

導致2013年8月9日南中國海劇烈亂流事件之中尺度對流系統分析

紀水上^{1,2} 劉清煌¹

¹中國文化大學大氣科學系；²真理大學通識教育中心

摘 要

本文利用半小時間距 MTSAT 紅外線衛星雲圖、地面至 200 hPa 各層天氣圖和飛機觀測快速存取記錄器 (QAR) 資料，探討導致 2013 年 8 月 9 日南海劇烈亂流中尺度對流系統 (MCS) 之形成、加強和移動機制，同時也分析該對流系統與亂流關係。結果顯示，地面~500hPa 低壓槽擾動輻合與高對流層 (~200hPa) 輻散/分流的耦合，提供對流系統形成和加強有利的綜觀環境。850~300hPa 厚度場顯示，在對流形成及加強區前 (西) 緣有明顯的分流，此意味著低對流層輻合、高對流層輻散，有利於對流系統在此區形成、加強及移動的趨勢，因此引發此劇烈亂流的 MCS 向西加強和移動。

衛星觀測顯示，對流系統因在其西南方和東北方對流雲系崩解產生下衝外流交互作用而形成。形成後，透過雲系間的合併、周圍雲系崩解等交互作用而向西加強。衛星觀測又顯示，導致亂流之對流兩側之對流呈東西走向線狀排列，且在其西側有雲簇形成與加強，導致該雲系沿著軸線向西移動。

衛星觀測又顯示，飛行路徑上，對流最強處與航線上最強風速 (15.3m/s)、最強垂直速度 (-22.9m/s)、最強風切危害因子 (F 因子)(0.8)，最大渦流耗散率 (0.77) 和飛機突降 1164ft (355m) 與最劇烈亂流強度一致。顯然，對流強弱與亂流程度成正比。

關鍵字：亂流、下衝流、交互作用、合併、渦流耗散率、快速存取記錄器

一、前言

美國國家運輸安全委員會 (National Transportation Safety Board; NTSB) 調查 2003~2007 年全美 8657 件飛機失事事件中，因天氣因素造成者有 1740 件，佔總失事案件 20.1%。在這 1740 天氣事件中，因風造成者有 1149 次 (~66.0%) 居第一位；其次為能見度/積冰 402 次 (~23.1%)；再次為高密度高度有 120 次 (~6.9%)；亂流造成者居第四位，有 114 次 (~6.6%)。引起亂流的因素可將亂流區分為：地形引發亂流、雷暴亂流、雲內亂流、山岳波亂流、對流引發亂流和晴空亂流等 (Lester, 1994)。根據 FAA (2010) 統計，上述各類亂流佔亂流總數的百分比分別為 19.7%、15.2%、19.7%、10.6%、18.2% 和 16.7%；在此等亂流中之雷暴 (15.2%)、雲內亂流 (19.7%) 和對流引發亂流 (18.2%) 等與對流系統有關，佔總亂流數的 53.1%。Comman and Carmichael (1993) 和 Bedka et. al. (2009) 等也指出，

對流引發亂流和近雲區亂流佔與亂流相關飛行事件達 60% 以上。若將 NTSB 的歸類與雷暴相關的天氣現象，如：閃電 (4 次)、雷暴 (42 次)、上衝流/下衝流 (81 次) 和陣風 (379 次) 併入計算，同時也以 60% 計算與雷暴有關的 114 次，則共計 574 次，約佔總數 33%。換言之，對流造成的亂流在天氣事件中約有三分之一，顯然對流在導致飛行事故中扮演極為重要角色。

亂流強度可分為輕度、中度、強烈和極劇烈四種類型。前兩者分別僅顛簸及飛行高度或姿態改變，但飛行員仍可控制；而後兩者分別為飛行高度或姿態有很大改變，飛行員失去控制。然而，對流引發亂流預報不像晴空亂流預報，可以從數值預報模式產品發展而成，而需要較高時空解析度的衛星觀測 (SNAPP, 2007)。高空間解析度的衛星雲圖具有提供辨識深對流/中尺度對流系統所引之：高對流層過衝雲頂 (overshooting tops)、重力波 (gravity waves) 和外流橫卷雲帶 (transverse cirrus outflow bands)；低對流層因冷空氣傾瀉至地面邊界層產生的中尺度高壓 (meso-high) 和陣風鋒面

(gust front)，以及由上層加熱、下層降溫、空氣柱被拉伸而產生的中尺度低壓 (meso-low) 亦即中尺度渦旋 (mesoscale convective vortex；MCV)。此外，高時空解析度衛星雲圖在辨識快速擴展的卷雲砧 (cirrus anvil) 和新發展中的對流系統等均扮演重要角色。

美國FAA (2010) 飛行指引指出，“當被確認有任一劇烈或強的雷達回波時，飛行員必須避開此等回波至少20哩”。此指引意味著飛機在雲砧邊緣飛行是相對安全的 (Feltz, 2010)。然而，亂流除可在劇烈雷暴上衝流上方晴空區發生外，在其周圍晴空區也有亂流發生的機會。因此，美國威斯康辛大學-氣象衛星聯合研究中心 (Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies, University of Wisconsin；UW- CIMSS)，國家大氣研究中心 (National Center for Atmospheric Research；NCAR) 和阿拉巴馬大學-漢次維校區 (The University of Alabama in Huntsville；UAH) 科學家們進行合作，提出一個以氣象衛星為基礎的即時和航空應用計畫 (Satellite-based Nowcasting and Aviation Application Program；SNAPP)，針對對流引發亂流做更進一步的診斷和預報，藉以強化飛行安全。他們針對GOES-1、MODIS和AVHRR等高解析度衛星影像進行分析，辨識引發亂流之對流雲型特徵 (如：過衝雲頂、重力波、快速擴展的卷雲砧、外流橫卷雲帶和新發展中的對流風暴等)，並配合渦流耗散率 (eddy dissipation rate；EDR) 觀測，完成識別對流引發亂流事件氣候值。EDR資料可代表被亂流大氣引發垂直速度的客觀測量，在亂流觀測中明顯優於傳統的飛行員報告 (pilot report；PIREPS)。因飛行員報告是主觀且其地點和時間與亂流事件有差異。若把EDR觀測疊加於高解析度衛星雲圖上 (包括可見光、紅外線和水氣頻道)，有助於亂流的事件之分析。因此，他們將各類引發亂流之雲系與渦流耗散率進行比對，歸納出這些雲系特徵與亂流的關係 (參閱 CIMSS, 2012；Bedka et al., 2008；Bedka et al., 2009和Lenz et al., 2009等)。

他們的研究指出，過衝雲頂附近，亂流和雲對地閃電的現象經常被發現，顯示過衝雲頂代表有顯著危害地面和空中飛行。CIMSS (2012) 指出，有58%中至更大強度亂流發生在過衝雲頂半徑約5公里處。雖然所有航班中，僅約1.25%在過衝雲頂0-5公里半徑內遭遇劇烈亂流，但卻是無過衝雲頂的12.5倍。輕度到中度強度亂流與上衝雲頂激發之重力波有關 (Bedka et al., 2008)；因當飛機飛經重力波區時，將遭遇強烈垂直運動。

大範圍強大氣亂流區經常具有寬廣雲覆蓋的特性，有時包含在可見光和紅外線衛星雲圖上清晰可辨的橫卷雲帶

(Ellrod, 1985)。此種橫卷雲帶 (transverse cirrus bands)，又稱“外流橫卷雲帶 (outflow transverse cirrus bands)”或“輻射狀卷雲帶 (radial cirrus bands)”。它們是由強對流引發的高對流層卷雲外流而成的，在雷暴生命期間的衛星雲圖上並非少見。此種雲帶也出現在噴流、熱帶氣旋外流和中緯度氣旋暖輸送帶上 (Knox et al., 2009)。經結合衛星雲圖和商用飛機之EDR分析比對發現，在橫雲帶中至少有93%出現輕度亂流的機率，出現中度亂流者有44%，顯然衛星雲圖的橫雲帶，在辨識航空亂流為一個強有利的指標 (Lenz et al., 2009)，因而已被航空氣象預報員列為預報亂流的標誌。砧雲快速的擴展指示強的高對流層輻散，伴隨發展中的對流。Bedka et al. (2009) 分析一時間序列的衛星雲圖，證實在外流層的上方/下方之間的大氣有強的垂直風切並引發亂流。

南海北部和中部不但是空中交通繁忙的區域，同時也在間熱帶輻合帶 (Intertropical Convergence Zone；ITCZ) 的劇烈對流區。但是，此區的亂流記錄報告是相當少的，以在2008年1月至2009年12月兩年間為例，飛經此區的總數達879,130架次，而中度或更大的亂流總報告僅為168次，僅佔飛行總數的0.02%。從遭遇劇烈亂流飛機的飛行資料來進一步分析亂流特質就更少 (Chan and Wong, 2014)。2013年8月9日，一架從馬來西亞飛往香港之A320班機，利用設置於其上的快速存取記錄器 (Quick access recorder；QAR) 詳實記錄了飛行期間的亂流資料。此種機載飛行資料記錄器的設置目的是提供快速、方便的方式存取原始飛行資料。該航班在當天1335UTC於南海上空 (~15.23°N/116.79°E) 遭遇劇烈亂流，飛機突然下墜1164呎 (355米)，造成一些機組人員受傷。一般而言，要獲得南海地區遭遇劇烈亂流的此種資料是不太容易的。因此，Chan and Wong (2014) 針對此資料進行分析，並利用軟體將該等資料推導垂直速度、渦流耗散率 (eddy dissipation rate；EDR) 和風切危害因子 (F因子) 等在標準QAR儲存資料中是無法得到的。分析結果指出，在遇到此顯著亂流時，飛機經歷風速的遽增、強下衝流、強水平風切危險因子和在飛行中量測亂流強度最重要的高層渦流耗散率。

Chan and Wong (2014) 又探討數值模式在此劇烈亂流事件的表現，結果顯示，世界區域預報系統 (World Area Forecast System) 的在積雨雲範圍和在雲內亂流潛勢產品，在亂流發生區及其鄰近地區有些許顯著亂流的跡象。甚至在事件發生前24至27小時，中尺度數值預報模式預報有中度至劇烈亂流發生的可能性。但，他們也指出利用任何數值預報產品預報在航線上劇烈亂流災害是困難的，機載雷達和快速

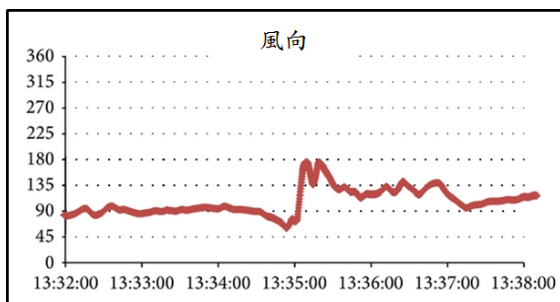
獲得衛星影像將是避免亂流的關鍵工具。SNAPP計畫也指出，對流引發的亂流 (convectively- induced turbulence ; CIT) 不像晴空亂流的預報可由數值預報產品獲得，CIT預報需要較高時空解析度的雲觀測，此種資料只有人造衛星可以提供。

