

國立臺灣師範大學理學院地球科學研究所

碩士論文

Graduate Institute of Earth Sciences

College of Science

National Taiwan Normal University

Master Thesis

康芮颱風(2013)結構演變與對流降水關係之研究

A study on the structural evolution of Typhoon Kong-Rey (2013)
and its relationship with convective precipitation



指導教授：王重傑 博士

Advisor: Chung-Chieh Wang, Ph.D.

中華民國 105 年 8 月

August, 2016

致謝

本篇論文得以完成，首先感謝指導教授——王重傑老師，有王老師細心指導與關鍵時刻之建議，才可使論文方向更加確定完善，尤其老師撰寫程式之功力更是令人佩服，許多複雜之計算程式均由老師親自獨力完成，成為學生努力精進學習之目標。再來感謝臺大之陳泰然老師與本校之簡芳萱老師，於百忙之中擔任學生之論文口試委員，兩位老師精闢之見解亦讓學生受益良多，提出許多未來可以更加深入研究之方向，並使學生之論文內容更臻完善。

在我二年之研究生涯中，鑫濤學長總是給予無盡之幫助，無論是電腦程式上之協助或繪圖技巧上之教導，總能幫助我解決問題並從中學取經驗，若無鑫濤學長之解惑與鼓勵，研究生之路勢必拉長，故心中滿是感激。擁有強大程式技巧之智昇學長與心怡學姊亦適時伸出援手，使電腦程式之操作可更加順利，亦萬分感謝。感謝研究室中之美鳳學姊、怡文學姊、璧瑜學姊及家餘學長辛苦打理一切行政事務，總是可讓我們學生無後顧之憂進行研究工作，並適時給予鼓勵，若無你們，研究之路將走得更艱辛。

22年前7月，一場提姆颱風開起我對大氣科學之熱愛，十多年來，這條大氣路走得並不順遂，但強烈之興趣與渴望最終使我成為大氣人之一份子，未來之大氣路依舊蜿蜒且充滿挑戰，但為所愛之大氣，無所畏懼，繼續堅持走下去！

李茂正

民國105年8月，於青年公園

摘要

2013 年 8 月下旬輕度颱風康芮(Kong-Rey)侵臺期間，衛星及雷達觀測資料均顯示其雨帶結構明顯不對稱，強對流雨帶多位於颱風中心之南側與西南側，且其渦旋垂直結構亦有傾斜現象，導致最大降雨區位於離颱風中心較遠之中、南部地區，累積雨量達 500-700 mm 以上，造成不少災損與人員傷亡，反觀離颱風中心最近之臺灣北部及東半部地區雨量則明顯偏少，多數地區累積雨量甚至不到 50 mm。

本研究利用雲解析風暴(CReSS)模式模擬康芮颱風侵臺時之結構與降水演變，並進行地形敏感度實驗及位渦傾向診斷。模擬結果顯示，康芮颱風位於海面上時，其雨帶之不對稱性(南強北弱)主要為環境流場東北向西南之垂直風切造成，而雨帶成因為颱風環流西側之偏北風與巴士海峽之西南風輻合所致，且隨著康芮颱風北上接近臺灣地區，此輻合區與雨帶亦隨之北移進入臺灣陸地，配合地形強迫舉升，產生南北走向平行山脈之滯留性雨帶，遂於臺灣中、南部地區造成致災性豪雨。

地形敏感度實驗中，Control Run 實驗因地形鎖定降水區域，使臺灣陸地上空產生大量潛熱釋放與垂直運動，導致中層正位渦隨時間增加，康芮颱風中層渦旋因而產生偏西分量移入臺灣陸地，而其低層之颱風中心則受地形阻擋持續北移，兩者遂產生明顯之相位差，使渦旋垂直結構隨高度向上向臺灣地形傾斜。No-Terrain Run 實驗中，移除臺灣之高山地形，颱風北移時潮濕西南風仍可匯入康芮颱風之中心附近，維持中心附近螺旋雨帶之生成與發展，進而使接近颱風中心之臺灣北部與東半部地區累積雨量較 Control Run 明顯增多，但因缺少地形鎖定之滯留性雨帶，臺灣上空中層之

正位渦值明顯較 Control Run 小，使康芮颱風之中層渦旋無法產生明顯之偏西分量，遂可維持較垂直之渦旋結構。

關鍵字：康芮颱風、渦旋垂直結構、位渦、地形效應、臺灣。



Abstract

Tropical Storm (TS) Kong-Rey (2013) affected Taiwan in late August 2013. During this period, satellite and radar observations indicated clear asymmetric structure, with its active convection and rainfall located most to the south and southwest of the typhoon center and a tilted vortex vertical structure. As a result, the maximum rainfall in Taiwan was over its southwestern region and far from the typhoon center, with an accumulative amount of over 500-700 mm that caused much damage and several casualties. On the other hand, over northern and eastern Taiwan closer to the storm center, only little rainfall was received (mostly below 50 mm).

In this study, the Cloud-Resolving Storm Simulator (CReSS) is used to successfully reproduce the evolution of TS Kong-Rey and related weather phenomena during the period when it affected Taiwan. The control (CTRL) simulation shows that the asymmetric rainfall of the storm was mainly due to the strong vertical wind shear (from northeast to southwest) in the environmental flow during the approach of Kong-Rey over the Bashi Channel. An intense rainband formed along the convergence zone between the northerly typhoon circulation and the southwesterly flow over the southern Taiwan Strait. Later when the storm moved further north, this rainband also moved overland into southwestern Taiwan and became stationary and north-south oriented (parallel to topography), and produced heavy rainfall and the subsequent hazards with enhancement from terrain uplifting.

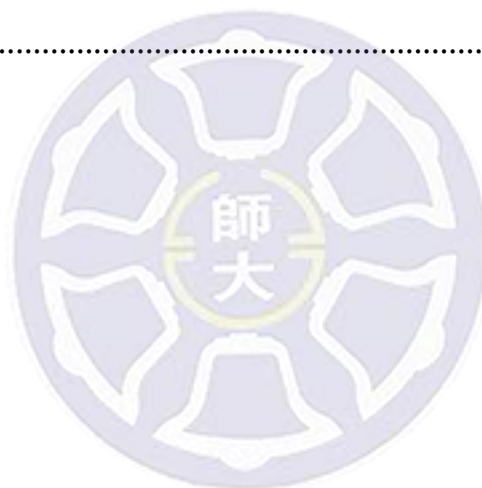
In the CTRL experiment, the convection is also phase-locked to the topography of Taiwan, and the associated latent heating effect leads to an increase in mid-level potential vorticity (PV) with time and a westward moving tendency of the mid-level vortex. In contrast, the low-level storm center, being blocked by the Central Mountain Range (CMR), continues to move northward as observed and results in the significant vertical tilt (toward the Taiwan terrain with height). In the “no-terrain” (NT) where the Taiwan topography is removed, the strong convection and rainband become migratory and move with the storm, more rain is simulated over northern and eastern Taiwan, the PV production over Taiwan is less, and the vertical tilt of the storm is also reduced compared to the CTRL. Thus, the topographic effect of Taiwan on convection and precipitation was also a key factor (in addition to the vertical wind shear) in the maintenance of the tilted vertical structure of Kong-Rey (2013) when it passed by Taiwan.

Keywords: Typhoon Kong-Rey, vortex vertical structural, potential vorticity, topographic effect, Taiwan.

目錄

致謝.....	i
中文摘要.....	ii
英文摘要.....	iv
目錄.....	vi
圖表目錄.....	viii
第一章 前言.....	1
1-1 文獻回顧.....	2
1-2 研究動機.....	5
1-3 論文架構.....	6
第二章 資料來源與研究方法.....	7
2-1 資料來源.....	7
2-2 研究方法.....	8
2-3 模式簡介.....	9
2-4 模式設定.....	11
2-5 位渦傾向方程.....	12
第三章 康芮颱風個案分析.....	14
3-1 綜觀天氣特徵分析.....	15
3-2 中尺度天氣特徵分析——衛星雲圖.....	16
3-3 中尺度天氣特徵分析——雷達回波圖與雙都卜勒風場.....	18
3-4 中尺度天氣特徵分析——累積雨量圖.....	19
3-5 小結.....	21

第四章 地形敏感度實驗與模擬結果.....	23
4-1 控制組 (Control Run) 實驗結果.....	23
4-2 移除臺灣地形組(No-Terrain Run)實驗結果.....	27
4-3 位渦傾向診斷.....	30
4-4 小結.....	32
第五章 總結.....	34
參考文獻.....	38
附表.....	41
附圖.....	43



圖表目錄

表 2.1、CReSS 模式個案實驗之模擬參數設定。.....	41
表 2.2、CReSS 模式個案實驗之每層高度列表，單位為公尺(m)。.....	42
圖 1.1、1949-2000 年間於臺灣及其近海過境之颱風因中央山脈影響路徑變化之模式圖。(摘自王，2007).....	43
圖 1.2、1979-1996 年間沿臺灣山脈東側北上之第六類路徑颱風範例，彩色路徑為「分裂過山」之颱風個案，白色路徑則為非「分裂過山」者，黃色長方形區域為「分裂過山」與否之關鍵區，粗紅線則為後製之康芮颱風路徑。(摘自「侵台颱風預報輔助系統」網頁)...	44
圖 1.3、2004 年敏督利颱風路徑圖(由臺灣海峽上之副中心取代登陸花蓮之原中心北上)。(摘自「侵台颱風預報輔助系統」網頁).....	45
圖 1.4、環境垂直風切與颱風對流關係示意圖，黑色粗箭頭為低層氣流，黑色細箭頭為颱風氣流場，灰色粗箭頭為高層氣流，白色箭頭為水相與冰相粒子之平流傳送方向，“+”為初始上衝流，“-”為主要下衝流，黑色陰影區為 45-50 dBZ 之強對流區，深灰色陰影區為眼牆區，淺灰色陰影區為雲砧。(摘自 Black et al. 2002).....	46
圖 1.5、深厚濕對流系統產生位渦距平示意圖。(摘自 Markowski and Richardson, 2010).....	47
圖 1.6、颱風傾向環境正位渦最大值處移動示意圖，上圖為颱風朝正位渦傾向之方向移動，中圖為颱風朝正位渦值較大處移動，下圖為颱風朝負位渦值較小處移動。(摘自陳，2013).....	48
圖 1.7、莫拉克颱風之不對稱潛熱效應影響移速示意圖，黑色虛線範圍為強降雨區，黑色點線範圍為降雨區，黑色粗箭頭為潛熱效應產生向東南方之微小向量，紫色箭頭為環境駛流方向，紅色箭頭為兩	

向量合成莫拉克颱風之移速移向，其結果使颱風整體移速減慢。(摘自 Wang et al. , 2012).....	49
圖 1.8、1991-2008 年颱風降雨氣候統計模式圖，紅色方形區為後製康芮颱風通過之區域，單位： mm h^{-1} 。(摘自葉等，2010).....	50
圖 2.1、CReSS 模式冷雨過程中各種水(冰)相粒子間轉換之雲物理過程示意圖。其中 q_c 、 q_r 、 q_i 、 q_s 、 q_g 分別代表雲水、雨、雲冰、雪、雹之混合比， NUA_{vi} 代表澱積核形成(deposition or sorption nucleation)、 NUC_{ci} 代表接觸凍結核形成(contact nucleation)、 NUH_{ci} 代表均質凍結核形成(homogeneous nucleation)、 SP 代表二次冰晶生成(secondary nucleation of ice crystals)、 VD 代表氣相沉積、蒸發、與昇華(vapor deposition, evaporation, and sublimation)、 CL 代表合併收集(collection)、 AG 代表凝集(aggregation)、 CN 代表粒子間轉換(conversation)、 ML 代表融解(melting)、 FR 代表凍結(freezing)、 SH 代表液態水剝離(shedding of liquid water)。	51
圖 2.2、CReSS 模式模擬範圍(水藍色區域).....	52
圖 3.1、中央氣象局康芮颱風路徑圖.....	53
圖 3.2、中央氣象局 2013 年 8 月 26 日 1200 UTC 之 850 hPa 天氣圖。(黑色線為等高線，單位： gpm 。紅色虛線為等溫線，單位： $^{\circ}\text{C}$)....	53
圖 3.3、CIMSS 8 月 26 日 0600 UTC 之 700 至 850 hPa 平均氣流圖。(白色線條為氣流線，彩色區域為風速，單位： knot 。)	54
圖 3.4 a、同圖 3.3，但為 26 日 0000 UTC 400 至 850 hPa 平均氣流圖。...	54
圖 3.4 b、同圖 3.4 a，時間為 26 日 0600 UTC。	55
圖 3.4 c、同圖 3.4 a，時間為 26 日 1200 UTC。	55
圖 3.4 d、同圖 3.4 a，時間為 26 日 1800 UTC。	56
圖 3.4 e、同圖 3.4 a，時間為 27 日 0000 UTC。	56

圖 3.4 f、同圖 3.4 a ，時間為 27 日 0600 UTC。	57
圖 3.4 g、同圖 3.4 a ，時間為 27 日 1200 UTC。	57
圖 3.4 h、同圖 3.4 a ，時間為 27 日 1800 UTC。	58
圖 3.4 i、同圖 3.4 a ，時間為 28 日 0000 UTC。	58
圖 3.4 j、同圖 3.4 a ，時間為 28 日 0600 UTC。	59
圖 3.4 k、同圖 3.4 a ，時間為 28 日 1200 UTC。	59
圖 3.4 l、同圖 3.4 a ，時間為 28 日 1800 UTC。	60
圖 3.4 m、同圖 3.4 a ，時間為 29 日 0000 UTC。	60
圖 3.4 n、同圖 3.4 a ，時間為 29 日 0600 UTC。	61
圖 3.4 o、同圖 3.4 a ，時間為 29 日 1200 UTC。	61
圖 3.4 p、同圖 3.4 a ，時間為 29 日 1800 UTC。	62
圖 3.5、中央氣象局康芮颱風之衛星觀測強度估計。(藍色實線為中心氣壓(hPa)，紅色虛線為中心附近最大持續風速(m s^{-1})。)	62
圖 3.6 a、CIMSS 8 月 27 日 0000 UTC 之深層垂直風切(約 200 減 850 hPa)疊加水氣頻道雲圖。(橘色氣流線為風切方向，等值線為風切強度，單位：knot。)	63
圖 3.6 b、同圖 3.6 a，時間為 27 日 0600 UTC。	63
圖 3.6 c、同圖 3.6 a，時間為 27 日 1200 UTC。	64
圖 3.6 d、同圖 3.6 a，時間為 27 日 1800 UTC。	64
圖 3.6 e、同圖 3.6 a，時間為 28 日 0000 UTC。	65
圖 3.6 f、同圖 3.6 a，時間為 28 日 0600 UTC。	65
圖 3.6 g、同圖 3.6 a，時間為 28 日 1200 UTC。	66
圖 3.6 h、同圖 3.6 a，時間為 28 日 1800 UTC。	66
圖 3.6 i、同圖 3.6 a，時間為 29 日 0000 UTC。	67
圖 3.6 j、同圖 3.6 a，時間為 29 日 0600 UTC。	67

圖 3.6 k、同圖 3.6 a，時間為 29 日 1200 UTC。	68
圖 3.6 l、同圖 3.6 a，時間為 29 日 1800 UTC。	68
圖 3.7-1 a、NRL 27 日 0032 UTC 之可見光雲圖。	69
圖 3.7-1 b、NRL 27 日 0132 UTC 之可見光雲圖。	69
圖 3.7-1 c、NRL 27 日 0232 UTC 之可見光雲圖。	70
圖 3.7-1 d、NRL 27 日 0332 UTC 之可見光雲圖。	70
圖 3.7-1 e、NRL 27 日 0432 UTC 之可見光雲圖。	71
圖 3.7-1 f、NRL 27 日 0532 UTC 之可見光雲圖。	71
圖 3.7-1 g、NRL 27 日 0632 UTC 之可見光雲圖。	72
圖 3.7-1 h、NRL 27 日 0732 UTC 之可見光雲圖。	72
圖 3.7-1 i、NRL 27 日 0832 UTC 之可見光雲圖。	73
圖 3.7-2 a、NRL 28 日 0032 UTC 之可見光雲圖。	73
圖 3.7-2 b、NRL 28 日 0132 UTC 之可見光雲圖。	74
圖 3.7-2 c、NRL 28 日 0232 UTC 之可見光雲圖。	74
圖 3.7-2 d、NRL 28 日 0332 UTC 之可見光雲圖。	75
圖 3.7-2 e、NRL 28 日 0432 UTC 之可見光雲圖。	75
圖 3.7-2 f、NRL 28 日 0532 UTC 之可見光雲圖。	76
圖 3.7-2 g、NRL 28 日 0632 UTC 之可見光雲圖。	76
圖 3.7-2 h、NRL 28 日 0732 UTC 之可見光雲圖。	77
圖 3.7-2 i、NRL 28 日 0832 UTC 之可見光雲圖。	77
圖 3.7-3 a、NRL 29 日 0032 UTC 之可見光雲圖。	78
圖 3.7-3 b、NRL 29 日 0132 UTC 之可見光雲圖。	78
圖 3.7-3 c、NRL 29 日 0232 UTC 之可見光雲圖。	79
圖 3.7-3 d、NRL 29 日 0332 UTC 之可見光雲圖。	79
圖 3.7-3 e、NRL 29 日 0432 UTC 之可見光雲圖。	80

圖 3.7-3 f、NRL 29 日 0532 UTC 之可見光雲圖。.....	80
圖 3.7-3 g、NRL 29 日 0632 UTC 之可見光雲圖。.....	81
圖 3.7-3 h、NRL 29 日 0732 UTC 之可見光雲圖。.....	81
圖 3.7-3 i、NRL 29 日 0832 UTC 之可見光雲圖。.....	82
圖 3.8-1 a、NRL 27 日 0032 UTC 之紅外線色調強化雲圖。.....	82
圖 3.8-1 b、NRL 27 日 0132 UTC 之紅外線色調強化雲圖。.....	83
圖 3.8-1 c、NRL 27 日 0232 UTC 之紅外線色調強化雲圖。.....	83
圖 3.8-1 d、NRL 27 日 0332 UTC 之紅外線色調強化雲圖。.....	84
圖 3.8-1 e、NRL 27 日 0432 UTC 之紅外線色調強化雲圖。.....	84
圖 3.8-1 f、NRL 27 日 0532 UTC 之紅外線色調強化雲圖。.....	85
圖 3.8-1 g、NRL 27 日 0632 UTC 之紅外線色調強化雲圖。.....	85
圖 3.8-1 h、NRL 27 日 0732 UTC 之紅外線色調強化雲圖。.....	86
圖 3.8-1 i、NRL 27 日 0832 UTC 之紅外線色調強化雲圖。.....	86
圖 3.8-2 a、NRL 28 日 0032 UTC 之紅外線色調強化雲圖。.....	87
圖 3.8-2 b、NRL 28 日 0132 UTC 之紅外線色調強化雲圖。.....	87
圖 3.8-2 c、NRL 28 日 0232 UTC 之紅外線色調強化雲圖。.....	88
圖 3.8-2 d、NRL 28 日 0332 UTC 之紅外線色調強化雲圖。.....	88
圖 3.8-2 e、NRL 28 日 0432 UTC 之紅外線色調強化雲圖。.....	89
圖 3.8-2 f、NRL 28 日 0532 UTC 之紅外線色調強化雲圖。.....	89
圖 3.8-2 g、NRL 28 日 0632 UTC 之紅外線色調強化雲圖。.....	90
圖 3.8-2 h、NRL 28 日 0732 UTC 之紅外線色調強化雲圖。.....	90
圖 3.8-2 i、NRL 28 日 0832 UTC 之紅外線色調強化雲圖。.....	91
圖 3.8-3 a、NRL 28 日 1332 UTC 之紅外線色調強化雲圖。.....	91
圖 3.8-3 b、NRL 28 日 1532 UTC 之紅外線色調強化雲圖。.....	92
圖 3.8-3 c、NRL 28 日 1632 UTC 之紅外線色調強化雲圖。.....	92

圖 3.8-3 d、NRL 28 日 1732 UTC 之紅外線色調強化雲圖。.....	93
圖 3.8-3 e、NRL 28 日 1832 UTC 之紅外線色調強化雲圖。.....	93
圖 3.8-3 f、NRL 28 日 1932 UTC 之紅外線色調強化雲圖。.....	94
圖 3.8-3 g、NRL 28 日 2032 UTC 之紅外線色調強化雲圖。.....	94
圖 3.8-3 h、NRL 28 日 2132 UTC 之紅外線色調強化雲圖。.....	95
圖 3.8-3 i、NRL 28 日 2232 UTC 之紅外線色調強化雲圖。.....	95
圖 3.8-3 j、NRL 28 日 2332 UTC 之紅外線色調強化雲圖。.....	96
圖 3.8-4 a、NRL 29 日 0032 UTC 之紅外線色調強化雲圖。.....	96
圖 3.8-4 b、NRL 29 日 0132 UTC 之紅外線色調強化雲圖。.....	97
圖 3.8-4 c、NRL 29 日 0232 UTC 之紅外線色調強化雲圖。.....	97
圖 3.8-4 d、NRL 29 日 0332 UTC 之紅外線色調強化雲圖。.....	98
圖 3.8-4 e、NRL 29 日 0432 UTC 之紅外線色調強化雲圖。.....	98
圖 3.8-4 f、NRL 29 日 0532 UTC 之紅外線色調強化雲圖。.....	99
圖 3.8-4 g、NRL 29 日 0632 UTC 之紅外線色調強化雲圖。.....	99
圖 3.8-4 h、NRL 29 日 0732 UTC 之紅外線色調強化雲圖。.....	100
圖 3.8-4 i、NRL 29 日 0832 UTC 之紅外線色調強化雲圖。.....	100
圖 3.9 a、QPESUMS 28 日 1600 UTC 之整合雷達回波圖疊加雙都風場。(風 標：深紅 1~2 km、深紫 3~4 km、桃紅 5~6 km、白色 7~10 km，單 位：knot。).	101
圖 3.9 b、同圖 3.9 a，時間為 28 日 1700 UTC。.....	101
圖 3.9 c、同圖 3.9 a，時間為 28 日 1800 UTC。.....	102
圖 3.9 d、同圖 3.9 a，時間為 28 日 1900 UTC。.....	102
圖 3.9 e、同圖 3.9 a，時間為 28 日 2000 UTC。.....	103
圖 3.9 f、同圖 3.9 a，時間為 28 日 2100 UTC。.....	103
圖 3.9 g、同圖 3.9 a，時間為 28 日 2200 UTC。.....	104

圖 3.9 h、同圖 3.9 a，時間為 28 日 2300 UTC。	104
圖 3.9 i、同圖 3.9 a，時間為 29 日 0000 UTC。	105
圖 3.9 j、同圖 3.9 a，時間為 29 日 0100 UTC。	105
圖 3.9 k、同圖 3.9 a，時間為 29 日 0200 UTC。	106
圖 3.9 l、同圖 3.9 a，時間為 29 日 0300 UTC。	106
圖 3.9 m、同圖 3.9 a，時間為 29 日 0400 UTC。	107
圖 3.9 n、同圖 3.9 a，時間為 29 日 0500 UTC。	107
圖 3.9 o、同圖 3.9 a，時間為 29 日 0600 UTC。	108
圖 3.9 p、同圖 3.9 a，時間為 29 日 0700 UTC。	108
圖 3.9 q、同圖 3.9 a，時間為 29 日 0800 UTC。	109
圖 3.9 r、同圖 3.9 a，時間為 29 日 0900 UTC。	109
圖 3.10、康芮颱風中層渦旋中心每三小時之定位與路徑圖。(28 日 1800 UTC 至 29 日 0900 UTC)	110
圖 3.11、27 日至 29 日(LST)臺灣地區之三日累積雨量圖(單位:mm)。	110
圖 3.12、29 日(LST)單日累積雨量圖(單位:mm)。	111
圖 3.13 a、29 日 0000 LST 至 0100 LST 之時雨量累積圖(單位:mm)。	111
圖 3.13 b、29 日 0100 LST 至 0200 LST 之時雨量累積圖(單位:mm)。	112
圖 3.13 c、29 日 0200 LST 至 0300 LST 之時雨量累積圖(單位:mm)。	112
圖 3.13 d、29 日 0300 LST 至 0400 LST 之時雨量累積圖(單位:mm)。	113
圖 3.13 e、29 日 0400 LST 至 0500 LST 之時雨量累積圖(單位:mm)。	113
圖 3.13 f、29 日 0500 LST 至 0600 LST 之時雨量累積圖(單位:mm)。	114
圖 3.13 g、29 日 0600 LST 至 0700 LST 之時雨量累積圖(單位:mm)。	114
圖 3.13 h、29 日 0700 LST 至 0800 LST 之時雨量累積圖(單位:mm)。	115
圖 3.13 i、29 日 0800 LST 至 0900 LST 之時雨量累積圖(單位:mm)。	115
圖 3.13 j、29 日 0900 LST 至 1000 LST 之時雨量累積圖(單位:mm)。	116

圖 3.13 k、29 日 1000 LST 至 1100 LST 之時雨量累積圖(單位:mm)。	...116
圖 3.13 l、29 日 1100 LST 至 1200 LST 之時雨量累積圖(單位:mm)。	...117
圖 3.13 m、29 日 1200 LST 至 1300 LST 之時雨量累積圖(單位:mm)。	...117
圖 3.13 n、29 日 1300 LST 至 1400 LST 之時雨量累積圖(單位:mm)。	...118
圖 3.13 o、29 日 1400 LST 至 1500 LST 之時雨量累積圖(單位:mm)。	...118
圖 3.13 p、29 日 1500 LST 至 1600 LST 之時雨量累積圖(單位:mm)。	...119
圖 3.13 q、29 日 1600 LST 至 1700 LST 之時雨量累積圖(單位:mm)。	...119
圖 3.13 r、29 日 1700 LST 至 1800 LST 之時雨量累積圖(單位:mm)。	...120
圖 3.13 s、29 日 1800 LST 至 1900 LST 之時雨量累積圖(單位:mm)。	...120
圖 3.13 t、29 日 1900 LST 至 2000 LST 之時雨量累積圖(單位:mm)。	...121
圖 3.13 u、29 日 2000 LST 至 2100 LST 之時雨量累積圖(單位:mm)。	...121
圖 3.13 v、29 日 2100 LST 至 2200 LST 之時雨量累積圖(單位:mm)。	...122
圖 3.13 w、29 日 2200 LST 至 2300 LST 之時雨量累積圖(單位:mm)。	...122
圖 3.13 x、29 日 2300 LST 至 30 日 0000 LST 之時雨量累積圖(單位:mm)。	...123
圖 4.1、中央氣象局康芮颱風每六小時之最佳路徑(藍色)及雙都卜勒風場每 三小時之康芮颱風中層渦旋(約 3~6 km)路徑圖(紅色)。	124
圖 4.2、CReSS CTRL Run 模擬路徑，康芮颱風海平面中心路徑(藍色)及 5771 m 中層渦旋路徑(紅色)，皆為每三小時一筆資料。	124
圖 4.3 a、康芮颱風 8 月 27 日 0600 UTC 之相對渦度場(10^{-5} s^{-1})、風場(knot) 與高度場(左側 NCEP – GFS – 925 hPa，單位：gpm)、氣壓場(右側 CReSS CTRL Run – 860 m，單位：Pa)。	125
圖 4.3 b、同圖 4.3 a，時間為 8 月 28 日 0000 UTC。	125
圖 4.3 c、同圖 4.3 a，時間為 8 月 29 日 0000 UTC。	125
圖 4.4 a、康芮颱風 8 月 27 日 0600 UTC 之相對渦度場(10^{-5} s^{-1})、風場(knot) 與高度場(左側 NCEP – GFS – 500 hPa，單位：gpm)、氣壓場(右側	

CReSS CTRL Run – 5771 m，單位：Pa)。	126
圖 4.4 b、同圖 4.4 a，時間為 8 月 28 日 0000 UTC。	126
圖 4.4 c、同圖 4.4 a，時間為 8 月 29 日 0000 UTC。	126
圖 4.5、12300 減 1506 m (約 200 減 850 hPa)之垂直風切(knot)，(27 日 0000 UTC 至 29 日 0600 UTC 每一小時之時間平均)。	127
圖 4.6、康芮颱風中心氣壓變化圖，紅線(CReSS)，藍線(CWB)。(單位 hPa)。	127
圖 4.7、Dvorak Technique TC 雲型判斷強度圖例。(摘自 Dvorak, 1975)...	128
圖 4.7-1、Dvorak Technique 估計 TC 強度換算表。(摘自 Dvorak, 1975)。	128
圖 4.8 a、大圖為 8 月 27 日 0400 UTC CReSS 模擬之 $q_{3\max}$ (g kg^{-1})、860 m (約 925 hPa)之氣流線與大於 $10 (10^{-5} \text{ s}^{-1})$ 之輻合區(粗虛線)， 左上角之小圖為 27 日 0441 UTC 康芮颱風 89 GHz 之微波頻道圖像。	129
圖 4.8 b、同圖 4.8 a，為 27 日 0900 UTC，小圖為 0847 UTC (91 GHz)。	129
圖 4.8 c、同圖 4.8 a，為 27 日 1400 UTC，小圖為 1352 UTC (85 GHz)。	130
圖 4.8 d、同圖 4.8 a，為 27 日 1700 UTC，小圖為 1702 UTC (89 GHz)。	130
圖 4.8 e、同圖 4.8 a，為 27 日 2100 UTC，小圖為 2119 UTC (91 GHz)。	131
圖 4.8 f、同圖 4.8 a，為 27 日 2200 UTC，小圖為 2203 UTC (85 GHz)。	131
圖 4.9 a、左圖為 8 月 28 日 0600 UTC CReSS CTRL Run 模擬之 $q_{3\max}$ (g kg^{-1})、860 m (約 925 hPa)之氣流線與大於 $10 (10^{-5} \text{ s}^{-1})$ 之輻合區(粗虛線)，右圖為相同時間中央氣象局之雷達合成回波圖。	132
圖 4.9 b、同圖 4.9 a，時間為 8 月 28 日 1200 UTC。	132
圖 4.9 c、同圖 4.9 a，時間為 8 月 28 日 1800 UTC。	133
圖 4.9 d、同圖 4.9 a，時間為 8 月 29 日 0000 UTC。	133
圖 4.9 e、同圖 4.9 a，時間為 8 月 29 日 0600 UTC。	134

圖 4.9 f、同圖 4.9 a，時間為 8 月 29 日 1200 UTC。	134
圖 4.10、8 月 29 日(地方時；LST)日累積雨量圖，左圖為 CReSS CTRL Run 之模擬結果，右圖為中央氣象局之觀測結果。(單位：mm).....	135
圖 4.11、CReSS NT Run 模擬路徑，康芮颱風海平面中心路徑(綠色)及 5771 m 中層渦旋路徑(桃紅色)，皆為每三小時一筆資料，左下小圖同圖 4.2。	135
圖 4.12、康芮颱風中心氣壓變化圖，紅線(CReSS NT Run)，藍線(CWB)。(單位：hPa).....	136
圖 4.13 a、CReSS NT Run 模擬之康芮颱風 8 月 27 日 0600 UTC 之相對渦度場(10^{-5} s^{-1})、風場(knot)與氣壓場(Pa)，左圖為 860 m，右圖為 5771 m。	137
圖 4.13 b、同圖 4.13 a，時間為 8 月 28 日 0000 UTC。	137
圖 4.13 c、同圖 4.13 a，時間為 8 月 29 日 0000 UTC。	137
圖 4.14 a、8 月 28 日 0600 UTC CReSS NT Run 模擬之 $q_3\text{max}$ (g kg^{-1})、860 m (約 925 hPa)之氣流線與大於 10 (10^{-5} s^{-1})之輻合區(粗虛線)。	138
圖 4.14 b、同圖 4.14 a，時間為 8 月 28 日 1200 UTC。	138
圖 4.14 c、同圖 4.14 a，時間為 8 月 28 日 1800 UTC。	139
圖 4.14 d、同圖 4.14 a，時間為 8 月 29 日 0000 UTC。	139
圖 4.14 e、同圖 4.14 a，時間為 8 月 29 日 0600 UTC。	140
圖 4.14 f、同圖 4.14 a，時間為 8 月 29 日 1200 UTC。	140
圖 4.15、CReSS NT Run 模擬之 8 月 29 日(地方時；LST)日累積雨量圖(單位：mm)。	141
圖 4.16、位渦傾向診斷計算範圍(紅色方形區)。	141
圖 4.17、CReSS CTRL Run 860 至 2987 m 位渦非絕熱項隨時間之變化圖，	

縱軸座標為非絕熱項量值(單位： 10^{-3}PVU s^{-1})，橫軸座標則為時間。.....142

圖 4.18、CReSS CTRL Run 2987 至 6978 m 位渦垂直平流項隨時間之變化圖，縱軸座標為垂直平流項量值(單位： 10^{-4}PVU s^{-1})，橫軸座標則為時間。.....142

圖 4.19、CReSS NT Run 860 至 2987 m 位渦非絕熱項隨時間之變化圖，縱軸座標為非絕熱項量值(單位： 10^{-3}PVU s^{-1})，橫軸座標則為時間。.....143

圖 4.20、CReSS NT Run 2987 至 6978 m 位渦垂直平流項隨時間之變化圖，縱軸座標為垂直平流項量值(單位： 10^{-4}PVU s^{-1})，橫軸座標則為時間。.....143



第一章、前言

臺灣地區位於西北太平洋颱風路徑之要衝，平均每年有三到四個颱風侵襲臺灣，雖然其為臺灣地區帶來重要之水資源，卻也時常造成重大災害，無論系統之強度、大小為何，皆可造成民眾生命財產之鉅大損失，尤其臺灣地區之地形與週遭鄰近國家相比，極其複雜，長約 340 km，寬約 80 km 呈南北走向之中央山脈擁有百餘座 3000 m 以上之高山，地形高度起伏極大，對侵襲臺灣之颱風而言，無論其強度、結構、行徑速度方向等，均會產生明顯且絕對之影響，其次亦因不同行政區位於中央山脈之不同方位，導致颱風侵襲時，臺灣各地區之風雨分佈時常嚴重不均，因此無論對氣象預報員、防災單位甚至一般民眾而言，每當颱風侵襲臺灣時，皆為一次次艱鉅之挑戰，稍有不甚，即可能造成無法挽回之悲劇！有鑑於此，深入瞭解知悉臺灣地形對颱風結構、降水之影響遂為一重要課題，本論文即以此為出發點，針對侵襲臺灣地區有趣之颱風個案——康芮颱風(Kong-Rey, 2013)進行研究分析，希望可以找出康芮颱風受臺灣地形影響，使結構與降水改變之原因，為日後臺灣地區學術上之颱風研究與實務上之颱風預報盡一份棉薄之力。

綜合以上所述，臺灣地形對颱風環流之改變至關重要，故本論文研究主要著重於康芮颱風侵襲臺灣時之結構變化與降水演變，除分析康芮颱風所處大氣環境對其結構之影響外，亦將進行地形敏感度實驗與位渦傾向診斷，探討臺灣地形、強對流雨帶降水與康芮颱風渦旋垂直結構三者之關係，試圖釐清造成康芮颱風侵襲臺灣地區時，結構出現明顯改變之可能原因與物理機制。

1-1 文獻回顧

臺灣複雜之地形對颱風環流結構及其路徑影響之研究，首推前中央氣象局顧問王時鼎先生，其使用臺灣本島與外島地區設置之氣象站，於颱風侵襲時，對各地區氣象站之氣壓、氣溫、風速、風向與降水量進行主觀分析，再統計數十年之侵臺颱風個案，設計分析出不同路徑、移速、強度、大小之颱風，受臺灣地形影響所產生之概念模式圖(圖 1.1)，並以水工模擬實驗驗證所提出之主觀分析，其研究之成果已統整入中央氣象局「侵台颱風預報輔助系統」(王，2007)，為臺灣地區之颱風預報做出極大之貢獻。其研究中，路徑與強度最顯著之分類，即為「自由過山」與「分裂過山」兩種類型(王，1980)，前者表示颱風中心於接近、登陸、通過與離開臺灣陸地時，均可分析出定位明顯之低壓或環流中心，代表颱風路徑有顯著之連續性，反之，後者則表示颱風中心於登陸、通過至離開臺灣陸地時，其路徑有不連續之現象發生，即原中心於登陸後逐漸減弱消失，由山脈另一側之副中心取而代之繼續前進，使颱風路徑於視覺上有跳過臺灣地形之現象，故以「分裂過山」稱之，而「分裂過山」之颱風強度減弱速度與程度亦較「自由過山」者為大。

2013 年之康芮颱風於侵臺路徑分類中屬於第六類路徑，即沿著臺灣東部海面北上型之颱風，但由於侵襲臺灣地區之颱風半數以上皆為西行者，故此類北行者路徑個案數之統計相對較少，但仍有許多此類颱風個案可做分析。圖 1.2 為 1979 - 1996 年間沿臺灣山脈東側北上之第六類路徑颱風範例，圖中之彩色路徑為「分裂過山」之颱風個案，白色路徑則為非「分裂過山」者，其次，圖中之黃色長方形區域為「分裂過山」與否之關鍵區，可以發現若為「分裂過山」者，均有從海拔較高之地形處登陸之現象，如圖 1.3 之敏督利颱風(Mindulle, 2004)，而非「分裂過山」者則無，造成此

現象之主因為颱風內核區受高山地形影響迅速破壞減弱，而外圍之環流與渦度則可於地形週圍海面或平坦陸地「重建」所致，進而取代登陸之原中心，反之，中心未登陸或於地形相對平坦處登陸之颱風個案遂無此現象發生，而康芮颱風即屬此例，屬於未登陸之颱風(圖 1.2 中粗紅線路徑)，故無「分裂過山」之現象發生。

颱風之結構改變除受地形影響外，所處大氣環境之垂直風切亦為重要之因素之一，颱風若處於隨高度變化之環境流場中，其產生之垂直風切將重新分佈颱風環流中對流及雲之結構，對於颱風對流結構之不對稱性有重大之影響，一般而言，颱風對流較易於下風切(downshear)處左側發展，且於強垂直風切之環境中，此下風切左側發展之不對稱對流在離颱風中心所有距離皆可發現，但於弱垂直風切之環境下，下風切左側不對稱對流多發展在近颱風中心處，離颱風中心較遠處則為於下風切處有不對稱對流；Black et al. (2002)之示意圖(圖 1.4)顯示，帶有雲及水滴之 updrafts 始於下風切處產生，順著颱風主環流以反鐘向方向平流，在下風切處左側產生明顯之亮帶，而於圖中東南方則多為向外氣旋式傳送之冰粒子形成之大片卷雲或砧狀雲。至於颱風渦旋垂直結構方面，Frank and Ritchie (2001)使用第五代中尺度數值模式(MM5)對颱風(颶風)渦旋進行垂直風切之敏感度測試，分析颱風渦旋對不同強度垂直風切之反應，其設定當颱風強度達到約 920 hPa 時，即於模式中分別加入 5 m s^{-1} 、 10 m s^{-1} 、 15 m s^{-1} 由弱至強之東風風切，其結果均顯示颱風強度皆有先增強再減弱之現象，而垂直風切較大時，颱風減弱之程度較為顯著，此外，颱風中心亦呈傾斜之狀態，且隨著颱風強度之減弱，傾斜之程度亦越大，當中、低層之颱風渦旋中心傾斜程度越趨明顯時，颱風渦旋整體垂直結構遂顯著被破壞。

綜合以上所述，若颱風渦旋處於具有垂直風切之環境流場中，無論其伴隨之對流雨帶或本身渦旋之垂直結構，均可發生明顯之改變；對流雨帶易於下風切處左側發展，而於強垂直風切環境中，颱風高、低層渦旋易被吹離(shear apart)，產生渦旋傾斜之現象，且隨傾斜程度越大，颱風整體渦旋結構破壞越明顯，強度亦越弱。康芮颱風之對流雨帶與渦旋結構似乎即有此現象發生，將於其後章節進行分析。

位渦分析方面，Markowski and Richardson (2010)和 Houze(2014)指出，對流層中若存在深厚之濕對流系統，其憑藉著大量水氣凝結成雨滴或凝固成冰晶之過程，將釋放大量潛熱加熱中、高層大氣，使非絕熱項對位渦呈正貢獻之區域存在於對流層中、低層範圍內(圖 1.5)。Wu and Wang (2000, 2001)針對由理想氣旋模式所模擬出之熱帶氣旋進行位渦收支分析，探討位渦與熱帶氣旋移動方向之因果關係，其結果顯示於某些高度處，熱帶氣旋之移動會受波數一之位渦趨勢分佈所主導，故當位渦之軸對稱分量夠大時，潛熱加熱作用所產生之位渦不對稱量會對其移動路徑造成影響，使其趨向不對稱量之最大順梯度(downgradient)之方向移動。Hsu et al. (2013)利用相似之方法探討颱風移速受臺灣地形降雨之影響，其結果顯示，颱風登陸臺灣前，位於迎風面之氣流受地形舉升影響將加強颱風環流內之對流系統，而背風面則為下沉氣流抑制對流發展，因此對於通過臺灣北邊西行之颱風而言，地形相位鎖定之深對流將出現於臺灣中、南部迎風面地區，受此加熱不對稱性分佈之影響，颱風可減速約 3 m s^{-1} ，而此現象於駛流微弱之環境中將更為顯著，故移速較慢之颱風登陸臺灣北部時，將存在一正回饋效應，使颱風滯留臺灣之時間拉長，帶來較大降雨量，而降雨量大又使颱風減速之效應更為顯著。由於颱風有傾向向環境正位渦最大值處移動之趨勢(圖 1.6)，故 Wang et al. (2012, 2013)和陳(2013)使用雲解析風暴模式

(CReSS)針對莫拉克(2009)、凡那比(2010)與海棠(2005)等三個颱風個案進行相同之位渦傾向診斷分析，其結果顯示，西南季風氣流或臺灣地形會於颱風環流內產生不對稱之降雨結構，尤其易於颱風中心東南側發生，該處因強潛熱效應將出現正位渦傾向，使系統具有明顯之波數 1 位渦傾向，颱風受其影響，將產生一段指向東南方之運動分量，進而減慢颱風離臺期間往西北方向之移速(圖 1.7)，從而產生更多降雨。

1-2 研究動機

康芮颱風於 2013 年 8 月下旬侵襲臺灣，其路徑於侵臺颱風分類中，屬於第六類路徑，即沿著臺灣東部近海北上，根據葉等(2010)分析 1991-2008 年颱風降雨氣候統計模式顯示(圖 1.8)，此類路徑之颱風最多之累積降雨區域應位於較靠近颱風中心之臺灣北部與東半部陸地，但康芮颱風所造成之豪雨致災區卻位於臺灣中、南部陸地，造成道路坍方、電力電信受損，以及雲林以南地區多處淹水等災情，其中，農林漁牧業產物及設施損失共達新臺幣 1.43 億元左右，並有 3 人死亡，亦因如此，使位於陸上颱風警報警戒區外之部份行政區首長，對中央氣象局此次之颱風預報頗有怨言，但實際上氣象局早有針對陸上颱風警戒區以外之地區提出預警，說明將有豪雨以上等級之降雨發生，此事件除突顯一般民眾甚至於防災單位對颱風、天氣預報理論與風險管理之不瞭解外，亦點出康芮颱風侵襲臺灣時之結構變化問題，為何主要致災性豪雨發生於離颱風中心較遠處？康芮颱風所處大氣環境對其結構有何影響？臺灣地形又扮演何種角色？均為相當有趣之問題，希望於未來有相似颱風個案侵襲時，各界皆能做出最佳之防災判斷。

1-3 論文架構

本論文研究共分為五章節，第一章為緒論，包含文獻回顧與研究動機；第二章介紹資料來源、研究方法與本研究所使用之雲解析風暴模式 (Cloud-Resolving Storm Simulator; CReSS)，包含模式內部數值方程式與雲物理過程，以及本研究所使用之初始與邊界條件、模式參數設定...等，並介紹後續位渦傾向診斷之分析方法；第三章敘述康芮颱風發生期間之綜觀環境變化與觀測資料上之中尺度特徵，包含衛星雲圖、雷達回波圖與降水分佈等資料；第四章除模式模擬結果與觀測資料進行較驗外，亦論述地形敏感度實驗與位渦傾向診斷之結果；第五章則為全文總結。



第二章、資料來源與研究方法

2-1 資料來源

本研究使用之資料如下：

1. 中央氣象局(Central Weather Bureau ; CWB)颱風資料庫康芮颱風(1315號)發生期間提供之颱風路徑圖、綜觀天氣圖、雷達回波圖、及累積雨量圖。
2. 日本氣象廳多功能傳送衛星 (Multi-functional Transport Satellite ; MTSAT-2) 每一小時康芮颱風之可見光與紅外線色調強化衛星雲圖。
3. 中央氣象局劇烈天氣監測系統 (Quantitative Precipitation Estimation and Segregation using Multiple Sensors ; QPESUMS) 康芮颱風侵臺期間之雙都卜勒雷達反演風場。
4. 美國海軍實驗室 (Navy Research Laboratory ; NRL) 網頁提供於多顆繞極軌道衛星上所裝設之 Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I)與 TRMM Microwave Imager (TMI)資料。此資料經接收微波輻射被動遙測所觀測之康芮颱風85、89、91 GHz微波頻道圖像。
5. 美國威斯康辛大學麥迪遜分校空間科學暨工程中心 (Space Science and Engineering Center / University of Wisconsin-Madison) 氣象衛星研究合作研究所 (Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies ; CIMSS) 之熱帶氣旋 (Tropical Cyclones) 網頁提供之衛星雲導風場資料。
6. 美國國家海洋暨大氣總署 (National Ocean and Atmospheric Administration; 簡稱NOAA) 2013年8月25日至31日七天平均之週海溫 (Optimum Interpolation SST) 資料，水平解析度為 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ 。

7. 美國國家環境預測中心 (National Centers for Environmental Prediction ; NCEP)之GFS資料，每6小時(0000、0600、1200與1800 UTC) $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ 經緯網格資料，垂直方向共26層 (1000、975、950、925、900、850、800、750、700、650、600、550、500、450、400、350、300、250、200、150、100、70、50、30、20 及10 hPa)，氣象變數包含重力位高度(z_{ϕ})、風場東西向分量(u)、風場南北向分量(v)、氣壓(p)、溫度(T)、垂直速度(w)及相對溼度(RH)，做為模式模擬之初始場與邊界條件並繪製相關範圍之環境場，以進行分析。

2-2 研究方法

本論文研究之重點在於 2013 年編號第 15 號颱風康芮侵臺期間之結構變化與其降水演變，故首先利用中央氣象局颱風資料庫提供之地面與高層天氣圖進行綜觀天氣系統分析，瞭解康芮颱風週遭之天氣系統配置，對於其路徑及強度變化有何影響，其次使用 MTSAT-2 觀測之可見光與色調強化衛星雲圖，分析康芮颱風之雲層結構，並搭配 NRL 之 85、89、91GHz 微波頻道圖像，分析康芮颱風之雨帶結構及其分佈。至於康芮颱風侵臺期間，則使用中央氣象局之整合雷達回波圖、雙都卜勒雷達反演之風場與累積雨量圖，分析其雨帶、環流、降水分佈與臺灣地形之關係。

由於本論文研究探討康芮颱風之不對稱結構變化，而其不對稱結構主要反映其雨帶之不對稱分佈，因此模式若有較高之解析度，則可較準確亦較完整模擬出康芮颱風之雨帶變化。本研究使用日本名古屋大學地球水循環研究中心所發展之雲解析風暴模式 (Cloud-Resolving Storm Simulator ; CReSS)來進行康芮颱風之個案模擬，由於採用較高之空間解析度時，此模式對於中小尺度對流與其伴隨之劇烈天氣現象有不錯之掌握與模擬能力

(Shimizu et al., 2008 ; Akter and Tsuboki, 2012 ; Wang et al., 2012)，故期望透過合理之模擬結果來探討康芮颱風之結構變化與其降水演變，並與傳統觀測資料以及衛星、雷達等遙測資料進行比對校驗，確定模式模擬結果與實際個案相近。

本論文研究中，因臺灣地形扮演影響康芮颱風結構之重要角色，故進行地形敏感度測試，除不改變臺灣地形之控制組實驗(Control Run；CTRL)外，再設計一組移除臺灣地形組實驗(No-Terrain Run；NT)，探討臺灣地形對康芮颱風結構之影響，再利用上述兩組之實驗結果進行位渦傾向診斷，釐清康芮颱風侵臺時期，是否因臺灣地形之鎖定作用，產生位置固定之豪雨中心，而此豪雨中心因大量潛熱釋放，導致康芮颱風環流內之位渦分佈發生改變，進而影響颱風結構。

2-3 模式簡介

本研究利用日本名古屋大學地球水循環研究中心(Hydrospheric Atmospheric Research Center；HyARC)所發展之雲解析風暴模式(Cloud-Resolving Storm Simulator；CReSS，Tsuboki and Sakakibara 2001)進行康芮颱風個案模擬。

本論文所使用之 CReSS 模式為 2.3 版，其採用非靜力、可壓縮之方程式系統。變數配置在水平向為 Arakara-C、垂直向為 Lorenz 交錯網格。對於雲中之微物理過程，模式完全採用外顯之雲微物理計算，共有暖雲與冷雲兩種總體過程可供選用，並無任何積雲參數化方法。邊界層亂流參數化法有 1 和 1.5 階閉合可供選用，後者亦含渦流動能(turbulencet kinetic energy；TKE)之計算，此外，本模式亦包含地面輻射參數化與地溫預報模式。水平

座標為卡氏座標 (Cartesian coordinate)，而垂直座標則為以高度為基礎之追隨地勢座標 (terrain – following curvilinear coordinate； ζ)，定義為：

$$\zeta(x, y, z) = \frac{z_t[z - z_s(x, y)]}{z_t - z_s(x, y)} \dots\dots\dots(1)$$

上式中， $z_s(x, y)$ 為地表高度， z_t 為模式頂高度。

以下將分別說明模式中所使用之基本方程式，其包括靜力方程式、狀態方程式、運動方程式、氣壓方程式、位溫方程式、水氣與滿足其他各類粒子質量守恒之混合比方程式等。

(a) 靜力方程式：

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} = -\bar{\rho}g \dots\dots\dots(2)$$

上式中， $p = \bar{p} + p'$ ， $\rho = \bar{\rho} + \rho'$ 。 $(\bar{p}、\bar{\rho})$ 為環境水平平均， $p'、\rho'$ 為前者之偏差量)

(b) 狀態方程式：

$$\rho = \frac{p}{R_d T} \left(1 - \frac{q_v}{\varepsilon + q_v}\right) (1 + q_v + \sum q_x) \dots\dots\dots(3)$$

上式中， g 為重力加速度， T 為溫度， ε 為水氣與乾空氣之莫爾分子量比 (0.622)， R_d 為乾空氣之氣體常數 ($287.05 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)， q_v 為水氣， q_x 為各種水、冰相粒子之混合比。

(c) 運動方程式：

$$\frac{\partial \bar{\rho} u}{\partial t} = -\bar{\rho} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial p'}{\partial x} + \bar{\rho} (f_s v - f_c w) + \text{Turb.} u \dots\dots(4)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} v}{\partial t} = -\bar{\rho} \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{\partial p'}{\partial y} - f_s \bar{\rho} u + \text{Turb.} v \dots\dots\dots(5)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} w}{\partial t} = -\bar{\rho} \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{\partial p'}{\partial z} - \bar{\rho} \text{Buoy.} w + f_c u + \text{Turb.} w \dots\dots(6)$$

以上三式中， $f_s、f_c$ 為科氏參數 ($f_s = 2\Omega \sin \varphi、f_c = 2\Omega \cos \varphi$ ， φ 為緯度， $\Omega = 7.292 \times 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$ 為地球自轉角速度)， Turb. 與 $\text{Buoy.} w$ 則分別表示亂流混合項與浮力項。

(d) 氣壓方程式：

$$\begin{aligned} \frac{\partial p'}{\partial t} = & - \left(u \frac{\partial p'}{\partial x} + v \frac{\partial p'}{\partial y} + w \frac{\partial p'}{\partial z} \right) + \bar{\rho} g w - \bar{\rho} c_s^2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ & + \bar{\rho} c_s^2 \left(\frac{1}{\theta} \frac{d\theta}{dt} - \frac{1}{Q} \frac{dQ}{dt} \right) \dots\dots\dots(7) \end{aligned}$$

上式中， c_s 為大氣中之聲速， $Q = 1 + 0.61q_v + \sum q_x$ 。

(e) 位溫方程式：

$$\frac{\partial \bar{\rho} \theta'}{\partial t} = -\bar{\rho} \left(u \frac{\partial \theta'}{\partial x} + v \frac{\partial \theta'}{\partial y} + w \frac{\partial \theta'}{\partial z} \right) - \bar{\rho} w \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} + \text{Turb.} \theta + \bar{\rho} \text{Src.} \theta \dots\dots\dots(8)$$

上式中， Src. 表示非絕熱作用之源(加熱)與滙(冷卻)。

(f) 水氣與滿足各類粒子質量守恆之混合比方程式：

$$\frac{\partial \bar{\rho} q_v}{\partial t} = -\bar{\rho} \left(u \frac{\partial q_v}{\partial x} + v \frac{\partial q_v}{\partial y} + w \frac{\partial q_v}{\partial z} \right) + \text{Turb.} q_v + \bar{\rho} \text{Src.} q_v \dots\dots\dots(9)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} q_x}{\partial t} = -\bar{\rho} \left(u \frac{\partial q_x}{\partial x} + v \frac{\partial q_x}{\partial y} + w \frac{\partial q_x}{\partial z} \right) + \text{Turb.} q_x + \bar{\rho} \text{Src.} q_x + \bar{\rho} \text{Fall.} q_x \dots\dots(10)$$

以上二式中， q_x 代表雲水(q_c)、雨(q_r)、雲冰(q_i)、雪(q_s)、及軟雹(q_g)中任一種類之混合比。 Src. 、 Turb. 、及 Fall. 分別代表雲物理過程之源(增濕)與滙(變乾)、亂流混合作用與降水所造成之局地傾向。雲物理現象之雲微物理相關轉換過程(冷雲過程)示於圖 2.1。

2-4 模式設定

本論文研究地圖投影採用藍伯特圓錐 (Lambert conformal conic) 地圖投影法，模式水平網格間距設定為 2.5 km，垂直方向使用追隨地勢之高度 (ζ) 座標，並使用三次(cubic)函數伸展網格，最小間距為 200 m 並向上逐漸增加，垂直伸展網格點界於 0 至 12 km。模式網格點數為 1000 × 800，模擬範圍為東經 110.5° 至 135.5°、北緯 9° 至 29°，共 2500 km × 2000 km，垂直方向網格點數為 60 層，總厚度為 30 km，上述水平範圍包含康芮颱風於菲律賓東方海面之生成與發展期之位置。

模式數值計算上，水平方向使用外顯有限差分法，垂直方向則採用內隱法並以高斯消去法求解。羅士比波與基本物理參數波動使用時間積分間距(大步積分)為 4.0 秒，聲波與重力波使用積分間距(小步積分)為 2.0 秒，至於次網格亂流混合選項，使用 1.5 階亂流閉合計算，預報渦流動能(TKE)，而研究探討因涉及颱風環流內部之深對流系統，故雲微物理選項使用總體冷雨(bulk cold-rain)之雲微物理過程。CReSS 2.3 版中分為單 CPU 版與多 CPU 版，本研究使用多 CPU 版，共由 48 顆處理核心進行模擬。

模式初始場與邊界條件採用美國國家環境預測中心(NCEP) GFS 之客觀分析資料，水平解析度為 1.0 度，模擬初始時間為 2013 年 08 月 27 日 0000 UTC (0800LST)，結束時間為 2013 年 08 月 30 日 00 UTC (0800LST)，總積分時間為 72 小時，共 3 日。模式之模擬結果設定為每 1 小時 (3600 sec) 輸出一個，模擬時間包含康芮颱風位於菲律賓呂宋島東北方海面，北行侵襲臺灣，至離開移至臺灣北部海面，為本論文研究主要探討之時間範圍。CReSS 模式本研究個案實驗之模擬參數設定請參見表 2.1，模式輸出每一層高度列表請參見表 2.2，模式模擬範圍請參見圖 2.2。

2-5 位渦傾向方程

位渦(Potential Vorticity; PV) 為一同時包含動力與熱力資訊之物理量，且於絕熱、無摩擦下為保守 (Holton and Hakim, 2012)，故其包含之作用項即為位渦收支中之貢獻與消耗項。

p 座標中之 Ertel's PV 形式如下：

$$P = -g(\zeta + f) \frac{\partial \theta}{\partial p} \dots\dots\dots(11)$$

上式中， P 表示位渦， g 為重力加速度， ζ 為相對渦度， f 為行星渦度， $(\zeta + f)$ 為絕對渦度， θ 為位溫。

由於颱風環流內部常有大量對流活動，產生潛熱釋放，故可知將有非絕熱項之加熱過程作用其中，位渦因而無法保守，常有位渦之生成(正貢獻)與消耗(負貢獻)產生，導致颱風環流內部之位渦發生改變。特別是在尺度較大之強對流系統中，此項作用更為明顯。加以颱風有傾向正位渦最大值處移動之趨勢，進而導致颱風之結構與運動發生變化。本研究以位渦傾向方程，診斷與探討地形引發強降水對康芮颱風結構之影響。位渦傾向方程形式如下：

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -\vec{V} \cdot \nabla_h P - w \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\zeta + f}{\rho} \left(\frac{\partial Q}{\partial z} \right) \dots\dots\dots(12)$$

上式中，等號左側為局地位渦趨勢項，等號右側第一項為位渦之水平平流項，第二項為位渦之垂直平流項，第三項為位渦之非絕熱項。其中， $\nabla_h P$ 為水平方向之位渦梯度、 V 為水平風速、 w 為垂直速度， ρ 為空氣密度， Q 為非絕熱項， Q 可以全微分展開如下：

$$Q = \frac{d\theta}{dt} = \frac{\partial \theta}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla_h \theta + w \frac{\partial \theta}{\partial z} \dots\dots\dots(13)$$

上式中，等號左側為位溫趨勢項，等號右側第一項為局地位溫趨勢項，第二項為位溫之水平平流項，第三項為位溫之垂直平流項。

本論文研究因涉及強對流之作用，故於位渦傾向方程中，主要探討位渦之垂直平流項與位渦之非絕熱項此兩項對康芮颱風結構之作用。

第三章、康芮颱風個案分析

康芮颱風為 2013 年西北太平洋上發生之第 15 號颱風，其於 8 月 26 日 0600 UTC 生成於菲律賓呂宋島東方海面，形成後向西北轉北北西方向朝臺灣東方海面前進，於整個颱風生命期中，其最大強度僅達輕度颱風(中心附近最大持續風速估計為 25 m s^{-1})，七級風暴風半徑亦只有 120 km，整體強度不強，範圍亦不大。圖 3.1 為中央氣象局康芮颱風路徑圖，由圖可知，康芮颱風最接近臺灣地區之時段為 28 日 0600 UTC 至 29 日 0600 UTC，為一沿著臺灣東部近海北上型之颱風，其暴風圈僅掠過臺灣東半部及北部陸地，然有趣之處在於康芮颱風侵襲期間(28 日至 29 日)，全臺灣最大之累積降雨量卻是在臺灣西南部地區，其中臺南市之山上自動雨量站測得 765 mm 之累積雨量，其次為屏東縣大漢山自動雨量站測得 730 mm，而雲林縣以南縣市累積雨量均達 500 mm 以上，遂造成不少災損。反觀離颱風中心最近之臺灣北部及東半部地區，雨量則明顯偏少，多數地區累積雨量甚至不到 50 mm，如此東西懸殊之雨量差異與康芮颱風之結構關係密切，故以現有觀測資料做初步分析，瞭解康芮颱風結構上之特殊性及其原因。

本章節利用 CIMSS 網頁下載之深層平均駛流場 (deep layer mean steering) 以及中央氣象局之 850 hPa 天氣圖先針對康芮颱風所在之大氣環境進行綜觀天氣系統特徵分析，以掌握康芮颱風之動態，特別是其行徑方向與強度變化。爾後，再利用衛星雲圖、雷達回波圖及累積雨量等資料，針對康芮颱風進行中尺度分析。而本章節分析之重點為當康芮颱風接近臺灣陸地時，受臺灣地形影響，產生之雨帶結構與渦旋垂直結構變化之現象。

3-1 綜觀天氣特徵分析

圖 3.2 為中央氣象局 2013 年 8 月 26 日 1200 UTC 之 850 hPa 天氣圖，圖中顯示太平洋副熱帶高壓脊向西延伸經臺灣上空至大陸華東、華南一帶，而季風槽則由孟加拉灣向東延伸經中南半島、南海再至菲律賓呂宋島一帶，康芮颱風即生成於季風槽之最東側，位於菲律賓呂宋島東方海面。圖 3.3 為 CIMSS 8 月 26 日 0600 UTC 之 700 至 850 hPa 平均氣流圖，其顯示綜觀環境氣旋與反氣旋環流之配置亦與 850 hPa 天氣圖相似，故康芮颱風生成於季風槽中，而其東側及北側即為太平洋副熱帶高壓環流，為導引康芮颱風行進之主要天氣系統。

圖 3.4 a ~ p 為 CIMSS 2013 年 8 月 26 日至 8 月 29 日每六小時之 400 至 850 hPa 平均氣流圖，26 日 0600 UTC (圖 3.4 b)康芮颱風形成，形成後即受到其東側太平洋高壓之反旋式環流導引，向北北西方移動並朝巴士海峽東側接近(圖 3.4 c ~ h)，28 日 0000 UTC (圖 3.4 i)大陸華北有氣旋式環流(槽線)東移，使大陸華東一帶之反旋式環流減弱並東退，遂導引康芮颱風持續向北北西移動，通過臺灣東方近海北上，並無向西登陸臺灣(圖 3.4 j ~ p)，整體而言，康芮颱風自生成、侵臺至遠離臺灣，主要均受其東方太平洋副熱帶高壓之反旋式環流導引，向北北西移動，就綜觀尺度之路徑上而言，其動態相對單純。

圖 3.5 為中央氣象局於康芮颱風發生期間所做之衛星觀測強度估計，藍色實線為中心氣壓(hPa)，紅色虛線為中心附近最大持續風速(m s^{-1})，兩者呈現明顯反向關係，氣壓越低風速越強，最大強度主要出現於 28 日，最低氣壓 985 hPa，最大風速 25 m s^{-1} ，強度僅達輕度颱風。圖 3.6 a ~ l 為 CIMSS 2013 年 8 月 27 日至 8 月 29 日每六小時之深層垂直風切(約 200

減 850 hPa)疊加水氣頻道雲圖，自 27 日 0000 UTC 至 1200 UTC (圖 3.6 a ~ c) 顯示，康芮颱風所處大氣環境存在 20 到 30 kts 之東北垂直風切 (東北向西南)，不利颱風顯著增強，水氣頻道雲圖亦顯示康芮颱風之西南象限(下風切處)有較多水氣分佈，整體雲層結構並不對稱。27 日 1800 UTC 至 28 日 0000 UTC (圖 3.6 d ~ e)時，垂直風切減弱至 20 kts 以下，颱風在強度上之反應，遂呈現增強趨勢。其後隨著垂直風切再度增強且系統逐漸接近臺灣陸地(圖 3.6 f ~ l)，颱風強度則又呈現減弱趨勢。整體而言，康芮颱風強度無法達到中度颱風之主要原因之一，可能是其所處環境之垂直風切偏強，其次為路徑較接近臺灣陸地，亦限制其發展空間。

3-2 中尺度天氣特徵分析——衛星雲圖

本節使用美國海軍實驗室 (Navy Research Laboratory ; NRL) 提供之 MTSAT-2 可見光雲圖(圖 3.7)與紅外線色調強化雲圖(圖 3.8)，針對康芮颱風進行分析。可見光雲圖主要分析雲層發展之厚度，若雲層越厚，則對太陽輻射之反照率越大，於雲圖中呈現之色調越偏白色；紅外線色調強化雲圖主要分析雲層發展之高度，若雲層發展高度越高，則其溫度越低，再將不同亮度溫度範圍以不同色階表示，強化視覺上之雲層發展高度判斷，本文使用之色調強化雲圖色階主要為黃色(小於 -80°C)、紅色($-80^{\circ}\text{C} \sim -70^{\circ}\text{C}$)、深綠色($-70^{\circ}\text{C} \sim -60^{\circ}\text{C}$)、淺綠色($-60^{\circ}\text{C} \sim -50^{\circ}\text{C}$)、深藍色($-50^{\circ}\text{C} \sim -40^{\circ}\text{C}$)、淺藍色($-40^{\circ}\text{C} \sim -30^{\circ}\text{C}$)，大於 -30°C 以上以灰階表示。

27 日 0032 UTC 至 0832 UTC 共九小時之可見光雲圖顯示 (圖 3.7-1 a ~ i)，康芮颱風之雲層分佈明顯不對稱，強且厚實之對流雲集中於颱風低層環流中心(low-level circulation center ; LLCC) 之南側，LLCC 附近反而無明顯強對流雲活動，但隨著時間，強對流雲有緩慢向 LLCC 靠近之趨勢，

亦反映康芮颱風之強度緩慢增強；相同時間之紅外線色調強化雲圖則顯示(圖 3.8-1 a ~ i)，康芮颱風之 LLCC 於此頻道中無法清楚辨識，但可觀察出其中心南側之強對流系統雲頂溫度小於 -80°C (黃色範圍)，足見該處對流發展極深，唯面積不大，再分析雲頂溫度之梯度，可以發現強對流雲東北側之溫度梯度較大，而西南側之溫度梯度則較小，其反映高層盛行東北風，將強對流雲形成於高層之冷雲雲砧(anvil)向下風處(西南方)平流且擴散，而此亦接近垂直風切之風切方向，導致康芮颱風南強北弱之對流結構。

圖 3.7-2 a ~ i 為 28 日 0032 UTC 至 0832 UTC 共九小時之可見光雲圖，圖中顯示康芮颱風之雲層結構較 27 日有加強之趨勢，深厚之強對流雲已在 LLCC 週圍發展活動，整體雲層分佈亦較 27 日對稱，但仍未出現颱風眼之結構，且其西南象限之強對流雲仍較東北象限為多；至於相同時間之紅外線色調強化雲圖顯示(圖 3.8-2 a ~ i)，雲頂溫度小於 -80°C (黃色範圍)之面積增大，且較接近軸對稱之圓形，但亦無颱風眼之結構，整體而言，若根據衛星雲圖估計康芮颱風之強度，可判斷 28 日應為強度最強時期。

圖 3.8-3 a ~ j 為 28 日 1332 UTC 至 2332 UTC 共十小時之紅外線色調強化雲圖，其中 1432 UTC 衛星資料受衛星蝕現象影響，故無觀測，且因正值夜晚，所以可見光頻道亦無資料。此處選取之時段為康芮颱風侵襲臺灣之際，其正由臺灣東南方近海逐漸北上，圖中可觀察到臺灣西南方海面已有強對流發展，雲頂溫度小於 -80°C ，且隨著時間強對流發展位置逐漸移入臺灣西南部陸地，反觀康芮颱風中心附近之強對流雲則呈現減弱之趨勢，雲頂溫度隨時間明顯升高，自 2132 UTC 以後，康芮颱風中心附近之強對流雲已逐漸減弱消散，臺灣西南部陸地至海面上之強對流雲則持續存在活動，使颱風結構之不對稱性隨時間逐漸加大，故可推測應受臺灣地形影響，

其結構遂發生明顯改變。

圖 3.7-3 a~i 與圖 3.8-4 a~i 為 29 日 0032 UTC 至 0832 UTC 之可見光及紅外線色調強化雲圖，根據中央氣象局之路徑圖顯示，此時康芮颱風已移至臺灣東北方近海並持續北移，但從上述兩種頻道之衛星雲圖觀察，康芮颱風中心附近及其暴風半徑內幾乎已無強對流雲發展活動，絕大多數深厚與低雲頂溫度之強對流系統均在臺灣西半部陸地及臺灣海峽上空發展，即強對流雲與康芮颱風之 LLCC 已明顯分離，強度迅速減弱，為康芮颱風侵襲臺灣之特點之一。

