

國立臺灣大學理學院大氣科學研究所



碩士論文

Graduate Institute of Atmospheric Sciences

College of Science

National Taiwan University

Master Thesis

臺北盆地東北季風時期之低空風切研究

A Study of Low-Level Wind Shear

at Taipei Basin during the Northeast Monsoon Period

劉沛滕

Pei-Teng Liu

指導教授：林博雄 博士

Advisor : Po-Hsiung Lin, Ph.D.

中華民國 102 年 6 月

June, 2013

## 誌謝

感謝新北市私立穀保家商總務處、鄭文章主任、莊清海書記，提供本研究之觀測場地、儀器電源，以及協助每週資料下載的便利性；感謝新北市中信國民小學行政處、林亨銘主任，新北市成功國民小學總務處、吳春明主任、顏裕豐組長，新北市德音國民小學總務處、廖學明主任、廖恆熙組長提供觀測場地。感謝民航局臺北航空氣象中心與莊清堯先生協助提供松山機場 LLWAS 原始觀測資料。感謝空軍氣象中心提供松山機場低空風切事件經驗與本研究之經費贊助。感謝行政院飛航安全調查委員會提供本研究之電腦計算資源。

謝謝林博雄老師，帶領我接觸許多有趣的氣象議題，也讓我有機會能參與各個有趣的計畫觀測，與其他領域交流，這些都是很棒的經驗；老師提供我研究上的各種協助，不論是實地觀測上或是模式思考上，對我都是很寶貴的科學研究啟發。感謝老師給我許多空間，在寫論文之餘，也為我考量未來的發展。

感謝吳健銘老師、何台華教授、楊宏智教授、官文霖主任擔任口試委員，用心地檢視我的論文與成果，給我寶貴的論文撰寫建議，以及提出我所忽略的問題，熱情地與我討論我的研究議題。

感謝三王、譯心、小盧、tp 哥哥、瑋哥、華哥、志輝學長、小莊哥、梅可忠、阿駿學長、凱元學長、周耿民、建勳、阿虛和孟澤，與我討論也教導我如何使用數值模式、操作觀測儀器，協助我搬運、架設、拆解相當具有重量的氣象儀器到各個觀測點去，接納我在不順遂時的吶喊、嘆息與告解，研究室的各位陪我經歷在 COOK 的生活，每次出外和你們合作，總是帶有期待、新奇與使命感；在許多出差、觀測、登山、討論的場合，我經驗尚淺、年紀最輕，各位哥和學長姊總是特別照顧我，和我分享許多經驗和知識，令我感動萬分。

謝謝毛利在夜裡陪我系住、聊天、吃宵夜，聽我訴苦也與我分享人生的種種際遇，謝謝溫文豪在我艱難時及時跳出來陪我，謝謝一路與我共同奮鬥 seminar 和論文的范范，家傑和貴格也常和我討論研究上、生活上的問題，超級強大鍾博婷和吳舜楠對於我準備畢業的協助，還有婉瑜、欣平、小 phi、吳孟軒，各位都是一同在台大成長、生活、奮鬥了六年的好夥伴。謝謝所有幫助我解決研究上問題的大氣系學長姊、同學們，還有關心我與我教學相長的大氣系學弟妹們。

謝謝我的家人體諒我的研究生作息，來自爸媽的許多關心，還有時常被我賦予鬧鐘任務的姊姊們。

謝謝你！閱讀完我的文章，在這兩年裡一直陪伴在我的心中，最後還為我加油打氣。

台大六年有起有伏，繁忙的、際遇的、愉快的、重挫的、成就的不曾少過。

於系住的 COOK

## 摘要

低空風切是影響飛行起降安全因子之一，其定義為 600 公尺以下的高度，出現水平方向 15 kts/km 的風切，並且持續存在 10 秒鐘以上；部份機場能透過低空風切警示系統(Low Level Windshear Alert System, LLWAS)的建置，來監測低空風切。然而，臺北盆地受到綜觀環境和地形的影響，所產生的低空風切可能不只在松山機場現有的 LLWAS 監測範圍內，在東北季風的影響之下，低空風切可能會發生在臺北盆地西側和西北側的區域。

為探討臺北盆地西側的低空風切，本研究在臺北盆地西側，新增了四個氣象觀測點和一套雲幕儀，建立臨時性氣象觀測網，並進行 60 天的高時間解析觀測。觀測資料經過資料處理和推算後，能使用「三角形遞迴運算法」得到達低空風切閾值的輻合、輻散值，藉以觀測 250 公尺高空的低空風切。在觀測期間該觀測網成功地觀測到低空風切，觀測發生低空風切的時間和松山機場 LLWAS 警報紀錄相近。此外，藉由輻合和輻散呈現負相關的兩個區域，討論氣象觀測網上空的氣流走向會有偏轉的情況。

為了解數值模式對低空風切的模擬效果，本研究使用中尺度氣象模式 WRF 和高解析度計算流力模式 STREAM，對東北季風期間臺北盆地低空風切事件進行模擬比較。WRF 模式利用超過低空風切閾值的渦度場和輻合、輻散場，推測低空風切時空分佈，在 1 公里解析度的模擬結果中，受綜觀環境條件和地形的影響下，WRF 模式能成功偵測低空風切的發生；2010 年 10 月 25 日東北季風增強的個案，WRF 模式成功模擬出和松山 LLWAS 警報紀錄時間相近的低空風切，而且涵蓋臺北盆地西側氣象觀測網和部份松山機場區域的上空。STREAM 模式使用高解析度臺北盆地地形和固定的邊界風場，模擬強盛東北季風進入臺北盆地時的風場結構，能顯示出臺北盆地中的強風速區空間位置，以風場的輻合和偏轉現象，進一步確認低空風切可能發生的區域。

關鍵詞：低空風切、臺北盆地、低空風切警示系統、氣象觀測網、數值模擬


## Abstract



Low-level wind shear is one of the important factors of flight safety factors.

Low-level wind shear is defined as 15 kts/km wind vector difference which persists more than 10 seconds between surface and 2,000 feet (600 m) height. At some airports, low-level wind shear could be detected by Low Level Windshear Alert System (LLWAS). However, due to the synoptic environment and topographic effect of Taipei Basin, the low-level wind shear phenomena may occur outside the LLWAS detecting range. Through the influences of northeast monsoon, low-level wind shear might occur at western and north-western regions of Taipei Basin.

In order to study low-level wind shear over the western region of Taipei Basin, a field network observation in high temporal resolution with 4 mobile weather stations and one ceilometer lidar lasting for two months were conducted. After data quality control and wind field estimation at 250 m height, the divergence/convergence values in which the strengths are over the low-level wind shear's threshold were estimated by "triangle recursion calculation method." During the observation period, the observatory network detected several cases of low-level wind shear which corresponds Song-Sang Airport (RCSS) LLWAS warning record well. Moreover, by means of a negative correlation existed in the divergence/convergence field between two regions, the air streams over the observatory network are deflected.

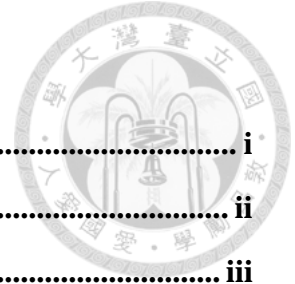


To understand the performance of numerical model simulation on low-level wind shear, Weather Research Forecasting (WRF) model and high resolution computational fluid dynamics STREAM model are used to simulate and discuss cases of low-level wind shear at Taipei Basin during the northeast monsoon period. The WRF numerical model can simulate significant vorticity field and divergence/convergence field in which the strengths are over the low-level wind shear's threshold. The results show that WRF model with 1-km resolution simulation can capture the low-level wind shear successfully by the influence of topography under various synoptic environment conditions. In the strong northeasterly wind case on Oct. 25<sup>th</sup> of 2010, the simulation results show that the hot spots of low-level wind shear locate at western and north-western regions of Taipei Basin including part region of RCSS. The results are consistent with the low-level wind shear alerts of RCSS. The STREAM model uses high resolution topography data and gives stationary boundary wind to simulate the wind structure during the strong northeast monsoon blowing into Taipei Basin. The results show the location of strong wind region at Taipei Basin. With the convergence and deflection of wind, the possible occurring region of low-level wind shear may be further confirmed.

Keywords: Low-level wind shear, Taipei Basin, Low level windshear alert system,

Meteorological observatory network, Numerical simulation

# 目錄



誌謝 .....	i
摘要 .....	ii
Abstract .....	iii
目錄 .....	v
表目錄 .....	vii
圖目錄 .....	ix
<b>Chapter 1 前言 .....</b>	<b>1</b>
1.1 低空風切及其對飛機起降安全的威脅 .....	1
1.2 LLWAS 低空風切警示系統與文獻回顧 .....	2
1.3 臺北盆地風場與地形特徵 .....	5
1.4 研究動機與目標 .....	6
1.5 論文架構 .....	7
<b>Chapter 2 數值模式與觀測設計 .....</b>	<b>8</b>
2.1 WRF 數值模式 .....	8
2.2 觀測設計 .....	9
2.2.1 氣象觀測網 .....	9
2.2.2 觀測站架設與周圍環境 .....	10
2.2.3 觀測儀器 .....	10
2.2.4 LLWAS 觀測資料 .....	11
2.3 觀測資料處理方法 .....	11
2.3.1 資料品質控制與比對 .....	11
2.3.2 高度風場推算 .....	12
2.3.3 參數選取 .....	13
2.4 STREAM 數值模式 .....	15
<b>Chapter 3 觀測網資料計算與分析 .....</b>	<b>17</b>
3.1 密集觀測期間氣象概況 .....	17
3.2 低空風切與觀測資料計算 .....	18



3.2.1	兩觀測點間的風切 .....	19
3.2.2	三角形面積的輻合、輻散值 .....	20
3.3	松山機場 LLWAS 資料比較 .....	21
3.4	輻合、輻散值討論 .....	22
3.5	小結 .....	24
<b>Chapter 4</b>	<b>數值模式模擬 .....</b>	<b>25</b>
4.1	2010 年 10 月 25 日東北季風增強個案 .....	25
4.1.1	天氣概述 .....	25
4.1.2	數值模式範圍與設定 .....	26
4.1.3	模擬結果 .....	27
4.2	2012 年 12 月 6 日個案 .....	28
4.2.1	天氣概述 .....	28
4.2.2	WRF 模式模擬結果 .....	29
4.3	小結 .....	30
<b>Chapter 5</b>	<b>數值模式討論 .....</b>	<b>32</b>
5.1	WRF 模式敏感度測試 .....	32
5.1.1	邊界層等參數敏感度測試 .....	32
5.1.2	地形高度敏感度測試 .....	34
5.2	STREAM 模式測試 .....	35
5.2.1	模式設定 .....	35
5.2.2	模式模擬結果討論 .....	36
5.3	觀測與數值模式結果討論 .....	37
5.4	小結 .....	39
<b>Chapter 6</b>	<b>總結與展望 .....</b>	<b>41</b>
6.1	結論 .....	41
6.2	討論與未來展望 .....	44
	<b>參考文獻 .....</b>	<b>46</b>
	<b>圖表 .....</b>	<b>48</b>



## 表目錄

表 1-1	2009 年 1 月到 2011 年 5 月之間，松山機場的 LLWAS 觀測到顯著的低空風切案例。按發生季節分為春、夏、秋、冬四個欄位，其中有底線的藍斜字為颱風影響的案例；本研究選取持續時間長的顯著低空風切，且為東北季風影響的 2010 年 10 月 25 日做為 WRF 模式模擬個案。.....	48
表 2-1	臺北盆地西側氣象觀測網，四個觀測點的儀器觀測記錄表。.....	48
表 2-2	1 號到 3 號觀測點風速計，與 4 號觀測點風速計的線性迴歸分析；其中 V1 為 1 號觀測點儀器風速資料，依此類推 V2、V3、V4。觀測資料 V1 到 V3 利用修正公式將風速修正，來對應參考風速計的風速 V4，斜率、截距、 $R^2$ 、資料筆數如表格所示。.....	50
表 3-1	氣象觀測網中，兩兩觀測點之間的距離。.....	50
表 3-2	氣象觀測網中，四組三角形區域(東、南、西、北)輻合、輻散值的相關係數。.....	51
表 4-1	中央氣象局 2010 年 10 月 25 日彭佳嶼氣象站逐時觀測資料。.....	52
表 4-2	中央氣象局 2010 年 10 月 25 日臺北氣象站逐時觀測資料。.....	53
表 4-3	2010 年 10 月 25 日 WRF 個案模式設定。.....	54
表 4-4	中央氣象局 2012 年 12 月 6 日彭佳嶼氣象站逐時觀測資料。.....	55
表 4-5	中央氣象局 2012 年 12 月 6 日淡水氣象站逐時觀測資料。.....	56
表 4-6	2012 年 12 月 6 日 WRF 個案模式設定。.....	57
表 5-1	WRF 模式模擬實驗參數設定表；比較使用不同的邊界層參數化、積雲參數化的使用與否、雲微物理過程參數的選用，所設定的實驗編號：Exp. 11~Exp. 16 和 Exp. 21~Exp. 26，其中 Exp. 11 為控制組。.....	57
表 5-2	對應 WRF 模式模擬中 250 公尺高度的輻合、輻散場，比較不同參數化設定，其中 Exp. 11 為控制組，其他各組參數設定請參考表 5-1。九網格平均數值最大散度絕對值、與控制組的比值、發生時間分別列出。.....	58




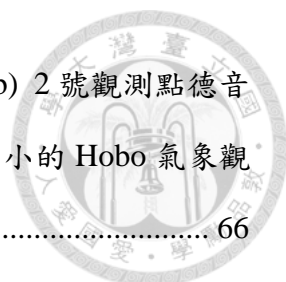


表 5-3	對應 WRF 模式模擬中 250 公尺高度的輻合、輻散場，比較不同地形高度設定，Exp. 11 為控制組，Exp. 30、31、32、33、35，分別為 0%、25%、50%、75%、120% 的地形高度。九網格平均數值最大散度絕對值、與控制組的比值、發生時間分別列出。.....	59
表 5-4	STREAM 模式參數設定 .....	60
表 5-5	STREAM 模式加入熱力條件參數設定 .....	61

## 圖目錄



- 圖 1-1 臺北盆地 google 衛星影像圖。臺北盆地為中間淺色等腰三角形，盆地的北方為大屯山群，西北方為觀音山，西方為林口臺地，西南面為雪山山脈丘陵。..... 62
- 圖 1-2 1990~2008 年松山機場(RCSS)整點風向風速資料統計；藍色為全部資料統計，紅色為 9~12 月和 1~2 月秋、冬兩季的資料統計，橫軸為風向方位，N、S、E、W 為東西南北方，VRB 為風向不定，C 為靜風；(a)各風向發生的百分比例(風向次數/所有次數)；(b)各風向發生時的平均風速，單位為 m/s。..... 62
- 圖 1-3 松山機場 10 號跑道飛機進場航線圖。(摘自民用航空局 Aeronautical Information Publication)..... 63
- 圖 1-4 臺北盆地 30 公尺解析度數位地形模式(Digital Terrain Model, DTM)等高地形圖(上方為北)；圖片中間黑色橫線為松山機場跑道，周邊 13 個黑點為松山機場 LLWAS 的 13 個測風臺，左右延伸的紅色斜線區域為航機儀器進場區域。..... 63
- 圖 1-5 2010 年 10 月 25 日個案之 WRF 模式模擬結果(WRF 設定見第三章)：250 公尺高度剖面的渦度場。圖中黑色等高線為 1 公尺，即可視為海岸線，黑色色塊為地形高於 250 公尺無渦度資料的區域，渦度單位為( $s^{-1}$ )。 . 64
- 圖 2-1 (a) WRF 模式所模擬的四層 Domain 繪製在 google 衛星影像圖上；黃色為 Domain 1、白色為 Domain 2、綠色為 Domain 3、紅色為 Domain 4。(b) 為圖 2-1 (a)的放大圖。..... 64
- 圖 2-2 (a)同圖 1-4，藍色方框為臺北盆地西側，即為圖 2-2(b)的區域。(b)臺北盆地西側 google 衛星影像圖，1、2、3、4 為四個觀測站的代號，綠色方框為觀測站的資訊，黃虛線為飛機航道，藍線為站與站間的連線。..... 65
- 圖 2-3 臺北盆地西側氣象觀測網各儀器照片，各風速計距支架底端都約為 3 公



尺。(a) 1 號觀測點成功國小的 MAWS 氣象觀測站；(b) 2 號觀測點德音國小的 R.M.Young 風速風向計；(c) 3 號觀測點中信國小的 Hobo 氣象觀測站；(d) 4 號觀測點穀保家商的 Hobo 氣象觀測站。..... 66

圖 2-4 各氣象站資料可使用時段示意圖。上方藍線為時間軸，藍線上方的數字為月份，下方的數字為日期，四個觀測點儀器資料可用時段用黃色線條表示，深灰色方塊表示該時段有資料斷缺，紅色垂直線標示資料斷缺事件發生時的日期。..... 67

圖 2-5 各測站風速計擺放於同一處頂樓(國立臺灣大學大氣科學系 C 館)，進行同步觀測比對。..... 67

圖 2-6 1、2、3 號觀測點風速計(y 軸)與參考站 4 號觀測點風速計(x 軸)的觀測比對資料線性迴歸分析圖。(a)第一觀測點；(b)第二觀測點；(c)第三觀測點。..... 68

圖 2-7 (a) 2012 年 11 月至 12 月間板橋探空資料，選取 100 公尺高風速大於 5 m/s 的資料，利用其 25 公尺至 100 公尺高風速資料，求得到 Power Law 指數  $\alpha$  介於 0.30 至 0.67 之間；其中紅點為 00 UTC (早上 8 時)的探空資料，藍點為 12 UTC (晚上 8 時)的探空資料。(b) 2012 年 12 月 6 日 12 UTC 的板橋探空資料，用 Power Law 進行擬合(fitting)結果，所得到的指數  $\alpha$  為 0.40。..... 68

圖 2-8 4 筆板橋探空資料。(a)風速(m/s)、風向(單位為每 10 度)、位溫(K)垂直剖面圖，用以推測邊界層高度；(b)探空觀測風速資料，與 Ekman 調整角度  $\theta$  為 25°、30°、35°，邊界層高度設為 700 公尺，從 100 公尺風速資料推算的風速剖面；(c)、(e)、(g)同(a)但不同時間；(d)、(f)、(h)同(b)但不同時間。..... 69

圖 2-9 2012 年 11 月 12 日，CL31 雲幕儀回波時間序列圖。..... 70

圖 2-10 2012 年 11 月 12 日，CL31 雲幕儀回波垂直差分時間序列圖。..... 70

圖 2-11	2012 年 11 月 13 日，CL31 雲幕儀回波時間序列圖。.....	71
圖 2-12	2012 年 11 月 13 日，CL31 雲幕儀回波垂直差分時間序列圖。.....	71
圖 3-1	氣象觀測網 1 號觀測點(最北方)地面氣壓(藍線)與氣溫(紅線)時間序列圖。 (a) 11 月 9 日至 12 月 9 日觀測資料;(b) 12 月 9 日至 1 月 8 日觀測資料。 .....	72
圖 3-2	氣象觀測網 1 號觀測點地面氣壓(藍線)與風速(綠點)時間序列圖。(a) 11 月 9 日至 12 月 9 日觀測資料;(b) 12 月 9 日至 1 月 8 日觀測資料。...	72
圖 3-3	氣象觀測網 1 號觀測點地面相對溼度(藍線)與溫度(紅線)時間序列圖。(a) 11 月 9 日至 12 月 9 日觀測資料;(b) 12 月 9 日至 1 月 8 日觀測資料。 .....	73
圖 3-4	中央氣象局 2012 年 12 月 5 日 12:00 UTC 地面天氣圖。.....	73
圖 3-5	中央氣象局 2012 年 12 月 23 日 00:00 UTC 地面天氣圖。.....	74
圖 3-6	中央氣象局 2012 年 12 月 30 日 00:00 UTC 地面天氣圖。.....	74
圖 3-7	氣象觀測網 1 號觀測點，觀測期間平均日變化。(a)氣壓(藍線)與風速(綠 點)平均日變化;(b)溫度(紅線)與風速(綠點)平均日變化。.....	75
圖 3-8	臺北盆地西側氣象觀測網各觀測點相對位置示意圖。(a)兩兩觀測點連線 可求之間的風切;(b) 1、2、3 號觀測點圍成「西」三角形，1、3、4 號 觀測點圍成「東」三角形;(c) 1、2、4 號觀測點圍成「北」三角形，2、 3、4 號觀測點圍成「南」三角形。.....	75
圖 3-9	兩觀測點間 250 公尺高的風切時間序列，紅線為輕度低空風切閾值 0.0077 ( $s^{-1}$ )。(a) 1 號和 2 號觀測點;(b) 2 號和 3 號觀測點;(c) 3 號和 4 號觀測 點;(d) 1 號和 4 號觀測點;(e) 1 號和 3 號觀測點;(f) 2 號和 4 號觀測點 間風切。.....	76
圖 3-10	臺北盆地西側氣象觀測網，取三個觀測點使用「三角形遞迴運算法」，得 到東(1-3-4)、南(2-3-4)、西(1-2-3)、北(1-2-4)，四種組合在 250 公尺高的	

	輻合(正值)、輻散(負值)時間序列圖，紅線為輕度低空風切閾值 $\pm 0.0077$ ( $s^{-1}$ )，絕對值超過此閾值的運算值會把記號放大顯示。.....	77
圖 3-11	臺北盆地西側氣象觀測網 2012 年 11 月 11 日至 11 月 17 日期間，250 公尺高的輻合(正值)、輻散(負值)，紅線為輕度低空風切閾值 $\pm 0.0077$ ( $s^{-1}$ )。.....	77
圖 3-12	同圖 3-11，時間為 2012 年 12 月 4 日至 12 月 7 日。.....	78
圖 3-13	同圖 3-11，時間為 2012 年 12 月 24 日至 12 月 30 日。.....	78
圖 3-14	松山機場 LLWAS 警報(藍點)和臺北盆地西側氣象觀測網北三角形區域達低空風切閾值的輻合、輻散絕對值(紅點)，兩者的時間與累積次數圖。.....	79
圖 3-15	同圖 3-14，但縱軸左側改為松山機場針對 10 號跑道飛機進場方向 LLWAS 警報(藍點)的累積次數圖。.....	79
圖 3-16	松山機場 LLWAS 的警報小時頻率。其中 1025 為 2010 年 10 月 25 日；1112、1114、1115、1204、1206、1224、1229 分別為 2012 年 11 月及 12 月的日期。.....	80
圖 3-17	松山機場 LLWAS 西側的 1、7、9 號測風臺圍成的三角形區域(黃色)，與臺北盆地西側氣象觀測網(藍色)，標記在 google 衛星影像圖上。.....	81
圖 3-18	2012 年 12 月 6 日，松山機場 LLWAS 西側 1、7、9 號測風臺圍成的三角形區域，每 10 秒鐘資料使用「三角形遞迴運算法」，所得的輻合、輻散值，紅線為輕度低空風切閾值 $\pm 0.0077$ ( $s^{-1}$ )，絕對值超過此閾值的運算值會把記號放大顯示。.....	81
圖 3-19	同圖 3-18，使用 6 筆 10 秒鐘風速、風向資料，平均成 1 分鐘資料進行計算的結果，絕對值超過 $\pm 0.005$ ( $s^{-1}$ )的運算值會把記號放大顯示。.....	82
圖 3-20	同圖 3-18，日期改為 2010 年 10 月 25 日，使用 6 筆 10 秒鐘風速、風向資料，平均成 1 分鐘資料進行計算的結果，絕對值超過 $\pm 0.005$ ( $s^{-1}$ )的運	

	算值會把記號放大顯示。.....	82
圖 3-21	臺北盆地西側氣象觀測網南三角形區域(藍點)和西三角形區域(洋紅點)，相同時間的輻合、輻散值比較，紅線為輕度低空風切閾值 $\pm 0.0077 \text{ (s}^{-1}\text{)}$ 。.....	83
圖 3-22	臺北盆地西側氣象觀測網西三角形(細紅線)和南三角形(粗黃線)，輻合、輻散風場分析示意圖，綠色區域為兩三角形重疊之面積。(a)西三角形輻合，南三角形輻散；(b)西三角形輻散，南三角形輻合。.....	83
圖 3-23	挑選輻合值 $F > 0.005 \text{ (s}^{-1}\text{)}$ 或 $F > 0.007 \text{ (s}^{-1}\text{)}$ ，以及輻散值 $F < -0.005 \text{ (s}^{-1}\text{)}$ ，三角形氣象觀測網的 250 公尺高度風場向量，每張圖相同顏色的箭頭為相同時間的風場，黑點和黑虛線為觀測點和觀測網。(a)、(c)、(e)、(g)分別為東、南、西、北三角形氣象觀測網輻合時的風場；(b)、(d)、(f)、(h)分別為東、南、西、北三角形氣象觀測網輻散時的風場。.....	84
圖 4-1	2010 年 10 月 25 日 06:00 UTC 地面天氣圖。.....	85
圖 4-2	2010 年 10 月 25 日 12:00 UTC 地面天氣圖。.....	85
圖 4-3	2010 年 10 月 25 日 09:30 UTC 可見光衛星雲圖。.....	86
圖 4-4	2010 年 10 月 25 日 09:30 UTC 紅外線衛星雲圖。.....	86
圖 4-5	中央氣象局 2010 年 10 月 25 日彭佳嶼、臺北、淡水、基隆氣象站每小時最大平均風速，單位為(m/s)。.....	87
圖 4-6	WRF 模式輸出 250 公尺高度的背景地圖。黑色色塊為受地形影響無資料的網格，中間為臺北盆地，北側為大屯山，西側為觀音山、林口臺地、龜山，東南側為雪山山脈丘陵；臺北盆地中間兩個黑點，左邊為臺北盆地西側氣象觀測網 1 號觀測點，右邊為松山機場 LLWAS 中最西側 1 號測風臺；黑色海岸線為海拔 1 公尺高的等高線，綠色線為間距 100 公尺的等高線。.....	88
圖 4-7	臺北盆地西側氣象觀測網(綠點)和松山機場 LLWAS 測風臺(藍點)，標註	

在 google 衛星影像圖上。兩個紅點對應圖 4-6 的兩個黑點，左為臺北盆地西側氣象觀測網 1 號觀測點，右為松山機場 LLWAS 中最西側 1 號測風臺。..... 88

圖 4-8 2010 年 10 月 25 日個案 WRF 模擬結果，250 公尺高度 8:00 到 11:30 UTC 的風場風速圖，紅色表示較大的風速，綠色表示較弱的風速，單位為(m/s)。..... 89

圖 4-9 2010 年 10 月 25 日個案 WRF 模擬結果，250 公尺高度 8:50、9:00、10:00 到 10:50 UTC 的渦度場圖，紅色表示正渦度區，藍色表示負渦度區，單位為( $s^{-1}$ )。..... 90

圖 4-10 2010 年 10 月 25 日個案 WRF 模擬結果，250 公尺高度 8:50、9:00、10:00 到 10:50 UTC 的散度場圖，紅色表示輻散區，藍色表示輻合區，單位為( $s^{-1}$ )。..... 91

圖 4-11 2012 年 12 月 5 日 12:00 UTC 地面天氣圖。..... 92

圖 4-12 2012 年 12 月 6 日 00:00 UTC 地面天氣圖。..... 92

圖 4-13 2012 年 12 月 6 日 09:00 LST (01:00 UTC) 可見光衛星雲圖。..... 93

圖 4-14 2012 年 12 月 6 日 09:00 LST (01:00 UTC) 紅外線衛星雲圖。..... 93

圖 4-15 2012 年 12 月 6 日 04:40 LST (5 日 20:40 UTC) 雷達回波圖。..... 94

圖 4-16 2012 年 12 月 6 日 08:00 LST (00:00 UTC) 雷達回波圖。..... 94

圖 4-17 2012 年 12 月 6 日 00:00 UTC 850 hPa 渦度與流線場(中央氣象局模式分析資料)。..... 95

圖 4-18 2012 年 12 月 6 日 06:00 UTC 850 hPa 渦度與流線場(中央氣象局模式分析資料)。..... 95

圖 4-19 中央氣象局 2012 年 12 月 6 日彭佳嶼、臺北、淡水、基隆氣象站每小時最大平均風速，時間為臺北當地時間，單位為(m/s)。..... 96

圖 4-20 中央氣象局 2012 年 12 月 6 日彭佳嶼、臺北、淡水、基隆氣象站每小時

	平均風向，時間為臺北當地時間，單位為方位角度。.....	96
圖 4-21	2012 年 12 月 6 日個案 WRF 模擬結果，250 公尺高度 12 月 5 日 23:00 到 12 月 6 日 02:30 UTC 的風場風速圖，紅色表示較大的風速，綠色表示較弱的風速，單位為(m/s)。.....	97
圖 4-22	2012 年 12 月 6 日個案 WRF 模擬結果，250 公尺高度 00:20 到 01:30 UTC 的渦度場圖，紅色表示正渦度區，藍色表示負渦度區，單位為(s <sup>-1</sup> )。 .	98
圖 4-23	2012 年 12 月 6 日個案 WRF 模擬結果，250 公尺高度 00:20 到 01:30 UTC 的散度場圖，紅色表示輻散區，藍色表示輻合區，單位為(s <sup>-1</sup> )。 .....	99
圖 5-1	2010 年 10 月 25 日個案散度場圖，紅色表示輻散，藍色表示輻合，單位為(s <sup>-1</sup> )。地圖中的紅色方框範圍中共有 36 × 41 個格點，每個格點 0.5 公里，為 WRF 模式 1 公里解析度模擬結果經過 2 倍內插而成。這一方框是表 5-2、表 5-3 各種敏感度組合的輻合、輻散場的分佈情形。 .....	100
圖 5-2	「九網格平均數值」範例圖，左側為原數值，右側為九網格平均數值。黑色方框示意為圖 5-1 的紅色方框，最外圍邊界不計算九網格平均數值；原數值 9 格綠色方格平均的數值，呈現在九網格平均數值最中間的網格；原數值紅色方框遇到邊界無數值問題，9 格中僅有 5 格有數值，因此加總除以 5 成為九網格平均數值的左上角的網格。 .....	100
圖 5-3	以圖 5-1 中的紅色方框範圍，呈現「控制組」輻合、輻散場的時間序列圖，紅色表示輻散區，藍色表示輻合區，單位為(s <sup>-1</sup> )，x、y 座標為網格數。 .....	101
圖 5-4	比較不同參數化設定，在 WRF 模式模擬中 250 公尺高的輻合、輻散場，其中 Exp. 11 為控制組，其他各組參數設定請參考表 5-1；紅色表示輻散區，藍色表示輻合區，單位為(s <sup>-1</sup> )，x、y 座標為網格數；挑選的時間為各實驗測試中，九網格平均數值最大輻合的時間。 .....	101
圖 5-5	比較不同地形高度在 WRF 模式模擬中 250 公尺高的輻合、輻散場，其中	





Exp. 11 為控制組，Exp. 30、31、32、33、35，分別為 0%、25%、50%、75%、120% 的地形高度；紅色表示輻散區，藍色表示輻合區，單位為( $s^{-1}$ )，x、y 座標為網格數；挑選的時間為各實驗測試中，九網格平均數值最大輻合的時間。..... 102

圖 5-6 控制組不同高度的輻合、輻散場圖，由左至右再由上到下分別為 50、100、150、200、250、300、500、600、700 公尺高度的輻合、輻散場；紅色表示輻散區，藍色表示輻合區，單位為( $s^{-1}$ )，x、y 座標為網格數。..... 102

圖 5-7 臺北盆地 45 × 36 公里範圍的 30 公尺解析度 DTM 平面圖，紅色點為臺北盆地西側氣象觀測網新增的四個觀測點。..... 103

圖 5-8 STREAM 模式顯示臺北盆地 45 × 36 公里範圍的立體地形圖。..... 103

圖 5-9 WRF 模式模擬 2010 年 10 月 25 日 08:00 UTC 的 250 公尺高度風速場，藍色的四個點為選取加入 STREAM 模式邊界垂直剖面風場的位置。 104

圖 5-10 放入 STREAM 模式四邊的風速垂直剖面。(a)北邊邊界剖面；(b)南邊邊界剖面；(c)西邊邊界剖面；(d)東邊邊界剖面。..... 105

圖 5-11 臺北盆地 45 × 36 公里範圍等高線圖，等高線間距為 25 公尺。..... 106

圖 5-12 臺北盆地 45 × 36 公里範圍的地表風風速。..... 106

圖 5-13 臺北盆地 45 × 36 公里範圍，STREAM 模式模擬 150 分鐘後(未達穩定)的 250 公尺高度風場，白點為臺北盆地西側氣象觀測網新增的四個觀測點。..... 107

圖 5-14 臺北盆地西側範圍，STREAM 模式模擬 150 分鐘後(未達穩定)的 250 公尺高度風場，白點為臺北盆地西側氣象觀測網新增的四個觀測點。.. 107

圖 5-15 臺北盆地 45 × 36 公里範圍，STREAM 模式模擬達穩定後的 250 公尺高度風場，白點為臺北盆地西側氣象觀測網新增的四個觀測點。..... 108

圖 5-16 臺北盆地西側範圍，STREAM 模式模擬達穩定後的 250 公尺高度風場，白點為臺北盆地西側氣象觀測網新增的四個觀測點。..... 108

- 圖 5-17 STREAM 模式模擬 150 分鐘後(未達穩定)的 250 公尺高度風場，和由南邊界往北  $Y=8280\text{ m}$ 、 $Y=16000\text{ m}$  的垂直截面風速，白點為臺北盆地西側氣象觀測網新增的四個觀測點(圖中只看到南邊的三個觀測點)。..... 109
- 圖 5-18 STREAM 模式模擬 150 分鐘後(未達穩定)的 250 公尺高度風場，和由西邊界往東  $X=5000\text{ m}$ 、 $X=10800\text{ m}$ 、 $X=19000\text{ m}$  的垂直截面風速，白點為臺北盆地西側氣象觀測網新增的四個觀測點(圖中只看到東邊的三個觀測點)。..... 109
- 圖 5-19 STREAM 模式模擬達穩定後的 250 公尺高度風場，和由南邊界往北  $Y=8280\text{ m}$ 、 $Y=16000\text{ m}$  的垂直截面風速，白點為臺北盆地西側氣象觀測網新增的四個觀測點(圖中只看到南邊的三個)。.....110
- 圖 5-20 STREAM 模式模擬達穩定後的 250 公尺高度風場，和由西邊界往東  $X=5000\text{ m}$ 、 $X=10800\text{ m}$ 、 $X=19000\text{ m}$  的垂直截面風速，白點為臺北盆地西側氣象觀測網新增的四個觀測點(圖中只看到東邊的三個)。.....110
- 圖 5-21 臺北盆地西側氣象觀測網 1 號觀測點的地面風速資料(藍點)，與北三角形面積的輻合、輻散絕對值(紅點)比較圖。地面風速大於  $4\text{ m/s}$  以及輻合、輻散絕對值大於  $0.004\text{ (s}^{-1}\text{)}$  的標記放大顯示。.....111
- 圖 5-22 臺北盆地西側氣象觀測網在 2012 年 11 月 12 日東北風增強時，四個觀測點的地面風速資料時間序列圖。紅色為 1 號觀測點，綠色為 2 號觀測點，洋紅色為 3 號觀測點，藍色為 4 號觀測點。.....111
- 圖 5-23 臺北盆地  $51 \times 45$  公里範圍，STREAM 模式加入熱力條件後的 250 公尺高度風場圖。模式模擬所經過的時間為 (a) 240 分鐘;(b) 270 分鐘;(c) 300 分鐘;(d) 330 分鐘;(e) 360 分鐘後的圖。.....112



# Chapter 1 前言


## 1.1 低空風切及其對飛機起降安全的威脅

依據聯合國國際民航組織(International Civil Aviation Organization, ICAO)以及美國大學大氣研究聯盟(University Corporation for Atmospheric Research, UCAR)的文獻定義，低空風切(Low-level Wind Shear)是指離地 2000 ft (600 公尺)的高度內，發生水平方向 15 kts/km 以上的單位距離風速向量差，並且低空風切發生的時間要持續 10 秒鐘以上，而不是短暫幾秒鐘的亂流或陣風造成的瞬間風速向量差(ICAO, 2005；UCAR, 2013)。

在近地面無強烈對流存在的環境中，垂直的風速趨近於零，因此在討論低空風切的時候，以水平風的水平風切和水平風的垂直風切為主。在飛機起飛或降落的過程中，如果所經過的航線存在強烈風切，將會影響飛機的操控及安全。如果飛機航線逆風風速增加(wind speed loss)，飛機的升力也會增加，飛機可能因為升力過大而造成飛機仰角快速上升；飛機降落時仰角過高導致不穩定進場，飛機需要重飛。如果飛機航線的順風風速增加(wind speed gain)，飛機升力會下降，導致飛機之航機仰角減少且爬升率下降，或是降落時造成下降速度突然增加，因而發生飛航事故。由此可知，低空風切是嚴重影響飛機起降階段的飛航安全。

低空風切依其單位距離風速向量差的大小，有不同的分級(蒲，2003)：15~19 kts/km 的單位距離風速向量差，歸類為輕微(slight)低空風切；20~29 kts/km 的單位距離風速向量差，歸類為中度(moderate)低空風切；大於 29 kts/km 的單位距離風速向量差，則稱為強烈(strong)低空風切。

造成低空風切的原因，主要有以下幾種(Lester, 2004)：(1) 微爆流：強烈的下沉輻散氣流；(2) 強烈對流陣風鋒面：陣風鋒面後的強風和前側形成強風切；(3) 鋒面：鋒面前後風速風向轉變造成的水平風切；(4) 地形效應：氣流受地形阻擋、繞行引起的低空風切；(5) 海陸風吹拂；(6) 低空噴流。其中微爆流最令人警惕及熟



知，當飛機飛入微爆流的過程中，先會有很強的逆風使飛機升力增加，飛機能輕易的上升而不需要太多往前飛行的速度來提供升力，但當飛機開始駛離微爆流中心，周邊風場會轉變成順風，讓飛機升力快速下降，使飛機有快速下墜的危險。微爆流屬於強烈順風風速增加的低空風切，對飛航安全有極大的威脅；本文所將討論的案例，則以地形效應引發的低空風切為主。

## 1.2 LLWAS 低空風切警示系統與文獻回顧

低空風切警示系統(Low Level Windshear Alert System, LLWAS)，是指機場跑道兩側平行飛機跑道的測風臺，以及其電腦演算、警示器所構成的系統。LLWAS 對於沿著機場跑道方向，前後 3 倍跑道長度內的範圍，進行低空風切的監測並適時發佈警報。測風臺上含有風向和風速計，與氣象觀測的風觀測有相同的觀測條件：風速和風向計所放置的測風臺必須離地面 10 公尺以上，且觀測點的儀器顯露度必須有一定的水準。測風臺可能建立在空曠處的地面，或是在較高的建築物頂樓之上。在臺灣松山機場(RCSS)以及桃園機場(RCTP)各有設置 LLWAS(從 2001 年建置啟用至今)，其中松山機場具有 12 座遠端測風臺以及 1 座中央測風臺，桃園機場具有 14 座遠端測風臺以及 1 座中央測風臺。

LLWAS 以各個測風臺 10 秒的時間解析度，再取平均風為原始觀測資料。由於地面風觀測位置離地面約在 20 至 30 公尺，因此再使用 power-law 函數剖面 (0 至 100 公尺) 和 Ekman Layer 特性(100 至 300 公尺)，將地面風觀測資料推算到 300 公尺(1000ft)高度(ICAO, 2005)，再進一步即時運算和發報警報。LLWAS 作業流程主要分為三個部份(蒲，2004；余和童，2011；UCAR, 1992)：

第一部份：將各個測站的 10 秒平均風速原始資料進行資料過濾，比較平均數和標準差，若有顯著差異，則利用統計方法(Chi-square)調整，剔除錯誤的數值。

第二部份：將各個測站的 10 秒平均風速，取兩個測站資料彼此作「風切計算演算法」，得到風切的方向及大小；並將各個測站的 10 秒平均風速，取三

個測站資料作「輻散分析演算法」，這三個測站的選取需符合：兩兩測站之間距離 1 到 5 公里，以及三個測站所圍出來的三角形，其最小的角度需大於 25 度，面積範圍為 0.433 至 10.825 平方公里。若其中有得到風切向量過大，或是輻合、輻散量過大，則進行第三部份警告分析作業。

第三部份：將風切向量投影到平行機場跑道方向，分析風切對於跑道影響的強度及種類，當風切持續出現達一定時間，會發佈飛機跑道的風切警告。

LLWAS 對於風切的演算法，是由 UCAR 所發展，從 LLWAS Phase-I 第一代最初的演算法，已經發展至 Network Expansion Low Level Windshear Alert System (LLWAS-NE)，使用 Phase-III Algorithm 第三代演算法。過去也有相關研究(Meyer *et al.*, 1999)討論儀器問題(sensor problems)及參數問題(parameter problems)，兩者造成的 LLWAS 的過度警報(over-warning)及警報失誤(false alerts)，其中參數問題造成許多的過度警報，因此 UCAR 不斷地研發調整 LLWAS 其中的演算法參數，目前 LLWAS Phase III (LLWAS-NE)已經有 90%以上的預報準確度，並且持續有新型低空風切系統研發(郭和吳，2006)，也試著與都卜勒氣象雷達(Terminal Doppler Weather Radar)做結合(Meyer *et al.*, 1999)。

由於 LLWAS 詳細的演算法並未公開，無法使用此演算法自行操作和建置相同的 LLWAS。何等(2005)的研究中，將松山和桃園機場 LLWAS 的原風速資料，使用「三角形遞迴運算法」，重新計算 LLWAS 任三個測風臺所圍出來符合規定的三角形輻合輻散量，以推得低空風切，計算公式為：

$$E = \frac{\oint V_n ds}{A} \quad (1.1)$$

E：輻合、輻散值，正值為輻散、負值為輻合；

$V_n$ ：垂直於三角形三個邊的風速分量；

s：三角形三個邊長；



A：三個測風臺所圍出來的三角形面積；

若三角形三個頂點的觀測點代號分別為 1、2 和 3，此三點的位置分別為 $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$ 、 $(x_3, y_3)$ 和風場為 $(u_1, v_1)$ 、 $(u_2, v_2)$ 、 $(u_3, v_3)$ ，定義新輻合、輻散之強度 F 為原輻合、輻散強度 E 的相反數，則三角形面積 A 及速度場平均之輻合、輻散強度 E 可改寫表示法為：

$$F \equiv -E \quad (1.2)$$

$$F = F_a + F_b \quad (1.3)$$

其中

$$F_a = \frac{(y_2 - y_1) \times (u_3 - u_1) - (y_3 - y_1) \times (u_2 - u_1)}{2A} \quad (1.4)$$

$$F_b = \frac{(x_3 - x_1) \times (v_2 - v_1) - (x_2 - x_1) \times (v_3 - v_1)}{2A} \quad (1.5)$$

面積的計算公式為：

$$A = \frac{\sqrt{(A_a - A_b)}}{2} \quad (1.6)$$


其中

$$A_a = [(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2] \times [(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2] \quad (1.7)$$

$$A_b = [(x_2 - x_1) \times (x_3 - x_1) + (y_2 - y_1) \times (y_3 - y_1)]^2 \quad (1.8)$$

以上公式中，輻合、輻散強度 F 單位為 $(s^{-1})$ ，正值代表輻合，負值代表輻散。依「三角形遞迴運算」計算得到的低空風切結果與 LLWAS 的警示結果比較，兩者所得到低空風切發生時間大致上相同，但此方法得到的低空風切強度較 LLWAS 的警示頻率略高，因此這個方法是可以有效的計算低空風切，我們也使用此種方法來進行低空風切的運算。

松山機場 LLWAS 觀測到的低空風切歷年統計資料，指出臺北盆地一年四季受各季節的天氣系統影響，皆有可能發生顯著的低空風切，但是在夏天和秋天發生



的頻率最高；在一天當中，以日間也就是臺北當地時間早上 8 時到下午 6 時，為低空風切的好發時段，其中又以接近中午、午後時段，低空風切發生的頻率最高(蒲，2003)。另外，桃園機場低空風切歷年統計也有相似的統計結果，但是增加海陸風影響這項因素，使得夜間時間也有低空風切發生的案例(蒲，2004)。

在 2009 年 1 月到 2011 年 5 月之間的松山機場 LLWAS 顯著案例(表 1-1)，呈現一年四季都有低空風切發生之紀錄，並以夏季和秋季的案例為最多，並且發生時間以日間到傍晚為主(余和童，2011)。依照綜觀天氣條件可進一步把低空風切案例分成四類：受鋒面過境、颱風、午後熱對流和東北季風的影響。我們從表 1-1 挑出同一天發生低空風切頻繁較高的幾個案例來進行數值模式模擬測試；其中 2010 年 8 月 30 日和 2010 年 9 月 19 日皆為颱風影響的結果，因颱風來臨時飛機可能會停飛或採用避讓飛行，此時低空風切對飛機起降安全影響較有限，而且颱風環流在數值模式模擬的結果不確定性較大。因此，本研究將此類個案加以排除。過去統計資料顯示，因東北季風所產生之低空風切對松山機場影響最大，本研究以 2010 年 10 月 25 日發生最頻繁的低空風切做為主要研究對象。本案例並沒有強對流、劇烈天氣發展，因此我們將鎖定水平風切加以討論；此外，LLWAS 系統的風場資料也僅是同一個水平高度面不同點的水平風資料，因此我們將以水平風切所產生的輻合輻散場來討論低空風切。

### 1.3 臺北盆地風場與地形特徵

臺北盆地(圖 1-1)四周環繞著山地、丘陵、臺地，北方為大屯山群，西北方為觀音山，西方為林口臺地，西南面為雪山山脈丘陵。臺北盆地地形獨特，東北方到北方、西方較高地形的另一側，即是東海、臺灣海峽等海洋。影響臺北盆地的氣象綜觀環境，可透過氣流過山、邊界層混合作用或是臺北盆地地形缺口，將氣流送入臺北盆地內陸地區。這些地形缺口，主要為東北方雪山山脈丘陵和大屯山群間，東北-西南走向的谷地地形(新北市汐止區)；西北方大屯山群和觀音山之間的淡水河口(新北市淡水區)；以及西南方林口臺地和雪山山脈丘陵間的大漢溪谷地



(新北市樹林區)。

松山機場在一年之中，由於近地面吹東風的時間較多，所以飛機的起降主要是使用 10 號跑道，此時東風即成為飛機起降的逆風。以 1990 年至 2008 年的松山機場風向資料來判定機場使用跑道的頻率(圖 1-2)，發現全年有 80% 以上的時間，飛機是使用 10 號跑道起降，在秋冬兩季更是有 90% 以上的時間。實務上，當機場跑道順風 10 kts 以下(中小型固定翼民航機之順風起降限制)或是機場操作考量，在跑道順風時也會使用 10 號跑道，因此使用 10 號跑道的時間，會比風向的時間統計還多，秋冬兩季松山機場使用 10 號跑道的時間，應當接近 100%。


飛機若使用 10 號跑道降落松山機場，需要在林口臺地進入儀器導航區並降低飛行高度到 500 公尺 (約 1640 ft) 左右，對準松山機場 10 號跑道開始下滑，經過泰山、五股、三重地區至臺北市圓山地區一帶到達 10 號跑道著陸區(圖 1-3)。但是飛機下方的地形地物卻有眾多的變化；在風速較大時，飛機沿途下降過程會發生機身左右晃動情形。不禁讓人想要進一步了解，受臺北盆地的地形因素影響所造成的低空風切，是否發生在松山機場 LLWAS 監測範圍以外？

## 1.4 研究動機與目標

中央氣象局基隆五分山氣象都卜勒雷達，以及桃園機場氣象都卜勒雷達，由於受限於盆地地形和回波產生條件，兩者均無法觀測臺北盆地地形下方的低空風場。松山機場由於有 LLWAS 的建置(圖 1-4)，得以進行低空風切觀測。然而臺北盆地地形複雜，在松山機場以外的其他地方，是否也經常有低空風切的發生，而暗藏飛航安全影響因子？

LLWAS 觀測資料在過去的研究文獻中，有統計分析的討論 (蒲，2003；余和童，2011)，以及運算操作方法和參數設定的探討研究(何等，2005；Meyer *et al.*, 2009)。然而，松山機場 LLWAS 從 2001 年建置以來的研究文獻不多，也沒有相關研究使用較高解析度的數值模式來模擬低空風切。Lin *et al.* (2008) 曾利用 WRF 模式來模擬臺北盆地海陸風氣流，藉以用來討論空氣污染的傳送，因此本研究也將利用 WRF





數值模式來進行低空風切的模擬，並且與低空風切觀測資料進行比對。在 2010 年 10 月 25 日「東北風增強」的顯著低空風切個案模擬結果中，顯示低空風切主要分佈在臺北盆地西側(圖 1-5)，松山機場 10 號跑道下滑航線正經過此處，並超出松山機場 LLWAS 最西側的偵測範圍，因此我們將在林口臺地到淡水河道之間進一步設立臨時氣象觀測網，來對臺北盆地西側的低空風切進行探討。

本文研究的主要目標可歸納如下：

1. 利用 WRF 數值模式模擬進行低空風切個案診斷。
2. 架設氣象觀測網，觀測秋冬之際東北風影響下的臺北盆地西側低空風切。
3. 比對臺北盆地西側和松山機場低空風切觀測資料。
4. 比對觀測資料和數值模式模擬結果。
5. 利用高解析度流體力學模式(STREAM 模式)模擬受地形影響的臺北盆地風場。

## 1.5 論文架構

本文第二章介紹所使用的數值模式(WRF 與 STREAM)與觀測儀器。在模式部份將介紹兩種數值模式版本與內涵，說明其主要的參數設定選項，以及初始氣象場資料來源；在儀器部份將介紹觀測地點和所使用的各種儀器設備，也包含觀測策略及資料過濾、處理和推算的方法。

本文第三章是 2012 年 11 月初至 2013 年 1 月初，臺北盆地西側的臨時觀測結果，我們將討論風切計算及輻合輻散的計算結果，並和松山機場 LLWAS 觀測資料進行比較。第四章探討 2010 年 10 月 25 日個案，以及挑選觀測期間顯著的 2012 年 12 月 6 日個案，進行低空風切的 WRF 模式模擬。

第五章對於 WRF 參數設定如邊界層條件等不同項選設定，以及地形高度進行敏感度測試，也使用 STREAM 模式在高解析度臺北盆地地形下，進行風場模擬，並比較觀測和模擬的結果。第六章將總結臺北盆地低空風切的模式模擬、觀測結果，以及展望未來更進一步的低空風切探討方向。

