

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、郭淑玲¹、陳台琦²、魏志憲¹

國防大學理工學院環境資訊及工程學系

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3月6日清晨澎湖地區發生冰雹個案分析。

98年3月5日2212UTC（地方時3月6日晨0712時）澎湖馬公機場南方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，適逢澎湖馬公空軍天氣中心完成新式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、種類有關係。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，而當粒子數目多時，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、地形或波束遮蔽(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5.309公分，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，掃描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，處理程序部分如圖3.1，首先對原始資料進行品質管制(Quality Control)：

步驟一：DPATC (Dual Pol based Attenuation Correction)：由於 Z_H 、 Z_{DR} 皆為電磁波功率之推導量，因此在降水系統內之

觀測量必須經過能量衰減修正後才可使用。Bringi et al.(1990)[4]假設ZH的衰減量(attenuation)為 A_H ， Z_{DR} 的差異衰減量(differential attenuation)為 A_{DR} ，電磁波往返雷達和觀測目標後的總衰減量為單向的兩倍)，經散射模擬發現， A_H 、 A_{DR} 分別與 Φ_{DP} 各有良好的線性關係。在本程式只以DP量來修正能量衰減問題詳式如下：

$$dBZ_{Corr}(r) = dBZ(r) + \alpha \Phi_{DP}(r)$$

方程式中C-Band系數(α)使用0.08 dB/deg

步驟二：SCDC (Sea Clutter Detection and Correction)：主要負責去除海面雜波，臺灣四周環海，尤其本個案雷達位於馬公，下墊面的海水造成雷達資料誤差甚鉅，採模糊邏輯(Fuzzy Logic)流程(圖3.1)區分海面雜波及氣象回波，其中隸屬函數使用Kessinger,et al., (1999)[5]梯形形式。

步驟三：進入「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)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：水象粒子分類步驟採模糊邏輯(Fuzzy Logic)流程(圖3.1)，但隸屬函數部分採Gourley et al. (2006)運用高斯函數自然分布特性擬合出隸屬函數，最後區分出：冰雹、冰水混相、軟雹、雪、雨...等11種水象例子。

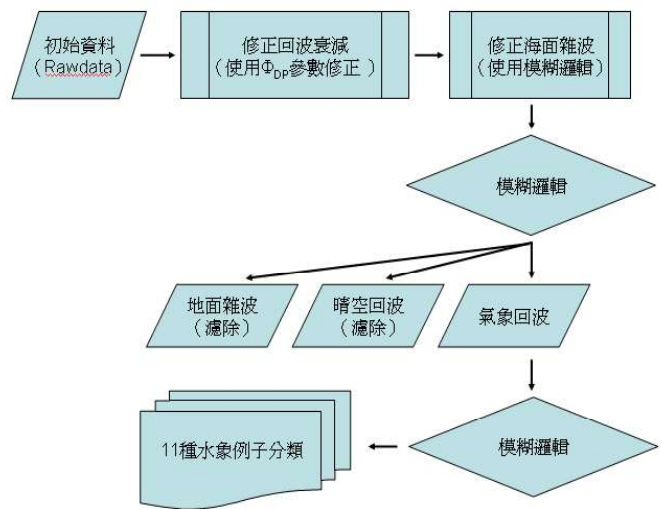


圖3.1 RainbowDART軟體，水象粒子分類流程圖。

四、個案天氣分析

(一) 地面高空天氣圖分析

圖4.1 a、b、c為3月5日12 UTC-3月6日00 UTC(地方時3月5日20時-3月6日08時)之綜觀地面天氣圖，顯示低壓中心位於日本九州西南洋面，勢力向西延伸通過臺灣中北部至廣東省一帶，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。

