

凡那比颱風(2010)侵台期間降水與結構演變 之數值模擬探討

周昆炫¹ 遲正祥² 葉峻銘² 沈逸翎²

¹ 中國文化大學大氣科學系

² 中國文化大學地學研究所

(中華民國一〇三年二月十日收稿；中華民國一〇三年七月二十九日定稿)

摘 要

凡那比颱風為 2010 年侵台颱風中唯一登陸台灣的颱風，登陸期間造成台灣西南部、南部山區嚴重災情。其生命期中除了侵台期間伴隨的強風豪雨外，亦包含值得深入研究的科學議題，如：1.侵台期間降水集中於台灣西南部；2.出海後，眼牆結構重整及其對流不對稱性。本研究主要藉由 WRF (Weather Research and Forecast model)數值模式的模擬結果，並且使用渦旋植入法來加強颱風的初始結構，以及進行有、無地形的敏感度實驗之模擬比對，來探討此颱風於侵台期間所具有的研究議題。

本研究使用 WRF 針對 2010 年凡那比颱風個案，以 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) $1^\circ \times 1^\circ$ 解析度的全球分析資料作為模式的初始場與邊界條件，透過三層巢狀網格設定（網格解析度分別為 30、10、3.3 公里）模擬凡那比颱風侵台期間之情形，並和觀測雷達回波圖做校驗比對。數值模擬結果顯示，模擬路徑皆掌握了颱風登陸、出海位置，使得模擬降水分布與實際觀測非常接近；此外，模式也模擬出凡那比颱風南側較強對流的不對稱結構，與登陸期間眼牆結構破壞與重整的演變過程。而地形敏感度實驗顯示，將台灣地形移除或設為平地時，颱風登陸台灣時的路徑較為平滑，強度則緩慢減弱，模擬實驗亦呈現颱風不對稱結構，但眼牆演變過程卻沒發生，此結果顯示，地形是造成眼牆結構演變的主因。

由地形與海溫敏感度實驗與環境垂直風切交互分析下，顯示環境北風風切是形成凡那比颱風對流不對稱結構的主要原因，其強對流區易發生於下風切處左側；此結果與過去探討環境垂直風切造成颱風不對稱對流結構之研究一致。另外，地形有無並不影響此環境垂直風切的產生，不過可以讓對流不對稱更加明顯；而海溫分布對颱風不對稱形成的影響則不顯著。

關鍵字：凡那比颱風、颱風結構、颱風降水、垂直風切

一、前言

台灣每年約有 3 至 4 個颱風侵襲，颱風降雨是台灣雨水主要來源之一，卻也常常帶來嚴重災情影響民生；台灣面積雖不大，但其複雜地形分布造成颱風預報上的困難，尤其又以中央山脈對颱風路徑和降水區域之預報影響最甚，例如路徑的偏折、打轉、移速、登陸位置和地形交互作用下的降雨等等，皆是造成颱風預報的不確定性因素，故各個單位皆希望發展具有參考價值的動力數值模式做長時間颱風預報，但由於颱風大多形成於洋面上，而海上缺乏足夠觀測資料以解析颱風結構，使得數值模式預報無法更臻完美。

本研究主要分析渦旋植入、眼牆重整，及地形等分析結果，探討對於侵台期間之凡那比颱風及其對流不對稱性結構的影響，並作以下之文獻回顧。渦旋植入部分，Hsiao et al. (2010) 之研究顯示，對 WRF 模式之颱風預測而言，颱風渦旋植入及渦旋移置技術可產生較好結果；周與黃(2011)使用不同降水物理參數法進行颱風路徑系集預報，並且使用渦旋植入法加強颱風初始強度，研究結果顯示，渦旋植入後可使路徑（誤差）分布縮小並對預報後期的結果可有效改善。故本研究在各組實驗皆使用渦旋植入以改善凡那比颱風之初始結構。

周等(2001)使用 MM5 模式針對瑞伯颱風

(1998)個案，探討地形對於颱風移動路徑、強度演變及降雨分布的影響。後續研究，Wu et al. (2003, 2009)則特別針對瑞伯颱風(1998)內部眼牆結構在受地形影響下，眼牆登陸前內縮，離陸後外擴的數值模擬探討與相關動力診斷分析。另一方面，Wu et al. (2009)針對芭比絲颱風(1998)與東北季風間之交互作用與降水的相關性研究，在地形敏感度實驗當中，移除台灣地形之後，颱風環流因為少了地形的舉升作用，使得降雨分布與有地形實驗結果完全不同。此外，朱等(2010)探討颱風接近或登陸台灣時，全台降雨量和環境提供水氣多寡的關係，該研究結果顯示，颱風侵台前，隨著亞洲夏季季風西南氣流通過南海南部及中南半島附近的低層大氣水氣通量，對颱風侵台之後在台灣降下的總累積降雨量有一定的貢獻。除了上游水氣提供的多寡，颱風在台灣附近的路徑變化也影響著台灣總累積雨量。而陳等(2010)之研究顯示地形的摩擦與阻擋效應對於颱風強度及降水分布有極大的影響。Chien et al. (2011)以莫拉克颱風個案檢驗其劇烈降雨因素，該研究指出，莫拉克侵台時間長，西南氣流和颱風環流的交互作用、以及地形的存在，是造成巨大降雨量的關鍵因素。由先前回顧可知，地形的存在與否除了改變水氣提供方式與多寡，更是深深影響了颱風降雨的機制與分布情形。

Chou et al. (2011)使用衛星微波影像及雷達

資料分析，觀察西北太平洋的颱風於地形效應下眼牆之演變過程，發現許多颱風個案之眼牆半徑有擴大現象；而凡那比颱風於出海後遭受地形破壞的眼牆結構迅速重整之情形與 Chou et al. (2011) 類似。

凡那比颱風的對流不對稱性是造成台灣南部慘重災情一大主因。Reasor et al. (2000) 研究颶風 Olivia (1994) 在移動方向沒多大改變情形下，颱風卻有明顯之對流不對稱性，而後分析結果歸因於環境垂直風切增強所造成。Black et al. (2002) 根據觀測颶風 Jimena (1991)、Olivia (1994) 所描繪出的對流與風切關係示意圖，他們發現對流易發生於風切方向左側。Corbosiero and Molinari (2002, 2003) 也根據熱帶氣旋之閃電資料分析發現，強垂直風切分別於下風切至下風切左側的內核區，以及下風切右側的外圍環流皆產生較高的閃電頻率，此情況表現出其明顯的對流不對稱性結構。Reasor et al. (2013) 以機載都卜勒雷達進行 TC 不對稱結構的研究，透過模式及觀測資料中的合成分析顯示，熱帶氣旋受風切影響下，會導致氣旋往下風切傾斜、下風切右側引發對流，及下風切左側有最大降水。而透過數值模擬來研究風切造成的不對稱結構中，Frank and Ritchie (1999, 2001) 發現在僅考慮絕熱過程的乾模式中，最大的對流與降水是出現在下風切的右側；而考慮非絕熱過程的濕模式中，最大對流與降水區則易發生於下風切的左側。

凡那比颱風是 2010 年唯一登陸台灣的颱風，侵台期間造成台灣南部及西南部嚴重災情，農業損失更高達 45 億元，其生命期除伴隨的強風豪雨，亦有如：侵台期間降水集中於台灣西南部；出海後，眼牆結構重整及其對流不對稱性等現象可深入探討，因此本研究除加入渦旋植入及渦旋

移置外，更搭配有無地形之實驗探討上述議題。

二、實驗設計

(一) 模式與物理參數設定

本研究將採用 WRF V3.3.1 版本，三層巢狀網格設定進行數值模擬，外層(D01)水平解析度為 30 公里，網格點數為 160×150；中層(D02)則為 10 公里，網格點數為 301×262；內層(D03)為 3.33 公里，網格點數為 550×508，其範圍如圖 1 所示。投影法選用藍伯特投影法，不變形緯度為北緯 15 度及 25 度，投影中心位在北緯 25 度，東經 123 度。模式垂直座標為追隨地勢座標(σ)，共有 28 層，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序為 180、60 及 20 秒。三層的雲微物理參數法皆選用 GCE (Goddard Cumulus Ensemble, Tao et al. 1989)；積雲參數法在第一和二層選用 Kain-Fritsch (Kain and Fritsch 1993)，第三層因為該層的網格解析度較高(3.3 公里)則無選用任何積雲參數法；各實驗其他物理過程均維持一致，長波輻射參數法使用 RRTM (Rapid Radiative Transfer Model, Mlawer et al. 1997)，短波輻射參數法使用 Dudhia (Dudhia 1989)，邊界層物理參數法選用 YSU (Yonsei University, Hong et al. 2006)，相關詳細設定請參考表 1。關於 WRF 模式更詳細之動力架構與物理過程介紹可參考 Skamarock et al. (2008)。

(二) 數值實驗

1. 渦旋植入法設計

本研究的初始場及邊界值是採用美國國家環

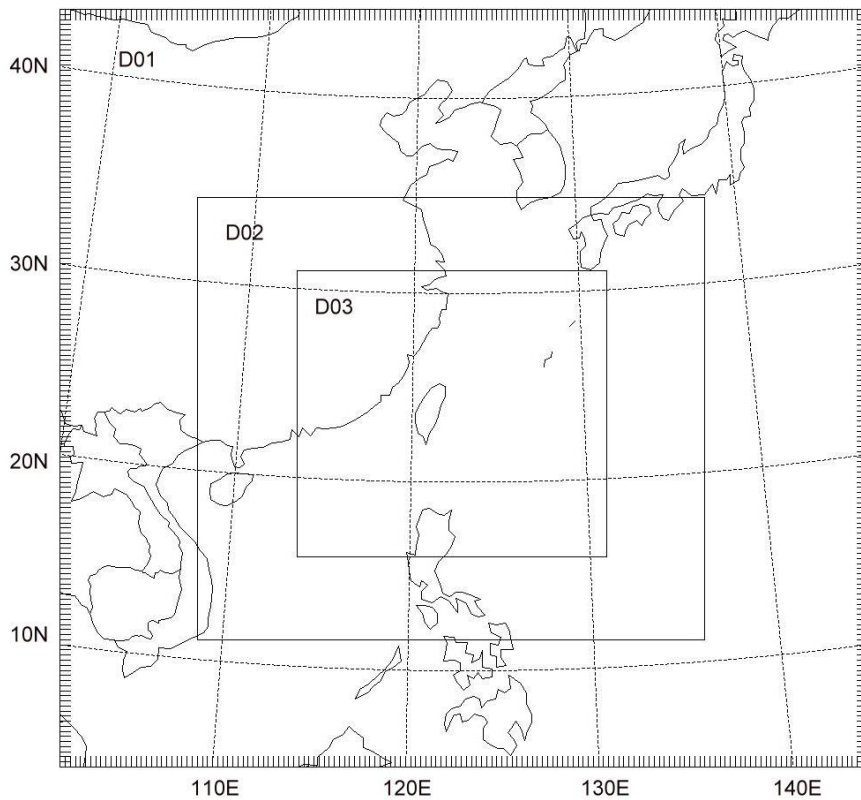


圖 1 凡那比颱風巢狀網格點設計示意圖，外層(D01)水平解析度為 30 公里，網格點數為 160×150；中層(D02)則為 10 公里，網格點數為 301×262；內層(D03)為 3.33 公里，網格點數為 550×508。

