

國立中央大學

大氣物理研究所

碩士論文

賀伯颱風與地形間的交互作用

指導教授：陳台琦 博士

研究生：孫怡芬

中華民國八十九年六月

## 摘要

本篇研究是比較颱風在海上以及陸上結構的不同，以更進一步了解台灣地形在賀伯颱風消散期間所扮演的角色。本研究中，使用鄧（1999）的雷達資料處理系統（RASTA），於追隨地勢座標來計算三維風場並與以往常用的 CEDRIC 軟體得到的結果比較，顯示在追隨地勢座標下的雷達分析方法所得的結果較為合理可信，較能獲得低層風場的資訊。由分析多個連續時間的回波及風場特徵，我們發現到：

（一）於海上及陸上分析區域之颱風水平及垂直結構的特性：（a）兩帶內側的徑向外流與外側的徑向內流輻合，於雨帶內側有最強的上升運動，不過南邊分析區域會隨地形升高，低層入流區有變厚的趨勢。切線風由下往上遞減，符合颱風的結構。（b）能清楚的看到最大切線風速半徑，於海上分析區域內的眼牆結構較為直立，而陸上的眼牆則呈現較傾斜的結構；（c）經由水平風場的統計分析發現，不但低層氣流型式受地形的影響，高層結構亦有明顯的不同。

（二）地形對於颱風低層風場及對流分布的影響：（a）地形的摩擦效應使得風速減小；（b）地形的強迫抬升運動以及下降運動；（c）地形的阻擋效應造成合流與分流；（d）地形的強迫抬升以及下降運動比面上輻合、輻散所造成的垂直運動強，因此我們所看到的三維風場會貼著地面有上升、下降運動，因而回波會隨地形而重新配置。

# 目 錄

摘要.....	01
目錄.....	02
附圖說明.....	04
第一章 緒論.....	09
1.1 前言.....	09
1.2 個案介紹.....	09
(a) 賀伯颱風的生命史簡介.....	09
(b) 賀伯颱風之動態.....	10
1.3 論文回顧.....	10
1.4 研究動機.....	13
第二章 資料來源以及分析方法.....	14
2.1 資料來源.....	14
2.2 分析方法.....	15
2.3 風場垂直剖面的統計.....	16
2.4 北邊以及南邊分析區域內之地形.....	16
第三章 海上與陸上分析區域內之颱風結構特性分析.....	17
3.1 維持雨帶之三維風場結構.....	17
3.2 雨帶的入流、外流及風切變化.....	18
3.3 低回波區在陸上的變化.....	19
3.4 眼牆的結構分析.....	20
3.5 位於眼牆內側的小渦旋.....	21

3.6 不同地形分析的水平風場之統計結構特徵.....	22
第四章 地形對於颱風低層風場及對流分布的影響.....	25
4.1 地形的摩擦效應使得風速減小.....	25
4.2 地形的強迫抬升運動及下降運動.....	26
4.3 地形的阻擋效應造成合流與分流.....	26
4.4 地形的強迫爬山及下山運動與合流、分流效應之垂直速度的探 討.....	27
4.5 RASTA 及 CEDRIC 軟體所得的雷達資料之比較.....	27
第五章 結論與展望.....	29
5.1 結論.....	29
5.2 展望.....	31
附錄 A 系統簡介.....	32
附錄 B 雷達資料處理流程.....	34
附錄 C 雙都卜勒三維風場的合成.....	35
附錄 D 擾動壓力場的反求.....	39
參考文獻.....	41
附圖.....	43

## 附圖說明

圖 1.1: 1996年7月31日至8月1日賀伯颱風逐時路徑圖(摘自CWB)

圖 1.2: 五分山雷達的賀伯回波圖 (PPI), 上方框框為北邊分析區域, 下方框框為南邊分析區域依 (a) 外圍環流時期; (b) (c) 雨帶結構時期; (d) 低回波時期; (e) 眼牆結構時期。

圖 2.1: 地形分布圖, 分析區域內所標示的為  $20 \times 20\text{km}$  的九個小區塊; (a) 北邊分析區域及 (b) 南邊分析區域。

圖 3.1: 參考張 (2000) 的颱風中心訂位法, 並利用郭與周 (1997) 提出的賀伯颱風旋轉週期, 以垂直高度為  $3\text{km}$  的回波, 觀看長短軸的位置來訂出颱風中心移動路徑。

圖 3.2: 北邊分析區域 2000LST (a)  $z=1.5\text{km}$  的回波場及相對水平風場; (b)  $z=1.5\text{km}$  的相對水平風速分布圖; (c)  $z=5.25\text{km}$  的回波場及相對水平風場; (d)  $z=5.25\text{km}$  的  $h$  場。

圖 3.3: 南邊分析區域 2000LST (a)  $z=1.5\text{km}$  的回波場及相對水平風場; (b)  $z=5.25\text{km}$  的回波場及相對水平風場; (c)  $z=5.25\text{km}$  的垂直速度場; (d)  $z=5.25\text{km}$  的  $h$  場。

圖 3.4: 北邊分析區域 2000LST (a)  $z$  (卡氏座標的垂直高度)  $=1.5\text{km}$ ; (b)  $z=3\text{km}$ ; (c)  $z=5.25\text{km}$ ; (d)  $z=9\text{km}$  的擾動壓力場。

圖 3.5: 南邊分析區域 2000LST (a)  $z=1.5\text{km}$ ; (b)  $z=3\text{km}$ ; (c)  $z=5.25\text{km}$ ; (d)  $z=9\text{km}$  的擾動壓力場。

圖 3.6: 2000LST, (a) 北邊分析區域的 AB 圓弧切向剖面 (同圖 3.2.a 上的 AB 圓弧) 之回波、切向風場及  $h$  場; (b) 橫越 AB 圓弧的徑向風; (c) 南邊分析區域橫越 CD 圓弧 (同圖 3.3.a 上的 CD 圓弧) 的徑向風; (d) 北邊分析區域, AB 圓弧切向剖面之相對水平風速; (e) 南邊分析區域, CD 圓弧切向剖面之相

對水平風速場。

圖 3.7 : 2000LST , ( a ) 北邊分析區域 , N-N' 徑向剖面 ( 同圖 3.2.a 上的 N-N' ) ; ( b ) 南邊分析區域 , S-S' 徑向剖面 ( 同圖 3.3.a 上的 S-S' ) 的回波、三維風場及  $h$  場。 ( c ) 北邊分析區域 , 橫越 N-N' 剖面的切向風 ; ( d ) 南邊分析區域 , 橫越 S-S' 剖面的切向風。

圖 3.8 : 北邊分析區域 2100LST , ( a )  $z=1.5\text{km}$  的回波及相對水平風場 ; ( b )  $z=1.5\text{km}$  的相對水平風速分布圖 ; ( c )  $z=5.25\text{km}$  的  $h$  場。

圖 3.9 : 南邊分析區域 2100LST , ( a )  $z=1.5\text{km}$  的回波及相對水平風場 ; ( b )  $z=1.5\text{km}$  的相對水平風速分布圖。

圖 3.10 : 北邊分析區域 2100LST ( a )  $z=1.5\text{km}$  ; ( b )  $z=3\text{km}$  ; ( c )  $z=5.25\text{km}$  ; ( d )  $z=9\text{km}$  的擾動壓力場。

圖 3.11 : 南邊分析區域 2100LST ( a )  $z=1.5\text{km}$  ; ( b )  $z=3\text{km}$  ; ( c )  $z=5.25\text{km}$  ; ( d )  $z=9\text{km}$  的擾動壓力場。

圖 3.12 :  $z=3\text{km}$  的雷達回波圖 LT 表長軸端點附近之眼牆結構 , LL 表長軸一側的眼牆結構 ( a ) 2115LST ; ( b ) 2130LST ; ( c ) 2145LST ; ( d ) 分析區域內的地形圖。

圖 3.13 :  $z=3\text{km}$  的回波及相對水平風場圖 ( a ) 北邊分析區域 2115LST ; ( b ) 北邊分析區域 2130LST ; ( c ) 南邊分析區域 2115LST , ; ( d ) 南邊分析區域 2130LST ; ( e ) 北邊分析區域 2145LST ; ( f ) 南邊分析區域 2145LST。

圖 3.14 :  $z=1.5\text{km}$  的相對水平風速分布圖 ( a ) 北邊分析區域 2115LST ; ( b ) 北邊分析區域 2130LST ; ( c ) 南邊分析區域 2115LST ; ( d ) 南邊分析區域 2130LST ; ( e ) 北邊分析區域 2145LST ; ( f ) 南邊分析區域 2145LST。

圖 3.15：切過長軸端點附近之眼牆結構 (LT) 的徑向剖面，(a) 北邊分析區域 2130LST，LT1-LT1' 剖面 (同圖 3.13.b 上的 LT1-LT1')；(b) 南邊分析區域 2145LST，LT2-LT2' 剖面 (同圖 3.13.f 上的 LT2-LT2') 的回波、徑向風場以及  $h$  場；(c) 北邊分析區域 2130LST，橫越 LT1-LT1' 剖面的切線風；(d) 南邊分析區域 2145LST，橫越 LT2-LT2' 剖面的切線風。

圖 3.16：南邊分析區域，切過長軸一側眼牆結構 (LL) 的徑向剖面 (a) 2115LST，LL1-LL1' 剖面 (同圖 3.13.c 上的 LL1-LL1')；(b) 2130LST，LL2-LL2' 剖面 (同圖 3.13.d 上的 LL2-LL2')；(c) 2145LST，LL3-LL3' 剖面 (同圖 3.13.f 的 LL3-LL3') 的回波、徑向風場以及  $h$  場；(d) 2115LST，橫越 LL1-LL1' 剖面的切線風；(e) 2130LST，橫越 LL2-LL2' 剖面的切線風；(f) 2145LST，橫越 LL3-LL3' 剖面的切線風。

圖 3.17：(a) 2030LST， $z=2.25\text{km}$  的雷達回波圖，EA 表長軸內側的小渦旋；(b) 2145LST， $z=2.25\text{km}$  的雷達回波圖，EA 表長軸內側的小渦旋；(c) 橫越小渦旋的 EA-EA' 垂直剖面 (同圖 3.17.b 上的 EA-EA') 的回波、徑向風場以及  $h$  場。

圖 3.18：風場分布類型 (a) 北邊分析區域內的主要分布類型；(b) 南邊分析區域內的分布類型 Type<sup>2</sup>；(c) 南邊分析區域內之分布類型 Type II。

圖 3.19：北邊分析區域 2115LST 之水平風場垂直統計 (a) domain 1~3；(b) domain 4~6；(c) domain 7~9 (如圖 2.1.a 上的分區)。

圖 3.20：南邊分析區域 2115LST 之水平風場垂直統計 (a) domain 1~3；(b) domain 4~6；(c) domain 7~9 (如圖 2.1.b 上的分區)。

圖 3.21：南邊分析區域 2000LST 之水平風場垂直統計 (a) domain 1~3；(b) domain 4~6；(c) domain 7~9。

圖 3.22：宜蘭測站之水平風速與風向的時序變化 (正方形表風向，圓

形表水平風速);(a)  $\Delta z=3\text{km}$  的雷達資料;(b)  $\Delta z=2.25\text{km}$  的雷達資料;(c) 地面站資料。

圖 3.23: 台北測站之水平風速與風向的時序變化(正方形表風向,圓形表水平風速);(a)  $\Delta z=2.25\text{km}$  的雷達資料;(b)  $\Delta z=1.5\text{km}$  的雷達資料;(c) 地面站資料。

圖 3.24: 中央大學 ISS 測站之水平風速與風向的時序變化(正方形表風向,實線表水平風速);(a)  $\Delta z=2.25\text{km}$  的雷達資料;(b)  $\Delta z=1.5\text{km}$  的雷達資料;(c) 地面站資料。

圖 4.1:  $\Delta z=1.5\text{km}$  的水平風速圖(a)北邊分析區域 2000LST;(b)南邊分析區域 2000LST;(c)北邊分析區域 2100LST;(d)南邊分析區域 2100LST;(e)北邊分析區域 2115LST;(f)南邊分析區域 2115LST;(g)南邊分析區域 2115LST,  $z=3\text{km}$  擾動壓力場的分布。

圖 4.2: 2115LST, 地形強迫作用造成的垂直速度場  $W_t$ (a)  $\Delta z=1.5\text{km}$  的北邊分析區域;(b)  $\Delta z=1.5\text{km}$ , 南邊分析區域;(c)北邊分析區域內之 AB 圓弧切向剖面(同圖 3.13.a 上的 AB 圓弧剖面);(d)南邊分析區域 2115LST CD 圓弧的切向剖面(同圖 3.13.c 上的 CD 圓弧);(e)EF 圓弧之切向剖面(同圖 3.13.c 上的 EF 圓弧)。

圖 4.3: 南邊分析區域 2115LST, 回波圖(a)CD 圓弧的切向剖面;(b)EF 圓弧之切向剖面。

圖 4.4: 南邊分析區域(a)2115LST,  $\Delta z=1.5\text{km}$  的流線場;(b)2115LST,  $\Delta z=1.5\text{km}$  的輻散場;(c) 2115LST,  $\Delta z=2.25\text{km}$  的  $h$  場;(d) 2000LST,  $\Delta z=1.5\text{km}$  的流線場。

圖 4.5: 南邊分析區域, 2115LST(a) CD 圓弧切向剖面之  $h$  場;(b) CD 圓弧切向剖面之垂直速度場;(c) EF 圓弧切向剖面的  $h$



場 ;(d) EF 圓弧切向剖面之垂直速度場 ;(e) CD 圓弧切向剖面之三維風場及回波場 ;(f) EF 圓弧切向剖面的三維風場及回波場。

圖 4.6 : 2000LST (a) 北邊 2km 高度風矢場 ;(b) 南邊 2km 高度風矢場 ;(c) 北邊 2km 高度水平風速場 ;(d) 南邊 2km 高度水平風速場 ;(e) 南邊 4km 高度垂直速度場[此圖摘自陳(1999) pp.67-69]。

# 第一章 緒論

## 1.1 前言

對於台灣而言，颱風雖然經常伴隨著強風、豪雨、土石流以及海水倒灌 ..... 等重大災害的到來，但是颱風所挾帶的豐沛雨量卻是台灣重要的水源之一。1996 年賀伯颱風是近幾年來對台灣造成最大災害之颱風，根據地面雨量站累積 24 小時的降雨資料顯示，最大降雨中心發生在阿里山山區(約 1800mm/day ) 桃竹苗山區(約 1000mm/day ) 以及高屏山區 (約 800mm/day )，這意味著地形與颱風所帶來的降水分布有很大的相關性。經由長期統計平均的結果顯示，每年約有三至五個颱風會影響到台灣地區，因此颱風結構與台灣地形間的關係亦成為我們感興趣的重要課題。

## 1.2 個案介紹

### (a) Herb 颱風生命史簡介

賀伯 (Herb) 颱風為 1996 西北太平洋上第八個颱風，7 月 24 日 12Z 於北緯 19.9 度、東經 148.8 度，關島東北方約 800 公里的海面增強為輕度颱風，並且持續增強中，起初是往西移動，接著轉往西南西方向前進，7 月 28 日 18Z，賀伯颱風轉為向西北方向移動。於這段期間，賀伯颱風的強度曾發展至強烈颱風，最大風速可達 51m/s，中心最低氣壓為 925hPa，暴風半徑約為 300km，可看到相當明顯的颱風眼、眼牆結構以及螺旋雨帶。7 月 31 日 12Z，賀伯颱風位於宜蘭外海準備登陸台灣，橢圓狀的颱風眼清晰可見，本地時間晚上 9 點多賀伯颱風中心由宜蘭頭城附近登陸，此時中心氣壓為 944.7hPa，颱風的移動路徑由西北西轉為西南西通過台灣北部地區，再轉為西北，而橢圓的颱風眼已經縮小為圓形的颱風眼，且逐漸變得不清晰，8 月 1 日

凌晨 2 點，颱風中心仍停留在北台灣，中心氣壓為 960hPa，但是颱風眼已經模糊難辨，凌晨 4 點多由新竹附近出海，其中心氣壓以填塞至 968.6hPa，在台灣陸地上約停留 7 個小時，由氣象局所提供的賀伯颱風路徑圖可知（圖 1.1）。

### （b）賀伯颱風之動態

由五分山雷達的回波時序圖，我們把進入到北邊以及南邊分析區域內的颱風結構劃分為四個時期：（1）1400LST 至 1530LST 為颱風的外圍環流（圖 1.2.a）：北邊分析區域內是弱回波區，而南邊分析區域內則於地形上呈現東北 - 西南走向零散的強回波；（2）1530LST 至 2030LST 為雨帶結構（圖 1.2.b、c）：這個時期已經可以看到賀伯颱風的橢圓眼牆，有不只一條南北走向之雨帶移入北邊及南邊分析區域，並與地形上東北 - 西南走向零散的強回波相結合，形成狀似襪子的強回波區塊，隨著時間，雨帶逐漸移出分析區域且消散；（3）2030LST 至 2100LST 為主要雨帶和颱風眼牆間的低回波區（圖 1.2.d）：根據曾（1998）等的論文，於 2030LST 與 2045LST 時，主要雨帶已經消散，此兩個時段落於分析區域中的部分是眼牆與主要雨帶間的弱回波區；（4）2100LST 至 2145LST 為眼牆結構（圖 1.2.e） [ 參考曾（1998）等所提出的雷達分析區域之三個時期 ]。

## 1.3 論文回顧

Jorgensen（1984a、b）藉由分析機載雷達的觀測資料，了解成熟颱風的三維結構。作者指出成熟颱風的降水形態包括，（1）於颱風眼牆的對流降水，（2）眼牆外的層狀降水區以及（3）包含層狀降水和對流降水的雨帶；眼牆區有最大的切線風速，眼牆內緣之低層徑向外流與外部的徑向內流輻合，造成眼牆區有強烈的上升運動，再加上水汽的匯合及抬升凝結作用，於眼牆處會有強降水。另外，作者還發現

到眼牆內 10dBz 的回波等值線隨著高度往外傾斜；當眼的半徑越小時，眼的結構越直立。

Willoughby et al. (1984) 就螺旋雨帶相對於颱風運動而言，分為準靜止雨帶 (Stationary Band Complex; SBC)、內移雨帶 (inward propagating band) 以及外移雨帶 (outward propagating band) 三種基本類型。其中準靜止雨帶 (SBC) 包括了主要雨帶 (principal band)、連接雨帶 (connecting band) 和次要雨帶 (secondary band)。

Bluestein 與 Hazen (1989) 藉由分析登陸後的熱帶氣旋 Alicia 颱風之都卜勒雷達資料，發現颱風結構主要可分為中心地區 (central area)、主要雨帶 (principal rainband) 以及外圍的螺旋雨帶 (outer band) 三種降水型態。中心區塊與主要雨帶為層狀降水，外圍螺旋雨帶則是呈現胞狀降水。主要雨帶有最強的徑向風輻合，伴隨上升運動，挾帶強烈的降雨。

Barnes et al. (1991) 進一步分析 Raymond 颱風，以建構出雨帶中對流胞之三維氣流場的配置情形。他們發現雨帶低層附近的上升運動多發生在回波梯度最大處，也就是對流胞的前方；雨帶上層的明顯垂直運動則發生在最強回波區。向上的垂直運動主要受熱力及風切的影響，但隨個案的不同，兩者重要性也不同。他們還提出由對流運動所產生的擾動壓力場在低層形成一對高低壓的配置，不僅使得低層呈現出流的情況，還加速了切線風分量。藉由雨帶內對流胞的研究，讓我們瞭解到對流胞對於颱風質量場具有輸送及調整的角色，對於風場亦有增強氣旋式環流的作用。

Black and Franklin (1999) 利用 GPS dropwindsonde 所得的水平風之垂直剖線，統計出外圍渦旋以及眼牆於低層都有一強風速帶，此強風速帶約位於垂直高度 1 公里處，於高度 1 公里以下的風速隨著高度降低而減弱。

台灣本島四面環海，雪山山脈、中央山脈、玉山山脈、阿里山山脈、海岸山脈等五大山脈佔據全島面積的三分之二以上，地勢非常的陡峭。由於中央山脈的水平尺度與西太平洋的颱風一般尺度相當，因此地形的動力作用將使得降水系統重新配置，所以侵台颱風與地形間的交互作用更顯得重要。

李與蔡（1995）利用都卜勒觀測資料分析侵台颱風伴隨雨帶的特徵，研究雨帶與地形的關係，並依颱風雨帶的結構和運動特徵的不同將之歸納為六類，並無發現 Willoughby et al.（1984）所定義的準靜止雨帶特徵。李與蔡更進一步提出颱風主要雨帶的生成，地形及氣流垂直於山脈的分量亦扮演重要角色；當地形或風向改變時，主要雨帶的強度即發生變化。

Brand and Blelloch（1974）發現登陸前 12 小時，颱風便開始減弱，登陸時之地面最大風速降低百分之四十以上。Powell et al.（1991）也指出地表摩擦效應將使得風速減低百分之五十，且壓力便開始填塞，颱風環流則減弱。呂（1997）亦分析了楊希與葛拉絲兩個颱風個案，發現地形對於風場的破壞可以使陸地側風速減弱百分之五十以上，並且颱風在陸地上停滯越久越不利於颱風強度的維持。

王（1994）曾指出山脈對於颱風渦旋回應的兩種最重要特徵為渠流（chanelling）及阻擋（blocking）效應，且兩者彼此關聯，其結果將產生風場重新分配。王等（1998）利用颱風旋流進入角與上游夫如數  $F_r$ ，定義出四種侵台颱風流型之特徵，即沿山流型（parallel flow regime）、阻擋流型（blocked）、非阻擋流型（unblocked）以及組合流型（combined）。由於颱風降雨與流場運動的特徵息息相關，因此此種分類對於侵台颱風的降雨預報提供了相當重要的訊息。

謝等（1997）對於賀伯颱風侵台期間豪雨原因進行分析，發現除了颱風本身環流雨帶及其蘊藏之強烈中小尺度降水系統過境影響

外，加上氣流輻合及地形抬升增強作用，是為此次持續性豪雨的主因。鄧等（1999）利用五分山及中正雷達資料，探討賀伯颱風接近北台灣時，颱風雨帶受到地形影響，其分析結果顯示，地形對於地面降水有重置（redistribution）的現象。

李與張（1998）針對 1989-1996 年侵台颱風的降雨特性，發現從東部海面進襲台灣的颱風，在台灣北部山區、宜蘭、花蓮與台東山區及中南部山區造成明顯的降水，尤其是海拔為 400-500 公尺的山坡地

#### 1.4 研究動機

本篇研究是為了比較颱風在海上以及陸上結構的不同，以期許能更進一步了解颱風與台灣地形間的交互作用以及颱風在登陸前、後之動力結構的不同，因此本篇研究將在追隨地勢座標上處理北邊和南邊區域的雷達資料，希望能獲得較正確的低層風場以及垂直運動，以探討三維風場及對流在複雜地形上的變化。

## 第二章 資料來源以及分析方法

### 2.1 資料來源

本研究中所使用的資料如下：

- 中正機場都卜勒雷達 (CAA) 的觀測資料：

中正機場雷達位於北緯 25.0778 度、東經 121.2094 度，觀測半徑為 120 公里。在賀伯颱風侵台期間，每十五分鐘有一全體掃描，其有 0.5°、1°、1.5°、2°、3°、4°、5°、6°、7°、8°、9°、10°、11°、12°、13°、14°、15°、16.5°、18°、19.5°等 20 種掃描仰角。

本文選用的分析時間為：1996 年 7 月 31 日 1401LST、1416LST、1431LST、1446LST、1501LST、1601LST、1701LST、1716LST、1838LST、1846LST、1901LST、2001LST、2101LST、2116LST、2131LST、2146LST，共有 16 組分析時間，而每一個時間均有一組徑向風場及回波場資料。

- 五分山都卜勒雷達 (RCWF) 的觀測資料：

五分山雷達位於北緯 25.0422 度、東經 121.4622 度，高度為 0.766 公里，觀測半徑為 240 公里。其對於降水系統可分為 VCP11 (計有 0.5°、1.45°、2.4°、3.35°、4.3°、5.25°、6.2°、7.5°、8.7°、10°、12°、14°、16.7°、19.5°等 14 種掃描仰角) 以及 VCP21 (計有 0.5°、1.45°、2.4°、3.35°、4.3°、6°、9.9°、14.6°、19.5°等 9 種掃描仰角) 兩種掃描策略。本次賀伯颱風的觀測多採用 VCP21 策略，大約六分鐘有一全體掃描資料。

為配合中正雷達之觀測時間，本文選用的分析時間為：1996 年 7 月 31 日 0602GMT、0614GMT、0632GMT、0644GMT、0701GMT、0801GMT、0903GMT、0915GMT、1039GMT、1045GMT、1102GMT、1203GMT、1303GMT、1315GMT、1332GMT、1344GMT，共有 16

組分析時間，而每一個時間均有一組徑向風場及回波場資料。

- ISS (精密改良型整合探空系統) 資料：由國立中央大學 ISS 測站所提供的風場資料。
- 台灣地區地面測站資料：由中央氣象局所提供的測站資料。

## 2.2 分析方法

本篇的雷達處理方法主要是利用鄧 (1999) 所發展的臺灣地區雷達處理軟體 (Radar Analysis System for Taiwan Area, 簡稱為 RASTA), 此系統分為兩大部分, 第一部份為雷達掃描座標 (球面座標) 下的都卜勒雷達處理以及顯示系統, 第二部份為追隨地勢座標 (或是卡氏座標) 下的都卜勒雷達處理以及顯示系統。我先將五分山雷達全體掃描資料放到 RASTA 第一部份, 進行風場偵錯改正後, 以中正雷達站為原點位置, 利用此系統內插至追隨地勢座標上所選定的分析區域中, 北邊分析區域為  $x=0 \sim 60 \text{ km}$ ,  $y=5 \sim 65 \text{ km}$ ,  $z=0 \sim 15 \text{ km}$

( $h = \frac{Z_t(Z - Z_g)}{Z_t - Z_g}$ ,  $h$ : 追隨地勢座標上的高度,  $Z_t$ : 頂層高度,  $Z_g$ : 地表高度,  $Z$ : 卡氏座標上的垂直高度), ( $\Delta x = \Delta y = 1 \text{ km}$ ,  $\Delta h = 0.75 \text{ km}$ ), 南邊分析區域為  $x=0 \sim 60 \text{ km}$ ,  $y=-65 \sim -5 \text{ km}$ ,  $z=0 \sim 15 \text{ km}$ , ( $\Delta x = \Delta y = 1 \text{ km}$ ,  $\Delta h = 0.75 \text{ km}$ )。接著對於中正雷達亦做相同的處理方式, 分別對於此兩組雷達資料中的回波強度以及徑向風場作補洞以及短波雜訊濾除的動作, 而後將補洞及平滑過的兩雷達徑向風場、五分山的雷達回波場及網格點高度放入 RASTA 第二部分中之雙都卜勒風場合成中得到分析區域內之三維風場。

其他對於 RASTA 系統的簡介, 可參見附錄 A; 而雷達資料處理流程表, 可參見附錄 B; 關於在追隨地勢座標下雙都卜勒合成風場的計算方法、垂直速度的求取以及三維風場的變分調節部分, 參照 Teng et al. (2000), 如附錄 C。



由於雙都卜勒雷達並無法直接量測到溫度及擾動壓力場，故需藉由雷達資料所得的三維風場，並配合適當的物理條件，反求出熱動力場的變數。本文中，主要是依據 Gal-Chen (1978) 的方法來改寫運動方程式，以求得所需的變數，其反演方法見附錄 D。

於本文中，除了擾動壓力場為卡氏座標外，其餘如：回波場、水平風場、平均風速場、輻合輻散場、 $h$ （於面上的輻合輻散場所得的垂直速度場）垂直速度場（ $w$  場為 $h$  場再加上地形提供的垂直速度）徑向剖面以及切向剖面……等，都是位於追隨地勢座標下所得到的分析場。

### 2.3 風場垂直剖面的統計

以中正雷達為原點位置，所選取的北邊分析區域為  $x=0 \sim 60$  km,  $y=5 \sim 65$  km,  $z=0 \sim 15$  km, 而南邊分析區域為  $x=0 \sim 60$  km,  $y=-5 \sim -65$  km,  $z=0 \sim 15$  km, ( $\Delta x = \Delta y = 1\text{km}$ ,  $\Delta h = 0.75\text{km}$ ) 將此分析區域每 20 公里劃分成一個小區域，共可分為九個小區塊(圖 2.1a b), 在小區塊內以每  $2\text{km} \times 2\text{km}$  為一點，並將水平風場分為風速以及風向，因而得到合成風場於追隨地勢座標下之垂直剖線。

### 2.4 北邊以及南邊分析區域內之地形

依據北邊分析區域內的地形分布(圖 2.1.a), 可看到較明顯的地形為座落在此區域的南方，高度為 1 公里以下的大屯山區；而南邊分析區域內的地型分布(圖 2.1.b), 主要由高度 1 公里以上之東北 - 西南走向的雪山山脈，以及中央山脈北段所構成，而兩山脈間的平坦地形即為海拔低於 100 公尺的蘭陽平原。而供應北部用水之重要水源：翡翠水庫以及石門水庫亦包含在雷達分析區域內。

### 第三章 海上與陸上分析區域內之颱風結構特性分析

為了想要進一步了解整個颱風的結構，第三章颱風水平及垂直結構特性之分析中，我所使用的水平風場為相對於颱風系統之風場 ( $\vec{V}_{rel} = \vec{V} - \vec{V}_s$ ， $\vec{V}_{rel}$ ：相對於颱風系統的風場； $\vec{V}$ ：total wind； $\vec{V}_s$ ：颱風移速)，因此如何利用高解析度的雷達資料加以定出颱風中心的位置更顯得重要。而本篇論文中的颱風中心定位方法主要是參考張 (2000) 等的論文之中心定位方法以及依據郭與周 (1997) 理論估計賀伯颱風眼為逆向旋轉週期 140 分鐘，橢圓眼之長軸約 30 公里，短軸約 20 公里，且長軸兩端常有深對流的特性來訂定颱風中心。利用垂直高度為 3 公里的回波場，觀看長短軸的強弱回波位置、颱風橢圓眼的轉動速率來訂出颱風中心位置；由此所訂出的颱風中心之移動路徑 (圖 3.1) 與颱風路徑圖 (圖 1.1) 很相近。

#### 3.1 維持雨帶之風場三維結構

雨帶是颱風環流中，具有帶狀強回波的範圍；由於 2000LST 至 2030LST 這段時間，主要雨帶正好進入到我們的分析區域內，因此本研究將對其特性做比較與探討。

由 2000LST，為 1.5km 的回波圖 (圖 3.2.a) 以及水平風速圖 (圖 3.2.b)，可看到北邊海上分析區域內的主要雨帶結構，且強回波區伴隨著較強的水平風速，風向為東北風。由 為 5.25km 的回波場 (圖 3.2.c) 和  $h$  場 (圖 3.2.d)，則可看到主要雨帶內側具有帶狀分布之較強烈的上升運動， $h$  ( $h = \frac{dh}{dt}$ ，表 面上輻合、輻散所造成的垂直運動) 約為 2-4m/s。南邊陸地上的分析區域內 為 1.5km 的回波圖 (圖 3.3.a)，我們可以看到主要雨帶之降水回波沿著地形變寬，結構

