

龍捲型風暴之發展

The Evolution of Tornadic Storms

學術發展組

摘要

為劇烈的地方性風暴之生命週期分類，業已建議可增添一第四期——半安定SR成熟期（The Quasi-Steady SR Mature Stage）於所熟知的 Byers-Braham 分類。一項將地面天氣與從三個隣近的劇烈性地方性風暴的雷達回波聯合分析，顯出每一風暴皆經過一相似的，和其成熟階段開始的澈底變性階段。此一階段之特殊性質，乃歸因於上升氣流的旋轉特性，該上升氣流據研究發展知，僅當其變的十分活躍足以形成巨雹時為然。

一、劇烈地方性風暴之生命週期分類

Byers 與 Braham (1949) 曾辨識出個體性雷雨細胞發展的三種階段；「積雲階段」（The Cumulus Stage）——僅有上升氣流之階段；「成熟階段」（The Mature Stage）——上升下降氣流同時存在之階段；及「消散階段」（The Dissipating Stage）——只有下降氣流之階段。如僅為非劇烈雷雨胞，此為一適當敘述；如將其適應於劇烈風暴細胞時，則有另加命名增加階段之需。

根據 Byers-Braham 分類，一孤立的非劇烈雷雨胞之成熟期，僅能在過渡於消散期前歷時 15—30 分鐘。更尋常者，一雷雨之組成是由一連串有進化發展能力的副細胞，給以蓬勃茁壯的發展孕育，使達更堅強或頑固的成熟階段之細胞程度，在該階段上升下降氣流以脈動式同時存在。然而如溫度，濕度與風場，原即有利的垂直分佈，則一般的成熟階段，即將發展為一更佳的有組織機能的劇烈成熟階段。此為一由缺乏有意義副細胞結構的大量對流累胞所特性的時期，且能在最後變為消散期前，累胞所堅定維持數小時。在美國中西部之多數劇烈地方性風暴，在此階段顯異常的旅經風之右方的情形。因此種事實導致作者 (1964) 命名其為 SR 成熟階段 (S 代表 Severe, R 代表 Right)，此即信賴為龍捲可發生之時期 (或階段)。

表一、劇烈地方性雷雨生命週期分類表

階段1	積雲階段	僅有上升氣流
階段2	一般成熟階段	上升與下降氣流同時存在
階段3	SR 成熟階段	僅有下降氣流
階段4	消散階段	

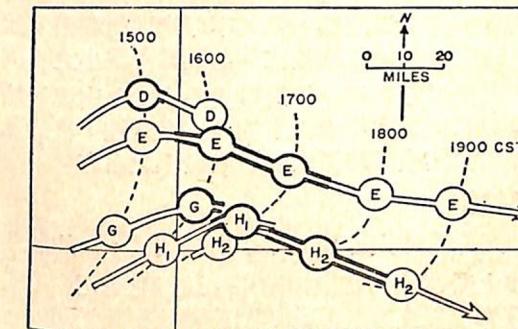
有關此種風暴進化之全分類綜合如表一，雖其階段1、2及4 在許多方面於類似於 Byers-Braham

分類表中之各階段，唯階段 3 例外；此為作者敘述 (1964) 之特例，其差異不僅與一般成熟階段有定量的不同，而在定性方面亦各異。其特性組織係由雷達透過所謂超級細胞結構（以鈎狀回波，拱形跳躍等）予以顯示。

此一說明之目的，乃在推陳三種雷雨細胞之研究例證，當其進化從一般成熟階段至龍捲型 SR 成熟階段，彷彿呈一特性形態。1963年5月26日所發展於 Oklahoma 的無數雷雨羣可能即被認為屬於此型。在許多其他天氣中，彼等變為當時所要瞭解研究的主題，地面天氣調查及由數種程式不同雷達，包括 WSR-57 及 FPS-6 的加強涵蓋的檢查，均極一時之盛，為更詳盡起見，讀者可參考原始的 AFC RL 報告。

