

TRMM 在颱風降雨強度之初步分析

鳳錦暉¹ 陳萬金² 李慶忠³

¹空軍氣象聯隊氣象中心

²國防大學中正理工學院應用物理系

³國防大學中正理工學院基礎課程系

摘要

本研究是利用 TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) 實驗衛星上所搭載的降水雷達 (Precipitation Radar; PR) 儀器針對 2001 年梧提 (WUTIP) 颱風與哈隆 (HALONG) 颱風在不同的生命期當中做降水強度與降水結構上的分析。並且利用 GMS-5 (Geostationary Meteorological Satellite 5) 衛星每小時獲得的紅外線衛星影像, 以連續時間的觀測, 做為觀測颱風變化情況的依據。若以颱風降雨在 1 mm/h 的值當作 storm height 的發展, 結果發現在初生期階段, 平均高度約在 17~18 公里; 在成熟期階段, 平均降低至 11~12 公里; 在消散期階段, 平均更降低至 8~9 公里。此外颱風眼牆隨高度傾斜程度的不同, 低層內傾而高層外傾, 甚至有從低層至高層完全向內傾斜的現象。

關鍵詞: TRMM、PR、storm height、降雨結構、降雨強度

一、前言

在熱帶海洋上令人印象最深刻的就是颱風了, 相信每個人都經歷過颱風, 其夾帶狂風及豪雨所造成的損失更是無法估計, 然而我們對颱風的瞭解卻很有限。尤其是在海洋上特別缺乏觀測的資料, 導致我們對颱風的降水結構一直無法更深入的探討。自 1960 年 TIROS (Television and Infrared Observation Satellite) 第一顆氣象衛星發射之後, 我們對海洋上的觀測才向前邁進一大步。不少的大型實驗計畫中, 也有針對熱帶海洋的觀測。像是在 1992 至 1993 年的 TOGA/COARE (Tropical Ocean Global Atmospheres/Coupled Ocean Atmosphere Response Experiment) 的實驗計畫中, 雖然主要是以海汽交互作用為研究主題, 但是卻也因此觀測到不少的颱

風, 加強了對颱風的認識與瞭解。隨著科技的進步, 對於資料之獲得也趨於多元化。目前對颱風觀測的文獻中大多是利用衛星微波頻道對颱風內部的組成做分析以利反演降水量。然雷達對於颱風內部的降水及運動場的結構較才能有進一步分析, 但僅限於颱風接近陸地時才能獲得觀測資料, 也因此, 才会有將雷達搬到太空上的構想。在 1970 年代中期開始有太空雷達的設計及規劃; 在 1980 年代執行了一系列有關太空雷達的計畫, 並提出了詳細的報告; 到 1990 年代中期透過了 Spaceborne Imaging Radar- C/X-Band Synthetic Aperture Radar (SIR-C/X-SAR) 及 TOPEX (Ocean Topography Experiment) 測高雷達進行有關降雨觀測, 也因此確定了以太空雷達進行降水觀測的可行性。TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) 實

驗衛星自 1997 年 11 月升空後，開始獲得大量的熱帶海洋資料。在 TRMM 實驗衛星上的降水雷達 (Precipitation Radar; PR) 儀器是第一具裝載於衛星上的雷達，其具有 (1) 可在陸地或海上進行降雨的估算不受背景的影響 (2) 雷達測量可提供垂直剖面的資料 (3) 雷達資料可用來修補微波資料不足的地方及其精度等優點，所以能提供三維空間的垂直結構及分佈，對颱風降雨強度及其降雨結構能有更深一層的瞭解。

以往颱風在海上階段，較少有被觀測到的機會。藉由 TRMM 實驗衛星，以約 90 分鐘繞地球一圈為週期，一天繞地球約 16 圈的密集觀測，收集相當大量位於海洋上的颱風資料。利用這些資料對海洋上的颱風作一分析及歸納，藉以瞭解颱風在不同階段的降雨結構及強度，希望能呈現颱風在海洋上的原始風貌，以做為未來在颱風方面定量降水估算的參考。

二、研究方法

(一) 颱風強度的分類

為瞭解颱風在不同階段的降雨強度及結構，必須先去判定颱風的強度。一般而言颱風的分類是依照颱風的暴風半徑與最強風速，而風速是當作強度的指標。本研究根據 Anthes (1982) 將颱風的生命週期分為初生期、成熟期及消散期這三個時期，因此吾人在颱風的分類上只利用颱風強度作為分類的標準，並利用 JTWC (Joint Typhoon Warning Center) 發佈的颱風警報中之最強風速資料作為分類的依據，將其所定義之熱帶氣旋剛發展成為熱帶低壓與輕度颱風歸類為初生期，之後颱風會逐漸發展成為中度颱風、強烈颱風與甚至是超級強烈颱風歸類為成熟期，隨後颱風逐漸減弱，這段時期就歸類為消散期。由於環

境場對於颱風的發展會有相當影響，所以在分類上會遇到有颱風從強烈颱風或中度颱風減弱至輕度颱風，過後一段時間又增強至中度颱風的案例，在本研究中將此種特殊案例除去，以便得到完整的概括性。

本研究是利用 PR 產品 2A25 資料中的降雨率資料為主，因為 PR 的刈幅 (swath) 較小，有時無法完整掃瞄到颱風的眼及眼牆部分，因此在篩選時特定將資料鎖定在含有眼牆及眼或是颱風中心定位有在 PR 刈幅之內。將選定的個案資料作水平面降雨強度和垂直剖面的分析，以瞭解當時颱風的降雨強度及結構。

(二) 輔助性資料

因為衛星上的 PR 資料屬於『瞬間』的觀測，相對於颱風的生命週期而言就顯得渺小。依 Willoughby, H. E. (1984) 指出颱風內部的環流型態與結構具有中尺度系統的特徵，甚至是外圍的螺旋雲帶上仍可發現對流胞。中尺度對流系統時間尺度的特徵可以從短至 30 分鐘，長甚至可達十幾小時，系統生命期的長短取決於維持機制。所以本研究就利用 GMS-5 (Geostationary Meteorological Satellite 5) 紅外線頻道雲圖資料加強 PR 瞬間資料的延伸性。藉由紅外線頻道逐時的影像觀測颱風的變化，並配合 TRMM 衛星上之 VIRS (Visible and Infrared Scanner) 儀器同步拍攝到的可見光及紅外線影像的強化，追蹤眼牆對流雲係的發展以及維持情形。

