

## 2013 高雄大樹龍捲風個案分析

### A Case Study of Tornado Occured at Dashu in Kaohsiung, 2013

張怡蕙<sup>1</sup> 劉清煌<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 經濟部水利署

<sup>2</sup> 中國文化大學大氣科學系

#### 摘 要

高雄大樹區龍捲風事件，造成多處電線桿折損倒塌、房屋損毀等災情，並造成 2 人受傷、逾千戶停電。所幸此次龍捲風事件發生在半夜且時間非常短暫，否則後果不堪設想。勘災資料顯示，致災路徑呈東西走向，總長度約 7.5 km、中尺度氣旋平均移速約  $17.4 \text{ m s}^{-1}$ ，龍捲風持續時間約 10 分鐘左右。

綜觀天氣顯示臺灣位處冷鋒前，且具低層暖濕空氣、低層噴流、位處高空槽前等特徵，均利於系統發展。再者，該龍捲風個案主要伴隨冷鋒前之飢線前緣生成的對流雲系所激發而成，屬界面型龍捲風個案。屏東機場探空圖顯示，低層水平風之垂直風切隨高度順轉，顯示有利於氣旋式渦旋發展。七股雷達回波與徑向速度顯示，激發龍捲風之中尺度氣旋具有鈎狀回波、弱回波區、低（上）層徑向速度場輻合（輻散），水平尺度則明顯大於垂直尺度，雷達徑向速度場估計之風切渦度約  $19.06 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。本研究個案生成之可能關鍵為飢線伴隨陣風鋒面提供低層空氣強迫舉升，助於強化中尺度氣旋環流，進而激發龍捲風生成。

**關鍵詞：**中尺度氣旋、龍捲風、鈎狀回波、弱回波區、風切渦度。

#### 前言

龍捲風為劇烈對流系統中產生之空間尺度小、生命期短，但破壞力強的災害性天氣。過去文獻將龍捲風分為超大胞龍捲風（supercell tornado）與非超大胞龍捲風（non-supercell tornado）兩大類（Wakimoto and Wilson 1989）。其中，超大胞生命期較長、更持久且帶來的天氣更劇烈，水平尺度可達 20~40 km 以上、垂直尺度可達 12~15 km，弱回波區（weak echo region, WER）可伸展到整個風暴的一半至三分之二左右的厚度，有時會形成一有界弱回波區（boundary weak echo region, BWER）。生命期則可達數小時以上，甚至可維持 12 小時到 1 天。根據改良藤田級數（Enhanced Fujita Scale, EF Scale）定義出之龍捲風強度分級（EF0 至

EF5）而言，超大胞所激發出的龍捲風強度可強達 EF5，主要發生地位於美國中西部。臺灣龍捲風則屬於非超大胞龍捲風，非超大胞生命期大約為 1~2 小時，激發出之龍捲風平均強度介於 EF0 至 EF1（3 秒平均陣風為  $29.1 \sim 49.2 \text{ m s}^{-1}$ ）之間，最強達約 EF2（3 秒平均陣風為  $49.6 \sim 60.4 \text{ m s}^{-1}$ ）左右。其強度與生命期雖遠比美國中西部大平原的超大胞龍捲風弱，但帶來的瞬間破壞力仍不容忽視。Wakimoto and Wilson（1989）研究結果顯示，非超大胞龍捲風生成主要源於低層輻合區，於輻合區因水平風切不穩定產生一些小渦旋，當持續發展的積雲之上升氣流與渦旋產生耦合，並透過渦流管抽拉作用，則能使得渦旋快速成長而形成龍捲風。

臺灣龍捲風可分成三類，分別為界面型

(如鋒面、飆線等)、積雲型及伴隨颶風生成之龍捲風,其中,絕大多數個案屬界面型,其次為積雲型,少數為伴隨颶風生成。伴隨界面生成之龍捲風,通常發生於4~6月鋒面/梅雨鋒面前緣約50~100公里處之對流胞,該對流胞呈現線狀排列且其移動方向幾乎垂直於界面移動方向,這些對流胞從初生期至成熟期只需1~2小時,龍捲風在對流胞生成過程中即有可能被激發(劉與張2004; Liu and Chang 2007; 劉與蔡 2011)。此類龍捲風生成之有利條件為界面前不穩定的暖濕空氣、較強西南風及界面快速移動,使得界面前緣之對流胞能於短時間內快速成長,甚至伴隨中尺度氣旋。當對流胞接近成熟期時,強烈之舉升作用則可能激發龍捲風(Holle and Majer 1980; Nilton and Bluestein 2000; Simpson et al. 1986; Simpson et al. 1991; Wakimoto and Wilson 1989)。而後隨著對流胞減弱,龍捲風亦跟著消散。但礙於臺灣龍捲風強度與生命期均較美國中西部超大型龍捲風要小,且限於觀測資料與解析度不足,使得可用資料更加侷限,因此對此類龍捲風生成機制瞭解仍很有限,尚待進一步深入研究,以釐清並瞭解綜觀環境特徵及其形成可能機制。

Liu (2010)、張與劉(2016)針對臺灣近18年(1998~2015年)來發生龍捲風個案資料進行統計分析,顯示龍捲風確定案件共103個(水龍捲72個、陸龍捲31個),年發生頻率約5.7個(水龍捲4.0個、陸龍捲1.7個)。就臺灣陸龍捲與水龍捲位置分布圖顯示,南部地區發生頻率最高,達41.7%,有「龍捲風巢」之稱(劉,1996)。其次為東南部地區達20.4%。季節分布顯示,臺灣龍捲風主要發生在5~9月最為顯著,時間分布則以14~17時(LST)最易發生,顯示影響臺灣的龍捲風主要好發於暖季的午後。

雖然影響臺灣的龍捲風,平均生命期約

在10幾分鐘,僅少數個案生命期可達30~40分鐘。龍捲風帶來的災害亦屬小區域範圍,但其瞬間帶來的強大破壞力,除了造成農作物、房屋、樹木、電線桿等毀損,亦可將車輛捲起拋到遠處,造成國家人民的財物損毀外,甚至可將小小的螺絲釘或鐵片捲起並拋出,讓這小小不起眼的物品瞬間轉成為殺人利器,進而對生命安全造成莫大的威脅。因此,龍捲風的影響,事實上遠遠超乎你我的想像,實不容小覷。像2013年4月6日凌晨0時40分(LST)左右發生於高雄大樹區的龍捲風事件,雖然歷時只有短短的10分鐘左右,但帶來的瞬間災害令人悚目驚心,遭龍捲風襲擊的區域滿目瘡痍,多處電線桿折損倒塌、房屋損毀、樹木倒塌、農作物損毀,並造成2人受傷、逾千戶停電。由勘災過程之災損情形顯示,此次龍捲風個案強度較影響臺灣之龍捲風的平均強度要強,為伴隨鋒面前之飆線前緣生成,屬於非超大型之界面型龍捲風。

故本文在此針對高雄大樹龍捲風個案進行相關分析。本文第二節介紹資料來源與研究方法。第三節則進行個案分析,內容包含綜觀天氣分析與高雄大樹龍捲風分析。最後,於第四節進行結果與討論。

## 一、資料來源與研究方法

運用中央氣象局2013年4月5日2000 LST與6日0200 LST東亞地區地面天氣圖,5日2000 LST高空天氣圖(850、700、500及300 hPa),空軍屏東機場(46750)探空觀測資料。ECMWF ERA-interim每6小時一筆再分析資料(1000至1 hPa共37層。解析度為 $0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$ )溫度、比濕及風場,並計算臺灣附近一帶對流可用位能(convective available potential energy, CPAE)與螺旋度(helicity),以利分析綜觀環境特徵條件。

其中,CAPE是用來衡量熱力不穩定之最佳參數,亦為風暴潛在強度的一個重要指標、強對流天氣分析預報的重要參數。當CAPE數值愈大,代表CAPE能量釋放後形成的上升氣流強度愈強,而較強上升氣流的對流系統通常易產生較明顯之致災性天氣,因此,本文運用CAPE( $J kg^{-1}$ )來進行相關分析。公式(Rose et al., 2002)如下:

$$CAPE = g \int_{LFC}^{EL} \frac{\theta(z) - \bar{\theta}(z)}{\bar{\theta}(z)} dz$$

$\theta(z)$ 為氣塊沿濕絕熱線上升時的位溫, $\bar{\theta}(z)$ 為環境位溫、LFC為氣塊的舉升自由對流面高度、EL為氣塊的平衡面高度。

螺旋度則是用來衡量風暴旋轉潛勢,其反映沿著對流風暴低層入流運動方向旋轉的強弱,並用來估算垂直風切變環境下風暴運動所產生的旋轉潛勢。螺旋度愈大,則能維持較持久之強對流雲系。風暴相對螺旋度( $m^2 s^{-2}$ )公式(Davies-Jones et al., 1990)如下:

$$H(z) = - \int_{z_0}^z \left[ (V_h - C) \cdot k \times \frac{\partial V_h}{\partial z} \right] dz$$

