

# 凡那比颱風(2010)眼牆重建之雙都卜勒雷達分析

劉振甫<sup>1</sup> 吳啟雄<sup>1</sup> 魏志憲<sup>2</sup>  
空軍氣象中心<sup>1</sup> 中華航空公司<sup>2</sup>

## 摘要

本研究利用空軍馬公雙偏極化雷達及中央氣象局七股都卜勒雷達進行雙都卜勒雷達資料合成，於凡那比(2010)颱風中心自台灣南部陸地出海前、其西南側兩帶明顯增強之際，針對該兩帶進行觀察與分析，並推測其隨後引發颱風眼牆重建之原因。由雙都卜勒雷達合成之風場資訊顯示，在該兩帶內緣(靠近颱風中心一側)之底層存在明顯輻合，中高層以上轉趨輻散之現象；透過垂直剖面圖可以發現，兩帶底層存在自海面流向颱風中心之徑向內流，且20~30dBZ以上之回波發展高度普遍可達10~15公里高度，而在8~10公里高度位置存在可能是由於冰晶形成過程產生之大量潛熱釋放所造成，垂直運動速度達每秒10公尺以上之上升運動區；此外，透過分析渦度收支方程式各項因子可以發現，水平平流項對渦度趨勢之影響最鉅，輻散項在底層的正貢獻隨時間有明顯增加之趨勢，傾斜項則是除了水平平流項外，在中高層扮演了最重要的角色。以上各種特徵顯示該兩帶中極可能有渦旋熱塔(Vortical Hot Tower)的存在，透過升尺度(Upscale)作用使得同時間颱風中心氣壓持續下降，進而增強沿兩帶方向旋轉之逆時針環流，最終引發眼牆的重建。

關鍵字：雙都卜勒雷達、渦度收支、渦旋熱塔

## 一、前言

西行颱風凡那比(2010)侵台期間，其眼牆結構雖受台灣複雜地形影響而破壞，但在颱風中心自台灣南部地區西移出海前，存在於其西南側發展迅速的兩帶、隨後結構重建之眼牆及其遠離後南側所遺留下來的的大片雲系，造成當時南部及東部地區豪雨不斷，部分交通因而嚴重受阻，更造成2名人員身亡、總農損逾新台幣45億元的慘劇；因此對於造成該兩帶增強、並引發隨後眼牆重建機制之研究就顯得十分重要。

本研究將針對颱風中心自台灣南部陸地出海前、颱風西南側兩帶明顯增強並發展成為帶狀回波之時段，利用雙都卜勒雷達資料進行其結構及特徵分析，以期了解造成該兩帶增強及肇致眼牆重建的機制。

## 二、資料來源與處理

本研究針對2010年9月19日0600UTC至其後約1小時時間內(颱風眼牆重建期間)，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進行雙都卜勒雷達資料之合成與分析(其有效涵蓋範圍如圖1中雙圓形內之陰影區)。在執行雙都卜勒雷達資料合成之前，首先需要把雷達資料經過格式轉換，再使用美

國國家大氣研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)所開發之 SOLO II 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，再將資料內插到以馬公雷達為中心之直角座標；在合成風場之前，需利用 CEDRIC 修補並平滑那些使用 REORDER 內插所得到之時間場及參數場資料；最後，再利用 GrADS 軟體繪製出雙都卜勒雷達風場合成圖，此外，亦可將各等高面上之輻散或渦度等量場疊加於其上，或做出其垂直結構剖面圖，如此將可幫助我們進一步了解颱風中心在出海前，造成其西南方兩帶增強乃至眼牆重建之主要原因。

