

二零零二年五月在香港觀測到的龍捲風

何家亮 陳世倜
香港天文台

摘要

2002年5月20日晚上有報告在赤鱸角出現類似龍捲風般的狂風。該龍捲風橫掃赤鱸角的東面，引致樹木倒下，廢紙箱和路牌被吹至東歪西倒。

該龍捲風的產生與徘徊在廣東沿岸區域的一道低壓槽有關。機場多普勒天氣雷達清楚地觀測到這個龍捲風的渦旋。本文描述跟今次事件相關的氣象觀測資料，特別是機場多普勒天氣雷達所提供的高分辨率數據。本文亦嘗試探討能否利用高分辨率的雷達數據，為預報員提供這類惡劣天氣的預警，從而進一步改進天氣警告服務。

Observation of a Tornado in Hong Kong in May 2002

Paul K.L. Ho and S.T. Chan
Hong Kong Observatory

Abstract

Violent winds resembling a tornado were reported at Chek Lap Kok in the evening of 20 May 2002. Trees were toppled and dustbins and road signs were blown around as the tornado swept across the eastern part of Chek Lap Kok.

The development of the tornado was associated with a trough of low pressure lingering around the coastal areas of Guangdong. The vortex of the tornado was well captured by the Terminal Doppler Weather Radar (TDWR). This paper presents the meteorological observations during the event, in particular the high-resolution data from the TDWR. The paper also attempts to explore the possibility of utilizing the high-resolution radar data in alerting forecasters to the presence of such severe weather with a view to enhancing the weather warning service.

二零零二年五月在香港觀測到的龍捲風

何家亮 陳世倜

香港天文台

1. 引言

2002年5月20日晚上約8:30，赤鱸角島上出現龍捲風。該龍捲風橫掃赤鱸角島東部，在陸上逗留了約數分鐘後，便移向島的東北面海域。它在陸上逗留期間，造成了一些破壞和混亂，如樹木倒下、錐形路標(俗稱雪糕筒)及廢紙箱被吹翻在地上滾動、行車天橋上的臨時路牌也被吹跌落橋下的行車線等。根據龍捲風的風速和破壞程度分級(見表1)(文獻[1])，可判斷是次龍捲風屬於最弱的F0級，即風速達每小時40至72英里(或每小時64至116公里)。

這次龍捲風的產生是跟一道徘徊在廣東沿岸區域的季風槽有關。自當日黃昏開始，季風槽所引起的強雷暴發展區域從珠江口的西面移到珠江口的東面。晚上八時，這些強雷暴開始影響整個大嶼山的北面，特別是赤鱸角島及其周邊範圍。機場多普勒天氣雷達對這些強雷暴作出觀測及記錄。從速度場數據分析中，雷達清楚地探測到該龍捲風的渦旋。

連同上述個案，香港有六次受龍捲風吹襲的記錄，但這是首次利用雷達探測到在香港出現龍捲風的渦旋識別標誌(Tornado Vortex Signature, TVS)(文獻[2])。本文除了分析由機場多普勒天氣雷達所提供的高分辨率數據外，也描述跟今次事件相關的其他氣象資料。同時，亦會討論利用高分辨率的雷達數據，為預報員提供這類惡劣天氣預警的可能性。

2. 背景

2002年5月中旬一道季風槽在華南沿岸徘徊，令香港和鄰近廣東地區普遍多雲有雨及間中有雷暴。20日約中午時份，廣東西部開始有驟雨和雷暴發展。至黃昏時分，在珠江口西面的雨區發展成為一強烈雷暴，並向東移動。由晚上7:00起，不斷有雨區和雷暴橫過大嶼

山和赤鱸角島。約在晚上 7:40，一個強雷暴在大嶼山的西南面形成，向東北方向移動。晚上 8:30 分，這個強雷暴在赤鱸角島上引起龍捲風，並夾雜著大雨移向赤鱸角島的東北面海域(圖 1)。晚上 8:45 分左右，赤鱸角島東北約 5 公里的大磨刀島(位置見圖 2)錄得順時針的風向改變、最大風速約為每小時 65 公里和最大陣風約為每小時 77 公里(圖 3)，達烈風程度。晚上 8:00 至 9:00 之間赤鱸角錄得超過 45 毫米的雨量。

3. 天氣尺度形勢分析

5 月 20 日早上中國東南沿岸地面受一道高壓脊支配，為東南沿岸至珠江口一帶帶來一股偏東氣流(圖 4)。季風槽由廣西向東南伸延，經廣東西部再伸延至呂宋海峽一帶。從當日早上 00 UTC 的探空資料所得(圖 5)，可見到大氣低層為暖濕氣流，而中、高層則較為乾，K 指數在 30 以上。這些條件均有利強雷暴的發展。晚上 12 UTC 的 K 指數更超過 40，SWEAT 指數亦達到 436，顯示大氣正處於極不穩定的狀態。

上空流場方面，當日 12 UTC 的 850 百帕流線圖(圖 6)顯示一道帶有氣旋性的西南季候性氣流正影響華南沿岸，而一道西南急流正由西向東擴展並於翌日早上完全覆蓋廣東沿岸區域(圖 7)。700 百帕和 500 百帕的流線圖(圖 8 和 9)亦顯示西南季風相當活躍，有頻密的短波經過華南沿岸區域。從 200 百帕的流線圖(圖 10)可見到香港上空處於輻散區附近。

概言之，在不穩定天氣條件下，西南季風與偏東氣流於珠江口相遇，觸發了強烈的對流活動，產生強雷暴。這些強雷暴在 700 百帕的西南風引導下在晚間開始影響香港。

4. 雷達數據分析

機場多普勒天氣雷達採用 C 波段，探測由雷暴引起的風切變。它坐落於赤 角島東北面約 12 公里的大瀧涌(位置見圖 2)，波長 5 公

分，天線安裝在離水平面約 60 米的高度，直徑約 7.6 米，半功率束寬為 0.55 度。雷達以不同的仰角掃描大氣，每次掃描後，提供不同仰角的 PPI 反射率、徑向速度及譜寬度等基礎數據，數據的分辨率為 1 度間的方位距離和 150 米間距。有關雷達的運作模式、信號處理、風切變探測的計算方法等詳細資料，請參考文獻[3]。

上述所載龍捲風約在晚上 8:30 出現在赤 角島上。雷達在當晚 8:31 仰角為 0.6 度的反射率(reflectivity)PPI 圖像中(圖 11)顯示出在雷達的西南面(232 至 236 度方位)約 10 公里處，有一達到 54 dBZ 的強烈回波。這回波呈鈎狀，垂直高度約由距離地面 170 米伸延至 1 公里上空。鈎狀回波是龍捲風出現在雷達圖像上的一種典型特徵，這鈎狀回波維持了數分鐘。

同一時間仰角為 0.6 度的徑向速度場(radial velocity) PPI 圖像中(圖 12)，在雷達的西南面(227 至 236 度方位)約 10 公里處(雷達波束高度約離地面 170 米)，可觀察到徑向速度發生急劇變化(圖 13)。起始在 227 度方位的負值(即朝向雷達的徑向速度 - 紫藍色代表)至 234 度方位時，突然改變為正值(即遠離雷達的徑向速度 - 黃紅色代表)，這改變完全是方位性而非徑向性的。圖 14 表明了上述的徑向速度變化，負徑向速度從 227 度方位不斷增加至 233 度方位的最大負值(-25.5 米/秒)後，就在 234 至 235 度方位短短 1 度之間轉為正值，並在 236 度方位達至最大正值(+14.75 米/秒)。從 234 至 235 度，負徑向速度與正徑向速度在短短 1 度(10 公里處的水平間距約為 175 米)之間相差達 38.5 米/秒，徑向速度的方位性梯度(azimuthal gradient)非常強，這是龍捲風渦旋識別標誌(TVS)的明顯特徵(文獻[2])。另外在 233 度方位的最大負值與在 236 度方位的最大正值這 3 度方位的距離，出現 40.25 米/秒的切變，方位性的切變(azimuthal shear)非常大，這也是確認龍捲風渦旋識別標誌的明顯特徵(文獻[4])。

雷達於 2 分鐘後記錄得這次龍捲風的最大切向速度(tangential speed)約為每小時 100 公里。龍捲風渦旋隨後移向赤蠟角島東北面海域，在晚上 8:45 左右，經過大磨刀島(位置見圖 2)，島上的風速計錄得順時針的風向改變，最大風速約為每小時 65 公里，最大陣風約為每小時 77 公里，達烈風程度。從雷達圖像在不同時間顯示的龍捲風位置可以估計它的平移速度(translation speed)約為每小時 25 公里。

