颱風外圍雨帶對航機起降之影響

魏志憲
中華航空公司

摘要

颱風外圍雨帶內的對流胞有時可以發展成弧狀對流系統，其雷達回波的型態類似颮線系統。本文將以 2009 年 Mo 颱風與 2014 年 Ma 颱風為例，當其暴風半徑遠離台灣本島後，外圍雨帶出現數道的線狀對流系統，而台灣中南部氣象雷達網亦觀測並掌握其氣流之特徵，因此將介紹氣象雷達觀測之對流雨帶內的渦旋強度與強上升(下沉)運動，並探討對航機所帶來之影響。

一、前言

航空氣象的防颱作業主要還是依循官方氣象單位所發布之颱風警報，其重點在於颱風路徑與暴風半徑所涵蓋之範圍。然而近年來研究發現颱風暴風半徑外之雨帶可藉由其他回饋方式影響颱風結構和強度(May and Holland 1999, Franklin et al., 2006)。此外，這些雨帶中存在所謂第二水平風最大區(secondary horizontal wind maxima SHWM) (Samsury and Zipser 1995)，此一氣流的風速大小並不亞於颱風內核區，Ryan et al. (1992)發現在發展中的熱帶氣旋內對流活耀的雨帶中會產生 SHWM。Franklin et al., (2006)則說明對流尺度的上升氣流的傾斜作用，將引發水平渦度導向垂直渦度，進而加強 SHWM。此外，May and Holland (1999)透過全物理模式研究顯示，熱帶氣旋的外圍雨帶層狀區的位渦增加可以影響渦漩強度，Chen and Yau (2001)對流現象透過模式指出在中對流層的螺旋雨帶有位渦異常增加，這個位渦增加主要發生在颱風加強過程。由以上的研究可知，颱風外圍雨帶的運動場結構遠比想像中來的複雜，並且劇烈的對流活動同樣存在於颱風外圍雨帶，因此此類雨帶對於飛行安全亦有重大的影響，不亞於颱風本體。

近來本文將介紹近年來研究所發現颱風外圍雨帶內部的中尺度天氣現象，探討這些現象對於航機起降之影響，特別是藉由 2009 年的 Mo 颱風、2014 年的 Ma 颱風等二個案分析，深入瞭解颱風外圍雨帶的特徵。

二、資料來源與分析

本文利用空軍在馬公 C 頻的雙偏極化氣象雷達和中央氣象局墾

丁與七股 S 頻的都卜勒氣象雷達資料來分析颱風外圍雨帶，馬公雷達與七股雷達距離 64 公里，因為雷達掃描範圍互有重疊（圖 1），可進行雙都卜勒雷達風場合成，有利於分析雨帶上的運動結構和探討支持雨帶持續發展的來源。雙都卜勒風場合成方法參考 Ray et al. (1978、1979)，而垂直運動場則是先積分非彈性連續方程式，再藉由變分法調整而得。首先先使用進行地形和海面雜波去除，並且濾去在觀測時，其風場信號內插到較高解析度時產生的錯誤資料，接下來針對風場去折疊為正確數值，然後使用 REORDER 軟體將資料從雷達座標(r,θ,ψ)內插到直角座標(x,y,z)，其中網格點資料的設定為水平解析度為 1.5 公里，垂直解析度為 0.5 公里，自 0.5-15 公里共 30 層，由於颱風雨帶系統移動速度快速，需經過系統平移以獲得更準確的合成風場，平移方法可以在 REORDER 中的”REFERENCE TIME”設定基準時間，並在”ADVECTION”設定颱風雨帶的移動方向與速度後，執行 REORDER 軟體即可完成雷達資料的內插和平移。然後利用 CEDRIC(Custom Editing and Display of Reduced Information in Cartesian space)對資料作平滑和修補，最後將處理好的資料進行合成和應用。

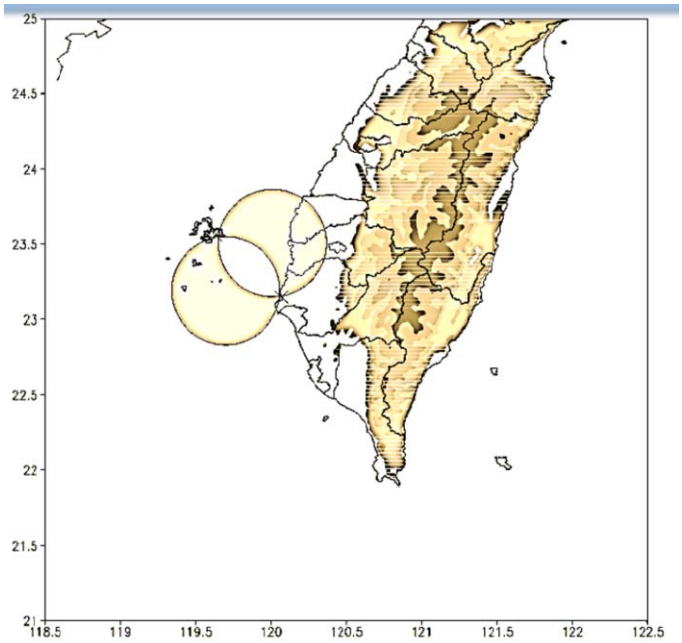


圖 1. 七股及馬公雷達掃瞄區域，可應用於雙都卜勒風場合成區域位於馬公至七股雷達中區域位置。

三、綜觀天氣概述

1. 2009 Mo 颱風

中央氣象局颱風路徑圖（圖 2）顯示，2009 年 8 月 3 日 0000UTC Mo 颱風在西北太平洋生成，之後轉向西移動，5 日 1200UTC 增強中度颱風以每小時 25 公里速度向西移動，7 日 0600UTC Mo 颱風速度

變慢並轉向西北移動，1600UTC 在花蓮市登陸並轉向北移動，8 日 0600UTC 強度減弱為輕度颱風並於桃園附近出海，繼續向北北西緩慢移動進入福建。而 8 月 7 日 0000UTC 地面天氣圖顯示（圖 3），除 Mo 颱風外，在香港附近另有一熱帶低壓緩慢向東移動，顯示 Mo 颱風正位於一個低壓帶中心，比對 8 日 0000UTC 地面天氣圖(圖 3)，颱風的移動速度減慢並逐漸轉向，因此當颱風逐漸接近台灣本島時，移動速度減慢以及強度減弱，可能受到附近颱風或低壓影響彼此牽引。

7 日 0000UTC 時 850 百帕天氣圖顯示（圖 4a），東沙群島及其附近海域測站風向顯示為西風，大陸沿海測站為南風，比對 8 日 0000UTC 時 850 百帕天氣圖發現（圖 4b），東沙群島及其附近海域測站風向轉為西南西風，有逐漸受到西南氣流影響趨勢，大陸沿海附近的氣流受到颱風影響，轉為北風，表示有一個風場不連續帶由台灣南部外海向西南延伸至香港南方海面。因此 850 百帕天氣圖顯示，Mo 颱風登陸期間東沙群島附近海域已受到西南氣流影響，範圍延伸至台灣南方海面。

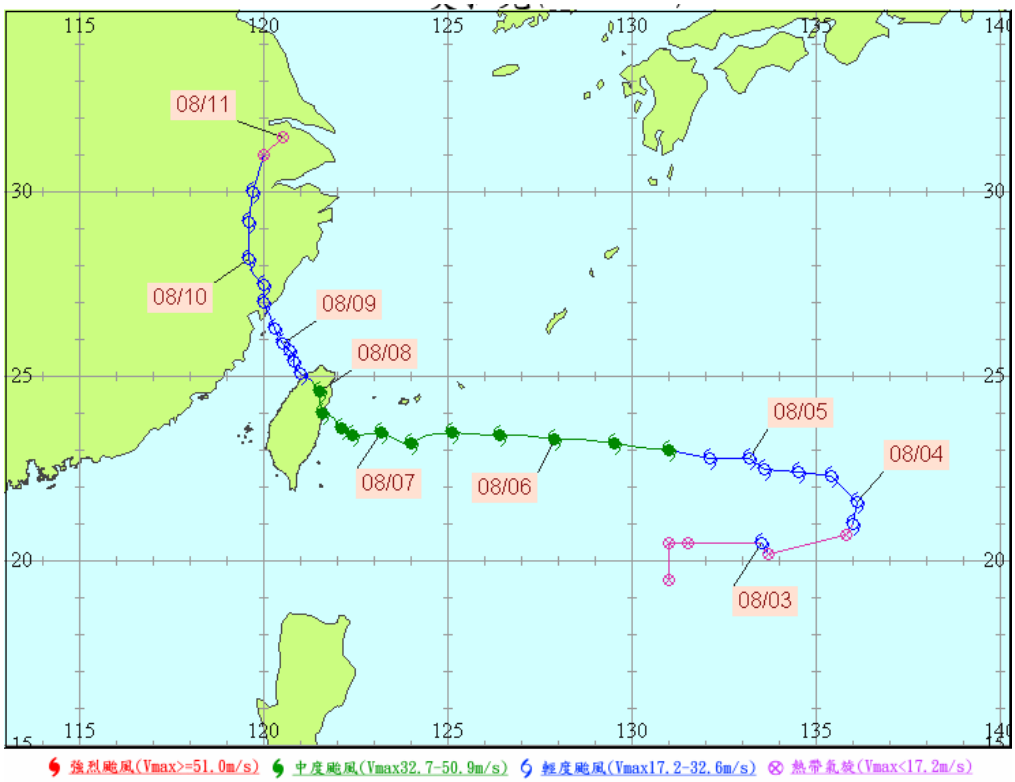
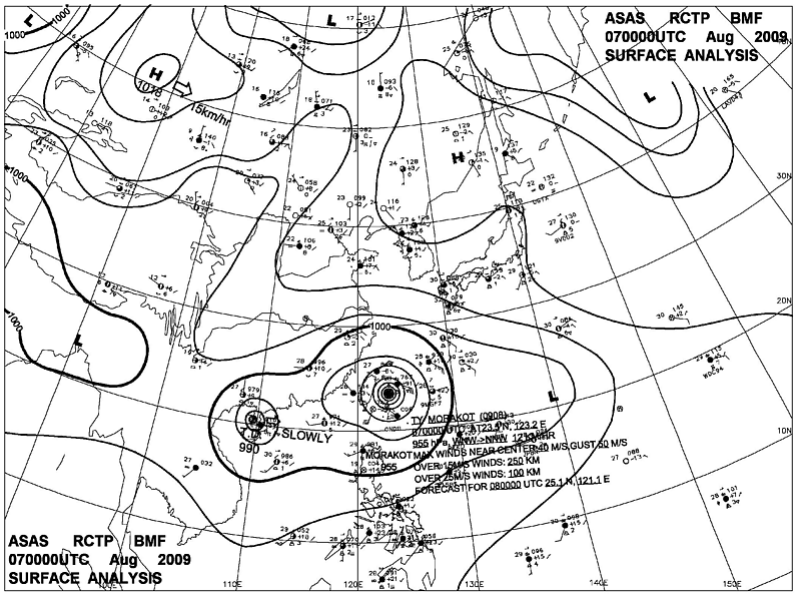