3-3 中尺度天氣特徵分析——雷達回波圖與雙都卜勒風場

本節使用中央氣象局劇烈天氣監測系統 (Quantitative Precipitation Estimation and Segregation using Multiple Sensors; QPESUMS) 之雙都卜勒雷達反演風場疊加雷達垂直向最大回波合成圖進行分析，選取時間為 28 日 1600 UTC 至 29 日 0900 UTC (29 日 0000 LST 至 1700 LST) 每一小時一筆資料(圖 3.9 a~r)。雙都卜勒風場是使用兩顆以上之都卜勒雷達徑向風做合成計算，反演出較接近真實大氣之三維風場，因徑向風係藉由雷達回波頻率之變化導出，故無回波處即無風場資料。圖中深紅色風標為 1~2 km 高度之風場、深紫色風標為 3~4 km 風場、桃紅色風標為 5~6 km 風場、白色風標為 7~10 km 風場，單位皆為海浬(knot)；颱風路徑圖為中央氣象局每小時之整點逐時定位，圓圈則為估計之暴風半徑。

同第二節所述，康芮颱風最接近臺灣時，結構已越趨不對稱，雷達回波值大於 45 dBZ 之強對流雨帶大多集中於颱風中心之西南側，並隨著颱風北移接近臺灣陸地，28 日 2000 UTC (圖 3.9 e) 一條南北走向平行臺灣地

形之強對流雨帶形成於臺灣西南部陸地，開始降下豪雨，雙都風場亦顯示低層 1~2 km 存在北北西風，已開始有西風分量出現，產生地形性降水，反觀距離颱風環流最近之臺灣北部與東半部地區，雷達回波卻並不明顯。28 日 2100 UTC 至 29 日 0300 UTC (圖 3.9 f~l)，強對流雨帶持續發展並略向山區移動，致災性豪雨於此時發生，由 1~2 km 風場清楚顯示，北北西風受臺灣地形舉升產生南北走向之對流雨帶，而其後西北風與偏西風輻合又造成東西走向之對流雨帶，兩者共同影響臺灣地區，且風速在 30 kts 左右，加上明顯之西風分量，使臺灣南北走向之迎風面高山地形扮演鎖定降水區域之角色，產生南北走向之強降雨區，造成淹水災情。另一最值得注意之現象發生於中層 3~6 km 之風場，可以清楚觀察到有一渦旋中心從花蓮南部與臺東北部交界處進入陸地，並向偏西北方移動經過南投上空，此渦旋行徑方向明顯與康芮低層中心不同。換言之，康芮颱風侵襲臺灣時，其渦旋垂直結構可能發生明顯改變，低層渦旋中心持續北移，但中層渦旋中心卻產生偏西分量進入臺灣陸地上空，使其垂直結構隨高度向上向臺灣地形傾斜，此為本論文欲探討之重要議題之一。29 日 0400 UTC 至 0900 UTC (圖 3.9 m~r) 資料顯示，低層 1~2 公里風速逐漸減弱，強對流系統之強度與範圍亦隨之減弱縮小，中層渦旋則於臺灣中部陸地隨低層渦旋中心北移，圖 3.10 為康芮颱風中層渦旋中心每三小時之定位與路徑圖，而此段時間內，康芮颱風低層中心附近幾乎再也無明顯強對流系統活動，甚為有趣！

3-4 中尺度天氣特徵分析——累積雨量圖

圖 3.11 為 27 日至 29 日(地方時)臺灣地區之三日累積雨量圖，雨量最多之豪雨中心均分佈於臺灣西南部陸地，其中累積雨量最多之地區位於臺南地區及屏東、臺東交界山區，超過 700 mm，有趣之處在於最接近颱風

中心之臺灣北部及東半部陸地雨量卻明顯偏少。由上節雷達分析可知，康芮颱風侵襲臺灣期間，強對流雨帶影響最顯著之時間發生於 29 日，故本節主要分析 29 日之降雨量特徵。圖 3.12 為 29 日單日累積雨量圖，若與圖 3.11 相比較，可以發現無論是雨區之配置或降雨多寡之分佈，皆無明顯差異，更加證明主要之降雨時段發生於 29 日。

圖 3.13 a ~ x 為 29 日逐時(地方時)累積雨量圖，強降雨始於 29 日 0300 LST 至 0400 LST (圖 3.13 d)，雨區分佈呈南北走向，最大時雨量出現於臺南、高雄一帶，超過 70 mm 以上，對應上節之雷達回波圖觀測，即為南北走向強對流雨帶開始影響該區之時間。0400 LST 至 0900 LST (圖 3.13 e ~ i)，雨區依然為南北走向，但範圍擴大，且逐漸偏向山區移動，可能反應出西風分量之風速增強。降雨強度方面，五個小時中，每一個小時皆有區域之時雨量超過 70 mm 以上，為南北走向強對流雨帶發展強度最強之時期，故無論從衛星雲圖或雷達回波圖中，均可觀察出強對流系統之特徵。0900 LST 至 1800 LST (圖 3.13 j ~ r)，雨區之範圍更為擴大，並包含整個臺灣中、南部地區，不過最大之時雨量強度隨時間逐漸減小，降雨區亦隨時間北移，若搭配上節之雷達觀測資料，對流系統即呈現減弱之趨勢，除回波強度下降外，其面積亦擴大，可能逐漸形成層狀降水區域，唯南部地區受西南風影響，迎風面之臺南、高雄一帶仍有範圍較小之強對流發展，產生較強降雨。1800 LST 至 30 日 0000 LST (圖 3.13 s ~ x)，隨著康芮颱風北上遠離，強對流系統減弱離開，臺灣各地之降雨遂明顯減弱。

整體而言，降雨最強之區域位於臺南山區近平地處，且主要強降雨時間集中於 1200 LST 之前，故 12 小時累積降雨量已超過超大豪雨等級(24 小時累積雨量大於 350 mm)，遂導致嚴重之淹水災情。

3-5 小結

根據以上觀測資料顯示，在動態方面，康芮颱風自形成後，主要受其東側之太平洋副熱帶高壓導引，向北至北北西之方向接近臺灣地區，為一沿著臺灣東部近海北上之颱風，至於強度方面，受環境東北方向之垂直風切影響，其結構始終不對稱，雨帶明顯呈現南強北弱之分佈，加以逐漸靠近臺灣陸地，限制其增強空間，故最大強度只達輕度颱風，強度並無顯著之增強。

參考中央氣象局康芮颱風強度變化與配合衛星雲圖分析可知，27日康芮颱風正值緩慢發展期，強對流雲多位於颱風中心南側發展，並隨時間向低層環流中心附近接近，結構逐漸改善；28日為康芮颱風強度最強階段，可見光與紅外線色調強化雲圖均顯示，深厚之強對流雲已於康芮颱風中心附近活動，且中心附近雲層結構較27日對稱，但大多數之強對流雲仍集中在康芮颱風之西南側；29日康芮颱風最靠近臺灣陸地，受地形影響，結構明顯更加不對稱，與其相關之強對流雲多在臺灣西南部陸地至臺灣海峽上活動，中心附近對流明顯消散，強度減弱。

由雷達回波與雙都風場資料分析，29日造成臺灣西南部超大豪雨之致災雨帶形成原因，可能為康芮颱風環流之西北風與環境偏西風輻合所致，加以臺灣中央山脈地形之鎖定作用，才造成降雨強度強，降雨時間長之超大豪雨，另一有趣現象為颱風渦旋結構之垂直變化，經由雙都風場分析出位於3~6 km之對流層中層，有一顯著之渦旋中心進入臺灣中部陸地上空，爾後隨時間北上，其動態與康芮颱風之低層渦旋中心有明顯差異，為本論文研究重點之一。

降雨資料分析結果則與遙測資料一致，康芮颱風影響期間，臺灣地區最大之累積雨量發生於 29 日，而豪雨中心主要位於臺灣西南部地區，日累積雨量超過 700 mm，若對逐時降雨記錄進行分析，可發現 29 日西南部地區超過一半之累積雨量是於 1200 LST 前出現，遂導致嚴重淹水災情，反觀最靠近颱風中心之臺灣北部與東半部地區，累積雨量卻明顯偏少，再次顯現出康芮颱風於結構上之特殊性。



第四章、地形敏感度實驗與模擬結果

本章節主要以探討 CReSS 模式模擬結果為主，分為不改變臺灣地形之控制組實驗(Control Run；CTRL)與移除臺灣地形組實驗(No-Terrain Run；NT)討論，並以觀測資料做比對，檢視 CReSS 模式對康芮颱風動態、結構掌握之合理性，其後再進行位渦傾向診斷，探討康芮颱風侵臺期間渦旋垂直結構與降水之變化。

4-1 控制組 (Control Run) 實驗結果

(1) 康芮颱風路徑及強度

圖 4.1 中之藍色線為中央氣象局康芮颱風每六小時之最佳路徑(best track)，選取時間為 8 月 27 日 0000 UTC 至 30 日 0000 UTC (模擬時間)，其顯示康芮颱風為一沿著臺灣東部近海北行之颱風，28 日至 29 日最接近臺灣地區；紅色路徑為使用中央氣象局 QPESUMS 之都卜勒風場所定位出之康芮颱風中層渦旋(約 3~6 km)路徑圖，每三小時一筆資料，可以發現雖然同為北行，但中層渦旋位置已移入臺灣陸地上空，兩者並未垂直耦合，渦旋結構向上向臺灣傾斜，有相位差產生。

圖 4.2 為 CReSS 模式模擬結果，藍色路徑為颱風中心於海平面之定位，紅色路徑為 5771 m (約 500 hPa)之渦旋中心定位，皆為每三小時一筆資料。模擬之颱風路徑與觀測相較，於康芮靠近臺灣之過程中(27 至 29 日)，模擬之低層颱風中心路徑較觀測稍快，但大方向依然沿著臺灣東部近海北上，且 28 日颱風中心略為向西擺盪之現象於模擬結果中亦有發生，至 30 日康芮颱風移至臺灣北部海面後，移速與觀測相比則較慢。整體而言，除颱風移速較觀測略有偏快或偏慢之現象外，其餘皆有良好掌握。至於中層渦旋

定位，可以發現此時段幾乎每筆資料均與低層中心有相位差，其大多位於低層中心之南側或西南側，顯示康芮颱風位於海面上時，其渦旋垂直結構即有傾斜現象，而隨著系統接近臺灣地形，渦旋垂直方向傾斜之程度更大，至 29 日 0000 UTC 達到最大，顯示臺灣地形對康芮颱風渦旋之垂直結構可能有著重要影響。

圖 4.3 a ~ c 與圖 4.4 a ~ c 分別為康芮颱風低層(925 hPa)渦旋與中層(500 hPa)渦旋之模擬結果位置比較，圖中左側為 NCEP - GFS ($1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$) 之分析資料，右側為 CReSS 模式之模擬結果，時間選取 27 日、28 日及 29 日各一筆資料，分別代表康芮颱風由南向北接近並掠過臺灣陸地之不同時間點，NCEP - GFS 採等壓面之重力位高度，CReSS 模式則採等高面之氣壓，但兩者物理意義相同，皆表示低層(925 hPa 或 860 m)與中層(500 hPa 或 5771 m)之大氣質量(壓力)，其餘兩變數則為該高度之相對渦度與水平風場。比較結果亦同上述路徑所述，CReSS 模式可合理掌握康芮颱風低層與中層渦旋之位置與動態，唯模擬中之低層渦旋北移速度稍快，且對於中層渦旋移至臺灣陸地上空之現象，亦有良好掌握。

圖 4.5 為模式模擬風場，做 27 日 0000 UTC 至 29 日 0600 UTC 之時間平均後，再將 12300 m 者減 1506 m 者(約 200 減 850 hPa)所得之平均垂直風切分佈結果。圖中可明顯觀察出垂直風切之方向大多為東北風(東北向西南)，且風切強度多在 25 kts 以上，唯臺灣東南方之風切強度較弱，與第三章之衛星觀測資料相近，可判斷康芮颱風之垂直結構受垂直風切影響向下風切處(西南方)傾斜，強度發展亦受到限制。圖 4.6 為康芮颱風中心氣壓之時序變化圖，紅線為 CReSS 模式之模擬結果，藍線則為中央氣象局利用地球同步衛星所估計之中心氣壓，可發現兩者之強度變化趨勢相同，但模

擬結果強度稍弱，亦較早反應出康芮颱風接近陸地時，受地形影響強度上減弱之趨勢（約 28 日 1200 UTC 後）。探究其原因，其一可能為康芮颱風中心並未通過任何設有氣象觀測站之島嶼或洋面，所以並無實測資料能知悉康芮颱風之確切強度；其二為中央氣象局之颱風強度估計使用 Dvorak Technique (DT, Dvorak 1975)，此方法主要透過紅外線與可見光雲圖分析颱風雲型(圖 4.7)，使預報作業人員主觀估計颱風強度(圖 4.7-1)，本身即會產生誤差，加以康芮颱風於夜晚接近臺灣陸地，並無可見光雲圖提供強度估計判斷，可能導致颱風實際強度與估計強度產生更大之誤差，為觀測技術上之限制。而模式模擬亦同樣具有誤差，因此與觀測估計往往有所差異。圖 4.6 中，兩者之差距保持在 5-10 hPa，應屬合理並可以接受之範圍。

(2) 康芮颱風雨帶結構

康芮颱風於遙測資料中雨帶結構即不對稱，為其結構重要特徵之一，故模式模擬結果必須掌握此一現象，因 27 日康芮颱風尚未進入臺灣地區之氣象雷達網觀測範圍內，遂使用 NRL 熱帶氣旋網頁所提供之康芮颱風 85、89、91 GHz 微波頻道圖像與 CReSS 模式模擬結果之 $q_{3\max}$ 做比較。 $q_{3\max}$ 為雨水(q_r)、雪(q_s)以及軟雹(q_g)三種降水粒子總混合比於垂直方向之最大值，單位為(g kg^{-1})，可用來檢視模擬之對流發展與演變過程。微波頻道圖像之觀測原理與紅外線雲圖相似，由繞極軌道衛星偵測地球表面之微波輻射量加以判斷深對流雲區域，因水相或冰相粒子會吸收或散射微波輻射，故若大氣垂直方向之液態水(雨滴)及固態水(冰晶)含量越多，則向外太空發射之微波輻射量將越少，可藉此得知強且深之對流雲位置與型態，其單位以雲頂亮度溫度表示，偵測到之輻射越少，雲頂亮度溫度越低。圖 4.8 a ~ f 中，大圖為 CReSS 模式模擬之 $q_{3\max}$ 、860 m (約 925 hPa)之氣流線與大於 10 (10^{-5} s^{-1})之輻合區(粗虛線)，左上角之小圖為相近時間康芮

颱風 85 GHz 之微波頻道圖像，由圖 4.8 a 至圖 4.8 d 可清楚發現康芮颱風雨帶結構之不對稱性，無論模擬結果或微波頻道圖像觀測均顯示相似之結構，強對流雨帶大多集中於康芮颱風中心之南側，且呈現東西走向。由氣流線分佈可知，此雨帶為颱風環流西側之偏北風與南海之西南風輻合所致，強迫機制明顯，亦為輻合場之大值區，並隨著時間隨著颱風北上而北移，圖 4.8 e 及圖 4.8 f 則顯示雨帶已從東西走向分佈轉為南北走向分佈，螺旋性亦較前時間者明顯，配合上節所述，約為康芮颱風增強之時間點。

28 日後，因康芮颱風已進入臺灣地區之氣象雷達觀測網，故以中央氣象局之雷達合成回波圖與 CreSS 模式模擬結果進行比較分析。圖 4.9 a ~ f 左側為模擬結果，參數同圖 4.8，唯 domain 不同，右側則為中央氣象局之雷達合成回波圖，選取時間為 28 日 0600 UTC 至 29 日 1200 UTC 每六小時一筆資料，圖 4.9 a 顯示，康芮颱風之螺旋雨帶主要集中於中心之南側與西南側，且因臺灣地形之故，颱風西側環流有繞山之現象發生，氣流繞過臺灣地形後再進入颱風環流西南側，與巴士海峽之西南風輻合，同時間臺灣東半部地區雖位於迎風面，但由雷達觀測與模擬結果均顯示該處並無強對流雲系活動，突顯康芮颱風結構上之特殊性。圖 4.9 b 顯示康芮颱風持續北移，氣流繞山後與西南風輻合之區域亦北移至臺灣西南部近海，臺灣東部迎風面地區則持續無強對流雲系活動。圖 4.9 c 康芮颱風中心已移入臺灣東北部近海，颱風環流西側偏北風與西南風輻合區之強對流雲系移入臺灣西南部陸地，遂開始降下豪雨，另外一深為有趣之處在於康芮颱風中心附近之對流變化，無論雷達觀測或模擬結果，均可觀察出康芮颱風中心附近之強對流雲系較之前時間點呈現減弱趨勢，可能表明受地形影響，其結構已受到破壞，不對稱性加大。圖 4.9 d 之對流變化更加突顯臺灣地形之重要性，此時康芮颱風中心已移至臺灣北部近海，其中心附近之強對流雲

系幾乎已完全減弱消失，所有強對流雲系均於臺灣西半部迎風面地區發展活動，並平行臺灣地形呈現南北走向分佈，除颱風環流與偏西風之輻合區外，其中一大部份對流應屬於地形舉升造成之滯留性雨帶，降雨遂達到最大值。圖 4.9 e 與圖 4.9 f 則顯示康芮颱風位於臺灣北部海面向北遠離，臺灣地區則持續受西南風影響，強對流雲系多位於迎風面活動，並隨時間逐漸減弱。

整體而言，CreSS 模式模擬結果經由微波頻道圖像與雷達回波圖像比較後，可得知模式對康芮颱風之雨帶結構有合理之掌握，包括雨帶走向、強對流位置、臺灣地形造成之影響等均有良好之模擬結果。

(3) 降水分佈

因康芮颱風主要於 8 月 29 日(地方時；LST)侵襲臺灣地區，並於當日帶來致災性降雨，故本小節主要探討本日之降水分佈。圖 4.10 左側為 CreSS 模式之模擬結果，右側為中央氣象局之觀測結果，圖中數字為綜觀氣象站之觀測雨量值，並非最大累積雨量值，無論模擬結果或實際雨量觀測資料均顯示主要豪雨中心位於臺灣中、南部地區，累積雨量普遍超過 300 mm，且其分佈呈南北走向並與臺灣山脈走向平行，顯示降水分佈明顯受地形影響，反觀臺灣東半部地區受地形屏障作用，累積雨量明顯偏少。

4-2 移除臺灣地形組(No-Terrain Run)實驗結果

No-Terrain Run 之實驗設計為將臺灣地形移除，改為只有海拔 10 m 之平坦陸地，至於模式中所有其餘參數設定均與 Control Run 相同，藉此呈現臺灣高聳之山脈地形對康芮颱風結構與其降水分佈所造成之影響。

(1) 康芮颱風路徑及強度

圖 4.11 為 NT Run 之模擬結果，綠色路徑為颱風中心於海平面之定位，桃紅色路徑為 5771 m (約 500 hPa) 之渦旋中心定位，皆為每三小時一筆資料，左下角之小圖則為 CTRL Run 之路徑模擬結果，放置同處可清楚比較出兩者之相異點，特別為接近臺灣陸地此段時間。圖中顯示，於 28 日 1200 UTC 之前，NT Run 與 CTRL Run 差異不大，皆持續向臺灣東北方近海接近，但隨後路徑開始出現顯著不同，CTRL Run 之中層渦旋路徑逐漸出現偏西分量移至臺灣陸地上空，但 NT Run 之中層渦旋路徑則持續沿著臺灣東海岸向北移動，並無進入臺灣陸地，且與低層中心保持幾乎等間距之相位差，相較於 CTRL Run，颱風渦旋隨高度傾斜之程度明顯較小。另一差異為颱風低層中心之移速變化，CTRL Run 之低層中心移速明顯較 NT Run 偏快，至 29 日 0000 UTC 時，CTRL Run 之低層中心已移至臺灣北部海面，而同一時間，NT Run 之低層中心卻仍在臺灣東北部近海，兩者之差距達到最大，造成此現象之原因，可能為 NT Run 之颱風渦旋結構相對較垂直亦較強，所接受之駛流層面不同所致，因颱風越強，所需考慮之駛流層面越高。至於強度方面，圖 4.12 為康芮颱風 NT Run 之中心氣壓變化圖(紅線)，圖中顯示其於靠近臺灣陸地後(28 日 1200 UTC)，強度較 CTRL Run 強且維持強度時間亦較久。整體而言，推測 NT Run 中颱風渦旋垂直結構之變化主要為受環境東北向西南方向之垂直風切影響，向下風切處(西南方)傾斜，而 CTRL Run 中颱風渦旋垂直結構之變化可能主要受臺灣地形影響，導致渦旋結構隨高度向上朝臺灣陸地傾斜，傾斜程度明顯加大且強度較弱，顯見臺灣地形影響康芮颱風結構改變之重要性。

圖 4.13 a ~ c 為 NT Run 所繪之相對渦度場、風場與氣壓場，時間選取 27 日、28 日及 29 日各一筆資料，同樣代表康芮颱風由北向南接近臺灣陸

地之時間點，左圖高度為 860 m (約 925 hPa)，代表低層，右圖高度為 5771 m (約 500 hPa)，代表中層，兩相比較之下，可以發現三個時間點中層渦旋中心之位置均較低層渦旋中心之位置南偏，此現象與 CTRL Run 相同，但 29 日 0000 UTC 中層渦旋中心之位置卻仍在臺灣東部沿岸，且與低層渦旋中心位置相去不遠，反映出與 CTRL Run 相比，渦旋隨高度傾斜之程度較小，低層渦旋之移速亦較慢。

(2) 康芮颱風雨帶結構

圖 4.14 a ~ f 為 NT Run 之實驗結果，圖中參數分別為 $q_{3\max}$ (代表降水區域)、860 m (約 925 hPa) 之氣流線與大於 $10 (10^{-5} \text{ s}^{-1})$ 之輻合區 (粗虛線)，選取時間為 28 日 0600 UTC 至 29 日 1200 UTC 每六小時一筆資料，圖 4.14 a ~ b 顯示移除臺灣地形後，氣流遂無繞山之現象發生，雨帶之分佈則與 CTRL Run 相同，均存在明顯之不對稱性，其螺旋雨帶主要集中於颱風中心之南側與西南側，且對應為颱風環流西側偏北風與巴士海峽西南風產生之強輻合區，此輻合區亦隨著颱風北上接近臺灣地區。圖 4.14 c ~ d 則顯示輻合區及螺旋雨帶已移入臺灣陸地，並隨著颱風中心北上由南往北通過臺灣全境，且因為陸地已成平坦地形，故並無產生如 CTRL Run 中，南北走向平行臺灣山脈之滯留性雨帶，反而呈現東西走向之移動性雨帶。圖 4.14 e ~ f 中，雨帶已移至臺灣北部陸地及北部近海，其結構仍呈現東西走向，同一時間，臺灣地區已盛行西南風，但因地形已移除，故完全無任何南北走向之地形性降水出現。

整體而言，移除臺灣地形後，康芮颱風之雨帶結構與分佈遂發生明顯改變，CTRL Run 中南北走向之滯留性雨帶消失，取而代之為東西走向之移動性雨帶出現，且極有可能因為臺灣地形之移除，在無地形阻擋之環境

中，而使潮濕之空氣順著西南風平流至颱風中心附近，維持其中心南側雨帶之生成與發展，亦對康芮颱風渦旋之垂直結構有著正貢獻，使之渦旋隨高度傾斜之程度明顯小於 CTRL Run。

(3) 降水分佈

圖 4.15 同為 8 月 29 日(地方時；LST)之日累積雨量圖，但為 NT Run 之結果，圖中之降水分佈與 CTRL Run 大相逕庭，如同上小節所述，雨帶之結構、走向與特性對降水分佈有直接性之影響，移除臺灣地形後，缺少地形性降水，南北走向之滯留性雨帶消失，因此與臺灣山脈平行之南北走向豪雨中心亦隨之消失，取而代之為受颱風中心附近南側之螺旋雨帶影響，降水呈現略帶弧狀之東西向分佈，累積雨量亦普遍在 300 mm 以下，而且因缺少地形阻擋，潮濕之西南風可匯入颱風中心附近，維持中心附近螺旋雨帶之生成與發展，故較接近颱風中心之臺灣北部與東半部陸地之累積雨量遂較 CTRL Run 明顯增多。

4-3 位渦傾向診斷

(1) 控制組(Control Run；CTRL)實驗

本節使用第二章第 12 式進行位渦傾向診斷，由於研究個案涉及強對流作用，故主要探討位渦之垂直平流項與位渦之非絕熱項此兩項對康芮颱風結構之影響，選取之計算範圍為北緯 22.5° 至 24.7° 、東經 120.3° 至 120.8° ，即上小節所述之豪雨中心區域，如圖 4.16 之紅色方形範圍。計算方式為先取 CReSS model 輸出之每一高度紅框範圍內之區域平均值，但此區域平均值為瞬時資料，故爾後再取每六小時之時間平均值，並以折線圖表示。圖 4.17 為位渦之非絕熱項隨時間之變化，圖 4.18 則為位渦之垂直平流項隨時間之變化，圖中縱軸座標為物理量值，橫軸座標則為時間。

在颱風環流中，絕對渦度傾向為正值，故位渦之非絕熱項若要產生正貢獻，則 $\frac{\partial Q}{\partial z}$ 必須亦為正值，而 Q 之增加或減少可為潛熱之釋放、吸收或輻射之增溫、冷卻，但本研究主要探討深對流雲對此項之影響，故影響因子主要來自潛熱作用。對流層中若存在深厚之濕對流系統，其憑藉著大量水氣凝結成雨滴或凝固成冰晶之過程，將釋放大量潛熱加熱大氣，而於深厚之濕對流中，釋放之潛熱大多集中於對流層之中、高層區域，故 $\frac{\partial Q}{\partial z}$ 為正值之區域便存在於對流層中、低層內，亦表示非絕熱項對位渦呈正貢獻之區域亦存在於對流層中、低層範圍內，因此圖 4.17 選擇垂直高度 860 至 2987 m (約 925 至 700 hPa) 進行非絕熱項之計算，其結果顯示自 28 日 1200 UTC 起，非絕熱項之位渦正貢獻快速增加，並於 29 日 0000 UTC 達到最高值，對應前述模擬資料與觀測資料均顯示為該區域降雨之起始時間與最大值時間，而此處可能因地形存在之降雨鎖定作用，導致連續 18 小時(28 日 1300 UTC 至 29 日 0600 UTC)出現位渦正貢獻之最大與次大值。至於垂直平流項部份則取垂直高度 2987 至 6978 m (約 700 至 450 hPa) 進行計算，主要欲得知對流層中層之位渦變化，圖 4.18 顯示垂直平流項對位渦之正貢獻同樣從 28 日 1200 UTC 開始增加，至 29 日 0600 UTC 達到最大值，時間稍落後非絕熱項，可能因低層正位渦需時間向上垂直平流至中層所致，由於颱風為一正位渦系統，其有傾向所處環境正位渦最大值區移動之趨勢，因此康芮颱風於接近侵襲臺灣之過程中，臺灣中、南部地區產生之強對流系統所引發之中層正位渦增加，可能導致康芮颱風中層渦旋中心逐漸出現偏西分量朝臺灣陸地移動，而低層渦旋中心因臺灣地形阻擋無法移向臺灣，兩者位置差距遂隨時間擴大，使康芮颱風渦旋之垂直結構隨高度向上向臺灣地形傾斜，產生非常有趣之渦旋結構變化。

(2) 移除臺灣地形組(No-Terrain Run；NT)實驗

圖 4.19 為 NT Run 位渦之非絕熱項隨時間之變化，圖 4.20 則為 NT Run 位渦之垂直平流項隨時間之變化，計算方式與範圍皆同 CTRL Run，圖 4.19 顯示，非絕熱項對位渦之正貢獻呈現波動分佈，並無 CTRL Run 中有明顯時間集中之最大值與次大值出現，造成此現象之原因應為缺乏南北走向長時間之地形性降水所致，故其波動狀之分佈可能反映出一波波東西走向之螺旋雨帶通過計算範圍，又因雨帶隨颱風持續移動，且雨帶與雨帶間可能存在弱降水區，故在無地形持續產生舉升機制之環境中，非絕熱項對位渦之正貢獻遂呈現波動狀分佈。至於垂直平流項隨時間之變化趨勢則與非絕熱項相似，亦呈現波動狀分佈，但與 CTRL Run 相比，位渦正貢獻之值亦明顯較小，其原因判斷同為無地形產生長時間舉升機制所致，導致該區域中層正位渦值較小，使康芮颱風之中層渦旋無法產生明顯之偏西分量，遂於 NT Run 中，可以維持較垂直之渦旋結構。

4-4 小結

綜合以上之分析討論，CReSS 模式對康芮颱風之模擬有良好且合理之掌握，於 CTRL Run 中，無論康芮颱風之路徑、渦旋結構、雨帶結構與臺灣地區之降水分佈等，均與觀測資料接近。進一步分析結果顯示，康芮颱風位於海面上時，其雨帶結構與分佈即不對稱，主要之螺旋雨帶皆集中於颱風中心之南側與西南側，與所處環境存在較強之東北向西南垂直風切有關，而雨帶之形成主要為颱風環流西側之偏北風與巴士海峽之西南風輻合所致，隨著康芮颱風北上接近臺灣地區，此輻合區與雨帶亦隨之北移進入臺灣陸地，配合地形舉升，遂於臺灣中、南部地區造成致災性豪雨，亦因如此，產生大量潛熱釋放與垂直運動之結果，導致臺灣陸地上空之正位渦增加，遂使康芮颱風之中層渦旋產生偏西分量，進而移至臺灣陸地，與其

低層之颱風中心產生明顯之相位差，使渦旋垂直結構隨高度向上向臺灣地形傾斜。

地形敏感度實驗中則顯示，若將臺灣地形移除後，臺灣中、南部地區之地形性豪雨消失，颱風渦旋隨高度向上向臺灣地形傾斜之程度亦隨之減小，且因缺少地形之阻擋，潮濕之西南風可匯入康芮颱風之中心附近，維持中心附近螺旋雨帶之生成與發展，故使接近颱風中心之臺灣北部與東半部地區累積雨量較 CTRL Run 明顯增多。



第五章、總結

康芮颱風為 2013 年西北太平洋上發生之第 15 號颱風，其於 8 月 26 日 0600 UTC 生成於菲律賓呂宋島東方海面，形成後，順著其東方太平洋高壓之反旋式順鐘向環流，向西北轉北北西方向朝臺灣東方海面前進，為一沿著臺灣東部近海北上之颱風，於 28 日至 29 日最接近臺灣地區，接近臺灣陸地前，增強速度緩慢，最大估計強度僅達輕度颱風(25 m s^{-1})，七級風暴風半徑估計亦只有 120 km，侵臺期間，最大降雨區位於離颱風中心較遠之中、南部地區，雲林縣以南縣市均有測得 500-700 mm 以上之累積雨量，遂造成不少災損與人員傷亡，反觀離颱風中心最近之臺灣北部及東半部地區雨量則明顯偏少，多數地區累積雨量甚至不到 50 mm。

根據衛星及雷達觀測資料顯示，康芮颱風於接近至侵襲臺灣期間，其雨帶皆維持不對稱之結構，強對流雨帶多位於颱風中心之南側與西南側，無論從可見光、紅外線色調強化雲圖或微波頻道圖像中觀察亦然，深厚且低雲頂溫度之雲層均集中於颱風中心南側與西南側發展活動，此原因與環境流場中之垂直風切有關，使用衛星觀測資料所計算出之雲導風場顯示，康芮颱風所處之大氣環境持續存在 20-30 kts 之東北向西南之垂直風切，根據 Black et al. (2002) 之研究指出，颱風對流較易於下風切(downshear)處左側發展，與康芮颱風之對流雨帶分佈吻合。至於雷達觀測資料方面，分為雷達合成回波圖與雙都卜勒雷達反演風場討論，強對流(> 45 dBZ)始於臺灣西南方近海，並隨著康芮颱風北上而北移進入臺灣中、南部陸地，雨帶走向與中央山脈走向平行，呈南北帶狀，顯示除境外移入之對流系統外，亦有地形性降水出現，且強度與範圍隨時間增強擴大，對應時雨量累積圖，降水區域亦呈南北帶狀分佈，且隨時間向山區移動，雨帶內許多地區最大

時雨量強度均在 70-90 mm 以上，且維持時間超過六小時，遂造成嚴重水患，而靠近颱風中心附近反而無強對流活動或對流呈減弱之趨勢。再由雙都風場進行分析，於低層 1~2 km 處 30 kts 之西風分量明顯，且存在西北風與偏西風之輻合區，加以迎風面地形之強迫舉升，應為強對流雨帶肇始之主因，其並隨西風分量增強與康芮颱風北上，亦有向山區及臺灣中部陸地移動之趨勢，此外，雙都風場亦顯示，於中層 3~6 km 處有一渦旋中心進入臺灣東部陸地，並向西北移動經過臺灣中部再逐漸北移，與未登陸之康芮颱風中心存在顯著之路徑差異，顯示康芮颱風之渦旋垂直結構出現隨高度向上向臺灣地形傾斜之現象。

本研究利用雲解析風暴(CReSS)模式以及水平格點間距 2.5 km 之高解析度模擬康芮颱風侵臺時之結構與降水演變，並進行地形敏感度實驗(Control Run；CTRL 與 No-Terrain Run；NT)及位渦傾向診斷。模擬結果與觀測資料比較顯示，康芮颱風中層、低層渦旋之移向、移速、強對流雨帶之特徵及降水分佈等現象，模式均可合理掌握與分析。康芮颱風位於海面上時，其雨帶之不對稱性(南強北弱)主要為環境流場東北向西南之垂直風切造成，而雨帶成因為颱風環流西側之偏北風與巴士海峽之西南風輻合所致，且隨著康芮颱風北上接近臺灣地區，此輻合區與雨帶亦隨之北移進入臺灣陸地，配合地形強迫舉升，產生南北走向平行山脈之滯留性雨帶，遂於臺灣中、南部地區造成致災性豪雨，北部及東半部地區累積雨量則偏少。

地形敏感度實驗中，CTRL Run 之颱風渦旋接近臺灣之地形時，其渦旋於垂直方向之傾斜程度加大，中層渦旋中心逐漸進入臺灣陸地上空，而低層渦旋中心則持續北移，兩者明顯不耦合，至於雨帶結構亦有顯著變化，

颱風中心附近之螺旋雨帶幾乎減弱消失，所有強對流雲系均於臺灣西半部迎風面地區發展活動，雨帶不對稱性加大，亦由於此一變化，臺灣陸地上空產生大量潛熱釋放與垂直運動，故進行位渦傾向診斷時，此處中層之正位渦遂隨時間逐漸增加，導致康芮颱風之中層渦旋產生偏西分量，向正位渦最大值處移動，進而移入臺灣陸地，而其低層之颱風中心則受地形阻擋只可持續北移，兩者遂產生明顯之相位差，使渦旋垂直結構隨高度向上向臺灣地形傾斜。

NT Run 設計為移除臺灣地形改為 10 m 之平坦陸地，其模擬結果顯示，康芮颱風接近臺灣陸地時，其渦旋於垂直方向之傾斜程度並未加大，螺旋雨帶之不對稱結構亦與靠近陸地前相似。相較 CTRL Run 移速而言，NT Run 移速則稍減慢，可能與颱風強度較強，受較厚層面駛流導引及強對流集中維持於颱風中心南側有關，即綜觀尺度與對流尺度變化共同影響颱風運動。進一步分析結果表明，由於臺灣之高山地形被移除，故當康芮颱風沿東部近海北上時，其西南方之潮濕西南風可匯入康芮颱風之中心附近，維持中心附近螺旋雨帶之生成與發展，進而使接近颱風中心之臺灣北部與東半部地區累積雨量較 CTRL Run 明顯增多，至於位渦傾向診斷則顯示，因缺少地形鎖定之滯留性雨帶，使臺灣上空中層之正位渦值明顯較 CTRL Run 小，使康芮颱風之中層渦旋無法產生明顯之偏西分量，遂可維持較垂直之渦旋結構。

綜上所述，臺灣地形對康芮颱風渦旋之結構與其伴隨之降水型態有極大之影響，且似乎為過去較少見之個案，由於康芮颱風為一強度弱、範圍小之颱風，故其結構可能極易受週遭環境變化與地形之影響發生改變，反而增加預報作業之困難度，故希望此研究可成為日後相似颱風個案之參考，

使各領域防災單位更能有效掌握颱風動態，做出更符合實際需求之防災作業。至於後續研究將以颱風中心為基準，選取固定半徑，計算颱風不同象限內之位渦變化，以強化位渦收支各項對康芮颱風中層渦旋移動之影響。



參考文獻

王時鼎，1980：台灣近海颱風運動及強度預報法，國科會研究報告 018 號，100pp。

王時鼎，2007：台灣的颱風——中央氣象局「侵台颱風預報輔助系統」簡介——。

葉天降、李清勝、楊明仁、馮欽賜、張保亮、何台華，2010：颱風路徑與侵臺颱風伴隨風雨預報技術之發展研究 2009 年成果，氣象學報，48(3)，43-58。

陳郁涵，2013：非對稱潛熱效應對離台期間颱風運動之影響。國立台灣大學大氣科學研究所，碩士論文，117pp。

林秉煜，2015：民國 102 年颱風調查報告——第 15 號康芮(Kong-Rey)颱風(1315)。交通部中央氣象局，43-68。

Akter, N., and K. Tsuboki, 2012: Numerical simulation of Cyclone Sidr using a Cloud-Resolving model: Characteristics and formation process of an outer rainband. *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 789-810.

Black, M. L., J. F. Gamache, F. D. Marks Jr., C. E. Samsury, and H. E. Willoughby, 2002: Eastern Pacific Hurricanes Jimena of 1991 and Olivia of 1994: The effect of vertical shear on structure and intensity. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 2291–2312.

Dvorak, 1975: Tropical Cyclone Intensity Analysis and Forecasting from Satellite Imagery. *Mon. Wea. Rev.*, **103**, 420–430.

Frank, W. M., and E. A. Ritchie, 2001: Effects of vertical wind shear on the intensity and structure of numerically simulated hurricanes. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 2249–2269.

Holton, J.R., and G.J. Hakim, 2012: An introduction to dynamic meteorology, 5th edition, Chapter 4, 95–122.

Hsu, L.-H., H.-C. Kuo, and R. G. Fovell, 2013: On the geographic asymmetry of typhoon translation speed across the mountainous island of Taiwan. *J. Atmos. Sci.*, **70**, 1006–1022.

Houze, R. A., Jr., 2014: Cloud Dynamics. 2nd ed. Elsevier, Chapter 9, 282–286.

Markowski, P., and Y. Richardson, 2010: Mesoscale Meteorology in Midlatitudes, 1st edition, Chapter 9, 245–272.

Shimizu, S., H. Uyeda, Q. Moteki, T. Maesaka, Y. Takaya, K. Akaeda, T. Kato, and M. Yoshizaki, 2008: Structure and formation mechanism on the 24 May 2000 supercell-like storm developing in a moist environment over the Kanto Plain, Japan. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 2389–2407.

Wang, C.-C., H.-C. Kuo, Y.-H. Chen, H.-L. Huang, C.-H. Chung, and K. Tsuboki, 2012: Effects of asymmetric latent heating on typhoon movement crossing Taiwan: The case of Morakot (2009) with extreme rainfall, *J. Atmos. Sci.*, **69**, 3172-3196.

———, Y.-H. Chen, H.-C. Kuo, and S.-Y. Huang, 2013: Sensitivity of typhoon track to asymmetric latent heating/rainfall induced by Taiwan topography: A numerical study of Typhoon Fanapi (2010). *J. Geophys. Res.*, **118**, 3292-3308.

Wu, L., and B. Wang, 2000: A potential vorticity tendency diagnostic approach for tropical cyclone motion. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 1533-1549.

———, and ———, 2001: Effects of Convective Heating on Movement and Vertical Coupling of Tropical Cyclones: A Numerical Study*. *J. Atmos. Sci.*, **58**, 3639–3649.

附表

表 2.1、CReSS 模式個案實驗之模擬參數設定。

格點設定	1000 × 800 × 60
模擬範圍	2500 km × 2000 km × 30 km
水平網格間距	2500 m
垂直網格間距	500 m
模擬時間	2013-08-27_0000UTC ~ 2013-08-30_0000UTC
模擬時間	72 hrs (3 days)
輸出頻率	3600 sec
初始與邊界條件	NCEP-GFS Analysis(1.0°×1.0° and 26 levels , 6h)
積分間距	4.0 , 2.0 s
雲微物理過程	Bulk cold rain type
計算資源	48 CPUs (2 nodes)
海溫資料	NOAA Weekly SST / Optimum Interpolation SST (1.0°×1.0°)

表 2.2、CReSS 模式個案實驗之每層高度列表，單位為公尺(m)。

層數	高度(m)	層數	高度(m)	層數	高度(m)
1	100	21	7387	41	18300
2	319	22	7801	42	18900
3	574	23	8224	43	19500
4	860	24	8658	44	20100
5	1172	25	9106	45	20700
6	1506	26	9572	46	21300
7	1858	27	10060	47	21900
8	2224	28	10574	48	22500
9	2601	29	11119	49	23100
10	2987	30	11700	50	23700
11	3378	31	12300	51	24300
12	3774	32	12900	52	24900
13	4172	33	13500	53	25500
14	4571	34	14100	54	26100
15	4971	35	14700	55	26700
16	5371	36	15300	56	27300
17	5771	37	15900	57	27900
18	6172	38	16500	58	28500
19	6574	39	17100	59	29100
20	6978	40	17700	60	29700

附圖



圖 1.1、1949-2000 年間於臺灣及其近海過境之颱風因中央山脈影響路徑變化之模式圖。(摘自王，2007)

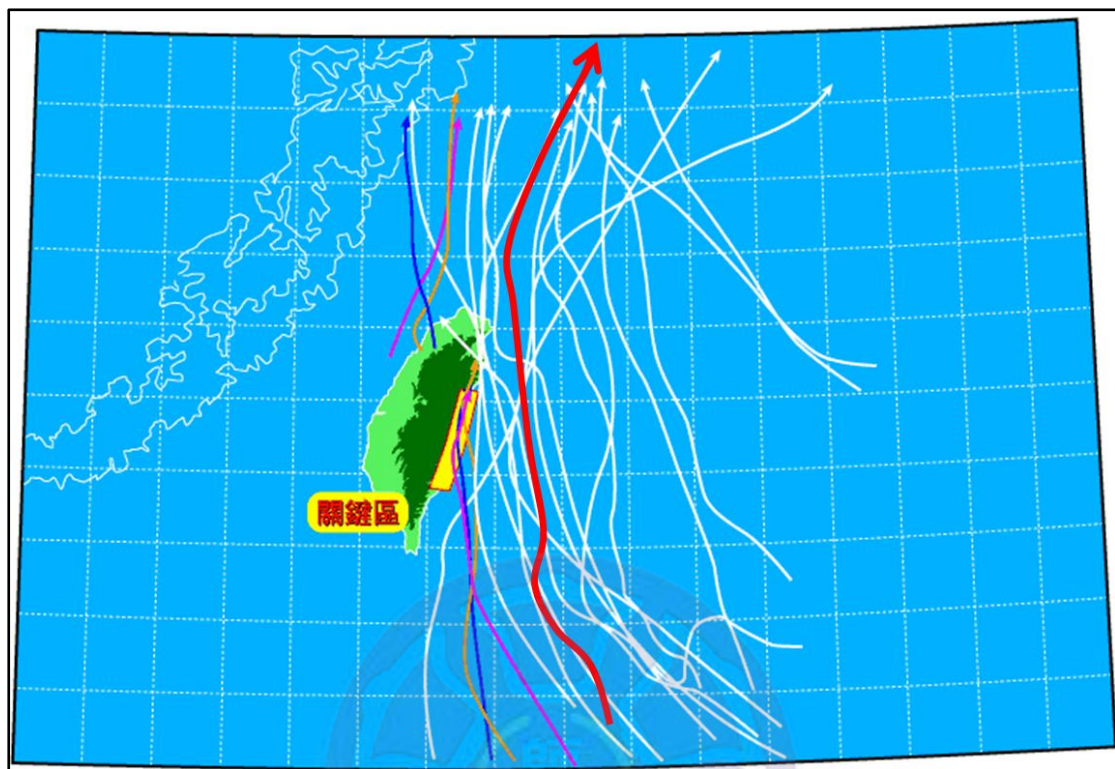


圖 1.2、1979-1996 年間沿臺灣山脈東側北上之第六類路徑颱風範例，彩色路徑為「分裂過山」之颱風個案，白色路徑則為非「分裂過山」者，黃色長方形區域為「分裂過山」與否之關鍵區，粗紅線則為後製之康芮颱風路徑。(摘自「侵台颱風預報輔助系統」網頁)

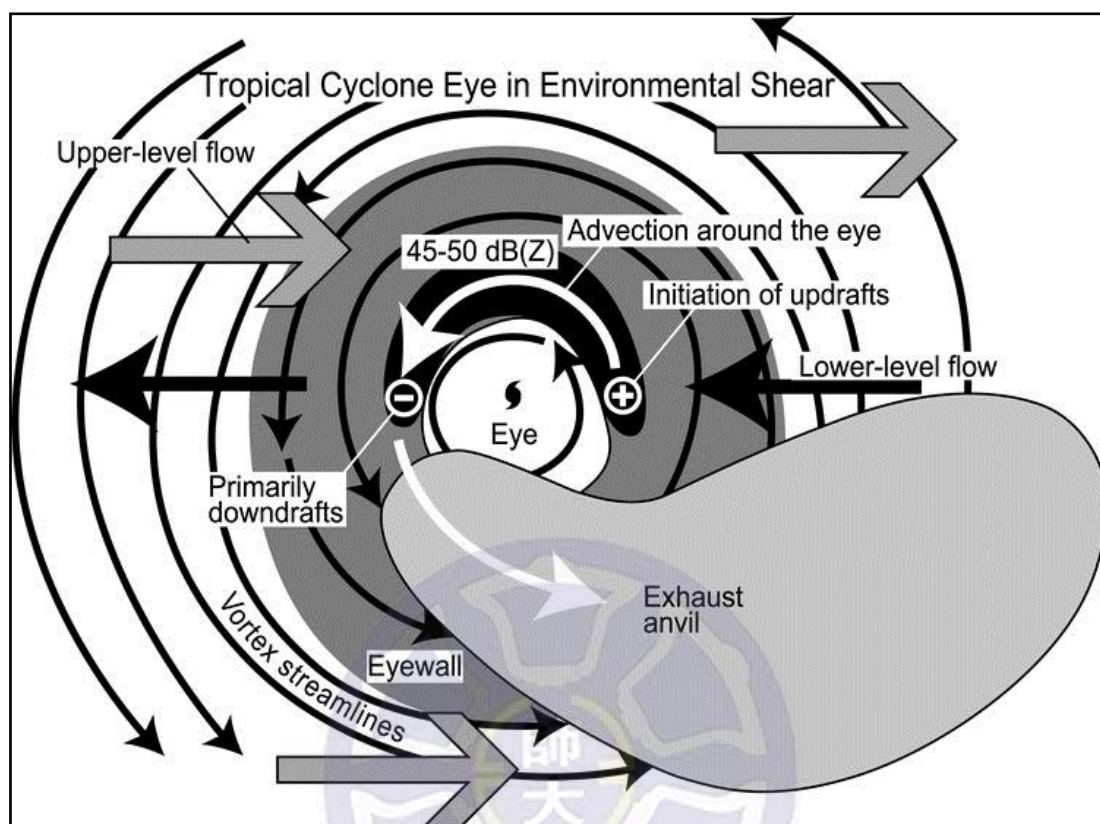


圖 1.4、環境垂直風切與颱風對流關係示意圖，黑色粗箭頭為低層氣流，黑色細箭頭為颱風氣流場，灰色粗箭頭為高層氣流，白色箭頭為水相與冰相粒子之平流傳送方向，“+”為初始上衝流，“-”為主要下衝流，黑色陰影區為 45-50 dBZ 之強對流區，深灰色陰影區為眼牆區，淺灰色陰影區為雲砧。(摘自 Black et al. 2002)

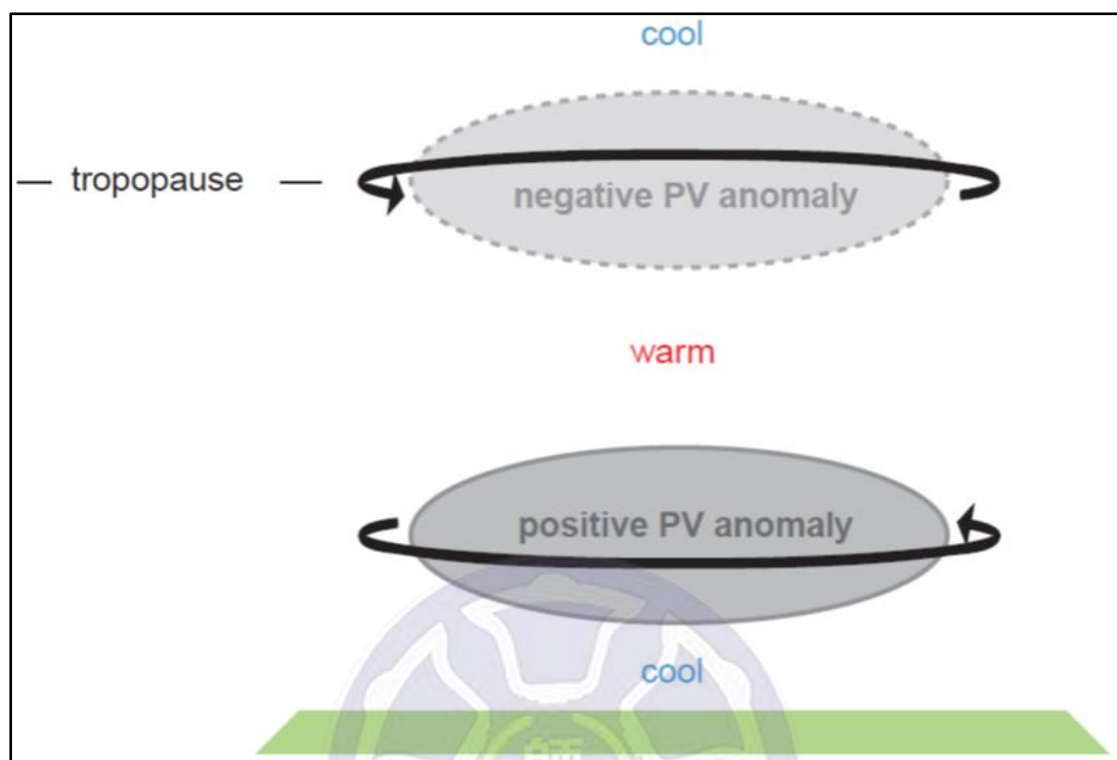


圖 1.5、深厚濕對流系統產生位渦距平示意圖。(摘自 Markowski and Richardson, 2010)

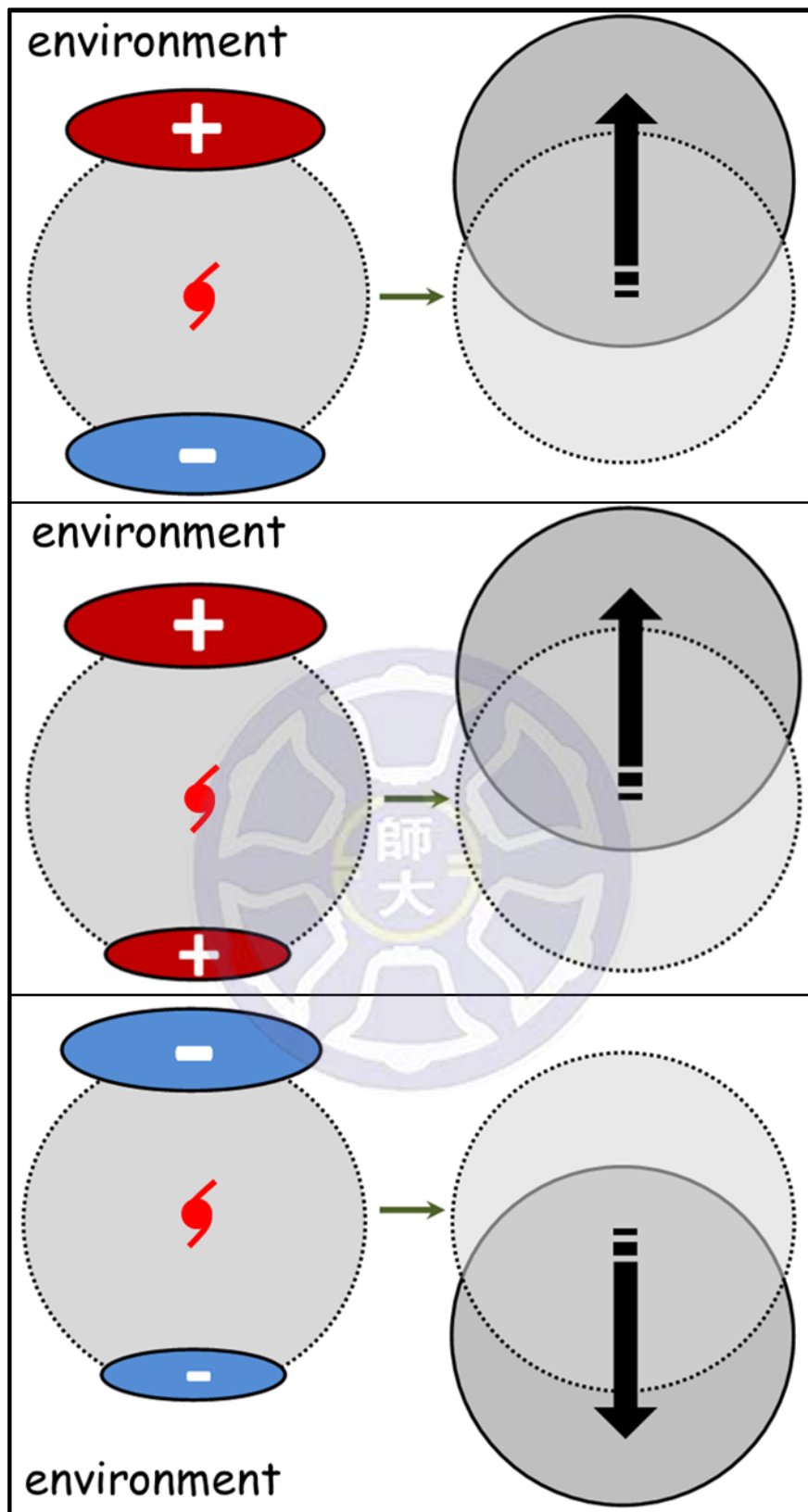


圖 1.6、颱風傾向環境正位渦最大值處移動示意圖，上圖為颱風朝正位渦傾向之方向移動，中圖為颱風朝正位渦值較大處移動，下圖為颱風朝負位渦值較小處移動。(摘自陳，2013)

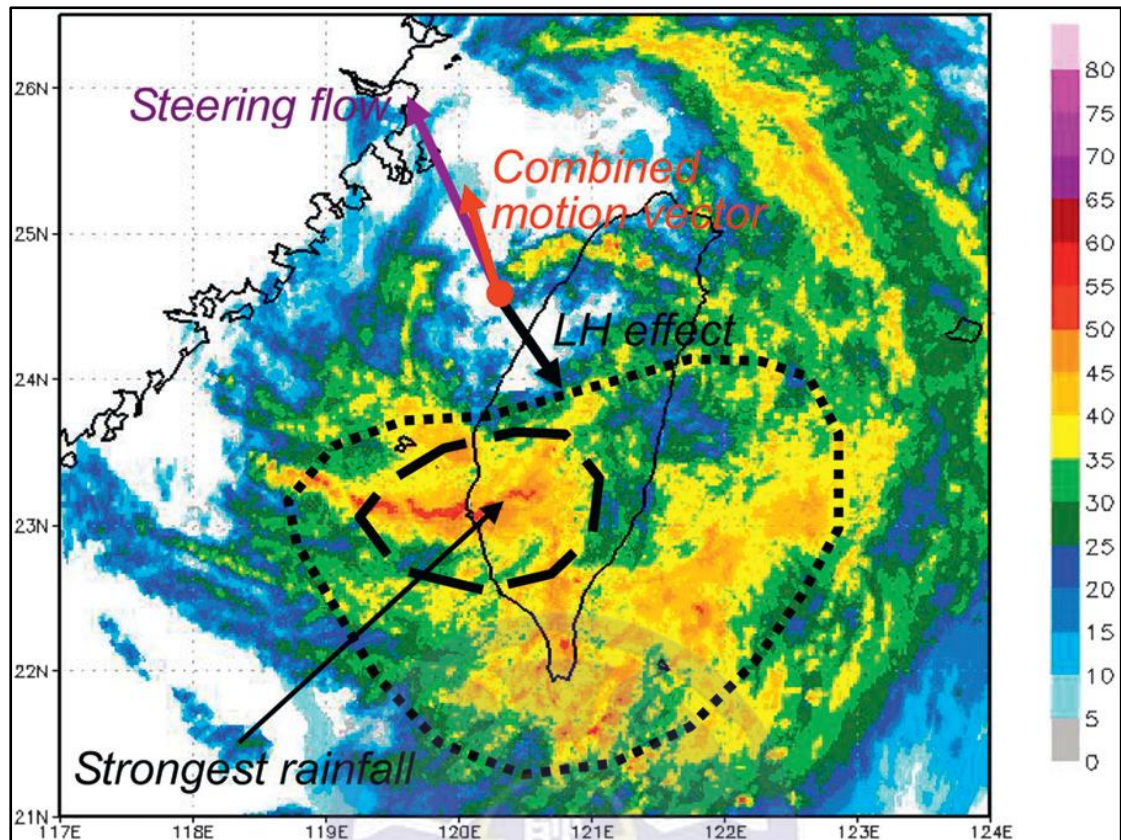


圖 1.7、莫拉克颱風之不對稱潛熱效應影響移速示意圖，黑色虛線範圍為強降雨區，黑色點線範圍為降雨區，黑色粗箭頭為潛熱效應產生向東南方之微小向量，紫色箭頭為環境駛流方向，紅色箭頭為兩向量合成莫拉克颱風之移速移向，其結果使颱風整體移速減慢。(摘自 Wang et al., 2012)

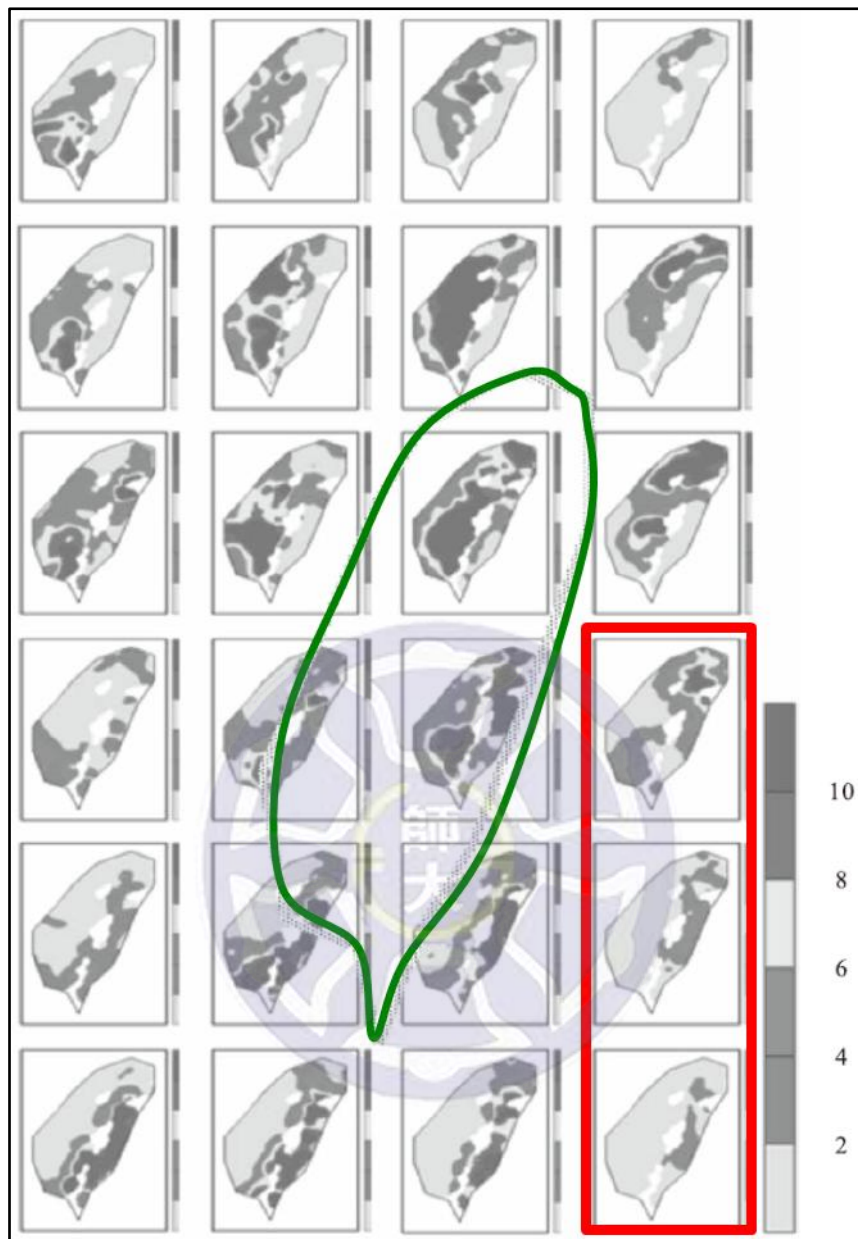


圖 1.8、1991-2008 年颱風降雨氣候統計模式圖，紅色方形區為後製康芮颱風通過之區域，單位： mm h^{-1} 。(摘自葉等，2010)

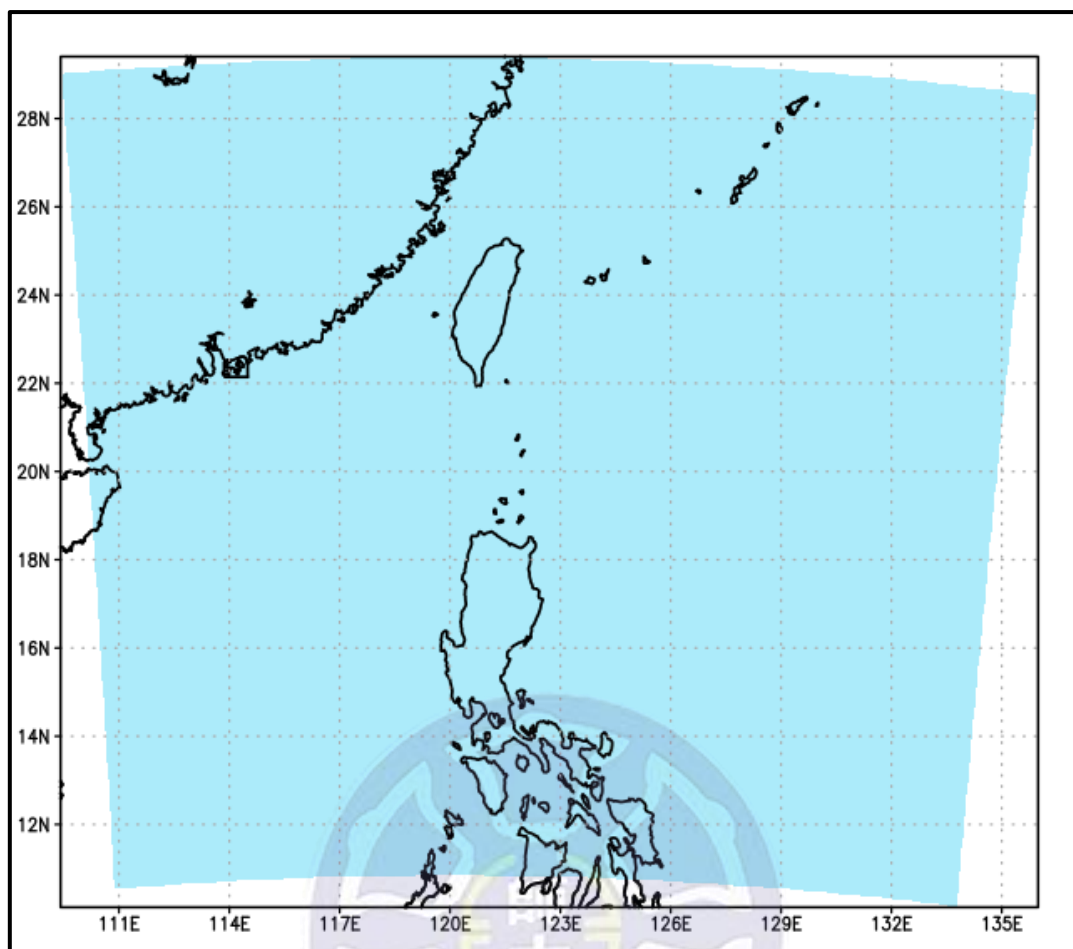


圖 2.2、CReSS 模式模擬範圍(水藍色區域)。

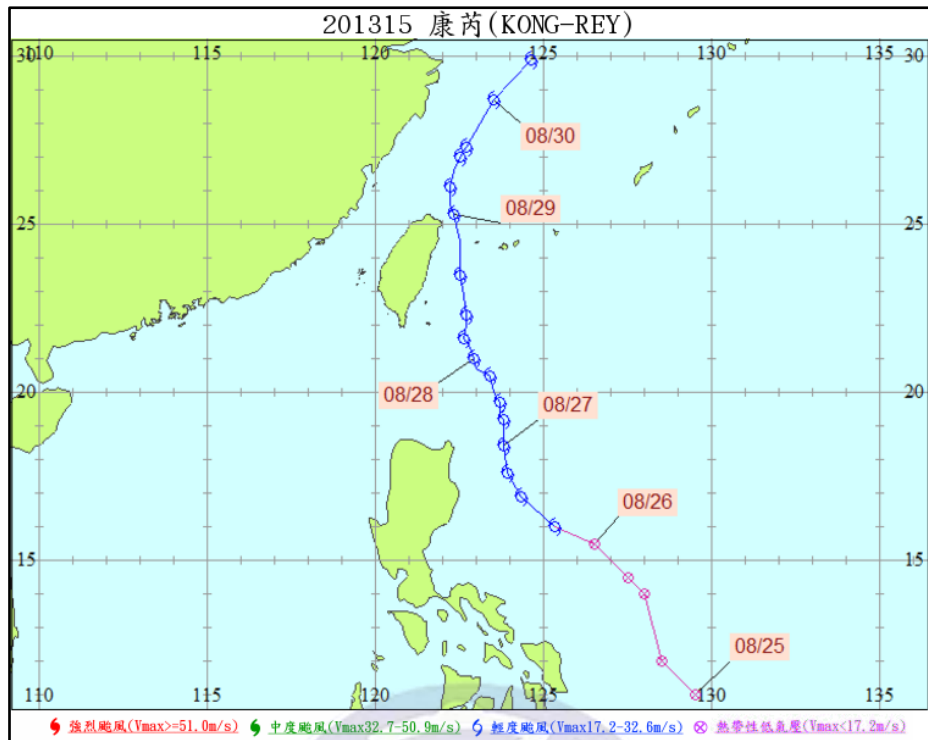


圖 3.1、中央氣象局康芮颱風路徑圖。

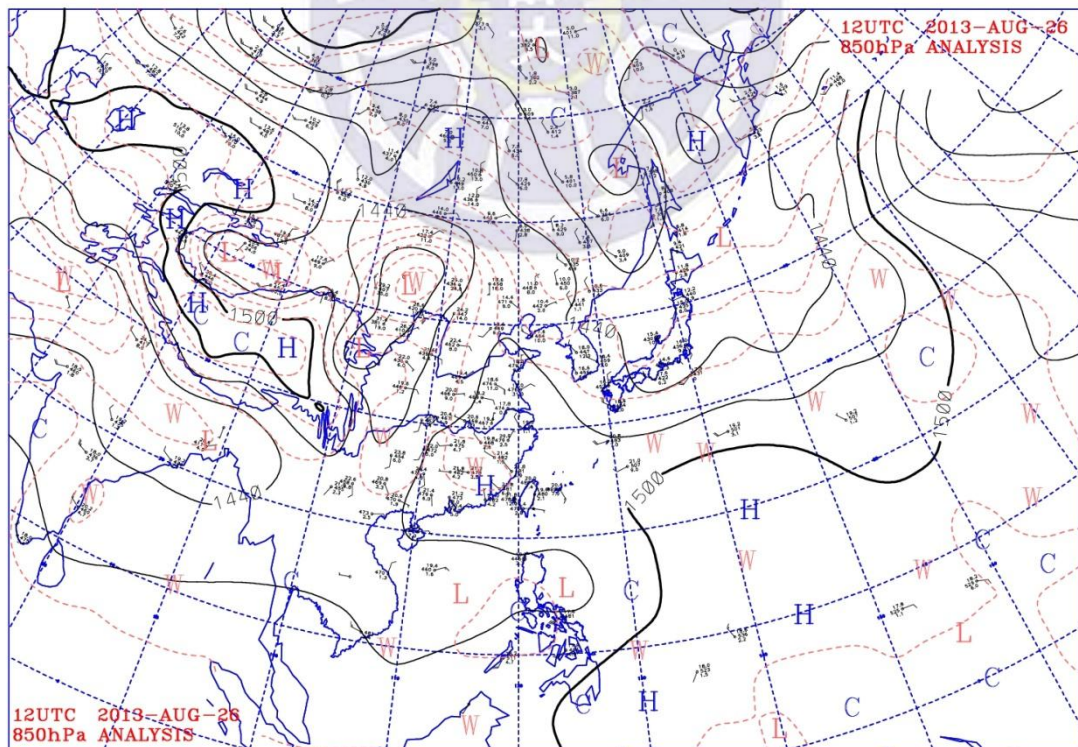


圖 3.2、中央氣象局 2013 年 8 月 26 日 1200 UTC 之 850 hPa 天氣圖。

(黑色線為等高線，單位：gpm。紅色虛線為等溫線，單位：°C)

