

凡那比颱風(2010)在西南台灣降水之颱風數值作業模式預報探討

葉天降* 陳得松 蕭玲鳳 鄭浚騰 黃康寧

中央氣象局

(中華民國 109 年 8 月 24 日收稿；中華民國 109 年 12 月 07 日定稿)

摘 要

2010 年侵台凡那比颱風(Fanapi)於 9 月 18 日中心由花蓮登陸、19 日由臺南進入台灣海峽，並以偏西北西方向緩慢移動遠離，侵台期間除在高屏山區有劇烈降雨外，在高雄都會區亦有劇烈降雨帶造成災情。本研究利用中央氣象局當時之颱風數值預報模式，針對此個案特別是高雄都會區小尺度劇烈降雨帶之預報，分析以了解模式對此個案之預報能力，和探討造成劇烈降雨可能之機制。結果顯示，中央氣象局颱風數值預報模式，能相當程度掌握凡那比颱風侵台之路徑預報；最內層為 5 公里解析，於 9 月 18 日 06UTC 為起始之預報也對台灣地區特殊之降水有相當程度之掌握。移除地形之敏感度實驗結果顯示，移除地形後，原在山區地形強化之降雨及在高雄都會區特殊之降水不再發生，惟凡那比颱風本身結構與強度存有顯著降雨、降雨較大值並在中心南側之情形，能提供有利條件，加上其能維持受地形影響而又不致消散，在台灣西側重新組織，形成雨帶，同時颱風移動方向和雨帶方向大致平行，造成高雄都會區小尺度劇烈降雨。

關鍵字: 颱風降雨量預測，數值模式預測，地形效應

* 通訊作者: 葉天降，tcyhcwb@gmail.com; Tel: 0910082488;台北市公園路 64 號

一、前言

依據中央氣象局之統計(<https://www.cwb.gov.tw/>)，台灣地區平均每年約受 3至4個颱風侵襲，颱風災害也是台灣地區各項氣象災害中最嚴重的一項(謝，1986)，侵台颱風所導致的災害，主要是由其所伴隨之強降雨。即使早期台灣地區雨量站尚不完整，廖(1960)就曾說明從1911至1959年間共有20幾個颱風夾帶超過700mm之豪雨，造成嚴重災情。在全球暖化趨勢下，蘇等(2017)分析1960-2015年西行且穿過台灣陸地之颱風，顯示累積降雨量較大之颱風更集中在2004年之後，近30年(1986-2015)的颱風平均累積降雨量與平均降雨強度較先前30年有顯著增加趨勢，尤其是颱風離陸後平均降雨強度增加更是明顯。國家災害防救科技中心藉「極端降雨綜合指標」評比1970至2017年間影響台灣的238個颱風(<https://dra.ncdr.nat.gov.tw/Frontend/Disaster/ClimateDetail/BAL0000004>)，亦顯示極端強降雨颱風事件發生機率愈趨頻繁，前10%的颱風排序(約24個颱風)中，有三分之二發生在後半期間(1995-2017年)。這些大降雨颱風包含如琳恩颱風(1987)、賀伯颱風(1996)、象神颱風(2000)、桃芝及納莉颱風(2001)、敏督利颱風(2004)、海棠及泰利颱風(2005)、柯

羅莎颱風(2007)、卡玫基及辛樂克颱風(2008)、莫拉克颱風(2009)、蘇拉颱風(2012)、蘇力颱風(2013)等等，這些颱風都造成許多民眾傷亡和巨大財物損失。

台灣地區颱風預報面臨許多挑戰(Wu and Kuo, 1999)，其中山脈高聳地形扮演很重要角色，過去氣候統計方法或簡單的概念模式為預報作業依循之主要工具(魏等，1971；王，1980；吳等，1981；葉等，2000；Lee et al., 2006)，在數值天氣預報模式逐漸改善後，數值模式預報結果成為颱風預報作業之主要參考資料(Hsiao et al., 2015、2020；Hong et al., 2015)，數值模式也協助對台灣地區颱風移動特殊路徑變化及風雨分布機制之了解(Wu et al., 2002、2009；Lin et al., 2005；Chien et al., 2008；Lee et al., 2008；Yang et al., 2008；Wang et al., 2009、2013；Fang et al., 2011；Yeh et al., 2012；Chen et al., 2017；Huang and Wu, 2018)。

前述造成大降雨量颱風在台灣地區之降雨特性多有不同，有些受東北季風共伴效應影響在東北部造成更強降雨(如琳恩颱風)，有些引進強烈西南氣流在西南部造成更強降雨(如敏督利颱風、莫拉克颱風)，有些受地形影響行成滯留性地形雨帶(如桃芝颱風、賀伯颱風)，有些移動速變慢或近似滯留但系統並未減弱而造成長時間降雨(如

納莉颱風)。由於情況多所不同，增加預報作業之困難。這些大降雨，一般以山區之降雨量較平地大，在防災作業上，若降雨主要發生在山區，在下游之都會區有一段時間可以採取行動應變。2010年凡那比颱風(Fanapi)除在高屏山區有劇烈降雨外，也在高雄都會區形成一小尺度劇烈降雨帶(Wang et al., 2013; 周等, 2014; Liou et al., 2016; Huang et al., 2016; Yang et al., 2018; Lin et al., 2020)，造成災情。由雷達觀測分析得知此劇烈降雨係凡那比颱風眼牆受地形破壞後之眼牆重建現象(Liou et al., 2016)，他們並進一步得到這重建之過程主要係由下層而上，渦旋度之增加除拉伸作用、水平平流、傾斜項之貢獻外，垂直向之平流亦是上層渦旋度能強化的關鍵。Yang et al. (2018)透由數值模擬，進一步說明在這個案中，垂直發展之熱塔(vertical hot towers)有助將下層渦旋度往上傳輸。Wang et al. (2013)、周等(2014)及Huang et al. (2016)由數值模擬顯示都能定性的預報此個案在台灣西側高雄一帶之劇烈降雨，並對其形成之機制有更進一步之了解，惟彼此間對個案降雨分布之模擬預報差異仍大，Lin et al. (2020)進一步以數值模式系集模擬，說明這個案預報之不確定性，同時了解台灣地形更增加預報之不確定性。

顧及在防颱作業上，除了加強了解降雨現象形成之機制和預報不確定性外，進一步了解作業單位提供預報資訊對系統之掌握情形，以發佈更具體資訊供下游應用也屬必須。本文將以凡那比颱風個案，探討及檢視中央氣象局當時之颱風數值預報模式(Hsiao et al., 2012)對此個案之預報情形，特別針對高雄都會區小尺度劇烈降雨帶之預報，以了解其預報能力，主要之缺失，作為後續預報作業之參考，增進防洪防颱。於後第二節將對個案及所採用模式作進一步介紹及說明，第三節將對模擬結果進行分析討論，最後為結論。

二、凡那比颱風及中央氣象局颱風預報模式簡介

凡那比颱風(Fanapi)是2010年西太平洋地區發生的第11個颱風(編號為1011)，於9月15日08UTC在琉球南方海面(北緯 20.7° ，東經 127.6°)形成，生成後向東北緩慢移動(路徑如圖1)並增強，達中度颱風後緩慢向北轉北北西行進，之後轉為偏西朝向台灣東方海面接近。依據中央氣象局紀錄，其暴風圈於18日18UTC左右接觸台灣東北部陸地，19日00UTC中心移到花蓮縣近岸，隨後中心由花蓮縣豐濱鄉附近登陸。19日10UTC颱風中心由臺南

進入台灣海峽，並以偏西北西方向緩慢移動，颱風中心於 20 日 00UTC 稍前由福建進入中國，20 日 18UTC 減弱為熱帶性低氣壓。詳細凡那比颱風的路徑定位、強度資料如表 1。

由中央氣象局雷達回波圖(圖 2)顯示，凡那比颱風在接近台灣，距陸地 100 公里前(18 日 18UTC)結構相當結實，雷達回波之颱風中心及雨帶清晰可見。在中心即將登陸時(19 日 00UTC)，中心仍可由雷達回波清楚定位，颱風西側之結構雖受地形影響而改變，東側仍維持完整颱風雨帶，特別是中心北側地形迎風面上之回波較先前更強化，引致花蓮以北山區造成較大降雨。中心登陸後(19 日 06UTC)，颱風北側之結構明顯受到地形破壞，雨帶消散，回波減弱，使颱風中心所在位置不易由雷達迴波定位；中心南側則仍維持較強回波，特別是可由回波圖清楚看到由海峽中界起，有一雨帶展延至高屏地區。之後颱風中心逐漸在台灣西側形成(19 日 12UTC)並逐漸西移，雨帶之形狀隨中心位置移動而有逐漸變化，方向亦由西北東南向、西向、至西南東北向或北向(19 日 18UTC)，由於長期間強雨帶之影響，致高屏山區以及高雄市區出現很大降雨。自 9 月 18 日 08UTC 至 21 日 08UTC 期間屏東縣瑪家累積雨量 1131mm(毫米)、高雄縣岡山累積

雨量 951mm，其中瑪家曾連續 9 小時之時雨量大於 60mm，6 小時之累積雨量 618.5mm 創下當時台灣地區 6 小時最大累積雨量紀錄(當年隨後梅姬颱風與東北季風在宜蘭縣蘇澳創下目前紀錄 645mm)，岡山曾連續 9 小時之時雨量大於 50mm，24 小時之累積雨量 939.5mm 創下岡山地區 24 小時最大累積雨量紀錄，台灣各地累積雨量分布如圖 3。

中央氣象局颱風預報模式(TWRF)為中央氣象局近年來致力發展之颱風數值模式(Hsiao et al., 2010, 2020)，此模式建置於 2010 年(TWRF1.0 版)，架構上是使用美國國家大氣研究中心(NCAR)發展之現代化研究社群數值(Weather Research and Forecasting, WRF)模式(<https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>)，常稱 ARW-WRF (ARW 為 Advanced Research WRF)。完整預報系統除數值模式(含動力過程及物理方案)外，亦包含動力初始化與資料同化模組等，2010 年中央氣象局作業使用之 TWRF 模式為三層巢狀網格(45/15/5km)，垂直方向則為 45 層，版本為 WRF V3.3.1，模式涵蓋區域如圖 4。選用之物理參數法包括 Yonsei University 邊界層參數法、Goddard 微物理參數法、new trigger Kain-Fritsch 積雲參數法。有關數值模式颱風預報作業，

