

國立中央大學

大氣物理研究所  
碩士論文

MM5 模式模擬之納莉颱風(2001)

登陸時風場結構變化

研究生：翁靜儀

指導教授：陳台琦博士

楊明仁博士

中華民國九十八年一月



# 國立中央大學圖書館 碩博士論文電子檔授權書

(95 年 7 月最新修正版)

本授權書所授權之論文全文電子檔(不包含紙本、詳備註 1 說明)，為本人於國立中央大學，撰寫之碩/博士學位論文。(以下請擇一勾選)

- ()同意(立即開放)  
( )同意(一年後開放)，原因是：\_\_\_\_\_。  
( )同意(二年後開放)，原因是：\_\_\_\_\_。  
( )不同意，原因是：\_\_\_\_\_。

以非專屬、無償授權國立中央大學圖書館與國家圖書館，基於推動「資源共享、互惠合作」之理念，於回饋社會與學術研究之目的，得不限地域、時間與次數，以紙本、微縮、光碟及其它各種方法將上列論文收錄、重製、公開陳列、與發行，或再授權他人以各種方法重製與利用，並得將數位化之上列論文與論文電子檔以上載網路方式，提供讀者基於個人非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印。

研究生簽名：\_\_\_\_\_ 翁靜儀 \_\_\_\_\_ 學號：\_\_\_\_\_ 956201014 \_\_\_\_\_

論文名稱：\_\_\_\_\_ MM5 模式模擬之納莉颱風(2001)登陸時風場結構變化 \_\_\_\_\_

指導教授姓名：\_\_\_\_\_ 陳台琦 博士、楊明仁 博士 \_\_\_\_\_

系所：\_\_\_\_\_ 大氣物理 \_\_\_\_\_ 所 博士班 碩士班

日期：民國\_98\_年\_01\_月\_23\_日

備註：

1. 本授權書之授權範圍僅限電子檔，紙本論文部分依著作權法第 15 條第 3 款之規定，採推定原則即預設同意圖書館得公開上架閱覽，如您有申請專利或投稿等考量，不同意紙本上架陳列，須另行加填聲明書，詳細說明與紙本聲明書請至 <http://blog.lib.ncu.edu.tw/plog/> 碩博士論文專區查閱下載。
2. 本授權書請填寫並親筆簽名後，裝訂於各紙本論文封面後之次頁(全文電子檔內之授權書簽名，可用電腦打字代替)。
3. 請加印一份單張之授權書，填寫並親筆簽名後，於辦理離校時交圖書館(以統一代轉寄給國家圖書館)。

國立中央大學碩士班研究生

論文指導教授推薦書

大氣物理 研究所 翁靜儀 研究生所提  
之論文 MM5 模式模擬之納莉颱風(2001)登陸  
時風場結構變化 係由本人指導撰述，同意  
提付審查。

指導教授

陳台奇

(簽章)

楊明仁

(簽章)

97 年 12 月 23 日

國立中央大學碩士班研究生  
論文口試委員審定書

大氣物理 研究所 翁靜儀 研究生所提  
之論文 MM5 模式模擬之納莉颱風(2001)登陸時  
風場結構變化 經本委員會審議，認定符合碩士  
資格標準。

學位考試委員會召集人

黃清勇

委 員

楊明仁

傅台奇

中華民國九十七年十二月二十三日

# 摘 要

台灣地形複雜，而當颱風登陸時會因地形作用而改變其結構，但對於颱風登陸期間之風場結構改變原因仍待進一步的探討。雷達資料可以用來分析颱風之三維結構，但是雷達對於低層大氣資料取得困難而受到很大的限制。

本研究使用 Yang et al. (2008) 之 PSU-NCAR MM5 模擬納莉颱風(2001)的模式輸出，透過高時空解析度之模式資料，藉以分析納莉颱風風場在登陸臺灣期間之變化，更深入瞭解颱風與地形間的交互作用；並且由動量方程式來做診斷分析，了解颱風風場結構產生變化的原因。

研究結果顯示，在海面上時颱風結構較為對稱，徑向風低層為入流、高層為出流。颱風接近陸地時，受到地形影響，徑向風低層入流增厚且中層出現一個傾斜向外的出流；切向風隨高度向外傾斜，颱風結構出現明顯不對稱性。颱風登陸期間，徑向風低層入流及中層出流皆持續增強變厚；切向風最大風半徑向外傾斜且半徑縮小，切向風最大值有減弱的現象。在眼牆之垂直速度上升運動區高度降低且最大值分布高度也降低，並向眼心收縮。MM5 模擬結果與蔡(2006)用都卜勒雷達合成風場結構分析相當類似，故此 MM5 模擬應有相當的可信度。

接下來更進一步使用每 2 分鐘之模式輸出資料對納莉颱風(2001)進行動量收支的分析，絕對角動量在遇到地形時，受垂直速度場的影響極大值向低層集中，絕對角動量變化主要受到氣壓梯度力及徑向水平平流項的影響；在切向風遇到地形時透過垂直傳輸將較小之切向風向上傳送，再加上摩擦效應使切向風減弱。經由計算徑向風動量收支項看出離心力項大於氣壓梯度力項，風場呈現超梯度風的情形，而低層徑向入流的增強來自於水平平流項，再配合垂直傳輸項將較強之徑向入流向上傳送，離心力項與氣壓梯度力項使得中層徑向出流增強。

# ABSTRACT

After landfall, the typhoon structure is changed by the topography. The reason why the typhoon structure is changed by the topography is still unknown. Dual-Doppler radar synthesis can compose three-dimensional wind, but it is difficult to get the data of the lowest level.

In order to understand the relationship between the typhoon and topography, this study utilizes the PSU-NCAR MM5 to investigate the structure of Typhoon Nari (2001) and mechanisms of the structures change during typhoon landing.

Before landing, the typhoon wind field was symmetric. Low level radial wind was inflow and high level of radial wind was outflow. During landfall, the typhoon wind field was asymmetric. Low level inflow becomes thicker over land and the outflow appears near the mountain on the middle level. We have compared the model results with radar data, and found the tangential wind, radial wind and vertical velocity are well simulated by MM5.

From analysis of the momentum budget equation, we found the downward absolute angular momentum (AAM) transport by the vertical advection. The tangential wind decreases at the low level through the upward transport of the smaller tangential wind. The results of the radial momentum budget showed that the tangential wind exhibited supergradient flow characteristics. The radial inflow was increased by the horizontal advection and the vertical advection. The increase of the radial outflow was caused by the centrifugal force and the pressure gradient force.

## 誌 謝

時間過的很快，兩年多的日子一下子就過去了，在這些日子裡，學習到不同的經驗，遇到了許多挫折，但是也得了很多收穫。在這裡要感謝許多老師、學長姐的協助以及同學的陪伴，讓我的研究所生活能順利渡過。

首先要感謝我的指導教授陳台琦老師以及楊明仁老師，感謝兩位老師辛苦的修改我的論文，並且在陳台琦老師身上我學到了對於科學研究的熱情以及對於各種事物都擁有著好奇心，並且除了在做研究以外，老師所分享的一些小故事也讓人受益良多；從楊明仁老師身上學到許多做研究的想法以及一些常被忽略掉的小細節。另外還要感謝實驗室的另一位老師廖宇慶老師，謝謝你時常的關心與鼓勵，老師對於研究工作認真的態度是值得我效法的。也要謝謝我的口試委員黃清勇老師給予許多寶貴的意見，讓我的論文能更加的完整。

再來要感謝氣象雷達實驗室的大家，偉裕學長、吉暉學長、博廷學長、雅茜學姊、雅茹學姊為我們準備課程，教給我們很多東西；沈先生及正紀學長辛苦的組裝移動式雷達，讓我在寫論文之餘還能參與到觀測實驗，還有雅亭以及文倫帶來的歡笑聲，讓每天的心情都很開心。還有最最要感謝的慧玲，每天都要當我的垃圾桶讓我解悶，還常常變出好吃的食物，很開心成為這個實驗室的一份子，就好像是第二個家一樣。還有不同實驗室但是常常被我抓著問程式問題的璿如學姐；感謝兩年來每天陪我吃飯的昶宇跟佳蓉，還有很愛耍孤癖的心華；感謝瑋靚、玉嫻及旻秀時常約出來吃飯聊天，彼此互相鼓勵；還要感謝奕德、小黑、裕仁平常陪我胡言亂語；還有所有研究所的同學們以及很多很多人，感謝在這兩年多來帶給我的美好回憶。

最後要感謝的是我的家人，雖然沒辦法常常回家，但我知道只要我有需要，一回頭，你們都會在那邊等著我，你們永遠在我心中占有很重要的位置，謝謝你們。

# 目 錄

中文摘要	.....	i
英文摘要	.....	ii
誌謝	.....	iii
目錄	.....	iv
表目錄	.....	v
圖目錄	.....	vi
第一章	緒論.....	01
1-1	前言.....	01
1-2	文獻回顧.....	01
1-3	研究動機.....	04
第二章	資料來源與分析方法.....	05
2-1	資料來源.....	05
2-1-1	模式介紹.....	05
2-1-2	模式設定.....	06
2-2	分析方法.....	06
第三章	颱風風場結構的演化.....	09
3-1	切向風和徑向風之水平結構變化.....	09
3-2	風場之垂直結構變化.....	10
3-3	風場之弧狀剖面.....	12
第四章	模式與觀測結果之比較.....	14
4-1	水平切向風和徑向風場結構.....	14
4-2	風場垂直結構.....	15
第五章	利用動量方程式分析颱風風場結構變化.....	17
5-1	颱風登陸期間絕對角動量變化.....	18
5-1-1	絕對角動量結構.....	18
5-1-2	絕對角動量變化.....	19
5-2	颱風登陸期間切向風變化.....	20
5-3	颱風登陸期間徑向風變化.....	22
第六章	結論與未來展望.....	26
6-1	結論.....	26
6-2	未來展望.....	27
參考文獻	.....	29

## 表 目 錄

表 1 絕對角動量動量方程式各個收支項之值，如圖 5.5 分為六個區域。...	31
表 2 切向風動量方程式各個收支項之值，如圖 5.5 分為六個區域。.....	32
表 3 徑向風動量方程式各個收支項之值，如圖 5.5 分為六個區域。.....	33

## 圖目錄

- 圖 1.1：颶風 Andrew(1992)內核結構概念圖。摘自 Liu et al. (1999)。…… 34
- 圖 2.1：2001 年 9 月氣象局之納莉颱風雷達回波 CV 圖(a) 16 日 0300 UTC、  
(b) 16 日 1500 UTC，以及模擬計算出之納莉颱風雷達回波 CV 圖 (c) 16 日 0000UTC、(d) 16 日 1200 UTC。雷達回波強度間距為 5 dBZ。摘自 Yang et al. (2008)。…… 35
- 圖 2.2：納莉颱風(2001)路徑比較圖。黑線為 CWB 的最佳路徑，灰線為模式模擬出的颱風路徑；每個點的時間間距為 6 小時。  
摘自 Yang et al. (2008)。…… 35
- 圖 2.3：MM5 巢狀網格分布(D1 (54 公里; 71 × 81)、D2 (18 公里; 100 × 100)、D3 (6 公里; 166 × 166)以及 D4 (2 公里; 229 × 154))和 CWB(Central Weather Bureau)納莉颱風(2001)每六小時的最佳路徑圖。摘自 Yang et al. (2008)。…… 36
- 圖 3.1：水平切向風場，高度 2 公里和 5 公里六個不同時間的變化(a)0106UTC 2 公里、(b)0106UTC 5 公里、(c)0808UTC 2 公里、(d)0808UTC 5 公里、(e)0936UTC 2 公里、(f)0936UTC 5 公里、(g)1026UTC 2 公里、(h)1026UTC 5 公里、(i)1116UTC 2 公里、(j)1116UTC 5 公里、(k)1146UTC 2 公里、(l)1146UTC 5 公里，單位： $\text{ms}^{-1}$ 。…… 37
- 圖 3.2：水平徑向風場，高度 2 公里和 5 公里六個不同時間的變化(a)0106UTC 2 公里、(b)0106UTC 5 公里、(c)0808UTC 2 公里、(d)0808UTC 5 公里、(e)0936UTC 2 公里、(f)0936UTC 5 公里、(g)1026UTC 2 公里、(h)1026UTC 5 公里、(i)1116UTC 2 公里、(j)1116UTC 5 公里、(k)1136UTC 2 公里、(l)1146UTC 5 公里，單位： $\text{ms}^{-1}$ 。…… 39
- 圖 3.3：切向風場垂直結構(方位角  $1^\circ$ - $360^\circ$  平均)六個不同時間的變化  
(a)0106UTC、(b)0808UTC、(c)0936UTC、(d)1026UTC、(e)1116UTC、

	(f)1146UTC，單位： $\text{ms}^{-1}$ 。.....	41
圖 3.4：	徑向風場垂直結構(方位角 $1^\circ$ - $360^\circ$ 平均)六個不同時間的變化	
	(a)0106UTC、(b)0808UTC、(c)0936UTC、(d)1026UTC、(e)1116UTC、	
	(f)1146UTC，單位： $\text{ms}^{-1}$ 。.....	42
圖 3.5：	垂直速度場垂直結構(方位角 $1^\circ$ - $360^\circ$ 平均)六個不同時間的變化	
	(a)0106UTC、(b)0808UTC、(c)0936UTC、(d)1026UTC、(e)1116UTC、	
	(f)1146UTC，單位： $\text{ms}^{-1}$ 。.....	43
圖 3.6：	切向風場垂直結構三個不同時間的變化(a)1026UTC方位角 $51^\circ$ - $71^\circ$ 、	
	(b)1026UTC方位角 $231^\circ$ - $251^\circ$ 、(c)1116UTC方位角 $51^\circ$ - $71^\circ$ 、(d)1116UTC	
	方位角 $231^\circ$ - $251^\circ$ 、(e)1146UTC方位角 $51^\circ$ - $71^\circ$ 、(f)1146UTC方位角	
	$231^\circ$ - $251^\circ$ ，單位： $\text{ms}^{-1}$ 。.....	44
圖 3.7：	徑向風場垂直結構三個不同時間的變化(a)1026UTC方位角 $51^\circ$ - $71^\circ$ 、	
	(b)1026UTC方位角 $231^\circ$ - $251^\circ$ 、(c)1116UTC方位角 $51^\circ$ - $71^\circ$ 、(d)1116UTC	
	方位角 $231^\circ$ - $251^\circ$ 、(e)1146UTC方位角 $51^\circ$ - $71^\circ$ 、(f)1146UTC方位角 $231^\circ$ -	
	$251^\circ$ ，單位： $\text{ms}^{-1}$ 。.....	45
圖 3.8：	垂直速度場垂直結構三個不同時間的變化(a)1026UTC方位 $51^\circ$ - $71^\circ$ 、	
	(b)1026UTC方位角 $231^\circ$ - $251^\circ$ 、(c)1116UTC方位角 $51^\circ$ - $71^\circ$ 、	
	(d)1116UTC方位角 $231^\circ$ - $251^\circ$ 、(e)1146UTC方位角 $51^\circ$ - $71^\circ$ 、	
	(f)1146UTC方位角 $231^\circ$ - $251^\circ$ ，單位： $\text{ms}^{-1}$ 。.....	46
圖 3.9：	0106UTC颱風尚在海面上時(a)半徑 20 公里切向風場弧狀剖面、(b)半徑	
	20 公里徑向風場弧狀剖面、(c)半徑 30 公里切向風場弧狀剖面、(d)半	
	徑 30 公里徑向風場弧狀剖面、(e)半徑 40 公里切向風場弧狀剖面、(f)	
	半徑 40 公里徑向風場弧狀剖面，單位： $\text{ms}^{-1}$ 。.....	47
圖 3.10：	0936UTC颱風接近台灣時 (a)半徑 20 公里切向風場弧狀剖面、(b)半徑	
	20 公里徑向風場弧狀剖面、(c)半徑 30 公里切向風場弧狀剖面、(d)半	
	徑 30 公里徑向風場弧狀剖面、(e)半徑 40 公里切向風場弧狀剖面、(f)	

半徑 40 公里徑向風場弧狀剖面，單位： $\text{ms}^{-1}$ 。.....	48
圖 3.11：1116UTC 颱風登陸時(a)半徑 20 公里切向風場弧狀剖面、(b)半徑 20 公里徑向風場弧狀剖面、(c)半徑 30 公里切向風場弧狀剖面、(d)半徑 30 公里徑向風場弧狀剖面、(e)半徑 40 公里切向風場弧狀剖面、(f)半徑 40 公里徑向風場弧狀剖面，單位： $\text{ms}^{-1}$ 。.....	49
圖 3.12：1146UTC 颱風登陸後 (a)半徑 20 公里切向風場弧狀剖面、(b)半徑 20 公里徑向風場弧狀剖面、(c)半徑 30 公里切向風場弧狀剖面、(d)半徑 30 公里徑向風場弧狀剖面、(e)半徑 40 公里切向風場弧狀剖面、(f)半徑 40 公里徑向風場弧狀剖面，單位： $\text{ms}^{-1}$ 。.....	50
圖 4.1：水平切向風場，納莉颱風(2001)登陸時高度 2 公里和 5 公里雷達風場與模式風場的比較(a)1116UTC 2 公里模式風場、(b)1116UTC 2 公里模式風場、(c)1400UTC 2 公里雷達風場、(d)1400UTC 5 公里雷達風場，單位： $\text{ms}^{-1}$ 。.....	51
圖 4.2：水平徑向風場，納莉颱風(2001)登陸時高度 2 公里和 5 公里雷達風場與模式風場的比較(a)1116UTC 2 公里模式風場、(b)1116UTC 2 公里模式風場、(c)1400UTC 2 公里雷達風場、(d)1400UTC 5 公里雷達風場，單位： $\text{ms}^{-1}$ 。.....	52
圖 4.3：切向風場垂直結構，納莉颱風(2001)登陸時不同方位角雷達風場與模式風場的比較(a)雷達風場 1400UTC 方位角平均 $91^{\circ}$ - $121^{\circ}$ 、(b)模式風場 1116UTC 方位角平均 $51^{\circ}$ - $71^{\circ}$ 、(c)雷達風場 1400UTC 方位角平均 $181^{\circ}$ - $201^{\circ}$ 、(d)模式風場 1116UTC 方位角平均 $231^{\circ}$ - $251^{\circ}$ ，單位： $\text{ms}^{-1}$ 。.....	53
圖 4.4：徑向風場垂直結構，納莉颱風(2001)登陸時雷達風場與模式風場的比較(a)雷達風場 1400UTC 方位角平均 $91^{\circ}$ - $121^{\circ}$ 、(b)模式風場 1116UTC 方位角平均 $51^{\circ}$ - $71^{\circ}$ 、(c)雷達風場 1400UTC 方位角平均 $181^{\circ}$ - $201^{\circ}$ 、(d)模式風場 1116UTC 方位角平均 $231^{\circ}$ - $251^{\circ}$ ，單位： $\text{ms}^{-1}$ 。.....	54

圖 4.5：垂直速度場垂直結構，納莉颱風(2001)登陸時雷達風場與模式風場的比較(a)雷達風場 1400UTC方位角平均  $91^{\circ}$ - $121^{\circ}$ 、(b)模式風場 1116UTC方位角平均  $51^{\circ}$ - $71^{\circ}$ 、(c)雷達風場 1400UTC方位角平均  $181^{\circ}$ - $201^{\circ}$ 、(d)模式風場 1116UTC方位角平均  $231^{\circ}$ - $251^{\circ}$ ，單位： $\text{ms}^{-1}$ 。…………… 55

圖 4.6：切向風場弧狀剖面，納莉颱風(2001)登陸時雷達風場與模式風場的比較  
(a)1400UTC半徑 30 公里，方位角 90-270 雷達風場、(b)1116UTC半徑 30 公里，方位角 1-360 模式風場、(c)1400UTC半徑 40 公里，方位角 90-270 雷達風場、(d)1116UTC半徑 40 公里，方位角 1-360 模式風場，單位： $\text{ms}^{-1}$ 。  
…………… 56

圖 4.7：徑向風場弧狀剖面，納莉颱風(2001)登陸時不同方位角雷達風場與模式風場的比較(a)1400UTC 半徑 30 公里，方位角 90-270 雷達風場、(b)1116UTC 半徑 30 公里，方位角 1-360 模式風場、(c)1400UTC 半徑 40 公里，方位角 90-270 雷達風場、(d)1116UTC 半徑 40 公里，方位角 1-360 模式風場，單位： $\text{ms}^{-1}$ 。  
…………… 57

圖 5.1：1992 年 8 月 23 日 2000-2100UTC，Andrew 颶風之方位角平均垂直結構  
(a)垂直運動、(b)徑向風、(c)切向風、(d)絕對角動量與相當位溫。摘自 Zhang et al. (2001)。…………… 58

圖 5.2：2001 年 9 月 16 日 0106UTC，納莉颱風之方位角平均垂直結構(a) 垂直運動( $\text{ms}^{-1}$ )、(b)徑向風( $\text{ms}^{-1}$ )、(c)切向風( $\text{ms}^{-1}$ )、(d)絕對角動量( $5 \times 10^5 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )。……………59

圖 5.3：1992 年 8 月 23 日 2000-2100UTC，Andrew 颶風絕對角動量方程式之方位角平均垂直結構(a)  $\frac{dM}{dt}$ 、(b)水平平流項、(c)垂直傳輸項、(d)  $\frac{\partial M}{\partial t}$ ，單位： $1 \times 10^5 \text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{h}^{-1}$ 。摘自 Zhang et al. (2001)。…………… 60

圖 5.4：2001 年 9 月 16 日 0106UTC，納莉颱風絕對角動量方程式之方位角平均垂直結構(a)  $\frac{dM}{dt}$ 、(b)水平平流項、(c)垂直傳輸項、(d)  $\frac{\partial M}{\partial t}$ ，單位：

$10^5 \text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{h}^{-1}$ 。.....61

圖 5.5：將納莉颱風眼牆(半徑 20 公里)之弧狀剖面分成 a~f 六個區域，b、d 區為地形左側，c、e 區為地形右側。..... 62

圖 5.6：絕對角動量垂直結構 (a)1116UTC (方位角 51-71)、(b)1116UTC (方位角 251-231)、(c) 1146UTC (方位角 51-71)、(d) 1146UTC (方位角 251-231)，單位： $10^5 \text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{h}^{-1}$ 。..... 62

圖 5.7：絕對角動量弧狀剖面 (a)1116UTC 半徑 20 公里、(b) 1146UTC 半徑 20 公里、(c) 1116UTC 半徑 30 公里、(d) 1146UTC 半徑 30 公里、(e) 1116UTC 半徑 40 公里、(f) 1146UTC 半徑 40 公里，單位： $5 \times 10^5 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 。..... 63

圖 5.8：半徑 20 公里弧狀剖面 (a)1114UTC 絕對角動量，單位： $5 \times 10^4 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 、(b) 1118UTC 絕對角動量，單位： $5 \times 10^4 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 、(c) 1114UTC 切向風，單位： $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 、(d) 1118UTC 切向風，單位： $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 、(e) 1114UTC 徑向風，單位： $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 、(f) 1118UTC 徑向風，單位： $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 。..... 64

圖 5.9：1116UTC 絕對角動量動量方程(2.7)式在半徑 20 公里弧狀剖面之各項  
 (a)  $\frac{\partial M}{\partial t}$  (b)  $-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \lambda}$  (c)  $-V_r \frac{\partial M}{\partial r}$  (d)  $-\frac{V_t}{r} \frac{\partial M}{\partial \lambda}$  (e)  $-w \frac{\partial M}{\partial z}$  (f)  
 $F(r) * r$  (g)  $\frac{dM}{dt}$ ，單位： $\text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{h}^{-1}$ 。..... 65

圖 5.10：1116UTC 切向風動量方程(2.4)式在半徑 20 公里弧狀剖面之各項(a)  
 $\frac{\partial V_t}{\partial t}$  (b)  $\frac{-V_t V_r}{r}$  (c)  $-\frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \lambda}$  (d)  $-V_r \frac{\partial V_t}{\partial r}$  (e)  $-V_t \frac{\partial V_t}{\partial \lambda}$  (f)  $-w \frac{\partial V_t}{\partial z}$   
 (g)  $F(\lambda)$  (h)  $\frac{dV_t}{dt}$  (i)  $\frac{-V_t V_r}{r} - \frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \lambda}$ ，單位： $\text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{h}^{-1}$ 。..... 66

圖 5.11：1116UTC 徑向風動量方程(2.5)式在半徑 20 公里弧狀剖面之各項(a)  
 $\frac{\partial V_r}{\partial t}$  (b)  $\frac{V_t^2}{r}$  (c)  $-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}$  (d)  $-V_r \frac{\partial V_r}{\partial r}$  (e)  $-\frac{V_t}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \lambda}$  (f)  $-w \frac{\partial V_r}{\partial z}$  (g)  
 $F(r)$  (h)  $\frac{dV_r}{dt}$  (i)  $\frac{V_t^2}{r} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}$ ，單位： $\text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{h}^{-1}$ 。..... 68

# 第一章 緒論

## 1-1 前言

臺灣位處於西北太平洋颱風的行進路線上，每年夏、秋兩季受颱風影響深遠，颱風所帶來的豐沛降水為臺灣地區主要的降水來源之一；但颱風往往受到臺灣複雜地形的效應，其路徑及雨量皆會受到影響，造成不同程度的災害。因此，瞭解臺灣地形對於颱風結構的影響顯得十分重要。

納莉颱風(2001)造成北臺灣很嚴重災情，其導致的損失難以計算。由於我們對於颱風與地形間的交互作用並未十分清楚，進而對於颱風登陸前後的移動路徑、強度變化、降水分佈也均未十分瞭解，因此如何利用雷達及模式資料來對於颱風登陸前後的風場結構變化能有更進一步的瞭解，為本研究的主要的課題之一。

## 1-2 文獻回顧

颱風的一生大部份都發生在海面上，受到傳統觀測的限制無法取得足夠的資料，即使再加上衛星與船舶的觀測，仍然受到時間與空間解析度上的限制，因此對於颱風的三維結構的瞭解十分有限。一直到將地面雷達、機載雷達等實際應用在颱風觀測上後，才對於颱風的結構有較多瞭解，但受到觀測條件的限制，研究結果依然十分有限。

在過去的研究中，Gray and Shea(1973)利用飛機觀測所收集到的資料，分析後所得到颶風內部的環流結構，發現颶風徑向風的最大輻合區與最大上

升運動區位於最大風半徑處(Radius of Maximum Wind ; RMW)；切向風場與徑向風場有不對稱的特徵；內部最高溫不是位於颶風眼牆內部強烈上升流的地方，而是位於有下沉氣流的颶風眼中心。

Jorgenson (1984) 分析四個颶風的機載雷達觀測資料，將颶風的降水結構分為眼牆、眼牆外的層狀降水區、其它對流及層狀降水的雨帶。由於颶風低層的入流與颶風中心的外流在眼牆區的內緣形成輻合，產生強烈的深對流並伴隨著水汽抬升凝結造成強降水的存在；眼牆外有較弱的層狀降水區。眼牆最大回波軸與最大風半徑(RMW)隨高度增加有向外傾斜的現象。

Marks and Houze(1987)利用機載雷達與地面雷達對 Alicia(1983)颶風作雙都卜勒雷達的合成分析，更加瞭解其環流結構及降水特性。颶風低層有最大徑向入流存在，高層則有徑向外流；眼牆區為強烈的垂直運動。Marks et al. (1992)利用機載都卜勒雷達觀測颶風 Norbert(1984)並分析其內核結構，發現颶風風場有相當程度的不對稱性，便將其風場分為颶風移動速度、水平平均風、對稱渦旋分量、非對稱渦旋分量來研究風場的不對稱性。

由於觀測上的限制，開始有學者利用模式模擬颶風結構，盼望能得到更仔細的風場結構。Liu et al. (1997)利用 MM5 模擬出颶風 Andrew(1992)相當接近真實情況之運動場及降水場，發現颶風中心有一個由眼中心微弱下沉氣流及沿眼牆內緣的較強下沉運動所影響的乾燥暖心結構。Liu et al. (1999)接著模擬出颶風 Andrew(1992)的內核對稱及非對稱結構，並提出颶風風場結構的概念模式，如圖 1.1 所示：主環流為低層的徑向入流，到達最大風半徑時，有強烈的上升運動，頂層則是出流區；而在低層眼牆內緣處的 RO(Return Outflow)及在頂層出流區上方的 RI(Return Inflow)則為次環流；眼中心主要為沉降氣流。Zhang et al. (2000)針對模式所模擬出的颶風 Andrew(1992)內核區垂直動量收支做分析，發現動力引起的垂直擾動氣壓梯度力為造成眼中心下沉運動的主要因素，切向風的徑向風切會加強動力擾動氣壓梯度力，

