

雙偏極化雷達對偵測飛機積冰的可能貢獻

呂崇華¹ 鄭敏璋¹ 馮雅茜²
 空軍氣象聯隊第三基地天氣中心¹
 國立中央大學大氣物理研究所²

摘 要

本研究為利用中央大學 C 頻雙偏極化(C-Pol)雷達進行水象粒子分類，進而有效掌握飛機積冰的可能發生區域。飛機積冰是影響航空安全的惡劣天氣之一，而飛機表面積冰是與氣象條件和飛行狀態(如速度大小)有關，不過若以氣象條件而言，雲中過冷卻水滴的存在和飛機表面溫度低於冰點則是結冰最直接的原因，因此若有效提供高空過冷水滴可能分佈區域，那麼對於飛機積冰掌握確實能達到預警的功效。

水象粒子的物理特性可藉由雙偏極化雷達觀測顯現出來，但同一個雙偏極化參數對於不同的水象粒子可能會有相同數值(重疊)，分界並不明確，故採用「模糊邏輯」的方法決定出最有可能的水象粒子種類。模糊邏輯之水象粒子分類法既簡單又有效率，並且和實際觀測的結果符合，目前中央大學 C 頻雙偏極化(C-Pol)雷達已有即時的水象粒子分類產品。

關鍵字：模糊邏輯 (*Fuzzy Logic*)、水象粒子 (*Hydrometeor*)

一、前言

近十年來不斷有研究證實雙偏極化雷達較傳統單一極化雷達更有應用價值，這包括雙偏極化雷達具有：(a)濾除非氣象回波，改善資料品質的能力；(b)獲得兩滴在解析體積內統計的資訊(如：大小、形狀)進而準確估算降雨率；(c)針對不同水象粒子特性，藉由模糊邏輯法(*Fuzzy logic*)辨別空間中各種水象粒子，(Vivekanandan et al., 1999)。

台灣地區在 2004 年底由中央大學與各單位的支持下完成了升級雙偏極化雷達的工作，使得台灣地區在雷達氣象的研究又進入到另一個全新的領域，本文乃藉由雙偏極化雷達優越的特性來進一步探討利用雙偏極化雷達偵測飛機積冰的可能貢獻。

雙偏極化雷達發射出水平、垂直偏極化方向的電磁波，可以觀測到回波(Z_{HH})、差異反射率(Z_{DR})、線性退偏振比(LDR)、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，藉由雙偏極化電磁波和水象粒子物理特性的交互作用，便可以推估水象粒子種類，提供高空過冷水滴可能分佈區域，進而有效掌握飛機積冰可能發生的區域以及可能發生高度。

水象粒子分類的方法，主要有以下四種：樹狀法 (*Decision Tree*)、統計法 (*Statistical Decision Theory*)、類神經網路 (*Neural Networks*)、模糊邏輯 (*Fuzzy Logic*)。樹狀法類似二分法；統計法計算較為複雜；類神經網路法則需要很多實地觀測資料即時；本研究乃使用模糊邏輯法，此法計算較簡單、有效率。

研究水象粒子更可以了解雲物理過程，例如：對流風暴中冰雹的生命週期、融解層

之高度 (Holler et al 1994)。進而可以改善數值天氣預報中雲模式的初始場(Sun and Crook 1997)。

二、飛機積冰(Aircraft Icing)

飛機積冰是影響航空安全的惡劣天氣之一。它以累積方式影響飛機，增加飛機之重量，因而減低飛機之飛行效率、爬升力和推進力，增加後拖力。以上的效應都能使飛機速度減慢，最後導致失速而下墮。以下的三種積冰情況對飛行安全構成不利的影響：首先，嚴重的翼面積冰能令翼面變形，而使與翼面接觸的氣流呈不規則的分佈狀態，引致減少升力，增加阻力，容易使航機失速。其次，機身外的高度儀積冰時，能使機艙內高度表的讀數不正確而發生危險。最後，天線積冰可使航機與地面的通訊完全隔絕，令利用儀器飛行的航機，產生嚴重的問題。