分析亂流發生歷程，天氣是唯一的因素，而中尺度對流系統 (Mesoscale Convective Systems ; MCSs) 是主角。從一時間序列高解析度MTSAT衛星雲圖得知，在此劇烈亂流發生的時間有一發展良好的MCS由東向西移至亂流發生的地點。Chan and Wong (2014) 雖已對此個案進行相當深入的分析，且提供許多寶貴的結果。但筆者等認為，若再詳細分析該期間高時空解析度的衛星雲圖，除有助於從衛星雲圖辨識亂流發生地點外，又可提供了解引發該亂流事件對流系統之形成、加強和移動過程。

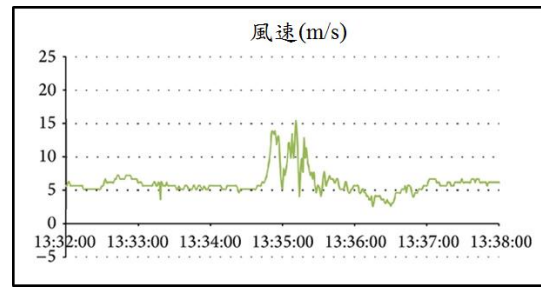
二、資料

圖1為A320飛機遭遇劇烈亂流 (1335 UTC) 前後 (1332~1338 UTC) 之飛行資料。風向時間序列 (圖1a) 中，在亂流發生前後，風向從東風轉為南風，之後又轉為東南風。在亂流發生期間之風速變化 (圖1b) 顯示有幾個震盪，最大達15m/s以上 (13:35:11 UTC之15.2m/s和13:35:11.25 UTC之15.3m/s)，遠較事件發生前及後 (約5m/s) 為大。垂直速度變化 (見圖1c) 顯示，飛機在事件中似乎遭遇強的下衝流，其下降速度達22m/s (13:35:07 UTC之-21.19 m/s、13:35:07.25 UTC之-22.28 m/s和13:35:07.5 UTC之-22.94m/s)，此顯示有一強的風切條件。風切危害因子 (F因子) (圖1d) 顯示，事件期間在+0.8和-0.6之間震盪，此值遠高於發布低空風切警報之傳統閾值 (thresholds) (-0.105)，和決定低層風切報告閾值 (-0.05)。

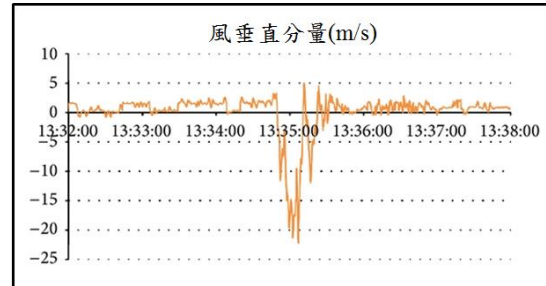
飛機高度和EDR見圖1e和圖1f，該航班遭遇劇烈亂流 (13:35:00 UTC) 前幾分鐘 (13:32:00 UTC) 飛行高度在34000呎 (10363m)，亂流前幾分鐘 (13:34:55 UTC) 開始爬升，至13:35:07 UTC爬到最高為34272ft (10446m)。之後，急速下降，13:35:33 UTC降至最低，為33108ft (10091m)。在短短的26秒 (13:35:07 UTC至13:35:33 UTC) 間，飛機下降了1164ft (355m)。至13:36:48 UTC回到34000ft的飛行高度 (參見圖1e)。



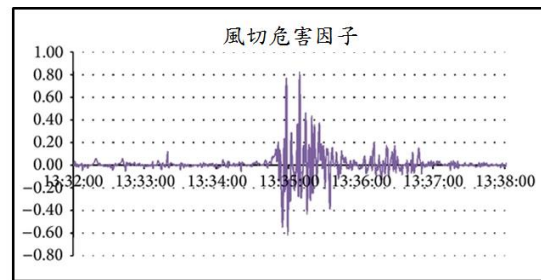
(a) 風向



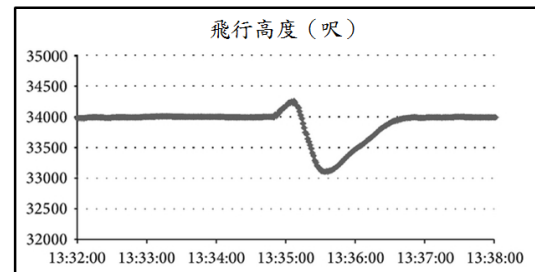
(b) 風速



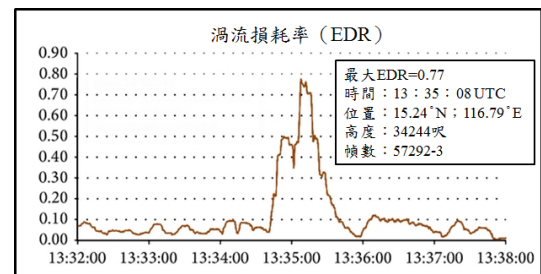
(c) 風垂直分量



(d) 風切危害因子



(e) 飛行高度



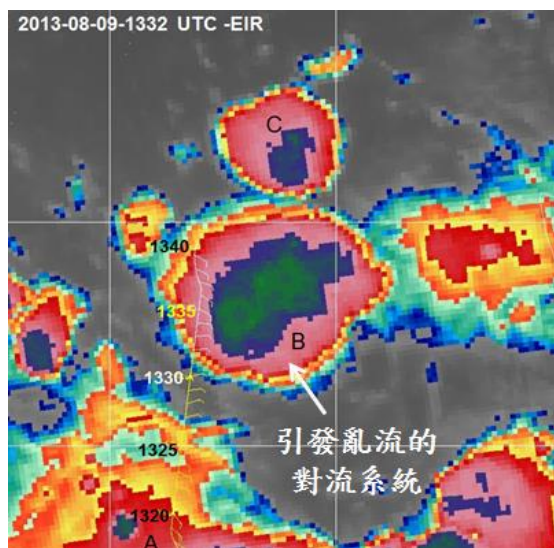
(f) 渦流損耗率

圖1 A320飛機飛行資料時間序列 (13:32~13:38) (摘自Chan and Wong, 2014)。

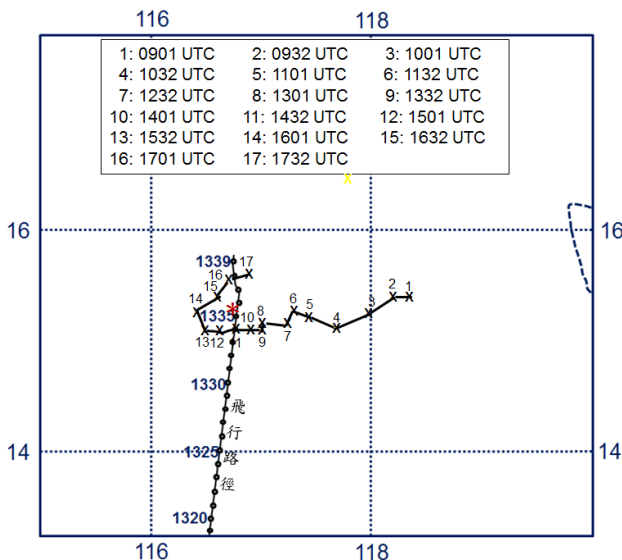
在事件期間，EDR也達到相當高的值， $EDR^{1/3}$ 有兩個高峰，一個達 $0.5m^{2/3}S^{-1}$ ，另一甚至達到 $0.77m^{2/3}S^{-1}$ 。前者自13:34:51 UTC之0.45增至13:34:53.5 UTC之0.50達最強後開始微降，但至13:34:57.25 UTC尚在0.49以上（共維持3.75秒）。後者自13:35:06.75 UTC之0.61急速增加，13:35:07.25增為0.70，至13:35:08 UTC達最大(0.77)，之後開始減弱，但至13:35:16.25 UTC都維持在0.7以上（維持9秒），13:35:17.25 UTC降為0.61。此兩個EDR值已分別達強烈和極強烈亂流（Lane et al., 2012；Lester, 1994）。

此次亂流發生於2013年8月9日1335UTC，地點在

~15.23°N/116.79°E。天氣是造成此次亂流事件的主要原因，而對流系統卻是導致此次亂流的主角。與亂流事件發生最接近的衛星雲圖為9日1332UTC（見圖2a）。圖2a顯示，有5個以上有組織的對流系統活躍於南海地區，在A320班機航線上（見圖2a伴有風羽之南向北直線）就有三個強而有組織的MCSs，分別以A、B和C字母代表MCS-A、MCS-B和MCS-C。其中MCS-B為造成劇烈亂流的主要系統。MCS-B於9日0901 UTC約在15.36°N/118.39°E，亦即在呂宋島西方172.5公里/亂流處東方172.5公里的南海海面上空形成，形成後向西移動（見圖2b）。



(a)



(b)

圖2 導致亂流之 (a) 對流系統雲系特徵及 (b) 對流中心軌跡（由東向西移動）和遭遇亂流飛機之飛行路徑（伴有風羽之由南向北直線）。路徑上小黑點為飛機飛行時所在位置，標有紅色「*」標誌為亂流發生時間及位置。

SNAAP 觀測實驗計畫（2007）指出，EDR資料可代表被亂流大氣引發垂直速度的客觀量測，在亂流觀測明顯優於傳統的飛行員報告（PIREPS）。因此，在亂流部分，本研究利用遭遇此次亂流事件13：32 UTC～13：38 UTC每秒四次觀測之EDR報告。該項資料包括位置、氣壓高度、風速、風向、EDR、垂直風分量、F-因子，其格式如表一。

表一 飛機EDR觀測格式（觀測間距：4次/秒）。

時間	緯度	經度	氣壓高度 (ft)	風速 (m/s)	風向	EDR	垂直風分量(m/s)	F-因子
13:35:07	15.23821	116.7891	34272.02	9.7736	164.6875	0.656408	-21.1866	4.98E-02
13:35:07.25	15.23872	116.7892		10.64567	161.9933	0.702022	-22.2774	-0.27963
13:35:07.50	15.23924	116.7892		11.67045	159.2555	0.737684	-21.9355	-0.27958
13:35:07.75	15.23975	116.7893		12.64701	156.5056	0.760326	-19.3848	-0.14935
13:35:08	15.24027	116.7893	34244	13.3744	153.775	0.770824	-18.0695	0.290226

上面所述，對流系統是導致此次亂流事件的主要天氣系統。然而，該亂流系統是形成於觀測資料缺乏的南海海域，且形成時的尺度僅數公里。因此，一般

傳統觀測無法解析其形成、加強和移動。要對此亂流系統進一步了解，需要較高的時空解析度的衛星雲圖。雖然亂流發生在9日的1335UTC，但為了解該亂流系統之演

變 (evolution) 及與亂流的關係，本研究採用對流系統整個生命過程之衛星雲圖，時間為 2013 年 8 月 9 日 0901 UTC ~ 10 日 0300 UTC 半小時間距之 MTSAT 紅外線雲圖。