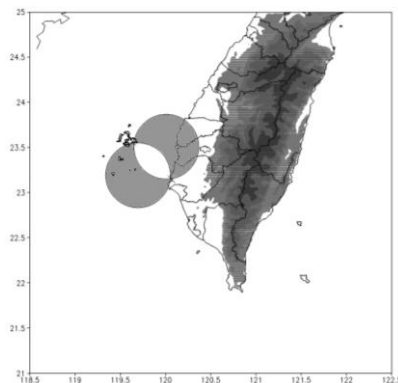



圖1 馬公及七股雙雷達合成之有效涵蓋範圍圖

## 三、結果與討論

本研究針對颱風眼牆結構遭受地形破壞後、其西南側雨帶迅速發展的期間，隨時間由北往南，對於該雨帶在 3 公里高度上強度較強之對流胞，以 2010 年 9 月 19 日 0600UTC 中央氣象局所定位之颱風中心 (120.5°E、23.2°N) 為原點，徑向向外製作其垂直剖面圖；而在眼牆消失之該段期間內，對於強回波所截取之垂直剖面位置示意圖如圖 2 所示，所得剖面圖如圖 3(圖中之陰影區代表回波場、箭號為風場、等值線為垂直運動場，而  符號代表颱風中心所在位置)。

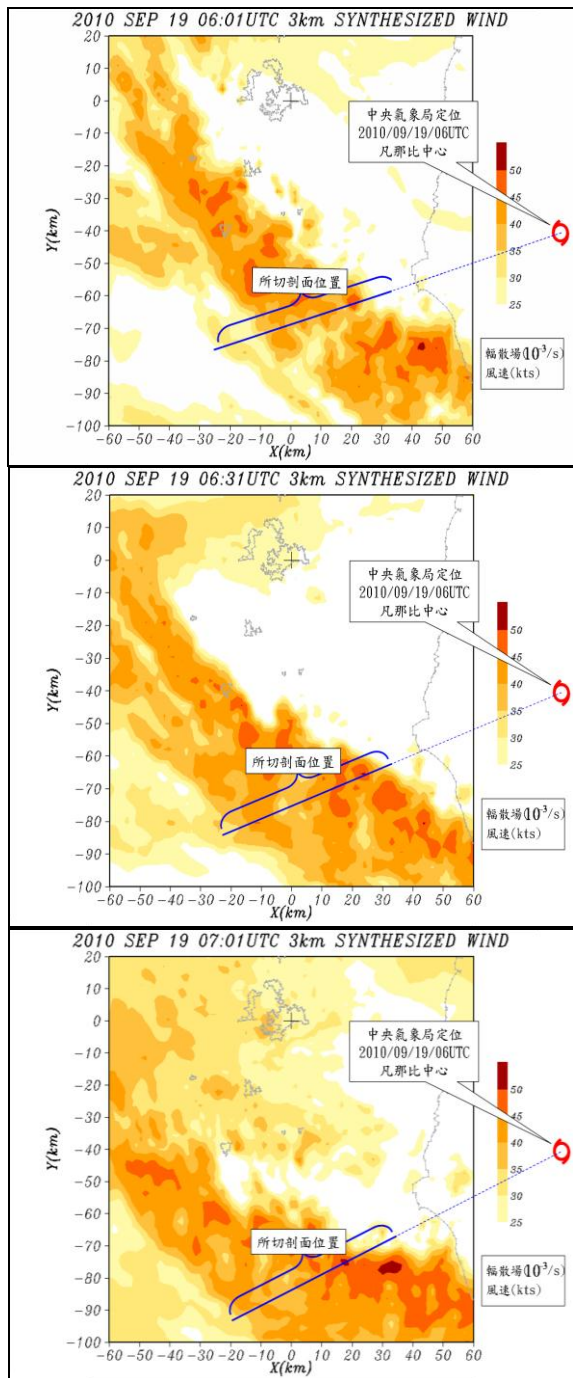


圖 2 眼牆消失期間針對強回波所截取之垂直剖面位置示意圖

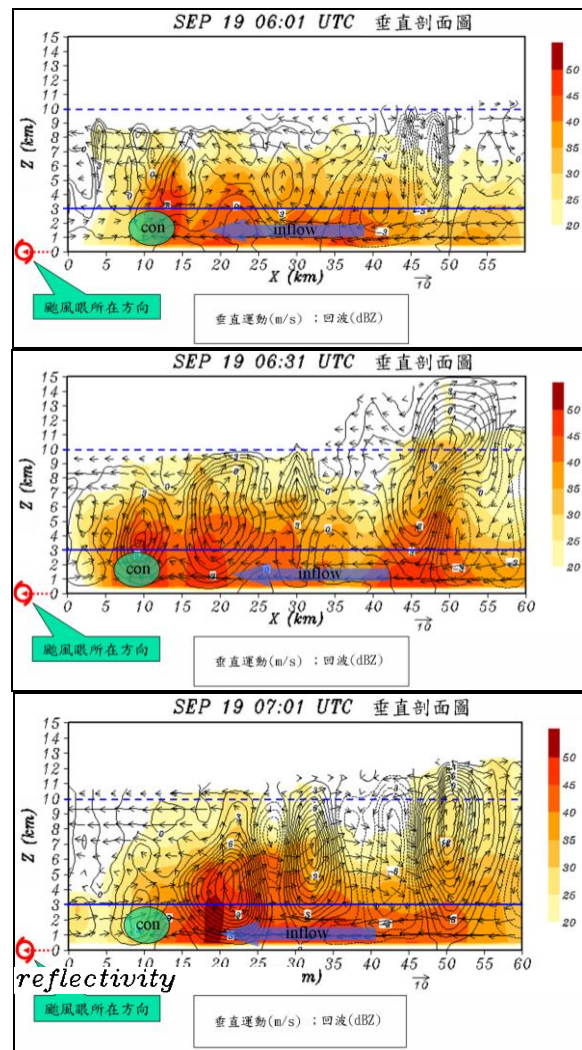


圖 3 對應於圖 2 所示位置之垂直剖面圖

由剖面圖所得之結果發現其沉降氣流區之勢力相較於上升氣流區普遍較不明顯、具有較強之回波區域伴隨較強上升運動區域之結構特徵(此一現象與一般的中尺度對流系統之強回波區附近通常會伴隨明顯沉降氣流的表現不同)，且存在於對流胞中的上升氣流區域之水平範圍可達十數公里；在 2010 年 9 月 19 日 0631UTC 以後，強度達 20~30 dBZ 之回波發展高度甚至普遍可達 10~15 公里，若依據唐(2010)[1]之定義(熱塔為 10 公里高度等高面上，其回波大於 25dBZ 之對流胞)，該發展中之雨帶內確有熱塔之存在；另外，在高度 8~10 公里的位置存在了垂直速度大於每秒 10 公尺以上之上升運動區(這很可能是由於高層冰晶形成過程所產生大量的潛熱釋放所造成)；以上該雨帶內對流系統所具有之特徵與 Houze et al.