

# 作業化颱風暴潮預警系統之效能評估

林熾瑛<sup>1</sup> 邱銘達<sup>2</sup> 陳致穎<sup>4</sup> 陳政欣<sup>1</sup> 柳文成<sup>1,3</sup>  
財團法人國家實驗研究院 台灣颱風洪水研究中心<sup>1</sup>  
國立台灣大學 海洋研究所<sup>2</sup>  
國立聯合大學 土木與防災工程學系<sup>3</sup>  
美國加利福尼亞大學戴維斯分校 陸氣與水資源系<sup>4</sup>

## 摘要

颱風暴潮預報之不確定性主要來自颱風的代表性誤差和颱風暴潮模式誤差，為了解這些誤差所引發的不確定性對颱風暴潮預報的影響，我們使用不同的颱風資訊來源驅動颱風暴潮的模擬，進行觀測與模擬之暴潮水位的交互驗證，以分析暴潮模式系統的預報準確度。本研究使用之颱風資訊來源主要分成三種，分別為三層巢狀網格解析度為45、15、5公里的颱風系集預報結果，解析度為18、6、2公里的單一颱風預報結果，以及解析度為15公里的合成颱風模擬結果。其中，前兩種颱風資訊提供的是預報結果，可用於颱風暴潮預警系統，提供颱風暴潮水位預報；後者可提供歷史或極端颱風事件資訊，提供虛擬颱風暴潮事件的水位估算，應用於海岸工程設施安全高度的推估。評估結果顯示，颱風強度與路徑資訊為影響暴潮水位預報準確度的重要因子，當颱風強度與路徑預報越準確時，颱風暴潮水位預報的誤差有降低的趨勢，誤差範圍約在20-30%之間；暴潮模式網格解析度，對颱風暴潮水位預報的影響則較不明顯。

關鍵字：颱風暴潮、預警系統、系統性評估

## 一、前言

颱風暴潮是一種近海水位為了平衡颱風的壓力差、風應力與風浪輻射應力而產生的水位上升現象。當颱風越強時，沿海水位上升的幅度也將越大。由於，台灣附近海域，海底地形變化較大，緩坡區域較少，因此，颱風暴潮水位上升的幅度以壓力差為主(Chiou, 2010)，風應力的作用較弱，風浪輻射應力的影響(波揚作用)程度，則因觀測資料不易取得，未有長期或系統性的相關研究評估其影響力。在台灣，廖建明(2015)探討2013年蘇力颱風事件在龍洞與福隆潮位站的水位觀測與模擬結果，說明波揚作用的存在及其造成的水位上升量是不可忽略的。由於，颱風帶來的暴潮和強降雨，是颱風侵台期間許多重大淹水事件的主因，因此，當颱風侵襲台灣時，進行潮汐與颱風暴潮水位預報是掌握沿海水位的重要方法，以利後續淹水預警系統的運作。

颱風暴潮、強降雨與淹水三這之間的關係，主要是因為颱風暴潮所引發的沿海水位上升現象，會在河道下游形成水壩，使陸上因降雨而形成的洪水無處宣洩，開始從都會區的排水系統溢淹至各處較低窪的區域。以2001年的納莉颱風為例，颱風暴潮和大潮使河道下游水位高

漲，臺北盆地因強降雨蓄積過多的洪水，造成台北多處都會區淹水，其中，又以捷運板南線淹水情形最為嚴重。因此，為了有效的掌握各地淹水預報情資，需同時進行颱風降雨及暴潮水位預報。

進行颱風降雨與暴潮水位預報時，國際上，多以系集預報的作法來掌握颱風與暴潮預報的不確定性，我們亦應用此方法於淹水預警降雨與沿海水位情資的建立。颱風預報的部分，颱風中心已於2010年結合學界與氣象局的研發能量，進行定量降雨系集預報實驗(TAPEX)，每日進行四次預報作業，提供20組以上的颱風預報結果。颱風暴潮預報的部分，我們即使用TAPEX的WRF系集預報成員(約10-15組系集成員)所提供的海平面氣壓場和10公尺高的風場，驅動颱風暴潮的預報作業，每日亦進行四次的颱風暴潮預報作業，提供台灣沿海水位系集預報結果。