飛機飛經過冷卻的雲層或雲雨區域時，機翼機尾及螺旋槳或其他部分，常會積聚冰晶，多者可能厚至數吋。那些區域最容易使飛機結冰呢？飛機在氣溫攝氏 0°C 至 -9.4°C 間之高空飛行，機體上最容易結冰；雲中最易見到有液態水滴，尤其是積狀雲如積雲、積雨雲和層積雲等，此時空中水滴常在冰點以下而不結冰仍保持液態水之狀態，就是所謂的過冷卻水滴，飛機飛過，空氣受擾動，過冷卻水滴立刻結冰附著於機體上，數秒鐘內機體上就會有嚴重的結冰；空氣中若濕度大，含有過冷卻水，容易構成昇華作用，飛機穿越其間，空氣略受擾動，迅速凝聚積冰；雖然晴空無雲，但是在結冰高度層上方，氣溫與露點溫度十分接近時，結冰之趨勢仍然存在。

目前全世界的航空氣象預報人員在發布飛機積冰天氣資訊時，通常採「預報方式」處理，除非獲得飛機空中積冰觀測報告，才會即時採用「測報之警告方式」發布，然而

氣象預報因受到氣象觀測資料在時空分布上有極大變異，以及天氣預報技術與氣象因素定義之局限，因此目前對於飛機遭受積冰現象的危害仍以啟動除冰裝備(包括直流電加熱化冰，或是以除冰靴敲碎積冰，讓其自然被風吹落)為主要處置方式，然而，根據美國航空安全委員 2000 年的調查結果顯示，不管採用什麼方法，或啟動什麼裝備，都必須在積冰開始形成之前；也就是說，企圖在飛航積冰發生時(或發生後)，再進行除冰措施，都不是件有效率的事，這也再一次突顯精確的氣象觀測技術與預報對飛行安全維護的重要。

三、模糊邏輯 (Fuzzy Logic) 方法

Fuzzy 原意：界線不清、模糊。模糊邏輯主要用於研究模糊、不確定的問題本身。例如：若由雷達回波和實地觀測經驗統計得知，回波值大於 50dBZ ，其水象粒子就不是雨滴，可能是冰雹或地形。當回波為 49.8dBZ 時，其水象粒子不一定是雨滴。由於事件本身即很模糊，故採用模糊邏輯，取一較寬廣的範圍，將發生的機率逐一遞減。圖 3.1：橫軸為回波，縱軸 1 代表水象粒子是雨滴，0 代表非雨滴，圖 3.1 左圖是二分法邏輯(*step function*)，圖 3.1 右圖：以模糊邏輯將回波從 $45\sim 55\text{dBZ}$ 去平滑觀測到的水象粒子機率。

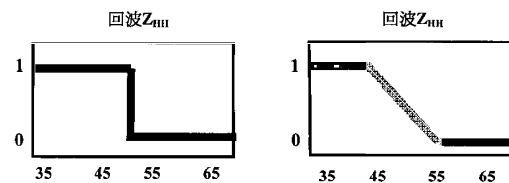


圖 3.1 左圖：二分法；右圖：採用模糊邏輯判別水象粒子是否為雨滴。

四、雙偏極化雷達參數

由雙偏極化雷達的電磁波，可以得到表 4.1(文後)內的六種參數：

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

由雷達接收到水象粒子所反射回的平均電磁波功率導出，回波為反射率因子。

$$Z_{HH} = \frac{\lambda^4}{\pi^5 |K|^2} \int \sigma N(D) dD$$

， Z_{HH} ：回波， N ：粒子個數， D ：粒子直徑， σ ：反散射截面積， $|K|^2$ ：介電因子。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，(圖 4.1)。