圖 2 中央氣象局 2009 年 Mo 颱風路徑圖。

a



b

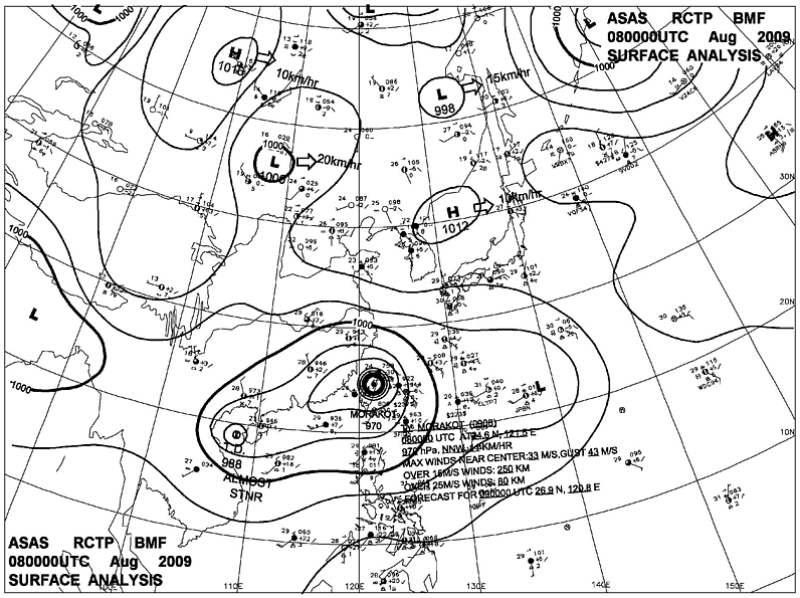
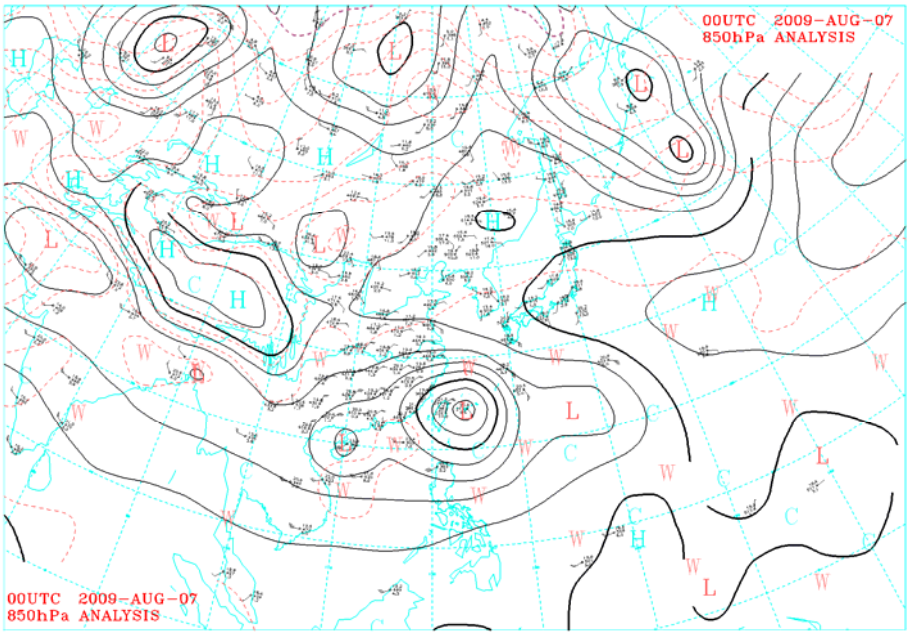


圖 3 (a)中央氣象局 8 月 7 日 0000UTC 地面天氣圖。(b) 中央氣象局 8 月 8 日 0000UTC 地面天氣圖。

a



b

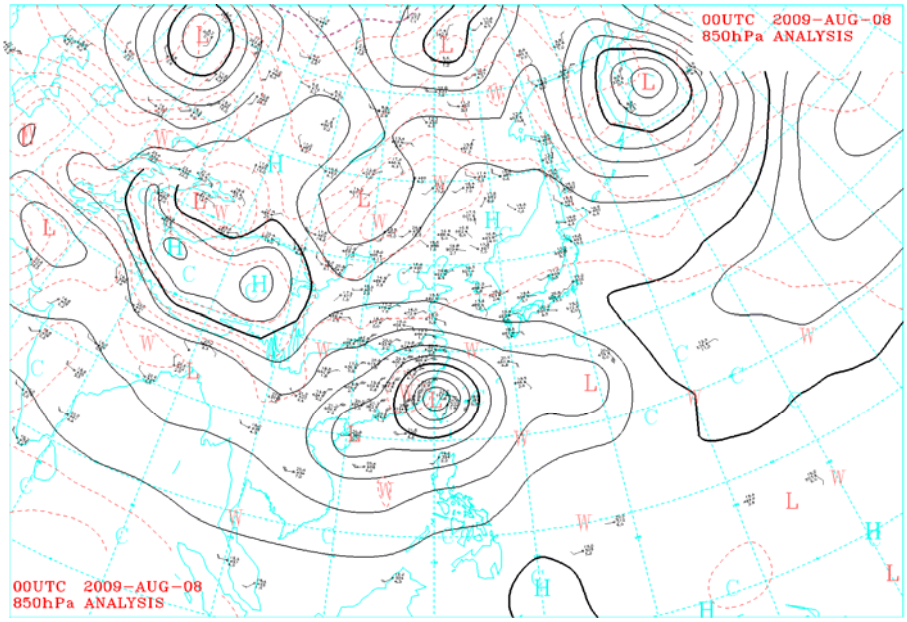


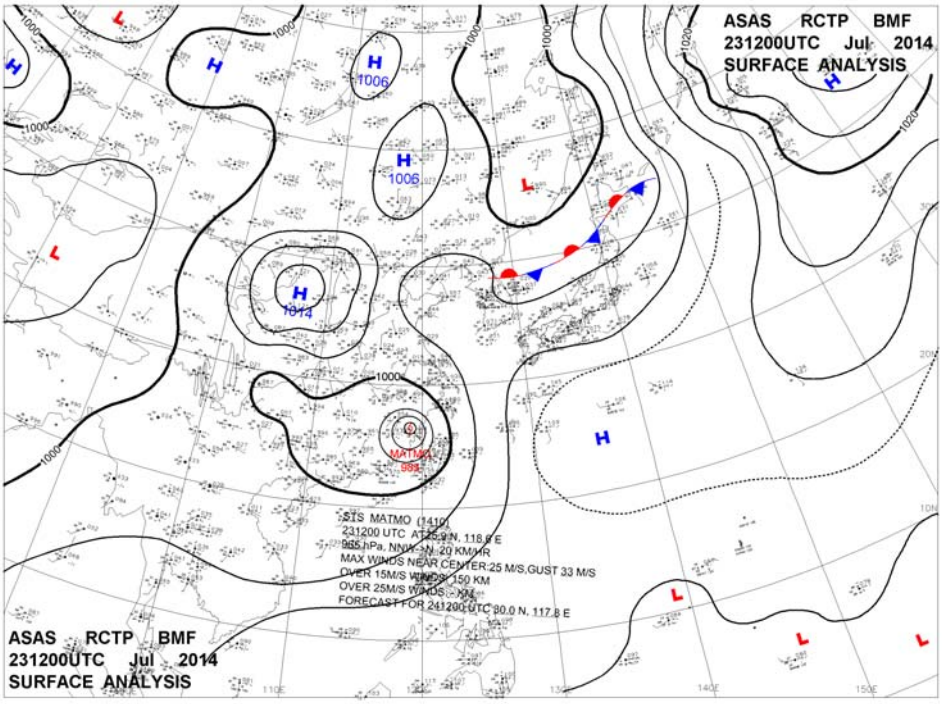
圖 4. (a)中央氣象局 8 月 7 日 0000UTC 850 百帕天氣圖。(b)8 月 8 日 0000UTC 850 百帕天氣圖。

2. 2014 年 Ma 颱風

由中央氣象局 2014 年 7 月 23 日 1200 UTC 地面及 850hPa 天氣圖顯示（圖 5），Ma 颱風登陸大陸東南沿海之後，受到北側高壓所帶來的乾冷空氣影響，對其第 1、2 象限水氣供應較為不利。此外由 850hPa 天氣圖中（圖 5b），可分析西南氣流或華南一帶之噴流對麥德姆颱風水氣供應的情況，由於中南半島相對溼度場雖達 85% 以上，

亦有降雨發生，唯風向為東北風，因此顯示未有供應水汽之情況。

a.



b.

