

清泉崗雷達分析危害飛安天氣資料 運用與季節特徵

沈 畦 徐天佑

空軍氣象中心

摘 要

氣象雷達在1970年開始有了突破性的發展，它結合了電腦功能，不僅資料處理速度快，且能提供都卜勒徑向風場觀測資料，使我們對危害飛安天氣系統的掌握有了極大的進展。1990年代，都卜勒氣象雷達將成為天氣守視雷達的主流。

都卜勒氣象雷達功能雖強，但仍有原理上的限制存在，比如不能觀測晴空亂流、冰雹等，但它卻可提供都卜勒風場資料分析出亂流所在；利用定高度水平面回波強度研判冰晶、冰雹或凍雨存在的威脅，所以說它雖不能直接觀測，但卻可提供方法與資料，使我們有能力掌握彼等天氣現象。

雷達回波每一季均有它的季節特性，經由特性討論，觀測員在守視時，較容易掌握回波的變化，加強守視作為。另也就資料運用方面提供建議，希望資料的運用是正確的運用，而非誤用。

關鍵詞：都卜勒氣象雷達，徑向風場，飛航安全，季節特徵。

一、前 言

氣象雷達的起源可追溯至1930年代，也就是第二次世界大戰時期，當時英國發明雷達之目的在於偵測德國戰轟機，偵測到目標後馬上發布空襲警報。雷達問世之後，美國與德國相繼投入於雷達功能改進之研究。1943年美國麻省理工學院特別成立了輻射研究所，隨即在雷達的研究上獲得了突破性的發展，新式輻射微電磁波頻雷達問世，美空軍馬上在B-17與B-24戰轟機上加裝此種新式雷達。往後任務執行中飛行員陸續的發現微電磁波頻的雷達對大雨風暴現象會測得強回波，而早期的雷達(指200MHZ

與400MHZ頻率之雷達)則不會有相同效果(Fletcher, 1990)。麻省理工學院輻射研究所針對此一現象，馬上就設計出SCR-584 型雷達(後稱之為XT-1型雷達)，試圖進行天氣現象專屬偵測工作。Fletcher本人也在1943年4月親自駕駛Cessna C-78 型飛機測試此型雷達功能，測試當日為一晴空天氣，他原飛行高度在80呎以上，未測得任何天氣回波，但當他把飛行高度下降到80呎以下時，就在離地面20到80呎的空氣層中探測到海風導致近地面層之混合性潮溼空氣回波，部分回波強度達 120dB (約30dBZ)。此一測試結果已使研究人員深信微電磁波頻雷達有能力做降雨天氣方面的偵測。此後在1943到1944

年間美空軍漸次的成立了氣象雷達偵測第一中隊（B-17）、第二中隊（B-25）及第三中隊（B-24），全力支援各戰區空中天氣偵測任務。由於成效非凡，美軍隨後又成立了許多類似中隊，機種也擴及P-47及P-61。第二次世界大戰結束以後，美空軍和麻省理工學院輻射研究所雷達研發小組曾就當時各型雷達的功能和各中隊偵測天氣報告作了一番比較，他們決定以B-29轟炸機上AN/APQ-13型（屬X-band）雷達作為氣象偵測雷達，它也成為現今氣象雷達的前身。當年美軍關島颱風偵測中隊成立時，也是使用AN/APQ-13 型雷達，雖然飛機由B-24、B-29、B-50到C-130機種，其氣象雷達仍源於AN/NPQ-13型雷達。

在陸地上第一座陸用氣象雷達則是在1944年啓用的，該雷達爲改良型之 AN/CPS-9 型雷達。到了1950年功能再度改良爲WSR-57型氣象雷達，此種雷達即爲現今氣象人員所熟知的傳統式氣象雷達。本軍目前仍在使用的傳統氣象雷達即屬此型，如馬公WSR-74及綠島WSR-80二氣象雷達均爲同一系列產品，WSR- 後之數字表示該雷達出廠時之西元年代。

1950到1960年代期間，有許許多多的空難事件被認定是危害性天氣（如風暴、暴風雨）造成。爲了深入瞭解風暴對飛行的危害性，以及氣象雷達守視觀測的可行性，美國氣象部門特於1965年結合學術研究單位、美空軍、與英國和加拿大等國專家共同實施了一次研究觀測實驗計畫。他們用地面氣象雷達觀測回波指揮在空的研究飛機刻意穿入風暴中蒐集資料，經過分析研究後，不僅讓氣象人員對風暴氣流、內部結構、特性有了深入瞭解，更在氣象雷達回波特性分類上也獲得了突破性的成果，氣象人員越來越倚重氣象雷達來守視危害性天氣已成趨勢。1970年之後，航空空難事件因危害性天氣造成案例已顯著減少，氣象雷達守視之功勞實不可滅。

另於1970年代氣象雷達又有了新的發展，新一代的氣象雷達（都卜勒氣象雷達）因為結合了電腦快速處理資料的功能，使得各種觀測資料可即時轉換為易讀的圖形畫面，提供我們更多可參考的資訊。

，比如都卜勒雷達徑向風場資料（Doppler Radar Velocity），它可以協助我們鑑定風暴中氣流有沒有旋轉的徵候，如果有，那麼該風暴不但危害性大，且可能會造成龍捲風等劇烈天氣現象。此一優點正促使國際上各氣象單位全面換裝的腳步加快，預期在1990年代，都卜勒氣象雷達將全面取代傳統氣象雷達，接替觀測守視任務。

氣象雷達，接替觀測系統正在國內早在1987年即在中正機場架設了一座都卜勒氣象雷達；空軍也在1991年初於洲際架裝完成另一座都卜勒氣象雷達。此二都卜勒雷達執行觀測已有一段時日，也見到許多學者用該等資料進行了個案分析，如王陳台琦教授用都卜勒雷達資料分析了梅雨期間中尺度對流產生豪雨結構(1991)；周仲島教授等運用EYCOM-3分析探討了TAMEX 10P-8 中尺度對流系統結構(1993)；周仲島教授等分析了台灣北部地區地形對中尺度降水系統機制(1993)等。使我們對中尺度對流系統發生機制、內部結構有了深一層的認識，在作業上已有相當大的幫助。但是這些資料是否對其他訊息我們尚未注意到呢？比如說雷達回波氣候特徵為何？回波的生成源地分布為何？回波向如何？季節變遷交替時回波強度變化又如何？這些問題是本報告的動機，希望從不同角度的分析後，能提供預報人員瞭解危害性天氣的季節特徵，進而增進我們對危害天氣的掌握，提升飛安的工作成效。

進而增進我們對危害天氣的
作成效。

二、都卜勒氣象雷達掌握危害天氣
力與限制

在討論都卜勒氣象雷達掌握危害天氣能力（限制），我們先要瞭解它的基本特性（限制），也避免我們因不當使用雷達而做出錯誤的判斷。

做出錯誤的判斷。

(一)都卜勒氣象雷達是一脈波式雷達：

它是以脈波方式發送電磁波的雷達，就像心臟脈搏跳動方式，在瞬間發射出高功率的電波，雷達在發送脈波的瞬間只做發射動作，

(又稱監聽)動作。當電磁波自天線發送出去後，雷達會停止發射動作，轉變為接收狀態，不再發射任何電磁波。此一較長的監聽時間就決定了雷達的最大偵測半徑距離，而發射脈波時間的一半即為雷達可觀測最小距離。一般而言，在監聽時間雷達會監聽有沒有電磁波被目標物折射回天線處？直到第二個電磁脈波發射時才會停止監聽動作。

它的電磁波波長為五公分：

雷達電磁波的波長與它可以偵測到目標物的直徑有直接的相關，波長較大的雷達可偵測到直徑較大的目標物。以五公分波長氣象雷達為例，它可以偵測到空氣中較大直徑的水滴，適宜用為偵測雷雨、豪雨等較劇烈的降雨現象。另以一公分波長的雷達為例，它只能抓到較小直徑的雲水滴。所以當雷雨隱含在雲帶中時，一公分的雷達會得到整片雲的回波，卻不能明白指出雷雨位置所在。因此一公分波長的雷達多用於雲物理方面研究觀測，很少用來做雷雨、豪雨等降雨現象的監控觀測。一般多用五公分或十公分波長氣象雷達擔任雷雨、豪雨等劇烈降雨天氣的觀測。

可做徑向風場

可做徑向風場 (Radial Wind或Doppler Wind) 觀測：

都卜勒氣象雷達借助於電腦的功能，可以記憶住每一個發送出去電磁波的頻率相位，並和接收回來的電磁波頻率相位作一比較，算出二頻率相位的偏差量（如圖1），再透過都卜勒原理就可推演出電磁波行進路徑上空氣流動的速度，簡稱之為徑向風場。

什麼是都卜勒原理？讓我們以火車汽笛聲為例做說明，當火車要進站前，通常會先拉汽笛聲，表示火車要進站了，請注意安全。這個時候假設我們是在火車站內，由於火車是向著我們在接近中，汽笛聲的聲波被壓縮，頻率增高，所以聲音聽起來非常尖銳刺耳。反過來說，當火車離開火車站時，汽笛聲聲波變得疏鬆，頻率降低，所以汽笛聲聽在耳中就顯得低沉（如圖 2）。同樣的原理，我們也可以應用到雷達電磁波頻率變化

上，當空氣中的水分子被氣流帶動向雷達站方向移動時，接收回來的電磁波頻率相位會向基準相位的右方偏移，就好像頻率被壓縮 ($\Delta f > 0$) 的效果；反之變小 ($\Delta f < 0$)，向左偏移 (如圖3)，於是徑向風場的風向、風速資料都可以計算出來了 (如圖4)。

四晴空亂流不可觀測：

晴空亂流不可觀測：

前文曾談到都卜勒氣象雷達在做徑向風場分析時，它是在觀測電磁波行進路徑上水分子的移動情形。此一觀念非常重要，也就是說雷達是靠水分子來反應回波。如果遇上晴天，空氣中缺乏水分子或水分子的直徑甚小，對五公分波長的氣象雷達而言，它完全失去了可觀測的目標物，就無法反應出任何徑向風場資料，當然也看不到亂流，所以說晴空亂流是不可觀測的。

(五)都卜勒氣象雷達不能直接觀測亂流：

都卜勒氣象雷達提供的徑向風場資料是運用水分子在空中飄移的軌跡推演計算出來的，它只能反應出那裡有亂流存在的位置，不能提供強度實際觀測值。一個有經驗的氣象雷達分析員很容易從徑向風場回波圖中研判出亂流所在位置，因為在顯示螢幕上已經把接近或遠離雷達站風場用不同顏色加以區分，只要發現在短距離內有顏色急劇變化處，就代表該處有亂流存在。

(六)冰雹不可觀測：

任何觀測儀器都有它設計的理論依據，都卜勒氣象雷達也不例外。在討論冰雹可不可以觀測問題時，我們也應該從氣象雷達設計原理討論起。所謂「可觀測」表示目標物折射回來電磁波具有一定程度以上的強度，足夠從雷達螢幕上顯示出它的存在（如圖 5）。根據雷達設計原理回波強度的值和雷達電磁波發送功率、目標物橫截面、目標物電磁介值等因素有關。空氣中水和冰雖然同屬水卻有液體與固體形狀之分，二者形狀全然不同，通常在空氣中水分子多為較規則的圓球體，它的橫截面不論是用何種角度來切割它幾乎都一樣（如圖 6），是為一個有效的反折射面，可反折射較強的電磁波功率回雷達天線；而冰在空中就

