

應用馬公C波段雙偏極化雷達進行冰雹個案分析

林育邦¹ 魏志憲² 郭淑泠² 陳台琦³

¹空軍氣象聯隊氣象中心

²國防大學理工學院環境資訊及工程學系

³中央大學大氣物理研究所

摘要

本研究計畫利用空軍氣象聯隊新一代C頻雙偏極化(C-Pol)雷達進行馬公降雹個案之分析，初步結果顯示此雷達在辨別水象粒子上具有不錯的能力，更進一步對此雹暴對流系統特徵作分析，包括使用各個雷達參數的密集觀測資料，以及結合七股徑向風資料計算雙督卜勒三維合成風場，配合水象粒子分類，以了解此雹暴之雲物理結構及演進發展之特徵與過程。

關鍵字：雙偏極化雷達、水象粒子分類、雹暴對流系統特徵

一、前言

過去傳統的天氣雷達傳送和接收平行於水平電場的線性電磁波輻射；後期發展出雙偏極化新一代氣象雷達是增加一垂直方向的電場電磁波輻射，藉水平與垂直參數差異，來估算獲得水象粒子的大小、形狀、指向以及熱力相態等訊息，反演雨滴數目隨形狀的變化，進而準確估計出降雨量，或經過模糊邏輯方法，即時分類降水型態，如雨滴、冰晶、雪花、冰雹、過冷水等。

飛機遭高空冰雹撞擊是影響航空安全的惡劣天氣之一，列舉：2006年6月南韓一架搭載200名乘客的A321型客機，從濟州島飛往首爾途中，遭遇雷電和冰雹襲擊，機鼻斷裂、駕駛艙玻璃碎裂。任何飛行危安因子，均會使國力耗損，綜合上述冰雹研究結果：最初的粒子型態都與過冷水息息相關。若能藉由各式天氣圖、儀器觀測、甚至模式預報及早

發現過冷水可能分布區域，必能達成及時預警之效。

空軍氣象聯隊基於危害性天氣之監測與預警效果以及改善機場短時天氣預報提高空軍氣象服務品質，於2008年9月完成清泉崗及馬公二座新一代氣象雷達提升案，自德商Gematronik公司引進具有雙偏極化功能之C波段都卜勒氣象雷達，為國內氣象作業用雷達開闢下一代氣象雷達應用新紀元，未來將與氣象學界、氣象局、水利單位合作，針對劇烈降雨估算與預報、偵測冰雹、大氣中水象粒子之分辨及改善雷達資料的品質等功能發揮最大的貢獻。本文將逐一介紹雙偏極化雷達各參數功能及其應用，並針對2009年03月6日清晨澎湖地區發生冰雹個案分析。

澎湖馬公機場南方98年3月5日2212UTC（地方時3月6日晨0712時），降下十一年來相當罕見的冰雹，大小宛如五十元硬幣且持

續二十幾分鐘，適逢澎湖馬公空軍氣象中心完成新式C波段雙偏極化雷達換裝，故此構思進行個案驗證及研究。

二、雙偏極化雷達參數及觀測原理

雙偏極化雷達主要發射出水平、垂直偏極化方向的電磁波，觀測回波(Z_{HH})、差異反射率(Z_{DR})、差異相位差(Φ_{DP})、比差異相位差(K_{DP})和相關係數(ρ_{HV})。這些雙偏極化參數對於水象降水粒子之物理特性：種類、形狀、大小、相態、密度和降落的行為非常敏感，以下分別敘述五種常用偏振參數：

(一) Z_{HH} 、 Z_{VV} ：Reflectivity (回波)

方程式中： Z_{HH} 水平偏極回波、波長、 N 粒子個數、 D 粒子直徑、 σ 反散射截面積、 $|K|^2$ 介電因子。

由雷達接收到水象粒子所反射回來的平均電磁波功率導出，回波是為反射率因子。回波會和水象粒子的數量、形狀、種類有關。例如：大雨滴的回波會比小雨滴大，冰雹的回波也會比雨滴大。

(二) Z_{DR} ：Differential reflectivity (差異反射率)