其中,C(風暴移動向量)於本文暫不估算(數值以零帶入相關計算),因此,計算出的數值僅以螺旋度稱之。通常取 $z - z_0$ (氣層厚度)為3 km,因此,本研究計算地面至700 hPa之螺旋度。 $V_h$ 則為水平速度。

本文高雄大樹龍捲風個案分析,使用中央氣象局接收日本MTSAT之紅外線色調強化雲圖(4月6日0001至0101 LST,間距約每30分鐘一張),另外運用相對應之中央氣象局雷達整合回波圖,以及南部地區地面觀測站之風場分布圖,進一步瞭解本研究個案相關資訊。

運用4月6日七股雷達站每7.5分鐘間距觀測資料平面位置顯示圖(plan-position indicator, PPI)與距離高度顯示圖(range-height indicator, RHI)之回波與徑向速度(經反摺)進行中尺度分析,以瞭

解激發本文龍捲風之中尺度氣旋水平與垂直結構。另亦透過徑向速度場繪製出風切線,並運用徑向速度場訂出中尺度氣旋中心位置隨時間的變化來估計中尺度氣旋平均移速。

此外,使用NCAR SOLO軟體,經由雷達回波與徑向速度場交叉比對,定出中尺度氣旋所在位置,並透過SOLO軟體獲取最大(MAX)與最小(MIN)徑向速度值,及其所在方位角與距離雷達之距離。並運用下列公式,計算中尺度氣旋之風切渦度( $\times 10^{-3} s^{-1}$ ):

$$\zeta = \left| \frac{(VR_{MAX} - VR_{MIN})}{\Delta s \times 10^3} \right| \times 10^3$$

$$\Delta s = \frac{r_{MAX} + r_{MIN}}{2} \times (\alpha_{MAX} - \alpha_{MIN}) \times \frac{\pi}{180}$$

其中,VR為徑向速度( $m s^{-1}$ ), $\Delta s$ 為最大正負徑向速度間之距離(km),r為距離雷達之距離, $\alpha$ 為方位角。

## 個案分析

### (一)綜觀天氣分析

圖1為2013年4月5日2000 LST與6日0200 LST地面天氣圖的時序變化。地面天氣圖顯示,有一低壓中心位於東海,並朝東北東方向往日本九州一帶靠近,冷鋒由此低壓中心向西南延伸經大陸華南沿海至海南島北邊一帶。從時序變化顯示,冷鋒正從北部沿海處逐漸通過臺灣地區。鋒後存在一明顯大陸高氣壓,且由等壓線密集程度顯示此高壓伴隨較強勁之東北風。龍捲風發生前(5日2000 LST),臺灣位處冷鋒前緣,主要盛行西南風,而這樣的大氣環境特徵配置顯示,臺灣逐漸處於愈來愈不穩定的狀態,再加上冷暖界面明顯的冷鋒影響下,提供有利對流系統發展之機制。龍捲風發生後(6日0200 LST),冷鋒已移至嘉義臺南一帶。

4月5日2000 LST 高空綜觀形勢顯示，如圖2所示。850 hPa 高空天氣圖（圖2a）顯示，低壓中心位於東海，鋒面由此中心向西南延伸至大陸華南沿海一帶。臺灣主要盛行強勁西南風，風速可達  $15 \text{ m s}^{-1}$ 。700 hPa 高空天氣圖（圖2b）顯示，槽線由大陸東北地區一帶向偏南方向延伸至大陸華南地區。臺灣盛行強勁西南西風，風速高達  $22.5 \text{ m s}^{-1}$ 。500 hPa（圖2c）高空天氣圖顯示有較明顯且深的東亞主槽且臺灣位處高空槽前，利於對流系統發展。臺灣高空以強勁西南西風為主。300 hPa（圖2d）槽線因大氣斜壓性之故，較500 hPa 位置向西偏移。臺灣風場則以強勁西北西風為主。從地面至500 hPa 天氣圖顯示，臺灣一帶風場隨高度增強且風向隨高度順轉。

圖3為透過 ERA-interim 再分析資料繪製4月5日2000 LST與6日0200 LST 臺灣一帶之925 hPa 溫度、比濕及風場分布圖。資料顯示於高雄大樹龍捲風發生約5小時前（圖3a），臺灣大部分地區位在相對較暖且濕度較高的區域，大致上溫度為  $19.5 \sim 21.0^\circ\text{C}$ 、比濕於中南部與東南部地區可達  $14 \times 10^{-3} \text{ kg kg}^{-1}$ 。到了6日0200 LST 時（圖3b），臺灣一帶變得更為潮濕，除了北部、東北部及東部局部地區之外，其他地區比濕可達  $14 \times 10^{-3} \text{ kg kg}^{-1}$  以上，且由等比濕線分布狀態，顯示有濕舌影響著臺灣。溫度分布狀態則顯示，此時於高屏地區溫度略升，溫度達  $21.0 \sim 22.5^\circ\text{C}$ 。資料結果顯示，龍捲風發生前至發生後，臺灣均位處在較暖且潮濕的狀態下，利於對流系統發展。

接下來透過 CAPE 與螺旋度這兩個常運用在預報強對流系統之氣象參數來進行相關診斷分析。圖4為4月5日2000 LST 臺灣一帶之 CAPE 分佈圖，顯示南部近海 CAPE 最大值可達  $800 \sim 1000 \text{ J kg}^{-1}$ ，即上升氣流之最大垂直速度約為  $40 \sim 44.7 \text{ m s}^{-1}$ 。高

雄大樹一帶也有  $200 \sim 600 \text{ J kg}^{-1}$ （上升氣流之最大垂直速度約為  $20.0 \sim 34.6 \text{ m s}^{-1}$ ）換言之，當 CAPE 數值愈大，其能量釋放後形成的上升氣流強度就愈強。就強對流系統之上升速度通常超過  $30 \text{ m s}^{-1}$ （俞等2006）來說，是有機會使強對流系統發展起來。圖5為5日2000 LST 與6日0200 LST 臺灣及其附近一帶螺旋度分佈狀態。龍捲風發生前（5日2000 LST，圖5a），顯示最強螺旋度位在臺灣海峽，最大螺旋度可達  $200 \sim 225 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ 。南部近海之最大螺旋度可達  $50 \sim 100 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ ，發生龍捲風事件之高雄一帶也有  $25 \sim 50 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ ，代表具有風暴旋轉潛勢，也就是有利於中尺度渦旋發展。到了龍捲風發生後（6日0200 LST，圖5b），臺灣海峽一帶顯著之螺旋度區域之中心位置往東往南移至彰化雲林近海處，強度雖較上一個時間明顯減弱，螺旋度亦較為減緩。此時，高雄大樹之螺旋度約為  $25 \sim 50 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ ，南部近海一帶可達  $75 \sim 125 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ 。

圖6為屏東機場4月5日0800與2000 LST 探空圖。0800 LST 風場顯示，1000至近850 hPa 風速偏弱且底層風向並無隨高度順轉的狀態，但到了2000 LST時，風速不僅明顯增強，且低層水平風之垂直風切隨高度順轉（1000至850 hPa），代表有利於氣旋式渦旋發展。風場隨高度之變化則顯示底層有較顯著之垂直風切，這表示底層有著較多的水平渦度，且透過上升運動的傾斜（tilting）作用可將水平渦度轉變為垂直渦度，即上層無顯著風切的狀態之下，渦度只能源自於低層，再透過輻合作用增強垂直渦度，亦即為大氣渦度方程中傾斜項（tilting term）及輻散項（divergence term）之貢獻。許多文獻（e.g. Rotunno and Klemp 1985）亦有相關說明，即在強垂直風切下，中層中尺度氣旋發展之垂直渦度主要是透過水平渦度傾斜（tilting）成垂直渦度，然後藉由伸展

（stretching）增大。Klemp（1987）指出，當風暴中的上升氣流與環境場垂直風切氣流相互作用時，水平渦度傾斜為垂直渦度，使得於風暴中之上升氣流左右兩側各形成反氣旋式及氣旋式渦旋。當環境場風向隨高度順轉（即垂直風切方向隨高度順轉）之狀態下，於風暴上升氣流右側形成向上之氣壓梯度力，強化氣旋式渦旋之上升氣流，使得氣旋式渦旋得以進一步發展。左側之反氣旋式渦旋處則形成向下氣壓梯度力，下沉氣流則抑制了反氣旋式渦旋發展。此外，於925至850 hPa 已能明顯看到有強風軸，且風速達  $15 \text{ m s}^{-1}$  以上，顯示有低層噴流，到了700 hPa 風速更強，可達  $25 \text{ m s}^{-1}$ 。0800 LST 於低層（850至700 hPa）則有沉降逆溫的情形，0800 LST 較2000 LST 明顯。空氣潮濕程度而言，2000 LST 相較0800 LST 較為潮濕。因此，就兩個時段來比，2000 LST 是更有利於劇烈天氣系統、中尺度氣旋之發展。