## Chapter 2 數值模式與觀測設計



本研究使用中尺度氣象模式 WRF (Weather Research and Forecasting, 見 2.1 節) 來進行低空風切擾動數值模擬，並使用 WRF 模式做為 STREAM 模式(見 2.4 節) 高解析度數值模式的初始場，進行時間與空間更高解析度的風切擾動模擬。在實際觀測部份則透過數值模擬資料的結果，選取臺北盆地西側架設四個含風速風向計的氣象觀測站，建構臨時性氣象密集觀測網，加上松山機場低空風切警報系統 (Low Level Windshear Alert System, 以下簡稱 LLWAS) 原始資料，一併做為本研究的觀測資料。

### 2.1 WRF 數值模式

The Weather Research and Forecasting (WRF) 模式，是由美國國家大氣研究中心 (National Center for Atmospheric Research, NCAR) 的中小尺度部門 (Mesoscale and Microscale Meteorology Division, MMM) 所發展的。WRF 天氣數值模式在研究用途以及作業單位上，皆廣泛地被運用來進行數值模擬，並進一步做為天氣診斷與預報的工具，透過電腦資源與各種平臺進行運算，可模擬、應用於數百公尺至數千公里尺度的天氣系統。WRF 模式主要可應用的議題，包含理想模擬、參數化研究、資料同化研究、預報研究、即時天氣預測、颶風研究、耦合模式以及教學訓練上的使用等，其他的相關資訊可由 WRF Model User Site 的網頁 <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/> 來取得。

本研究使用 WRF 3.2.1 版本，可設定多層巢狀網格，本研究模式設定使用四層巢狀網格，空間解析度分別為 27、9、3、1 公里，分別有  $193 \times 170$ 、 $148 \times 163$ 、 $148 \times 181$ 、 $157 \times 145$  個網格(圖 2-1)，其中第三層網格包含整個臺灣陸地，第四層(最內層)網格則包含臺灣北部，本文後述的討論均以第四層模擬結果的數據輸出為主；在垂直分層的部份，本研究使用 34 層來進行模擬，在近地面的垂直分層設置較多，以利對臺北盆地近地面的模擬。在模擬中使用的 WRF 參數：邊界層為

Mellor-Yamada-Janjic (MYJ) scheme；雲物理為 Lin *et al.* (1983) scheme；積雲參數化為 Kain-Fritsch (KF) scheme，但是在第三和第四層網格，因為網格解析度較高，積雲參數化是不使用的。由於本研究所討論的議題為低空風切，邊界層的設定非常重要，在模式中邊界層參數的選用是很值得注意的，因此特別比較了另一種常用的邊界層參數化 Yonsei University (YSU) scheme 的設定，另外也比較使用另兩種雲物理參數，以及外層網格積雲參數化使用與否等模擬，來討論模擬結果之差異程度(見 5.1 節)。

本研究使用的綜觀環境初始場和邊界條件來源，是美國海洋大氣總署(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) National Centers for Environmental Prediction (簡稱 NCEP) Final Analysis (Final from GFS) (ds083.2) 的分析場網格資料，該資料為 NCEP 例行使用的 Global Forecast System (GFS) 模式於 1999 年 7 月 30 日開始上線免費提供。此一資料的水平空間解析度為  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  經緯度，時間解析度為每 6 小時，垂直資料有 1 層地面層和 26 層特性層(1000 hPa 到 10 hPa)，包含地表邊界層、特定的 sigma 層、對流層頂以及其他資訊。所擁有的變數為氣壓、氣溫、海洋表面溫度、相對溼度、地表風、u、v 風場、垂直運動、反照率、長波及短波輻射量等 40 種變數，變數的完整資訊可見 <http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/>。

## 2.2 觀測設計

### 2.2.1 氣象觀測網

為獲取東北風增強情境下，受臺北盆地地形影響的低空風切觀測資料，我們在 2012 年 11 月 9 日到 2013 年 1 月 8 日東北季風容易增強的時節，將四套含有風速風向計的地面氣象站，擺放在臺北盆地西側。經過地圖分析與現地勘查，選取了幾處學校頂樓做為氣象站置放地點(圖 2-2)，每個觀測點之間的距離都在 2.3 公里到 3.7 公里之間，這四個觀測點圍成一接近正方形的四邊形氣象觀測網，每三個點一組可圍出四組三角形，觀測點與觀測點的距離以及所圍成的四個三角形，都



符合 LLWAS 在選取兩個或三個測站時，做「風切計算演算法」、「輻散分析演算法」(UCAR, 1992) 以及「三角形遞迴運算法」(何等, 2005)的條件要求，以利之後進行風切以及輻合、輻散場的計算。

## 2.2.2 觀測站架設與周圍環境

臺北盆地西側新增的氣象觀測地點，由北方的觀測點開始逆時針方向分別為：成功國小(25°05' 09"N、121°27' 20"E)、德音國小(25°04' 18"N、121°26' 05"E)、中信國小(25°03' 21"N、121°26' 56"E)、穀保家商(25°04' 07"N、121°28' 18"E)，以下分別以 1、2、3、4 號觀測點稱呼之，海拔高度分別為 4、14、7、5 公尺，氣象站儀器廠牌分別為芬蘭 Vaisala 公司 MAWS、美國 R.M.Young、美國 ONSET 公司 Hobo 氣象紀錄器與套件以及芬蘭 Vaisala 公司的 CL31 雲幕儀。放置在這些學校頂樓上的環境顯露度條件皆為良好，1 號觀測點成功國小，西面即為寬擴的二重疏洪道，北面、東面、南面皆為和學校建築等高的公寓建築，仰角(周邊建物遮蔽度的視角角度)在 5 度以下，儀器 MAWS 放置在頂樓(6 樓)水泥水塔上(圖 2-3(a))；2 號觀測點德音國小，西方即為抬升的林口臺地以及沿上升地形所建之建築，較明顯受地形因素影響而受遮蔽，仰角約 15 度，北面、東面、南面皆為低層樓建築，顯露度條件極佳，風速風向計 R.M.Young 放置在頂樓(6 樓)平臺的東北角落(圖 2-3(b))；3 號觀測點中信國小，四周皆為綠地及未開發之荒地，東北方和南面在遠處(約 250 公尺遠)才有大樓建築，仰角在 5 度以下，儀器 HOBO-1 放置在頂樓(6 樓)上(圖 2-3(c))；4 號觀測點穀保家商，四周皆為低層樓建築，西邊鄰近二重疏洪道以及捷運機場線，顯露度條件極佳，儀器 HOBO-2 放置在頂樓(7 樓)平臺上(圖 2-3(d))，另外也在此處架設 CL31 雲幕儀。

## 2.2.3 觀測儀器

本研究主要探討低空風切，主要的觀測要素是風速和風向，也同時記錄溫度、溼度、氣壓、輻射量等氣象參數，也記錄雲、雨與氣膠的時間序列。這些觀測設



備和設定簡述如下。

MAWS：風速風向計、溫溼度計、氣壓計，1 分鐘平均與輸出時間解析度。

R.M.Young：風速風向計，1 分鐘平均與輸出時間解析度。

HOBO：風速風向計、溫溼度計、輻射計，10 秒鐘觀測時間解析度，取每 6 筆資料做平均，得到 1 分鐘時間解析度的資料。

CL31：雲幕儀，910 nm 近紅外線波段的垂直指向光達，可觀測天空的狀況包含雲、霧、降雨、氣膠等，觀測時間解析度為 5 秒鐘，垂直解析度為 5 公尺，垂直高度上限是 7.5 公里。

## 2.2.4 LLWAS 觀測資料

密集觀測期間民用航空局飛航服務總臺也提供了松山機場 LLWAS 原始觀測資料做為臺北盆地東側的風切資訊。我們整理從 2012 年 11 月 9 日到 2012 年 12 月 31 日共 53 天的資料，加上近年來最顯著的 2010 年 10 月 25 日的強烈低空風切個案觀測資料(余和童，2011)。LLWAS 原始觀測資料包含 13 個測風臺的 10 秒鐘平均風速風向資料，以及每 10 秒鐘的瞬時風速風向資料；每 1 分鐘、10 分鐘、1 小時會有偵測低空風切情況的代碼，其中如果 LLWAS 有偵測到達低空風切閾值的時刻，會在 10 秒鐘觀測資料中加註風切警告之電碼(SPESOK)，以及 10 號跑道和 28 號跑道飛機進、離場方向的低空風切警告電碼，可供低空風切警報次數的統計。

## 2.3 觀測資料處理方法

### 2.3.1 資料品質控制與比對

觀測資料首先進行資料品質控制(quality control)，由於受到感測器電路問題、降雨以及人為因素(如：儀器設定、下大雨無法準時到現場收資料)影響，部份資料無法使用而加以剔除(圖 2-4)，其中 3 號觀測點由於儀器電路短路，資料無法寫入，可用觀測資料較少；此外較大的降雨使得風杯啟動旋轉的靜摩擦力過大，需等待

風力足夠時，風杯才能正常啟動，由於本研究討論的低空風切風速較大，因此直接將風速為 0 m/s 的資料時段加以剔除；最後是測站記憶體容量問題(容量上限為七天觀測資料)，由於其中一次作者因雨勢過大，無法準時前往現地進行資料下載，部份儀器資料記憶體發生滿溢而短缺半天。經過排除以上各種影響觀測進行的因素之後，整體的觀測能穩定進行，表 2-1 整理了觀測時程與有效資料長度。

此外，本研究也將四套風速計擺放在同一處進行觀測比對(圖 2-5)，比對修訂的流程為：各風速計觀測資料分別和參考風速計的觀測資料，求取兩者之間的線性迴歸函數來加以修正，參考風速計是以 4 號觀測點風速計做為標準。

由於低空風切個案發生當下的環境風速通常較大，因此在進行不同風速計比對的過程中，本研究針對風力較大時段來進行線性迴歸分析。1 號到 3 號觀測點的風速計(y 軸)與參考風速計(x 軸)的線性迴歸斜率分別為 1.048、0.935、0.943，截距分別為-0.339、-0.387、0.188， $R^2$  的值分別為 0.949、0.884、0.883 (圖 2-6 (a)(b)(c) 與表 2-2)；結果發現風速計比對的迴歸分析相關性良好，因此在之後的觀測網風切都是經過表 2-2 的公式，將風速資料修正成參考風速計的風速後再進一步計算。

### 2.3.2 高度風場推算

氣象觀測網所架設的儀器，都是在 6、7 樓層高度再加上儀器本身支架向上延伸 3 公尺，因此風速計距離地面的高度大約 25 公尺，本研究再使用 Power Law 函數關係將離地 25 公尺的風速風向資料推算至離地 100 公尺的風速風向資料(ICAO, 2005)，這兩層高度與風速之間的公式為：

$$\frac{V}{V_r} = \left(\frac{Z}{Z_r}\right)^\alpha \quad (2.1)$$

$V_r$ ：觀測設備的風速 (m/s)；

$Z_r$ ：觀測設備的高度 (m)；

$V$ ：所推算的風速 (m/s)；

$Z$ ：所推算的高度 (m)；

我們將  $Z_r$  設為 25 公尺， $Z$  設為 100 公尺， $\alpha$  指數將會依當地環境、地表狀況和氣象條件改變；接著再使用 Ekman Layer 的特性，將所得到的離地 100 公尺風速風向資料，推算至 250 公尺高度的風速風向資料(ICAO, 2005)，250 公尺高度數據是考量臺北盆地西側靠近林口臺地的地形高度而來，不同高度之間的風場換算公式為：

$$u = V_g - V_g \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\theta \cdot e^{-\gamma z} \cdot \cos\left(\gamma z + \frac{\pi}{4} - \theta\right) \quad (2.2)$$

$$v = V_g \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\theta \cdot e^{-\gamma z} \cdot \sin\left(\gamma z + \frac{\pi}{4} - \theta\right) \quad (2.3)$$

$$\gamma = \frac{\pi}{D_e} = \sqrt{\frac{f}{2K_m}} \quad (2.4)$$

$u$ 、 $v$ ：東西、南北分量風速 (m/s)；

$V_g$ ：地轉風風速 (m/s)；

$z$ ：距離地面的高度 (m)；

$\pi$ ：圓周率；

$\theta$ ：Ekman Layer 所調整的角度；

$D_e$ ：Ekman Layer 的厚度 (m)；

$f$ ：科氏力參數，觀測地點位於北緯 25 度， $f$  設為  $6.164 \times 10^{-5} \text{ (s}^{-1}\text{)}$ ；

$K_m$ ：渦流黏性參數。(m<sup>2</sup>/s)

### 2.3.3 參數選取

考慮在不同地貌環境以及不同氣象條件之下，Power Law 中的指數參數  $\alpha$  會有所不同。由於臺北盆地西側為航空管制區，無法釋放探空氣球，但是周圍的地貌環境與中央氣象局板橋探空站附近相似，因此本研究取得板橋探空氣球的氣象觀測內插為 25 公尺垂直解析度的資料來求得  $\alpha$  參數。本研究針對 2012 年 11 月到 2013 年 1 月密集觀測期間，板橋站探空資料測得於 100 公尺高度，風速大於 5 m/s 的資料來計算  $\alpha$  值。分析結果發現  $\alpha$  分佈在 0.30 至 0.67 之間(圖 2-7 (a))，其中舉例 2012

年 12 月 6 日 12 UTC 的探空風速資料剖面， $\alpha$  數值為 0.40 (圖 2-7 (b))，由於低空風切多發生在白天到傍晚的時段(余和童，2011)，混合作用強， $\alpha$  值應該較小，因此選取 0.30 做為  $\alpha$  數值。

臺北盆地冬季的邊界層高度統計平均結果，當地時間白天 10 點到 16 點，大約 600 至 800 公尺高之間，夜間約在 350 到 450 公尺高之間(彭和林，1995)；挑選幾個風速較大的探空資料，來判斷當地晚上 8 時邊界層高度落在 350 至 500 公尺附近，與文獻統計資料相符。其中 4 筆探空資料如圖 2-8，2012 年 11 月 12 日 00:00 UTC (圖 2-8(a))，邊界層高度約在 500 公尺高，在此高度，位溫隨高度增加開始增加，風速、風向有一些變化；2012 年 11 月 13 日 12:00 UTC (圖 2-8(c))，邊界層高度約在 450 公尺高；2012 年 12 月 6 日 12:00 UTC (圖 2-8(e))，邊界層高度不明顯，可能在 450 公尺高，在 1000 至 1200 公尺高的地方有風速隨高度減弱、位溫隨高度增加快速的現象，是因分裂冷高壓影響臺灣，造成 1100 公尺左右厚度的近地面東風層，並隨高壓出海風速逐漸減弱(見 4.2 節)；2012 年 12 月 24 日 00:00 UTC (圖 2-8(g))，邊界層高度約在 600 公尺高。

由 CL31 雲幕儀回波，在臺北盆地中空氣污染嚴重時，可以觀測到邊界層的氣膠(Müinkel, 2006; Schäfer *et al.*, 2008)，由氣膠的分佈範圍推估當時的邊界層高度(圖 2-9)；不過日間段受太陽輻射或是其他紅外線輻射的影響，800 公尺以上的高空容易有雜訊產生。將回波值垂直差分，上 5 公尺減下 5 公尺(圖 2-10)，「上藍下紅」的地方，代表進入雲層或是氣膠濃度較高的區域；在邊界層上緣有一層淺藍的區域，是因為邊界層頂氣膠濃度有較明顯下降的關係。由 CL31 觀測資料推估，2012 年 11 月 12 日早上邊界層高度約在 500 到 600 公尺，下午約 800 到 900 公尺，晚上降低到 500 公尺。同樣地，由 2012 年 11 月 13 日 CL31 雲幕儀的回波(圖 2-11)和回波的垂直差分(圖 2-12)，可以推斷出上午邊界層高度約 600 至 700 公尺，而且沿著邊界層頂還有雲的訊號，下午大約為 800 公尺。CL31 雲幕儀可以觀測到雲、雨、氣膠等訊號，在雨天時會收到較強的雨滴回波，無法觀測混合在邊界層的氣





膠，也沒有邊界層高度的推估。

由於低空風切主要發生在白天到傍晚，因此使用 700 公尺做為邊界層高度，也就是將 Ekman Layer 厚度設定為 700 公尺，將探空觀測 100 公尺高的風速資料，分別以 25°、30°、35°的 Ekmen Layer 調整角度，代入 Ekman Layer 的公式，推算高空的風速(圖 2-8(b)、(d)、(f)、(h))，可以看到用公式推算出來的風速，在 250 公尺高度觀測結果，除了以 2012 年 12 月 6 日(圖 2-8 (f))，受分裂冷高壓出海，東風減弱造成較大的差異外，其他三個的差異都在 1.2 m/s (10%) 之內，由於邊界層高度隨時間變動，每個時間的風速垂直剖面也不同，本研究選擇在各個時間都最接近實際探空資料的 700 公尺和 30°做為邊界層高度和 Ekmen Layer 調整的角度，如果將 Ekmen Layer 調整的角度設為 25°、35°，所得到的 250 公尺高的風速分別角度為 30°時的 91% 和 110%。

經由以上的資料分析與處理，本研究可將地面觀測風場資料轉換成 250 公尺高度的風向風速資料，提供低空風切計算使用。

## 2.4 STREAM 數值模式

本研究在討論臺北盆地地形對風場影響的模擬中，使用 STREAM 模式進行模擬，它是一個高解析度的計算流體力學模式(Computational fluid dynamics, CFD)，由日本 Cradle 公司開發。該模式擅長處理流體遭遇障礙物或複雜地表產生的變化。從極小尺度的汽車空間內空調的對流模擬，到地方性的建築對風場影響的模擬(梅，2012)，山區的山谷風模擬(王，2011)，甚至是整座城市的紊流模擬等，都可在 STREAM 模式中進行設定。現今大氣科學界所採用的 WRF 中尺度氣象模擬善於模擬自由大氣，但對於邊界層複雜地形的處理並不是很完整，或是使用邊界層參數化來模擬，利用 STREAM 模式可補足 WRF 模式在模擬近地面受地形影響時空間解析度不足的情形。本研究所探討的低空風切周邊地形環繞，因此需要討論受地形效應影響之下的流場，高解析度地形是必要的數值模式下邊界條件，以呈現出完整的盆地地形，並讓流場模擬更加真實。我們預期 STREAM 能順利達成此一

目標。

STREAM 模式的模擬過程包含模式設定、計算執行、結果繪圖輸出三個步驟。本研究在模式設定的部份，以東西向 45 公里，南北向 36 公里，垂直方向 3 公里的 domain box 為模擬範圍，並且匯入臺北盆地的實際地形，水平網格解析度為 90 公尺，垂直網格解析度在近地面為 25 公尺，會隨著離地形的距離增加而降低垂直網格解析度，因此共有  $500 \times 400 \times 60$  個網格點；邊界條件設定方面，以 WRF 模式的風場模擬結果，選取臺北盆地的上游風場剖面(海面上為主)輸入模式，並考慮地表的摩擦進行模擬。接著是內部進行數值模擬計算執行，最後是結果繪圖輸出，將模擬結果圖形化，以呈形風場在各時空之下的分佈情形。

## Chapter 3 觀測網資料計算與分析



### 3.1 密集觀測期間氣象概況

本研究自 2012 年 11 月 9 日下午開始，至 2013 年 1 月 8 日早上在臺北盆地西側架設氣象觀測網，針對低空風切進行密集觀測；由於這一期間是秋冬季節轉換時段，臺北盆地受到大陸性冷氣團影響，有幾次冷鋒過境，也帶來強勁的東北季風，而在這 60 天當中水汽相當充足，中央氣象局臺北氣象站記錄到 43 天雨跡以上的降雨紀錄。

將氣象觀測網中，最北側的 1 號觀測點資料經過迴歸分析校正後，畫成氣壓與氣溫的時間序列圖(圖 3-1)、氣壓與風速的時間序列圖(圖 3-2)以及氣溫與相對溼度的時間序列圖(圖 3-3)，討論密集觀測期間的天氣演變概況，觀測資料都是以臺北當地時間來記錄。11 月份雖受大陸冷高壓影響，但是氣壓振幅不大，氣壓主要在 1010 hPa 到 1020 hPa 之間振盪。氣溫方面有幾天溫度偏高，但只是白天溫度上升以及相對溼度同時明顯下降，應為太陽輻射加熱的結果；受到大陸冷高壓影響之際，有氣壓上升以及氣溫下降的跡象，11 月份整體氣溫是呈現緩緩下降的趨勢。

12 月 4 日到 6 日由氣壓的變化推測可能受鋒面雲帶影響，鋒前、鋒後氣壓較高，鋒面通過時氣壓較低，同時對照降雨資料與相對溼度，12 月 5 日雲帶通過臺灣地區造成降雨，而 4 日、6 日兩天則比較乾燥；4 日白天相對溼度 60%，6 日白天相對溼度 50%，對照中央氣象局 12 月 5 日 12:00 UTC 的地面天氣圖(圖 3-4)，冷鋒僅從臺灣北方通過，但是隨之而來的是 1028 hPa 分裂冷高壓的乾冷空氣影響臺灣，造成東北季風增強。12 月 19、23、30 日以及 1 月 4 日受大陸冷氣團影響，氣壓明顯上升，氣溫也明顯下降，其中 12 月 23 日除了氣溫下降外，受到 1048 hPa 分裂高壓影響(圖 3-5)，也使得風速增強，並且在 12 月 24 日白天受強烈東北季風影響，1 號觀測點平均風速達到 6 至 7 m/s；12 月 30 日氣溫更下降至 8.6°C，與前一天 25°C 以上的高溫有極大的溫度落差，對照中央氣象局當天 00:00 UTC 的地面

天氣圖(圖 3-6)，可以看到在臺灣東方有一道冷鋒已通過臺灣，中國大陸有一分裂冷高壓 1046 hPa 以 15 km/hr 的速度往臺灣移動，造成臺灣地區氣壓梯度大，北風、東北風強盛；根據我們的觀測紀錄，12 月 29 日當地時間晚上 10 時前後，臺北盆地風向、風速都呈現劇烈的變化。

將 60 天密集觀測期間的資料逐時平均，得到氣壓、溫度、風速的平均日變化(圖 3-7)。在氣壓的平均日變化部份，能夠看到大氣潮(Atmospheric Tide)氣壓振盪情況，平均最高氣壓在早上 9 點出現，最低氣壓在下午 2 點出現，振幅約 3 hPa。由溫度平均日變化，可以看到清晨 6 點氣溫最低，中午 12 點到 1 點之間氣溫最高；風速平均日變化中，清晨 5 點風速最低，下午 1 點到 2 點之間風速最高；比較溫度和風速的平均日變化，可以看到最高溫度的時間比最大風速的時間早一個小時左右。由邊界層氣象學理論，白天溫度的上升會帶動近地面邊界層的混合作用，風速的增加可能和近地面混合作用相關，另一方面白天陸地溫度增加所引起的海風，也是造成東北風風速增強的原因之一。

由以上觀測資料和天氣圖的氣象概況，有幾天出現了強盛東北季風或是風速、風向突然間轉變現象，它們將做為下一節低空風切計算討論中的驗證個案。

## 3.2 低空風切與觀測資料計算

將氣象觀測網的觀測資料經過資料過濾、儀器間的線性迴歸函數修正後，再依近地面風速 Power Law 剖面 and Ekman Layer 邊界層發展概念，計算離地 250 公尺高度的風向、風速，再進行風切計算和「三角形遞迴運算法」的輻合、輻散值計算。氣象觀測網內兩兩測站連線可計算之間的風切大小(圖 3-8(a))，分別可得 1-2、2-3、3-4、1-4、1-3、2-4 六組風切數據，再以 1-2-3 觀測點圍成「西」三角形區域，1-3-4 觀測點圍成「東」三角形區域，1-2-4 觀測點圍成「北」三角形區域，2-3-4 觀測點圍成「南」三角形區域(圖 3-8(b)(c))，來計算東、南、西、北三角形面積內的輻合、輻散值量。氣象觀測網四個三角形面積大小相近，分別為 3.2016、2.9842、2.9908、3.2082 平方公里。



### 3.2.1 兩觀測點間的風切

低空風切的閾值為 15 kts/km，經過單位換算成風切、輻合、輻散的常用單位為  $0.0077 \text{ (s}^{-1}\text{)}$ ，將兩個觀測點 250 公尺高度風切計算結果，加入低空風切閾值的比較顯示在圖 3-9。由該圖 1 號、2 號觀測點之間的風切時間序列顯示，11 月 12 日、12 月 4 日、12 月 6 日、12 月 13 日、12 月 29 日可以看到有達到低空風切閾值的風切產生，11 月 15 日、11 月 23 日、12 月 23 日、12 月 24 日也有接近低空風切大小的風切產生。

2 號、3 號觀測點之間以及 3 號、4 號觀測點之間的風切，受 3 號觀測點資料的缺漏所影響，資料較少，但是 11 月 12 日、11 月 14 日、11 月 15 日、11 月 19 日仍然達到低空風切最低閾值；其中，2 號、3 號觀測點之間的風切較 1 號、2 號觀測點之間的風切大；3 號、4 號觀測點之間的風切較 1 號、2 號觀測點之間的風切小。1 號、4 號觀測點之間的風切也較 1 號、2 號觀測點之間的風切小，12 月 6 日達低空風切最低閾值，11 月 14 日、11 月 27 日、12 月 4 日、12 月 22 日、12 月 23 日、12 月 24 日有較大的風切產生；1 號和 3 號觀測點之間的風切明顯偏小，此外兩觀測點間的距離也比較大；2 號和 4 號觀測點之間僅有 11 月 12 日、11 月 14 日、11 月 15 日、12 月 4 日、12 月 6 日接近低空風切最低閾值。

雖然兩觀測點之間的風切大小有明顯的差距，但是兩觀測點之間風切偏大的發生時間大致相同。經由風切的計算結果，可以得到 11 月 12 日、11 月 14 日、11 月 15 日、12 月 4 日、12 月 6 日應有低空風切產生，11 月 27 日、12 月 24 日、12 月 29 日也應有較大的風切產生。

氣象觀測網中，各觀測點間的距離如表 3-1 所示，兩觀測點間距離較遠造成觀測的解析度不足而得到較小的風切，兩觀測點間距離如果較近，得到的風切誤差可能較大；另外，2 號、4 號觀測點之間的風切，並沒有較相距 3 公里以內兩觀測點的風切小太多，也可能與兩者所在地理位置相關，造成 2 號、4 號觀測點風速、風向有明顯的差異。由於兩兩觀測點間的距離會影響風切計算的結果，所以低空



風切的計算與討論，集中在受到觀測點間距離影響較小的「三角形遞迴運算法」，所得到的輻合、輻散值這一參數。

### 3.2.2 三角形面積的輻合、輻散值

圖 3-10 是選取東、南、西、北四組三角形的觀測資料所計算得到的輻合、輻散值，由於 3 號觀測點的資料缺漏較多，東、南、西這三組三角形計算出來得到可用值的時間比較少，主要以"北三角形"區域資料最為完整，上下兩條紅線為低空風切閾值，正值為輻合、負值為輻散，當輻合、輻散值大於  $0.0077 \text{ (s}^{-1}\text{)}$  時，圖上的標記被放大顯示，以利討論。

由三角形遞迴運算法計算的結果，顯示共有 71 次達低空風切閾值的輻合、輻散值，大多數達低空風切最低閾值為輻合現象，強度從  $0.0077 \text{ (s}^{-1}\text{)}$  到最大的  $0.0121 \text{ (s}^{-1}\text{)}$ ，甚至超過中度低空風切的閾值  $0.0103 \text{ (s}^{-1}\text{)}$ ，也就是 20 kts/km 以上的低空風切。這些強輻合現象發生的時間和上述強風切計算的結果相似，主要是受到強盛東北季風影響，僅有 11 月 19 日、12 月 16 日和 12 月 29 日夜間，這三個時間屬輻散場的low空風切。11 月 19 日於西三角形區域之觀測結果為輻合、於南三角形區域之觀測結果為輻散；12 月 16 日當天也有較強的風速；12 月 29 日為強烈鋒面過境造成風速、風向變化，因此和其他受強盛東北季風影響造成的輻合風場不太相同。


由 11 月 11 日到 11 月 17 日的輻合、輻散值時間序列(圖 3-11)，可以看到強輻合值主要出現在白晝，由於白晝期間也是東北季風風速較大的時段，和過去低空風切紀錄符合。12 月 4 日和 12 月 6 日北三角形區域的輻合值數度超過低空風切閾值(圖 3-12)，從風切計算和地面單一測站觀測的分析結果，都顯示這兩天很可能有低空風切出現，其中 12 月 5 日鋒面從臺灣北邊掠過，帶來降雨而未及時收資料造成觀測點資料缺漏，鋒面過後風速增強，12 月 6 日觀測資料恢復正常即得到強輻合值。12 月 24 日到 12 月 30 日的輻合、輻散值時間序列(圖 3-13)，可以看到 12 月 24 日和 12 月 26 日有部份時段，北三角形區域都有觀測到達低空風切閾值的強輻合發生，12 月 29 日則是夜間有達低空風切閾值的輻散值。



### 3.3 松山機場 LLWAS 資料比較

LLWAS 的警報分為風切型(Windshear)或是微爆流型(Microburst)，是由風切的大小和順風逆風來判斷，2012 年 11 月和 12 月是受東北季風或是鋒面過境影響，風切未達微爆流型的大小，因此這段時間的低空風切警報，皆屬於風切型低空風切警報；在 2010 年 10 月 25 日的風切曾達到微爆流型低空風切的大小，在 963 次針對機場跑道的風切記錄中也只有 34 次達到微爆流型低空風切的強度。上一節使用「三角形遞迴運算」的計算結果，以北三角形區域資料最為完整，因此以北三角形區域達低空風切閾值的時間，與松山機場觀測的 LLWAS 風切警告時間(電碼：SPESOK)，進行時間累積次數之比較，圖 3-14 縱軸左側為松山機場 LLWAS 警報次數(藍色)，從 11 月 10 日到 12 月 30 日期間總共發生 477 次低空風切警報。縱軸右側(紅色)是氣象觀測網北三角形區域達到低空風切閾值的輻合、輻散值累積次數，期間共 50 次。由於松山機場 LLWAS 時間解析度是 10 秒鐘，我們的觀測資料是 1 分鐘一筆，因此北三角形區域達低空風切閾值的輻合、輻散值在無其他因素影響之下，次數較少是合理的。兩者在主要幾個低空風切發生的時間：11 月 12 日、11 月 14 日、11 月 15 日、12 月 4 日、12 月 6 日、12 月 24 日、12 月 26 日、12 月 29 日，都有觀測的紀錄，而其他時段零碎分佈的低空風切，有兩種觀測網都有紀錄的時段，也有不同發生時間的現象，由於兩個地方所在位置不同，對於低空風切的偵測有警報次數和發生時間上的些微差異是合理的。此外我們將松山機場 LLWAS 針對 10 號跑道飛機進場方向的區域，所發佈的低空風切警報次數(藍色)，同樣和氣象觀測網北三角形區域達到低空風切閾值的輻合、輻散值累積次數(紅色)作圖(圖 3-15)，這樣的選擇是因為 10 號跑道飛機進場方向的區域和氣象觀測網的範圍比較接近，從 11 月 10 日到 12 月 30 日期間總共對此區域發佈 143 次低空風切警報，但是 10 號跑道在 2012 年 12 月 29 日鋒面通過時，警報的發佈次數較氣象觀測網北三角形區域達低空風切閾值的輻合、輻散值次數多。

將松山機場 LLWAS 警報以每小時為單位來計算發生次數頻率，比較 2010 年



10月25日的警報紀錄與2012年11月12日、11月14日、11月15日、12月4日、12月6日、12月24日、12月29日的警報紀錄(圖3-16)。顯示2012年11及12月間低空風切主要發生在白天到傍晚的時段,以12月6日和12月24日較多,其中12月29日因鋒面在夜間過境造成低空風切警報,11月15號各個時段都有發生,但次數並不多;2010年10月25日低空風切警報從傍晚開始,出現每小時30次以上高頻率的低空風切警報,在夜間持續到隔天清晨。

上述討論僅用 LLWAS 輸出的警報次數,來比較本研究新增的氣象觀測網三角形遞迴運算結果,因此我們再對 LLWAS 的原始觀測風速與風向資料,同樣進行三角形遞迴運算來加以分析討論。我們選取 LLWAS 西側的 1、7、9 號測風臺(圖 3-17),因為它們構成的三角形處於前一章模式模擬標記的區域(位於大屯山、圓山地區的西南背風側),而且這三個測風臺之間的面積為 3.61 平方公里,較本研究新增的氣象觀測網四個三角形面積 3 到 3.2 平方公里略大,對低空風切的觀測空間解析度會略差,但都符合前述的進行輻合、輻散計算的觀測條件。我們使用同樣的方法來計算 2012 年 12 月 6 日的輻合、輻散值,得到的結果(圖 3-18)顯示出這一區域以輻合為主,並且有許多時間達到低空風切閾值,再度吻合我們的觀測計算結果。

另一方面,LLWAS 的原始資料為 10 秒鐘一筆資料,將它的風速平均成每 1 分鐘一筆再做一次輻合、輻散計算,僅得到接近低空風切閾值的輻合值(圖 3-19),因此在松山機場 LLWAS 1、7、9 號測風臺範圍內發生的低空風切,比起臺北盆地西側觀測的低空風切並不持續久,強度也較弱;比較 2010 年 10 月 25 日強低空風切個案(圖 3-20),將 LLWAS 的原始資料風速平均成每 1 分鐘的資料做輻合、輻散計算,可得到許多次較持久的低空風切事件,也有超過中度低空風切閾值  $0.0103 (s^{-1})$  的風切產生,可見 2010 年的低空風切個案是很顯著的。

### 3.4 輻合、輻散值討論

由 2012 年 11 月中旬的四組三角形輻合、輻散值時間序列中(圖 3-11),發現西三角形區域輻合跟南三角形區域輻散,會在相近的時間內出現,因此本節進一步



討論這兩個區域的輻合、輻散值特徵。比對所有兩區域相同時間的資料(圖 3-21)，發現當西三角形區域輻合、輻散值出現負值時，南三角形區域很可能出現正值，反之亦然。西三角形區域的輻合值達到低空風切閾值時，南三角形的區域卻尚未達到，我們推測兩組三角形的輻合、輻散數值可能呈現負相關，且西三角形區域輻合的強度較強。

計算四組三角形區域輻合、輻散數值彼此之間的相關矩陣(表 3-2)，可以看到東和南、東和北、南和北、西和北的三角形區域輻合、輻散值呈現正相關，亦即兩者皆輻合或兩者皆輻散；但是東和西、南和西的三角形區域輻合、輻散值呈現負相關，南三角形和西三角形相關係數還高達 -0.500。

討論南三角形和西三角形區域的風場情況(圖 3-22)，發現當東北風吹拂時，當西北側區域風場輻合，而東南側區域風場輻散，中間區域的風場(兩條黑箭頭)相較於兩邊的風場有順轉偏移的效果；當西北側區域風場輻散，而東南側區域風場輻合，中間區域的風場(兩條黑箭頭)相較於兩邊的風場有逆轉偏移的效果。我們推測這種偏移效果應與地形效應有關，因此更進一步將實際風資料畫出來比較，圖 3-23 左排為輻合狀態各組三角形區域的風場，右排為輻散狀態各組三角形區域的風場，每一張圖之內，相同顏色的箭頭表示相同時間的風場，不同的顏色之間沒有時間上的關係(隨機選取)。

以西三角形區域輻合時(圖 3-23(e))來看，南、北側 1 號、3 號觀測點吹東風，西側的 2 號觀測點會有可能有吹西風的情況，而 2 號觀測點的位置西邊即為林口臺地；搭配南三角形區域輻散時(圖 3-23(d))，風場有順時針旋轉的情況。若西三角形區域輻合、南三角形區域輻散，應是偏東風氣流撞擊臺北盆地西側地形，由於氣流較少進入西南側大漢溪谷地，向右順時針偏轉向北的結果，或是偏北風的氣流摩擦臺北盆地西側地形，向右順時針偏轉進入西南側大漢溪谷地的結果。

以西三角形區域輻散時(圖 3-23(f))來看，南、北側 1 號、3 號觀測點主要吹拂東風和東北風，氣流並未向西側的 2 號觀測點集中，此時 2 號觀測點吹東風；搭

配南三角形區域輻合時(圖 3-23(c))，風場有逆時針旋轉的情況；若西三角形區域輻散、南三角形區域輻合，這一配置應是東風氣流撞擊臺北盆地西側地形，並且氣流能進到西南側大漢溪谷地，向左逆時針偏轉的結果。



### 3.5 小結

由單一觀測點地面觀測資料，即可透過氣壓、氣溫、溫度的變化，再搭配天氣圖來了解當時的綜觀氣象條件，推測可能發生低空風切之天氣條件。在秋冬之際臺北盆地東北季風盛行的季節，低空風切常在中午過後到傍晚風速較大的時候發生，當鋒面過境或是受強烈的氣象環境場影響，也可能在其他時間發生低空風切。

針對臺北盆地西側所增設的氣象觀測網，能夠依照兩測站間風切的計算，以及三角形區域內的輻合、輻散值，判斷有無低空風切發生。由於兩兩觀測點間的距離會影響風切計算的結果，所以低空風切的計算，以受觀測點間距離影響較小的「三角形遞迴運算法」，所得到的輻合、輻散值加以討論。這些觀測資料經過處理運算之後，所觀測到的低空風切和松山機場 LLWAS 的警報有相近的結果。

由氣象觀測網之中，四組三角形區域輻合、輻散值彼此可能呈現正相關或負相關，西三角形和南三角形區域輻合、輻散值呈現負相關，其可能結果有二：(1)林口臺地至西三角形區域，風場呈現順時針旋轉時(西三角形區域輻合、南三角形區域輻散)，偏東風氣流撞擊臺北盆地西側地形後，氣流順時針偏向北，或是偏北風的氣流摩擦臺北盆地西側地形，向右順時針偏轉進入西南側大漢溪谷地；(2)林口臺地至西三角形區域，風場呈現逆時針旋轉時(西三角形區域輻散、南三角形區域輻合)，偏東風氣流撞擊臺北盆地西側地形後，氣流逆時針偏轉進入西南側大漢溪谷地。



## Chapter 4 數值模式模擬


### 4.1 2010 年 10 月 25 日東北季風增強個案

2010 年 10 月 25 日傍晚時分，一架軍機採用松山機場 10 號跑道進場落地，該機飛行員通報在降落過程中遭遇低空風切(空軍氣象中心口頭提供)。根據當日松山機場顯著低空風切紀錄，當天傍晚時分一共標註 4 次顯著低空風切，時間分別為 10:17 UTC、11:36 UTC、11:48 UTC、12:15 UTC。本事件是 2009 年至 2011 年間顯著低空風切次數前三多的事件(余和童，2011)；從 LLWAS 警報紀錄來看，當日 08:00 UTC 開始就持續有風切警報發生，持續至當日 21:00 UTC，非常特別的是此次低空風切事件除了在傍晚發生之外，整個夜晚還持續有警報發出，因此非常適合做為本研究主題的深入探索之代表性個案。

#### 4.1.1 天氣概述

依據中央氣象局 2010 年 10 月 25 日 06:00 UTC 及 12:00 UTC 之地面天氣圖(圖 4-1 與圖 4-2)，位於蒙古地區的大陸冷高壓增強，並且往東南方移動，使得臺灣以及中國東方沿海地區氣壓上升、風速增強，雖然冷鋒僅通過琉球群島一帶，但受高氣壓接近影響，還是讓臺灣地區的北北東風增強；由 12:00 UTC 地面天氣圖顯示，位於臺灣北部和東北部海面的彭佳嶼和與那國島測站，分別觀測到 25 knots (13 m/s) 和 35 knots (18 m/s) 左右的地面風速；輕度颱風佳芭(Chaba，國際編號第 1014 號)位於臺灣東南東方海面約 1200 公里處發展並往北移動，並未影響臺灣，但不排除受其外圍環流影響，造成臺灣附近的風速增強。由 09:30 UTC 可見光衛星雲圖與紅外線衛星雲圖(圖 4-3 與圖 4-4)，顯示中國大陸上的雲區範圍和大陸冷高壓的範圍相當，而且雲高隨著高壓的空氣往南送而降低，在臺北盆地上轉為雲高較低的層狀雲。

中央氣象局早上 8 時，即對當天下午臺灣沿海地區發佈陸上強風特報，對附近海域持續發佈海上強風特報。根據當日氣象局彭佳嶼(表 4-1)和臺北氣象站(表 4-2)



的測站逐時觀測資料，顯示彭佳嶼從早上風速就開始增強，而且持續增強到晚上 8 時，平均風速已達 14 m/s，風向以北北東風為主，臺北氣象站則在下午風速逐漸增強，平均風速約在 5 m/s 左右；氣壓方面受高氣壓影響，兩測站在下午 2 到 3 點之間開始上升，氣溫從中午到夜晚也下降 5 至 6°C；降雨方面，僅有臺北氣象站在傍晚時分有下每小時 2.5 mm 以下的小雨，或是有出現雨跡。為了得知當天強陣風發生情形，我們比較彭佳嶼、臺北、淡水、基隆氣象站每小時的最大平均風速(圖 4-5)，得知四個測站風力從上午就開始增強；中午過後淡水、基隆的最大平均風速增加的情況較平緩，在下午 3 點之後，最大平均風速再度增強；臺北測站下午的最大平均風速則是上下振盪。


#### 4.1.2 數值模式範圍與設定

本個案模擬的時間從上述事件發生前一天(2010 年 10 月 24 日)的 12:00 UTC 開始，距離高壓接近臺灣以及顯著低空風切紀錄的時間，還有 12 小時提供做 WRF 模式進行初始化(initialization)的動力調整(包含聲波、重力波等因素)。本次模擬採用四層巢狀網格，使得最內層解析度達 1 公里，下邊界層選定 Mellor-Yamada-Janjic (MYJ) scheme，主要詳細的參數設定如表 4-3，模式模擬範圍如圖 2-1。

模式採用的垂直座標為 34 層 eta 座標， $\eta = 1.0000、0.9975、0.9950、0.9925、0.9900、0.9875、0.9850、0.9825、0.9800、0.9750、0.9700、0.9600、0.9500、0.9400、0.9300、0.9100、0.8900、0.8500、0.8000、0.7500、0.7000、0.6500、0.6000、0.5500、0.5000、0.4500、0.4000、0.3500、0.3000、0.2400、0.1800、0.1200、0.0700、0.0000$ ，

$$\eta = \frac{P - P_t}{P_s - P_t} \quad (4.1)$$

其中 P 是指靜力平衡的壓力， $P_s$ 、 $P_t$  分別為模式地表及模式頂層的壓力，而  $P_t$  為一固定值。若以地面氣壓 1000 hPa 以及模式頂層壓力為 50 hPa 來計算，在 900 hPa 高度層之下模式層數共有 16 層，在 980 hPa 高度層之下模式層數共有 9 層，因此能達到增加近地面邊界層解析度的效果。



模式輸出的模擬結果以第四層網格為主，空間解析度為 1 公里，時間解析度為 10 分鐘。我們針對 LLWAS 可推算至 250 公尺的高度進行討論，超過 250 公尺以上的地形(無氣象資料)以黑色色塊表示，海岸線為 1 公尺高的黑色等高線(圖 4-6)，其中標註松山機場 LLWAS 最東邊的 1 號測風臺，以及臺北盆地西側氣象觀測網中最北方的編號 1 號觀測點，以做為模擬與觀測的對照，圖 4-6 的兩個黑點即是圖 4-7 兩個標記為紅色的觀測點。

### 4.1.3 模擬結果

由 WRF 模式所輸出的 2010 年 10 月 25 日，臺北盆地 250 公尺高度的風場圖(圖 4-8)，整理成 30 分鐘的時間間隔時間序列，可以模擬出強勁東北風並且逐漸增強的現象；風速大的區域由西北方往東邊擴張，從 08:00 UTC 臺灣北部外海的風速約為 16 m/s，11:00 UTC 已達 20 m/s；臺北盆地內風速亦漸漸增強，風從淡水河口以及基隆吹入臺北盆地，在大屯山的西南側，也就是標記的觀測站與測風臺處，出現風場輻合現象；臺北盆地西南側有弱風區，與進入臺北盆地的東北風產生速度差，08:00 UTC 弱風區風速僅有 2 至 4 m/s，在 11:00 UTC 弱風區的風速略增加，但還是與強勁東北風有顯著的速度差。

由 WRF 模式所輸出的 2010 年 10 月 25 日，臺北盆地 250 公尺高度的渦度場(圖 4-9)，可以看到在 09:00 UTC 即有大於  $0.008 \text{ (s}^{-1}\text{)}$  的區域產生，地點就在臺北盆地西側的觀測點上空；在 10:00 UTC 到 10:50 UTC 時段，較強的正、負渦度區持續在臺北盆地西北半部發生，這些渦度擾動區主要是從大屯山背風區往西南側延伸與移動，應為氣流繞山及過山後在此區域會合，造成渦旋洩離(vortex shedding)或是渦街(vortex street)的結果；在 11:00 UTC 之後，渦度擾動區的特徵以及範圍和 10:00 UTC 到 11:00 UTC 這段時間的特徵相似，12:40 UTC 還有大範圍  $0.008 \text{ (s}^{-1}\text{)}$  以上的渦度區存在，一直到 13:00 UTC 渦度場才較為減弱，但還是持續有  $0.004 \text{ (s}^{-1}\text{)}$  的渦度值發生。前述所提到的低空風切閾值為 15 kts/km，換算成渦度場或輻散場的單位為  $0.0077 \text{ (s}^{-1}\text{)}$ ，因此我們將絕對值大於  $0.0077 \text{ (s}^{-1}\text{)}$  的渦度或輻合、輻散區域，

列為低空風切發生的可能區域。對照松山機場 LLWAS 顯著低空風切發生的 4 筆紀錄，時間範圍在 10:17 UTC 到 12:15 UTC 之間，與模擬的結果相當符合，強渦度區的範圍也曾通過松山機場 LLWAS 西側的測風臺上空。

由 WRF 模式所輸出的 2010 年 10 月 25 日，臺北盆地 250 公尺高度的輻散場(圖 4-10)，在 08:50 UTC 和 09:00 UTC 期間出現超過  $0.008 \text{ (s}^{-1}\text{)}$  的輻合區發生在測風臺和氣象觀測網一帶的上方；10:00 UTC 至 10:50 UTC，也持續有較強輻合區發生，並維持到 13:30 UTC 才略微下降，但還是有  $0.004 \text{ (s}^{-1}\text{)}$  的輻合強度發生。在 WRF 模式的模擬結果中，在松山機場跑道附近的渦度或輻合、輻散區域未達低空風切閾值，推測原因一方面是此區域在東北季風增強的情況下，風切的強度較臺北盆地西側弱，另一方面在 WRF 模式解析度最高只到 1 公里，松山機場北側和東北側的許多地形變化，未能在模式中進行模擬，因此未能於松山機場跑道上模擬出達低空風切閾值的結果；真正的原因須加入高解析度模式(STREAM)的模擬來進行驗證(見 5.2 節)。

## 4.2 2012 年 12 月 6 日個案

松山機場 LLWAS 在 2012 年 12 月 6 日中午一共發佈了 87 次警報，是本研究在臺北盆地西側架設氣象觀測站的 60 天當中次多的一天，同時臺北盆地氣象觀測網的兩種計算方法都有出現低空風切的判斷，因此本節將對此個案進行數值模擬與討論。

### 4.2.1 天氣概述

依據中央氣象局 2012 年 12 月 5 日 12:00 UTC 及 2012 年 12 月 6 日 00:00 UTC 之地面天氣圖(圖 4-11 與圖 4-12)，鋒面從臺灣北方海面通過，1028 hPa 分裂冷高壓往東南東方移動，影響臺灣地區使東北風增強，並在 6 日 00:00 UTC 出海，使臺灣地區的風向轉變成偏東風；中度颱風寶發(Bopha，國際編號第 1224 號)位於南海地區，對臺灣並未造成影響。由 6 日 01:00 UTC 可見光雲圖(圖 4-13)和紅外線衛

星雲圖(圖 4-14)，指出東北方鋒面雲帶沿伸至臺灣、海南島地區，雲高在高的對流雲區在鋒面雲帶的最前側，此時鋒面雲帶已經通過，臺灣地區受分裂冷高壓影響，而且在臺灣北方海面有雲街的產生。由 5 日 20:40 UTC 和 6 日 00:00 UTC 的雷達回波圖(圖 4-15 與圖 4-16)，可以看到降雨雲帶通過臺灣往東南方移動，氣象局保留了臺灣北部外海，因強風吹拂海面造成的雷達回波雜訊，由 6 日 00:00 UTC 和 06:00 UTC 的 850 hPa 流場與渦度場模式分析圖(圖 4-17 與圖 4-18)，可以看到臺灣地區在 850 hPa 受東北風影響，並在臺灣海峽北側產生強烈的渦度帶，臺灣地區隨著高壓出海，風向改為偏東風。

根據當日氣象局彭佳嶼(表 4-4)和淡水氣象站(表 4-5)的測站逐時觀測資料，顯示場彭佳嶼清晨的東北風為 8 至 9 m/s，到了白天東北風呈現減弱的情況，並且在中午轉向偏東風，淡水氣象站風速一整天都約在 1 至 3 m/s，在當地時間上午 11 時有明顯的風向轉變；而氣壓方面因受高壓影響，在清晨氣壓最高，到了中午因高壓出海減弱，氣壓下降；兩測站都沒有降雨的情況，搭配衛星雲圖和 CL31 雲幕儀觀測資料，當天上午臺灣北部為多雲時晴的天氣。比較彭佳嶼、臺北、淡水、基隆氣象站每小時最大平均風速(圖 4-19)，可以看到彭佳嶼和基隆最大平均風速減弱，淡水最大平均風速約在 3 m/s 左右，而臺北的最大平均風速卻是在當地時間上午 11 時最強達到 9 m/s 以上，和其他測站的特徵不同；比較四個測站的風向(圖 4-20)，從清晨到下午，彭佳嶼、淡水、基隆的風向由東北風轉偏東風，其中淡水更有轉變成東南風的趨勢，只有臺北一整天風向都為偏東風。

