

宜蘭南澳水龍捲之分析

劉清煌¹ 蔡沛旻²

¹ 中國文化大學大氣科學系

² 宜蘭縣南澳國民小學

(中華民國一百年一月十二日收稿；中華民國一百年三月三十日定稿)

摘 要

本文分析 2010 年 08 月 16 日於宜蘭南澳所發生之水龍捲個案，作者利用拍攝到之水龍捲照片及花蓮雷達資料探討水龍捲之成長與積雲(母雲, parent cloud)間之相關。使用照相測量法(photogrammetry)可求得照片上水龍捲之仰角及方位角，再利用雷達回波所提供之距離及積雲之移動速度，可求得水龍捲的位置、直徑及高度等數值。分析結果顯示水龍捲之成長至消散與積雲的發展階段有密切的關係，當母雲於發展期時水龍捲之漏斗雲(funnel cloud)形成，母雲發展達成熟期時水龍捲達最強且直徑可達 40 公尺，之後當母雲進入消散期時水龍捲很快消散。水龍捲路徑分析顯示前期之路徑跟隨母雲的方向移動，但後半期路徑偏離母雲，猜測是積雲於消散期時下衝流變強且面積加大，迫使上升氣流區域外移使得水龍捲的移動路徑產生偏移。作者利用有限之資料首次對台灣地區的水龍捲做較深入的分析，結果有助於瞭解此類劇烈天氣系統的發展與積雲之間的關係，進而可為預報之參考。

關鍵字：水龍捲、龍捲風、漏斗雲、照相測量法、積雲對流、下衝流

一、前言

龍捲風是所有天氣系統中最暴烈的天氣現象，雖然其生命期僅有數分鐘至數十分鐘，但強度卻是最強的，任何時間及地點只要氣象條件適合均有可能發生龍捲風，由於其生命期短且在很短時間內即可形成，故發生龍捲風之大氣環境有其特殊之條件。根據發生龍捲風地點之統計，世界上發生龍捲風最頻繁地區是位於美國中部，包含德克薩斯州、奧克拉河馬州、內布拉斯加州及以東的地區，南來之墨西哥暖濕空氣與北來之乾冷空氣在此交會，乾冷空氣下沉、暖濕空氣上升，此區特別有利於劇烈對流系統的發生，大部分的超大胞（Supercell）均在此地誕生，這些超大胞以及劇烈對流天氣系統（如弓形回波、飈線）醞釀出強大的龍捲風（Kessler 1992, Doswell 2001）。此地之氣候條件相當有利於龍捲風的生成，其強度及直徑均大過其他地區之龍捲風，這個地方俗稱為「龍捲風巷」（Tornado alley, Bluestein 1999），也被譽為「龍捲風的故鄉」。以超大胞產生之龍捲風而言，龍捲風多半發生於超大胞下方兩陣風鋒面（gust fronts）交接點，此處乃超大胞最不穩定的地方，產生之龍捲風稱為超大胞龍捲風（Supercell tornado）（Wakimoto and Wilson 1989）。除超大胞易發生龍捲風外，伴隨強烈之界面（如鋒面）或強烈對流胞也有可能產生龍捲風，這類龍捲風稱之為非超大胞龍捲風（non-supercell tornado），其強度及大小均較超大胞龍捲風為弱且小，且生命期也較短，但仍會有強個案發生，Wakimoto and Wilson（1989）研究非超大胞龍捲風之個案認為這類龍捲風是起源於低層的輻合區，於輻合區中由於水平風切之風切不穩定會產生一些小的渦旋，若積雲之上升氣流區與小渦旋耦合在一起，透過渦流管之抽拉作

用，使得小渦旋快速成長而形成龍捲風。非超大胞龍捲風雖然較弱，但其生成條件較容易滿足，因此發生之頻率與造成的災害也不容輕忽。目前科學家對龍捲風仍許多不理解之處，經由科學實驗希望對龍捲風之生成環境及內部結構能有進一步的認識，如 Verification of the Origins of Rotation in Tornadoes Experiment（VORTEX-1）1994-1995（Rasmussen et al. 1994），VORTEX-2 2009-2010（VORTEX-2 experimental design overview http://www.eol.ucar.edu/dir_off/OFAP_info/longterm/edo_VORTEX2.pdf）等實驗。

龍捲風是發生在陸地上，有時稱為陸龍捲（landspout），若發生在水（海）上則稱為水龍捲（waterspout）。水龍捲較少伴隨超大胞，大多數出現在鋒面、飈線或積雲對流系統，因此其強度、大小及生命期均不如大型的龍捲風。台灣地區發生龍捲風與水龍捲的大氣環境相似，兩者可以一併討論，本文中提及之「龍捲」意指龍捲風（陸龍捲）及水龍捲，出現龍捲的環境可分為三類：第一類之大氣環境是龍捲發生於快速移動界面（如鋒面或飈線）前緣之對流胞，這些對流胞一般出現在界面前緣約 50~100 公里處，對流胞呈線狀排列且發展相當快速，出生至成熟只需 1~2 小時，成長過程中有機會引發龍捲風（劉與張 2004; Liu and Chang 2007）。過去文獻指出界面前暖區有利的條件包括不穩定的暖濕空氣、較強的西南風、及界面快速移動對流線的抬升作用，使得對流胞在短時間內得以快速成長或甚至伴隨中尺度氣旋，當對流胞接近成熟時，強烈的抬升作用會激發龍捲（Holle and Majer 1980; Nilton and Bluestein 2000; Simpson et al 1986, 1991; Wakimoto and Wilson 1989），一段時間之後對流胞減弱不易繼續維持龍捲風的運作，導致龍捲風

消散。台灣地區這類對流胞的出現以 4~6 月伴隨梅雨鋒面居多，對流胞出現在鋒面到達陸地前的海上，移動到陸地時常伴隨中尺度氣旋的生成，甚至引發龍捲風 (Liu and Chang 2007)，這類對流胞的統計及形成機制有待深入的研究。第二類的大氣環境是伴隨發展的積雲，系統多發生於海上，故以水龍捲為主，積雲之強烈上、下運動使得水平渦度扭轉成垂直渦度，加上輻合及抽拉作用使得垂直渦度在短時間內迅速加強而形成龍捲，因此水龍捲常出現在積雲的上升氣流與下衝流之間，此大氣環境與發生在美國佛羅里達州附近的個案相似 (Golden 1974a,b, 1977; Simpson et al. 1986; Wakimoto and Lew 1993)，產生水龍捲的積雲通常只需 3~4 公里高左右或更高，且這些積雲呈線狀排列 (Brady and Szoke 1989)。第三類的大氣環境是龍捲伴隨颱風雨帶產生，這類龍捲形成的個案較少但強度可以很強，例如 1992 年 8 月 24 日安德魯颶風在美國佛羅里達州登陸引發的龍捲風 (Wakimoto and Black 1993)，在台灣較為熟知之個案為 1977 年 7 月 25 日賽洛瑪颶風侵襲高雄所引發的龍捲風事件 (徐 1977)，但文中未提及出現龍捲風明確的證據，唯一較可參考的內容是「據市民說，於該日 (1977 年 7 月 25 日) 九時左右，曾見小港區有烏黑之柱狀雲，雲移動處，地上物被捲起」，這句話所描述的現象可以猜測是龍捲風，但仍缺較直接的證據。

台灣地區發生龍捲的機率不高且多數無明顯的災害，發生的個案顯示大部分屬界面型或積雲對流型，極少數伴隨颱風雨帶。但在 1961~1993 年間曾發生一些災情較嚴重的案例 (陳 1995；莊 2001)，其中 1971 年 4 月發生於高雄、屏東地區之龍捲風所導致的農業損失最為嚴重，達新台幣 9,500 萬元；1977 年 7 月 25 日賽洛瑪颶風侵襲高

屏地區，高雄港多部貨櫃起重機被吹倒，乃颱風環流引發龍捲風可疑的案例，再者 1982 年 5 月 2 日之龍捲風，造成房屋半倒 79 棟及約 200 萬元之損失；另外 1993 年 6 月 5 日發生於台南縣的龍捲風，造成 5 人受傷及將軍鄉房屋半倒 49 棟。2007 年 4 月 18 日凌晨在台南市安南區發生近年來較明顯的龍捲風，龍捲風持續約 40 分鐘且總路徑長約 40 公里，是歷年來持續時間最久且路徑最長的案例 (Liu and Chang 2007)，行經台南縣市及高雄縣等四個鄉鎮，安南區有 65 個受災戶，台南縣及高雄縣無詳細的統計資料。劉 (1996) 指出過去 40 年台灣平均每年出現 1.8 至 2 次龍捲風，其中三分之二集中在台南縣市、高雄縣市及屏東之平原地帶，這個區域被氣象人員稱為「龍捲風巢」，此統計數字是陸上龍捲風被觀測到的個數，實際上可能還有更多未被觀測到的個案。除陸上龍捲風外，台灣近海附近也經常發生水龍捲，Liu and Chang (2007) 統計 1998-2005 龍捲 (包括未延伸到地面的漏斗雲) 個數顯示，每年約有 3~4 個個案被觀測到，但個數仍可能低估。隨著數位相機及照相機的普遍對龍捲個案的紀錄較多，對數之統計也較為完整，Liu (2010) 最新統計 1998~2010 年台灣地區發生龍捲個數，較確定的案例共有 55 次，平均每年約有 4.2 例，另外有 6 個可疑的案例，出現之地點也以西南部 (台南、高雄及屏東) 地區最多，其次是花、東海域 (圖 1)，時間則以 5~7 月份 15~18 時較多 (圖 2)，顯示水龍捲的發生與午後旺盛積雲對流有關。

過去對於龍捲的紀錄多僅有媒體的報導，缺乏有系統的勘災及資料記載，且僅對有發生災害之個案做概略性的記錄，鮮有對此類天氣現象有較深入之研究，對於龍捲的生成與積雲對流間的關係及龍捲之大小及高度等資料則無文獻可詢。

慶幸的是本文第二作者 2010 年 8 月 16 日在宜蘭南澳附近拍攝到一系列的水龍捲照片，利用照片測量技術（Photogrammetry）（Holle 1986; Kassander and Sims 1957）吾人可得水龍捲較可靠之數據，再利用花蓮雷達資料的輔助探討水龍捲的形成與積雲發展的相關性，這也是少數可對水龍捲有較深入探討的個案，所用到的資料、個案介紹與分析方法及分析結果將在第二及三節中介紹，最後是結論與討論。

二、個案資料與照相測量法

本研究分析 2010 年 8 月 16 日於宜蘭縣南澳拍攝到之水龍捲個案，利用綜觀天氣圖、衛星及雷達資料探討水龍捲發生時台灣附近之大氣環境，再利用花蓮雷達觀測到之回波計算積雲對流胞的移動速度，應用照相測量法可求出水龍捲與攝影者之間的仰角、方位角及回波與攝影者的距離，即可求得每張照片上水龍捲與攝影者的位置。根據雷達觀測的時間選出相近時間的照片，分析雷達回波與當時之照片可知水龍捲在該時間發生時與積雲的對流的關係，最後將水龍捲位置疊加於雷達回波上以探討水龍捲的移動與母雲間的關係。

照相測量法即鏡頭看到的物體與於照片位置之投影(mapping)關係，觀念與地圖投影類似，然不同焦段之鏡頭其照片涵蓋範圍不同，焦距越長（俗稱長鏡頭）照片涵蓋範圍越窄，但對物體的辨識率越高，反之焦距越短（俗稱廣角鏡）涵蓋範圍越寬，對景物的解析度越低。本文之水龍捲照片所用的焦段在 22~29 mm 之間屬廣角範圍，對水龍捲的解析度較低，但優點是可完整呈現出積雲與水龍捲間的關係。照相測量法存在已久，較早 Kassander and Sims (1957) 利用兩組機用的