方程式中 Z_{DR} 是水平偏極回波 Z_{HH} 和垂直回波 Z_{VV} 的比例，此參數受水象粒子種類、形狀(軸比=短軸長度除以長軸長度)、密度影響。當雨滴越大時，形狀越扁平(短軸長度除以長軸長度越小)， Z_{DR} 越大。但冰雹在掉落過程中會翻滾，所以在解析體積內水平、垂直回波值會差不多，因此 Z_{DR} 趨近零。所以即使 Z_{HH} 很相近，但 Z_{DR} 有明顯差異，即可初步判斷：雨滴粒徑大小不同。當 Z_{HH} 很大， Z_{DR} 趨近零則有可能是冰雹。

(三) Φ_{DP} ：Differential phase shift (差異相位差)

當水平和垂直電磁波通過水象粒子區域時，其水平、垂直電磁波的相位差。和水象粒子形狀、種類、個數有關。當所經過的區域為大水滴(形狀較扁平)，其水平回波的相位會落後垂直，而當粒子數日多時，相位差會以累積方式增大，則 Φ_{DP} 越大，此現象可由沿著一個方向的 Φ_{DP} 剖面，明顯看出其增加的趨勢。

(四) K_{DP} ：Specific differential propagation phase shift (比傳播相位偏移差)

方程式中比差異相位差 K_{DP} 為 Φ_{DP} 對距離的微分，和水象粒子形狀、種類、個數有關。 K_{DP} 和接收機、發射機的校正無關，並且不會受到衰減、地形或波束遮擋 (beam blockage) 的影響，所以對於定量降水估計有很大的幫助。

(五) ρ_{HV} ：Cross-correlation Coefficient (相關係數)

$$\rho_{hv}(0) = \frac{\langle S_{VV} S_{HH}^* \rangle}{\sqrt{\langle |S_{HH}|^2 \rangle \langle |S_{VV}|^2 \rangle}}$$

其中 $\langle \rangle$ 代表期望值，為假設水象粒子的大小、形狀、傾斜角是依統計特性的分佈；* 代表共軛複數。

在連續時間裡雷達觀測到同一解析體積中 Z_{HH} 和 Z_{VV} 之間相關性的指標。若該解析體積裡的水象粒子的形狀、大小、降落方式等很接近，則觀測到的水平、垂直回波相關性就會很大，相關係數大。例如在純雨區 ρ_{HV} 會大於 0.99，而在冰、水混合區則出現較低相關係數。

三、資料來源

本研究主要使用澎湖馬公C波段雙偏極化雷達觀測98年3月5日23UTC (地方時3月6

日晨7時)，鋒面系統造成澎湖馬公降下冰雹個案研究分析，同時驗證水象分類準確性，觀察、分析雹暴的生長狀況。

(一) 澎湖馬公雷達

澎湖馬公基地於 97 年 9 月中完成型號 Gematronik METEOR-1500C 雙偏極化雷達建案，該設備地處東經 119.634399 度、北緯 23.562901 度，標高 48 公尺，波長 4.709 公分，表一為馬公雷達系統規格，此雷達在本研究中所使用觀測參數計有 Z_H (Reflectivity)、 Z_{DR} (Differential reflectivity)、 ρ_{HV} (Cross-correlation Coefficient)、 K_{DP} (Specific differential propagation phase shift)、 Φ_{DP} (Differential phase shift) 五種。

由於馬公雷達屬作業用雷達，在個案分析期間，雷達每一個波束上的距離單位 (gate) 為 240 公尺，掃瞄半徑為 120km，掃瞄策略仰角分別為 0.5°、1.4°、2.4°、3.4°、4.3°、6.0°、9.9°、14.6°、19.5°、25° 共 10 層仰角掃瞄，一次體積掃瞄 (volume scan) 約需 4 分 33 秒完成，掃瞄策略定為每十分鐘執行一次。

(二) 研究方法與步驟

澎湖馬公雷達使用 RainbowDART 軟體製作水象粒子分類圖，處理程序如圖 3.1，首先對原始資料進行品質管制 (Quality Control)：

步驟一：針對 K_{DP} 資料進行驗證，將同一筆 Φ_{DP} 使用中央大學反演 K_{DP} 方法 (紀，2005, [1]) 計算，結果與 Rainbow 計算出的 K_{DP} 結果相仿。

