

凡那比颱風(2010)眼牆重建之雙都卜勒雷達之初步分析

劉振甫¹ 魏志憲¹

¹國防大學理工學院環境及資訊工程學系

摘要

凡那比颱風於2010年9月19日登陸台灣前，具有明顯且紮實之颱風眼及同心圓對稱結構。颱風於台灣東岸登陸後其颱風眼消失，且颱風北側回波逐漸轉弱，成為一個明顯的不對稱結構。當颱風眼自台灣西岸出海而眼牆尚未重建前，颱風南側之雨帶有明顯增強並持續發展之趨勢，造成當時台灣南部地區創下驚人的累積雨量。本研究欲探討造成該雨帶增強及隨後颱風眼牆重建之機制，利用馬公及七股都卜勒雷達資料，針對該時段之雨帶特性進行初步分析，主要分析時間為2010年9月19日0601-0701UTC。由合成風場資料顯示，在高度2公里以下，颱風環流的偏北風與雨帶上之西北風(風速常大於25m/s)於雨帶之北側產生明顯輻合作用，同時高層該處位處風場流出之輻散區，有利於激發並維持強對流雨帶。此外，透過分析其垂直剖面結構特徵，發現分佈於底層並夾帶來自海面之暖濕氣流；最後，透過分析渦度收支方程式中各項因子對渦度變化的貢獻，進一步探討造成其渦度變化之動力機制，尋找可能存在於該雨帶中之渦旋熱塔(vortical hot tower)，以期發現造成雨帶增強並使眼牆重建之有力證據。

關鍵字：雙都卜勒雷達、底層輻合及暖濕入流、高層輻散、渦旋熱塔、渦度收支

一、前言

2010年9月凡那比颱風在台灣南部及東部地區造成豪雨，其移動路徑圖(圖1)屬於西行之颱風。就累積雨量之時空分布特徵而言(圖2)，最大累積雨量之位置隨時間由北向南偏移，甚至在岡山地區亦創下歷來最大時雨量紀錄(圖3)。

2010年9月19日凡那比颱風在侵台期間其眼牆結構雖遭受台灣複雜地形影響而破壞，但隨其西移出海後其南方顯著的降水對台南及高屏地區造成嚴重的災情。因此對於其南方雨帶的增強乃至於眼牆之重建過程的研究便顯得十分重要，吾人將針對颱風眼出海前海峽南部雨帶之結構及特徵做進一步之分析及探討。

由於凡那比颱風南側雨帶約自9月19日06UTC之後回波強度發展至50dBZ以上且開始呈現明顯之帶狀分佈特徵，本研究將

針對9月19日06UTC至其後約莫1小時左右，利用空軍馬公基地雙偏極化雷達與中央氣象局七股都卜勒雷達資料進行雙雷達風場合成分析(圖4)，並繪製各等高面上之各項量場分佈圖，再以9月19日06UTC中央氣象局定位之官方颱風中心位置向外朝南方發展中之雨帶製作垂直剖面圖，分析其回波及風場結構，期望能夠進一步了解颱風眼在出海前，造成其南方雨帶增強乃至眼牆重建之主要原因。

本文第二節為資料來源與處理；第三節則描述凡那比颱風眼於即將出海前，南方逐漸增強之雨帶結構特徵及進行初步探討；最後為結論與展望。

二、資料來源與處理

本研究使用空軍馬公雙偏極化雷達與中

央氣象局七股都卜勒雷達進行雙雷達之分析，主要分析時間為2010年9月19日0601~0701UTC，首先經過格式轉換，再透過SOLOII軟體將其全體積掃描資料進行風場折錯及各種除錯處理後，將資料內插到以馬公雷達為中心之直角座標；在合成風場前，需利用CEDRIC修補並平滑那些使用REORDER內插所得之時間場與使用SPRINT內插所得之參數場結合後的資料。

