

熱帶氣旋的衛星觀測

中國文化大學

地學研究所大氣科學組

花雲挺 呂木村

一、前言

利用衛星資料來分析熱帶氣旋的技術乃基於研究熱帶氣旋發展和移動所產生的概念模式，故此模式所描述的氣旋生命週期即為氣旋在衛星上的呈現。

至於分析原理的成立乃源於觀測經驗上的修正與改進。本章節以下的解註和圖解即為本模式下的儀器觀測之應用。

Dvorak 1975 曾作如下的表示：觀測乃是顯示熱氣旋與其所處的環境隨著氣旋的增強和減弱而有可茲辨別的不同時期。雲狀的產生與其形成過程中的環境密切相關。會造成破壞的影響因子，諸如風切、陸地、冷水等條件吾人已知將會防礙熱帶氣旋的發展。而氣旋生成時首要的確實依據，是吾人可在一或一天半前預測出它將達到熱帶風暴的強度。曲帶發展的過程中，中心氣壓下降的比例會漸增，同時密雲亦會更加的環繞風暴的中心部位。Watanabe (1985) 以迴歸法分析太平洋颱風均得到以下結論：眼的溫度與環繞的雲溫度均與熱帶氣旋的中心氣壓有高度的相關性。崩潰。此現象發生時我們會觀察到低層中心附近的雲逐漸分散，而非白天成的削弱（變暖）則會出現在雲頂，

或是有密雲掩蓋了風暴的中心。減弱時，我們可在風暴的中心氣壓昇高前六到十二小時觀察到一些象徵（Lushine, 1977）。雲形的轉變將優先於中心壓力的變化（Shimada, 1984），雲形總是經常的、不斷的在改變。這是因為雲總是不時的受對流的過程、日夜的變化、附近環境的影響。Maramatsu 認為日夜的變化會使氣旋的眼直徑在清晨時最小，而在下午時發展到最大。邊界層與水汽不連續所產生的雲形有助於描述上層的流場。由衛星方法所提供的分析與預報可促進洪災預警的能力。

二、熱帶氣旋發展初期之雲狀觀測

A. 一般發展

以衛星雲圖觀測氣旋的發展即是觀察雲狀在有利的環境條件下之演化過程。

Dvorak (1975) 曾作如下的表示：觀測乃是顯示熱氣旋與其所處的環境隨著氣旋的增強和減弱而有可茲辨別的不同時期。

在雲狀演化的最早先階段，對流雲和上層的雲碎片首先有組織的變成彎曲雲帶（圖 1a, 1b）。本階段中，雲狀在短時間內通常會顯示相當大的變異性。而此變異的發生通常導因於

日間的溫度影響或鄰近的氣旋系統所造成的擾動。

當彎曲的雲帶盤繞在氣團中心時，中心便顯現在陰暗的雲團中而進入了颱風時期（或稱颶風，hurricane）。中間的眼形空隙此時變得更深而清楚。

雲狀的演化與氣旋的強度有關，但此有組織的發展則與對流胞及上層雲的數量無關。Arnold (1977) 利用高解可見光雲圖討論氣旋發展不同階段的對流胞數量並無明顯的差異而證明了此論點。

雲狀的產生與其形成過程中的環境密切相關。會造成破壞的影響因子，諸如風切、陸地、冷水等條件吾人已知將會防礙熱帶氣旋的發展。其中由陸地與冷水造成的負面影響經由衛星影像察知尤為明顯。但風切造成的影響程度則較難估算與了解。

經由觀測了解，破壞因子所造成最常見的影響如圖 2（攝於大西洋西北）。標示 A 處為一發展中的熱帶風暴。在雲帶的彎曲處自 B 到 A 的西北有一明顯的深槽，此槽業已導致風暴地在西半部一些雲的發展受到抑制。圖 2b 為二十四小時後的雲圖。此加深的槽已抵達附近，風暴 A 的強度因受其影響而減弱，且它的西行運動亦隨之而減緩。此減弱是由接近此雲系統的中心深層雲系損失所產生的結果並造成這低層環流的中心。在接下來的三天中此擾動將會繼續導致減弱的發生。

圖 2c 為四天後再發展的風暴 A，其深層對流的建立乃是完全環繞著系統的中心。值的我們注意的是槽 B 已經消散，而此擾動由西流向北方的彎曲雲帶更加地彎曲環繞此擾動的中心，這暗示著有一脊線存在於 C 到 A 的西北方。

B. 熱帶氣旋形成的初期階段

當熱帶氣旋發生並形成的二、三天前，即一擾動要到達熱帶風暴強度左右時，我們便可以觀測到一些連續發生的事件。常見的有無組

織雲團的邊界逐漸變直及對流活動的突然旺盛。它通常表示雲團的變形是高空槽或偏西的割離低壓交互作用的結果。連續秀出的衛星雲圖尤其常出現此推論。圖 3 即明顯地呈現出此交互作用。在此連續的十二小時紅外線雲圖中，3a 的雲團 A 因高空槽的關係而變形，此變形導致了系統北方的雲邊界 B 處有變直的現象發生。

圖 3b 則是槽線產生一割離的中心在 C 的位置。接下來在照片 c 和 d 中可看出被標示區 C 和 A 已分離，A 的雲狀並形成彎曲狀的雲帶。此現象說明了熱氣旋正在生成。