## （二）高雄大樹龍捲風分析

高雄大樹龍捲風事件發生於2013年4月6日0時40分至0時50分（LST）。圖7為6日0001至0101 LST 約每半小時之紅外線色調強化雲圖與相對應時間之雷達整合回波圖（0001 LST之衛星資料是衛星開始掃描的時間，掃到臺灣地區時需要約10分鐘左右，因此，衛星雲圖之實際時間約為0011 LST，其餘依此類推），分別代表龍捲風發生前、發生時及發生後。6日0001 LST 之紅外線色調強化雲圖顯示，南部海上至南臺灣一帶有強對流雲系，此外對相對應之雷達整合回波圖中可看到該區有一狹窄帶狀組織之對流雲系從南部地區往東南部海上延伸，激發龍捲風之對流雲系（以黑色空心圓標示）即在該狹窄帶狀對流雲系中。再加上相對應在雷達整合回波圖呈現狹窄帶狀組織之對流雲系，判斷該系統應為颶線

（squall line）。且由雲圖隨時間變化（0001至0101 LST）可清楚看到該對流雲系之形狀依照 Parker and Johnson（2000）對於層狀雲區在颶線的分佈位置將線狀或弧狀的對流類型分為三種來說，此對流雲系應屬於前引層狀型（Leading stratiform）。

接著透過雷達整合回波圖來看中尺度氣旋隨時間之變化（圖7）。於龍捲風發生前（雷達整合回波時間為6日0015 LST），激發龍捲風之對流雲系（以黑色空心圓標示）位在高屏沿海處，且位處狹窄帶狀組織之對流雲系範圍內。龍捲風發生時（6日0045 LST），激發龍捲風之對流雲系（以黑色空心圓標示）已移至高雄大樹一帶，回波值依舊維持在50 dBZ以上。到了6日0115 LST 時之雷達整合回波顯示，該對流雲系已逐漸減弱。

圖8為4月6日0000至0100 LST 地面觀測站之風場分佈圖。0000 LST（龍捲風發生前）觀測資料顯示，由臺南（西南西風）及高雄（南南西風）沿海地區之風場分佈顯示，高雄一帶存在一風切帶。0100 LST（龍捲風發生後）地面風場顯示，橘色空心圓一帶呈現氣旋式風場。對應圖7中之雷達整合回波中中尺度氣旋移動方向及其位置隨時間之變化顯示，此橘色空心圓一帶應為中尺度氣旋通過之區域。因此，進一步來看該區域三個測站（美濃、三地門、尾寮山）於4月5日1800 LST至6日0600 LST 之風場與溫度場（觀測資料完整度低）變化情形（圖9）。地面觀測資料顯示，美濃站由原本的南南東風（5日2100 LST）轉成為吹東北風（5日2300 LST）、東風（6日0100 LST，見圖8）。三地門由原本的東北東風（5日1900至2100 LST）依序轉成為吹東南東風（5日2200至2300 LST）、南風（6日0000 LST）、北北西風（6日0100 LST）。尾寮山於5日2300 LST以前都是吹南南西風，到了6日0100 LST 產生明顯風變，風

向轉成為北北東風，6日0300 LST轉成為北北西風。由三測站之觀測資料顯示，於6日凌晨0100 LST該區域確實有氣旋式風場出現，且與前一個時間來比有明顯風變。溫度變化方面，只能看到三測站整體溫度隨時間變化均為下降的趨勢，6日0000 LST氣溫不降反升的原因（尤其三地門升溫較為顯著，其次為尾寮山），由於觀測資料非常有限，故無法進一步了解其可能原因。

接著，透過更詳細且高時間頻度之雷達觀測資料進行相關分析，以瞭解龍捲風發生前、發生時及發生後，其母雲隨時間從高雄一帶海上逐漸移至高雄陸地之變化情形。圖10~圖15為6日0015~0053 LST（0040~0050 LST為龍捲風發生時間）每7.5分鐘之七股雷達 $0.5^\circ$ 仰角PPI回波與徑向速度場。0015 LST（龍捲風發生前25分鐘，圖10）時，由徑向速度場可看到高雄一帶海上有一正負徑向速度對比明顯之區域（位在七股雷達站於方位角約 $177^\circ$ 、距離雷達約50 km處），也就是激發龍捲風之對流雲系。由正負徑向速度之配置及其相對位置呈現不對稱的狀態可知，此時該對流雲系已呈現逆時鐘方向旋轉，最大正徑向速度達 $15\text{ m s}^{-1}$ 以上、最大負徑向速度達 $-21\text{ m s}^{-1}$ 以上。另外，風切線（紅色虛線）則運用徑向速度之分佈繪製而成，此風切帶即為颯線所在位置，且主要較顯著之回波也位在風切線一帶。從圖中可以看到激發龍捲風之對流雲系就位處在颯線上，也因為此氣旋式渦旋改變了風切線原本之位置，使得風切線呈現扭曲的狀態。0023 LST（龍捲風發生前17分鐘，圖11）時，較上一個時間朝偏東方向移動、逐漸靠近高雄陸地。此時正負徑向速度值差異略微減小，最大負徑向速度約為 $-15\sim-18\text{ m s}^{-1}$ ，正徑向速度最大值則跟前一個時間差不多，可達 $15\text{ m s}^{-1}$ 以上。0030 LST（龍捲風發生前10分鐘，圖12）時，本研究之中

尺度氣旋已抵達高雄陸地，回波值依舊達50 dBZ以上，徑向速度場變得相對較緊縮，最大負徑向速度值有增強趨勢。0038 LST（龍捲風發生前2分鐘，圖13）時，該對流雲系持續往高雄內陸移動並往高雄一帶逐漸靠近，其正負徑向速度之對比明顯變大且明顯變得更緊縮、範圍變得更窄小，最大正徑向速度約為 $18\sim 21\text{ m s}^{-1}$ ，最大負徑向速度約為 $-18\sim-21\text{ m s}^{-1}$ 。0045 LST（龍捲風發生時，圖14）時，該對流雲系已移至高雄大樹一帶，其正負徑向速度最緊縮、範圍最窄小，最大正負徑向速度值則與0038 LST時差不多。到了0053 LST（龍捲風發生後，圖15）時，無論是回波與正負徑向速度都是明顯減弱，正負徑向速度範圍擴大且對比明顯變小。

藉由圖10~圖15繪製風切線的方式將4月5日2352 LST至6日0053 LST每個時間點之風切線繪製在圖16，並將本研究之中尺度氣旋中心位置隨時間之變化以藍色叉號標示在圖16中，其中底圖為4月6日0045 LST（龍捲風發生時）之徑向速度場。該風切線是由雷達徑向風場之正負徑向速度繪製而成，每條風切線代表由4月5日2352 LST至6日0053 LST之變化情形。其中，由圖10~圖15之中尺度氣旋的徑向速度分布與圖16之風切線與中尺度氣旋中心位置對應，可看到激發龍捲風之對流系統就位在風切線上，其中心位置就為在風切線扭轉處，可顯見風切線隨時間受到中尺度氣旋的影響呈現扭曲變化的形狀。對應4月6日0000至0100 LST地面觀測站之風場分佈圖（圖8）顯示，臺南高雄沿海一帶之風場狀態顯示該區確實存在一風切。再者，由圖16風切線所在位置以及風切線一帶之徑向速度場隨時間之分佈變化顯示，以風切線分界之最大與最小徑向速度的對比隨著靠近龍捲風發生時間愈來愈明顯，代表該風切線之強度發展愈來愈強。此外，運用中尺度氣旋

中心位置（藍色叉號標示）隨時間之變化估計出中尺度氣旋平均移速約為 $17.4\text{ m s}^{-1}$ 。

接著來看中尺度氣旋之雷達觀測資料進行相關分析，以瞭解龍捲風發生前、發生時，其母雲的變化情形。圖17為6日0038 LST（龍捲風發生前2分鐘）七股雷達 $0.5^\circ$ 仰角PPI回波與徑向速度場，黑色點位為龍捲風軌跡。回波場資料顯示，激發龍捲風生成之對流雲系回波強度可達50 dBZ以上。徑向速度場可看到激發龍捲風之對流雲系之最大負徑向速度為 $-15\sim-18\text{ m s}^{-1}$ 、最大正徑向速度為 $18\sim 21\text{ m s}^{-1}$ 。此時中尺度氣旋已非常接近龍捲風發生處。且由正負徑向速度之配置及其相對位置呈現不對稱的狀態可知，該對流雲系呈現氣旋式方向旋轉。圖18為6日0045 LST（龍捲風發生時），該對流雲系有狀似鈎狀回波結構特徵。此外，龍捲風生成於該對流雲系行進方向的右側後方處。徑向速度場則顯示，中尺度氣旋之最大負徑向速度為 $-18\sim-21\text{ m s}^{-1}$ 、最大正徑向速度為 $18\sim 21\text{ m s}^{-1}$ 。此時透過中尺度氣旋之正負徑向速度顯示為不對稱的狀態，顯示亦有速度場輻合。且正負徑向速度場的範圍變得最為緊縮。到了0053 LST（龍捲風發生後）時，回波明顯減弱，正負徑向速度場之對比明顯變小且範圍擴大，此時最大正徑向速度為 $15\sim 18\text{ m s}^{-1}$ 、最大負徑向速度為 $-9\sim-12\text{ m s}^{-1}$ （圖19）。