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

$$Z_{DR} = 10 \log \frac{Z_{HH}}{Z_{VV}}$$

，水平回波和垂直回波的比例。受到水象粒子種類、形狀(軸比=a/b，圖 4.2)、密度影響。當雨滴越大時，形狀越扁平(a/b 越小)， Z_{DR} 越大。冰雹因為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。當 Z_{HH} 很相近，但 Z_{DR} 不一樣，可大略推知：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！(圖 4.3)

4.3 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。(圖 4.4)

4.4 K_{DP} ：Specific differential propagation phase shift (比差異相位差)

$$K_{DP} = \frac{d\Phi_{DP}}{2dr}$$

，意即為 Φ_{DP} 對距離的微分，也就是在圖上看到的斜率(梯度)(圖 4.4)。若要將雷達觀測範圍沿著每一個角度都畫一張剖面圖觀察很不方便，於是就利用 K_{DP} 觀察，較方便。故簡易來說， K_{DP} 和水象粒子形狀、種類、個數亦均有關係。

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

ρ_{HV} 是指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，如亮帶區：回波明顯增大，但 ρ_{HV} 會較小。(圖 4.5)

五、水象粒子分類方法與應用

5.1 使用模糊邏輯的原因：

由於雙偏極化雷達參數推估水象粒子的事件本身，屬於模糊事件，所以在定義水象粒子一雙偏極化雷達參數的 membership function 時，其範圍的界定，以一模糊的邊界界定之，並且在同一參數的某些相同範圍內，可能存在兩種以上的降水粒子(如圖 5.1)，使事件更模糊，故採用模糊邏輯方法解決之。

5.2 分類方法介紹：

若雙偏極化雷達觀測到回波 $Z_{HH} = 47\text{dBZ}$ ， $Z_{DR} = 1.2\text{dB}$ ， $LDR = -24\text{ dB}$ (如圖 5.2)。將觀測值帶入水象粒子一雙偏極化雷達參數的 membership function，找出其水象粒子在每一個參數中之機率(得分)，並且將各參數所獲機率(得分)相加起來(表 5.1)。最後擁有最大值的水象粒子，即為輸出結果的水象粒子。另一種情況是，雷達參數會有誤差等原因時，所以每個參數在加總時的權重就會有所不同，此時就必須將每個相對得分成上該參數的權重，如(表 5.2)。整體而言，此方法分成五個部份：

a) 雙偏極化雷達觀測(input) → b) 水象粒子一雙偏極化雷達參數 membership function 找出該水象粒子發生機率 → c) Inference(計算推論) → d) 找出最大值 → e) 判定為何種水象粒子。(方法流程:圖 5.3)

水象粒子一雙偏極化雷達參數的 membership function，是由雙偏極化雷達觀測配合當地觀測，如：飛機穿越、雨滴譜儀、地面冰雹測量儀器以及雲模式模擬...等，所

得出來的統計結果。

5.3 水象粒子分類法結果：

圖5.4為中央大學雙偏極化雷達於2006年7月17日下午1533時(地方時)之雷達回波掃描圖，在石門流域山區附近(中大雷達東面)有對流系統生成，本研究乃任意取對流系統西南側(雷達134°方位角處)製作水象粒子分類距離高度剖面圖(RHI)(如圖5.5)，分類結果於距雷達約11~13公里及高度約6~7公里處有過冷水滴(SCLW；Supercooled liquid water)反應，由回波平面圖觀測研判，此區並非為強回波區(圖5.4)，同時由圖5.5可知0°C線(約4~5公里高度)以下粒子分類結果均為液態雨滴(輕雨或毛雨)，顯見此區並非為對流區，然而當飛行器經於此處卻因有過冷水滴存在，導致發生積冰現象危害飛安。過冷水滴的發生，在目前氣象儀器尚無法有效觀測，甚至氣象模式尚且無法準確預測，僅能推估大氣0°C(結冰點)高度，由此高度至-9.4°C高度間最有機會出現過冷水滴，並提供飛行員避免飛行於此高度間，但若能藉由雙偏極化雷達觀測預先有效掌握易發生飛機積冰區，相信更能提高飛行安全。

