

中國文化大學地學研究所大氣科學組

碩 士 論 文

東亞地區颱風影響下地形雨帶  
之模擬與比較研究



指導教授：曾鴻陽、王重傑

研 究 生：林子鈞

中華民國 98 年 12 月

## 致 謝

本文順利完成，首先要感謝指導教授王重傑教授。在研究生涯三年中，使我對數值模式及程式運用有進一步的了解，教授的諄諄教誨與不厭其煩的指導，讓我從中體會科學研究所需要的嚴謹及做行事態度，也了解模式對於大氣研究的輔助的重要性。謝謝曾鴻陽教授、王重傑教授，在我撰寫論文期間給予細心的指導，也謝謝口試委員游政谷教授與周昆炫教授的正面批評與建議，讓本文更臻於完整。

感謝台灣大學大氣資料庫楊先生與中國文化大學劉清煌教授提供的資料，以及日本名古屋大學地球水循環研究中心Tsuboki教授所發展的CReSS模式及其提供的模擬結果、分析場資料，使研究過程更為順利。

感謝文化振瑋學長、品峻學長、金門學長、凌文學長在課業上及程式上的經驗分享與協助。感謝台大小玲學姐、瑩薰學姐、嘉倫學長、哲佑學長、怡蕙學姐、偉銘學長、怡文學姐及允薇學姐，在研究生涯中的鼓勵與指導。感謝佩娟學姐在撰寫論文過程中的建議與協助，感謝好麻吉俊祥及奇峰的陪伴。感謝培根、海龜、晉堯、菁華、心怡、俞綸、曉薇、慧玲在研究過程的鼓勵與幫助。感謝所有在研究生涯中認識的朋友、學長姐，因為你們讓我在研究生涯更充實。

最後要感謝的是在背後默默支持我的家人，讓我在求學的過程中無後顧之憂，全心全意在專心在課業上，並順利完成碩士學位。

## 摘要

本研究共討論兩個個案，分別為 2004 年 10 月 19 日颱風陶卡基(TOKAGE，個案一)及 2006 年 5 月 14 日颱風珍珠(CHANCHU，個案二)颱風環流在地形迎風面上游激發之對流雨帶進行研究。個案一期間，颱風陶卡基在接近日本的過程中於日本南部引發三到四個大小不等的弧狀對流雨帶，並有準滯留的情形，隨後因颱風接近風速增大而潰散向陸地移動；個案二期間，珍珠颱風影響台灣東部上游風場，由東北風轉至東風及東南風，並激發對流雨帶的生成及滯留，中後期雨帶向陸地移動，但此對流雨帶未接觸陸地。此兩個個案地形條件不同，激發類似對流雨帶系統，但在對流雨帶發展後期中卻有不同現象。

本研究主要使用日本名古屋大學地球水循環研究中心所發展的雲解析風暴模式(Cloud-Resolving Storm Simulator，簡稱 CReSS)模式，對颱風影響下激發之對流雨帶進行模擬。從模式的高解析度結果，了解雨帶結構演變，配合夫如數(Froude Number,  $Fr$ )與浮力震盪頻率(Brunt-Vaisala frequency,  $N$ )計算結果，再搭配地形敏感度的實驗，希望藉此能了解穩定度在雨帶滯留及向陸地移動的二個狀態間的關鍵性變化。

此二個案的模擬解結果相當接近觀測分析場資料。從模擬結果與穩定度計算結果可以看出雨帶在滯留與移動的變化。個案一中，雨帶後側氣流主要為(雨帶與陸地間)為環境風場越山而來的東北風，雨帶上游為颱風環流之南風，二者互相抗衡。雨帶上游在滯留期時  $Fr$  值計算結果大於 1 以上，氣流處於易於越山的狀態，但雨帶卻為滯留狀態；雨帶在向陸地移動時，雨帶上游因颱風環流使風速持續增加，雨帶後側氣流轉向為平行雨帶走向，在剖面方向減弱了離岸流的貢獻。在個案二中，雨帶後側氣流則主要為地形阻擋而轉向之氣流，雨帶上游在滯留期  $Fr$  值為 0.25，氣流不易越山，同時在雨帶後側有下沉氣流，使雨帶後側的穩定度提高；在雨帶向陸地移動時，雨帶的結構減弱，後側下沉氣流減弱，雨帶後側的穩定度也下降。概觀來說，主導個案一雨帶行為的因素為颱風環流之向岸風與環境風場，而個案二為颱風環流之向岸風與向岸風因地形阻擋轉向後的氣流，以及雨帶後側下沉氣流伴隨穩定度的變化。

考量工作站計算效能，個案二另外進行地形減半的地形敏感度實驗。於結果

可以看到，地形降低後，地形阻擋效應減弱，因地形阻擋轉向的氣流強度也減弱，使低層輻合減弱，進而影響雨帶位置。在滯留期時，雨帶位置較全地形結果靠近地形，雨帶後側仍可看到下沉氣流伴隨穩定度的變化；在雨帶向陸地移動時，雨帶南端可接觸陸地。顯示地形對雨帶的作用不僅在雨帶的強弱，離岸距離的遠近同時，也會影響其空間位置，相對雨帶滯留位置也較全地形靠近沿岸。



# 目 錄

致 謝 .....	I
摘 要 .....	II
目 錄 .....	IV
圖 表 說 明 .....	VI
第一章 前言 .....	1
一、文獻回顧 .....	1
二、研究動機 .....	2
三、論文結構 .....	3
第二章 資料來源與研究方法 .....	4
一、資料來源 .....	4
二、研究方法 .....	4
三、模式簡介 .....	5
四、模式設定 .....	7
第三章 個案觀測資料及綜觀分析 .....	9
一、個案一 .....	9
二、個案二 .....	11



第四章 個案一模擬結果 .....	13
一、模擬結果 .....	13
二、區域及剖面特性分析 .....	15
三、小結 .....	19
第五章 個案二模擬結果 .....	21
一、全地形模擬結果 .....	21
二、半地形模擬結果 .....	25
三、剖面平均分析及小結 .....	28
第六章 總結 .....	30
參考文獻 .....	33



## 圖表說明

- 表 2.1 CReSS 模式個案一及個案二個案實驗之模擬參數設定
- 表 4.1 個案一 CReSS 模擬結果之剖面雨帶演變分類，“滯”代表雨帶在剖面上該時間區間為滯留狀態，“退”代表雨帶在剖面上該時間區間為向陸地後退，“ $\Delta$ ”代表雨帶在剖面上已接觸陸地。
- 表 4.2 個案一 計算各剖面上之起迄點座標及 Froude Number (Fr) 所使用之特徵地形高度 ( $h_0$ , m)。
- 表 4.3 個案一之各剖面上游 50 km N ( $s^{-1}$ )、Froude Number (Fr)、位溫 (pt, K) 及向岸風 ( $u_x$ ,  $m s^{-1}$ ) 之逐時平均值表。其中 N、Froude Number 及向岸風為高度 2500 m 以下平均，位溫為 1000 m 以下平均。
- 表 4.4 個案一之剖面平均中雨帶上游 50 km，高度 2500 m 以下 N、Froude Number (Fr)、位溫 (pt)、向岸風 ( $u_x$ ) 之平均值表。
- 表 5.1 個案二 CReSS 模擬結果之剖面雨帶演變分類。
- 表 5.2 個案二 CReSS 模擬結果選取之剖面起迄點經緯度及計算 Froude Number 所使用之特徵地形高度 (m)。
- 表 5.3 個案二之各剖面上游 50 km N ( $s^{-1}$ )、Froude Number (Fr)、位溫 (pt, K) 及向岸風 ( $u_x$ ,  $m s^{-1}$ ) 之逐時平均值表。其中 N、Froude Number 及向岸風為高度 2500 m 以下平均，位溫為 1000 m 以下平均。
- 表 5.4 個案二 CReSS 半地形模擬結果之剖面雨帶演變分類。
- 表 5.5 個案二 CReSS 半地形模擬結果選取之剖面起迄點經緯度及計算 Froude Number 所使用之特徵地形高度 (m)。
- 表 5.6 個案二 CReSS 模擬半地形結果之各剖面上游 50 km N ( $s^{-1}$ )、Froude Number (Fr)、位溫 (pt, K) 及向岸風 ( $u_x$ ,  $m s^{-1}$ ) 之逐時平均值表。其中 N、Froude Number 及向岸風為高度 2500 m 以下平均，位溫為 1000m 以下平均。
- 表 5.7 個案二 CReSS 模擬結果之剖面雨帶上游 50 km，高度 2500 m 以下 N、Froude Number (Fr)、位溫 (pt, k)、向岸風 ( $u_x$ ,  $m s^{-1}$ ) 之平均值表。
- 圖 2.1 CReSS 模式冷雨過程中各種水相與冰相粒子間轉換之雲物理過程示意圖。其中  $q_c$ 、 $q_r$ 、 $q_i$ 、 $q_s$  以及  $q_g$  分別為雲水、雨水、雲冰、雪及軟雹之混和比。NUAvi 表澱積核形成 (deposition or sorption nucleation)，NUCCI 表接觸凍結核形成 (contact nucleation)，NUHci 表均質凍結核形成 (homogeneous nucleation)，SP 表二次冰晶生成 (secondary nucleation of ice crystals)，VD 表水蒸氣之澱積，蒸發與昇華 (vapor deposition, evaporation)

and sublimation), CL 表合併收集(collection), AG 表凝集(aggregation), CN 表粒子間轉換(conversation), ML 表溶解(melting), FR 表凍結(freezing), SH 表液態水的剝離(shedding of liquid water)。

- 圖 3.1 (a) 個案一之日本氣象廳陶卡基颱風路徑圖，颱風路徑為紫色線，時間為 UTC。(b) 日本地理位置概圖。
- 圖 3.2 2004 年 10 月 19 日 (a) 1200 UTC、(b) 1400 UTC、(c) 1600 UTC、(d) 1800、(e) 2000 UTC 及 (f) 2200 UTC 之雷達回波反演之降雨強度圖。
- 圖 3.3 2004 年 10 月 (a) 19 日 0000 UTC、(b) 19 日 1200 UTC、(c) 20 日 0000 UTC 及 (d) 20 日 1200 UTC 地形天氣圖。
- 圖 3.4 2004 年 10 月 (a) 19 日 0000 UTC、(b) 19 日 1200 UTC、(c) 20 日 0000 UTC 及 (d) 20 日 1200 UTC ECMWF 之 925 hPa 綜觀分析圖，實線為重力位高度，色階為相對溼度。
- 圖 3.5 2004 年 10 月 (a) 19 日 0000 UTC、(b) 19 日 1200 UTC、(c) 20 日 0000 UTC 及 (d) 20 日 1200 UTC 850 hPa 天氣圖。實線為高度場，虛線為溫度場，風場為 kts。
- 圖 3.6 2004 年 10 月 (a) 19 日 0000 UTC、(b) 19 日 1200 UTC、(c) 20 日 0000 UTC 及 (d) 20 日 1200 UTC 700 hPa 天氣圖。實線為高度場，虛線為溫度場，風場為 kts。
- 圖 3.7 2004 年 10 月 (a) 19 日 0000 UTC、(b) 1200 UTC (c) 20 日 0000 UTC (d) 1200 UTC ECMWF 之 500 hPa 綜觀分析圖，實線為重力位高度 (gpm)，5880 gpm 以紅色表示。
- 圖 3.8 個案二之中央氣象局珍珠颱風路徑圖。
- 圖 3.9 2006 年 5 月 (a) 14 日 1600 UTC ~ (f) 15 日 1400 UTC 每 2 小時中央氣象局雷達回波 CV 合成圖 (dBZ)。
- 圖 3.10 2006 年 5 月 (a) 14 日 0000 UTC、(b) 1200 UTC、(c) 15 日 0000 UTC 及 (d) 1200 UTC 地面天氣圖。
- 圖 3.11 2006 年 5 月 (a) 14 日 0000 UTC、(b) 1200 UTC、(c) 0000 UTC 及 (d) 15 日 1200 UTC 850 hPa 天氣圖。實線為高度場，虛線為溫度場，風場為 kts。
- 圖 3.12 2006 年 5 月 (a) 14 日 0000 UTC、(b) 1200 UTC、(c) 15 日 0000 UTC 及 (d) 1200 UTC ECMWF 之 850 hPa 綜觀分析圖，實線為重力位高度，色階為相對溼度。
- 圖 3.13 2006 年 5 月 (a) 14 日 0000 UTC、(b) 1200 UTC、(c) 15 日 0000 UTC 及 (d) 1200 UTC ECMWF 之 500 hPa 綜觀圖，實線為重力位高度 (gpm)，

5880 gpm 以紅色表示。

圖 4.1 個案一 CReSS 模式模擬範圍之地形示意圖，圖中橘色框為重點分析區域。

圖 4.2 圖 4.1 中橘色框區域之地形示意圖。

圖 4.3.1 2004 年 10 月個案一 CReSS 模擬 100 m 結果(a)19 日 1200 UTC、(c) 1800 UTC 及 (e)20 日 0000 UTC 氣壓場(藍線，間隔 2 hPa)，風標(kts) 及風速值(色階)與 ECMWF 1000 hPa 分析場資料(b)19 日 1200 UTC、(d) 1800 UTC 及 (f) 20 日 0000 UTC 重力位場(棕線，間隔 50 gpm)，風標(kts) 及風速值(色階)。

圖 4.3.2 2004 年 10 月個案一 CReSS 模擬 973 m 結果(a)19 日 1200 UTC、(b) 1800 UTC 及 (e)20 日 0000 UTC 氣壓場(藍線，間隔 1 hPa)，風標(kts) 及風速值(色階)與 ECMWF 925 hPa 分析場資料(b)19 日 1200 UTC、(d) 1800 UTC 及 (f) 20 日 0000 UTC 重力位場(棕線，間隔 50 gpm)，風標(kts)，風速值(色階)。

圖 4.3.3 2004 年 10 月個案一 CReSS 模擬 1457 m 結果(a)19 日 1200 UTC、(c) 1800 UTC 及 (e)20 日 0000 UTC 氣壓場(藍線，間隔 1 hPa)，風標(kts) 及風速值(色階)與 ECMWF 850 hPa 分析場資料(b)19 日 1200 UTC、(d) 1800 UTC 及 (f) 20 日 0000 UTC 重力位場(棕線，間隔 50 gpm)，風標(kts)，風速值(色階)。

圖 4.4 2004 年 10 月個案一 CReSS 模式模擬(a)19 日 1400 UTC、(b)1500 UTC、(c) 1600 UTC、(d) 1700 UTC、(e) 1800 UTC、(f) 1900 UTC、(g) 2000 UTC、(h) 2100 UTC、(i) 2200 UTC、(j) 2300 UTC 及 (k) 20 日 0000 UTC 雨量結果。時雨量(色階)，300 m 風場(kts)。