雖然如圖 3 中所顯示的交互作用經常被衛星觀測到，但卻不是每次都是必然。它也有可能是熱帶氣旋生成初期時，受一些機械作用的影響所導致。而氣旋生成時首要的確實依據，是吾人可在一或一天半前預測出它將達到熱帶風暴的強度。此時對流雲團可觀測到彎曲的低雲線或雲帶附近將可觀測到深對流的產生。

我們通常在雲團要發展成熱帶氣旋時可觀測到以下四個主要特徵：

1. 彎曲的雲線或雲帶會形成一小範圍曲率中心。
2. 由密集出現的烏雲而在其附近定義出中心位置。
3. 雲所形成的系統至少要持續十二小時以上。
4. 環境獲得更進一步的強化支持。

以上的特徵是我們可在地表面氣壓顯著下降的前二十四小時便可由觀測獲得。圖 3c 和 d 便是此一階段發展的例子。當發展的初期，低層雲線被觀測到會逐漸的合併。當強度益發的增加時，雲線的彎曲程度也就愈大。

另外，在發展的初期，我們有時也可觀測到雲狀有所變異。此時，低層的彎曲雲帶將變得更為密實，但此現象實則與深對流無關。每當夜晚之時，總會有大量的雲形成小而有組織的結構。雖然大部份的熱帶低壓於其形成初期多發生在熱帶的暖洋面上，但仍有少部份的例

子顯示雲帶會經過低氣壓區域的陸地。

熱帶氣旋生成的初期，一個由西往西北移動的擾動並非表示上層槽線的加深。但當上層槽線的加深顯而易見時，雲系便會失去其組織並減弱直至它們彎曲並又開始移到槽線的西北側。

C. 曲帶（盤繞）時期 (Curved Band or Coiling Stage)

我們觀測到熱帶氣旋多半是對流雲或上層的雲碎片所組成的彎曲雲帶區域。偶而在氣旋生成的早期也可觀測到二個彎曲雲帶的結合。圖 4 顯示著達到熱帶氣旋最小強度（34kts）前一或一天半前的彎曲雲形（請與附圖中的 T-Number 圖做比較）。在彎曲雲帶形成之後，我們首先便可偵測到氣壓的下降。當雲系的中心藉由雲線的觀測或飛機的偵察而確定其位置時，它多是接近彎曲雲帶的凹陷處。而彎曲帶的方向通常指向風暴所處環境的上層氣流方向。圖 4 便是氣旋在上層偏西的風向中向西行進的例子。

當觀測到曲帶環繞風暴中心至少 1/2 圈時，此氣旋便已達到熱帶風暴的強度（風速最小要持續在 34kts 以上）。此階段中，彎曲帶內的對流胞集團通常會形成一密實的彎曲雲線，它暗示此階段即是雲牆的形成期（圖 4 的第二天部分）。另外，此時期的彎曲低雲線多清晰可見，並常接近雲系的中心。

當此曲帶盤繞中心 3/4 時（如圖示的第三天部分），氣旋便達到強烈的風暴階段。當曲帶完全盤繞中心時，已具有了颶風（颶風）的強度（64kts）。圖上的虛線用以顯示盤繞的程度。

曲帶發展的過程中，中心氣壓下降的比例會漸增，同時密雲亦會更加的環繞風暴的中心部位。圖 4 便是世界上大部份熱帶氣旋其雲狀的發展情況。由剛開始發展的第一天到最小的颶風（颶風）強度（64kts），大約需要三天的間隔。觀察中迅速發展的熱帶氣旋欲演化到

颶風（颶風）強度約需彎曲雲帶發展二天左右，若是緩慢發展的熱帶氣旋則需要四或更多天。

D. 中心嵌入（颶風）時期 (Embedded Center or Hurricane Stage)

通常在強烈熱帶風暴階段後約二十四小時，我們便可以觀測到『中心嵌入』的或稱『眼狀』的時期（如圖 4 第四天的部分）。當熱帶氣旋的彎曲雲帶完全的環繞中心時，便會出現眼狀的嵌入中心。最初的眼形成之後，熱帶氣旋尚會逐漸的增加其強度，此現象在雲圖上的表現將愈來愈清楚，或言中心嵌入的程度逐漸地在加深（更多的雲圍繞）。由紅外線色調強化雲圖觀測此時期顯示，眼的部份溫度會逐漸上昇而環繞在周圍的雲溫度則會逐漸下降。Both Dvorak(1985) 研究大西洋颶風，Watanabe(1985) 以迴歸法分析太平洋颶風均得到以下結論：眼的溫度與環繞的雲溫度均與熱帶氣旋的中心氣壓有高度的相關性。

圖 5 即是彎曲雲帶發展導致眼狀形成的例子。可見光雲圖在每天傍晚掃過圖的頂端（A 列），而在第二天清晨掃過底端（E 列）。此可見光雲圖顯示了夜間每六小時的變化，雲圖中最冷處（也就是最高的雲）為白色的亮區，較溫暖或較細的雲（顯現有如陰影般的）則是灰色的區域。

研究圖 5 的 A-E 列，我們可以發現它由第一天的“前風暴”時期發展到第四天的颶風（颶風）時期。對綜列分析可看出日夜間的變化。我們發現：雲狀均有小部分的細微改變，至於夜間複雜的雲狀則是受日間的影響與風切所造成。

