

熱帶氣旋三維軌跡線分析研究

遲正祥¹ 周昆炫²

¹ 中國文化大學地學研究所

² 中國文化大學大氣科學系

(中華民國一〇二年十二月十二日收稿；中華民國一〇三年八月十九日定稿)

摘 要

近年來雖然衛星、飛機、雷達資料快速的發展，然而對於熱帶氣旋的分析在眾多資料當中仍然存在著諸多問題，例如繞極衛星資料的資料誤差和時間的解析度不足，同步衛星的空間解析度不足；飛機資料的垂直風場不準確，空間和時間涵蓋範圍稀少；雷達資料的反演誤差以及範圍只限於近陸地等，因此無法完全了解熱帶氣旋的風場更細節的結構。本研究藉由合理的 WRF (Weather Research and Forecasting) 模式模擬資料，大大提升空間和時間解析度，藉此探討典型強烈熱帶氣旋在海上的風場結構，並突破以往二維的分析概念，目的是為了更全面的了解整個熱帶氣旋氣塊軌跡的運動情形。。

本研究使用新一代分析工具 VAPOR (Visualization and Analysis Platform for Ocean, Atmosphere, and Solar Researchers)，其為互動式三維環境之基礎，來檢視海上熱帶氣旋的三維氣塊軌跡線運動情況，包括颱風眼、颱風眼牆、內核雨帶、外核雨帶、外圍環流，五個區域由近地面層至高層的結構分析。

研究結果顯示，除了颱風眼的位置，其餘區域在近地面的氣塊來源為外圍環流，並且會向內傳送至颱風眼牆的區域而後往上旋轉抬升。在近邊界層頂除了颱風眼區，各對流區的氣塊來源亦為外圍環流，然而不同的是氣塊會向內傳送到各對流區後，在其區域旋轉抬升，這點與過去的颱風結構示意圖有差異。本研究結果繪出新的颱風結構示意圖，對於氣塊軌跡的向前(Forward)和向後(Backward)積分皆在本文中有較詳盡的討論。

關鍵字：熱帶氣旋、WRF、VAPOR、軌跡線分析

一、前言

現階段對颱風的認識，隨著氣象衛星資料的發展，將越來越能夠掌握颱風在海上的資料，但是目前不論是微波頻道、紅外線頻道，或是主動式感應器以及被動式感應器，其計算和反演出的資料仍有許多待解的難題，比如資料的完整性和時間及空間的解析度都仍有相當大的進步空間，特別在了解颱風各個對流區的氣塊運動情形上相當不足。早期雖然有實驗計畫使用飛機觀測得到相當寶貴的颱風資料並以此有許多的研究(Riehl and Malkus 1961; Miller 1962 等)，但是除了所獲得的資料仍相當少數外，所了解到的颱風三維結構仍相當粗糙(Miller 1958; Frank 1977)，即使到最近，Emanuel (2005)、UCAR (University Corporation for Atmospheric Research, <http://meted.ucar.edu/>)或 NOAA (The National Oceanic and Atmospheric Administration; http://www.srh.noaa.gov/jetstream/tropics/tc_structure.htm)提出的颱風的風場結構也只能概括地描述其環流狀況。這不令人感到意外，因為即使是飛機資料，由於儀器的限制及資料誤差，亦無法完整觀測到颱風的每層結構。

近年來由於數值模式的發展，常常被使用於分析颱風的結構與路徑，但由於觀測資料給定模式初始場的解析度和準確性不足，以及自然現象為非線性等複雜因素，不可能模擬出與實際颱風一致的模擬結果，模擬所得的數值也必須謹慎使用；另外由於受到各種不同參數化的影響，用於探討定性分析的結果時也必須不斷校驗其合理性，若是合理，通常模擬結果與觀測有接近或相似的型態就能更進一步探討其個案的特殊現象(Hu et al. 2010; Gibbs et al. 2011; Salamanca et al. 2011)。然而若要定量了解哪些條件造成颱風路

徑、強度或結構的改變，一般的研究會以真實個案進行個案模擬及相關機制的敏感度探討，但大氣的演變過程是相當複雜的非線性過程，透過這些敏感度實驗結果的比較，並不能直接代表模擬的改變是由於那個機制所造成。因此目前比較客觀的研究概念是透過理想化的模式來進行相關機制的敏感度研究，如此則能克服非線性問題所造成的不確定性。

另一方面，受到分析工具的限制，在分析氣塊運動情況的應用上，過去有些研究有使用軌跡線分析來探討颱風特殊現象的狀況，如 Jian and Wu (2008)和 Huang et al. (2011)檢視颱風接近地形時產生的管道效應，分析其軌跡線顯示氣塊受到地形擠壓時增加速度後對颱風路徑帶來的影響。而吳等人(2010)檢視莫拉克颱風(2009)的氣塊軌跡以釐清此颱風環流的來源是否為西南氣流。Chiao and Jenkins (2010)也利用了氣塊軌跡線配合地形敏感度實驗分析非洲西邊熱帶氣旋的生成原因，發現是來自於東風波的影響。

雖然傳統的軌跡線分析，如 RIP4 (Read/Interpolate/Plot)也是三維的軌跡線分析，但是由於其呈現方式是以二維風場為主，且在二維的分析圖中需靠想像力及文字加以描述，因此不能清楚呈現颱風氣塊在三維空間的運動狀態，所以過去較少研究使用此分析更進一步探討颱風整體結構。

因此，本研究的首要目的是為了透過分析包括颱風眼在內之不同對流區三維的氣塊軌跡，更加清楚地了解颱風內部結構的氣流運動特徵；其次在於討論造成氣塊運動狀況可能不同的原因；最後，以分析結果重新繪製更清楚的颱風結構示意圖。

二、實驗設計

1. 模式與物理參數設定

本研究將採用 WRF V3.4.1 版本來探討彩雲颱風(2009)，挑選此個案的優點為由生成到成熟期至消散期皆位於海上，在無地形以及弱環境背景影響下發展成強烈颱風，並且具有結構上的對稱性。WRF 模式是由 NCAR (National Center for Atmospheric Research)等團隊共同研發，為最新一代中尺度數值天氣預報系統，適用空間尺度從數十公尺到數千公尺。網格設定是以 145°E，25°N 為中心的三層巢狀網格，投影法選用藍伯特投影法，所選定的不變形緯度為 15°N、25°N，第一層(D1)解析度 30 公里，網格數為 160×150；第二層(D2)解析度 10 公里，網格數為 331×331；第三層(D3)解析度 3.33 公里，網格數為 517×700，垂直層為 28 層，以 σ 為座標，分別為 1.000, 0.990, 0.978, 0.964, 0.946, 0.922, 0.894, 0.860, 0.817, 0.766, 0.707, 0.644, 0.576, 0.507, 0.444, 0.380, 0.324, 0.273, 0.228, 0.188, 0.152, 0.121, 0.093, 0.069, 0.048, 0.029, 0.014, 0.000。三層積分的時間步長依次為 180、60 及 20 秒。三層的微物理參數法都選用 Goddard GCE 法；積雲參數法在第一和二層選用 Kain-Fritsch，第三層則無積雲參數法；邊界層參數法三層都選用 Yonsei University (YSU)。

2. 數值實驗

本研究的初始場及邊界值是採用美國國家環境預報中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的最終分析資料(Final Analysis; FNL)，其空間及時間解析度分別為 1.0°×1.0°及 6 小時。模擬時間從 2009 年 9 月 15 日 18 UTC 開始模擬 84 小時，結束時間為 2009 年 9 月 19 日

06 UTC。另外，由於全球分析資料的解析度較差，無法完整解析颱風的強度與結構，因此本研究亦使用 Chou and Wu (2008)及周與黃(2010)所提渦旋植入技術來改善模擬初始時間之颱風強度及結構，其植入渦旋之最大風速為 65 m/s。

3. 分析工具

本研究使用之軌跡線分析工具為 VAPOR 2.3 版本。VAPOR 為新一代互動式三維可視化環境下分析平台，由 NCAR 團隊所發展，主要目的為解決地球科學、太空科學、特別是大氣、太陽、海洋和氣候等科學議題上的需要，於流體力學中有清楚的顯示功能，並且能處理大量時間和空間解析度的模式資料。除此之外，VAPOR 的計算速度迅速，並可以直接讀取多種模式資料如：WRF、MOM、POP、ROMS 等，因此不必二次輸出的龐大模式資料，這項優點在處理高時間和空間解析度的資料時，也就是較大容量的資料，例如超過 100 GB 以上的資料，不必另外處理成可讀取的格式，同時使用了最小的計算資源達到以上目的。

其計算上的優點由 Kenwright and Lane (1995)提出的探索技術(heuristic technique)四階 Runge-Kutta 數值計算方法，方程式如下：

$$a = v(r(t), t)\Delta t$$

$$b = v\left(r(t) + \frac{a}{2}, t + \frac{\Delta t}{2}\right)\Delta t$$

$$c = v\left(r(t) + \frac{b}{2}, t + \frac{\Delta t}{2}\right)\Delta t$$

$$d = v(r(t) + c, t + \Delta t)\Delta t$$

$$r(t + \Delta t) = r(t) + \frac{1}{6}(a + 2b + 2c + d) \quad (1)$$

這裡的 r 為氣塊位置， v 為該位置的速度向

量, Δt 為時間步長。最初的時間步長大小估計為：

$$\Delta t = \frac{1}{|u|} \sqrt[3]{\frac{V}{6}} \quad (2)$$

而 $|u|$ 是當前位置的速度值, V 的定義如下：

$$\begin{pmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{pmatrix} = \frac{1}{V} \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_p - x_1 \\ y_p - y_1 \\ z_p - z_1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

這裡的 ξ 、 η 和 ζ 是自然座標, 而 x_p 、 y_p 和 z_p 則為物理點的直角座標。由於氣塊移動時角度的不同會影響到時間步長的計算, 其角度定義為 θ_n , 則方程式如下：

$$\cos \theta_n = \frac{r(t_{n-1} - r(t_n)) \cdot (r(t_n) - r(t_{n+1}))}{|r(t_{n-1}) - r(t_n)| |r(t_n) - r(t_{n+1})|} \quad (4)$$

當 θ_n 大於 15 度時, 時間步長則減少一半; 當 θ_n 小於 3 度時, 時間步長則加倍; θ_n 若介於 3 到 15 度之間, 則時間步長不變。這樣可以防止當氣塊轉向過大時, 時間步長若仍不變則無法計算出氣塊精確軌跡的問題。除此之外, 加上主流的線性基本內插法 (Linear basis function interpolation) 如下：

$$u(\xi, \eta, \zeta) = u_1 + (u_2 - u_1)\xi + (u_3 - u_1)\eta + (u_4 - u_1)\zeta \quad (5)$$

以此方程式亦可得到與線性物理內插法一樣的結果, 但是在浮點數的計算上可以減少為只需 27 個浮點數, 綜合上述, 比起傳統的三線性函數 (trilinear functions) 和 Newton-Raphson 方法計算方式增加了約 6 倍的計算效率。

另外, 使用 VAPOR 以 Lagrange 的角度檢視熱帶氣旋的優點, 在於可清楚檢視氣塊的三維分布和其流動, 早期在研究軌跡線的應用時必須使用氣流軌跡整合模式 (Galvin et al. 1978; Miller et

al. 1978; Samson 1980; 林等人, 1998), 主要用於研究追蹤污染氣塊來源, 計算等壓或等熵面之氣塊軌跡線以及牽涉到的複雜氣象與化學反應。然而若要檢視颱風強烈對流中的軌跡線, 在缺乏海上觀測資料以及衛星資料的時間解析度也不足的情況下, 則必須透過模式來產生合理的颱風三維結構。由於本研究模擬之颱風路徑、強度、結構與觀測相當類似, 因此透過模式所產生的高解析度風場資料來進行氣塊軌跡分析, 具有相當程度的代表性。本研究亦搭配高時間和空間解析度的 WRF 模式以及 VAPOR 工具, 分析颱風之氣塊向前及向後計算之軌跡線, 以清楚檢視颱風環流的氣塊運動狀況。

