分佈可以明顯觀察到條痕結構。

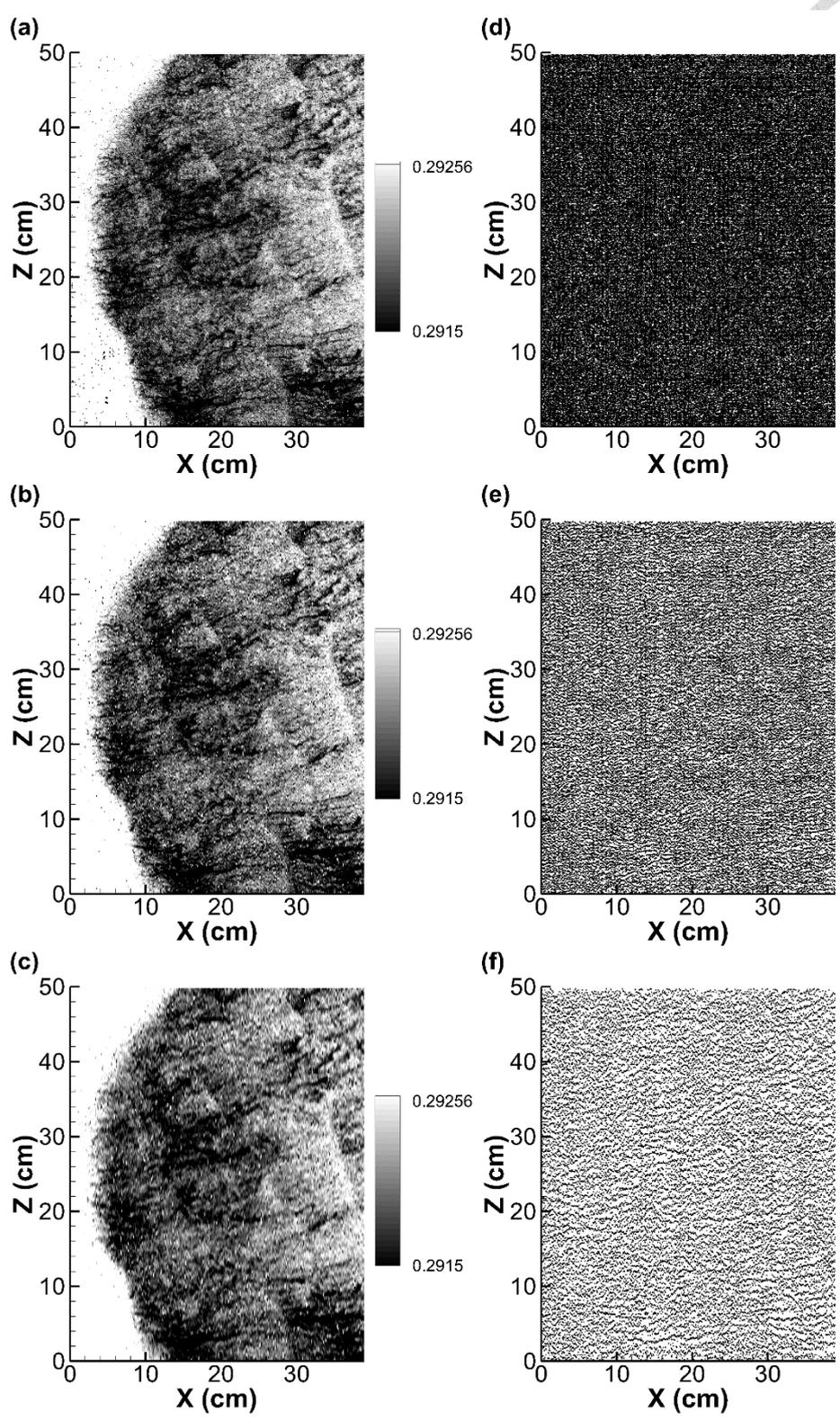


圖 3.21：摩擦速度 $u^* = 1.3 \text{ cm/s}$ ，雜訊去除前後所辨識出跨流向上的相對低溫點位之結果。圖 a、圖 b 與圖 c 分別為原始熱圖像、取出模態 1 後的熱圖像以及取出模態 1 和模態 2 後的熱圖像，並依序辨識出跨流向上的相對低溫點位分別對應圖 d、圖 e 與圖 f。當去除模態 1 與模態 2 後，其相對低溫點位分佈可以明顯觀察到條痕結構。



3.3 自動辨識步驟

本研究採用溫國暉 (2004) 分析水面紊流邊界層條痕結構的自動辨識方法：選用沿流向流速在跨流向上的相對最高速的位置進行條痕辨識。將其概念應用在辨識熱圖像中的低溫條痕，以溫度在跨流向的相對低溫點位作為判斷依據 (如圖 3.22 所示)，觀察到低溫條痕上確實有相對低溫點位的分佈 (圖 3.23a)。然而於非條痕處亦有出現標示低溫點位。這可能是因實驗過程中受到環境、儀器等影響產生的雜訊或者所調整的色階無法有效地呈現熱圖像中的所有條痕結構，所以實驗數據不如數值模擬數據般容易分析。而自動辨識則是將相對低溫點位連結在一起 (圖 3.23b)，透過適當的點位連結範圍及條痕成立準則，得以辨識出影像中的低溫條痕 (圖 3.24)。為了因應實驗數據的特性，進行條痕辨識時，需謹慎訂定「點位連結範圍」和「點位連結成群的標準」才能有較佳的判斷結果。

開始自動辨識前，欲用客觀標準決定「點位連結範圍」即兩點位之間距離若小於等於一個特定距離；換言之，以此範圍作為半徑，在該圓內所涵蓋的相對低溫點位，則視為同一族群的點位 (圖 3.25a)。步驟如下：

- 1、選定沿流向上特定位置，將該位置於跨流向上的所有相對低溫點位置進行標記，並計算相對低溫點的間距 (圖 3.22)。選取沿流向特定位置時，避免選於干擾嚴重的區塊，如圖 2.2 不同摩擦速度的熱圖像中，沿流向上約 0 至 10 公分處，溫度偏高的區塊 (偏向紅色處)，可能因拍攝角度之故，造成不易於觀測溫度分佈情形而較不適合選擇此區域，除了上述考量外，在其它位置則不受限。本研究主要選擇於圖像約略中間的位置：約 23.34 公分處。
- 2、取適當的影像數量 (本研究選取 400 張熱圖像)，計算每張影像在沿流向特定位置上相對低溫點位間之距離 λ_p (如圖 3.25b 雙箭頭所示)，進一步統計相對低溫點位間距之平均 $\overline{\lambda_p}$ 和標準差 σ_p 。
- 3、從步驟 2 計算出相對低溫點的平均間距和間距標準差，作為「點位連結範圍」

的基準。若點位連結範圍較大時，點位容易連結，所辨識出的條痕數也較多(圖 3.26a)。若點位連結範圍較小時，點位不易連結，則辨識出的條痕數較少(圖 3.26b)。因此，其範圍以相對低溫點位之平均間距扣除幾倍間距標準差為依據，分別以 $\bar{\lambda}_p - 1.0\sigma_p$ 、 $\bar{\lambda}_p - 1.25\sigma_p$ 、 $\bar{\lambda}_p - 1.5\sigma_p$ 和 $\bar{\lambda}_p - 2.0\sigma_p$ 四種連結範圍進行比較，觀察其中的差異並可能擬定最佳點位連結範圍。

實驗數據中受到雜訊干擾，所以於辨識上較為複雜，因此，我們訂定「點位連結成群的標準」以明確且有邏輯性的步驟判斷每個點位組別以及是否符合條痕標準。

1、將整個水面溫度在跨流向上的相對低溫點標記出來，以利迅速辨識各個點位所屬的族群(圖 3.22 及圖 3.23b)。

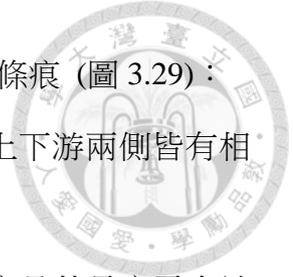
2、條痕的判定(以搜尋下游點位為例)：

(1) 以計算截線(即計算截線上下游兩側皆有相同族群點位分佈)上相對低溫點作為每一個族群的起始點位：以起點為中心，尋找小於等於點位連結範圍的最近之下游點位，作為新點位。以計算截線為界，下游尋找一個符合上述條件的新點位(如圖 3.27a 計算截線以右的黃色圓點)。

(2) 每回僅找出一個新點位作為下一次搜尋的中心點。依序上述條件尋找新點位，直到中心點搜尋不到該條件下的新點位，則該族群的下游點位已分組完畢，如圖 3.27(b) 所示。當有兩個點位以上離中心點距離相同時，分別說明兩種狀況：

- i. 當兩個點位皆於相同的沿流向之位置時，可選取任一點位，最後其辨識之結果相近(圖 3.28a)。
- ii. 點位在不同沿流向與跨流向之位置時，選擇距離中心點位之跨流向的最近點位(圖 3.28b)。

以計算截線為界，往上游進行點位連結時，則依上述步驟尋找每一個新點位皆小於等於點位連結範圍的最近之上游點位。



(3) 符合下述兩個條件，則視族群為一條在沿流向上延伸之條痕 (圖 3.29)：

- i. 同一族群需要貫穿計算截線，即為計算截線上下游兩側皆有相同族群點位分佈。
- ii. 將分完的一組，計算該組在沿流向上分佈長度且其長度需大於 100 個無因次長度單位 (即 $\Delta x^+ > 100$)，即紊流邊界層流場中，條痕長度的經驗值。

(4) 每條條痕貫穿計算截線位置僅有一個點位，則該點位視為條痕代表位置。

計算截線上每一個相對低溫點，各別進行步驟 (1)~(3)，直到計算截線上每個相對低溫點都進行判斷後，則停止辨識。

3、記錄計算截線上每一個條痕代表位置及條痕間距。

需主觀訂定的點位連結範圍，則分別以 $\bar{\lambda}_p - 1.0\sigma_p$ 、 $\bar{\lambda}_p - 1.25\sigma_p$ 、 $\bar{\lambda}_p - 1.5\sigma_p$ 與 $\bar{\lambda}_p - 2.0\sigma_p$ 進行條痕辨識後，來觀察自動辨識與人工辨識出條痕位置之差異性。當範圍較小 ($\bar{\lambda}_p - 2.0\sigma_p$) 時，以摩擦速度 0.2 cm/s 為例，條痕辨識結果與實際人工辨識有顯著的落差，如條痕數量明顯較少且長度較短，甚至會發生無法辨識出影像中條痕，推判可能因辨識範圍過小而導致點與點之間無法連結成群。當辨識範圍較大 ($\bar{\lambda}_p - 1.0\sigma_p$) 時，能清楚判斷出每一條痕，但條痕數量卻比實際人工辨識稍多些，此外發現與辨識範圍為 $\bar{\lambda}_p$ 時，判斷結果是相近的，可進一步說明，雖然採用嚴謹的辨識方法，但可能因辨識範圍過大，造成影像存在的雜訊仍被視為組成條痕之一的點位。從上述例子中，發現難以斷定適當的辨識範圍，但點位連結範圍會有特定某一範圍大小，當範圍太大時，則會將計算截線上全部的相對低溫點連結成條痕；當範圍過小時，則判斷出的條痕數銳減甚至判斷不出條痕，故辨識結果會因為主觀決定的點位連結範圍而有所差異。

觀察不同點位連結範圍，從圖 3.30 中發現當點位連結範圍標準愈寬鬆 (連結範圍大)，條痕數量愈多且沿流向長度較長，條痕數相較肉眼所觀測的結果為多；當點位連結範圍較為嚴格 (連結範圍小)，條痕數相對減少且長度可能會較短，但

與肉眼所觀測的結果較符合。當摩擦速度為 0.29 cm/s 與 0.47 cm/s 時，亦是如此(圖 3.31 和圖 3.32)，但摩擦速度為 0.76 cm/s 與 1.3 cm/s 時，則無法從影像中明顯察覺出點位連結範圍對辨識結果的影響(圖 3.33 和圖 3.34)。換言之，水分子產生劇烈的交互作用或者有碎波產生，致使水面溫度分佈較為紊亂。根據三位不同辨識者依上述條痕成立之條件進行人工辨識，發現其單張影像之結果與自動辨識中選用點位連結範圍為 $\bar{\lambda}_p - 1.5\sigma_p$ 之判斷結果較為吻合(表 3.2)。

另一需主觀決定的「點位連結成群的標準」中，主要為依循兩個準則：(1) 從計算截線作為點位連結的起點；(2) 每一回辨識僅尋找一個新點位。擬定這兩個準則的原因如下：此實驗數據存在過多的雜訊，即便在自動辨識前使用雜訊去除方法進行處理，卻無法有效去除全部雜訊。因此當整個影像進行自動辨識時，只要符合點位連結範圍的新點位，一律作為下一次的中心點位時，同一族群則會聚集成一大區塊(非條痕呈現)。而點位連結的起點選擇在不受雜訊影響嚴重的區塊即可，此研究選在計算截線上不僅不會影響判斷結果外，甚至可以減少自動辨識時間。

從上述說明如何嚴謹地訂定「點位連結範圍」與「點位連結成群的標準」，並比較數張影像的人工與自動辨識結果，其吻合度相當高，亦證明了相對低溫點位確實能代表條痕所在位置，且運用此方法能有效的省下時間與人力消耗，進而避免主觀意識之影響。

表 3.2：自動辨識與人工辨識單張影像之結果。

方法		條痕數	條痕間距數	平均間距 (cm)
自動辨識 (點位連結範圍)	$\bar{\lambda}_p - 1.0\sigma_p$	44	43	1.158
	$\bar{\lambda}_p - 1.25\sigma_p$	44	43	1.158
	$\bar{\lambda}_p - 1.5\sigma_p$	32	31	1.606
人工辨識	三位辨識者結果	27	26	1.915