當眼中心向下的氣壓梯度力大於浮力時，空氣乾絕熱下沉增溫，造成眼心處的下沉運動，並增強颶風的發展。Zhang et al. (2001)利用模擬徑向動量及絕對角動量來分析颶風內不平衡的氣流，利用計算徑向動量和絕對角動量的收支，來了解眼牆中梯度風的平衡狀態。模擬結果顯示眼牆的絕對角動量近似保守，而低層入流是絕對角動量的主要來源，會加速氣旋旋轉。絕對角動量收支平衡顯示眼牆中切向風的增強，是來自於低層入流水平傳輸的絕對角動量和眼牆上升氣流增強時垂直傳輸的絕對角動量。

隨著觀測儀器的進步及數值模式的發展，颱風的結構逐漸為大家所瞭解，但對臺灣而言，地形對於颱風的路徑、強度、降水都有相當程度的影響。曾(1998)利用雙都卜勒雷達資料分析賀伯颱風(1996)之主要雨帶、低回波地區、眼牆等結構特徵，並以動力角度來解釋較強水平風速伴隨較強回波的情形。孫(2000)利用雷達資料探討賀伯颱風(1996)與地形的交互作用，發現不僅低層入流遇到地形時會被地形抬升，高層風場結構也會受到地形影響。

納莉颱風(2001)在臺灣周圍停滯徘徊，並且在登陸期間結構受到地形影響，帶來豐沛的降水，對臺灣造成嚴重災情。江(2003)利用GBVTD (Ground-Based Velocity Track Display)方法反演納莉颱風(2001)登陸前的軸對稱切向風和徑向風及非軸對稱切向風分量，並分析颱風登陸前的回波及風場三維結構變化及登陸後風場的垂直結構與特性。Liou et al. (2006)利用Extended-GBVTD方法進一步求得非軸對稱颱風風場結構，提高非軸對稱徑向風場的準確性。蔡(2006)利用都卜勒雷達分析納莉颱風(2001)在登陸期間的風場結構變化，並做動量收支分析，發現登陸時納莉颱風風場具有不對稱特徵，徑向風低層入流有隨地形增厚的現象。由動量收支計算可發現，切向風風速值隨時間遞減，地面摩擦力對低層切向風的垂直傳送影響十分重要；垂直傳送項對低層入流增厚有相當程度的貢獻。

Yang et al. (2008)利用MM5模式模擬納莉颱風(2001)，探討地形對於颱

風路徑、結構以及降水分佈的影響，其模擬出的納莉颱風眼位置、颱風眼牆及雨帶的雷達回波分佈及強度與氣象局的CV雷達回波觀測資料相當接近。納莉颱風(2001)登陸前，切向風及徑向風場分布較垂直且較為軸對稱的結構；颱風登陸後，氣流受地形舉升，使得眼牆結構呈現明顯向地形傾斜的狀態。經由地形敏感度測試實驗可以發現，臺灣地形高度與納莉颱風(2001)強度受地形破壞程度呈線性的關係；而納莉颱風路徑與臺灣地形高度則為非線性的變化關係。

### 1-3 研究動機

台灣地形複雜，而當納莉颱風(2001)登陸時，颱風與地形間的交互作用會改變其結構，對於納莉颱風(2001)登陸期間之風場結構改變原因本研究要做進一步的探討。地面雷達資料可以用來分析颱風之三維結構，但是由於雷達低層資料受到地形阻擋而有相當限制，所以本研究希望能利用颱風之模式模擬結果，藉以瞭解颱風與地形間的交互作用。另外再進一步做動量收支分析，以找出納莉颱風風場登陸期間結構改變之原因。

本論文研究第二章為介紹所使用的MM5模式設定以及分析方法；第三章為MM5模式所模擬出的納莉颱風(2001)從海面上到登陸後的風場結構演化；第四章將MM5模式模擬出的風場結構與蔡(2006)利用雙都卜勒雷達合成的風場結構來做比較；第五章則對颱風登陸時的絕對角動量及動量方程式做診斷分析，探討颱風風場結構變化的原因；第六章為結論與未來展望。

## 第二章 資料來源與分析方法

### 2-1 資料來源

由於 Yang et al. (2008) 利用 MM5 模式模擬納莉颱風(2001)的颱風中心位置、颱風眼牆及雨帶的雷達回波分佈及強度與氣象局的 CV 雷達回波觀測資料近似(如圖 2.1、圖 2.2 所示)，故本論文研究利用 Yang et al. (2008) 使用中尺度模式 MM5 所模擬出的納莉颱風(2001)結果，藉以分析納莉颱風登陸前後的風場結構變化。但模式所模擬出的納莉颱風路徑仍有些許差異，登陸時間模式較觀測約提早三小時。

#### 2-1-1 模式介紹

本研究所使用的第五代中尺度靜力/非靜力數值模式 MM5 第 3.5 版(The Fifth generation PSU/NCAR Mesoscale Model)為美國賓州州立大學(Pennsylvania State University ; PSU) 與美國國家大氣科學研究中心(National Center for Atmospheric Research ; NCAR)共同研發出來的。MM5 模式為考慮非靜力平衡的有限區域三維數值模式，為多重巢狀網格；而且垂直座標所採用  $\sigma$  座標，為追隨地形的高度座標，可將地形變化對於地面氣壓的影響考慮進去，應用於不同尺度間之交互作用可有較好的解析及模擬。良好的 MM5 模擬對於複雜的中尺度天氣系統而言，可以彌補觀測資料不足而在空間及時間上解析度不足的問題。

## 2-1-2 模式設定

由於納莉颱風(2001)侵台時間為9月16日1300 UTC至9月18日1500 UTC，MM5模式的模擬時間為9月15日1200 UTC至9月19日0000UTC（共84小時），將侵台時間涵蓋在內。如圖2.3所示，MM5模式有四層水平巢狀網格，分別為D1（54公里；71 × 81）、D2（18公里；100 × 100）、D3（6公里；166 × 166）以及D4（2公里；229 × 154），垂直座標為 $\sigma$ 座標，四個網域皆為31層，模式頂層氣壓設定為50 hPa。

模式所使用的初始場及邊界層資料取自於歐洲中期天氣預報中心(European Center for Medium-Range Weather Forecast; ECMWF)之 $1.125^\circ \times 1.125^\circ$ 全球分析資料。模式模擬所使用的次網格積雲參數法為Grell積雲參數法(Grell 1993)，積雲參數化方法只使用在D1（54公里網格間距）及D2（18公里網格間距）兩個網域中，因為D3（6公里網格間距）及D4（2公里網格間距）應能直接解析中、小尺度的天氣系統。雲微物理參數法則使用Reisner Graupel雲微物理參數法(Reisner et al. 1998)，在每層網格皆有使用。輻射方法採用Dudhia(1989)大氣輻射方法。由於模式所使用的初始場及邊界層資料解析度比MM5模式模擬解析度粗，使得模式模擬出來的颱風強度偏弱；所以，本研究在初始資料處理過程中使用Davis and Low-Nam（2001）的颱風植入方法來植入颱風渦旋，用以改善模式的初始颱風渦旋結構。

## 2-2 分析方法

本論文研究主要使用的資料為D4(2公里網格間距)資料，中尺度模式MM5所使用的水平座標系統所採用的是直角座標，而垂直座標系統為追隨地勢座標，為對颱風結構能有更深入的瞭解，將MM5模式資料的水平座標由直角座

標系統轉換成圓柱座標系統(正東為  $1^\circ$ 、正北為  $91^\circ$ 、正西為  $181^\circ$ 、正南為  $271^\circ$ )，垂直座標則由追隨地勢座標轉換成高度座標之後再進行分析。颱風中心定位方式採用 1.5 公里高度的最小氣壓值定中心。

本研究主要將模擬風場資料針對兩部份來做討論，第一部份討論將颱風移速扣除之後的風場，即  $V_{rel} = V_{total} - V_s$  ( $V_{rel}$  : relative wind,  $V_{total}$  : total wind,  $V_s$  : storm motion)，做結構上的分析；第二部份對未扣除颱風移速之風場，針對動量方程式的收支項，討論每一項對於風場變化的貢獻。

在圓柱座標系統下徑向風及切向風的動量方程式如下：

$$\frac{dV_t}{dt} = -fV_r - \frac{V_t V_r}{r} - \frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \lambda} + F_\lambda, \quad (2.1)$$

$$\frac{dV_r}{dt} = fV_t + \frac{V_t^2}{r} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + F_r, \quad (2.2)$$

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + V_r \frac{\partial}{\partial r} + \frac{V_t}{r} \frac{\partial}{\partial \lambda} + w \frac{\partial}{\partial z}, \quad (2.3)$$

利用(2.3)式將(2.1)式、(2.2)式展開

$$\frac{\partial V_t}{\partial t} = -fV_r - \frac{V_t V_r}{r} - \frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \lambda} - V_r \frac{\partial V_t}{\partial r} - \frac{V_t}{r} \frac{\partial V_t}{\partial \lambda} - w \frac{\partial V_t}{\partial z} + F_\lambda, \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial V_r}{\partial t} = fV_t + \frac{V_t^2}{r} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} - V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{V_t}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \lambda} - w \frac{\partial V_r}{\partial z} + F_r, \quad (2.5)$$

另外，絕對角動量公式可表示為

$$M = V_t r + \frac{f r^2}{2}, \quad (2.6)$$

而其絕對角動量的動量方程式如以下所示

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -fV_r r - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \lambda} - V_r \frac{\partial M}{\partial r} - \frac{V_t}{r} \frac{\partial M}{\partial \lambda} - w \frac{\partial M}{\partial z} + F_\lambda r, \quad (2.7)$$

$V_r$  : 徑向風,  $V_t$  : 切向風,  $w$  : 垂直速度,  $r$  : 徑向半徑,  $\lambda$  : 方位角,  $f$  : 科氏參數,  $\rho$  : 空氣密度,  $p$  : 氣壓,  $F_r$ 、 $F_\lambda$  : 剩餘項,  $M$  : 絕對角動量。

我們將討論徑向風、切向風及絕對角動量的動量方程式中的各項，找出改變颱風風場結構的動力機制。

本研究中所採用的 MM5 模式之模式輸出時間解析度為 2 分鐘，假設 2 分鐘內的風場變化為線性的，則在圓柱座標系統上將前後兩時間之數值( $t+1$ 、 $t-1$ )相減後對時間做差分，即可得到(2.4)式、(2.5)式、(2.7)式中的  $\frac{\partial V_t}{\partial t}$ 、 $\frac{\partial V_r}{\partial t}$ 、 $\frac{\partial M}{\partial t}$ ，對於方程式中各個微分項(如平流項、氣壓梯度力項等)皆是利用 2 階中差法來計算，而將  $\frac{\partial V_t}{\partial t}$ 、 $\frac{\partial V_r}{\partial t}$ 、 $\frac{\partial M}{\partial t}$  分別減去右式中除 F 外之各項和之後求得的為剩餘項，剩餘項中包含摩擦力以及計算誤差在內。

## 第三章 颱風風場結構的演化

在前人的研究中，對於納莉颱風(2001)登陸前後的風場結構，已經有過許多討論；但由於觀測上的限制，颱風低層的風場結構無法完整的得知。故本研究將對於 MM5 模式所模擬出的風場做分析討論，希望能對於颱風低層的風場結構變化能有更進一步的瞭解。

本章將 MM5 模式模擬出的納莉颱風(2001)，針對以下時間的風場結構變化分為三階段來做討論：尚在海面上(0106UTC)、接近臺灣時(0808UTC、0936UTC)至登陸前後期間(1026UTC、1116UTC、1146UTC)。第一部分為切向風與徑向風水平結構的變化，第二部份為切向風、徑向風與垂直速度之方位角平均垂直結構及有無受地形影響的垂直結構，第三部分將風場做弧狀剖面討論風場不對稱的特徵。

### 3-1 切向風和徑向風之水平結構變化

圖 3.1 為 0106UTC 至 1146UTC 共六個時間、兩種高度(2 公里、5 公里)的水平切向風場。圖 3.1. (a)為 0106UTC 高度 2 公里的切向風場，此時納莉颱風(2001)中心在臺灣東北東方約 100 公里處的海面上，風速約在半徑 20 公里處向內向外遞減，最大值位於颱風前進方向的右側，其值為每秒 55~60 公尺之間。

在幾小時後當颱風靠近臺灣時(0808UTC、0936UTC)，切向風最大值增加(圖 3.1. (c)、(e))，最大值位置也從颱風前進方向的右側轉變為颱風前進方向的後方；而颱風登陸前後期間(1026UTC、1116UTC、1146UTC)，切向風最

大值有減小的趨勢(圖 3.1. (i)、(k))，且切向風場在颱風的南北側出現了很明顯的不對稱性。圖 3.1. (b)、(d)、(f)、(h)、(j)、(l)為高度 5 公里的切向風場，與高度 2 公里不同的地方是，高度 5 公里切向風的最大值隨著靠近臺灣其值越小，並沒有像高度 2 公里處的切向風最大值一樣有先增強再減弱的趨勢。

圖 3.2 為水平徑向風場，0106UTC 納莉颱風還在海面上時，高度 2 公里與 5 公里處颱風的西北半部為徑向出流，東南半部則為徑向入流，大值出現在離颱風中心約 20 公里的地方；幾小時後颱風慢慢接近臺灣，徑向出流與徑向入流的位置會跟著颱風環流有氣旋式方向的旋轉，並且有加強的現象；直到颱風登陸後，在這兩個高度上，徑向出流有明顯增強的現象，尤其颱風登陸後高度 2 公里處(圖 3.2. (i)、(k))徑向出流最大值到達每秒 18~21 公尺。颱風登陸後可以發現其徑向入流分布在海面上，而徑向出流位於地形上(圖 3.2. (i)、(j)、(k)、(l))。

### 3-2 風場之垂直結構變化

為了得知切向風及徑向風場的垂直分佈情況，將風場做方位角平均(即將同一半徑之 360 個方位角之風場資料做平均)而得到圖 3.3 之切向風場垂直結構、圖 3.4 之徑向風場垂直結構及圖 3.5 之垂直速度場垂直結構。由圖 3.3 可發現，在海面上時(0106UTC)切向風的垂直分布較為垂直，最大值約在半徑 20 公里、高度 1 公里處，向四周遞減；在颱風接近臺灣時，雖然尚未登陸但是切向風場垂直結構原本垂直的切向風最大風半徑(圖 3.3. (a))開始有向外傾斜的特徵出現(圖 3.3. (b)、(c))；颱風登陸時期，切向風向外傾斜越來越明顯(圖 3.3. (d)、(e)、(f))，且在颱風登陸後切向風速有減弱的趨

勢。

徑向風的部份(見圖 3.4)，在海面上時徑向風分布為低層徑向入流及高層徑向出流(圖 3.4. (a))；數小時後颱風接近臺灣，雖然尚未登陸但是徑向風場垂直結構也已受到地形影響，使得原本較淺之低層徑向入流有漸漸增厚且增強的現象，厚度約從 1 公里增厚至 2 公里，風速最大值為每秒 21 公尺，中層漸漸有徑向出流出現，且在徑向入流上方有較大的出流(圖 3.4. (b)、(c))；而到了颱風登陸期間，低層徑向入流依然持續增強，風速最大值為每秒 24 公尺，而中層出流也越來越明顯，尤其在徑向入流上方，風速最大值為每秒 9 公尺(圖 3.4. (d)、(e)、(f))。

另外於圖 3.5 中，可以發現在垂直速度場方面，在半徑 20 公里處有強的上升運動，而當納莉颱風(2001)還在海面上時，其上升速度的極大值位置高層約 10 公里的地方(見圖 3.5. (a))，在颱風接近臺灣時，最大值位置高度降低(圖 3.5. (b))，直到登陸後降至高度 2 公里處，並且原本呈垂直分布之上升運動區有傾斜的現象並且出現雙峰的特徵(圖 3.5. (d))，而此時的徑向風的高層出流也隨著上升運動區高度降低，切向風也有傾斜並出現雙峰的現象。

由於納莉颱風(2001)有很明顯的不對稱性，而前面所述之風場垂直結構在經過 360 個方位角平均後會將其不對稱特徵平均而使其變得不明顯，故分別選取方位角  $51^{\circ}\sim 71^{\circ}$  位於海上的區域，代表未受地形影響之風場及方位角  $231^{\circ}\sim 251^{\circ}$  在臺灣地形上並有經過高於 1 公里之山脈的區域，代表有地形情況下的風場，分別作區域方位角(sector)平均，討論兩者風場之差異。

圖 3.6、圖 3.7 及圖 3.8 分別為納莉颱風(2001)登陸期間前後的切向風、徑向風及垂直風速在這兩個區域的垂直結構。無地形影響的切向風最大風半

徑較垂直(圖 3.6. (a)、(c)、(e))；徑向風低層入流厚且強，高層有出流(圖 3.7. (a)、(c)、(e))；垂直速度方面上升運動區較垂直，在上升運動區靠眼心側可以看到有較微弱的下沉運動區的存在(圖 3.8. (a)、(c)、(e))。在地形上時，切向風最大風半徑向地形傾斜(圖 3.6. (b)、(d)、(f))；而徑向風低層也有入流，並沿著地形分布，但不如在海面上時來的強，主要以中層出流為主(圖 3.7. (b)、(d)、(f))；垂直速度在地形上呈現較零亂分布，主要的上升運動區依然在半徑 10 公里至 20 公里之間，但在半徑較大處有些零星的上升運動區與下沉運動區分布，應該是受到地形舉升的影響。從圖 3.6、圖 3.7、圖 3.8 可以發現，在圖 3.3、圖 3.4、圖 3.5 中所看到的特徵垂直速度與切向風、徑向風的分布位置十分近似。

### 3-3 風場之弧狀剖面

圖 3.9、圖 3.10、圖 3.11、圖 3.12 為海面上(0106UTC)、颱風接近臺灣時(0936UTC)、登陸時(1116UTC)及登陸後(1146UTC)四個時間的切向風與徑向風風場結構的弧狀剖面(正東方為  $1^\circ$ 、正北方為  $91^\circ$ 、正西方為  $181^\circ$ 、正南方為  $271^\circ$ )；共有三種半徑分佈，分別為 20 公里、30 公里、40 公里。

圖 3.9 為 0106UTC 颱風位於海面上時的切向風與徑向風弧狀剖面，切向風最大值在低層，風速隨高度及半徑向外遞減，東北方至東南方(方位角  $120^\circ$  至  $240^\circ$ ) 為切向風較大的區域。而徑向風的低層為入流，厚度約 1 公里左右，在半徑 20 公里、30 公里及 40 公里的中高層有出流存在，並且有向外及由西向東北傾斜的特徵。

0936UTC(圖 3.10)為納莉颱風接近臺灣時，雖尚未登陸但已經受到臺灣地形的影響，可以看到與圖 3.9 有明顯的差異，切向風風速有增強的現象。臺灣地形大約位於方位角  $180^\circ$  至  $240^\circ$  左右的位置，切向風在迎風面上因受

到地表摩擦力影響風速值變小，而山脈上方風速則因被地形抬升而有增強的現象，另外在颱風東南方的低層海面上切向風風速值與東北方低層海面上的切向風風速值要來的小許多，也是受到地形影響的關係(見圖 3.10. a. c. e)。徑向風的低層入流變強，且高度變厚至兩公里高，一直延伸至半徑 40 公里處，而在中層的徑向出流高度較颱風還在海面上時低，緊貼著低層入流(見圖 3.9. b. d. f)。

圖 3.11 為 1116UTC 時的弧狀剖面圖，此時納莉颱風在臺灣北海岸登陸，在颱風登陸時切向風有減弱的現象，遇到地形時，如圖 3.10 一樣，在迎風面風速減弱，山脈上風速增強，而在颱風東南方的低層有較弱的切向風。徑向風的低層入流在颱風登陸時則有增強的趨勢，而且在低層入流上方的徑向出流也有高度降低並且增強的現象。在颱風登陸之後(見圖 3.12, 1200UTC)，切向風與徑向風的弧狀剖面與登陸時分布差不多，徑向風會有氣旋式的平移現象，且切向風與徑向風風速都有減弱的現象。

由本章所討論之風場結構可以得知，在納莉颱風登陸時，切向風場及徑向風場皆有不對稱的特徵，切向風場最大風半徑有很明顯的傾斜特徵，並且風速隨著登陸時間而減小。徑向風場在海面上以低層徑向入流為主，而隨著颱風中心登陸其低層之徑向入流有增強增厚的現象。納莉颱風中層有徑向出流產生，與垂直速度場比較，可以發現徑向出流分布與上升運動區分布即為相似。

## 第四章 模式與觀測結果之比較

上一章節大致瞭解模式模擬出的納莉颱風(2001)風場結構之後，本章將就模式模擬結果與蔡(2004)分析都卜勒雷達觀測到的納莉颱風(2001)風場來做比較，證明模式結果之可信度；在下一章節再進一步進行動量收支的分析計算，找出影響颱風風場結構變化之可能原因。

MM5 模式所模擬出來的納莉颱風(2001)之路徑與 CWB 所發佈之最佳路徑有些許不同(圖 2.2)。模式中納莉颱風的登陸位置在台灣東北角偏北海岸處，而實際上納莉颱風是在台灣宜蘭地區登陸。且颱風登陸台灣的時間，模擬結果也較觀測提早約三小時，雷達觀測到的登陸時間為 09 月 16 日 1400UTC(當地時間 2200)，而模式所模擬出的登陸時間為 09 月 16 日 1116UTC，因此在比較時要考慮到此點時間差異(timing error)。

### 4-1 水平切向風和徑向風場結構

圖 4.1 為水平切向風，圖 4.1.(a)、(b)為模式風場，圖 4.1.(c)、(d)為雙雷達合成風場，雷達在觀測上會受到地形的限制，加上雙雷達合成的範圍有限，所呈現出來的雷達風場圖較破碎，只能針對有資料的地方來做比較。由圖 4.1 可以發現，雙雷達合成的切向風比模式模擬的切向風風速要來得小，而雷達合成風場在高度 2 公里處只有颱風西北半部的切向風場(圖 4.1.(c))、高度 5 公里處缺少海面上的切向風場資訊(圖 4.1.(d))，無法做完整的比較，將部分的雷達切向風場與模擬切向風場比較過後，發現無論是雷達還是模式的切向風場之極大值皆在距離颱風中心半徑 20 公里至 30 公里處，高度 5 公里切向風最大風半徑較高度 2 公里的最大風半徑大，顯示其最大切向風半徑隨高度增加有向外擴張的趨勢。

圖 4.2 為水平徑向風，與圖 4.1 相同，雷達合成風場部份並不完整，而

模式的徑向風速較雷達合成的徑向風速強約每秒 3 至 6 公尺。就圖 4.2. (b) 與圖 4.2. (d) 來比較，可以發現在地形上的徑向風大多為正值(出流)，尤其在台灣東北部山區上的徑向風出流特別明顯，但在海面上的徑向風場因雷達資料有限就無法進行雷達風場與模式風場的比較。

#### 4-2 風場垂直結構

在比較過水平的風場之後，將風場分別無地形與有地形兩個區域的方位角平均，得到雷達及模式的切向風、徑向風及垂直速度垂直結構來比較。由於觀測與模擬的納莉颱風(2001)登陸的位置不同，故兩者所取的區域並不相同。雷達觀測風場無地形區域選擇方位角  $91^{\circ}$  至  $121^{\circ}$ ，有地形區域為方位角  $181^{\circ}$  至  $201^{\circ}$ ；而模式風場無地形區域選擇方位角  $51^{\circ}$  至  $71^{\circ}$ ， $231^{\circ}$  至  $251^{\circ}$  為有地形的區域。(見圖 4.3、圖 4.4、圖 4.5)

由切向風場的垂直結構(見圖 4.3)可以看到，雷達切向風與模式切向風無論是在海面上還是在地形上兩者的切向風分布皆十分相似(圖 4.3. (a)、(b) 與圖 4.3. (c)、(d))，但模式的風速值較雷達觀測的風速大，且模式的最大風半徑在 20 公里左右，而雷達則在 30 公里左右。再來比較徑向風的部分(見圖 4.4)，由於受到雷達觀測上的限制，沒有低層風場資料，圖 4.4. (a) 看不到低層徑向入流，而圖 4.4. (c) 因為低層入流受到地形抬升，高度較高，故雷達可觀測到，模式模擬出的徑向風也有低層入流的存在(見圖 4.4. (b)、(d))，並在中層有向外傾斜的徑向出流，如圖 4.4. (a) 與圖 4.4. (b)。雷達觀測與模式模擬差別較大的地方是：模式中地形上有較強及較傾斜集中的徑向出流，圖 4.4. (d)，但是在圖 4.4. (c) 的雷達徑向風場中徑向出流風速較小些，可能與登陸之模擬颱風強度較觀測颱風強度為強所致(圖 4.1 及圖 4.2)。

圖 4.5 為垂直速度場，從圖 4.5. (a)、圖 4.5. (b) 中可以發現在半徑 20

公里處有強烈的上升運動，半徑外的垂直運動就不那麼明顯。當在地形上時，圖 4.5.(c)、圖 4.5.(d)的差異較大，在眼牆處的上升運動區內側皆有下沉運動存在，但是在眼牆外雷達觀測到的是上升運動區，而模式所模擬的垂直速度場卻在中低層為下沉運動，在高層才有上升運動的存在。

除了方位角平均過後的垂直風場結構之外，再來針對風場的弧狀剖面來做討論，雷達觀測部份為有受到地形影響的區域，方位角  $90^{\circ}$  至  $270^{\circ}$  也就是颱風的東半部。雷達觀測與模式模擬結果的地形分布不太一樣，故在風場結構上有些許差異，但仍可看出兩者風場結構的相似之處。圖 4.6、圖 4.7 分別為切向風及徑向風在半徑 30 公里及 40 公里時的弧狀剖面，切向風的部分可以發現其分布很相似，無論是觀測或是模擬的切向風風速最大值都在低層，尤其是在遇到山脈時，迎風面風速值減弱而到了山脈上方會出現較大的切向風。在徑向風的部分，兩者低層都有很明顯的入流存在，尤其是在山脈上方，徑向入流受地形抬升(見圖 4.7.(c)、(d))，中層為強的徑向出流，一直延伸到高層，而觀測與模式之徑向風分布皆有入流與出流交互分布的特徵。

經由以上的雷達合成風場與模式模擬風場的比較之後，可以知道其兩者的納莉颱風(2001)風場結構有相當程度的相似性；不相似部份的原因，來自於模擬颱風登陸地點與實際觀測到的登陸地點不同，而導致所遭遇到的地形也不一樣所造成的風場差異。模式模擬的颱風風場在風速上都比雷達合成風場來的大，可能是模式高估或是雷達在觀測資料處理上的低估。但是就整體上而言，模式的模擬結果是可信任的。故可利用模式模擬出的納莉颱風(2001)來更進一步的了解低層的風場結構，而下一章將利用較完整的模式風場來進行動量方程式的分析，探討地形影響風場結構的原因。

## 第五章 利用動量方程式分析颱風風場結構變化

由第三章可以看到納莉颱風(2001)從海上至登陸後風場結構的改變，經由第四章與雷達觀測資料的比較之後，本研究使用 MM5 模式模擬納莉颱風(2001)的風場結構與實際上納莉颱風的風場結構分佈相似，故本章將分析納莉颱風登陸期間絕對角動量、切向風、徑向風動量方程式中的各個收支項，以探討切向風變小、徑向風低層入流增強、中層出流增強等風場結構改變之原因。

Zhang et al. (2001)使用 MM5 模式模擬 Andrew 颶風(1992)，對於其風場結構以及絕對角動量動量方程式做了深入的探討，在進行納莉颱風登陸時的各項角動量方程式分析之前，將本論文研究先將納莉颱風(2001)還在海面上(0106UTC)時的風場結構與絕對角動量等與 Zhang et al. (2001)針對 Andrew 颶風(1992)中的各項來做比較。

圖 5.1 為 Andrew 颶風(1992)的垂直運動、徑向風、切向風及絕對角動量之方位角平均垂直結構，而圖 5.2 為納莉颱風(2001)的垂直運動、徑向風、切向風及絕對角動量之方位角平均垂直結構。垂直運動中(圖 5.1. (a)、圖 5.2. (a))在最大風半徑內側皆有較大的上升運動區，而垂直運動場靠眼中心的位置有微弱的下沉運動區存在；Andrew 颶風(1992)的強度較大，徑向風、切向風風速極大值與最大風半徑皆大於納莉颱風(2001)，眼牆也較納莉颱風隨高度向外傾斜。再來比較絕對角動量方程式中絕對角動量隨時間的變化項以及傳輸項，由於 Andrew 颶風(1992)強度較納莉颱風(2001)強，在圖 5.3 各項中的值皆較圖 5.4 中的值要大，而兩者值的分佈極為相似，水平平流項(圖 5.4. (b))及垂直傳輸項(圖 5.4. (c))的絕對值分佈類似、但符號相反，相互抵消後為絕對角動量變化的最主要影響因素。

在經過本研究所模擬的納莉颱風(2001)與 Zhang et al. (2001)所模擬的

Andrew 颶風(1992)的詳細比較之後，我們將在下面小節中，討論動量方程式計算出來的結果。動量方程式中的局部變化項是利用前後兩分鐘的數值來做中差法，圖 5.8 為 1114UTC 及 1118UTC 的絕對角動量、切向風、徑向風之半徑 20 公里弧狀剖面圖，而方程式之其他項是利用 1116UTC 時的數值來做運算。