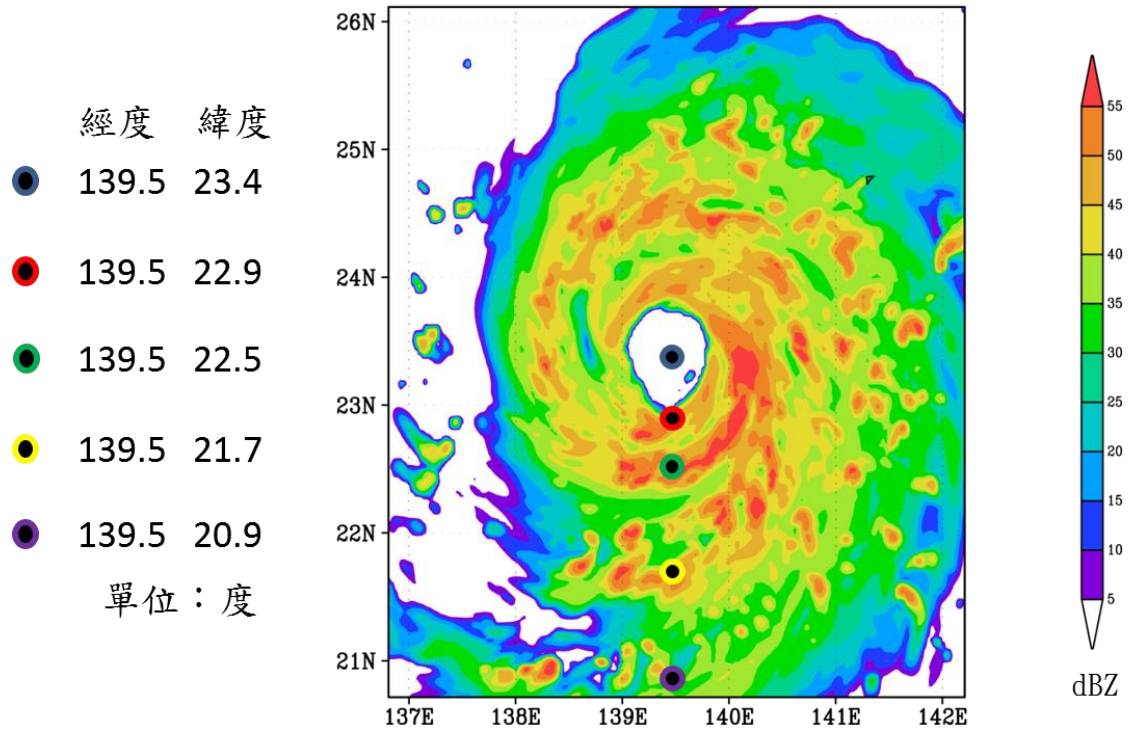
本研究將氣塊粒子分為五個部分做檢視, 分別為, 颱風眼、颱風眼牆、內核雨帶、外核雨帶、外圍環流, 時間解析度為 10 分鐘一筆模式模擬資料。以上五個部分再以離地面高度分別區分為 30 公尺、1 公里、5 公里、10 公里, 藉以檢視其氣塊往前計算 20 小時和往後計算 24 小時的結果, 了解氣塊的來源及去向 (圖 1)。

四、模擬結果

1. 路徑、強度與結構

模式模擬颱風成熟期之雷達回波圖為圖 1a, 由於模擬之颱風移速稍快, 因此與 MTSAT (Multi-functional Transport Satellite) 紅外線衛星雲圖之比較, 時間點的選取分別為 2009 年 9 月 17 日 1820 UTC 及 2009 年 9 月 18 日 0057 UTC, 這兩個時間點的位置與強度最為接近, 其結構與圖 1b 之比較相當相似。圖 2 為彩雲颱風 (2009) 的模擬路徑與強度演變結果, 圖 2a 顯示模擬路徑呈現迴轉的情況, 與觀測亦非常相似, 但是模擬的渦旋移動

(a) WRF Simulated max.dbz - 18:20Z17SEP2009



(b)

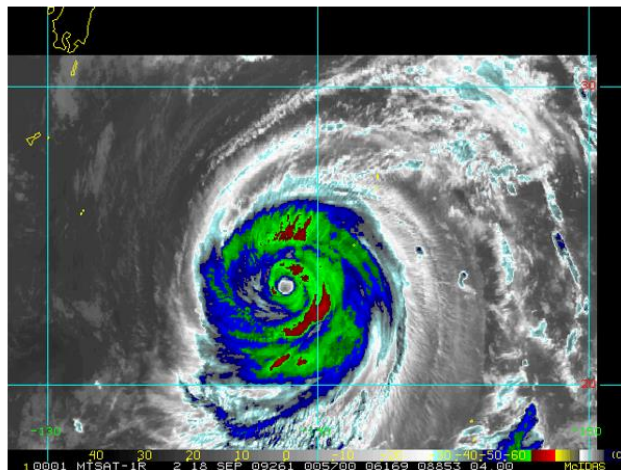


圖 1 彩雲颱風(2009)，(a) WRF 模式最大值雷達迴波圖，時間：2009 年 9 月 17 日 1820 UTC；(b) MTSAT 紅外線衛星雲圖，時間：2009 年 9 月 18 日 0057 UTC。

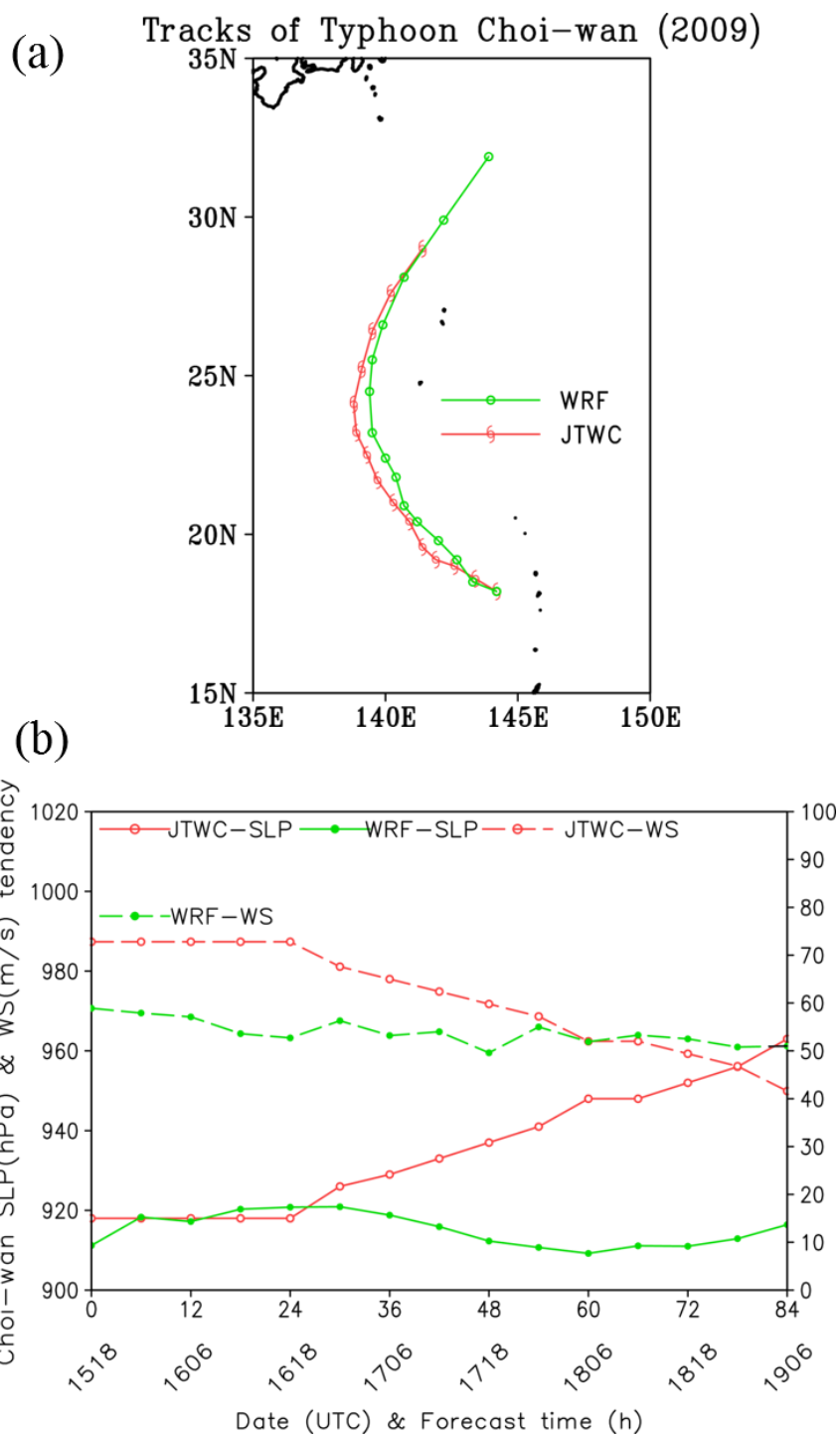


圖 2 彩雲颱風(2009)之 WRF 模擬結果。(a)模式路徑(WRF)與 JTWC 路徑圖；(b)模式強度演變(WRF)與 JTWC 強度演變(WS/SLP)圖。

速度較快。另外由於在使用渦旋植入的條件下，初始時間的強度與 JTWC (Joint Typhoon Warning Center) 的觀測強度也較為相近（圖 2b）。在模擬 24 小時之後，JTWC 的地面中心氣壓呈現逐漸減弱，模式則無此結果，但是在最大風速方面，不管是觀測或模式，其演變都呈現一致。隱含在颱風中，最小中心地面氣壓與最大風速不一定有絕對關係，此部分仍需更多探討，而本研究之重點也不在於完全與觀測之彩雲颱風相同而選用此個案，而是採取其生命期於海上並發展成強颱，且不受地形干擾之條件為主要模擬依據。在本研究中顯示模式已有掌握到彩雲颱風的強度和路徑，且已達到強烈颱風(Category 4)的標準，並具備颱風眼牆、眼牆隨高度傾斜、颱風雨帶等現象，符合典型發展完整之颱風結構，因此使用模式模擬的三維風場資料來分析颱風內部的氣塊軌跡具有相當的代表性。

2. 近地面層軌跡線

在模擬時間超過 24 小時後的 9 月 17 日 1820 UTC 為起始點，圖 3 為近地面 30 公尺選取上述第二部分之五個對流區，向前計算 20 小時，顯示在颱風眼區域的氣塊會往移動方向打轉（圖 3a），並且有逐漸上升的情況（圖 3b）；颱風眼牆及內核雨帶的區域也被限制在原本的位置，並隨著移動方向打轉，但是上升的情況較明顯，此區域打轉的位置受限於慣性穩定度，由於颱風眼牆區的慣性穩定度很大，因此颱風眼區的氣塊不易進入颱風眼牆(Holland and Merrill 1984)。氣塊上升至上層大氣約 15 公里後開始向外移動；外核雨帶和外圍環流區會隨著颱風環流往內旋轉而後上升，圖 3 中除颱風眼外，其餘區域之氣塊皆向內旋轉至颱風眼牆區域才開始抬升如圖 3c。

為了釐清氣塊分布問題，避免分析氣塊個數過少之不準確性，圖 4 為地面 30 公尺之叢集軌跡線圖，以解析度 3.3 公里網格在五個實驗點的上下左右各增加 2 個點的矩陣，共 25 個軌跡計算起始點，計算這些氣塊的軌跡，發現在颱風眼內主要的氣塊除了緩慢上升外，也有部分氣流（10 個實驗點）受到颱風眼牆內側影響而逆時針旋轉上升得較快如圖 4a，其三維速度約為 42 m/s。颱風眼牆、內核雨帶、外核雨帶和外圍環流中的氣塊流動則均呈現一致（圖 4b-e），但可明顯發現，無論於近地面的哪個位置，氣塊都向內旋轉至颱風眼牆相似於圖 3c，而後再往上抬升，並且三維速度由 23 m/s 增加至 49-56 m/s，然而當氣塊上升至高層時，三維速度減小至 3-6 m/s 並向外移動。另外，以外核雨帶而言（圖 4d），氣塊輻合至颱風眼牆位置而上升時，在中層則呈現散亂分佈的狀況，此種情況在外圍區更為明顯（圖 4e）。