步驟二：針對 Z_H 、 Z_{DR} 係統偏移進行修正，首先利用層狀區下小雨滴趨近於圓形的特性，找出 Z_{DR} bias 約為 0.7dB，接著引用紀 (2005) [1] 公式法計算 Z_H bias 式子如下：

$$Z_{bias} = Z_H - \frac{10}{0.98} \left[0.2 \times Z_{DR} + \log \frac{K_{DP}}{1.46 \times 10^{-4}} \right]$$

其中 Z_H 、 Z_{DR} 均經過 Bringi et al. (1990) [4] 的線性衰減修正方法修正。最後求得 Z_H bias 約為 0.54。

步驟三： Z_H 、 Z_{DR} 經過系統偏移及衰減修正後，使用 Rainbow 軟體進行「初步水象粒子分類」，使用經模糊邏輯 (Fuzzy Logic) 法，其中隸屬函數同使用 Kessinger, et al. (1999) [2] 梯形分布，分成地面雜波 (指建物或樹木，不移動的非氣象回波)、晴空回波 (指鳥、昆蟲，會移動的非氣象回波) 及氣象回波三類，並將前兩類濾除。

步驟四：在使用 Rainbow 軟體將水象粒子部分，再一次使用模糊邏輯 (Fuzzy Logic) 流程 (圖 3.1)，最後區分出：冰雹、冰水混相、軟雹、雪、雨... 等 11 種水象例子。

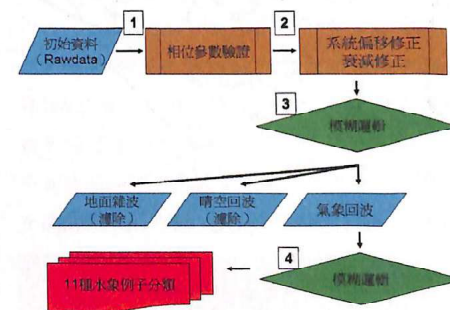


圖 3.1 水象粒子分類流程圖。

四、個案天氣分析

(一) 地面高空天氣圖分析

圖 4.1 為 3 月 6 日 00 UTC (地方時 3 月 6 日 08 時) 之中尺度地面天氣圖，顯示低壓中心位於台灣中部到南部一帶，勢力向西延伸至廣東省一帶，澎湖馬公地區受低壓鋒面影響，且有明顯發展趨勢，在動力上提供底層良好的輻合機制，且低層為風向均偏北風。

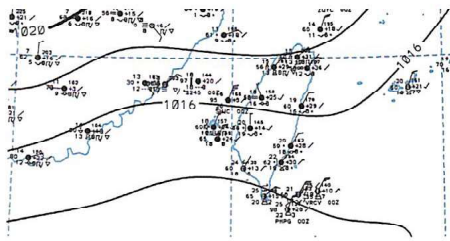


圖4.1 3月6日00 UTC地面中尺度分析圖。

850hPa高空分析圖(圖4.2a、b)上顯示6日00UTC(地方時6日8時)位於海峽中北部有一明顯氣旋式環流(紅色圓圈處),配合濕度場資料分析是為一底層低壓環流,且位於台邊西線沿海至海峽中線一帶地區風場由低層的偏北風轉變為南風,顯示明顯風切。

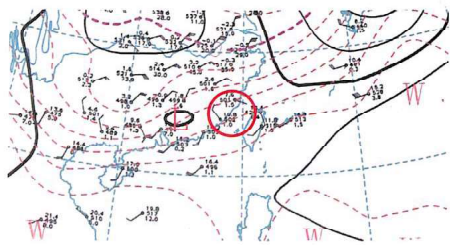


圖4.2 資料時間3月6日00UTC的850hPa高空分析圖。

(二) 探空資料分析

由探空圖的溫度露點線分析,600hPa以下溫度露點相近表示溼度較高,且底層900hPa的逆溫現象屬鋒面逆溫,0°C高度3.8km,風向由地面的北風至850hPa轉成西南風,風隨高度逆轉顯示存在冷平流及上下風切不連續面。