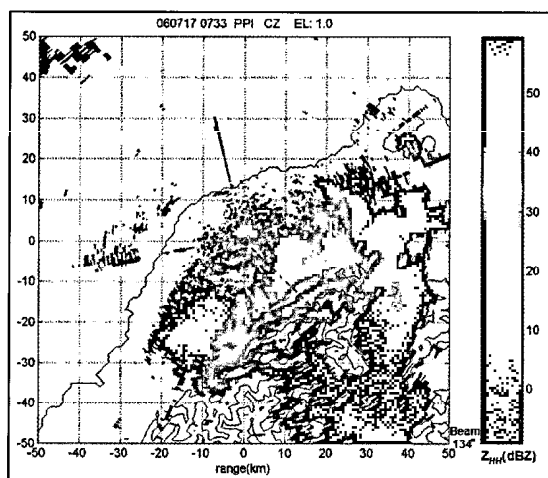


圖 5.4 中央大學雙偏極化雷達(中心紅圈處) 1°仰角掃描回波圖(色階, dBZ)；灰階曲線為地形等高線。

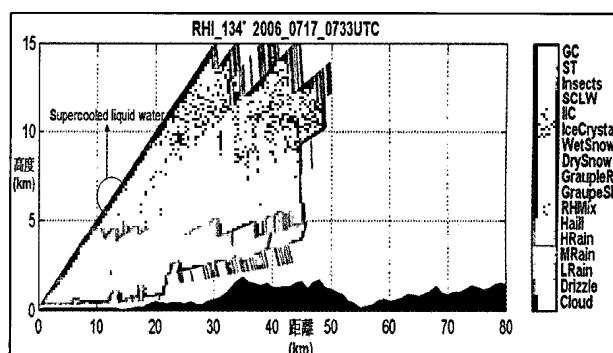


圖 5.5 中央大學雙偏極化雷達 134°方位角距離高度剖面圖(RHI)；色階，代表不同水象粒子；黑色陰影處為地形圖。

六、結論

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，而雙偏極化雷達不止可傳送和接收水平方向，也包括垂直方向的電場電磁波輻射。典型的雙偏極化雷達，傳送水平及垂直極化電磁波且接收受極化的反散射訊號，由於所照射的水象粒子可能不是球體，因此這些非球狀水象粒子反散射截面的水平及垂直極化並不會相同，而電磁波傳播經過降雨區將會遭受到散射(scattering)、差異衰減(differential attenuation)、差異相位差(differential phase shifts)以及退極化(depolarization)等各種改變訊號的因素，也因此可以由電磁波傳播所產生的訊號改變資訊，來估算或反演獲得水象粒子的大小、形狀、指向以及熱力相態等訊息，使得雙偏極化雷達可用於改善降雨率的估算、偵測冰雹、資料的品質管制、水象粒子辨識以及進一步分析雲物理特性。

經由雙偏極化雷達觀測，我們可以獲得更多水象粒子的資訊，因為不同水象粒子的物理特性不同，影響到垂直與水平回波的程度也不盡相同。因為雷達觀測與水象粒子分類的為模糊事件，所以採用模糊邏輯的方法進行水象粒子分類；從水象粒子-雷達參數 Membership function，得出每種水象粒子可能

發生機率之後，再經過簡單的運算，找出一最大值，即為粒子種類。此種方法簡單又有效率，能夠利用雷達資料分析是否存在過冷水滴，對偵測影響飛機積冰區域得以發揮極大的貢獻。

氣象的守視與掌握，在維護飛行安全的工作上經常扮演重要的角色。透過研究資料顯示，飛機的「積冰」現象常常是導致飛航安全的天氣因素之一，當飛機遇到了積冰，不但容易改變原先流線體之外觀，讓飛行員對起初的環境流場產生誤判；也使得飛機上舉力在瞬間減少，拖力、重量、失速同時增加，倍增飛行任務的危險性。由於積冰常發生在飛機操縱系統外部可活動部分之表面，也亦引發飛機操縱系統失靈的危險。