圖 4.5 同圖 4.4b，2004 年 10 月 19 日 1500 UTC 之個案一 CReSS 模擬結果時雨量圖，圖中黑色框為區域劃分示意圖，由左至右分別為區域 A、區域 B、區域 C。區域 A 範圍為 31.5°N~34°N、131°E~133°E，區域 B 範圍為 32°N~34.5°N、132°E~136°E，區域 C 範圍為 32.5°N~35.5°N、135°E~138.5°E。

圖 4.6 個案一期間，(a) 區域 A、(b) 區域 B 及 (c) 區域 C 雨帶逐時演變示意圖，橘直線為區域選取之剖面。

圖 4.7.1 2004 年 10 月 19 日 1400 UTC (a) 100 m、(b) 305 m、(c) 519 m、(d) 743 m 及 (e) 973 m 個案一 CReSS 模擬結果之流線場與位溫圖。色階為位溫減去 273.15 K，各層色階不同如圖所示，色階間隔皆為 1 度。

圖 4.7.2 2004 年 10 月 19 日 1600 UTC (a) 100 m、(b) 305 m、(c) 519 m、(d)

743 m 及 (e) 973 m 個案一 CReSS 模擬結果之流線場與位溫圖。色階為位溫減去 273.15 K，各層色階不同如圖所示，色階間隔皆為 1 度。

圖 4.7.3 2004 年 10 月 19 日 1800 UTC (a) 100 m、(b) 305 m、(c) 519 m、(d) 743 m 及 (e) 973 m 個案一 CReSS 模擬結果之流線場與位溫圖。色階為位溫減去 273.15 K，各層色階不同如圖所示，色階間隔皆為 1 度。

圖 4.7.4 2004 年 10 月 19 日 2000 UTC (a) 100 m、(b) 305 m、(c) 519 m、(d) 743 m 及 (e) 973 m 個案一 CReSS 模擬結果之流線場與位溫圖。色階為位溫減去 273.15 K，各層色階不同如圖所示，色階間隔皆為 1 度。

圖 4.8 2004 年 10 月 (a) 19 日 1500 UTC、(b) 1700 UTC、(c) 1800 UTC 及 (d) 2000 UTC 個案一剖面 A1 之水氣與風場結果。色階為水氣含量 ( $\text{g kg}^{-1}$ )，等值線為雲滴加冰晶 ( $\text{g kg}^{-1}$ )，黑色粗虛線為剖面平行風之零值線，向量為垂直風與剖面水平風之合成風場 ( $\text{m s}^{-1}$ )。圖中藍色三角形為雨帶位置。

圖 4.9 2004 年 10 月 (a) 19 日 1500 UTC、(b) 1700 UTC、(c) 1800 UTC 及 (d) 2000 UTC 個案一剖面 A1 之 Froude Number 計算結果。色階為 Froude Number，黑色粗虛線為剖面平行風之零值線，向量為垂直風與剖面水平風之合成風場 ( $\text{m s}^{-1}$ )。圖中藍色三角形為雨帶位置。

圖 4.10 2004 年 10 月 (a) 19 日 1500 UTC、(b) 1700 UTC、(c) 1800 UTC 及 (d) 2000 UTC 個案一剖面 A1 之 Brunt Vaisala Frequency ( $N$ ) 計算結果。色階為  $N$  ( $\text{s}^{-1}$ ) 值，黑色粗虛線為剖面平行風之零值線，等值線為位溫 ( $\text{K}$ )。圖中藍色三角形為雨帶位置。

圖 4.11 2004 年 10 月 (a) 19 日 1500 UTC、(b) 1700 UTC、(c) 1800 UTC 及 (d) 2000 UTC 個案一剖面 A1 之水平風場垂直分佈圖。黑色向量為水平風 ( $\text{m s}^{-1}$ )，紅色向量為平行剖面方向之  $u_x$  風場 ( $\text{m s}^{-1}$ )，綠色向量為垂直剖面方向之  $v_y$  風場 ( $\text{m s}^{-1}$ )，灰色粗虛線為剖面平行風之零值線。圖中藍色三角形為雨帶位置。

圖 4.12 2004 年 10 月 (a) 19 日 1500 UTC、(b) 1700 UTC、(c) 1800 UTC 及 (d) 2000 UTC 個案一剖面 B3 之水氣結果。色階為水氣含量 ( $\text{g kg}^{-1}$ )，等值線為雲滴加冰晶 ( $\text{g kg}^{-1}$ )，黑色粗虛線為剖面平行風之零值線，向量為垂直風與剖面水平風之合成風場 ( $\text{m s}^{-1}$ )。圖中藍色三角形為雨帶位置。

圖 4.13 2004 年 10 月 (a) 19 日 1500 UTC、(b) 1700 UTC、(c) 1800 UTC 及 (d) 2000 UTC 個案一剖面 B3 之 Froude Number 計算結果。色階為 Froude Number，黑色粗虛線為剖面平行風之零值線，向量為垂直風與剖面水平

風之合成風場 ( $\text{m s}^{-1}$ )。圖中藍色三角形為雨帶位置。

圖 4.14 2004 年 10 月 (a) 19 日 1500 UTC、(b) 1700 UTC、(c) 1800 UTC 及 (d) 2000 UTC 個案一剖面 B3 之 Brunt Vaisala Frequency( $N$ )計算結果。色階為  $N$  值，黑色粗虛線為剖面平行風之零值線，等值線為位溫 ( $\text{K}$ )。圖中藍色三角形為雨帶位置。

圖 4.15 2004 年 10 月 (a) 19 日 1500 UTC、(b) 1700 UTC、(c) 1800 UTC 及 (d) 2000 UTC 個案一剖面 B3 之水平風場垂直分佈圖。黑色向量為水平風 ( $\text{m s}^{-1}$ )，紅色向量為平行剖面方向之  $u_x$  風場 ( $\text{m s}^{-1}$ )，綠色向量為垂直剖面方向之  $v_y$  風場 ( $\text{m s}^{-1}$ )，灰色粗虛線為剖面平行風之零值線。圖中藍色三角形為雨帶位置。

圖 4.16 2004 年 10 月 (a) 19 日 1700 UTC、(b) 1900 UTC、(c) 2000 UTC 及 (d) 2200 UTC 個案一剖面 C2 之水氣結果。色階為水氣含量 ( $\text{g kg}^{-1}$ )，等值線為雲滴加冰晶 ( $\text{g kg}^{-1}$ )，黑色粗虛線為剖面平行風之零值線，向量為垂直風與剖面水平風之合成風場 ( $\text{m s}^{-1}$ )。圖中藍色三角形為雨帶位置。

圖 4.17 2004 年 10 月 (a) 19 日 1700 UTC、(b) 1900 UTC、(c) 2000 UTC 及 (d) 2200 UTC 個案一剖面 C2 之 Froude Number 計算結果。色階為 Froude Number，黑色粗虛線為剖面平行風之零值線，向量為垂直風與剖面水平風之合成風場 ( $\text{m s}^{-1}$ )。圖中藍色三角形為雨帶位置。

圖 4.18 2004 年 10 月 (a) 19 日 1700 UTC、(b) 1900 UTC、(c) 2000 UTC 及 (d) 2200 UTC 個案一剖面 C2 之 Brunt Vaisala Frequency( $N$ )計算結果。色階為  $N$  值，黑色粗虛線為剖面平行風之零值線，等值線為位溫 ( $\text{K}$ )。圖中藍色三角形為雨帶位置。

圖 4.19 2004 年 10 月 (a) 19 日 1700 UTC、(b) 1900 UTC、(c) 2000 UTC 及 (d) 2200 UTC 個案一剖面 C2 之水平風場垂直分佈圖。黑色向量為水平風 ( $\text{m s}^{-1}$ )，紅色向量為平行剖面方向之  $u_x$  風場 ( $\text{m s}^{-1}$ )，綠色向量為垂直剖面方向之  $v_y$  風場 ( $\text{m s}^{-1}$ )，灰色粗虛線為剖面平行風之零值線。圖中藍色三角形為雨帶位置。

圖 4.20 個案一區域 A 之剖面 (a) Froude Number 與  $N$ 、(c) 向岸風速與盛行風速及 (e) 位溫之 1000 m 以下平均與資料筆數，紅線為滯留狀態，藍線為後退狀態，(b) (d) (f) 為 2500 m 以下平均。圖中 x 軸之 0 點為雨帶位置，x 軸座標單位為公里。

圖 4.21 個案一區域 B 之剖面 (a) Froude Number 與  $N$ 、(c) 向岸風速與盛行風速及 (e) 位溫之 1000 m 以下平均與資料筆數，紅線為滯留狀態，藍

線為後退狀態，(b) (d) (f) 為 2500 m 以下平均。圖中 x 軸之 0 點為雨帶位置，x 軸座標單位為公里。

圖 4.22 個案一區域 C 之剖面 (a) Froude Number 與 N、(c) 向岸風速與盛行風速及 (e) 位溫之 1000 m 以下平均與資料筆數，紅線為滯留狀態，藍線為後退狀態，(b) (d) (f) 為 2500 m 以下平均。圖中 x 軸之 0 點為雨帶位置，x 軸座標單位為公里。

圖 5.1 個案二 (a) 模擬範圍 (圖中黑色框線區域) 與 (b) 地形示意圖 (色階為地形高度)。

圖 5.2.1 2006 年 5 月 CReSS 模擬 163 m 結果 (a) 14 日 1800 UTC、(c) 15 日 0000 UTC、(e) 0600 UTC、(g) 1200 UTC 及 (i) 1800 UTC 氣壓場 (藍線)、風標 (kts) 及風速值 (色階) 與 ECMWF 1000 hPa 分析場資料 (b) 14 日 1800 UTC、(d) 15 日 0000 UTC、(f) 0600 UTC、(h) 1200 UTC、及 (j) 1800 UTC 重力位場 (棕線，間隔 10 gpm)、風標 (kts) 及風速值 (色階)。

圖 5.2.2 2006 年 5 月 CReSS 模擬 1060 m 結果 (a) 14 日 1800 UTC、(c) 15 日 0000 UTC、(e) 0600 UTC、(g) 1200 UTC 及 (i) 1800 UTC 氣壓場 (藍線)、風標 (kts) 及風速值 (色階) 與 ECMWF 925 hPa 分析場資料 (b) 14 日 1800 UTC、(d) 15 日 0000 UTC、(f) 0600 UTC、(h) 1200 UTC、及 (j) 1800 UTC 重力位場 (棕線，間隔 10 gpm)、風標 (kts) 及風速值 (色階)。

圖 5.2.3 2006 年 5 月 CReSS 模擬 1531 m 結果 (a) 14 日 1800 UTC、(c) 15 日 0000 UTC、(e) 0600 UTC、(g) 1200 UTC 及 (i) 1800 UTC 氣壓場 (藍線)、風標 (kts) 及風速值 (色階) 與 ECMWF 850 hPa 分析場資料 (b) 14 日 1800 UTC、(d) 15 日 0000 UTC、(f) 0600 UTC、(h) 1200 UTC、及 (j) 1800 UTC 重力位場 (棕線，間隔 10 gpm)、風標 (kts) 及風速值 (色階)。

圖 5.3 2006 年 5 月 CReSS 模擬結果 (a) 14 日 1800 UTC、(c) 15 日 0000 UTC、(e) 0600 UTC、(g) 1200 UTC 及 (i) 1800 UTC 地面降雨強度結果圖 (色階，半小時雨量，mm；紫色實線，氣壓值，hPa) 與雷達回波圖 (b) 14 日 1800 UTC、(d) 15 日 0000 UTC、(f) 0600 UTC、(h) 1200 UTC 及 (j) 1800 UTC。

圖 5.4 個案二期間雨帶逐時演變示意圖，圖中橘直線為區域圖取之剖面。

圖 5.5.1 2006 年 5 月 14 日 1800 UTC (a) 163 m、(b) 463 m、(c) 844 m 及 (d) 1290 m 個案二 CReSS 模擬結果之流線場與位溫圖。色階為位溫減去

273.15 K，各層色階不同如圖所示，色階間隔皆為 1 度。

圖 5.5.2 2006 年 5 月 14 日 2300 UTC (a) 163 m、(b) 463 m、(c) 844 m 及 (d) 1534 m 個案二 CReSS 模擬結果之流線場與位溫圖。色階為位溫減去 273.15 K，各層色階不同如圖所示，色階間隔皆為 1 度。

圖 5.5.3 2006 年 5 月 15 日 0400 UTC (a) 163 m、(b) 463 m、(c) 844 m 及 (d) 1290 m 個案二 CReSS 模擬結果之流線場與位溫圖。色階為位溫減去 273.15 K，各層色階不同如圖所示，色階間隔皆為 1 度。

圖 5.5.4 2006 年 5 月 15 日 0900 UTC (a) 163 m、(b) 463 m、(c) 844 m 及 (d) 1290 m 個案二 CReSS 模擬結果之流線場與位溫圖。色階為位溫減去 273.15 K，各層色階不同如圖所示，色階間隔皆為 1 度。

圖 5.6 2006 年 5 月 (a) 14 日 1800 UTC ~ (f) 15 日 1400 UTC 個案二剖面 1 號之水氣結果。色階為水氣含量 ( $\text{g kg}^{-1}$ )，等值線為雲滴加冰晶 ( $\text{g kg}^{-1}$ )，黑色粗虛線為剖面平行風之零值線，向量為垂直風與剖面水平風之合成風場 ( $\text{m s}^{-1}$ )。圖中藍色三角形為雨帶位置。

圖 5.7 2006 年 5 月 (a) 14 日 1800 UTC ~ (f) 15 日 1400 UTC 個案二剖面 1 號之 Froude Number 計算結果。色階為 Froude Number，黑色粗虛線為剖面平行風之零值線，向量為垂直風與剖面水平風之合成風場 ( $\text{m s}^{-1}$ )。圖中藍色三角形為雨帶位置。

圖 5.8 2006 年 5 月 (a) 14 日 1800 UTC ~ (f) 15 日 1400 UTC 個案二剖面 1 號之 Brunt Vaisala Frequency (N) 計算結果。色階為 N 值，黑色粗虛線為剖面平行風之零值線，等值線為位溫 (K)。圖中藍色三角形為雨帶位置。

圖 5.9 2006 年 5 月 (a) 14 日 1800 UTC ~ (f) 15 日 1400 UTC 個案二剖面 1 號之水平風場垂直分佈圖。黑色向量為水平風，紅色向量為平行剖面方向之  $u_x$  風場，綠色向量為垂直剖面方向之  $v_y$  風場，灰色粗虛線為剖面平行風之零值線。圖中藍色三角形為雨帶位置。