沒有固定的形態，它的橫截面為一不良反射面，電磁波會因入射角度的不同而有極大的變化，冰質為一不規則又不理想的反反射體，當然冰的反射電磁波強度就比水分子小很多。我們若拿水珠和冰雹比較，冰雹的回波強度就小於水珠幾十倍。所以當冰雹與水珠的反反射電磁波同時顯像於螢幕中時，已完全被水珠的強度掩蓋住，無法辨認（如圖7）。因此我們說冰雹是不可觀測（指現行理論而言）。這是否表示我們對冰雹就失去了掌握嗎？也不盡然，我們可以利用都卜勒氣象雷達產品中，五公里定高度可降雨量產品圖來研判。因為五公里高度正好處於臺灣地區結冰高度之上層，所以在此高度上仍有可降雨量值出現，表示該層水汽充沛，溫度低於攝氏零度C，則該處極可能出現凍雨、冰晶或冰雹。我們仍能適度的發出警告。

接下來讓我們來認識清泉崗都卜勒氣象雷達的各項產品，該雷達每次觀測之後，電腦都可以立即提供這些產品：

(一)水平面回波強度：

此即傳統氣象雷達PPI顯示的回波圖功能，這一點傳統與都卜勒氣象雷達功能是相同的。清泉崗雷達的觀測半徑有260、120、50公里等變換能力。圖8為120公里觀測回波顯示圖，本項產品可提供我們降雨系統的位置及強度，強度值及回波排列方式有助於研判天氣現象的劇烈程度。

(二)定高度平面回波強度：

清泉崗雷達每一次觀測均執行十一個仰角觀測，觀測完後電腦會自動處理，把資料換算到指定高度上，如圖9即為50公里觀測半徑1公里定高度的平面回波強度圖，此定高度值可由觀測員決定，一般我們都會做1公里及5公里的定高度分析，幫助我們掌握高空冰晶以及地面降雨系統強度等。

(三)垂直向積分可降雨量：

每次觀測後，電腦可以從地面一直到雲頂間作垂直向積分，計算出這一空氣柱內有多少可降雨量（如圖10）。此資料可幫助我們校驗水平面回波

強度觀測的正確性，也可幫助我們決定天氣現象到達時，下雨的程度、雨量大小等。

(四)水平面顯示雲頂高度：

電腦會根據實測資料分析出觀測範圍內各天線波最高雲頂高度，化作水平面顯示，如圖11中白色點位置雲頂在40000呎，發展相當高，研判出那是一個雷雨雲，藏在一雲系當中，若管導引上，宜避免帶航機進入此一區域，減少空安事件發生。

(五)垂直剖面顯示：

圖12為垂直剖面回波強度顯示，根據此圖我們可以分析出，雷雨並不止一個單一雲胞，其中A為成熟期當中的雷雨，雲胞B為衰退中的雷雨，而雲胞C與D二者則為新生成的雷雨，且持續在增強中。本項產品同時也告訴我們發展高度有沒有超過結冰高度（五公里），那麼冰晶、凍雨警告即應發布。

(六)都卜勒徑向風場：

此資料是都卜勒氣象雷達產品中精華所在，提供了雷達站四週徑向風場的配置情形，而風場中氣流以不同顏色加以區分，凡是向雷達站方向移動的氣流均以藍色偏寒色表示，遠離雷達站方向移動的氣流以紅、黃等偏暖色表示，圖13我們可以很清楚地看出清泉崗外海20公里有一鋒面正在接近中，因為該處有一風切線前為西南風，風切線後偏西北風。

以上各項產品均提供了非常豐富的參考資料彼此間不僅可以相互驗證，也提供了足夠的資料讓氣象人員掌握危險天氣的動態。清泉崗雷達來，已有多次成功的發布預警，使空中及地面飛機能及早採取預防措施，減少了聽線帶來之損失。

三、觀測危害性天氣季節特徵

根據過去資料分析顯示，回波在季節性上非常明顯，一般來說，冬季的回波比較強，夏季

組織（如圖14），雨量也不大，回波強度在40dBZ以下，每次過境時持續時間不長。在春季，回波較有組織，而且是一波一波的移入觀測範圍內，回波強度偶爾可達50dBZ，當50dBZ出現時，會有春雷發生。春季中回波移動的速度較快，平均每小時可移動70公里（如圖15、16），回波引發新生雲雨能力強，故常見一波又一波雲雨帶移入。回波通常在鋒面到達前比較活躍，鋒面南下時，回波才會侵犯南部，否則多侵犯中部以北地區，而回波的動向通常都可以反應出雲雨帶的移動方向。進入夏季以後，我們不太容易見到有組織性的回波，只有在春末夏初梅雨季中才可見。梅雨季中，回波多以組織性型態由大陸方向移入本省，回波多半與華南沿海中尺度對流系統MCS有關聯，當MCS東移至本省時，回波會一波接一波出現，圖17至21為民國82年6月1日至2日不同時間的水平面回波強度觀測資料，在1903時分第一波雲雨回波開始入侵，2133時分中部也影響到，次日0203時分另一波正在原先回波後方海峽中成長，0403時分第二波線狀回波又成形，到0503時分後二波回波入侵中部，在馬公南方台南外海處又見另一線狀排列回波生成，當時各地大雨連連間又夾雜著雷雨，台中地區日雨量超過100公釐以上，危害性相當高，所幸該系統發生時間在深夜至清晨，對飛安的危害威脅小了許多。梅雨季過後，天氣趨向良好，只有午後出現雷陣雨時，才會在雷達上看到回波。夏天的回波通常在北部地區都會呈線狀排列發展（如圖22），發展時間快，30分鐘內即可達成熟期，強度可達50dBZ，北部地區有三個固定地區是為雷雨回波最易出現的源地，分別位於新店山區（如圖23）。入秋以後，回波系統與冬季雲系有組織，但新生回波的情形不多見，鋒面過後，回波立即消散，侵犯時間不長，下雨現象較少出現持續48小時的情形。秋冬時節在回波特性上常見一種現象，即當地面出現毛雨時，雷達降雨回波強度會觀測不到回波，但是從垂直向積分可降雨量產品中觀之，會有最弱等級資料顯示，這表示毛雨為

近地面層非常薄的雲雨，由於水分子直徑較小，雷達不易抓到目標所致。

四、如何運用分析資料

都卜勒氣象雷達提供的資料很多，基本上這些資料已經能對危害飛安的天氣現象發揮守視功能。然而當我們在使用這些資料時，仍應謹慎使用，勿做錯誤判決，或誇大功能說明，誤用了資料，以下所列建議提供各位在運用資料時做參考。

(一)任何資料首先求證資料之正確性，可藉著衛星雲圖、或落雷偵測系統來印證資料的正確性。但應把握時效，迅速印證後馬上處理預警措施。

(二)都卜勒雷達功能上的特性與限制不能誤用。

(三)多利用都卜勒徑向風場資料幫助我們掌握風切線（亦即亂流所在如圖24）、聽線、鋒面等較劇烈天氣系統動向。也可以幫助我們過濾地形回波，地形回波有一明顯特性，它一定是高回波強度，但卻是零風速值。

四運用垂直積分可降雨量驗證降雨回波強度的可靠性。

(五)應運用五公里定高度降雨回波資料研判冰晶或冰雹的威脅程度，並採取必要之預警措施。

(六)對於發布警告之區域，非必要盡量迴避，以確保飛安。

(七)對於圖24中風切線的移動動向應採大風防範措施，避免地面上飛機受損。

(八)應多做動畫顯示，經由連續性畫面，我們可以推算出系統的移動速度，方向，研判出到達侵犯時間，以及將持續時間，對時間上的掌握極為重要。

五、結 論

清泉崗都卜勒氣象雷達功能優於傳統式氣象雷達已是不可爭的事實，由於功能的提升，各種資料的輔助，我空軍氣象部隊在危害飛安天氣守視上已有極大的進步。本文分析了過去所蒐集的寶貴資料

，也發現了雷達回波在不同季節上的特性，這些特性在守視任務執行中可做為觀測上的參考，像是北部地區夏季雷雨回波源地，觀測時多留意回波的發展，至少可給我們多出30分鐘的預警時間，對飛安之維護效益宏大。另也討論到了都卜勒雷達功能上的特性與限制，一方面在正聽，以免大家誤用或誇大其功能，另一方面也導引大家在資料運用上考量的角度，期使都卜勒雷達的功能得以正確的發揮，確保飛安任務，方是主要目的。

參考文獻

- 王陳台琦、林沛練、陳景森、楊健生與魏運寶，1991：梅雨期中尺度對流系統產生豪雨的雷達分析。天氣分析與預報討論會論文彙編。交通部中央氣象局，p.227-237。
- 沈哇、俞川心、張培臣，1994：清泉崗都卜勒雷達分析春夏季北部雷雨季節特性。八十三年度航空氣象預報研討會論文報告彙編，交通部民用航空協會，中國氣象學會，1994年1月，p.39-42。

- 林沛練、葉青青、陳台琦，1990：TAMEX 10P 13長生命期雨帶的內部結構之診斷分析。氣象雷達與飛航安全研討會論文彙編。交通部民用航空局，p.125-138。
- 周仲島、洪景山、鄧秀明，1990：梅雨鋒面對流雙都卜勒雷達分析。大氣科學，18，p.323-364。
- 周仲島、鄧秀明，1990：DVAD方法的研究與其中尺度對流系統的應用。氣象雷達與飛航安全研討會論文彙編，交通部民用航空局，p.27-34。
- 陳台琦，林沛練，1990：梅雨鋒面雨帶結構及移動方式之分析。氣象雷達與飛航安全研討會論文彙編，交通部民用航空局，p.425-438。
- Fletcher, J.O., 1990: Early Developments of Weather Radar during World War II. Radar in Meteorology, AMS, Boston, p.3-6.