將納莉颱風眼牆(半徑 20 公里)之弧狀剖面分成 A~F 六個區域(圖 5.5)，B、D 區為地形左側，C、E 區為地形右側，並且將各個收支項之數值就這六個區域分成三種高度(1 公里以下、1-2 公里及 2-4 公里)，取平均之後製成表 1、2、3，來討論納莉颱風(2001)登陸時(1116UTC)動量方程式中各項在受到地形影響後，如何造成風場結構改變。

## 5-1 颱風登陸期間絕對角動量變化

### 5-1-1 絕對角動量結構

利用(2.6)式求得絕對角動量，圖 5.6 為登陸時(1116UTC)及登陸後(1146UTC)不同地形上的角動量垂直結構，圖 5.6. (a)、(c)為沒有地形影響的區域，圖 5.6. (b)、(d)為有受到地形影響的區域。絕對角動量的分佈基本上是由中心向外隨半徑增加，而在沒有受到地形影響的區域可以看到其絕對角動量垂直結構分佈較垂直，在有受地形影響的區域可以發現絕對角動量垂直結構分佈於低層大氣較為密集，而地形上方中高層部份的絕對角動量比沒有地形區域的絕對角動量小許多。圖 5.7 為納莉颱風半徑 20 公里處絕對角動量的弧狀剖面，絕對角動量的最大值分佈在低層(1.5-2 公里)。隨著颱風登陸，絕對角動量最大值有減小的趨勢，並且會沿氣旋式方向平移，在地形背風面上方絕對角動量向下傳輸(絕對角動量等值線有向下沿伸)的現象。

## 5-1-2 絕對角動量變化

圖 5.9 為登陸時颱風絕對角動量動量方程式(2.7)式中納莉颱風眼牆處(半徑 20 公里)各項之弧狀剖面：

- 由於科氏力項( $-fV_r r$ )其值很小，故不討論：
- 圖 5.9. (a)為左式之絕對角動量隨時間的局部變化項( $\frac{\partial M}{\partial t}$ )，可以看到在 B、C 區 2 公里以下的絕對角動量隨時間的變化為正值，也就是代表絕對角動量隨時間有變大的趨勢，而在高度 2 公里以上及 D、E、F 區的絕對角動量變化則是隨著時間減小。
- 圖 5.8. (b)為(2.7)式右式之氣壓梯度力項( $-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \lambda}$ )，位於地形左側的 A、B、D 三區為正值，而另外三區為負值，表示氣壓當遇到地形時有減弱的現象。
- 圖 5.9. (c)為徑向水平平流項( $-V_r \frac{\partial M}{\partial r}$ )，低層徑向風為入流  $V_r < 0$ ， $-V_r \frac{\partial M}{\partial r} > 0$ ， $\frac{\partial M}{\partial r} > 0$ ，徑向入流將外圍較大之絕對角動量向內傳送，使絕對角動量增加，而在中層(2~4 公里)徑向風為出流  $V_r > 0$ ， $-V_r \frac{\partial M}{\partial r} < 0$ ， $\frac{\partial M}{\partial r} > 0$ ，徑向出流使得絕對角動量減小。
- 圖 5.9. (d)為切向水平平流項( $-\frac{V_t}{r} \frac{\partial M}{\partial \lambda}$ )， $-\frac{V_t}{r} \frac{\partial M}{\partial \lambda}$  在 c、d、e 三區為正值，且延伸至高度 2 公里以上，而其他區域為負值；當  $-\frac{V_t}{r} \frac{\partial M}{\partial \lambda} > 0$  時， $\frac{\partial M}{\partial \lambda} < 0$ ，切向風將較大之絕對角動量沿氣旋方向傳送，使絕對角動量變大；當  $-\frac{V_t}{r} \frac{\partial M}{\partial \lambda} < 0$  時， $\frac{\partial M}{\partial \lambda} > 0$ ，切向風使絕對角動量減小。

- 圖 5.9. (e) 為垂直傳輸項  $(-w \frac{\partial M}{\partial z})$ ，低層大部份區域  $-w \frac{\partial M}{\partial z}$  皆小於零， $\frac{\partial M}{\partial z} > 0$ ，上升運動將較小之絕對角動量往上传送，使絕對角動量減小；而在高度 2 公里以上及 C、E 區高度 1 公里以下的  $-w \frac{\partial M}{\partial z}$  大於零， $\frac{\partial M}{\partial z} < 0$ ，上升運動使絕對角動量增加，而負值的區域，絕對角動量為減小，如圖 5.6. (b) 地形上方之絕對角動量等值線高度降低。
- 圖 5.9. (g) 為絕對角動量 Lagrangian tendency  $(\frac{dM}{dt})$ ，將徑向水平平流項、切向水平平流項與垂直傳輸項由右式移至左式與絕對角動量隨時間的局部變化項相加後即可以得到，與氣壓梯度力項(圖 5.9. (b))相似，氣壓梯度力為主要影響此弧面絕對角動量 Lagrangian tendency 的因素，而兩項相減後所得為剩餘項(圖 5.9. (f))，包含了摩擦力的貢獻，在低層皆為負值，減弱絕對角動量。

影響絕對角動量變化的因素中(見表 1)，高度 1 公里以下絕對角動量的增加來自於氣壓梯度力的影響，以及切向風將絕對角動量沿氣旋式方向旋轉，將較大之絕對角動量帶往此處；而絕對角動量之減小為切向風及垂直速度的傳送所造成，另外可以看到摩擦力的影響也較明顯。隨高度增加其氣壓梯度力項的影響逐漸減弱，主要以水平及垂直傳輸項為主，其摩擦力的貢獻也較低層小。

## 5-2 颱風登陸期間切向風變化

圖 5.10 為登陸時(1116UTC)颱風切向風動量方程式(2.4)式中納莉颱風

眼牆(半徑 20 公里)各項之弧狀剖面，圖 5.10. (a)為左式之切向風隨時間的局部變化項( $\frac{\partial V_t}{\partial t}$ )，由圖中可以發現切向風隨時間的局部變化有減弱的趨勢。

再來個別探討切向風動量方程式(2.4)式中右式的各項：

- 科氏力項( $-fV_r$ )由於其值太小影響不大，故不討論：
- 圖 5.10. (b)為曲率項( $\frac{-V_t V_r}{r}$ )，其分佈與徑向風分佈類似，符號相反。
- 圖 5.10. (c)為氣壓梯度力項( $-\frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \lambda}$ )，地形右側之 C、E、F 三區為負值。
- 圖 5.10. (d)為徑向水平平流項( $-V_r \frac{\partial V_t}{\partial r}$ )，與圖 3.11. (b)對照，低層徑向風為入流的區域，其徑向水平平流項 $-V_r \frac{\partial V_t}{\partial r} < 0$ ， $V_r < 0$ ， $\frac{\partial V_t}{\partial r} < 0$ ，徑向風將較小之切向風由外向內傳送，使切向風減弱；而在徑向風為出流的區域，其 $-V_r \frac{\partial V_t}{\partial r} < 0$ ， $V_r > 0$ ， $\frac{\partial V_t}{\partial r} > 0$ ，徑向風將較小之切向風由內向外傳送，使切向風減弱。
- 圖 5.10. (e)為切向水平平流項( $-V_t \frac{\partial V_t}{\partial \lambda}$ )， $-V_t \frac{\partial V_t}{\partial \lambda} < 0$ 的區域(A、B、F 三區)，由於切向風恆為正值，故 $\frac{\partial V_t}{\partial \lambda} > 0$ ，切向風將較小之切向風沿氣旋式方向水平傳送，使切向風減弱；而在 $-V_t \frac{\partial V_t}{\partial \lambda} > 0$ 區域(c、d、e 三區)，其 $\frac{\partial V_t}{\partial \lambda} < 0$ ，切向風將較大之切向風沿氣旋方式水平傳送，使切向風增強。
- 圖 5.10. (f)為垂直傳輸項( $-w \frac{\partial V_t}{\partial z}$ )，在 2 公里以下的低層區域 $-w \frac{\partial V_t}{\partial z} < 0$ ， $w > 0$ ， $\frac{\partial V_t}{\partial z} > 0$ ，垂直運動將較小之切向風向上傳送，使切向風減弱；

$-w \frac{\partial V_t}{\partial z} > 0$  之區域，垂直速度為正值， $\frac{\partial V_t}{\partial z} < 0$ ，垂直運動將較大之切向

風向上傳送，使切向風增強。

- 圖 5.10. (h) 為切向風 Lagrangian tendency ( $\frac{dV_t}{dt}$ )，將圖 5.10. (d) 為徑向水平平流項 ( $-V_r \frac{\partial V_t}{\partial r}$ )、圖 5.10. (e) 為切向水平平流項 ( $-V_t \frac{\partial V_t}{\partial \lambda}$ )、圖 5.10. (f) 為垂直傳輸項 ( $-w \frac{\partial V_t}{\partial z}$ ) 移至方程式的左邊，與切向風隨時間的局部變化項 ( $\frac{\partial V_t}{\partial t}$ ) 相加後即可得到，與圖 5.10. (b) 為曲率項 ( $\frac{-V_t V_r}{r}$ )、圖 5.10. (c) 為氣壓梯度力項 ( $-\frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \lambda}$ ) 相加後所得到的圖 5.10. (i) 比較後，我們可以發現其分佈即為相似，而其兩項相減後得到圖 5.10. (g) 之剩餘項 ( $F(\lambda)$ )，低層為負值，即摩擦力亦為造成此弧面上切向風減弱的其中一個原因。

影響切向風變化的因素中(見表 2)，高度 1 公里以下之切向風一方面受切向水平平流項影響增強，另一方面又受到徑向水平平流項、垂直傳輸項以及摩擦力的影響而減弱，在各區中的局部變化項，只有 E、F 兩區為負值，其餘四區為正值，也就是說切向風變化為不對稱的，有區域為減弱、有區域為增加；而在高度 2 至 4 公里處之切向風的變化，曲率項的影響大於氣壓梯度力項，加上徑向水平平流項使得切向風減弱。

### 5-3 颱風登陸期間徑向風變化

而隨著颱風登陸，可以發現徑向風場不但低層徑向入流增厚，在中層的出流也有高度降低且增強的現象(圖 3.10. (b))，圖 5.11 為登陸時(1116UTC)納莉颱風(2001)徑向風動量方程式(2.5)式中的各項。

- 圖 5.11. (a) 為左式之徑向風隨時間的局部變化項( $\frac{\partial V_r}{\partial t}$ )，由圖中可以發現在徑向風場隨時間的變化低層除了 E、F 兩區外皆為增加，對照徑向風的弧狀剖面圖(圖 3.11. (b))增加的部分為中層出流的部分，而隨時間減小的部分為低層徑向入流增強的地方。
- 再來看到(2.5)式中的右式各項，科氏力項( $-fV_t$ )其值很小，故不討論；主要影響徑向風的為圖 5.11. (b)之離心力項( $\frac{V_t^2}{r}$ )和圖 5.11. (c)之氣壓梯度力項( $-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}$ )，其兩項之和為圖 5.11. (i)，我們可以發現雖然離心力項與氣壓梯度力項分佈相似，但離心力項的值大於氣壓梯度力項，也就是說在此弧面上有超梯度風的現象。
- 圖 5.11. (d) 為徑向水平平流項( $-V_r \frac{\partial V_r}{\partial r}$ )，A 區低層有徑向入流的存在， $-V_r \frac{\partial V_r}{\partial r}$  為負值， $V_r < 0$ ， $\frac{\partial V_r}{\partial r} < 0$ ，徑向風隨著半徑減小，代表徑向入流將外圍較強之入流向颱風中心傳送，使徑向入流增強；而中層出流區有正負值的分佈，而此區之 $V_r > 0$ ，正值區之 $\frac{\partial V_r}{\partial r} < 0$ ，徑向風將較大之徑向風向外傳送，徑向出流增強，而負值區 $\frac{\partial V_r}{\partial r} > 0$ ，徑向風將較小之徑向風向外傳送，徑向出流減弱，使得徑向出流高度有降低並且增強的現象。
- 圖 5.11. (e) 為切向水平平流項( $-\frac{V_t}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \lambda}$ )，a、c 兩區以及 e 區高度 1 公里以下 $-\frac{V_t}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \lambda} < 0$ ，而切向風恆為正值， $\frac{\partial V_r}{\partial \lambda} > 0$ ，切向風將較小之徑向風沿著氣旋方向傳送，增強徑向入流；在中層出流區(c 區 2 公里

以上及 d 區)，為正值  $-\frac{V_t}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \lambda} > 0$ ， $V_t > 0$ ， $\frac{\partial V_r}{\partial \lambda} < 0$ ，切向風沿氣旋方向傳送較大的徑向風使得中層出流增強。

- 圖 5.11. (f) 為垂直傳輸項  $(-w \frac{\partial V_r}{\partial z})$ ，A、B、D、F 四區高度 2 公里以下範圍之  $-w \frac{\partial V_r}{\partial z} < 0$ ，扮演著將較小之徑向風向上傳送，使徑向入流增厚的角色；而 C、E 兩區及其餘四區高度 2 至 4 公里之  $-w \frac{\partial V_r}{\partial z} > 0$ ，垂直速度將較大之徑向風向上傳送，使徑向出流增強。
- 圖 5.11. (h) 為徑向風 Lagrangian tendency  $(\frac{dV_r}{dt})$ ，而此圖與圖 5.11. (i) 在 A、B、C 區以及 F 區的分佈十分相似，可知道離心力項與氣壓梯度力項為影響此弧面徑向風變化的主因；徑向風速加強，主要是來自於超梯度風的影響，而其差異分佈於 D、E 兩區之中高層，而兩者相減後可以得到圖 5.11. (g) 之徑向剩餘項  $(F(r))$ 。在地形上可以發現有摩擦力正值的存在，代表地形阻擋徑向風，使得低層徑向入流及中層徑向出流都有減小的現象，但其貢獻依然比不上離心力項與氣壓梯度力項的貢獻量。

影響徑向風變化的因素中(見表 3)，高度 1 公里以下之徑向風變化，只有 E、F 區之徑向入流為增強，其餘為減弱；高度 1 至 2 公里之徑向風主要受到離心力項與氣壓梯度力項的影響，而在 B、D 區因為還受到地形的影響，切向水平平流項及垂直傳輸項也會造成徑向入流增強並且增厚；而在高度 2 至 4 公里處之徑向風的變化除了受到離心力項與氣壓梯度力項的影響之外，還有切向水平平流項使徑向入流增強。

在以上小節的討論過後，可以知道在此弧面上絕對角動量之減小為切向風及垂直速度的傳送再加上摩擦力的影響所造成的；切向風的減弱與水平平流或是垂直傳送有關；徑向風場無論是低層入流增強增厚或是中層徑向出流的出現增強皆與垂直及切向傳輸項有關。

但是並不是所有象限所得到的結果為切向風減弱、徑向風低層入流及中層出流增強，其變化為不對稱分布，可能與計算時所用的資料時間有關，1114UTC 至 1118UTC 之間變化可能與長時間的變化不相同，為了使資料更有代表性，應計算半小時內之動量方程式，並將取其平均再來進行分析。

## 第六章 結論與未來展望

### 6-1 結論

本論文研究所使用的資料為 Yang et al. (2008) 以 MM5 模式 (2 公里解析度) 模擬的納莉颱風 (2001)，由於模式資料較雷達觀測資料更為完整，故用模式輸出來分析颱風的風場結構變化，特別是登陸臺灣期間地形對納莉颱風風場結構的影響，再利用動量收支方程式進一步探討其變化的原因。以下為幾點重點結論：

1. 切向風場最大值位於颱風前進方向之右側，而在登陸後之切向風速值有減弱的趨勢，其最大風速半徑會沿高度向外傾斜；颱風登陸後受地形影響後原本較垂直之最大風速半徑更為向外傾斜並且有雙峰特徵出現。
2. 徑向風場分佈呈現明顯非軸對稱的特徵，且沿著氣旋式方向旋轉，其方位角平均垂直結構為低層入流、高層出流；如比較颱風登陸時及 30 分鐘後之徑向風場的方位角平均垂直結構，發現低層入流有增強並且增厚的現象，高層出流減弱，中層有出流出現，此徑向出流會隨地形影響增加而增強並且有高度降低的現象。
3. 垂直速度場在眼牆的部份為上升運動區，並且在靠眼中心的內側有微弱的下沉運動區；隨著颱風靠近臺灣地形，原本較垂直的上升運動區開始向外傾斜，並且其最大值高度向下移動，此時徑向風原本在高層的出流也隨著移至中層，在颱風登陸後也有雙峰極值的出現，與切向風在登陸後傾斜與雙峰的特徵有關。
4. 透過針對 1116UTC 納莉颱風登陸期間之動量收支計算可以得知：
  - 納莉颱風在遇到地形時，半徑 20 公里的弧狀剖面中，絕對角動量受

垂直速度場的影響其極大值向低層集中，氣壓梯度力及徑向水平平流項主導絕對角動量隨時間的變化。

- 切向風及徑向風場之動量收支分布為非軸對稱的，部份象限之變化為增加，部份象限則為減少。
- 當切向風遇到地形時，垂直傳輸項扮演很重要的角色，再加上摩擦力的貢獻，使得該區切向風減弱。
- 在眼牆附近之徑向風場大部份區域呈現超梯度風現象。而在近地形最底層則為次梯度風現象，此現象有助於低層徑向入流的增強。
- 無論是低層入流增強增厚或是中層徑向出流的出現增強的區域，其變化皆與垂直及切向傳輸項有關。

在納莉颱風(2001)登陸後，風場結構雖然受到臺灣地形的破壞變得較不完整，切向風也有減弱的現象；但是由於徑向風低層入流被抬升並且還有加強的現象，以致於納莉颱風於臺灣地形上仍能維持住水氣的輸入，於臺灣全島降下強烈豪雨，再透過潛熱的機制維持低壓中心。

## 6-2 未來展望

在進行動量分析的部份，可以發現其變化為不對稱分布，與第三章所得到的結果為切向風減弱、徑向風低層入流及中層出流增強不同，應與計算時所使用資料的時間有關，1114UTC 至 1118UTC 之間四分鐘的變化與長時間的變化不完全相同。若能在計算動量方程式時，能將增加資料時間個數，並將其平均再來進行分析，此分析結果會更有代表性。

數值模式能夠提供較完整的颱風風場熱力場及降水場結構，可以彌補雷

達觀測資料之不足；但是由於模式中所採用的方程組皆經過參數化及各種假設，並且在經過數值差分計算之後，與真實情況有若干出入。模式模擬結果與觀測分析做比較時，在定性上較為接近，但在定量上還是有其差異存在。倘若觀測上能取得更好的資料，如更高時間及空間解析度的雷達資料、或是利用移動式雷達取得低層完整的颱風觀測資料等，如果模式能再提高所使用之解析度，加上資料同化技術，相信能模擬出與真實情況更加接近之颱風個案，可以增進對於颱風結構之了解。

## 參考文獻

- 江晉孝，2003：利用都卜勒雷達分析颱風風場結構—2001年納莉颱風。國立中央大學碩士論文。
- 孫怡芬，2000：賀伯颱風與地形間的交互作用。國立中央大學碩士論文。
- 張雅茹，2004：利用Extended-GBVTD方法反求非軸對稱颱風（颶風）風場結構。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。
- 蔡雅婷，2006：納莉颱風登陸時的結構演化。國立中央大學碩士論文。
- Jorgenson, D.P., 1984a: Mesoscale and convective scale characteristics of mature hurricanes. Part I: General observations by research aircraft. *J. Atmos. Sci.*, **41**, 1268-1285.
- , 1984b: Mesoscale and convective scale characteristics of mature hurricanes. Part II: Inner core structure of Hurricane Allen(1980). *J. Atmos. Sci.*, **41**, 1287-1311.
- Liu, Y., D.L. Zhang, and M.K. Yau, 1997: A multiscale numerical study of Hurricane Andrew (1992). Part I: explicit simulation and verification. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 3073-3093.
- , ——, and ——, 1999: A multiscale numerical study of Hurricane Andrew (1992). Part II: Kinematics and Inner-Core Structures. *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 2597-2616.
- Liou, Y.C., T.C.C. Wang., W.C. Lee., and Y. J. Chang, 2006: The retrieval of asymmetric tropical cyclone structures using Doppler radar simulations and observations with the extended GBVTD Technique. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 1140-1160.

- Marks, F. D., Jr., and R. A. Houze, Jr., 1987: Inner core structure of Hurricane Alicia from airborne Doppler radar observations. *J. Atmos. Sci.*, **44**, 1296-1317.
- , ———, and J. F. Gamache, 1992: Dual-aircraft investigation of inner core of Hurricane Norbert. Part I: Kinematic structure. *J. Atmos. Sci.*, **49**, 919-942.
- Shea, D. J., and W. M. Gray, 1973a : The hurricane' s inner core region. Part I: Symmetric and asymmetric structure. *J. Atmos. Sci.*, **30**, 1544 - 1564.
- , and ———, 1973b: The hurricane' s inner core region. Part II: Thermal stability and dynamic characteristics. *J. Atmos. Sci.*, **30**, 1565 - 1576.
- Yang, M. J., D. L. Zhang, and H. L. Huang, 2008: A modeling study of Typhoon Nari (2001) at landfall. Part I: Topographic Effects. *J. Atmos. Sci.*, **65**, 3095 - 3115.
- Zhang, D. L., Y. Liu, and M. K. Yau, 2000: A multiscale numerical study of Hurricane Andrew (1992). Part III: Dynamically induced vertical motion. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 3772-3788.
- , and ———, 2001: A multiscale numerical study of Hurricane Andrew(1992).Part IV: Unbalanced flows. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 92 - 107.

表 1 絕對角動量動量方程式各個收支項之值，如圖 5.5 分為六個區域，  
單位： $1 \times 10^5 \text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{h}^{-1}$ 。

**2~4km**

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
	1-160	161-175	176-200	201-260	261-290	291-360
氣壓梯度力項	26.00	76.99	-8.95	-15.87	-97.05	-18.26
徑向水平平流項	-151.18	-331.09	-274.88	-45.66	30.80	46.29
切向水平平流項	-37.22	19.09	289.15	-27.97	62.56	-22.65
垂直傳輸項	127.98	137.27	-9.63	26.68	4.96	19.77
剩餘項	-0.58	106.81	-0.68	39.15	-3.79	-45.59
局部變化項	-40.31	1.46	-11.11	-24.48	-1.09	-18.41
Lagrangian tendency	21.00	175.19	-15.75	22.47	-99.41	-61.82

**1~2km**

氣壓梯度力項	16.92	207.01	-55.96	0.62	-17.62	-56.49
徑向水平平流項	69.79	-155.41	-327.79	-266.02	-13.70	106.69
切向水平平流項	-72.46	-145.15	446.52	67.61	109.81	-66.25
垂直傳輸項	-27.48	52.72	4.48	135.97	-11.39	69.00
剩餘項	-9.15	77.96	-46.57	20.57	-86.79	-72.96
局部變化項	-18.82	33.00	13.34	-46.06	-19.87	-16.30
Lagrangian tendency	11.33	280.84	-109.86	16.38	-104.59	-125.75

**<1km**

氣壓梯度力項	19.37	432.83	-133.97	129.29	-98.26	-94.16
徑向水平平流項	168.02	-18.38	-52.79	101.66	356.00	303.32
切向水平平流項	-67.32	533.11	-272.27	475.36	-266.70	-29.08
垂直傳輸項	-48.05	-520.09	285.59	-405.46	65.11	-100.10
剩餘項	-79.62	-217.66	34.01	-160.14	-295.77	-107.71
局部變化項	1.54	35.99	45.94	15.47	-47.49	-14.12
Lagrangian tendency	-51.10	194.53	-89.67	-25.66	-374.34	-188.26

表 2 切向風動量方程式各個收支項之值，如圖 5.5 分為六個區域，單位： $m^2s^{-1}h^{-1}$ 。

**2~4km**

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
	1-160	161-175	176-200	201-260	261-290	291-360
曲率項	-74.96	-126.41	-94.56	-11.52	19.86	27.62
氣壓梯度力項	11.82	34.99	-4.07	-7.21	-44.11	-8.30
徑向水平平流項	8.24	-20.66	-27.60	-8.85	-6.52	-7.50
切向水平平流項	-16.92	8.68	131.43	-12.71	28.44	-10.30
垂直傳輸項	57.76	62.39	-4.38	12.13	2.25	8.99
剩餘項	-2.27	45.12	-3.09	17.41	-1.07	-19.80
局部變化項	-18.32	0.66	-5.05	-11.13	-0.49	-8.37
Lagrangian tendency	-66.99	-49.75	-104.5	-1.69	-24.66	0.44

**1~2km**

曲率項	62.57	-83.26	-137.59	-79.04	-1.80	59.76
氣壓梯度力項	7.69	94.09	-25.43	0.28	-8.01	-25.68
徑向水平平流項	-32.47	14.44	-8.18	-39.68	-4.35	-12.95
切向水平平流項	-32.94	-65.98	202.96	30.73	49.91	-30.11
垂直傳輸項	-12.49	23.96	2.04	61.80	-5.18	31.36
剩餘項	-2.54	33.61	-24.40	7.15	-39.52	-31.48
局部變化項	-8.55	15.00	6.06	-20.94	-9.03	-7.41
Lagrangian tendency	69.91	42.57	-190.76	-73.79	-49.42	4.23

**<1km**

曲率項	149.13	51.79	-16.15	52.03	103.02	195.59
氣壓梯度力項	8.97	196.74	-60.89	58.77	-44.66	-42.80
徑向水平平流項	-76.75	-61.36	-5.58	-5.63	54.01	-63.87
切向水平平流項	-30.60	242.32	-123.76	216.07	-121.23	-13.22
垂直傳輸項	-21.84	-236.40	129.81	-184.30	29.60	-45.50
剩餘項	-32.20	-97.91	15.02	-71.63	-132.57	-42.80
局部變化項	0.70	16.36	20.88	7.03	-21.59	-6.42
Lagrangian tendency	117.35	122.70	-55.22	28.31	-55.92	104.10

表 3 徑向風動量方程式各個收支項之值，如圖 5.5 分為六個區域，單位： $m^2s^{-1}h^{-1}$ 。

**2~4km**

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
	1-160	161-175	176-200	201-260	261-290	291-360
離心力項	403.13	392.12	323.92	288.29	283.12	274.63
氣壓梯度力項	-276.22	-296.12	-284.90	-267.64	-269.31	-267.31
徑向水平 平流項	-3.89	-49.54	-48.38	-21.36	1.44	9.37
切向水平 平流項	-53.71	19.60	110.64	60.39	40.22	-12.30
垂直傳輸項	-35.91	-9.93	-21.23	13.64	-6.36	8.03
剩餘項	-31.67	-72.13	-98.60	-110.45	-88.58	-40.26
局部變化項	12.72	-5.19	-8.70	-27.78	-30.20	-18.71
Lagrangian tendency	105.57	34.69	-49.73	-80.45	-65.50	-23.48

**1~2km**

離心力項	521.44	604.60	534.01	400.84	342.87	364.48
氣壓梯度力項	-301.72	-369.79	-365.70	-339.90	-320.22	-272.65
徑向水平 平流項	-15.71	26.61	32.47	-19.19	-6.73	-6.87
切向水平 平流項	-77.42	-110.74	-155.12	118.40	54.54	81.52
垂直傳輸項	-119.76	-162.80	11.44	-74.53	3.25	-108.45
剩餘項	-1.81	7.12	-72.68	-105.48	-117.47	-75.50
局部變化項	17.56	8.54	-2.88	-8.88	-33.60	-6.97
Lagrangian tendency	229.01	255.46	108.33	-33.56	-84.66	26.43

**<1km**

離心力項	455.70	511.37	470.21	369.46	322.01	313.05
氣壓梯度力項	-318.58	-388.59	-425.16	-416.91	-394.60	-323.67
徑向水平 平流項	-37.03	-5.27	3.43	-22.89	-40.55	-20.98
切向水平 平流項	-76.59	31.42	-214.52	292.69	34.88	80.08
垂直傳輸項	-30.37	-153.26	86.13	-232.85	21.55	-89.04
剩餘項	17.49	-31.45	52.30	-40.65	-5.44	19.08
局部變化項	22.33	0.53	7.12	22.75	-37.57	-11.76
Lagrangian tendency	150.26	121.59	110.52	-46.29	-49.44	16.28