表 1 三層巢狀網格設計模擬凡那比個案之詳細設定。

模式	WRF V3.3.1 版本		
中心緯度	東經 123°，北緯 25°		
投影法	蘭伯特投影，不變形緯度為北緯 15°和 25°		
網巢回饋	雙向式		
垂直解析度	28 層， σ 座標		
	範圍 1	範圍 2	範圍 3
水平解析度	30 公里	10 公里	3.33 公里
網格數	160×150	301×262	550×508
時間步長	180 秒	60 秒	20 秒
微物理參數法	Goddard GCE	Goddard GCE	Goddard GCE
積雲參數法	Kain-Fritsch	Kain-Fritsch	無
邊界層參數法	YSU	YSU	YSU

境預報中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 的分析資料, 其空間及時間解析度分別為 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ 及 6 小時。另外, 本研究亦使用 Wu et al. (2002), Chou and Wu (2008), 以及周與黃(2011)所提渦旋植入技術使颱風初始結構於模擬初始時間更加完善及合理。由於初始場中距離颱風中心 600 公里的資料會被取代, 因此颱風距離陸地過近時會有無法進行渦旋植入的問題, 因此, 本研究中只選取颱風中心在距離台灣東部海岸線 600 公里以外的時間作為模式的初始時間。模擬時間從 2010 年 9 月 16 日 1200 UTC 開始模擬 96 小時, 結束時間為 2010 年 9 月 20 日 1200 UTC。首先, 於積分前六小時使用 Rankine vortex 結構植入模式中預跑, 其軸對稱風場依據下列公式定義:

$$V(r, z) = F(r)W(z) \quad (1)$$

$$F(r) = V_{\max} \left(\frac{r}{R_{\max}} \right), \quad (r \leq R_{\max}) \quad (2)$$

$$F(r) = V_{\max} \left(\frac{R_{\max}}{r} \right)^{\alpha}, \quad (r > R_{\max}) \quad (3)$$

式中, $V(r, z)$ 、 $F(r)$ 分別為以颱風為中心之柱狀座標下的二維及一維軸對稱切向風場; $W(z)$ 為切向風場在垂直壓力層之權重、 r 為離颱風中心距離、 z 為垂直高度; V_{\max} 為近中心最大風速, 實驗中設定為 35.0 m/s, R_{\max} 為最大風速之半徑, 實驗中設定為 35 公里; α 為風速隨半徑遞減之指數, 實驗中設定為 0.2。在颱風渦旋初始化流程中, 除了颱風渦旋植入(bogus)外, 也多加了渦旋移置技術(replace), 即將模式初始場之颱風結構由發展後之非對稱渦旋結構取代, 再開始進行模式積分。由於本研究模式採雙向式網格連結(two-way grid nesting)架構, 因此渦旋植入法只使用於解析

度較高的第三層網格。另外, 渦旋植入的第二步驟中, 距離中心 300 公里內之資料完全由發展後之資料取代, 而 300-600 公里則為模式發展後之資料與初始場資料的簡單線性結合。

2. 地形敏感度測試

颱風深受地形存在與否影響, 而為瞭解台灣與部分大陸地形對凡那比颱風於侵台期間的影響, 本研究設計了五組實驗來探討此問題, 五組實驗皆加入渦旋植入以改善其初始結構, TL 實驗為控制實驗組, 地形處理為 3.3 公里解析地形, 透過此實驗之模擬結果與實際颱風路徑、結構的比較以檢驗地形對於凡那比颱風的影響性。本研究四組地形有無之敏感度實驗為將台灣地形高度降低及台灣或部分大陸地形移除之實驗; FL 實驗是將台灣地形設為 1 公尺高的平地, 降低颱風經過台灣地形時所受之地形阻擋; OC 實驗中將原本台灣地形移除, 以海洋取代, 在無台灣地形之摩擦作用, 亦無地形阻擋效應下, 凡那比颱風的移動方向和結構能顯示不同結果; TT 實驗則是將模式設定之第三層巢狀網格中所包含部分大陸地形移除, 主要是利用此實驗分析凡那比颱風出海後不對稱性之可能成因, 如地形有無的水氣提供; NT 實驗即是結合 OC、TT 實驗, 同時將台灣與部分大陸地形移除, 在完全無地形實驗中, 可更加瞭解凡那比颱風本身的結構。

三、模擬結果與分析

(一) 路徑與強度

圖 2 為實際颱風路徑與五組實驗颱風路徑預測圖。圖中可看出, 凡那比颱風從生成至消散皆為一向西行進之颱風, 五組實驗皆有模擬出此特性, 並且在 TL、FL、OC 實驗掌握到颱風登陸與

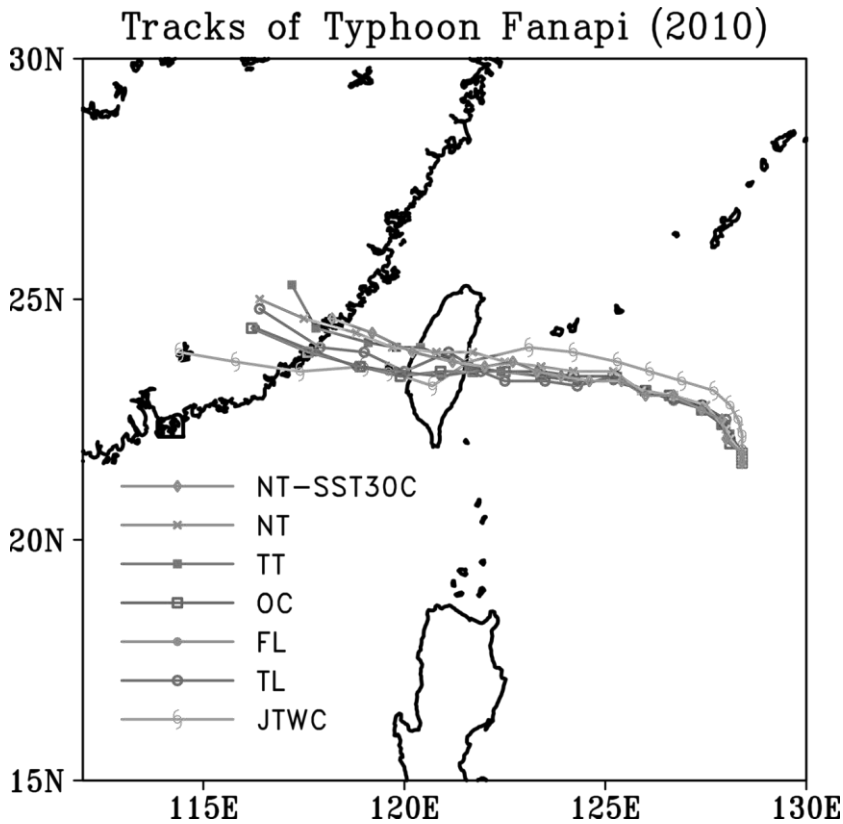


圖2 JTWC公布之凡那比颱風最佳路徑與五組地形敏感度實驗及海溫敏感度NT-SST30C實驗的颱風路徑預測圖。

出海位置，FL、OC 實驗，台灣地形設計雖分別是平地與海洋，但兩組實驗路徑非常類似，即地表摩擦力對颱風路徑影響較小，而此兩組實驗與另一無台灣地形之實驗(NT)相較，由於沒有地形阻擋，颱風路徑也較為平滑，NT 與 TT 實驗則是皆無部分大陸地形實驗，此兩組實驗路徑較另三組實驗路徑偏北，顯示大陸地形可能對於凡那比颱風路徑有一定之影響；而五組實驗登陸、出海位置雖與 JTWC 最佳路徑相仿，移速卻有較大的誤差，這是因模式在颱風中心登陸前受到地形影響而減慢移速的情況較為明顯，但本研究主要為分析凡那比颱風結構與其不對稱性，其與造成移速差異的原因本研究並不深入討論。儘管如此，根據 TL 及 OC 模擬路徑的比較可以發現，台灣

地形的存在讓凡那比在登陸前 24 小時即開始南偏，登陸後則路徑偏北，整體偏移路徑並不顯著，約在 20 公里左右。此結果與 Huang et al. (2011) 之理想數值實驗之結果一致，其圖 8 中顯示，若颱風於台灣中部附近登陸的話，颱風內核區的風速受到地形影響，在登陸前會開始南偏，而登陸後則呈現往北偏的情形。

圖 3 為颱風中心氣壓趨勢比較圖，因五組實驗 (TL、FL、OC、NT 與 TT) 皆有使用渦旋植入法，故第一個積分時間點五組實驗位置、強度皆相同，與 JTWC 之強度相比，本研究五組實驗所設計強度略強 5 hPa；圖中實線、點虛線、點實線依序分別代表凡那比颱風登陸台灣、出海、登

