

TRMM 衛星 PR 資料於海上颱風 降雨特徵之研究

李慶忠¹ 鳳錦暉² 劉崇治² 石大明¹

¹國防大學中正理工學院

²空軍氣象聯隊

(中華民國九十三年十一月三十日收稿；中華民國九十四年三月二十八日定稿)

摘 要

研究中分析 1998~2002 年 Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) 衛星上裝載的 Precipitation Radar (PR) 於西北太平洋所觀測的颱風資料。目的在探討海上颱風於不同生命期中降雨強度與結構的特徵。同時，利用日本 Geostationary Meteorological Satellite 5 (GMS-5) 衛星所提供的逐時紅外線觀測資料，增加颱風觀測的時間解析度；以及應用美國太空總署 TRMM 辦公室提供之 TRMM Microwave Imager (TMI) 2A12 微波資料反演降雨產品，輔助對颱風中心(眼牆)的定位。研究結果發現，若以 PR 2A25 降雨產品計算的 1 mm/h 降雨強度定義颱風的發展高度，在初生期階段，平均高度在 15.3 公里，最高可達 18 公里以上；在成熟期階段，平均高度降低至 12.9 公里，但是有對流塔的出現，就會發現達到 18 公里的高度，如果將具有對流塔的個案除去，其平均高度在 12.2 公里；在消散期階段，平均高度更降低至 8.6 公里。在降雨特徵方面，初生期主要是以對流胞和對流集合體(convective complex)為最強的降雨；進入成熟期之後，這些對流成為有組織的對流系統，並且眼牆降雨是這時期最主要且最強的降雨區域；消散期的颱風主要是以層狀的降雨再加上淺對流為主。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、颱風降雨特徵

一、前 言

自 1960 年 Television and Infrared Observation Satellite 1 (TIROS1) 第一顆氣象衛星發射之後，人類對海洋的觀測便向前邁進了一大步。之後，不少的大型實驗計畫也陸續針對

熱帶海洋做科學觀測，例如 The Tropical Ocean Global Atmosphere Coupled Ocean Atmosphere Response Experiment (TOGA/COARE) 的實驗計畫即是以海氣交互作用為研究主題，同時也因為獲得了不少的颱風觀測資料，所以加強了對颱風的認識與瞭解。

隨著衛星科技的進步，對於以颱風為研究主題的資料獲得也趨於多元化，其中，衛星微波資料在降雨方面的應用研究是近代科學研究的主流之一。目前在有關颱風觀測的文獻中，大多是利用衛星微波頻道對颱風內部的組成做分析，以利反演降雨量。然而，雷達才能進一步分析颱風內部的降雨結構與運動場，更是分析颱風結構的利器。但陸基雷達僅限於颱風接近陸地時才能獲得觀測資料，無法對外海的颱風做有效觀測，因此，才會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。到 1990 年代中期，透過了 Shuttle-Imaging Radar C (SIR-C)、X-SAR (Synthetic Aperture Radar) 及 TOPEX (ocean topography experiment) 測高雷達進行有關降雨觀測，確定了以太空雷達進行降雨觀測的可行性。

於 1997 年 11 月 27 日由美、日合作發射之 Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) 衛星上的 Precipitation Radar (PR) 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而不受背景的影響；(2)雷達測量可提供降雨垂直剖面的資料；(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，所以能夠提供降雨的三維分佈資訊，對於颱風的降雨強度及其降雨結構能有更深一層的瞭解 (Toshiaki 等人, 2001)。

TRMM 衛星的主要任務為對地球南北緯 40 度間的熱帶區域作降雨觀測，而觀測資料可用來研究如聖嬰現象等氣候異常的原因，並可改進全球環境變遷模式的降雨物理機制以及研究熱帶降雨系統動力與熱力變化的過程。TRMM 計畫的設計是因為全球的雨水大部份落在廣大海洋所覆蓋的熱帶地區，其釋放的潛熱影響全

球環境變遷甚鉅，而研究熱帶降雨過程預期對了解全球氣候與環流變化有很大的幫助。TRMM 衛星軌道高度在 2001 年 8 月之前為 350 km，以 35 度傾角、周期約 92 分鐘繞地球運轉，進行預計為期三年的熱帶地區降雨觀測。在 2001 年八月之後為延長其任務壽命，衛星高度已提高到 402 km。除了 PR 之外，TRMM 衛星上其他觀測降雨的儀器還有微波成像儀 (TRMM Microwave Imager, TMI)、可見光與紅外線探測儀 (Visible and Infrared Scanner, VIRS)、雲及地球的輻射能系統 (Clouds and the Earth Radiant Energy System, CERES)、閃電觀測儀 (Lightning Imaging Sensor, LIS) 等設備 (Kummerow 等人, 1998)。

Daniel 等人 (2002a, b) 利用 TRMM 衛星上的儀器對於颱風眼牆和雨帶的回波強度、冰晶散射與閃電做定量的描述。而 Lim 等人 (2000) 則利用 PR 以及 Quick Scatterometer (QuikSCAT) 和 Korea Multi-purpose Satellite/ Ocean Scanning Multispectral Imager (KOMPSAT-1/OSMI) 的衛星資料對於在成熟階段的傑拉華 (Jelawat) 颱風進行分析，並指出 PR 的觀測中，可以很清楚的分辨出眼牆對流、層狀區域和對流雨帶。上述研究成果均顯示 TRMM 衛星 PR 資料的解析度能夠觀測到颱風內部的中尺度系統，所以本文將進一步利用 TRMM 衛星 PR 資料分析颱風之降雨強度及其結構進行分析。

颱風在各個生命階段中具有不同的降雨型態，此外受地形等因素之影響，其內部結構會有所改變，降雨型態也隨之變化。根據 Anthes (1982) 所提出的說法，颱風的生命期有三個階段：1、初生階段：在往東的氣流中，隨著波的擾動是一群相對配置混亂的雲系和飆線。2、成熟階段：是一個具有大範圍軸對稱的強旋轉環

流所組成，而在其低壓中心的雲系組織相當完整。3、消散階段：環流減弱並向外擴大，相對於中心也變得不對稱。一般雷達觀測通常會著重於颱風的成熟期，而對初生期或消散期的颱風較少注意。但由於颱風在不同的生命階段有不同的降雨型態，所以若能掌握颱風各個階段的降雨特徵，將有助於颱風定量降雨的預報。

本文將以 PR 降雨反演值分析西北太平洋海上颱風降雨強度及其特徵，並輔以 TMI 微波資料和 GMS-5 的紅外資料以增加資料在時間及空間上的解析度。之所以將研究範圍限制在海上，主要是要探討颱風降雨強度及結構的原始特徵，有別於受陸地影響後之情形。這些瞭解將有助於未來探討颱風降雨強度受地形影響之研究。

二、資料來源與介紹

針對颱風降雨強度及結構分析，本文所使用的衛星資料包括 TRMM 和 GMS-5 兩種衛星資料，另外還有 JTWC (Joint Typhoon Warning Center) 發佈的颱風報告，用來分析 1998~2002 年間西北太平洋地區所發生的海上颱風降雨特徵。JTWC 是 NPMOC (Naval Pacific Meteorology and Oceanography Center) 中的一個部門，隸屬於美國國防部。主要的任務是監測太平洋及印度洋上生成的熱帶氣旋，並提出警告。

(一) PR 資料

PR 為主動式的相位陣列雷達，具有 128 個單元，每個單元都包含了發射與接收機制。PR 所使用的頻率為 13.8GHz (相當於波長為 2.17 cm)，最小可量測到的降雨強度為 0.5 mm/h，垂直解析度為 250 公尺，在星下點的水平解析度為 4.3 公里，而刈幅(swath)寬 215 公里 (如圖

1)，每個所解析的體積掃描取樣數為 64 筆獨立樣本(Toshiaki 等人, 2001)，但自 2001 年 8 月之後，因衛星提升至 402 公里其星下點解析度而變為 5 公里，而刈幅亦變寬為 220 公里，相關的參數如列表一。

TRMM 衛星資料以階層式資料庫管理方式分為 Level 1、Level 2、Level 3 與 Level 4 這四層。Level 1 是最原始沒有經過處理的資料；而 Level 2 是經過校正後所得到瞬間地球物理學的參數；Level 3 是將 Level 2 的資料以 30 天平均為一筆內插至 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 的網格點資料；最後 Level 4 是將 Level 3 的資料在與其它衛星資料相結合所做出以 5 天平均一筆內插至 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的網格點資料。其中，PR 的資料共分為 1B21、1C21、2A21、2A23、2A25、3A25、3A26 等七種資料庫，而 1B21 和 1C21 分別為 PR 接收到的能量及回波值，2A21 為降雨衰減值 σ° 和他的可靠度，2A23 為降雨型態、亮帶高度與結冰高度，2A25 為各層降雨率的反演和 2 公里與 4 公里的平均降雨率，3A25 為月平均的降雨結構，3A26 為月平均的地面降雨。

本研究使用 PR 2A25 的產品中各層降雨率反演的資料來分析颱風的降雨結構。該產品主要是利用雷達回波與降雨率的 Z-R 關係式反演出垂直結構上的降雨率。垂直結構共有 80 層，空間間距為 250 公尺，可以提供地面至高度 20 公里間的降雨反演值。這樣高度密集的垂直解析度資料有助於對颱風垂直結構的探討，並且預期能獲得良好的降雨估算，是目前一般衛星利用微波頻道反演降雨所無法達到的。

(二) GMS-5 衛星資料

1995 年 6 月發射的 GMS-5 衛星屬地球同步衛星，位置在東經 140 度的赤道上空 3 萬 6

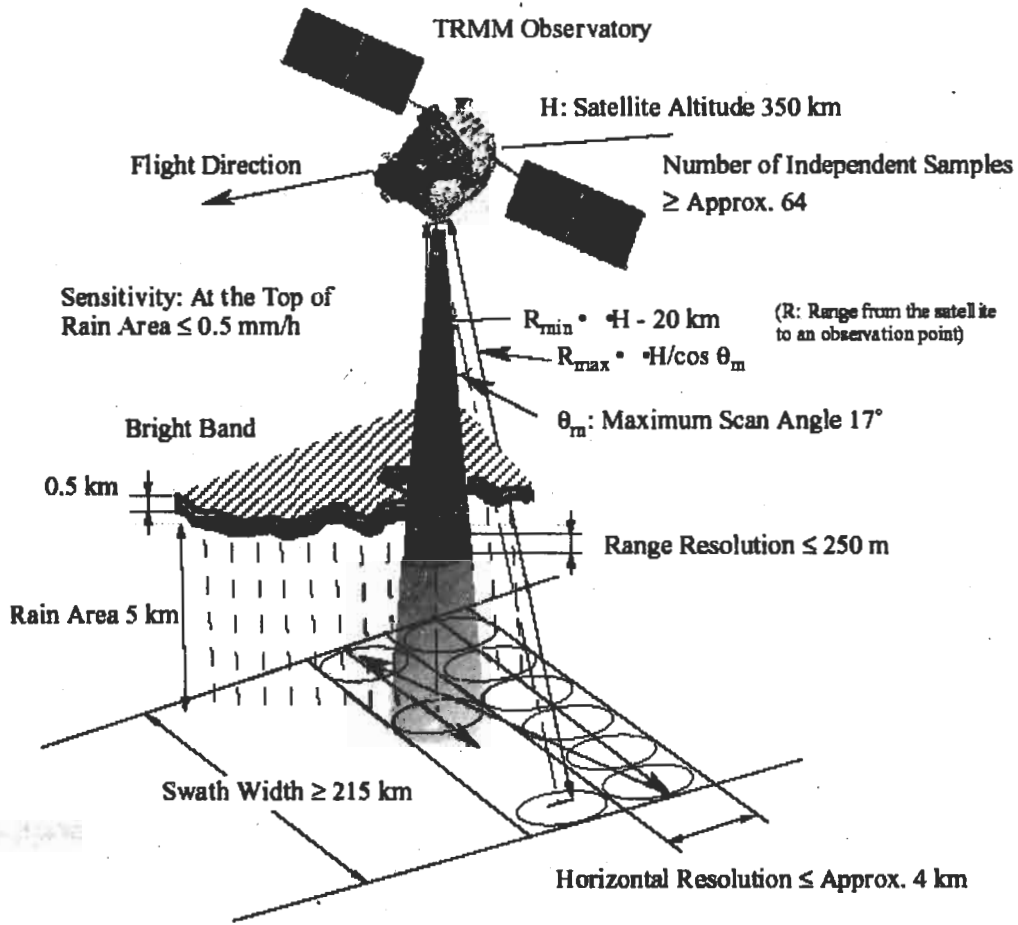


圖 1 PR 的掃描參數及型態。(摘錄自 JAXA 網站)

表一 PR 主要參數列表

項目	特性
頻率	13.769, 13.802 GHz
靈敏度	\leq 約 0.7 mm/h (S/N/pulse $\approx 0\text{ dB}$)
刈幅	220 km
水平解析度	4.3 km (星下點)
垂直解析度	0.25 km (星下點)
天線:	
型式	128-element WG planar array
頻寬	$0.71^\circ \times 0.71^\circ$
孔徑	2.0 m \times 2.0 m
掃描角度	$\pm 17^\circ$ (Cross track scan)

千公里處，對包含東亞及澳洲等地區約四分之一地球表面做持續性的觀測。可提供每日計二十八次（4 次半小時及 24 次逐時）連續且大範圍的觀測資料 (Prata, 1999)。GMS-5 衛星上的 Visible and Infrared Spin Scan Radiometer (VISSR) 有一個可見光(0.55~0.90 μm) 頻道，地面解析度為 1.25 km；三個紅外線（6.5~7.5 μm 、10.5~11.5 μm 、11.5~12.5 μm ）頻道，地面解析度均為 5 km (GMS-5 User's Guide, 1997)。本研究利用 10.5~11.5 μm 與 11.5~12.5 μm 這兩個頻道的分裂窗區 (split window) 資料特性，在沒有 TRMM 衛星觀測的時段內，對於研究區內海上的颱風進行持續的降雨觀測。