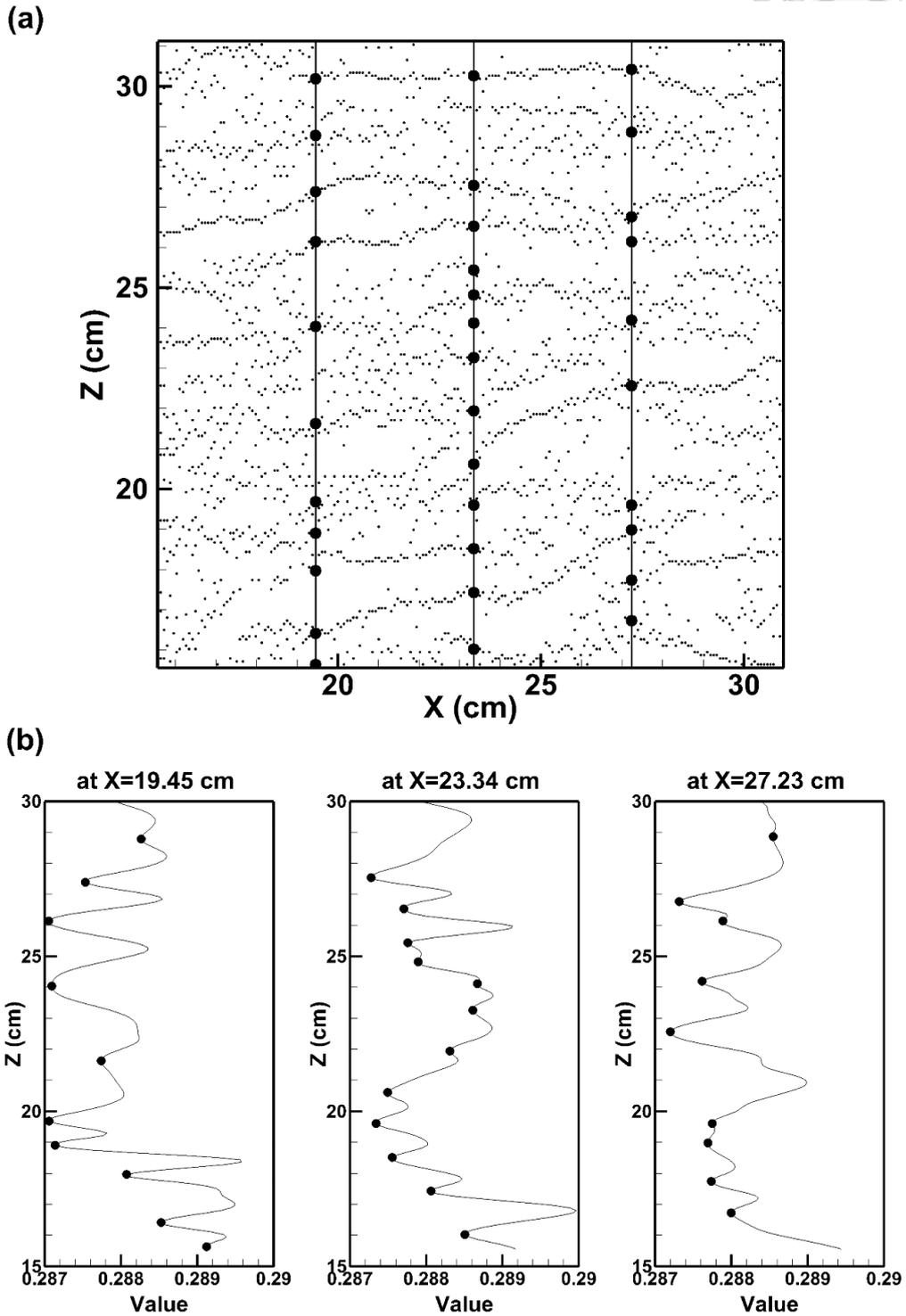
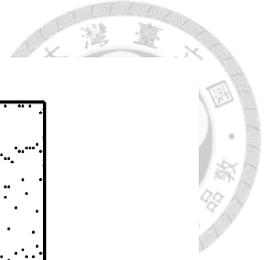


圖 3.22：溫度相對低溫點位分佈之示意圖。流向由左至右，摩擦速度為 0.2 cm/s 。
圖 a：小黑點為溫度在跨流向上相對低溫點位。圖 b 為三張溫度在跨流向上的相對低溫點位，由左至右分別對應圖 a 中 $x = 19.45 \text{ cm}$ 、 $x = 23.34 \text{ cm}$ 及 $x = 27.23 \text{ cm}$ 三處截線，圖中溫度分佈曲線上的波谷（跨流向上相對最小值）位置，即是圖 a 中三條計算截線上的黑點位置。

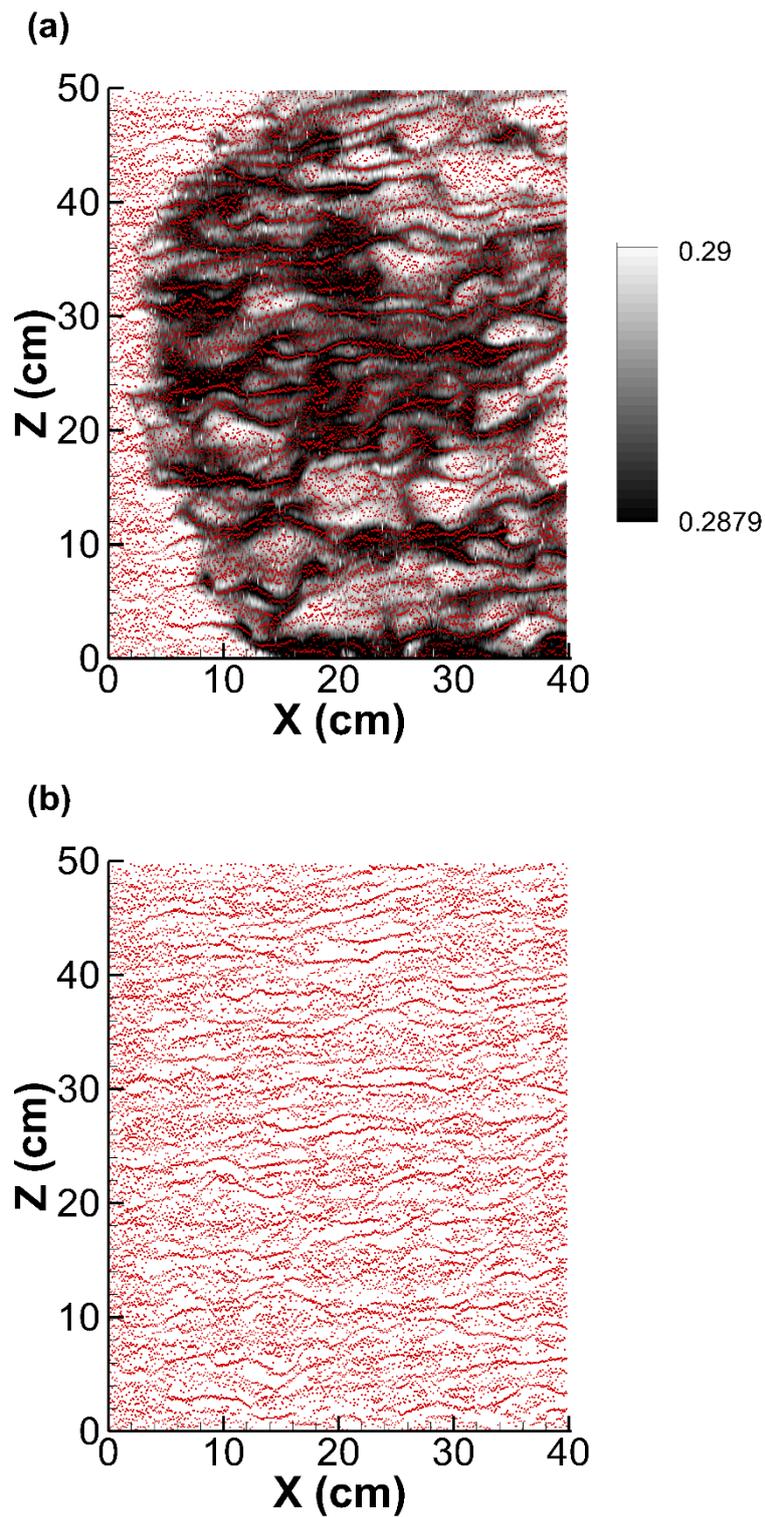


圖 3.23：熱圖像中，跨流向上相對低溫點位分佈圖。圖 a 為摩擦速度 $u^* = 0.2 \text{ cm/s}$ 的溫度分佈（以灰階顏色表示）與跨流向上相對低溫點位（以紅點表示）的疊合圖。圖 b 為跨流向上相對低溫點位（以紅點表示）示意圖。

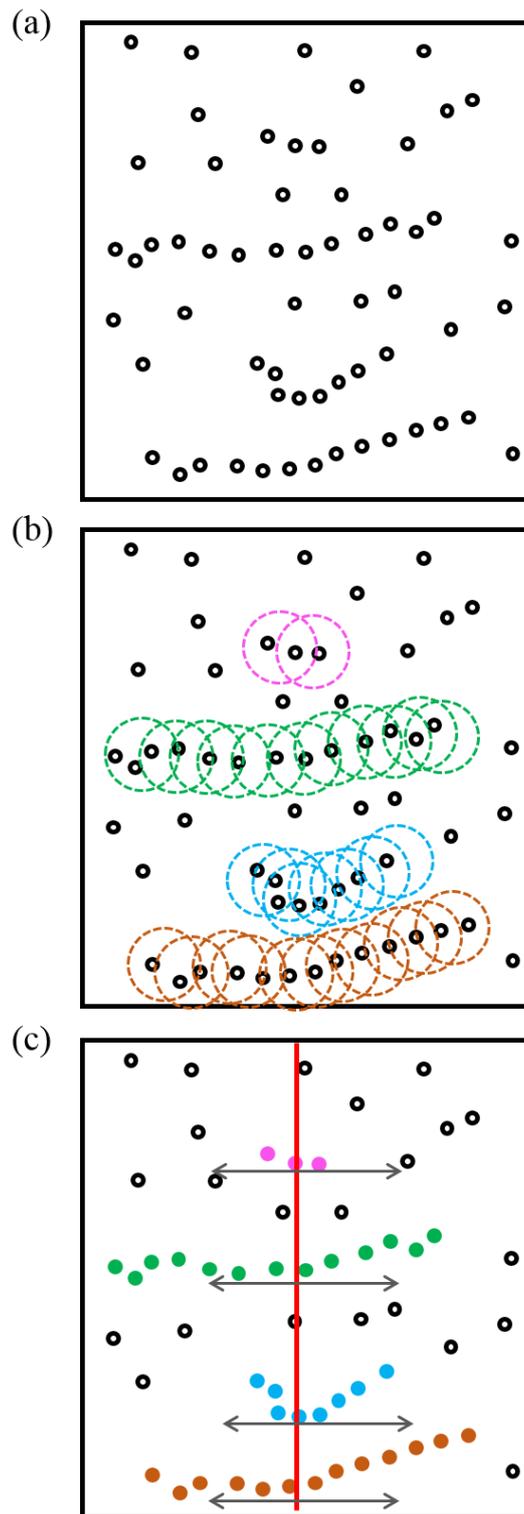
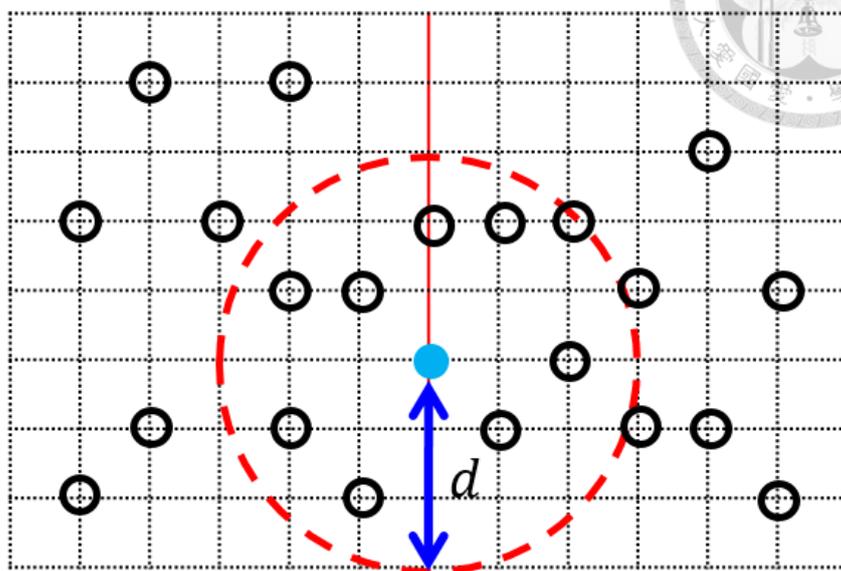


圖 3.24：自動辨識流程示意圖。小圓點皆為熱圖像中溫度在跨流向上的相對低溫點位。圖 a 為熱圖像中的相對低溫點位。圖 b 則將點位結連結成同一族群。圖中粉紅、綠、藍、褐色分別為四個不同的族群。圖 c 為條痕成立的準則。同一族群是否符合長度標準（雙箭頭）、是否貫穿計算截線（紅線），即為計算上下由兩側皆有同族點位分佈。



(a)



(b)

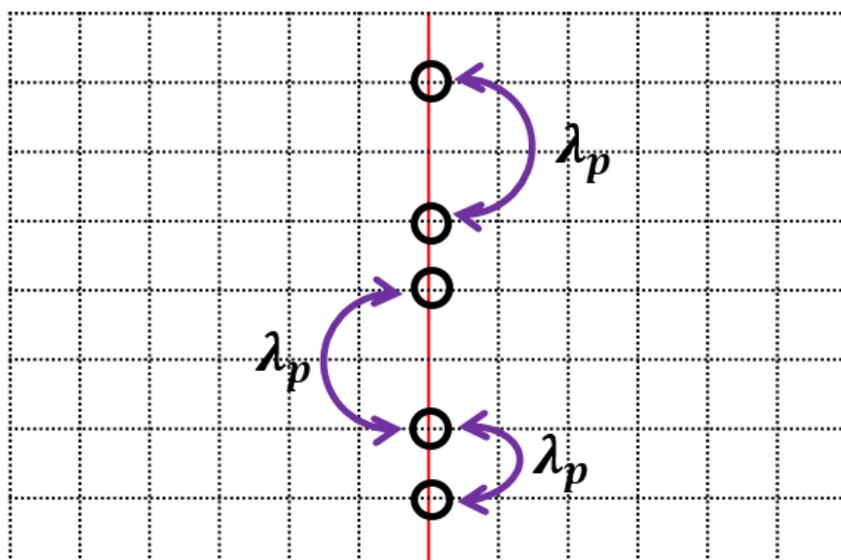


圖 3.25：點位連結範圍的定義與標準之示意圖。小圓點為跨流向上相對低溫點位。圖 a 為點位連結範圍的定義。以點位連結範圍 d 為半徑，該圓內（紅圓）所涵蓋的全部相對低溫點位，視為同一族群之點位。圖 b 為計算相對低溫點位的距離。選定熱圖像中沿流向上某一處作為計算位置（紅線），計算該處兩兩相對低溫點位之距離 λ_p ；選取數張影像，依上述方式計算相對低溫點之平均間距 $\bar{\lambda}_p$ 和間距標準差 σ_p 。

