

國立中央大學

大氣物理研究所

碩士論文

利用都卜勒雷達分析颱風風場結構  
- 2001 年納莉颱風

研究生：江晉孝

指導教授：陳台琦博士

中華民國九十二年六月



# 國立中央大學圖書館 碩博士論文授權書

(91年5月最新修正版)

本授權書所授權之論文全文與電子檔，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，基於推動讀者間「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、光碟、網路或其它各種方法收錄、重製、與發行，或再授權他人以各種方法重製與利用。以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： 江晉孝

論文名稱：利用都卜勒雷達分析颱風風場結構 - 2001年納莉颱風

指導教授姓名：陳台琦

系所：大氣物理 所 博士 碩士班

學號：90621004

日期：民國92年6月23日

備註：

1. 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）。
2. 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）。
3. 讀者基於個人非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印上列論文，應依著作權法相關規定辦理。

## 摘要

2001 年納莉颱風侵襲台灣，造成台灣極為嚴重的災害，本文使用五分山氣象雷達資料，運用 GBVTD 方法反演納莉颱風登陸前之水平分層的軸對稱切向風與徑向風，以及非軸對稱切向風，可由結果分析納莉颱風登陸前的回波及風場三維結構之變化。

本文首先利用不同的理想風場測試 GBVTD (Ground - Based Velocity Track Display) 方法，藉以瞭解 GBVTD 的誤差來源及準確性，當理想風場中軸對稱徑向風( $V_R C_0$ )與軸對稱切向風( $V_T C_0$ )維持一定比例下，隨著徑向風非軸對稱分量( $V_R C_1, V_R C_2, V_R S_1, V_R S_2$ )的增加，反演後的切向風相對誤差值亦隨之增加；而在徑向風的反演方面，在  $V_R$  高次項/ $V_R C_0$  接近 1 時，相對誤差值甚至逼近 100%，此結果顯示若忽略掉徑向風非軸對稱等項的值越高，反演出的結果就越失真。

納莉颱風在外海時，GBVTD 反演所得颱風的切向風以時間、空間連續性、颱風結構特性來推論發現結果十分合理，但徑向風則較不符合過去文獻之觀測，若以理想風場的結論我們得知海上颱風的徑向風高次項對切向風影響不大，對徑向風則造成較大的誤差，因徑向風高次項無從得知因此誤差大小無法估計。

本研究亦使用中正機場雷達與五分山氣象雷達資料，運用 RASTA(Radar Analysis System for Taiwan Area)技術對登陸後的納莉颱風做雙雷達風場之合成分析，並加以驗證 GBVTD 方法在颱風登陸後反演之適用性與準確性，同時藉由雙雷達合成後所得之水平分層的風場，分析納莉颱風登陸後風場的垂直結構與特性，結果發現徑向風高次項與軸對稱徑向風比例很大時，GBVTD 反演會高估軸對稱切向風，因此推測在陸地上因地形作用使用 GBVTD 方法需十分謹慎。

## 致謝

兩年的研究生涯是種新的體驗也是一種磨練，最感謝的是指導我的陳台琦老師，不斷鼓勵資質駑鈍的我，讓我有信心做好每一件事；同時也要感謝廖宇慶老師在觀念上的啟發、李文兆老師、林沛練老師以及口試委員謝信良局長、周仲島老師提供寶貴的建議；氣象局的周思運、鄧仁星、鄧財文、張保亮等四位學長在雷達資料處理與程式上的協助與幫忙，特別要感謝鍾高陞學長在課業解惑、生活上的幫助，讓我能順利通過層層考驗。

然而，讓我的研究生活能多采多姿的動力就是朋友啦！感謝文典學長與婉卿學姐在生活上的照顧；老鶴、錢之駿兩位我的好友，謝謝你們讓我在課業上、程式上有更深一層的瞭解，同時也讓我的生活充滿了歡笑，還有謝謝俊煌、佳佩、璿如、勝傑、玉璇、佩君、志翔、家幹、志文、仁豪、宜豪、闊顯等同窗好友的陪伴，下一屆的學弟妹：致穎、伯榮、雅茹、潔如、思瑩、舜華謝謝你們的幫忙，有了你們這些好友的研究生涯絕對會是我人生最值得留念的一段時光。

最後，要感謝的是我的祖母、父母親、大哥及關心我的親朋好友，對我的鼓勵與支持，讓我能心無旁騖的完成這本論文。這本論文對納莉颱風的研究尚屬初步階段，願能提供從事這方面研究的學弟妹們有些許的幫助。

# 目錄

|                   |     |
|-------------------|-----|
| 摘要                | i   |
| 致謝                | ii  |
| 目錄                | iii |
| 圖表說明              | v   |
| <br>              |     |
| 第一章：緒論            | 1   |
| 1-1：前言            | 1   |
| 1-2：論文回顧          | 1   |
| 1-3：研究動機          | 5   |
| <br>              |     |
| 第二章：資料來源與分析方法     | 6   |
| 2-1：資料來源          | 6   |
| 2-2：分析方法          | 6   |
| 2-2-1：RASTA 軟體的應用 | 6   |
| 2-2-2：颱風中心之定位     | 7   |
| 2-2-3：GBVTD 方法    | 8   |
| <br>              |     |
| 第三章：方法驗證與理想風場測試   | 9   |
| 3-1：方法的驗證         | 9   |
| 3-2：理想風場測試        | 11  |
| 3-3：測試總結          | 15  |
| <br>              |     |
| 第四章：個案分析          | 18  |
| 4-1：納莉颱風          | 18  |
| 4-2：登陸前雷達回波分析     | 19  |

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 4-3 : GBVTD 反演切向風場.....        | 21 |
| 4-4 : GBVTD 反演軸對稱徑向風場.....     | 24 |
| 4-5 : 登陸後風場合成分析.....           | 25 |
| 4-6 : 雙都卜勒雷達合成驗證 GBVTD 方法..... | 26 |
| <br>                           |    |
| 第五章 : 結論與展望.....               | 29 |
| 5-1 : 結論.....                  | 29 |
| 5-2 : 展望.....                  | 31 |
| <br>                           |    |
| 附錄 A : 雙都卜勒雷達三維風場的合成 .....     | 33 |
| 附錄 B : GBVTD 方法原理 .....        | 37 |
| 參考文獻 .....                     | 41 |
| 附圖 .....                       | 44 |
| 附表 .....                       | 87 |

## 圖表說明

- 圖 1-1：1980 年 8 月 5 日，Allen 颱風的垂直剖面示意圖。摘錄自 Jorgenson(1984b)。
- 圖 1-2：颱風雨帶複合體(SBC)之回波與流線示意圖。摘錄自 Willoughby et al.(1984)。
- 圖 1-3：1983 年 8 月 18 日，Alicia 颱風雨帶複合體(SBC)示意圖。摘錄自 Marks and Houze(1987)。
- 圖 1-4a：1983 年 8 月 18 日，Alicia 颱風次環流垂直剖面示意圖。摘錄自 Marks and Houze(1987)。
- 圖 1-4b：1983 年 8 月 18 日，Alicia 颱風次環流水平剖面與降水粒子軌跡示意圖。摘錄自 Marks and Houze(1987)。
- 圖 1-5：颱風眼之熱動力概念模式示意圖。摘錄自 Willoughby(1998)。
- 圖 1-6：颱風氣流之三維概念模式示意圖。摘錄自 Heymsfield et al.(2001)。
- 圖 2-1：颱風中心尋找示意圖，圖中星號為經由 VDAD 求得之颱風中心，分別計算此中心周圍四公里內 81 個點(網格間距為一公里)的軸對稱切向風量值大小，找到最大的軸對稱切向風量值即為颱風中心的所在位置。
- 圖 2-2：GBVTD 方法概念圖。摘錄自 Lee et al.(1999)。
- 圖 2-3：GBVTD 方法平面幾何關係圖。摘錄自 Lee et al.(1999)。
- 圖 2-4：GBVTD 程式將雷達觀測資料以颱風中心為原點取一圈 90 點資料示意圖。
- 圖 3-1：理想風場不考慮非軸對稱徑向風 --- 隨著  $V_{TC0}$  的改變，理想風場的切向風與 GBVTD 反演後的切向風之比較。
- 圖 3-2：理想風場不考慮非軸對稱徑向風 --- 隨著  $V_{TC0}$  的改變，理想風場的徑向風與 GBVTD 反演後的徑向風之比較。
- 圖 3-3：理想風場不考慮非軸對稱徑向風 --- 隨著  $V_{RC0}$  的改變，理想風場的切向風與 GBVTD 反演後的切向風之比較。

圖 3-4：理想風場不考慮非軸對稱徑向風 --- 隨著  $V_{RC0}$  的改變，理想風場的徑向風與 GBVTD 反演後的徑向風之比較。

圖 3-5：理想風場考慮非軸對稱徑向風 --- 隨著  $V_{TC0}$  的改變，理想風場的切向風與 GBVTD 反演後的切向風之比較。

圖 3-6：理想風場考慮非軸對稱徑向風 --- 隨著  $V_{TC0}$  的改變，理想風場的徑向風與 GBVTD 反演後的徑向風之比較。

圖 3-7：理想風場考慮非軸對稱徑向風 --- 隨著  $V_{RC0}$  的改變，理想風場的切向風與 GBVTD 反演後的切向風之比較。

圖 3-8：理想風場考慮非軸對稱徑向風 --- 隨著  $V_{RC0}$  的改變，理想風場的徑向風與 GBVTD 反演後的徑向風之比較。

圖 3-9：理想風場考慮非軸對稱徑向風 --- 隨著  $V_{RC1}$ ,  $V_{RC2}$ ,  $V_{RS1}$ ,  $V_{RS2}$  的改變，理想風場的切向風與 GBVTD 反演後的切向風之比較。

圖 3-10：理想風場考慮非軸對稱徑向風 --- 隨著  $V_{RC1}$ ,  $V_{RC2}$ ,  $V_{RS1}$ ,  $V_{RS2}$  的改變，理想風場的徑向風與 GBVTD 反演後的徑向風之比較。

圖 4-1：納莉颱風高度 3 公里的逐時回波場  
(a)0858UTC;(b)1002UTC;(c)1100UTC。

圖 4-2：納莉颱風高度 4.5 公里的逐時回波場  
(a)0858UTC;(b)1002UTC;(c)1100UTC。

圖 4-3：納莉颱風高度 6 公里的逐時回波場  
(a)0858UTC;(b)1002UTC;(c)1100UTC。

圖 4-4：納莉颱風高度 3 公里每六分鐘變化的回波場  
(a)1036UTC;(b)1042UTC;(c)1048UTC。

圖 4-5：納莉颱風高度 4.5 公里每六分鐘變化的回波場  
(a)1036UTC;(b)1042UTC;(c)1048UTC。

圖 4-6：納莉颱風高度 6 公里每六分鐘變化的回波場  
(a)1036UTC;(b)1042UTC;(c)1048UTC。

圖 4-7：高度 3 公里，以颱風中心為原點經由 GBVTD 反演後的切向風逐時變化(a)0858UTC;(b)1002UTC;(c)1100UTC，箭號為颱風移動方向。

- 圖 4-8 : 高度 4.5 公里，以颱風中心為原點經由 GBVTD 反演後的切向風逐時變化(a)0858UTC;(b)1002UTC;(c)1100UTC，箭號為颱風移動方向。
- 圖 4-9 : 高度 6 公里，以颱風中心為原點經由 GBVTD 反演後的切向風逐時變化(a)0858UTC;(b)1002UTC;(c)1100UTC，箭號為颱風移動方向。
- 圖 4-10 : 高度 3 公里，以颱風中心為原點經由 GBVTD 反演後的切向風-每六分鐘變化(a)1036UTC;(b)1042UTC;(c)1048UTC，箭號為颱風移動方向。
- 圖 4-11 : 高度 4.5 公里，以颱風中心為原點經由 GBVTD 反演後的切向風-每六分鐘變化(a)1036UTC;(b)1042UTC;(c)1048UTC，箭號為颱風移動方向。
- 圖 4-12 : 高度 6 公里，以颱風中心為原點經由 GBVTD 反演後的切向風-每六分鐘變化(a)1036UTC;(b)1042UTC;(c)1048UTC，箭號為颱風移動方向。
- 圖 4-13 : 納莉颱風軸對稱切向風分量( $V_T C_0$ )垂直剖面逐時變化示意圖。
- 圖 4-14 : 納莉颱風軸對稱切向風分量( $V_T C_0$ )垂直剖面六分鐘變化示意圖。
- 圖 4-15 : 最大風速半徑(RMW)隨高度向外傾斜示意圖(a)0858UTC~1100UTC;(b)1036UTC~1048UTC。
- 圖 4-16 : 納莉颱風軸對稱徑向風分量( $V_R C_0$ )垂直剖面逐時變化示意圖。
- 圖 4-17 : 納莉颱風軸對稱徑向風分量( $V_R C_0$ )垂直剖面逐時六分鐘變化示意圖。
- 圖 4-18 : 雙都卜勒雷達合成風場分析區域示意圖，此時颱風中心位於(-15, -55)。
- 圖 4-19 : 雙雷達合成之風場與回波示意圖(a)3.75km;(b)4.5km;(c)5.25km;(d)6km。

圖 4-20：合成風場在 X 方向的分量 (U) 示意圖  
(a)3.75km;(b)4.5km;(c)5.25km;(d)6km。

圖 4-21：合成風場在 Y 方向的分量 (V) 示意圖  
(a)3.75km;(b)4.5km;(c)5.25km;(d)6km。

圖 4-22：卡氏座標上的 U、V 分量合成颱風的切向風與徑向風  
(a) $V_T$ ;(b) $V_R$ 。

圖 4-23：高度 6 公里、距中心 22 公里經由雙雷達合成的 U、V 組合的風場(a)切向風;(b)徑向風。

圖 4-24：高度 6 公里、距中心 22 公里經由波數 2 組成的風場(a)切向風;(b)徑向風。

圖 4-25：高度 6 公里、距中心 22 公里經由 GBVTD 方法反演的風場(a)切向風;(b)徑向風。

圖 4-26：合成風場、僅取至波數 2 的合成風場、GBVTD 反演風場之比較(a)切向風;(b)徑向風。

表一：理想風場不考慮非軸對稱徑向風分量 -- 軸對稱切向風以間距 10 增加。

表二：理想風場不考慮非軸對稱徑向風分量 -- 軸對稱徑向風以間距 2 增加。

表三：理想風場考慮非軸對稱徑向風分量 -- 軸對稱切向風以間距 10 增加。

表四：理想風場考慮非軸對稱徑向風分量 -- 軸對稱徑向風以間距 1 增加。

表五：理想風場考慮非軸對稱徑向風分量 - 環境風場以間距 10 增加。

表六：理想風場考慮非軸對稱徑向風分量 - 非軸對稱徑向風以間距 1 增加。

表七：合成切向、徑向風場經傅利葉轉換所得波數值與 GBVTD 反演後的波數值之比較。

表八：雙雷達合成風場合回颱風的切向風場、徑向風場經傅利葉轉換後大於波數 2 的高次項。

# 第一章 緒論

## 1-1 前言

台灣位處西南太平洋，每年夏、秋兩季受颱風影響深遠，其所帶來豐沛的雨量亦為台灣地區主要的水源，然而近年來台灣地區因九二一地震所造成土質鬆軟又加上數個颱風連續的侵襲，所挾帶的強風、豪雨所造成山崩、土石流、淹水等災害不斷發生，也為台灣社會帶來經濟與生命上的衝擊。

納莉颱風 (Nari, 2001) 重創北台灣，造成北台灣捷運、市區淹水等災情，所造成之損失難以估算；而由於颱風與地形間交互作用，我們對其登陸前與登陸後的移動路徑、強度變化、降水分佈均未十分瞭解，因此本文藉由中央氣象局五分山(RCWF)雷達站觀測資料分析颱風登陸前的結構變化，並配合民航局中正機場(CAA)雷達站觀測登陸後的颱風資料，對納莉颱風做進一步的研究與探討，希望能對納莉颱風登陸前與登陸後的結構與特性有更深的瞭解。

## 1-2 論文回顧

Shea 與 Gray(1973)分析 22 個颱風後指出颱風的徑向風場最大輻合區與最大上升運動區位於最大風速半徑處( Radius of Maximum Wind, 簡稱 RMW )，然而 RMW 隨高度之變化並不明顯。

雷達觀測提供了高時間及空間解析度的資料，使人類對劇烈的中尺度天氣系統的結構能更加瞭解，進而對災害性的天氣系統之防治與應變能有更進一步的改進與準備。

隨著科技的進步，機載都卜勒雷達(airborne)亦加入氣象觀測，最早被應用於觀測熱帶氣旋 Debby(Marks and Houze, 1984)，之後 Jorgenson(1984a、b)針對四個颱風的飛機觀測資料做合成分析指出颱風的降水結構可區分為三部分：眼牆對流降水區、眼牆外層狀降水區及其他對流與層狀降水之雨帶。眼牆區伴隨著最大切向風與強降

水，而颱風低層的徑向內流與眼心的外流在眼牆內緣處輻合，產生強烈的上升運動，而伴隨著水汽凝結會產生強回波亦即強降水現象。眼牆的強回波軸會隨著高度向外傾斜，然而當颱風眼的半徑縮小時，強回波軸的傾斜幅度亦隨之減小。

Jorgenson(1984b)分析 Allen 颱風的內部結構如(圖 1-1)所示，發現低層徑向內流在進入眼牆降水區後會減速並在眼牆處輻合產生上升氣流，而最大上升運動區則位於 RMW 內數公里，颱風在增強階段時，此上升運動可將低層動量往上傳輸至高層，使切向風速增加並導致眼牆往內收縮，伴隨著眼牆上升運動之下沈氣流區沿著眼牆內邊緣其範圍約 10~20 公里；眼牆外有大範圍層狀降水區，此區垂直速度相當微弱，在融解層附近參雜著液態水與冰晶，在雷達回波圖上可見到明顯的亮帶(bright band)存在。

Willoughby(1977)指出某些颱風的雨帶呈現類似重力波移動方式的水平結構，然而也有相當多的颱風則在相對於颱風中心的固定位置上存在一些螺旋雨帶，尤其在東側較為明顯。Willoughby et al. (1984)稱這些螺旋雨帶結構為” 滯性雨帶複合體”(Stationary Band Complex, 簡稱 SBC)，如(圖 1-2)所示，SBC 包含三部分：主要雨帶(principal band)、連接雨帶(connecting band)、次要雨帶(secondary band)；主要雨帶是由颱風渦旋中心的一側向外延伸的螺旋雨帶，其對流胞分佈在雨帶靠近颱風中心側，當颱風增強至一定程度時，主要雨帶與眼牆並不一定會相連。連接雨帶則是連接眼牆與主要雨帶之間的橋樑，此雨帶內大部分為層狀降水，僅有少數對流胞出現。次要雨帶位於眼牆與主要雨帶之間，大部分為較微弱的淺對流所組成。當颱風增強時，SBC 會發展成對流環，並往颱風中心收縮，主要雨帶相對於颱風中心有氣旋式旋入，此時颱風的路徑會較不穩定；反之若雨帶位置相對於颱風中心較為固定，則其路徑亦較為穩定。

Marks and Houze(1987)利用機載雷達配合地面雷達觀測 Alicia 颱風，並做雙都卜勒雷達分析，由回波圖中可明顯看出類似 SBC 雨帶結構(圖 1-3)與切向風場隨高度向外傾斜之特性。同時也對颱風的次環流結構作深入的分析，如(圖 1-4a)所示，在低層 2~4.5KM 高度內有最大徑向內流，而高層約 10KM~14KM 處則有最大徑向外流；眼牆內則有對流尺度的上升與下降氣流，上升氣流在 6KM 以上出現最大值，而眼牆外的層狀降水區中，以融解層(高度約 4~6KM)為分界，融解層上方有微弱的中尺度上升氣流，融解層下方則為下降氣流；眼牆內降水粒子之運動軌跡為(圖 1-4b)所示兩種路徑。

許多學者對颱風內部的環流做深入的探討；如 Shapiro and Willoughby(1982)利用模式得知眼牆中的對流軸隨高度向外傾斜，且當上升氣流造成潛熱釋放的熱源在 RMW 附近時，颱風的強度會隨之增強；Ooyama(1982)也認為眼牆內有組織的上升氣流是維持颱風強度的主要機制之一。Willoughby(1988)提出颱風在水平面上為軸對稱的氣旋式環流，而在主環流之外則有較弱的不對稱水平運動及垂直次環流，垂直次環流是由低層的徑向內流在眼牆處輻合上升，在中對流層有深對流的形成，而在高對流層則有徑向外流向外輻散，並且有一部份流向颱風眼中心，產生微弱的下沉運動，次環流在颱風的能量平衡與強度上扮演極為重要的角色。

對於颱風眼內的熱力與動力特性，Willoughby(1998)經由探空資料分析 Olivia、Jimena、Hugo、Flo 等 4 個颱風，提出了概念模式詳細描述颱風眼的熱動力結構(圖 1-5)：(1)颱風眼以逆溫層為分隔，逆溫層上為乾空氣、逆溫層下則為濕空氣(2)因蒸發而產生的下沉氣流會沿著眼牆內側邊緣下沉至逆溫層底(3)颱風眼內因熱力與動力產生之下沉氣流會使颱風眼內氣柱絕熱增溫(4)摩擦內流受眼牆上升運動與浮力作用會向上至高層輻散。

由於颱風在海上時，我們以單雷達觀測所能得知的資訊相當有限，因此如何利用單雷達觀測資料並利用各種反演技術進而獲取更多關於颱風的訊息即為重要的課題。Lee et al. (1999)以單都卜勒雷達徑向風場資料，針對颱風風場近似軸對稱的特性與幾何關係，利用傅氏級數轉換建立 GBVTD 方法 (Ground-Based Velocity Track Display)，反演 Alex 颱風水平分層的軸對稱及非軸對稱切向風、軸對稱徑向風等定性與定量結構，有助於瞭解颱風風場的三維結構變化。

Lee and Marks (2000)認為 GBVTD 方法與颱風中心定位有密不可分之關連，因此針對中心定位提出 GBVTD-simplex 演算法，經由模式測試得知誤差僅為 340m，而將此方法應用在 1987 年 ALEX 颱風上，所得誤差約為 2km，顯示此方法可提高颱風中心定位之準確性。

Lee et al. (2000)利用 GBVTD 方法反演 ALEX 颱風之軸對稱徑向風，計算其軸對稱的水平輻散場與垂直速度，同時也利用軸對稱切向風計算無摩擦狀況下單位質量的軸對稱角動量及梯度風近似下的軸對稱擾動氣壓場。

Teng et al. (2000)在追隨地勢座標下建立處理雷達資料的方法，其名稱為台灣地區雷達分析系統 (Radar Analysis System for Taiwan Area，簡稱為 RASTA)，此方法運用在複雜的台灣地形上，不僅可將低層因地形所造成之雜波扣除，亦可在雙雷達合成分析時，降低邊界垂直速度估算的誤差，進而求取系統的三維風場與熱動力結構，此方法對於颱風登陸後的結構分析有相當大的助益。

Heymsfield et al. (2001)研究 Bonnie (1998) 颱風在增強期結束期間對流爆流 (convective burst) 與颱風強度的關聯，提出了三維概念模式 (圖 1-6)，模式中認為颱風增強時期，當旺盛的上升氣流由底層流入對流層頂，則在眼牆內側的對流層頂有強的下沉運動，此下沉運動為上升氣流之補償流，其從平流層所挾帶而下的暖乾空氣是造成

颱風眼暖心的主要因素，然而在颱風減弱時期，上升氣流較弱，因此在眼牆內側就無補償流之產生。

### 1-3 研究動機

2001 年台灣遭受數個颱風連續侵襲，尤其以路徑詭異的納莉颱風令人印象深刻。納莉颱風的行徑速度緩慢造成台灣地區因連日豪雨而造成多處淹水、山崩、土石流等災情頻傳；納莉颱風帶來的單日降雨量亦刷新了歷史紀錄，北台灣捷運及鐵路支線也因淹水而造成交通停擺，全台灣經濟損失約上百億元。

因此研究納莉颱風回波與風場的三維結構變化、颱風登陸後地形與風場之交互作用，所造成之降水區域及降水強度等相關課題，希望對納莉颱風能有進一步的瞭解與探討。

本文的動機主要有下列幾大項：(1)運用理想風場測試 GBVTD 的誤差來源及限制；(2)運用 GBVTD 方法研究海面上的颱風並探討其物理現象(3)利用 RASTA 軟體分析登陸後的颱風結構；(4)驗證 GBVTD 方法在登陸之後的準確性。

中央氣象局五分山雷達與民航局中正機場雷達皆提供了高時間及空間解析度的觀測資料。颱風登陸之後，此兩雷達可提供詳細資料在某特定區域內做雙都卜勒雷達風場合成，進而能瞭解颱風登陸後其垂直、水平方向風場的分布與變化。

## 第二章 資料來源與分析方法

### 2-1 資料來源

本文所使用的資料如下列所示：

五分山都卜勒雷達(RCWF)資料;五分山都卜勒雷達座落於台灣東北方，位置為北緯 25.0442 度、東經 121.4622 度，標高 0.766 公里，觀測半徑為 240 公里。對於降水系統有 0.5°、1.45°、2.4°、3.35°、4.3°、5.25°、6.2°、7.5°、8.7°、10°、12°、14°、16.7°、19.5° 等 14 種仰角的 VCP11 掃描策略及 0.5°、1.45°、2.4°、3.35°、4.3°、6°、9.9°、14.6°、19.5° 等 9 種仰角的 VCP21 掃描策略。而 2001 年納莉颱風之觀測則採用 VCP21 掃描策略。

分析時間為：2001 年 9 月 16 日 0858UTC、1002UTC、1007UTC、1013UTC、1019UTC、1025UTC、1031UTC、1036UTC、1042UTC、1048UTC、1054UTC、1100UTC、1203UTC、1301UTC、1601UTC。每個時間皆有一組徑向風場與回波場資料。

中正機場都卜勒雷達(CAA)資料;中正機場都卜勒雷達位於北緯 25.0778 度、東經 121.2094 度，高度 0.027 公里，觀測半徑為 120 公里;共有 0.5°、1°、1.5°、2°、3°、4°、5°、6°、7°、8°、9°、10°、11°、12°、13°、14°、15°、16.5°、18.5°、19.5° 等 20 種仰角。

分析時間為：2001 年 9 月 17 日 0000LST。每個時間皆有一組徑向風場與回波場資料。

### 2-2 分析方法

#### 2-2-1. RASTA 軟體的應用

處理雷達資料過程中，主要應用鄧(1999)發展的台灣地區雷達分析系統(Radar Analysis System for Taiwan Area，簡稱為 RASTA)，此系統分為兩部分，第一部份為球面座標下的都卜勒雷達

處理及顯示系統，第二部分為追隨地勢座標下的都卜勒雷達處理及顯示系統。

利用 RASTA 軟體可將因低仰角掃描所造成的地面回波去除及對徑向風場折疊校正做處理；而在風場合成方面，能有效降低以往雷達軟體做雙都卜勒雷達風場合成時，在複雜地形區域(如台灣)之下邊界垂直速度的誤差。

有關追隨地勢座標下雙都卜勒合成風場的計算方法、垂直速度之求取以及三維風場的變分調節，參照 Teng et al.(2000)，詳見附錄 A。

## 2-2-2. 颱風中心之定位

### A. VDAD 方法

颱風環流中心的定義，對於 GBVTD 方法有顯著的影響，因此本文參考周等人(1996)提出的 VDAD(Velocity-Distance Azimuth Display) 方法，利用雷達觀測的都卜勒水平速度( $V_r$ )與各觀測點至雷達之距離( $D$ )兩者的乘積，由此乘積之極大值與極小值對應之中點，定為颱風中心位置；而兩個極值相對距離的一半即為最大風速半徑，利用此方法對每個時間之各層高度做中心定位之處理。

由 VDAD 方法定位出的颱風中心，我們發現此颱風中心在垂直分層上並沒有相當良好的連續性，因此我們再加以運用類似 simplex 方法來修正颱風中心的定位。

### B. 尋找軸對稱切向風場最大值之定位方法

根據上述定位所遇到的困難，本文亦將 VDAD 方法定出的颱風中心，分別計算此中心周圍四公里內的 81 個點(圖 2-1 所示，網格間距為一公里)其軸對稱切向風量值( $V_T C_0$ )大小，找到最大的軸對稱切向風量值即為颱風中心的所在位置。

### 2-2-3. GBVTD 方法

為瞭解颱風的風場結構與特徵，本文利用 Lee et al.(1999)提出的 GBVTD(Ground - Based Velocity Track Display)方法，針對颱風環流風場近似軸對稱的特性，使用幾何方法將雷達觀測的徑向速度以傅利葉級數展開，進而求取颱風的軸對稱、非軸對稱切向風場及軸對稱的徑向風場，圖 2-2 為 GBVTD 方法概念圖，而圖 2-3 則為平面幾何示意圖，詳細之原理見附錄 B。

本研究引進李文兆博士與台大 P3 實驗室共同發展的 GBVTD 程式，在前置處理上運用 RASTA 軟體對雷達觀測資料做各高度的風場折疊與錯誤資料校正的處理，並去除不合理的雜波與地形回波之後，將網格點資料放入 GBVTD 程式。

以颱風中心為原點以間隔一公里向外取一圈資料，各圈的起始點以雷達為原點通過颱風中心的連線與颱風環流相交點，並沿著逆時針方向取 90 點資料(圖 2-4)，若有遺缺資料則在 GBVTD 程式中使用最小平方法會做填補的動作，而所取的圈數則取決於颱風與雷達之間的距離，若颱風越靠近雷達則所能取的資料圈數就越少，再將經由 GBVTD 程式所求得之颱風切向風與颱風徑向風合成回雷達觀測的雷達徑向速度與原始雷達觀測的雷達徑向速度做驗證，此步驟僅證實引進程式後之流程無誤，但無法證實所反演的颱風切向風與徑向風分量是否正確，因此下一章節會以理想風場做討論。

### 第三章 方法驗證與理想風場測試

Lee et al. (1999)發展的 GBVTD 方法，利用登陸前颱風環流近似軸對稱的特性，使用幾何方法將雷達觀測的雷達徑向速度予以傅利葉級數展開，可求得颱風的軸對稱( $V_T C_0$ )與非軸對稱( $V_T C_1, V_T C_2, V_T S_1, V_T S_2$ )切向風場、軸對稱徑向風場( $V_R C_0$ )；然而在求解過程中，僅取軸對稱的徑向風分量( $V_R C_0$ )，而忽略非軸對稱等高波數項的徑向風分量( $V_R C_1, V_R C_2, V_R S_1, V_R S_2$ )，因此本章針對忽略徑向風場的高波數非軸對稱項與反演結果之關係做探討與測試。

#### 3-1 方法的驗證

本章節中，我們想驗證的是經由省略徑向風場非軸對稱高次項後僅剩餘的七項 $[V_T C_0, V_T C_1, V_T C_2, V_T S_1, V_T S_2, V_R C_0, V_M \cos(\theta_T - \theta_M)]$ ，合回雷達觀測到的雷達徑向速度，與不省略徑向風場非軸對稱高次項時所有十一項 $[V_T C_0, V_T C_1, V_T C_2, V_T S_1, V_T S_2, V_R C_0, V_M \cos(\theta_T - \theta_M), V_R C_1, V_R C_2, V_R S_1, V_R S_2]$ 合回的雷達徑向速度此兩者為相等關係，此結果表示我們若僅以七項數值合回原始雷達徑向速度並無法解釋切向風與徑向風在反演時的誤差量值。

首先針對附錄 B 中的(B6)~(B9)式提出討論：

$$\frac{\hat{V}_r}{\cos\phi} \approx V_M \left[ \cos(\theta_T - \theta_M) \left( \frac{1 - \cos\alpha_{\max}}{2} \cos 2\psi + \frac{1 + \cos\alpha_{\max}}{2} \right) - \sin(\theta_T - \theta_M) \sin\alpha_{\max} \sin\psi \right] - V_T \sin\psi + V_R \cos\psi \quad (\text{B6})$$

$$\frac{\hat{V}_r(\psi)}{\cos\phi} = \sum_0^L (A_n \cos n\psi + B_n \sin n\psi) \quad (\text{B7})$$

$$V_T(\psi) = \sum_0^M (V_T C_n \cos n\psi + V_T S_n \sin n\psi) \quad (\text{B8})$$

$$V_R(\psi) = \sum_0^N (V_R C_n \cos n\psi + V_R S_n \sin n\psi) \quad (\text{B9})$$

然而經由三角函數轉換與比較係數我們可以得到下列關係式：

$$V_M \cos(\theta_T - \theta_M) = A_0 + A_2 - V_R C_1 \quad (\text{B19})$$

$$V_T C_0 = -B_1 - B_3 + V_R S_2 - V_M \sin(\theta_T - \theta_M) \sin \alpha_{\max} \quad (\text{B20})$$

$$V_T C_1 = -2B_2 + V_R S_1 \quad (\text{B21})$$

$$V_T C_2 = -2B_3 + V_R S_2 \quad (\text{B22})$$

$$V_T S_1 = A_2 - A_0 + (A_0 + A_2 - V_R C_1) \cos \alpha_{\max} \quad (\text{B23})$$

$$V_T S_2 = 2A_3 - V_R C_2 \quad (\text{B24})$$

$$V_R C_0 = A_1 + A_3 - V_R C_2 \quad (\text{B25})$$

僅考慮颱風徑向風場的軸對稱項( $V_R C_0$ )，可簡化(B19)~(B25)式：

$$V_M \cos(\theta_T - \theta_M) = A_0 + A_2 \quad (\text{B26})$$

$$V_T C_0 = -B_1 - B_3 - V_M \sin(\theta_T - \theta_M) \sin \alpha_{\max} \quad (\text{B27})$$

$$V_T C_1 = -2B_2 \quad (\text{B28})$$

$$V_T C_2 = -2B_3 \quad (\text{B29})$$

$$V_T S_1 = A_2 - A_0 + (A_0 + A_2) \cos \alpha_{\max} \quad (\text{B30})$$

$$V_T S_2 = 2A_3 \quad (\text{B31})$$

$$V_R C_0 = A_1 + A_3 \quad (\text{B32})$$

(B19)~(B25)式為雷達徑向速度的分解(共 11 項未知數)。

(B26)~(B32)式為因求解需要而簡化後的雷達觀測徑向速度的分解(共 7 項未知數)。

|      |     |
|------|-----|
| 11 項 | 7 項 |
|------|-----|

$$\begin{aligned} (\text{B19}) - (\text{B26}) &\rightarrow V_M \cos(\theta_T - \theta_M) - V_M \cos(\theta_T - \theta_M) = -V_R C_1 \quad (\text{A}) \\ (\text{B20}) - (\text{B27}) &\rightarrow V_T C_0 - V_T C_0 = V_R S_2 \\ &\quad - V_M \sin(\theta_T - \theta_M) \sin \alpha_{\max} \quad (\text{B}) \\ (\text{B21}) - (\text{B28}) &\rightarrow V_T C_1 - V_T C_1 = V_R S_1 \quad (\text{C}) \\ (\text{B22}) - (\text{B29}) &\rightarrow V_T C_2 - V_T C_2 = V_R S_2 \quad (\text{D}) \\ (\text{B23}) - (\text{B30}) &\rightarrow V_T S_1 - V_T S_1 = -V_R C_1 \cos \alpha_{\max} \quad (\text{E}) \\ (\text{B24}) - (\text{B31}) &\rightarrow V_T S_2 - V_T S_2 = -V_R C_2 \quad (\text{F}) \\ (\text{B25}) - (\text{B32}) &\rightarrow V_R C_0 - V_R C_0 = -V_R C_2 \quad (\text{G}) \end{aligned}$$

- ◆ 將 B(26)~B(32){7 項解}代入 B(8), B(9)替換後，再代入 B(6)右式
- ◆ 將 B(19)~B(25){11 項解}代入 B(8), B(9)替換後，再代入 B(6)右式

可以得到  $\frac{\hat{V}_r}{\cos\phi}$  (7 項解)及  $\frac{\hat{V}_r}{\cos\phi}$  (11 項解)