到了第四天，熱帶氣旋已增強並顯現出眼狀的特徵。我們可由紅外線雲圖推論雲系的中心藉由對彎曲冷雲的中心定位方法，或由可見光雲圖中心密雲區的陰影來加以判定。9/01/09GMT 的圖中，冷雲（白色的）部份環繞成一黑點（暖）使得中心部位顯現，接下來的圖

中，濃密的黑雲環繞造成一點狀的清晰的眼。

三、抑制發展與減弱

一旦雲狀被觀察到開始演化，它便會持續到受不利的環境影響而逐漸崩潰。此現象發生時我們會觀察到低層中心附近的雲逐漸分散，而非白天成的削弱（變暖）則會出現在雲頂，或是有密雲掩蓋了風暴的中心。會抑制氣旋發展的不利環境有陸地、冷水、風切區域。圖 2 就是風切造成熱帶氣旋減弱的一例。

一個風暴開始減弱時，我們可在風暴的中心氣壓昇高前六到十二小時觀察到一些象徵（Lushine, 1977）。雲形的轉變將優先於中心壓力的變化（Shimada, 1984），當風暴在減弱或迅速加強時，此現象尤為明顯。圖 6 為 Zehr (1989) 對此現象的說明。它顯示高解衛星資料經複雜的運算與偵察機測量後的對照（對照對象為 1983 年迅速增強的颶風 Marge）。圖片 b, c 中，紅外線衛星資料的完全自動化計算處理與偵察機得到的壓力值（點線）作十二與二十四小時平均後可以看出是密切對應的，但圖 a 中衛星資料則是顯著地領先觀測到的氣壓值。圖 6 是數個 Zehr 研究迅速發展颶風的例子。我們發現過去二十四小時的衛星資料平均值與偵測到的結果最為吻合；但對大部分的氣旋而言，過去六至十二小時平均則是較合人意的。

四、雲狀的變異

當我們看連續的衛星雲圖時，熱帶氣旋的雲形總是經常的、不斷的在改變。這是因為雲總是不時的受對流的過程、日夜的變化、附近環境的影響。因為這些影響，印象中我們觀測到的總是雲狀爆炸性的發展與隨之的平息。

舉例來說，圖 7 就是熱帶風暴生命週期中每四小時的三階段（Gert, 1981）。圖 a，風暴的雲形因西邊短波槽的變遷而崩潰破裂。二小

後，b 圖的彎曲雲帶開始復發，接著 b 圖的二個小時後，在圖 c 我們發現強烈的熱帶風暴雲形與圖 4 中第三天的雲形極為相似。造成這一類熱帶風暴雲形的中斷或強度的減弱多是由日夜變化造成。一位分析人員在解析衛星雲圖時所遭遇的大部分問題便是對流數量的變化與觀察雲狀的形成組織。雖然熱帶氣旋中最常觀測到的便是彎曲雲形，附帶一提的是偶而也有其它情形發生（如圖 4 觀測到的另外兩種雲狀）。

A. 衛星雲圖所觀測到的另類雲形

有一種常觀測到的雲狀，我們稱為“切割式”雲狀 (shear pattern)，它發生在颶風發展時期的深對流雲處而在雲的邊緣產生突然而不連續的直線形狀（如圖 8 所示）。

熱帶擾動的低層雲線乃部分的暴露在外並可觀測到它環繞著低層的中心。當擾動加強時，低層雲線的環繞將更加彎曲，並在中心處有更進一步的密雲覆蓋。當此切變的效應隨著時間逐漸的增加後，中心部分會隨著密雲逐漸的分裂，而後便進入了擾動的衰減時期了。

另一種常觀測到的雲狀為“中心密雲”（Central Dense Overcast, CDO）覆蓋我們定義風暴中心的雲線。如圖 9 箭頭部位，可見光雲圖觀測到在彎曲帶狀的範圍之內，中心密雲的大小與熱帶氣旋的強度有關。吾人粗略的估算較微弱的熱帶風暴階段，中心密雲（CDO）的直徑大約是一個緯度左右，若是在微弱的颶風時期則會增至兩個緯度的大小。

當我們審視紅外線雲圖中的熱帶氣旋發展，尤其是強化的紅外線雲圖中，一個延伸的圓形冷雲集團多被觀測到接近雲系的中心。而“中央覆蓋冷雲”（Central Cold Cover）形則被觀測到是條狀的密卷雲在雲系的外表延伸，若是此中心的覆蓋冷雲持續下去，氣旋的發展便會受到抑制。

B. 日夜變化的影響

日夜變化的影響也對彎曲雲帶有明顯的作用，尤其是在發展的早期。熱帶氣旋的雲形通

常會在上層雲狀包含最少的雲時，如夜間或清晨減弱。反言之，雲形將在白天裡顯現激烈的、良好的輪廓。我們觀察到大部分的高雲和對流活動在午夜時會最小，午夜之後，對流逐漸增加而雲便會在下午的時候，蓬狀般的展開至最大 (Browner, et al., 1977; Muramatsu, 1982)。Muramatsu 認為日夜的變化會使氣旋的眼直徑在清晨時最小，而在下午時發展到最大。

五、結論

自第一枚衛星在 1960 年 4 月 1 日升空後，從衛星已觀測到數百個氣旋。此種觀測已提供氣象學家有關熱帶氣旋的雲型位置、強度和移動有關的豐富資訊；當今此種技術已大部分被運用在以衛星影像為主要資料的分析作業上。