圖 4f 為向後計算 24 小時之五個對流區叢集軌跡圖，代表氣塊的來源，顯示颱風眼的底層空氣被限制在眼內，其來源可能由內眼牆而來，並且其餘區域的氣塊皆由外圍底層而來，代表颱風眼牆於近地面層具有阻擋氣塊內流的現象。

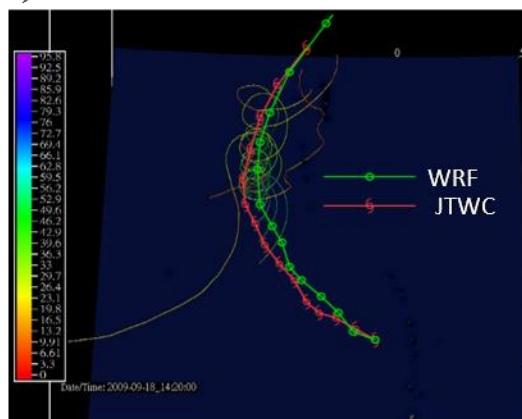
3. 近邊界層頂軌跡線

本研究中，使用的 YSU 邊界層參數法，是透過熱和溼度等通量並配合 K 剖面，即垂直通量梯度 K 理論，來決定邊界層之不穩定混合過程，而邊界層頂由浮力通量剖面決定，並且加入逸入層，使其垂直混合。K 剖面公式如下：

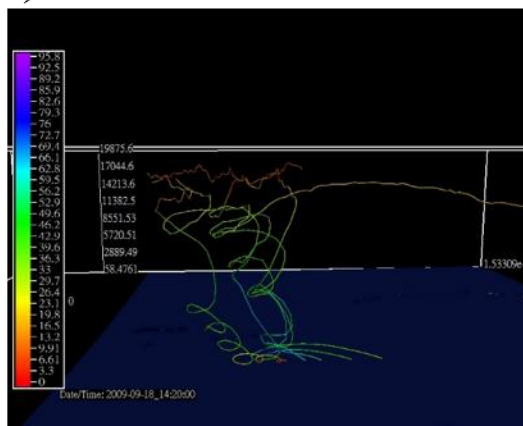
$$K_z(z) = k \frac{u_*}{\phi} z(1 - z/h)^p \quad (6)$$

這裡 k 是逢卡爾曼常數(von Karman constant)， u_* 為地表摩擦速度(surface friction velocity)， ϕ 為

(a)



(b)



(c)

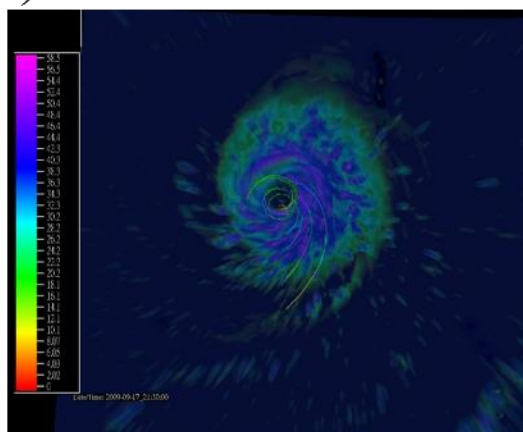


圖 3 彩雲颱風(2009)之 WRF 近地面 (30 公尺) 氣塊向前(forward)積分 20 小時軌跡線分析圖。單位：m/s。(a)水平視角；(b)垂直剖面視角，時間：2009 年 9 月 18 日 1420 UTC；(c)水平視角與半透明之雷達回波，單位：dBZ，時間：2009 年 9 月 17 日 2130 UTC。

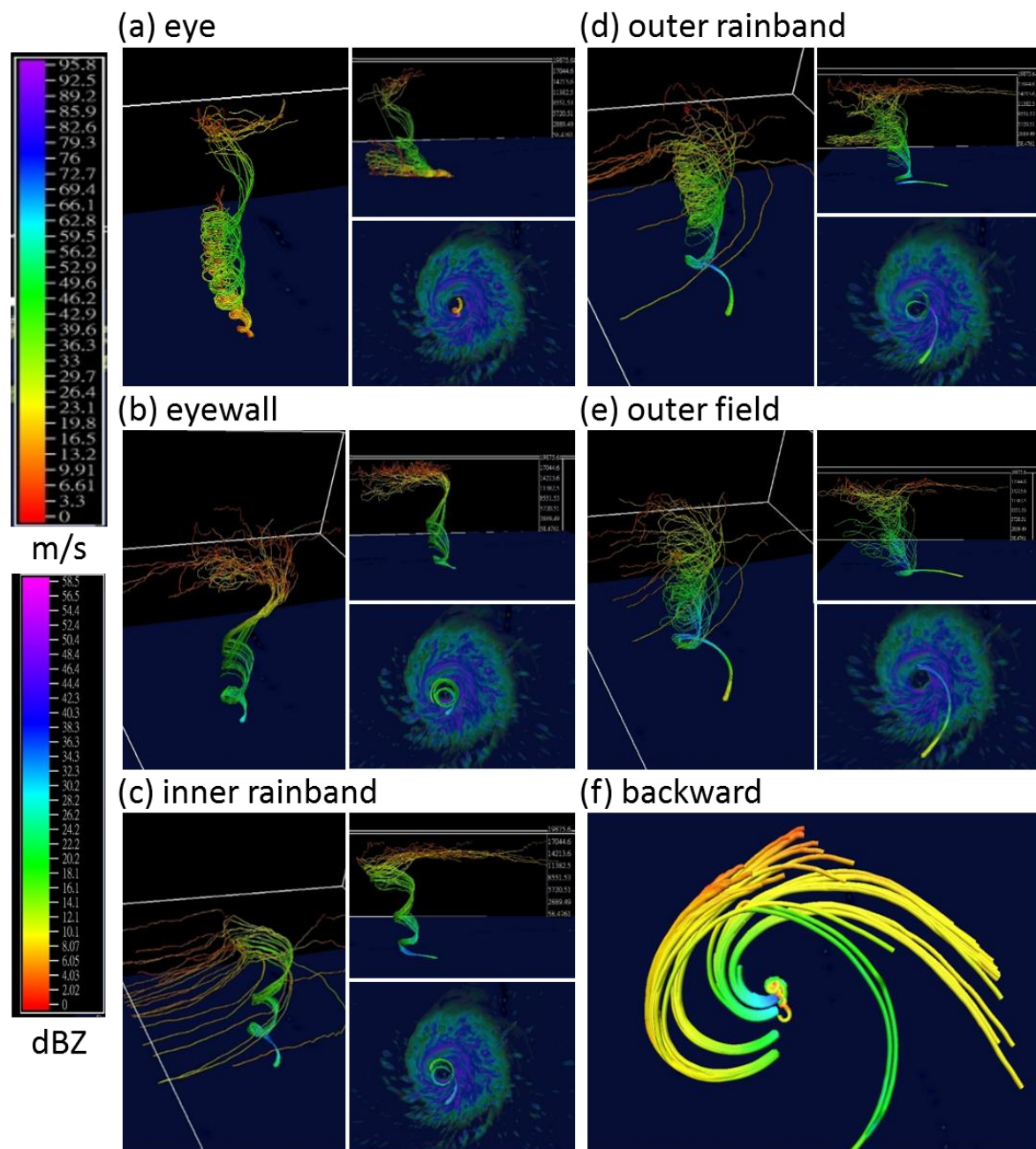


圖 4 彩雲颱風(2009)之 WRF 近地面 (30 公尺) 氣塊軌跡線分析圖, 單位: m/s。(a)颱風眼; (b)颱風眼牆; (c)內核雨帶; (d)外核雨帶; (e)外圍環流區, 各圖右上為垂直剖面視角, 右下為水平視角與半透明之雷達回波, 單位: dBZ, 水平視角向前積分 3 小時, 其餘向前積分 20 小時; (f)五個分析區向後積分 24 小時。

無因次風切， z 為離地面高度， h 為邊界層頂高度， p 為控制垂直混合擾動程度包括溫度和水氣之數值。

YSU 較常適用於颱風模式之模擬設定參數，原因之一為其具備較強的垂直混合擾動(Hu et. al 2010)，因此在颱風強烈擾動的情況下，能合理的模擬其颱風結構。邊界層高度雖然會隨著時間和空間變化，為了簡化實驗，本研究以離地面高度 1 公里之分析代表近邊界層頂，初步檢視其氣塊軌跡的運動情形，根據 Zhang et. al (2013)對動力邊界層頂的定義，為颱風平均軸對稱最大切向風之位置，由圖 7a, b 亦可發現模擬颱風之近邊界層頂約為 1 公里 (880 hPa 左右)，再加上本研究亦分析了高度 700、1300、1500 公尺之實驗點 (圖未顯示)，氣塊軌跡特性皆與高度 1 公里之實驗點結果相仿，也就是說此高度可代表在摩擦力減少的低對流層的氣塊運動情形。

圖 5 顯示向前計算 20 小時，離地面 1 公里高度之叢集軌跡線圖，颱風眼區的實驗點比起 30 公尺之分析 (圖 4a)，較多受到颱風內側眼牆逆時針旋轉的影響而上升 (12 個實驗點)，其餘中心部分仍舊在颱風眼內由三維速度約 3.0 m/s 緩慢上升 (圖 5a)，並且由於受影響之氣塊三維速度約為 33-36 m/s，其速度比未受影響之中心氣塊還要快，因此圖中顯示 20 小時內在高空移動的氣塊也較多。隨著離地面高度越高，受摩擦力減少的緣故而徑向風較弱，因此在相同經緯度之不同高度的實驗點下，越高層則越容易隨著颱風眼牆旋轉 (圖 6a)。相似的結果在圖 5b-e 亦可發現，不同於颱風近地面層的軌跡線，圖 5b 中颱風眼牆的軌跡線隨著時間，仍然在颱風眼牆的位置旋轉上升。值得注意的是，內核雨帶和外核雨帶區域由於在颱風東側輻合 (圖 1)，因此圖 5c, d 顯示這兩個

區域均繞著內核雨帶旋轉上升，並且因為隨著颱風的移動一邊往北一邊旋轉。另外，氣塊在颱風眼和颱風眼牆區的高層有向外移動的情況，顯示有部分垂直運動的氣塊 (圖 5b 紅色圈部分及圖 7d)，但於內核和外核雨帶則順著環流進行水平移動，且所有區域之高層氣塊三維速度約為 9-16 m/s，均比中低層的 42-66 m/s 要弱。最後，圖 5e 外圍區的氣塊軌跡亦顯示仍舊在外圍區打轉，三維速度雖有 46 m/s，但由於計算 20 小時仍在外圍，高度約為 9 公里，因此得知其緩慢上升之速度為 0.1 m/s，無法向內繞進，對照圖 7d 之外圍垂直速度亦是如此。圖 5f 綜合描述了上述情況，和地面 30 公尺的氣塊軌跡線有顯著的不同，也就是離近地面層越高的區域，則越明顯受到自由大氣的影響，並且颱風眼區域氣塊在旋轉上升時只會在颱風眼區；颱風眼牆區域氣塊在旋轉上升時只會在颱風眼牆區域；其餘對流區域亦是如此。檢視在起始時間點的五個區域，由底層至中層的風場如圖 6，均為順時針向上空旋轉，這解釋了底層的氣塊會先向內旋轉至颱風眼牆再上升，而近邊界層頂的氣塊則維持在原本的對流區域旋轉的情況，此結果與由地表摩擦作用所產生的艾克曼螺旋理論概念一致，如圖 4, 5 之平面視角圖與雷達回波圖所示。

