

應用雷達資料分析颱風眼牆重建過程

莊耀中¹ 葉南慶²

¹空軍航空技術學院航空通訊電子系

²空軍航空技術學院軍事氣象系

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，選取個案為凡那比(2010)颱風，個案研究時間為其中心自台灣南部陸地出海前、其西南側雨帶明顯增強之際，針對該雨帶進行觀察與分析，利用雙都卜勒雷達資料合成分析該雨帶中是否有渦旋熱塔(Vortical Hot Tower)的存在，並推測其隨後引發颱風眼牆重建之原因。

關鍵字：雙都卜勒雷達

Analysis on the Reconstruction of the Typhoon Eyewall by Using Radar Data

Yao-Chung Chuang¹ Nan-Ching Yeh²

¹Department of Aviation Communication & Electronics, Air Force Institute of Technology

²Department of Military Meteorology, Air Force Institute of Technology

Abstract

By synthesizing the respective dual-polarimetric and Doppler radar data from Ma-Kung and Chi-Gu, this study seeks to analyze the relevant mechanisms behind the intensification of the rainband in the south-west quadrant of Typhoon Fanapi (2010). In addition, this study also offers insights as to why the typhoon eyewall was able to build again, when the typhoon center was about to leave the Taiwan area. The aforementioned features indicate the possible existence of a vortical hot tower within the rainband.

Keywords: dual-Doppler radar

1. 前言

凡那比颱風即為受到台灣地形之影響而使其結構發生明顯改變的個案，但其眼牆在遭受地形破壞後，仍能在颱風中心出海後隨即重建，如此颱風結構變化之特徵與Wu et al.(2003)[1]觀測謝柏颱風(1998)個案於登陸菲律賓前至離開菲律賓後所表現之現象類似，而在該研究中利用MM5 模式亦成功地模擬出謝柏颱風眼牆遭受破壞前至重建後的變化特徵。Houze et al.(2009)[2]亦曾提及熱帶低壓在演變成為Ophelia(2005)的過程中，渦旋熱塔所扮演的重要角色：在熱帶低壓雨帶之強對流胞內，存在因潛熱釋放作用引發之上升氣流，造成自底層延伸至中層高度具有顯著的渦度分布，進而產生一個存在於中層高度的氣旋式渦旋；而在對流胞內的上升氣流中，該受到熱力作用引發而生成、自底層貫穿至中對流層的渦旋，隨後被併入對流胞旁之層狀雲系內；最後，位於對流胞及其旁側之層狀雲系內，廣泛地分布了自底層至中層高度的正渦度極大值區域。雖然對於其造成颱風(颶)風完整成形的更詳細過程目前未能完全明瞭，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強度增強，進而演變成為颱風(颶)風，或許它同樣也能增強遭地形破壞之颱風的氣旋式環流，並使其結構重新組織。

有關於熱塔(Hot Tower)一詞早先乃由 Riehl and Malkus(1958)[3]所引用，起初是用來廣泛地描述發展於熱帶地區的深對流系統，但 Heymsfield et al.(2001)[4]將熱塔一詞使用來描述那些偶發於已發展成熟的颱風(颶)風眼牆上，受熱力作用所引發、垂直發展高聳且具明顯渦旋特徵的雲系；而 Houze et al.(2009)[5]所謂的熱塔是指那些發生在正在增強當中、但尚未具備熱帶風暴或颱風(颶)風環流特徵的低壓系統內之對流系統。由此可見，無論是尚未形成颱風(颶)風之前的低壓系統或是已發展成熟的颱風(颶)風內皆可能有熱塔的存在。

而Houze(2010)[6]也曾提及有關於渦旋熱塔影響熱帶地區附近低壓帶，使其演進成為有利颱風(颶)風形成

之環境的概念模式。當海表面上明顯的潛熱釋放加上有利的大氣條件，使得熱帶地區易有渦旋熱塔的生成及發展；在渦旋熱塔發展成熟的過程中，其旁側之層狀雲系會在平衡高度(EL)以下，攜帶渦旋熱塔中所隱含之高正渦度自對流雲系之主體向外擴張，形成中尺度對流渦旋(Mesoscale Convective Vortex, MCV)，並與原先逐漸消散中之渦旋熱塔合稱為中尺度對流系統(Mesoscale Convective System, MCS)；在渦旋熱塔消失後，僅存的中尺度對流渦旋仍能維持數個小時。在熱帶地區，當一個廣大的低壓帶內具有數個渦旋熱塔所引發的中尺度對流系統時，其各別之中尺度對流系統將會分別地供應其隱含之高正渦度至其所存在的低壓帶內，當所貢獻之所有正渦度累積至一定程度時，便足以被軸對稱化地引入低壓帶之環流上，進而增強其氣旋式結構，成為一個非常有利於颱風(颶)風形成之環境。由此可知，渦旋熱塔具有高正渦度分布之特徵，並可藉由上述的升尺度(Upscale)作用將其渦度值導入至整個低壓系統，有利其發展成為具有氣旋式環流之颱風(颶)風；因此我們可以進一步推測，即使在颱風結構遭受地形破壞後，只要其雨帶中存在著發展中的渦旋熱塔，亦有可能使得颱風的環流結構重建。

