

# 台灣地區登陸颱風的一些特徵：納莉颱風個案

周仲島 高聿正 顏健文  
國立台灣大學大氣科學研究所

## 摘 要

現階段我們對登陸颱風的瞭解非常有限，尤其是中小尺度相關過程。2001年9月16日在台灣北部登陸的納莉颱風（NARI 編號 0116），由於其超長滯留期（滯留本島超過兩天時間）和特殊移動路徑（由北往南幾乎貫穿全島），提供一個絕佳機會利用全省雷達網和中尺度站網資料，進行納莉颱風登陸後近中心環流和降雨結構變化特徵的分析。

結果顯示，納莉颱風登陸後，近中心軸對稱切向風分量顯著減弱，有時非軸對稱分量甚至大過軸對稱。同樣的，徑向風也在減弱，但減弱速率較切向風緩慢，甚至出現徑向風大於切向風情形。此一結果顯示，登陸颱風經過一段時間後，近中心區域典型渦旋結構（切向風遠大於徑向風）已不復存在。

雙都卜勒合成風場和 GBVTD 反演風場比較結果顯示，GBVTD 有將非軸對稱波數 2 切向風分量投影到軸對稱分量情形，導致環流強度高估。最後，由軸對稱雷達回波分析結果顯示，納莉颱風在登陸階段回波場有明顯變化，由原先單一極值（眼牆區離中心約 35 公里）轉變成雙極值分布，且外極值（離中心約 90-120 公里）較內極值（離中心約 50-70 公里）為大。

## 一、前言

1998 年颶風密契（Mitch）侵襲中美洲宏都拉斯和尼加拉瓜，造成重大洪水和土石流災害，死亡人數超過五千，兩國原本就已脆弱之經濟建設倒退近二十年。1999 年颶風佛洛伊德（Floyd）侵襲北卡羅來納州，造成大範圍內陸洪水，引發沿海各州居民恐慌。在台灣，颱風所帶來的災害更是耳熟能詳。1996 年 7 月的賀伯颱風，帶來破紀錄的山區降雨；2000 年 10 月的象神颱風，造成北部地區大洪災；2001 年連續多個颱風（潭美，桃芝，納莉）所帶來的洪水和土石流，不但造成全台經濟建設重大創傷，更撼動整個社會導致全民不安。世界各國政府對於熱帶風暴登陸所造成的重大災害和影響不但有了深刻的認識，也瞭解到更多相關研究的迫切性，尤其是在定量降雨預報的部分。

現階段我們對登陸颱風的瞭解非常有限，尤其是中小尺度相關過程（Marks et al. 1998; Wu and Kuo 1999）。Geerts et al. (2000) 利用機載都卜勒雷達（美國航空太空總署所擁有，裝置在 ER2 垂直指向之 X 波段都卜勒雷達），針對 1998 年 9 月 22 日登陸希斯盤紐拉島的喬治士（Georges）颶風進行登陸前後降雨和氣流變化觀測研究。結果顯示喬治士登陸後，除了中心氣壓快速增加強度減弱外，還觀測到眼牆砧狀雲下沉、眼牆內冰晶濃度減少、以及颶風眼消失由深對流所取代等降雨結構特徵。伴隨此深對流之高層上衝氣流強度達 20 公尺每秒，發生的時機和颶風眼移到島上主要山脈吻合，顯示地形在登陸颶風所扮演的重要角色。另外文章中也指出，喬治士登陸後雷達回波垂直剖面顯示，回波強度在溶解層以下仍然隨高度遞減而增加，這個結果和颶風登陸前很不相同，顯示地形舉升對於低層降雨有