三、結果與討論

(a) 梧提 (WUTIP) 颱風個案

2001 年 8 月 26 日於太平洋上生成熱帶低壓，並於 28 日形成梧提颱風，持續往東北方向行進。在其生命過程中，被 PR 掃瞄過共有 8 筆資料，其軌道號碼分別為

21573、21578、21593、21608、21619、21623、21666 和 21667。而這些資料當中屬於颱風初生期的資料有 2 筆，屬於成熟期的資料有 4 筆，屬於消散期的資料有 2 筆。表 1 為梧提颱風期間 TRMM 衛星軌道編號相對應的時間及當時颱風的最大風速。圖 1 為梧提颱風之行經路徑，並可以看到以紅色為主的線段以及與藍綠為主

的兩種線段，清楚劃分出颱風的三個生命階段。該颱風於 8 月 29 日 12Z 至 30 日 00Z 期間內發展為超級強烈颱風，但自維持的時間不長，相信在這背後有其一定的環境因素與發展機制的存在，但不在本研究主要的範圍內，所以並未深入探討。圖 2 為梧提颱風 GMS-5 衛星之紅外線連續雲圖。

表 1 梧提颱風期間 TRMM 衛星軌道編號相對應的時間及當時颱風的最大風速。

軌道號碼	時間 (mmdd/hhmm)	風速 (kt)	備註
21573	0827/0148Z	35	初生期
21578	0827/1002Z	40	初生期
21593	0828/0907Z	80	成熟期
21608	0829/0811Z	125	成熟期
21619	0830/0042Z	125	成熟期
21623	0830/0714Z	120	成熟期
21666	0902/0111Z	55	消散期
21667	0902/0250Z	55	消散期

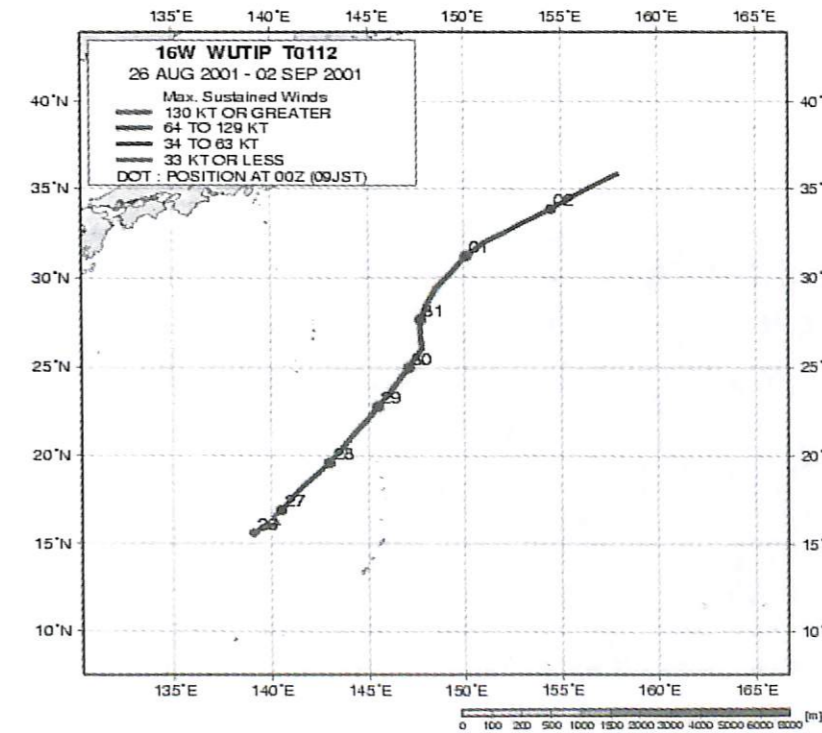


圖 1 梧提颱風行經之路徑。(摘自 JAXA 網站)