三、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與結構，必須先從颱風整個生命過程裡區分出不同的階段。本研究依據 Anthes (1982) 對颱風生命期的分類，將颱風的生命週期也分成初生期、成熟期及消散期這三個時期，由於本研究之區域是在西北太平洋地區，其範圍由東經 100 度至 180 度。而此區域的地區中心 (Regional Specialized Meteorological Center, RSMC) 是日本氣象廳的太平洋颱風中心 (RSMC Tokyo-Typhoon Center) 所負責，其颱風強度分類的標準如表二。

研究中使用 JTWC 發佈的最佳路徑資料中的颱風風速作為分類的標準。將熱帶氣旋剛發展成熟帶低壓與輕度颱風歸類為颱風的初生期，颱風會逐漸增強成為中度颱風、強烈颱風，甚至是超級颱風 (Super Typhoon) 歸類為成熟期。隨後颱風逐漸減弱，直到颱風強度減弱至輕度颱風或是熱帶低壓，之後這段時期就歸類

為消散期。由於環境場對於颱風的發展會有相當影響，所以在分類上會有遇到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，有此特性之個案在本研究中將不列入統計分析。除此之外，為了要能瞭解颱風整個生命史過程中，每個時期的不同變化，所以目前收集到的颱風資料主要是發展至中度以上的颱風為主，至於有許多颱風個案在整個發展過程中並未達到中度颱風以上，因此就不屬於本研究的範疇。

因為 PR 刈幅（僅有 215 公里）較小，有時無法完整掃描到颱風的眼及眼牆部分，因此篩選資料時，特別鎖定在颱風眼牆及颱風眼或是颱風中心定位與最強降雨區域落在 PR 掃描範圍內，如此才能對颱風的眼牆與眼或是強降雨區之空間分佈、降雨強度和垂直結構作分析（如圖 2 所示之資料選取流程）。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。根據 Willoughby 等人 (1982) 研究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 紅外線頻道的雲圖資料與 TMI 儀器中 85GHz 頻道對冰晶的散射，嘗試用來分析和加強 PR 瞬間資料的延伸性。藉由紅外線頻道逐時的圖像，用來觀測颱風的變化，並配合影像的強化，追蹤眼牆對流雲系的發展以及維持情形。而 TMI 之 85GHz 其解析度為 5 公里，與 PR 的解析度相當，可用來辨認眼牆對流的範圍，並與強化過的紅外線影像比對，更能明確判定颱風眼牆的變化。

(二) 資料蒐集

表二 太平洋颱風中心對颱風強度的分類

熱帶低氣壓之名稱	近颱風中心之風速(kt)
Tropical Depression	最大風速小於34 kts
Tropical Storm	最大風速34~63 kts之間
Typhoon	最大風速64~127 kts之間
Super Typhoon	最大風速在128 kts以上

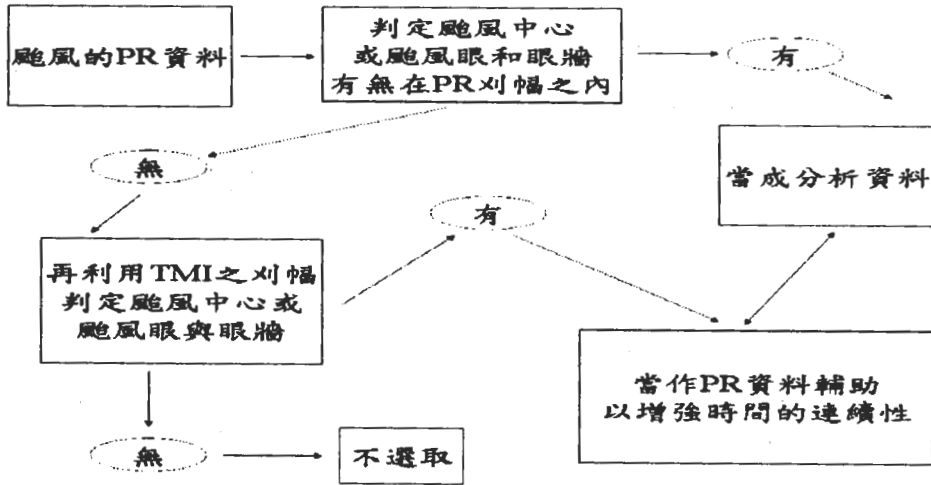


圖2 資料選取流程圖。

表三 颱風處在各時期的個案數

	個案數	備註
初生期	20 (筆)	1、1998年至2002年颱風總數為158個。 2、本研究的颱風個數為27個。 3、資料總數共為88筆。
成熟期	61 (筆)	
消散期	7 (筆)	

從1998年至2002年發生於西北太平洋地區的颱風(包含熱帶低壓)總數為158個,其中被PR掃過而符合選取規則的個案總數有27個颱風,共有88筆資料。當中判定屬於初生期的資料有20筆,屬於成熟期的資料有61筆,屬於消散期的資料有7筆(如表三)。由於衛星

觀測時間大部分無法配合到JTWC最佳路徑時間(每6小時一筆定位資料),因此衛星觀測的時間大部分會介於發佈時間的前後兩筆資料中間,所以在判定上是以JTWC的資料時間是在衛星觀測時間之前最接近的資料為主。但在2000年的蘇納姆(SONAMU)颱風的第2筆資料的判

定上雖然未達到中度颱風的標準，但是因為與下筆時間 JTWC 發佈的資料時間相距甚近，且達到中度颱風之程度，故在判定上仍屬於成熟期。從這些選取出的 88 筆 PR 的資料當中，吾人發現到梧提(WUTIP)颱風與哈隆(HALONG)颱風的 PR 資料，跨越了他們整個生命期中的每個階段。因此本研究將對 1998 年至 2002 年於西北太平洋地區被 PR 掃過而符合選取規則的 27 個颱風個案資料做統計分析，並特別針對梧提颱風與哈隆颱風這兩個個案來分析探討颱風各個生命期的降雨特徵。

四、結果與分析

本研究分別以梧提及哈隆颱風的生命週期進行颱風降雨特徵的探討，其生命期變化情形詳如圖 3 (摘錄至 Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA 網站)。梧提颱風於 2001 年 8 月 26 日在北緯 16 度、東經 138 度附近生成，之後持續朝東北行進，並於 9 月 28 日 0000Z 增強為中度颱風，最後才於 9 月 1 日 1200Z 減弱成輕度颱風。哈隆颱風則於 2002 年 7 月 7 日在北緯 8.5 度、東經 158 度附近生成，之後持續往西北行進，並於 7 月 9 日 1200Z 增強為中度颱風，行經至東經 128 度時開始轉往東北方向前進，最後於 7 月 15 日 0600Z 後減弱為輕度颱風。

(一) 颱風的初生期

由 GMS-5 衛星紅外(infrared, IR)雲圖顯示，颱風於形成之初其主要的雲系發展集中在颱風中心附近區域，這時期颱風的眼尚未形成，所以整張雲圖上到處可見反白很亮的區域，也就是亮度溫度很低的地方。圖 4 與圖 5 為 TRMM 衛星上 VIRS 儀器所接收到波長為 10.8 μm 經過影像強化的 IR 雲圖，可以清楚分辨出颱風雲頂

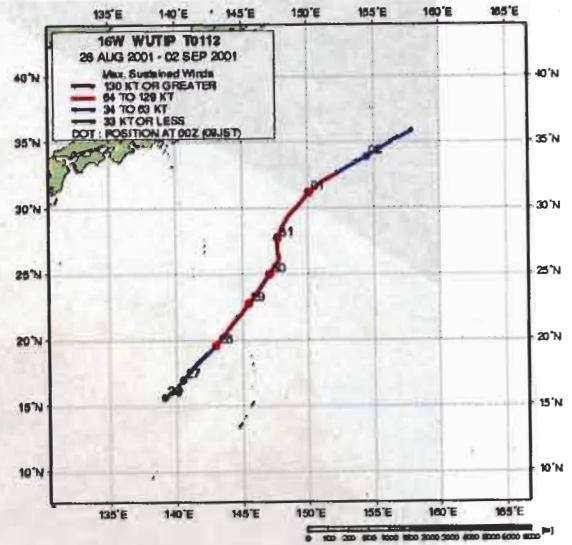


圖 3 (a) 梧提颱風的生命期。(摘錄自 JAXA 網站)

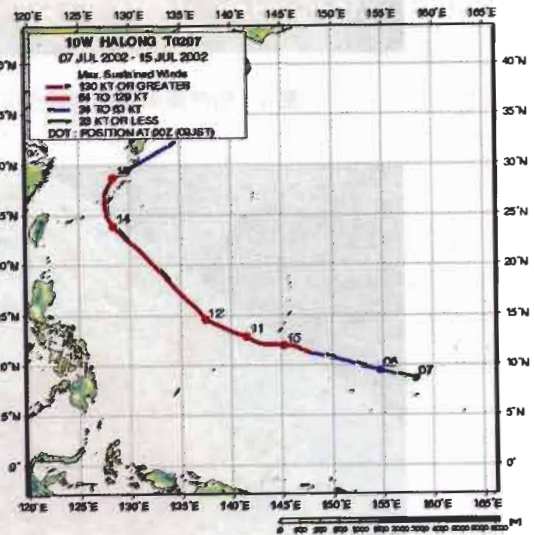


圖 3 (b) 哈隆颱風的生命期。(摘錄自 JAXA 網站)

亮度溫度(brightness temperature, T_b)值低於 180 K 的鮮紅色區域範圍，主要是分佈在環流中心附近與外圍雲系上對流系統發展的地方。但由 PR 的觀測資料顯示(如圖 6)，原本以為在 IR 雲圖中旺盛的對流雲系底下是大量的降雨，但是實際情形並非如想像那樣。相反的，降雨的