因颱風大都形成於廣闊洋面上，常缺乏足夠觀測資料以正確解析颱風結構，故如何獲得良好之颱風渦旋初始化，以妥善處理數值模式中之颱風環流為數值模式進行颱風預測時之重要關鍵技術。2010 年中央氣象局 TWRP 模式已包含颱風渦旋植入(bogus scheme)及渦旋移置(relocation scheme)技術之颱風渦旋初始化流程(Hsiao et al., 2010)，同時進一步採用 Partial cycling 初始場優化策略、並於三維變分資料同化(3DVAR)流程中引用 outer loop、同時優化背景誤差協方差(CV3/CV5) (版本更新為 TWRP1.1, Hsiao et al., 2012)，TWRP 於颱風臨台時，每天進行 4 次(00/06/12/18UTC)預報作業，每次預報 120 小時，側邊界條件則來自美國國家環境預報中心(National Centers for Environment Prediction, NCEP)0.5 度解析度之全球模式預報場，經內插至 TWRP 模式格點。模擬預報之初始場是由美國國家環境預報中心(NCEP)全球預報模式(GFS)在預報時間 12 小時前之分析場經內插至 TWRP 模式格點得到預報時間 12 小時前客觀分析所需之 FIRST GUESS 場，後再經兩次 6 小時分析預報循環更新(update cycle)得到預報時間客觀分析所需之 FIRST GUESS 場；再經客觀資料分析而得。TWRP 3DVAR 分析係在 45/15/5 公里三網格

層皆進行，所使用之資料則為作業時中央氣象局所蒐集之各種地面、船舶、探空、衛星等觀測資料，當時尚未應用雷達觀測所得資料。

圖 5 顯示 TWRP 模式自 9 月 15 日 12UTC 起至 19 日 12UTC 對凡那比颱風之路徑預報，除生成初期 15 日 12UTC、18UTC 及 17 日 00UTC 所作預報較明顯偏離觀測路徑外，其餘多集中、疊合以致對各預報路徑較難分辨，作業預報大致能掌握凡那比颱風之行徑，如前期由北轉西行，中心登陸與侵襲台灣，並在接近台灣時路徑有南偏，其中特別是颱風中心已經由北轉為西行之後，所做的預報誤差更小，整期共 18 個預報之平均 12/24/36/48/60/72 小時之路徑預報誤差分別為 68/83/99/138/159/164 公里(個案數分別為 18/17/15/13/11/9)。由圖 5 中若濾除 15 日 12、18UTC 及 17 日 00UTC 所作預報路徑(圖中標記分別為 1、2 及 6)，則可見台灣上游各路徑較鄰近台灣各路徑更集中，和 Lin et al. (2020)模擬得知台灣高山增加凡那比颱風預報之不確定性一致。由中央氣象局所分析之 500hPa 高度場及地面氣壓初始場(圖 6)顯示，在 9 月 18 日至 20 日凡那比颱風鄰近台灣期間，颱風主要是處在 500hPa 上高壓系統之南緣，颱風附近沒有其他熱帶天氣系統，所處綜觀環

境相對較單純。17 日 18UTC 至 18 日 18UTC 各預報之平均 12/24/36/48 小時路徑誤差分別為 28/49/58/134 (17/18UTC)、46/27/35/109 (18/00UTC)、13/69/138/166 (18/06UTC)、27/61/151/191 (18/12UTC)、74/71/34/-- (18/18UTC，48 小時颱風已經消散無校驗)公里，預報誤差較一般小，惟在台灣附近之預報位置(見圖 5)仍有相當程度分散。在防颱實務作業上，更著重於在 18 小時前提供關鍵地區風雨預報，於後將以 9 月 18 日 06UTC 之模擬預報結果做進一步分析及討論。

表 1、中央氣象局所提供凡那比颱風最佳路徑中心定位、中心氣壓、強度及動向資料表。

時間 (UTC)			中心位置 (度)		中心氣壓 (hPa)	強度	移動方向 (度)	移動速度 (km/hr)	近中心最大風速 (m/s)		暴風半徑 (km)	
月	日	時	北緯	東經					持續風	陣風	30kts	50kts
9	15	12	20.7	127.6	998	輕度	309	9	18	25	100	
		18	20.9	127.5	995	輕度	335	4	20	28	120	
		16 00	21.4	127.7	985	輕度	20	10	25	33	120	
		06	21.5	128.0	980	輕度	70	5	28	35	150	
		12	21.8	128.3	970	中度	43	7	33	43	150	50
		18	22.1	128.3	970	中度	360	6	33	43	150	50
		17 00	22.3	128.3	965	中度	360	3	35	45	180	80
		06	22.7	128.1	960	中度	335	8	38	48	180	80
		12	23.1	127.8	955	中度	325	9	40	50	200	80
		18	23.3	126.9	950	中度	282	17	43	53	200	80
		18 00	23.3	126.1	950	中度	270	14	43	53	200	80
		06	23.7	125.3	950	中度	299	15	43	53	200	80
		12	23.8	124.3	950	中度	270	17	43	53	200	80
		18	24.0	123.1	950	中度	287	25	43	53	200	80
		19 00	23.6	121.7	940	中度	250	32	45	55	200	80
		06	23.2	120.5	965	中度	270	17	35	45	200	80
		12	23.4	119.7	970	中度	299	15	33	43	200	50
		18	23.5	119.0	970	中度	290	10	33	43	200	50
		20 00	24.0	117.6	970	中度	295	26	33	43	200	50
		06	23.6	116.0	985	輕度	255	28	25	33	150	
		12	23.8	115.3	995	輕度	287	12	20	28	150	
		18	24.0	113.5	1000	熱帶性 低氣壓	277	31	15	23		

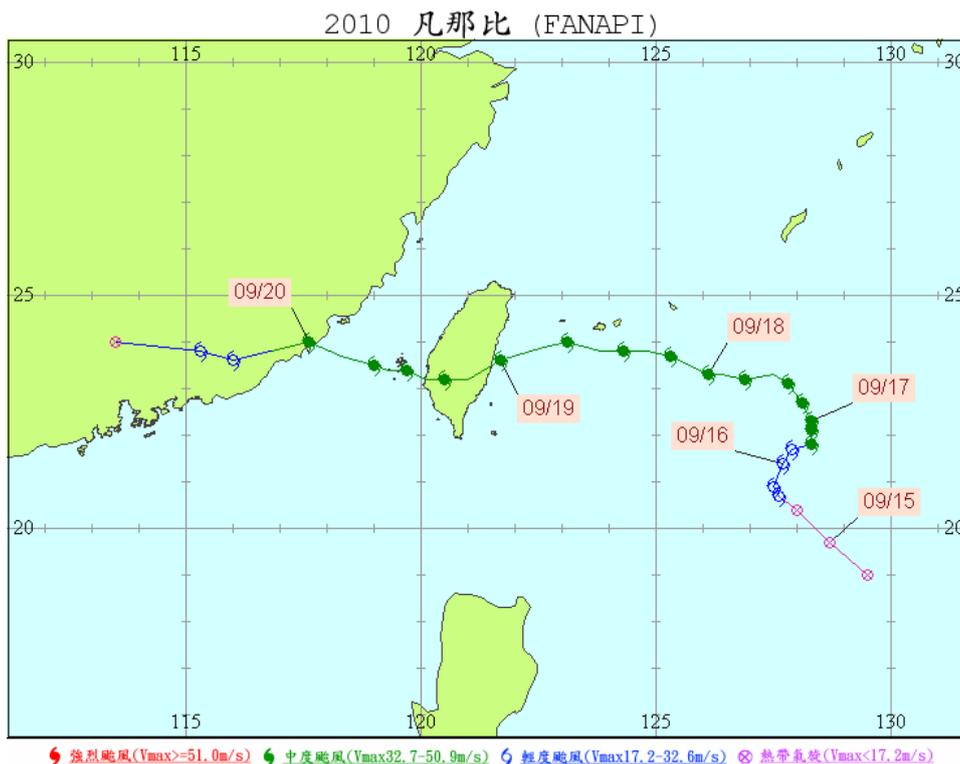


圖 1、中央氣象局凡那比颱風最佳路徑圖。圖中路徑各顏色、符號表不同強度(見圖下方說明)，符號間距為 6 小時，數字標記每日 00UTC 中心位置，如 09/15 為 09 月 15 日 00UTC。