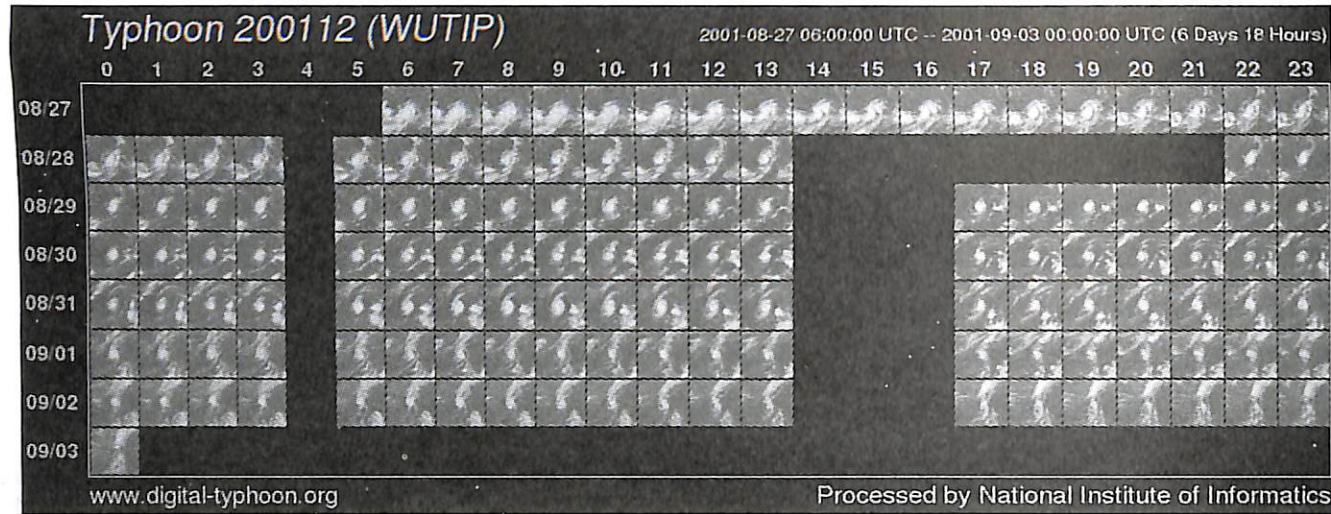


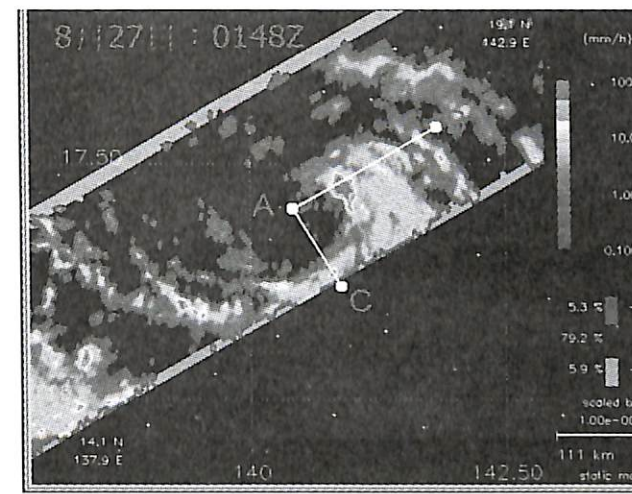
圖 2 梧提颱風之 GPS-5 紅外線衛星雲圖時間連續圖。(摘自 digital-typhoon 網站)

為了能進一步瞭解在這段時期內的降水強度與特徵，以及在垂直方向上的分佈與異同，利用 PR 的資料可以輕易達成。一般雷達在判斷 storm height 時，是以 10dBZ 為判斷的標準。相對以雷達的通用式 ($Z = 300R^{1.4}$) 來換算，降雨率相當於 0.088 mm/h。由於 PR 的波長 2.17 cm，對於所能偵測到的最小降雨為 0.5 mm/h，因此在本研究中就訂定以 1 mm/h 降雨率所能出現的最高高度當作是 storm height。接著我們來看颱風的初生期，利用 PR 之 2A25 產品所反演出的降雨率以及 VIRS 所拍攝之強化過的紅外線雲圖 (圖 3)，我們可以發現在雲層的覆蓋下，降雨的區域卻是如此的零散，而降雨較大的區域有超過 100 mm/h 的降雨。接著將分別沿 AB 與 AC 連線做降雨的垂直剖面分析，由圖 4 可看出 AB 剖面在強降雨的部分，其發展高度低於第 20 層 (換算成高度約為離地面 15 公里)，整體雨勢集中在地面到 5 公里的高度；AC 剖面的降雨垂直高度和強度皆不如 AB 剖面，但兩者的雨勢都集中在地面至高空 5 公里之間。就中尺度對流的觀點而言，颱風內部林立的對流系統，多屬於獨立發展。另一項值得一提的就是，

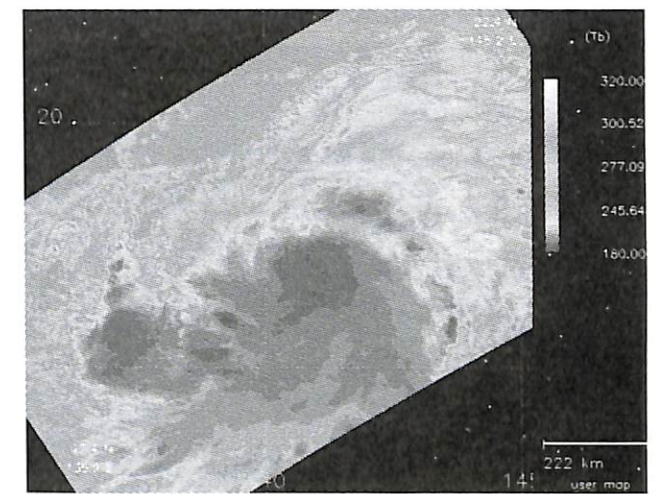
在颱風的內部結構中發現到如同 Houze(1997) 所陳述之對流降水與層狀降水的特徵，也就是有亮帶 (bright band) 的存在 (如圖 5)，就如同颱風線的降雨型態。進入成熟期之後 (圖 6) 此颱風屬於 wave number 1 的型態。降雨強度增強，降雨率大於 100 mm/h 的範圍增廣，甚至有超過 100 mm/h 的區域，如圖中箭號所標示的區域。由圖 7 中 AB 與 AC 剖面觀察在眼牆與螺旋雲帶上的對流發展，發現在眼牆的對流要比雲帶上的對流為弱，且高度也較低，雖然降雨率都達到 100 mm/h，但主要的強降雨區域高度已經降低在地面至 2.5 公里之間，由此可推論眼牆的對流應當在減弱，此時的對流系統應處於消散階段。另外，AC 剖面上眼牆的對流顯示也在減弱，雲帶上的對流則剛形成，而且中心強降雨區域也剛生成。此時雲帶上重新組織的對流，推測將可能取代眼牆，完成一次眼牆內縮。但同時也發現在整體的垂直降雨結構之高度比初生期要低很多，約在 8 ~ 10 公里之間。另一方面，在張等人 (2002) 在對賀伯颱風的眼牆環流結構分析中發現眼牆有隨高度往外側傾斜的現象，以及低層內傾高層外傾的特殊現象。分析梧提颶

風眼牆的部分，也發現到相類似傾斜的現象，但卻是向內傾斜。另外，在圖 8 可以看到低層內傾高層外傾的這樣的特殊情形，甚至在 (b) 和 (c) 中更明顯看到其向內傾斜程度相對於垂直軸達到 60 度。依據 Emanuel (1986) 利用理想化的模式探討中指出，當空氣塊於邊界層內混合均勻達飽和時，在對稱中性穩定的大氣環境條件之下，位於邊界層之空氣塊將可沿著等角動

量 (相當位溫) 面上升，促使眼牆傾斜的對流形成。但張等人指出低層內傾高層外傾現象發生的原因可能和地形有關，但在本研究的個案中，是出現於海上的颱風。因此出現在賀伯颱風現象，與梧提颱風個案所發現的現象，其發生的原因應是源自於颱風本身，而非地形影響。至於是不是 Emanuel 所提出的機制，仍須後續的研究探討。

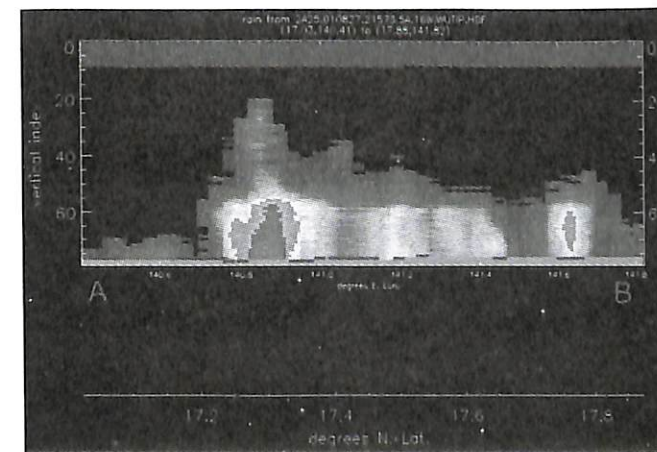


(a)