將此兩項相減後代入(A)~(G)之關係式，我們可以得到結果全部消去為零，因此證明此兩項為相等。

由以上的推導可得知，GBVTD 方法雖然在求解過程中省略了颱風的徑向風場高次項，但是經由計算結果我們發現消去這些高次項後，利用所解出颱風的切向風場、徑向風場投影至雷達電磁波束上的雷達徑向速度與原始觀測的雷達徑向速度相符合，因此只取徑向風場軸對稱項仍然可以合成正確的雷達徑向速度，由此可知儘管颱風的徑向風場存在很高的波數項也無法從雷達徑向速度合成結果正確而推知誤差的大小。

### 3-2 理想風場測試

由本節開始所有切向風與徑向風皆代表以颱風為中心的颱風切向風與颱風徑向風。

上一節的討論，主要驗證在計算過程中忽略颱風徑向風場高波數項後，經由軸對稱徑向風場與軸對稱、非軸對稱切向風場投影至雷達波束後之雷達徑向速度與雷達觀測的雷達徑向速度是相符合的。

本節則設計不同的理想風場對 GBVTD 方法做測試，希望能以不同的切向風與徑向風比例配置，瞭解 GBVTD 誤差來源。

1. 定義方均根誤差(root mean square error) 為：

$$rms \quad error = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{90} (OV - RV)^2}{90}}$$

其中  $OV$ ：理想的切向風場 or 徑向風場。

$RV$ ：反演所得的切向風場 or 徑向風場。

90 點：每圈各有 90 個資料點。

2. 定義相對誤差(relative error)為：

$$relative \quad error = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{90} (OV - RV)^2}{90}}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{90} (OV)^2}{90}}}$$

理想風場的設定：以颱風中心為原點，設計一圈有 90 個資料點的風場，在測試過程中，將理想風場再細分為不考慮非軸對稱徑向風分量( $V_{RC_1}, V_{RC_2}, V_{RS_1}, V_{RS_2}$ )及考慮非軸對稱徑向風分量兩種情況，針對此兩種情況利用切向風場的各波數項與徑向風場的各波數項之比例，配合環境駛流風場的改變，探討 GBVTD 方法之誤差來源。

### 3-2-1. 不考慮非軸對稱徑向風分量

當理想風場不考慮非軸對稱徑向風分量時，且固定環境風場( $V_M$ )、軸對稱徑向風( $V_{RC_0}$ )與非軸對稱切向風( $V_{TC_1}, V_{TC_2}, V_{TS_1}, V_{TS_2}$ )分量，僅改變軸對稱切向風分量( $V_{TC_0}$ )，測試結果由(表一)得知在此情況下，切向風與徑向風各分量值反演結果與理想風場方均根誤差約 1~2.52 m/s，但因切向風數量級比徑向風數量級大，因此切向風的相對誤差僅 0.02，而徑向風的相對誤差則為 0.11~0.25，而由此測試中亦可發現當  $V_{TC_0}$  增加時，切向風相對誤差幾乎不變，但徑向風相

對誤差則有些微增加的趨勢;圖 3-1 為理想切向風與反演後的切向風之比對,圖 3-2 為理想徑向風與反演後的徑向風之比對。

若固定切向風所有分量及環境風場( $V_M$ ),僅改變軸對稱徑向風( $V_R C_0$ ),我們可由(表二)發現,切向風的方均根誤差約為 1m/s 而相對誤差則為 0.02;另外徑向風的方均誤差約為 2m/s 其相對誤差為 0.11~0.18,而結果亦顯示切向風相對誤差不隨著 $V_R C_0$ 增加而有太大的變化,但徑向風的相對誤差則會因 $V_R C_0$ 的增加而隨之減低;圖 3-3 為理想切向風與反演後的切向風之比對,圖 3-4 為理想徑向風與反演後的徑向風之比對。

由上述測試結果顯示,徑向風場因其數量級比切向風場數量級小很多,因此在不考慮非軸對稱徑向風分量時,經 GBVTD 方法反演後所得的切向風方均根誤差值僅為 1m/s,此誤差對切向風而言微乎其微,而經 GBVTD 方法反演所得的徑向風方均根誤差值約為 2 m/s,對數量級較小的徑向風而言會有較大的相對誤差,因 GBVTD 程式中使用最小平方法求解會有誤差值產生,因此這些誤差僅屬於計算上的誤差值,由上述測試我們發現 $V_R C_0 / V_T C_0$ 越大,徑向風的反演就越正確。

### 3-2-2. 考慮非軸對稱徑向風分量

當理想風場考慮非軸對稱徑向風分量,若先固定徑向風所有分量、環境風場( $V_M$ )及非軸對稱切向風( $V_T C_1, V_T C_2, V_T S_1, V_T S_2$ )分量,僅改變軸對稱切向風分量( $V_T C_0$ ),經由(表三)的反演測試後,可瞭解在此情況下切向風的方均根誤差隨著 $V_T C_0$ 的增加而由 0.19 降低至 0.06,但相較(表一)、(表二)的反演測試我們發現切向風的相對誤差值有明顯偏高的情況;而徑向風場的反演結果亦顯示其方均根誤差隨 $V_T C_0$ 增加而隨之增加,且相對誤差都維持在 0.37~0.47,此測試中我們發

現在考慮非軸對稱徑向風分量後，反演後所有風場的相對誤差值會隨之加大；圖 3-5 為理想切向風與反演後的切向風之比對，圖 3-6 為理想徑向風與反演後的徑向風之比對。

若照上述情況我們將改變的對象換成軸對稱徑向風分量 ( $V_R C_0$ )，其餘的風場皆不改變，測試結果(表四)指出，當  $V_R C_0$  增大時切向風的方均根誤差與相對誤差幾乎不變，但是徑向風的相對誤差從 0.85 降至 0.52，顯示當  $V_R C_0$  很小時有很嚴重的相對誤差值發生，此情況將會嚴重的影響反演後所得徑向風的結果；圖 3-7 為理想切向風與反演後的切向風之比對，圖 3-8 為理想徑向風與反演後的徑向風之比對。

此外，我們亦將理想風場中的環境風場 ( $V_M$ ) 量值加以改變，其餘的風場分量皆設為固定不變，由(表五)我們可以發現不管環境風場大小為何，切向風場的相對誤差皆維持在 0.06，而徑向風場的相對誤差亦維持在 0.47，由此可知環境風場的改變對反演的結果影響並不大。

若改變了非軸對稱徑向風 ( $V_R C_1, V_R C_2, V_R S_1, V_R S_2$ ) 分量的值，而固定其他風場，經由(表六)我們發現當非軸對稱徑向風分量越高時，反演後的切向風場的相對誤差值亦由 0.09 增加至 0.2，徑向風的相對誤差值則由 0.6 暴增至 0.93，在此狀況下徑向風場的反演將與理想風場所給定的徑向風場相距甚大，因此 GBVTD 所反演出之結果將會嚴重的失真；圖 3-9 為理想切向風與反演後的切向風之比對，圖 3-10 為理想徑向風與反演後的徑向風之比對。

### 3-3 測試總結

綜合上述在不同的理想風場配置下所得的結果，我們發現在第一部分不考慮非軸對稱徑向風場( $V_R C_1, V_R C_2, V_R S_1, V_R S_2$ )分量時，切向風與徑向風的方均根誤差僅為 1~2.5 m/s，但因徑向風數量級相對於切向風數量級為小，因此徑向風的相對誤差會比切向風來的大。

我們由附錄 B 的(B19~B25 式)來討論：在第一部份中因為理想風場不考慮非軸對稱徑向風分量，然而 GBVTD 方法求解時，會因方程式個數少於未知數個數而必須消去非軸對稱徑向風場分量的假設，亦即下列 B19~B25 式裡省略 $V_R C_1, V_R C_2, V_R S_1, V_R S_2$ 等項，在此就不會影響 GBVTD 方法反演後所得的結果，而測試中所產生些微的誤差則應為計算誤差。

$$V_M \cos(\theta_T - \theta_M) = A_0 + A_2 - V_R C_1 \quad (\text{B19})$$

$$V_T C_0 = -B_1 - B_3 + V_R S_2 - V_M \sin(\theta_T - \theta_M) \sin \alpha_{\max} \quad (\text{B20})$$

$$V_T C_1 = -2B_2 + V_R S_1 \quad (\text{B21})$$

$$V_T C_2 = -2B_3 + V_R S_2 \quad (\text{B22})$$

$$V_T S_1 = A_2 - A_0 + (A_0 + A_2 - V_R C_1) \cos \alpha_{\max} \quad (\text{B23})$$

$$V_T S_2 = 2A_3 - V_R C_2 \quad (\text{B24})$$

$$V_R C_0 = A_1 + A_3 - V_R C_2 \quad (\text{B25})$$

而第二部分中，我們考慮颱風的徑向風不僅為軸對稱的狀況，因此理想風場中加入非軸對稱徑向風場( $V_R C_1, V_R C_2, V_R S_1, V_R S_2$ )分量，根據(表三)到(表五)的反演測試結果顯示，固定 $V_M, V_R C_0, V_R C_1, V_R C_2, V_R S_1, V_R S_2$ 時，若 $V_T C_0$ 增加時反演後的切向風方均根誤差會隨之降低，而徑向風的方均根誤差則隨之增加；若是固定 $V_M, V_T C_0, V_R C_1, V_R C_2, V_R S_1, V_R S_2$ ，而 $V_R C_0$ 增加時反演後的切向風方均根誤差會隨之微幅增加，但增加的幅度不明顯，而徑向風的方均根誤差則

幾乎不變，但當 $V_R C_0$ 越小則反演後的徑向風相對誤差會越大；而僅改變 $V_M$ 時，反演後切向風與徑向風的方均根誤差幾乎不變，但總體而言在理想風場為非軸對稱颱風時，反演後的切向風及徑向風的方均根誤差均大於軸對稱颱風反演後的方均根誤差，而比較大的誤差則會導致徑向風場的反演有誤判的情形。

針對上述的誤判情形，(表六)藉著 $V_R C_1, V_R C_2, V_R S_1, V_R S_2$ 的改變，探討徑向風非軸對稱分量的量值越高對反演結果之影響，結果顯示非軸對稱量值越高，切向風及徑向風的方均根誤差也越高，因此在 $V_R C_0 / V_T C_0 = 0.16$ 、 $V_R$ 高次項/ $V_R C_0 = 0.7$ 情況下，相對誤差甚至大到0.93，此結果明確的告訴我們，若忽略掉 $V_R C_1, V_R C_2, V_R S_1, V_R S_2$ 等項的值越高，反演出的結果就越失真，因此若在大自然真實個案中，遇到上述情形則GBVTD方法所反演出的徑向風場將會有嚴重的誤差。

同樣的我們若從附錄B的(B19~B25)式討論上述結果，在第二部分中因考慮徑向風的非軸對稱分量，而我們在求解時忽略了這些分量的量值，因此會產生反演失真的情形，其中B19式、B23式、B24式、B25式中 $V_R C_1, V_R C_2$ 前面皆為負號，而我們在GBVTD方法求解時忽略這幾項因此會使反演結果( $V_M, V_T S_1, V_T S_2, V_R C_0$ )會有高估的情形；然而B20式、B21式、B22式三式中因 $V_R S_1, V_R S_2$ 前面皆為正號，因此反演結果( $V_T C_0, V_T C_1, V_T C_2$ )會有低估的情形，此結果也與(表三)~(表六)反演結果結果吻合，而我們亦從(表六)的測試證實了若徑向風非軸對稱分量值越高，反演的結果與真實的風場誤差越大。

GBVTD方法中，因切向風( $V_T$ )各分量與徑向風( $V_R$ )的各分量，相互的牽絆因此造成互補的情形，雖然可以正確合成回雷達觀測的都卜勒速度場，在真實個案中若颱風為一軸對稱風場結構，則GBVTD假設

的解法可以完整的反演出其風場結構，但若真實颱風的徑向風非軸對稱分量越強，則 GBVTD 法反演出來的風場結構就失真越多，尤其是在徑向風場的反演上，將會有誤判情況發生。

## 第四章 個案分析

前一章節僅對 GBVTD 方法做理想風場的測試與探討，本章則對真實個案做分析，主要分為三個大方向：(1)納莉颱風登陸前回波結構在空間上與時間上是否有連續性，再運用 GBVTD 方法求得納莉颱風登陸前其風場結構分佈情形，並針對其物理特性做討論。(2)納莉颱風登陸後我們使用 RASTA 軟體做雙都卜勒雷達風場合成，並研究其登陸後的風場變化與垂直結構特性。(3)利用雙都卜勒雷達合成的風場對 GBVTD 方法做驗證，希望能對登陸後的納莉颱風有進一步的瞭解。

### 4-1 納莉颱風

納莉颱風於 9 月 6 日在台灣東北方海面生成，以緩慢的速度朝東北方向的琉球那霸移動，8 日轉向西北西方向移動，但 10 日又東移至琉球那霸附近海面打轉，直到 13 日才再次折回並緩慢的往台灣而來，中央氣象局在 15 日凌晨 2 點 45 分發佈海上陸上颱風警報，此時納莉颱風為輕度颱風，中心氣壓 975 百帕，近中心最大風速 30 m/s，位在台灣東北東方約 370 公里的海面上，以每小時 12 公里的行進速度朝西南方向直撲台灣而來。15 日 20 時納莉颱風增強為中度颱風，中心氣壓降至 970 百帕，近中心最大風速增強至 33 m/s，但行進速度減緩每小時僅 6 公里。16 日 20 時 30 分距基隆東南東方約 60 公里海面上，其強度再次增強，中心氣壓降至 960 百帕，近中心最大風速達 40 m/s，而在 16 日 21 時 40 分納莉颱風在三貂角及宜蘭頭城附近登陸，歷經 49 小時後納莉颱風才由台南安平附近進入台灣海峽南部，並加速移至廣東省即轉弱為熱帶性低氣壓。

納莉颱風其詭異的路徑及在台灣滯留期間過長，為台灣地區帶來了豐沛雨量，9 月 16 日至 17 日兩天在宜蘭土場、台北陽明山降下了超過 1000 公釐的雨量，而台北市區的南港、天母亦有近 800 公釐的累積雨量，造成北台灣捷運及火車站等多處交通設施淹水；同時山區

亦引發土石流。

## 4-2 登陸前雷達回波分析

本文所使用的回波場主要是將五分山的雷達回波資料利用 RASTA 軟體差分至追隨地勢座標上，以五分山雷達為原點，X 方向為-10km ~130km、Y 方向為-70km ~70km，垂直方向上每一層的間距為 0.75km，共取 12 層資料，並針對納莉颱風登陸前在 0858UTC、1002UTC、1100UTC 等三個小時的回波逐時變化做分析，同時我們亦分析 1002UTC~1100UTC 之間每六分鐘一筆的回波場變化，並發現在 1036UTC、1042UTC、1048UTC 三個時間納莉颱風有短暫的增強與減弱之現象。

### 4-2-1. 回波場逐時變化分析

首先我們先分析回波場的逐時變化，(圖 4-1. a、b、c)所示在高度 3 公里，0858UTC 強回波區( >35dBZ )呈現帶狀分佈，且強回波區僅在颱風中心西南側較不明顯；1002UTC 強回波區較為完整不似 0858UTC 呈現帶狀分佈型態，涵蓋範圍主要在颱風中心的東北至東南側；1100UTC 我們發現大於 40dBZ 的強回波所涵蓋的範圍較前兩個小時來的大，且有大於 45dBZ 的回波值出現，顯示在此時間颱風的對流正處於增強階段，而主要雨帶仍然位於颱風中心的東側，與 0858UTC、1002UTC 分佈一致。

高度 4.5 公里(圖 4-2. a、b、c)所示，大於 35dBZ 的強回波區涵蓋範圍較高度 3 公里來的小，但仍然維持在颱風中心的東北至東南側，0858UTC 強回波區出現的區域較為鬆散，但偶而有大於 40dBZ 的零星對流產生；1002UTC 強回波區較 0858UTC 明顯且範圍也較大，而大於 40dBZ 的強回波分佈範圍也較寬廣；1100UTC 強回波區仍然與 1002UTC 分佈範圍一致。

(圖 4-3. a、b、c)為高度 6 公里的回波場，在此高度上我們發現回波值皆小於前兩個高度，而且大於 35dBZ 的強回波區域呈現零星分佈，顯示在此高度回波不似高度 3 公里及 4.5 公里時來的旺盛，但分佈區域與前兩個高度仍然吻合。

由逐時的回波場分析，我們發現納莉颱風的回波結構在空間上與時間上呈現相當好的連續性，尤其在高度 3 公里時此增強現象最為明顯，因此可瞭解在納莉颱風登陸前其對流是呈現增強的狀態，因此我們再取 1002UTC~1100UTC 之間每六分鐘的回波資料加以分析。

#### 4-2-2. 回波場每六分鐘變化分析

由 1002UTC~1100UTC 之間每六分鐘的回波資料做分析，我們發現在 1036UTC、1042UTC、1048UTC 這三個時間點回波強度有增強與減弱的現象，(圖 4-4. a、b、c)發現高度 3 公里時，納莉颱風的強回波區皆集中於颱風中心的東側與東北側，而最強的回波區域其強度約 45dBZ，在 1036UTC 時最強回波區位於颱風中心東南方但範圍不大；然而到了 1042UTC，位於颱風中心東南方的最強回波區範圍擴大，而且在颱風中心的東北方亦出現了 45dBZ 的強回波；1048UTC 時我們發現在颱風東北方及東南方的最強回波區範圍就不如 1042UTC 時範圍來的廣大。

高度 4.5 公里，(圖 4-5. a、b、c)最強回波約為 40dBZ，略小於高度 3 公里時的最強回波值，而 1042UTC 的最強回波涵蓋範圍最大，仍然位於颱風中心的東側；而在高度 6 公里處(圖 4-6. a、b、c)所示 1036UTC~1048UTC 等三個時間的最強回波值約為 35dBZ，同樣的我們亦發現 1042UTC 的最強回波範圍比 1036UTC 與 1048UTC 大，其涵蓋位置皆位於颱風中心的東側。

由上述三個時間的回波分析顯示，1042UTC 的強回波涵蓋區域不僅寬廣且強度也較前後兩個時間(1036UTC、1048UTC)強，顯示颱風在

此時對流較為旺盛，使雨帶結構更為完整；而由高度 3 公里至 6 公里的垂直回波結構顯示，納莉颱風在此階段其主要雨帶集中於颱風中心的東北至東南側。

從回波場的逐時變化分析與更細微的每六分鐘變化分析，我們皆可發現納莉颱風其增強與減弱的趨勢，而且也可以得知登陸前的納莉颱風回波結構在空間與時間上有相當良好的連續性。

過去許多學者皆提出颱風的強回波出現的位置與強切向風出現的位置相吻合，Marks et al. (1992) 利用雙機載雷達觀測 Norbert 颱風內部核心結構亦證實有此一現象，因此我們利用 GBVTD 方法反演納莉颱風的切向風，並研究其最大切向風出現的位置是否與強回波所在位置相吻合。

### 4-3 GBVTD 反演切向風場

針對上一節回波特性和分析所選取的時間，我們將五分山雷達觀測到的徑向速度，利用 RASTA 軟體差分至追隨地勢座標上，在低層去除了因地形所造成的雜波干擾，同樣的亦以五分山雷達為原點，X 方向為 -10km~130km、Y 方向為 -70km~70km，垂直方向每一層間距為 0.75km，共取 12 層資料，再藉由 GBVTD 方法反演出以颱風中心為原點的切向風(Tangential Wind)及徑向風(Radial Wind)，並加以討論軸對稱切向風( $V_T C_0$ )、軸對稱徑向風( $V_R C_0$ )、以及最大風速半徑(Radius of Maximum Wind , RMW)的強度與變化。

#### 4-3-1. GBVTD 反演所得的切向風-逐時變化分析

我們利用 GBVTD 方法反演切向風的逐時變化，(圖 4-7. a、b、c)為高度 3 公里時的反演結果，結果顯示切向風場隨時間呈現些微減弱的情形，在 0858UTC 與 1002UTC 兩個時間切向風最大值皆為 55m/s，而到了 1100UTC 時切向風最大值則降低至 50m/s。由此高度的反演我

們發現切向風最大值分佈的區域與回波最大值分佈區域(圖 4-1)位置相吻合，皆位於颱風中心的東側，但我們從回波場看到颱風增強現象卻無法從切向風反演結果來加以驗證。

(圖 4-8. a、b、c)為高度 4.5 公里的反演結果，我們發現 0858UTC 與 1100UTC 的切向風最大值涵蓋區域不似高度 3 公里來的寬廣，但在 1002UTC 卻出現了 60m/s 的強切向風，同樣的切向風最大值出現的區域仍與回波場分佈區域一致。高度 6 公里(圖 4-9. a、b、c)切向風最大值仍維持在颱風中心的東側，且其強度亦小於高度 3 公里與 4.5 公里的強度。

由切向風的逐時變化分析，我們發現切向風之反演無法顯示颱風增強的情形，亦即無法與回波增強有良好的呼應，但是我們可藉由此反演結果得知，強切向風與強回波出現的位置相符合，且在垂直結構上與時間上呈現相當好的連續性。

#### 4-3-2. 切向風每六分鐘變化分析

由於切向風的逐時變化我們無法看出切向風有類似回波隨時間增強的情形，因此我們亦反演每六分鐘的切向風場，希望能得到其更細微的變化，(圖 4-10)是經由 GBVTD 方法反演所得納莉颱風在高度 3 公里的切向風，由反演結果顯示強切向風出現在位於颱風中心的東北至東南側，與(圖 4-4)強回波出現的位置大致符合，而 1042UTC 的最大切向風約 50m/s 其涵蓋的範圍大於 1036UTC 與 1048UTC，此結果亦與(圖 4-4. b)出現最強回波及最大涵蓋區域相吻合。

高度 4.5 公里，反演的強切向風仍然位於颱風中心的東側如(圖 4-11)所示，且強切向風(45m/s 以上)涵蓋範圍皆大於高度 3 公里時的強切向風涵蓋範圍，1042UTC 出現了 55m/s 的最大切向風比同時間在高度 3 公里時的最大切向風(約 50m/s)來的大。而高度再往上至 6 公里，如(圖 4-12)所示，強切向風出現的位置大致不變，但最大切

向風不若高度 4.5 公里強，而同樣的 1042UTC 的切向風仍大於前後兩個時間。

藉由每六分鐘的切向風反演結果，我們發現強切向風出現的位置大致與最強回波區相吻合；而當對流旺盛使回波增強時，切向風場的反演結果顯示切向風有隨之增強的趨勢，此現象與 Heymsfield(2001) 年提出颱風低層因風速較強因此低層較高的動量藉由上升運動旋轉抬升至高層因此會在高層產生切向風速極大值與強回波區。

#### 4-3-3. 軸對稱切向風( $V_T C_0$ )垂直剖面、最大風速半徑(RMW)

納莉颱風登陸前近似軸對稱形狀的回波場，因此其軸對稱分量應扮演重要的角色，根據此一假設我們將 GBVTD 反演出的軸對稱切向風分量( $V_T C_0$ )繪製成隨高度與距颱風中心距離的剖面圖，因分析時間內颱風距雷達較遠，因此高度 2.25 公里以下的資料較缺乏，(圖 4-13)為逐時的軸對稱切向風變化，由圖可得知軸對稱切向風分量隨高度呈現向外傾斜的趨勢，同時亦可看出在 1100UTC 時其強度較 0858UTC 與 1002UTC 兩個時間弱，與回波場在 1100UTC 時增強的情形不太符合。

我們亦取每六分鐘間隔的軸對稱切向風來加以分析其更短時間的變化趨勢，(圖 4-14)分析結果也顯示軸對稱切向風亦有隨著高度向外傾斜的趨勢，尤其是 1042UTC 其最大的軸對稱切向風分量(40m/s)傾斜的趨勢與範圍最為明顯，顯示颱風在此時為增強階段與回波分析結果一致。

若由最大風速半徑(RMW)來分析颱風強度變化，從(圖 4-15)發現最大風速半徑隨著高度有傾斜的趨勢，此傾斜的原因為角動量守恆所造成，因在高層最大風速較小因此半徑會隨之加大，相對的低層因為最大風速較強因此半徑會內縮進而導致最大風速半徑呈現傾斜分佈，此現象與 Jorgenson(1984b)觀測 Allen 颱風所得的結果相吻合。而經由下列關係式我們可以得到角動量傾斜的角度：

$$\tan \phi = - \frac{V_{\theta}}{RMW} \left( \frac{\partial V_{\theta}}{\partial Z} \right)^{-1}$$

其中  $\phi$  : 角動量距離水平面之傾斜角度

$V_{\theta}$  : 切向風

經由計算結果得知 0858UTC 其角動量的傾斜角度為  $33.42^{\circ}$ ，而 RMW 的傾斜角度為  $32.62^{\circ}$ ；1002UTC 其角動量的傾斜角度為  $29.68^{\circ}$ ，RMW 的傾斜角度為  $25.17^{\circ}$ ，由上述結果可得知 0858UTC~1002UTC 角動量與 RMW 皆有隨高度向外傾斜的趨勢，且角動量傾斜角度與 RMW 傾斜角度相符合，而 1002UTC 因其低層有收縮的趨勢但高層卻無收縮趨勢，因此會導致其傾斜角度較平緩。

首先看 RMW 的逐時變化(圖 4-15a)結果顯示在高度 6 公里以下，納莉颱風越靠近台灣陸地時其 RMW 越往颱風中心收縮，但收縮的距離僅數公里。

(圖 4-15b)為 1036UTC~1048UTC 間隔六分鐘的 RMW 變化，同樣的我們發現最大風速半徑亦有隨著高度有傾斜的趨勢，但因三個時間的 RMW 幾乎重疊因此很難分辨出當 1042UTC 颱風增強時，最大風速半徑是否有收縮的趨勢。

#### 4-4 GBVTD 反演軸對稱徑向風場

由於 GBVTD 方法在求解上的限制，因此我們在求解過程中僅能求得軸對稱的徑向風分量( $V_{RC_0}$ )，因此求出的軸對稱徑向風分量並不能代表颱風真正的徑向風，我們定義徑向風朝向颱風中心為負(亦即內流)，而因反演徑向風場的結果在距中心 25 公里內會呈現不合理的結果，因此繪圖時將其剔除，(圖 4-16)顯示軸對稱徑向風的逐時變化，結果顯示 0858UTC 時高度 6 公里以上有微弱外流，其餘區域皆為內流區；1002UTC 時則全為內流區，然而到了 1100UTC 時發現距颱風中心 20~35 公里範圍內有一區域皆為外流從高度 2.25~7.5 公里呈

現傾斜分佈，此區域的外流之強度並不強，而其餘的區域則全部為內流。

若再考慮每六分鐘的軸對稱徑向風變化，由(圖 4-17)發現 1036UTC 內流區主要集中在距颱風中心 20~45 公里，垂直分佈從高度 2.25 公里延伸至 8.25 公里，而距中心 40 公里以外則為外流區；1042UTC 我們發現外流區域比 1036UTC 廣大，隨高度呈現傾斜分佈其範圍約為距中心 20~35 公里，垂直延伸至高度 7.5 公里，而在外流區下則為內流僅分佈在距中心 25~42 公里處；1048UTC 外流區域分佈範圍不似 1042UTC 來的寬廣，但距中心 40 公里外仍有外流的分佈。

Frank (1977a)提出颱風結構的概念模式，詳細指出在颱風低層有內流，高層則有外流的現象，而我們經由 GBVTD 反演所得的軸對稱徑向風與此概念模式有些許的出入，因此我們很難由軸對稱徑向風分辨颱風的強弱變化與其真實性，因為我們僅能反演出軸對稱分量，但真實颱風內存在著軸對稱與非軸對稱分量，因此徑向風場的反演其可信度較低，此結論亦可由本文第三章的測試結果加以驗證，若真實颱風的非軸對稱分量越高，而因我們在計算時忽略了這些項，因此其反演出的誤差亦越大。

## 4-5 登陸後風場合成分析

納莉颱風登陸後其行進速度緩慢，使台灣地區因其滯留時間過長所帶來的豪雨導致多處地方災害頻傳，因此研究納莉颱風登陸後的回波與風場結構為另一重要課題。

本文使用 RASTA 軟體對五分山雷達與中正機場雷達資料做雙雷達風場合成分析，雙雷達的合成分析範圍如(圖 4-18)所示，合成分析所選取的時間為 2001 年 9 月 17 日 0000LST，合成範圍則以五分山雷達為原點，X 方向為-50km~50km，Y 方向為-5km~-105km，分別做

高度 3.75 公里、4.5 公里、5.25 公里、6 公里的合成分析，(圖 4-19. a、b、c、d)為高度 3.75 公里~6 公里的合成風場與回波場示意圖，我們清楚地發現颱風中心的位置在(-15,-55)而且合成風場皆呈現逆時針方向旋轉，垂直分佈呈現相當好的一致性。

(圖 4-20)為合成後在不同高度所得到的風場在 X 方向分量(U)的分佈，由結果顯示在距五分山雷達南方 45 公里處為風場轉向的分界線，在此分界線以上為東風，分界線下則為西風主導，由垂直結構上我們亦發現極值與東、西風分佈的位置大致不變。(圖 4-21)為不同高度所得到的合成風場在 Y 方向分量(V)的分佈，我們發現零值線呈現西北-東南走向，零值線右側為北風，左側則為南風，垂直結構也呈現不錯的連續性。

## 4-6 雙都卜勒雷達合成驗證 GBVTD 方法

因 GBVTD 方法在反演颱風的切向風及徑向風上所做的假設會造成反演結果與真實情況有極大的差異，因此我們只能在颱風登陸後利用雙都卜勒雷達所能分析的範圍內，利用幾何關係與傅利葉轉換對 GBVTD 方法做驗證，並瞭解其誤差的來源與大小。

### 4-6-1. 利用雙雷達合成 U、V 分量合成切向風與徑向風

我們將雙都卜勒雷達風場合成所得到在 X 方向上的分量(U)、Y 方向上的分量(V)，利用下列公式可將颱風的切向風與徑向風求出：

$$V_T = \frac{xv - yu}{r} \quad (4-1)$$

$$V_R = \frac{ux + vy}{r} \quad (4-2)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (4-3)$$

其中 u、v 為合成風場在 x 方向與 y 方向的分量

x、y 為以颱風為中心，每個資料點所在的位置

$r$ ：資料點距離颱風中心距離

$V_T$ ：颱風的切向風

$V_R$ ：颱風的徑向風

我們選取高度六公里經由雙雷達合成後所得在網格點上的  $U$  與  $V$  風場，因此時資料為追隨地座標的格式，需做座標轉換將資料轉至卡氏座標上，然後給定颱風中心，每向外一公里取一圈資料，各圈上有 90 個資料點，經由上述(4-1)~(4-3)式計算可得到颱風的切向風場與徑向風場，結果如圖(4-22)所示，切向風場的極大值位於颱風中心的西方，而最大值則約為 20m/s 位於颱風中心的西南方；而徑向風場方面，在颱風中心南方有一極大的外流區，颱風中心東北方則為內流區，且外流的強度比內流來的旺盛。

#### 4-6-2. 合成切向風、徑向風驗證 GBVTD 方法

我們利用上一節所求得納莉颱風登陸後在高度 6 公里處，經由  $U$ 、 $V$  合成的切向風與徑向風，取距離颱風中心 22 公里的一圈資料，此圈有 90 個資料點(圖 4-23)所示，並對此圈資料做傅利葉轉換分析，我們可得到切向風場與徑向風場軸對稱與非軸對稱的分量值，為了瞭解 GBVTD 誤差的來源，我們只取經由傅利葉轉換後所得的波數 2 以下(包含波數 2)的分量，將這些分量重新組成一組新的切向風、徑向風如(圖 4-24)所示，將此組切向風與徑向風經由 GBVTD 方法再反演一次，會得到另一組反演後的切向風與只有軸對稱徑向風分量的風場(圖 4-25)，我們將兩組風場做方均根誤差與相對誤差的分析，可得到(表七)的結果，我們發現反演後的切向風其方均根誤差約為 6.25m/s，但因登陸後切向風場不似登陸前來的大，因此相對誤差高達 0.427；徑向風場的反演則呈現更大的差異，因 GBVTD 方法忽略了徑向風的非軸對稱高次項，因此反演後的相對誤差大至 1.06，由此真實個案的驗證我們可得知 GBVTD 方法求解時對徑向風非軸對稱高

次項忽略的假設，為反演結果帶來相當大的誤差量值，而且切向風與徑向風非軸對稱高次項又互相牽絆的因素，易造成反演結果呈現失真情形，(圖 4-26a、b)為切向風與徑向風比較示意圖，(表八)為經由傅利葉轉換分析合成的切向風、徑向風後大於波數 2 的高波數值，這些高波數值因 GBVTD 無法反演得出所以可得知，因此為反演誤差的來源。

## 第五章 結論與展望

### 5-1 結論

本研究主要分為三大部分，第一部份為針對 GBVTD 方法的準確性與誤差來源做測試，GBVTD 方法在求解時因為未知數個數多於方程式個數，因此在切向風極大於徑向風的前提下，忽略徑向風非軸對稱的高波數項量值，進而僅求解得到軸對稱徑向風與軸對稱、非軸對稱切向風，因此我們設計幾組理想風場做測試，發現在非軸對稱徑向風分量假設為零的理想風場下，GBVTD 皆能反演出與理想風場十分接近的結果，但因切向風量值大於徑向風量值，因此徑向風的相對誤差會較切向風來的大。

當理想風場包括了非軸對稱量分量時，我們發現當理想風場中  $V_R$  高次項/ $V_T C_0$  的比例調整下，隨著徑向風非軸對稱分量 ( $V_R C_1, V_R C_2, V_R S_1, V_R S_2$ ) 的增加，反演後的切向風相對誤差值亦隨之增加；而在徑向風的反演方面，隨著非軸對稱徑向風分量的增加，因 GBVTD 方法中假設這些項皆不考慮，因此反演後的徑向風方均根誤差也隨之加大，在  $V_R$  高次項/ $V_R C_0$  接近 1 時，相對誤差值甚至到達 0.93，而由推導公式我們發現切向風的反演與非軸對稱徑向風的量值互相牽絆，切向風餘弦分量會低估、正弦分量會有高估的情形發生，因此相對的會影響切向風場反演的準確性，使切向風場有相位改變的情形。

而本文第二部分則針對真實颱風做分析，探討 2001 年造成台灣嚴重災害的納莉颱風其登陸前的風場與回波垂直結構，我們針對 9 月 16 日 0858UTC~1100UTC 做逐時變化分析，結果發現回波在 1100UTC 有增強的趨勢，垂直結構上亦呈現相當一致的分佈型態，顯示其颱風結構相當完整且時間上有不錯的連續性，而經由 GBVTD 反演所得的切向風場我們發現 0858~1002UTC 切向風隨回波增強而變大，而在 1002UTC~1100UTC 切向風則並不似回波般有隨時間增加而強度有增強的趨勢，但我們可以成功的由切向風的反演得知最大切向風所在位

置與強回波區出現的位置互相吻合，而且切向風分佈也呈現良好的時間連續性；為了探討更細微的時間變化，因此我們再針對 1002UTC~1100UTC 每六分鐘變化的回波場加以分析，經由分析 1036UTC、1042UTC、1048UTC 等三個時間，我們發現在 1042UTC 時回波有增強的情形，而 GBVTD 反演的切向風亦發現有此增強趨勢，而我們若從軸對稱切向風分量看其強弱變化與分佈，皆可得知其最大風速皆有隨著高度與距颱風中心距離向外傾斜的趨勢，若再加以繪出最大風速半徑分佈，我們也可以得到最大風速半徑隨高度傾斜的分佈，此傾斜的原因為角動量守恆所造成，因在高層風速較小因此半徑會隨之加大，相對的低層因為風速較大因此半徑會內縮進而導致最大風速半徑呈現傾斜分佈，此結果與 Jorgenson(1984a、b)觀測 Allen 颱風的結果相符合，然而在反演納莉颱風徑向風方面，我們經由 GBVTD 所得的結果並不像一般概念模式中的徑向風場隨高度的分佈，在高層有明顯的外流、低層有明顯的內流現象。

第三部分我們選取 9 月 17 日 0000LST 的資料，利用 RASTA 軟體以五分山雷達為原點，並與中正機場雷達做雙都卜勒雷達合成分析，分析結果我們發現登陸後的納莉颱風在高度 3 公里~6 公里的合成風場，皆可清楚的看到颱風中心位置及環流逆時針旋轉的型態，而垂直結構上風場分佈也呈現相當連續的現象。