三、雨帶結構特徵及初步探討

利用整合雷達回波圖觀察凡那比登陸台灣前後之結構變化(圖5)。當其在登陸前強度明顯增強之時，除具有較小且結構紮實之颱風眼外，其整體回波亦呈現較接近同心圓對稱型態；當其登陸台灣地區後，由於台灣地區地形破壞其結構及水汽受到截斷的影響，其颱風眼明顯消失，且整體結構呈現南強北弱之不對稱型態；當颱風逐漸朝西遠離台灣陸地的過程中，位於颱風眼南側之雨帶於2010年9月19日06~07UTC時有明顯增強並呈現帶狀分布之特徵，並於隨後(颱風眼出海後)重建為一較大之眼牆。

2010年9月19日06UTC時，颱風眼位於七股雷達東北東方約50公里處，相當於在南部山區一帶。一般概念上認為颱風眼南方雨帶之所以會發展而維持，是受到颱風環流與地形間交互作用所產生之動力舉升機制所引起，但觀察馬公雷達於該時段附近之回波分佈演變情況(圖6)可發現，該強回波區域乃自颱風環流上游之海峽南部海面即持續存在，並向東南延伸至台灣南部地區，並非是弱回波移入中南部山區後於山緣附近增強之情況，由此可見該持續發展並增強之帶狀回波的生成及維持機制主要與颱風本身和環境場間的交互作用有所關聯。

圖7顯示颱風本身偏北風之環流與兩帶內偏西南風之風場於較強回波區之北側(即

靠近颱風眼之內緣)交會，並由輻散場之水平分佈可印證該處存在較強之輻合區。隨著時間之演進，較強回波區之北側大於45dBZ以上之回波範圍發展更加擴大且更趨於完整之線狀結構。

相較於圖7綠色橢圓之相對位置，圖8之該處恰為風場流出區，亦與輻散場之分佈範圍一致，故底層輻合、高層輻散，有利於該兩帶之發展與維持。

此外，雨帶上強回波有向南移動並逐漸增強的趨勢。為瞭解雨帶上強回波之垂直結構，遂以2010年9月19日06UTC官方颱風中心為原點，向外追蹤0601、0631以及0701UTC2公里高度眼牆上具較強回波值區域做垂直剖面(圖9藍色實線表所切垂直剖面位置)。

在雨帶明顯增強與發展的0601~0701UTC時段，所切之垂直剖面(圖10，其中○表颱風中心)具有以下特徵：

- 一、雨帶內緣回波強度隨時間發展迅速，但強回波高度多在5公里以下；且邊界層內具有明顯自海面向颱風眼內流入之氣流，這意味氣流在底層由颱風外圍之海面向內攜入了暖濕(可能隱含高相當位溫)之空氣，使得大氣底層環境之穩定度降低，有利於氣旋之發展。
- 二、有別於一般中尺度對流系統，其下沉氣流較不明顯，且強回波區伴隨較強上升運動。另外，隨時間推移及所取最大渦度場之剖面愈向南推，其回波普遍發展之垂直高度更加明顯。

關於上述特徵二之結構分佈，與Houze et al.(2009)針對2005年的Ophelia颶風所作研究發現的渦旋熱塔(vortical hot tower)結構特徵相似。有關於渦旋熱塔，其在熱帶氣旋演變成颱風的過程中，扮演了重要的角色；它是受浮力作用而產生的對流性上升流，其底部伴隨之輻合作用將環境場底層渦度向上

拉升，使其成為一個垂直向上伸展且伴隨高正渦度值的上升氣流，雖然仍未完全明白其中詳細變化過程，但它確實能使熱帶地區海洋上、包含數個中尺度對流系統的廣大低壓帶演進成具有氣旋特性的颱風；同樣它也可能使結構受地形破壞的颱風重新組織、並增強它氣旋式的環流；另外，有關於熱塔(hot tower)，唐(2010)定義為在 10 公里高度等高面上，其回波大於 25dBZ 之對流胞。雖然從剖面圖上發現在等高面 10 公里以上偶有介於 20~30dBZ 回波分佈，但實際之強度及範圍並不明顯，是否為渦度熱塔可嘗試由渦度變化的特徵進一步驗證。