顯著加強作用。這篇論文可能是第一篇利用高解析度儀器探討當颶風和複雜地形交互作用時降雨和氣流結構變化的特徵，對於登陸颶風之定量降雨預報意義重大。

另一方面，Ferraro et al. (1999) 指出由衛星影像估計發現，造成宏都拉斯大洪災的颶風密契雖然在登陸前為一個五級颶風，登陸後很快減弱成熱帶低壓，但是大部分的降雨卻都是密契登陸以後發生的。這個結果很明顯說明熱帶風暴登陸後即使強度快速減弱，也能夠很有效率的繼續大量水氣輻合，尤其是登陸地區周圍有暖洋面存在時。此一觀察和侵襲台灣的颶風有相當多吻合之處（例如 Lin et al. 2001; Wu et al. 2002），登陸颶風低層水氣輻合過程是值得深入探討的問題。

除了降雨問題之外，登陸中的熱帶風暴另一個重要且有趣的問題是，近中心環流結構變化特徵。1997 年 7 月 19 日發生在墨西哥灣的丹尼颶風 (Danny) 就是一個很有趣的案例。丹尼在登陸前僅達輕度颶風標準的最下限，登陸前在阿拉巴馬州摩拜灣滯留超過 1 天以上，移動速度緩慢，且明顯增強。Blackwell (2000) 利用海岸 WSR-88D 都卜勒雷達的回波和風場資料分析顯示，丹尼在摩拜灣具同心眼牆結構（一般較常在強烈颶風觀測到 Willoughby et al. 1982）；之後，外眼牆內縮取代內眼牆，完成一次眼牆取代過程（Willoughby 1990）；登陸前，經歷一次快速的環流轉變過程，從原先高度對稱結構轉變成不對稱。在此期間於西側眼牆發展出一個中尺度渦旋，直徑約 4~6 公里。此一渦旋不但加強局部對流發展，並造成丹尼路徑的擺動。Blackwell 指出，丹尼在登陸期間雷達觀測最強風出現在離地表大約 600~700 公尺高度且非常不對稱，東側微弱西側顯著，可能和中尺度渦旋的發展有關。而降雨的分布也呈現類似的型態。作者指出正確低層風場的資訊，對於風暴的強度和降雨預報都有密切的關係。

周等 (1994) 和 Lee et al. (1999) 針對海岸都卜勒雷達觀測颶風時徑向速度場經常具顯著偶極分布特徵，利用幾何關係以及傅式級數轉換，發展速度軌跡顯示法 (GBVTD)，反演颶風近中心主次環流結構。近年來，此一方法已應用在一些登陸颶風個案分析研究上 (周等 1996; Lee et al. 2000; 周 2001; 張等 2002; 楊 2003; 高 2003)，希望對登陸颶風中尺度環流結構及其變化有較深入的認識。但是速度軌跡顯示反演法因著本身的假設和限制，有其適用性，尤其是在登陸中的颶風，受地形影響，其環流結構常較不具渦旋特徵。

2001 年 9 月 16 日在台灣北部登陸的納莉颶風 (NARI 編號 0116)，由於其超長滯留期（滯留本島超過兩天時間）和特殊移動路徑（由北往南幾乎貫穿全島），提供一個絕佳機會利用全省雷達網和中尺度站網資料，進行颶風登陸後近中心環流和降雨結構變化特徵的分析。納莉在其登陸後，近中心環流正好進入氣象局五分山雷達和民航局中正機場雷達雙都卜勒分析範圍。在前後約 3 個小時期間，近地面到 8 公里高度三度空間風場都可以完整反演求得。本文將針對納莉登陸後環流強度的變化以及近中心環流結構特徵的改變進行初步分析結果報告。另一方面，也利用此一難得機會，針對雙都卜勒合成風場和速度軌跡顯示法所反演風場進行比對工作，討論兩者差異。最後將針對納莉颶風登陸前後降雨結構特徵和變化進行討論。

## 二、登陸後近中心環流變化特徵

納莉颶風於當地時間 9 月 16 日晚間 9 點左右在台北縣三貂角附近登陸。在納莉登陸約 1 小時後，颶風近中心環流進入中正機場和五分山雷達雙都卜勒合成分析區域。本研究分析了隨後 3 個多小時 (1430Z~1745Z) 的資料，每筆資料時間間隔為 15 分鐘，共 12 個分析時間 (缺 1600Z)。