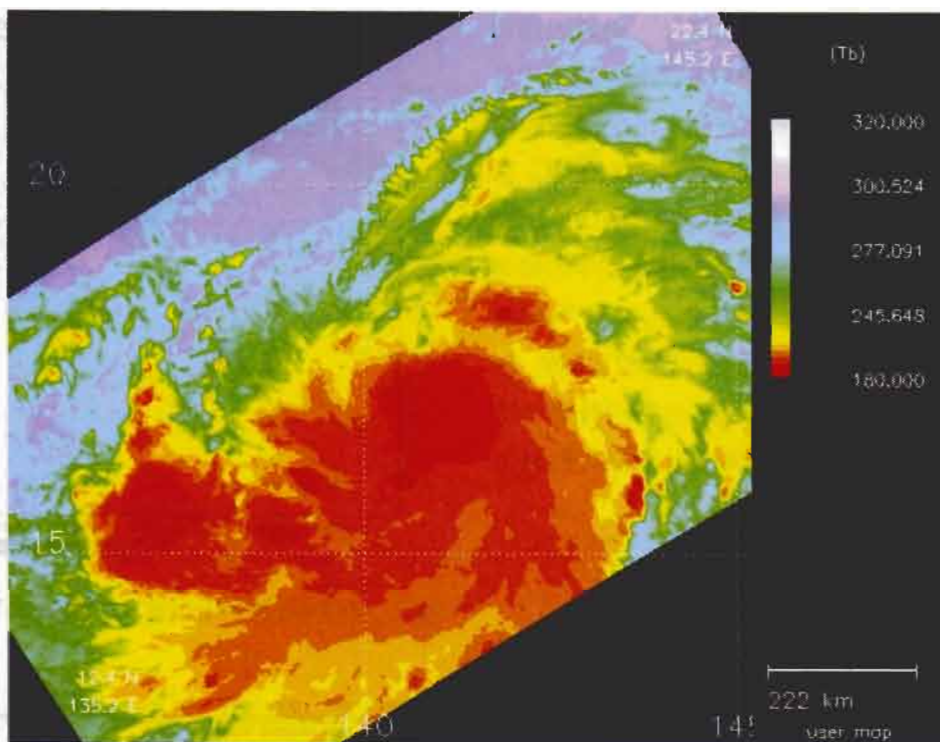


圖 4 梧提颱風經過影像強化之紅外線雲圖 (軌道號碼 21573)。

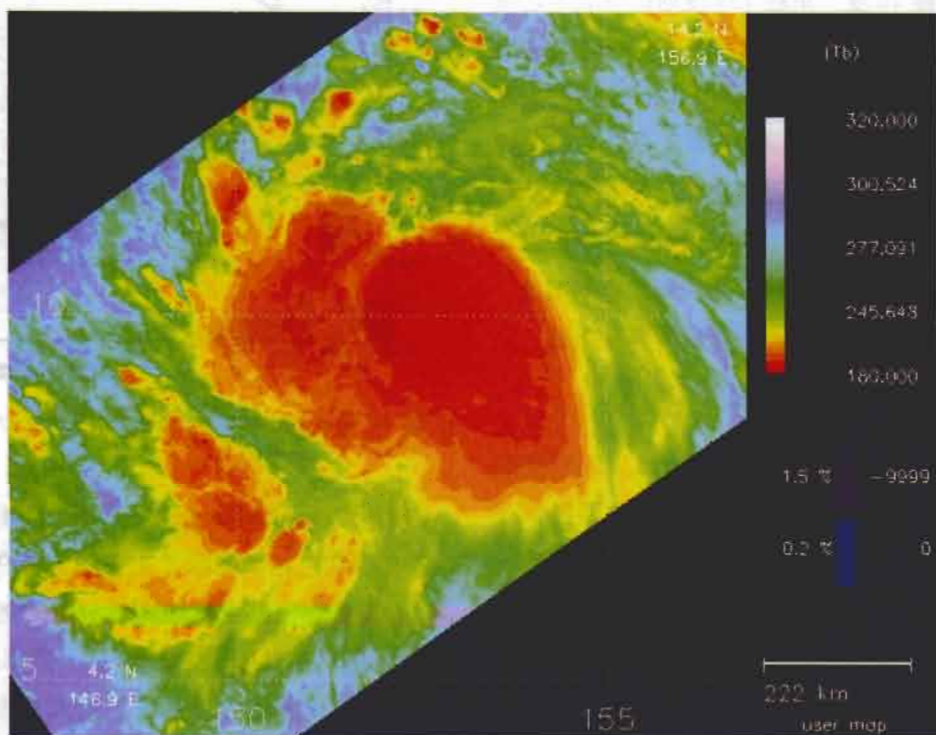
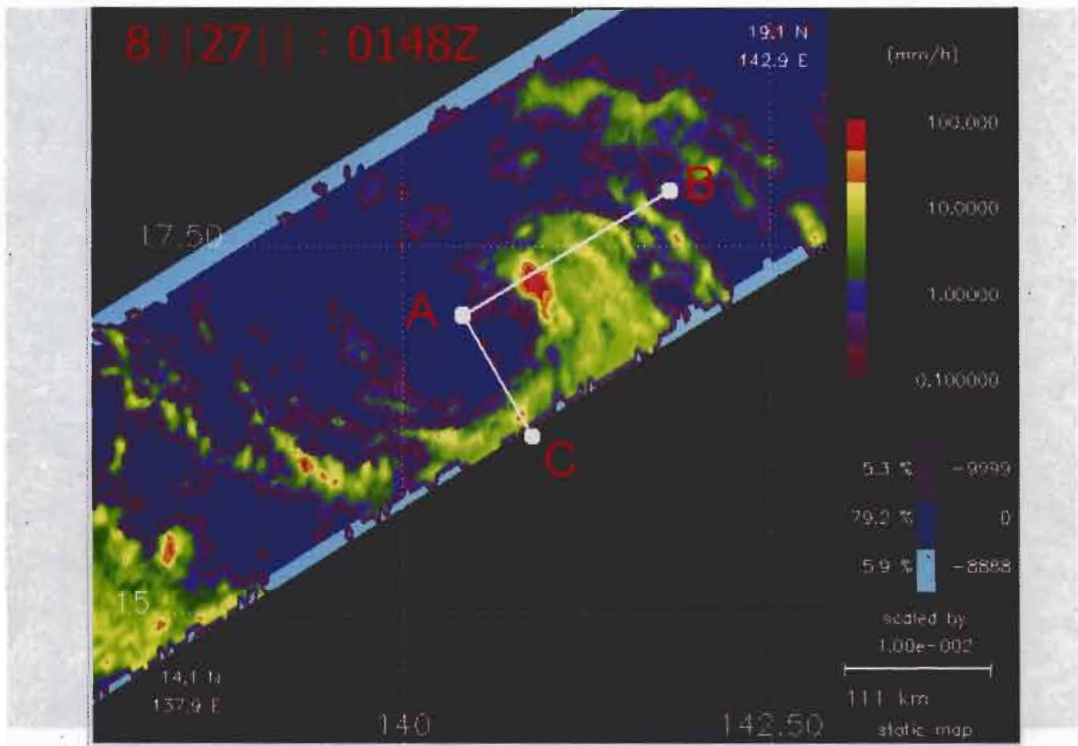
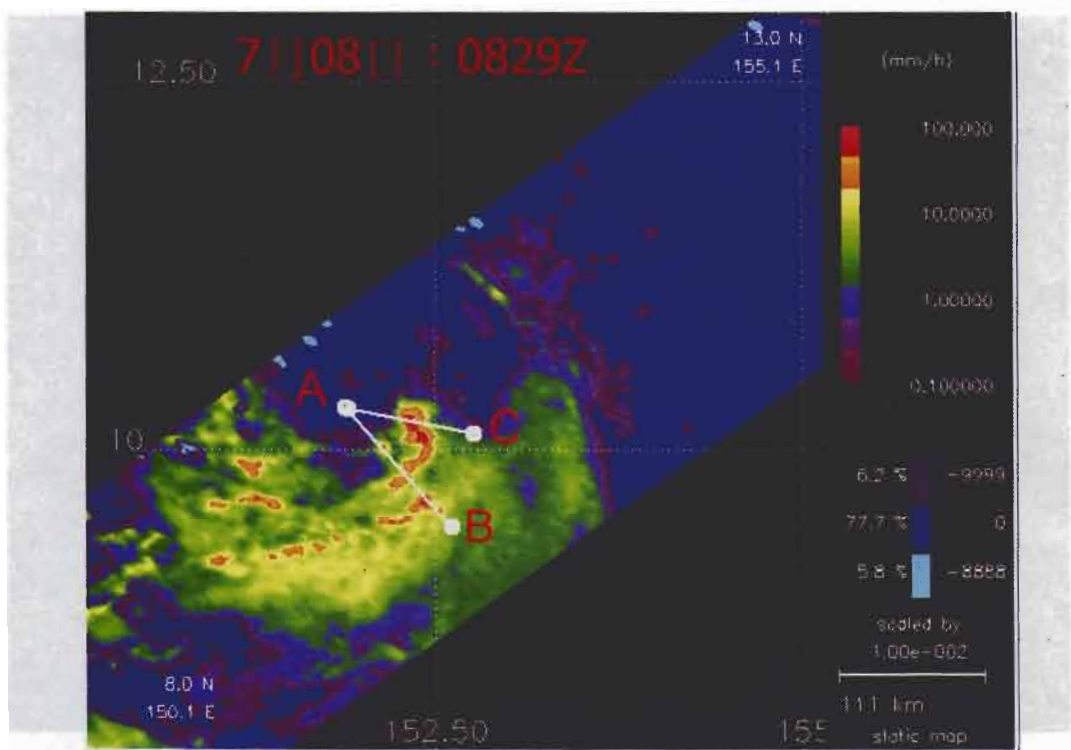


圖 5 哈隆颱風經過影像強化之紅外線雲圖 (軌道號碼 26487)。

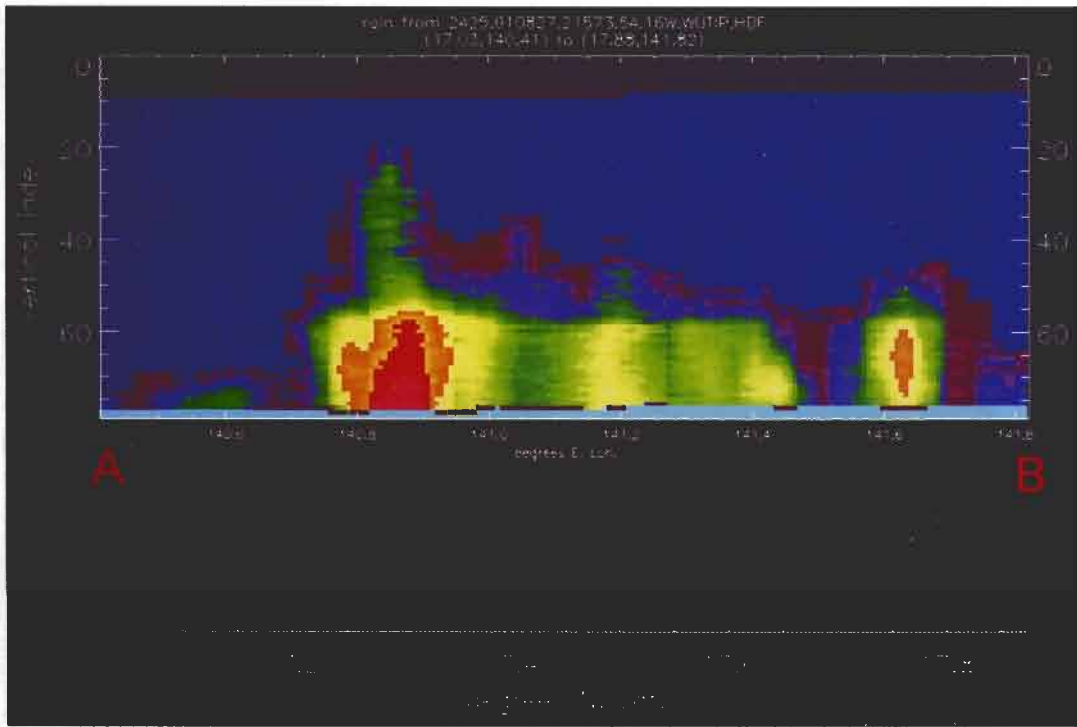


(a)

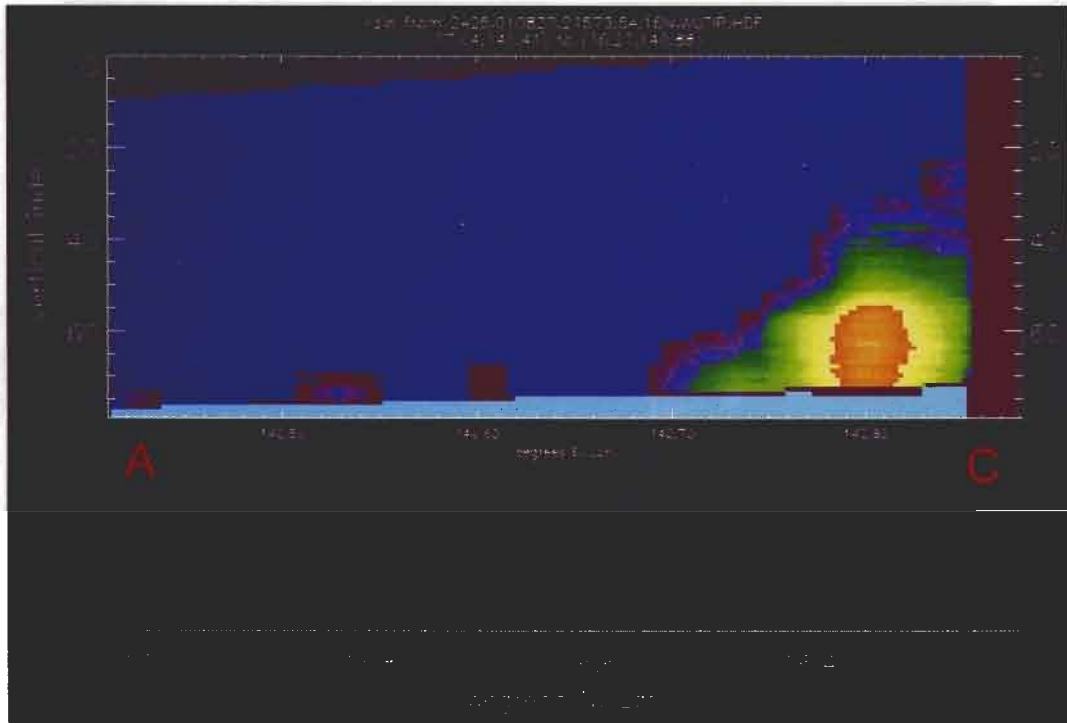


(b)

圖 6 (a)、(b)為梧提、哈隆颱風在初生期距地面 2 公里之 PR 反演降雨分佈。

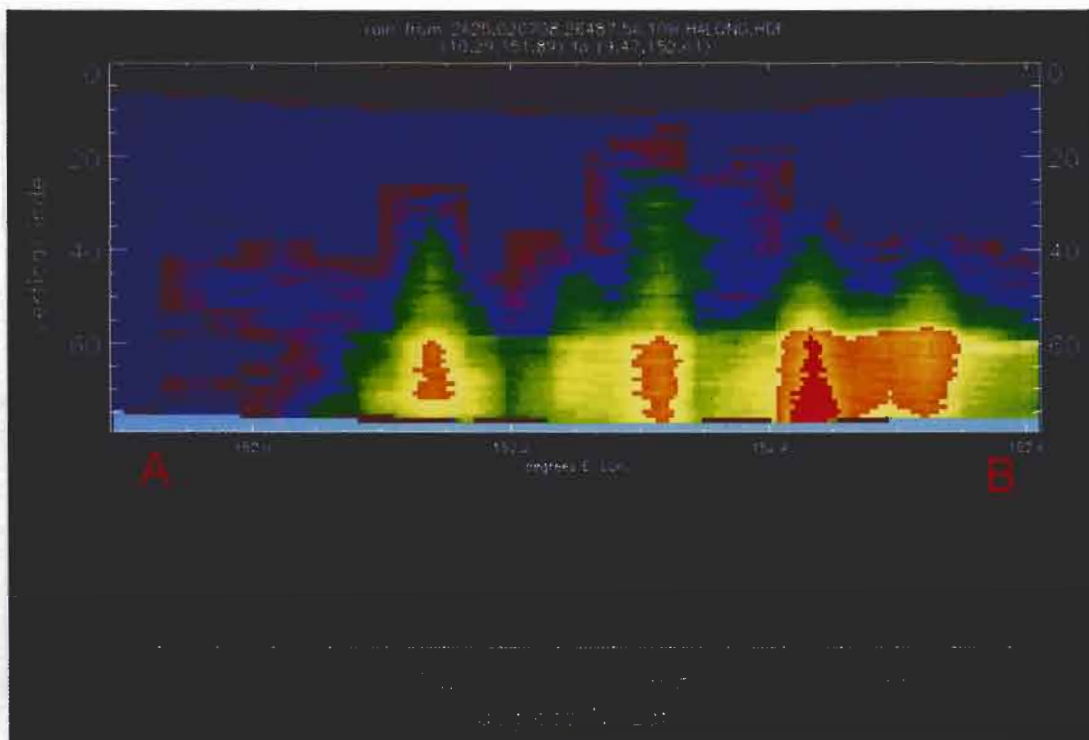


(a)