為了解作業化颱風暴潮系集預報系統的暴潮水位預報能力，我們以颱風資訊來源的不同，進行三組颱風暴潮預報實驗(圖1)。第一組是使用TAPEX的颱風預報資訊，進行15公里解析度的颱風暴潮系集預報實驗；第二組是使用高解析度颱風預報資訊，進行近

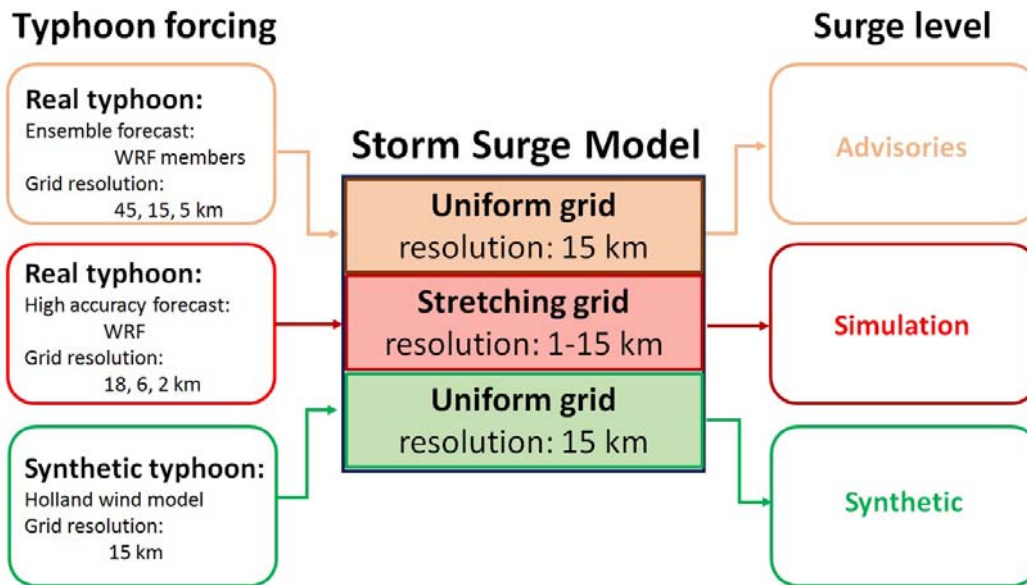


圖1. 颱風暴潮預報實驗之架構圖

岸約1公里解析度的颱風暴潮預報實驗；第三組是使用15公里解析度的合成颱風資訊，進行15公里的颱風暴潮模擬。第一組颱風暴潮預報實驗為作業化的颱風暴潮預警結果，第二、三組為對照組，用來了解颱風預報的準確度和模式網格解析度對颱風暴潮預報準確度的影響。在第二章，將簡介此三組實驗設計中颱風模擬的方法，第三章說明颱風暴潮模式系統，第四章分析三組數值實驗的結果，第五章為結論。

## 二、颱風模擬的方法

本研究使用四場颱風事件，分別為2009年莫拉克颱風、2010年凡那比颱風、2012年蘇拉颱風和2013年蘇力颱風(圖2)，驗證作業化颱風暴潮模式系統的預報表現。颱風模擬方式分成颱風系集預報、高解析度颱風預報和合成颱風模擬三類。