較為鬆散，位於蘭陽平原處則可看到一個回波小於 20dBz 的區塊，而分析區域內從北到南的風向，是由北北東轉北風，再轉變成北北西風以及西北風，若結合北邊分析區域的風場，能看到渦旋式的颱風結構環流。為 5.25km 的回波圖（圖 3.3.b），我們可以看到南邊分析區域內呈帶狀分布的強回波。由  $w$  場（圖 3.3.c） $(w_{air} = \frac{Z_t - Z_g}{Z_t}(\mathbf{h} + w_t))$ ， $w$ ：垂直速度場， $w_t$ ：地形強迫的抬升以及下降運動， $Z_t$ ：頂層高度， $Z_g$ ：地勢高度）可以看到強烈的上升運動與 30dBz 以上的回波位置相吻合； $h$  場（圖 3.3.d），亦可看到微弱上升運動。不論海上或是陸上的分析區域，從底層到高層的擾動壓力場分布（圖 3.4、圖 3.5），可看到颱風整層結構為近颱風中心處的擾動壓力低，而離颱風中心較遠處的擾動壓力相對來說比較高，符合颱風的結構。

### 3.2 雨帶的入流、外流及風切變化

為了更了解雨帶在垂直剖面上的特性，我們以颱風座標沿著切線方向的圓弧做垂直剖面，以及徑向方向的垂直剖面。

在北邊分析區域內，沿切線方向上的圓弧剖面（如圖 3.2.a 上的 AB 圓弧）之切線風非常均勻（圖 3.6.a），且  $h$  很小；而橫越圓弧上的徑向風（圖 3.6.b），可清楚看到低層有入流，高層有外流的現象；南邊分析區域內，沿切線方向的圓弧剖面（如圖 3.3.a 上的 CD 圓弧）上的徑向風（圖 3.6.c），也可以看到相同的情況，但是南邊分析區域會隨地形升高入流區有變厚的趨勢。由海上的水平風速沿 AB 圓弧之剖面（圖 3.6.d）可看到低層風速大，隨高度增加風速逐漸遞減，風速分布呈現成層狀；而陸上的水平風速沿 CD 圓弧之剖面（圖 3.6.e）最底層的風速減弱，高度為 2~3km 處的風速有最大值，垂直高度 2~3km 以上風速隨高度增加而遞減，而且水平上分布情況則是風速有

向南邊傾斜的現象。

由北邊分析區域內徑向方向的剖面(如圖 3.2.a 上的 N-N' 剖面), 由回波、風場及h場(圖 3.7.a), 我們可以在水平距離約 30km 處附近看到主要雨帶有往外傾斜的現象; 相對於颱風中心而言, 於此剖面上的最底層為徑向入流, 而雨帶內側的徑向外流與外側的徑向內流輻合, 雨帶內側有最強的上升運動。陸地上的分析區域, 沿著地勢較低的徑向方向剖面(如圖 3.3.a 上的 S-S' 剖面), 於水平距離約 20-40km 的回波場(圖 3.7.b) 能發現回波沿著地形變寬, 徑向風和北邊區域一致。海上橫越 N-N' 剖面的切線風(圖 3.7.c), 所看到的最底層切線風速大, 高層切線風速較小的現象, 符合颱風的結構, 而陸上橫越 S-S' 剖面的切線風(圖 3.7.d), 水平距離為 0-40km 處的最底層風速小, 隨高度增加到 3 公里, 風速逐漸增強, 高度為 3 公里以上風速則開始減弱。

### 3.3 低回波區在陸上的變化

2100LST, 由  $r = 1.5\text{km}$  的回波圖(圖 3.8.a), 北邊分析區域為小於 35dBz 的回波, 均勻分布的層狀區, 而整層的水平風速值非常一致(圖 3.8.b), 並沒有呈現帶狀分布,  $r = 5.25\text{km}$  的h場很微弱(圖 3.8.c)。南邊分析區域內的回波場有眼牆結構的分布(圖 3.9.a), 颱風眼區則位於雪山山脈東北方, 由  $r = 1.5\text{km}$  的水平風速(圖 3.9.b), 得知風速大小較北邊分析區域內的風速略小(圖 3.8.b), 因而我們可推測颱風本身的結構已經受到地形破壞; 風速由北邊分析區域向南邊分析減小時, 並依據梯度風平衡 ( $fu + \frac{uv}{r} = -\frac{1}{rr} \frac{\partial p}{\partial q}$ ,  $-fv - \frac{v^2}{r} = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r}$ , u: radial wind, v: tangential wind, p: pressure, r: radial distance, q: 方位角), 可看到北邊擾動壓力場的梯度較南邊來的大(圖 3.10、

圖 3.11 )。

### 3.4 眼牆的結構分析

眼牆區為颱風最強降水的區域之一，也是水平風速最大的地方。在本研究中的最後三個時間，眼牆的一部份已經進入到我們的分析區域中，因此我將追蹤長軸左側的眼牆結構 (LL) 及長軸端點附近之眼牆結構 (LT) 討論分析。

由 2115LST，垂直高度為 3km 的雷達回波圖 (圖 3.12.a)，並對找此分析區域內的地形 (圖 3.12.d)，颱風眼位於南邊分析區域外的東方，橢圓眼的長軸正對準北方，LT 位於海上區域外之東方 15km 處，LL 則是位於陸上區域內之雪山山脈以東的位置；2130LST 時 (圖 3.12.b)，颱風眼逐漸往西移動，長軸指向北北西的方向，LT 則是位於海上區域內之大屯山附近，LL 則位於雪山山脈上和雪山山脈走向呈垂直的位置上。2145LST (圖 3.12.c)，颱風眼已經有一半進入到分析區域內，長軸為西北 - 東南走向，LT 則位於雪山山脈的西北方，而 LL 位於蘭陽平原上。因此從 2115LST、2130LST 以及 2145LST， $\Delta t = 1.5\text{km}$  的北邊和南邊分析區域之回波及水平風場 (圖 3.13.a、b、c、d、e、f)，北邊分析區域內隨時間的風向變化本來是以呈現均勻的圓弧形運動，位於大屯山附近氣流會轉向呈平行橢圓眼長軸的運動方向，2145LST 已經明顯看到氣流繞著橢圓眼之長軸端點轉彎的現象，南邊分析區域隨時間之風向主要是平行長軸一側的氣流，但是 2145LST，雪山山脈東北方的氣流則具有非常明顯的曲率。結合北邊及南邊分析區域內  $\Delta t = 1.5\text{km}$  的水平風速圖 (3.14.a b c d e f)，南邊以及北邊的最強風速從南北走向轉變為東西走向，因此可以知道強風速的分布型態與橢圓眼的走向有關。於 2115LST 能明顯的看到從海上到陸上的最大切線風速呈現連續的情況，但是於 2130LST 以

及 2145LST，我們發現當眼牆強風速帶遇到地形阻擋時，風速有減弱的情況。

比較 2135LST，切過海上區域內以及 2148LST 時，陸上區域內的 LT 之徑向垂直剖面（如圖 3.13.b 上的 LT1-LT1' 剖面，圖 3.15.a；3.13.f 上的 LT2-LT2' 剖面，圖 3.15.b），LT1-LT1' 剖面上，水平距離為 70km 的眼牆回波以及  $h$  場比 LT2-LT2' 剖面，水平距離 28km 處的強烈。若再比較水平風速圖（圖 3.15.c、d），沿著徑向垂直剖面的切線風可以發現到 2135LST 風速比 2148LST 大，且結構較為直立。

比較 2118LST、2135LST 以及 2148LST 時，陸上區域內的 LL 之徑向垂直剖面（如圖 3.13.c 上的 LL1-LL1' 剖面，圖 3.16.a；3.13.d 上的 LL2-LL2' 剖面，圖 3.16.b；如圖 3.13.f 上的 LL3-LL3' 剖面。圖 3.16.c），由 LL1-LL1' 剖面水平距離 50km 處，LL2-LL2' 剖面水平距離 30km 處，我們還可以看到眼牆的強回波結構，但是從 LL3-LL3' 剖面水平距離 20km 處，可看到回波減弱很多， $h$  場也有變弱的趨勢，若沿著徑向剖面上的切線風（圖 3.16.d、e、f）則可看到風速由 40 m/s 減弱至 15 m/s，且最大風速軸都呈現傾斜的結構。

### 3.5 位於眼牆內側的小渦旋

由中央氣象局所提供的資料以及觀看垂直高度為 2.25km 的 2030LST、2145LST 之回波圖（圖 3.17.a、b），我們發現到位於橢圓眼牆內側有一尺度小於 10km 的小渦旋 EA。通過小渦旋的渦旋中心（ $x=58\text{km}, y=-16\text{km}$ ），切過陸上區域內的 EA 之垂直剖面（如圖 3.17.b 上的 EA-EA' 剖面，圖 3.17.c），位於 EA-EA' 剖面上，水平距離為 40km 處，我們發現到勾狀回波發展的高度只有 5km，而位於勾狀回波左側則呈現 V 字形的弱回波區，而且近渦旋中心處可以看到有入流的情況。

### 3.6 不同地形分區的水平風場統計結構特徵

自下午 2 點至颱風登陸其間的風場垂直剖面之統計結果，可以看到北邊分析區域內的九個小區塊主要的分布類型為（圖 3.18.a）： $z=1.5\text{km}$  處的最底層有最大風速，低層垂直風切並不大，隨高度遞增至  $z=5\text{km}$  風速隨之遞減， $z=5\text{km}$  以上的風速近乎相同。根據 2115LST 之風場垂直分布（圖 3.19.a、b、c），可得知颱風尚未受到地形影響之風場結構只有一種。

南邊分析區域內九個小區塊的風場分布，隨所處的地形位置而有明顯不同的分布類型，因此我將這九個區塊之風場歸納成兩種分布類型（Type 1, Type 2）。Type 1（圖 3.18.b）：低層（ETA=1~4km）風速隨高度增加而逐漸增強，中層（ETA=4~8km）有一強風速帶，高層（ETA=8~10km）風速會隨高度呈現快速遞減的趨勢；Type 2（圖 3.18.c）：低層有風速的極值，但是中、高層的風速隨高度增加為等值遞減。

南邊分析區域內的 Domain 1 ( $x=0\sim 20\text{km}$ ,  $y=-5\sim -25\text{km}$ , 圖 3.20.a 圖 3.21.a) 是屬於較平坦且沒有地形的區塊，整層風向分布集中，所呈現的風速垂直剖線與 Type 1 相吻合，也就是  $z=6\sim 7\text{km}$  處有強風帶，不過當中層噴流開始加強時，低層風則開始減弱，反觀，當中層噴流減弱時，低層風則有加強的趨勢。Domain 2 ( $x=20\sim 40\text{km}$ ,  $y=-5\sim -25\text{km}$ ) 裏則有一些較低的地形存在，其內總共包含 Type 1、Type 2 兩種類型。Domain 3 ( $x=40\sim 60\text{km}$ ,  $y=-5\sim -25\text{km}$ ) 的地形也是較平坦，但是高度為 0.5~1km 地形所佔的比例較 Domain 2 高，於 Domain 3 中所呈現的低層風向分布不太集中；風速垂直剖面呈現的類型為 Type 1，低層風速為所有區塊中最大的。Domain 4 ( $x=0\sim 20\text{km}$ ,  $y=-25\sim -45\text{km}$ , 圖 3.20.b 圖 3.21.b) 存有明顯的地形，

風速分布類型為不是很明顯的 Type 。 Domain 5 (  $x=20\sim 40\text{km}$  ,  $y=-25\sim -45\text{km}$  ) , 地勢較為陡峭且梯度也較大 , 因此 Domain 5 的低層強風帶之垂直高度較 Domain 3 高 , 此區塊內主要的分布類型為 Type , 低層風向分布範圍比較廣。 Domain 6 (  $x=40\sim 60\text{km}$  ,  $y=-25\sim -45\text{km}$  ) 地形特性與 Domain 3 相似 , 低層風向為集中分布 , 而風速的分布為 Type , 但是低層風速的極值較不明顯。 Domain 7 (  $x=0\sim 20\text{km}$  ,  $y=-45\sim -65\text{km}$  , 圖 3.20.c、圖 3.21.c ) 內的地勢皆超過 1km , 風向分布很散亂 , 風速分布類型為 Type , 低層風速為所有區塊中最小的。 Domain 8 (  $x=20\sim 40\text{km}$  ,  $y=-45\sim -65\text{km}$  ) 的地形為山谷凹槽 , 分布類型較接近 Type , 低層風向分布較為散亂。 Domain 9 (  $x=40\sim 60\text{km}$  ,  $y=-45\sim -65\text{km}$  ) 與 Domain 3 的地形很相似 , 不過地勢較 Domain 3 來的高 , 此區塊內的風向分布較集中 , 風速分布的類型較接近 Type , 但是並不是很明顯。

由海上及陸上的水平風場統計分析顯示 , 海上分析區域內的最底層為最強風速帶 ,  $z=5\text{km}$  時 , 則存在有風速最小值 ,  $z=5\text{km}$  以上的風速近乎相同 , 而陸上分析區域內的最底層風速有減弱 , 其低層強風速帶的 高度與地勢的高度有關 , 當地勢較陡峭時( 如 Domain 5 ) , 其低層強風速帶的 高度也較高 , 反之 , 當地形較為平坦時 ( 如 Domain 2 & 3 ) , 其強風速帶的 高度較低。

由於五分山雷達位於七百多公尺的高處 , 對於低層的情形無法觀測到 , 我將嘗試選取位於南邊分析區域內的宜蘭測站以及距離陸上分析區域較近的台北測站以及中央大學的 ISS 測站 , 把地面風場以及雷達所能求取到的風場作比對 ( 圖 3.22、圖 3.23、圖 3.24 ) , 我們發現到地面風速約降低為低層強風速的百分之六十。

小結 :



由以上的分析剖面圖，可以得到颱風大體上的水平以及垂直結構，颱風結構主要可畫分為眼牆、雨帶以及弱回波區；從切線方向來看，可發現到底層的切線風速大，而高層切線風速小，位於徑向方向的風速，則是近颱風中心處的風速較大，而且低層有徑向入流，上層有徑向外流。雨帶內側的徑向外流與外側的徑向內流輻合，於雨帶內側有最強上升運動，不過一般來說， $h$ 場都是比較微弱的， $h$ 的大小約為 0-2 m/s。從擾動壓力場來看，海上以及陸上區域都是近颱風中心的擾動氣壓低，離中心較遠則擾動氣壓高。若結合北邊以及南邊分析區域的水平風場，我們可以看到颱風氣旋式的環流。北邊與南邊分析區域的差別主要是在於北邊區域的海面比較平坦，而南邊區域的地形主要是呈現東北 - 西南走向，地形高低起伏，最高的地勢高度可達 2 公里以上；若由近低層的回波場來看這兩個分析區域，於北邊分析區域回波結構較為完整，而南邊分析區域內的回波較為零散，且有沿著地形變寬以及往外傾斜的趨勢，低層回波比較破碎分散，而高層的回波則稍微具有組織。依據梯度風平衡，當風速由北邊分析區域向南邊分析區域減小時，於擾動氣壓場，我們可發現北邊分析區域內的擾動氣壓場之梯度大，而南邊分析區域內的擾動氣壓之梯度小，因此可得知地形對於颱風結構的影響是很大。

## 第四章 地形對於颱風低層風場對流分布的影響

本章主要是探討地形作用，所有的風場均為 $\bar{v}$  (total wind)，即相對於地面的全風速。

### 4.1 地形的摩擦效應使得風速減小

比較雨帶時期 2000LST， $z = 1.5\text{km}$  的海上以及陸上分析區域的水平風速圖（圖 4.1.a、b），我們可以看到海上的水平風速全都大於 40 m/s，而南邊分析區域的風速減弱，並且依地形分為兩側，右上角呈現南北走向的強風帶，而左上角則呈現東西向分布的強風帶，位於雪山山脈西方（ $x=10\text{km}$ ），由北到南可以看到風速由 47 m/s 減小至 30 m/s，且在雪山山脈上存在有低風速軸。為了想要更進一步了解陸上風速減弱的現象，我們將探討低回波區時期 2100LST，以及眼牆結構時期 2115LST， $z = 1.5\text{km}$  的海上以及陸上分析區域的水平風速圖（圖 4.1.c、d、e、f），我們發現北邊以及南邊的水平風速分布與 2000LST 有相似的情形。因此根據以上分析，我們可以得知陸地上的地形摩擦及地形阻擋效應，使得風速有減弱的現象。依據 2115LST 追隨地勢座標下的陸上風場之垂直剖面（圖 3.20.a、b、c），我們知道 Domain 1 內的風向分布很集中，低層風向主要為北北東， $z = 1.5\text{km}$  的風速為 30 m/s；Domain 4 的風速減弱為 20 m/s；Domain 7 的風速與 Domain 4 差不多，符合前所述的地形摩擦使風速變小。比較陸上分析區域 2005LST 以及 2115LST 的擾動壓力場（圖 3.5.b、圖 4.1.g），可以看到當風速減弱時，擾動氣壓的梯度較小，因此於雪山山脈上可以看到一相對高壓，這表示受到地形的影響比較大；反之，當風速較大時，擾動氣壓的梯度較大，雪山山脈上的相對高壓則較不明顯。

## 4.2 地形的強迫抬升運動以及下降運動

由於地形摩擦效應，風速減小，於是風場在迎風坡前堆積、輻合，引發地形強迫性的上升運動，反之，在背風處則有強迫性的下降運動。觀看 2115LST 海上分析區域內  $\Delta z = 1.5\text{km}$  處由地形所造成的垂直速度場 ( $W_t$  場，圖 4.2.a)，可以發現大屯山的迎風面有大於  $6\text{ m/s}$  的垂直上升速度，而其背風面則有  $6\text{ m/s}$  以上的垂直下降速度；於陸上分析區域內的垂直速度場 ( $W_t$  場，圖 4.2.b)，亦可發現相同的情形。比較北邊以及南邊分析區域內，沿切線方向上的圓弧剖面(如圖 3.13.a 上的圓弧，圖 3.13.c 上的 CD 圓弧、EF 圓弧)之地形造成的垂直運動場(圖 4.2.c、d、e)，能清楚的看到較陡峭之迎風面上，會有爬山運動，若配合 CD 圓弧剖面上的回波(圖 4.3.a)，我們可以在水平 30 公里處，看到迎風面上有較強的回波；反之，背風面則有下山運動，以及於 EF 圓弧剖面上水平 22 公里之回波則較微弱(圖 4.3.b)。

## 4.3 地形的阻擋效應造成合流與分流

2115LST， $\Delta z = 1.5\text{km}$  的流線場(圖 4.4.a)，可以在雪山山脈上， $x = 20\text{km}$ ， $y = -45\text{km}$  的位置附近看到明顯的分流情形，而位於雪山山脈與中央山脈間的蘭陽平原，可在  $x = 37\text{km}$ ， $y = -48\text{km}$  看到合流的情形；並依據  $\Delta z = 1.5\text{km}$  的低層輻合、輻散場(圖 4.4.b)以及  $\Delta z = 2.25\text{km}$  的  $h$  場(圖 4.4.c)，我們可以在前面所提到的分流位置存在有輻散場以及負的  $h$ ，而合流位置則看到輻合現象以及正的  $h$ 。若配合追隨地勢座標下的風場之垂直剖面(圖 3.20.a b c)則可以在 Domain 5 以及 Domain 7，我們可以發現到低層風向有北北西、北風以及北北東的方向，也就是說低層風向分布廣，具有分流的現象。不過 2000LST 時， $\Delta z = 1.5\text{km}$  的流線場(圖 4.4.d)則看不到明顯的分流，這可能是因為 2000LST 的風速比 2115LST 大  $10\text{ m/s}$  以上， $F_r$  大於 1，氣流比

較容易過山，因而分流情況較不明顯 ( $F_r = \bar{u}/NH$ ， $\bar{u}$ ：水平風速， $N$ ：浮揚頻率， $H$ ：高度)；相對來說，2115LST 時， $F_r$  小於 1，因此較容易看到分流及合流的情形。於其他分析時間，亦可看到相同情況。

#### 4.4 地形的強迫爬山、下山運動與合流、分流效應之垂直速度的探討

南邊分析區域內，沿切向方向的 CD 圓弧剖面上的  $W_v$ 、 $h$  (圖 4.2.d、圖 4.5.a)，並配合地形，我們可以在水平距離為 7km 處發現山前有地形的強迫上升運動，但是因為地形的阻擋有分流的情況產生負的  $h$ ，也就是說氣流一邊爬山一邊分流、輻散，但是由於地形強迫抬升運動較強，所以此處的垂直速度為向上運動 (圖 4.5.b)。在水平距離為 20km 處，可看到下山分流的情況。沿切向方向的 EF 圓弧剖面上的  $W_v$ 、 $h$  (圖 4.2.e、圖 4.5.c)，水平距離為 24km 處，可看到下山合流的情況；在水平距離為 34km 處則可看到上山合流。因此 2115LST 的 CD 圓弧切向剖面之  $W_v$ 、 $h$  以及  $w$  場 (圖 4.2.d、4.5.a、b、c、d)，我們可以知道地形的強迫抬升以及下降運動比面上輻合、輻散所造成的垂直運動強，因此我們所看到的三維風場 (圖 4.5.e、圖 4.5.f) 會貼著地面有上升、下降運動。位於 EF 圓弧剖面上之水平距離 24km 為蘭陽平原，由於背風沉降的增溫作用以及水汽在雪山山脈已經先凝結降水，所以此區域為弱回波區。

#### 4.5 RASTA 及 CEDRIC 軟體所得的雷達資料之比較

比較分析時間 2000LST，由 RASTA 及 CEDRIC 軟體處理所得的北邊和南邊分析區域內之風矢場、水平風速場及垂直速度場 (圖 3.2.a、3.3.a、4.1.a、b 及 3.3.c；圖 4.6.a、b、c、d、e [取自曾 (1998)、陳 (1999)])，顯示兩者在海上分析區域所求得的風矢場與水平風速

場具有良好的一致性，而陸上分析區域則是以 RASTA 於追隨地勢座標下的雷達分析方法所得的水平風場資料較為完整，且垂直速度的值較 CEDRIC 大一倍，可以看到強烈的垂直上升運動與強回波位置相吻合。

## 第五章 結論與展望

### 5.1 結論

本篇研究是比較颱風在海上以及陸上結構的不同，以更進一步了解台灣地形在賀伯颱風的消散期間所扮演的角色，因此本文中以多個連續時間的回波及風場特徵來加以探討颱風環流與地形間的交互作用以及颱風在登陸前、後之動力結構的改變。在本研究中，使用鄧（1999）的雷達資料處理系統（RASTA），於追隨地勢座標來計算三維風場並與以往常用的 CEDRIC 軟體得到的結果比較（曾等 1998，陳等 1999），顯示兩者在海上分析區域所求得的结果具有良好的一致性，而在陸上分析區域則有明顯的差異，以在追隨地勢座標下的雷達分析方法所得的結果較為合理可信，較能獲得低層風場的資訊。

由 1996 年 7 月 31 日 1400LST~2145LST 的合成分析時間中，我們將其結果主要分為陳述如下：

#### （一）海上與陸上分析區域之颱風水平及垂直結構的特性分析

海上分析區域內，主要雨帶結構為一往外傾斜的強回波區並伴隨著較強的水平風速，相對於颱風系統的移速，最底層為徑向入流，雨帶內側的徑向外流與外側的徑向內流輻合，於雨帶內側有最強的上升運動；南邊陸地上的分析區域內，可以看到主要雨帶之降水回波沿著地形變寬，結構較為鬆散。當眼牆還未受到地形的破壞時，位於眼牆處的強風速帶非常連續且結構較為直立，但是眼牆進入到雪山山脈時，眼牆處的強風速帶則減弱，其結構也呈現較傾斜的現象。

結合北邊及南邊分析區域的風場，能看到渦旋式的颱風結構環流，海上分析區域的底層切線風速大，高層切線風速較小的現象，符合颱風結構，不過陸上分析區域的低層強風速帶並非位於最底層，而是位於 $h=1.5\sim 2.25\text{km}$ 。由於地形的摩擦效應造成低層風速減弱，並依

據梯度風平衡得知 (  $fu + \frac{uv}{r} = -\frac{1}{rr} \frac{\partial p}{\partial q}$  ,  $-fv - \frac{v^2}{r} = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r}$  ) , 當風速減小時, 則徑向內流必須增強, 因此陸上的入流區則會有增厚, 且低層風的風向會往颱風中心切入的情形。

## (二) 地形對於颱風低層風場及對流分布的影響

陸地上地形的摩擦效應, 使得陸地上的風速較海上分析區域的風速小, 且在雪山山脈上存在有一低風速軸, 於是風場在迎風坡前堆積、輻合, 引發地形強迫性的上升運動, 產生較強的回波; 反之, 背風處則有強迫性的下降運動, 回波也顯得微弱。然而地形的阻擋效應會引發分流以及合流, 位在地勢較高處會有分流、輻散的情況, 產生微弱的下降運動 ( 負的  $h$  ), 而地勢較低處則會有合流、輻合的現象, 因而有微弱的上升運動 ( 正的  $h$  ), 不過當風速較強時, 依據  $F_r$  可以得知分流效應較不顯著。

總而言之, 地形的強迫抬升以及下降運動比 面上輻合、輻散所造成的垂直運動強, 我們所看到的三維風場會貼著地面有上升、下降運動, 因此回波會隨著地形而重新配置。

我們企圖以雙都卜勒分析來了解颱風的結構, 而每一個分析時間裏只能看到龐大颱風的一角, 所以當颱風旋轉的接近分析區域時, 我們漸漸地可拼湊出一個較整體的了解。我們觀察到海上低層強烈的切線風, 在接觸到地形上時, 於很短的距離內, 低層風速就減低了約 10m/s; 而且陸地上水平風場之最大風速值位於地形上 1km 高度, 並根據地面測站的風場資料可知地面風速又比地形上 1km 高度的風速降低約百分之六十。第二個明顯的特徵是在海上非常直立的風場結構, 到了陸地上, 風場結構便受到很大的破壞, 除了整層的風速降低以外, 且低層風速減小使得陸地上的風場受到地形的配置而呈現傾斜的結構。

## 5.2 展望

本研究中，利用追隨地勢座標下所求取的三維風場雖有改善，但是由於雷達本身的特性導致高層、低層的資料有所缺漏，再加上五分山雷達位於七百多公尺的高度，因此低層風場的資訊無法確切獲得，若能利用分析區域內之地面測站來補齊地面風場的資訊，應可對於颱風低層結構之變化有更詳盡的了解。由於颱風在登陸前、後的動力結構有明顯的不同，若能改善雷達資料的時間解析度，將有助於颱風 spin-down 過程的研究。倘若能再進一步利用模式來模擬颱風與地形之間的交互作用，我們則可以更清楚了解地形在颱風消散中所扮演的角色。



## 附錄 A

系統簡介 ( Radar Analysis System for Taiwan Area , 簡稱 RASTA ):

### I. 球面座標下的雷達處理及顯示系統

此部份系統包含了雷達資料的輸入、輸出、資料的編輯、資料的顯示以及內插至追隨地勢座標或卡氏座標上。其中輸入的格式可為雷達資料常用的 uf 格式( universal format )或是系統本身輸出的格式( 簡稱為 ppi format ), 而輸出的格式可為 ppi 格式或是內插至追隨地勢座標後的格式( 簡稱 ter format )。雷達資料中的編輯包含了資料的補洞、地形回波地去除以及徑向速度場的摺疊校正, 其中徑向速度場的校正因不同的參考速度而分為好幾個部分, 例如: 利用觀測的實測資料當做參考徑向速度 ( 區域摺疊校正, local unfold ) 或是給定一參考徑向速度、參考平均水平風速亦或是一參考的颱風水平風場等 ( 強迫摺疊校正, force unfold )。資料顯示包含 PPI 面及 RHI 面上的圖形顯示與數值資料的顯示, 其中關於數值資料的顯示部分並可做資料的刪除, 而關於內插的部份中的垂直網格可選擇非線性的內插。若選擇內插至追隨地勢座標則需讀進台灣地形資料, 此地形資料則是由中央大學洪秀雄教授所提供的解析度一公里的地表高度資料, 此資料在做圖形顯示時亦需讀入。內插完後會自動要求輸入一檔名, 並將內插後之網格點資料 ( 包含回波強度、徑向速度、觀測時間以及網格點高度 ) 存入此檔內。此檔的格式 ( ter format ) 滿足於追隨地勢座標下的雷達處理及顯示系統的輸入格式。

