

如何利用氣象雷達判定雷雨之強弱

徐 忠 民 (譯)

摘 要

雷達技術的革新將有助於對強烈雷雨結構及其發展有更進一步瞭解。當我們使用 PPI 觀測模式的影像完成及反射率的處理過程時，僅有的雷達資料乃是由美國國家氣象局 (National Weather Service) 的雷達 (WSR-57, WSR-74C, S) 中去獲得，本文中六個暴雨的 WSR-57 實際雷達資料，將用以闡明此技術與標準的例證。

一、引 言

自 1960 年代開始，就已經有關於對流性暴雨的結構和發展之全面性研究，資料來源包括了自動觀測站、特殊地面與上層大氣工作網、飛機和高解析度之傳統與都卜勒雷達。藉由這些資料的整理統合，可以瞭解許多強烈雷雨的特性。同時，新技術的發展更衍生了較進步的雷達資料處理及顯像系統，一些新的雷達顯像技術，已可當作操作系統的工貝，(例如影像完成和過程，VIP)，但強烈雷雨之雷達判定技術和警告標準對雷暴結構的瞭解却甚少幫助。

由 Lemon (1977) 所寫的報告與本文提供了美國國家氣象局 (NWS) 改進傳統雷達及強烈雷雨判定方法的持續性研究。既然雷雨的物理結構對其特性有相當的重要性，加上雷達的掃描，我們提出了此結構的一般性討論，希望能對使用 VIP WSR-57、WSR-74C 和 S 雷達資料的雷達專家和預報員有所助益，使其能更有效確認初期的強烈雷雨，並且能夠及時的發出警告。

二、超大型細胞風暴

我們已可確認數種雷雨，包括了飢線 (squall lines)，多細胞 (multicell) 和超大型細胞 (super cell)，以及強烈切變風暴 (sheared storms) 等 (Marwitz, 1972a, b, c; Chisholm, 1973)。飢線可能由多細胞或 (和) 超大型細胞風暴組成，但以前者居多。強烈切變風暴為超大型細胞之一小塊。由此可知，多細胞和超大型細胞風暴為最基本的風暴類型。大多數的雷暴屬於非強烈的多細胞風暴，由連續的細胞或單獨的共存細胞所組成，它們之間經歷大家熟知的上升一下降的生命循環 (Byers and Braham, 1949)。

有一些看起來很小但甚具有影響力之特性的單一持續性風暴，通常可估計出它會向風的右方 (偶而向左方) 移動。這些超大型細胞有雷達可辨認的結構，即上升與下降氣流共存的週期，而此週期遠較空氣穿過風暴的時間猶長。

雖然我們對超大型細胞做有關風暴之研究，但對有記錄的強烈天氣現象而言，少數相關的超大型細胞缺乏其統計上的重要性。Nelson (1976) 在奧克拉荷瑪 (Oklahoma) 冰雹風暴中發現多細胞雹塊的平均最大直徑是 1.9 cm，而超大型細胞則超過 5.3 cm，多細胞風暴成行的雹列平均最大寬

度為 10 km，而超大型細胞的是 20.2 km，而 Nelson 的研究中，超大型細胞有 8/10 造成了雹或其他更強烈之天氣現象，更有 6/10 的造成漏斗雲或龍捲風；相對地，多細胞風暴僅有 4/17 造成強烈天氣現象，而沒有龍捲風的產生。Browning and Foote (1976) 和 Summers (1972) 同時指出，超大型細胞風暴雖然只是雹塊風暴的一部分，但卻由於其大直徑的雹粒、雹的持續強度及其他隨之強烈天氣現象造成了嚴重毀害。

超大型風暴之發生在早期就已發現和記載 (Browning and Ludlam 1962; Browning and Donaldson, 1963; Browning, 1964, 1965a, b)。我們熟知的超大型細胞之特性，包括了在右側翼的陡斜懸雲回波，在最高風暴下穿越懸雲回波的拱型空隙及在低層部份包圍空隙的鈎狀回波。

在中層廣大回波下之區域，最廣被接受的名詞是微弱回波區 (weak echo region, WER)，而圓拱型空隙現在常被稱為 BWER (bounded WER) (Chisholm 1973; Browning and Foote, 1976)。WER 或 BWER 確定了強烈上升氣流的區域，在 BWER 內，因為上升氣流太強以致大雨滴沒有時間在中低層內形成，且不致於由上面落入上升氣流的核心。在 WER 上方，稍微有一些較弱但強烈的上升氣流，造成持續的懸雲回波。藉飛機穿越、雷達追蹤和汽球釋放都可證明在 BWER 與 WER 中有上升氣流的存在 (Hart and Cooper, 1968; Marwitz and Berry, 1971; Marwitz, 1973)。當懸雲回波組合時，上升氣流強度、風暴頂、回波強度及反射率梯度均有最大值出現 (Marwitz, 1972b)，Marwitz (1972c) 觀測到當 WER 中的上升氣流減弱，WER 就充滿了回波並向下發展或崩潰。

藉由高解析度雷達的研究發現，在大多數強烈天氣現象 (多細胞或超大型細胞) 中都存在一 WER (Chisholm, 1973)。同時也證明並非所有適合超大型細胞定義的風暴，都包含了一 BWER，許多風暴都只有一 WER，WER 在超大型細胞風暴比

在多細胞風暴中持續更久。

許多研究都強調了 WER 幾近穩定且與時間無關的特性，及其他以雷達描述的超大型細胞特性，然而，近來各項資料顯示，超大型細胞通常進行一具有穩定週期的持續發展，其週期常低於一小時 (Burgess, 1974; Lemon et al., 1975; Lemon and Burgess, 1976; Burgess and Lemon, 1976)。

最早有記錄的超大型細胞是在英國的烏欽罕 (Wokingham, England) (Browning and Ludlam, 1962)。從此在加拿大 (Chisholm and Renick 1972)、蘇俄 (Sulakvelidze et al., 1967; Marwitz, 1971) 及美國落磯山以東的所有地區都觀測到，可知超大型細胞風暴並非祇是地區性的存在，而是一經由強烈、潮濕、對流性的上升氣流與控制此過程的大氣物理機制所造成的組合。

根據上述，似乎超大型細胞要為大多數強烈雷雨災害負責。甚至，我們可說製造嚴重龍捲風的雷雨中大多數都是超大型細胞造成的，此處提出的技術與標準最早是為偵測超大型細胞風暴的。他們對確認產生嚴重強烈天氣的多細胞風暴成效卓著。

三、風暴中上升氣流與回波之關係

在第二部份的討論中特別強調了強烈上升氣流，概括言之，上升氣流的強度決定了風暴的強烈性。於是為達到發警告目的之故，我們必先找出上升氣流強度指數，通常，一個風暴回波的頂點及最大反射率與上升氣流強度有關，因此這些特性就被用來當作風暴強度的指數。

為畫出強烈上升氣流對其雷達回波之關係，此處提出一項被高度所簡化，但非常有用之推演。想像上升氣流是風中垂直的噴泉，水滴被強風吹到噴泉以外的地面 (水滴有如上升氣流產生的降水)，在噴泉下風處，水滴降落的區域有如低層的雷雨降水回波，當然在強烈雷雨的環境中，風隨高度順轉並加強。要強調的重點，是在其低層 1/3 深度上之雷