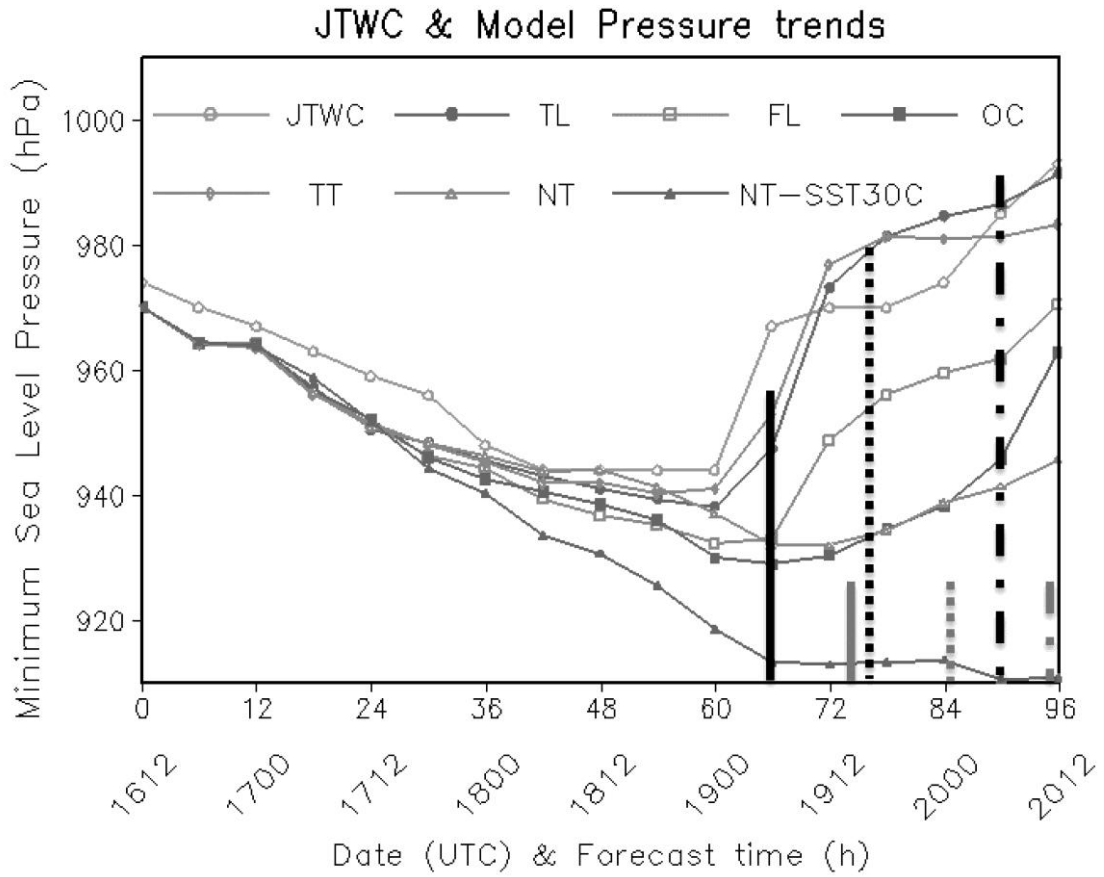


圖 3 凡那比颱風中心氣壓隨模擬時間之變化圖，圖中黑色實線、點線及虛線依序分別代表凡那比颱風登陸台灣、出海以及登陸中國之模式模擬時間點；灰色實線、點線及虛線依序為 NT-SST30C 實驗之登陸台灣、出海以及登陸中國之時間點。

陸大陸之模式模擬時間點，而前一節有提到，五組實驗移速較 JTWC 之觀測資料慢約 6 小時，故比較登陸或出海時強度，需與 JTWC 前一個時間點之強度比較。圖中實線可看出，有台灣地形實驗(TL、TT)接觸到陸地後，受到地形破壞導致強度明顯驟降，而有地形實驗與實際強度較接近，FL 實驗中颱風受地形阻擋效應較小，強度只略減 20 hPa，OC、NT 實驗因無地形影響，登陸台灣時強度毫無減弱仍持續加強；圖中點虛線為凡那比颱風出海時間，這段時間各組實驗強度皆有減弱趨勢，估計除因為快接觸大陸地形之影響，台

灣海峽之海洋溫度不利於凡那比颱風發展也可能是強度減弱原因之一，故無部分大陸地形實驗 (TT、NT)強度才有氣壓略減的趨勢；而圖中點實線為凡那比颱風登陸大陸時間點，有大陸地形之實驗(TL、FL、OC)在此時強度較無大陸地形實驗 (TT、NT)有更顯著的減弱。由以上討論可初步得知，五組實驗強度趨勢的改變皆是合理的結果，而有台灣地形實驗的強度較弱、也較無地形實驗接近實際強度。

(二) 降水分析

凡那比颱風主要降水區域位於台灣南部沿海及平原，又逢滿潮使得降雨無法宣洩，造成南部嚴重的災情，本研究透過模式之模擬降水情形與中央氣象局日累積雨量圖比較分析降水情形。圖 4 為凡那比颱風影響台灣期間累積雨量圖，結果顯示存在台灣地形的 TL、TT 實驗在山區產生比觀測強的降水外，其餘降水分布與極值出現區域，主要集中在地形東側之迎風面及颱風過山後颱風中心南側，相似於中央氣象局觀測資料；而當台灣地形為 1 公尺平地或無台灣地形之實驗 (FL、OC、NT) 則呈現颱風本身環流降雨，極值也比當地形存在時來的低，主要集中在中心兩側附近；其中 FL 與 OC 實驗之降水也可看出降水偏向路徑南側之不對稱情形，且 FL 的不對稱性又比 OC 高，此為即使 FL 實驗無地形抬升的作用，但依然存在地表的摩擦作用所形成。總體而言，當台灣地形存在時，南部山區之降水較無地形增加 200-300 毫米，約為 50%~100%，且地形使雨量分布更偏南側，此比較得知台灣地形存在對於凡那比颱風降水的空間分布扮演關鍵的角色。

圖 4 之降雨分析已顯示不同敏感度實驗在台灣陸地上的降水差異，進一步檢視模式中無台灣地形時，凡那比颱風於海面上及陸地上整體之降水情形，即 TL 與 OC 之降水分布，結果如圖 5 所示，可以發現除了由於地形迎風面與背風面所造成地形上降水分布的差異之外，颱風在海上行進過程並無太大差異，而在台灣東部沿海可發現當地形存在時極值區反而有縮小的趨勢，這可能與颱風強度減弱有關。另在台灣海峽南側海域也產生些微差異，即使此時兩者實驗之颱風強度已有明顯差異，且路徑 TL 實驗比 OC 實驗更往北

一些，但 TL 實驗在此區域及南部山區附近卻是產生比 OC 實驗更多的降水，此結果應是 TL 實驗中颱風眼牆及環流受地形破壞重整後，會讓外圍的降水變多所導致。此由於颱風受地形影響下，於颱風外圍產生較大降水的現象與 Chou et al. (2011) 所發現之觀測與雨量分析結果一致。

(三) 颱風水平結構分析

凡那比颱風在 19 日 0040 UTC 於花蓮縣豐濱鄉登陸，登陸前凡那比颱風已有對流不對稱之結構，且本研究地形敏感度之五組實驗皆有此特性如圖 6；侵台期間，颱風眼接觸到陸地後，眼牆結構隨即遭到破壞，OC、NT 無地形實驗之颱風結構則是無任何改變，FL 實驗受地形高度破壞程度較低 (圖未示)。圖 7 指出，凡那比颱風於離陸後對流區集中在東南側，呈現東南-西北不對稱的對流結構，五組實驗皆有掌握此特性，但有台灣地形 (TL、TT) 的實驗較無台灣地形 (FL、OC、NT) 的實驗更為明顯，即台灣地形高度對凡那比颱風之不對稱性結構有一定影響，然而要更進一步探討無地形下造成不對稱結構的原因，則需藉由其他因子之探討如海溫控制實驗及垂直風切分析等。

關於颱風受地形影響所產生的結構演變也可由圖 6a 與圖 7a 的比較得知，颱風在登陸台灣前有較小的颱風眼，眼牆的強對流也比較靠近颱風中心，然而颱風離開地形重回海上後，颱風眼則變大，眼牆的強對流也往外擴張。圖 8 為進一步比較 TL 與 OC 實驗模擬期間之模式底層切向風場與降水率之哈莫圖 (Hovmöller diagram) 分析，藉由此圖可以比較有無台灣地形對颱風風速結構與降水分布產生的影響。由 TL 的分析結果顯示 (圖 8 a,c)，在積分前 48 小時，由於凡那比在海