(2009)[2]在 Ophelia(2005)颶風生成前所觀察到渦旋熱塔之動力結構相似。

再者，由剖面圖資訊可以發現存在於底層，來自遠處海面、徑向流入颱風中心方向之內流，比較Wallace and Hobbs(2006)[3]所作 Inez(1966)颶風之熱力及動力剖面結構可以發現，由於此道內流將使得中層高度以下之相當位溫隨高度遞減，使潛在不穩定增加，提供了另一個可能促使該雨帶得以迅速發展的有利條件；此外，該內流於雨帶底層之內緣與自颱風中心徑向向外之外流(outflow)產生明顯之輻合。透過垂直剖面之資訊，亦可發現雨帶內緣接近颱風中心一側具有垂直次環流的存在，而經由該次環流所提供在風場上的水平及垂直分量，亦可以有效地維持颱風主要環流的強度。經由觀察垂直剖面圖，發現該雨帶中存在與渦旋熱塔動力結構類似之對流系統，下一步便考慮觀察隨時間、各層高度之渦度變化情況，透過渦度收支方程式檢驗，觀察其中各項因子對渦度趨勢貢獻情況，探討其中可能造成雨帶增強及眼牆重建的機制。

在探討渦度收支各項因子的特徵之前，首先嘗試了解渦度場在時間及空間上的分布及變化情況，再進一步觀察其與雷達回波之間相對應的關係。圖4為2010年9月19日0601UTC、0631UTC及0701UTC，在1公里高度平面上雙都卜勒雷達合成風場、雷達回波及渦度場之疊加圖，其中箭號代表風場、陰影區為雷達回波、藍色等值線則為渦度場，而渦度分布之相對極大值區域皆以亮綠色圓框加以標示。