進一步分析龍捲風發生前與發生時之中尺度氣旋垂直結構的變化。龍捲風發生前（0038 LST），選定 $151^\circ$ 方位角RHI回波場之垂直剖面圖（圖20）顯示距離雷達約55~56 km之近地面有一弱回波區，該對流雲系之水平尺度大於垂直尺度，垂直發展高度約7 km。徑向速度場之垂直剖面圖可看到近地面有一明顯入流，距離雷達56~59 km處之徑向速度可達 $-14\sim-18\text{ m s}^{-1}$ ，且底層呈現速度場輻合。上層之徑向速度場則有速度

場輻散。龍捲風發生時（0045 LST）則選定 $145^\circ$ 方位角之垂直剖面來看中尺度氣旋結構（圖21）。回波場垂直剖面圖顯示可能為弱回波區處因缺資料故無法進行確認。但由其他方位角之回波場垂直剖面圖顯示有弱回波區（圖未在文中呈現）。該對流雲系之水平尺度大於垂直尺度，垂直發展高度約7 km左右。徑向速度場之垂直剖面圖可看到近地面距離雷達60~61 km左右有一明顯入流，徑向速度可達 $-18\sim-22\text{ m s}^{-1}$ ，且低層速度場輻合較龍捲風發生前明顯。上層呈現速度場輻散相較於龍捲風發生前亦較顯著。

## 二、 結論與討論

高雄大樹區龍捲風事件，雖然發生時間僅短短10分鐘左右，但龍捲風襲擊的區域滿目瘡痍、令人怵目驚心，多處電線桿折損倒塌、房屋損毀、樹木倒塌、農作物損毀等災情，並造成2人受傷、逾千戶停電。所幸該事件發生在半夜且時間非常短暫，否則後果不堪設想。本研究個案主要發生在春季冷鋒通過臺灣時，冷鋒前緣颯線上之對流雲系所激發之龍捲風事件，屬於界面型龍捲風個案。

本研究個案之綜觀環境特徵為臺灣位處冷鋒前，且具低層暖濕空氣、低層噴流、位處高空槽前等特徵，均利於系統發展。再者，該龍捲風個案主要伴隨冷鋒前之颯線前緣生成之對流雲系所激發而成。文獻顯示，颯線前緣通常有發展良好的陣風鋒面（gust front），而陣風鋒面這樣的外流邊界與低層暖濕偏南風之環境風場形成水平風切不穩定，不僅提供低層空氣強迫舉升，並驅使外流邊界前緣產生渦層（vortex sheet）擾動，有助於強化該中尺度氣旋環流，甚至激發出龍捲風（Lee and Wilhelmson 1997）。屏東機場探空資料顯示，低層水平風之垂直風切隨高度順轉，代表有利於氣旋式渦旋發展。



即當 1. 低層有顯著垂直風切時，可透過上升運動之傾斜作用將水平渦度轉成為垂直渦度；2. 垂直風切方向隨高度順轉時，所產生之穿過上升氣流的水平氣壓梯度加強了風暴右側之上升運動，利於風暴右側之氣旋式渦旋發展 (Klemp 1987)。此外，南部近海 CAPE 最大值可達 800~1000 J kg<sup>-1</sup>，即上升氣流之最大垂直速度約為 40~44.7 m s<sup>-1</sup>。高雄大樹一帶為 200~600 J kg<sup>-1</sup> (換算成最大垂直速度約為 20.0~34.64 m s<sup>-1</sup>)。即在強對流系統之上升速度通常超過 30 m s<sup>-1</sup> (俞等 2006) 來說，CAPE 隨著時間變化有加大趨勢，顯示該區是有機會使得強對流系統發展起來的。龍捲風發生地區及其近海之螺旋度為 75~125 m<sup>2</sup> s<sup>-2</sup>，代表具有風暴旋轉潛勢，有利於中尺度氣旋發展。雷達回波與徑向速度場之水平與垂直結構顯示，本研究之中尺度氣旋具有鈎狀回波、弱回波區、低層徑向速度場輻合、上層速度場輻散，且中尺度氣旋之水平尺度明顯大於垂直尺度，垂直發展高度約 7 km 左右。研究結果顯示，本研究個案生成可能關鍵為總線伴隨陣風鋒面 (扮演外流邊界角色)，提供低層空氣強迫舉升，助於強化中尺度氣旋環流，甚至激發龍捲風生成。

本文探討 2013 年 4 月 6 日高雄大樹龍捲風事件之中尺度氣旋 (母雲) 風切渦度隨時間變化分布圖 (各層隨時間變化之風切渦度的相對應距地高度與詳細資料請參見表 1)，如圖 22 所示。其中，龍捲風發生時間為 0040~0050 LST。從龍捲風發生前 32 分鐘 (0015 LST) 時，低層 (仰角 1.5°) 風切渦度為 3.99 × 10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>，明顯較前一個時間減弱。0023 LST 時，風切渦度為 3.67 × 10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>，較前一個時間略微減弱。到了 0030 LST (龍捲風發生前 10 分鐘) 時，風切渦度增強為 5.57 × 10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>。0038 LST 時 (龍捲風發生前 2 分鐘)，風切渦度持續增強，

數值為 8.78 × 10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>。龍捲風發生時 (0045 LST)，風切渦度達最大值 (15.79 × 10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>)。龍捲風發生後 (0053 LST)，風切渦度明顯減弱 (9.05 × 10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>)。中層 (仰角 2.4°) 風切渦度隨著時間變化趨勢與 1.5° 仰角呈現類似的結果。風切渦度最大值亦發生在龍捲風發生時，風切渦度值為 19.06 × 10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>，龍捲風發生後逐漸減弱。此外，中層最大風切渦度強度較低層 (仰角 1.5°) 強。上層 (仰角 3.4°) 風切渦度於 0023 至 0038 LST 隨著時間變化呈現持續增強趨勢，並於龍捲風發生前 (0038 LST) 之中尺度氣旋風切渦度達最大值 (12.65 × 10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>)，龍捲風發生時則略微減弱 (10.76 × 10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>)。至於龍捲風發生後 (0053 LST) 由於中尺度氣旋迅速減弱，在無法定其相關位置以致於無法估計其風切渦度。

上述資料統整顯示高雄大樹龍捲風發生前 17 分鐘 (0023 LST) 至發生時 (0045 LST) 之風切渦度，低層 (仰角 1.5°) 風切渦度值增強幅度約 4.3 倍，中層 (仰角 2.4°) 風切渦度值增強幅度約 3.1 倍。上層 (仰角 3.4°) 於龍捲風發生前 17 分鐘至龍捲風發生前 2 分鐘時，風切渦度值增強幅度約 1.5 倍，增強幅度明顯較中低層小。換言之，中尺度氣旋的風切渦度於低層增強速度最快。此外，於 0023~0030 LST 時，上層風切渦度均大於中低層風切渦度。0038 LST 時，中低層風切渦度明顯增強，甚至中層風切渦度值超越上層。到了龍捲風發生時 (0045 LST)，中低層渦度均大於上層，且較上層大約 1.5~1.7 倍。顯示與龍捲風發生前至發生時，最大風切渦度值由原先的上層往下降至中低層。

此外，運用簡化之渦度方程式

$$\frac{d\zeta}{dt} \approx -\zeta(\nabla \cdot \vec{V}) \quad (1)$$

$$\text{積分可得 } \zeta \approx \zeta_0 \exp(-\nabla \cdot \vec{V} \times t) \quad (2)$$

轉換為簡化之散度方程式

$$-\nabla \cdot \vec{V} \approx \frac{\ln(\zeta/\zeta_0)}{t} \quad (3)$$

其中， $\zeta$  為風切渦度， $\zeta_0$  為初始風切渦度， $t$  為經過時間， $-\nabla \cdot \vec{V}$  為散度。本個案運用表 1 中 0038~0045 LST 之風切渦度變化，計算而得之輻合值約為 1.3 × 10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup> (仰角 1.5°)，較傳統的輻合值 (10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>) 大了兩個數量級。