由於渦旋熱塔具有明顯的正渦度分布特性，所以我們可以透過渦度收支方程式來加以檢驗其渦度變化之特性。在唐(2010)研究[7]中亦提及有關渦度收支的驗證，其利用高解析度之雙都卜勒雷達合成風場計算出渦度場及渦度收支方程式中各項因子後，進一步討論垂直平流項、輻散項和傾斜項對於渦度趨勢項的正貢獻量分布，觀察垂直運動對於垂直渦度的影響，而其正貢獻量值越大表示對下個時間局地正渦度的增加越有利。由Wallace and Hobbs(2006)[8]所發表颶風Inez(1966)之相當位溫及風場垂直剖面結構可知，風場於邊界層內自外向內流入之徑向內流，使得近底層高相當位溫之空氣產生了充份的混合並成層。由此可知，由於颱風底層持續發生之徑向內流，使其具有中層高度以下相當位溫隨高度遞減之潛在(對流)不穩定特性，這也是颱風得以發展

及維持的重要機制。此外，分布於眼牆內側之垂直次環流，亦可以有效地維持颱風主環流的強度。

本研究所利用之雙都卜勒雷達資料恰可涵蓋凡那比颱風中心即將出海時，其西南側雨帶明顯增強之範圍，故針對本個案該時段之該雨帶，吾人可以利用雙都卜勒雷達合成資料作詳盡之觀察與分析，以期能夠更加了解颱風西南側雨帶增強乃至眼牆重建之過程。

2. 資料介紹

利用空軍在馬公 C-波段的雙偏極化氣象雷達和中央氣象局在七股 S-波段的都卜勒氣象雷達資料來分析颱風重建，執行本次雙都卜勒雷達資料合成之時間點約落在 2010 年 9 月 19 日 0600UTC、0630UTC 以及 0700UTC。在執行資料合成前須先行確認以上各時間點上游資料之完整性，以避免發生最後合成出之雙都卜勒雷達產品無法採用的情況。

3. 研究方法

凡那比颱風西南側雨帶約自 2010 年 9 月 19 日 0500UTC 起開始明顯增強，至 0600UTC 其回波強度發展至 50dBZ 以上且開始呈現明顯之帶狀分布結構；本研究將針對 19 日 0600UTC 至其後約 1 小時時間內，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。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(Custom Editing and Display of Reduced Information in Cartesian Space)修補並平滑那些使用 REORDER 內插所得之時間場及參數場資料；最後，再利用 GrADS(Grid Analysis and Display System)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，造成其西南方雨帶增強乃至眼牆重建之主要原因。

此外，根據氣象局發布之海上陸上颱風警報，在分析本颱風個案之主要時段內，颱風中心以每小時約 20 公里(約每秒 5.6 公尺)的速度朝西方移動，但在本次研究所分析的主要時段中，雨帶上之風速普遍皆可達到 100 kts(約每秒 51.4 公尺)以上，已較颱風中心移動速度大了約一個量級。故本個案中以雙都卜勒雷達合成、繪製出之颱風環流風場，是在不考慮當時颱風中心移動速度的前提下完成。

4. 個案分析

由凡那比強度變化及路徑圖(如圖 1)可知，於 2010 年 9 月 14 日形成之熱帶低壓至 15 日 1200UTC 時增強為凡那比颱風，並於 16 日 1200UTC 增強成為一中度颱風，至 17 日 1200UTC 後其移動速度逐漸增加並維持偏西之方向朝台灣地區接近，在 19 日 0000UTC 左右，颱風中心自花蓮豐濱鄉一帶登陸，並於同日 1000UTC 自台南將軍鄉出海。