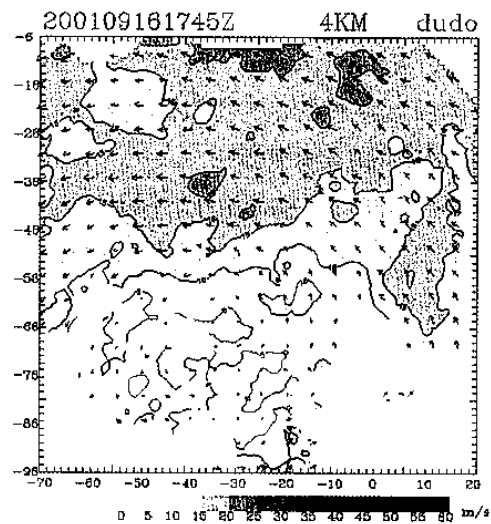
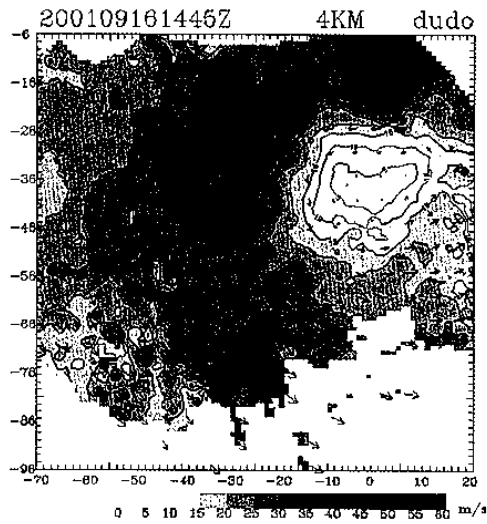


圖 1. 納莉颱風登陸期間高度 4 公里雙都卜勒合成風場，等值線為等風速線，間隔為每  $5\text{ms}^{-1}$ 。時間分別為 2001 年 9 月 16 日 1445Z (左圖) 與 1745Z (右圖)。

圖 1 為 9 月 16 日 1445Z 與 1745Z 兩個分析時間，高度 4 公里合成水平風場。箭頭指向代表風向，灰階代表風速大小，愈強的風速顏色愈深。納莉颱風進入蘭陽平原後，沿著雪山山脈東側往西南方緩慢移動。在登陸後約 1 個小時 (1445Z)，4 公里高度颱風近中心環流顯示，颱風眼內弱風速區 ( $< 5\text{ms}^{-1}$ ) 呈長橢圓形，東西向長軸約 20 公里南北向短軸約 10 公里 (面積約 200 平方公里)。弱風速區往下在 2 公里高度往上在 6 公里高度 (圖未示) 都很明顯。眼牆大風速區 ( $> 35\text{ms}^{-1}$ ) 則位於中心西北偏西 (行進方向的東北象限) 約 25~40 公里處。在西南方 30~40 公里處有另一較大風速區 ( $> 30\text{ms}^{-1}$ )，由於接近分析區域邊緣，較難確定範圍大小，不過此一大風速區在 6 公里高度不復存在。

經過 3 小時後 (1745Z)，颱風中心已由蘭陽平原進入中央山脈，此時分析區域內各高度風速都減弱甚多，颱風眼弱風速區域擴大約 2 至 3 倍，颱風中心已很難直接由風場資料判斷。大於  $20\text{ms}^{-1}$  較強風速出現在離中心約 80 公里正北方，顯示整個颱風眼牆往外擴張已經不明顯，環流也已減弱許多。這三個小時期間，宜蘭測站地面氣壓值也由  $985\text{hPa}$  上升至接近  $1000\text{hPa}$ ，顯示颱風強度確實已明顯減弱。