另與迷你超大胞龍捲風 (2015 年 7 月 20 日臺南新化龍捲風)、伴隨一般鋒面生成之 2015 年 5 月 24 日臺南下營龍捲風之中尺度氣旋的風切渦度 (張與劉，2016) 進行相關比較。分析結果顯示，3 個個案之最大風切渦度皆出現在龍捲風發生時。本研究個案之中尺度氣旋的風切渦度最大值 (19.06 × 10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>) 介於迷你超大胞 (37.26 × 10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>) 與伴隨一般鋒面生成之龍捲風個案 (11.36 × 10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>) 之間。龍捲風發生前至龍捲風發生時之風切渦度成長幅度亦為迷你超大胞最為顯著，其次為本研究個案。整體而言，3 個龍捲風個案之中尺度氣旋在生成龍捲風前至龍捲風生成時，其風切渦度於低層增強速度最快。

過去迄今，臺灣地區於暖季經常有劇烈對流系統發展並受其影響，但並非每次劇烈對流系統都會激發龍捲風生成。且由本文件隨鋒前總線生成之龍捲風個案，以及迷你超大胞龍捲風個案 (張與劉，2016) 研究結果均顯示，龍捲風生成有其可能關鍵。再者，本文主要透過觀測資料進行相關個案分析，但就目前高時空解析度之觀測資料不足的狀態下，僅能針對所看到的現象說明可能激發龍捲風之關鍵因素，但無明確證據可證實關鍵因素在激發龍捲風個案當中所扮演的實際角色為何。因此，期望未來能持續累積相關臺灣龍捲風個案分析，並進行相關統計、分類及定義各類型之可能關鍵激發因子。另為瞭解可能關鍵因子所扮演的角色，將進一步考

慮數值模擬的可行性。

## 致謝

本研究得以順利完成要特別感謝中央氣象局提供寶貴氣象資料，感謝張智昇先生、楊菁華小姐的協助。感謝中國文化大學大氣科學系提供資料分析所需的設備，以及中央氣象局 1042153C，科技部 MOST 104-2625-M-034-001、MOST 105-2625-M-034-003，陽明山國家公園管理處 1050703 的支持。

## 參考文獻

- 林定宜，2012: 臺灣北部對流風暴關於「風暴相對螺旋度」、「對流可用位能」及「能量-螺旋度指數」之應用研究。《氣象學報》，49，P69~92。
- 林博雄、曾忠一，1994: GMS 地球同步衛星影像數位資料在雲分類上的應用。《大氣科學》，22，P319~335。
- 俞小鼎、姚秀萍、熊廷南、周小剛、吳洪、鄧北勝、宋燕，2006: 多普勒天氣雷達原理與業務應用。《氣象出版社》，314頁。
- 張怡蕙，2017: 臺灣地區龍捲劇烈對流系統之研究。中國文化大學地學研究所博士論文，300頁。
- 張怡蕙、劉清煌，2016: 2015年7月20日臺南新化龍捲風個案分析。《大氣科學》，44，P237~264。
- 劉昭民 1996: 台灣的氣象與氣候。《常民文化》，365頁。
- 劉清煌、張智昇，2004: 2003 年伴隨梅雨鋒面所發生之水龍捲及龍捲風。《第八屆全國大氣科學學術研討會》，桃園龍潭，2004年5月17日至20日。
- 劉清煌、蔡沛旻，2011: 宜蘭南澳水龍捲之分析。《大氣科學》，39，P117-146。
- Bluestein, H. B., 1985: The formation of a "landspout" in a "broken-line" squall line in Oklahoma. Preprints, 14th Conf. on Severe

Local Storms, Indianapolis, IN, *Amer. Meteor. Soc.*, 447-450.

Davies-Jones, R. P., D. Burgess, and M. Foster, 1990: Test of helicity as a tornado forecast parameter. Preprints, 16th Conf. on Severe Local Storms, Kananaskis Park, AB, Canada, *Amer. Meteor. Soc.*, 588-592.

Fujita, T., 1965: Formation and steering mechanisms of tornado cyclones and associated hook echoes. *Mon. Wea. Rev.*, **93**, 67-78.

Holle, R. L., and M. W. Majer, 1980: Tornado formation from downdraft interaction in the FACE mesonetwork. *Mon. Wea. Rev.*, **108**, 1010-1028.

Klemp J. B. 1987: Dynamics of tornadic thunderstorms. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **19**, 369-402.

Knupp K. R., R. L. Clymer, and B. Geerts, 1996: Preliminary classification and observational characteristics of tornadic storms over northern Alabama. Preprints, 18th Conf. on Severe Local Storms, San Francisco, CA, *Amer. Meteor. Soc.*, 447-450.

Lee, B. D., and R. B. Wilhelmson, 1997: The numerical simulation of non-supercell tornadogenesis. Part I: Initiation and evolution of pretornadic misocyclone circulations along a dry outflow boundary. *J. Atmos. Sci.*, **54**, 32-60.

Liu, C.-H., 2010: A waterspout observed under weak southwesterly flow near Kauhsiung on 7 July 2010. *Third SoWMEX/TIMREX Science Workshop*, 3-5 November 2010, Taipei, Taiwan.

\_\_\_\_\_, and C. -S. Chang, 2007: A study of 2007-04-17 Tainan tornado. *Conf on Mesoscale Meteorology and Typhoon in East Asia (ICMCS-VI)*, 6-8 November, 2007, Taipei, Taiwan.

Nilton, O. R., and H. B. Bluestein, 2000: A simple theory for waterspout, *J. Atmos. Sci.*, **58**, 927-932.

Parker, M. D., R. H. Johnson, 2000: Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 3413-3436.

Rose, S. F., P. V. Hobbs, J. D. Locatelli, and M. T. Stoelinga, 2002: Use of a mesoscale mode 1 to forecast severe weather associated with a cold front aloft. *Wea. Forecasting*, **17**, 755-773.

Rotunno, R., and J. B. Klemp, 1985: On the rotation and propagation of simulated supercell thunderstorms. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 271-292.

Simpson, J., B. R. Morton, M. C. McCumber, and R. S. Penc, 1986: Observations and mechanisms of GATE waterspouts. *J. Atmos. Sci.*, **43**, 753-782.

\_\_\_\_\_, G. Roff, B. R. Morton, K. Labas, G. Dietachmayer, M. McCumber, and R. S. Penc, 1991: A Great Salt Lake waterspout. *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 2741-2770.

Suzuki, O., H. Niino, H. Ohno, and H. Nirasawa, 2000: Tornado-producing mini supercells associated with typhoon 9019. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 1868 - 1882.

Wakimoto, R. M., H. V. Murphey, D. C. Dowell, and H. B. Bluestein, 2003: The Kellerville tornado during VORTEX: Damage survey and doppler radar analyses. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 2197-2221.

\_\_\_\_\_, and C. -H. Liu, 1998: The Garden City, Kansas, storm during VORTEX 95. Part II: The wall cloud and the tornado. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 393-408.

\_\_\_\_\_, and J. W. Wilson, 1989:

Non-supercell tornadoes. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 1113-1140.

Weisman, M. L., and J. B. Klemp, 1982: The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy. *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 504-520.

表 1 2013 年 4 月 6 日 0008 至 0053 LST，中尺度氣旋於 1.5°、2.4°及 3.4°仰角之正負徑向速度 (VR)，距地高度 (h)、最大正負徑向速度間之距離 (Δs) 及風切渦度 (ζ) 隨時間之變化一覽表。

LST	0008		0015		0023		0030		0038		0045		0053	
仰角	1.5°		1.5°		1.5°		1.5°		1.5°		1.5°		1.5°	
VR(m s <sup>-1</sup> )	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.
		10.0	-31.8	11.0	-20.0	14.5	-14.5	16.5	-17.5	22.8	-18.5	29.8	-17.5	18.0
h (km)	1.28		1.27		1.30		1.34		1.47		1.55		1.64	
Δs (km)	4.4		7.8		7.9		6.1		4.7		3.0		3.3	
ζ (×10 <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> )	9.58		3.99		3.67		5.57		8.78		15.79		9.05	

LST	0008		0015		0023		0030		0038		0045		0053	
仰角	2.4°		2.4°		2.4°		2.4°		2.4°		2.4°		2.4°	
VR(m s <sup>-1</sup> )	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.
		16.0	-24.3	18.5	-19.5	25.8	-17.5	29.8	-17.5	23.3	-13.5	32.8	-4.5	25.8
h (km)	2.05		2.03		2.08		2.15		2.35		2.47		2.63	
Δs (km)	4.3		4.2		6.9		6.3		2.8		2.0		2.2	
ζ (×10 <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> )	9.43		9.00		6.24		7.56		13.13		19.06		13.16	

LST	0008		0015		0023		0030		0038		0045		0053	
仰角	3.4°		3.4°		3.4°		3.4°		3.4°		3.4°		3.4°	
VR(m s <sup>-1</sup> )	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.
		16.0	-21.0	18.5	-20.0	26.3	-16.5	37.3	-12.5	28.3	-7.5	25.3	4.0	-
h (km)	2.87		2.84		2.93		3.17		3.37		3.50		-	
Δs (km)	5.1		4.2		5.2		4.7		2.8		2.0		-	
ζ (×10 <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> )	7.30		9.21		8.27		10.69		12.65		10.76		-	