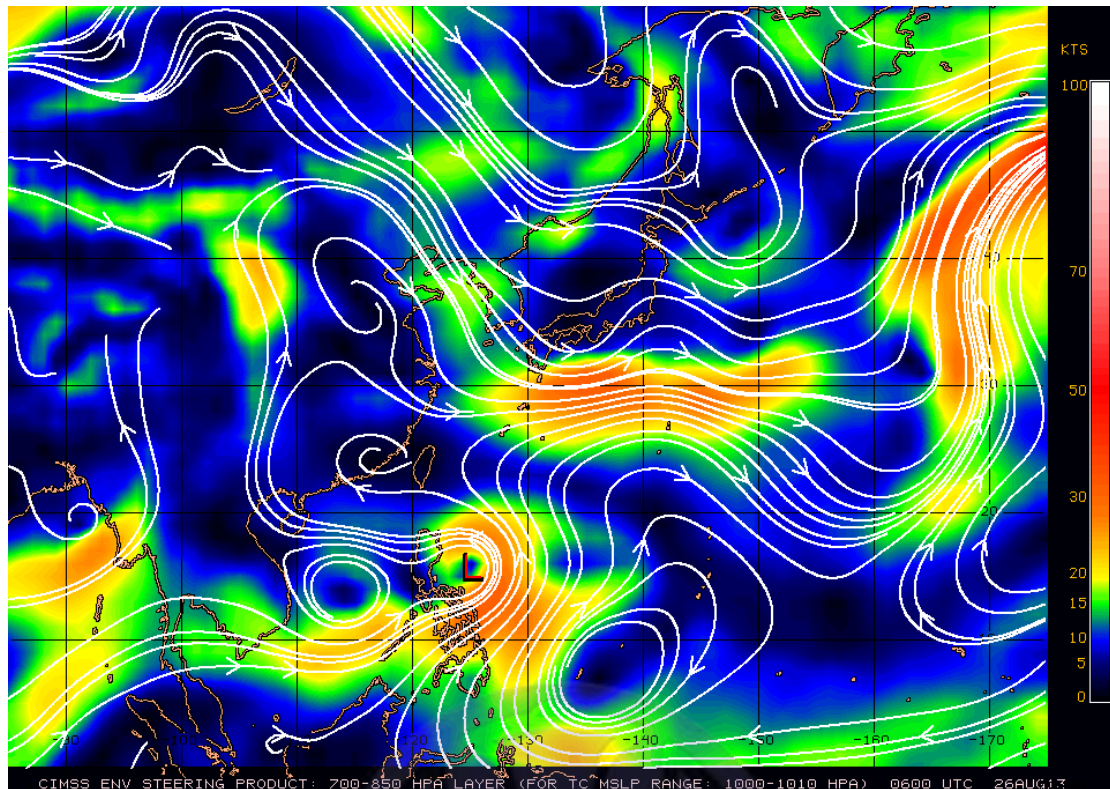


圖 3.3、CIMSS 8 月 26 日 0600 UTC 之 700 至 850 hPa 平均氣流圖。

(白色線條為氣流線，彩色區域為風速，單位：knot。)

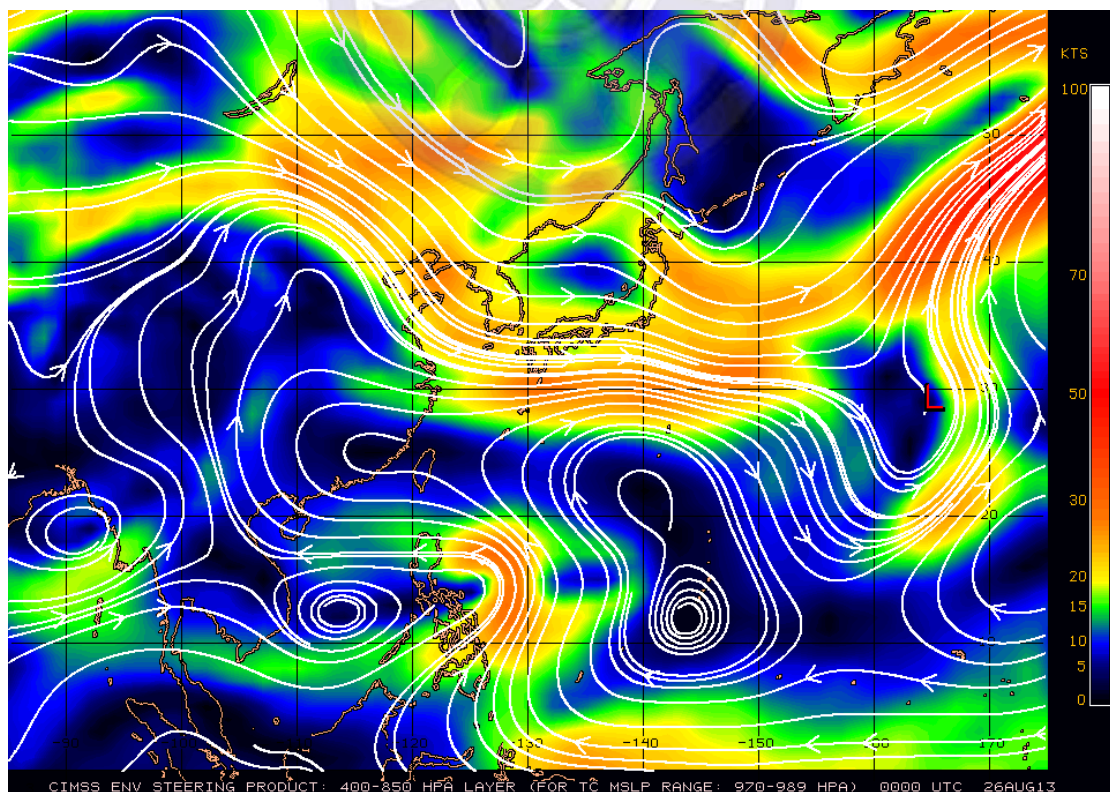


圖 3.4 a、同圖 3.3，但為 26 日 0000 UTC 400 至 850 hPa 平均氣流圖。

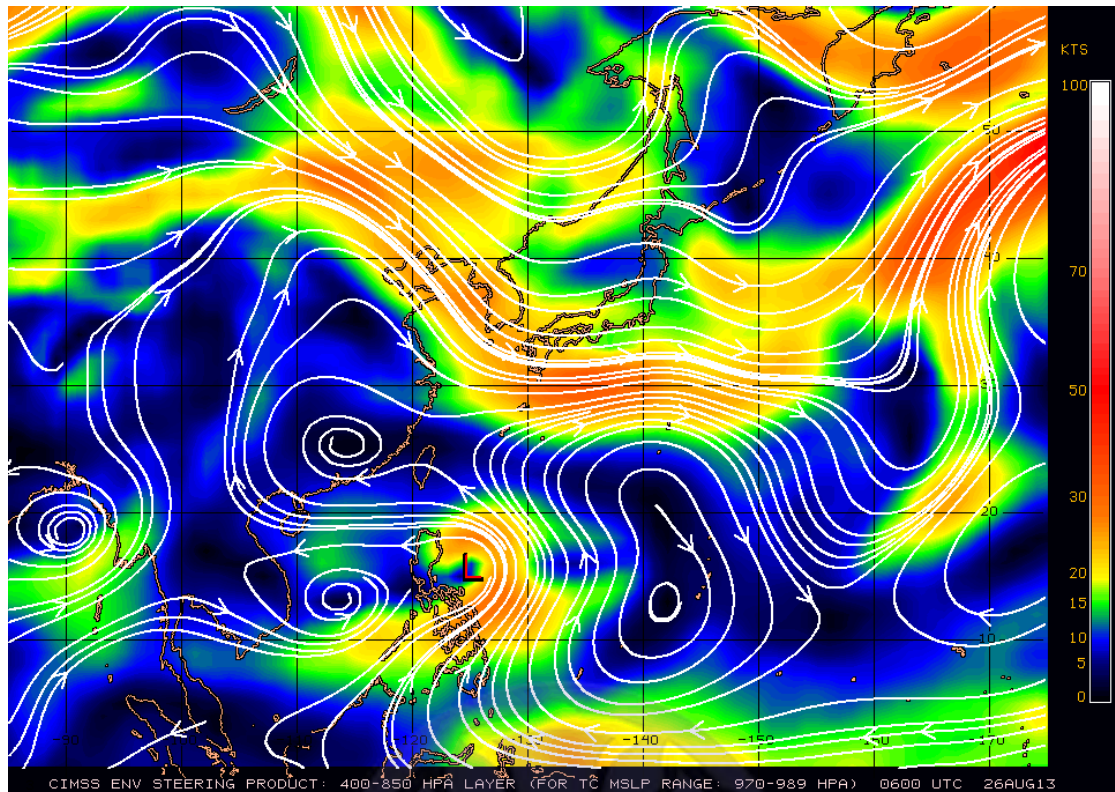


圖 3.4 b、同圖 3.4 a ，時間為 26 日 0600 UTC。

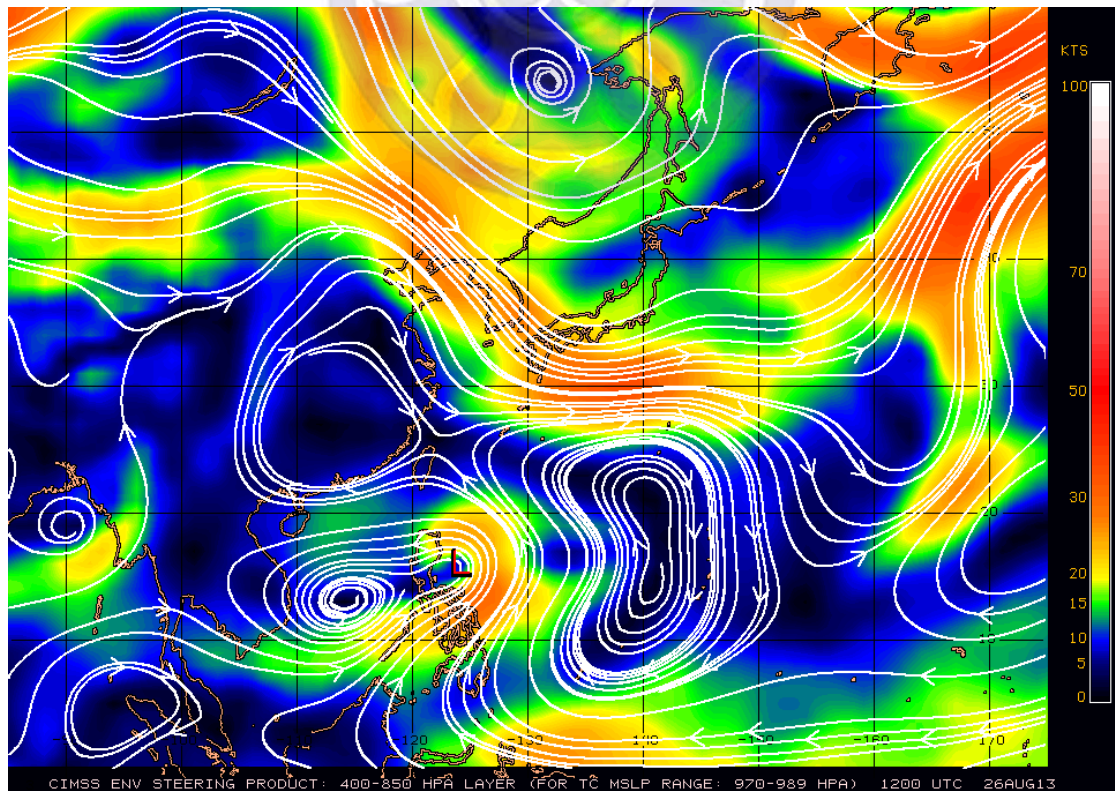


圖 3.4 c、同圖 3.4 a ，時間為 26 日 1200 UTC。

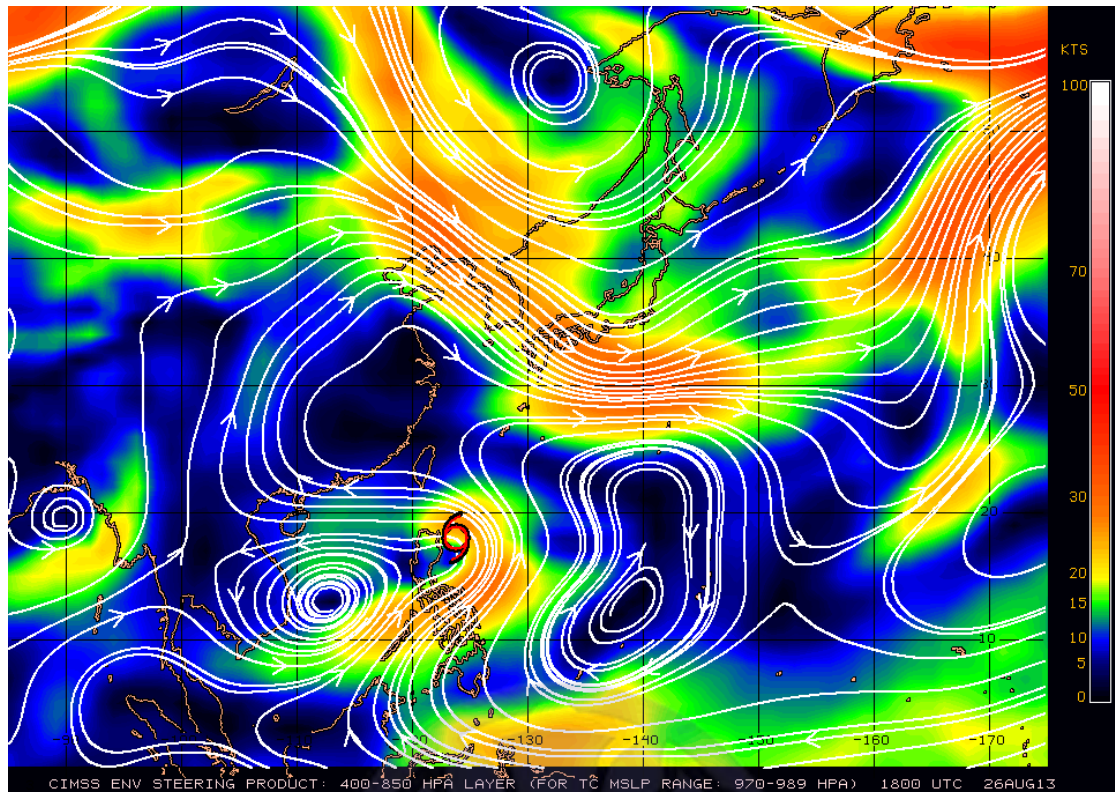


圖 3.4 d、同圖 3.4 a ，時間為 26 日 1800 UTC。

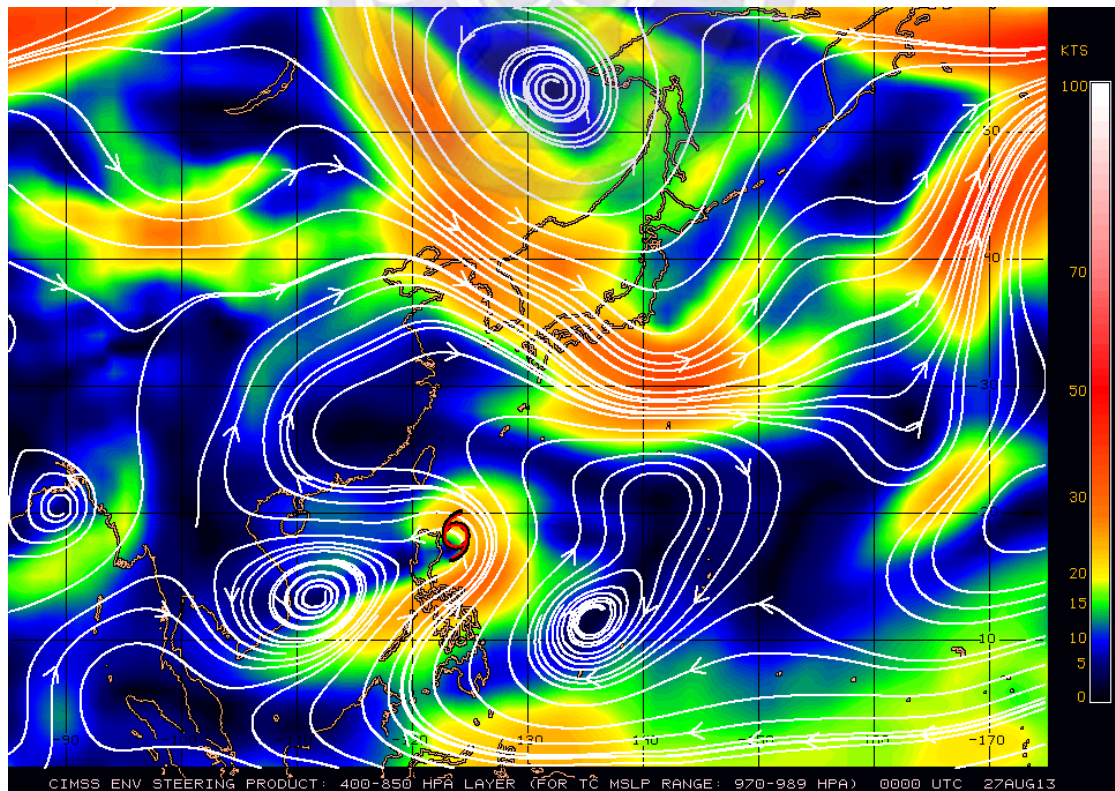


圖 3.4 e、同圖 3.4 a ，時間為 27 日 0000 UTC。

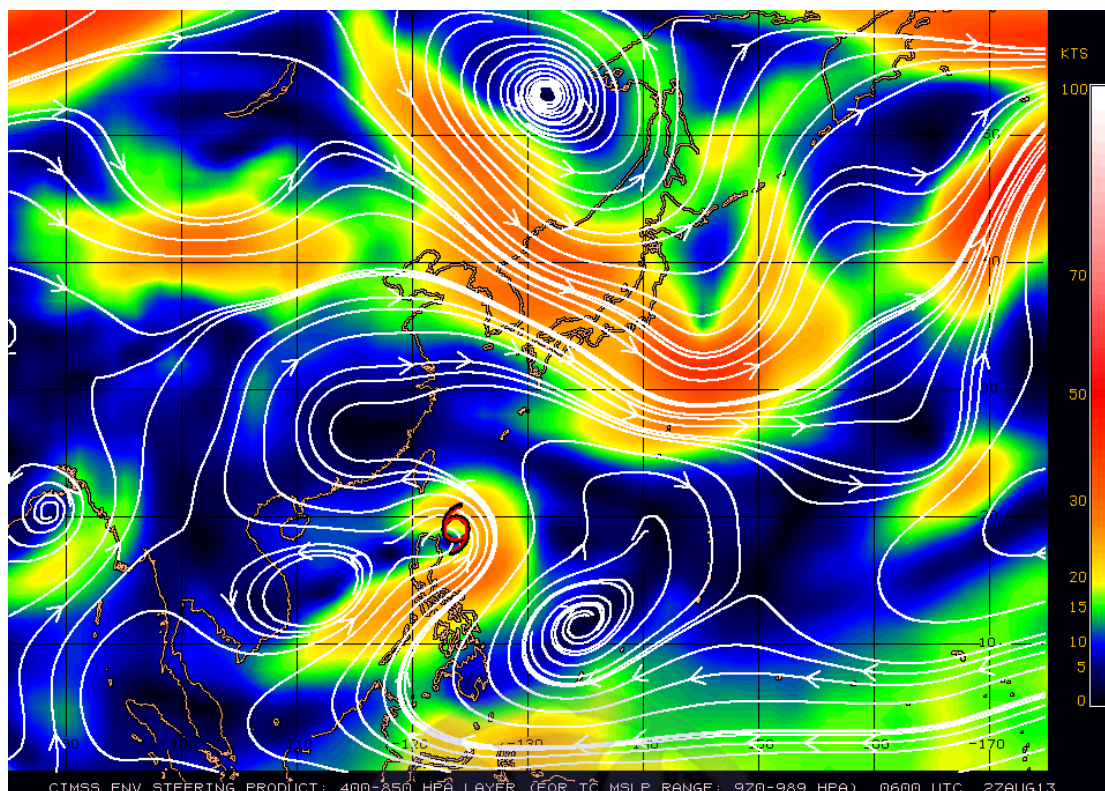


圖 3.4 f、同圖 3.4 a，時間為 27 日 0600 UTC。

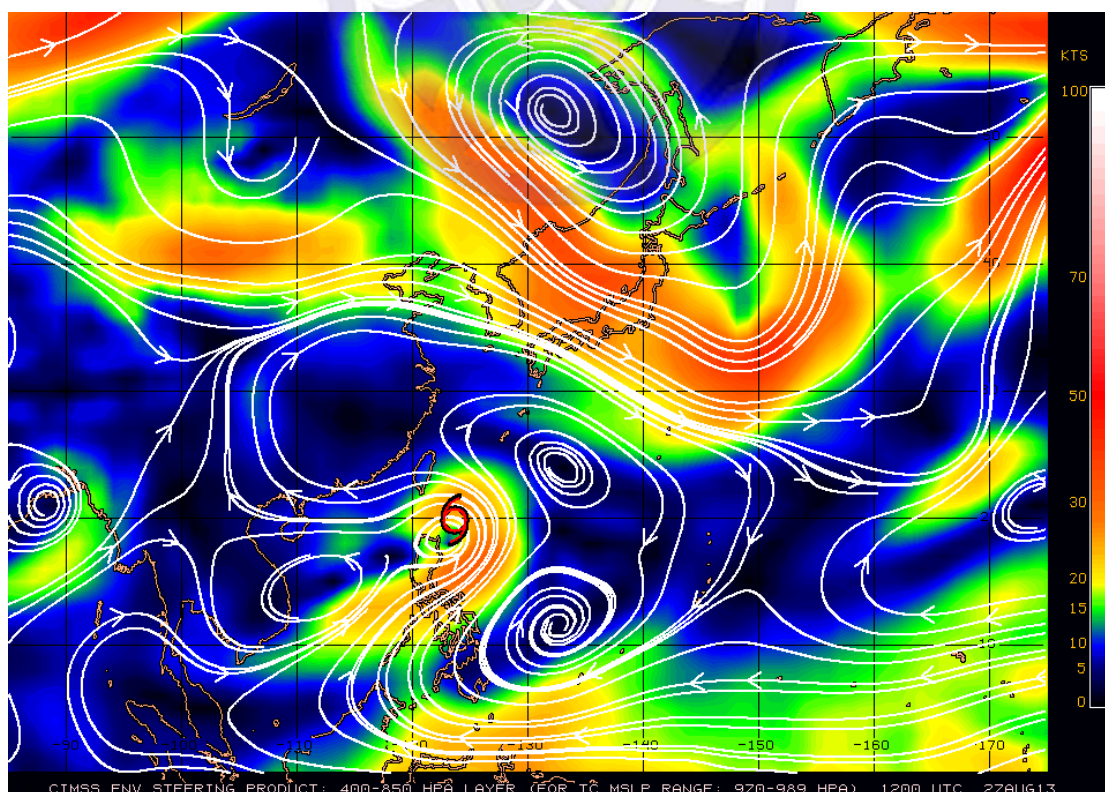


圖 3.4 g、同圖 3.4 a，時間為 27 日 1200 UTC。

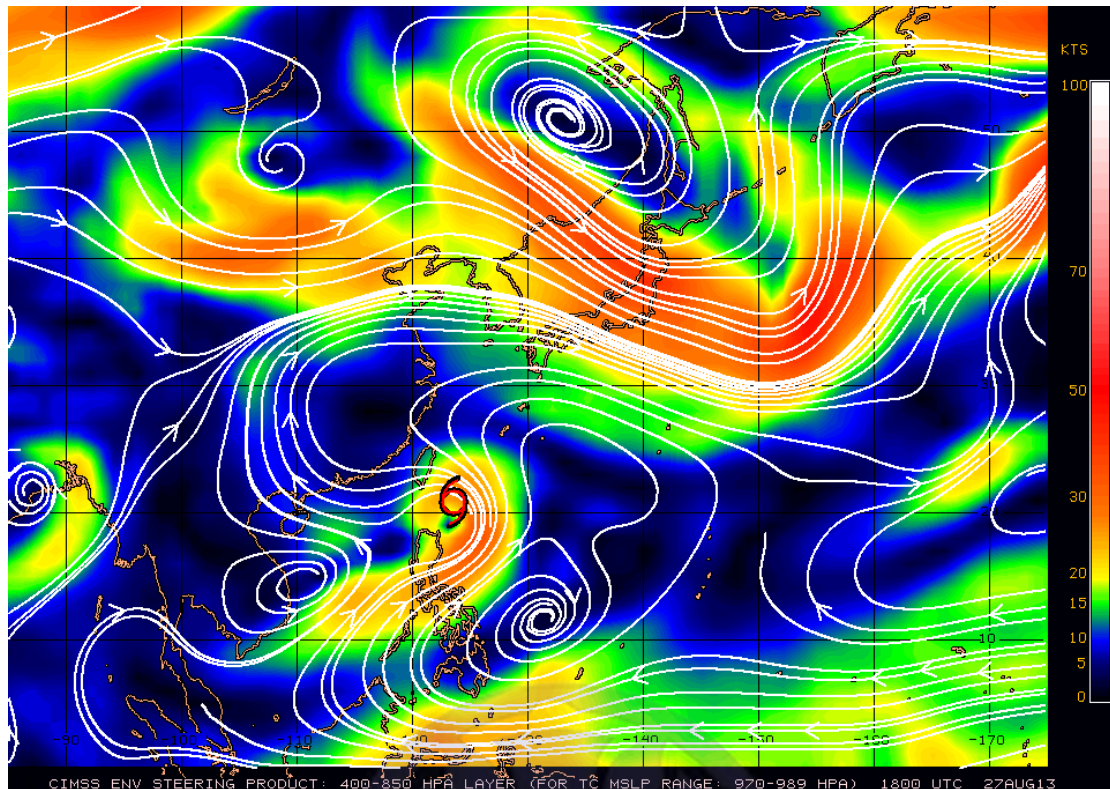


圖 3.4 h、同圖 3.4 a ，時間為 27 日 1800 UTC。

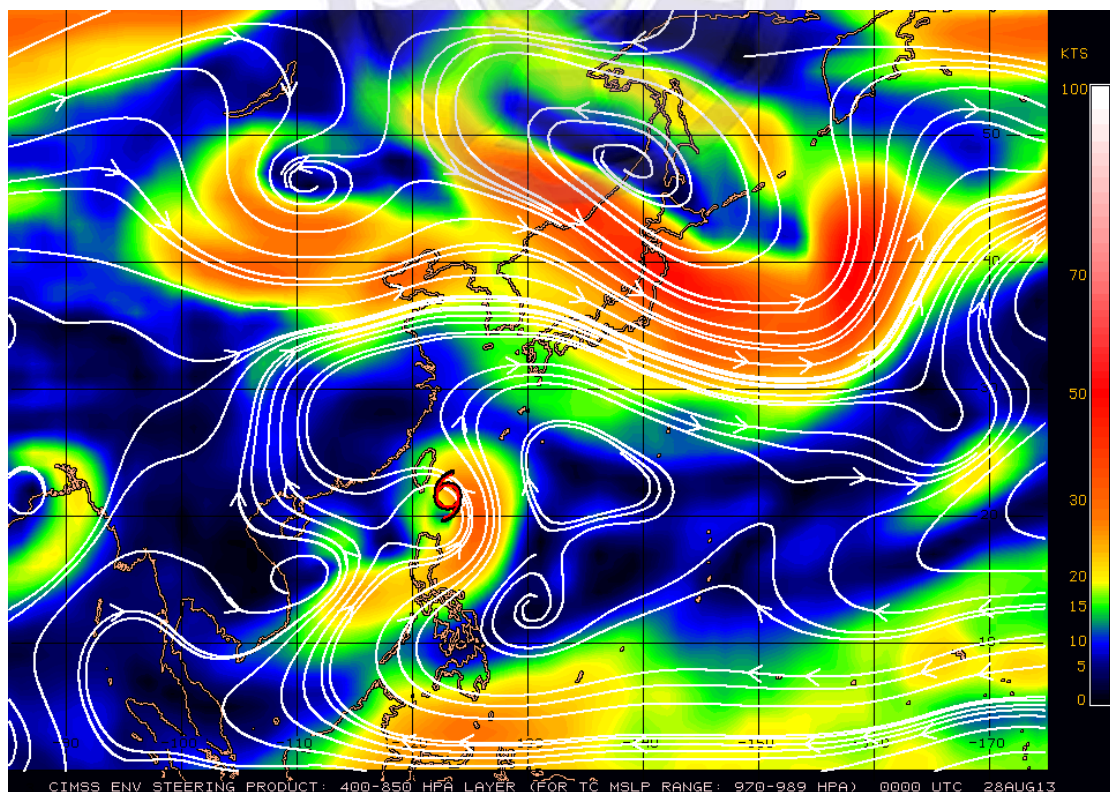


圖 3.4 i、同圖 3.4 a ，時間為 28 日 0000 UTC。

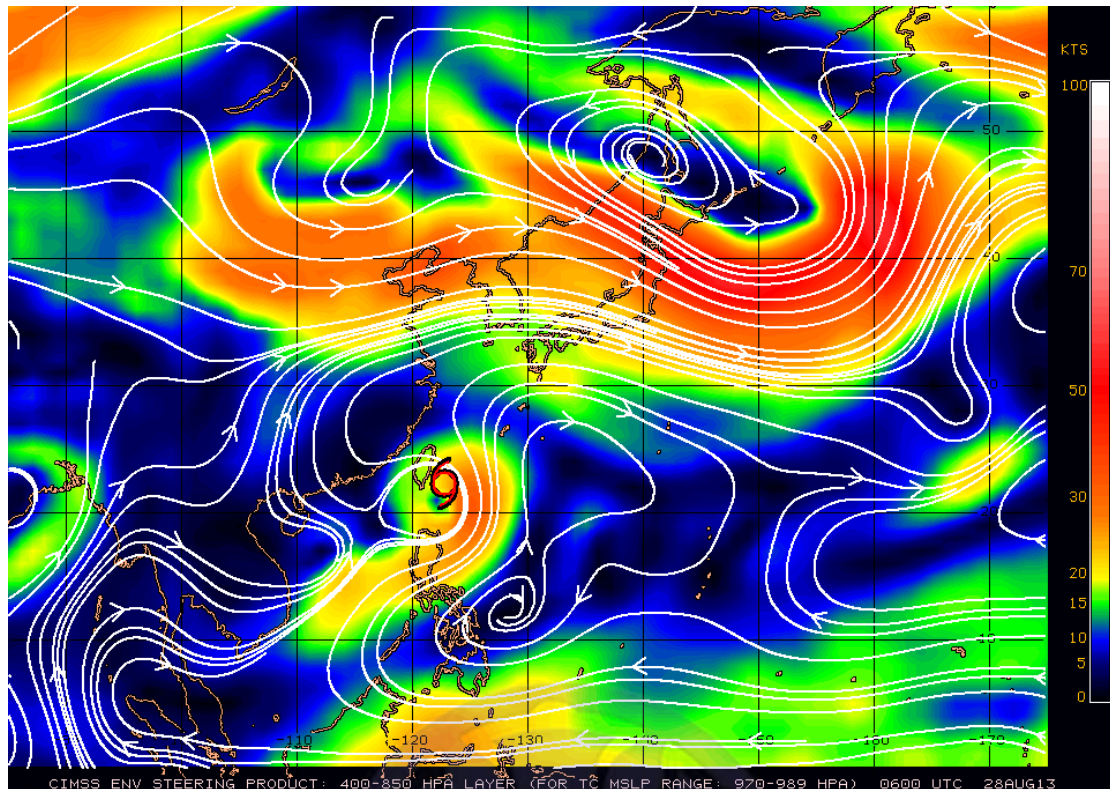


圖 3.4 j、同圖 3.4 a ，時間為 28 日 0600 UTC。

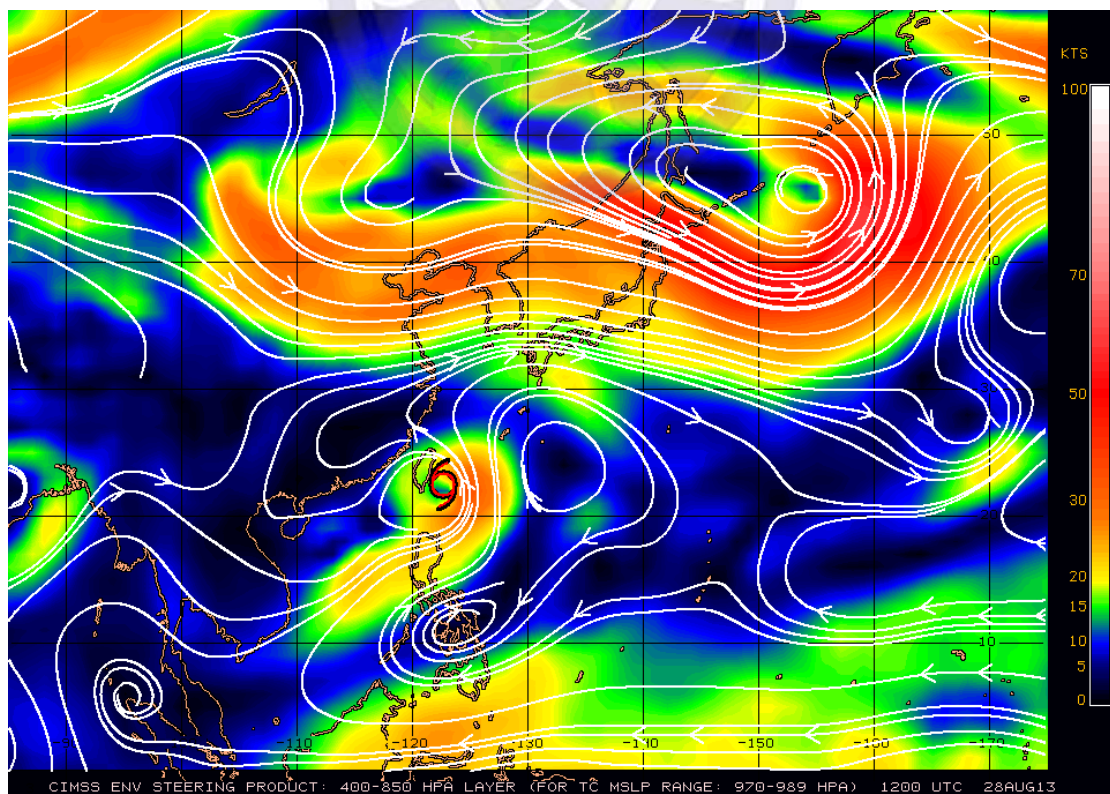


圖 3.4 k、同圖 3.4 a ，時間為 28 日 1200 UTC。

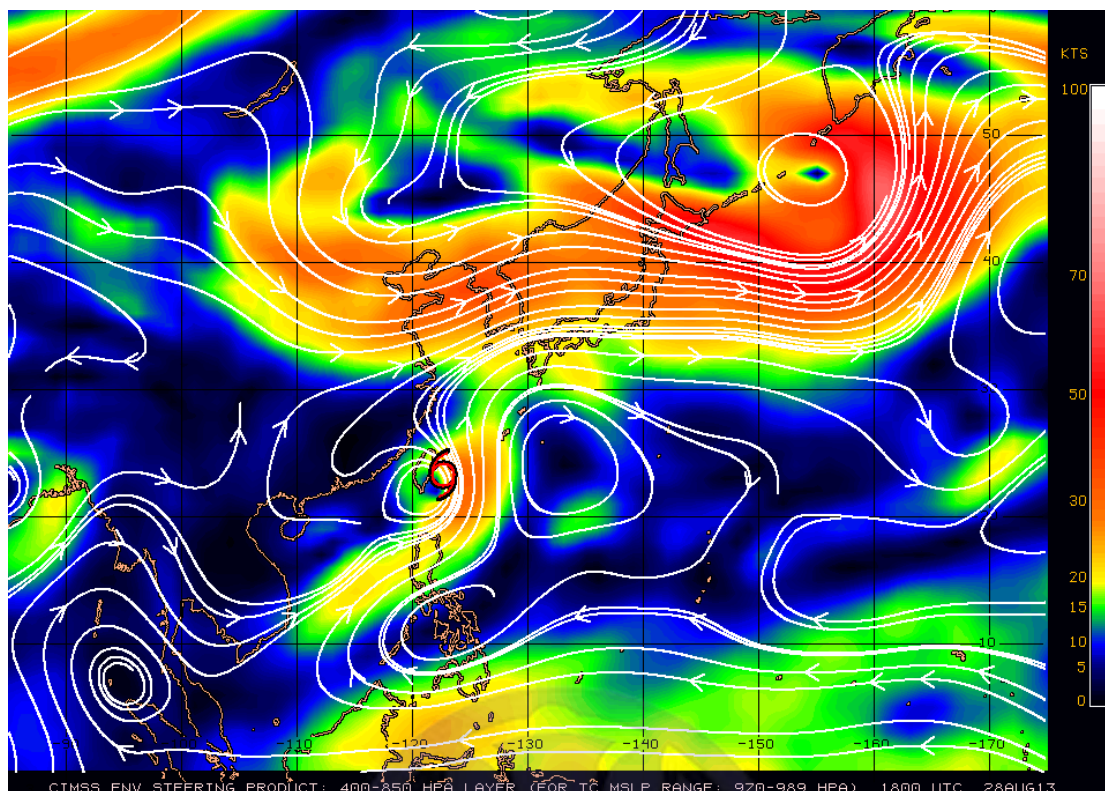


圖 3.4l、同圖 3.4 a ，時間為 28 日 1800 UTC。

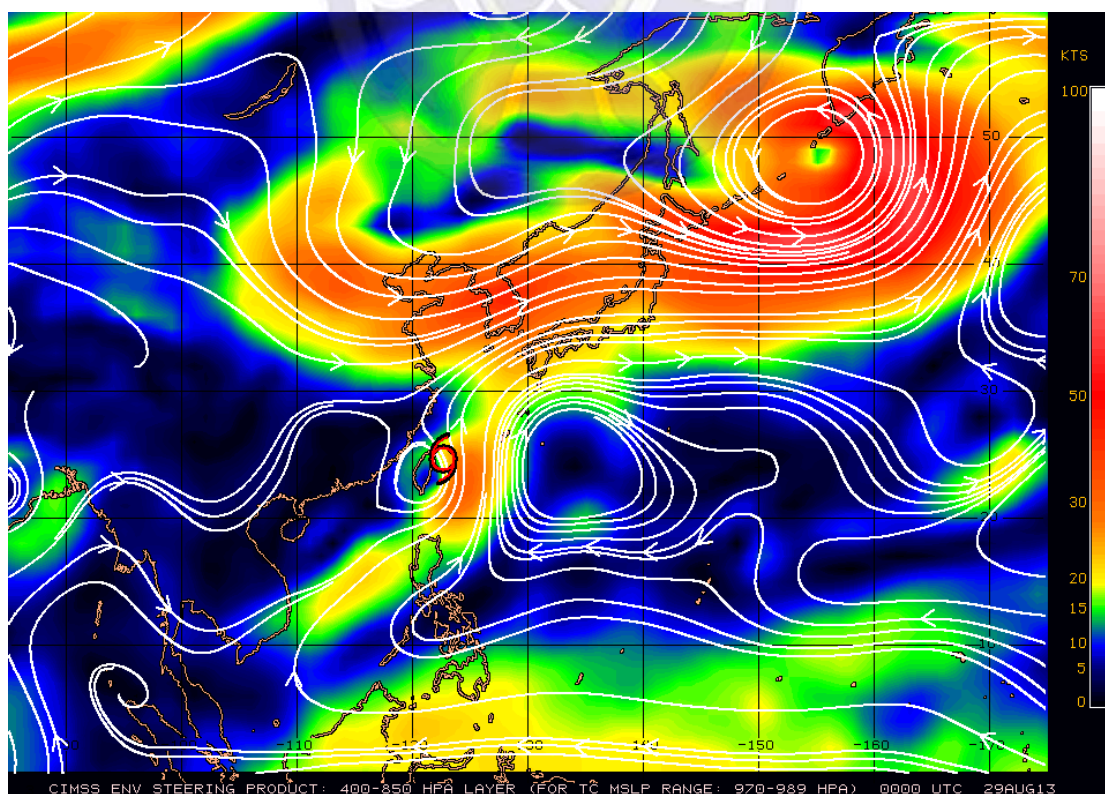


圖 3.4 m、同圖 3.4 a ，時間為 29 日 0000 UTC。

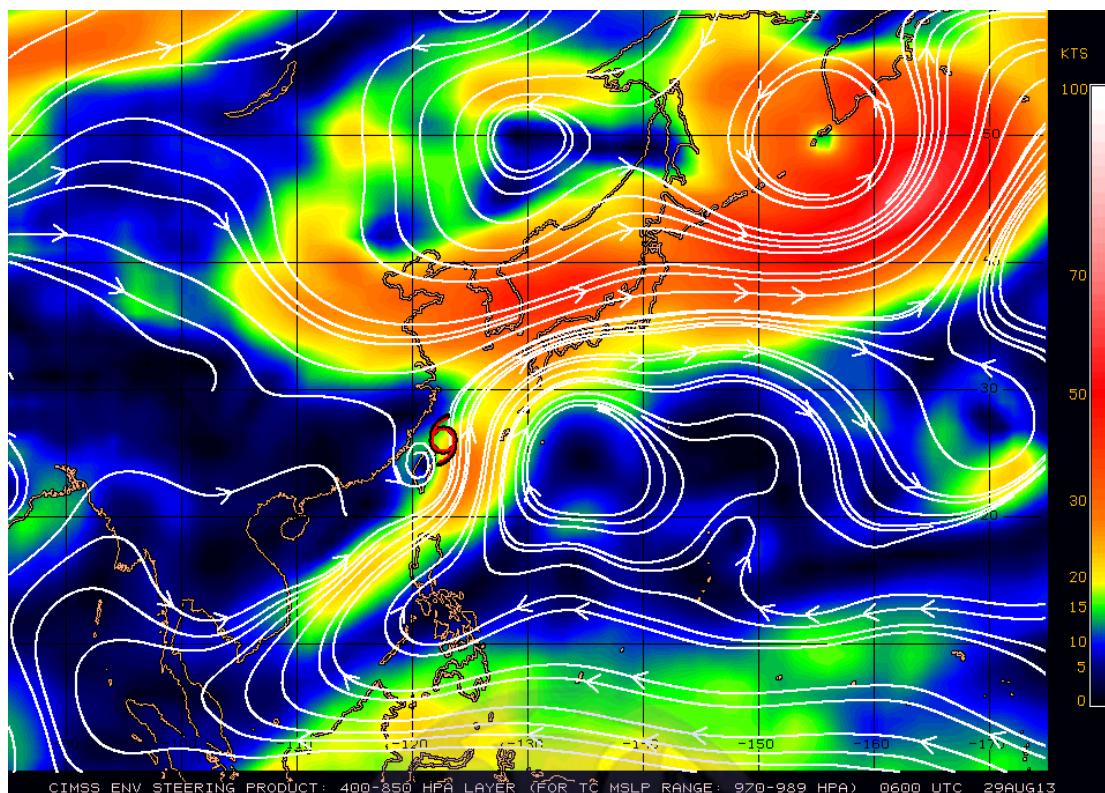


圖 3.4 n、同圖 3.4 a ，時間為 29 日 0600 UTC。

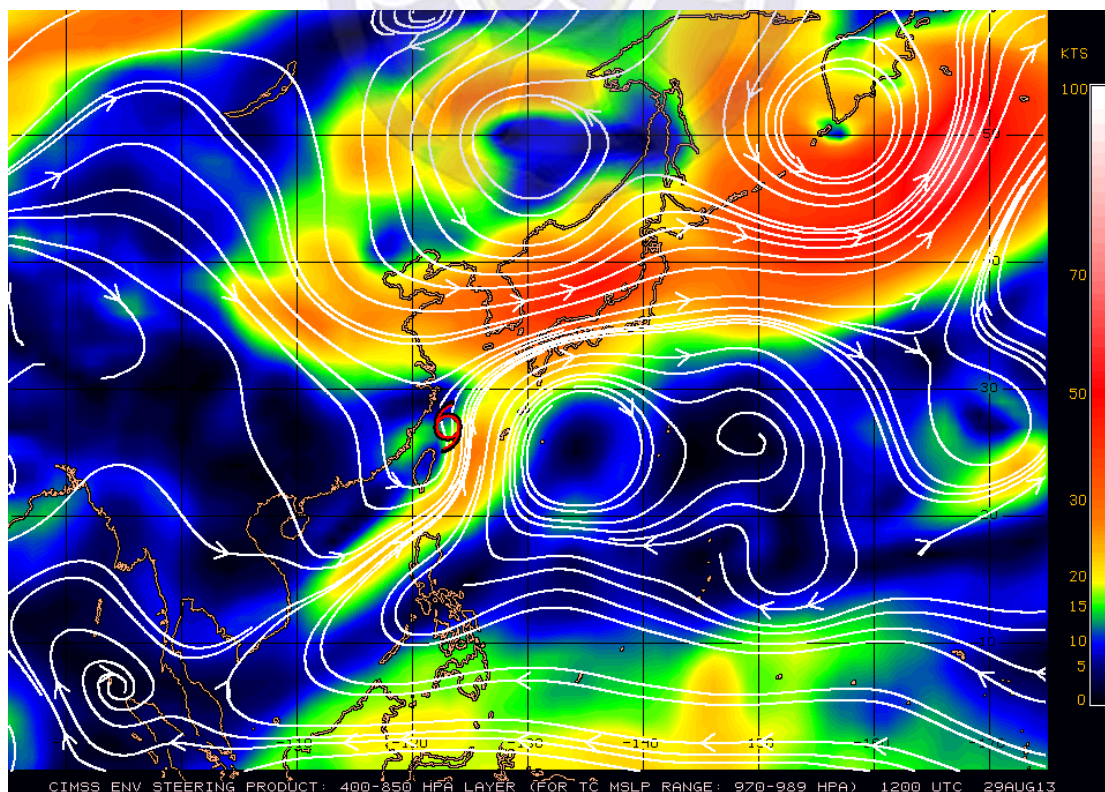


圖 3.4 o、同圖 3.4 a ，時間為 29 日 1200 UTC。

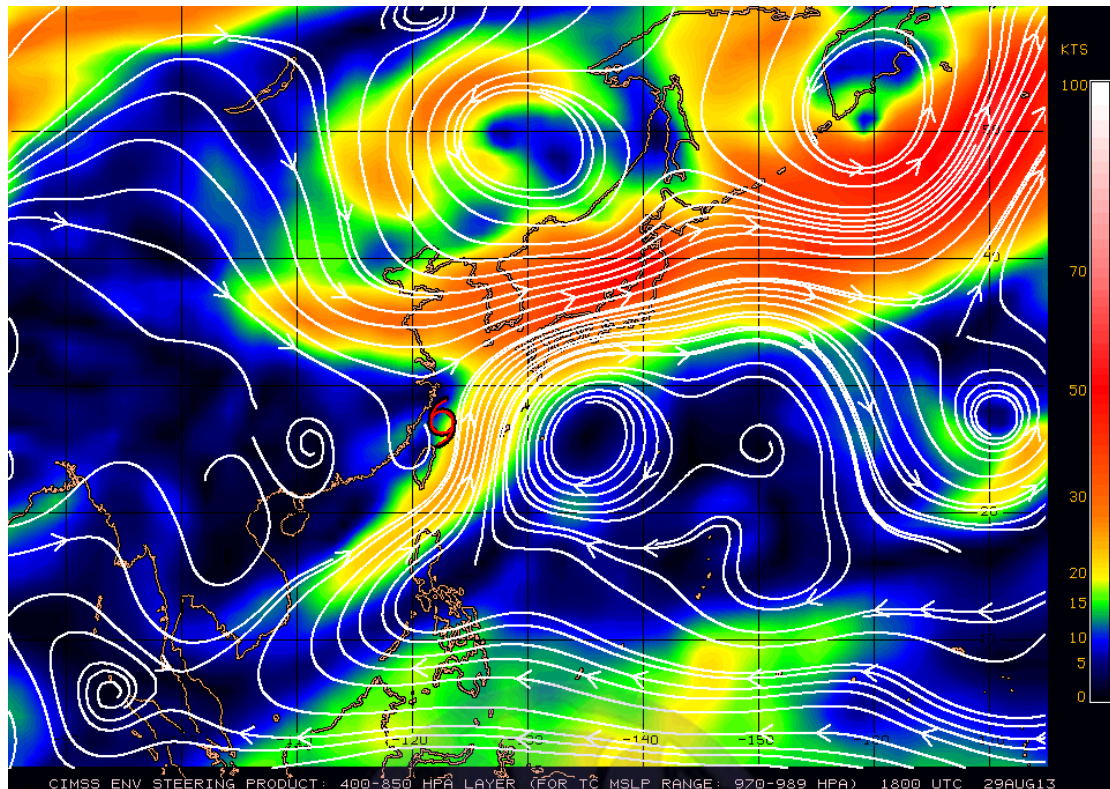


圖 3.4 p、同圖 3.4 a，時間為 29 日 1800 UTC。

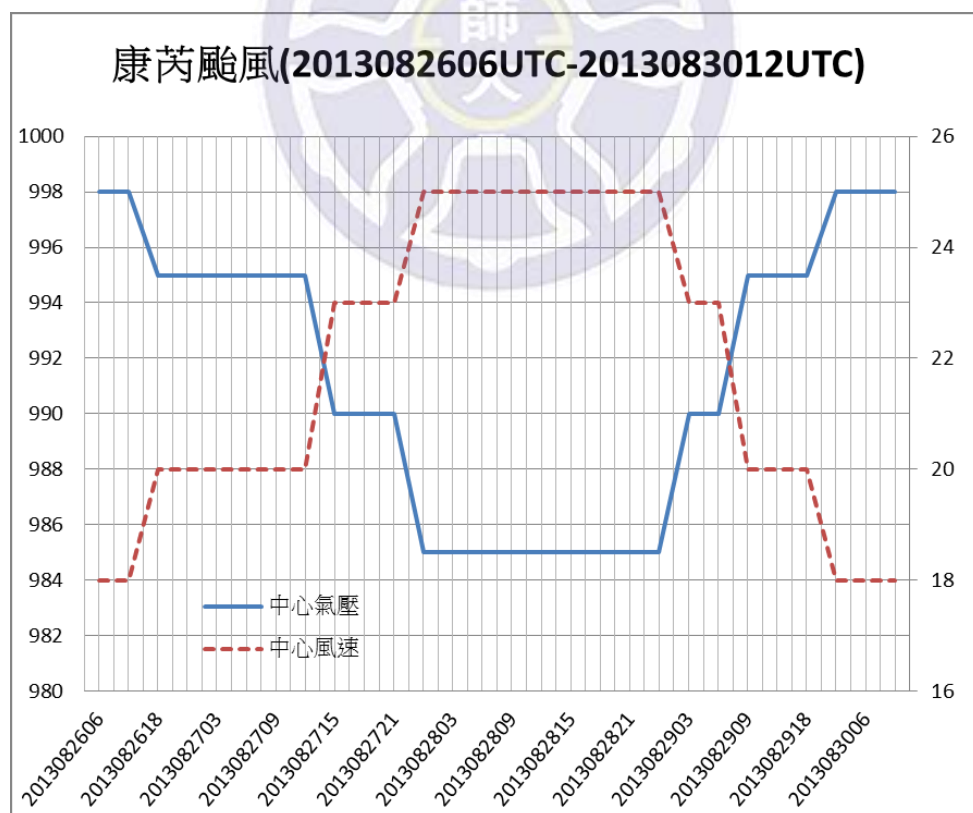


圖 3.5、中央氣象局康芮颱風之衛星觀測強度估計。

(藍色實線為中心氣壓(hPa)，紅色虛線為中心附近最大持續風速(m s^{-1})。)

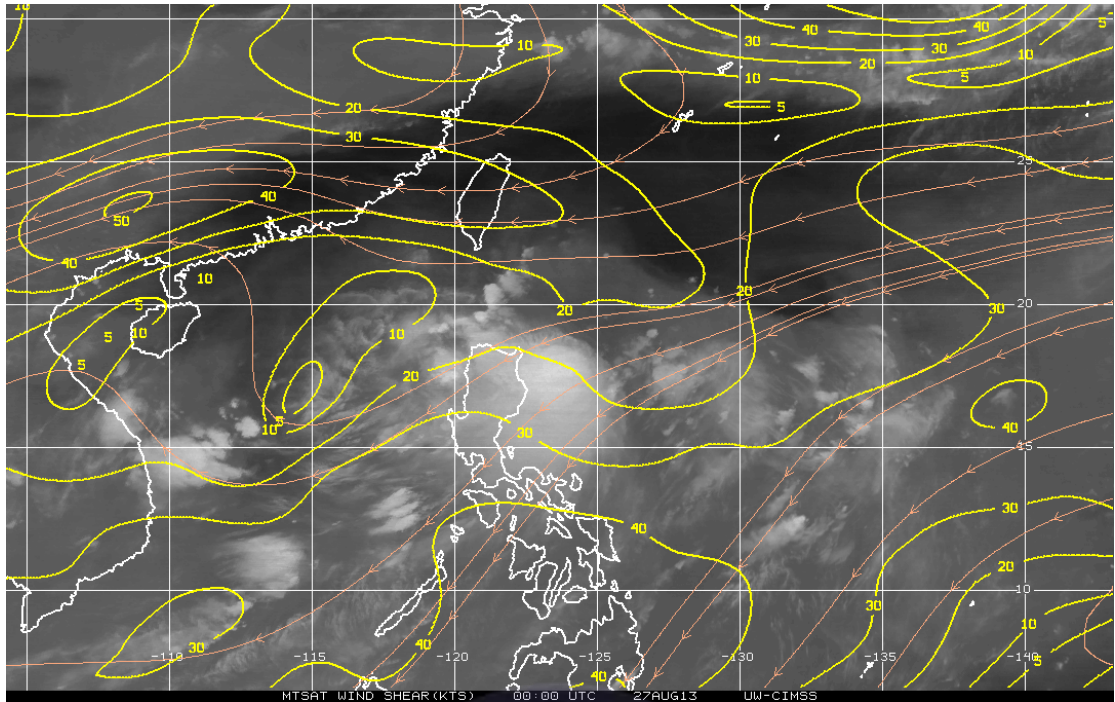


圖 3.6 a、CIMSS 8 月 27 日 0000 UTC 之深層垂直風切(約 200 減 850 hPa)疊加水氣頻道雲圖。(橘色氣流線為風切方向，等值線為風切強度，單位：knot。)