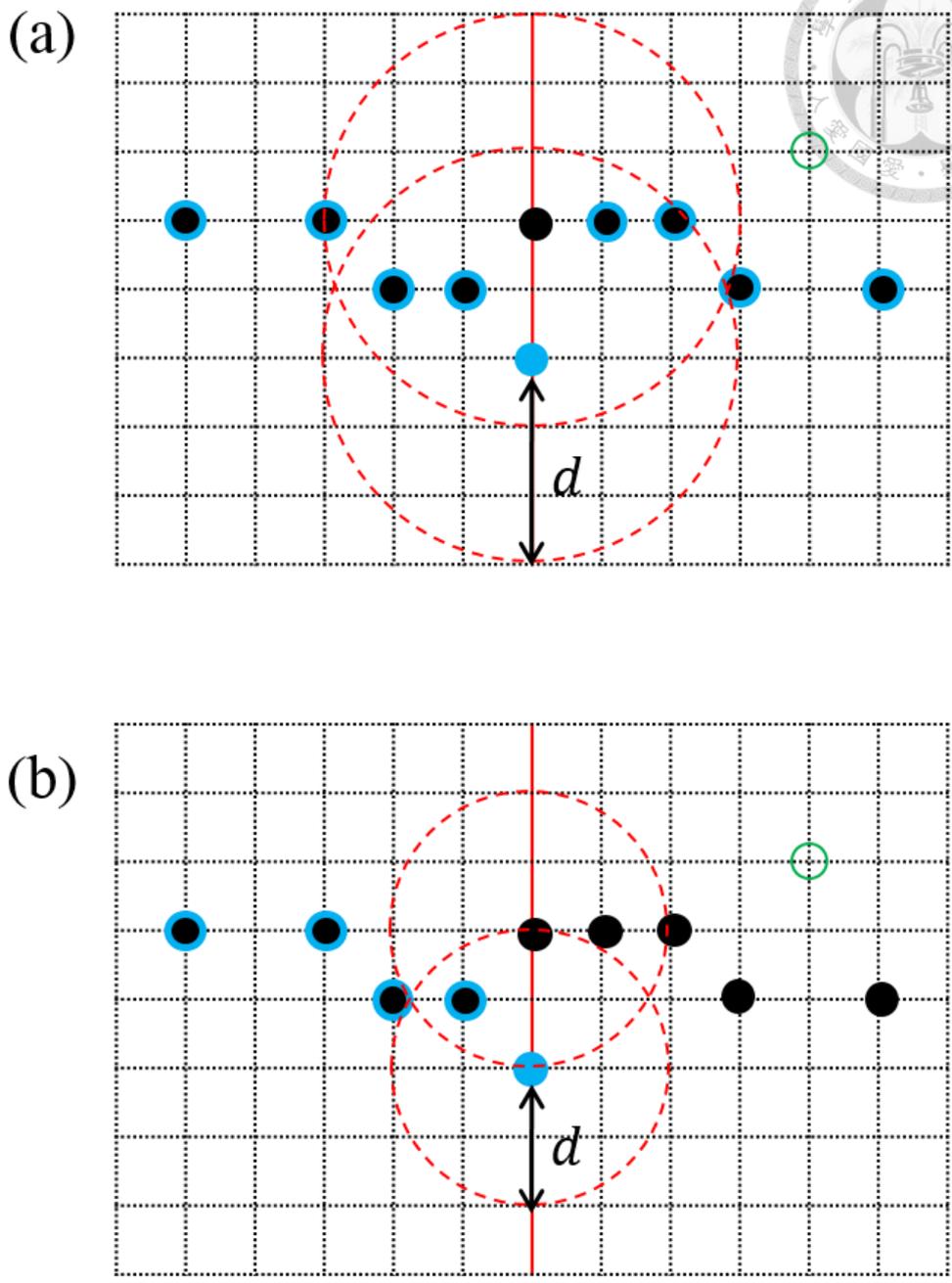
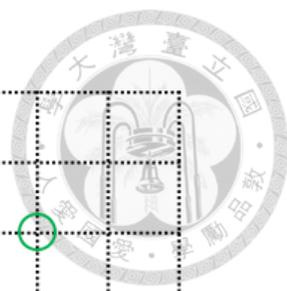
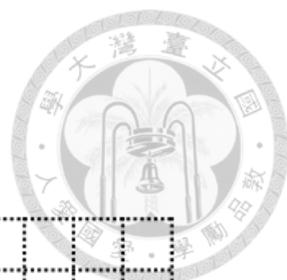
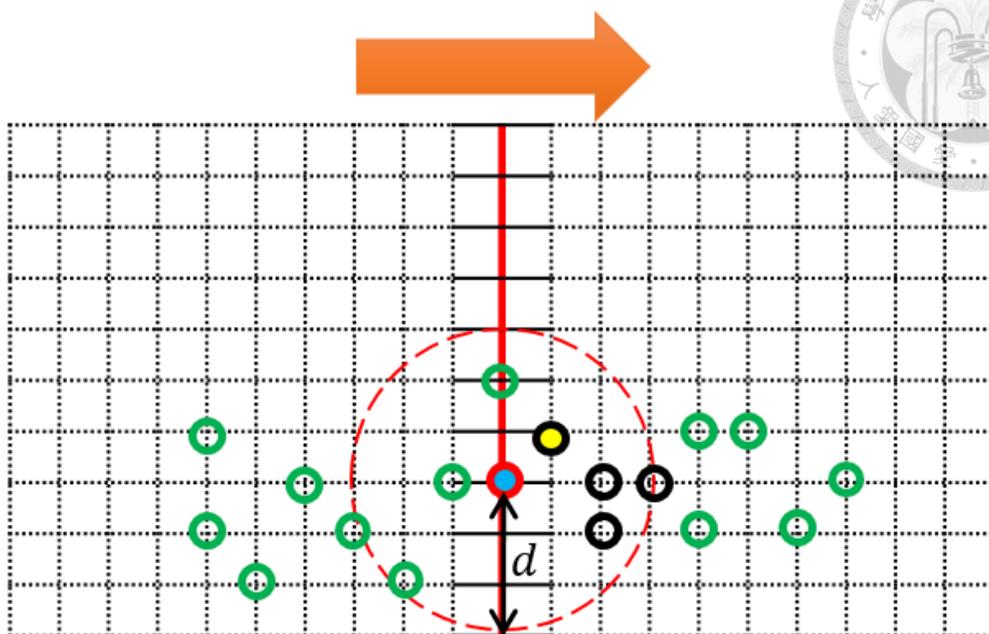


圖 3.26：點位連結範圍示意圖。小圓點皆為跨流向上相對低溫點位，紅線為計算截線。藍、黑圓分別為不同族群；一個圓中含有兩種顏色即表示屬於兩個族群；虛線圓為以點位連結範圍 d 為半徑，該圓內所涵蓋的全部相對低溫點位，視為同一族群之點位。圖 a：當 d 較大時，運用自動辨識系統後，則會判斷出兩種族群，但僅有起始點相異（藍、黑圓），其餘族群則為相同點位（兩種顏色的圓）。圖 b：當 d 較小時，運用自動辨識系統後，則僅辨識出一種族群（黑圓）。由此可知點位連結範圍大小會影響偵測出的族群數多寡。



(a)



(b)

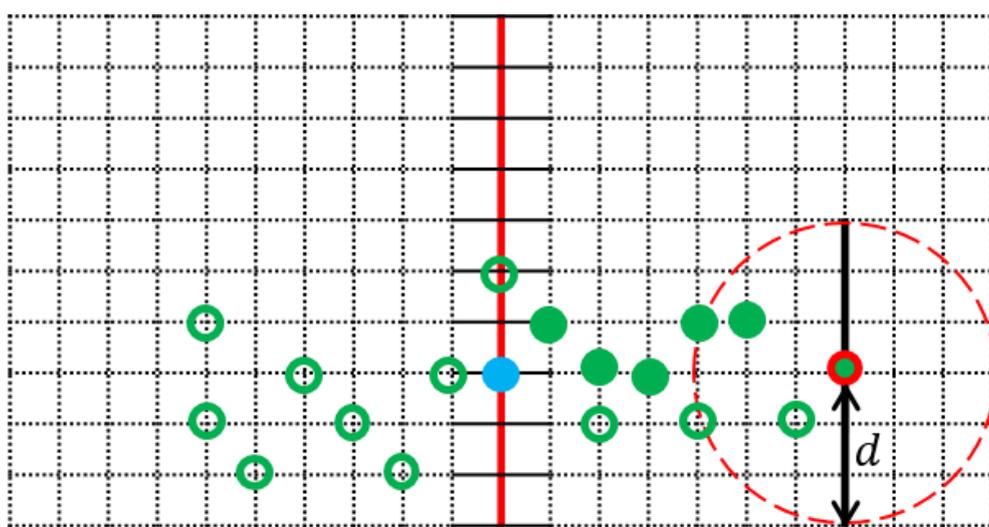
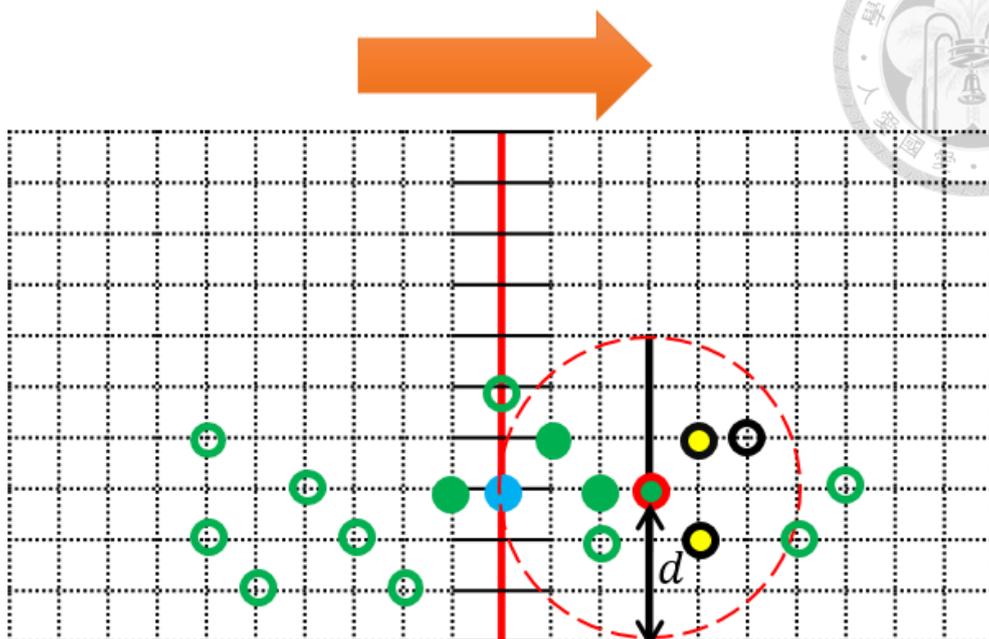


圖 3.27：相對低溫點族群分類示意圖。橘色箭頭為辨識條痕的方向，紅線為計算截線，小圓皆為相對低溫點，藍色圓為族群分類的起始點（即為條痕代表位置），紅色虛線圓為以點位連結範圍 d 為半徑，該圓內所涵蓋的全部相對低溫點位，視為同一族群之點位。紅框小圓為此回判斷的中心點，黑框圓為點位連結範圍內可能成為下一回判斷的中心點，黃色圓為下一回判斷中心點（最接近前一個族群的點位）。圖 a：以計算截線上相對低溫點作為分族群的起始點，尋找小於等於點位連結範圍的最近之下游點位，作為新點位。圖 b：持續往下游尋找，直到中心點搜尋不到該條件下的新點位，則該族群的下游點位已分組完畢。



(a)



(b)

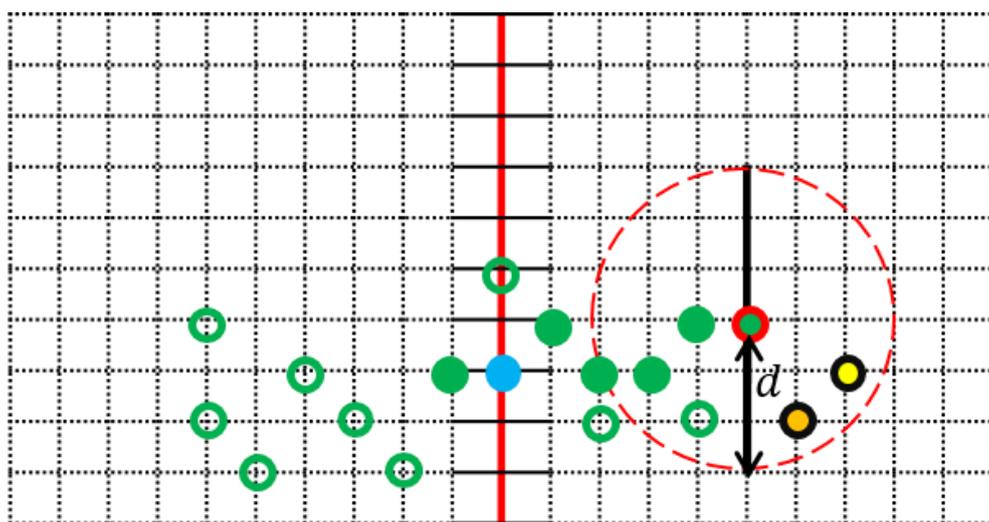


圖 3.28：判斷相同距離之點位族群示意圖。橘色箭頭為辨識條痕的方向，紅線為計算截線，小圓皆為相對低溫點，藍色圓為條痕代表位置之點位，紅色虛線圓為以點位連結範圍 d 為半徑，該圓內所涵蓋的全部相對低溫點位，視為同一族群之點位，紅框小圓為此回判斷的中心點，黑框圓為點位連結範圍內可能成為下一回判斷的中心點，黃色圓為下一回判斷中心點。圖 a：可選取任一黃色點位，其辨識之結果相近。圖 b：選擇距離中心點位之跨流向的最近點位。