空中照相機架設於相距 1.3 英哩之兩點拍攝積雲的發展，計算積雲的位置與高度，指出這種照片定位方式可以精確的計算出 1~40 英哩間雲的位置，且雲高精確度在 500 英呎以內，這可能是最早使用照相技術研究雲的文獻，之後照相測量法廣泛應用於對流尺度天氣系統之研究及氣象災害定位（Fujita 1981; Kingsmill and Wakimoto 1991; Wakimoto and Liu 1998; Wakimoto et al. 2000; Wakimoto et al. 2003），照相測量法的細節可參考 Holle (1986) 的文獻。使用照相測量法之基本條件乃照片要能訂出水平線、使用之鏡頭焦距及底片大小（傳統之底片大小為 35 mm），即可求出照片上任何一點相對於水平線的仰角及相對於相片垂直中心線之方位角。若照片上有任何一點之地理方位角已知，則照片上任何點的仰角及方位角均可求得。但此方法僅能求得角度，若攝影者到照片上目標物的距離或照片上任兩點之距離已知，則照片上物體之大小及距離多半可求得，之前的文獻應用此方法於龍捲風的研究中，將雷達資料與同時間之照片疊加，可清楚呈現氣象觀測資料與真實影像的關係（例如 Kingsmill and Wakimoto 1991 等）。

本研究之水龍捲發生時間為 8 月 16 日地方時 18 點左右（以下之分析時間使用世界標準時間，UTC），作者於宜蘭縣南澳溪河口南側往東北方向定點拍攝到一系列水龍捲由形成到消散的照片，精確的拍攝地點位於東經 121 度 48 分 30.95 秒、北緯 24 度 26 分 37.01 秒。作者主要拍攝積雲，適時水龍捲距離拍攝地點約 15 公里左右且直徑僅數十公尺，拍攝時並無察覺故未對水龍捲做局部之放大。全程拍攝約 30 分鐘，而有水龍捲的照片共 30 張，涵蓋時間為 10:04:20 UTC 至 10:22:17 UTC，平均每 36 秒一張（表一）。照片之拍攝使

表一 2010-08-16 水龍捲照片時間、仰角、方位角、距離及直徑

照片編號	時間(UTC)	仰角(度)	方位角(度)	距離(km)	直徑(m)
6517	10:04:20	2.05	77.14	13.09	44.2
6518	10:04:29	2.04	76.97	13.09	41.6
6519	10:05:15	2.02	75.92	13.28	52.7
6523	10:06:42	2.07	74.09	13.66	59.2
6524	10:08:09	2.00	72.74	13.56	53.6
6527	10:10:04	1.99	70.48	13.91	24.0
6528	10:10:47	2.03	69.90	13.67	23.2
6530	10:11:02	2.02	69.59	13.80	23.4
6532	10:12:21	1.97	68.25	14.02	18.7
6533	10:12:29	1.97	68.12	14.02	18.7
6535	10:12:55	1.95	67.67	14.04	21.4
6536	10:13:04	1.91	67.52	14.06	18.7
6537	10:13:50	1.86	65.90	15.21	18.8
6538	10:14:12	1.83	65.55	15.41	17.6
6539	10:14:29	1.84	65.28	15.60	19.2
6541	10:15:01	1.83	64.96	15.30	22.6
6543	10:15:32	1.80	64.47	15.47	28.0
6544	10:15:52	1.78	64.14	15.61	25.6
6546	10:16:17	1.78	63.78	15.88	26.1
6548	10:16:39	1.75	63.49	16.09	26.4
6549	10:16:59	1.76	63.21	16.22	37.3
6550	10:17:33	1.74	62.79	16.62	38.3
6551	10:17:54	1.80	62.63	17.14	37.1
6552	10:18:03	1.78	62.50	17.10	37.0
6553	10:18:41	1.75	62.10	17.76	37.5
6555	10:19:30	1.70	61.52	17.98	49.9
6557	10:19:52	1.67	61.41	18.11	41.3
6558	10:20:02	1.67	61.24	18.15	47.4
6559	10:20:49	1.63	60.73	18.57	36.6
6562	10:22:17	1.58	59.63	18.46	22.8

用 Canon EOS 500D 數位相機搭配 17~50 mm 及 12 mm 鏡頭，使用之焦距 (Focal Length)、畫素及拍攝時間均記錄於相片之可交換影像格式上 (Exchangeable image file format, Exif)，此相機採用 Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (CMOS) 22.2×14.8 mm 感光元件，影像之畫素 (相當於照片解析度) 為 4752×3168，焦距需乘 1.6 倍以換算為 35 mm 底片片幅，Exif 記錄的時間經過校正使之與氣象資料時間同步，相片計算之方位角與經緯儀實地測量做比對 (圖 3a)，經緯儀測量七個明確點之仰角及方位角 (表二)，比對結果顯示仰角的相差值在 0.1 度以內，而方位角約有 0.1 度的系統性差值，所用之經緯儀精確度僅到小數點一位，與此差值相當接近。圖中 A 點為烏石鼻之位置，由攝影點測量其方位角為 49.3 度，此點為之後所有照片計算之參考點。

部分時間漏斗雲未伸及海面，部分時間漏斗雲雖伸及海面但無法由照片訂出位置，因此吾人追蹤水龍捲位於雲底之位置，利用電腦軟體將照片放大數倍後可讀出照片上烏石鼻像素位置、水龍捲位於雲底之中心像素位置及水龍捲兩側像素位置等之座標，經過投影且利用烏石鼻之參考點，則照片上水龍捲位置之仰角及方位角即可求得，再由水龍捲管 (funnel cloud tube) 兩側的方位角差值乘以距離即可求得水龍捲之直徑 (如圖 3b)。單位像素之角度解析度與總畫素 (Pixels) 及焦距有關，以此照片為例，水平畫素為 4752、等效焦距為 78.83 mm，可求得相片水平涵蓋的角度為 59.12 度，即單位像素之角度為 5.3727×10^{-3} 度，若以水龍捲所在的位置約 15 km 計，此角度相當於 1.4 m，而水龍捲兩側像素座標之讀數準確度可在 3 個像素以內，即可能之誤差在 4 m 以內，若照片越清晰像素位置的讀數越精確，則準確率

越高，水龍捲之直徑亦可更準確估算。

三、個案分析

1. 綜觀天氣分析

探討本個案之綜觀環境，8月16日1200 UTC 地面天氣圖 (圖 4a) 顯示一短滯留鋒面位於長江口附近，對台灣並無直接之影響，台灣位於副熱帶高壓脊西緣，受此高壓外圍氣流影響台灣東北部地區以微弱之南風為主，而 850 hPa 及 500 hPa 之天氣圖 (圖 4b 及 4c) 顯示台灣位於副高邊緣的勢力範圍之內，大範圍深對流系統之發展仍將受到抑制，但是局部對流系統仍有機會發展。1200 UTC 花蓮的探空資料顯示 (圖 5)，最低層 (地面 ~1000 hPa) 吹南南西風，1000 hPa~925 hPa 為均勻混合層，以微弱之西風為主，混合後之相當位溫為 ~ 343.5 K，850hPa 以上空氣較乾，但相當位溫顯示 (圖 5 最右側的數字，黑體字表示該層相當位溫隨高度減小，意旨該層為對流不穩定，灰體字表示該層相當位溫隨高度增加，乃為對流穩定層) 925 hPa~800 hPa 間為對流不穩定，因此仍有利於局部對流之發展，此探空計算出來的舉升凝結高度 (Lifting Condensation Level, LCL) 高度在 924.32 hPa (≈ 800 m)，此高度亦可視為雲底高。

2. 衛星資料分析

中央氣象局接收日本氣象同步衛星 (Multi-functional Transport Satellite, MTSAT2) 資料，衛星之星下點 (Satellite sub-point) 位於 0°N , 145°E ，約每半小時有一次觀測資料，可見光頻道之空間解析度約 1 公里，但僅於白天影像才有資料 (紅外線頻道無法判讀此對流雲，故未使用)。圖 6 為 8月16日 0832 UTC ~ 1001 UTC 每半小時



圖 3a 經緯儀測量與照片計算之仰角及方位角比對點，A 點的位置是烏石鼻。

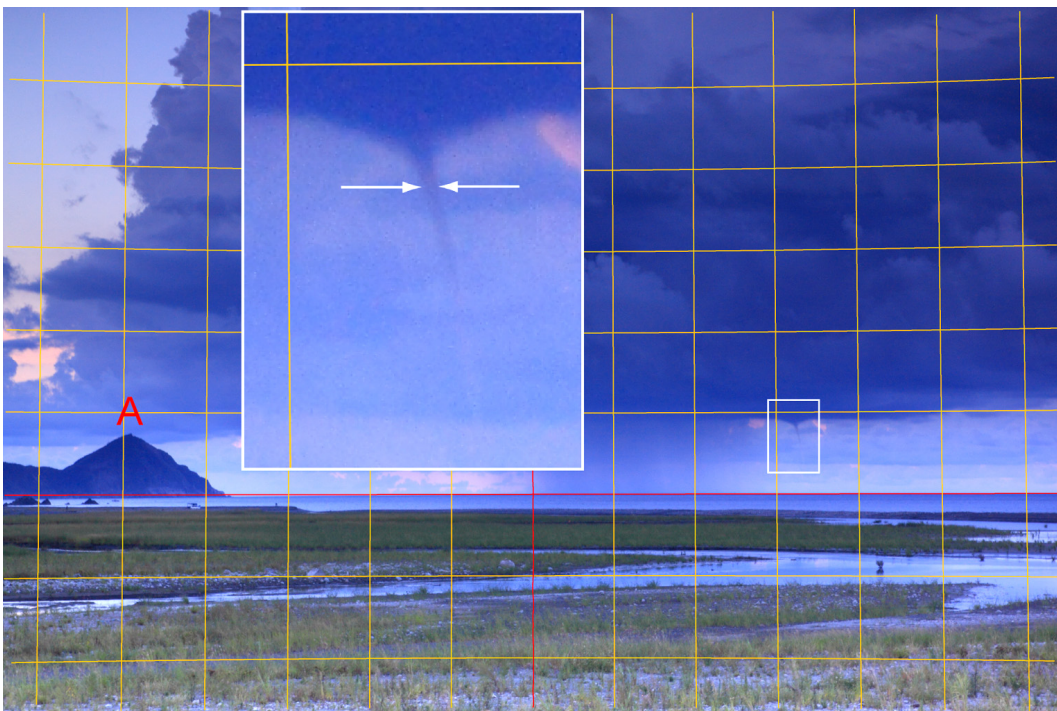


圖 3b 照相測量法之示意圖。紅色線各為水平線及照片中心線，黃色線為間格 2 度之仰角及方位角，A 點位置為烏石鼻，白色框為水龍捲之放大圖，白色箭頭指示水龍捲之直徑。

表二 經緯儀測量之仰角、方位角與照片計算角度之比對

測量點	A	B	C	D	E	F	G
經緯儀仰角	1.5	-0.1	-0.1	0.0	0.2	1.3	0.8
經緯儀方位角	49.3	48.2	47.2	46.7	44.5	43.4	45.1
照片計算之仰角	1.56	-0.04	-0.05	0.06	0.20	1.29	0.90
照片計算之方位角	49.3	48.33	47.32	46.84	44.60	43.31	45.00

之可見雲圖，水龍捲發生時太陽仰角很低，因此雲圖較暗，在此先對衛星資料做太陽光角的訂正（林與曾 1994），之後再使用電腦軟體將影像適度調亮以利判讀積雲。圖 6 吾人訂出產生水龍捲之對流雲位置（白色圓圈），圖中虛線區域指示該對流雲所在之對流雲線呈北北東-南南西方向向北移動，衛星雲圖顯示此對流線乃單對流積雲所組成，曾等（2006）研究台東海岸水龍捲個案之照片、雷達回波及衛星雲圖亦顯示類似之對流雲線，於美國佛州之水龍捲也有類似之系統（Golden 1974a, 1977），在此環境下若產生水龍捲，很有可能出現多個漏斗雲或水龍（例如：曾等 2006）。