有關於渦度方程在卡式座標內的形式如下：

$$\frac{D(\zeta+f)}{Dt} = -(\zeta+f)\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right) - \left(\frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial z}\right) + \frac{1}{\rho^2} \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\partial \rho}{\partial y} \frac{\partial p}{\partial x}\right)$$

此方程式代表局地渦度變化乃是由等式右方各項(由左至右分別為輻散項、傾斜項與力管項)綜合的貢獻。所分析之時間點為 2010 年 9 月 19 日 0601UTC 以及 0701UTC，範圍選擇上考慮離雙都雷達基線較遠、同時涵蓋到最大渦度區且具有較強回波之區域(圖 11)。

在假設颱風為正壓系統，不考慮力管項對渦度變化貢獻的情況，分析輻散項、傾斜項在各層高度上的表現有以下特徵(以下僅擷取部份高度圖形，圖 12~15 中輻散項及傾斜項皆以陰影表示、綠色粗實線為回波值 40dBZ 之等值線，而黑色細實線乃是渦度等值線)：

一、輻散項對渦度變化貢獻較明顯之高度，

集中於 2.0 公里高度以下(圖 12、13)。

二、0601UTC 時，傾斜項對渦度變化貢獻較明顯之高度，僅位於 5.5 公里高度附近(圖 14)；0701UTC 時，傾斜項轉為在高度 3.0 公里以下，對於渦度變化皆有明顯貢獻(圖 15)。

由輻散項、側傾項與回波及渦度特徵的表現來看，我們可以發現，強回波區伴隨局部高正渦度值。強回波底層輻合項之作用有

利於渦度的增強。傾斜項作用自 0601Z 至 0701Z 明顯增大，表示該期間內垂直運動增強，使水平渦度受其影響而被側傾為垂直渦度。

四、結論與展望

歷史上以類似凡那比颱風侵台之路徑登陸台灣者不在少數，本個案受地形破壞結構後又重建眼牆並造成台灣嚴重災情之現象更是值得我們加以研究，並期望在日後能夠提早警覺、加強戒備，使傷害減至最低。

透過雙都雷達分析，吾人發現了颱風與環境風場在中尺度動力機制的作用下，產生了底層輻合與高層輻散的現象，使得短時間內能夠迅速增強颱風南側兩帶內緣之強度；此外透過垂直剖面之資訊，我們發現兩帶底層存在著明顯自海面流向颱風中心之入流，這也為颱風眼牆出海後能夠重建提供另一個可能的有力證據；而在所切垂直剖面的結構特徵上，初步發現與渦旋熱塔有相似之處，雖然回波強度及高度上之表現不如唐(2010)針對莫拉克(2009)所分析之特徵明顯，但在嘗試尋找的過程中發現，隨著時間的推移以及所取之位置更加往南，回波有發展高度愈高且強度愈強之趨勢，也許條件足夠被稱為渦旋熱塔的塔狀積雲在此個案中是可以預期被發現的。

另外有關渦度收支的部份僅作初步之分析，未來仍需作更嚴謹之驗證，利用局地渦度變化之方程式：

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -(u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y}) - w \frac{\partial \zeta}{\partial z} - \zeta \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \left(\frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho^2} \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\partial \rho}{\partial y} \frac{\partial p}{\partial x} \right)$$

其所代表之意義為：局地渦度隨時間變化的程度分別受到方程式中右方各項的影響，分別為(由左至右)水平渦度平流項、垂直渦度平流項、渦管輻合輻散項、傾斜項以及力管項等諸項綜合的貢獻，但由於空氣密度資訊