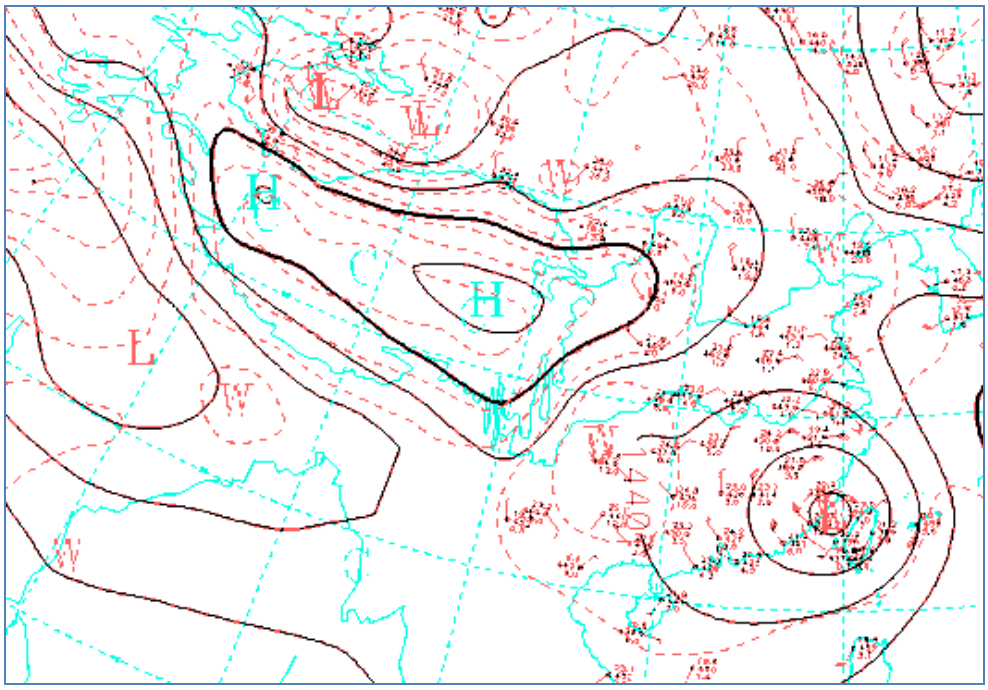


圖 5 2014 年 7 月 23 日 1200 UTC 時中央氣象局(a)地面天氣圖。(b) 850 百帕天氣圖。

四、中尺度天氣特徵

1. 2009 Mo 颱風

利用 8 月 7 日 1200UTC 中央氣象局整合雷達回波圖（圖 6a）顯

示颱風外圍結構相當完整，因此颱風降雨分布有不對稱性情況，颱風主要雨帶位於台灣南方海面，主要集中在颱風第三象限，以螺旋向內形式滙入眼牆， 8 日 0000UTC 雷達回波圖（圖 6b）顯示，主要雨帶強度減弱，線性雨帶持續維持，由回波強度分析，有多個對流胞串聯成線性雨帶的現象，降雨分布集中在南部山區，比較 8 日 0600UTC 雷達回波圖（圖 6c）發現，颱風中心由桃園附近出海，眼牆部分有重新建立情況，主要雨帶位於台灣南方海面強度逐漸增強，南部外海附近線性雨帶強度增強，降雨分布集中在南部山區且有順著山區降雨情況， 8 日 1800UTC 雷達回波圖（圖 6d）發現颱風逐漸北移，外圍雨帶呈現線性雨帶，有別於一般颱風雨帶的螺旋狀特徵，且具有長生命期現象，線性雨帶為多個對流胞組成，持續向東移動，顯示西南氣流持續提供能量，維持主要雨帶發展。

2. 2014 Ma 颱風

Ma 颱風暴風半徑在 7 月 23 日 1100 UTC 時已逐漸遠離台灣本島，然而當時的整合雷達回波圖（圖 7），顯示台灣海峽有一線狀回波正在颱風外圍雨帶內部發展，以約 24 m/s 之速度朝東北方向移動，主要的強降水回波帶由新竹外海向南沿伸至台中，再持續轉向西南方至馬公上空，後更持續沿伸至馬公西南方約 90 公里處之外海，總長度約 300 公里，其中可定義出數道波型線狀回波，與發生在中緯度之波型線狀回波型態相似。

五、都卜勒雷達資料分析

1. 2009 Mo 颱風外圍雨帶特徵

為了進一步確認影響颱風雨帶形成的原因，利用馬公、七股和墾丁雷達資料分析登陸時和登陸後颱風雨帶強度及風場分布情況；從 8 月 7 日 1616 UTC 七股雷達回波圖（圖 8a）發現南部外海有二條颱風雨帶，且颱風雨帶走向為西北-東南，而 07 日 1616 UTC 墾丁雷達回波圖（圖 8b）指出有二條颱風雨帶走向分別為西北-東南和西南西-東北東，二條颱風雨帶走向不一樣，應是受到不同氣流交互作用影響。7 日 1617 UTC 馬公徑向風場（圖 9a）顯示該地區風場為北北西風，其中徑向風場西南方有幾條錯誤干擾線，因為雷達的西南方有干擾源，但不影響判斷環境風場結果；而墾丁徑向風場（圖 9b）顯示該地區風場為西南西風。馬公和七股雷達的雙都卜勒風場（圖 10a）分析顯示 A 區域環境風場為北北西風轉西北風，與颱風環流方向一致，墾丁和七股雷達的雙都卜勒風場（圖 10b）分析顯示 B 區域環境風場為西北西風轉西風，與颱風環流方向相異。雨帶上上升氣流可達 4 ms^{-1}，下沉氣流則約 2~3 ms^{-1}。綜觀上述資料顯示，馬公雷達到墾丁雷達的颱風雨帶走向為由西北向東南，但是墾丁雷達附近的颱風雨

帶轉為由西南向東北為主，配合風場分析發現，墾丁附近環境風場開始轉向以西南西風為主，且伴隨明顯的上升與下沉氣流。

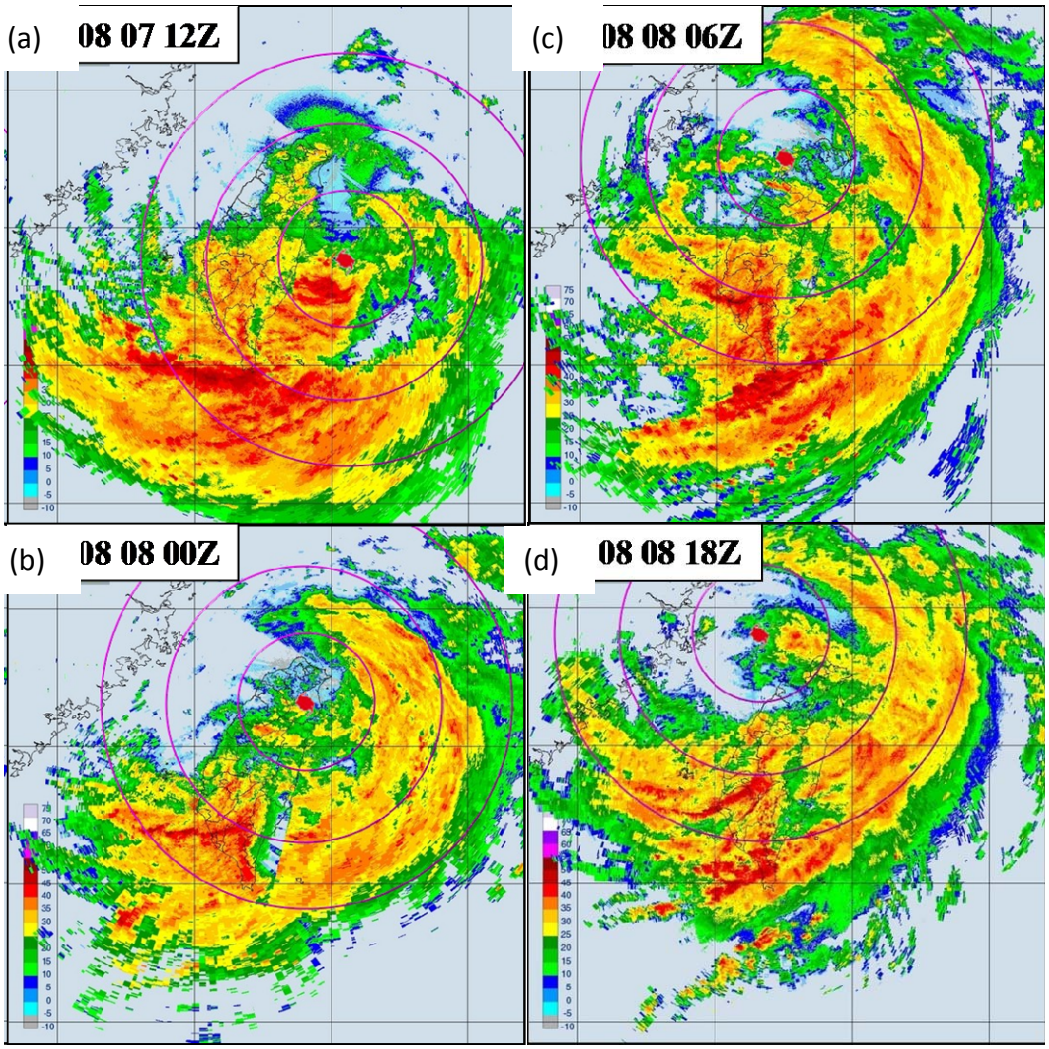


圖 6 2009 年中央氣象局雷達回波圖。颱風符號位置為中央氣象局定位颱風中心。紅色圓圈為以 100 公里為半徑所畫的圓周，依序增加 100 公里。(a) 8 月 7 日 1200 UTC，(b) 8 月 8 日 0000 UTC，(c) 8 月 8 日 0600 UTC，(d) 8 月 8 日 1800 UTC。