圖 15 提供了在晚上 8:31 分左右徑向速度場的垂直剖面，每層高度的徑向速度數據都是由雷達以不同仰角(最低的 0.6、1.1、2.4、6.0..... 至 39.6 度)掃描所得的資料組合而成。但是由於雷達不可能在同一時間以不同仰角掃描，所以這些掃描所得的資料在時間上存在少許差異。用以製作此圖的資料的起始記錄時間為晚上 8:30:14，終止時間則為 8:31:51。以龍捲風渦旋的平移速度約為每小時 25 公里計算，在這相距 1 分 37 秒的時段內，龍捲風渦旋已移動了超過 500 米。因此，我們抽取靠近渦旋中心或最大方位性切變的數據來重組一個有連貫性垂直結構的龍捲風渦旋。由於渦旋的中心或方位性切變最大的區域都在低仰角的掃描中較為明顯，所以在圖 15 中低層以至近地面的垂直結構是相當連貫的。圖中可見貼近地面至 500 米高度左右(即在仰角 2.4 度附近)，在 234 至 235 這 1 度方位之間出現非常緊密的徑向速度的方位性梯度，由此可推斷龍捲風渦旋的垂直高度是由近地面至約 500 米高，而在高度超過 500 米的地方出現的徑向速度的方位性梯度相對減弱。憑此推斷在 500 米以上高度的旋轉氣流為衍生出這次龍捲風的中尺度渦旋(Mesocyclone) (文獻[5])。

這龍捲風的中尺度渦旋早在晚上 7:47 已在大嶼山的西南面，距離雷達約 28 公里及離地面高度約 1300 米處觀測得到(圖 16 - 2.4 度仰角的徑向速度場 PPI 圖像)。此外，同一時間 2.4 度仰角的反射率 PPI 圖像中(圖 17)，顯示出在相同位置上出現鈎狀回波，這龍捲風的中尺度渦旋朝東北方向移動，在晚上 8:00 左右靠近大嶼山，及後便開始倚著大嶼山的西北面沿岸移動，直至晚上 8:18 左右略過在赤角島西南面約 2.5 公里的沙螺灣(位置見圖 2)時，引致該處錄得大氣壓力急跌(圖 18)，跌幅約為 1.5 百帕，最低的氣壓讀數維持了約 1 分鐘。大約 7 分鐘後，這渦旋進入赤角島，也引致島上的氣壓計錄得大氣壓力急跌，跌幅同樣為 1.5 百帕，最低的氣壓讀數維持了約 2 分鐘。當這渦旋逐步離開赤角島時，氣壓迅速回升，情形就如同有熱帶氣旋經過一樣。氣壓急跌的現象並未在長洲(位置見圖 2)出現。

另外，我們在晚上 8:31 仰角為 0.6 度的反射率 PPI 圖像中(圖 11)，發現另一鈎狀回波，反射率強度約為 43 dBZ，位置在距離雷達西南面約 35 公里，這回波也是朝東北方向移動並逐漸增強。雷達在晚上 9:10 仰角為 0.6 度的反射率 PPI 圖像中(圖 19)，顯示這鈎狀回波有所

增強，強度約為 54 dBZ。這時回波已移近至距離雷達約 22 公里處，在同一時間仰角為 0.6 度的徑向速度場 PPI 圖像中(圖 20)，可觀察到徑向速度在方位 263(-21.5 米/秒)至 264 度(+18.5 米/秒)之間出現急劇變化，在這 1 度的方位距離內，出現了 40 米/秒的徑向速度的方位性梯度，由此可推斷另一龍捲風渦旋識別標誌已經出現。至於這龍捲風是否已伸延至海面而成為水龍捲，因為沒有收到任何實地觀測報告而未能確定。

5. 臨近預報的探討

根據以上雷達數據的分析，仰角為 0.6 度的徑向速度場 PPI 圖像出現以下的特徵時，預報員便需要警覺到龍捲風有可能已出現：

- (一) 在與雷達距離相若的回波上及在順時針的方位改變下，出現突然的相反方向的徑向速度轉變(由負值至正值，對應正渦度)。
- (二) 在比較近的水平距離(即方位相差少於 3 度)下，最大負值和最大正值構成足夠大的方位性切變(如這個案所計算出的約 40 米/秒)。

除此之外，在反射率 PPI 圖像中出現的鈎狀回波，也是一個很好的特徵來驗證龍捲風的出現。

上述特徵二可由雷達系統所提供的實時計算方位性切變的功能來幫助預報員識別出來。這方位性切變的計算方法是：在與雷達保持固定距離的地方，將毗鄰方位的徑向速度數值相減，從而得到方位性切變數值。雷達系統可以將超過某一預設臨界值的方位性切變的地方在 PPI 徑向速度場圖像上標示出來，並且顯示方位性切變的最大數值。因此，祇要找出一個臨界值，用來偵測龍捲風渦旋那特有的強大方位性切變，雷達系統就能按這臨界值在圖像上顯示出有可能出現龍捲風的地方，作為給預報員一個提示。

我們利用此個案所得的徑向速度數據並選取 15 米/秒/公里以作為方位性切變的臨界值來測試系統的上述功能。圖 21 是一幅在晚

上 8:27 仰角為 0.6 度的 PPI 徑向速度場圖像，圖中紅色框內的陰影部份就是雷達系統標示出超越預定方位性切變臨界值的區域，同時也顯示出方位性切變的最大值為每小時 40 海里。紅色框代表提供自動預警的監察範圍，若惡劣天氣減弱或消失時，紅色框就會自動轉回黑色。這時雷達系統因應強大方位性切變的出現而自動發出了首個預警，較龍捲風出現在赤蠟角島的時間早了約 3 分鐘。

測試中所用的方位性切變的臨界值祇是試驗的起步點，我們仍需收集更多類似個案的數據資料及在不同天氣情況下進行測試，從而找出一個適合在業務上應用的臨界值。

6. 總結

綜合對天氣尺度形勢和雷達數據的分析，大嶼山一帶區域在 5 月 20 日黃昏受到一道十分活躍的季風槽影響，有頻密的強對流天氣及超過一個中尺度渦旋發展，而其中一個中尺度渦旋更發展成龍捲風影響赤 角島。機場多普勒天氣雷達的高分辨率數據提供了此個案的詳細資料，清楚顯示出龍捲風渦旋出現時那特有的強大方位性切變和鈎狀回波。透過這些數據，預報員可清楚觀測到龍捲風渦旋的特徵。

此外，雷達系統的功能包括實時計算方位性切變並在計算所得數值超過預定臨界值時自動發出預警。測試証明它有能力在龍捲風渦旋出現前向預報員及早發出預警。在經過發展軟件及適當選定臨界值後，這功能有條件成為協助預報員監察龍捲風的一件有效工具。

參考文獻

- [1] Fujita, T.T., 1971: Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity. SMRP Res. Paper No.91, University of Chicago, 42 pp.
- [2] Doviak, R.J., and Zrnic, D.S., 1993: Doppler Radar and Weather Observations. Academic Press, 336 pp.

- [3] Shun, C.M., and Lau, S.Y., 2000: Terminal Doppler Weather Radar (TDWR) observation of atmospheric flow over complex terrain during tropical cyclone passages. Proc. SPIE, Vol. 4152, SPIE, 42-53.
- [4] Brown, R.A., Lemon, L.R., and Burgess, D.W., 1978: Tornado detection by pulsed Doppler radar. Mon. Weather Rev. 106, Amer. Meteor. Soc., 29-38.
- [5] Rotunno, R., 1986: Tornadoes and Tornadogenesis. Mesoscale Meteorology and Forecasting, Amer. Meteor. Soc., 415 pp.