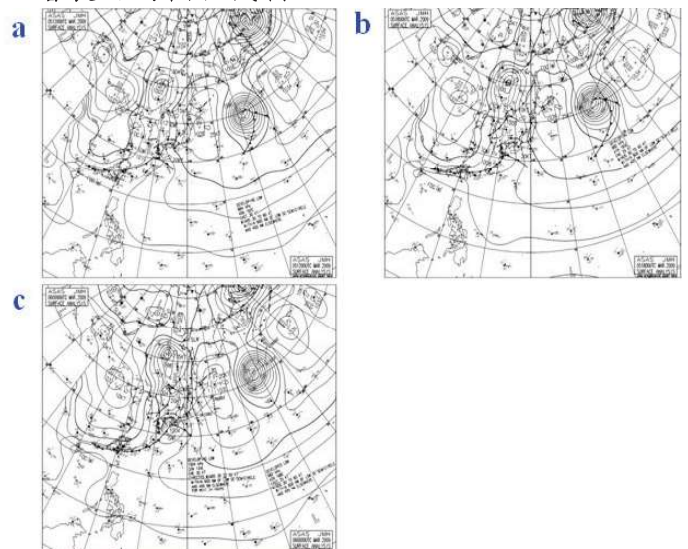


圖4.1 (a) 3月5日12UTC地面圖；(b) 3月5日18UTC地面分析圖；(c) 3月6日00UTC地面分析圖。

850hPa高空分析圖(圖4.2a、b)上顯示5日12UTC(地方時5日20時)位於大陸東南沿海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,至6日00UTC(地方時6日08時)此低壓環流(紅色圓圈處)明顯東移出海,影響大陸東南沿海一帶,使地面風場接近南-北走向。

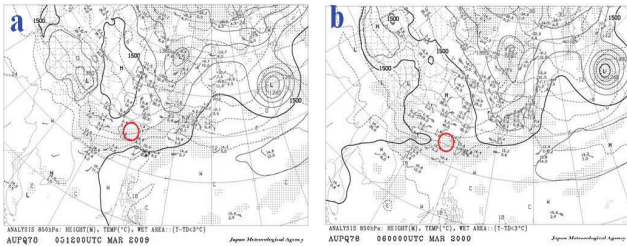


圖4.2 (a) 3月5日12UTC, 850hPa高空分析圖; (b) 3月6日00UTC 850hPa高空分析圖, 紅色圓圈處表明顯低壓環流, 顯示該區域不穩定機制。

(二) 探空資料分析

從探空資料中(圖4.3a、b)分析溫度露點分布曲線, 近底層的逆溫現象屬鋒面逆溫, 溫度露點線靠近平行向上延伸至300hPa處表示鋒面勢力強, 從兩張圖型變化可以發現只存在底層少量負能區、並無正能區分布、同時CAPE值偏低(3月5日12UTC值為34.5、3月6日00UTC值為9.8), 顯示環境場穩定, 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, 此外從風向桿顯示, 位於850hPa有明顯風切, 且850hPa以上各空層均存在噴流, 綜合以上資料, 推測3月5到6日澎湖馬公地區可能受鋒面影響。