Radar

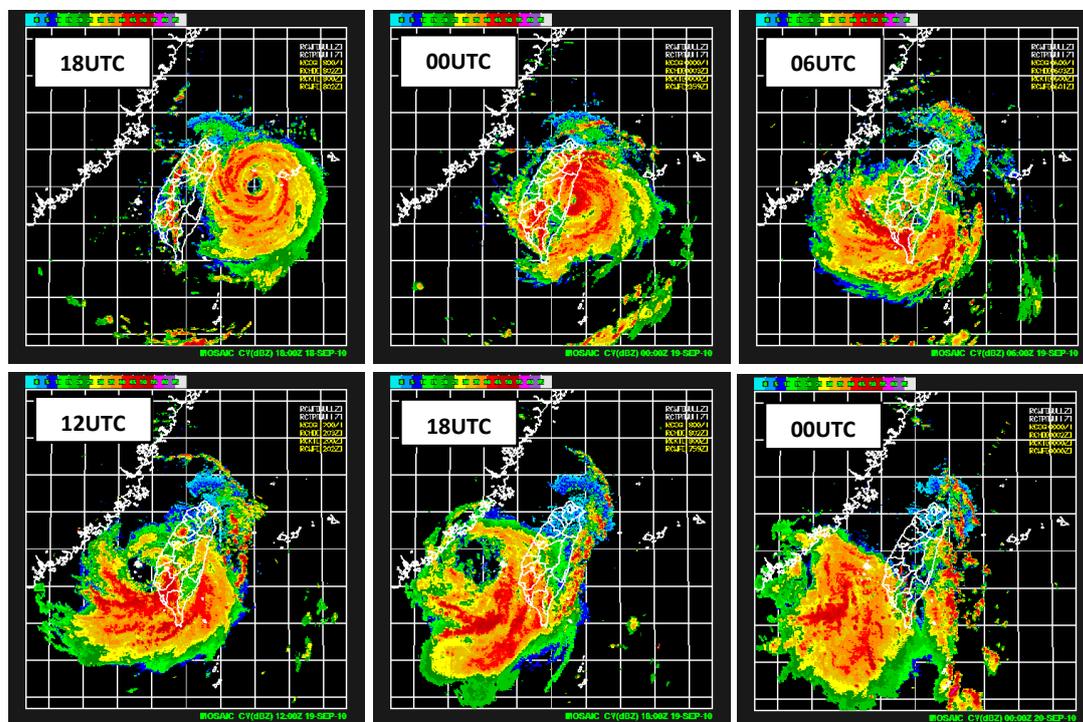


圖 2、凡那比颱風影響台灣期間(18 日 18UTC 至 20 日 00UTC，由左至右由上而下)中央氣象局所觀測每 6 小時間距之雷達回波圖。

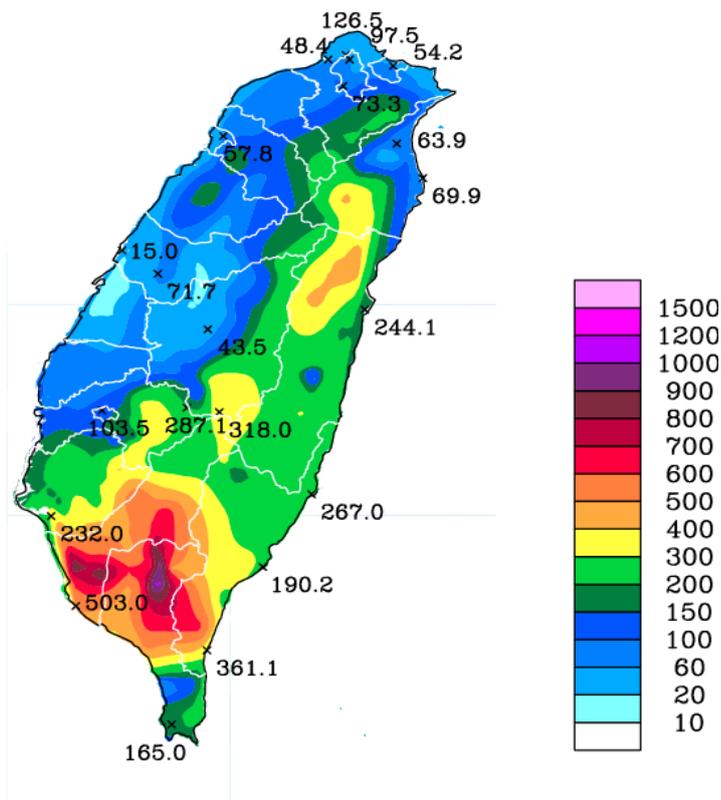


圖 3、中央氣象局所觀測 2010 年 9 月 18 日 08UTC 至 21 日 08UTC 止台灣各地累積雨量分布(單位 mm)。圖中數字為中央氣象局所屬氣象站累積雨量。

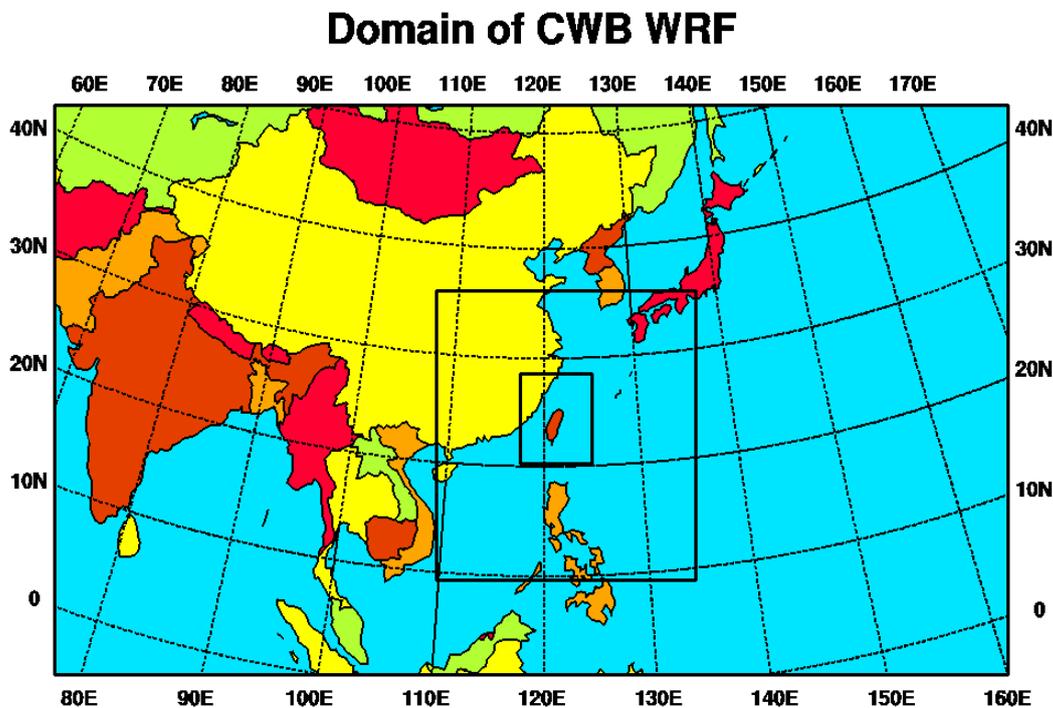


圖 4、中央氣象局 TWRP 模式涵蓋區域。

TWRF(15KM) TYPHOON TRACK FORECAST 10/09/15/12UTC--10/09/19/12UTC

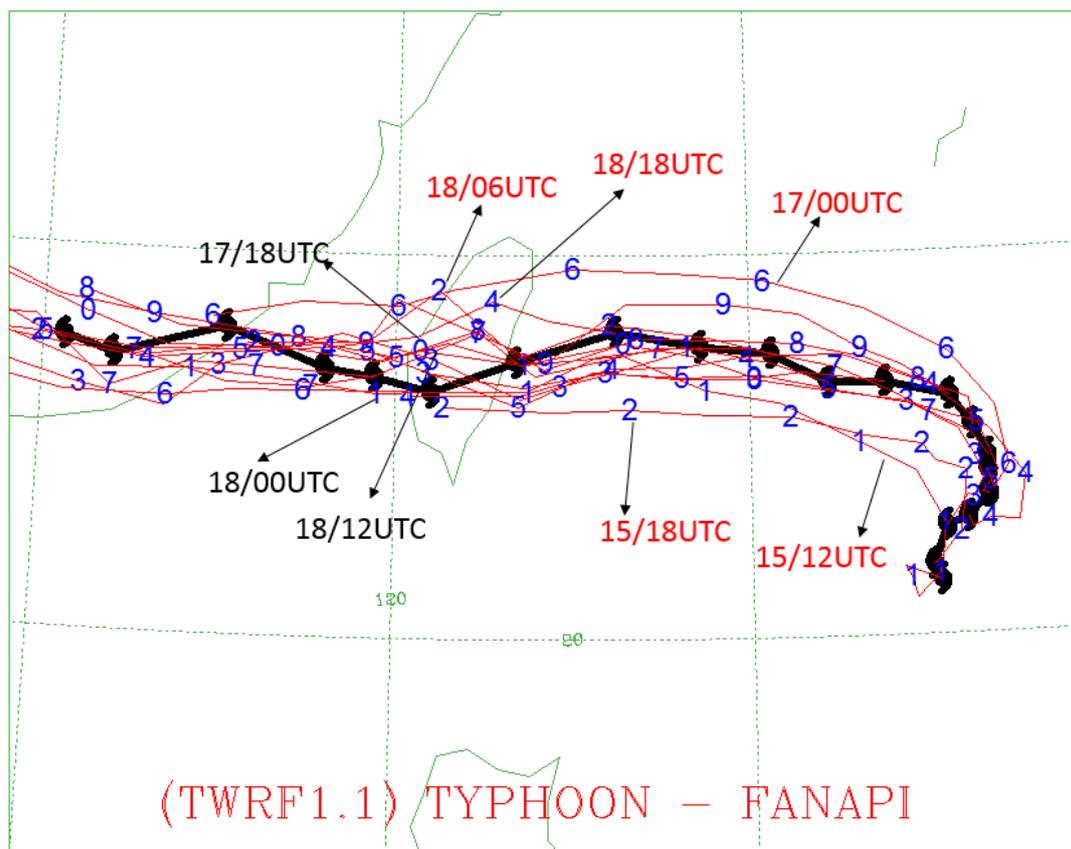


圖 5、TWR1.1 模式自 9 月 15 日 12UTC 起至 19 日 12UTC 每隔 6 小時對凡那比颱風之路徑預報(紅色路徑，標記由 1 起循序增加至 9，再自 0、1 起循序增加至 7，標記間距 12 小時)，觀測路徑為黑色標記颱風符號(標記間距 6 小時)。預報路徑與觀測有較大偏離者並以紅色標示預測之起始日/時間，17 日 18UTC、18 日 00UTC 及 18 日 12UTC 預報在台灣西側附近之位置亦分別標示以利分辨。

