

雙偏極化雷達降水粒子識別技術研發與冰雹事件分析

廖信豪、李宗融、黃紹欽、于宜強

國家災害防救科技中心 氣象組

摘要

對臺灣而言，中尺度劇烈天氣系統是引發極端降水事件的關鍵氣象因子，也常造成顯著的災害。為強化對劇烈天氣現象的即時監測與降水型態的辨識能力，本研究整合國內 C 波段雷達資料，透過模糊邏輯架構，建置一套適用於全臺的降水粒子識別技術。此技術將降水粒子區分為符合實務應用的 7 類，其中包含冰雹、大雨等具防災價值之粒子類別。在 2025 年 3 月 4 日的強降雨事件中，降水粒子識別(Particle Identification, PID)技術所識別的冰雹發生地點與實際通報紀錄高度一致，且雙偏極化雷達參數亦觀測到冰雹的典型物理特徵，顯示本技術在實務應用上已具有良好的分類性能與科學合理性。

一、前言

臺灣位處熱帶與副熱帶氣候的交界，因其獨特的地理位置而易受多種劇烈天氣的影響，例如春季的鋒面與颱風，春夏交替期間的梅雨

鋒面，以及夏季的颱風與午後雷雨等。再者，臺灣複雜的地形分布，也常加劇對流系統的發展，引發致災性的劇烈天氣事件。這些劇烈天氣不僅常造成淹水與土石災害，強對流系統內的強烈垂直運動，也可能使水滴進一步形成冰雹，對農作物與民眾財產造成衝擊。隨著氣候變遷影響日益加劇，極端天氣事件的發生頻率及降雨強度呈現上升趨勢¹。為了因應此挑戰，強化劇烈天氣系統的即時監測、動態分析，乃至於短期預報能力，已成為氣象災害預警與防減災策略中不可或缺的一環。

雙偏極化氣象雷達因具有高時空解析度與可觀測雨滴粒徑分布的特性，是監測強對流發展及定量降雨估計的重要工具。2008年起，臺灣開始將傳統都卜勒雷達更新為雙偏極化雷達。其中，空軍氣象聯隊於2008年9月完成馬公及清泉崗雷達的升級，並於2017年1月完成綠島雷達的更新。中央氣象署則於2014年完成五分山雷達的升級，而花蓮、七股及墾丁雷達也在2022年至2023年間完成更新。此外，為因應都會區及低窪易淹水地區的防災需求，水利署與中央氣象署合作，於2017年至2019年陸續於高雄市林園、新北市樹林及臺中市南屯建置C波段雙偏極化防災降雨雷達。目前，全臺已建構完整的雙偏

¹ 國家氣候變遷科學報告 2024：現象、衝擊與調適

極化雷達觀測網(圖 1)，可取得 10 座高解析度的雙偏極化參數觀測資料，觀測範圍涵蓋全臺。

相較於傳統的都卜勒雷達，雙偏極化雷達能同時發射、接收水平與垂直方向的電磁波，從而提供雨滴形狀、大小與相態等特徵有關的參數，例如：差異反射率(Z_{DR})、相關係數(ρ_{HV})、差異相位差(Φ_{DP})及比差異相位差(K_{DP})等。這些新增參數不僅能提升降水估計的準確性(Chang et. al., 2016、陳等, 2017)，亦可用於識別不同型態的降水粒子，例如：雨、雪、冰雹等，進而為劇烈天氣監測與災害預警操作提供更可靠的依據。

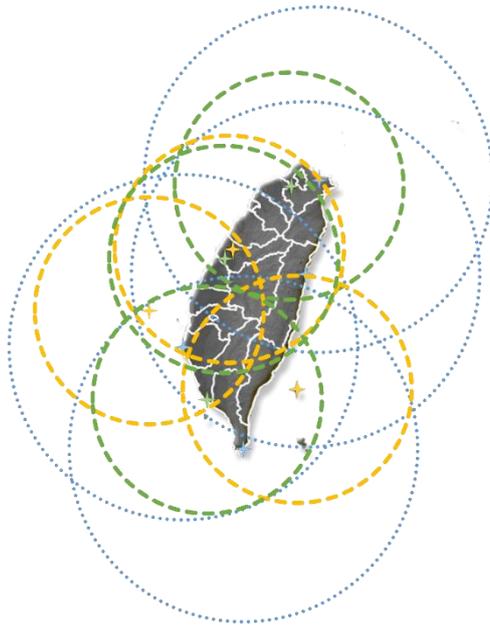


圖 1. 臺灣雙偏極化雷達觀測網。星號和虛線分別為雷達位置與觀測範圍。藍色為五分山、七股、花蓮及墾丁雷達(S 波段)。橘黃色是清泉崗、馬公及綠島雷達(C 波段)。綠色是樹林、南屯及林園防災降雨雷達(C 波段)。