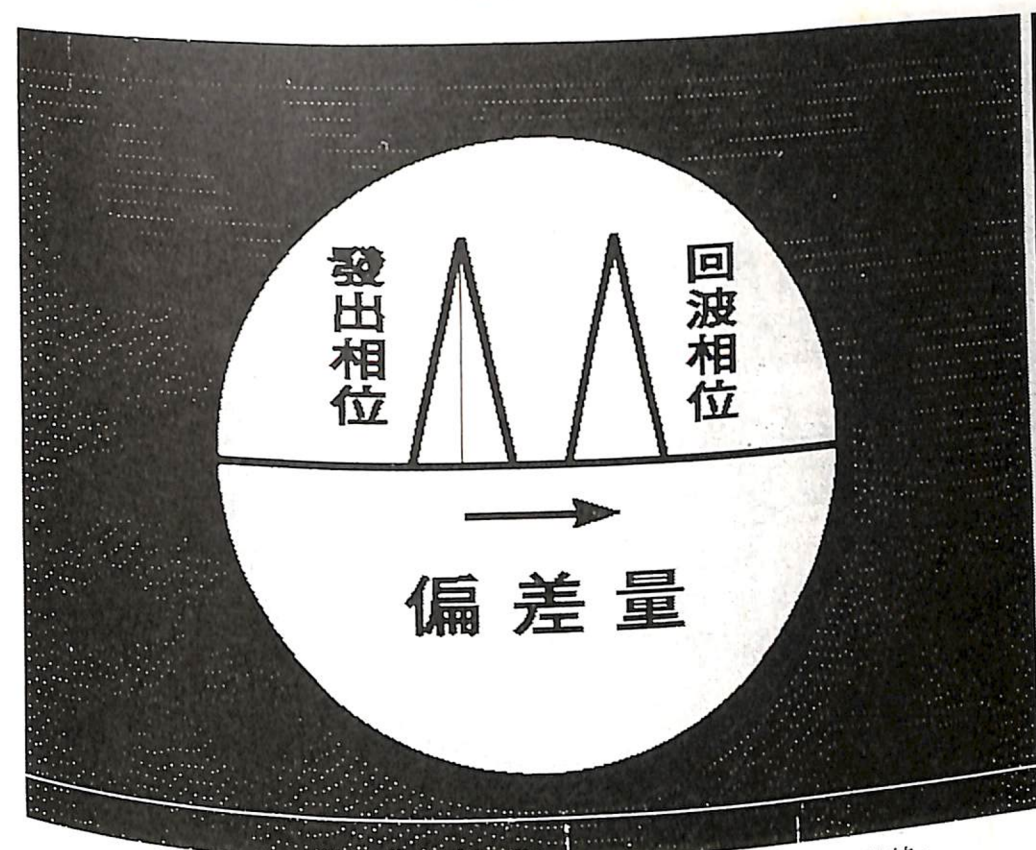


圖1 都卜勒氣象雷達可記憶各個電磁波頻率相位，並做比較，利用彼此間的偏差量來計算都卜勒風速值。

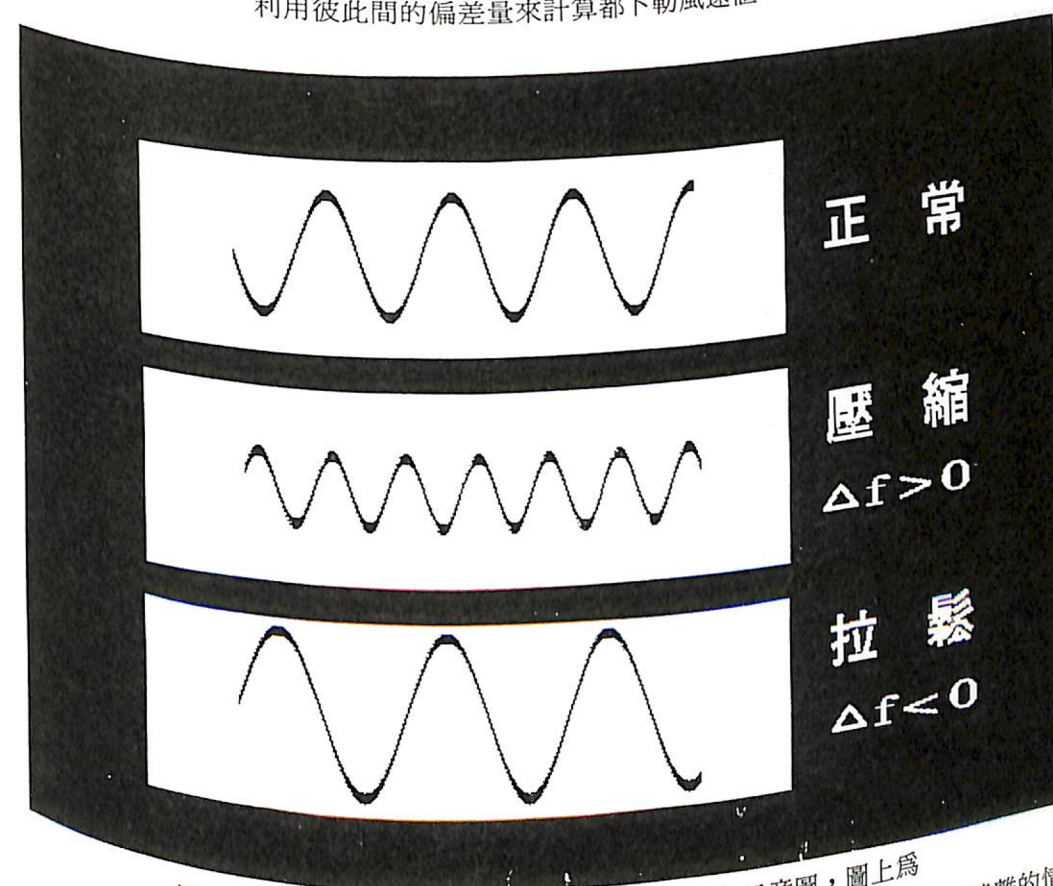


圖2 電磁波頻率相位在相對運動中頻率變化示意圖，圖上為發送出之基本相位，圖中為相互接近時相位，圖下則為相互遠離的情形。

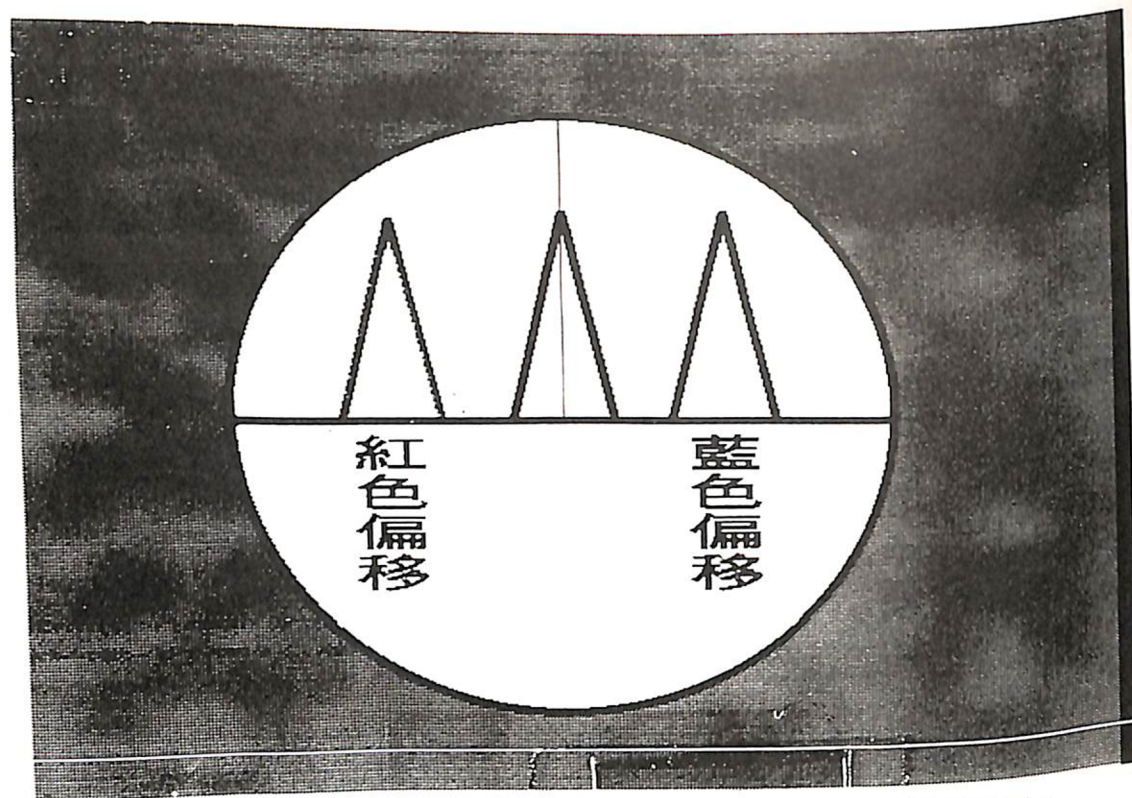


圖3 都卜勒氣象雷達接收回電磁波與發射出電磁波間相位偏移示意圖。

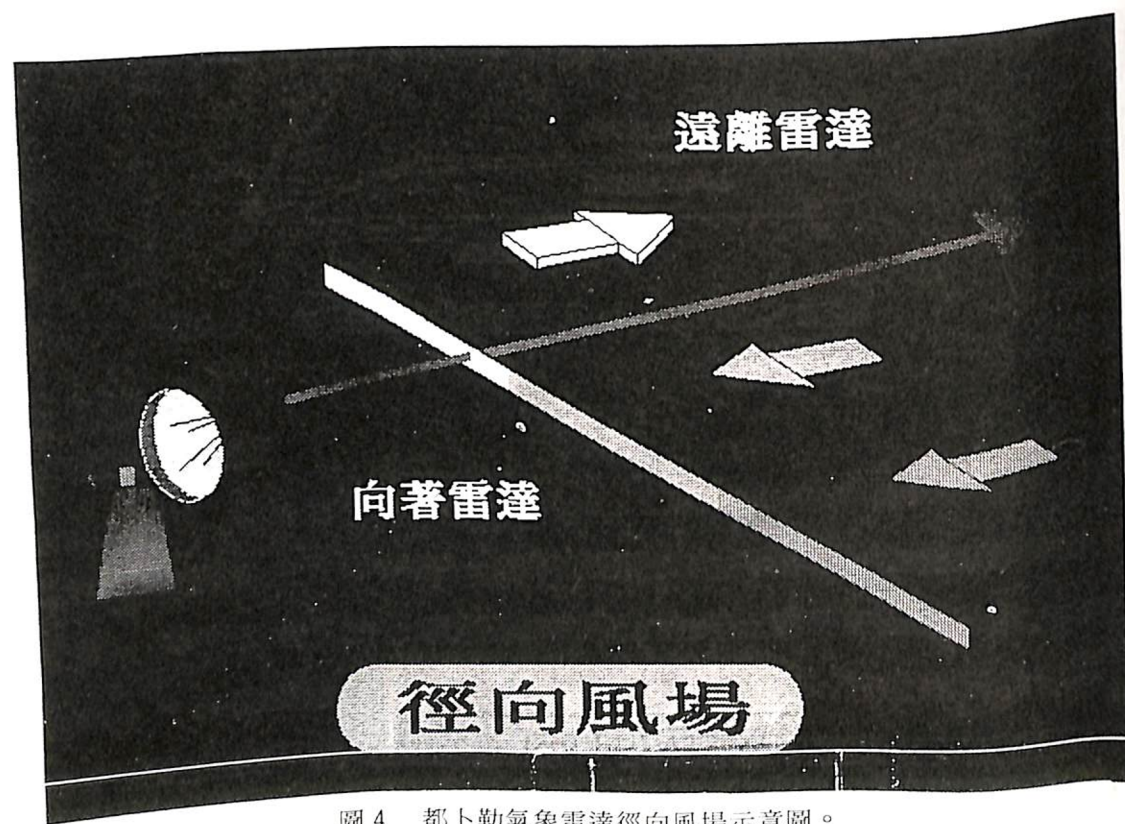