達回波代表了在上升氣流中被環境氣流帶至下風處，由高層降下之降水。

有了上述的概念，要瞭解上升氣流強度對雷雨中垂直與水平回波分布的關係就容易多了 (圖 1~圖 3)，圖中的環境氣流在強烈雷雨是典型的，速度切變與相對的上層強風同時存在，風向隨高度順轉 (地面的南流轉成上方的西流)，以下的各節中，“中層”代表 5 km (6,400 ft) ~ 12 km (39,000 ft) 處高度的範圍，而“低層”則表示高度在 1.5 km (5,000 ft) 以下的範圍。

微弱至中度的上升氣流會受到環境風之強烈影響，當上升氣流空氣上揚，環境的風場迫使其向下，當上升氣流中之降水顆粒形成時即立刻掉落，結果使得風暴之頂、中與下層的反射核心以垂直的方式一個連接一個 (圖 1a)。在 PPI 上，並沒有強的反射率梯度，也無中層懸雲回波 (如 WER)，而中層風暴核心及回波頂端則被發現於低層核心上 (圖 1b)。在具有相當強勁的中高層風之環境中，風暴可能隨高度偏向順風，使得風暴頂在低層回波核心之下游 (相對於中高層風)，具有圖 1 結構及 40 dBZ 以上反射率的風暴，常和大雨有關，如果有雹存在，通常都是 ≤ 1.0 cm (0.4 inch 直徑) 的小型雹。

如果上升氣流較強，如圖 2a，它以一較前例為小的斜率上升至較高的高度。此發展階段的風暴通常較嚴重，但可能是強烈多細胞或超大型細胞風暴中之任一者，如為多細胞者，則將存在不只一個回波頂，多細胞風暴頂或中高層回波核心，現在位於強烈低層反射率梯度 (在上升氣流風暴側翼) 之改變，導致該地強盛的風暴反射梯度 (圖 2b)，中層位於 WER 上之懸雲回波向外射出，超出低層回波邊緣 (或強反射率梯度邊緣) 的 6 至 25 公里，整個回波通常緩慢而可察覺其會向非強烈回波的右方移動，當以 WSR-57 雷達觀測時，可確定此回波結構為雹型風暴，同時伴隨或提前 30 分鐘發生 2.0 cm 以上的大型地面雹，此時，地面風強盛且呈陣性，但通常小於 25 ms^{-1} ，低層回波 (圖 2b) 也具

有強烈反射率梯度 (在此定義其值為 $\geq 8 \text{ dBZ km}^{-1}$) 的特性，通常伴隨風暴側翼強烈的上升氣流，或偶而有下降氣流 (Nelson, 1977)。沒有或是較小的上升氣流 (即下降氣流) 存在的地區，則梯度較小。

當風暴獲得了強烈上升氣流且雷達解析度足夠，則可偵測的 BWER 可能隨之發展 (圖 3)。上升氣流幾乎垂直向上而不管強烈的環境風場，風暴頂可到達 180 km 以上，BWER 被強烈反射率及更上層的風暴頂覆蓋。從今日奧克拉荷馬州所有記錄的案例來看，一風暴由 WSR-57 雷達觀測到具有 2° 寬度，最大地面雹塊大小在 4.5 cm 以上，則有一 BWER，在此強烈狀況中，地面風常大於 25 ms^{-1} ，而漏斗雲亦會形成。在少數生命期長，準穩定型風暴中，龍捲風可能伴隨此回波結構發生。

在此懸雲下方 (圖 3b)，低層回波常有一被懸垂或是鈎狀回波局限在後方的凹面，並緊臨著強烈反射率梯度，風暴頂端通常位於凹面最高點之上，但也可能位於其自身懸垂回波之上，在一非 BWER 的風暴中，低層反射率核心轉向至上升氣流側翼，此類風暴絕對是超大型細胞，當風暴在超大型細胞階段，其邊緣一些較小的細胞可能被包含在大群回波之中 (Lemon, 1976a)。

四、超大型風暴之發展

具有圖 1~圖 3 特性的風暴可依序視為一個風暴的發展階段。事實上，一個具備強烈超大型細胞狀態特性之風暴 (圖 3)，常先經歷雹塊風暴狀態 (圖 2)，現在便考慮有關風暴發展的一些細節。

雖然準平衡狀態之超大型細胞常在發表的研

暴 (Browning and Ludlam, 1962; Browning and Atlas, 1965; Lemon, 1970; Nelson, 1977; Burgess et al., 1977)。在風暴上升氣流側翼發展的每一細胞，變得比前者更強，一直到一個細胞變得具優勢且能維持長時期的生命為止。當連續性細胞發展的時間間隔變得很短時，便會發生多細胞型態轉變至超大型細胞之現象，以至超大型細胞結構只有一個細胞產生。在這些序列中的任一過程，雷達回波變得更強且十分有可能變強烈，此結果由 Brandes (1972) 找出，他並且發現在統計上最大且最強的風暴是最嚴重的。然而，除非中層回波很強 (≥ 45 dBZ) 且風暴具有一 WER，否則就算再大也不太可能很嚴重。

一個風暴變強烈的最早指標是當中層回波隨 WER 發展而迅速增加其大小和 (或) 強度，同時最高回波頂會由低層核心之上或其下風處朝上升氣流側翼方向轉變。此回波頂發生於強烈反射率梯度之上，或甚至在位於發展的 WER 上的低層回波之外，重要的是回波頂及中層回波懸雲突然發展的轉變在風暴變強烈前就已存在。

在非強烈的細胞風暴中，新細胞在入流側翼發展，並首先在產生短生命期懸雲回波的中層處變得明顯，但最高風暴頂並無改變，在其他時間，回波頂端的一些改變可能在無懸雲發展的情況下發生。當兩個指標 (中層回波懸雲的發展及強化，回波頂的轉變) 同時發生或幾乎是持續的發生，則風暴為強烈，但有時在地表回波中有 5~15 分鐘幾乎無改變，直到中層產生的降水落下，低層回波才發生嚴重變化。

當中層回波懸雲存在一相當之量 ($\sim 6-25$ km) 且回波頂端已轉變，則 WER 存在。在 WER 發展的 30 分鐘內，大於 2 公分的電開始在地面發生，地面風也開始增加，回波通常緩和下來並且轉向 $15^\circ-100^\circ$ 往右，而低層回波核心轉向上升氣流側翼。

如果風暴發展，有強烈的上升氣流且雷達解析足夠，則 BWER 就可能形成並且被探測到，BWER

的某種傾斜可能於地面至風暴頂發生，但持續性可由傾斜序列得到，當 BWER 發生，非常大的電 (≥ 4.5 公分) 降落且強風也產生了。

WER 形成後，且又在 BWER 形成之時，右後回波側翼經常向南擺盪形成一垂懸的回波，同樣在 WER 或 BWER 存在時，回波頂端到達其最大垂直範圍，BWER 之頂端 (於此上方 BWER 成為一回波核心，有強烈垂直反射率梯度) 隨時間降低，BWER 內之反射率則增加，BWER 變得較小，在 BWER 崩潰時，中層回波懸雲常減少其面積，而低層回波却增加，回波頂端也開始減低。