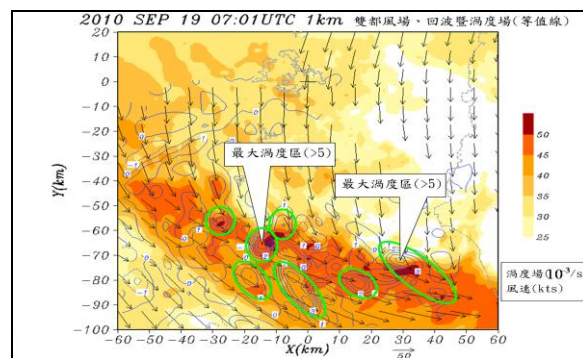
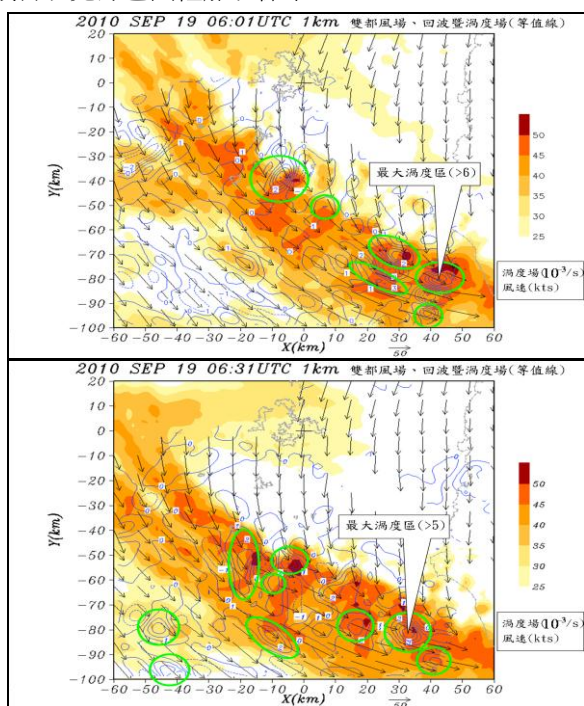


圖4 2010年9月19日0601~0701UTC馬公及七股雙都卜勒雷達合成風場、雷達回波暨渦度場疊加圖(1公里高度)

經過初步的觀察後可以發現，渦度相對極大值區域普遍皆位於雨帶上，在雨帶隨風場南移的情況下，渦度相對極大值區域亦隨之向南移動。高度3公里(含)以下、強度大於45dBZ以上之強回波區，在其南移並增強的過程中，有逐漸靠攏並演變成為線狀分布之趨勢，同時，在同樣高度位置上，渦度之相對極大值區域與強回波區之變化趨勢一致，亦有逐漸集中成為接近線狀分布的特徵，由此可見渦度相對極大值區與雨帶中對流胞(系統)的迅速增強之間存在著相當程度的關係。此外，透過進一步的觀察可知，回波強度大於50dBZ以上之強回波區，普遍皆重疊或鄰近於局部高正渦度區上(而大部份最強回波區是位在最大正渦度值之風場下游位置處)，這可能是因為局部地區最大正渦度受到風場平流的影響，使得其緊鄰下游位置處存在著數個各別發展旺盛的強對流胞。而有關0601UTC、0631UTC及0701UTC時各層高度上渦度場與回波間之關係，則是各自與其各別時間1公里高度上所表現之特徵相似(除0701UTC其5公里高度上渦度相對極大值區域無明顯靠攏集中之趨勢)；0601UTC及0631UTC至3公里高度以上時，其渦度值至多僅達 $3 \times 10^{-3} \cdot S^{-1}$ ，且回波強度大於50dBZ以上的範圍亦不明顯；不過到了0701UTC時，其局部渦度值達 $3 \times 10^{-3} \cdot S^{-1}$ 的範圍可向上伸展至5公里高度平面，同時50dBZ強度之對流胞，在雨帶內緣下游的局部位置亦可發展至約4.5公里高度；這顯示了在0631UTC~0701UTC期間，空間上具有較完整之垂直渦度分布，故此期間回波強度的表現亦較0601UTC~0631UTC來得明顯。