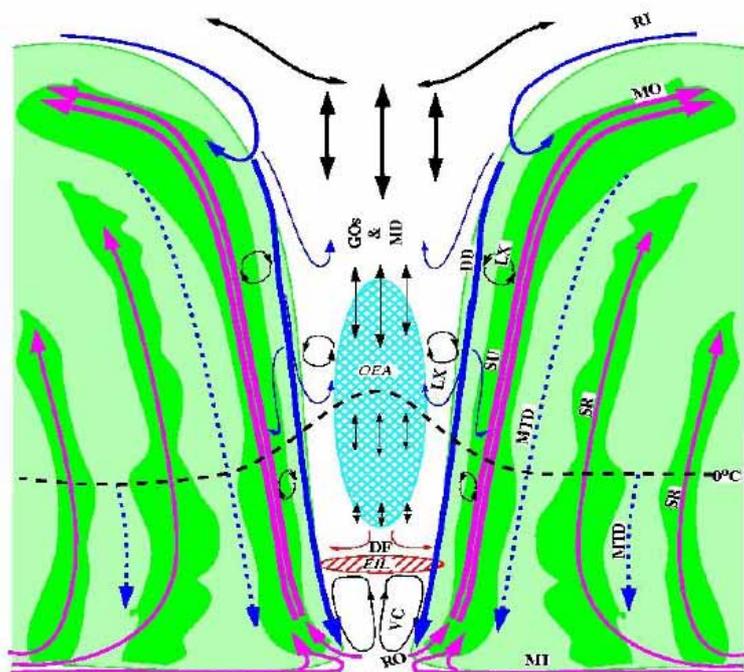


圖 1.1 颶風 Andrew(1992)內核結構概念圖。摘自 Liu et al. (1999)

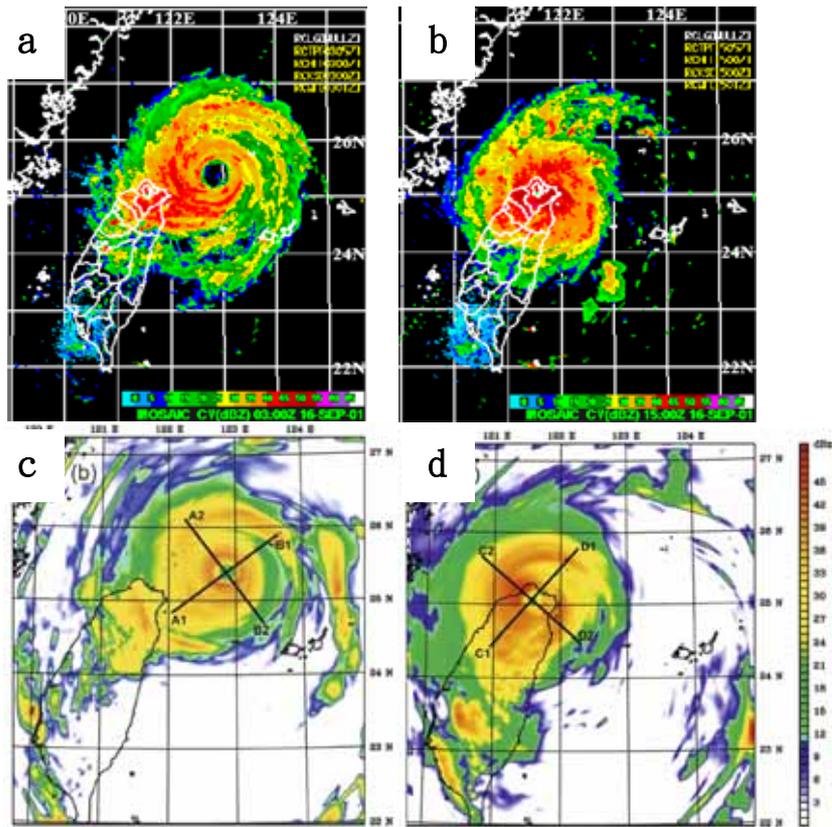


圖2.1 2001年9月氣象局之納莉颱風雷達回波CV圖(a) 16日0300 UTC、(b) 16日1500 UTC，以及模擬計算出之納莉颱風雷達回波CV圖(c) 16日0000UTC、(d) 16日1200 UTC。雷達回波強度間距為5 dBZ。摘自Yang et al. (2008)

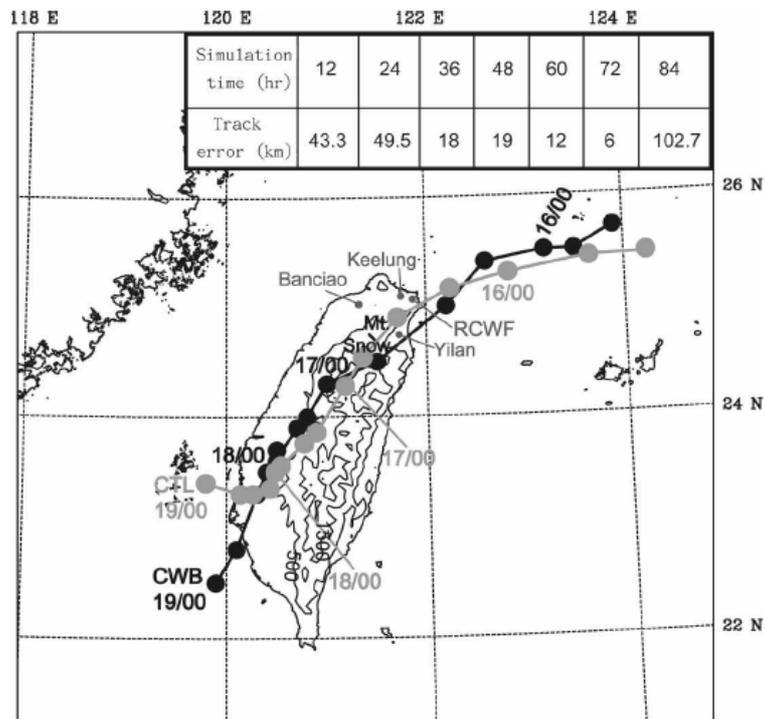


圖 2.2 納莉颱風(2001)路徑比較圖。黑線為 CWB 的最佳路徑，灰線為模式模擬出的颱風路徑；每個點的時間間距為 6 小時。摘自 Yang et al. (2008)

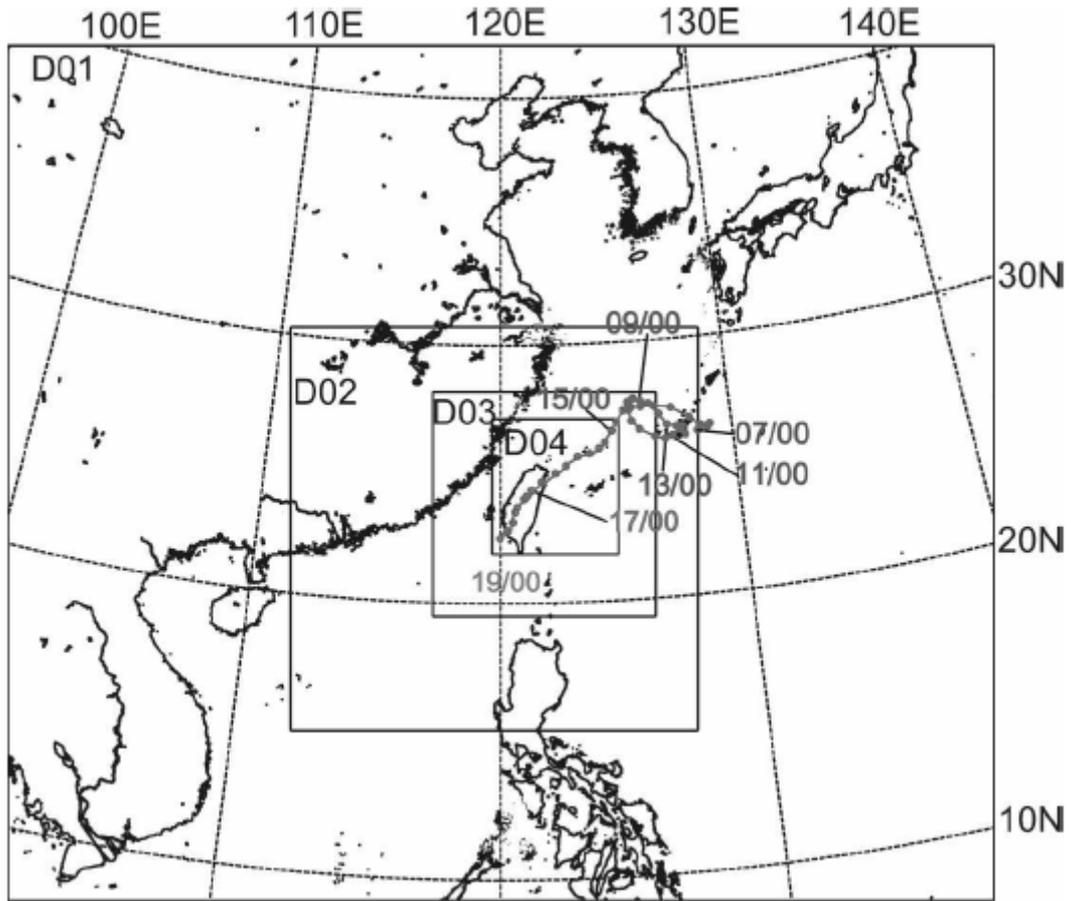
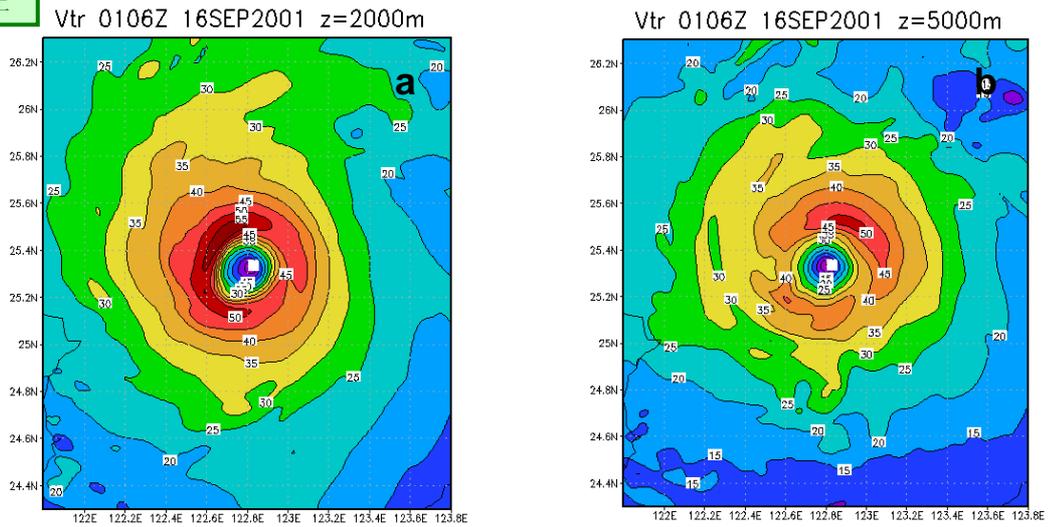


圖 2.3 MM5 巢狀網格分布(D1 (54 公里; 71 × 81)、D2 (18 公里; 100 × 100)、D3 (6 公里; 166 × 166)以及 D4 (2 公里; 229 × 154))和 CWB(Central Weather Bureau)納莉颱風(2001)每六小時的最佳路徑圖。摘自 Yang et al. (2008)

海面上



接近  
臺灣

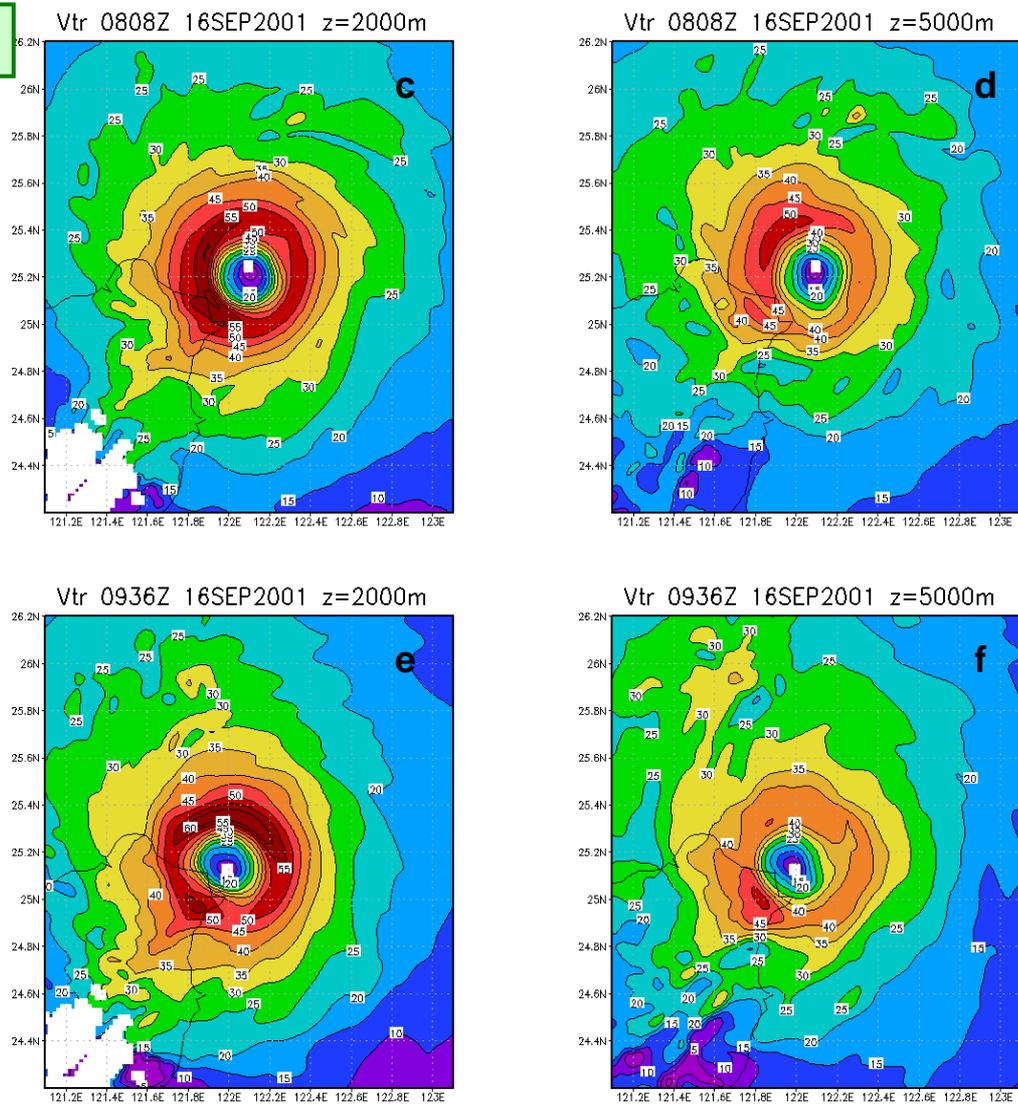
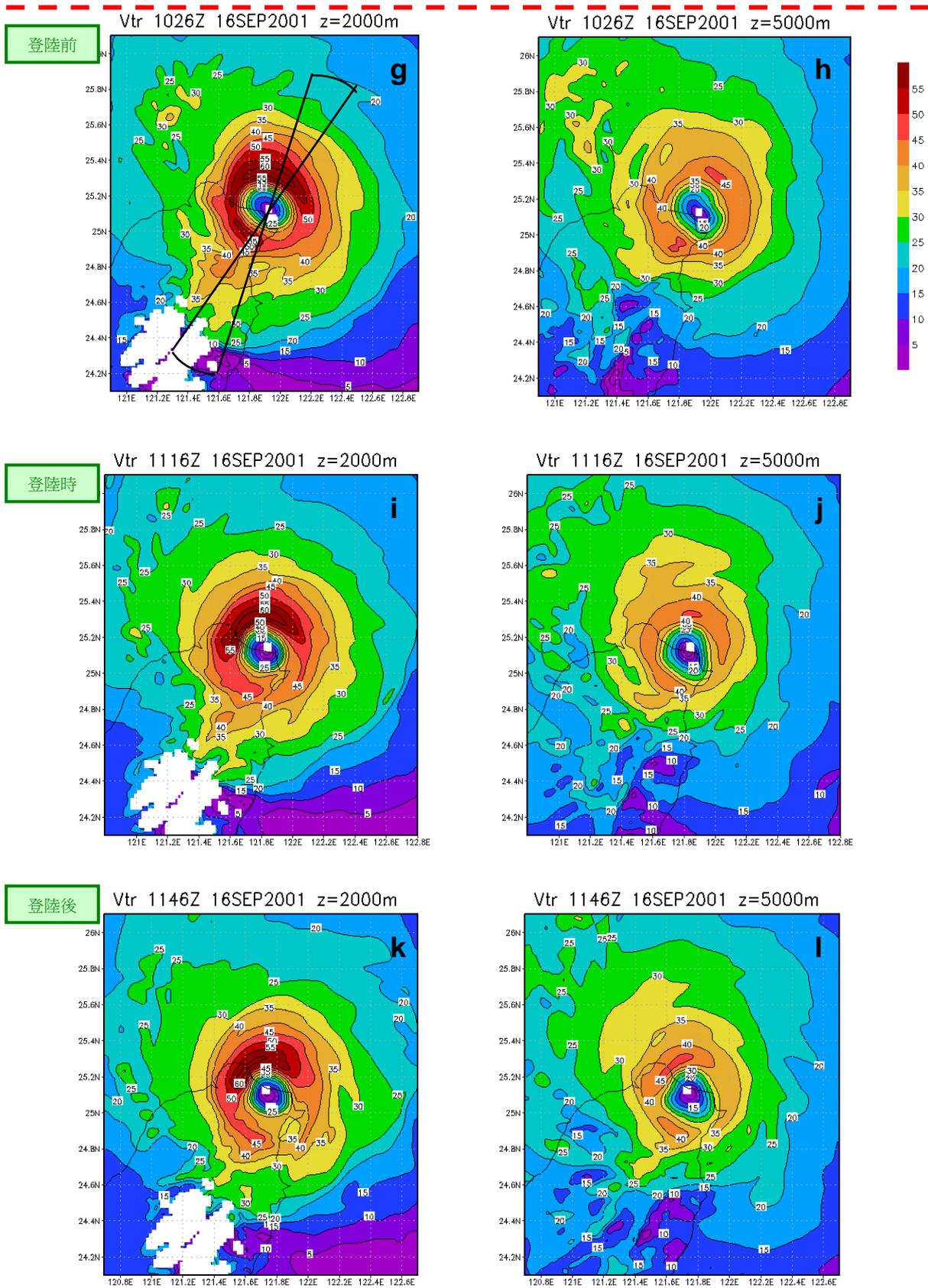


圖 3.1 水平切向風場，高度 2 公里和 5 公里六個不同時間的變化(a)0106UTC 2 公里、(b)0106UTC 5 公里、(c)0808UTC 2 公里、(d)0808UTC 5 公里、(e)0936UTC 2 公里、(f)0936UTC 5 公里，單位： $\text{ms}^{-1}$ 。



續圖 3.1 水平切向風場，高度 2 公里和 5 公里六個不同時間的變化(g)1026UTC 2 公里、(h)1026UTC 5 公里、(i)1116UTC 2 公里、(j)1116UTC 5 公里、(k)1146UTC 2 公里、(l)1146UTC 5 公里，單位： $\text{ms}^{-1}$ 。

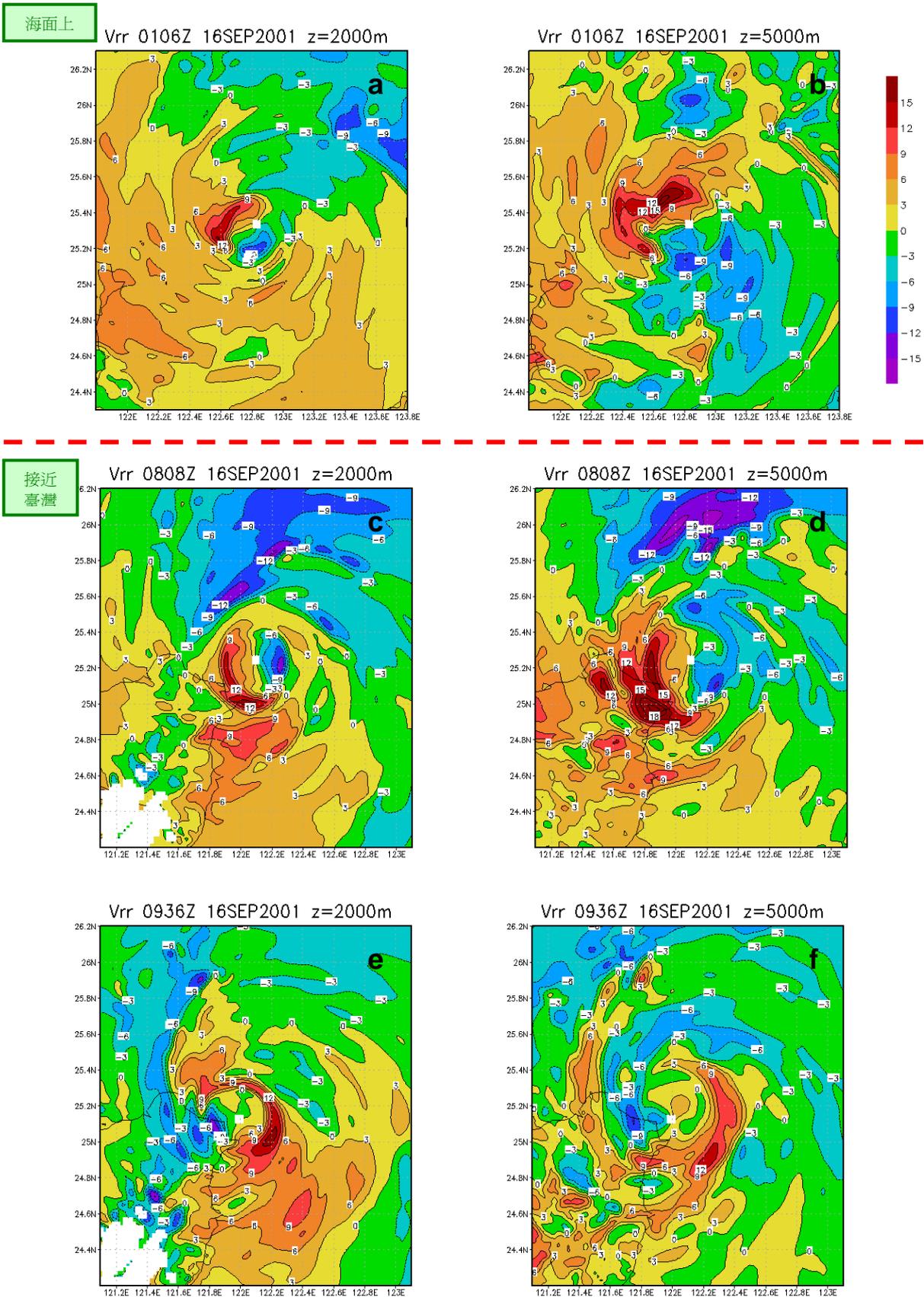
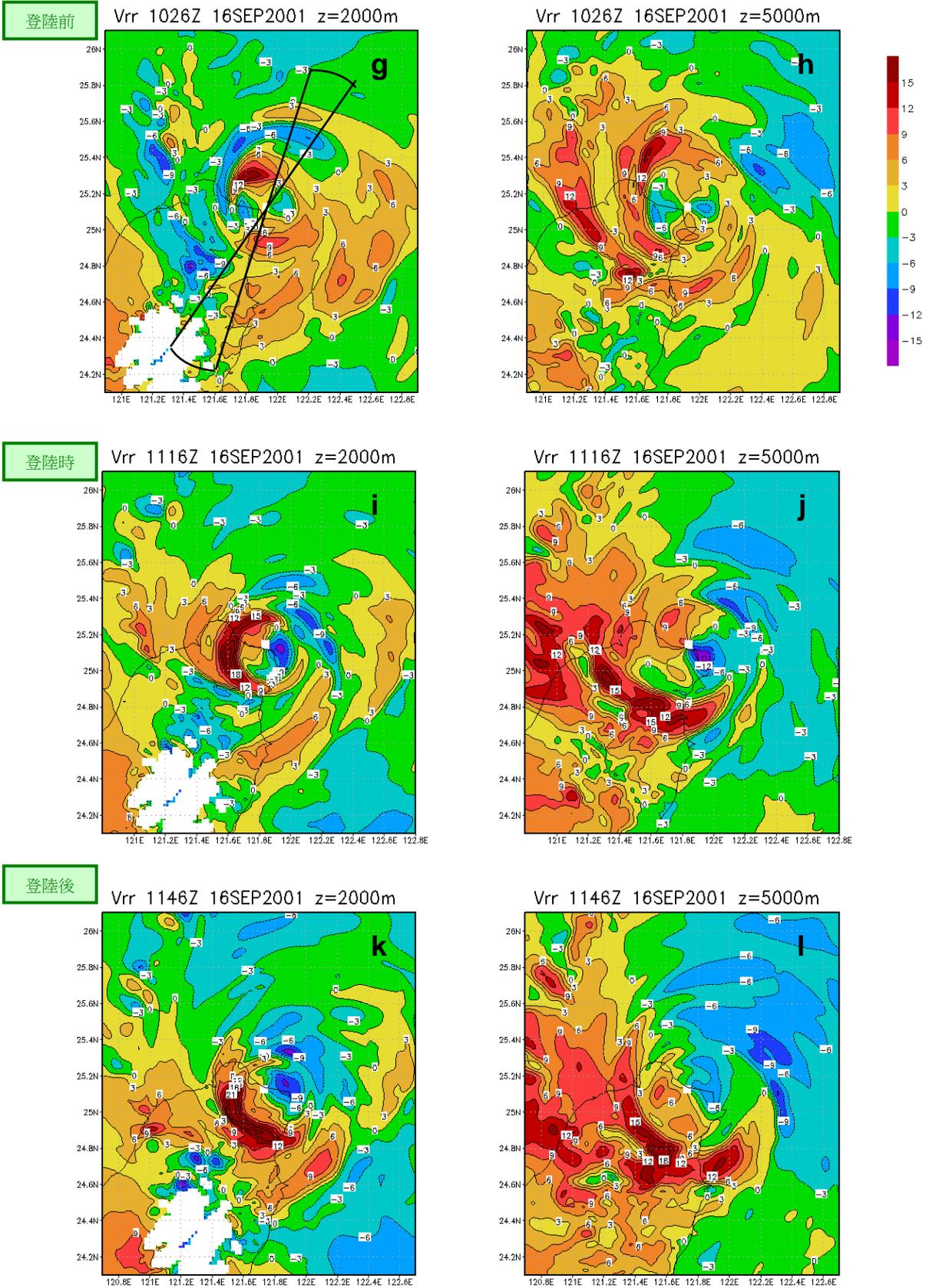


圖 3.2 水平徑向風場，高度 2 公里和 5 公里六個不同時間的變化(a)0106UTC 2 公里、(b)0106UTC 5 公里、(c)0808UTC 2 公里、(d)0808UTC 5 公里、(e)0936UTC 2 公里、(f)0936UTC 5 公里，單位： $\text{ms}^{-1}$ 。



續圖 3.2 水平徑向風場，高度 2 公里和 5 公里六個不同時間的變化(g)1026UTC 2 公里、(h)1026UTC 5 公里、(i)1116UTC 2 公里、(j)1116UTC 5 公里、(k)1136UTC 2 公里、(l)1146UTC 5 公里，單位： $\text{ms}^{-1}$ 。