同時底層有少量負能區,並無正能區分布,配合偏低的CAPE值34.5表示環境場穩定,熱力場舉升作用微弱,若無動力舉升出現,不易出現劇烈天氣。

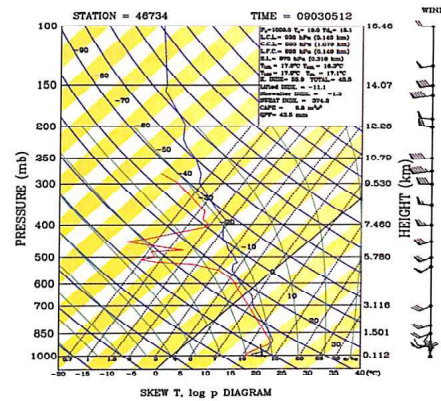


圖4.3 馬公探空資料時間3月6日00UTC。

(三) 衛星雲圖資料分析

3月6日每小時色調強化衛星雲圖(圖4.4)顯示大陸東南沿海一帶存在發展旺盛鋒面對流雲系,藉由連續圖分析此鋒面向東移動,其水平尺度東西方向約達4個經距,南北則約7個緯距,主體以勢力變化可劃分為南北兩塊對流胞,北方勢力由強減弱,南邊對流胞則由弱增強,由地理位置研判對海峽中部一帶地區及澎湖造成劇烈天氣影響。

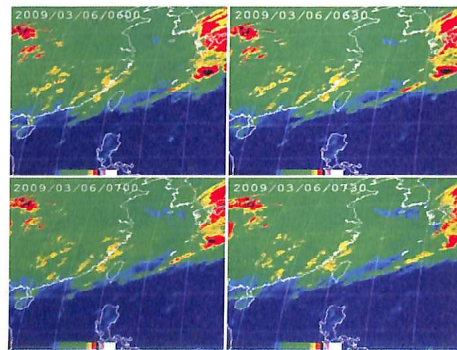


圖4.4 3月5日22時30分UTC至23時30分UTC,色調強化彩色衛星雲圖,海峽一帶具有明顯鋒面生成東移。

(四) 雷達資料分析

雷達分析上,Zrníc and Ryzhkov(1999)[3]認為雙偏極化雷達已經通過兩個重要測試:偏極化的資訊包含水象粒子特性,以及反演足夠精確度的其它訊息。由於雙偏極化雷達對於水象粒子(hydrometeor)的個數、介電常數(dielectric constant)、形狀、粒徑與降落時的傾斜角分布有不同反應,所以雙偏極化雷達較傳統雷達具備更多的能力:

- (1)改善雷達資料品質,濾除非氣象回波。
- (2)獲得解析體積內雨滴的統計資訊(如:雨滴粒徑分布)。
- (3)利用模糊邏輯(fuzzy logic)辨別空間中的水象粒子。
- (4)能夠得到較為準確的定量降水估計。

馬公雷達回波圖資料時間序列分析(如圖4.5)由6日06時52分至6日7時22分四張連續圖,顯示西南海面有一弓狀回波向東北東移入澎湖,且最大回波達60dBZ以上。

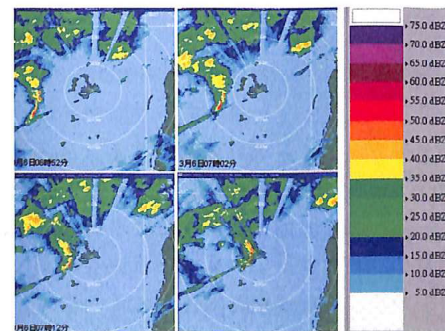


圖4.5 地方時3月6日06時52分至07時22分仰角0.5度,連續回波圖。

據當地值班人員及報導指出冰雹發生在地方時6日7時20分馬公西南方五德及鎖港里(據報導第一個檢到冰雹的地方),利用雙偏極化雷達0722時水象粒子分類圖

(ECLASS:利用模糊邏輯法對雙偏極化雷達觀測參數進行各水象粒子分類),圖4.6所顯示為0.5°水象粒子分類圖,位於馬公機場西南方五德及鎖港里(據報導第一個檢到冰雹的位置)處有「Rain-hail mixture(雨—冰雹混合)」訊號發生。