二、1963年5月26日的雷雨研究特例

風暴之運行：於 5 月 26 日午後一雷雨細胞線形成於近奧克拉荷馬城低空露點不連續線之前緣。少頃，該雷雨由其合併的表面外流產生一中高之主緣，漸變為有機組織。有為數約五個此種風暴之軌跡，由圖中 D 至 H₂ 有組織的顯示於圖一。所有各個風

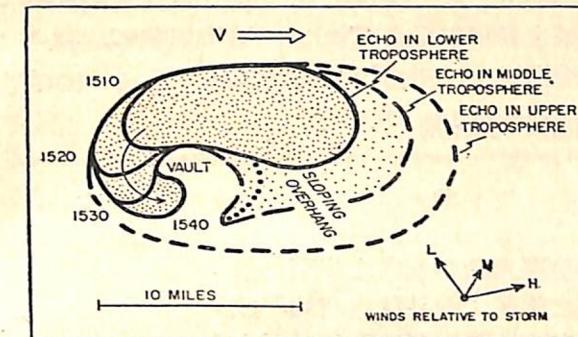


圖一：1963年5月26日風暴胞之組織及運動結構分解圖。觀測點為圖中所示交叉點 Norman 氣象雷達實驗室。成熟階段軌跡線由粗實線代表，同時之風暴位置由斷線連成。

暴在其軌跡在圖一中顯示粗線期，均以超級細胞維持着其 SR 成熟期。在 D, G 及 H₁ 之各風暴中，由於新風暴細胞在其右側近處的強化，為爭補從南接近的溫暖低空空氣，其生命週期顯示較短。相反，風暴 E 及 H₂ 却能堅持一較久時間。

順轉而隨高度增強之低層南來風，在 80Km 高度的對流層頂變為西來風。在 SR 階段開始前所有在中對流層的細胞方向均朝向 070° 前進；在 SR 開始後其速度減緩方向變為 110°，居對流層內垂直各層風向之右。

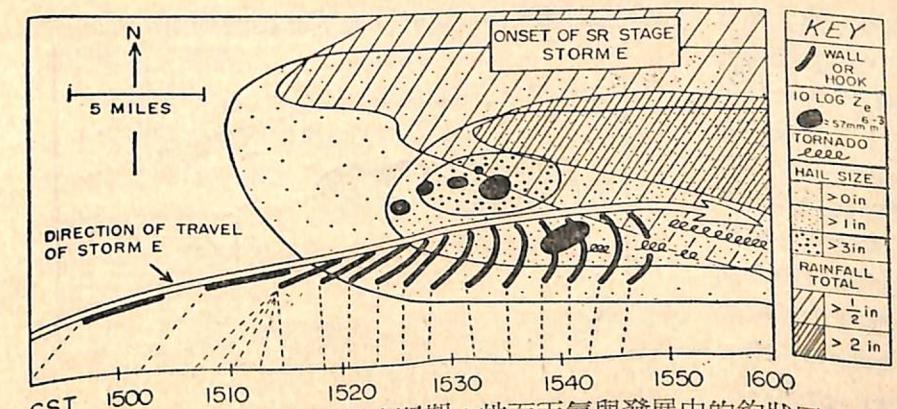
鈎形回波之發展 雷雨 E 及 G 及發展甚小之 H₃ 被用相當好的分解法予以完成觀測。所有三雷雨中從雷雨後部所得之指狀回波由其而進化的鈎狀回波，其超級結構之特性最為明顯。其組織情形詳見圖二。



圖二：風暴 E 內之鈎狀回波發展結構分解圖，鈎狀之連續位置為圖中 1510、1520、1530 及 1540 cst 說明。

圖中時間係主以雷雨 E 而言。在不足 30 分鐘的時間內，其指狀圍指風暴之右側，首先示一垂飾附屬物狀回波，然後即為一近似的鈎狀。垂飾物狀變為鈎狀之進化情形甚相似於龍捲型 Champaign 風暴之習性 (Fujita, 1958)，雖其不像 Champaign 風暴能被解得更多之詳情。