圖4 都卜勒氣象雷達徑向風場示意圖。

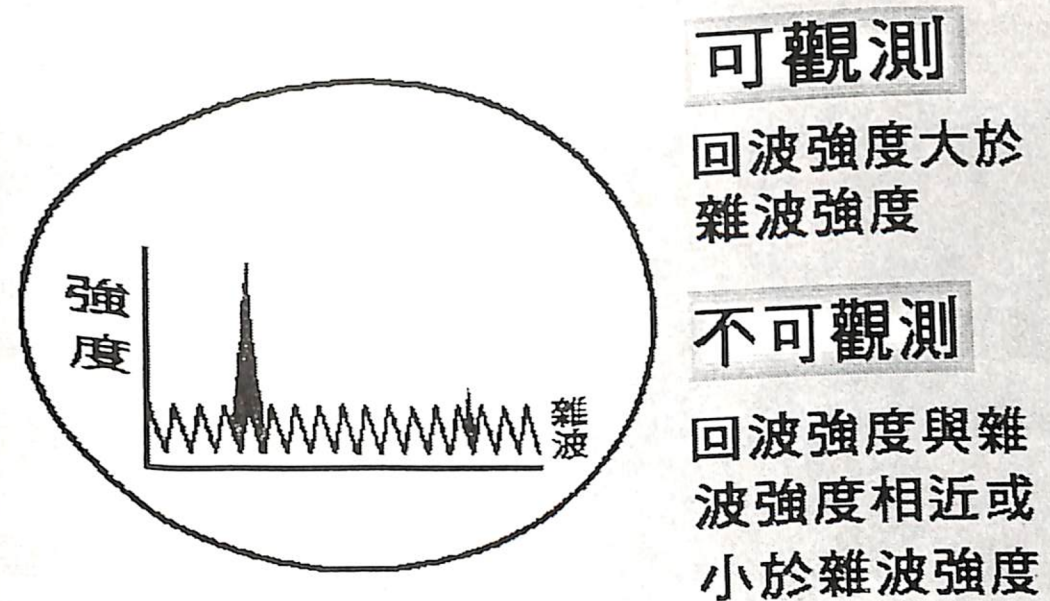


圖5 回波強度可觀測與不可觀測示意圖。

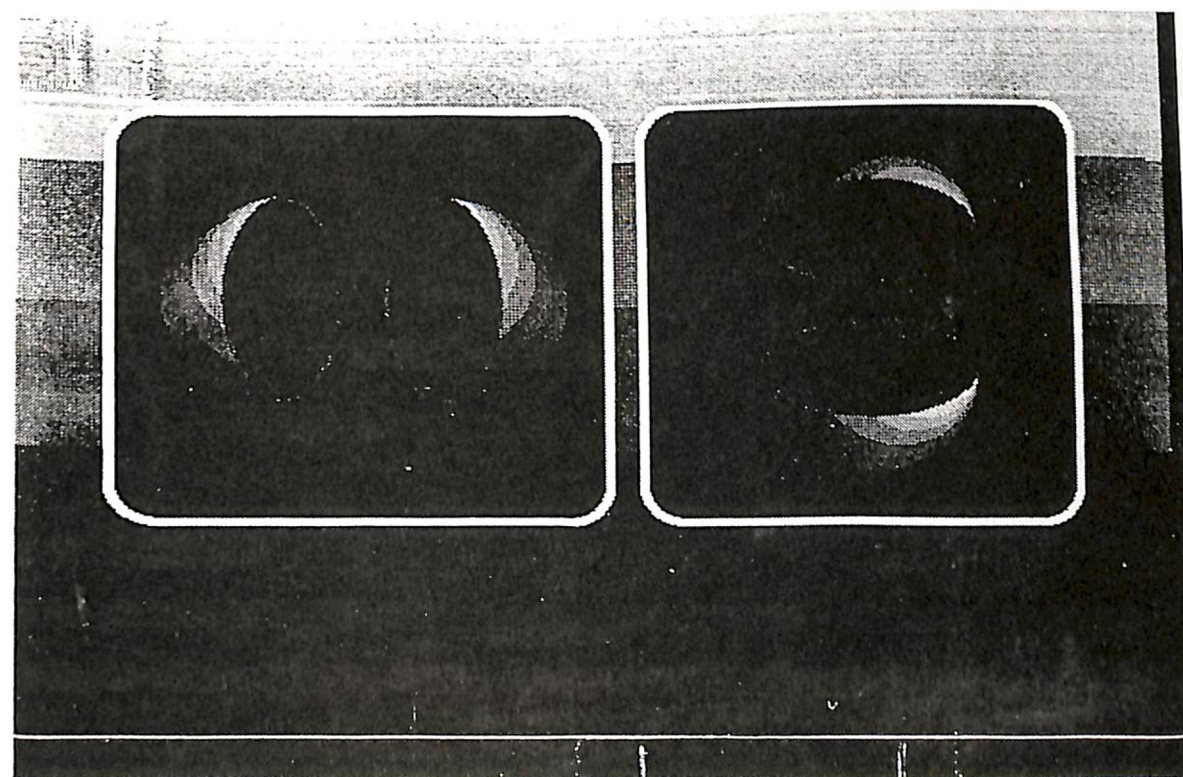


圖6 水珠圓球體橫截面為一有效反折面示意圖。

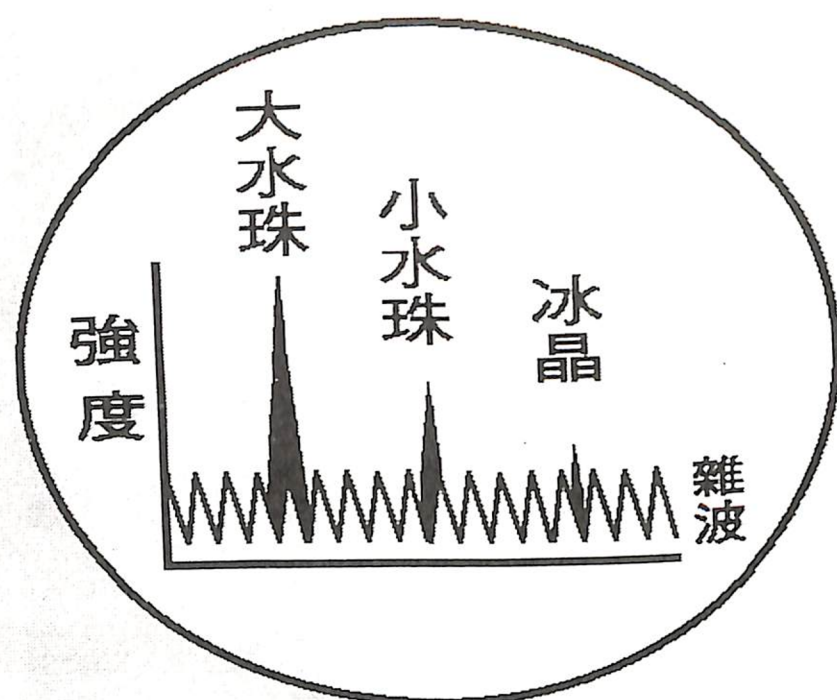


圖7 冰晶回波強度近乎雜波訊號強度，水珠回波強度甚強，冰晶不可觀測示意圖。

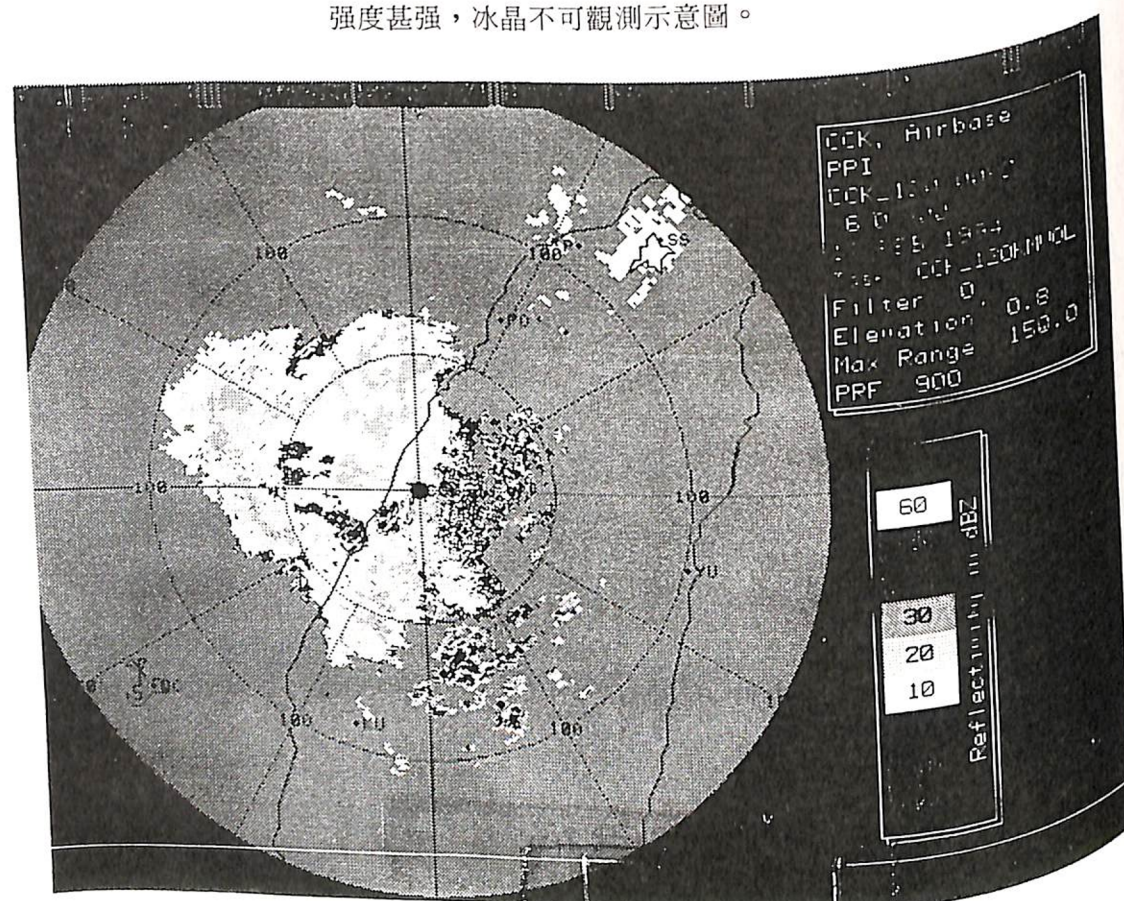


圖8 清泉崗都卜勒雷達民國83年2月13日120公里觀測半徑，仰角為0.8度水平面回波強度圖。