雖然發展良好的深對流雲，其雲頂很高、溫度很低，不論在可見光或紅外線雲圖上均顯現白亮色調，然而其雲頂比較光滑，只當出現穿透性（過衝雲頂）強對流時，在可見光雲圖上，太陽角度低時才能顯現不均勻的紋理。然而，此事件對流雲之形成與加強在入夜及深夜時分，已無可見光雲圖可用，一般未經特別處理的紅外線雲圖無法辨識其特徵（見圖 3a），因此，本文特將此等雲圖進行色調強化，如圖 3b。比較圖 3a 及 3b，在圖 3a 之 MCS 雲系呈現白亮的勻滑特徵，無法解析該 MCS 的結構，而圖 3b 的色調強化雲圖顯示，雲頂溫度梯度清晰可辨，也容易確定對流中心位置。

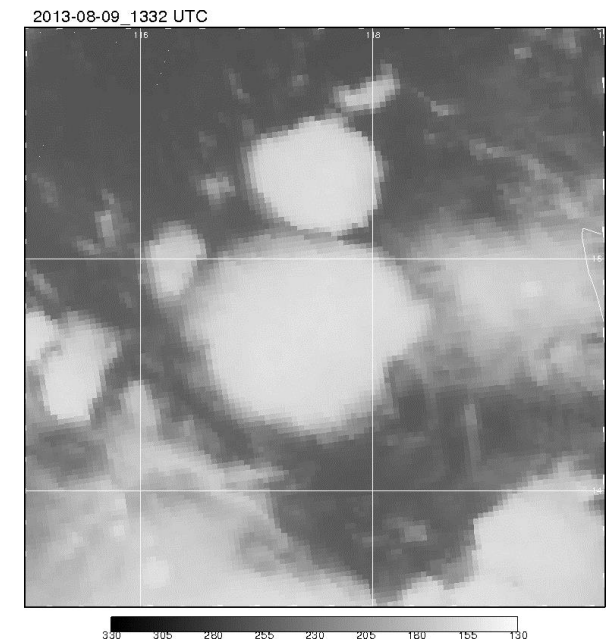
雖然高時空解析度衛星雲圖在對流系統之演變及移動扮演重要角色，但要了解該系統形成與加強的綜觀環境條件還需要傳統的地面及高空觀測，然而在廣闊的南海洋面上缺乏一般的傳統觀測。因此，本文除利用地面和高空觀測外，也利用了美國海軍全球環境模式 (Navy Global Environmental Model ; NAVGEM) 之數值預報產品。

三、天氣形勢

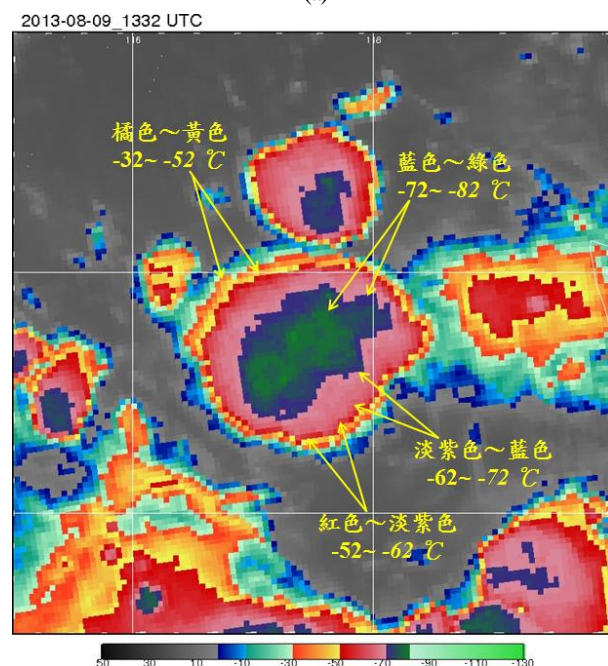
圖 4 為亂流事件發生 (1335 UTC) 前 1.5 小時之地面至 200 hPa 各層天氣分析，約與高空天氣圖相同時間之 1232 UTC 水氣雲圖疊加於 850~200hPa 到高空天氣圖上在天氣圖上。各層天氣圖上的“●”標記為亂流發生區，該標記東邊的雲系（雲系-B）是引發亂流的對流系統。地面天氣圖（圖 4a）顯示，低壓帶在從菲律賓東方海面之熱帶低壓向西伸經呂宋島南部/馬尼拉北部至中沙群島西部，亂流發生於呂宋島西方約 300 公里之低壓槽附近。該熱帶低壓後來發展成強烈颱風尤特 (typhoon Utor)。925hPa（圖未示）和 850hPa（圖 4b）顯示，風場在 MCS-B 及亂流發生區“●”呈現輻合和氣旋式環流區，同時也在正渦度區及正渦度軸線上，最大渦度中心之一，位於 MCS-B 及亂流發生區“●”之東北方，風沿著最大正渦度中心平流至此對流區，顯然該區有明顯的正渦度平流（positive vorticity advection ; PVA）。此兩圖又顯示，925hPa 明顯較 850hPa 為強。700hPa（圖 4c），風場

顯示，在 MCS-B 及亂流發生區“●”渦度分布不明顯，渦度平流也不顯著，僅呈微弱的氣旋彎曲氣流。

中對流層 500hPa 的分布型式與 700hPa 者類似，但強度更弱（見圖 4d）。顯然，低層（地面~850hPa）有明顯的擾動輻合，輻合強度隨高度減弱，至 500hPa 幾無明顯的特徵。



(a)



(b)

圖 3 2013 年 8 月 9 日 1332UTC 之紅外線雲圖。(a) 未經色調強化，(b) 經由色調強化（橘色： $\leq -32^{\circ}\text{C}$ 、紅色： $\leq -52^{\circ}\text{C}$ 、淡紫色： $\leq -62^{\circ}\text{C}$ 、深藍色： $\leq -72^{\circ}\text{C}$ 、深綠色： $\leq -82^{\circ}\text{C}$ ）。

高對流層之 300hPa (圖 4e), 在 MCS-B 及其鄰近地區之氣流已由 500hPa 之平直氣流轉為反氣旋式環流, 唯在其前方 (西方) 為氣旋式環流。輻散場顯示, MCS-B 在微弱輻合/輻散場, 而在其西方則為明顯的輻合。至 200hPa (圖 4f) 氣流分布型式已較 300hPa 有明顯的反氣旋, 且在其前方 (西方) 鄰近地區有明顯的分流和強輻散。

由上分析顯示, MCS-B 所在區之地面至 500hPa 中低對流層有低壓環流籠罩, 但其氣旋式環流隨高度減弱 (見圖 4d~4f), 而該區上空之 300hPa 和 200hPa

高對流層確有反氣旋式的輻散, 尤其 200hPa 更為明顯 (見圖 4e 及圖 4f)。分析又顯示, 在 MCS-B 前方鄰近地區的 300hPa 有強的輻合, 而 200hPa 有強輻散, 此顯示對流系統移至該處將再加強, 此可由 MCS-B 於 1401~1501 UTC (見圖 5j~5l) 有顯著的加強且達成熟階段印證。顯然, 此種中低對流層 (地面~500hPa) 的輻合與高對流層 (~200hPa) 的輻散/分流的一致配合, 是提供深對流形成與加強的有利條件之一。

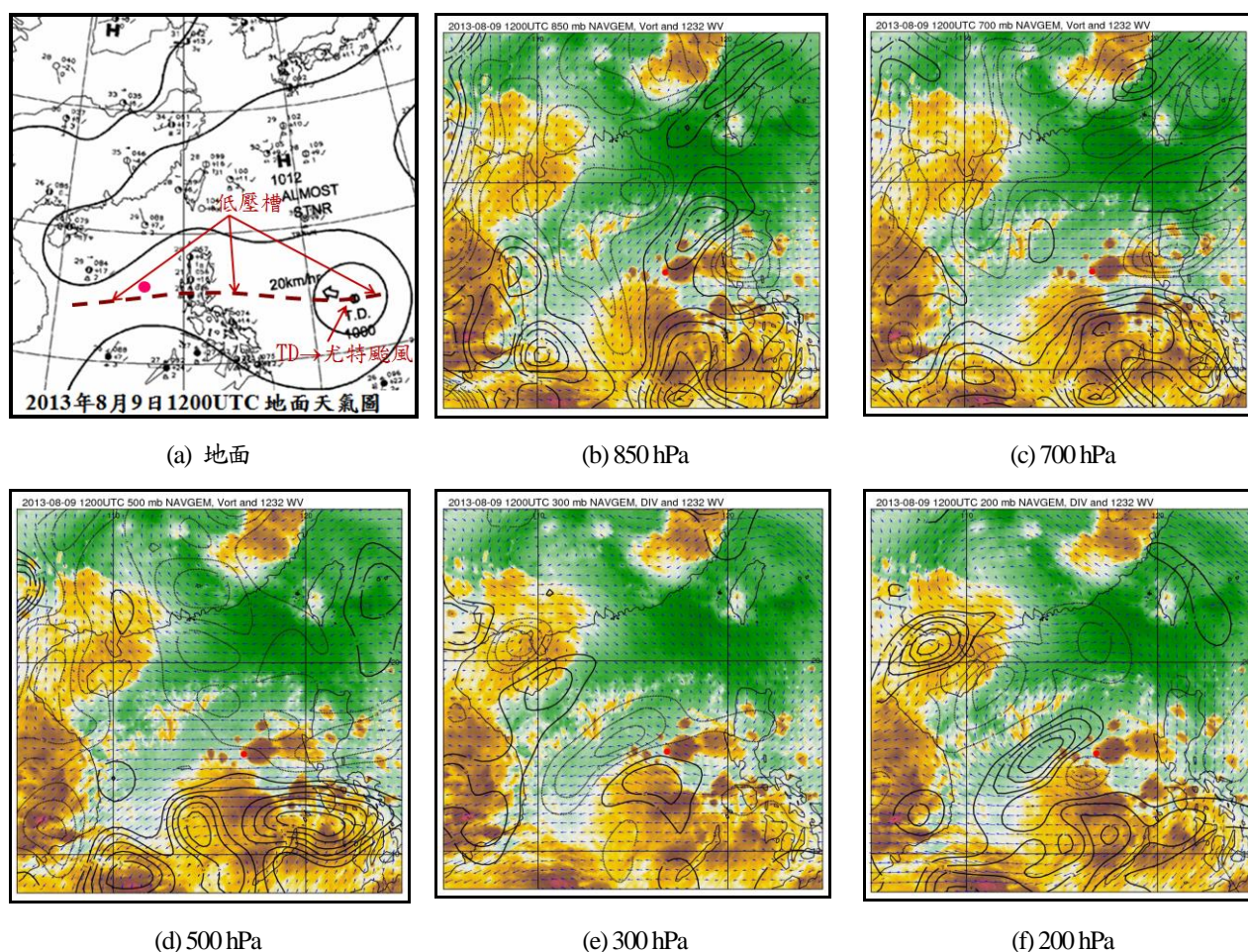


圖 4 亂流發生 (1335 UTC) 前 1.5 小時 (2013 年 8 月 9 日 1200 UTC) 之 (a) 地面天氣圖、(b) 850hPa、(c) 700hPa、(d) 500hPa、(e) 300hPa 和 (f) 200hPa 天氣圖。1232UTC 水氣雲圖疊加於高空天氣圖中。圖中“●”為亂流發生區, 雲系-B 為造成亂流事件的中尺度對系統, 東西走向之棕色粗虛線為低壓槽。高空圖上藍色箭頭: 風場; 彎曲等值線為渦度 (850~500hPa) / 輻散 (300~200hPa) (粗黑實線: 正渦度/輻散; 點線: 負渦度/輻合)。

