

# 利用都卜勒雷達分析颱風風場結構—2001 納莉颱風

江晉孝 陳台琦

國立中央大學大氣物理研究所

(中華民國九十四年三月三十一日收稿；中華民國九十五年四月二十四日定稿)

## 摘 要

颱風環流結構對於颱風路徑與強度的模擬十分重要，同時對於風雨分佈診斷亦有絕佳的助益，在台灣都卜勒雷達網連架設後，使用單都卜勒雷達反演颱風環流十分值得探討。本文首先利用不同的理想風場測試以單都卜勒雷達資料估算颱風環流之 GBVTD (Ground - Based Velocity Track Display) 方法，藉以瞭解 GBVTD 反演颱風環流的準確性及誤差來源，此結果顯示若忽略掉颱風徑向風非軸對稱項的值越高，反演出的結果就越失真。本文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。

爲了瞭解納莉颱風在登陸前及登陸後的結構，本文使用五分山氣象雷達資料，在納莉颱風登陸前，運用 GBVTD 方法反演納莉颱風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隨時間變化；納莉風登陸後，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。

研究結果顯示，在納莉颱風登陸前 GBVTD 反演的颱風軸對稱最強切向風，隨高度向外傾斜，且包含非軸對稱項之最大切向風亦出現在強回波附近，最強切向風半徑收縮時，風速亦有增強的情形，顯示 GBVTD 在外海可以反演出成熟颱風的結構；登陸後，雙雷達合成風場顯示有較強非軸對稱徑向風分量，GBVTD 反演結果較難得到正確的風場結構。

關鍵詞：都卜勒雷達，GBVTD，RASTA

## 一、前言

單一都卜勒雷達所能得到的資訊為回波及平行於電磁波束的徑向投影風場，為了能獲取完整的三維風場資料進而利用兩座雷達觀測相同區域的徑向風場作合成分析，但上述的方法有許多限制，如：兩座雷達耗費甚鉅、觀測區域與距離的限制等因素。為此雷達氣象學家發展了單雷達反演技術，利用有限的資料運用數學方法求取更多的資訊。

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，挾帶的強風、豪雨造成山崩、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。

## 二、分析方法

### (一) 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做折疊校正處理；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。

### (二) 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。

本研究在前置處理上運用 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，詳細的 GBVTD 方法於第三節中詳述。

### (三) 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 個點其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。

處理流程則以颱風中心為原點以間隔一公里向外取一圈資料，各圈的起始點為通過颱風中心的電磁波與颱風環流相交點，並沿著逆時針方向取 90 點資料 (圖 1)，若有遺缺資料則在 GBVTD 程式中會做填補的動作，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

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。

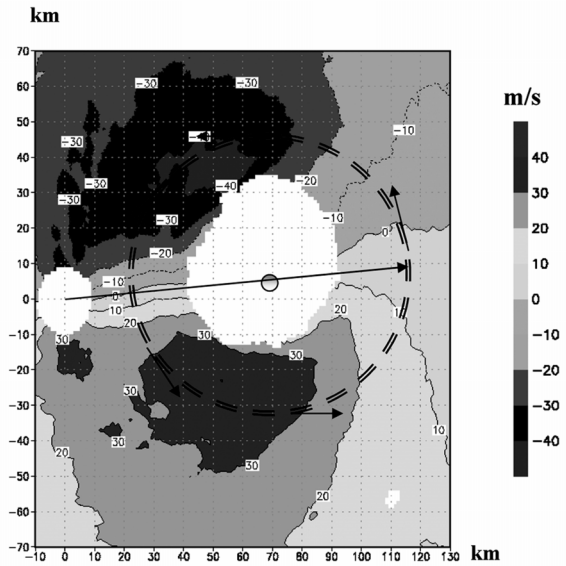


圖 1 GBVTD 程式將雷達觀測資料以颱風中心為原點取一圈 90 點資料示意圖。

三、GBVTD 方法驗證

根據 Lee et al.(1999)所推導之公式與幾何圖形，我們可以將雷達觀測到的徑向風場以方位角 ( $\phi$ )為自變數展開並得到下列關係式：

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

當  $\alpha_{\max}$  在半徑固定時為常數，所以  $\frac{\hat{V}_r}{\cos \phi}$  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：

$$\frac{\hat{V}_r(\psi)}{\cos \phi} = \sum_0^L (A_n \cos n\psi + B_n \sin n\psi) \tag{2}$$

$$V_T(\psi) = \sum_0^M (V_T C_n \cos n\psi + V_T S_n \sin n\psi) \tag{3}$$

$$V_R(\psi) = \sum_0^N (V_R C_n \cos n\psi + V_R S_n \sin n\psi) \tag{4}$$

將(2)~(4)代回(1)式，並利用下列三角函數公式(積化和差)：

取  $L=3, M=2, N=2$  可得到：

$$\begin{aligned} \frac{V_r(\hat{\psi})}{\cos \phi} &= A_0 + A_1 \cos \psi + B_1 \sin \psi + A_2 \cos 2\psi \\ &\quad + B_2 \sin 2\psi + A_3 \cos 3\psi + B_3 \sin 3\psi \quad (5) \\ &= \frac{1}{2} [V_M \cos(\theta_T - \theta_M)(1 + \cos \alpha_{\max}) - V_T S_1 + V_R C_1 \\ &\quad + (2V_R C_0 + V_R C_2 - V_T S_2) \cos \psi \\ &\quad + (-2V_T C_0 + V_T C_2 + V_R S_2 - 2V_M \sin(\theta_T - \theta_M) \sin \alpha_{\max}) \sin \psi \\ &\quad + (V_T S_1 + V_R C_1 + V_M \cos(\theta_T - \theta_M)(1 - \cos \alpha_{\max})) \cos 2\psi \\ &\quad + (V_R S_1 - V_T C_1) \sin 2\psi + (V_R C_2 + V_T S_2) \cos 3\psi \\ &\quad + (V_R S_2 - V_T C_2) \sin 3\psi] \quad (6) \end{aligned}$$