圖 2 為 1430-1730Z，以颱風中心為原點所計算距中心 30 公里半徑內平均渦度隨時間變化情形。從圖中可以明顯看出颱風中心平均渦度隨時間快速遞減情形，從初始渦度值  $2.06 \times 10^{-3}\text{s}^{-1}$  在約 105 分鐘內減弱為  $0.5 \times 10^{-3}\text{s}^{-1}$ 。若計算此渦旋旋消  $e$  倍折疊時間 (spin-down e-folding time) 大約為 76 分鐘。渦度的減弱在分析時間前一個小時快速減弱，之後，減弱速率變小，甚至有稍微的增加。這種情形是否發生在每一個登陸颱風，值得進一步瞭解。

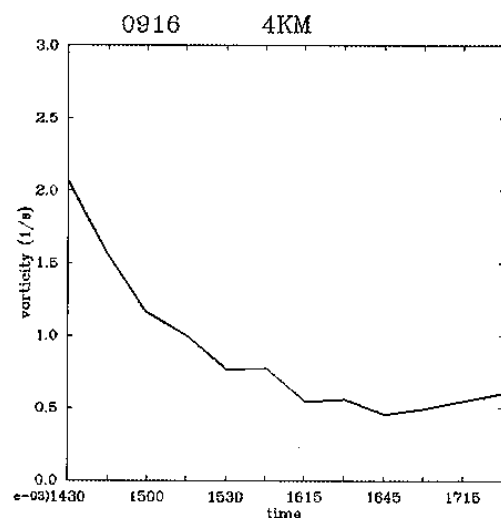


圖 2. 颱風中心 4 公里高度半徑 30 公里內平均渦度隨時間變化。

納莉颱風登陸後環流強度變化顯著，接下來進一步分析環流結構特徵變化情形。首先利用雙都卜勒合成風場反演流函數 (stream function) 求取颱風的環流中心。圖 3 為 4 公里高度流函數流線分佈情況 (1445Z)。流線的奇異點定義為颱風的中心位置。中心決定之後，我們將直角座標水平風場  $u$ 、 $v$  分量內插至以颱風中心為原點，極座標之切向風 ( $V_t$ ) 和徑向風 ( $V_r$ ) 分量。然後進行傅立葉分析，分解出軸對稱和非軸對稱 (至波數 4) 分量。