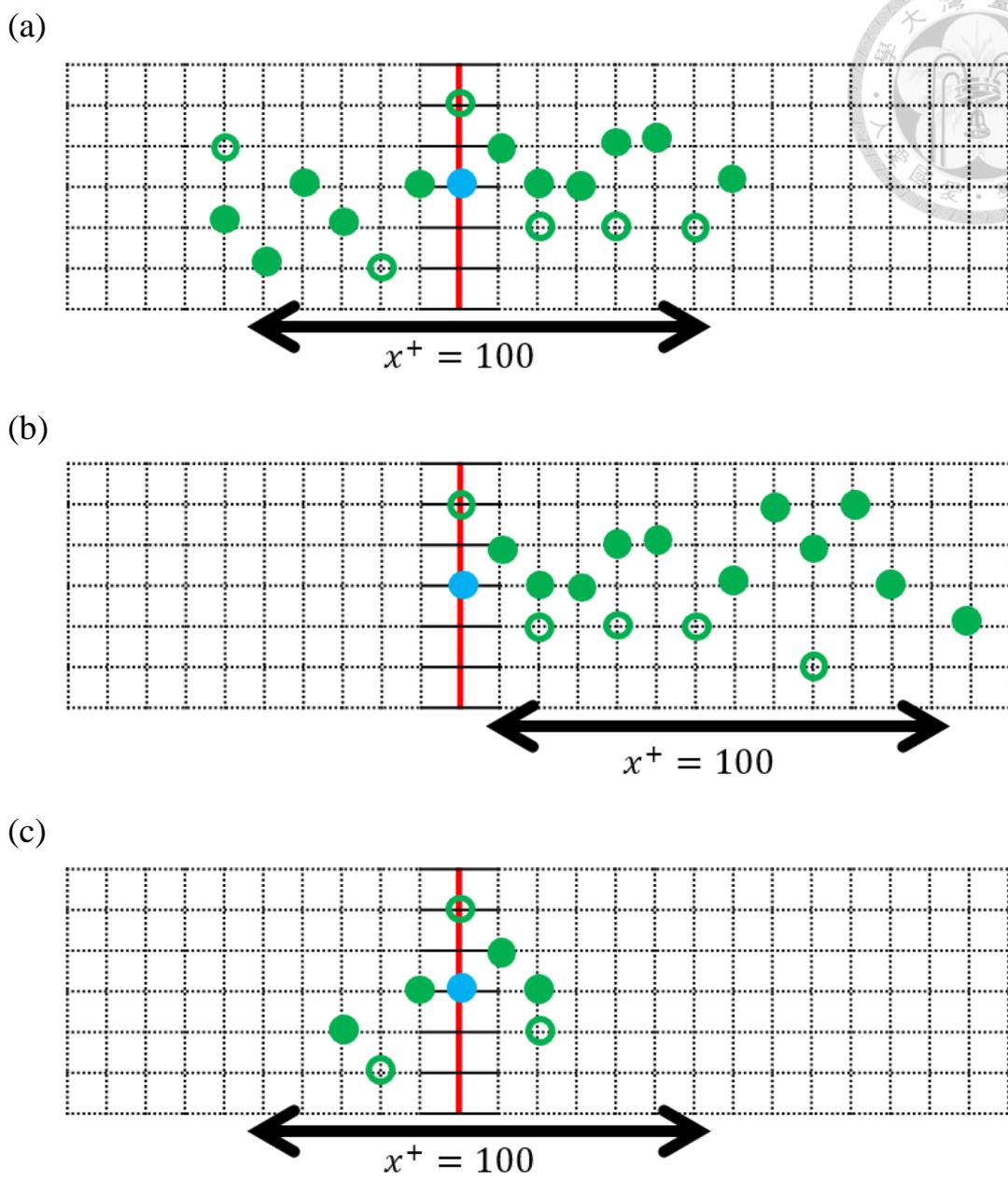


圖 3.29：條痕辨識準則示意圖。紅線為計算截線，小圓皆為相對低溫點，藍色圓為條痕代表位置之點位，綠框圓為未分組的組群，綠圓為同組的族群，黑色箭頭為族群長度標準。若同一族群通過計算截線且其長度符合 $x^+ > 100$ 之標準，則成為條痕。圖 a：族群貫穿計算截線且族群沿流向長度 $x^+ > 100$ ，此族群符合條痕成立準則。圖 b：族群沿流向長度 $x^+ > 100$ ，但未貫穿計算截線，因此不符合條痕準則。圖 c：族群貫穿計算截線，但沿流向長度 $x^+ < 100$ ，不符條痕準則。

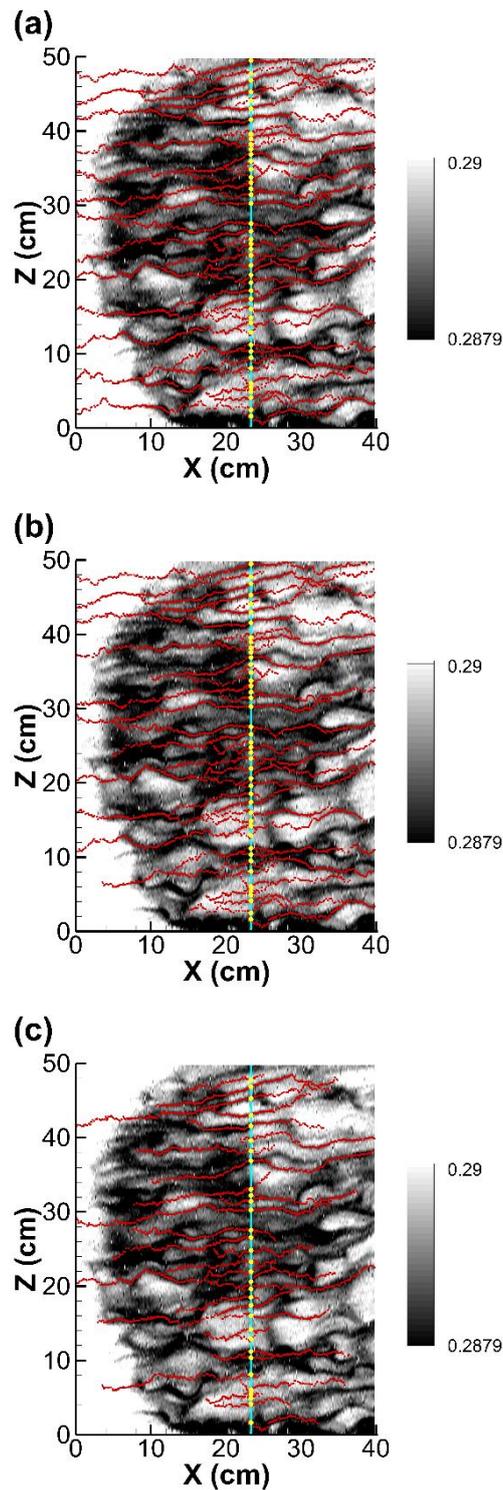


圖 3.30 : $u^* = 0.2 \text{ cm/s}$ 在不同連結範圍的自動辨識結果。流場由左至右，影像尺寸為 $39.8336 \text{ cm} \times 49.792 \text{ cm}$ 。熱圖像以灰階圖表示水面溫度高低，溫度較低偏向深色；溫度較高則偏向淺色。紅色為辨識條痕之結果，黃點為條痕代表位置，藍線為計算截線。圖 a、圖 b 及圖 c 分別以 $\bar{\lambda}_p - 1.0\sigma_p$ 、 $\bar{\lambda}_p - 1.25\sigma_p$ 及 $\bar{\lambda}_p - 1.5\sigma_p$ 作為點位連結範圍。

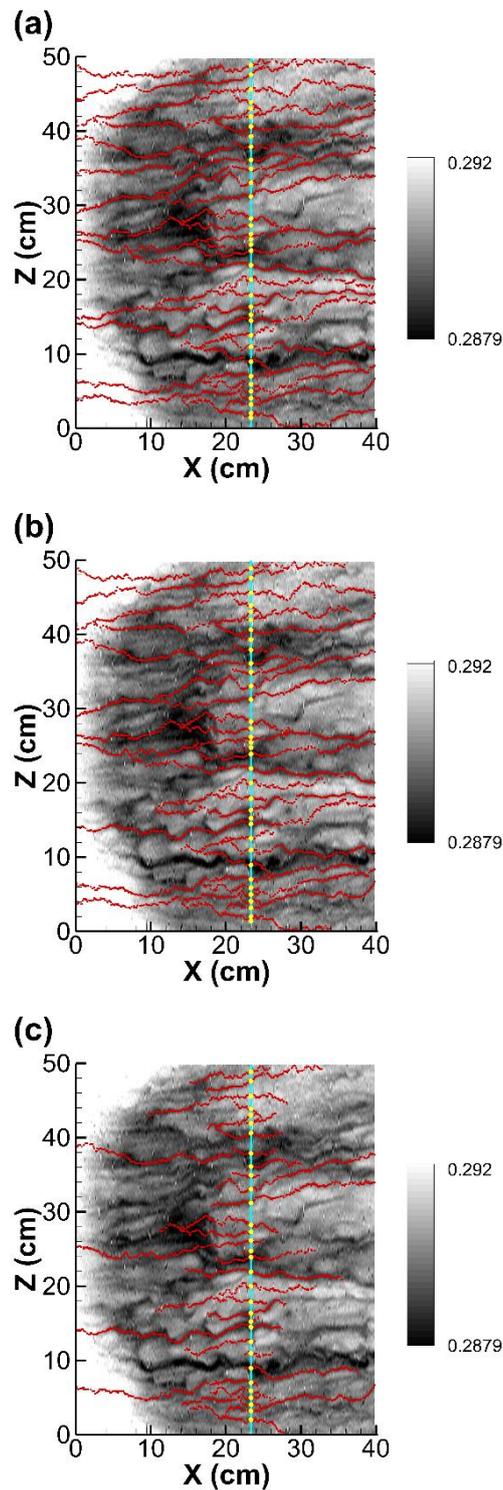


圖 3.31 : $u^* = 0.29 \text{ cm/s}$ 在不同連結範圍的自動辨識結果。流場由左至右，影像尺寸為 $39.8336 \text{ cm} \times 49.792 \text{ cm}$ 。熱圖像以灰階圖表示水面溫度高低，溫度較低偏向深色；溫度較高則偏向淺色。紅色為辨識條痕之結果，黃點為條痕代表位置，藍線為計算截線。圖 a、圖 b 及圖 c 分別以 $\bar{\lambda}_p - 1.0\sigma_p$ 、 $\bar{\lambda}_p - 1.25\sigma_p$ 及 $\bar{\lambda}_p - 1.5\sigma_p$ 作為點位連結範圍。

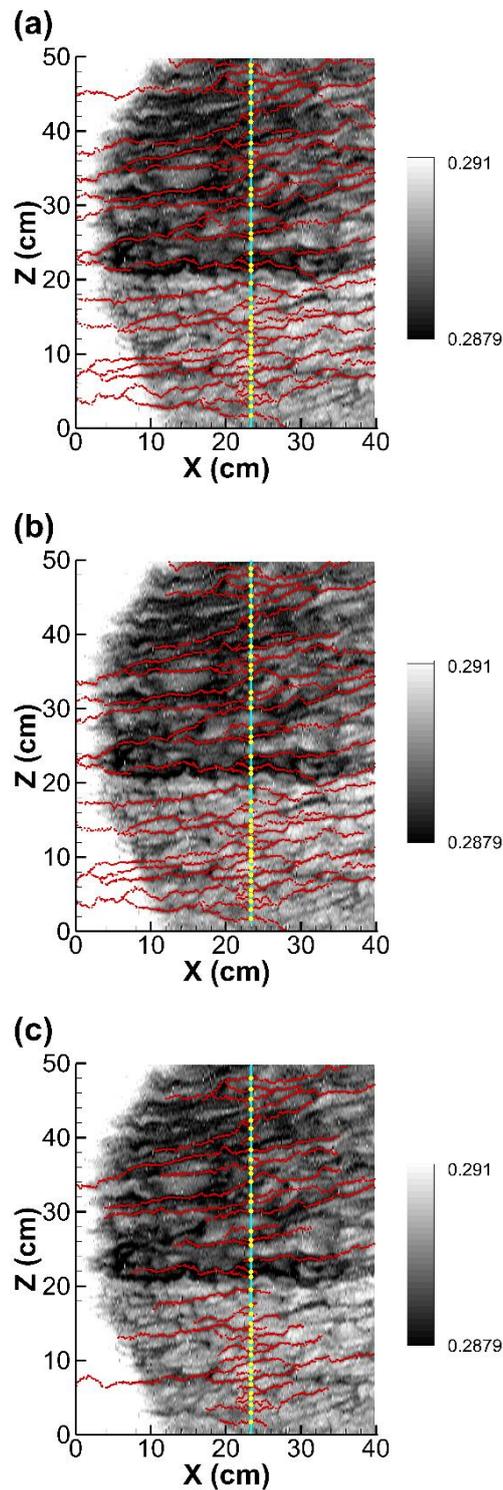


圖 3.32 : $u^* = 0.47 \text{ cm/s}$ 在不同連結範圍的自動辨識結果。流場由左至右，影像尺寸為 $39.8336 \text{ cm} \times 49.792 \text{ cm}$ 。熱圖像以灰階圖表示水面溫度高低，溫度較低偏向深色；溫度較高則偏向淺色。紅色為辨識條痕條痕之結果，黃點為條痕代表位置，藍線為計算截線。圖 a、圖 b 及圖 c 分別以 $\bar{\lambda}_p - 1.0\sigma_p$ 、 $\bar{\lambda}_p - 1.25\sigma_p$ 及 $\bar{\lambda}_p - 1.5\sigma_p$ 作為點位連結範圍。

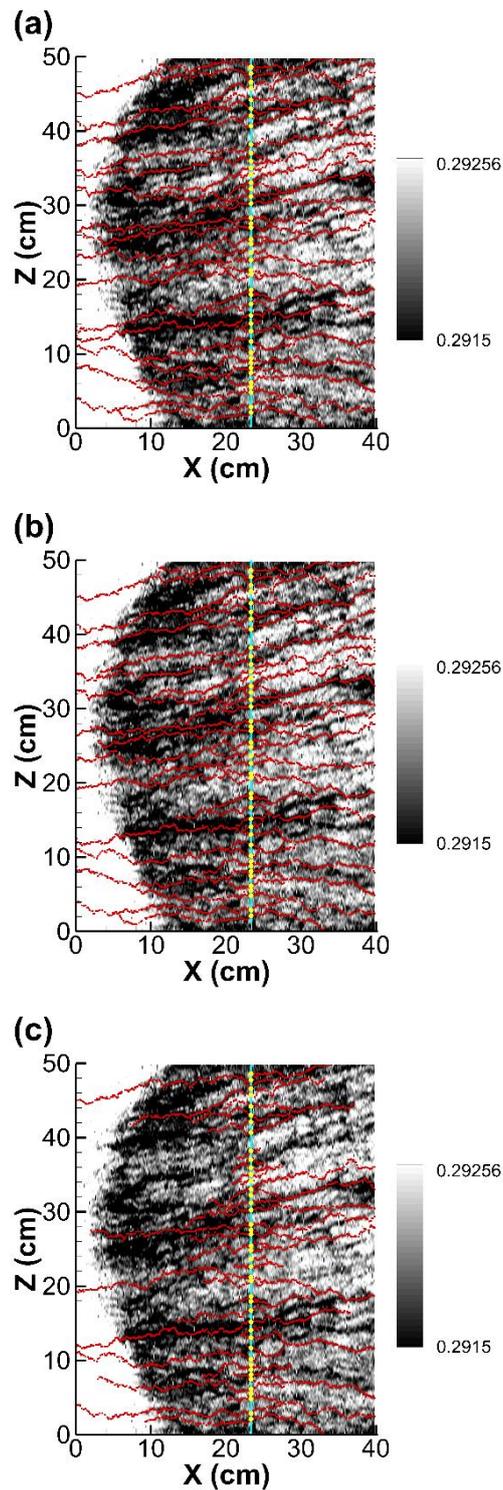


圖 3.33 : $u^* = 0.76$ cm/s 在不同連結範圍的自動辨識結果。流場由左至右，影像尺寸為 39.8336 cm \times 49.792 cm。熱圖像以灰階圖表示水面溫度高低，溫度較低偏向深色；溫度較高則偏向淺色。紅色為辨識條痕之結果，黃點為條痕代表位置，藍線為計算截線。圖 a、圖 b 及圖 c 分別以 $\bar{\lambda}_p - 1.0\sigma_p$ 、 $\bar{\lambda}_p - 1.25\sigma_p$ 及 $\bar{\lambda}_p - 1.5\sigma_p$ 作為點位連結範圍。