在 BWER 存在時及其崩潰階段，最大的電開始降落 (Browning 1965a; Burgess 1974; Lemon et al., 1975)。同樣的，在 BWER 崩潰時，低層垂懸開始“包裹” (Wrap up) (其特色為懸盪向南及向東方，相對於其母回波體而言)，龍捲風開始生成，非常具破壞性的強風也達到最大產生機率 (Brown et al., 1973; Lemon et al., 1975)。

當此崩潰進行時，低層垂懸完成，包裹並且消失。低層回波增加其範圍 (size) 且可能開始減弱，回波頂降低，通常約 2~7 公里，就在此階段，龍捲風到達最大尺度及最高機率，降水由包圍旋轉上升氣流的中層落至低層，於低層回波中造成一環流中心，回波頂端仍接近環流中心，並以此轉回接近回波核心。懸雲回波範圍減少了，電的大小迅速縮小，且量也減低了。

龍捲風消散前，回波很典型地減弱一些，且通常變成沒有強烈上升氣流殘留指標 (如 BWER 和 WER) 的颱風之一部份，並減少反射率梯度，回波頂端在回波核心之上，風暴經常變成多細胞類型。

新生上升氣流 (特別當回波仍與其它回波分離) 可能旋轉經過上述發展，並重複嚴重天氣現象及產生龍捲風。

目前的指標是，當地面露點為嚴重天氣現象之邊緣值 ($\leq 10^\circ\text{C}$)，預期的電太小可能不會發生，其他嚴重天氣的強度將很難預測，甚至有上述之雷

達資料亦然 (Williams, 1976)。然而就算有邊緣環境條件，具有強烈結構之風暴將可能只產生嚴重天氣到一個限定範圍內。

五、操作應用

由目前強烈風暴結構的知識及其普遍性，雷達警告技術及警告標準可由氣象方法 (更甚於通行之經驗方法) 只使用 PPI VIP 資料之顯示，因為雷達解析及取樣之限制，使用 S 或 C 帶狀雷達，其光束寬約 2° ，脈波約 2 km 或少些，此地敘述的技術在 40~200 km 的範圍內有效，如有更多的窄雷達光束帶，有效外圍界限可再擴張。

(一) 傾斜序列

一個預報員不祇將其資料侷限於地面及雷文機 (rawinsonde) 探測所得，而應注意各大氣層氣象變數的水平分布，同樣的，天氣雷達專家也需知道強烈風暴的探測及警告於低中高層的水平雷達回波分布。

做一低層 PPI 掃描及許多 RHI 觀測是不相同的，事實上若雷達所在的位置不是很得當，相對風暴而言，只使用 RHI 可能探測不到 WER，因此 VIP 雷達資料在使用維持約 2~6 分鐘之 PPI 傾斜序列時就應該被使用，且每隔 10~12 分鐘應重覆一次。

傾斜序列的垂直間距是回波範圍 (亦即垂直回波解析度) 的函數， 2° 的間距大體上是足夠的，一直到風暴頂， 1° 的資料較適合決定頂層高度。此間距是可變的，然而可藉由每一狀況之特性被選擇或改變，一簡單的列綫圖表可有效使用來轉變天綫仰角為高度 (圖 4)。

為了要方便比較不同高度的回波分布，在 PPI 顯示幕上我們使用“追蹤”的方法，在傾斜序列中，應首先追蹤中層資料，這是為要決定當天綫返回最低掃描層 ($0\sim0.5^\circ$ 高) 時懸雲回波的範圍 (當風暴超過 100 km, 55 nmi, 最低掃描層應始終為 0°)。既然最大懸雲回波可能在 5~12 km 高度發生，我們必須在此最大值產生的仰角決定之前，追

踪二或三個中層仰角的回波，此高度及仰角也可能隨各風暴變異，此仰角也隨一固定高度的風暴範圍而改變。

當 PPI 傾斜序列繼續，一個小點會出現在螢幕上，標示為最高仰角的回波中心，此點即代表最高回波頂的位置。當天綫回到最低掃描層，在 PPI 上就會出現中層及回波頂追蹤與低層回波間的比較。

必須注意的是上層回波追蹤及低層比較掃描間的時間間距應儘可能縮小。如果風暴移動快速，一明顯的懸雲可能出現，也就是說，在中層回波與回波頂比較之前，低層回波已移動相當的距離時，則懸雲會出現在後側翼。

在一懸雲回波被確認後，回波的微弱缺口可能發展，這些可在 PPI 顯示幕上被圍繞並與回波頂位置及低層回波相比較。若微弱缺口在回波頂下，並在可能的上升氣流風暴側翼的低層回波邊緣之上，此概略區域可能真是一 BWER。

(二) 初始顯示幕求值法

下面為初始雷達顯示幕求值法，由一給定之 PPI 回波分佈，這些回波發展成強烈上升氣流的最大機率可由 Hamilton (1969) 之研究與其引用之參考中判定。亦即，具有最低之可用低層水份競爭之力之回波，就是最可能成為強烈之回波，下面為一些典型：

1. 孤立之回波 (在雷雨綫之前或是其它情況)。
2. 在疏雷雨綫中之細胞。
3. 在裂雷雨綫之細胞，特別是那些在綫裂口正北方的細胞。
4. 在雷雨綫南端之回波。
5. 在綫突出處之細胞，也就是引導其他細胞之細胞。

(三) 強烈風暴出現或急劇發展之指標

在此提出通常發生在風暴發展前半段的回波特性之摘要。大部分均已在圖 2 及圖 3 中表示其特徵性，並且在前面已討論過。發展強烈上升氣流之回波大多在上升氣流風暴側翼顯現以下特性 (通常在右後翼，偶而在後或左後翼)。

性的加強及增長。

0°, 1550 —— 在中層風暴強度發展變得明顯後約 25 分鐘，低層風暴大小及強度亦快速增加。

6°, 1552 —— 大於第三層回波之覆蓋區域在 17 分鐘內增加超過二倍，此超大型細胞風暴之回波直徑約 56 km。

0°, 1556 —— 回波繼續增長，在懸雲之下，一可能之懸垂回波已發展，現在對是否發布龍捲風之警告應嚴加考慮，但仍應該等確定結構為持續性後才做決定。

0°, 1605 —— 懸垂回波持續，回波頂在適當位置，其上方被懸垂回波所覆蓋，此時強烈雷雨警告應由龍捲風警告取代。

4°, 1606 —— 發展之 BWER (箭頭所指) 出現，更確定了發龍捲風警告的決定。

0°, 1609 —— 微小的改變。然而 11cm 的雹，具破壞力之東風，三道漏斗雲生於風暴核心南端之最強反射率梯度的面積之中。

0°, 1618 — 1°, 1618 — 2°, 1619 — 4°, 1620 — 6°, 1620 — 10°, 1621 —— 相對於低層回波之最高回波頂位置在 0°, 1618 欄標示出，注意 2°, 1619 至 6°, 1620 中的 BWER。每一掃描的中央光束平均高度如下：0°, 400 m；1°, 1800 m；2°, 3200 m；4°, 6000 m；6°, 10,000 m；10°, 17,000 m。