分析近邊界層頂氣塊來源的結果顯示，颱風眼的氣塊被侷限於眼內，圖 8a 可發現在 25 個實驗點中均為此狀況，其餘的區域皆顯示氣塊來源由外圍而來 (圖 8b-e)，但仍需注意的是，與颱風底層的氣塊來源分布仍有相當的差異，在颱風底層氣塊來源較固定且密集 (圖 4f)，然而在近邊界層頂上，氣塊則由分散的外圍環流區域分別向內旋轉 (圖 8b-e)，此部分仍有待釐清，另外，圖 8 之氣塊來源軌跡線於此高度仍然只具有微弱的垂

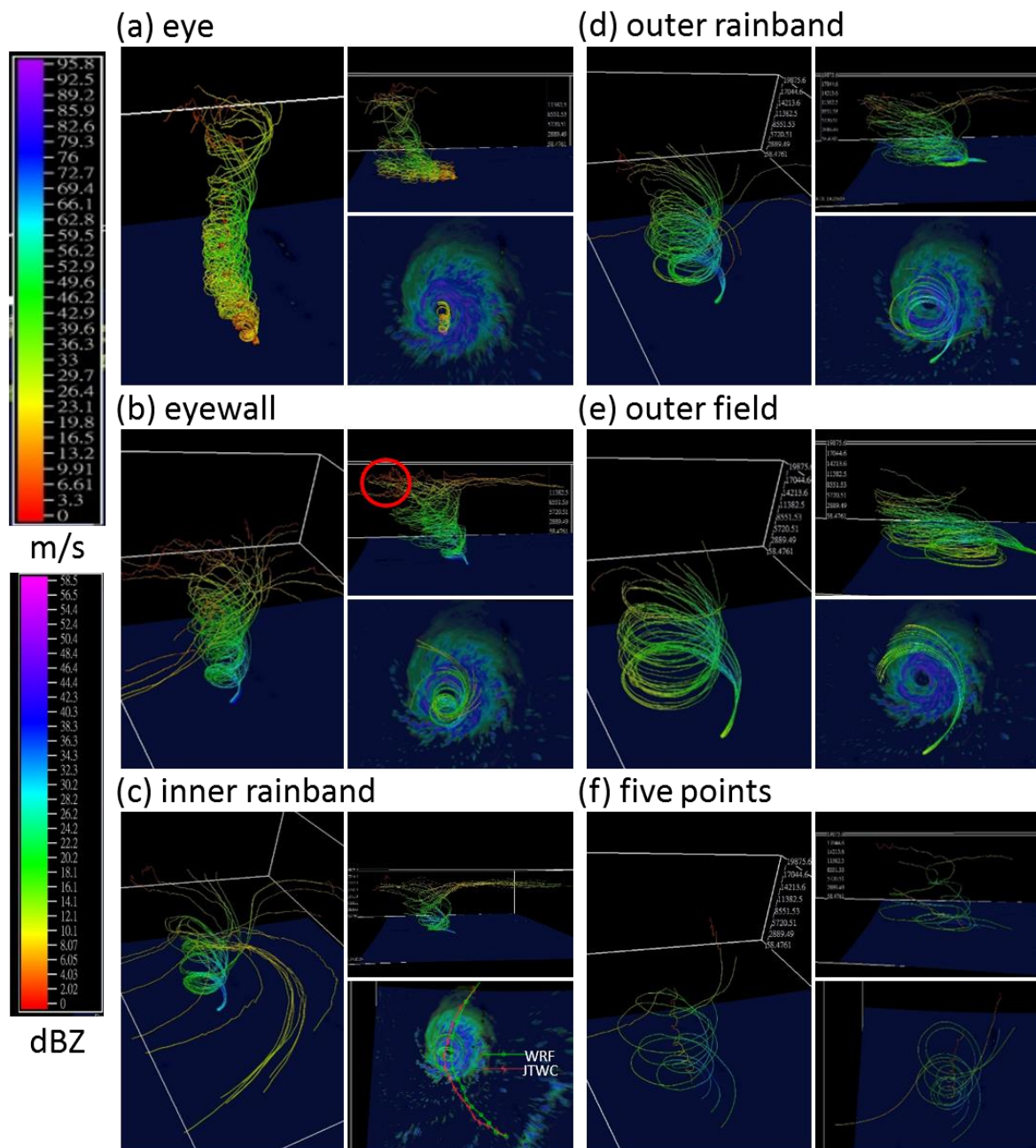


圖 5 彩雲颱風(2009)之 WRF 近地面 (1 公里) 氣塊軌跡線分析圖，單位：m/s。(a)颱風眼；(b)颱風眼牆；(c)內核雨帶；(d)外核雨帶；(e)外圍環流區，各圖右上為垂直剖面視角，右下為水平視角與半透明之雷達回波，單位：dBZ，水平視角向前積分 6 小時，其餘向前積分 20 小時；(f)五個分析區向後積分 24 小時。

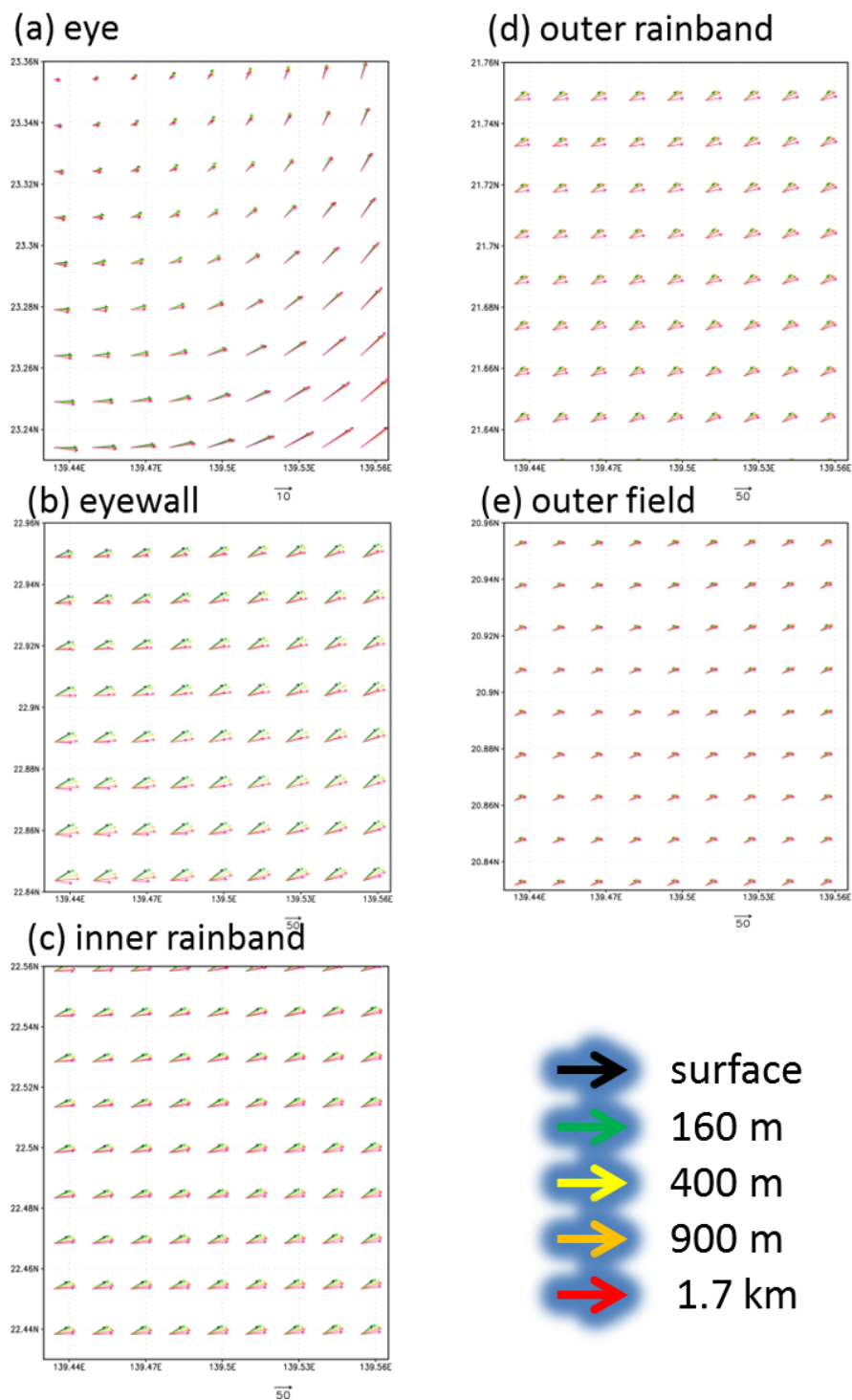


圖 6 彩雲颱風(2009)之 WRF 不同高度風向風速分析圖。(a)颱風眼；(b)颱風眼牆；(c)內核雨帶；(d)外核雨帶；(e)外圍環流區。

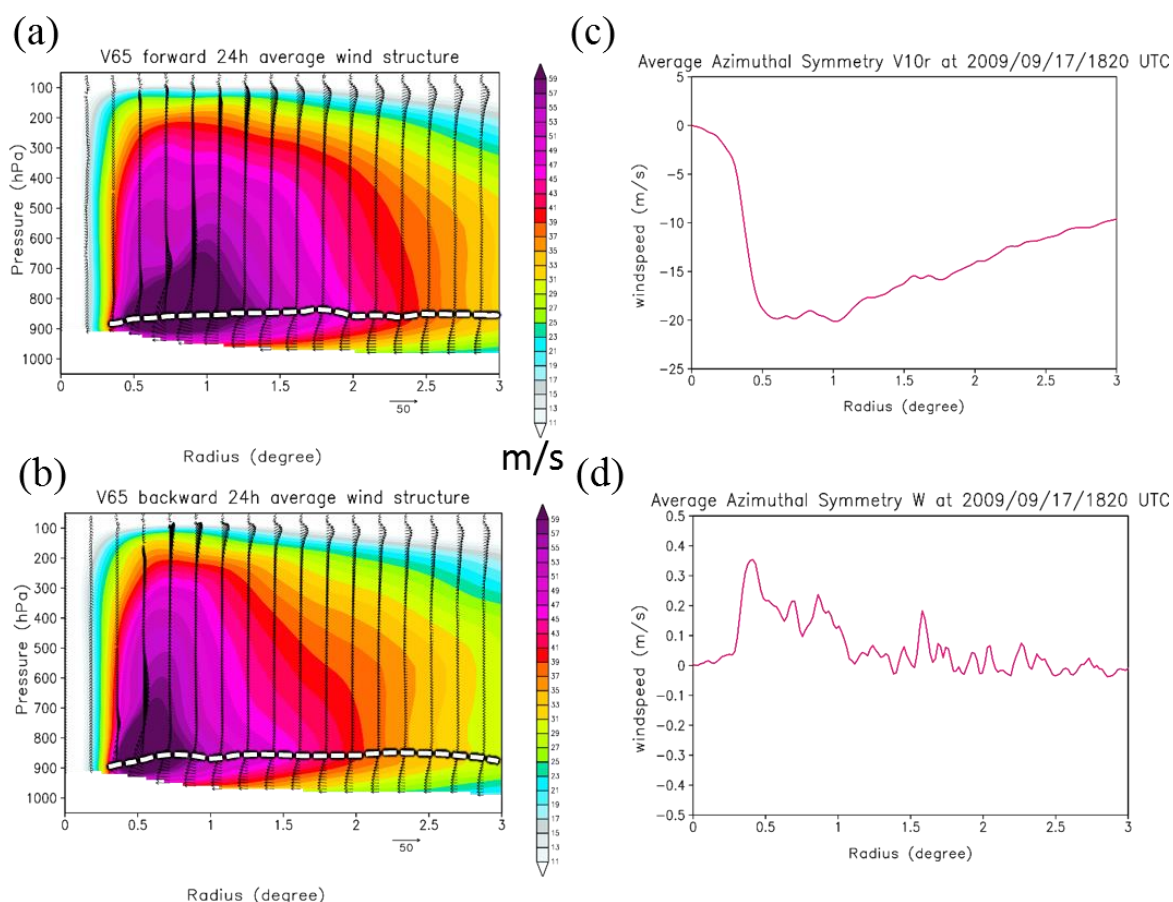


圖 7 彩雲颱風(2009)之 WRF 軸對稱平均風場分析圖，時間為 2009 年 9 月 17 日 1820 UTC，色階為切向風之強度，向量為徑向速度與 50 倍垂直速度之合成向量，單位為 m/s。(a)往前平均 24 小時；(b)往後平均 24 小時；(c)地面軸對稱徑向速度；(d)900 hPa 之軸對稱垂直速度。圖(a)、(b)中之白色折線代表動力邊界層頂所在位置。