衛星影像已被視為偵測全球洋面上熱帶氣旋的主要觀測工具達二十年之久。在近幾年內，氣象學家已發現衛星資料可提供熱帶氣旋合理的位置和強度。確定未被風切扭曲的強熱帶氣旋中心位置是簡單而合理的，然而衛星對熱帶氣旋做分析通常具有複雜度。特別是

1. 熱帶氣旋的雲形呈現不定性的外觀。
2. 雲型因與環境的風場和鄰近的天氣系統交互作用而造成嚴重的扭曲。
3. 確定氣旋地面位置的中央雲貌背後因卷雲覆蓋而模糊。
4. 某些情況下雲型之變化較風和氣壓為快。

分析者常需面對有關熱帶氣旋中心的位移、強度的改變以及多種環流系統交互作用導致之路徑變化等複雜的決定。此決定在夜間如僅有低解像的紅外線雲圖時將倍增困難。

台灣地區每年因氣象災害所造成的損失約新台幣 100 億，因此了解導致災害之天氣系統的特徵及如何預防災害，便成為當今最重要的課題之一。衛星雲圖為大氣動力和熱力的結果，因此衛星資料在了解颱風系統扮演非常重

要的角色。

颱風導致之豪雨所引發之自然災害為台灣地區所有降水中最劇烈者；因此精確的預報和適時的警告為颱風作業上最重要的事項。颱風作業上第一個步驟為決定當時的颱風中心位置，因中心位置為颱風未來路徑和強度預報的必要條件。然而颱風形成於熱帶洋面上，傳統的氣象觀測資料不易獲得；且當颱風加強時，船舶為了安全而避開颱風中心。颱風偵查飛機停飛後，氣象衛星資料成為全球各地確定颱風位置及強度估計的最重要資料來源之一。

如我國的中央氣象局便利用每小時之 GMS 衛星雲圖透過新聞媒體向社會大眾發布最新消息以期事先預防而減低生命財產損失至最低限度。熱帶氣旋在陸地上的降水常帶來嚴重的影響，如洪水便會帶來顯著的災害與生命的損失。雖然降水無法從衛星資料直接觀測到，但仍可以由不同的雲頂外貌及它們在一定時間內的改變來推論。例如熱帶氣旋的眼牆、中心密雲、雲帶等都是我們知道與降水比例有關的徵候。一些重要因素，如氣旋的移動速度、發展或減弱的趨勢、及其所遭遇的地勢因子，都是衛星上用來推斷降水的技巧。

由衛星方法所提供的分析與預報可促進防災預警的能力

參考文獻：

- 李清勝，吳鳳娥，1988：雲頂相當黑體溫度和熱帶氣旋的關係。氣象學報，第三十四卷，第一期，23-24 頁。
- 李清勝，吳鳳娥，1989：利用紅外線資料分析颱風中對流之特性。大氣科學，第十七期，第四號，331-354 頁。
- 紀水上，蘇敏惠，鄒中惠，蕭俊隆，1987：利用地球同步資料衛星亮度溫度估計颱風位置、強度及移動之研究。研究報告第 212 號，中央氣象局，66 頁。

- Dvorak, V.F., 1975: Tropical cyclone intensity analysis and forecasting from Satellite. Rev., 103, 420-430.
- Shoemaker, D.N., 1989: Relationships between tropical cyclone deep convection and the radial extent of damaging winds. Dept. of Atmos. Sci. Paper No. 457, Colo. state Univ., Ft. Collins, Co, 109pp.
- Weatherford, C.L., 1985: Typhoon structural variability. Dept. of Atmos. Sci. Paper 391, Colo. State Univ., Ft. Collins, Co, 75pp.

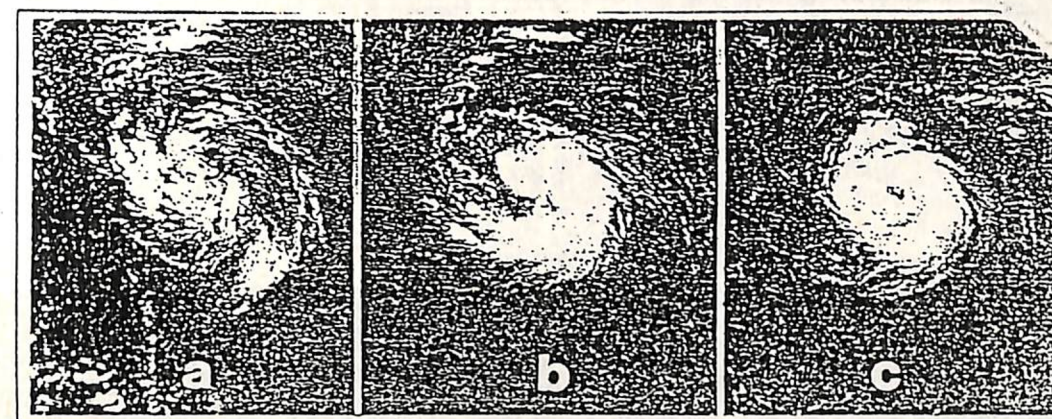


圖 1 熱帶氣旋的雲型 (a) 熱帶低壓 (Pre-storm), (b) 輕度颱風 (Tropical storm), (c) 中度颱風 (Hurricane)。