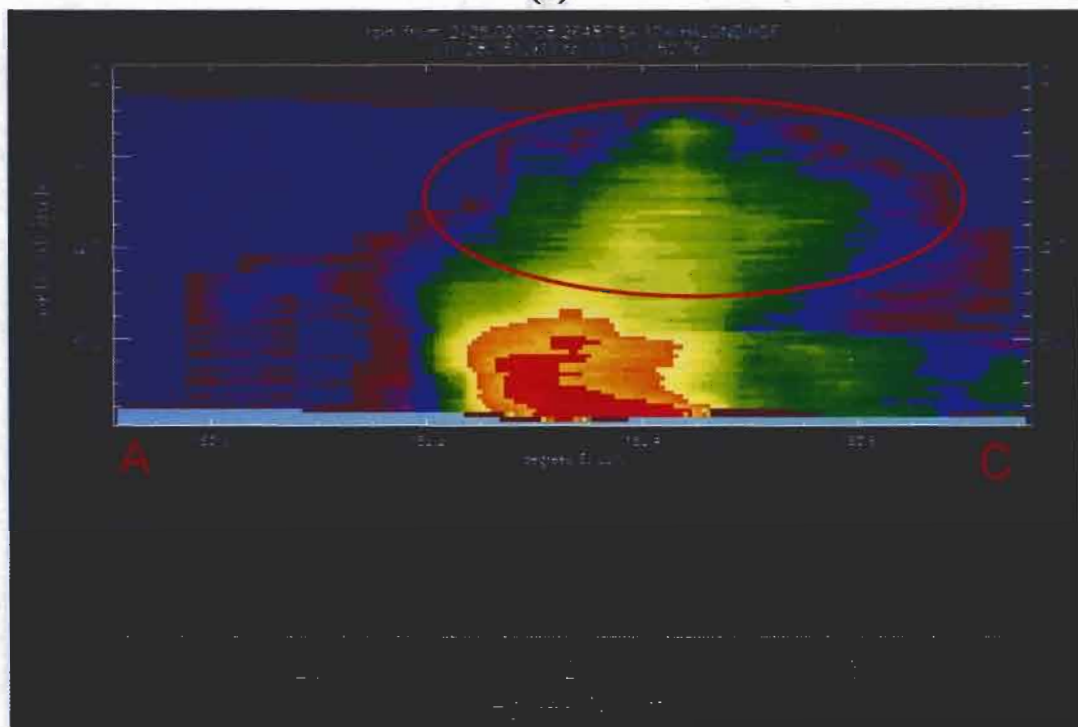


(b)

圖 7 (a)為圖 6(a)中 AB 之垂直剖面，(b)為 AC 之垂直剖面。(color bar 同圖 6)

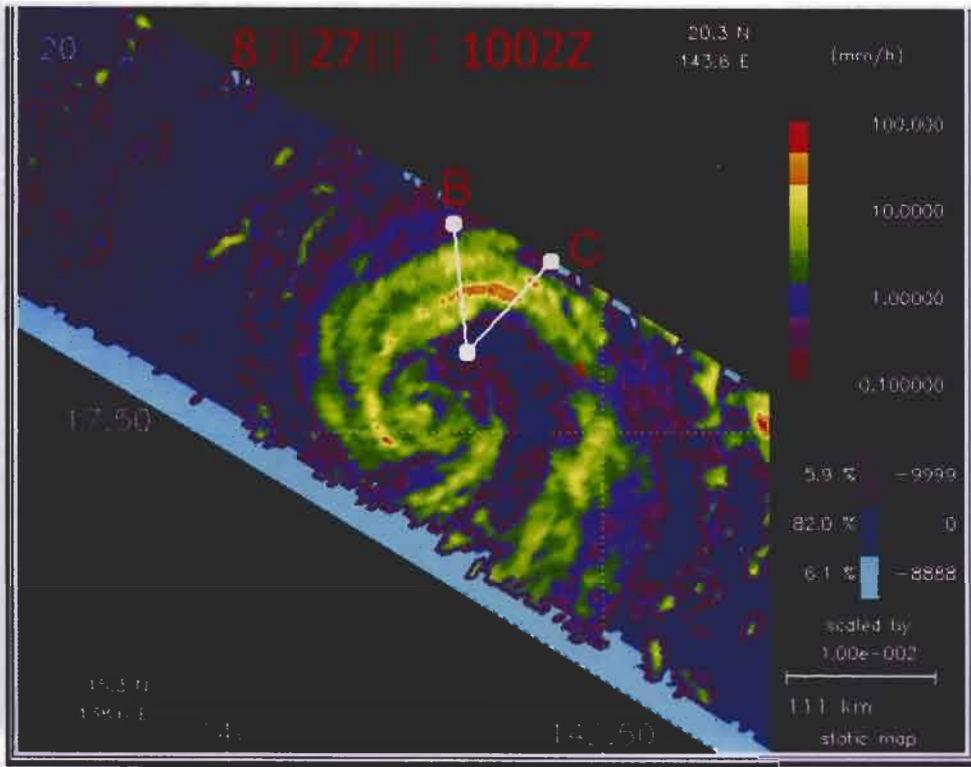


(a)

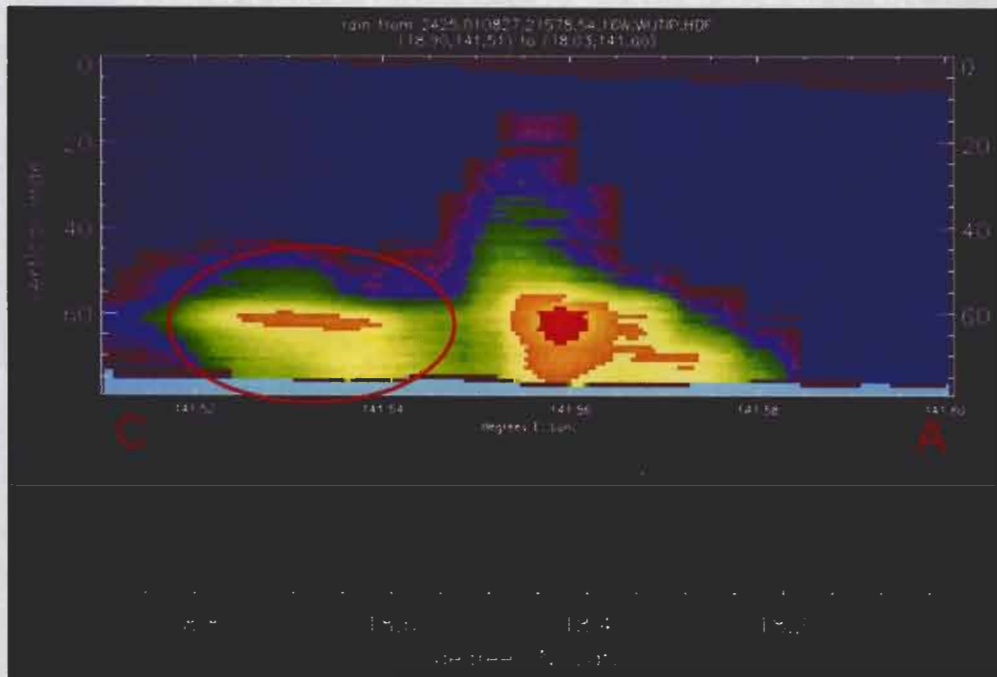


(b)

圖 8 (a)為圖 6(b)中之 AB 垂直剖面，(b)為 AC 之垂直剖面。(color bar 同圖 6)



(a)



(b)

圖 9 (a)為梧提颱風在地面 2 公里之 PR 降雨分佈，(b)為 AC 線段之垂直剖面 (color bar 同圖(a))。

位置與紅外線雲圖亮度溫度最低的區域，存在著些許差異。藉由 PR 的觀測可以瞭解這時期的對流發展，像是獨立的對流胞，而非有組織性的對流系統。但在哈隆颱風中，這時期的對流就顯得較有組織性，但依然沒有發現類似眼牆的結構出現。

在 PR 的觀測中，圖 6(a) 的 AB 線段與圖 6(b) 的 AC 線段所經過的是最強降雨區域，圖中顯示出 IR 的亮度溫度值可以估計出雲頂的高度與可能有對流的發展位置，但實際真正的降雨區域與 IR 所顯示的，還是有一段差距。根據 Toshiaki 等人 (2001) 所提及 PR 在 sensitivity 項目中，於 $Z_c = 372R^{0.54}$ 假設下，在儀器發展階段 $S/N \text{ per pulse} \geq 0 \text{ dB for } 0.7 \text{ mm/h at rain top}$ (儀器設計階段為 0.5 mm/h)，為求更嚴謹一點，故本研究以 1 mm/h 降雨強度所能出現的最高高度當作是 storm height。因此在降雨強度 1 mm/h 之藍色區域顯示，其高度相當於 15 公里；甚至在哈隆颱風的個案中更可以高達 18 公里，可以說是發展的相當高 (如圖 7、8)。而這樣的情形普遍存在於這個時期，可以說是颱風在這個時期裡的一大特徵。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) 所陳述之對流降雨與層狀降雨的特徵，也就是有亮帶 (bright band) 的存在 (如圖 9 中紅色圈示區)，就如同颶線的降雨型態。

整體而言，這時期的降雨屬於無組織性的對流系統，而降雨強度大於 10 mm/h 的區域明顯隨對流胞發展而變化，甚至有些降雨大於 50 mm/h 的區域是停留在空中，如圖 7(a) 中在經度 141.65 度附近與圖 8(a) 中在經度 151.15 度附近的對流，橘色線所圈示出的區域並未與地面相連，顯示這部分的降雨並未到達地面，是相當

特殊的現象。推測此時的上升氣流相當旺盛，並且大於雨滴的重力加速度，因此才會造成雨滴停留在空中，並未落到地面；而這應當是屬於剛在發展中的對流。就整體的分析中可以發現，靠近颱風中心發展出的對流雲系比較旺盛，不管是在水平的強降雨區域，或是垂直的發展高度，都要比非颱風中心附近發展出來的對流胞，在整體的結構上還要好。這可能是由於颱風環流中心附近是主要氣流輻合中心的緣故，因此在其附近發展的對流可以獲得良好的發展環境。

(二) 颱風的成熟期

颱風成熟期的雲系組織與環流相當完整，從 GMS-5 衛星 IR 雲圖中可以觀察到梧提與哈隆颱風在此階段雲系的變化不大，但原本在颱風中心的整團雲系逐漸轉變成眼牆，眼牆所包圍的區域也變為無雲的颱風眼。颱風眼在這時期相當明顯，從 IR 的雲圖很容易就可以辨認出來。

圖 10 與圖 11 是梧提颱風與哈隆颱風經強化影像處理後的 IR 雲圖。這時梧提颱風的眼半徑大約有 15 公里。同樣的雲頂亮度溫度值低於 180 K 之鮮紅色色階，主要集中在颱風眼牆的下方區域附近，此時眼牆上方區的雲係高度較低。同樣的，哈隆颱風的眼非常清楚，其半徑約為 30 公里。亮度溫度較低區域在颱風眼牆的下半部區域，反而上半部區域的亮度溫度較高。如 PR 所觀測到之降雨結果 (如圖 12)，可以清楚分辨出在颱風眼牆附近的兩個主要強降雨區域與中間相隔的弱降雨區域。並且由圖中可發現，強降雨的區域集中在颱風中心的一側，並配合 TMI 2A12 產品的模式反演地面降雨量共同分析結果，顯示颱風眼周圍並沒有出現另一強降雨