3. 雷達回波及徑向速度分析

水龍捲屬強對流系統，過去文獻指出產生水龍捲的積雲（母雲）並不需要發展得很深（Golden 1974a, b; Wakimoto and Lew 1993），雲頂高在 3~4 公里左右之積雲即有能力產生水龍捲，且水龍捲的直徑僅數公尺至數十公尺，鮮有超過百公尺者。以目前中央氣象局作業之 S 波段（電磁波波長~10 公分）氣象雷達之徑向解析度為 500 公尺，難以由雷達資料中判讀水龍捲，因此使用雷達資料詮釋此類天氣系統時宜審慎。雷達資料雖無法解析水龍捲，但可用以探討積雲之發展以瞭

解水龍捲之生成環境。本個案發生地點位於宜蘭縣南澳，屬花蓮雷達之涵蓋區域，水龍捲出現地點距離雷達約 65 公里，以雷達波束寬為 1 度計，在此距離之解析度約為 1.1 公里。

根據照片時間（表一）吾人選出與照片相近之雷達資料分別為：1004、1012 及 1019 UTC 等三個立體掃描，圖 7、圖 8 及圖 9 乃此三個時間雷達仰角 0.5、1.4、2.4 及 3.4 度之回波及徑向速度，此徑向速度已扣除系統移動速度於徑向之分量。第一個時間（圖 7a~d）顯示最強回波位於仰角 2.4 及 3.4 度，徑向速度場（圖 7e~h）顯示最低層（圖 7e）有明顯之速度場輻合。第二個時間（圖 8a~d）最強回波在仰角 1.4 及 2.4 度，低層（圖 8e）之輻合場加強且上層之輻散（圖 8h）較明顯。到第三個時間時（圖 9a~d）最強回波則位於仰角 0.5 及 1.4 度，但輻合及輻散場相較前一個時間有減弱之趨勢。比較此三個時間之回波場發現最強的回波首先出現在上層，隨時間最強回波之高度往下降，到第三個時間時，最強的回波已降至最低層，速度場也顯示低層之輻合場及上層之輻散場由弱、增強、再減弱的趨勢。

利用編號 6519、6532 及 6553（表一）等三個與雷達立體掃描相近時間照片之中心方位角，

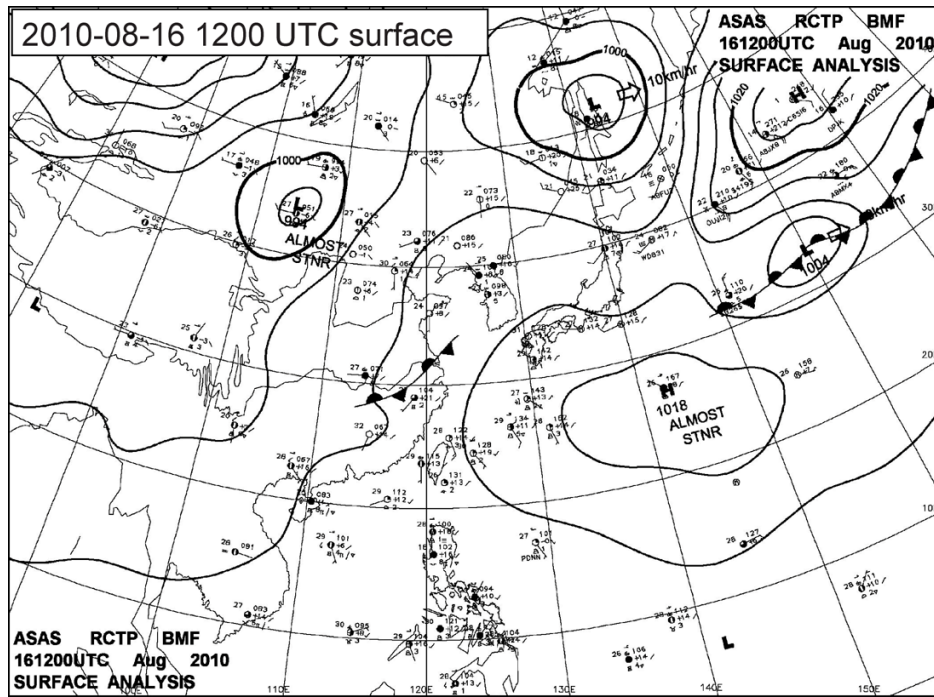


圖 4a 2010 年 8 月 16 日 1200 UTC 地面天氣圖。粗實線為等壓線（間距為 4 hPa），風標全桿及半桿分別表示風速 5 m s^{-1} 及 2.5 m s^{-1} 。

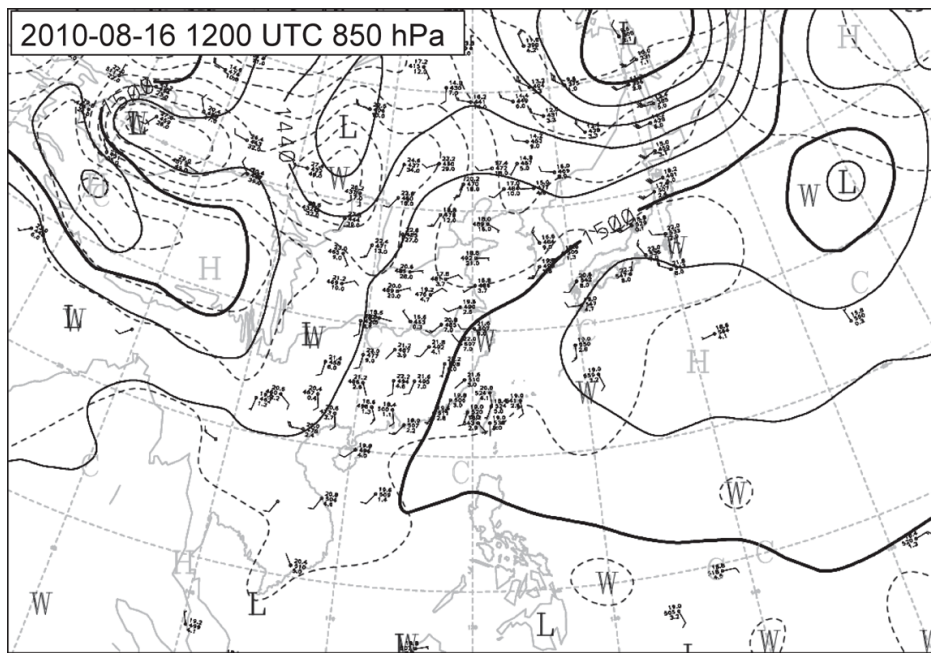


圖 4b 2010 年 8 月 16 日 1200 UTC 850 hPa 天氣圖。粗實線為等高線（間距為 30 gpm），灰色虛線為等溫線（間距為 3°C ），風標全桿及半桿分別表示風速 5 m s^{-1} 及 2.5 m s^{-1} 。

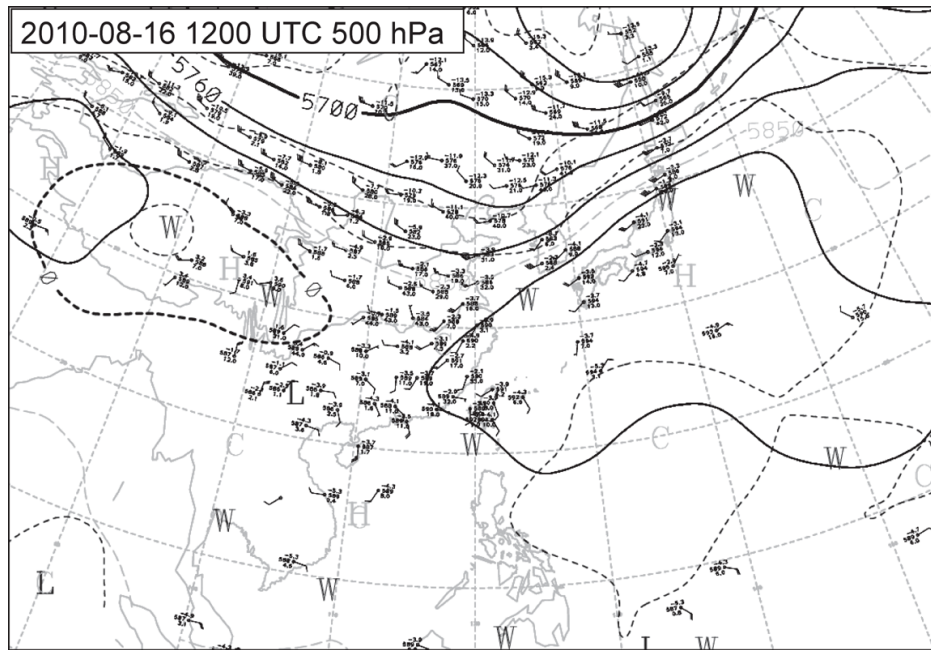


圖 4c 同圖 4b，但為 500 hPa。

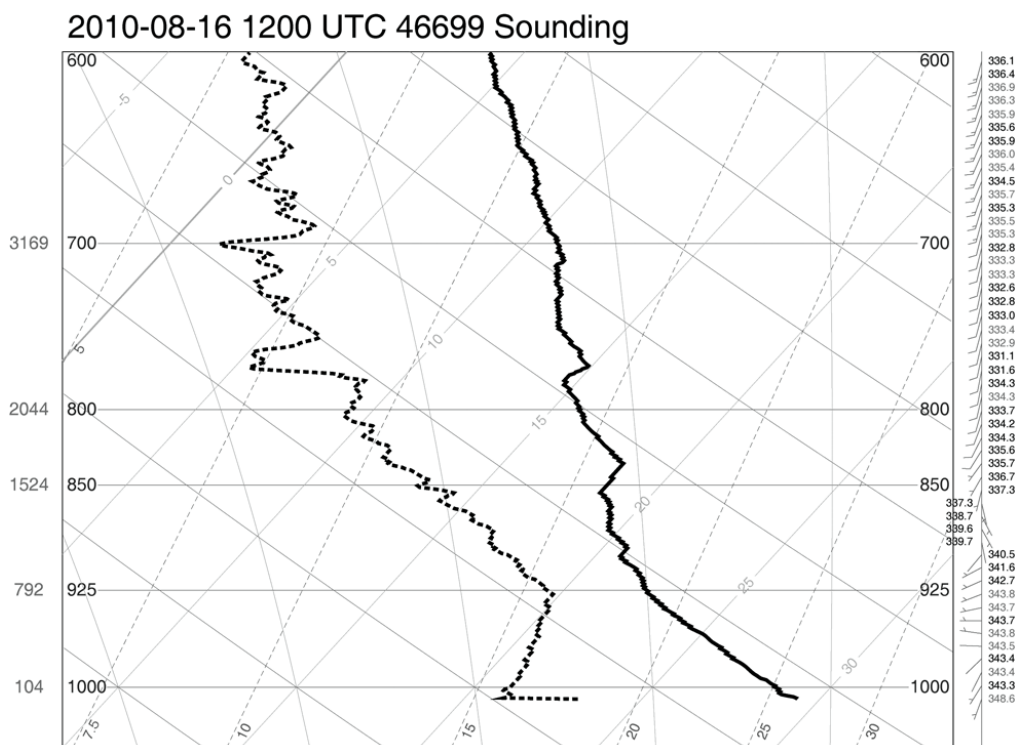


圖 5 2010 年 8 月 16 日 1200 UTC 花蓮探空圖。粗黑實線為溫度線、粗黑虛線為露點溫度線，最右側之數字為相當位溫（黑體字表示該層相當位溫隨高度減小，灰體字表示該層相當位溫隨高度增加），風標全桿及半桿分別表示風速 5 m s^{-1} 及 2.5 m s^{-1} 。