#### 4.2.2 WRF 模式模擬結果

本個案的 WRF 模式從鋒面雲帶影響前，12 月 3 日 12:00 UTC 開始模擬，其他的參數、模擬範圍設定都與 4.1.2 節的模擬相同(見表 4-6)。

由 WRF 模式所輸出的 2012 年 12 月 6 日，臺北盆地 250 公尺高度的風場圖(圖 4-21)，整理成 30 分鐘的時間間隔時間序列，能看出東北外海的東北風從 10 m/s 以上減弱到 10 m/s 以下的情況，反倒是臺北盆地上空的東風能夠維持在 10 至 12

m/s，另外也可以看到在大屯山的背風面，臺北盆地的西北側有弱風區的產生。

由圖 4-22 渦度場的模擬結果，可以看到強渦度區即在臺北盆地西北側，涵蓋臺北盆地西側氣象觀測網的黑色標點，最大渦度發生在 00:40 UTC，數值為 0.0079 ( $s^{-1}$ ) 剛好達到低空風切閾值 0.0077 ( $s^{-1}$ )，雖然到 03:00 UTC 都還有達到低空風切閾值的強渦度區出現，但是臺北盆地東風強勁，強渦度區因而往西北側偏向淡水河口移動。由圖 4-23 輻合、輻散場的模擬結果，可以看到輻合、輻散場都不強，但是藍色的輻合區有涵蓋臺北盆地西側氣象觀測網，和松山機場 LLWAS 的西側測風臺，最大值的輻合值發生在 01:30 UTC 為 0.0046 ( $s^{-1}$ )。


### 4.3 小結

2010 年 10 月 25 日臺灣北部受大陸高壓影響導致東北風增強，當天松山機場 LLWAS 觀測到數次顯著低空風切，可見此一個案受到綜觀環境風場影響相當大。綜合以上結果，WRF 模式所模擬出來的強渦度和強散度區域，主要在臺北盆地西北側，涵蓋本研究設立的氣象觀測網地區，以及松山機場 LLWAS 西側的測風臺。WRF 模式模擬發生低空風切的時間區段和松山機場的 LLWAS 時間觀測紀錄吻合，並且臺北盆地西北側到西側一帶都是低空風切持續最久且最大的範圍；而模擬的結果在松山機場區域中，風切未達低空風切閾值，可能是模式空間地形解析度不足的結果，待更高解析度的 STREAM 模式驗證。

2012 年 12 月 6 日的個案和 2010 年 10 月 25 日的低空風切個案，主要的成因不盡相同，雖然都是受東北季風影響，但是 2012 年 12 月 6 日的個案是屬於環境場風速減弱，而環境風向明顯轉變的案例。以觀測和模擬的結果，可以得到臺北盆地東風增強，淡水測站風向轉變的情形，由 WRF 模式模擬可看到強渦度區集中在臺北盆地西北側，最大的渦度和輻合、輻散場強度都較 2010 年 10 月 25 日的個案小，僅有最大的渦度值有達到低空風切閾值，而且發生時間較觀測紀錄來得早。

由 2010 年 10 月 25 日和 2012 年 12 月 6 日的個案，可知東北風的增強和風向轉變都可能造成低空風切。另外也用同樣模式設定，模擬 2012 年 11 月 12 日、11





月 15 日、12 月 4 日、12 月 24 日等個案，強渦度和強輻合、輻散的位置也多在臺北盆地的西北側，其中 12 月 24 日在模式中達低空風切閾值。11 月 12 日、12 月 4 日、12 月 24 日和 2010 年 10 月 25 日個案類似，是屬於風速增強造成的低空風切個案，但風速變化沒有像 2010 年的個案增強那麼多；11 月 15 日和 2012 年 12 月 6 日的個案類似，屬於東北風的風向轉變造成的低空風切。WRF 模式能透過適當的綜觀環境場，得到受地形影響較小尺度的低空風切，但是模擬出低空風切發生的時間和位置，可能和實際觀測的結果略有偏差。



## Chapter 5 數值模式討論

### 5.1 WRF 模式敏感度測試

WRF 模式模擬了 2010 年 10 月 25 日，臺北盆地區域內的風場輻合、輻散場平均值大小，本節進一步透過模式不同的設定，討論所計算之低空風切模擬結果的差異程度。臺北盆地內選取的範圍如圖 5-1 中的紅色方框所示，為 250 公尺的高度層，共有  $36 \times 41$  個水平格點，每個格點 0.5 公里，為 WRF 模式 1 公里解析度模擬結果經過 2 倍內插而成。

計算平均值大小的方法為：取得圖 5-1 中紅色方框的各時間點輻合、輻散場數值，計算本身的格點和周圍 8 個格點所構成的「九網格平均數值」。如圖 5-2 所示，黑色方框示意為圖 5-1 的紅色方框，最外圈邊界不計算九網格平均數值；其他原數值的計算以每 9 格(如綠色方格)平均的數值，呈現在九網格平均數值最中間的網格位置中；當原數值所取的 9 格遇到邊界無數值問題時(如紅色方框)，9 格中僅有 5 格有數值，因此將 5 個數值加總除以 5，成為九網格平均數值左上角的網格。計算完各種模擬設定的九網格平均數值，再將各種模擬設定中，出現最大值的時間挑出來進行比較。

#### 5.1.1 邊界層等參數敏感度測試

WRF 模式模擬的結果，其中關於下邊界層的參數設定部份，對 300 公尺以下的地面邊界層風場的結構可能會有影響(Lin *et al.*, 2008)，因此本小節以邊界層 Mellor-Yamada-Janjic (MYJ) scheme 參數設定做為模擬測試控制組，MYJ scheme 主要是透過紊流動能(Turbulent kinetic energy, TKE)的預報方程進行邊界層的垂直混合模擬；邊界層 Yonsei University (YSU) scheme 參數設定則做為模擬測試的實驗組，YSU scheme 主要是透過 K-profile 進行邊界層的垂直混合模擬，包含精確的熱量通量、水汽的逸入作用。另外再搭配外層(第一、第二層)巢狀網格的積雲參數化 Kain-Fritsch (KF) scheme 的使用(控制組)與否(open or close)，選取幾種學術研究常

用的雲微物理參數化過程，Lin *et al.*(控制組)、Kessler 和 Double-Moment 6-class scheme 等三種 schemes 進行敏感度測試討論，將各參數設定對 2010 年 10 月 25 日的模擬組合，分別編排模擬測試代號 Exp. 11 到 Exp. 16 和 Exp. 21 到 Exp. 26 (表 5-1)，其中 Exp. 11 為實驗控制組。

比較的結果如表 5-2 所示，在各組模擬結果中計算完九網格平均數值，出現最大值的時間挑出來做比較，發現不同設定組合下所出現的最大散度絕對值，都是輻合的因素所造成，其中 Exp. 12、13、14、16、25 的數值較控制組 Exp. 11 (CTL) 大，但除了 Exp. 12、13、16 的輻合的強度較大之外，其他各組的數值大小都和控制組相差在 23% 以內，最大輻合發生的時間也都在 9:30 UTC 到 12:30 UTC 這段顯著低空風切實際發生的時間範圍內。

比較邊界層設定 MYJ scheme 的 Exp. 11~16 和 YSU scheme 的 Exp. 21~26，顯示 MYJ scheme 模擬的數值在 6 種組合中，有 5 種比 YSU scheme 的數值大，只有在 Exp. 15 的數值中卻較 Exp. 25 小，因此使用 MYJ scheme 來模擬低空風切的強度可能會稍大。比較外層網格的積雲參數化使用與否的比對結果(Exp. 11~13、21~23 和 Exp. 14~16、24~26)，發現其與模擬的低空風切強度並無明顯關聯。而三種雲微物理參數化過程的使用(Exp. 11、14、21、24; Exp. 12、15、22、25; Exp. 13、16、23、26)也與低空風切模擬強度也沒有明顯關聯；這些結果可能與這次個案的綜觀環境背景是秋季冷鋒和東北季風，沒有激發對流性積雲系統，臺北盆地低空風切與地形特徵和下邊界特性較有顯著關聯。

圖 5-3 為控制組 Exp. 11 輻合、輻散場網格的時間序列圖，從 09:00 UTC 開始到 12:50 UTC 每 10 分鐘間距模擬結果，可以看到強輻合區都在左上方(西北側)一帶，強度會隨時間變化，各種模擬的強輻合值都出現在這個時間範圍之內。

將以上各種模擬之中，最強輻合值出現的該時段渦度場取出加以比較(圖 5-4)，強輻合區也都出現在西北側一帶，因此各種模擬的低空風切位置大略相同，其中 Exp. 12、16 這兩個有比較大輻合值的模擬結果，主要出現強輻合區的地點貼近北



方的大屯山，而最大輻合值的西南側有明顯的輻散跡象，Exp. 13 也有類似的情況；Exp. 21、22、24 的輻合區域有較複雜的風場，導致主要的輻合區域有分裂為二的現象。

### 5.1.2 地形高度敏感度測試

在上一小節的多種模擬結果中，呈現出風場在大屯山西南側有顯著輻合現象，因此我們預期這和盆地周遭地形效果作用應有所關聯，因此這一小節再進一步說明地形高度變化在 WRF 數值模擬的敏感度測試結果。

我們選取原始地形高度的 0%、25%、50%、75%、100%和 120% 分別進行模式模擬，模擬測試的代號是 Exp. 30、31、32、33、11(CTL)、35，地形高度修改的範圍為 20°N~30°N、120°E~130°E，其中 0% 的地形高度雖將臺灣地形整個剷平，但是地表使用型態並未更改，所以還是有海洋和陸地之分。

比較的結果如表 5-3 所示，在各組模擬結果中計算完九格平均數，出現最大值的該時間輻合、輻散場結果挑出來比較，發現各地形高度設定所出現的最大散度絕對值，在原地形高度 50% 以下時(Exp. 30~32)，只有 0.0035 ( $s^{-1}$ ) 的大小；但是當地形高度達到原地形高度的 75%，輻合的強度達到 0.0068 ( $s^{-1}$ )；當地形高度達到原地形高度的 120%，輻合的強度更達到 0.0098 ( $s^{-1}$ )，由此可驗證臺北盆地地形高度的存在，對低空風切的形成有相當大的影響。亦即，臺北盆地的地形高度如增加 20%，則低空風切的強度將增強為 1.21 倍。

比對以上實驗結果區分成地形較平坦的 Exp. 30~32，以及受地形影響顯著的 Exp. 33、11(CTL)、35 兩大類(圖 5-5)，地形增高 Exp. 35 的最大輻合發生時間提早到 09:30 UTC，強輻合發生的位置就在背風面的臺北盆地西北側；地形較平坦的模擬中，最大輻合發生的時間主要在 11:20 UTC 至 11:50 UTC，主要的輻合地區在臺北西北側靠海的地區(在正常地形高度下此處為觀音山)。檢查各網格點的風速風向模擬資料，得知大約在 250 公尺高度 20 m/s 的東北風進入到臺北盆地內，在地形較平坦的模擬中，強烈輻合主要是由風速梯度增強所造成，但是當地形高度升高

時，受地形影響導致的風向變化，也對輻合造成貢獻。

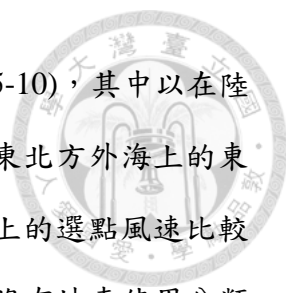
圖 5-6 是控制組 10:30 UTC 各高度的輻合、輻散場模擬結果，發現強輻合區主要發生在 300 到 500 公尺的高度以下，在 500 公尺以上輻合就沒有較強的輻合區發生，僅有 $-0.003$  至 $-0.004$  ( $s^{-1}$ )的散度，控制組的 500 公尺高度和 Exp. 32 模擬結果的 250 公尺高度的輻合、輻散場類似；換句話說，將 Exp. 32 (50%地形)的垂直尺度放大兩倍，即和控制組的模擬結果相似。因此氣流通過大屯山群地形時，受到顯著程度的擾動，氣流擾動的垂直範圍和大屯山群的地形高度成正相關。

## 5.2 STREAM 模式測試

### 5.2.1 模式設定

為了進一步了解臺北盆地地形如何影響風場流動，我們設定 STREAM 模式涵蓋臺北盆地水平範圍為  $45 \times 36$  平方公里，垂直範圍為 3 公里，並使用 30 公尺解析度的 DTM 資料做為 STREAM 模式下墊面(圖 5-7)，其中地形的西南角為北緯  $25^{\circ}00'00''$ ，東經  $121^{\circ}22'30''$ ；考慮模擬的解析度需求，選用 90 公尺的水平網格解析度和近地面 25 公尺的垂直解析度網格，將 DTM 的地形網格化，使得地形的水平解析度從 30 公尺變成 90 公尺，垂直解析度為 25 公尺，來進行風場的數值模擬(圖 5-8)。模擬時間設定 30 秒為一個 time step，模擬至風場呈現穩定態為止；以上的空間與時間各種設定之下，大約經過 420 個 cycle 會達到風場穩定現象，也就是模擬中的時間經過了 210 分鐘(3.5 小時)。

模式側邊界為了模擬東北季風增強情境，因此在強風進入臺北盆地之際，將 STREAM 模式的東、西、南、北側邊界加入固定的垂直風場，選用 2010 年 10 月 25 日個案的 WRF 模式模擬結果如下:當東北風在臺灣北部海面增強，強風尚未進入臺北盆地之際(08:00 UTC 時間點)的四點風速垂直剖面(圖 5-9)，其中最北邊和最東邊的觀測點選擇離臺灣陸地較遠的海上，以獲取不受 WRF 模式陸地地形影響的風場，最西邊的點也選在淡水河口外海上，最南邊的點選在臺北盆地西南側大




漢溪河谷。將這四個網格點的  $u$ ,  $v$  風場畫出風速垂直剖面(圖 5-10)，其中以在陸地上，未進入東北季風強風區的南邊選點風速最弱，而在臺灣東北方外海上的東邊選點因東北季風尚未增強，所以風速次弱，其他兩個在海面上的選點風速比較大。至於地表邊界部份，我們設定地表摩擦為平整邊界，由於沒有地表使用分類的差別(都設為土壤，沒有都市、郊區、森林之分)，每一網格點的地表摩擦力都相同。但是地表摩擦對於風速的影響主要來自高解析度地形資訊(圖 5-11)，將此模擬設定的穩定態模擬結果之地表風風速畫出(圖 5-12)，可以看到地表風風速和地形高度的變化程度相關。由於強烈東北季風經常伴隨雲層降雨的現象，地表的熱力作用影響偏小，因此我們未設定地面溫度和空氣流體溫度的差異，兩者皆為  $20^{\circ}\text{C}$ ，也先不考慮熱力的條件。詳細的風場模擬條件設定如表 5-4 所列。

### 5.2.2 模式模擬結果討論

本小節將以兩個模擬時間之結果加以討論，第一個時間為強盛東北季風進入臺北盆地之時，選取模擬開始 150 分鐘(第 300 個 cycle)之後進行討論；此一時間點符合實際天氣情況，東北季風從北部外海開始增強，接著強風區才逐漸進入陸地；另一個時間為當風場模擬結果呈現穩定不再變化為止。

圖 5-13 為模擬 150 分鐘之後的 250 公尺高度風場圖，可以看到臺灣北部外海的風速約 15 至 20 m/s，其中東北方海面的風速差異，為北面和東面邊界初始給定的垂直剖面風速差所造成的；臺北盆地有三處風速較強達 12 m/s 的區域，風向為東北風，靠近地形的區域風速較小，其中四個白色標點為臺北盆地西側氣象觀測網新增的四個觀測點。將臺北盆地西側的部份放大顯示(圖 5-14)，該圖的北邊為臺北盆地西北側，南邊為盆地西南側，該圖中間為氣象觀測網的位置，而西邊則是林口臺地；模式模擬出盆地西北側風速以東北風略偏北風的風速吹入，碰到林口臺地地形後減速；盆地的西南側為東北風略偏東風，因東北季風強風尚未完全影響，風速較弱；在西邊與南邊的 2 號、3 號白色標記觀測點則有較明顯的輻合現象。

圖 5-15 為模擬達風場穩定後 250 公尺高度風場圖，可以看到臺灣北部外海的




風速較 150 分鐘的模擬結果更強，除了邊界設定的風速差之外，強盛東北風已完全建立，臺北盆地內的風速已增強到 12 至 15 m/s。臺北盆地西半部原先兩個較強風速區已經合併，而靠近地形的區域風速還是較小，在臺北盆地東西兩側強風區中間(如圖中間相當於松山機場的位置)有較大風速梯度，可能有低空風切的發生。將臺北盆地西側部份區域放大顯示(圖 5-16)，顯示盆地西側的林口臺地風速較小，強風速區在南邊與西邊的 3 號、4 號白色標記觀測點，和北邊與東邊的 1 號、2 號觀測點有風速上的差異，風向在臺北盆地西南側順轉進入西南側的大漢溪河谷。

圖 5-17 為模擬 150 分鐘之後風場未達穩定態的 250 公尺高度風場，疊加由南邊界往北  $Y=8280$  m 和  $Y=16000$  m 的 X-Z 風速垂直截面，可以看北邊的  $Y=16000$  m 截面在大屯山群上空 1 到 1.5 公里的風速相當強勁，強風區往西南側發展， $Y=8000$  m 截面上空的強風區和  $Y=16000$  m 截面上空的強風區相關；圖 5-18 顯示由西邊邊界往東  $X=5000$  m、 $X=10800$  m、 $X=19000$  m 的 Y-Z 垂直截面風速；將  $X=19000$  m 截面大屯山上的強風區往西南側移動，能在  $X=10800$  m 截面看到相同結果的，但在  $X=10800$  m 截面的南側，1 到 1.5 公里高的強風速區的影響正在建立，而  $X=5000$  m 林口臺地邊緣，風速受地形影響而比較弱。圖 5-19 及圖 5-20 和圖 5-17 及圖 5-18 設定相同，但是在風場已達穩定態，其中臺北盆地強風已經建立，在垂直剖面的強風區，往下混合到較低的高度，始得氣流過山能讓臺北盆地 250 公尺高的風速增加，與東北方的汐止谷地、西北方的淡水河口為臺北盆地內強勁東北風的入口。

### 5.3 觀測與數值模式結果討論

本研究在臺北盆地西側架設氣象觀測網，擁有東北季風時期風速、風向等氣象資料，也有松山機場 LLWAS 的原始資料；另一方面，在數值模式部份也使用了 WRF 與 STREAM 模式進行模擬。此研究資料和結果，還有部份議題值得討論，本節將對觀測資料、WRF 模式與 STREAM 模式做比較討論。

WRF 模式模擬風切出現的地區主要在臺北盆地西北側，位置和松山機場跑道附近有些偏差，圖 3-15 特別討論松山機場 10 號跑道飛機進場方向的警報時間累積




次數，此外也對於 2012 年 11 月 12 日、11 月 15 日、12 月 4 日、12 月 6 日、12 月 24 日 5 個個案進行 WRF 模式模擬，在臺北盆地的西北側皆有對應 LLWAS 觀測記錄的強渦度和輻合、輻散區產生，但 WRF 模式模擬中都是以 10 分鐘資料輸出，模式模擬結果和 LLWAS 的 10 秒鐘觀測資料有時間解析度的差異，目前 WRF 模式主要是藉由綜觀環境的分析，得到大略有強風切出現的時間和空間，與 LLWAS 準確度相當高的即時觀測能力比較，尚待加強。如果要使用 WRF 模式對低空風切做進一步的診斷和預報，應該要增加模式的時間、空間解析度，並且要加強處理小尺度地形效應的能力。

由 WRF 模式敏感度測試的結果，東北季風盛行之下，臺北盆地低空風切的產生受地形影響顯著，由 STREAM 模式也得知這是屬於氣流過山的議題。在本文之前的推測，東北季風風速越強，可能越容易造成低空風切。我們在 WRF 模式中幾個個案模擬中也見到，當綜觀環境風速較強，過山後會造成的渦度場或輻合輻散場也較強；而在觀測上即有數據可以驗證，圖 5-21 是觀測期間氣象觀測網 1 號觀測點和北三角形域區輻合、輻散絕對值的比較，在幾個風速比較大的資料，相對的輻合、輻散絕對值也比較大。計算 1 號觀測點的風速和北三角形區域輻合、輻散絕對值的相關係數為 0.247，若是討論輻合、輻散絕對值大於  $0.007 \text{ (s}^{-1}\text{)}$  以上的強風切情況，1、2、4 號測站的平均風速與輻合、輻散絕對值的相關係數為 0.397，確實是風速比較大，越容易造成越強的low空風切。

從 STREAM 模式中，可以得到在東北季風進入臺北盆地後，氣象觀測網中最北邊的 1 號觀測點風速相對較弱，因此比較 2012 年 11 月 12 日東北季風增強的低空風切個案，氣象觀測網 4 個觀測點的地面風速資料(圖 5-22)，1 號和 2 號觀測點的風速確實是比較弱的，在當天早上 9 點到下午 3 點間，1 到 4 號的觀測點平均風速分別為 4.03、4.59、5.10、6.37 m/s，這也更驗證 STREAM 模式模擬對於與現實觀測的準確性。

比較 STREAM 和 WRF 模式對於 2010 年 10 月 25 日風場的模擬結果(圖 5-15



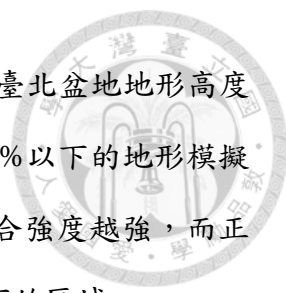


和圖 4-8)，在大屯山群的西南側，STREAM 模式的強風區比較靠近盆地中央，大屯山山邊的風速比較小，而 WRF 模式強風速區緊貼著山邊；在 STREAM 模式中臺北盆地的強風區可以分成兩側，中間風速較弱的地方正好通過松山機場上空的區域，是有機會形成低空風切的地方，WRF 模式中同樣可以看到強風分別從東北側汐止谷地和西北側淡水河口進來，但中間並沒有明顯的弱風區。STREAM 使用 90 公尺水平解析度，比較 WRF 使用 1 公里水平解析度，地形解析度不足以把松山機場北側的地形完整勾勒出來，因此對於地形周遭的模擬準確性，以 STREAM 的模擬較有說服力，而 STREAM 也能解釋松山機場周邊的風切問題，以及在臺北盆地西側的風切情況。

在模式設定上，STREAM 模式是使用固定的邊界風場，在當天東北季風增強後 12:00 UTC 至 18:00 UTC，WRF 模擬的風場和此固定風場差異不大，都是強東北風持續吹拂；在 5.2 節 STREAM 模式的模擬考慮較單純的機械條件，未考慮熱力條件，當模式設定上加入熱力條件(表 5-5)，並將模擬範圍放大到  $51 \times 45$  平方公里，地形的西南角為北緯  $24^{\circ}56'30''$ ，東經  $121^{\circ}20'00''$ ，STREAM 模式模擬結果的風速風向特徵，和未加入熱力條件的結果相似，主要的差別是風速會隨時間振盪(圖 5-23)，會有波動的現象不易達到穩定不變的型態，這點和 WRF 模式看到的渦旋洩離或渦街現象相當。STREAM 模式是屬於流力模式，在一些天氣現象像是雲雨、輻射、對流的模擬，不及 WRF 模式具有完整理論的數值公式，但是單純考慮風場吹送的作用，像是東北季風此類的低空風切，STREAM 模式具有高解析度數值模擬的優勢，因此使用 STREAM 模式進行模擬是相當合適的。

## 5.4 小結

比較 WRF 模式不同邊界層設定、積雲參數化使用與否、雲微物理過程的模擬結果，僅有更改邊界層設定會對低空風切的強度造成相關的影響，使用 YSU scheme 的平均最大輻合強度會較使用 MYJ scheme 弱 15%；各種模擬結果所呈現的低空風切位置大略相同，時間也都在一定的範圍內。



比較使用不同地形高度進行 WRF 模式模擬的結果，可驗證臺北盆地地形高度的存在，對低空風切的形成有相當大的影響，使用原始地形 50% 以下的地形模擬結果，輻合、輻散場都偏弱，相對地當地形越高，所得到的輻合強度越強，而正常地形模擬結果中，強輻合區僅出現在受地形影響 500 公尺以下的區域。

使用 STREAM 模式進行高解析度的時間、空間模擬，輸入東北風增強時的邊界風場，討論強東北風進入臺北盆地，和風速達到穩定兩個時間的風場。臺北盆地西側氣象觀測網在強風剛進入時，西邊碰到林口臺地地形減速，西南側因東北季風強風尚未完全影響，風速較慢使風場有輻合的現象；待模擬至風場穩定時，臺北盆地風速增強，在氣象觀測網西邊同樣受到林口臺地地形影響，有風速上的差異，風向則有順轉的現象。

分析 STREAM 模式模擬的前後時間的流場垂直剖面，發現強風能經由氣流過山進入臺北盆地的上空，再影響近地面的風場，因此 250 公尺高度的風場風主要由東北方的汐止谷地、西北方的淡水河口以及氣流過山所造成的。

STREAM 模式得到的風場，與同樣為東北季風風速增強時的氣象觀測網風速相比，皆能看到氣象觀測網 1 號觀測點的風速，較其他觀測點的風速弱；由氣象觀測網的觀測，也可驗證風速越大，造成的低空風切強度越大。而當 STREAM 模式加入熱力效應，模擬結果和純機械效應的模擬結果相似，但會有與 WRF 模式模擬結果相似的渦旋洩離或渦街的風速振盪現象產生，風場不易達到穩定不變的型態。在東北季風造成臺北盆地低空風切的議題中，STREAM 模式具有高解析度數值模擬的優勢，適合進行數值模擬。



## Chapter 6 總結與展望


### 6.1 結論

舉凡影響航機飛行之性能及穩定之大氣環境，總稱為航空氣象之危害天氣，常見之危害天氣，比如陣風、風切、亂流、積冰、大雨、大霧等。由於臺灣地理與氣候特徵，東北季風、季節性鋒面、颱風與伴隨的西南氣流，以及雷暴系統，都容易引發臺灣上空時間空間尺度大小不等的風切亂流現象，加上松山機場位於臺北盆地之內，機場周遭地形引起之地形風，造成航機於離進場階段的風切擾動，影響飛機起降的安全。

松山機場已建置一套低空風切警示系統，以監測低空風切之強度與位置，透過塔臺人員提供警示資訊給飛行員。但是，於松山機場 10 號跑道進場航線約 7 到 10 公里外的臺北盆地西側，易受到綜觀環境以及地形結構影響，也可能發生低空風切，目前未架設低空風切警示系統之觀測儀器。以秋、冬兩季東北風盛行時來說，臺北盆地西側與西北側最容易有低空風切產生，也可能會影響松山機場之飛機起降安全。

本研究在臺北盆地西側新增氣象觀測網進行密集觀測，觀測資料經過處理和推算之後，能夠依照兩測站之間進行風切計算，以及三角形區域內的輻合、輻散值計算，來判斷有無低空風切發生。由於兩兩觀測點間的距離會影響風切計算的結果，所以低空風切的計算與討論，集中在受到觀測點間距離影響較小的「三角形遞迴運算法」，所得到的輻合、輻散值參數，兩個月的觀測結果發現該觀測網上空判斷發生低空風切之時間，和松山機場 LLWAS 警報記錄時間是相近的(3.3 節)。我們也發現西三角形和南三角形區域輻合、輻散值呈現負相關，氣流在南三角形區域可能受地形影響，會向右順時針旋轉，或是向左逆時間旋轉，造成西三角形區域和南三角形區域有輻合、輻散的差異(3.4 節)。

2010 年 10 月 25 日低空風切個案分析顯示，臺灣受大陸高壓影響導致東北風



增強，當天松山機場 LLWAS 有數度顯著低空風切發生的紀錄，可見此個案受綜觀環境風場影響相當大。WRF 模式所模擬出來的顯著渦度和散度區域，主要在臺北盆地西北側，涵蓋本研究設立的氣象觀測網地區，以及松山機場 LLWAS 西側的測風臺；此外，WRF 模式模擬發生低空風切的時間，也與松山機場 LLWAS 警報紀錄相當一致，並且臺北盆地西北側到西側一帶都是低空風切持續最久與最大的地點(4.1 節)。WRF 模式透過適當的綜觀環境場模擬，成功偵測到受地形影響的低空風切，在 2012 年 12 月 6 日的個案，WRF 模式模擬的風場變化和地面觀測的資訊相同，與臺北盆地西側觀測網和松山機場 LLWAS 都有偵測到低空風切，但是模擬得到的低空風切發生的時間和地區，比觀測紀錄略早 1 至 2 小時，地點較偏西北側(4.2 節)。

在 WRF 模式敏感度測試方面，我們發現該模式的參數只有邊界層設定對於輻合、輻散場的結果略微影響；積雲參數化過程的使用與否，以及三種雲微物理參數化過程對輻合、輻散場的影響都不大，這些結果可能與這個案的綜觀環境背景是秋季冷鋒和東北季風，並沒有激發對流性積雲系統相關。此一個案顯示臺北盆地低空風切現象，與盆地地形特徵和模式的下邊界特性較有顯著關聯(5.1.1 節)。在地形高度變化的方面，WRF 模式中使用原始地形 50% 以下的地形模擬結果，輻合、輻散場都偏弱；相對地在原始地形 50% 以上的地形模擬結果，當地形越高所得到的輻合強度越強。在正常地形高度的模擬結果中，強輻合區僅出現在受地形影響的 500 公尺高度以下的區域，顯示了臺北盆地地形因素對低空風切生成的重要性(5.1.2 節)。

本研究使用 STREAM 模式進行高解析度的時間、空間模擬，能夠更清楚地了解東北風增強進到臺北盆地內之後的流動情況。藉由輸入東北風增強時的邊界風場，討論強東北風進入臺北盆地時，和風速達到穩定的兩個時間之風場，而能呈現強勁東北風進入臺北盆地內，受地形影響以及風速差異出現的輻合現象，也能看到受地形影響，風向有偏轉現象(5.2.2 節)。分析 STREAM 模式模擬的前後時間



的流場垂直剖面，發現強風能經由氣流過山進入臺北盆地的上空，再影響近地面的風場，因此 250 公尺高度的風場主要由東北方的汐止谷地、西北方的淡水河口以及氣流過山所造成的。

STREAM 模式模擬結果在臺北盆地西側的風速變化，與在東北季風吹拂下的風速觀測資料類似。而當 STREAM 模式加入熱力效應，模擬結果和純機械效應的模擬結果相似，但風場會持繼振盪，在東北季風造成臺北盆地低空風切的議題中，STREAM 模式具有高解析度數值模擬的優勢，適合進行數值模擬(5.3 節)。

回顧本研究 1.4 節的主要目標：

1. 本論文利用 WRF 數值模式，設定 1 公里水平解析度模擬，分析 250 公尺高度的渦度場和輻合、輻散場，結果證實能成功模擬低空風切之形成。
2. 架設在臺北盆地西側的氣象觀測網，於秋冬之際東北季風盛行下的觀測期間，利用「三角形遞迴運算」得到輻合、輻散值，確實發現 71 次達到低空風切閾值的時間點。
3. 比對臺北盆地西側和松山機場低空風切觀測資料，在較多警報次數的低空風切個案，兩者都能成功偵測到低空風切，少數幾個零星個案，只有其中之一有觀測到，由於觀測地區的不同，低空風切可能只出現在其中一個地區，因此此結果是合理的，也顯示增加觀測點，對提升低空風切觀測解析是有效的。
4. 在觀測資料和數值模式模擬的比對上，WRF 模式主要是藉由綜觀環境的分析，得到大略有強風切出現的時間和空間，與觀測結果略有偏差，需要增加 WRF 模式的時間、空間解析度，並且要加強處理小尺度地形效應的能力；STREAM 模式則有高解析度地形數值模擬的優勢，能得到和觀測結果類似的風場。
5. 高解析度流體力學模式(STREAM)模擬加入地形下邊界，以及使用 WRF 模式所模擬的環境風場剖面，能看出東北風氣流進入臺北盆地後是如何流動的，也看到受地形影響，風場出現輻合或偏轉的現象。



## 6.2 討論與未來展望

由 STREAM 模式看到的東北季風增強個案，250 公尺高度的風場是由 1 到 1.5 公里高的強風速區向下層混合所加強的，而本研究架設的氣象觀測網以及松山機場 LLWAS 的低空風切觀測方法，是由地面觀測資料向上空推測的；若是強風區是由上到下影響，那麼在空中可能已經出現低空風切，但地面觀測卻要等待一段時間才會偵測到低空風切。未來若可以使用剖風儀(wind profiler)觀測邊界層的風速垂直剖面資料，垂直解析度能達到 20 到 25 公尺，再和氣象觀測網以及機場 LLWAS 進行觀測上的比對，將可以了解空中的風場垂直結構，以及地面測站和 LLWAS 觀測的低空風切，與空中確實發生的低空風切，是否有時間上的差異。

本論文的高空風場是依照 ICAO (2005) LLWAS 的使用手冊，使用 Power Law 和 Ekman Layer 的方法推算，其中 Power Law 的參數  $\alpha$  和 Ekman Layer 邊界層厚度  $D_e$  和調整角度  $\theta$ ，是依照探空資料和 CL31 雲幕儀資料推算。但是邊界層厚度和風速剖面會隨時間變化，LLWAS 和我們的氣象觀測網應該要依照此資料做演算的調整。礙於板橋探空資料一天只有兩筆資料，而 CL31 雲幕儀雖能高時間解析觀測邊界層高度，卻又有天氣的條件限制；若地面風場觀測能加上垂直剖風儀的觀測，計算高度風場所用的參數  $\alpha$ 、 $D_e$  和  $\theta$ ，或是有新的垂直風速擬合方法，能即時由垂直剖風儀的資料做調整，再應用到各觀測點的風速資料做計算，預期能得到高準確性的低空風切觀測結果，並推估 250 公尺以上的低空風切。

低空風切警示系統是以 10 秒鐘的時間間隔發佈警報，但是本研究的觀測資料以 1 分鐘為主，因此由氣象觀測網資料求得的低空風切都是持續時間較長，而且具有一定強度，才能在 1 分鐘的平均資料中被發掘；1 分鐘時間解析度的優點是能夠直接過濾掉瞬間陣風和亂流的影響，但缺點是可能會遺漏部份時間較短的低空風切。在我們的儀器之中也有兩組可以進行 10 秒鐘平均風的觀測紀錄，所求出來的風切大小較 1 分鐘的平均資料增加許多，因此觀測的時間解析度的議題也值得探討。未來若能有相關觀測研究，可試著增加各觀測儀器的時間解析度，處理更

大的資料量，藉以得到更精細的低空風切或相關議題的資訊。

本論文使用的高解析度流體力學模式 STREAM，對於邊界垂直風場剖面的輸入是固定，未來也可加上時間的變化，進一步討論當邊界風速增強或是風向轉變時，臺北盆地的風場結構，以及低空風切生成的情況。

本研究探討的低空風切主要發生在秋冬之際，此一季節臺北盆地一旦東北季風增強，再加上盆地地形作用就有機會產生低空風切現象。除了東北季風以外，還有許多天氣系統，例如夏季熱力對流、春夏之間的鋒面系統、海陸風、甚至是颱風所造成的低空風切，也值得進一步的探討和研究。我們認為先透過模式模擬分析不同天氣系統造成的低空風切的好發地區，進一步架設密集氣象觀測網，應能夠進一步追蹤探索低空風切的成因。我們也認為在臺北盆地範圍內，未來若能在重點地區加入更密集的三維氣象觀測，包含地面測站與剖風儀，應可以得到更完整的低空風切時空特性。

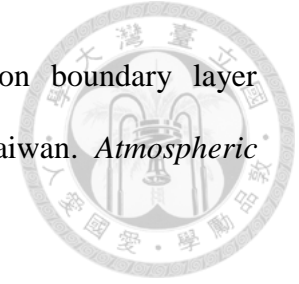


## 參考文獻



- 王嘉璋，2010：山谷邊界層之觀測與模擬。國立臺灣大學大氣科學研究所碩士論文，pp96。
- 何台華，涂明聖，蒲金標，魏志憲，2005：2002年梅雨季中正與松山機場低空風切之個案研究。*大氣科學*，**31**，119~142。
- 余曉鵬，童茂祥，2011：臺灣桃園及松山機場低空風切警告系統(LLWAS)介紹。飛行安全基金會，*2011年飛行安全秋季刊*，64~73。
- 梅可忠，2011：臺北盆地都市微氣候觀測與模擬。國立臺灣大學大氣科學研究所碩士論文，pp95。
- 郭忠暉，吳拱辰，2006：新型低空風切警告系統LLWAS-RS簡介。*飛航天氣*，**5**，28~37。
- 彭啟明，林松錦，1995：台灣北部地區混合層高度的觀測與模擬。*大氣科學*，**23**，311~336。
- 蒲金標，2003：臺灣松山機場低空風切警告系統與低空風切診斷分析。*大氣科學*，**31**，181~198。
- 蒲金標，2004：中正國際機場低空風切之分析研究。*第八屆全國大氣科學學術研討會*，82~92。
- ICAO, 2005: Manual on Low-level Wind Shear. 1st, International Civil Aviation Organization, Chapter 2~3.
- Lester, P. F., 2004: Aviation Weather. 2ed, Jeppesen Sanderson Inc., Chapter 11.
- Lin, C.-Y., F. Chen, J.-C. Huang, W.-C. Chen, Y.-A. Liou, W.-N. Chen and S.-C.





Liu, 2008: Urban heat island effect and its impact on boundary layer development and land-sea circulation over northern Taiwan. *Atmospheric Environment*, **42**, 5635–5649.

Meyer, D.R., M.A. Isaminger, and E.A. Proseus, 1999: Study of the Network Expansion LLWAS (LLWAS-NE) fault identification and system warning optimization through joint use of LLWAS-NE and TDWR Data. *Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology*, **8**, Dallas, TX., Amer. Meteor. Soc., 358-362.

Münkel, C., 2006: Boundary layer and air quality monitoring with a commercial lidar ceilometer. *SPIE 6367., Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing II*, 63670Q; doi: 10.1117/12.689775.

Schäfer, K., S. Emeis, C. Jahn, C. Münkel, S. Schrader and M. Höß, 2008: New results from continuous mixing layer height monitoring in urban atmosphere. *Proc. SPIE 7107., Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XIII*, 71070A; doi: 10.1117/12.800358.

UCAR, 1992: Appendix A&B, Network Expansion LLWAS (Phase III), Algorithm Specification. University Corporation for Atmospheric Research, pp51.

UCAR, 2013: Low Level Windshear Alert System (LLWAS).  
<http://www.rap.ucar.edu/projects/llwas/>

表 1-1 2009 年 1 月到 2011 年 5 月之間，松山機場的 LLWAS 觀測到顯著的低空風切案例。按發生季節分為春、夏、秋、冬四個欄位，其中有底線的藍斜字為颱風影響的案例；本研究選取持續時間長的顯著低空風切，且為東北季風影響的 2010 年 10 月 25 日做為 WRF 模式模擬個案。

Winter (DJF)		Summer (JJA)		Autumn (SON)	
2009/01/22	0321Z	2009/06/11	0036Z	2009/10/04	1137Z
2009/02/13	0745Z	2009/06/13	0215Z	2009/11/04	0412Z
2009/02/25	0634Z	2009/06/13	0216Z	<u>2010/09/19</u>	<u>1130Z</u>
		2009/06/26	0959Z	<u>2010/09/19</u>	<u>1154Z</u>
		2009/06/26	1000Z	<u>2010/09/19</u>	<u>1341Z</u>
		2009/07/06	0600Z	<u>2010/09/19</u>	<u>1355Z</u>
		2009/07/24	0242Z	<u>2010/09/19</u>	<u>1412Z</u>
		2009/07/24	0801Z	2010/10/21	0651Z
		2010/07/07	0901Z	2010/10/25	1017Z
		2010/07/11	0130Z	2010/10/25	1136Z
		2010/07/11	0703Z	2010/10/25	1148Z
		<u>2010/08/30</u>	<u>0532Z</u>	2010/10/25	1215Z
		<u>2010/08/30</u>	<u>0920Z</u>		
		<u>2010/08/30</u>	<u>0946Z</u>		
		<u>2010/08/30</u>	<u>1240Z</u>		
		<u>2011/05/28</u>	<u>0126Z</u>		
		<u>2011/05/28</u>	<u>0138Z</u>		

表 2-1 臺北盆地西側氣象觀測網，四個觀測點的儀器觀測記錄表。

Station 1 成功國小 MAWS	
2012/11/09	13:30 架設完成，因磁場問題，無法做方位角校正。
2012/11/15	收資料，確認儀器順利運作，因操作問題損失當天 10:00 前的資料。
2012/12/04	收資料，確認儀器順利運作。
2012/12/17	收資料，利用太陽角度確認儀器方位角偏移量。
2012/12/29	晚上 10 點前後冷鋒通過，風速變化，帶來短時間強降雨。
2013/01/08	13:00 收儀器，結束觀測。
2013/01/09	進行觀測後的儀器比對。
Station 2 德音國小 R.M.Young	
2012/11/09	16:00 架設完成，因磁場問題，無法做方位角校正。
2012/11/14	收資料，確認儀器順利運作。
2012/12/03	收資料，更換電池。
2012/12/12	收資料，利用太陽角度確認儀器方位角偏移量。
2012/12/24	收資料，確認儀器順利運作。
2012/12/29	晚上 10 點前後冷鋒通過，風速變化，帶來短時間強降雨。
2013/01/08	11:00 收儀器，結束觀測。
2013/01/09	進行觀測後的儀器比對。

表 2-1 臺北盆地西側氣象觀測網，四個觀測點的儀器觀測記錄表(續)。

<b>Station 3 中信國小 Hobo-1</b>	
2012/11/09	15:30 架設完成，方位角確認。
2012/11/14	收資料，確認儀器順利運作。
2012/11/21	收資料，發現 11/19 開始資料無法以正確數值存取。
2012/11/26	原打算將儀器拆除帶回檢驗，發現 11/26 當天資料恢復正常處理。
2012/11/28	收資料，清空記憶體。
2012/12/05	原定收資料日，但因下大雨未前往。
2012/12/06	11:00 收資料，因儀器記憶體已滿，缺少 11/28 10 個小時的資料。同時發現 12/2 風速資料又無法以正確數值存取。
2012/12/12	風速資料數值持續錯誤。
2012/12/19	風速資料有幾天恢復正常數值，但還是很不穩定。決定直接將風速計拆解帶回檢驗，結束風速、風向觀測。
2012/12/26	資料無法以正確值寫入的原因，主要是資料傳輸線短路接觸不良。短路疑似因線路進水所導致。
2012/12/29	晚上 10 點前後冷鋒通過，風速變化，帶來短時間強降雨。
2013/01/08	14:00 收回剩於儀器，結束觀測。
2013/01/09	進行觀測後的儀器比對。
<b>Station 4 穀保家商 Hobo-2</b>	
2012/11/09	11:30 架設完成，方位角確認。
2012/11/14	收資料，確認儀器順利運作。
2012/11/21	收資料，清空記憶體。
2012/11/28	收資料，清空記憶體。
2012/12/05	原定收資料日，但因下大雨未前往。
2012/12/06	10:00 收資料，因儀器記憶體已滿，缺少 12/5 22:00 到 12/6 10:00 的資料。
2012/12/12	收資料，清空記憶體。
2012/12/19	收資料，清空記憶體。
2012/12/26	收資料，清空記憶體。發現 Missing Data。 12/26 清晨少了 8 小時資料，12/27 清晨開始少了一天半的資料。
2012/12/29	晚上 10 點前後冷鋒通過，風速變化，帶來短時間強降雨。
2013/01/02	收資料，清空記憶體。
2013/01/08	10:00 收儀器，結束觀測。
2013/01/09	進行觀測後的儀器比對，發現 Missing Data 的問題在於風杯積水，需要有較大風速才能順利旋轉，並將積水吹出。

表 2-2 1 號到 3 號觀測點風速計，與 4 號觀測點風速計的線性迴歸分析；其中 V1 為 1 號觀測點儀器風速資料，依此類推 V2、V3、V4。觀測資料 V1 到 V3 利用修正公式將風速修正，來對應參考風速計的風速 V4，斜率、截距、 $R^2$ 、資料筆數如表格所示。

	修正公式 線性迴歸方程式	斜率	截距	$R^2$	資料筆數
<b>Station 1</b> MAWS	$V4 = (V1 + 0.3390) / 1.0477$ $V1 = V4 \times 1.0477 - 0.3390$	1.048	-0.339	0.949	358
<b>Station 2</b> R.M.Young	$V4 = (V2 + 0.3868) / 0.9350$ $V2 = V4 \times 0.9350 - 0.3868$	0.935	-0.387	0.884	93
<b>Station 3</b> Hobo-1	$V4 = (V3 - 0.1888) / 0.9425$ $V3 = V4 \times 0.9425 + 0.1888$	0.943	0.189	0.883	227

表 3-1 氣象觀測網中，兩兩觀測點之間的距離。

觀測點與觀測點	距離 (km)
Sta. 1 - Sta. 2	2.597
Sta. 2 - Sta. 3	2.289
Sta. 3 - Sta. 4	2.614
Sta. 1 - Sta. 4	2.463
Sta. 1 - Sta. 3	3.352
Sta. 2 - Sta. 4	3.691

註：Sta.為觀測點縮寫

表 3-2 氣象觀測網中，四組三角形區域(東、南、西、北)輻合、輻散值的相關係數。

Triangle Area	East 東	South 南	West 西	North 北
East 東	1	0.825	-0.241	0.430
South 南	0.825	1	-0.500	0.148
West 西	-0.241	-0.500	1	0.666
North 北	0.430	0.148	0.666	1

表 4-1 中央氣象局 2010 年 10 月 25 日彭佳嶼氣象站逐時觀測資料。

時間	海平面氣壓 (hPa)	氣溫 (°C)	平均風速 (m/s)	平均風向 (方位角°)	最大平均 風速(m/s)	降雨量 (m/s)
01:00	1010.2	24.3	3.8	60	4.0	0
02:00	1010.1	24.1	3.4	30	4.2	0
03:00	1010.2	24	3.7	20	3.8	0
04:00	1010.1	23.9	3.6	30	3.9	0
05:00	1010.6	23.8	3.5	30	4.6	0
06:00	1011.0	23.8	4.6	30	5.6	0
07:00	1011.5	23.8	5.9	30	6.5	0
08:00	1011.7	24.9	7.0	30	7.8	0
09:00	1012.1	26	7.7	40	8.4	0
10:00	1012.1	25.4	8.3	40	9.0	0
11:00	1011.9	26.3	7.0	30	9.4	0
12:00	1011.5	26.3	8.0	40	9.0	0
13:00	1011.0	26.6	9.2	40	10.1	0
14:00	1010.7	25.8	9.9	40	10.9	0
15:00	1011.1	24.6	9.0	30	11.6	0
16:00	1011.8	24.3	10.8	30	11.2	0
17:00	1012.3	23.9	11.2	30	12.3	0
18:00	1012.9	23.2	11.9	30	12.8	0
19:00	1013.7	22.9	12.5	30	12.7	0
20:00	1014.3	22.9	14.0	30	14.1	0
21:00	1015.0	22.4	13.3	30	15.5	0
22:00	1015.8	21.9	13.1	30	14.5	0
23:00	1016.2	21.9	12.3	30	16.3	0
24:00	1016.1	21.7	13.2	30	15.3	0

表 4-2 中央氣象局 2010 年 10 月 25 日臺北氣象站逐時觀測資料。

時間	海平面氣壓 (hPa)	氣溫 (°C)	平均風速 (m/s)	平均風向 (方位角°)	最大平均 風速(m/s)	降雨量 (m/s)
01:00	1009.6	25.0	0.2	0	1.0	0
02:00	1009.7	25.0	0.7	170	0.9	0
03:00	1009.8	24.5	0.5	170	1.3	0
04:00	1009.5	24.3	0.4	150	1.4	0
05:00	1010.0	24.0	0.7	170	1.6	0
06:00	1010.7	23.8	0.7	160	1.8	0
07:00	1011.4	24.3	0.3	170	1.1	0
08:00	1011.5	25.9	0.6	160	1.6	0
09:00	1011.5	27.3	1.8	70	1.8	0
10:00	1011.4	28.1	2.9	60	3.7	0
11:00	1010.9	28.5	4.8	60	5.0	0
12:00	1010.2	29.0	5.5	70	5.5	0
13:00	1010.0	29.0	5.0	60	6.6	0
14:00	1009.7	28.1	2.9	40	6.1	0
15:00	1009.9	26.9	3.6	60	6.1	0
16:00	1010.7	24.7	3.3	60	5.0	2.5
17:00	1011.1	24.3	4.0	40	4.2	1.5
18:00	1011.5	24.1	3.5	40	4.0	1.5
19:00	1012.9	23.9	4.3	40	6.0	雨跡
20:00	1013.7	23.6	4.7	20	5.2	雨跡
21:00	1014.5	23.6	5.6	30	6.5	雨跡
22:00	1015.3	23.1	3.5	70	5.6	0
23:00	1016.0	22.9	5.2	20	5.8	0
24:00	1016.4	22.5	3.4	40	4.8	0

表 4-3 2010 年 10 月 25 日 WRF 個案模式設定。

<b>Version</b>	WRF 3.2.1			
<b>Data source</b>	NCEP Final Analysis (FNL from GFS)			
<b>Simulation time</b>	2010/10/24 12:00 UTC ~ 2010/10/25 18:00 UTC			
<b>Region</b>	0.91°S ~ 42.87°N ; 94.48°E ~ 154.32°E			
<b>Domain</b>	4			
<b>resolution</b>	27 km	9 km	3 km	1 km
<b>Grid points</b>	193x170	148x163	148x181	157x145
<b>Vertical levels</b>	34	34	34	34
<b>Microphysics</b>	Lin <i>et al.</i> scheme			
<b>Cumulus Para.</b>	Kain-Fritsch (KF)		None	
<b>PBL</b>	Mellor-Yamada-Janjic (MYJ)			
<b>Land Surface</b>	Noah			
<b>Surface Layer</b>	Eta Similarity			
<b>LW Radiation</b>	RRTM			
<b>SW Radiation</b>	Goddard			



表 4-4 中央氣象局 2012 年 12 月 6 日彭佳嶼氣象站逐時觀測資料。

時間	海平面氣壓 (hPa)	氣溫 (°C)	平均風速 (m/s)	平均風向 (方位角°)	最大平均 風速(m/s)	降雨量 (m/s)
01:00	1022.0	15.4	9.5	30	10.4	0
02:00	1022.3	15.1	9.5	30	10.7	0
03:00	1022.3	14.5	9.8	30	11.1	0
04:00	1022.5	14.1	9.8	30	11.5	0
05:00	1023.3	13.9	8.1	30	11.4	0
06:00	1024.0	13.5	8.8	30	11.1	0
07:00	1024.3	13.5	9.8	40	10.2	0
08:00	1024.5	13.7	8.3	50	10.4	0
09:00	1024.5	14.6	9.0	50	9.6	0
10:00	1024.0	15.3	8.3	50	8.9	0
11:00	1023.1	15.5	8.3	60	9.1	0
12:00	1021.7	16.3	8.4	50	8.9	0
13:00	1021.3	16.5	8.1	60	9.8	0
14:00	1020.4	15.8	7.3	70	8.8	0
15:00	1020.2	16.2	6.4	70	7.2	0
16:00	1020.3	16.3	7.4	70	7.5	0
17:00	1020.5	16.4	5.7	70	8.0	0
18:00	1021.2	16.7	7.0	70	8.2	0
19:00	1021.0	16.8	6.4	80	8.1	0
20:00	1021.4	16.9	6.2	80	6.3	0
21:00	1021.4	17.3	4.7	90	6.8	0
22:00	1021.3	17.7	5.6	100	6.8	0
23:00	1021.1	17.9	5.4	100	7.9	0
00:00	1021.4	17.9	5.3	90	5.8	0