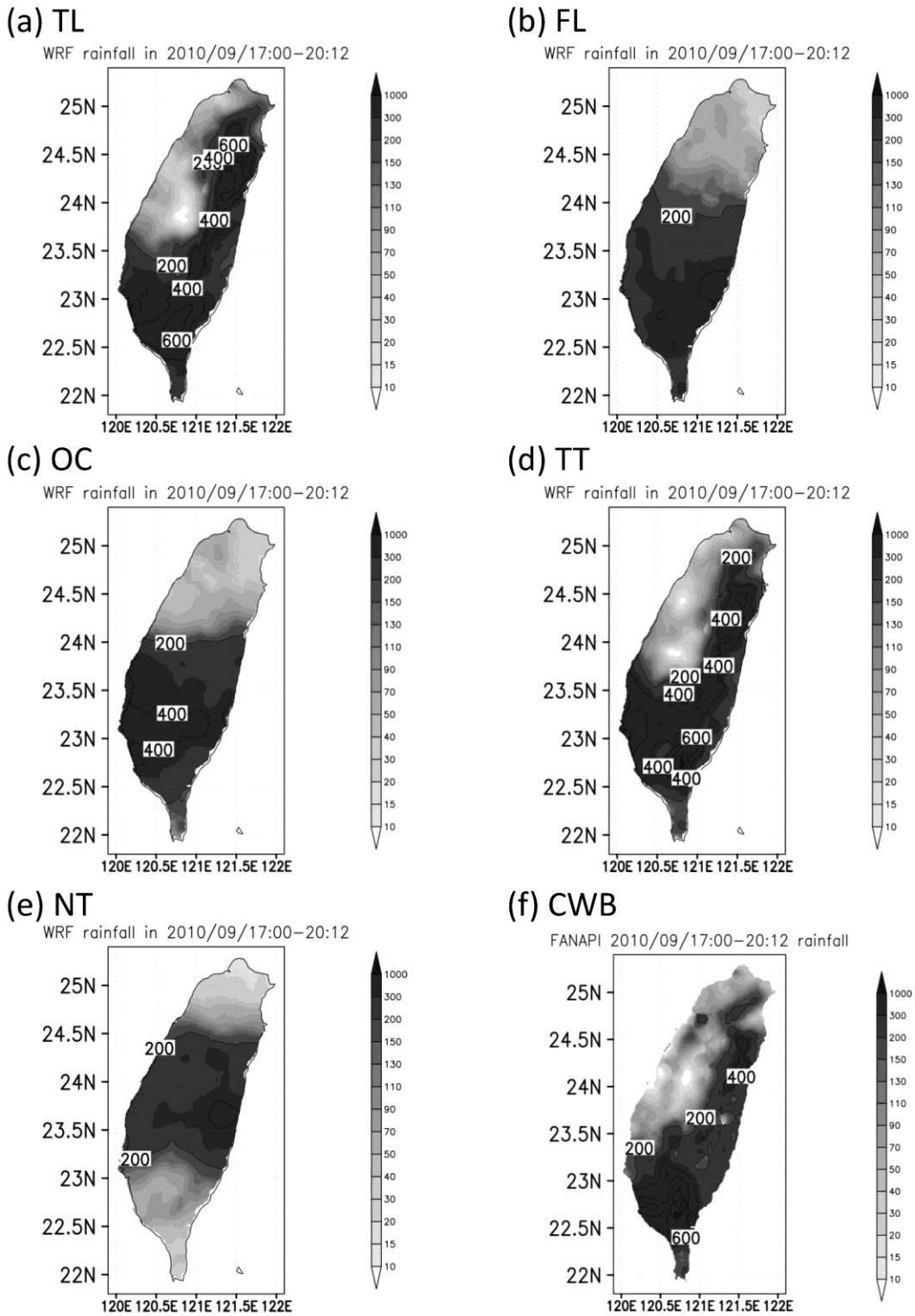


圖 4 時間為 2010 年 9 月 17 日 0000 UTC 至 2010 年 9 月 20 日 1200 UTC 之 84 小時累積雨量圖，單位為 mm。

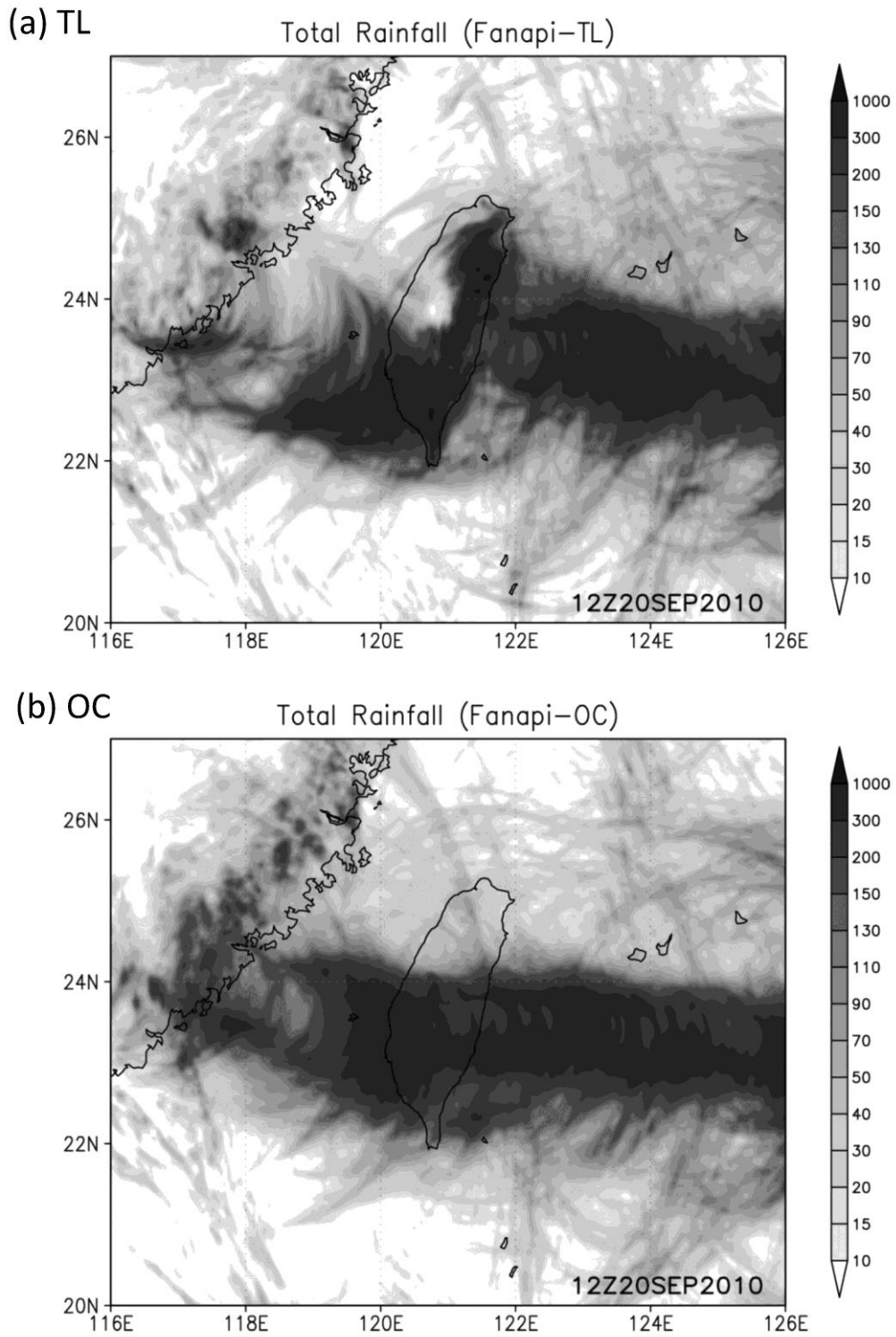


圖 5 侵台前至登陸中國前之 48 小時累積降水圖，時間為 2010 年 9 月 18 日 1200 UTC 至 2010 年 9 月 20 日 1200 UTC，單位為 mm。

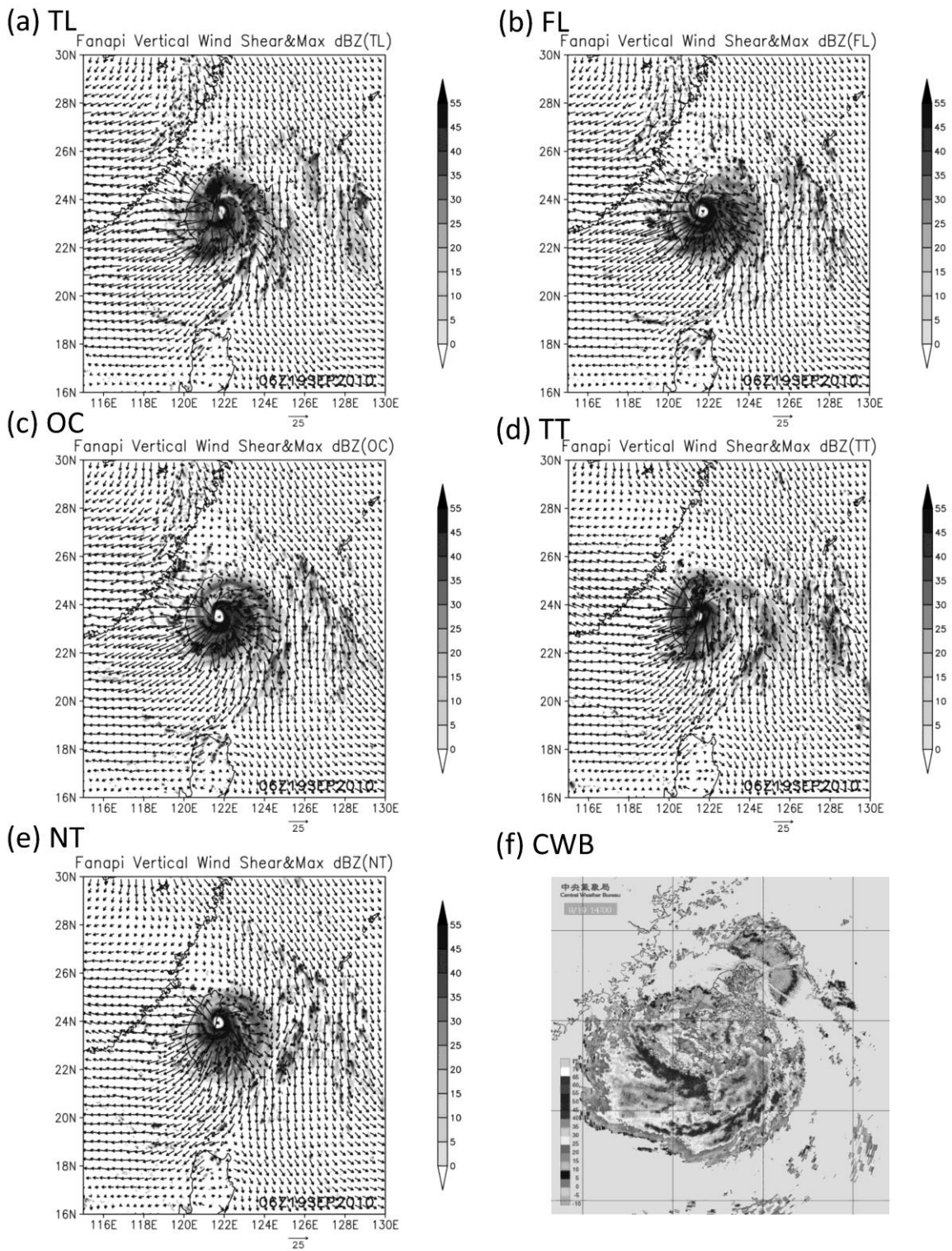


圖 6 (a)至(f)為五組地形敏感度實驗與觀測之雷達回波圖，單位為 dBZ；垂直風切圖，單位為 m/s。時間為 2010 年 9 月 19 日 0600 UTC。

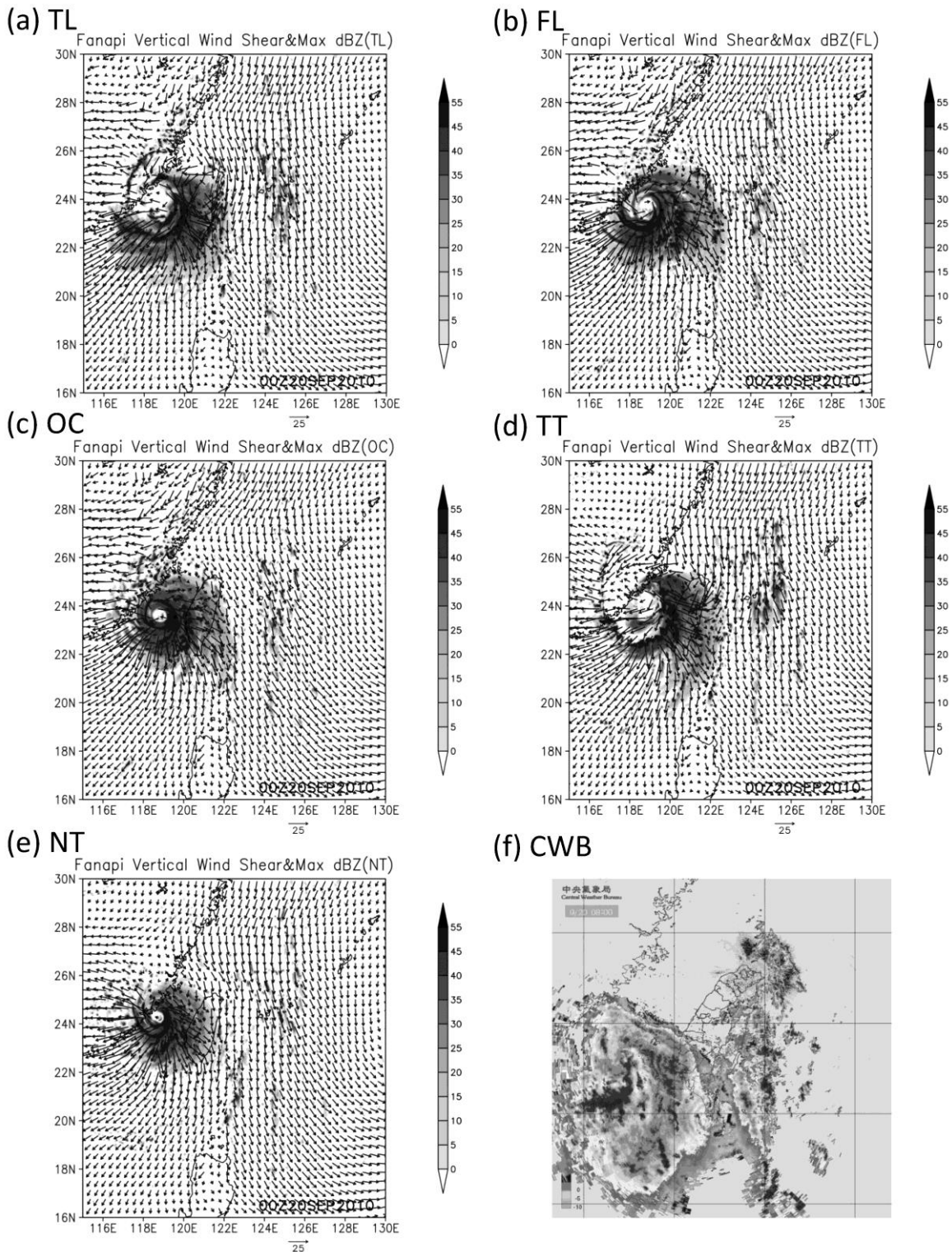


圖 7 (a)至(f)為五組地形敏感度實驗與觀測之雷達回波圖，單位為 dBZ；垂直風切圖，單位為 m/s。時間為 2010 年 9 月 20 日 0000 UTC。