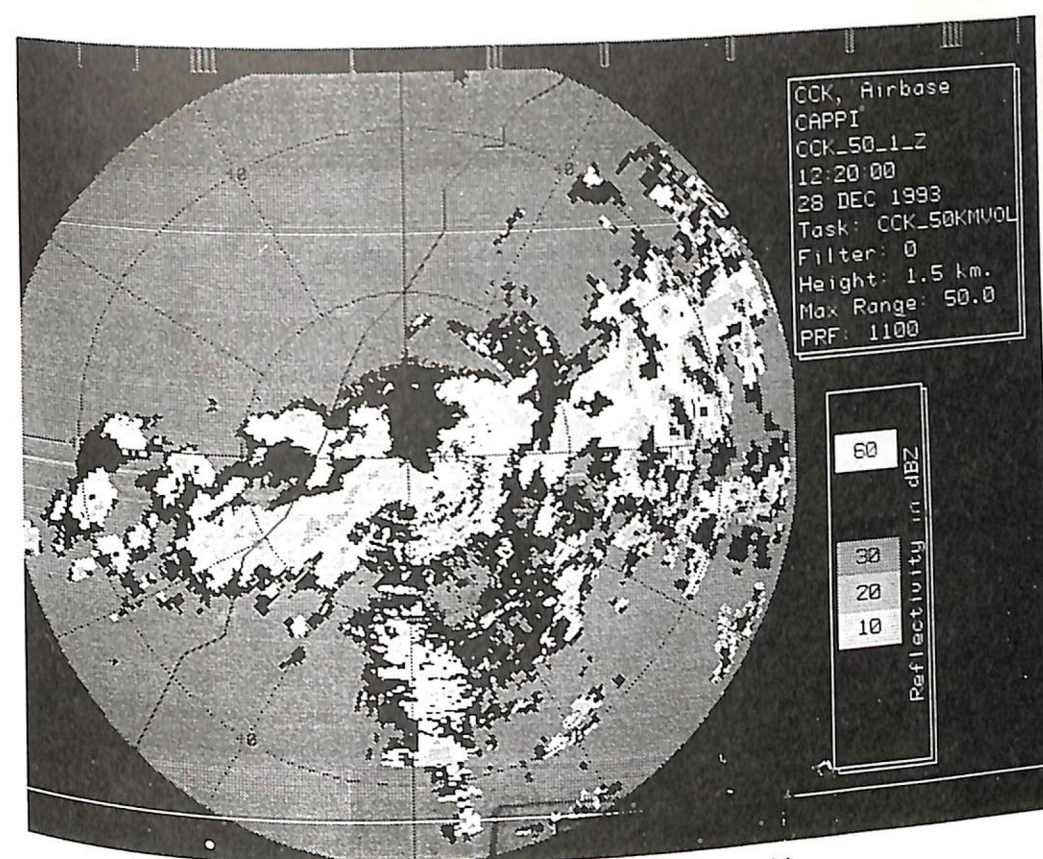


圖9 民國82年12月28日50公里觀測半徑，1公里定高度水平回波強度圖。

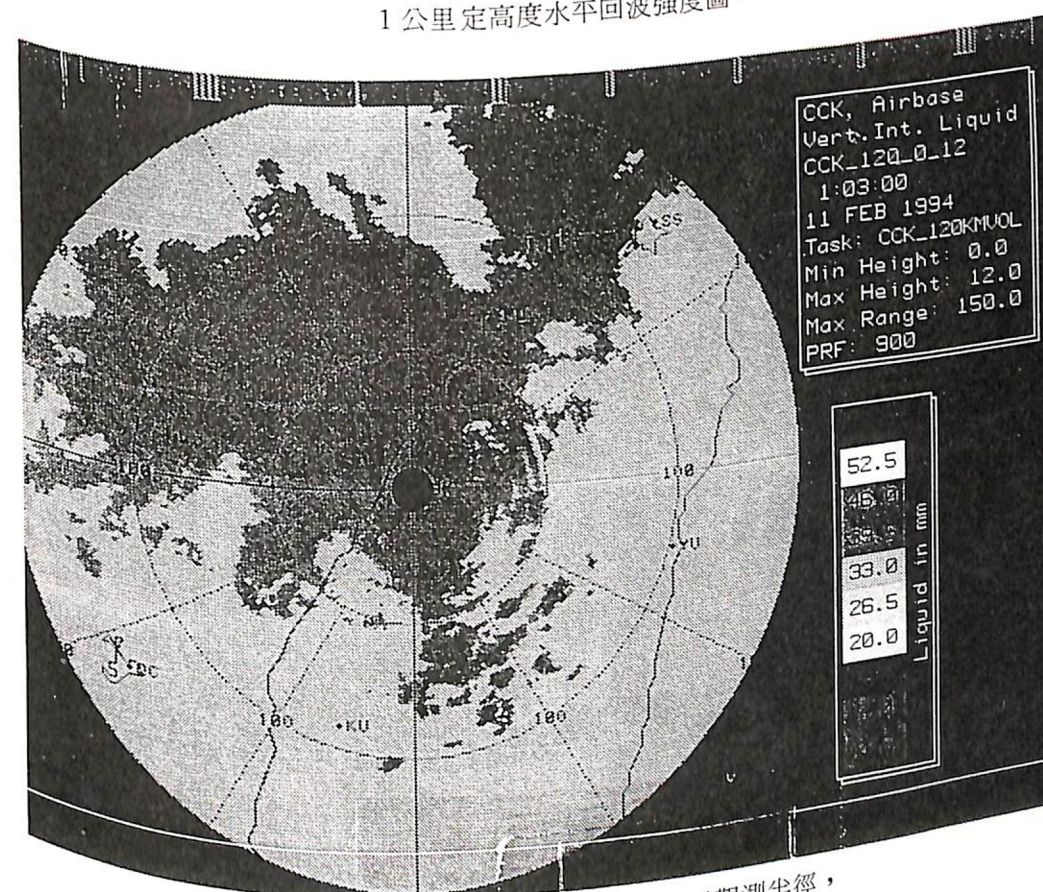


圖10 民國83年2月11日120公里觀測半徑，垂直向積分可降雨量產品圖。

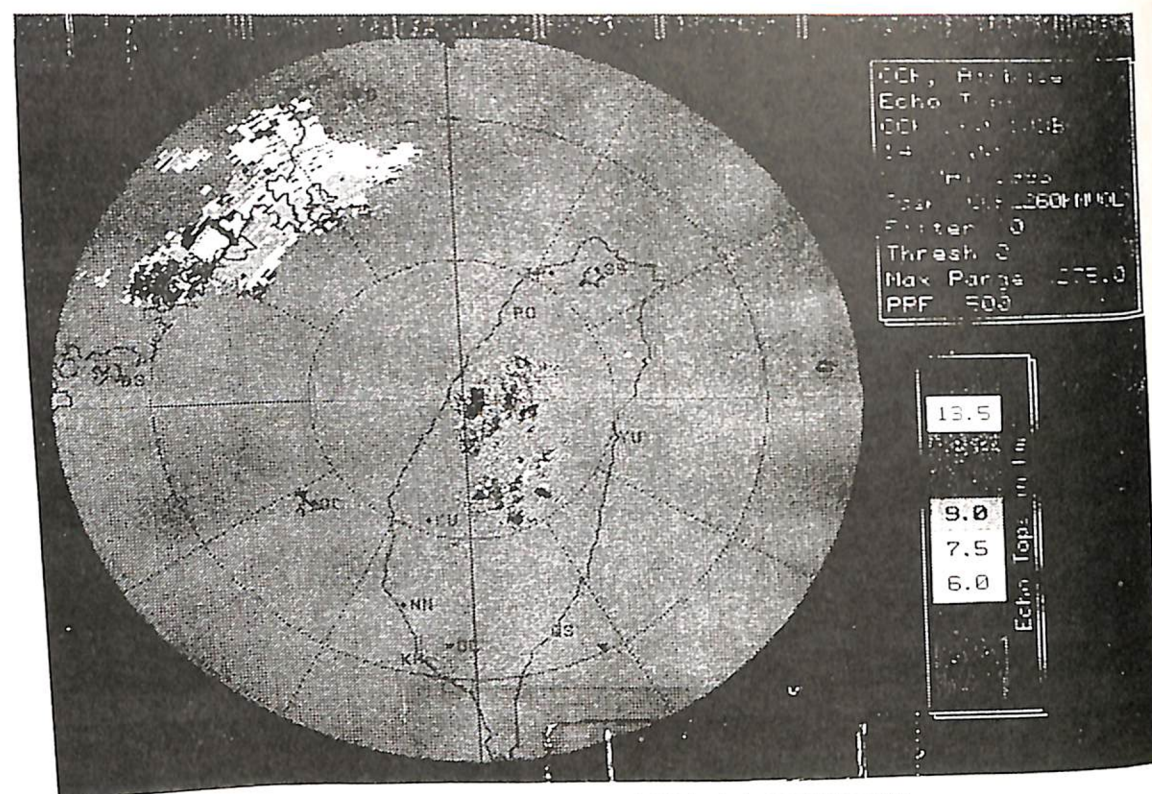


圖11 民國82年5月7日雲頂高度水平面顯示圖。

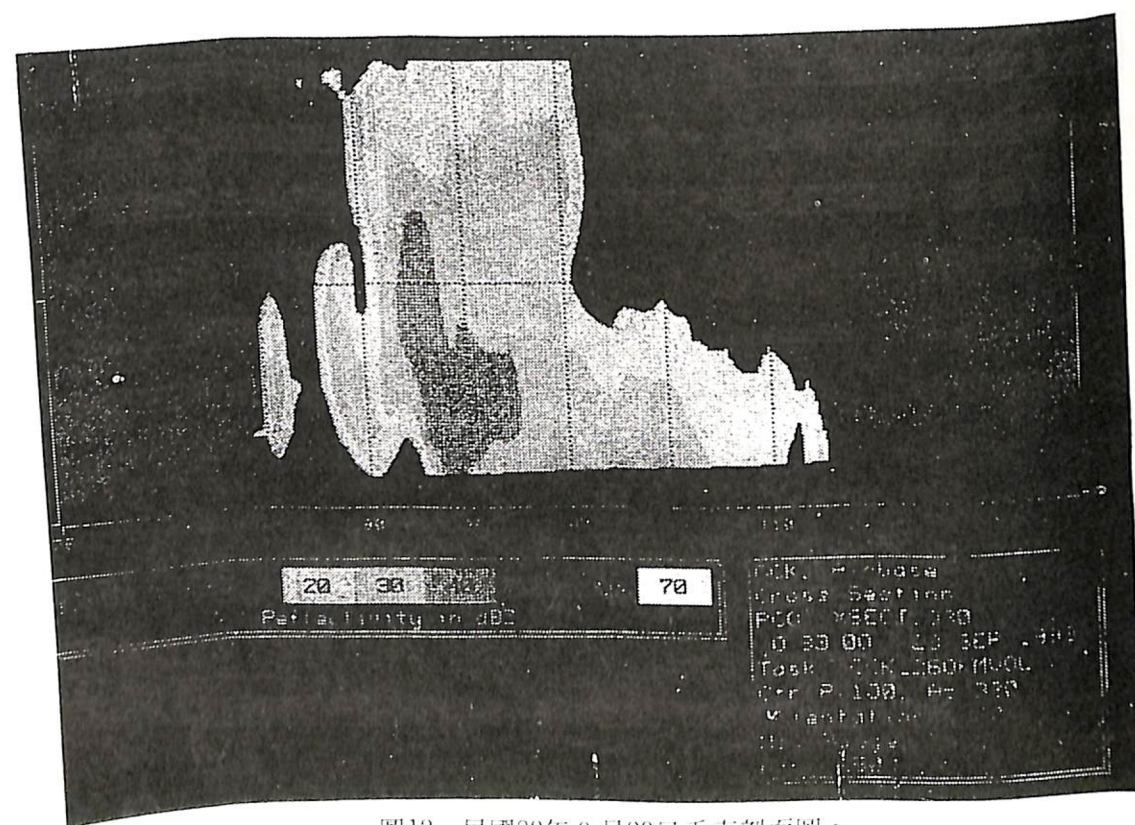


圖12 民國82年9月23日垂直剖面圖。