將(5)與(6)式比較係數及重新整理可得到：

$$V_M \cos(\theta_T - \theta_M) = A_0 + A_2 - V_R C_1 \quad (7)$$

$$V_T C_0 = -B_1 - B_3 + V_R S_2 - V_M \sin(\theta_T - \theta_M) \sin \alpha_{\max} \quad (8)$$

$$V_T C_1 = -2B_2 + V_R S_1 \quad (9)$$

$$V_T C_2 = -2B_3 + V_R S_2 \quad (10)$$

$$V_T S_1 = A_2 - A_0 + (A_0 + A_2 - V_R C_1) \cos \alpha_{\max} \quad (11)$$

$$V_T S_2 = 2A_3 - V_R C_2 \quad (12)$$

$$V_R C_0 = A_1 + A_3 - V_R C_2 \quad (13)$$

上述有 11 個未知變數

$$\left( \begin{array}{l} V_M \cos(\theta_T - \theta_M), V_T C_0, V_T C_1, \\ V_T C_2, V_T S_1, V_T S_2, V_R C_0, V_R C_1, \\ V_R C_2, V_R S_1, V_R S_2 \end{array} \right)$$

，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(7)~(13)式最後可整理成下列方程式：

$$V_M \cos(\theta_T - \theta_M) = A_0 + A_2 \quad (14)$$

$$V_T C_0 = -B_1 - B_3 - V_M \sin(\theta_T - \theta_M) \sin \alpha_{\max} \quad (15)$$

$$V_T C_1 = -2B_2 \quad (16)$$

$$V_T C_2 = -2B_3 \quad (17)$$

$$V_T S_1 = A_2 - A_0 + (A_0 + A_2) \cos \alpha_{\max} \quad (18)$$

$$V_T S_2 = 2A_3 \quad (19)$$

$$V_R C_0 = A_1 + A_3 \quad (20)$$

(14)~(20)式，等號左邊各項解出後代回(3)與(4)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。

依據上述原理，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 7s 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 11 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。

我們可由不忽略非軸對稱徑向風分量(7)~(13)式與忽略非軸對稱徑向風分量(14)~(20)之比較可驗證：

(7)~(13)式為雷達徑向速度的分解(共 11 項未知數)。

(14)~(20)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)。

$$\boxed{11 \text{ 項}} \quad \boxed{7 \text{ 項}}$$

$$\begin{aligned} (7) - (14) &\rightarrow V_M \cos(\theta_T - \theta_M) - V_M \cos(\theta_T - \theta_M) \\ &= -V_R C_1 \quad (A) \end{aligned}$$

$$(8) - (15) \rightarrow V_T^{11} C_0 - V_T^7 C_0 = V_R^{11} S_2 - V_M \sin(\theta_T - \theta_M) \sin \alpha_{\max} \quad (B)$$

$$(9) - (16) \rightarrow V_T^{11} C_1 - V_T^7 C_1 = V_R^{11} S_1 \quad (C)$$

$$(10) - (17) \rightarrow V_T^{11} C_2 - V_T^7 C_2 = V_R^{11} S_2 \quad (D)$$

$$(11) - (18) \rightarrow V_T^{11} S_1 - V_T^7 S_1 = -V_R^{11} C_1 \cos \alpha_{\max} \quad (E)$$

$$(12) - (19) \rightarrow V_T^{11} S_2 - V_T^7 S_2 = -V_R^{11} C_2 \quad (F)$$

$$(13) - (20) \rightarrow V_R^{11} C_0 - V_R^7 C_0 = -V_R^{11} C_2 \quad (G)$$

◆將(14)~(20){7項解}代入(3)，(4)替換後，再代入(2)右式

◆將(7)~(13){11項解}代入(3)，(4)替換後，再代入(2)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驗證結果正確而推知環流誤差的大小。

#### 四、理想風場測試

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，但是反演的風場卻是錯誤的。

針對上述結論，我們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誤差來源及大小。

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( $V_R C_1, V_R C_2, V_R S_1, V_R S_2$ )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。

### (一) 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( $V_R C_0$ )與非軸對稱切向風( $V_T C_1, V_T C_2, V_T S_1, V_T S_2$ )分量，僅改變軸對稱切向風分量( $V_T C_0$ )，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  $V_T C_0$  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。

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。

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僅僅為 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

表一 理想風場不考慮非軸對稱徑向風分量一軸對稱切向風以間距 20 增加

	測試 1		測試 2		測試 3	
	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 $V_M$	20	19.95	20	19.95	20	19.94
切向風各項數值						
VTC0	30	29.62	50	49.89	70	70.15
VTC1	10	9.8	10	10.39	10	10.98
VTC2	10	9.58	10	9.92	10	10.23
VTS1	10	10.26	10	10.27	10	10.28
VTS2	10	11.15	10	11.16	10	11.16
徑向風各項數值						
VRC0	10	11.12	10	11.82	10	12.51
VRC1	0	無法反演	0	無法反演	0	無法反演
VRC2	0	無法反演	0	無法反演	0	無法反演
VRS1	0	無法反演	0	無法反演	0	無法反演
VRS2	0	無法反演	0	無法反演	0	無法反演
	測試 1		測試 2		測試 3	
切向風方均根 rms error	0.97		0.89		1.12	
理想切向風 rms magnitude	33.16		51.96		71.41	
切向風 Relative Error	0.03		0.02		0.02	
	測試 1		測試 2		測試 3	
徑向風方均根 rms error	1.12		1.82		2.52	
理想徑向風 rms magnitude	10		10		10	
徑向風 Relative Error	0.11		0.18		0.25	