二、 降水粒子識別技術研發

早期，氣象學家主要依賴傳統都卜勒雷達測量的雷達回波強度來研判降雨強度，並以回波值是否達到 60 dBZ 作為推估冰雹發生的指標。1990 年起，在雙偏極化雷達快速發展下，氣象學家已能透過雙偏極化參數，更精確地掌握雨滴粒徑特性。當強回波同時伴隨較小的 Z_{DR} 、 ρ_{HV} 與 K_{DP} 時，代表該區域出現冰雹的可能性較高。自 1996 年起，鑒於降水粒子識別(Particle Identification, PID)的需求增加，氣象學家進一步採用統計(Carey and Rutledge, 1996)、類神經網路(Liu and Chandrasekar, 1999)，以及模糊邏輯(Fuzzy logic; Vivekanandan et al., 1999; Zrníc and Ryzhkov, 1999; Park et al., 2009; Feng et al., 2018)等技術，進行降水粒子分類的相關研究。其中，模糊邏輯方法不同於傳統「是或否」的二元邏輯，能夠處理「非真即假」之外的模糊性或不確定性資訊。其核心精神在於允許變數具有介於 0 到 1 之間的連續隸屬值(membership value)，用來描述變數符合特定語意或分類的程度。此特性使電腦在進行分類判斷或決策時，能更貼近自然現象的連續變化與人類思維模式。

本研究參考 Vivekanandan 等人於 1999 年提出的 PID 模糊邏輯法 (圖 2)。該方法計算每一種粒子分類對應的總和值(Q_i)，並將最大 Q_i 值所對應的分類，判定為最相關的粒子類型。

$$Q_i = \sum_{j=1}^n P_i^j W_j$$

其中， j 為不同的雷達參數、 n 為欲使用的雷達參數總數、 W_j 為各參數的權重， P_i^j 代表雷達參數對應到粒子分類的隸屬值。

首先，制定每個雷達參數與不同降水粒子類別之間的隸屬函數 (membership functions)，即針對每一種降水粒子，定義其在特定雷達參數的數值範圍與隸屬程度。例如，當某一雷達參數的數值完全不符合該降水粒子分類的物理特性時，其隸屬值(P_i)為 0，表示完全不相關；反之，若雷達參數完全符合該粒子分類的特徵，則隸屬值(P_i)為 1。介於 0 至 1 之間的隸屬值，則用來量化參數與粒子類型的契合程度，亦可反映粒子分類時的模糊性與不確定性。隸屬值的設定，會因地理位置與氣候型態不同而有所差異，故需在考量當地的大氣環境與降水粒子特性後，進行在地化的調整與最佳化。

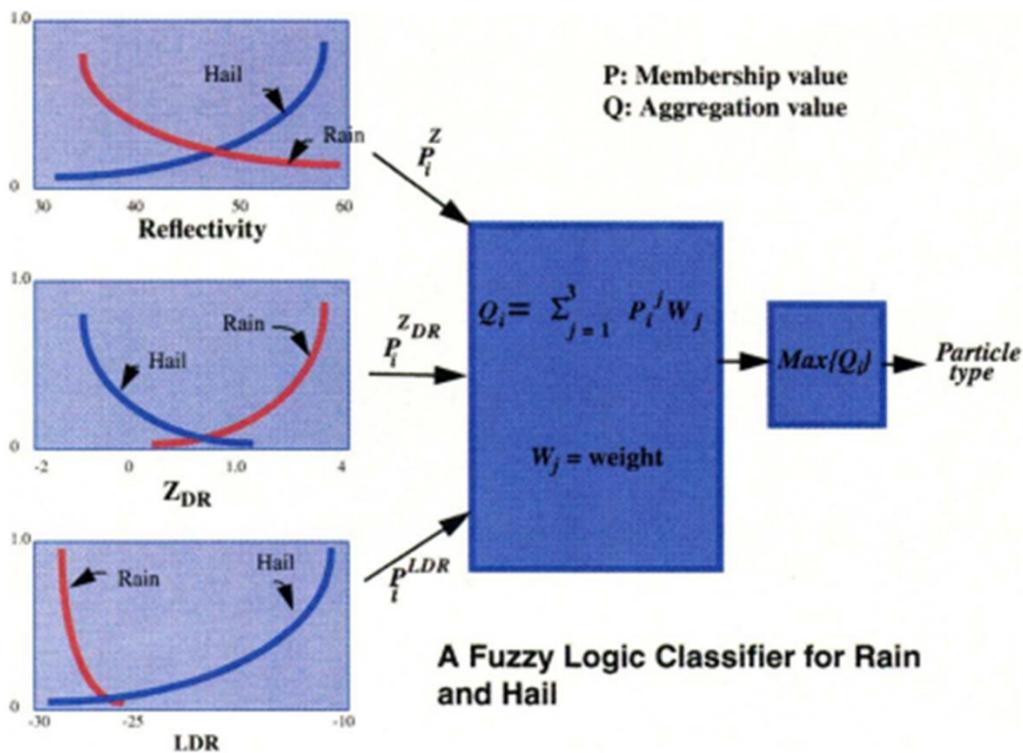


圖 2. 模糊邏輯應用於水象粒子鑑別之概念流程圖。(圖片摘自 Vivekanandan et al., 1999)