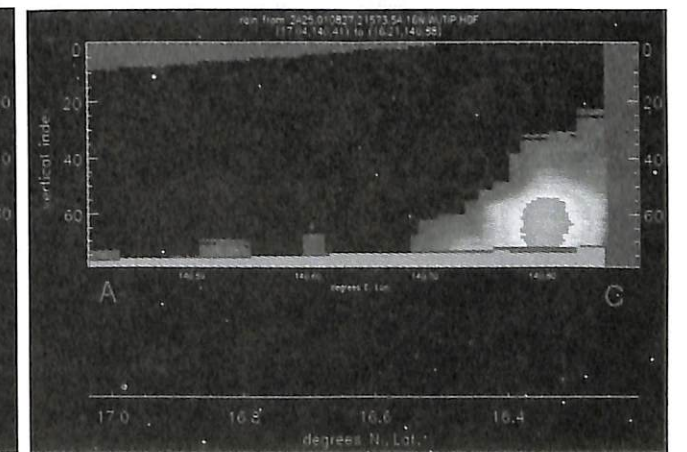


(b)

圖 3 8 月 27 日 0148Z (a) PR 在高度 2 公里所反演的降雨率，(b) 同一時間的 IR 強化後之雲圖。

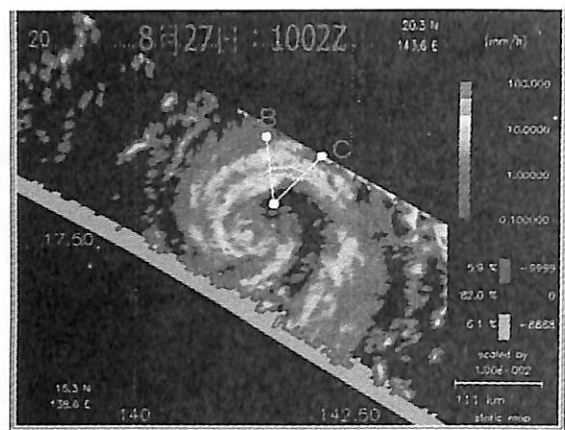


(a)

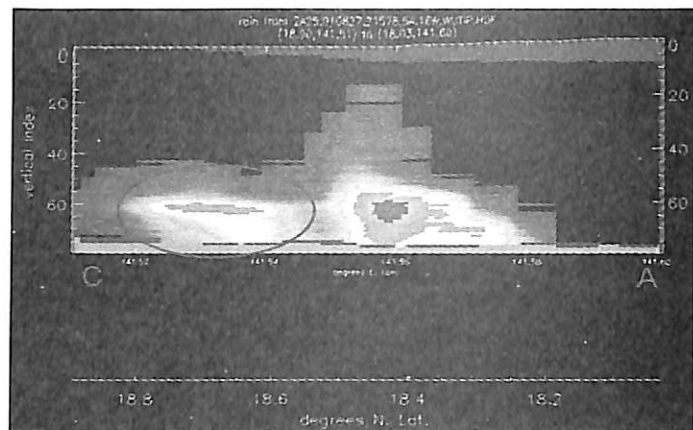


(b)

圖 4 (a) 為圖 3a 之 AB 剖面。(b) 為圖 3a 之 AC 剖面。



(a)



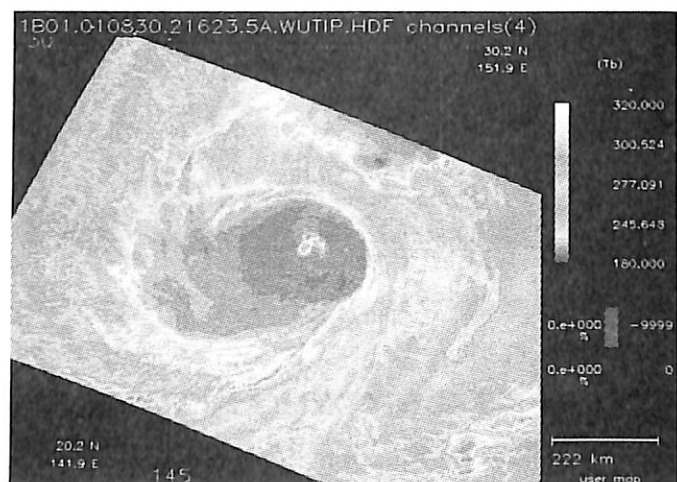
(b)

圖 5 (a)為梧提颱風在軌道號碼 21578 地面 2 公里之 PR 反演降雨分佈，(b)為 AC 線段之垂直剖面。

之後颱風逐漸進入消散期，此時降雨的強度明顯減弱，且降雨區域分佈也較零散(圖 8)。AB 剖面的降雨垂直結構(圖 9)顯示大部份的降雨率為 10 mm/h，顯示降水已趨緩，且平均高度也減至 7 公里，比成熟期時更為降低。

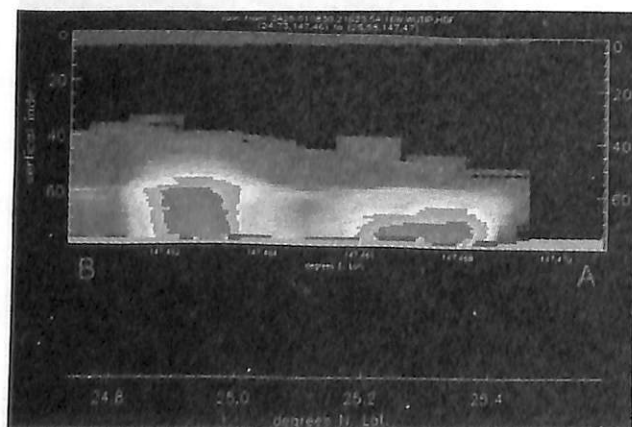


(a)