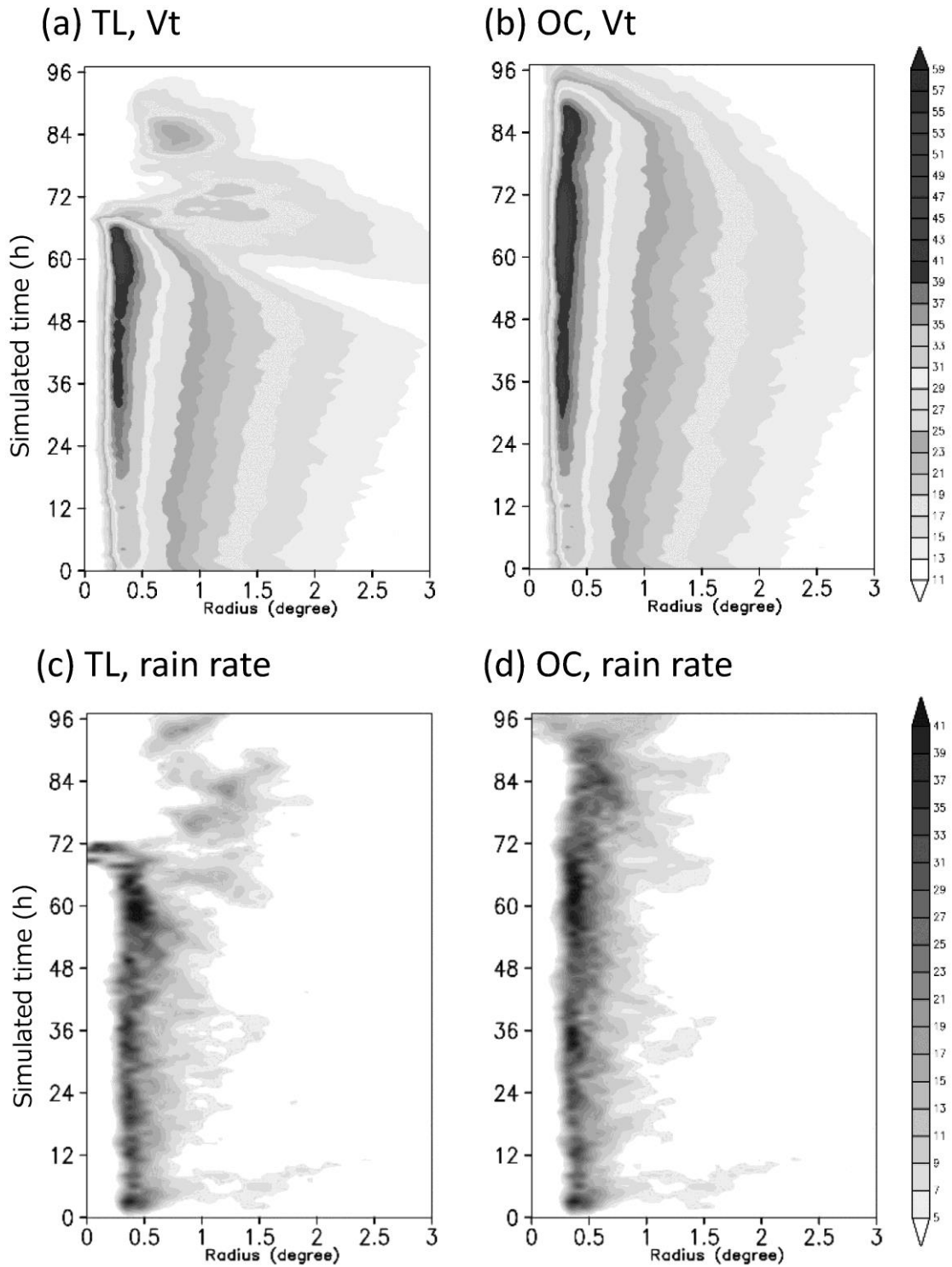


圖 8 模擬期間軸對稱平均之底層切向風場與降雨率 Hovmöller diagram(半徑-時間)分布圖。左列為 TL、右列為 OC 實驗；上排為模式最底層切向風場($\sigma = 0.995$)，單位為 m/s，下排為降雨率，單位為 mm/h。模式資料為每小時一筆。

上強度逐漸增強，其最大風速半徑有些微內縮的現象，較強的降雨量也同樣出現在最大風速半徑的附近。而在積分 60-72 小時登陸期間，由於地形摩擦效應其最大風速半徑與強降雨區則有更內縮的現象；在內核強度逐漸減小的過程中，外圍的強風區與強降水區則開始形成，而隨著颱風出海進入巴士海峽，其強風區與降水區則逐漸內縮。然而，若比較無地形之實驗（圖 8 b,d），可以發現颱風的強風速區與降水區均位在距颱風中心 0.3-0.4 度的區間，變化幅度並不明顯。由以上分析顯示，颱風眼牆結構與降水區域受地形影響產生的變化的情形，與 Chou et al. (2011) 使用凡那比颱風觀測回波與降水資料之分析一致。

(四) 海溫控制實驗

由於海表溫度分布不均勻有可能造成颱風對流的不對稱性，因此檢驗 NOAA/NESDIS (National Oceanic and Atmospheric Administration/National Environmental Satellite, Data, and Information Service) 以 50 公里解析度，4 天平均之海溫資料發現（圖未示），凡那比颱風侵台前台灣附近海溫約 30 至 32°C，而出海後台灣海峽的海溫大約是 28 至 30°C。凡那比颱風在通過台灣期間，台灣海峽上的海溫溫度梯度並不明顯，因此初步排除海溫是造成凡那比對流不對稱的主要機制。為了深入探討海溫對於凡那比颱風對流不對稱之影響，於是將原地形敏感度實驗中的 NT 實驗（全海洋實驗）為基礎，並控制海溫為 30°C，其它參數設定則是與其他實驗相同，以探討凡那比颱風之對流不對稱性結構於較高之均勻海溫的環境設定條件下，與 NT 實驗比較是否有明顯差異，該實驗稱之為 NT-SST30C。

圖 2 顯示，NT-SST30C 實驗相較於其他實驗

的移動速度慢了 6 小時，也就是慢了 JTWC 最佳路徑 12 小時，路徑位置則是與 NT 實驗相仿；NT-SST30C 實驗之氣壓趨勢與 NT 實驗相仿，但由於海溫控制於 30°C，使其颱風強度更強，於侵台至出海期間之氣壓值較 JTWC 強 60 至 70 hPa（如圖 3 所示）。由於控制海溫而導致的路徑與強度誤差，並不是此實驗主要探討目的，因此本研究不多加討論。

圖 9 為 NT-SST30C 實驗之水平結構。由圖中可發現，控制海溫為較高的 30°C 後，凡那比颱風較先前 NT 實驗之對流結構更完整且對流區範圍更大，雖然強度、結構皆有較好結果，但不論是在登陸前、侵台期間或出海後，皆有強對流區集中在颱風東、東南側的現象，也就是其對流不對稱性，可見凡那比颱風對流不對稱的特性並不是因海溫分布不均勻所導致。

(五) 垂直風切分析

透過地形敏感度實驗、控制海溫實驗等分析，對於確認造成凡那比颱風對流不對稱性的原因仍然不足，以水平風場與垂直風切分析來探討凡那比颱風對流不對稱特性有其必要性。

在凡那比颱風侵台前，高層 200 hPa 風場顯示，台灣西北方上空有一大陸高壓，而恰與台灣東方上空的冷心低壓左右排列，造成台灣北方高層含有一道較強的北風分量，而這情形在凡那比颱風侵台期間與出海後（圖 10）更加顯著，而在底層 850 hPa 之台灣東方海面相同位置上，則存在一副熱帶高壓。在這樣的綜觀尺度流場特徵下，分析凡那比颱風在侵台期間及出海後的垂直風切（圖 6、圖 7），兩張圖皆顯現出綜觀尺度流場為北風方向的風切場，而這現象在 NT-SST30C 實驗中亦有相同結果（圖 9）。