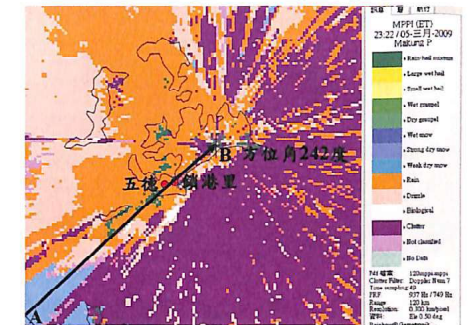


圖4.6 仰角0.5°水象粒子分類圖。

圖4.7針對回波移入時最接近的時間點6日7時22分(地方時)做方位角242度通過五德及鎖港里上空剖面,可以明顯發現垂直分布有出現雨—雹混合訊號(綠色區域)顯示水象粒子分類結果與實際現象互相符合。

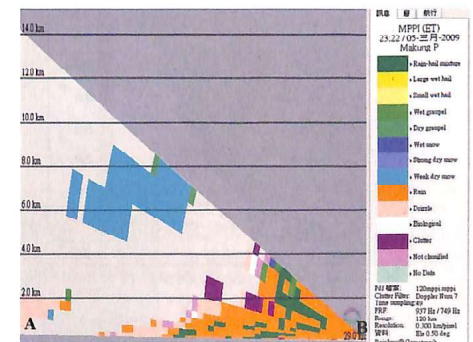


圖4.7 地方時3月6日07時22分,水象粒子分類與徑向風場垂直剖面圖。

(五) 雙都卜勒合成風場配合雷達資料分析

欲分析電暴對流系統在海上發展狀況，選取資料時間地方時3月6日0702時分析，並結合七股雷達反演雙都卜勒三維風場(如圖4.8)。

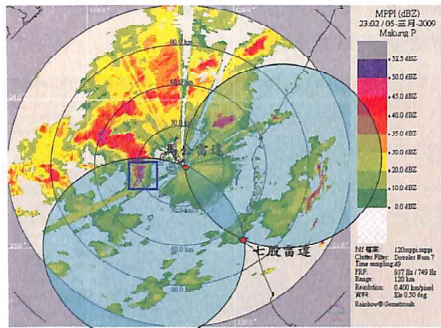


圖4.8 合成風場圖範圍示意圖，藍色方框為電暴系統分析範圍。

觀察定高面1km風場變化(如圖4.9)電暴主體前緣的位置出現氣旋式風場的輻合現象。

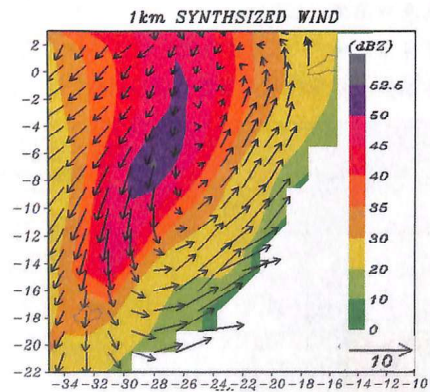


圖4.9 高度1km合成風場圖，色階表回波。

接著在相同資料時間，高度3km平面上選取回波最大以及上升速度最高的位置進行剖面(如圖4.10)。

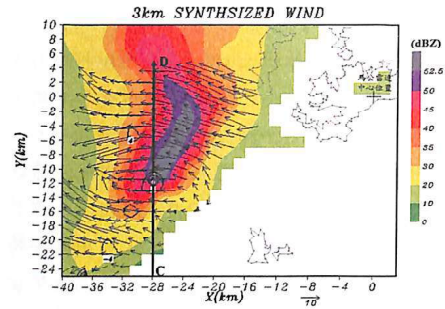


圖4.10 剖面示意圖。

各參數與相對風場(即三維風場扣除系統移動速度)剖面圖(圖4.11a)並配合PID與垂直運動圖(圖4.11b)，列舉(A)(B)(C)(D)(E)(F)(G)七個區域分述：