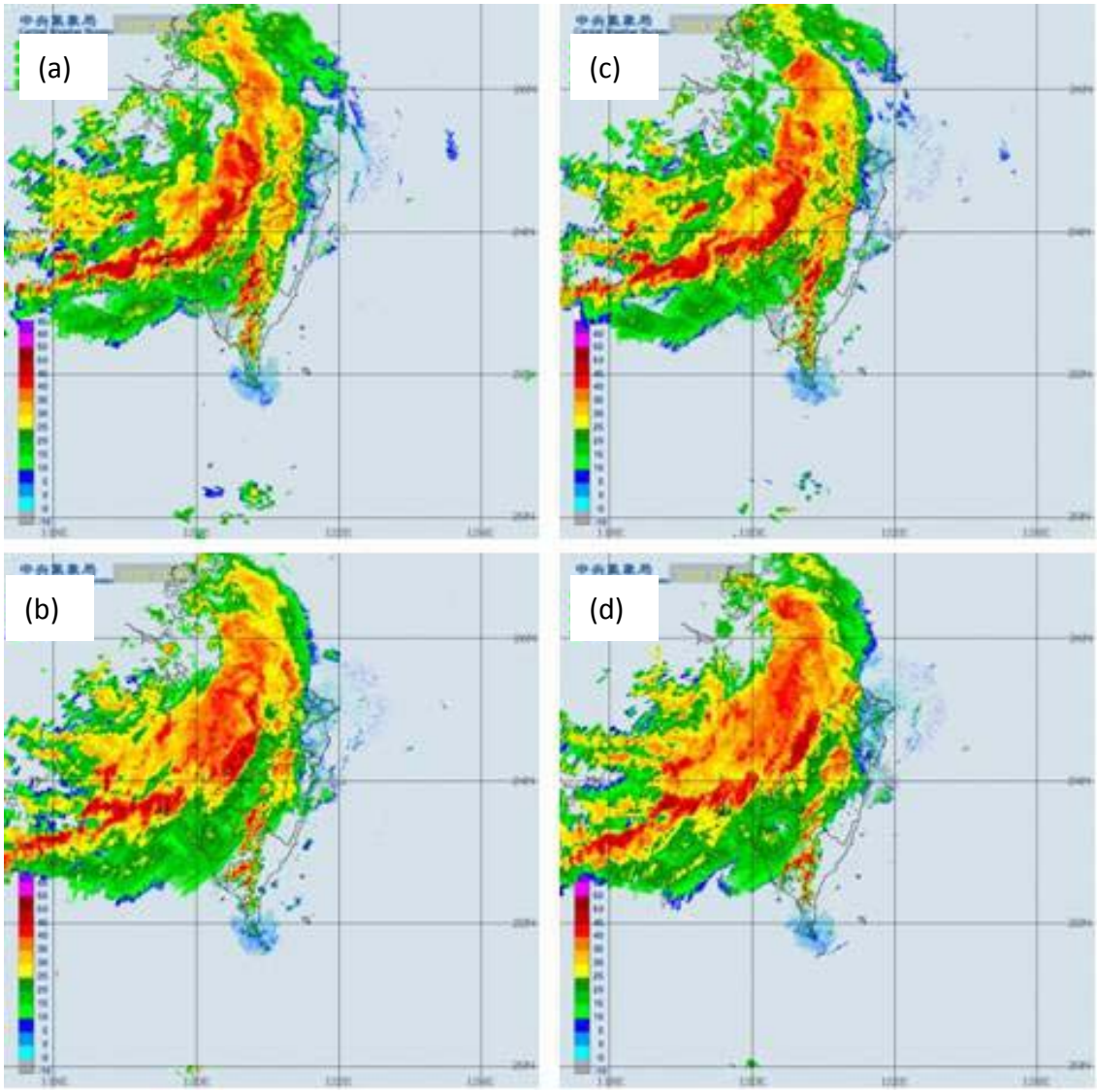
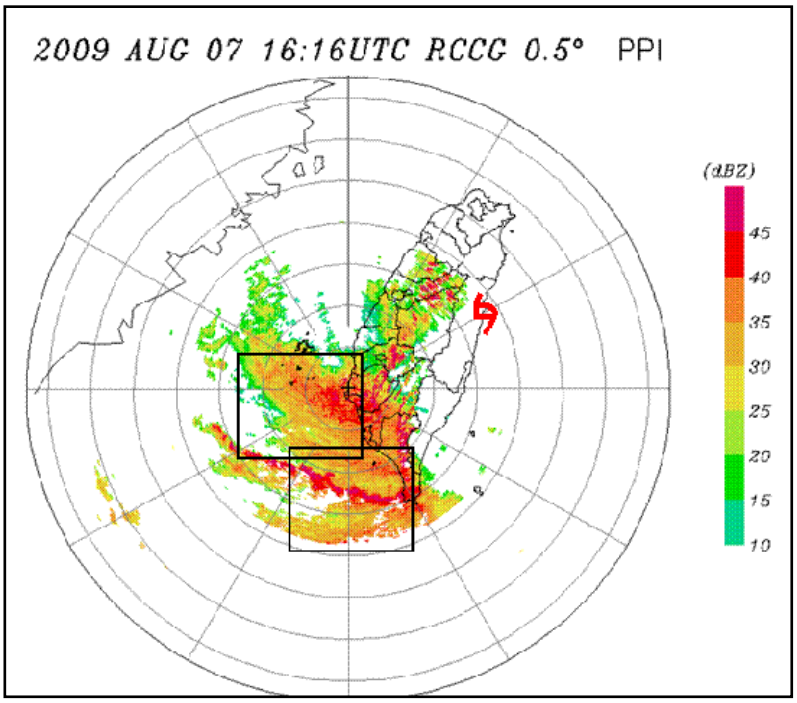


圖 7 2014 年中央氣象局雷達回波圖。颱風符號位置為中央氣象局定位颱風中心。紅色圓圈為以 100 公里為半徑所畫的圓周，依序增加 100 公里。(a) 7 月 23 日 1050 UTC，(b) 1110 UTC，(c) 1130 UTC，(d) 1150 UTC。

a



b

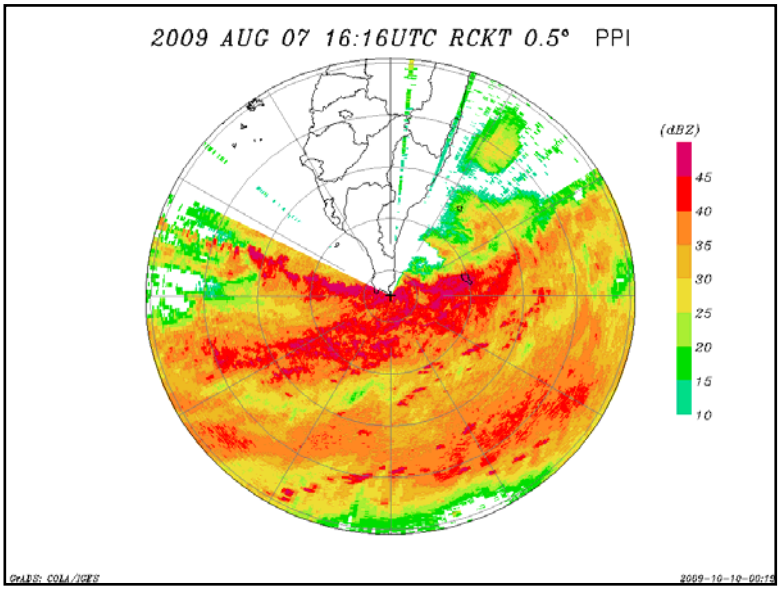
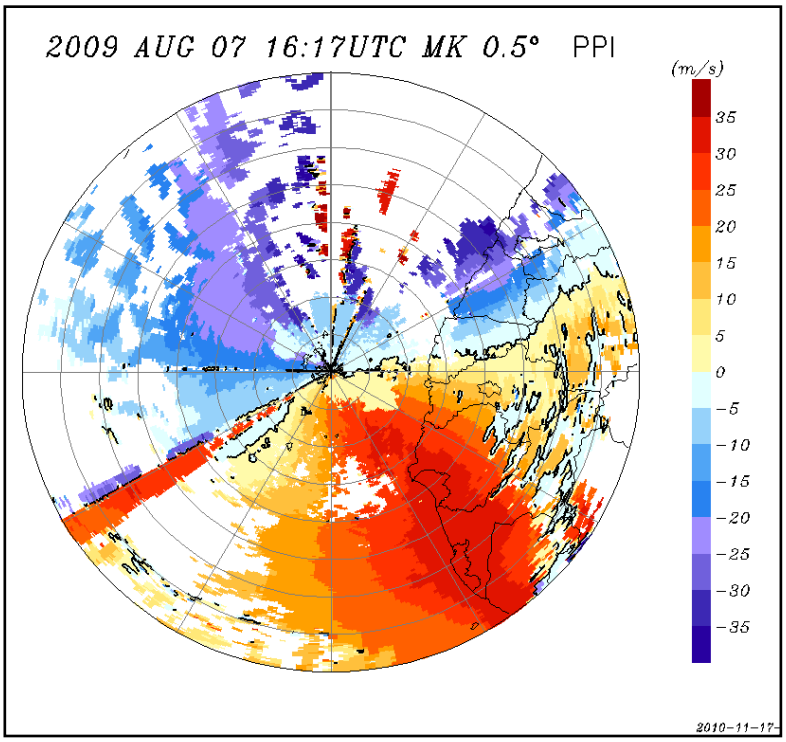