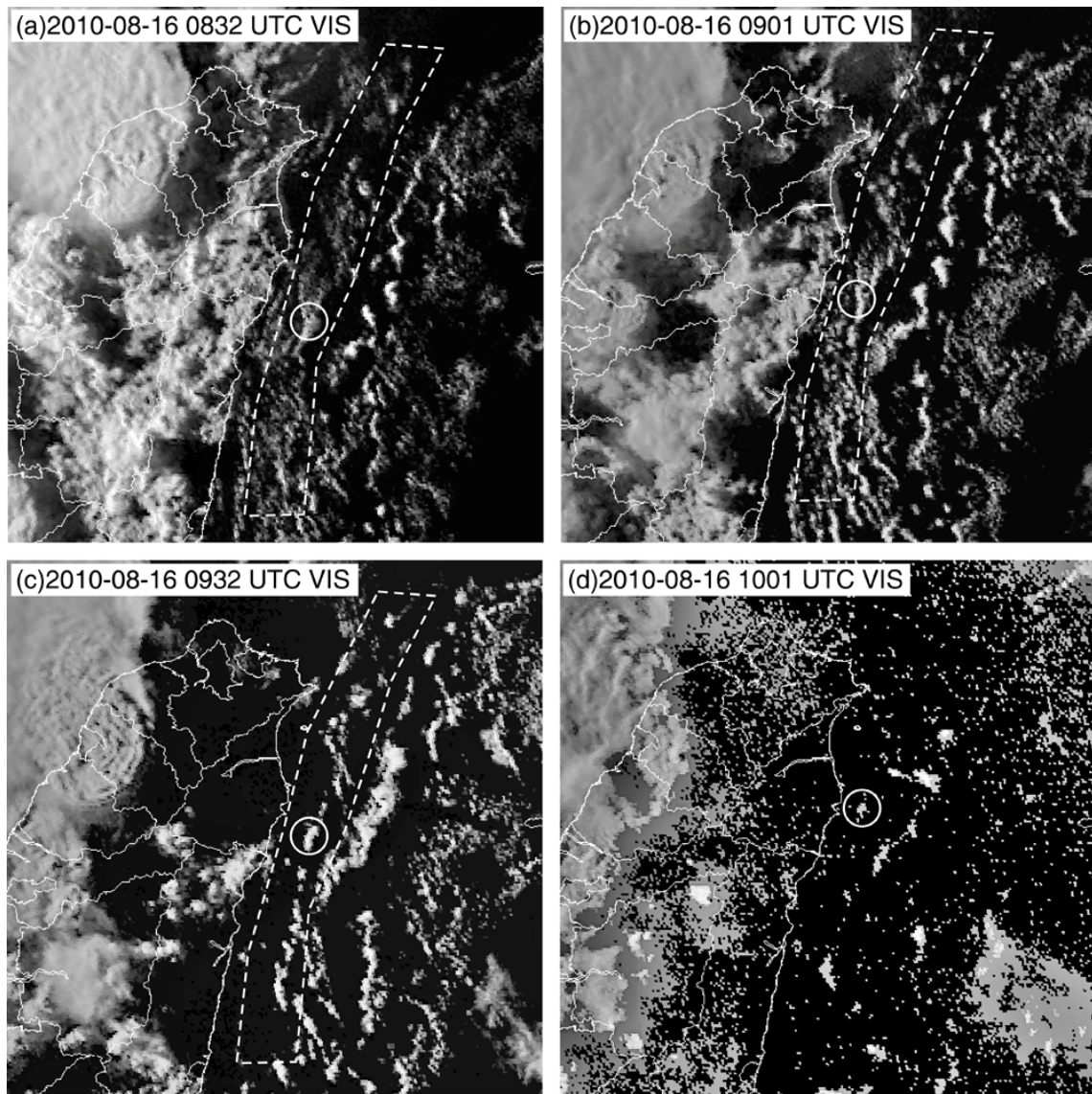


圖 6 2010 年 8 月 16 日(a)0832、(b)0901、(c)0932 及(d)1001 UTC 可見光衛星雲圖，白色圓圈指示產生水龍捲之積雲，白色虛線指示該積雲所在之對流雲線，(d)因光線太暗，無法訂出對流雲線的區域。

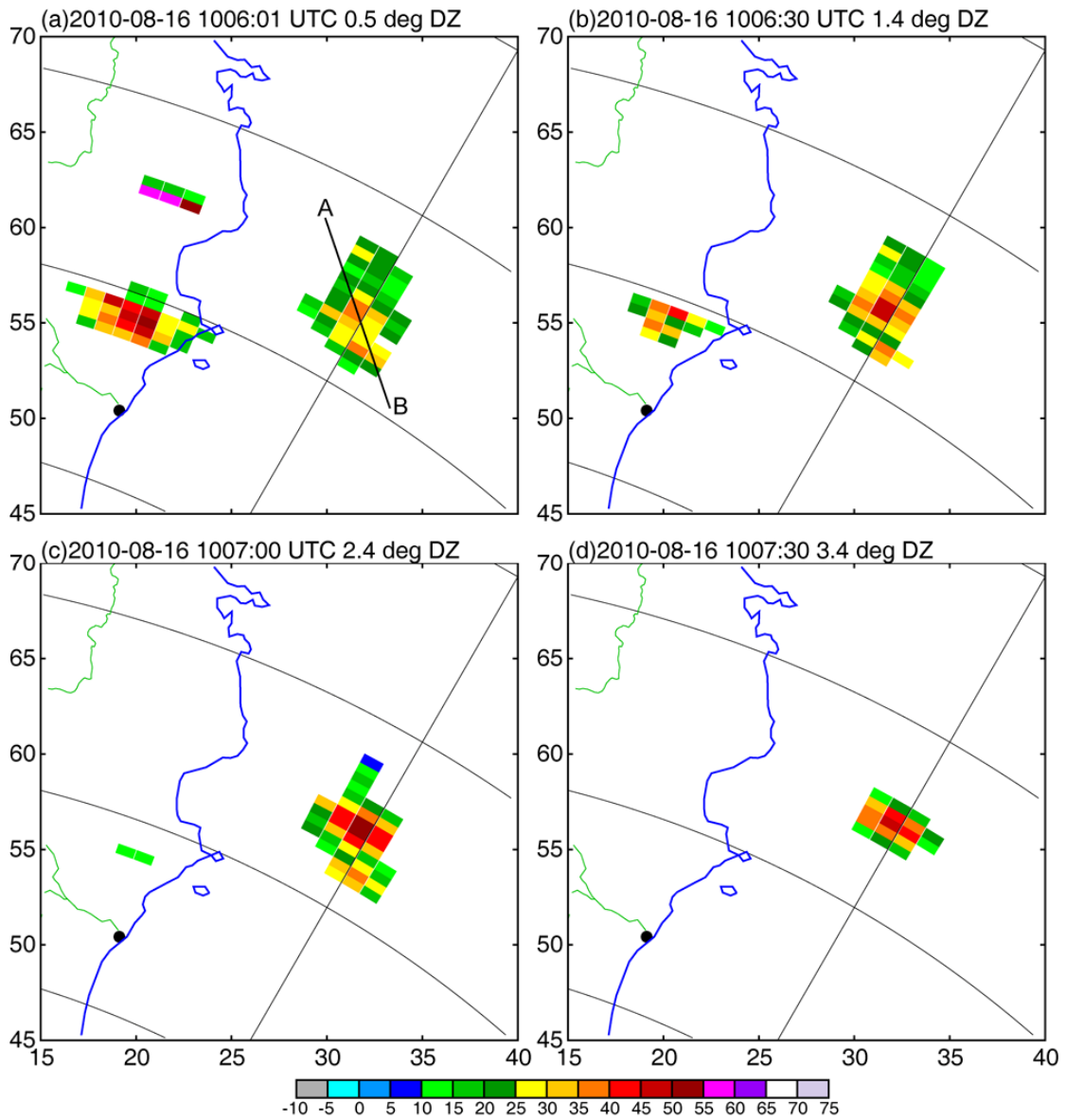


圖 7 2010 年 8 月 16 日 1004 UTC 花蓮雷達立體掃描仰角(a)0.5 度、(b) 1.4 度、(c) 2.4 度及(d) 3.4 度回波 (單位：dBZ)。圖 e~f 同圖 a~d 但為徑向速度。座標軸單位為公里，原點位置為花蓮雷達站，弧線間距為 10 公里，黑色點為拍照位置，AB 為回波剖面的位置。

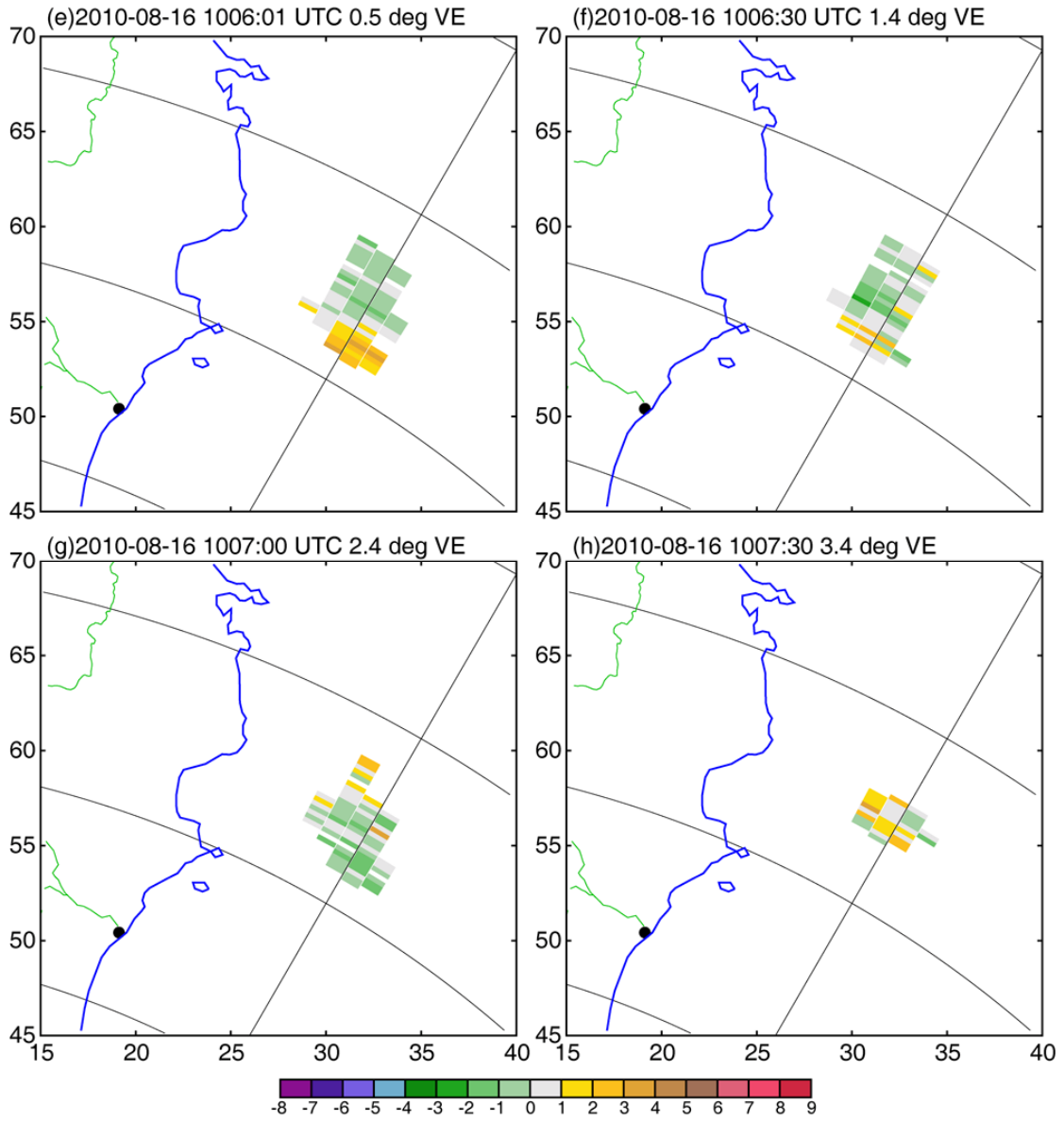


圖 7 (續)