(1)編號(A)區域：在回波30~40dBZ(粒子變小或個數減少)的範圍，出現4~5dB(水象形狀非圓形)較高的ZDR值(如圖5.5a)，配合0~1deg/km弱KDP值表含水量少(如圖5.5b)、及介於0.85~0.9偏低pHV值存在冰水混相(如圖5.5c)，綜合各參數特徵涵義，水象粒子中同時具有體積小、形狀不規則及冰水混相的特性即是濕軟雹，而PID圖(如圖5.5d)也分類出雨及濕軟雹兩種類型，配合相對風方向，此區域風場是從電暴系統內送出，且具速度2~4m/s的弱上升氣流(如圖5.5e)。綜合以上，電暴內部風場將較小、較輕的濕軟雹帶出，以及洋面水氣受微弱上升運動抬升，造成此區域的冰水混相情況。

(2)編號(B)區域：回波大於50dBZ，ZDR值2~3dB(如圖5.5a)，配合KDP值大於3deg/km(如圖5.5b)且pHV值在0.8~0.85(如圖5.5c)顯示存在冰水混相情形，在分類上則包含冰水混相及濕軟雹兩種類型(如圖5.5d)，配合垂直運動其上升速度為8m/s(如圖5.5e)。綜合以上，上升氣流將低層較小

的軟雹及水滴帶往靠近0°C空層，經溶化(riming)作用使濕軟雹增大，同時強上升氣流能承托住較重的軟雹，後隨內部風場向東北移動，而較輕的水滴則會被送往更高層凝結。

(3)編號(C)區域：位於強上升氣流8m/s的頂端(如圖5.5e)，回波降至20dBZ而ZDR值降至0.5 dB以下(如圖5.5a)，KDP值也低於1deg/km(如圖5.5b)，但pHV值則在0.9~0.95間(如圖5.5c)，PID圖(如圖5.5d)對此區域分類是為高密度的乾雪類型。綜合以上，這個現象即是「白吉龍過程」(Bergeron

process)，大氣中對熱的傳導效率很低，是故低於0°C時不會馬上凍結，依然可以液態水相態存在，此稱為過冷水，而當溫度低於15°C且同時存在過冷水、水汽與冰晶時，基於擴散原理過冷水會由水汽高的地方往水汽低的地方移動，即由水汽凝結成冰晶。此區域高度約7km由探空資料(圖4.4)顯示溫度約-20°C，是故經凝積(deposition)現象產生的冰粒子到達強上升氣流頂端後，會如噴泉般的往四周散落，但在本個案主要隨高空風向東北風移動。

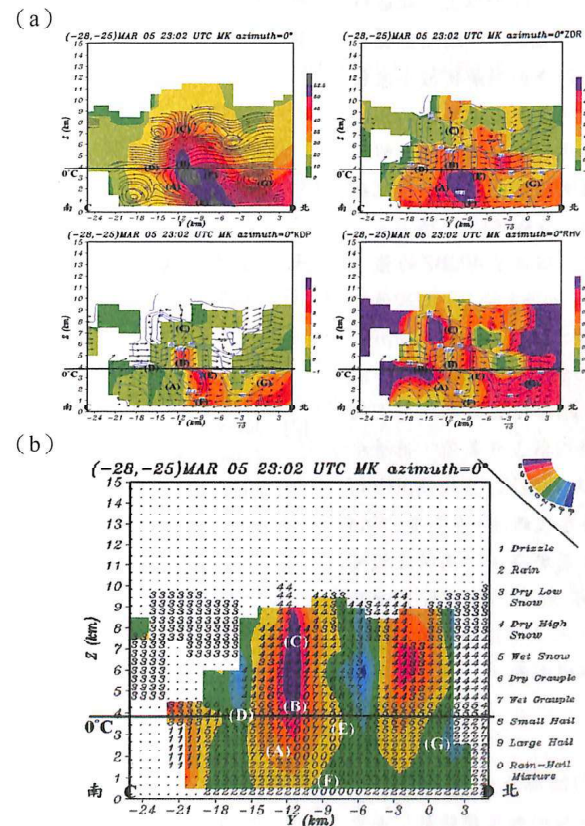


圖4.11 (a)四種參數配合相對運動場剖面圖。(b)水象粒子分類結果配合垂直速度剖面圖。

(4)編號(D)區域：回波值約30dBZ，ZDR值在1~2dB之間(如圖5.5a)，KDP低於1deg/km(如圖5.5b)，而pHV值大於0.97(如圖5.5c)，高度位於0°C凝結層位置其水象分類含有濕雪及降雨(如圖5.5d)，且具有弱下沉運動(如圖5.5e)。綜合以上，可以了解此區域即融解層(melting layer)是為層狀區。