由以上渦度與回波之間關係的初步分析資料顯示，凡那比颱風中心出海前，尤其是在2010年9月19



日的0631UTC~0701UTC期間，其西南側雨帶內也許存在有渦旋熱塔，透過升尺度作用對該雨帶的發展及眼牆之重建產生明顯的貢獻。下一步將嘗試透過檢驗渦度收支方程式中各項因子的變化情況，分析雨帶在增強過程中，其背後所隱含之機制。

渦度趨勢分別受到輻散項、傾斜項、水平平流項、垂直平流項以及力管項等諸項的影響。Yu et al. (1999)[4] 曾分析渦度收支方程式中各項因子在長生命週期之中尺度渦旋形成過程中的表現，該個案中，因其所分析系統之正壓性明顯，故分析的過程中可以忽略力管項不計；而在本個案中，由於颱風本身即為一個標準的正壓系統，故本研究在分析渦度收支方程式中各項因子時，力管項對於渦度趨勢所造成的影響是不予考慮的，僅先分析其他四項在各層高度上隨時間變化的特徵(渦度收支方程式中各項因子與渦度趨勢間之相關係數表如表1所示)。

時間	高度(公里)	輻散項	傾斜項	水平平流項	垂直平流項
2010/ 09/19/ 0601UTC	1	0.0178758	0.00811828	0.977411	0.00867315
	2	-0.180393	0.27664	0.951622	-0.101934
	3	-0.0544801	0.311804	0.961051	-0.0462274
	4	-0.01147	0.294555	0.970611	-0.0284821
	5	0.037757	0.224824	0.977597	-0.0637193
	6	0.0266836	0.361836	0.949585	0.12405
2010/ 09/19/ 0631UTC	1	0.177553	-0.264494	0.97417	-0.181613
	2	0.0164457	0.107544	0.935826	-0.0713695
	3	0.0567885	0.285958	0.948378	-0.21752
	4	0.0309106	0.302845	0.969766	0.0187
	5	-0.050305	0.330349	0.979107	0.0101575
	6	-0.0357788	0.27093	0.975038	-0.0512199
2010/ 09/19/ 0701UTC	1	0.339812	-0.213181	0.971114	0.110168
	2	0.202085	0.179309	0.888867	0.0760161
	3	-0.0195765	0.384418	0.872359	0.104878
	4	0.176154	0.339504	0.949281	-0.0646796
	5	0.191479	0.301558	0.955272	-0.0457641
	6	0.121951	0.286473	0.943107	0.0440671

表1 渦度收支方程式中各項因子與渦度趨勢間之相關係數表

就輻散項之貢獻而言，由於先前已觀察到在0601UTC~0701UTC期間，該雨帶底層靠近內緣之輻合作用有逐漸增強的趨勢，故可預期底層輻合作用對渦度趨勢所造成的正貢獻。(由於在本研究中輻散項  $-\zeta\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right)$  內之輻散場已乘上負號轉變為輻合場後

再代入計算，故在此當輻散項正(負)貢獻愈大則代表受輻合(散)作用影響愈大)。在0601UTC時，輻散項在高度1~5公里皆無明顯表現(強度多在 $\pm(3 \times 10^{-6} \cdot S-2)$ 以內)；至0631UTC，在回波逐漸南移並增強的同時，底層輻散項具有較大正負值貢獻之區域開始增加，尤以雨帶內緣底層出現較多數值達 $3 \times 10^{-6} \cdot S-2 \sim 6 \times 10^{-6} \cdot S-2$ 的正貢獻區，同時該區域在1公里高度附近亦多對應到回波強度45~50(以上)dBZ之強回波區。此一現象與先前利用雙都卜勒雷達合成風場資料所分析出之風場輻合區高度及位置頗為一致，說明了底層之輻合作用除了有利於底層氣流的舉升，由於輻散項對渦度趨勢的正貢獻，更使得該上升氣流之垂直渦度在經歷舉升過程的同時亦逐漸增強；此一由於底層輻合作用造成渦度垂直向上拉伸的現象與渦旋熱塔所表現之特徵相符。接下來於0701UTC時，輻散項之正負貢獻量又較0631UTC時更為明顯，局部地區強度可達 $\pm(9 \times 10^{-6} \cdot S-2 \sim 12 \times 10^{-6} \cdot S-2)$ ，且分布高度仍多在2公里以下，同時其相對極大值區域更多地對應到大於50dBZ強回波之範圍，說明了在0631~0701UTC期間高度2公里以下輻散項對渦度趨勢及回波增強之貢獻較0601~0631UTC時明顯。若就輻散項與渦度趨勢之相關係數的表現來看，在1公里高度處，0601UTC時其相關係數為0.0178758、0631UTC時增加為0.177553，0701UTC時則上升至0.339812；同樣在2公里高度位置，0601UTC時為-0.180393、0631UTC時增加為0.0164457，0701UTC時則上升至0.202085，這顯示了輻散項在底層對渦度趨勢之貢獻有隨時間增加的趨勢，且因輻合作用乃由最底層位置開始發生，所以高度愈低處輻散項之貢獻愈顯著；唯在4~6公里高度位置上，輻散項最後之正貢獻亦有增加的趨勢，推測乃是由於該高度附近因潛熱釋放所產生之局部相對低壓區而引發外界空氣向內入流所造成之輻合現象所致。