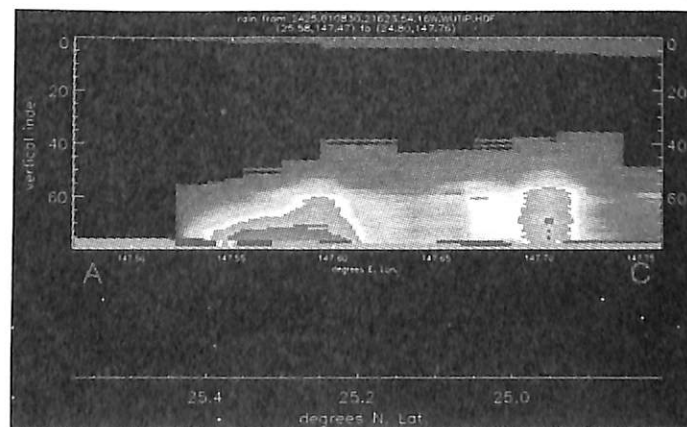


(b)

圖 6 同圖 3，但時間為月 30 日 0714Z。

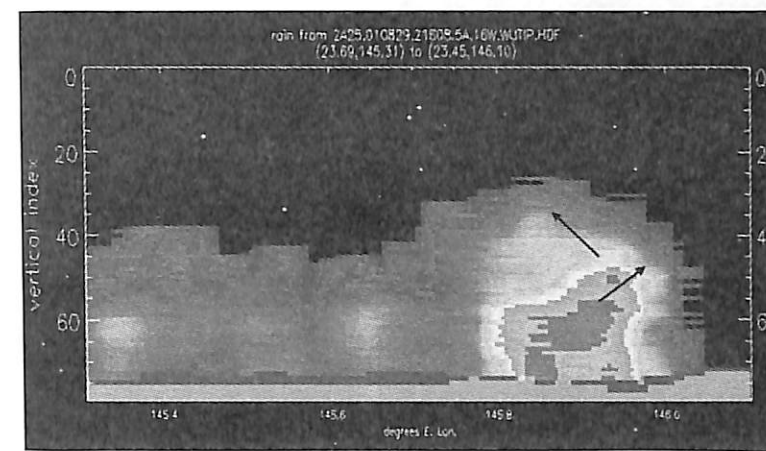


(a)

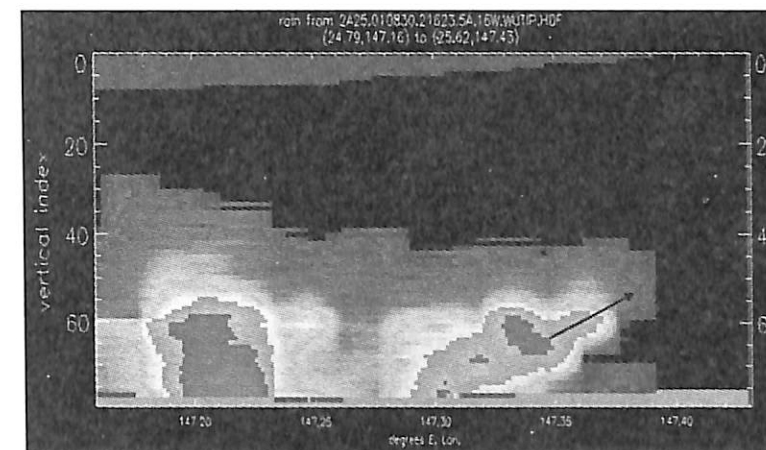


(b)

圖 7 同圖 4，但時間為 8 月 30 日 0714Z。



(a)

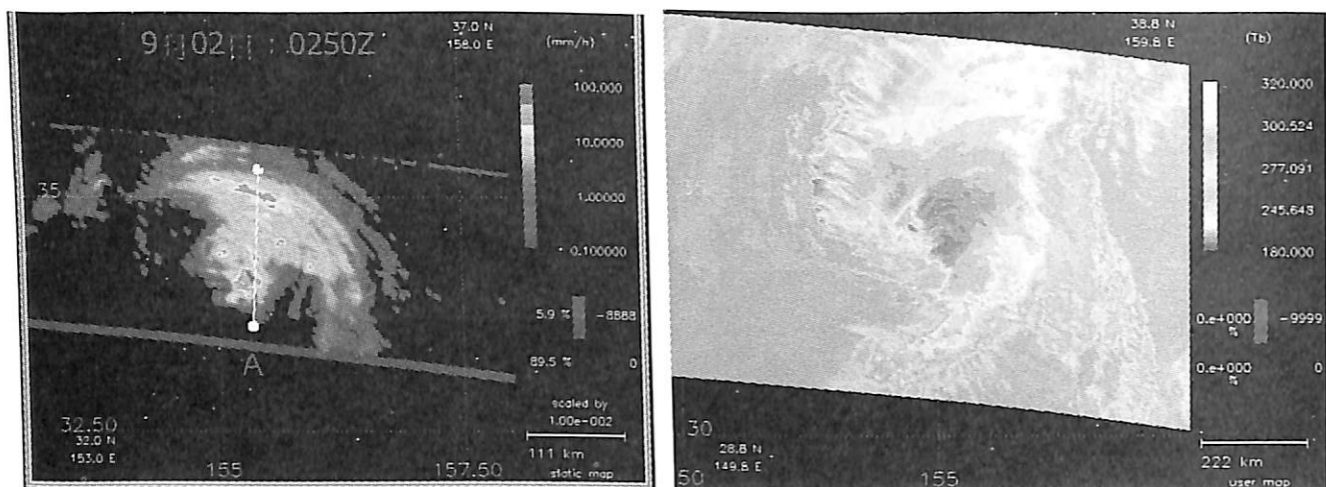


(b)



(c)

圖 8 (a)為軌道號碼 21608 之 PR 剖面，(b)和(c)為軌道碼 21623 之 PR 剖面。



(a) (b)