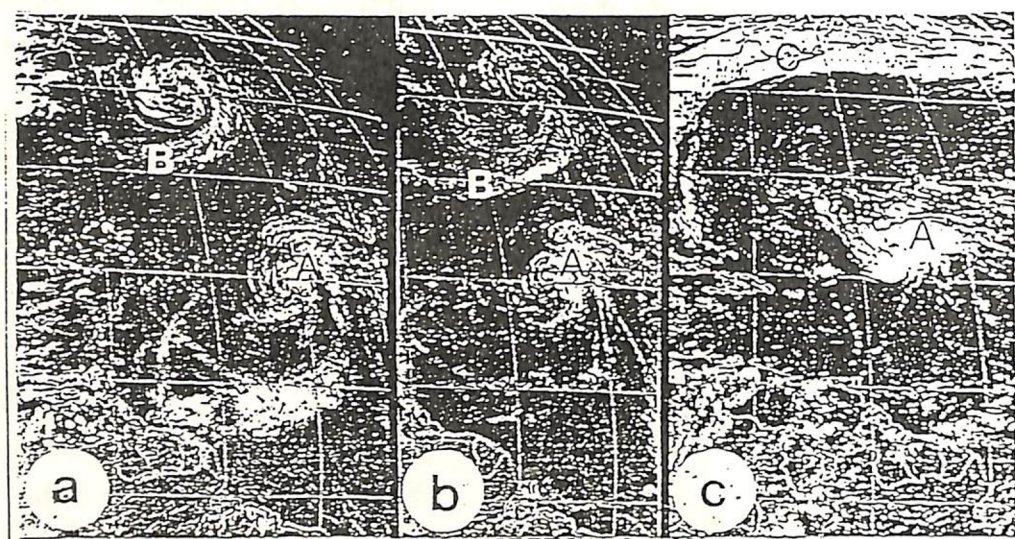


圖 2 可見光雲圖 (a) 槽線在 A 的西北方緩慢向東移動, (b) 氣旋 A 的發展受到限制, (c) 槽線通過後在 C 的北方的脊線建立, 造成高空輻散增強使得低層輻合, 氣旋 A 因之而發展。