四、中尺度對流系統演變及移動過程

從與亂流發生時刻相近之衛星雲圖 (圖 2a) 往回

追蹤, 該系統由菲律賓西方南海地區之小而淺的對流雲系發展而成。在 0901UTC (圖 5a), 有三個發展不是很強的對流雲, 為了方便解說, 分別以 B、B1 和

B2 代表雲系-B、雲系-B1 和雲系-B2，並以箭頭所示。此時雲系-B 在雲系-B1 和雲系-B2 之間。雲系-B1 和雲系-B2 逐漸潰解（減弱），而雲系-B 也逐漸加強（見圖 5b 和圖 5c），至 1001 UTC（圖 5c）已有清晰可辨

的對流中心（雲系-B 中的小黑圓區）。該小對流雲逐漸增強，並於 1032UTC 進入加強期。0901UTC～1001UTC 可視為生成期。

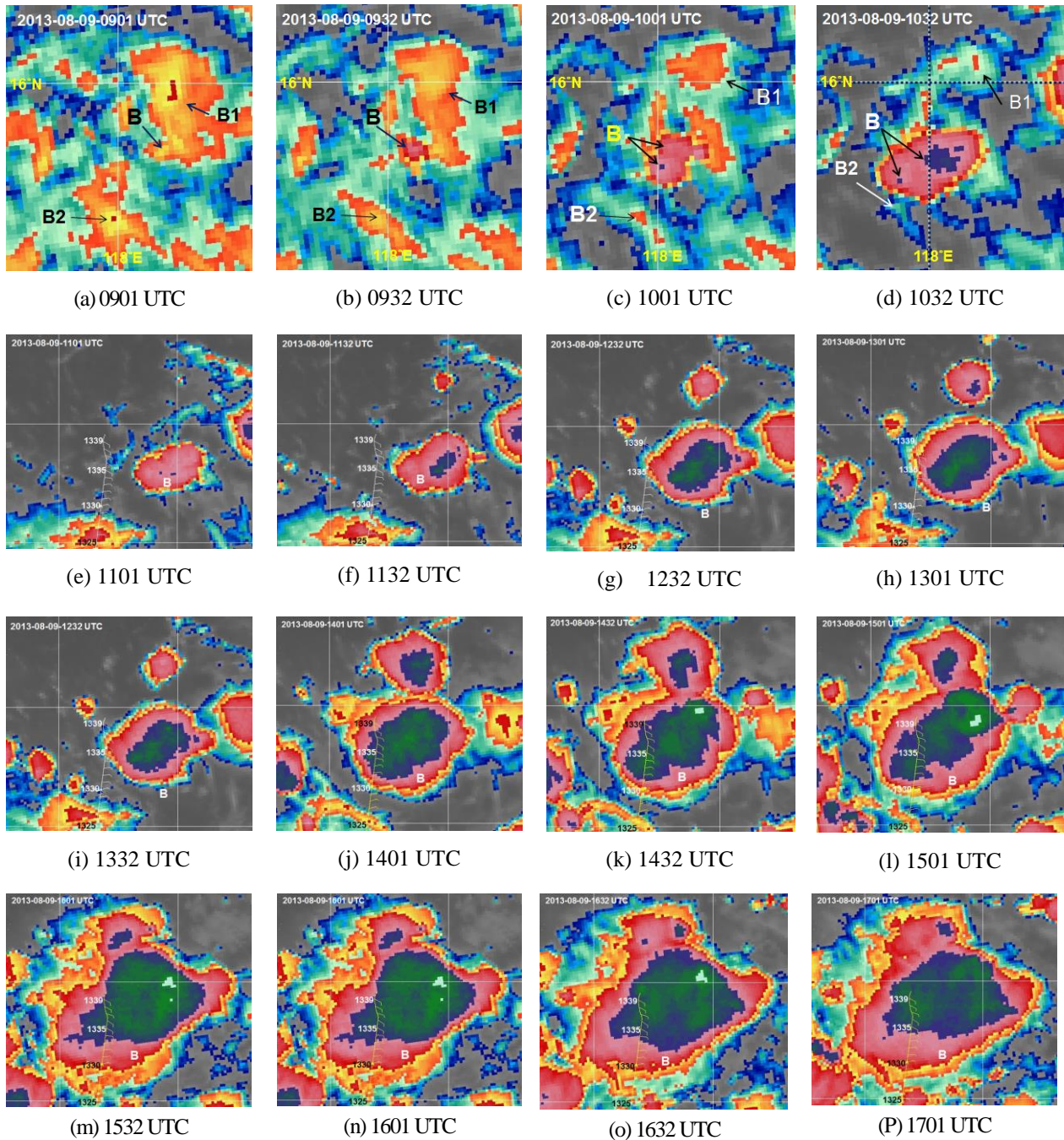


圖5 導致亂流之對流系統形成之半小時間距MTSAT紅外線雲圖（資料時間2013年8月9日0901UTC～2332UTC）。

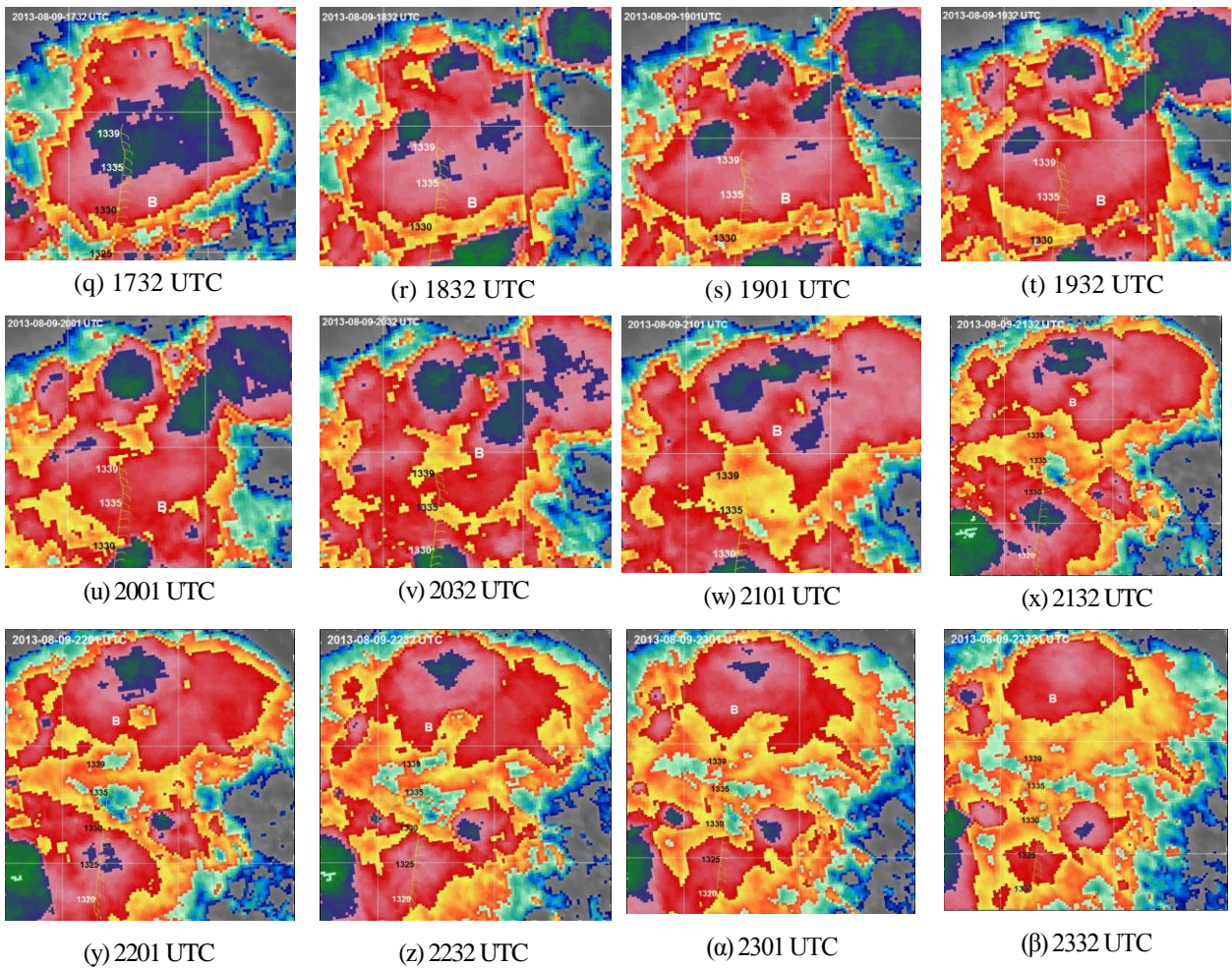


圖5 續。

9日1001 UTC 雲圖(圖5c)顯示,在雲系-B 北側又另有一較淺的對流雲形成,並向東南發展,而雲系-B 向西發展,兩者合併而加強,雲頂溫度變冷、雲系範圍擴大,雲系軸線走向從1001UTC之東北-西南轉為此時的東北東-西南西走向(見圖5d)。1032UTC 雲圖(圖5d)顯示,雲系-B1 和雲系-B2 不但再度潰解且幾將消散,雲系-B 則快速加強並進入加強期。顯然,雲系-B1 和雲系-B2 的潰解有利於雲系-B 的加強。

在1032UTC(圖5d),雲系-B 與在其北方的對流雲合併後,可以觀測到兩個較強的對流中心,在西者(原來雲系-B)與在東者(雲系-B 北方對流雲併入者)相當,惟在東者比在西者範圍為大,於1132UTC(圖5f)兩者合併並加強,但仍稱雲系-B。之後,雲系-B 雲頂中心溫度持續變冷(即雲頂增高),範圍擴大並持續向西發展。從雲系之雲頂溫度、雲系範圍和雲頂溫度梯度等結構分析,該雲系於1432 UTC 至1501 UTC 達成熟期(見圖5k 和5l)。在形成後至成