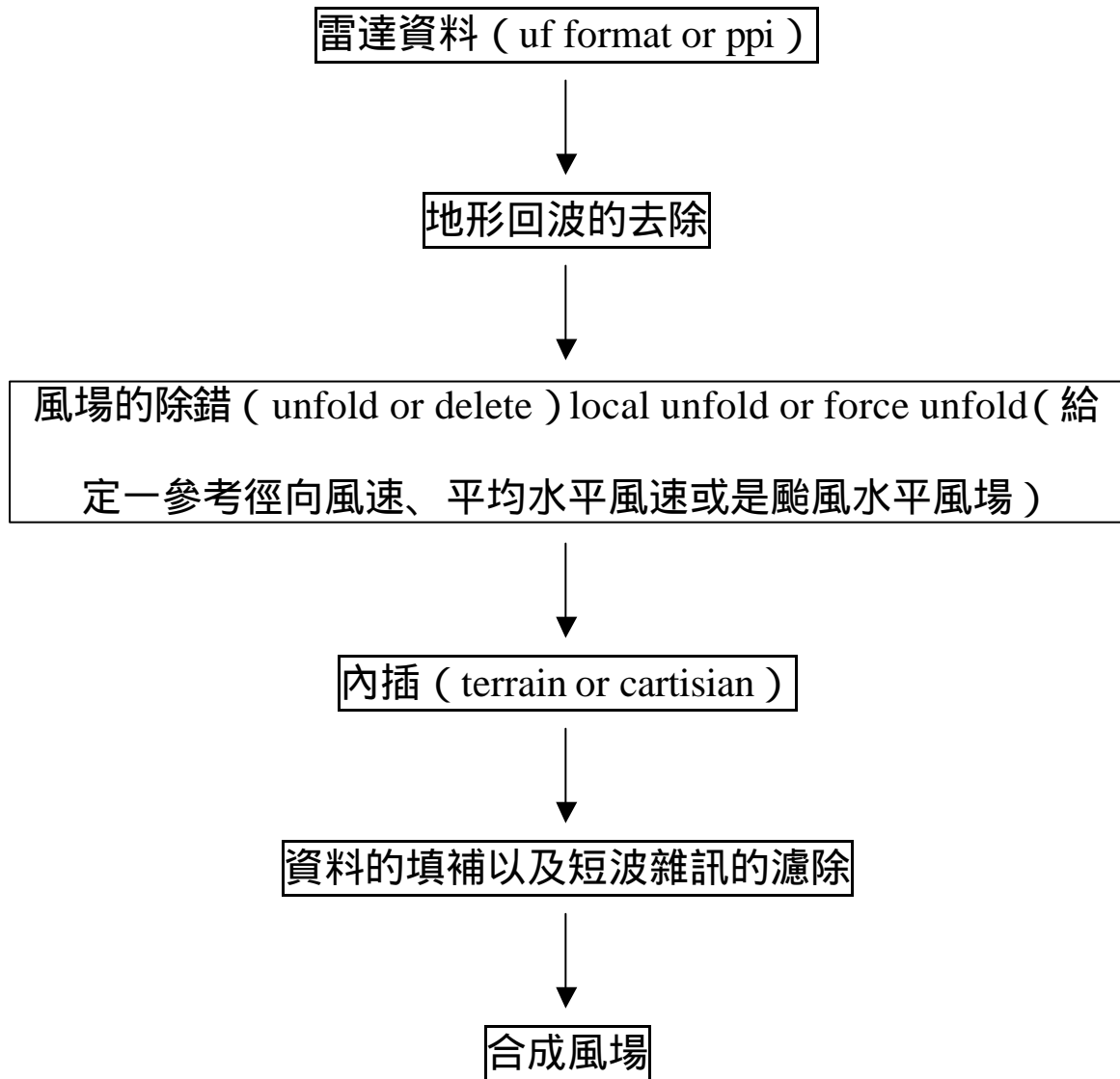
### II. 追隨地勢座標下的雷達處理系統及顯示系統

此部份系統包含了網格點資料的輸入、輸出、座標的旋轉與平

移、資料場的刪除與移入、資料補洞，徑向速度場的摺疊校正、函數的運算、雙都卜勒風場的合成、資料與圖形的顯示、壓力與溫度反求、風場的反求徑向速度場與短波雜訊的濾除。輸入與輸出的格式為 ter 格式；資料的補洞包括二為及三維的補洞；而徑向速度場的摺疊校正則包括了區域摺疊校正及強迫摺疊校正；函數的運用共包含了 30 種常用的函數。雙都卜勒風場的合成方法如附錄 C 中所述；資料的顯示包含水平剖面及垂直剖面上的圖形顯示與數值資料的顯示，其中數值資料的顯示亦可做資料的刪除，垂直剖面不僅可切 X 或 Y 軸，亦可切任一條直線（僅需輸入兩端點的座標）或是弧線（僅需輸入兩端點及中間任一點的座標值）；短波雜訊的濾除則包含了六種不同的方法（uniform、hanning、inverse hanning、leise、least square 及 two-way hanning）。

螢幕顯示。

## 附錄 B 雷達資料處理流程



## 附錄 C 雙都卜勒三維風場的合成

### (一) 雙都卜勒雷達資料處理方法

雙都卜勒風場合成處理是參照 Teng et al. (2000) 的方法，此方法是建立在追隨地勢座標下但因為要與卡氏座標相容將  $h$  的定義做一些修正，故其方法可改寫如下：

由兩個都卜勒雷達所提供的雷達徑向風場 ( $V_{r1}$ ,  $V_{r2}$ ) 與三維風場 ( $U, V, W$ ) 之間的幾何關係為：

$$V_{r1} = U \sin b_1 \cos q_1 + V \cos b_1 \cos q_1 + (W + V_t) \sin q_1 \quad (C1)$$

$$V_{r2} = U \sin b_2 \cos q_2 + V \cos b_2 \cos q_2 + (W + V_t) \sin q_2 \quad (C2)$$

其中  $b_1, b_2$  為相對於兩個雷達方位角， $q_1, q_2$  為相對於兩個雷達的高度角， $V_t$  為粒子終端速度，可用經驗式表示之 ( $V_t = -4.32(\text{dBZ})^{0.0714286}$ ， $\text{dBZ}$  為雷達回波強度)， $U, V, W$  為粒子再直角座標上三維的速度分量。

由 (C1) 式及 (C2) 式可解得  $U, V$  為：

$$U = U' + M_1 W_{air} \quad (C3)$$

$$V = V' + M_2 W_{air} \quad (C4)$$

其中

$$M_1 = \frac{\cos b_1 \cos q_1 \sin q_2 - \sin q_1 \cos b_2 \cos q_2}{\cos q_1 \cos q_2 (\sin b_1 \cos b_2 - \cos b_1 \sin b_2)}$$

$$M_2 = \frac{\sin q_1 \sin b_2 \cos q_2 - \sin b_1 \cos q_1 \sin q_2}{\cos q_1 \cos q_2 (\sin b_1 \cos b_2 - \cos b_1 \sin b_2)}$$

$$U' = \frac{\cos b_2 \cos q_2 V_{r1} - \cos q_1 \cos b_1 V_{r2}}{\cos q_1 \cos q_2 (\sin b_1 \cos b_2 - \cos b_1 \sin b_2)} + M_1 V_t$$

$$V' = \frac{\sin b_1 \cos q_1 V_{r2} - \cos q_2 \sin b_2 V_{r1}}{\cos q_1 \cos q_2 (\sin b_1 \cos b_2 - \cos b_1 \sin b_2)} + M_2 V_t$$

在 (C3) 式及 (C4) 式中，有三個未知數 ( $U, V, W$ )，因此我們必須加入連續方程式來解這三個未知數，在追隨地勢座標下的非彈性

連續方程式為：

$$\frac{\partial r\mathbf{h}}{\partial \mathbf{h}} = -\left(\frac{\partial rU}{\partial x} + \frac{\partial rV}{\partial y}\right) + SrU + PrV \quad (\text{C5})$$

其中

$$\mathbf{h} = \frac{Z_t(Z - Z_g)}{Z_t - Z_g}$$

$$S = \frac{1}{Z_t - Z_g} \frac{\partial Z_g}{\partial x}$$

$$P = \frac{1}{Z_t - Z_g} \frac{\partial Z_g}{\partial y}$$

$Z_g$  表地表高度,  $Z_t$  為模式頂高度(在此設為 15km),  $r$  為空氣密度(只為高度的函數),  $\mathbf{h}$  為追隨地勢座標下的垂直速度 ( $\mathbf{h} = \frac{dh}{dt}$ )。將 (C3) 式, (C4) 式代入 (C5) 式並寫成垂直方向向下積分的差分式時, 可得  $\mathbf{h}$  的垂直差分方程式為：

$$\begin{aligned} (\mathbf{r}\mathbf{h})_c = & (\mathbf{r}\mathbf{h})_p - \mathbf{dh} \overline{\left(\frac{\partial rU'}{\partial x} + \frac{\partial rV'}{\partial y}\right)}_{p\sim c} + \mathbf{dh} \overline{(SrU' + PrV')}_{p\sim c} \\ & \text{A} \quad \text{B} \quad \text{C} \quad \text{D} \\ & - \frac{\partial \mathbf{h}}{2} \left( \underbrace{\frac{\partial rM_1 W_{air}}{\partial x}}_{E1} + \frac{\partial rM_2 W_{ait}}{\partial y} \right)_p - \frac{\partial \mathbf{h}}{2} \left( \frac{\partial rM_1 W_{air}}{\partial x} + \underbrace{\frac{\partial rM_2 W_{ait}}{\partial y}}_{E2} \right)_c \\ & + \frac{\partial \mathbf{h}}{2} \underbrace{(SrM_1 W_{air} + PrM_2 W_{ait})}_F_p + \frac{\partial \mathbf{h}}{2} \underbrace{(SrM_1 W_{air} + PrM_2 W_{ait})}_F_c \end{aligned} \quad (\text{C6})$$

其中  $( )_c$  表示此層的資料,  $( )_p$  表示上層資料,  $( )_{p\sim c}$  表示兩層的平均。所以 (C6) 式可改寫為：

$$A_m = B + C + D + E1 + E2_{m-1} + F1 + F2_{m-1} \quad (\text{C7})$$

在 (C7) 式中, B, C, D, E1, F1 項為已知, A, E2, F2 項為待求, 其中 E2, F2 項所使用的  $W_{air}$  是從上一層的疊代法所獲得, 並利用反覆算法解 (C7) 式, 直到

$$\left| (\mathbf{r}W_{air,c,m}) - (\mathbf{r}W_{air,c,m-1}) \right| \leq \mathbf{e}_0$$

其中  $e_0 = 0.001 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ 。

在 (C6) 式中，未知數  $(W_{air})_c$  及  $(h)_c$ ，在反覆計算的過程中此兩項的關係可由 (C3) 式及 (C4) 式中得知為：

$$rW_{air} = \frac{\frac{Z_t - Z_g}{Z_t} [r\mathbf{h} + \mathbf{r}(Z_t - \mathbf{h})SU' + \mathbf{r}(Z_t - \mathbf{h})PV']}{1 - \frac{Z_t - Z_g}{Z_t} (Z_t - \mathbf{h})(M_1S + M_2P)} \quad (\text{C8})$$

如此我們可以向下積分來求取每一層的垂直速度，再代回 (C3) 式及 (C4) 式來得到三維風場。

## (二) 三維風場的變分調節

以利用追隨地勢座標下的三維連續方程式 (C5) 式當作變分的控制方程，令  $r\mathbf{h} = \mathbf{h}$ ， $rU = \hat{U}$ ， $rV = \hat{V}$ ，並將  $(\hat{\quad})$  去掉後，以 (C5) 式為控制方程式的變分函數為：

$$J = \iint \{ \int [(U - \tilde{U})^2 + (V - \tilde{V})^2] d\mathbf{h} + 2I \int [(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y}) - SU - PV] d\mathbf{h} \} dx dy \quad (\text{C9})$$

其中  $\tilde{U}$ ， $\tilde{V}$  為前一部份所得到的水平風場， $I$  為 Lagrangian 乘數。

令  $dJ = 0$  求此函數的極小值，我們可以得到 Euler-Lagrange 方程式：

$$U = \tilde{U} + \frac{\partial I}{\partial x} + SI \quad (\text{C10})$$

$$V = \tilde{V} + \frac{\partial I}{\partial y} + PI \quad (\text{C11})$$

$$\int_0^{z_t} (\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} - SU - PV) d\mathbf{h} = 0 \quad (\text{C12})$$

及自然邊界條件 (即在邊界  $I = 0$ )。

將 (C10) 式、(C11) 式代入 (C12) 式消去  $U, V$ ，可得到  $I$  的方程式：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} + \frac{\partial SI}{\partial x} + \frac{\partial PI}{\partial y} - S \frac{\partial I}{\partial x} - P \frac{\partial I}{\partial y} - I(S^2 + P^2) \\ & = -\int_0^{Z_t} \left[ \frac{\partial \tilde{U}}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{V}}{\partial y} - S\tilde{U} - P\tilde{V} \right] dh \end{aligned} \quad (C13)$$

由 (C13) 式及自然邊界條件，利用緩和法可解得  $I(x, y)$ ，再代入 (C10) 式及 (C11) 式得到調節後滿足連續方程式的  $U, V$ 。

對於垂直速度場的調節方面，則是利用 (C10) 式、(C11) 式以及 (C12) 式消去  $I$ ，而連續方程式 (C5) 則表示為：

$$\int_0^{Z_t} \left( \frac{\partial \dot{h}_0}{\partial h} - \frac{\partial \dot{h}}{\partial h} \right) dh = -\dot{h}_0 \Big|_{h=0} \quad (C14)$$

其中最上層的邊界條件為 ( $\dot{h}_0 \Big|_{h=Z_t} = 0$ )， $\dot{h}_0$  為前面部分求得並乘上空氣密度後之追隨地勢座標下的垂直速度。

由 (C14) 式，可得到：

$$\dot{h}_t - \dot{h}_{0t} = \frac{Z_t - h}{Z_t} \dot{h}_0 \Big|_{h=0} \quad (C15)$$

根據 (C15) 式可知對於  $h$  的調節會隨  $h$  的增加而增加，然後我們可以利用下式求得垂直速度場：

$$W_{air} = \frac{Z_t - Z_g}{Z_t} [(\dot{h} + S(Z_t - h)U + P(Z_t - h)V)] \quad (C16)$$

至此，我們才由雙都卜勒雷達資料再追隨地勢座標下求得滿足連續方程式的三維風場。

## 附錄 D 擾動氣壓場的反求

由雙都卜勒雷達資料分析可以得到詳盡的三維風場資訊及相關診斷場的分布狀況，因此可以了解颱風低層對流分布的情況，以及海上與陸上分析區域之水平及垂直的運動結構。但是雷達並無法直接量測到熱、動力場等變數（如擾動壓力以及溫度），故需藉由雷達資料所得的風場，再配合上適當的物理條件，以反求所需的變數。在本研究中主要是反求擾動壓力場。

在此根據 Gal-Chen (1978) 的分法來改寫運動方程式：

$$\frac{\partial P'}{\partial x} = \mathbf{r}_0 \left( \frac{dU}{dt} + f_x \right) \equiv F \quad (D1)$$

$$\frac{\partial P'}{\partial y} = \mathbf{r}_0 \left( \frac{dV}{dt} + f_y \right) \equiv G \quad (D2)$$

$$\frac{\partial P'}{\partial z} = -\mathbf{r}_0 \left( \frac{dW}{dt} - g \left( \frac{\mathbf{r}'}{\mathbf{r}_0} - q_l \right) + f_z \right) \quad (D3)$$

其中  $P'$  為壓力擾動量， $\mathbf{r}_0$  為水平平均的空氣密度值， $\mathbf{r}_0 = \mathbf{r}_{00} e^{(-z/H)}$ ， $H$  為特徵高度定為 10 公里， $\mathbf{r}_{00}$  為地面的空氣密度值定為  $1.0 \text{ kg/m}^3$ ， $f_x$ 、 $f_y$ 、 $f_z$  分別為 X、Y、Z 三個方向的摩擦項， $\frac{dU}{dt}$ 、 $\frac{dV}{dt}$ 、 $\frac{dW}{dt}$  分別為 X、Y、Z 三個方向的加速度， $q_l$  為液態水的混合比，包含雲低混合比  $q_c$  以及雨水混合比  $q_r$ 。因為尺度較小，故科式效應可以忽略不計，而在計算過程忠義忽略摩擦項，所以水平方向僅為加速度及擾動氣壓梯度力的平衡，垂直方向則為加速地與擾動氣壓梯度力、浮力以及降水載入（loading）作用的合成。

在 (D1) 與 (D2) 式中， $F$ 、 $G$  均為已知的位置函數，但觀測所得到的  $F$ 、 $G$  並不一定符合 (D1) 與 (D2) 式，所以假設求出的解和  $F$ 、 $G$  的關係滿足最小頻方誤差的要求，即：



$$\iint \left( \frac{\partial P'}{\partial x} - F \right)^2 + \left( \frac{\partial P'}{\partial y} - G \right)^2 dx dy = \min \quad (\text{D4})$$

經由變分法可以得到 Euler-Lagrange 方程式，即氣壓方程式：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial P'}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial P'}{\partial y} \right) = \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} \quad (\text{D5})$$

在追隨地勢座標下的氣壓方程式為：

$$\frac{\partial^2 P'}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P'}{\partial y^2} - (Z_t - \mathbf{h}) \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial Z_s}{\partial x} \frac{\partial P'}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial Z_s}{\partial y} \frac{\partial P'}{\partial z} \right) \right] = \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} \quad (\text{D6})$$

若利用 (D6) 式去解  $P'$  會遇到一個問題，即其有  $\frac{\partial P'}{\partial z}$  項，其無上下邊界條件可以利用，故無法求得其解。所以壓力的擾動變化量為在直角座標下反求，即利用 (D5) 式以及 Neumann 邊界條件以連續過緩和法可得到氣壓擾動場。但由此求得的解非唯一解，故採用擾動場對其水平平均的偏差量  $P''$  ( $P'' = P' - \bar{P}'$ ) 為唯一解。

## 參考文獻

- 王時鼎，1994：侵台颱風地形影響實例研究及有關問題。海峽兩岸天氣與氣候學術研討會論文彙編，pp. 324-338。
- 王時鼎、謝信良、鄭明典與葉天降，1998：侵台颱風流型與颱風路徑走向間之關係研究。天氣分析與預報研討會論文彙編（87），pp. 268-275。
- 李清勝與蔡德攸，1995：利用 CAA 都卜勒雷達資料分析四個侵台颱風。大氣科學，23，2，pp. 209-236。
- 李清勝與張奕郎，1998：1989-1996 侵台颱風伴隨降水特性分析。天氣分析與預報研討會論文彙編（87），pp. 276-281。
- 呂靜葉，1997：北部侵台颱風環流結構變化之雷達分析與比較。國立中央大學碩士論文。
- 郭鴻基與周仲島，1997：賀伯颱風眼轉動機制探討。天氣分析與預報研討會論文彙編（85），pp. 381-381。
- 張保亮，2000：登陸中颱風環流變化分析：賀伯（9608）個案研究。國立台灣大學博士論文。
- 陳麗如，1999：賀伯颱風（1996）登陸期間特性分析。國立中央大學碩士論文。
- 曾吉暉，1998：賀伯颱風結構之雙都卜勒雷達分析。國立中央大學碩士論文。
- 鄧仁星，1999：侵台颱風降水預報之應用研究-台灣地區雷達資料處理系統之建立與測試，國科會博士後研究結案報告。
- 鄧仁星、王時鼎與陳台琦，1999：賀伯颱風雨帶之地形效應。第六屆全國大氣科學學術研討會論文彙編，pp. 165-168。
- 謝信良、邱台光、徐新欽，1997：民國八十五年賀伯颱風侵台期間豪雨原因分析。天氣分析與預報研討會論文彙編（85），pp.

336-345.

- Barnes, J. F., M. A. LeMone, and G. J. Stossmeister, 1991: A Convective Cell in a Hurricane Rainband. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 119, pp. 776-794.
- Black, M. L., and J. L. Franklin, 1999: 29<sup>th</sup> *Conf. on Radar Meteorology, Boston, Amer. Meteor. Soc.*, pp.370-373.
- Bluestein, H. B., and D. S. Hazen, 1989: Doppler-Radar analysis of a tropical cyclone over land: Hurricane Alicia ( 1983 ) in Oklahoma. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 117, pp. 2594-2611.
- Brand, S., and J. W. Blelloch, 1974: Changes in the characteristic of typhoons crossing the island of Taiwan. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 102, pp. 708-713.
- Gal-Chen, T., 1978 : A method for the initialization of anelastic equation : Implications for matching models with observation. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 106, pp. 587-606.
- Jorgensen, D. P., 1984a: Mesoscale and Convective-Scale Characteristics of Mature Hurricanes. Part I: General observations by research aircraft. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 41, No.8, pp. 1268-1285.
- Jorgensen, D. P., 1984b: Mesoscale and Convective-Scale Characteristics of Mature Hurricanes. Part II: Inner Core Structure of Hurricane Allen ( 1980 ) . *J. Atmos. Sci.*, Vol. 41, No.8, pp. 1287-1311.
- Powell, D. M., P. P. Dodge, and M. L. Black, 1991 : The landfall of hurricane Hugo in the Carolinas: Surface wind distribution. *Wea. Forecasting.*, Vol. 6, pp. 379-399.
- Teng, J.-H., C.-S. Chen, T.-C. C. Wang, Y.-L. Chen; 2000 : Orographic Effects on a Squall Line System over Taiwan. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 128, pp. 1123-1138.
- Willoughby, H. E., F. D. Marks, and R. J. Feinberg, 1984: Stationary and moving convective bands in hurricanes. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 41, pp. 3189-3211.

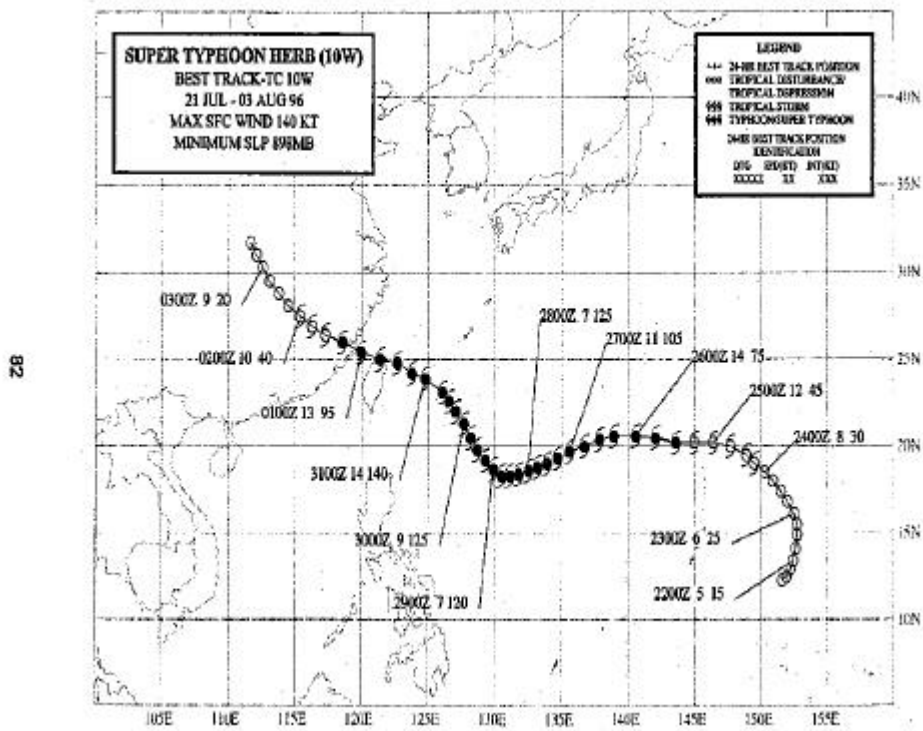


圖 1.1 1996 年 7 月 31 日至 8 月 1 日賀伯颱風逐時路徑圖 (摘自 CWB)。

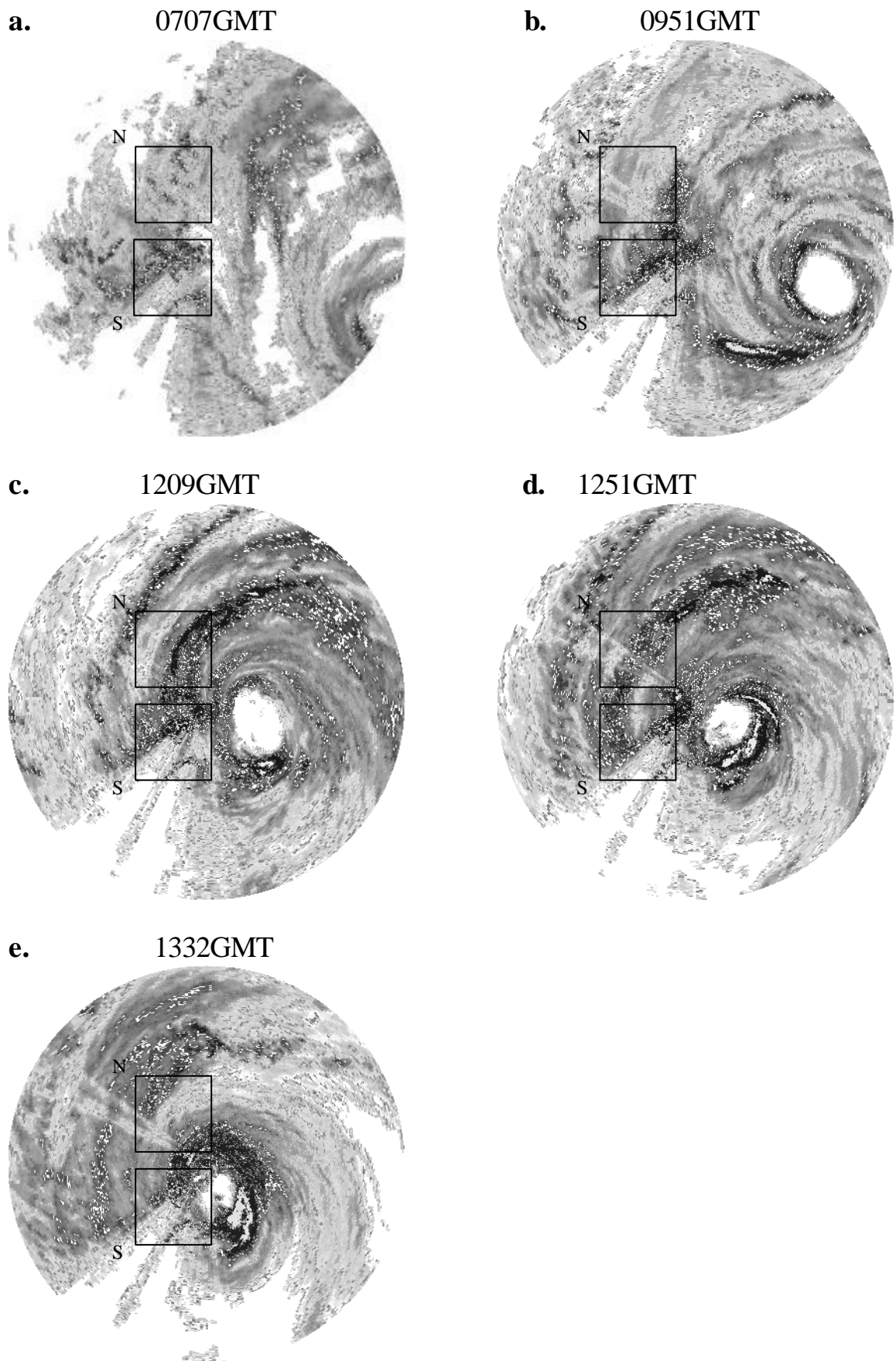


圖 1.2 五分山雷達的賀伯回波圖 (PPI), 上方框框為北邊分析區域, 下方框框為南邊分析區域 (a) 外圍環流時期; (b) (c) 雨帶結構時期; (d) 低回波時期; (e) 眼牆結構時期。

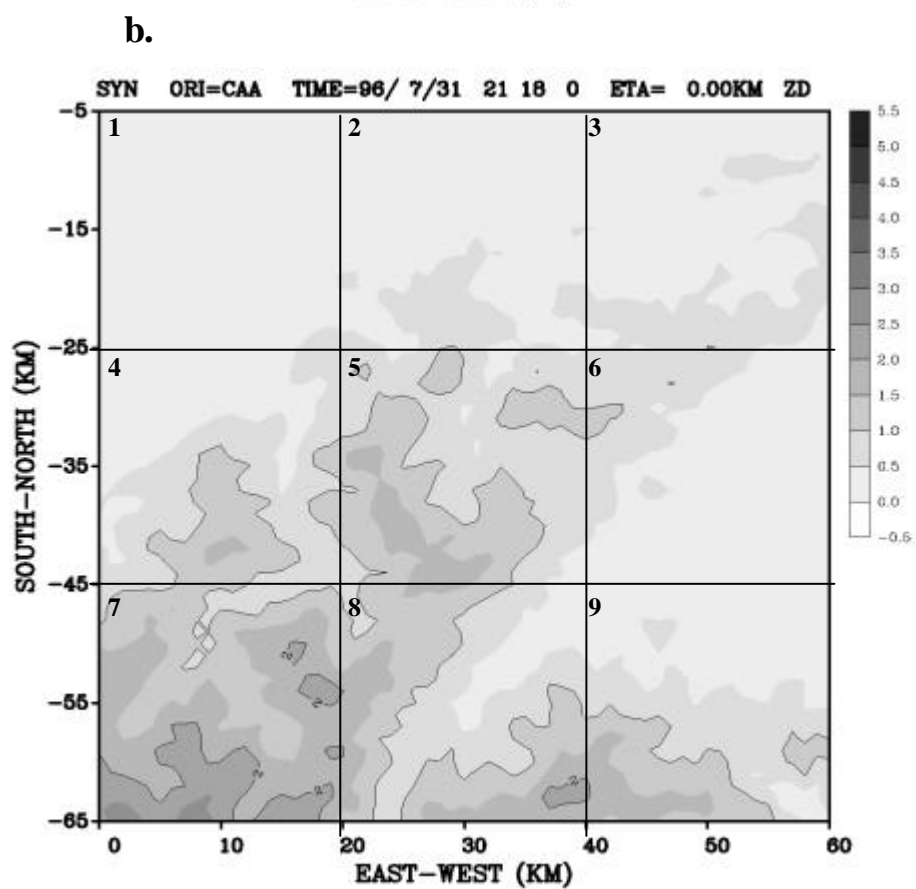
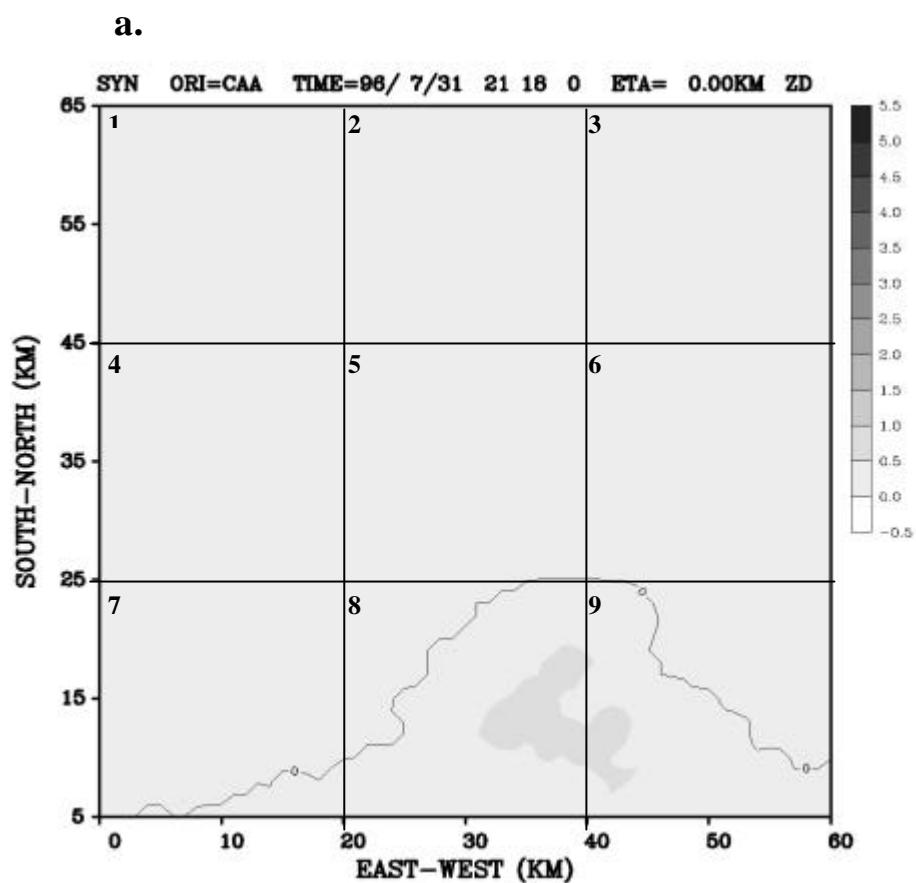