為了驗證納莉颱風登陸後 GBVTD 反演的準確性，我們將雙雷達合成後所得的 U、V 分量利用向量形式合成納莉颱風的切向風與徑向風，並對其做傅利葉轉換取至波數 2 的分量值，經由傅利葉分析結果我們發現切向風波數 0 與波數 1 分量佔了極大的量值；徑向風則為波數 1 分量所主導，利用這些係數值組合成一組新的切向風與徑向風，並將此組切向風與徑向風再做一次 GBVTD 分析，得到另一組切向風與徑向風，經由誤差分析此兩組風場經由結果得知切向風的相對誤差約 0.427，雖然切向風誤差值偏高，但我們仍然可以得到切向風定性的

分佈型態;徑向風的相對誤差則為 1.06，顯示出 GBVTD 方法在反演納莉颱風登陸後，因其忽略徑向風的非軸對稱高次項的求解假設，會造成徑向風反演後有高誤差的情況。

我們經由 GBVTD 方法成功地反演海面上颱風的切向風場，因此有了這些資訊我們可以進而得知其強度變化、垂直上的結構變化，然而反演颱風的徑向風場我們發現有較大的誤差值，因此需再加以研究如何求得徑向風場的高次項進而增進徑向風場反演的準確性。

納莉颱風登陸後，藉由雙雷達風場合成驗證後我們發現 GBVTD 反演切向風場其表現尚可，但在徑向風場反演上就呈現較不佳的結果，此原因為颱風登陸後因切向風與徑向風之比例並不符合 GBVTD 方法求解時切向風必須極大於徑向風的假設，因此反演結果會有誤差較高的情況產生。

## 5-2 展望

本研究僅使用理想風場與真實個案對 GBVTD 方法做驗證，探討其誤差來源與適用性，但若能在之後的研究中，對於求解徑向風的非軸對稱高波數項有突破性的解法，相信必能對 GBVTD 方法提供更好的改良與提高其準確性;然而中心定位一直是影響 GBVTD 其準確性的要素之一，因此如何能找到一組中心使得反演的結果與真實情況最符合，亦是另一門重要的課題。

個案分析方面，本文僅研究納莉颱風登陸前與登陸後的風場結構變化，但對納莉颱風其回波與風場之間強弱的關係、壓力變化、最大風速半徑傾斜角度、角動量守恆、強度變化、溫度場的反演等熱動力結構仍須加以研究與探討，以期能完全對納莉颱風有完整及深入的瞭解。

本文中運用 GBVTD 方法對登陸前、登陸後的颱風做反演分析，但若能有移動式都卜勒雷達(Doppler on Wheel)加入觀測行列，則必能

對劇烈的中尺度天氣系統有更深的瞭解，同時提高增加資料的準確性  
進而提供模式更良好的觀測資料。

## 附錄 A 雙都卜勒三維風場的合成

### (一) 雙都卜勒雷達資料處理方法

雙都卜勒風場處理方法是建立在追隨地勢座標下，因此參照 Teng et al. (2000) 的方法，必須將卡氏座標下的合成方法改寫為：

由兩座都卜勒雷達所提供的雷達徑向風場 ( $V_{r1}, V_{r2}$ ) 與三維風場 ( $U, V, W$ ) 之間的幾何關係為：

$$V_{r1} = U \sin \beta_1 \cos \theta_1 + V \cos \beta_1 \cos \theta_1 + (W + V_t) \sin \theta_1 \quad (A1)$$

$$V_{r2} = U \sin \beta_2 \cos \theta_2 + V \cos \beta_2 \cos \theta_2 + (W + V_t) \sin \theta_2 \quad (A2)$$

其中  $\beta_1, \beta_2$  為相對於兩個雷達的方位角， $\theta_1, \theta_2$  為相對於兩個雷達的高度角， $V_t$  為粒子的終端速度 (可由雷達回波強度 (dBZ) 估計之： $V_t = -4.32(\text{dBZ})^{0.0714286}$ )， $U, V, W$  為粒子在直角座標上三度空間的速度分量。

由(A1)與(A2)兩式可解得水平風場( $U, V$ )為：

$$U = U' + M_1 W_{air} \quad (A3)$$

$$V = V' + M_2 W_{air} \quad (A4)$$

其中

$$M_1 = \frac{\cos \beta_1 \cos \theta_1 \sin \theta_2 - \sin \theta_1 \cos \beta_2 \cos \theta_2}{\cos \theta_1 \cos \theta_2 (\sin \beta_1 \cos \beta_2 - \cos \beta_1 \sin \beta_2)}$$

$$M_2 = \frac{\sin \theta_1 \sin \beta_2 \cos \theta_2 - \sin \beta_1 \cos \theta_1 \sin \theta_2}{\cos \theta_1 \cos \theta_2 (\sin \beta_1 \cos \beta_2 - \cos \beta_1 \sin \beta_2)}$$

$$U' = \frac{\cos \beta_2 \cos \theta_2 V_{r1} - \cos \beta_1 \cos \theta_1 V_{r2}}{\cos \theta_1 \cos \theta_2 (\sin \beta_1 \cos \beta_2 - \cos \beta_1 \sin \beta_2)} + M_1 V_t$$

$$V' = \frac{\sin \beta_1 \cos \theta_1 V_{r2} - \sin \beta_2 \cos \theta_2 V_{r1}}{\cos \theta_1 \cos \theta_2 (\sin \beta_1 \cos \beta_2 - \cos \beta_1 \sin \beta_2)} + M_2 V_t$$

而(A3)與(A4)中包含三個未知的變數( $U, V, W$ )，因此必須加入連續方程式才能將此三個未知變數求得，且因考慮在地形複雜區域，因此採用追隨地勢座標下的非彈性連續方程式為：

$$\frac{\partial \rho \dot{\eta}}{\partial \eta} = -\left(\frac{\partial \rho U}{\partial x} + \frac{\partial \rho V}{\partial y}\right) + S\rho U + P\rho V \quad (\text{A5})$$

其中

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

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

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

$Z_g$  為地形高度， $Z_t$  為模式頂高度(此設為 15KM)， $\rho$  為空氣密度(僅為高度的函數)， $\dot{\eta}$  為追隨地勢座標下的垂直速度，並定義為  $(d\eta/dt)$ 。將(A3)與(A4)式代入(A5)式，並寫成垂直方向的差分方程式：

$$\begin{aligned} (\rho \dot{\eta})_c = & (\rho \dot{\eta})_p - \delta\eta \overline{\left(\frac{\partial \rho U'}{\partial x} + \frac{\partial \rho V'}{\partial y}\right)}_{p \sim c} + \frac{\delta\eta \overline{(S\rho U' + P\rho V')}}_{p \sim c}}{D} \\ & - \frac{\delta\eta}{2} \left(\frac{\partial \rho M_1 W_{air}}{\partial x} + \frac{\partial \rho M_2 W_{air}}{\partial y}\right)_p - \frac{\delta\eta}{2} \left(\frac{\partial \rho M_1 W_{air}}{\partial x} + \frac{\partial \rho M_2 W_{air}}{\partial y}\right)_c \\ & + \frac{\delta\eta}{2} (S\rho M_1 W_{air} + P\rho M_2 W_{air})_p + \frac{\delta\eta}{2} (S\rho M_1 W_{air} + P\rho M_2 W_{air})_c \end{aligned} \quad (\text{A6})$$

其中  $(\ )_c$  表示這一層資料， $(\ )_p$  表示上一層資料， $(\ )_{p \sim c}$  表示兩層的平均，經由反覆計算，可將(A6)式改寫為：

$$A_m = B + C + D + E1 + E2_{m-1} + F1 + F2_{m-1} \quad (\text{A7})$$

(A7)式中，B, C, D, E1, F1 為已知項，A, E2, F2 為待求項，其中 E2, F2 兩項所使用之  $W_{air}$  為從上一層的疊代法獲得，並利用反覆計算解(A7)式，直至

$$\left| (\rho W_{air})_{c,m} - (\rho W_{air})_{c,m-1} \right| \leq \varepsilon_0$$

其中  $\varepsilon_0=0.001\text{kg/m}^2\text{s}$ ，用來判別是否停止反覆計算的垂直速度最大偏差值。

在(A6)式中，未知數為( $W_{\text{air}}$ )及 $(\dot{\eta})_c$ ，在反覆計算過程中，此兩項關係可由(A3)與(A4)兩式得知為：

$$\rho W_{\text{air}} = \frac{\frac{Z_t - Z_g}{Z_t} [\rho \dot{\eta} + (Z_t - \eta) SU' + \rho (Z_t - \eta) PV']}{1 - \frac{Z_t - Z_g}{Z_t} (Z_t - \eta) (M_1 S + M_2 P)} \quad (\text{A8})$$

因此我們可以向下積分來求取每一層的垂直速度，再代回(A3)及(A4)兩式得到水平風場(U, V)。

## (二) 三維風場的變分調節

在上述方法中，當利用連續方程式向下積分時，因差分產生的誤差，會使得三維風場不能滿足連續方程式，因此採用變分法去調節風場，使其能確實符合連續方程式。

利用(A5)式當作變分法的控制方程，令  $\rho \dot{\eta} = \hat{\eta}$ ， $\rho U = \hat{U}$ ， $\rho V = \hat{V}$ ，並將 $\hat{\cdot}$ 去除，以(A5)式為控制方程式的變分函數為：

$$J = \iint \{ [(U - \tilde{U})^2 + (V - \tilde{V})^2] d\eta + 2\lambda \int [(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y}) - SU - PV] d\eta \} dz dy \quad (\text{A9})$$

其中  $\tilde{U}$ ， $\tilde{V}$  為前一部份所得的水平風場， $\lambda$  為拉氏乘數(Lagrangian multiple)。

令  $\delta J=0$  求此泛函的極小值，可得到 Euler-Lagrange 方程式：

$$U = \tilde{U} + \frac{\partial \lambda}{\partial x} + S\lambda \quad (\text{A10})$$

$$V = \tilde{V} + \frac{\partial \lambda}{\partial y} + P\lambda \quad (\text{A11})$$

$$\int_0^{Z_t} (\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} - SU - PV) d\eta = 0 \quad (\text{A12})$$

以及自然邊界條件(即在邊界上  $\lambda=0$ )。

將(A10)、(A11)代入(A12)式中消去  $U$ 、 $V$ ，可得到關於  $\lambda$  的方程式：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 \lambda}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \lambda}{\partial y^2} + \frac{\partial S \lambda}{\partial x} + \frac{\partial P \lambda}{\partial y} - S \frac{\partial \lambda}{\partial x} - P \frac{\partial \lambda}{\partial y} - \lambda(S^2 + P^2) \\ & = - \int_0^{Z_t} \left[ \frac{\partial \tilde{U}}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{V}}{\partial y} - S \tilde{U} - P \tilde{V} \right] d\eta \end{aligned} \quad (A13)$$

由(A13)式及自然邊界條件，利用緩和法可解得  $\lambda(x, y)$ ，再代入(A10)、(A11)兩式得到調節後滿足連續方程式的水平風場( $U, V$ )。

而垂直速度的調節，則是利用(A10)、(A11)、(A12)三式消去  $\lambda$ ，則連續方程式(A5)可重新表示為：

$$\int_0^{Z_t} \left( \frac{\partial \dot{\eta}_0}{\partial \eta} - \frac{\partial \dot{\eta}}{\partial \eta} \right) d\eta = - \dot{\eta}_0 \Big|_{\eta=0} \quad (A14)$$

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

由(A14)式可得到：

$$\dot{\eta} - \dot{\eta}_{0l} = \frac{Z_t - \eta}{Z_t} \dot{\eta}_0 \Big|_{\eta=0} \quad (A15)$$

由(A15)式可知對於  $\dot{\eta}$  的調節會隨著  $\eta$  的增加而遞減，因此我們可以利用下式求得垂直速度場：

$$W_{air} = \frac{Z_t - Z_g}{Z_t} \dot{\eta}_0 [(\eta + S(Z_t - \eta))U + P(Z_t - \eta)V] \quad (A16)$$

由以上所有方法，我們才由雙都卜勒雷達資料得到一組在追隨地勢座標下滿足連續方程式的三維風場。

## 附錄 B      GBVTD 方法原理

GBVTD 方法建立在等高面上，因此必須先求得等高面上的都卜勒速度。因此定義等高面上的都卜勒速度為  $\hat{V}_r$  可表示為：

$$\frac{\hat{V}_r}{\cos\phi} = V_r - (w - v_t)\sin\phi \quad (\text{B1})$$

$\phi$ ：雷達電磁波束的仰角

$V_r$ ：雷達於仰角  $\phi$  時所測得的都卜勒速度

$w$ ：垂直速度(向上為正)

$v_t$ ：雨滴終端速度(向下為正)

$\hat{V}_r$ ：扣除垂直速度、雨滴終端速度後的都卜勒速度

其中，雨滴終端速度  $v_t$  可由回波估計予以扣除，並且忽略垂直速度  $w$ 。

(圖 2-3) 為 GBVTD 平面幾何關係示意圖，利用此關係可將颱風風場分為切向速度與徑向速度；因此距離颱風中心  $R$ 、雷達觀測仰角  $\phi$ 、方位角  $\theta$  的 E 點之平面都卜勒速度可寫成：

$$\frac{\hat{V}_r}{\cos\phi} = V_M \cos(\theta - \theta_M) - V_T \sin\psi + V_R \cos\psi \quad (\text{B2})$$

$\psi$ ：電磁波束與颱風徑向速度的夾角( $0^\circ \sim 360^\circ$ )

$V_R(R, \psi, z)$ ：颱風的切向速度(向外為正)

$V_T(R, \psi, z)$ ：颱風的切向速度(逆時針為正)

$V_M(z)$ ：環境風場

$\theta$ ：方位角(與正東之夾角)

$\theta_M$ ：環境風場的夾角(與正東之夾角)

$\theta_T$ ：颱風環流中心的方位角

$\alpha$ ：通過颱風中心的電磁波束與任一電磁波束的方位角夾角

而  $\theta - \theta_M$  可以表示成  $\theta_T + \alpha - \theta_M$ ，因此  $V_M \cos(\theta - \theta_M)$  可寫成：

$$V_M \cos(\theta - \theta_M) = V_M [\cos(\theta_T - \theta_M) \cos \alpha - \sin(\theta_T - \theta_M) \sin \alpha] \quad (\text{B3})$$

其中  $\sin \alpha$ 、 $\cos \alpha$  可表示為：

$$\sin \alpha = \sin \alpha_{\max} \sin \psi \quad (\text{B4})$$

$$\cos \alpha \approx \left( \frac{1 - \cos \alpha_{\max}}{2} \right) \cos 2\psi + \left( \frac{1 + \cos \alpha_{\max}}{2} \right) \quad (\text{B5})$$

將(B3)、(B4)、(B5)三式代入(B2)可得到

$$\frac{\hat{V}_r}{\cos \phi} \approx V_M \left[ \cos(\theta_T - \theta_M) \left( \frac{1 - \cos \alpha_{\max}}{2} \cos 2\psi + \frac{1 + \cos \alpha_{\max}}{2} \right) - \sin(\theta_T - \theta_M) \sin \alpha_{\max} \sin \psi \right] - V_t \sin \psi + V_R \cos \psi \quad (\text{B6})$$

當  $\alpha_{\max}$  在半徑固定時為常數，所以  $\hat{V}_r / \cos \phi$  為  $\psi$  的函數，並且將  $V_T$ 、 $V_R$  以  $\psi$  為自變數予以傅利葉級數展開，可得到：

$$\frac{\hat{V}_r(\psi)}{\cos \phi} = \sum_0^L (A_n \cos n\psi + B_n \sin n\psi) \quad (\text{B7})$$

$$V_T(\psi) = \sum_0^M (V_T C_n \cos n\psi + V_T S_n \sin n\psi) \quad (\text{B8})$$

$$V_R(\psi) = \sum_0^N (V_R C_n \cos n\psi + V_R S_n \sin n\psi) \quad (\text{B9})$$

將(B7)~(B9)代回(B6)式，並利用下列三角函數公式(積化和差)：

$$2 \sin A \cos B = \sin(A + B) + \sin(A - B)$$

$$2 \sin A \sin B = \cos(A - B) - \cos(A + B)$$

$$2 \cos A \cos B = \cos(A + B) + \cos(A - B)$$

取  $L=3$ ， $M=2$ ， $N=2$  可得到：

$$\frac{\hat{V}_r(\psi)}{\cos \phi} = A_0 + A_1 \cos \psi + B_1 \sin \psi + A_2 \cos 2\psi + B_2 \sin 2\psi + A_3 \cos 3\psi + B_3 \sin 3\psi \quad (\text{B10})$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{2} [V_M \cos(\theta_T - \theta_M)(1 + \cos \alpha_{\max}) - V_T S_1 + V_R C_1 \\ &+ (2V_R C_0 + V_R C_2 - V_T S_2) \cos \psi \\ &+ (-2V_T C_0 + V_T C_2 + V_R S_2 - 2V_M \sin(\theta_T - \theta_M) \sin \alpha_{\max}) \sin \psi \\ &+ (V_T S_1 + V_R C_1 + V_M \cos(\theta_T - \theta_M)(1 - \cos \alpha_{\max}) \cos 2\psi \\ &+ (V_R S_1 - V_T C_1) \sin 2\psi + (V_R C_2 + V_T S_2) \cos 3\psi \\ &+ (V_R S_2 - V_T C_2) \sin 3\psi] \end{aligned} \quad (\text{B11})$$

將(B10)與(B11)式比較係數可以得到的得到：

$$A_0 = \frac{1}{2} [V_R C_1 - V_T S_1 + V_M \cos(\theta_T - \theta_M)(1 + \cos \alpha_{\max})] \quad (\text{B12})$$

$$A_1 = \frac{1}{2} [2V_R C_0 + V_R C_2 - V_T S_2] \quad (\text{B13})$$

$$A_2 = \frac{1}{2} [V_T S_1 + V_R C_1 + V_M \cos(\theta_T - \theta_M)(1 - \cos \alpha_{\max})] \quad (\text{B14})$$

$$A_3 = \frac{1}{2} [V_R C_2 + V_T S_2] \quad (\text{B15})$$

$$B_1 = \frac{1}{2} [V_T C_2 + V_R S_2 - 2V_T C_0 - 2V_M \sin(\theta_T - \theta_M) \sin \alpha_{\max}] \quad (\text{B16})$$

$$B_2 = \frac{1}{2} [V_R S_1 - V_T C_1] \quad (\text{B17})$$

$$B_3 = \frac{1}{2} [V_R S_2 - V_T C_2] \quad (\text{B18})$$

將(B12)~(B17)式重新整理可得到：

$$V_M \cos(\theta_T - \theta_M) = A_0 + A_2 - V_R C_1 \quad (\text{B19})$$

$$V_T C_0 = -B_1 - B_3 + V_R S_2 - V_M \sin(\theta_T - \theta_M) \sin \alpha_{\max} \quad (\text{B20})$$

$$V_T C_1 = -2B_2 + V_R S_1 \quad (\text{B21})$$

$$V_T C_2 = -2B_3 + V_R S_2 \quad (\text{B22})$$

$$V_T S_1 = A_2 - A_0 + (A_0 + A_2 - V_R C_1) \cos \alpha_{\max} \quad (\text{B23})$$

$$V_T S_2 = 2A_3 - V_R C_2 \quad (\text{B24})$$

$$V_R C_0 = A_1 + A_3 - V_R C_2 \quad (\text{B25})$$

$V_M \cos(\theta_T - \theta_M), V_T C_0, V_T C_1,$   
 $V_T C_2, V_T S_1, V_T S_2, V_R C_0, V_R C_1,$   
 $V_R C_2, V_R S_1, V_R S_2$

上述有 11 個未知變數( )，但只有 7 個方程式，因此必須採取下列步驟才能將未知數解出：

- (1) 必須考慮忽略高次項。
- (2) 由於颱風的徑向風場的分量非常小於切向風場，因此省略徑向風場的高波數項(  $V_R C_1, V_R C_2, V_R S_1, V_R S_2$  )，只取軸對稱的徑向風場(  $V_R C_0$  )。

則(B19)~(B25)式最後可整理成下列方程式：

$$V_M \cos(\theta_T - \theta_M) = A_0 + A_2 \quad (B26)$$

$$V_T C_0 = -B_1 - B_3 - V_M \sin(\theta_T - \theta_M) \sin \alpha_{\max} \quad (B27)$$

$$V_T C_1 = -2B_2 \quad (B28)$$

$$V_T C_2 = -2B_3 \quad (B29)$$

$$V_T S_1 = A_2 - A_0 + (A_0 + A_2) \cos \alpha_{\max} \quad (B30)$$

$$V_T S_2 = 2A_3 \quad (B31)$$

$$V_R C_0 = A_1 + A_3 \quad (B32)$$

(B26)~(B32)式，等號左邊各項解出後代回(B8)與(B9)式，即可求得颱風的軸對稱、非軸對稱切向風場與軸對稱徑向風場。

## 參考文獻

- 周仲島、張保亮與李文兆，1994：都卜勒雷達在颱風環流中尺度結構分析的應用。大氣科學，**22**，163-187。
- 周仲島、鄧秀明、張保亮，1996：都卜勒雷達在颱風中心定位與最大風速半徑決定的應用。大氣科學，**24**，1-24。
- 鄧仁星，1999：侵台颱風降水預報之應用研究-台灣地區雷達資料處理系統之建立與測試，國科會博士後研究結案報告。
- 鄧仁星，2000：RASTA(Radar Analysis System for Taiwan Area)使用說明書。
- Frank, W. M., 1977a: The structure and energetics of the tropical cyclone, I: Storm structure. *Mon. Wea. Rev.*, **105**, 1119-1135.
- Heymsfield, G. M., J. B. Halverson., J. Simpson., L. Tian., and T. P. Biu., 2001: ER-2 Doppler radar investigations of the eyewall of Hurricane Bonnie during the Convection and Moisture Experiment3. *J. Appl. Meteor.*, **40**, 1310-1330.
- Jorgensen, D. P., 1984a: Mesoscale and convective-scale characteristics of mature hurricanes. Part I: General observations by research aircraft. *J. Atmos. Sci.*, **41**, 1268-1285.
- Jorgensen, D. P., 1984b: Mesoscale and convective-scale characteristics of mature hurricanes. Part II: Inner core structure of hurricane Allen(1980). *J. Atmos. Sci.*, **41**, 1287-1311.
- Lee, W.-C., B. J.-D. Jou, P.-L. Chang, and S.-M. Deng, 1999: Tropical cyclone kinematic structure retrieved from single Doppler radar observations. Part I: Interpretation of Doppler velocity patterns and the GBVTD technique. *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 2419-2439.

- Lee, W.-C., and F. D. Marks, 2000: Tropical cyclone kinematic structure retrieved from single-Doppler radar observations. Part II: The GBVTD-simplex center finding algorithm. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 1925-1936.
- Lee, W.-C., B. J.-D. Jou, P.-L. Chang, and F. D. Marks, 2000: Tropical cyclone kinematic structure retrieved from single-Doppler radar observations. Part III: Evolution and Structure of Typhoon Alex (1987). *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 3982-4001.
- Marks, F. D. Jr., and R. A. Houze, Jr., 1984: Airborne Doppler radar observations in hurricane Debby. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **65**, 569-582.
- 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.
- Marks, F. D., R. A. Houze, and J. F. Gamache, 1992: Dual - aircraft investigation of the inner core of Hurricane Norbert. Part I: Kinematic structure. *J. Atmos. Sci.*, **49**, 919-942.
- Ooyama, K. V., 1982: Conceptual evolution of the theory and modeling of the tropical cyclone. *J. Meteor. Soc. Japan*, **60**, 369-380.
- Shapiro, L. J., and H. E. Willoughby, 1982: The response of balanced hurricanes to local sources of heat and momentum. *J. Atmos. Sci.*, **39**, 378-394.
- Shea, D. J., and W. M. Gray, 1973: The hurricane's inner core region: I. Symmetric and asymmetric structure. *J. Atmos. Sci.*, **30**, 1544-1564.
- Teng, J.-H., C.-S. Chen, T.-C. C. Wang, and Y.-L. Chen; 2000: Orographic Effects on a squall Line System over Taiwan. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 1123-1138.

Willoughby, H. E., 1977: Inertia-buoyancy waves in hurricanes. *J. Atmos. Sci.*, **34**, 1028-1039.

Willoughby, H. E., F. D. Marks, Jr., and R. J. Feinberg, 1984: Stationary and propagating convective bands in asymmetric hurricanes. *J. Atmos. Sci.*, **41**, 3189-3211.

Willoughby, H. E., 1988: The dynamics of the tropical cyclone core. *Aust. Meteor. Mag.*, **36**, 183-191.

Willoughby, H. E., 1998: Tropical Cyclone Eye Thermodynamics. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 3053 - 3067.

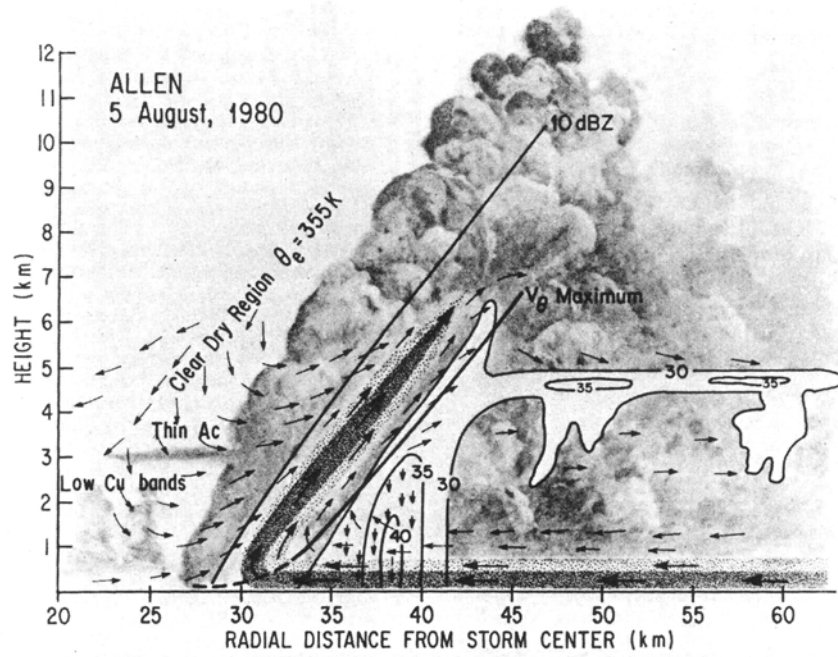


圖 1-1：1980 年 8 月 5 日，Allen 颱風的垂直剖面示意圖。摘錄自 Jorgenson(1984b)。

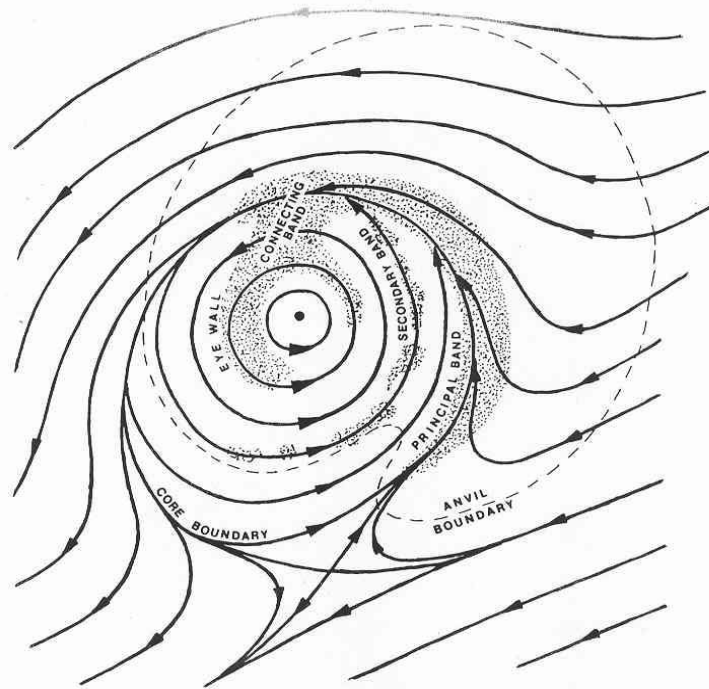


FIG. 7. Idealized model of the stationary band complex and the flow in which it's embedded (from Willoughby et al. 1984).