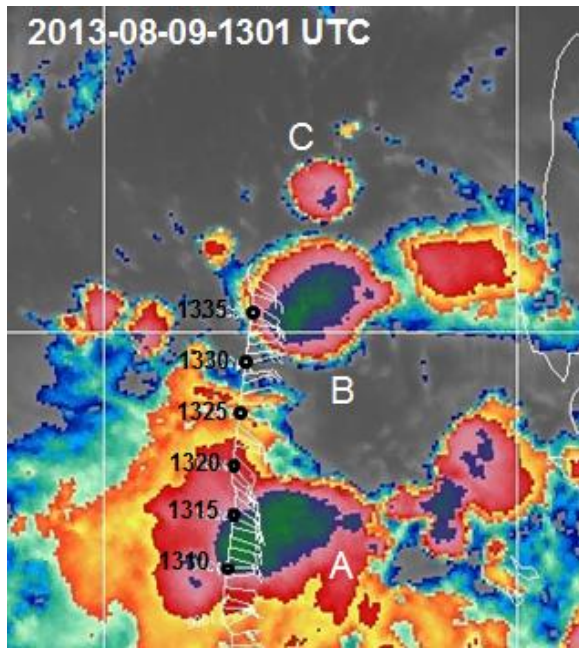
熟前(1032~1401UTC)為加強期(見圖5d~5j)。

雲系-B 自9日1532UTC 開始減弱,唯在減弱初期減弱不明顯(見圖5m~5p),至1832 UTC(圖5r)起才稍有較明顯的減弱。雖已明顯減弱,但因其北方有深對流移入並合併,致使該雲系於2332 UTC 仍具有相當明顯的對流特徵(圖5β),於10日0300 UTC 消散(圖未示)。雲系B 於9日0901 UTC 開始形成,於1501UTC 達成熟期,於10日0300 UTC 消散,其生命期達17.5小時。

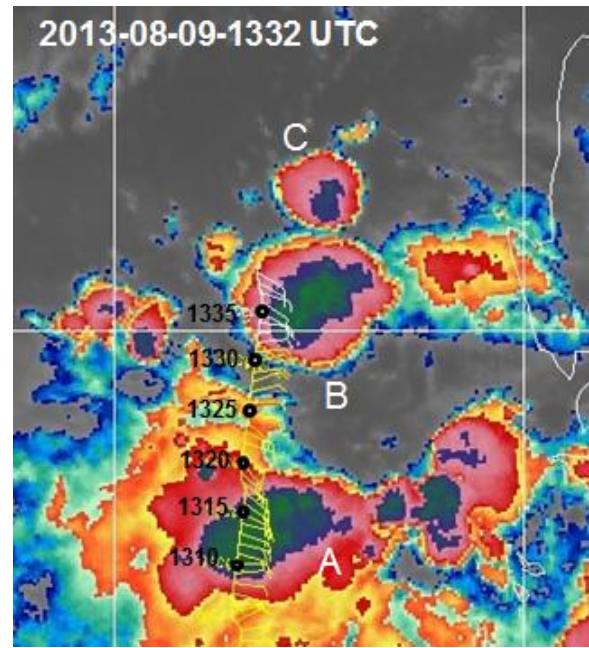
由於廣大的南海海域觀測稀少,現有的綜觀觀測無法提供對流移動的資訊,高時空解析度之衛星雲圖在此即可扮演重要角色,尤其是動態的連續影像更容易看出雲系的移動過程。由圖5之半小時間距衛星雲圖可知,雲系-B 形成後向西移動並加強,特別在加強期至成熟期向西移動更明顯(見圖5d 至圖5l)。雲系-B 在其減弱初期,雲系的移動雖稍有西進,但不明顯。在明顯減弱後,雲系範圍縮小外,也稍微東移(見圖5r-5β)。

五、對流與亂流關係

亂流發生於8月9日1335UTC，與亂流發生時間最接近的衛星雲圖為1301 UTC及1332 UTC。此等時間為衛星觀測的起始時刻，完成全球觀測歷時25分鐘，因此觀測至赤道需時12.5分。由此推算，衛星觀測到亂流區（15.23°N/ 116.79°E）需時約10.4分鐘，因此上述兩雲圖時間分別為1311.5 UTC及1342.5 UTC。圖



(a) 1301 UTC



(b) 1332 UTC

圖6 2009年8月9日(a) 1301 UTC及(b)1332 UTC紅外線色調強化雲圖。「●」為飛機在1310~1335 UTC之飛行位置。

將衛星雲圖放大（如圖 7 a~圖 7d）有助於分析雲系的發展情況。從 1132 UTC 至 1332 UTC，雲系範圍有明顯的擴大，且雲頂溫度梯度的結構越清晰，顯然此對流系統有明顯的加強。雲頂溫度梯度在雲系的西緣最大，此區為最強的對流區，飛機飛經此區將遭遇最大的亂流。圖 7e 和圖 7f 為與上述雲圖同時間，雲頂溫度 $\leq -32^{\circ}\text{C}$ （實線）和 $\leq -52^{\circ}\text{C}$ （點線）雲系範圍之描繪。不論 $\leq -32^{\circ}\text{C}$ 或 $\leq -52^{\circ}\text{C}$ 之雲系範圍均與隨時間擴展，並均向西移動，且雲系西緣向西移動遠大於東緣者。雖然這些雲圖時間圖似乎不在亂流發生時間，然而此系統由東西移動（見圖 2b 及圖 4），根據上述雲圖雲系之移動，飛機在 1332~1338 UTC 在雲系 B 中飛行，因此 1332 UTC 的雲圖可以用來解析此亂流事件。

六、討論與總結

雲系 B 形成前 1.5 小時的綜觀天氣分析（圖 4）顯示，地面低壓帶在從菲律賓東方海面的熱帶低壓處西伸經菲律賓進入南海中部，低壓槽也橫躺於菲律賓至南海中北部海域。分析顯示，中低對流層（地面~500hPa）在南海中部有低壓環流配合高對流層（~200hPa）反氣旋式的輻散。此種天氣形勢的配合，提供深對流形成與加強的有利條件，然而卻無法提供雲系-B 在何處形成？向何處發展與移動？高時空解析度之衛星雲圖（見圖 5）就可提供寶貴的資訊。因此本文以半小時間距的 MTSAT 4 公里解析度之紅外線衛星雲圖說明雲系-B 之形成機制。為了方便說明，把相關的雲系標上英文字母。

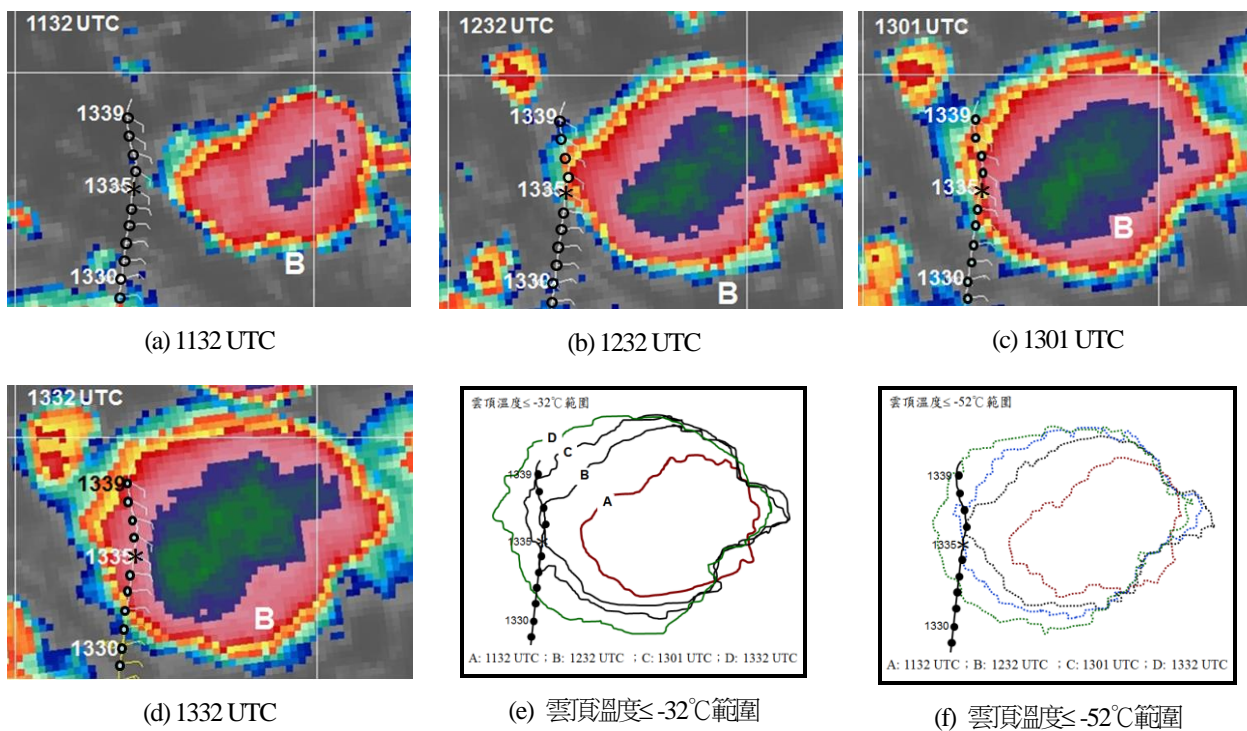


圖 7 2009年8月9日(a) 1132 UTC、(b) 1232 UTC、(c) 1301 UTC和(d)1332 UTC之紅外線色調強化雲圖。(e)和(f)分別為上述雲圖時間雲頂溫度 $\leq -32^{\circ}\text{C}$ 和 $\leq -52^{\circ}\text{C}$ 範圍之描繪圖。「o/•」為飛機在1329~1339 UTC之飛行位置，「*」號為亂流發生地點。

9日 0901 UTC 衛星雲圖顯示，在菲律賓西方南海有兩個較強但消散中的對流雲系，稱雲系-B1 和雲系-B2。在雲系-B1 和雲系-B2 之間有一小而淺的對流雲，如箭頭所示之雲系-B。該小對流的形成似與此兩雲系潰解有關，雲系-B1 和雲系-B2 之下衝流在雲系-B 處相交，產生交互作用（參見圖 8），因而引發導致此次亂流事件的對流雲系-B。在雲系-B 兩側雲系

持續潰解，雲系-B 也持續加強（雲頂溫度降低、雲系範圍擴大）（見圖 5b 至圖 5d）。圖 5c 又顯示，雲系-B 有兩個明顯的對流雲組成，在南者比在其北北東側者為強，對流中心清晰可見。此兩對流分別向西及東南移動並加強，其雲頂溫度更冷、雲系擴展（見圖 5d），雲系-B 因而加強。潰解中對流雲之下衝流激發新對流之形成與加強之概念模式見圖 8。