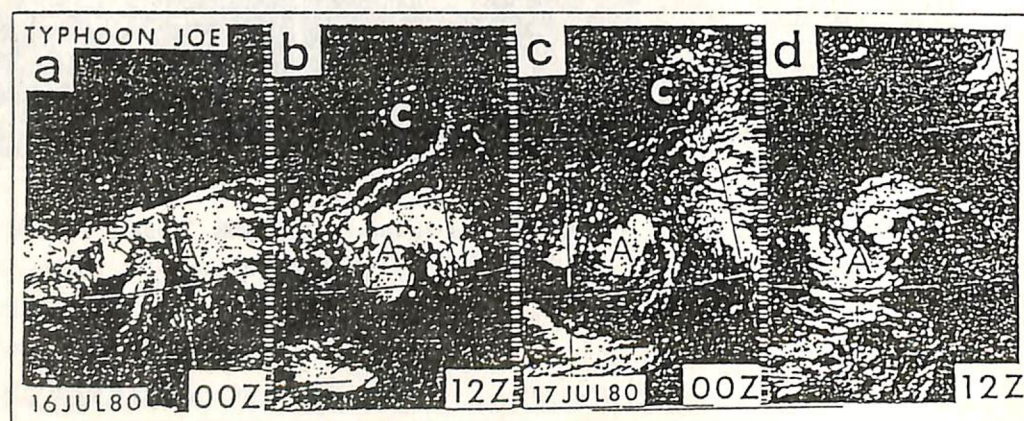


圖 3 (a) 雲團 A 因高空槽的關係, 使得雲邊界 B 有變直的現象

(b) 圖 3b 卷雲線由西南向東北伸出, 槽線產生一割離的中心 (冷心低壓) 在 C 的位置。

(c) 圖 3 卷雲線開始彎曲, 高層輻散增強 A 的發展。

(d) 圖 4 槽線通過, 高空脊建立, 氣旋 A 發展到颱風強度。

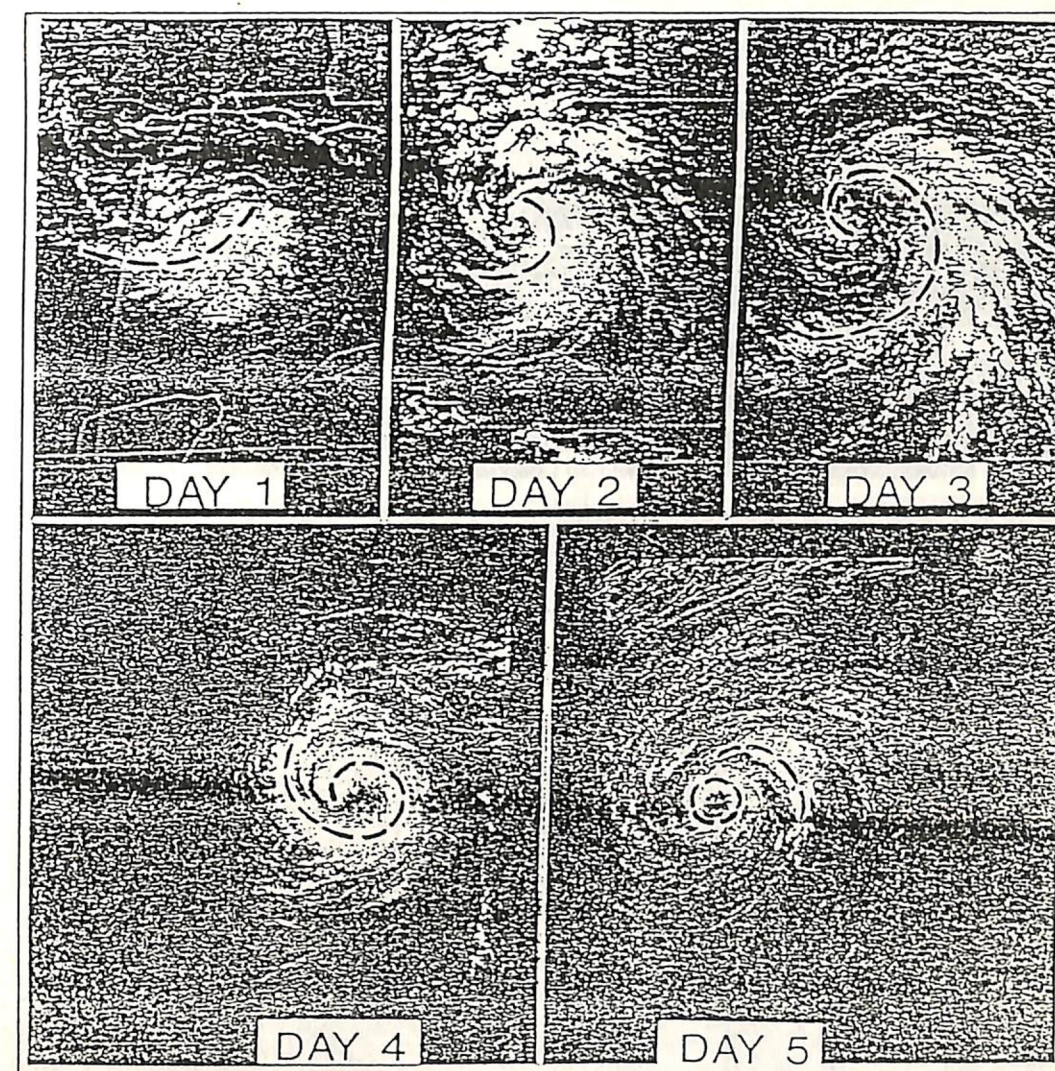
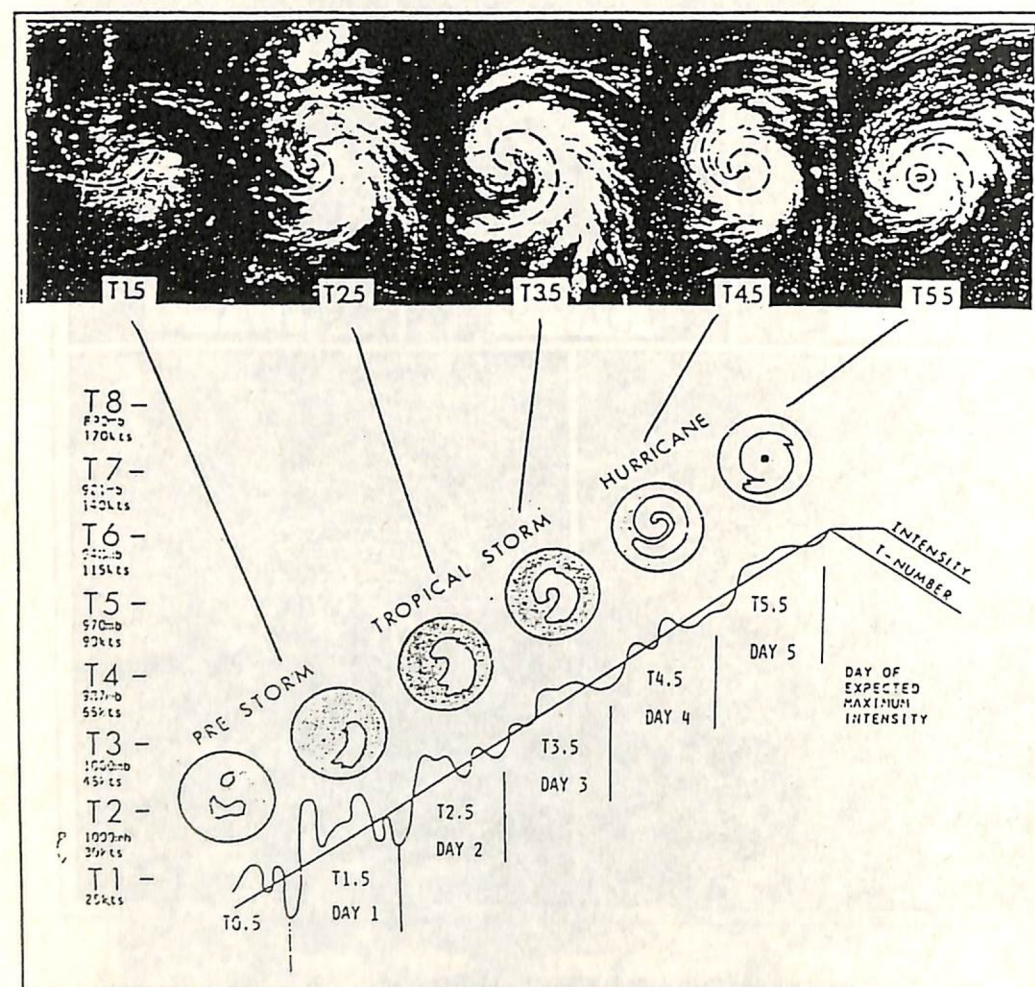