表二 理想風場不考慮非軸對稱徑向風分量一軸對稱徑向風以間距 4 增加

	測試 4		測試 5		測試 6	
	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	19.91
切向風各項數值						
VTC0	60	59.95	60	59.81	60	59.66
VTC1	10	10.68	10	10.68	10	10.67
VTC2	10	10.08	10	10.08	10	10.08
VTS1	10	10.31	10	10.37	10	10.43
VTS2	10	11.17	10	11.19	10	11.22
徑向風各項數值						
VRC0	12	14.16	16	18.15	20	22.14
VRC1	0	無法反演	0	無法反演	0	無法反演
VRC2	0	無法反演	0	無法反演	0	無法反演
VRS1	0	無法反演	0	無法反演	0	無法反演
VRS2	0	無法反演	0	無法反演	0	無法反演
	測試 4		測試 5		測試 6	
切向風方均根 rms error	0.99		1.02		1.08	
理想切向風 rms magnitude	61.64		61.64		61.64	
切向風 Relative Error	0.02		0.02		0.02	
	測試 4		測試 5		測試 6	
徑向風方均根 rms error	2.16		2.15		2.14	
理想徑向風 rms magnitude	12.00		16.00		20.00	
徑向風 Relative Error	0.18		0.13		0.11	

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。

## (二) 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  $V_R C_0 / V_T C_0$  減小而隨之增加，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。

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  $V_R C_0 / V_T C_0$  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  $V_R C_0 / V_T C_0$  很小且  $V_R C_1, V_R C_2, V_R S_1, V_R S_2 / V_R C_0$  比值較大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。

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 20 增加

	測試 1		測試 2		測試 3	
	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	21.81
切向風各項數值						
VTC0	20	17.34	40	37.60	60	57.87
VTC1	10	7.40	10	7.98	10	8.57
VTC2	10	7.14	10	7.47	10	7.80
VTS1	10	12.05	10	12.06	10	12.07
VTS2	10	12.96	10	12.96	10	12.97
徑向風各項數值						
VRC0	10	12.59	10	13.29	10	13.98
VRC1	2	無法反演	2	無法反演	2	無法反演
VRC2	2	無法反演	2	無法反演	2	無法反演
VRS1	2	無法反演	2	無法反演	2	無法反演
VRS2	2	無法反演	2	無法反演	2	無法反演
	測試 1		測試 2		測試 3	
切向風方均根 rms error	4.58		4.18		3.81	
理想切向風 rms magnitude	24.49		42.43		61.64	
切向風 Relative Error	0.19		0.10		0.06	
	測試 1		測試 2		測試 3	
徑向風方均根 rms error	3.84		4.34		4.89	
理想徑向風 rms magnitude	10.39		10.39		10.39	
徑向風 Relative Error	0.37		0.42		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 2 增加

	測試 4		測試 5		測試 6	
	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	21.82	20	21.82
切向風各項數值						
VTC0	60	58.04	60	57.97	60	57.90
VTC1	10	8.58	10	8.57	10	8.57
VTC2	10	7.81	10	7.81	10	7.80
VTS1	10	11.99	10	12.02	10	12.05
VTS2	10	12.94	10	12.95	10	12.96
徑向風各項數值						
VRC0	5	9.00	7	10.99	9	12.99
VRC1	2	無法反演	2	無法反演	2	無法反演
VRC2	2	無法反演	2	無法反演	2	無法反演
VRS1	2	無法反演	2	無法反演	2	無法反演
VRS2	2	無法反演	2	無法反演	2	無法反演
	測試 4		測試 5		測試 6	
切向風方均根 rms error	3.68		3.73		3.79	
理想切向風 rms magnitude	61.64		61.64		61.64	
切向風 Relative Error	0.06		0.06		0.06	
	測試 4		測試 5		測試 6	
徑向風方均根 rms error	4.90		4.89		4.89	
理想徑向風 rms magnitude	5.74		7.55		9.43	
徑向風 Relative Error	0.85		0.65		0.52	



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(表五)我們發現當  $V_R C_0 / V_T C_0$  固定且  $V_R C_1, V_R C_2, V_R S_1, V_R S_2 / V_R C_0$  比值較大時，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。

由(表四)及(表五)的比較我們可得知在考慮非軸對稱徑向風分量 ( $V_R C_1, V_R C_2, V_R S_1, V_R S_2$ ) 後，非軸對稱徑向風分量不僅無法得知確切的徑向風場，同時亦會污染到切向風場反演的真實性。

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(表六)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。

### (三) 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。

我們由下列的(7~13 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

表五 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 2 增加

	測試 7		測試 8		測試 9	
	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	24.61	20	26.47
切向風各項數值						
VTC0	60	56.79	60	54.63	60	52.48
VTC1	10	7.51	10	5.40	10	3.28
VTC2	10	6.66	10	4.38	10	2.11
VTS1	10	12.96	10	14.75	10	16.54
VTS2	10	13.87	10	15.68	10	17.49
徑向風各項數值						
VRC0	10	14.89	10	16.71	10	18.52
VRC1	3	無法反演	5	無法反演	7	無法反演
VRC2	3	無法反演	5	無法反演	7	無法反演
VRS1	3	無法反演	5	無法反演	7	無法反演
VRS2	3	無法反演	5	無法反演	7	無法反演
	測試 7		測試 8		測試 9	
切向風方均根 rms error	5.55		9.09		12.64	
理想切向風 rms magnitude	61.64		61.64		61.64	
切向風 Relative Error	0.09		0.15		0.20	
	測試 7		測試 8		測試 9	
徑向風方均根 rms error	6.48		9.75		13.06	
理想徑向風 rms magnitude	10.86		12.25		14.07	
徑向風 Relative Error	0.60		0.80		0.93	