藉由觀察逐時雷達回波合成圖(如圖 2，由五分山、七股、墾丁及花蓮四顆雷達所合成)，以進一步了解凡那比颱風登陸前至出海後雨帶結構詳細之演變情況。結果發現凡那比颱風在登陸台灣之前，除了如雲圖所見之特徵，是一個結構對稱，且具有明顯而紮實、直徑約為 50 公里之颱風眼之中型中度颱風外(如圖 2(a))，更進一步發現，當其自台灣花蓮豐濱一帶登陸之後，由於受到地形的破壞，北側之回波漸趨減弱致使颱風眼及其眼牆結構逐漸消失，形成一個回波南強北弱、兩側對流配置不對稱之分布型態(如圖 2(b))。在颱風中心向西朝台灣西岸逐漸出海的過程中，雖然其眼牆尚未明顯重建成形，但其西南側雨帶的強度開始有逐漸增強之趨勢(如圖 2(c)以後)，並持續了約 6 小時後重新演變成為一環狀之颱風眼牆(如圖 2(d))，也因此造成該時段內台灣南部累積降雨迅速地增加。

圖 3 中之藍色陰影方框為 2010 年 9 月 19 日

0631UTC 2 公里高度平面之馬公及七股雙都卜勒雷達合成圖，而圖 4 的風場、雷達回波並疊加上水平輻合場之分布(箭號代表風場、陰影區為雷達回波、藍色等值線則為輻合場，其正值代表輻合，以實線表示，負值代表輻散，以虛線表示)，由圖可知，雨帶北側之風場為偏北風(圖中以淡藍色大型箭號標示)，其與雨帶及其外緣上偏西北風之風場(圖中以淡紅色大型箭號標示)於雨帶內緣處(即雨帶靠近颱風中心之一側)交會，並由輻合場之水平分布可印證該處的確存在較強之輻合區(圖中以亮綠色(橢)圓圈標示較強輻合區之位置)。隨著時間的演進，強輻合區之範圍逐漸擴大，且沿雨帶內緣朝風場之下游方向集中；同時，大於 45dBZ 以上之回波發展的範圍更加擴大且更趨於完整之線狀結構。

圖 5 則為 2010 年 9 月 19 日 0631UTC 5 公里高度平面之馬公及七股雙都卜勒雷達合成風場、雷達回波並疊加上水平輻合場之分布圖。相較於圖 4，在雨帶內緣的相對位置上，圖 5 之該處恰為位於風場輻散區，該區域亦與輻合場負值區之分布範圍一致(圖中以亮綠色虛線(橢)圓圈標示較強輻散區之位置)；底層風場輻合強度及範圍有隨時間更趨明顯且輻合高度略為提升的趨勢。如此底層(2 公里高度以下)輻合、中高層(3 公里高度以上)隨高度漸趨輻散的情況，相信對於該雨帶內緣強度的迅速增強有十分重要的貢獻；而關於造成 2 公里高度(含)以下，雨帶北側呈現偏北風之風場的原因，初步推測可能由於該位置距離台灣陸地較近，故風場乃順勢沿中央山脈北北東-南南西之走向南下而產生偏北風之結果；至於雨帶及其外圍之風場普遍為偏西北風，可能是因為該處距離台灣陸地較遠，受中央山脈地形影響較小，故仍維持颱風本身逆時針方向之環流所致；依此，則地形的影響乃是造成該雨帶內緣底層發生強輻合、搭配中高層高度以上輻散，進而使雨帶內緣迅速增強的重要原因。

接著進一步嘗試在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 6 所示(該圖所分析範圍如圖 2(c)中之白色方框，所截取之剖面位置如圖 5 上所標示之藍色實線，颱風符號代表颱風中心所在位置)。截取後所製作出相對應之產品如圖 7(該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，而颱風符號亦是代表颱風中心所在位置)。

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，強度達 20~30 dBZ 之回波發展高度甚至普遍可達 10~15 公里(圖 7 中藍色虛線表 10 公里等高度線)，若依據唐(2010)[7]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，如圖 8；再者，由剖面圖的資訊可以發現存在於底層(主要為 3 公里高度以下，圖 7 中以藍色實線表 3 公里等高度線)，來自遠處海面、徑向流入颱風中心方向之內流(圖 7 中以淺藍色箭號及 inflow 字標表示)，比較 Wallace and Hobbs(2006)[8]所作 Inez(1966)颶風之熱力及動力結構剖面圖(如圖 9)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，亦即使得潛在(對流)不穩定之特性增加，提供了另一個可能促使該雨帶得以迅速發展的有利條件；而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)產生明顯之輻合區域(圖 7 中以淺綠色橢圓框及 con 字標表示)，此現象與透

過雙都卜勒雷達合成風場資料所發現雨帶內緣底層之輻合現象一致。此外，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。

經由剖面圖所觀察到之特徵，發現該雨帶中存在與渦旋熱塔動力結構類似之對流系統，後續研究可針對時間、各層高度之渦度的變化情況，並透過渦度收支方程式的檢驗，觀察其中各項因子對渦度趨勢的貢獻情況，探討其中可能造成雨帶增強及眼牆重建的機制。