圖 4 可見光雲圖顯示熱帶氣旋彎曲雲帶的每日變化。第一天曲帶環繞少於二分之一圈, 強度約為熱帶氣旋 (TD)。第二天曲帶環繞超過二分之一圈, 強度約為熱帶風暴。第三天曲帶環繞達四分之三圈, 強度約為強烈熱帶風暴。第四天後曲帶環繞達一圈以上, 強度達到颱風或中度颱風。至於各圖的 T 指數詳見下頁附圖。



T 指數的附圖

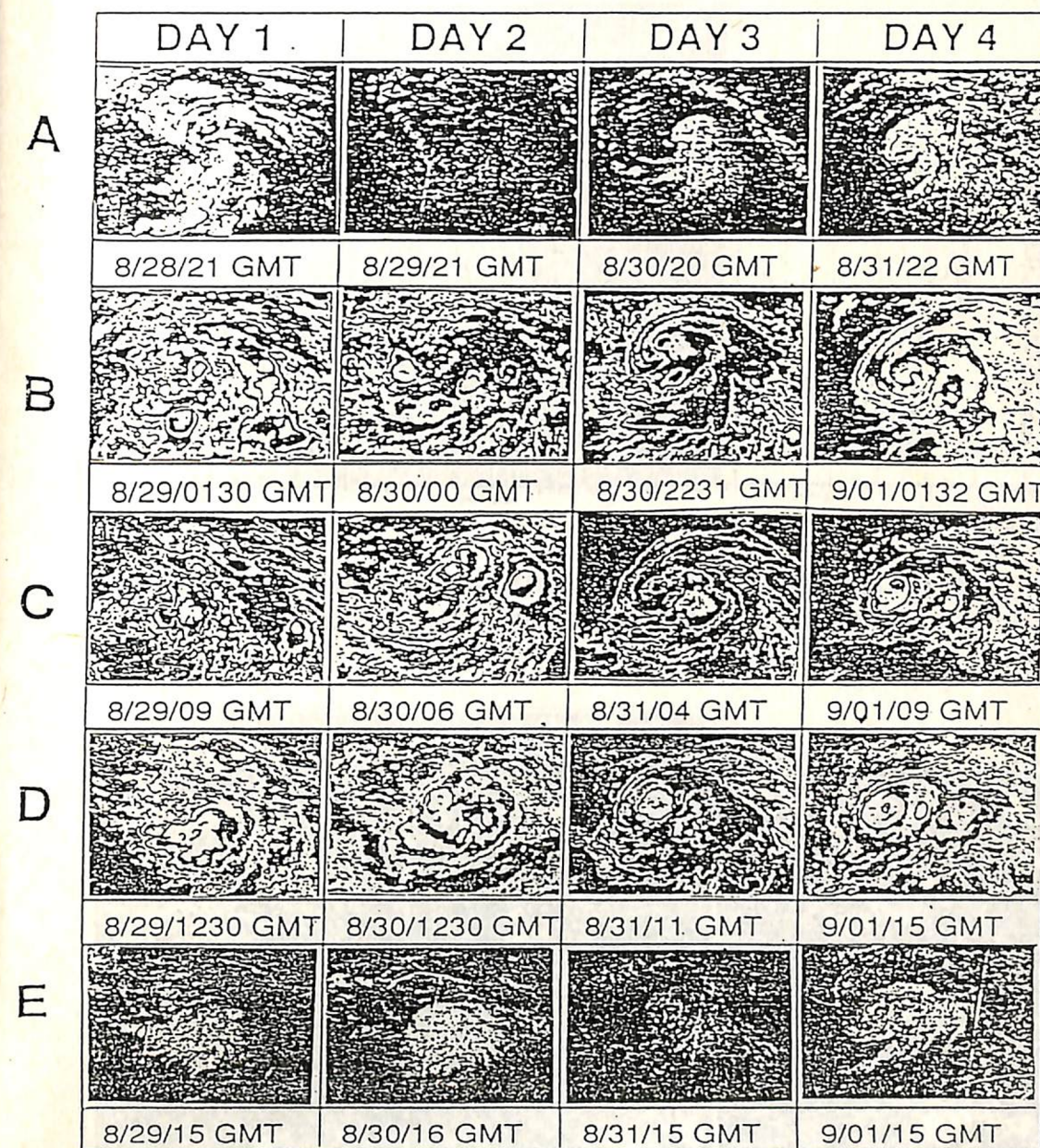


圖 5 顯示連續四天每日傍晚至次日清晨間每六小時的強化紅外線雲圖，颱風逐漸發展直至 9/01/09 GMT 時使出現颱風眼。

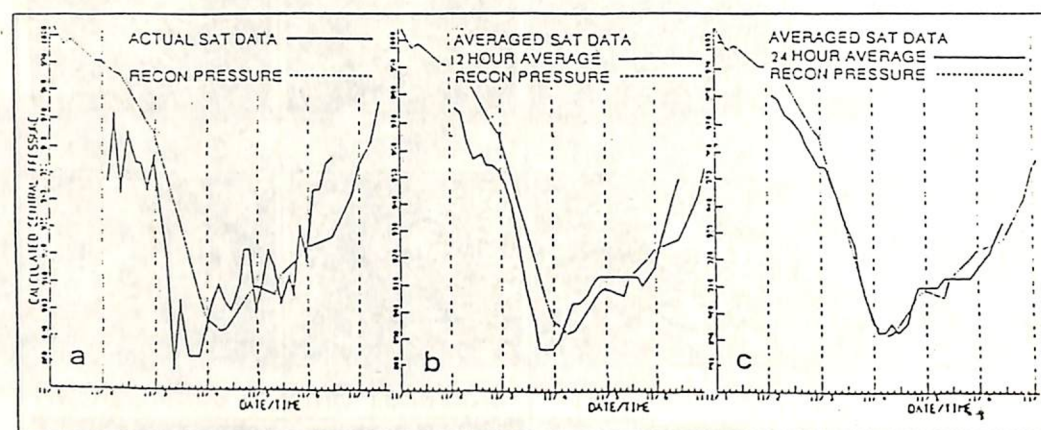