0°, 1622 — 4°, 1623 — 0°, 1625 —— 只有些不重要之改變。BWER 發展得更成熟，並在 4° 處較明顯，結構只有微小變化。

4°, 1626 —— 包圍 BWER 的兩個第五層核心部份似乎受到中型氣旋環流之影響。

0°, 1629 — 4°, 1630 — 6°, 1630 —— BWER 與前述傾斜序列比較，現在則充滿了較高之反射率回波，且 BWER 之頂正下降，亦即 BWER 正在崩潰，注意風暴 F 南方之回波，它正向東北移，且開始與強烈右向偏移之風暴 F 合併。

0°, 1641 —— 在第二及第三層的小懸垂回波由西南方回波側翼在南方擴張，於 1634 回波頂到達 19 km 之頂點後，即開始減低，現在則為 17.9

km，由圖 5 看回波頂相對龍捲風產生之改變，注意較小回波之合併接近完成。

6°, 1643 —— 第三層外圍邊界不清楚的小楔形凹痕，是崩潰的 BWER 餘留物 (箭頭所指)。

0°, 1645 —— 伴隨此風暴的龍捲風產生源於強烈旋轉上升氣流 (中尺度氣旋) 而與東邊 18 km 處發生的合併過程無關。(龍捲風維持到 1657 碰觸到風暴頂西南方之第三層圖形頂端，即箭頭所指)

6°, 1646 —— 沒有 BWER 餘留痕跡，只有大的強烈回波。

0°, 1658 —— (第一個龍捲風消散)，第二個小回波與風暴 F 合併，在回波頂西方是不太明確的懸垂回波，它位於第三和第四層，在 1704 時向東擺盪並“包裹”(wrapping)。

0°, 1704 —— (第二個強龍捲風於 1701 ~ 1712 形成，正好位於最高回波頂西南方)。先前的斜傾序列 (1648 ~ 1651) 顯示廣大的懸雲與 0°, 1658 中的小懸垂持續，因此在 1705 解除的警告在 1705 ~ 1805 又再發布，因小懸垂的包裹、強烈結構持續且 BWER 的崩潰在短時間內剛發生。

0°, 1728 —— 回波頂被顯示出來，但不是懸雲回波，一叉狀物於其下發展，正位於回波頂位置西南方 (第三個龍捲風位於第三層一廣大不甚明確之垂懸回波下方的地面，在其上，限制叉狀物朝向西方)。風暴北翼上投射回波的彎曲帶 (箭頭所指)，可由中層阻塞性旋轉上升氣流得到解釋，且發現它伴隨相當強烈雷雨。

0°, 1731 —— 回波結構幾無變化。(龍捲風仍在地面，直到 1734) 回波頂減低，現在為 15.2 km (見圖 5)，注意雷雨正在風暴 F 南方，並開始與之合併。

1°, 1732 —— 第五層核心中一相當明確之鈎狀回波正位於回波頂 (未被顯示) 西側，且正在包裹中。

0°, 1756 —— 風暴 F 減弱了相當度，同時南方回波與 F 之上升氣流區合併，切斷了低層水汽之入流，懸雲已消散，回波頂非常接近核心，警告可

於 185 解除，風暴 F 不再有強烈天氣現象伴隨。

相對於風暴發展的間波頂擾動及強烈天氣現象的產生都繪於圖 5，發生於 1973 年 6 月 18 日及 1972 年 4 月 19 日之龍捲風均產生於回波頂衰退中，最近許多研究也顯示是如此 (Lemon et al., 1975; Lemon and Burgess, 1976; Lemon, 1976 c)。

七、技術與標準之證實

為要求取強烈雷雨和龍捲風的預測、偵測及警告的新雷達技術及標準。一項有價值的工具即由 Donaldson et al (1975a,b) 發明的 CSI (Critical success index) 求法。CSI 考慮了錯誤警告比率 (FAR; false alarm rate) 及偵測機率 (POD; probability of detection)。CSI, FAR 和 POD 的範圍是從 0 至 1.0，一完美的技術包含了 CSI 為 1.0，相對應的無錯誤警告 (FAR = 0) 和 100% 的偵測機率 (POD = 1.0)。

用包含 30 個已證實為強烈雷雨的 80 個雷雨的少量資料作為新技術及標準的初始 CSI，這些資料由奧克拉荷馬 10 年週期中的 13 天取得，因為這些天發生了相當強烈的風暴，這些天的雷達影片可用來當作模擬真實資料來處理，而警告的發布和解除亦僅是由此報告所提供的標準和 VIP 傾斜序列 WSR-57 雷達資料而來，此證實由風暴資料 (Storm Data) 所完成，而地面與天空之觀測則由 NSSL 人員完成。強烈風暴與龍捲風警告兩者之結果 CSI 為 0.71，POD 為 0.93，FAR 則為 0.24。Foster (1976) 利用 NWS 人工操作雷達資料，求得目前的雷達判定技巧，他的結果平均指出通用的 NWS 之 CSI 大約為 0.13，POD 為 0.47 及 FAR 為 0.85，更特別地，Foster 的結果指出奧城 NWS 的平均值為 CSI 為 0.24，POD 為 0.56，FAR 為 0.71，可以預期若新技術被操作使用，其 CSI 將由前述非常高的值掉落，但仍比目前的標準來的高明許多。

此外，新技術與標準在第一個嚴重報告前約 27 分鐘，產生一平均警告前導時間，由許多例子可獲致前導時間是 50 到 70 分鐘，這些前導時間值指出雷達可準確地有一非常短範圍的預測值。

八、結 論

現有的強烈雷雨及龍捲風警告標準，幾乎是以經驗趨近法來判定一個過去甚少被了解的現象，事實上却是最合乎潮流的 (Donaldson et al., 1975a; Foster, 1976)。雖然離完全了解強烈對流的地步，還有一段距離，但我們仍努力的確實以氣象方法達到雷達警告標準為可能。

伴隨風暴 (無論多細胞或超大型細胞) 的龍捲風及強烈天氣現象，產生了一個由強盛潮濕上升氣流引進之雷達回波結構組織，這些風暴遵循一致且可預測之發展，它直接與強烈天氣現象之產生有關。而 PPI 傾斜序列方式中，雷達 VIP 的使用，使得此知識直接轉換為強烈天氣警告技術。

總之，下列三項標準對強烈雷雨警告而言皆為所必須的條件：

1. 存在一中層 (5 ~ 12 公里) 回波，且大於或等於 45 dBZ。
2. 中層懸雲回波至少超越低層 (地表至 1.5 km) 回波或最強反射率梯度外緣 6 公里以上。
3. 在回波核心及回波邊緣間的低層反射率梯度之上或在低層回波之外的最高回波頂正在具有懸雲的風暴側翼之上。

龍捲風警告需要上述三項強烈雷雨標準皆符合及下列任一條件者：

1. 在 20 dBZ 或以上之等反射率圖中存在一低層懸垂，通常在風暴運動之直角產生 (此懸垂必須在懸雲回波之下或限制其向西)。
2. 偵測到一 BWER。

當地表露點對強烈天氣現象言為邊界值時，單單 BWER 的存在並不夠，此風暴必須還伴隨一低層懸垂回波。

只達到強烈多細胞階段的風暴，也就是說未發

展為超大型細胞組織者，滿足強烈雷雨警告標準，多細胞的特性可由二或三個回波頂的出現來判定，但其中至少有一得滿足強烈雷雨第三個條件。

雖然這些技術可增進我們的警告能力與及時性，但仍有許多強烈雷雨產生一些劇烈現象，至今仍未有有效之雷達判定方法，只有一些發布的報告可用於產生這些現象的風暴之測探與警告上。