表 4-5 中央氣象局 2012 年 12 月 6 日淡水氣象站逐時觀測資料。

時間	海平面氣壓 (hPa)	氣溫 (°C)	平均風速 (m/s)	平均風向 (方位角°)	最大平均 風速(m/s)	降雨量 (m/s)
01:00	1021.3	15.5	1.3	40	1.9	0
02:00	1021.9	15.5	1.1	50	2.5	0
03:00	1021.5	15.1	2.2	60	2.2	0
04:00	1021.4	15	2.6	40	2.6	0
05:00	1021.9	14.5	3.4	40	3.6	0
06:00	1022.8	14.2	2.2	60	3.5	0
07:00	1022.3	14.2	2.5	70	2.5	0
08:00	1022.8	14.6	2.5	70	3.2	0
09:00	1022.5	15	2.6	60	3.3	0
10:00	1021.9	16.2	2.9	60	3.2	0
11:00	1020.9	17.5	1.3	不定	3.6	0
12:00	1019.5	18.9	2.1	100	2.7	0
13:00	1018.7	18	2.9	130	3.1	0
14:00	1017.8	18.8	1.2	80	2.8	0
15:00	1017.9	17	2	170	3	0
16:00	1018.1	17	3.1	140	3.1	0
17:00	1018.1	16.6	2.9	150	3.5	0
18:00	1018.9	16.9	2.2	160	3.4	0
19:00	1019.1	17.3	2.8	150	2.9	0
20:00	1019.3	17.1	2.9	150	4.3	0
21:00	1019.4	17.4	1.6	140	3.3	0
22:00	1019.5	17.2	2.2	140	3	0
23:00	1019.8	17.5	3.9	150	4	0
00:00	1019.9	16.5	1.9	140	3.9	0

表 4-6 2012 年 12 月 6 日 WRF 個案模式設定。

<b>Version</b>	WRF 3.2.1			
<b>Data source</b>	NCEP Final Analysis (FNL from GFS)			
<b>Simulation time</b>	2012/12/3 12:00 UTC ~ 2012/12/6 18:00 UTC			
<b>Region</b>	0.91°S ~ 42.87°N ; 94.48°E ~ 154.32°E			
<b>Domain</b>	4			
<b>resolution</b>	27 km	9 km	3 km	1 km
<b>Grid points</b>	193x170	148x163	148x181	157x145
<b>Vertical levels</b>	34	34	34	34
<b>Microphysics</b>	Lin <i>et al.</i> scheme			
<b>Cumulus Para.</b>	Kain-Fritsch (KF)		None	
<b>PBL</b>	Mellor-Yamada-Janjic (MYJ)			
<b>Land Surface</b>	Noah			
<b>Surface Layer</b>	Eta Similarity			
<b>LW Radiation</b>	RRTM			
<b>SW Radiation</b>	Goddard			

表 5-1 WRF 模式模擬實驗參數設定表；比較使用不同的邊界層參數化、積雲參數化的使用與否、雲微物理過程參數的選用，所設定的實驗編號：Exp. 11~Exp. 16 和 Exp. 21~Exp. 26，其中 Exp. 11 為控制組。

<b>Planetary Boundary Layer</b>		Mellor-Yamada-Janjic		Yonsei University	
<b>Cumulus Parameterization</b> Kain-Fritsch		open	close	open	close
<b>Microphysics</b>	Lin <i>et al.</i>	Exp. 11	Exp. 14	Exp. 21	Exp. 24
	Kessler	Exp. 12	Exp. 15	Exp. 22	Exp. 25
	Double-Moment 6-class	Exp. 13	Exp. 16	Exp. 23	Exp. 26

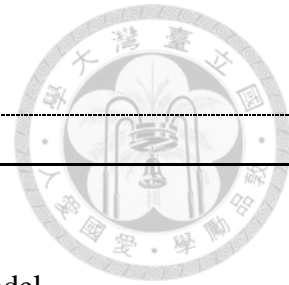
表 5-2 對應 WRF 模式模擬中 250 公尺高度的輻合、輻散場，比較不同參數化設定，其中 Exp. 11 為控制組，其他各組參數設定請參考表 5-1。九網格平均數值最大散度絕對值、與控制組的比值、發生時間分別列出。

實驗測試編號	九網格平均數值 最大散度絕對值( $s^{-1}$ )	最大散度絕對值 與控制組比值	發生時間
Exp. 11	0.0081 (輻合)	1.00	09:30 UTC
Exp. 12	0.0110 (輻合)	1.37	09:50 UTC
Exp. 13	0.0110 (輻合)	1.36	11:00 UTC
Exp. 14	0.0088 (輻合)	1.10	11:10 UTC
Exp. 15	0.0071 (輻合)	0.88	12:30 UTC
Exp. 16	0.0122 (輻合)	1.51	09:30 UTC
Exp. 21	0.0076 (輻合)	0.94	10:10 UTC
Exp. 22	0.0080 (輻合)	0.99	09:50 UTC
Exp. 23	0.0071 (輻合)	0.88	09:10 UTC
Exp. 24	0.0069 (輻合)	0.86	12:10 UTC
Exp. 25	0.0099 (輻合)	1.23	11:10 UTC
Exp. 26	0.0078 (輻合)	0.97	09:40 UTC

表 5-3 對應 WRF 模式模擬中 250 公尺高度的輻合、輻散場，比較不同地形高度設定，Exp. 11 為控制組，Exp. 30、31、32、33、35，分別為 0%、25%、50%、75%、120% 的地形高度。九網格平均數值最大散度絕對值、與控制組的比值、發生時間分別列出。

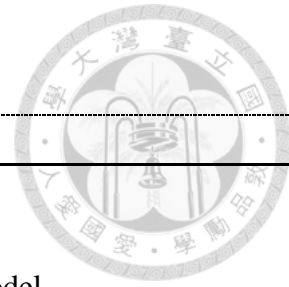
實驗測試編號	地形高度	九網格平均數值 最大散度絕對值( $s^{-1}$ )	最大散度絕對值 與控制組比值	發生時間
Exp. 30	0 %	0.0034 (輻合)	0.42	11:40 UTC
Exp. 31	25 %	0.0033 (輻合)	0.41	11:20 UTC
Exp. 32	50 %	0.0042 (輻散)	0.52	11:50 UTC
		0.0036 (輻合)	0.45	11:20 UTC
Exp. 33	75 %	0.0068 (輻合)	0.84	10:20 UTC
Exp. 11	100 %	0.0081 (輻合)	1.00	09:30 UTC
Exp. 35	120 %	0.0098 (輻合)	1.21	09:30 UTC

表 5-4 STREAM 模式參數設定



<b>Analysis Types</b>	
Incompressible/Compressible flow	Incompressible
Flow field	Turbulent flow
Turbulence model	Standard k-eps model
Flow	Consider
Heat	
Steady Analysis/Transient Analysis	Transient analysis
<b>Basic Settings</b>	
Gravity	
Acceleration due to gravity	
Ambient temperature	
<b>Fluid Region</b>	
Fluid number 1 Domain(cuboid) :	air(20C)
<b>Flow</b>	
Components of velocity	X,Y,Z-direction
<b>Initial Condition</b>	
The number of initial condition settings	2
Domain(cuboid)	FluidTemp1 : Initial T (20°C)
Undefined solid parts	20°C
<b>Flow Boundary</b>	
The number of flux boundary settings	5
Xmin	<b>Velocity boundary (WRF west point)</b>
Xmax	<b>Velocity boundary (WRF east point)</b>
Ymin	<b>Velocity boundary (WRF south point)</b>
Ymax	<b>Velocity boundary (WRF north point)</b>
Zmax	Natural outflow boundary
<b>Wall Boundary</b>	
The number of wall boundary settings	1
All fluid boundary	Noslip(smooth)

表 5-5 STREAM 模式加入熱力條件參數設定



<b>Analysis Types</b>	
Incompressible/Compressible flow	Incompressible
Flow field	Turbulent flow
Turbulence model	Standard k-eps model
Flow	Consider
Heat	<b>Consider</b>
Steady Analysis/Transient Analysis	Transient analysis
<b>Basic Settings</b>	
Gravity	<b>Consider</b>
Acceleration due to gravity	( 0, 0, -1 ) 9.8 m/s <sup>2</sup>
Ambient temperature	20°C
<b>Fluid Region</b>	
Fluid number 1 Domain(cuboid) :	air(20C)
<b>Flow</b>	
Components of velocity	X,Y,Z-direction
<b>Initial Condition</b>	
The number of initial condition settings	2
Domain(cuboid)	FluidTemp1 : Initial T (20°C)
Undefined solid parts	20°C
<b>Flow Boundary</b>	
The number of flux boundary settings	5
Xmin	<b>Velocity boundary (WRF west point)</b>
Xmax	<b>Velocity boundary (WRF east point)</b>
Ymin	<b>Velocity boundary (WRF south point)</b>
Ymax	<b>Velocity boundary (WRF north point)</b>
Zmax	Natural outflow boundary
<b>Wall Boundary</b>	
The number of wall boundary settings	1
All fluid boundary	Noslip(smooth)
<b>Thermal Boundary</b>	
The number of heat transfer boundary settings	4
landsurface	HeatTransfer4 : Heat transfer [log-law]
Undefined(Heat: Outer boundary)	HeatTransfer1 : Adiabatic
Undefined(Heat: Fluid-solid boundary)	HeatTransfer4 : Heat transfer [log-law]
Undefined(Heat: Between solids boundary)	HeatTransfer3 : Conduction

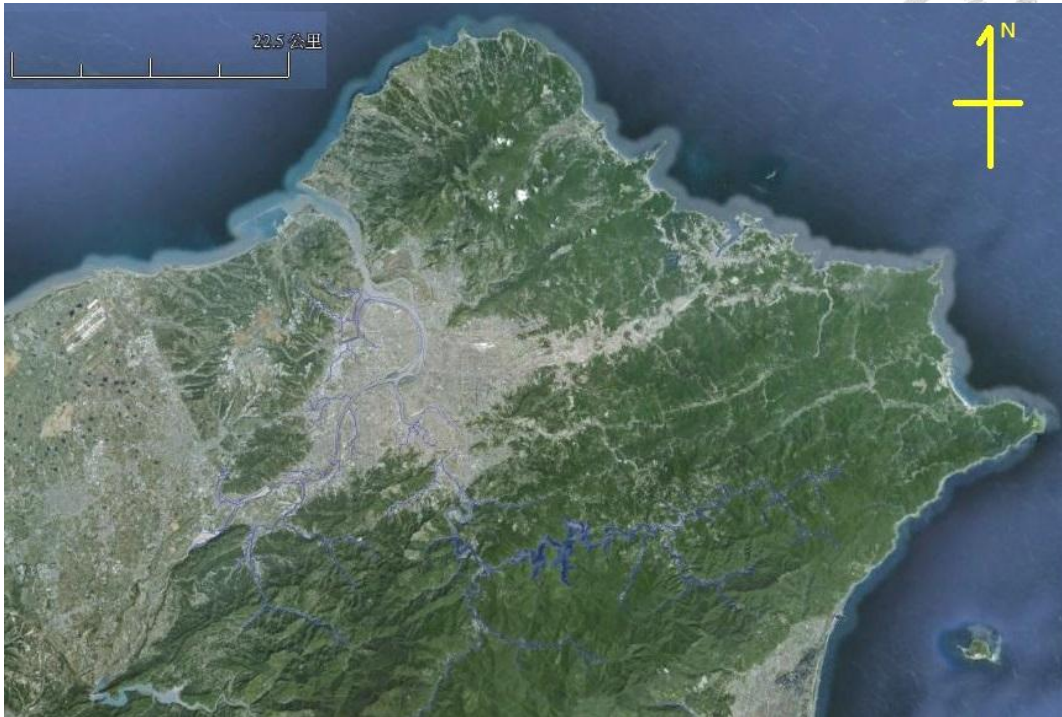


圖 1-1 臺北盆地 google 衛星影像圖。臺北盆地為中間淺色等腰三角形，盆地的北方為大屯山群，西北方為觀音山，西方為林口臺地，西南面為雪山山脈丘陵。

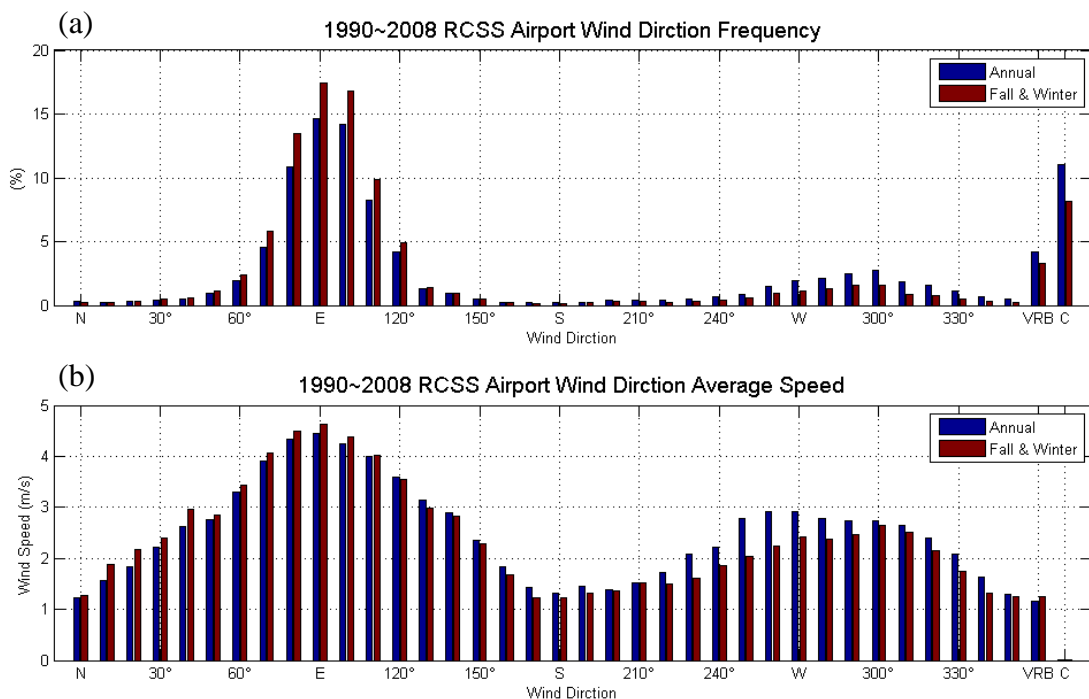


圖 1-2 1990~2008 年松山機場(RCSS)整點風向風速資料統計；藍色為全部資料統計，紅色為 9~12 月和 1~2 月秋、冬兩季的資料統計，橫軸為風向方位，N、S、E、W 為東西南北方，VRB 為風向不定，C 為靜風；(a)各風向發生的百分比比例(風向次數/所有次數)；(b)各風向發生時的平均風速，單位為 m/s。



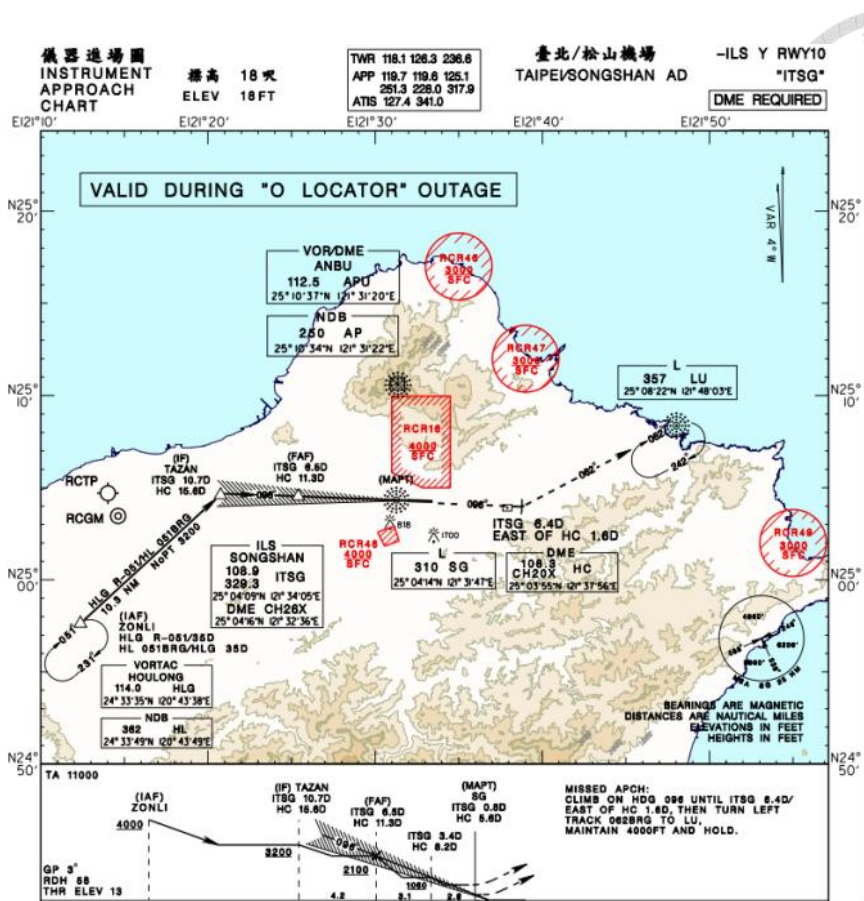


圖 1-3 松山機場 10 號跑道飛機進場航線圖。(摘自民用航空局 Aeronautical Information Publication)

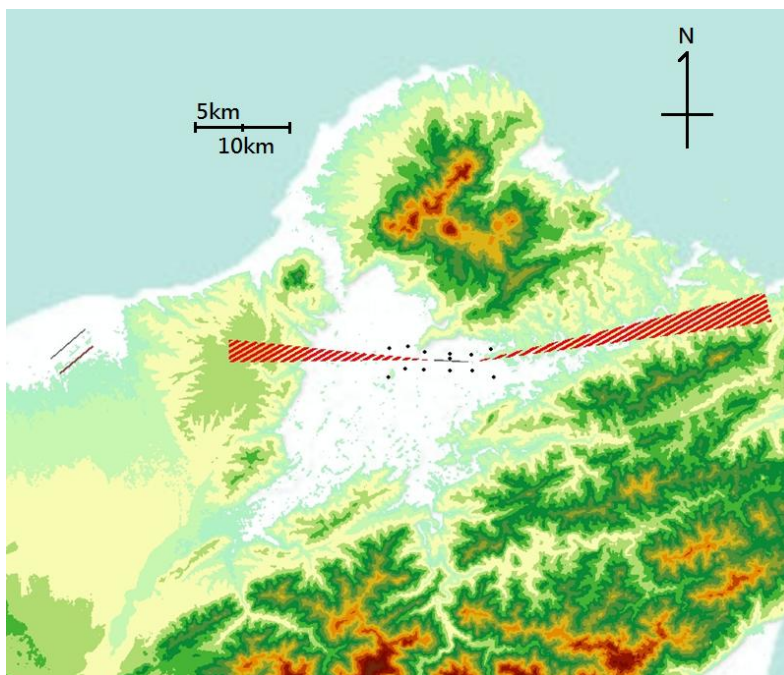
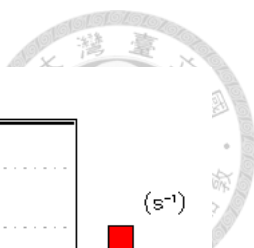


圖 1-4 臺北盆地 30 公尺解析度數位地形模式(Digital Terrain Model, DTM)等高地形圖(上方為北);圖片中間黑色橫線為松山機場跑道,周邊 13 個黑點為松山機場 LLWAS 的 13 個測風臺,左右延伸的紅色斜線區域為航機儀器進場區域。



### 250m Vorticity 2010/10/25 11:00 UTC

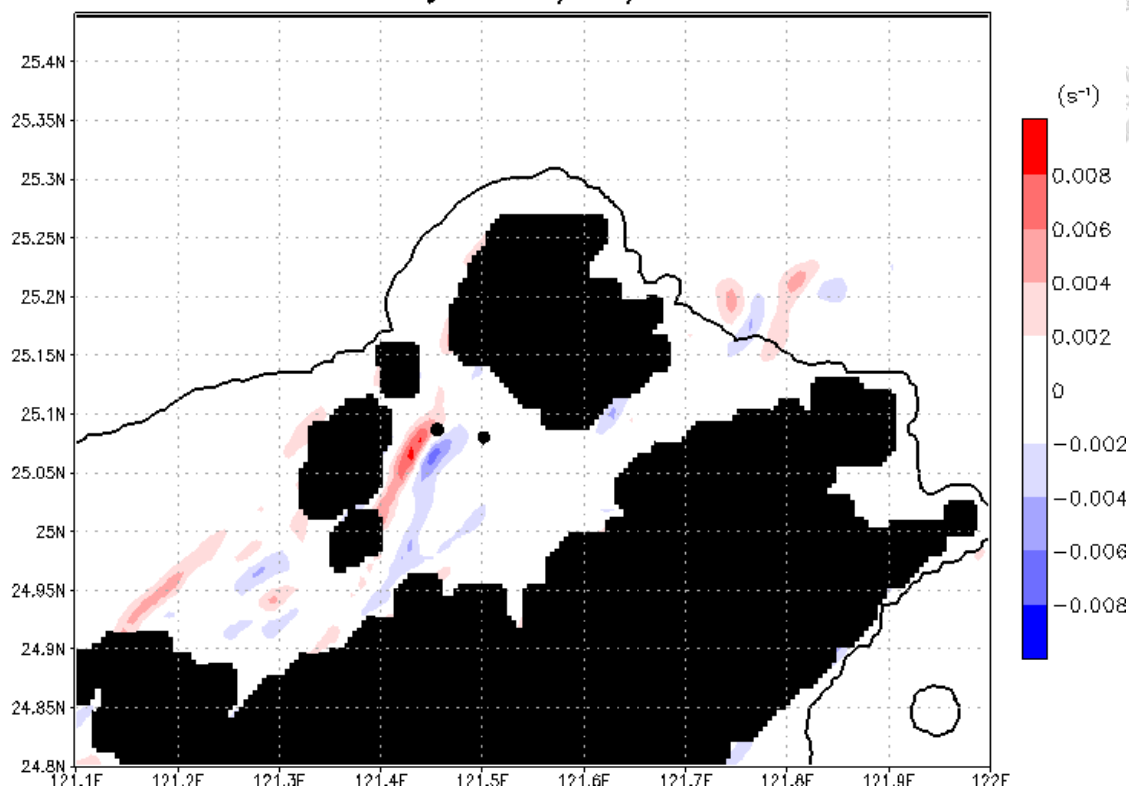


圖 1-5 2010 年 10 月 25 日個案之 WRF 模式模擬結果(WRF 設定見第三章)：250 公尺高度剖面的渦度場。圖中黑色等高線為 1 公尺，即可視為海岸線，黑色色塊為地形高於 250 公尺無渦度資料的區域，渦度單位為(s<sup>-1</sup>)。

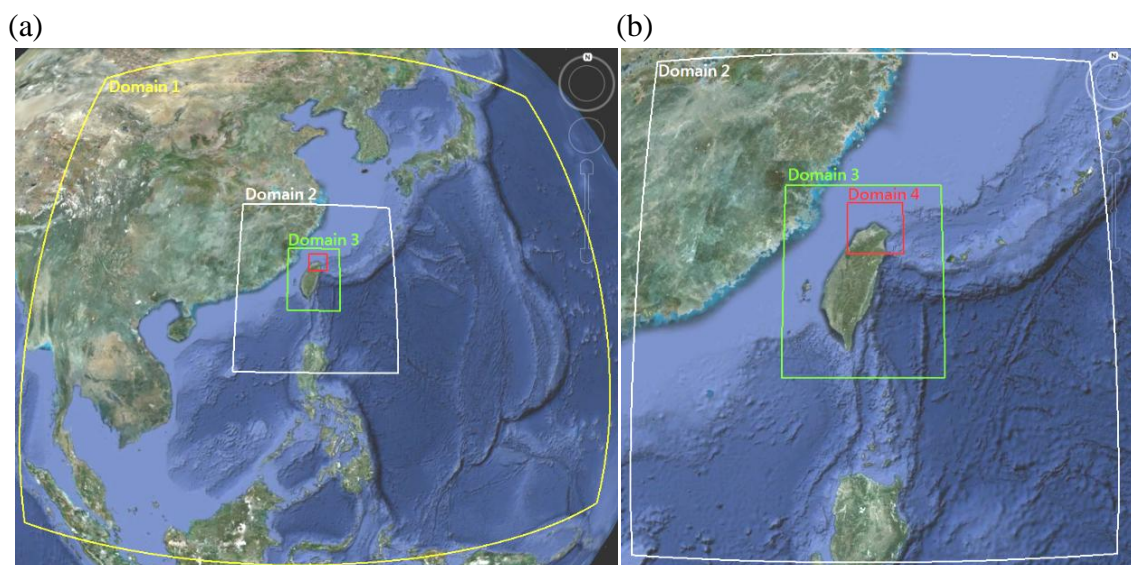


圖 2-1 (a) WRF 模式所模擬的四層 Domain 繪製在 google 衛星影像圖上；黃色為 Domain 1、白色為 Domain 2、綠色為 Domain 3、紅色為 Domain 4。(b) 為圖 2-1 (a)的放大圖。

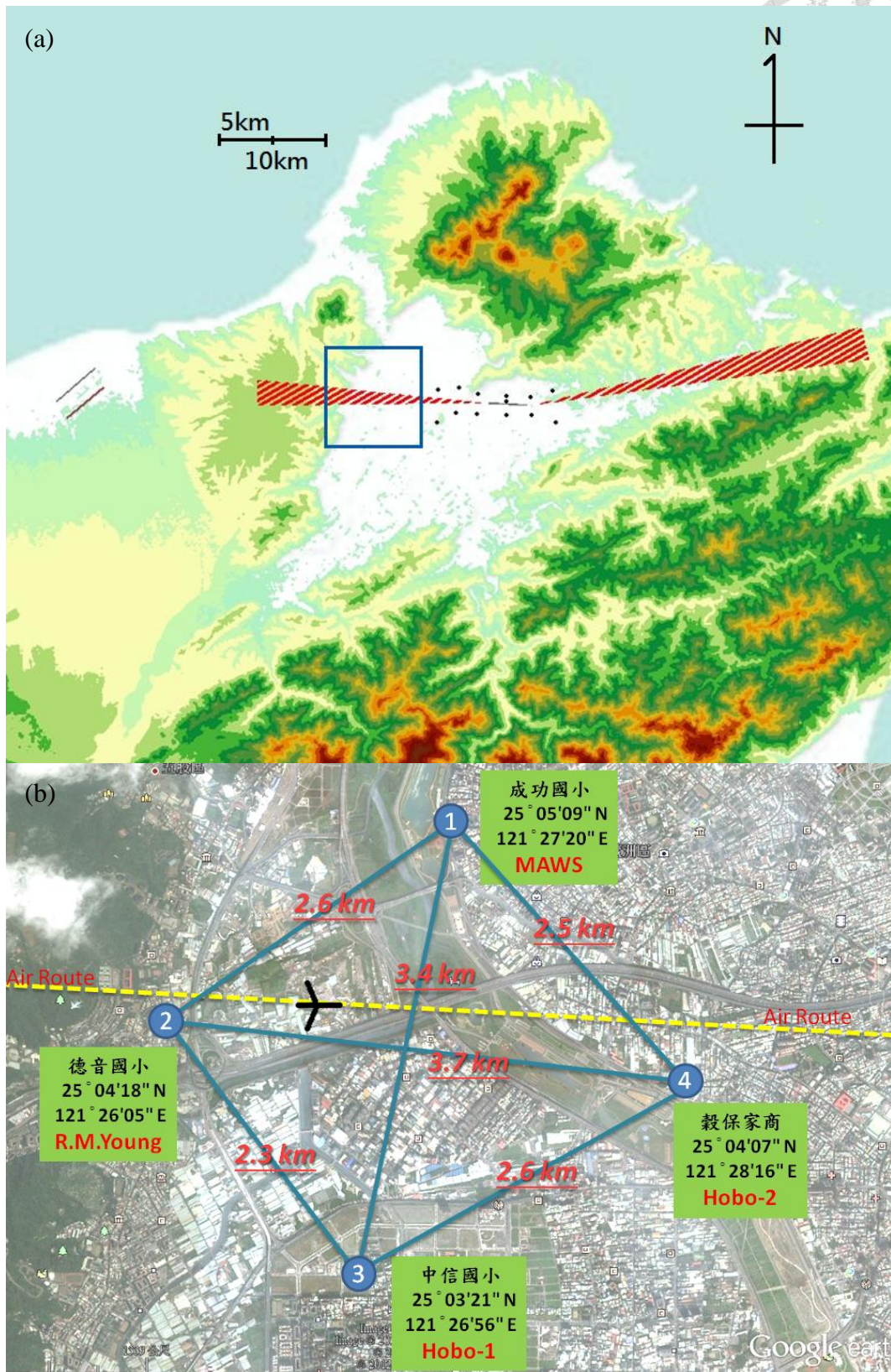


圖 2-2 (a)同圖 1-4，藍色方框為臺北盆地西側，即為圖 2-2(b)的區域。(b)臺北盆地西側 google 衛星影像圖，1、2、3、4 為四個觀測站的代號，綠色方框為觀測站的資訊，黃虛線為飛機航道，藍線為站與站間的連線。

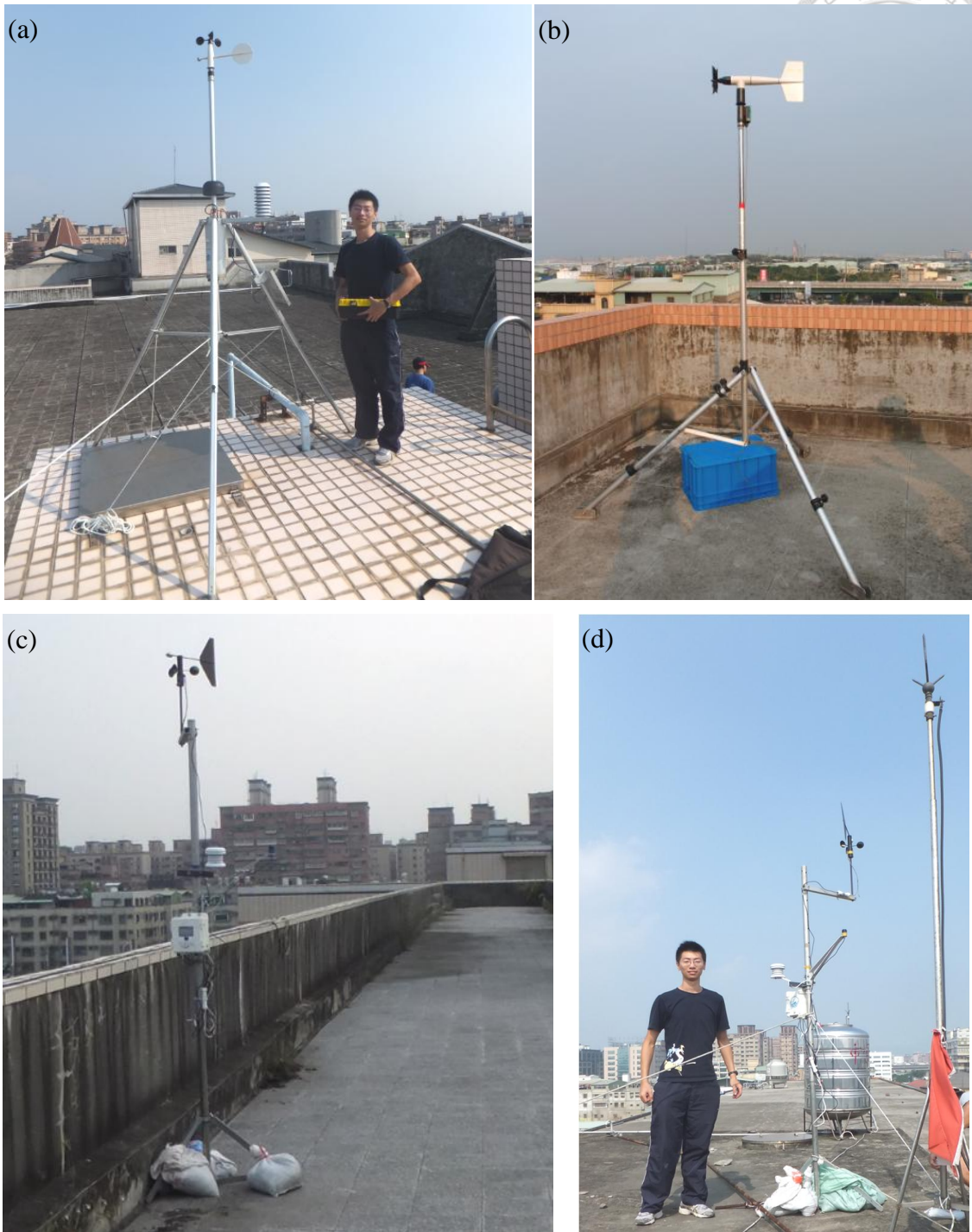


圖 2-3 臺北盆地西側氣象觀測網各儀器照片，各風速計距支架底端都約為 3 公尺。  
(a) 1 號觀測點成功國小的 MAWS 氣象觀測站；(b) 2 號觀測點德音國小的 R.M.Young 風速風向計；(c) 3 號觀測點中信國小的 Hobo 氣象觀測站；(d) 4 號觀測點穀保家商的 Hobo 氣象觀測站。

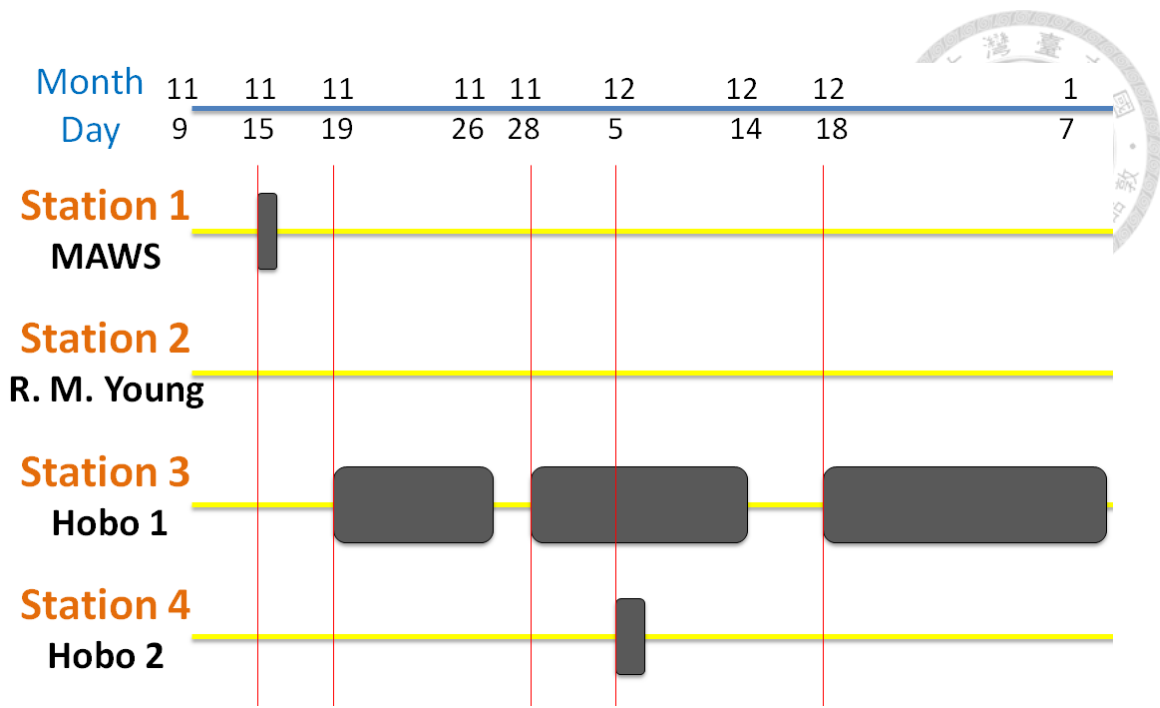


圖 2-4 各氣象站資料可使用時段示意圖。上方藍線為時間軸，藍線上方的數字為月份，下方的數字為日期，四個觀測點儀器資料可用時段用黃色線條表示，深灰色方塊表示該時段有資料斷缺，紅色垂直線標示資料斷缺事件發生時的日期。



圖 2-5 各測站風速計擺放於同一處頂樓(國立臺灣大學大氣科學系 C 館)，進行同步觀測比對。

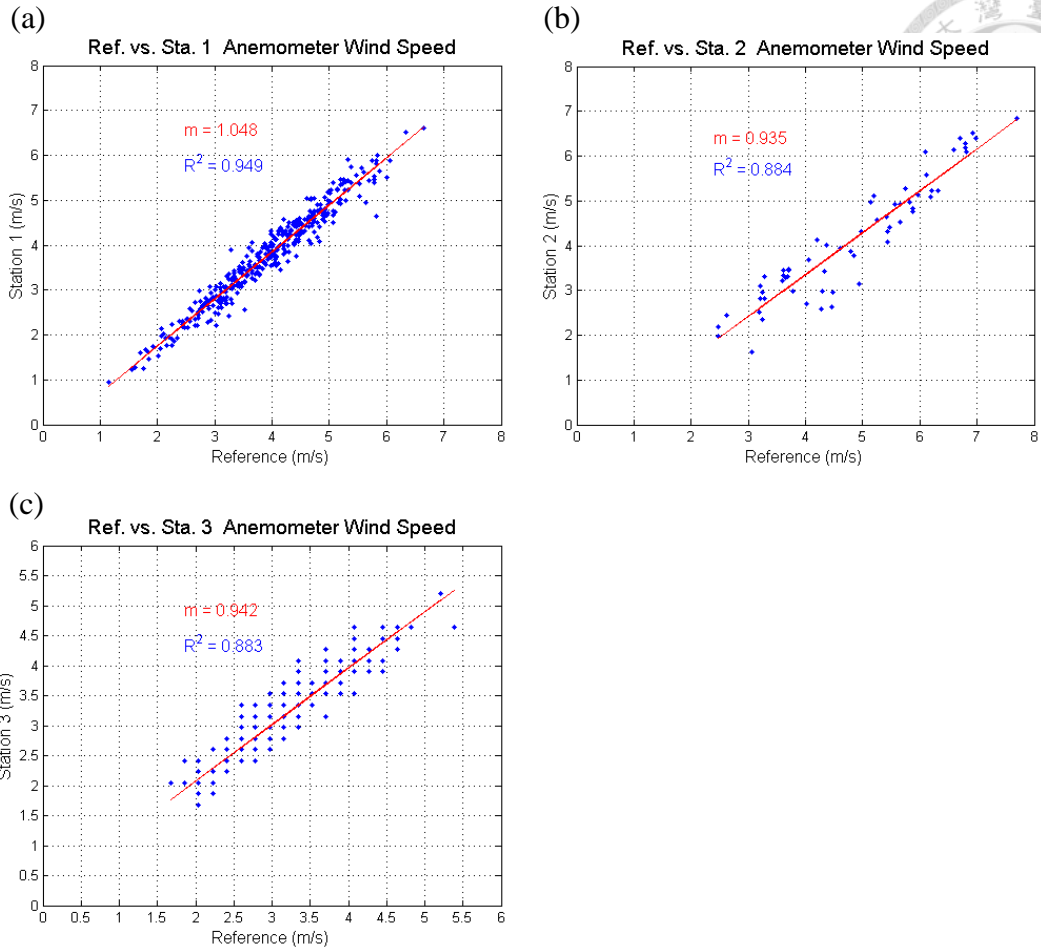


圖 2-6 1、2、3 號觀測點風速計(y 軸)與參考站 4 號觀測點風速計(x 軸)的觀測比對資料線性迴歸分析圖。(a)第一觀測點；(b)第二觀測點；(c)第三觀測點。

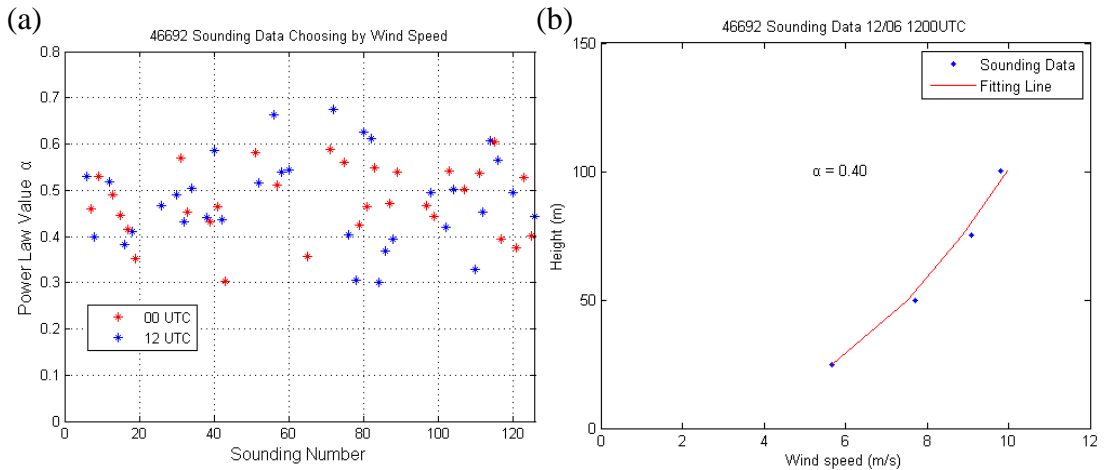


圖 2-7 (a) 2012 年 11 月至 12 月間板橋探空資料，選取 100 公尺高風速大於 5 m/s 的資料，利用其 25 公尺至 100 公尺高風速資料，求得到 Power Law 指數  $\alpha$  介於 0.30 至 0.67 之間；其中紅點為 00 UTC (早上 8 時)的探空資料，藍點為 12 UTC (晚上 8 時)的探空資料。(b) 2012 年 12 月 6 日 12 UTC 的板橋探空資料，用 Power Law 進行擬合(fitting)結果，所得到的指數  $\alpha$  為 0.40。

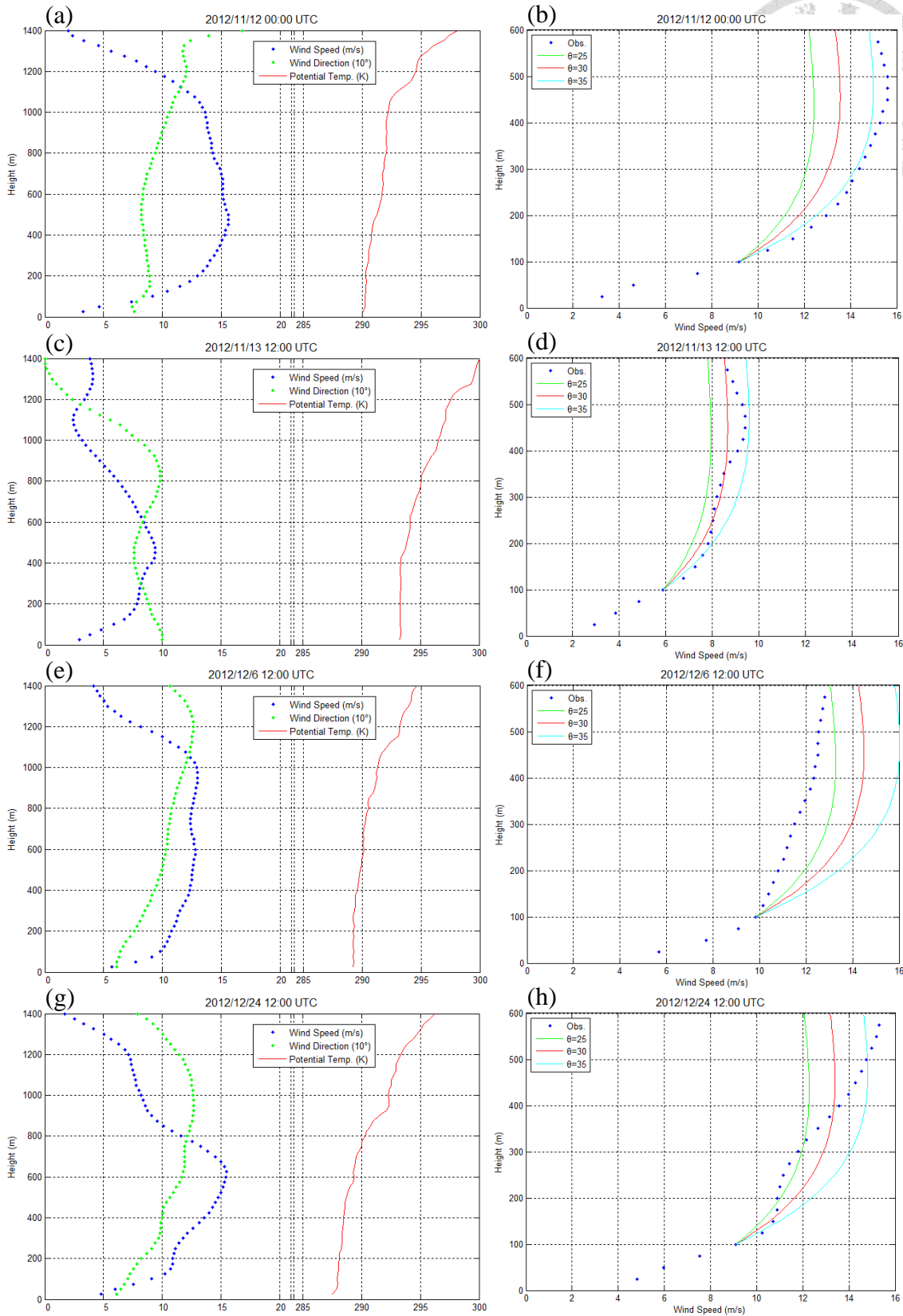


圖 2-8 4 筆板橋探空資料。(a)風速(m/s)、風向(單位為每 10 度)、位溫(K)垂直剖面圖，用以推測邊界層高度；(b)探空觀測風速資料，與 Ekman 調整角度  $\theta$  為  $25^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $35^\circ$ ，邊界層高度設為 700 公尺，從 100 公尺風速資料推算的風速剖面；(c)、(e)、(g)同(a)但不同時間；(d)、(f)、(h)同(b)但不同時間。