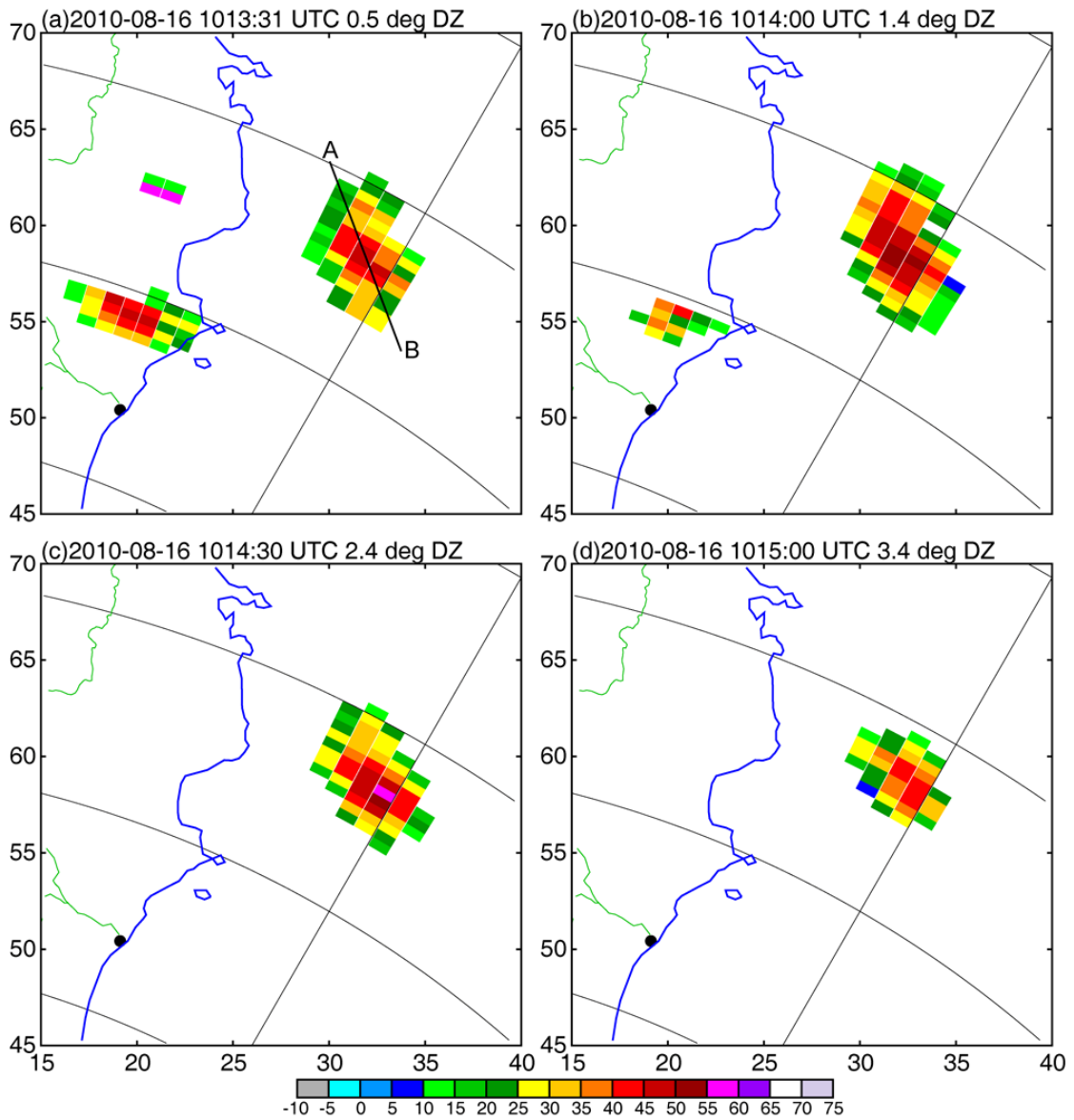


圖 8 同圖 7，但為 1012 UTC，圖 e 黑色箭頭指示最大徑向速度位置。

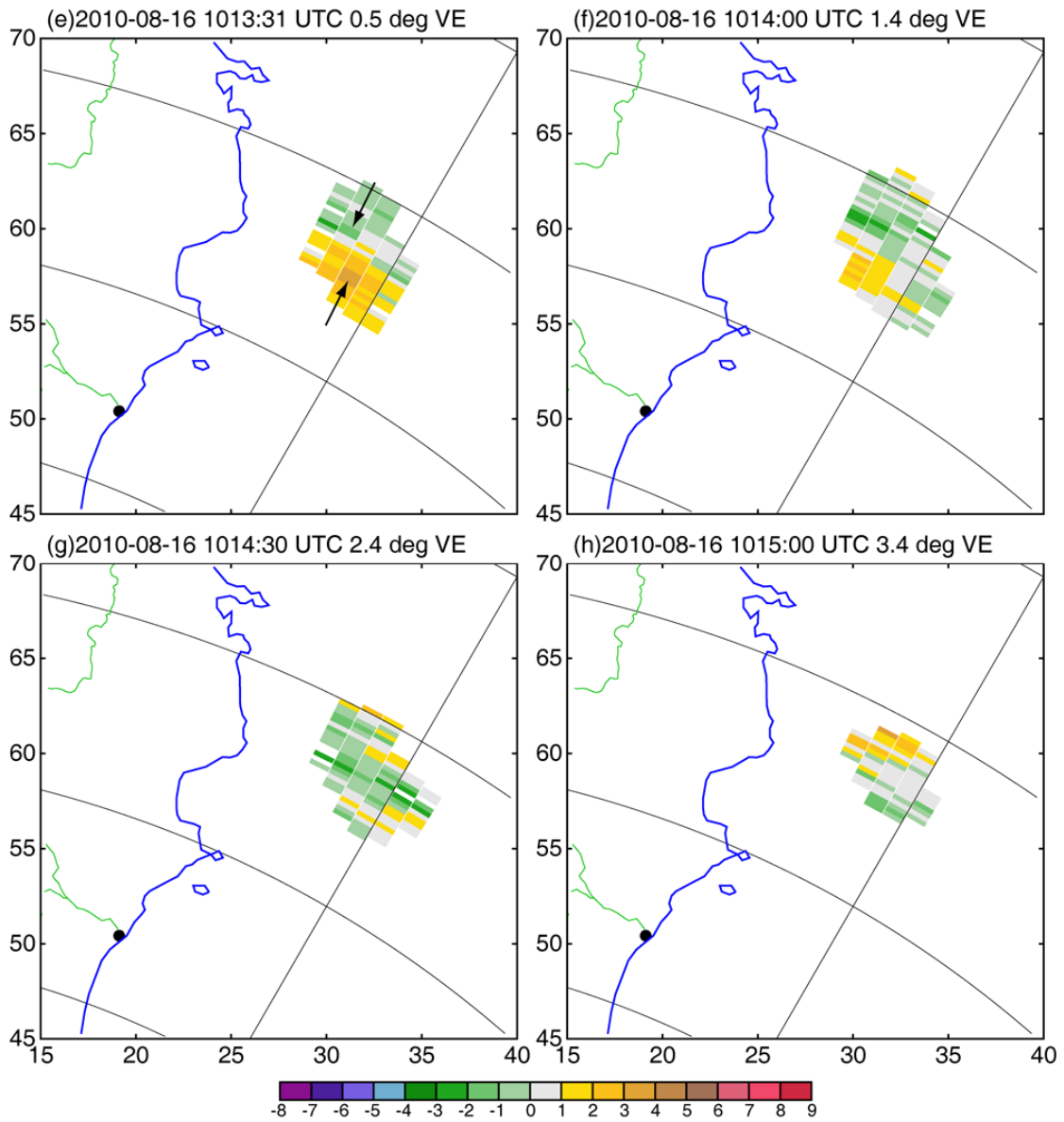


圖 8 (續)