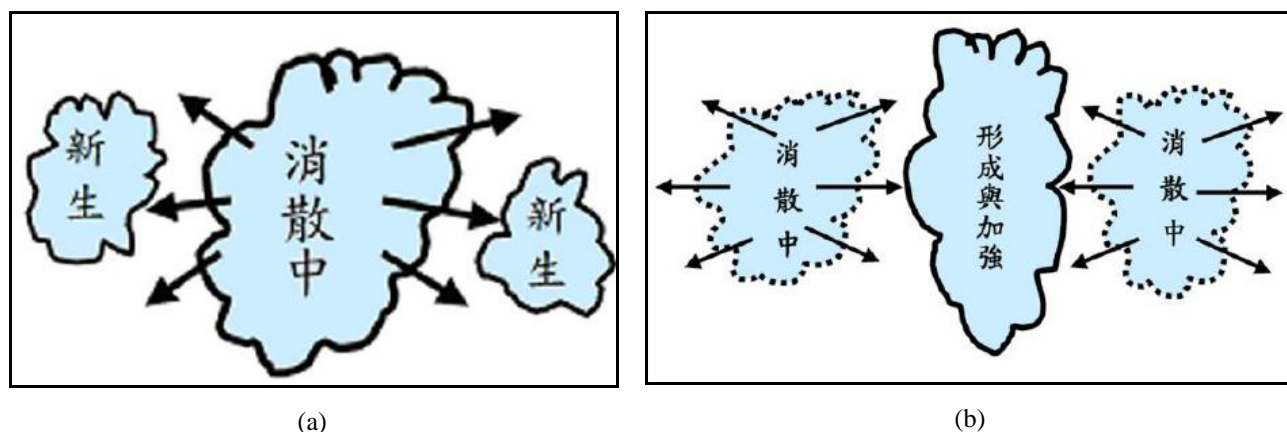
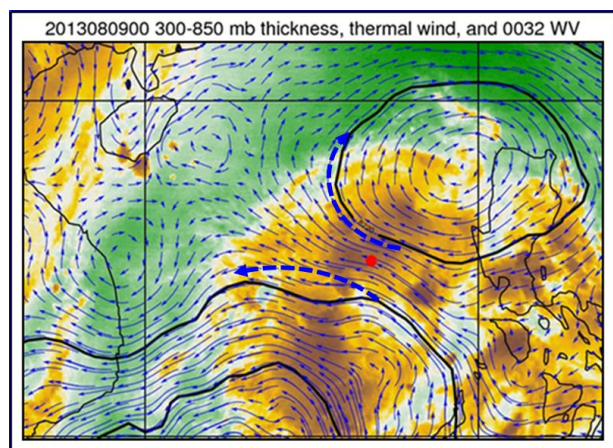


圖8 潰解中對流雲之下衝流激發新對流形成之概念模式（摘自紀和齊，2011）。

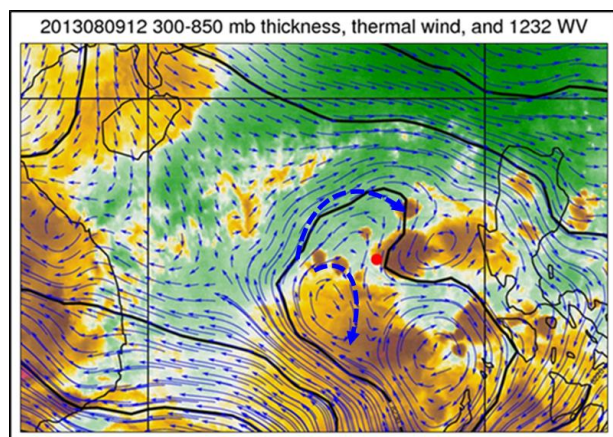
衛星雲圖（見圖5）顯示，導致亂流的對流系統形成後就向西發展，其對流中心也向西移動（見圖

2b）。為何向西移動並發展，本文嘗試以850~300hPa 厚度分布型式（見圖9）來說明。圖9a為MCS-B形成

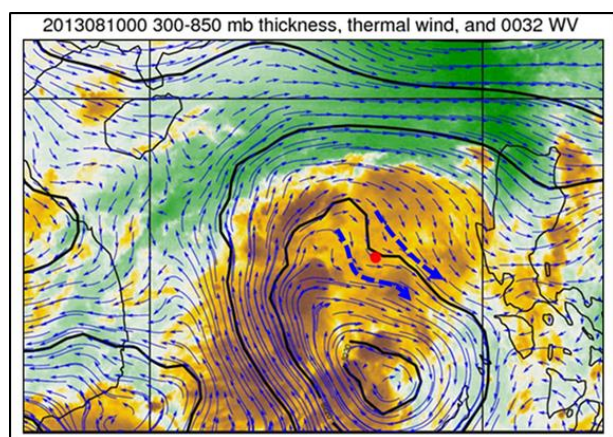
(~0900UTC)前9小時和加強期(圖9b)的厚度分析顯示,在亂流區及MCS-B加強期的位置有厚度分流,而在減弱期的厚度圖型式(見圖9c)則與前兩時間大異其趣,已呈平行而無分流,此時系統有轉向東移動趨勢(圖2及圖5)。



(a) 9日0000 UTC



(b) 9日1200 UTC



(c) 10日0000 UTC

圖9 2013年8月9-10日850~300hPa厚度圖。(a) 9日0000 UTC、(b) 9日1200 UTC和(c) 10日0000 UTC。1232UTC之水氣雲圖疊加於圖中。圖中“•”為亂流發生區。

為何厚度分流區有利於MCS之形成與加強? Funk (1991)以圖10的例一做說明。在例一(a), V_u (高空地轉風)在A點和B點相等,而 V_l (低層地轉風)在B點大於A點,因為熱力風(V_{th})為高低層地轉風的向量差,它平行等厚度線,在此種情況下,意味著低層有速率輻合,因此在A點和B點之間可能會有對流發生。在例一(b),若在A點和B點的 V_l 相等,則 V_u 在A點和在B點為分流。例二也可用同樣的方法找出低層輻合與高層分流/輻散的組合。此種低層輻合與高層分流/輻散的配合可做為對流形成、加強和移動的指標。

雖然厚度型式對MCS之形成、加強與移動型式可扮演重要角色,但此種資料12小時才可提供一次,對於此種尺度小、短延時的對流系統的形成和加強有其困難度,特別在預測其移動的困難度更高。本文就嘗試以衛星雲圖顯現雲型的分布型式來說明。圖11為2013年8月9日1001 UTC~1432 UTC之紅外線雲圖,為方便說明,將對流雲排列之深對流軸繪於衛星雲圖上(如圖中粗虛線)。該圖顯示,在呂宋島東西兩側海面均有活躍對流雲存在,在西方海面(南海)者遠較在東方者為強。該等對流雲呈東西走向線狀排列,顯然從呂宋島東方近海至西方的南海低層有東西走向的輻合帶存在,見9日1200UTC(圖2a)和1800UTC之該區地面天氣圖(圖未示),不但有利於對流形成和加強,而且在其移動可扮演角色。

在9日1001UTC~1101 UTC期間(見圖11a~c),對流軸線幾無變化,但雲系B卻向西移動並發展,此似與在其西方新生小對流有關,即有較不穩定大氣在其西方附近成,導致雲系-B向西移動並加強。這些小對流雖沒發展起來,甚至消散,但在9日1132UTC時,在雲系-B西方,15°N/115°E附近又另有發展較深的對流雲簇形成,且其軸線呈東西向排列,顯然對流軸線已深入該區,導致對流再度沿著此軸線向西移動且加強(見圖11d~i)。圖12為紀等(2004)分析1992年6月13日800-1200 LST逐時紅外線雲圖(見圖12a)指出,在台灣海峽南部之MCS,其對流中心(即雲頂溫度最低處)位於雲系西南側,且在該雲系之上游有新生小對流雲,在此種情況下MCS向上游發展。此種向上游(向後)發展的概念模式如圖12b。雲型特徵又顯示, MCS-B呈橢圓微樹狀(wedge type),雲系尖端指向西方,顯示MCS-B西緣有強烈的上升運動,有利於MCS向西移動並發展。該雲型又指出無強烈的垂直風切和高對流層強風,但仍可辨識對流區在雲系西側,卷雲羽在東側。

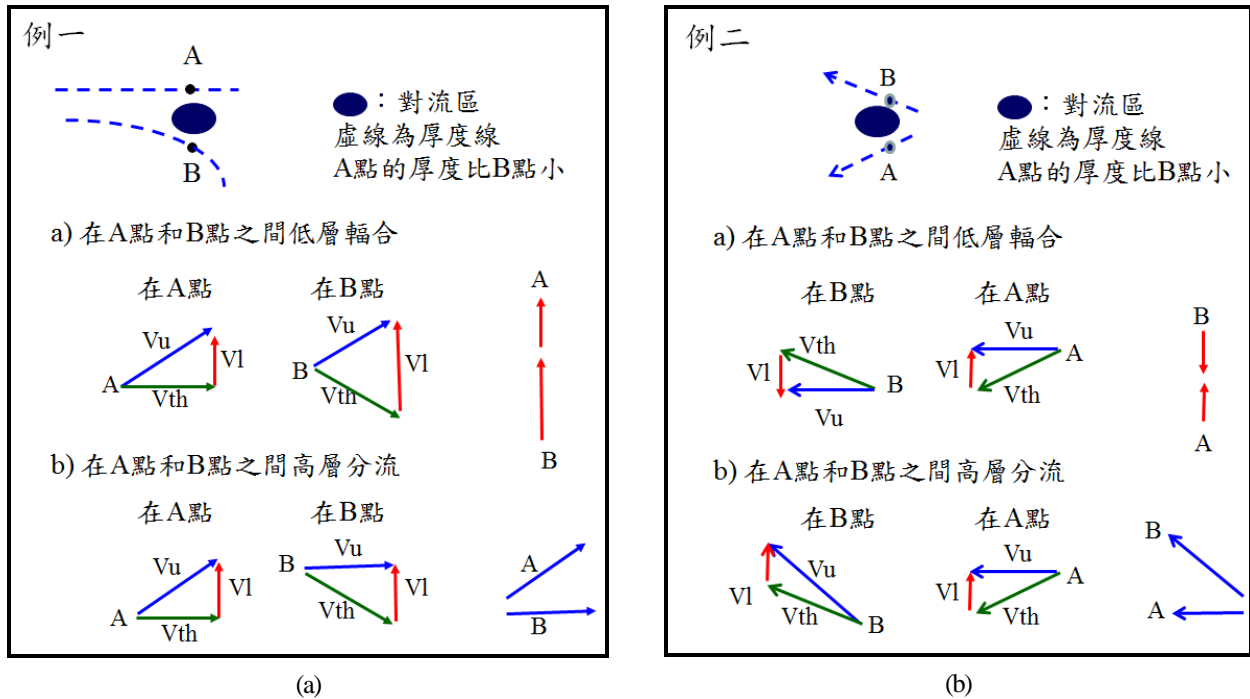


圖10 兩個厚度分流顯示低層輻合高層輻散的例子。(a) 厚度由西向東分流，(b) 厚度由東向西分流。虛線為等厚度線； V_u 和 V_l 分別為高層和低層地轉風； V_{th} 為熱力風，定義為高低層風的向量差，平行於等厚度線。風向量的大小與風速成正比。圖 (a) 摘自Funk (1991)。