圖 8 2009 年 8 月 7 日 1616 UTC(a)七股雷達，(b) 墾丁雷達在仰角 0.5 度之平面位置圖。颱風符號為當時中央氣象局定位颱風中心位置。黑色方框為個案分析區域。

a



b

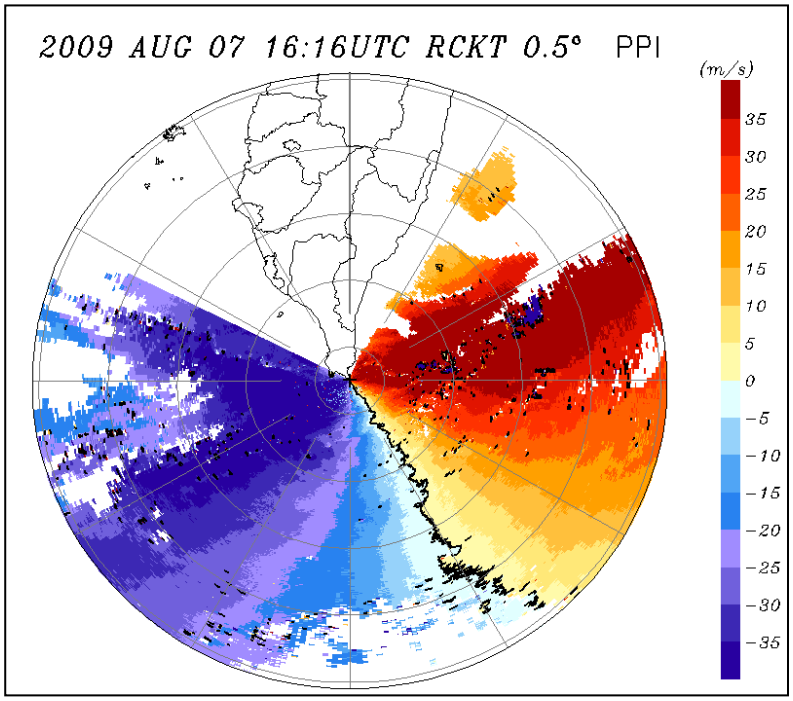
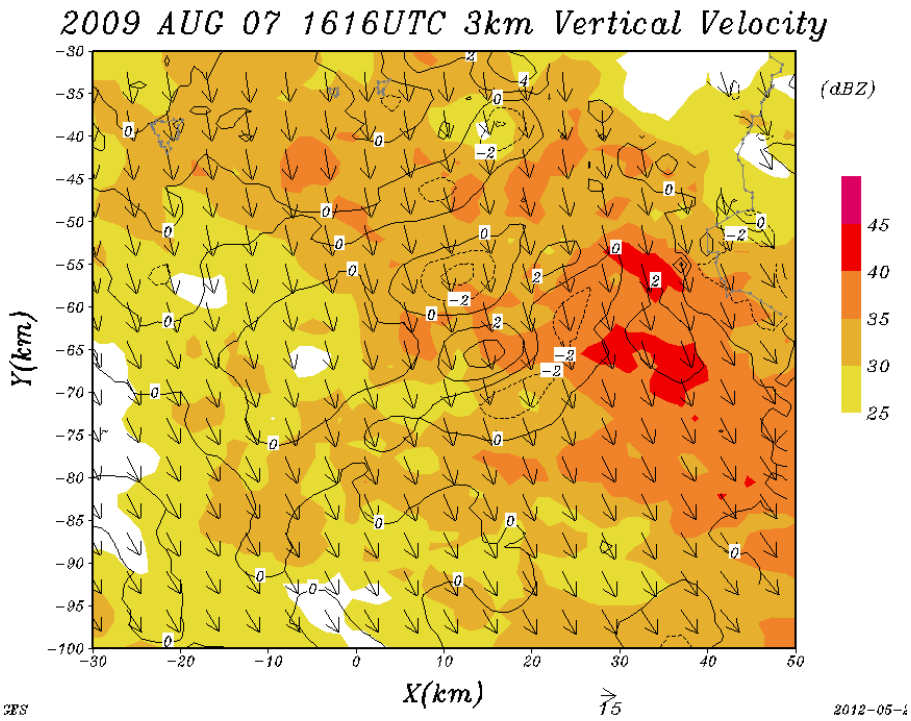


圖 9 2009 年 8 月 7 日 1617 UTC(a)馬公雷達，(b)墾丁雷達在仰角 0.5 度之徑向風場圖。

a



b

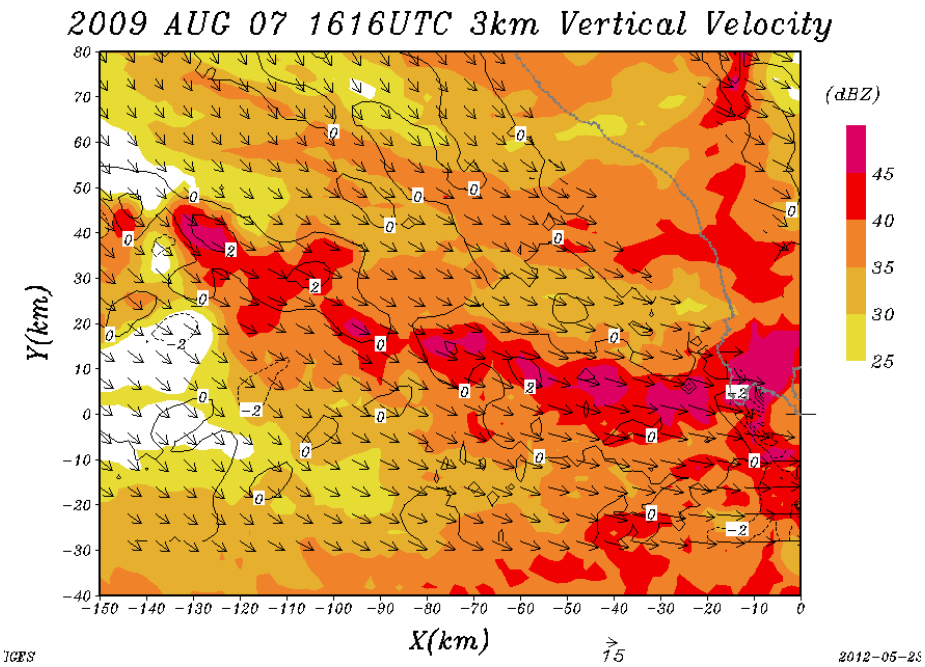
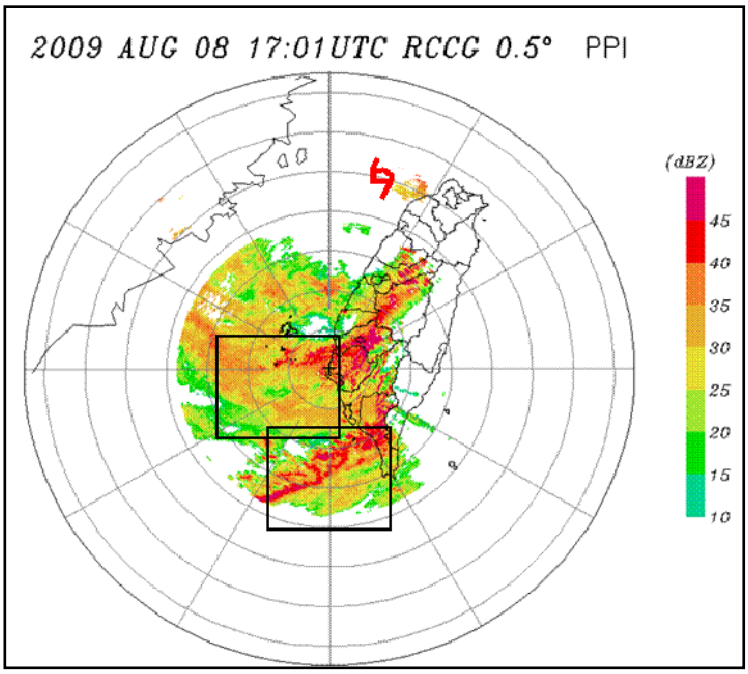


圖 10 2009 年 8 月 7 日 1616 UTC 時 (a)馬公與七股雷達，(b) 墾丁與七股雷達在 3 公里高度雙都卜勒合成風場圖。填色代表降水回波，等值線為垂直速度場，灰色實線代表海岸線。橫座標與縱座標代表與雷達站之距離。