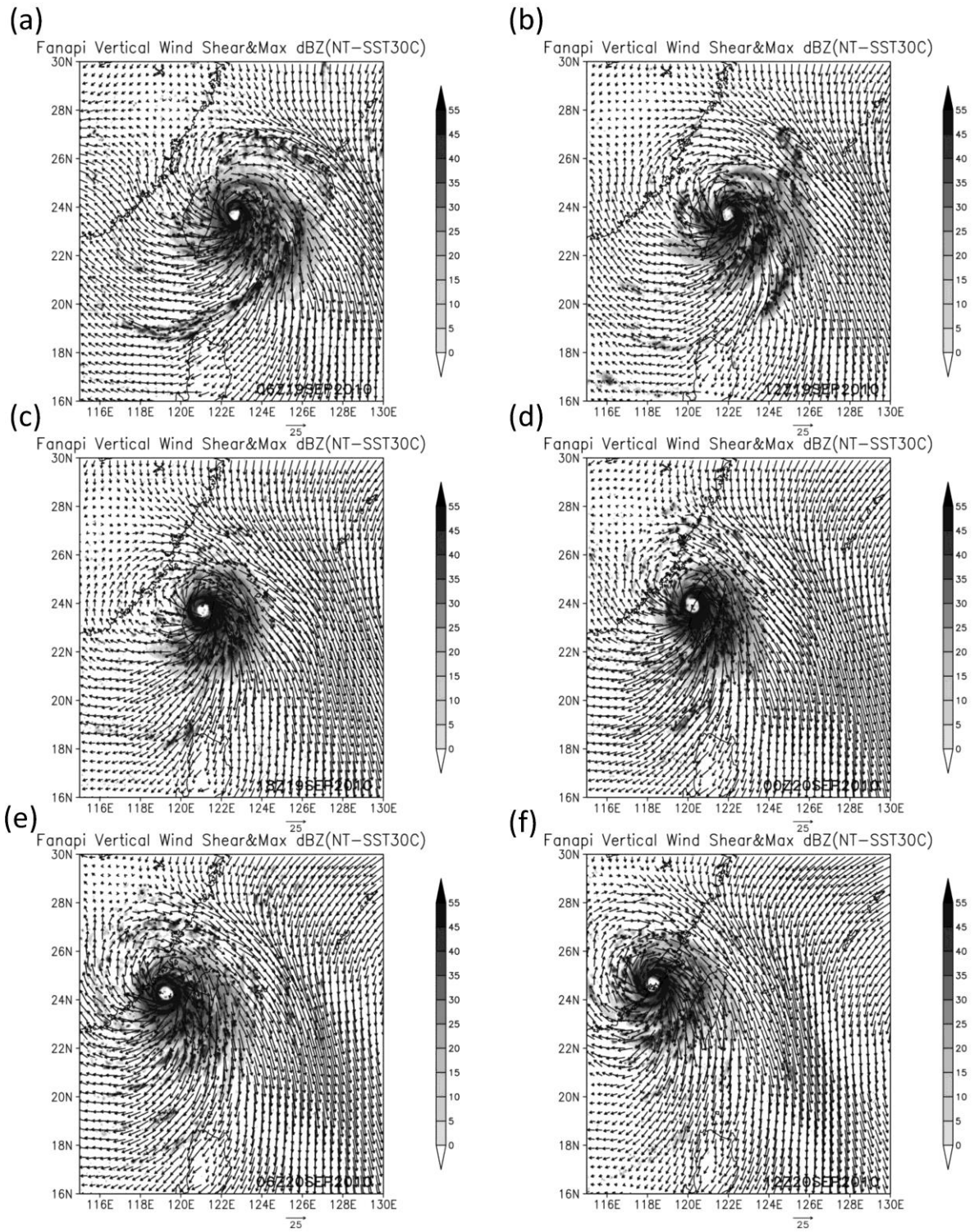
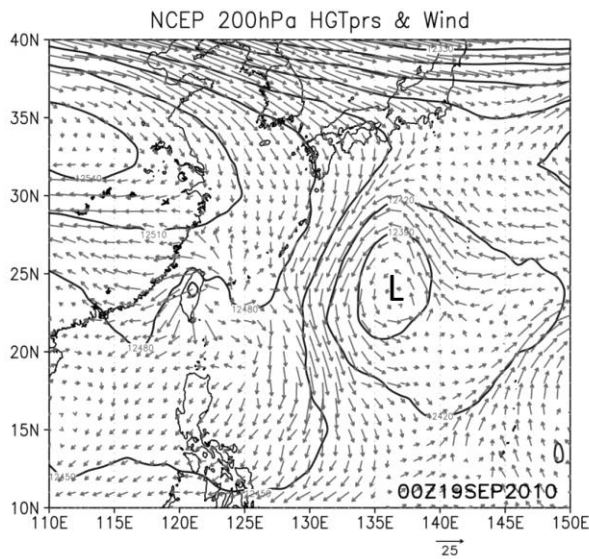
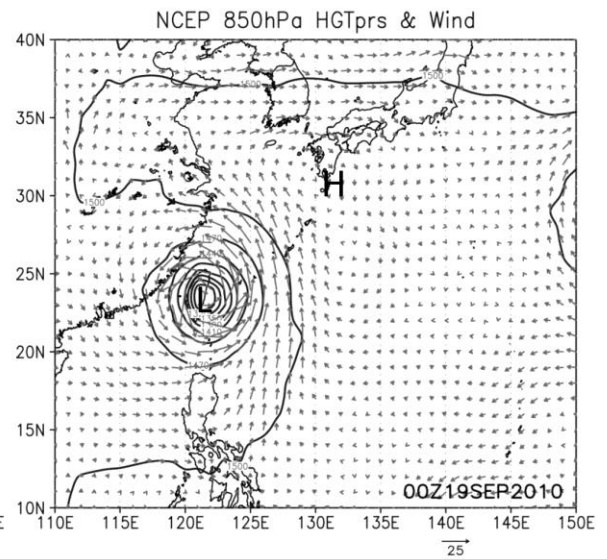


圖 9 (a)至(f)為 NT-SST30C 實驗之雷達回波圖，單位為 dBZ；垂直風切圖，單位為 m/s。時間為 2010 年 9 月 19 日 0006 UTC 至 2010 年 9 月 20 日 1200 UTC。

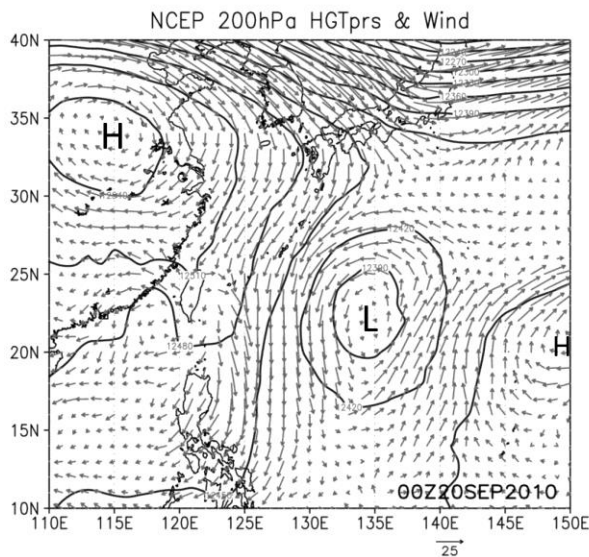
(a) 2010/09/19 0000 UTC 200 hPa



(b) 2010/09/19 0000 UTC 850 hPa



(c) 2010/09/20 0000 UTC 200 hPa



(d) 2010/09/20 0000 UTC 850 hPa

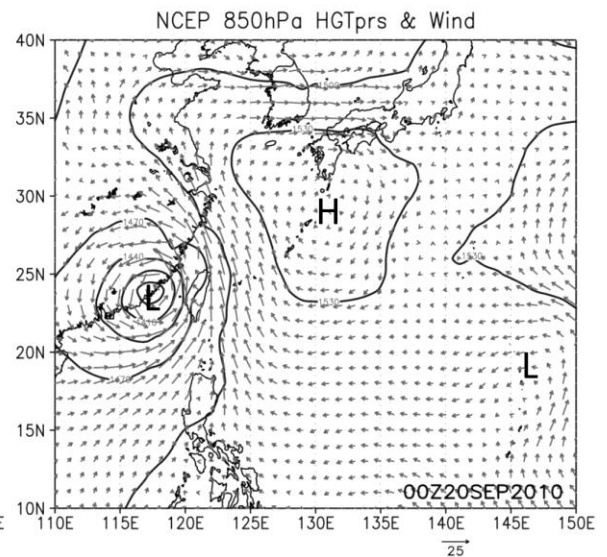


圖 10 (a)及(b)為 NCEP 分析資料於 2010 年 9 月 19 日 0000 UTC 之 200 hPa 及 850 hPa 風場與重力位高度場；(c)及(d)則為 9 月 20 日 0000 UTC 之風場與重力位高度場。箭矢為風速，單位 m/s；等值線為重力位高度，單位為 gpm。

藉由計算以颱風為中心 2 度至 8 度範圍內環境垂直風切，此環境垂直風切定義為 200 hPa 與 850 hPa 空間風場差異，結果顯示（圖 11）在凡那比颱風登陸台灣前之環境風切約為 8 至 10 m/s，而越接近台灣時風切增加到 11 至 12 m/s，皆為北風風切。而無論是觀測資料或是數值模擬之風切強度及方向差異並不大，即使當無台灣地形時亦同，顯示環境風切強弱在此個案不受到台灣地形有無而影響。

當環境存在強垂直風切時，經由積分時間第 36 及 48 小時平行風切方向與正交風切方向之垂直剖面（圖 12）發現，較強與廣泛的回波區易發生於風切下游及風切左側，圖中等值線為相對於切面之水平風分量，正值為向右、負值則向左，顯示在風切下游與風切左側之低層有較大的內

流、高層則有較大的外流出現，另由（圖 12b, d）發現在此個案中下風切左側 10 公里以下皆為內流。此由環境風切所造成在下風切處有較強內流與 Reasor et al. (2013)都卜勒機載雷達資料所反演之流場一致。另外，為量化颱風垂直運動與降水回波結構的不對稱性，本研究計算颱風內核區強對流與回波的平均位置與颱風中心位置的差距以量化不對稱的程度；若平均中心距離颱風中心較遠則有較大的不對稱性，反之，則不對稱較小。圖 13 為 TL 與 OC 兩實驗模擬 12 至 96 小時期間每三小時平均垂直速度與降水回波相較於颱風中心之位置。圖中結果顯示當北風風切存在時，強垂直運動平均中心出現的位置出現在風切下游處（圖 13a），而後隨著颱風主環流氣旋式（北半球為逆時針方向）旋轉平移至風切下游或左側產生

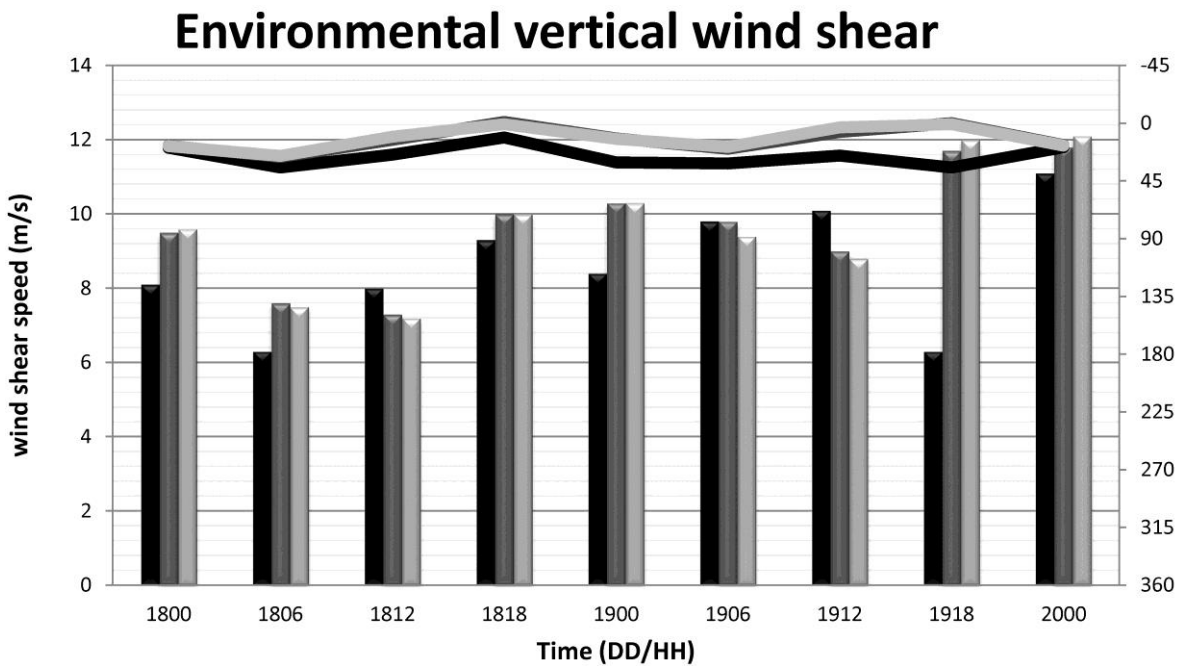


圖 11 為 2010 年 9 月 18 日 0000 UTC 至 20 日 0000 UTC，每 6 小時之環境風切計算。圖中，黑色為 NCEP 分析資料、深灰色為 TL 實驗、淺灰色為 OC 實驗。直狀圖為環境風切大小，單位 m/s；折線為環境風切方向，單位為度，0 度表北方。