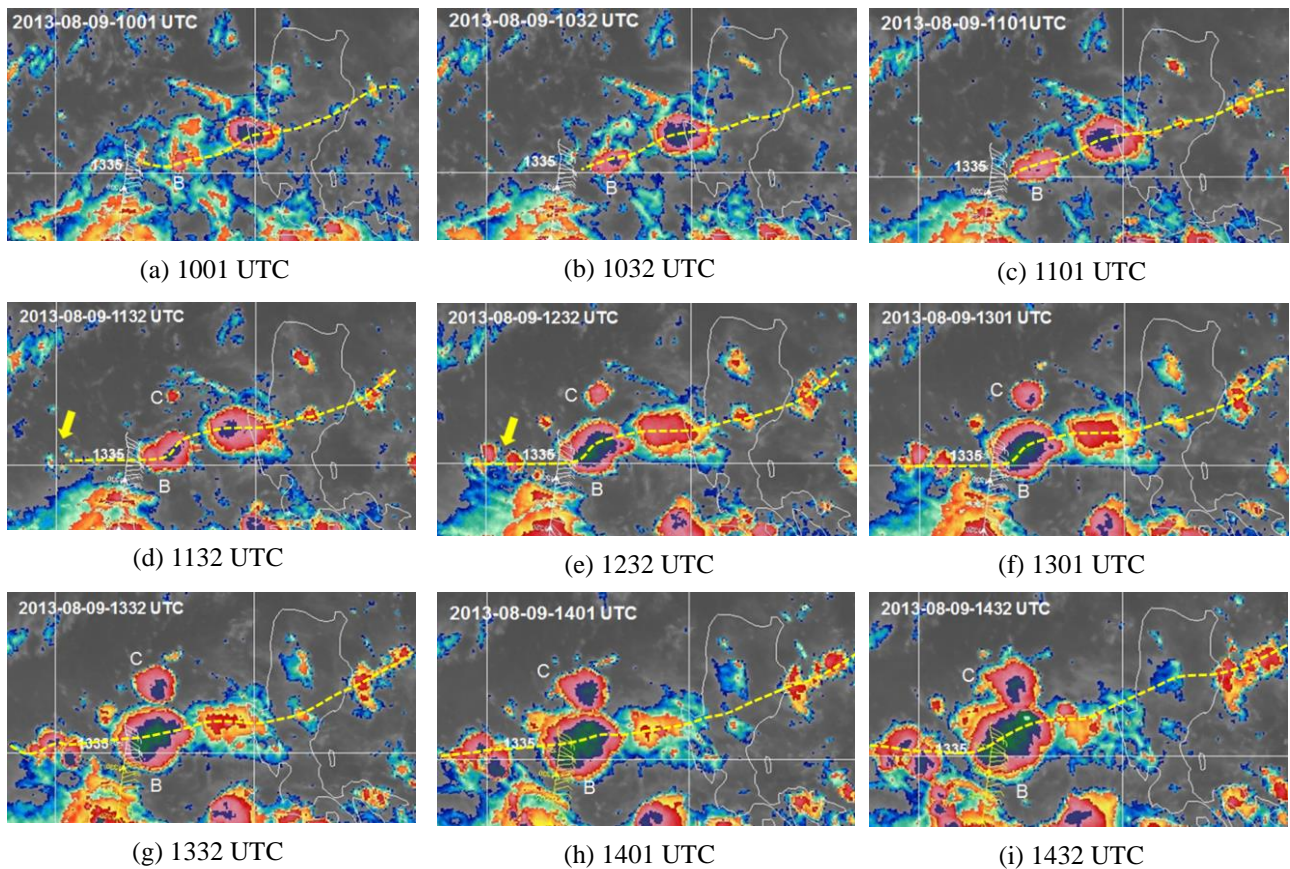


圖11 2013年8月9日1001~1432UTC之半小時間距MTSAT紅外線色調強化雲圖。圖中粗箭頭為雲簇發生區，粗虛線為深對流軸。

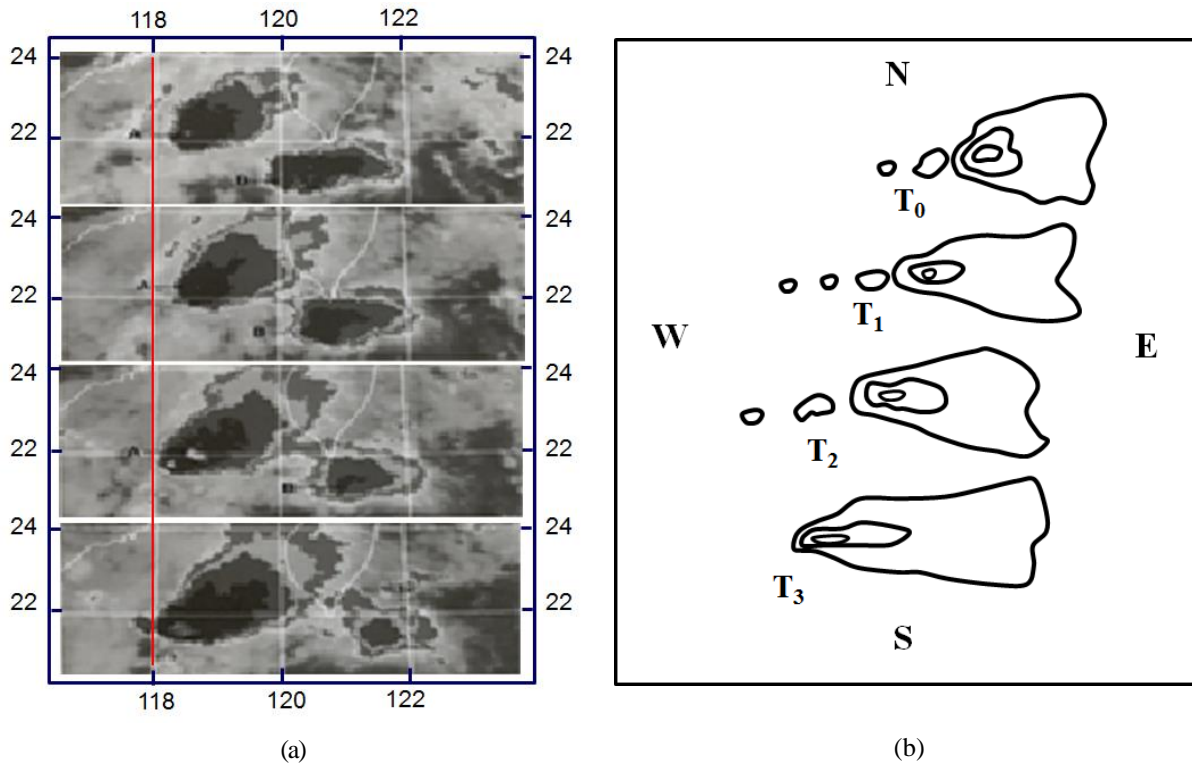


圖12 (a) 1992年6月13日0900LST至1200LST之GMS紅外線色調強化雲圖和(b) MCS向後移動MCS之示意圖 (摘自紀等, 2004)。

前已說明與此次劇烈亂流最接近此事件的衛星雲圖為1332 UTC，該次觀測自1332從北極開始，至赤道為1344.5 UTC，而至亂流區 (~ 15.23°N/116.79°E) 約為1342.4UTC。由EDR觀測知，最強亂流約發生於1335 UTC。而1332UTC雲圖可否做為辨識對流和亂流的關係？所幸該對流亂流系統由東向西移動 (見圖2b及圖5)，因此可從半小時間距雲圖，將此對流雲系推算至劇烈亂流發生時刻 (1335

UTC) 的雲圖 (如圖13)。圖13是由1301 UTC和1332 UTC觀測 (見圖7c及圖7d) 推算，此兩次觀測至亂流發生區分別為1311.4 UTC和1342.4 UTC。兩次觀測，不論 $\leq -32^{\circ}\text{C}$ 或 $\leq -52^{\circ}\text{C}$ 雲系範圍之外緣均向西移動 0.215°E (23.7 km)，13424 UTC與1335 UTC差7.4分。因此由觀測時間的1332UTC雲圖之雲系向東退 0.05°E (約5.5公里)，即為推算的1335UTC雲圖 (見圖13)。

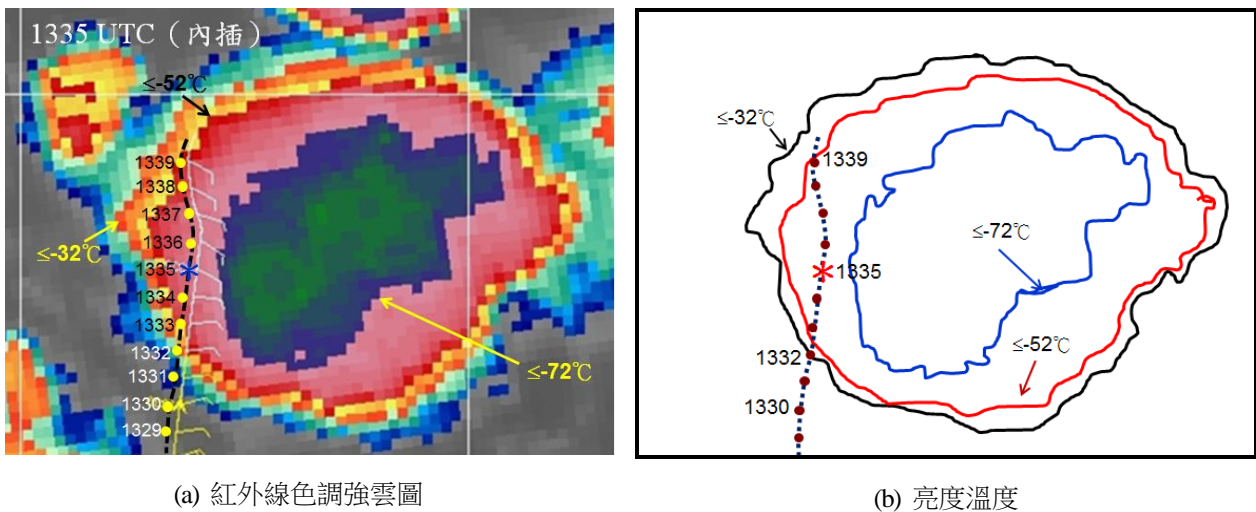


圖13 根據雲系移動速度推算成1335 UTC之 (a) MTSAT紅外線色調強雲圖及 (b) 亮度溫度分布。圖中「●」為飛機在1329~1339 UTC之飛行位置，「*」號為亂流發生時間和地點。