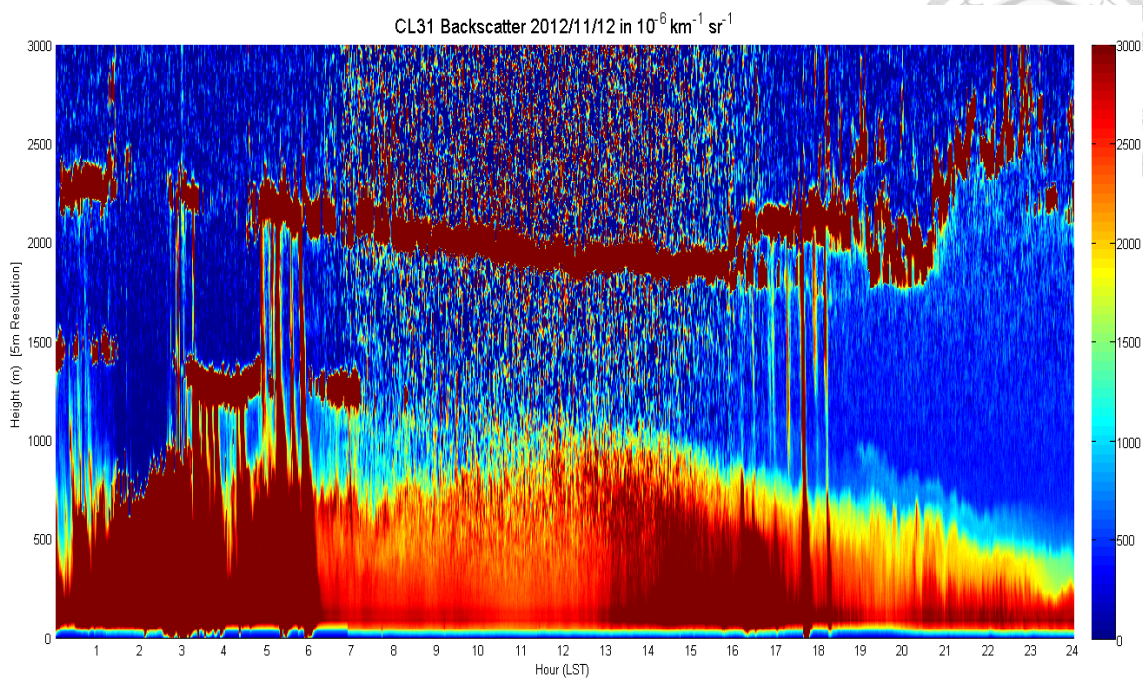


圖 2-9 2012 年 11 月 12 日，CL31 雲幕儀回波時間序列圖。

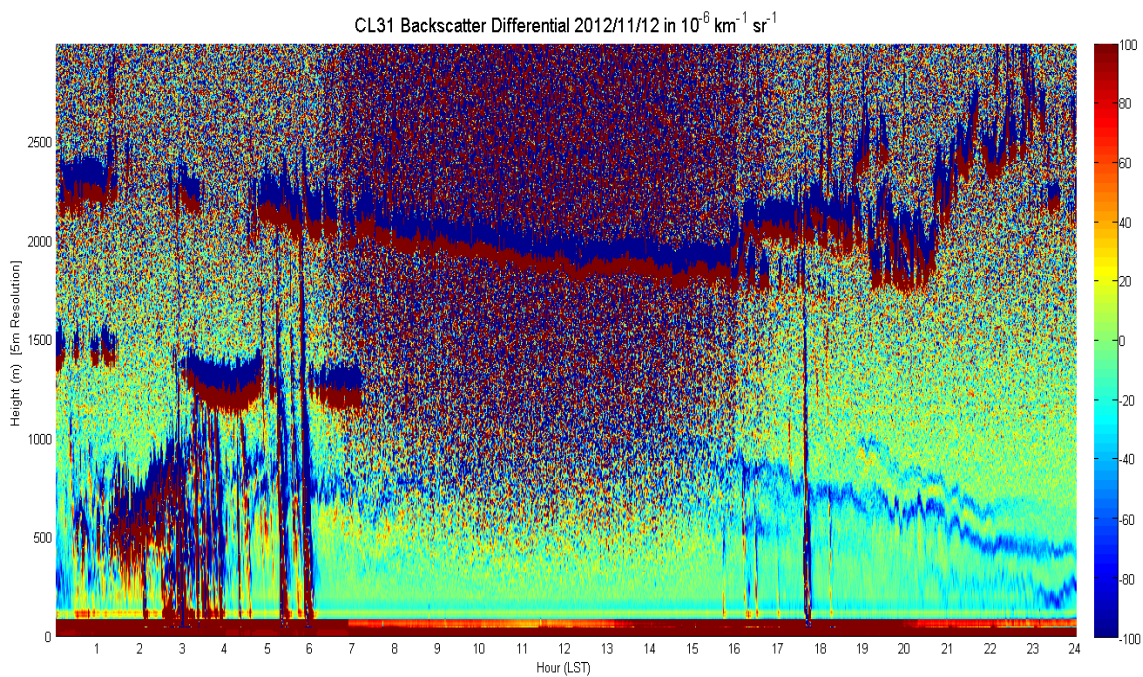


圖 2-10 2012 年 11 月 12 日，CL31 雲幕儀回波垂直差分時間序列圖。



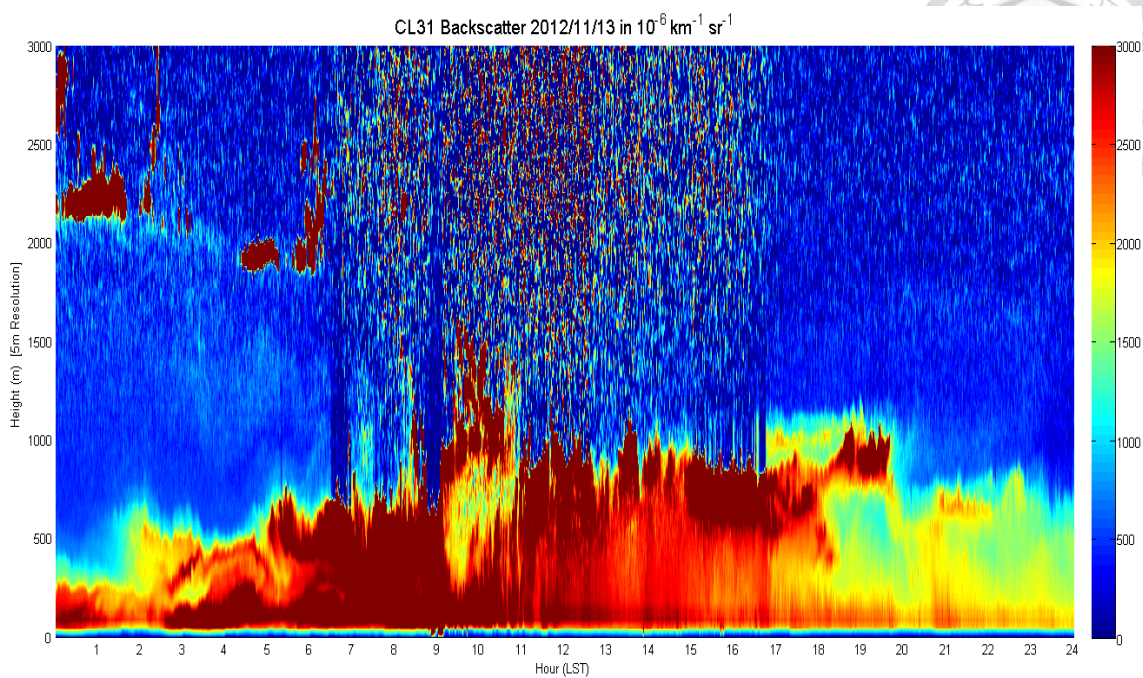


圖 2-11 2012 年 11 月 13 日，CL31 雲幕儀回波時間序列圖。

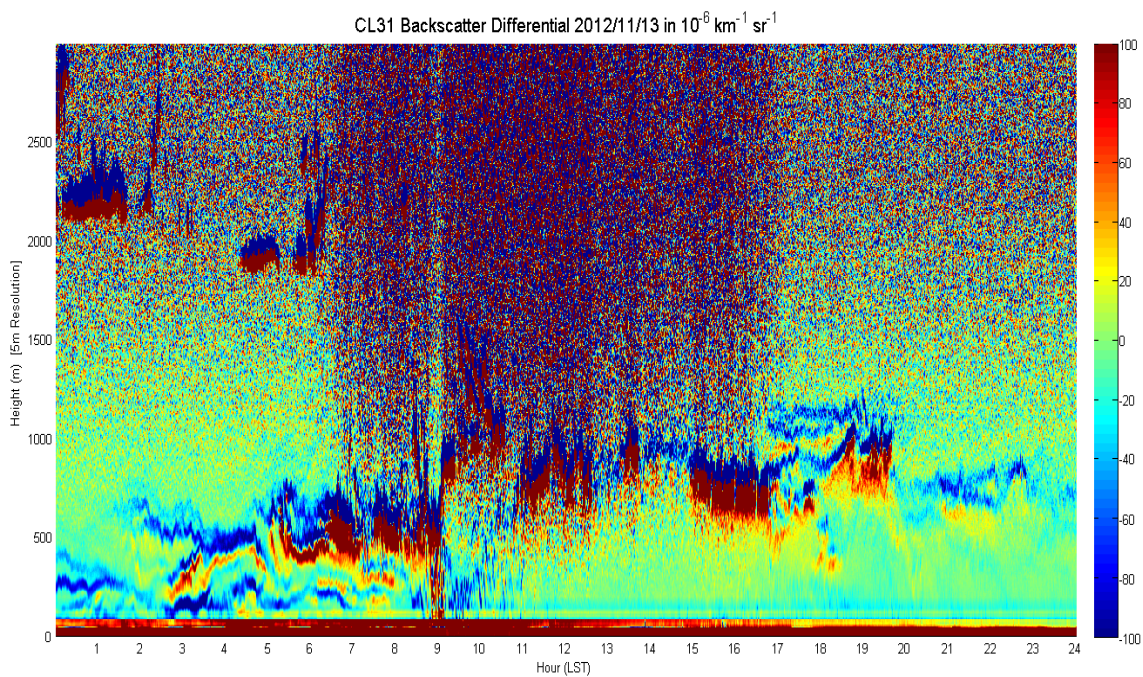


圖 2-12 2012 年 11 月 13 日，CL31 雲幕儀回波垂直差分時間序列圖。

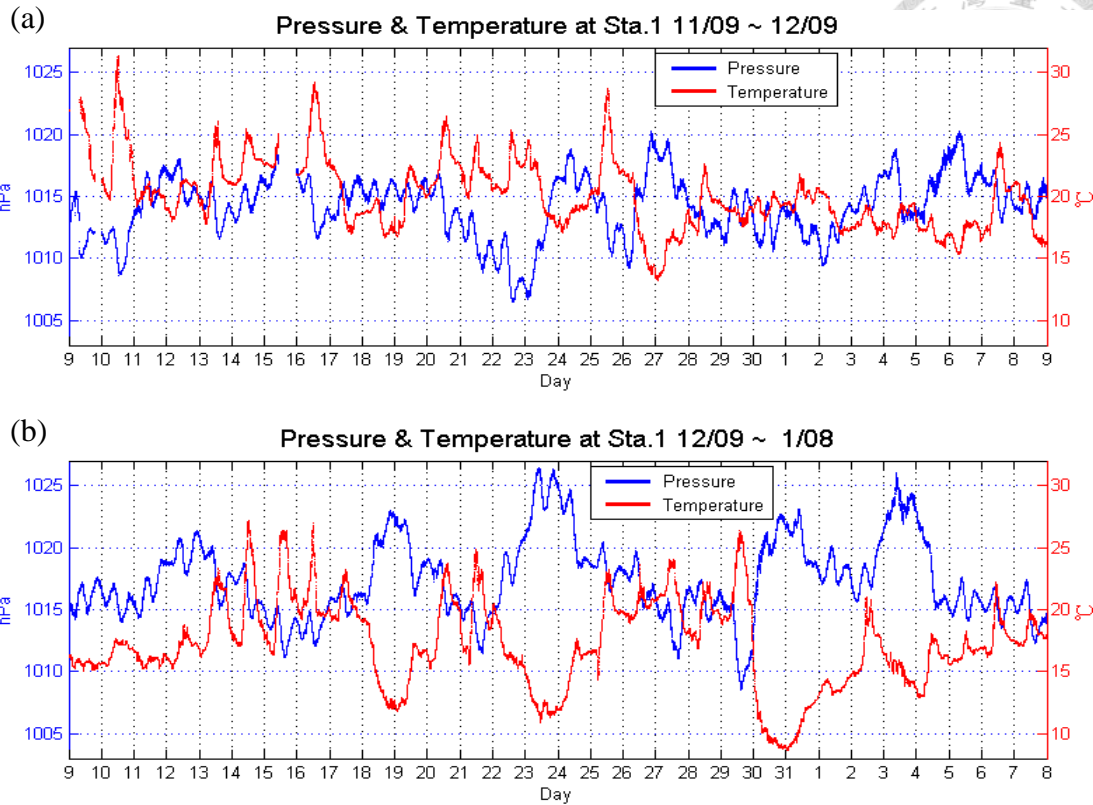


圖 3-1 氣象觀測網 1 號觀測點(最北方)地面氣壓(藍線)與氣溫(紅線)時間序列圖。(a) 11 月 9 日至 12 月 9 日觀測資料；(b) 12 月 9 日至 1 月 8 日觀測資料。

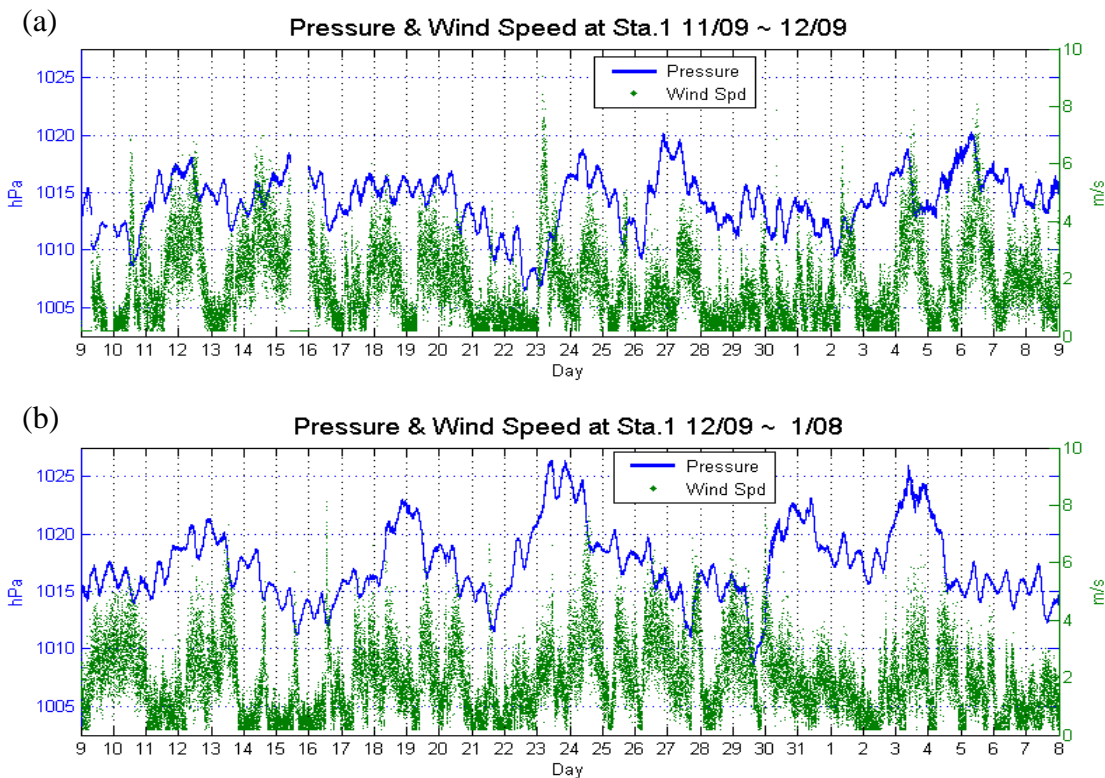


圖 3-2 氣象觀測網 1 號觀測點地面氣壓(藍線)與風速(綠點)時間序列圖。(a) 11 月 9 日至 12 月 9 日觀測資料；(b) 12 月 9 日至 1 月 8 日觀測資料。

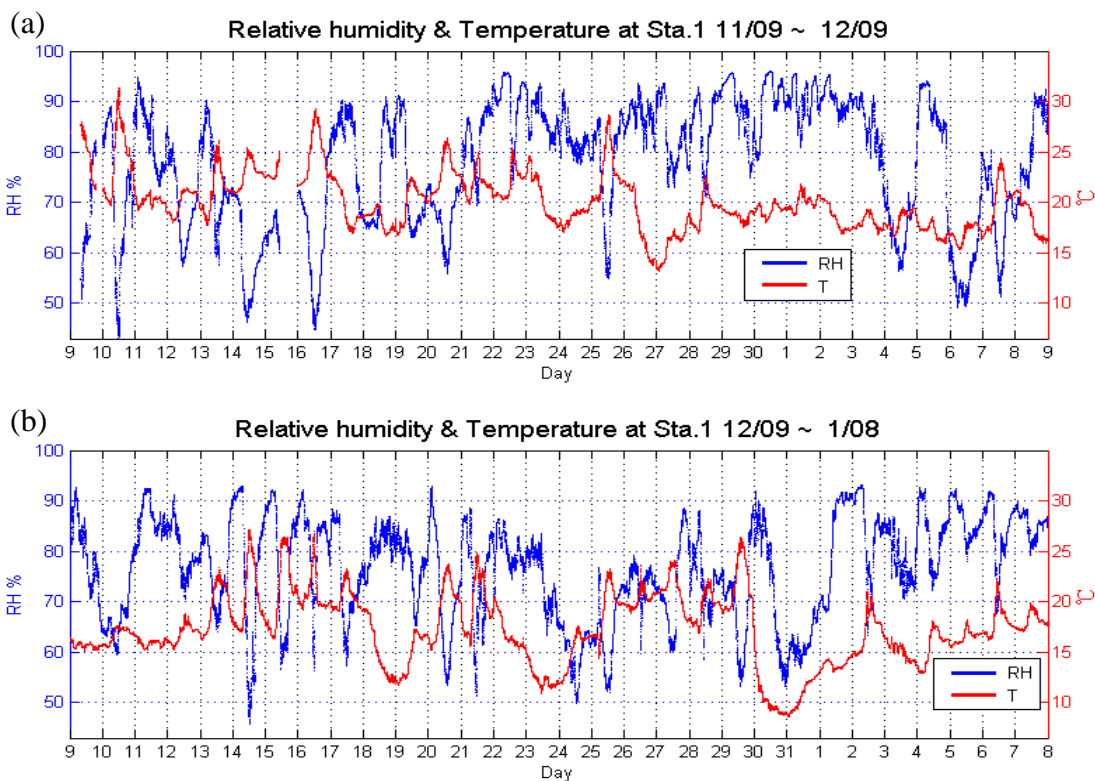


圖 3-3 氣象觀測網 1 號觀測點地面相對溼度(藍線)與溫度(紅線)時間序列圖。(a) 11 月 9 日至 12 月 9 日觀測資料；(b) 12 月 9 日至 1 月 8 日觀測資料。

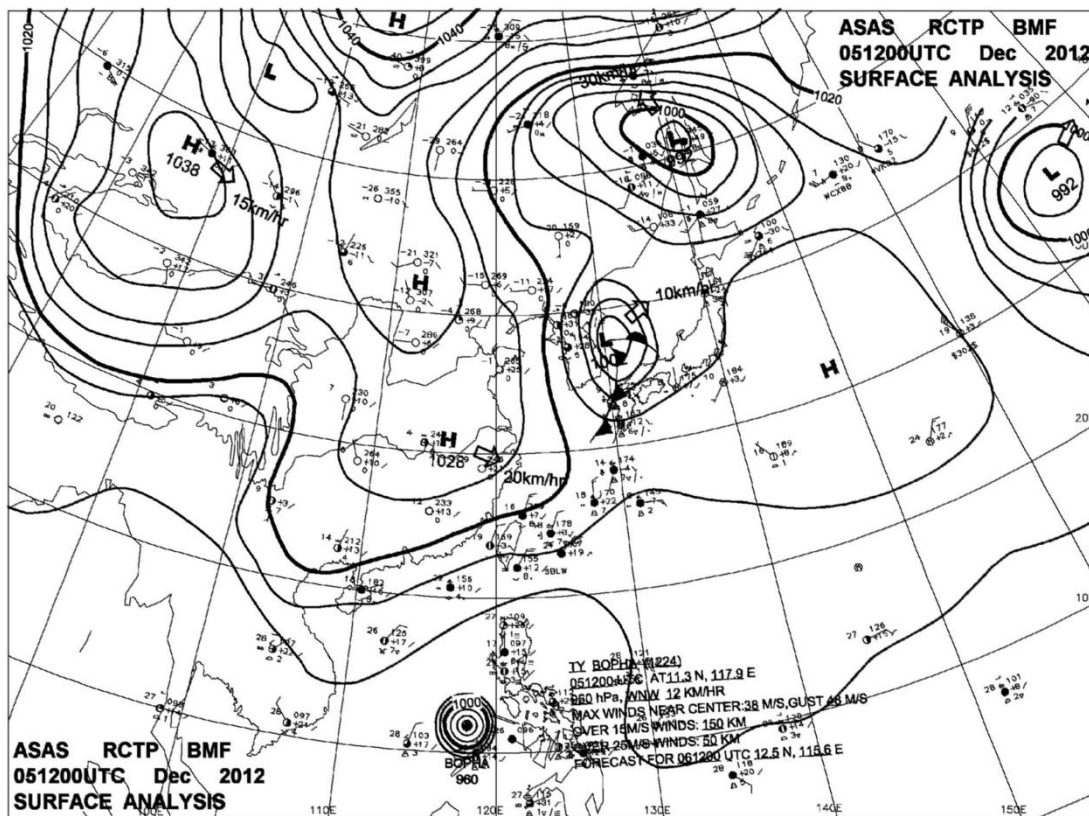


圖 3-4 中央氣象局 2012 年 12 月 5 日 12:00 UTC 地面天氣圖。

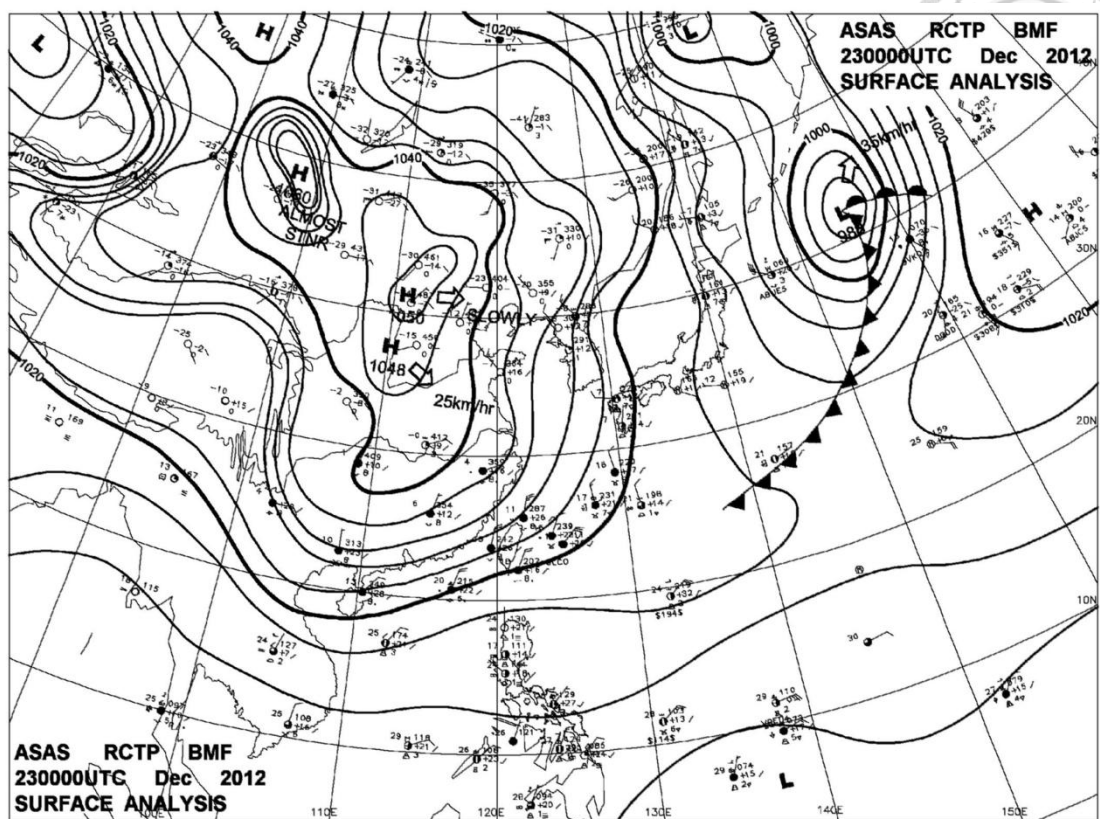


圖 3-5 中央氣象局 2012 年 12 月 23 日 00:00 UTC 地面天氣圖。

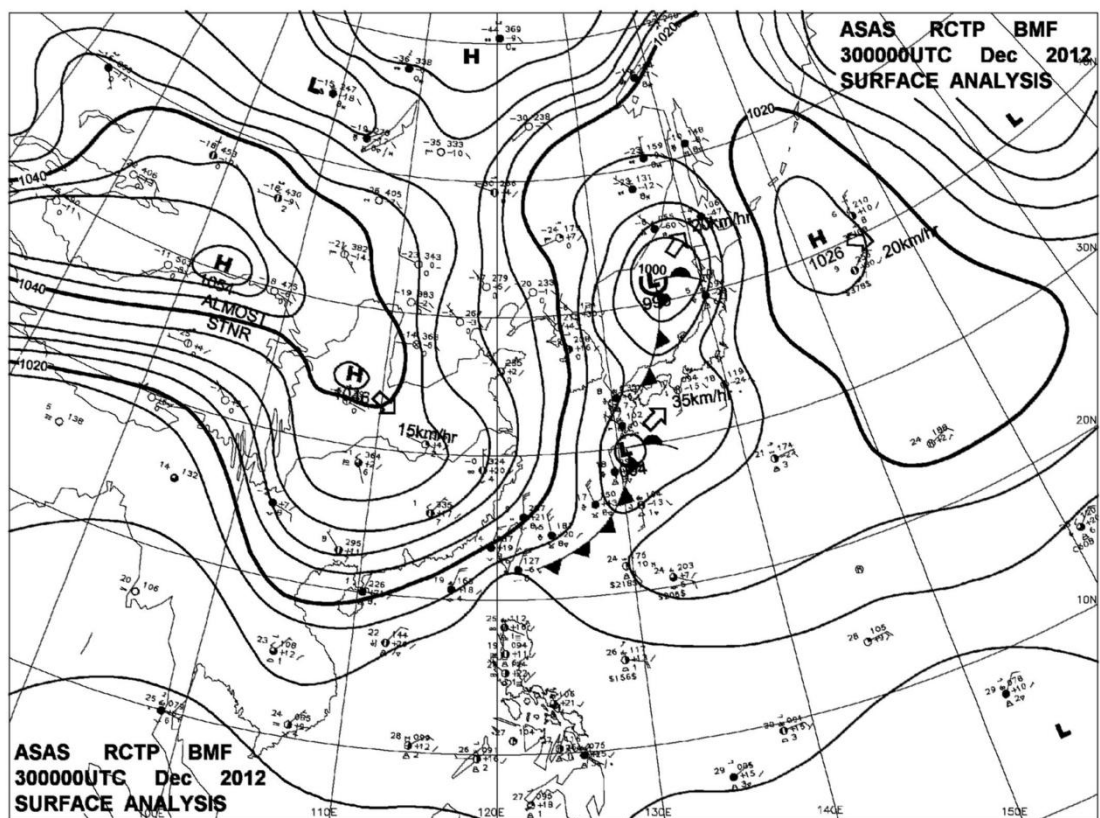


圖 3-6 中央氣象局 2012 年 12 月 30 日 00:00 UTC 地面天氣圖。

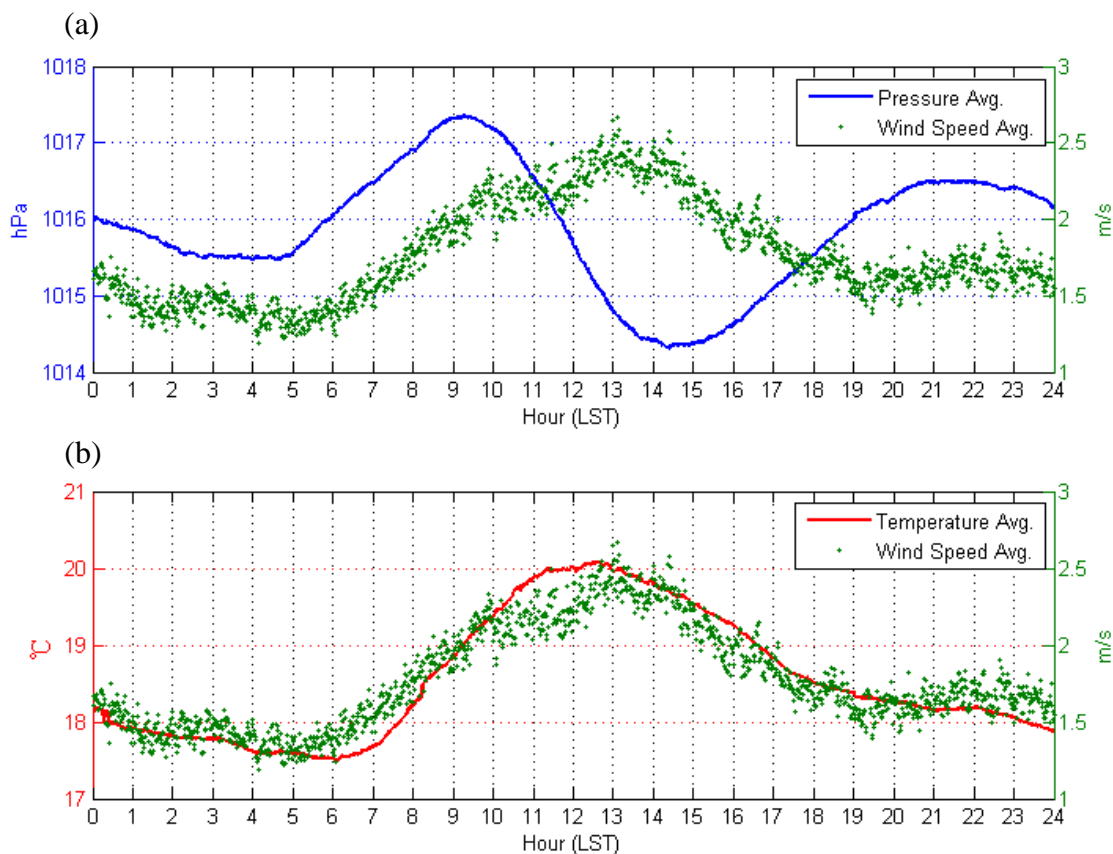


圖 3-7 氣象觀測網 1 號觀測點，觀測期間平均日變化。(a)氣壓(藍線)與風速(綠點)平均日變化；(b)溫度(紅線)與風速(綠點)平均日變化。

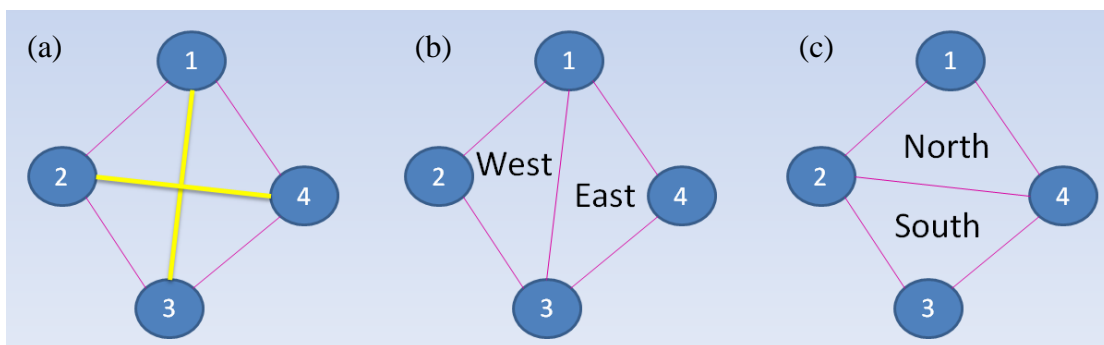


圖 3-8 臺北盆地西側氣象觀測網各觀測點相對位置示意圖。(a)兩兩觀測點連線可求之間的風切；(b) 1、2、3 號觀測點圍成「西」三角形，1、3、4 號觀測點圍成「東」三角形；(c) 1、2、4 號觀測點圍成「北」三角形，2、3、4 號觀測點圍成「南」三角形。

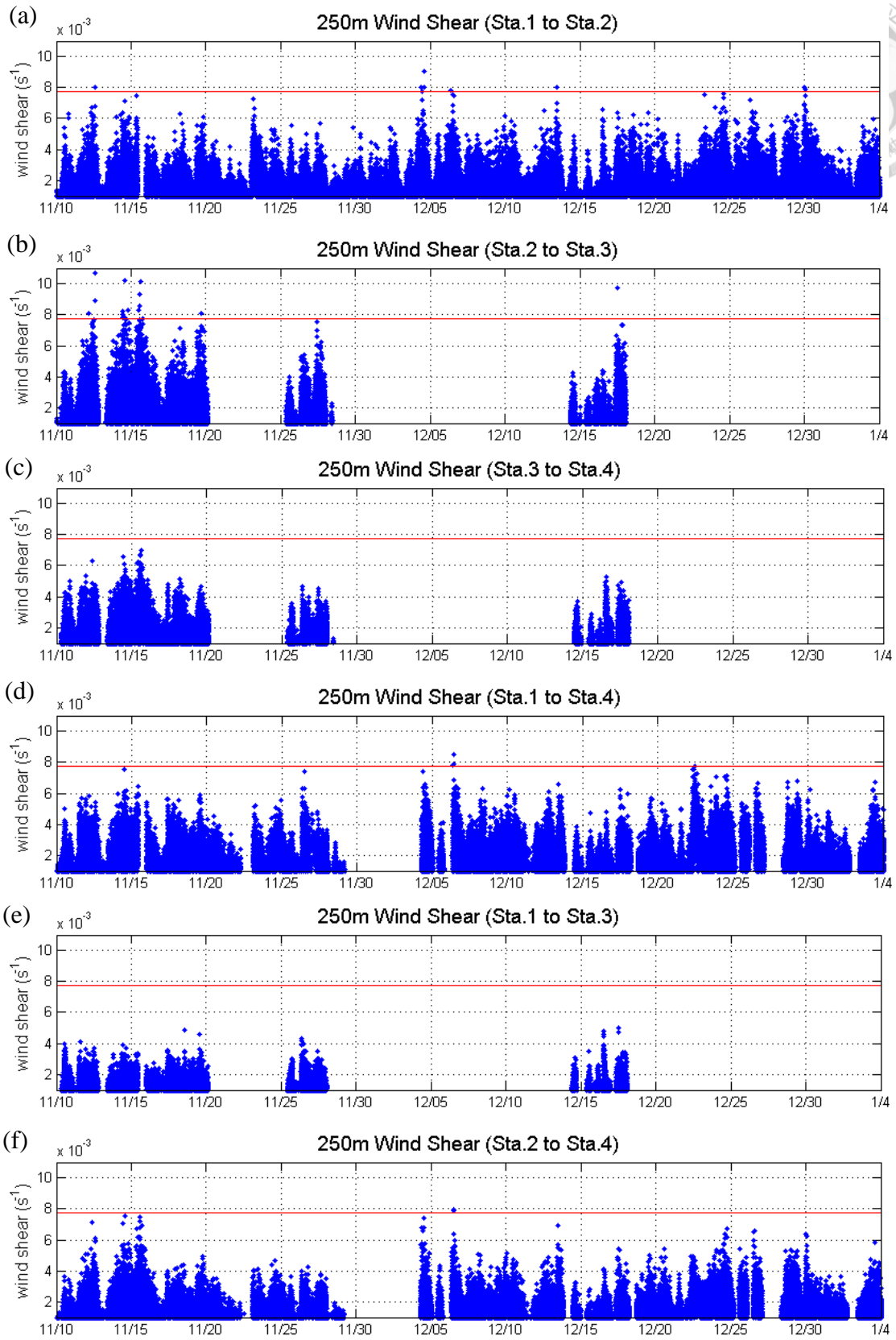


圖 3-9 兩觀測點間 250 公尺高的風切時間序列，紅線為輕度低空風切閾值  $0.0077 \text{ (s}^{-1}\text{)}$ 。(a) 1 號和 2 號觀測點；(b) 2 號和 3 號觀測點；(c) 3 號和 4 號觀測點；(d) 1 號和 4 號觀測點；(e) 1 號和 3 號觀測點；(f) 2 號和 4 號觀測點間風切。

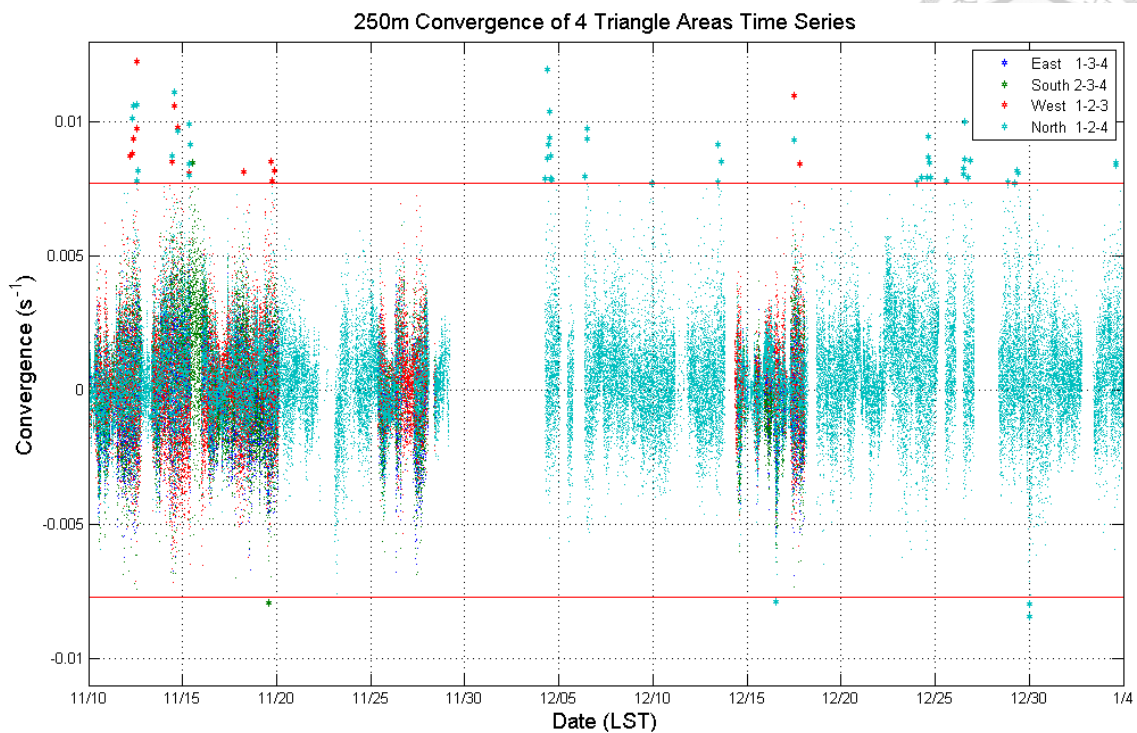


圖 3-10 臺北盆地西側氣象觀測網，取三個觀測點使用「三角形遞迴運算法」，得到東(1-3-4)、南(2-3-4)、西(1-2-3)、北(1-2-4)，四種組合在 250 公尺高的輻合(正值)、輻散(負值)時間序列圖，紅線為輕度低空風切閾值  $\pm 0.0077 \text{ (s}^{-1}\text{)}$ ，絕對值超過此閾值的運算值會把記號放大顯示。

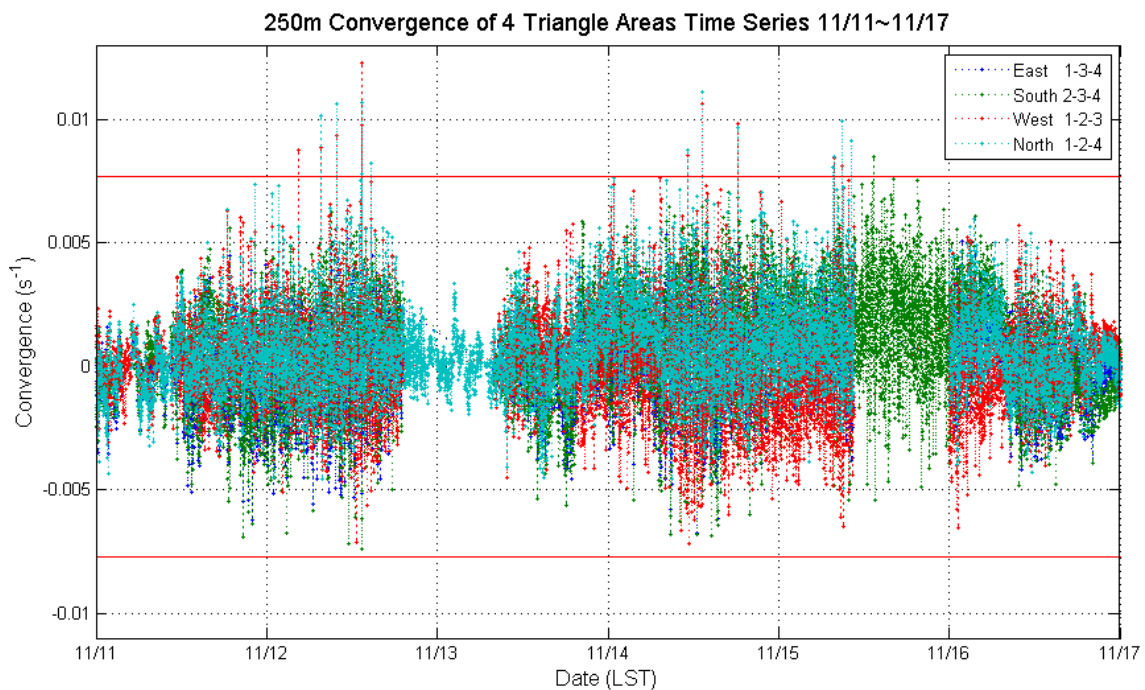


圖 3-11 臺北盆地西側氣象觀測網 2012 年 11 月 11 日至 11 月 17 日期間，250 公尺高的輻合(正值)、輻散(負值)，紅線為輕度低空風切閾值  $\pm 0.0077 \text{ (s}^{-1}\text{)}$ 。

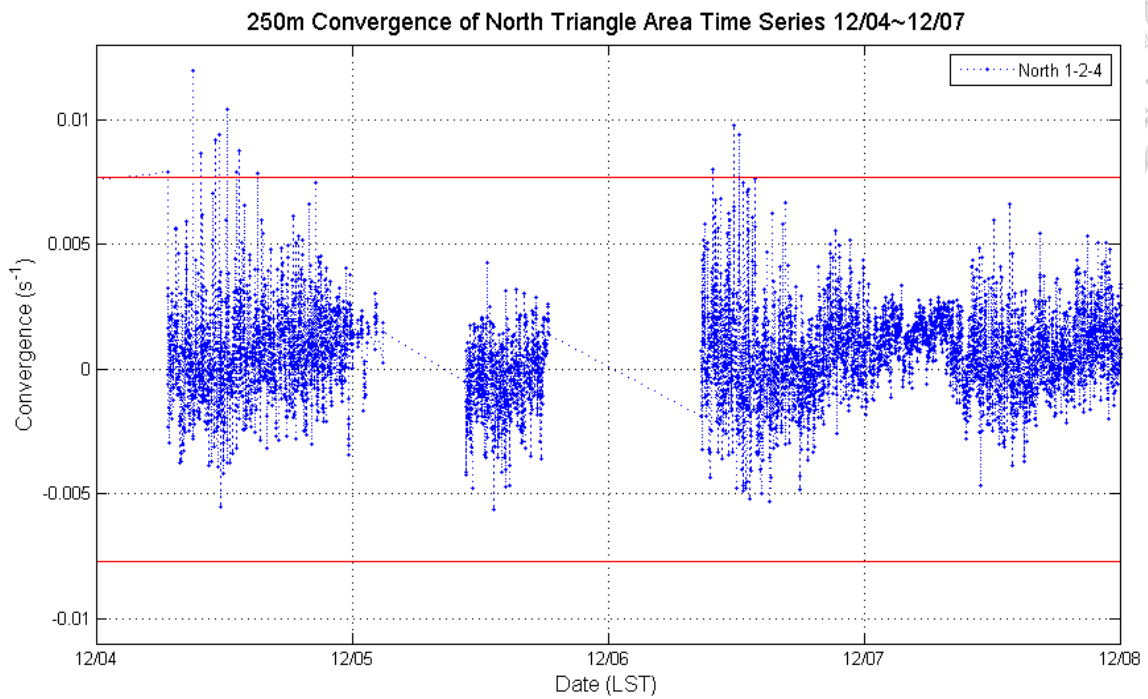


圖 3-12 同圖 3-11，時間為 2012 年 12 月 4 日至 12 月 7 日。

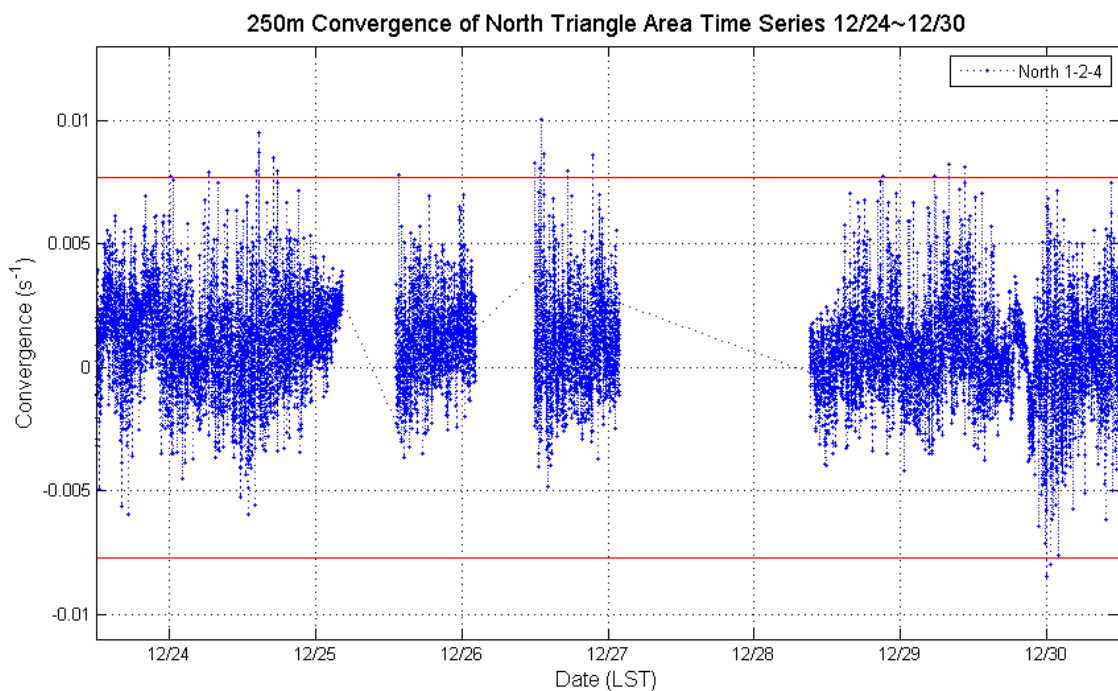


圖 3-13 同圖 3-11，時間為 2012 年 12 月 24 日至 12 月 30 日。



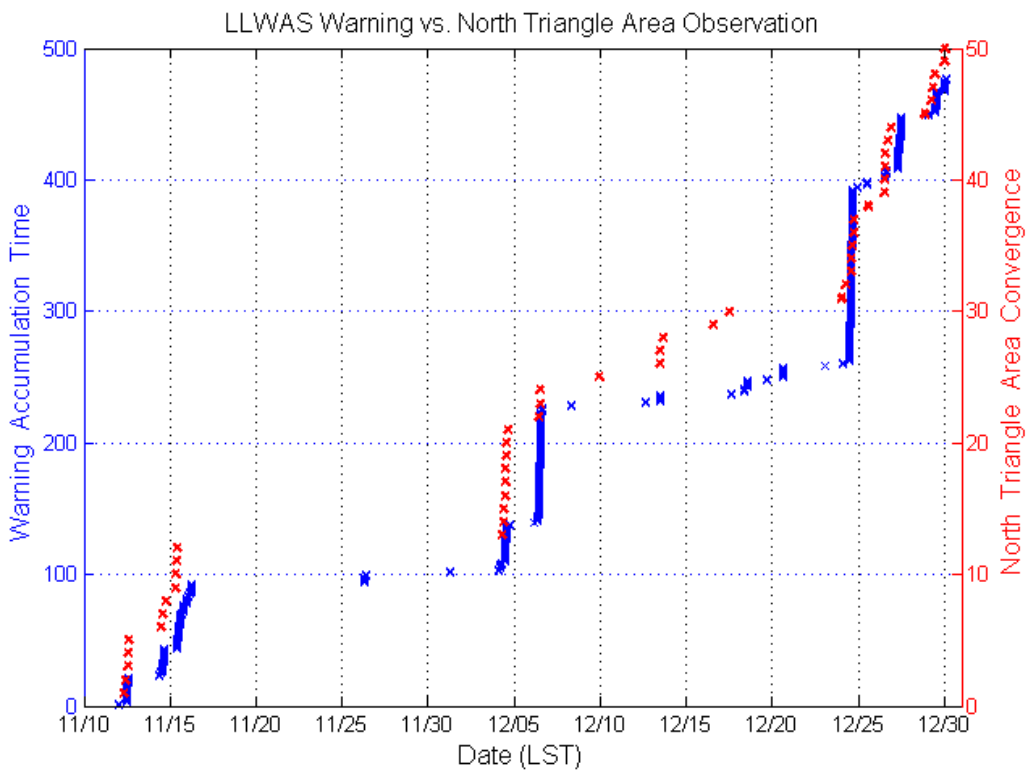


圖 3-14 松山機場 LLWAS 警報(藍點)和臺北盆地西側氣象觀測網北三角形區域達低空風切閾值的輻合、輻散絕對值(紅點)，兩者的時間與累積次數圖。

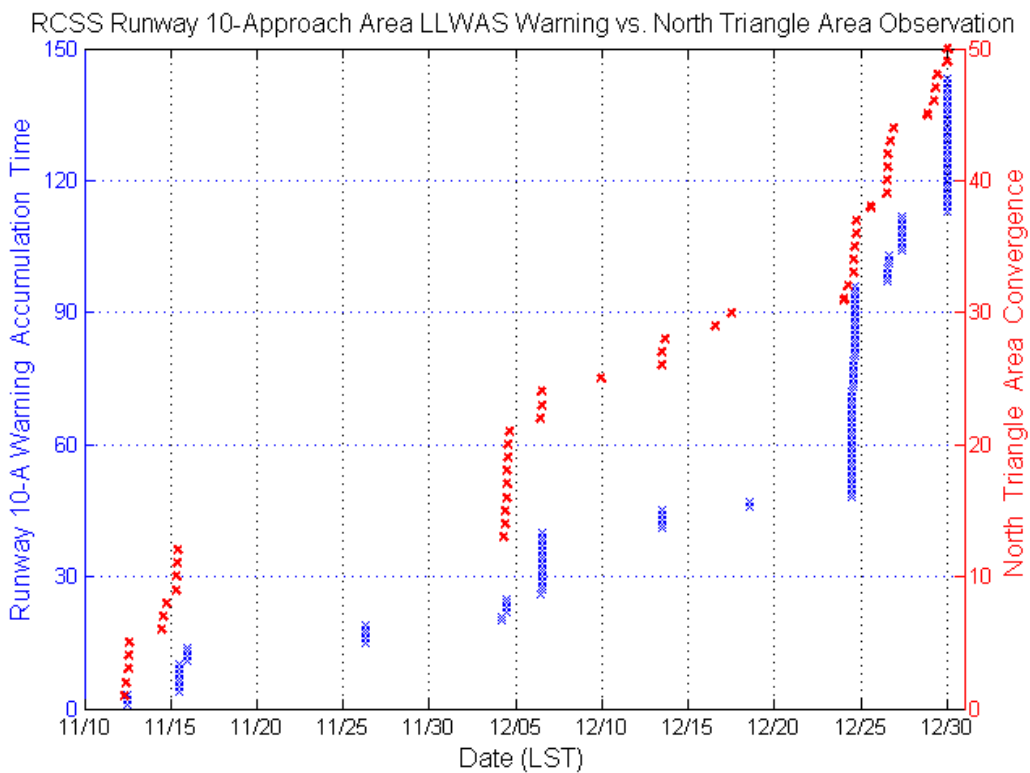


圖 3-15 同圖 3-14，但縱軸左側改為松山機場針對 10 號跑道飛機進場方向 LLWAS 警報(藍點)的累積次數圖。

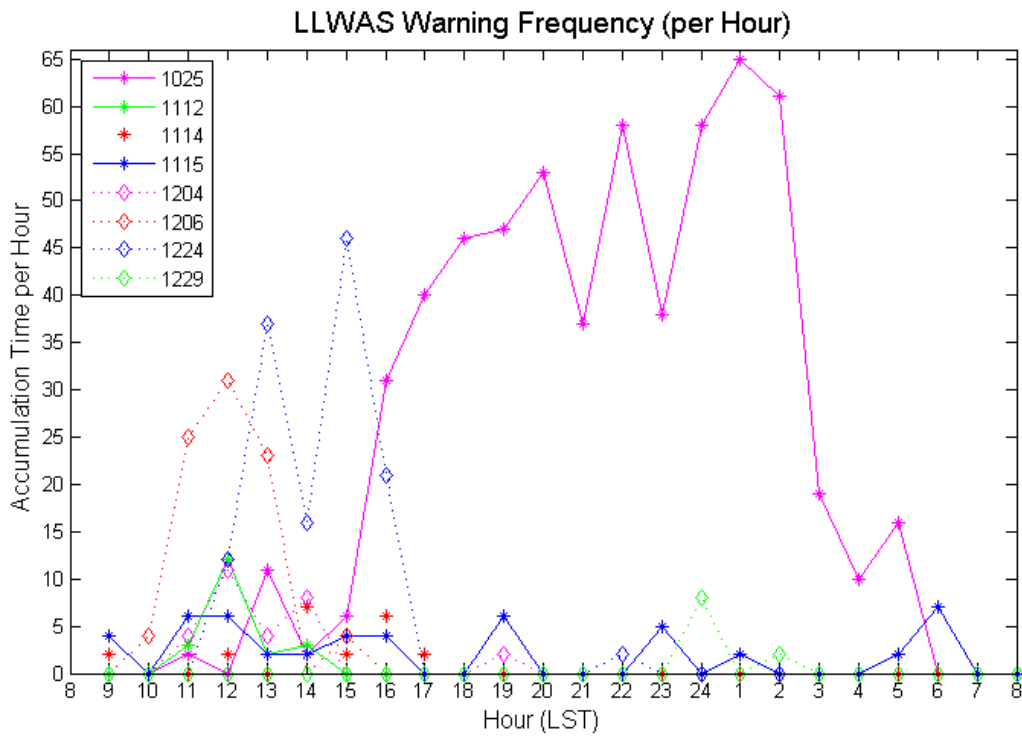
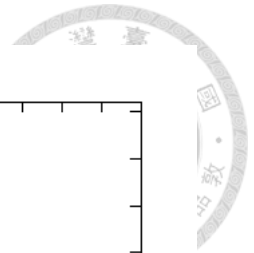