表 1 龍捲風等級 (Fujita, 1971)

等級	英里／小時 (公里／小時)	預其破壞	破壞程度
F0	40 – 72 (64-116)	輕微的破壞	煙囪受損，指示牌及窗戶被破壞，樹枝折斷。
F1	73 – 112 (117-180)	中度的破壞	屋頂被揭起，拖車屋被推離地基或翻倒，行駛中的車輛被吹離行車線，樹木折斷。
F2	113 – 157 (182-253)	相當大的破壞	屋頂被扯掉，地基脆弱的房屋翻倒，大樹折斷或被連根拔起。
F3	158 – 206 (254-332)	嚴重的破壞	屋頂和牆壁被扯掉，道路表面被捲起，火車翻倒，大型車輛被拋至空中，森林中大部分樹木被連根拔起。
F4	207 – 260 (333-418)	毀滅性的破壞	堅固的房屋被夷平，小型房屋被捲走，車輛被拋起及解體。
F5	261 – 318 (420-512)	難以置信的破壞	堅固的房屋被吹移至相當遠的距離並解體，車輛可被拋至一百米以外，樹木的表層被扯脫。



圖 1 龍捲風渦旋在赤 角島上的移動途徑

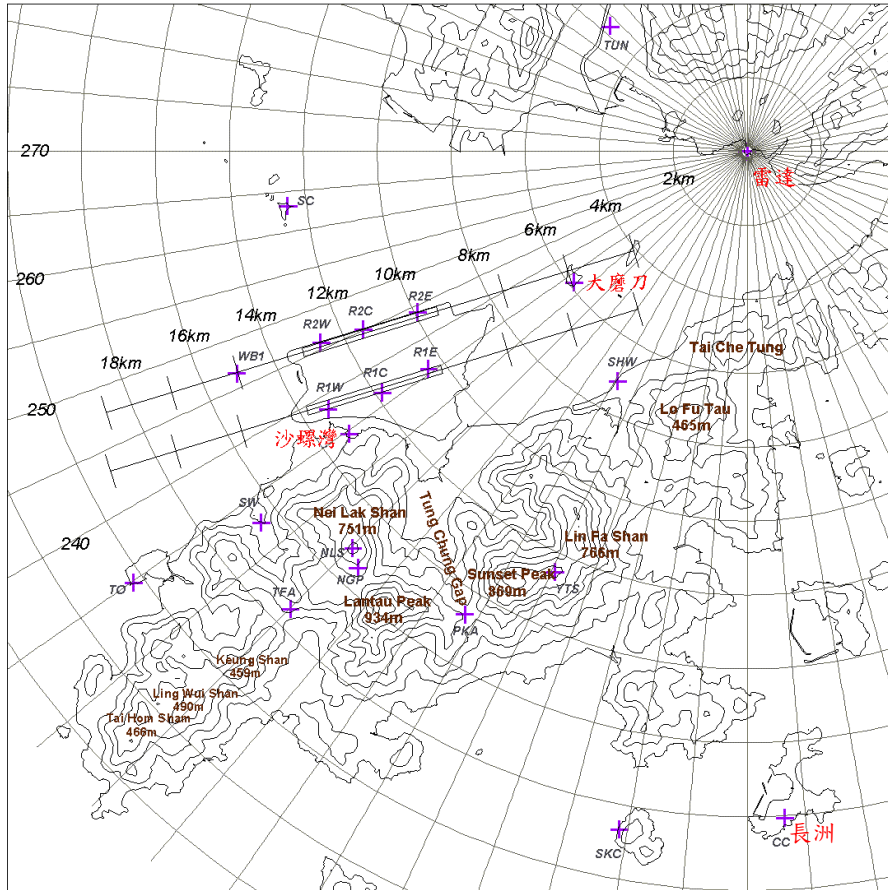


圖 2 機場多普勒天氣雷達、大磨刀島、沙螺灣及長洲的位置示意圖

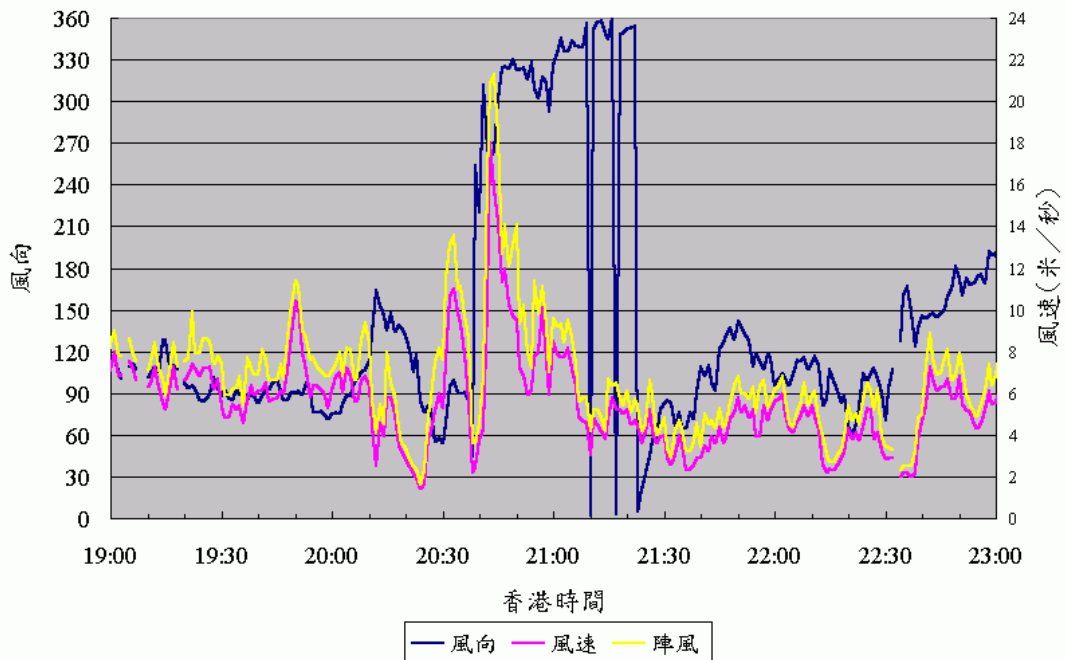


圖 3 大磨刀島風向和風速在 5 月 20 日晚上 7:00 至 11:00 的變化

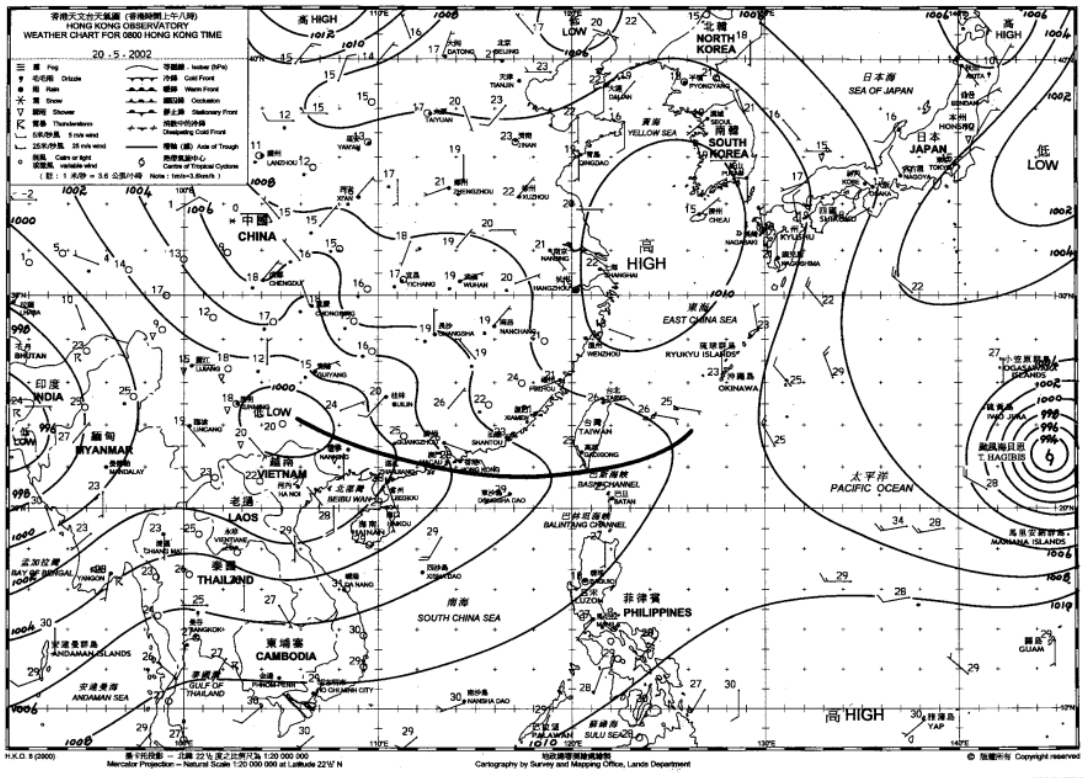


圖 4 5月20日的地面天氣圖