表六 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 10		測試 11		測試 12	
	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
切向風各項數值						
VTC0	60	57.87	60	57.87	60	57.87
VTC1	10	8.57	10	8.57	10	8.57
VTC2	10	7.80	10	7.80	10	7.80
VTS1	10	12.07	10	12.07	10	12.07
VTS2	10	12.97	10	12.97	10	12.97
徑向風各項數值						
VRC0	10	13.98	10	13.98	10	13.98
VRC1	2	無法反演	2	無法反演	2	無法反演
VRC2	2	無法反演	2	無法反演	2	無法反演
VRS1	2	無法反演	2	無法反演	2	無法反演
VRS2	2	無法反演	2	無法反演	2	無法反演
測試 10                      測試 11                      測試 12						
切向風方均根 rms error	3.81		3.81		3.81	
理想切向風 rms magnitude	61.64		61.64		61.64	
切向風 Relative Error	0.06		0.06		0.06	
測試 10                      測試 11                      測試 12						
徑向風方均根 rms error	4.89		4.89		4.89	
理想徑向風 rms magnitude	10.39		10.39		10.39	
徑向風 Relative Error	0.47		0.47		0.47	

量的假設，亦即下列 7~13 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。

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，因此在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，而此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，(表五)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。

同樣的我們若從上述的(7~13)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 7、11、12、13 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 8、9、10 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(表五)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。

## 五、真實個案—納莉颱風

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)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，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，希望能對登陸後的納莉颱風有進一步的瞭解。(3)利用雙都卜勒雷達合成的風場對 GBVTD 方法做驗證。

### (一) 反演切向風場

針對上一節回波特性分析所選取的時間，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。

#### 1. 切向風每六分鐘變化分析

我們反演每六分鐘的切向風場，(圖 2-A)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，而 1042UTC 的最大切向風約 50m/s 其涵蓋的範圍大於 1036UTC 與 1048UTC。

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 2-B)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

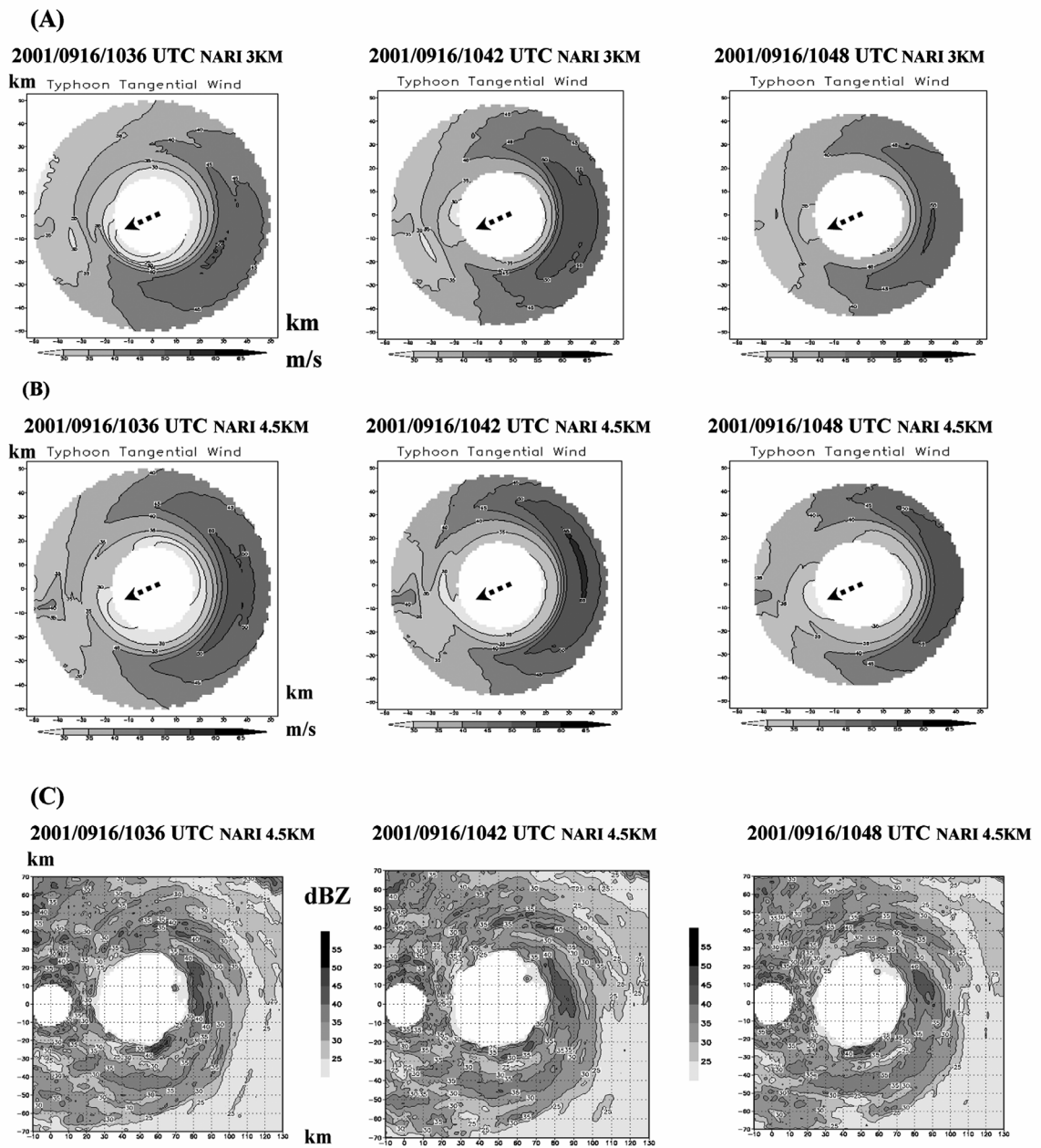


圖 2 (A) 高度 3 公里，以颱風中心為原點經由 GBVTD 反演後的切向風—每六分鐘變化，箭號為颱風移動方向。  
 (B) 高度 4.5 公里，以颱風中心為原點經由 GBVTD 反演後的切向風—每六分鐘變化。  
 (C) 納莉颱風高度 4.5 公里每六分鐘變化的回波場。