圖 9 同圖 3，但時間為 9 月 2 日 0250Z。

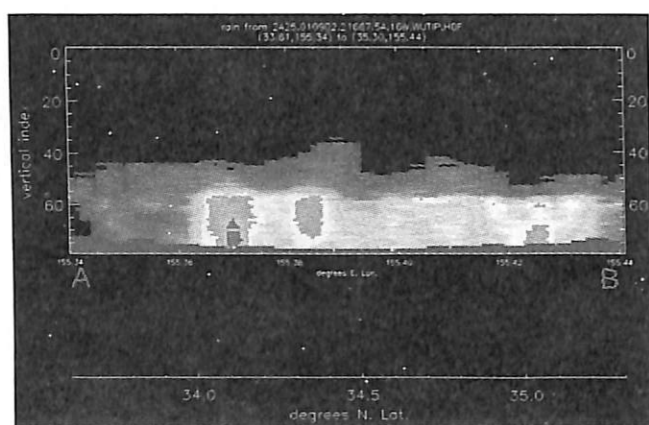


圖 10 同圖 4，但時間為 9 月 2 日 0250Z

(b) 哈隆 (HALONG) 颱風個案

2002 年 7 月 7 日於海面上生成為熱帶低壓，並於 8 日形成颱風，之後往西北方向前進，並於 14 日轉變為向東北方向前進 (圖 10)。表 2 為哈隆颱風期間 TRMM 衛星軌道編號相對應的時間及當時颱風的最大風速，其中屬於初生期的資料有 1 筆，成熟期 3 筆，消散期 1 筆。圖 11 為哈隆颱風 GMS-5 紅外線連續雲圖。

表 2 軌道號碼相對應的時間及最大風速

軌道號碼	時間 (mmdd/hhmm)	風速 (kt)	備註
26487	0708/0829Z	40	初生期
26518	0710/0813	95	成熟期
26549	0712/0758	105	成熟期
26565	0713/0840	135	成熟期
26599	0715/1322	55	消散期

同樣地，圖 12-14 為哈隆颱風在各生命時期 PR 所反演的降雨量及其垂直剖面。值得注意的是，哈隆颱風在初生期降雨發展高度比梧提颱風還要高，強降雨的區域也比梧提颱風範圍寬廣。從圖 12(c) 中對流的發展可明顯的看出其強度相當旺盛，且降雨率大於 100 mm/h 的區域呈現傾斜狀態，而非直立的型態。

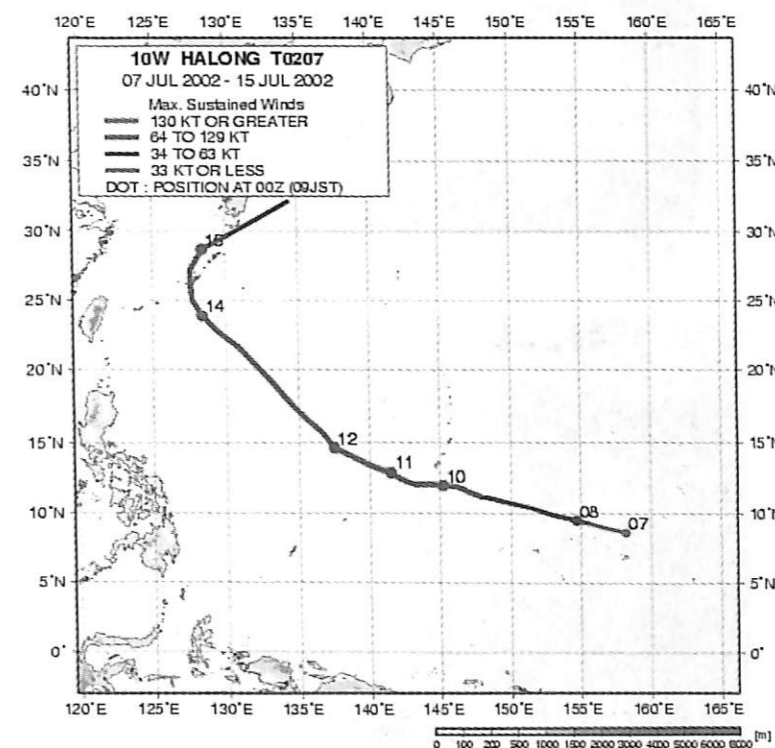


圖 11 哈隆颱風行經之路徑。

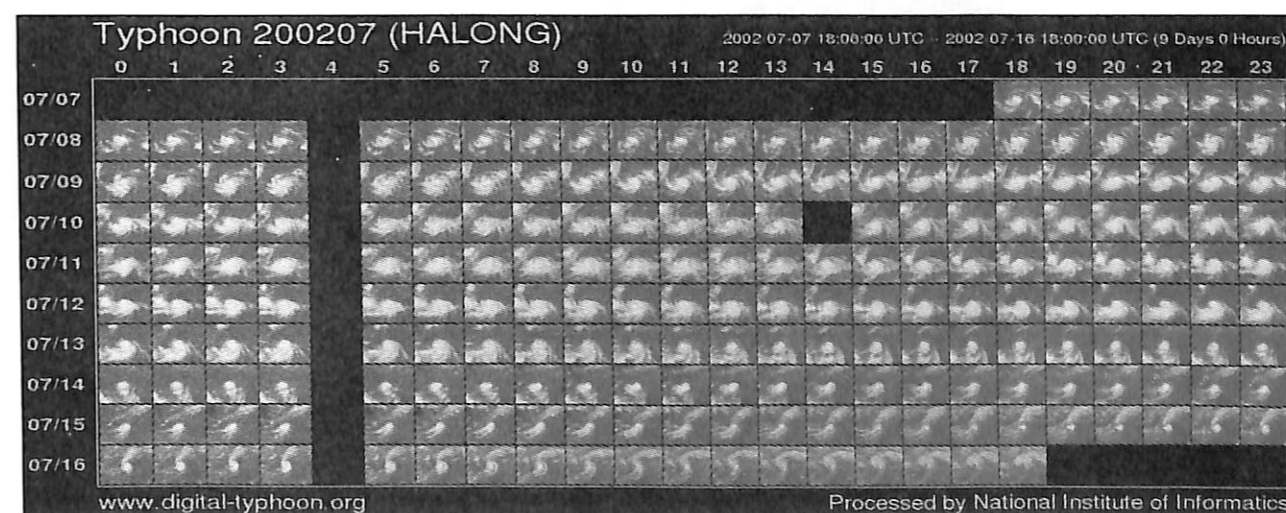
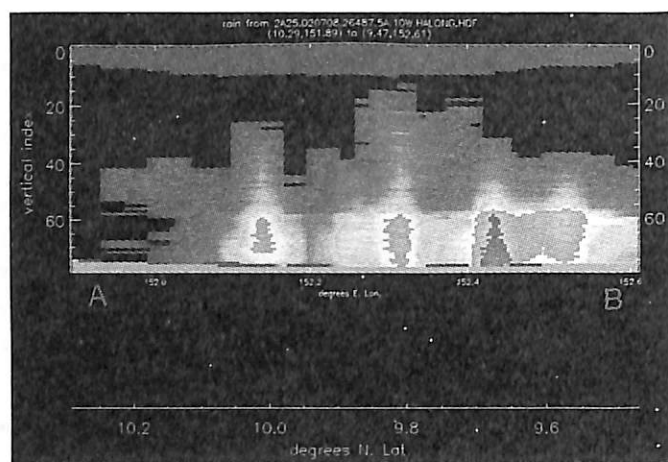