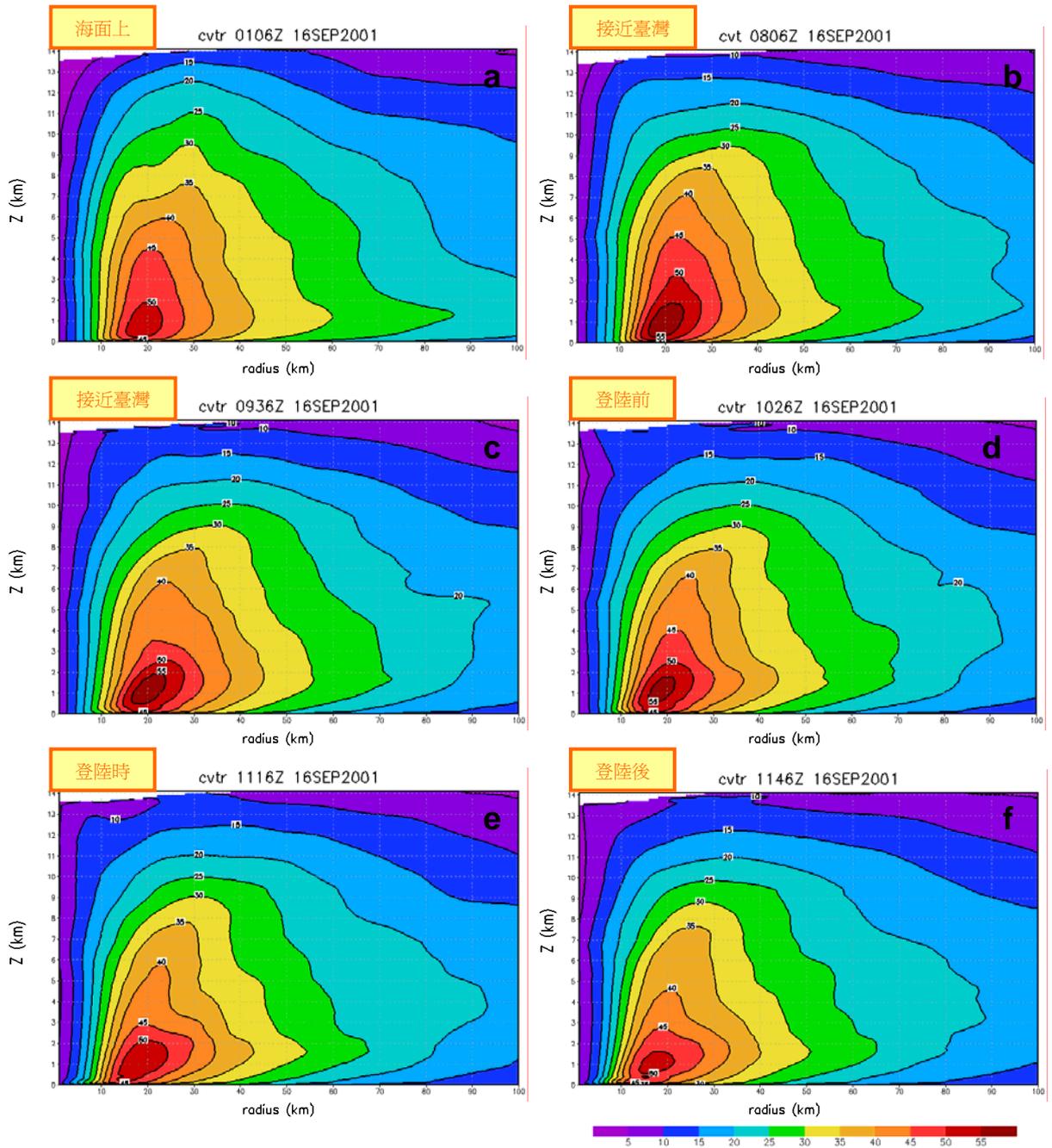


圖 3.3 切向風場垂直結構(方位角  $1^{\circ}$ - $360^{\circ}$  平均)六個不同時間的變化(a)0106UTC、(b)0808UTC、(c)0936UTC、(d)1026UTC、(e)1116UTC、(f)1146UTC，單位： $\text{ms}^{-1}$ 。

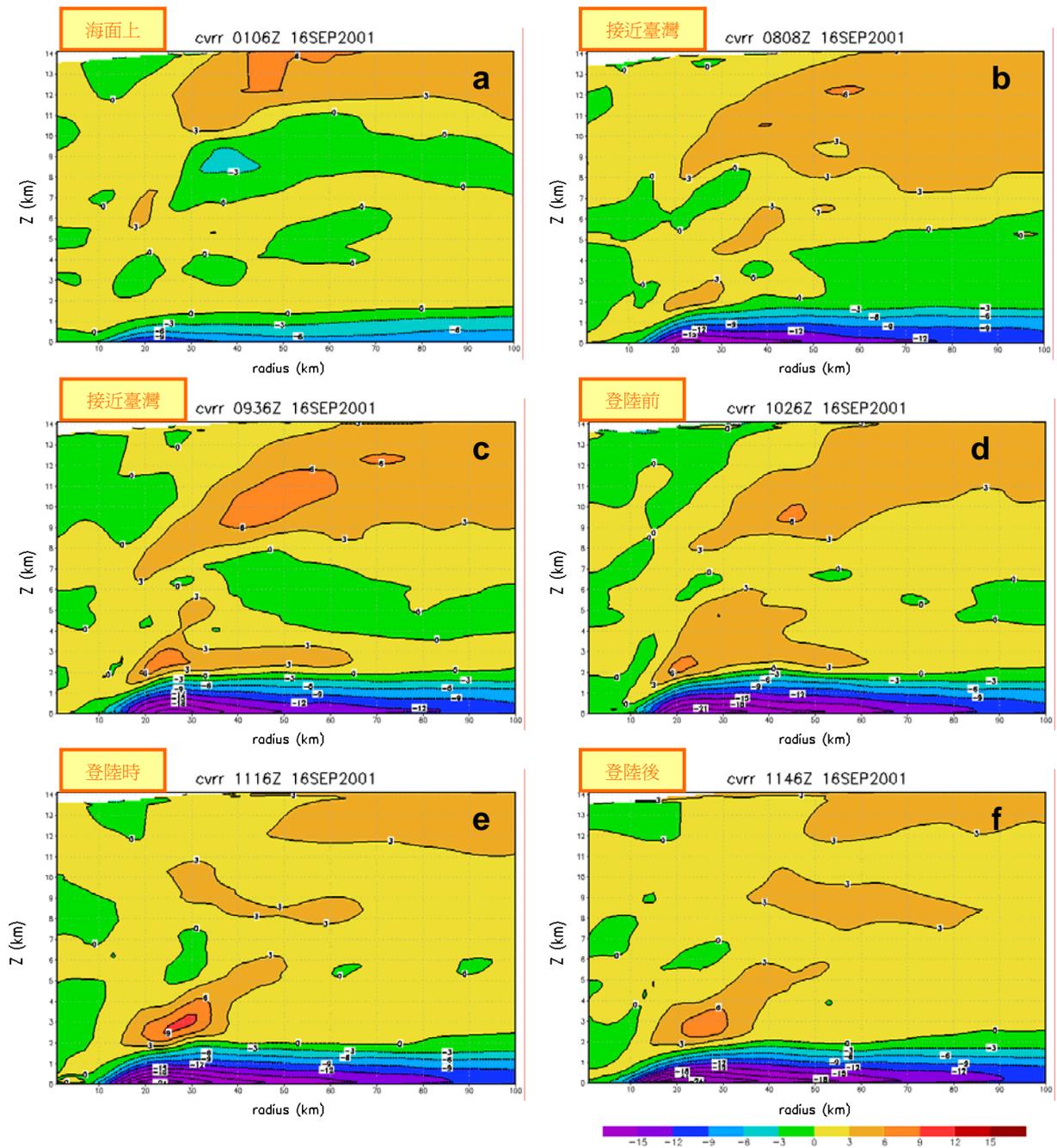


圖 3.4 徑向風場垂直結構(方位角  $1^{\circ}$ - $360^{\circ}$  平均)六個不同時間的變化(a)0106UTC、(b)0808UTC、(c)0936UTC、(d)1026UTC、(e)1116UTC、(f)1146UTC，單位： $\text{ms}^{-1}$ 。

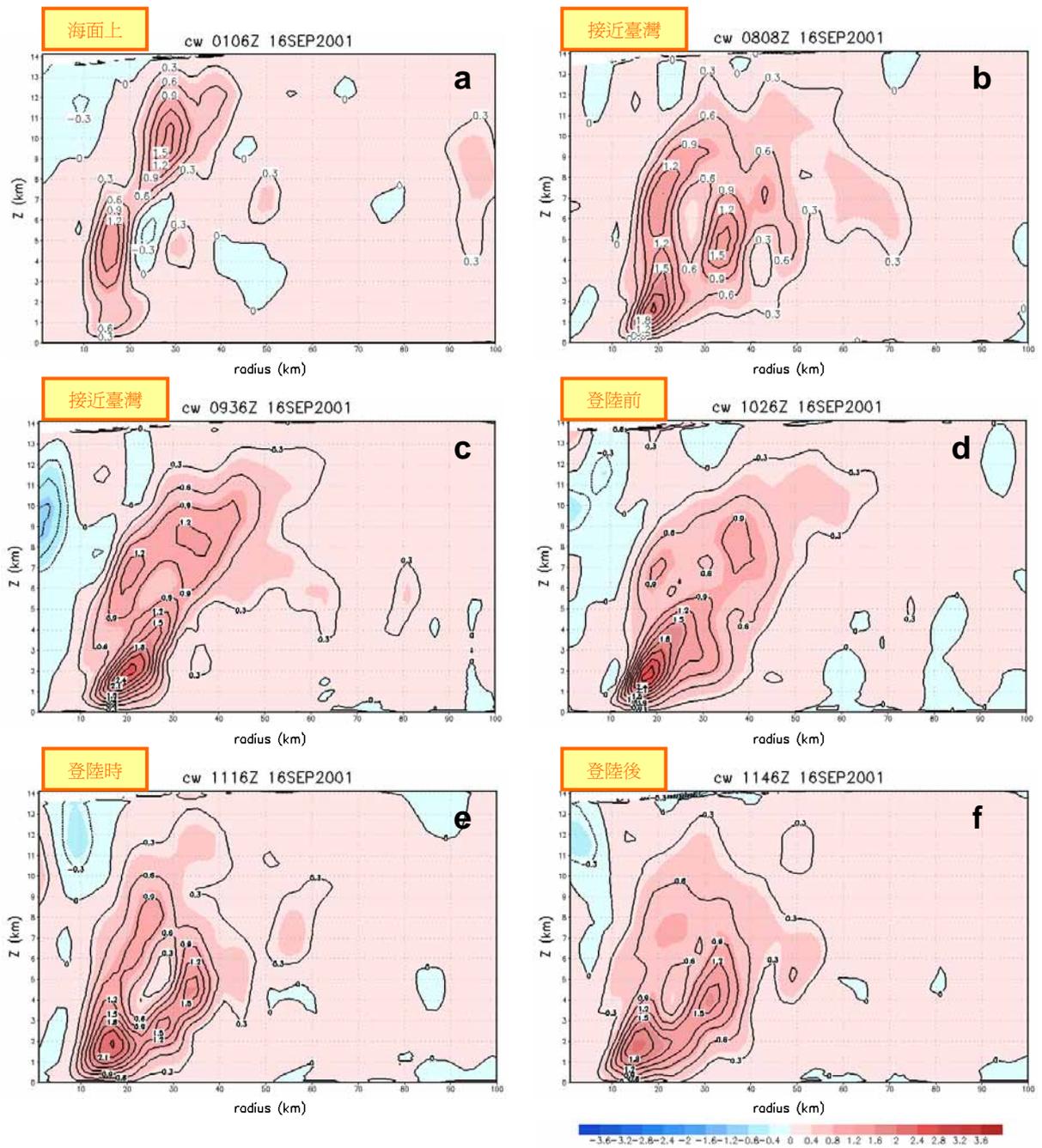


圖 3.5 垂直速度場垂直結構(方位角  $1^{\circ}$ - $360^{\circ}$  平均)六個不同時間的變化(a)0106UTC、(b)0808UTC、(c)0936UTC、(d)1026UTC、(e)1116UTC、(f)1146UTC，單位： $\text{ms}^{-1}$ 。

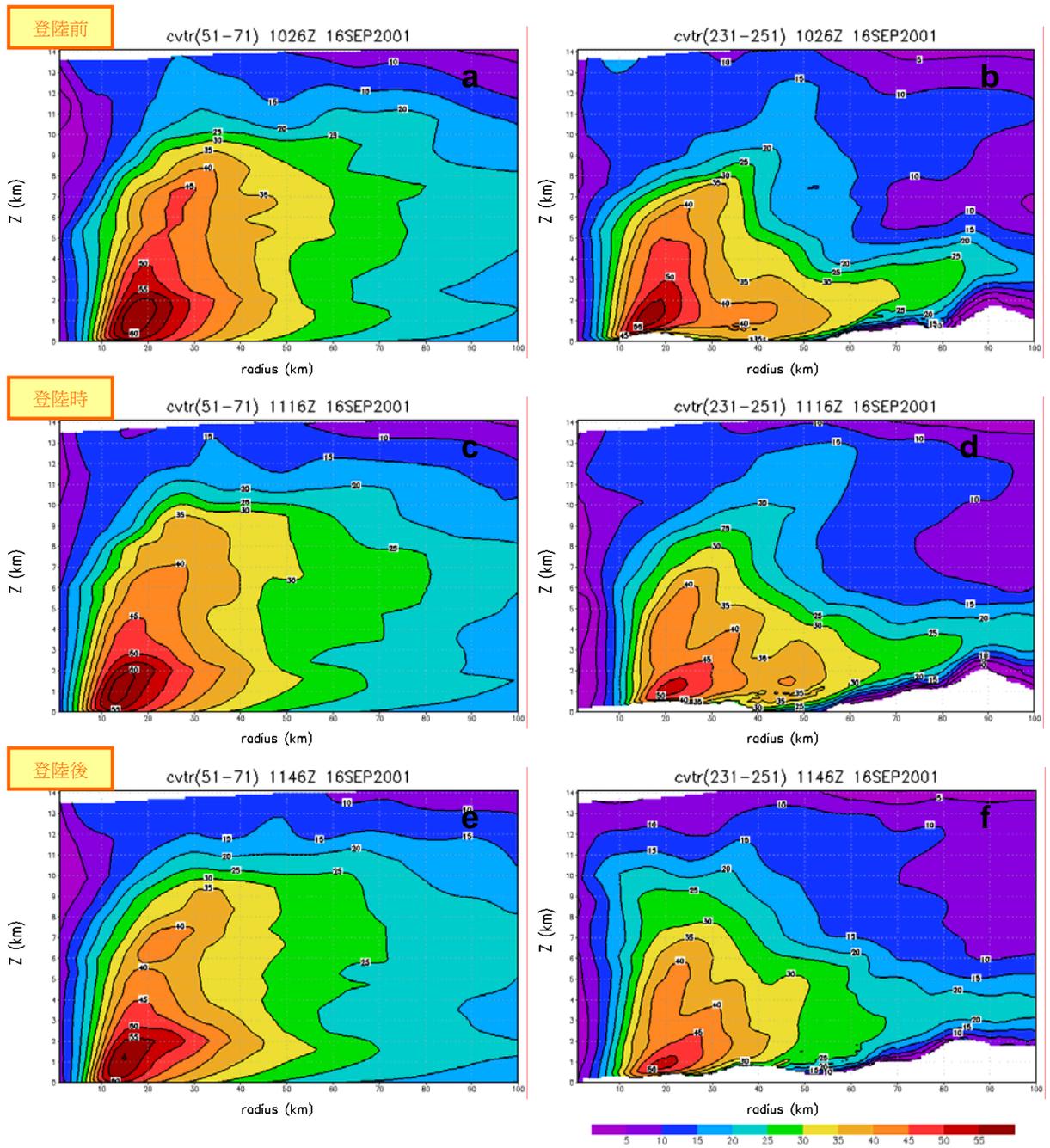


圖 3.6 切向風場垂直結構三個不同時間的變化(a)1026UTC 方位角  $51^\circ$ - $71^\circ$ 、(b)1026UTC 方位角  $231^\circ$ - $251^\circ$ 、(c)1116UTC 方位角  $51^\circ$ - $71^\circ$ 、(d)1116UTC 方位角  $231^\circ$ - $251^\circ$ 、(e)1146UTC 方位角  $51^\circ$ - $71^\circ$ 、(f)1146UTC 方位角  $231^\circ$ - $251^\circ$ ，單位： $\text{ms}^{-1}$ 。

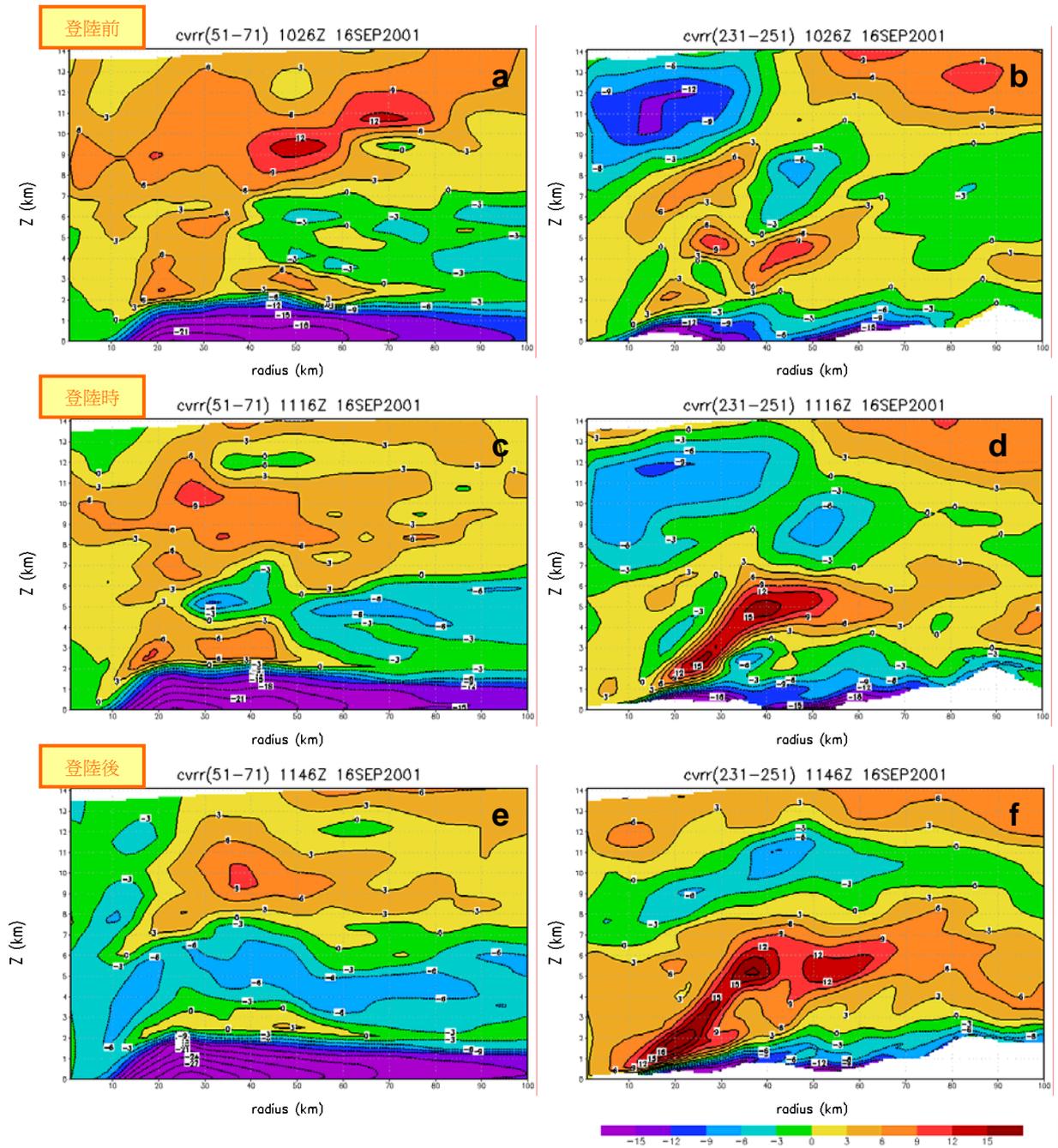


圖 3.7 徑向風場垂直結構三個不同時間的變化(a)1026UTC 方位角  $51^{\circ}$ - $71^{\circ}$ 、(b)1026UTC 方位角  $231^{\circ}$ - $251^{\circ}$ 、(c)1116UTC 方位角  $51^{\circ}$ - $71^{\circ}$ 、(d)1116UTC 方位角  $231^{\circ}$ - $251^{\circ}$ 、(e)1146UTC 方位角  $51^{\circ}$ - $71^{\circ}$ 、(f)1146UTC 方位角  $231^{\circ}$ - $251^{\circ}$ ，單位： $\text{ms}^{-1}$ 。

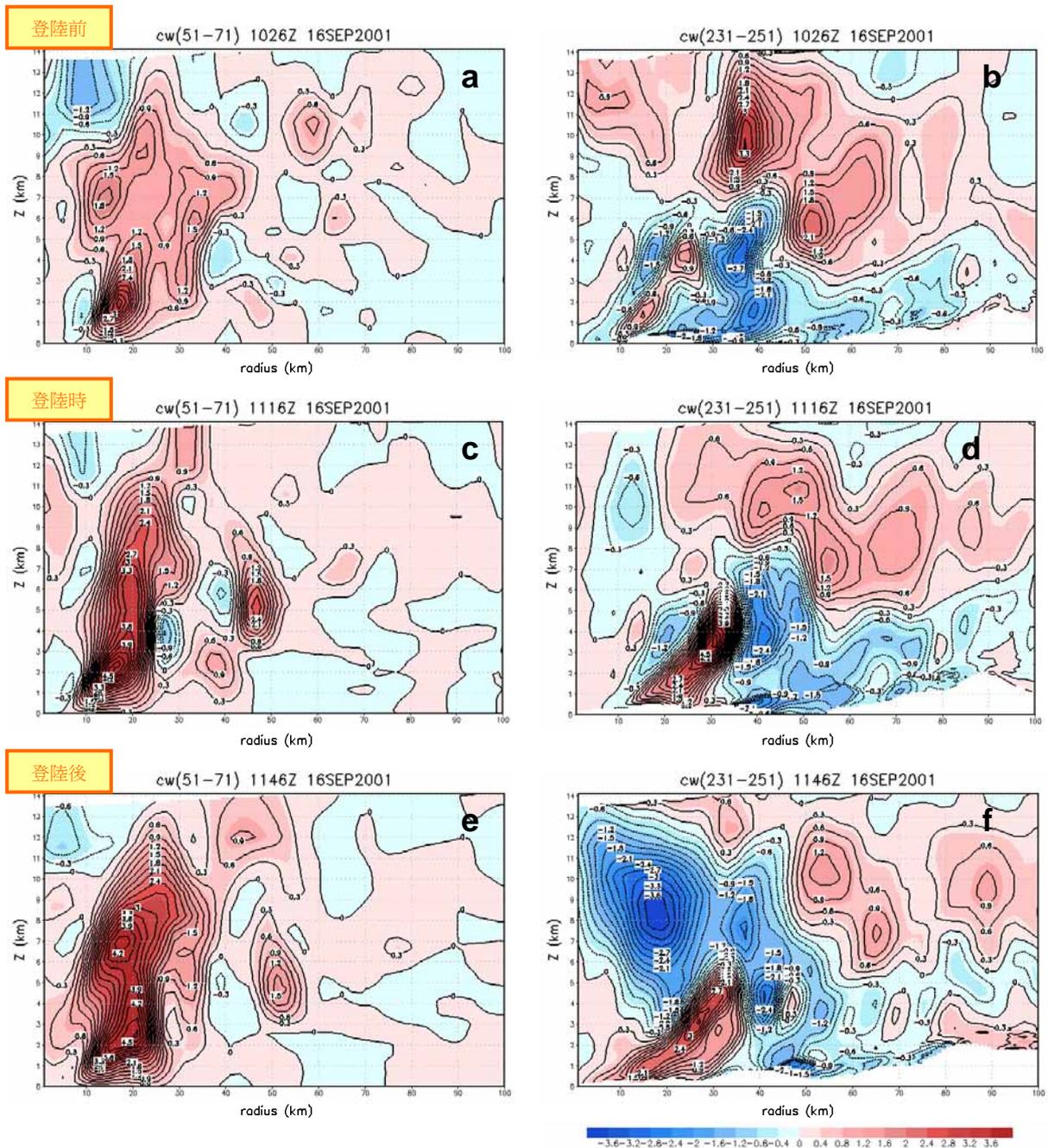


圖 3.8 垂直速度場垂直結構三個不同時間的變化(a)1026UTC 方位角 51°-71°、(b)1026UTC 方位角 231°-251°、(c)1116UTC 方位角 51°-71°、(d)1116UTC 方位角 231°-251°、(e)1146UTC 方位角 51°-71°、(f)1146UTC 方位角 231°-251°，單位： $\text{ms}^{-1}$ 。

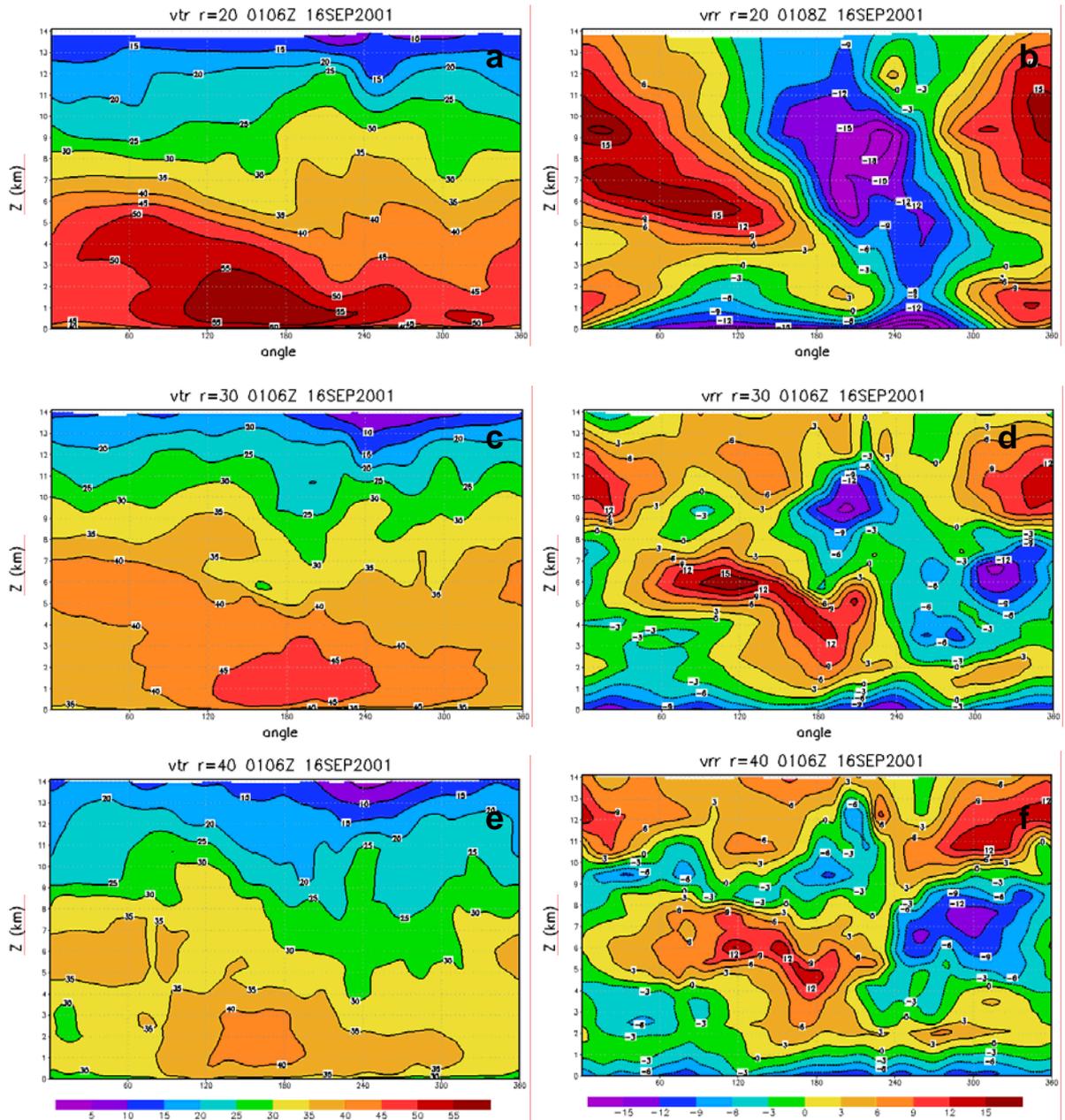


圖 3.9 0106UTC 颱風尚在海面上時(a)半徑 20 公里切向風場弧狀剖面、(b)半徑 20 公里徑向風場弧狀剖面、(c)半徑 30 公里切向風場弧狀剖面、(d)半徑 30 公里徑向風場弧狀剖面、(e)半徑 40 公里切向風場弧狀剖面、(f)半徑 40 公里徑向風場弧狀剖面，單位： $\text{ms}^{-1}$ 。