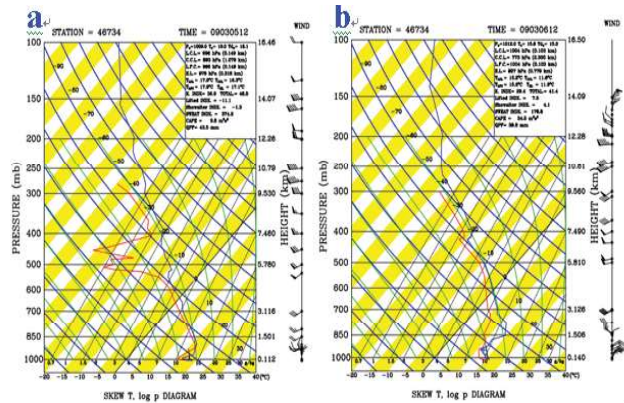


圖4.3 (a) 馬公探空資料時間3月5日12UTC; (b) 馬公探空資料時間3月6日00UTC

(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。

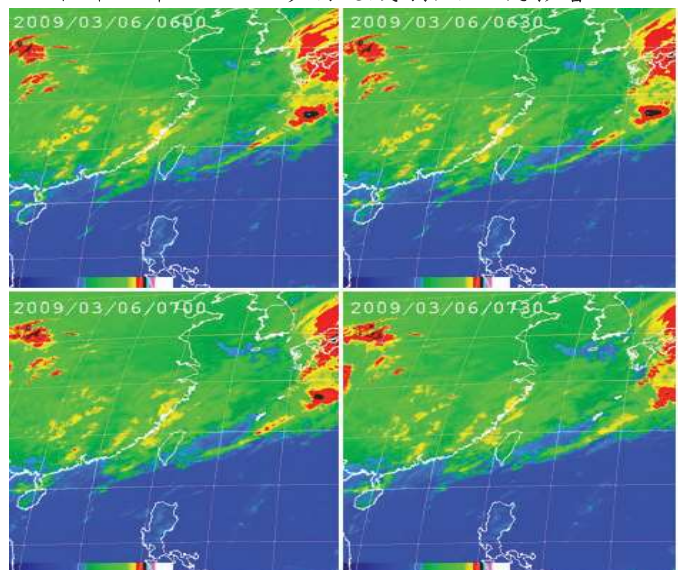


圖4.4 3月5日22時30分UTC至23時30分UTC, 色調強化彩色衛星雲圖, 海峽一帶具有明顯鋒面生成東移。

(四) 雷達資料分析

雷達分析上, Zrníc and Ryzhkov(1999)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5.1)由6日06時52分至6日07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。

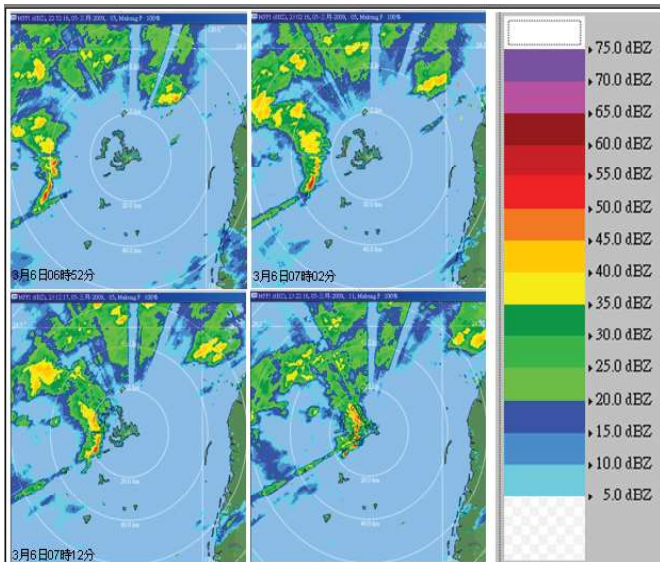


圖5.1 地方時3月6日06時52分至07時22分仰角0.5度，連續回波圖。

據當地值班人員及報導指出冰雹發生在6日7時20分馬公西南方，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5.2所顯示為高度1.7公里之CAPPI水象粒子分類圖，位於馬公機場西南方約5公里處有「Rain-hail mixture(雨-冰雹混合)」訊號發生。