無法求得，故所分析時段的大氣條件是否符合正壓性亦需要其他較詳盡的資料驗證，以考慮力管項對渦度變化所可能造成的影響。

另外，以時間差分法估算局地渦度變化的公式可表示如下：

$$\left(\frac{\Delta \zeta}{\Delta t}\right)_i = \frac{\zeta_{i+1} - \zeta_{i-1}}{2\Delta t}$$

由於上述兩式所計算的結果是相互獨立的，可以依此比較利用時間差分法所估算局地渦度變化的結果與渦度收支方程中各項總合對渦度變化的貢獻，以進一步探討渦度收支分析的合理性；若兩者具有相似的分佈特徵，代表該兩種計算方法之間存在一定的可信程度，可以進一步詳盡分析渦度收支方程中各項因子的變化與回波強度或垂直運動變化之間的關係，對於眼牆重建之動力機制可以有更進一步的了解。但若兩者之間分佈特徵迥異，可能是由於力管項的影響或是由於時間差分法所取的時間長度過長所致。

五、參考文獻

- 唐玉霜，2009 莫拉克颱風雷達觀測中尺度兩帶特性研究，國立中央大學大氣物理研究所碩士論文，82 頁，2010。
- Riehl, H., and J. S. Malkus, 1958, "On the heat balance in the equatorial trough zone." *Geophysica*, 6, 503-538.
- Heymsfield, G. M., J. B. Halverson, J. Simpson, L. Tian, and T. P. Bui, 2001, "ER-2 Doppler radar investigations of the eyewall of Hurricane Bonnie during the Convection and Moisture Experiment-3." *J. Appl. Meteor.*, 40, 1310-1330.
- Robert A. Houze Jr., and Wen-Chau Lee and Michael Bell Convective, "Contribution to the Genesis of Hurricane Ophelia (2005)" *Monthly Weather Review*, Vol.137, 2778-2800.

Hendricks, E. A., M. T. Montgomery, and C. A. Davis, 2004, "On the role of vortical hot towers in formation of Tropical Cyclone Diana (1984)." *J. Atmos. Sci.*, 61, 1209-1232.

Wallace, J. M., and P. V. Hobbs, 2006, "Atmospheric Science: An Introductory Survey." 2nd ed. Academic Press, 483 pp.

林育邦，雙偏極化雷達反演雷暴個案水象粒子分佈之研究。國防大學理工學院碩士論文，84 頁，2010。

Sachidananda, M., and Zrnica, D. S., "Differential propagation phase shift and rainfall rate estimation," *Radio Science*, Vol. 21, No. 2, pp.235-247, 1986.

Chun-Chieh Wu, Kun-Hsuan Chou, and Hsiu-Ju Cheng, "Eyewall Contraction, Breakdown and Reformation in a Landfalling Typhoon" *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 30, NO.17 (2003)