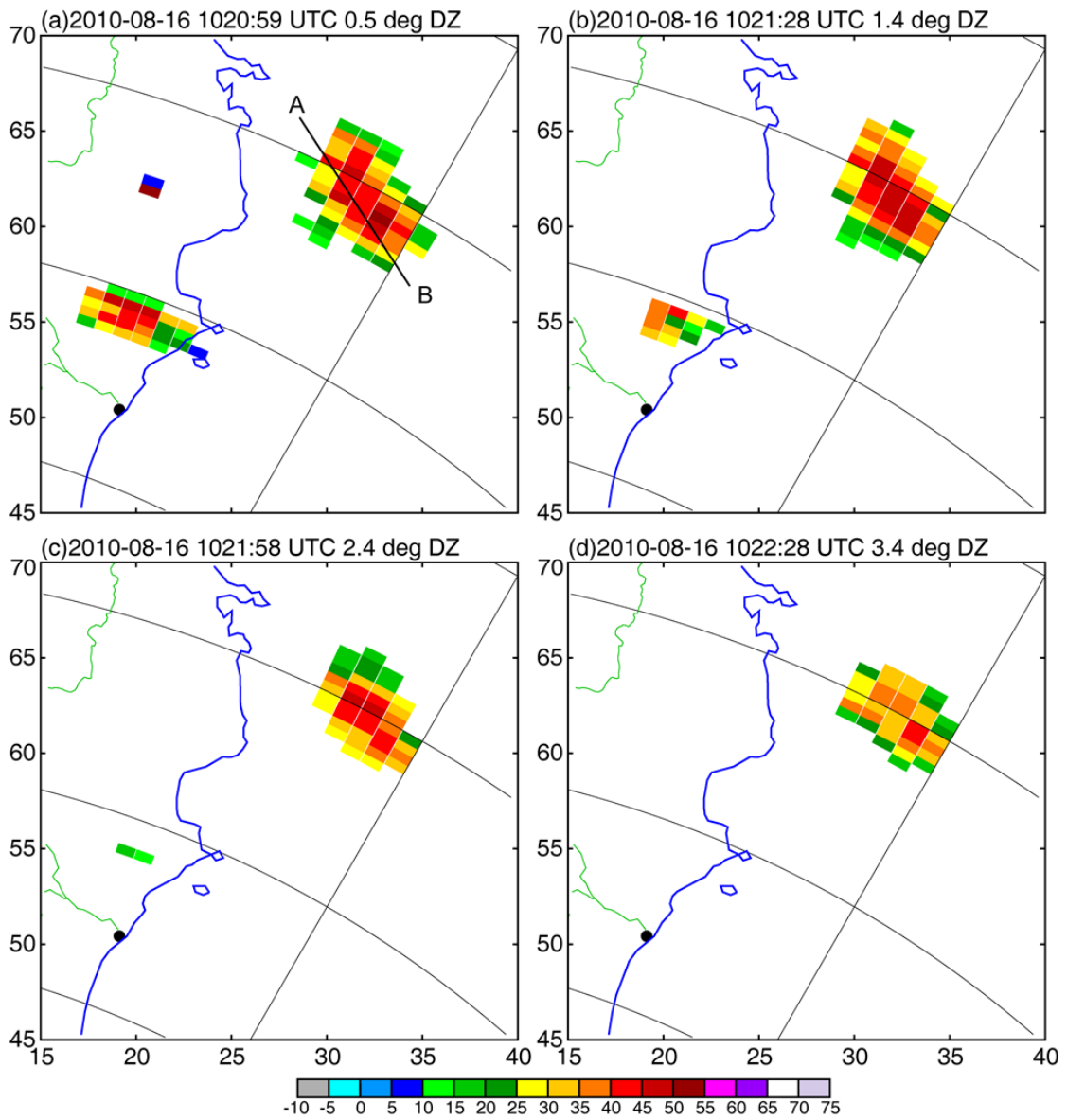


圖9 同圖7，但為 1019 UTC。

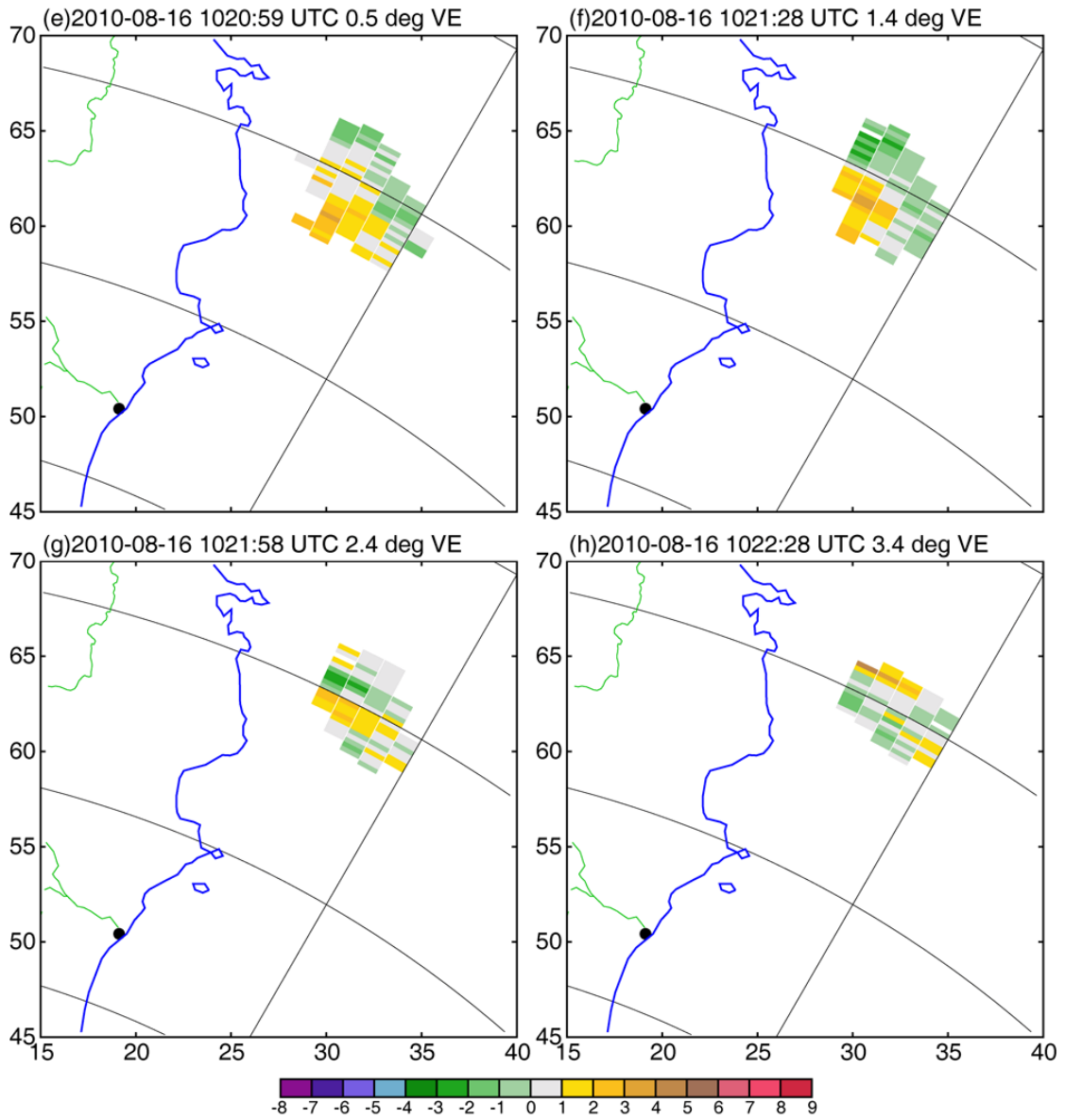


圖9 (續)

取雷達回波資料與照片同方位角之垂直剖面(圖 10·11 及 12, 剖面位置參考圖 7·8 及 9), 圖 10(a) 照片顯示積雲於發展期時, 積雲底部無明顯之雨區, 雷達回波垂直剖面(圖 10b) 顯示較強的回波出現在第三、四個仰角, 且回波頂(echo top) 可達第五個仰角(4.3 度) 高度約 5 公里, 而積雲底部之回波較上層為弱, 剖面之回波與照片所呈一致。第二個時間時照片顯示積雲底部出現明顯之雨區(圖 11a), 但區域並未擴及全積雲底部, 此時積雲已達成熟期, 最強回波位於第三個仰角且高度較前一個時間略低。到消散期時, 積雲照片可見底部均為降雨區(圖 12), 最強回波已降至最低層。此三個時間之雷達回波搭配照片及輻合、輻散場之分析清楚顯示雷雨發展過程之發展期、成熟期及消散期等三個階段(Byers and Braham 1949; Kingsmaill and Wakomoto 1991)。

由於資料空間解析度之限制, 本個案水龍捲渦度之增強僅能以積雲尺度的觀點探討之, 利用簡化的渦度方程式

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

積分可得

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

此方程式說明渦度之增強呈指數遞增, 其中 ζ 為垂直渦度, ζ_0 為初始渦度, t 為經過時間, 而初始渦度可源於垂直運動所產生的傾斜效應或是環境事先已存在之小渦旋(pre-existing vortex)(Wakimoto and Liu 1998)。本個案利用圖 8e 最大徑向速度(圖 8e 黑色箭頭處)估計相距 5 km 之速度差約為 8 m s^{-1} , 相當於輻合值約 $1.6 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, 積雲由發展期到成熟期(圖 8e)之時間約為 10 分鐘, 可得 $\zeta \approx 2.6\zeta_0$, 即渦度於 10 分鐘增強 2.6

倍。在此僅估計徑向風場之輻合, 而非完整風場之輻合, 故此渦度成長速度仍屬低估, 但仍提供可參考之渦度成長效率。

4. 水龍捲分析

前節之資料分析無法確認水龍捲之位置, 利用拍攝到之 30 張照片分析水龍捲(表一), 除了編號 6523 照片使用 12 mm 焦距外, 其餘照片使用 17~50 mm 之焦段。應用照相測量算出每照片中心線之方位角, 再以烏石鼻為參考點即可求得水龍捲之方位角。開始時雲底出現兩個漏斗雲(圖 10a V_1 及 V_2), 漏斗雲 V_1 持續發展成水龍捲, 而漏斗雲 V_2 僅觀測到約 6 分鐘即消散, 前六張照片(編號 6517~6527) 可訂出 V_2 的位置。探討 V_2 相對於 V_1 的移動, 首先 V_2 出現在 V_1 之左側距 V_1 約 450 公尺, 隨後 V_2 往 V_1 接近, 最後移動到 V_1 的右側而消散, 推測兩漏斗雲可能是產生於不同的母雲, 故移動方向不同。探討 V_1 水龍捲的定位, 開始時為漏斗雲, 之後漏斗雲延伸至海面而形成水龍捲, 難以確定水龍捲位於海面之位置, 但水龍捲在雲底之位置則可追蹤。表一顯示每一時間水龍捲之仰角及方位角, 水龍捲由攝影位置 77 度之方位向北移動至 60 度的方位, 隨距離變遠, 仰角由 2.05 度降到 1.58 度。

探討水龍捲的成長與積雲之關係, 當積雲於發展期時(圖 10), 雷達雖然無法測得垂直速度, 但由輻合場及積雲的發展情形可知雲底部應有強的上衝流(Updraft), 此上衝流帶動的抽拉作用(stretching effect) 使得漏斗雲產生。第二時間時(圖 11), 積雲底部已有明顯之降雨且雨區位於最高雲頂下方之左側, 顯示下衝流之位置亦位於雲頂下方之左側, 而水龍捲位置則位於最高雲頂的下方之右側, 下衝流所產生之外流與上衝流的

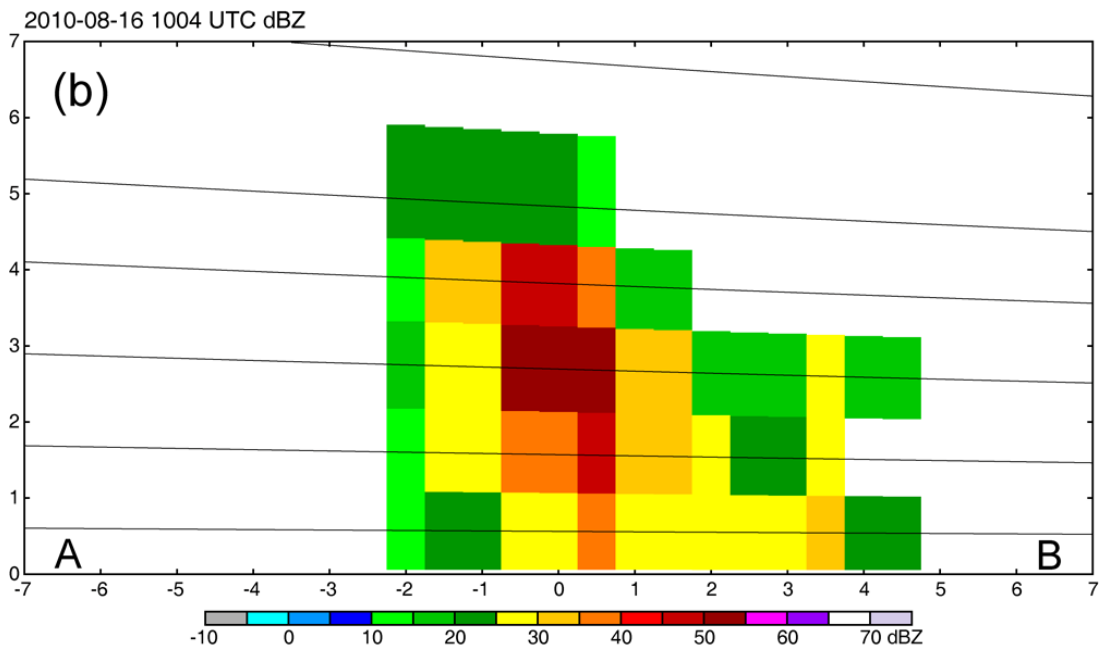


圖 10 (a)2010 年 8 月 16 日 1005:15 UTC 水龍捲照片 (左下角為漏斗雲 V_1 及 V_2 之放大圖) 與(b)1004 UTC 花蓮雷達回波垂直剖面(剖面位置標示於圖 7a 中), 回波中心方位角為 71.2 度, 黑色細線由下往上各為 0.5, 1.4, 2.4, 3.4, 4.3 及 6.0 度仰角。