(5)編號(E)區域：回波在40~50dBZ之間，ZDR值介於2~4dB(如圖5.5a)，KDP值也介於2~4deg/km(圖5.5b)，而pHV在0.85~0.95區間(如圖5.5c)，配合PID圖(如圖5.5d)包含冰水混相及濕軟雹。綜合以上，此區域位於垂直環流中心(如圖5.5e)雖然垂直運動微弱，但仍可以帶動表面融解後較小冰粒子順著內部風場，再次進入雹暴主體的強上升氣流區，如此不斷進行凝結及表層溶解的循環，粒子重量會逐漸增加直到上升氣流無法維持而下落至地面(如編號(F)區域)。

(6)編號(G)區域：回波在40dBZ的強，ZDR值在1~2dB之間(如圖5.5b)，KDP值介於1.5~2deg/km(如圖5.5c)而有較高的pHV值在0.97以上(如圖5.5d)，故PID圖(如圖5.5d)上顯示為雨，配合相對風場均為下沉氣流，由於內部風場均無上升氣流，低層水汽無法到達0°C高度凝結成冰，且由高pHV判斷水象粒子即純液態水或純冰，在高度2.5km的位置顯示此區域是屬於降雨，同時比較編號(E)區域得知雹暴系統主體後方首先會降下冰雹或水包冰的冰水混相粒子，離主體越遠則降下的粒子會轉變成雨。

五、結論

Doswell(1987)[4]認為大尺度的有利條件，僅能影響對流系統的強度與發展，而中尺度的強迫舉升過程，是主宰劇烈天氣系統

爆發時間與地點的重要因子。綜合以上各個條件，3月5到6日澎湖位於鋒面前緣輻合不穩定區域，系統提供了動力向上發展，且地理位置四周環海提供充沛水氣，是劇烈天氣能夠發展的重要因素。

本文乃藉由馬公降雹事件，初步證實了雙偏極化雷達分辨水象粒子功能的成效，並經由密集的觀測資料，了解強對流胞發展的演變過程，藉由雙偏極化雷達各參數所代表的不同物理意義，未來仍可持續嘗試去探討冰雹成長的雲物理過程、或應用雙普勒三維風場分析雹暴的動力機制，預先掌握降雹發生。

六、誌謝

銘謝中央氣象局周思運先生在Rainbow 5雷達程式應用給予建議及指導。

七、參考文獻

- [1] 紀博庭，紀利用中央大學雙偏極化雷達資料反求雨滴粒徑分佈及降雨率方法的研究，國立中央大學大氣物理研究所碩士論文，80頁，2005。
- [2] Kessinger, C., S. Ellis, and J. VanAndel, 1999: A Fuzzy Logic Radar Echo Classification Scheme for the WSR-88D, Preprints, 29th International Conference on Radar Meteorology, AMS, Montreal, 12-16 July 1999, 576-579
- [3] Zmic, D.S., and A. V. Ryzhkov, 1999: Polarimetry for weather surveillance radars. Bull. Amer. Meteor. Soc., 80, 389-406.
- [4] Doswell, C. A., III, 1987: The distinction between large-scale and mesoscale contribution to severe convection: A case study example. Wea. Forecasting, 2, 3-16.

Hail Detection by RCBM C-band Dual-Polarization Radar

Yu-Bang Lin Chin-Hsien Wei
Shu-Ling Kao Tai-Chi Chen Wang

Abstract

The purpose of this study is to verify the function of RCBM C-band Dual-Polarization (C-Pol) Radar to identify hydrometeor particle types. The hailstorm happened in Making on 6 March 2009 is adopted in this case study. The preliminary analysis shows that the capability of the radar's identification algorithm is acceptable. The convective precipitation structures and revolution characteristics are analyzed further to help to understand the cloud microphysics processes in this hailstorm.

Keywords: dual-polarization radar, particles identification, hailstorm