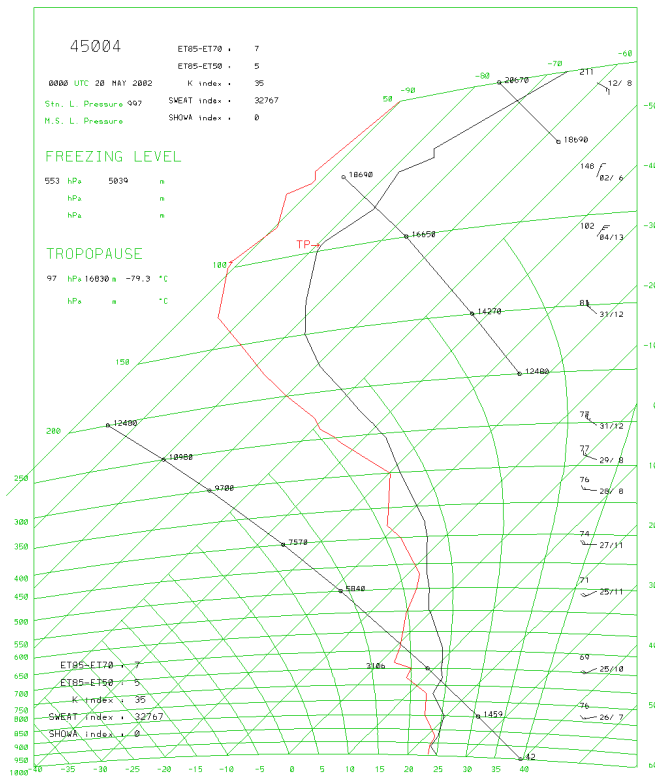


圖 5 5月20日早上00 UTC的溫熵圖

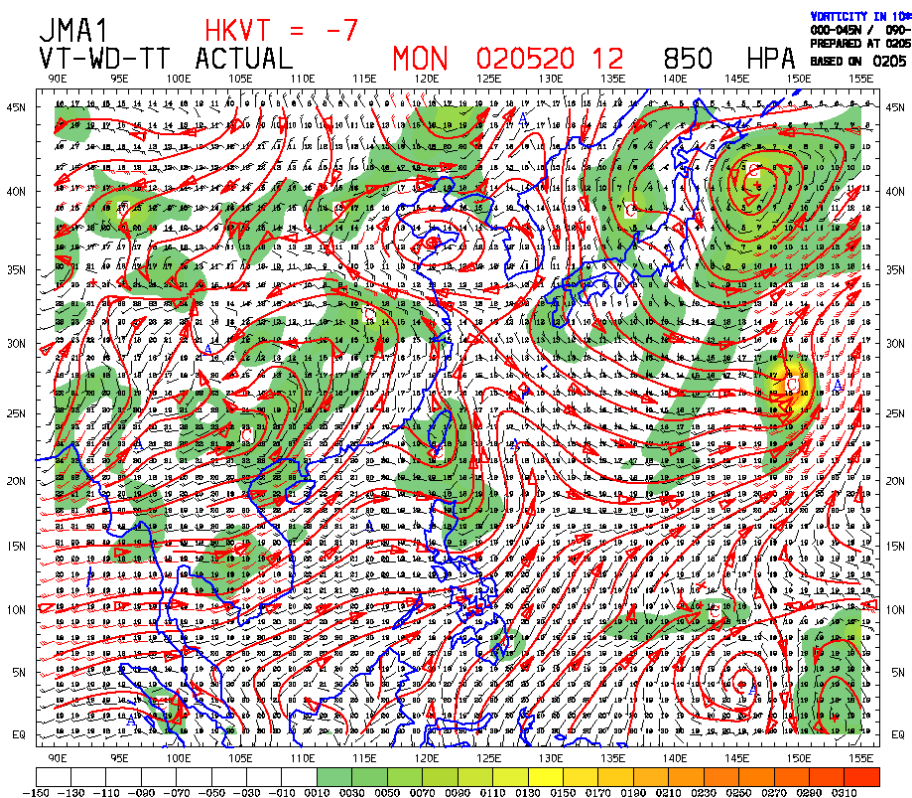


圖 6 5月20日晚上12 UTC的850百帕流線圖

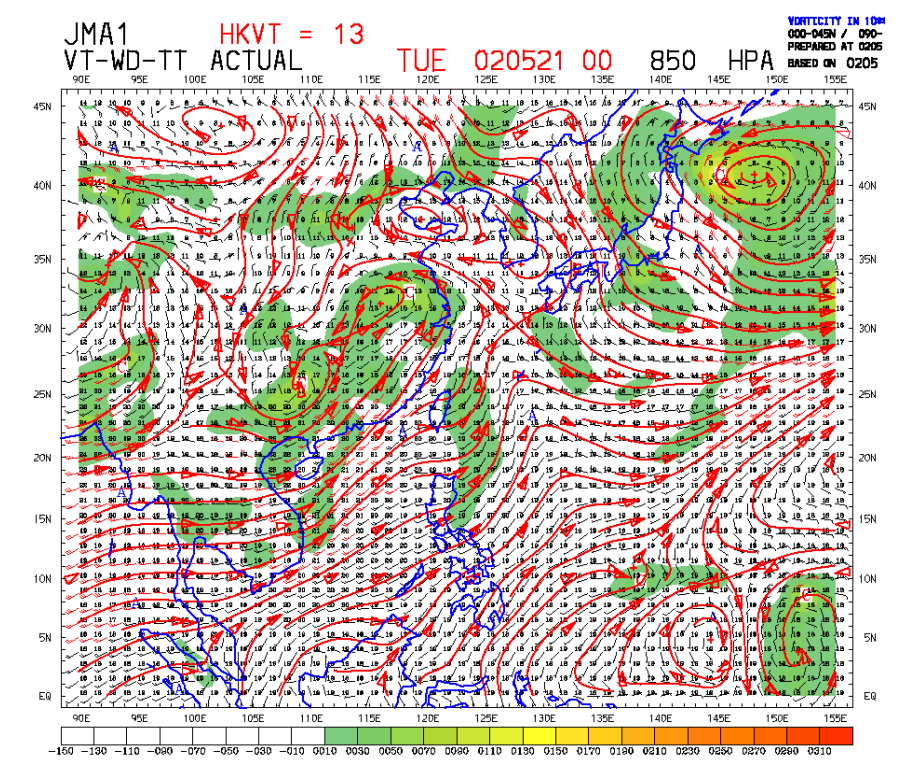


圖 7 5月21日早上00 UTC的850百帕流線圖

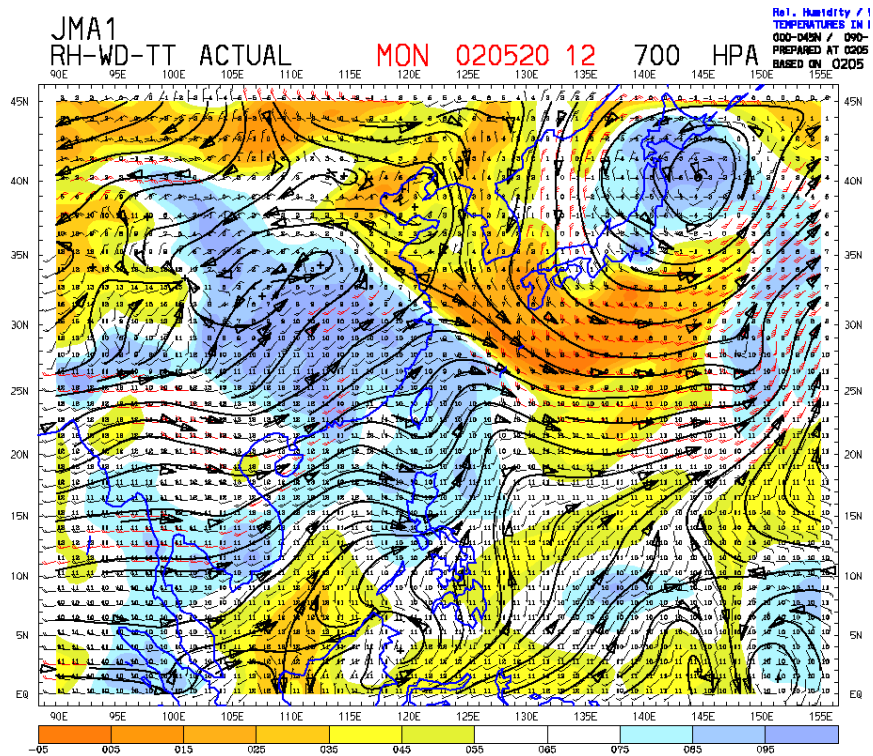


圖 8 5月20日晚上12 UTC的700百帕流線圖

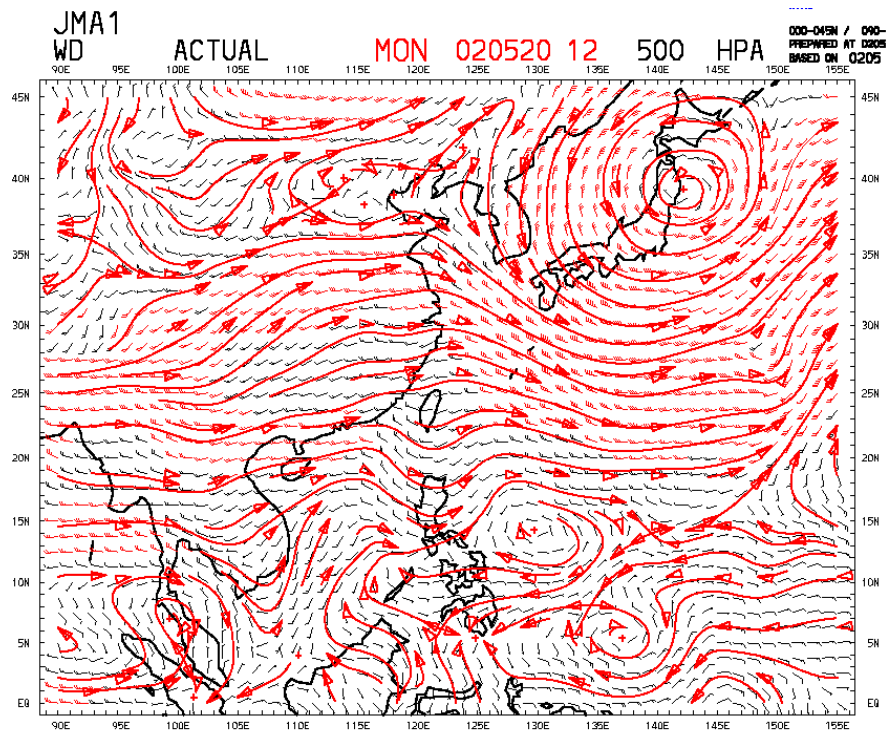


圖 9 5月20日晚上12 UTC的500百帕流線圖