直運動（可參考結論之網址連結），顯然離地面 1 公里的高度處於近邊界層和自由大氣的雙重影響。綜合圖 5 和圖 8 的結果，可得於近邊界層頂之氣塊會由颱風外圍環流區向內旋轉至對流區，並在進入相對應之對流區後，開始維持在其對流區旋轉並向上抬升（如固定視角的圖所示）。

4. 中高層自由大氣軌跡線

為了瞭解中高層大氣氣塊移動情況，本研究檢視離地面 5 公里、10 公里的實驗點，圖 9a 顯

示離地面 5 公里高度的颱風眼氣塊，其的垂直上升運動相當緩慢為 0.05 m/s。近年來由於衛星遙測的進步，許多觀測的颱風雲圖皆可發現，颱風眼牆內側的雲是由下往外傾斜而上(Simpson 1952; Jorgensen 1984; Bluestein and Marks 1987)，而 Marks et al. (2008)亦使用飛機雷達回波等資料分析其結構。因此固定實驗點的經緯度，隨著高度增加，離颱風眼牆內側距離越遠，所有實驗點呈現三維速度約為 3 m/s 緩慢旋轉上升(比對圖 7)，其餘甚至在 20 小時內無法抬升至高層（圖 9a）。

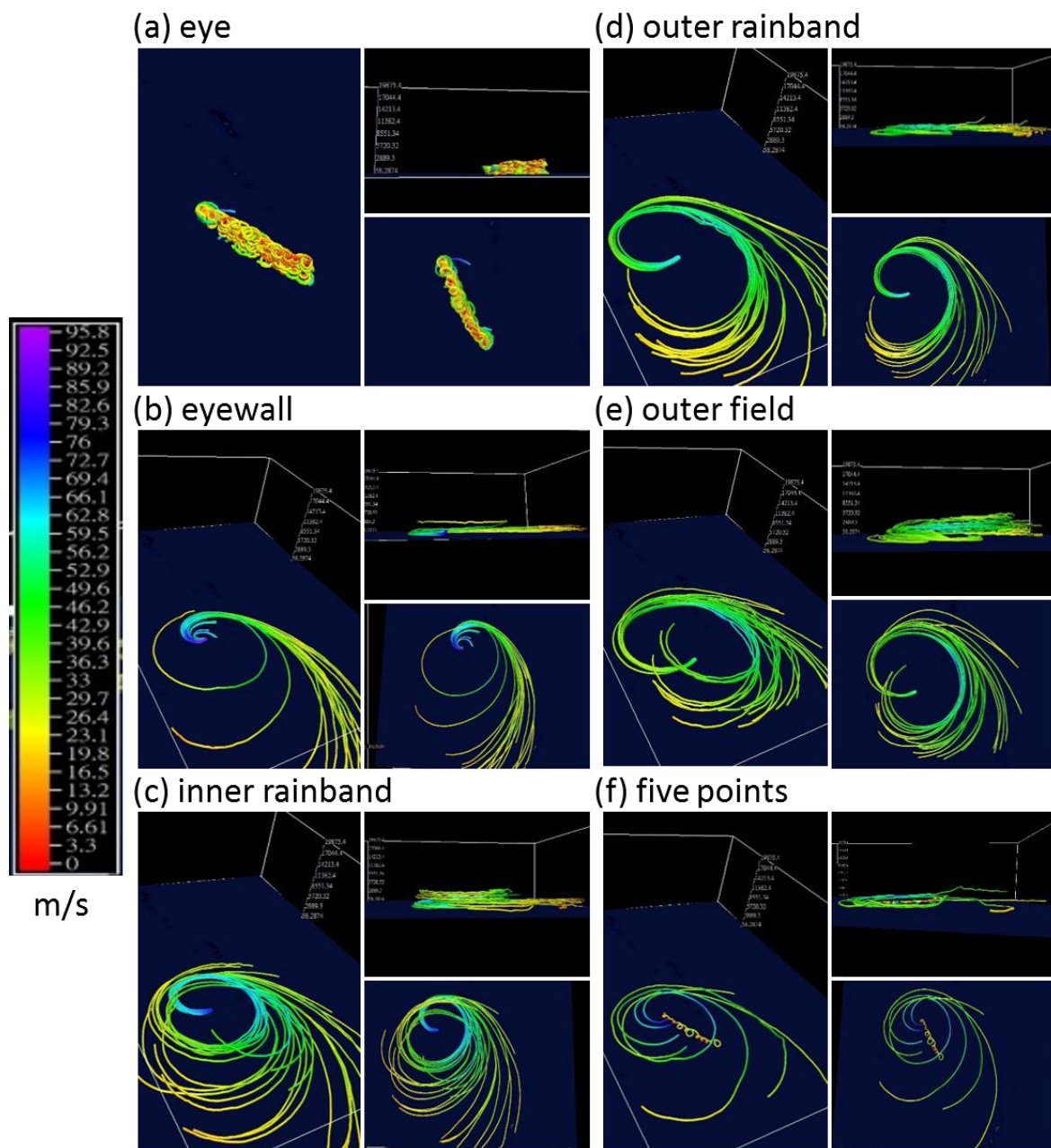


圖 8 彩雲颱風(2009)之 WRF 近邊界層頂(1 公里)氣塊軌跡線分析圖。(a)颱風眼；(b)颱風眼牆；(c)內核雨帶；(d)外核雨帶；(e)外圍環流區；(f)五個實驗點，向後積分 24 小時。

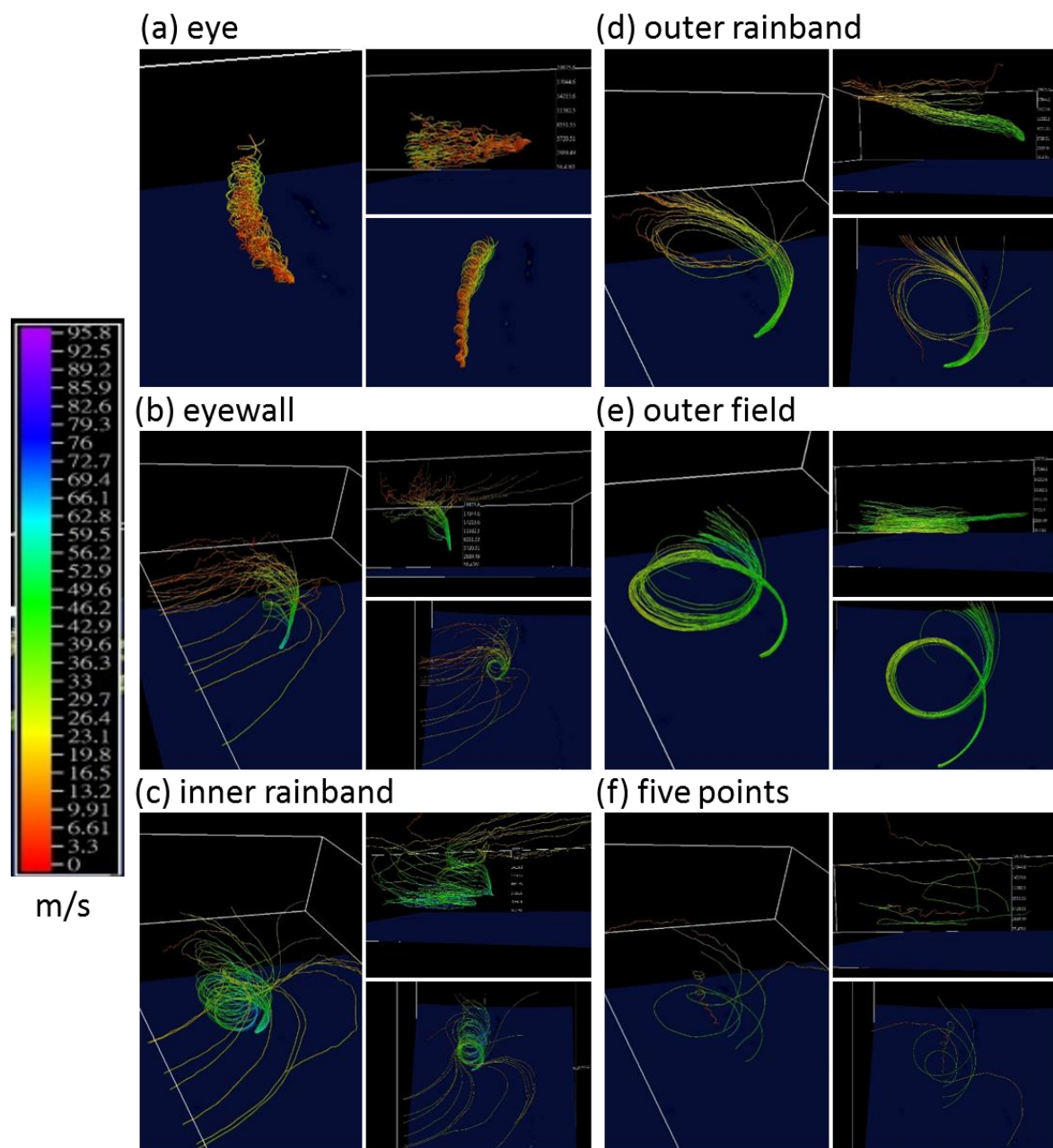


圖 9 彩雲颱風(2009)之 WRF 中層自由大氣(5 公里)氣塊軌跡線分析圖。(a)颱風眼；(b)颱風眼牆；(c)內核雨帶；(d)外核雨帶；(e)外圍環流區；(f)五個實驗點，向前積分 20 小時。

圖 9b 指出有 21 個實驗點之氣塊以三維速度約 63 m/s 快速往上移動，與一般對颱風結構的認知一致，在中層的颱風眼牆垂直運動較劇烈。圖 9c, d 顯示在內核和外核雨帶的運動情況並無輻合在內核雨帶的位置，與近地面層不相同，並且外核雨帶垂直上升的速度也增加為 0.15 m/s，而圖 10a 的 500 hPa 高度場與風場平行亦代表摩擦力越來越小，艾克曼螺旋的程度亦越大。圖 10 比較底層和中層 5 公里高度的風場，可更清楚顯示其流場狀況，圖 10b 為底層風場及對流區，由圖 7c 得知具有較強的徑向風（約 20 m/s）以至於產生輻合；相反地，圖 10c 為離地面 5 公里高度($\sigma = 0.57$)之風場，整體而言多為同心圓，氣塊沒有輻合。因此，圖 9e 中層外圍環流區與圖 10c 之風場結構一致。另一方面，向後計算 24 小時的結果在圖 11，颱風眼的實驗點為圖 11a 中紅色圈的位置，可發現其氣塊來源有 4 個實驗點為底層氣塊上升，其餘實驗點隨著颱風的移動路徑旋轉上升或下沉（請參考結論所附動態影片）。圖 11b 之颱風眼牆內側區域亦有 4 個實驗點在受其限制而打轉。圖 11b-d 呈現與圖 5 和圖 8 綜合的結果，氣塊由外圍低層旋轉至對應的對流區，而後維持在其區域旋轉上升。值得注意的是，在離地面 5 公里高度的外圍環流區，其氣塊來源除了由低層旋轉上升外，也包含了在中層水平旋轉的氣塊（圖 11e, f），顯示其自由大氣較不受摩擦力限制的特性（圖 10a）。