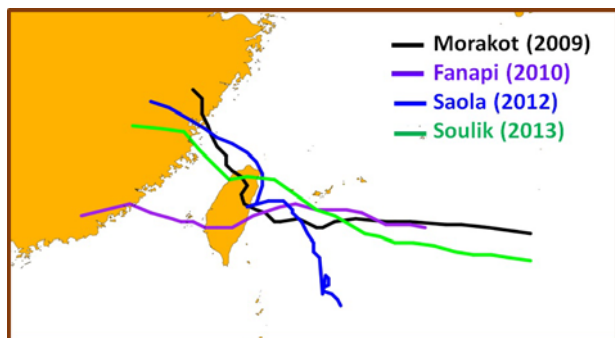


圖2. 四場颱風事件之颱風觀測路徑

### 1. 颱風系集預報

第一組數值實驗為控制組，颱風模擬資訊來自颱風系集預報結果。颱風系集預報的資料是颱風中心、氣象局和學界共同建置的定量降雨系集預報實驗平台(Taiwan Cooperative Precipitation Ensemble Forecast Experiment, TAPEX)的颱風預報資料。颱風系集成員間的差異，來自使用不同的資料同化策略(冷啟動或部分循環策略)、資料同化方法、邊界條件、模式物理參數化方式(積雲參數化或邊界層參數化)等。大氣模式 WRF 使用 3 層巢狀網格方式進行模擬，以台灣附近區域的解析度最高，從外到內 3 層網格的解析度分別是 45 公里、15 公里和 5 公里。

相應的海洋模式的網格系統解析度設定與大氣模式 WRF 的第二層模擬範圍相同，模式的網格解析度為 15 公里。

### 2. 高解析度颱風預報

第二組數值實驗為對照組，颱風模擬資訊來自高解析度颱風預報結果。高解析度的颱風預報資料來自使用 Nguyen & Chen (2011) 的颱風初始化方式所建立的預報實驗。颱風模擬區域的設定，使用三層巢狀網格建構方式，解析度依序為 18、6 和 2 公里。其中，第三層的 2 公里解析度網格系統為動態網格系統，模擬範圍會依颱風的位置調整，使最高解析度的網格範圍跟著颱風移動。

相應的海洋模式的網格系統為變動網格系統，網格解析度範圍介在 1 至 15 公里之間，以台灣東北角的解析度最高。此組數值實驗的設計目的，用於觀察高解析度且較準確的颱風預報，對暴潮水位預報準確度的影響。

### 3. 合成颱風模擬

第三組數值實驗為對照組，颱風模擬資訊來自合成颱風的參數化方程式。合成颱風模型為 Holland(1980)之颱風參數化方程式，其參數化方程式如下所示：

$$\begin{aligned}
 B &= V_{\max}^2 \rho e / (P_n - P_c) \\
 P(r) &= P_c + (P_n - P_c) e^{-(R_{\max}/r)^\beta} \\
 V_g(r) &= \sqrt{V_{\max}^2 e^{(1-(R_{\max}/r)^\beta)} (R_{\max}/r)^\beta + \left(\frac{rf}{2}\right)^2} - \left(\frac{rf}{2}\right)
 \end{aligned} \quad (1)$$

其中，其中參數 $B$ 為颱風結構參數， $P_n$ 與 $P_c$ 為模擬颱風外圍與中心氣壓， $e$ 為Euler數， $R_{\max}$ 最大暴風半徑， $r$ 為七級風暴風半徑， $V_{\max}$ 最大風速， $f$ 為科氏力， $\rho$ 為大氣密度。

相應的海洋模式的網格解析度設定為為15公里，測試提供低解析度但較準確的颱風模擬資訊，是否能提供較準確的颱風暴潮水位預報。

### 三、 颱風暴潮模式

本研究使用的颱風暴潮模式系統為邱銘達等(2008)、Chiou(2010)所建置之潮汐與暴潮模式系統。模式系統由全球潮汐模式TPXO6.2 (TOPEX/POSEIDON global tidal model)與海洋模式POM (Princeton Ocean Model)整合而成，颱風暴潮之控制方程式為：

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - \gamma v &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial x} + \frac{1}{\rho h} (\tau^x - \tau_b^x) \\
 \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \gamma u &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial y} + \frac{1}{\rho h} (\tau^y - \tau_b^y) \\
 \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} &= 0
 \end{aligned} \quad (2)$$