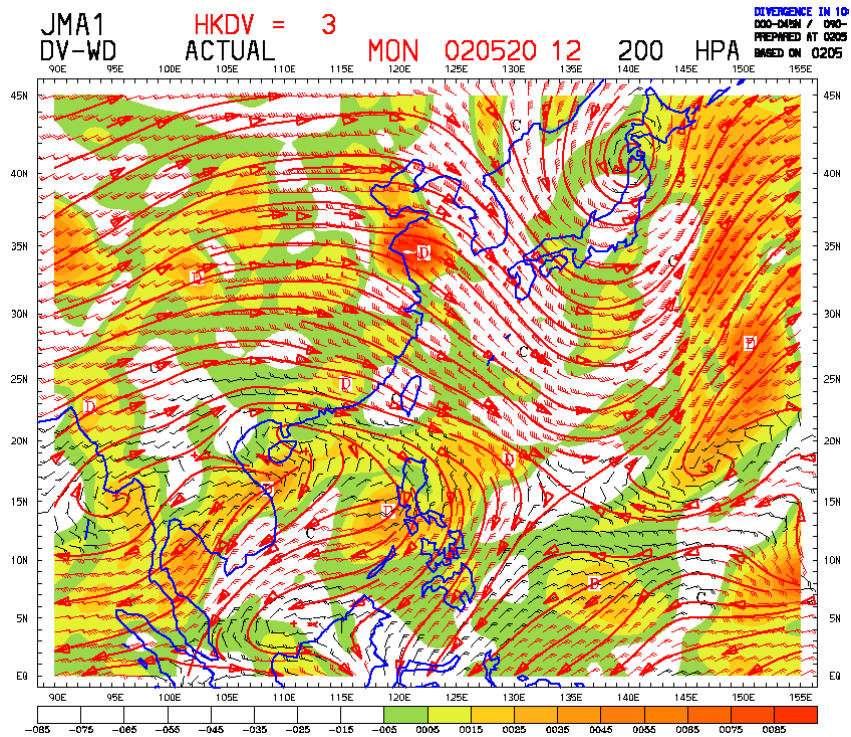


圖 10 5月20日晚上12 UTC的200百帕流線圖

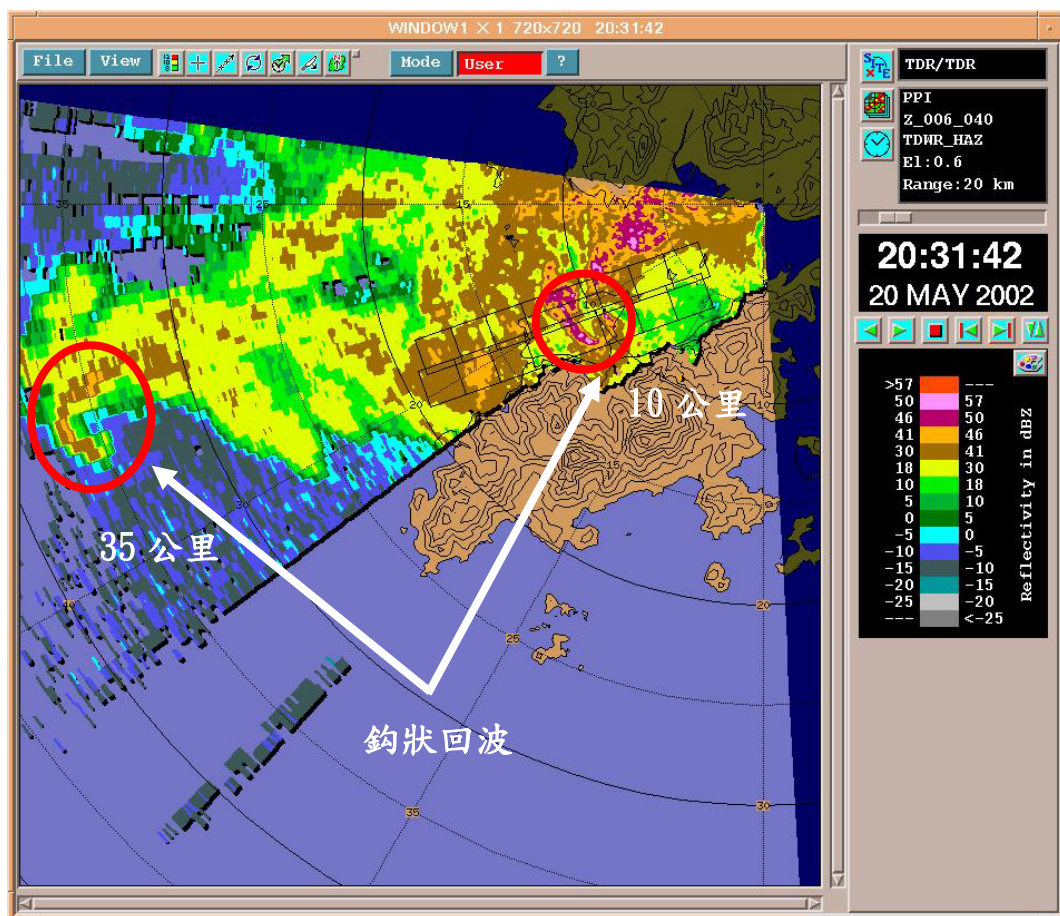


圖 11 雷達在晚上 8:31 分仰角為 0.6 度的反射率(reflectivity) PPI 圖像

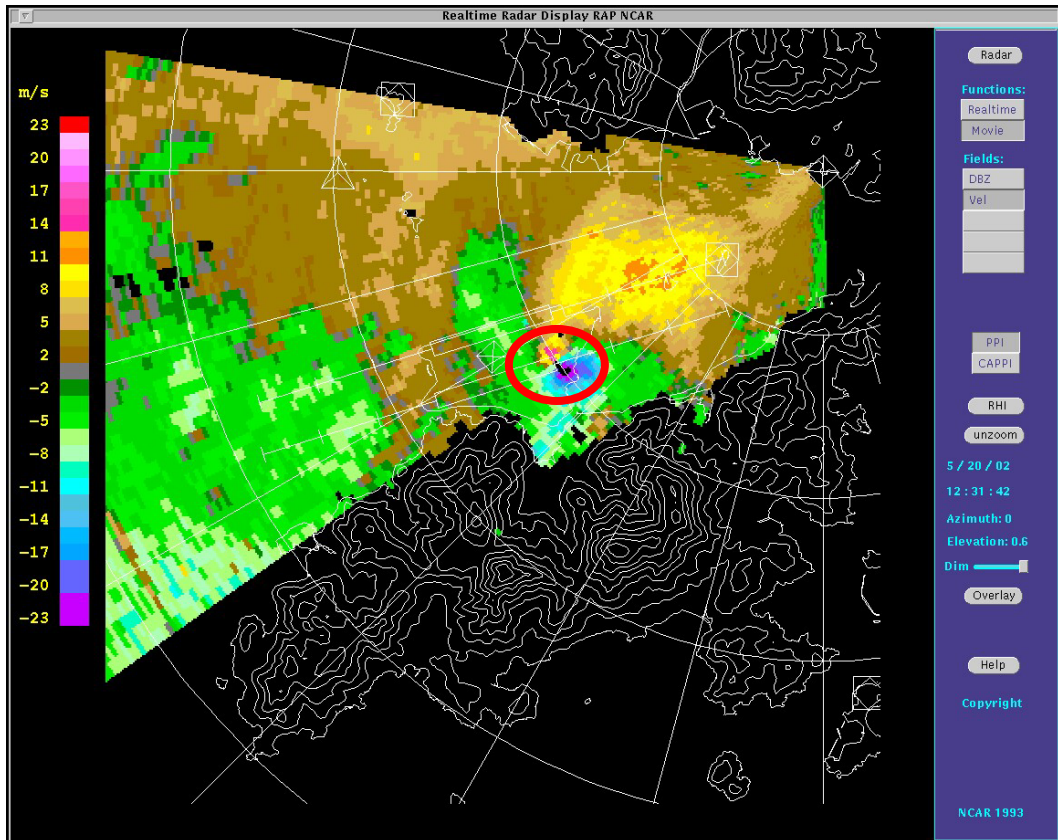


圖 12 晚上 8:31 仰角為 0.6 度的徑向速度場(radial velocity) PPI 圖像

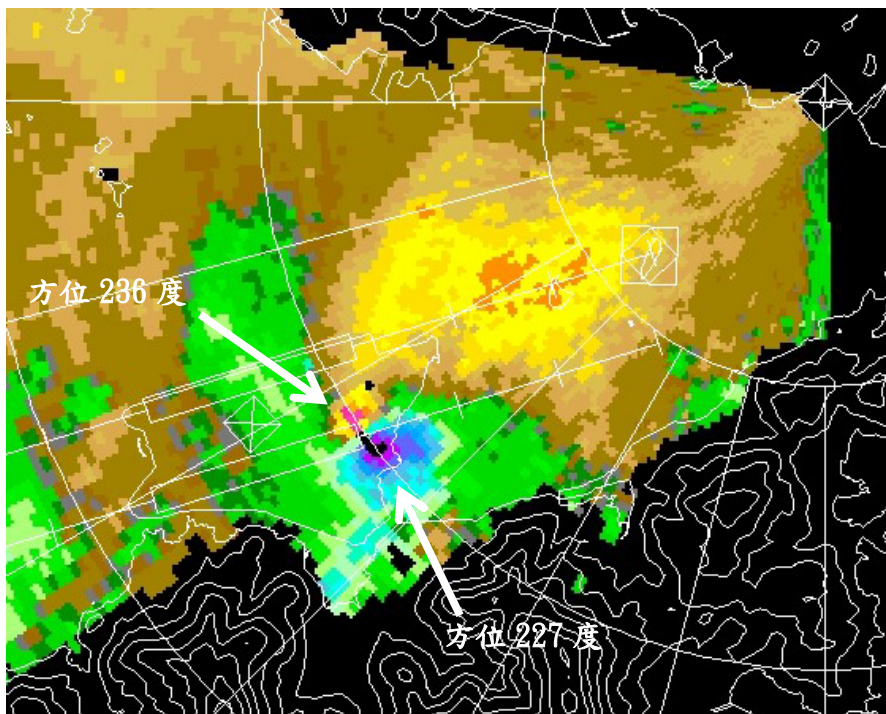


圖 13 將圖 12 紅圈內的回波放大，以顯示出方位 227 至 236 度的位置所在