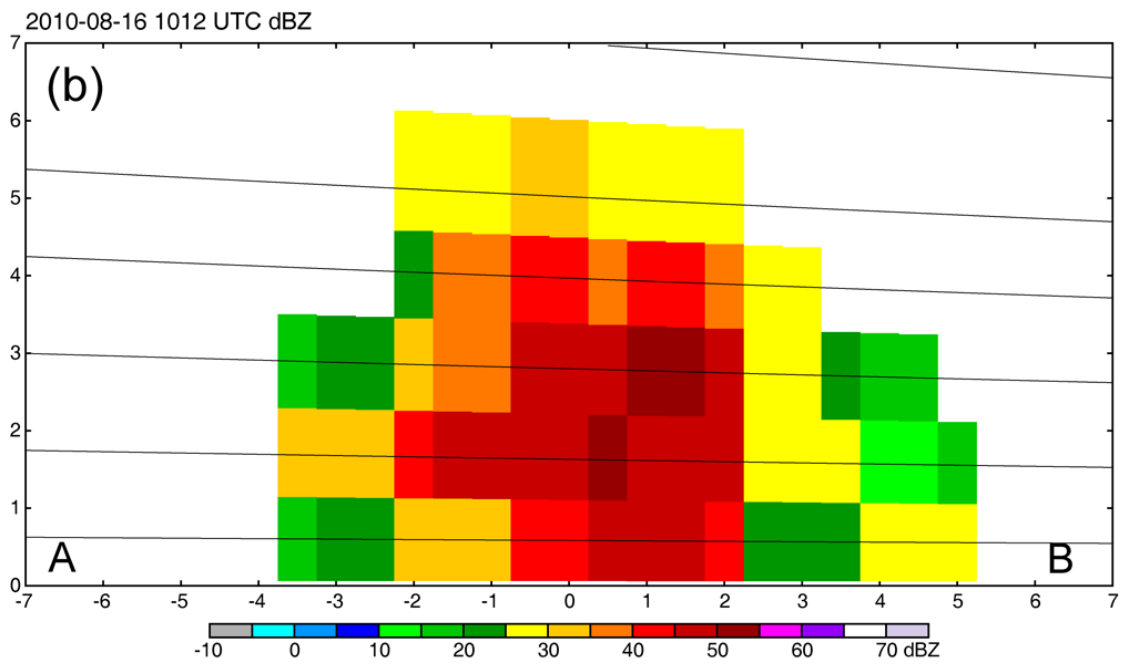


圖 11 同圖 10，但照片（黑色箭頭為水龍捲的位置）及雷達回波資料時間分別為 10:12:21 UTC 及 1012 UTC，剖面位置標示於圖 8a 中，雷達回波中心方位角為 69.3 度，(a)中右下角為相片編號 6538 之水龍捲。

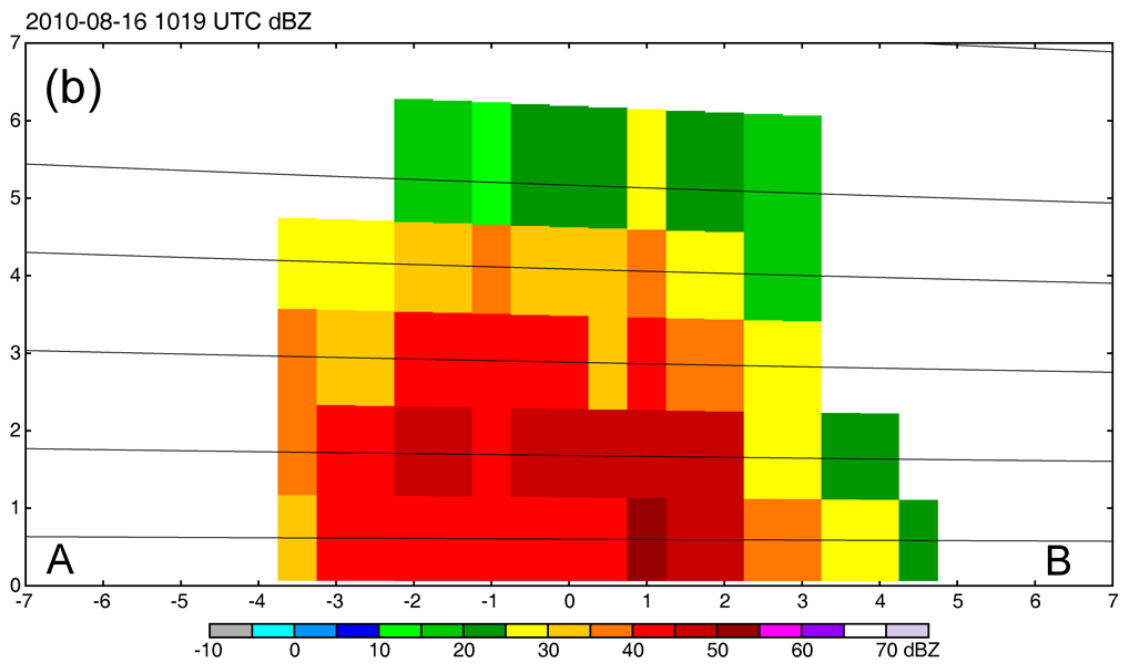


圖 12 同圖 10 但照片及雷達回波資料時間分別為 10:18:41 UTC 及 1019 UTC，剖面位置標示於圖 9(a)中，雷達回波中心方位角為 56.8 度，(a)中右下角為相片編號 6560 之水龍捲。

入流交會，使得輻合增強而加強抽拉作用，原先之漏斗雲得以持續發展成水龍捲延伸至海面（圖 11a 右下角之放大圖），也顯示渦流管（Vortex tube）幾乎呈垂直狀。至第三時間時積雲開始進入消散期（圖 12）雲底兩區域擴大，下衝流形成之外流區阻擋水龍捲的上升氣流且將水龍捲底部向外推，使得水龍捲呈傾斜狀（圖 12a 右下角之放大圖），導致水龍捲逐漸消散。

本個案之照片乃單點攝影，僅能求得水龍捲之仰角及方位角無法得知距離，

過去水龍捲之研究（例如：Wakimoto and Lew 1993）顯示水龍捲及母雲的移動路徑均呈直線運動且龍捲及母雲的移動速度一致。本個案之衛星雲圖（圖 6）及雷達資料顯示系統穩定向北移動，利用前面之三立體掃描的雷達資料，追蹤仰角 0.5 度最強回波的位置，可算出積雲（母雲）之移動速度為 5.5 m s^{-1} 往 11.9 度方位，再利用 1004 UTC 之雷達資料與照片編號 6519（10:05:15 UTC）水龍捲的位置求出水龍捲到攝影位置的距離。本個案中水龍捲跟著母雲移動，但允許水龍捲有不同之移向，利用此移速、仰角及方位角吾人可求得水龍捲於每一時間之距離及直徑（表一）。本個案前五張照片（編號 6517~6524）因漏斗雲剛形成無明顯的下伸，表一（粗體字）顯示漏斗雲之寬度由 40 公尺而寬度增加為 50 餘公尺，顯示漏斗雲有增強的趨勢。編號 6527 之後漏斗雲開始下延伸且水龍捲直徑明顯，將照片放大可較準確訂出直徑像素位置以求得其寬度。一般而言，龍捲（直徑）越大其強度越強，此水龍捲之直徑由積雲發展期時的 20 公尺增大到積雲成熟期時的 40 公尺，顯示積雲的增強伴隨水龍捲的成長，最後母雲進入消散期時，產生較強的外流使得水龍捲在很短的時間消失。

圖 13 將表一中所有水龍捲位置疊加於編號 6549 照片上（照片已經過裁切），用以表示水龍捲於不同時間之相對位置，垂直紅色線之方位為 63.21 度，紅色點為本照片時間水龍捲之位置，水龍捲向北移動離攝影點漸遠，故仰角越遠越低。這些水龍捲雲底位置雖得自不同時間，疊加後仍位於本照片之雲底，顯示雲底高度於個案分析期間無明顯之異動，利用表一之距離及仰角求出水龍捲位於雲底之高度約在 480~520 公尺間。

最後將各時間之水龍捲位置疊加於 1004 UTC~1019 UTC 三個立體掃描 0.5 度之雷達回波合成圖上（圖 14，圖上只顯示大於 20dBZ 之回波），合成圖顯示回波呈線性向北移動，前半段時間水龍捲移動方向幾乎跟著母雲方向移動，而當母雲達成熟期後，水龍捲之移動路徑開始偏離母雲，這種路徑偏離情形於龍捲風之個案中偶而被觀測到，但偏離原因並不很清楚（Brown and Knupp 1980; Wakimoto et al. 2003），於本個案中水龍捲位置與積雲之上衝流耦合在一起，當母雲達成熟後下衝流區域變大，相對的，積雲內之上衝流區減小且被推離積雲中心，使得水龍捲的路徑發生偏離現象。

四、結果與討論

本文對台灣地區所發生之水龍捲個案首次有較深入之探討，作者利用有限之觀測資料及水龍捲相片探討水龍捲發生之環境。綜觀天氣圖分析顯示大氣環境受副高外緣壓制，不利於大範圍對流之發生，然花蓮探空資料顯示中下層仍有對流不穩定的區域存在，局部的對流系統仍有機會發展，探空資料顯示 LCL 高度約 800 公尺，此高度與雲底高（約~500 公尺）相差約 300 公尺，可能原因乃花蓮探空地點是位於對流線的南側，大氣



圖 13 所有水龍捲位置疊加於編號 6549 照片。紅色點為本照片時間之水龍捲位置，紅色線分別為水平線及照片中中心線，黃色線為間距 4 度的方位角線及仰角線。

環境較乾，且時間相差約兩個小時，大氣環境也可能有異動，另一可能因素乃探空儀使用 Viasala RS80 的型號，此探空儀有乾偏倚 (dry bias) 之情況 (Ciesielski et al. 2009; 2010)，這些因素對 LCL 的高度計算均有影響。

本研究展示照片在科學研究上的使用，利用照相測量法可訂出照片上任何一點之仰角及方位角，若知道距離，則相片上物體的大小及距離均可求得。本研究利用花蓮雷達資料之輔助訂出積雲與攝影位置之距離且估計積雲的移動速度，進而求得水龍捲位於雲底的位置並且計算每一個時間水龍捲之直徑，直徑之大小反應水龍捲的強弱，照片紀錄水龍捲由漏斗雲增強為一完整之水龍捲到消散之全部過程，即使國外科學實

驗中也少有如此完整過程之個案。照片顯示之水龍捲成長到消散過程與積雲從發展期到消散期過程相當一致，而產生水龍捲之母雲不需發展得很高 (Wakimoto and Lew 1993)，本水龍捲之母雲回波高約 5~6 公里，以高度而言已高於一般可生成水龍捲積雲 3~4 公里之高度。

花蓮雷達一個完整之立體掃瞄所需時間為 7 分 30 秒，每個仰角的掃瞄時間約 30 秒，水龍捲發生時距雷達超過 60 公里，雷達資料解析度約為 $0.5 \times 1.1 \times 1.1$ 公里無法解析水龍捲，但可用以探討產生水龍捲之積雲。利用與照片相近之三個立體掃瞄雷達資料，清楚顯示積雲之發展期、成熟期及消散期三個階段，最強回波由較高之仰角下降到最底層是個典型的積雲發展過程。此三個時間