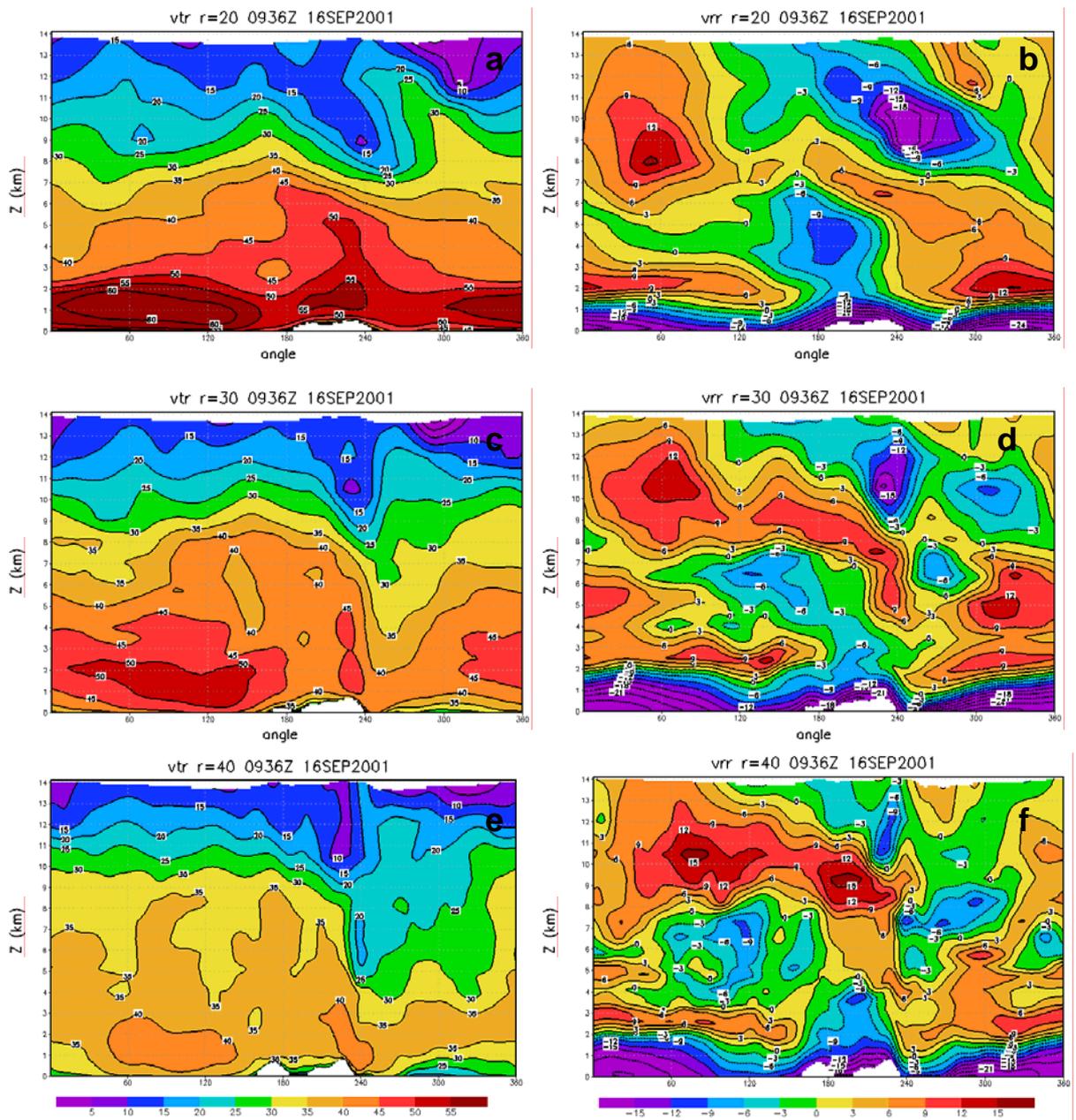


圖 3.10 0936UTC 颱風接近台灣時 (a) 半徑 20 公里切向風場弧狀剖面、(b) 半徑 20 公里徑向風場弧狀剖面、(c) 半徑 30 公里切向風場弧狀剖面、(d) 半徑 30 公里徑向風場弧狀剖面、(e) 半徑 40 公里切向風場弧狀剖面、(f) 半徑 40 公里徑向風場弧狀剖面，單位： $ms^{-1}$ 。

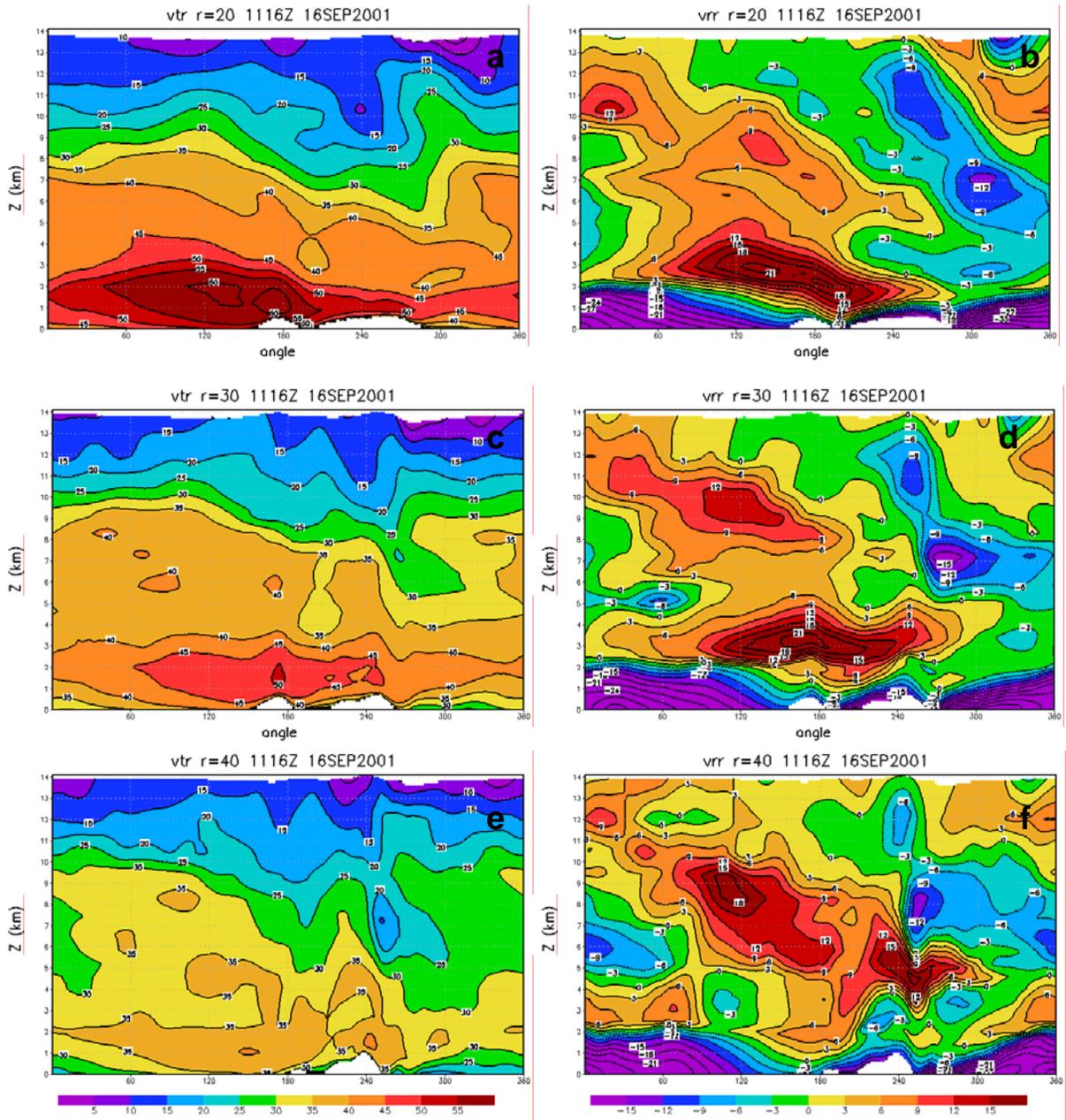


圖 3.11 1116UTC颱風登陸時 (a)半徑 20 公里切向風場弧狀剖面、(b)半徑 20 公里徑向風場弧狀剖面、(c)半徑 30 公里切向風場弧狀剖面、(d)半徑 30 公里徑向風場弧狀剖面、(e)半徑 40 公里切向風場弧狀剖面、(f)半徑 40 公里徑向風場弧狀剖面，單位： $\text{ms}^{-1}$ 。

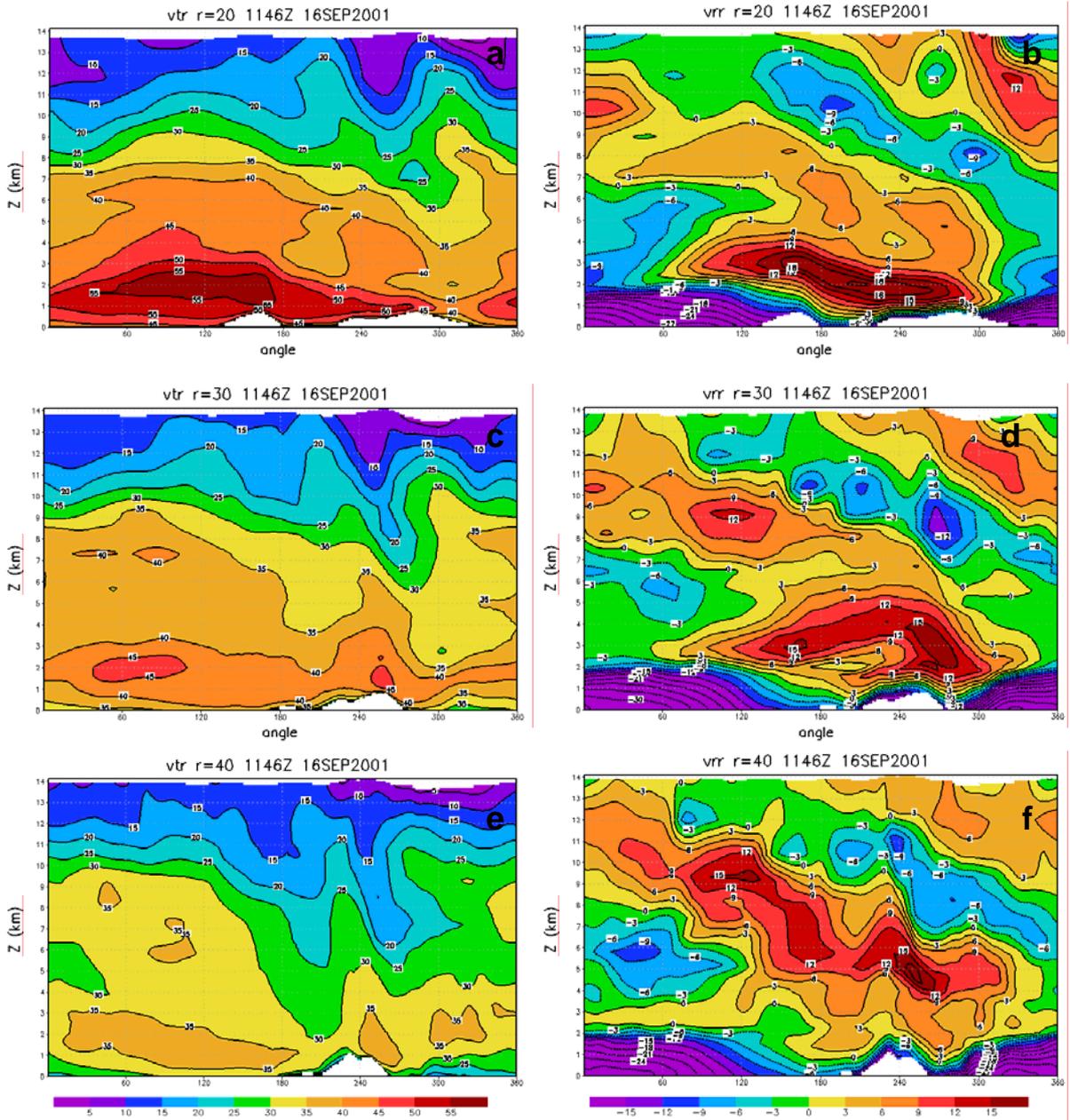


圖 3.12 1146UTC颱風登陸後 (a)半徑 20 公里切向風場弧狀剖面、(b)半徑 20 公里徑向風場弧狀剖面、(c)半徑 30 公里切向風場弧狀剖面、(d)半徑 30 公里徑向風場弧狀剖面、(e)半徑 40 公里切向風場弧狀剖面、(f)半徑 40 公里徑向風場弧狀剖面，單位： $\text{ms}^{-1}$ 。

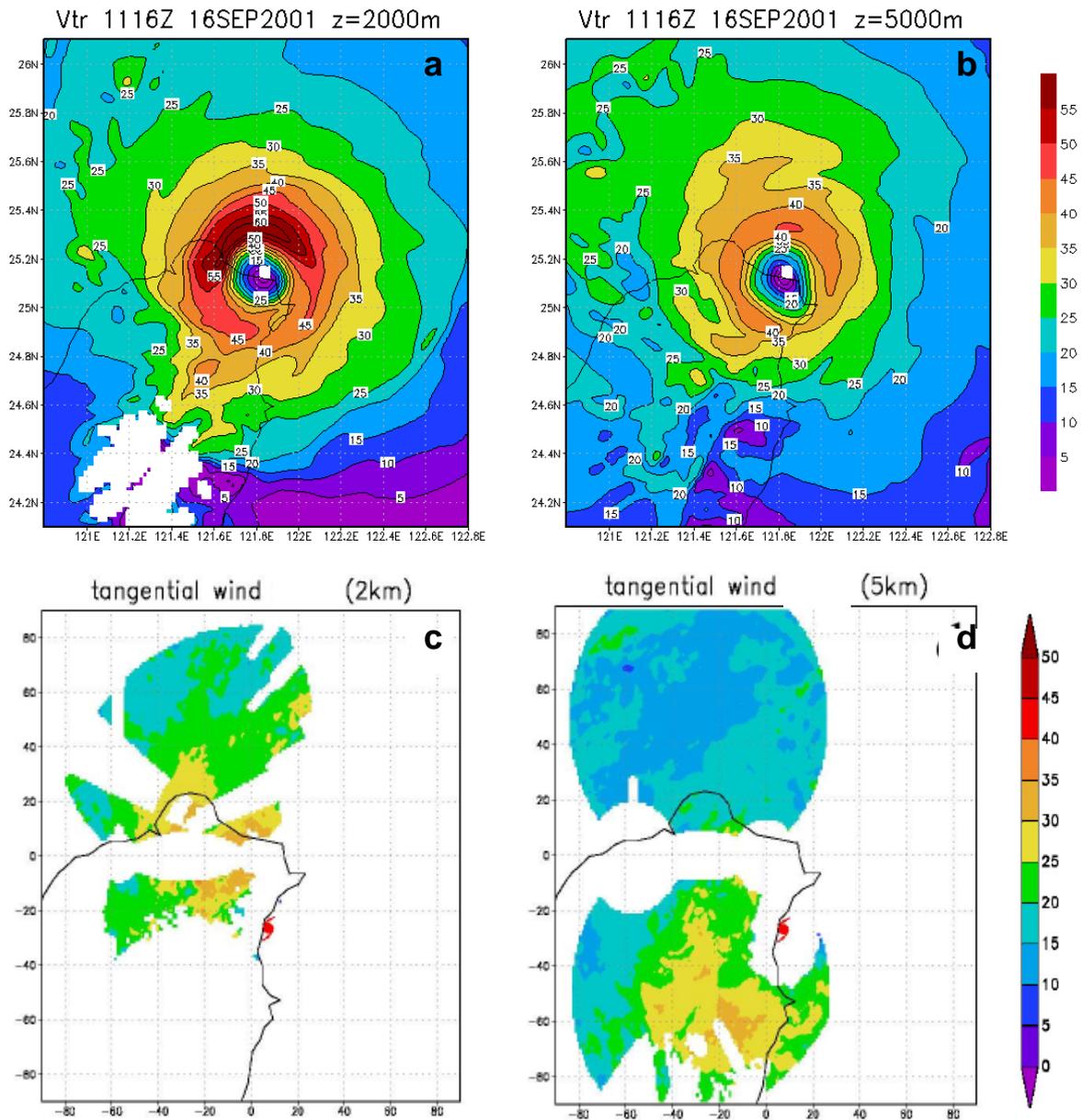


圖 4.1 水平切向風場，納莉颱風(2001)登陸時高度 2 公里和 5 公里雷達風場與模式風場的比較(a)1116UTC 2 公里模式風場、(b)1116UTC 2 公里模式風場、(c)1400UTC 2 公里雷達風場、(d)1400UTC 5 公里雷達風場，單位： $\text{ms}^{-1}$ 。

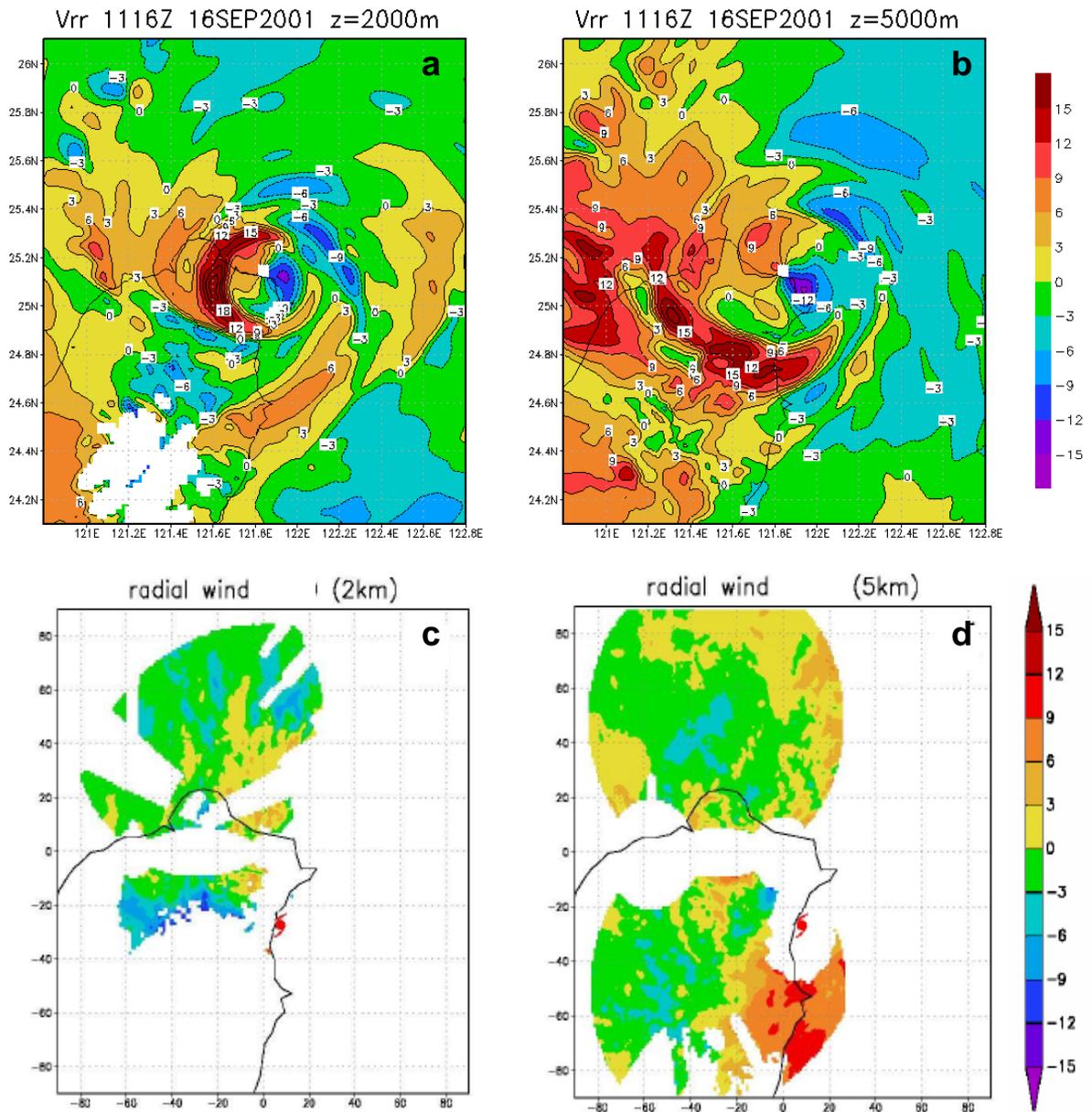


圖 4.2 水平徑向風場，納莉颱風(2001)登陸時高度 2 公里和 5 公里雷達風場與模式風場的比較(a)1116UTC 2 公里模式風場、(b)1116UTC 5 公里模式風場、(c)1400UTC 2 公里雷達風場、(d)1400UTC 5 公里雷達風場，單位： $\text{ms}^{-1}$ 。

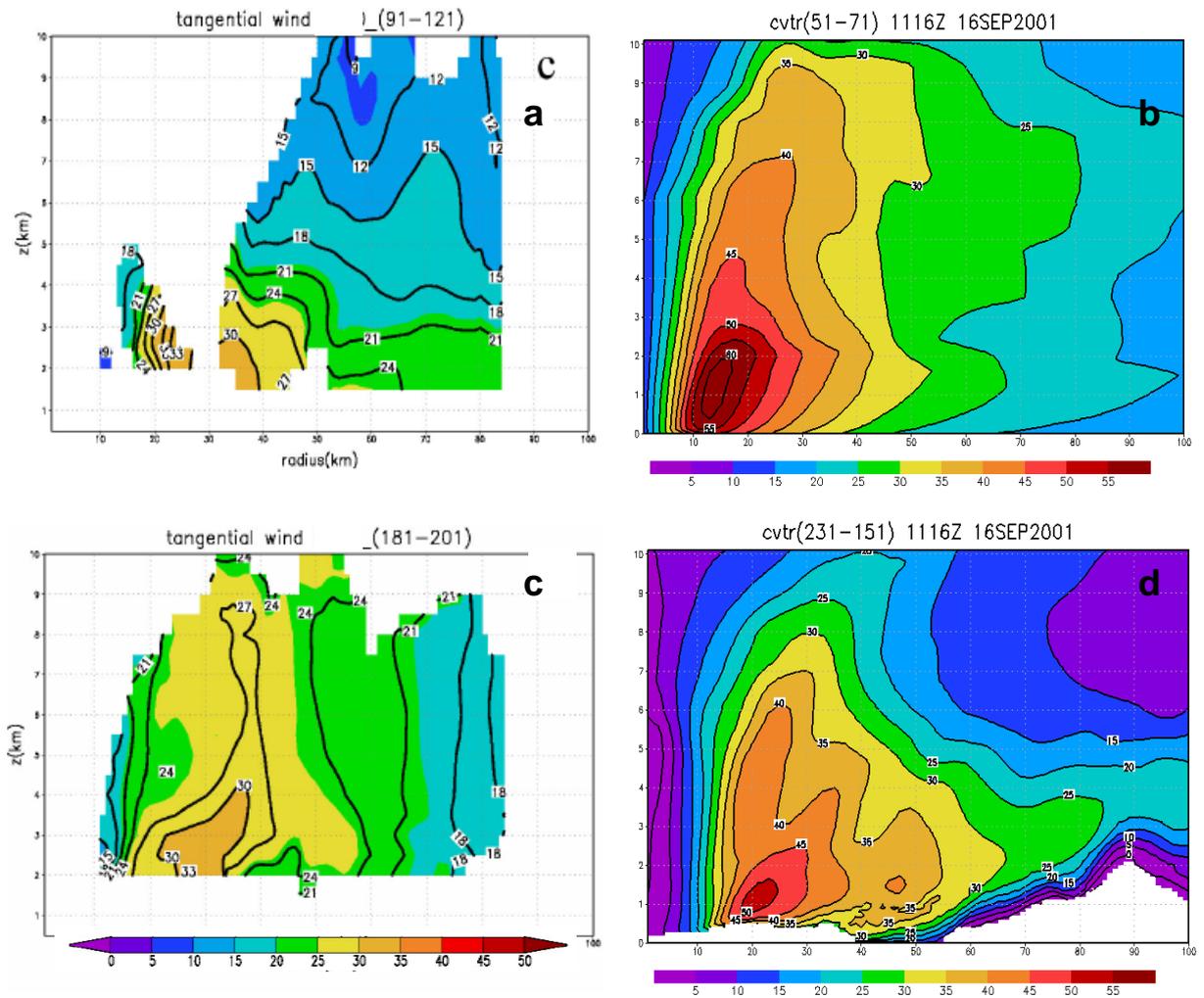


圖 4.3 切向風場垂直結構，納莉颱風(2001)登陸時不同方位角雷達風場與模式風場的比較(a)雷達風場 1400UTC方位角平均  $91^{\circ}$ - $121^{\circ}$ 、(b)模式風場 1116UTC方位角平均  $51^{\circ}$ - $71^{\circ}$ 、(c)雷達風場 1400UTC方位角平均  $181^{\circ}$ - $201^{\circ}$ 、(d)模式風場 1116UTC方位角平均  $231^{\circ}$ - $251^{\circ}$ ，單位： $\text{ms}^{-1}$ 。

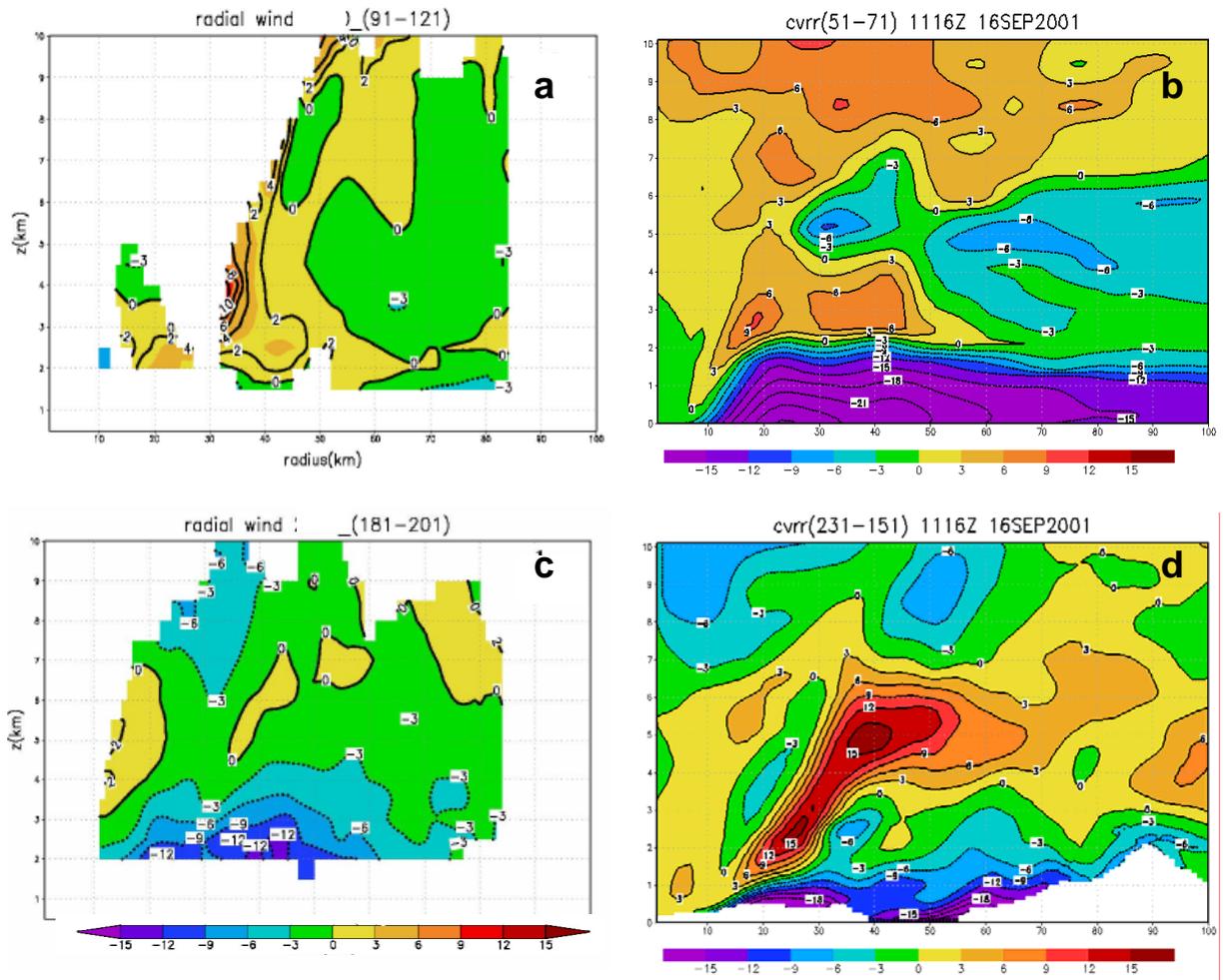


圖 4.4 徑向風場垂直結構，納莉颱風(2001)登陸時雷達風場與模式風場的比較(a)雷達風場 1400UTC方位角平均  $91^{\circ}$ - $121^{\circ}$ 、(b)模式風場 1116UTC方位角平均  $51^{\circ}$ - $71^{\circ}$ 、(c)雷達風場 1400UTC方位角平均  $181^{\circ}$ - $201^{\circ}$ 、(d)模式風場 1116UTC方位角平均  $231^{\circ}$ - $251^{\circ}$ ，單位： $\text{ms}^{-1}$ 。