在高層的颱風眼內之氣塊移動情形則呈現出上升和下沉交錯出現的垂直運動特徵，此部分與 Willoughby (1998)所提出的熱力結構示意圖中，高層颱風眼是大範圍的下沉氣流區有所差異，雖然在 Liu et. al (1999)的研究中未提及颱風眼中心高層的氣流，但從他們的圖 3h 仍可發現有些微的

上升氣流，且在 Yau et. al (2004)的研究中，由他們的圖 6a 仍可發現颱風眼高層有上升氣流，只是相關研究都顯示颱風眼牆內側有較明顯的下沉氣流，至於此部分的動力機制則需更多釐清。由於颱風眼牆隨高度外傾的關係，因此這個位置的氣塊受到颱風內側眼牆影響大幅減少（圖 12a），其三維速度僅 10 個實驗點能達到約 15 m/s。此外，此區域氣塊皆為下沉，確可觀察出有 3 個實驗點初期有往上抬升之情況，目前也無學理能解釋颱風眼區高層的氣塊往上抬升的物理因素，此結果將需進一步分析。另一方面，若分析氣塊軌跡的高度繼續往上提升至對流層頂，則呈現的結果就越混亂（圖未示）。圖 12b 可發現颱風眼牆的氣塊相當一致地上升至近平流層底的高度，而後向外移動，並且垂直剖面圖顯示一部分的氣塊將進行下沉並向外移動的運動（請參考結論所附動態影片）。圖 12c-e 的氣塊軌跡線均整齊地順著逆時針環流移動，而後才呈現順時針環流而外流，並且可從垂直剖面以及圖 12f 發現，按著 5 個實驗點順序排列，越靠近颱風眼牆的位置，其對流強度越強，氣塊抬升的高度就越高（圖 7a, b, d），呈現合理的結果。高層的向後計算 24 小時的結果如圖 13a，紅色圈為氣塊軌跡計算起始點，其中 19 個實驗點之氣塊來源為颱風眼內較低高度（約 8 公里）的上升和較高高度（約 13 公里）的下沉運動，但有 6 個實驗點有兩次由底層快速旋轉上升（三維速度約 46 m/s）後又下沉而來（請參考結論所附動態影片）。相對而言，除了颱風眼的區域，其餘的區域在高層較有規則性，但仍然因為自由大氣的特性而稍有變化，以圖 13c-e 來說，氣塊會在其環流區上升至實驗點的位置。除此之外，圖 13b 清楚顯示在高層的颱風眼牆其來源出現了伴隨著颱風移動的旋轉情況。

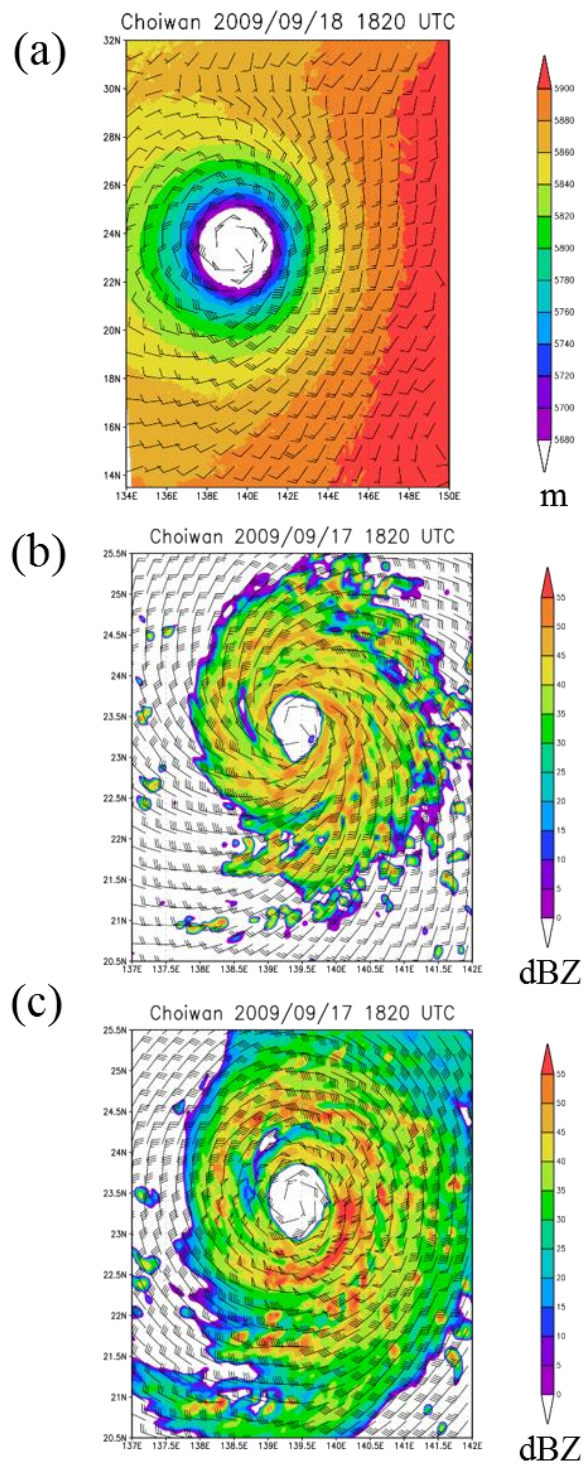


圖 10 彩雲颱風(2009)之 WRF 流場圖。(a)疊加 500 hPa 高度場；(b)離地面 10 公尺高度疊加雷達回波；(c)離地面約 5 公里高度($\sigma = 0.57$)疊加雷達回波。單位分別為：m、dBZ。

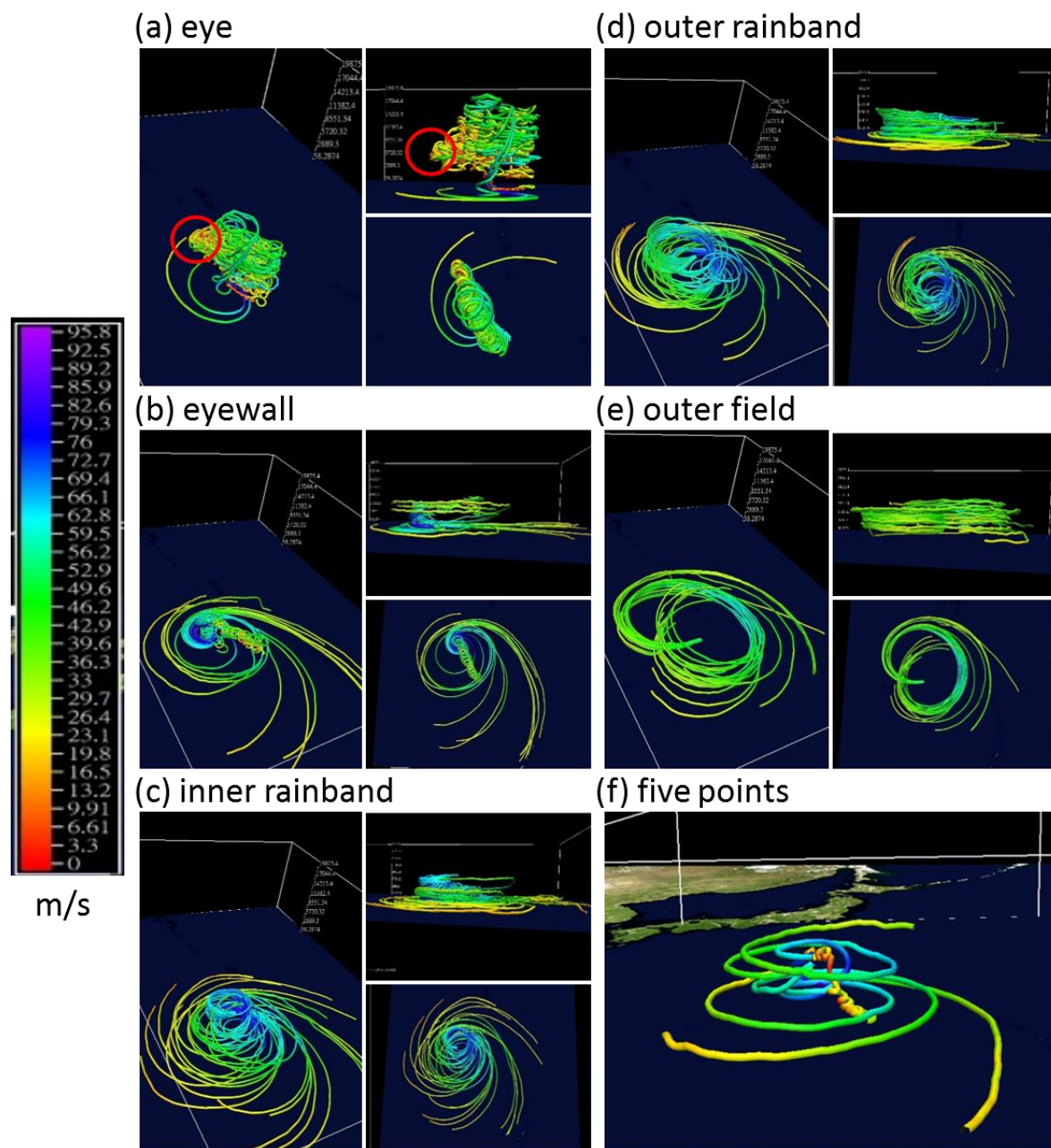


圖 11 彩雲颱風(2009)之 WRF 中層自由大氣(5 公里)氣塊軌跡線分析圖。(a)颱風眼，紅圈為初始點；(b)颱風眼牆；(c)內核雨帶；(d)外核雨帶；(e)外圍環流區；(f)五個實驗點，向後積分 24 小時。

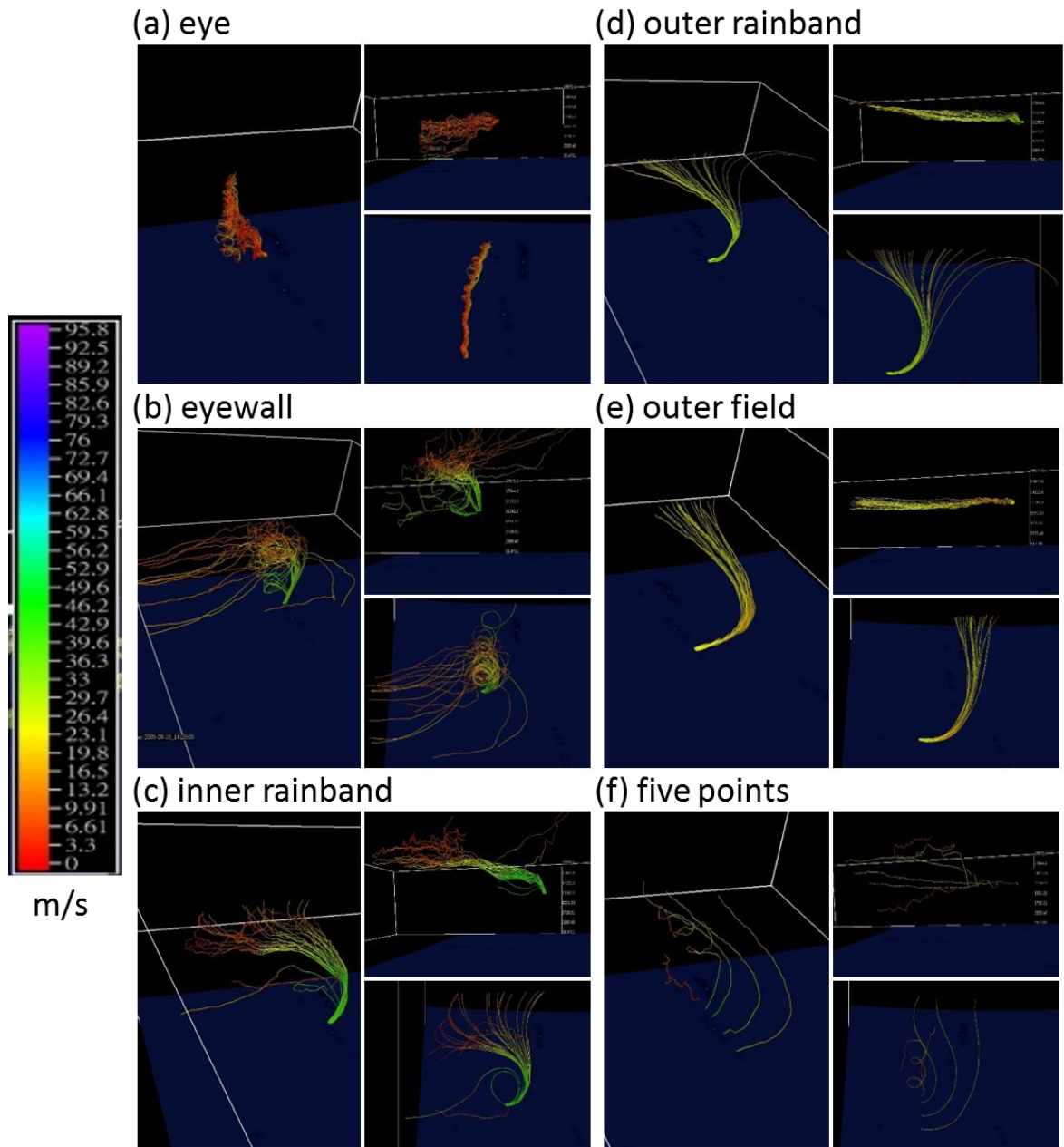


圖 12 彩雲颱風(2009)之 WRF 高層自由大氣(10 公里)氣塊軌跡線分析圖。(a)颱風眼；(b)颱風眼牆；(c)內核雨帶，左下為側視圖；(d)外核雨帶；(e)外圍環流區；(f)五個實驗點，向前積分 20 小時。