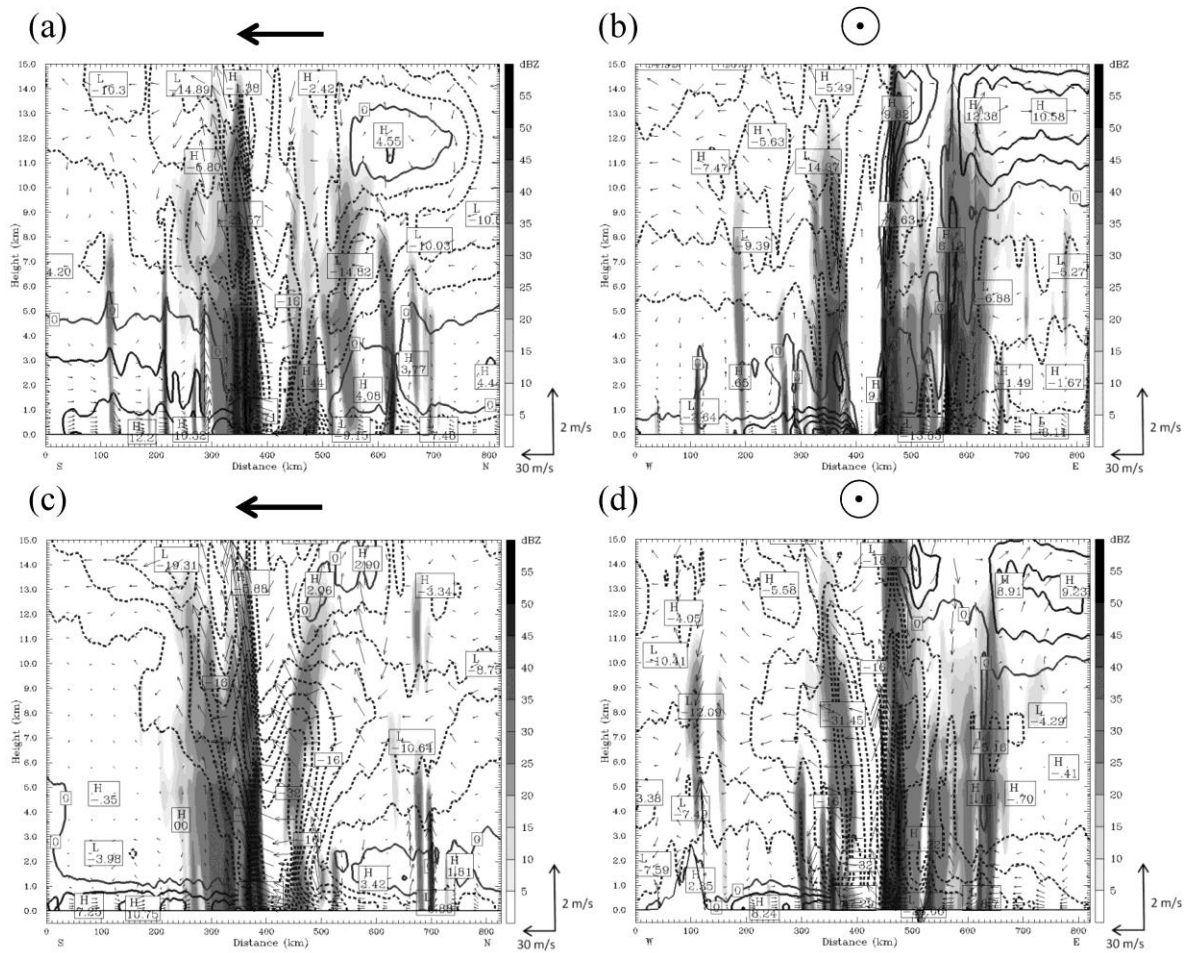


圖 12 TL 實驗於 domain 3 之垂直剖面，(a)及(b)時間為 2010 年 9 月 18 日 0000 UTC，(c)及(d)時間為 2010 年 9 月 18 日 1200 UTC；左列圖為平行於垂直風切、右列圖為垂直於垂直風切之剖面。色階為回波，單位為 dBZ；等值線為相對於切面之水平風分量、正值為向右、負值為向左，單位為 m/s；箭矢為風向風速，單位為 m/s。圖上方之符號表示垂直風切的方向。

較大的回波（圖 13c）。另此圖中也顯示無地形存在實驗（OC；圖 13b, d）之對流，其對流與回波中心出現位置皆較地形存在的實驗更靠近颱風內核區，此結果顯示地形可讓凡那比颱風受風切影響產生之不對稱結構更加明顯。

經由以上分析與比較，得知凡那比颱風對流不對稱性來源，主要是由台灣上方這一道強烈的北風風切抑制了凡那比颱風北方、西北方的對流

發展，且強對流區也集中在下風切處（北風風切）的左側，此與前人於觀測分析及模式研究結果發現渦旋受環境風切影響，會使渦旋出現波數 1 的不對稱結構，且最大對流區易發生於下風切處左側之論點一致(Frank and Ritchie 2001; Black et al. 2002; Corbosiero and Molinari 2003; Roger et al. 2003; Chen et al. 2006; Xu and Wang 2013; Reasor et al. 2013)。

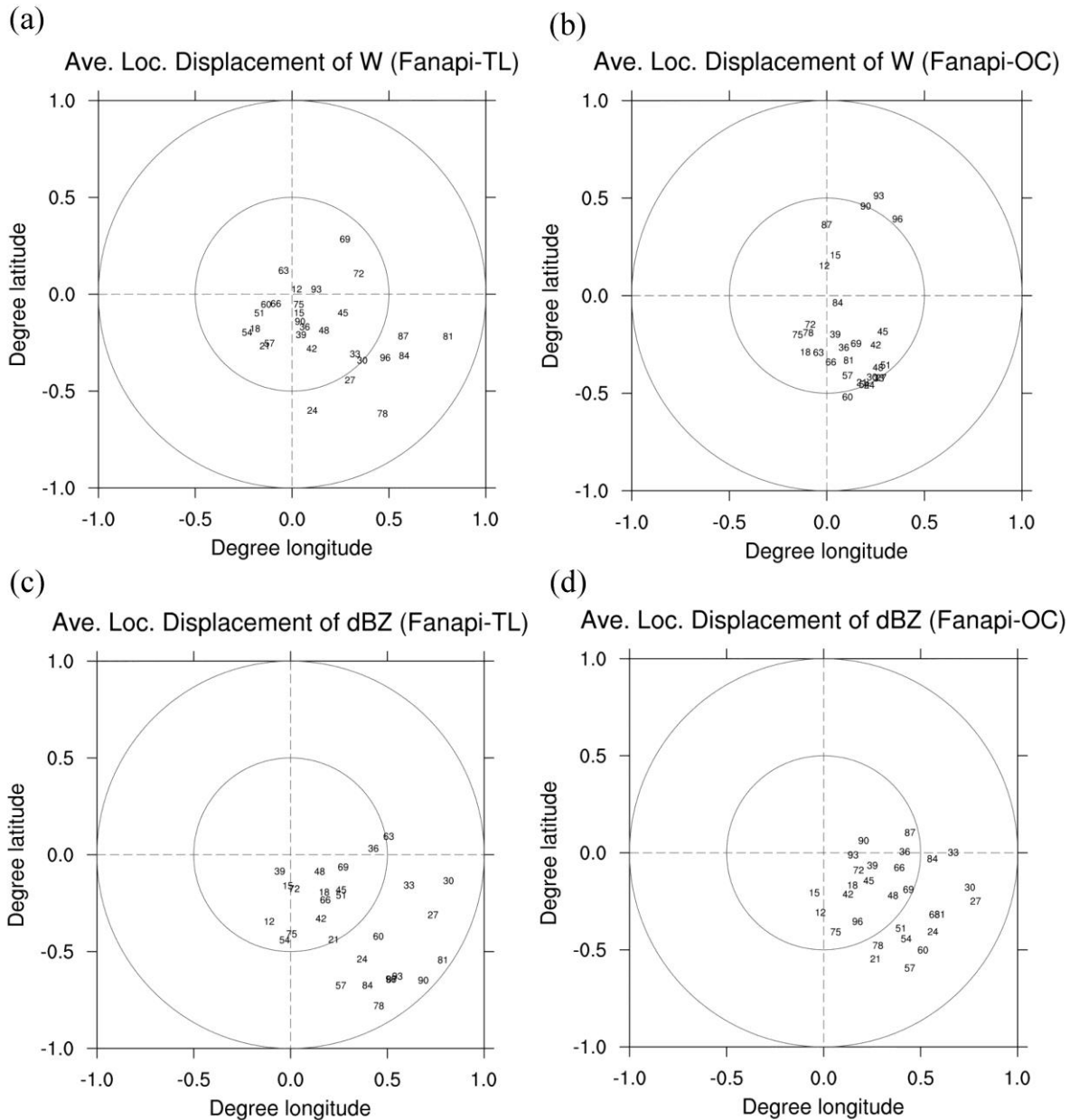


圖 13 颱風中心 3 度範圍內強垂直運動速度與高降水回波之平均位置分布，垂直運動速度計算方式為模式網格中大於 0.5 m/s、降水回波則是大於 10 dBZ。分析時間為 2010 年 09 月 17 日 0000 UTC 至 2010 年 09 月 20 日 1200 UTC 期間，每 3 小時一筆之 domain 3 模擬資料，圖上標示之數字為相較颱風中心之平均位置。(a) 為 TL 實驗之垂直運動速度；(b) 為 OC 實驗之垂直運動速度；(c) 為 TL 實驗之降水回波；(d) 為 OC 實驗之降水回波。