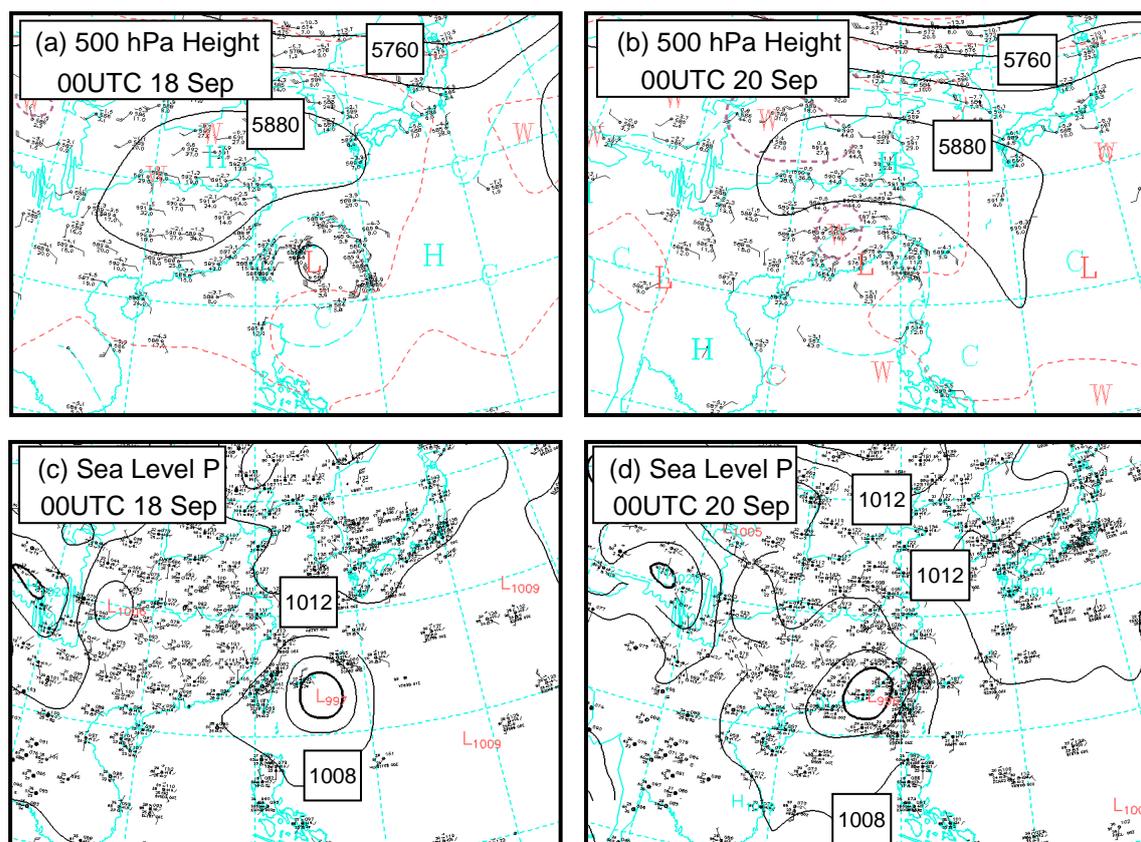


圖 6、中央氣象局所分析(a)9月18日00UTC及(b)9月20日00UTC之500hPa高度場(單位公尺)與(c)9月18日00UTC及(d)9月20日00UTC之海平面氣壓場(單位hPa)。

三、模擬結果及討論

圖 7 顯示 TWRF 模式於 9 月 18 日 06UTC 之預報路徑和觀測相當接近，在台灣東側之登陸點十分一致，惟稍慢。中心在台灣陸地時之路徑略偏北，中心出海後移速略偏快，特別是在 19 日 12UTC 至 18UTC 這段期間，使得中心登陸大陸之位置雖接近，但登錄時間快了約 6 小時。TWRF 模式模擬凡那比颱風侵台主要降雨階段(18 日 16UTC 至 19 日 16UTC)之 24 小時累積雨量如

圖 8，北台灣西測雨量多在 150mm 以下，東側花蓮縣北部和宜蘭縣南部有比較大降雨量，和同期間中央氣象局觀測所得日雨量相較，十分相近。南台灣之降雨模擬結果，則以山脈西測較多，降雨中心並在高屏台東山區，在高屏平地很大一部分區域之雨量也達到 500mm 以上，這都和觀測相近。惟在更定量、更小尺度之降雨分布仍未能完全正確模擬，如在高屏台東山區之降雨中心量值略大，大於 600mm 區域在

南北向之延伸也略較實際長，另位於高雄市小港一帶之極值中心，模擬雖顯示有一雨帶由山區向西延至小港一帶，但於小港一帶之降雨量較觀測略小，極值未能和山區極值區清楚的分離。

在颱風侵台過程上，由模擬所得雷達回波(圖 9)顯示，和觀測相近，在 18 日 18UTC 時颱風中心清晰可見，颱風外圍剛接觸到台灣東北部。19 日 00UTC 時中心已在沿岸附近，即將登陸，之後颱風北側之回波明顯消散，南側則由台灣海峽起形成明顯之雨帶，至 19 日 12UTC 也如同觀測，雨帶已再次環繞颱風中心之四周。和觀測略有不同的是颱風南側之雨帶較廣，18 日 18UTC 時模擬之雨帶已由台灣西側一路延續至颱風南側；中心移到台灣地區時，台灣東南部背風區之雨帶強度

也較觀測強。中心登陸前，氣旋式環流受地形影響之迎風面在北台灣東測，因此主要之降雨也發生在該區，而由於模擬和觀測之雷達回波相似，因此也反映在一致之降雨分布與量值上。

比較圖 9，模擬結果中心南側在南台灣之雨帶形成較實際觀測早、較廣、且較強，這也和圖 8 模擬在高屏山區之降雨量較觀測為大一致。觀察 19 日 08UTC 在中心南側之雷達回波雨帶分布走向，在上游之海峽上，模擬和觀測相近，主要為西北-東南向；在高屏地區，模擬和觀測則有較明顯不同，模擬高估了西南-東北走向之回波，這或許是造成前述於高屏山區降雨極值較觀測大、降雨量達 600 mm 以上區域在南北向之延伸也較實際分布區域長之情形一致。

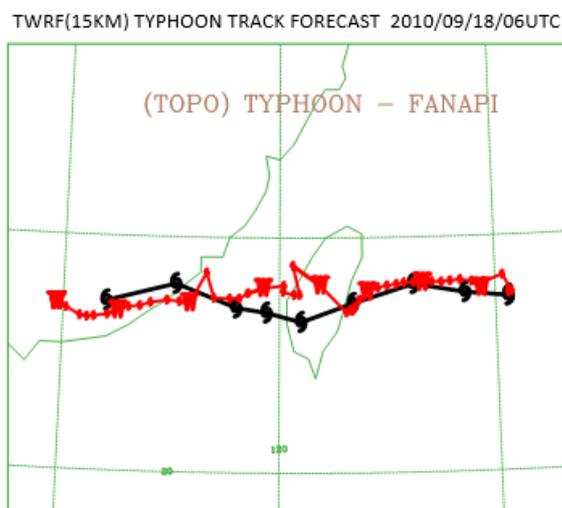


圖 7 中央氣象局所訂凡那比颱風 9 月 18 日 06UTC 至 20 日 06UTC 路徑(黑颱風符號)及 TWRP 模式 9 月 18 日 06UTC 預報 48 小時路徑(紅 W 符號)。

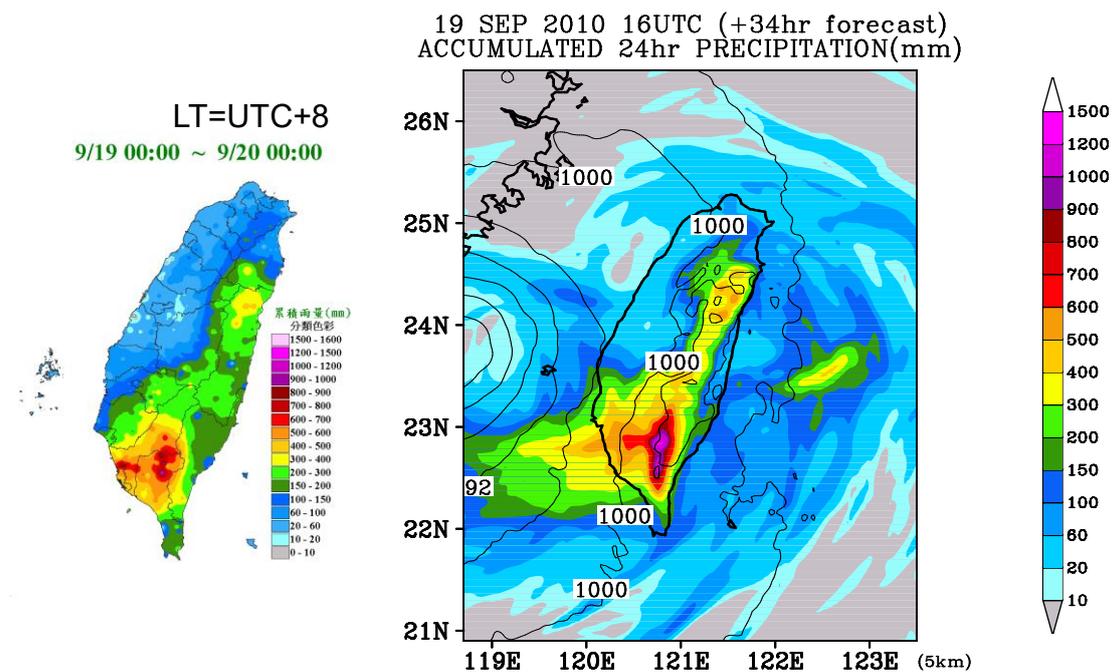


圖 8 TWRf 模擬凡那比颱風侵台主要降雨階段(18 日 16UTC 至 19 日 16UTC)之 24 小時累積雨量(顏色, 單位 mm)及 19 日 16UTC 之海平面氣壓場(等值線, 單位 hPa)。同期間中央氣象局日雨量圖(19 日 00LT 至 20 日 00LT)資料附於左側。