5. 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，透過垂直剖面的資訊，我們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，這意味著在颱風的底層，存在著由該內流自颱風外圍之海面向內攜入的暖濕(可能隱含高相當位溫)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(對流)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 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)[4]針對熱塔所下之定義(10 公里高度等高面上且其回波大於 25dBZ 之對流胞)吻合；而在 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。

6. 參考文獻

[1] Wu, C. C., Chou, K. H., and Cheng, H. J., "Eyewall Contraction, Breakdown and Reformation in a Landfalling Typhoon," *Geophys. Res. Lett.*, Vol.30,

No.17, pp.1-4, 2003.
[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] Riehl, H. and Malkus, J.S., "On the heat balance in the equatorial trough zone," *Geophysica*, Vol.6, pp.503 - 538, 1958.
[4] Heymsfield, G. M., Halverson, J. B., Simpson, J., Lin, T., and Bui, T. P., "ER-2 Doppler radar investigations of the eyewall of Hurricane Bonnie during the Convection and Moisture Experiment-3," *J. of Appl. Meteorol.*, Vol.40, pp.1310 - 1330, 2001.
[5] 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.
[6] Houze Jr., R. A., "REVIEW - Clouds in Tropical Cyclones," *Mon. Weather Rev.*, Vol.138, pp.293-344, 2010.
[7] 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。
[8] Wallace, J. M. and Hobbs, P. V., *Atmospheric Science: An Introductory Survey* (2nd ed.), Academic Press, United States, pp.483, 2006.

7. 圖表彙整

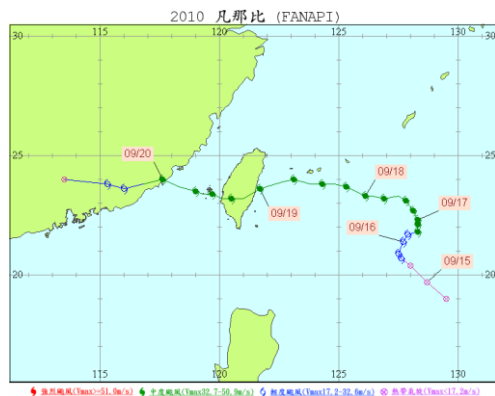


圖 1. 凡那比颱風強度變化及路徑圖(資料來源：中央氣象局)

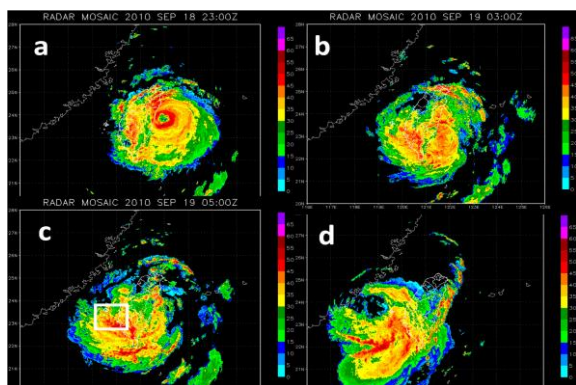


圖 2. 凡那比逐時雷達回波合成圖(資料來源：空軍氣象聯隊)

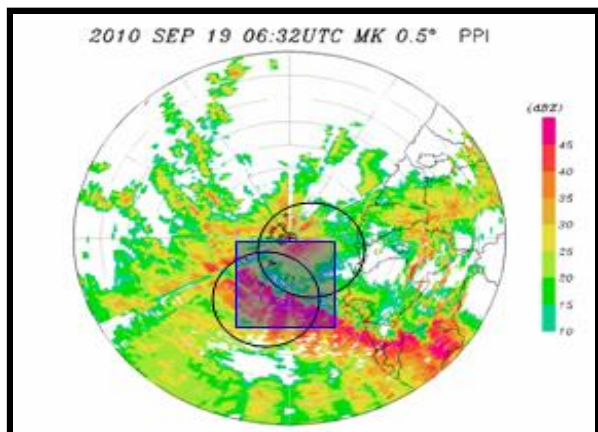


圖 3. 資料相對位置圖。

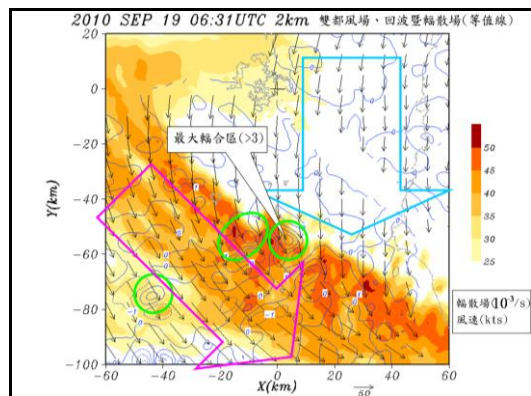


圖 4. 2010 年 9 月 19 日 0701UTC 馬公及七股雙都卜勒雷達合成風場、雷達回波暨輻合場疊加圖(2 公里高度, 箭號代表風場、陰影區為雷達回波、藍色等值線則為輻合場, 其正值代表輻合, 以實線表示, 負值代表輻散, 以虛線表示)