此地提出之技術與回波特徵可使用於任一監視氣象雷達，但專為使用 WSR-57 雷達而設計。特殊雷之大小與預期地面強烈天氣也提到了且與回波結構相關，但這些關係仍使用 WSR-57 雷達繪出。任一光束寬度約 2° 及積分器入口大小為 $1 \sim 2$ km 之雷達，因此很可大膽地使用這些技術及發展。具更小光束寬度的雷達更易辨認回波特徵，因為解析度的增加可以降低一些地表強烈天氣與回波發展的相關。然而，在這些高解析雷達被廣泛運用前，此地討論的現行技術與原則應還十分實用。

最近的計劃為繼續並更新這些技術，同時可期待如果都卜勒雷達在 NWS 被採用為一警告工具時，這些技術與都卜勒速度資料的合成將最有助益，這至少有二個理由。第一強烈多細胞風暴未經由都卜勒可偵測之中尺度氣旋渦度特徵來描述 (Lemon et al., 1977)。第二有時只以速度資料建立中尺度氣旋之存在仍有困難，在這些狀況，當考慮風暴反射率結構的背景時，對這些特徵之求得却頗有助益，可能不是所有雷達均具有都卜勒能力之設備，因此這些傳統雷達系統即可使用此地所描述之技術。

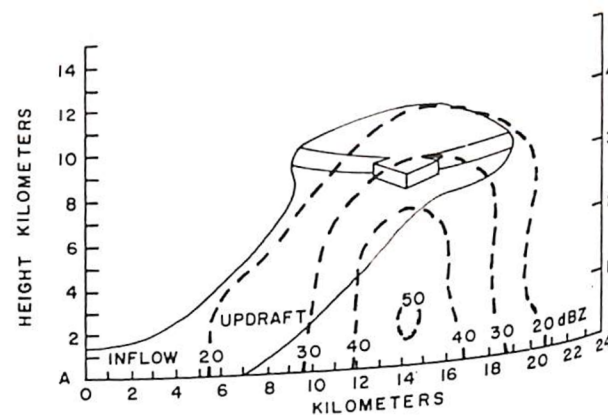


圖 1 a 具有低層匯入緩和上升氣流和上層流出(實線)的雷雨，其垂直橫斷面雷達顯示(或 RHI 雷達顯示)，點狀面積內雷達反射強度大於 50dBZ 之區域。

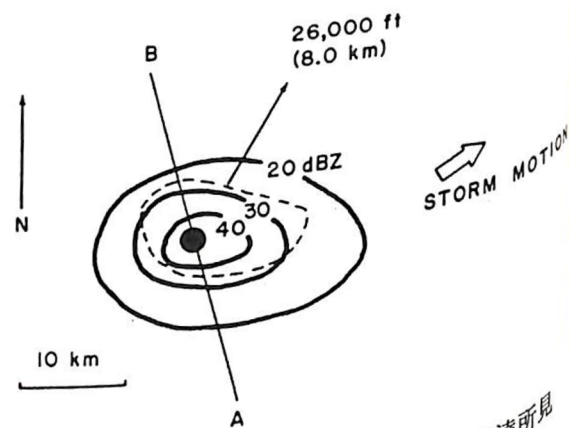


圖 1 b 在某一傾斜面上，從 VIP PRI 雷達所見與圖 1 a 相同的中度雷雨合成圖。實線是低層反射率曲線，虛線內是中層立體掃描反射率大於 20dBZ 的區域。黑點是高層掃描最大回應的位置。