本研究乃初步將雙偏級化雷達資料應用於影響飛行安全的飛機積冰現象，並獲得可行性。未來空軍氣象聯隊將分別於清泉崗及馬公機場建置二座雙偏極化都卜勒雷達，期許我空軍氣象人員，藉由新一代氣象雷達資訊，進一步提供更正確飛航天氣訊息，以利空軍飛行員得以更安全執行各航線之飛行任務。

致謝

感謝國立中央大學雷達氣象實驗室所提供之雙偏極化雷達資料以及實驗室師長在資料處理與問題討論上所給予的支援，特此表達深摯的感謝。

參考文獻

呂崇華, 2006: 雙偏極化雷達資料資料分析梅雨鋒面雨滴粒徑分佈的物理特性, 國立中央大學大氣物理碩士論文, 100 頁。

Gorgucci, E., V. Chandrasekar, V. N. Bringi, and G. Scarchilli, 2002: Estimation of raindrop size distribution parameters from polarimetric radar measurements. *J. Atmos. Sci.*, **59**, 2373–2384.

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

Liu Hongping and V. Chandrasekar, 2000: Classification of Hydrometeors Based on Polarimetric radar Measurements: Development of Fuzzy Logic and Neuro-Fuzzy Systems, and In Situ Verification. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **17**, 140-164.

Seliga, T. A., and V. N. Bringi, 1976: Potential use of radar differential reflectivity measurements at orthogonal polarizations for measuring precipitation. *J. Appl. Meteorol.*, **15**, 69–76.

S. Lim, V. Chandrasekar, and V. N. Bringi, 2005:

Hydrometeor Classification System Using Dual-Polarization Radar Measurements: Model Improvements and In Situ Verification. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **43**, 792-801.

Vivekanandan, J., D. S. Zrnic', S. M. Ellis, R. Oye, A. V. Ryzhkov, and J. Straka, 1999: Cloud microphysics retrieval using S-band dual-polarization radar measurements. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **80**, 381-388

Willis, P. T., 1984: Functional fits to some observed droplet size distributions and parameterization of rain. *J. Atmos. Sci.*, **41**, 1648-1661

Zhang, G., J. Vivekanandan, and E. Brandes, 2001: A method for estimating rain rate and drop size distribution from polarimetric radar measurements. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **39**, 830-841

Z_{HH} Z_{VV}	Radar reflectivity	回波	dBZ
Z_{DR}	Differential reflectivity	差異反射率	dB
LDR	Linear depolarization ratio	線性退偏極比	dB
Φ_{DP}	Differential phase shift	差異相位差	°
K_{DP}	Specific differential propagation phase shift	比差異相位差	° /km
ρ_{HV}	Cross-correlation Coefficient	相關係數	%