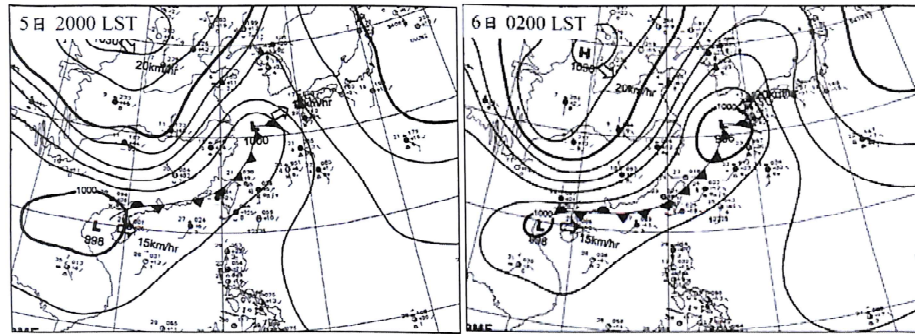


圖1 2013年4月5日2000 LST與4月6日0200 LST地面天氣圖。

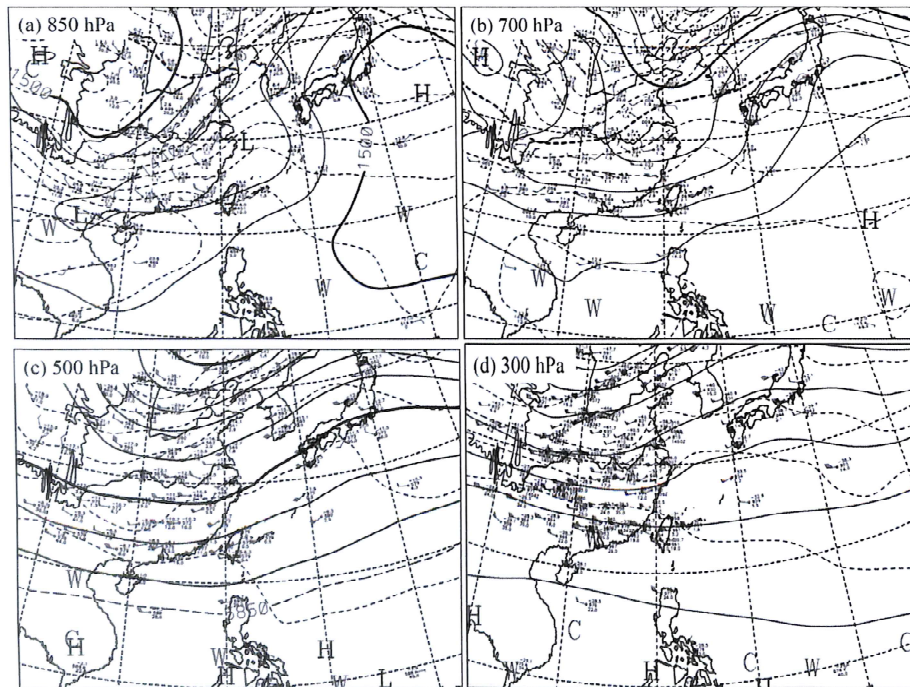


圖2 2013年4月5日2000 LST (a) 850、(b) 700、(c) 500 及 (d) 300 hPa 中央氣象局天氣分析圖。實線為等高線（間距為30 gpm），虛線為等溫線（間距為3°C），L為低壓、H為高壓、C為冷心、W為暖心。

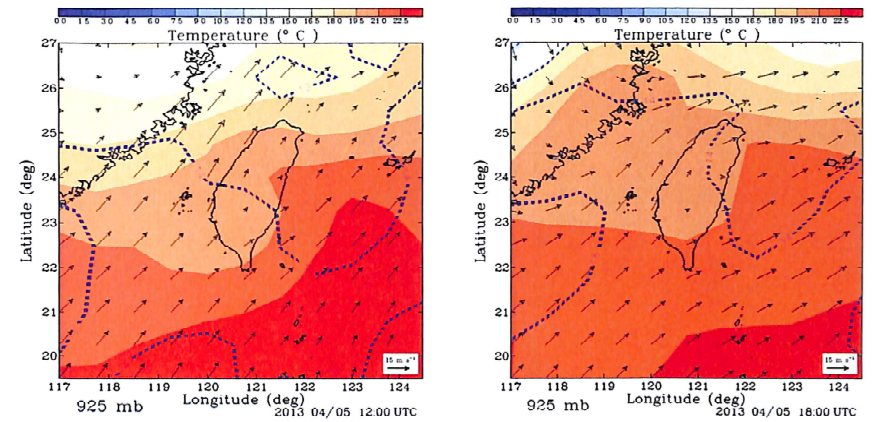


圖3 2013年4月5日2000 LST與4月6日0200 LST ERA-interim 再分析資料之925 hPa 溫度、比濕（虛線）及風場分佈圖。比濕單位為  $\times 10^{-3} \text{ kg kg}^{-1}$ ，間距為  $2 \times 10^{-3} \text{ kg kg}^{-1}$ 。

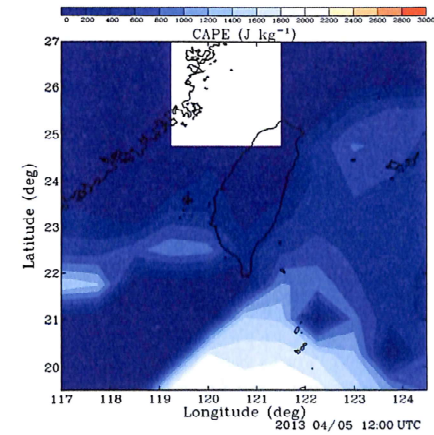


圖4 2013年4月5日2000 LST ERA-interim 再分析資料繪製之 CAPE 分佈圖。



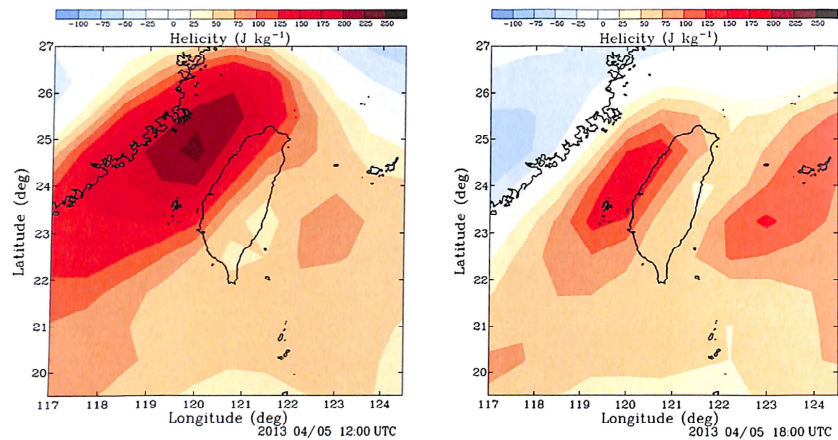


圖 5 2013 年 4 月 5 日 2000 LST 與 6 日 0200 LST ERA-interim 再分析資料繪製之螺旋度分布圖。

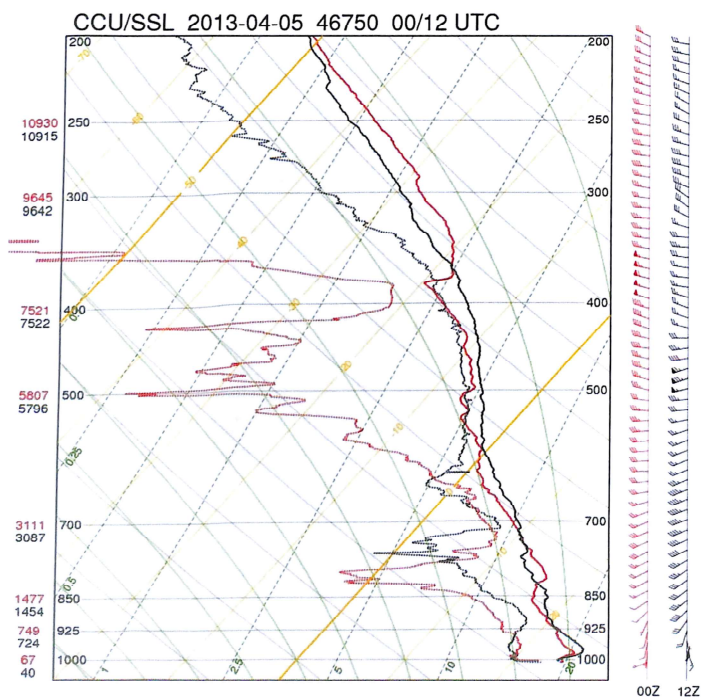


圖 6 2013 年 4 月 5 日 0800 (紅色) 與 2000 (黑色) LST 屏東機場探空圖。溫度線與露點溫度分別以紅(黑)色實線與虛線代表之。風標長桿與短桿分別代表風速  $5 \text{ m s}^{-1}$  與  $2.5 \text{ m s}^{-1}$ 。