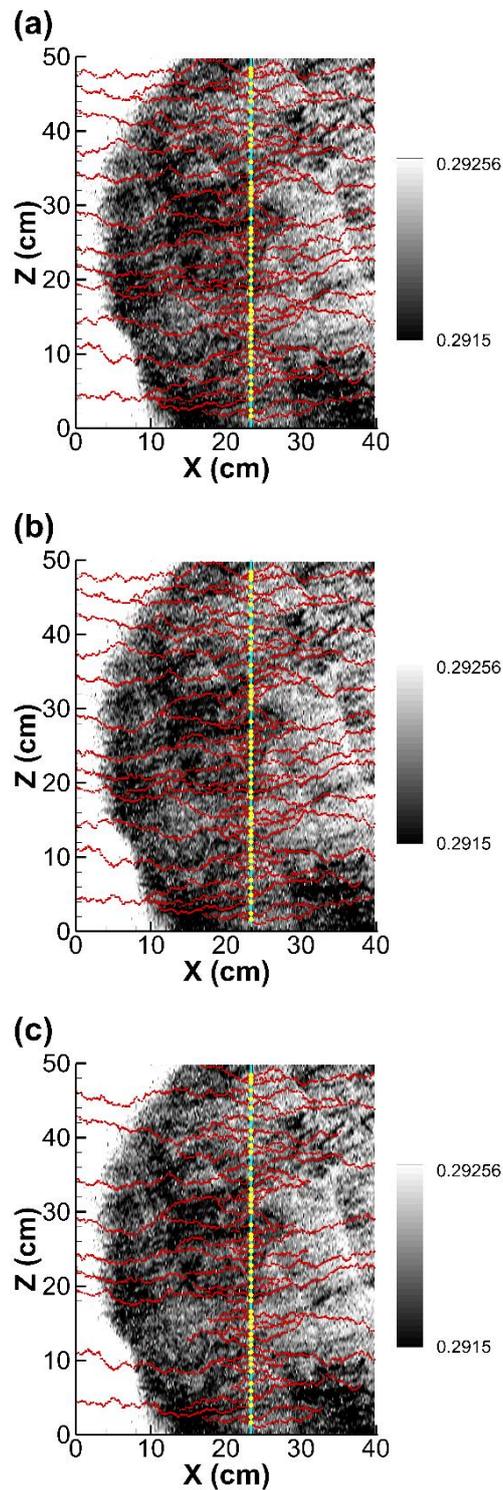


圖 3.34 : $u^* = 1.3 \text{ cm/s}$ 在不同分組範圍的自動辨識結果。流場由左至右，影像尺寸為 $39.8336 \text{ cm} \times 49.792 \text{ cm}$ 。熱圖像以灰階圖表示水面溫度高低，溫度較低偏向深色；溫度較高則偏向淺色。紅色為辨識條痕之結果，黃點為條痕代表位置，藍線為計算截線。圖 a、圖 b 及圖 c 分別以 $\bar{\lambda}_p - 1.0\sigma_p$ 、 $\bar{\lambda}_p - 1.25\sigma_p$ 及 $\bar{\lambda}_p - 1.5\sigma_p$ 作為點位連結範圍。



第四章、條痕間距特性探討

透過自動辨識，大量計算並統計影像中條痕間距的分析流程具有可行性。我們以 Nakagawa 等 (1981) 發現無滑移邊界層條件之牆面紊流邊界層中，其條痕間距分佈近似於對數常態分佈的現象，來觀察風驅動水面紊流流場產生條痕結構之特性。接著探討不同點位連結計算範圍對統計結果的影響與其準確性。最後比較與討論各個以往研究風驅動水面紊流流場條痕間距之結果。

4.1 統計條痕間距分佈

無滑移邊界紊流流場中，Smith 等 (1983) 以人工方式紀錄條痕通過位置並計算每個時刻沿流向上條痕與條痕間之間距，目的為量化條痕間距、統計條痕間距特性與觀察分佈狀況。而 Nakagawa 等 (1981) 發現條痕間距分佈具有對數常態分佈 (logarithmic-normal distribution function) 的特性：透過計算條痕間距總數 n 、條痕平均間距 $\bar{\lambda}$ 、標準差 σ_λ 及均差比值 ψ_λ ：

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad ; \quad (4.1)$$

$$\sigma_\lambda = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\lambda_i - \bar{\lambda})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad ; \quad (4.2)$$

$$\psi_\lambda = \frac{\sigma_\lambda}{\bar{\lambda}} \quad . \quad (4.3)$$

再以對數常態分佈函式 $P(\lambda)$ 進行條痕間距分佈的近似：

$$P(\lambda) = \frac{\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{1}{\psi_0} \ln \frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^2\right\}}{\lambda \psi_0 (2\pi)^{\frac{1}{2}}} \quad ; \quad (4.4)$$

其中參數 λ_0 和 ψ_0 與 ψ_λ 的關係式如下：

$$\lambda_0 = \bar{\lambda} (1 + \psi_\lambda^2)^{-\frac{1}{2}} \quad , \quad (4.5)$$

$$\psi_0 = [\ln(1 + \psi_\lambda^2)]^{\frac{1}{2}} \quad (4.6)$$

使用對數常態分佈函式近似條痕間距機率密度分佈，發現兩者趨勢吻合。故可使用此分佈描述條痕間距的特性（圖 4.1 如 Smith 等 (1983)）。此外，溫國暉 (2004) 亦運用上述方法歸納出水面條痕結構與特性，且兩者趨勢相近（如圖 4.2）。所以 Smith 等 (1983) 所提出的統計方法，同時適用於無滑移紊流邊界層與水面紊流邊界層，因此本研究採用此計算條痕間距與統計方法。

此研究以自動辨識方法分析偵測 400 張風浪表面熱圖像，記錄下每張紅外線影像中通過計算截線的條痕，將條痕代表位置標記於計算截線上，進一步推算條痕與條痕間距，並計算選取的全部影像之平均條痕間距、條痕間距的標準差、條痕間距機率密度及對數常態機率密度分佈。其發現不同點位連結範圍的條痕間距機率密度分佈與對數常態分佈曲線相吻合（圖 4.3、圖 4.4 及圖 4.5）。由此可知，不論是無滑移邊界紊流邊界層或者風驅動水面紊流邊界層，兩者條痕間距分佈之特性皆符合對數常態分佈。

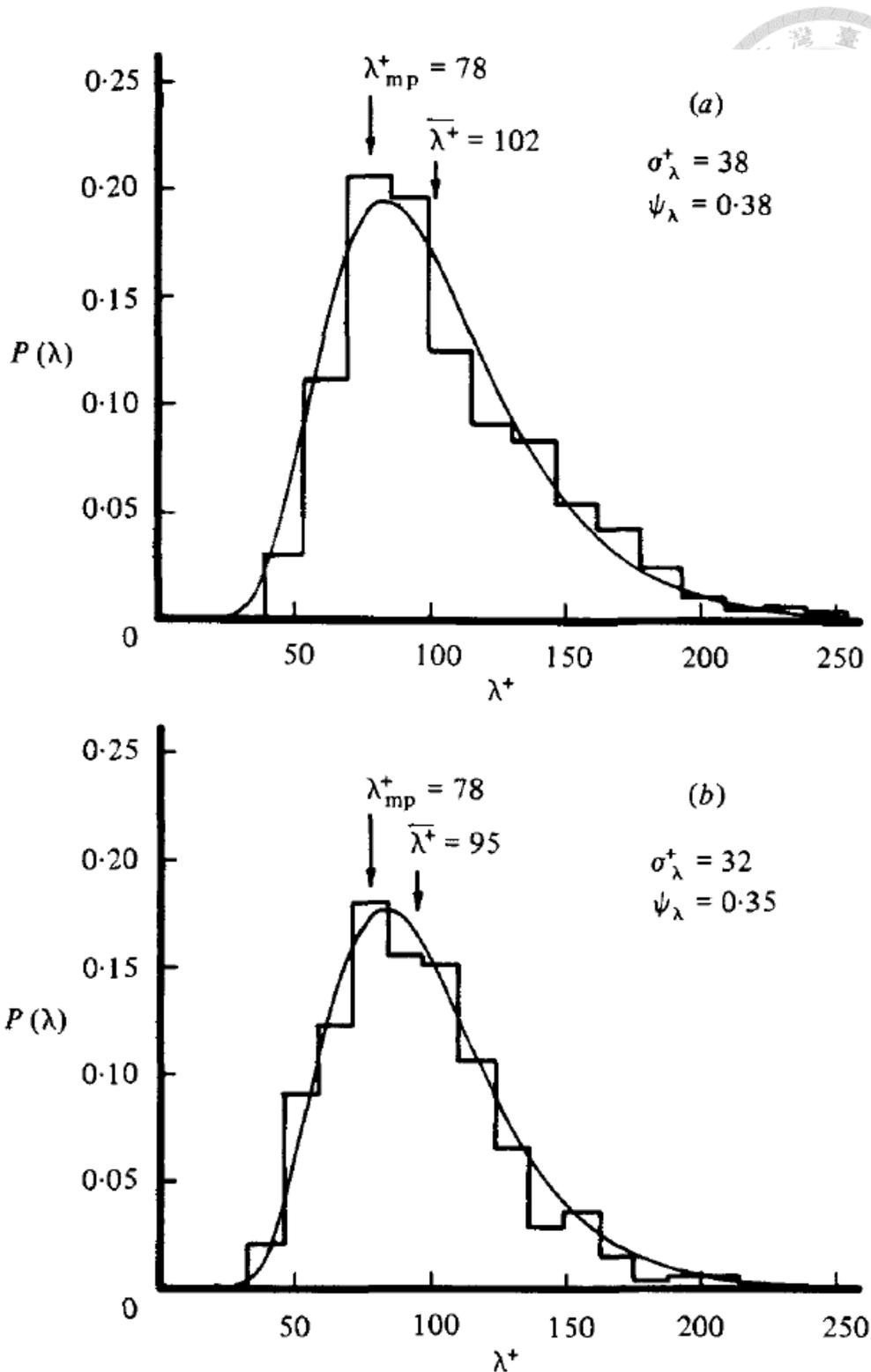
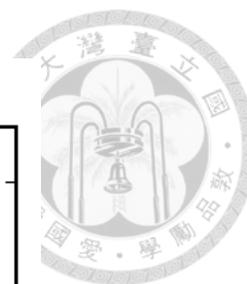
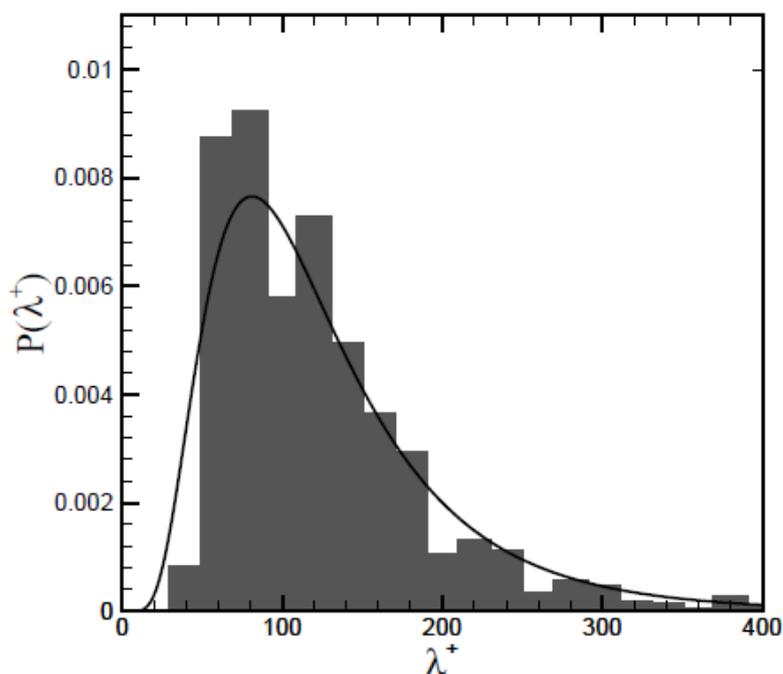


圖 4.1：無滑移紊流邊界層之對數常態分布曲線與條痕間距機率密度直方圖的疊合圖。鉑線放置於接近水槽底部的位置：(a) 流場的雷諾數 $Re_{\theta} = 1490$ ，條痕間距總數 $n = 437$ (b) 流場的雷諾數 $Re_{\theta} = 5830$ ，條痕間距總數 $n = 411$ 。(來源：Smith & Metzler (1983))