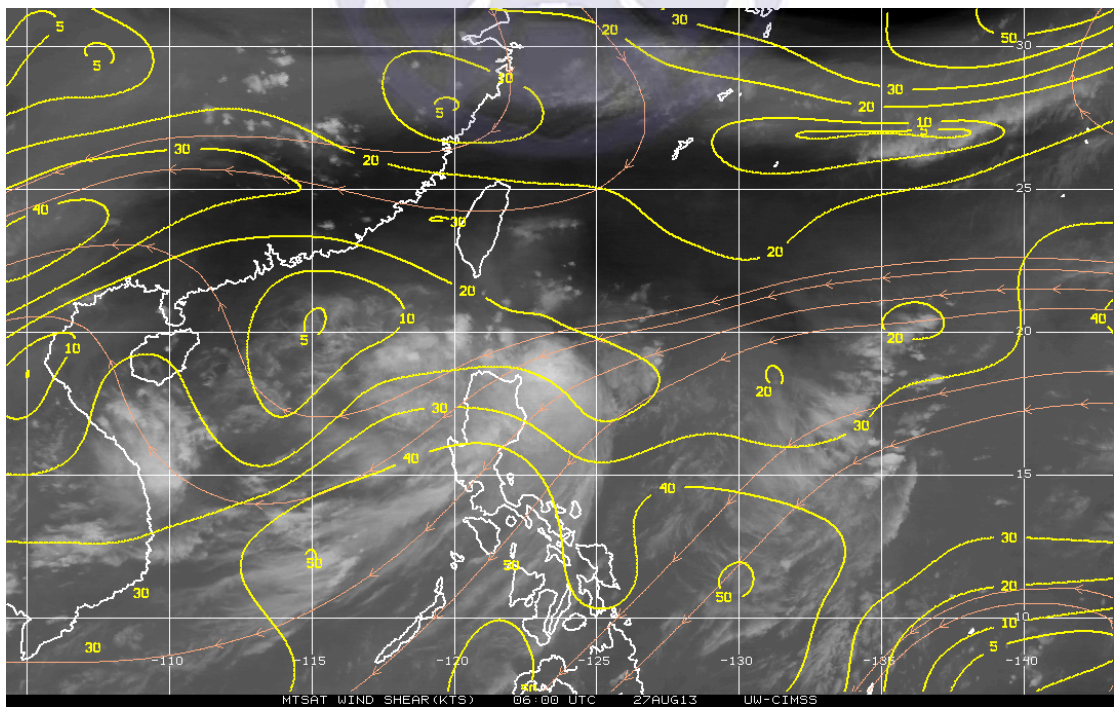


圖 3.6 b、同圖 3.6 a，時間為 27 日 0600 UTC。

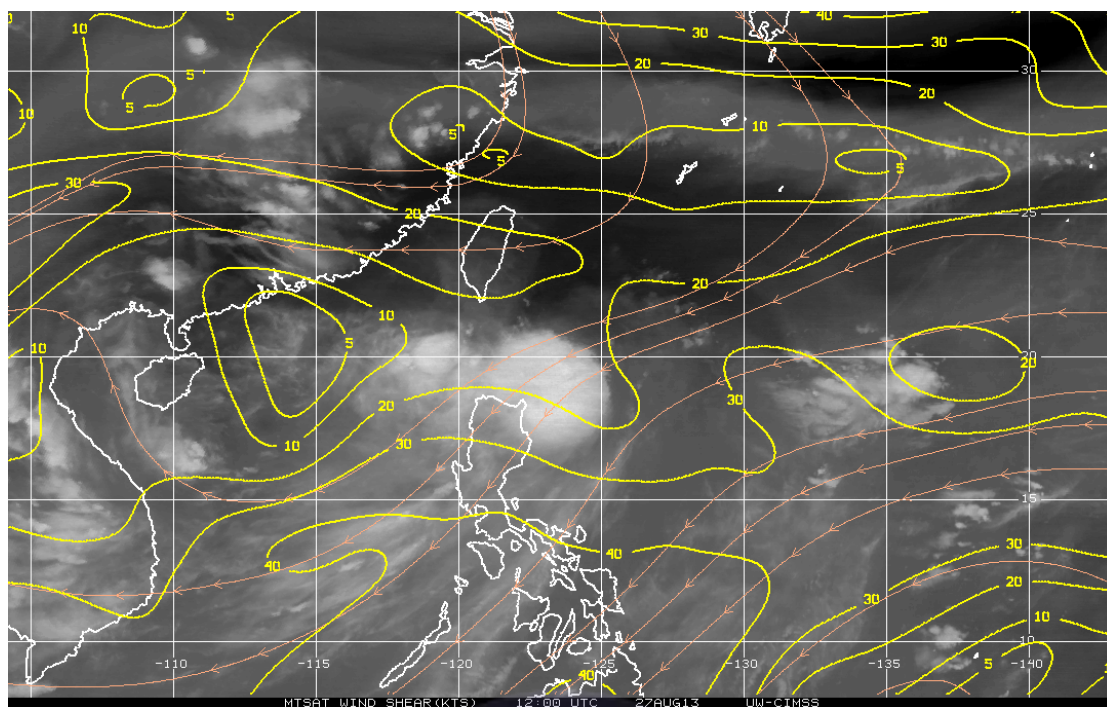


圖 3.6 c、同圖 3.6 a，時間為 27 日 1200 UTC。

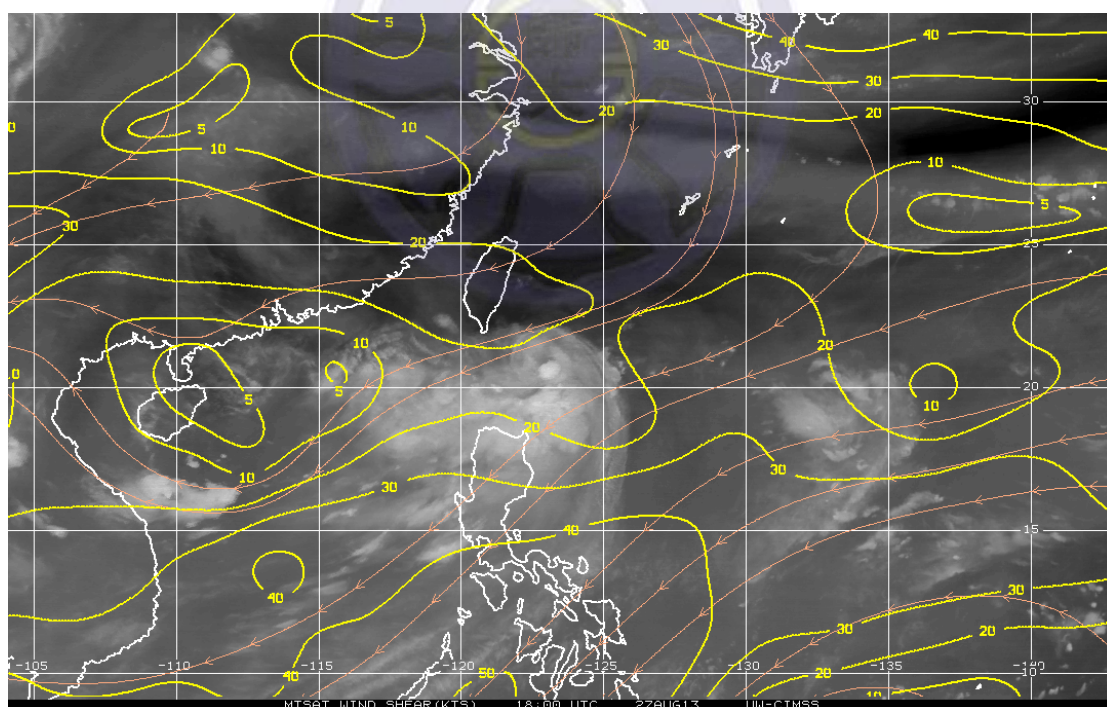


圖 3.6 d、同圖 3.6 a，時間為 27 日 1800 UTC。

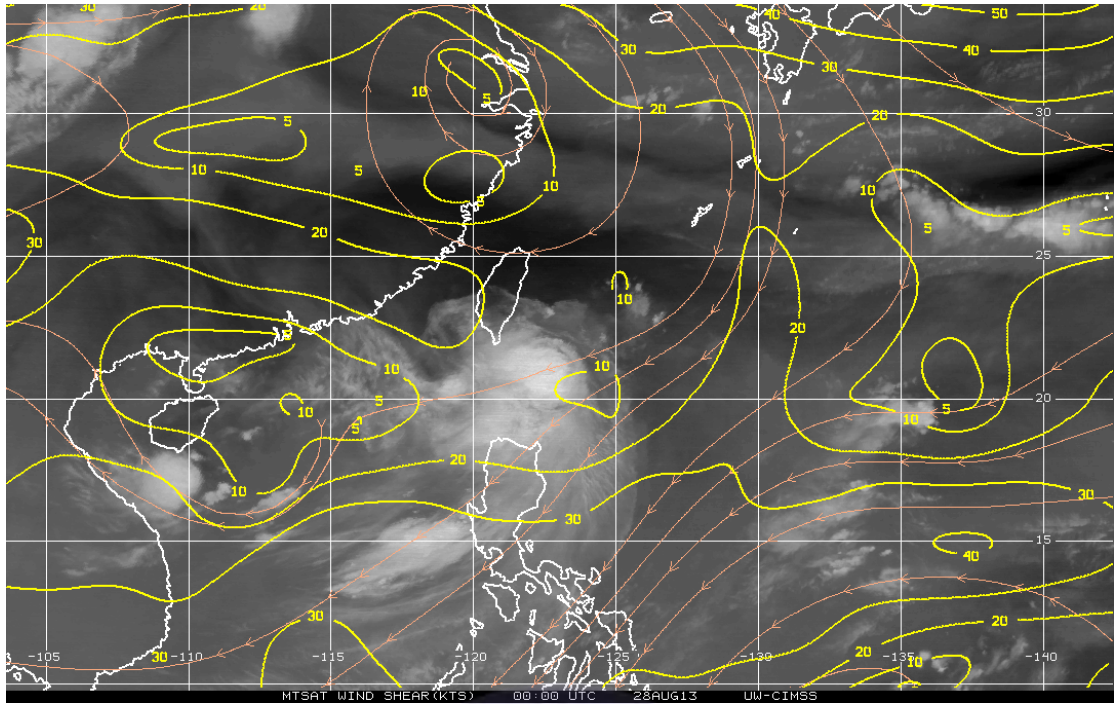


圖 3.6 e、同圖 3.6 a，時間為 28 日 0000 UTC。

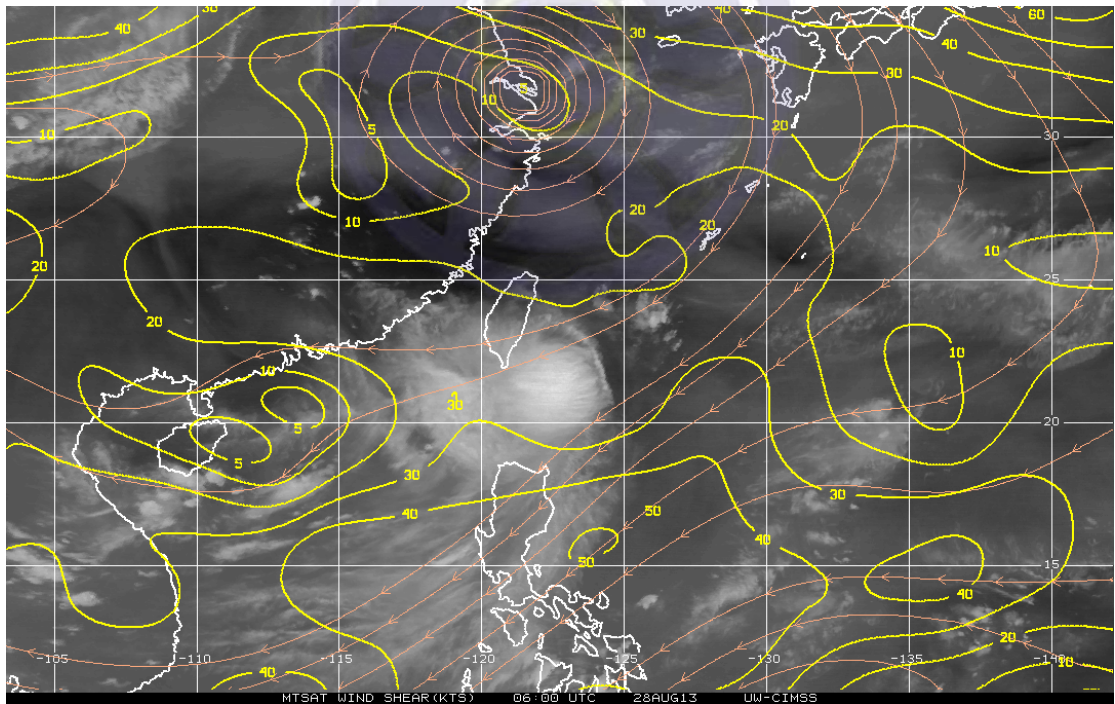


圖 3.6 f、同圖 3.6 a，時間為 28 日 0600 UTC。

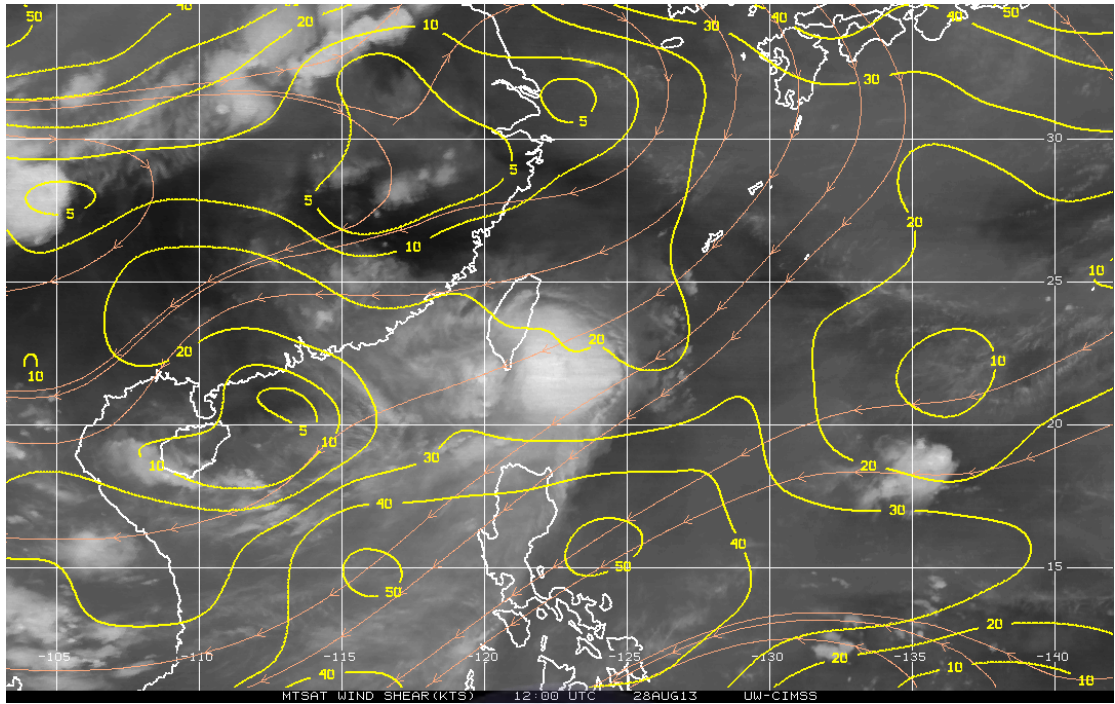


圖 3.6 g、同圖 3.6 a，時間為 28 日 1200 UTC。

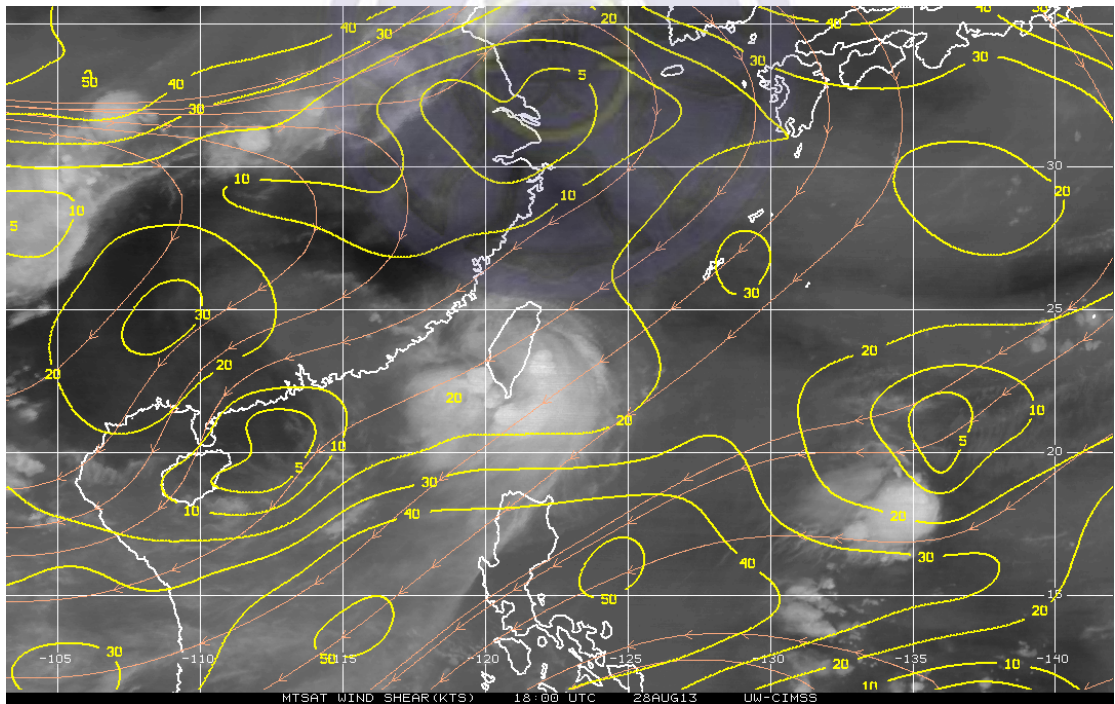


圖 3.6 h、同圖 3.6 a，時間為 28 日 1800 UTC。

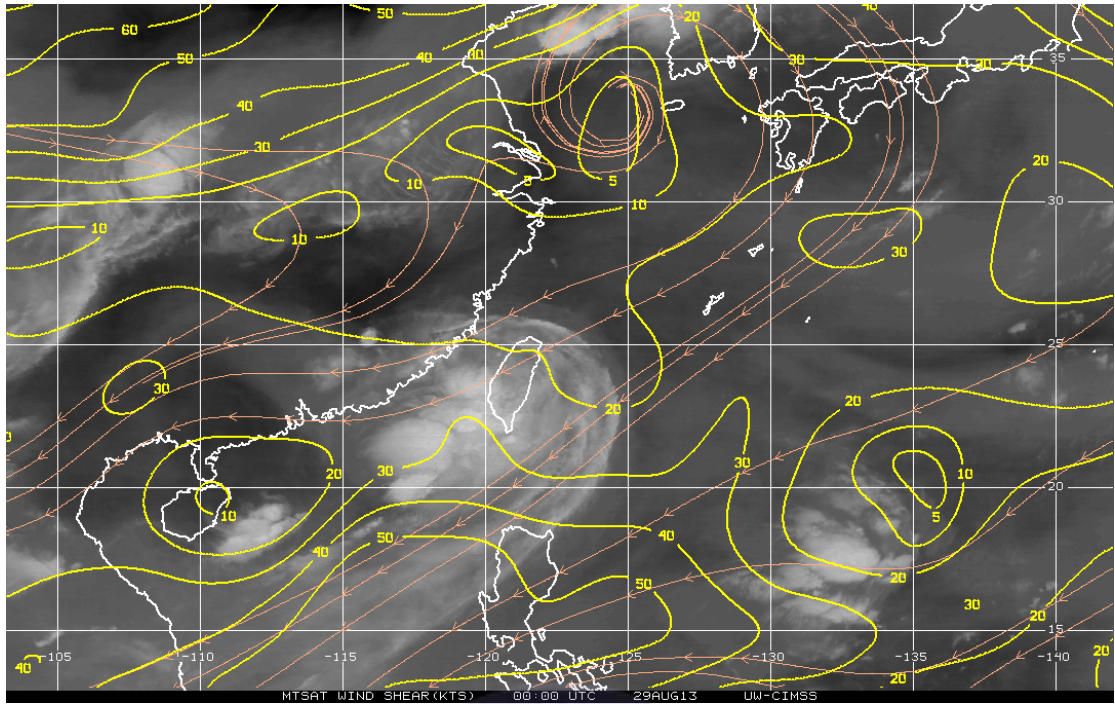


圖 3.6 i、同圖 3.6 a，時間為 29 日 0000 UTC。

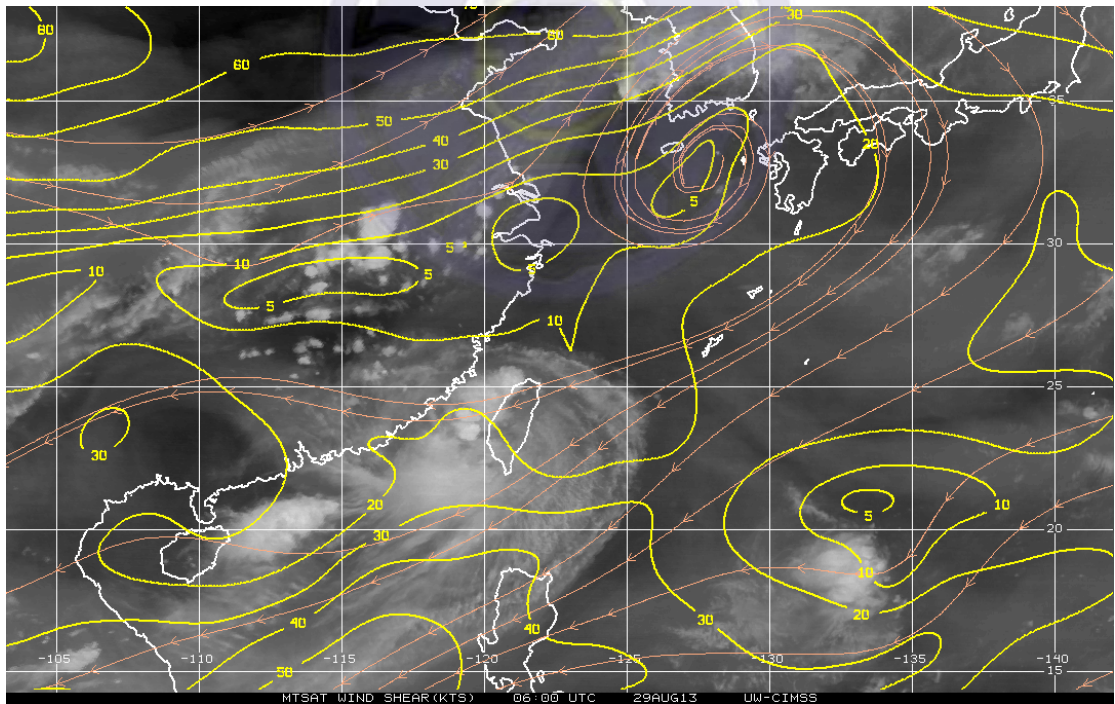


圖 3.6 j、同圖 3.6 a，時間為 29 日 0600 UTC。

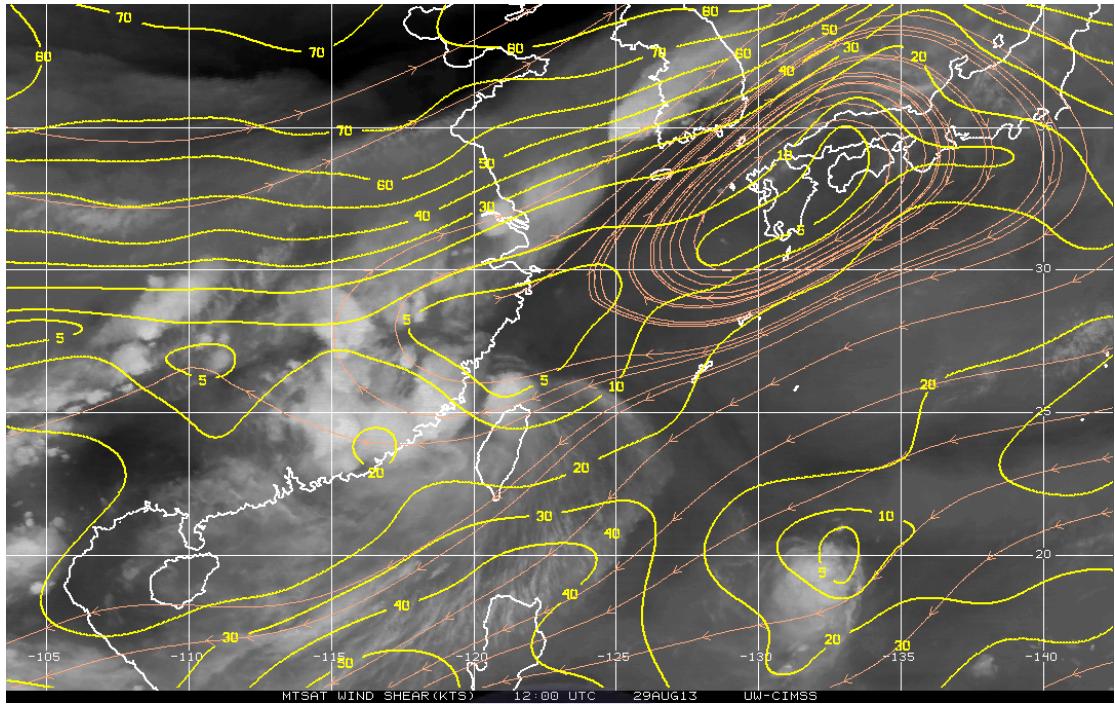


圖 3.6 k、同圖 3.6 a，時間為 29 日 1200 UTC。

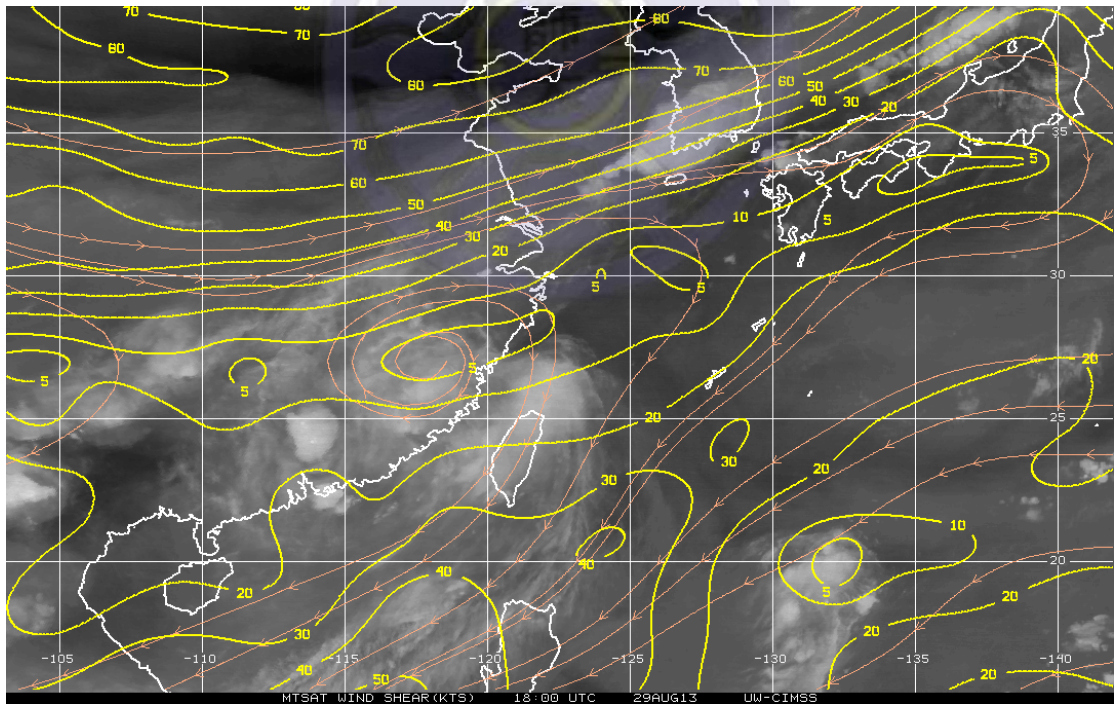


圖 3.6 l、同圖 3.6 a，時間為 29 日 1800 UTC。

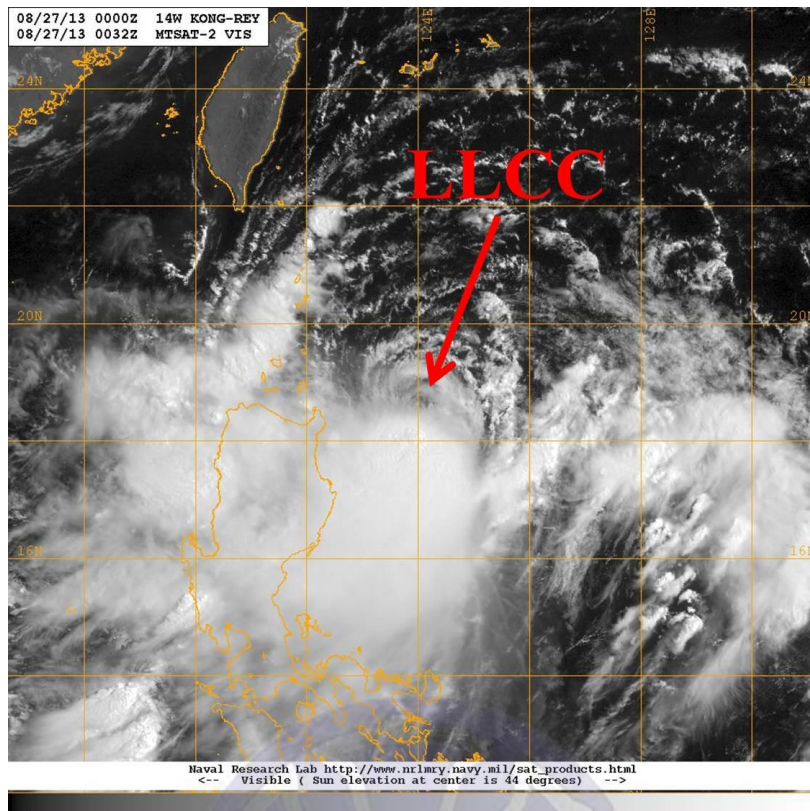


圖 3.7-1 a、NRL 27 日 0032 UTC 之可見光雲圖。

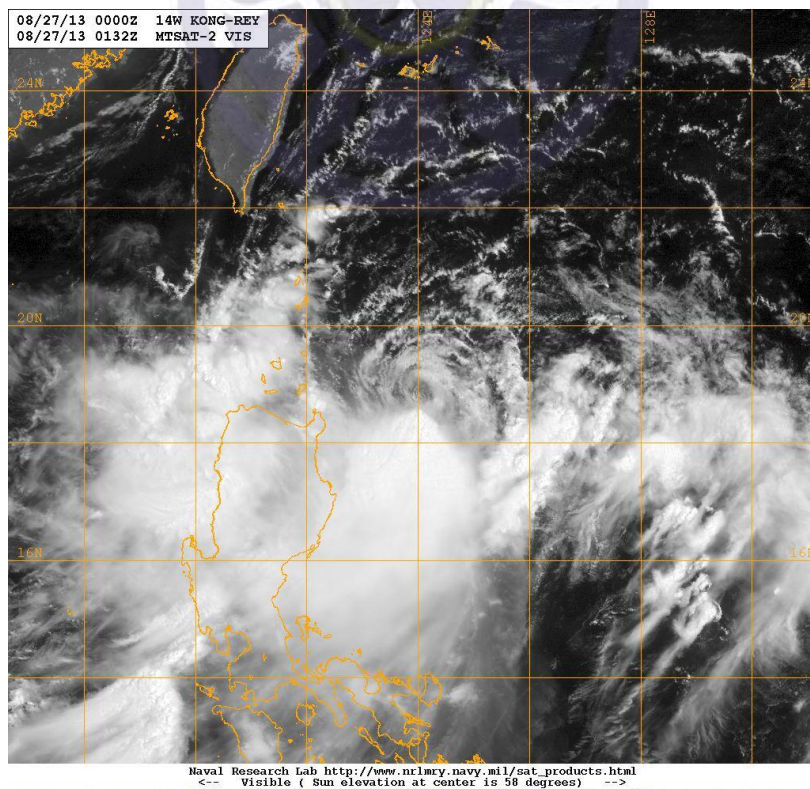


圖 3.7-1 b、NRL 27 日 0132 UTC 之可見光雲圖。

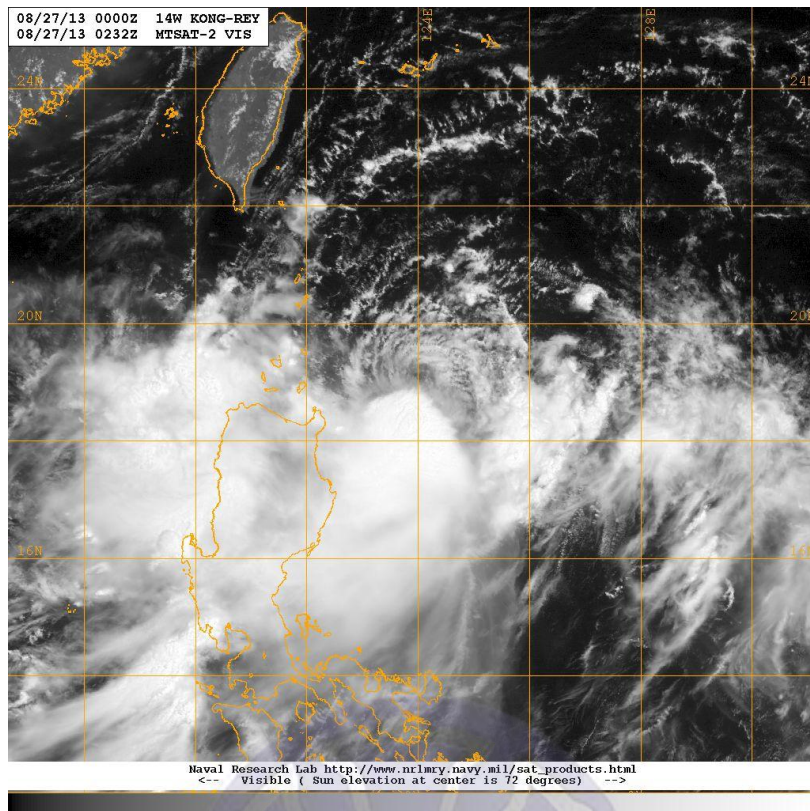


圖 3.7-1 c、NRL 27 日 0232 UTC 之可見光雲圖。

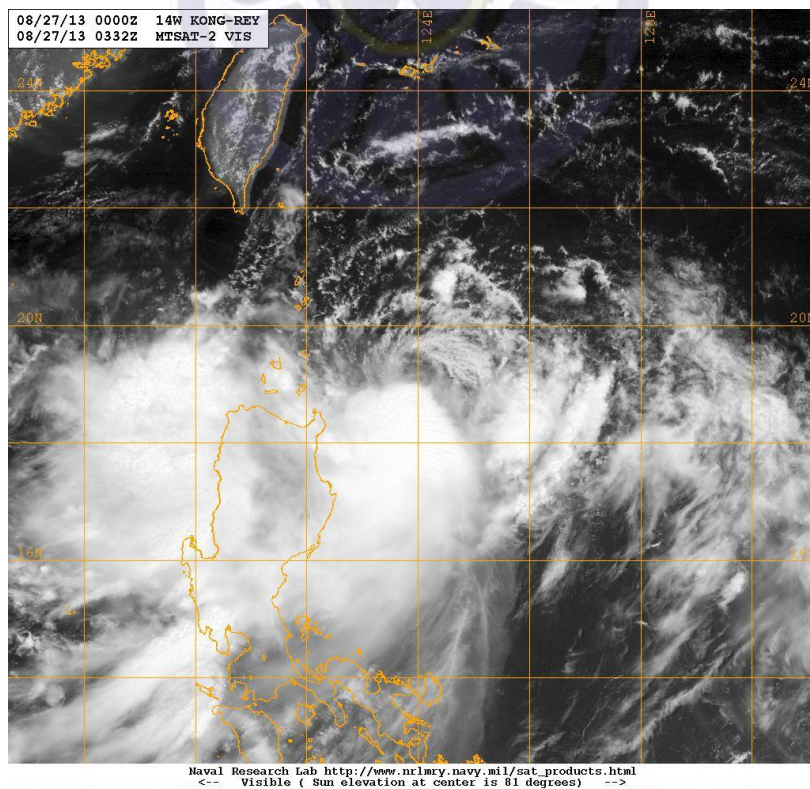


圖 3.7-1 d、NRL 27 日 0332 UTC 之可見光雲圖。

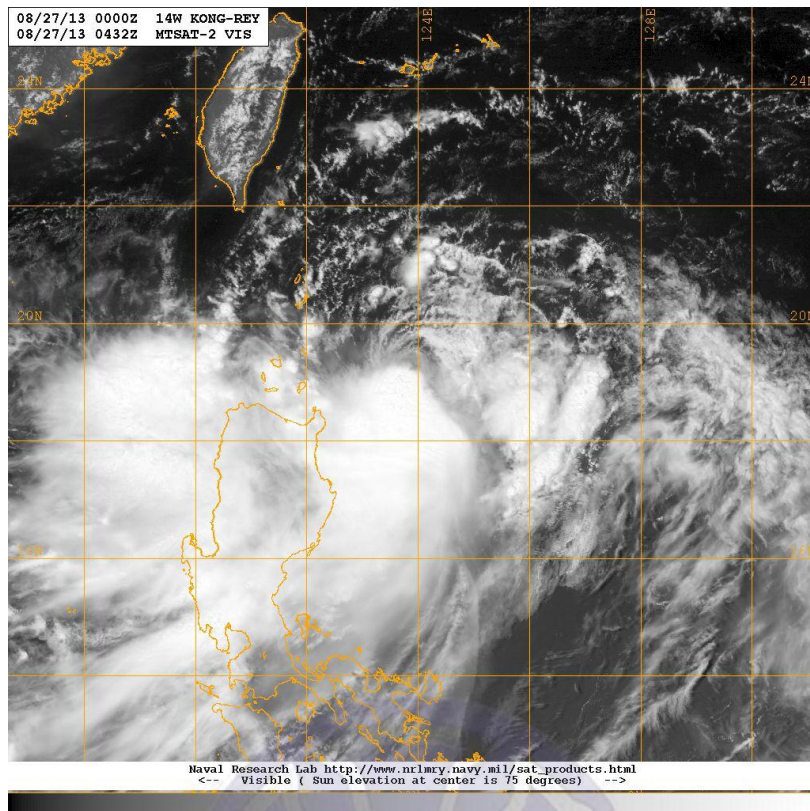


圖 3.7-1 e、NRL 27 日 0432 UTC 之可見光雲圖。

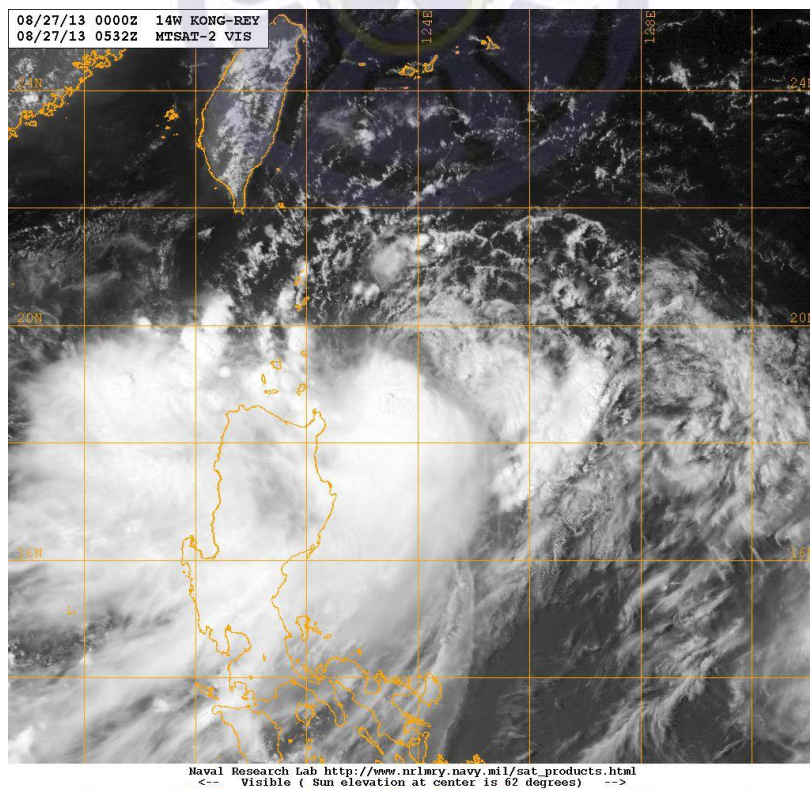


圖 3.7-1 f、NRL 27 日 0532 UTC 之可見光雲圖。

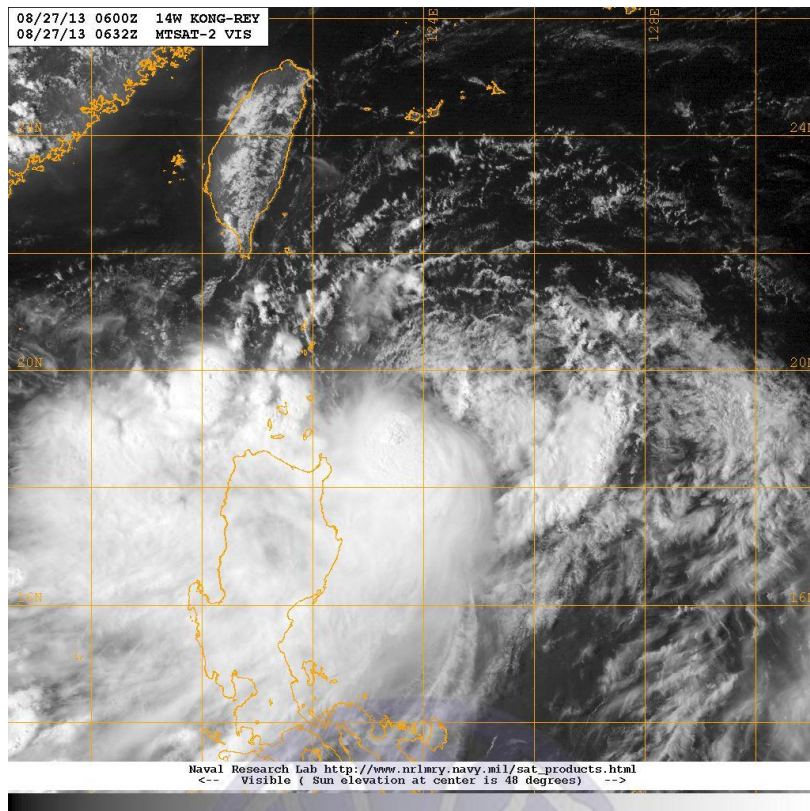


圖 3.7-1 g、NRL 27 日 0632 UTC 之可見光雲圖。

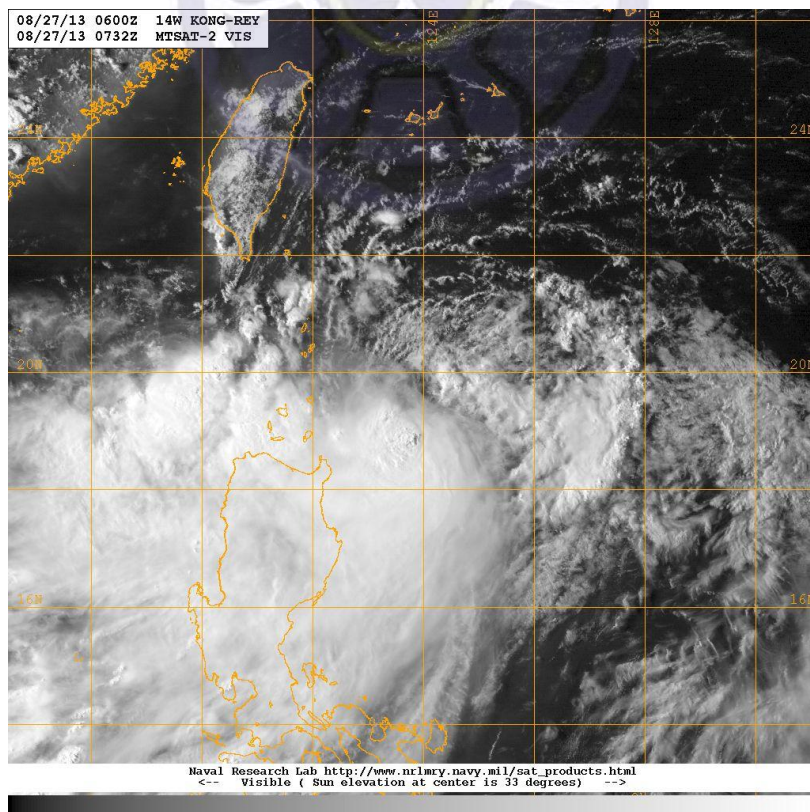


圖 3.7-1 h、NRL 27 日 0732 UTC 之可見光雲圖。

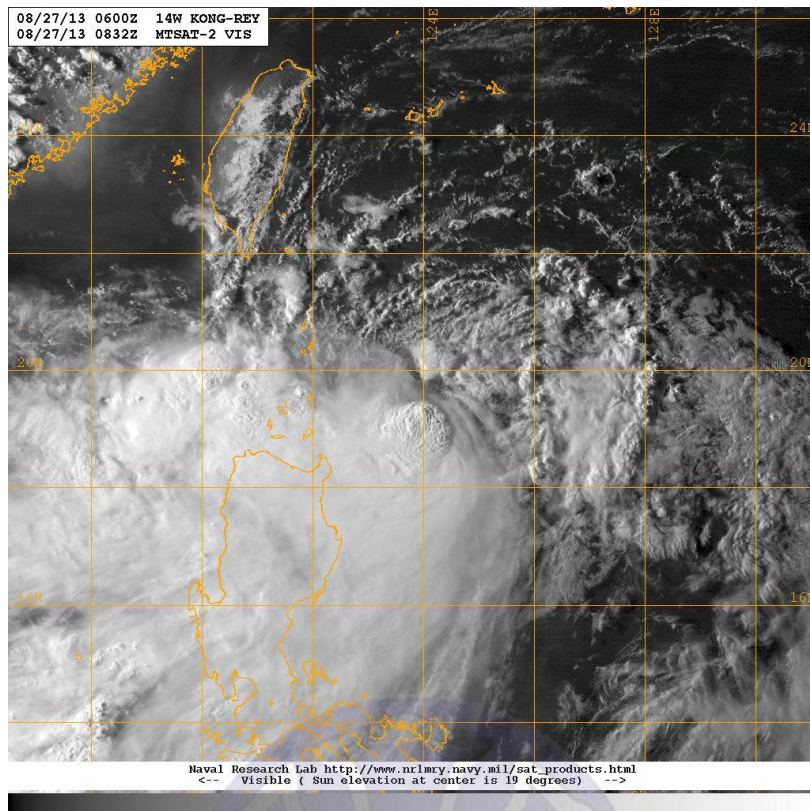


圖 3.7-1 i、NRL 27 日 0832 UTC 之可見光雲圖。

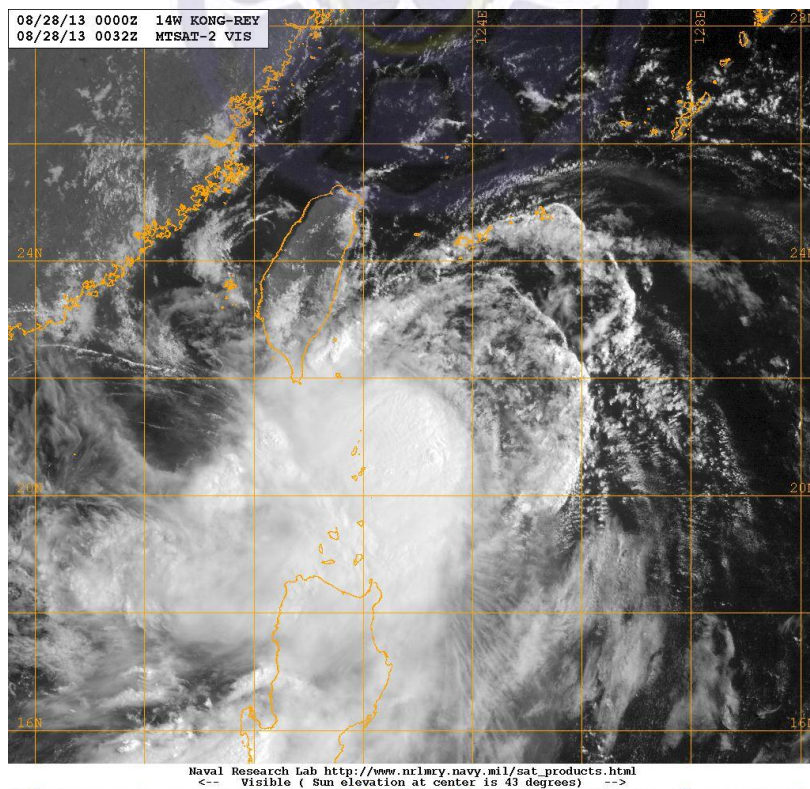


圖 3.7-2 a、NRL 28 日 0032 UTC 之可見光雲圖。

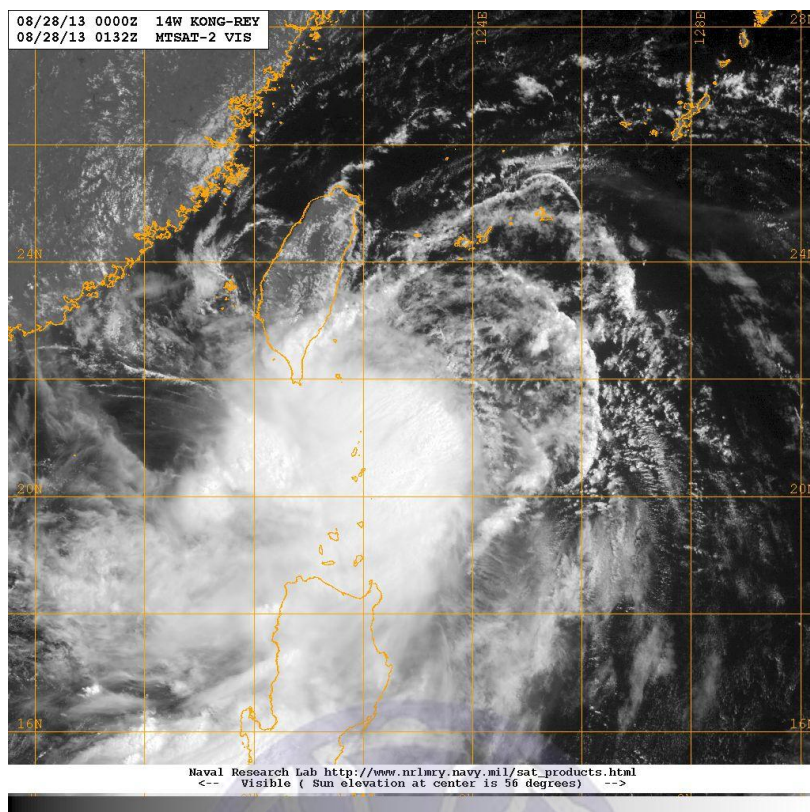


圖 3.7-2 b、NRL 28 日 0132 UTC 之可見光雲圖。

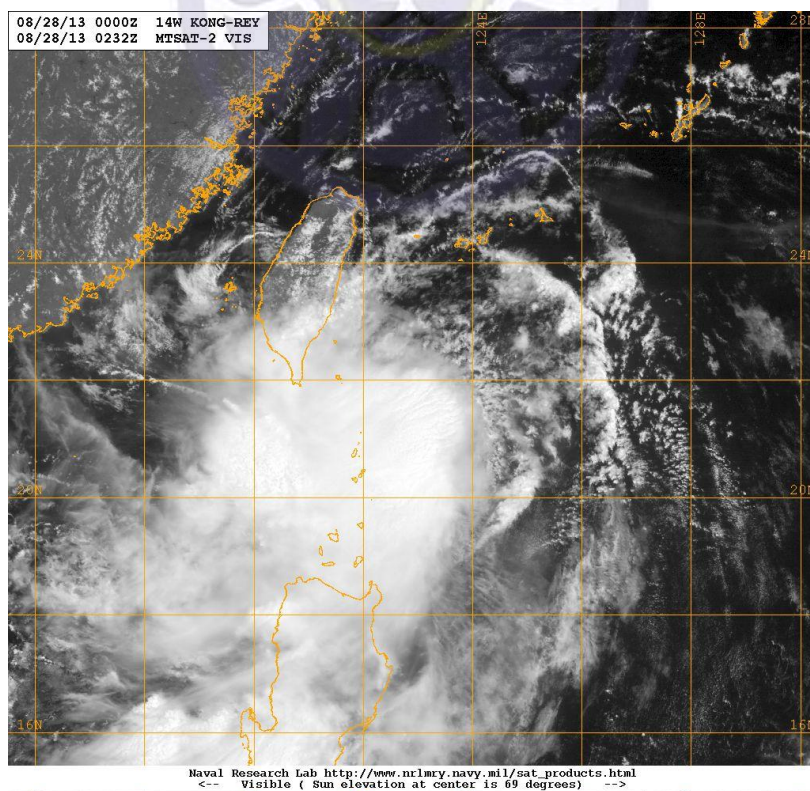


圖 3.7-2 c、NRL 28 日 0232 UTC 之可見光雲圖。

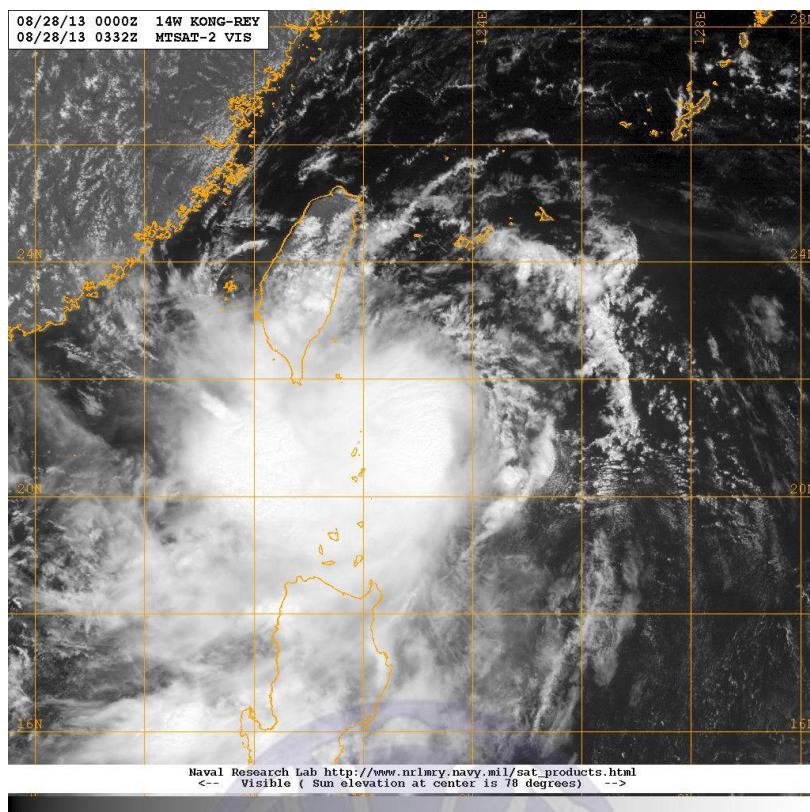


圖 3.7-2 d、NRL 28 日 0332 UTC 之可見光雲圖。

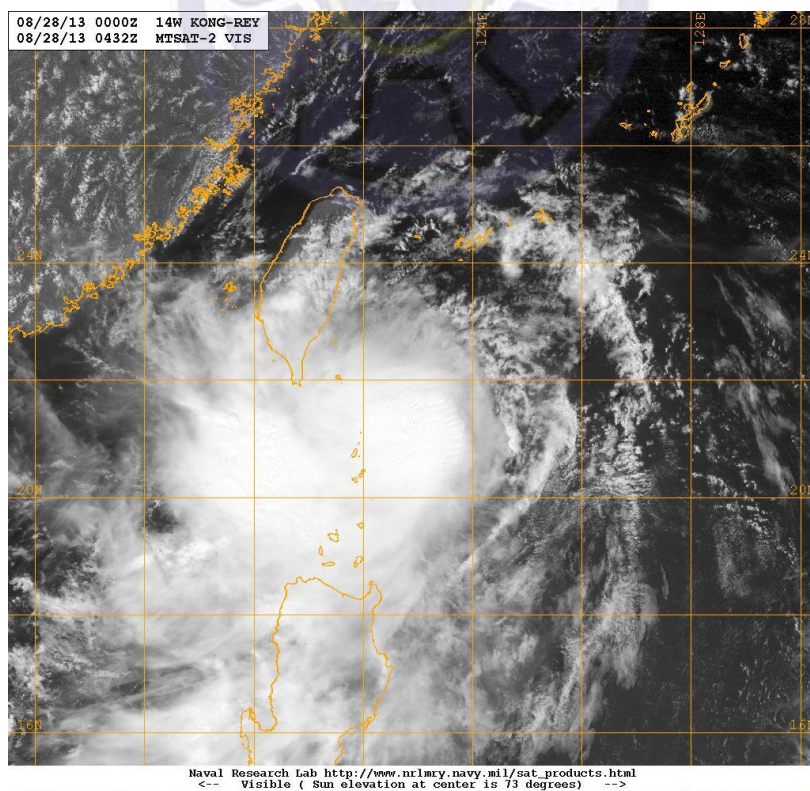


圖 3.7-2 e、NRL 28 日 0432 UTC 之可見光雲圖。

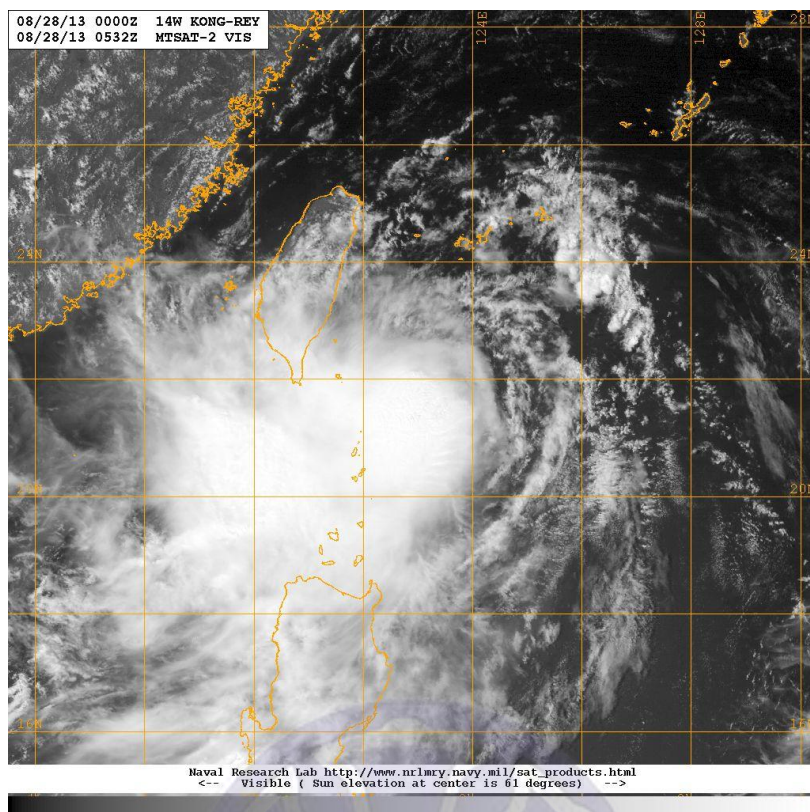


圖 3.7-2 f、NRL 28 日 0532 UTC 之可見光雲圖。

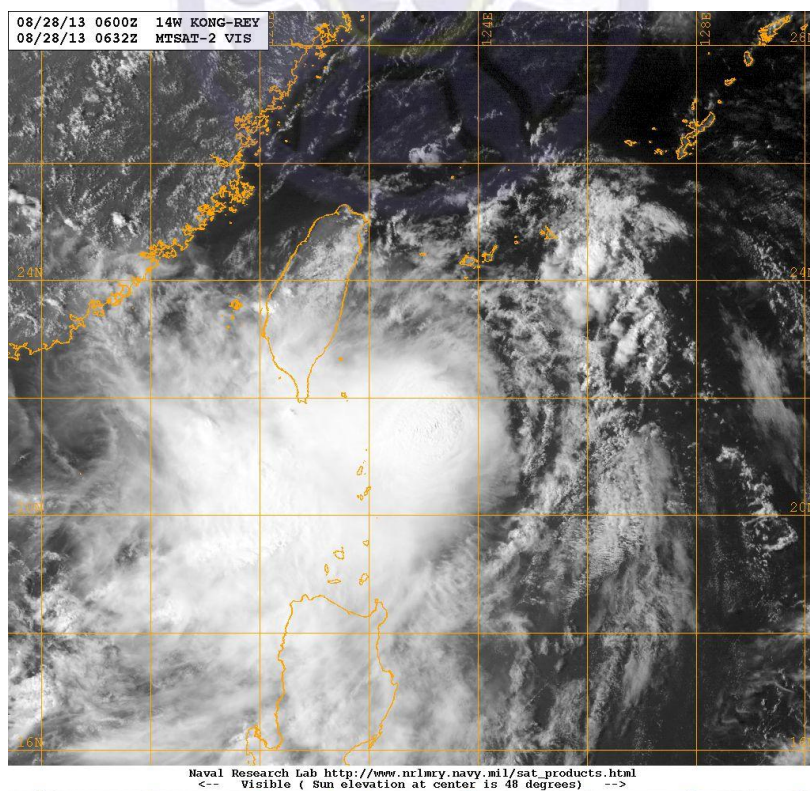


圖 3.7-2 g、NRL 28 日 0632 UTC 之可見光雲圖。

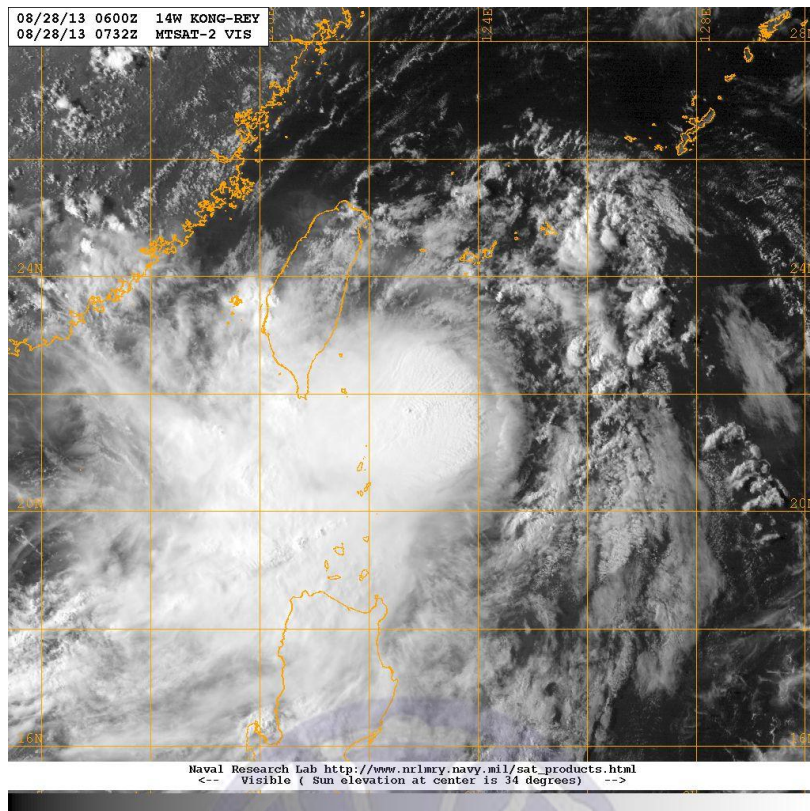


圖 3.7-2 h、NRL 28 日 0732 UTC 之可見光雲圖。

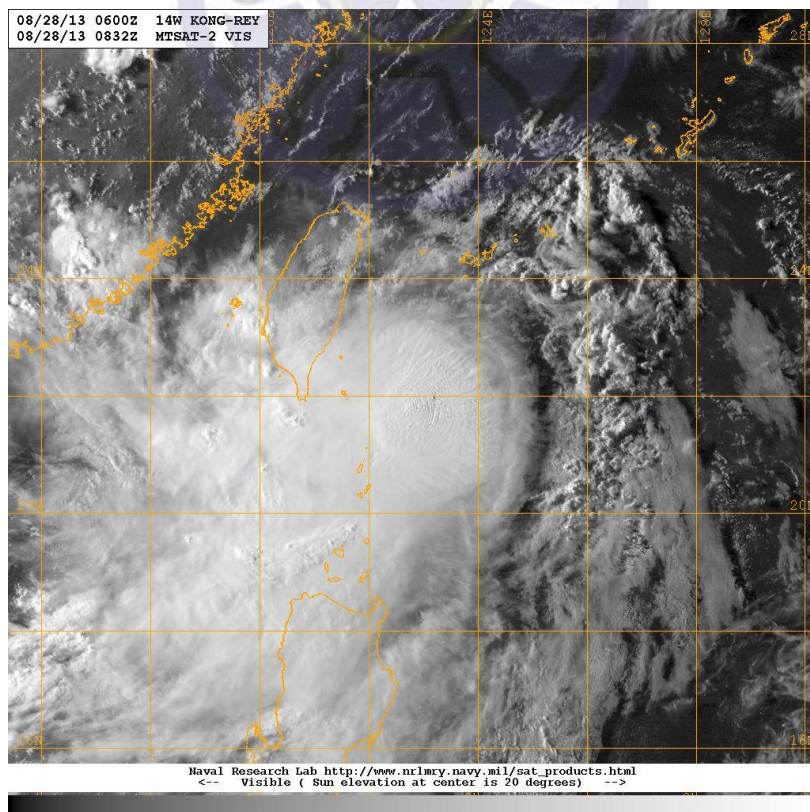


圖 3.7-2 i、NRL 28 日 0832 UTC 之可見光雲圖。

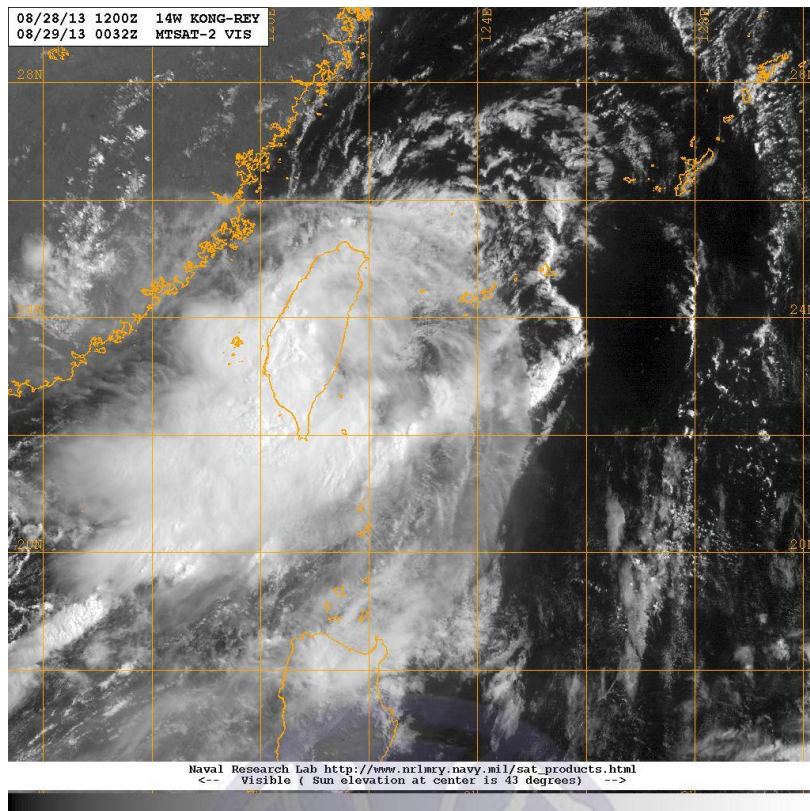


圖 3.7-3 a、NRL 29 日 0032 UTC 之可見光雲圖。

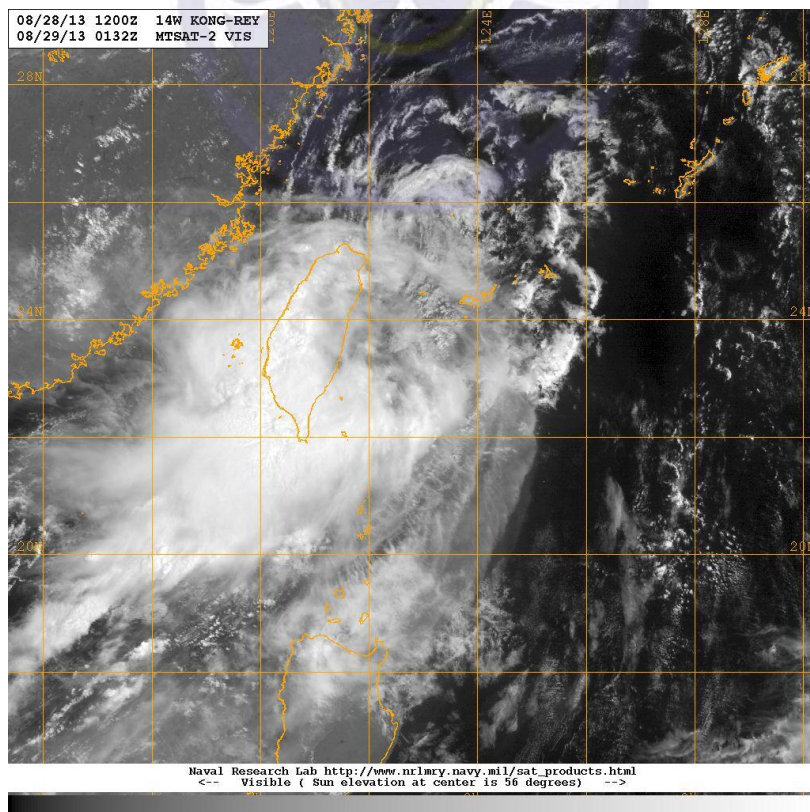


圖 3.7-3 b、NRL 29 日 0132 UTC 之可見光雲圖。

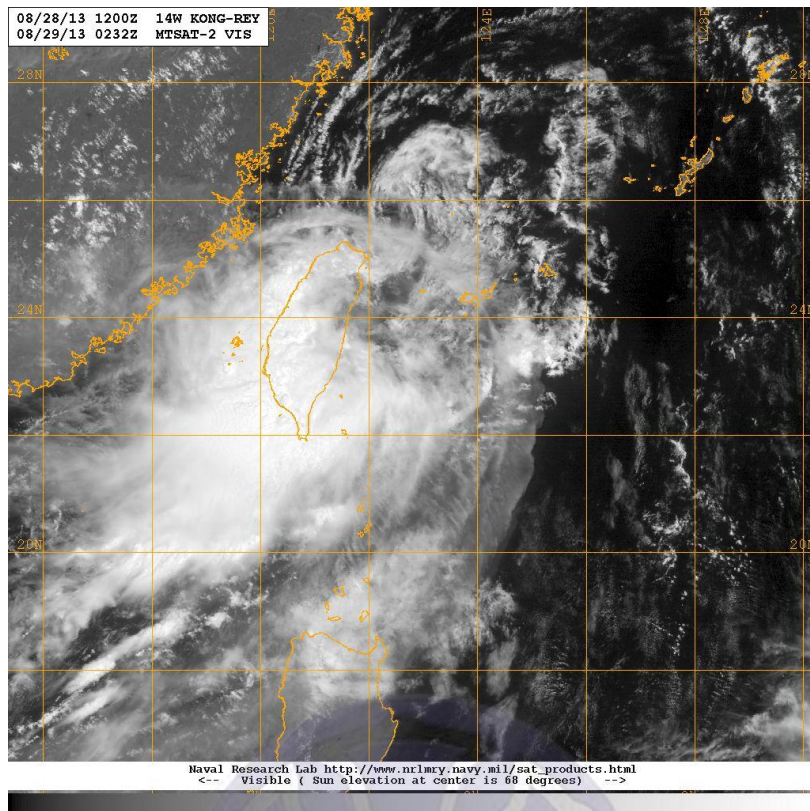


圖 3.7-3 c、NRL 29 日 0232 UTC 之可見光雲圖。

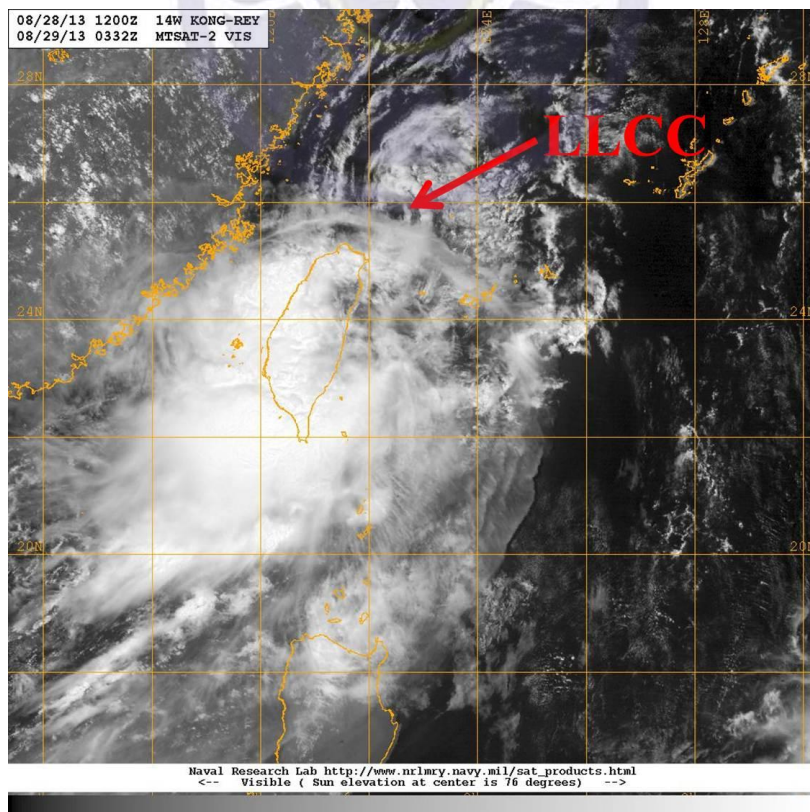