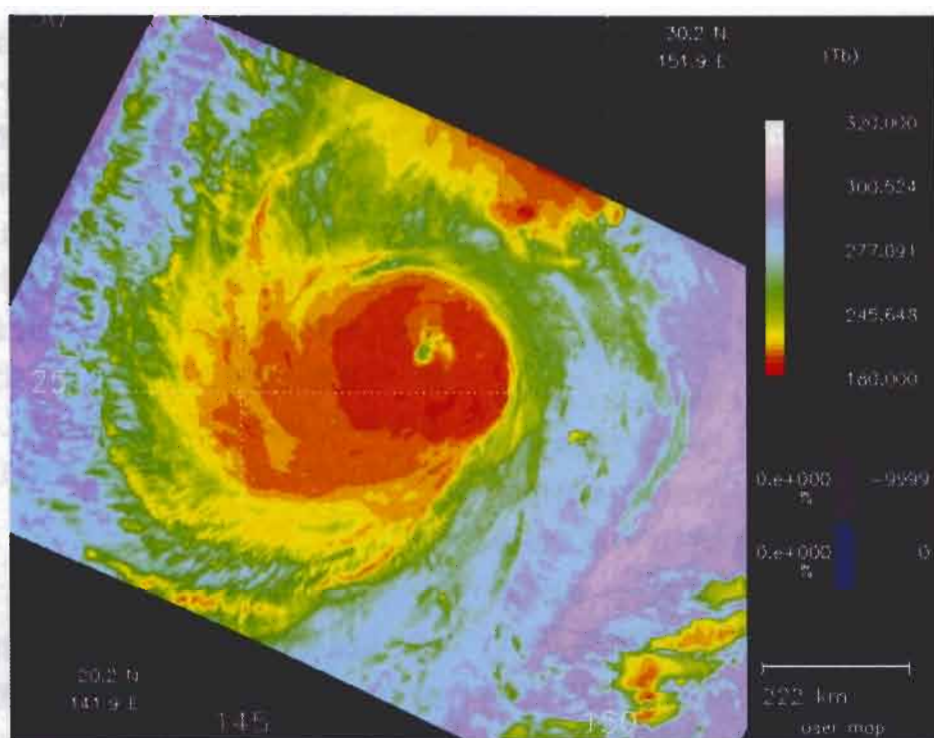


圖 10 梧提颱風經過影像強化之紅外線雲圖（軌道號碼 21623）。

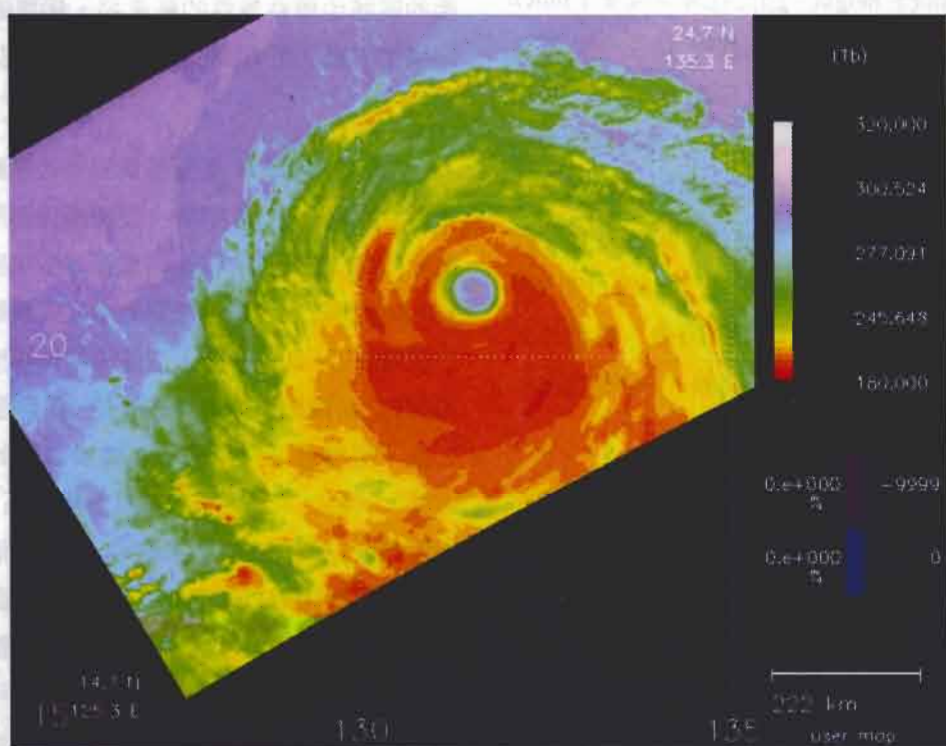
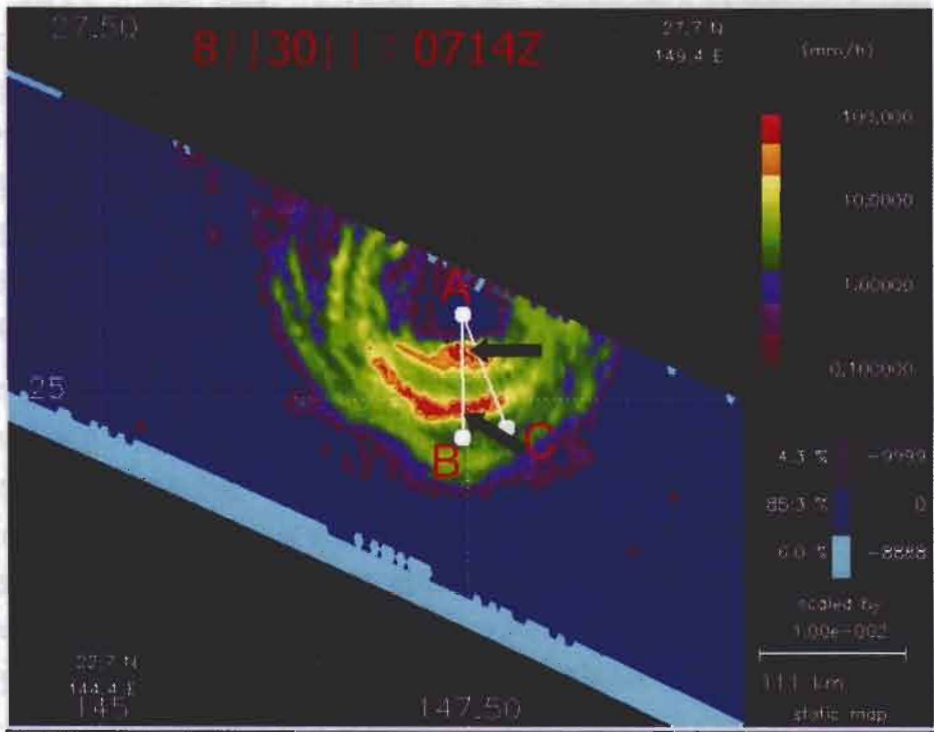
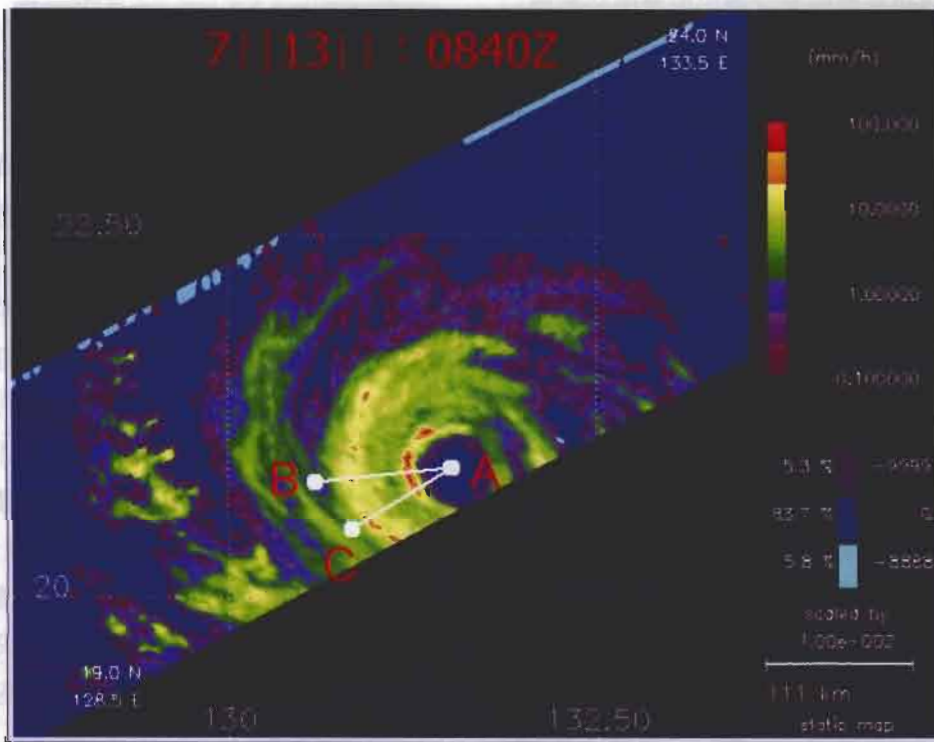


圖 11 哈隆颱風經過影像強化之紅外線雲圖（軌道號碼 26565）。



(a)



(b)

圖 12 (a)、(b)為梧提、哈隆颱風在成熟期距地面 2 公里之 PR 反演降雨分佈。

的區域，所以颱風此時是屬於 wave number 1 的；然而哈隆颱風從圖 12(b)與 2A12 產品所顯示出是屬於 wave number 2。從降雨強度在 100 mm/h 以上的區域來判別，可以很明顯比較出梧提颱風在眼牆區域的降雨要比哈隆颱風眼牆區域的降雨還要劇烈（詳如圖 12(a)中箭號所示，降雨強度大於 100 mm/h 之區域）。

圖 13 與 14 是垂直剖面的線段位置及其剖面圖。同樣以 1 mm/h 降雨強度存在的高度來看 storm height，明顯地就降低許多。這兩個颱風的 storm height 大約在第 40 層，每層間格為 250 公尺，換算過來也就是 10 公里的高度，比起初生期要低了 5~8 公里，差異非常明顯。但相反的，降雨強度在 30 mm/h 以上的橘色區域增大，甚至是降雨強度高達 100 mm/h 的紅色區域範圍也明顯增加，也就是說這時期強降雨的區域增廣了。就梧提颱風而言，靠近颱風眼的雨帶，在降雨發展高度上，要比外圍為低。推測其原因可能是因為外圍的雨帶發展旺盛，因而抑制了內部對流的發展，很可能會發生內眼牆收縮被外眼牆取代的過程。

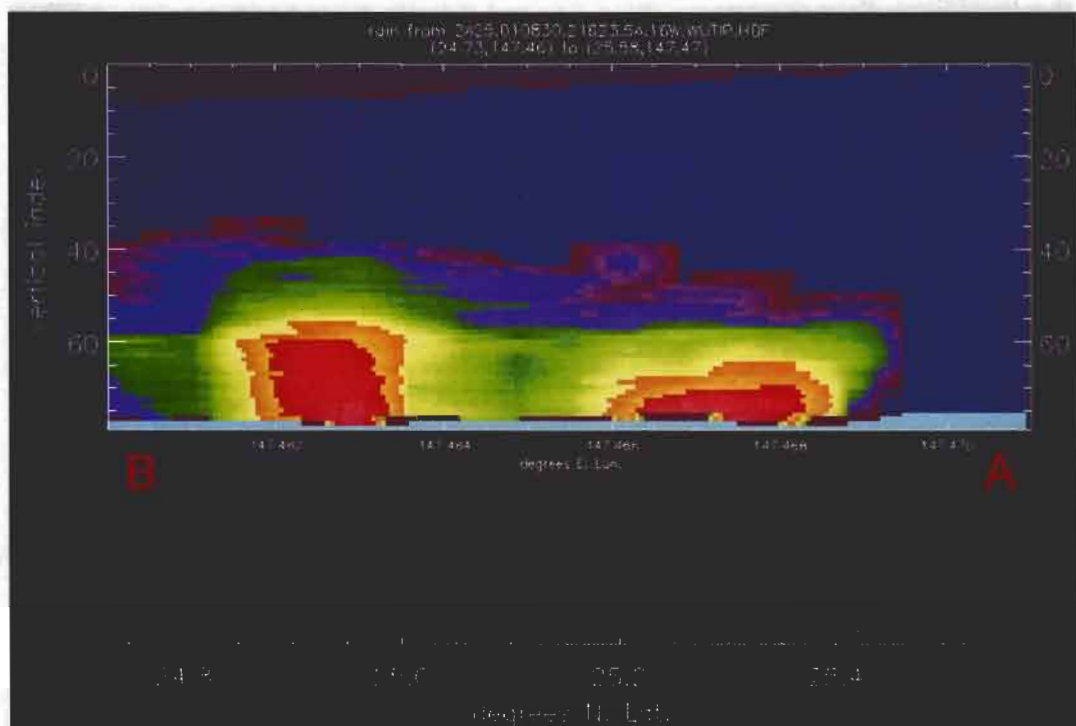
另一方面，在張等人(2002)在對賀伯颱風的眼牆環流結構分析中發現眼牆有隨高度往外側傾斜的現象，以及低層內傾高層外傾的特殊現象。分析梧提颱風眼牆的部分，也發現到相類似傾斜的現象，但卻是向內傾斜。另外，在圖 15(a)可以看到低層內傾高層外傾這樣的特殊情形，甚至在(b)和(c)中更明顯看到其向內傾斜程度相對於垂直軸達到 60 度。依據 Emanuel (1986)利用理想化的模式探討中指出，當空氣塊於邊界層內混合均勻達飽和時，在對稱中性穩定的大氣環境條件之下，位於邊界層之空氣塊將可沿著等角動量（相當位溫）面上升，促使

眼牆傾斜的對流形成。但張等人(2002)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 (1986)所提出的機制，有待後續研究來探討。

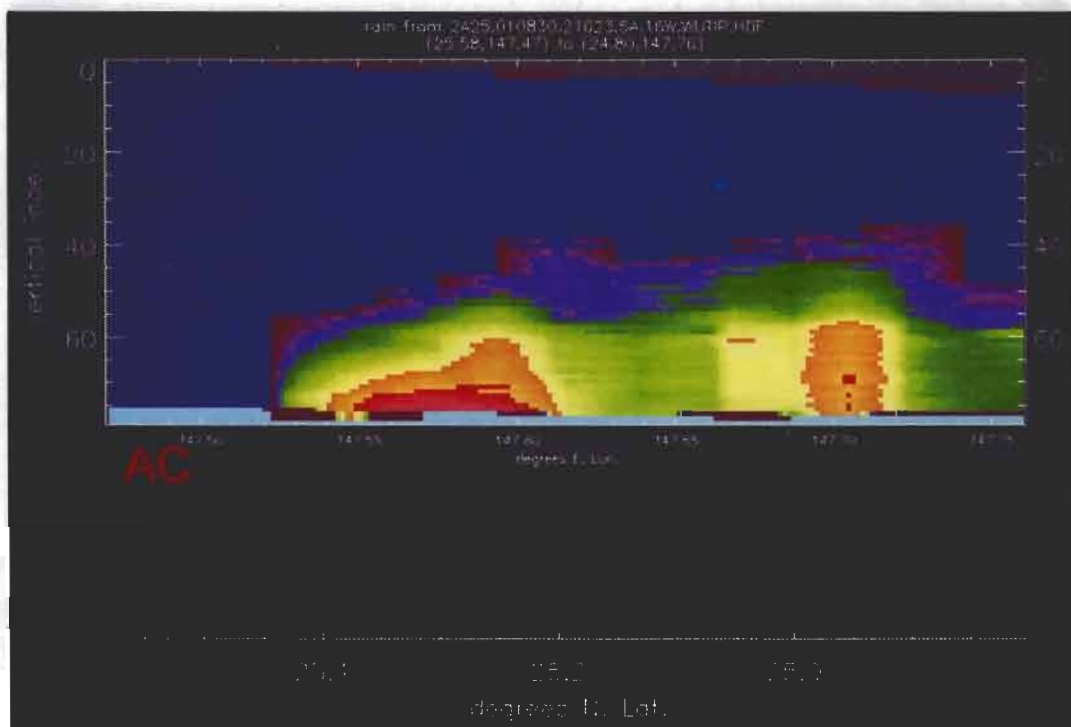
Shapiro 和 Willoughby (1982)曾探討眼牆內縮現象，他們理論中指出，在最大風速半徑內側加入熱源，將造成渦旋中心氣壓降低，進而使得環流增強。Willoughby 等人 (1982)進一步印證了這樣的想法。他們指出，颱風眼牆內縮的現象相當普遍，最常發生於增強中的高軸對稱颱風系統，當颱風內部活躍的環流結構出現（如眼牆）時，透過對流潛熱加熱效應，最大風速半徑內緣風速將快速增強，使得最大風速半徑因而內縮。