圖 4 為登陸後約 1 小時 (1445Z) 軸對稱

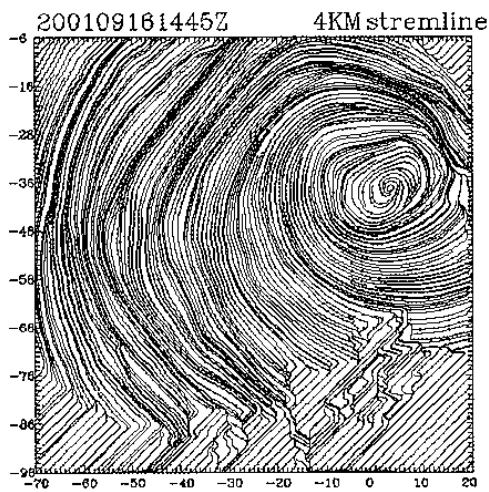


圖 3. 利用水平風場反演之 4 公里高度流線分佈，時間為 2001 年 9 月 16 日 1445Z。

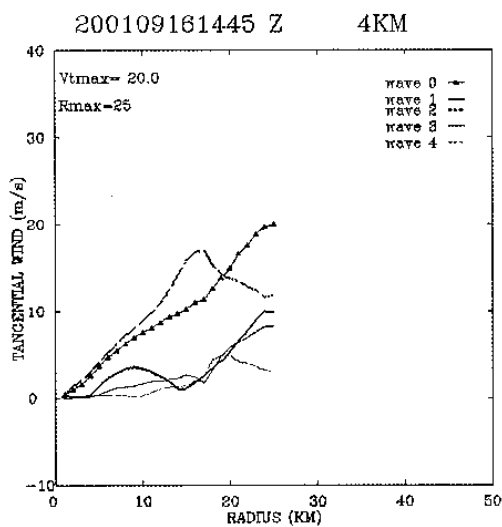


圖 4. 納莉登陸後 4 公里高度軸對稱和非軸對稱切向風分量離颱風中心距離變化情形。

(wave 0) 和非軸對稱 (wave 1-4) 切向風分量，在 4 公里高度隨半徑變化情形。有幾個明顯的特徵：(1) 軸對稱分量由颱風中心往外遞增，最大值 ( $20\text{ms}^{-1}$ ) 出現在 25 公里附近。(2) 20 公里內波數 2 振幅大於軸對稱分量，20 公里外波數 2 振幅則迅速減小。(3) 其餘波數的振幅相較軸對稱和波數 2 都來得小，在 20 公里附近才開始有明顯增加情形。另外在離中心 10 公里處，波數 1 振幅有一相對極值出現。整體來看，納莉颱風登陸後切向風環流結構在半徑 20 公里內以波數 2 為主，半徑 25 公里外

則以軸對稱結構為主。除了波數 2 外，其餘非軸對稱分量的振幅都明顯很小。在徑向風部分的特徵 (圖未示) 有：(1) 軸對稱分量為負值，代表內流。此內流隨著遠離中心明顯增大，最大內流發生在大約 25 公里處，其值約  $19\text{ms}^{-1}$ ，和軸對稱切向風數值相當。(2) 17 公里內，波數 2 振幅較軸對稱分量為大，17 公里外波數 2 振幅明顯減小。(3) 波數 1 和 3 的振幅在 20 公里內相對都比較小，但在 20 公里外則迅速增強，在 25 公里，波數 1 的振幅和軸對稱分量接近。雖然從軸對稱分量看起來從中心到 25 公里都是內流，但在 20 公里內波數 2 的振幅較軸對稱分量來得大，而在 25 公里波數 1 的振幅和軸對稱分量大小也相當，表示在這些分析中某些半徑上，有可能出現外流。

為了方便討論切向風和徑向風各分量隨時間變化情況，在每個分析時間，找出軸對稱和非軸對稱振幅最大值，予以圖示 (圖 5)。從圖中很清楚看到切向風之軸對稱分量在 1445Z 之後快速減弱，1530Z 之後已較波數 1、2 振幅來的小。波數 2 振幅在 1430Z 之後，明顯較其他分量來得大。但整體上是減弱的趨勢。徑向風部分 (圖未示) 軸對稱和波數 1、2 分量，都有減弱趨勢。不同於切向風的是，大部分時間軸對稱分量都較其他分量來得大。比較切向風和徑向風軸對稱分量，1500Z