圖 3.7-3 d、NRL 29 日 0332 UTC 之可見光雲圖。

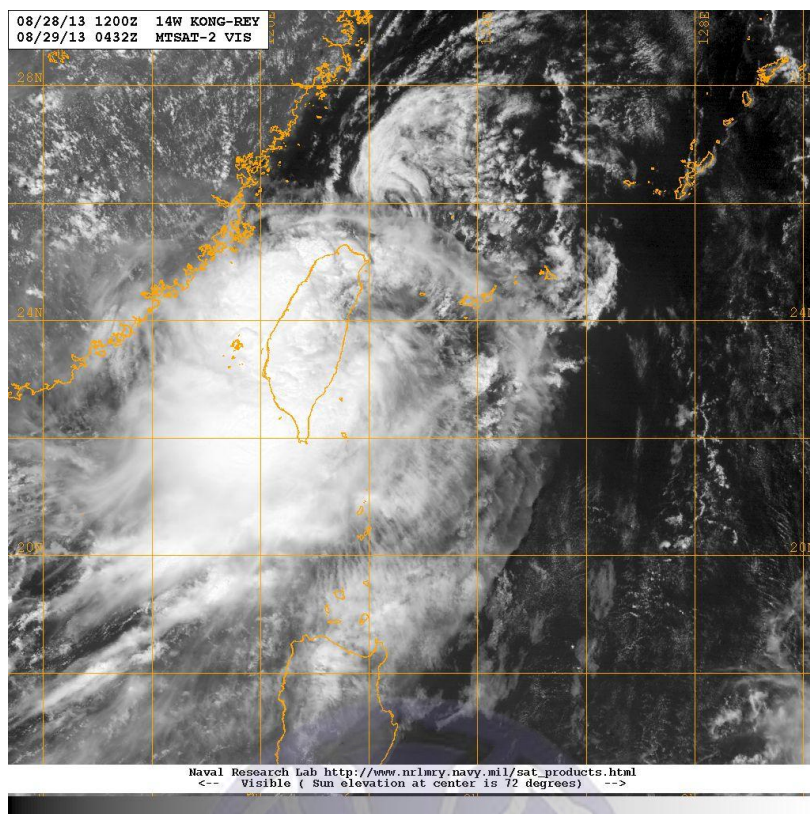


圖 3.7-3 e、NRL 29 日 0432 UTC 之可見光雲圖。

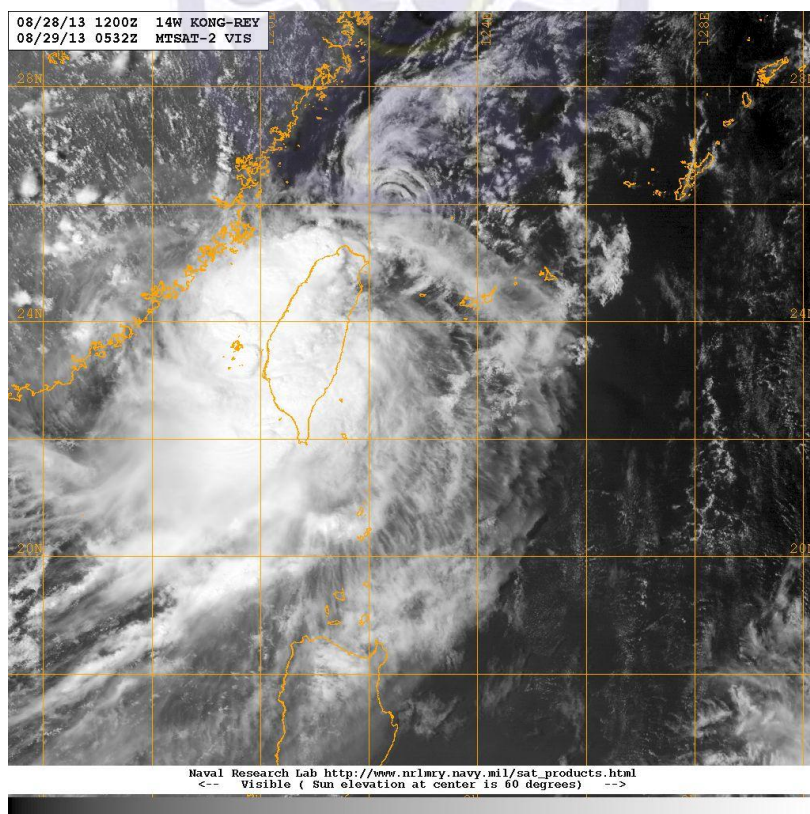


圖 3.7-3 f、NRL 29 日 0532 UTC 之可見光雲圖。

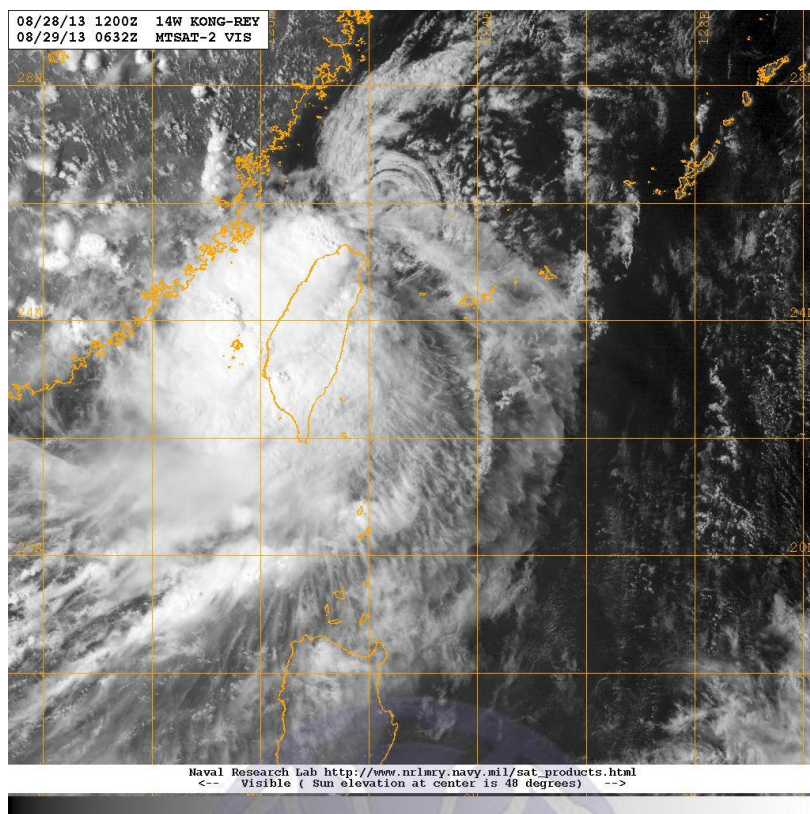


圖 3.7-3 g、NRL 29 日 0632 UTC 之可見光雲圖。

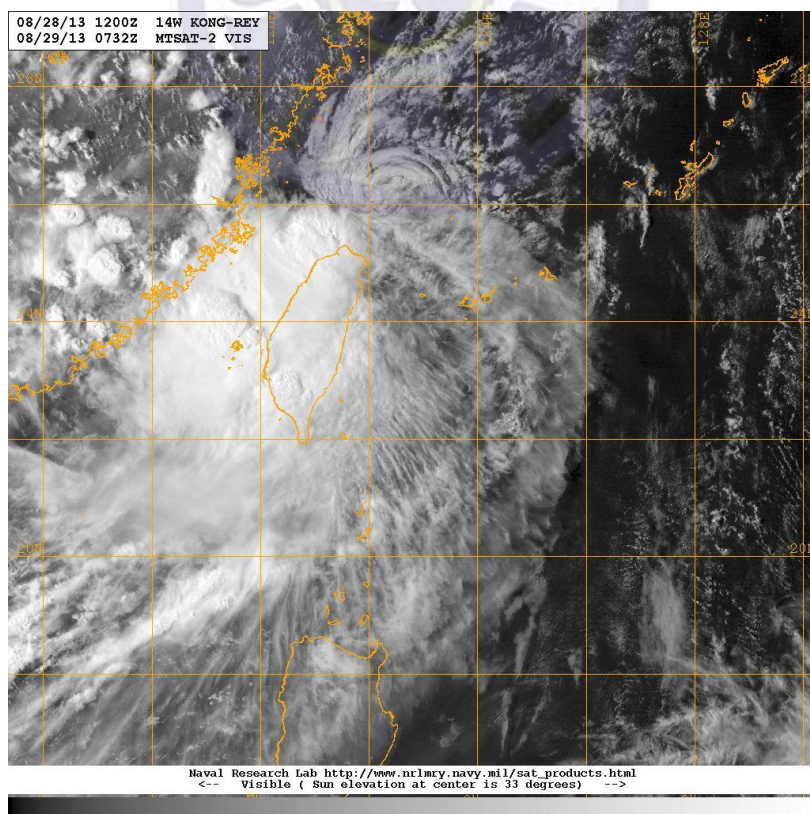


圖 3.7-3 h、NRL 29 日 0732 UTC 之可見光雲圖。

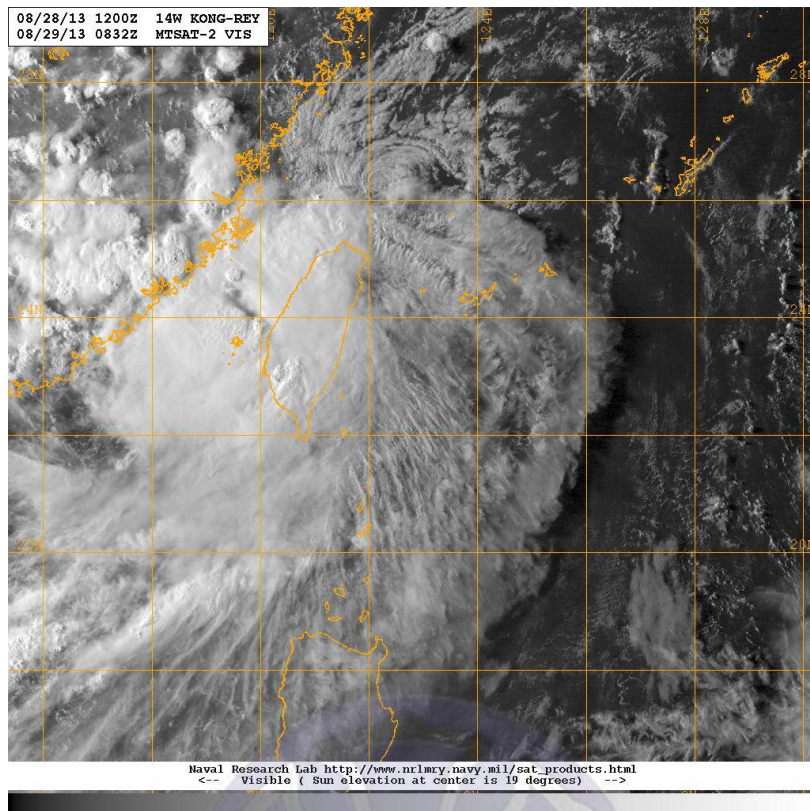


圖 3.7-3 i、NRL 29 日 0832 UTC 之可見光雲圖。

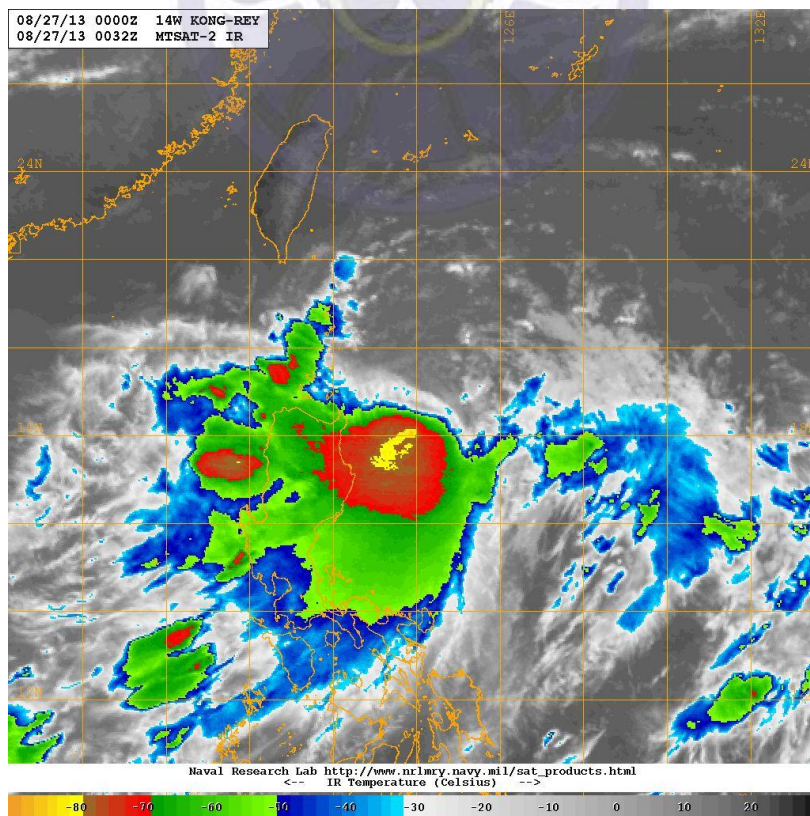


圖 3.8-1 a、NRL 27 日 0032 UTC 之紅外線色調強化雲圖。

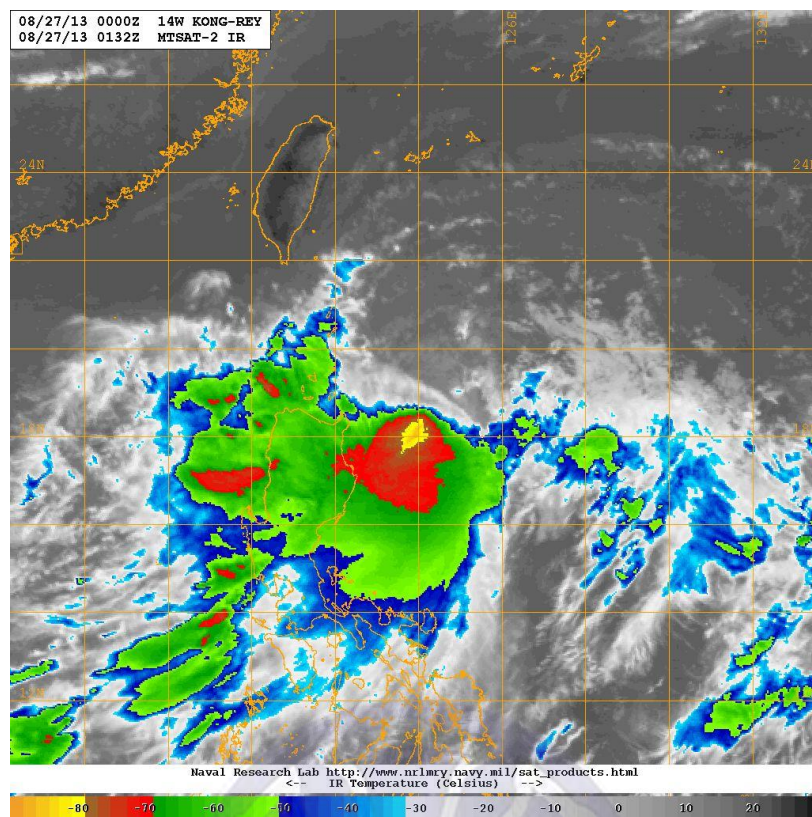


圖 3.8-1 b、NRL 27 日 0132 UTC 之紅外線色調強化雲圖。

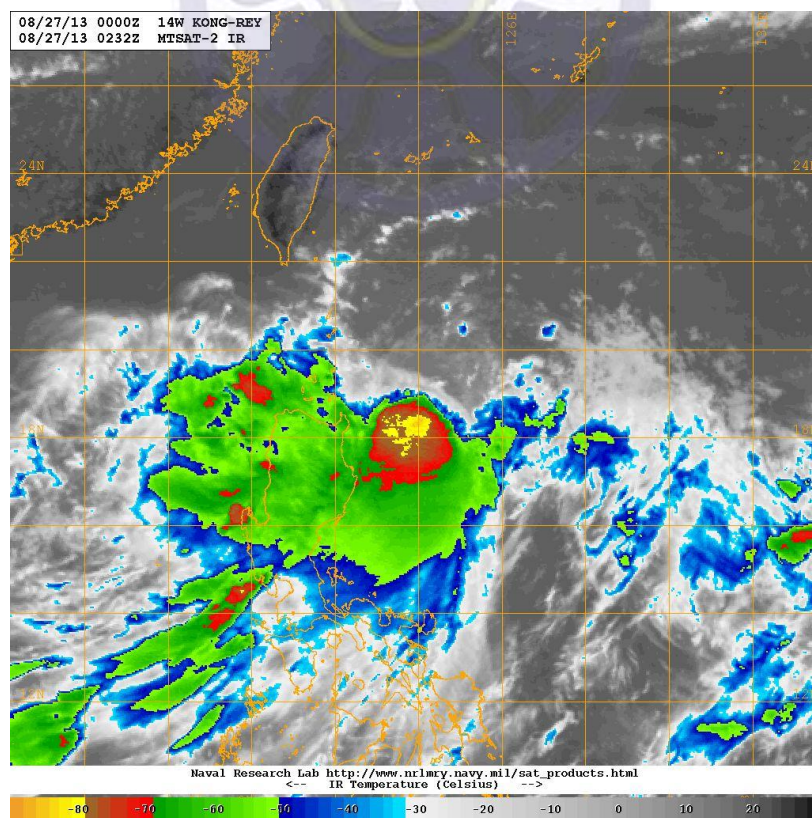


圖 3.8-1 c、NRL 27 日 0232 UTC 之紅外線色調強化雲圖。

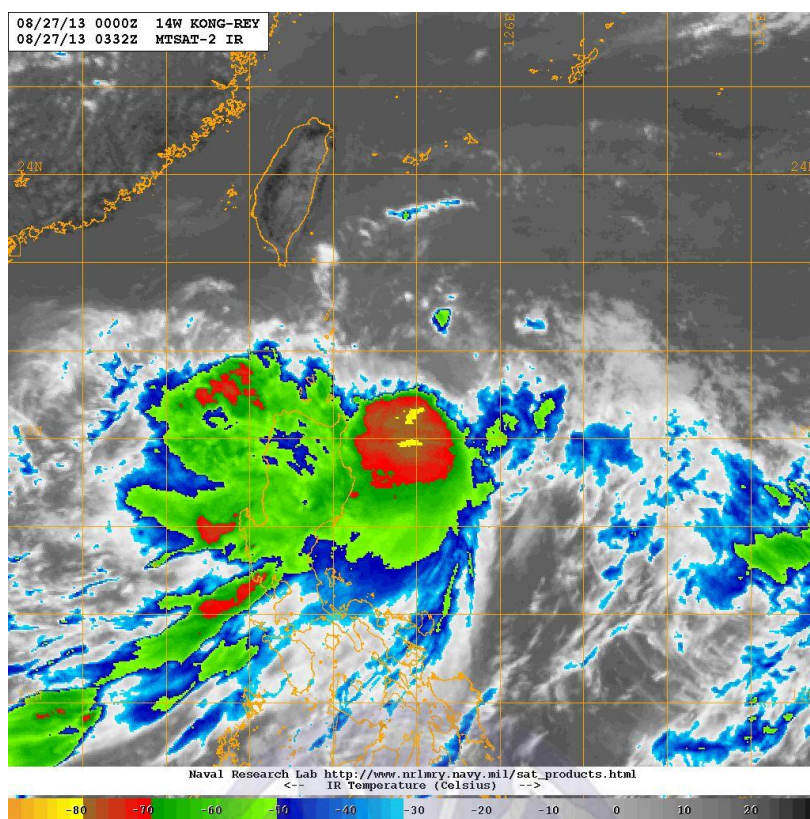


圖 3.8-1 d、NRL 27 日 0332 UTC 之紅外線色調強化雲圖。

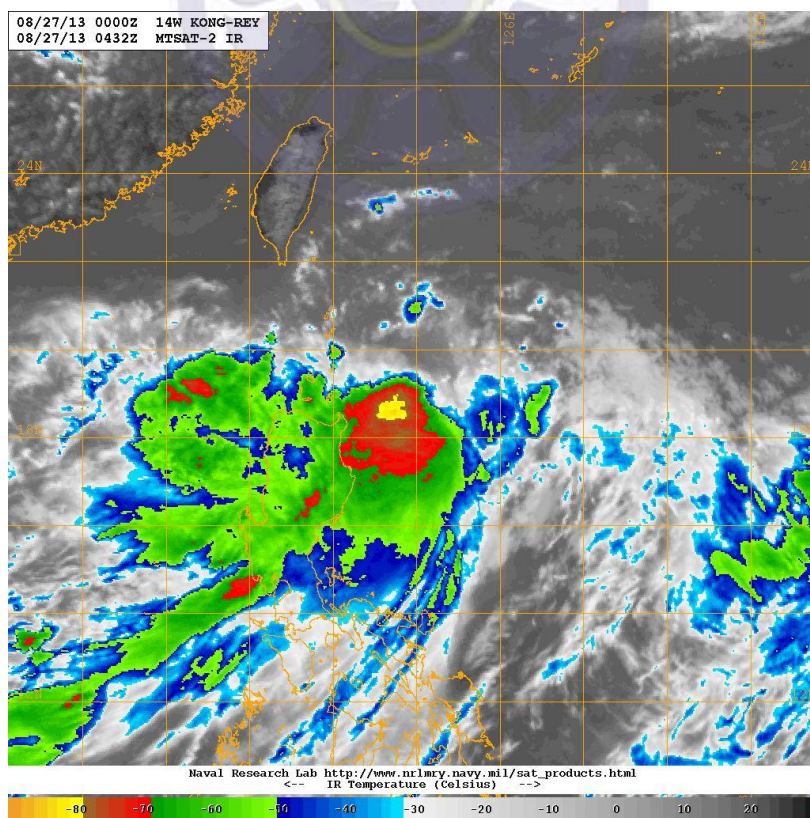


圖 3.8-1 e、NRL 27 日 0432 UTC 之紅外線色調強化雲圖。

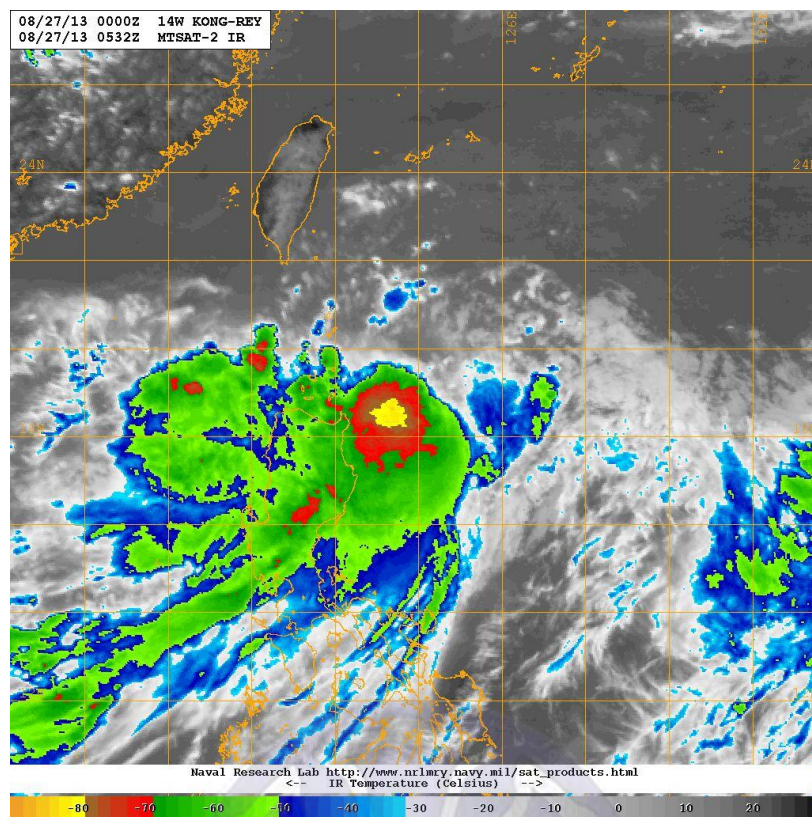


圖 3.8-1 f、NRL 27 日 0532 UTC 之紅外線色調強化雲圖。

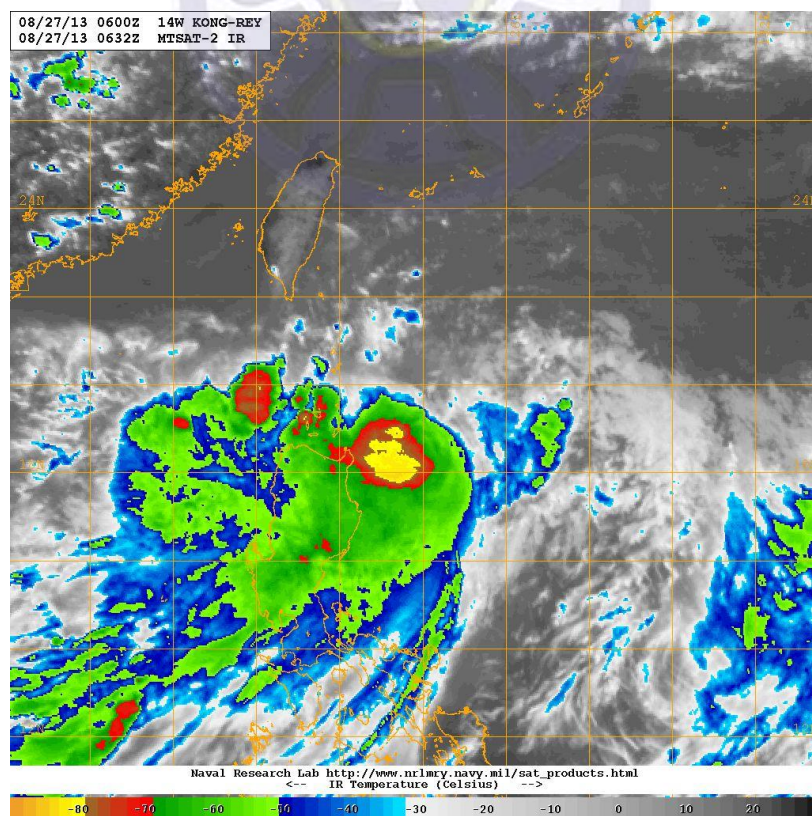


圖 3.8-1 g、NRL 27 日 0632 UTC 之紅外線色調強化雲圖。

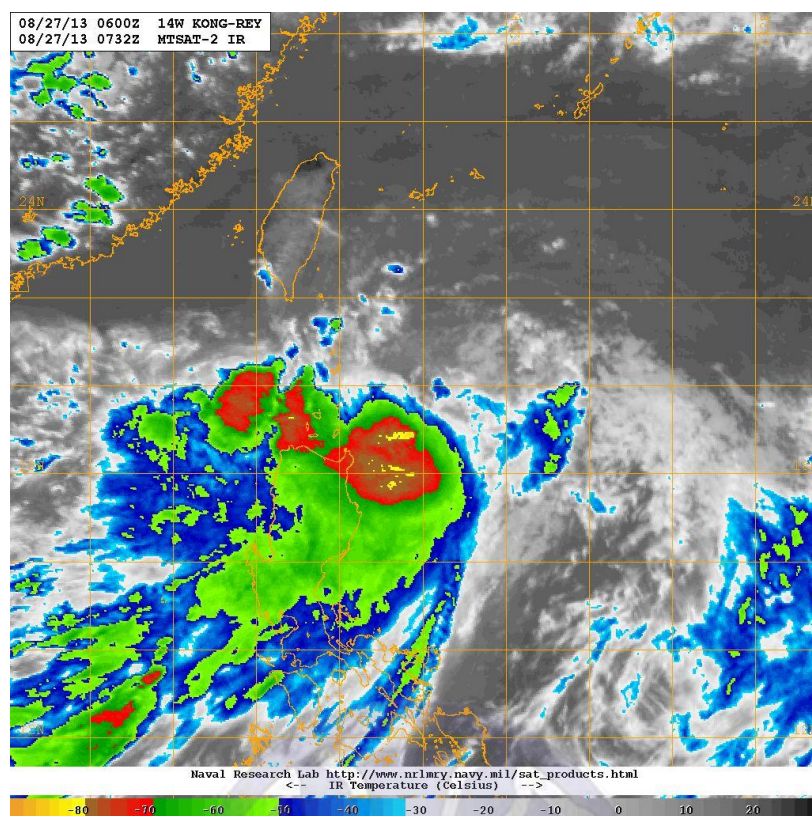


圖 3.8-1 h、NRL 27 日 0732 UTC 之紅外線色調強化雲圖。

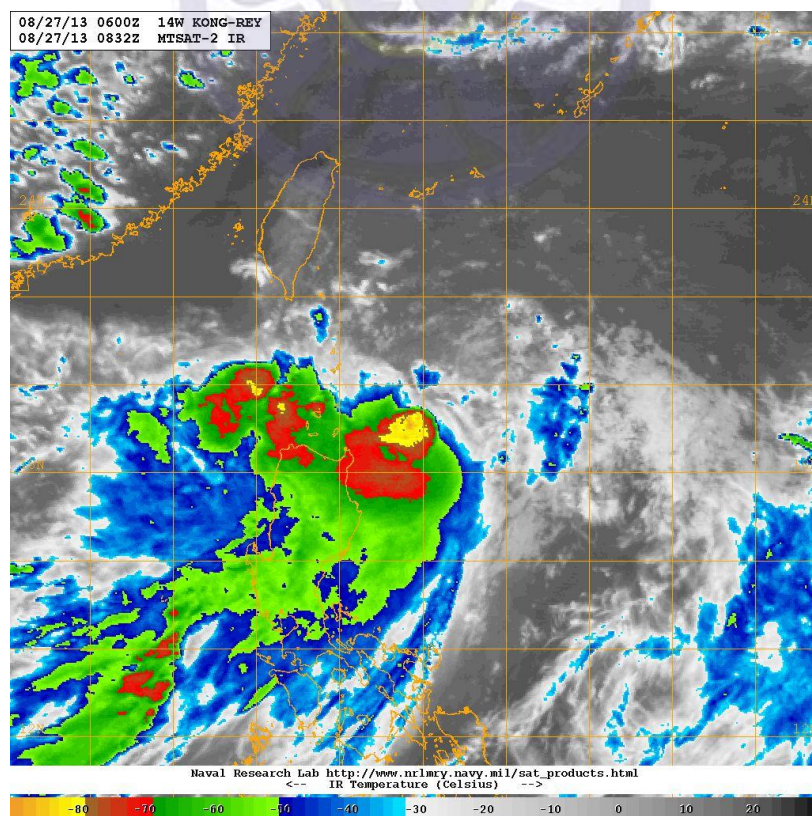


圖 3.8-1 i、NRL 27 日 0832 UTC 之紅外線色調強化雲圖。

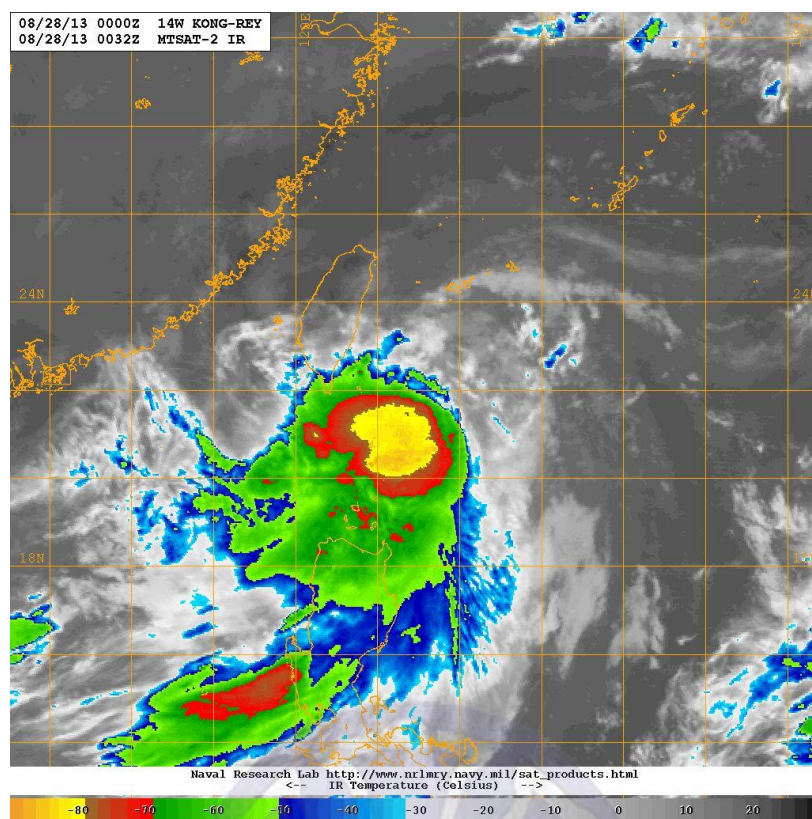


圖 3.8-2 a、NRL 28 日 0032 UTC 之紅外線色調強化雲圖。

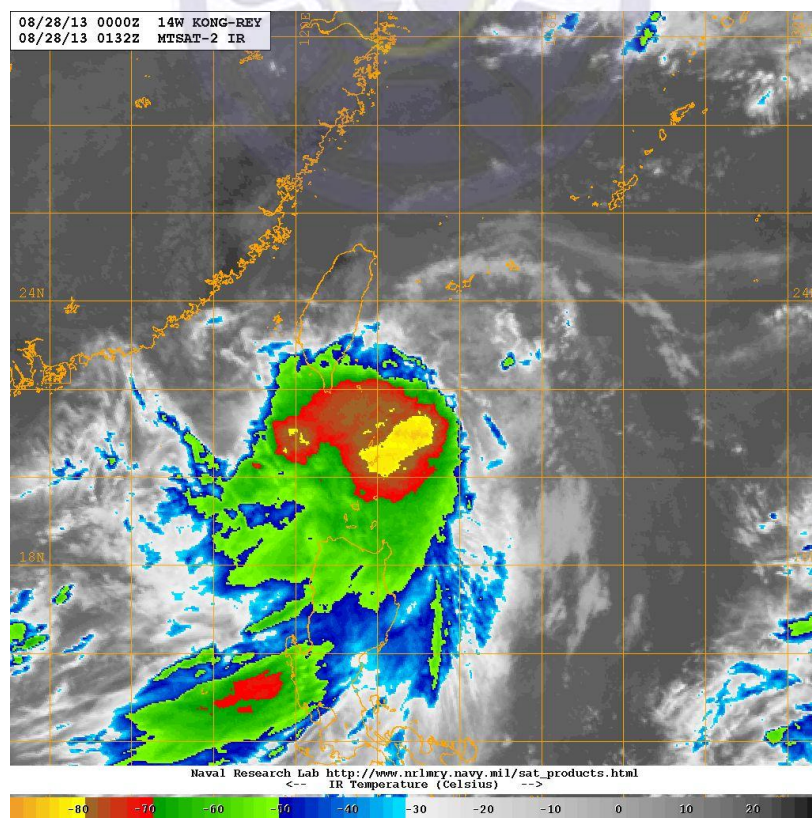


圖 3.8-2 b、NRL 28 日 0132 UTC 之紅外線色調強化雲圖。

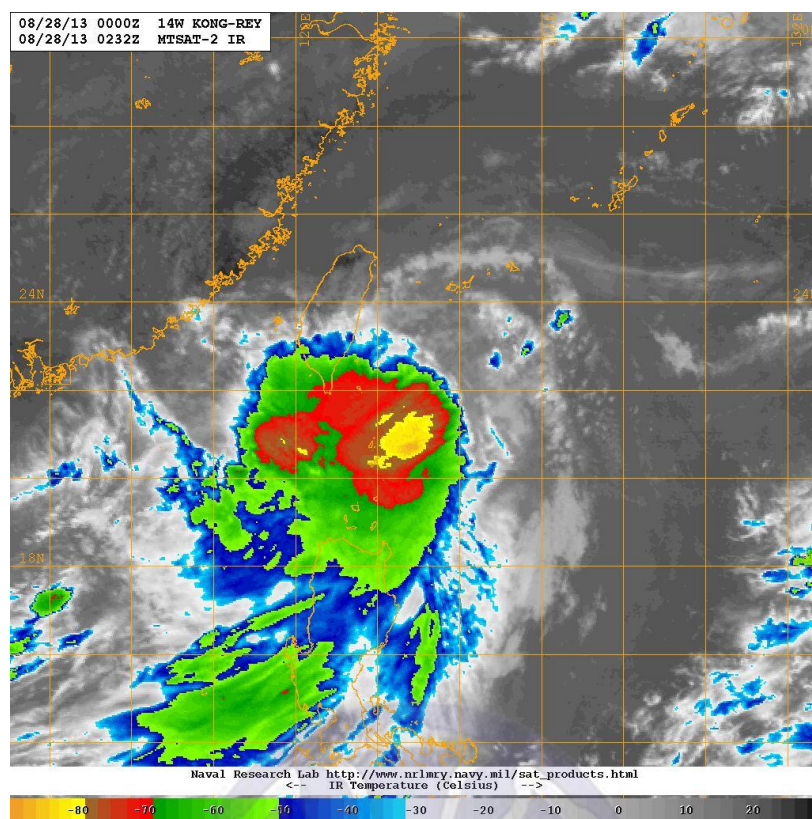


圖 3.8-2 c、NRL 28 日 0232 UTC 之紅外線色調強化雲圖。

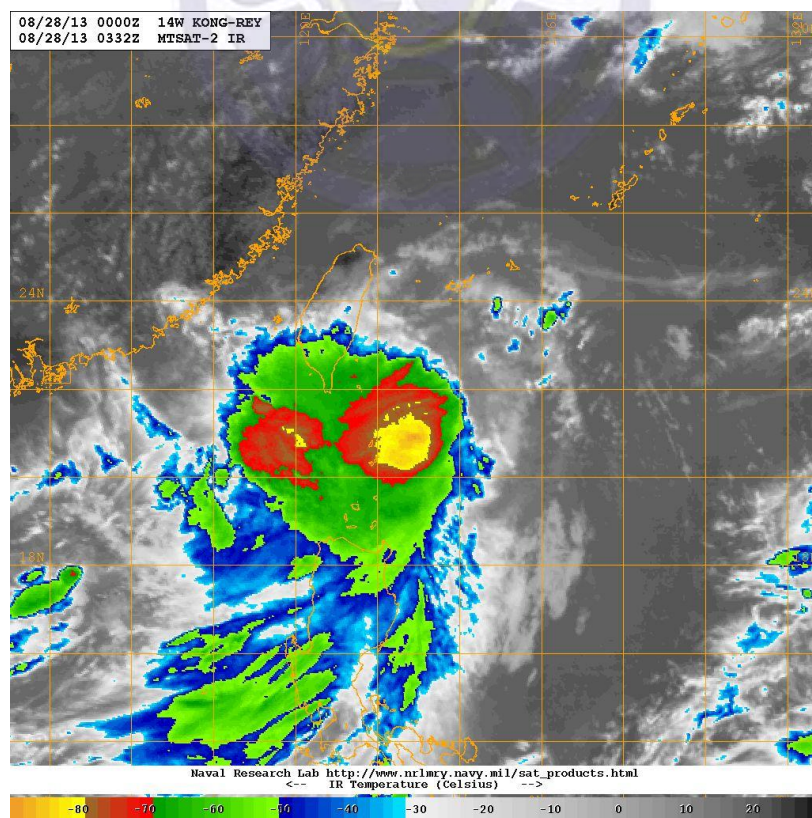


圖 3.8-2 d、NRL 28 日 0332 UTC 之紅外線色調強化雲圖。

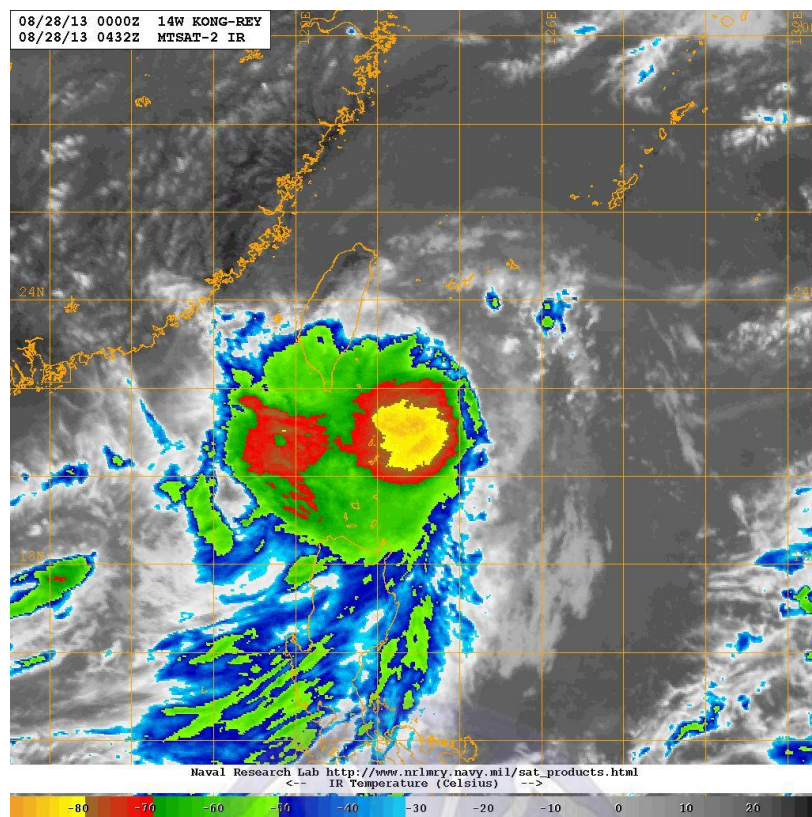


圖 3.8-2 e、NRL 28 日 0432 UTC 之紅外線色調強化雲圖。

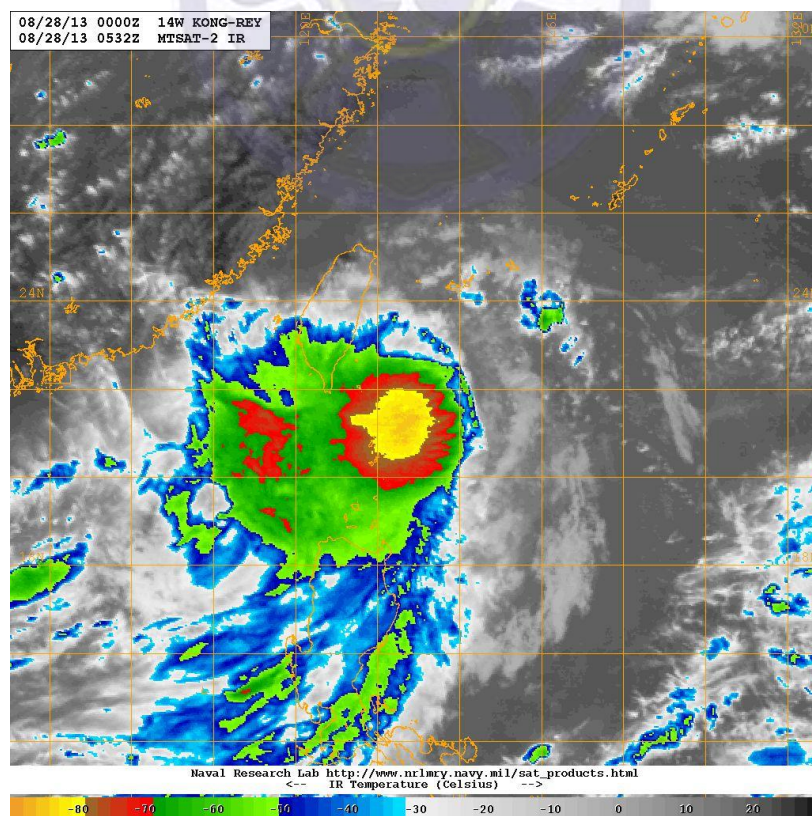


圖 3.8-2 f、NRL 28 日 0532 UTC 之紅外線色調強化雲圖。

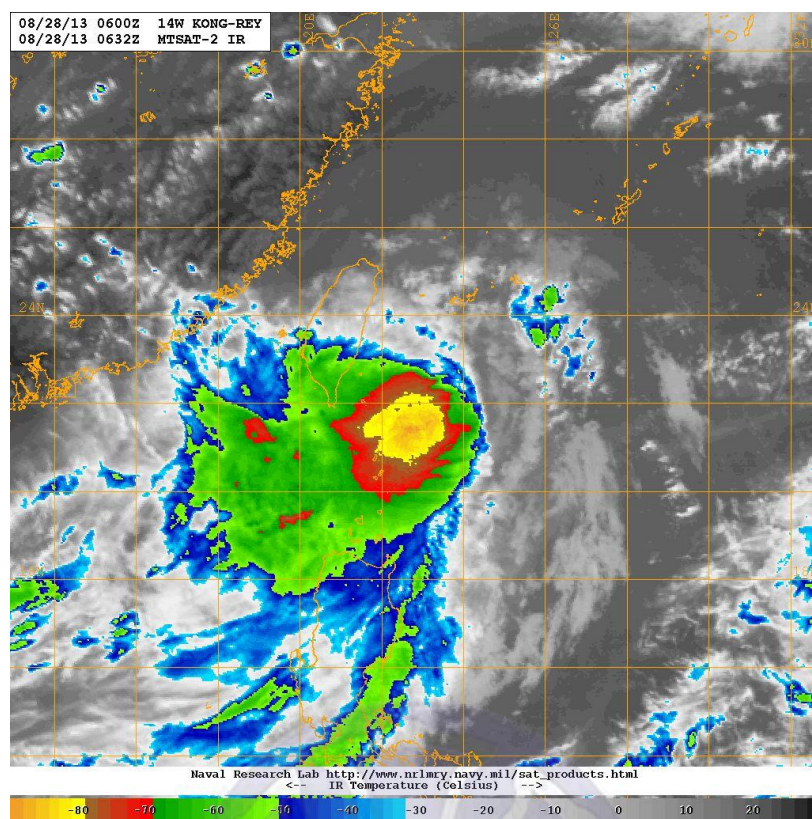


圖 3.8-2 g、NRL 28 日 0632 UTC 之紅外線色調強化雲圖。

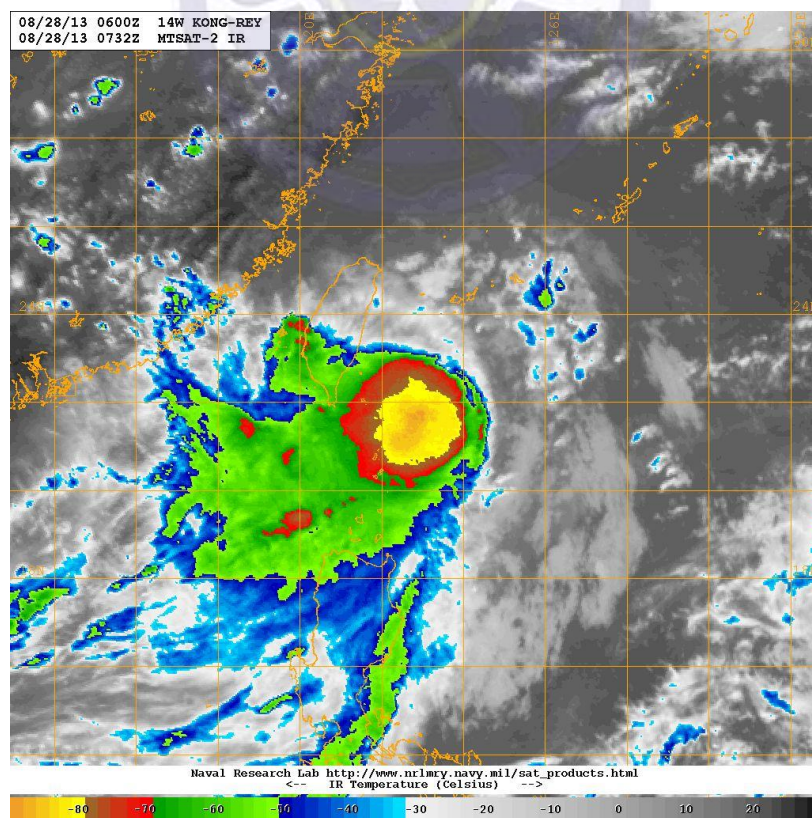


圖 3.8-2 h、NRL 28 日 0732 UTC 之紅外線色調強化雲圖。

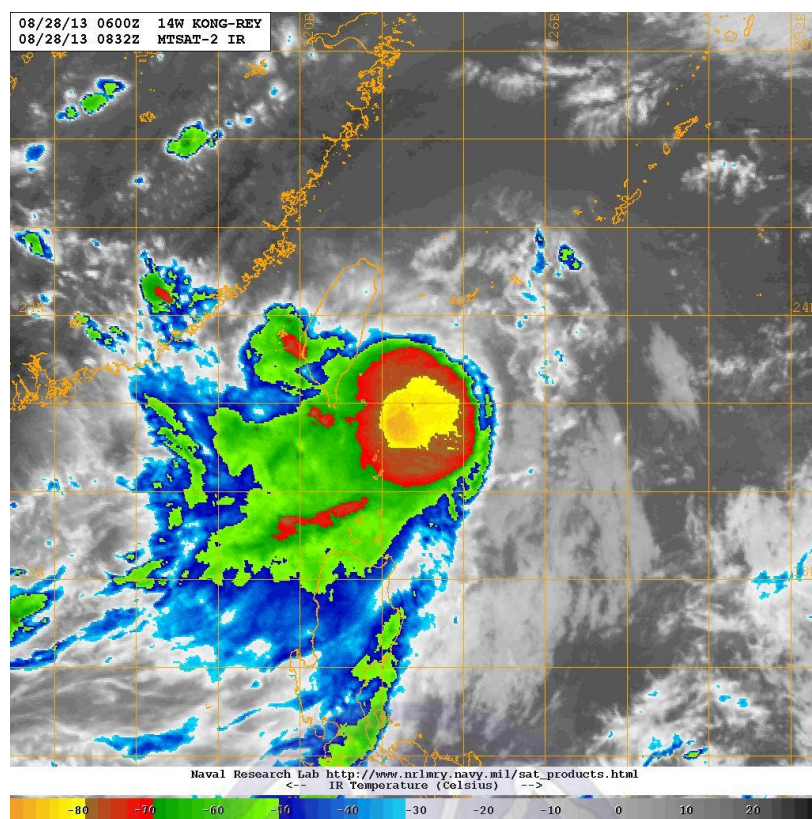


圖 3.8-2 i、NRL 28 日 0832 UTC 之紅外線色調強化雲圖。

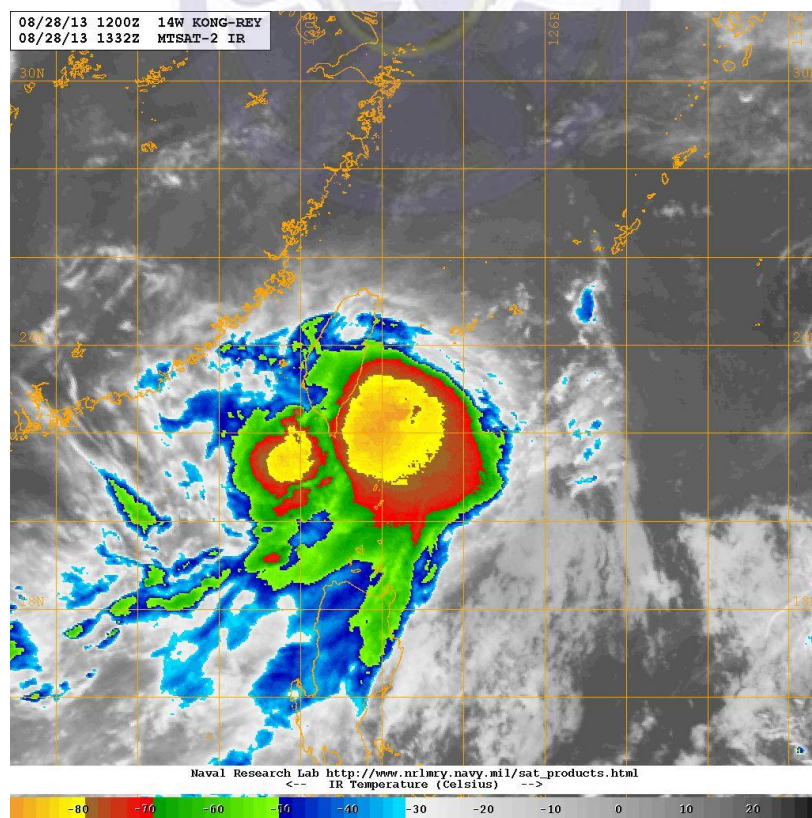


圖 3.8-3 a、NRL 28 日 1332 UTC 之紅外線色調強化雲圖。

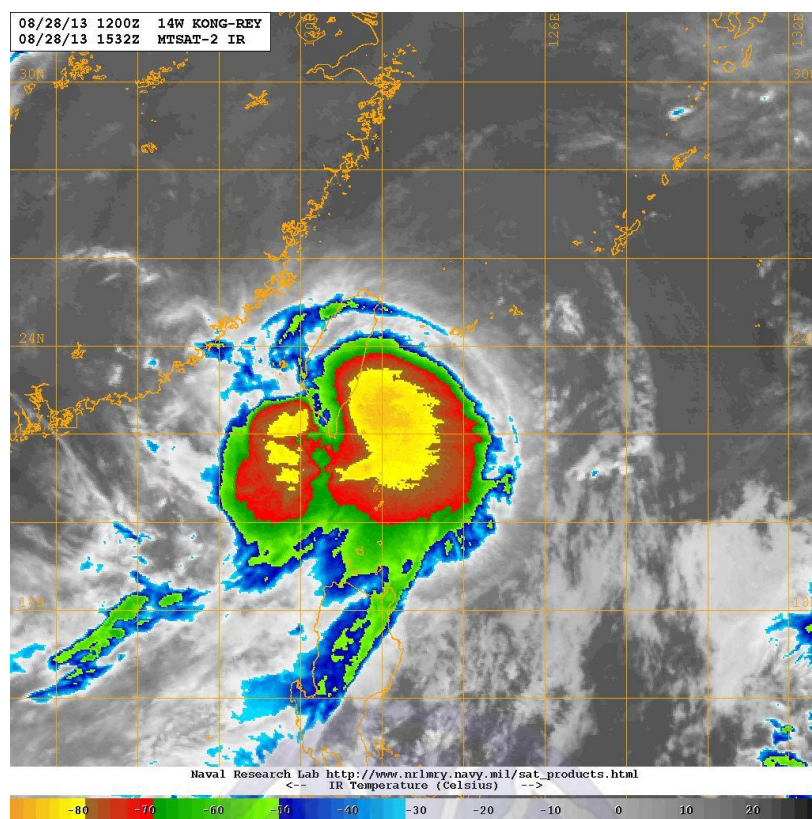


圖 3.8-3 b、NRL 28 日 1532 UTC 之紅外線色調強化雲圖。

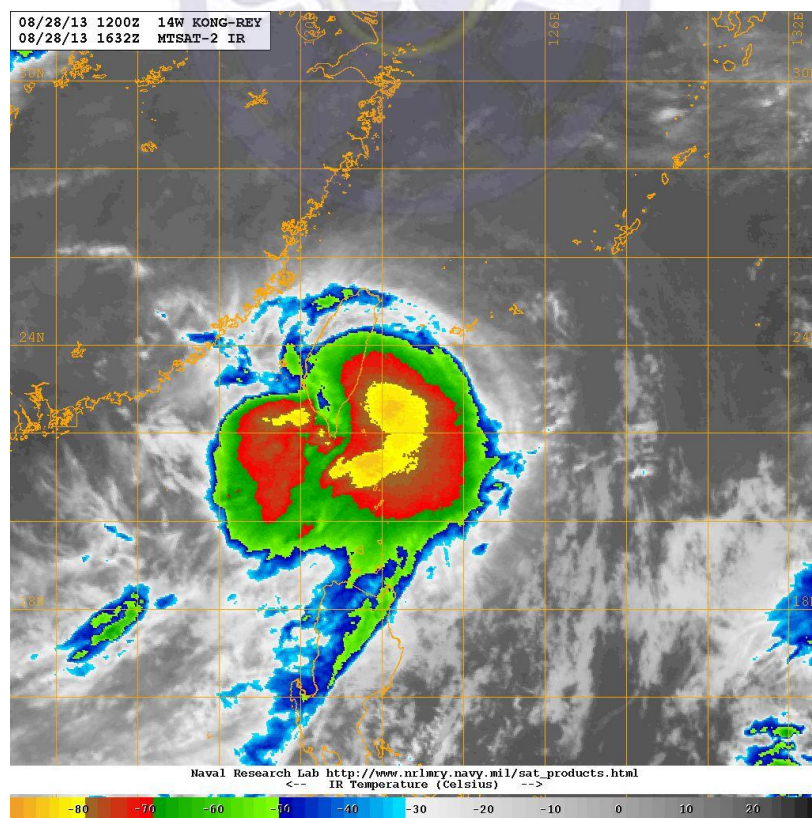


圖 3.8-3 c、NRL 28 日 1632 UTC 之紅外線色調強化雲圖。

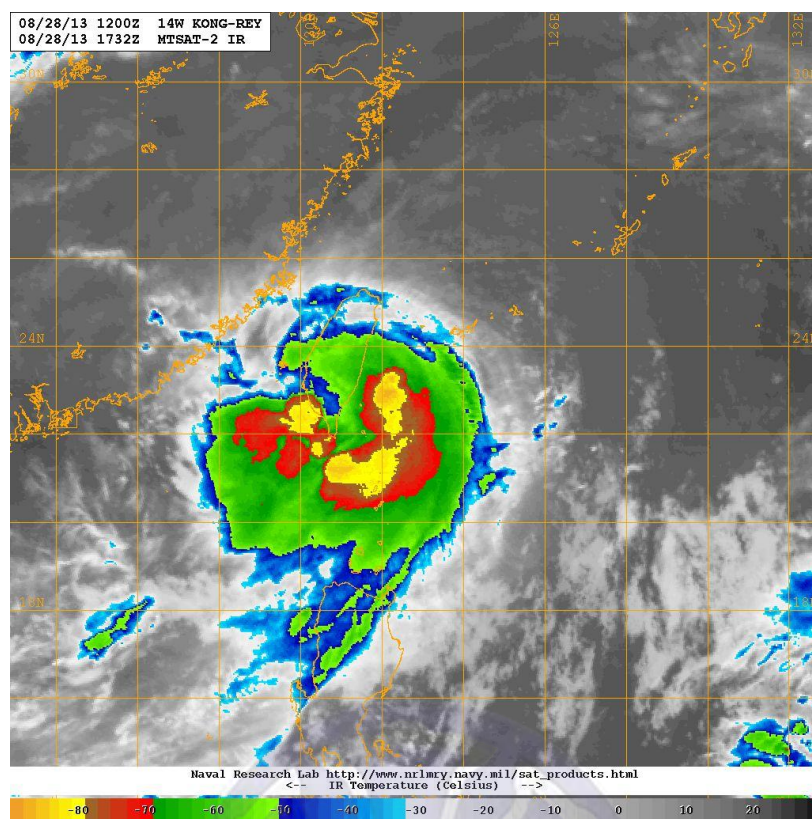


圖 3.8-3 d、NRL 28 日 1732 UTC 之紅外線色調強化雲圖。

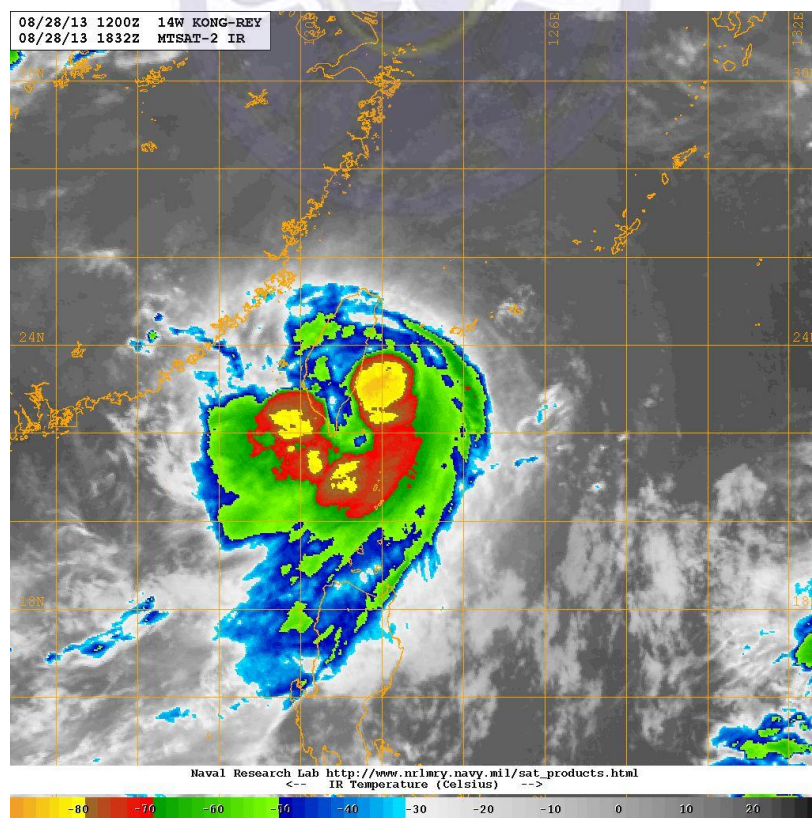


圖 3.8-3 e、NRL 28 日 1832 UTC 之紅外線色調強化雲圖。

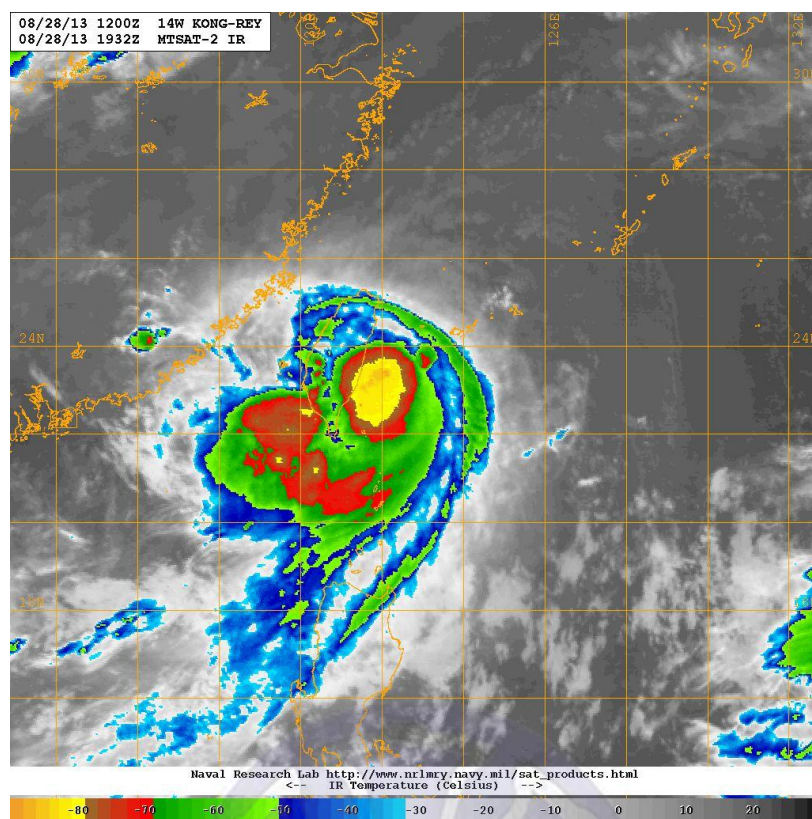


圖 3.8-3 f、NRL 28 日 1932 UTC 之紅外線色調強化雲圖。

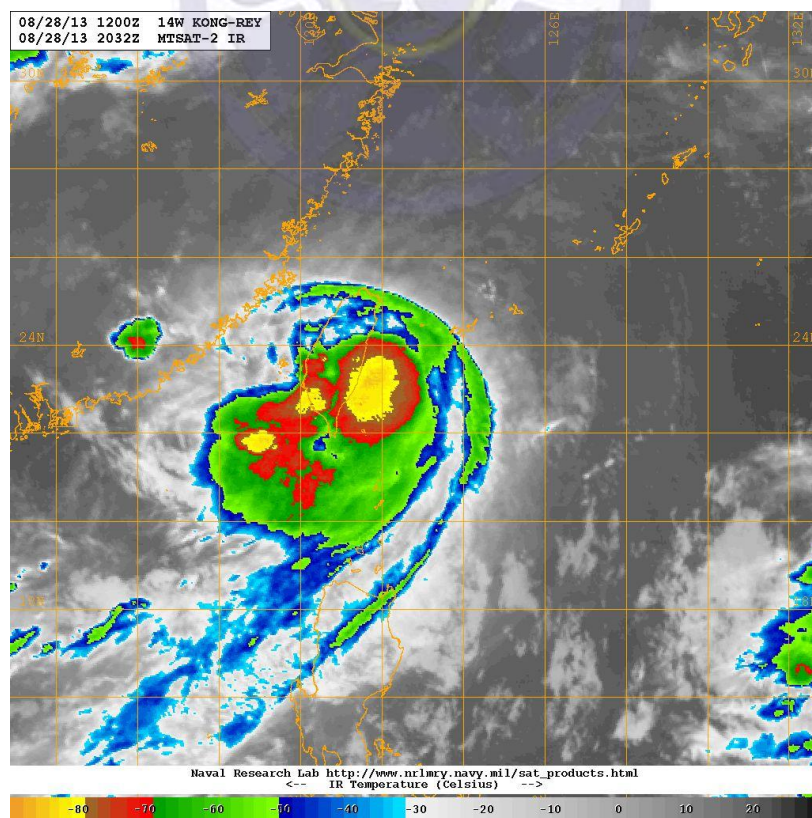


圖 3.8-3 g、NRL 28 日 2032 UTC 之紅外線色調強化雲圖。

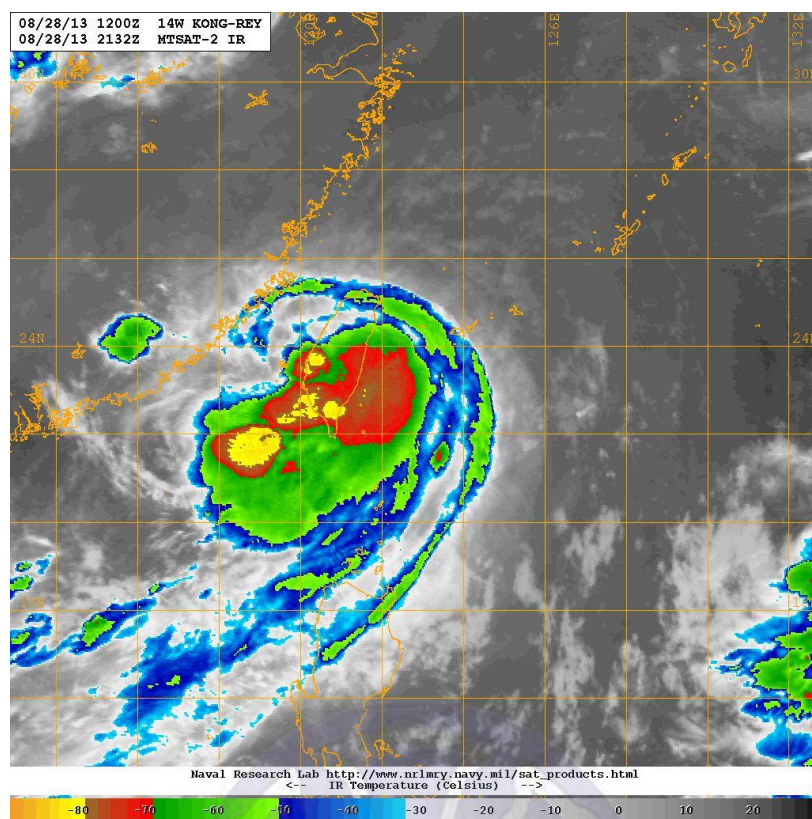