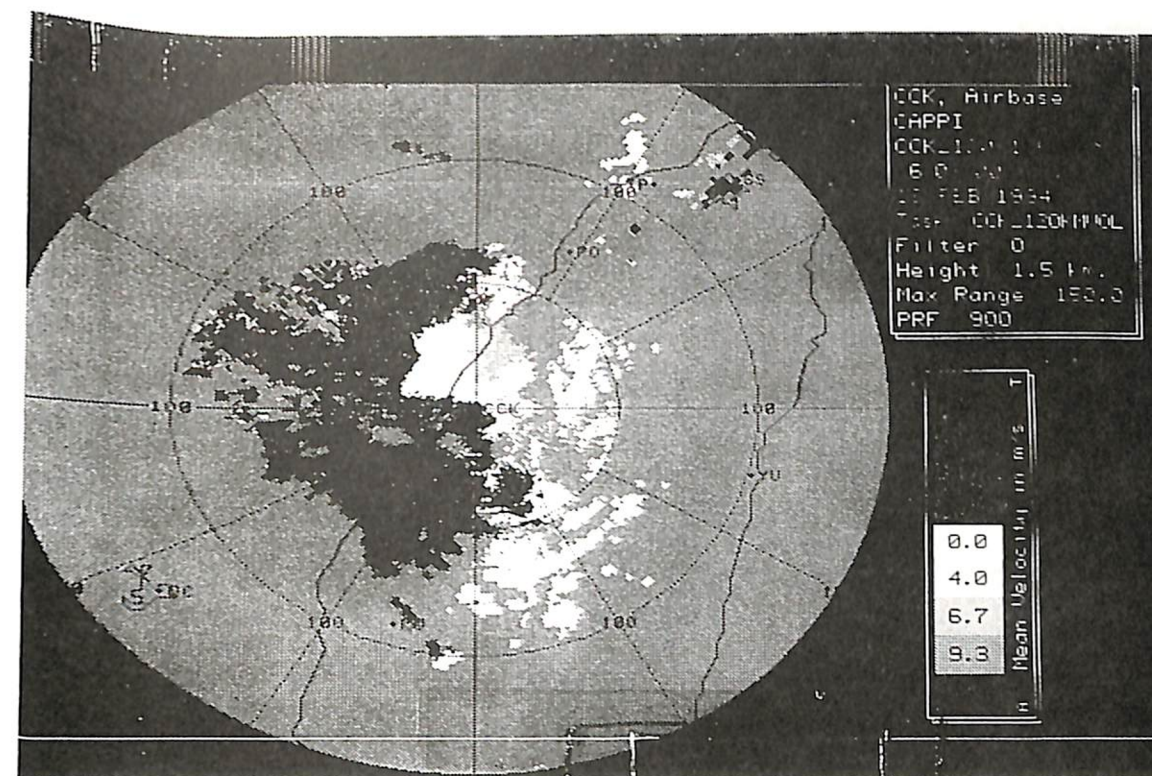


圖13 民國83年2月13日都卜勒徑向風場圖，圖中暗色部分表氣流有向雷達站移動分量，較亮處表示氣流有遠離雷達站的分量。

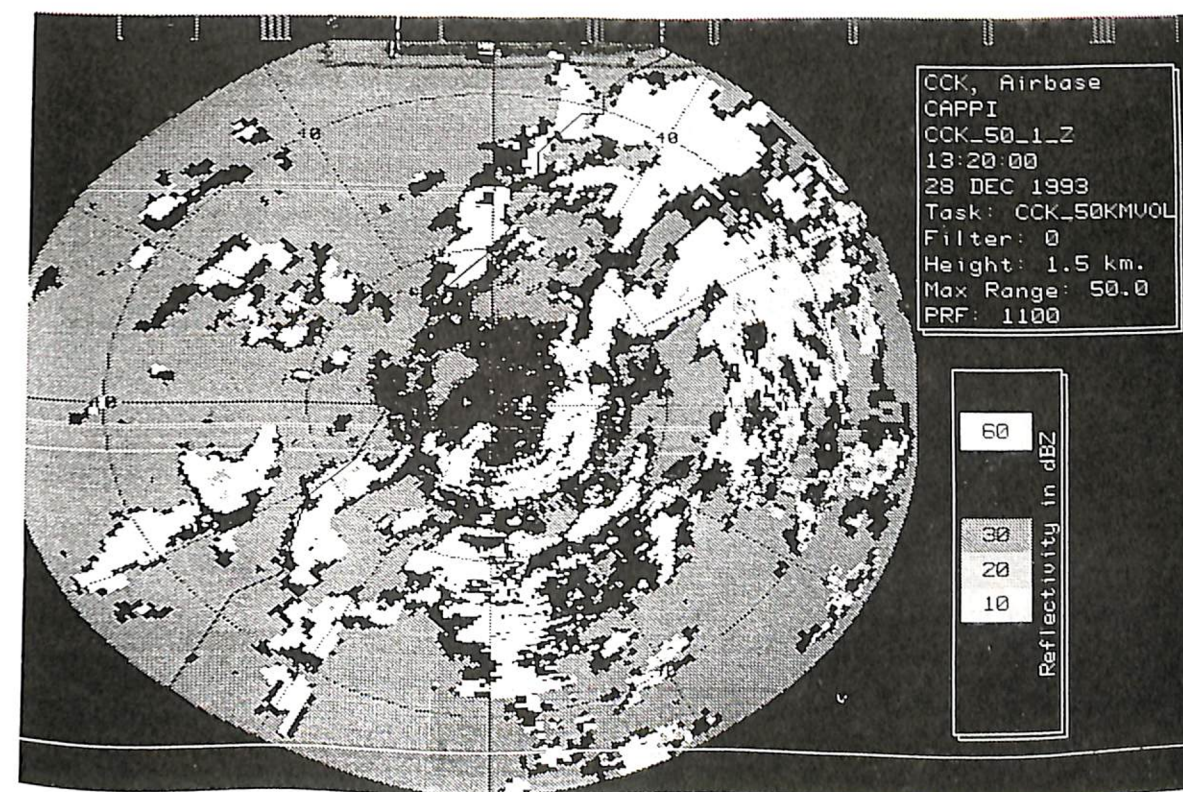


圖14 民國82年12月28日50公里觀測半徑，1公里定高度水平面回波強度圖。

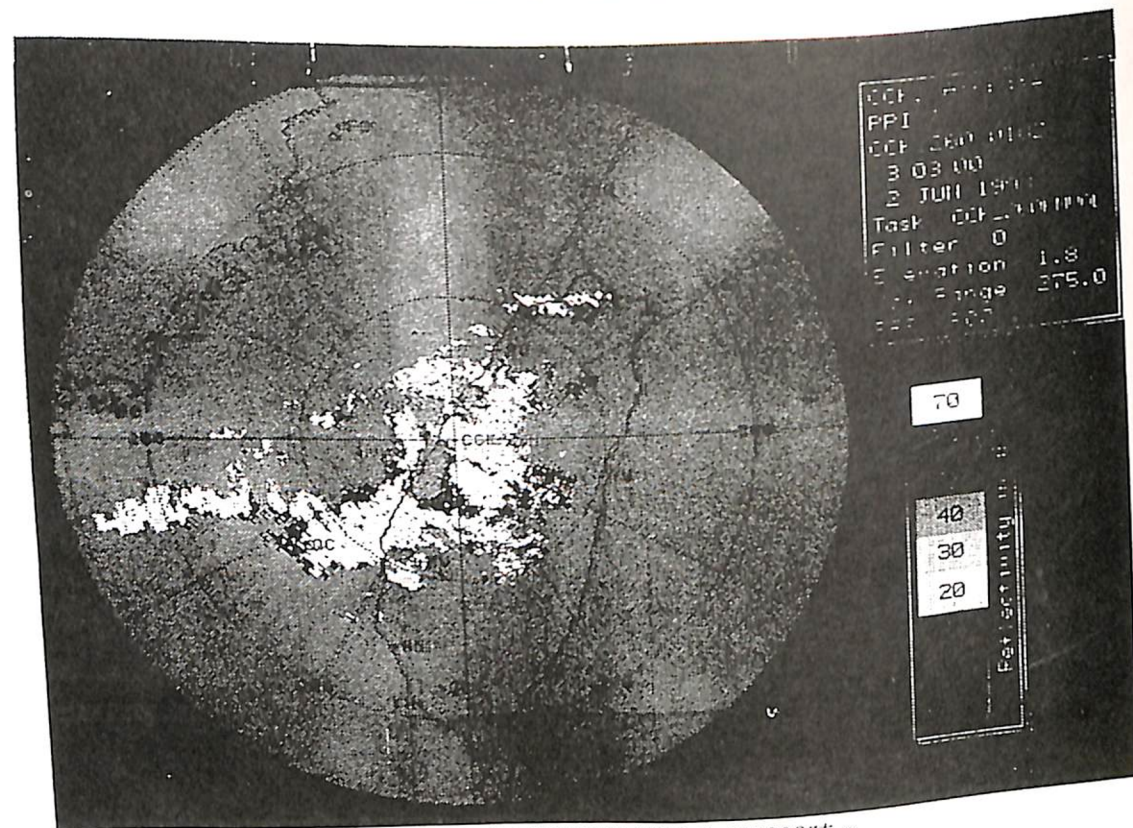


圖19 同圖18惟觀測時間為次日0303時。

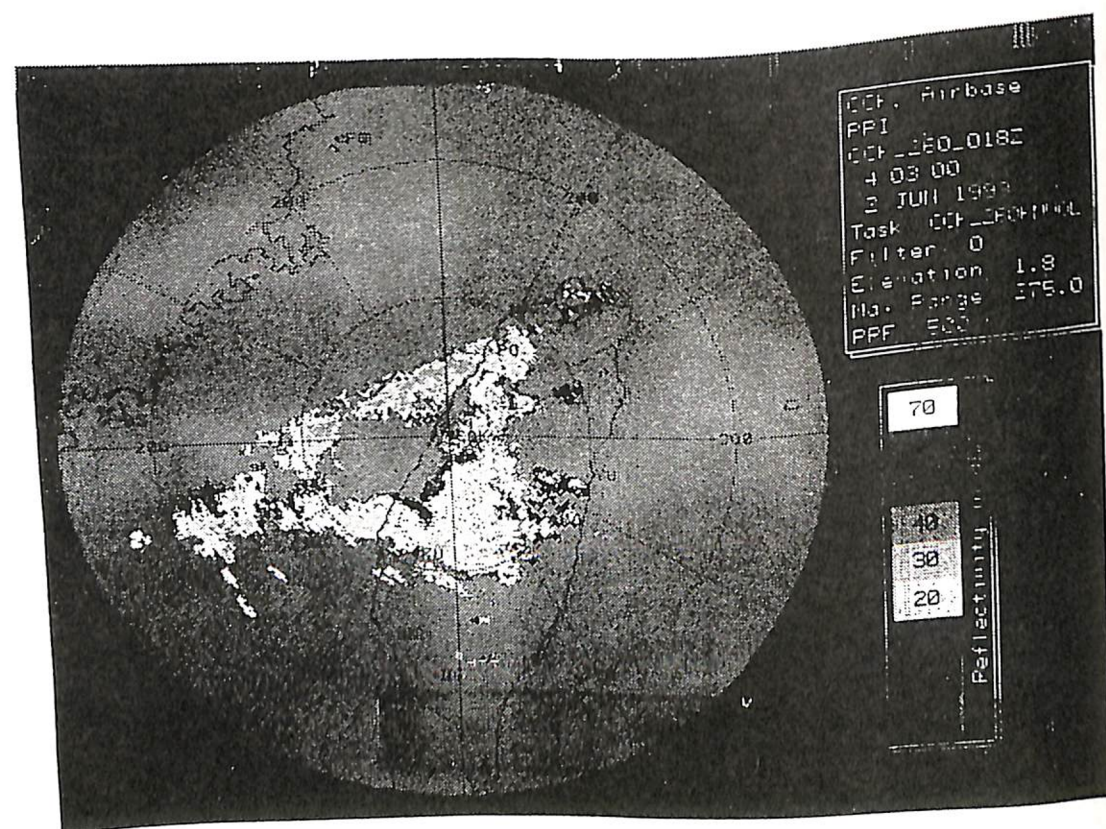