圖 1-2：颱風雨帶複合體(SBC)之回波與流線示意圖。摘錄自 Willoughby et al. (1984)。

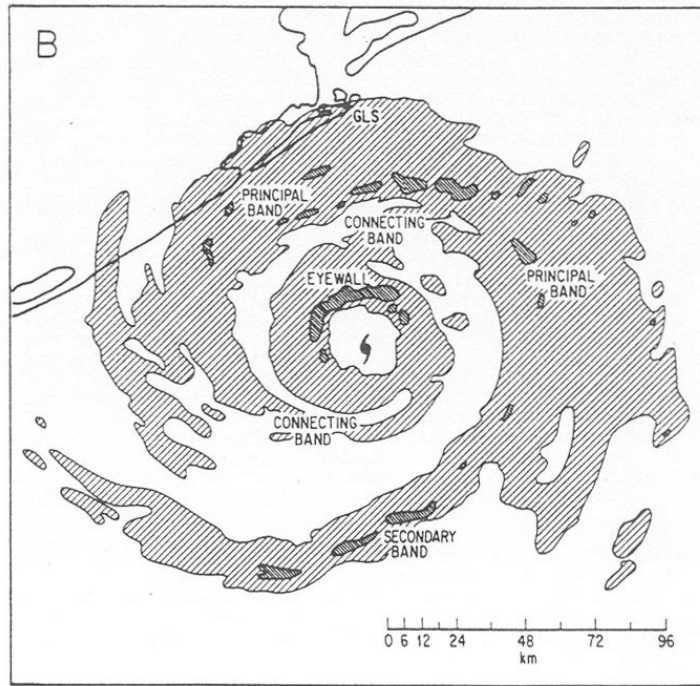


圖 1-3 : 1983 年 8 月 18 日, Alicia 颱風雨帶複合體(SBC)示意圖。摘錄自 Marks and Houze(1987)。

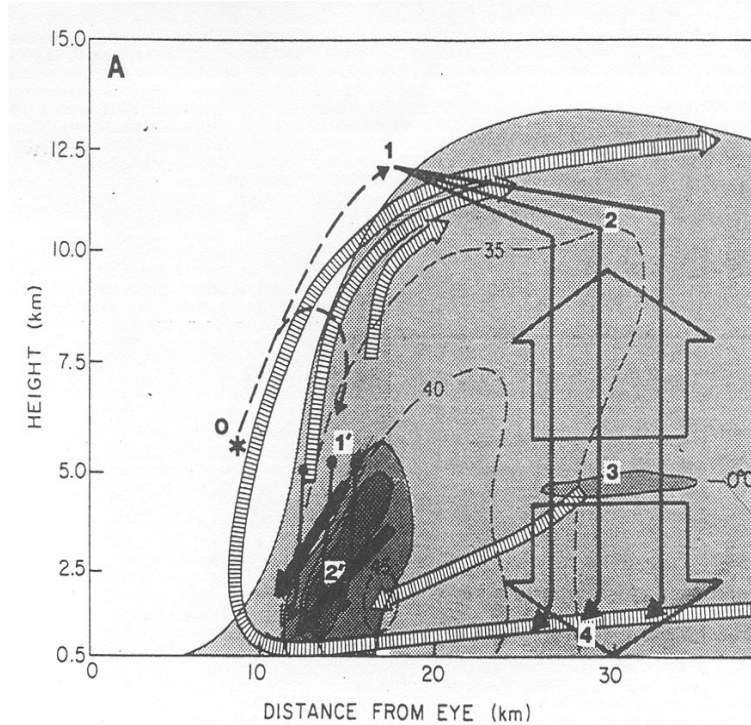


圖 1-4a : 1983 年 8 月 18 日, Alicia 颱風次環流垂直剖面示意圖。摘錄自 Marks and Houze(1987)。

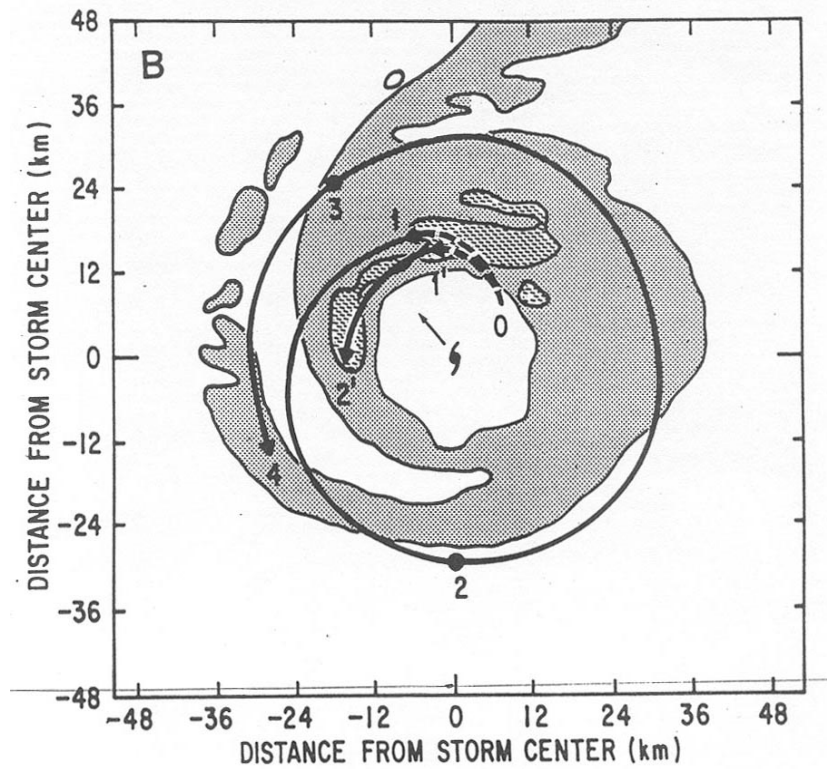


圖 1-4b : 1983 年 8 月 18 日，Alicia 颱風次環流水平剖面與降水粒子軌跡示意圖。摘錄自 Marks and Houze(1987)。

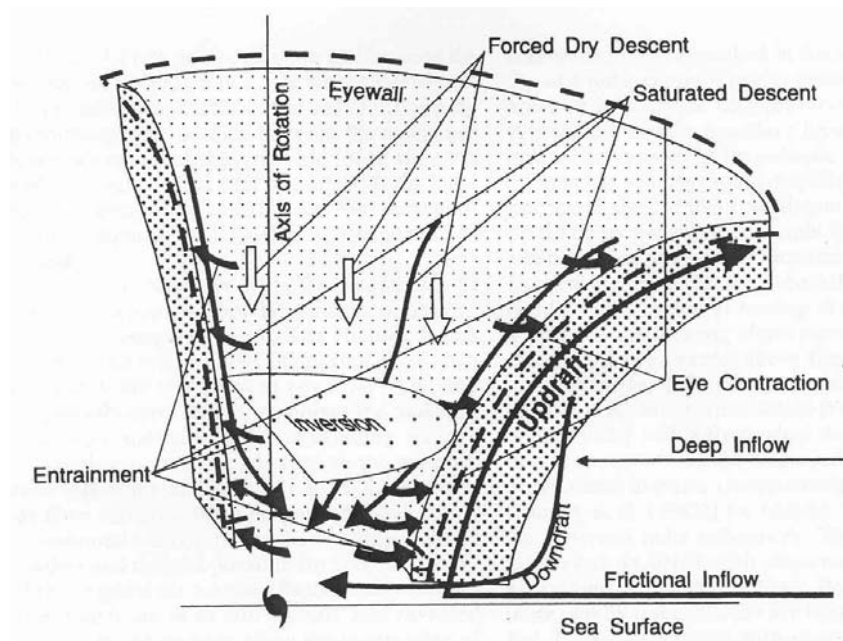


圖 1-5：颱風眼之熱動力概念模式示意圖。摘錄自 Willoughby(1998)。

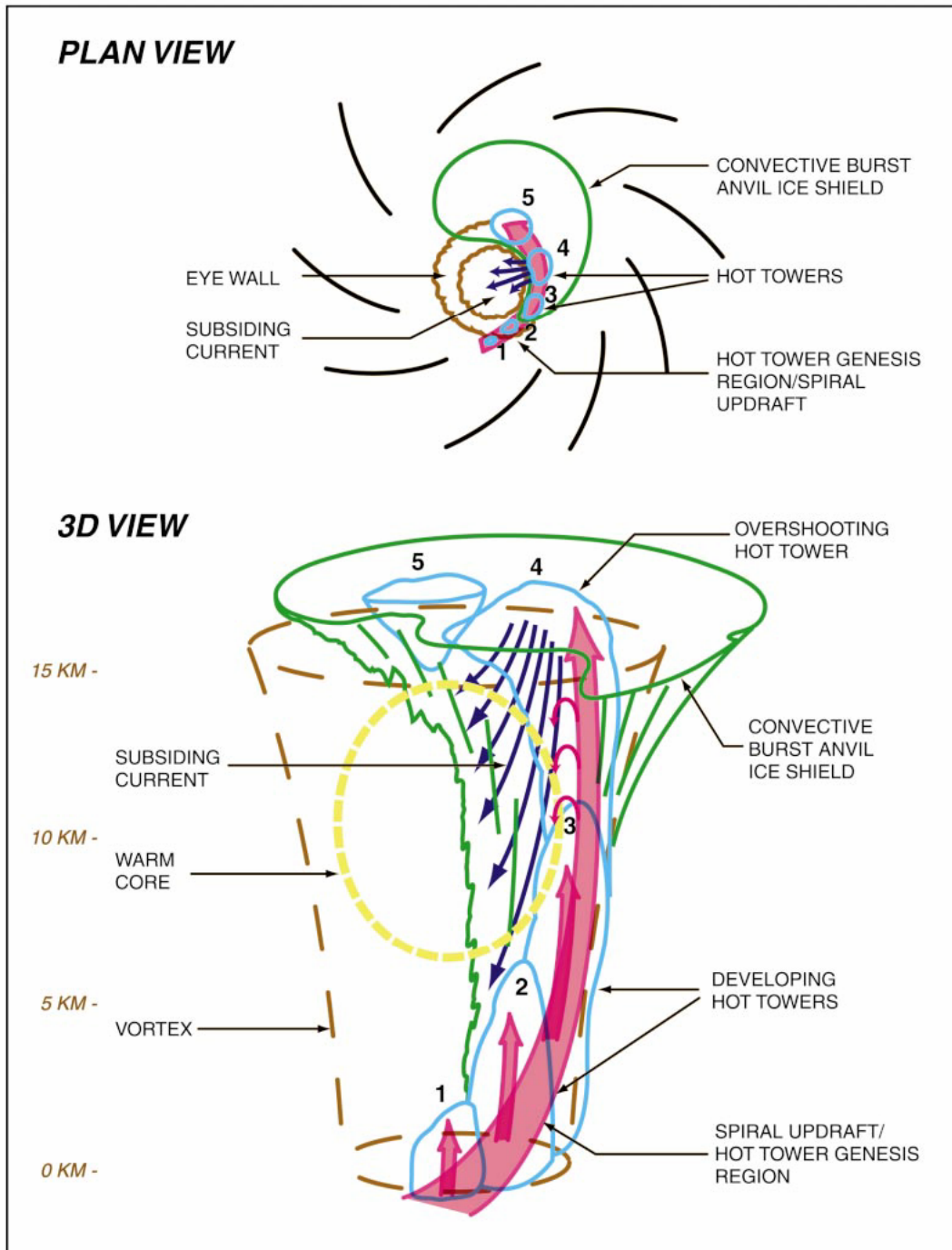


圖 1-6：颱風氣流之三維概念模式示意圖。摘錄自 Heymsfield et al. (2001)。

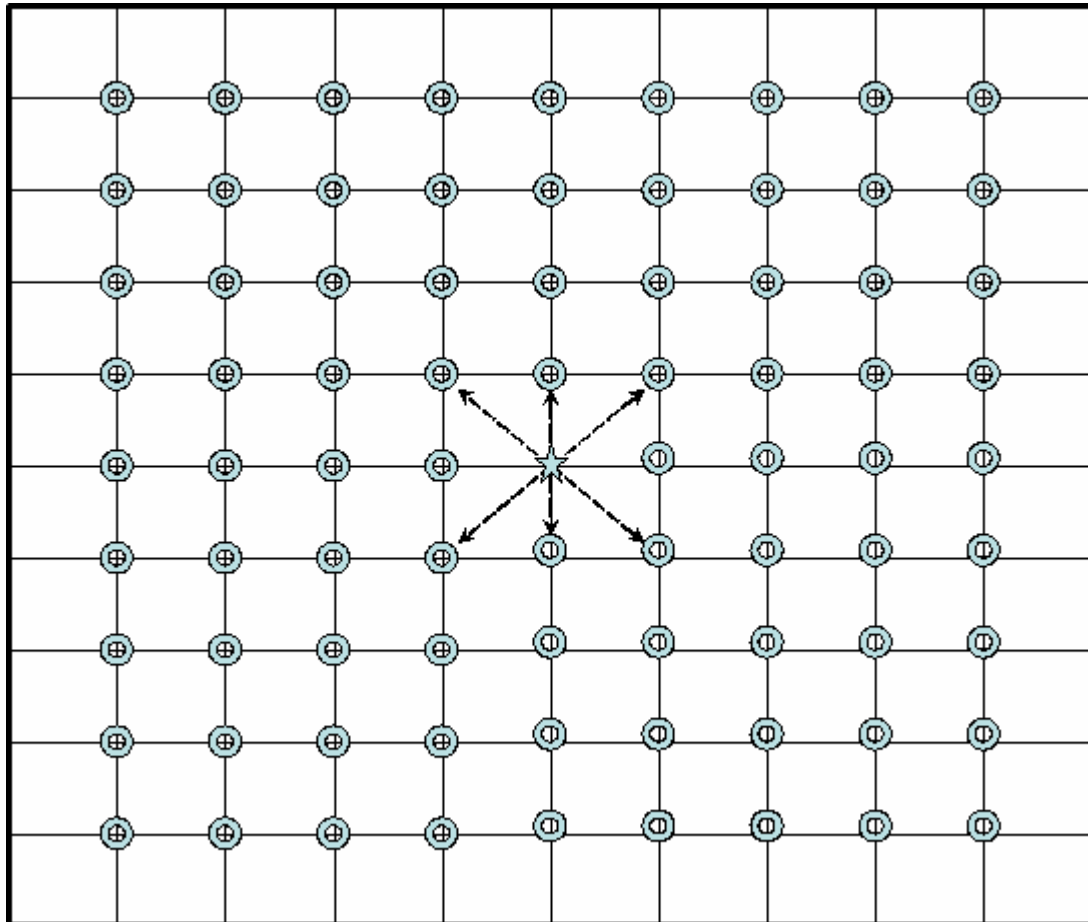


圖 2-1：颱風中心尋找示意圖，圖中星號為經由 VDAD 求得之颱風中心，分別計算此中心周圍四公里內 81 個點(網格間距為一公里)的軸對稱切向風量值大小，找到最大的軸對稱切向風量值即為颱風中心的所在位置。

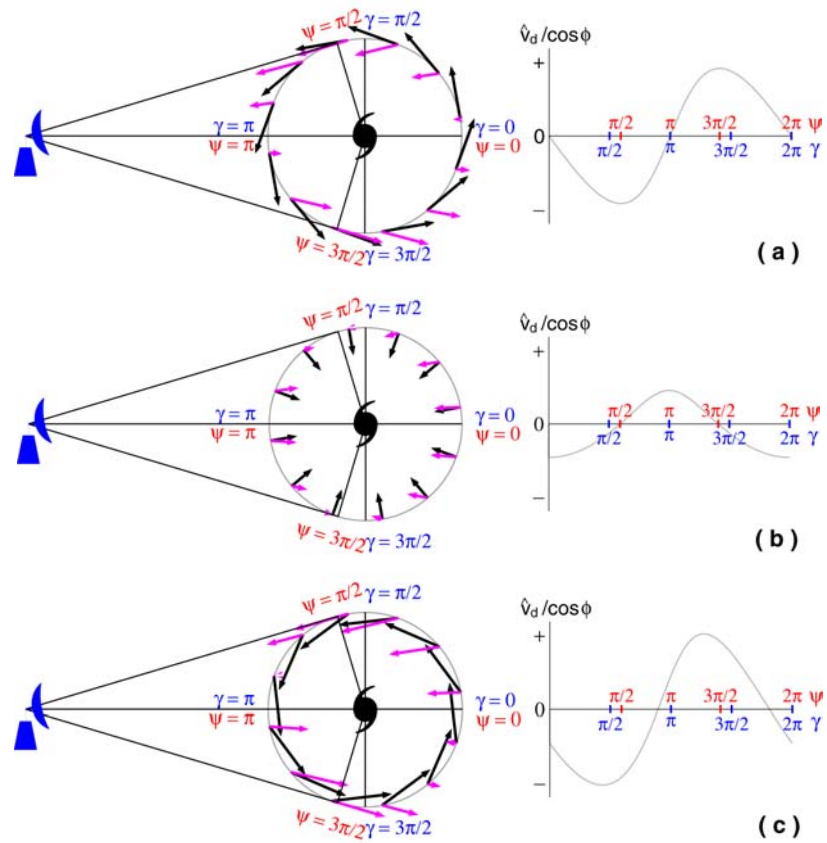


圖 2-2：GBVTD 方法概念圖。摘錄自 Lee et al. (1999)。

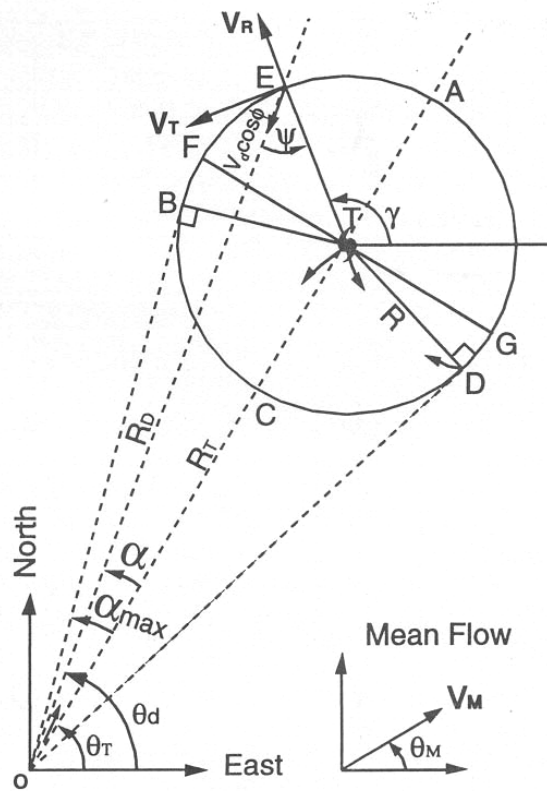


圖 2-3：GBVTD 方法平面幾何關係圖。摘錄自 Lee et al. (1999)。

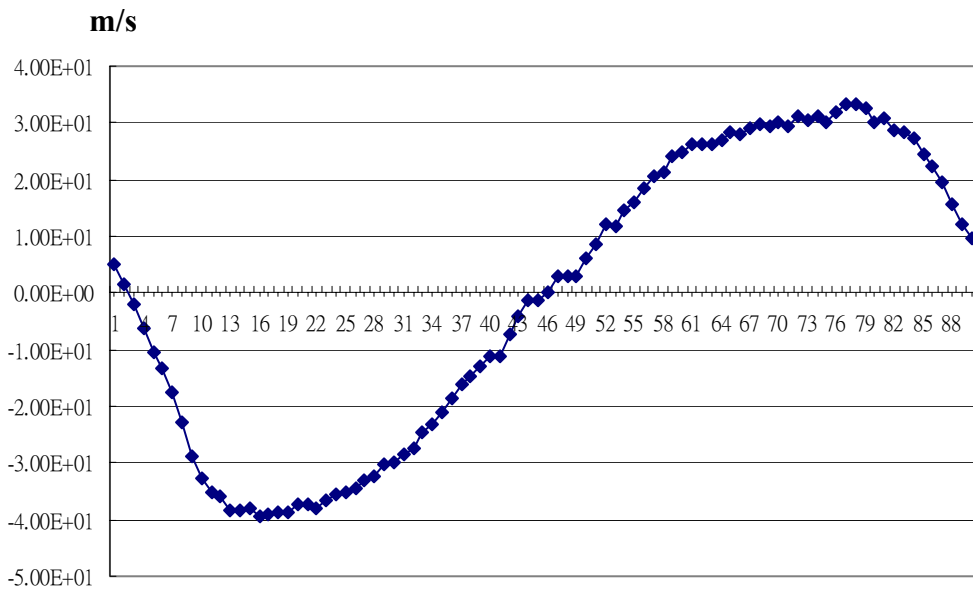
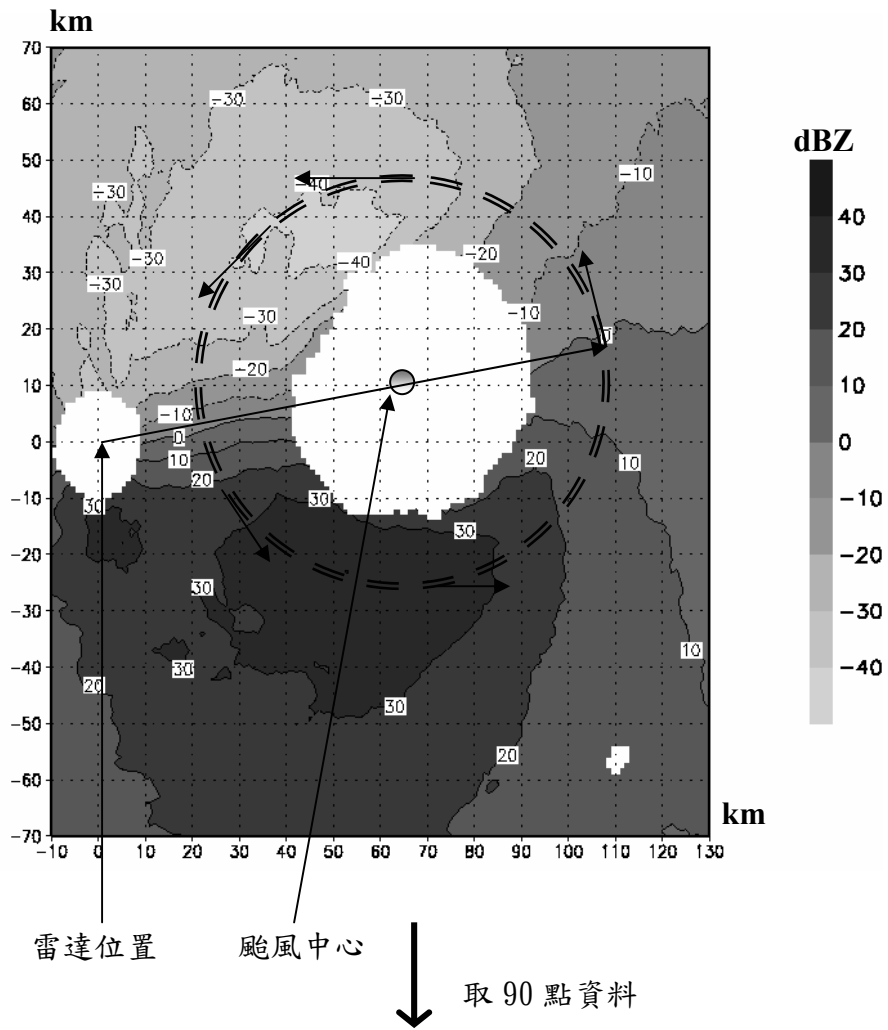