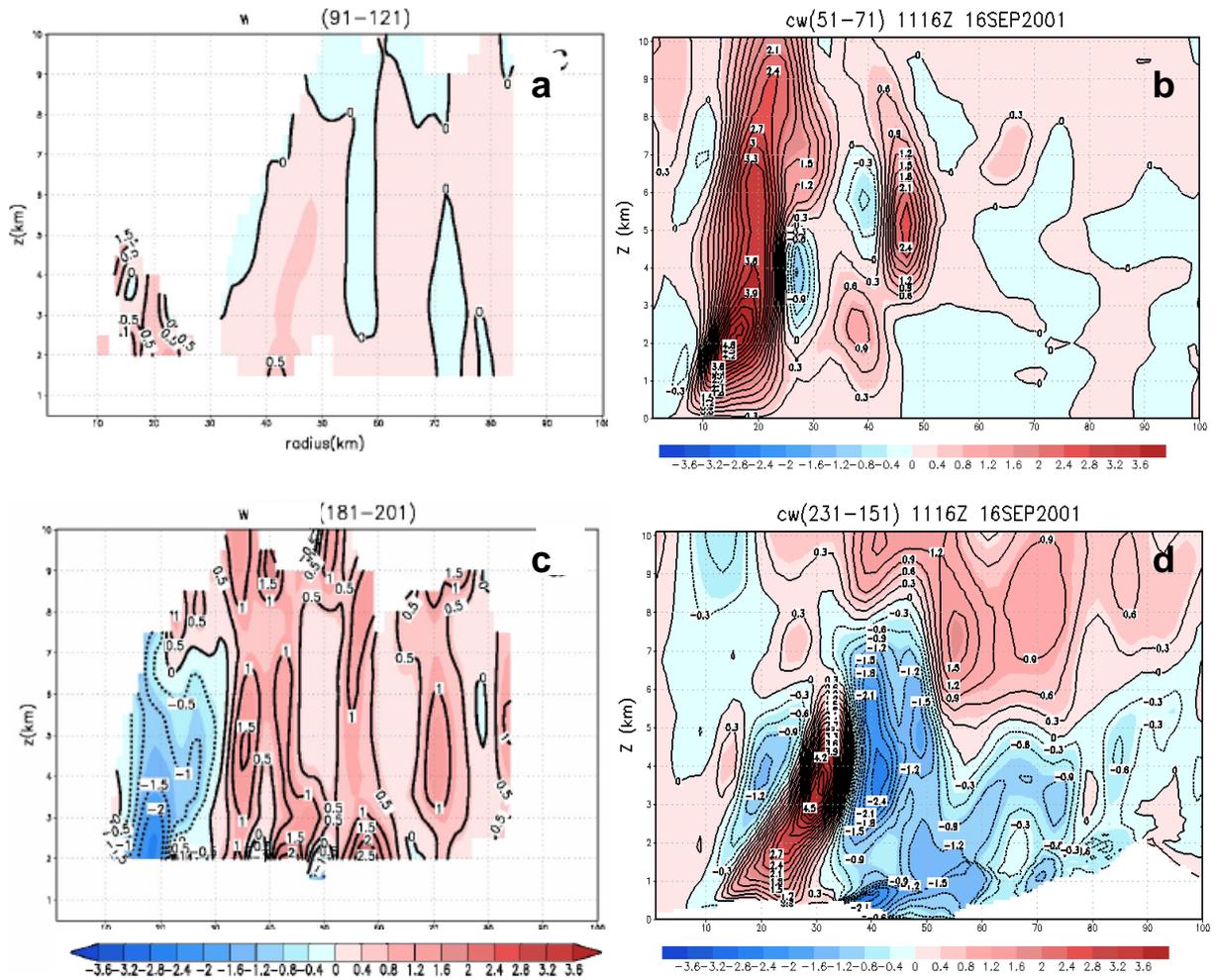


圖 4.5 垂直速度場垂直結構，納莉颱風(2001)登陸時雷達風場與模式風場的比較(a) 雷達風場 1400UTC方位角平均  $91^{\circ}$ – $121^{\circ}$ 、(b)模式風場 1116UTC方位角平均  $51^{\circ}$ – $71^{\circ}$ 、(c) 雷達風場 1400UTC方位角平均  $181^{\circ}$ – $201^{\circ}$ 、(d)模式風場 1116UTC方位角平均  $231^{\circ}$ – $251^{\circ}$ ，單位： $\text{ms}^{-1}$ 。

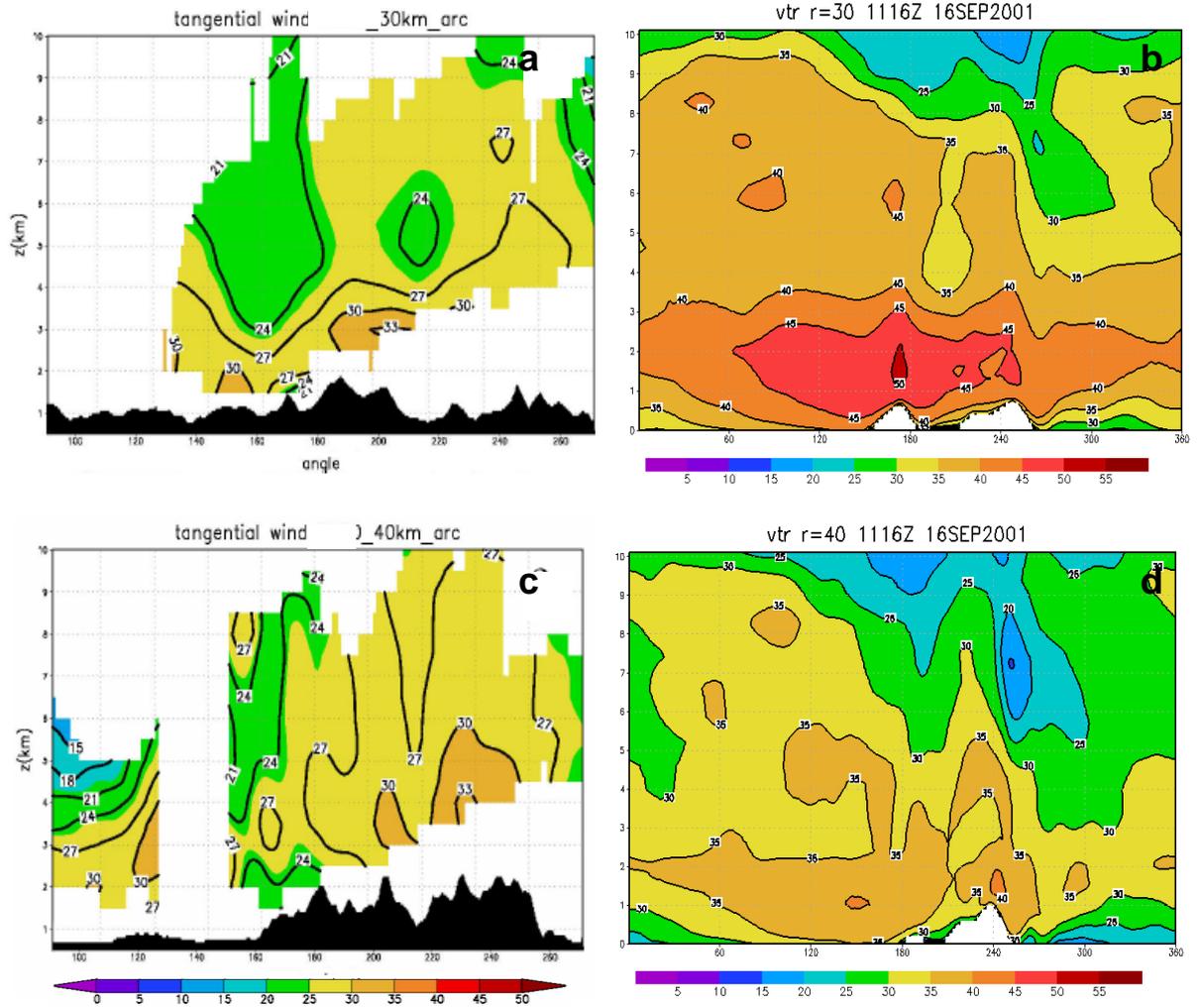


圖 4.6 切向風場弧狀剖面，納莉颱風(2001)登陸時雷達風場與模式風場的比較  
 (a)1400UTC半徑 30 公里，方位角 90-270 雷達風場、(b)1116UTC半徑 30 公里，方位角 1-360 模式風場、(c)1400UTC半徑 40 公里，方位角 90-270 雷達風場、(d)1116UTC半徑 40 公里，方位角 1-360 模式風場，單位： $\text{ms}^{-1}$ 。

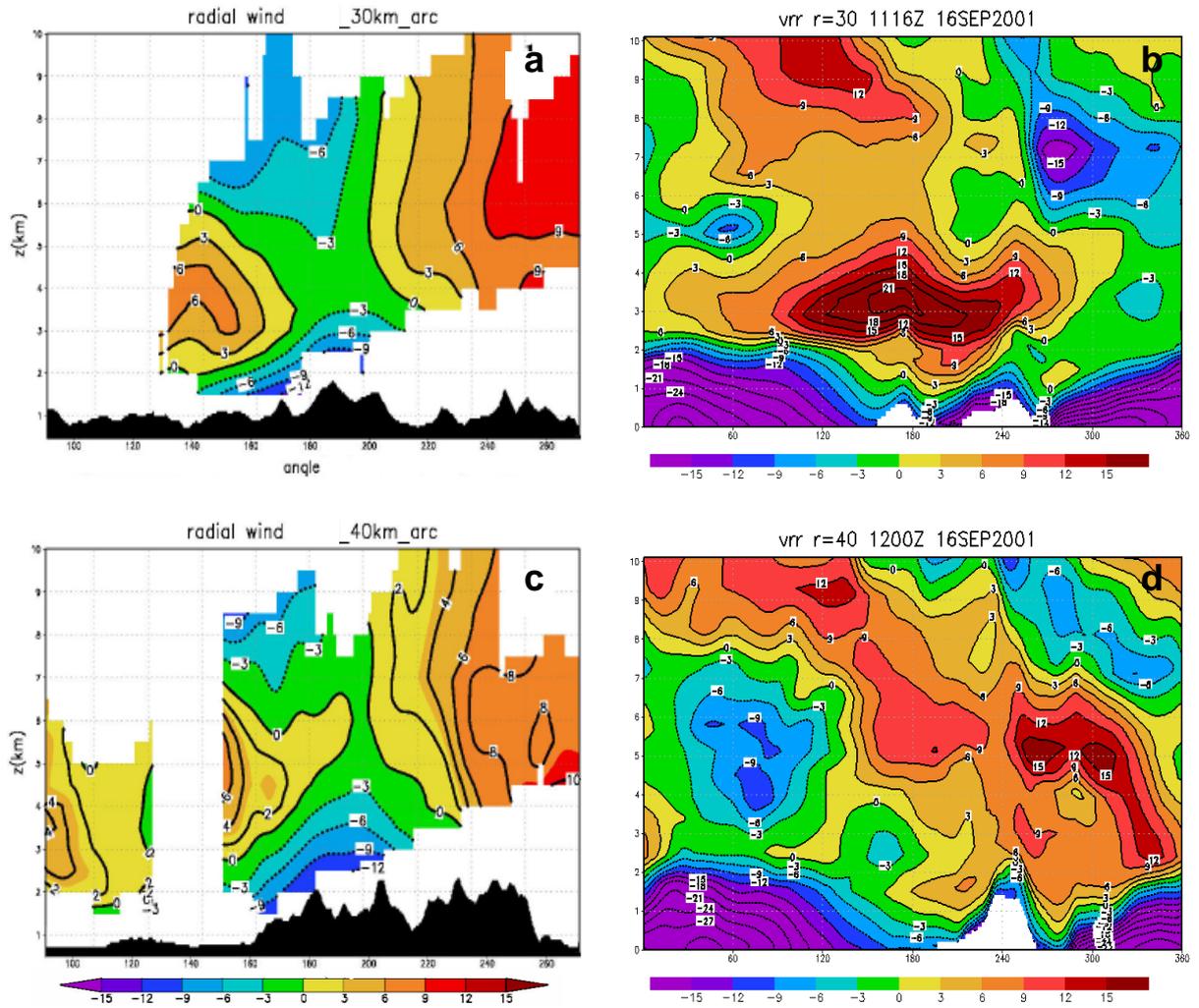


圖 4.7 徑向風場弧狀剖面，納莉颱風(2001)登陸時不同方位角雷達風場與模式風場的比較(a)1400UTC半徑 30 公里，方位角 90-270 雷達風場、(b)1116UTC半徑 30 公里，方位角 1-360 模式風場、(c)1400UTC半徑 40 公里，方位角 90-270 雷達風場、(d)1116UTC半徑 40 公里，方位角 1-360 模式風場，單位： $\text{ms}^{-1}$ 。

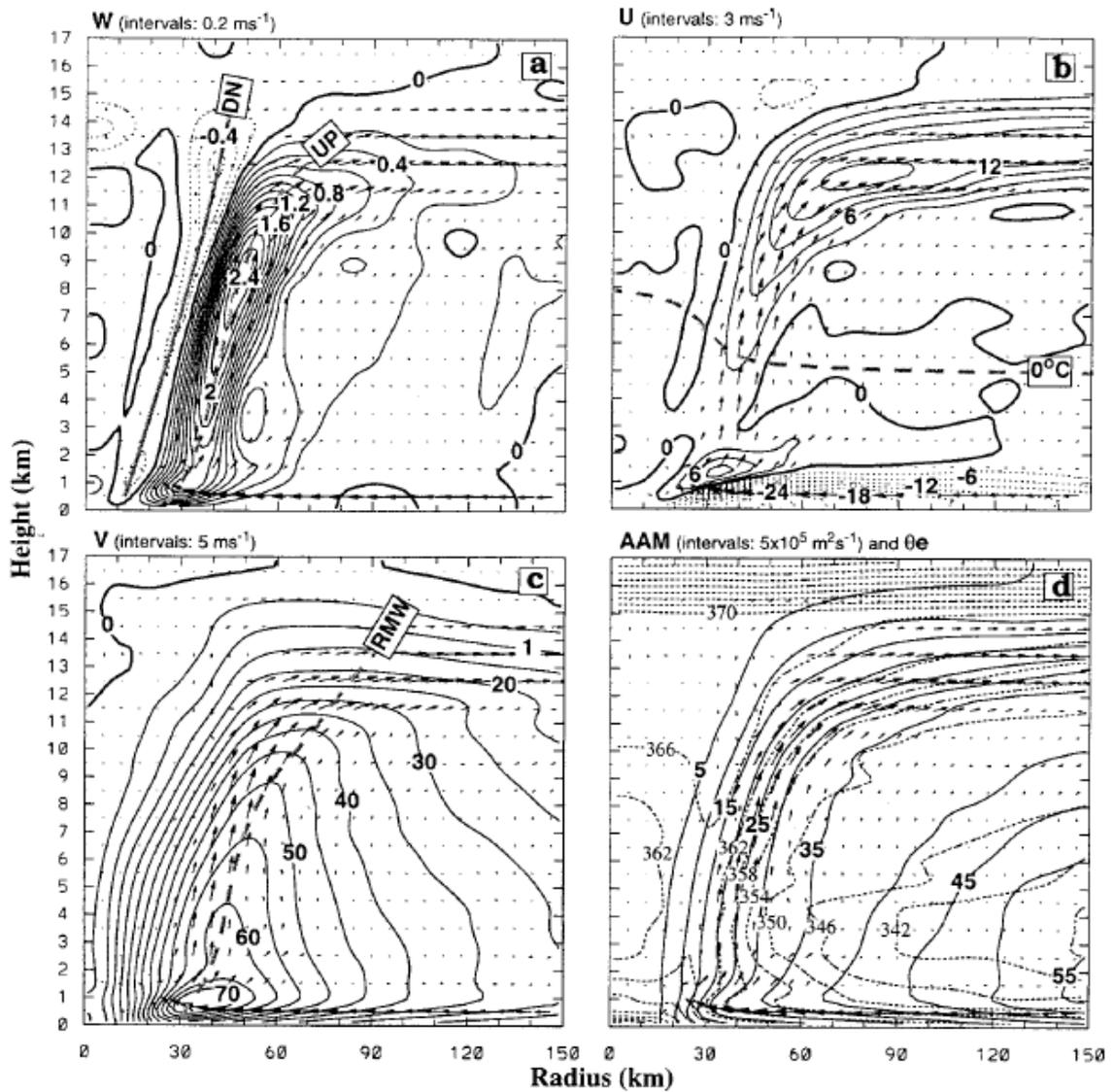


圖 5.1 1992 年 8 月 23 日 2000-2100UTC，Andrew 颶風之方位角平均垂直結構(a)垂直運動、(b)徑向風、(c)切向風、(d)絕對角動量與相當位溫。摘自 Zhang et al. (2001)

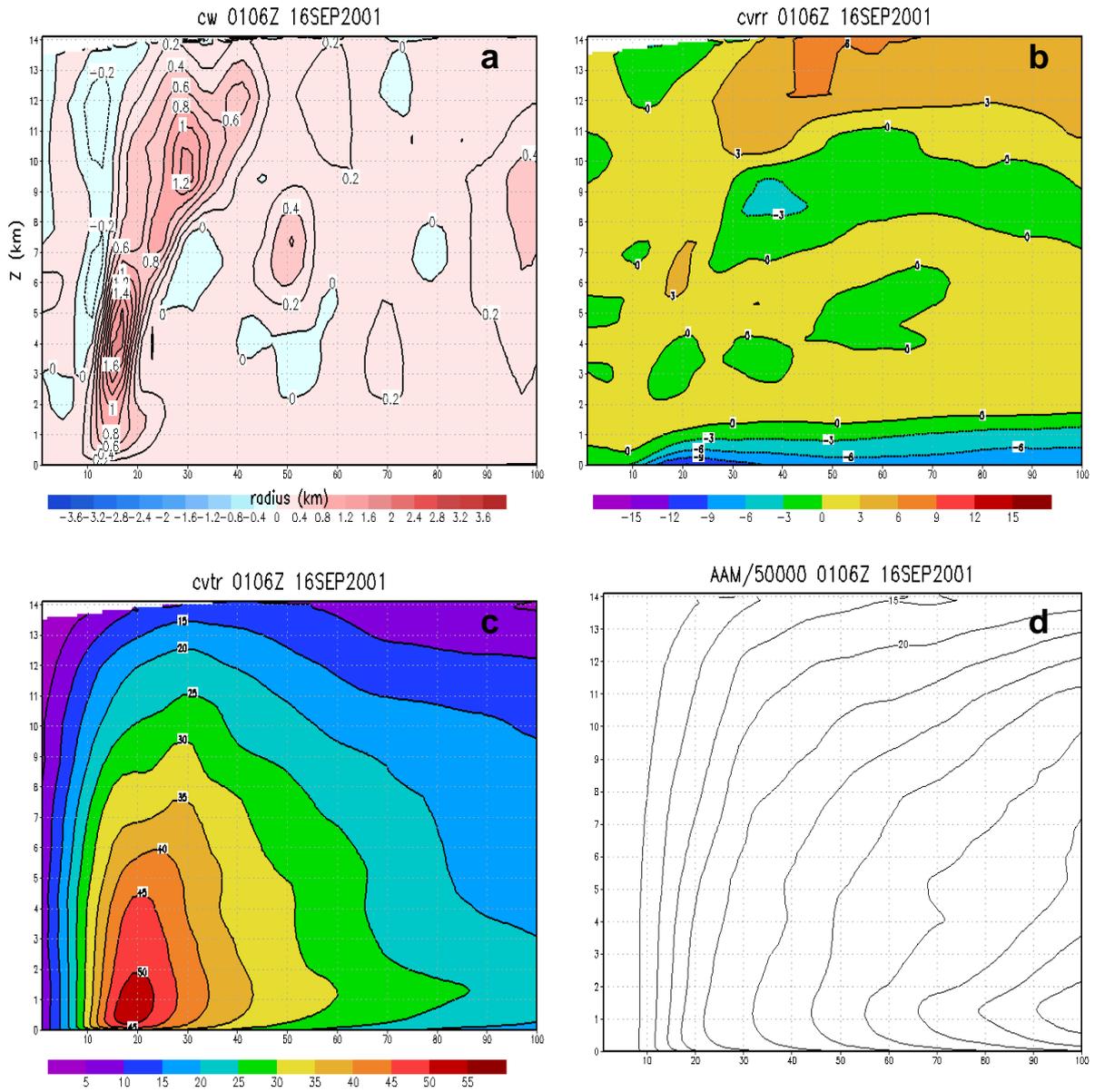


圖 5.2 2001 年 9 月 16 日 0106UTC，納莉颱風之方位角平均垂直結構(a) 垂直運動 (ms<sup>-1</sup>)、(b)徑向風(ms<sup>-1</sup>)、(c)切向風(ms<sup>-1</sup>)、(d)絕對角動量(5×10<sup>5</sup>m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>)

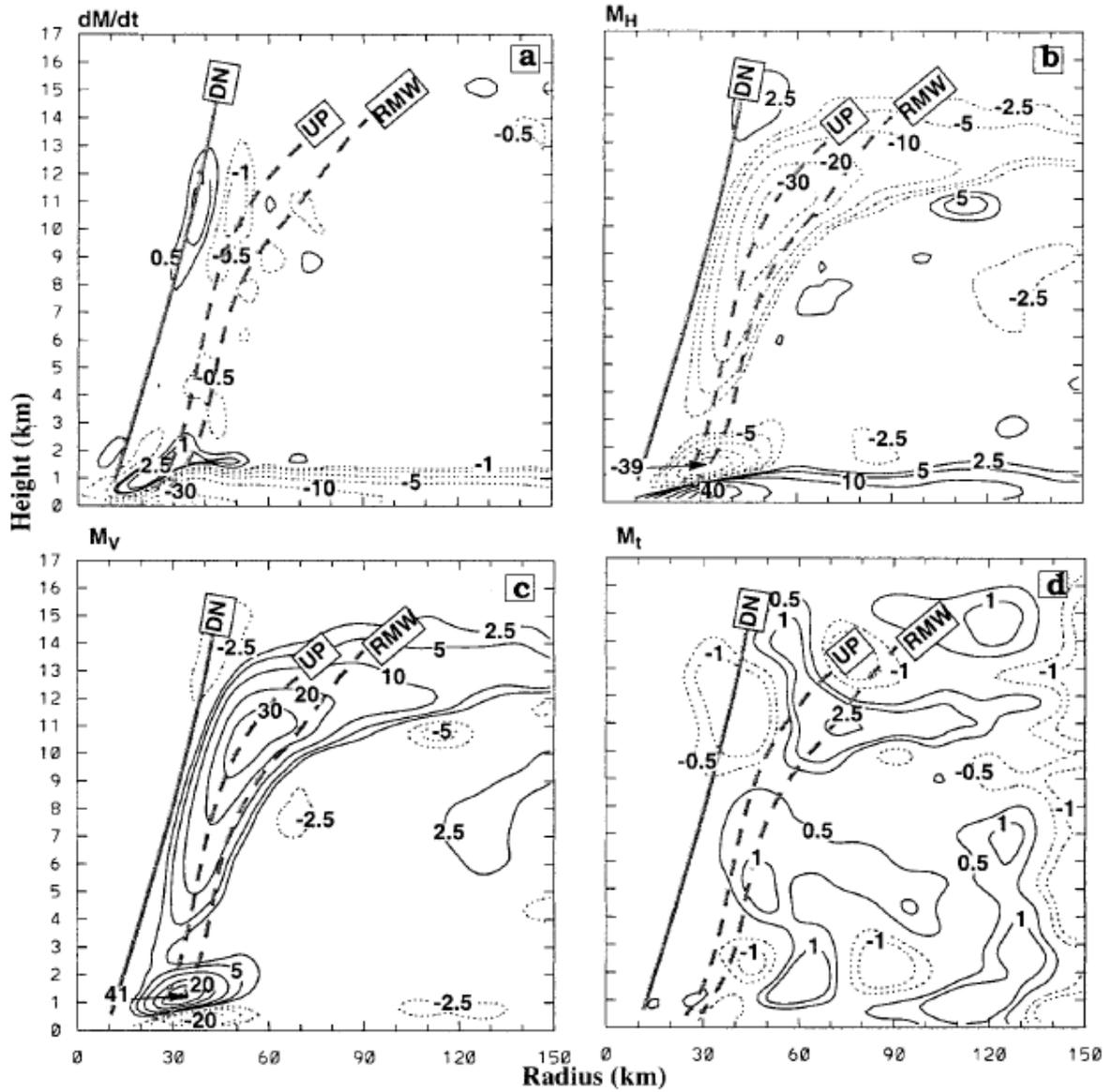


圖 5.3 1992 年 8 月 23 日 2000-2100UTC，Andrew 颶風絕對角動量方程式之方位角平均垂直結構(a)  $\frac{dM}{dt}$ 、(b)水平平流項、(c)垂直傳輸項、(d)  $\frac{\partial M}{\partial t}$ ，單位： $1 \times 10^5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 。摘自 Zhang et al. (2001)

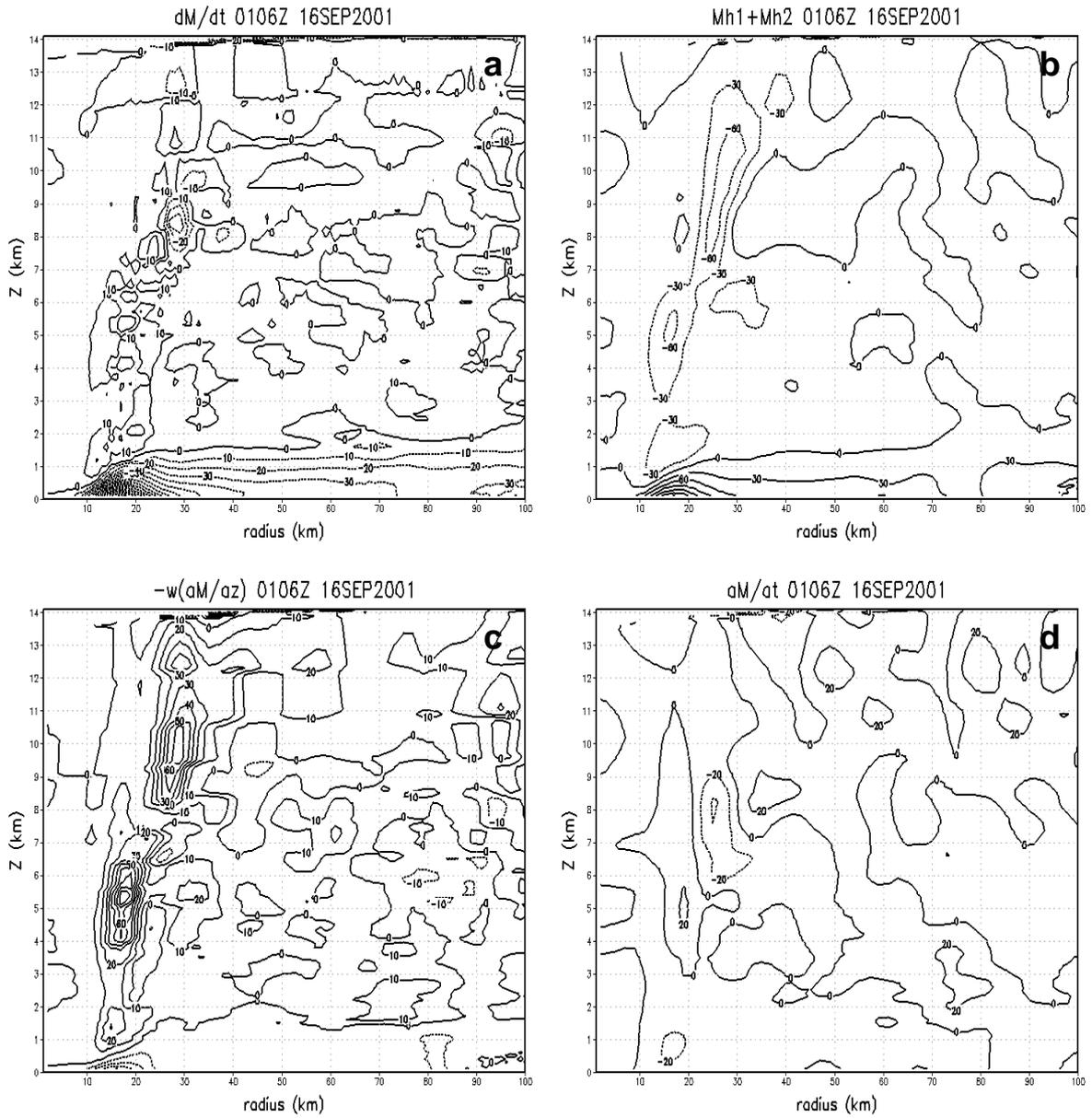


圖 5.4 2001 年 9 月 16 日 0106UTC，納莉颱風絕對角動量方程式之方位角平均垂直結構

(a)  $\frac{dM}{dt}$ 、(b) 水平平流項、(c) 垂直傳輸項、(d)  $\frac{\partial M}{\partial t}$ ，單位： $1 \times 10^5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 。