之前兩者大小相當，而 1500Z 之後則是徑向風大於切向風，此種颱風環流結構特徵和開放洋面上所觀測到具明顯渦旋結構特徵已有顯著差異。

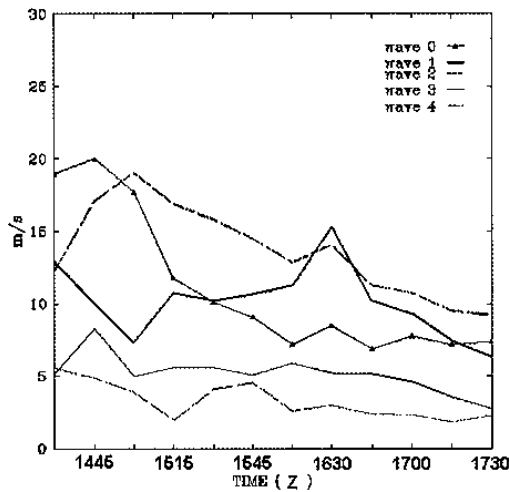


圖 5. 4 公里高度切向風軸對稱和非軸對稱最大振幅隨時間變化情形 (2001 年 9 月 16 日)。

我們利用中正機場雷達資料進行納莉颱風 GBVTD 風場反演。以雙都卜勒合成風場反演之流函數所定義之環流中心為 GBVTD 方法的颱風中心，將軸對稱和非軸對稱 (至波數 3) 分量分別解出，並和雙都卜勒合成風場結果進行比對。圖 6 為 GBVTD 反演所得風場，我們可以發現和雙都合成風場 (圖 1) 兩者有顯著不同。在 GBVTD 反演風場中，大風速區出現在距離颱風中心約 20~25 公里的西邊、北北西與東南方向，在東南的大風速區範圍大，最大風速值達  $40\sim 45\text{ms}^{-1}$ 。在雙都合成風場中，大風速區位於颱風中心西北西方，最大風速值僅約  $30\sim 35\text{ms}^{-1}$ 。兩者在數量上差異頗大，GBVTD 有明顯高估情形，但是在在大風速區的分布上差異較小。

圖 7 為 GBVTD 反演切向風各分量離颱風中心距離變化情形。從圖中可以明顯看出 GBVTD 反演風場明顯的高估。GBVTD 所反演軸對稱切向風最大值 (離中心 24 公里) 為  $34\text{ms}^{-1}$ ，而雙都合成風場最大值僅有  $20\text{ms}^{-1}$ 。除了軸對稱分量有很大差別外，非軸對稱波數

2 也有顯著差異。GBVTD 反演結果約在半徑 15 公里處波數 2 有增強趨勢，和雙都合成結果相類似，不過振幅小了很多。因此，從分量分解結果發現，GBVTD 風場反演有將非軸對稱波數 2 分量投影到軸對稱分量的情形，導致軸對稱分量高估，非軸對稱波數 2 低估結果。