圖 2-4：GBVTD 程式將雷達觀測資料以颱風中心為原點取一圈 90 點資料示意圖。

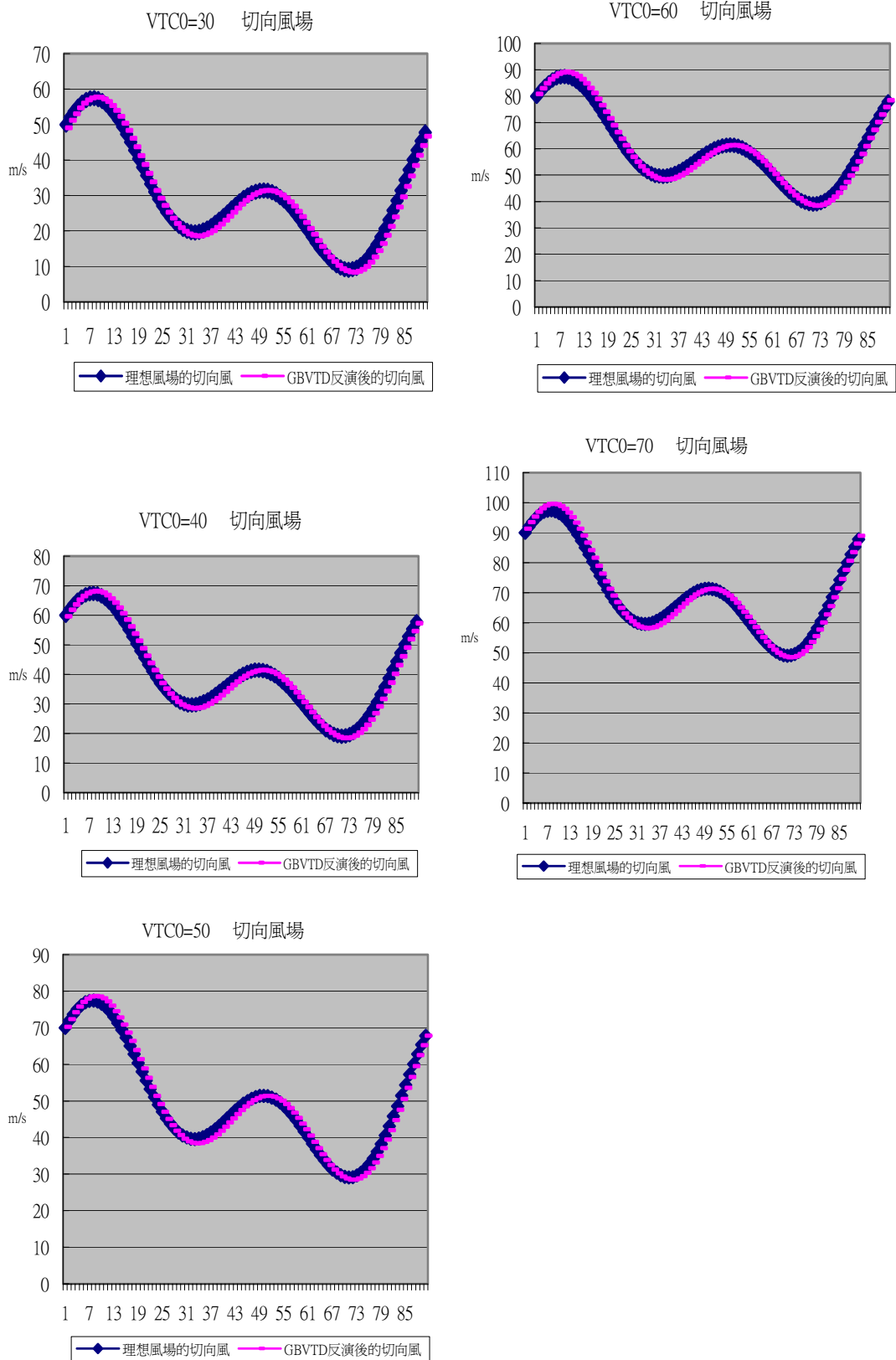


圖 3-1：理想風場不考慮非軸對稱徑向風 --- 隨著 VTC0 的改變，理想風場的切向風與 GBVTD 反演後的切向風之比較。

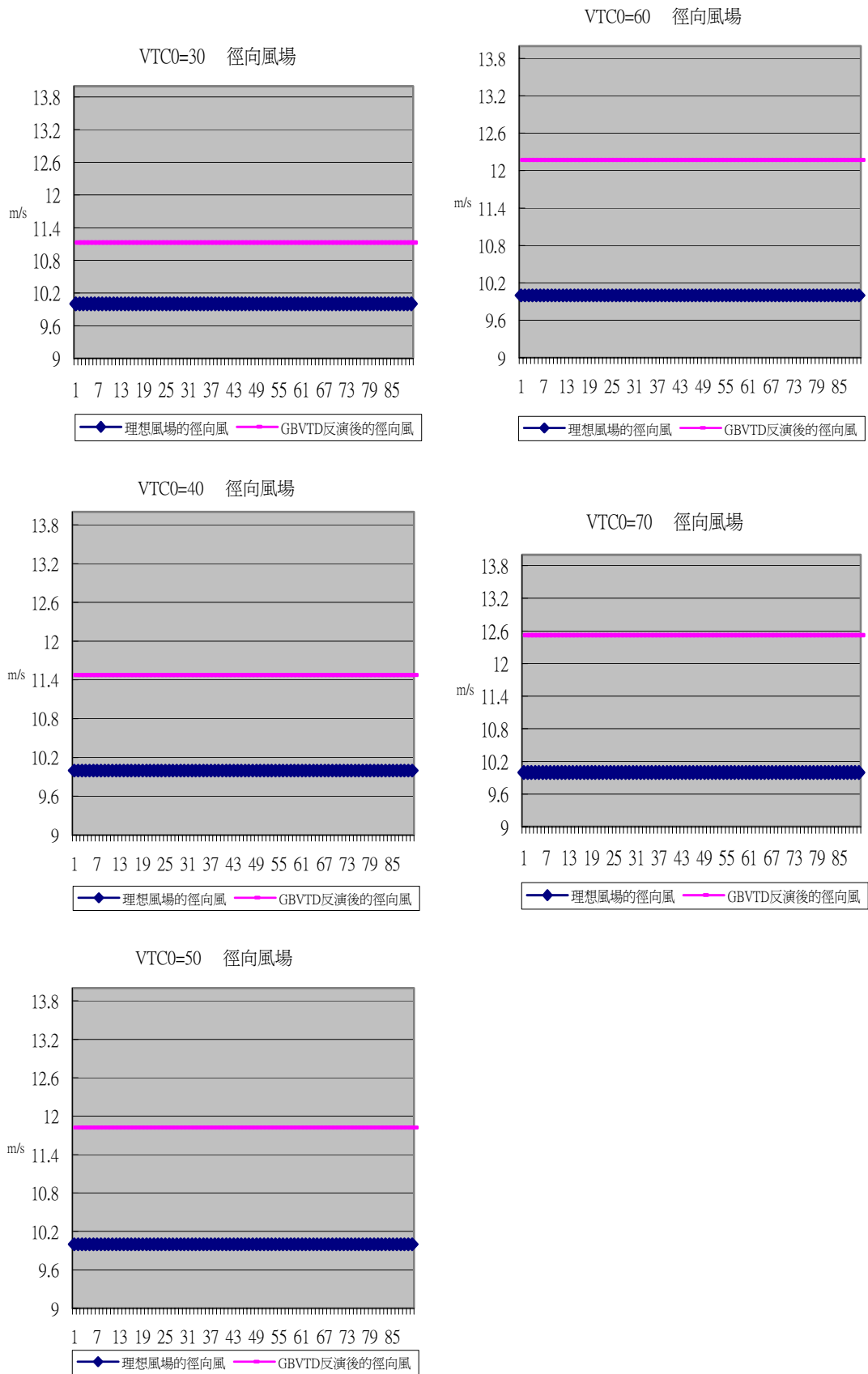


圖 3-2：理想風場不考慮非軸對稱徑向風 --- 隨著 VTC0 的改變，理想風場的徑向風與 GBVTD 反演後的徑向風之比較。

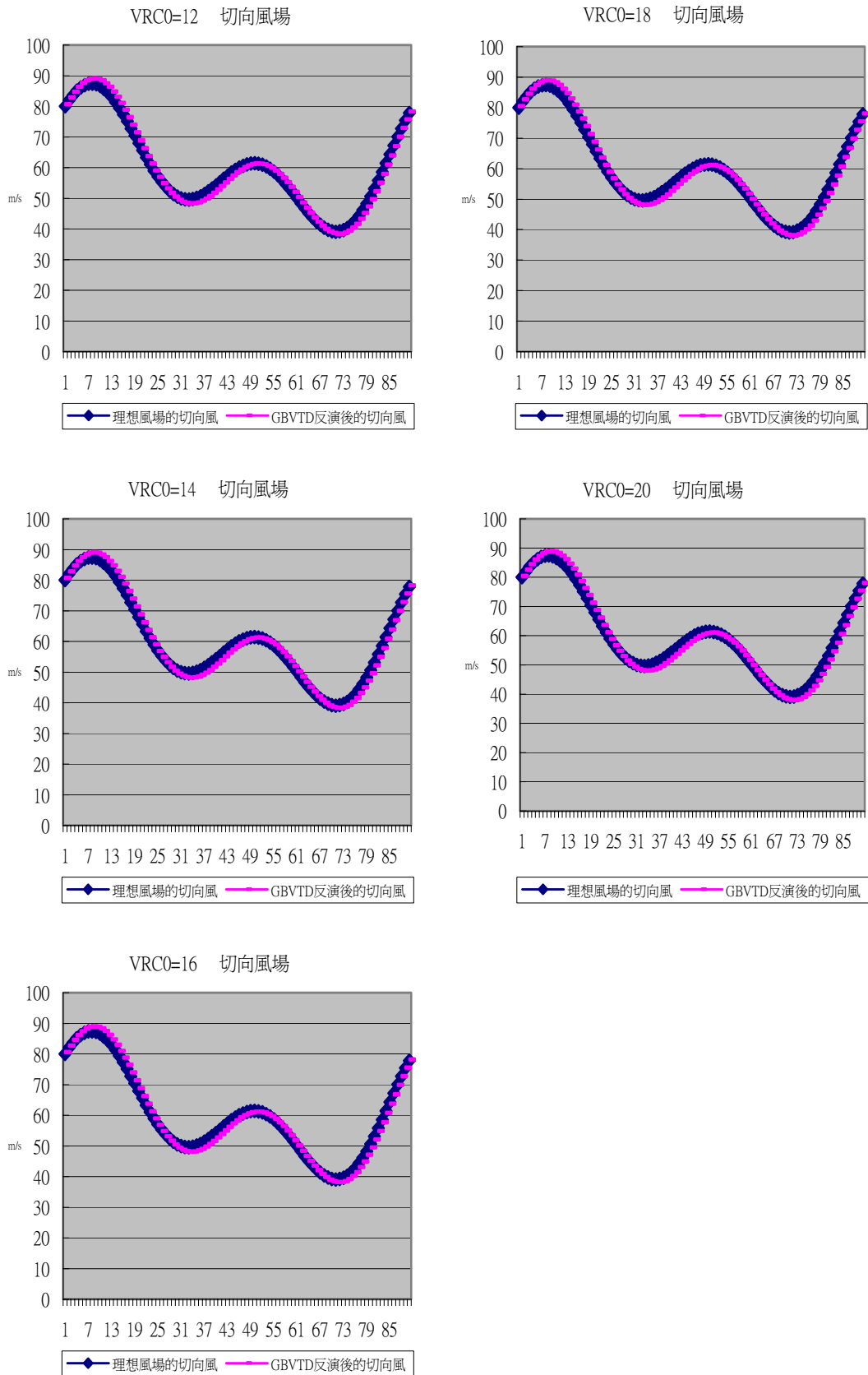


圖 3-3：理想風場不考慮非軸對稱徑向風 --- 隨著 VRC0 的改變，理想風場的切向風與 GBVTD 反演後的切向風之比較。

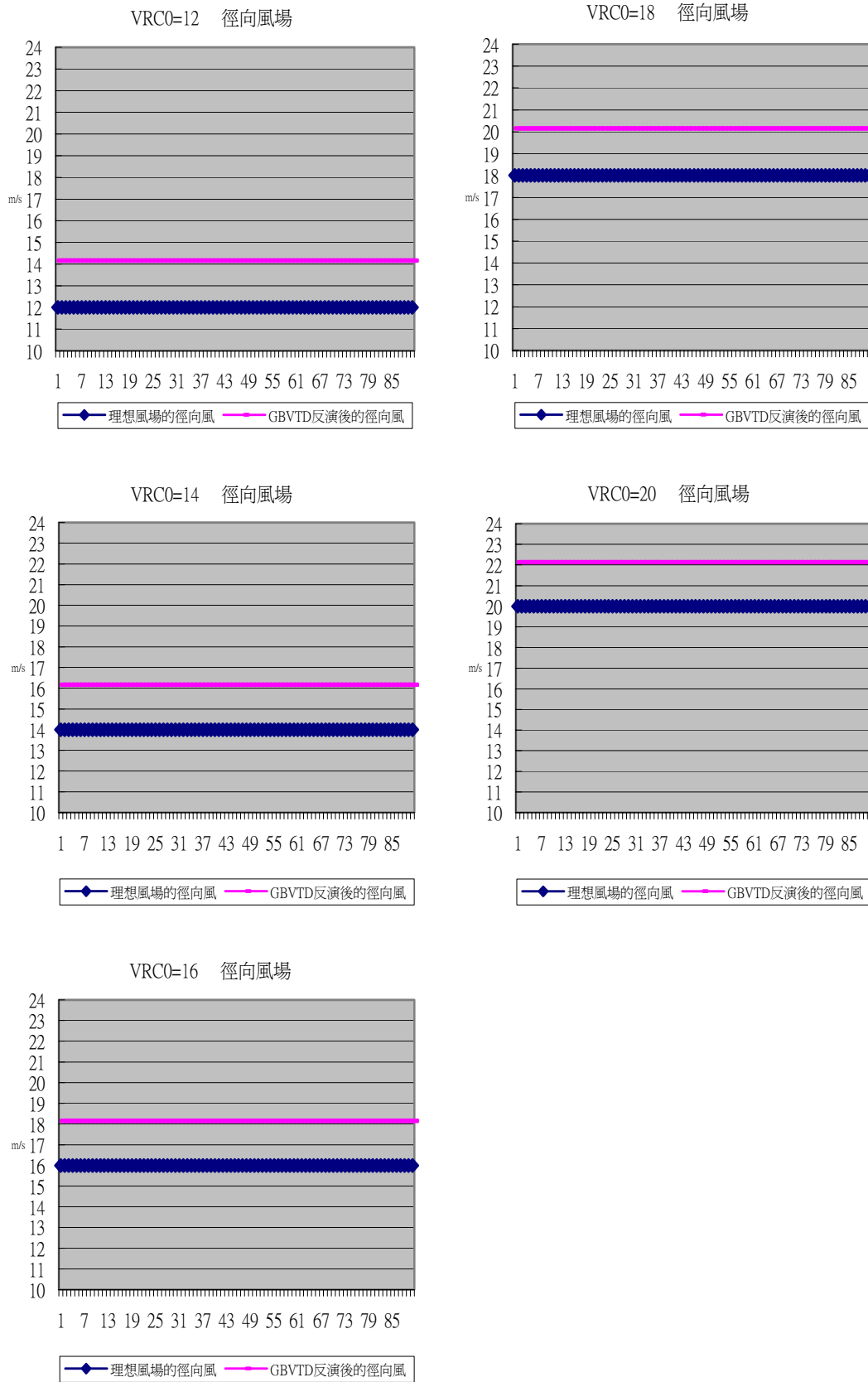


圖 3-4：理想風場不考慮非軸對稱徑向風 --- 隨著 VRC0 的改變，理想風場的徑向風與 GBVTD 反演後的徑向風之比較。

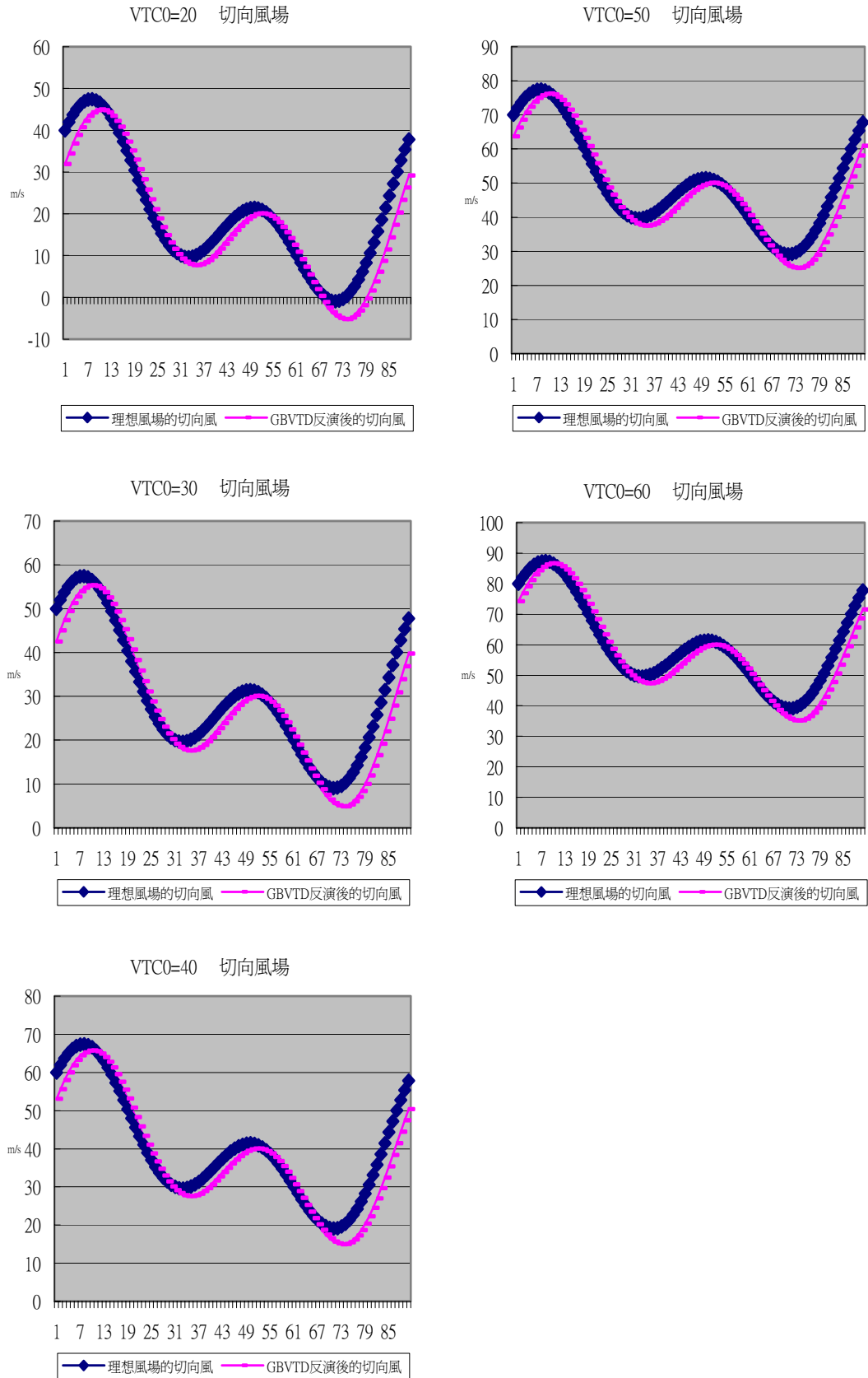


圖 3-5：理想風場考慮非軸對稱徑向風 --- 隨著 VTC0 的改變，理想風場的切向風與 GBVTD 反演後的切向風之比較。

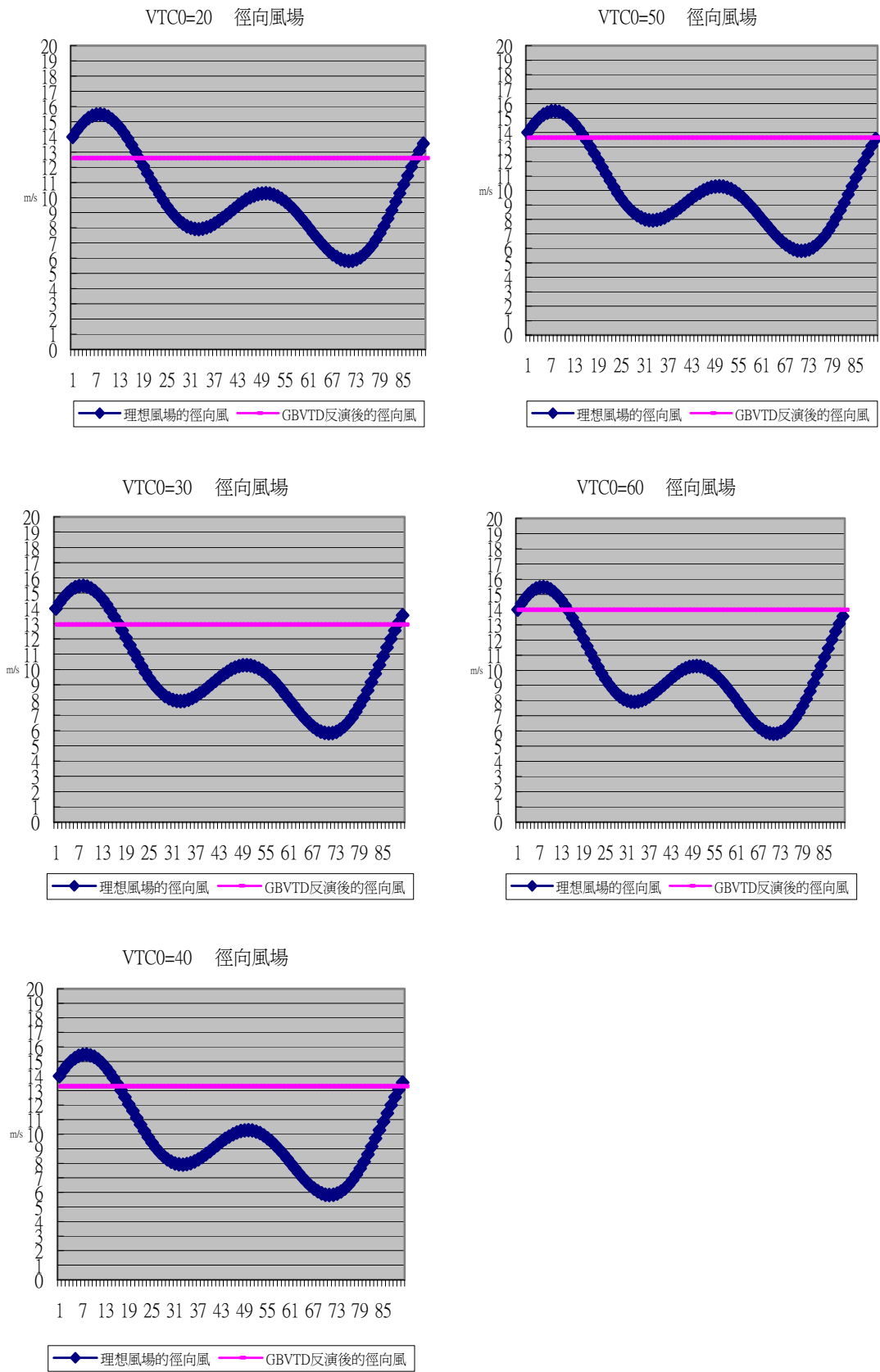


圖 3-6：理想風場考慮非軸對稱徑向風 --- 隨著 VTC0 的改變，理想風場的徑向風與 GBVTD 反演後的徑向風之比較。

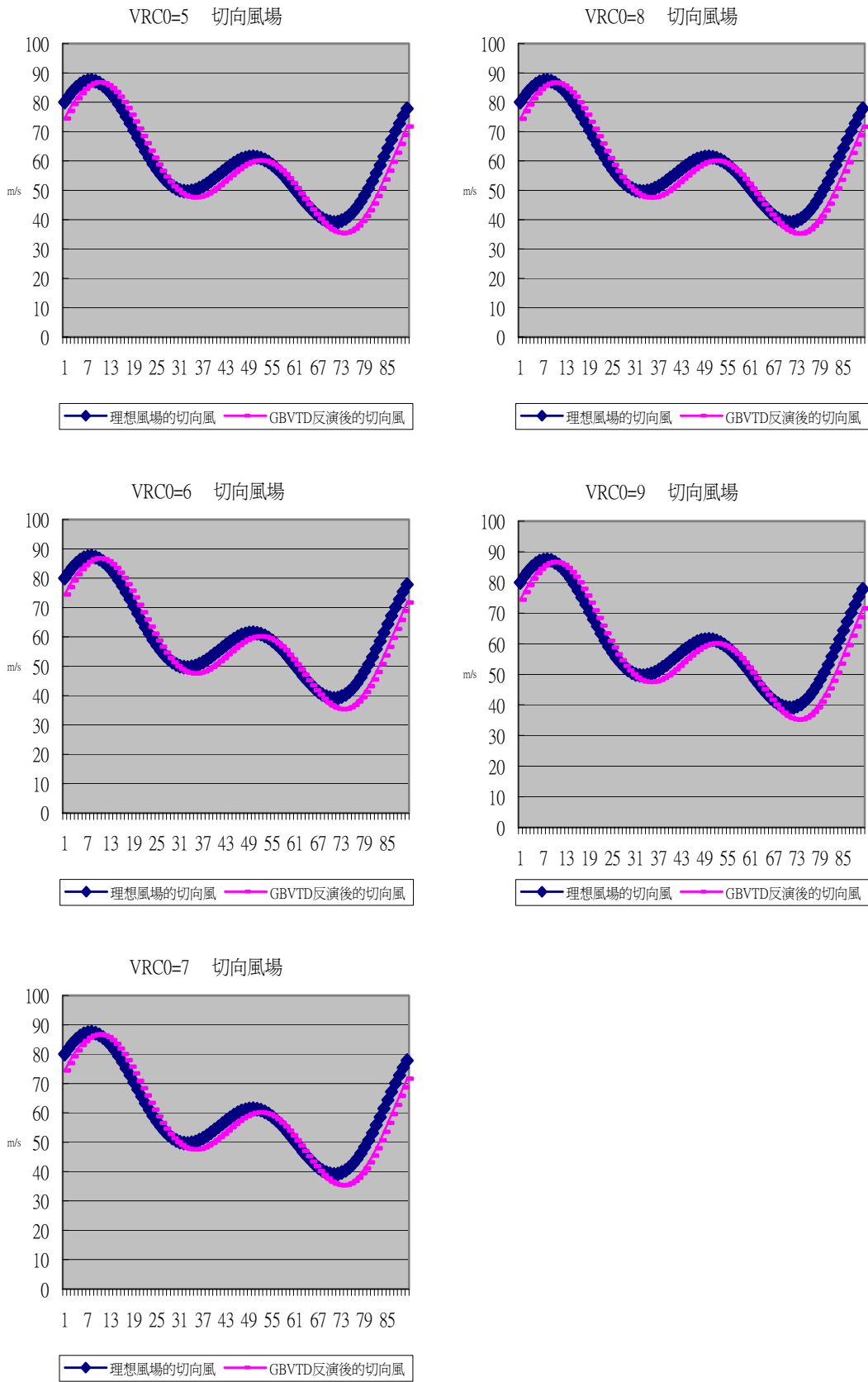


圖 3-7：理想風場考慮非軸對稱徑向風 --- 隨著 VRC0 的改變，理想風場的切向風與 GBVTD 反演後的切向風之比較。

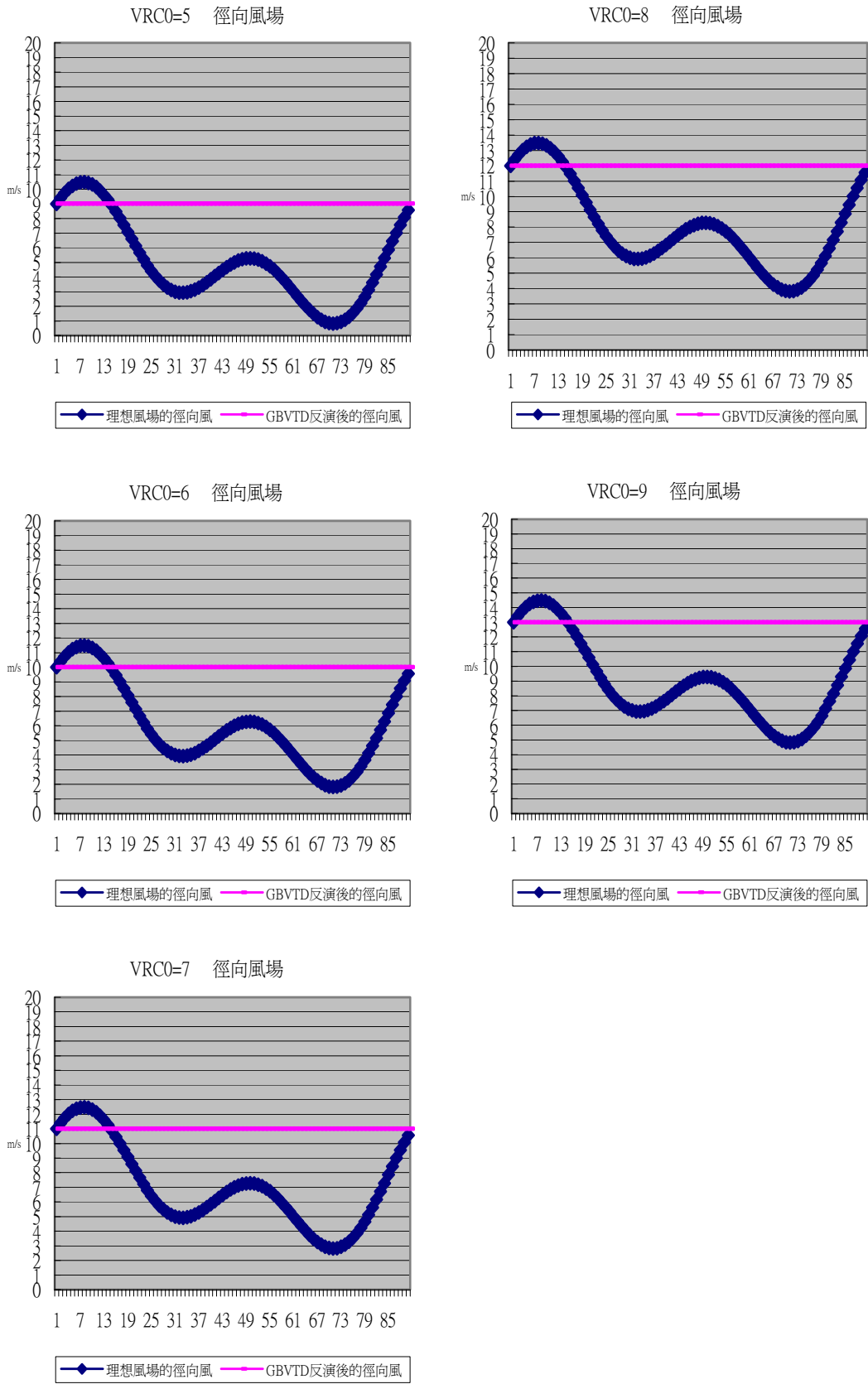


圖 3-8：理想風場考慮非軸對稱徑向風 --- 隨著 VRC0 的改變，理想風場的徑向風與 GBVTD 反演後的徑向風之比較。

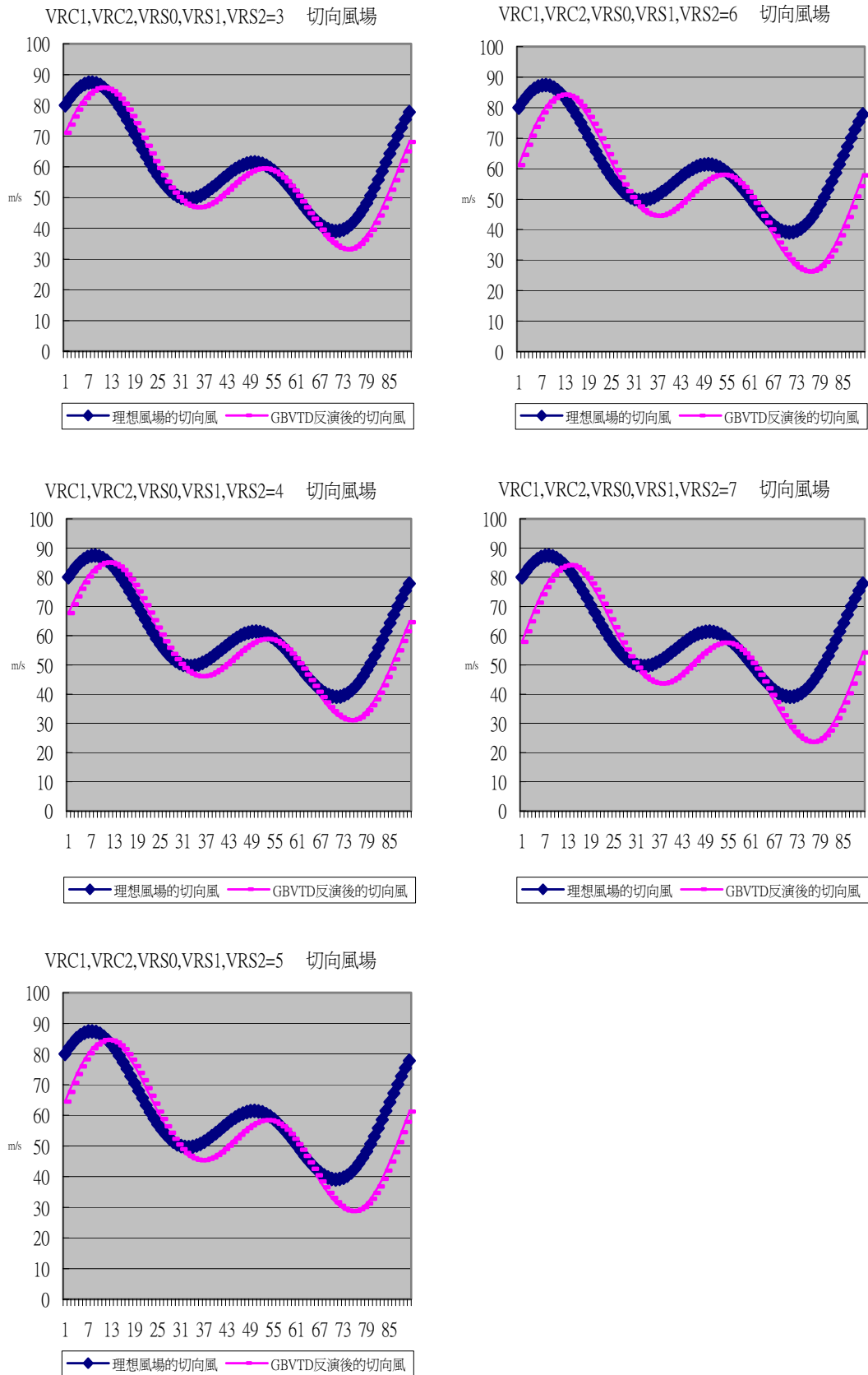


圖 3-9：理想風場考慮非軸對稱徑向風 --- 隨著 VRC1, VRC2, VRS1, VRS2 的改變，理想風場的切向風與 GBVTD 反演後的切向風之比較。

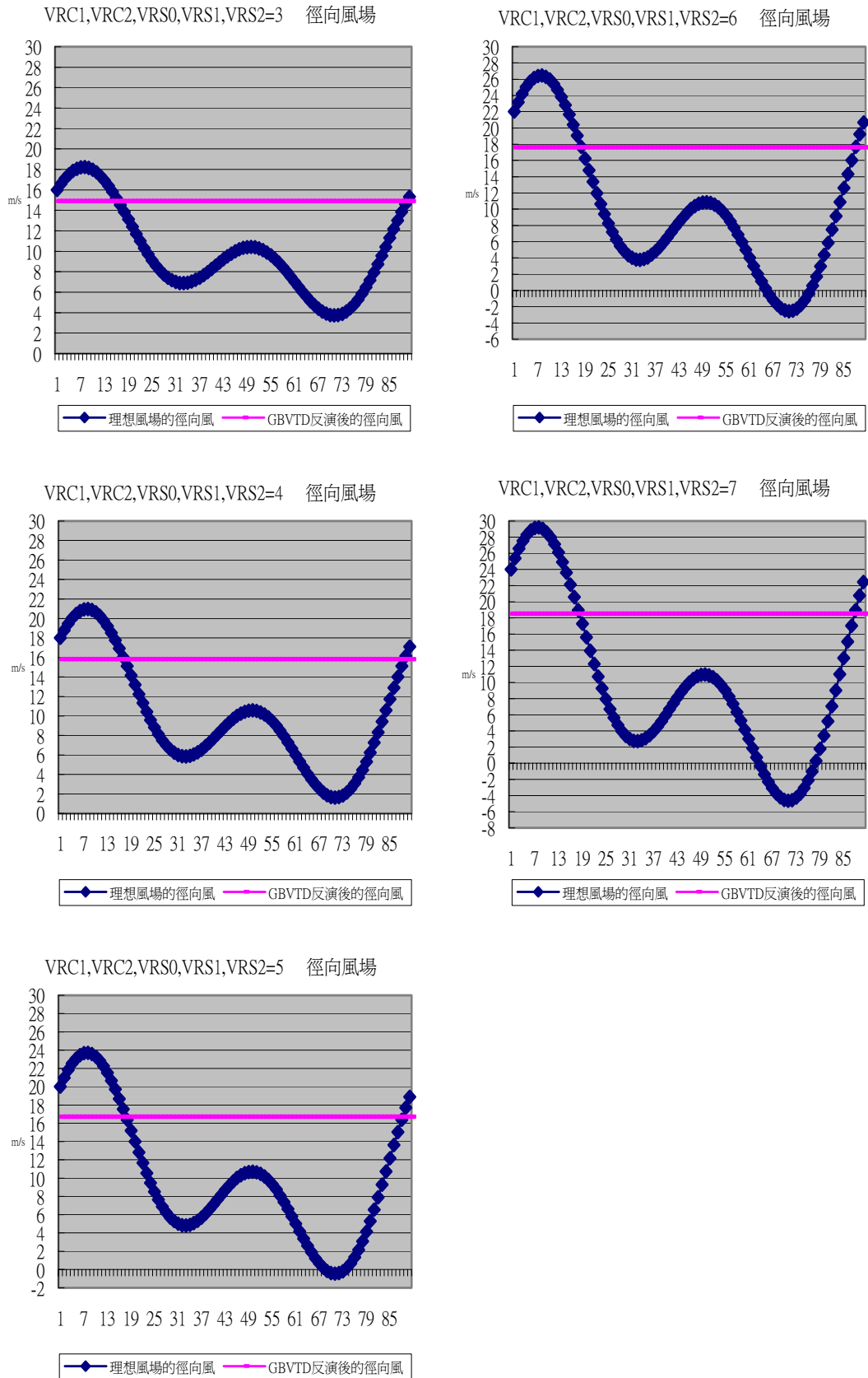
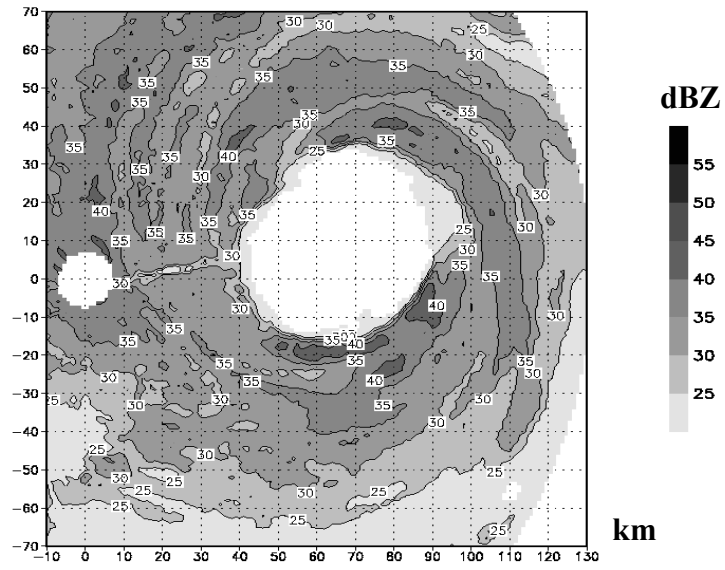
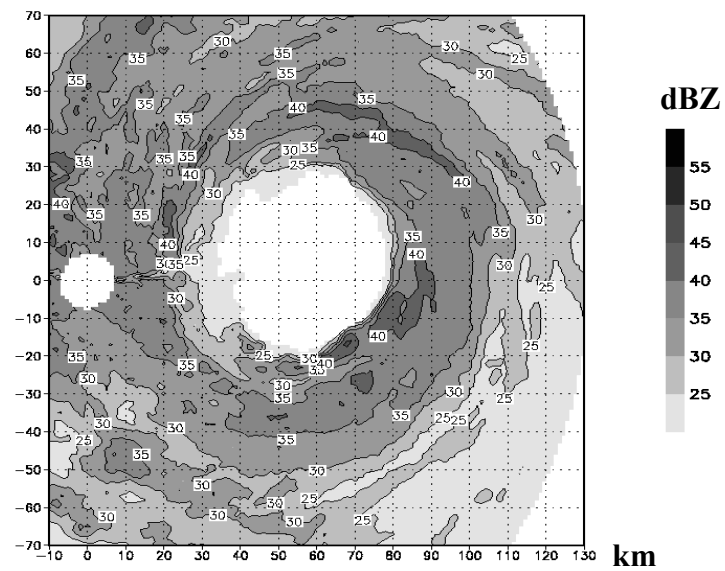


圖 3-10：理想風場考慮非軸對稱徑向風 --- 隨著 VRC1, VRC2, VRS1, VRS2 的改變，理想風場的徑向風與 GBVTD 反演後的徑向風之比較。

a. km



b. km



c. km

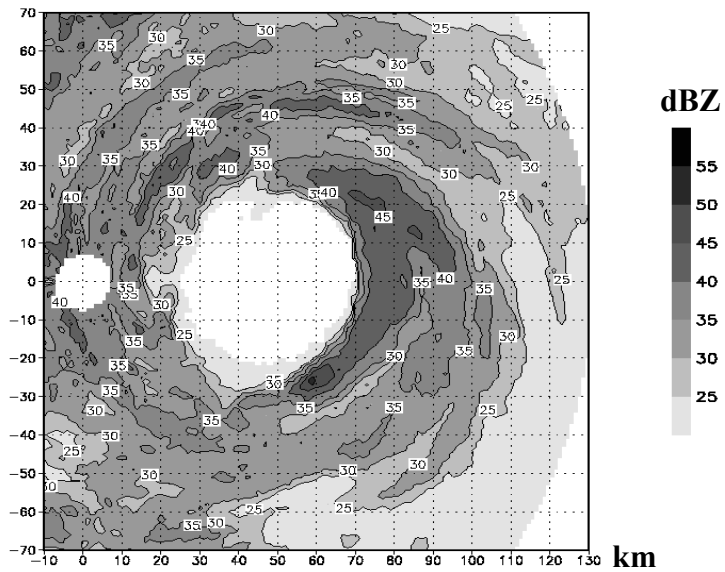


圖 4-1：納莉颱風高度 3 公里的逐時回波場(a)0858UTC；(b)1002UTC；(c)1100UTC。

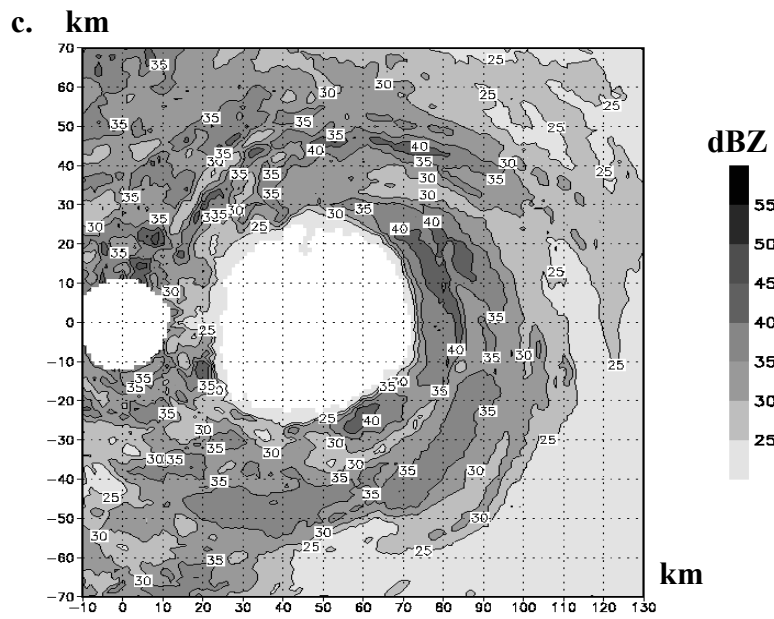
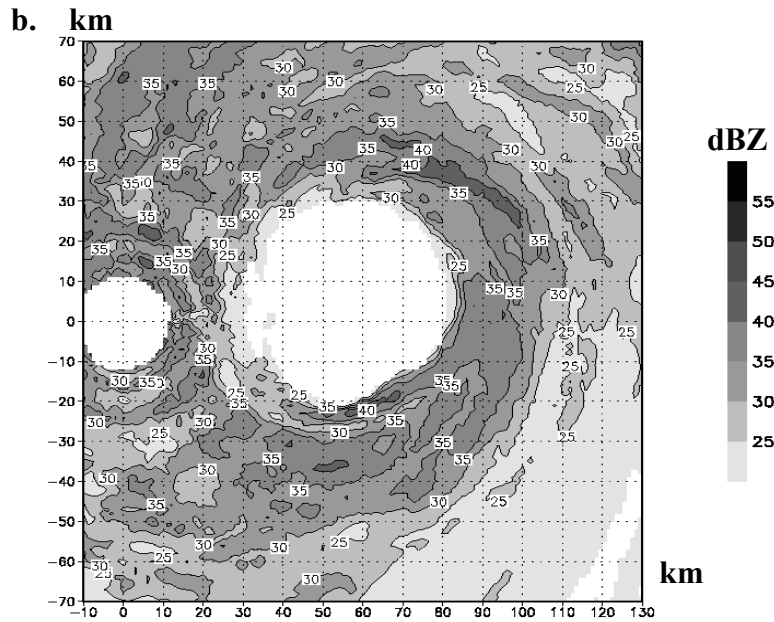
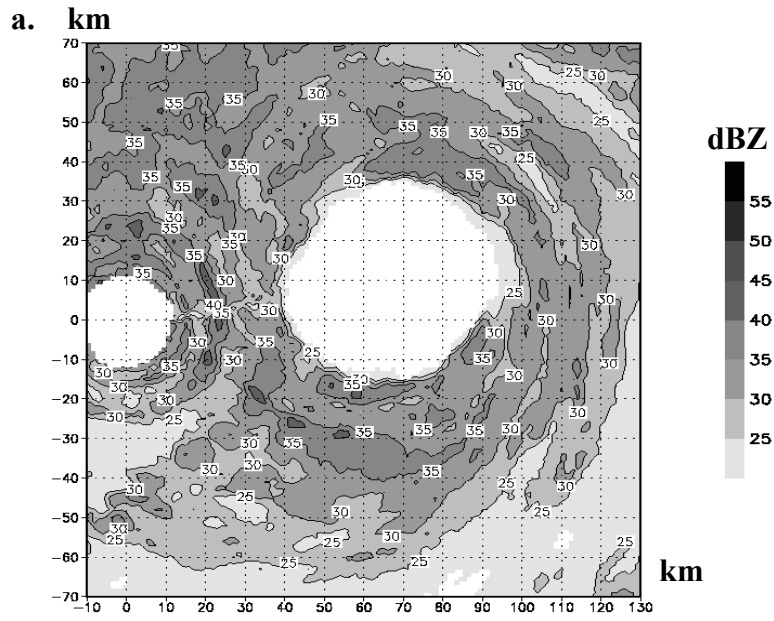
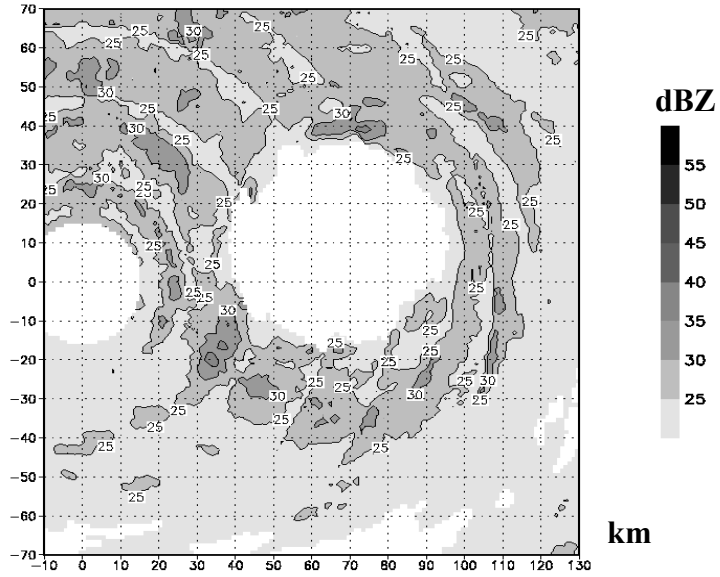
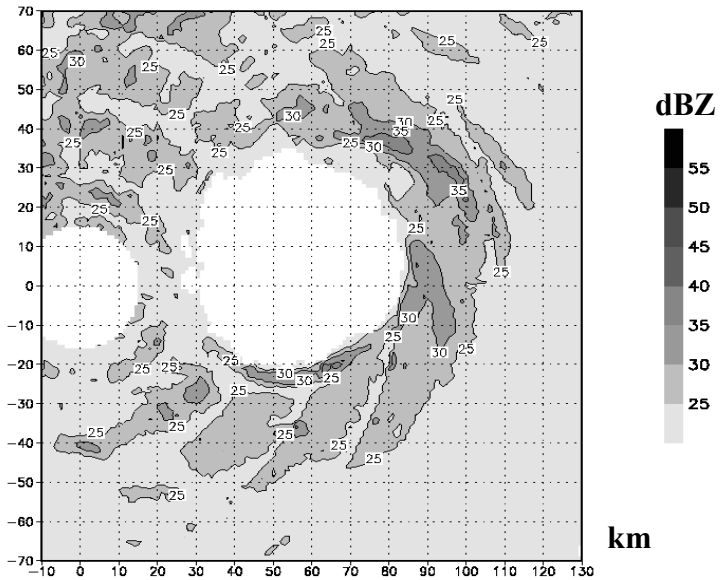


圖 4-2：納莉颱風高度 4.5 公里的逐時回波場(a)0858UTC;(b)1002UTC;(c)1100UTC。

a. km



b. km



c. km

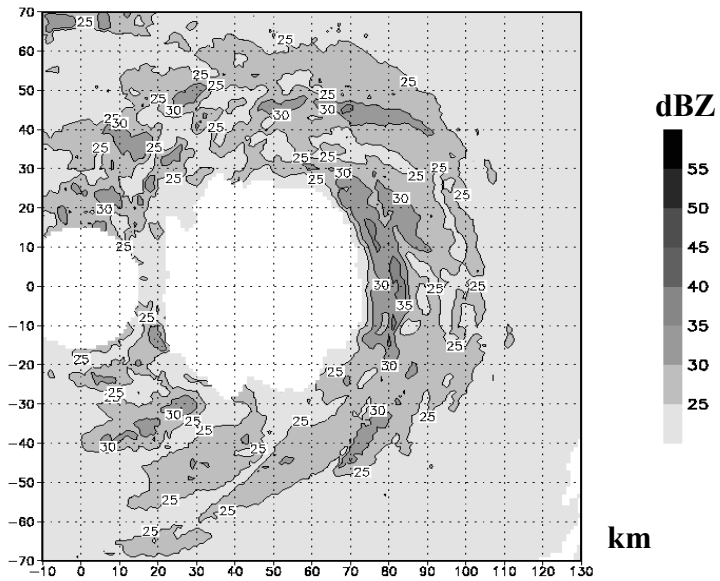


圖 4-3：納莉颱風高度 6 公里的逐時回波場(a)0858UTC；(b)1002UTC；(c)1100UTC。

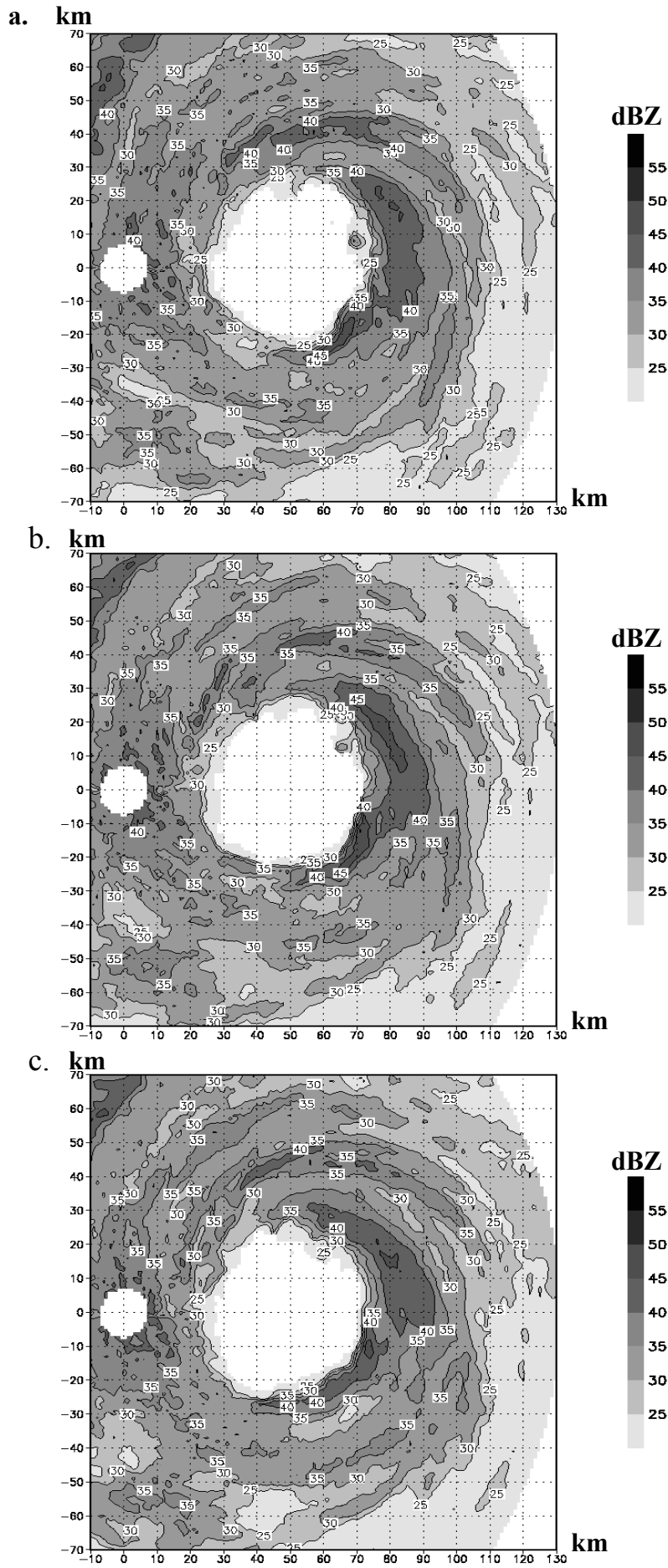


圖 4-4：納莉颱風高度 3 公里每六分鐘變化的回波場(a)1036UTC;(b)1042UTC;(c)1048UTC。

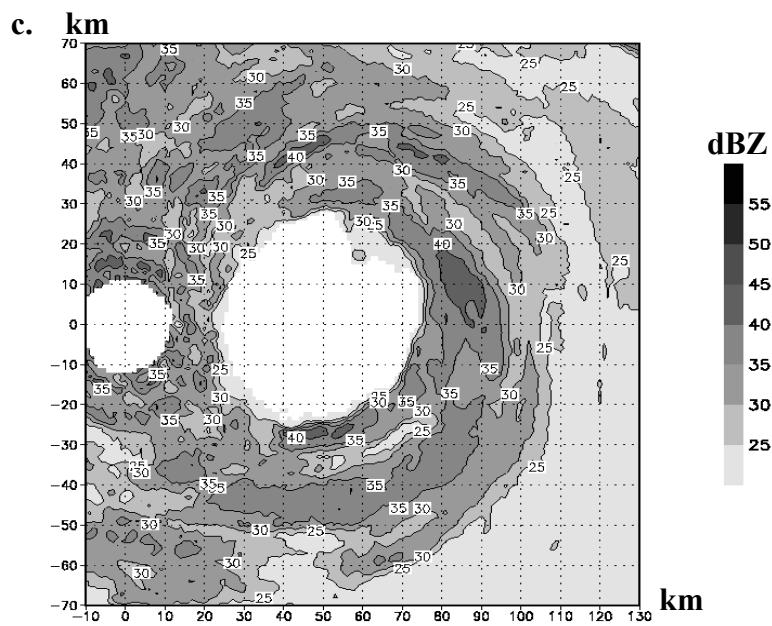
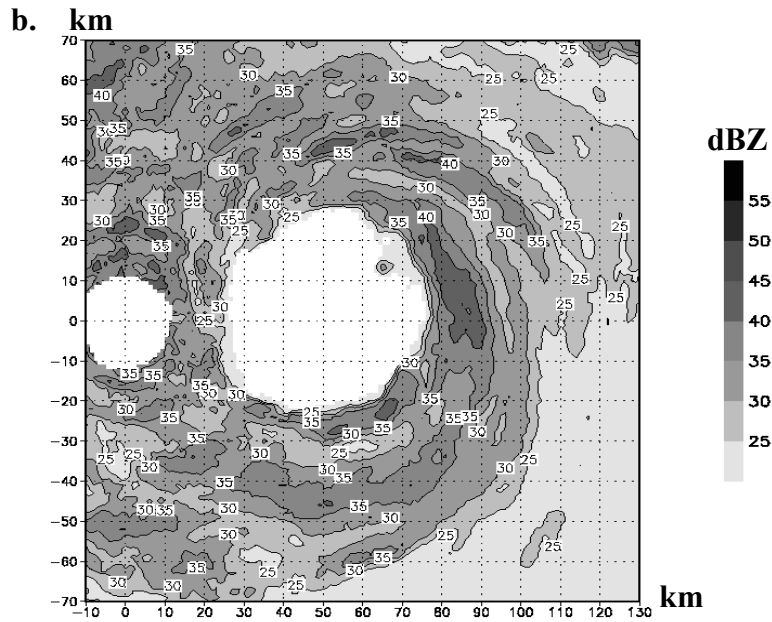
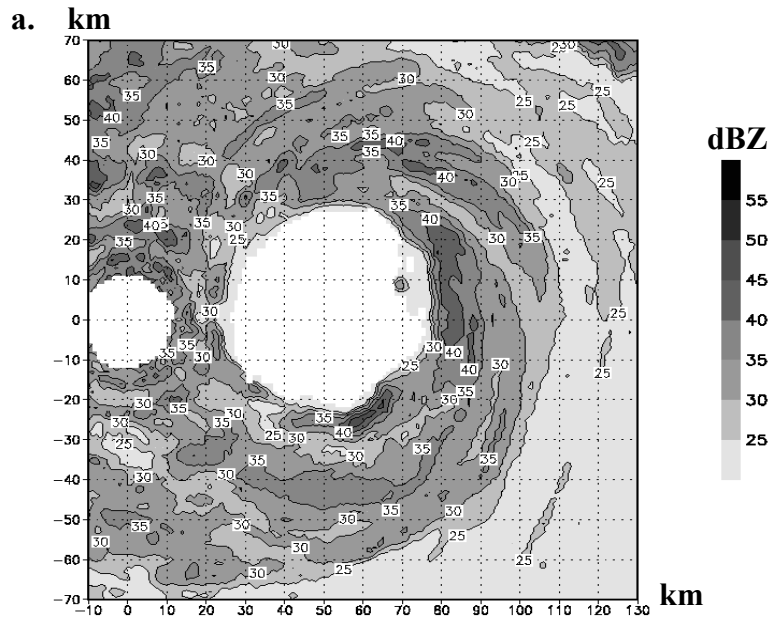