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，上述強切向風出現的位置與（圖 2-C）出現最強回波及最大涵蓋區域相吻合。

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。

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

納莉颱風登陸前的回波場與 GBVTD 反演之切向風場皆呈現波數一分佈且強值區位置相吻合，但其軸對稱分量亦應扮演重要的角色，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，我們取每六分鐘間隔的軸對稱切向風來加以分析其變化趨勢，（圖 3-A）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 3-B）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。

## (二) 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( $V_R C_0$ )，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（亦即入流），若考慮每六分鐘的軸對稱徑向風變化，由（圖 4）發現 1036UTC 入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，而在外流區下則為入流僅分佈在距中心 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入流，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相符但仍有些許的出入，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。

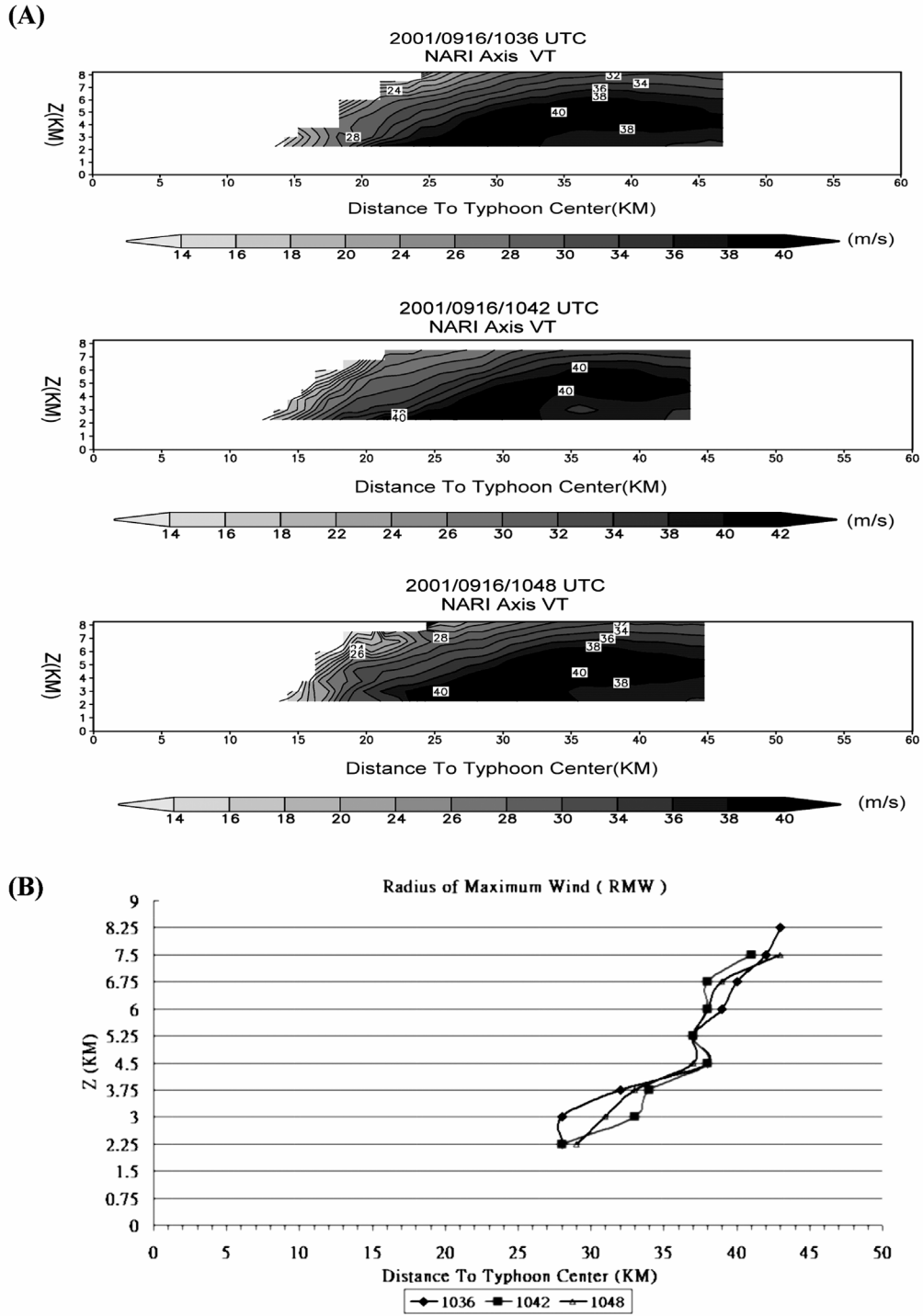


圖 3 (A)納莉颱風軸對稱切向風分量( $V_T C_0$ )垂直剖面六分鐘變化示意圖。  
(B)最大風速半徑(RMW)隨高度向外傾斜示意圖。

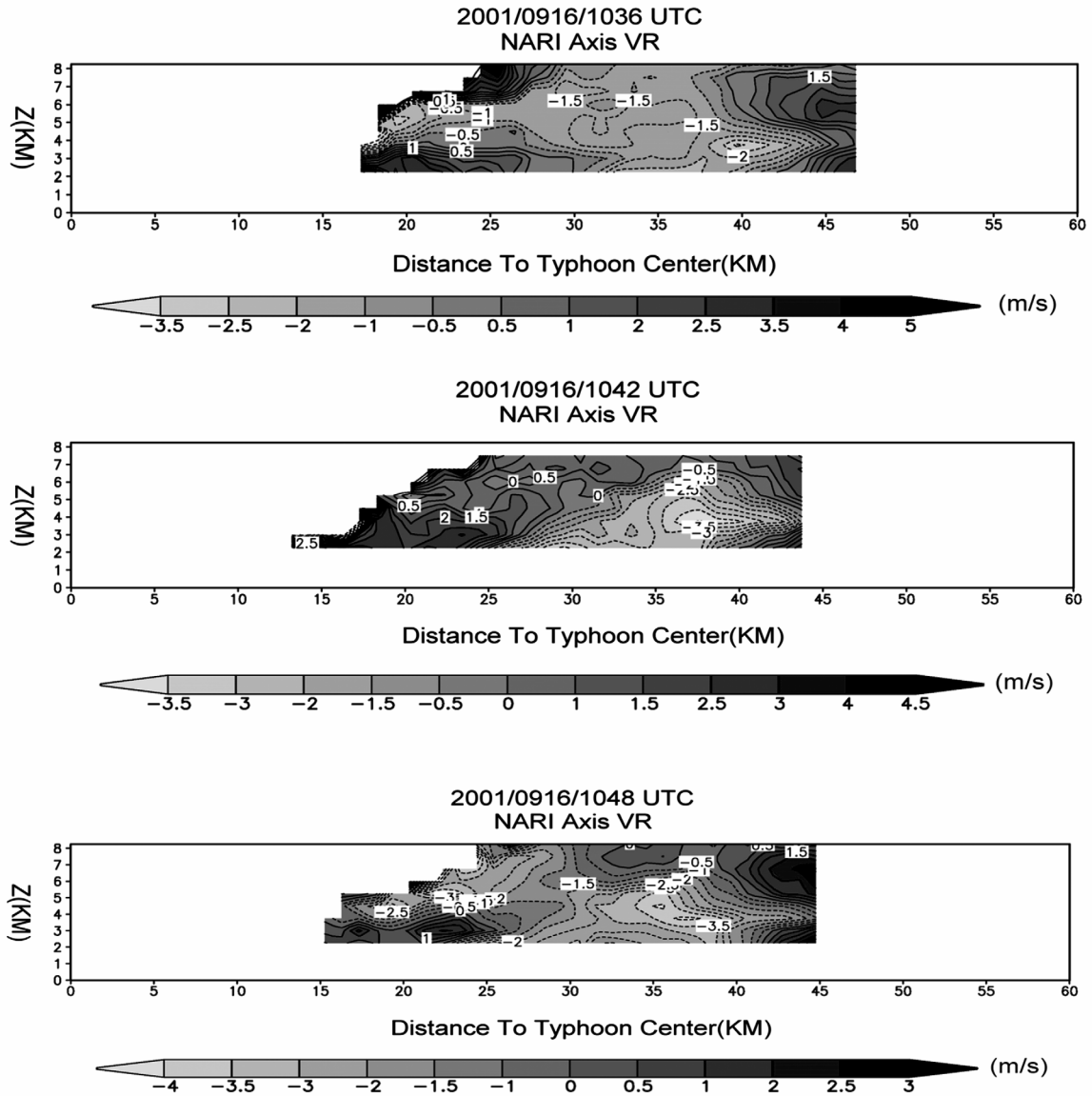


圖 4 納莉颱風軸對稱徑向風分量( $V_R C_0$ )垂直剖面逐時六分鐘變化示意圖。

### 六、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 5)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，

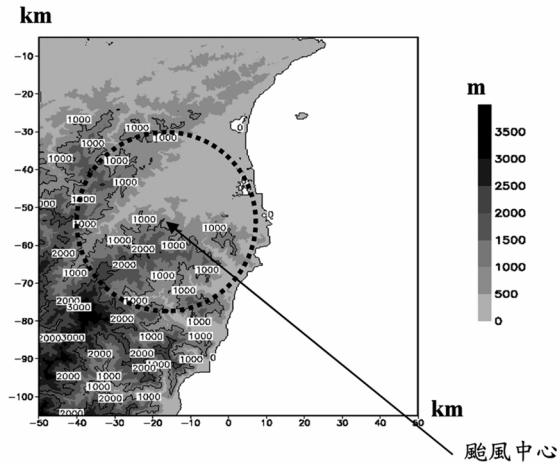


圖 5 雙都卜勒雷達合成風場分析區域示意圖，此時颱風中心位於(-15km,-55km)。

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 6) 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。