（三）颱風的消散期

颱風進入這一時期，表示環境場有不利於颱風發展的條件。這時期颱風通常會進入中緯度地區，由於高低層垂直風切太大，不利於颱風環流垂直結構的發展，因此颱風本身的環流結構無法維持而逐漸消散，甚至有可能發生高低層環流分離的情況發生。從連續的雲圖中可以觀察到，颱風眼會迅速消失，而且颱風已經無法維持其環流的特徵，雲系呈現鬆散狀態。在梧提颱風（圖 16）及哈隆颱風（圖 17）的 IR 雲圖中，最明顯的變化在於亮度溫度值低於 180 K 的區域，相形之下要比初生期和成熟期減小很多，雲頂的高度普遍降低。PR 在高度 2 公里的降雨強度資料分析發現（如圖 18），降雨的分佈呈現出無系統、無組織的狀態。降雨強度普

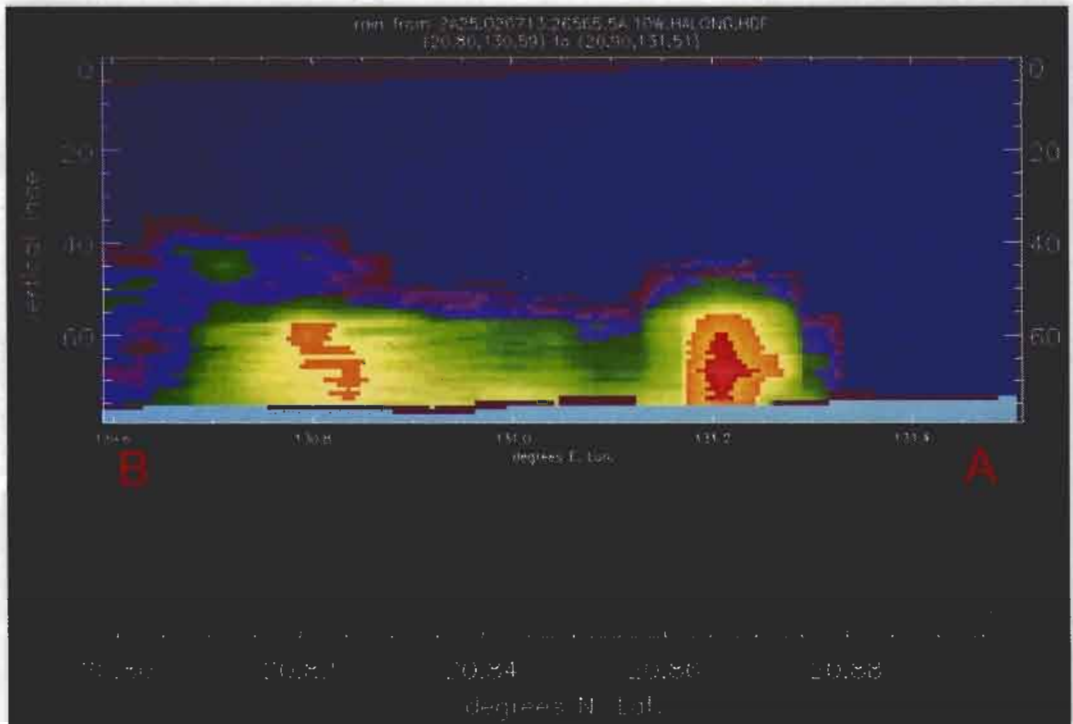


(a)

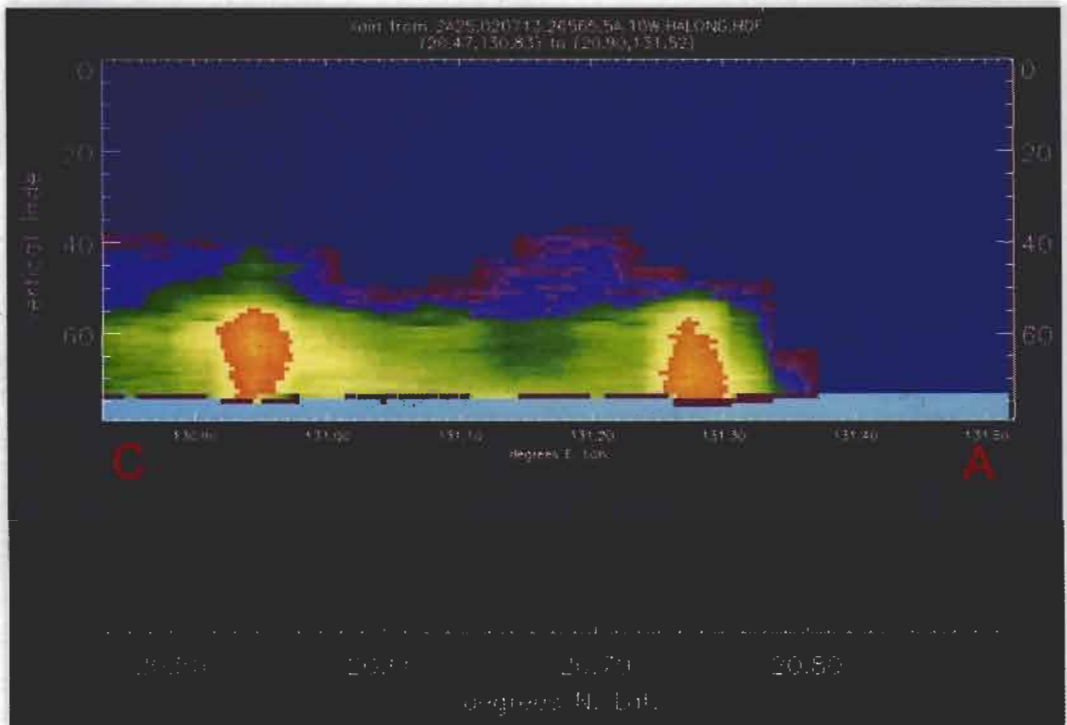


(b)

圖 13 (a)為圖 12(a)中之 AB 垂直剖面，(b)為 AC 之垂直剖面。(color bar 同圖 12)



(a)



(b)

圖 14 (a)為圖 12(b)中之 AB 垂直剖面，(b)為 AC 之垂直剖面。(color bar 同圖 12)

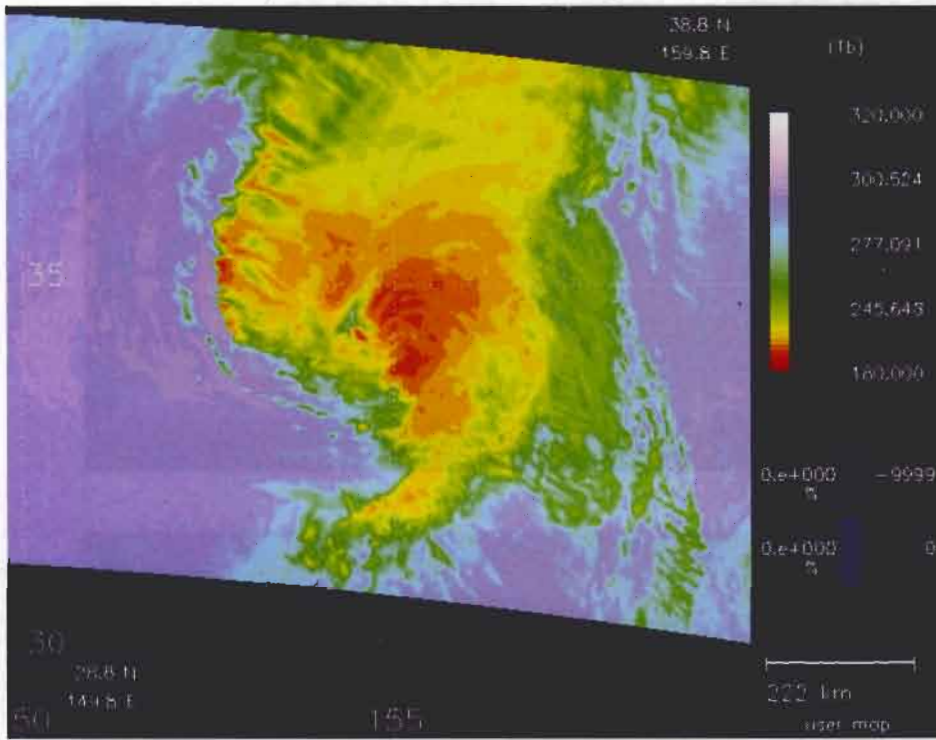


圖 16 梧提颱風經過影像強化之紅外線雲圖（軌道號碼 21667）。

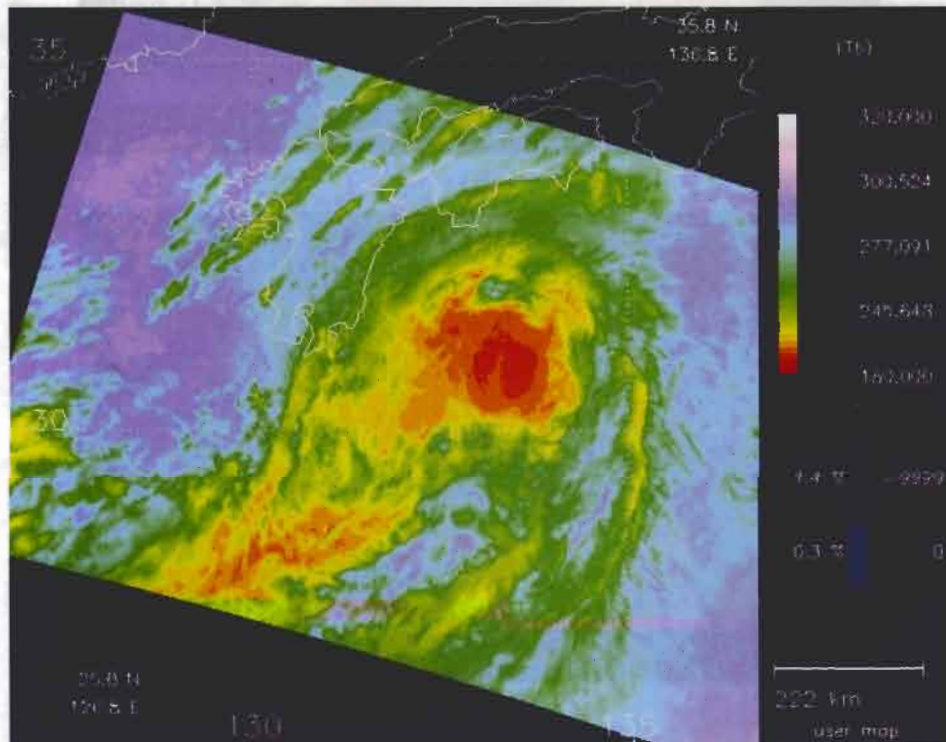
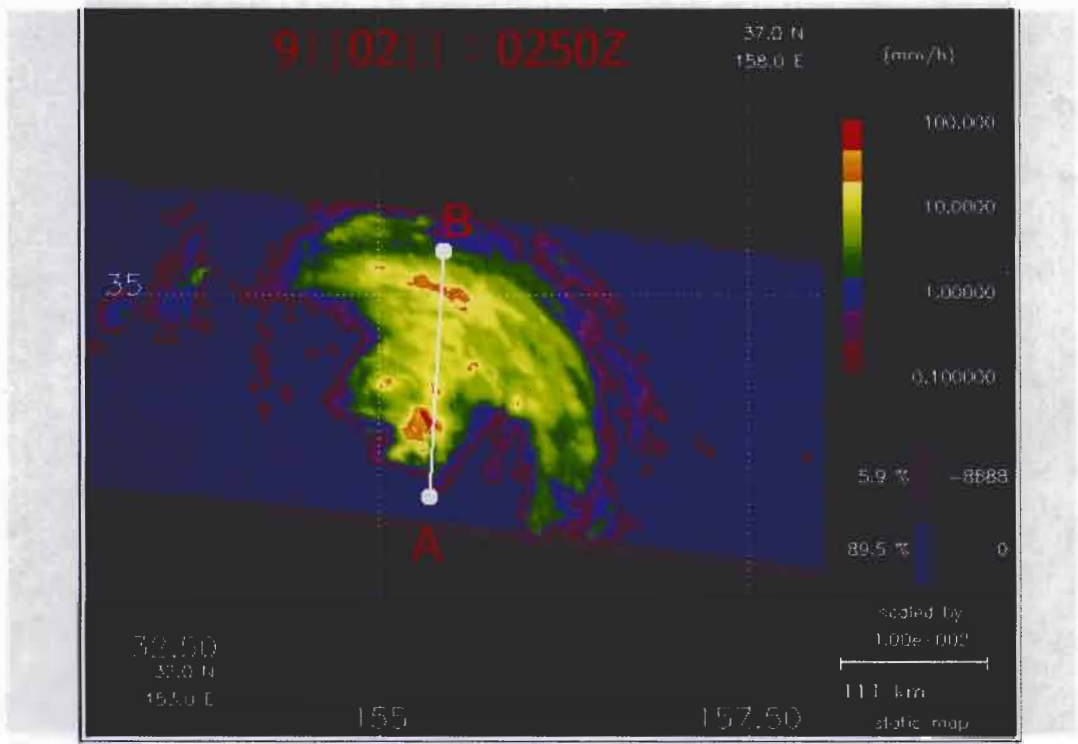
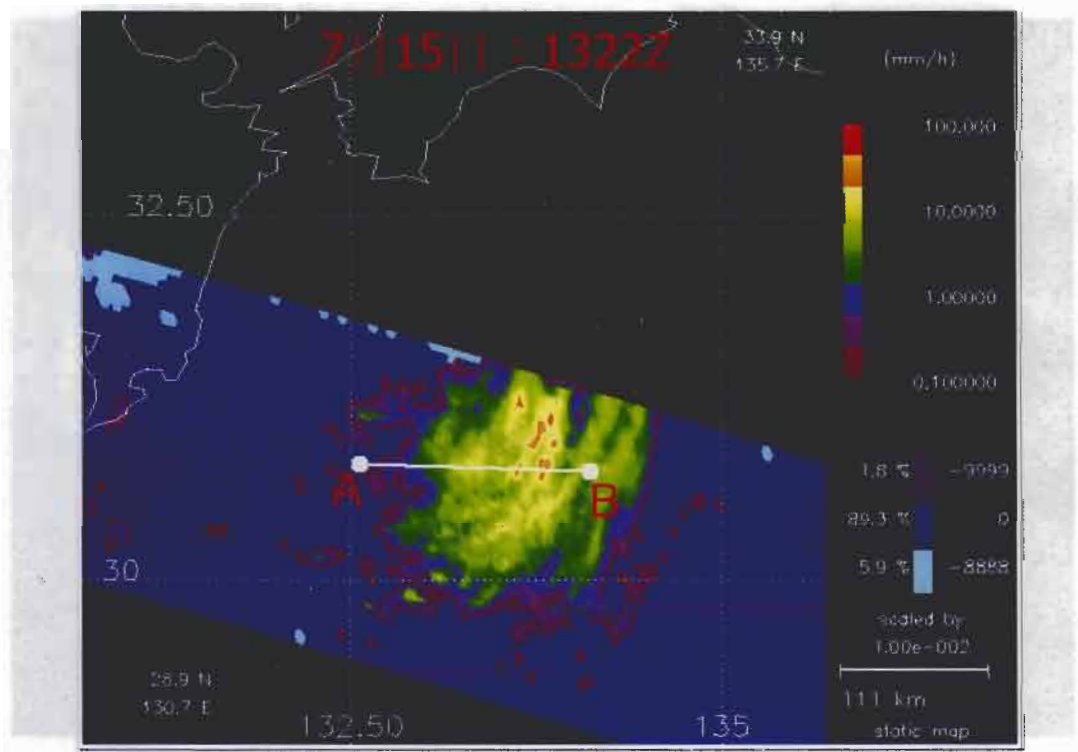