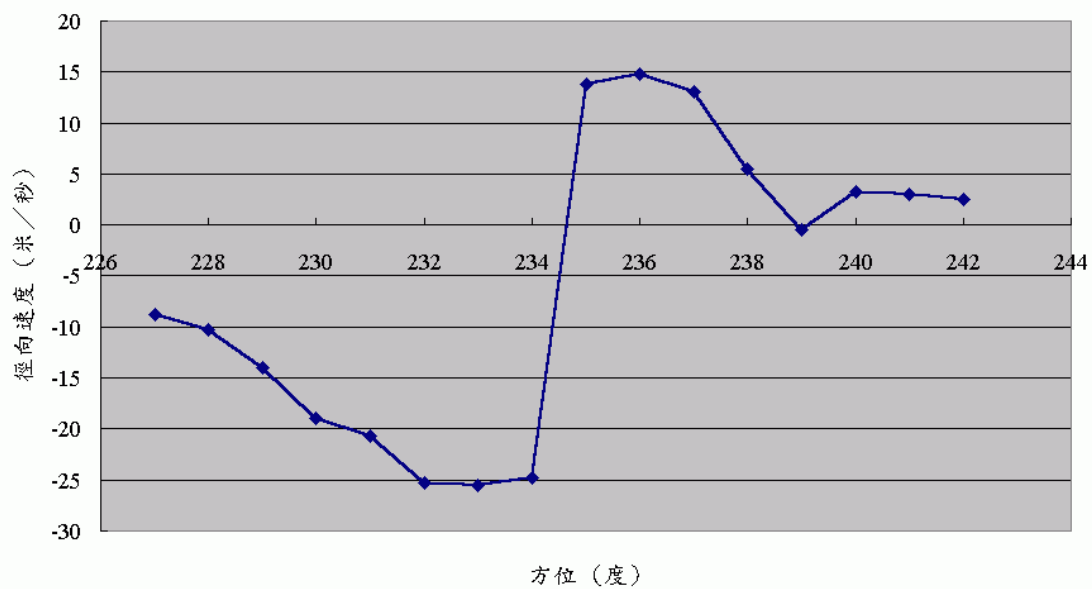


圖 14 顯示在方位 227 至 242 度之間的徑向速度變化

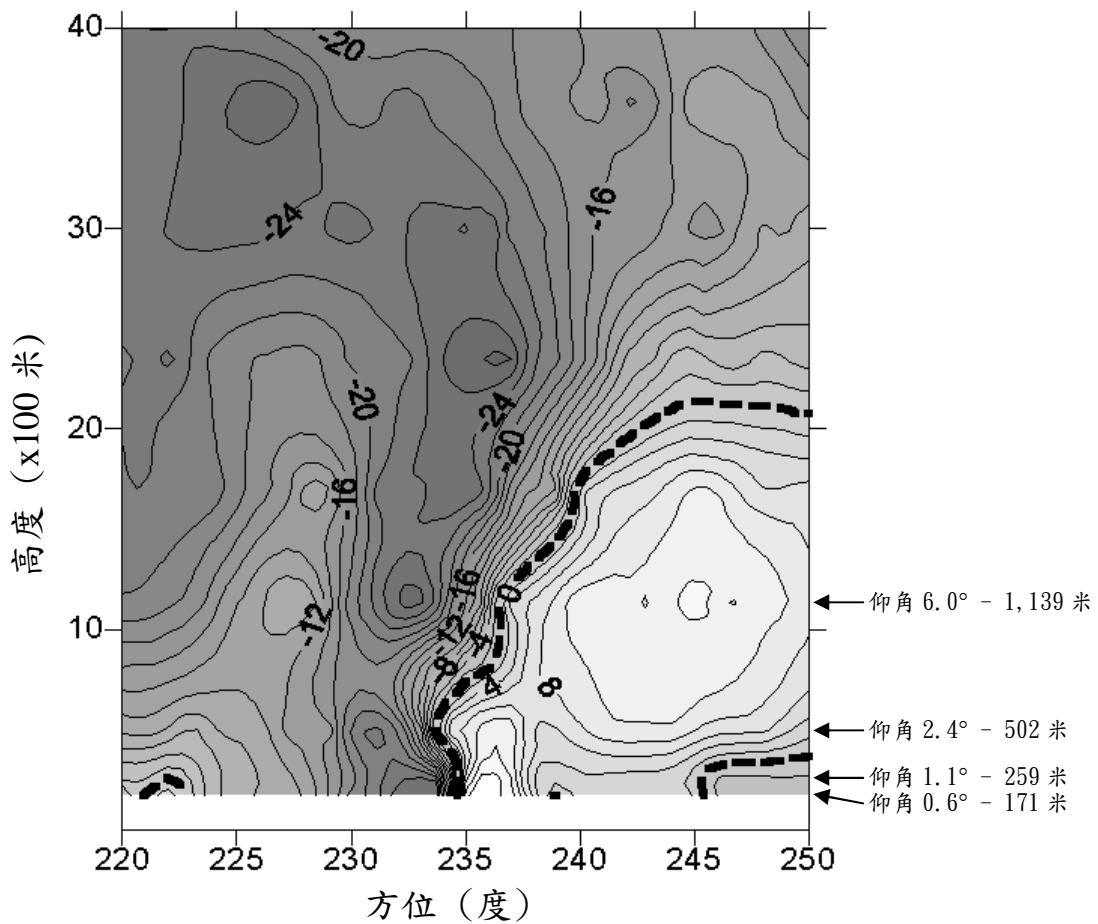


圖 15 晚上 8:31 左右的徑向速度場的垂直剖面

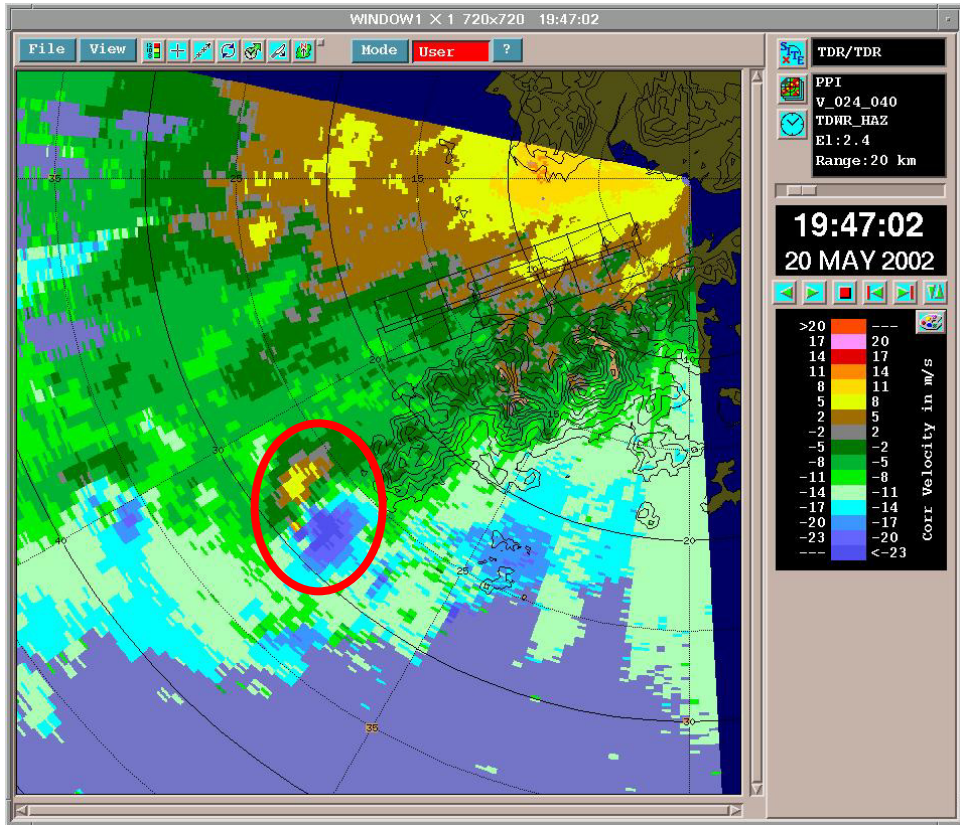


圖 16 晚上 7:47 分仰角為 2.4 度的徑向速度場 PPI 圖像

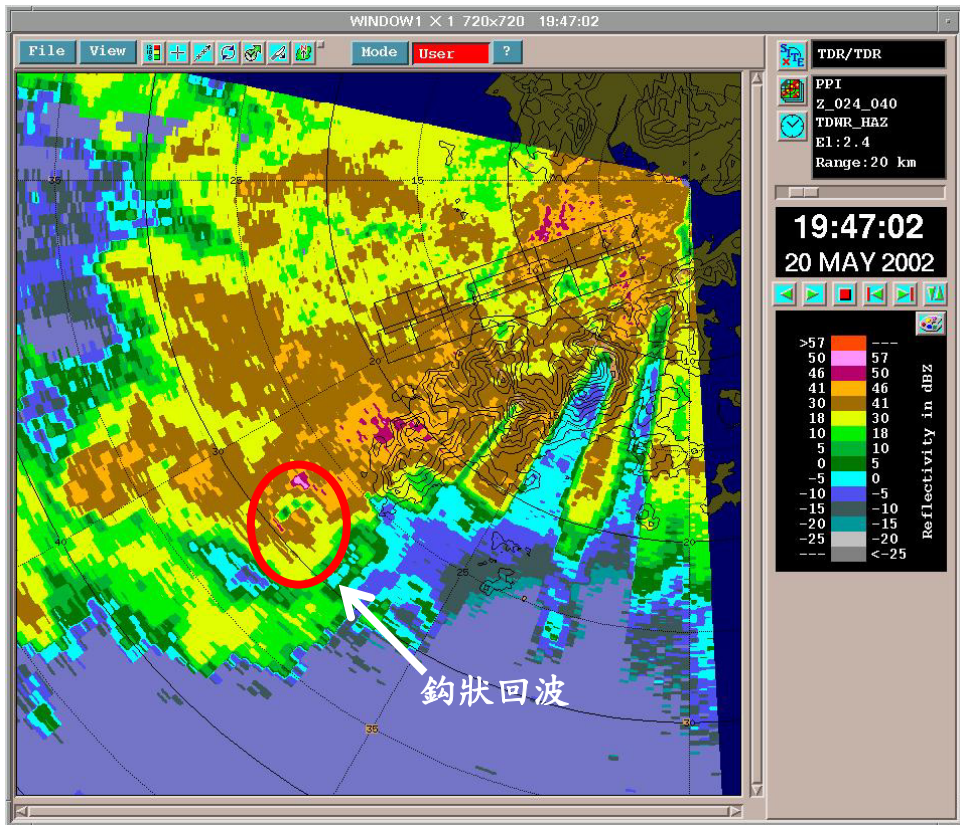


圖 17 晚上 7:47 仰角為 2.4 度的反射率 PPI 圖像

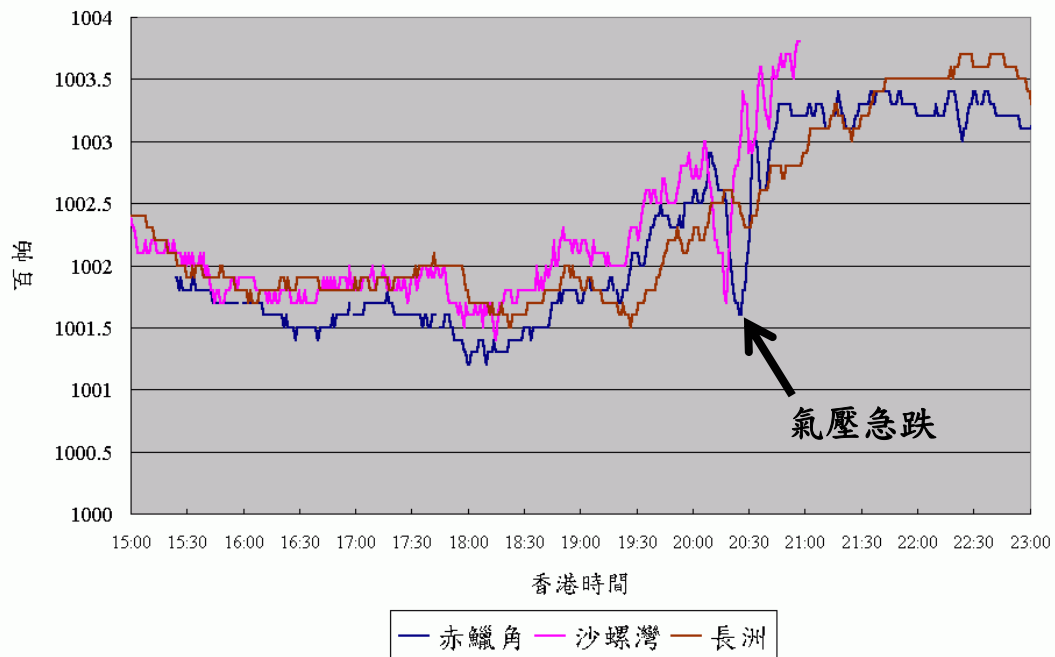