觀察0601UTC時傾斜項所表現之特徵，發現其在雨帶上且高度2公里附近具有較大數值的分布，強度大部分可達到 $\pm(3 \times 10^{-6} \cdot S-2 \sim 6 \times 10^{-6} \cdot S-2)$ ，在強回波位置附近最大甚至可達到 $12 \times 10^{-6} \cdot S-2 \sim 15 \times 10^{-6} \cdot S-2$ 。這說明了在0601UTC時，底層輻散項開始產生明顯的影響前(輻散項在0631UTC~0701UTC時才有明顯增強的情況)，便存在除了底層輻合作用以外的其他機制增

強雨帶上的垂直運動，進而造成當時在2公里高度附近的雨帶上開始具有傾斜項極值區域的分布，推測這可能是因為潛熱釋放自該高度起開始發生作用所造成的影響。在0631UTC與0701UTC時，傾斜項正(負)極值區的分布高度有逐漸提高的趨勢，且亦多與40dBZ以上強回波之相對強(弱)分布位置有所交集；尤其在0701UTC時，傾斜項在強度及範圍的分布上，又較0631UTC時更加明顯。0701UTC時在靠近颱風中心一側之內緣雨帶上，其2~3公里高度上局部地區之強度甚至可以達到 $\pm(15 \times 10^{-6} \cdot S-2 \sim 18 \times 10^{-6} \cdot S-2)$ 左右，表示在此時，雨帶之中層高度附近垂直運動速度的明顯增強，使得水平渦度受其影響而被側傾成為垂直渦度。

就傾斜項與渦度趨勢間之相關係數的表現而言，在雨帶不斷演進的過程中，傾斜項在3公里(含)以上高度之正貢獻始終較底層更為明顯；且在3公里高度(含)以上，傾斜項與渦度趨勢之相關係數大小僅次於水平平流項之貢獻，也就是說，除了水平平流項以外，中層高度以上之渦度趨勢主要是受到傾斜項主導，這也隱含了在3公里高度以上，因潛熱釋放而存在更多局部強上升氣流的可能。

比較各時間點之各層高度上，渦度收支各項因子對渦度趨勢貢獻的程度，可以發現主要皆以水平平流項的影響最為明顯(最大可達 $\pm 50 \times 10^{-6} \cdot S-2$ 左右)，從水平平流項與渦度趨勢間之相關係數大小的表現上也可以發現，在雨帶增強過程中，水平平流項對渦度趨勢的貢獻始終扮演了最重要的角色。在本個案所探討之雨帶上，當水平平流效應愈強且垂直渦度在水平方向上分布的差異愈大時，水平平流項對於渦度趨勢就會有更加明顯的影響；在雨帶增強的期間，其上之風速普遍皆可達100 kts(約每秒51.4公尺)以上，且渦度正負極值區在受到風場的導引後，在水平方向上的分布型態由原本的零散分布逐漸演變成為向雨帶下游靠攏，如此強烈的風場加上渦度正負極值區彼此之間分布的漸趨集中(亦即渦度在水平方向上分布的差異增大)，是可預期水平平流項對渦度趨勢的顯著貢獻的。