圖 4-5：納莉颱風高度 4.5 公里每六分鐘變化的回波場(a)1036UTC;(b)1042UTC;(c)1048UTC。

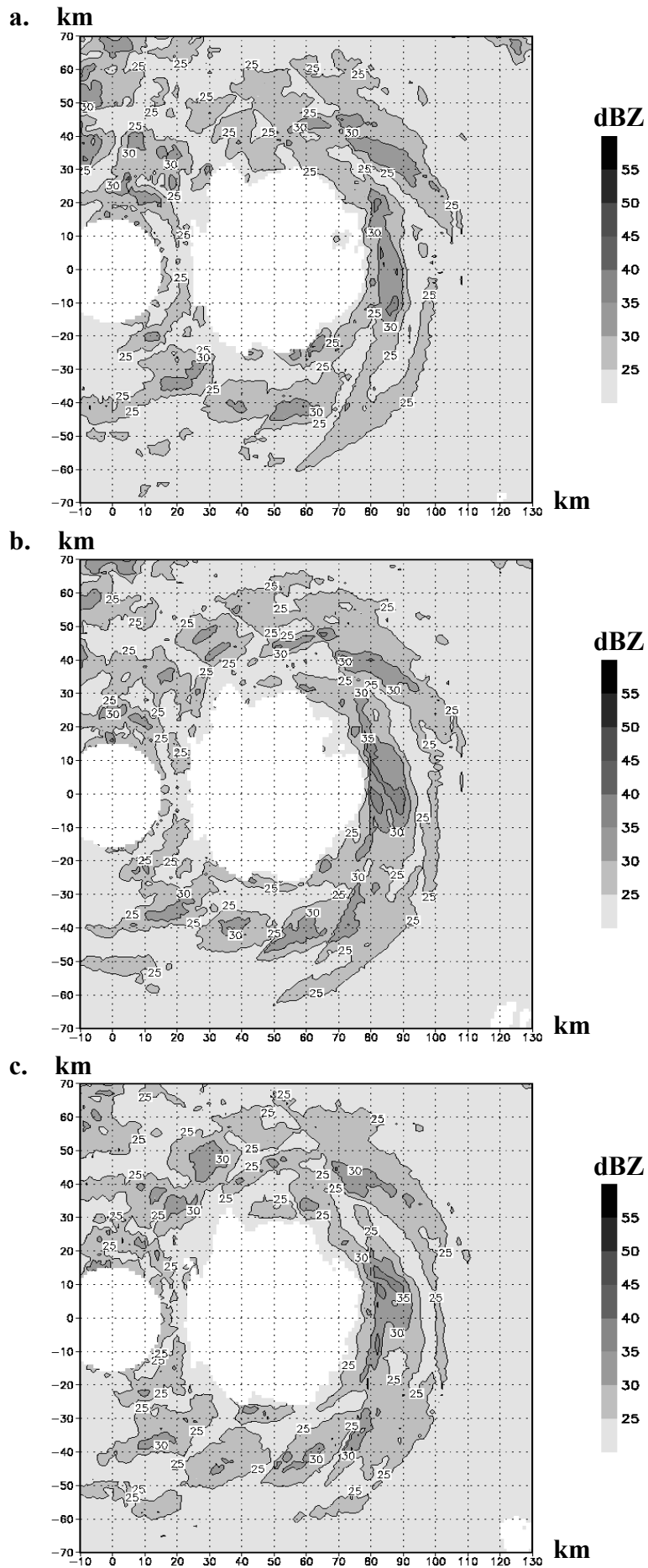
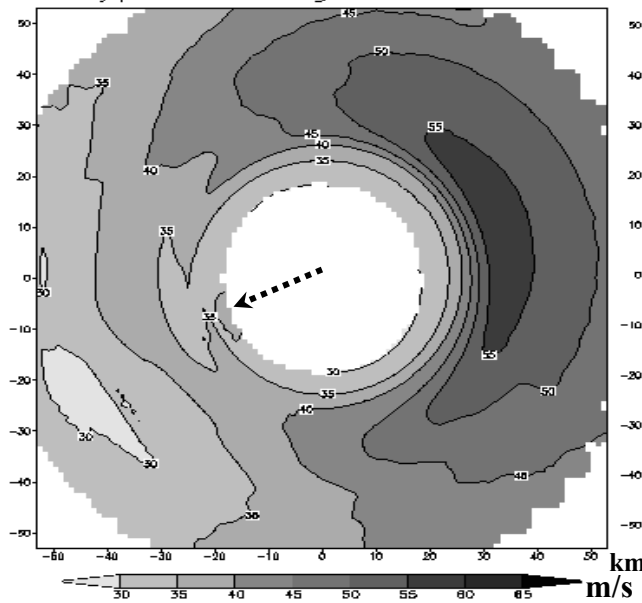


圖 4-6：納莉颱風高度 6 公里每六分鐘變化的回波場(a)1036UTC;(b)1042UTC;(c)1048UTC。

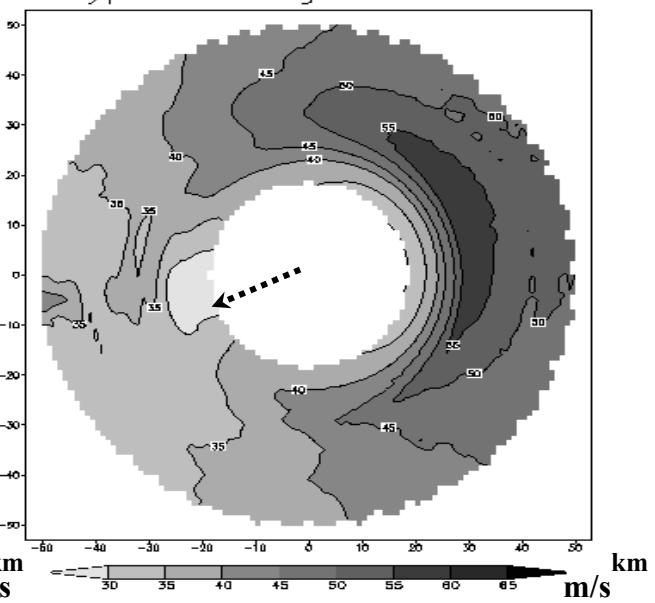
2001/0916/0858 UTC NARI 3KM

2001/0916/1002 UTC NARI 3KM

km Typhoon Tangential Wind



km Typhoon Tangential Wind



2001/0916/1100 UTC NARI 3KM

km Typhoon Tangential Wind

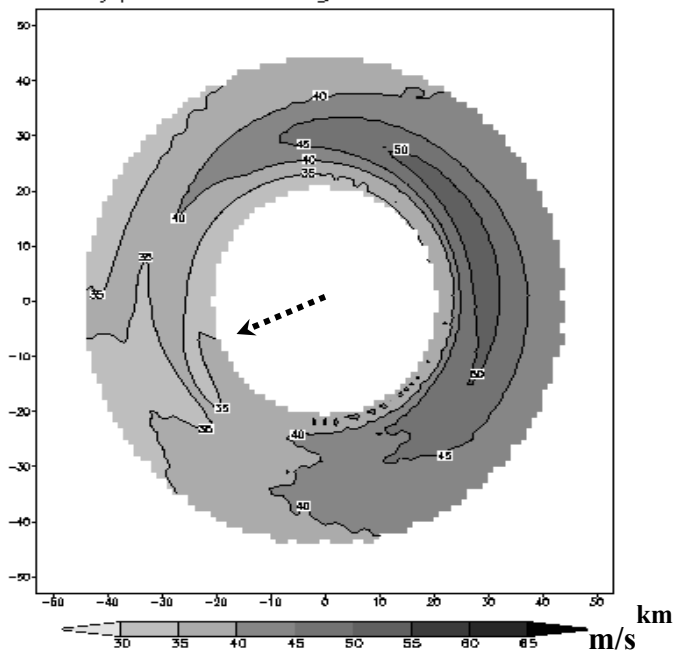
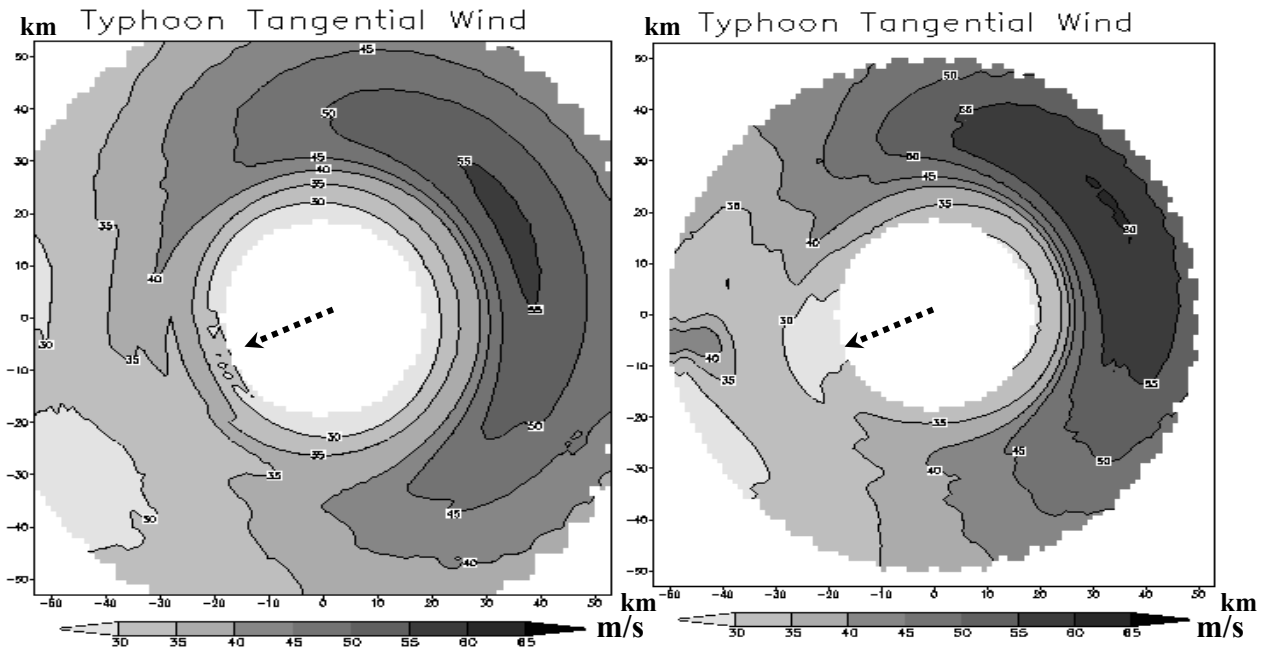


圖 4-7：高度 3 公里，以颱風中心為原點經由 GBVTD 反演後的切向風逐時變化  
(a)0858UTC;(b)1002UTC;(c)1100UTC，箭號為颱風移動方向。

2001/0916/0858 UTC NARI 4.5KM 2001/0916/1002 UTC NARI 4.5KM



2001/0916/1100 UTC NARI 4.5KM

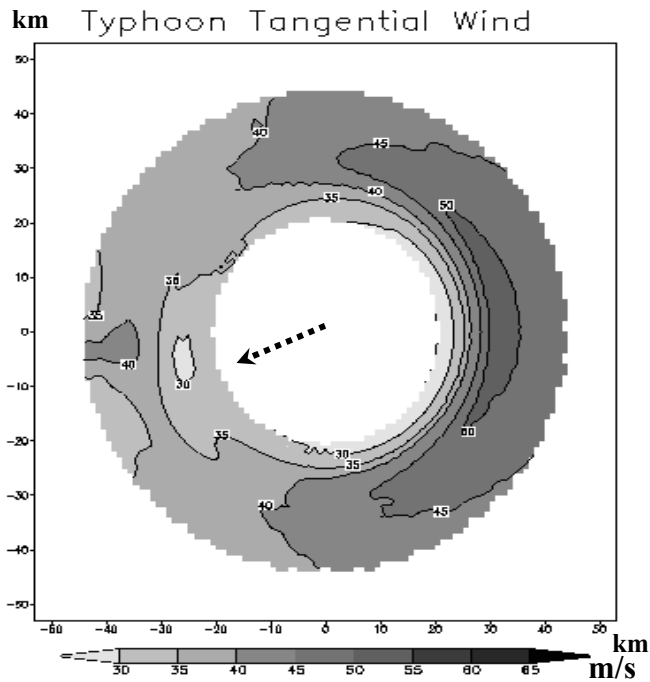
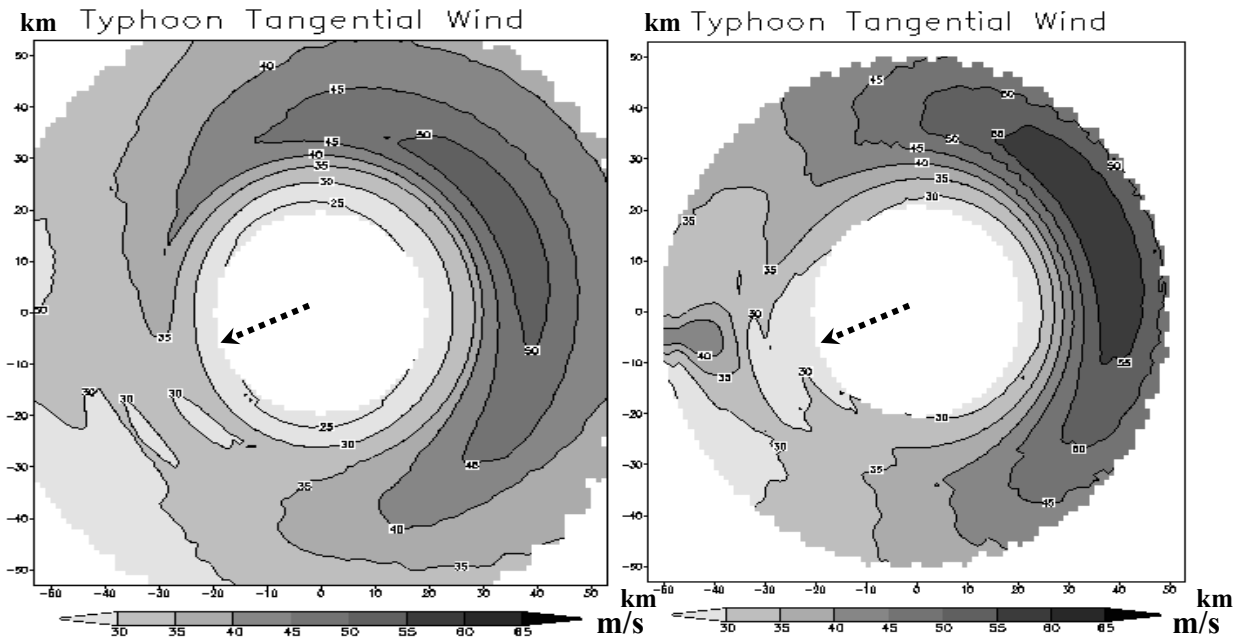


圖 4-8：高度 4.5 公里，以颱風中心為原點經由 GBVTD 反演後的切向風逐時變化 (a)0858UTC;(b)1002UTC;(c)1100UTC，箭號為颱風移動方向。

2001/0916/0858 UTC NARI 6KM 2001/0916/1002 UTC NARI 6KM



2001/0916/1100 UTC NARI 6KM

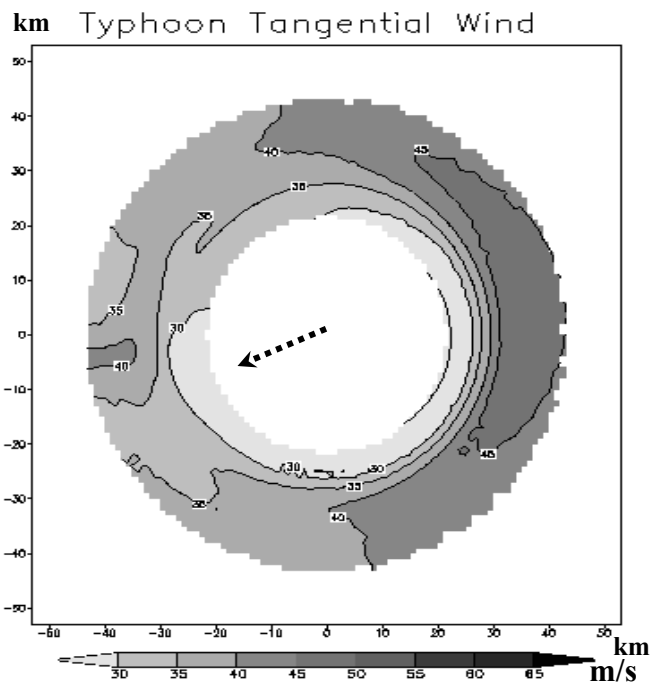


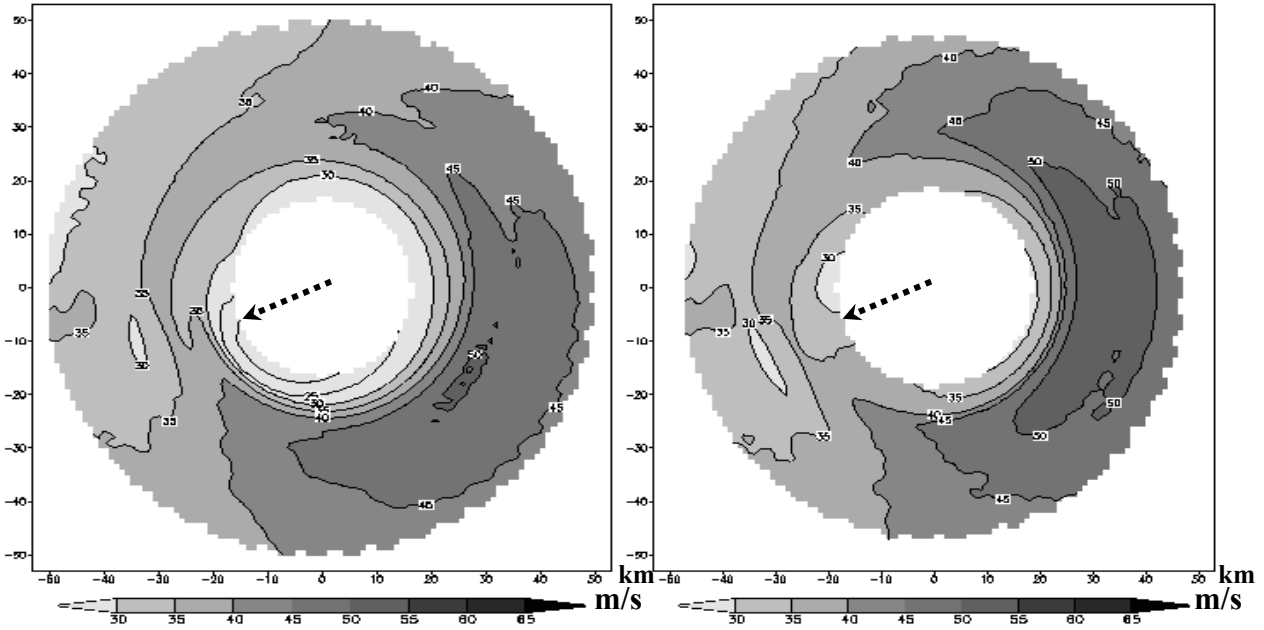
圖 4-9：高度 6 公里，以颱風中心為原點經由 GBVTD 反演後的切向風逐時變化  
(a)0858UTC;(b)1002UTC;(c)1100UTC，箭號為颱風移動方向。

2001/0916/1036 UTC NARI 3KM

2001/0916/1042 UTC NARI 3KM

km Typhoon Tangential Wind

km Typhoon Tangential Wind



2001/0916/1048 UTC NARI 3KM

km Typhoon Tangential Wind

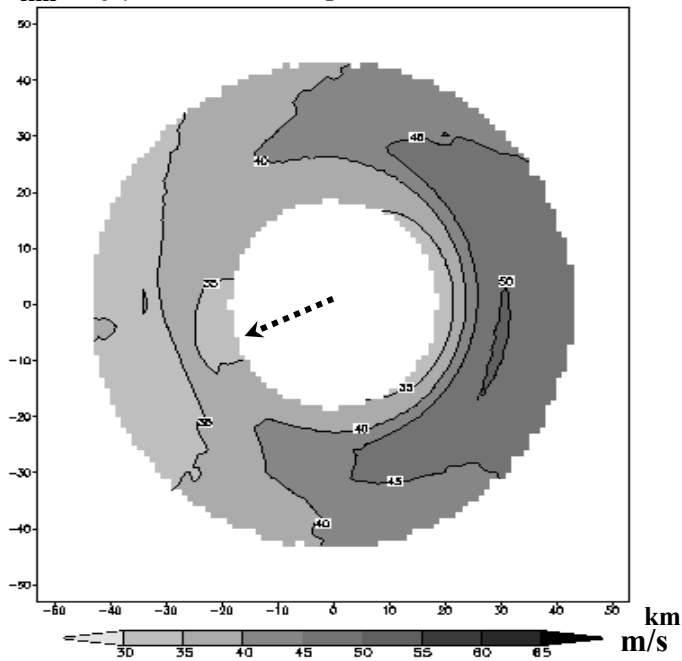
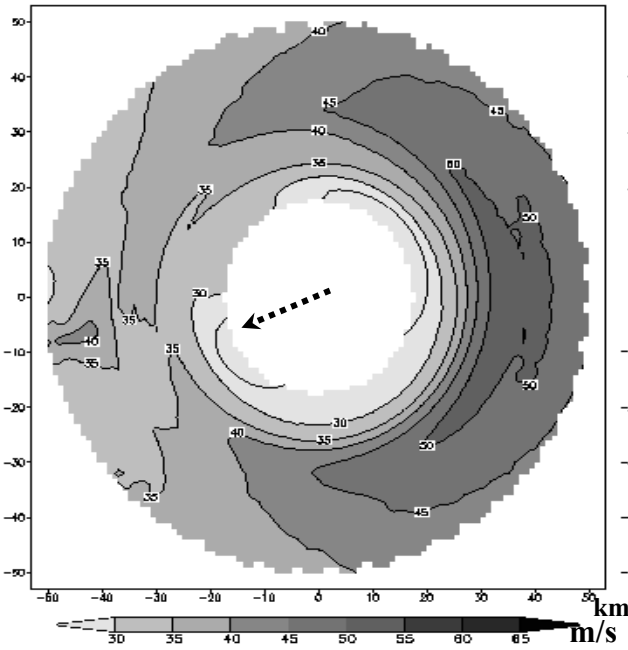


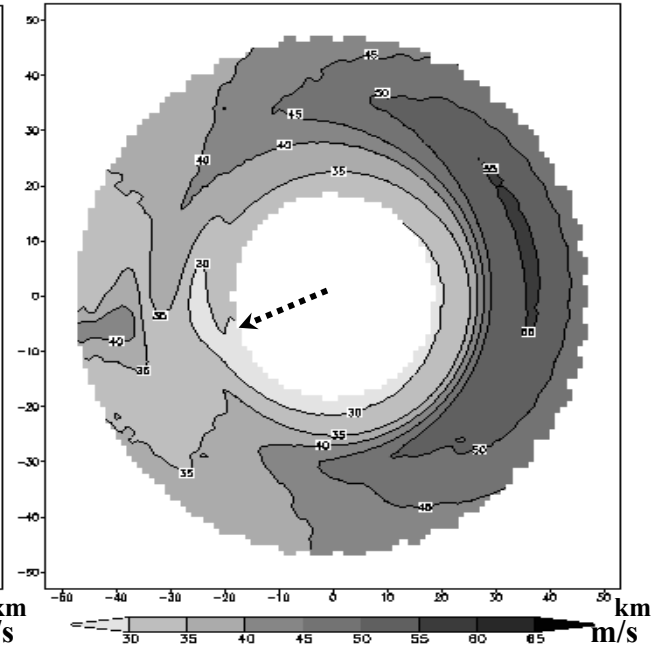
圖 4-10 : 高度 3 公里, 以颱風中心為原點經由 GBVTD 反演後的切向風-每六分鐘變化 (a)1036UTC;(b)1042UTC;(c)1048UTC, 箭號為颱風移動方向。

2001/0916/1036 UTC NARI 4.5KM 2001/0916/1042 UTC NARI 4.5KM

km Typhoon Tangential Wind



km Typhoon Tangential Wind



2001/0916/1048 UTC NARI 4.5KM

km Typhoon Tangential Wind

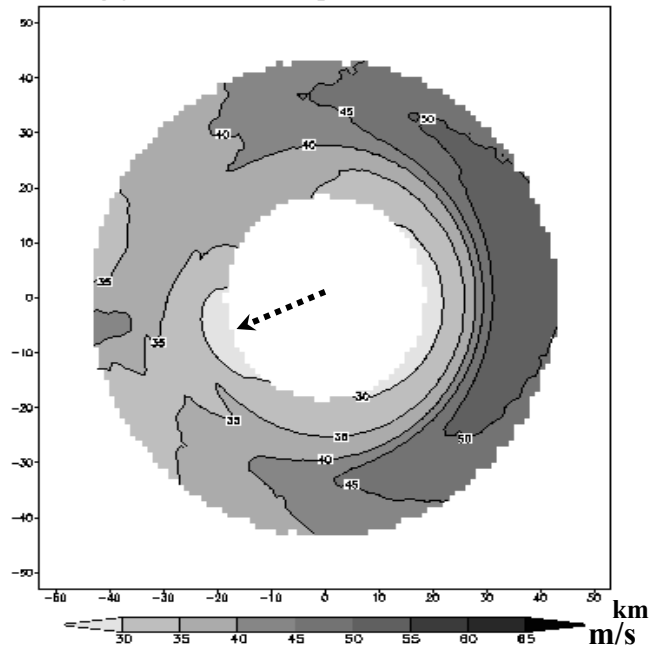


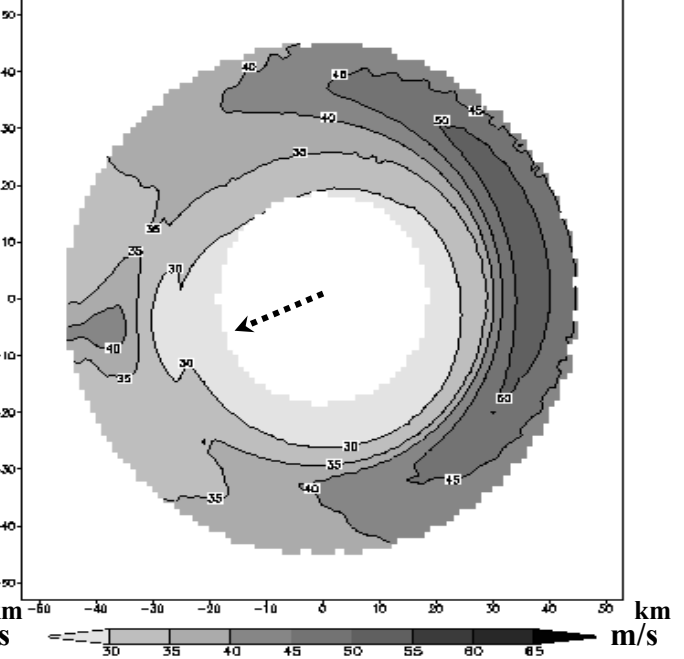
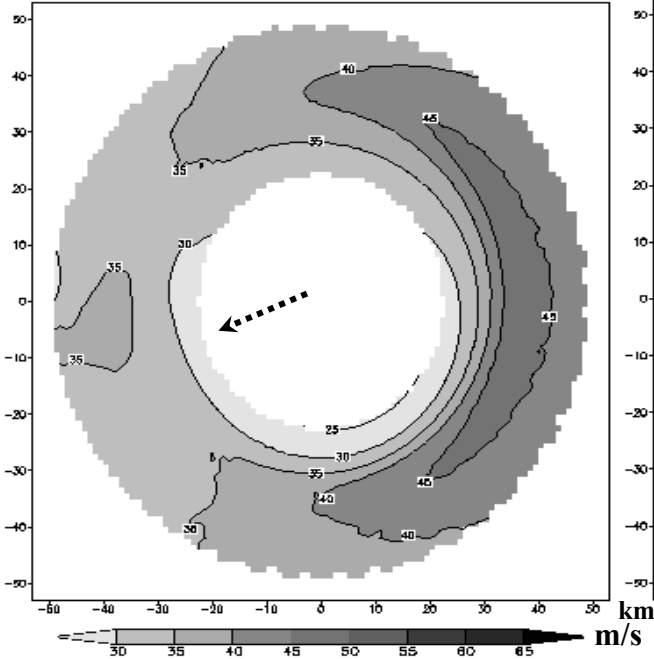
圖 4-11 : 高度 4.5 公里, 以颱風中心為原點經由 GBVTD 反演後的切向風-每六分鐘變化 (a)1036UTC; (b)1042UTC; (c)1048UTC, 箭號為颱風移動方向。

2001/0916/1036 UTC NARI 6KM

2001/0916/1042 UTC NARI 6KM

km Typhoon Tangential Wind

km Typhoon Tangential Wind



2001/0916/1048 UTC NARI 6KM

km Typhoon Tangential Wind

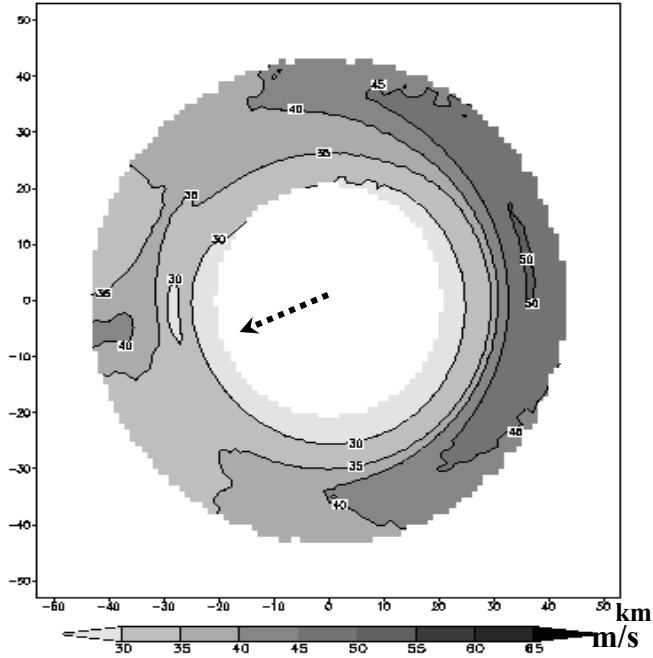


圖 4-12：高度 6 公里，以颱風中心為原點經由 GBVTD 反演後的切向風-每六分鐘變化 (a)1036UTC;(b)1042UTC;(c)1048UTC，箭號為颱風移動方向。