圖20 同圖19惟觀測時間為0403時。

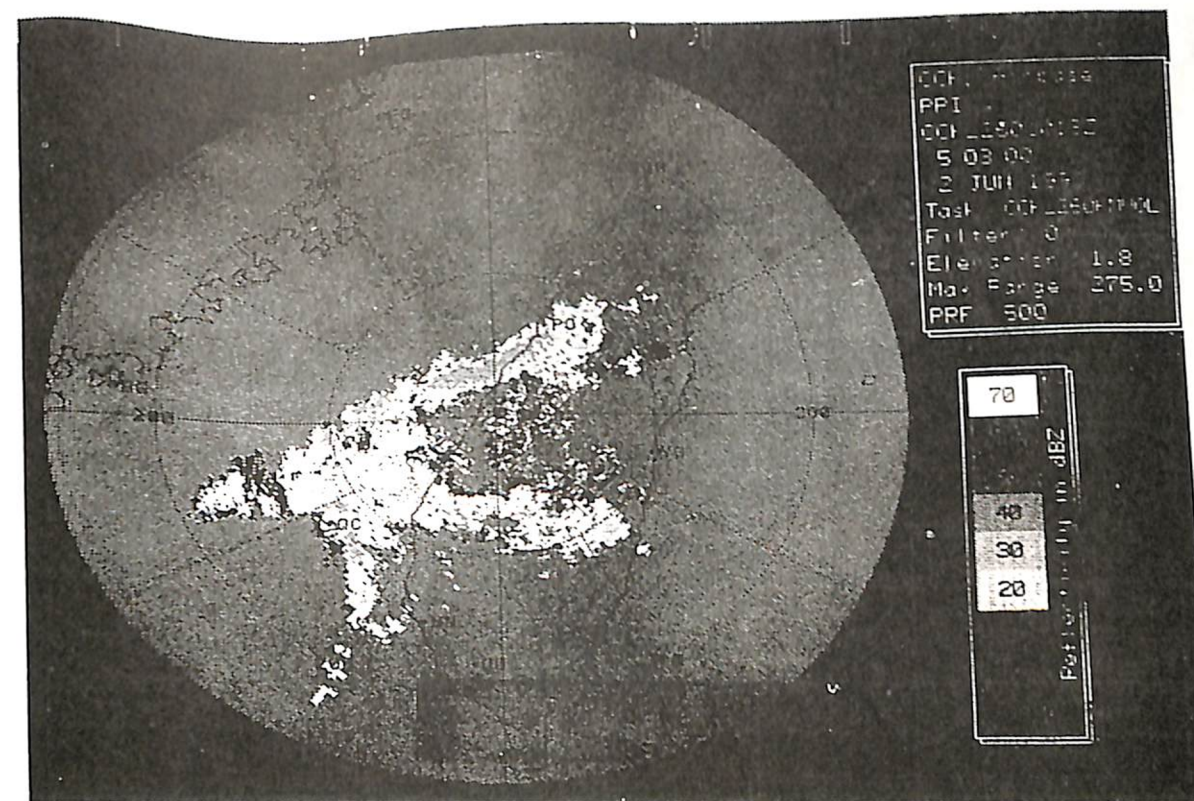


圖21 同圖20惟觀測時間為0503時。

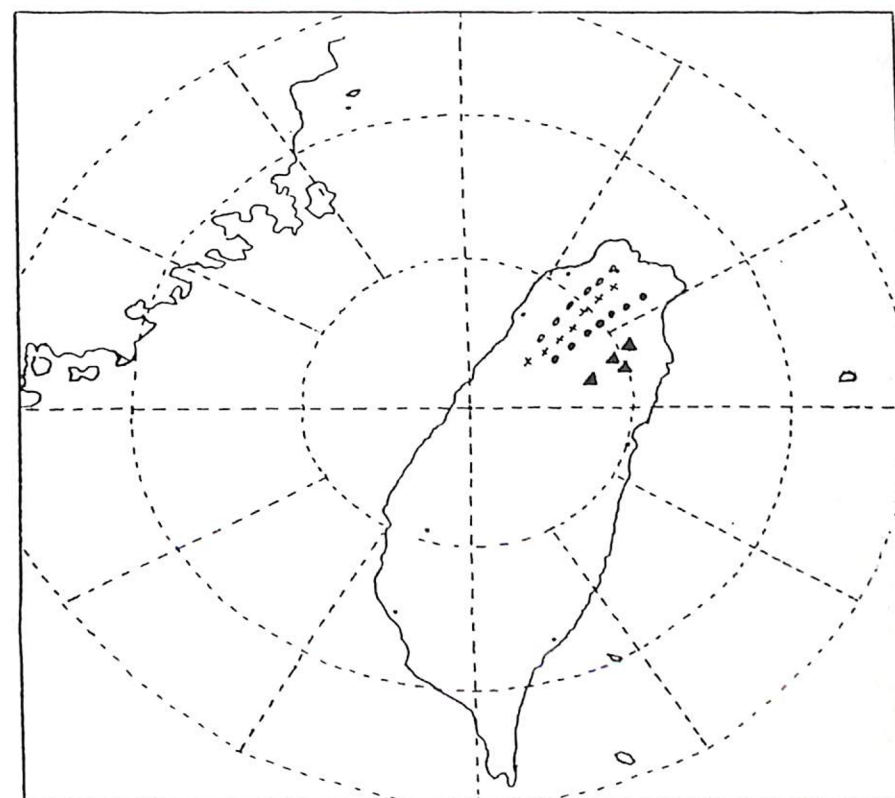


圖22 夏季北部地區午後雷雨、陣雨回波成線狀排列示意圖。

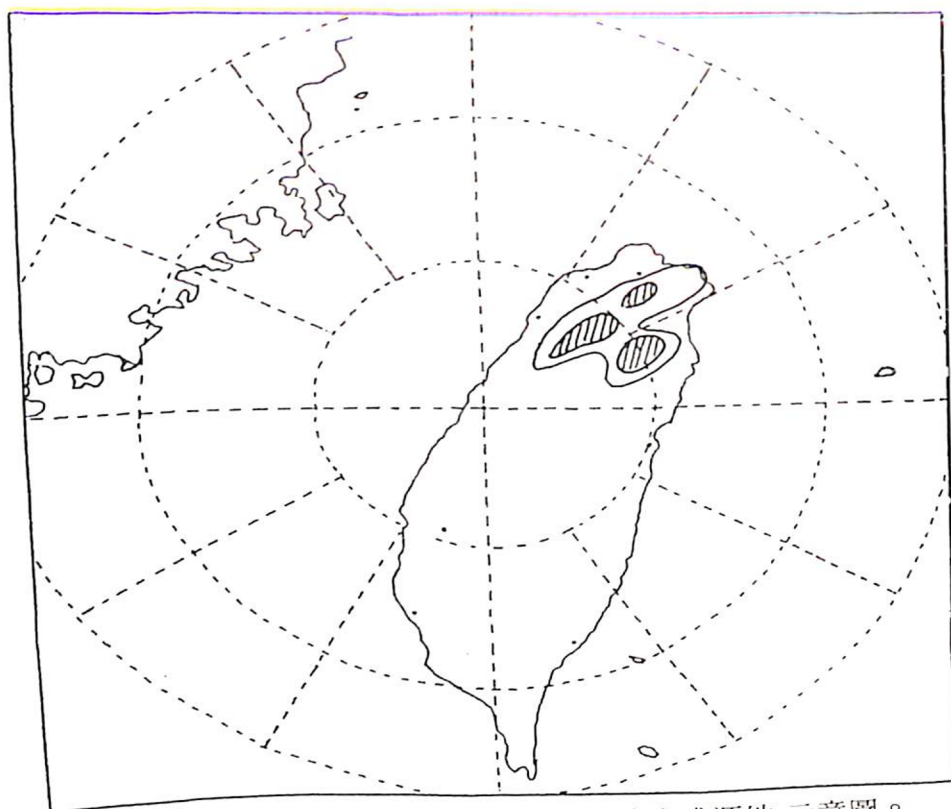


圖23 夏季北部地區午後雷雨、陣雨回波生成源地 示意圖。

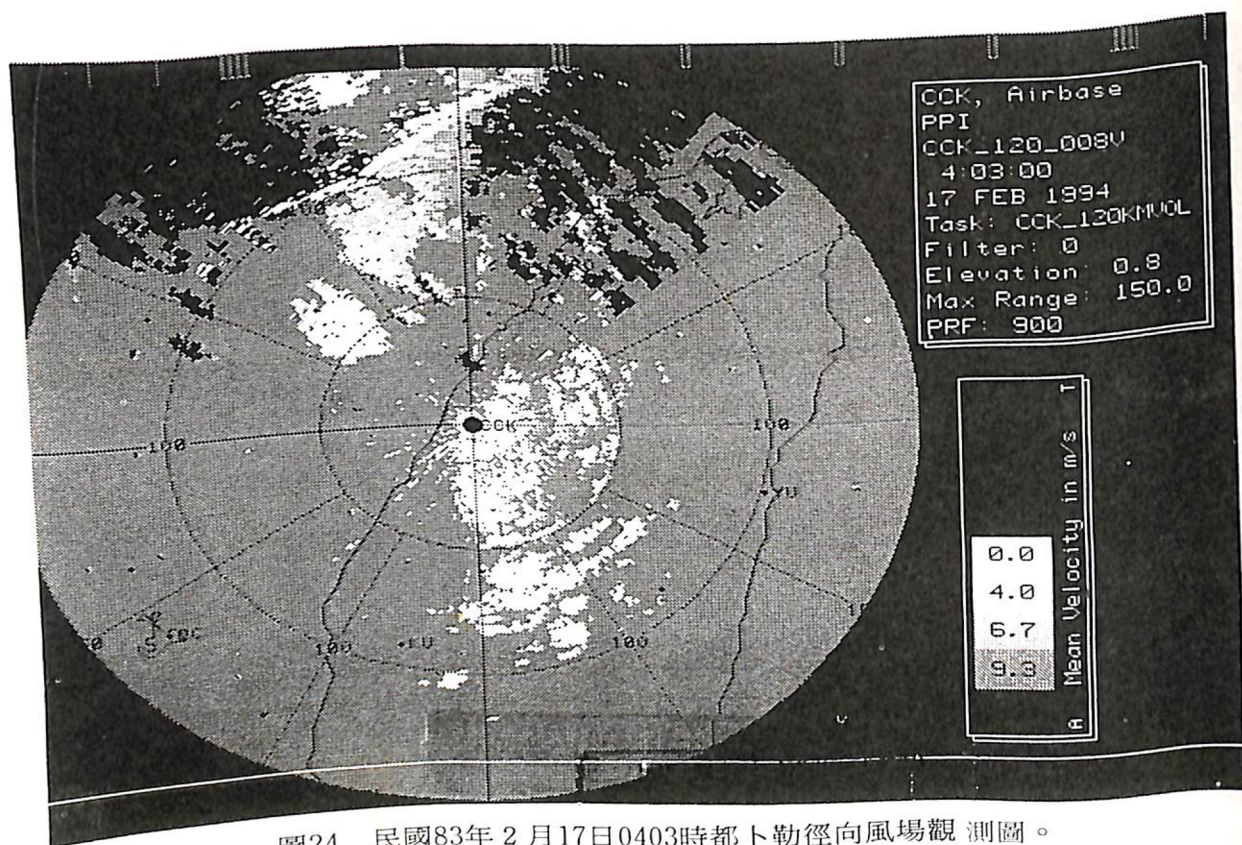


圖24 民國83年2月17日0403時都卜勒徑向風場觀測圖。