此外當颱風登陸後，從 8 月 8 日 1701 UTC 七股雷達回波圖(圖 11a)發現有二條颱風雨帶形成，走向為西南-東北，同樣的從 08 日

1701 UTC 墾丁雷達回波圖(圖 11b)發現颱風雨帶也是西南-東北走向，比對七股徑向風場(圖 12a)顯示該地區為西南西風（七股徑向風場為初始資料並沒有經過風場修正），而墾丁徑向風場(圖 12b) 顯示該地區為西南風。利用墾丁和七股雷達的雙都卜勒風場(圖 13)的分析顯示該地區環境風場為西南風，由上述資料可以推估該時段環境風場已轉為偏西南風。綜合二個時段的回波圖、徑向風場和雙都卜勒風場資料顯示登陸時七股雷達附近持續受到颱風環流影響，環境風場以偏北風為主，但是墾丁雷達附近開始受到西南氣流影響，環境風場已開始轉為偏南風，登陸後南部地區及外海的環境風場以西南風為主，上升與下沉氣流均大於 2 m s^{-1}。

a



b

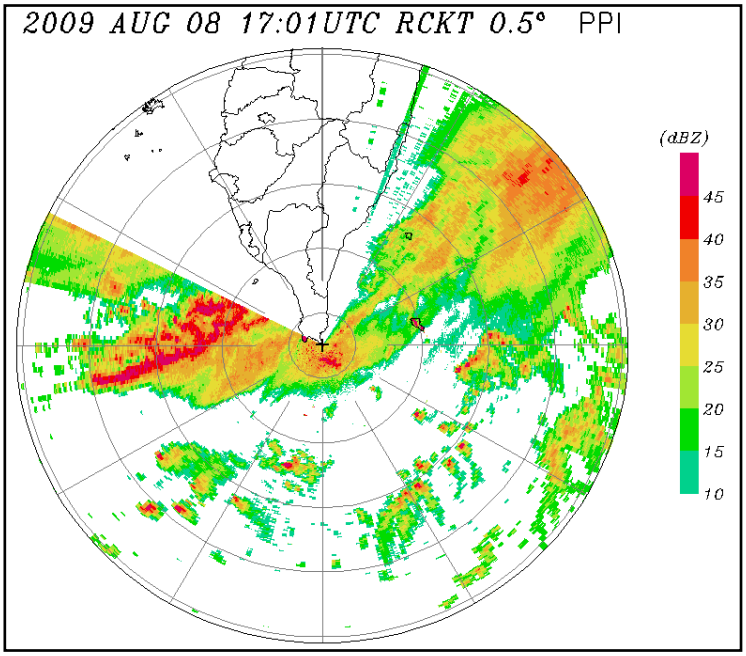
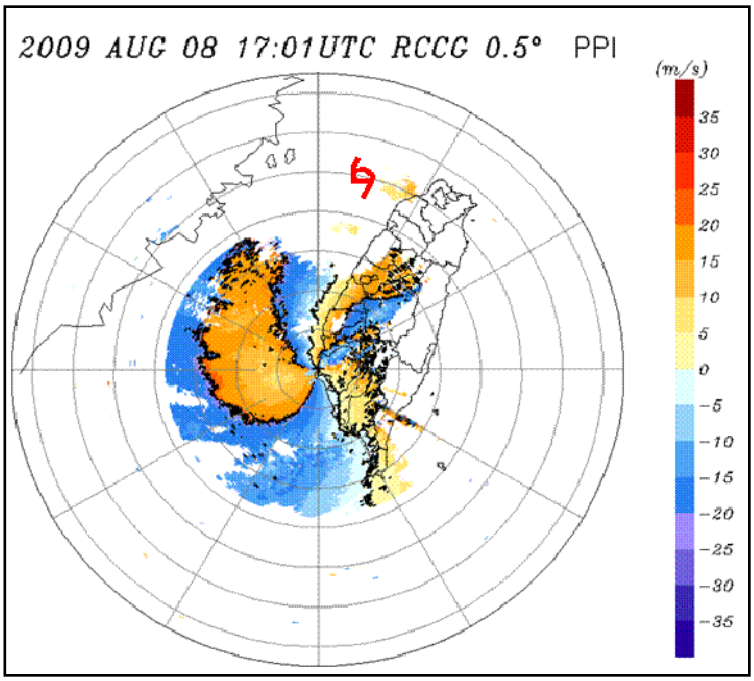


圖 11 2009 年 8 月 7 日 1616 UTC(a)七股雷達，(b)墾丁雷達在仰角 0.5 度之平面位置圖。颱風符號為當時中央氣象局定位颱風中心位置。黑色方框為個案研究區域。

a



b

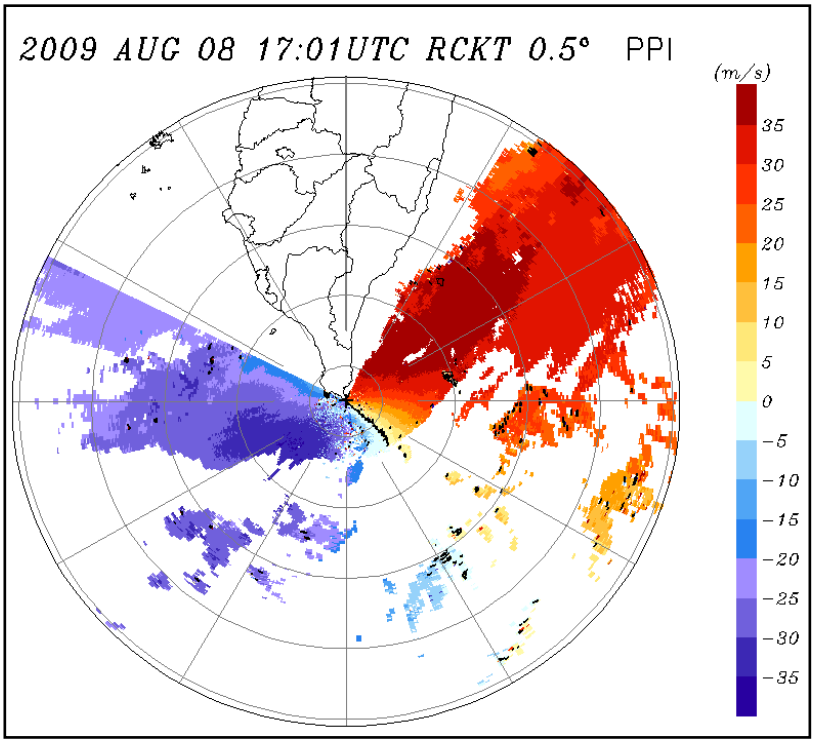


圖 12 8 月 8 日 1701 UTC(a)七股雷達，(b) 墾丁雷達在仰角 0.5 度之徑向風場圖。

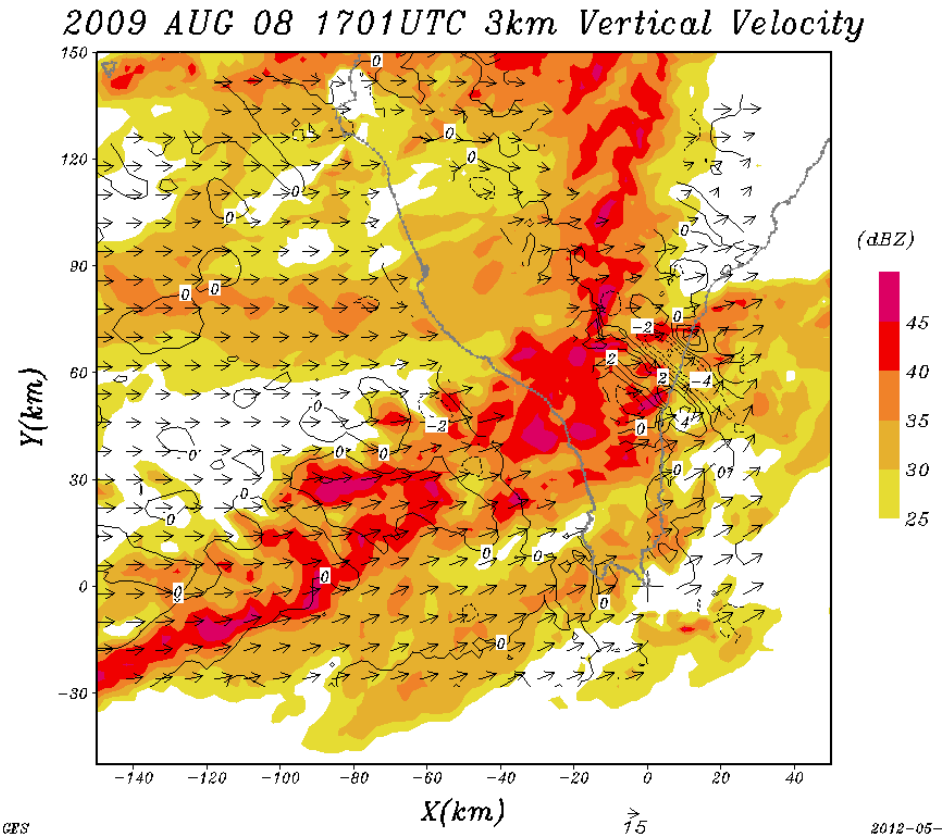


圖 13 2009 年 8 月 8 日 1701 UTC 時墾丁與七股雷達在 3 公里高度雙都卜勒合成風場圖。填色代表降水回波，等值線為垂直速度場，灰色實線代表海岸線。橫座標與縱座標代表與雷達站之距離。

2. 2014 Ma 颱風外圍雨帶特徵

前段使用單一個七股雷達，針對三次線狀回波通過馬公機場時之風場與垂直剖面分析。但亦可使用七股與馬公雙都卜勒雷達合成針對三維風場分析，唯合成有其限制必需為二個以上都卜勒雷達重疊區域位置，另外因七股及馬公雷達基線(base-line)之風場合成結果夾角過小，基線 30°內之合成風場不可參考，因此受限於馬公雷達之有效掃描範圍及高度，故無法針對公馬公機場正上空做有效之雙都卜勒回波合成剖面。

本次分析依照表 3.6.1 之時間序列，對前三個較強回波時段通過馬公地區上空線狀回波探討高度於 2 公里之回波結構與水平風場之關係，於關鍵處做剖面分析，其風場與 4.1 節相同亦為移除系統移動方向 230°，速度 24 m/s 之結果。

在 2014 年 7 月 23 日 0946 UTC 時（圖 14），一道類似波形之線狀回波通過馬公測站時，由風場分析回波北邊無氣旋式環流，南邊則有反氣旋式環流，綜合比較水平風場可知僅南邊具有書夾渦旋型式，並分析在(X：0，Y：20)位置有線狀回波之後方入流，因此此一回波型