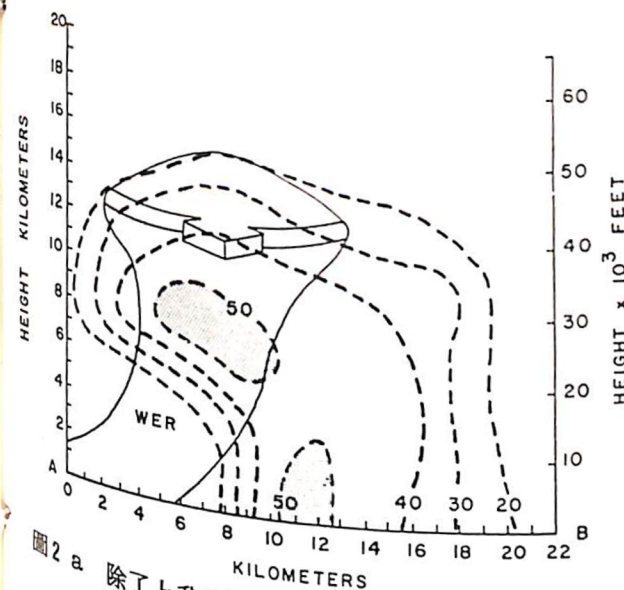


圖 2 a 除了上升氣流較強之外，其餘與圖 1 a 相同，其中 WER 是弱回波區域。

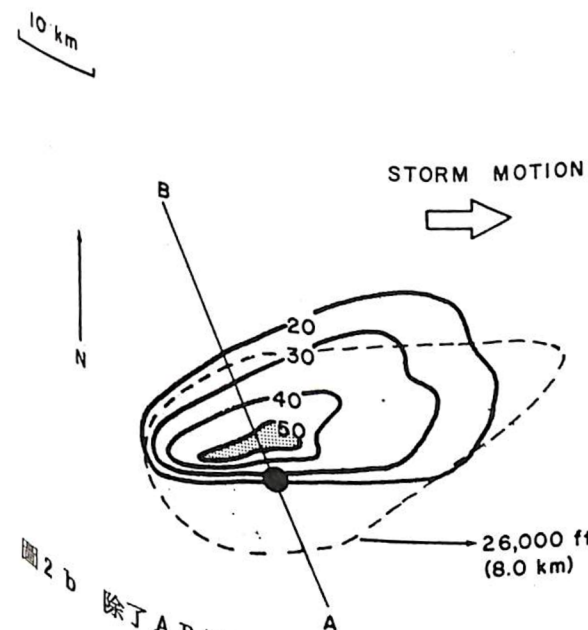


圖 2 b 除了 A-B 線對應於圖 2 a 中的橫斷面之外，其餘與圖 1 b 相同。

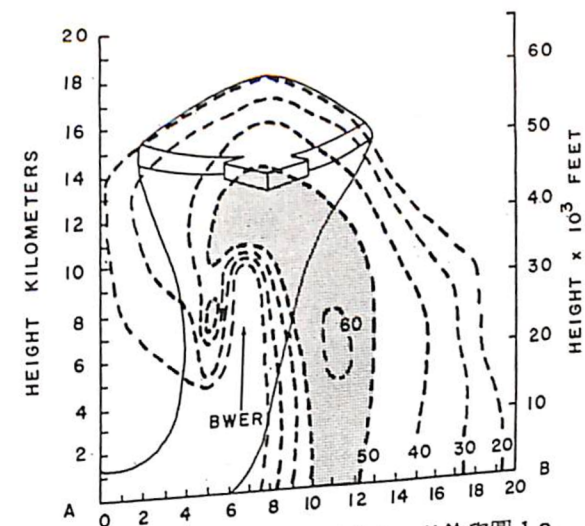


圖 3 a 除了上升氣流是極強之外，其餘與圖 1 a 相同。

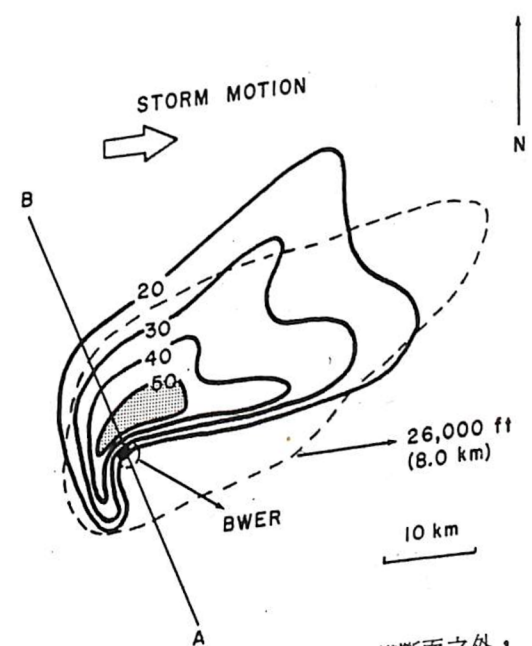


圖 3 b 除了 A-B 線是圖 3 a 中的橫斷面之外，BWER 是限制的弱回波區域，其餘與圖 1 b 相同。

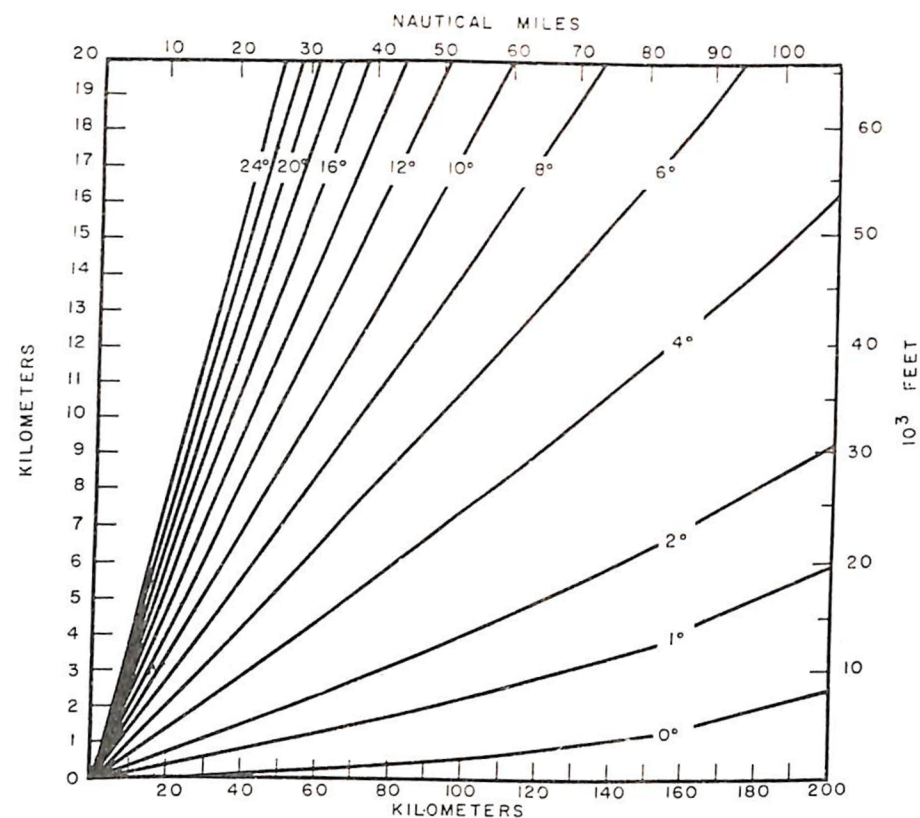