圖 12 哈隆颱風 GMS-5 紅外線衛星連續時間之雲圖。(摘自 digital-typhoon 網站)



(a)

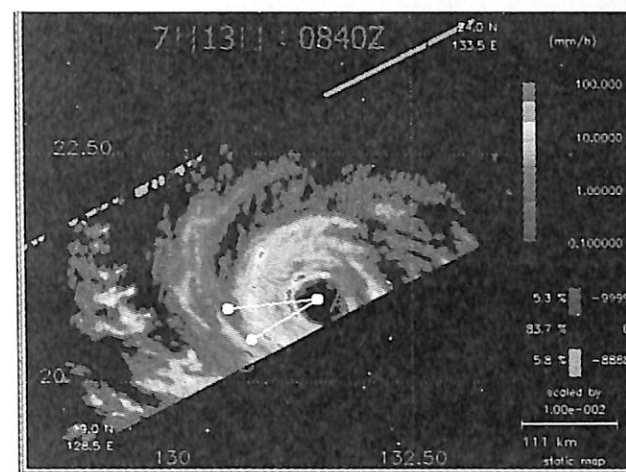


(b)

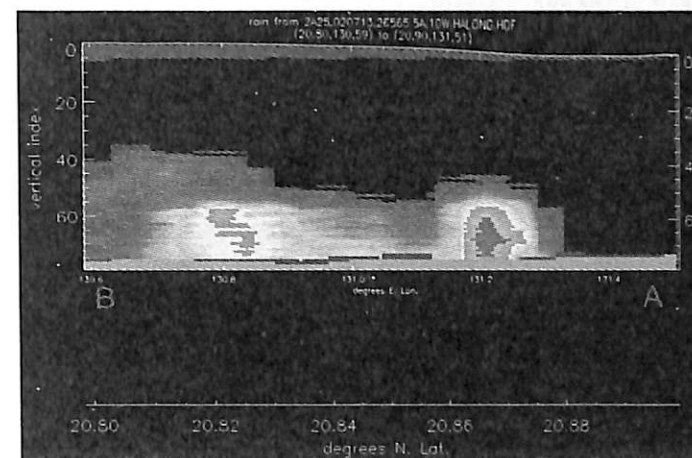


(c)

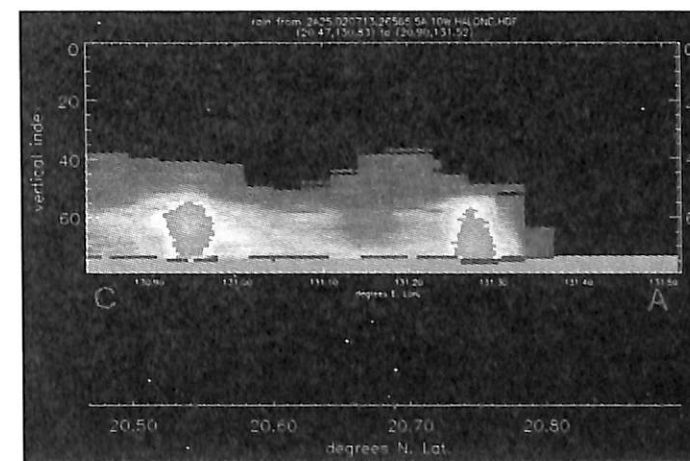
圖 13 (a) 同圖 3a, (b)、(c) 同圖 4, 但時間為 7 月 08 日 0829Z 的哈隆颱風。



(a)

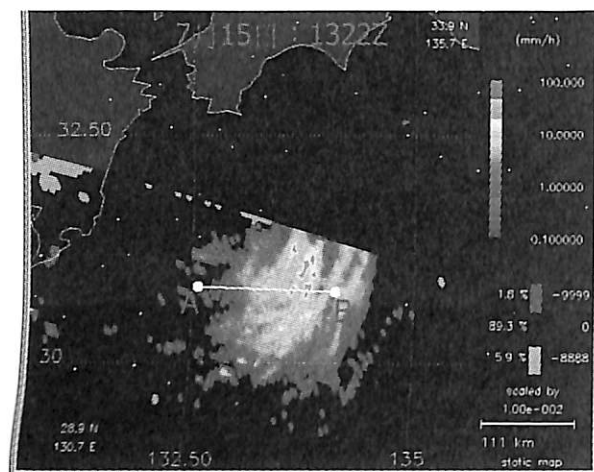


(b)

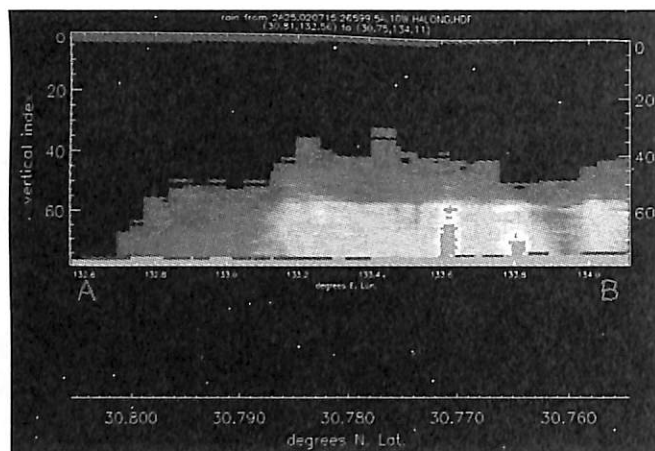


(c)

圖 14 同圖 13, 時間為 7 月 13 日 0840Z。



(a)



(b)