圖 6 顯示高解紅外線衛星資料經複雜的運算與偵察機測量後的壓力值（點線）作十二與二十四小時移動平均後的對照（對照對象為 1983 年迅速增強的颱風 Marge）。

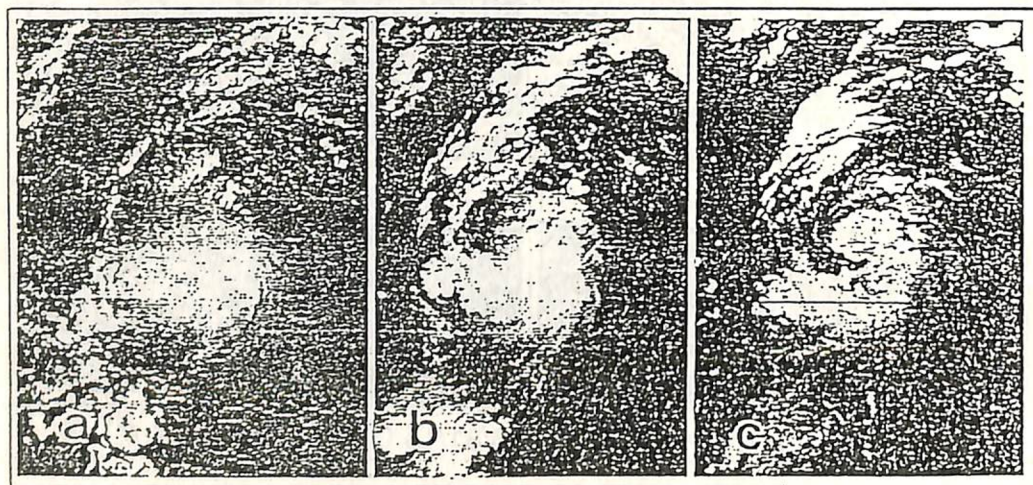


圖 7 就是熱帶風暴生命週期中每四小時的三階段（Gert, 1981）。圖 a，風暴的雲形因西邊短波槽的變遷而崩潰破裂。二小時後，b 圖的彎曲雲帶開始復發，接著 b 圖的二個小時後，在圖 c 我們發現強烈熱帶風暴的雲形。

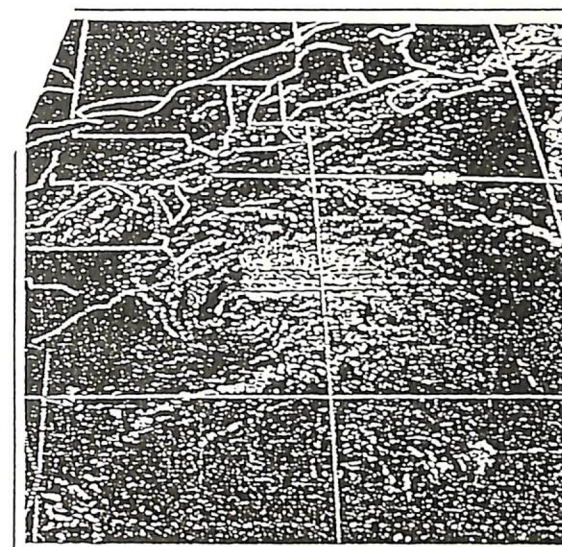


圖 8 可見光雲圖中的切割式雲狀

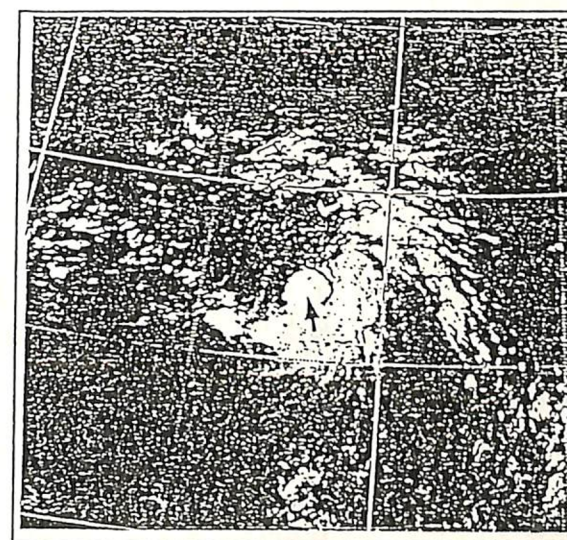


圖 9 可見光雲圖中的中央濃密覆蓋雲型