圖 18 5月20日下午3:00至晚上11:00赤鱓角、沙螺灣及長洲的水平面氣壓變化

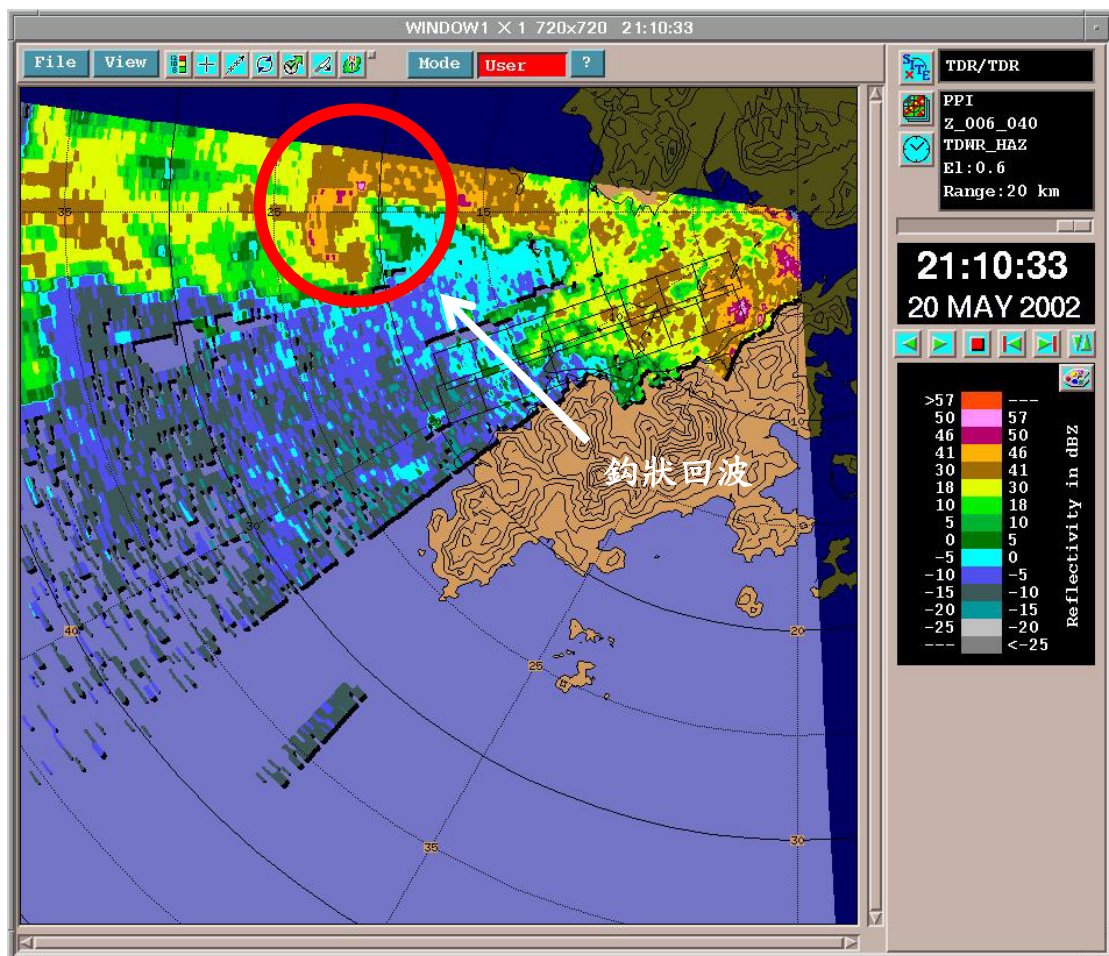


圖 19 晚上9:10仰角為0.6度的反射率PPI圖像

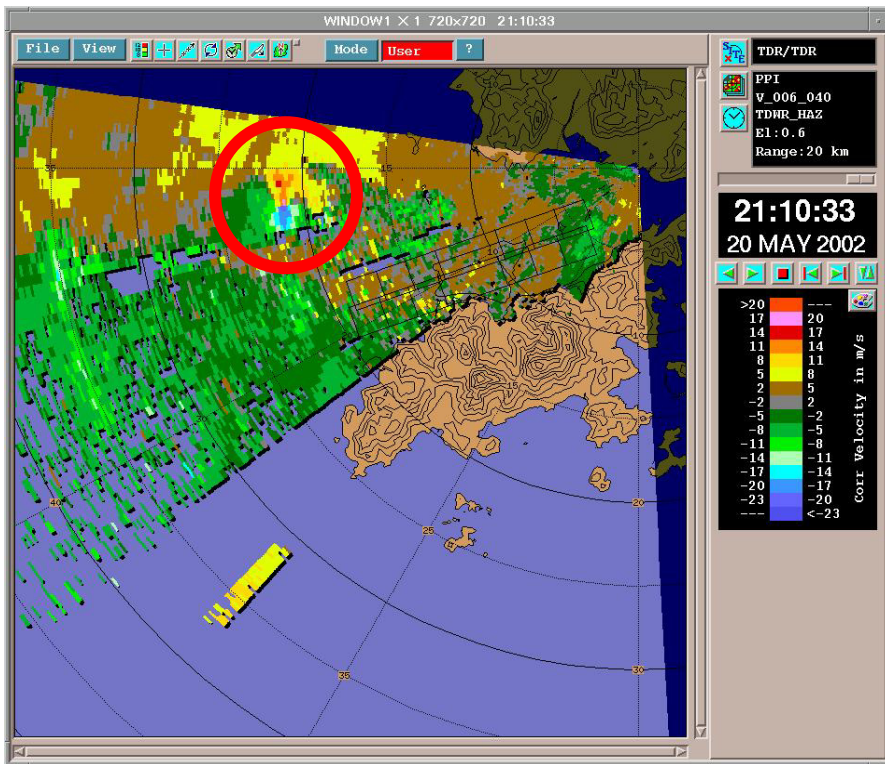


圖 20 晚上 9:10 仰角為 0.6 度的徑向速度場 PPI 圖像

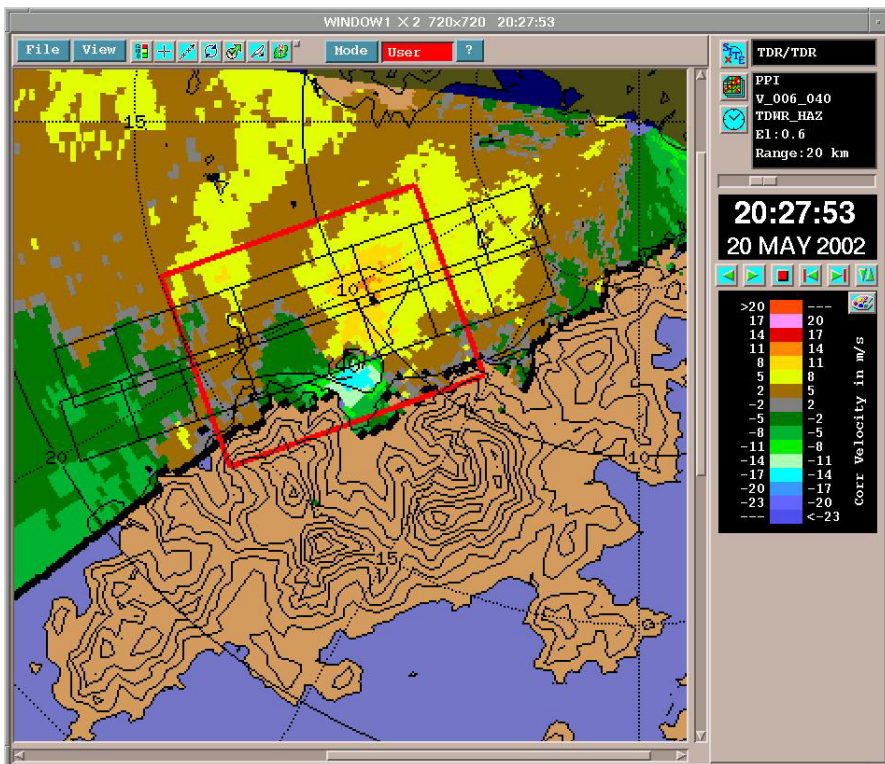


圖 21 晚上 8:27 仰角為 0.6 度的徑向速度場 PPI 圖像。圖中紅色框內的陰影部份標示出超越預定方位性切變臨界值的區域，同時顯示方位性切變的最大值為每小時 40 海里