圖 3-16 松山機場 LLWAS 的警報小時頻率。其中 1025 為 2010 年 10 月 25 日；1112、1114、1115、1204、1206、1224、1229 分別為 2012 年 11 月及 12 月的日期。



圖 3-17 松山機場 LLWAS 西側的 1、7、9 號測風臺圍成的三角形區域(黃色)，與臺北盆地西側氣象觀測網(藍色)，標記在 google 衛星影像圖上。

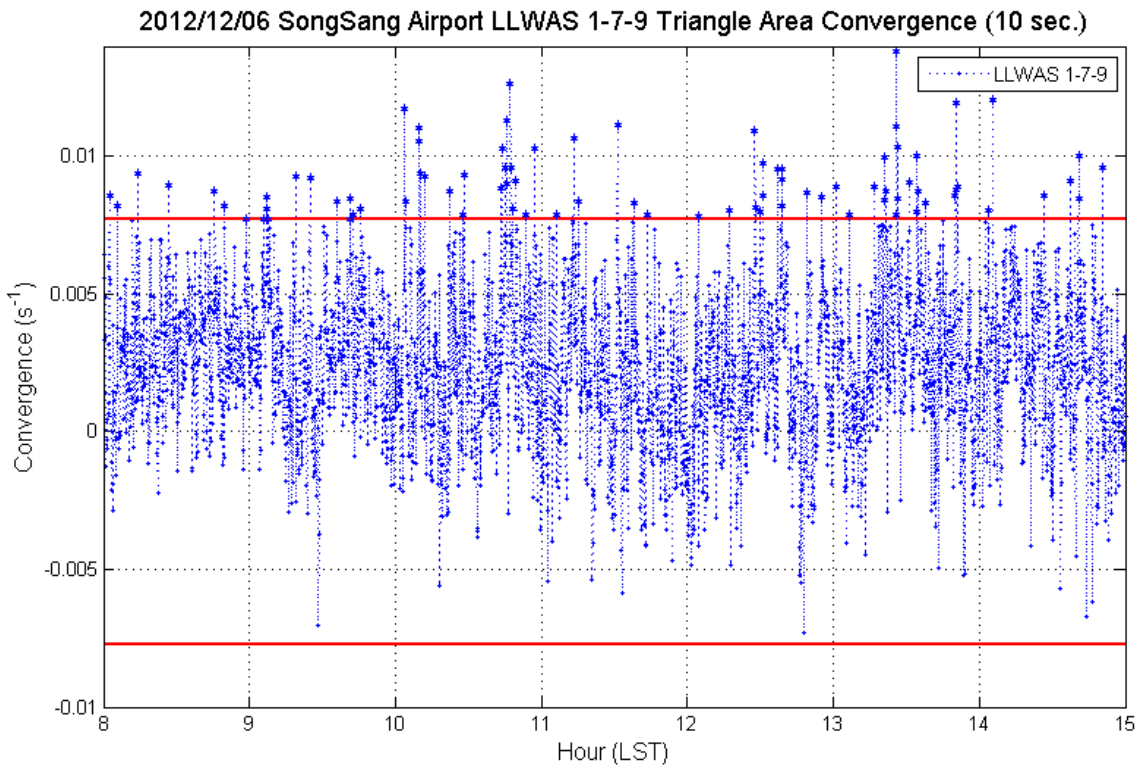


圖 3-18 2012 年 12 月 6 日，松山機場 LLWAS 西側 1、7、9 號測風臺圍成的三角形區域，每 10 秒鐘資料使用「三角形遞迴運算法」，所得的輻合、輻散值，紅線為輕度低空風切閾值  $\pm 0.0077 \text{ (s}^{-1}\text{)}$ ，絕對值超過此閾值的運算值會把記號放大顯示。

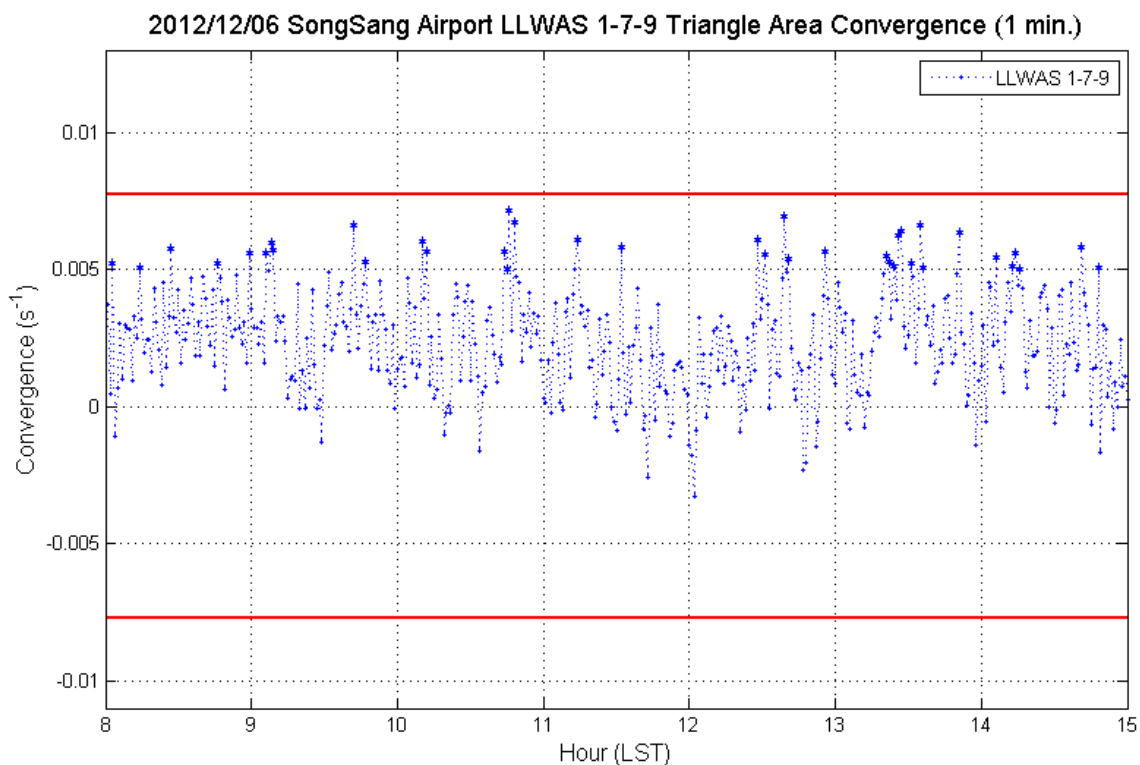


圖 3-19 同圖 3-18，使用 6 筆 10 秒鐘風速、風向資料，平均成 1 分鐘資料進行計算的結果，絕對值超過  $\pm 0.005 \text{ (s}^{-1}\text{)}$  的運算值會把記號放大顯示。

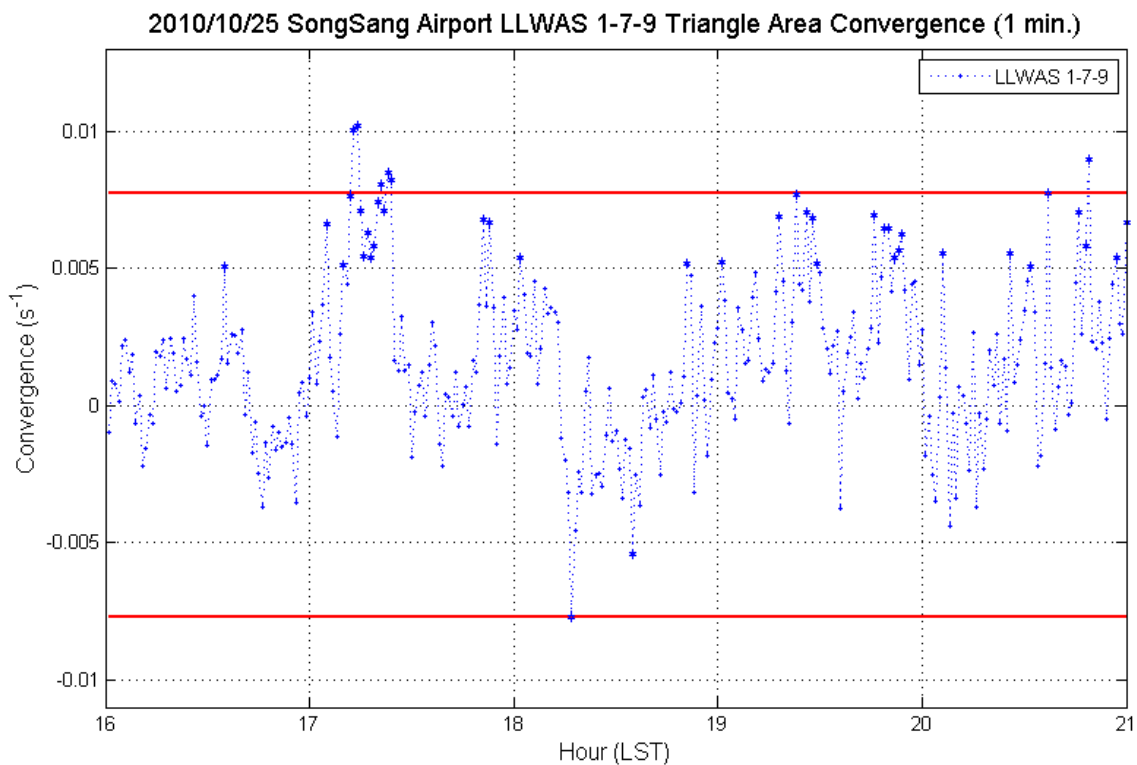


圖 3-20 同圖 3-18，日期改為 2010 年 10 月 25 日，使用 6 筆 10 秒鐘風速、風向資料，平均成 1 分鐘資料進行計算的結果，絕對值超過  $\pm 0.005 \text{ (s}^{-1}\text{)}$  的運算值會把記號放大顯示。

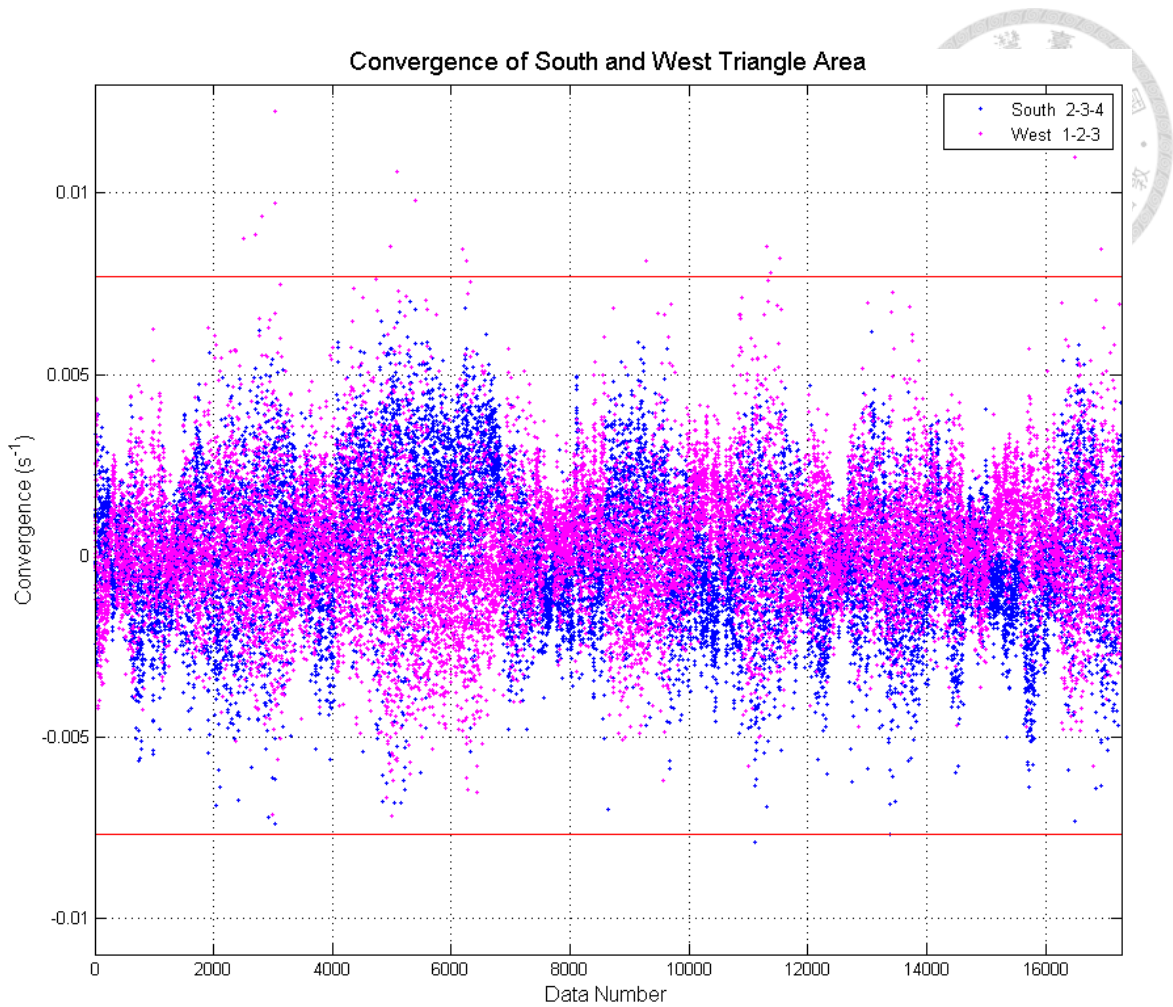


圖 3-21 臺北盆地西側氣象觀測網南三角形區域(藍點)和西三角形區域(洋紅點),相同時間的輻合、輻散值比較,紅線為輕度低空風切閾值  $\pm 0.0077 \text{ (s}^{-1}\text{)}$ 。

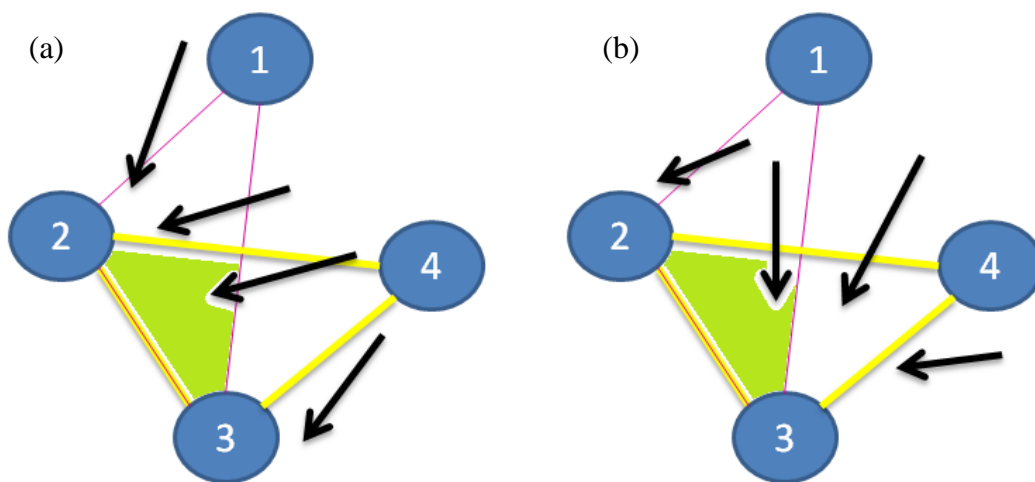


圖 3-22 臺北盆地西側氣象觀測網西三角形(細紅線)和南三角形(粗黃線),輻合、輻散風場分析示意圖,綠色區域為兩三角形重疊之面積。(a)西三角形輻合,南三角形輻散;(b)西三角形輻散,南三角形輻合。

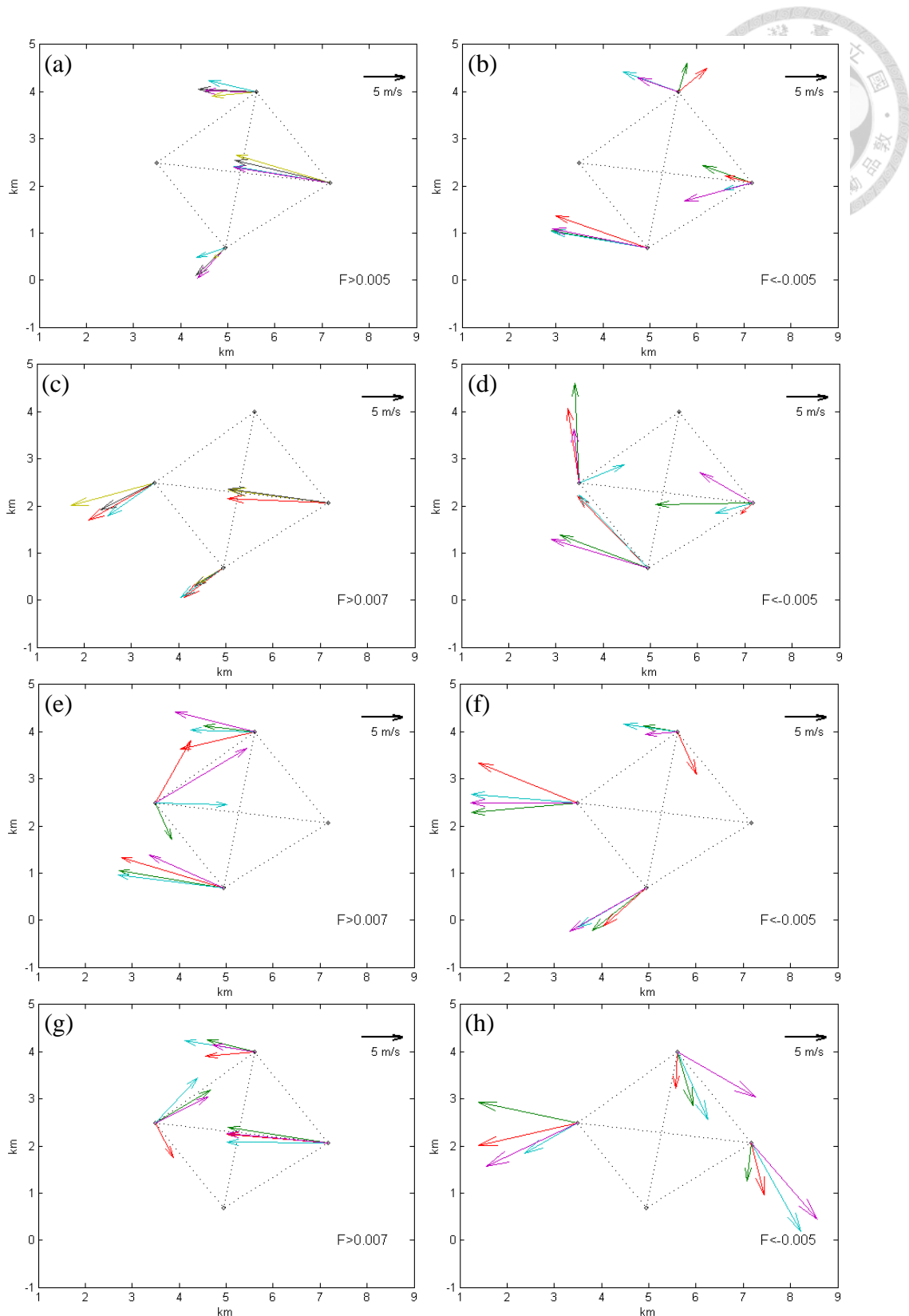


圖 3-23 挑選輻合值  $F > 0.005$  ( $s^{-1}$ ) 或  $F > 0.007$  ( $s^{-1}$ ), 以及輻散值  $F < -0.005$  ( $s^{-1}$ ), 三角形氣象觀測網的 250 公尺高度風場向量, 每張圖相同顏色的箭頭為相同時間的風場, 黑點和黑虛線為觀測點和觀測網。(a)、(c)、(e)、(g) 分別為東、南、西、北三角形氣象觀測網輻合時的風場; (b)、(d)、(f)、(h) 分別為東、南、西、北三角形氣象觀測網輻散時的風場。

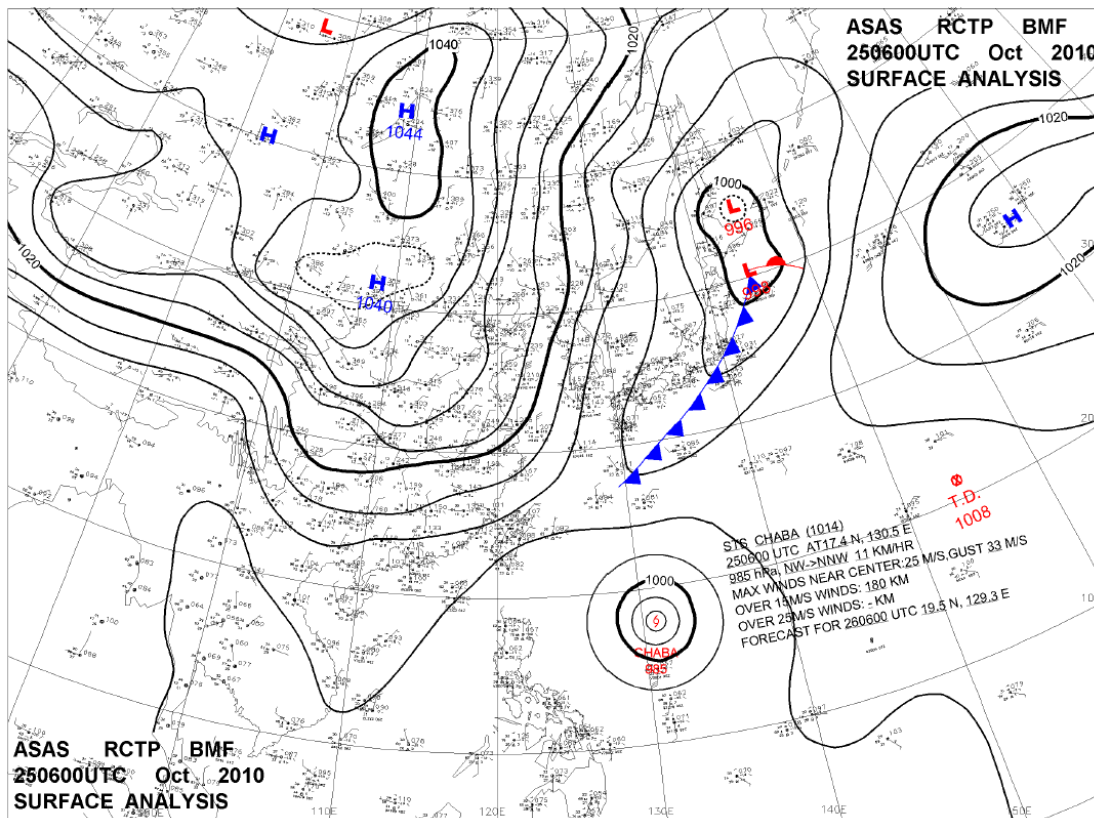


圖 4-1 2010 年 10 月 25 日 06:00 UTC 地面天氣圖。

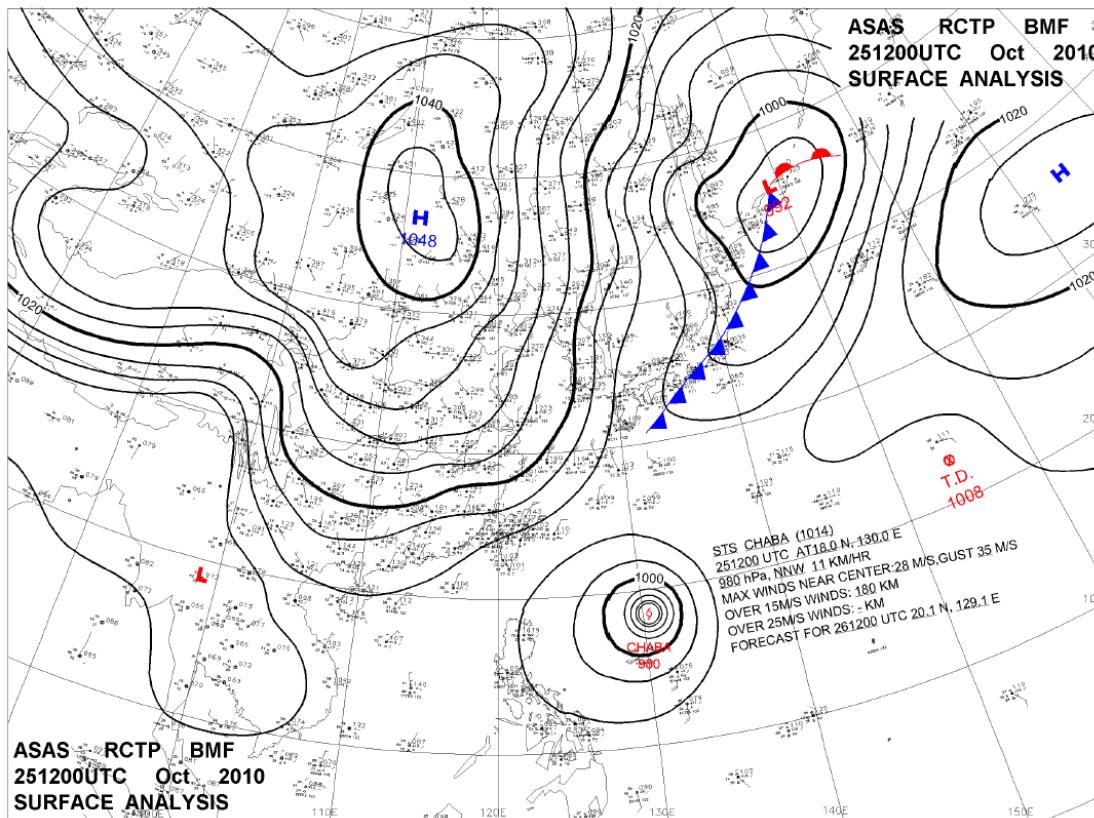


圖 4-2 2010 年 10 月 25 日 12:00 UTC 地面天氣圖。

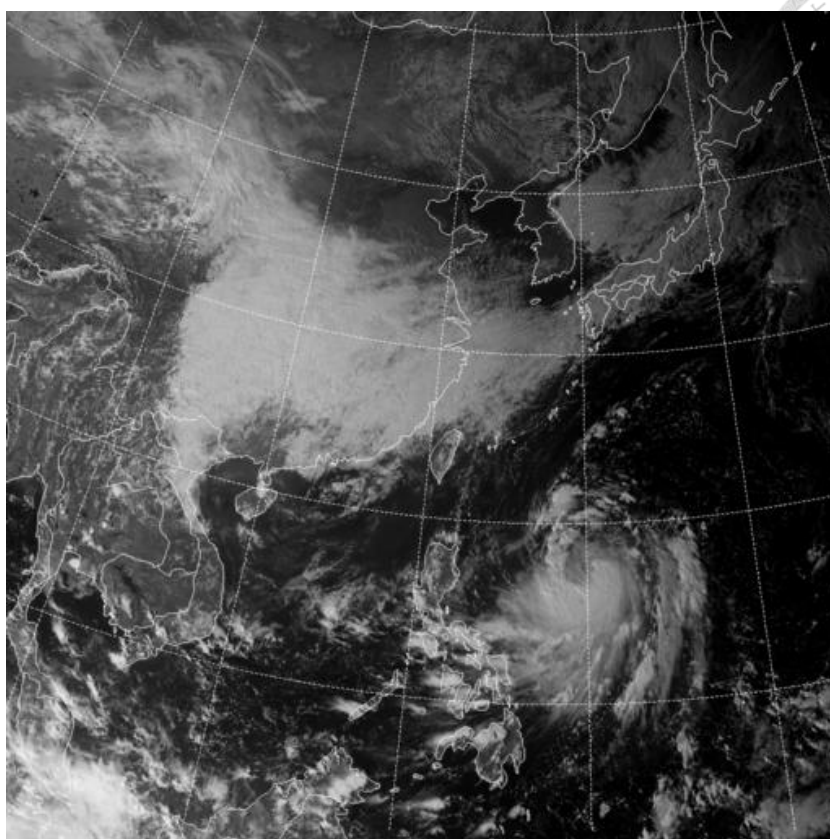
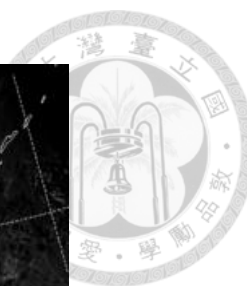


圖 4-3 2010 年 10 月 25 日 09:30 UTC 可見光衛星雲圖。

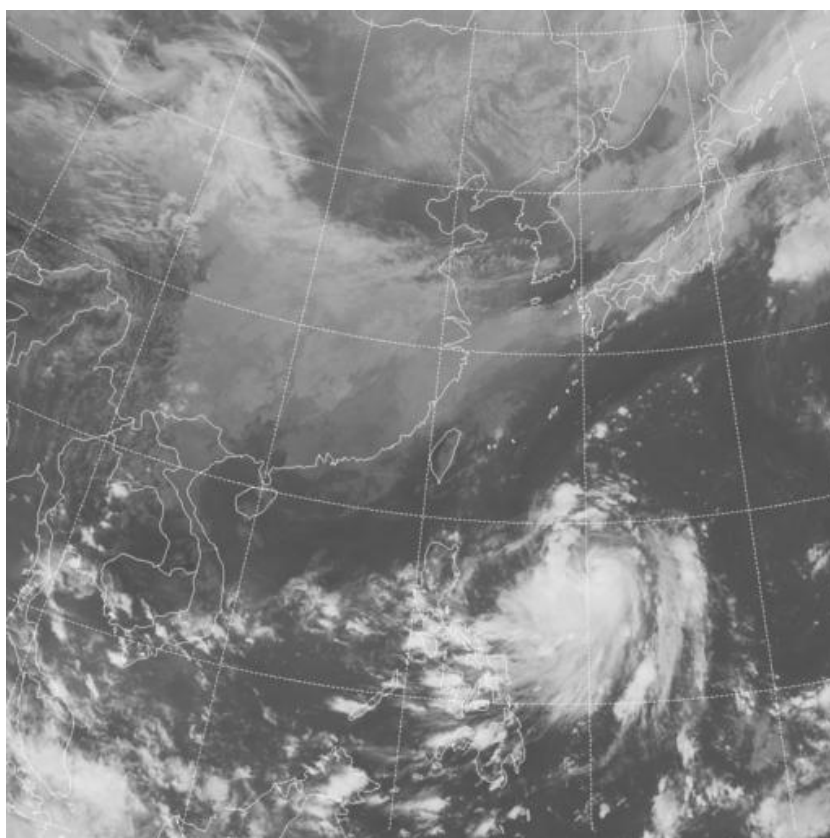


圖 4-4 2010 年 10 月 25 日 09:30 UTC 紅外線衛星雲圖。



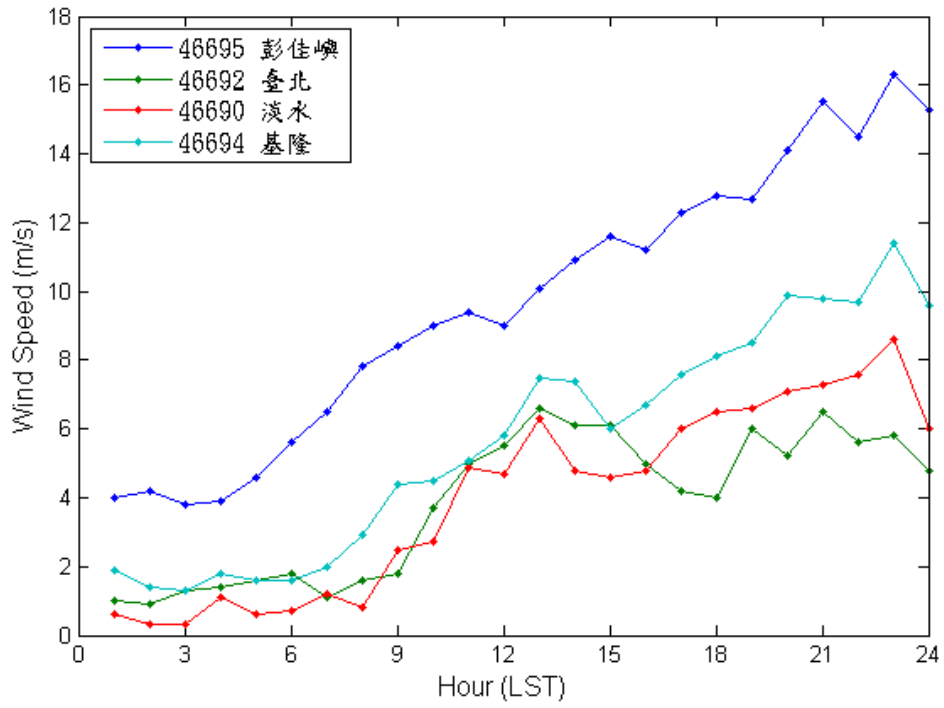
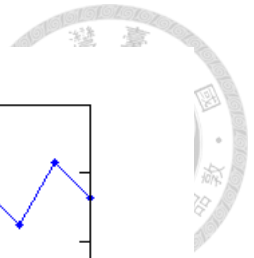


圖 4-5 中央氣象局 2010 年 10 月 25 日彭佳嶼、臺北、淡水、基隆氣象站每小時最大平均風速，單位為(m/s)。

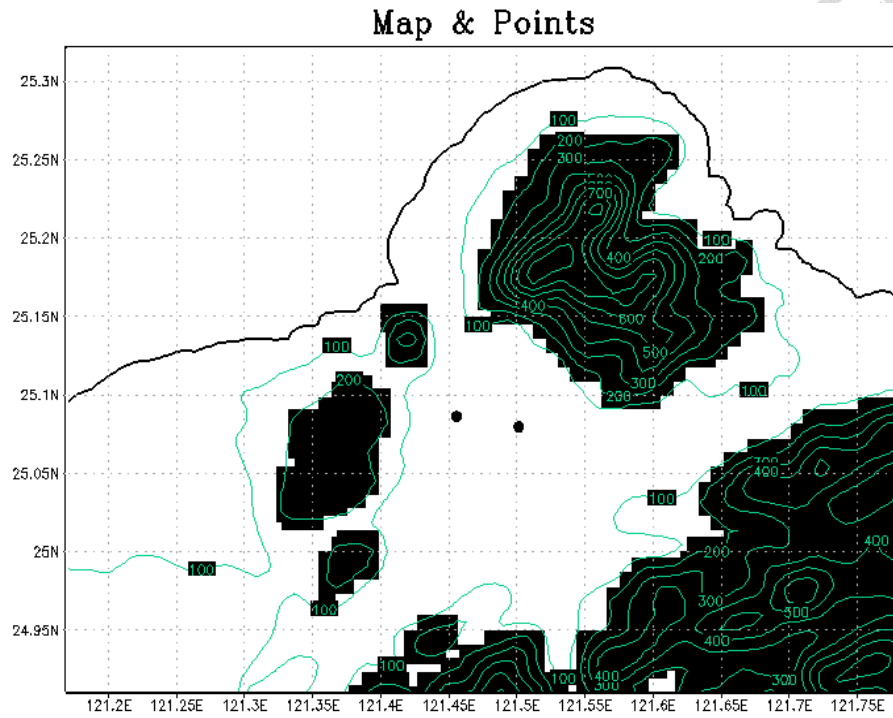


圖 4-6 WRF 模式輸出 250 公尺高度的背景地圖。黑色色塊為受地形影響無資料的網格，中間為臺北盆地，北側為大屯山，西側為觀音山、林口臺地、龜山，東南側為雪山山脈丘陵；臺北盆地中間兩個黑點，左邊為臺北盆地西側氣象觀測網 1 號觀測點，右邊為松山機場 LLWAS 中最西側 1 號測風臺；黑色海岸線為海拔 1 公尺高的等高線，綠色線為間距 100 公尺的等高線。

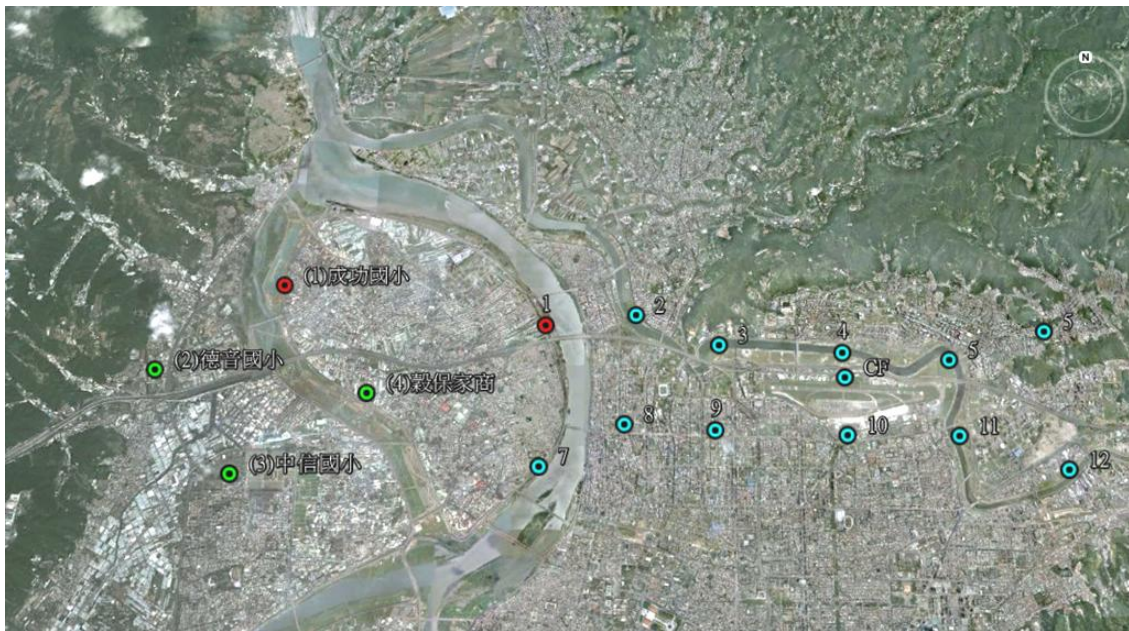


圖 4-7 臺北盆地西側氣象觀測網(綠點)和松山機場 LLWAS 測風臺(藍點)，標註在 google 衛星影像圖上。兩個紅點對應圖 4-6 的兩個黑點，左為臺北盆地西側氣象觀測網 1 號觀測點，右為松山機場 LLWAS 中最西側 1 號測風臺。

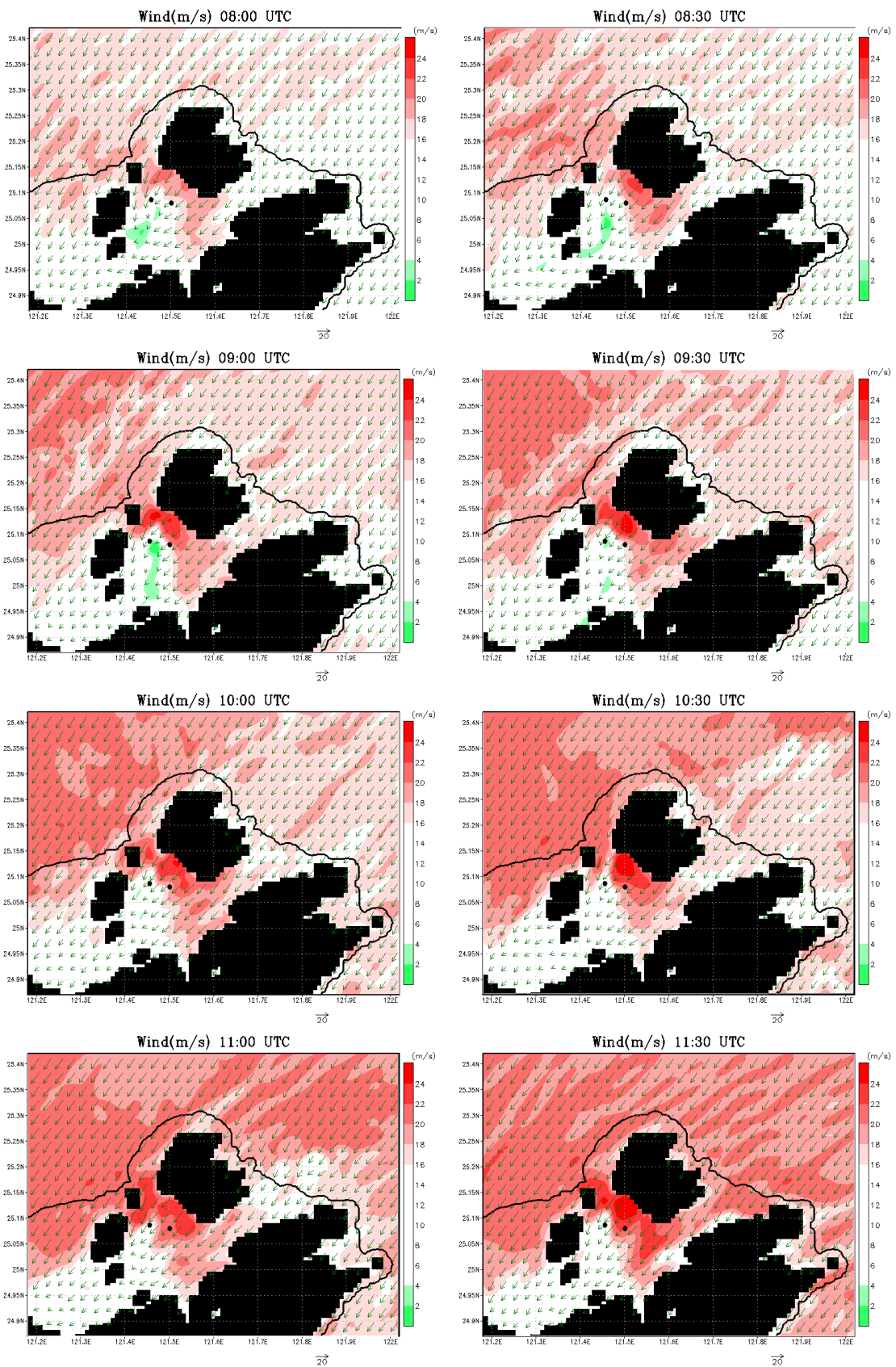


圖 4-8 2010 年 10 月 25 日個案 WRF 模擬結果，250 公尺高度 8:00 到 11:30 UTC 的風場風速圖，紅色表示較大的風速，綠色表示較弱的風速，單位為(m/s)。

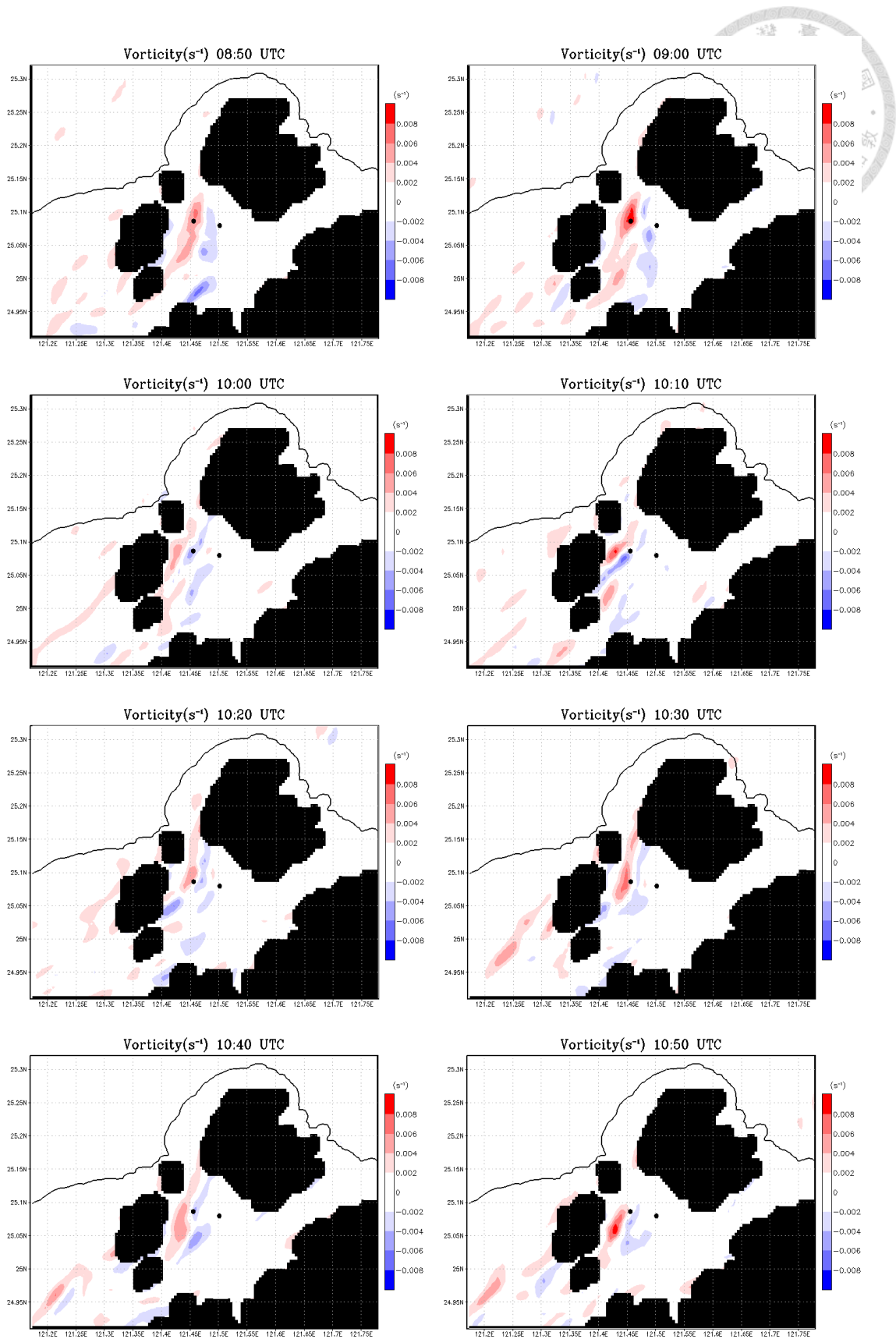


圖 4-9 2010 年 10 月 25 日個案 WRF 模擬結果，250 公尺高度 8:50、9:00、10:00 到 10:50 UTC 的渦度場圖，紅色表示正渦度區，藍色表示負渦度區，單位為  $(s^{-1})$ 。

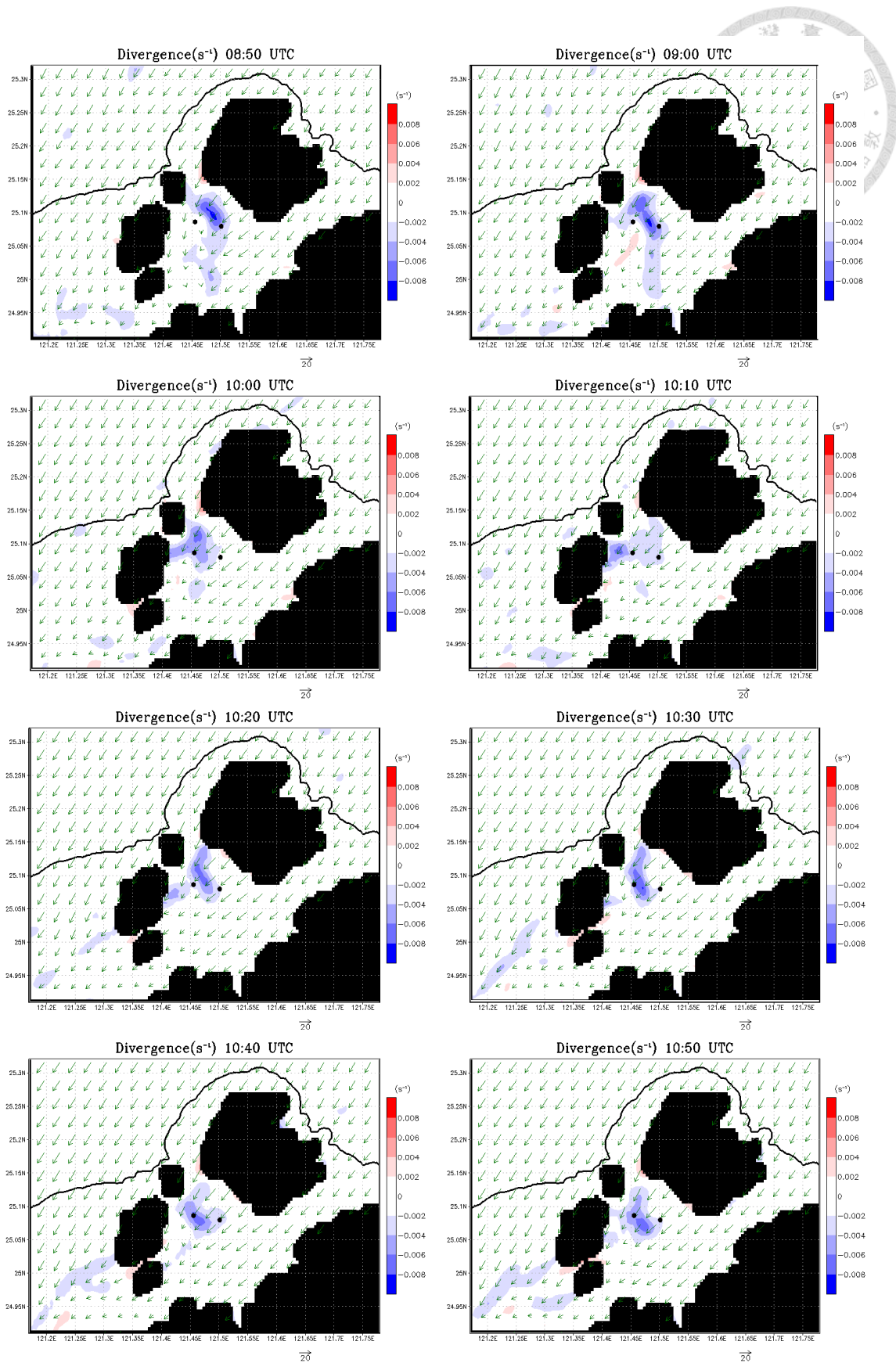


圖 4-10 2010 年 10 月 25 日個案 WRF 模擬結果，250 公尺高度 8:50、9:00、10:00 到 10:50 UTC 的散度場圖，紅色表示輻散區，藍色表示輻合區，單位為( $s^{-1}$ )。