圖 3.8-3 h、NRL 28 日 2132 UTC 之紅外線色調強化雲圖。

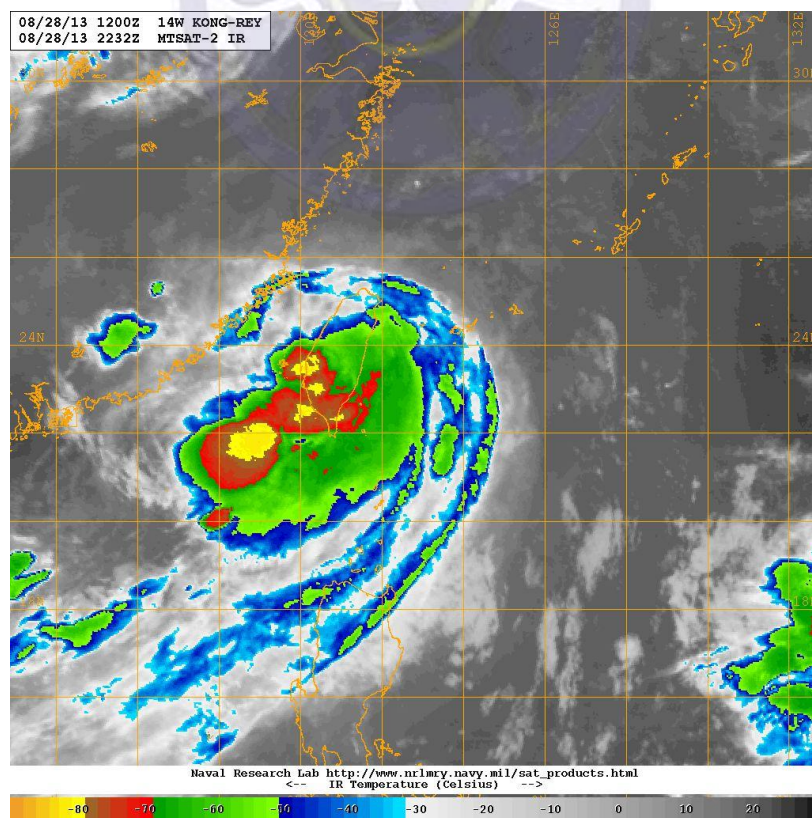


圖 3.8-3 i、NRL 28 日 2232 UTC 之紅外線色調強化雲圖。

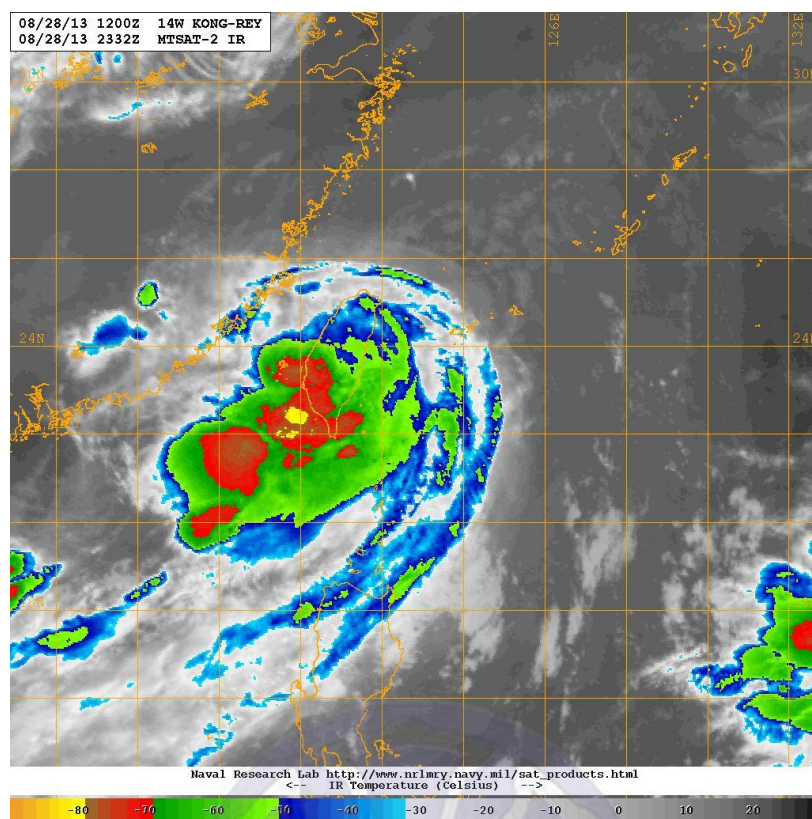


圖 3.8-3 j、NRL 28 日 2332 UTC 之紅外線色調強化雲圖。

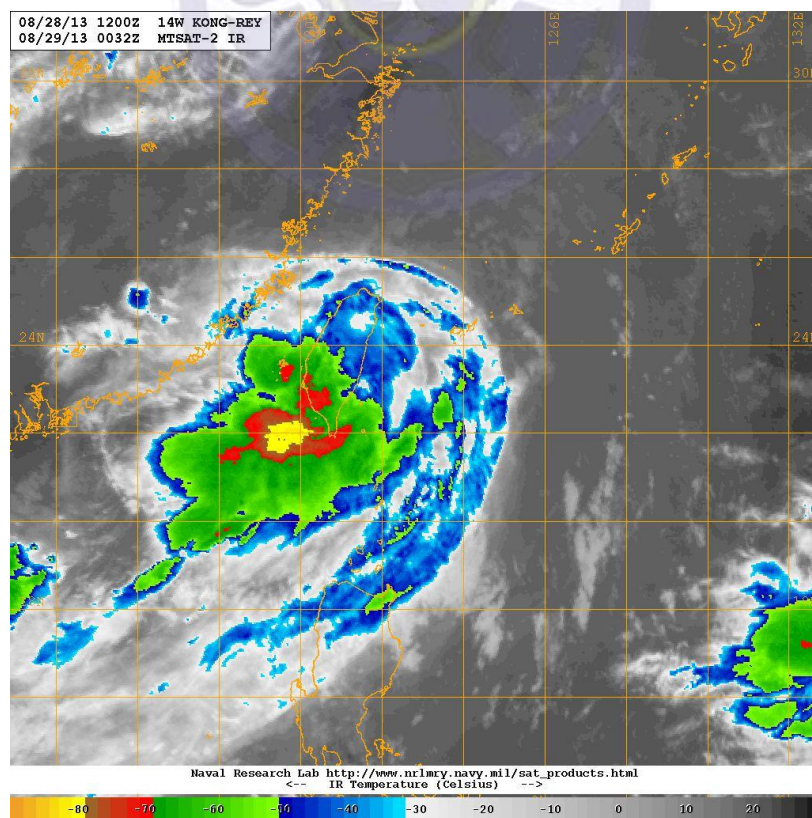


圖 3.8-4 a、NRL 29 日 0032 UTC 之紅外線色調強化雲圖。

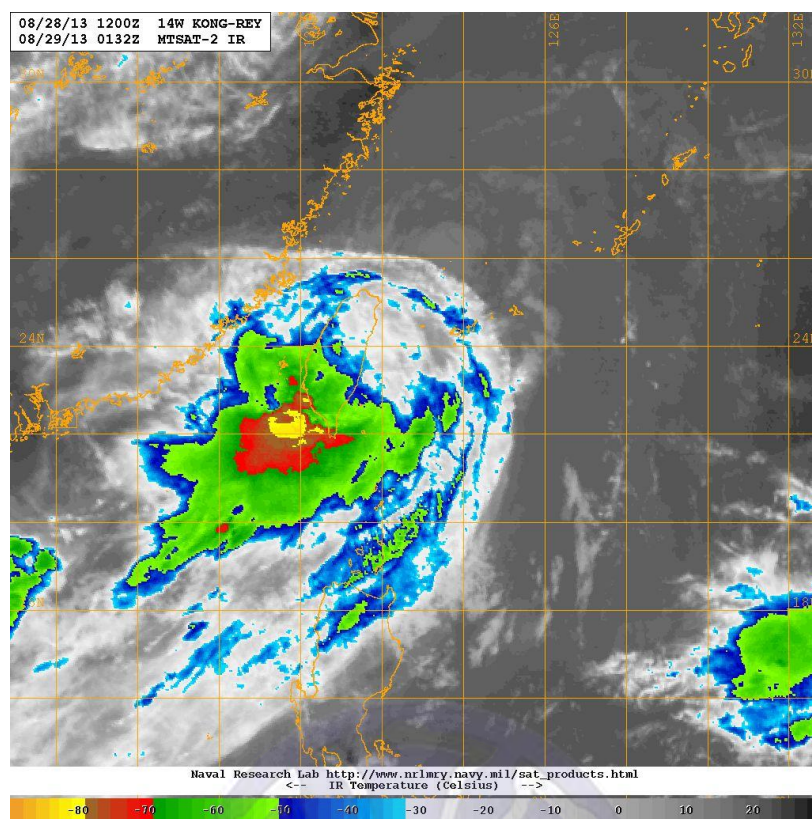


圖 3.8-4 b、NRL 29 日 0132 UTC 之紅外線色調強化雲圖。

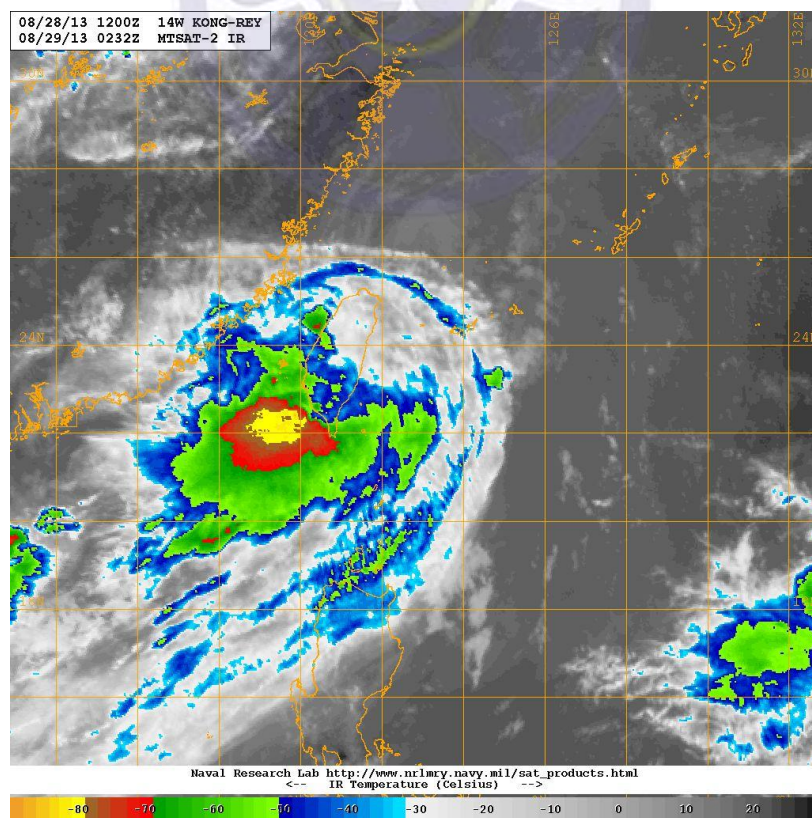


圖 3.8-4 c、NRL 29 日 0232 UTC 之紅外線色調強化雲圖。

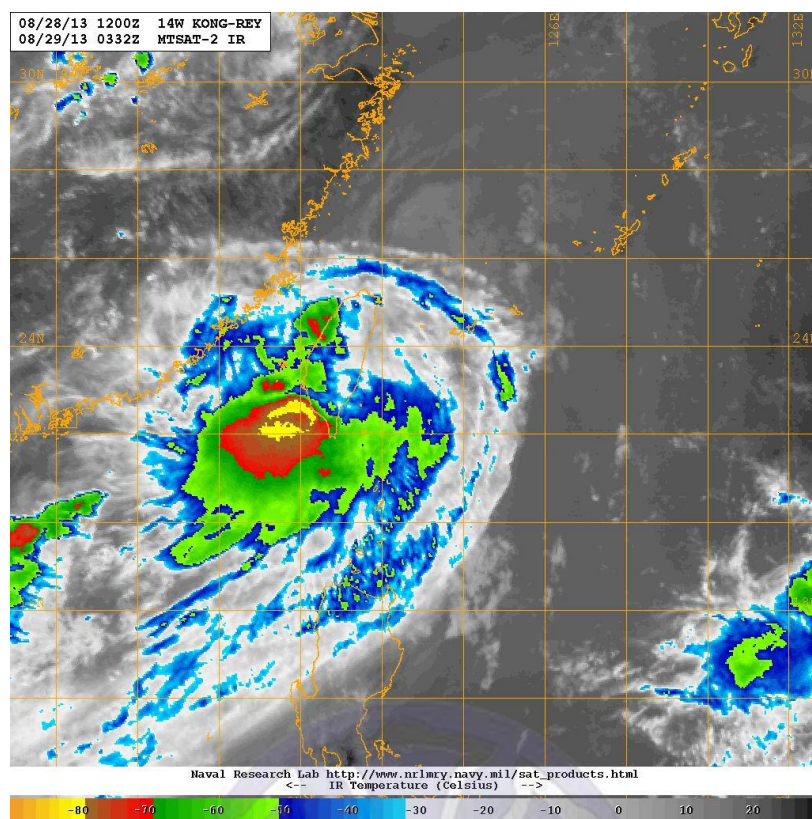


圖 3.8-4 d、NRL 29 日 0332 UTC 之紅外線色調強化雲圖。

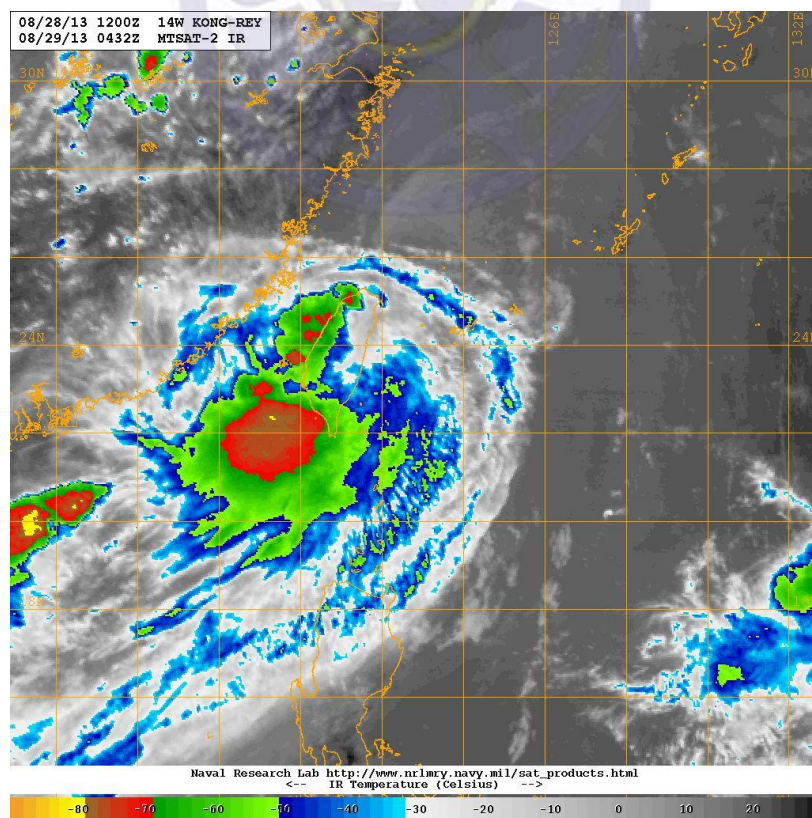


圖 3.8-4 e、NRL 29 日 0432 UTC 之紅外線色調強化雲圖。

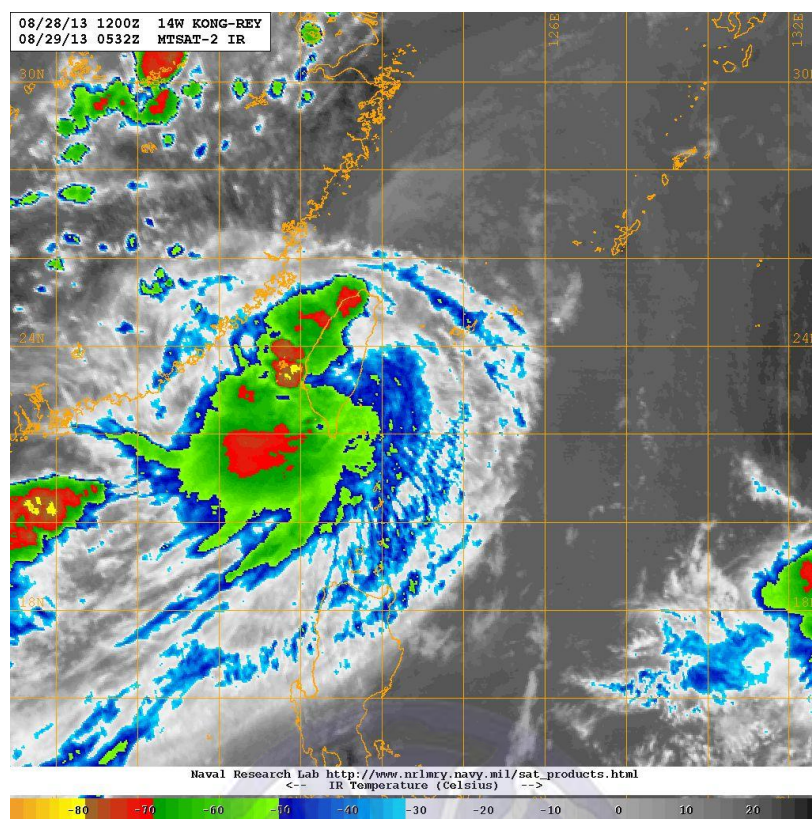


圖 3.8-4 f、NRL 29 日 0532 UTC 之紅外線色調強化雲圖。

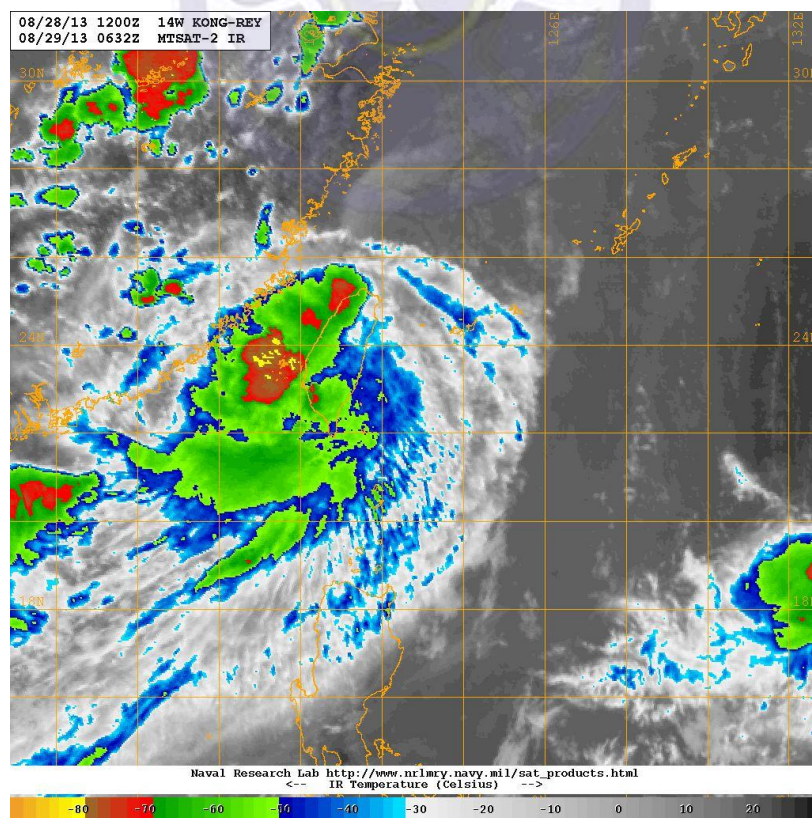


圖 3.8-4 g、NRL 29 日 0632 UTC 之紅外線色調強化雲圖。

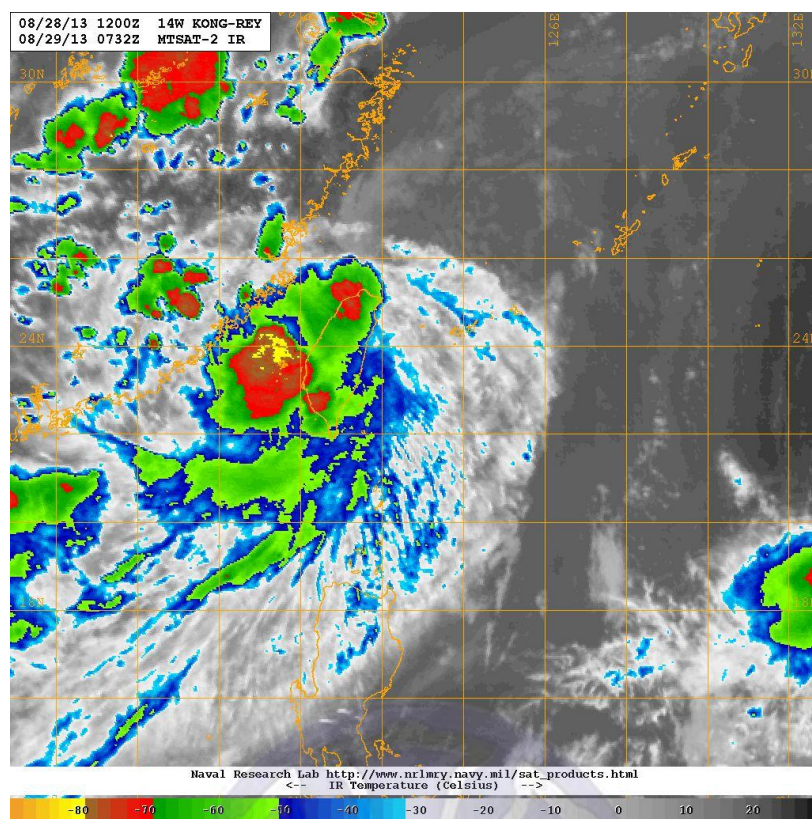


圖 3.8-4 h、NRL 29 日 0732 UTC 之紅外線色調強化雲圖。

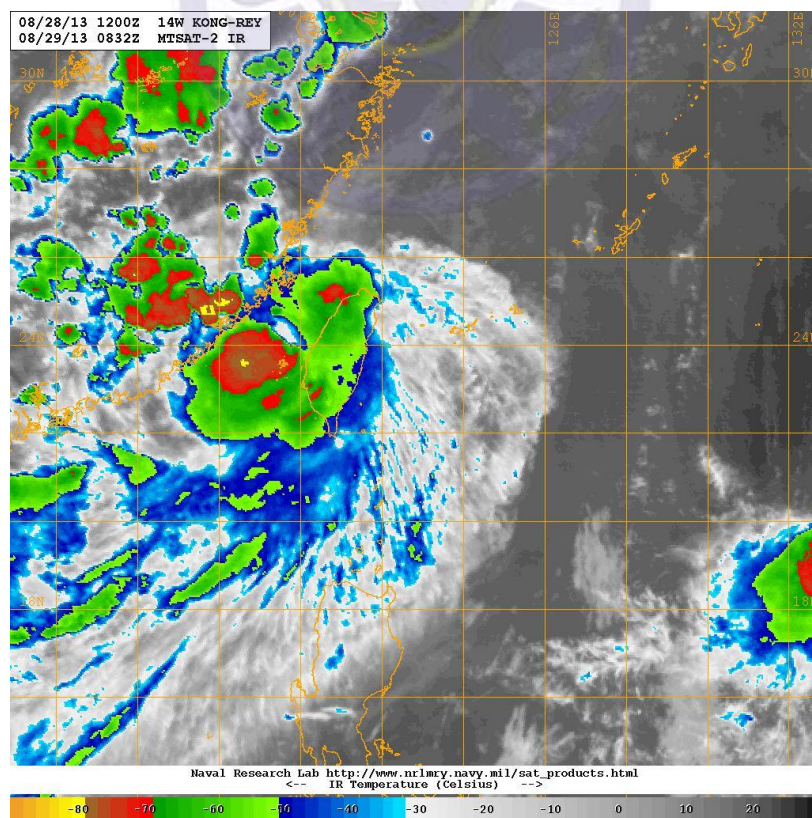


圖 3.8-4 i、NRL 29 日 0832 UTC 之紅外線色調強化雲圖。

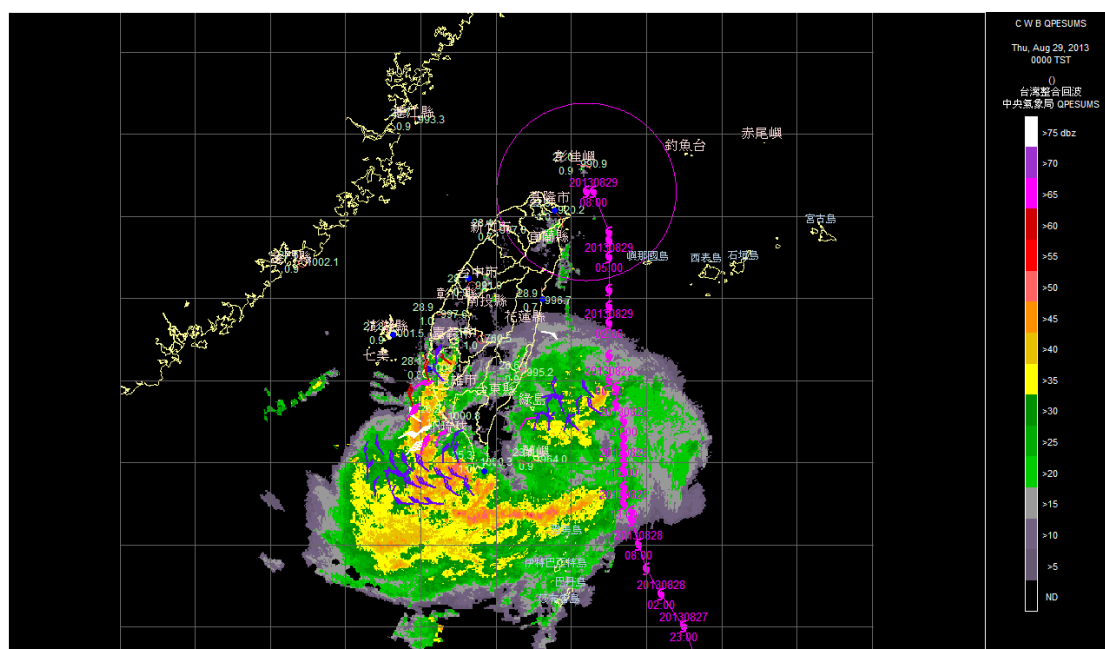


圖 3.9 a、QPESUMS 28 日 1600 UTC 之整合雷達回波圖疊加雙都風場。
(風標：深紅 1~2 km、深紫 3~4 km、桃紅 5~6 km、白色 7~10 km，單位：
knot。)

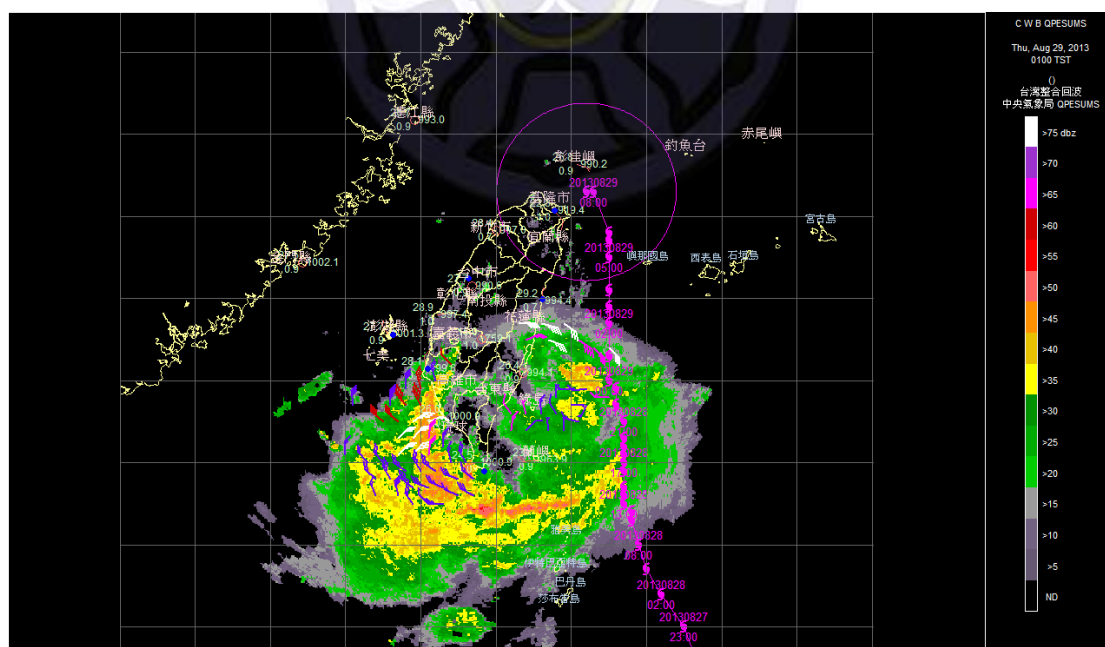


圖 3.9 b、同圖 3.9 a，時間為 28 日 1700 UTC。

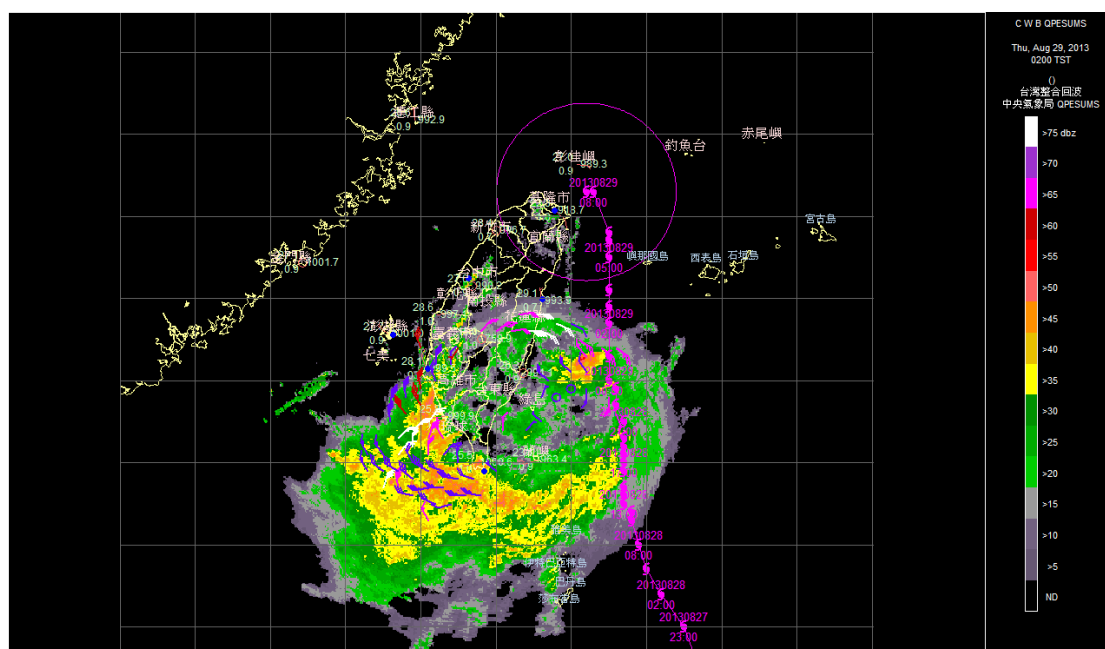


圖 3.9 c、同圖 3.9 a，時間為 28 日 1800 UTC。

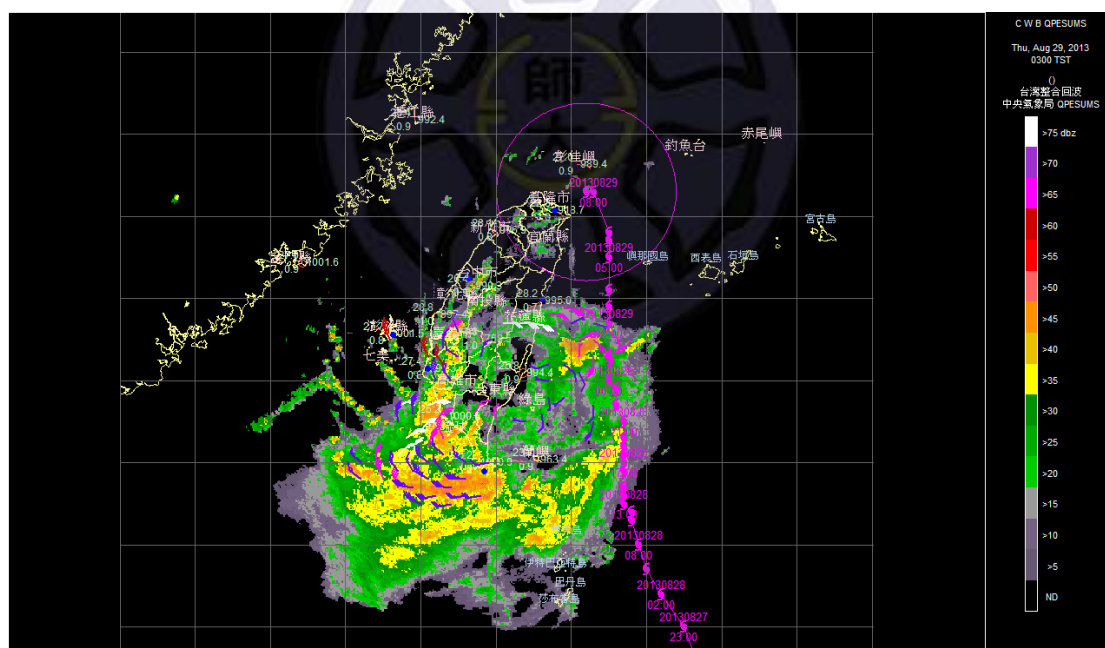


圖 3.9 d、同圖 3.9 a，時間為 28 日 1900 UTC。

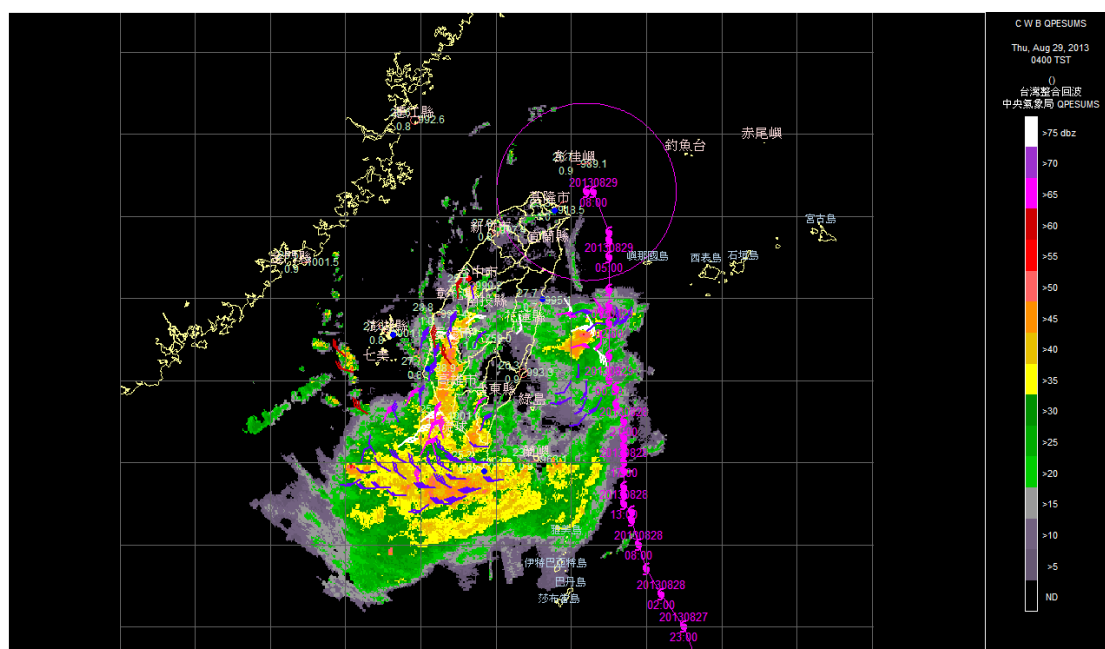


圖 3.9 e、同圖 3.9 a，時間為 28 日 2000 UTC。

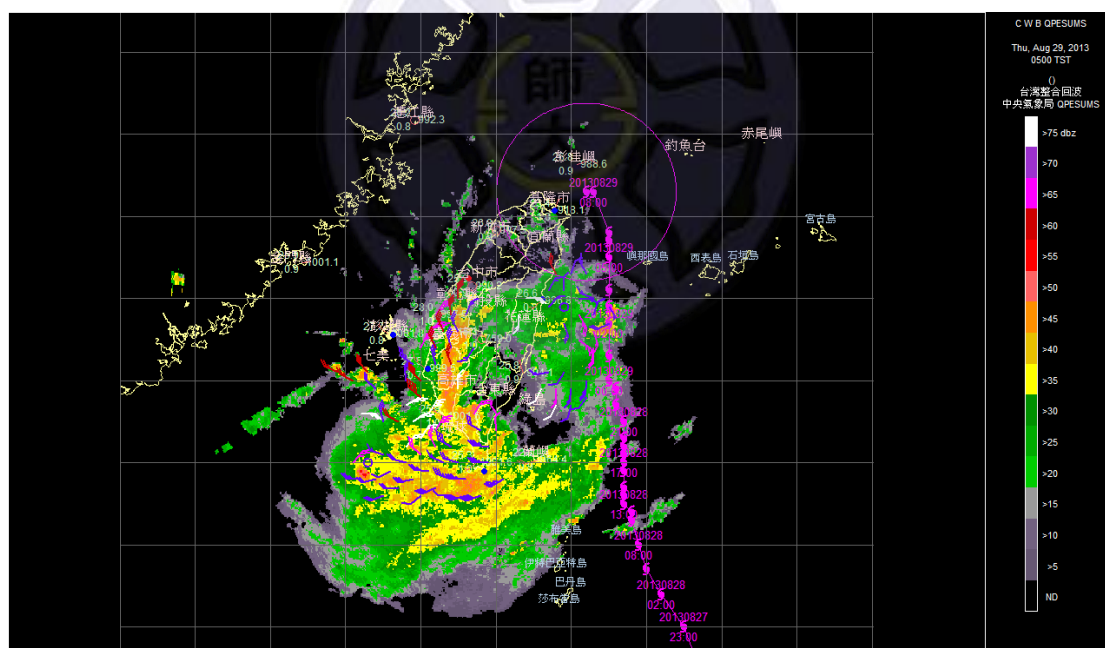


圖 3.9 f、同圖 3.9 a，時間為 28 日 2100 UTC。

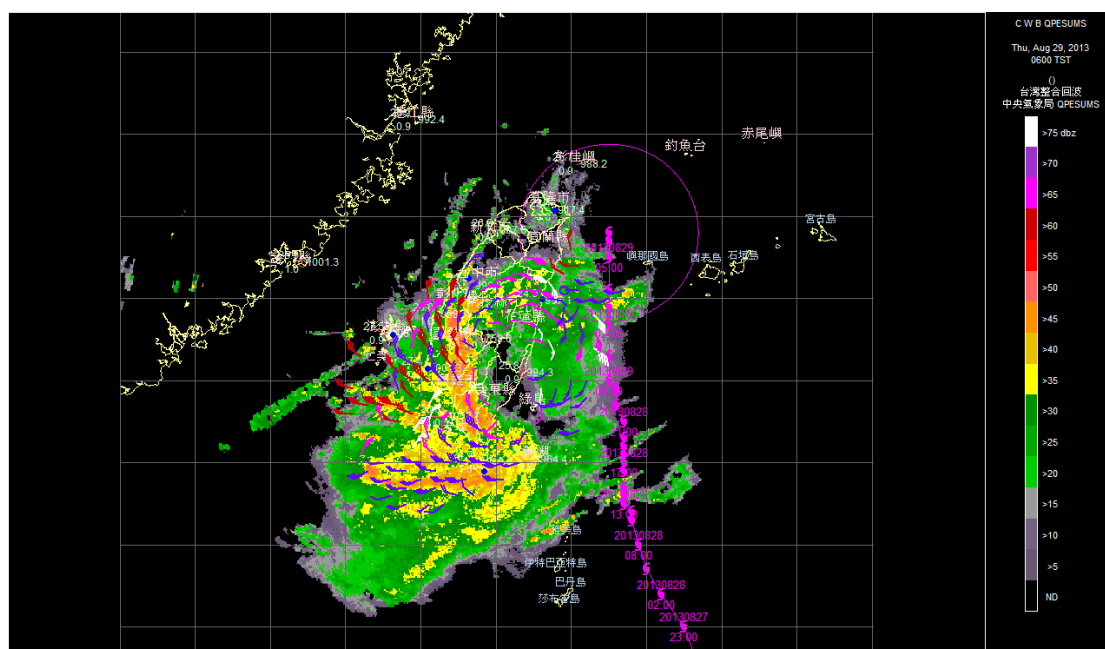


圖 3.9 g、同圖 3.9 a，時間為 28 日 2200 UTC。

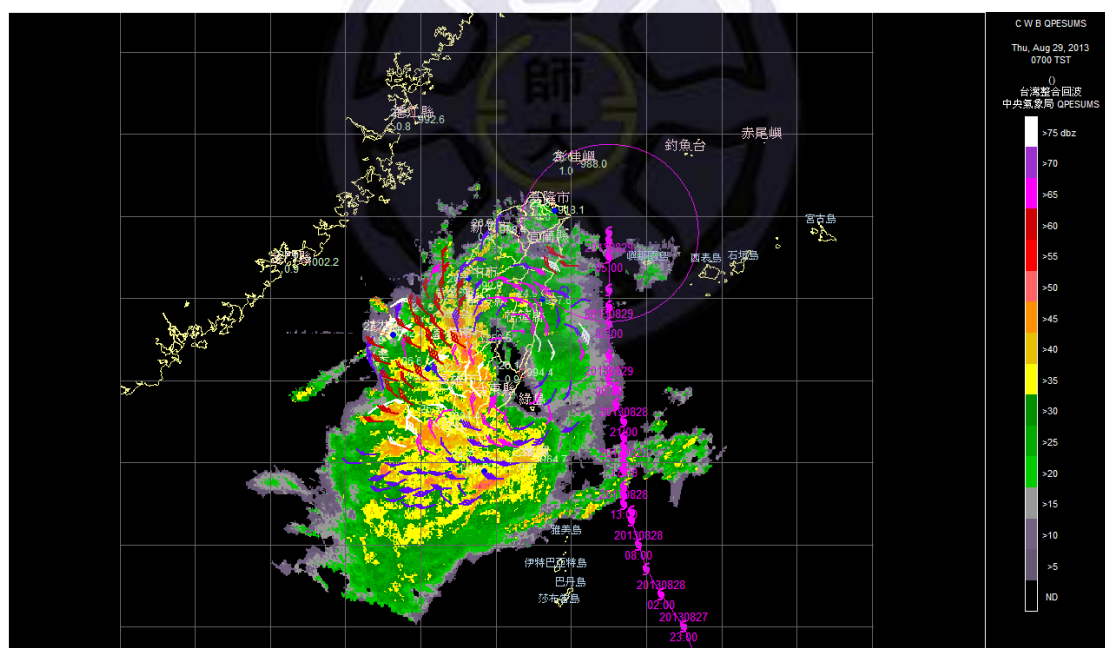


圖 3.9 h、同圖 3.9 a，時間為 28 日 2300 UTC。

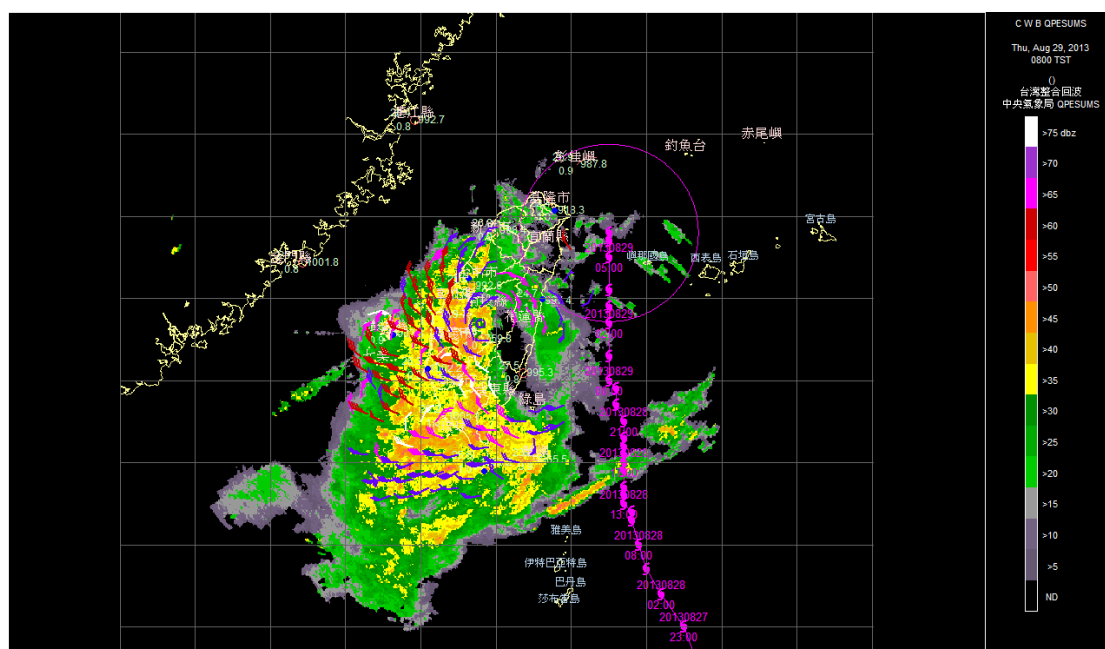


圖 3.9 i、同圖 3.9 a，時間為 29 日 0000 UTC。

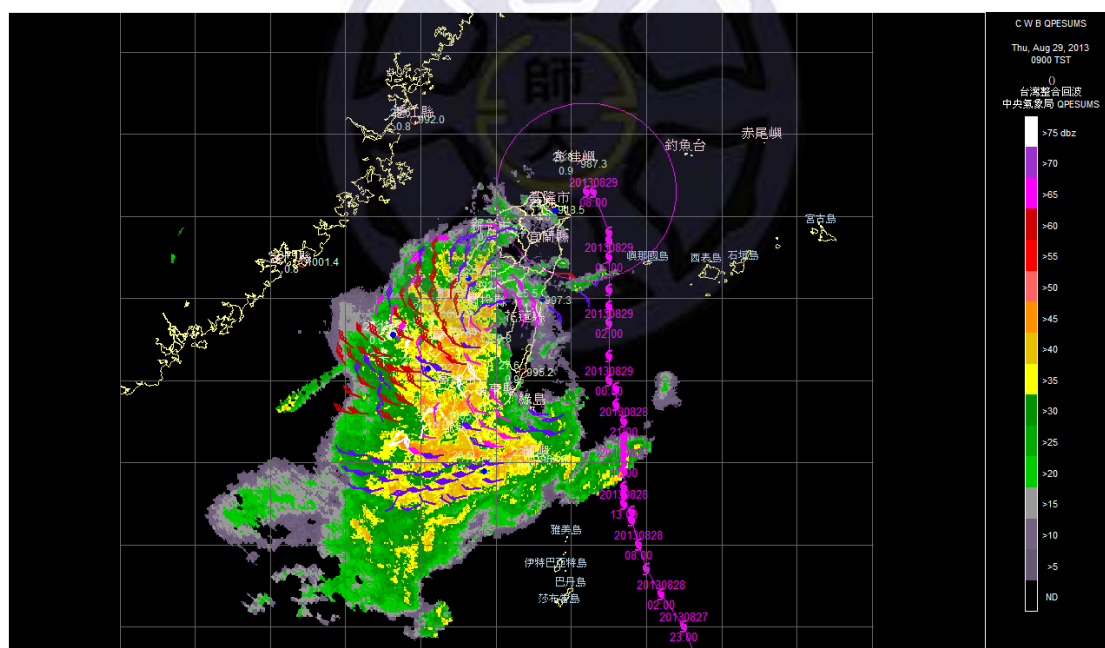


圖 3.9 j、同圖 3.9 a，時間為 29 日 0100 UTC。

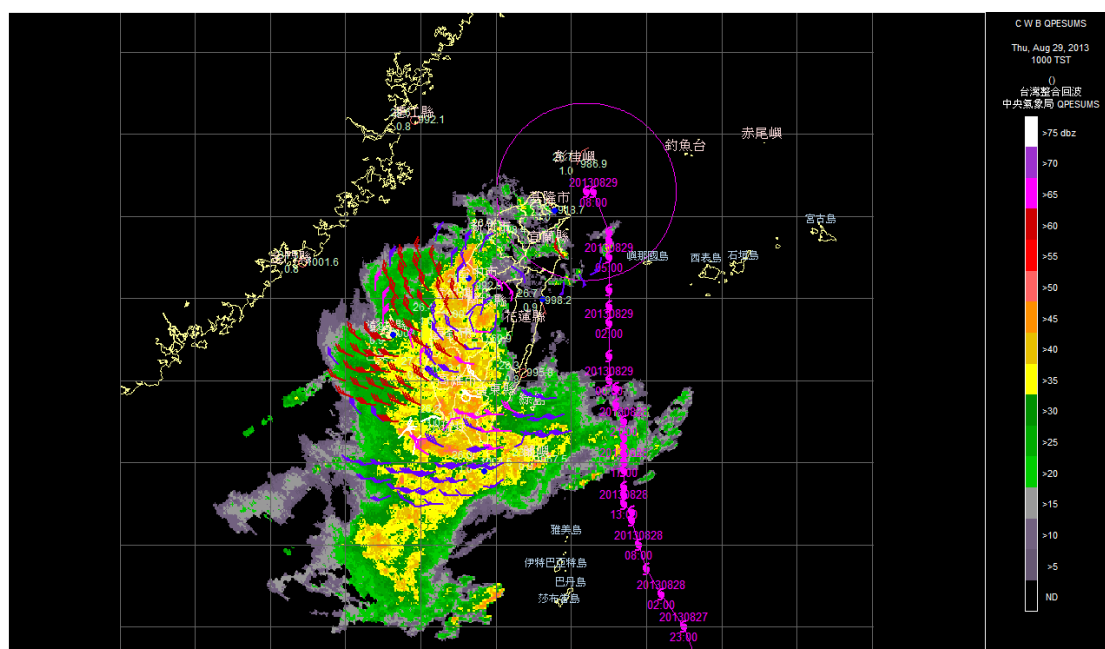


圖 3.9 k、同圖 3.9 a，時間為 29 日 0200 UTC。

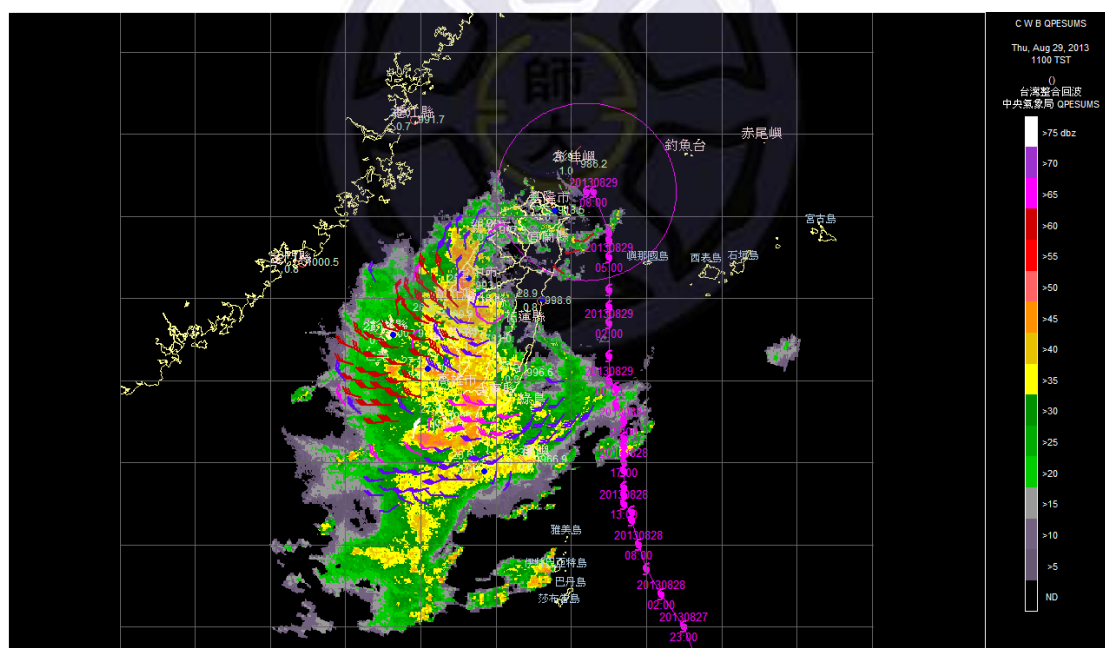


圖 3.9 l、同圖 3.9 a，時間為 29 日 0300 UTC。

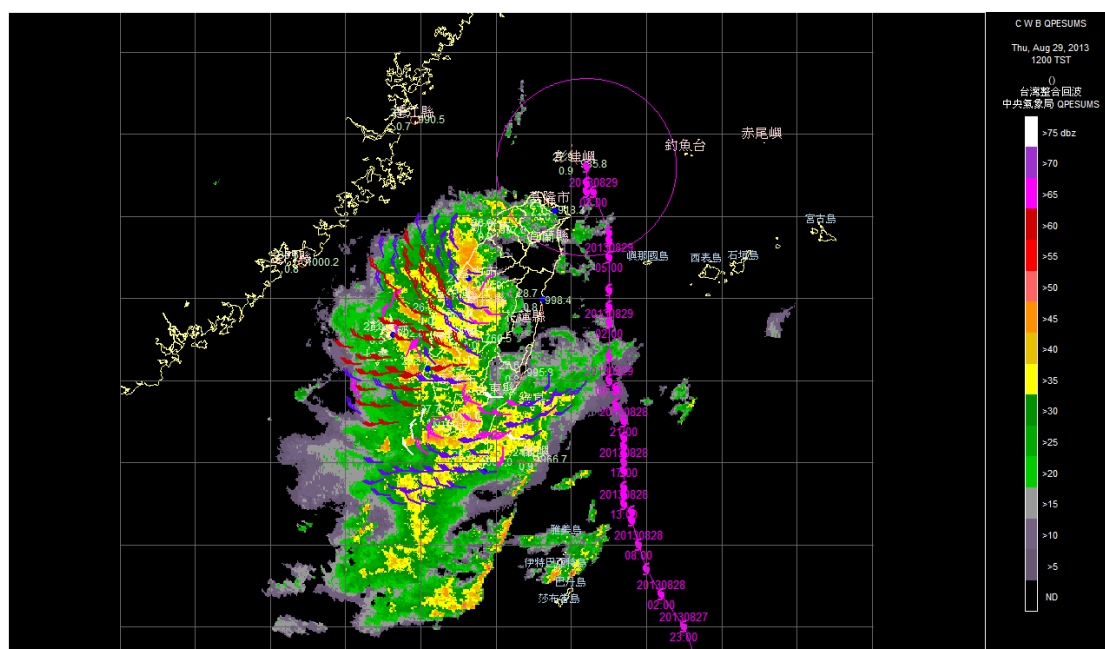


圖 3.9 m、同圖 3.9 a，時間為 29 日 0400 UTC。

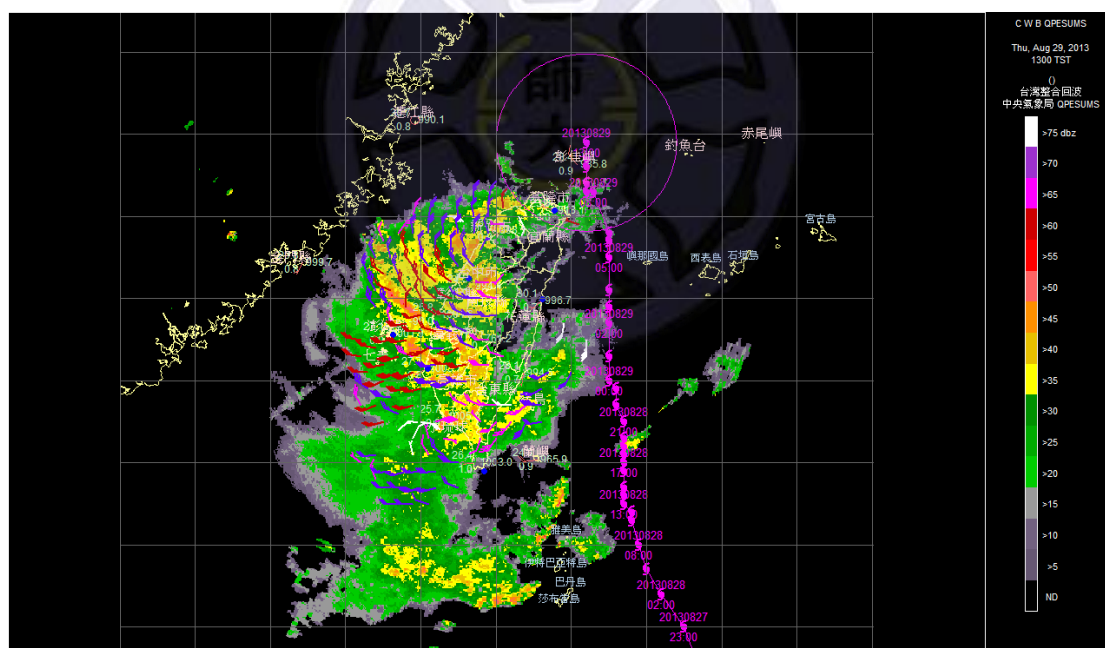


圖 3.9 n、同圖 3.9 a，時間為 29 日 0500 UTC。

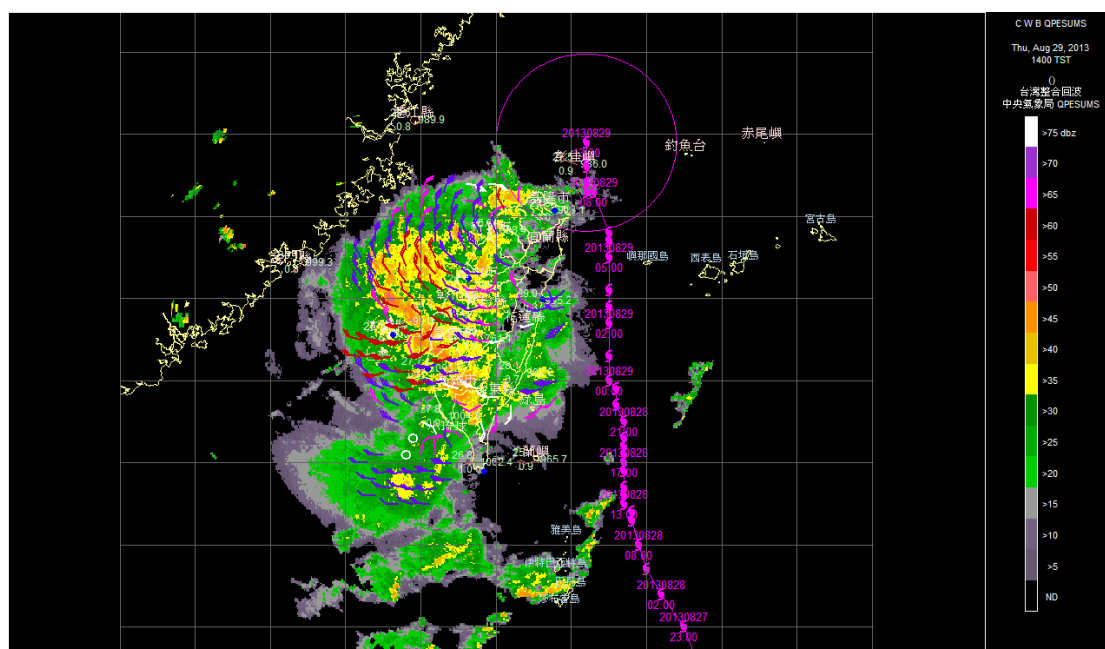


圖 3.9 o、同圖 3.9 a，時間為 29 日 0600 UTC。

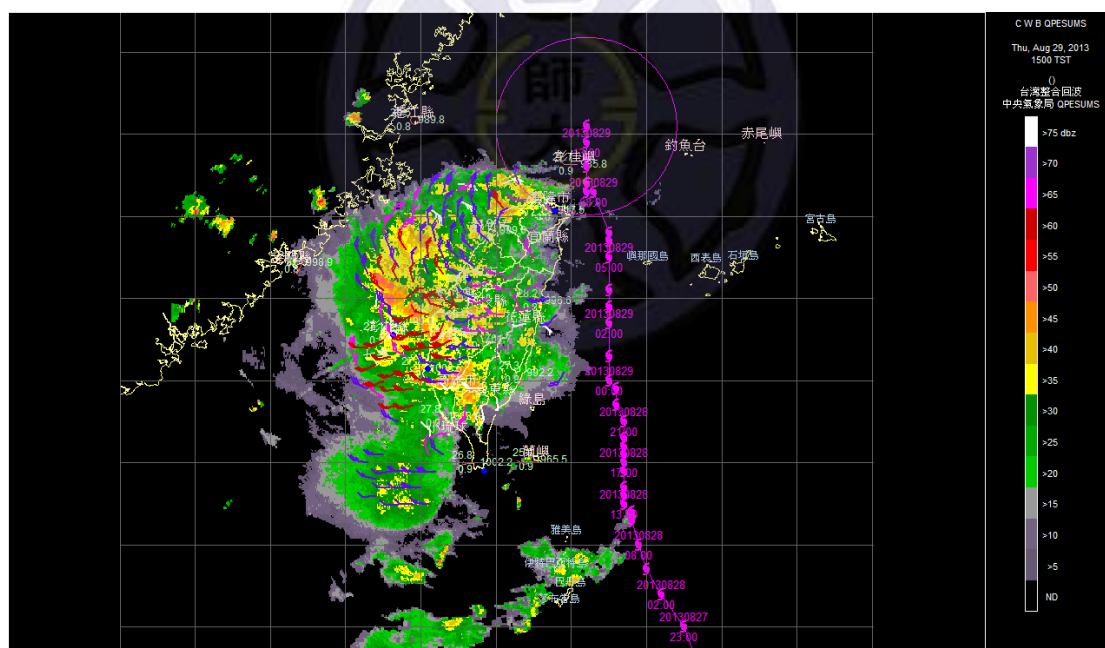


圖 3.9 p、同圖 3.9 a，時間為 29 日 0700 UTC。

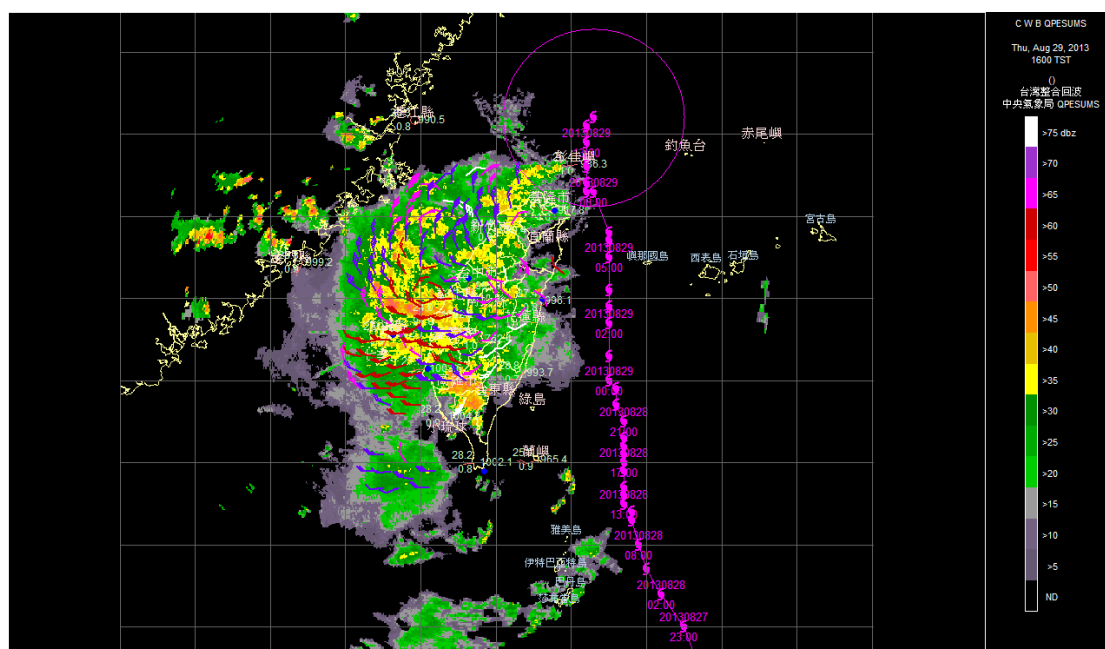


圖 3.9 q、同圖 3.9 a，時間為 29 日 0800 UTC。

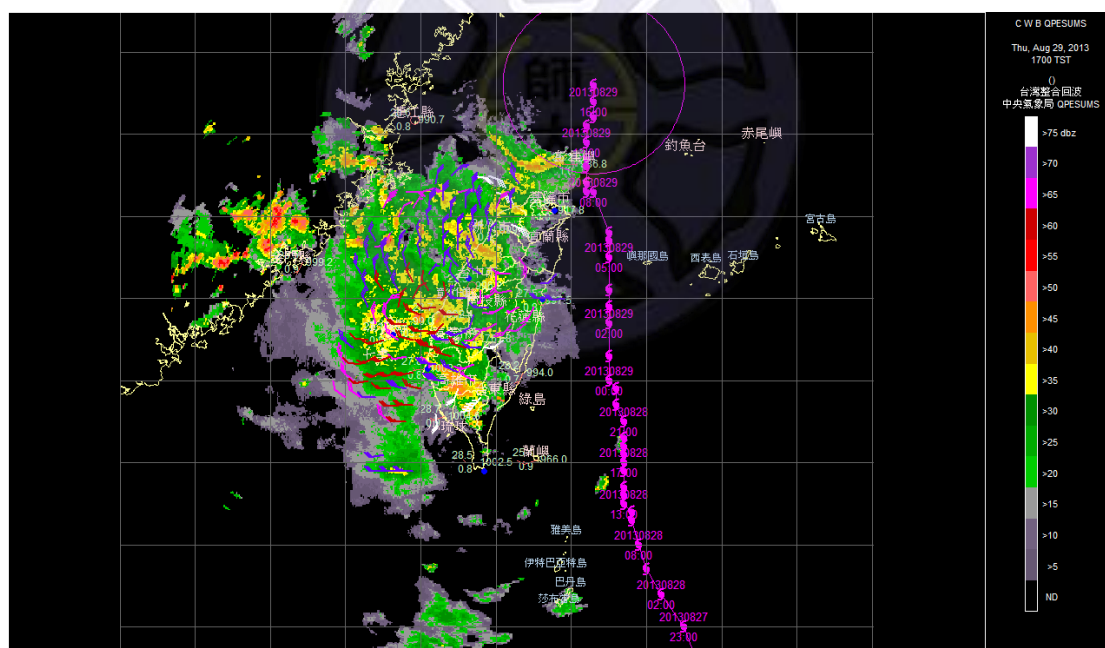


圖 3.9 r、同圖 3.9 a，時間為 29 日 0900 UTC。

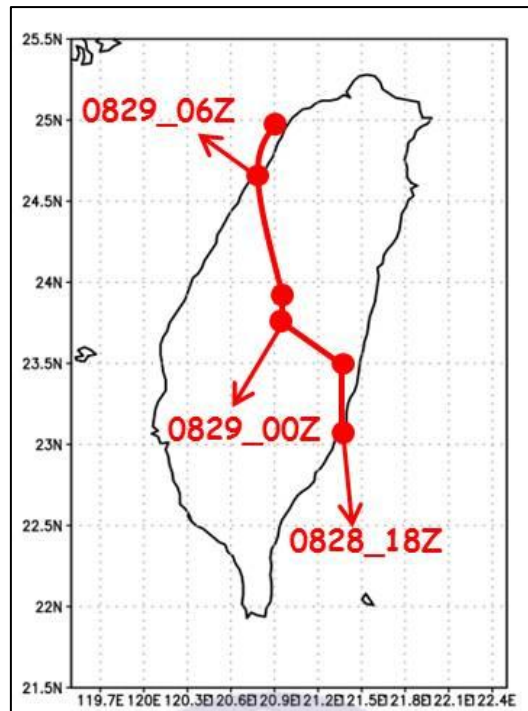


圖 3.10、康芮颱風中層渦旋中心每三小時之定位與路徑圖。
(28 日 1800 UTC 至 29 日 0900 UTC)