圖 2.1 地形分布圖，分析區域內所標示的為  $20 \times 20\text{km}$  的九個小區塊 (a) 北邊分析區域及 (b) 南邊分析區域。

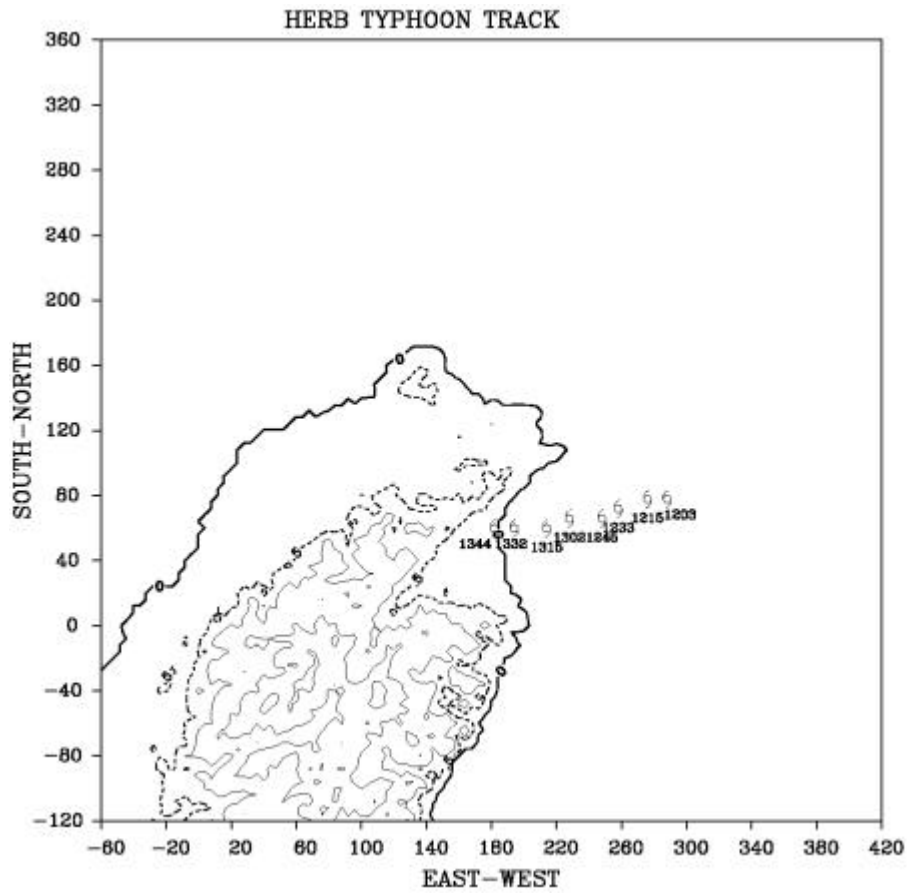


圖 3.1 參考張（2000）的颱風中心訂位法，並利用郭與周（1997）提出的賀伯颱風旋轉週期，以垂直高度為 3km 的回波，觀看長短軸的位置來訂出颱風中心移動路徑。

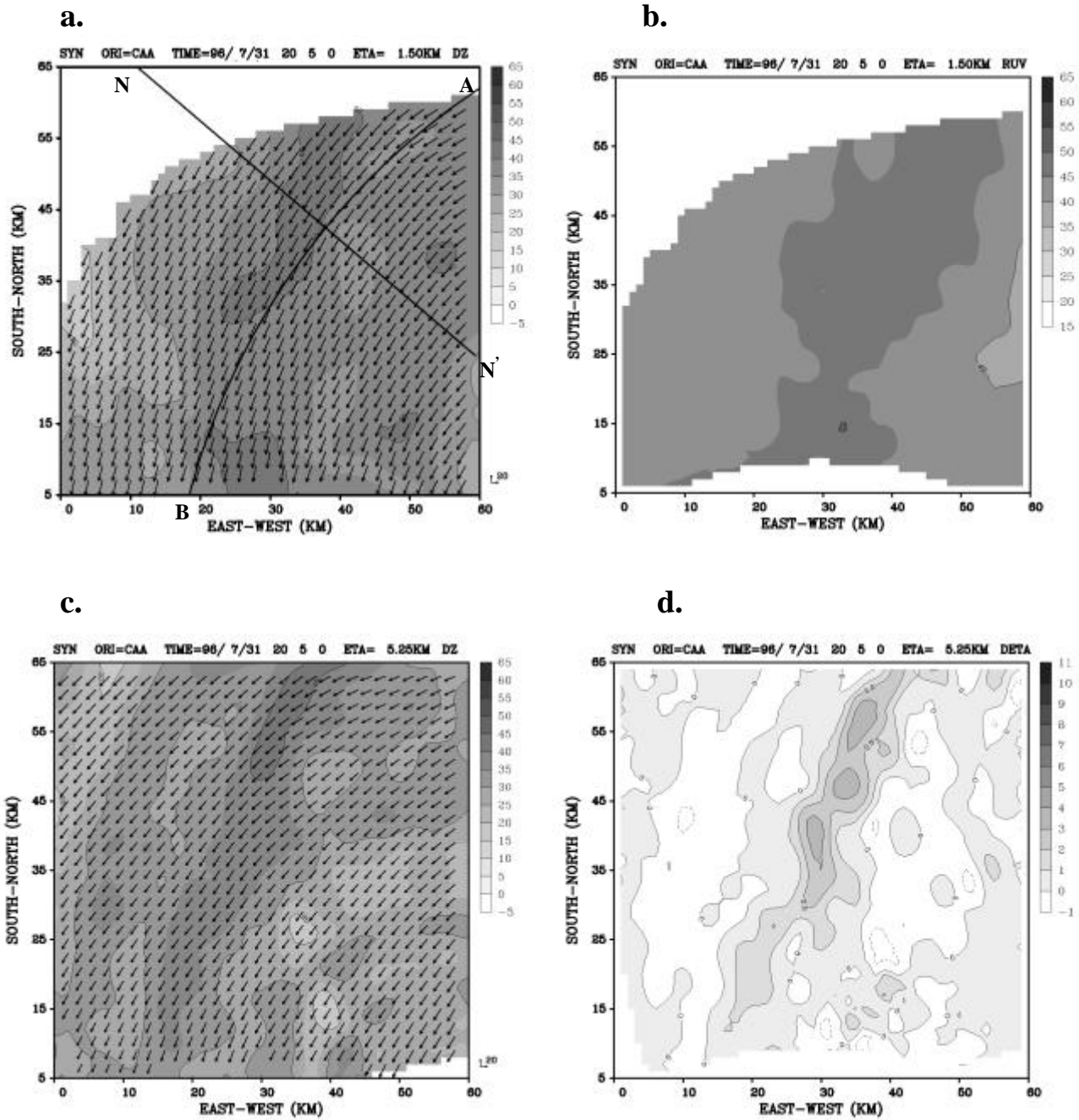


圖 3.2 北邊分析區域 2000LST (a)  $=1.5\text{km}$  的回波場及相對水平風場 ;(b)  $=1.5\text{km}$  的相對水平風速分布圖 ;(c)  $=5.25\text{km}$  的回波場及相對水平風場 ;(d)  $=5.25\text{km}$  的  $h$  場。



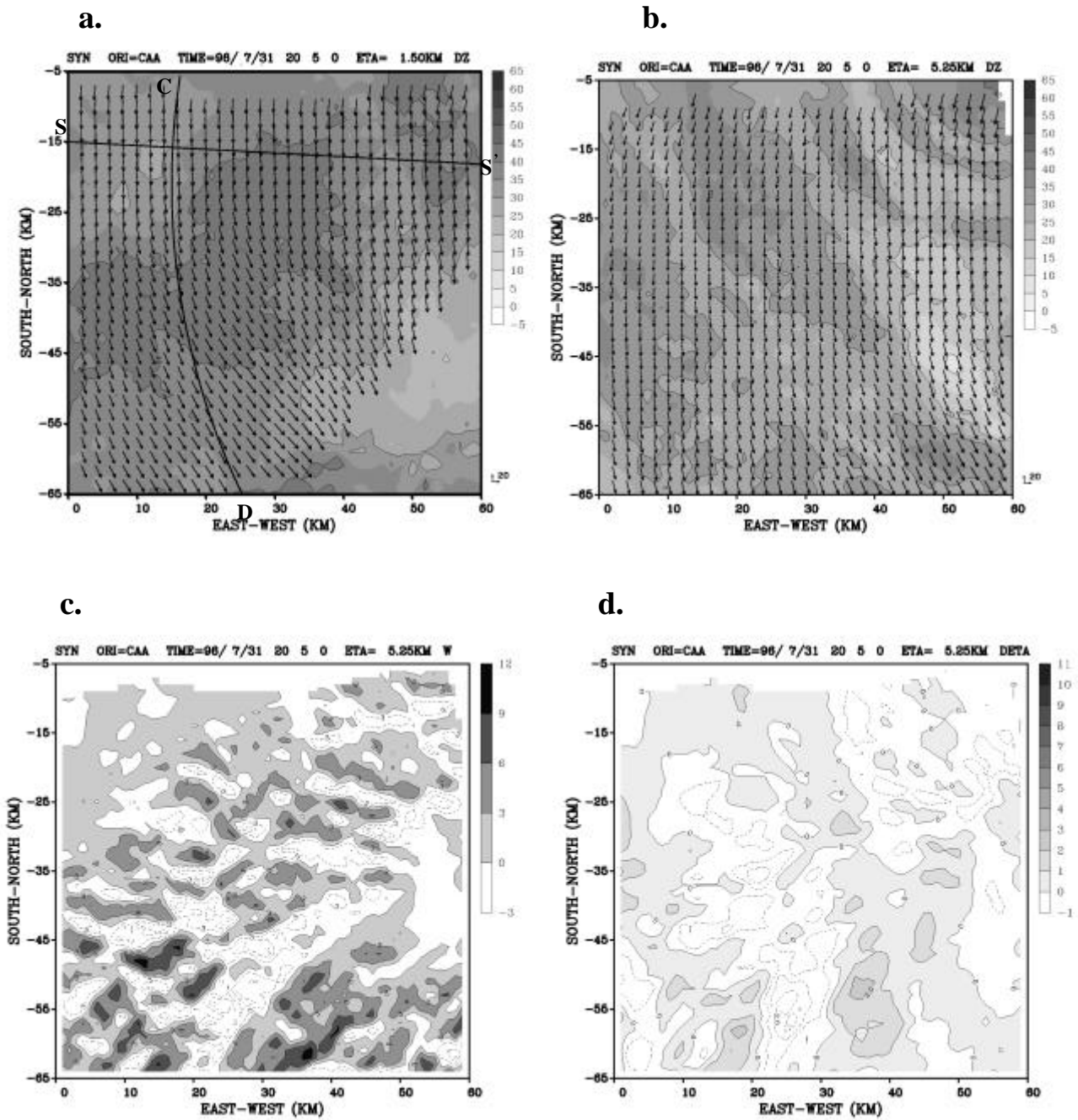


圖 3.3 南邊分析區域 2000LST (a)  $=1.5\text{km}$  的回波場及相對水平風場 ;(b)  $=5.25\text{km}$  的回波場及相對水平風場 ;(c)  $=5.25\text{km}$  的垂直速度場 ;(d)  $=5.25\text{km}$  的  $h$  場。

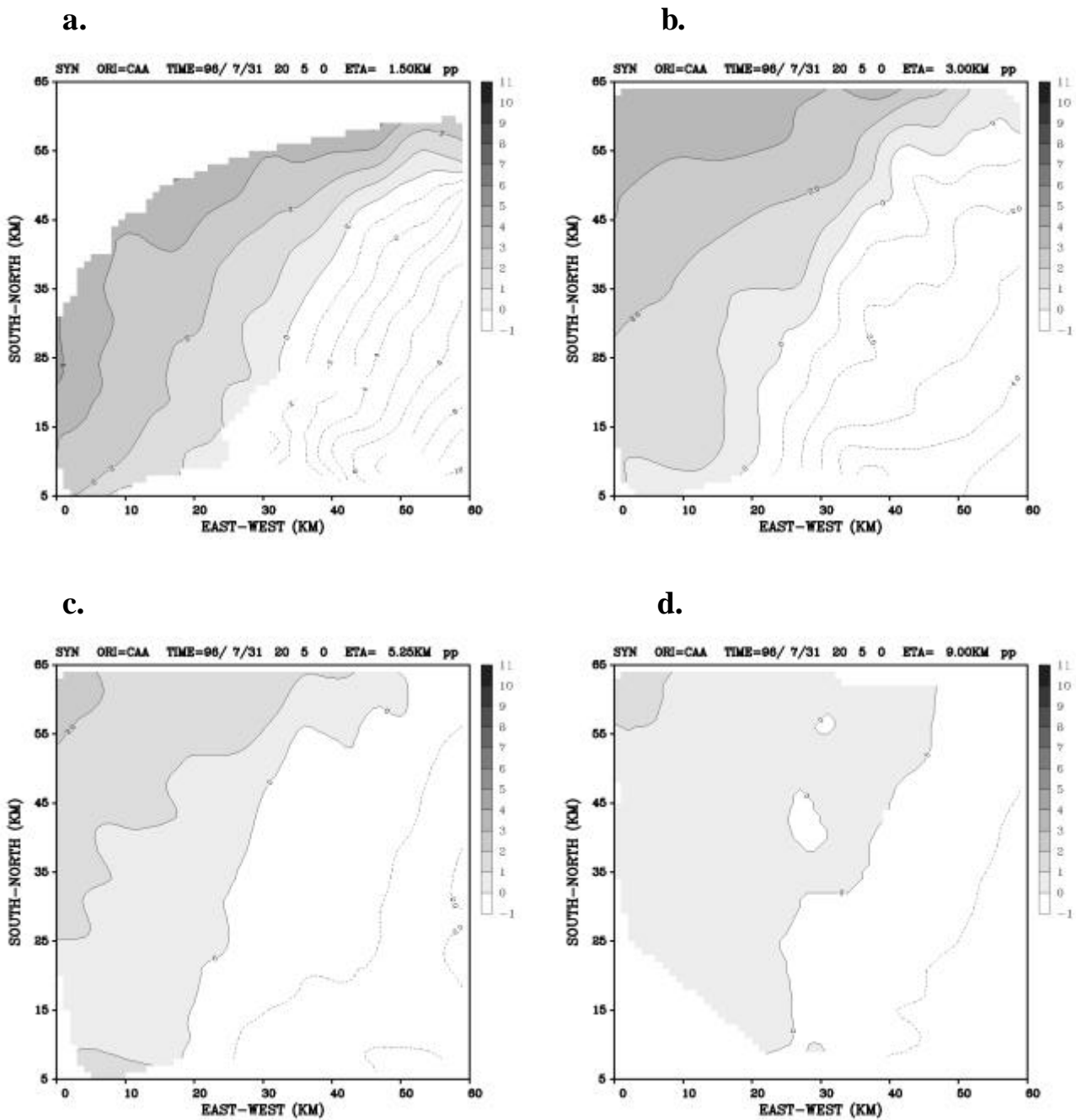


圖 3.4 北邊分析區域 2000LST (a)  $z$  (卡氏座標的垂直高度) = 1.5km ; (b)  $z$  = 3km ; (c)  $z$  = 5.25km ; (d)  $z$  = 9km 的擾動壓力場。

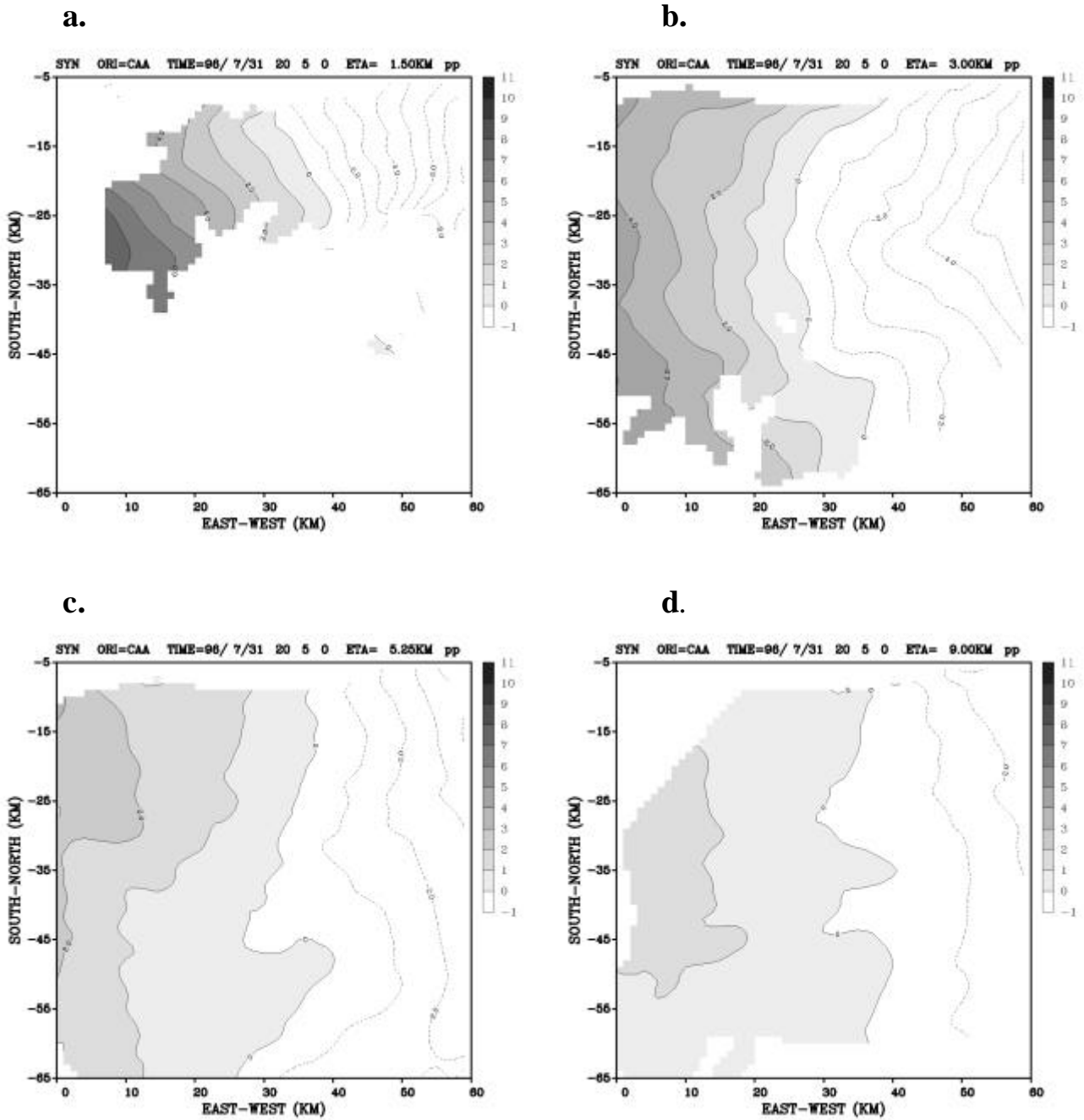


圖 3.5 南邊分析區域 2000LST (a)  $z=1.5\text{km}$  ; (b)  $z=3\text{km}$  ; (c)  $z=5.25\text{km}$  ; (d)  $z=9\text{km}$  的擾動壓力場。

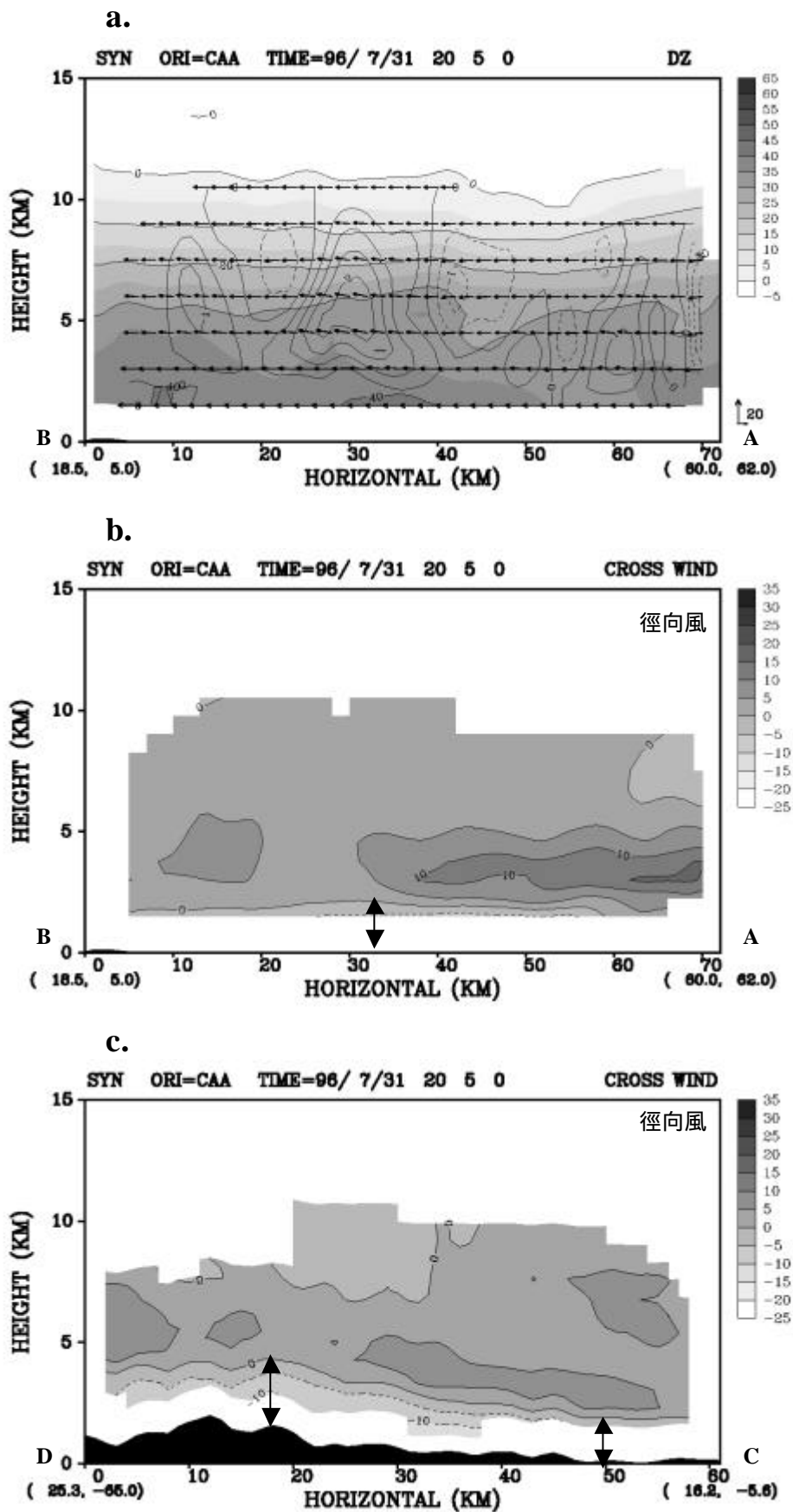
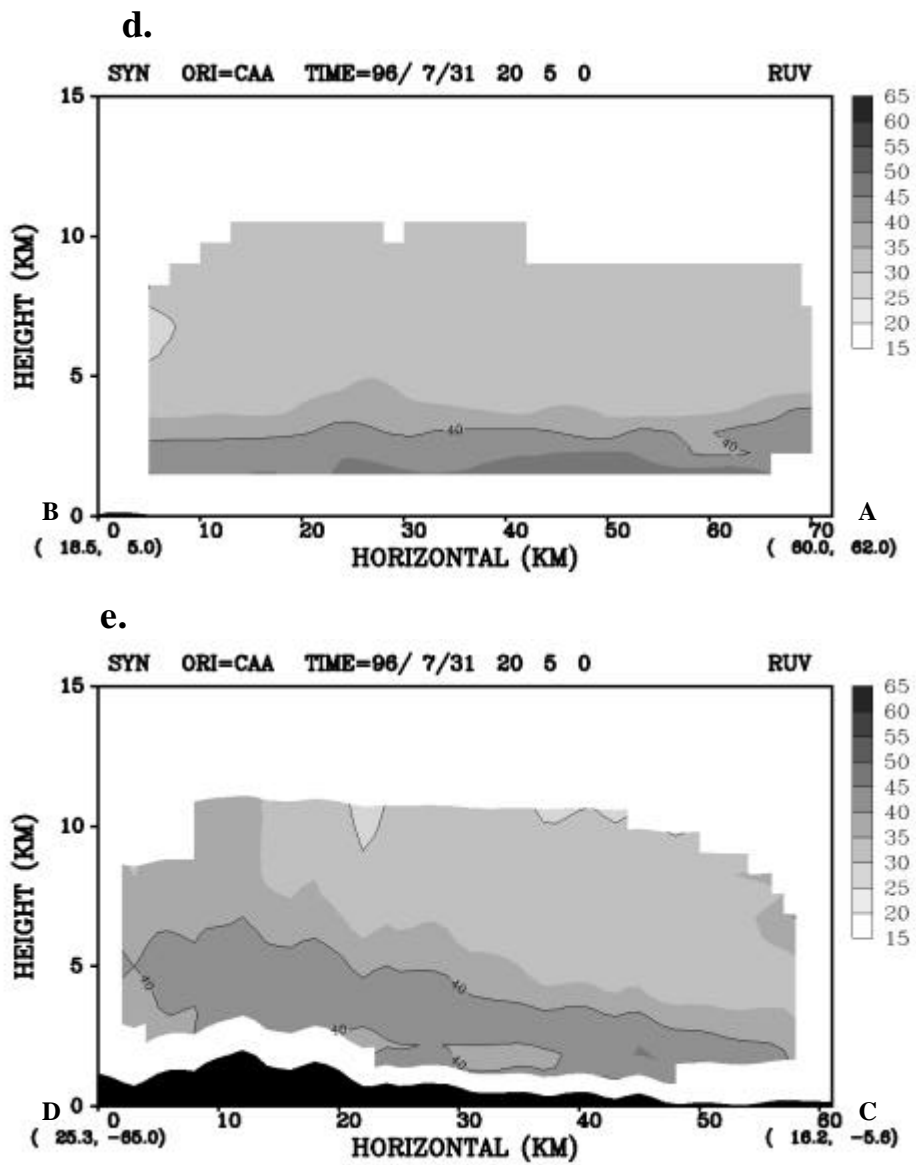


圖 3.6 2000LST , (a) 北邊分析區域的 AB 圓弧切向剖面 (同圖 3.2.a 上的 AB 圓弧) 之回波、切向風場及  $h$  場 ; (b) 橫越 AB 圓弧的徑向風 ; (c) 南邊分析區域橫越 CD 圓弧 (同圖 3.3.a 上的 CD 圓弧) 的徑向風 (箭頭表入流區的厚度)。



續圖 3.6 2000LST , (d) 北邊分析區域 , AB 圓弧切向剖面 ; (e) 南邊分析區域 , CD 圓弧切向剖面之相對水平風速場。

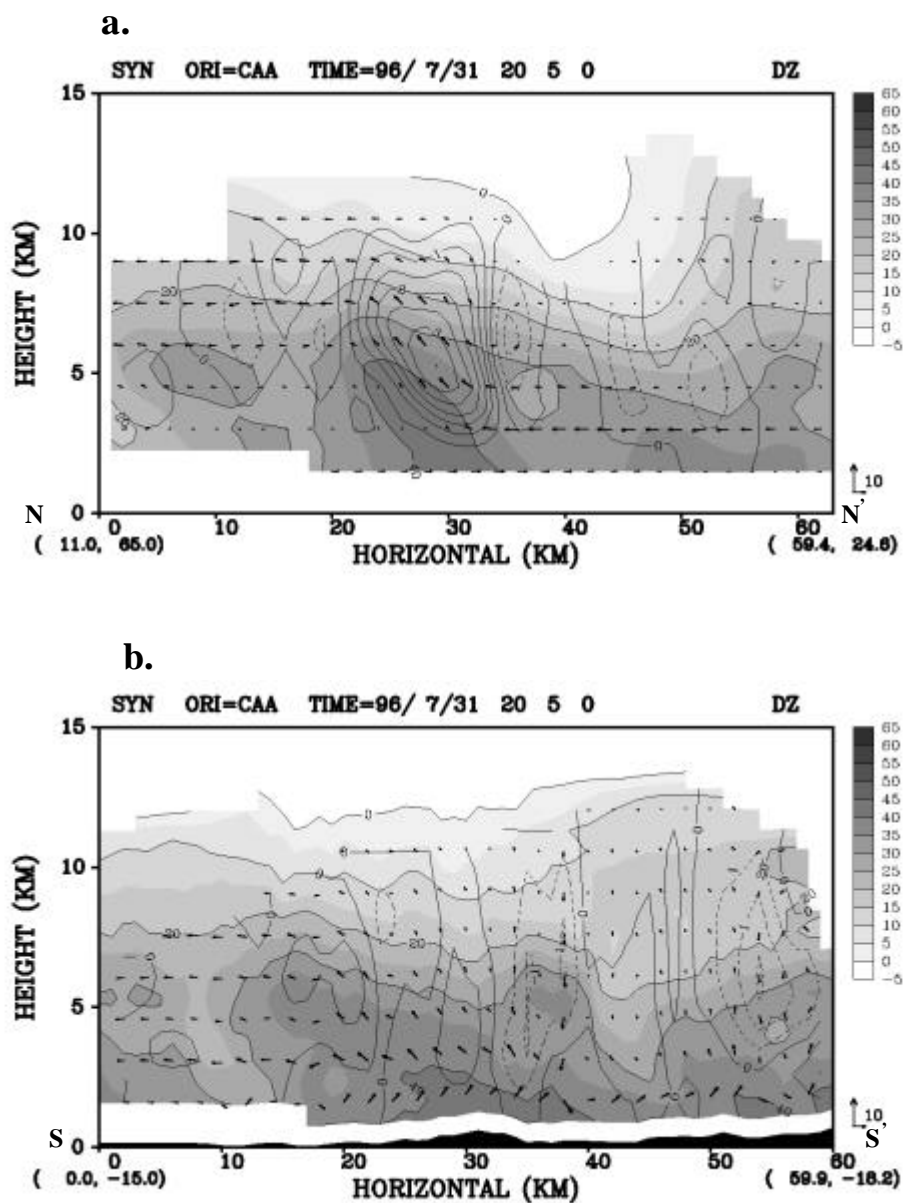
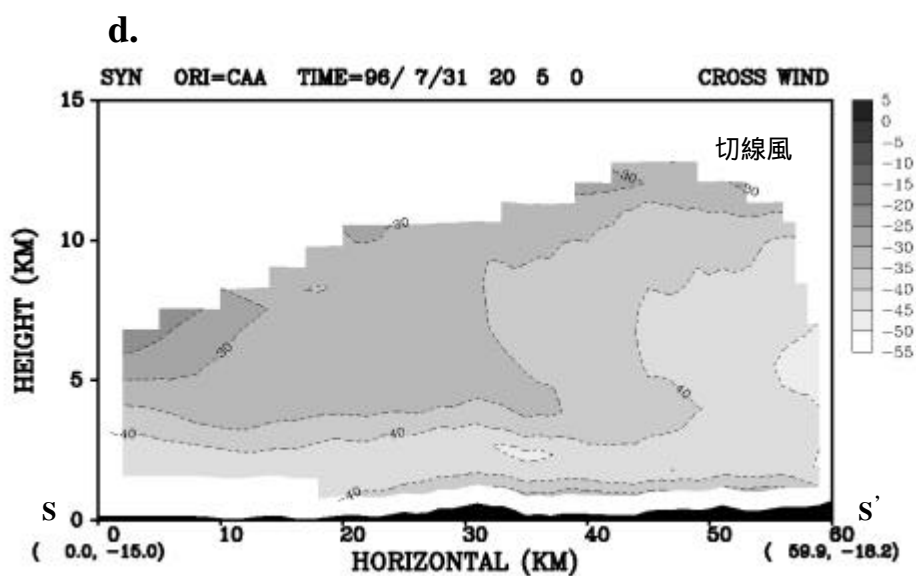
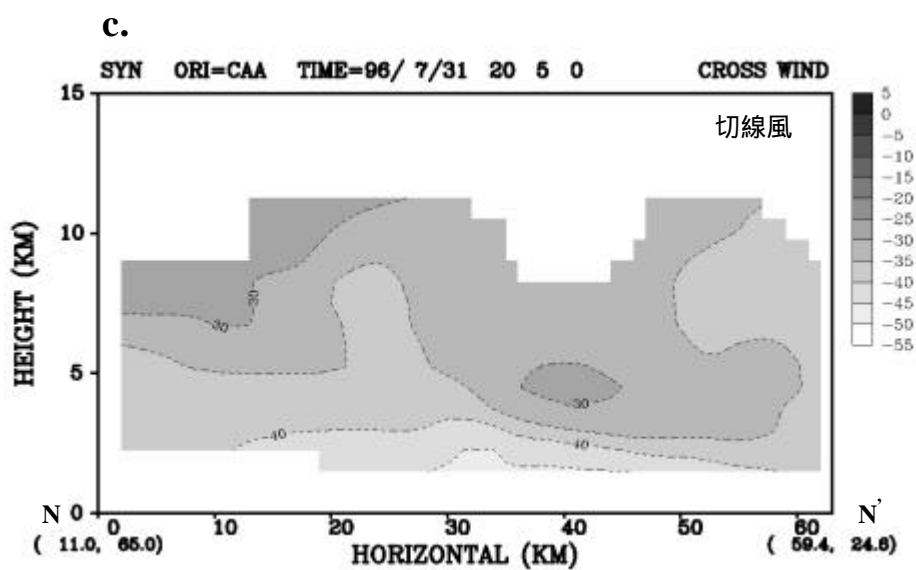