魏志憲，台灣地區波型線狀回波與中尺度渦旋之雙都卜勒雷達分析。國防大學理工學院博士論文，71-72 頁，2006。

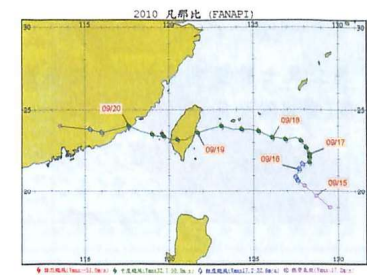


圖 1 2010 年 9 月凡那比颱風行進路徑圖。

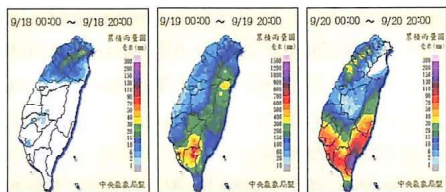


圖 2 2010 年 9 月 18-20 日地方時累積雨量圖。



圖 3 2010 年 9 月 19 日 01 時~9 月 20 日 10 時岡山地區累積雨量。

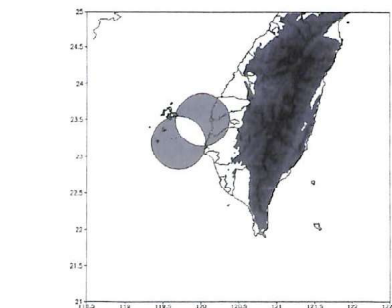


圖 4 馬公及七股雙雷達合成有效涵蓋範圍圖(雙圓陰影區)。

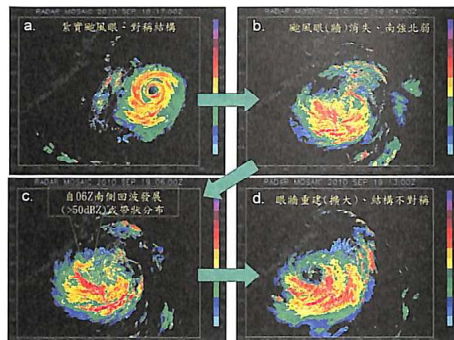


圖 5 凡那比颱風之整合雷達回波圖。

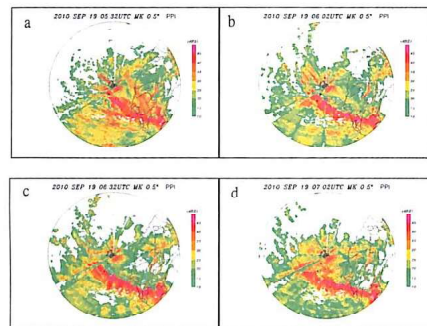


圖 6 馬公雷達回波 0.5 度 PPI 圖。

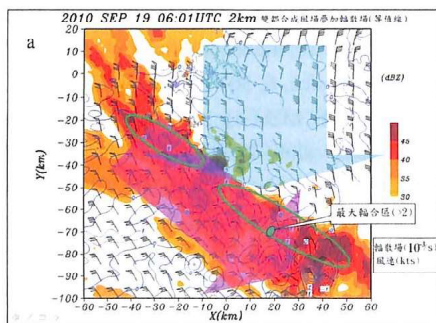


圖 7 馬公及七股雙都雷達合成圖(高度 2 公里)。

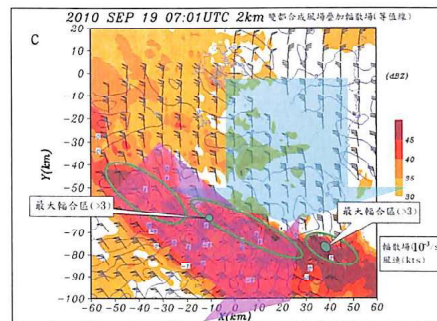
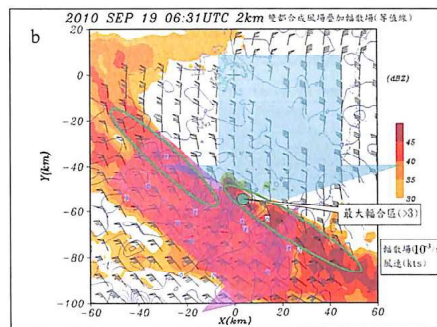


圖 7(續) 馬公及七股雙都雷達合成圖(高度 2 公里)。

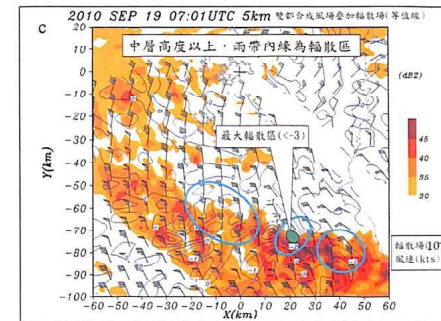
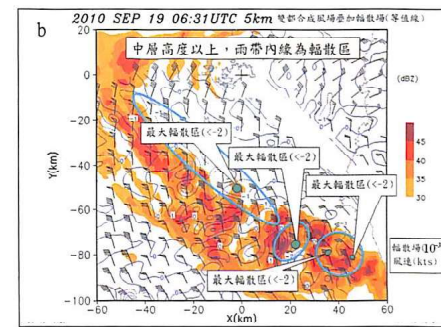