圖 17 哈隆颱風經過影像強化之紅外線雲圖（軌道號碼 26599）。

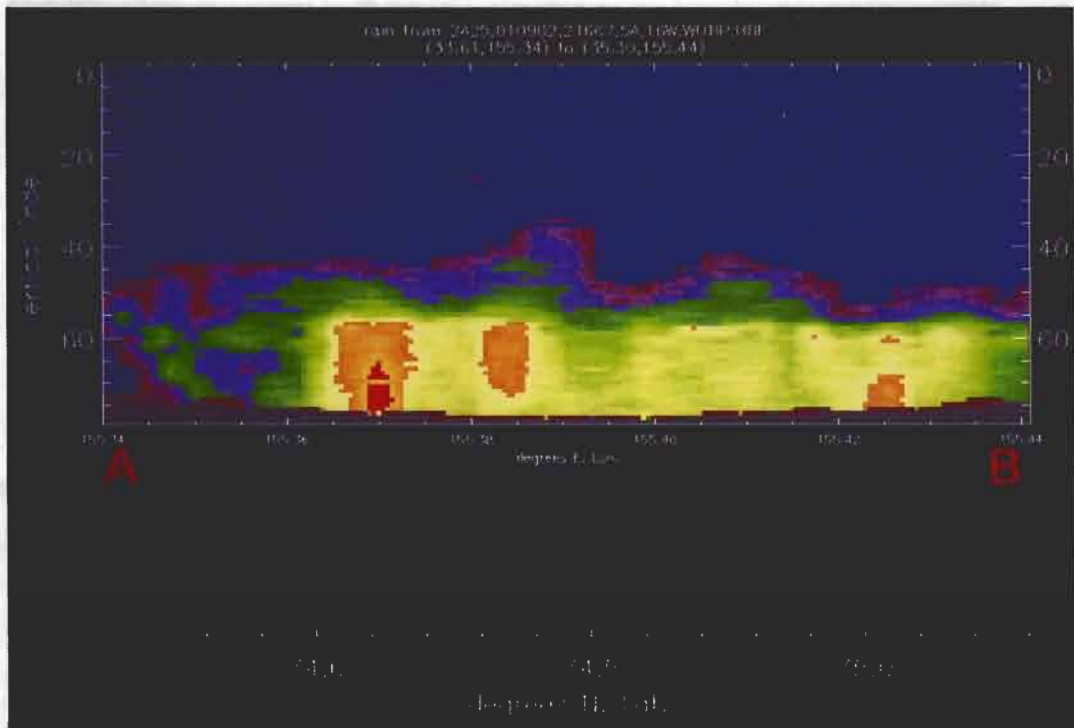


(a)

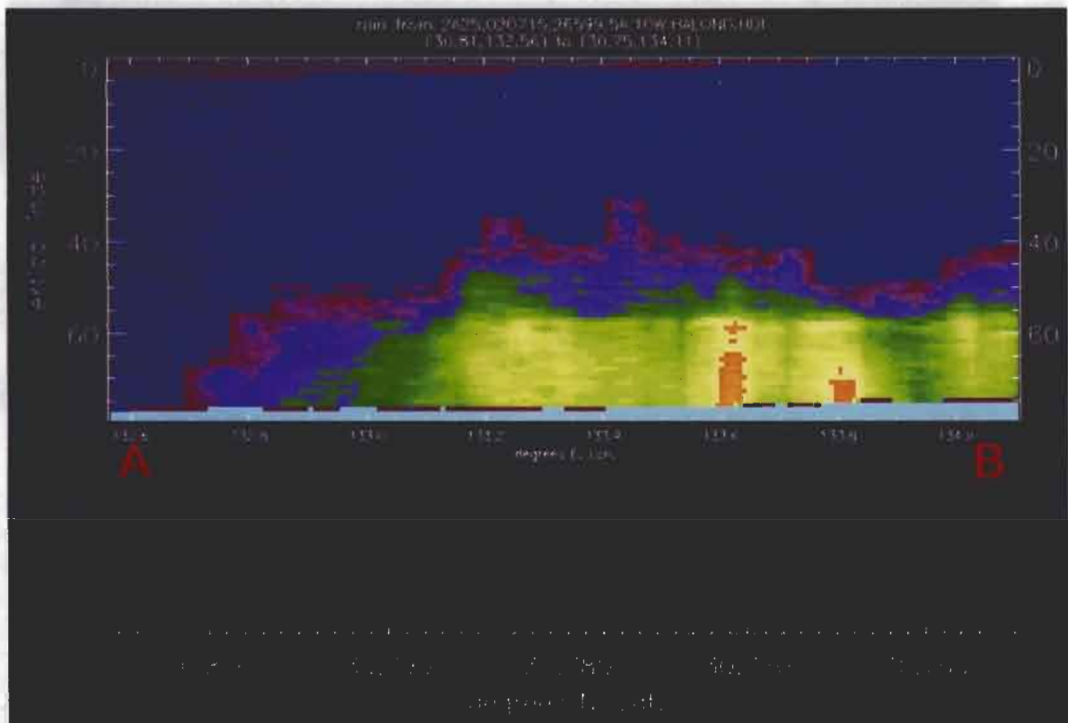


(b)

圖 18 (a)、(b)為梧提、哈隆颱風在消散期距地面 2 公里之 PR 反演降雨分佈。



(a)



(b)

圖 19 (a)為梧提颱風 AB 垂直剖面；(b)為哈隆颱風之 AB 垂直剖面。(color bar 同圖 18)

遍集中在 10 mm/h 或以下，少部分區域有超過 30 mm/h 的強降雨產生。這些較高降雨強度的區域，可能是在成熟期發展的對流系統，當颱風進入消散期之後，這些對流系統尚未完全消散；或是在這時期所發展出對流，應發展高度不高，強度不強，所以看到降雨強度較高的區域，應該就是那些對流系統。圖 19 為垂直剖面的線段位置及其剖面圖。以 storm height 的高度而言，平均約在第 30 層，相當於 7.5 公里的高度，與前個時期相比較，明顯地下降 2.5 公里。如圖中所示，對流胞發展的較弱且高度亦不高，推測此時的對流發展應該是屬於淺對流的特徵。如果從 2A12 的地面降雨來分析，整體反映出無高於 10 mm/h 的降雨值，顯示弱降雨區的廣泛存在應該是這時期最主要的特徵。不過，在圖 19(a)，於經度 155.385 位置上對流胞，也顯示出降雨停留在空中的特性，但出現在這時

期，是比較特殊的。

(四) 討論與分析

整體而言，剛開始颱風降雨發展高度的變化從初生期的發展高度約 15~18 公里降低至 10~12 公里。再加上颱風雲系在初期是以颱風中心為主要的雲團，到成熟期是有螺旋雲帶與颱風眼牆的分佈；以及依據 PR 降雨的水平分佈與垂直分佈來推斷，颱風的初生期是一群無組織性的對流集合體(convective complex)，到達成熟階段之後，這一群無組織性的對流被整合成組織性相當良好對流系統。透過颱風發展之整個環流過程的瞭解，颱風環流在低層輻合高層輻散，所以颱風中心是以低壓的型態出現，而高層相對則是高壓。當颱風發展進入成熟期之後，原本由個別發展的對流轉變為有組織的對流系統時，其發展高度受到抑制。但是這樣的系統卻可以維持很長的時間，而且一直不斷發展。

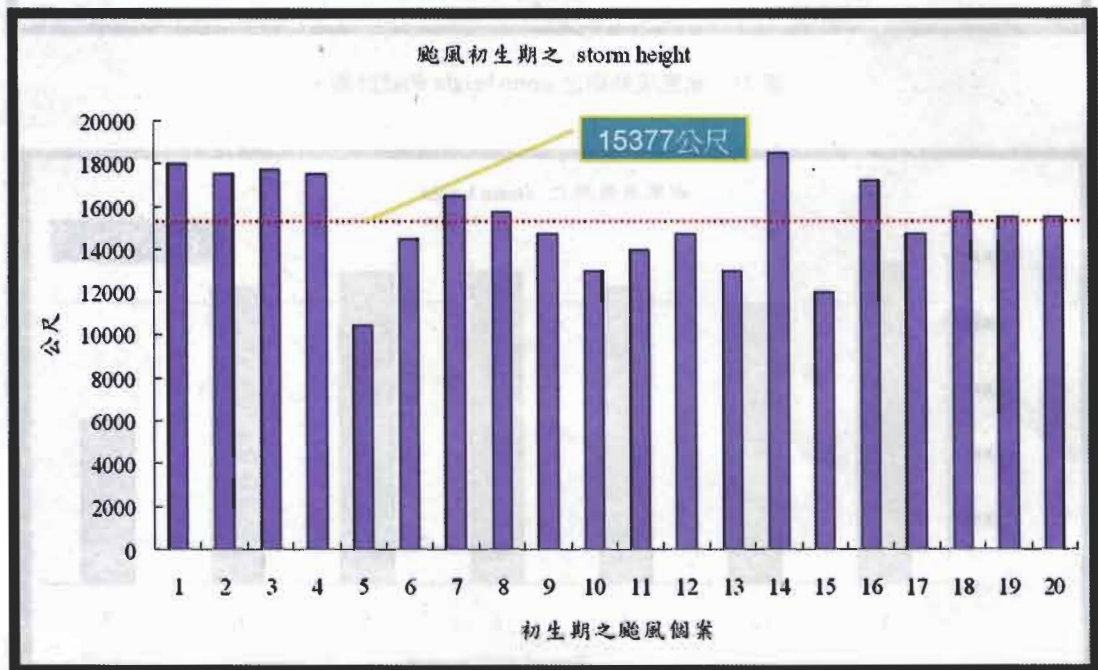


圖 20 颱風初生期之 storm height 的統計圖。

藉由此兩個案的分析結果，發現 storm 颶風，其 storm height 的平均約為 15.3 公里；height 在不同的時期有不同的變化。圖 20、圖 21 和圖 22 分別表示不同時期颶風之 storm height，而紅色的線條則標示出其平均值。在初生期的

成熟期的颶風，其 storm height 的平均約為 12.9 公里；消散期的颶風，其 storm height 的平均約為 8.6 公里。從颶風的初生期到成熟期，最後到