圖 3.7 2000LST ,(a)北邊分析區域，N-N'徑向剖面（同圖 3.2.a 上的 N-N'）；  
 (b)南邊分析區域，S-S'徑向剖面（同圖 3.3.a 上的 S-S'）的回波、  
 三維風場及 $h$ 場。



續圖 3.7 2000LST ,(c)北邊分析區域,橫越 N-N'剖面;(d)南邊分析區域,橫越 S-S'剖面的切向風。

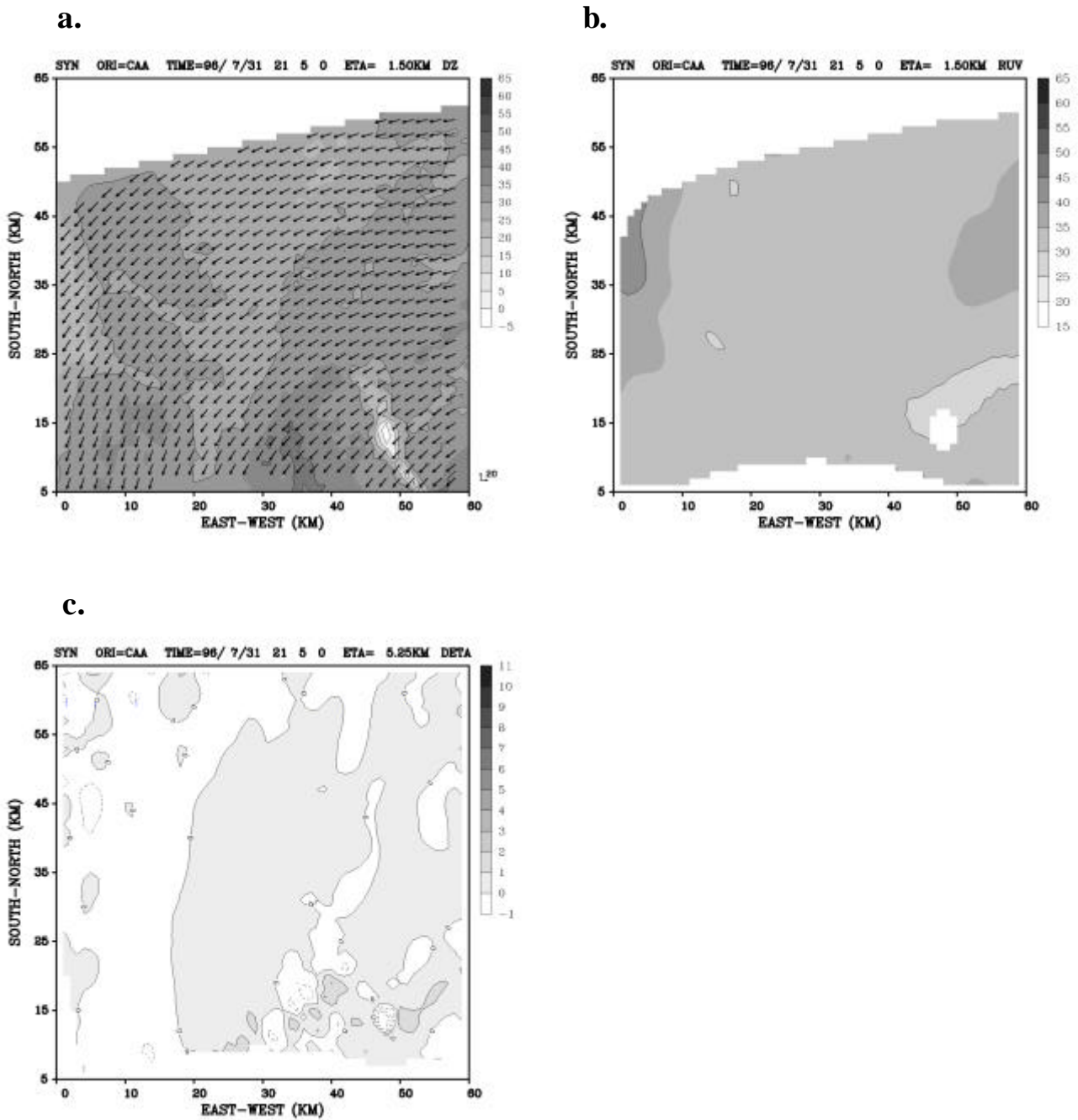
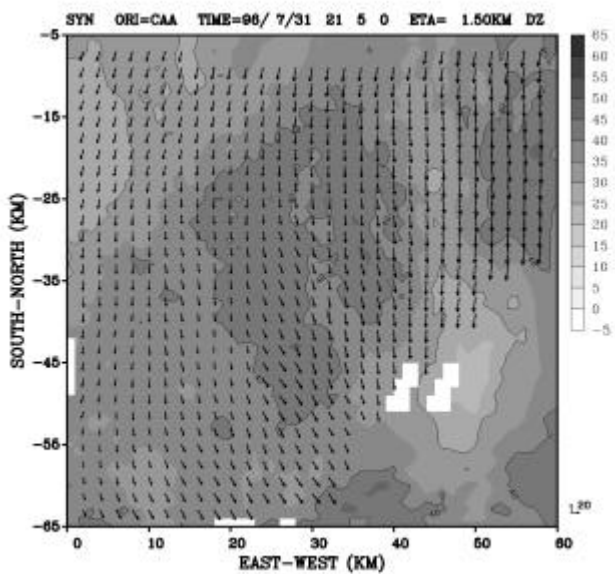


圖 3.8 北邊分析區域 2100LST, (a)  $=1.5\text{km}$  的回波及相對水平風場 ;(b)  $=1.5\text{km}$  的相對水平風速分布圖 ;(c)  $=5.25\text{km}$  的  $h$  場。



a.



b.

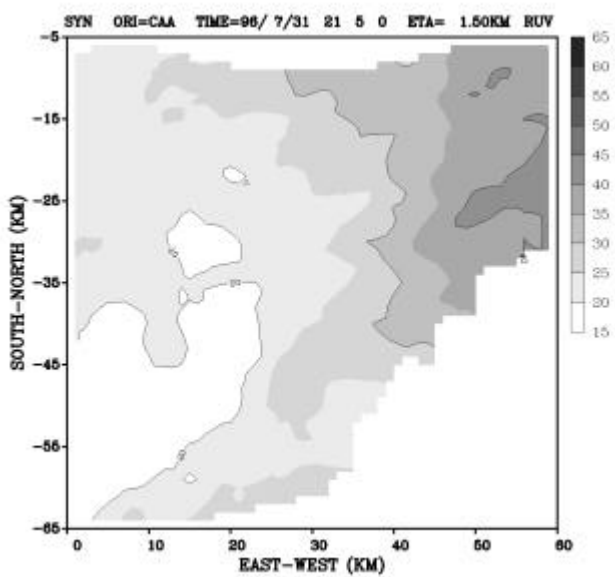


圖 3.9 南邊分析區域 2100LST ,(a) =1.5km 的回波及相對水平風場 ;(b) =1.5km 的相對水平風速分布圖。

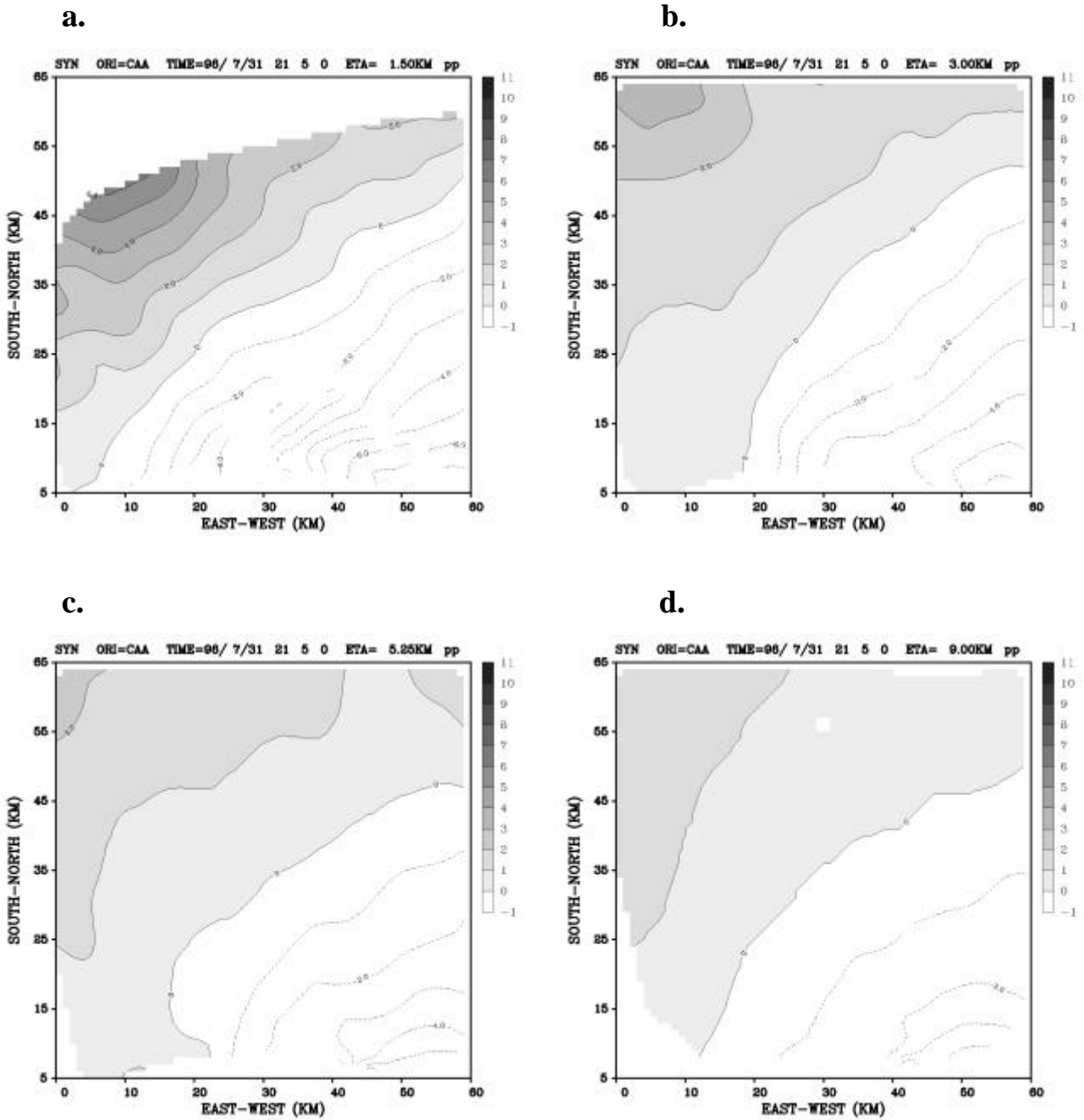


圖 3.10 北邊分析區域 2100LST ( a )  $z=1.5\text{km}$  ; ( b )  $z=3\text{km}$  ; ( c )  $z=5.25\text{km}$  ; ( d )  $z=9\text{km}$  的擾動壓力場。

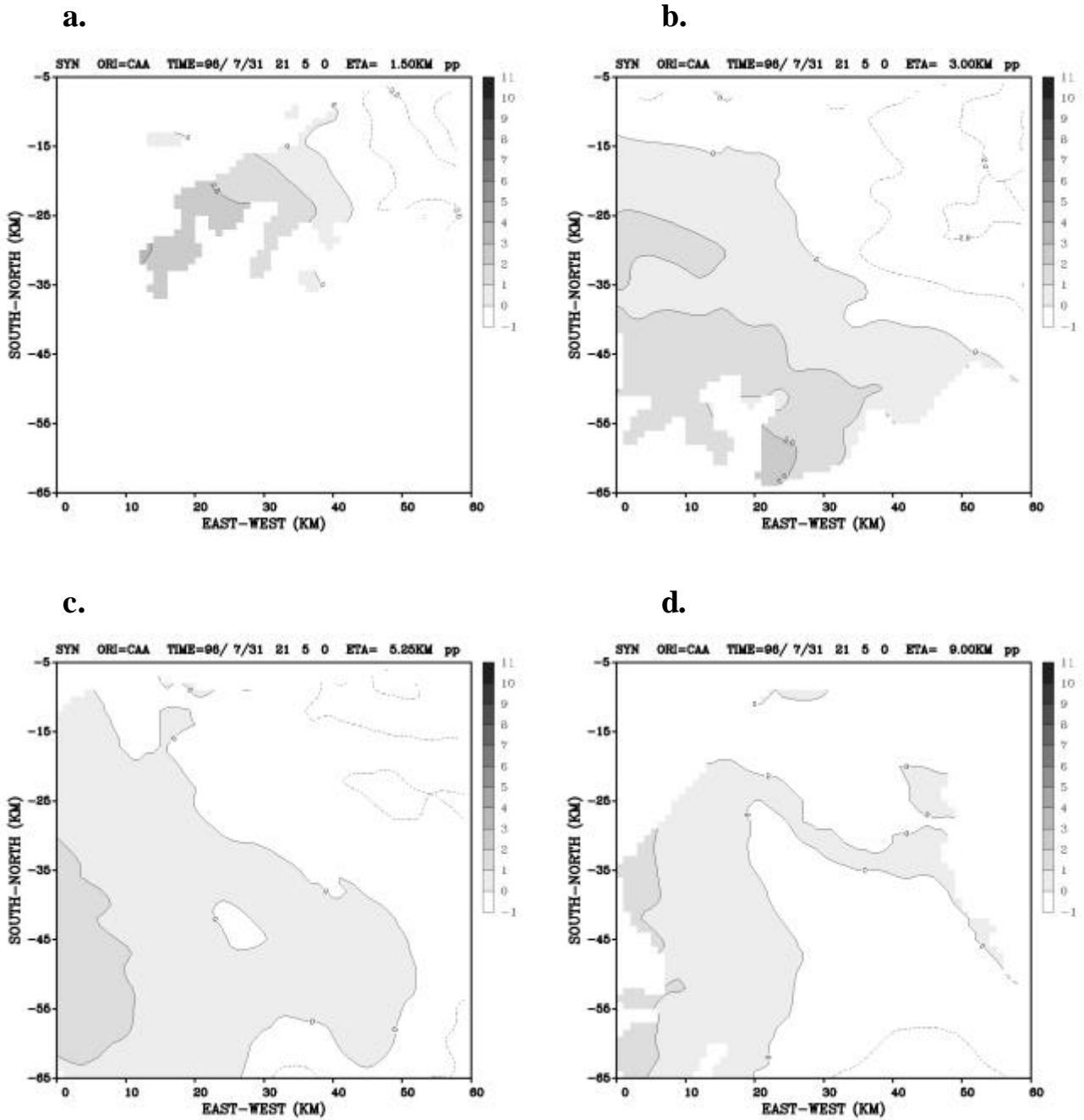


圖 3.11 南邊分析區域 2100LST ( a )  $z=1.5\text{km}$  ; ( b )  $z=3\text{km}$  ; ( c )  $z=5.25\text{km}$  ; ( d )  $z=9\text{km}$  的擾動壓力場。

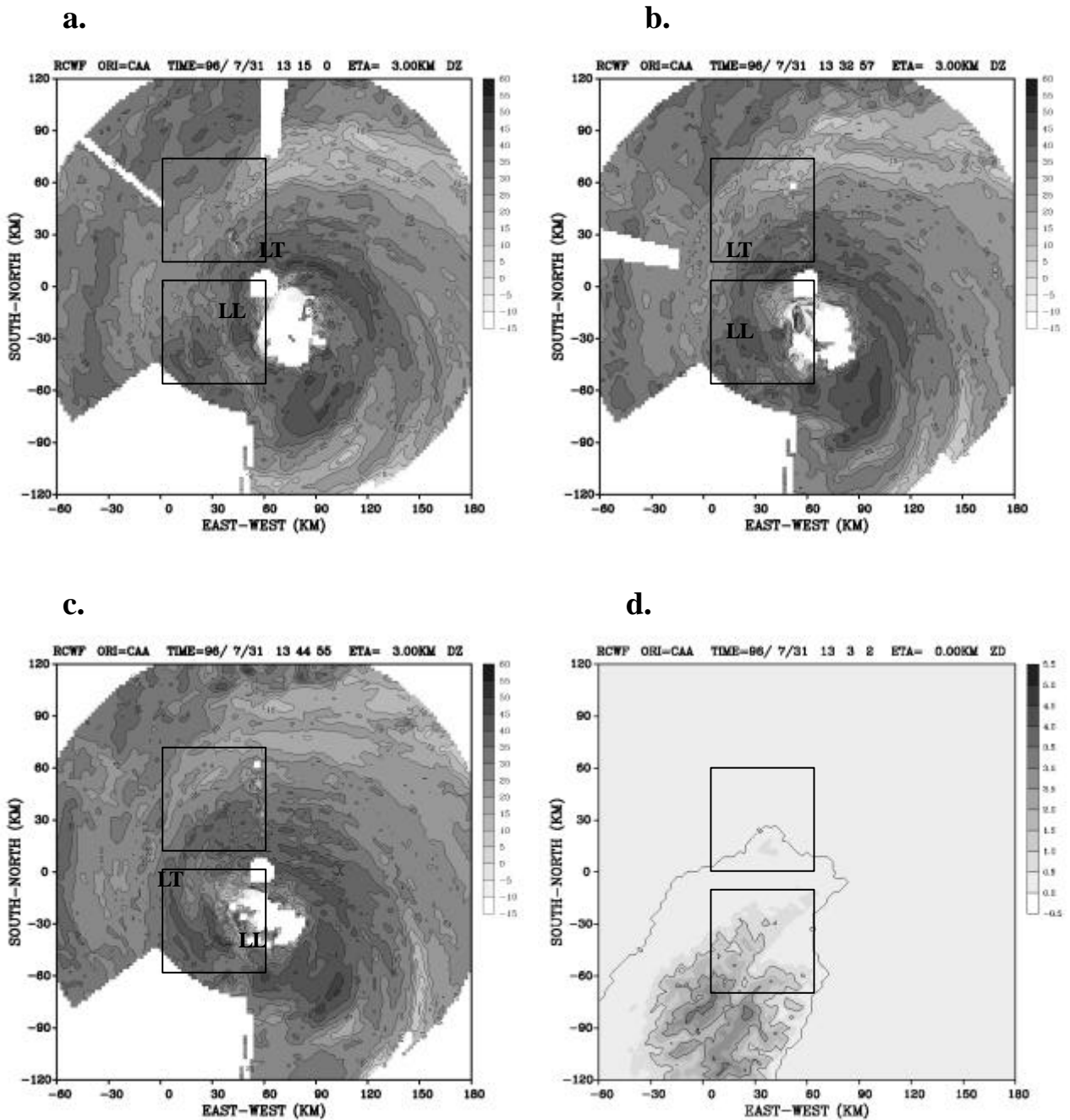


圖 3.12  $z=3\text{km}$  的雷達回波圖，LT 表長軸端點附近之眼牆結構，LL 表長軸左側的眼牆結構 (a) 2115LST ; (b) 2130LST ; (c) 2145LST ; (d) 分析區域內的地形圖。

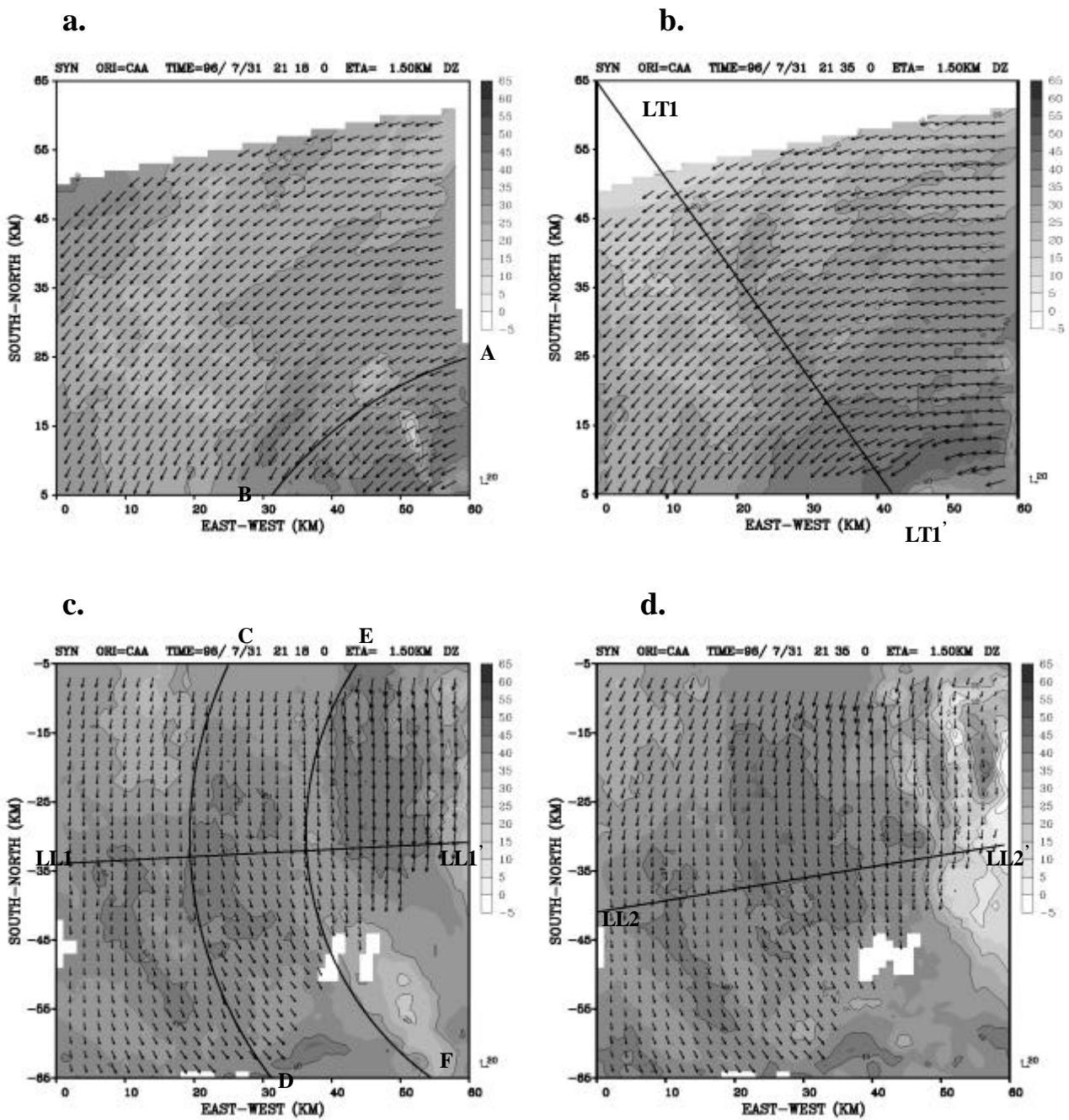
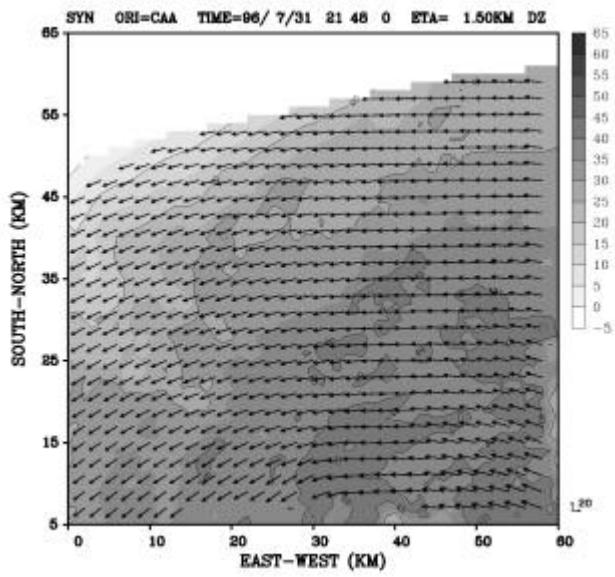
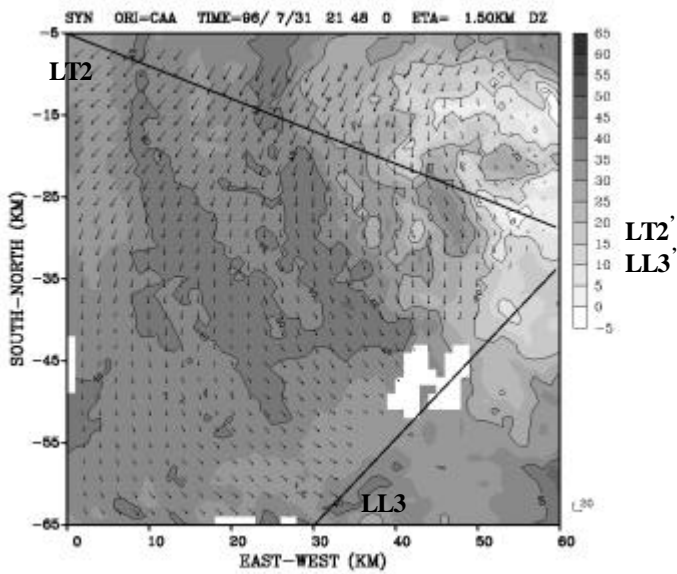


圖 3.13  $=3\text{km}$  的回波及相對水平風場圖 (a) 北邊分析區域 2115LST ;(b) 北邊分析區域 2130LST ;(c) 南邊分析區域 2115LST , ;(d) 南邊分析區域 2130LST。

e.



f.