(a) wind speed = 5m/s ; t= 5.4 ~ 8.1s



(b) wind speed = 5m/s ; t= 9.4 ~ 12.1s

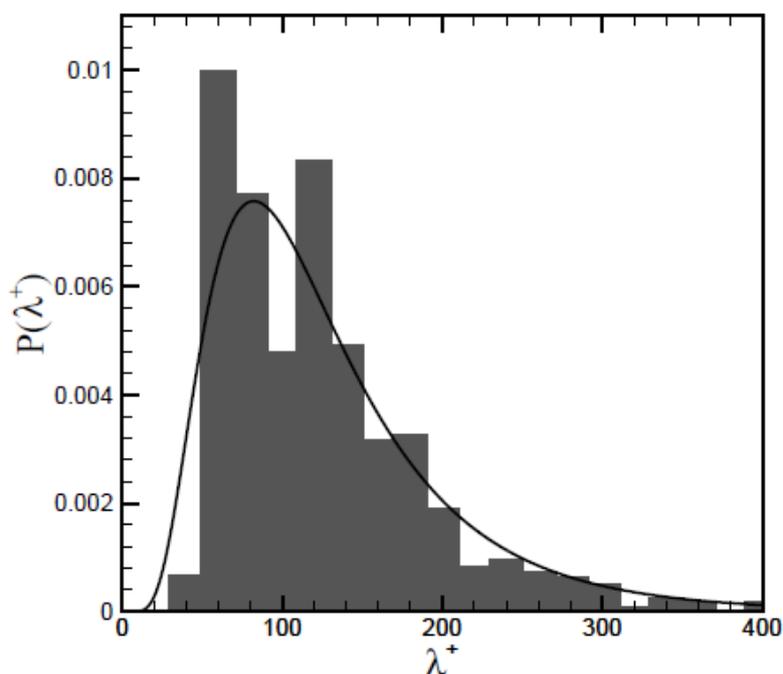


圖 4.2：水面紊流邊界層之對數常態度分佈曲線與條痕間距機率密度直方圖的疊合圖。模擬風速為 5 m/s，圖 a、b 取樣時段分別為 $t = 5.4\text{s} \sim 8.1\text{s}$ 及 $t = 9.4\text{s} \sim 12.1\text{s}$ 。圖中每 100 個牆面單位約等於 1.28cm；條痕間距機率密度分佈的統計寬帶為 $\Delta\lambda^+ = 20$ ，曲線為對數常態機率密度分佈曲線。(來源：溫國暉(2004))

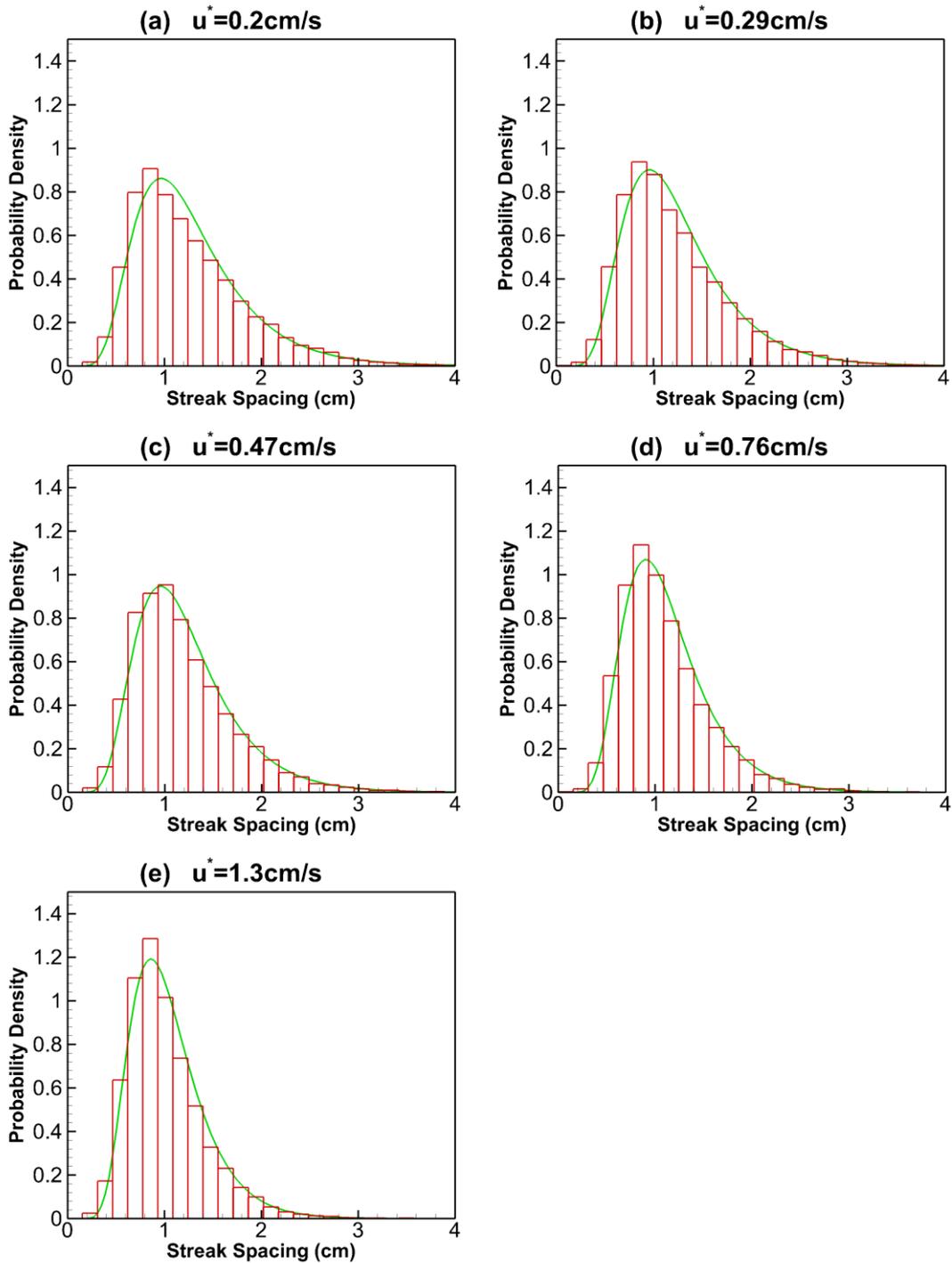


圖 4.3：水面紊流邊界層之對數常態分佈曲線與條痕間距機率密度直方圖的疊合圖。點位連結範圍為相對低溫點之平均間距扣除 1 倍間距標準差 (即 $\bar{\lambda}_p - 1.0\sigma_p$)，圖 a、圖 b、圖 c、圖 d 與圖 e 分別為 $u^* = 0.2 \text{ cm/s}$ 、 $u^* = 0.29 \text{ cm/s}$ 、 $u^* = 0.47 \text{ cm/s}$ 、 $u^* = 0.76 \text{ cm/s}$ 及 $u^* = 1.3 \text{ cm/s}$ 。條痕間距機率密度分佈的統計寬帶為 0.1556 cm ，曲線為對數常態機率密度分佈曲線。

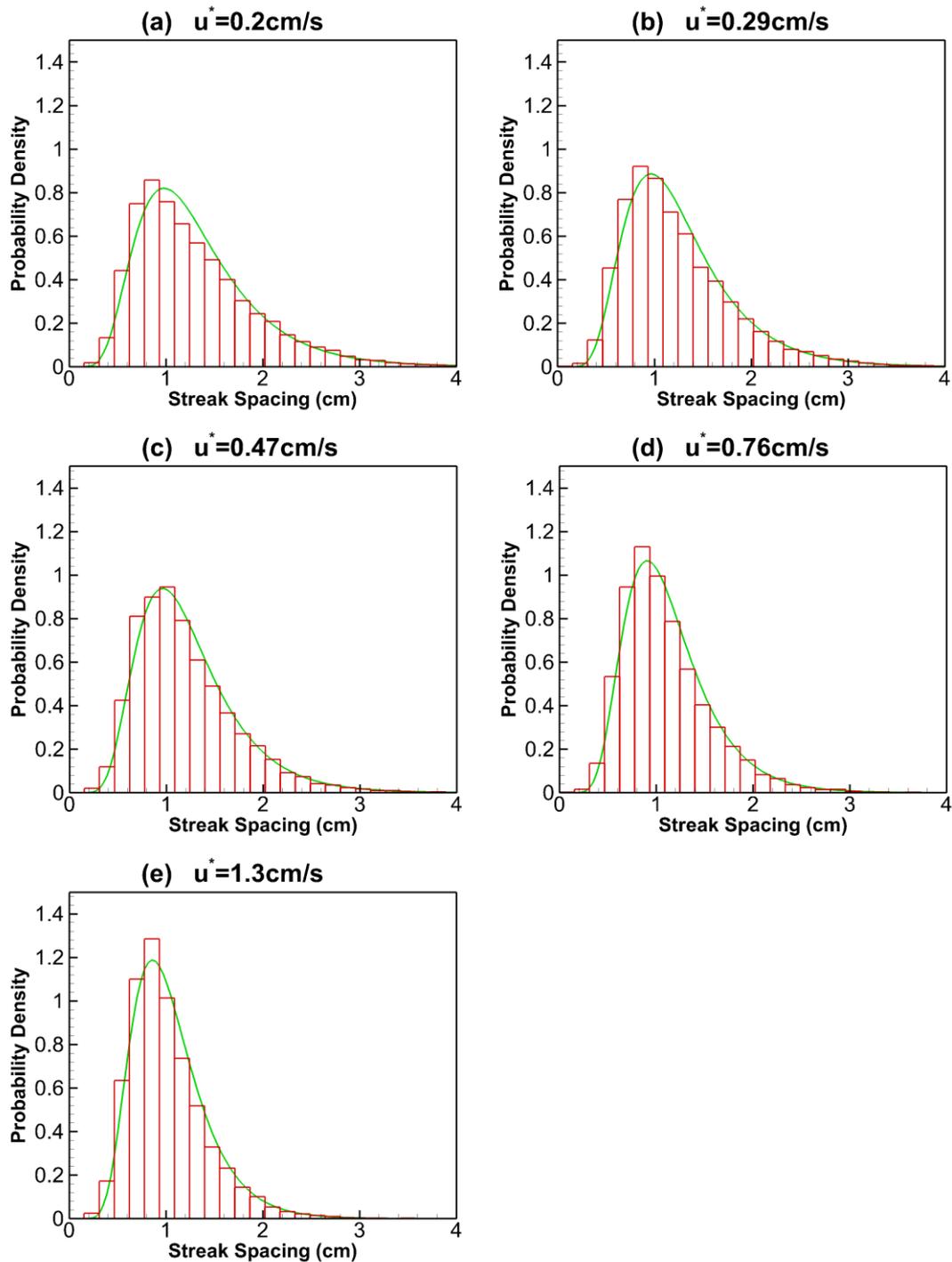


圖 4.4：水面紊流邊界層之對數常態度分佈曲線與條痕間距機率密度直方圖的疊合圖。點位連結範圍為相對低溫點之平均間距扣除 1.25 倍間距標準差 (即 $\bar{\lambda}_p - 1.25\sigma_p$)，圖 a、圖 b、圖 c、圖 d 及圖 e 分別為 $u^* = 0.2 \text{ cm/s}$ 、 $u^* = 0.29 \text{ cm/s}$ 、 $u^* = 0.47 \text{ cm/s}$ 、 $u^* = 0.76 \text{ cm/s}$ 及 $u^* = 1.3 \text{ cm/s}$ 。條痕間距機率密度分佈的統計寬帶為 0.1556 cm ，曲線為對數常態機率密度分佈曲線。

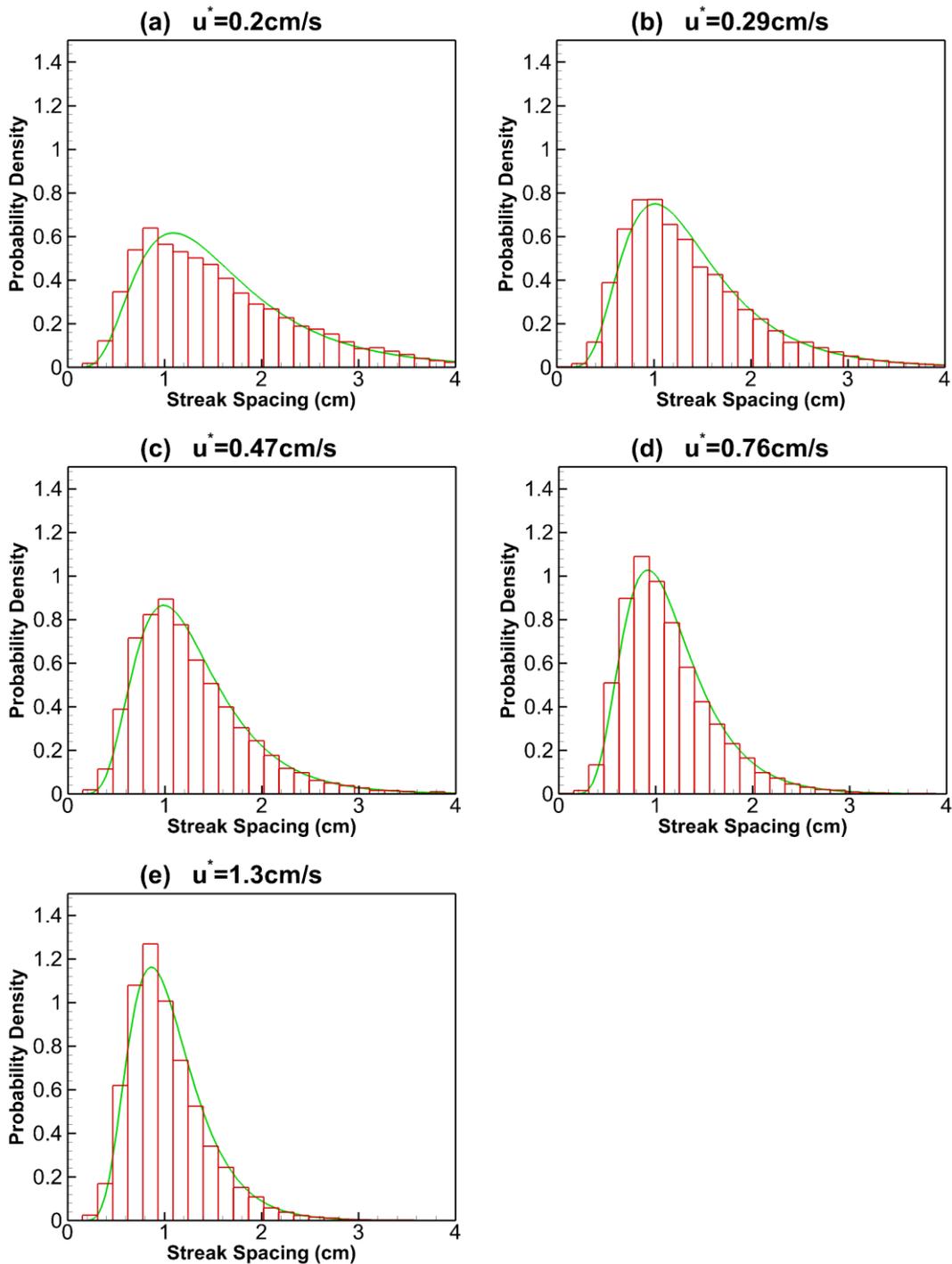


圖 4.5：水面紊流邊界層之對數常態度分佈曲線與條痕間距機率密度直方圖的疊合圖。點位連結範圍為相對低溫點之平均間距扣除 1.5 倍間距標準差 (即 $\bar{\lambda}_p - 1.5\sigma_p$)，圖 a、圖 b、圖 c、圖 d 及圖 e 分別為 $u^* = 0.2 \text{ cm/s}$ 、 $u^* = 0.29 \text{ cm/s}$ 、 $u^* = 0.47 \text{ cm/s}$ 、 $u^* = 0.76 \text{ cm/s}$ 及 $u^* = 1.3 \text{ cm/s}$ 。條痕間距機率密度分佈的統計寬帶為 0.1556 cm ，曲線為對數常態機率密度分佈曲線。