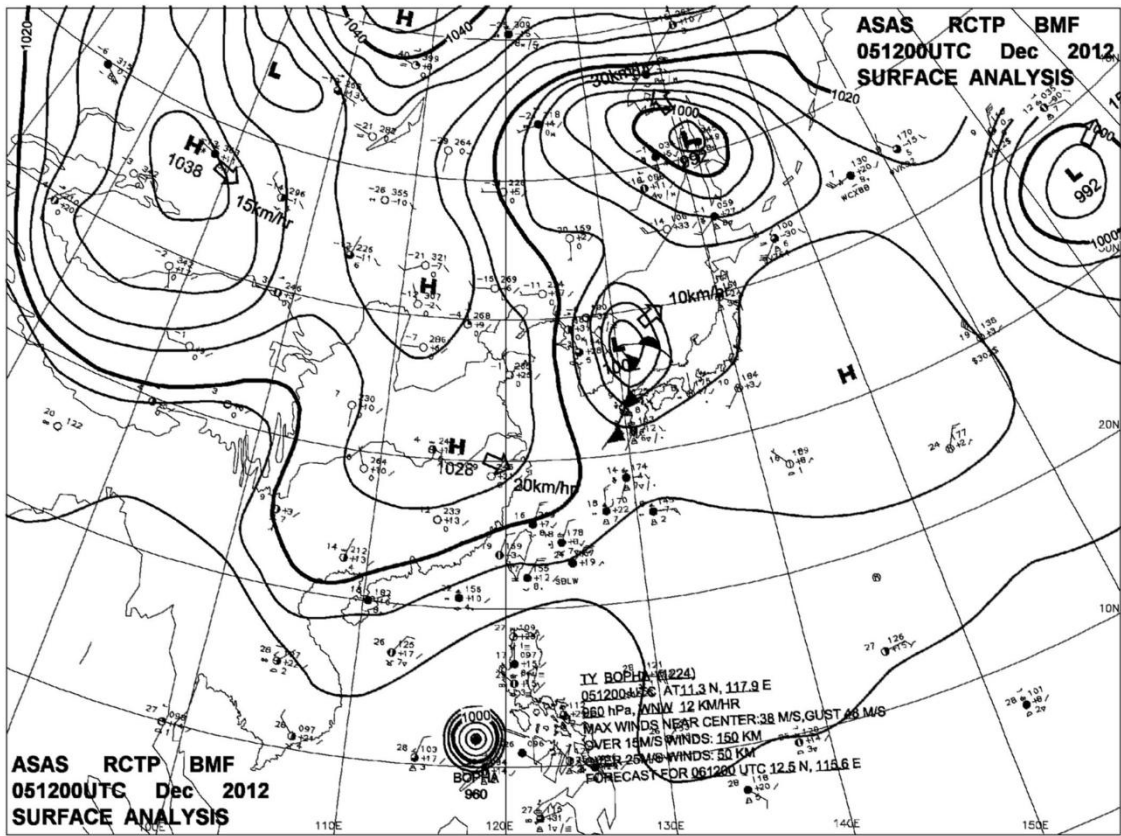


圖 4-11 2012 年 12 月 5 日 12:00 UTC 地面天氣圖。

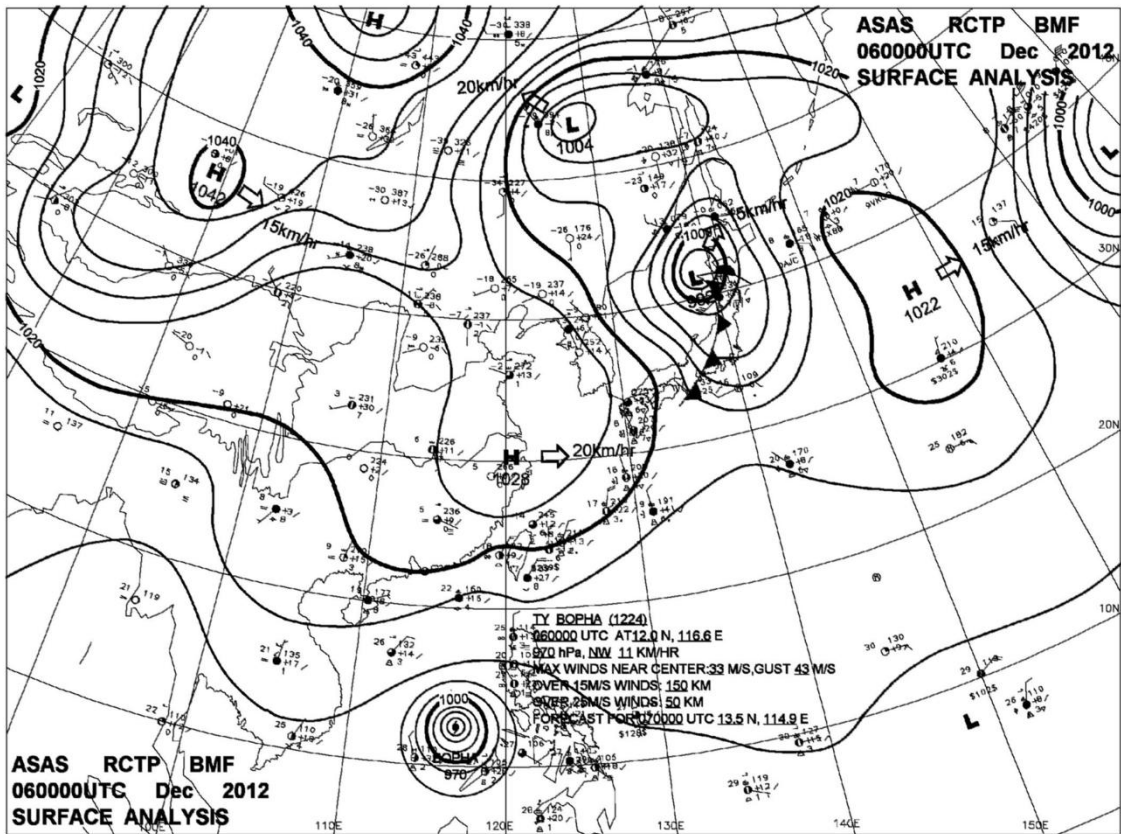


圖 4-12 2012 年 12 月 6 日 00:00 UTC 地面天氣圖。

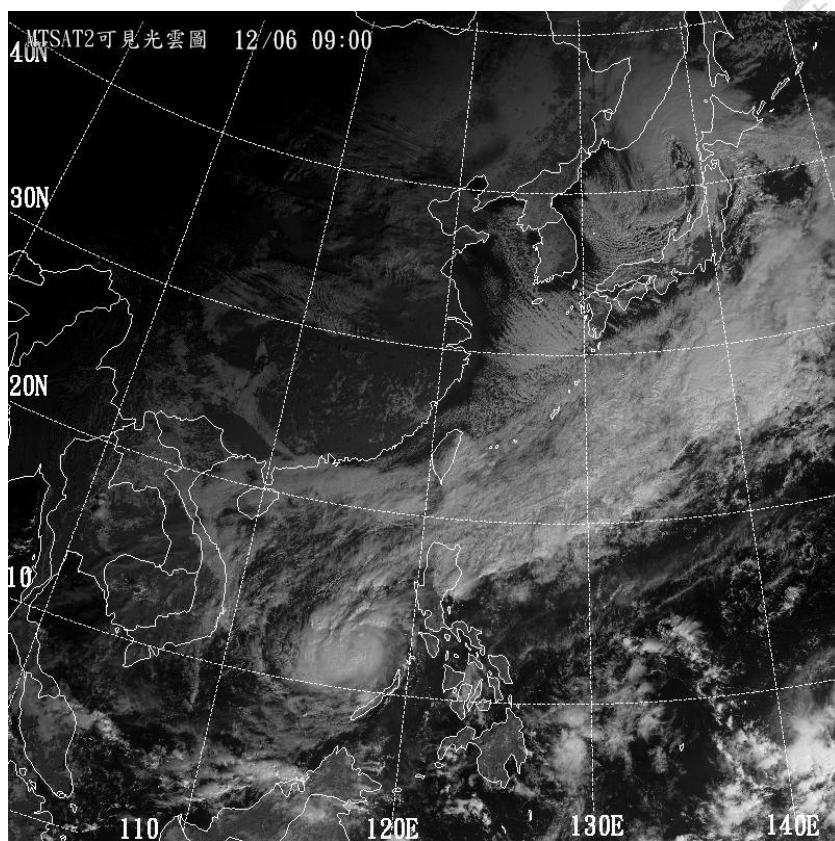
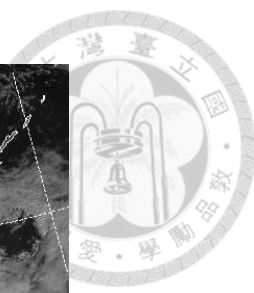


圖 4-13 2012 年 12 月 6 日 09:00 LST (01:00 UTC) 可見光衛星雲圖。

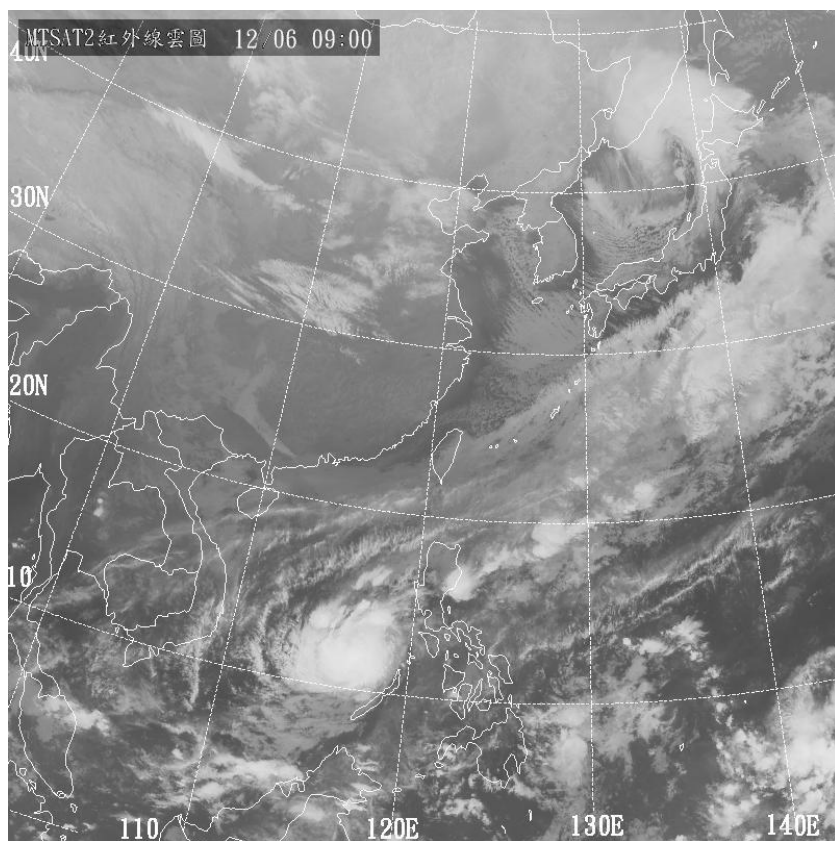


圖 4-14 2012 年 12 月 6 日 09:00 LST (01:00 UTC) 紅外線衛星雲圖。

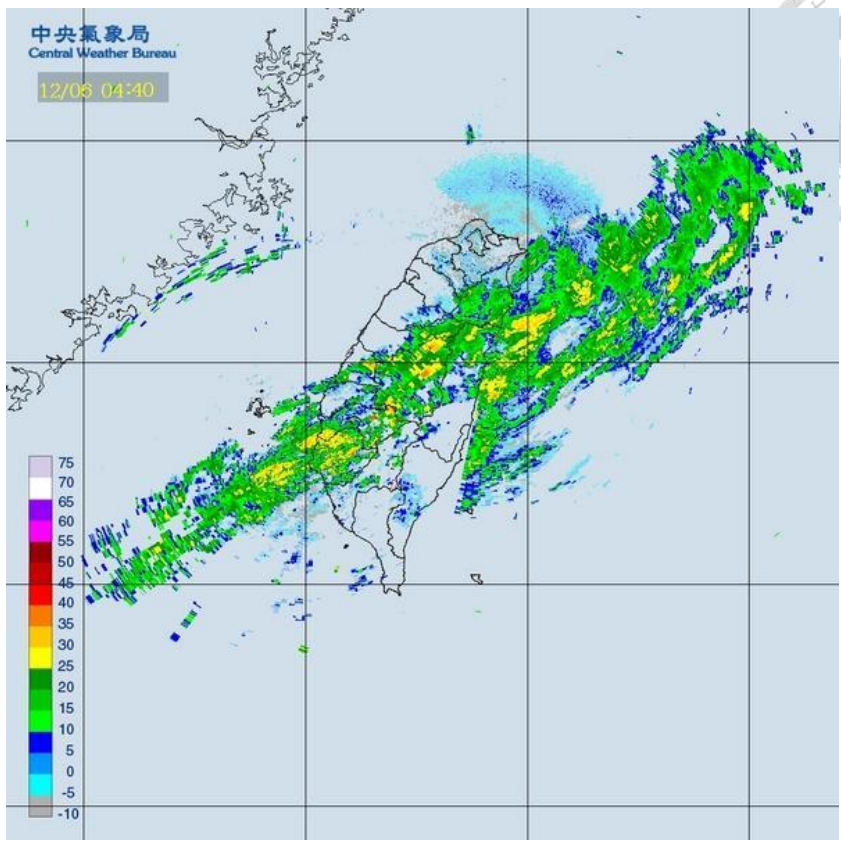
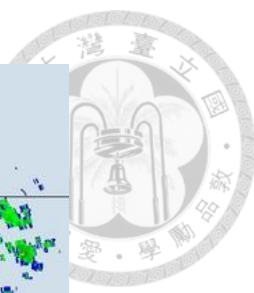


圖 4-15 2012 年 12 月 6 日 04:40 LST (5 日 20:40 UTC) 雷達回波圖。

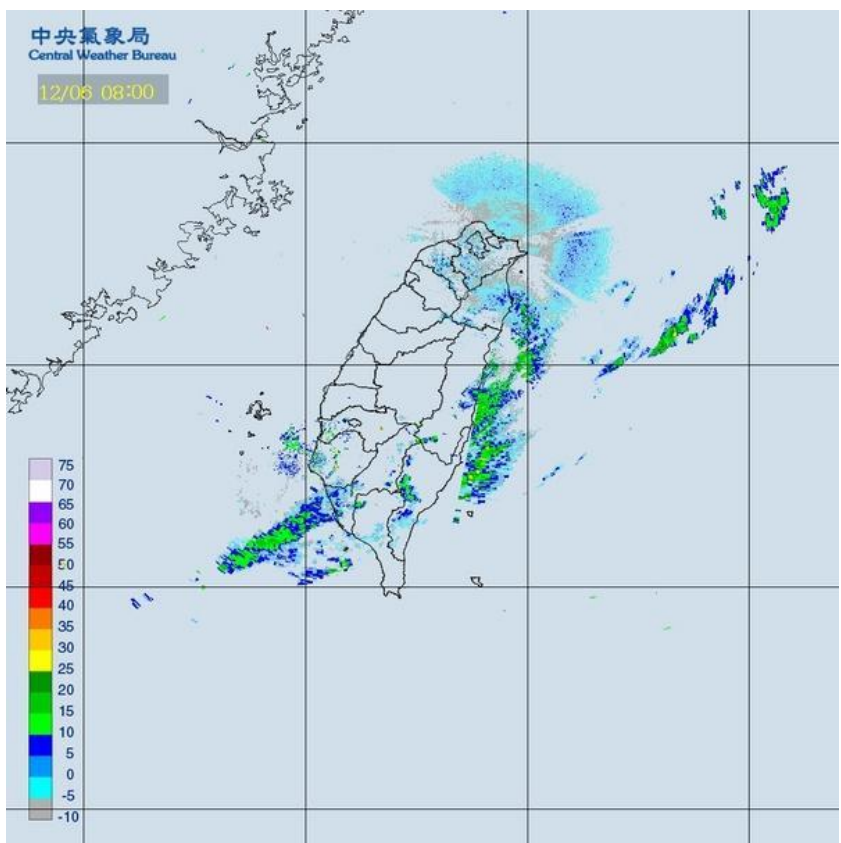


圖 4-16 2012 年 12 月 6 日 08:00 LST (00:00 UTC) 雷達回波圖。



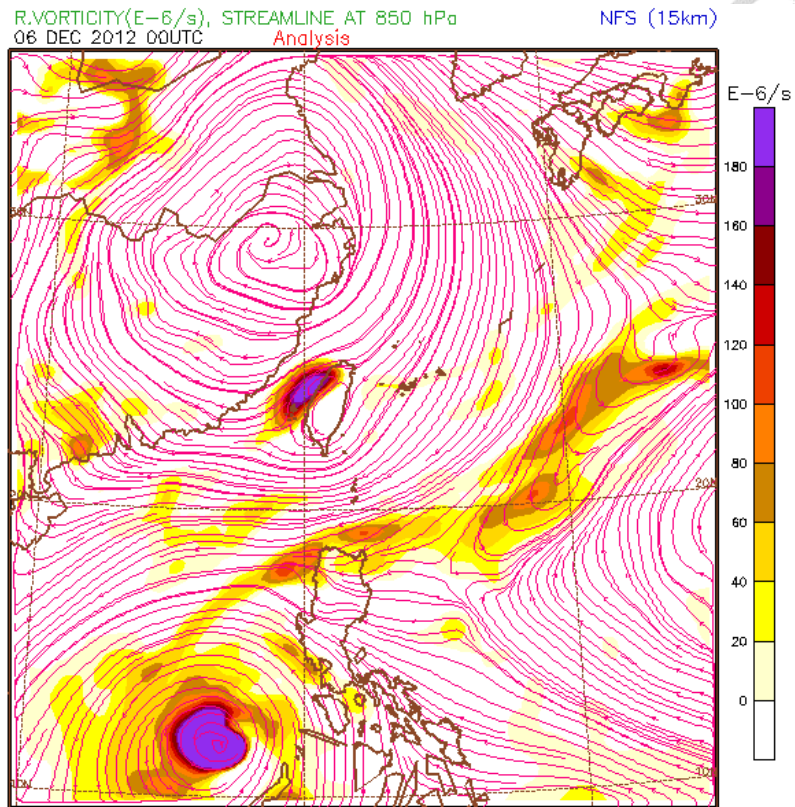


圖 4-17 2012 年 12 月 6 日 00:00 UTC 850 hPa 渦度與流線場(中央氣象局模式分析資料)。

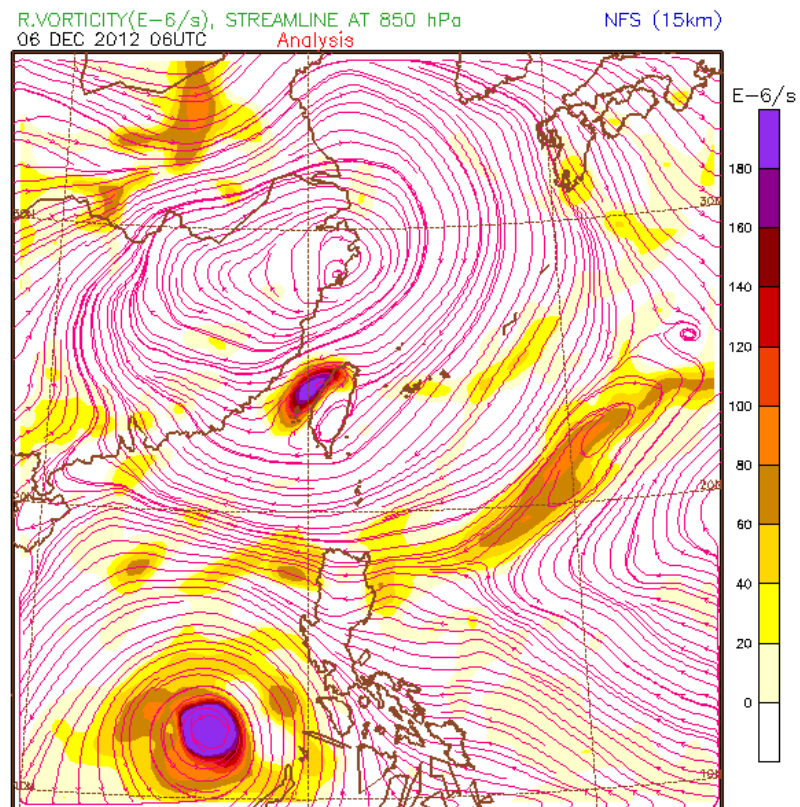


圖 4-18 2012 年 12 月 6 日 06:00 UTC 850 hPa 渦度與流線場(中央氣象局模式分析資料)。

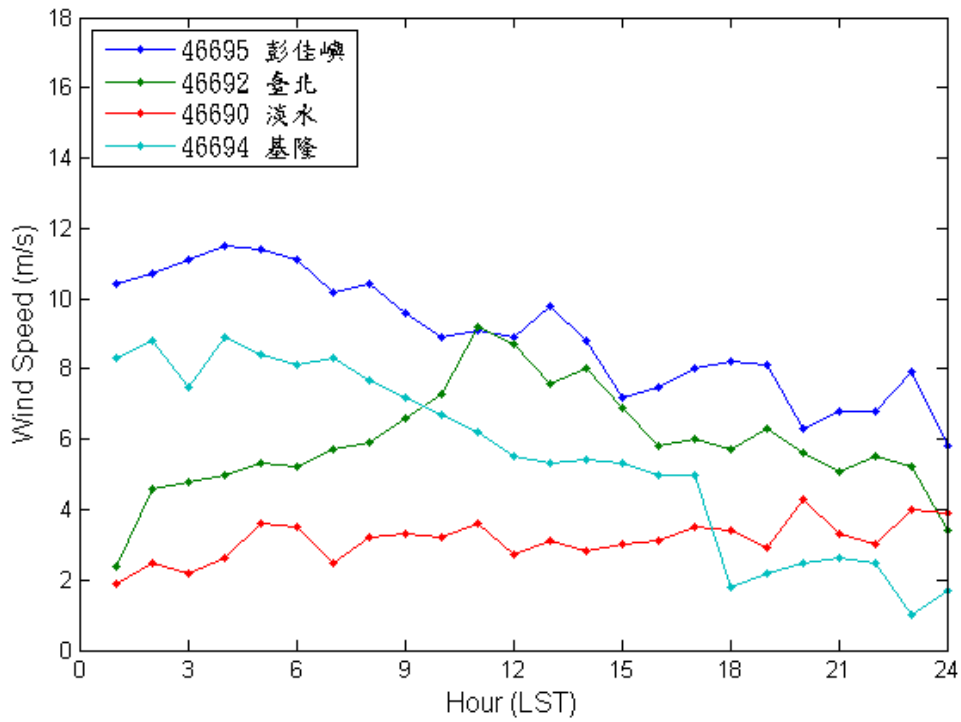
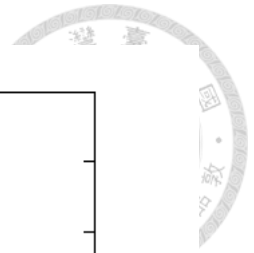


圖 4-19 中央氣象局 2012 年 12 月 6 日彭佳嶼、臺北、淡水、基隆氣象站每小時最大平均風速，時間為臺北當地時間，單位為(m/s)。

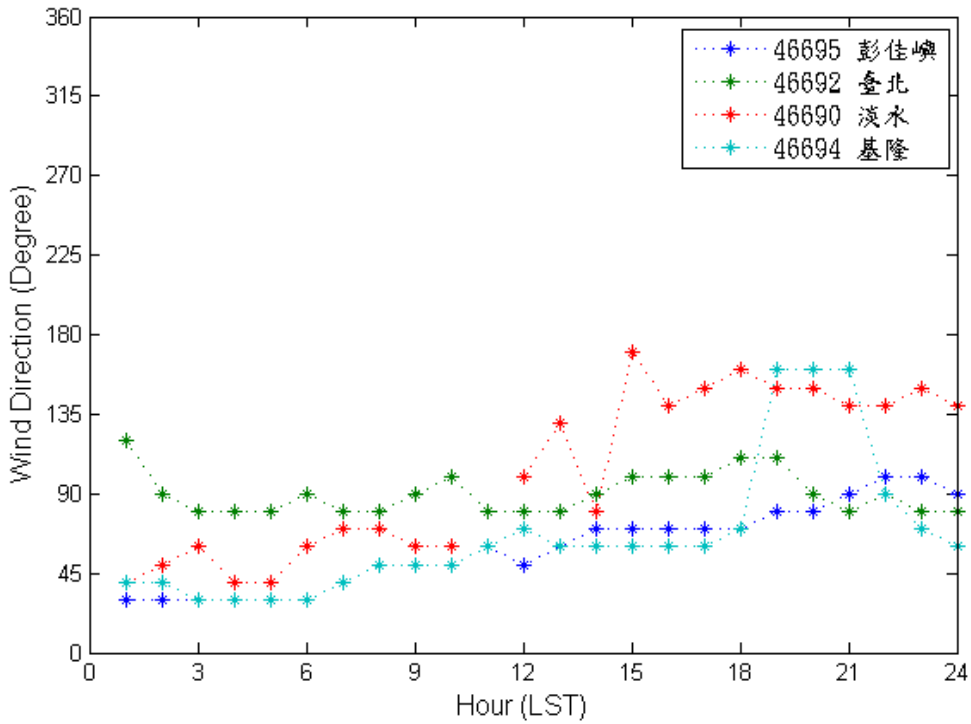


圖 4-20 中央氣象局 2012 年 12 月 6 日彭佳嶼、臺北、淡水、基隆氣象站每小時平均風向，時間為臺北當地時間，單位為方位角度。

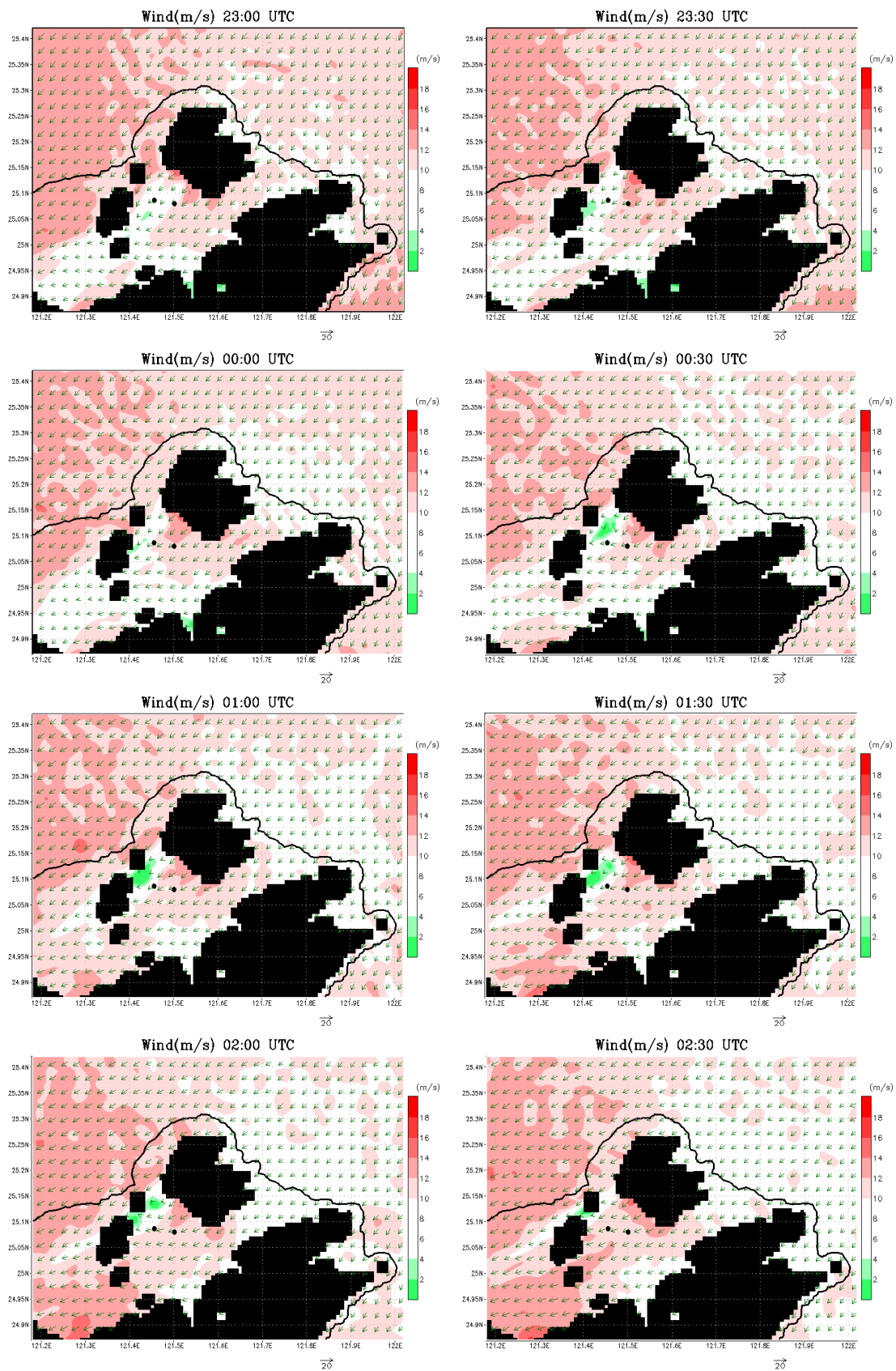


圖 4-21 2012 年 12 月 6 日個案 WRF 模擬結果，250 公尺高度 12 月 5 日 23:00 到 12 月 6 日 02:30 UTC 的風場風速圖，紅色表示較大的風速，綠色表示較弱的風速，單位為(m/s)。

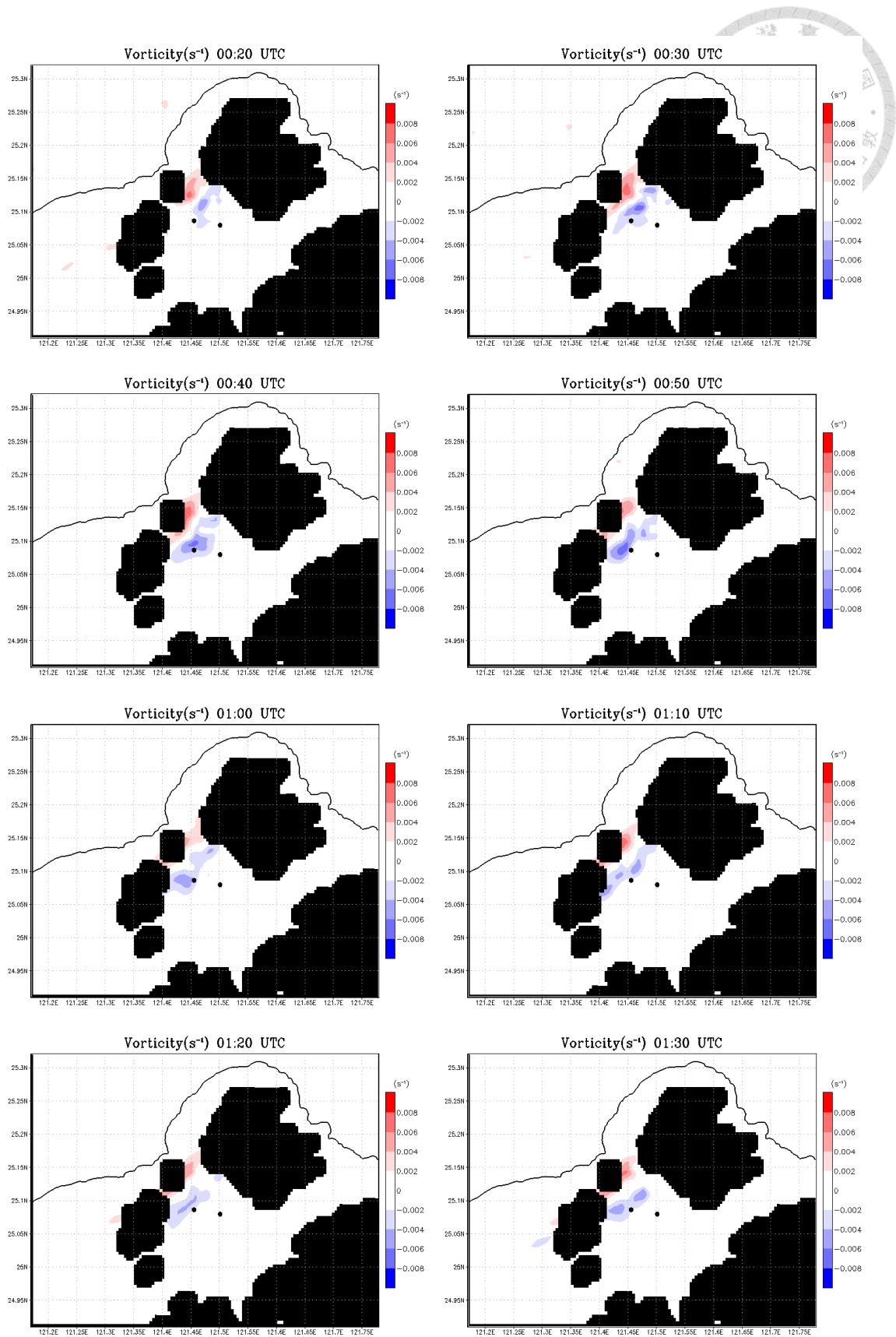


圖 4-22 2012 年 12 月 6 日個案 WRF 模擬結果，250 公尺高度 00:20 到 01:30 UTC 的渦度場圖，紅色表示正渦度區，藍色表示負渦度區，單位為( $s^{-1}$ )。

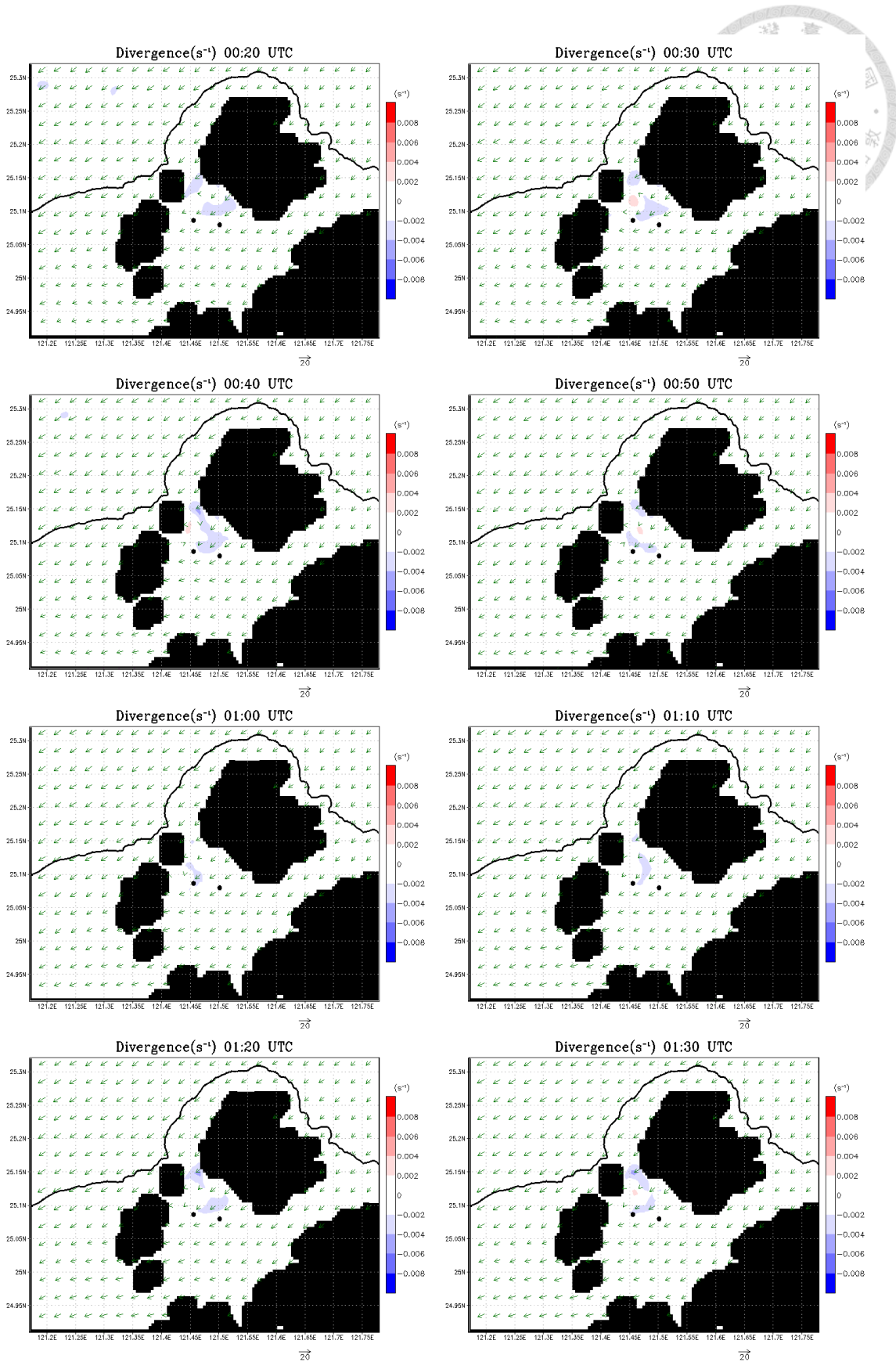


圖 4-23 2012 年 12 月 6 日個案 WRF 模擬結果，250 公尺高度 00:20 到 01:30 UTC 的散度場圖，紅色表示輻散區，藍色表示輻合區，單位為(s<sup>-1</sup>)。

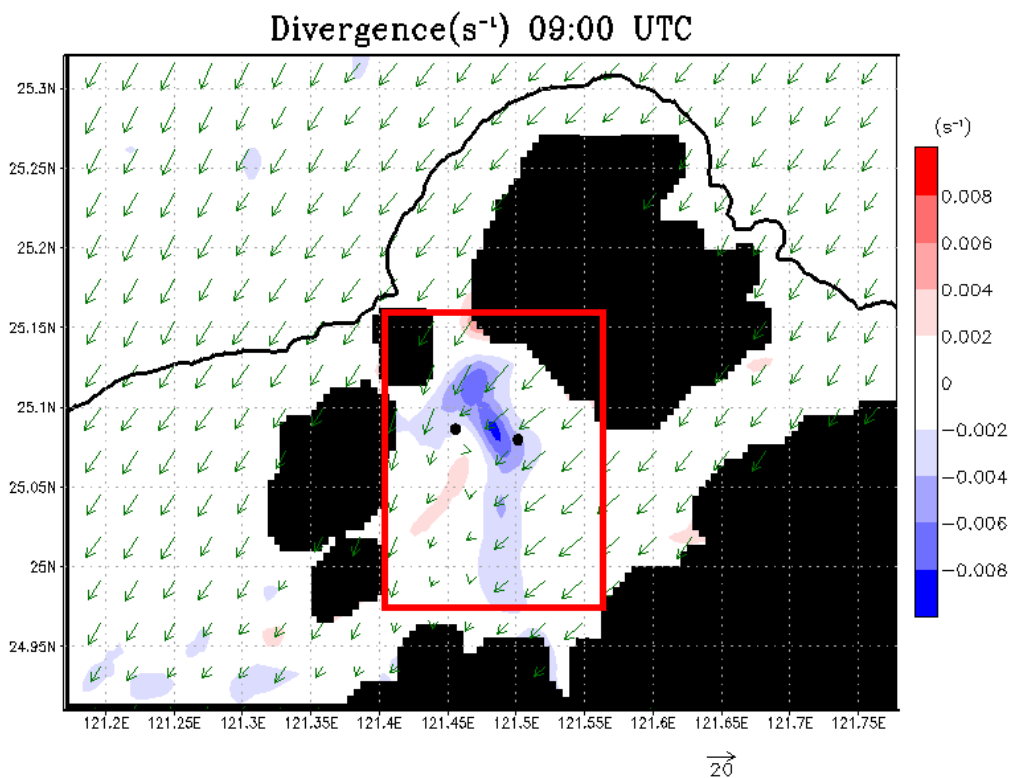
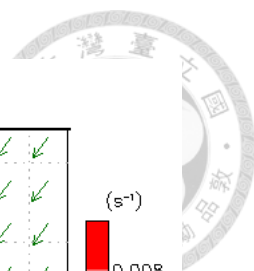


圖 5-1 2010 年 10 月 25 日個案散度場圖，紅色表示輻散，藍色表示輻合，單位為 ( $s^{-1}$ )。地圖中的紅色方框範圍中共有  $36 \times 41$  個格點，每個格點 0.5 公里，為 WRF 模式 1 公里解析度模擬結果經過 2 倍內插而成。這一方框是表 5-2、表 5-3 各種敏感度組合的輻合、輻散場的分佈情形。



圖 5-2 「九網格平均數值」範例圖，左側為原數值，右側為九網格平均數值。黑色方框示意為圖 5-1 的紅色方框，最外圈邊界不計算九網格平均數值；原數值 9 格綠色方格平均的數值，呈現在九網格平均數值最中間的網格；原數值紅色方框遇到邊界無數值問題，9 格中僅有 5 格有數值，因此加總除以 5 成為九網格平均數值的左上角的網格。

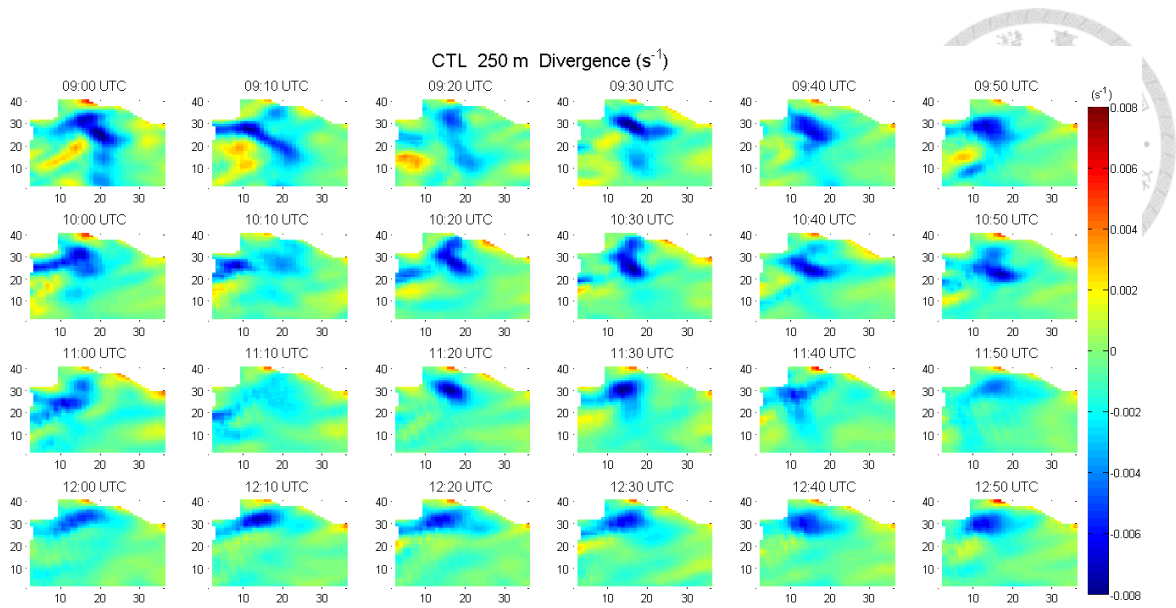


圖 5-3 以圖 5-1 中的紅色方框範圍，呈現「控制組」輻合、輻散場的時間序列圖，紅色表示輻散區，藍色表示輻合區，單位為( $s^{-1}$ )，x、y 座標為網格數。

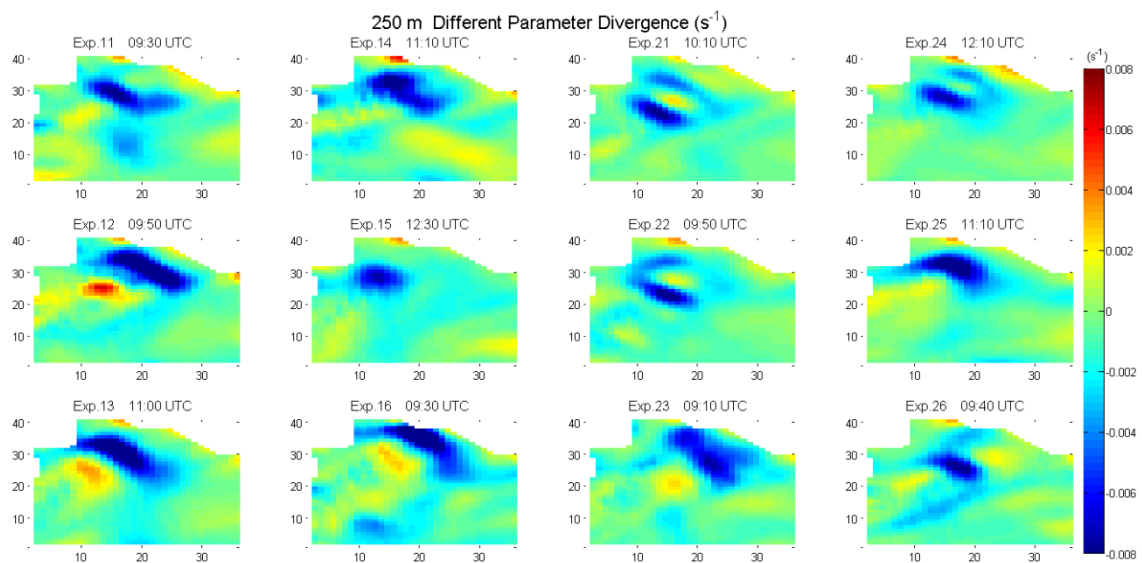


圖 5-4 比較不同參數化設定，在 WRF 模式模擬中 250 公尺高的輻合、輻散場，其中 Exp. 11 為控制組，其他各組參數設定請參考表 5-1；紅色表示輻散區，藍色表示輻合區，單位為( $s^{-1}$ )，x、y 座標為網格數；挑選的時間為各實驗測試中，九網格平均數值最大輻合的時間。

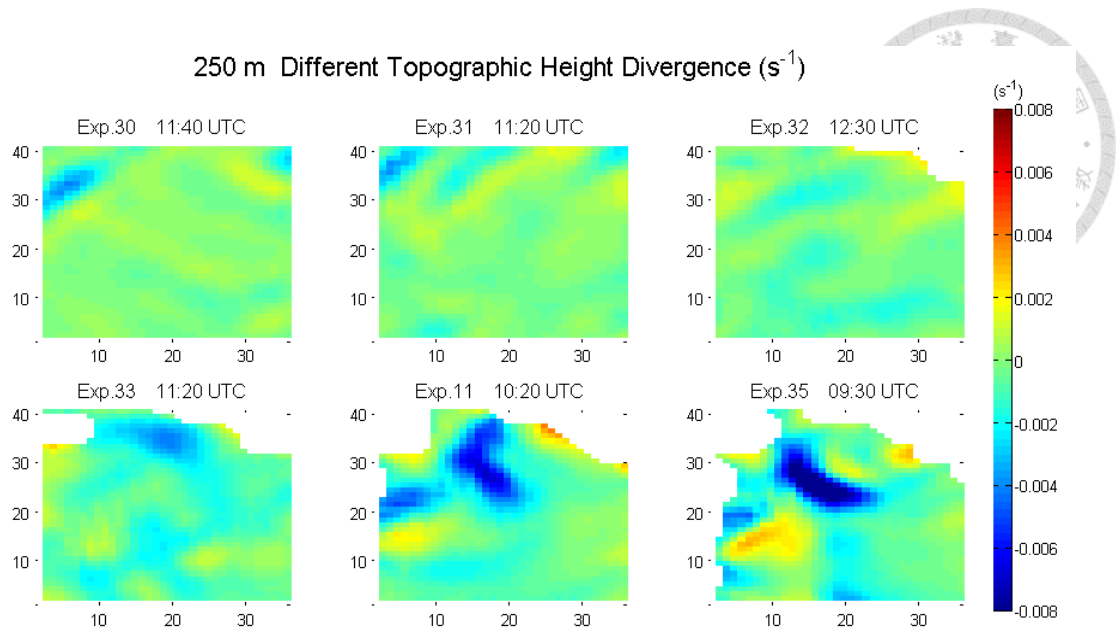


圖 5-5 比較不同地形高度在 WRF 模式模擬中 250 公尺高的輻合、輻散場，其中 Exp. 11 為控制組，Exp. 30、31、32、33、35，分別為 0%、25%、50%、75%、120% 的地形高度；紅色表示輻散區，藍色表示輻合區，單位為  $(s^{-1})$ ，x、y 座標為網格數；挑選的時間為各實驗測試中，九網格平均數值最大輻合的時間。