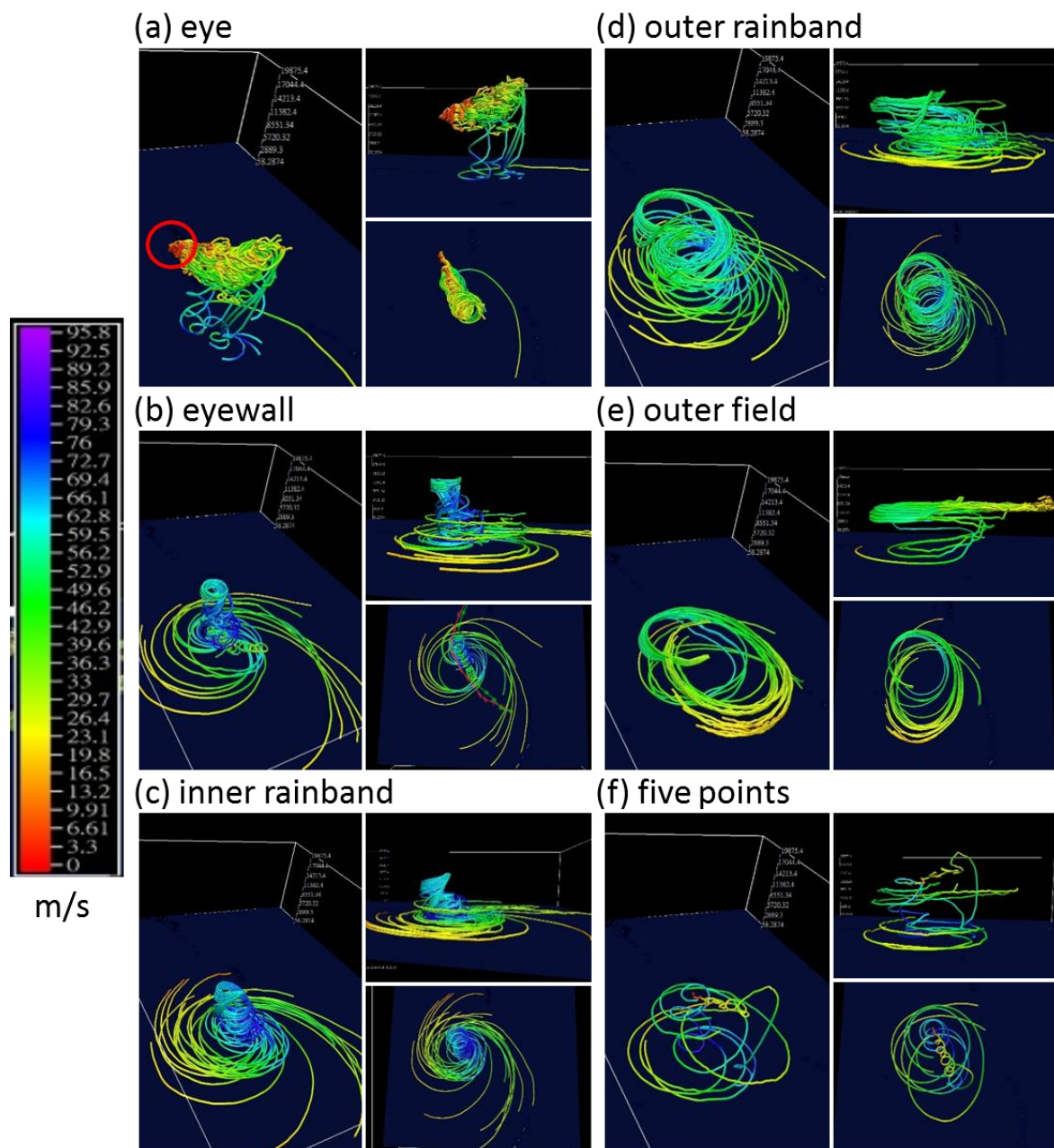


圖 13 彩雲颱風(2009)之 WRF 高層自由大氣(10 公里)氣塊軌跡線分析圖。(a)颱風眼，紅圈為軌跡計算之初始點；(b)颱風眼牆；(c)內核雨帶；(d)外核雨帶；(e)外圍環流區；(f)五個實驗點，向後積分 24 小時。

比離地面 10 公里更高的高空，甚至在 13 公里以上，其氣塊軌跡不論是向前或向後計算，都呈現相當混亂的狀態（圖未示），因此目前尚未發現比較明確的運動規則和原因。

五、結語與展望

本研究使用 WRF 模式模擬彩雲颱風(2009)成熟期間高時間、空間解析度的資料，並透過新一代 VAPOR 的三維軌跡分析程式，以 Lagrange 的角度來分析熱帶氣旋於沒有顯著環境因子影響下的氣流運動特徵。研究分析結果顯示，離地面 30 公尺的底層氣塊來源皆為底層外圍區，代表底層氣塊除了颱風眼之外均向內旋轉；而後氣塊持續向內旋轉至颱風眼牆的位置才旋轉上升。而近邊界層頂高度（1 公里）的氣塊來源，則於颱風外圍環流區水平向內旋轉至各個對流區，並受到摩擦較小的影響，其來源較為分散，而後氣塊會維持在對應之對流區域旋轉上升。

在中層區域之自由大氣中（5 公里），颱風眼的水平大小較底層大，在弱風切下的颱風眼之高低層位置應一致之條件下，其氣塊的來源分為更高層（約 8 公里）、低層（約 3 公里）及底層三個部分，而且隨著颱風的移動而往移動方向旋轉；而在颱風眼牆以外的區域，其氣塊來源除了在外圍環流區有從中層和低層而來，其餘來源皆為外圍近邊界層頂，而後氣塊亦維持在對應的對流區域旋轉上升。

而高層大氣（10 公里）具有較紊亂的趨勢，尤其在颱風眼更為明顯，其氣塊來源有 18 個實驗點之氣塊在更高層（13 公里）和中高層（8 公里）的颱風眼內，也有 6 個實驗點之氣塊從底層外圍旋轉至颱風眼牆，而後又逸入颱風眼內，但是一

旦進入眼內，仍然會被限制在其間做垂直運動；而高層的其餘區域之氣塊來源，顯示和中層相似的結果，但具有較多的垂直運動，而後氣塊的走向與中層不同的地方，在於其快速一致性的上升至對流層頂後向外移動或下沉，這也是由於對流較強所導致，越接近颱風眼牆，氣塊能上升的高度越明顯。

本研究分析之氣塊軌跡有助於更細節地了解颱風系統中氣塊運動的整體情況，圖 14 為綜合上述討論所繪出之颱風結構示意圖。最顯著的部分為近地面之氣塊來源由外圍向內傳送至颱風眼牆後上升，但在圖 15 中之現有颱風示意圖教材中是以 Eulerian 的角度所分析，無清楚標示內流氣塊之高度，在近邊界層頂附近的氣塊雖然其來源也是外圍區域，但卻會在相對應的對流區如外圍環流、外核雨帶、內核雨帶便往上抬升，此兩處之不同從圖 15b 並無法釐清。另外在高層颱風眼區仍然出現氣塊會緩慢以逆時針旋轉（約三維速度 3 m/s）並抬升的情況。在高層的颱風眼牆會因往上抬升之垂直對流強勁而使氣塊達到對流層頂，而後上下振動並往單一方向移動（圖 12b, f），其餘高層的對流區亦往不同方向移動，但卻沒有足夠強的對流抬升情況。為了幫助更清楚圖文對應，本研究將分析圖之三維動態結果上傳至 YouTube 網站，各層及各對流區向前積分 20 小時之結果網址如下：<http://www.youtube.com/playlist?list=PLqIAiX68IRx3ZP9gEH4-1Ncegni-7Q6y8>。

各層及各對流區向後積分 24 小時之結果網址如下：http://www.youtube.com/playlist?list=PLqIAiX68IRx2zLF__sQpgnMKhzl_outwh。

另外，為了釐清此研究之結果是否可能為模擬之結果所產生之問題導致，本研究亦使用了渦

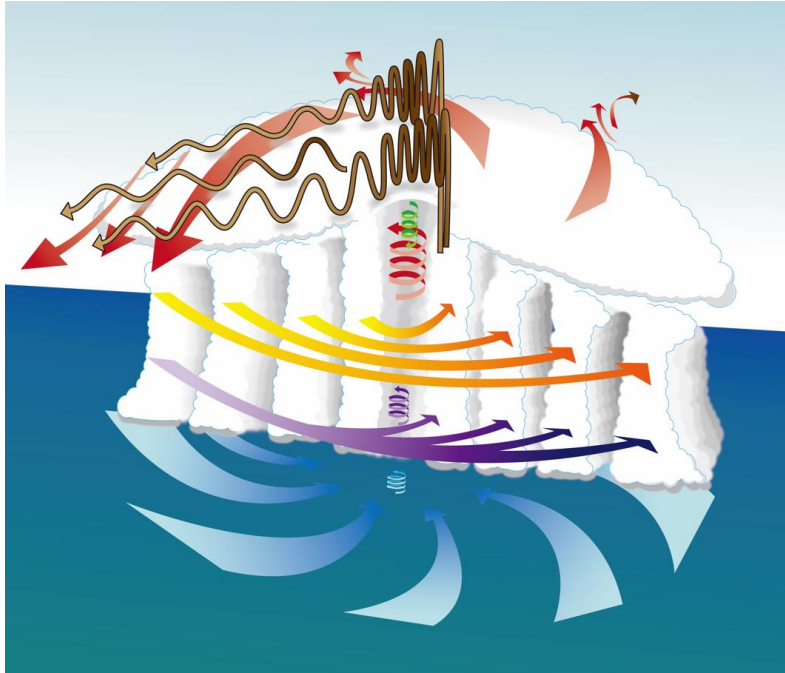


圖 14 颱風結構示意圖。底部藍色箭頭高度為近地面 30 公尺；紫色箭頭為離地面高度 1 公里之氣塊來源；橘色箭頭為中層自由大氣高度之對流區對流情況；褐色箭頭為高層自由大氣之颱風眼牆對流情況，紅色箭頭為高層自由大氣個對流區移動情況；颱風眼內的綠色、紫色、藍色和紅色旋轉箭頭為其垂直運動情況。