圖 5.10 個案二全地形模擬結果之剖面 (a) Froude Number 與 N、(c) 向岸風速與盛行風速及 (e) 位溫之 1000 m 以下平均與資料筆數，紅線為滯留狀態，藍線為後退狀態，(b) (d) (f) 為 2500 m 以下平均。圖中 x 軸之 0 點為雨帶位置，x 軸座標單位為公里。

圖 5.11 個案二半地形示意圖 (色階為地形高度)。

圖 5.12.1 個案二 2006 年 5 月 CReSS 全地形模擬 163 m 結果 (a) 14 日 1800 UTC、(c) 15 日 0000 UTC、(e) 0600 UTC、(g) 1200 UTC 及 (i) 1800 UTC 氣壓場 (藍線)、風標 (kts) 及風速值 (色階) 與 CReSS 半地形模擬 163

m 結果 (b) 14 日 1800 UTC、(d) 15 日 0000 UTC、(f) 0600 UTC、(h) 1200 UTC、及 (j) 1800 UTC 氣壓場 (藍線)、風標 (kts) 及風速值 (色階)。

圖 5.12.2 個案二 2006 年 5 月 CReSS 全地形模擬 1060 m 結果 (a) 14 日 1800 UTC、(c) 15 日 0000 UTC、(e) 0600 UTC、(g) 1200 UTC 及 (i) 1800 UTC 氣壓場 (藍線)、風標 (kts) 及風速值 (色階) 與 CReSS 半地形模擬 1060 m 結果 (b) 14 日 1800 UTC、(d) 15 日 0000 UTC、(f) 0600 UTC、(h) 1200 UTC、及 (j) 1800 UTC 氣壓場 (藍線)、風標 (kts) 及風速值 (色階)。

圖 5.12.3 個案二 2006 年 5 月 CReSS 全地形模擬 1531 m 結果 (a) 14 日 1800 UTC、(c) 15 日 0000 UTC、(e) 0600 UTC、(g) 1200 UTC 及 (i) 1800 UTC 氣壓場 (藍線)、風標 (kts) 及風速值 (色階) 與 CReSS 半地形模擬 1531 m 結果 (b) 14 日 1800 UTC、(d) 15 日 0000 UTC、(f) 0600 UTC、(h) 1200 UTC、及 (j) 1800 UTC 氣壓場 (藍線)、風標 (kts) 及風速值 (色階)。

圖 5.13 2006 年 5 月 CReSS 模擬結果 (a) 14 日 1800 UTC、(c) 15 日 0000 UTC、(e) 0600 UTC、(g) 1200 UTC 及 (i) 1800 UTC 地面降雨強度結果圖 (色階, 半小時雨量, mm; 紫色實線, 氣壓值, hPa) 與雷達回波圖 (b) 14 日 1800 UTC、(d) 15 日 0000 UTC、(f) 0600 UTC、(h) 1200 UTC 及 (j) 1800 UTC。

圖 5.14 個案二半地形模擬期間雨帶逐時演變示意圖, 圖中橘直線為區域圖取之剖面。

圖 5.15.1 2006 年 5 月 14 日 1800 UTC (a) 163 m、(b) 463 m、(c) 844 m 及 (d) 1290 m 個案二 CReSS 半地形模擬結果之流線場與位溫圖。色階為位溫減去 273.15 K, 各層色階不同如圖所示, 色階間隔皆為 1 度。

圖 5.15.2 2006 年 5 月 14 日 2300 UTC (a) 163 m、(b) 463 m、(c) 844 m 及 (d) 1534 m 個案二 CReSS 半地形模擬結果之流線場與位溫圖。色階為位溫減去 273.15 K, 各層色階不同如圖所示, 色階間隔皆為 1 度。

圖 5.15.3 2006 年 5 月 15 日 0400 UTC (a) 163 m、(b) 463 m、(c) 844 m 及 (d) 1290 m 個案二 CReSS 半地形模擬結果之流線場與位溫圖。色階為位溫減去 273.15 K, 各層色階不同如圖所示, 色階間隔皆為 1 度。

圖 5.15.4 2006 年 5 月 15 日 0900 UTC (a) 163 m、(b) 463 m、(c) 844 m 及 (d) 1290 m 個案二 CReSS 半地形模擬結果之流線場與位溫圖。色階為位溫減去 273.15 K, 各層色階不同如圖所示, 色階間隔皆為 1 度。

- 圖 5.16 2006 年 5 月 (a) 14 日 1800 UTC ~ (f) 15 日 1400 UTC 個案二半地形模擬結果剖面 1 號之水氣結果。色階為水氣含量 ( $\text{g kg}^{-1}$ )，等值線為雲滴加冰晶 ( $\text{g kg}^{-1}$ )，黑色粗虛線為剖面平行風之零值線，向量為垂直風與剖面水平風之合成風場 ( $\text{m s}^{-1}$ )。圖中藍色三角形為雨帶位置。
- 圖 5.17 2006 年 5 月 (a) 14 日 1800 UTC ~ (f) 15 日 1400 UTC 個案二半地形模擬結果剖面 1 號之 Froude Number 計算結果。色階為 Froude Number，黑色粗虛線為剖面平行風之零值線，向量為垂直風與剖面水平風之合成風場 ( $\text{m s}^{-1}$ )。圖中藍色三角形為雨帶位置。
- 圖 5.18 2006 年 5 月 (a) 14 日 1800 UTC ~ (f) 15 日 1400 UTC 個案二半地形模擬結果剖面 1 號之 Brunt Vaisala Frequency ( $N$ ) 計算結果。色階為  $N$  值，黑色粗虛線為剖面平行風之零值線，等值線為位溫 ( $\text{K}$ )。圖中藍色三角形為雨帶位置。
- 圖 5.19 2006 年 5 月 (a) 14 日 1800 UTC ~ (f) 15 日 1400 UTC 個案二半地形模擬結果剖面 1 號之水平風場垂直分佈圖。黑色向量為水平風，紅色向量為平行剖面方向之  $u_x$  風場，綠色向量為垂直剖面方向之  $v_y$  風場，灰色粗虛線為剖面平行風之零值線。圖中藍色三角形為雨帶位置。
- 圖 5.20 個案二半地形模擬結果之剖面 (a) Froude Number 與  $N$ 、(c) 向岸風速與盛行風速及 (e) 位溫之 1000 m 以下平均與資料筆數，紅線為滯留狀態，藍線為後退狀態，(b) (d) (f) 為 2500 m 以下平均。圖中 x 軸之 0 點為雨帶位置，x 軸座標單位為公里。

# 第一章 前言

## 一、文獻回顧

台灣位於東亞季風帶，夏、冬季分別受到太平洋副高壓及大陸冷高壓等系統影響，同時由於台灣四面環海，西部為平原地形，中部有南北走向之陡峭中央山脈，而東部沿岸為海岸山脈與花東縱谷，地形坡度大，常因加熱不均而形成局部環流系統。其中渦旋與線狀對流為台灣東南部常見的天氣現象。

大氣中有許多機制能將深對流組織成為線狀對流，例如：鋒面、地形、足夠大的垂直風切 (Wang et al., 2005)。其中，地形對氣流的影響，是相當複雜而且不易從觀測資料中解析的。當氣流遇到地形，會因地形阻擋而引發一些現象，如氣流自由舉升 (越山)、轉向 (繞山)、因地形阻擋產生低層輻合而影響伴隨之降雨等等。在判斷估計氣流越山、繞山三種形態，最常使用的判斷參數為夫如數 (Froude number,  $Fr=U/Nh_0$ ,  $U$  為垂直地形走向之向岸風速； $N$  為 Brunt Vaisala Frequency,  $N = (g \, d \ln \theta / dz)^{1/2}$ ,  $\theta$ : 位溫； $h_0$  為地形高度)，當  $Fr$  大於 1 時，氣流易越山， $Fr$  小於 1 時，地形阻擋作用明顯，使氣流不易越山 (Pierrehumbert 1984; Blumen 1990; Baines 1995)。

Wang et al. (2005) 對 2005 年強綜觀下的梅雨鋒面模擬研究顯示，鋒面由台灣西北方向東移動時，在台灣西部海上激發一個次線狀對流系統，於離岸 70 km 處發展成熟，此時估計之  $Fr$  約 0.25，發現此線狀對流系統生成原因為向岸風因地形阻擋，使向岸風在迎風面上減速，進而使迎風場及沿岸氣壓值增加，產生離岸流分量，再與向岸風形成輻合，激發線狀對流系統。研究中對台灣地形使用台灣地形減半 (半地形) 及台灣地形削去但保留地形特性 (無地形) 的地形敏感度實驗。在全地形與半地形及無地形的比較發現， $Fr$  因迎風面地形高度降低而增加，梅雨鋒面引發的次線狀對流系統，也因迎風面地形高度降低及地形阻擋效應減弱，對流系統形成位置將離岸距離縮短，伴隨之降雨量也減少。Rotunno and Ferretti (2003) 分析 Mesoscale Alpine Program (MAP) 的觀測實驗 IOP8 及 IOP2b 期間在義大利北邊的降雨情形，發現 IOP8 期間，在  $Fr$  小於 1 的情況下，低層南風氣流被山脈阻擋，在迎風面上降雨較預期為少；IOP2b 期間， $Fr$  大於 1，低層強及不穩定

的氣流不受地形阻擋而越山，造成相當大的降雨，降雨區域也更靠近山脈迎風面山坡上。Chen and Lin (2005) 使用理想化模式對跨越二維地形不穩定氣流，控制未飽和的濕夫如數 (mosit Froude number,  $F_w=U/N_{wh_0}$ ) 以及可用位能，研究雲降水系統的型態。研究結果顯示，當固定可用位能為 $3000 \text{ J kg}^{-1}$ 時， $F_w$ 值愈大，氣流趨向越山，對流系統由上游向下游移動；當固定 $F_w$ 值為0.26時，可用位能愈大，氣流易在迎風面舉升，對流系統傾向發生在上游。

在弱綜觀下，即無強烈天氣系統影響，對於台灣東南部,  $Fr \leq 0.5$ ，也常因局部環流與大環境風場的輻合激發線狀對流組織。此種線狀的雨帶通常由多個對流胞以線狀或弧狀列呈現。在弱綜觀條件下，形成原因與沿岸地區夜間的山風(離岸風)與大環境的向岸風產生輻合所激發的對流有關，線狀雨帶成熟期之長度大於50 km，維持時間大於1小時，最大向岸風速為 $3 \sim 6 \text{ m s}^{-1}$ ，平均發生在離岸30 km處 (Yu and Jou 2005)。Wang and Huang (2009) 延續前篇研究，針對1998年5月14日發生在台灣東南方近海線狀對流個案進行模擬，從模擬結果中得知，海岸山脈有明顯的地形阻塞效應，在個案期間，可見環境風場在低層300 m造成地形回流，到了夜間結合山風，使得離岸流增強，在近海與上游風場輻合產生線狀對流。因此海岸山脈造成的地形阻擋作用與山風發展，為此個案於夜間形成線狀對流的主因。

## 二、研究動機

由前人研究可以知道地形對氣流及伴隨之對流系統的影響是相當大的，從估計  $Fr$  可以大概掌握氣流形態及對流系統演變。以台灣為例，在台灣東部，一般情況下  $Fr$  值大約為 0.25~0.5 間，氣流相當不容易越山，若要提高  $Fr$ ，得提升向岸風速。當有強烈天氣系統影響時，如颱風，則可使向岸風速提升。

日本也與台灣類似，為四面環海的島嶼，同樣常受颱風侵襲，但在地形高度上較台灣低，氣流相對的容易越山。在 2004 年第 23 號颱風陶卡基 (TOKAGE) 侵襲日本的過程中，由觀測資料發現在迎風面前離岸數十公里至數百公里有四至五條大小不等的對流雨帶形成。名古屋大學地球水循環研究中心使用其發展之 CReSS 模式去進行個案模擬，發現模擬結果也顯示有相同的現象，並從對流雨

帶的演變，發現對流線形成後，會持續一段近乎滯留的狀態，隨著颱風接近風速增強，對流雨帶發生潰散的情況。在颱風環流影響下，迎風面之盛行風將會增強，Fr 值同時也將增大，此時盛行風與地形阻擋效應激發之對流雨帶將因颱風環流影響風速增大會從滯留狀態到對流雨帶潰散，並往陸地後退。颱風影響下，雨帶呈現滯留至潰散的演變，Fr 值可由低值明顯提升到高 Fr 的情況，其中之轉換過程值得探討卻甚少研究。在台灣地區，因台灣地形高，Fr 傾向較小之情形，為了比較發生在台灣與日本對流線發展的過程的異同處，在侵襲台灣的颱風個案中，選取 2006 年第一號颱風珍珠（CHANCHU）為個案之一進行模擬比較研究。

本研究將使用模式模擬颱風影響下之對流雨帶個案，由模擬結果，分析對流雨帶滯留及後退之間穩定度變化，加上地形高度之敏感度實驗，使用穩定度相關參數找出關鍵的變化，期望對對流雨帶演變行為的特徵能有更深入的認識。

### 三、論文結構

本文共分為六章，第一章為前言，包含文獻回顧與研究動機，第二章介紹資料來源與分析方法，以及本研究所使用的雲解析風暴模式(Cloud-Resolving Storm Simulator；簡稱 CReSS)，包含模式內部的方程式組與架構，以及本研究所使用初始與邊界條件、模式參數設定等等。第三章敘述個案期間之綜觀環境與天氣系統概況及地形雨帶的行為特徵。第四章及第五章為個案之 CReSS 模式模擬結果，分析地形雨帶結構特徵及演變概況，探討雨帶形成原因及維持機制。第六章為總結。

## 第二章 資料來源與研究方法

### 一、資料來源

本研究使用資料如下：

1. 2004 年 10 月 18~20 日日本氣象廳之地面、各層高空天氣圖，雷達回波反演之雷達回波圖
2. 2004 年 10 月 18 日~20 日、2006 年 5 月 13~16 日，每 6 小時之歐洲中期天氣預報中心(European Center for Medium-Range Weather Forecasts, 簡稱 ECMWF)之全球網格資料，水平解析度為  $1.125^{\circ} \times 1.125^{\circ}$  經緯度，垂直方向共 10 層(1000、925、850、700、500、400、300、250、150、100 hPa)，氣象變數包含風場東西向分量 (u)、南北向分量 (v) 與垂直 (w) 風場，溫度 (t)，比溼，相對溼度 (RH) 及重力位高度 ( $\Phi$ )。
3. 2004 年 10 月 19 日 1200 時 ~ 20 日 1800 時之 CReSS 模式模擬資料，由名古屋大學地球水循環中心(Hydrosphere Atmosphere Research Center; 簡稱 HyARC)所提供。
4. 2006 年 5 月 13~16 日中央氣象局之地面、各層標準高空天氣圖、雷達回波圖。
5. 2006 年 5 月 13~16 日日本氣象廳之(JMA Regional Anaylysis)區域分析資料，水平解析度為  $20 \text{ km} \times 20 \text{ km}$ ，垂直方向共 20 層(1000、950、925、900、850、800、700、600、500、400、300、250、200、150、100、70、50、30、20、10 hPa)，氣象變數包含風場東西向分量 (u)、南北向分量 (v) 與垂直 (w) 風場，溫度 (t)，混合比 (q)，氣壓場 (p) 及重力位高度 ( $\Phi$ )。