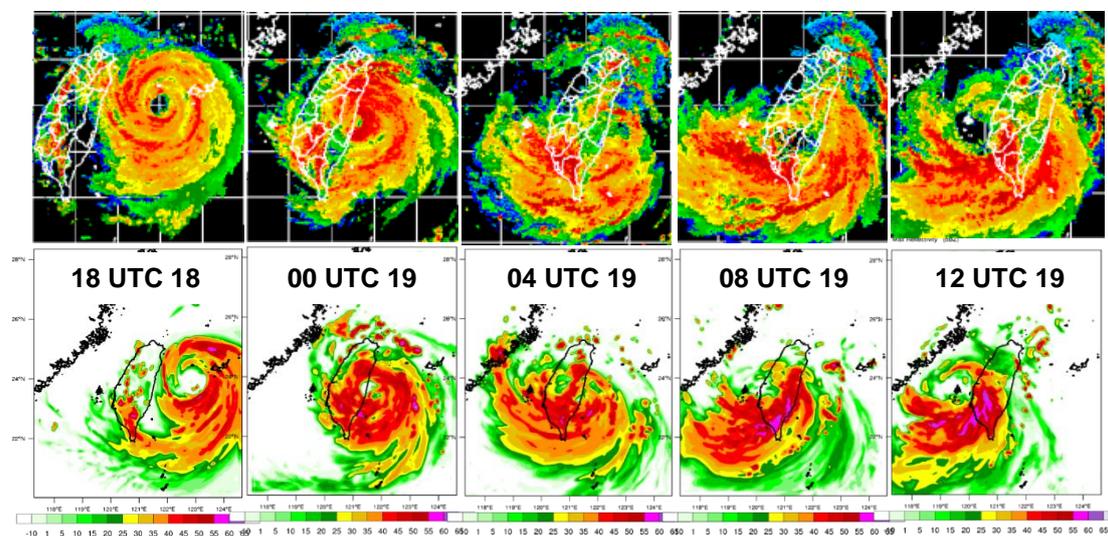


圖 9 凡那比颱風侵台 18 日 18UTC 至 19 日 12UTC(由左至右)期間, 每 6 小時觀測(上)與 TWRf 模式模擬(下)雷達回波。

進一步檢視模擬所得凡那比颱風侵台海平面氣壓與時雨量分布(圖 10)，顯示 19 日 00UTC(圖 10a)颱風中心於山脈東側接近時，逐漸於山脈西側形成低壓區(圖 10b)。至 04UTC(圖 10c)颱風中心繼續移上東部陸地，惟西側之低壓區已另形成一中心，並至 06UTC(圖 10d)當東側之中心減弱時，西側中心之氣壓值則進一步降低、發展，至 08UTC(圖 10e)及其後(圖 10f 至 10h)東側已不見中心、西側之中心則持續向西移行。由此模擬海平面氣壓分布分析顯示，凡那比颱風中心呈不連續過山。850hPa 流線(圖 11)則顯示，逆時針颱風環流之分布較台灣地形廣，外圍受地形之影響較少，颱風內核區則有較明顯受地形影響而變形，02UTC(圖 11a)及 04UTC(圖 11b)對應於上述海平面氣壓中心，於山脈東側亦有環流中心，06UTC(圖 11c)環流中心主要在山脈西側，至 08UTC(圖 11d)環流繼續往西移，中心也清楚的顯示在流線分布圖上。06UTC 環流中心(圖 11c)較海平面氣壓中心(圖 10d)位置偏南，環流北側下山氣流有利增溫、降壓而成低壓中心。至 08UTC 時，環流中心(圖 11d)及海平面氣壓中心(圖 10e)之位置已較一致，颱風內核區已移離高山區，到沿海平地。模擬所得凡那比颱風中心呈不連續過山，和 Liou et al. (2016)

雷達觀測分析結果一致，他們指出凡那比颱風之中心與眼牆在登陸台灣後消失，而在台灣西側重組。圖 11 也顯示 850hPa 等壓面大於 40m/s 較大風速區(圖 11 紅色)在颱風中心南側，海峽上及西南部較大風速區隨時間逐漸擴廣，至 06UTC 較大風速區已由海峽中段環繞到台灣東側，西南部地區有很強之氣流朝向高山區，這和 06UTC 起西南部有很強之降雨一致(圖 10d 及 10e)，進一步檢視，時雨量分布與 850hPa 風場輻合區分布相當一致，如 08UTC 時(圖 12)位於中心南側及高山區(於圖 12 高屏地面氣壓小於 850hPa 較高山區不顯示輻散值)之雨帶位置為很明顯之風場輻合區，雨帶及輻合帶也都存在小尺度的結構，大雨區在環流方向(或順等氣壓線方向)可展延較長，和環流垂直之方向(圖 11 南北向)就有明顯之小尺度變化，這現象和實際降雨相似。

先前提及，圖 8 模擬累積雨量雖顯示有一雨帶由山區向西延至小港一帶，但於小港一帶之降雨量較觀測略小，極值未能和山區極值區清楚的分離。圖 12a 則顯示 08UTC 時之時雨量分布確實有兩分離之大雨中心，除在高屏山區之極值中心外，另一大於 70mm/h 細狹長大雨區在中心南側之雨帶上，由外海沿伸至西南部陸地，和圖

8 觀測累積雨量大於 600mm 大雨區(圖 8 紅色區)極為相似。因此,凡那比颱風在高雄地區這種型態之降雨確實可模擬得到,惟模擬颱風後續之移動較快,若移動較慢,相似時雨量分布能再延續長久些,總累積雨量分布就能和觀測更接近。

為進一步了解台灣地形對凡那比颱風路徑及降雨分布之影響,以及凡那比颱風之特性,進行了移除台灣地形之模擬,圖 13 顯示移除台灣地形(地形高度設為 0 公尺、維持為陸面)時凡那比颱風在模擬過程之海平面氣壓、850hPa 流線場維持相似如典型之颱風結構,近圓形、同心,中心低氣壓、風速小,近中心有最大風速及較強降雨。中心強度可能受陸面之影響,在進入平坦之台灣陸地後略有減弱。和原模擬海平面氣壓(見圖 10)、流線(圖 13)相較,高山陸地明顯造成颱風結構與降雨分布之改變,如高山地形存在時,受地形阻擋風速變弱、有山脈背風面低壓槽區(或副中心)生成、主要之降雨在山脈迎風面上。無此高山地形存在時,主要之降雨較成環狀,惟很明顯的降雨集中在中心南側、量值亦達 40mm/h 以上,850hPa 輻散場(圖 13c 及 13f)也顯示在中心南側有較明顯輻合。在移除台灣地形時,整體系統並平順、穩定向西移動,整個過程之路徑如圖 14a,

顯示大尺度環流在這段期間並沒有槽線或低壓等特別系統接近或較明顯之改變,這和圖 6 綜觀環境一致。而因時雨量降雨更集中在中心南側,累積雨量(圖 14b)也有相同之分布,累積大雨中心沿著中心路徑之南側。周等(2014)也有相似之模擬結果,他們將台灣地形設為平地時,凡那比颱風登陸台灣時的路徑較為平滑,強度則緩慢減弱,模擬實驗亦呈現凡那比颱風南側較強對流的不對稱結構,他們進一步指出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,地形效應可以讓對流不對稱更加明顯。

在時雨量及輻散場分布上,在移除台灣地形後仍可見到有小尺度之結構,比較當中心移到東經 120 度左右時,高雄沿海區域在有高山地形存在及無高山地形存在,兩者差異可見,有高山地形存在時,時雨量及輻散場(圖 12)較呈東西向分布,而無高山地形存在時,時雨量(圖 13d)及輻散場(圖 13f)較呈環型分布。環型分布之降雨系統在系統移動時,較不利在累積雨量分布圖上形成小尺度結構,而降雨系統呈特定方向分布時,只要系統也順著這方向移動,在累積雨量分布圖上就能較容易呈現小尺度結構。綜合而言,由移除台灣地形之模擬顯示,上述凡那比颱風一些特徵,如降雨明顯、較大

雨區在中心南側、移動方向和雨帶方向平行，都有助實際個案於高屏地區有大雨發生。這些基本條件，加上地形效應，凡那比颱風中心有遭破壞再重組，形成之雨帶更呈東西向，和凡那比颱風移行方向相似，造成凡那比颱風在南台灣特殊之降雨。

有關 24 小時累積雨量分布預測和觀測雖接近，但在更定量、更小尺度之降雨分布仍未能完全正確模擬，如在高屏台東山區之降雨中心量值略大，小港一帶之降雨量較觀測略小，極值未能如觀測和山區極值區清楚的分離。Wang et al. (2013)、周等(2014)、Huang et al. (2016)之研究也有相似之情形，周等(2014)、Huang et al. (2016)也都高估台灣東側和高屏山區之雨量，Wang et al. (2013)則略高估台灣東側之雨量、略低估高屏山區之雨量。小港一帶之降雨極值與高屏山區降雨極值分離為兩中心部分，周等(2014)之模擬並未注重與呈現；Huang et al. (2016) 其圖 6 之模擬雖能將小港一帶之降雨極值與高屏山區降雨極值分離為兩中心部分，惟主要雨區在海面上，低估小港一帶之降雨，同時其雨帶朝向西南延伸，和觀測向西不同；Wang et al. (2013)之模擬結果圖 6 顯示，小港一帶之降雨極值與高屏山區降雨極值有分離為兩中心，惟低估小港一帶之降雨，同時台南沿

海另多出一較高雄更明顯之一降雨量中心，和觀測也有較大差異。Lin et al. (2020)進行 28 組成員系集模擬，其結果圖 20 顯示，隨系集成員之不同在台灣西側降雨有相當不同之分布，支持並更清楚呈現預報之不確定性，而綜合系集模擬之結果(其圖 6)48 小時降雨模擬明顯高估宜蘭花蓮一帶降雨、明顯低估高屏山區降雨。

上述結果都顯示凡那比颱風數值模式雨量預報仍有相當程度之不確定性，在現階段之防颱實務上，仍需要思考如何才能更準確的提供更明確之雨量預報資訊供應用。TWRf1.1 受到電腦資源之限制，最小解析度為 5 公里，5 公里解析度所涵蓋之區域也太小，另外初始場處理也仍需思考較有效之方法，讓綜觀尺度與颱風尺度之初始場有更好之彌合。在引用全球模式與區域模式彌合 (Blending of global and regional analyses)技術(Hsiao et al., 2015)後，TWRf1.1 更新為 TWRf1.5；而在進一步提高解析為 3 公里、擴大 3 公里解析度所涵蓋之區域後，並應用 WRF 最新的一些更新(WRF3.8.1)，TWRf1.5 更新為 TWRf2.0(Hsiao et al., 2020)。以 TWRf1.5 及 TWRf2.0 對凡那比颱風降雨量預報之結果如圖 15，TWRf1.5 模擬降雨分布與 Huang et al. (2016)較相近，顯示台灣西側之降雨中心，並顯示此