為了整合不同雷達參數對同一個降水粒子的隸屬值，此技術採用加權平均的方式進行彙總。各參數的權重值(w_j)，依其對該降水粒子的敏感度或識別度而定。舉例來說， Z_{DR} 對雨滴與雪的區分效果好，可在識別相關粒子時設定較高權重。而 K_{DP} 對強降雨較敏感，在鑑別大雨滴時也能有較高的權重。同時，權重值可根據不同天氣系統型態或區域性長期觀測經驗進行調整，以提升 PID 技術的準確度。最後，在每個雷達觀測格點上，計算各個雷達參數在不同降水粒子的隸屬值

與權重值的乘積，並加總成為該降水粒子類別的總和(Q_i)。總和值最大的粒子類別，即代表觀測特徵與該降水粒子最相符。

過去臺灣的 PID 研究，多使用單一 C 波段雷達進行小範圍區域分析(呂與劉, 2009; 周, 2017; 魏, 2018; 2019)。從防災應用的角度出發，如果能針對全臺建立 PID 技術，在實務上將更具價值。因此，本研究整合 6 座 C 波段雙偏極化雷達(樹林、南屯、林園、馬公、清泉崗及綠島)資料，並考量臺灣防救災的實務需求，將粒子分類聚焦至小雨、中雨、大雨、冰雹、晴空回波、二次回波、地面雜波。目前，已成功建置一套全臺降水粒子識別技術(圖 3)。

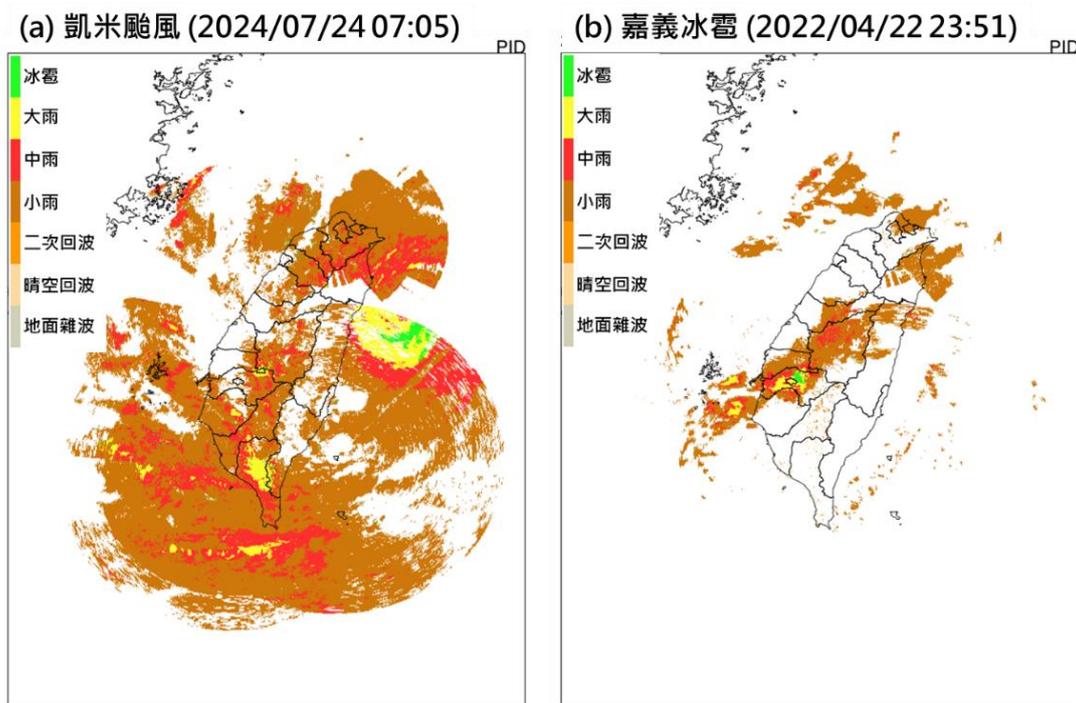


圖 3. 全臺降水粒子識別技術應用於(a) 2024 年凱米颱風與(b) 2022 年嘉義冰雹事件。(繪圖：國家災害防救科技中心)

三、 2025 年 3 月 3~4 日冰雹事件氣象分析

隨著個人隨身通訊設備及社群媒體網絡普及，龍捲風與冰雹等劇烈天氣事件已能廣泛被民眾記錄與分享，這些影片和照片往往成為極端天氣事件研究的最佳驗證資料。為瞭解本研究建置的全臺降水粒子識別技術，在實際劇烈天氣事件的分類能力與可行性，本研究以 2025 年 3 月 3~4 日發生在臺北及臺中的冰雹事件進行分析與驗證。