表 4.1 雙偏極化雷達參數表

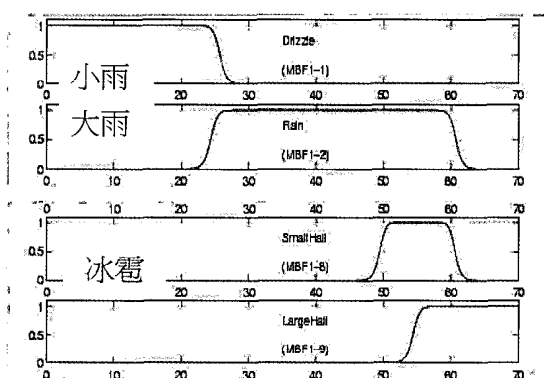


圖 4.1 大、小雨滴、冰雹與回波的 membership Function。

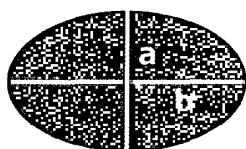


圖 4.2 雨滴軸比 a/b

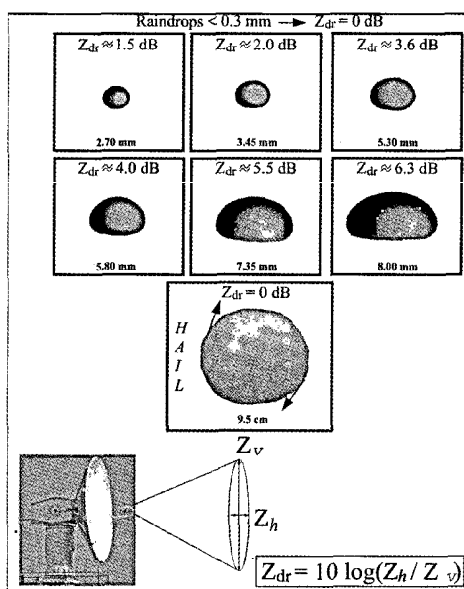


圖 4.3 Z_{DR} 和不同軸比雨滴間的關係。

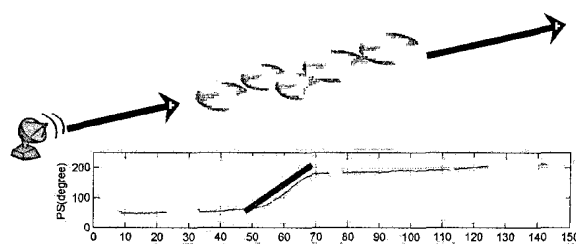


圖 4.4 雷達經過水象粒子的示意圖。下：電磁波某方向上的 Φ_{DP} ，斜曲線： K_{DP} 。

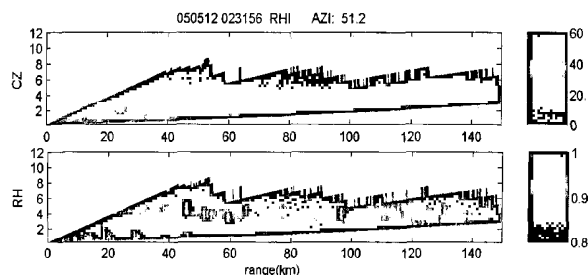


圖 4.5 中央大學雷達觀測頗面圖。上圖：回波，下圖：相關係數。亮帶大約位於 4km 高度處。

	Rain	Hail
$P(Z_{HH})$	0.8	0.2
$P(Z_{DR})$	1	0
$P(LDR)$	0.5	0.1
SUM	2.3	0.3
水象粒子	Rain	

表 5.1 水象粒子—雙偏極化雷達參數對應表，每種參數的比例不同。

	權重	Rain	Hail
$P(Z_{HH})$	1	0.8	0.2
$P(Z_{DR})$	0.8	0.8	0
$P(LDR)$	0.2	0.1	0.02
SUM		1.7	0.22
水象粒子		Rain	