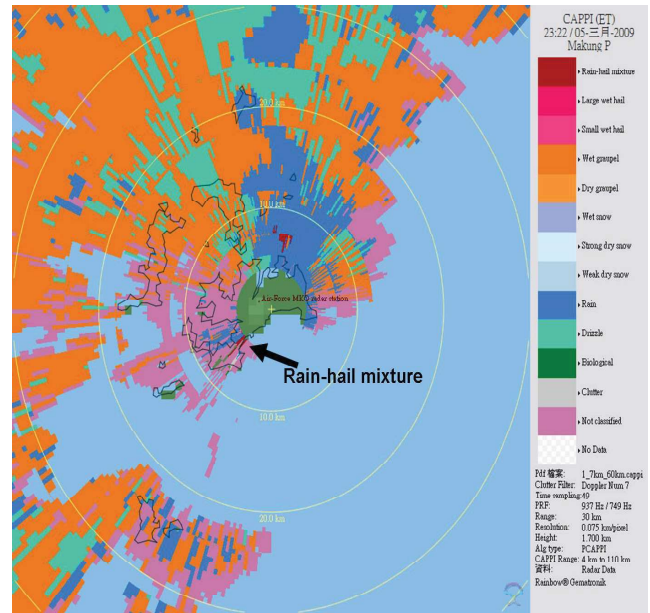


圖5.2 高度1.7公里之CAPPI水象粒子分類圖，位於馬公機場西南方約5公里處有「Rain-hail mixture(雨-冰雹混合)」訊號發生。

圖5.3針對回波移入時最接近的時間點6日7時22分做方位角227度，距離20公里的垂直剖面，分析垂直徑向風場底層有明顯、強烈徑向風切不穩定機制。

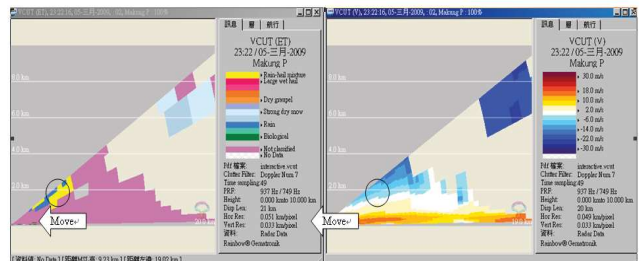


圖5.3 地方時3月6日07時22分，水象粒子分類與徑向風場垂直剖面圖。

觀察發展前期海面上電胞狀況，圖5.4顯示各參數的垂直剖面圖。資料時間6日6時30分正西方100KM距離內的垂直剖面圖上黑色圈框處，顯示有水、冰雹混相區域，分析各個參數：由 ρ_{HV} 值低於0.9可以了解此空層水象粒子均質性低，即空層中存在的粒子性質差異大；配合參數 Z_{DR} 高於2.0現象，判斷有雨水包覆冰的情況使得 Z_{DR} 值偏高；同時回波場 Z_H 值顯示此對流胞高度超過8公里，該空域回波平均超過35dBZ最大值更在

50dBZ以上，此外位於3km高度上下，出現了相對弱的回波，此即界弱回波區 (bounded weak echo regions :BWER) 特徵，顯然其對流胞內上升氣流特別強，在其上升運動區出現了相對弱的回波區，但在降雹區，由於雹塊集中降落，形成了垂直方向的最強回波區。

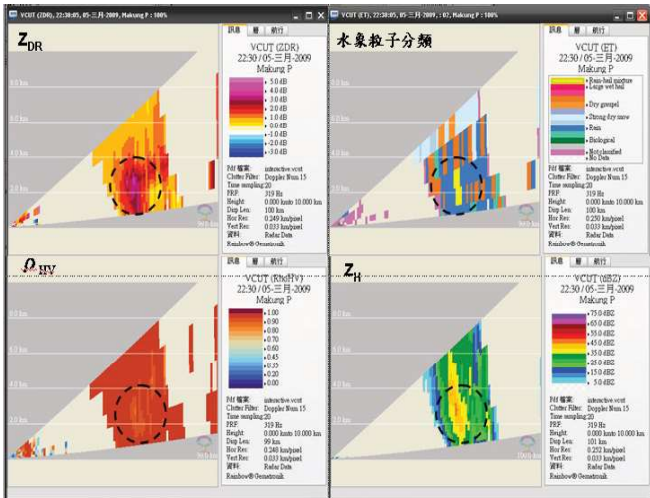


圖5.4 地方時3月6日06點30分，西南方270度距雷達100公里各參數垂直剖面圖，黑色橢圓處表降雹區。

五、結論

Doswell(1987)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、或應用雙都卜勒三維風場分析電暴的動力機制，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

Balakrishnan, N., and D.S. Zmic, 1990: Use of polarization to characterize precipitation and discriminate large hail. *J. Atmos. Sci.*, 47, 1525-1540.

Illingworth, A.J., and I.J. Caylor, 1989: Cross polar observation of the bright band. *Proc. 24th Radar Meteor. Conf., Amer. Meteor. Soc.*, 323-327

Illingworth, A.J., 2004: Improved Precipitation rates and data quality by using polarimetric measurements. *Advanced Applications of Weather Radar, Chapter 5, Springer Press*, 130-166.

Bringi, V.N., V. Chandrasekar, N. Balakrishnan, and D.S. Zmic, 1990: An Examination of propagation effects in rainfall on radar measurements at microwave frequencies. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 7, 829-840.

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

Gourley, * Pierre Tabary, AND JACQUES PARENT DU CHATELET 2006 : A Fuzzy Logic Algorithm for the Separation of Precipitating from Nonprecipitating Echoes Using Polarimetric Radar Observations *JOURNAL OF ATMOSPHERIC AND OCEANIC TECHNOLOGY VOLUME 24*, 1439-1451.

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.

Zmic', D.S., and A. V. Ryzhkov, 1999: Polarimetry for weather surveillance radars. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 80, 389-406