續圖 3.13 =3km 的回波及相對水平風場圖(e)北邊分析區域 2145LST;(f)南邊分析區域 2145LST。

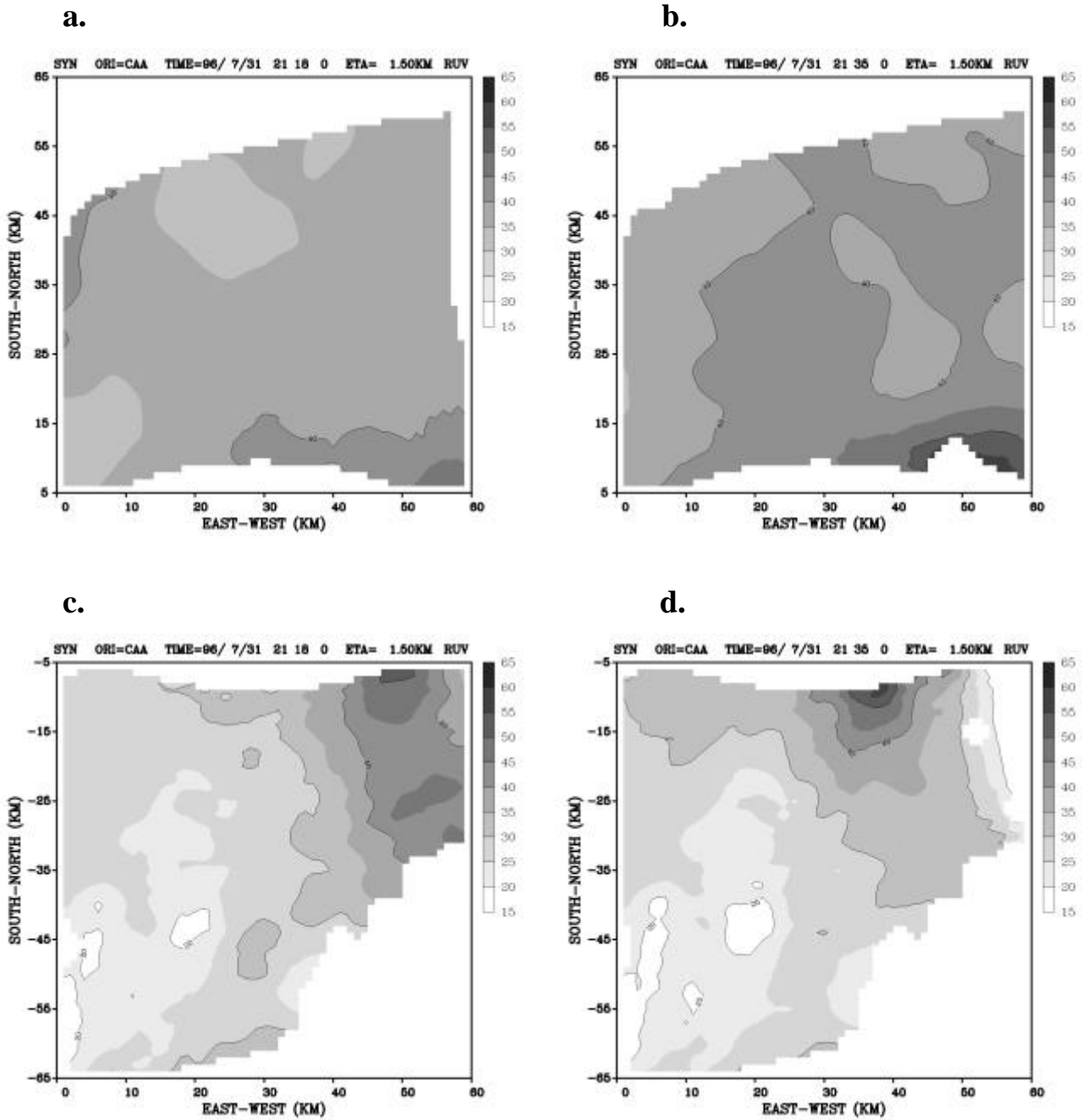
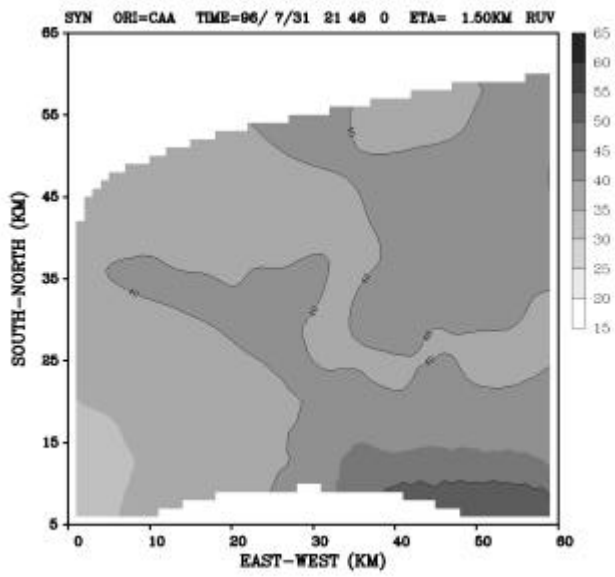
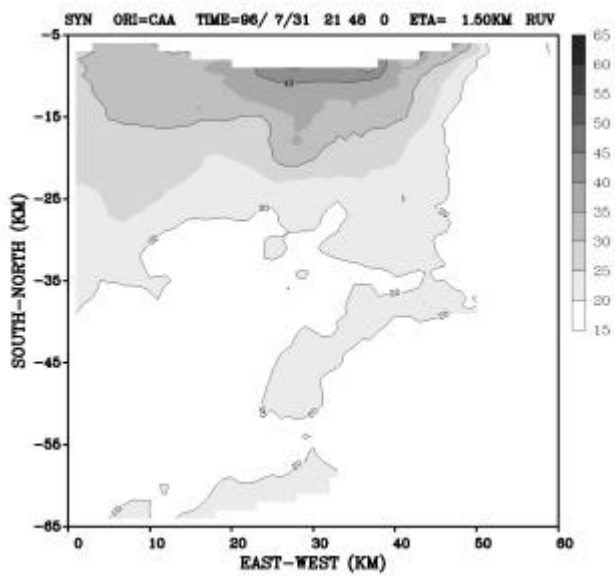


圖 3.14 =1.5km 的相對水平風速分布圖 (a) 北邊分析區域 2115LST ;(b) 北邊分析區域 2130LST ;(c) 南邊分析區域 2115LST ;(d) 南邊分析區域 2130LST。

e.



f.



續圖 3.14 =1.5km 的相對水平風速分布圖(e)北邊分析區域 2145LST;(f)南邊分析區域 2145LST。



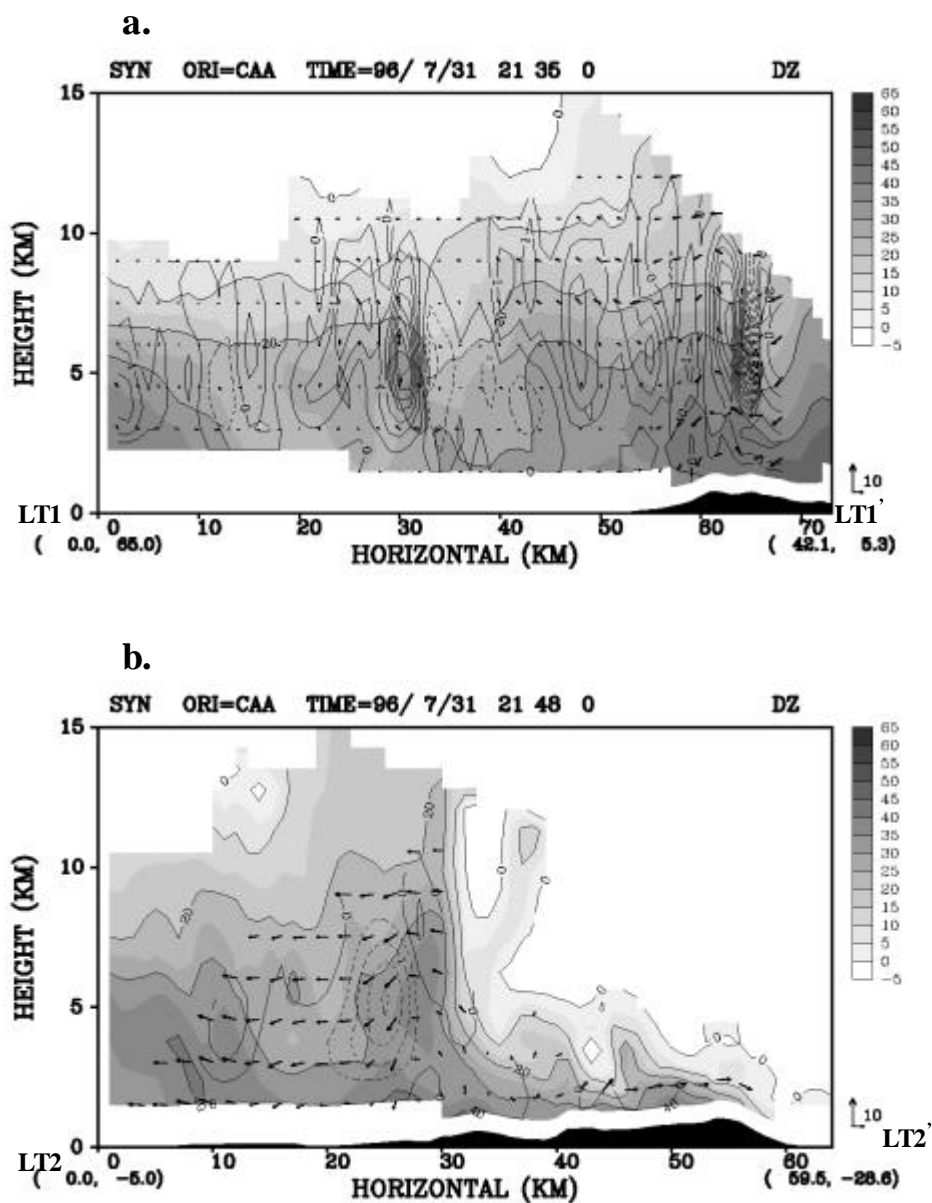
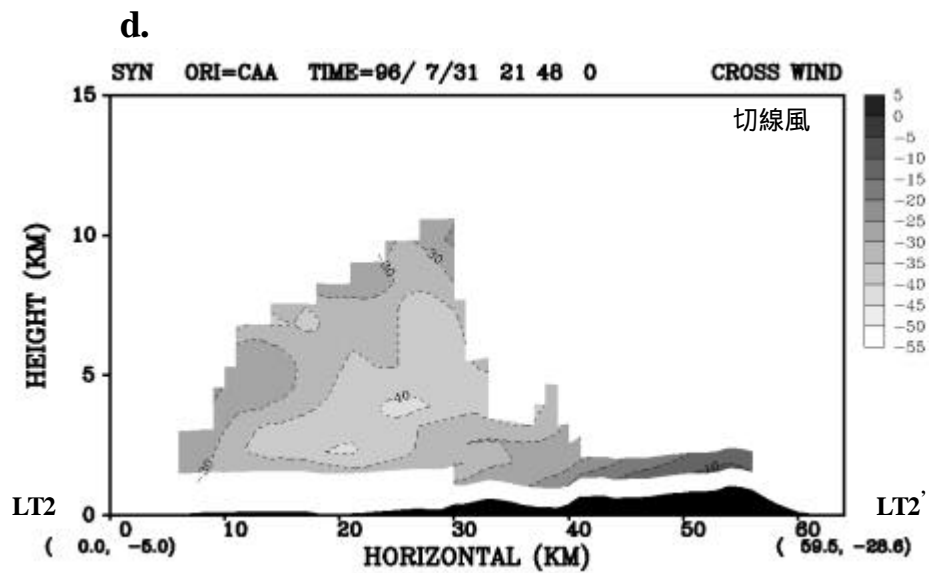
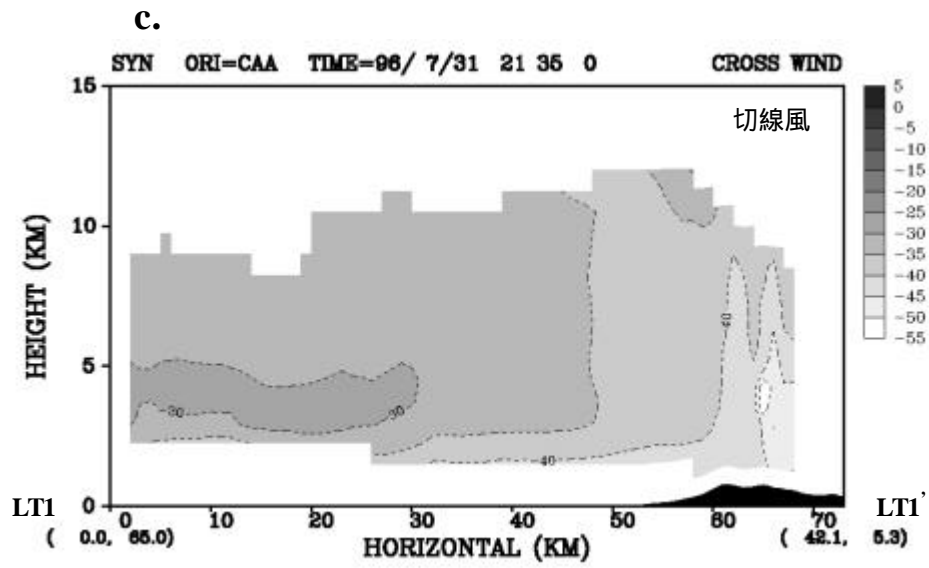


圖 3.15 切過長軸端點所指之眼牆結構 (LT) 的徑向剖面, (a) 北邊分析區域 2130LST, LT1-LT1'剖面 (同圖 3.13.b 上的 LT1-LT1'); (b) 南邊分析區域 2145LST, LT2-LT2'剖面 (同圖 3.13.f 上的 LT2-LT2') 的回波、徑向風場以及  $h$  場。



續圖 3.15 橫越 LT 結構的徑向剖面之切線風 (c) 北邊分析區域 2130LST，橫越 LT1-LT1' 剖面；(d) 南邊分析區域 2145LST，橫越 LT2-LT2' 剖面的切線風。

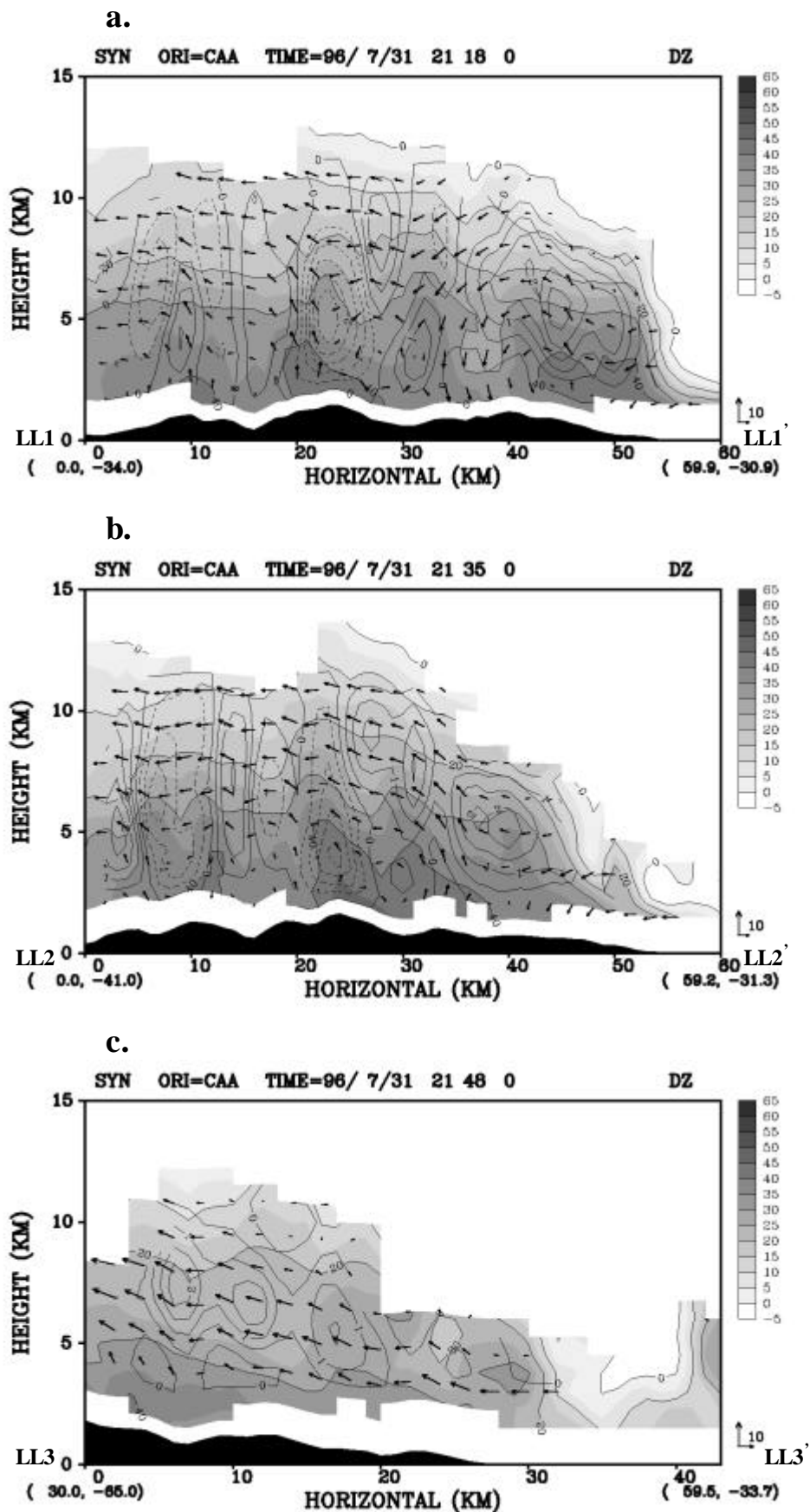
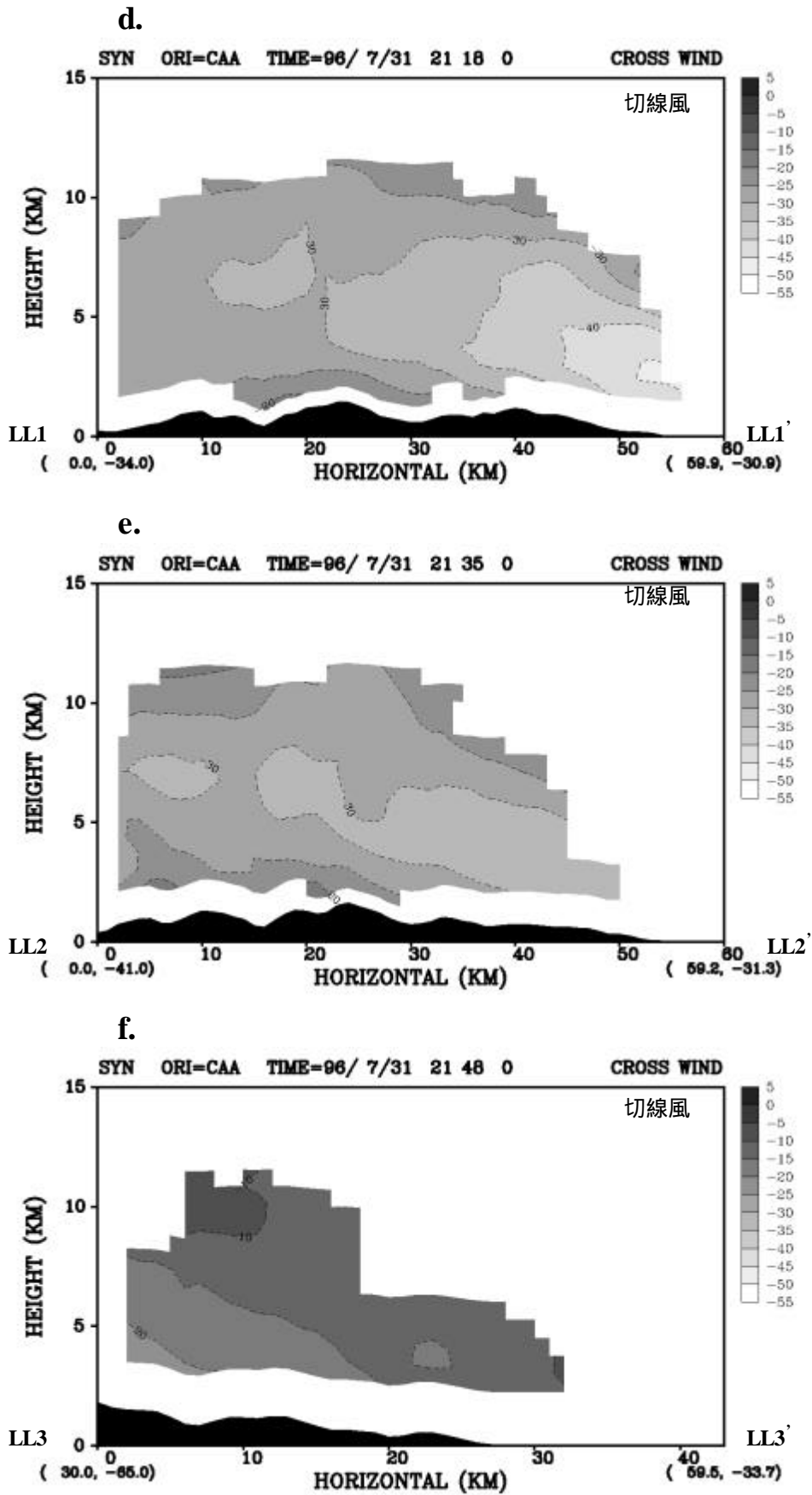


圖 3.16 南邊分析區域，切過長軸一側眼牆結構 (LL) 的徑向剖面 (a) 2115LST, LL1-LL1' 剖面 (同圖 3.13.c 上的 LL1-LL1'); (b) 2130LST, LL2-LL2' 剖面 (同圖 3.13.d 上的 LL2-LL2'); (c) 2145LST, LL3-LL3' 剖面 (同圖 3.13f 的 LL3-LL3') 的回波、徑向風場以及  $h$  場。



續圖 3.16 南邊分析區域，橫越 LL 結構的徑向剖面之切線風 (d) 2115LST，橫越 LL1-LL1' 剖面；(e) 2130LST，橫越 LL2-LL2' 剖面；(f) 2145LST，橫越 LL3-LL3' 剖面的切線風。

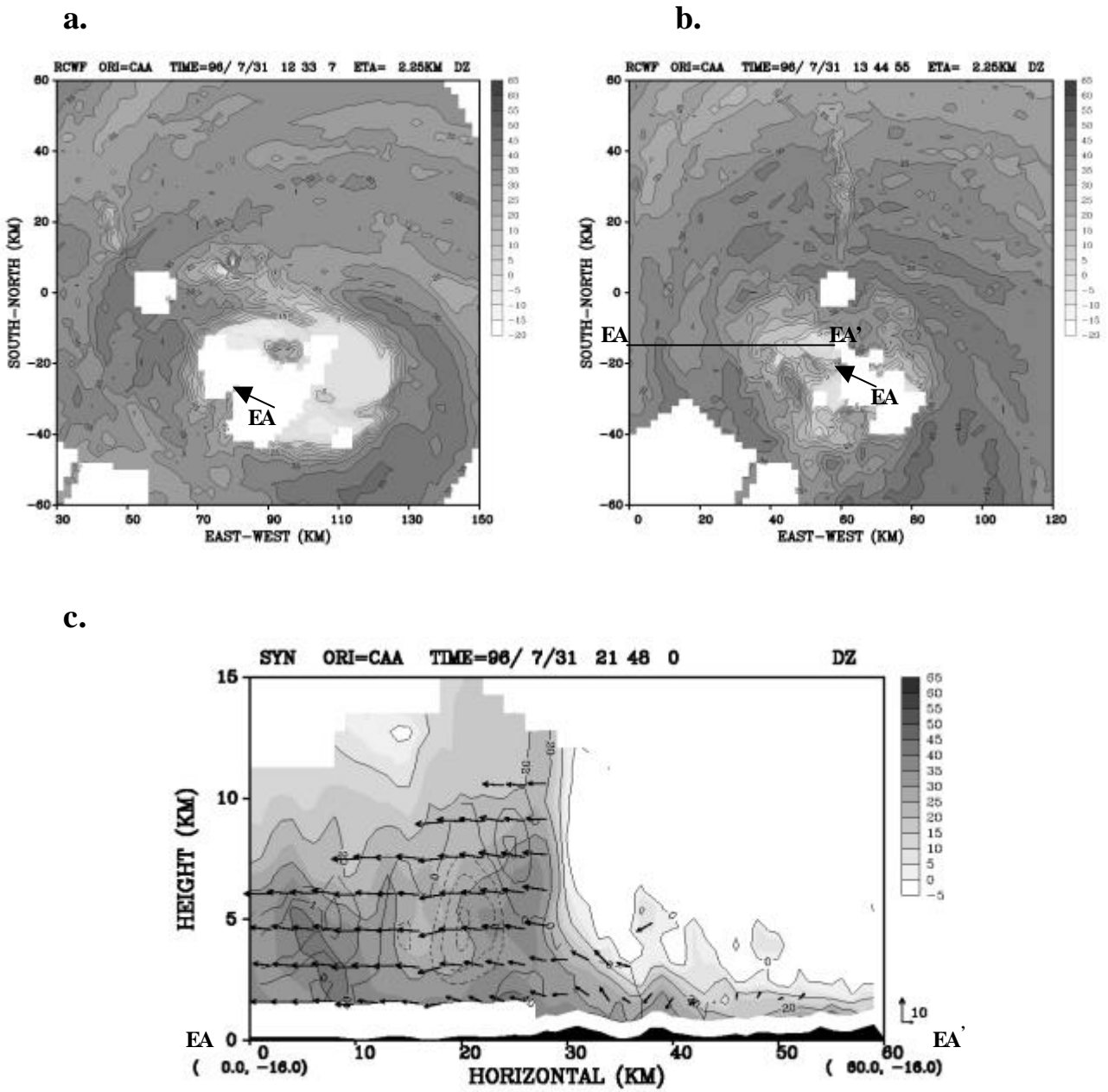
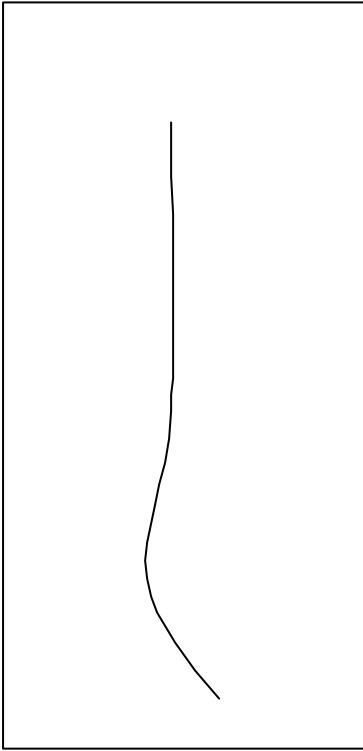
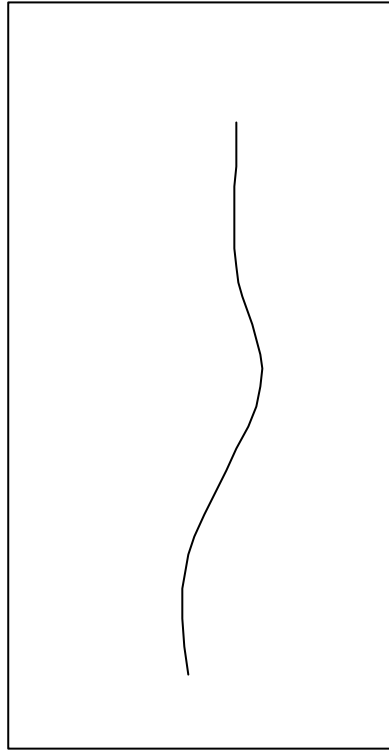


圖 3.17 (a) 2030LST,  $z=2.25\text{km}$  的雷達回波圖, EA 表長軸內側的小渦旋;  
 (b) 2145LST,  $z=2.25\text{km}$  的雷達回波圖, EA 表長軸內側的小渦旋;  
 (c) 橫越小渦旋的 EA-EA' 垂直剖面 (同圖 3.17.b 上的 EA-EA') 的回波、徑向風場以及  $h$  場。

a.



b.



c.

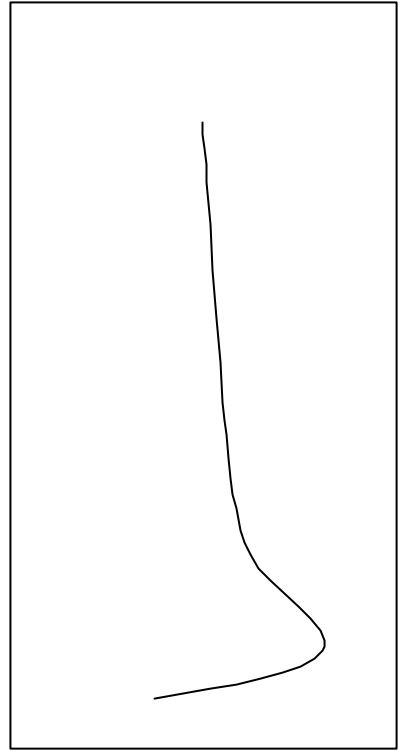
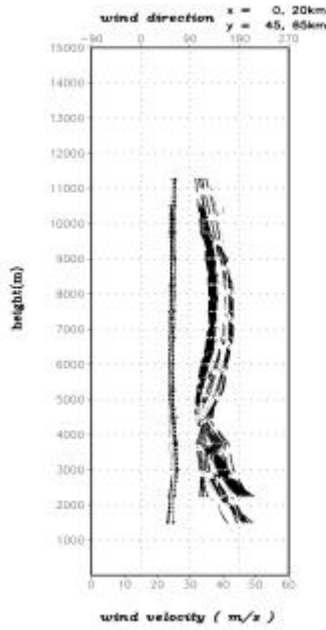
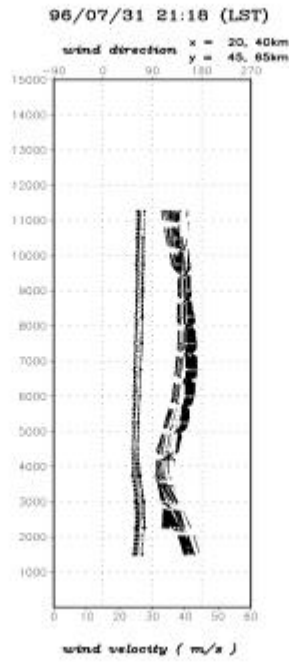


圖 3.18 風場分布類型 (a) 北邊分析區域內的主要分布類型 ;(b) 南邊分析區域內的分布類型 Type<sup>2</sup> ;(c) 南邊分析區域內之分布類型 Type II。

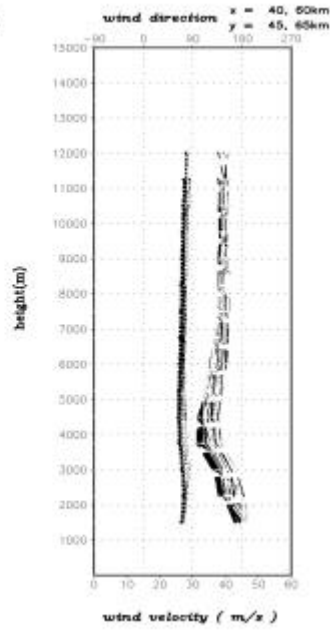
a. domain 1



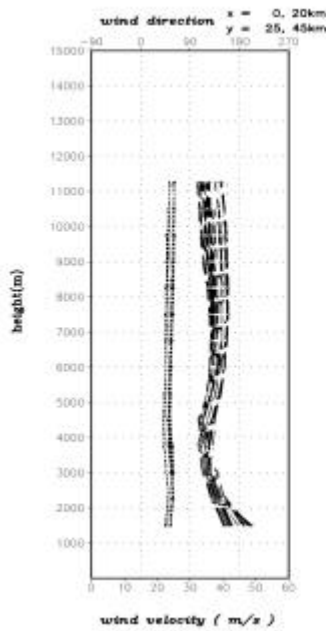
domain 2



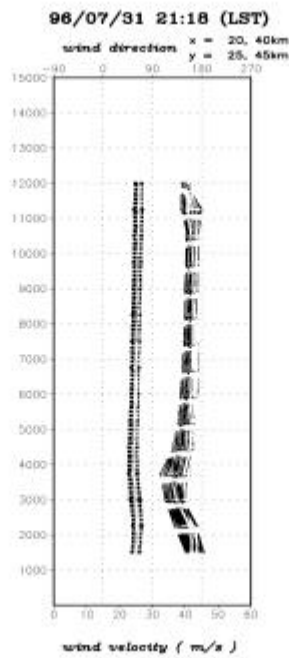
domain 3



b. domain 4



domain 5



domain 6

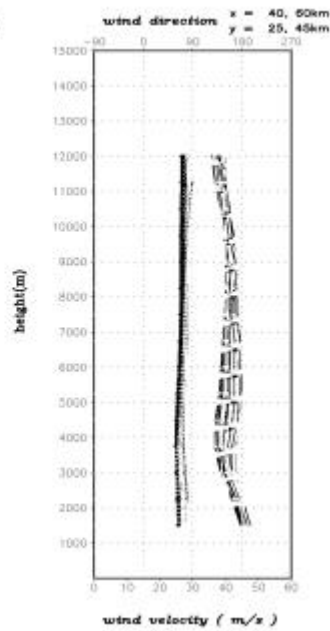
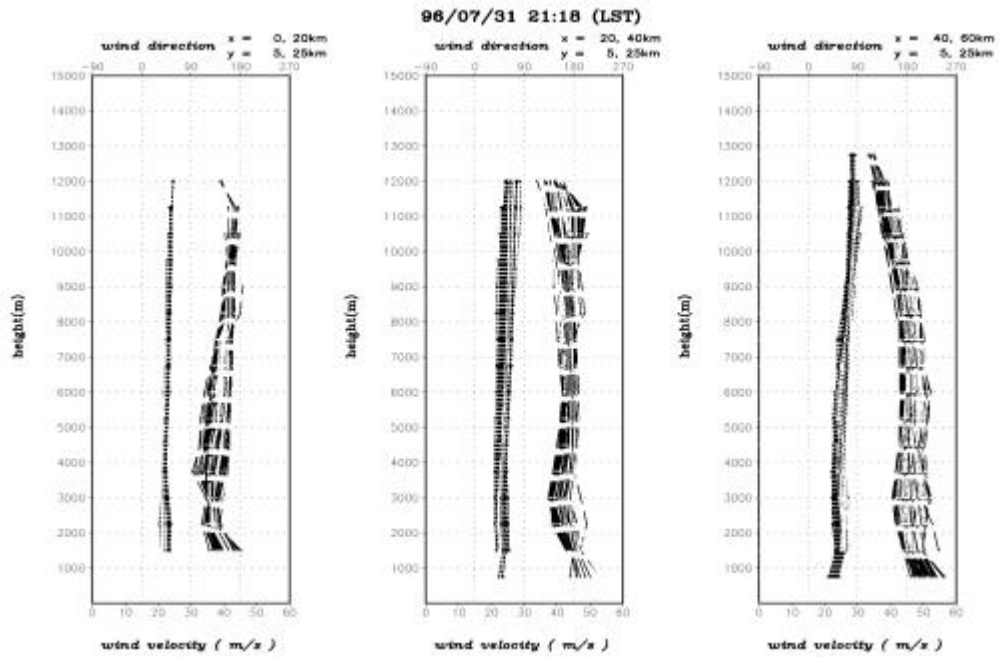