圖 8(續) 馬公及七股雙都雷達合成圖(5 公里)。

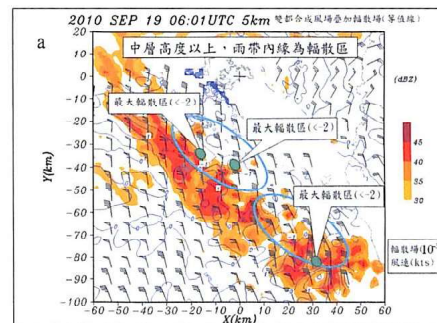


圖 8 馬公及七股雙都雷達合成圖(5 公里)。

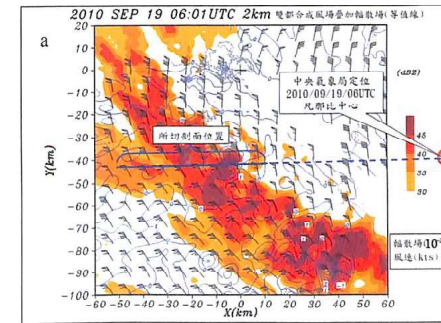


圖 9 垂直剖面位置示意圖。

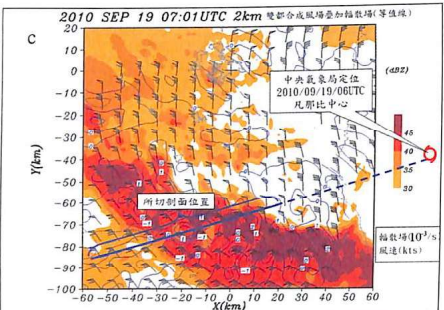
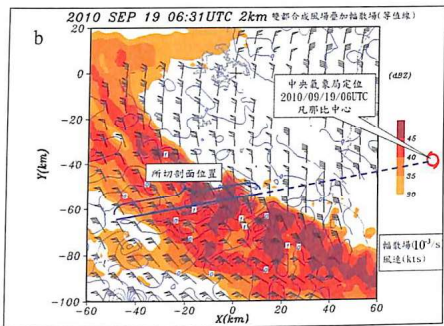


圖9(續) 垂直剖面位置示意圖。

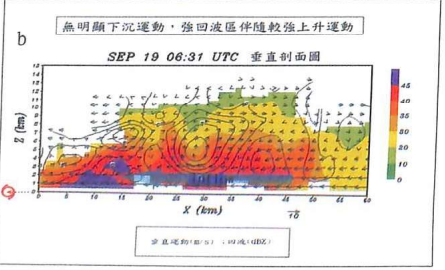
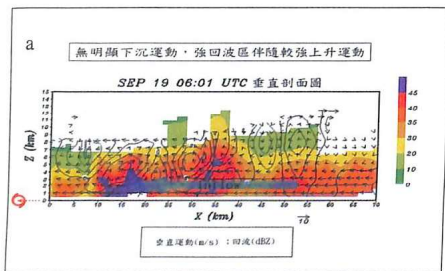