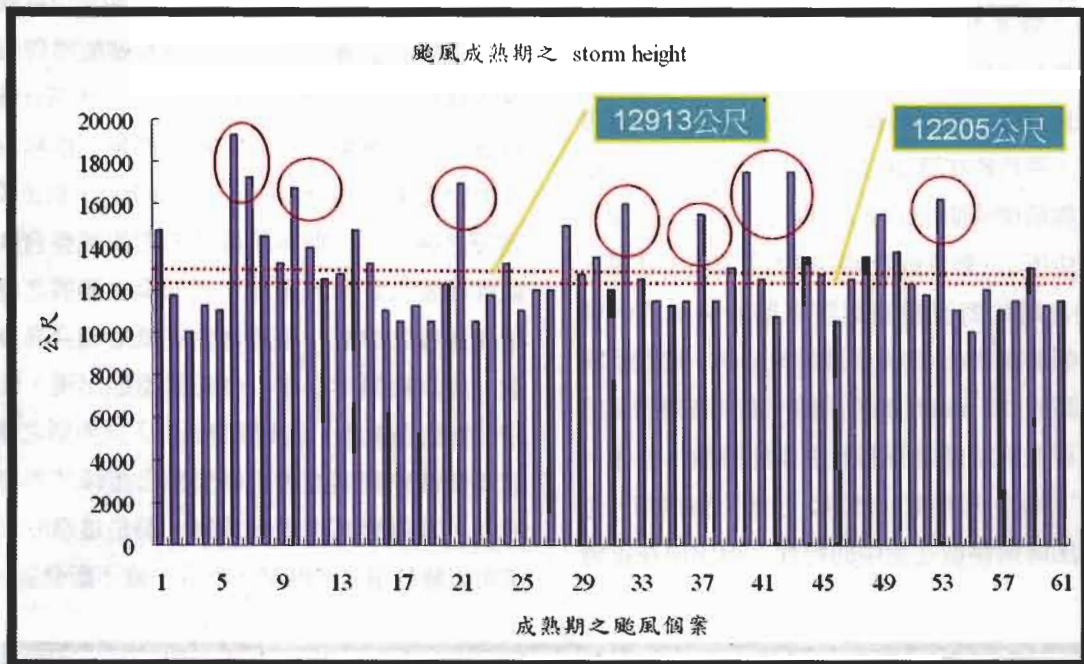


圖 21 颶風成熟期之 storm height 的統計圖。

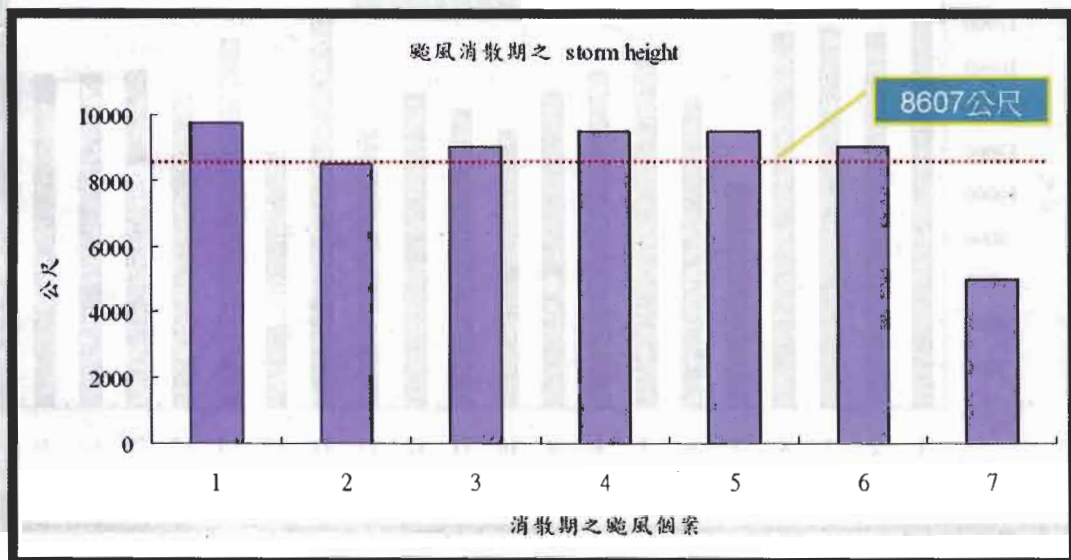


圖 22 颶風消散期之 storm height 的統計圖。

消散期，storm height 不斷隨颱風生命期的變化而降低，間接的顯示從初生期到成熟期的對流發展高度受到抑制，而從成熟期到消散期的對流發展可能是受到環境場改變的影響。因為缺少有利的發展環境，所以對流發展的也不高。但是在圖 21 中仍然可以發現到有 storm height 的高度到達 16 公里以上，也就是在颱風的成熟階段。根據 Kelley 和 Stout (2004) 對於颱風眼牆中對流塔(convective towers)的研究結果顯示這樣的對流塔可以發展超過 15 公里，甚至可以達到 18 公里，相當於平流層底部。而且對流塔的出現與颱風強度增強有關，在一個颱風內出現有 2 個以上的對流塔，颱風增強的機率相當高。如果出現在較強的颱風中，其增強的機率有 35%；如過是在較弱的颱風中出現，其增強的機率可以達到 50%。如果將這些平均發展高度大

於 15 公里以上的對流塔排除之後，成熟期之 storm height 則為 12.2 公里，其高度降低更為明顯。

圖 23 為颱風各個生命期 storm height 之平均值與標準差，在初生期的平均值為 15337 公尺、標準差為 2135 公尺、取樣數為 20；成熟期的平均值為 12205 公尺、標準差為 1335 公尺、取樣數為 52（不含 9 筆 storm height 超過 15 公里的個案資料）；消散期的平均值為 8607 公尺、標準差為 1644 公尺、取樣數為 7。從數據中可以發現初生期的 storm height 變動最大，而成熟期與消散期的變動較小。一般而言對於成熟期的颱風具有一定的規律性是比較好掌握的，然而對於初生期的颱風而言，其變異性較大也較不易掌握。

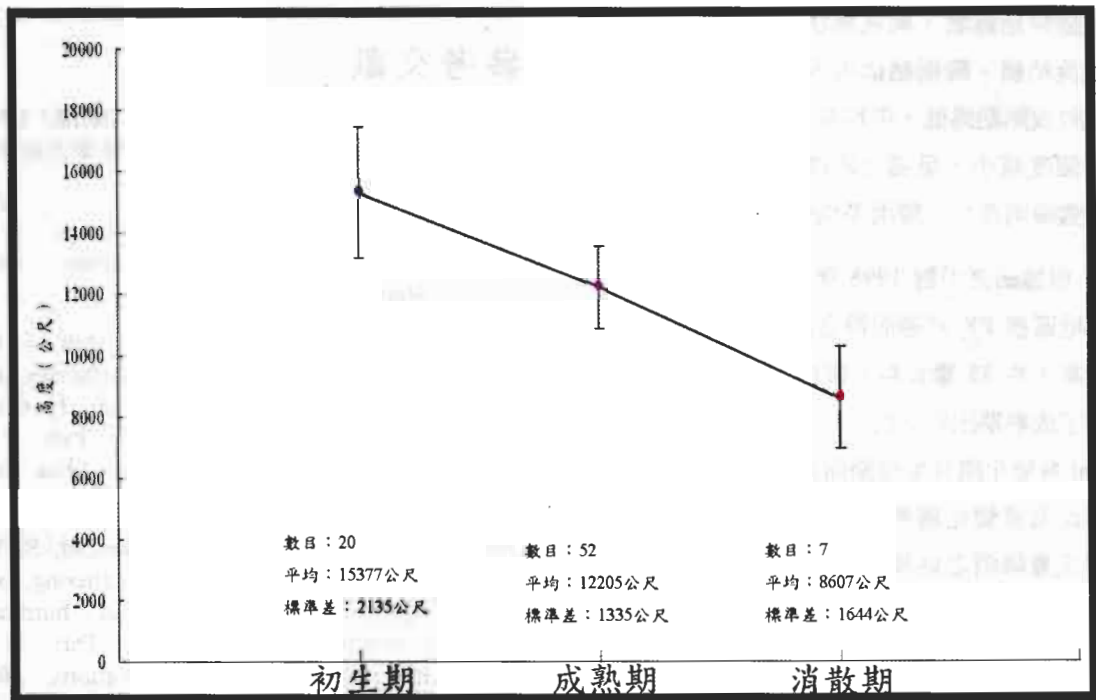


圖 23 颱風各個生命期之的平均值與標準差（不含 9 筆 storm height 超過 15 公里的成熟期颱風個案資料）。

五、結論與展望

海上颱風在初生期階段的降雨區域散亂，主要以單獨發展的對流胞為主，颱風眼及眼牆尚未形成。在降雨結構方面，storm height 可以達到 15 公里，甚至有些可以達到 18 公里，其平均在 15.3 公里。

成熟期的颱風眼的形狀接近圓形的強降雨位置，與強化之紅外線衛星雲圖中亮度溫度最低的位置相配合。颱風眼及眼牆結構明顯，眼的形狀多樣變化。在降雨結構上明顯發現 storm height 平均降至 12.2 公里。在降雨強度上普遍比初生期要來的強，且範圍也變大，但眼牆附近仍是最強的區域。

消散期的颱風雲系環流仍可見，但降雨區域的分佈並不如成熟期來的一致。而高層雲系雖增多，但並無降雨。颱風眼迅速消失，眼牆的結構開始鬆散，颱風無法維持其原有的形狀與環流結構。降雨結構與成熟期相似，但發展高度較成熟期為低，平均高度降低至 8.6 公里。降雨強度減小，呈獨立的淺對流發展，且無明顯的強降雨產生，降雨平均值約為 10 mm/h。

根據研究中對 1998 年至 2002 年於西北太平洋地區被 PR 掃過而符合選取規則的 27 個颱風個案（共 88 筆資料）做統計分析的結果，發現除了成熟期出現的對流塔之外，颱風之 storm height 會變化隨其生命期而有線性遞減趨勢。藉瞭解此高度變化趨勢，將有助於颱風降雨之分類與定量降雨之估算。此外，比較微波及紅外線資料與降雨的關係，再度驗證了微波在降雨反演的優異性。

再者，颱風在不同時期的降雨，在垂直高度上有明顯的不同，降雨強度也有顯著變化。

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。所以，後續研究中 PR 可與其它衛星資料交互運用以彌補其時間解析之不足，以利加強對颱風演變及降雨改變的偵測與分析，達到對颱風降雨精確估算，以達事前防災的目的。由此也說明引入新的降雨觀測儀器，確實有助於我們更加瞭解天氣系統內部降雨的特徵，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。

致 謝

本文在國科會專題研究計畫 NSC93-2625-Z-014-003 支持下完成，謹此致謝。特別感謝審查者細心審查本文，及對本文的寶貴建議。並感謝國防大學中正理工學院蔡明達先生在資料整理方面的協助。

參考文獻

- 張保亮、周仲島、李文兆，2002：賀伯颱風(1996)中尺度分析：第一部分：眼牆環流結構。大氣科學，30，201-216。
- Anthes, R., 1982: Tropical cyclones: Their evolution, structure, and effects, *Amer. Meteor. Soc.*, Boston, 208 pp.
- Daniel, J. C., Zipser, E. J., and Nesbitt, S. W., 2002a: Reflectivity, ice scattering, and lightning characteristics of hurricane eyewalls and rainbands. Part I: Quantitative description, *Mon. Wea. Rev.*, 130, 769-784.
- Daniel, J. C., Zipser, E. J., and Nesbitt, S. W., 2002b: Reflectivity, ice scattering, and lightning characteristics of hurricane eyewalls and rainbands. Part II: Intercomparison of observations, *Mon. Wea. Rev.*, 130, 785-801.
- Emanuel, K. A., 1986: An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part I: Steady-state

- maintenance, *J. Atmos. Sci.*, **43**, 585-604.
- GMS-5 User's Guide, 1997, Meteorological satellite center of Japan, Nakakiyoto, Tokyo, 190 pp.
- Houze, R. A., 1997: Stratiform precipitation in regions of convection: A meteorological paradox ?, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 2179-2196.
- Kelley, O. A., and Stout, J., 2004: Convective towers in eyewalls of tropical cyclones observed by the TRMM Precipitation Radar in 1998~2001, *84th AMS annual meeting*, Seattle, WA, January 10-16, p1.43.
- Kummerow, C., Barnes, W., Kozu, T., Shiue, J., and Simpson, T., 1998: The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Sensor Package, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **15**, 809-817.
- Lim, Hyo-Suk, Choi, Gi-Hyuk, and Kim, Han-Dol, 2000: Characteristics of Typhoon Jelawat observed by OSMI, TRMM/PR and QuikSCAT, *Journal of the Korean Society of Remote Sensing*, **16**, 4, 293-303.
- Prata, A. J. and Cechet, R. P., 1999: An assessment of the accuracy of land surface temperature determination from the GMS-5 VISSR, *Remote Sens. Environ.*, **67**, 1-14.
- Shapiro, L. J., and Willoughby, H. E., 1982: The response of balanced hurricanes to local sources of heat and momentum, *J. Atmos. Sci.*, **39**, 378-394.
- Toshiaki, K., Kawanishi, T., Kuroiwa, H., Kojima, M., Oikawa, K., Kumagai, H., Okamoto, K., Okumura, M., Nakatsuka, H., and Nishikawa, K., 2001: Development of Precipitation Radar onboard the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) satellite, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **39**, 102-116.
- Willoughby, H. E., Closs, J. A., and Shoreibah, M. G., 1982: Concentric eyewall, secondary wind maxima, and the evolution, *J. Atmos. Sci.*, **39**, 395-411.

Using TRMM / PR Data to Analyze Typhoon Rainfall Characteristics over the Oceans

Ching-Chung Li¹ Chin-Hui Feng² Chung-Chih Liu² Ta-Ming Shih¹

¹Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University

²The Weather Wing, Republic of China Air Force

(Manuscript received 30 November 2004 ; in final form 28 March 2005)

ABSTRACT

The Precipitation Radar (PR) of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) is the first space-borne radar that is cable of resolving the detailed vertical structure of rain profile. Covering 1998 through 2002, 88 overpasses of 27 typhoons of West Pacific Ocean by the TRMM satellite are used to document the observed rain rate (RR) and the PR measurements. The life cycle of tropical cyclones consist of three stages such as the genesis stage, the mature stage and the decaying stage. In all my collecting dataset, the data of WUTIP and HALONG typhoons have over the life cycle, so we use them to analyze 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 RR of 1 mm/h as the storm height. Resulting the average altitude of the storm height is 15.3 km in the genesis stage, even higher than 18 km. In mature stage, the average altitude of the storm height is 12.2 km. If convective towers exist, than the altitude is higher as the genesis stage. In the decaying, the average altitude of the storm height is 8.6 km. Aspect of the intensity of RR, 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. We also discover many kind of eye's shape and the most are circular and elliptical, but polygonal eye also being found.

Key words: TRMM, PR, Typhoon rainfall characteristics