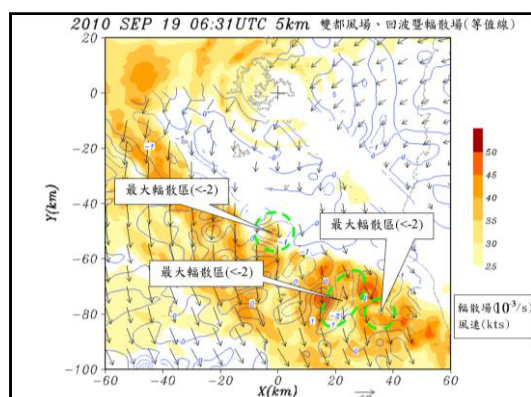


圖 5. 同圖 4, 但為 5 公里高度

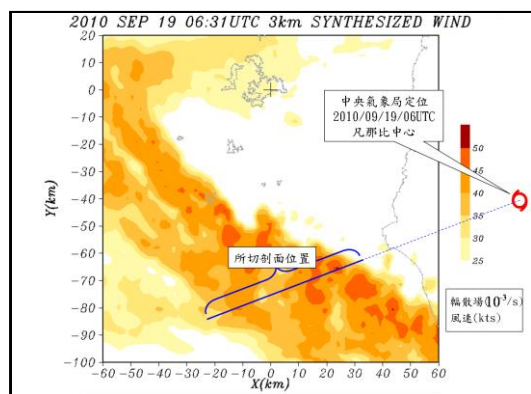


圖 6. 眼牆消失期間針對強回波所截取之垂直剖面位置示意圖。

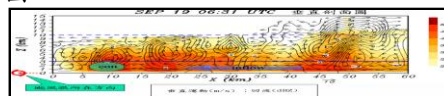


圖 7. 對應於圖 6 所示位置之垂直剖面圖。

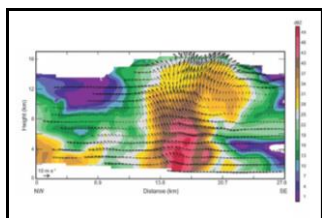


圖 8. Houze et al.(2009)觀察Ophelia(2005)颶風生成前，存在於其低壓雨帶內渦旋熱塔之動力結構圖，圖中箭號代表風場，陰影區為回波場。

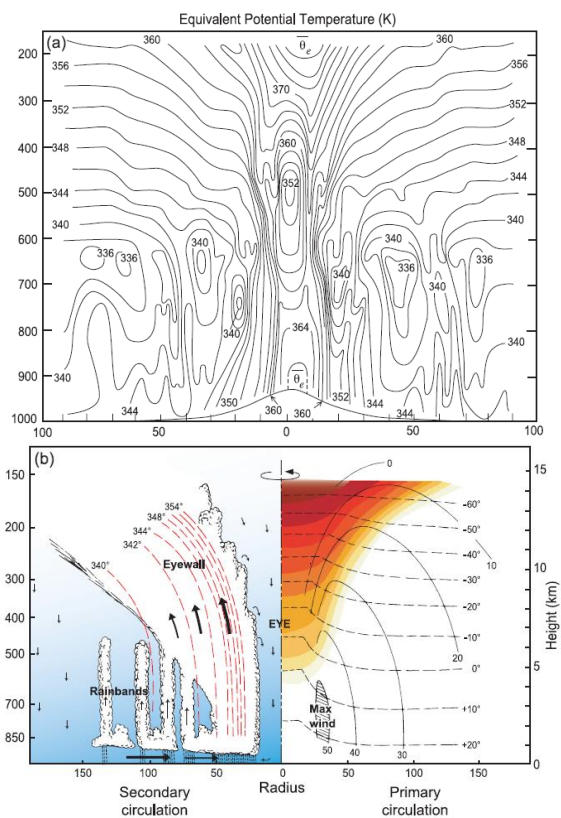


圖 9. Inze (1966)颶風熱力及動力結構剖面圖。