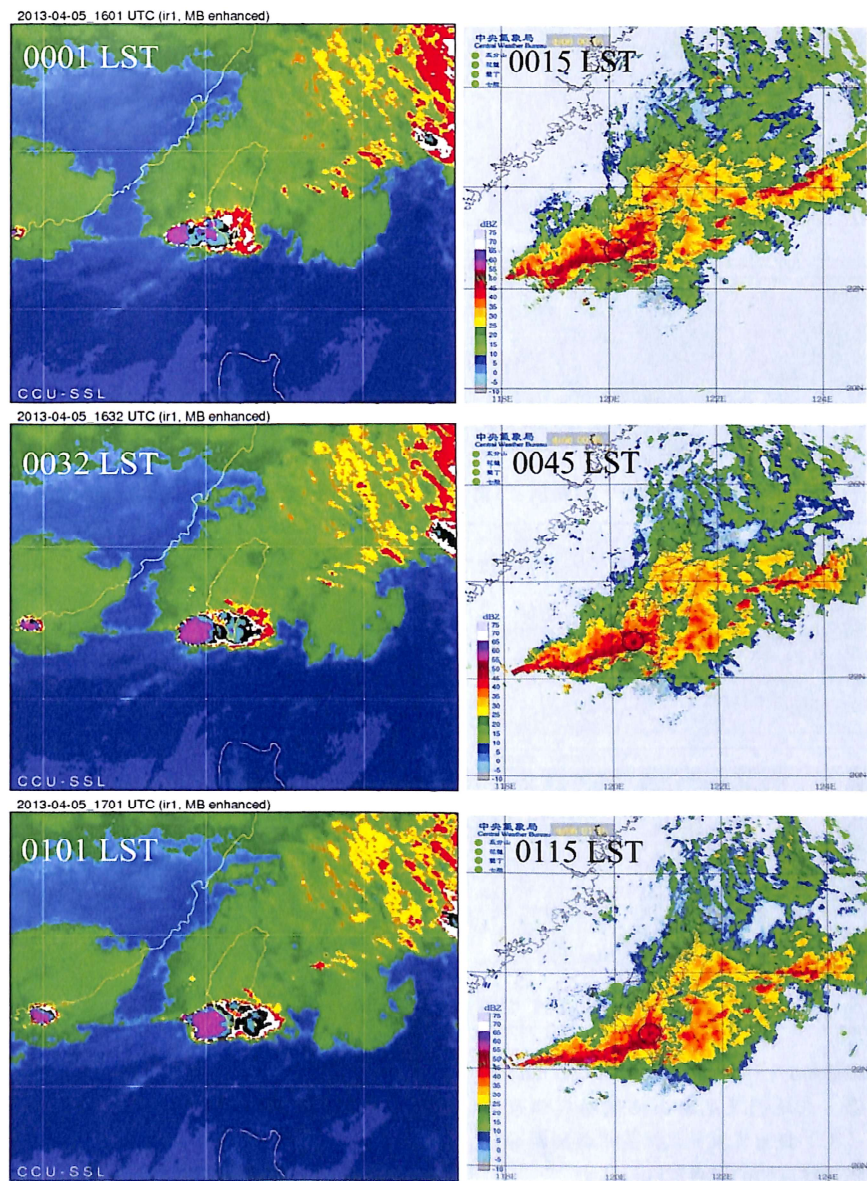


圖 7 2013 年 4 月 6 日 0001~0101 LST 每 30 分鐘一筆紅外線色調強化雲圖與相對應時間之雷達整合回波圖。中尺度氣旋以黑色空心圓標示。



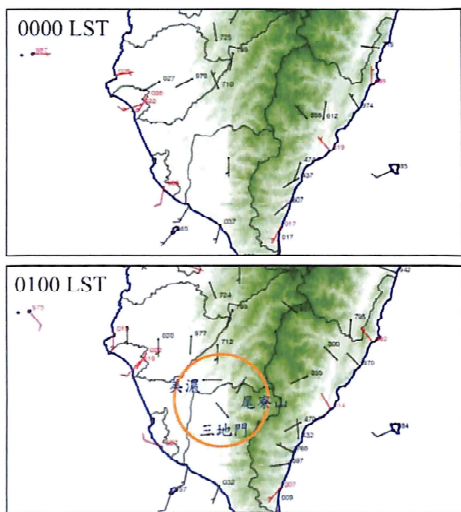


圖8 2013年4月6日0000~0100 LST 每小時一筆地面觀測站之風場分佈圖。

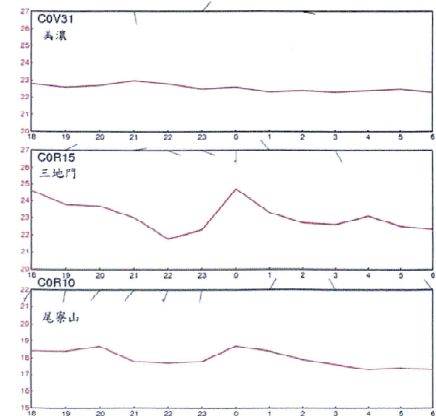


圖9 2013年4月5日1800至4月6日0600LST美濃、三地門及尾寮山站風場與溫度場(°C)觀測資料。風標長桿與短桿分別代表風速5 m s<sup>-1</sup>與2.5 m s<sup>-1</sup>。

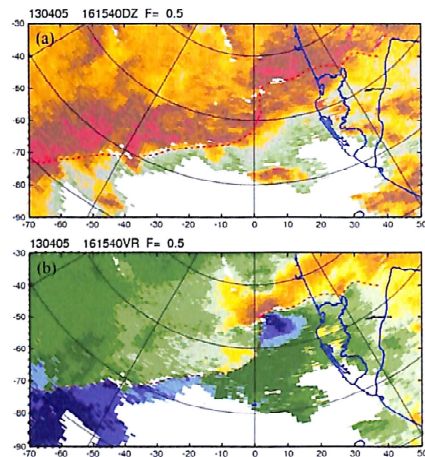


圖10 2013年4月6日0015 LST七股雷達於0.5°仰角PPI之回波(dBZ)、(b) 徑向速度(m s<sup>-1</sup>)。座標軸單位為km, 紅色虛線為風切線。