式類似於 Davis et al.(2004)所發現之形式。

配合剖面分析，剖面 b-b'為此線狀回波較接近馬公機場之位置(圖 15)，回波後緣之入流水平風速約為 8 m/s，在回波最強處有風場輻合，上衝流可達 8 ms^{-1} 於 25 公里處有弱下沉運動，其垂直速度約為 2 m/s，下沉運動未抵達地面，與移向回波之水平風場結合後向回波移動，至回波前緣有上升運動，其下沉垂直速度達 4 m/s，上升至 8 公里高度時轉為向回波後緣形成繞流現象。

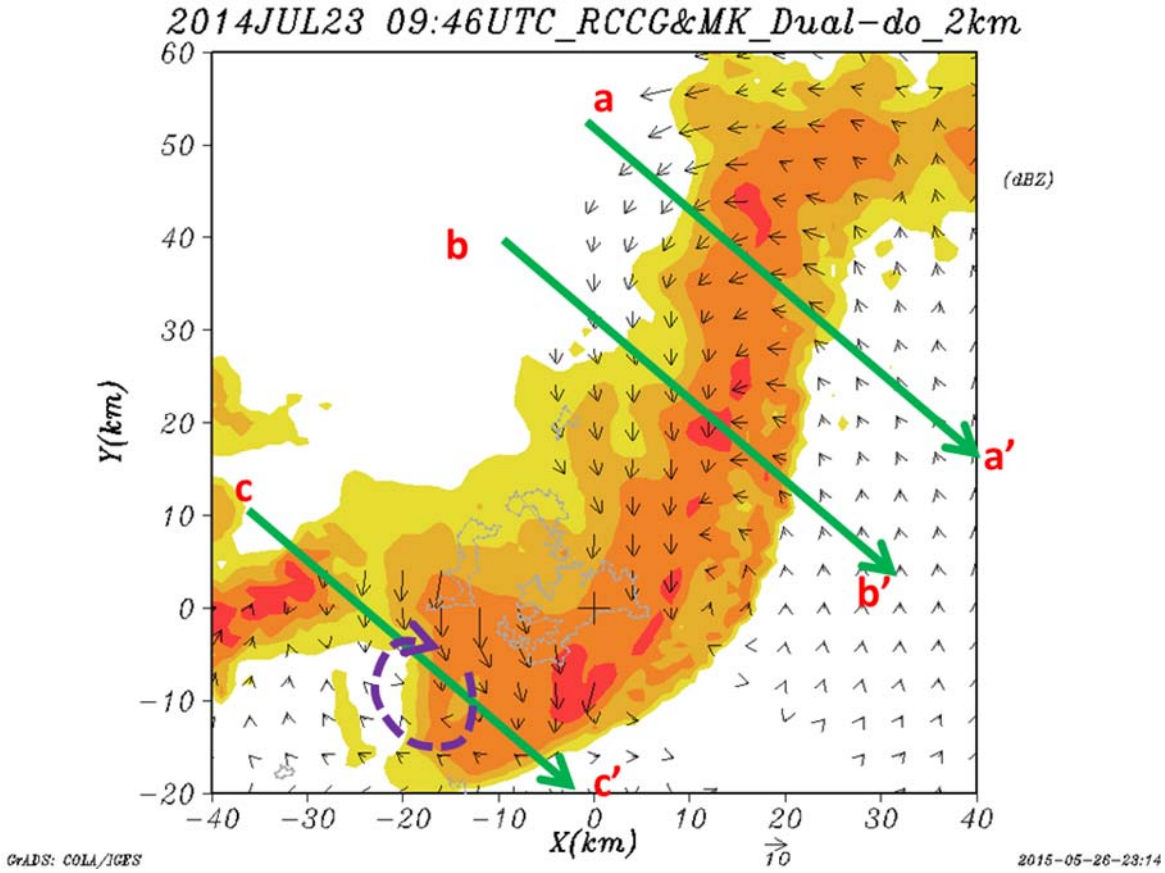


圖 14 2014 年 7 月 23 日 1746 LST，雙都卜勒 35dBz 以上回波及合成風場圖，綠實線 a-a'、b-b'及 c-c'為剖面選取範圍，紫色虛線為環流方向。

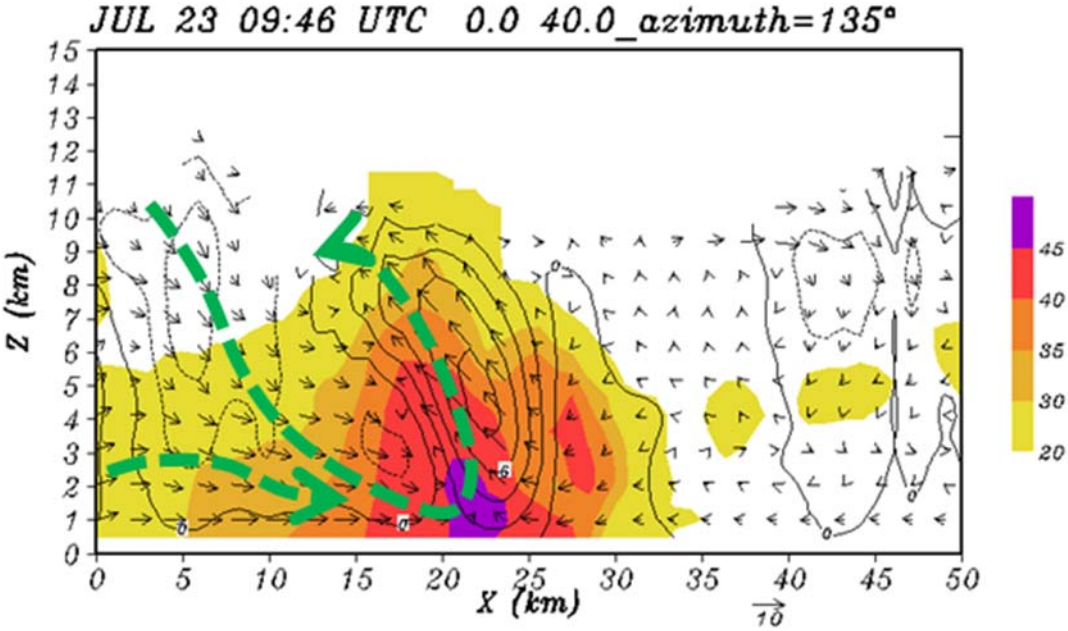


圖 15 為圖 14 中剖面 a-a'圖。

1109 UTC 時另一道波型線狀回波通過馬公機場(圖 16)，由回波場配合水平風場(如紫色虛線箭頭所示)可分析出二道線狀回波，北側回波(X：40，Y：40)位置之北邊及南邊都具有典型之氣旋及反氣旋，符合書夾渦旋型式，並在回波後緣具有後方入流，以水平風場來分析約為 2~4 m/s，此北側較小的回波具有典型弓狀回波之型態。較小的回波後方連結另一較大之線狀回波，並在回波後緣形成入流，風速約為 10 m/s，而回波南邊無明顯的環流存在。配合剖面分析，剖面 b-b'為此波型線狀回波中間較接近馬公機場之位置(圖 17a)，回波後緣之入流水平風速約為 10~12 m/s，回波之前、後緣之氣流與剖面相同均為吹向回波最強處，為明顯的風場輻合，輻合造成氣流上升達到 6 公里高度。分析垂直方向環流，於 5~10 公里處(距最強回波處 12 公里)為接近回波之風場，且有強烈的下沉運動，其速度達到 8 m/s 並抵達地面，氣流繼續向回波移動至回波前緣(25 公里)時有上升運動，其垂直速度達 4 m/s，上升至 6 公里高度時轉為向回波後緣形成繞流現象(如所示)。

剖面 c-c'為此弓狀回波後段之位置(圖 17b)，與前二波不同的是，就算是在回波南邊，屬於線狀回波尾端，其回波後緣之下沉氣流亦相當強烈，在水平 17 公里，高度 8 公里位置處甚至達到 10m/s 之譜，但此圖之氣流場在回波最強處僅造成輕微的上升後，持繼向東南方向移動，並未如北邊及中段在回波最強處有輻合情況產生。