1. 冰雹的形成原理與雷達觀測特徵

冰雹主要發生在劇烈發展的強對流性天氣系統中。當雲內的水滴被強烈上升氣流抬升至 0°C 以下的高空時，會形成過冷水滴並與雲中的冰晶、霰或其他冰相粒子產生碰撞和合併，形成初始的冰雹粒子。隨後，當粒子重量增加至上升氣流無法支撐時，冰雹就會開始落下。此過程可能重複多次，使冰雹不斷成長，直到上升氣流無法完全支撐，或被強大下衝流帶往地面，形成冰雹事件。

在雷達觀測上，冰雹具有許多明顯的特徵。例如，高雷達回波值（一般可達 55~60 dBZ 以上）、接近 0 dB 的 Z_{DR} （冰雹粒子接近球形，使水平和垂直方向的反射能力接近），以及較低的 ρ_{HV} （冰雹具多層結構，且常混雜大雨滴和融化的雪等粒子，導致 ρ_{HV} 降低）。這些參數特徵是辨識冰雹的依據，也是 PID 技術設定隸屬值與權重的參考資訊。

2. 事件概述

本起事件共發生 2 次冰雹現象。第一次出現在 3 日 23:55 至 4 日 00:15 間，臺北盆地內多個行政區有冰雹通報紀錄，包括臺北市的信義、內湖、南港與文山，以及新北市的新店、中和與汐止。第二次則發生於 4 日 16:25 至 17:00 間，臺中市的烏日、大雅、清水、谷關、德基及梨山等地同樣有冰雹通報紀錄。

當時的大氣環境條件顯示，3 日 20 時，一道鋒面位於臺灣北部外海，中國華南地區亦有另一道鋒面逐漸接近臺灣。3 日深夜起，桃園與新竹地區開始受第一道鋒面前緣的強對流系統影響(圖 4a)，出現短延時強降雨，並伴隨高頻率的閃電活動。隨後，此對流系統快速增強並朝臺北盆地移動(圖 4b)，臺北市的信義、內湖與南港，以及新北市的汐止、新店與中和等地，陸續出現冰雹通報紀錄。

在首道鋒面快速通過後，第二道鋒面於 4 日下午接續影響臺灣。從雷達回波圖(圖 4c~d)可以發現，鋒面上的強對流系統於 16 時開始影響中部地區，並帶來強風豪雨，使臺中地區出現路樹倒塌及局部積淹水災情。同時，大雅、清水、谷關地區亦陸續出現冰雹紀錄。