圖 3.19 北邊分析區域 2115LST 之水平風場垂直統計 (a) domain 1~3 ; (b) domain 4~6 (如圖 2.1.a 的分區)

c. domain 7

domain 8

domain 9



續圖 3.19 北邊分析區域 2115LST 之水平風場垂直統計 (c) domain 7~9 (如圖 2.1.a 上的分區)。



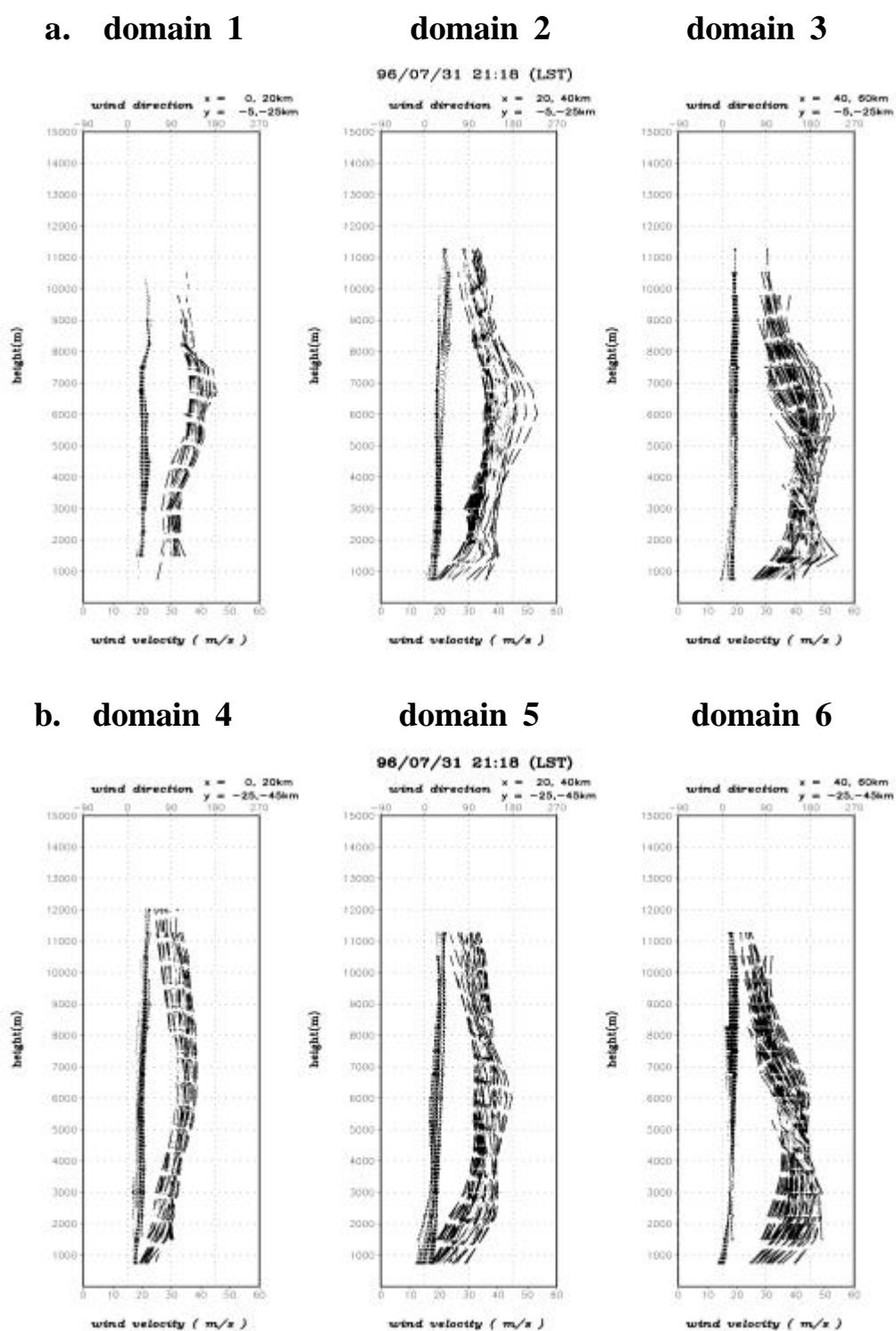
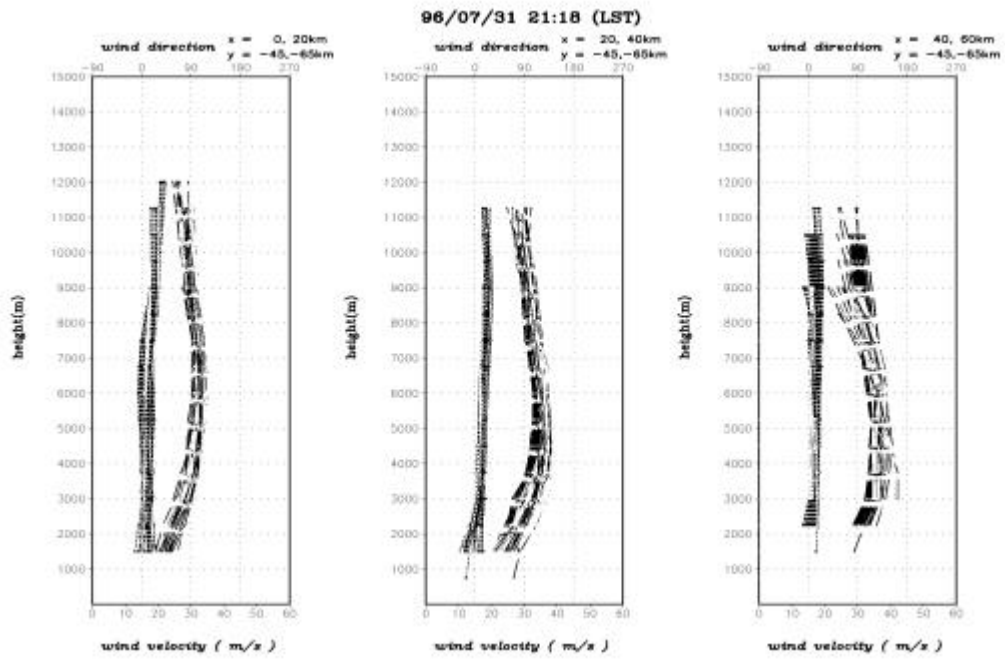


圖 3.20 南邊分析區域 2115LST 之水平風場垂直統計 (a) domain 1~3 ; (b) domain 4~6 (如圖 2.1.b 的分區)。

c. domain 7

domain 8

domain 9



續圖 3.20 南邊分析區域 2115LST 之水平風場垂直統計 ( c ) domain 7~9 ( 如圖 2.1.b 上的分區 )。

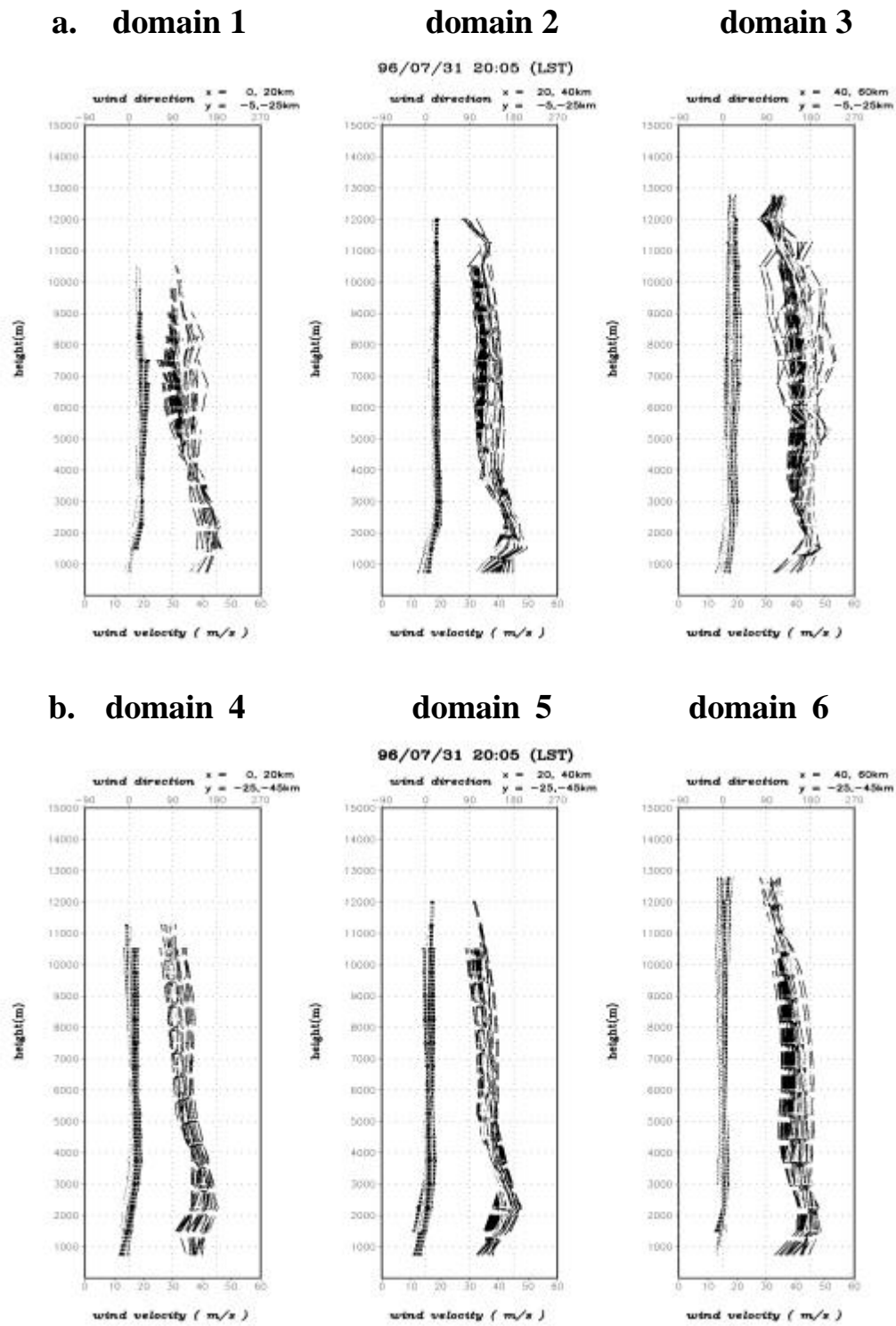
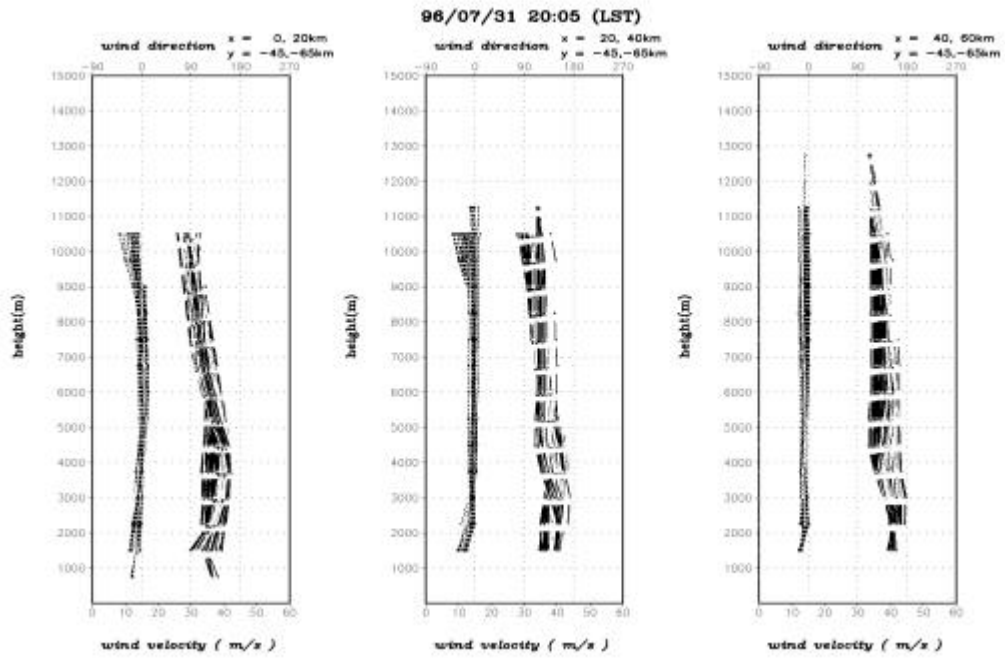


圖 3.21 南邊分析區域 2000LST 之水平風場垂直統計 ( a ) domain 1~3 ; ( b ) domain 4~6.

c. domain 7

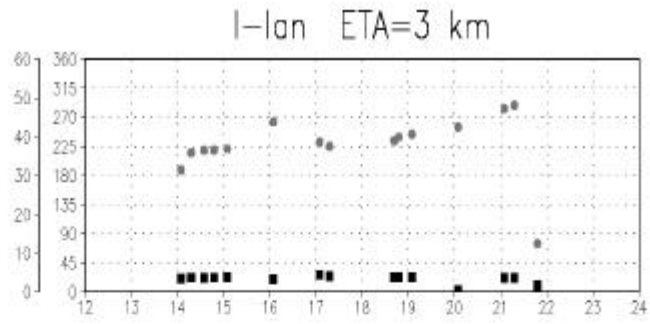
domain 8

domain 9

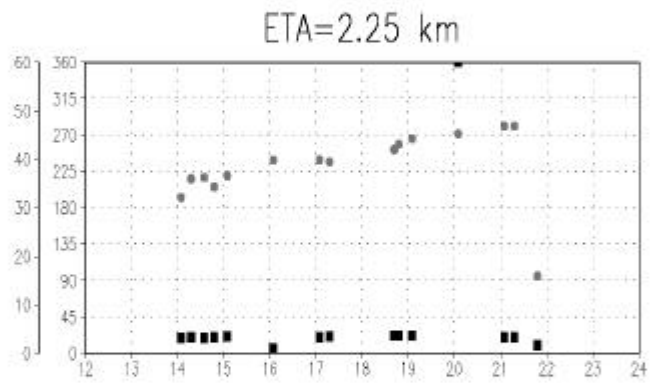


續圖 3.21 南邊分析區域 2000LST 之水平風場垂直統計 (c) domain 7~9。

a.



b.



c.

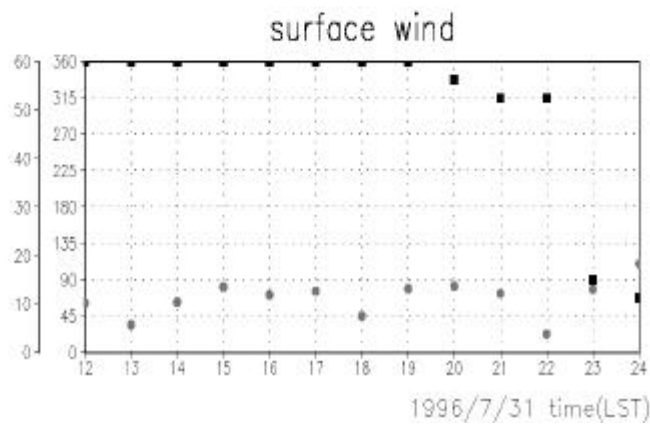
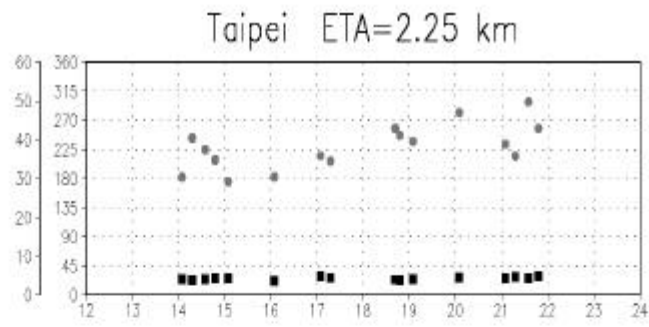
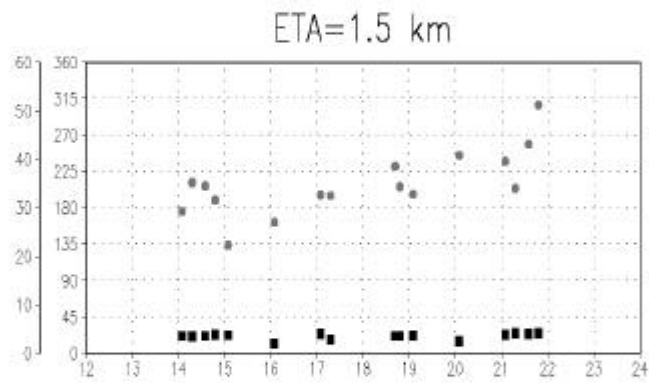


圖 3.22 宜蘭測站之水平風速與風向的時序變化（正方形表風向，圓形表水平風速）；(a) =3km 的雷達資料；(b) =2.25km 的雷達資料；(c) 地面站資料。

a.



b.



c.

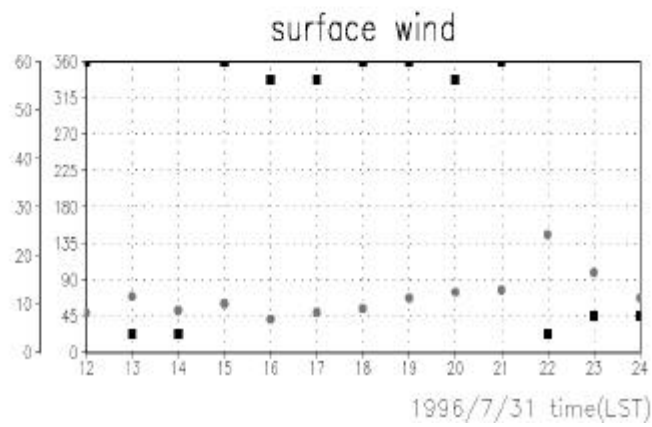
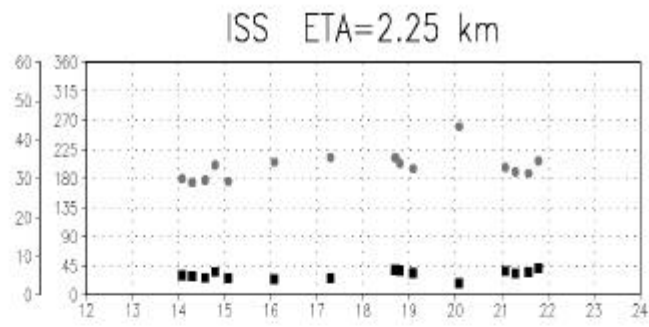
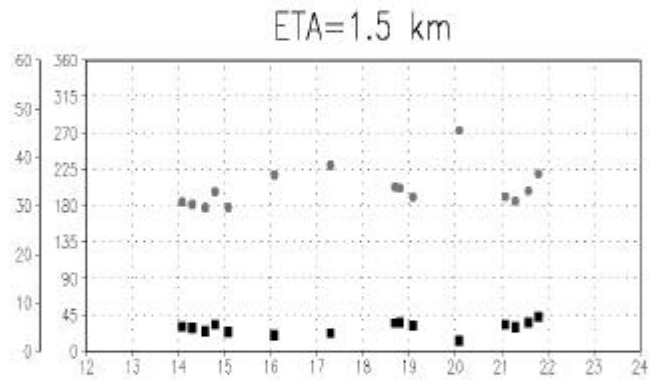


圖 3.23 台北測站之水平風速與風向的時序變化（正方形表風向，圓形表水平風速）；(a) =2.25km 的雷達資料；(b) =1.5km 的雷達資料；(c) 地面站資料。

a.



b.



c.

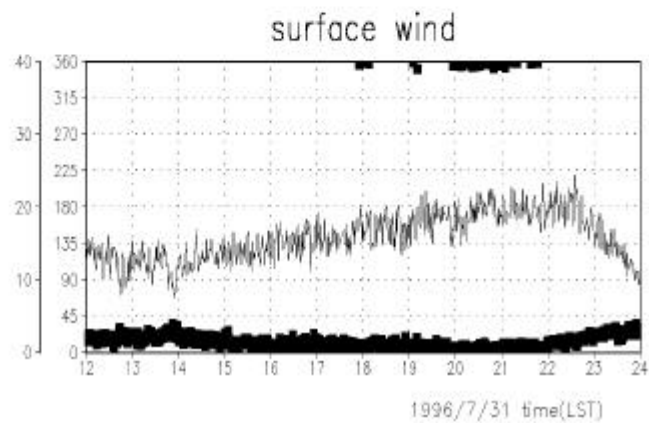


圖 3.24 中央大學 ISS 測站之水平風速與風向的時序變化（正方形表風向，實線表水平風速）；(a) =2.25km 的雷達資料；(b) =1.5km 的雷達資料；(c) 地面站資料。

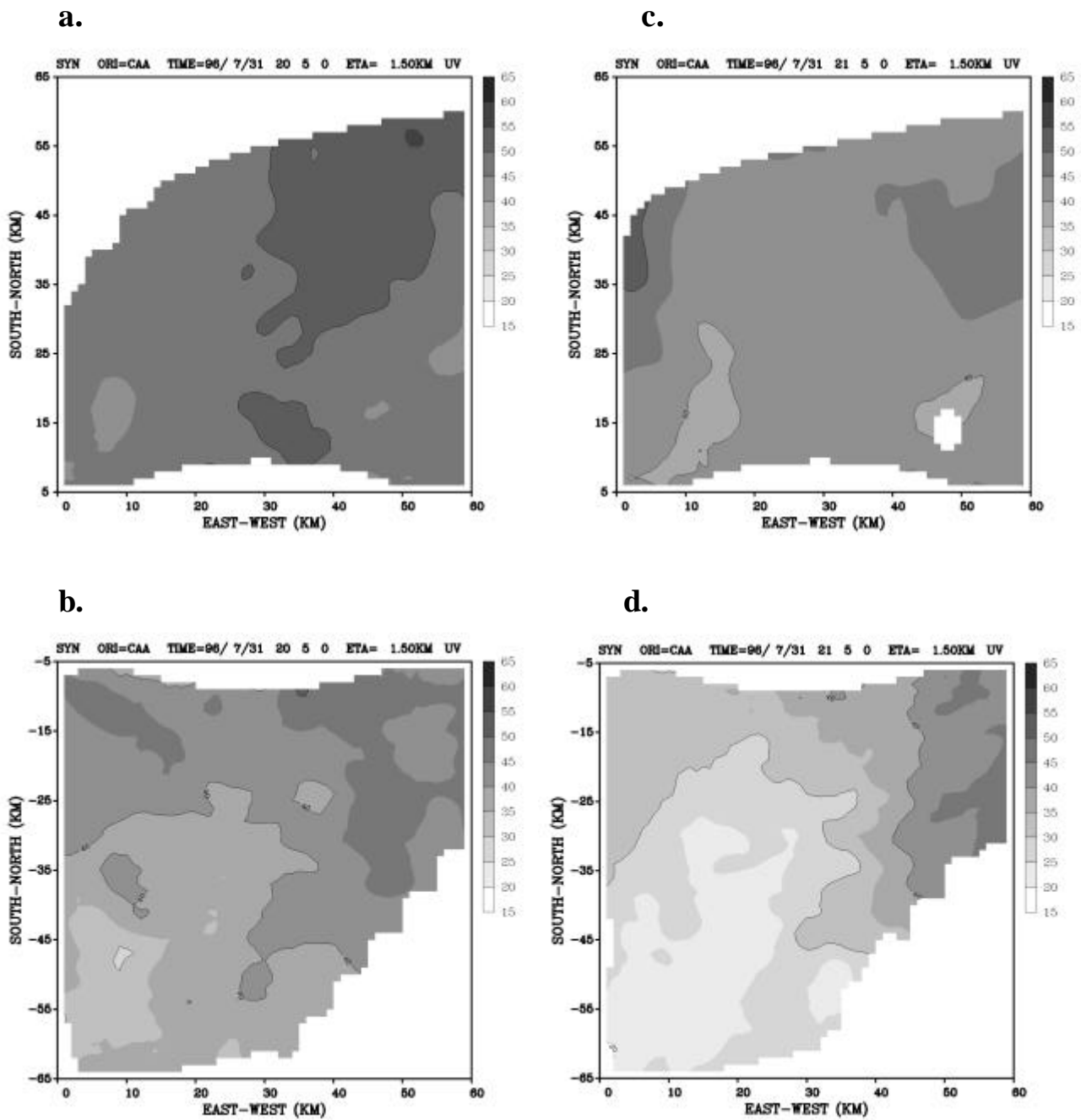
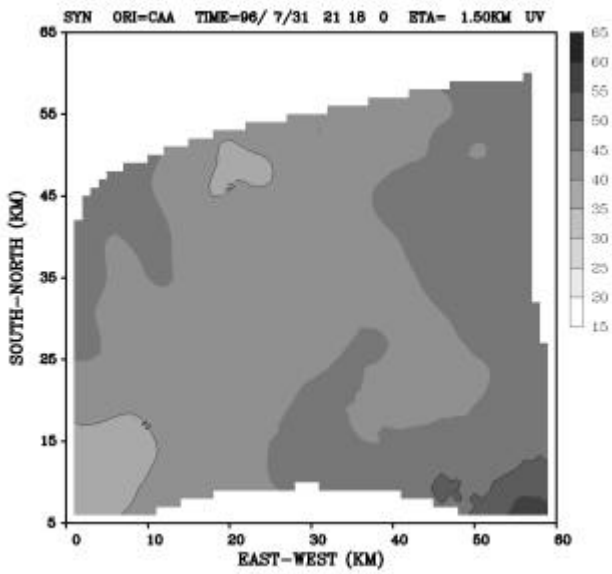


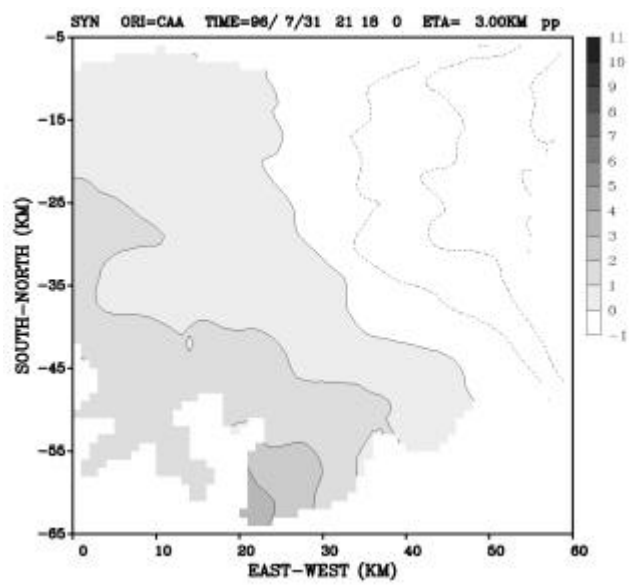
圖 4.1  $=1.5\text{km}$  的水平風速圖 (a) 北邊分析區域 2000LST ;(b) 南邊分析區域 2000LST ;(c) 北邊分析區域 2100LST ;(d) 南邊分析區域 2100LST。



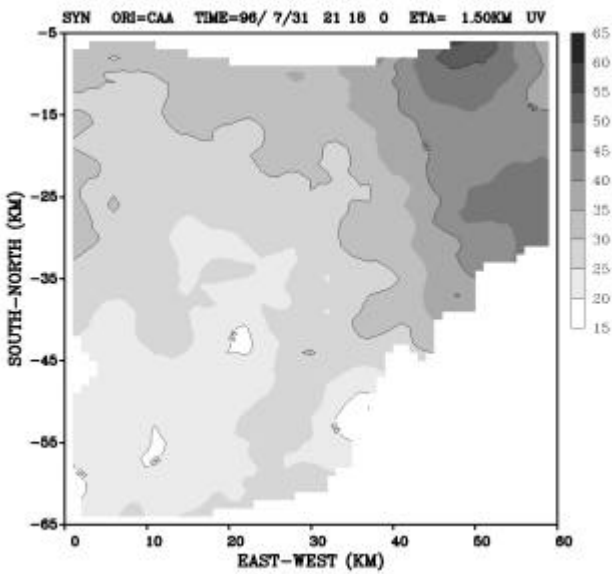
e.



g.



f.