4.2 點位連結範圍造成條痕間距計算的影響

不同點位連結範圍其條痕間距分佈皆具有對數常態分佈特性，而從微觀角度比較其條痕平均間距與間距標準差，僅有微小變化（如表 4.1）。當點位連結範圍較大（ $\bar{\lambda}_p - 1.0\sigma_p$ ）時，點位之間較容易連結成群，因此，辨識出條痕數量較多且其沿流向長度較長，所以平均條痕間距會較小；當點位連結範圍較小（ $\bar{\lambda}_p - 1.5\sigma_p$ ）時，點位之間不易連結成群，所以平均條痕間距較大且其結果接近人工辨識之結果。從自動辨識出的單張圖像，亦能觀測到此現象（圖 3.20、圖 3.21 及圖 3.22）。

Smith 等 (2007) 和 Schnieders 等 (2013) 等諸多文獻中，提及風剪驅動水面紊流邊界層條痕結構之特性：隨著摩擦速度愈大，平均條痕間距愈小。而本研究採用自動辨識方法進行兩組以上點位連結範圍之測試，發現平均條痕間距隨摩擦速度愈大，其值愈小的特性，但點位連結範圍仍會造成其平均條痕間距些微差異。為了確保辨識結果的客觀性，僅略選定合理之點位連結範圍極值，若於極值外可能造成條痕數量過多、稀疏或者無法辨識出任一條痕等現象，與人工辨識結果不符，而從某一範圍內進行條痕辨識，其會隨範圍愈大而平均條痕間距愈小，但相同點位連結範圍仍保持隨摩擦速度愈大，其平均條痕間距愈小之特性。

觀測圖 4.1 發現當摩擦速度愈大時，條痕間距機率密度分佈範圍愈窄（即間距分佈範圍小，間距標準差小）且峰值愈高（即機率密度的最大值位置），而不同點位連結範圍之間距分佈（圖 4.3、圖 4.4 及圖 4.5）與表 4.1 數值中，都符合 Smith 等 (1983) 之結果；但在低摩擦速度（ $u^* = 0.20 \text{ cm/s}$ 、 $u^* = 0.29 \text{ cm/s}$ 與 $u^* = 0.47 \text{ cm/s}$ ）中，連結範圍 $\bar{\lambda}_p - 1.0\sigma_p$ 與 $\bar{\lambda}_p - 1.25\sigma_p$ 所計算出的條痕平均間距與標準差僅有微小變化，推判此數據的相對低溫點分佈較密集及連結範圍大，較容易連結成條痕，而比對此三個摩擦速度於相同點位連結範圍，其統計出的平均條痕間距與條痕間距標準差亦僅有小幅變化，但仍符合風驅動水面紊流邊界層

之條痕結構。雖點位連結範圍會小幅度影響辨識結果，若選定適合之範圍，則不會造成劇烈改變。



表 4.1：不同摩擦速度於溫度在跨流向上相對低溫點進行自動辨識，所得條痕間距統計資料。

$u^* = 0.2 \text{ cm/s}$		
點位連結範圍	平均間距	標準差
$\bar{\lambda}_p - 1.0\sigma_p$	25.677 ⁺ (1.284 cm)	11.744 ⁺ (0.587 cm)
$\bar{\lambda}_p - 1.25\sigma_p$	26.516 ⁺ (1.326 cm)	12.518 ⁺ (0.626 cm)
$\bar{\lambda}_p - 1.5\sigma_p$	32.678 ⁺ (1.634 cm)	18.139 ⁺ (0.907 cm)
$u^* = 0.29 \text{ cm/s}$		
點位連結範圍	平均間距	標準差
$\bar{\lambda}_p - 1.0\sigma_p$	36.354 ⁺ (1.254 cm)	16.057 ⁺ (0.554 cm)
$\bar{\lambda}_p - 1.25\sigma_p$	36.708 ⁺ (1.266 cm)	16.399 ⁺ (0.565 cm)
$\bar{\lambda}_p - 1.5\sigma_p$	40.903 ⁺ (1.410 cm)	20.367 ⁺ (0.702 cm)
$u^* = 0.47 \text{ cm/s}$		
點位連結範圍	平均間距	標準差
$\bar{\lambda}_p - 1.0\sigma_p$	57.594 ⁺ (1.225 cm)	24.351 ⁺ (0.518 cm)
$\bar{\lambda}_p - 1.25\sigma_p$	57.966 ⁺ (1.233 cm)	24.594 ⁺ (0.523 cm)
$\bar{\lambda}_p - 1.5\sigma_p$	61.016 ⁺ (1.298 cm)	27.178 ⁺ (0.578 cm)
$u^* = 0.76 \text{ cm/s}$		
點位連結範圍	平均間距	標準差
$\bar{\lambda}_p - 1.0\sigma_p$	85.729 ⁺ (1.128 cm)	34.123 ⁺ (0.449 cm)
$\bar{\lambda}_p - 1.25\sigma_p$	85.901 ⁺ (1.130 cm)	34.225 ⁺ (0.450 cm)
$\bar{\lambda}_p - 1.5\sigma_p$	87.846 ⁺ (1.156 cm)	35.768 ⁺ (0.471 cm)
$u^* = 1.3 \text{ cm/s}$		
點位連結範圍	平均間距	標準差
$\bar{\lambda}_p - 1.0\sigma_p$	136.392 ⁺ (1.049 cm)	51.394 ⁺ (0.359 cm)
$\bar{\lambda}_p - 1.25\sigma_p$	136.561 ⁺ (1.050 cm)	51.574 ⁺ (0.397 cm)
$\bar{\lambda}_p - 1.5\sigma_p$	138.026 ⁺ (1.062 cm)	52.994 ⁺ (0.408 cm)



4.3 與他人結果進行比較

至今有許多風驅動水面產生紊流流場的研究，從不同實驗方法，如可視化技術觀測流場中條痕結構分佈、水面流場速度分佈和溫度分佈或者數值模擬，以及數種分析方式，如物理特性分析（人工與自動辨識）、頻譜分析、微波分析或者分類演算法，皆歸納出風驅動水面產生地紊流流場具有一定的特性（如圖 4.6 對應其數據為表 2 至表 11）。

本研究分析的實驗數據，來自海德堡大學環境物理學院，以 Aeolotron 環狀風浪水槽進行風剪趨動水面紊流邊界層之實驗，透過紅外線照相機將水面輻射熱轉換溫度值。運用紊流流場的物理特性進行自動辨識：將紅外線影像資料以點位和辨識準則進行邏輯判斷；辨識過程中，則以 $\bar{\lambda}_p - 1.0\sigma_p$ 、 $\bar{\lambda}_p - 1.25\sigma_p$ 與 $\bar{\lambda}_p - 1.5\sigma_p$ 作為點位連結範圍，從圖 4.6 (如表 4.2 至表 4 所示) 發現主觀決定三種連結範圍對平均條痕間距不會造成顯著變化，於 4.2 節亦提及選定適當的範圍對整體分析結果較不易受影響，且此三個範圍中皆得到與風剪驅動水面紊流邊界層之條痕研究相同的結果：隨摩擦速度愈大，平均條痕間距愈小。

Schnieders 等 (2013) 中，運用分類演算法，分析不同的實驗數據且皆為 *cool-skin cases*。主要分析的實驗數據取自海德堡大學環境物理學院的 Aeolotron 環狀風浪水槽實驗，並以不同的紅外線照相機，進行相同條件的實驗，分別為 2011 年所進行的實驗（簡稱 Aeolotron 2011），與空間解析度較高的 2012 年之實驗（簡稱 Aeolotron 2012）；其一取自邁阿密大學海洋與大氣科學的羅森斯蒂爾學院中，以海氣交互作用的鹽水水槽（Air-Sea Interaction Saltwater Tank）進行量測（簡稱 ASIST, cool skin）；另一則以新南威爾士大學的水研究實驗室（Water Research Laboratory）進行實驗（簡稱 WRL）。

本研究所分析的實驗數據即為 Schnieders 等 (2013) 分析四筆數據中的 Aeolotron 2012 之數據，運用兩種分析方法分析同筆數據，(圖 4.6a、表 4.2 至表



4.5) 發現兩者摩擦速度 $u^* \leq 0.76 \text{ cm/s}$ 時，平均條痕間距隨摩擦速度愈大而愈窄，但在高摩擦速度 ($u^* = 0.76 \text{ cm/s}$ 與 $u^* = 1.3 \text{ cm/s}$ 兩個高摩擦速度) 時，Aeolotron 2012 之平均條痕間距些微變大，而本研究則會隨之變小，推測可能是波浪已近破碎並產生碎波，造成水面溫度混亂且不易辨識水面條痕結構。以本研究分析摩擦速度 $u^* = 1.3 \text{ cm/s}$ 為例：運用程式自動辨識時，會依循著既定的邏輯辨識出條痕，但從圖 3.24 的單張影像中，較難以肉眼判斷結果的準確性。分析結果顯示，本研究計算的平均條痕間距皆大於 Aeolotron 2012 之分析結果，再者觀察無因次單位統計結果 (圖 4.6b、表 4.2 至表 4.5)，其不若無滑移邊界中，無因次化的平均條痕間距為定值 ($\bar{\lambda}^+ = 100$)，且兩者平均條痕間距的變化仍有些微落差，Aeolotron 2012 在摩擦速度 u^* 由 0.2 cm/s 至 0.76 cm/s ，變化較為和緩，而本研究則變化較劇烈，推測可能基於兩者分析方法之差異所致。兩者比較結果產生之差異，主要因本研究與 Schnieders 等 (2013) 分別運用自動辨識方法與分類演算法，計算平均條痕間距。

Schnieders 等 (2013) 不僅分析 Aeolotron 2012 之實驗數據，亦有 Aeolotron 2011、ASIST, cool skin 以及 WRL 之實驗數據。(圖 4.6a) 其摩擦速度 $u^* \leq 0.8 \text{ cm/s}$ 時，計算結果大部分趨勢一致，隨摩擦速度愈大，平均條痕間距愈小，但高摩擦速度之結果則否，如 Aeolotron 2011 與 2012 之數據其平均間距變寬，ASIST, cool skin 之平均間距則是由寬窄相間；其中，WRL 數據之分析結果與本研究結果較為貼近，Aeolotron 2012 之結果則是與 ASIST, cool skin 結果相近，由此推測採用相同分析方法，不同實驗數據對於統計結果亦會造成影響。Schnieders 等 (2013) 對不同實驗數據分析結果，提出的論點為平均條痕間距會由隨著摩擦速度愈大而愈窄，當達到高摩擦速度時，其間距則是從窄變寬的趨勢。

由於本研究與 Schnieders 等 (2013) 分析結果相異；因此，蒐集同為風剪驅動水面紊流邊界層的數據，分別為 Melville 等 (1998) 之實驗數據以及 Tsai 等 (2005) 引入 Melville 等 (1998) 真實水槽實驗的物理參數進行數值模擬，產生之



模擬數據，除了平均條痕間距存在隨摩擦速度愈大而愈窄的特性，較為特別的為平均條痕間距遠大於其他學者分析結果，其因當實驗剛開始時，波浪很小且流場尚未發展完成，則進行量測所致；由此可知流場尚在發展與流場發展成熟之不同條件下，分析結果會有明顯區別；當流場尚在發展中，平均條痕間距較大，如 Tsai 等 (2005) 及 Melville 等 (1998)；當流場發展成熟，平均條痕間距較小，如本研究、Schniders 等 (2013) 與 Scott 等 (2008)。

上述的統計結果皆與無滑移邊界中，平均條痕間的理論值約 $\overline{\lambda^+} = 100$ 不吻合，唯有 Scott 等 (2008) 提出其以小波分析 (wavelet analysis) 之結果與該理論值趨勢較為符合 (圖 4.6a)，此數據與 ASIST, cool skin 為相同實驗數據，趨勢有明顯的落差，主要源自於不同分析方法，若以 Scott 等 (2008) 之結果進行無因次化後，發現與理論值相差甚遠 (圖 4.6b)，且本文中探討的不同風剪驅動水面紊流邊界層之實驗數據以及數值模擬數據，其平均條痕間距無因次化後，皆不為一定值。

探討各種風驅動水面不同變因對整體影響，如：流場尚在發展中，量測後分析的結果間距則會較大；不同的實驗或者分析方法結果都會有所差異，但不影響水面紊流邊界層條痕結構的主要特性：摩擦速度愈大，條痕間距愈小。