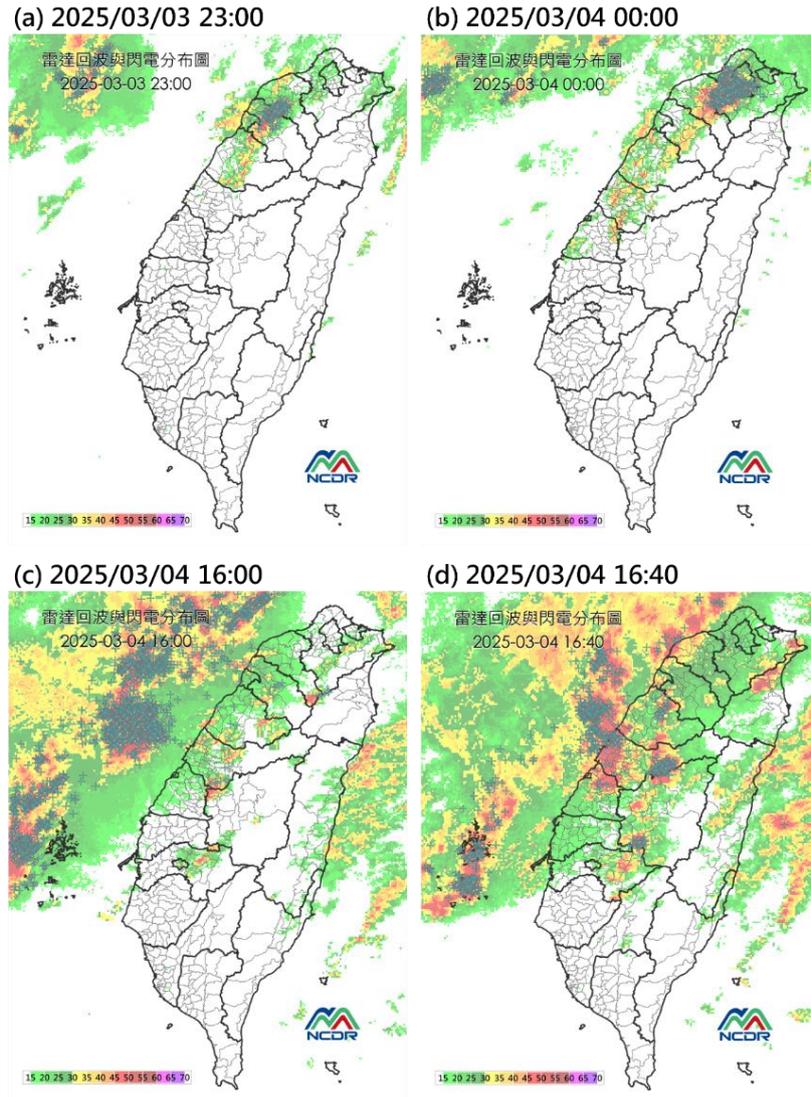


圖 4. 全臺即時雷達回波與閃電資訊。(a)2025 年 3 月 3 日 23:00、(b)2025 年 3 月 4 日 00:00、(c)2025 年 3 月 4 日 16:00，以及(d)2025 年 3 月 4 日 16:40。

3. 雙偏極化參數及 PID 判釋分析

在第一次冰雹事件中，透過雙偏極化雷達觀測可發現，造成冰雹的強回波區(圖 5a1)由臺北盆地的西南側(新北市的新店、中和及永和)朝東北方向移動，影響臺北市的信義和南港，以及新北市的汐止。此

對流胞的強度在通過臺北市中心時達巔峰(圖 5a2)，最大雷達回波超過 60 dBZ，隨後強度略為減弱，並持續往基隆市移動。 Z_{DR} 的分析顯示，23:57 時(圖 5b1)，對流胞大多為高 Z_{DR} 區(大於 3 dB)，表示該區域的降水粒子以大型雨滴為主。隨著對流胞持續增強(圖 5b2)，在高 Z_{DR} 區南側觀測到低 Z_{DR} 區(小於 1 dB)，顯示新北市新店與臺北市文山一帶主要由接近球形的降水粒子所組成，極有可能發生冰雹。同時， ρ_{HV} 亦出現類似特徵(圖 5c1~c3)。對流胞中的高 ρ_{HV} 區表示該區域降水主要由純水相粒子組成，而其南側的低 ρ_{HV} 區則為混合相態的降水粒子，再次支持該區域存在冰雹發生的可能性。根據本研究研發的 PID 技術分析結果顯示，此強對流胞主要由中雨至大雨等級的降水粒子組成，並能成功識別出冰雹(圖 5d1~d3)，且其空間分布與新聞報導中所記載的冰雹發生地點具有良好的一致性。