續圖 4.1 (e) 北邊分析區域 2115LST,  $z=1.5\text{km}$  的水平風速圖 ;(f) 南邊分析區域 2115LST,  $z=1.5\text{km}$  的水平風速圖 (g) 南邊分析區域 2115LST,  $z=3\text{km}$  擾動壓力場的分布。

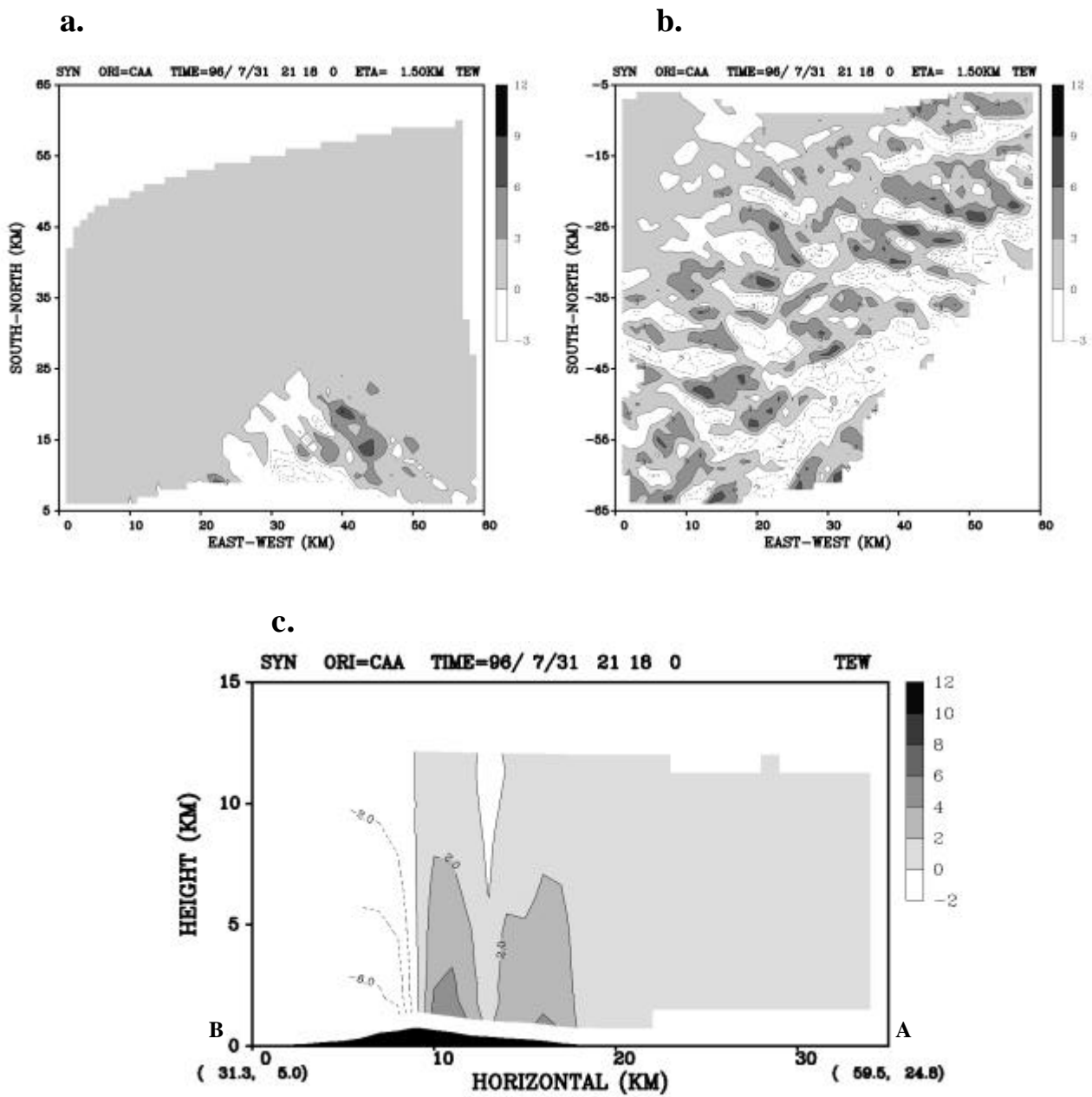
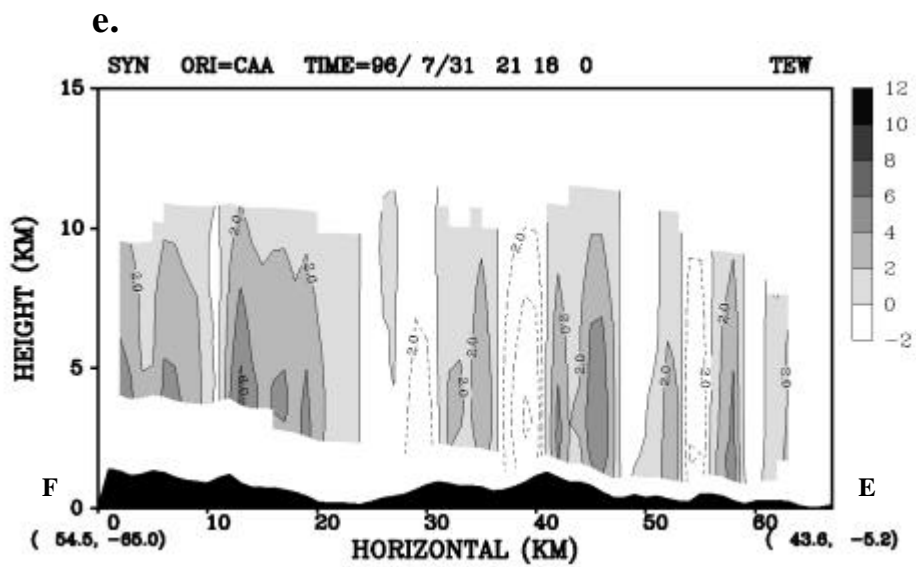
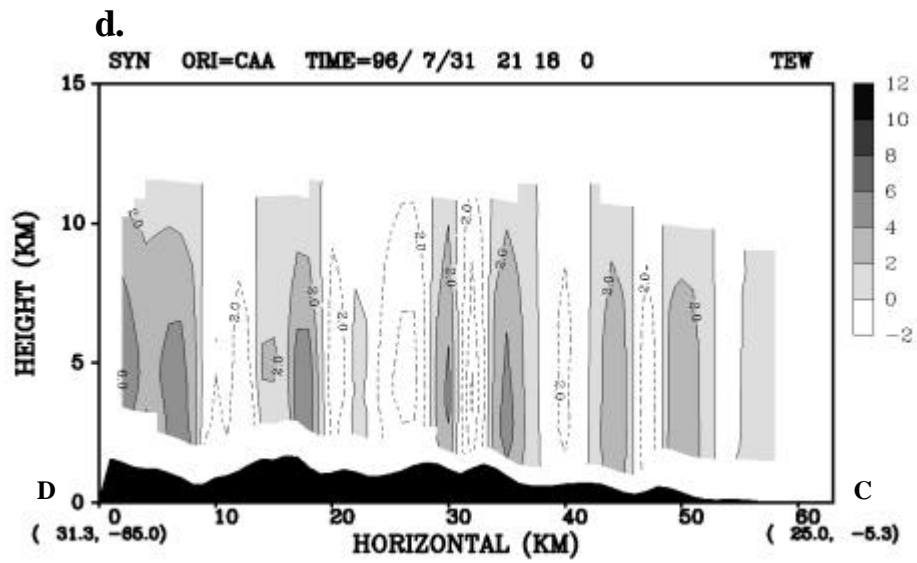


圖 4.2 2115LST，地形強迫作用造成的垂直速度場  $W_t$  (a)  $=1.5\text{km}$  的北邊分析區域；(b)  $=1.5\text{km}$ ，南邊分析區域；(c) 北邊分析區域內之 AB 圓弧切向剖面（同圖 3.13.a 上的 AB 圓弧剖面）。



續圖 4.2 南邊分析區域 2115LST，地形強迫作用造成的垂直速度場  $W_t$  (d) CD 圓弧的切向剖面 (同圖 3.13.c 上的 CD 圓弧); (e) EF 圓弧之切向剖面 (同圖 3.13.c 上的 EF 圓弧)。

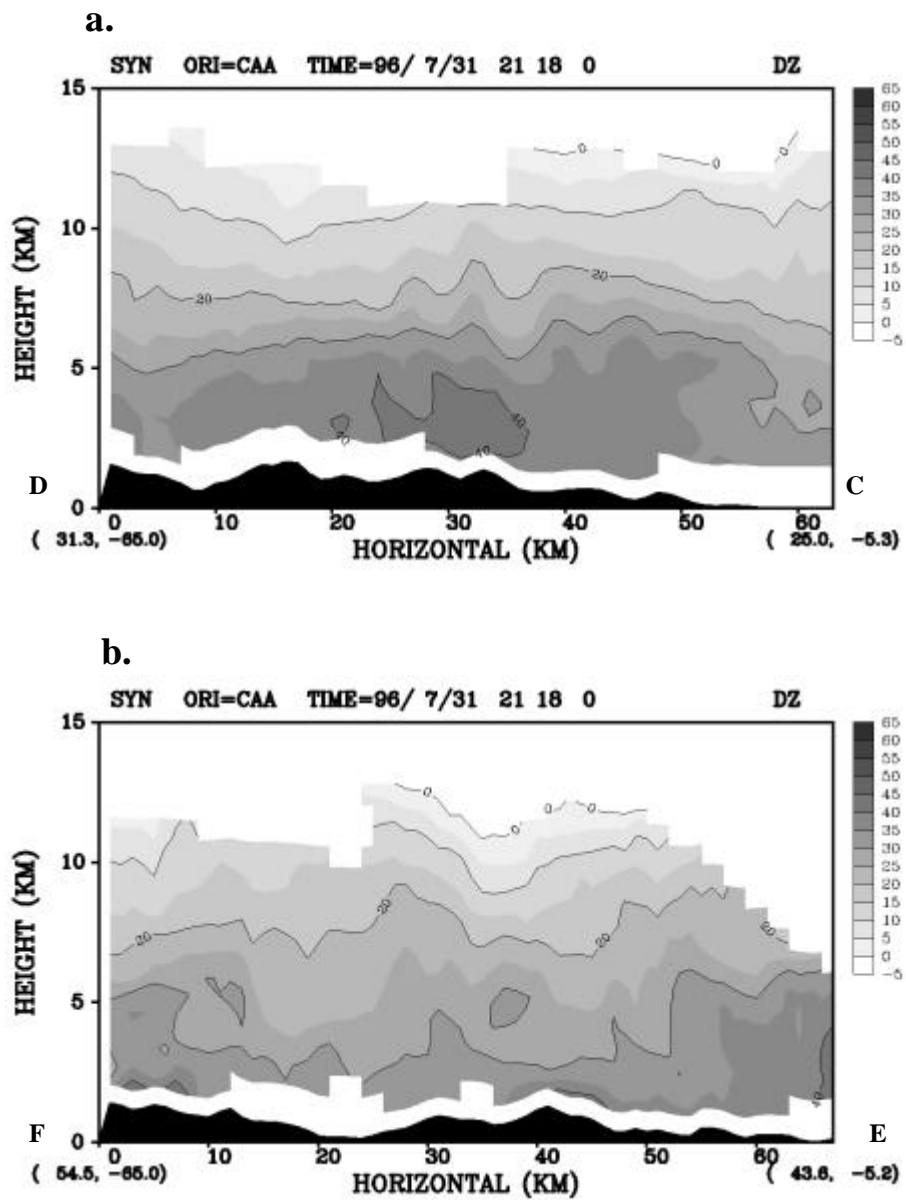
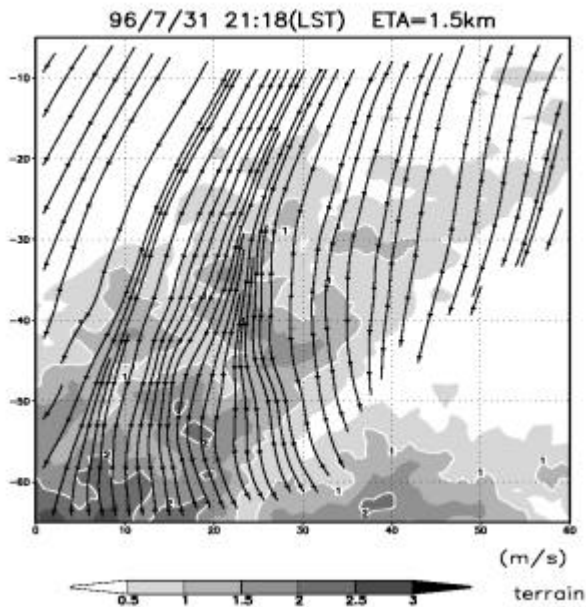
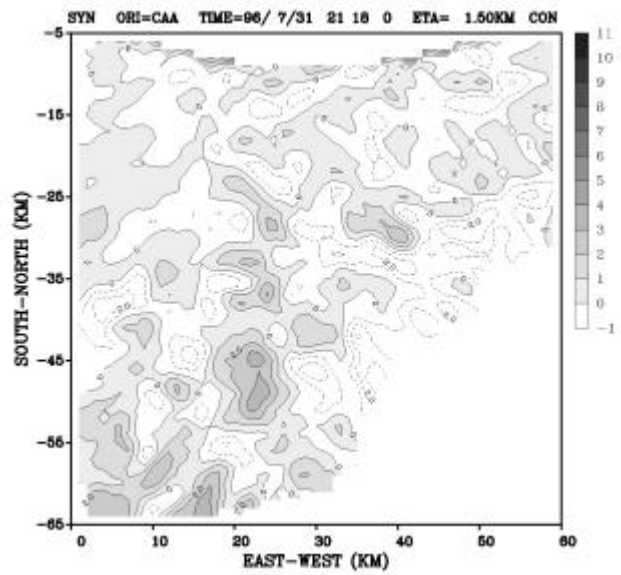


圖 4.3 南邊分析區域 2115LST，回波圖 (a) CD 圓弧的切向剖面；(b) EF 圓弧之切向剖面。

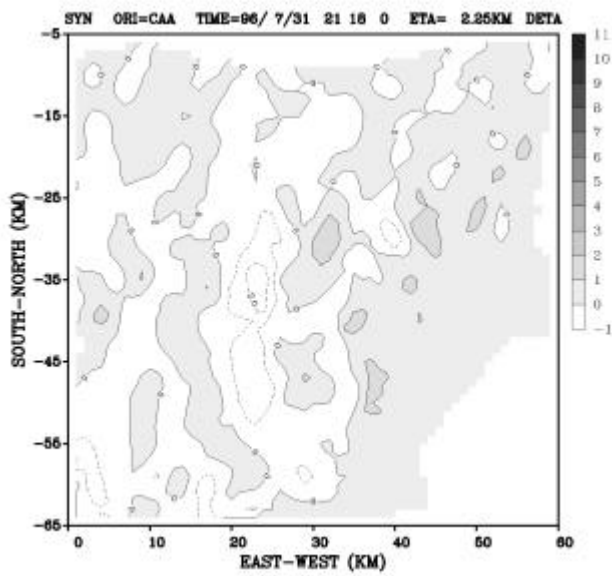
a.



b.



c.



d.

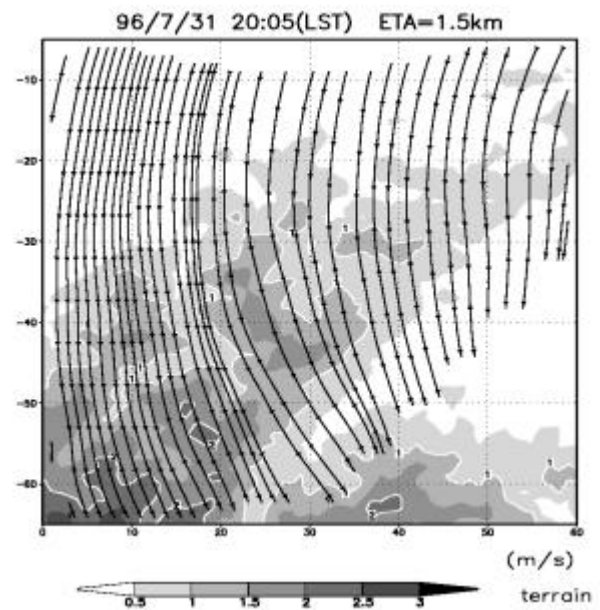


圖 4.4 南邊分析區域 (a) 2115LST,  $\Delta t=1.5\text{km}$  的流線場 ;(b) 2115LST,  $\Delta t=1.5\text{km}$  的輻散場 ;(c) 2115LTS,  $\Delta t=2.25\text{km}$  的  $h$  場 ;(d) 2000LST,  $\Delta t=1.5\text{km}$  的流線場。

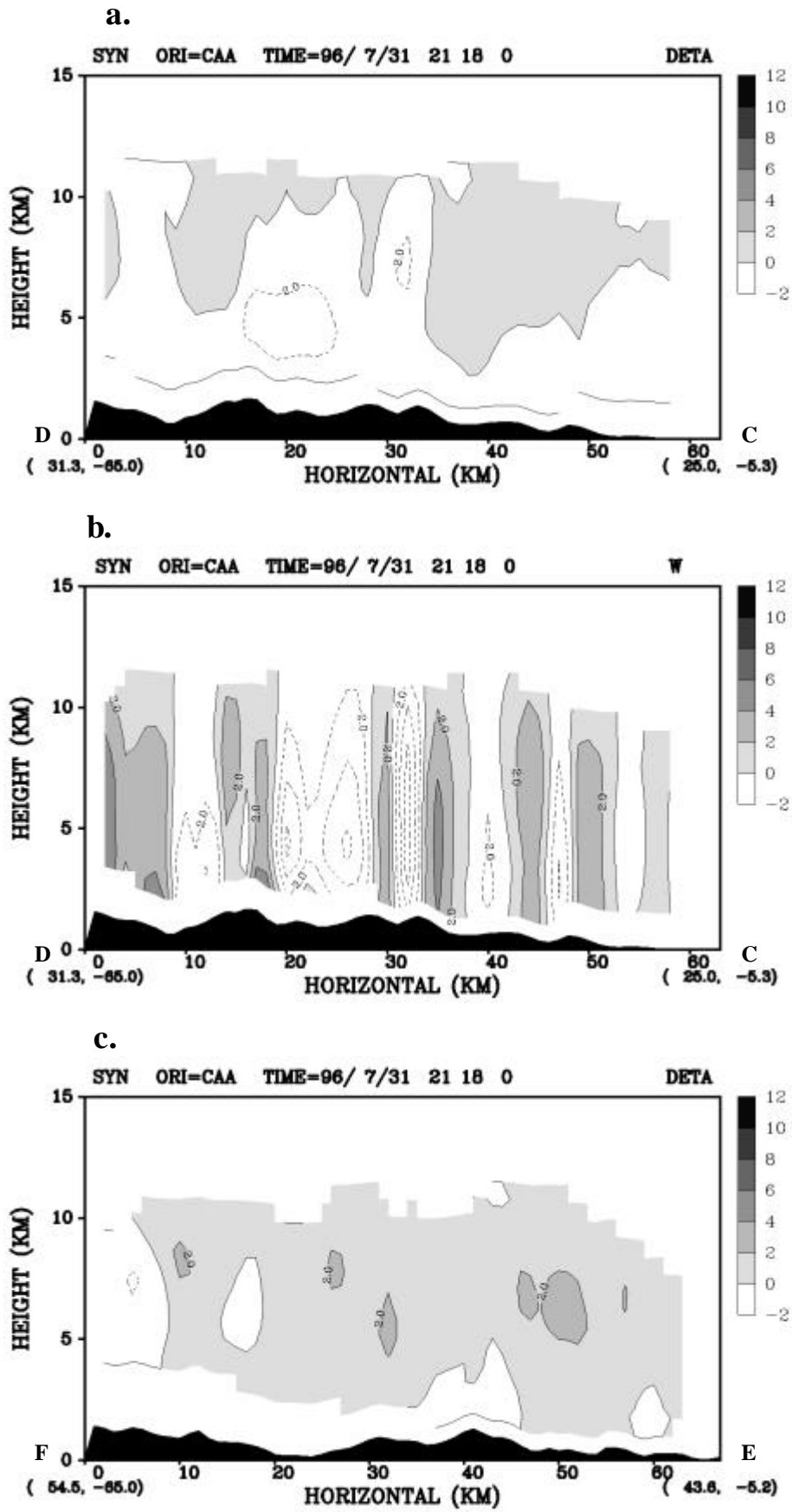
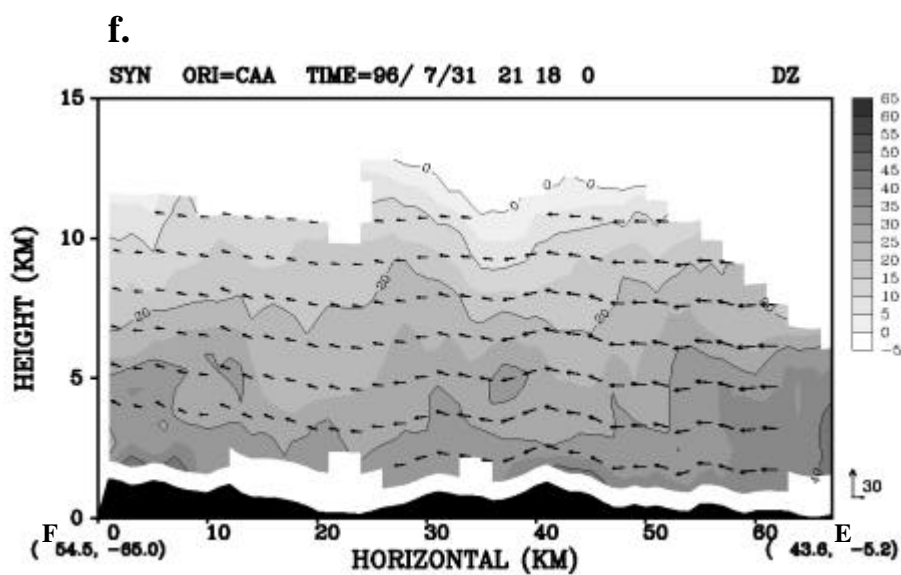
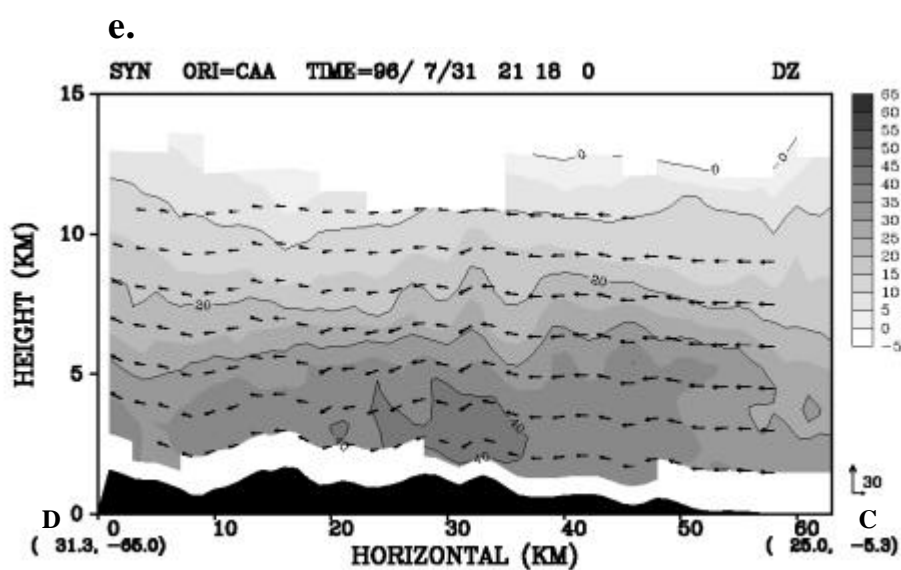
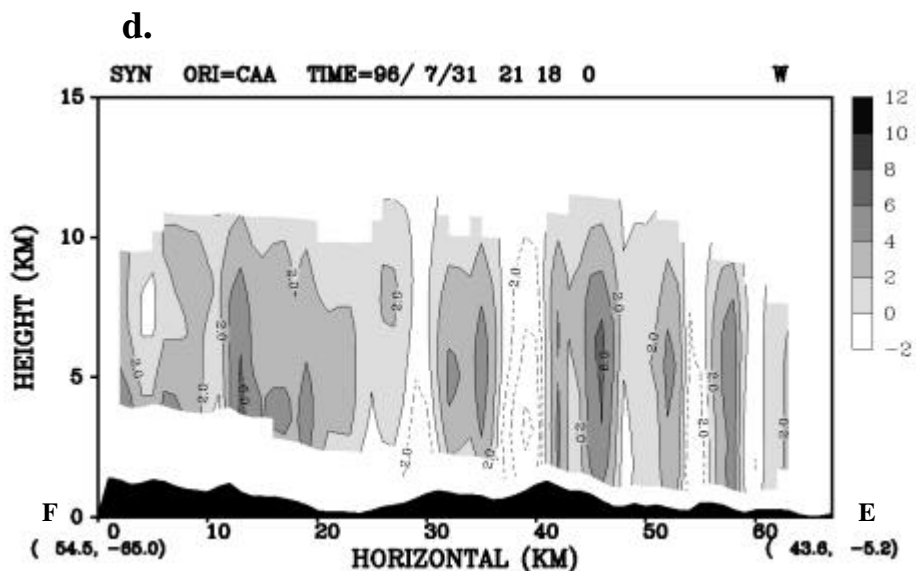
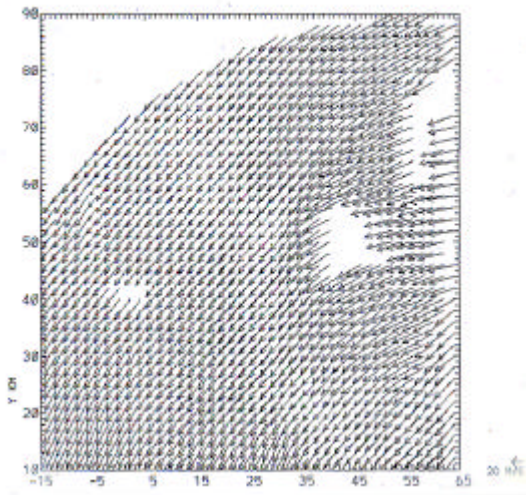


圖 4.5 南邊分析區域，2115LST (a) CD 圓弧切向剖面之 $h$ 場；(b) CD 圓弧切向剖面之垂直速度場；(c) EF 圓弧切向剖面之 $h$ 場。



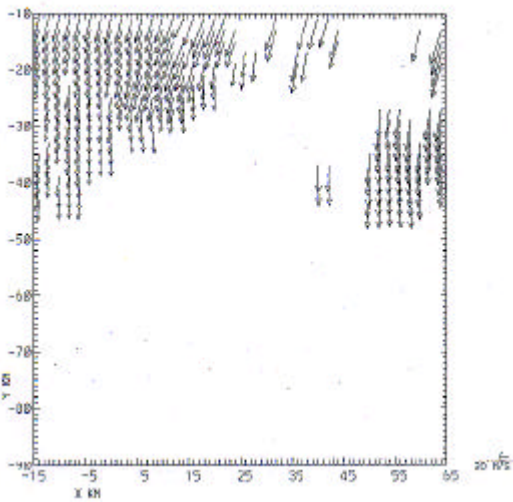
續圖 4.5 南邊分析區域，2115LST (d) EF 圓弧切向剖面之垂直速度場；(e) CD 圓弧切向剖面之三維風場及回波場；(f) EF 圓弧切向剖面之三維風場及回波場。

96/ 7/31 20 5 0-20 5 0 COMBIN Z = 2.00 KM  
 (RS OF 06/09/99) ORIGIN=C 0.00, 0.001 KM X-AXIS= 90.0 DEG

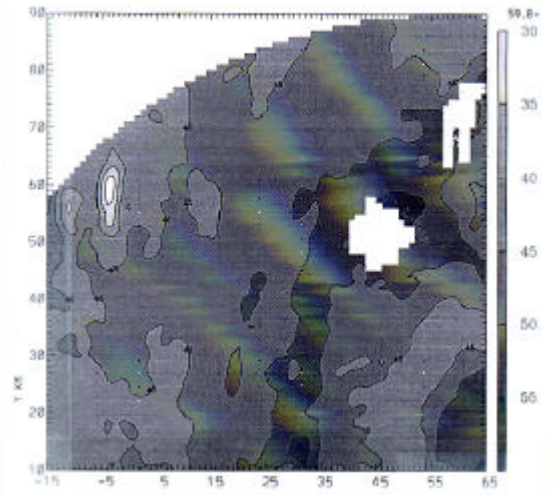


**b.**

96/ 7/31 20 5 0-20 5 0 COMBIN Z = 2.00 KM  
 (RS OF 06/09/99) ORIGIN=C 0.00, 0.001 KM X-AXIS= 90.0 DEG

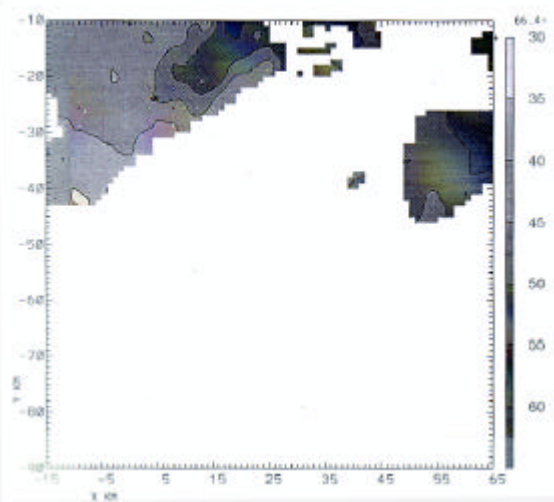


96/ 7/31 20 5 0-20 5 0 COMBIN Z = 2.00 KM TOTAL V  
 (RS OF 06/09/99) ORIGIN=C 0.00, 0.001 KM X-AXIS= 90.0 DEG



**d.**

96/ 7/31 20 5 0-20 5 0 COMBIN Z = 2.00 KM TOTAL V  
 (RS OF 06/09/99) ORIGIN=C 0.00, 0.001 KM X-AXIS= 90.0 DEG



**e.**

96/ 7/31 20 5 0-30 5 0 COMBIN Z = 4.00 KM M2  
 (RS OF 06/09/99) ORIGIN=C 0.00, 0.001 KM X-AXIS= 90.0 DEG

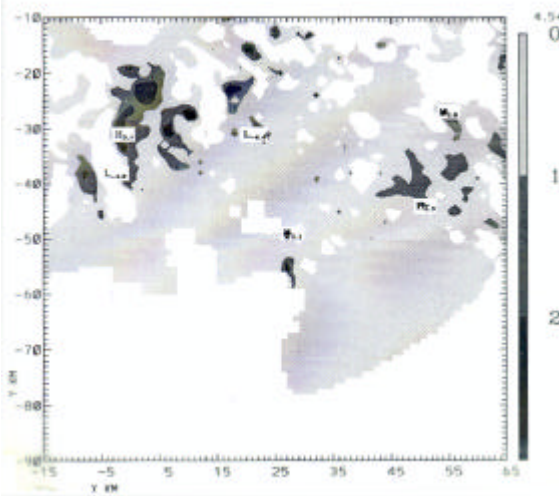


圖 4.6 2000LST (a) 北邊 2km 高度風矢場 ;(b) 南邊 2km 高度風矢場 ;(c) 北邊 2km 高度水平風速場 ;(d) 南邊 2km 高度水平風速場 ;(e) 南邊 4km 高度垂直速度場[此圖摘自陳 (1999) pp.67-69]。