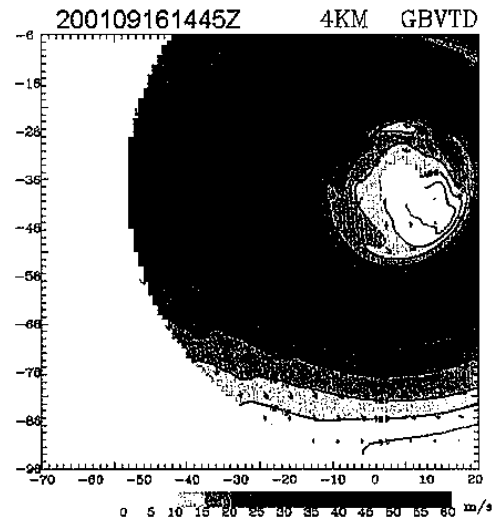


圖 6. GBVTD 反演高度 4 公里風場，灰階深淺代表風速大小。本圖已加上估計之系統移動速度。時間為 2001 年 9 月 16 日 1445Z。

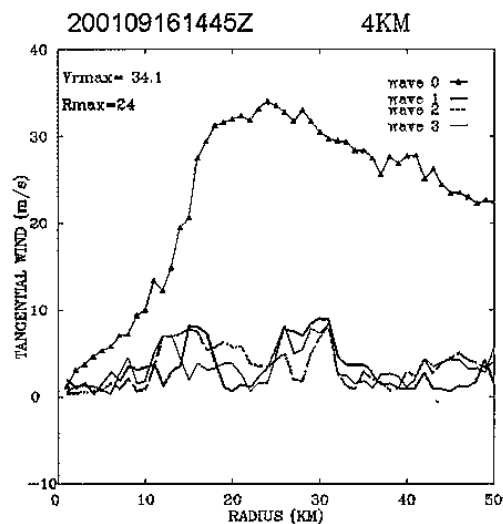


圖 7. GBVTD 反演切向風各個分量離颱風中心距離變化情形。時間為 2001 年 9 月 16 日 1445Z。

### 三、登陸颱風降雨結構變化

台灣地區登陸颱風降雨特徵過去已有相當多的研究成果。針對不同路徑，不同颱風特

性，包括強度、暴風半徑大小等，進行侵台颱風降雨之氣候統計。然而，至今仍沒有一個較為系統性的研究，討論侵台颱風降雨結構特徵和變化特性。美國除了一些飛機機載雷達針對開放洋面颶風降雨特徵研究成果外（Willoughby et al. 1982; Jorgensen 1984），對登陸中的颶風系統性的研究結果也很少。本研究嘗試利用新完成之台灣全島都卜勒雷達資料，探討登陸颱風的降雨結構和變化特徵。由軸對稱雷達回波分析結果顯示（圖 8，分析方法細節請參考：顏 2003），納莉颱風在登陸階段回波場有明顯變化，由原先單一極值（眼牆區離中心約 35 公里）轉變成雙極值分布，且外極值（離中心約 90-120 公里）較內極值（離中心約 50-70 公里）為大。此一結構性變化顯示，颱風在登陸階段短暫的時間內產生劇烈的變化，除了颱風自身環流的改變之外，外圍環流和地形交互作用的影響非常顯著（例如：降雨次高峰的出現）。

#### 四、結語

納莉在宜蘭附近登陸後，沿著雪山山脈東側往西南方移入中央山脈。由這段時間雙都卜勒合成分析結果，我們很清楚的看到颱風環流結構受到地形影響產生的變化。整體而言，軸對稱切向風分量顯著減弱，有時非軸對稱分量甚至大過軸對稱。同樣的，徑向風分量也在減弱，但減弱速率較切向風為緩慢，甚至出現徑向風大於切向風的情形。此一結果顯示，登陸颱風經過一段時間後，近中心區域典型渦旋結構（切向風遠大於徑向風）已不復存在，因此利用 GBVTD 方法解析登陸颱風近中心環流結構不是好的選擇。

Chen and Yau (2001) 曾針對熱帶氣旋強度變化進行數值模擬實驗。他們指出在忽略對流過程下，颱風強度將會因邊界層的摩擦效應（Eliassen and Lystad 1997）和位渦混合作用（Schubert et al. 1999）以線性方式減弱低層渦

旋強度。當考慮對流過程，在眼牆和雨帶區域經由潛熱釋放所產生的高位渦，會被渦旋羅士比波和非線性混合過程帶入近中心區域，增強颱風。納莉颱風登陸後，近中心環流強度快速減弱，渦度極值朝颱風眼集中且迅速減弱。但值得注意的是，在此同時，離颱風中心約 100 公里外圍區，對流反而加強，形成登陸後降水回波次高峰的出現。此一次高峰降水回波的出現，似乎和颱風外圍環流和減弱中的颱風近中心環流交互作用有關。對於納莉颱風超長生命期的影響為何，有待進一步的分析。

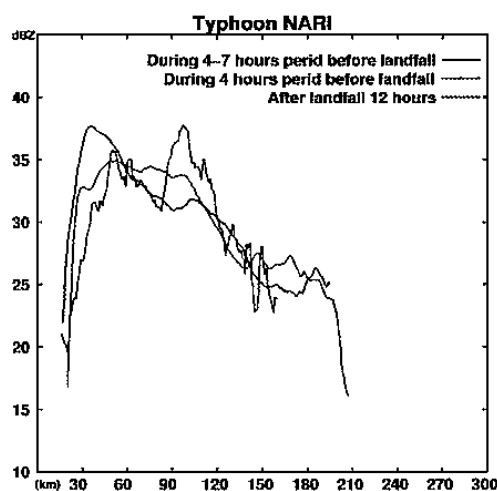


圖 8. 納莉颱風登陸期間不同時段（2001 年 9 月 16 日 0000-1300Z），五分山雷達之平均回波隨半徑變化情形。其中藍色曲線代表登陸前 4-7 小時回波特徵，紫色曲線代表登陸前 0-4 小時，綠色曲線代表登陸後第 12 小時。

致謝：本文在國科會專題研究計畫編號 NSC91-2111-M-002-023-AP4 支持下完成。

#### 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、與張保亮，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。
- 張保亮、周仲島、與李文兆，2002：賀伯颱風（1996）