所獲之進化的鈎狀回波之三度空間結構，其情



圖三：風暴 E 內之整體時間期，地面天氣與發展中的鈎狀回波主緣連續位置間之關係。

形亦獲得於風暴 E 及 G 之例證中。此顯示指狀之南緣，常會形成一回波牆，該回波牆常甚光銳且偶至直立（參見 Browning 與 Donaldson, 1963 之圖五中的牆形）。稍後，此牆即構成一進化中的鈎狀回波前緣。

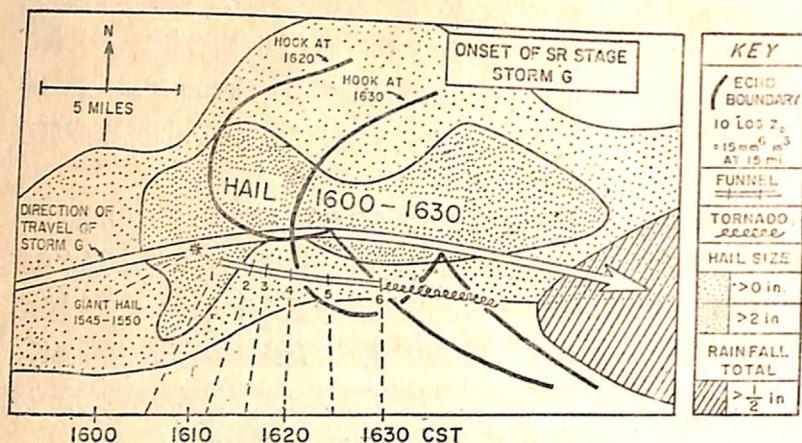
風暴 E 內之 SR 階段之開始：圖二中風暴 E 的發展鈎狀之連續位置之作圖，係相對該風暴本身在其階段中之旅經速度被認為以 25kt 向 080 度進行。圖三之連續位置係相對地面，其時間係順應每一由斷線引至根據風暴速而定其相對距離的時間坐標之每一位置。

至 1505 cst 其牆平行於旅行方向。從 1505—1515 cst 對地面幾保持不動姿態，而和相對於運動中的風暴之垂飾狀物之向後部發展保持一致。從 1515—1530 墙轉形成鈎狀回波的主緣，而該鈎狀回波之最初旅行向係向 080 度前進，但在 1600 後即改變為 110 度。

除以形像描寫鈎狀回波之進化外，圖三亦表示地面天氣的整體分佈。顯然，當風暴進入其 SR 階段時，各種劇烈天氣均競相極力發展。3 inches (少數甚至 4 inches) 近球形直徑的含砂雹，適落於鈎形形成處之北方。第一個龍捲發生於鈎形形成後不久，正如在 Champaign 中者然。但後者之此時，其雹已落於有最大雹區之東。此第一個龍捲及以後之其他龍捲與甚多之破壞，皆係由於發生在鈎狀回波本身路徑內之直線型強風所引起。強烈豪雨發生於最大雹之稍東和稍北；其始也至為突兀，以四倍之強度，和從 $\frac{1}{2}$ 至 2 in 直徑的雹發生於 3 分鐘之短暫過程中。

約發生於 1520 分左右的風暴之超級細胞，被維持至 1720 cst 時。此期間其回波頂保持約 60,000 ft，因其在 30 分鐘內被雷達所測定之頂不足垂直柱寬 1 度，此為一可信賴之估計 (Donaldson, 1964)，且持久的保持其頂高出對流層以上 20,000 ft。雖此風暴於其挾 25kt 之強風向 110 度，產生破壞性風，雹及豪雨的寬廣和連續幅度中，作兇猛之挺進，然其巨雹仍嚴格受限於階段的開始之一瞬。(所稱「巨雹」，其直徑被定義規定為 2 inches)。