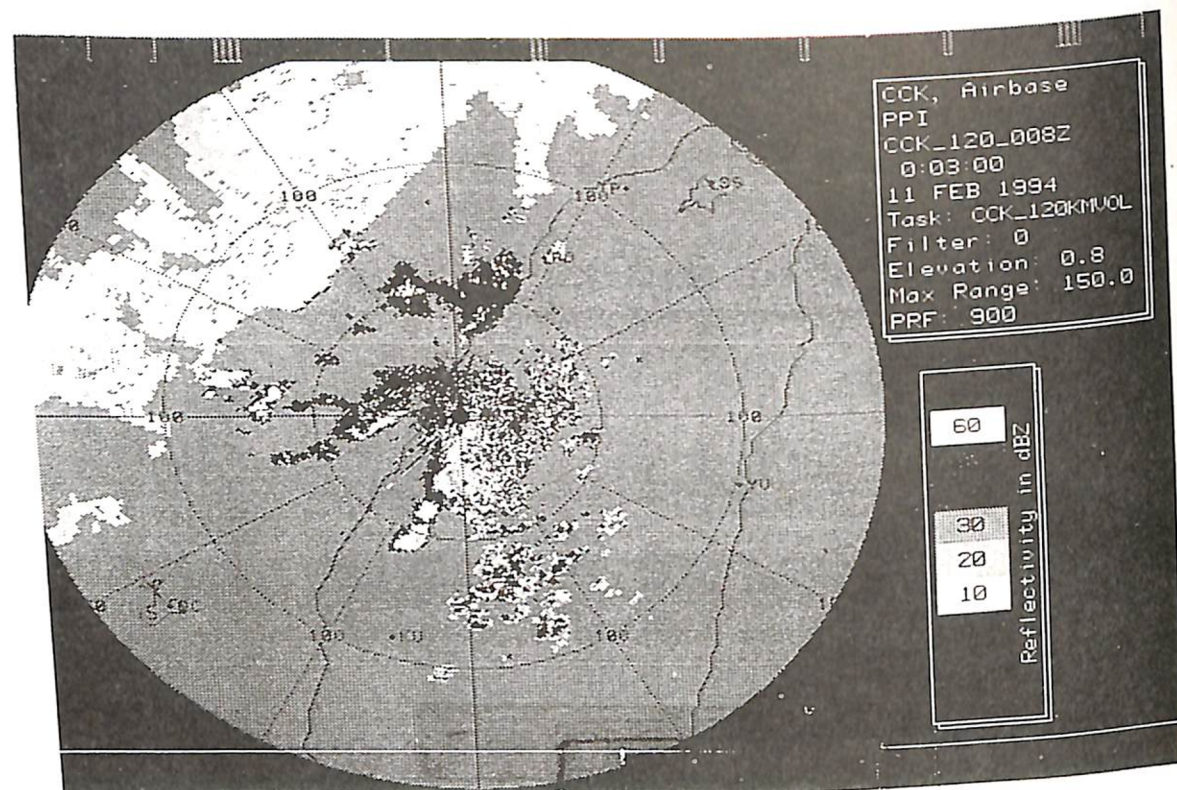


圖15 民國83年2月11日120 公里觀測半徑，仰角0.8 度
水平面回波强度圖，圖中為一春雨系統。

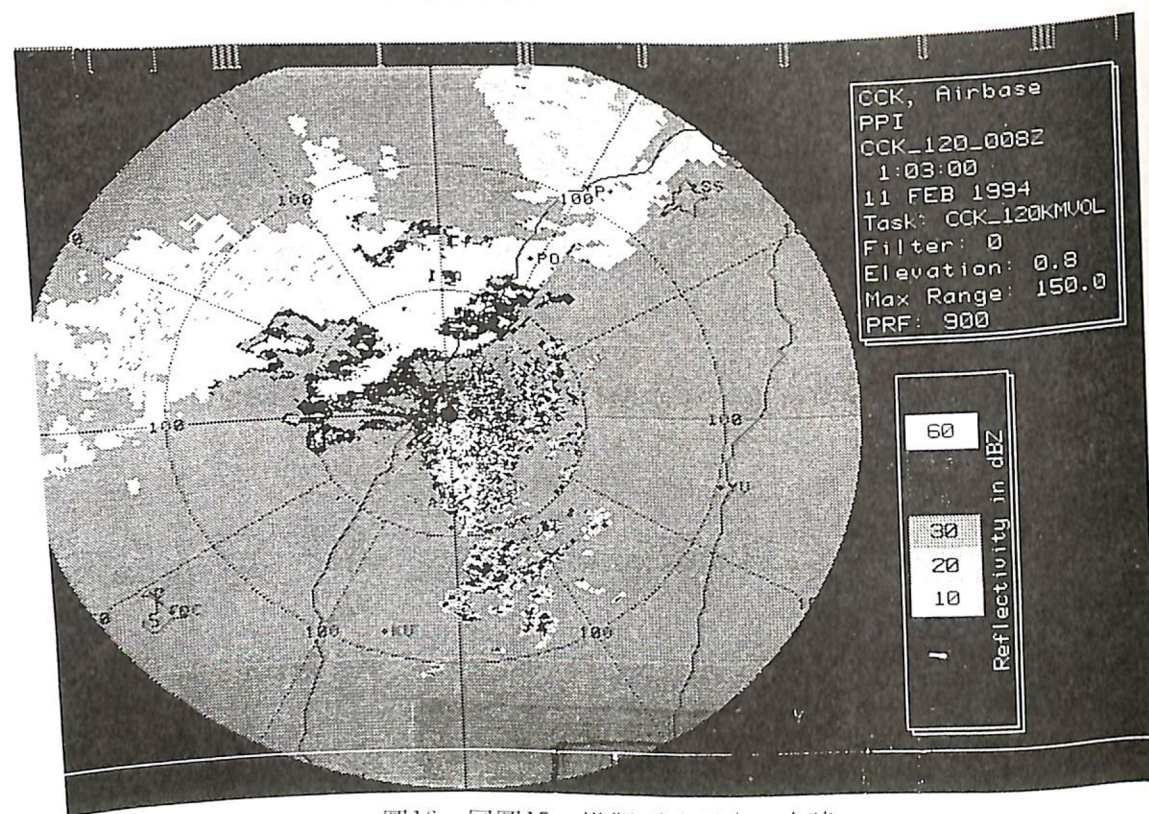


圖16 同圖15，惟觀測時間晚一小時。

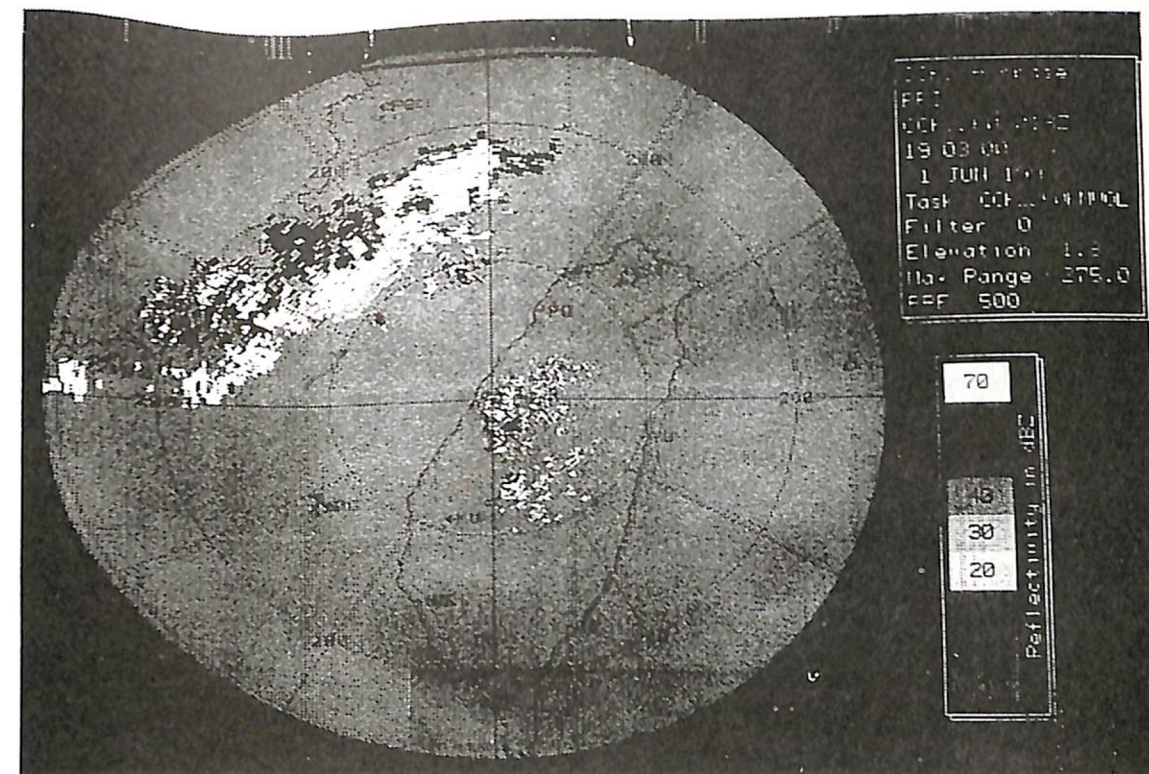


圖17 民國82年6月1日1903時，260 公里觀測，
仰角為1.8 度之水平面回波强度觀測。

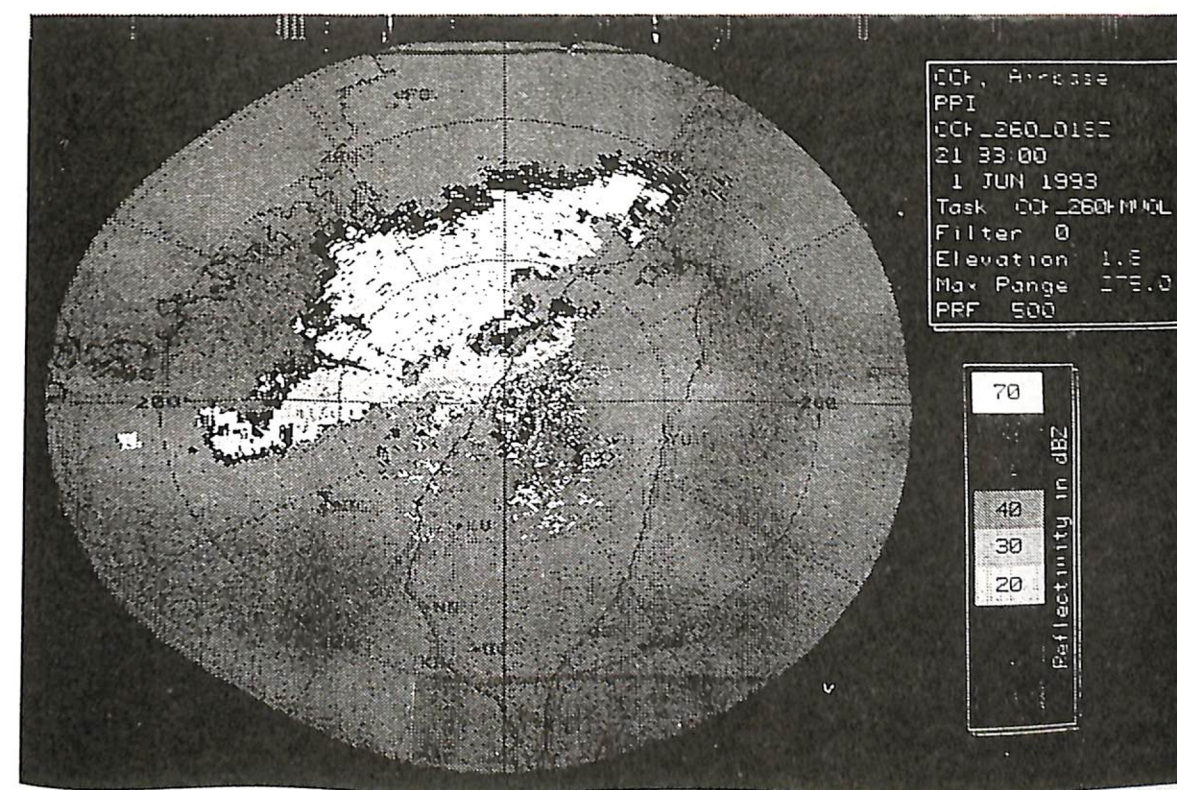


圖18 同圖17惟觀測時間為2133時。