### 二、研究方法

本研究選用了二個颱風個案，分別為 2004 年第 23 號颱風陶卡基 (T0423，文中代稱為個案一) 與 2006 年第 1 號颱風珍珠 (T0601，文中代稱為個案二)。研究中，首先分析個案觀測資料：由雷達回波圖中了解雨帶逐時演變概況，以了解個案中的雨帶行為特徵；次從綜觀天氣圖分析颱風與綜觀天氣系統的配置，環境盛行風向、風速的演變，配合 ECMWF 資料對於中低層提供的風場、氣壓場、

水汽量資訊，以了解個案之大氣環境背景及天氣演變間的關係，做為下一階段模式模擬的基本參考依據。

在模式模擬方面，對颱風影響下引發之地形雨帶進行高解析度模擬，如上一小節所述，個案一模擬結果為名古屋大學所提供，配合在文大 HPC 進行模擬之個案二模擬結果，對此二個案進行模式預報結果比較。由模擬結果檢視雨帶結構特徵及演變概況，探討雨帶形成原因及維持機制，再將雨帶行為特徵分類，對剖面上風場、降雨、Fr 及穩定度分析，做更細部的討論。穩定度方面，Reinecke and Durran (2007) 在穩定度非均勻的情況估計地形阻擋之 Fr 變化時，使用二種估計特性層穩定度的方法，(一) 以厚度  $h_0$  對穩定度 (N) 做垂直方向積分求得一平均值  $N_A$ ；(二) 以高度  $h_0$  的位溫與近地面的位溫求得厚度  $h_0$  之穩定度  $N_B$ 。其中  $N_A$  與  $N_B$  分別為：

$$N_A = \frac{1}{h_0} \int_0^{h_0} N(z) dz \quad N_B = \sqrt{\frac{g}{\theta_{00}} \frac{\theta_{h_0} - \theta_{00}}{h_0}}。$$

發現由方法一對氣流遇山後風速的估計分析較好，方法二對氣流遇山後風向轉變的估計分析較好，在分析穩定度時，將會利用類似方法，來找出影響雨帶行特定厚度及特徵。

由第一章回顧，地形可能為影響雨帶形成主因之一。由 Wang and Chen (2005) 的研究可以知道，地形對對流系統的位置及伴隨雨量有密切的關係，衡量工作站之效能，將對個案二進行地形減半的地形敏感度實驗，希望能進一步了解地形高度對雨帶之影響。

### 三、模式簡介

本文之研究對象係於個案期間發生台灣海峽海面上的中尺度對流系統，由於海上資料相當缺乏，故利用日本名古屋大學地球水循環研究中心 (Hydrosphere Atmosphere Research Center；簡稱 HyARC) 所發展的雲解析風暴模式 (Cloud-Resolving Storm Simulator；簡稱 CReSS, Tsuboki and Sakakibara 2001) 模擬此準線狀對流系統，透過模式的模擬彌補海上資料的不足。

本文所使用的 CReSS 模式(2.2 版)採用非靜力、完全可壓縮之方程式系統。變數配置在水平向為 Arakara-C、垂直向為 Lorenz 交錯網格。對於雲中的微物理

過程，本模式完全採用外顯之雲微物理計算，共有暖雲與冷雲兩種總體過程可供選用，並無任何積雲參數化方法。邊界層亂流參數化法有 1 和 1.5 階閉合可供選用，後者亦含渦流動能（Turbulence Kinetic Energy；TKE）之計算。本模式亦包含地面輻射參數化與地溫預報模式。水平座標為卡氏座標（Cartesian coordinate）。垂直座標則為以高度為基礎之追隨地勢座標（terrain-following curvilinear coordinate； $\zeta$ ），定義為：

$$\zeta(x, y, z) = \frac{z_t [z - z_s(x, y)]}{z_t - z_s(x, y)} \dots\dots\dots (1)$$

其中， $z_s(x, y)$  為地表高度， $z_t$  為模式頂之高度。

模式中所使用之方程式包括：靜力方程式、狀態方程式、運動方程式、氣壓方程式、位溫方程式、水氣與滿足混合比方程式等。

各方程式如下：

(1) 靜力方程式：

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} = -\bar{\rho}g$$

其中  $p = \bar{p} + p'$ ， $\rho = \bar{\rho} + \rho'$

(2) 狀態方程式：

$$\rho = \frac{p}{R_d T} \left( 1 - \frac{q_v}{\varepsilon + q_v} \right) (1 + q_v + \sum q_x) \dots\dots\dots (2)$$

其中  $g$  為重力加速度， $T$  為溫度， $\varepsilon$  為水氣與乾空氣之分子量比（0.622）， $R_d$  為乾空氣之氣體常數（ $287.05 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ）， $q_v$  為水氣， $q_x$  為各種水、冰相粒子之混合比。

(3) 運動方程式：

$$\frac{\partial \bar{\rho}u}{\partial t} = -\bar{\rho} \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial p'}{\partial x} + \bar{\rho} (f_s v - f_c w) + \text{Turb.}u \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}v}{\partial t} = -\bar{\rho} \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{\partial p'}{\partial y} - f_s \bar{\rho}u + \text{Turb.}v \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}w}{\partial t} = -\bar{\rho} \left( u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{\partial p'}{\partial z} - \bar{\rho} \text{Buoy.}w + f_c u + \text{Turb.}w \dots\dots\dots (5)$$

其中  $f_s$ 、 $f_c$  為科氏參數（ $f_s = 2\Omega \sin \phi$ 、 $f_c = 2\Omega \cos \phi$ ， $\phi$  為緯度， $\Omega$  為地球自



轉之角速度， $\Omega = 7.292 \times 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$ ），*Turb.*與*Buoy.w*則分別表示亂流混合作用與浮力項。

(4) 氣壓方程式：

$$\frac{\partial p'}{\partial t} = -\left(u \frac{\partial p'}{\partial x} + v \frac{\partial p'}{\partial y} + w \frac{\partial p'}{\partial z}\right) + \bar{\rho} g w - \bar{\rho} c_s^2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\right) + \bar{\rho} c_s^2 \left(\frac{1}{\theta} \frac{d\theta}{dt} - \frac{1}{Q} \frac{dQ}{dt}\right) \dots \dots \dots (6)$$

其中  $c_s$  為大氣中的聲速， $q = 1 + 0.61q_v + \Sigma q_x$

(5) 位溫方程式：

$$\frac{\partial \bar{\rho} \theta'}{\partial t} = -\bar{\rho} \left(u \frac{\partial \theta'}{\partial x} + v \frac{\partial \theta'}{\partial y} + w \frac{\partial \theta'}{\partial z}\right) - \bar{\rho} w \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} + \text{Turb.} \theta + \bar{\rho} \text{Src.} \theta \dots \dots \dots (7)$$

其中 *Src.* 表示非絕熱作用之源與匯（加熱與冷卻）。

(6) 水氣與滿足混合比方程式：

$$\frac{\partial \bar{\rho} q_v}{\partial t} = -\bar{\rho} \left(u \frac{\partial q_v}{\partial x} + v \frac{\partial q_v}{\partial y} + w \frac{\partial q_v}{\partial z}\right) + \text{Turb.} q_v + \bar{\rho} \text{Src.} q_v \dots \dots \dots (8)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} q_x}{\partial t} = -\bar{\rho} \left(u \frac{\partial q_x}{\partial x} + v \frac{\partial q_x}{\partial y} + w \frac{\partial q_x}{\partial z}\right) + \text{Turb.} q_x + \bar{\rho} \text{Src.} q_x + \bar{\rho} \text{Fall.} q_x \dots (9)$$

其中  $q_x$  代表雲水 ( $q_c$ )、雨 ( $q_r$ )、雲冰 ( $q_i$ )、雪 ( $q_s$ )、及軟雹 ( $q_g$ ) 中任一種類之混合比。*Src.*、*Turb.*、及 *Fall* 分別代表雲物理過程之源與匯、亂流混合作用、及降水所造成之時間變率。雲物理現象之雲微物理的相關轉換過程（冷雲過程）示於圖 2.1。

#### 四、模式設定

表 2.1 為使用日本名古屋大學地球水循環研究中心之 CReSS 模式，個案模擬設定表：

(1) 個案一 (T0423)

初始與邊界條件為 JMA Regional Spectral model output，水平格點設定為 1536x1408，水平解析度為 1 km，垂直層數為 60 層，地圖投影為藍伯特圓錐 (Lambert Conformal Conic)，模擬初始時間為 2004 年 10 月 19 日 1200 UTC，

模擬預報長度為 30 小時，積分間距為 3 s（時間積分大步距）及 1 s（時間積分小步距），微物理過程為冷雲過程，輸出間隔為 3600 s（1 小時），垂直伸展設定為 14400 m 為水平層開始高度，以下為追隨地勢座標。初始條件設定為模式初始場，由外部三維客觀分析場提供。

(2) 個案二全地形（T0601）

初始與邊界條件為 JMA Regional Analysis（20 x 20 km，6 hr），水平格點設定為 540 x 480，水平解析度為 2 km，垂直層數為 60 層，地圖投影為藍伯特圓錐（Lambert Conformal Conic），模擬初始時間為 2006 年 5 月 14 日 1200UTC，模擬預報長度為 36 小時，積分間距為 2 s（時間積分大步距）及 1 s（時間積分小步距），微物理過程為冷雲過程，輸出間隔為 1800 s（30 分鐘），垂直伸展設定為 12000 m 為水平層開始高度，以下為追隨地勢座標。初始條件設定為模式初始場，由外部三維客觀分析場提供。

(3) 個案二半地形

同（2），但地形高度為全地形之 50%。



## 第三章 個案觀測資料及綜觀分析

### 一、個案一

#### (1) 路徑

颱風陶卡基路徑圖如圖 3.1 a，日本地理位置概略圖為圖 3.2 b。颱風陶卡基源於 2004 年 10 月 12 日 0000 UTC 於  $12^{\circ}\text{N}$ 、 $151^{\circ}\text{E}$  之熱帶擾動，並向西行進；至 13 日 0000 UTC，發展成熱帶氣旋，持續向西行進；14 日 1200 UTC 移動至  $13.7^{\circ}\text{N}$ 、 $136.6^{\circ}\text{E}$ ，颱風中心低壓增強至 970 hPa 並持續增強，正式形成為颱風，為 2004 年第 23 號颱風，並轉向西北移動；16 日 1200 UTC 至 1800 UTC，中心氣壓下降到最低 940 hPa；18 日 1200 UTC 中心氣壓減弱至 950 hPa，於  $23.0^{\circ}\text{N}$ 、 $126.9^{\circ}\text{E}$  轉向東北向日本侵襲；19 日 1200 UTC 向東北移動至北緯  $27.4^{\circ}\text{N}$ 、 $128.9^{\circ}\text{E}$ ，其外圍環流開始在日本迎風面沿海九州東南方、四國南方、紀伊半島東南方激發對流雨帶，雨帶依距颱風距離遠近，持續 8 至 12 小時不等；20 日 0400 UTC 於四國登陸，並持續向東北行進；於 20 日 1500 UTC 離開日本，並轉弱為溫帶氣旋。

#### (2) 雷達回波反演之降雨強度

圖 3.2 為颱風陶卡基侵襲日本期間之雷達回波反演之降雨強度圖。19 日 1200 UTC (圖 3.2a) 可以看到在九州的東南方海面上有弧狀雨帶出現，在四國南方海面、紀伊半島南方海面上也可以看到相似的完整弧狀雨帶；19 日 1400 UTC (圖 3.2 b) 隨颱風接近，九州東南方之雨帶、四國南方之雨帶中段開始有個別對流胞向陸地潰散情形出現；19 日 1600 ~ 1800 UTC (圖 3.2c ~ d) 九州東南方之雨帶被推向陸地；19 日 2000 UTC (圖 3.2 e) 時，四國南方雨帶、紀伊半島南方之雨帶也向陸地後退；19 日 2200 ~ 20 日 0000 UTC (圖 3.2f ~ g) 四國南方及紀伊半島南方之雨帶已後退至陸地上。

#### (3) 綜觀天氣分析

由 2004 年 10 月 19 日 0000 UTC 至 20 日 1200 UTC 之 JMA 地面天氣圖所示 (圖 3.3)，19 日 0000 UTC 時 (圖 3.3a)，日本的西北方在  $48^{\circ}\text{N}$ 、 $112^{\circ}\text{E}$  有一個分裂高壓，日本北方  $50^{\circ}\text{N}$ 、 $129^{\circ}\text{E}$  為低壓，東方  $38^{\circ}\text{N}$ 、 $152^{\circ}\text{E}$  為太平洋高壓，

加上陶卡基颱風，使日本區域位於環境場形成一個鞍形場的配置中心南方，導致日本地區近地面盛行風為東北風；同時東北風與颱風的外圍環流在日本南方形成鋒面系統。19日1200 UTC時(圖3.3 b)，可以看到整個日本西北方的分裂高壓、北方的低壓及東方的太平洋高壓往東移動，因此鞍形場的中心東移，同時可以看到日本地區之東北風風減弱。20日0000 UTC時(圖3.3 c)，隨著大環境系統東移，且颱風接近日本地區，日本地區盛行的東北風反而受颱風環流而增強。圖3.4為ECMWF 925 hPa分析圖，在19日0000 UTC至1200 UTC間，日本北面近地面之東北風隨颱風接近而增強，由10~15 kts增加至25 kts左右；日本南側的向岸風場主要為南風，風速值也由20~30 kts增加至近30 kts以上。在相對溼度場，可以知道因颱風環流帶來之水氣，日本南側之迎風場相當潮溼。

由850 hPa JMA天氣圖(圖3.5)可以知道，日本地區之風場主要受到颱風影響，在南方迎風面吹東南或南風，向北輸送南方較暖空氣，迎風面之向岸風速約20~30 kts，隨颱風接近增加至近40 kts以上；北方背風面為東北風。溫度露點差在日本地區附近也相當小，都在3度以下，主要汽集中在颱風心及日本南方近海岸區域。從700 hPa JMA天氣圖(圖3.6)在日本地區東北風已經看不到了，不過日本地區溫度露點差還是小於3度以下，顯示在700 hPa還是相當潮溼。