風暴 G 的 SR 階段之開始：與風暴 E 有關的地面天氣資料分析，



圖四：風暴 G 內地面天氣與 1620—1630cst 發展鈎因受定時觀測資料不足之限，雖其情況或結果較佳於其他風暴，然此例之雷達資料亦貧乏。有關風暴 G 的 SR 階段開始之地面天氣觀測，茲綜如圖四。其鈎狀回波約形成於 1605 cst，而其廣泛的巨電現

表二、風暴 G 龍捲發展之定時觀測

位 置 (圖四所給各點)	時 間 (CST)	速 度	現 象 叙 述
1	1605	約10kt	先測得渦旋區週圍雲底內之亮區部份。
2	1612		先見渦旋之旋轉；漏斗狀雲開始形成。
3	1616		漏斗狀雲向下伸展達至地面1600呎之內。
4	1620	約20kt	察得漏斗狀雲內之甚快旋轉速度。
5	1625	約20kt	漏斗狀雲變寬，且有一尖端下達離地700ft之內。
6	1630		龍捲觸地，開始造成重大破壞。

他風暴中，其龍捲直至多數巨雹降落之後尚未觸地，而據以發展的雲渦旋，却早在25分鐘前當巨雹普遍降落而鈎狀恰好發展時的短暫階段即已變的清晰可見。

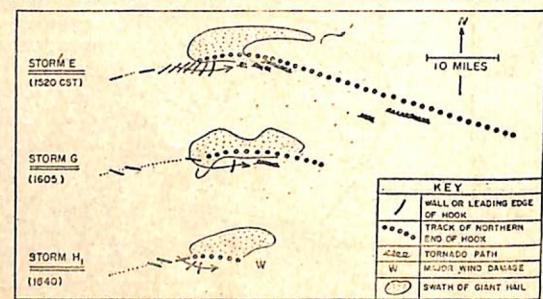
由 Spatola 所示之隣近目視觀測，位置 1 之渦旋，係與一在堡狀積雨雲中心內（直徑不足 1 哩）的升高雲底的光亮部分相結合。由於此區之安定亮度及缺乏可見的閃電放射，則此情形彷彿極合理於 Spatola 的觀測，該觀測謂在一強烈上升氣流的堡狀積雨雲中心內，有一相對的雲與自由上升氣流眼存在之特殊現象。（如被 Fujita, 1965 所討論者，這種情形可能會造成「眼」；但不可和雷達回波所示之拱形混為一談；後者之較大自由降水量係聯合週圍強烈上升氣流同時出現。因眼位於雹形內甚難由雷達回波區別。）SR 階段風暴 G 的雷達回波開始時不但強烈順轉，且其速亦從 30kt 減至 20kt。在第一次測得後之數分鐘時間內，龍捲之渦旋甚至較此為小。

象亦能降落於其發展期，其最大直徑為 4 inches，而此巨雹之首一報告，於 1545 來自圖四中有星標之位置。所有的降水亦於 1550 終止於此處。再向圖中東移在巨雹圍範內之多數雹，於 1600—1630 期恰好落於發展中的鉤形回波之北。此區一般之降水為輕型， $\frac{1}{2}$ inches 等雨量線 (Isohyet) 之西緣，全位巨雹範圍之東。

可能圖四中最有趣之特性，為回波間之關係。龍捲發展的良好記錄史。沿發展龍捲路徑的六個數字位置，乃為 Messrs. Ralph J. Donaldson, Jr., Alfred A. Spatola 及其從 AFCRL 而來之同事和得自 Tinker AFB 氣象觀測員等之直接觀測之綜合，其詳情參見表 2。雖然如在其

風暴H₁之觀測，其資料欠詳，但為強調其與風暴E與G之相似性，將簡述如次節。

風暴 E, G 及 H₁之近似進化：巨型雹之整個時間延展，龍捲路徑，及風暴 E, G 及 H₁的鈎狀回波進化，悉被填繪於圖五中，在該圖中風暴之軌跡，被重疊轉換俾便比較。雖其詳細觀測如用於強調每



圖五：巨雹範圍與1963年5月26日龍捲對風暴E,G及H₁內發展鈎狀回波之關係。括號時間代表鈎狀開始形成時之相近時間。