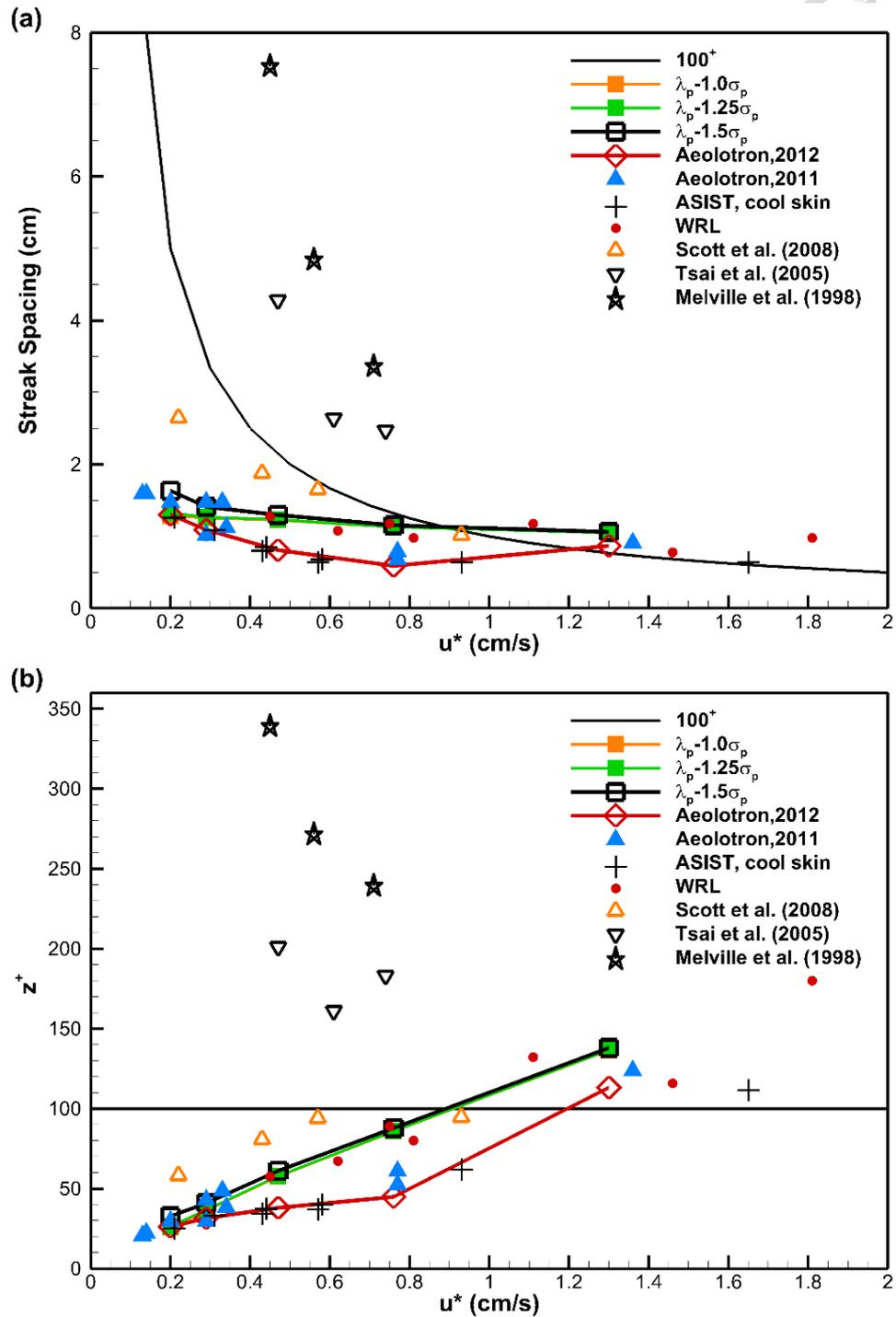


圖 4.6：平均條痕間距與摩擦速度之關係圖。黑線為無滑移紊流邊界層中，平均條痕間距的理論值（約為 $\bar{\lambda}^+ = 100$ ， $\bar{\lambda}_{theo} = 100v/u^*$ ）。橘色、綠色及黑色方形圖為本研究結果，其點位連結範圍關係如下： $\bar{\lambda}_p - 1.0\sigma_p$ 、 $\bar{\lambda}_p - 1.25\sigma_p$ 及 $\bar{\lambda}_p - 1.5\sigma_p$ 。菱形、藍色三角形、加號與紅點皆為運用 Schnieders 等 (2013) 影像處理技術的分析結果。橘色三角形、倒三角形與黑星星分別為 Scott 等 (2008)、Tsai 等 (2005) 及 Melville 等 (1998) 不同分析方法之結果。圖 a 縱軸為公分與圖 b 縱軸為無因次化長度。

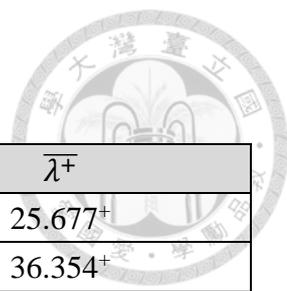


表 4.2：本研究以點位連結範圍 ($\bar{\lambda}_p - 1.0\sigma_p$) 分析之結果。

u^* (cm/s)	$\bar{\lambda}$ (cm)	$\bar{\lambda}^+$
0.2	1.284	25.677 ⁺
0.29	1.254	36.354 ⁺
0.47	1.225	57.594 ⁺
0.76	1.128	85.729 ⁺
1.3	1.049	136.392 ⁺

表 4.3：本研究以點位連結範圍 ($\bar{\lambda}_p - 1.25\sigma_p$) 分析之結果。

u^* (cm/s)	$\bar{\lambda}$ (cm)	$\bar{\lambda}^+$
0.2	26.516 ⁺	1.326
0.29	1.266	36.708 ⁺
0.47	1.233	57.966 ⁺
0.76	1.130	85.901 ⁺
1.3	1.050	136.561 ⁺

表 4.4：本研究以點位連結範圍 ($\bar{\lambda}_p - 1.5\sigma_p$) 分析之結果。

u^* (cm/s)	$\bar{\lambda}$ (cm)	$\bar{\lambda}^+$
0.2	1.634	32.678 ⁺
0.29	1.410	40.903 ⁺
0.47	1.298	61.016 ⁺
0.76	1.156	87.846 ⁺
1.3	1.062	138.026 ⁺

表 4.5：Schnieders 等 (2013) 中，分析 Aeolotron 2012 數據之結果。

u^* (cm/s)	$\bar{\lambda}$ (cm)	$\bar{\lambda}^+$
0.2	1.3	26
0.29	1.09	21.31
0.47	0.81	38.07
0.76	0.59	44.84
1.3	0.87	113.10

表 4.6：Schnieders 等 (2013) 中，分析 Aeolotron 2011 數據之結果。

u^* (cm/s)	$\bar{\lambda}$ (cm)	$\bar{\lambda}^+$
0.13	1.59	20.67
0.14	1.59	22.26
0.20	1.48	29.60
0.29	1.02	29.58
0.29	1.48	42.92
0.33	1.48	48.84
0.34	1.13	38.42
0.77	0.68	52.36
0.77	0.79	60.83
1.36	0.91	123.76

表 4.7：Schnieders 等 (2013) 中，分析 ASIST, cool skin 數據之結果。

u^* (cm/s)	$\bar{\lambda}$ (cm)	$\bar{\lambda}^+$
0.21	1.31	27.51
0.31	1.14	35.34
0.43	0.85	36.55
0.44	0.90	39.60
0.57	0.69	39.33
0.58	0.73	42.34
0.93	0.69	64.17
1.65	0.69	113.85

表 4.8：Schnieders 等 (2013) 中，分析 WRL 數據之結果。

u^* (cm/s)	$\bar{\lambda}$ (cm)	$\bar{\lambda}^+$
0.45	1.3	58.5
0.62	1.1	68.2
0.75	1.2	90
0.81	1.0	81
1.11	1.2	133.2
1.46	0.8	116.8
1.81	1.0	181

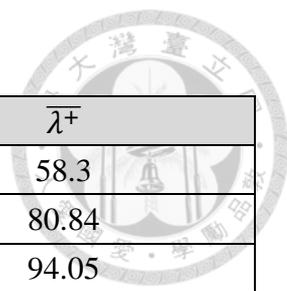


表 4.9：Scott 等 (2008)中，分析實驗數據之結果。

u^* (cm/s)	$\bar{\lambda}$ (cm)	$\bar{\lambda}^+$
0.22	2.65	58.3
0.43	1.88	80.84
0.57	1.65	94.05
0.93	1.02	94.86

表 4.10：Tsai 等 (2005) 中，分析數值模擬數據之結果。

u^* (cm/s)	$\bar{\lambda}$ (cm)	$\bar{\lambda}^+$
0.47	4.28	201
0.61	2.64	161
0.74	2.47	183

表 4.11：Melville 等 (1998) 中，分析實驗數據之結果。

u^* (cm/s)	$\bar{\lambda}$ (cm)	$\bar{\lambda}^+$
0.45	7.55	339.75
0.56	4.86	272.16
0.71	3.38	239.98



第五章、結論與建議

無滑移邊界紊流流場有明顯條痕結構，在風驅動自由液面產生之紊流流場亦觀測出此現象。此外，觀測水面流場之特性，不僅能由水面流速分佈著手外，亦能從水面溫度分佈進行。而本研究則以分析紅外線照相機記錄風驅動水面的實驗數據，並由溫度分佈影像進行條痕的辨識與間距的統計，如圖 3.9a 中，溫度較低的水團聚集成細長條痕（圖中藍色區域），此種條痕結構稱作 *cool-skin case*。藉由自動辨識方法進行影像的條痕辨識與間距統計，並比較各種摩擦速度產生的條痕間距之特性。

前人在無滑移紊流邊界層之流場中，從可視化影像觀測出某一特性：當摩擦速度愈大時，平均條痕間距愈窄。對於風剪驅動水面產生紊流流場而言，由追跡質點、速度分佈和溫度分佈關係皆能觀測出條痕的特性。欲了解紊流流場隨時間變化情況，可藉由統計條痕的平均間距與間距標準差，並比較摩擦速度與平均間距之關係。經由 Smith 等 (1983) 對無滑移邊界紊流流場產生之條痕結構，其條痕間距機率密度分佈中，當摩擦速度愈大時，機率密度極值愈高（即峰值愈高）且條痕間距分佈愈窄（即間距標準差愈小），且其分佈符合對數常態分佈曲線，在風驅動自由液面亦能觀察到此現象，雖為不同特性的紊流邊界層，但所觀測到的流場內條痕結構之特性是相似的。

此外，先前研究證實無滑移邊界紊流流場的平均條痕間距皆為一定值（約 $\bar{\lambda}^+ = 100$ ）。從圖 4.6(b) 顯示數據來源不同或者分析方法之差異，其平均間距皆與無滑移邊界大不相同，表示在風剪驅動水面紊流邊界層，平均條痕間距不為一定值。而本研究運用物理特性之自動辨識方法比較 Schniders 等 (2013) 的分類演算法，處理相同實驗數據 (Aeolotron 2012) 之結果，兩者平均條痕間距不一致，主要因實驗數據的雜訊去除與辨識方法不同所致；而過去學者對於自由液面的分析無明確歸納出無因次之平均條痕間距為定值，推判可能因水面紊流流場生成機



制較無滑移邊界複雜許多，不論在實驗、模擬層面及分析方法等，需要考慮諸多因子，每一因子的變動都會致使結果的變化，因此，至今還未如無滑移邊界紊流流場的平均條痕間距有明確定值，但隨著實驗、分析方法的差異，其趨勢會在某一個範圍之間變動。

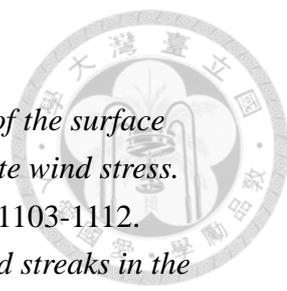
本研究亦觀察到在不穩定的紊流流場中，水面的條痕出現於相對低溫處且平均條痕間距隨著摩擦速度愈大，而變窄。此研究內容詳細紀錄的辨識條痕步驟、方法與實驗數據分析上可能遇到的問題，盼可對後人進行風驅動水面紊流邊界層流場之條痕辨識統計時，作為參考的方向。

未來分析實驗數據時，可以參考諸多雜訊去除的方法，尋找出最適合此數據的去除型態，降低實驗數據受雜訊干擾的程度；運用此自動辨識方法時，若能以更客觀方式決定點位連結範圍，提高分析的準確性。

參考文獻



1. Ferrell, J.K., F.M. Richardson, and K.O. Beatty Jr, *Dye Displacement Technique for Velocity Distribution Measurements*. Industrial & Engineering Chemistry, 1955. **47**(1): p. 29-33.
2. Gemmrich, J. and L. Hasse, *Small-scale surface streaming under natural conditions as effective in air-sea gas exchange*. Tellus B, 1992. **44**(2): p. 150-159.
3. Handler, R., G. Smith, and R. Leighton, *The thermal structure of an air–water interface at low wind speeds*. Tellus A, 2001. **53**(2): p. 233-244.
4. Handler, R.A., I. Savelyev, and M. Lindsey, *Infrared imagery of streak formation in a breaking wave*. Physics of Fluids (1994-present), 2012. **24**(12): p. 121701.
5. Handler, R.A. and G.B. Smith, *Statistics of the temperature and its derivatives at the surface of a wind-driven air-water interface*. Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012), 2011. **116**(C6).
6. Huang, N.E., et al. *The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis*. in *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1998. The Royal Society.
7. Kenney, B.C., *Observations of coherent bands of algae in a surface shear layer*. Limnology and oceanography, 1993. **38**(5): p. 1059-1067.
8. Kline, S.J., et al., *The structure of turbulent boundary layers*. Journal of Fluid Mechanics, 1967. **30**(04): p. 741-773.
9. Long, S.R., *Applications of HHT in image analysis*. Hilbert–Huang Transform and Its Applications, 2005: p. 289-305.
10. Melville, W.K., R. Shear, and F. Veron, *Laboratory measurements of the generation and evolution of Langmuir circulations*. Journal of Fluid Mechanics, 1998. **364**: p. 31-58.
11. Nakagawa, H. and I. Nezu, *Structure of space-time correlations of bursting phenomena in an open-channel flow*. Journal of Fluid Mechanics, 1981. **104**: p. 1-43.
12. Runstadler, P.W., S.J. Kline, and W.C. Reynolds, *An experimental investigation of the flow structure of the turbulent boundary layer*. 1963, DTIC Document.
13. Schnieders, J., et al., *Analyzing the footprints of near-surface aqueous turbulence: An image processing-based approach*. Journal of Geophysical

- 
- Research: Oceans, 2013. **118**(3): p. 1272-1286.
14. Scott, N.V., R.A. Handler, and G.B. Smith, *Wavelet analysis of the surface temperature field at an air–water interface subject to moderate wind stress*. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2008. **29**(4): p. 1103-1112.
 15. Smith, C.R. and S.P. Metzler, *The characteristics of low-speed streaks in the near-wall region of a turbulent boundary layer*. Journal of Fluid Mechanics, 1983. **129**: p. 27-54.
 16. Smith, G., R. Handler, and N. Scott, *Observations of the Structure of the Surface Temperature Field at an Air-Water Interface for Stable and Unstable Cases*, in *Transport at the Air-Sea Interface*, C. Garbe, R. Handler, and B. Jähne, Editors. 2007, Springer Berlin Heidelberg. p. 205-222.
 17. Tsai, W.-T., *A numerical study of the evolution and structure of a turbulent shear layer under a free surface*. Journal of Fluid Mechanics, 1998. **354**: p. 239-276.
 18. Tsai, W.t., *On the formation of streaks on wind-driven water surfaces*. Geophysical research letters, 2001. **28**(20): p. 3959-3962.
 19. Tsai, W.-T., S.-M. Chen, and C.-H. Moeng, *A numerical study on the evolution and structure of a stress-driven free-surface turbulent shear flow*. Journal of Fluid Mechanics, 2005. **545**: p. 163-192.
 20. Woodcock, A.H., *Surface cooling and streaming in shallow fresh and salt waters*. J. Mar. Res, 1941. **4**(2): p. 153-160.
 21. 品質管制編輯委員會編著, *品質管制*. 1983, 中壢市: 先鋒企業管理發展中心.
 22. 溫國暉, *風剪趨動水體紊流邊界層水面高速條痕結構特徵之探討*, 國立交通大學土木工程系. 2004.