(一) 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。

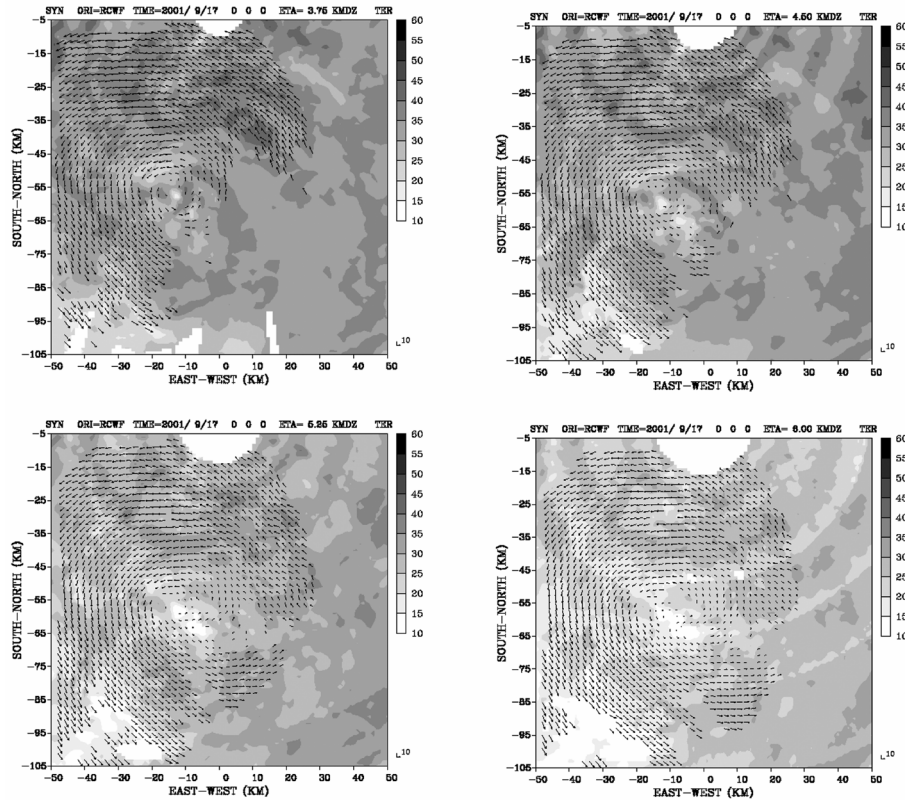


圖 6 雙雷達合成之風場與回波示意圖 (高度 3.75km~高度 6km)。



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：

$$V_T = \frac{xv - yu}{r} \tag{6-1}$$

$$V_R = \frac{ux + vy}{r} \tag{6-2}$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \tag{6-3}$$

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(6-1)~(6-3)式計算可得到颱風的切向風場與徑向風場，結果如(圖 7)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。

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 8-A)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