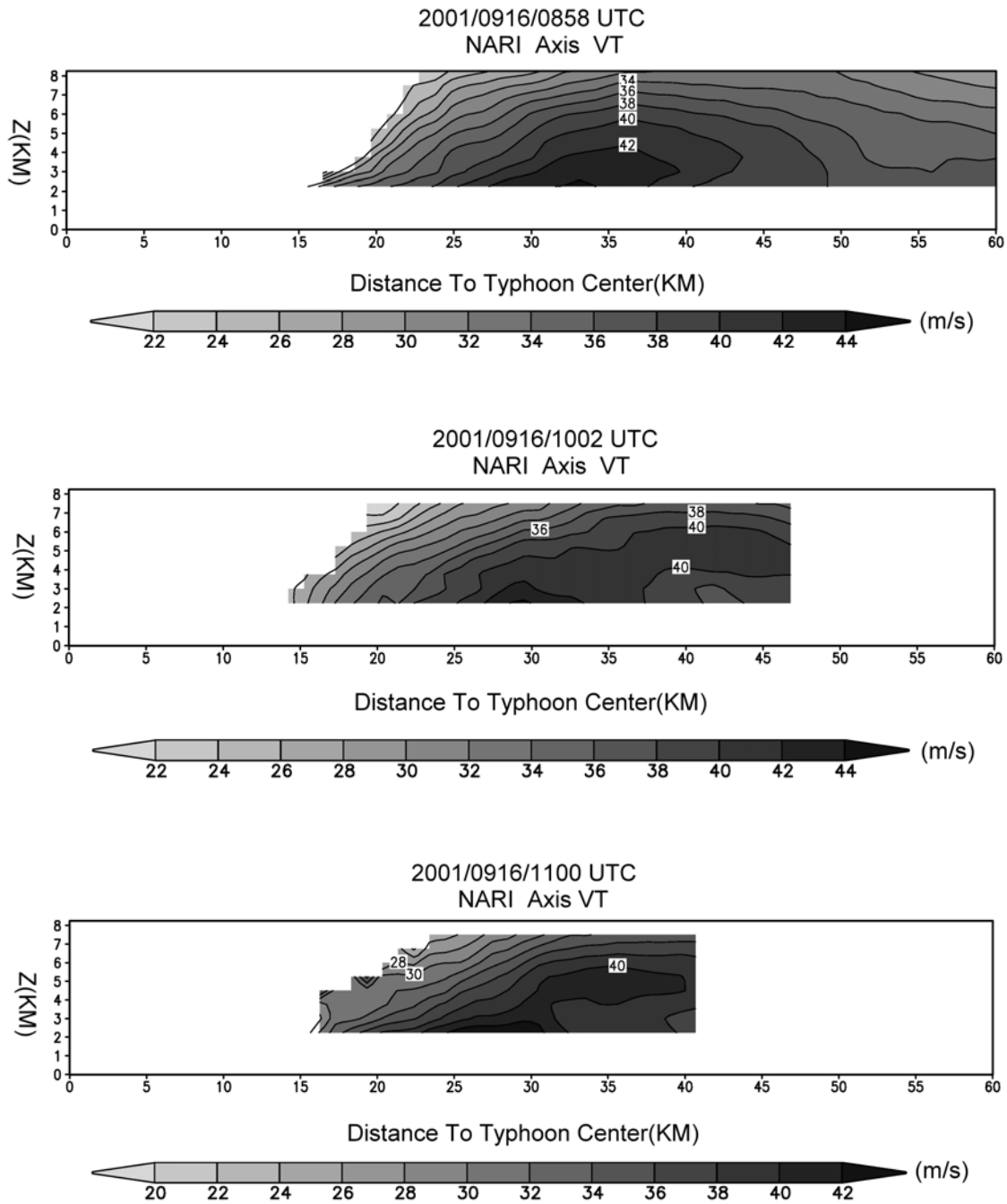


圖 4-13 : 納莉颱風軸對稱切向風分量( $V_T C_0$ )垂直剖面逐時變化示意圖。

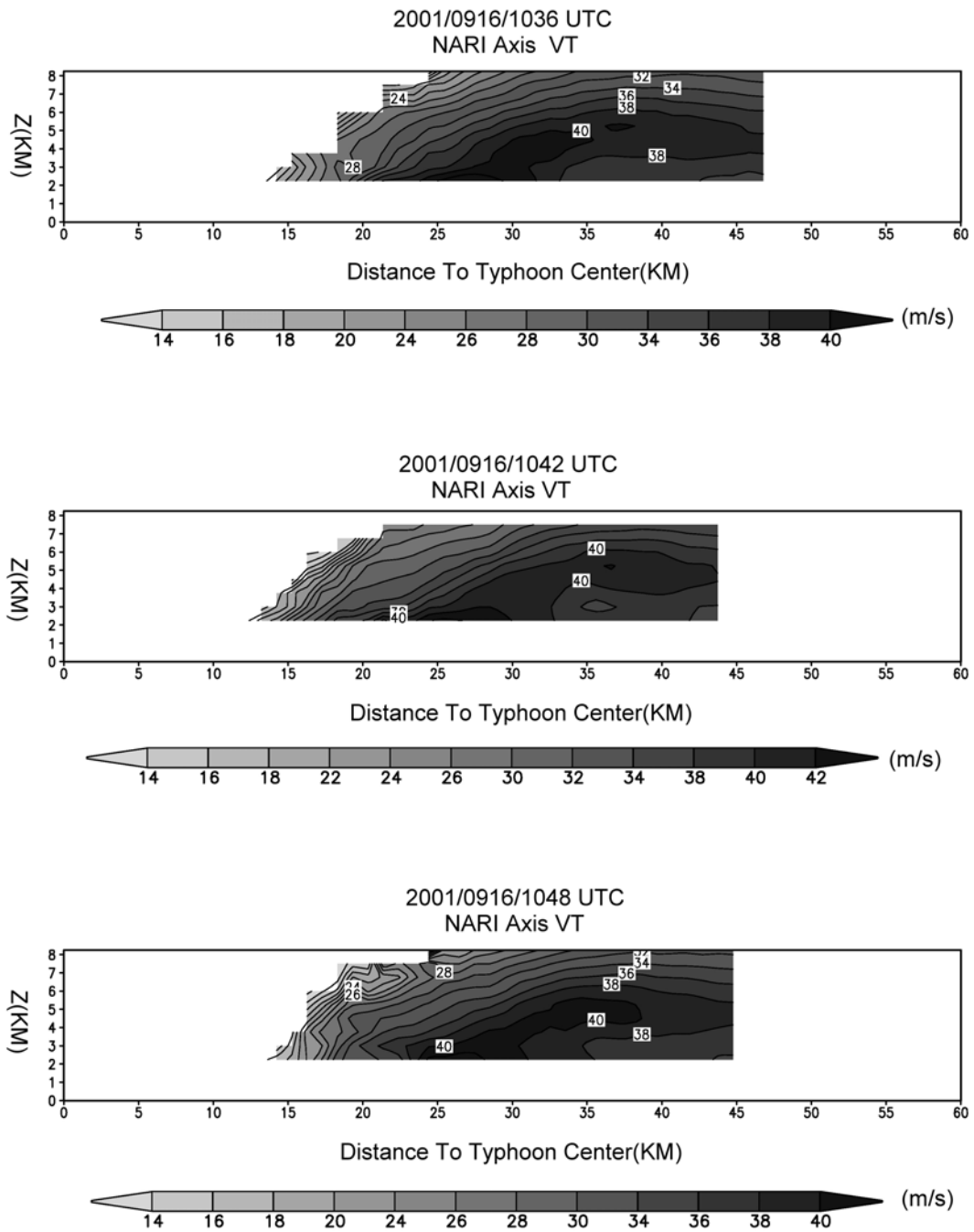


圖 4-14 : 納莉颱風軸對稱切向風分量( $V_T C_0$ )垂直剖面六分鐘變化示意圖。

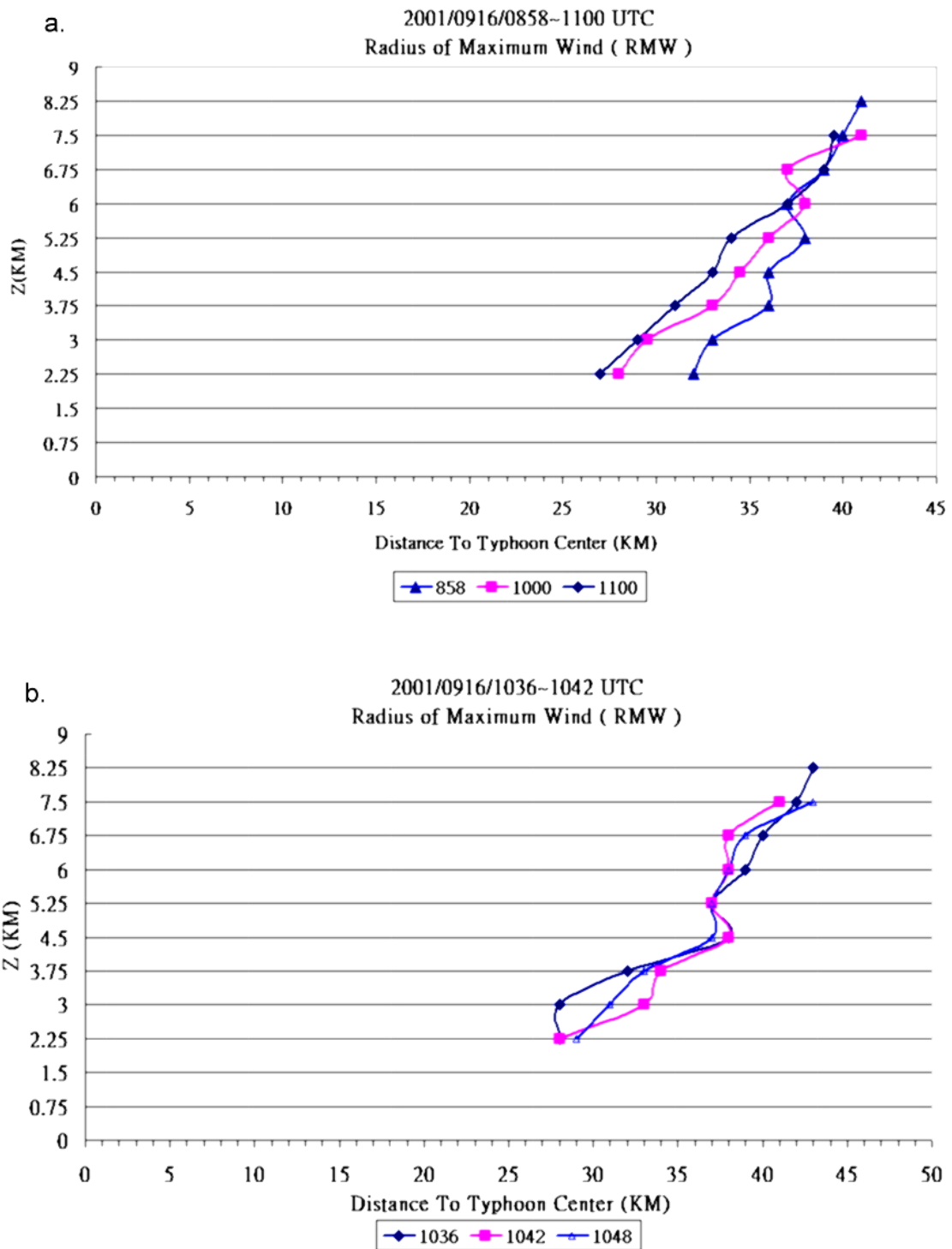


圖 4-15 : 最大風速半徑(RMW)隨高度向外傾斜示意圖(a)0858UTC~1100UTC;  
(b)1036UTC~1048UTC。

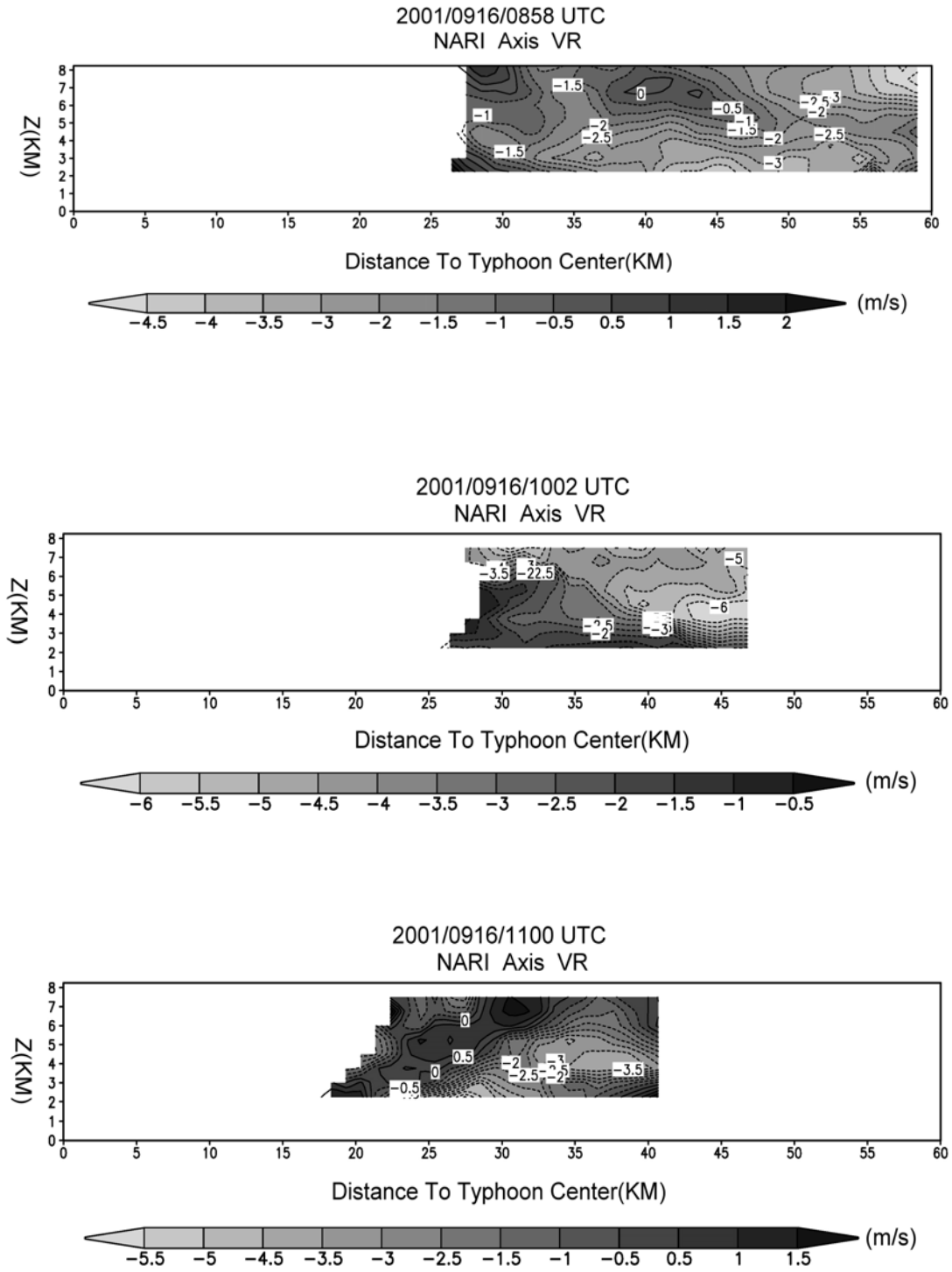


圖 4-16 : 納莉颱風軸對稱徑向風分量 ( $V_R C_0$ ) 垂直剖面逐時變化示意圖。

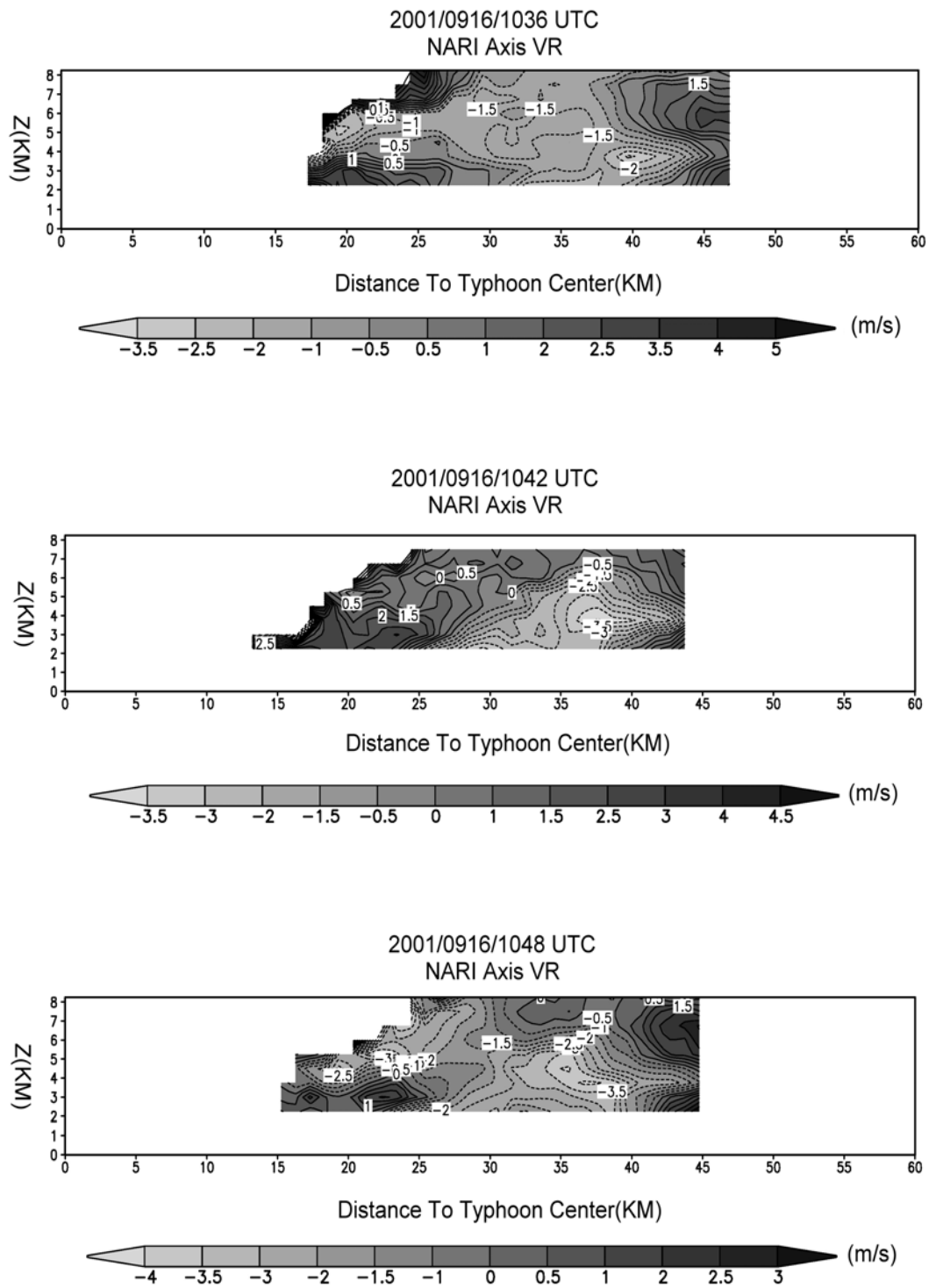


圖 4-17 : 納莉颱風軸對稱徑向風分量( $V_R C_0$ )垂直剖面逐時六分鐘變化示意圖。

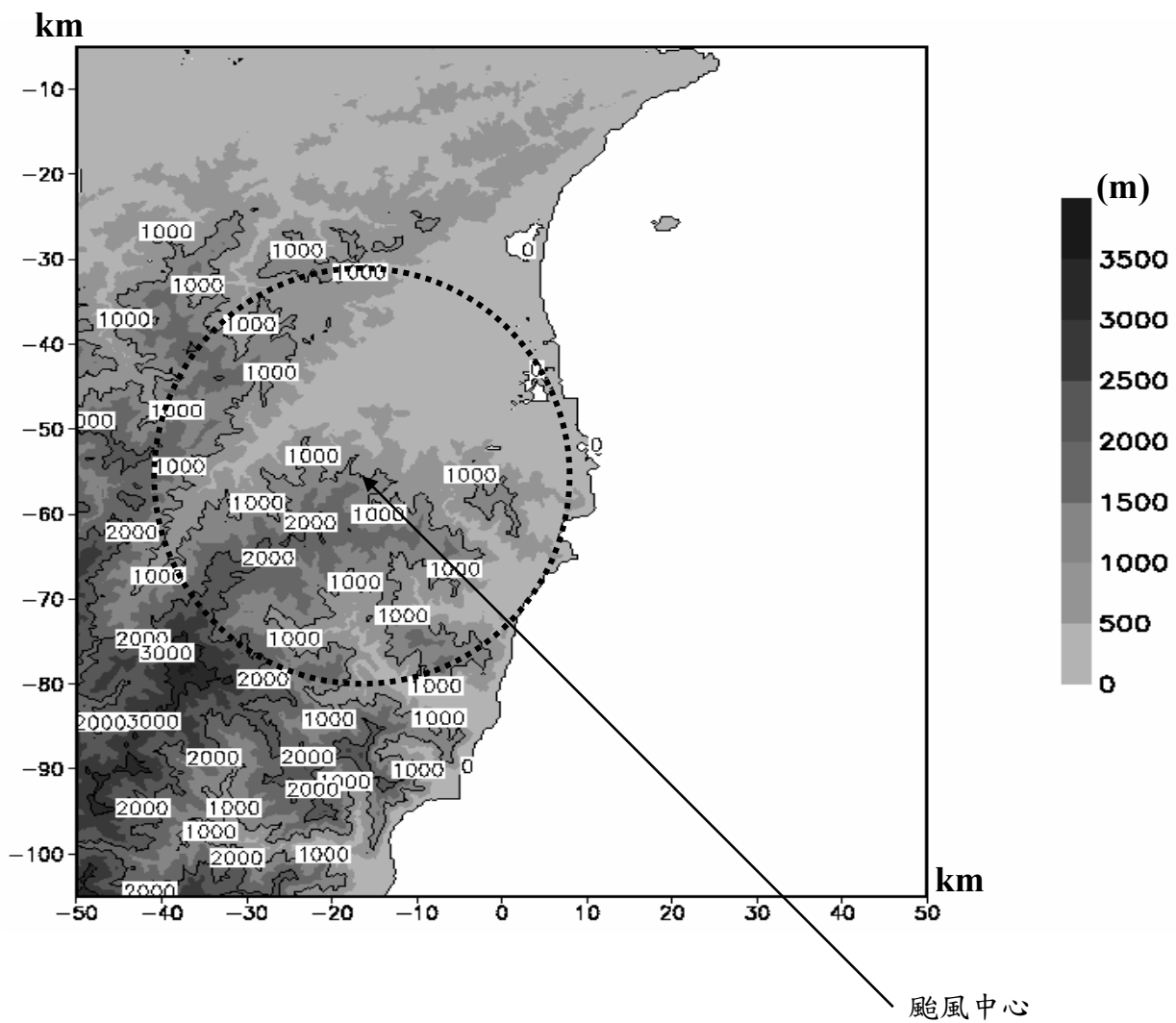


圖 4-18：雙都卜勒雷達合成風場分析區域示意圖，此時颱風中心位於(-15, -55)。

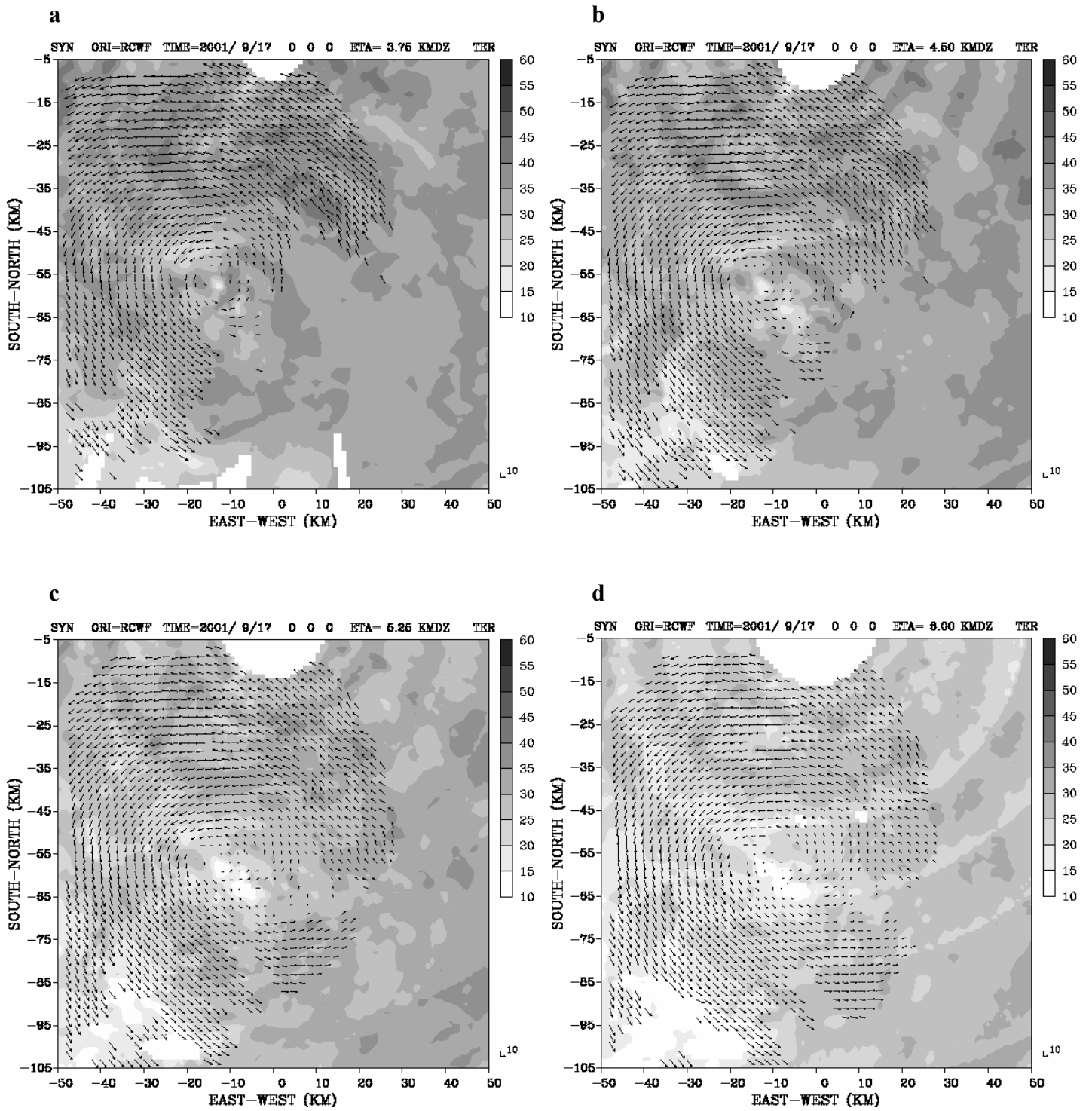


圖 4-19：雙雷達合成之風場與回波示意圖 (a)3.75km;(b)4.5km;(c)5.25km;(d)6km。

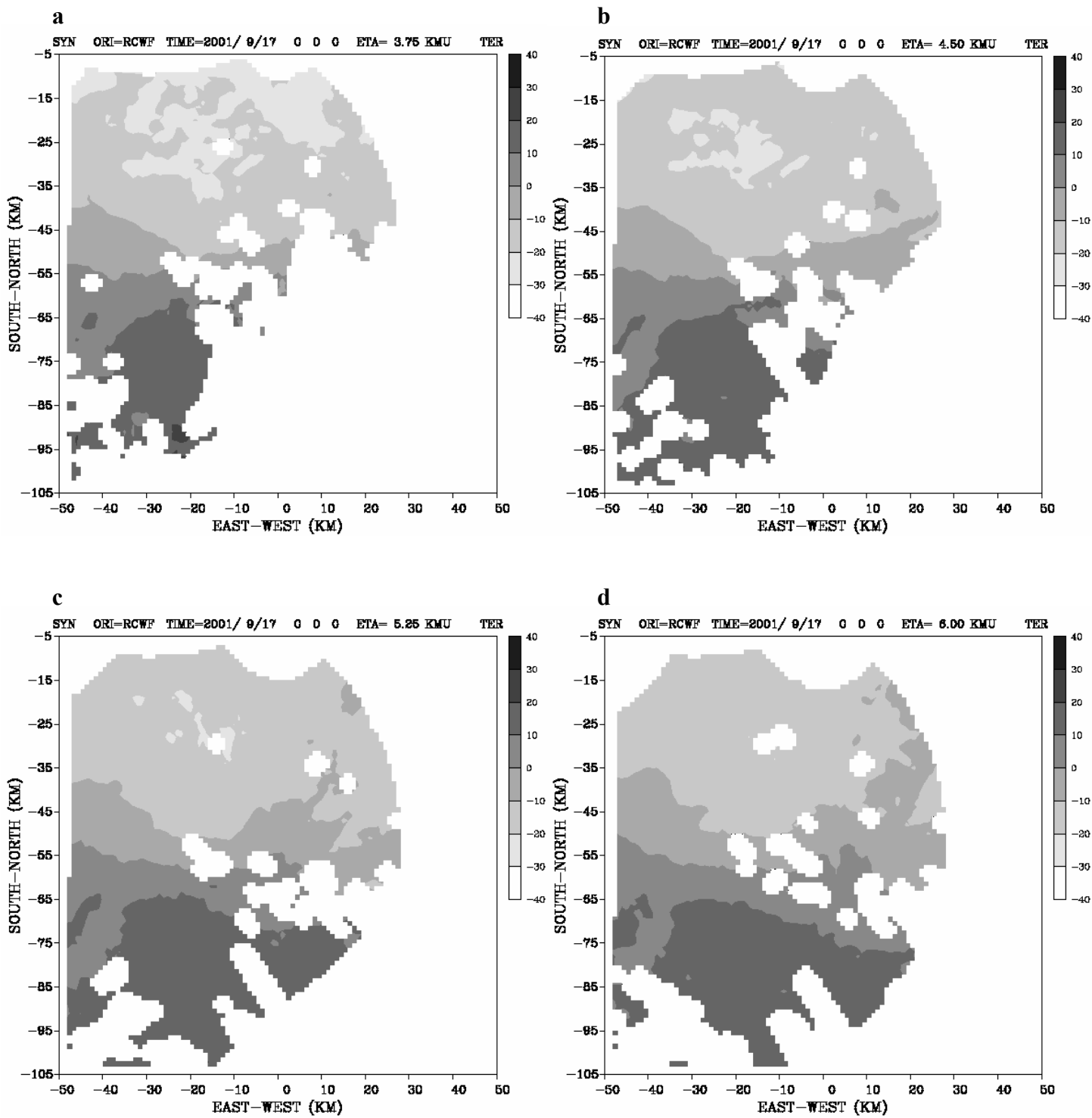


圖 4-20：合成風場在 X 方向的分量(U)示意圖(a)3.75km;(b)4.5km;(c)5.25km;(d)6km。

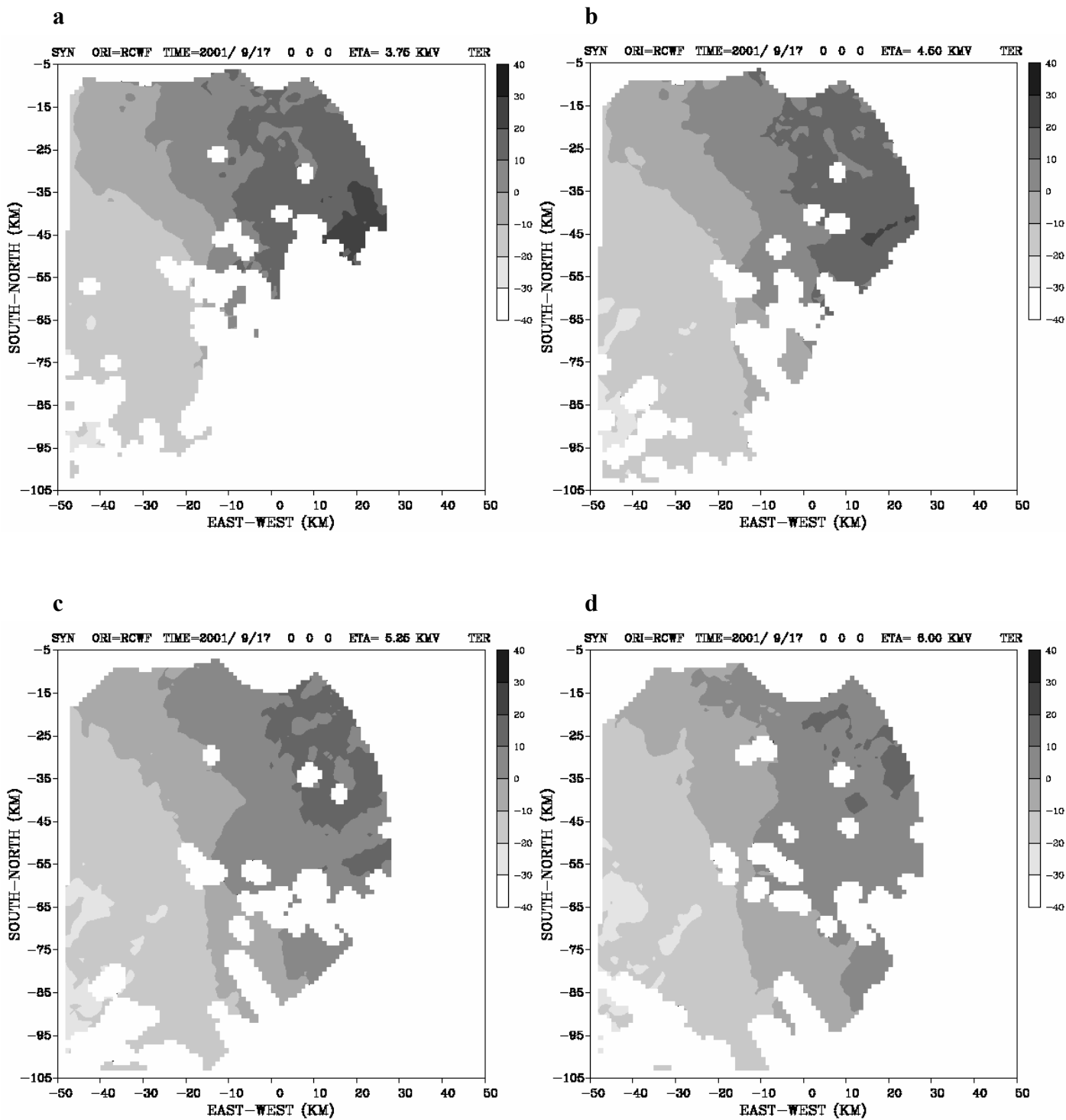


圖 4-21：合成風場在 Y 方向的分量( $V$ )示意圖(a)3.75km; (b)4.5km; (c)5.25km; (d)6km。

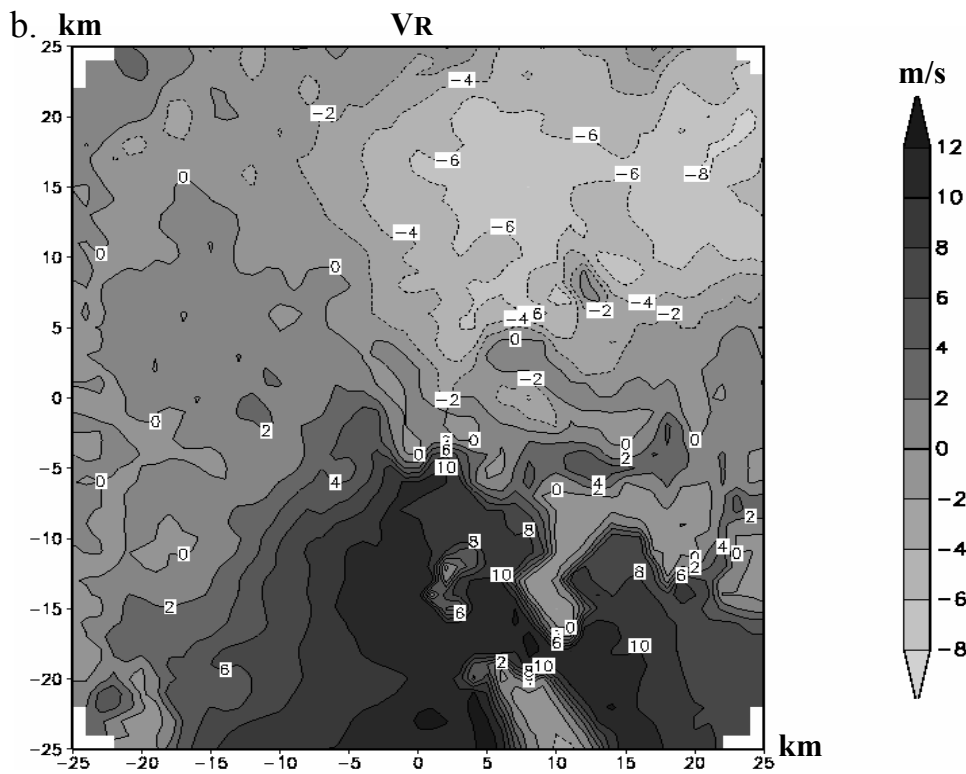
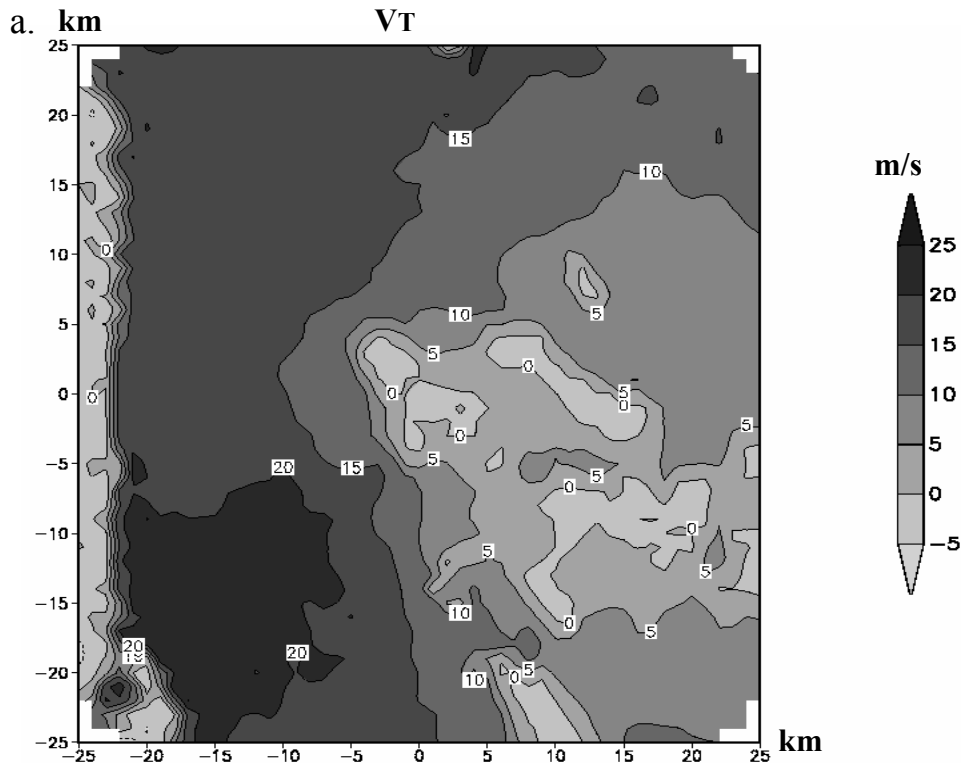