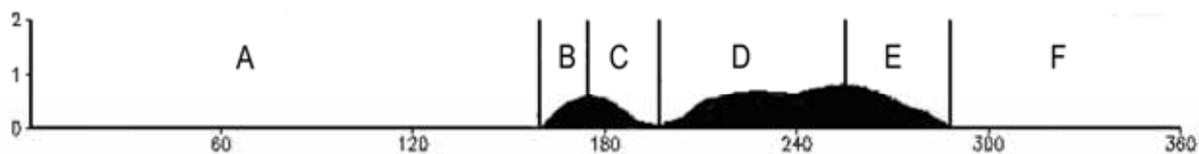


圖 5.5 將納莉颱風眼牆(半徑 20 公里)之弧狀剖面分成 A~D 六個區域，B、D 區為地形左側，C、E 區為地形右側。

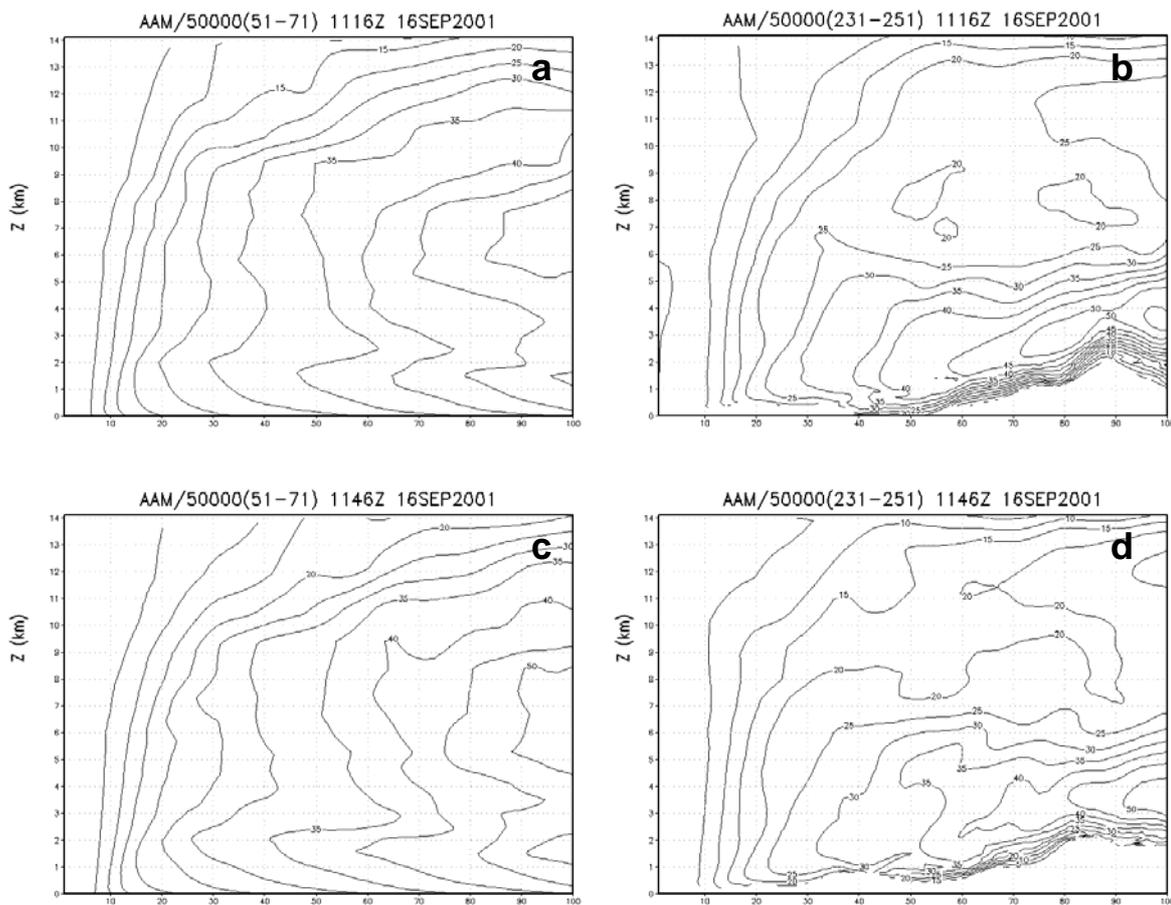


圖 5.6 絕對角動量垂直結構 (a)1116UTC (方位角 51-71)、(b)1116UTC (方位角 251-231)、(c) 1146UTC (方位角 51-71)、(d) 1146UTC (方位角 251-231)，單位： $5 \times 10^4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 。

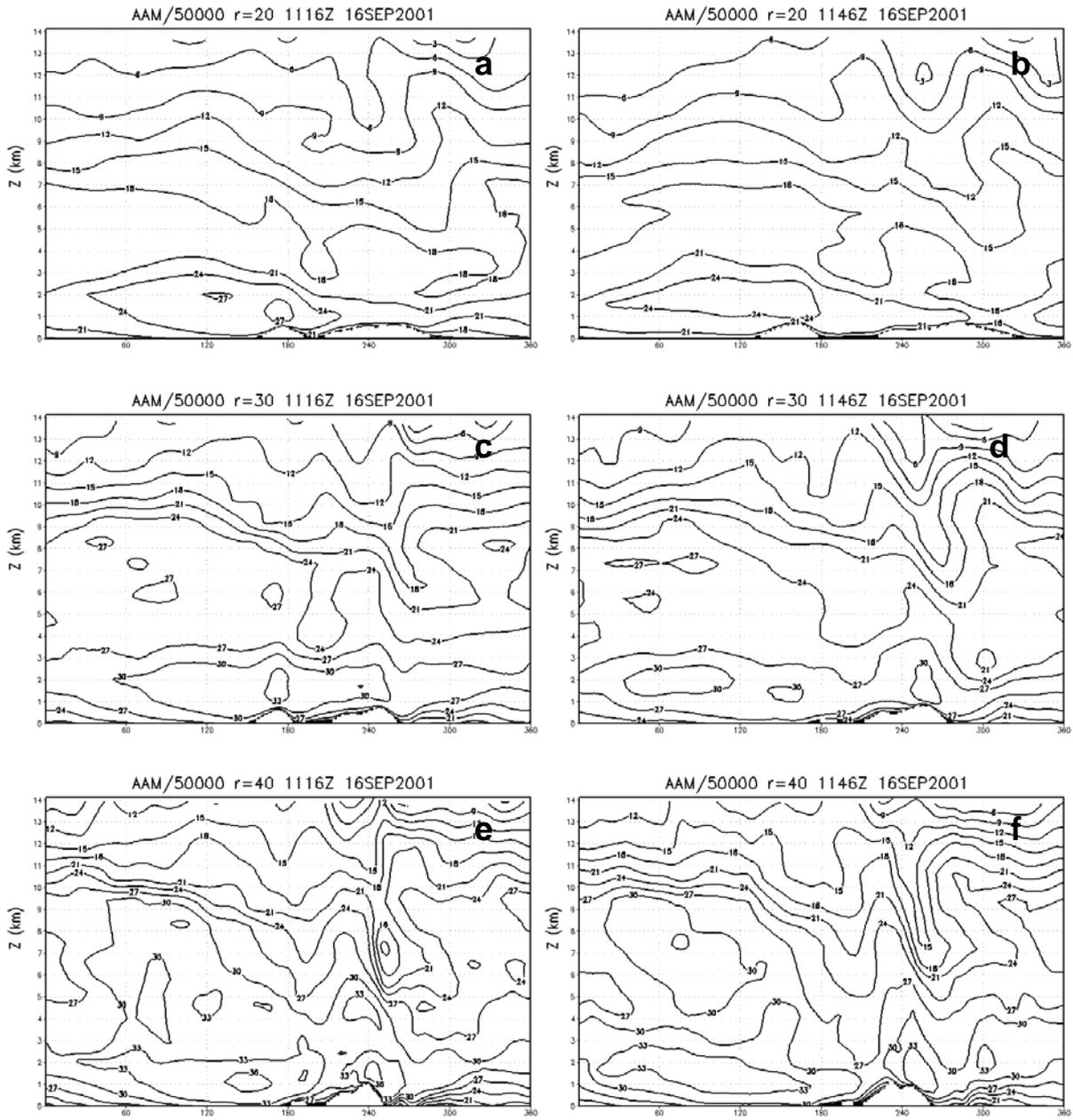


圖 5.7 絕對角動量弧狀剖面 (a)1116UTC 半徑 20 公里、(b) 1146UTC 半徑 20 公里、(c) 1116UTC 半徑 30 公里、(d) 1146UTC 半徑 30 公里、(e) 1116UTC 半徑 40 公里、(f) 1146UTC 半徑 40 公里，單位： $5 \times 10^4 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 。

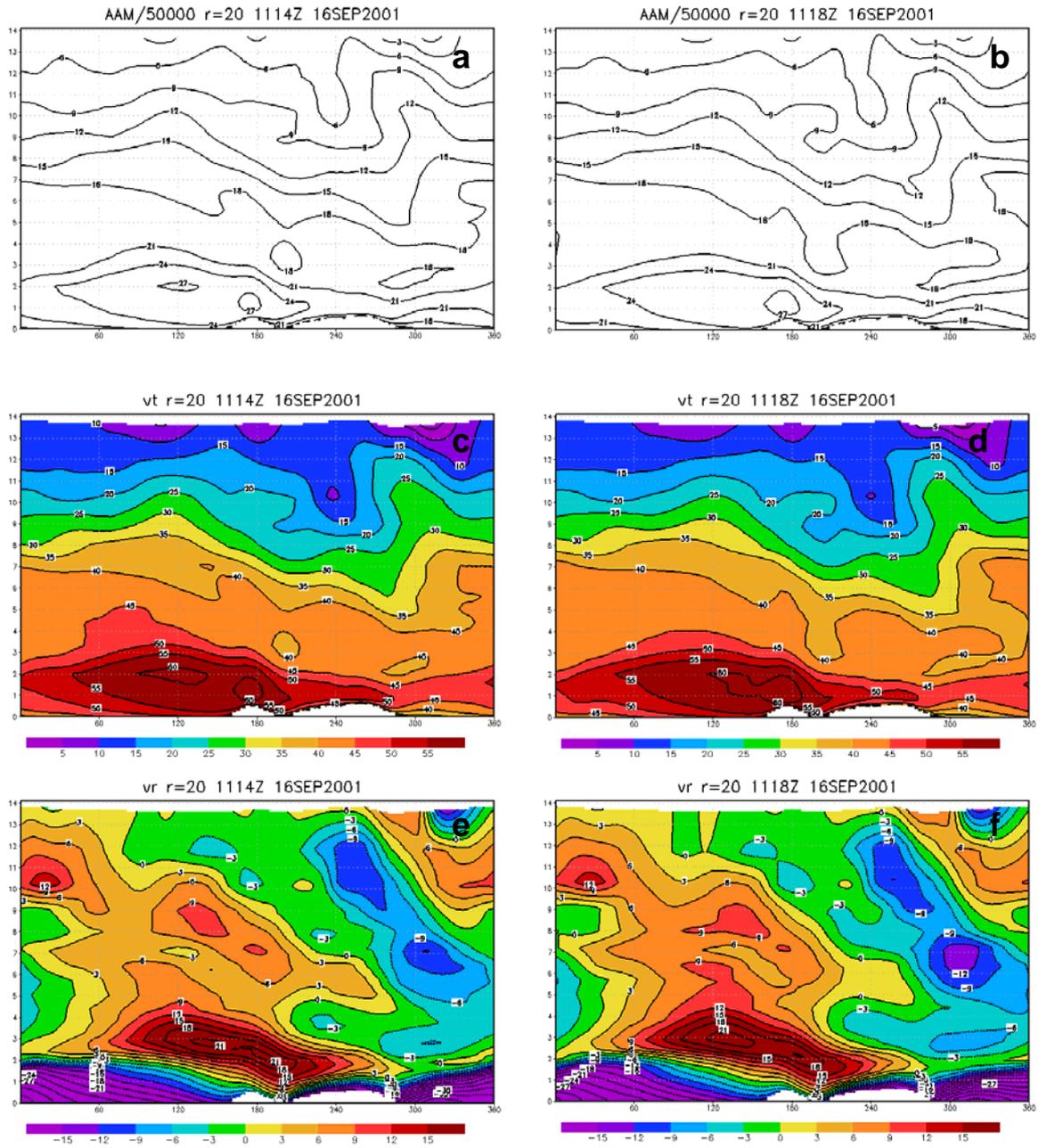


圖 5.8 半徑 20 公里弧狀剖面 (a)1114UTC 絕對角動量，單位： $5 \times 10^4 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 、(b) 1118UTC 絕對角動量，單位： $5 \times 10^4 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 、(c) 1114UTC 切向風，單位： $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 、(d) 1118UTC 切向風，單位： $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 、(e) 1114UTC 徑向風，單位： $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 、(f) 1118UTC 徑向風，單位： $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 。

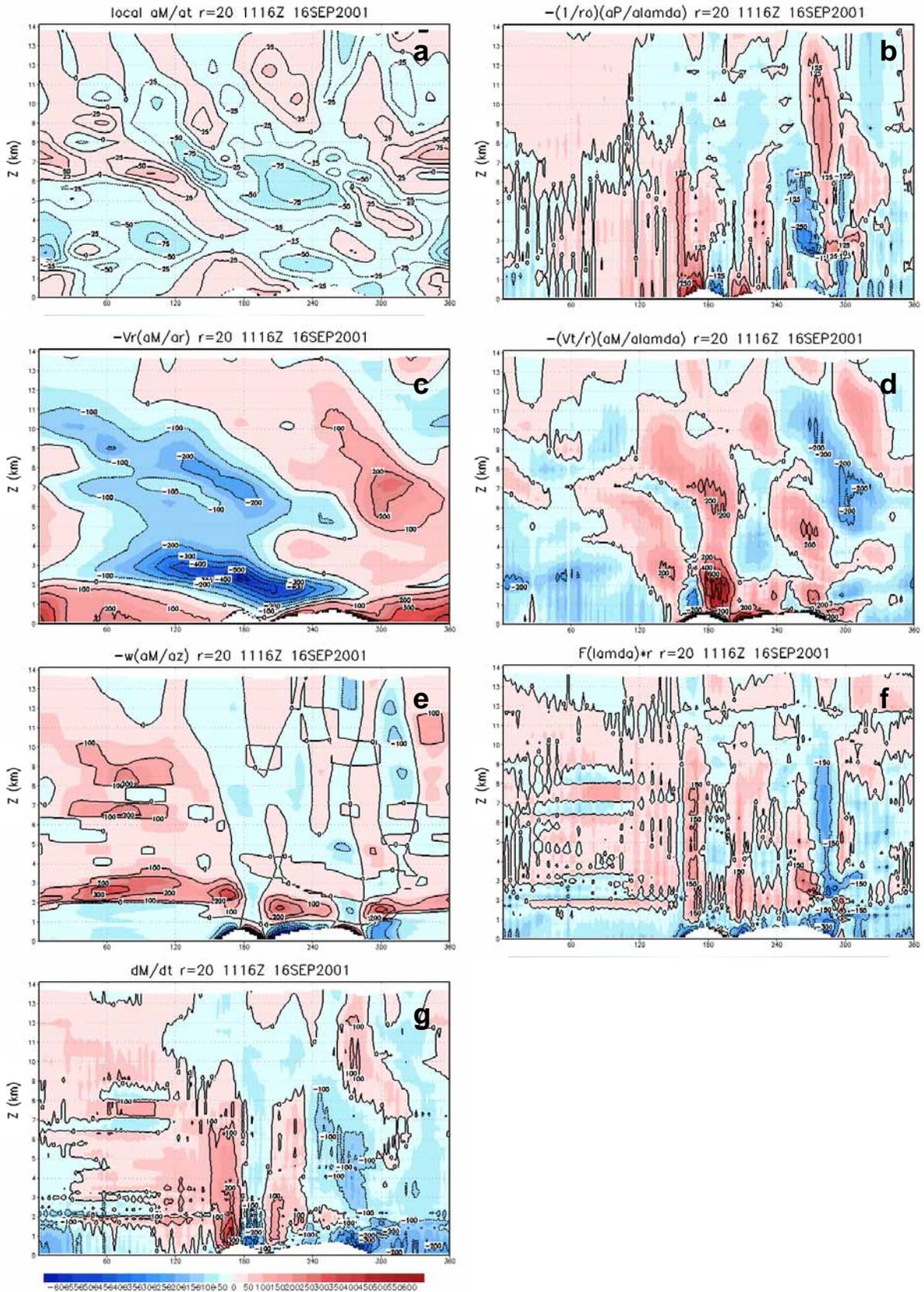


圖 5.9 1116UTC 絕對角動量動量方程(2.7)式在半徑 20 公里弧狀剖面之各項(a)  $\frac{\partial M}{\partial t}$  (b)  $-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \lambda}$  (c)  $-V_r \frac{\partial M}{\partial r}$  (d)  $-\frac{V_t}{r} \frac{\partial M}{\partial \lambda}$  (e)  $-w \frac{\partial M}{\partial z}$  (f)  $F(r)*r$  (g)  $\frac{dM}{dt}$  , 單位:  $1 \times 10^5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 。

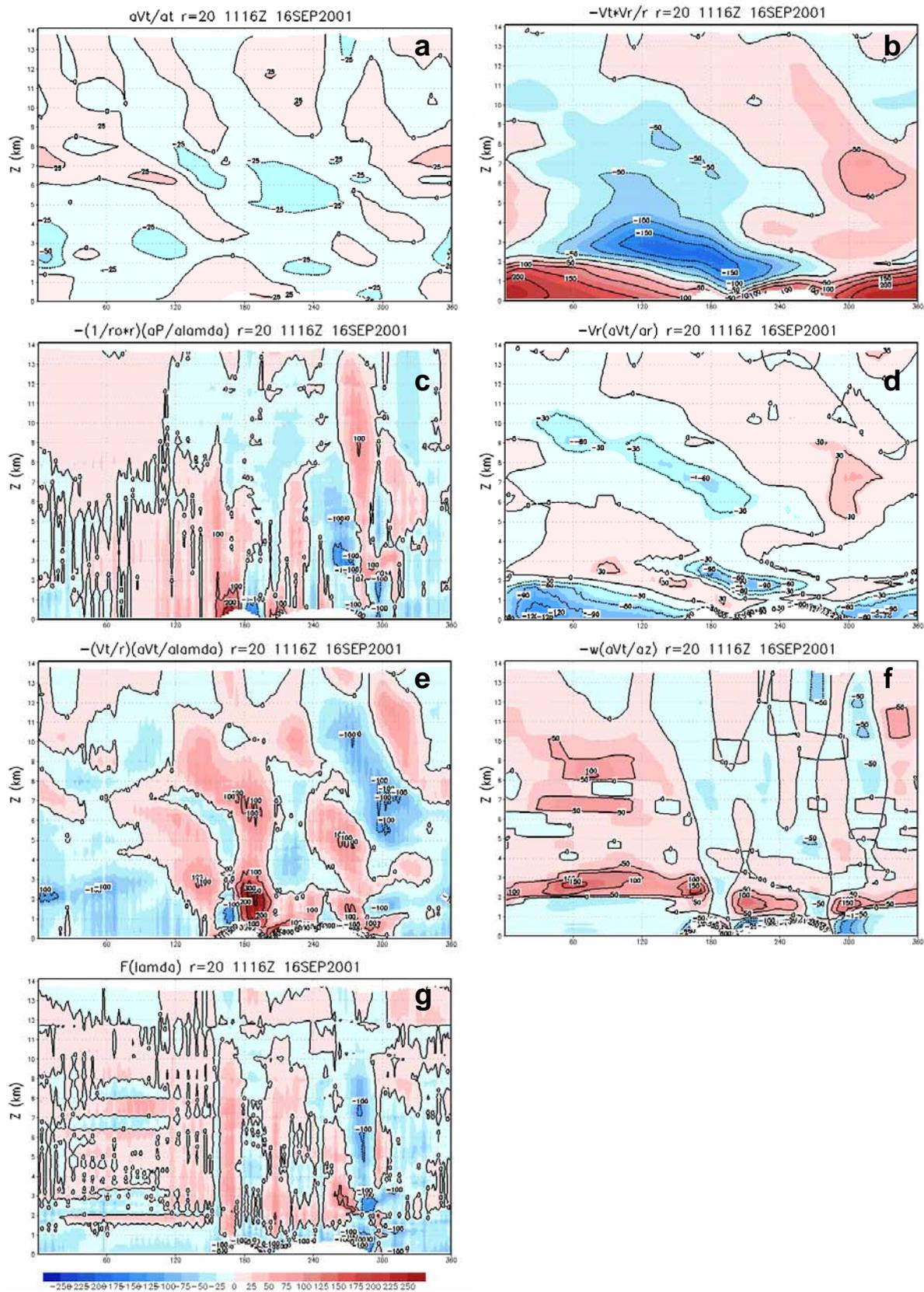
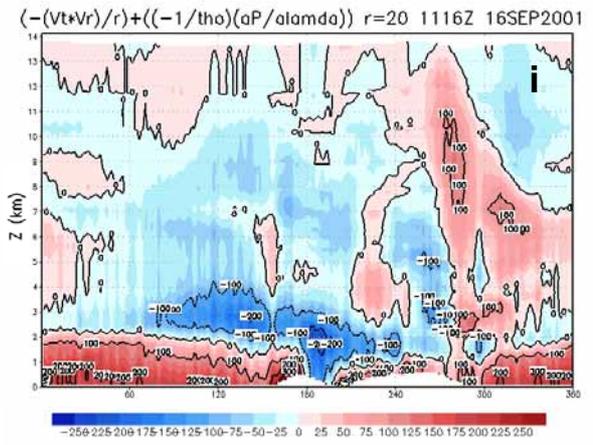
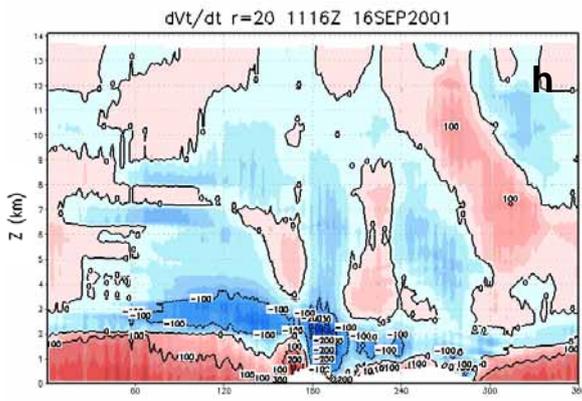


圖 5.10 1116UTC 切向風動量方程(2.4)式在半徑 20 公里弧狀剖面之各項(a)  $\frac{\partial V_t}{\partial t}$  (b)  $-\frac{V_t V_r}{r}$  (c)  $-\frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \lambda}$  (d)  $-V_r \frac{\partial V_t}{\partial r}$  (e)  $-V_t \frac{\partial V_t}{\partial \lambda}$  (f)  $-w \frac{\partial V_t}{\partial z}$  (g)  $F(\lambda)$ ，單位： $\text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{h}^{-1}$ 。



續圖 5.10 1116UTC 切向風動量方程(2.4)式在半徑 20 公里弧狀剖面之各項(h)  $\frac{dV_t}{dt}$

(i)  $\frac{-V_t V_r}{r} - \frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \lambda}$  , 單位:  $\text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{h}^{-1}$ 。

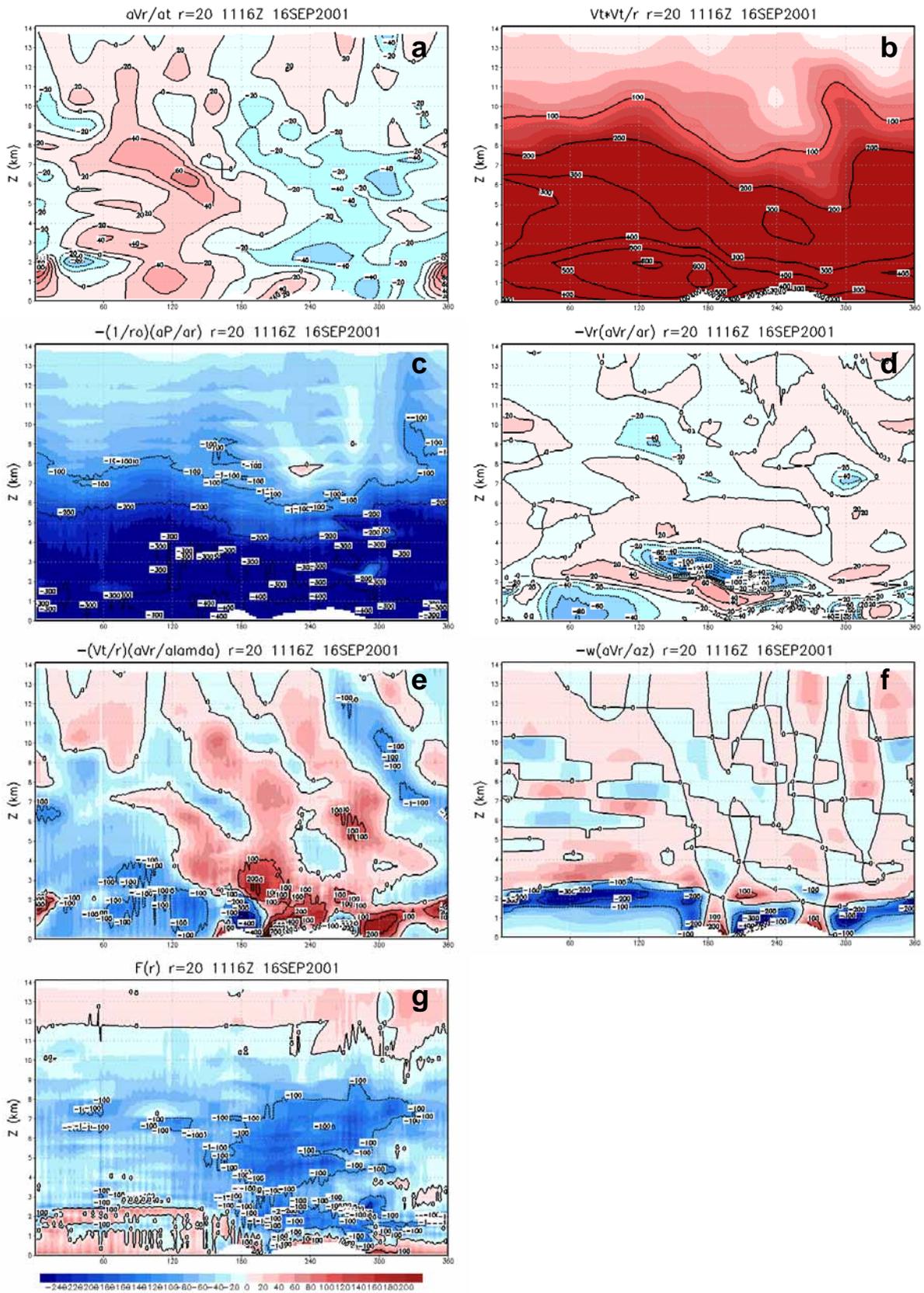
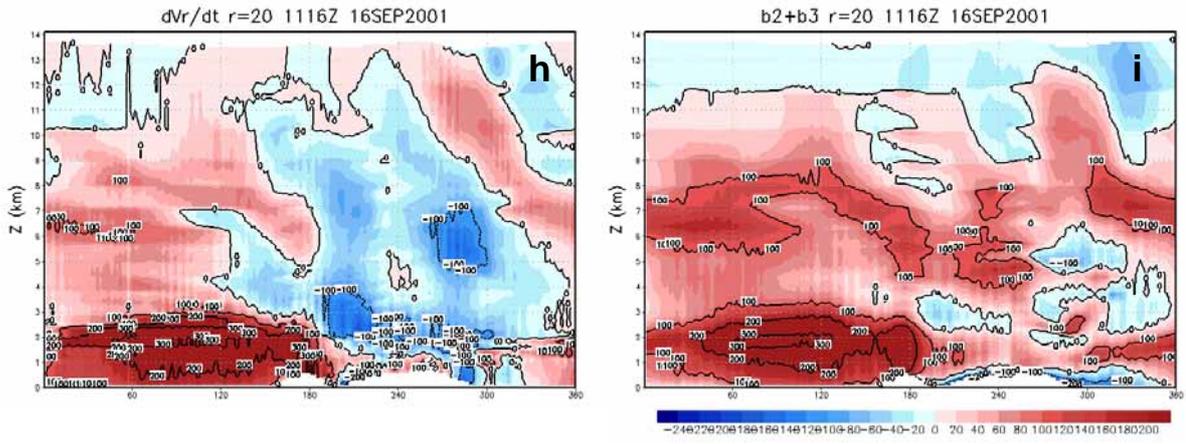


圖 5.11 1116UTC 徑向風動量方程(2.5)式在半徑 20 公里弧狀剖面之各項(a)  $\frac{\partial V_r}{\partial t}$  (b)

(c)  $\frac{V_t^2}{r}$  (c)  $-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}$  (d)  $-V_r \frac{\partial V_r}{\partial r}$  (e)  $-\frac{V_t}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \lambda}$  (f)  $-w \frac{\partial V_r}{\partial z}$  (g)  $F(r)$  , 單位:  $\text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{h}^{-1}$ 。



續圖 5.11 1116UTC 徑向風動量方程(h)  $\frac{dV_r}{dt}$  (i)  $\frac{V_t^2}{r} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}$ ，單位： $\text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{h}^{-1}$ 。