表 5.2 水象粒子—雙偏極化雷達參數對應表，每種參數的比例不同。

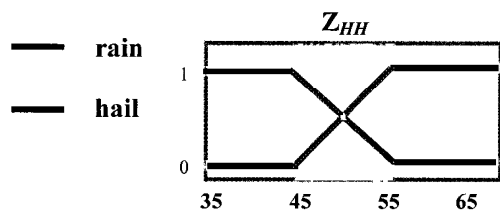


圖 5.1 雨滴(rain)—雷達回波，冰雹(hail)—雷達回波 membership function。陰影為回波對兩種不同水象粒子之模糊處。

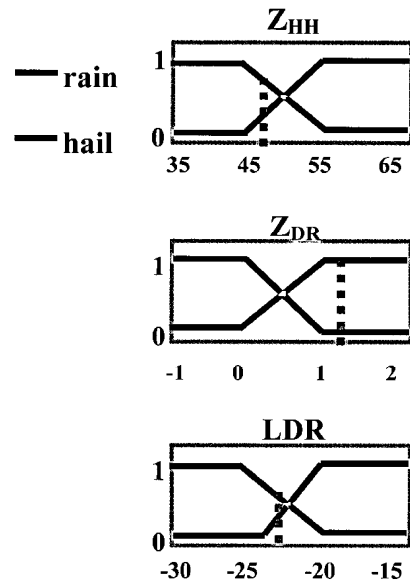


圖 5.2 兩種水象粒子：雨滴和冰雹與 Z_{HH} 、 Z_{DR} 、LDR 之間的 membership function。

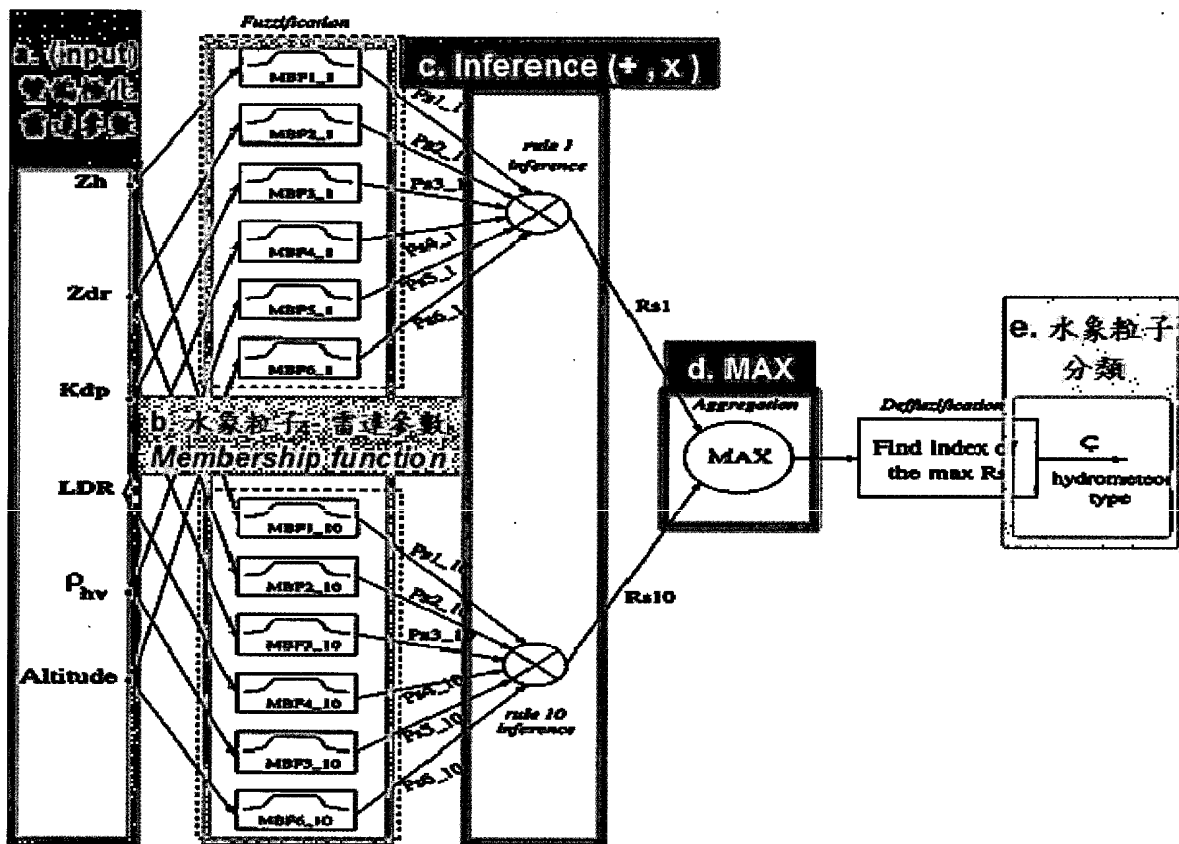


圖 5.3 利用雙偏極化雷達參數，經由模糊邏輯方法，進行水象粒子分類。