其中， $u$ 和 $v$ 為水深平均的速度分量， $t$ 是時間， $\gamma$ 是科氏力， $g$ 是重力加速度， $\zeta$ 是水位高度， $\rho$ 為海水密度， $p_a$ 為海平面氣壓， $\tau^x$ 和 $\tau^y$ 為海表面應力在 $x$ 與 $y$ 方向的分量， $\tau_b^x$ 和 $\tau_b^y$ 為海底摩擦應力在 $x$ 與 $y$ 方向的分量， $h = D + \zeta$ 為瞬間水深， $D$ 為平均水深。

### 四、 潮位站觀測

本研究使用中央氣象局潮位站所觀測的水位，驗證颱風暴潮模擬結果。首先，我們使用調和分析工具 T\_TIDE (Pawlowicz et al., 2002)將觀測水位中的潮汐與颱風暴潮成分分解出來。如圖 3 所示，潮位站觀測到的水位(紅色實線)減去調和分析法算出的天文潮水位，即得到颱風暴潮水位(藍色實線)。以蘇拉颱風事件為例，2012年7-8月的水位資料顯示觀測資料起始點為2012年7月1日00時，在蘇拉颱風登陸時(第748小時)，水位有明顯的抬升現象，即颱風所引起之暴潮水位偏差。觀測資料顯示，颱風引起之暴潮水位台灣東岸觀測到的暴潮水位比西岸觀測到的暴潮水位大，東岸的暴潮水位又以颱風登陸點附近的暴潮水位為最大。蘇拉颱風事件中，颱風引發之最大暴潮水位東北角，以福隆(Fulong)和蘇澳(Suao)潮位站為例，最大的暴潮偏差值約在40-50公分之間。