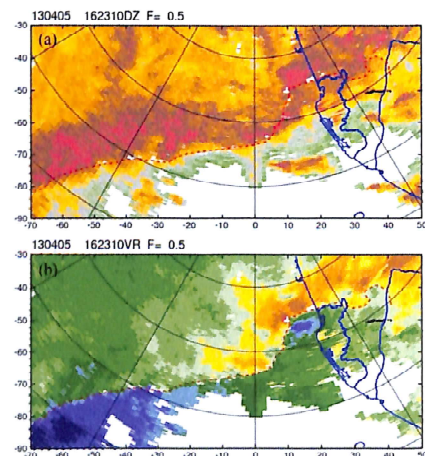


圖11 同圖10, 但時間為6日0023 LST。

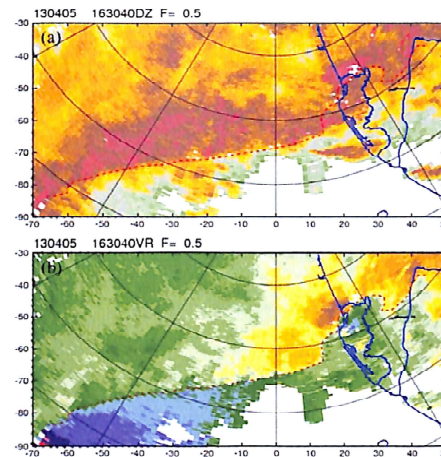


圖12 同圖10, 但時間為6日0030 LST。

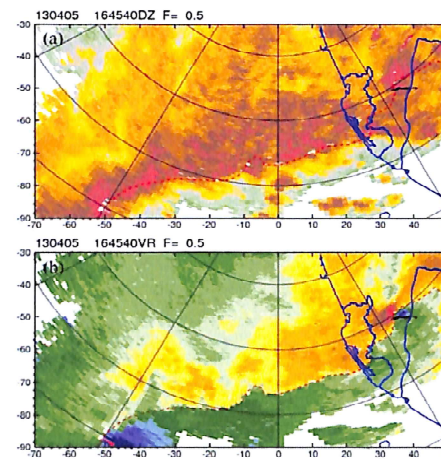


圖14 同圖10, 但時間為6日0045 LST。

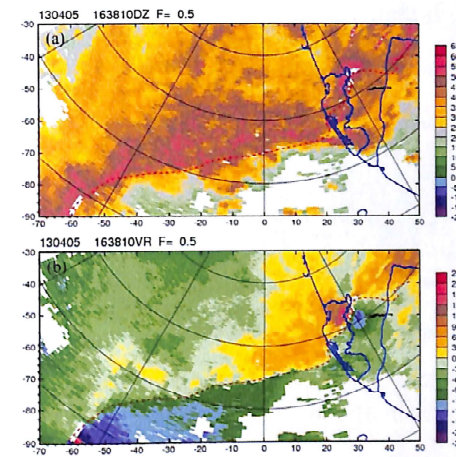


圖13 同圖10, 但時間為6日0038 LST。

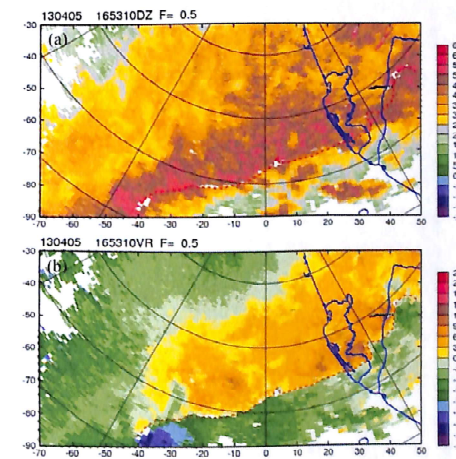


圖15 同圖10, 但時間為6日0053 LST。



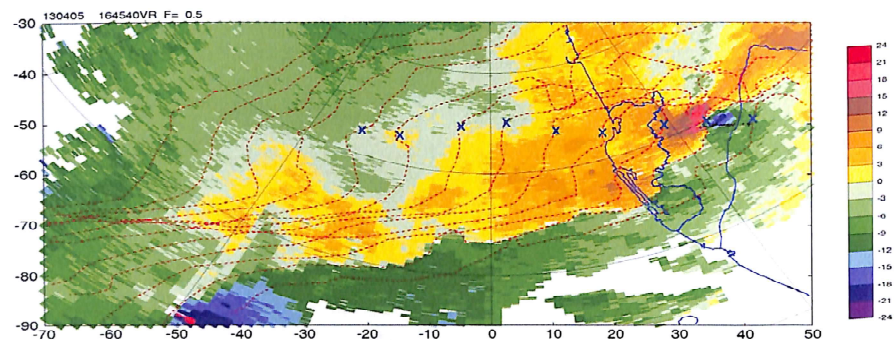


圖16 2013年4月5日2353至4月6日0053 LST風切線(紅色虛線)變化圖疊加0045 LST七股雷達於0.5°仰角PPI之徑向速度(m s-1)場。藍色叉號標示中尺度氣旋中心位置隨時間之變化。

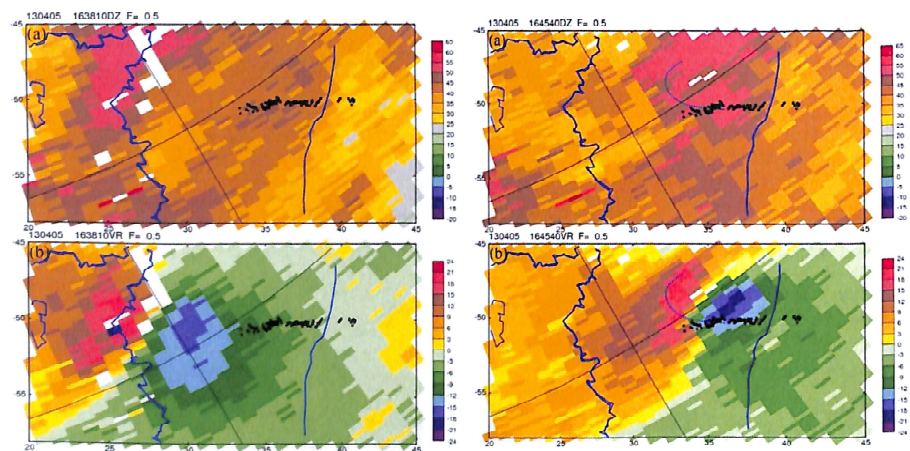


圖17 2013年4月6日0038 LST七股雷達於0.5°仰角PPI之(a)回波(dBZ)與(b)徑向速度(m s-1)。黑色點位為龍捲風軌跡。座標軸單位為km。

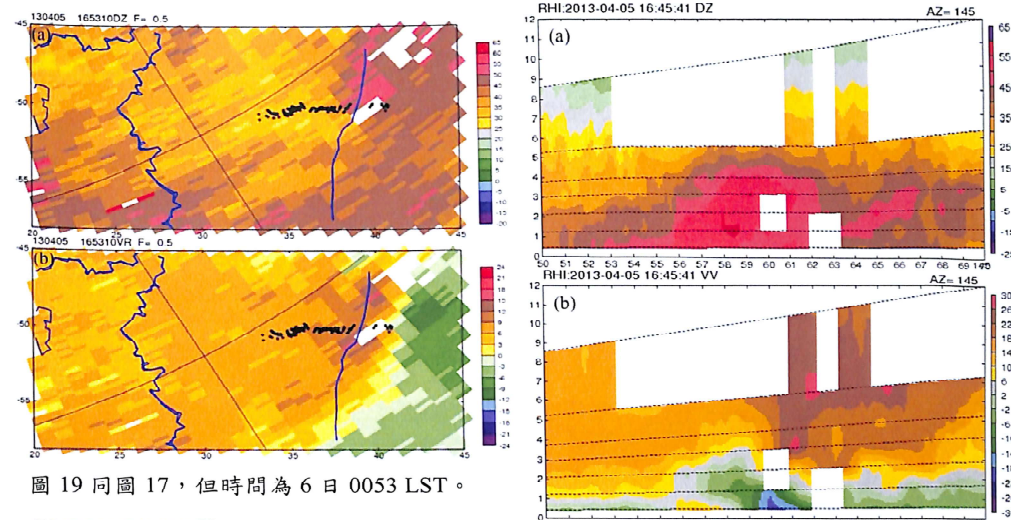


圖19 同圖17,但時間為6日0053 LST。

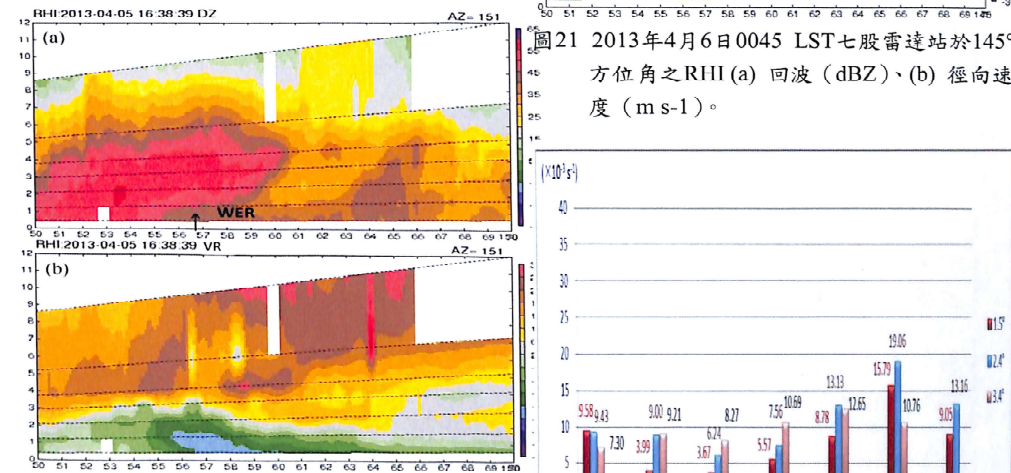


圖20 2013年4月6日0038 LST七股雷達站於151°方位角之RHI (a)回波(dBZ)、(b)徑向速度(m s-1)。

圖21 2013年4月6日0045 LST七股雷達站於145°方位角之RHI (a)回波(dBZ)、(b)徑向速度(m s-1)。

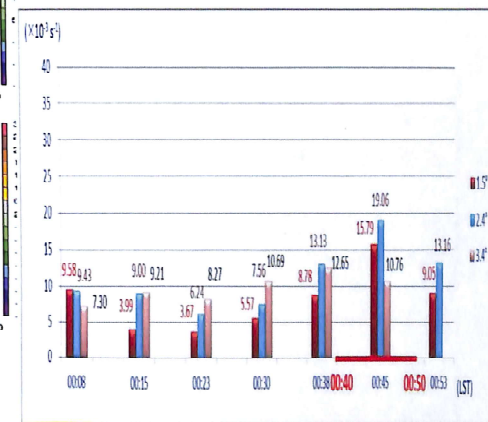


圖22 2013年4月6日高雄大樹龍捲風事件(發生時間約為0040~0050 LST)之風切渦度(x 10-3 s-1)隨時間變化分布圖。紅色粗線代表龍捲風發生時間。