圖 4 已標示上昇角及距離雷達的範圍，其雷達束中點的高度圖。

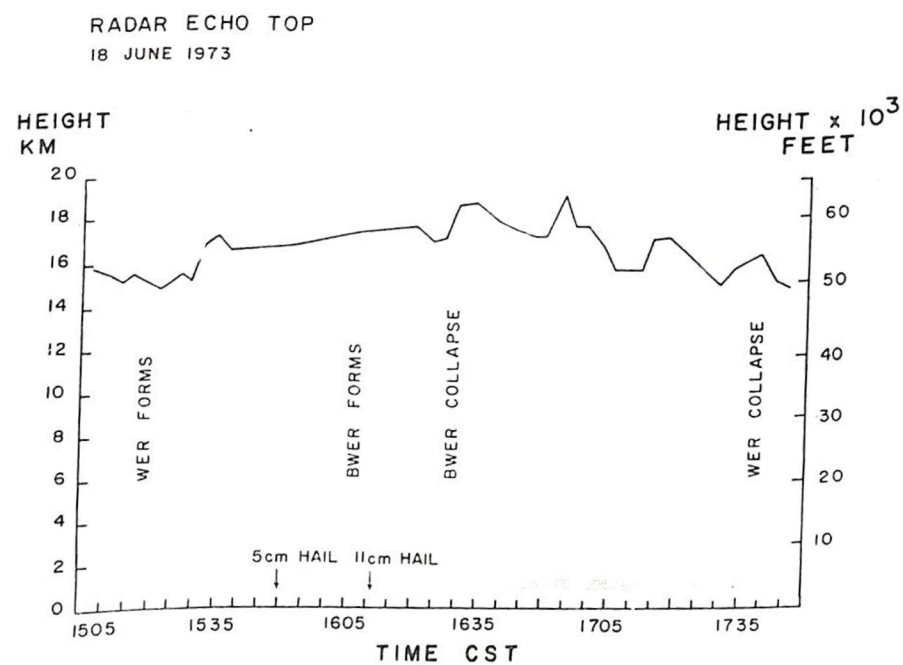
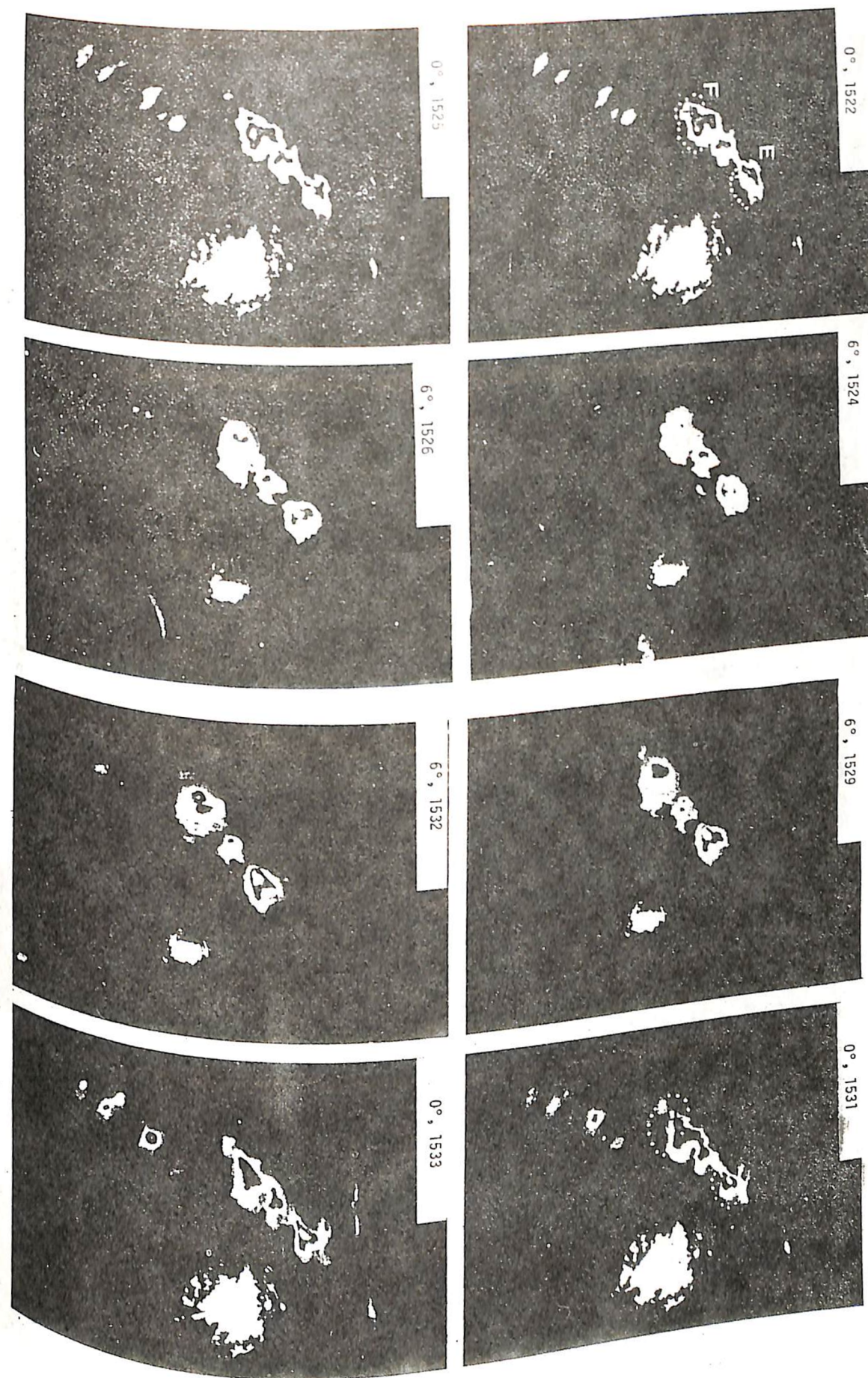
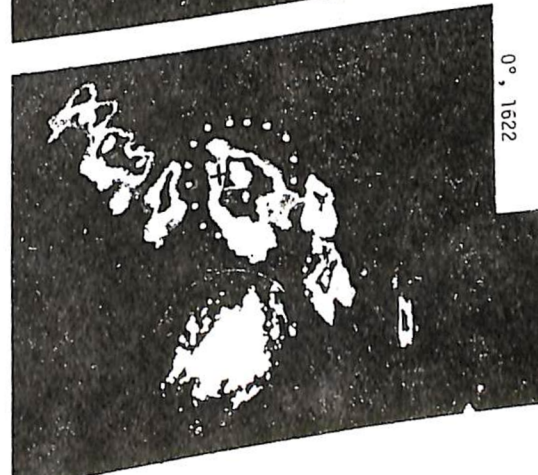
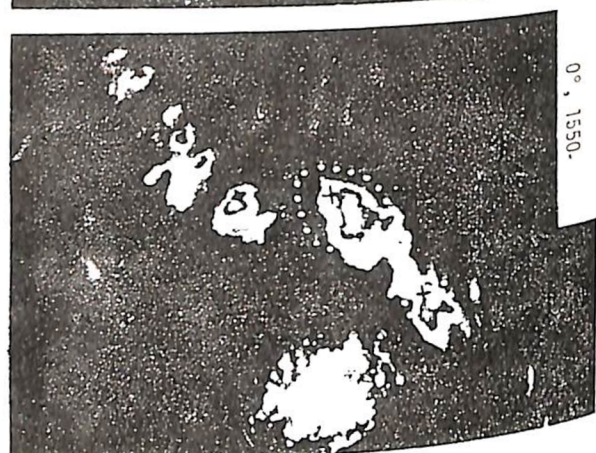
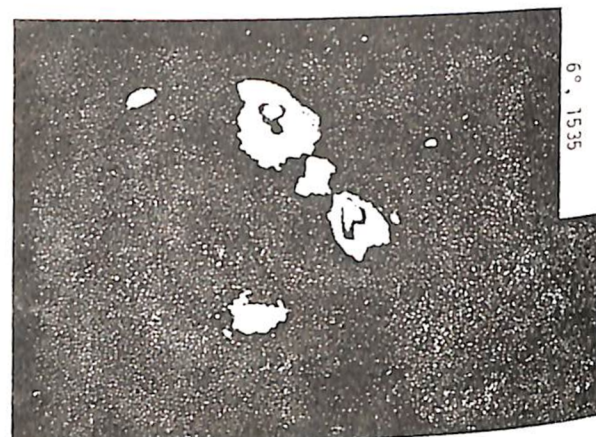
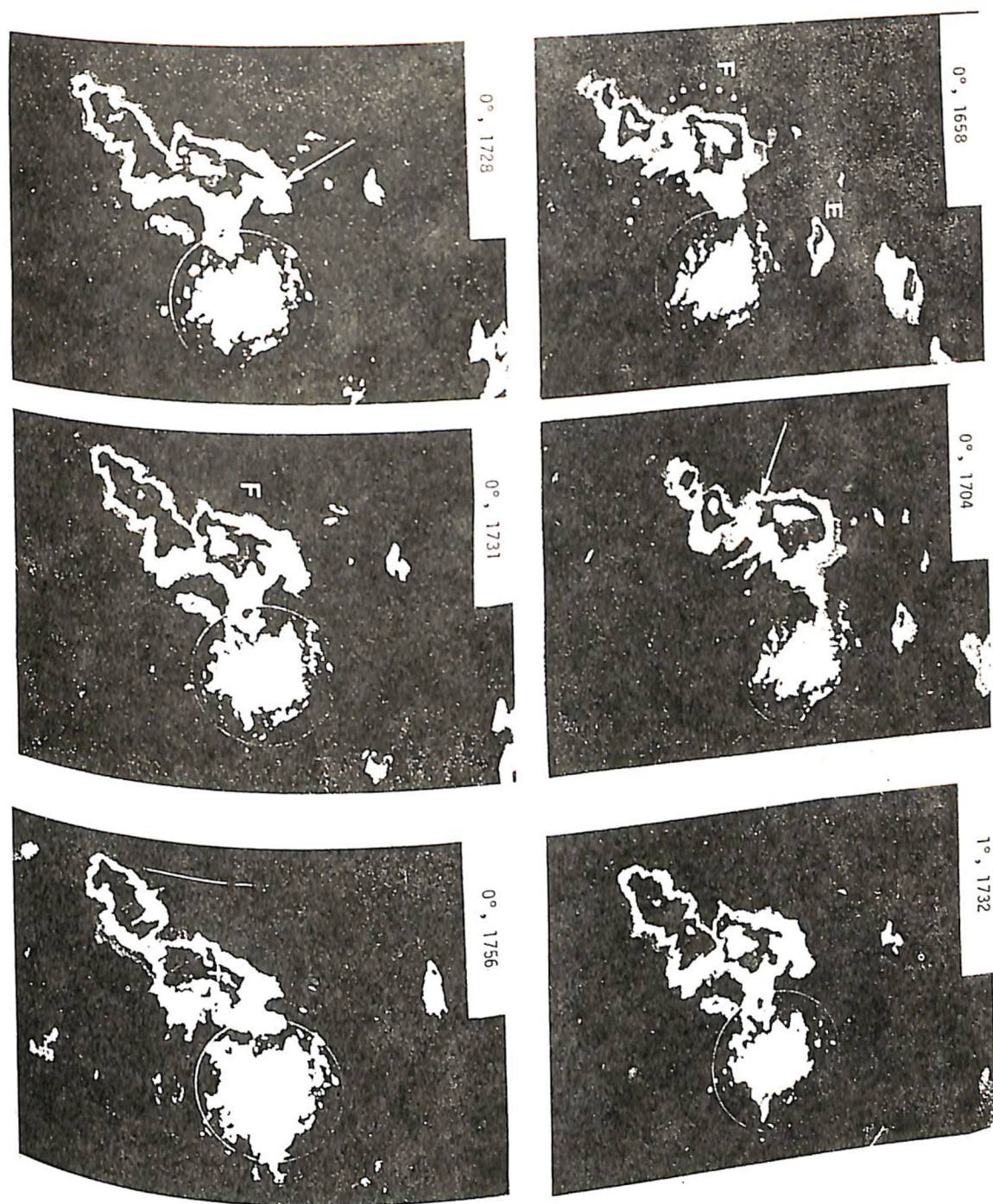
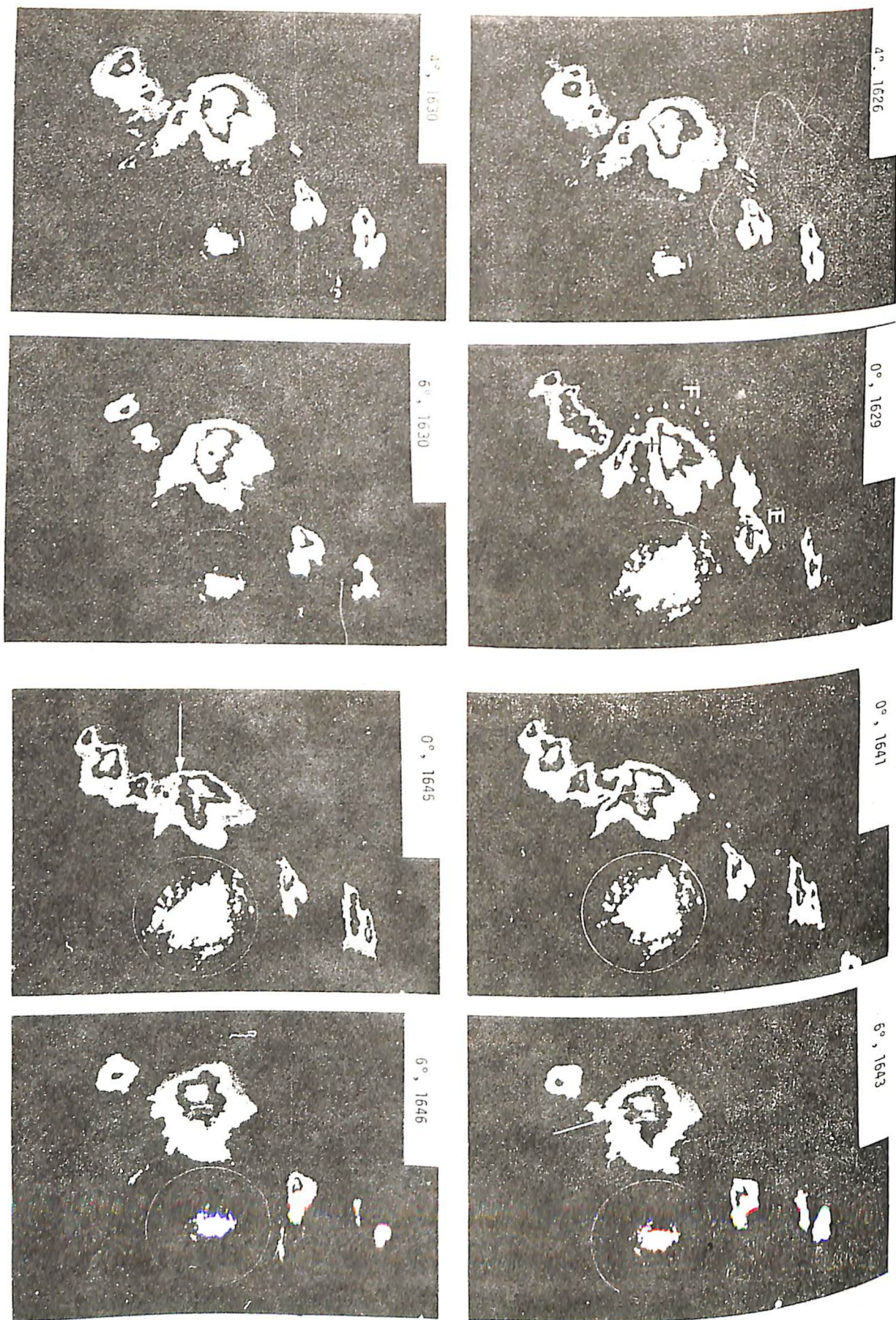


圖 5 風暴 F 回波頂點的時間—高度函數圖，圖中點棒表示龍捲風在地表持續的時間，其他回波與地面天氣如圖中說明。







新 書 介 紹

1. 各種重要天氣系統的等熵分析研究(二)

作 著：劉廣英、徐天佑

執行單位：氣象聯隊

出版年月日：中華民國 76 年 7 月 30 日

2. 空勤人員氣象手冊

發行單位：空軍總部

出版年月日：中華民國 76 年 4 月 14 日

3. 空軍各基地危險天氣預報研究兵要

發行單位：氣象聯隊

出版年月：中華民國 76 年 6 月

4. 台灣地區空軍各基地大雨及暴雨之成因與預報方法研究

發行單位：氣象聯隊

出版年月：中華民國 76 年 6 月

5. 七十五年中華民國科技研究摘要

發行單位：國科會

出版年月：中華民國 75 年

6. 1986 ANNUAL TROPICAL CYCLONE REPORT

發行單位：U.S. NAVAL OCEANOGRAPHY
COMMAND CENTER

出版年月：中華民國 75 年