降雨向西南延伸到外海；TWRf2.0 模擬降雨分布則較類似 Wang et al. (2013) 也以 3 公里解析度所作之模擬結果，已能顯示小港一帶有小尺度劇烈雨帶，而對在台南沿海之降雨，TWRf2.0 模擬改善了 Wang et al. (2013)過度預報。

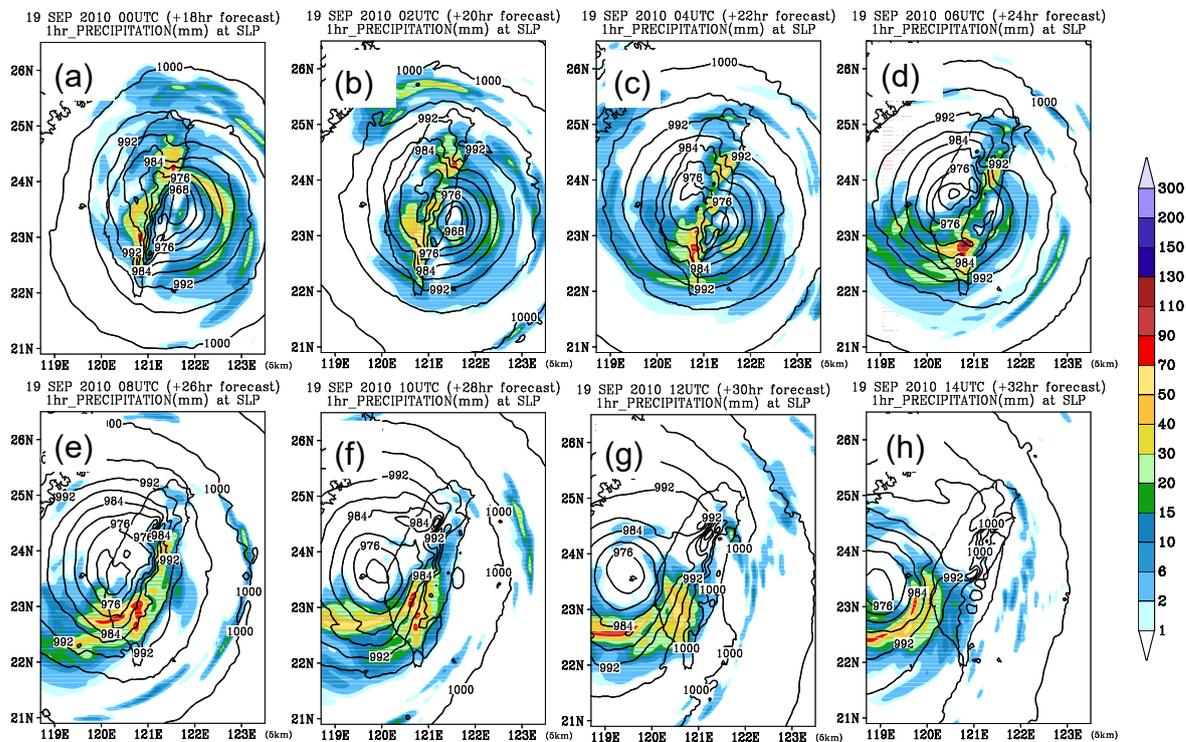


圖 10 模式模擬所得凡那比颱風侵台 19 日(a)00UTC、(b)02UTC、(c)04 UTC、(d)06UTC、(e)08UTC、(f)10UTC、(g)12UTC 至(h)14UTC 期間，每 2 小時之海平面氣壓(等值線，線距 4hPa)與時雨量(右側尺標，單位 mm)分布。

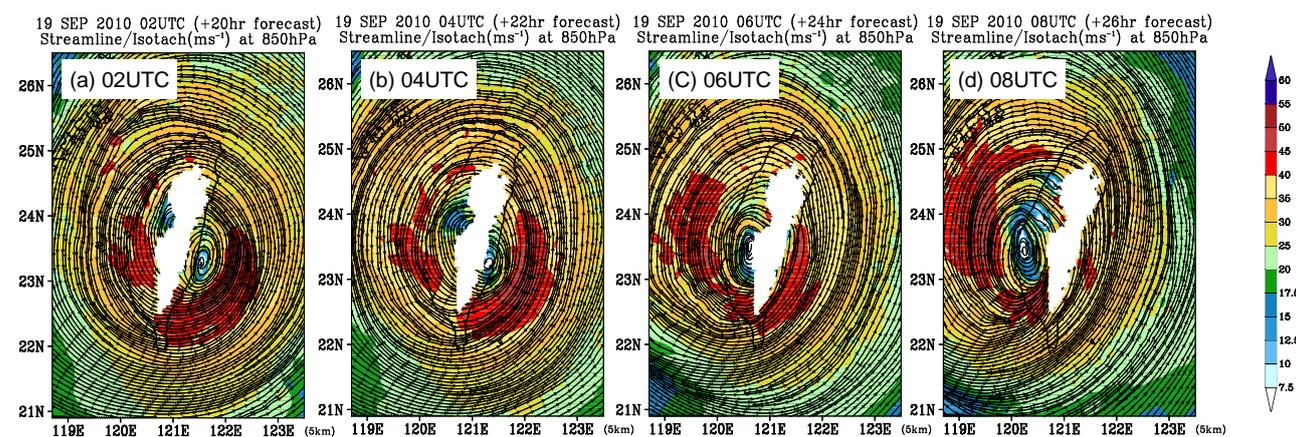


圖 11 模式模擬所得凡那比颱風侵台 19 日(a)02UTC、(b)04UTC、(c)06UTC、至(d)08UTC 期間，每 2 小時之 850hPa 流線與風速(右側尺標，單位每秒公尺，由小至大為由藍、綠、黃、紅)分布。空缺處之地面氣壓低於 850hPa。

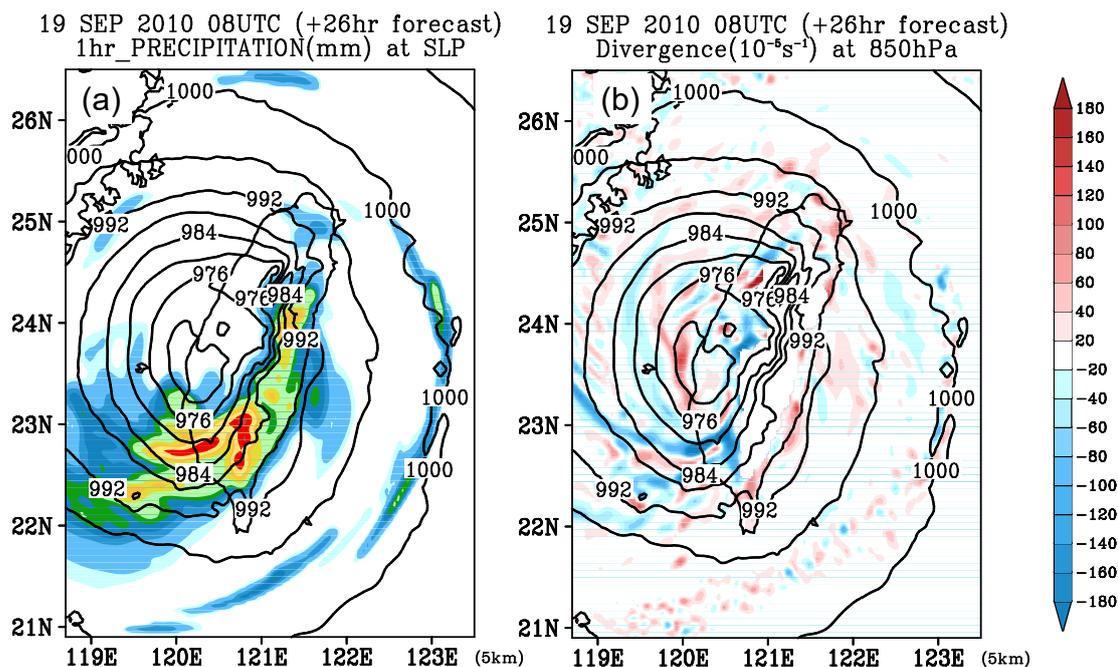


圖 12 模式模擬所得凡那比颱風侵台 19 日 08UTC 之海平面氣壓(等值線，線距 4hPa)與(a)時雨量(同圖 10e，單位 mm 尺標見圖 10)及(b) 850hPa 輻散場(右側尺標，單位 $10^{-5}S^{-1}$ ，藍色為輻合，地面氣壓小於 850hPa 較高山區未顯示輻散值)。