圖3.7為ECMWF 500 hPa分析圖。在500 hPa仍可以看到颱風渦旋，大致上日本區域為西風帶，在19日1200 UTC(圖3.7 b)可以看到日本地區之西風風速達50 kts以上；而副熱帶高壓範圍的5880 gpm參考等值線距日本南方已有一段距離，對日本地區影響不大。

#### (4) 小結

日本區域為南北低壓與東西高壓的鞍形場配置，導致日本地區近地面盛行東北風，但在環境系統東移的過程中，地面盛行風影響逐漸減弱，隨颱風接近，東北風反而隨之增強；此東北風在日本南方與颱風環流之南風有輻合的情形；在500 hPa分析圖可以看到日本地區上面有風速增加的情形，同時太平洋副高勢力範圍也逐漸東移，有利於低層對流發展。近地面水氣分佈集中在颱風環流及日本南方，垂直方向在700 hPa方面，也有水氣含量高的情形。

## 二、個案二

### (1) 路徑

珍珠颱風路徑如圖 3.8 所示，於 2006 年 5 月 8 日 1200 UTC 在北緯 8.7 度，東經 13.5 度的小擾動開始發展向西移動；於 9 日 1200 UTC 增強為輕度颱風，路徑稍偏西北越過菲律賓；在 13 日 1800 UTC 時再增強為中度颱風，其中心氣壓為 970 hPa；14 日 1800 UTC 再向西移動至北緯 13.8 度東經 115.5 度後，轉向往北前進，此時台灣東部有弧狀對流雨帶生成，此時中心氣壓為 935 hPa；15 日 0000 UTC 至 16 日 0000 UTC 為中心氣壓最強時期，約 930 hPa；隨後，颱風路徑略偏東北，並與 17 日 1800 UTC 與汕頭登陸，登陸後颱風迅速減弱。

### (2) 雷達回波

如圖 3.9 所示，14 日 1600 UTC 在台灣東部有弧狀對流生成，14 日 2000 UTC 形成一個成熟弧狀對流系統，離岸約 50~100 km，並持續一段時間。15 日 0400 UTC 雨帶南端結構逐漸變得不連續，回波最強位置也移至雨帶的北端，。15 日 1000 UTC 雨帶向陸地內縮，雨帶上的對流胞往東北方平流。15 日 1200 UTC 雨帶再向陸地後退，雨帶北端的對流胞逐漸向東北傳播，雨帶的南端激發出新的對流系統，並持續至 16 日 0000 UTC，南端新的對流系統才退到東部陸地。

### (3) 綜觀天氣分析

圖 3.10 為中央氣象局地面天氣圖。由圖 3.10a，在 14 日 0000 UTC 大陸高壓範圍延伸至海上，台灣環境風場受其影響為東北風，1200 UTC (圖 3.8b) 時大陸高壓勢力範圍後退，台灣海峽雖為東北風，但台灣東部及東部海面上游風場逐漸因颱風接近而受颱風環流影響轉為東風或東南風 (圖 3.10c-d)。

由中央氣象局 850 hPa 天氣圖 (圖 3.11) 可知，14 日 0000 UTC (圖 3.11a) 大陸沿海風場仍為東北風，台灣東岸風場卻已轉向為東風，隨時間演變，逐漸轉為東南風 (圖 3.1 c、d)。ECMWF 850 hPa 資料 (圖 3.12) 顯示，水汽主要分佈在海峽南方、台灣東方及北方，而東部之向岸風速，由 15~20 kts 增加至 20~25 kts。ECMWF 500 hPa 資料 (圖 3.13)，於 14 日 0000 UTC (圖 3.13a) 可以看到有一短槽從黃河口延伸之黃中，並緩慢向東移動，但副高壓勢力也逐漸向西移動擠壓短槽，故短槽台灣鄰近地區影響不大。

#### (4) 小結

初期主要為大陸高壓影響台灣北方區域，使台灣海峽區域為東北風，台灣北部為東北東風，隨時間演變，大陸高壓後退與颱風接近，使台灣東部上游由東北風轉東風至東南風，垂直方面台灣東部的東風延伸至 850 hPa，水氣主要分佈區域包含台灣東部，對台灣東部提供有利對流發展條件。



## 第四章 個案一模擬結果

### 一、模擬結果

本研究所使用 CReSS2.2 多 CPU 版本，為非靜力可壓縮之雲模式，個案一模式設定如表 2.1，模擬範圍及地形如圖 4.1，重點分析範圍如 4.2 所示。

如第二章所述（表 2.1），模擬初始資料為 JMA 區域波譜模式之輸出結果，模擬初始時間為 2004 年 10 月 19 日 1200 UTC，總模擬時間為 30 小時，模擬結果設定為 30 分鐘輸出一次，可以得到高時間解析的資料，可提供用來分析雨帶演變的結果及討論。

#### （一）綜觀比對

圖 4.3.1 為模式模擬開始（2004 年 10 月 19 日 1200 UTC）及 6 小時後、12 小時後在 100 m 處之風場和氣壓場，及相同時間 ECMWF 之 1000 hPa 風場和高度場。19 日 1800 UTC 時（圖 4.3.1c），CReSS 模式裡日本北方為東風或東北風，南方迎風面由西向東為東南風至南風，在 ECMWF 分析資料中（圖 4.3.1d），模式在風向的掌握與 ECMWF 類似，但在紀伊半島東南方，ECMWF 顯示為西南風，模式為北風，有些許的不同，另外，在九州近沿海地區可以看到北風或北北東風、四國南側有東北風轉東風及紀伊半島東南側有北北東風，這些風場與上游之向岸風形成風切進而產生輻合，在 ECMWF 分析資料中，雖然解析度不高，但勉強可看到類似的狀況。風速方面，模式在紀伊半島東南方上游處已達到 30 kts，ECMWF 資料中風速只有 20~25 kts；九州東南方模式顯示風速已達 30~40 kts 以上，ECMWF 也只有 15~25 kts 左右，顯示風速在近地面這二個地方有過大的預報。20 日 0000 UTC 時（圖 4.3.1e-f），模式風向與 ECMWF 還是吻合的，但是在四國地區及九州東南方的風速值還是過大；因颱風接近，地形上游東北風與向岸風的風切情況已經消失了。圖 4.3.2 為模式模擬開始（2004 年 10 月 19 日 1200 UTC）及 6 小時後、12 小時後在 973 m 處之風場和氣壓場，及相同時間 ECMWF 之 925 hPa 風場和高度場。圖 4.3.2 可以看到模式的風向結果，19 日 1800 UTC 時（圖 4.3.2c-d）紀伊半島東南方的南風向岸風，經過南日本阿爾卑斯山脈時有轉向成東風至東北風的情形，與 ECMWF 吻合；日本北側在模式結果風速達 30 kts 處

達九州北端 (約 34.5N, 131E), ECMWF 風速達 30kts 達中国地區北側 (約 35.5°N, 133°E), 模式在北側風速有低估的情形; 在紀伊半島東南方上游處, ECMWF 可以看到風速較低的區域 (20~30 kts), 模式結果也看到相同區域有風速較周圍低的情形, 但風速較 ECMWF 高 (30~40 kts)。20 日 0000 UTC 時 (圖 4.3.2e-f), 在風速與風向大致都相近, 不過模式在紀伊半島北方區域風速比 ECMWF 分析資料弱了 5~10 kts 左右, 另外, 模式結果之颱風中心 (約 31.25°N, 131.5°E) 略落後 ECMWF 之颱風中心 (約 31.5°N, 132.5°E)。圖 4.3.3 為模式模擬開始 (2004 年 10 月 19 日 1200 UTC) 及 6 小時後、12 小時後在 1457 m 處之風場和氣壓場, 及相同時間 ECMWF 之 850 hPa 風場和高度場。19 日 1800 UTC 時 (圖 4.3.3c-d), 與 4.3.2c-d 類似, 模擬結果在九州北側風速較 ECMWF 弱, 而在紀伊半島東南方較 ECMWF 強; 在風向上, 模式在南側南風向岸風遇南阿爾卑斯山脈後轉向位置較 ECMWF 西邊。20 日 0000 UTC (圖 4.3.3e-f) 時, 因颱風接近, 日本西南半部風速皆達 40 kts 以上; 模式中, 可看到紀伊半島附近之南風, 在遇南日本阿爾卑斯山脈後轉向為東北風, 也與 ECMWF 相近。

## (二) 雷達觀測比對及雨帶演變

由圖 3.2 雷達回波圖可以明顯看出在日本南方迎風面上對流雨帶呈弧狀, 分別在九州東南方, 四國南方及紀伊半島東南方沿海。圖 4.4 為 2004 年 10 月 19 日 1400 UTC 至 20 日 0000 UTC CReSS 每一小時之時雨量分析圖。比對雷達觀測, CReSS 模式結果在時雨量分佈表現上與雷達回波相近。19 日 1500 UTC (圖 4.4 b) 時, 整體雨帶結構成熟, 分別在九州東南方, 四國南方及紀伊半島東南方沿海形成弧狀之對流雨帶; 19 日 1600 UTC 時 (圖 4.4 c) 九州之雨帶上對流胞有向後方潰散的情形; 19 日 1700 UTC 時 (圖 4.4 d), 九州之雨帶開始向陸地內縮; 19 日 1900 UTC 時 (圖 4.4 f), 四國南方之雨帶對流胞也開始有向後方潰散的情形, 同時也開始向陸地後退; 19 日 2000 UTC 時 (圖 4.4 g), 九州之雨帶接觸陸地, 而紀伊半島東南方之雨帶開始有潰散後退的情形; 19 日 2200 UTC-20 日 0000 UTC (圖 4.4 i~k) 可以看到四國與紀伊半島南方之雨帶前後分別後退並接觸陸地。

整體來說, 模式模擬結果與雷達觀測相近, 在逐時的比較中, 模式顯示雨帶演之結果約晚雷達觀測一小時左右。

## 二、區域及剖面特性分析

依照雨帶分佈，將模擬結果分為三區域進行細部分析，針對風場，如向岸風及雨帶後側離岸風與東北風，配合流線場對風場與雨帶之演變進行討論，找出東北風的來源及因地形阻擋使向岸風轉向進而加強東北風的產生的影響；針對位溫做雨帶前後溫度梯度做討論；再進一步對不同區域的主要地形，以垂直地形走向及平行上游向岸風走向取剖面並分析之，在剖面分析上，以降雨量及最大上升速度定位雨帶位置，配合平面分析圖，在不同剖面隨時間變化中將雨帶之演變分類為滯留與後退二種狀態；計算穩定度 (N) 及 Froude Number (Fr)，分析剖面上雨帶演變與相關參數之相關性。

如圖 4.5 所示，針對個案一模擬結果不同雨帶範圍劃分三個區域：九州東南方雨帶為區域 A，四國南方雨帶為區域 B，紀伊半島東南方雨帶為區域 C。圖 4.6 為個案期間以 CReSS 模擬結果之雨帶不同區域逐時演變示意圖及所選取之剖面走向。根據 CReSS 模擬結果，配合水平及剖面分析圖，將雨帶演變分類如表 4.1 剖面雨帶分類表，表 4.2 為剖面起迄點及各剖面上之地形特徵高度，用於計算 Froude Number 上。圖 4.7.1 至圖 4.7.4 為 CReSS 模擬結果之流線場與位溫分析圖。

### (一) 區域 A

在區域 A 中 (圖 4.6a)，整體雨帶在 19 日 1400 UTC 至 1500 UTC 為滯留狀態，1500 UTC 至 1700 UTC 向陸地後退，1700 UTC 至 1900 UTC 在近沿海處滯留，隨後退後至陸地上。由圖 4.7.1 至圖 4.7.4 流線場分析，可以看到在區域 A 之雨帶後側東北風來源有二，一為日本北側東北風，在紀伊半島北邊向南越山，穿過瀨戶內海向西南吹，遇九州之地形後，因地形阻擋而有繞山轉向為東北風延豐後水道向東南方吹，再至九州東部沿海轉向為東北風；二為紀伊半島東南方之向岸南風，遇南日本阿爾卑斯山脈後，也因地形阻擋，轉向為東風越過名古屋與大阪，與東北風輻合，整體影響區域 A 雨帶的東北風厚度約 1000 m。在溫度場方面，雨帶前後之溫度梯度隨高度愈低而增加。圖 4.8、圖 4.9、圖 4.10、圖 4.11 分別為區域 A 之剖面 A1 (VCSA1) (剖面走向如圖 4.6a) 水氣分析圖、Fr 分析圖、N 值分析圖及水平風場垂直分佈圖。在 19 日 1400 UTC 至 1500 UTC 期間，

由水氣分析圖（圖 4.8a）雨帶有滯留情形，雨帶上游低層 Fr 約 1.2 至 1.4 間（圖 4.9a），N 約  $0.6 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  至  $0.8 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  之間（圖 4.10a），風場在約 700 m 以下與剖面方向平行（圖 4.11a）；雨帶後側在離岸流上方高度在 500 m 至 1500 m 間之 N 值皆大於  $1.6 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，在離岸流低層風場接近北風，隨高度增加，風場順轉由北風轉向至東北風，甚至為東風（圖 4.11a 離岸流上方，高度約 700 m 處）。

在 19 日 1500 UTC 至 19 日 1700 UTC 中（圖 4.8a-b）可以看到對流降雨形態主要由迎風面之對流胞系統所主導，雨帶後側離岸流厚度約 500 m。在 19 日 1600 UTC 時，由對流系統與風場變化可以看到與雨帶後退一段距離，同時，雨帶後側離岸流有減弱的情形，離岸流內近地面位溫約 294 度 K，在上游部分 Fr 在 2500 m 高度以下已達到 1.6 以上。

19 日 1800 UTC 後，降水形態因颱風接近，上游出現層狀降水的現象（圖 4.8c-d），而 19 日 1700 UTC 至 1900 UTC 間雨帶在近沿海滯留時，雨帶後側離岸流又重新維持 500 m 左右的厚度，風向主要為東北風（圖 4.11c），風約達近 40 kts 左右，19 日 1900 UTC 時雨帶後側位溫有增加近 1 度左右，N 也跟下降；上游 Fr 也達 2.4 以上（4.9c-d）。19 日 2000 UTC 時，上游 Fr 值增加至 2.4 至 3 以上，風速值也增加至近 50 至 60 kts，雨帶後退至陸地。

區域 A 裡另一剖面 A2（VCSA2），概觀上與 VCSA1 相近，VCSA2 位置在 VCSA1 東邊（圖 4.6a），差異在於雨帶後方東北風轉向情形對二剖面影響不同。因 VCSA1 位置較靠近東北風繞山轉向為北風，對離岸流的正貢獻較大，從剖面風場結果（圖未示）來看，離岸流的厚度沿迎風坡至海面上在 500 ~ 700 m 間，離岸流的風速值在滯留期最大可達約 10 ~ 20 kts，比 VCSA1 中離岸流的表現較強。在 19 日 1400 UTC 至 1800 UTC 雨帶為滯留的狀態。