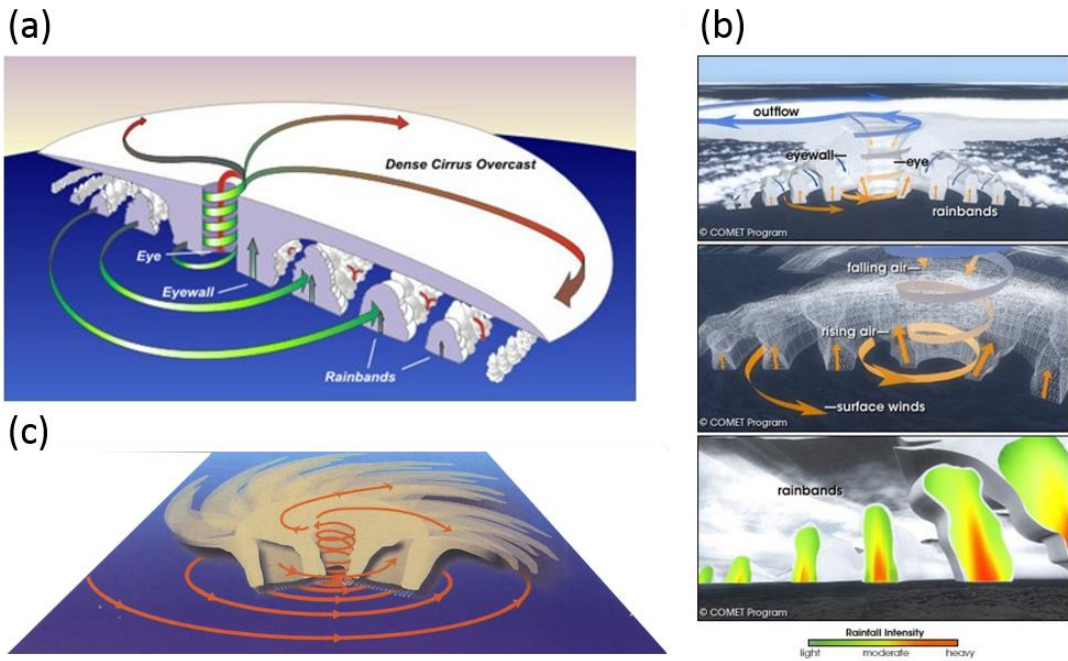


圖 15 颱風結構示意圖。(a)圖來源為 NOAA；(b)圖來源為 UCAR；(c)圖來源為 Emanuel (2005)。

旋植入最大風速為 30 m/s 之實驗，於成熟期之強度和其颱風軌跡線結果與控制組(CTL)實驗之模擬相似且一致(圖未示)，即排除模擬實驗中可能產生的不確定性。

雖然以目前的模式架構及電腦能力無法計算到紊流尺度的氣塊運動特徵，不過本研究中 3.3 公里的網格解析度仍可定性地分析整體颱風的結構。然而本研究仍有許多尚待解開的問題，除了在颱風眼牆的結果與過去的研究有些許差異外，比如在對流區和對流區的中間區域，其氣塊運動情況尚待釐清；在強垂直風切條件下所造成的颱風傾斜情況時，其氣塊運動特徵又會如何？環境風切導致的對流不對稱現象發生時，各氣塊的分布狀況將如何呈現？甚至颱風遇到地形時所產生的變化，都值得透過三維軌跡分析來深入探討。未來將分析上述由於外在環境因子所產生的影響，並嘗試更加提高解析度，以盼更清楚瞭解颱風內部的結構與其氣塊運動特徵。

致謝

本研究是在科技部計畫 NSC 101-2119-M-034-001 及 NSC 102-2119-M-034-001 的支持下完成研究。另外，特別感謝 2 位審查委員之建議與文圖訂正，對於本論文之改進有很大的助益。

參考文獻

- 周昆炫及黃柏智，2010：渦旋植入對不同降水物理參數法颱風路徑系集預報之影響研究，大氣科學，38，301-329 頁。
- 林能暉、彭啟明及陳進煌，1998：東亞硫化物之長程輸送：氣流軌跡線之應用，大氣科學，26，265-280 頁。
- 吳俊傑、黃清勇、楊明仁、簡芳青、洪景山、顏自雄，2010：颱風數值模擬之現況與挑戰——2009 年莫拉克颱風，大氣科學，38，99-134 頁。
- Bluestein, H. B., and F. D. Marks, 1987: On the Structure of the Eyewall of Hurricane Diana (1984): Comparison of Radar and Visual Characteristics. *Mon. Wea. Rev.*, 115, 2542-2552. doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1987\)115<2542:OTSOTE>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1987)115<2542:OTSOTE>2.0.CO;2)
- Chiao, S. and G. Jenkins, 2010: Numerical investigations on the formation of tropical storm Debby during NAMMA-06. *Wea and Forecasting*, 25, 866-884.
- Chou, K.-H., and C.-C. Wu, 2008: Development of the typhoon initialization in a mesoscale model combination of the bogus vortex and the dropwindsonde data in DOTSTAR. *Mon. Wea. Rev.* 136, 865-879.
- Emanuel, K. A., 2005: *Divine Wind: The History and Science of Hurricanes*. Oxford University Press, pp. 296.
- Frank, W. M., 1977: The Structure and Energetics of the Tropical Cyclone I. Storm Structure. *Mon. Wea. Rev.*, 105, 1119-1135. doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1977\)105<1119:TSAEOT>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1977)105<1119:TSAEOT>2.0.CO;2)
- Galvin, P. J., P. J. Samson, P. E. Coffey, and D. Ramano, 1978: Transport of sulfates to New York state, *Environ. Sci. Technol.*, 12, 580-591. doi: 10.1021/es60141a012

- Gibbs, J. A., E. Fedorovich, and A. M. J. van Eijk, 2011: Evaluating Weather Research and Forecasting (WRF) Model Predictions of Turbulent Flow Parameters in a Dry Convective Boundary Layer. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 50, 2429-2444. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2011JAMC2661.1>
- Holland, G. J., and R. T. Merrill, 1984: On the dynamics of tropical cyclone structural changes, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 110, 723-745.
- Hu, X.-M., J. W. Nielsen-Gammon, and F. Zhang, 2010: Evaluation of Three Planetary Boundary Layer Schemes in the WRF Model. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 49, 1831-1844. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2010JAMC2432.1>
- Huang, Y.-H., C.-C. Wu, and Y. Wang, 2011: The Influence of Island Topography on Typhoon Track Deflection. *Mon. Wea. Rev.*, 139, 1708-1727. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2011MWR3560.1>
- Jian, G.-J., and C.-C. Wu, 2008: A Numerical Study of the Track Deflection of Supertyphoon Haitang (2005) Prior to Its Landfall in Taiwan. *Mon. Wea. Rev.*, 136, 598-615. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2007MWR2134.1>
- Jorgensen, and F. David, 1984: Mesoscale and Convective-Scale Characteristics of Mature Hurricanes. Part I: General Observations by Research Aircraft. *J. Atmos. Sci.*, 41, 1268-1286. doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469\(1984\)041<1268:MACSCO>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469(1984)041<1268:MACSCO>2.0.CO;2)
- Kenwright, D. and Lane, D., 1995: Optimization of Time-Dependent Particle Tracing Using Tetrahedral Decomposition, *Proceedings of Visualization '95*, IEEE Computer Society Press, October.
- Liu, Y., D.-L. Zhang, and M. K. Yau, 1999: A Multiscale Numerical Study of Hurricane Andrew (1992). Part II: Kinematics and Inner-Core Structures. *Mon. Wea. Rev.*, 127, 2597-2616. doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1999\)127<2597:AMNSOH>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1999)127<2597:AMNSOH>2.0.CO;2)
- Marks, F. D., P. G. Black, M. T. Montgomery, and R. W. Burpee, 2008: Structure of the Eye and Eyewall of Hurricane Hugo (1989). *Mon. Wea. Rev.*, 136, 1237-1259. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2007MWR2073.1>
- Miller, B. I., 1958: The three-dimensional wind structure around a tropical cyclone. *NHRP Rep.* 15, 41 pp. [Available from NOAA/TPC Library, 11691 SW 17th St., Miami, FL 33165.]
- Miller, B. I., 1962: On the momentum and energy balance of Hurricane Helene (1958), *Nat. Hurricane Res. ProjRep.* 53.
- Miller, J. M., J. N. Galloway, and G. E. Likens, 1978: Origin of air masses producing acid precipitation at Ithaca, New York: A preliminary report, *Geophys. Res. Lett.*, 5(9), 757-760, doi:10.1029/GL005i009p00757
- Riehl, H., and J. S. Malkus, 1961: Some aspects of Hurricane Daisy, 1958, *Tellus*, 13, 181-213.

- Salamanca, F., A. Martilli, M. Tewari, and F. Chen, 2011: A Study of the Urban Boundary Layer Using Different Urban Parameterizations and High-Resolution Urban Canopy Parameters with WRF. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 50, 1107–1128. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2010JAMC2538.1>
- Samson, P. J., 1980: Trajectory Analysis of Summertime Sulfate Concentrations in the Northeastern United States. *J. Appl. Meteor.*, 19, 1382–1394. doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450\(1980\)019<1382:TAOSSC>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450(1980)019<1382:TAOSSC>2.0.CO;2)
- Simpson, R. H., 1952: Exploring the eye of Typhoon “Marge,” 1951. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 33, 286–298.
- Willoughby, H. E., 1998: Tropical Cyclone Eye Thermodynamics. *Mon. Wea. Rev.*, 126, 3053–3067. doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1998\)126<3053:TCET>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126<3053:TCET>2.0.CO;2)
- Yau, M. K., Y. Liu, D.-L. Zhang, and Y. Chen, 2004: A Multiscale Numerical Study of Hurricane Andrew (1992). Part VI: Small-Scale Inner-Core Structures and Wind Streaks. *Mon. Wea. Rev.*, 132, 1410–1433. doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<1410:AMNSOH>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<1410:AMNSOH>2.0.CO;2)
- Zhang, J. A., R. F. Robert, R. D. Paul, U. W. Eric, and M. D. Frank, 2013: Asymmetric Hurricane Boundary Layer Structure from Dropsonde Composites in Relation to the Environmental Vertical Wind Shear. *Mon. Wea. Rev.*, 141, 3968–3984. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/MWR-D-12-00335.1>

Three-Dimensional Trajectory Analyses of Tropical Cyclone

Cheng-Hsiang Chih¹ and Kun-Hsuan Chou²

¹ Graduate School of Earth Science, Chinese Culture University

² Department of Atmospheric Sciences, Chinese Culture University

(manuscript received 12 December 2013 ; in final form 19 August 2014)

ABSTRACT

Although the aircraft, satellite, and radar observation developed rapidly in recent years, it can't still figure out the detail tropical cyclone (TC) structure. For example, there are the data inaccuracy retrieved from the polar orbiting satellite, and it have not possess enough temporal resolution; the spatial resolutions of geostationary satellites are too coarse for tropical cyclone requiring a higher spatial resolution; the vertical wind data are not accurate by the scarce coverage of aircraft data; the retrieving error in the radar data and limit near the ground. Therefore, in terms of the reasonable data of numerical model simulation, it could be further understand the structure of TC on the ocean effectively by improve the temporal and spatial resolutions in this study.

A tool VAPOR (Visualization and Analysis Platform for Ocean, Atmosphere, and Solar Researchers) is developed to analyses interactive 3D visualization environment including tropical cyclone. In this study, the trajectories of eye, eyewall, rainband, outer rainband, and outer field of tropical cyclone will be investigated by VAPOR.

Except the eye of TC area, the results show that the sources of air parcels on the surface are come from outer field, and concentrate to eyewall. In addition, the parcels on the boundary layer are also come from outer field, but they would be induced in the convection, which is the significant different from the schematic diagram of TC in the past studies. The backward and forward calculation of five areas and different height parcels would be shown on the new schematic diagram in this study.

Key Words: Tropical Cyclone, WRF, VAPOR, Trajectory Analysis