- 中尺度分析：第一部份：眼牆環流結構。大氣科學，30，201-216。
- 周晉民，2001：登陸颱風之中尺度特徵分析。台灣大學大氣科學研究所碩士論文，共94頁。
- 高聿正，2003：納莉颱風近中心環流結構特徵分析。台灣大學大氣科學研究所碩士論文，共105頁。
- 楊三吉，2003：登陸颱風之中心定位與中尺度結構-啓德颱風個案研究。台灣大學大氣科學研究所碩士論文，共94頁。
- 顏健文，2003：侵台颱風降雨結構之時空變化特徵。台灣大學大氣科學研究所碩士論文，共112頁。
- Blackwell, K. G., 2000: The evolution of Hurricane Danny (1997) at landfall: Doppler-observed eyewall replacement, vortex contraction/intensification, and low level wind maxima. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 4002-4016.
- Chen, Y., and M. K. Yau, 2001: Spiral bands in a simulated hurricane. Part I: Vortex Rossby wave verification. *J. Atmos. Sci.*, **58**, 2128-2145.
- Eliassen, A., and M. T. Lystad, 1997: The Ekman layer of a circular vortex: A numerical and theoretical study. *Geophys. Norv.*, **31**, 1-16.
- Ferraro, R., G. Vicente, M. Ba, A. Gruber, R. Scofield, Q. Li, and R. Weldon, 1999: Satellite techniques yield insight into devastating rainfall from Hurricane Mitch. *EOS, Amer. Geophys. Union*, **80**, 505-514.
- Geerts, B., G. M. Heymsfield, L. Tian, J. B. Halverson, A. Guillory, and M. I. Mejia, 2000: Hurricane Georges's landfall in the Dominican Republic: Detailed airborne Doppler radar imagery. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **81**, 999-1018.
- Jorgensen, D. P., 1984: Mesoscale and convective-scale characters of mature hurricanes. Part I: General observations by research aircraft. *J. Atmos. Sci.*, **41**, 1268-1285.
- Lee, W. C., B. J.-D. Jou, P.-L. Chang, and S.-M. Deng, 1999: Tropical cyclone kinematic structure retrieved from single-Doppler radar observation. Part I: Interpretation of Doppler velocity patterns and GBVTD technique. *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 2419-2439.
- \_\_\_\_\_, B. J.-D. Jou, P.-L. Chang, and F. D. Marks, 2000: Tropical cyclone kinematic structure retrieved from single-Doppler radar observation. Part III: Evolution and structure of Typhoon Alex (1987). *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 3982-4001.
- Lin, Y.-L., S. Chiao, T.-A. Wang, M. L. Kaplan, R.P. Weglarz, 2001: Some common ingredients for heavy orographic rainfall. *Wea. Forecasting*, **16**, 633-660.
- Marks, F. D., L. K. Shay, and Coauthors, 1998: Land-falling tropical cyclones: Forecast problems and associated research opportunities. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **79**, 305-323.
- Schubert, W. H., M. T. Montgomery, R. K. Taft, T. A. Guinn, S. R. Fulton, J. P. Kossin, and J. P. Edwards, 1999: Polygonal eyewalls, asymmetric eye contraction, and potential vorticity mixing in hurricanes. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 1197-1223.
- Willoughby, H. E., J. A. Clos, and M. G. Shoreibah, 1982: Concentric eyewalls, secondary wind maxima, and the evolution of the hurricane vortex. *J. Atmos. Sci.*, **39**, 395-411.
- Wu, C. C., and Y. H. Kuo, 1999: Typhoons affecting Taiwan: Current understanding and future challenge. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **80**, 67-80.
- Wu, C. C., T.-H. Yen, Y.-H. Kuo, and W. Wang, 2002: Rainfall simulation associated with Typhoon Herb (1996) near Taiwan. Part I: The topographic effect. *Wea. Forecasting*, **17**, 1001-1015.