## （二）區域 B

雨帶逐時演變及選取剖面如圖 4.6b，雨帶在 19 日 1400 UTC 成熟，維持至 19 日 1900 UTC 時，雨帶上的對流胞有向後方潰散的情形至向陸地後退，至 20 日 0000 UTC 雨帶接觸陸地。由圖 4.7.1 至 4.7.4 流線場所示，雨帶後側之東北風來源，為紀伊半島東南方向岸南風，吹向南日本阿爾卑斯山脈時，受地形阻擋轉向為東北風，越過名古屋地區，然後氣流遇四國地形時，再繞山轉向為東北風進入四國南方，與四國南方之向岸南風輻合。雨帶後側之東北風，流向雨帶中段

至西段時，轉向為東風；雨帶後側之東北風厚度約 700 m。

圖 4.12、圖 4.13、圖 4.14、圖 4.15 分別為區域 B 之剖面 B3 (VCSB3) (剖面走向如圖 4.6b) 水氣分析圖、Fr 分析圖、N 值分析圖及水平風場垂直分佈圖。在 19 日 1400 UTC 至 1800 UTC 期間，由水氣分析圖 (圖 4.12 a-b) 可以看到雨帶有滯留情形，降雨之主要形態為雨帶上對流胞所主導，Fr 方面雨帶上游低層 Fr 約 1.2 至 1.4 間 (圖 4.13 a-b)，上游風向主要為東南風，風速由約 20 增加至 30 kts (圖 4.15 a-b)；雨帶後側 N 值之配置與 VCSA1 類似，在離岸流上方高度在 500 m 至 1000 m 間之 N 值皆大於  $1.6 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，在離岸流低層風場接近東北東風，對剖面上的向岸風向量有大的貢獻，其厚度為 500 m，隨高度增加，風場順轉由東北風轉向至東風或東南風 (圖 4.15 a-b)。

19 日 1900 UTC 時，雨帶開始後退，在 19 日 1800 UTC 的 N 值分析圖 (圖 4.14 c)，可以發現在雨帶後退前，雨帶後側的位置會上升一度左右，約由 296 增加至 297，連帶影響穩定度，在垂直方向發現穩定度下降的情形 (圖 4.14c,  $134.33^\circ \text{E}$  處)。上游 Fr 的分佈，近地面 Fr 增加的不多，主要增加在 1500 m 以上之高度。

19 日 1900 UTC 至 19 日 2200 UTC (圖 4.12 d) 為雨帶後退期間。由風場來看 (圖 4.15d)，離岸流前緣之東北風雖然沒有減弱的情形，但在風向上逐漸與剖面垂直，投影至剖面上的  $u_x$  也減弱，隨著颱風接近，伴隨上游風速增強，雨帶也接著後退，期間上游之 Fr 由 1.4 增加 1.8。在 19 日 2200 UTC 時 (圖 4.12 i)，雨帶後退至陸地上，上游出現層狀降雨的情形。

與 VCSB3 相鄰之剖面 VCSB2 及 VCSB4 之結果，和 VCSB3 也有相近的狀況，但與區域 A 的情況類似，剖面在雨帶東西方向不同，離岸流會有不同的表現，如 VCSB4 在雨帶後側東北風的上游，因東北風遇四國地形時繞山轉向成接近北北東風，對於剖面上之向岸風貢獻就比較大，而東北風在雨帶後側向西進時，慢慢轉向成東風或東南風，對於 VCSB2 的向岸風貢獻就比較小，離岸流在 VCSB2 也較不明顯。在雨帶西側還有一個剖面 VCSB1，因雨帶後側風場轉向及剖面角度問題，從 VCSB1 的剖面結果離岸流不明顯。在位溫方面，VCSB2 及 VCSB3 在雨帶後退時 (1800 UTC)，雨帶後側的位溫有高接近 1 度的情形。

### (三) 區域 C

雨帶逐時演變及選取剖面如圖 4.6c，雨帶在 19 日 1500 UTC 時成熟，滯留

至 1800 UTC，期間雨帶的東北端有向上游移動的情形，對此情形配合流線場（圖 4.7.1 至 4.7.4）檢示，在 1500 UTC 時，可以看到南日本阿爾卑斯山脈南方沿海向岸南風與東北風（圖 4.7.1c）有很大的風切，隨後形成一個小渦旋，並向東移；1900 UTC 時，雨帶東側之渦旋消散，雨帶西側也有消散減弱的情形，同時雨帶上對流胞有向後方潰散的情形，並開始向陸地後退。在 20 日 0000 UTC 時接觸陸地。雨帶後側之東北風來源為南日本阿爾卑斯山脈向岸南風遇南日本阿爾卑斯山脈轉向為東南風，再與富士山東南方之環境東北風輻合轉為東風，氣流遇紀伊半島之地形轉向為二，一為越過大阪進入瀨戶內海，一為轉向成東北風，向南吹向紀伊半島東南方沿海，與上游盛行之南風輻合；此東北風厚度約 700 m。

圖 4.16、圖 4.17、圖 4.18、圖 4.19 分別為區域 C 之剖面 C2 水氣分析圖、Fr 分析圖、N 值分析圖及水平風場垂直分佈圖。在 19 日 1400 UTC 至 2000 UTC 期間（圖 4.16a-c）雨帶表現為滯留的情形，因距颱風距離較遠，上游向岸風速增加的不多，19 日 1500 UTC 時因風切產生的小渦旋向東移動的過程中，影響了上游向岸南風，使其轉向為西南風，對於剖面上之向岸風場有負的貢獻，在 Fr 方面，滯留期間因上游風場無明顯增加，Fr 的改變量也不大，約由 0.9 增加至 1.2 左右，風速約為 20 至 25 kts 左右；在雨帶後側方面，離岸流厚度平均在 500 m 左右，1500 UTC 至 1600 UTC 間，東北風有加速的情形，離岸流風速也相對增加，1700 UTC 之後，東北風速稍微減弱，並轉向呈東北東風，對剖面上之離岸風貢獻減少，而整體離岸流也逐漸變弱，此原因為提供紀伊半島區域之東北風在遇紀伊半島地形轉向的南向分支減弱所造成的。N 值在離岸流上空高度 500 ~ 1000 m，1400 UTC 至 1800 UTC 期間有達  $1.6 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  以上，在 1900 UTC 時（圖 4.18 b）時，離岸流上空之 N 之下降至  $1.4 \times 10^{-2}$ ，雨帶後側近地面位溫由 295 增加至 297 左右。

雨帶由 19 日 2000 UTC 時開始後退（圖 4.16 d），後退過程中，因颱風距離較遠，所以未看到颱風環流帶來的層狀降雨。在上游方面，隨颱風接近，上游風速有明顯增加，在雨帶後退開始是接觸陸地期間（19 日 2000 UTC 至 2300 UTC）約從 25 kts 增加至 40 kts 左右，而 Froude Number 也有明顯的增量，約 1.3 增加至 2.1（圖 4.17 d）；在雨帶後側方面，因雨帶後側東北風之來源減弱，其成分逐漸被紀伊半島東南方向岸南風轉向所主導，隨颱風接近，雨帶後側之風場有轉東

風越山的情形，在雨帶的維持上不利，於 19 日 2300 UTC 雨帶便後退至陸地上。

#### (四) 剖面平均分析

表 4.3 為各剖面在 2500 m 以下之 Fr 平均後，再對雨帶上游 50 km 做逐時平均之結果，表 4.4 同表 4.3，參數為向岸風。依表 4.1 之雨帶演變分類，對同狀態之剖面資料，以雨帶位置為基準做上游及下游之平均，三個區域平均結果如圖 4.20、4.21、4.22 所示。表 4.4 為剖面平均中雨帶上游 50 km N、Froude Number、位溫、向岸風之平均值表。

在 Froude Number 方面，雨帶在後退期間皆比滯留期高，相同的向岸風速也有相同結果，三個區域由西向東，Fr 及向岸風為遞減情形是可預期的。在穩定度上，區域 A 及區域 B 在上下游的平均中，後退期的 N 值皆大於滯留期，但區域 C 的情況卻相反。在位溫方面，後退期間的雨帶後側位溫皆高於滯留期。

### 三、小結

個案一的雨帶演變主要受到颱風環流及雨帶後東北風影響，在東北風成份方面，一部分的東北風來源為環境風場越山，如區域 A 雨帶後側東北風，另一部份之東北風，為颱風環流之向南風場因地阻擋而有繞山的情形，進而轉向為東北風，如區域 B 及區域 C。在雨帶滯留與後退二個狀態之間，在一些剖面上可以看到後退前雨帶後側之位溫有增加的情形，如剖面平均分所結果(圖 4.20.2c、4.21.2c、4.22.2c)，但在區域 A、B 的 N 值結果(圖 4.20.2b、4.21.2b)，雨帶後側在後退期高於滯留期，說明了雨帶後退主要為上游風場增迫使雨帶潰散後退，而在區域 C 的平均 N 值結果(圖 4.20.2b)雨帶後側在後退期有低至於滯留期的情況。在 Froude Number 方面，概觀三個區域 Fr 值(圖 4.20.2a、4.21.2a、4.22.2a)在滯留期上游平均皆大於 1 以上，為氣流易於越山的狀況。

綜合上面結果，在區域 A、B 的雨帶滯留時，主要由上游向岸風場及雨帶後側東北風所互相抗衡所致，後退時則因東北風轉向，對於剖面方面之離岸風貢獻降低，加上上游向岸風持續增強，使雨帶向陸地後退。

區域 C 的情況，與前面二個區域原因類似，但在 N 值上可以看到雨帶後側在後退期穩定度略低於滯留期，所以在區域 C 中，雨帶滯留原因為向岸風與雨

帶後側東北風互相抗衡，而後退期時，除了東北風轉向與上游向岸風增強外，雨帶後側的穩定度降低在某種程度上提供了有利對流發展的條件使對流能向陸地發展。



## 第五章 個案二模擬結果

### 一、全地形模擬結果

#### (1) 模擬結果

個案二使用之模擬工具同個案一，使用 CReSS 多 CPU 版本進行模擬，實驗設計如表 2.1，模擬範圍及地形如 5.1 所示。模擬初始資料為 JMA 區域分析場資料，模擬初始時間為 2006 年 5 月 14 日 1200 UTC，總模擬時間為 72 小時，模擬設定為 30 分鐘輸出一筆。

#### a. 綜觀比對

圖 5.2.1 為模式模擬開始後 6 小時至 30 小時後，間隔 6 小時之 163 m 之風場和氣壓場，及相同時間 ECMWF 之 1000 hPa 風場和高度場。14 日 1800 UTC 時（圖 5.2.1 a）時，CReSS 模式結果顯示台灣海峽為東北風，風速值達 30 至 40 kts，台灣東岸迎風面為東南東風，風速值約 10 至 20 kts 左右，東岸向岸風在遇台灣地形時在宜蘭沿海附近轉向為北風，並與較南邊的向岸風輻合，在台灣的東南岸有風速增強的情形，另外，發現在迎風面近海岸地區氣壓值較上游高。在同時間的 ECMWF 資料中（圖 5.2.1 b），可以看到模式在風場的預報與 ECMWF 的分析資料頗為相似，如台灣海峽的強風區與台灣東南方沿海風速因輻合增強的區域，不過在風速值的預報，模式模擬結果在海峽上稍微過大，在重力位高度場方面，也看到 ECMWF 在台灣東方沿岸高於上游區域的現象。15 日 0000 UTC 至 0600 UTC 時（圖 5.2.1 c、e），模擬結果在台灣東岸的強風速區域逐漸減弱，此時向岸風風向遇漸轉由東風或東南東風轉為東南風，轉向位置向南移動至台灣東部海岸線中段，氣流在此分為向北與向南兩支氣流，在氣壓場上，模擬結果顯示在沿岸地區仍可以看到氣壓值略高於上游；在 EMCWF（圖 5.2.1 d、f）分析資料中，向岸風轉向位置也有向南位移，在台灣東部近海仍看得到高度場高於上游區域，台灣海峽的風場部份，強風區域有向已位移的情形，此時集中在西部沿岸，而模式結果風速大的區域在海峽南側，同時模式結果還是略大於 EMCWF 的分析值。15 日 1200 UTC 至 1800 UTC 時，在模式結果（圖 5.2.1 g、i）中，台灣東岸向岸風為東南風，風速值分佈為 15 至 25 kts 與 ECMWF 分析（圖 5.2.1 h、j）相同，

海峽上的強風區域在 ECMWF 分析結果可以看到 15 日 1200 UTC 由西部沿海向東北延伸至台灣北方，風速達 40 至 40 kts，1800 UTC 即減弱，而模式模擬結果，在台灣北部可以看到東北風與東風而風速增強，在海峽上，風速值大的區域仍在海峽南側，與 ECMWF 稍有不同。

圖 5.2.2 同圖 5.2.1，為模式 1060 m 結果與 ECMWF 925 hPa 之分析資料。在 14 日 1800 UTC 至 15 日 0000 UTC 間，模擬結果（圖 5.2.2a、c）在環境風場上，台灣北方的東風在台灣海峽北端轉為東北風，進入台灣海峽，於於西北岸有風速較大的區域，約為 25 至 30 kts，台灣的西南方可以看到颱風環流，在上游風場為東南東風，風速值約為 15 至 20 kts 左右，東岸近海岸地區氣壓值也有高於上游的情形，。而在 15 日 0000 UTC 時可以看到向岸風轉向位置逐漸向南移動。ECMWF 資料上，模擬結果整體與 ECMWF 大致相似，台灣海峽上風速約 25 至 35 kts，模擬結果略低於 ECMWF 分析資料。在 15 日 0600 UTC 至 1800 UTC 間，（圖 5.2.2e-i）模擬結果在氣壓場上，已經看不到沿海地區高於上游地區的情形，0600 UTC 時（圖 5.2.2e）向岸風轉為東南風，15 日 1800 UTC 時（圖 5.2.2i）向岸風轉為南南東風，轉向位置也位移至台東近海。ECMWF 在分析資料上，仍可以看到台灣海峽上的強風區向上游延伸至台灣北方，1800 UTC 時（圖 5.2.2j）台灣北方之強風區域雖然減弱，於西北岸仍可以看到 25 至 30 kts 的風速值，在同時間的模擬結果，在台灣西岸的風速卻有偏低的情形，約 10 至 15 kts 左右，顯示模式模擬結果在台灣海峽上的風速結果較差。