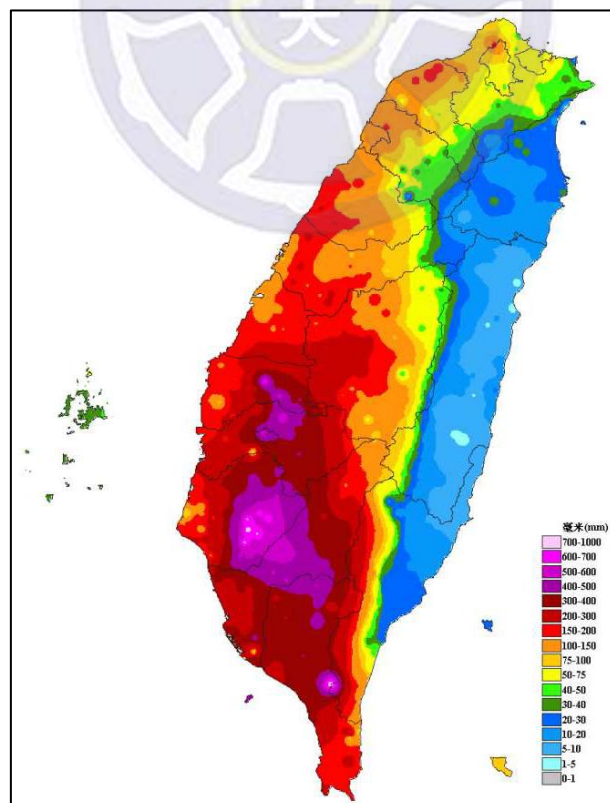


圖 3.11、27 日至 29 日(LST)臺灣地區之三日累積雨量圖(單位：mm)。

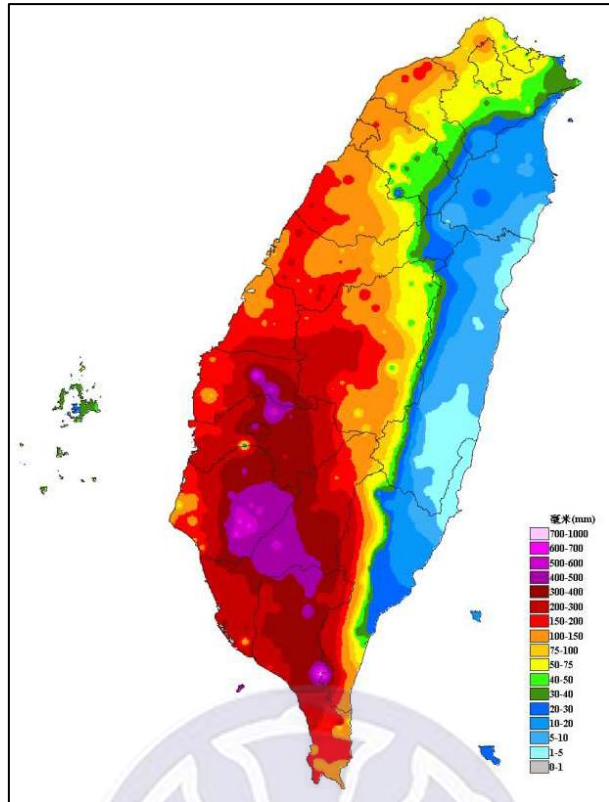


圖 3.12、29 日(LST)單日累積雨量圖(單位：mm)。

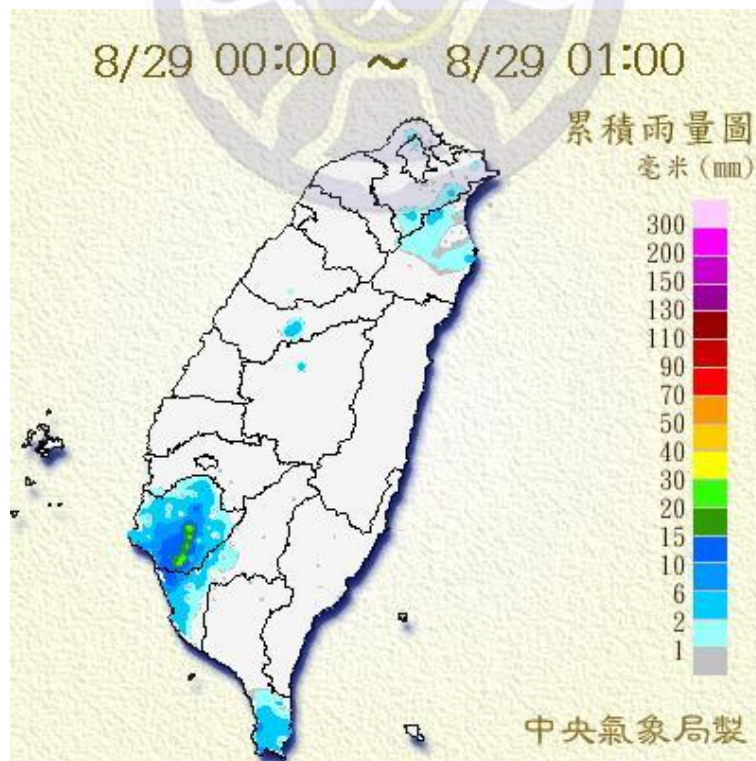


圖 3.13 a、29 日 0000 LST 至 0100 LST 之時雨量累積圖(單位：mm)。

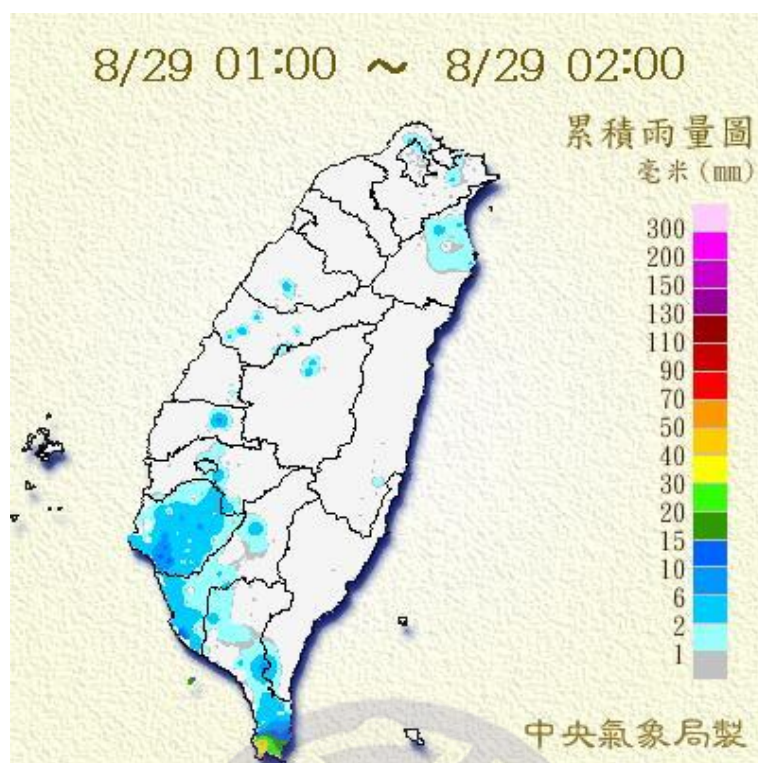


圖 3.13 b、29 日 0100 LST 至 0200 LST 之時雨量累積圖(單位：mm)。

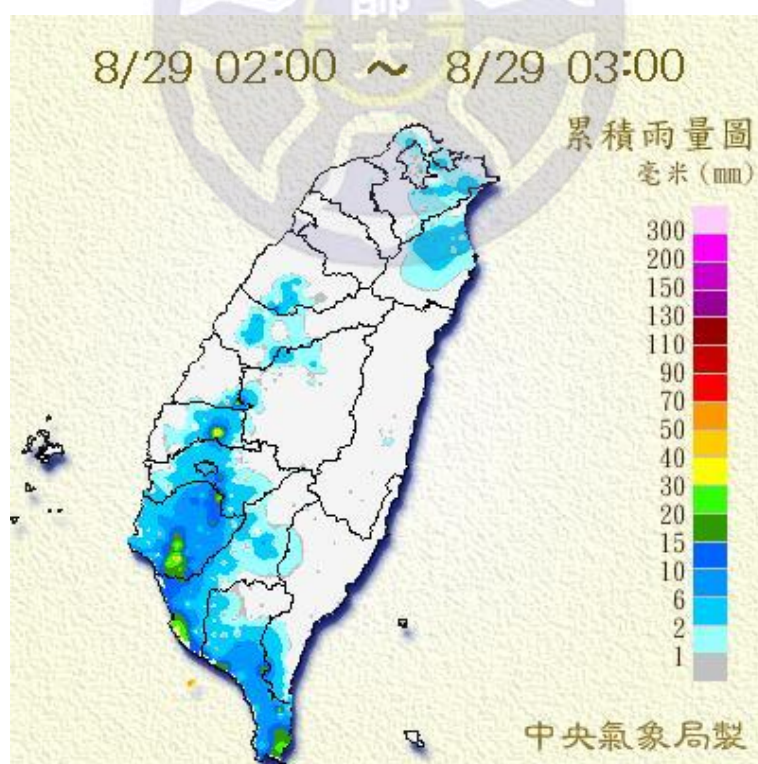


圖 3.13 c、29 日 0200 LST 至 0300 LST 之時雨量累積圖(單位：mm)。

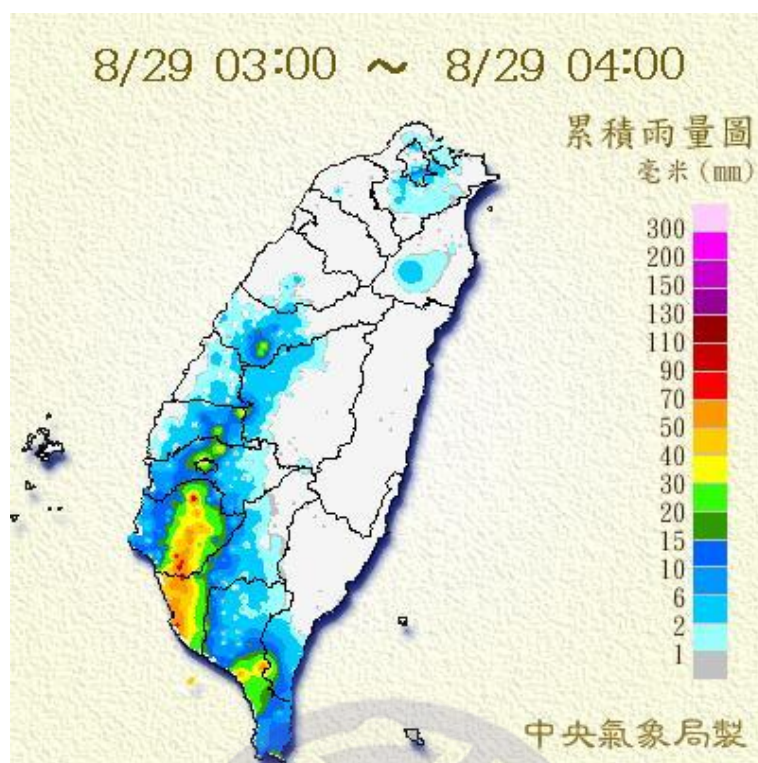


圖 3.13 d、29 日 0300 LST 至 0400 LST 之時雨量累積圖(單位：mm)。

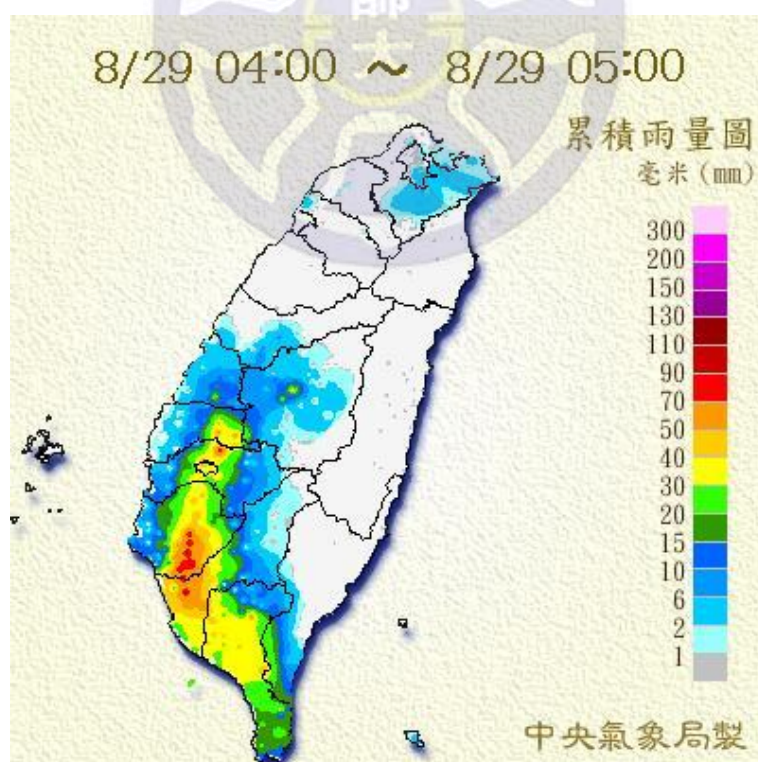


圖 3.13 e、29 日 0400 LST 至 0500 LST 之時雨量累積圖(單位：mm)。

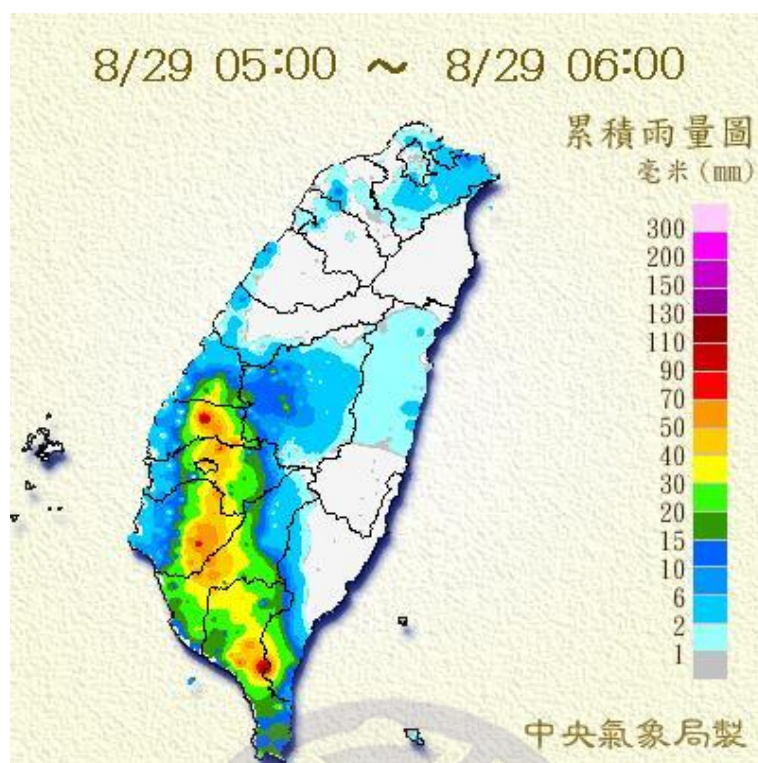


圖 3.13 f、29 日 0500 LST 至 0600 LST 之時雨量累積圖(單位：mm)。

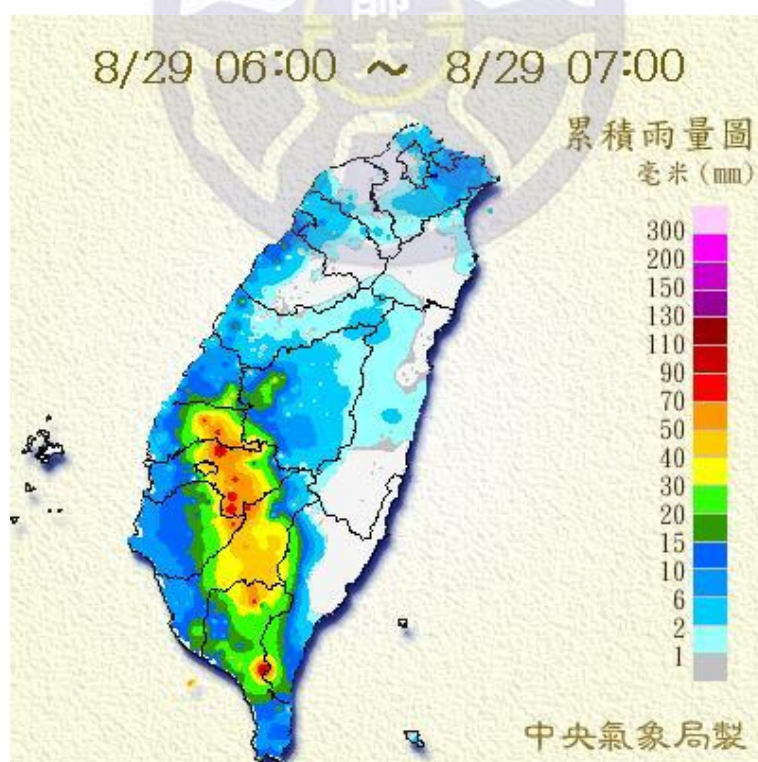


圖 3.13 g、29 日 0600 LST 至 0700 LST 之時雨量累積圖(單位：mm)。

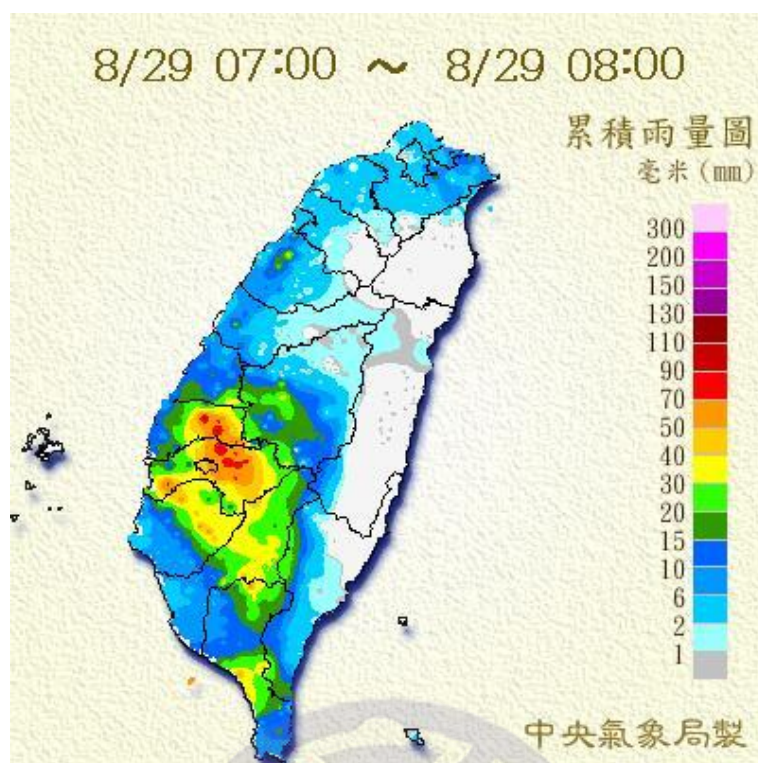


圖 3.13 h、29 日 0700 LST 至 0800 LST 之時雨量累積圖(單位：mm)。

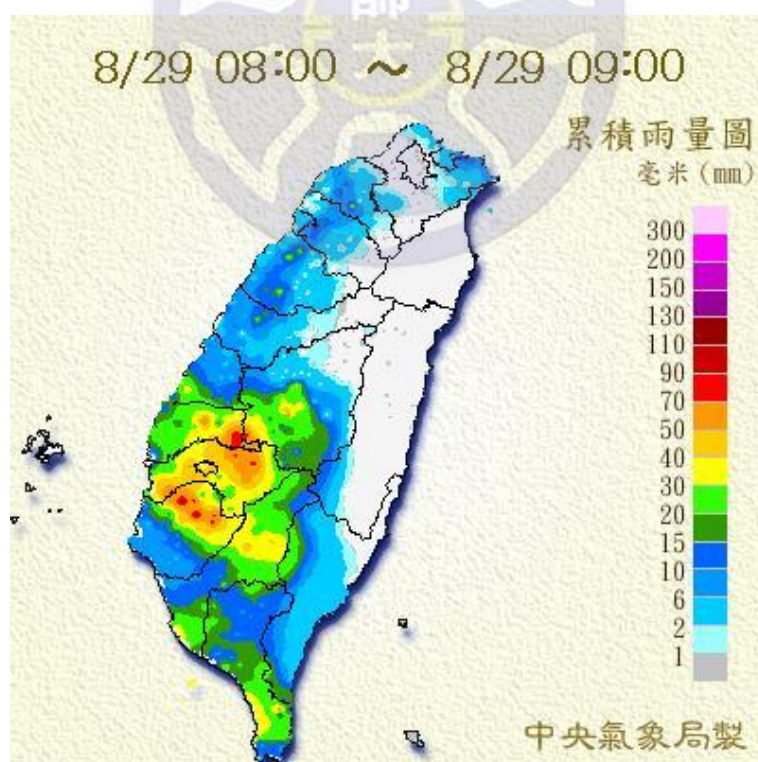


圖 3.13 i、29 日 0800 LST 至 0900 LST 之時雨量累積圖(單位：mm)。

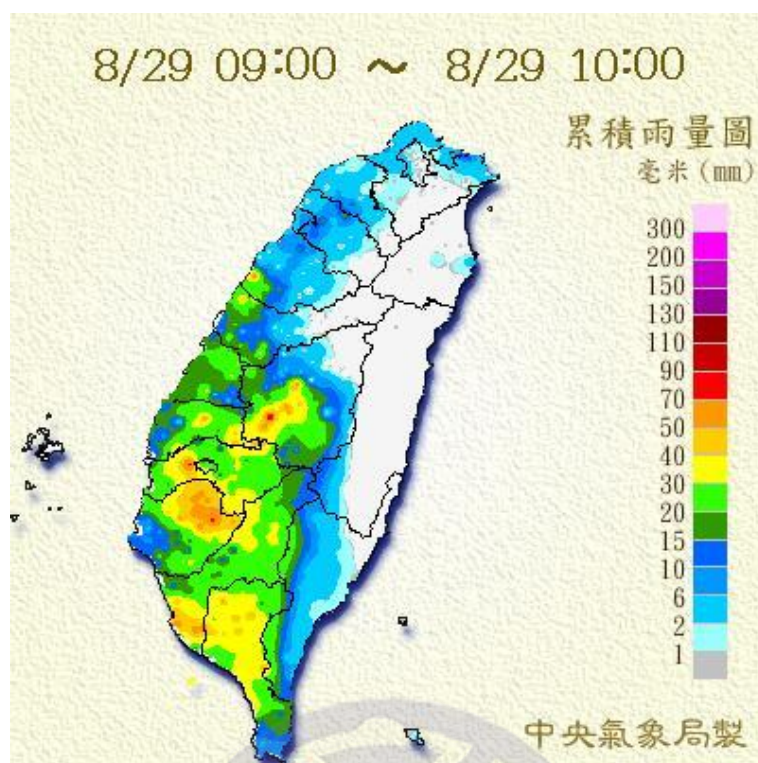


圖 3.13 j、29 日 0900 LST 至 1000 LST 之時雨量累積圖(單位：mm)。

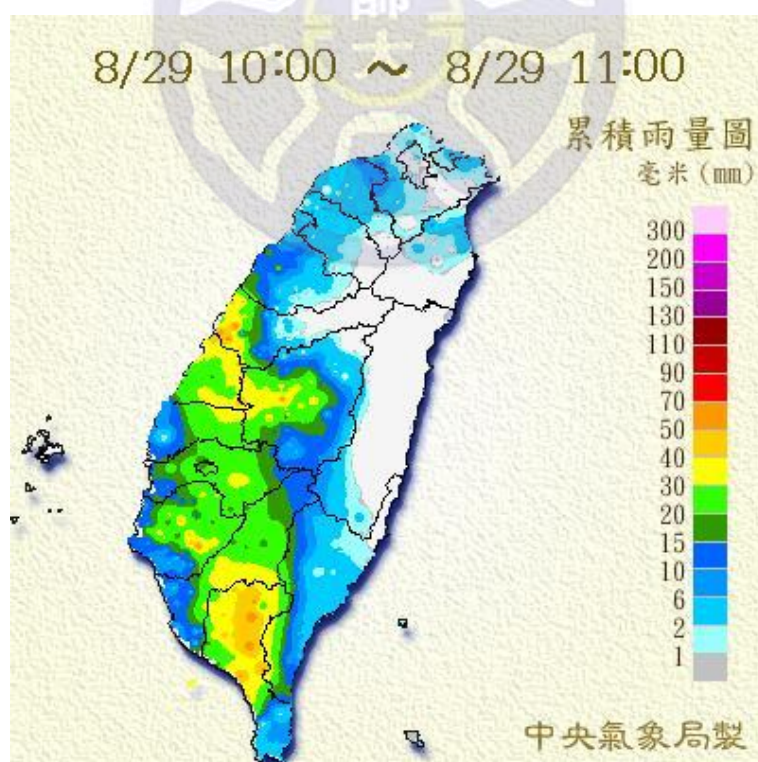


圖 3.13 k、29 日 1000 LST 至 1100 LST 之時雨量累積圖(單位：mm)。

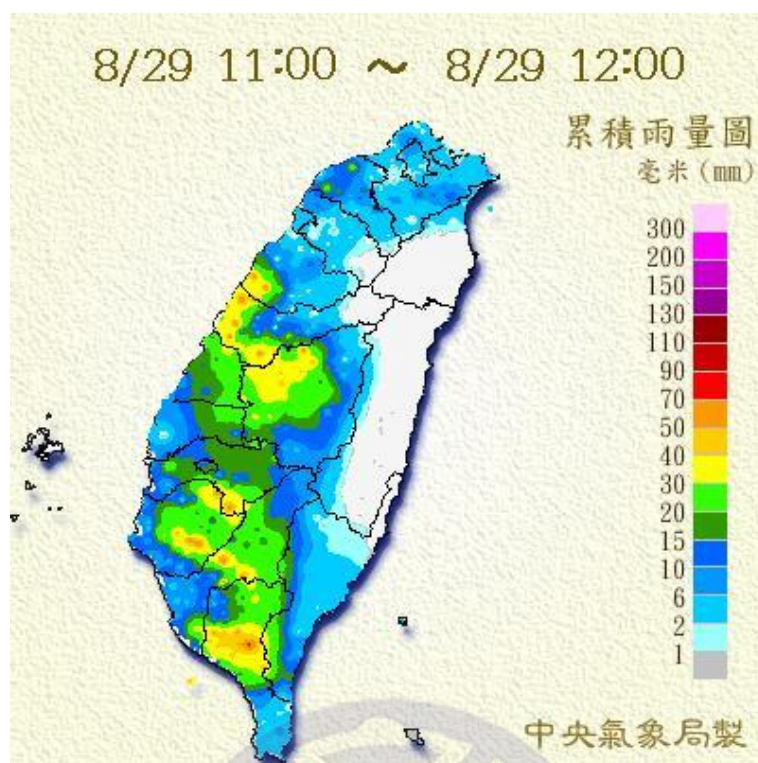


圖 3.13 l、29 日 1100 LST 至 1200 LST 之時雨量累積圖(單位：mm)。

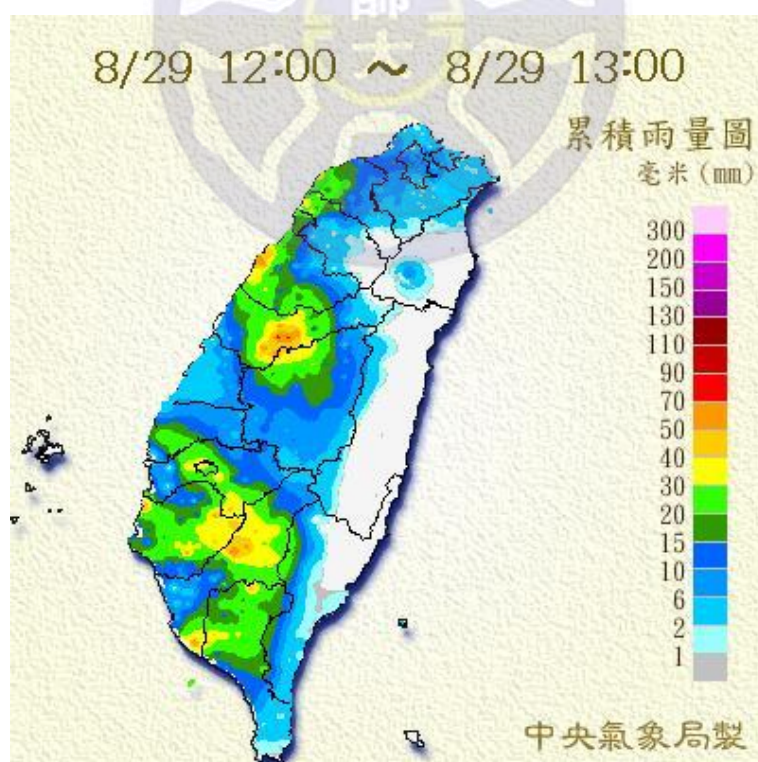


圖 3.13 m、29 日 1200 LST 至 1300 LST 之時雨量累積圖(單位：mm)。

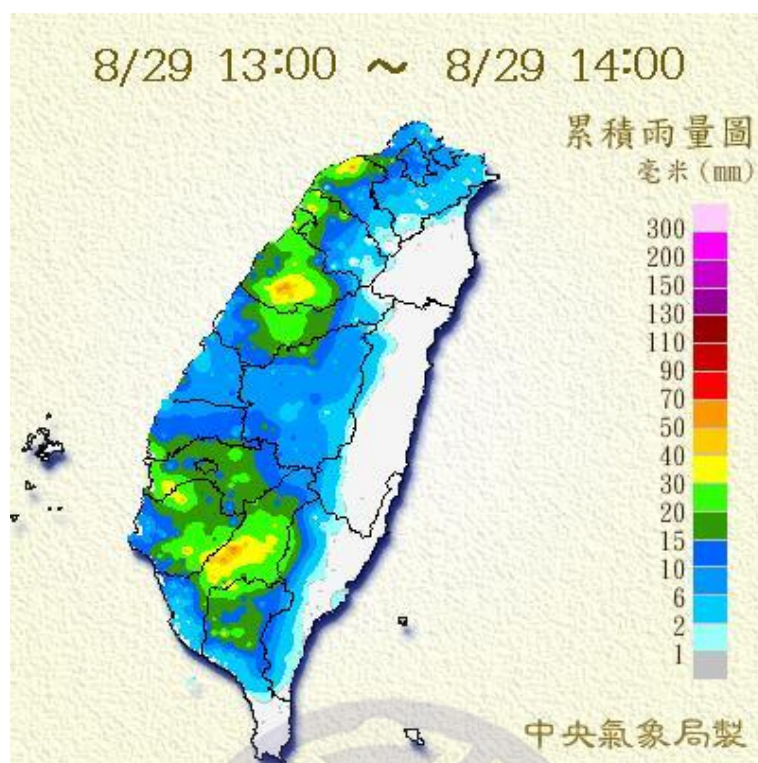


圖 3.13 n、29 日 1300 LST 至 1400 LST 之時雨量累積圖(單位：mm)。

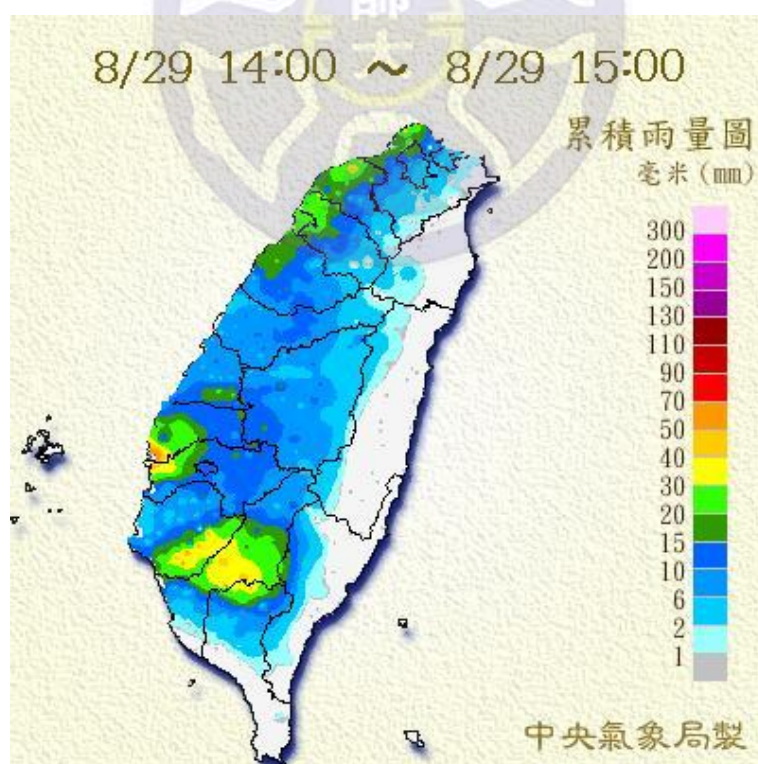


圖 3.13 o、29 日 1400 LST 至 1500 LST 之時雨量累積圖(單位：mm)。

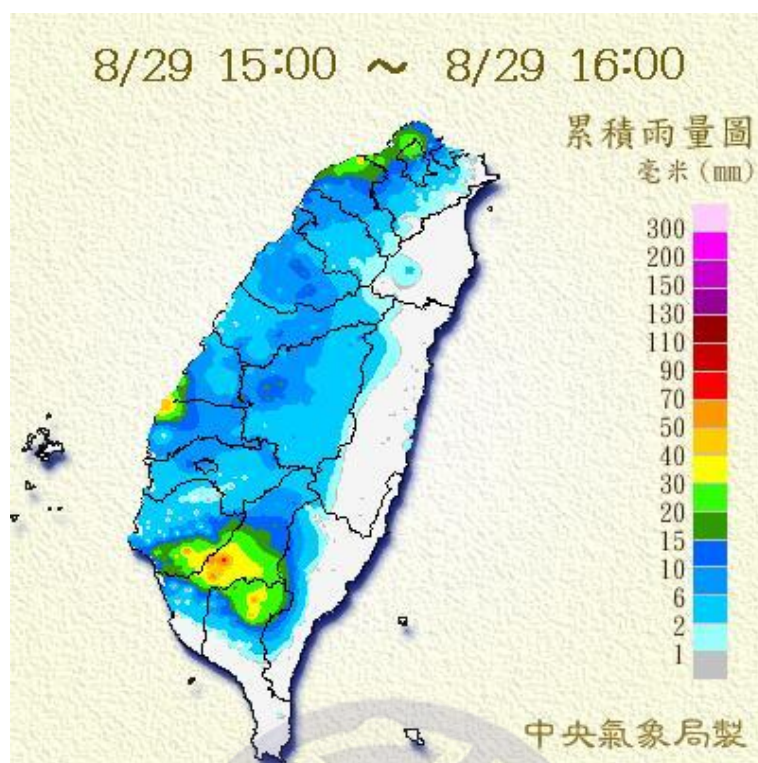


圖 3.13 p、29 日 1500 LST 至 1600 LST 之時雨量累積圖(單位：mm)。

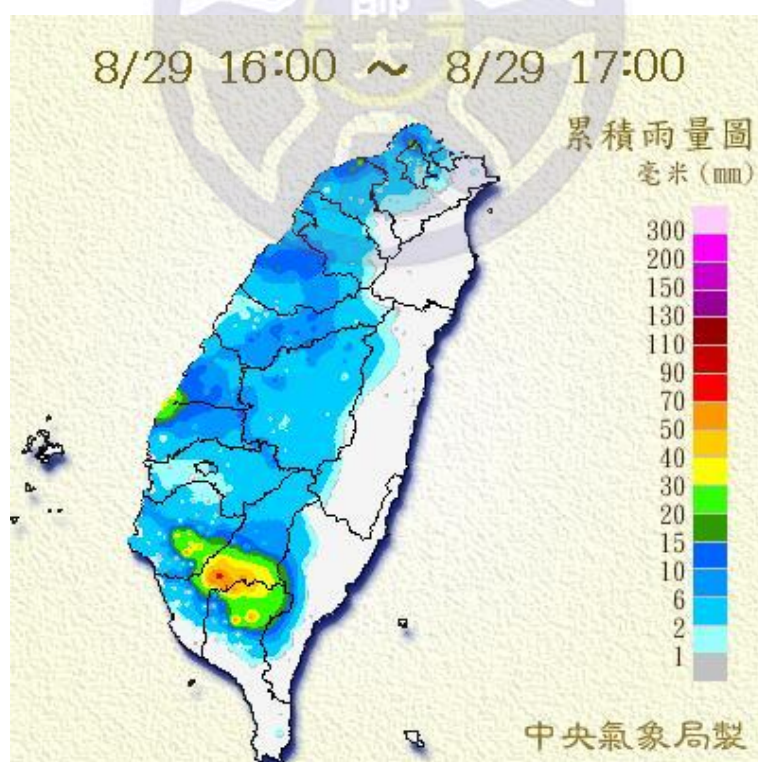


圖 3.13 q、29 日 1600 LST 至 1700 LST 之時雨量累積圖(單位：mm)。

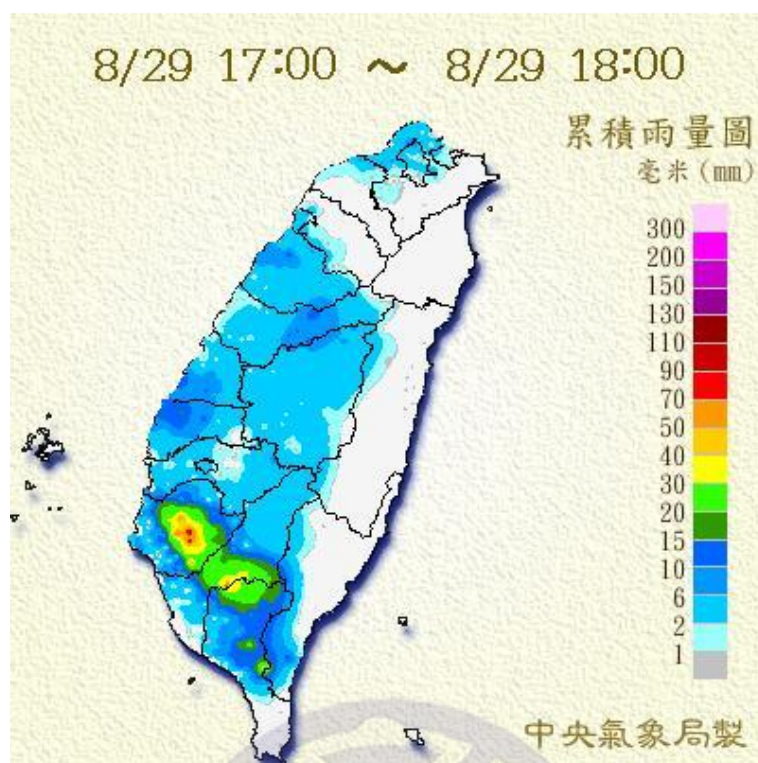


圖 3.13 r、29 日 1700 LST 至 1800 LST 之時雨量累積圖(單位：mm)。

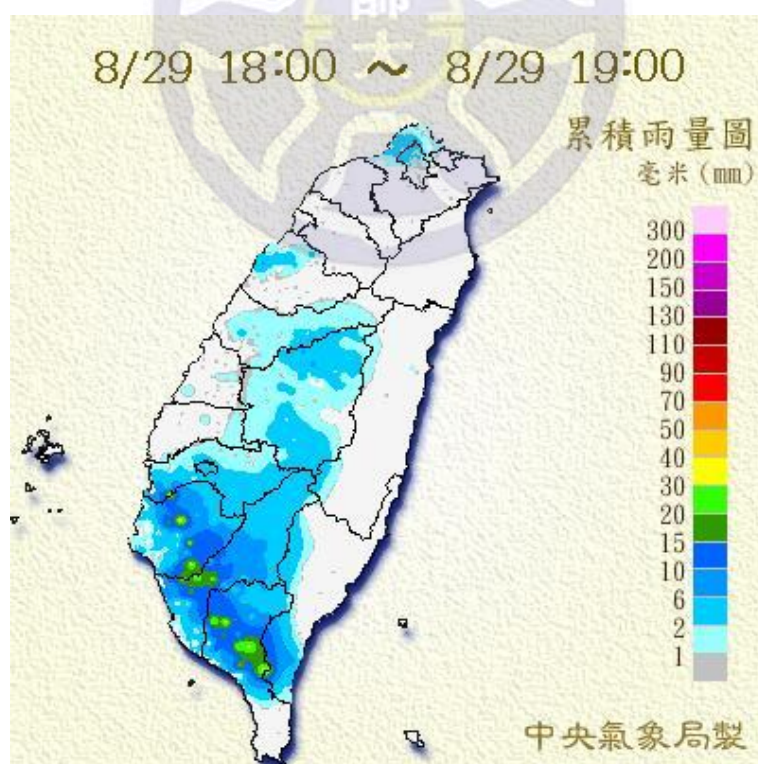


圖 3.13 s、29 日 1800 LST 至 1900 LST 之時雨量累積圖(單位：mm)。

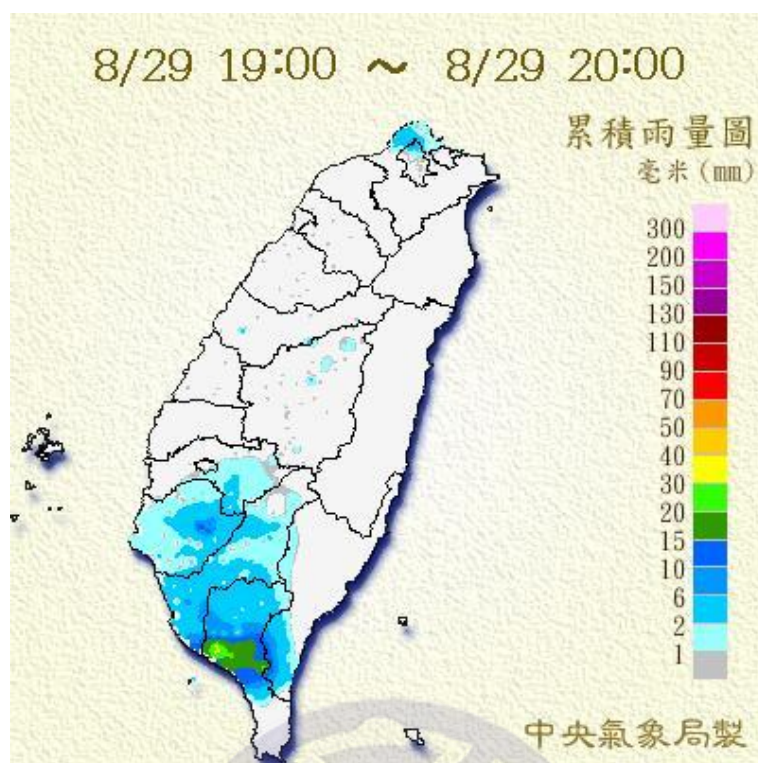


圖 3.13 t、29 日 1900 LST 至 2000 LST 之時雨量累積圖(單位：mm)。

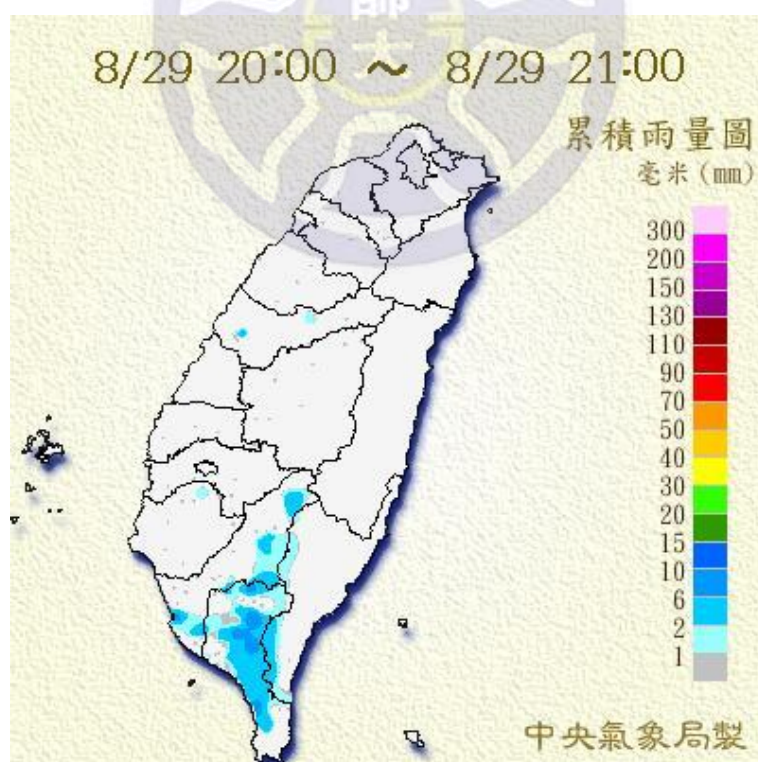


圖 3.13 u、29 日 2000 LST 至 2100 LST 之時雨量累積圖(單位：mm)。

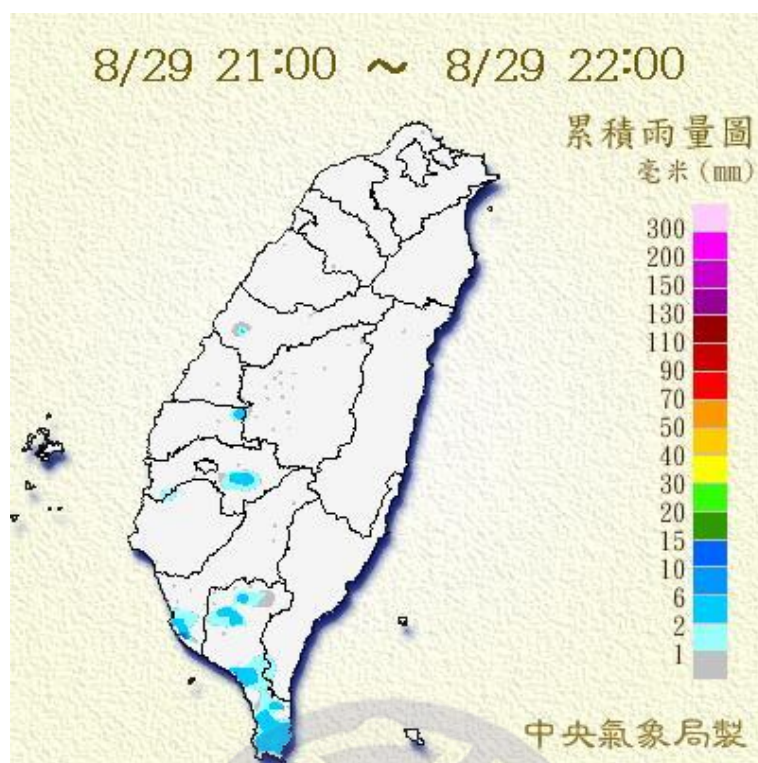


圖 3.13 v、29 日 2100 LST 至 2200 LST 之時雨量累積圖(單位：mm)。

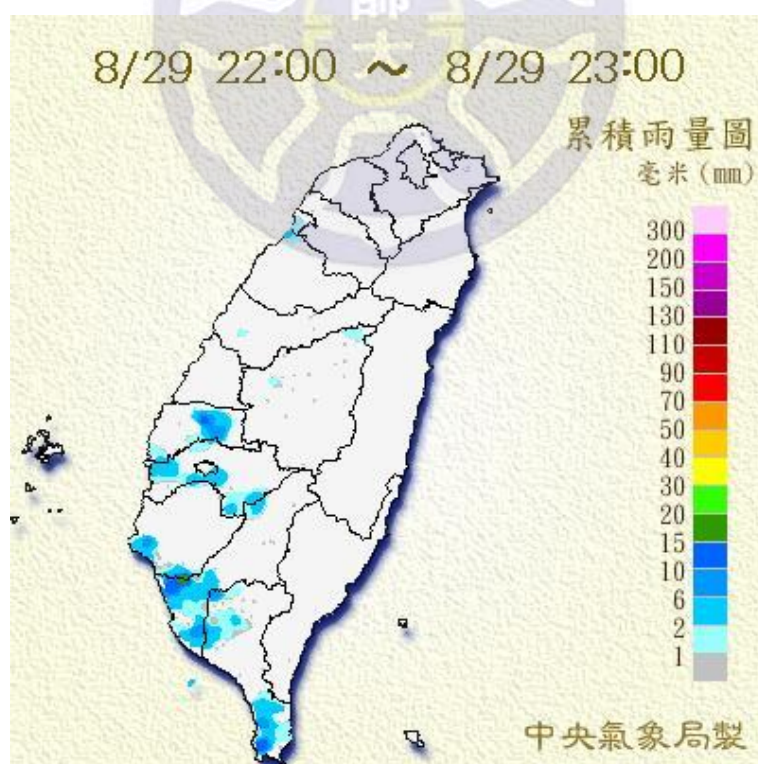


圖 3.13 w、29 日 2200 LST 至 2300 LST 之時雨量累積圖(單位：mm)。

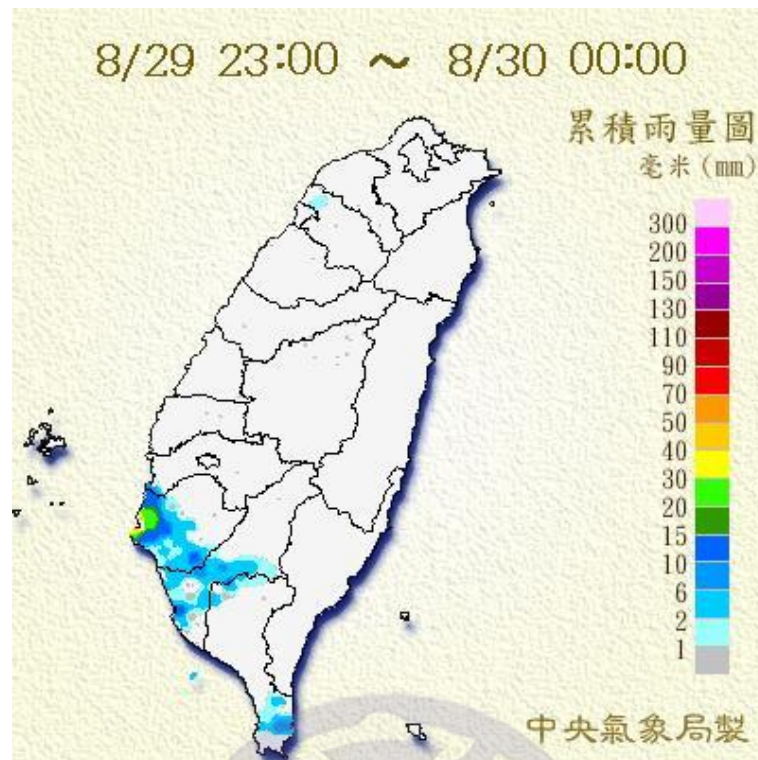


圖 3.13 x、29 日 2300 LST 至 30 日 0000 LST 之時雨量累積圖(單位:mm)。

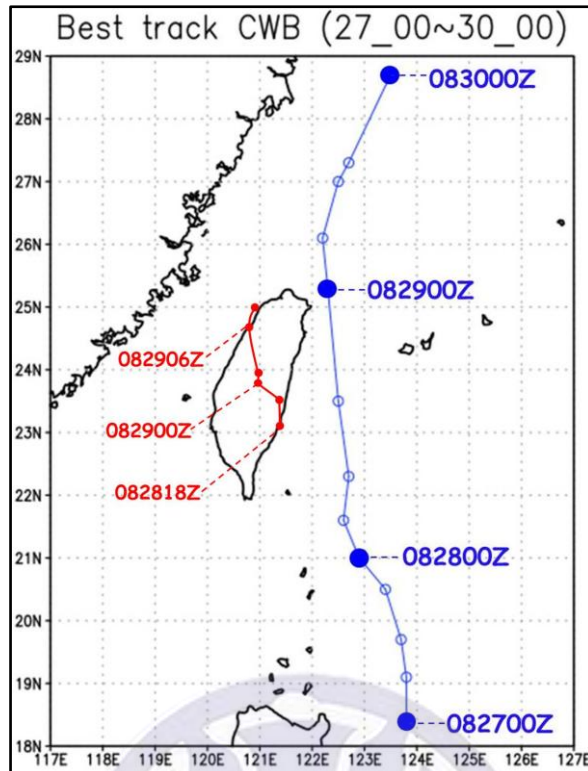


圖 4.1、中央氣象局康芮颱風每六小時之最佳路徑(藍色)及雙都卜勒風場每三小時之康芮颱風中層渦旋(約 3~6 km)路徑圖(紅色)。

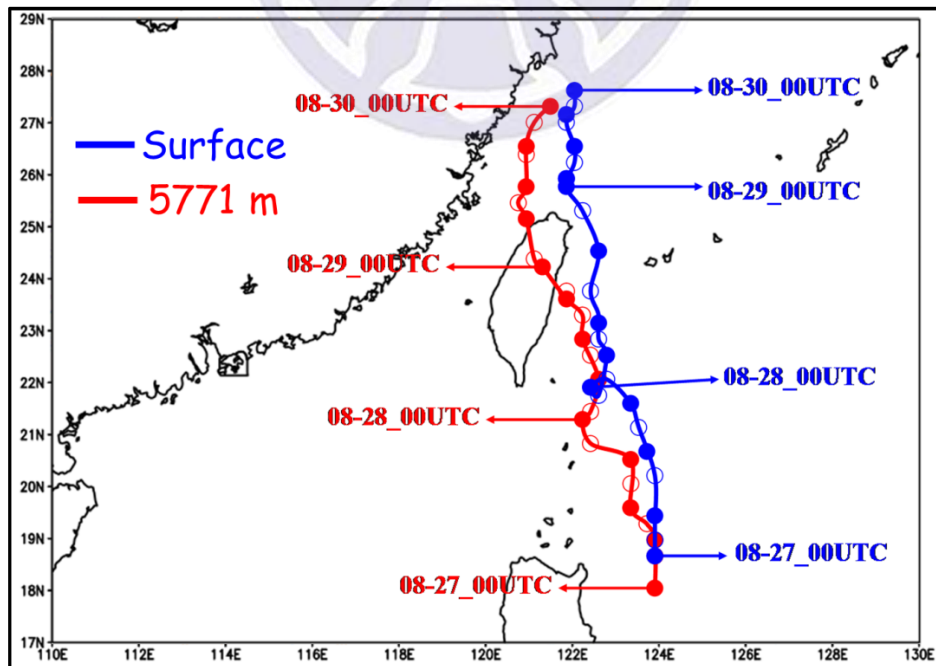


圖 4.2、CReSS CTRL Run 模擬路徑，康芮颱風海平面中心路徑(藍色)及 5771 m 中層渦旋路徑(紅色)，皆為每三小時一筆資料。

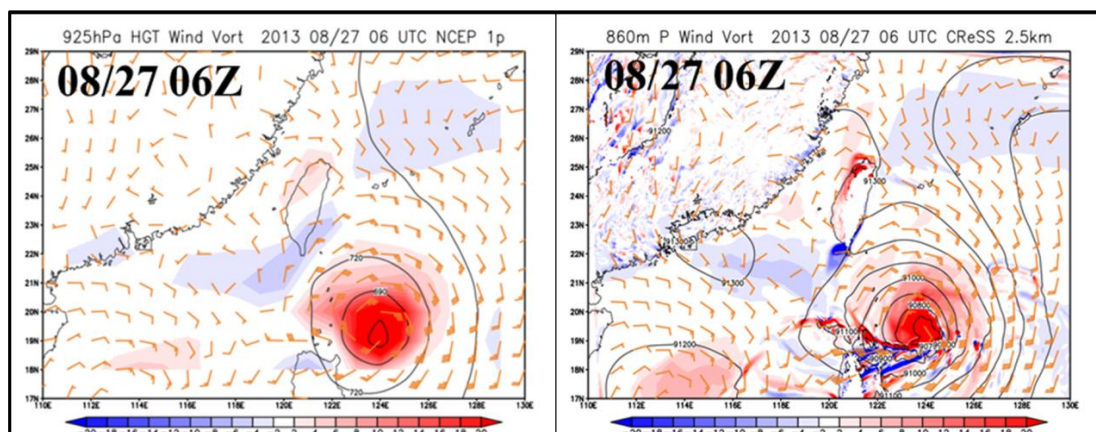


圖 4.3 a、康芮颱風 8 月 27 日 0600 UTC 之相對渦度場(10^{-5} s^{-1})、風場(knot)與高度場(左側 NCEP – GFS – 925 hPa，單位：gpm)、氣壓場(右側 CReSS CTRL Run – 860 m，單位：Pa)。

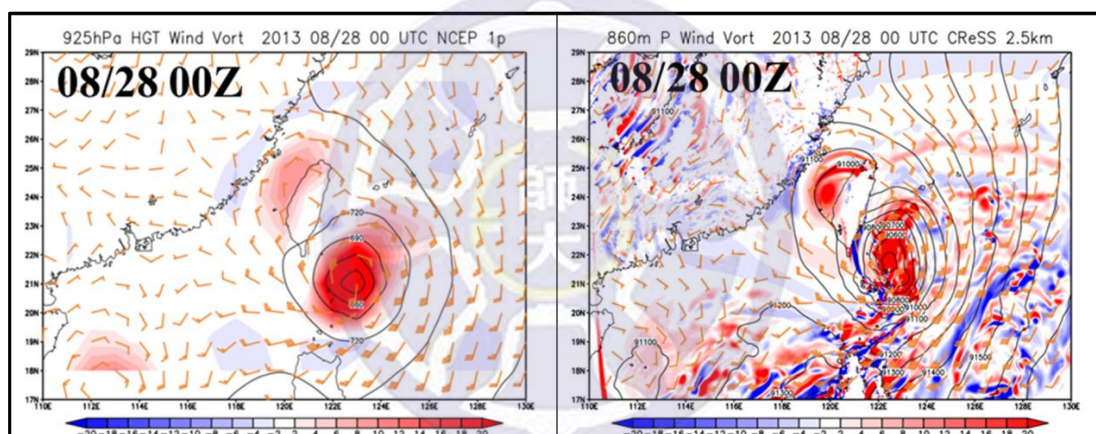


圖 4.3 b、同圖 4.3 a，時間為 8 月 28 日 0000 UTC。

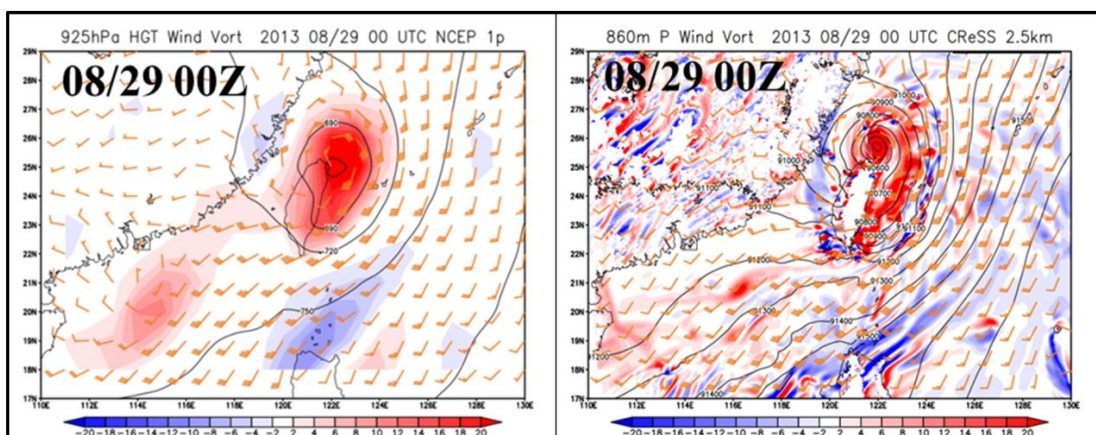


圖 4.3 c、同圖 4.3 a，時間為 8 月 29 日 0000 UTC。

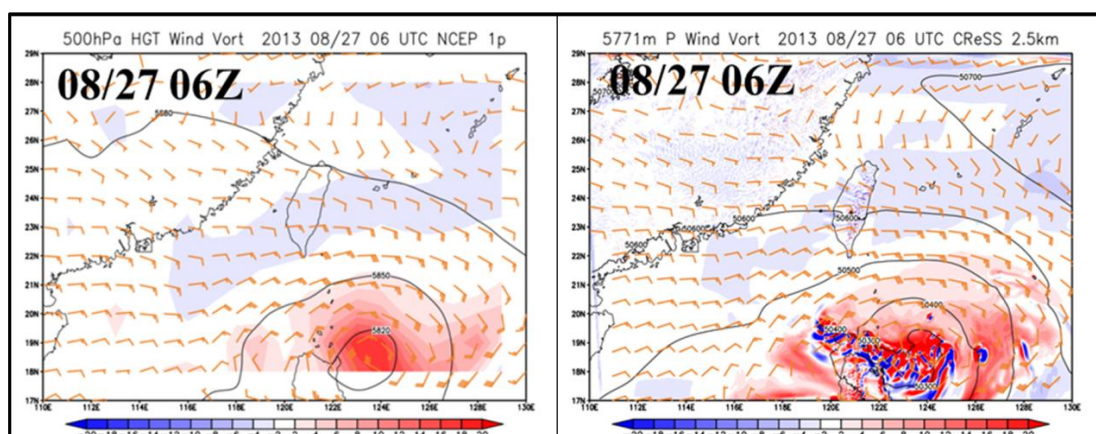


圖 4.4 a、康芮颱風 8 月 27 日 0600 UTC 之相對渦度場(10^{-5} s^{-1})、風場(knot)與高度場(左側 NCEP – GFS – 500 hPa，單位：gpm)、氣壓場(右側 CReSS CTRL Run – 5771 m，單位：Pa)。

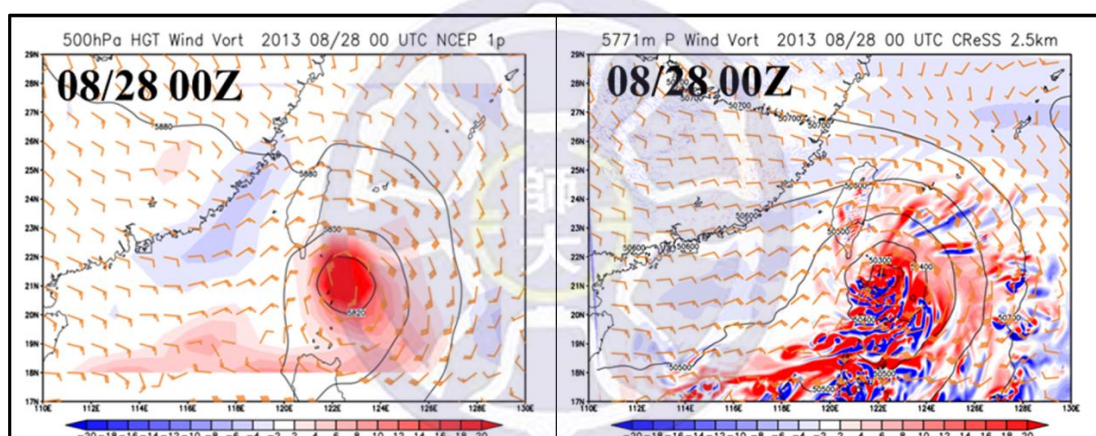


圖 4.4 b、同圖 4.4 a，時間為 8 月 28 日 0000 UTC。

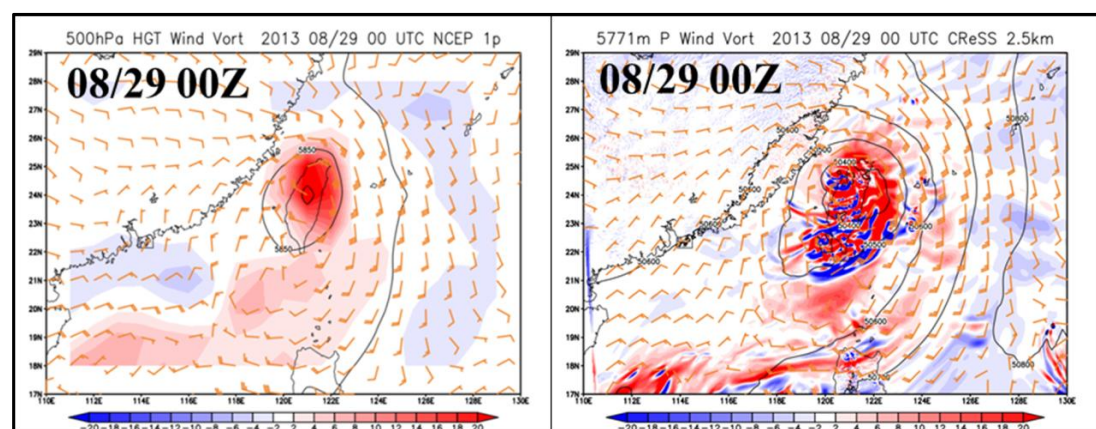


圖 4.4 c、同圖 4.4 a，時間為 8 月 29 日 0000 UTC。

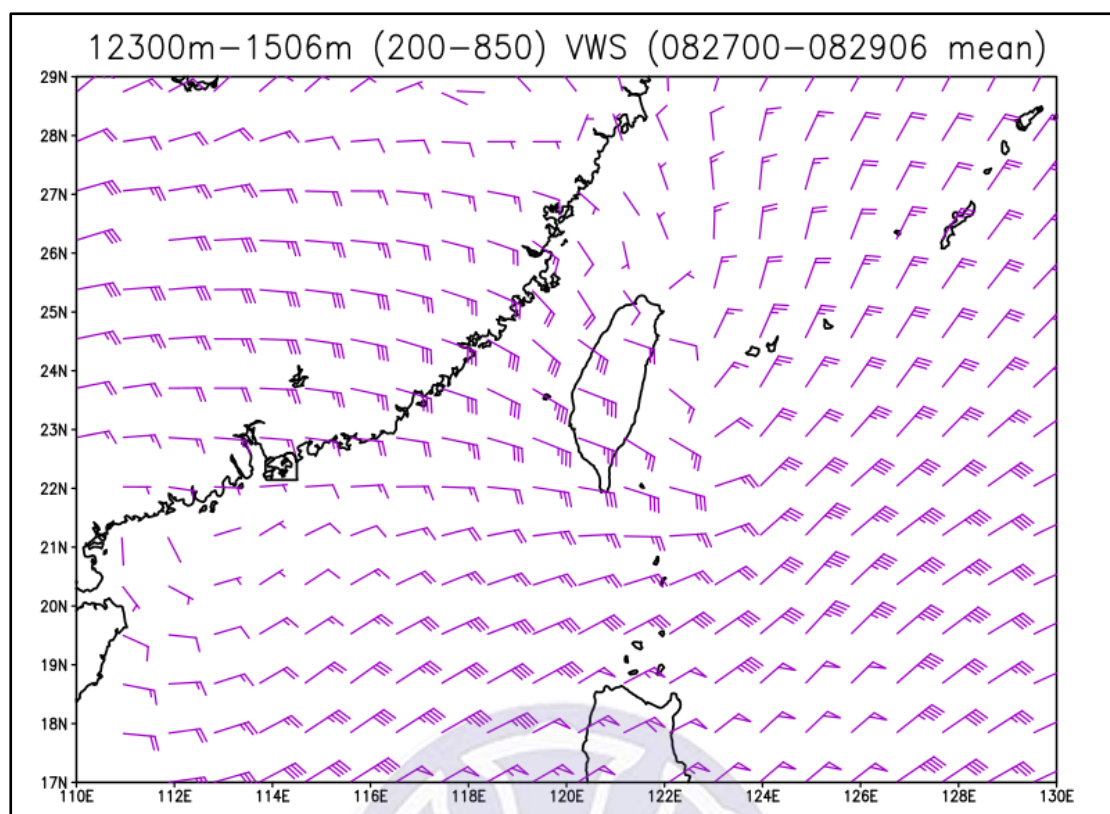


圖 4.5、12300 減 1506 m (約 200 減 850 hPa)之垂直風切(knot)，
(27 日 0000 UTC 至 29 日 0600 UTC 每一小時之時間平均)。

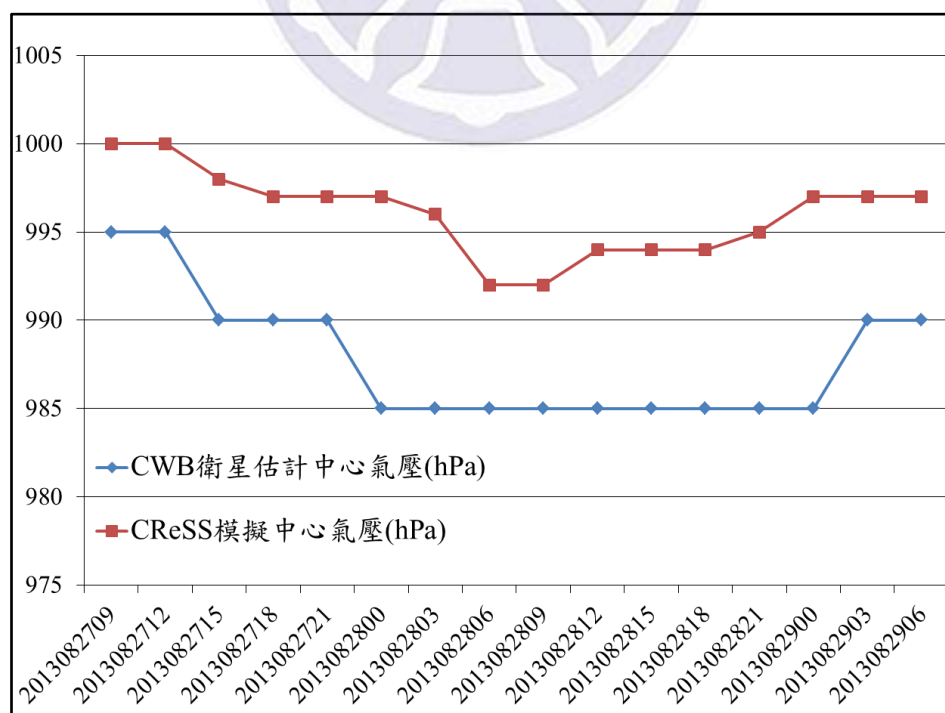


圖 4.6、康芮颱風中心氣壓變化圖，紅線(CReSS)，藍線(CWB)。(單位：hPa)