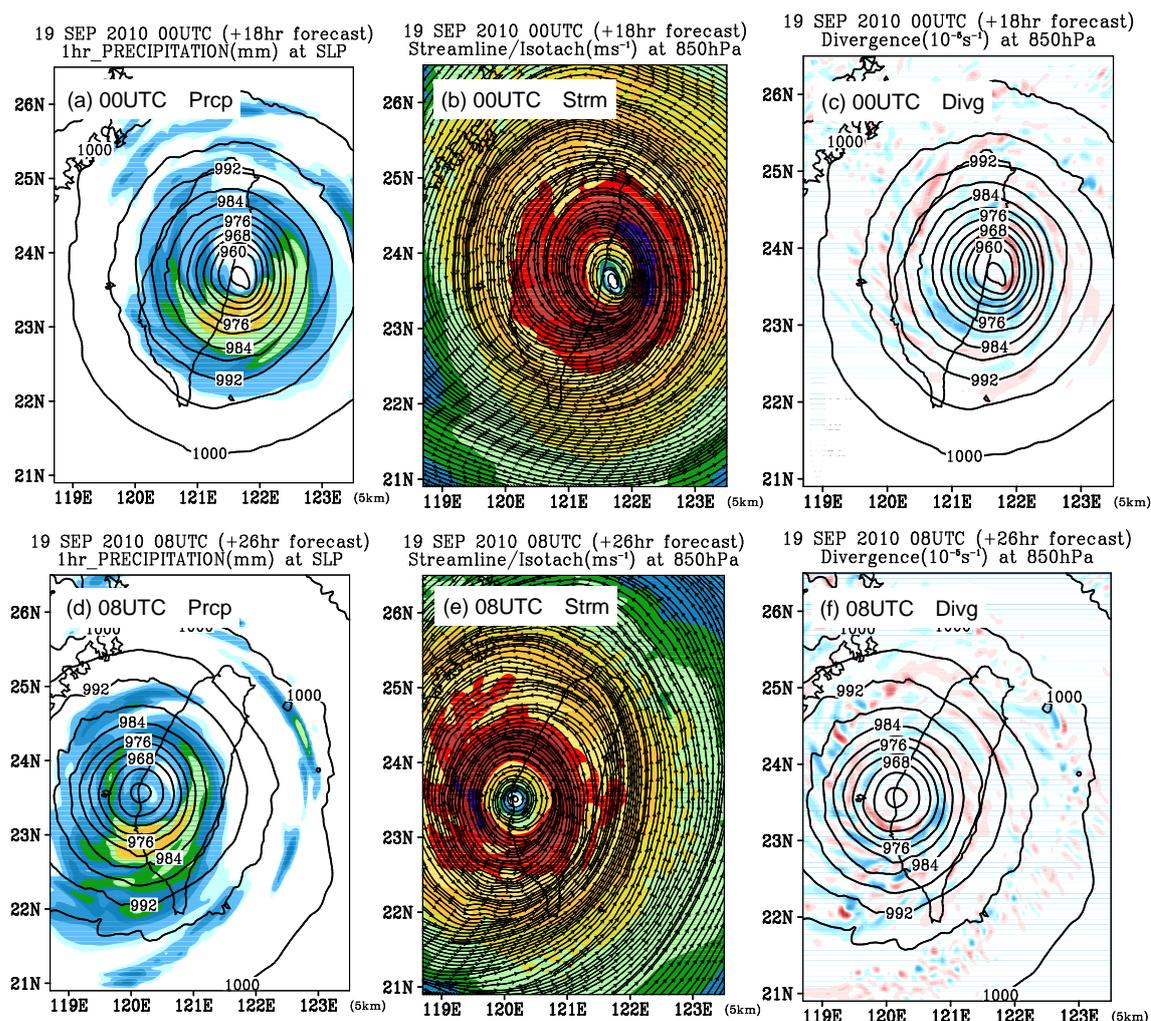


圖 13 凡那比颱風在移除台灣地形模擬預報 19 日 00UTC(上)及 08UTC(下)之海平面氣壓與時雨量(左圖)，850hPa 流線與風速(中圖，尺標見圖 11 單位每秒公尺，由小至大為由藍、綠、黃、紅)，以及海平面氣壓與 850hPa 輻散場分布(右圖)。其中海平面氣壓(單位 hPa)、時雨量(單位 mm)及輻散場(單位 $10^{-5}S^{-1}$)分布圖如同圖 12，海平面氣壓以等值線標繪，線距 4hPa，時雨量色階尺標見圖 10，輻散場分布之尺標見圖 12，藍色為輻合區。

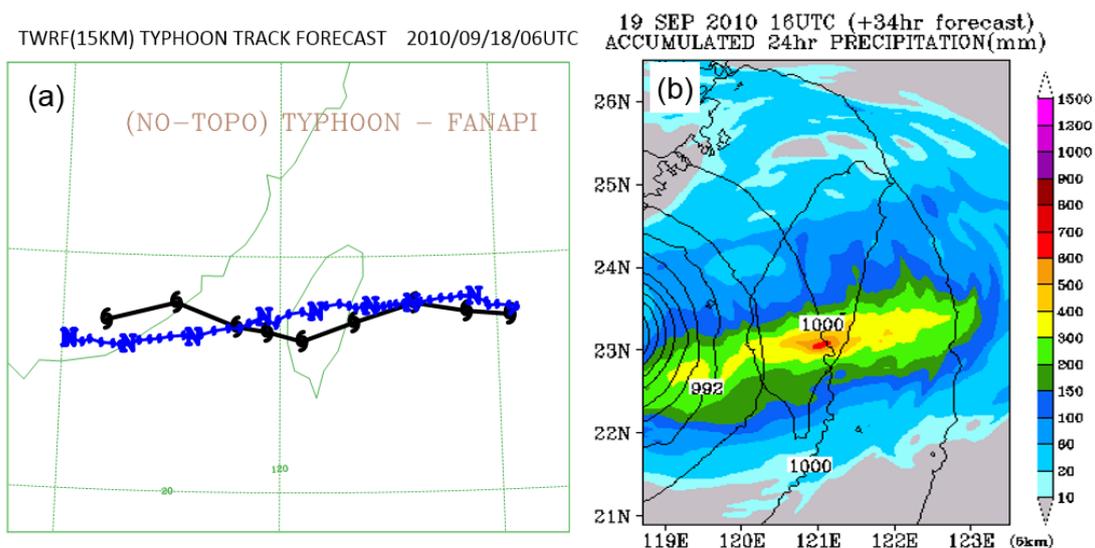


圖 14 (a)凡那比颱風路徑(黑颱風符號)及移除台灣地形模擬預報路徑(藍 N 符號)與(b)移除台灣地形模擬預報 18 日 16UTC 至 19 日 16UTC 24 小時累積降雨量(單位 mm)。

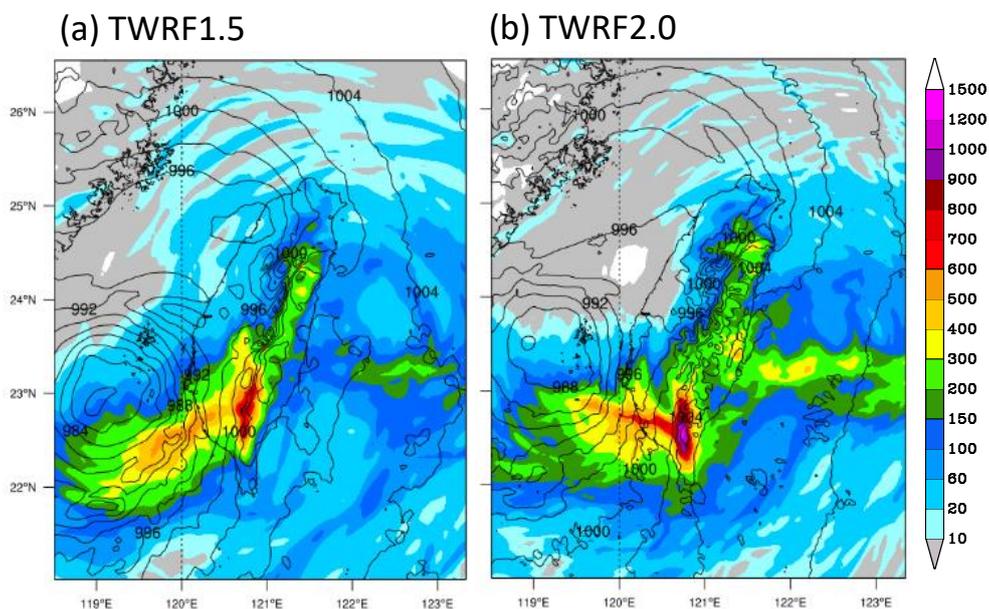


圖 15 如同圖 8，惟為(a)TWRf1.5 及(b)TWRf2.0 模擬凡那比颱風侵台主要降雨階段(18 日 16UTC 至 19 日 16UTC)之 24 小時累積雨量(顏色，單位 mm)及 19 日 16UTC 之海平面氣壓場(等值線，單位 hPa，線距 2hPa)。

四、結論

台灣常受颱風影響，而每個颱風情況多有不同，2010 年凡那比颱風 (Fanapi) 除在高屏山區有劇烈降雨外，在高雄都會區亦有劇烈降雨帶 (Wang et al., 2013; 周等, 2014; Liou et al., 2016; Huang et al., 2016; Yang et al., 2018; Lin et al., 2020)，造成災情。本文探討及檢視中央氣象局颱風預報模式 TWRP (Hsaio et al., 2012) 對此個案之預報情形，特別針對高雄都會區小尺度劇烈降雨帶之預報，以了解模式對此個案之預報能力，和可能之機制，作為後續預報作業之參考，增進防洪防颱。

分析結果顯示，內層 5 公里解析度之 TWRP 模式基本上能定性的掌握凡那比颱風侵台路徑預報和雨量分布，包含在南台灣特殊之降雨。在路徑上，預報和觀測相當接近，惟在台灣東側登陸時間稍慢、中心在台灣陸地時之路徑略偏北，中心出海後移速略偏快。在雨量分布上，預報和觀測之 24 小時累積雨量分布亦接近，但在更定量、更小尺度之降雨分布也有些未能完全正確模擬，如在高屏台東山區之降雨中心量值略大，小港一帶之降雨量較觀測略小，極值未能如觀測和山區極值區清楚的分離。

模擬與觀測雷達回波則顯示颱風

登陸後颱風北側之回波明顯消散，南側則由台灣海峽起形成明顯之雨帶，而後系統再發展、雨帶再次環繞颱風中心之四周。模擬海平面氣壓分布分析顯示，凡那比颱風中心呈不連續過山，850hPa 流線則顯示，颱風逆時針環流之分布較台灣地形廣，外圍受地形之影響較少，登陸階段颱風內核區則有較明顯受地形影響而變形，環流中心和海平面氣壓中心位置並不一致，直至颱風內核區已離高山區到沿海平地，環流中心及海平面氣壓中心之位置才逐漸一致。進一步檢視，時雨量分布與 850hPa 風場輻合區分布相當一致，雨帶及輻合帶也都存在小尺度的結構，大雨區在環流方向(或順等氣壓線方向)可展延較長，與環流垂直之方向就有明顯之小尺度變化。

由移除台灣地形(高度設為 0 公尺、仍為陸面)之模擬呈現凡那比颱風呈現，颱風和大尺度環境之特性，在大尺度環境上，在凡那比颱風侵台期間改變較少，使颱風平順、穩定向西移動，颱風本身則存有包含主要之降雨亦較成環狀，惟很明顯的降雨集中在中心南側、量值亦達 40mm/h 以上之特性。在時雨量及輻散場分布上，在無高山地形存在時仍可見到有小尺度之結構，惟當中心移到東經 120 度左右時，有高山地形存在時(圖 10e 或圖 12a)，時雨