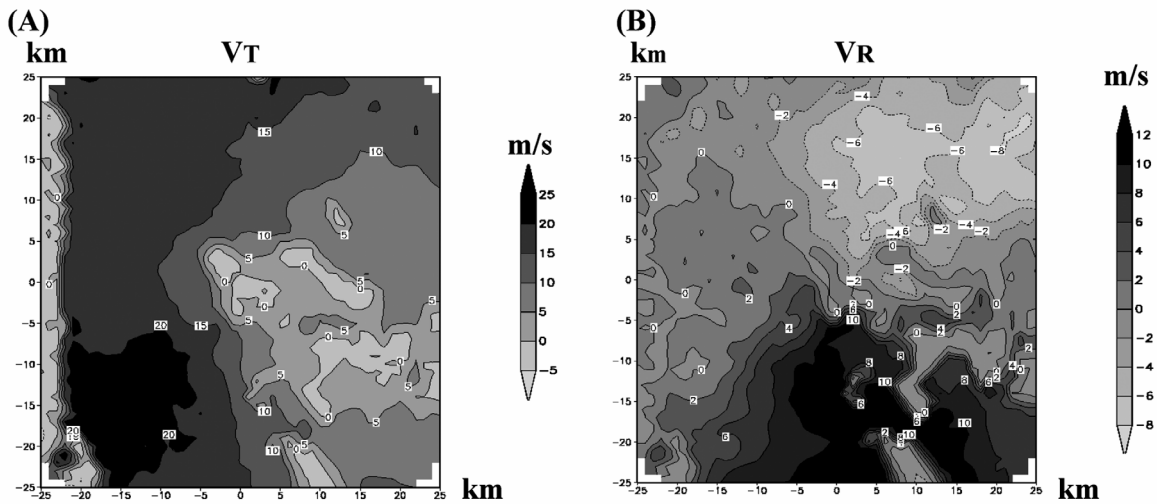


圖 7 卡氏座標上的 U、V 分量合成颱風的切向風與徑向風 (A)VT；(B)VR

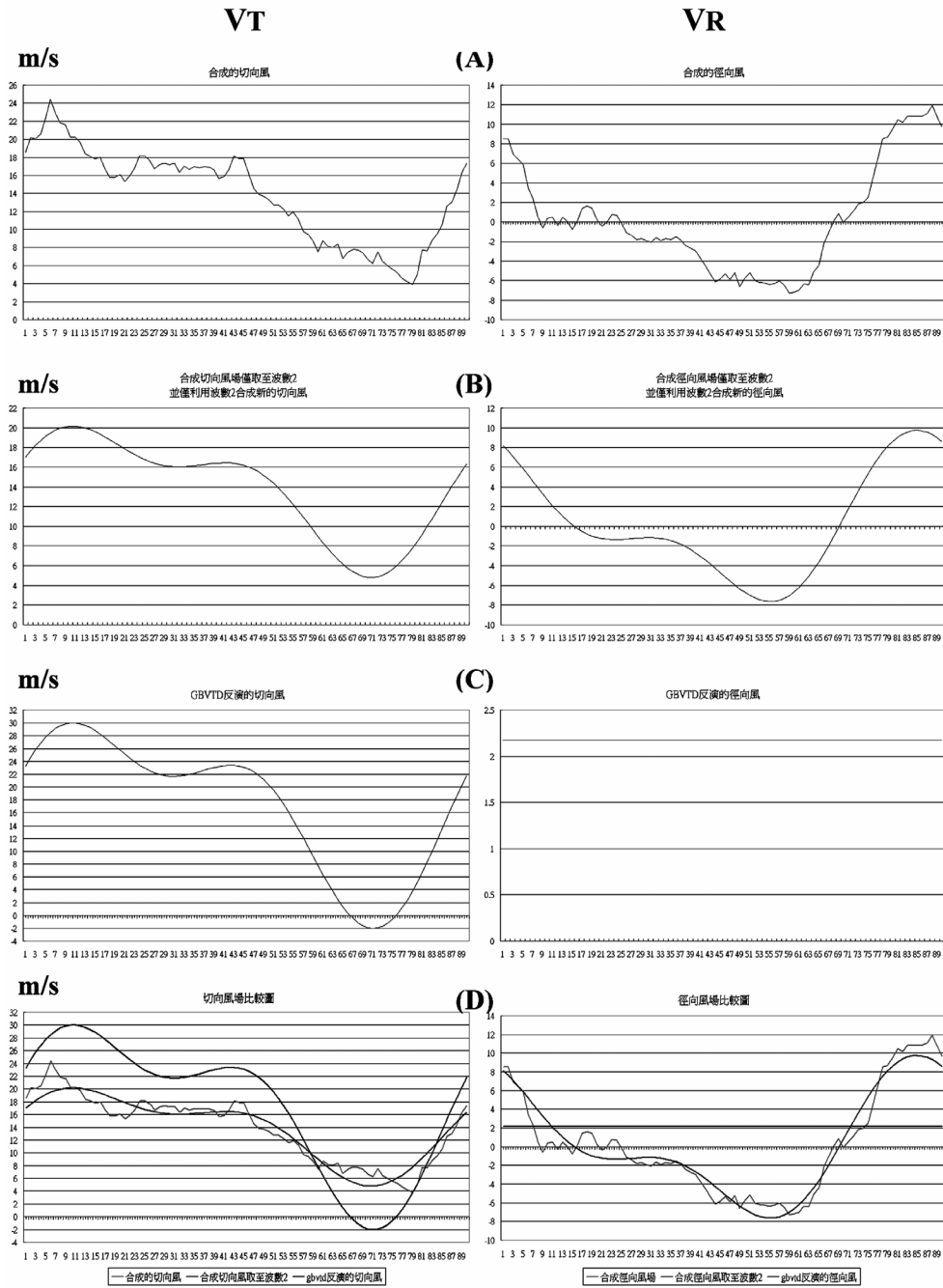


圖 8 (A) 高度 6 公里、距中心 22 公里經由雙雷達合成的 U、V 組合的風場。  
 (B) 高度 6 公里、距中心 22 公里經由波數 2 組成的風場。  
 (C) 高度 6 公里、距中心 22 公里經由 GBVTD 方法反演的風場。  
 (D) 合成風場、僅取至波數 2 的合成風場、GBVTD 反演風場之比較。

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，將這些分量重新組合成一組新的切向風、徑向風如（圖 8-B）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 8-C），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，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 8-D）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。

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 (11)	13.81	VTC0 (7)	17.10
VTC1 (11)	0.51	VTC1 (7)	0.25
VTC2 (11)	2.72	VTC2 (7)	5.94
VTS1 (11)	6.06	VTS1 (7)	12.53
VTS2 (11)	1.61	VTS2 (7)	3.68
VRC0(11)	0.26	VRC0(7)	2.17
$V_M \cos(\theta_T - \theta_M) + VRC1(11)$	6.64	VRC1(7)	0.00
VRC2 (11)	1.24	VRC2 (7)	0.00
VRS1 (11)	-0.37	VRS1 (7)	0.00
VRS2 (11)	-3.29	VRS2 (7)	0.00
高度 6 KM - 第 22 圈			
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		
高度 6 KM - 第 22 圈			
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

## 七、結 論

本研究目的為瞭解納莉颱風環流結構，在外海因其環流接近軸對稱分佈，因此使用 GBVTD 方法來分析其三維風場結構，同時亦藉由理想風場探討 GBVTD 準確性與可能之誤差來源；而在颱風登陸後分別利用雙雷達合成與 GBVTD 方法做驗證，進而瞭解 GBVTD 在颱風登陸後之適用性。

因此本文結論主要分為三大部分，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 /  $V_R C_0$  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結構，經由 GBVTD 反演所得的切向風場我們發現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，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。

爲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；徑向風則爲波數 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爲 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，此原因爲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。

## 誌 謝

本研究感謝交通部中央氣象局及民航局提供都卜勒雷達資料。感謝台灣大學大氣科學系周仲島教授及中央氣象局張保亮博士協助使用 GBVTD 程式，以及氣象局鄧仁星博士協助使用 RASTA 程式。本研究由國科會計劃 MSC93-2119-M-008-011-AP1 與 MSC92-2119-M-008-009-AP1 經費支助。

## 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。
- Black, M. L., R. W. Bupee, and F. D. Marks, 1996: Vertical Motion characteristics of tropical cyclone determined with airborne Doppler

- radial velocities. *J. Atmos. Sci.*, 53, 1887-1909.
- 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., T. P. Bui., 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., 1984: Mesoscale and convective-scale characteristics of mature hurricanes. Part I: General observations by research aircraft. *J. Atmos. Sci.*, 41, 1268-1285.