在垂直平流項部份，0601UTC時各高度上其數值普遍皆偏小，大部份皆分布於 $\pm 3 \times 10^{-6} \cdot S-2$ 之間；在0631UTC時，雖然在部分回波強度較大之區域內其值最大可達 $6 \times 10^{-6} \cdot S-2 \sim 9 \times 10^{-6} \cdot S-2$ ，但在絕大部分區

域內其數值仍僅維持在 $\pm 3 \times 10^{-6} \cdot S-2$ 之間；至0701UTC時，在3~4公里高度上，位於以馬公雷達東南面，出現了一個垂直平流項之極大值區(強度達 $15 \times 10^{-6} \cdot S-2 \sim 18 \times 10^{-6} \cdot S-2$ )，該處亦恰位在所分析範圍內強度最強、發展最高之對流胞上。垂直平流項之數值乃是由垂直運動強弱及垂直方向上渦度差異的大小所決定，故要造成垂直平流項出現明顯極值，則需要有強烈的垂直運動，或是原本在垂直方向上就存在明顯的垂直渦度差異。雖然在0601UTC~0701UTC之間，透過傾斜項數值明顯的增加可以加以推測，局部地區垂直運動有明顯增強的趨勢，但可能在所分析雨帶內原本就普遍存在著垂直發展完整的渦度結構，也就是說，其在垂直方向上之渦度差異普遍不明顯，所以造成在所分析的一小時之內垂直平流項的貢獻亦不甚明顯(除上述提及0701UTC時在該回波強度最強、發展高度最高之對流胞內3~4公里高度處，可能因具有十分強烈上升運動才造成垂直平流項極大值區域出現)。

整體而言，在2010年9月19日0701UTC時，該雨帶無論在回波強度及發展高度、垂直運動強度、輻合(散)場以及渦度場的表現上，皆達到所分析時段內極大值，接下來針對該時間點所剖面位置附近底層渦度相對極大值區域進行渦度收支各項之面積平均計算(選取高度為2公里，選取範圍如圖5區域A及區域B；計算所得之結果如表2所示。)

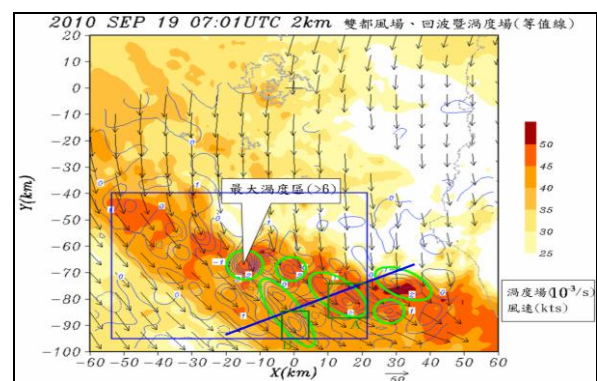


圖5 選取分析渦度收支各項面積平均之位置示意圖

時間/高度(公里)	區域	輻散項	傾斜項	水平平流項	垂直平流項	渦度趨勢
2010/09/19 0701 UTC (2公里)	A	0.701555	-1.0707	-1.91991	-0.47722	-2.766275
	B	0.998671	-2.28903	-0.326666	-0.0607795	-1.6778045

表2 選取渦度相對極大值區域內渦度收支各項之面積平均值

由計算所得結果發現，由於選取高度較低，輻散項具有最大數值，傾斜項最小；又由於渦度相對極大值位置皆位於正負水平平流交界處(亦即在水平平流零值線上)，於是針對渦度相對極大值區域內作渦度收支方程式中各項之面積平均時，所得水平平流項之數值便會明顯較取面積平均前下降甚至趨近於零；而在正渦度相對極大值區域內之渦度趨勢為負值，此亦證明了局地正渦度有隨風場朝下游處迅速移動的特徵。