圖 5.2.3 同圖 5.2.1 為模式 1531 m 結果與 ECMWF 850 hPa 之分析資料。從模擬結果來看，氣壓場已看不到在沿海有較高氣壓值的情形，上游風場一開始為東南風（圖 5.2.3a），隨颱風接近，後期轉為南南東風或南風（圖 5.2.3g、i），與 ECMWF 分析資料相近。

#### **b. 雷達觀測比對及雨帶演變**

圖 5.3 為模擬結果降雨強度分析圖及雷達回波圖比對。在 14 日 1800 UTC 時（圖 5.3a），模擬結果顯示雨帶形成一個較完整的結構。15 日 0000 UTC（圖 5.3c）則可以看到一個清楚的弧狀雨帶，雨帶最突出的位置離岸約 100 km，0300 UTC 時（未附圖）雨帶開始有後退的情形，同時向岸風場轉向位置向南位移。0600 UTC 時（圖 5.2e）因向岸風場轉向位置向南位移，雨帶在轉向位置有減弱

消散的情形，使得雨帶不連續，而整體雨帶有向後退的情形，雨帶的北端因向內的東南風與環境的東北風形成風切輻合的情形，激發對流並向北移動。1200 UTC 時（圖 5.2 g）雨帶退後至距陸地 30 km 左右。1800 UTC（圖 5.3 i）時，雨帶北端對流向東北移動，原雨帶消散，屏東沿海再激發出新的對流系統。

比較雷達回波圖（圖 5.3 b、d、f、h、j），模擬結果與雷達觀測相近。

## (2) 剖面特性

由觀測及模式初步比對結果，台灣的迎風面為向岸的南風，背風面為環境場的東北風。在迎面風可以看出向岸風因台灣地形阻擋，而有轉向的情形，轉向後的氣流，再與向岸風輻合產生對流雨帶。雨帶在 14 日 1800 UTC 成熟，並發展持續至 15 日 1800 UTC。在接下來的章節，將針對 14 日 1800 UTC 至 15 日 1800 UTC 分析之，分析方法上，與個案一相同，使用流線場資料來分析向岸風及轉向後氣流演變，位溫場分析雨帶前後之溫度梯度，配合與地形走向垂直及平行上游向岸風走向取剖面位置，以剖面上的最升速度及降雨量來定位雨帶位置，並隨時間變化對雨帶變演情形分類為滯留與後退二種；再進一步計算穩定度及 Froude Number，分析剖面上雨帶演變及相關參數之關聯性。

圖 5.4 個案二雨帶逐時演變示意圖及剖面走向，主要選定了二剖面，VCS1 及 VCS2，走向為東北西南。由雨帶演變及剖面雨帶定位可以將雨帶分類如表 5.1，表 5.2 為各剖面起迄點經緯度及剖面上地形特徵高度，用於計算 Froude Number，圖 5.5.1 至圖 5.5.4 為 CReSS 全地形模擬結果之流線場與位溫分析圖比較。

如圖 5.4 雨帶逐時演變所示，雨帶在 14 日 1800 UTC 成熟至滯留至 15 日 0200 UTC 左右，雨帶中段開始有向後退的情形，在 15 日 0700 UTC 時再滯留至 1500 UTC 後，雨帶北端並向北移動，雨帶南端消散後又重新激發出新的對流。從流線場來看，14 日 1800 UTC 時（圖 5.4.1 a~d），在台灣東南方上游風場底層 163 m、463 m 及 844 m 高度為向岸東南東風，而東方外海為東北東風，這二種風在約 23.5°N 輻合後向岸吹，在宜蘭沿海轉向為北北東風，同時可以看到向岸風與轉向後的北北東風在台灣東方沿海有輻合呈東北 - 西南走向的情形，而在 1290 m 的高度，台灣東方海域之風場轉向為東南風，同時在屏東南端可以看到些許氣流越山的情形。位溫方面，在低層 163 m 雨帶前後位溫差約 3 K，而較高層 463 m、844 m 及 1290 m 雨帶前後差異較小，有 2 K 左右。14 日 2300 UTC 時

(圖 5.5.2 a~d)，在低層 163 m 雨帶前後位溫差有減少的情形，約 2 K，463 m 及 844 m 在雨帶前後則還有 1 K 左右的位溫差，隨高度增加雨帶前後位溫差愈來愈不明顯；氣流場上，可以看到台灣東方向岸風，在宜蘭沿海轉向為北風向南行進，同時再與南方向岸風輻合。15 日 0400 UTC 時 (圖 5.5.3 a~d)，為雨帶後退期間，雨帶前後位溫差愈來愈小，在低層 163 m 高度雨帶前面還有 1 K，高度 463 m 以上逐漸看不到位溫有明顯的差異了。氣流方面，在 163 m 及 463 m 雨帶後側為轉向的北風，向岸氣流轉向的位置也逐漸由宜蘭東方向南移動。15 日 0900 UTC 時 (圖 5.5.4 a~d)，在低層 163 m 可以看到向岸氣流向岸推進，氣流轉向的位置南移至約 23.5 °N，以南為北風，以北為南風，在宜蘭沿海可以看到因風切產生的渦旋系統。

圖 5.6、圖 5.7、圖 5.8、圖 5.9 分別為 VCS1 水氣、Fr、N 值及水平風場垂直分佈之模擬結果圖。14 日 1800 UTC 時 (圖 5.6 b) 由水氣結果可以發現，滯留時，雨帶結構相當明顯，在雨帶後側有下衝流出現，在雨帶後側形成降溫的作用，2200 UTC 時 (圖 5.6 b)，雨帶後退還有微弱的下沉氣流出現。從 N 值結果 (圖 5.8a~b) 來看，雨帶上游之 N 值在 500 m 高度約  $0.4 \times 10^{-2}$ ，與雨後側因下衝流冷卻效應，使 N 值提高至  $1.2 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  以上，同時，陸地在下衝流之間的 N 值介於  $1 \times 10^{-2}$  至  $0.8 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  之間。在 Froude Number 方面 (圖 5.7 a~b)，計算結果 Fr 值在雨帶上游高度 500 m 左右達 0.8，從水平風場來看 (圖 5.9 a~b)，雨帶後之離岸流厚度相近 1000 m 左右。雨帶後之氣流主要為北風為主，以剖面的走向來說，對離岸流為正的貢獻，同時雨帶後側下衝流對離岸流也有貢獻：1800 UTC 時雨帶後側的下衝流，在底層輻散時，使底層 500 m 以下形成強烈的離岸流，使風場變為東北風及西北風。在 15 日 0000 UTC 至 0700 UTC 後退期中，由水氣分佈圖 (圖 5.6 c~d) 可以看到雨帶結構削弱很多，下沉氣流也逐漸消失，從 N 值結果 (圖 5.8 c~d) 來看，雨帶上游高度 500 m 穩定度低 ( $N=0.6 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  以下) 的區域因下衝流減弱，因其帶來的降溫造成穩定度增加的影響消失，使雨帶後退。在 Froude Number 來看 (圖 5.7 c~d)，雨帶上游高度 500 m 大於 Fr 值 0.5 的區域變小，從水平風場圖可以知道 (圖 5.9 c~d)，上游風場由東南東風轉為東南風，對剖面上的向岸風正貢獻減小，離岸流部份厚度變小，風速值也減小，原因為氣流轉向位置南移，使雨帶後側風場減弱，對離岸流的貢獻也因此降低。

在 15 日 0700 UTC 至 1400 UTC 的滯留期中，由水氣結果（圖 5.6 e~f）可以看到又重新雨帶出現，伴隨著雨後側的下沉氣流，雨帶後側位溫有提高的情形（圖 5.8 e~f）。在 Froude Number（圖 5.7 e~f）及水平風場來看（圖 5.9 e~f），上游向岸風場減弱，Fr 也有稍稍減弱的情形，上游向岸風減弱的原因為雨帶南段北移，伴隨的弱風區也向北移動所導致。

選取之另剖面 VCS2 之表現與 VCS1 相近，故在此不詳述。

## 二、半地形模擬結果

### (1) 模擬結果

個案二使用之模擬工具同個案一，使用 CReSS 多 CPU 版本進行模擬，實驗設計如表 2.1，模擬範圍及半地形如 5.11 所示。在半地形的處理上，選取的範圍為 21.8~25.38 °N，119.9~122.15 °E，只將台灣本島的地形高度除以 2。模擬初始資料為 JMA 區域分析場資料，模擬初始時間為 2006 年 5 月 14 日 1200 UTC，總模擬時間為 72 小時，模擬設定為 30 分鐘輸出一筆。

#### a. 半地形模擬結果比對

圖 5.12.1 至 5.12.3 為模式模擬開始後 6 小時至 30 小時後，間隔 6 小時之 163 m 之全地形與半地形風場和氣壓場不同高度的比較（163 m 圖 5.12.1、1060 m 圖 5.12.2、1531 m 圖 5.12.3）。163 m 高度（圖 5.12.1）的模擬結果中，可以看到全地形與半地形在海峽上風場的表現頗相近，但於桃園沿海的風速值，半地形結果比全地形要來得少近 5~10 kts 左右，原因為台灣北部的地形降低後，地形阻擋效應對於台灣北方海域東北風的影響減弱，使得氣流繞山的程度降低，風速值也降低。迎風面方面也可以從模擬結果看到地形降低後地形阻擋效應減弱對風場及氣壓場的影響。在 14 日 1800 UTC 至 15 日 0600 UTC 時，從半地形模擬結果中（圖 5.12.1 b、d、f）可以看到雨帶後側轉向氣流的風速值也小全形模擬結果（圖 5.12 a、c、e）約 5 kts 左右，另外在逐時演變中，向岸風與雨帶後側氣流輻合帶的位置，半地形模擬結果離岸距離也比全地形結果要來得近，15 日 1200 UTC 時（圖 5.12.1 g），全地形結果在台東東方有一塊向東延伸的弱風區（小於 10 kts），15 日 1800 UTC 時（圖 5.12.1 i）中，弱風區集中在花蓮沿海，而在半地形結果

中，在同一時間的表現上，可以看到弱風區的區域向北位移；在氣壓場，半地形模擬結果與全地形模擬結果類似，迎風面沿海氣壓值有增加的情形，但從 15 日 0000 UTC (圖 5.12.1 c、d) 花蓮沿海 1003 hPa 等值線的走向可以很清楚的看到，半地形模擬結果之氣壓場因地形阻擋在沿海形成之高壓強度略弱於全地形模擬結果的情形。

在較高層的結果 (1060 m 圖 5.12.2、1531 m 圖 5.12.3)，海峽及背風面的風場方面，可以看到因颱風環流接近，在背風場南側的風速值，半地形結果中，較強的風速值比全地形結果更容易向北延伸。迎風面上，向岸風風速的較強區域也離陸地較近，如 15 日 0000 UTC 時 (圖 5.12.2 e)。

### b. 半地形模擬雨帶結果演變比對

圖 5.13 為全地形與半地形模擬降雨強度及海平面氣壓場結果比較。14 日 1800 UTC 時 (圖 5.13 a~b)，從半地形結果可以看到一條弧狀雨帶，最突出端離岸約 90 km 左右，與全地形結果類似。15 日 0000 UTC 時 (圖 5.13 c~d)，則可以看到半地形雨帶中段已開始後退，雨帶南側對流胞排列的較為散亂的情形。15 日 0600 UTC (圖 5.13 e~f) 時，全地形與半地形結果中雨帶皆向陸地後退，很明顯的可以看到半地形結果雨帶位置後退的幅度較大，且離岸也較近；另外，在雨帶的北端半地形的模擬結果也可以看到一個新發展的渦旋系統，由渦旋系統中心氣壓場來看，較全地形結果中的渦旋系統弱。15 日 1200 UTC 至 1800 UTC 間 (圖 5.13 g~j)，全地形模擬結果的雨帶北端向東北發展，台東東南沿海激發出新的對流雨帶，半地形模擬結果也看到類似的情形，雨帶北端向東北發展後，雨帶南端也向北移動至宜蘭花蓮沿海，在位置上比全地形的結果還要來得北邊。

## (2) 剖面特性

從全地形與半地形模擬結果比較中可以了解，因地形減半後，地形阻擋的效應減弱，半地形模擬結果中，風場、氣壓場及雨帶位置皆因其而與全地形結果有所不同的表現。風場方向，在低層向岸風轉向效應減弱，使雨帶後側風速降低，高層中，東南氣流在地形的南端易越山，進一步的使後期新激發出的雨帶位置帶向北；氣壓場方面，也因地形阻擋效應減弱，迎風面沿海的高壓強度也略弱與全地形結果。在接下來的討論，將針對 14 日 1800 UTC 至 15 日 1500 UTC 分析之，分析方法上，與全地形相同，使用流線場資料來分析向岸風及轉向後氣流演變，

位溫場分析雨帶前後之溫度梯度，剖面位置選取與全地形模擬相同，再以剖面上的最升速度及降雨量來定位雨帶位置，並隨時間變化對雨帶變演情形分類為滯留與後退二種；再進一步計算穩定度及 Froude Number，分析剖面上雨帶演變及相關參數之關聯性。

圖 5.14 個案二雨帶逐時演變示意圖及剖面走向，同全地形模擬結果，主要選定了二剖面，VCS1 及 VCS2，走向為東北西南。由雨帶演變及剖面雨帶定位可以將雨帶分類如表 5.4，表 5.5 為各剖面起迄點經緯度及剖面上地形特徵高度，用於計算 Froude Number，圖 5.15.1 至圖 5.15.4 為半地形模擬結果不同高度之流線場與位溫分析圖比較。

如圖 5.14 雨帶逐時演變所示，雨帶在 14 日 1800 UTC 成熟至滯留至 15 日 0000 UTC，隨後雨帶中段向後退，在 15 日 0700 UTC 時再滯留至 1500 UTC 後，雨帶再向陸地後退。從流線場來看，14 日 1800 UTC 時（圖 5.14.1 a~d），在台灣東南方上游風場底層 163 m 高度為向岸東南東風，而東方外海為東北東風，這二種風在約 23.5°N 輻合後向岸吹，在宜蘭沿海轉向為北北東風，在較高層 463 m 及 844 m 的流線場可以看到類似的情形。而在 1290 m 的高度，台灣東方上游風場為東南風，同時在中央山脈的南端可以看到氣流越山的情形。位溫方面，在低層 163 m 及 463 m 雨帶前後位溫差約 2 K，而較高層 844 m 及 1290 m 雨帶前後差異較小，約 1 K 左右。14 日 2300 UTC 時（圖 5.15.2 a~d），在低層 163 m 及 463 m 雨帶前後位溫差有減少的情形，約 1~2 K，隨高度增加雨帶前後位溫差也愈來愈不明顯；氣流場上，在高度 844 m 處中央山脈的南端已有繞山氣流出現。15 日 0400 UTC 時（圖 5.15.3 a~d），為雨帶後退期間，雨帶前後位溫差愈來愈小，在低層 163 m 高度雨帶前面還有 1 K，高度 463 m 逐漸看不到位溫有明顯的差異了。氣流方面，在 163 m 及 463 m 雨帶後側為轉向的北風，向岸氣流轉向的位置也逐漸由宜蘭東方向南移動。15 日 0900 UTC 時（圖 5.15.4 a~d），在低層 163 m 可以看到向岸氣流推到離岸相當近，氣流轉向的位置南移至花蓮，以南為北風，以北為南風，在基隆沿海可以看到因風切產生的渦旋系統，因颱風環流影響，在迎風面上游的位溫有提高近 1 K 左右。