圖 15 同圖 11，時間為 7 月 15 日 1322Z。

四、結論

由以上兩個颱風的個案分析，對於颱風在各個階段的特性，可概略歸納如下：

(a) 初生期：

1、降水區域散亂，且降水區域之分佈與紅外線雲圖上的最低溫度之分佈雖然是同相位，但並非全部都有降雨。

2、在降水結構方面，以定義之 storm height 而言可以達到 17~18 公里。

3、在降水強度方面，處在這時期的降水偏弱，但仍有對流系統產生，降水強度就會加強。

(b) 成熟期：

1、雲系相當完整，而降水區域變的有

組織，紅外線雲圖中之最低溫度分佈相當符合。

2、在降水結構上明顯發現有降水區域的 storm height 降至 11~12 公里。

3、在降水強度上，這時期普遍比初生期要來的強，且範圍也變大，而眼牆附近仍是最強的降雨區域。

(c) 消散期：

1、這時期的颱風雲系環流仍可見，但降水區域的分佈並不如成熟期來的一致。而高層雲係增多，但並無降水。

2、降水結構與成熟期相似，但 storm height 降至 8~9 公里。

3、降水強度減小，獨立的對流發展，但無明顯的強降水產生。

以往常藉由 IR 的雲圖來辨別是否會有降雨產生，在本研究中可以清楚的發現，IR 所對應到的降雨區並不是都有降雨，而且降雨強度的分佈在 IR 雲圖中是無法判別的。經由此一新的儀器，讓我們更瞭解天氣系統內部降雨的分佈狀況，也可當成是分析天氣系統的一種指引，指引著發現有趣的天氣現象與特殊的天氣系統。再者，颱風在不同時期的降水，在垂直高度上有明顯的不同，降水強度也有顯著變化。根據過去的理論基礎，眼牆結構的變化與颱風未來的強弱有關，但限於時間的解析較弱，無法有力的證明。

五、未來展望

PR 對於颱風在海上階段時，便能提供良好的觀測，尤其是垂直結構，但對 PR 反演值仍需校驗，以滿足實用性。未來將累積颱風個案，希望能對海上的颱風在降水強度及結構上能有更深一層的認識，以便提昇對颱風之預報。此外 PR 可與其它衛星資料交互運用以彌補時間解析之不足。未來亦可利用此一雷達之特性校驗地面雷達，以發展適合區域特性之 Z-R 關係式。

六、參考文獻

1. Anthes, R., 1982: Tropical Cyclones, Boston, American Meteorological Society.
2. Hiroshi Kuroshi, H. Kumagai, H. Nakatsuka, K. Oikawa, K. Nishikawa, K. Okamoto, M. Kojima, M. Okumura, T. Kozu, and T. Kawanishi, 2001: Development of Precipitation Radar Onboard the Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM) Satellite, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol. 39, No. 1, 102-116.

3. Hyo-Suk Lim, Gi-Hyuk Choi, and Han-Dol Kim, 2000: Characteristics of Typhoon Jelawat Observed by OSMI, TRMM/PR and QuikSCAT, Journal of the Korean Society of Remote Sensing, Vol. 16, No. 4, 293-303.
4. Kummerow, C., W. Barnes, T. Kozu, J. Shiue, and T. Simpson, 1998: The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Sensor Package, J. Atmos. Oceanic Technol., Vol. 15, 809-817.
5. Kummerow, C., J. Simpson, O. Thiele, W. Barnes, A. T. C. Chang, E. Stocker, R. F. Adler, A. Hou, R. Kakar, F. Wentz, P. Ashcroft, T. Kozu, Y. Hong, K. Okamoto, T. Iguchi, H. Kuroiwa, E. Im, Z. Haddad, G. Huffman, B. Ferrier, W. S. Olson, E. Zipser, E. A. Smith, T. T. Wilheit, G. North, T. Krishnamurti, and K. Nakamura, 2000: The Status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after Two Years in Orbit, J. Appl. Meteor., Vol. 39, 1965-1982.
6. Stanley Q. Kidder and Thomas H. Vonder Haar, 1995: Satellite Meteorological, Academic Press.
7. Tutorial for reading Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Data Products, 1998, NASA/GSFC.
8. http://www.eorc.nasda.go.jp/TRMM/typhoon/index_e.htm
9. Houze, R. A., 1997: Stratiform Precipitation in in Regions of Convection: A Meteorological Paradox ?, Bull. Amer. Meteor. Soc., Vol. 78, 2179-2196.
10. Emanuel, K. A., 1986: A n air-sea

interaction theory for tropical cyclones.

Part I: Steady-state maintenance, J. Atmos. Sci., Vol. 43, 585-604.

11. 張保亮、周仲島、李文兆，2002：賀伯颱風(1996)中尺度分析：第一部份：眼牆環流結構，大氣科學，第30期，第201-216頁。
12. Willoughby, H. E., Closs, J. A., and Shoreibah, M. G., 1982: Concentric eye wall, secondary wind maxima, and the evolution, J. Atmos. Sci., Vol. 39, 395-411.

TRMM on Elementary Analysis of Rainfall Intensity of Typhoon

¹Cing-Hui Feng, ² Wann-Jin Chen, and ³ Cing-Li

¹Weather Center Weather Wing, CAF ROC

²Dept of Applied Physics of Chung Cheung Cheng Institute of Technology, Nation Defense University

³ Dept of General Courses of Chung Cheung Cheng Institute of Technology, Nation Defense University

ABSTRACT

The Precipitation Radar of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) is the first space-borne radar that is capable of resolving the detailed vertical structure of rain profile. The life cycle of tropical cyclones consist of three stages such as the genesis stage, the mature stage and the decaying stage (Anthes, 1982). In all my collecting dataset, the data of WUTIP and HALONG typhoons have over the life cycle, so we use them to analyse the intensity and rain profile of the life cycle of tropical cyclones. Besides, the GMS-5 has one image ever per hour, use them to emphasis on temporal continuation of tropical cyclones.

We define the rain rate of 1 mm/h as the storm height. Resulting the average altitude of the storm height is 17~18 km in the genesis stage, even higher than 18 km. In mature stage, the average altitude of the storm height is 11~12 km. In the decaying, the average altitude of the storm height is 8~9 km. Aspect of the intensity of rain rate, convective cell or group of convective cells is the main in the genesis stage. In the mature stage, all of the group of convective cells convert into the eye wall and become more organization. In the decaying stage, the main behavior is the stratiform precipitation and shallow convection.