## 四、結論

透過雙都卜勒雷達合成資料可以得知，在凡那比中心即將出海前其西南側迅速發展的雨帶內緣，具有底層輻合與中高層以上漸趨輻散的現象；另外透過垂直剖面資訊，發現雨帶底層存在著自海面徑向流入颱風中心之明顯內流，也就是在颱風的底層存在著由該內流自颱風外圍之海面向內攜入的暖濕空氣，使得颱風底層的大氣條件具有相當位溫隨高度遞減之潛在不穩定特性。有別於一般的中尺度對流系統，本個案所研究雨帶之垂直剖面結構中的沉降氣流區域較不明顯，且具有強回波區域附近普遍伴隨強烈上升運動區域的特性。並在2010年9月19日0631UTC及0701UTC之垂直剖面資訊中發現，存在於對流胞中的上升氣流區其水平範圍可達十數公里，而強度達20~30dBZ之回波發展高度普遍可達10~15公里，與唐(2010)[1]針對熱塔所下之定義吻合；而8~10公里高度位置存在可能因為冰晶形成所釋放之大量潛熱而造成的上升運動區(其垂直運動速度大於每秒10公尺)；以上各種特徵與Houze(2009)[2]在Ophelia(2005)颶風生成前所觀測到渦旋熱塔之動力結構表現相似。雖然藉由垂直剖面資訊並沒有發現明顯的、範圍較廣泛的中尺度對流渦旋之層狀結構，但透過眼牆重建期間雷達回波隨時間演變的情況可以發現，雨帶內強回波區除強度逐漸增強外，其周圍之較弱回波區範圍亦有逐漸擴大之趨勢，與中尺度對流渦旋於颶(颶)風形成前在低壓帶內的演進趨勢類似。雨帶顯著發展期間，分布於雨帶上渦度之相對極大值區域與強回波區在空間上的配置及變化趨勢相當一致，顯示渦度的增減與雨帶的消長間存在著相當程度的關係；再藉由觀察渦度趨勢與雷達回波間變化之特徵得知，回波強弱之演變與渦度趨勢間亦

具有一定程度之相關性；分析同時段內渦度收支方程式中各項因子變化之特徵後發現，在雨帶內緣2公里高度(含)以下位置，輻散項的貢獻有明顯隨時間增加之趨勢，此結果與透過雙都卜勒雷達合成風場資料所分析出底層之輻合現象一致，而這種位於底層、受輻合作用由下至上，使輻散項對渦度趨勢正貢獻隨時間顯著增加的特徵，與Houze(2010)[5]提到“渦旋熱塔底部伴隨之輻合作用將環境場底層之渦度向上拉升，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”之描述類似；而傾斜項在3公里高度(含)以上始終具有顯著之貢獻，這顯示了在雨帶發展期間內該高度以上可能由於受到潛熱釋放的熱力作用，造成局部地區垂直運動之增強所導致。另外，當颱風中心登陸後，在其水汽來源受陸地截斷且颱風整體結構遭地形明顯破壞的情況下，其中心氣壓仍能持續地下降，這可能與西南側迅速發展之雨帶有關，加上前述提及與渦旋熱塔特徵吻合之各種證據，顯示雨帶在增強的當時，其中極可能有渦旋熱塔的存在，透過升尺度作用使得颱風中心氣壓降低，進而增強雨帶上逆時針旋轉的環流並造成後續眼牆的重建。

## 參考文獻

- [1]唐玉霜，“2009 莫拉克颱風雷達觀測中尺度雨帶特性研究”，國立中央大學大氣物理研究所碩士論文，中壢，第17-25頁，2010。
- [2]Houze Jr., R. A., Lee, W. C., and Bell, M. M., “Convective Contribution to the Genesis of Hurricane Ophelia (2005),” *Mon. Weather Rev.*, Vol.137, pp.2778– 2800, 2009.
- [3]Wallace, J. M. and Hobbs, P. V., *Atmospheric Science: An Introductory Survey* (2nd ed.), Academic Press, United States, pp.483, 2006.
- [4]Yu, C. K. and Jou, B. J.-D., “Formative Stage of a Long-Lived Mesoscale Vortex Observed by Airborne Doppler Radar,” *Mon. Weather Rev.*, Vol.127, pp.838–857,1999.
- [5]Houze Jr., R. A., “REVIEW - Clouds in Tropical Cyclones,” *Mon. Weather Rev.*, Vol.138, pp.293–344, 2010.