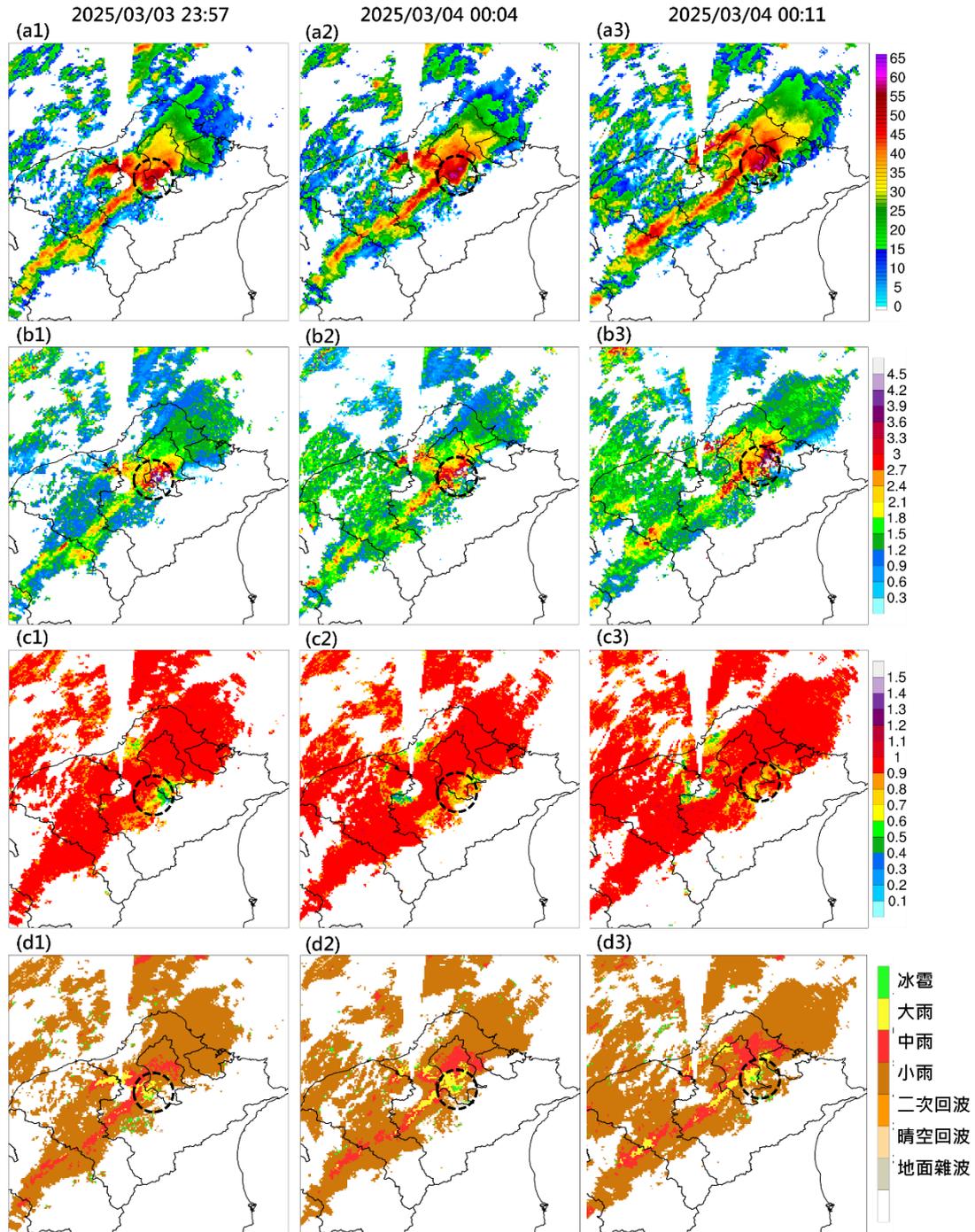


圖 5. 2025 年 3 月 3 日 23 : 57 至 4 日 00 : 11，每 7 分鐘樹林雷達觀測之回波(a1~a3)、差異反射率(b1~b3)、相關係數(c1~c3)及降水粒子識別結果(d1~d3)。

在第二次冰雹事件中，從雷達回波時序(圖 6a1~a3)可觀察到，對流系統自沿海向山區移動並逐漸加強，最大雷達回波超過 60 dBZ，且強回波(超過 55 dBZ)的範圍明顯大於第一次冰雹事件。雙偏極化參數的分析亦顯示，兩次冰雹事件具有相似的 Z_{DR} 與 ρ_{HV} 特徵，包括高 Z_{DR} 區旁伴隨低 Z_{DR} 區(圖 6b1~b3)，以及高 ρ_{HV} 區域內出現 ρ_{HV} 突然降低的現象(圖 6c1~c3)。PID 的分析結果(圖 6d1~d3)則顯示，本次事件所判釋出的大雨區域明顯大於北部冰雹事件，且能成功識別冰雹訊號，並精確掌握其隨時間往山區移動的過程，這與實際冰雹通報紀錄相符。進一步分析雷達三維風場垂直剖面可清楚發現，強對流胞於 16:50 已位於近山區(圖 7a)，雷達回波超過 60 dBZ 區域的垂直發展可達 9 公里以上，並有明顯的正、負垂直速度交錯現象(圖 7b)，顯示此對流胞發展旺盛且有劇烈的垂直運動，符合冰雹發生所需的大氣環境特徵。綜合上述分析結果，可驗證本研究研發的 PID 技術在實際冰雹事件中具有優良的降水粒子分類能力與可信度。

除此之外，本研究亦針對 2022 年 4 月 22 日的嘉義冰雹事件與 2025 年 3 月 13 日的南投冰雹事件進行測試。結果顯示，PID 技術能掌握冰雹發生位置。由此可見，透過直觀的 PID 分類結果，能協助防災人員與一般民眾快速理解，無須自行判讀大量且艱深的雷達圖資，