圖 4-22：卡氏座標上的 U、V 分量合成颱風的切向風與徑向風 (a)VT;(b)VR。

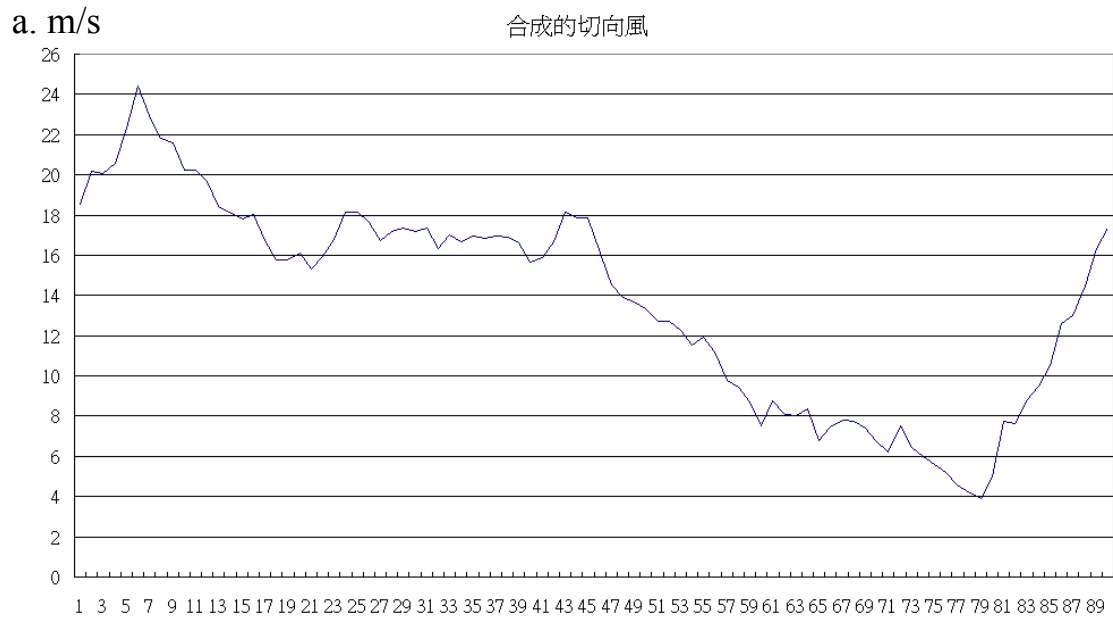


圖 4-23：高度 6 公里、距中心 22 公里經由雙雷達合成的 U、V 組合的風場(a)切向風；  
(b)徑向風。

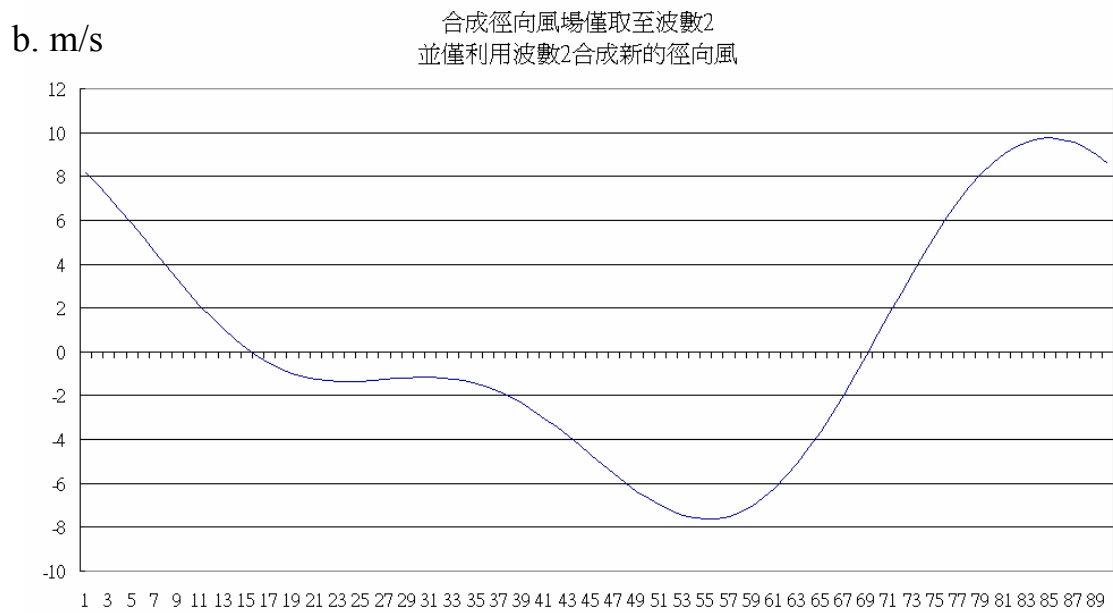
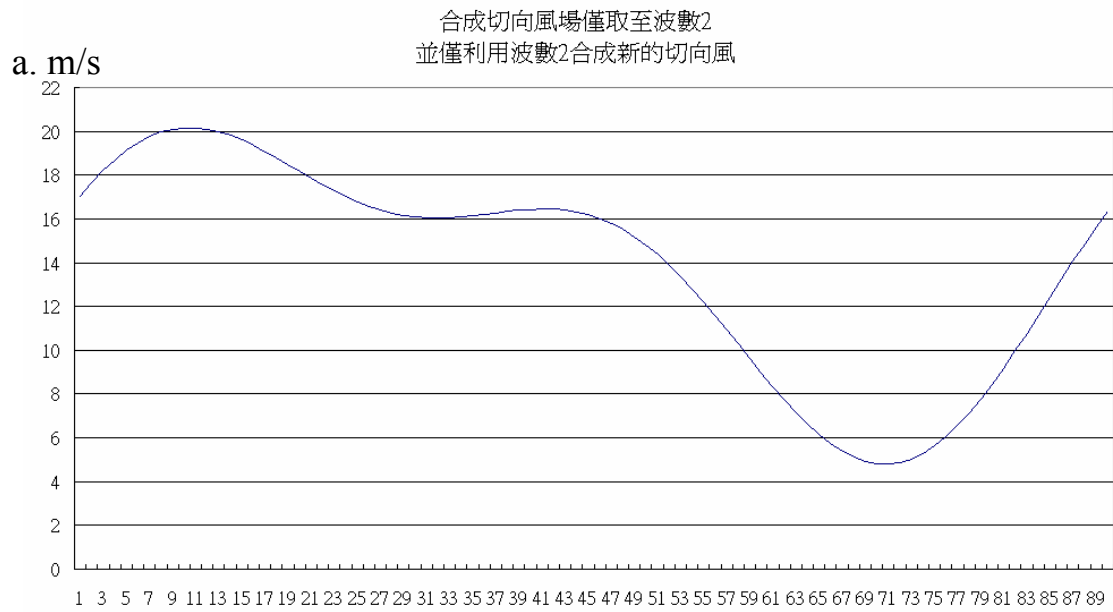
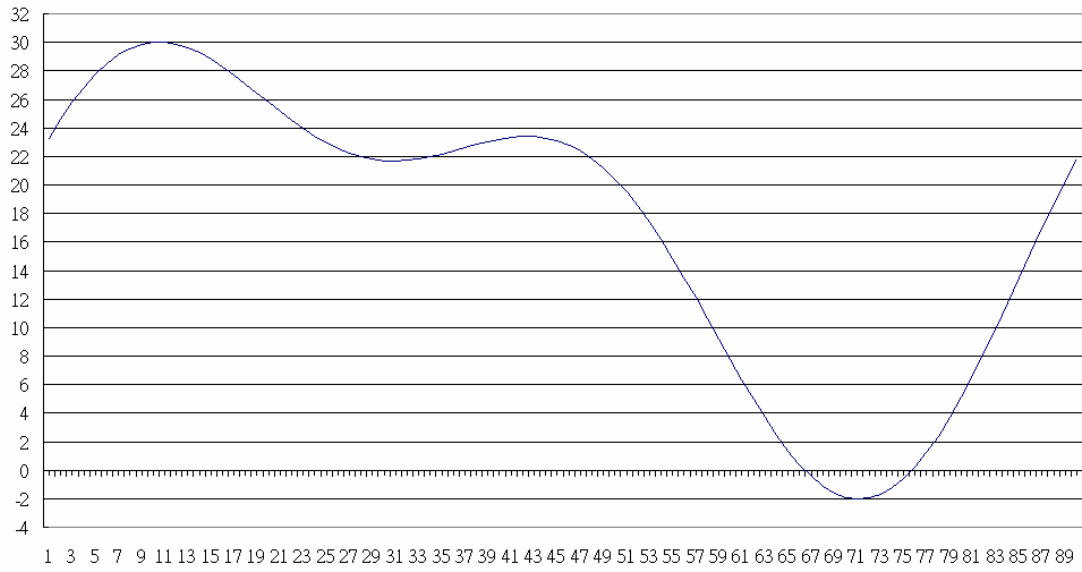


圖 4-24：高度 6 公里、距中心 22 公里經由波數 2 組成的風場(a)切向風；  
(b)徑向風。

a. m/s

GBVTD反演的切向風



b. m/s

GBVTD反演的徑向風

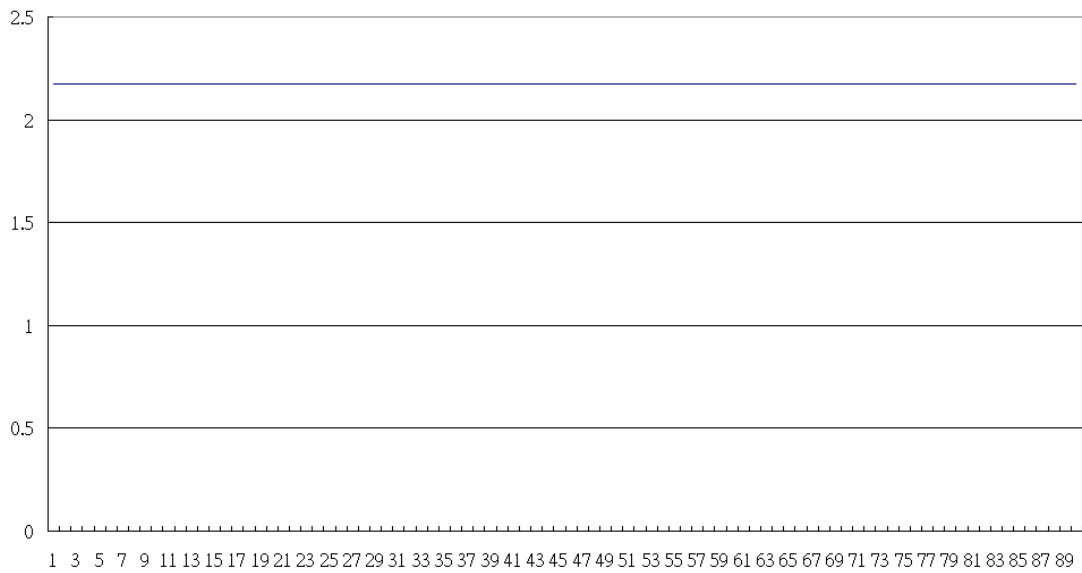


圖 4-25：高度 6 公里、距中心 22 公里經由 GBVTD 方法反演的風場(a)切向風；  
(b)徑向風。

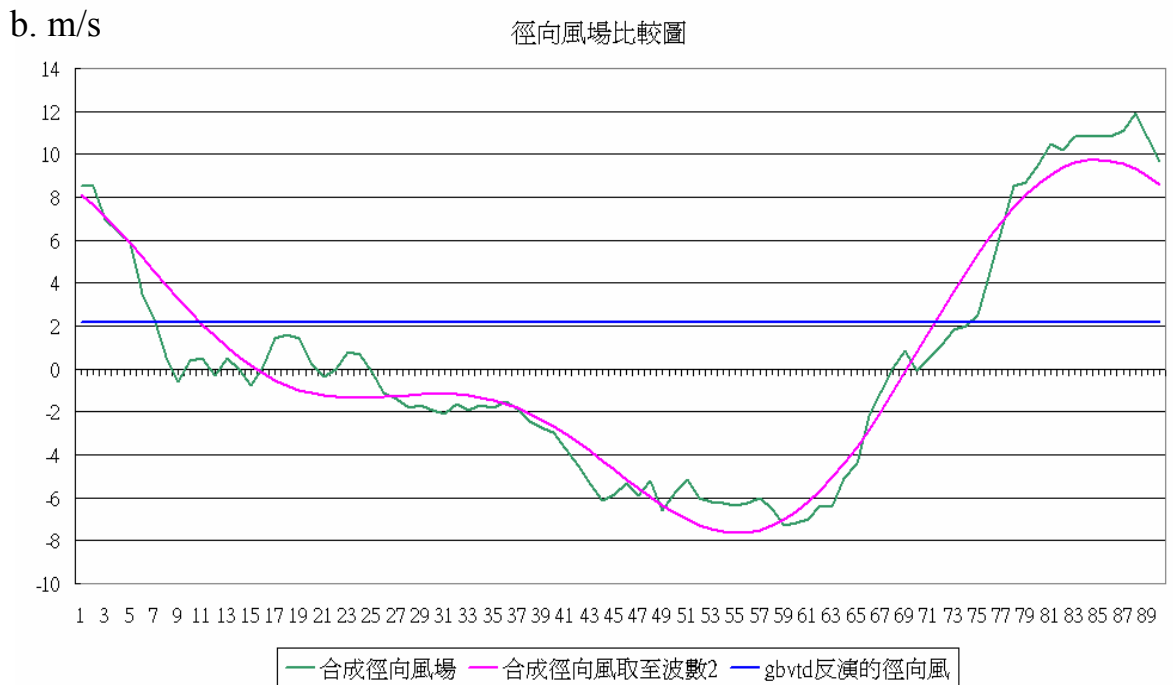
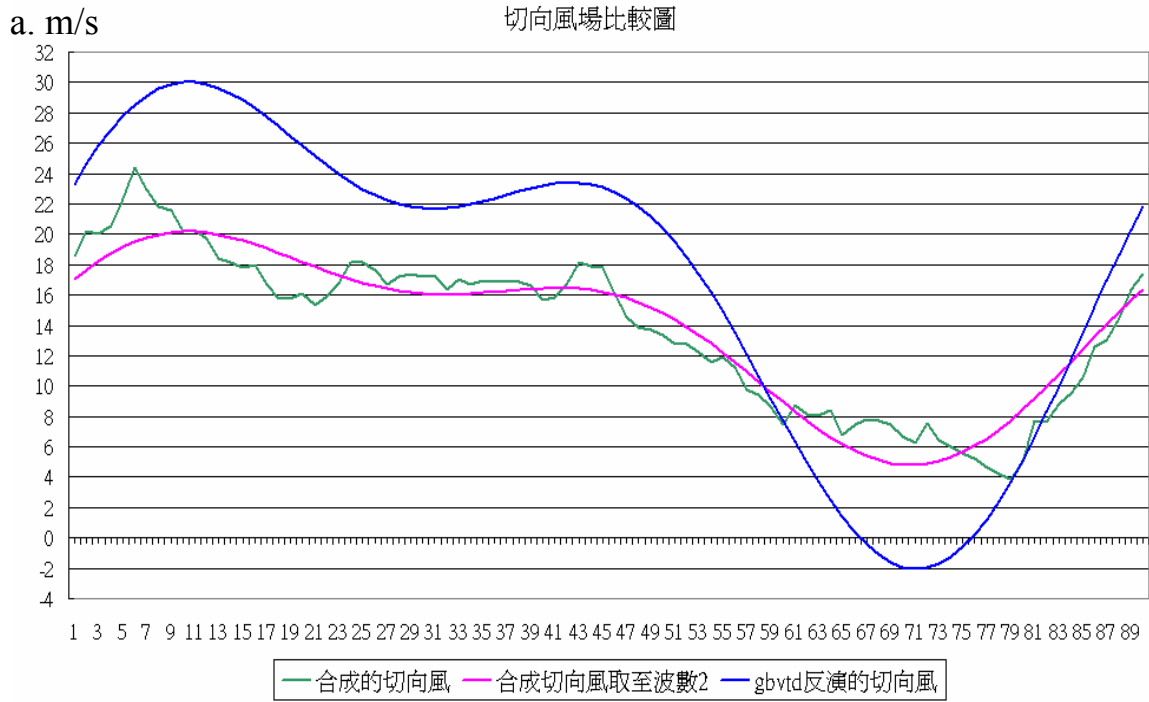


圖 4-26：合成風場、僅取至波數 2 的合成風場、GBVTD 反演風場之比較(a)切向風；(b)徑向風。

表一：理想風場不考慮非軸對稱徑向風分量 -- 軸對稱切向風以間距 10 增加

|                     | 測試 1 |       | 測試 2 |       | 測試 3 |       | 測試 4 |       | 測試 5 |       |
|---------------------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|
|                     | 理想風場 | 反演風場  | 理想風場 | 反演風場  | 理想風場 | 反演風場  | 理想風場 | 反演風場  | 理想風場 | 反演風場  |
| 環境風場 VM             | 20   | 19.95 | 20   | 19.95 | 20   | 19.95 | 20   | 19.94 | 20   | 19.94 |
| 切向風各項數值             |      |       |      |       |      |       |      |       |      |       |
| VTC0                | 30   | 29.62 | 40   | 39.75 | 50   | 49.89 | 60   | 60.02 | 70   | 70.15 |
| VTC1                | 10   | 9.8   | 10   | 10.09 | 10   | 10.39 | 10   | 10.68 | 10   | 10.98 |
| VTC2                | 10   | 9.58  | 10   | 9.75  | 10   | 9.92  | 10   | 10.08 | 10   | 10.23 |
| VTS1                | 10   | 10.26 | 10   | 10.26 | 10   | 10.27 | 10   | 10.28 | 10   | 10.28 |
| VTS2                | 10   | 11.15 | 10   | 11.15 | 10   | 11.16 | 10   | 11.16 | 10   | 11.16 |
| 徑向風各項數值             |      |       |      |       |      |       |      |       |      |       |
| VRC0                | 10   | 11.12 | 10   | 11.47 | 10   | 11.82 | 10   | 12.17 | 10   | 12.51 |
| VRC1                | 0    |       | 0    |       | 0    |       | 0    |       | 0    |       |
| VRC2                | 0    |       | 0    |       | 0    |       | 0    |       | 0    |       |
| VRS1                | 0    |       | 0    |       | 0    |       | 0    |       | 0    |       |
| VRS2                | 0    |       | 0    |       | 0    |       | 0    |       | 0    |       |
|                     |      |       |      |       |      |       |      |       |      |       |
| 切向風方均根 rms error    |      | 0.97  |      | 0.89  |      | 0.89  |      | 0.97  |      | 1.12  |
| 理想切向風 rms magnitude |      | 33.16 |      | 42.42 |      | 51.96 |      | 61.64 |      | 71.41 |
| 切向風 Relative Error  |      | 0.03  |      | 0.02  |      | 0.02  |      | 0.02  |      | 0.02  |
|                     |      |       |      |       |      |       |      |       |      |       |
| 徑向風方均根 rms error    |      | 1.12  |      | 1.47  |      | 1.82  |      | 2.17  |      | 2.52  |
| 理想徑向風 rms magnitude |      | 10    |      | 10    |      | 10    |      | 10    |      | 10    |
| 徑向風 Relative Error  |      | 0.11  |      | 0.15  |      | 0.18  |      | 0.22  |      | 0.25  |

表二：理想風場不考慮非軸對稱徑向風分量 -- 軸對稱徑向風以間距 2 增加

|                     | 測試 6 |       | 測試 7 |       | 測試 8 |       | 測試 9 |       | 測試 10 |       |
|---------------------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|-------|-------|
|                     | 理想風場 | 反演風場  | 理想風場 | 反演風場  | 理想風場 | 反演風場  | 理想風場 | 反演風場  | 理想風場  | 反演風場  |
| 環境風場 VM             | 20   | 19.94 | 20   | 19.93 | 20   | 19.93 | 20   | 19.92 | 20    | 19.91 |
| 切向風各項數值             |      |       |      |       |      |       |      |       |       |       |
| VTC0                | 60   | 59.95 | 60   | 59.88 | 60   | 59.81 | 60   | 59.74 | 60    | 59.66 |
| VTC1                | 10   | 10.68 | 10   | 10.68 | 10   | 10.68 | 10   | 10.68 | 10    | 10.67 |
| VTC2                | 10   | 10.08 | 10   | 10.08 | 10   | 10.08 | 10   | 10.08 | 10    | 10.08 |
| VTS1                | 10   | 10.31 | 10   | 10.34 | 10   | 10.37 | 10   | 10.4  | 10    | 10.43 |
| VTS2                | 10   | 11.17 | 10   | 11.18 | 10   | 11.19 | 10   | 11.2  | 10    | 11.22 |
| 徑向風各項數值             |      |       |      |       |      |       |      |       |       |       |
| VRC0                | 12   | 14.16 | 14   | 16.16 | 16   | 18.15 | 18   | 20.14 | 20    | 22.14 |
| VRC1                | 0    |       | 0    |       | 0    |       | 0    |       | 0     |       |
| VRC2                | 0    |       | 0    |       | 0    |       | 0    |       | 0     |       |
| VRS1                | 0    |       | 0    |       | 0    |       | 0    |       | 0     |       |
| VRS2                | 0    |       | 0    |       | 0    |       | 0    |       | 0     |       |
|                     |      |       |      |       |      |       |      |       |       |       |
| 切向風方均根 rms error    |      | 0.99  |      | 1.01  |      | 1.02  |      | 1.05  |       | 1.08  |
| 理想切向風 rms magnitude |      | 61.64 |      | 61.64 |      | 61.64 |      | 61.64 |       | 61.64 |
| 切向風 Relative Error  |      | 0.02  |      | 0.02  |      | 0.02  |      | 0.02  |       | 0.02  |
|                     |      |       |      |       |      |       |      |       |       |       |
| 徑向風方均根 rms error    |      | 2.16  |      | 2.16  |      | 2.15  |      | 2.14  |       | 2.14  |
| 理想徑向風 rms magnitude |      | 12.00 |      | 14.00 |      | 16.00 |      | 18.00 |       | 20.00 |
| 徑向風 Relative Error  |      | 0.18  |      | 0.15  |      | 0.13  |      | 0.12  |       | 0.11  |

表三：理想風場考慮非軸對稱徑向風分量 -- 軸對稱切向風以間距 10 增加

|                     | 測試 1 |       | 測試 2 |       | 測試 3 |       | 測試 4 |       | 測試 5 |       |
|---------------------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|
|                     | 理想風場 | 反演風場  | 理想風場 | 反演風場  | 理想風場 | 反演風場  | 理想風場 | 反演風場  | 理想風場 | 反演風場  |
| 環境風場 VM             | 20   | 21.82 | 20   | 21.82 | 20   | 21.82 | 20   | 21.81 | 20   | 21.81 |
| 切向風各項數值             |      |       |      |       |      |       |      |       |      |       |
| VTC0                | 20   | 17.34 | 30   | 27.47 | 40   | 37.60 | 50   | 47.73 | 60   | 57.87 |
| VTC1                | 10   | 7.40  | 10   | 7.69  | 10   | 7.98  | 10   | 8.28  | 10   | 8.57  |
| VTC2                | 10   | 7.14  | 10   | 7.31  | 10   | 7.47  | 10   | 7.64  | 10   | 7.80  |
| VTS1                | 10   | 12.05 | 10   | 12.05 | 10   | 12.06 | 10   | 12.06 | 10   | 12.07 |
| VTS2                | 10   | 12.96 | 10   | 12.96 | 10   | 12.96 | 10   | 12.97 | 10   | 12.97 |
| 徑向風各項數值             |      |       |      |       |      |       |      |       |      |       |
| VRC0                | 10   | 12.59 | 10   | 12.94 | 10   | 13.29 | 10   | 13.64 | 10   | 13.98 |
| VRC1                | 2    |       | 2    |       | 2    |       | 2    |       | 2    |       |
| VRC2                | 2    |       | 2    |       | 2    |       | 2    |       | 2    |       |
| VRS1                | 2    |       | 2    |       | 2    |       | 2    |       | 2    |       |
| VRS2                | 2    |       | 2    |       | 2    |       | 2    |       | 2    |       |
|                     |      |       |      |       |      |       |      |       |      |       |
| 切向風方均根 rms error    |      | 4.58  |      | 4.38  |      | 4.18  |      | 3.99  |      | 3.81  |
| 理想切向風 rms magnitude |      | 24.49 |      | 33.17 |      | 42.43 |      | 51.96 |      | 61.64 |
| 切向風 Relative Error  |      | 0.19  |      | 0.13  |      | 0.10  |      | 0.08  |      | 0.06  |
|                     |      |       |      |       |      |       |      |       |      |       |
| 徑向風方均根 rms error    |      | 3.84  |      | 4.08  |      | 4.34  |      | 4.61  |      | 4.89  |
| 理想徑向風 rms magnitude |      | 10.39 |      | 10.39 |      | 10.39 |      | 10.39 |      | 10.39 |
| 徑向風 Relative Error  |      | 0.37  |      | 0.39  |      | 0.42  |      | 0.44  |      | 0.47  |

表四：理想風場考慮非軸對稱徑向風分量 -- 軸對稱徑向風以間距 1 增加

|                     | 測試 6 |       | 測試 7 |       | 測試 8 |       | 測試 9 |       | 測試 10 |       |
|---------------------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|-------|-------|
|                     | 理想風場 | 反演風場  | 理想風場 | 反演風場  | 理想風場 | 反演風場  | 理想風場 | 反演風場  | 理想風場  | 反演風場  |
| 環境風場 VM             | 20   | 21.83 | 20   | 21.83 | 20   | 21.82 | 20   | 21.82 | 20    | 21.82 |
| 切向風各項數值             |      |       |      |       |      |       |      |       |       |       |
| VTC0                | 60   | 58.04 | 60   | 58.01 | 60   | 57.97 | 60   | 57.94 | 60    | 57.90 |
| VTC1                | 10   | 8.58  | 10   | 8.57  | 10   | 8.57  | 10   | 8.57  | 10    | 8.57  |
| VTC2                | 10   | 7.81  | 10   | 7.81  | 10   | 7.81  | 10   | 7.80  | 10    | 7.80  |
| VTS1                | 10   | 11.99 | 10   | 12.01 | 10   | 12.02 | 10   | 12.04 | 10    | 12.05 |
| VTS2                | 10   | 12.94 | 10   | 12.94 | 10   | 12.95 | 10   | 12.96 | 10    | 12.96 |
| 徑向風各項數值             |      |       |      |       |      |       |      |       |       |       |
| VRC0                | 5    | 9.00  | 6    | 10.00 | 7    | 10.99 | 8    | 11.99 | 9     | 12.99 |
| VRC1                | 2    |       | 2    |       | 2    |       | 2    |       | 2     |       |
| VRC2                | 2    |       | 2    |       | 2    |       | 2    |       | 2     |       |
| VRS1                | 2    |       | 2    |       | 2    |       | 2    |       | 2     |       |
| VRS2                | 2    |       | 2    |       | 2    |       | 2    |       | 2     |       |
|                     |      |       |      |       |      |       |      |       |       |       |
| 切向風方均根 rms error    |      | 3.68  |      | 3.71  |      | 3.73  |      | 3.76  |       | 3.79  |
| 理想切向風 rms magnitude |      | 61.64 |      | 61.64 |      | 61.64 |      | 61.64 |       | 61.64 |
| 切向風 Relative Error  |      | 0.06  |      | 0.06  |      | 0.06  |      | 0.06  |       | 0.06  |
|                     |      |       |      |       |      |       |      |       |       |       |
| 徑向風方均根 rms error    |      | 4.90  |      | 4.90  |      | 4.89  |      | 4.89  |       | 4.89  |
| 理想徑向風 rms magnitude |      | 5.74  |      | 6.63  |      | 7.55  |      | 8.49  |       | 9.43  |
| 徑向風 Relative Error  |      | 0.85  |      | 0.74  |      | 0.65  |      | 0.58  |       | 0.52  |

表五：理想風場考慮非軸對稱徑向風分量 – 環境風場以間距 10 增加

|                     | 測試 11 |       | 測試 12 |       | 測試 13 |       | 測試 14 |       | 測試 15 |       |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                     | 理想風場  | 反演風場  | 理想風場  | 反演風場  | 理想風場  | 反演風場  | 理想風場  | 反演風場  | 理想風場  | 反演風場  |
| 環境風場 VM             | 0     | 1.81  | 10    | 11.81 | 20    | 21.81 | 30    | 31.81 | 40    | 41.96 |
| 切向風各項數值             |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| VTC0                | 60    | 57.87 | 60    | 57.87 | 60    | 57.87 | 60    | 57.87 | 60    | 58.11 |
| VTC1                | 10    | 8.57  | 10    | 8.57  | 10    | 8.57  | 10    | 8.57  | 10    | 9.05  |
| VTC2                | 10    | 7.80  | 10    | 7.80  | 10    | 7.80  | 10    | 7.80  | 10    | 8.26  |
| VTS1                | 10    | 12.07 | 10    | 12.07 | 10    | 12.07 | 10    | 12.07 | 10    | 12.29 |
| VTS2                | 10    | 12.97 | 10    | 12.97 | 10    | 12.97 | 10    | 12.97 | 10    | 12.57 |
| 徑向風各項數值             |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| VRC0                | 10    | 13.98 | 10    | 13.98 | 10    | 13.98 | 10    | 13.98 | 10    | 13.95 |
| VRC1                | 2     |       | 2     |       | 2     |       | 2     |       | 2     |       |
| VRC2                | 2     |       | 2     |       | 2     |       | 2     |       | 2     |       |
| VRS1                | 2     |       | 2     |       | 2     |       | 2     |       | 2     |       |
| VRS2                | 2     |       | 2     |       | 2     |       | 2     |       | 2     |       |
|                     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 切向風方均根 rms error    |       | 3.81  |       | 3.81  |       | 3.81  |       | 3.81  |       | 3.39  |
| 理想切向風 rms magnitude |       | 61.64 |       | 61.64 |       | 61.64 |       | 61.64 |       | 61.64 |
| 切向風 Relative Error  |       | 0.06  |       | 0.06  |       | 0.06  |       | 0.06  |       | 0.05  |
|                     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 徑向風方均根 rms error    |       | 4.89  |       | 4.89  |       | 4.89  |       | 4.89  |       | 4.86  |
| 理想徑向風 rms magnitude |       | 10.39 |       | 10.39 |       | 10.39 |       | 10.39 |       | 10.39 |
| 徑向風 Relative Error  |       | 0.47  |       | 0.47  |       | 0.47  |       | 0.47  |       | 0.47  |

表六：理想風場考慮非軸對稱徑向風分量 – 非軸對稱徑向風以間距 1 增加

|                     | 測試 16 |       | 測試 17 |       | 測試 18 |       | 測試 19 |       | 測試 20 |       |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                     | 理想風場  | 反演風場  | 理想風場  | 反演風場  | 理想風場  | 反演風場  | 理想風場  | 反演風場  | 理想風場  | 反演風場  |
| 環境風場 VM             | 20    | 22.74 | 20    | 23.68 | 20    | 24.61 | 20    | 25.54 | 20    | 26.47 |
| 切向風各項數值             |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| VTC0                | 60    | 56.79 | 60    | 55.71 | 60    | 54.63 | 60    | 53.56 | 60    | 52.48 |
| VTC1                | 10    | 7.51  | 10    | 6.46  | 10    | 5.40  | 10    | 4.34  | 10    | 3.28  |
| VTC2                | 10    | 6.66  | 10    | 5.52  | 10    | 4.38  | 10    | 3.25  | 10    | 2.11  |
| VTS1                | 10    | 12.96 | 10    | 13.86 | 10    | 14.75 | 10    | 15.64 | 10    | 16.54 |
| VTS2                | 10    | 13.87 | 10    | 14.78 | 10    | 15.68 | 10    | 16.58 | 10    | 17.49 |
| 徑向風各項數值             |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| VRC0                | 10    | 14.89 | 10    | 15.80 | 10    | 16.71 | 10    | 17.61 | 10    | 18.52 |
| VRC1                | 3     |       | 4     |       | 5     |       | 6     |       | 7     |       |
| VRC2                | 3     |       | 4     |       | 5     |       | 6     |       | 7     |       |
| VRS1                | 3     |       | 4     |       | 5     |       | 6     |       | 7     |       |
| VRS2                | 3     |       | 4     |       | 5     |       | 6     |       | 7     |       |
|                     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 切向風方均根 rms error    |       | 5.55  |       | 7.32  |       | 9.09  |       | 10.86 |       | 12.64 |
| 理想切向風 rms magnitude |       | 61.64 |       | 61.64 |       | 61.64 |       | 61.64 |       | 61.64 |
| 切向風 Relative Error  |       | 0.09  |       | 0.12  |       | 0.15  |       | 0.18  |       | 0.20  |
|                     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 徑向風方均根 rms error    |       | 6.48  |       | 8.10  |       | 9.75  |       | 11.40 |       | 13.06 |
| 理想徑向風 rms magnitude |       | 10.86 |       | 11.49 |       | 12.25 |       | 13.11 |       | 14.07 |
| 徑向風 Relative Error  |       | 0.60  |       | 0.71  |       | 0.80  |       | 0.87  |       | 0.93  |

表七：合成切向、徑向風場經傅利葉轉換所得波數值與 GBVTD 反演後的波數值做比較

| 高度 6KM - 第 22 圈     | U、V 合成之風場 | 經 GBVTD 還原後之風場 |
|---------------------|-----------|----------------|
| VTC0                | 13.81     | 17.10          |
| VTC1                | 0.51      | 0.25           |
| VTC2                | 2.72      | 5.94           |
| VTS1                | 6.06      | 12.53          |
| VTS2                | 1.61      | 3.68           |
|                     |           |                |
| VRC0                | 0.26      | 2.17           |
| VRC1                | 6.64      | 0.00           |
| VRC2                | 1.24      | 0.00           |
| VRS1                | -0.37     | 0.00           |
| VRS2                | -3.29     | 0.00           |
|                     |           |                |
| 切向風方均根 rms error    |           | 6.25           |
| 理想切向風 rms magnitude |           | 14.64          |
| 切向風 Relative Error  |           | 0.43           |
|                     |           |                |
| 徑向風方均根 rms error    |           | 5.65           |
| 理想徑向風 rms magnitude |           | 5.33           |
| 徑向風 Relative Error  |           | 1.06           |

表八：雙雷達合成風場合回颶風的切向風場、徑向風場經傅利葉轉換後大於波數 2 的高次項

|      |       |      |       |
|------|-------|------|-------|
| VTC3 | 1.06  | VRC3 | 1.88  |
| VTS3 | 1.50  | VRS3 | -1.26 |
| VTC4 | 0.95  | VRC4 | 0.32  |
| VTS4 | 0.75  | VRS4 | -0.60 |
| VTC5 | -0.10 | VRC5 | 0.54  |
| VTS5 | 0.18  | VRS5 | -0.38 |
| VTC6 | -0.19 | VRC6 | -0.30 |
| VTS6 | -0.26 | VRS6 | 0.39  |