四、結語與展望

本研究主要藉由 WRF 數值模式的模擬結果，並且使用渦旋植入法來加強颱風的初始結構，以及進行地形敏感度實驗之模擬分析，探討凡那比颱風(2010)於侵台期間所造成嚴重災情的原因。凡那比颱風出海後依然引發大量的降水，且集中在台灣南部及山區，而有此降雨分布情形，主要是凡那比颱風受環境北風風切的影響下，形成颱風南側對流較強北側較弱的對流不對稱分布，在出海後其對流不對稱特性更加顯著，故強降雨區才集中在台灣南部、南部山區及高屏地區等。另外由於颱風受地形影響下，內核附近的風場及對流結構受地形影響下會由中心向外擴張的現象，這也是造成南部山區及高屏地區有較多降水的原因。

地形有無之敏感度實驗中，TL、FL、OC 實驗掌握了颱風登陸與出海位置，無地形的實驗，颱風路徑較為平滑，實驗中移速則與 JTWC 最佳路徑相差約 6 小時；五組實驗的強度皆有呈現其地形處理應有的趨勢結果，雖有台灣地形之實驗與實際相比強度較弱、但相較於無地形實驗則是較接近實際強度；而實驗結果也顯示出地形高度對於凡那比颱風降水分布有一定的影響，在無地形阻擋效應影響下，降水分布皆為颱風本身環流所主導，有地形實驗之強降雨區分布與實際觀測結果較相近；從雷達回波水平結構分析下，得知模式可掌握颱風通過地形時，眼牆產生重整之情形，但並無法檢驗地形高度與凡那比颱風對流不對稱性相關程度。

在控制海溫的實驗裡，颱風雖比實際強度強，但路徑移速卻慢了 12 小時，分析該實驗雷達回波水平結構，結果發現海溫實驗對於其對流不

對稱結構的影響不明顯；經由垂直風切分析後，發現凡那比對流不對稱性主要是因為台灣上方的北風風切抑制了凡那比颱風北方、西北方的對流發展，儘管地形敏感度實驗對於環境垂直風切強度的影響並不顯著，但 TL 實驗之凡那比颱風不對稱結構依然較無地形實驗來得顯著，且強對流區易生成在下風切處左側，與前人研究結果相同。

本研究雖發現凡那比颱風南方象限強於北方象限的不對稱結構是由垂直風切影響所造成，但為何風切會產生如此明顯的結構差異，其動力機制值得進一步分析；此外亦可進行改變垂直風切的敏感度實驗，理論上可透過位渦反演的方法將颱風附近的綜觀環境進行動力及熱力一致性的改變，便可探討其對於對流不對稱的影響；另外地形的存在又如何增強其對流不對稱性，更有待後續研究工作加以釐清。此外未來也將瞭解是否類似凡那比颱風路徑的颱風皆有對流不對稱性的特性，而其成因又是否與凡那比颱風相同，或者含有對流不對稱性之颱風，降雨分布情形是否也類似，目前已挑出近年類似凡那比颱風西行路徑且具有對流不對稱性的颱風，例如：海棠颱風(2005)、泰利颱風(2005)、龍王颱風(2005)、帕布颱風(2007)、柯羅莎颱風(2007)、鳳凰颱風(2008)、辛樂克颱風(2008)、薔蜜颱風(2008)，期望在更深入研究後，能歸納出些許規則，在未來能提早防範類似路徑下的颱風所帶來的災害。

致謝

本研究是在科技部計畫 NSC 100-2111-M-034-003 及 NSC 101-2119-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、吳俊傑及顏自雄，2001：瑞伯颱風(1998)之數值模擬探討。大氣科學，29，291-314頁。
- 陳得松、黃康寧、蕭玲鳳、鄭銘華、葉天降，2010：中央氣象局TWRP颱風預測模式之改進與其降雨預測。中央氣象局、台灣颱風洪水研究中心，2010海峽兩岸災害性天氣分析與預報研討會，共8頁。
- 朱吟晨、吳宜昭、林李耀，2010：低層大氣水氣通量對颱風降雨的影響，氣象災害防治組/國家災害防救科技中心，共5頁。
- 周昆炫、黃柏智，2011：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。
- Black M. L., J. F. Gamache, F. D. Marck, 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.
- Chen, S. Y. S., J. A. Knaff, and F. D. Marks, 2006: Effects of vertical wind shear and storm motion on tropical cyclone rainfall asymmetries deduced from TRMM. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 3190-3208.
- Chien, F.-C., and H.-C. Kuo, 2011: On the extreme rainfall of Typhoon Morakot (2009), *J. Geophys. Res.*, **166**, D05104, doi: 10.1029/2010JD015092.
- Chou, K.-H., and C.-C. Wu, 2008: Development of the typhoon initialization in a mesoscale model – Combination of the bogus vortex with the dropwindsonde data in DOTSTAR. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 865-879.
- Chou, K.-H., C.-C. Wu, and Y. Wang, 2011: Eyewall evolution of typhoons crossing the Philippines and Taiwan: An observational study. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, **22**, 533-548. doi: 10.3319/TAO.2011.05.10.01(TM)
- Corbosiero, Kristen L., and J. Molinari, 2002: The effects of vertical wind shear on the distribution of convection in tropical cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 2110-2123.
- Corbosiero, Kristen L., and J. Molinari, 2003: The relationship between storm motion, vertical wind shear, and convective asymmetries in tropical cyclones. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 366-376.
- Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 3077-3107.
- Frank, W. M., and E. A. Ritchie, 1999: Effects of environmental flow on tropical cyclone structure. *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 2044-2061.
- Frank, William 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.
- Hong, S.-Y., Y. Noh, and J. Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit

- treatment of entrainment processes. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 2318-2341.
- Hsiao, L. F., C.-S. Liou, T.-C. Yeh, Y.-R. Guo, D.-S. Chen, K.-N. Huang, C.-T. Terng, and J.-H. Chen, 2010: A vortex relocation scheme for tropical cyclone initialization in advanced research WRF. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 3298-3315.
- 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.
- Kain, J., and M. Fritsch, 1993: Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme. *The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models, Meteor. Monogr.*, No. 46, Amer. Meteor. Soc., 165-170.
- Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, **102 (D14)**, 16663-16682.
- Reasor, P. D., M. T. Montgomery, F. D. Marks Jr., and J. F. Gamache, 2000: Low-wavenumber structure and evolution of the hurricane inner core observed by airborne dual-doppler radar. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 1653-1680.
- Reasor, P. D., R. Rogers, and S. Lorsolo, 2013: Environmental flow impacts on tropical cyclone structure diagnosed from airborne Doppler radar composites. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 2949-2969.
- Rogers, R., S. Chen, J. Tenerelli, and H. Willoughby, 2003: A numerical study of the impact of vertical shear on the distribution of rainfall in Hurricane Bonnie (1998). *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 1577-1599.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, 2008: A description of the advanced research WRF version 3. *NCAR tech notes-475+STR*, 113 pp.
- Tao, W.-K., J. Simpson, and M. McCumber, 1989: An ice-water saturation adjustment. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 231-235.
- Wu, C.-C., T.-H. Yen, Y.-H. Kuo, and W. Wang, 2002: Rainfall simulation associated with Typhoon Herb (1996) near Taiwan. Part I: The topographic effect. *Wea. and Forecasting*, **17**, 1001-1015.
- Wu, C.-C., K.-H. Chou, H.-J. Cheng, and Y. Wang, 2003: Eyewall contraction, breakdown and reformation in a landfalling typhoon. *Geophys. Res. Lett.* **30** (17), 1887.
- Wu, C.-C., H.-J. Cheng, Y. Wang, and K.-H. Chou, 2009: A numerical investigation of the eyewall evolution in a landfalling typhoon. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 21-40.
- Wu, C.-C., K. K. W. Cheung, and Y.-Y. Lo, 2009: Numerical study of the rainfall event due to interaction of Typhoon Babs (1998) and the

northeasterly Monsoon. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 2049-2064.

Xu, Y., and Y. Wang, 2013: On the initial development of asymmetric vertical motion

and horizontal relative flow in a mature tropical cyclone embedded in environmental vertical shear. *J. Atmos. Sci.*, **70**, 3471-3491.

The Precipitation and Structure Evolution of Typhoon Fanapi (2010) in a Non-hydrostatic Mesoscale Model

Kun-Hsuan Chou¹ Cheng-Hsiang Chih² Chun-Ming Yeh² Yi-Ling Shen²

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

²Graduate Institute of Earth and Atmospheric Science,
Chinese Culture University, Taipei, Taiwan

(manuscript received 10 February 2014 ; in final form 29 July 2014)

ABSTRACT

Typhoon Fanapi (2010) is the only landfalling case for Taiwan in 2010, and the severe disaster has been created at southern and southwestern of Taiwan. Except the heavy rainfall and extreme wind in its period of alarm from Central Weather Bureau, the scientific issues include 1) The rainfall maintain in southwestern Taiwan in the period of landfall. 2) The causes of asymmetry convective structure and the eyewall reformation after landfall. This study would be discussed the above topic by the topography and Sea Surface Temperature (SST) sensitivity experiments of Weather Research and Forecast (WRF) model simulation.

The WRF version is V3.3.1 in this study. The initial and lateral boundary conditions are based on the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Global Forecast System (GFS) global final analysis data ($1^\circ \times 1^\circ$). The integration domain has a triply nested grid system with resolutions of 30, 10, and 3.3 km. The model results catch the intensity tendency and close tracks by all sensitivity experiments, especially the control run (TL). The simulation results show that due to the simulated track is quite similar with observed, leads the simulated precipitation distribution very close to the observed rainfall distribution. The model well simulated the shear induced asymmetric convection of storm and terrain induced eyewall evolution during landfall. Further, the terrain sensitivity experiments show that when removed or flatten the terrain of Taiwan, the asymmetric structure can also appear in the simulation; however, the evolution of the eyewall does not occur, this result shows that the eyewall evolution is mainly caused by the effect of the topography.

From the several sensitivity experiments results and vertical wind shear analyses, it is suggested the environmental northern vertical wind shear is the main cause to produce the asymmetry convective structure

of Fanapi. The convective cells form on the downshear side, then advect around the eye into the semicircle to the left of shear vector, thus lead a precipitation maximum forming over the downshear-left side of storm. These result is consistent with previous studies regarding the environmental vertical wind shear on the formation of the asymmetric convection of tropical cyclones. Furthermore, it is found that the asymmetric convection is not obviously influenced by the terrain, but tends to induce more asymmetric convection of the storm. The SST horizontal variation has not significant influence for the phenomena.

Key Words: Typhoon Fanapi, Typhoon structure, Typhoon rainfall, Vertical wind shear