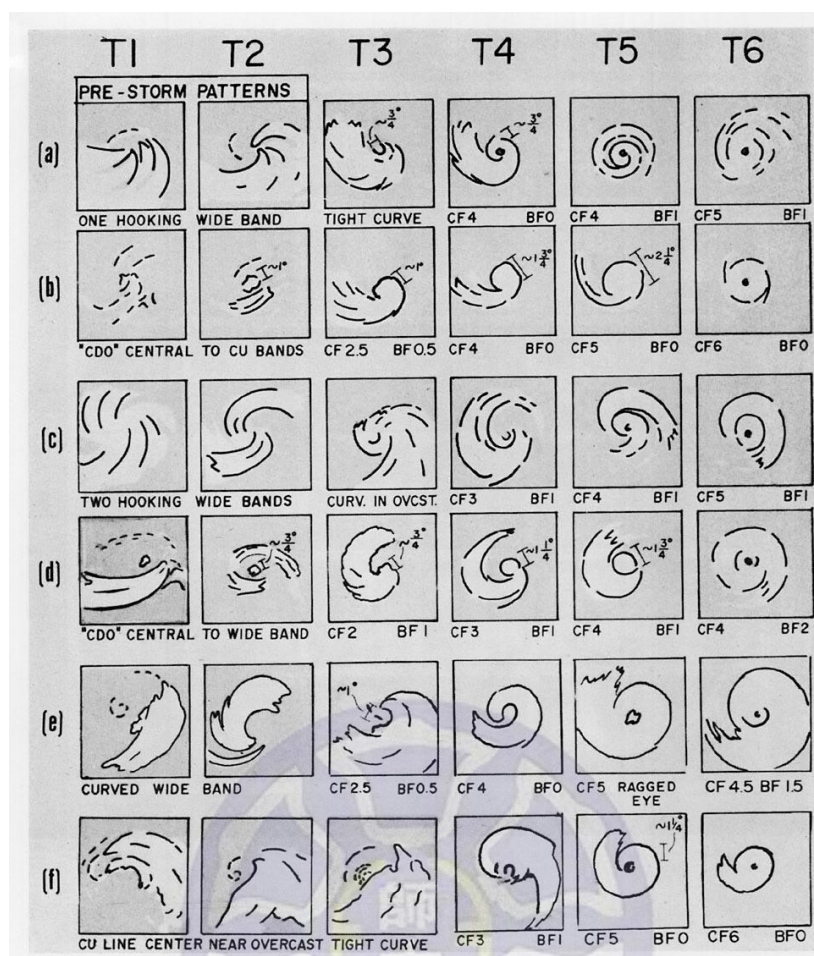


圖 4.7、Dvorak Technique 熱帶氣旋雲型判斷強度圖例。(摘自 Dvorak, 1975)

C.I. Number	MWS (Knots)	T Number	MSLP (Atlantic)	MSLP (NW Pacific)
1	25K	1		
1.5	25K	1.5		
2	30K	2	1009 mb	1003 mb
2.5	35K	2.5	1005 mb	999 mb
3	45K	3	1000 mb	994 mb
3.5	55K	3.5	994 mb	988 mb
4	65K	4	987 mb	981 mb
4.5	77K	4.5	979 mb	973 mb
5	90K	5	970 mb	964 mb
5.5	102K	5.5	960 mb	954 mb
6	115K	6	948 mb	942 mb
6.5	127K	6.5	935 mb	929 mb
7	140K	7	921 mb	915 mb
7.5	155K	7.5	906 mb	900 mb
8	170K	8	890 mb	884 mb

圖 4.7-1、Dvorak Technique 估計熱帶氣旋強度換算表。(摘自 Dvorak, 1975)

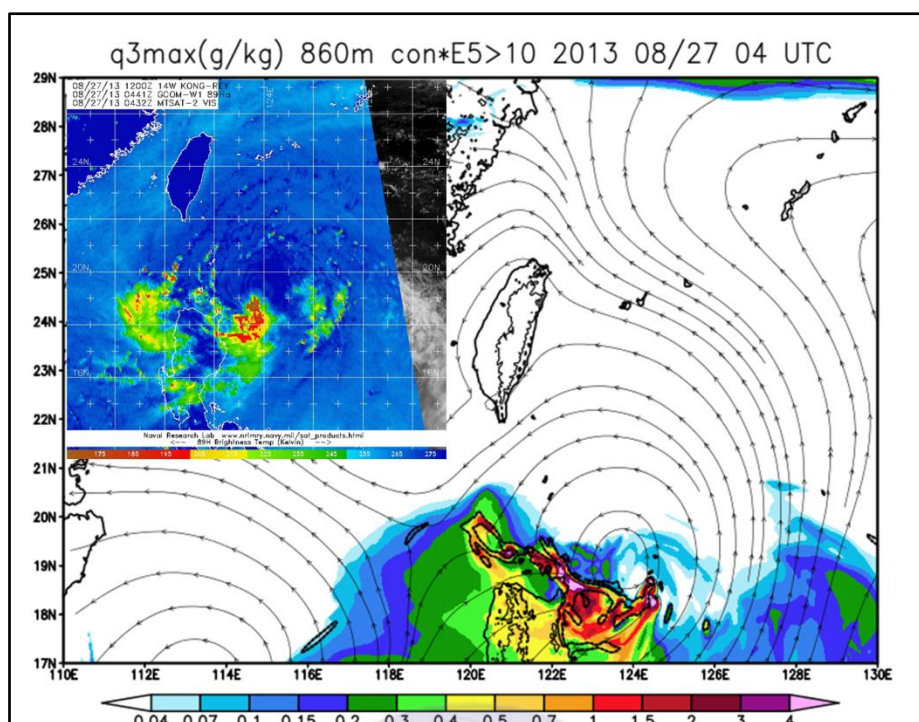


圖 4.8 a、大圖為 8 月 27 日 0400 UTC CReSS 模擬之 $q_{3\max}$ (g kg^{-1})、860 m (約 925 hPa) 之氣流線與大於 10 (10^{-5} s^{-1}) 之輻合區(粗虛線)，左上角之小圖為 27 日 0441 UTC 康芮颱風 89 GHz 之微波頻道圖像。

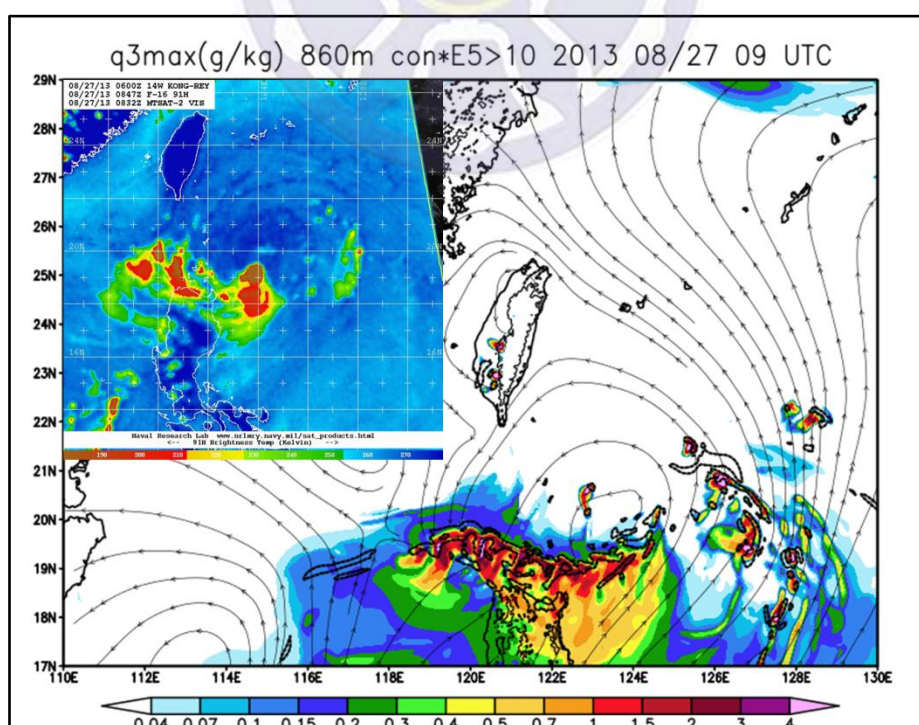


圖 4.8 b、同圖 4.8 a，大圖為 27 日 0900 UTC，小圖為 0847 UTC (91 GHz)。

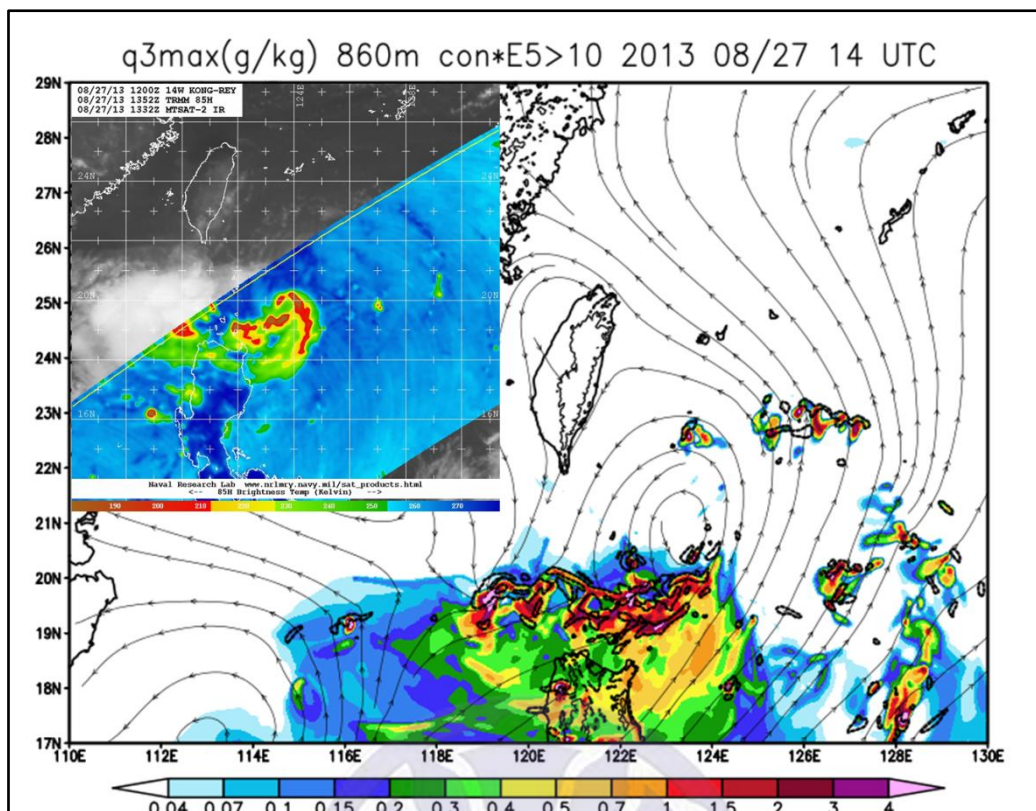


圖 4.8 c、同圖 4.8 a，大圖為 27 日 1400 UTC，小圖為 1352 UTC (85 GHz)。

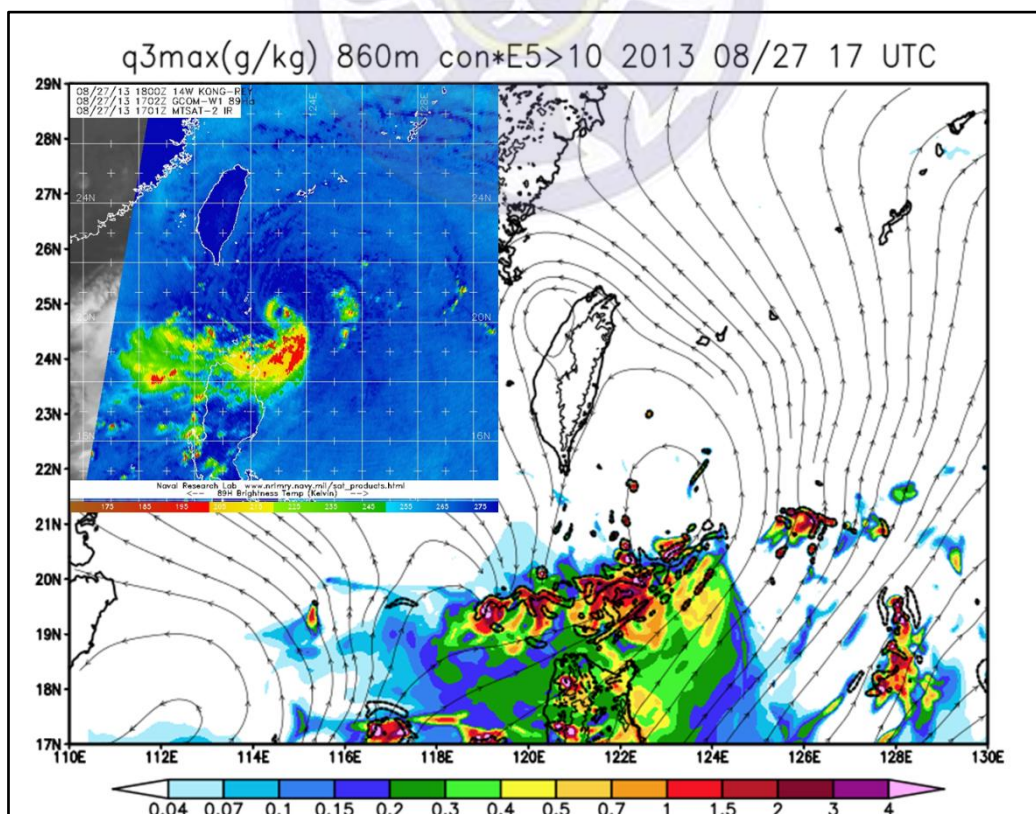


圖 4.8 d、同圖 4.8 a，大圖為 27 日 1700 UTC，小圖為 1702 UTC (89 GHz)。

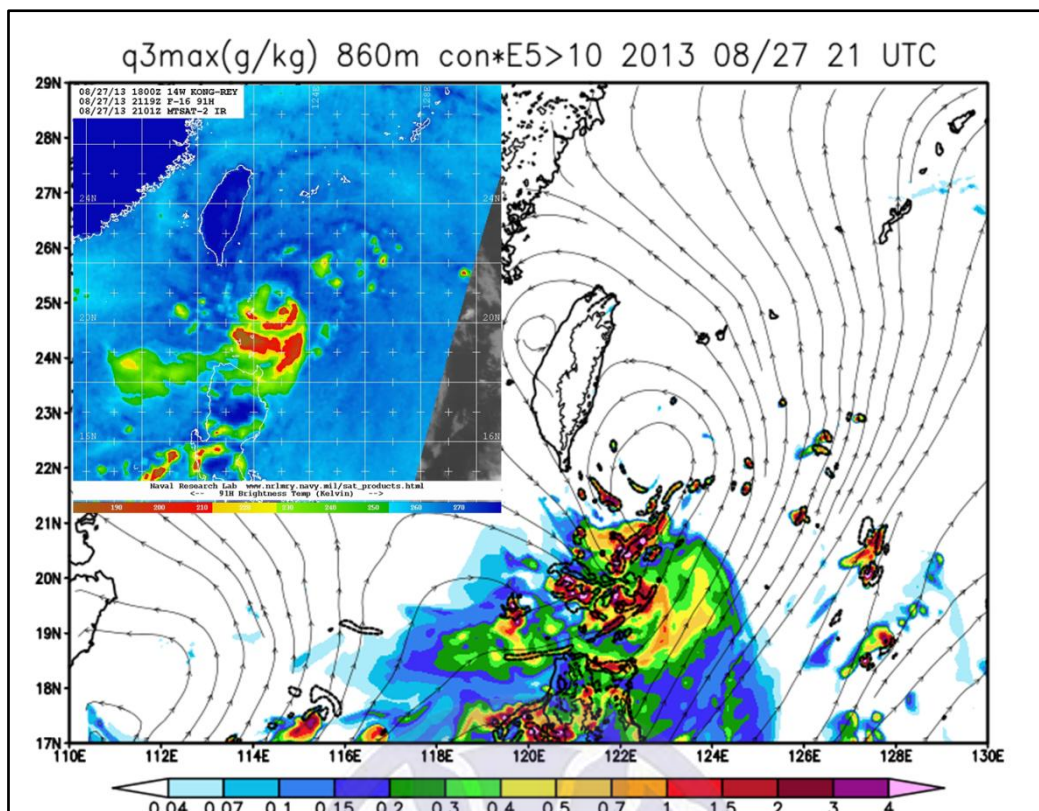


圖 4.8 e、同圖 4.8 a，大圖為 27 日 2100 UTC，小圖為 2119 UTC (91 GHz)。

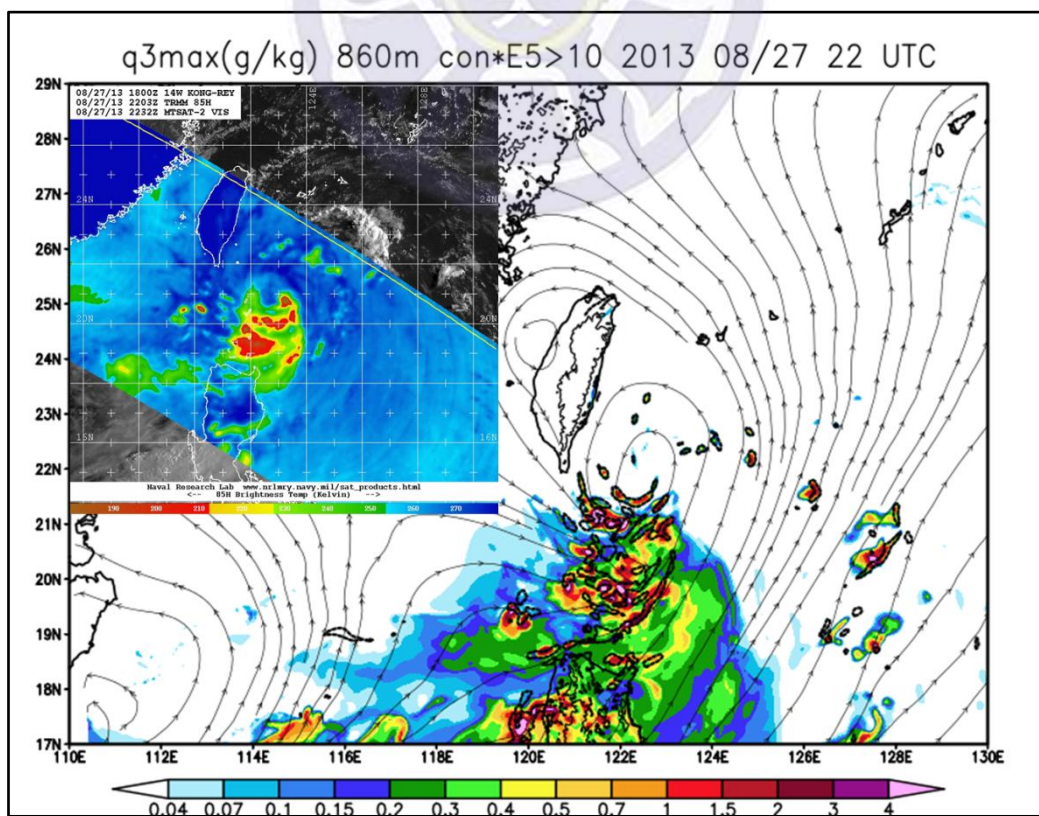


圖 4.8 f、同圖 4.8 a，大圖為 27 日 2200 UTC，小圖為 2203 UTC (85 GHz)。

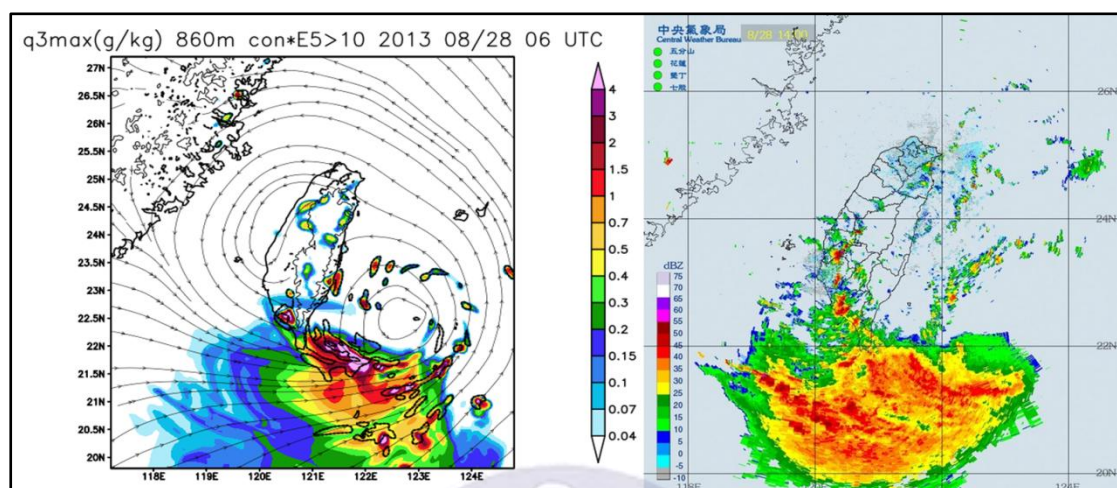


圖 4.9 a、左圖為 8 月 28 日 0600 UTC CReSS CTRL Run 模擬之 $q_{3\max}$ (g kg^{-1})、860 m (約 925 hPa) 之氣流線與大於 10 (10^{-5} s^{-1}) 之輻合區(粗虛線)，右圖為相同時間中央氣象局之雷達合成回波圖。

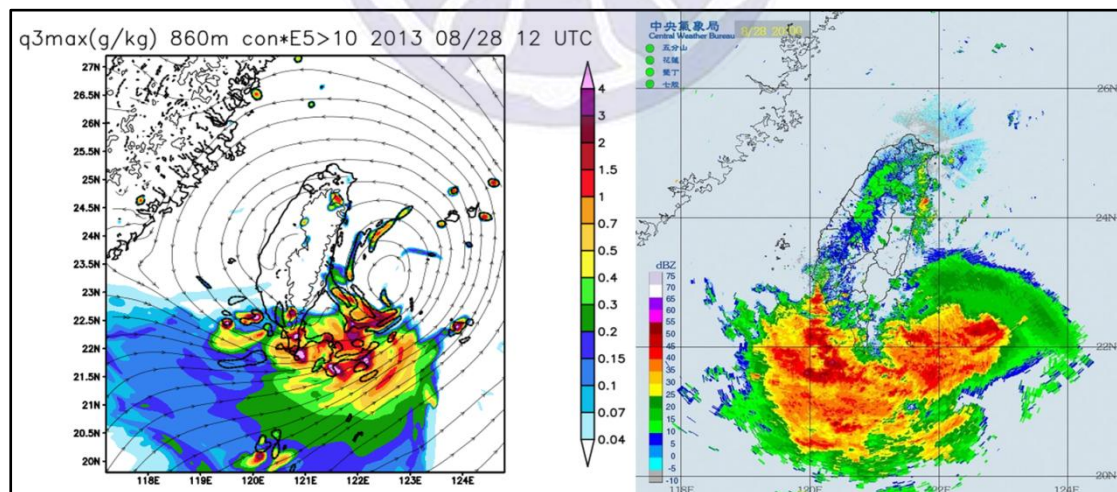


圖 4.9 b、同圖 4.9 a，時間為 8 月 28 日 1200 UTC。

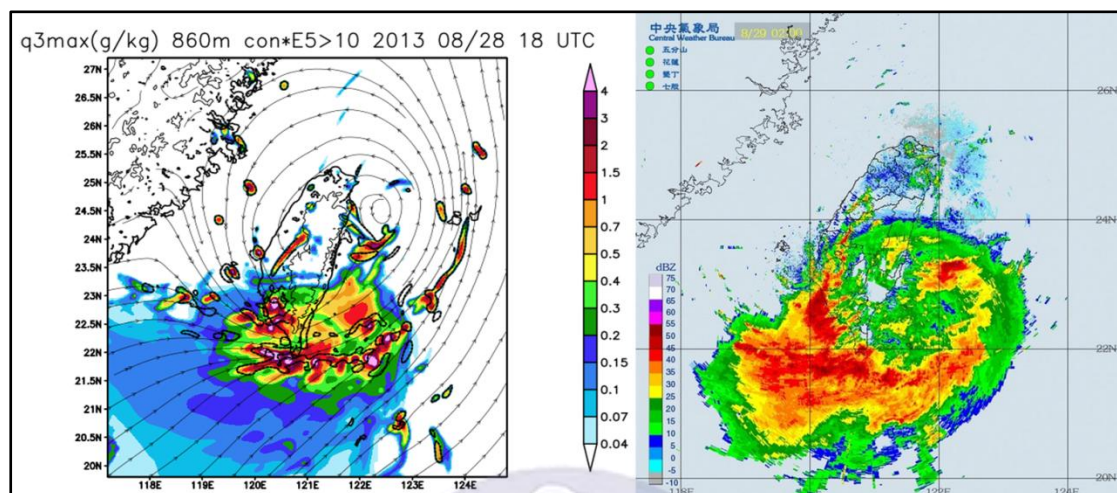


圖 4.9 c、同圖 4.9 a，時間為 8 月 28 日 1800 UTC。

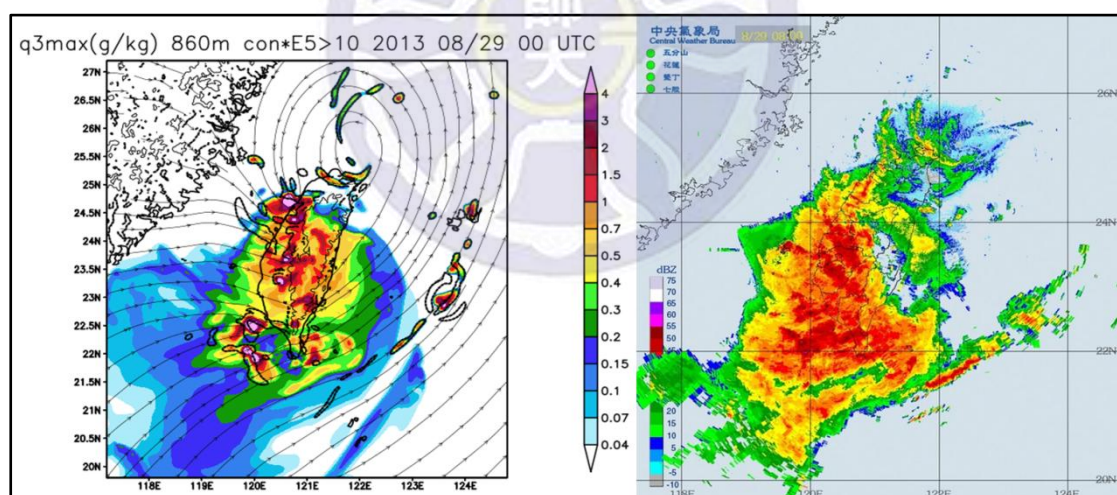


圖 4.9 d、同圖 4.9 a，時間為 8 月 29 日 0000 UTC。

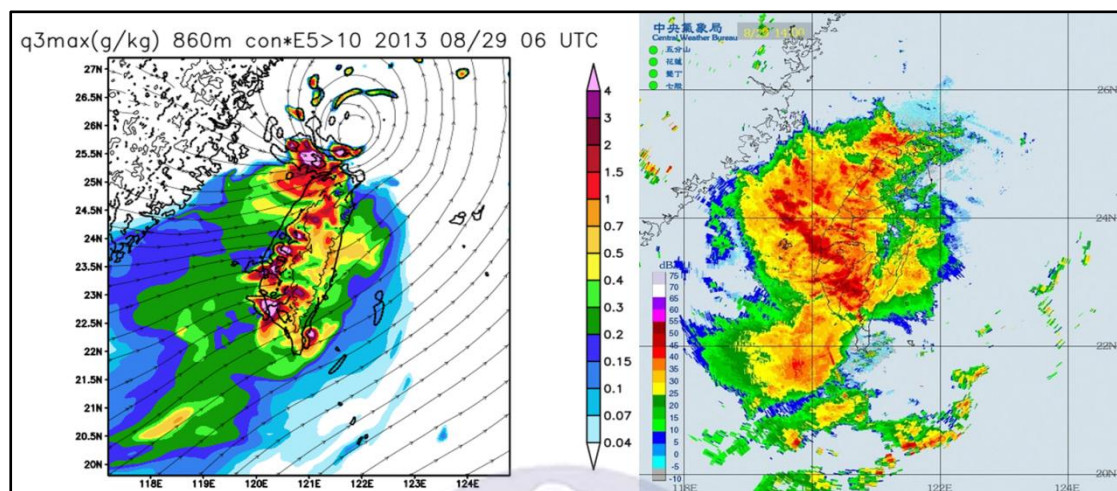


圖 4.9 e、同圖 4.9 a，時間為 8 月 29 日 0600 UTC。

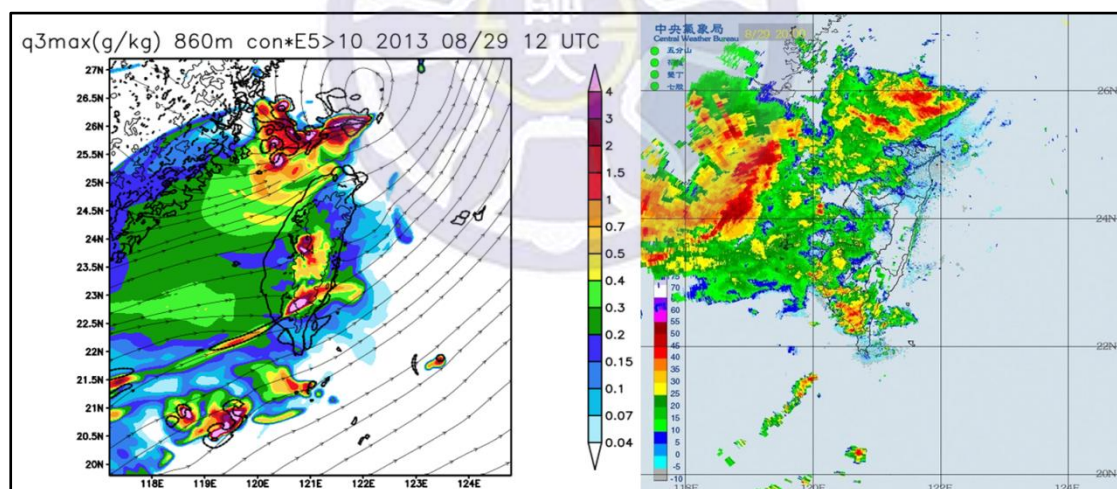


圖 4.9 f、同圖 4.9 a，時間為 8 月 29 日 1200 UTC。

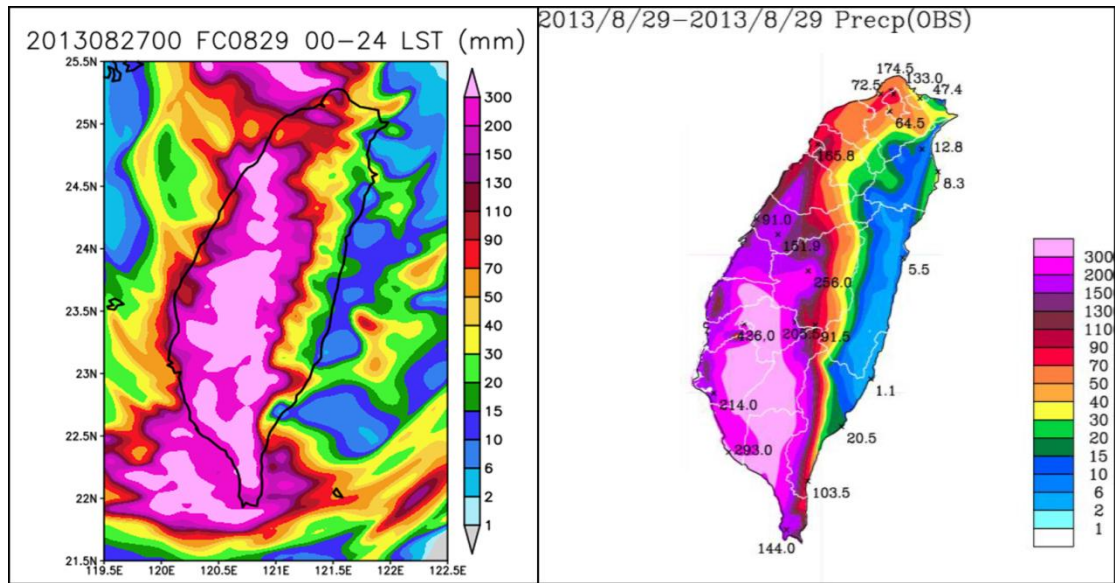


圖 4.10、8 月 29 日(地方時；LST)日累積雨量圖，左圖為 CReSS CTRL Run 之模擬結果，右圖為中央氣象局之觀測結果。(單位：mm)

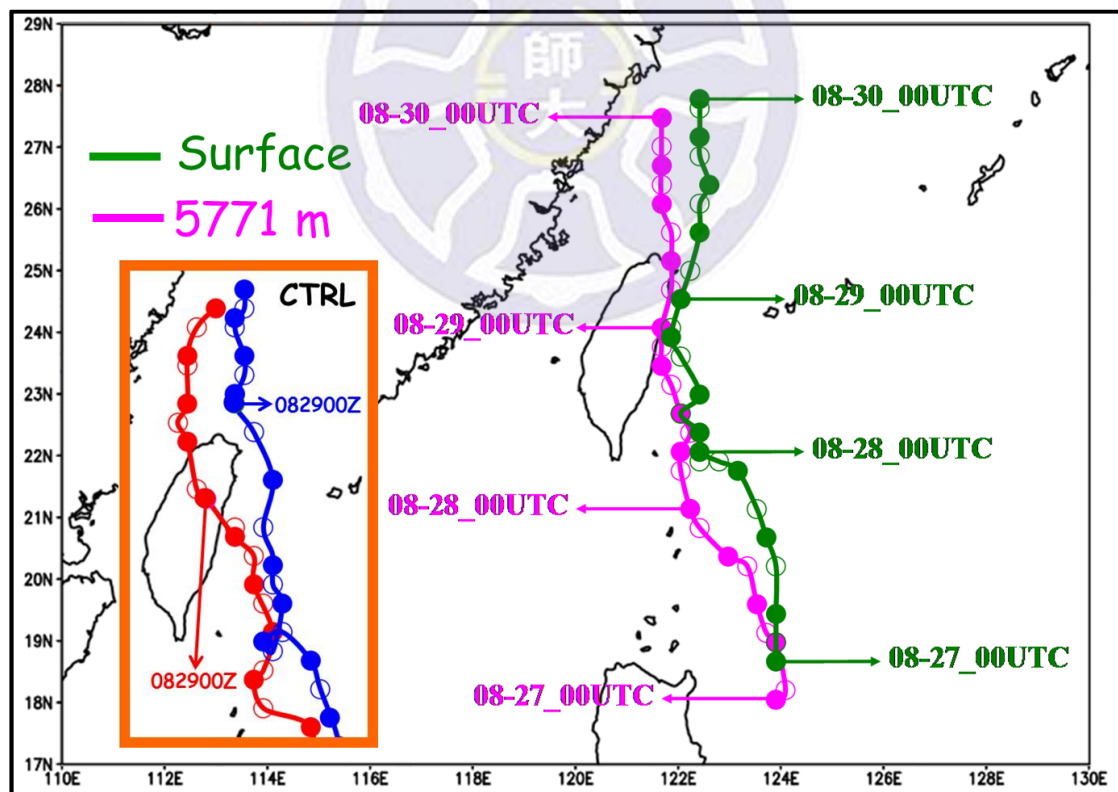


圖 4.11、CReSS NT Run 模擬路徑，康芮颱風海平面中心路徑(綠色)及 5771 m 中層渦旋路徑(桃紅色)，皆為每三小時一筆資料，左下小圖同圖 4.2。

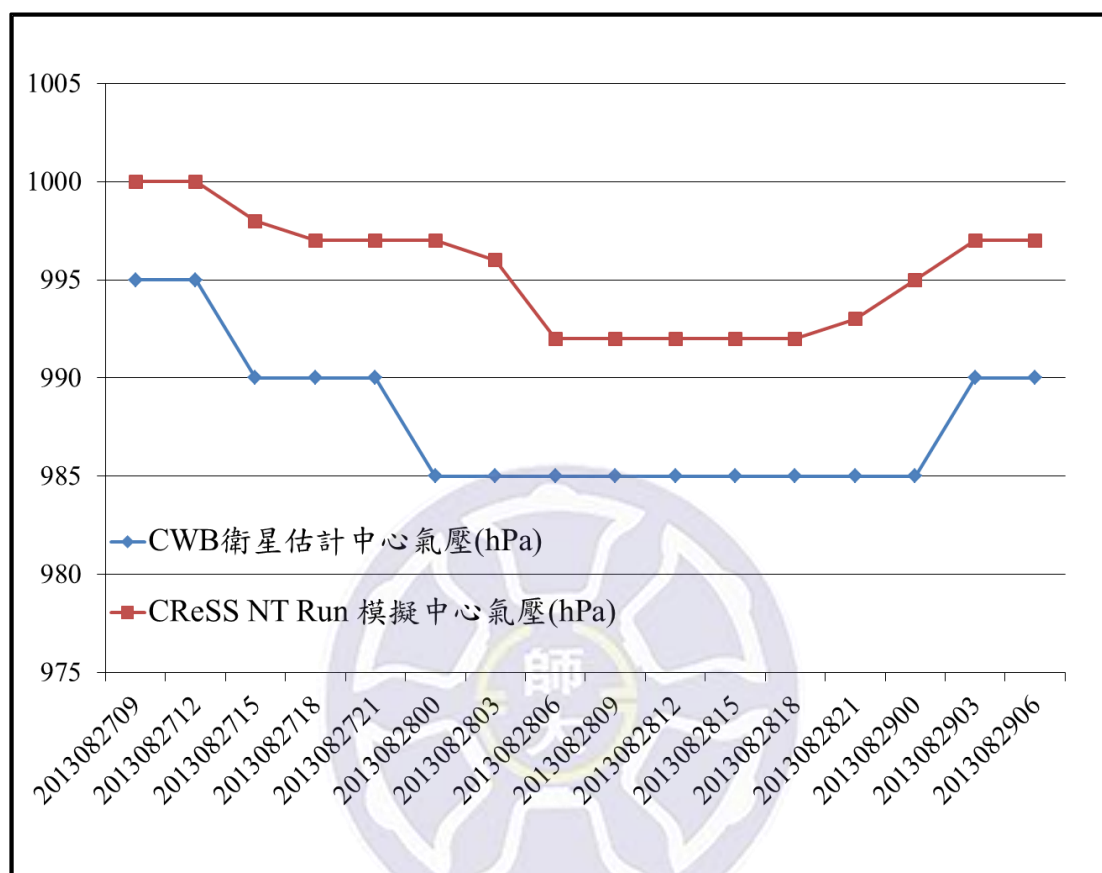


圖 4.12、康芮颱風中心氣壓變化圖，紅線(CReSS NT Run)，藍線(CWB)。
(單位：hPa)

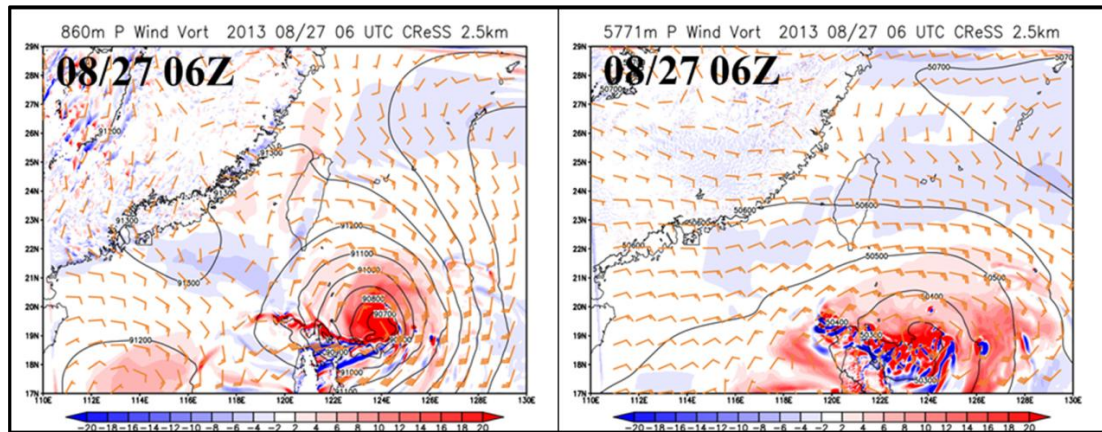


圖 4.13 a、CReSS NT Run 模擬之康芮颱風 8 月 27 日 0600 UTC 之相對渦度場(10^{-5} s^{-1})、風場(knot)與氣壓場(Pa)，左圖為 860 m，右圖為 5771 m。

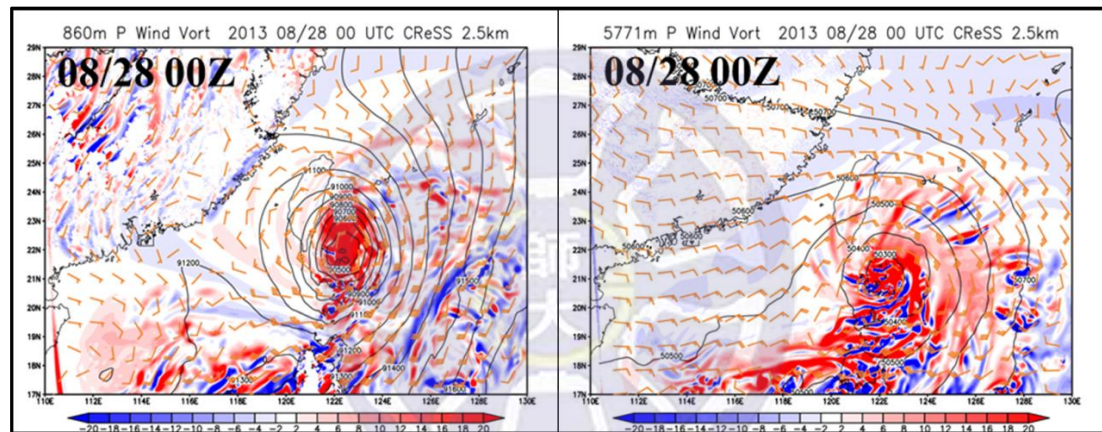


圖 4.13 b、同圖 4.13 a，時間為 8 月 28 日 0000 UTC。

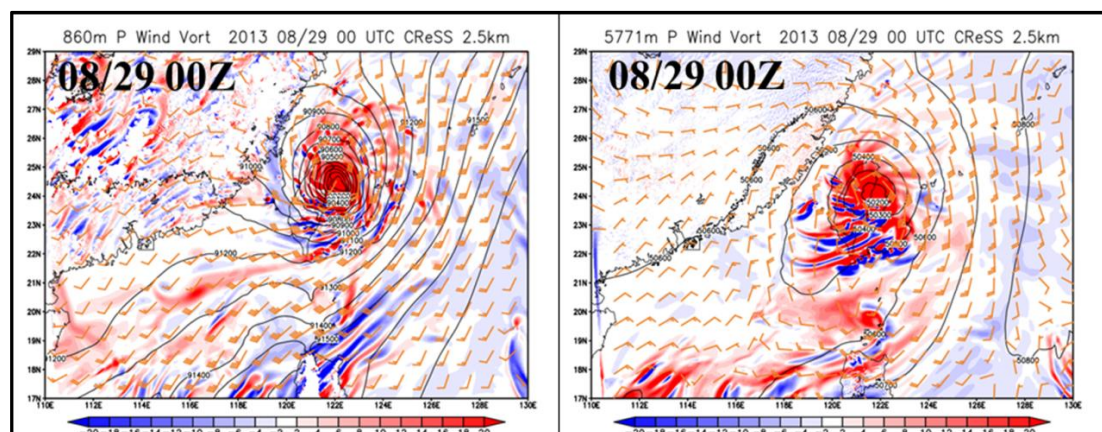


圖 4.13 c、同圖 4.13 a，時間為 8 月 29 日 0000 UTC。

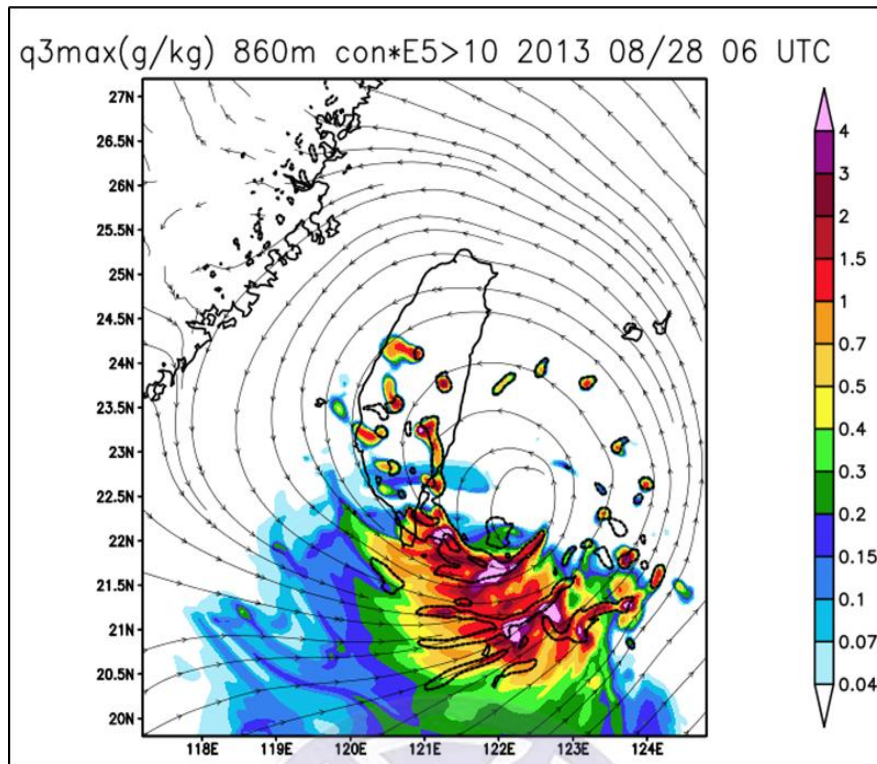


圖 4.14 a、8 月 28 日 0600 UTC CReSS NT Run 模擬之 $q_{3\max}$ (g kg^{-1})、860 m (約 925 hPa) 之氣流線與大於 10 (10^{-5} s^{-1}) 之輻合區(粗虛線)。

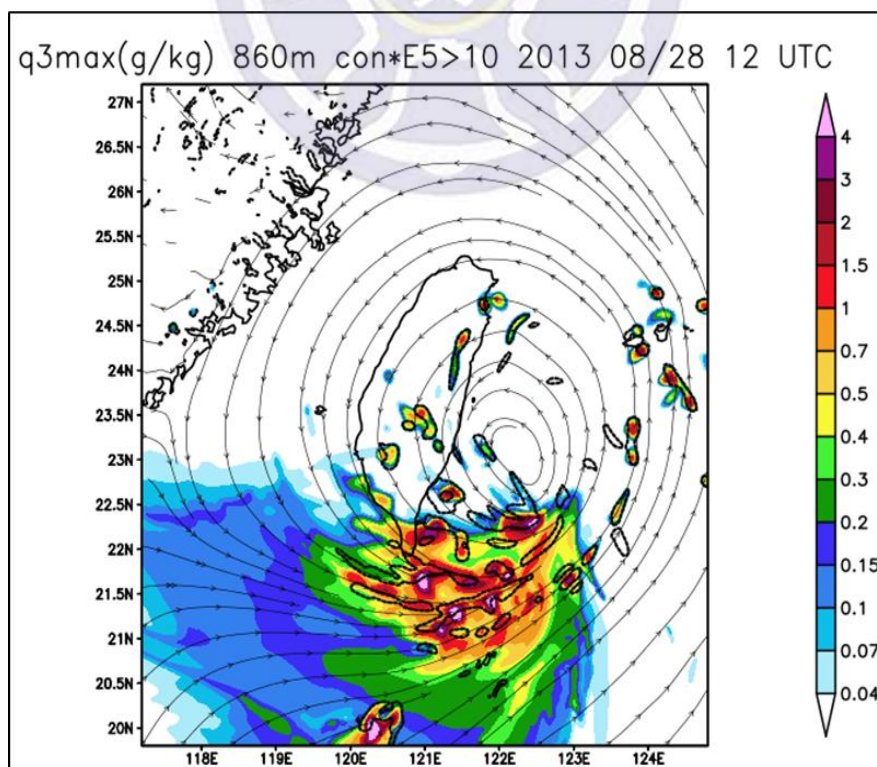


圖 4.14 b、同圖 4.14 a，時間為 8 月 28 日 1200 UTC。

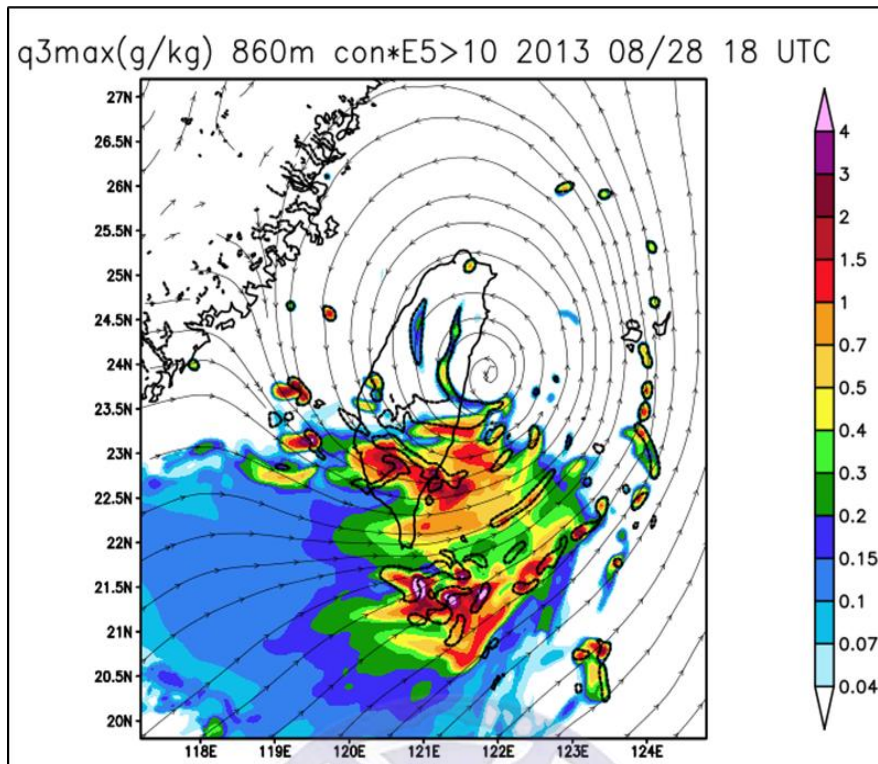


圖 4.14 c、同圖 4.14 a，時間為 8 月 28 日 1800 UTC。

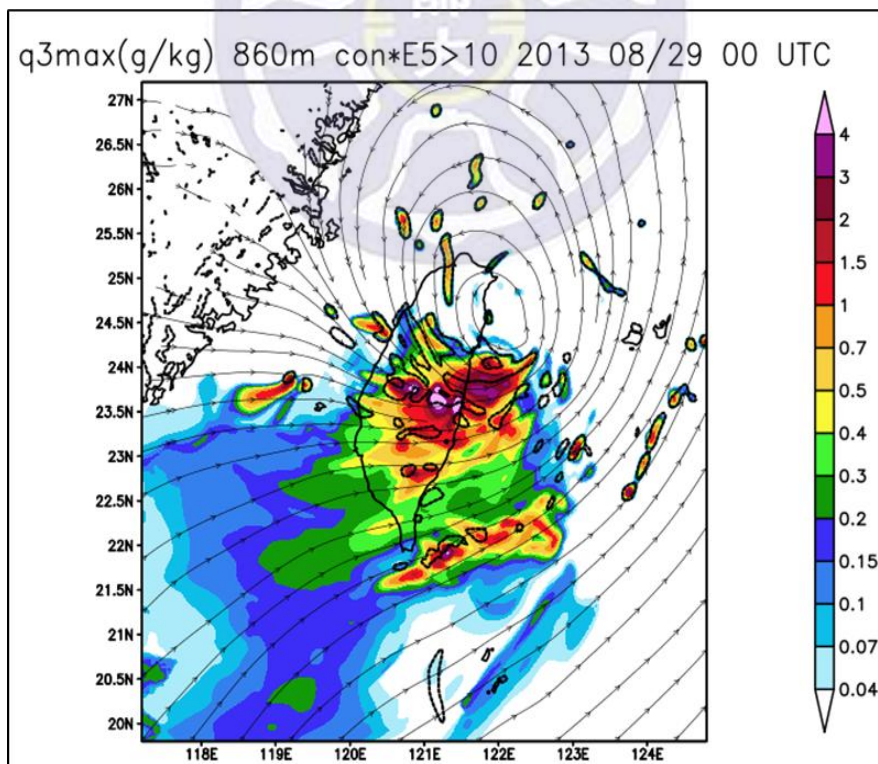


圖 4.14 d、同圖 4.14 a，時間為 8 月 29 日 0000 UTC。

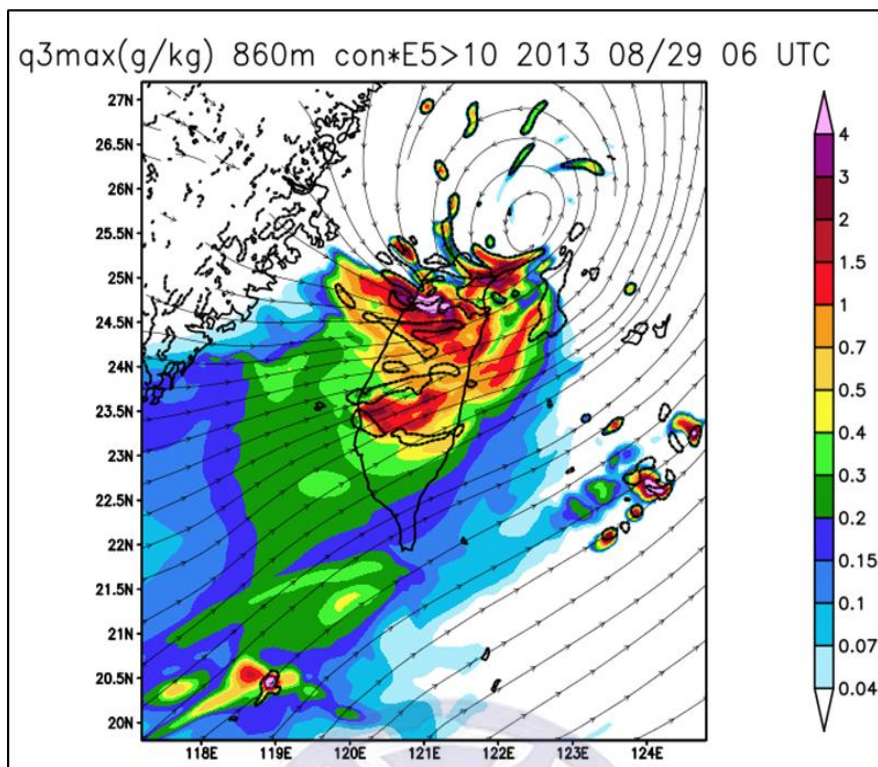


圖 4.14 e、同圖 4.14 a，時間為 8 月 29 日 0600 UTC。

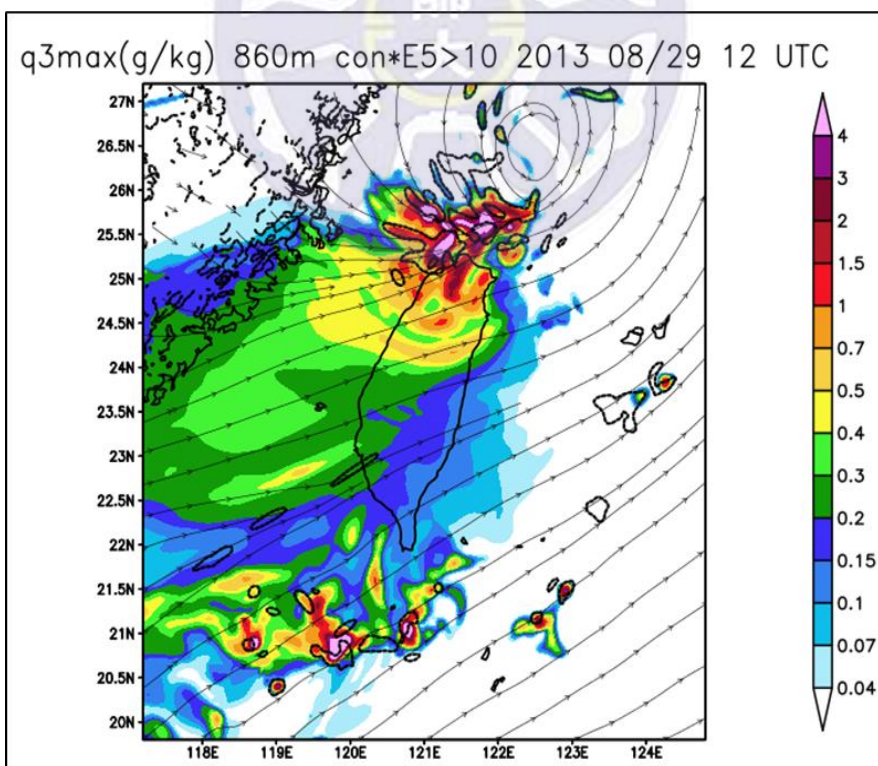


圖 4.14 f、同圖 4.14 a，時間為 8 月 29 日 1200 UTC。

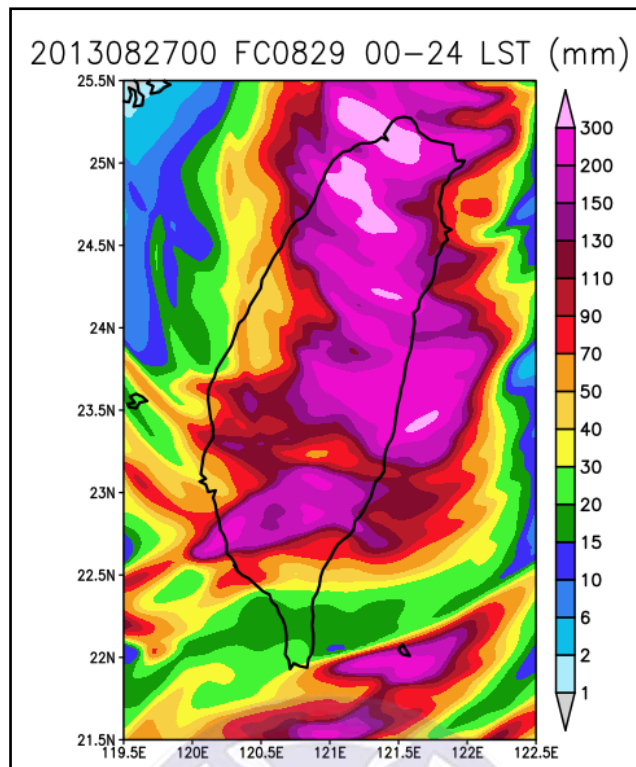


圖 4.15、CReSS NT Run 模擬之 8 月 29 日(地方時；LST)日累積雨量圖
(單位：mm)。

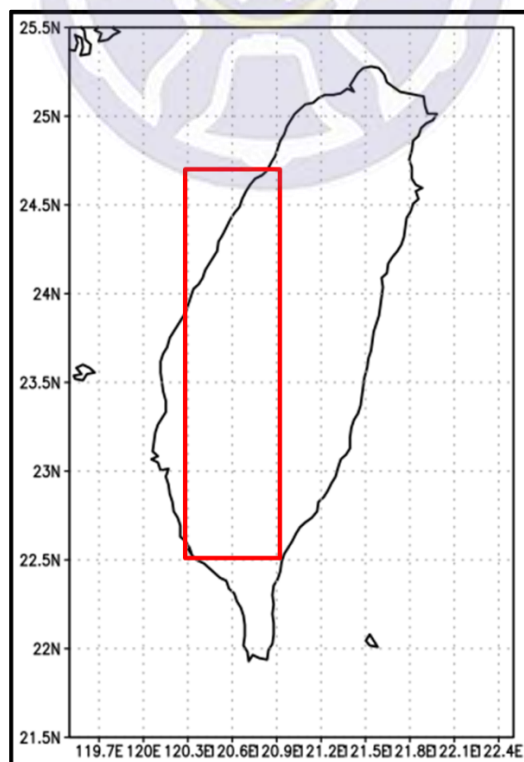


圖 4.16、位渦傾向診斷計算範圍(紅色方形區)。

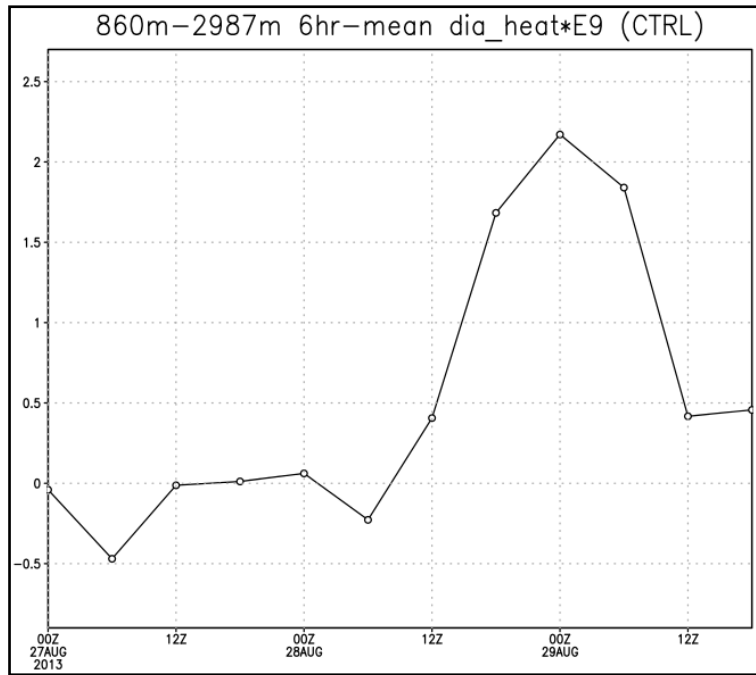


圖 4.17、CReSS CTRL Run 860 至 2987 m 位渦非絕熱項隨時間之變化圖，縱軸座標為非絕熱項量值(單位： 10^{-3} PVU s^{-1})，橫軸座標則為時間。

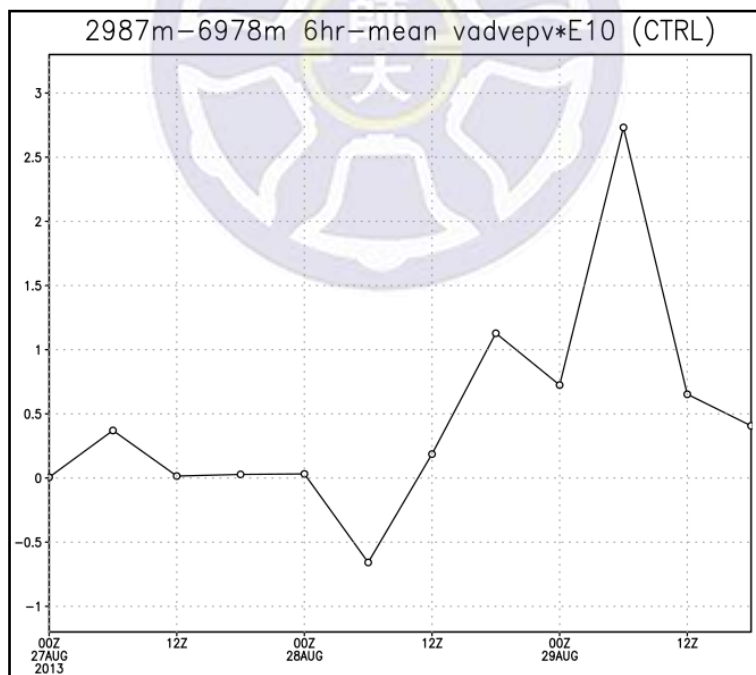


圖 4.18、CReSS CTRL Run 2987 至 6978 m 位渦垂直平流項隨時間之變化圖，縱軸座標為垂直平流項量值(單位： 10^{-4} PVU s^{-1})，橫軸座標則為時間。

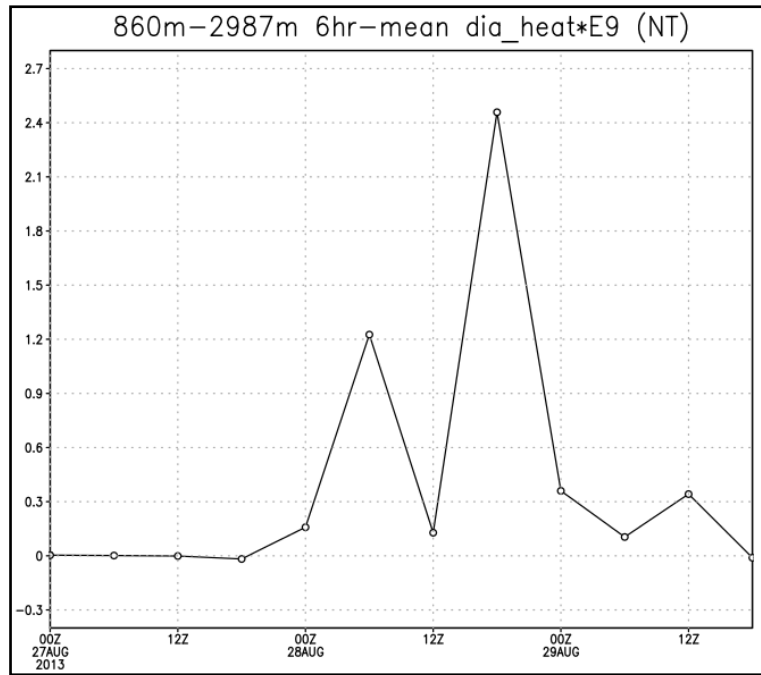


圖 4.19、CReSS NT Run 860 至 2987 m 位渦非絕熱項隨時間之變化圖，縱軸座標為非絕熱項量值(單位： 10^{-3}PVU s^{-1})，橫軸座標則為時間。

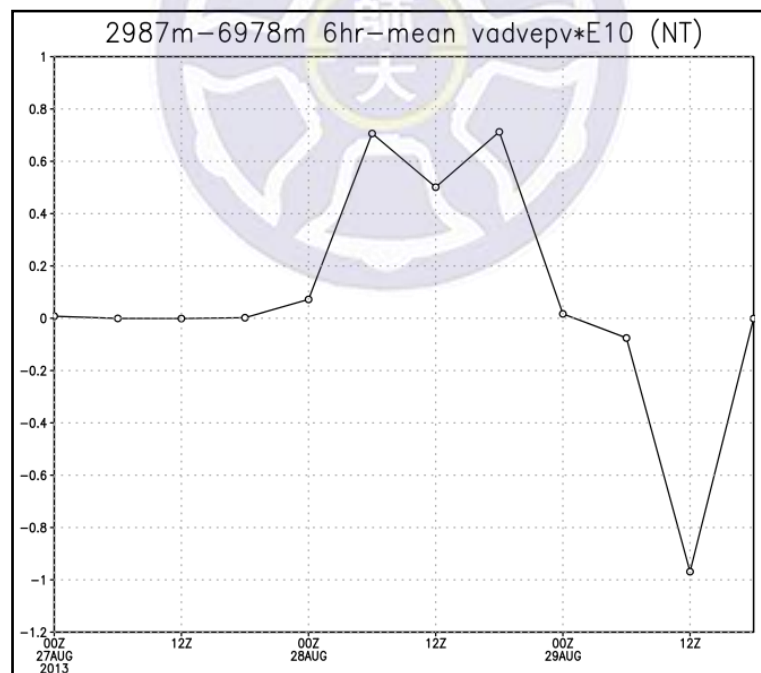


圖 4.20、CReSS NT Run 2987 至 6978 m 位渦垂直平流項隨時間之變化圖，縱軸座標為垂直平流項量值(單位： 10^{-4}PVU s^{-1})，橫軸座標則為時間。