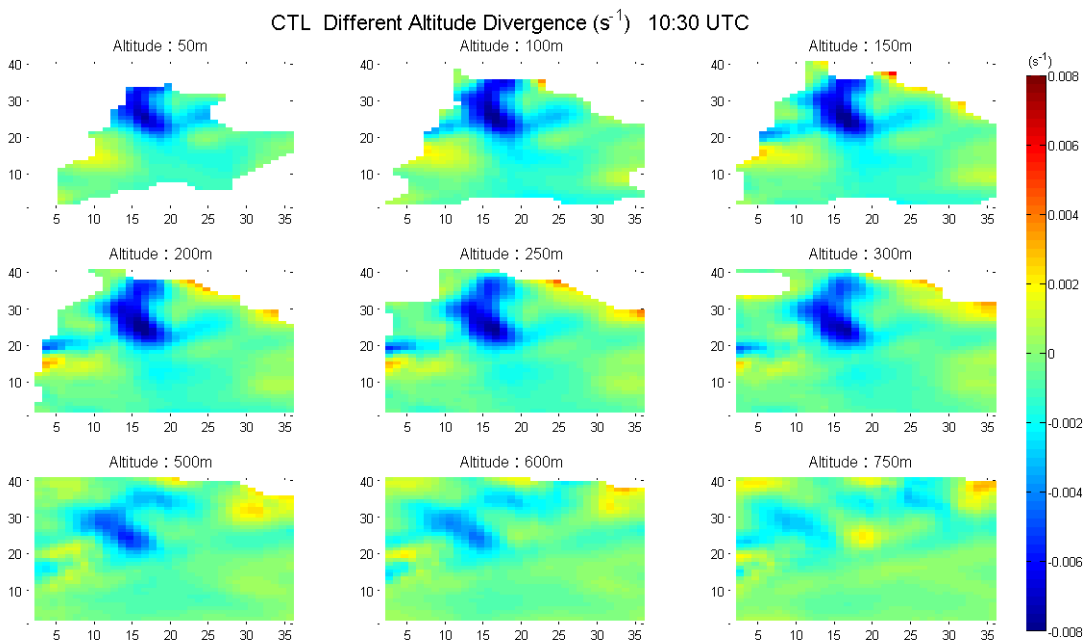


圖 5-6 控制組不同高度的輻合、輻散場圖，由左至右再由上到下分別為 50、100、150、200、250、300、500、600、700 公尺高度的輻合、輻散場；紅色表示輻散區，藍色表示輻合區，單位為  $(s^{-1})$ ，x、y 座標為網格數。



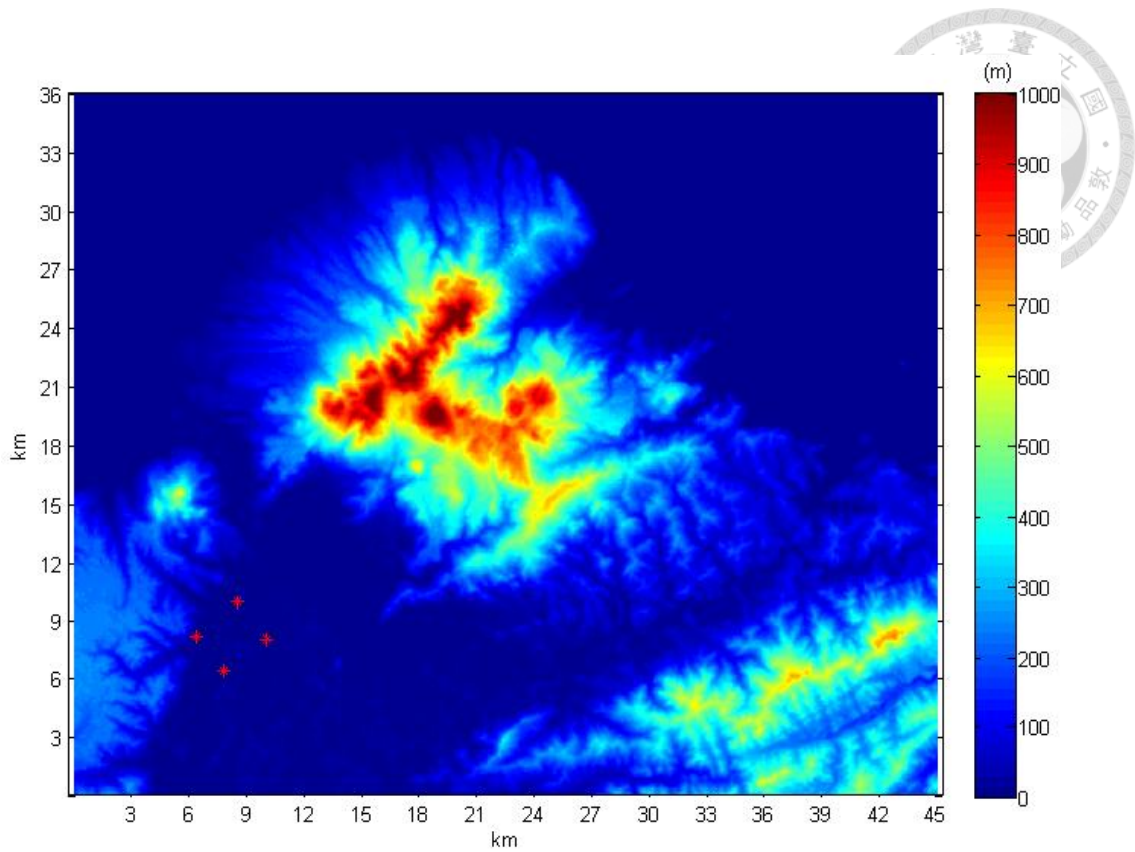


圖 5-7 臺北盆地 45 × 36 公里範圍的 30 公尺解析度 DTM 平面圖，紅色點為臺北盆地西側氣象觀測網新增的四個觀測點。

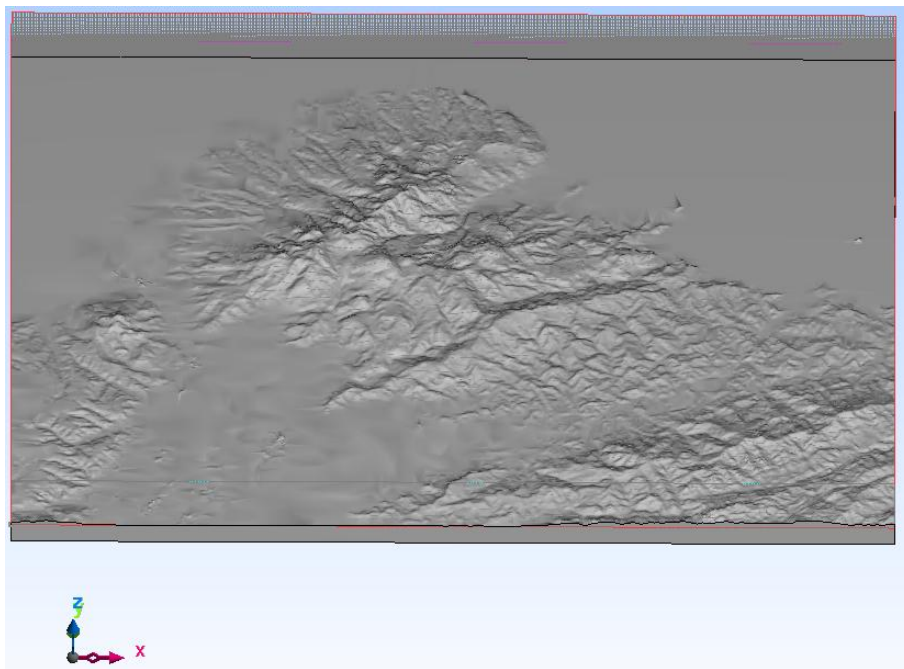


圖 5-8 STREAM 模式顯示臺北盆地 45 × 36 公里範圍的立體地形圖。

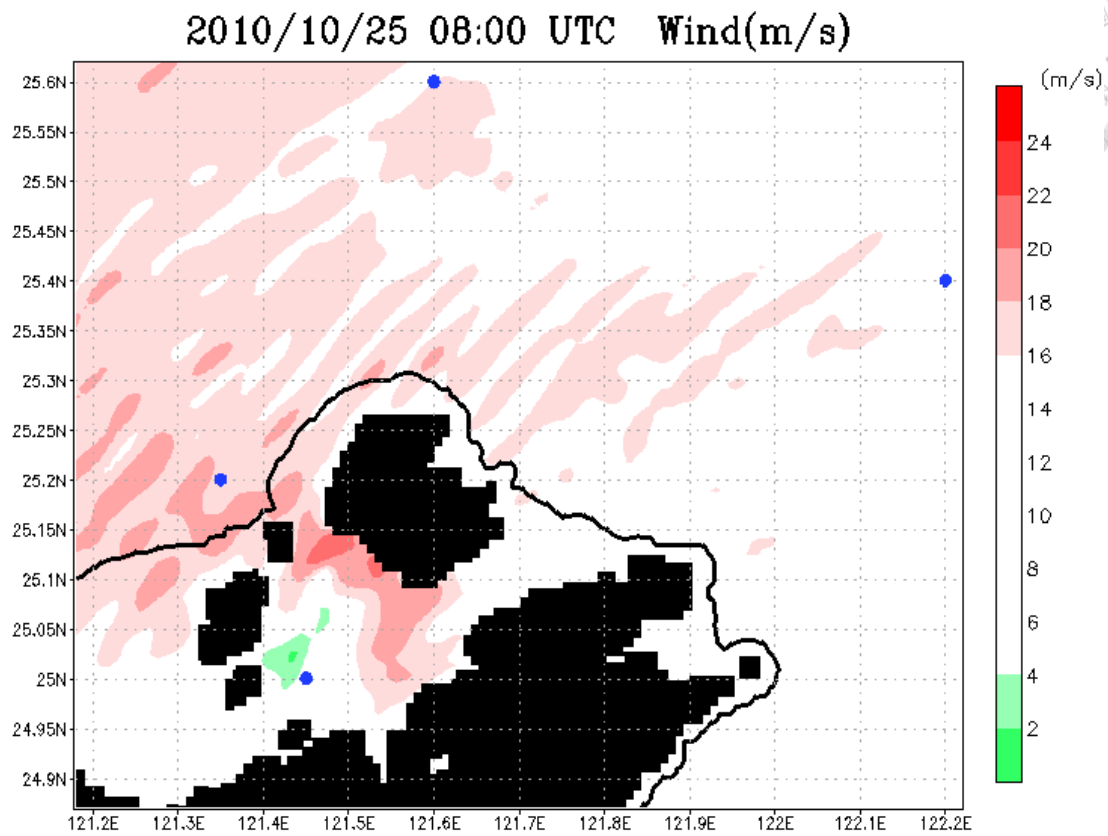
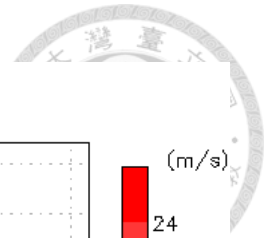


圖 5-9 WRF 模式模擬 2010 年 10 月 25 日 08:00 UTC 的 250 公尺高度風速場，藍色的四個點為選取加入 STREAM 模式邊界垂直剖面風場的位置。

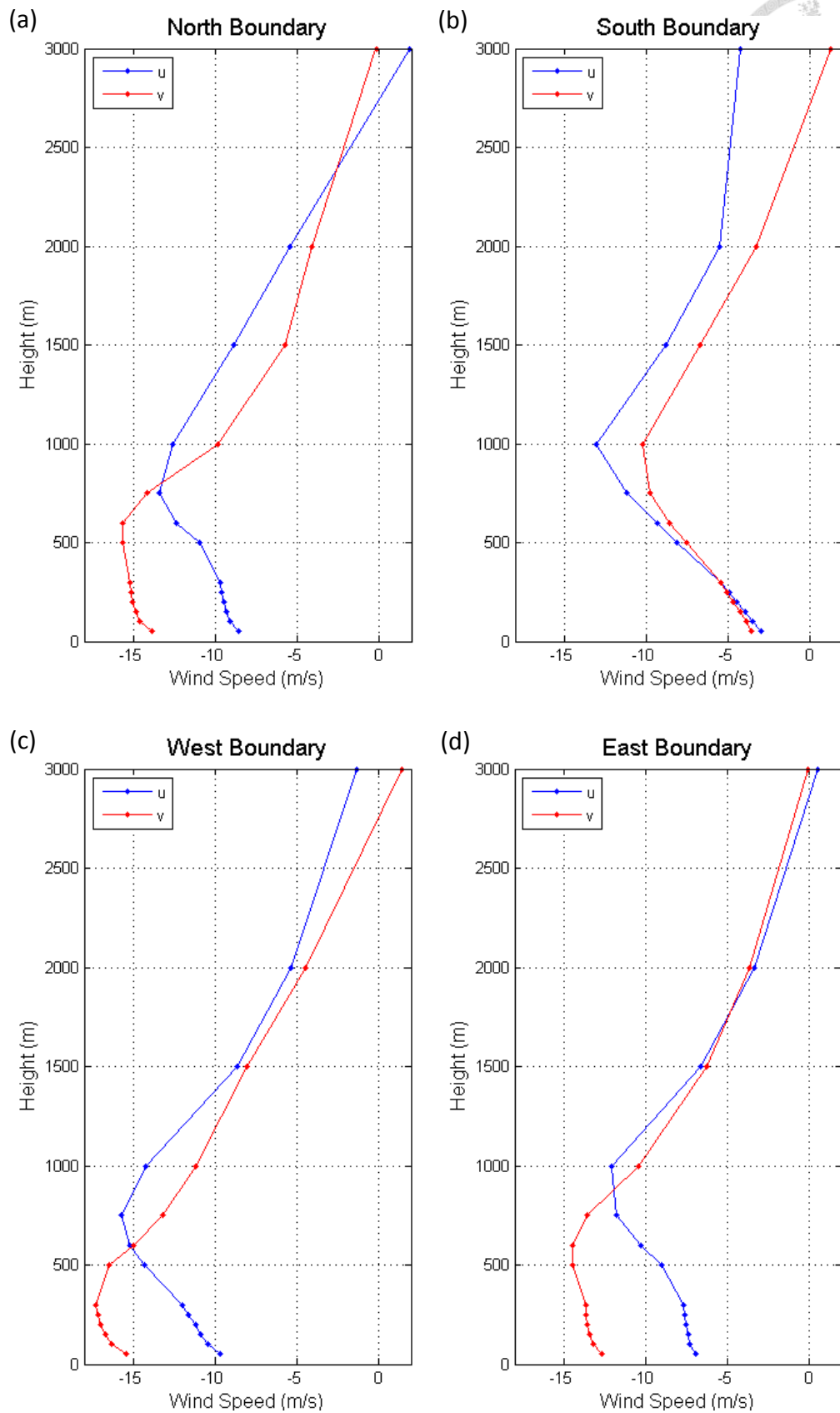


圖 5-10 放入 STREAM 模式四邊的風速垂直剖面。(a)北邊邊界剖面；(b)南邊邊界剖面；(c)西邊邊界剖面；(d)東邊邊界剖面。

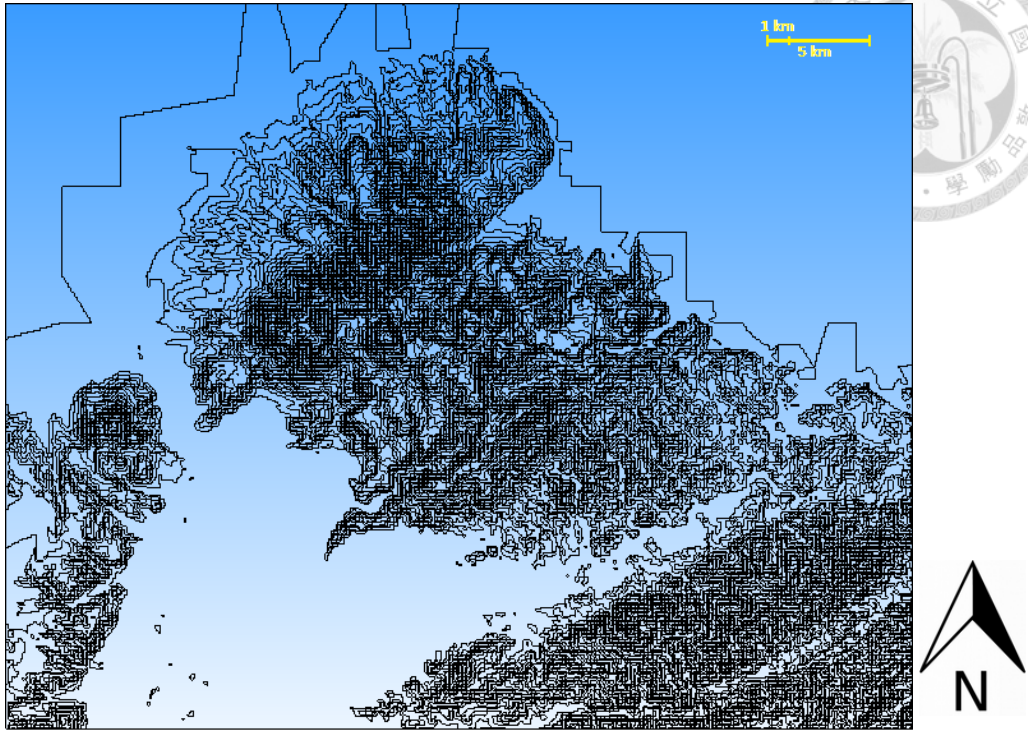


圖 5-11 臺北盆地 45 × 36 公里範圍等高線圖，等高線間距為 25 公尺。

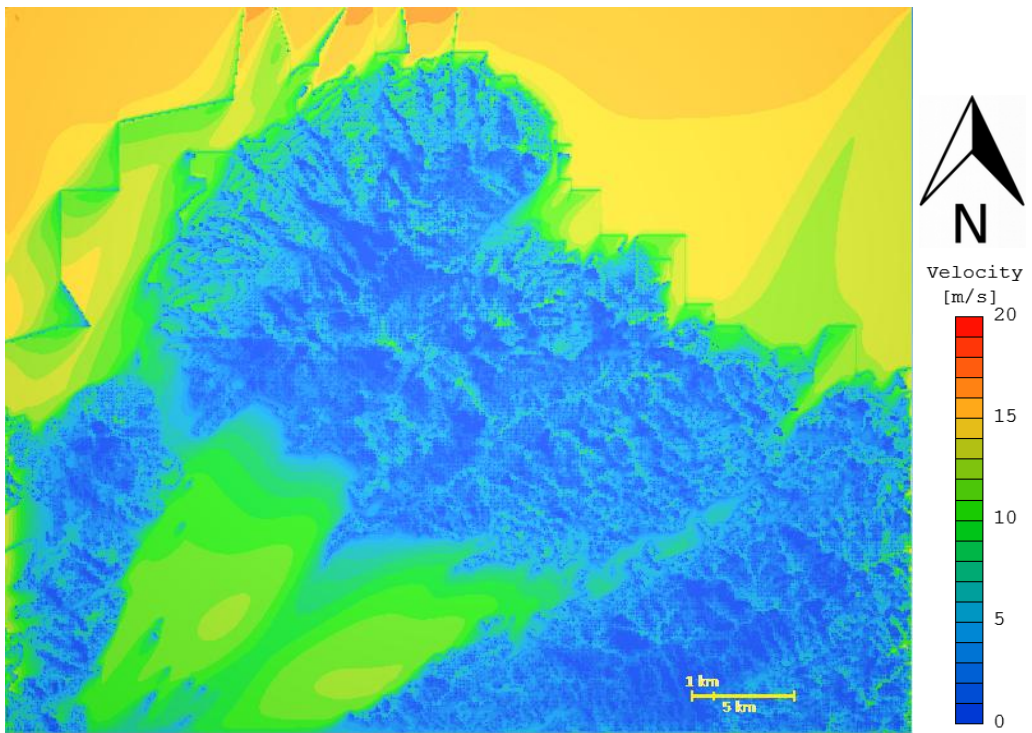


圖 5-12 臺北盆地 45 × 36 公里範圍的地表風風速。

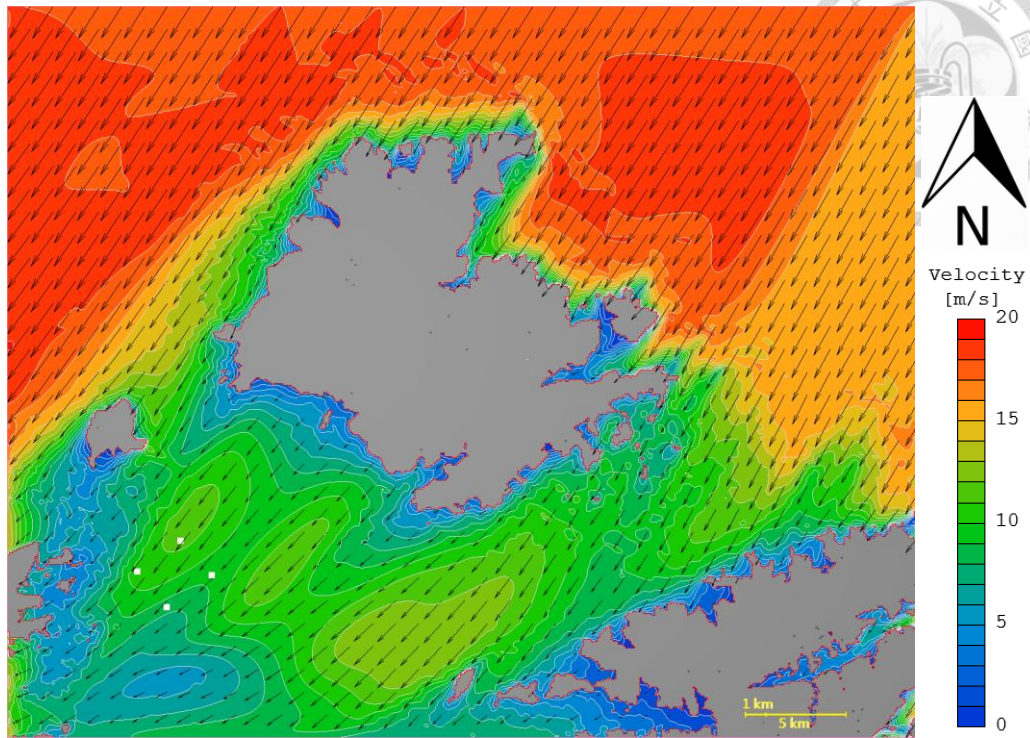


圖 5-13 臺北盆地 45 × 36 公里範圍，STREAM 模式模擬 150 分鐘後(未達穩定)的 250 公尺高度風場，白點為臺北盆地西側氣象觀測網新增的四個觀測點。

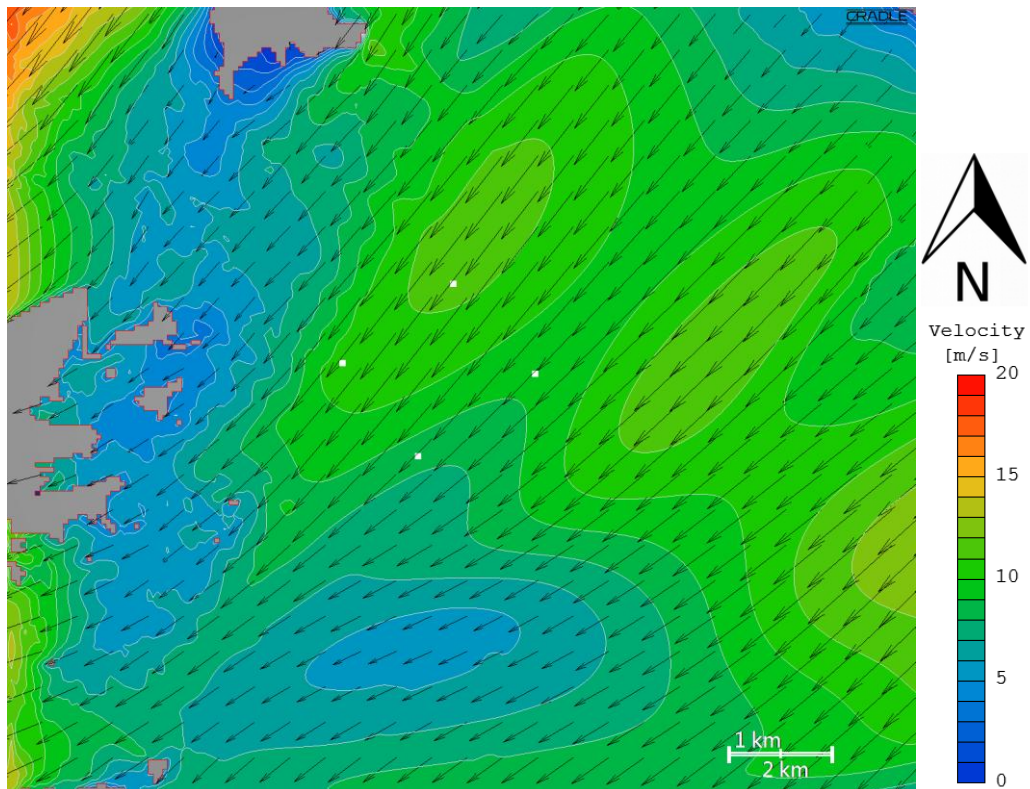


圖 5-14 臺北盆地西側範圍，STREAM 模式模擬 150 分鐘後(未達穩定)的 250 公尺高度風場，白點為臺北盆地西側氣象觀測網新增的四個觀測點。

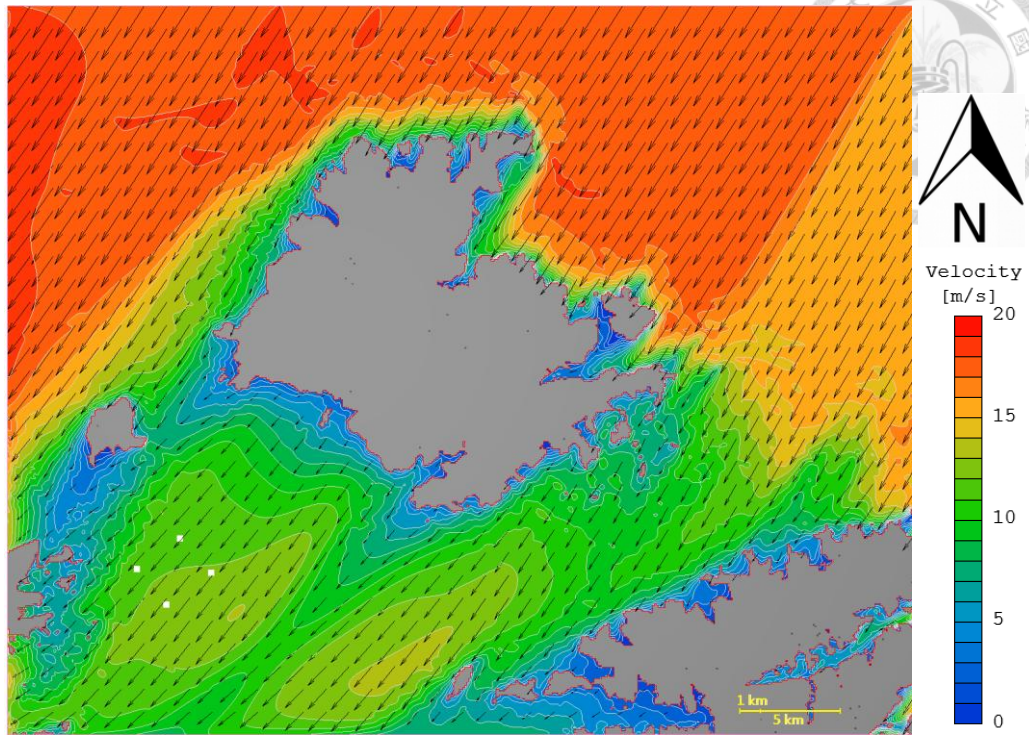


圖 5-15 臺北盆地 45 × 36 公里範圍，STREAM 模式模擬達穩定後的 250 公尺高度風場，白點為臺北盆地西側氣象觀測網新增的四個觀測點。

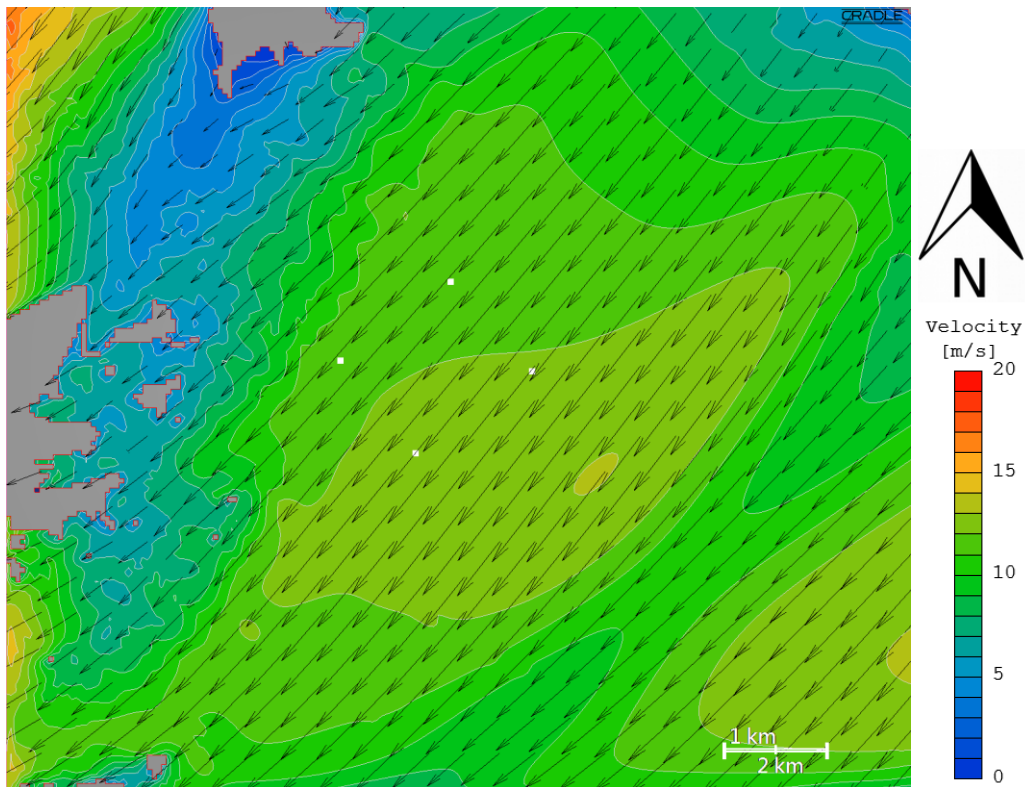


圖 5-16 臺北盆地西側範圍，STREAM 模式模擬達穩定後的 250 公尺高度風場，白點為臺北盆地西側氣象觀測網新增的四個觀測點。

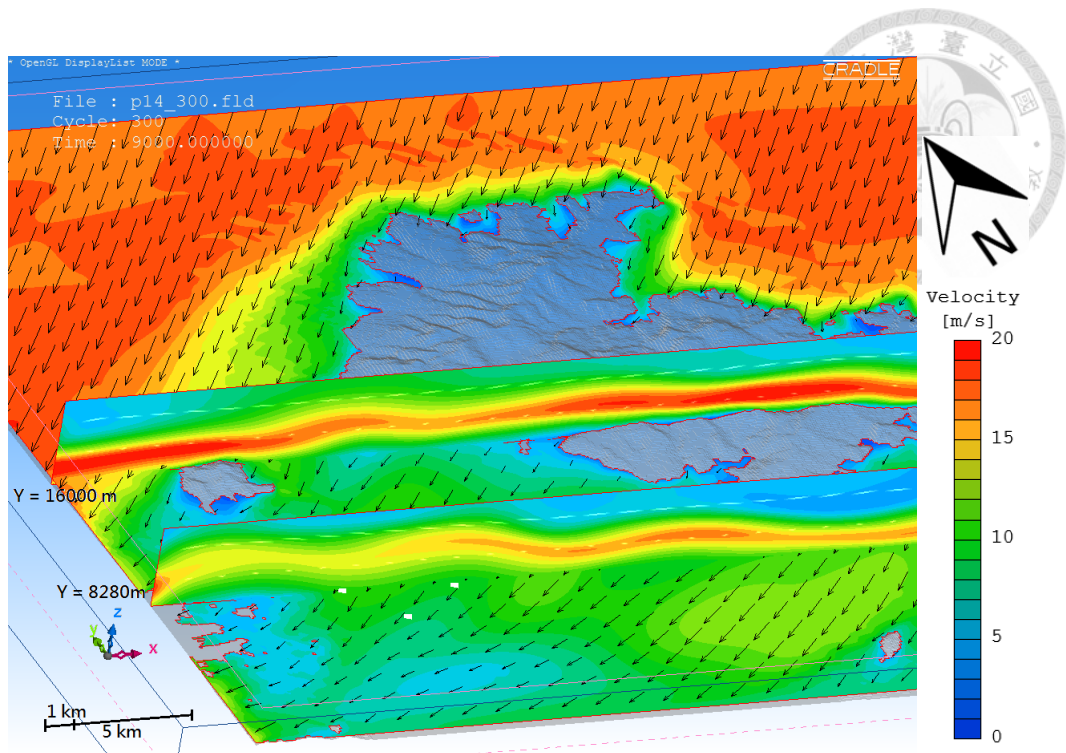


圖 5-17 STREAM 模式模擬 150 分鐘後(未達穩定)的 250 公尺高度風場，和由南邊界往北 Y=8280 m、Y=16000 m 的垂直截面風速，白點為臺北盆地西側氣象觀測網新增的四個觀測點(圖中只看到南邊的三個觀測點)。

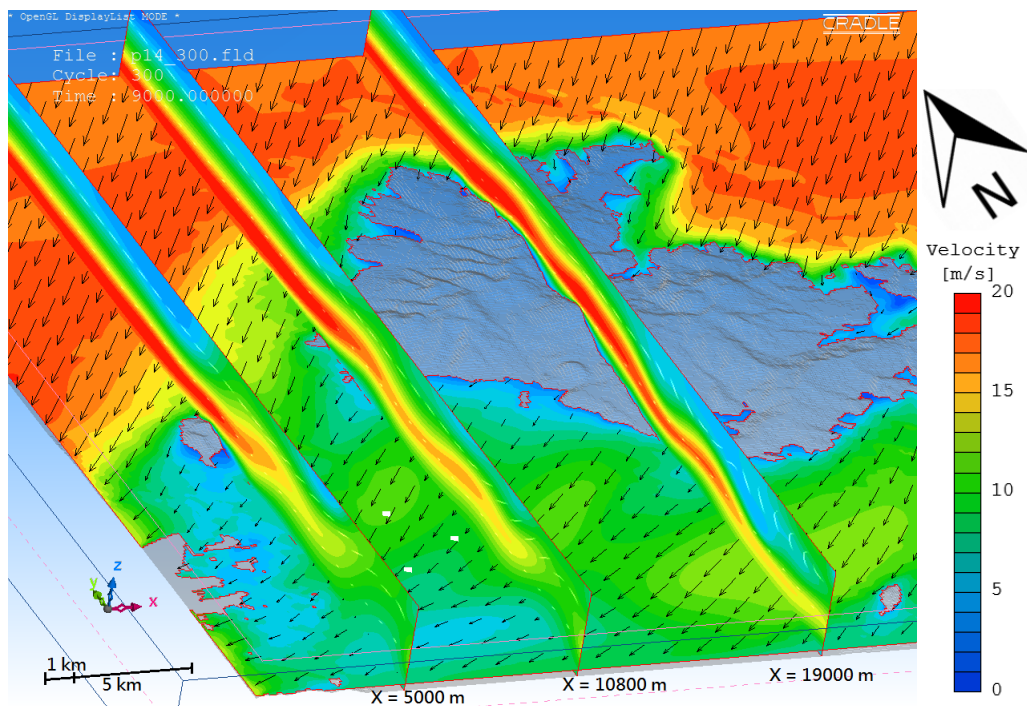


圖 5-18 STREAM 模式模擬 150 分鐘後(未達穩定)的 250 公尺高度風場，和由西邊界往東 X=5000 m、X=10800 m、X=19000 m 的垂直截面風速，白點為臺北盆地西側氣象觀測網新增的四個觀測點(圖中只看到東邊的三個觀測點)。

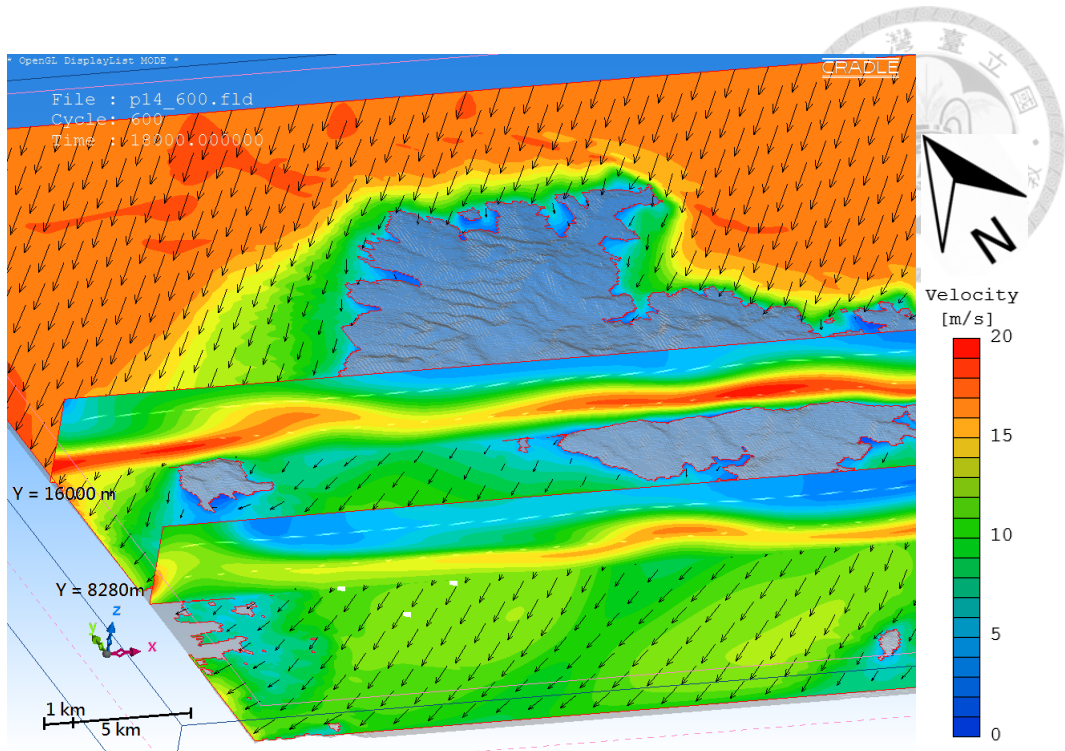


圖 5-19 STREAM 模式模擬達穩定後的 250 公尺高度風場，和由南邊界往北 Y=8280 m、Y=16000 m 的垂直截面風速，白點為臺北盆地西側氣象觀測網新增的四個觀測點(圖中只看到南邊的三個)。

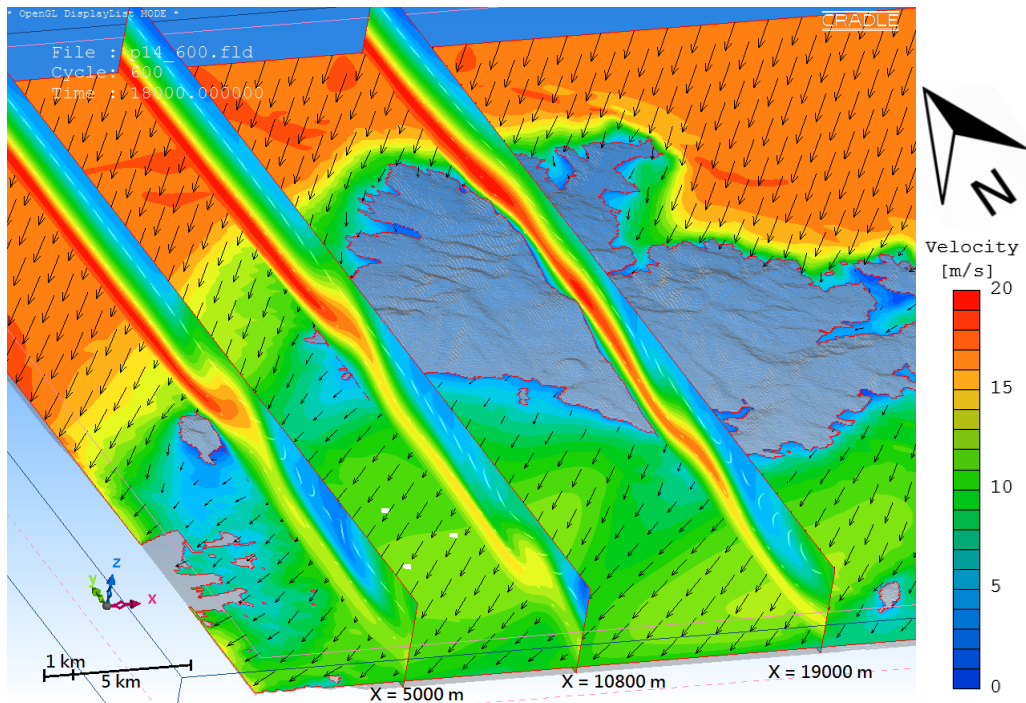


圖 5-20 STREAM 模式模擬達穩定後的 250 公尺高度風場，和由西邊界往東 X=5000 m、X=10800 m、X=19000 m 的垂直截面風速，白點為臺北盆地西側氣象觀測網新增的四個觀測點(圖中只看到東邊的三個)。



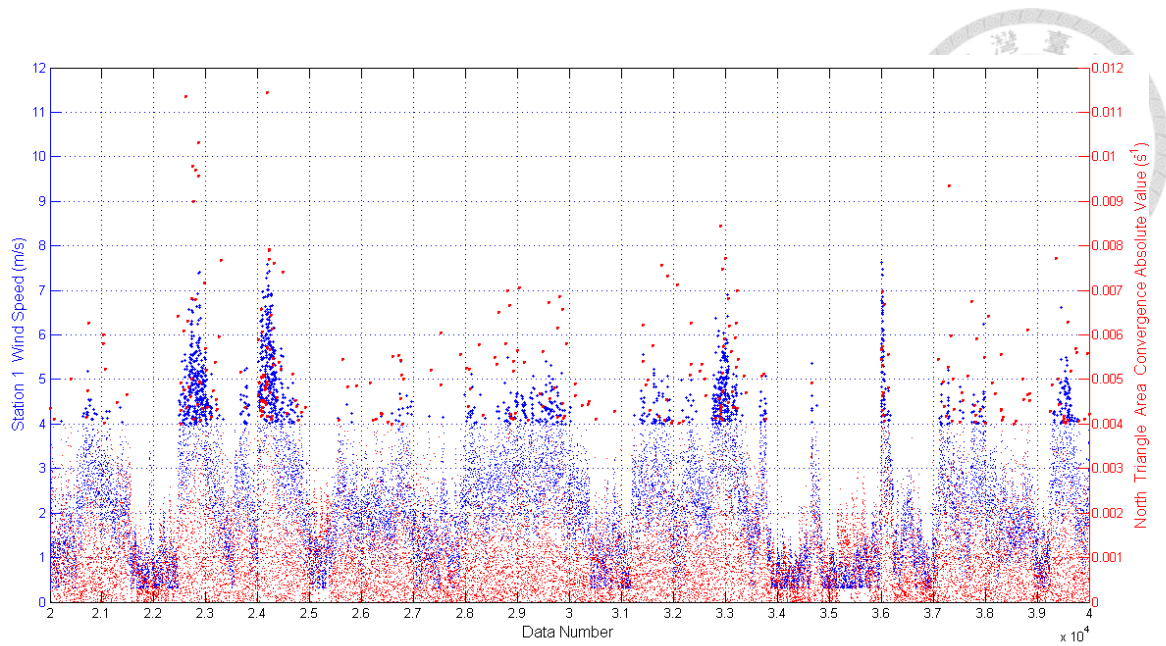


圖 5-21 臺北盆地西側氣象觀測網 1 號觀測點的地面風速資料(藍點)，與北三角形面積的輻合、輻散絕對值(紅點)比較圖。地面風速大於 4 m/s 以及輻合、輻散絕對值大於 0.004 ( $s^{-1}$ )的標記放大顯示。

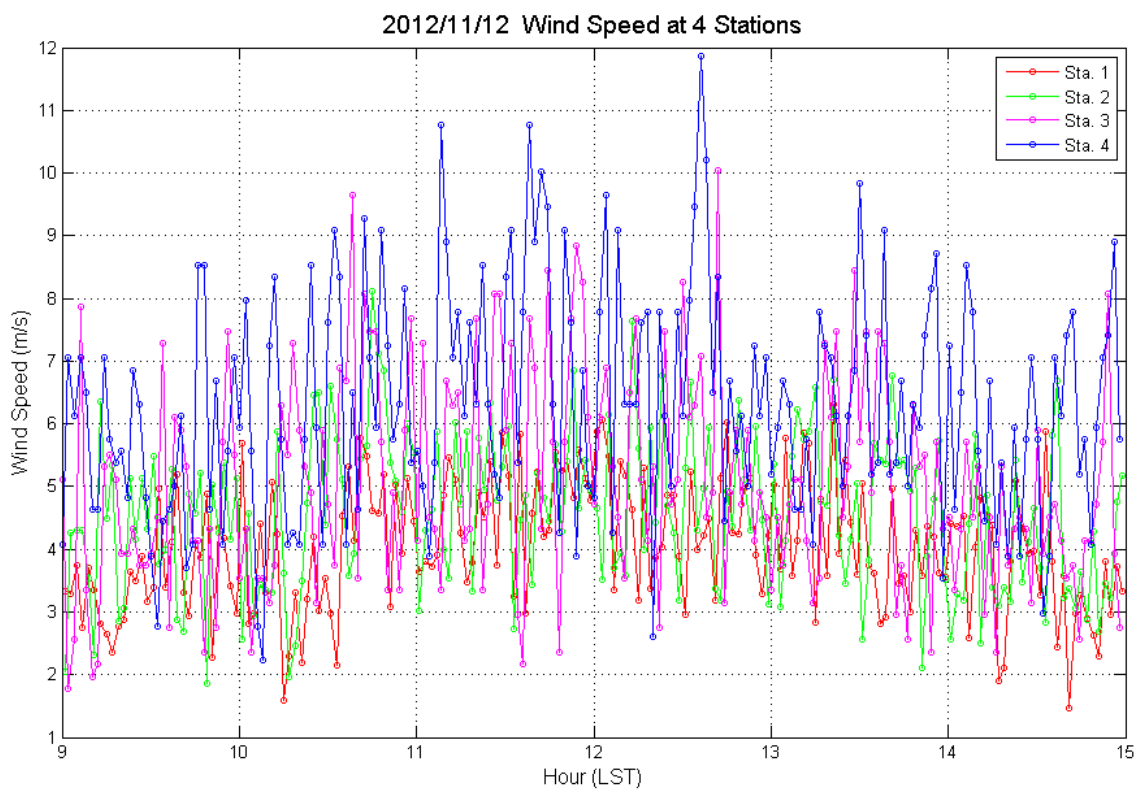


圖 5-22 臺北盆地西側氣象觀測網在 2012 年 11 月 12 日東北風增強時，四個觀測點的地面風速資料時間序列圖。紅色為 1 號觀測點，綠色為 2 號觀測點，洋紅色為 3 號觀測點，藍色為 4 號觀測點。

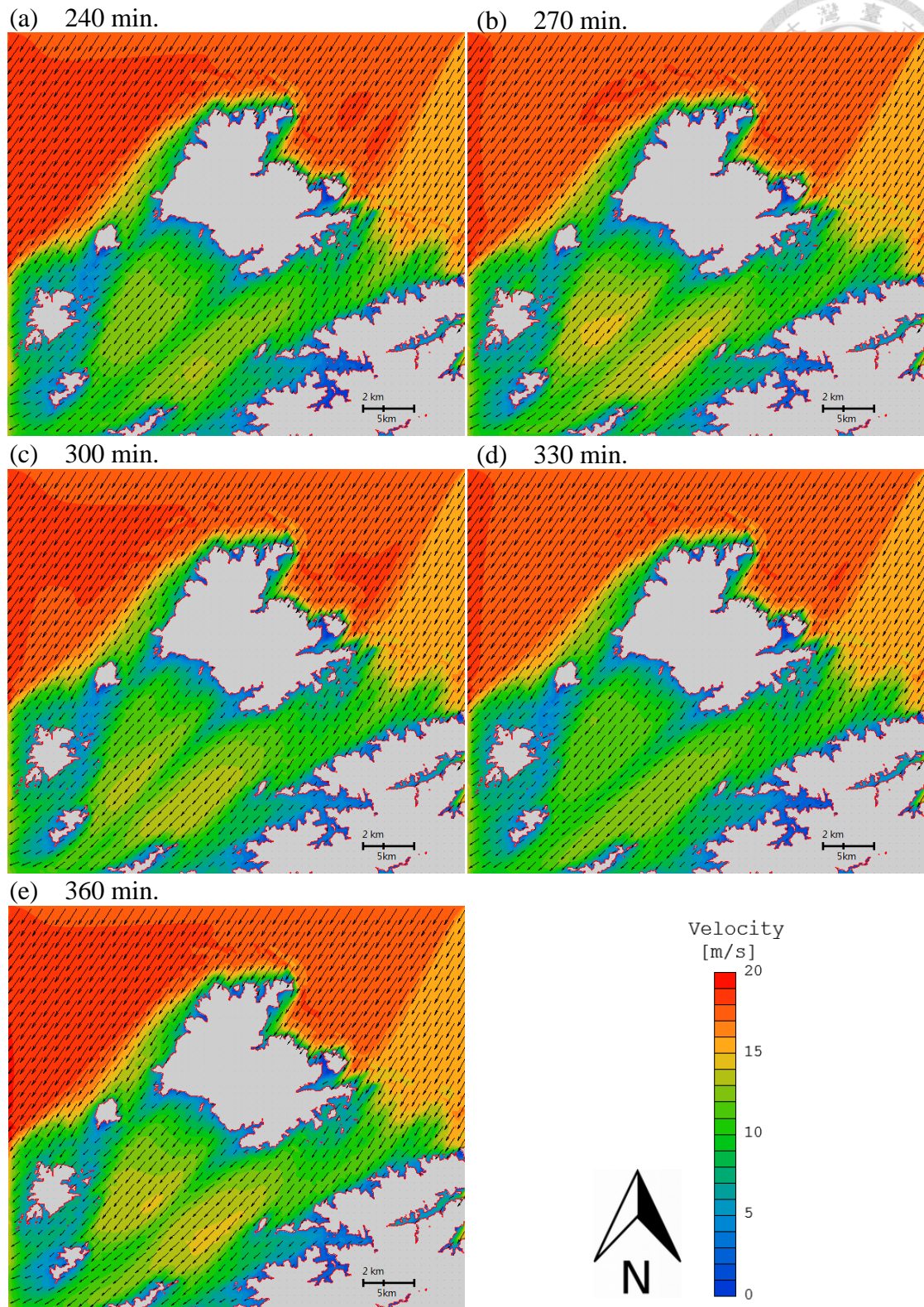


圖 5-23 臺北盆地 51 × 45 公里範圍，STREAM 模式加入熱力條件後的 250 公尺高度風場圖。模式模擬所經過的時間為 (a) 240 分鐘；(b) 270 分鐘；(c) 300 分鐘；(d) 330 分鐘；(e) 360 分鐘後的圖。