有效節省時間，加速致災性劇烈天氣的預警時效。

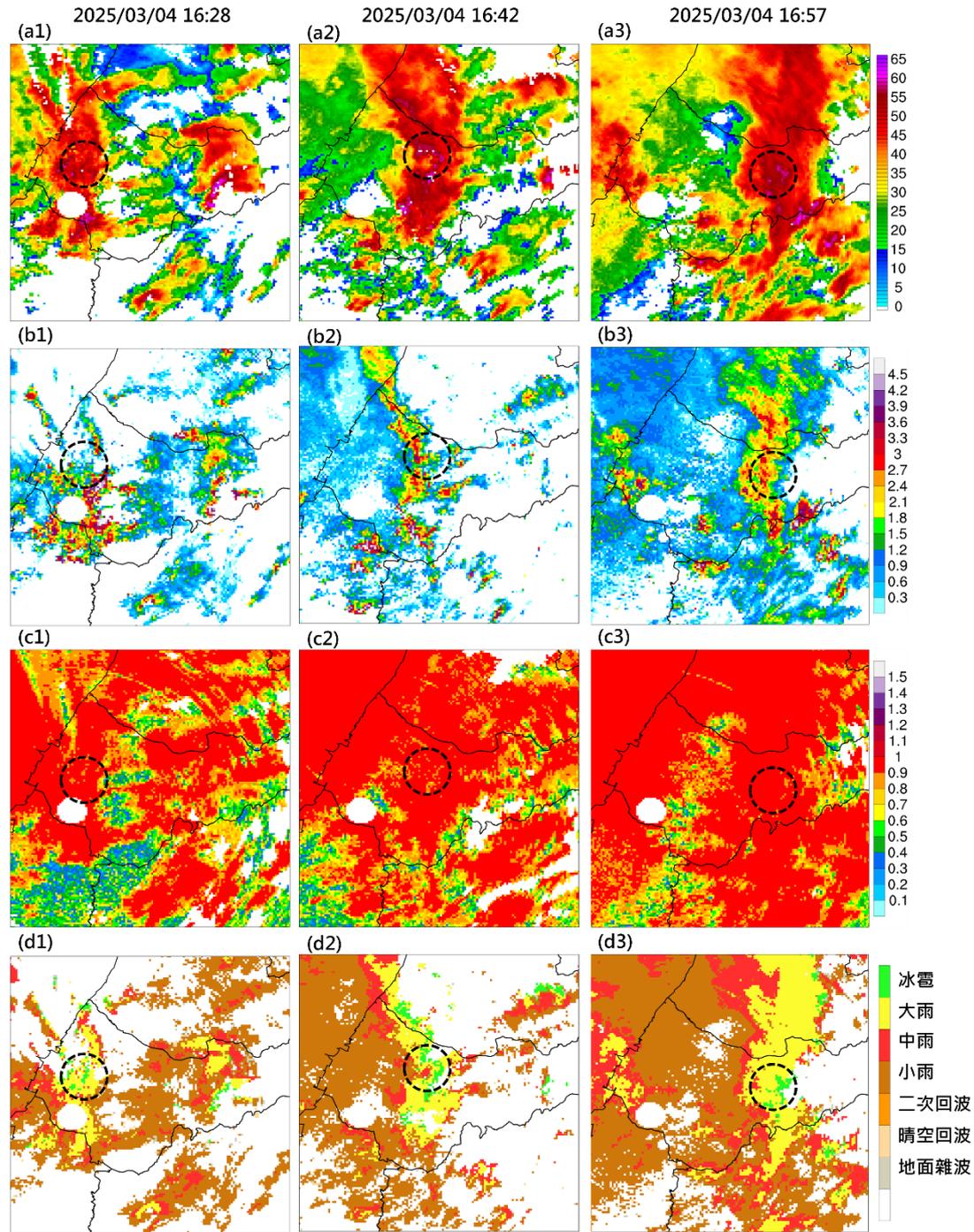


圖 6. 2025 年 3 月 4 日 16:28 至 16:57，每 14 分鐘南屯雷達觀測之回波(a1~a3)、差異反射率(b1~b3)、相關係數(c1~c3)及降水粒子識別結果(d1~d3)。