圖 5.16、圖 5.17、圖 5.18、圖 5.19 分別為 VCS2 水氣、Fr、N 值及水平風場垂直分佈之模擬結果圖。14 日 1800 UTC 至 2200 UTC 時（圖 5.16 a~b）由水

氣結果可以發現，滯留時，雨帶結構相當明顯，在雨帶後側有下衝流出現，在雨帶後側形成降溫的作用，從 N 值結果（圖 5.18a ~ b）來看，雨帶上游之 N 值在 500 m 高度約  $0.4 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，與雨後側因下衝流冷卻效應，使 N 值提高至  $1.2 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  以上，同時，陸地在下衝流之間的 N 值介於  $1 \times 10^{-2}$  至  $0.8 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  之間。在 Froude Number 方面（圖 5.17 a ~ b），因為地形高度降低，計算結果 Fr 值在雨帶上游高度 500 m 左右達 1.5 以上，從水平風場來看（圖 5.19 a ~ b），雨帶後之離岸流厚度達 1000 m 左右。雨帶後之氣流主要為北風為主，以剖面的走向來說，對離岸流為正的貢獻，另外，雨帶後側的下衝流，在 1800 UTC 時使底層 500 m 以下形成強烈的離岸流，2200 UTC 時，下衝流在低層轉向，影響底層水平風，使風場變為東北風及西北風。在 15 日 0000 UTC 至 0700 UTC 後退期中，由水氣分佈圖（圖 5.16 c ~ d）可以看到雨帶結構削弱很多，下衝流也逐漸消失，從 N 值結果（圖 5.18 c ~ d）來看，雨帶上游高度 500 m 穩定度低（ $N=0.6 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  以下）的區域因下衝流減弱，因其帶來的降溫造成穩定度增加的影響消失，使雨帶後退。在 Froude Number 來看（圖 5.17 c ~ d），雨帶上游高度 500 m 大於 Fr 值 1.5 的區域變小，從水平風場圖可以知道（圖 5.19 c ~ d），上游風場由東南東風轉為東南風，對剖面上的向岸風正貢獻減小，離岸流部份厚度變小，風速值也減小，原因為氣流轉向位置南移，使雨帶後側風場減弱，對離岸流的貢獻也因此降低。在 15 日 0700 UTC 至 1400 UTC 的滯留期中，由水氣結果（圖 5.16 e ~ f）可以看到雨帶後側的下衝流又出現，雨帶後側位溫有提高的情形（圖 5.18 e ~ f）。在 Froude Number（圖 5.17 e ~ f）及水平風場來看（圖 5.19 e ~ f），上游向岸風場減弱，Fr 也有稍稍減弱的情形，上游向岸風減弱的原因為雨帶南段北移，伴隨的弱風區也向北移動所導致。

VCS2 之表現與 VCS1 相近，故在此也不詳述。

### 三、剖面平均分析及小結

#### (1) 剖面平均分析

表 5.3 與 5.6 分別為個案二全地形及半地形剖面 VCS1 及 VCS2 雨帶上游 50 km、地面至 2500 高度的 N、Fr、位溫及向岸風速平均。圖 5.10 與圖 5.20 為個

案二全地形及半地形剖面上的參數，以雨帶位置做雨帶前後 1000 m 與 2500 m 高度以下之平均。表 5.7 為以雨帶為中心做所有剖面的平均後，取其上游 50 km 的平均。

在 1000 m 以下的剖面平均，由 N 值來看（圖 5.10 a、5.20 a），全地形及半地形皆可以看到雨帶後側在退後期的穩定度低於滯留期，在位溫方面（圖 5.10 e、5.20 e）可以看到雨帶後側有略高於滯留期。Fr 的剖面平均在全地形的結果（圖 5.10 a），上游 50 km 後退期是略高於滯留期，分別約為 0.37 與 0.35，在上游風場來看，向岸風在退後期（圖 5.10.1 c）約  $7 \text{ m s}^{-1}$  左右，而盛行風速（圖 5.10.1 e）卻達  $8 \sim 9 \text{ m s}^{-1}$  左右大於向岸風速，原因為上游風場轉向為東南風，在剖面上的貢獻減少。半地形的 Fr 剖面計算結果（圖 5.20 a）可以看到滯留期與後退期分別可以達到 0.8 與 0.9，在上游風場也與全地形計算結果類似。

在 2500 m 以下的平均來看，全地形整體上游向岸風速在高度 2500 m 以下滯留期平均約  $7 \text{ m s}^{-1}$ ，後退期則約  $8 \text{ m s}^{-1}$ ，半地形在後退期略高約為  $8.3 \text{ m s}^{-1}$ 。在 Fr 的滯留期的平均，半地形約 0.55 為全地形的二倍（0.24），後退期略高滯留期 0.1 至 0.2。

## （2）小結

從個案二在全地形模擬結果分析上，可知道雨帶滯留的原因有二：第一個為台灣地形高度高，上游 Froude Number 計算結果為約 0.24，為不易越山的狀態，向岸氣流因地形阻擋形成之雨帶後側轉向氣流與向岸氣流抗衡；第二為雨帶後側的下衝流，造成了雨帶後側穩定度提高，使雨帶對流不易向陸地發展。從表 5.3 可以看到，隨颱風接近，上游向岸風速有增加的情形，但是雨帶後退的卻沒有立刻後退，而是當雨帶後側的下衝流減弱，及上游風速持續增強，雨帶後側穩定度下降，雨帶才開始後退。

從半地形的模擬結果，雨帶滯留的情形與全地形類似，同樣的也可以看到雨帶後側有下衝流發生，但因地形減半後，台灣上游的平均 Fr 高度 2500 m 以下由 0.24 提高至 0.55，而在低層 1000 m Fr 由 0.36 提高至 0.85 左右，使氣流從不易過山的狀態轉變為中性，同時向岸氣流轉向為雨帶後側氣流的程度也減弱，為雨帶滯留為位較全地形模擬結果近的原因。

## 第六章 總結

本研究使用日本名古屋大學地球水循環研究中心所發展的中尺度雲解析風暴模式 (Cloud-Resolving Storm Simulator; CReSS)，針對個案一期間 2004 年 10 月 19 日至 20 日及個案二期間 2006 年 5 月 14 日至 16 日因颱風環流影響下引發之地形雨帶進行模擬研究，並對雨帶行為做進一步的分析。透過觀測資料分析與模式模擬結果顯示，重要結論有下列各項：

1. 透過綜觀天氣分析，對於個案一期間，主要影響天氣的綜觀系統為南北低壓、東西高壓的鞍形場，日本位於鞍形場的中心南方，使日本地區主要盛行風為東北風；對於個案二期間，主要影響天氣的綜觀系統為大陸高壓及太平洋副高，初期大陸高壓主導，影響台灣北部風場，使台灣北方海域至台灣海峽吹東北風，颱風環流影響台灣東部風場為東風。
2. 個案一中颱風陶卡基從日本西南方向東北移動，從在行進過程中登陸日本，其環流引發之對流雨帶生命期約 10~12 小時，隨後因颱風接近，雨帶有潰散後退情形；而個案二中颱風珍珠由熱帶中太平洋生成，西進通過呂宋島時，其環流也引發了台灣東部雨帶生成，雖然後期颱風珍珠轉向往北北東行進，未登陸台灣，雨帶未受颱風環流破壞生命期較個案一長，約 24 小時左右。
3. 兩個案中颱風環流皆影響雨帶上游風場為向岸風，但因颱風走向問題，個案一在底層上游風場因颱風接近為南風，並且雨帶上游風速在低層達 25~35 kts，而個案二，在雨帶上游風速最大達 15~25 kts，明顯的小於個案一的上游風速，加上迎風面特徵地形高度高於日本，為個案一的 Fr 值大於個案二的主要原因。
4. 使用日本名古屋大學地球水循環研究中心所發展的中尺度雲解析風暴模式 (CReSS) 來模擬此兩個案之對流雨帶演變。模擬結果顯示，CReSS 皆能掌握到雨帶的形成與其行為 (滯留與後退) 及降水分布。在對環境場條件 (個案一的東北風) 與氣流遇山後轉向的情形等等也都掌握的不錯。不過模式在風場表現上，風速在雨帶背風面會有低估的情形。
5. 由模擬結果之氣流線分布圖及剖面分析顯示，個案一上游的 Fr 值平均

在滯留期皆大於 1 以上，理論上，氣流應較易產生過山現象，但觀測上，卻出現雨帶滯留，顯示表示滯留的原因，主要為雨帶上游颱風環流與雨帶後側東北風輻合，雨帶後側的東北風在個案一的區域 A、B 的成份，為環境場之東北風從日本中國地區北方向南越山而來；而區域 C 雨帶後側的東北風的成份有二，一為富士山上游之東北風，二為颱風環流之向岸南風遇日本南阿爾卑斯山脈轉向為東北風，此二風場輻合匯入雨帶後側。後退的原因為雨帶後側的東北風轉向，對剖面方向的離岸氣流貢獻減少，同時上游向岸氣流隨颱風接近增強所致。

6. 在個案二全地形模擬結果之氣流線分布圖及剖面分析顯示，上游 Fr 值平均在 1 以下，地形阻擋效應明顯，東部沿岸可看到氣壓上升的情形，對離岸流的發展有利，同時雨帶後側之下沈氣流使雨帶後側 N 值上升，穩定度上升，不利於雨帶後側對流發展，為雨帶滯留的主要二個原因。雨帶向岸後退的原因，主要當雨帶後側下沈氣流減弱，使雨帶後側的穩定度下降，利於雨帶向陸地發展，與上游向岸風增加時，雨帶由滯留較為向陸地移行。
7. 在個案二地形減半後的半地形模擬結果，可以發現地形減半後，地形阻擋效應減弱，平均 Fr 值由全地形的 0.25 增至半地形的 0.55，向岸氣流遇地形後轉向的風速減弱，颱風對地形的影響下產生的弧狀雨帶後期，在二個案全地形結果中，會位於台灣東南部地區，但在半地形下，其位置則受地形高度減半影響，向北移至台東花蓮一帶，顯示地形對雨帶的作用，不僅在雨帶的強弱，離岸距離的遠近同時，也會影響其空間位置，相對雨帶滯留位置也較全地形靠近沿岸。

## 未來展望

本研究針對颱風影響下雨帶演變進行個案模擬研究，並對模擬結果進行穩定度相關參數的計算，探討雨帶的不同狀態與穩定度變化中轉換過程。因相關研究較少，及工作站效能問題，故研究中遇到些許困難與感想，可以提供於未來相關研究上：

1. 個案一為日本名古屋大學地球水循環中心模擬結果，原本預期對個案一

進行地形敏感度實驗，但其模擬結果解析度為 1 km，模擬範圍相當大，但考量工作站效能，以致無法實行，未來也許可以找適合環境進行之。

2. 個案二為在文大 HPC 進行之模擬結果，解析度為 2 km，在研究中期，嘗試使用解析度 1 km 進行模擬但未成功，地形敏感度實驗，對個案二進行了半地形模擬，未來可以再嘗試 1 km 解析度進行模擬，對雨帶做更細部分析，以及進行無地形的地形敏感度實驗，找出地形高低對雨帶的行為影響程度。

3. 對於雨帶的演變，未來可以使用軌跡法進行分析。



## 參考文獻

- Chen, S.H., and Y.L. Lin, 2005: Effects of Moist Froude Number and CAPE on a Conditionally Unstable Flow over a Mesoscale Mountain Ridge. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 331–350.
- Chu, C.M., and Y.L. Lin, 2000: Effects of Orography on the Generation and Propagation of Mesoscale Convective Systems in a Two-Dimensional Conditionally Unstable Flow. *J. Atmos. Sci.*, **57**, 3817–3837.
- Durran, D.R., and J.B. Klemp, 1982: On the Effects of Moisture on the Brunt-Väisälä Frequency. *J. Atmos. Sci.*, **39**, 2152–2158.
- Lin, Y.J., 1993: Orographic Effects on Airflow and Mesoscale Weather Systems Over Taiwan. *TAO, Vol.4, No.4*, December 1993.
- Lin, Y.J., R.W. Pasken, and H.W. Chang, 1992: The Structure of a Subtropical Prefrontal Convective Rainband. Part I: Mesoscale Kinematic Structure Determined from Dual-Doppler Measurements. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 1816–1836.
- Lin, Y.L., S. Chiao, T.A. Wang, M.L. Kaplan, and R.P. Weglarz, 2001: Some Common Ingredients for Heavy Orographic Rainfall. *Wea. Forecasting*, **16**, 633–660.
- Lin, Y.L., and T.A. Wang, 1996: Flow Regimes and Transient Dynamics of Two-Dimensional Stratified Flow over an Isolated Mountain Ridge. *J. Atmos. Sci.*, **53**, 139–158.
- Rotunno, R., and Ferretti, R., 2003: Orographic effects on rainfall in MAP cases IOP 2b and IOP 8. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 129, pp. 373–390.
- Wang, C.-C., and W.-M. Huang, 2009: High-resolution simulation of a nocturnal narrow convective line off the southeastern coast of Taiwan in the Mei-yu season, *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L06815,

doi:10.1029/2008GL037147.

- Wang, C.C., and G.T.J. Chen, 2002: Case Study of the Leaside Mesolow and Mesocyclone in TAMEX. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 2572–2592.
- Wang, C.C., and G.T.J. Chen, 2003: On the Formation of Leaside Mesolows under Different Froude Number Flow Regime in TAMEX. *JMSJ*, Vol. **81**, 339-365.
- Wang, C.C., G.T.J. Chen, T.C. Chen, and K. Tsuboki, 2005: A Numerical Study on the Effects of Taiwan Topography on a Convective Line during the Mei-Yu Season. *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 3217–3242.
- Yu, C.K., and B. J.D. Jou, 2005: Radar observations of the diurnally forced offshore convective along the Southeastern Coast of Taiwan. *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 1613-1636.
- Yu, C.K., and C.Y. Lin, 2008: Statistical Location and Timing of the Convective Lines off the Mountainous Coast of Southeastern Taiwan from Long-Term Radar Observations. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 5077–5094.