圖13顯示，飛機於世界標準時9日13時32分進入雲頂溫度 $\leq -32^{\circ}\text{C}$ 雲系範圍；33分進入 $\leq -52^{\circ}\text{C}$ 雲系範圍；34~37分進入 $\leq -64^{\circ}\text{C} \sim -72^{\circ}\text{C}$ 雲系範圍，而35及36分進入路徑上雲頂高度最高（溫度最低）處。之後，逐漸飛進較低雲頂處，於39分飛離雲頂溫度 $\leq -52^{\circ}\text{C}$ 雲系範圍。因此，飛行路徑上對流最強處是在13時35-36分之一分鐘內。根據Chan and Wong (2014) 推導此次事件的QAR資料，得知風速較大在13時35分11~11.5秒，最強15.3m/s在11.25秒；垂直速度較強在13時35分7 - 7.75秒，最強22.9m/s在7.5秒；F因子較大在13時35分8.25~8.75秒，最大0.8在8.5秒；EDR較大在13時35分6.75~17.25秒，最大0.77在8秒；亂流前幾秒鐘（13:34:55 UTC），飛機開始爬升，至13:35:07UTC爬到最高為34272ft（10446m）。之後，急速下降，13:35:33UTC降至最低，為33108ft（10091m）；至於飛行高度在短短的26秒（13:35:07至13:35:33UTC）內，飛機下降了1164ft（355m）。顯然，亂流的程度與對流的強弱成正比。

本文利用半小時間距 MTSAT 高解析度紅外線衛星雲圖、地面至 200 hPa 各層天氣圖和飛機觀測之 QAR 資料，探討導致 2013 年 8 月 9 日南海劇烈亂流對流系統之形成、加強和移動的機制，同時也分析對流系統強度與亂流強弱之關係，獲致初步結果如下：

1. 成熟的深對流系統（Cb/MCSs/MCC）除可在地表面邊界層和近對流層頂產生的中尺度高壓及中層中尺度低壓（中尺度渦旋）外，尚有過衝雲頂和重力波。低層中尺度高壓的強外流將引發陣風鋒（弧形雲），高對流層中尺度高壓的外流可形成外流卷雲帶（橫雲帶）。這些雲系都是引發亂流的對流雲系。

2. 造成此次亂流事件的對流系統在飛機航線和呂宋島之間的南海上空形成，形成後向西移動並發展。該雲系的對流區於9日1335 UTC移至飛機航路上，而導致該班機在短短的26秒內，下降了1164ft（355m）。

3. 綜觀分析顯示，在亂流對流系統之形成系統之形成、演變和移動區之綜觀環境為：中低對流層（地面~500hPa）有低壓槽、氣旋環流，高對流層（~200hPa）呈輻散/分流。此種中低對流層輻合配合高對流層（~200hPa）輻散/分流，提供此深對流形成與加強的有利的環境條件。

4. 850~300hPa厚度場顯示，在對流形成及加強區前（西）緣有明顯的分流，此意味著低對流層有輻合、高對流層有輻散，因此對流系統有在對流西緣形成與加強，而導致此MCS向西加強和移動。

5. 本事件對流系統係因其兩旁雲系之下衝流產生交互作用而形成。雲系的合併和外圍雲系的潰解是

雲系加強的因素之一。導致亂流對流雲兩側的對流呈線狀排列，其對流軸線呈東西走向，致使MCS沿著軸線移動，而在事件對流雲西側雲簇的形成，是造成該對流雲西移的機制。此外，事件對流雲之雲型呈微樹狀橢圓，雲系尖端指向西方，顯示MCS西緣有強烈的上升運動，有利於MCS向西移動並發展。

6. 飛行路徑上對流最強處與航線上最強風速（15.3m/s）、最強垂直速度（-22.9m/s）、最強風切危害因子（F因子）（0.8）和最大渦流耗散率（0.77）和飛機突降1164ft（355m）一致。顯然，亂流的程度與對流的強弱成正比。

導致此次亂流事件的主要天氣系統是對流系統，因其尺度小，一般傳統觀測不易解析，尤其它在觀測資料缺乏的南海海域形成、加強和移動更是困難。因此，此種因對流引發的亂流之預報不像晴空亂流預報可以從數值預報模式產品發展而成，它的預報需要較高的空間解析度的衛星雲圖。亂流的發生是瞬間的，雲圖解析度除需高空間外，還需高時間解析度。Himawari-8於2015年7月7日開始作業，它除提供更高解析度0.5~2公里空間解析度外，更提供10分鐘高時間解析度。尤其衛星雲圖是唯一可顯現不同尺度的天氣系統於一幅圖上，其雲型與大氣的動力和熱力有密切關係，因此應多利用衛星資料於作業分析及學術研究上。又，雲圖為大氣動力和熱力的綜合結果，而導致分析困難。因此，分析衛星雲圖時，應結合相關資訊，如傳統天氣圖分析、數值預報產品和雷達資料等，才能提供天氣預報更好的資訊。

致謝

本文之完成承蒙香港天文台Dr. Pak-Wai Chan 提供完整的飛機觀測，中央氣象局氣象衛星中心齊祿祥技正提供衛星資料，在此敬表謝忱。

參考文獻

- 紀水上和齊祿祥，2011：SoWMEX 期間導致南臺灣豪雨事件之中尺度對流系統分析。103 年天氣分析預報研討會，179-196。
- 紀水上、齊祿祥、林允才，2004：梅雨季台灣及其鄰近地區中尺度對流系統發展與移動之概念模式研究。中央氣象局天氣分析與預報研討會論文，428-433。
- Bader, M. J., G.S. Forbes, J. R., Grant, R.B.E. Lilley and A.J. Waters, 1995: Images in weather forecasting: A practical guide for interpreting satellite and radar

- imagery. Chapter 6, p. 350-444.
- Bedka, K., W. Feltz, J. Mecikalski, R. Sharman, A. Lenz, and J. Gerth, 2009: Satellite signatures associated with significant convectively- induced turbulence events. Proc. Joint Meteorological Satellite and 15th Satellite Meteorology and Oceanography Conf., Amsterdam, Netherlands, EUMESAT and Amer. Meteor. Soc. 6PP.
- Chan P. W. and W. K. Wong, 2014: An Analysis of a Severe Turbulence Event Encountered by an Aircraft over the South China Sea and the Application of Numerical Weather Prediction Models in the Early Alerting of the Event. *Advances in Meteorology*, vol. 2014, 11PP.
- CIMMS, 2007: SNAAP Projects- Convectively Induced Turbulence Decision Support for Avoidance of Convectively Induced Turbulence
- CIMMS / CIMSS Satellite Blog /, 2009 : Mesoscale Convective Vortex (MCV) in the Upper Midwest region. cimms.ssec.wisc.edu/goes/blog/archives/3215.
- CIMMS · 2012 : Satellite-based Nowcasting and Aviation Application Program- Detection of Overshooting Tops. <https://cimss.ssec.wisc.edu/snaap/overshootingtop/>
- Cornman, L. B. and B. Carmichael, 1993: Varied research efforts are under way to find means of avoiding air turbulence. *ICAO Journal*, 48, 10-15.
- Ellrod, G. P., 1985: Detection of high level turbulence using satellite imagery and upper air data. NOAA Tech. Memo. NESDIS 10, 30 pp.
- Ellrod, G.P. (1989) : A decision tree approach to clear air turbulence analysis using satellite and upper air data. NOAA tech. memo, NESDIS, Washington, D. C., Department of Commerce. 20pp.
- FAA · 2010 : Weather-related aviation accident study 2003–2007. Department of Transportation 71pp.
- FAA · 2010 : Aeronautical Information Manual: Official Guide to Basic Flight Information and ATC Procedures. Chapter 7, "Safety of Flight"
- Feltz, J., 2010: Satellite-based Nowcasting and Aviation Application Program (SNAPP) Project.
- Funk, T. W., 1991: Forecasting Techniques utilized by the Forecast Branch of the National Meteorological Center during a major convective rainfall event. *Wea. Forecasting*, 6, 548-564.
- Knox, J. A., A. S. Bachmeier, W. M. Carter, J. E. Tarantino, L. C. Paulik, E. N. Wilson, G. S. Bechdol, and M. J. Mays, 2009: Transverse cirrus bands in weather systems: A grand tour of an enduring enigma. *Weather*
- Lenz, A., K. Bedka, W. Feltz, and S. Ackerman, 2009: *Convectively-induced transverse band signatures in satellite imagery*. *Wea. Forecasting*, Vol. 24, No. 5, pages 1362–1373
- Lester P.F., 1994: Turbulence – A new perspective for pilots. Jeppesen Sanderson Training Systems, 280pp.
- Trier, S.B., and R. D. Sharman, 2009: Convection-permitting simulations of the environment supporting widespread turbulence within the upper-level outflow of a mesoscale convective system. *Mon Wea. Rev.*, 137, 1972-1990.
- Wagtendonk, W. (2003). *Meteorology for Professional Pilots*. Bay of Plenty, New Zealand: Aviation Theory Centre (NZ) Ltd.

Analysis on the Mesoscale Convective System induced severe turbulence over South China Sea in 9 August 2013.

Shui-Shang Chi^{1,2} Ching-Hwang Liu¹

¹ **Department of Atmospheric Sciences, Chinese Culture University, Taipei, Taiwan**

² **Center for General Education, Aletheia University, Taipei, Taiwan**

Abstract

A mesoscale convective system induced a severe turbulence event in August 9, 2013 over the South China Sea is to be studied for the initiation, intensification and movement of the convection systems. The relationship between convection and turbulence is also explored. Half-hourly MTSAT infrared imageries, convective surface and upper air observations and Aircraft observations of Quick Access Recorder (QAR) data are used. Results show that the convergence produced by low pressure trough and cyclonic circulation from the surface to 500 hPa coupled with the speed divergence and diffluent flow at both 300 and 200 hPa are the favorable synoptic conditions of the mechanism of formation, intensification and maintenance. The thickness pattern of 850~300hPa indicates a thickness diffluence in the area where MCS developed. It implies low level convergence and upper level diffluence. Under these situations, convections tend to be formed and intensified over the western edge of the MCS resulted in the MCS westward building and movement.

Satellite observations reveal that the formation of turbulence system is due to the interaction under the downdrafts produced by the collapsing convections which are over its southwest and northeast. Clouds merger and the interaction of the surrounding convections result in the turbulence system intensified westward. Satellite observations also indicate that the east and west sides of the turbulence system are linear type in east-west orientation and cloud clusters for over the west side resulted in the MCS propagated westward.

Results also indicate that the strongest convection area over the flight pass is consistent with the strongest wind speed (15.3 m/s), vertical velocity (-22.9m/s), wind shear hazard factor (F-factor) (0.8), eddy dissipation rate (0.77) and suddenly lost height about 1164 ft (355). Obviously, the intensity of turbulence and convection is in direct proportion.

Key words: turbulence, downdraft, interaction, merger, eddy dissipation rate, Quick Access Recorder