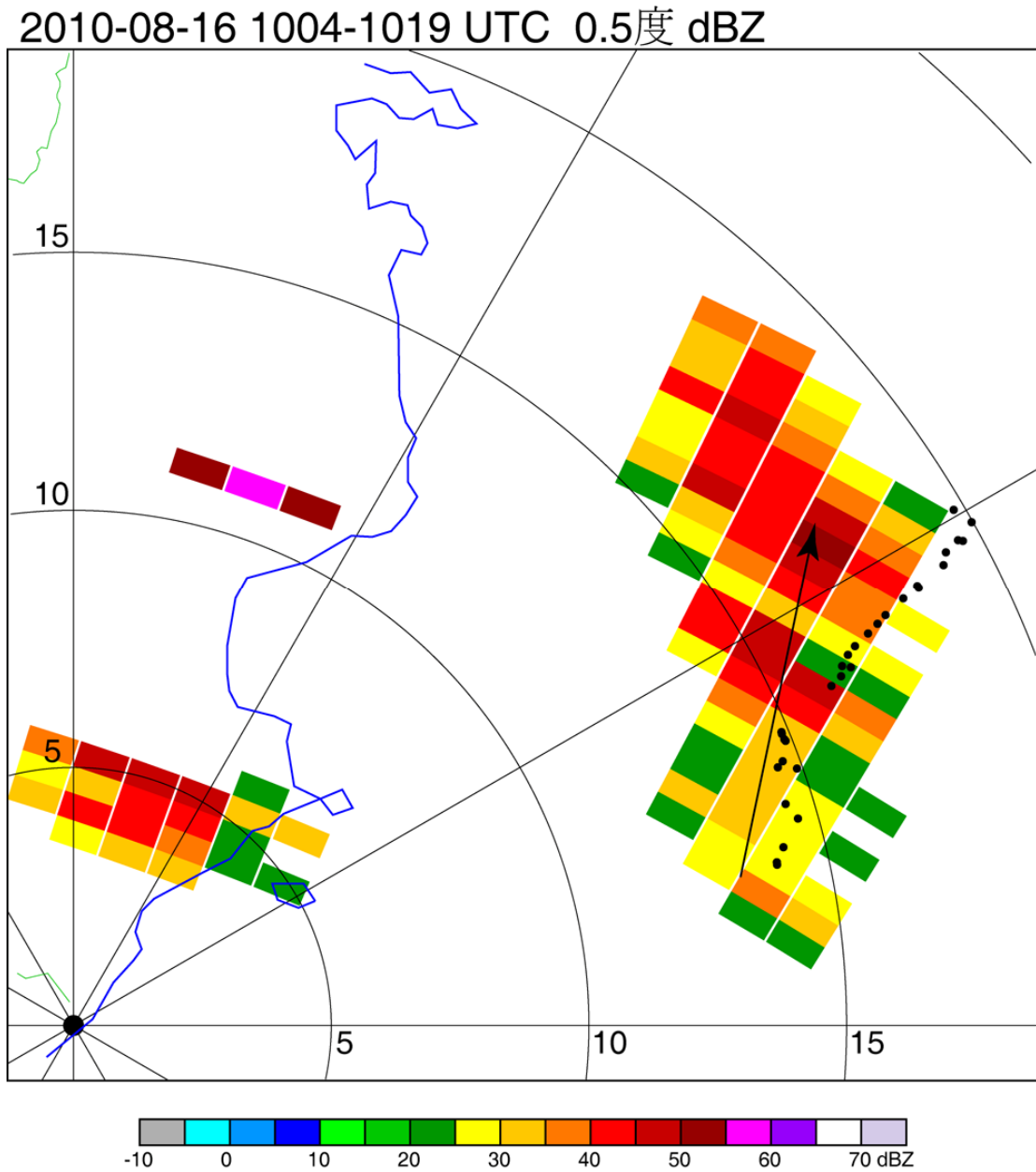


圖 14 2010 年 8 月 16 日 1004-1019 UTC 花蓮雷達連續三個立體掃瞄仰角 0.5 度回波大於 20dBZ 與水龍捲位置(黑色細點)疊加圖。座標軸原點為拍照地點，圓弧間距為 5 公里，黑色箭頭為母雲的移動方向。

之雷達回波與同時間之相片搭配(圖 10, 11, 12)顯示於發展期時水龍捲之漏斗雲剛形成, 漏斗雲持續發展成一完整之水龍捲, 當積雲達成熟期時, 水龍捲也發展到最強直徑可達 40 公尺, 積雲進入消散期時, 受到積雲下衝流外流影響, 水龍捲很快消散, 此乃首次於台灣地區觀測到積雲之發展與水龍捲之形成有良好關係之個案。本個案水龍捲之形成乃透過積雲發展之上衝流與下衝流之相互影響產生的, 上衝流之存在乃為必要條件, 下衝流產生之外流加強水平風切及輻合, 導致更強之上升氣流, 使得渦度扭轉項及抽拉項得以持續作用, 此下衝流有助於水龍捲的形成與加強, 但到了後期, 下衝流卻是讓水龍捲消散的主因 (Schwiesow 1981)。

水龍捲之移動, 前半段時間沿著母雲的方向移動, 但後半段時間路徑偏右, 這種偏離的情形在龍捲風的研究中也有類似情形 (Wakimoto et al. 2003), 於本個案中這種偏離現象猜測與積雲消散期時下衝流加強且面積加大, 迫使上升氣流外移使得水龍捲的移動路徑產生偏移, 確定的運作機制需要更有高解析度的觀測資料予以佐證, 或是用高解析度的雲模式加以驗證。本個案乃台灣地區研究水龍捲少有的案例, 未來將收集更多個案進行分析與統計, 希望能更清楚瞭解龍捲產生之環境及其生成、發展及消散之機制提供診斷分析之參考。

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的氣象資料、黃紹欽先生幫忙處理雷達資料、張智昇先生幫忙收集氣象資料、楊菁華小姐幫忙文稿的處理以及文章撰寫當中 Dr. Roger Wakimoto、李文兆博士、郭鴻基教授以及兩位審

查者提供諸多寶貴意見使得本文更具學術研究參考價值, 並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 MOTC-CWB-99-2M-04、國科會 98-2745-M-002-008-MY3、98-2111-M-002-007-MY2 及 97-2111-M-002-017-MY3 的支持。

參考文獻

- 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**, 319~335。
- 徐寶箴 1977: 賽洛瑪颱風與龍捲風, 《氣象學報》, **23**, 9-15。
- 曾俊傑、陳永強、劉振甫、劉清煌、黃紹欽 2006: 台灣東南海域劇烈天氣探討-水龍捲, 天氣分析與預報研討會, 中央氣象局台北市, 2006 年 10 月 18 日至 20 日。
- 莊月璇 2001: 台灣地區風速機率分佈之研究, 國立中央大學土木工程研究所碩士論文。
- 陳正改 1995: 台灣地區氣象災害分析, 《台北師院學報》第 8 期。
- 劉昭民 1996: 台灣的氣象與氣候, 常民文化。
- 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, 桃園縣龍潭, 2004 年 5 月 17 日至 20 日。
- Bluestein H. B., 1999: Tornado Alley - monster of the great plains, 180pp. Oxford University Press, Inc.
- Brady, R. H., and E. Szoke, 1989: A case study of nonmesocyclone tornado development in

- northeast Colorado: Similarities to waterspout formation. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 843-856.
- Brown, J. M., and K. R. Knupp, 1980: The Iowa cyclonic-anticyclonic tornado pair and its parent thunderstorm. *Mon. Wea. Rev.*, **108**, 1626-1646.
- Byers, H. R., and R. R. Braham, Jr., 1949: *The Thunderstorm*. U.S. Govt. Printing Office, 287 pp.
- Ciesielski, P. E., W.-M. Chang, S.-C. Huang, R. H. Johnson, B. J.-D. Jou, W.-C. Lee, P.-H. Lin, C.-H. Liu and J. Wang, 2010: Quality-controlled upper-air sounding dataset for TiMREX/SoWMEX: Development and Corrections. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **27**, No. 11, 1802-1821.
- , R. H. Johnson, and J. Wang, 2009: Correction of humidity biases in Vaisala RS80-H sondes during NAME. To appear in *J. Atmos. Oceanic Technol.*
- Doswell, C. A., 2001: *Severe Convective Storms*, 561pp. American Meteorological Society.
- Fujita, T. T., 1981: Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales. *J. Atmos. Sci.*, **28**, 1511-1534.
- Golden, J. H., 1974a: The life cycle of Florida Keys' waterspouts. I. *J. Appl. Meteor.*, **13**, 676-692.
- , 1974b: Scale-interaction implications for the waterspout life cycle. II. *J. Appl. Meteor.*, **13**, 693-709.
- , 1977: An assessment of waterspout frequencies along the U.S. East and Gulf Coasts. *J. Appl. Meteor.*, **16**, 231-236.
- Holle, R. L., 1986: Photogrammetry of thunderstorms. *Thunderstorms: A Social and Technological Documentary*, 2d ed., E. Kessler, Ed., Vol. 3, University of Oklahoma Press, 77-98.
- , and M. W. Majer 1980: Tornado formation from downdraft interaction in the FACE mesonetwork. *Mon. Wea. Rev.*, **108**, 1010-1028.
- Kassander, A. R. Jr., and L. L. Sims 1957: Cloud photogrammetry with ground-locked K-17 aerial cameras. *J. Meteor.*, **14**, 43-49.
- Kessler E., 1992: *Thunderstorm Morphology and Dynamics*, 411pp. University of Oklahoma Press.
- Kingsmill, D. E., and R. M. Wakimoto 1991: Kinematic, dynamic, and thermodynamic analysis of a weakly sheared severe thunderstorm over Northern Alabama. *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 233-261.
- 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.
- Rasmussen, E. N., J. M. Straka, R. Davies-Jones, C. A. Doswell, F. H. Carr, M. D. Eilts, and D. R. MacGorman, 1994: Verification of the origins of rotation in tornadoes experiment: VORTEX. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **75**, 995-1006.
- Schwiesow, R. L., 1981: Horizontal wind structures in waterspouts. *J. Appl. Meteor.*, **20**, 349-360.
- 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. Penc, 1991: A Great Salt Lake waterspout. *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 2741-2770.
- Wakimoto, R. M., and P. G. Black, 1993: Damage survey of Hurricane Andrew and its relationship to the eyewall. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **75**, 189-200.
- , H. V. Murphey, D. C. Dowell, H. B. Bluestein, 2003: The Kellerville Tornado during VORTEX: Damage survey and Doppler radar analyses. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 2197-2221.
- , and J. K. Lew, 1993: Observations of a Florida waterspout during CAPE. *Wea. Forecasting*, **8**, 412-423.
- , 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 H. Cai, 2000: Analysis of a nontornadic storm during VORTEX 95. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 565-592.
- , and J. W. Wilson, 1989: Non-supercell tornadoes. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 1113-1140.

Analyses of YiLan NanAo waterspout

Ching-Hwang Liu¹ Pei-Min Tsai²

¹**Department of Atmospheric Sciences, Chinese Culture University**

²**YiLan County, NanAo Elementary School**

(manuscript received 12 January 2011 ; in final form 30 March 2011)

ABSTRACT

A waterspout observed on 16 August 2010 near YiLan NanAo is presented. A sequence of waterspout pictures combining with the Hua-Lain radar data were used to study the waterspout development and its parent cloud. The photogrammetry technique was applied to compute the elevation and azimuthal angles of the waterspout. Using the radar echo, the distance from the photo site to the parent cloud was computed. Accordingly, the size and height of the waterspout were obtained. Result has shown close relationship between the waterspout development and the growth of its parent cloud. The funnel cloud was formed during the cumulus developing stage and then intensified as a fully developed waterspout while the parent cloud reached its mature stage. Subsequently the waterspout dissipated while the parent cloud was dissipating. The track of the waterspout followed its parent cloud at the beginning stage. However, the track deviated to the right of the parent cloud at the later stage. A hypothesis of this deviation was due to the downdraft occupying larger the sub-cloud area of the cumulus cloud pushing the updraft core to the periphery area that resulted in the waterspout deviating its track. This is the first detail waterspout study in Taiwan area using very limited available data. The results will advance our understanding of the relationship between a developing waterspout and its parent cloud which may benefit to the weather forecast.

Key Words: waterspout, tornado, funnel cloud, photogrammetry, cumulus convection, downdraft