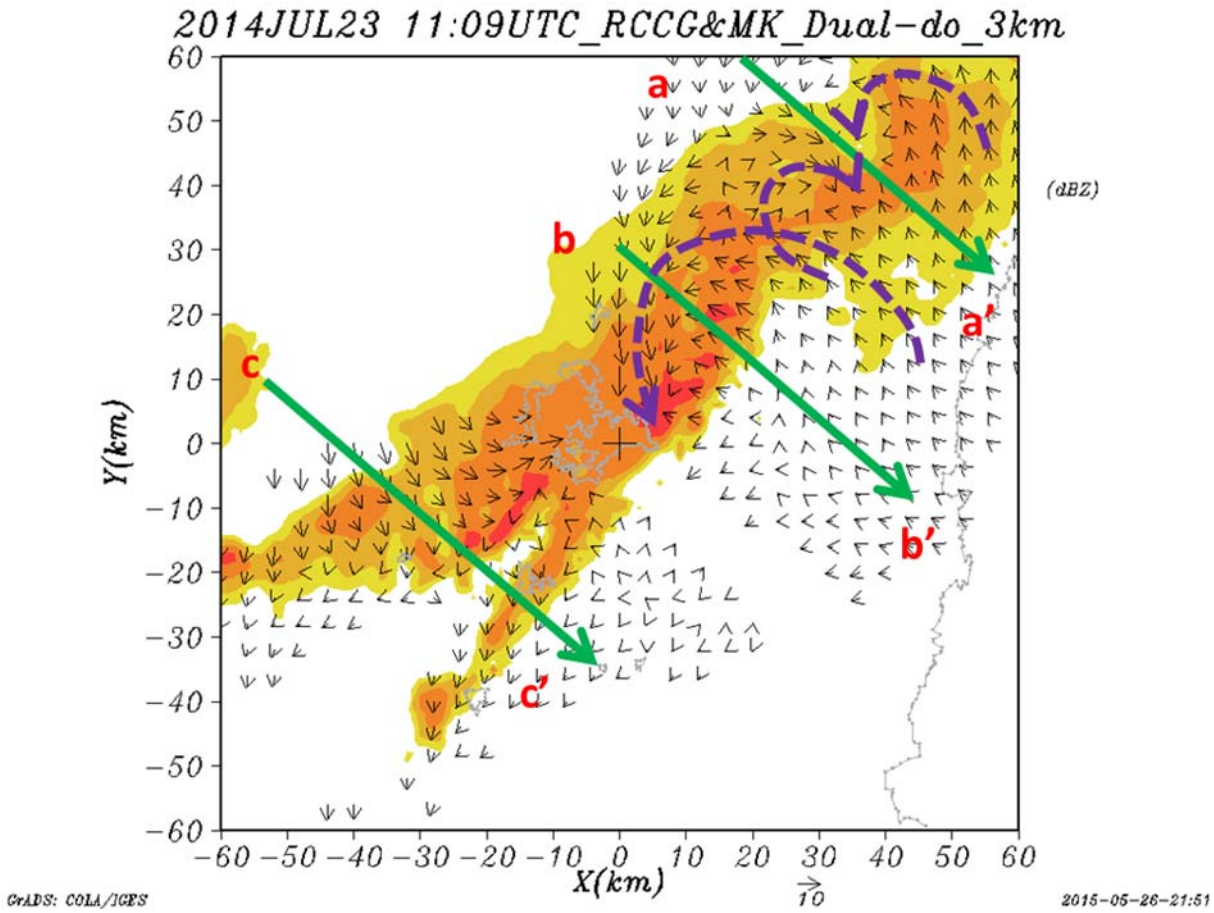
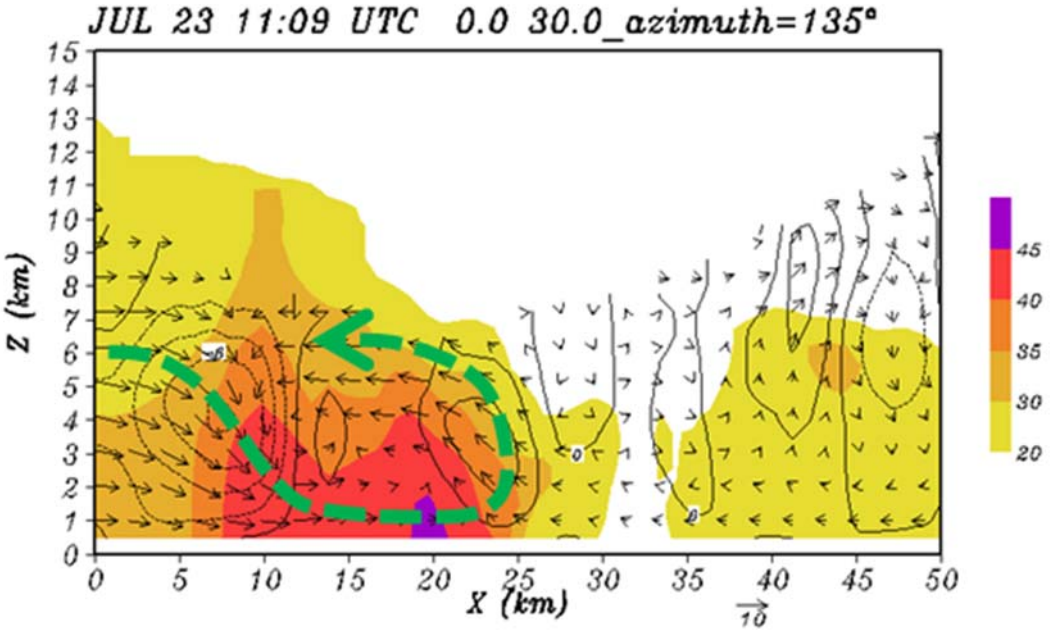
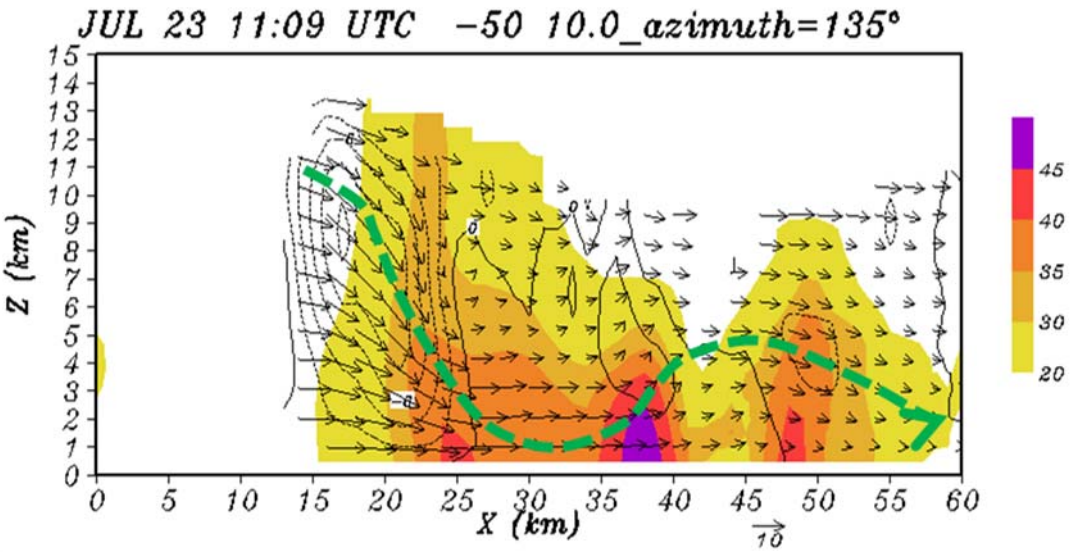


圖 16 2014 年 7 月 23 日 1909 LST，雙都卜勒 35dBz 以上回波及合成風場圖，綠實線為剖面選取範圍，紫色虛線為環流方向。





圖**錯誤! 所指定的樣式的文字不存在文件中。**17 為圖 16(a)剖面 b-b'，(b) 剖面 c-c'圖。等直線為垂直運動場，綠色實線代表氣流方向。

由以上雙都卜勒回波場之平面風場及剖面風場配合回波位置分析，最大上升及下沉氣流均出現在回波中段位置，即使是在颱風外圍環流當中，其線狀回波內的垂直運動高度可從 10 公里延伸至近地面，而垂直運動代表此處之氣流最紊亂，最不利於飛行器從中間通過；而後方入流(RIJ)出現在回波中段處時具有最大風速。

六、討論與結論

近十年颱風外圍雨帶所帶來的大量雨勢造成台灣地區頗多重大災情，由於這些雨帶並非位在颱風主體之內，然而卻能挾帶劇烈降雨，因此這些雨帶內部對流尺度的氣流型態值得進一步探討。近來國外許多學者針對颱風外圍雨帶特徵進行研究，發現雨帶伴隨強勁的水平風，風速可大於 20 ms^{-1}，並且同時有旺盛的上升氣流與下沉氣流，這些氣流亦能扭轉垂直風切而形成氣旋式環流。這些研究成果說明颱風外圍雨帶亦屬於劇烈對流雲系，無論是風或雨均能帶來強大的破壞。鑒於先關研究僅限於討論美國地區的颶風雨帶，針對颱風雨帶的類案研究鮮少，因此本文利用台灣南部地區都卜勒氣象雷達觀測網，分析 2009 年的 Mo 颱風、2014 年的 Ma 颱風等二個案，進而瞭解颱風外圍雨帶的特徵。初步結果發現，當颱風雨帶呈現不對稱結構時，外圍雨帶上存在強烈的水平風切，並引發上升氣流，風速約 4~5 ms^{-1}。而降雨所伴隨之下沉氣流速度約 2ms^{-1}。雨帶生命期在颱風遠離後仍可維持 8 至 10 小時。此外，部分外圍雨帶內的對流發展與組織類似於中緯度地區之波形線狀回波，具有強烈的下衝流，速度可達 10 ms^{-1}，到達近地面時將轉變為強勁的水平風，形成由後向前氣流。若

此氣流之風向又與跑道方向呈 90 度夾角，將形成側風，則側風加上強烈下沉氣流，這類的氣流將航空飛行器的起降安全帶來重大影響。因此即使在陸上颱風警報解除後，雨帶的影響仍可維持相當長的時間。而加強對氣象雷達圖判圖的能力，將有效對雨帶內危害飛安之天氣特徵進行辨別，進而增進航機起降之安全。

參考文獻

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.

Davis, C. “The Bow Echo and MCV Experiment: Observations and Opportunities”, American Meteorological Society,2004.

Franklin, C. N., G. J. Holland, and P. T. May (2006), Mechanisms for the generation of mesoscale vorticity features in tropical cyclone rainbands, Mon. Weather Rev., 134, 2649–2669.

May, P. T., and G. J. Holland (1999), The role of potential vorticity generation in tropical cyclone rainbands, J. Atmos. Sci., 56, 1224–1228.

Ray, P. S., K. K. Wagner, K. W. Johnson, J. J. Stephens,W. C. Bumgarner and E. A. Mueller, 1978: Triple-Doppler Observations of a Convective Storm. J. Appl. Meteor. 17, 1201-1212.

Ray, P. S., J. J. Stephens and K. W. Johnson, 1979: Multiple-Doppler Radar Network Design. J. Appl. Meteor. 18, 706-710.

Ryan, B., G. Barnes, and E. Zipser (1992), A wide rainband in a developing tropical cyclone, Mon. Weather Rev., 120, 431–447.

Samsury, C. E., and E. J. Zipser (1995), Secondary wind maxima in hurricanes: Airflow and relationship to rainbands, Mon. Weather Rev., 123, 3502– 3517.