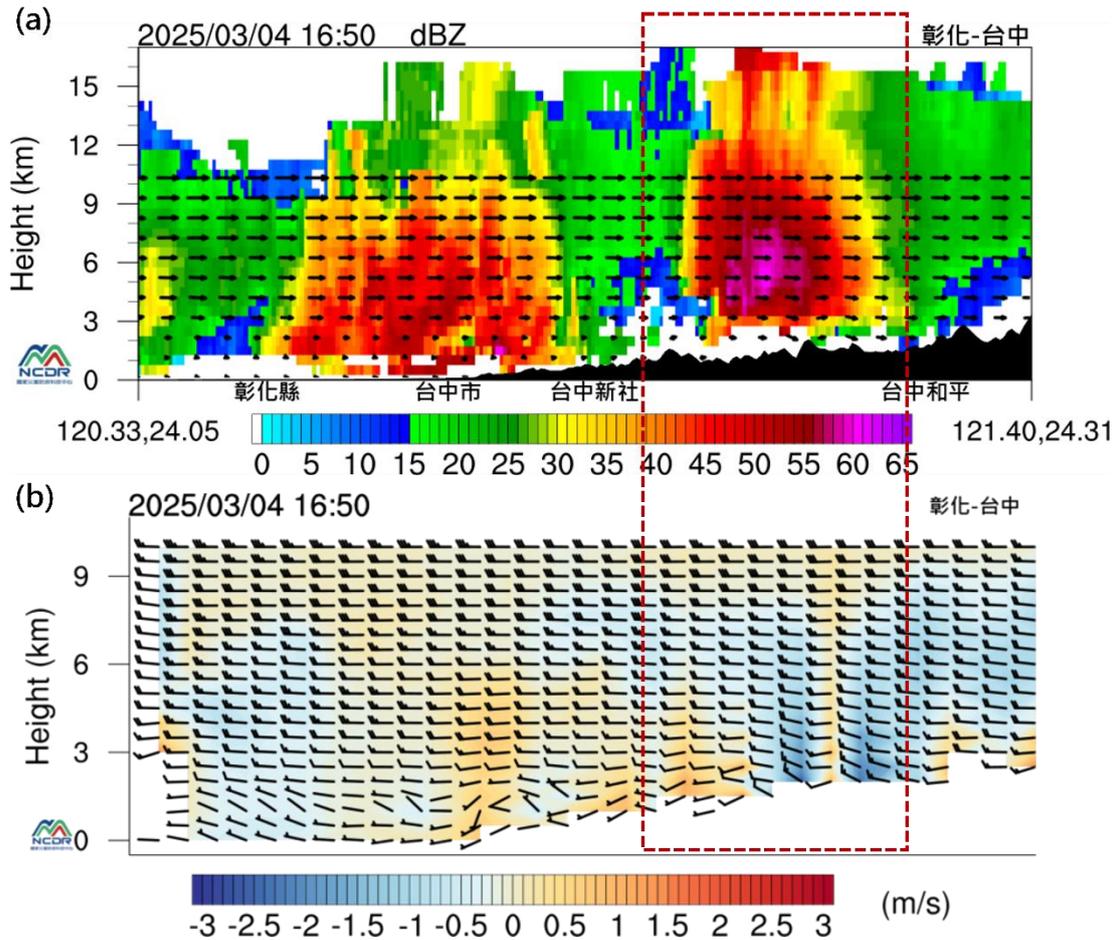


圖 7. 2025 年 3 月 4 日 16:50，中部冰雹個案垂直剖面圖。(a)雷達回波(顏色)與水平風場(箭頭);(b)垂直運動速度(顏色，正值為上升運動，負值為下沉運動)與水平風場(箭頭)。

四、 結論

颱風、鋒面與午後雷雨等中尺度劇烈天氣系統，是造成臺灣發生短延時強降雨的主要原因。這些天氣系統除了強風豪雨外，亦常伴隨冰雹等劇烈天氣現象，進而造成經濟損失。為提升氣象研究或防救災人員對劇烈天氣的辨識能力，本研究整合國內 6 座 C 波段雙偏極化雷達資料，利用模糊邏輯方法，建立一套全臺的降水粒子識別技術。

這套技術在 2025 年 3 月 4 日發生在臺北和臺中的冰雹事件中已得到很好的證明，PID 偵測到的冰雹發生時間和位置與實際結果高度相符，顯示此技術在實務上具備降水粒子的分類能力與可信度。

本研究建置的降水粒子識別技術，主要是希望能快速將雙偏極化雷達的觀測資訊，轉譯為直觀且易於理解的降水型態分類，降低防災人員判讀雷達圖資所需的時間，進而提升災害預警與應變效率。展望未來，隨著人工智慧技術的發展，若能整合多種雙偏極化雷達即時監測技術與極短期預報，將有助於提升短延時強降雨之預警能力。

致謝

本研究感謝交通部中央氣象署、國防部空軍氣象聯隊及經濟部水利署提供雷達觀測資料，使本研究可順利完成。

參考文獻

1. 呂崇華、劉仲潤，2009：新一代氣象雷達之發展與應用-利用雙偏極化雷達觀測馬公冰雹事件。《氣象預報與分析》，**199**，1-10。
2. 陳如瑜、張偉裕、陳台琦，2017：北台灣 S 與 C 波段雙偏極化雷達定量降雨估計之比較。《大氣科學》，**45**，57-80。
3. 周筱倩，2017：2016 年 1 月 23-24 日台灣北部降雪個案水象粒子分布之研究。國立中央大學碩士論文，67 頁。
4. 魏志憲，2018：利用雙偏極化氣象雷達觀測探討雹暴個案水象粒子分布之研究。《飛航天氣》，**30**，1-34。

5. 魏志憲，2019：運用雙偏極化氣象雷達偵測水象粒子分布之驗證。
飛航天氣，**31**，1-20。
6. Chang, W.-Y., Vivekanandan, J., Ikeda, K., Lin, P.-L., 2016:
Quantitative Precipitation Estimation of the Epic 2013 Colorado Flood
Event: Polarization Radar-Based Variational Scheme. *Journal of
Applied Meteorology and Climatology*, **55**, 1477–1495
7. Feng, L., Xiao, H., & Sun, Y., 2018: A study on hydrometeor
classification and application based on X-band dual-polarization radar
measurements. *Climatic and Environmental Research*, **23(3)**, 366–386.
8. Park, H., Ryzhkov, A., Zrnić, D., & Kim, K., 2009: The hydrometeor
classification algorithm for the polarimetric WSR-88D: Description and
application to an MCS. *Weather and Forecasting*, **24(3)**, 730–748.
9. Vivekanandan, J., S. M. Ellis, R. Oye, D. S. Zrnic, A. V. Ryzhkov and
J. Straka, 1999: Cloud Microphysics Retrieval Using S-band Dual-
Polarization Radar Measurements. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **80**, 381-
388.
10. Zrnic, D., Ryzhkov, A., 1999: Polarimetry for weather surveillance
radars. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **80**, 389-406.