- Jorgensen, D. P., 1984: 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, 1973a: 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, 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, 1984a: 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.

# **The Analysis of Typhoon Wind Field Structure using Doppler Radar – A Case Study of Typhoon Nari (2001)**

**Chin-Hsiao Chiang    Tai-Chi Chen Wang**

**Institute of Atmospheric Physics, National Central University**

(Manuscript received 31 March 2005; in final form 24 April 2006)

## **ABSTRACT**

The typhoon circulation structure is very important in simulation of typhoon track and intensity. The more realistic structure can also improve the diagnosis of the distribution of wind and rainfall. Since the installation of Doppler Radar Observation network in Taiwan, it is very necessary to retrieve typhoon circulation by using single Doppler radar. This research used different ideal wind fields to test the Ground-Based Velocity Track Display (GBVTD) technique. At first, the higher value of asymmetric radial wind of typhoon which was neglected in GBVTD method, the more distortion of retrieved wind structure will occur.

Before and after the landfall of typhoon Nari, the GBVTD retrieval of wind structures were carried out for five time stages. Before landing, the axisymmetric tangential wind maximum were tilted outward, the strongest tangential wind located near the strongest echo area. While the radius of maximum wind was contracting, the maximum tangential wind also increasing. These phenomena were very similar to the documented mature typhoon structure, indicating the GBVTD retrieval was able to reveal the typhoon structure over the open ocean in Nari's case.

After landing, the dual Doppler synthesis 3-D wind fields were carried out by RASTA (Radar analysis System for Taiwan Area) method using CKS and RCWF Doppler radar data. The GBVTD retrieved wind fields were compared to the dual-Doppler wind, we found the higher asymmetric radial wind component did cause some error in GBVTD retrieved wind structure. The high terrain may be the reason of the higher value of asymmetric component.

**Key words: Doppler Radar, GBVTD, RASTA**