量較呈東西向分布，而無高山地形存在時，時雨量較呈環型分布，環型分布較不利在累積雨量分布圖上形成小尺度結構，呈東西方向分布時，只要移動也順著這方向移動，在累積雨量分布圖上就能呈現小尺度結構。圖 10e 或圖 12a 時雨量分布也顯示，除在高屏山區有極值中心外，另一大於 70mm/h 細狹長大雨區在中心南側之雨帶上，由外海沿伸至西南部陸地，因此，TWRf 模式確實可掌握凡那比颱風在高雄地區異常之降雨，惟 TWRf 模式對凡那比颱風後續之移動預測較快，若移動較慢，相似時雨量分布能再延續長久些，總累積雨量分布就能和觀測更接近。TWRf 模式解析度 5 公里，經由模式在初始場處理之改善和模式解析度之提升為 3 公里後，初步顯示 TWRf 模式能進一步提升對凡那比颱風在南台灣特殊之降雨預報，詳細之情形和更完整機制之分析有待後續進行。

模式模擬與分析綜合歸納得到類似凡那比颱風在南台灣特殊之降雨，其形成有利條件包含：在颱風所處之環境與結構上，颱風降雨明顯，較大雨區並在中心南側；強度與移速上，能足夠維持颱風在受地形影響又不至消散，而在山西側能重新組織(弱、小及移速太快之颱風不利)，形成雨帶；加上過山形成雨帶後，系統移動方向和雨帶

方向大致平行。

誌謝

本研究是在科技部計畫 NSC 99-2625-M-052-003-MY3、MOST 107-2625-M-052-003 及中央氣象局的支持下完成，並感謝兩位審查委員提供建設性意見，讓本文更充實、正確。

參考文獻

- 王時鼎，1980：台灣近海颱風運動及強度預報法，*行政院國家科學委員會防災科技研究報告*，018 號，100 頁。
- 吳宗堯、謝信良、喬鳳倫、陳正改與黃清芬，1981：曾文水庫集水區降水特性分析及颱風降水預報之研究。*大氣科學*，8，1-18。
- 周昆炫、遲正祥、葉峻銘與沈逸翎，2014：凡那比颱風(2010)侵台期間降水與結構演變之數值模擬探討。*大氣科學*，42，181-203。
- 葉天降、謝信良與吳石吉，2000：簡單統計方法於台灣地區颱風降水預測之研究(二)預測結果隨區域之分布。*大氣科學*，28，263-279。
- 廖學鎰，1960：台灣之氣象災害。*氣象學報*，6(第一期)，1-29。
- 謝信良，1986：台灣氣象災害之探討。*大氣科學*，13，89-108。
- 魏元恆、謝信良與林民生，1971：颱風特性與台灣雨量之研究。*氣象學報*，

- 17(第三期), 1-17。
- 蘇世顯、陳郁涵、楊憶婷、徐理寰與郭鴻基, 2017: 氣候變遷下台灣颱風豪雨之變化與機制探討。 *大氣科學*, **45**, 305-331。
- Chen, Y.-H., H.-C. Kuo, C.-C. Wang, and Y.-T. Yang, 2017: Influence of southwest monsoon flow and typhoon track on Taiwan rainfall during the exit phase: Modelling study of typhoon Morakot (2009). *Q. J. R. Meteor. Soc.* **143**, 3014-3024.
- Chien, F.-C., and H.-C. Kuo, 2011: On the extreme rainfall of Typhoon Morakot (2009). *J. Geophys. Res.*, **116**, D05104.
- Fang, X., Y.-H. Kuo, and A. Wang, 2011: The impact of Taiwan topography on the predictability of Typhoon Morakot's record-breaking rainfall: A high-resolution ensemble simulation. *Wea. Forecasting*, **26**, 613-633.
- Hong, J.-S., C.-T. Fong, L.-F. Hsiao, Y.-C. Yu, C.-Y. Tzeng, 2015: Ensemble Typhoon Quantitative Precipitation Forecasts Model in Taiwan. *Wea. Forecasting*, **30**, 217-237.
- 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.
- Hsiao, L.-F., D.-S. Chen, Y.-H. Kuo, Y.-R. Guo, T.-C. Yeh, J.-S. Hong, C.-T. Fong, and C.-S. Lee, 2012: Application of WRF 3DVAR to operational typhoon prediction in Taiwan: Impact of outer loop and partial cycling approaches. *Wea. Forecasting*, **27**, 1249-1263.
- Hsiao, L.-F., X.-Y. Huang, Y.-H. Kuo, D.-S. Chen, H. Wang, C.-C. Tsai, T.-C. Yeh, J.-S. Hong, C.-T. Fong, C.-S. Lee, 2015: Blending of global and regional analyses with a spatial filter: Application to typhoon prediction over the western North Pacific Ocean. *Wea. Forecasting*, **30**, 754-770.
- Hsiao, L.-F.; D.-S. Chen, J.-S. Hong, T.-C. Yeh, and C.-T. Fong, 2020: Improvement of the numerical tropical cyclone prediction system at the Central Weather Bureau of Taiwan: TWRP (Typhoon WRF). MDPI Open Access Journals, *Atmosphere*, **11(6)**, 657. (<https://doi.org/10.3390/atmos11060657>)

- Huang, C.-H., and C.-C. Wu, 2018: The impact of idealized terrain on upstream tropical cyclone track. *J. Atmos. Sci.*, **75**, 3887-3910.
- Huang, C.-Y., I.-H. Wu, and L. Feng, 2016: A numerical investigation of the convective systems in the vicinity of southern Taiwan associated with Typhoon Fanapi (2010): Formation mechanism of double rainfall peaks. *J. Geophys. Res.*, **121**, 12647-12676.
- Lee, C. S., C., L.-R. Huang, H.-S. Shen, and S.-T. Wang, 2006: A climatology model for forecasting typhoon rainfall in Taiwan. *Natural Hazards*, **37**, 87-105.
- Lee, C.-S., Y.-C. Liu, and F.-C. Chien, 2008: The secondary low and heavy rainfall associated with Typhoon Mindulle (2004). *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 1260-1283.
- Lin, Y.-L., S.-Y. Chen, C. M. Hill, and C.-Y. Huang, 2005: Control parameters for the influence of a mesoscale mountain range on cyclone track continuity and deflection. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 1849 – 1866.
- Lin, Y.-F., C.-C. Wu, T.-H. Yen, Y.-H. Huang, and G.-Y. Lien, 2020: Typhoon Fanapi (2010) and its interaction with Taiwan terrain - Evaluation of the uncertainty in track, intensity and rainfall simulations. *J. Meteor. Soc. Japan*, **98**, 93-113.
- Liou, Y.-C., T.-C. Wang Chen, and P.-Y. Huang, 2016: The inland eyewall reintensification of Typhoon Fanapi (2010) documented from an observational perspective using multiple-Doppler radar and surface measurements. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 241-261.
- 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.
- Wang, C. -C, 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). *Geophys. Res. Atmos.*, **118**, 3292-3308.
- Wu, C.-C., and Y.-H. Kuo, 1999: Typhoons affecting Taiwan: Current understanding and future challenges. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **80**, 67-80.

- 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. Forecasting*, **17**, 1001-1015.
- 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.
- Yang, M.-J., D.-L. Zhang, and H.-L. Huang, 2008: A modeling study of Typhoon Nari (2001) at landfall. Part I: Topographic effects. *J. Atmos. Sci.*, **65**, 3095-3115.
- Yang, M.-J., Y.-C. Wu, and Y.-C. Liou, 2018: The study of inland eyewall reformation of Typhoon Fanapi (2010) using numerical experiments and vorticity budget analysis. *J. Geophys. Res.*, **123**, 9604-9623.
- Yeh, T.-C., L.-F. Hsiao, D.-S. Chen, and K.-N. Huang, 2012: A study on terrain-induced tropical cyclone looping in East Taiwan: Case study of Typhoon Haitang in 2005. *Natural Hazard*, **63**, 1497-1514.

A study on the prediction of the operational typhoon numerical model for Typhoon Fanapi (2010) rainfall over Southwestern Taiwan

**Tien-Chiang Yeh Der-Song Chen Ling-Feng Hsiao
Chun-Teng Cheng Kang-Ning Huang**

Central Weather Bureau

(manuscript received 24 August 2020 ; in final form 07 Desember 2020)

Abstract

In 2010, the Typhoon Fanapi made landfall from central Eastern Taiwan on September 18 and entered the Taiwan Strait from Tainan County the next day, and moved slowly in the west-northwest direction before made landfall in China. During the invasion, except for heavy rainfall in the Kaohsiung-Pingtung mountainous area, severe rains also caused disasters in the Kaohsiung metropolitan area. This study uses the TWRP (typhoon numerical forecast model) of the Central Weather Bureau to analyze the forecast of this case, especially the small-scale severe rain band in the Kaohsiung metropolitan area, to understand the forecasting capabilities of the model for this event, and to explore the possible mechanisms caused the severe rainfall. The results show that the TWRP model can will predict the track of Typhoon FANAPI to a considerable extent. The forecast of the innermost grid resolution of 5 kilometers, starting at 06UTC on September 18, is also useful for the special precipitation in Southern Taiwan. The results of the sensitivity experiment by removing the terrain show that both the enhanced rainfall in mountainous area and the special rainfall in the Kaohsiung metropolitan area no longer exist without terrain. The Typhoon FANAPI with significant rainfall and the rainfall is more intense in the south side of the system providing favorable conditions to the rainfall in southern Taiwan. Coupled with the condition that the FANAPI is affected by the terrain but is able to maintain and reorganize on the west side of Taiwan to form a rain band. Meantime, the moving direction of the reorganized system is roughly parallel to the orientation of the rain band, resulting in the special small-scale heavy rainfall in the Kaohsiung metropolitan area.

Key Words: Typhoon rainfall prediction, numerical model prediction, terrain effect. doi: 10.3966/025400022020124802004