圖10 相對於圖9所示位置之垂直剖面圖。

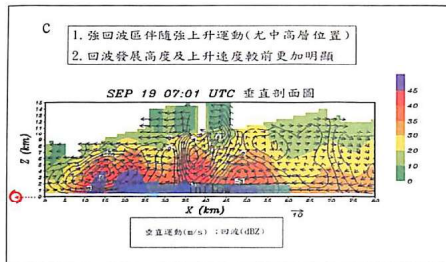


圖10(續) 相對於圖9所示位置之垂直剖面圖。

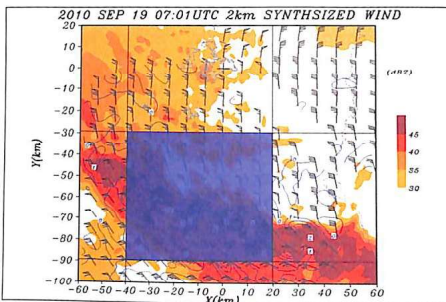


圖11 選取分析輻散項及扭轉項之區域範圍。

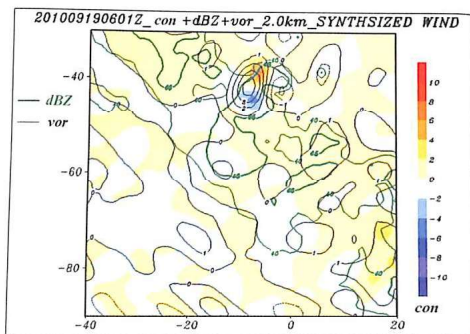


圖12 0601UTC輻散項、回波場及渦度場疊加圖。

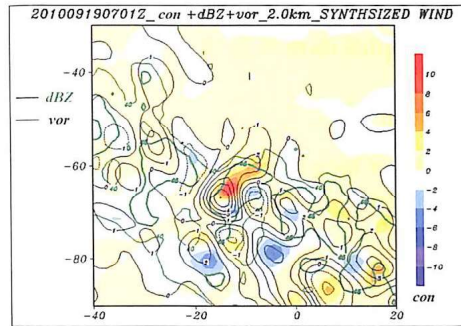


圖13 0701UTC輻散項、回波場及渦度場疊加圖。

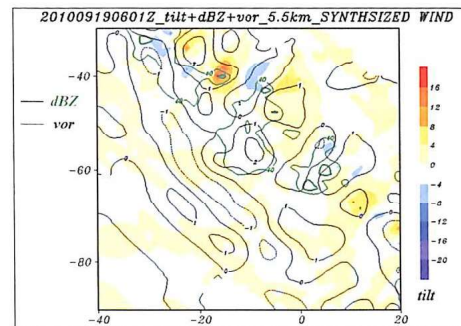


圖14 0601UTC傾斜項、回波場及渦度場疊加圖。

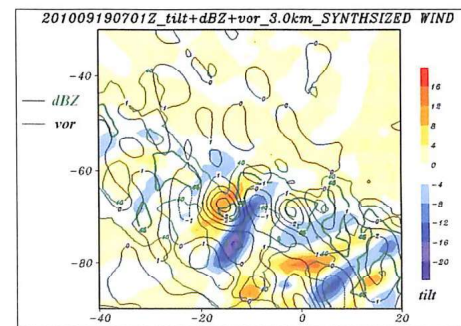


圖15 0701UTC傾斜項、回波場及渦度場疊加圖。

Preliminary analysis on the intensification of the eyewall of typhoon Fanapi (2010) by using dual-Doppler data

Chen-Fu Liu, Chih-hsien Wei

Department of Environmental Information and Engineering, Chung Cheng Institute of Technology,
National Defense University

ABSTRACT

The purpose of this study is to the intensification of eyewall in typhoon Fanapi(2010). The eyewall has characteristics of clear-shape and axis-symmetry. The eye was lack of organization after landfall due to the terrain effect. However, it reconstructed after moved out of Taiwan Island. The re-build eyewall was asymmetric that the eye of typhoon was larger than before. The dual-Doppler wind synthesized by Chigu and Makung Doppler radar revealed that a rainband with cellular structure developed closing to the inner core of typhoon. A remarkable inflow in the low-level structure enhanced the embedded convective cells. Moreover, there were several convective cells accompanying with intense vertical vorticity at low level. These cells were tilting outward and extended to more than 10 km in height, and it may resemble the vertical hot towers. More discussions about vorticity budget is needed to verify the mechanisms causing the intensification of the eyewall.

Keywords : dual-Doppler radar, low level convergence and warm-moist inflow, high level divergence, vortical hot tower, vorticity budget