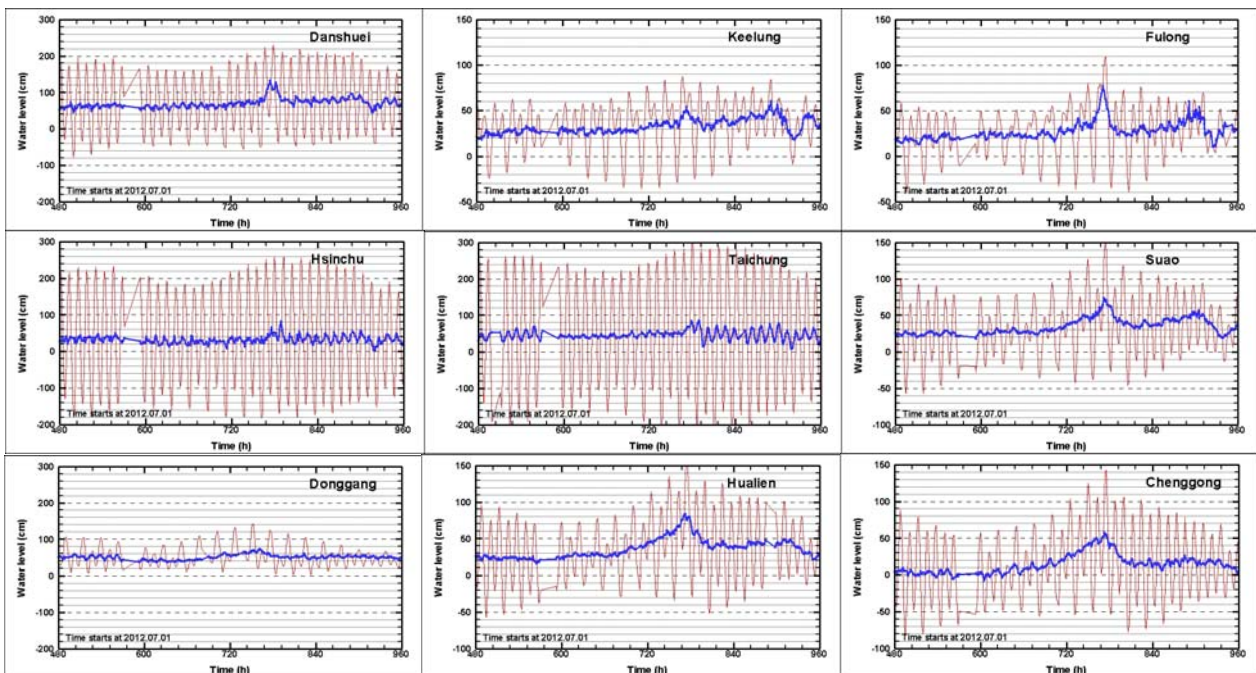


圖3. 2012年蘇拉颱風侵台期間之環台各潮位站之水位觀測(紅色實線)與暴潮水位(藍色實線)

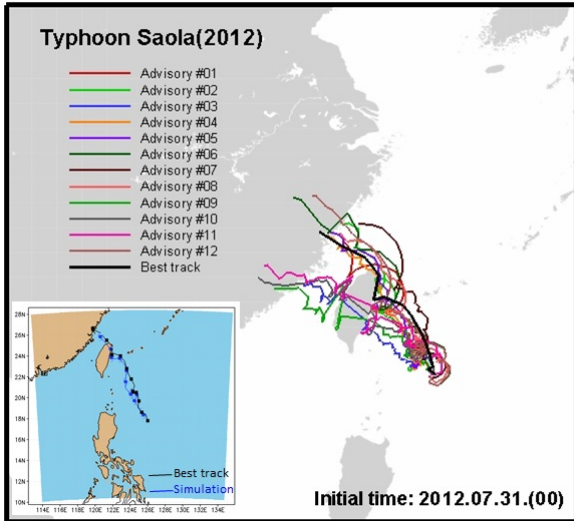


圖4. 颱風預報與觀測路徑。主圖，黑色實線為觀測，各式彩色實線為颱風系集預報；左下角副圖，藍色點線為高解析度的颱風預報，黑色點線為觀測

## 五、系集預報實驗與分析

颱風暴潮的模擬或預報為例，不確定性的來源有颱風的代表性誤差(representative error)和模式誤差(model error)。

颱風的代表性誤差，是因為颱風觀測或模擬資料在空間和時間解析度上的不足，無法完整呈現當時颱風的狀態，使得颱風驅動暴潮的力量有誤差存在，稱為代表性誤差。進行颱風暴潮模擬時，颱風的狀態無論是透過合成颱風或颱風模式進行模擬，與真實颱風的狀態仍有不同，為了解這些誤差造成的不確定性，我們從三種角度切入，探討颱風模擬不確定性對颱風暴潮模擬的影響。首先，本研究設定的第一組數值實驗的控制組為15公里解析度的颱風系集預報，驅動15公里解析度的颱風暴潮系及預報。颱風系集預報的結果，以2012年蘇拉颱風為例，圖4的主圖顯示的是系集成員預報的颱風路徑分布狀態與颱風觀測路徑的比較，圖5顯示的是系集成員預報的颱風中心氣壓的分布狀態與觀測結果的比較；颱風路徑與中心氣壓的預報結果皆說明每個系集成員的預報會受預報初始場資料同化、物理參數化、全球模式所提供之背景場的不同等建構方式，而產生不同的預報結果。因此，進行颱風暴潮預報時，這些系集成員預報的颱風狀態皆有可能是未來三天內的運動狀態，當系集成員預報的颱風路徑越一致時，表示颱風預報的誤差較小，不確定性較低；相反地，若颱風預報路徑越分歧時，表示颱風的代表性誤差越大，不確定性越高。然而，不論各系集成員預報的颱風路徑

或強度誤差如何，實際的颱風狀態應該都能被包含在系集成員的預報中，因此，我們使用颱風系集預報的結果驅動颱風暴潮的運動，觀察颱風暴潮預報水位是否也能掌握真實暴潮水位的大小與發生時間；其次，本研究設定的第二組數值實驗的參照組為高解析度(最系網格解析度為2公里)且與觀測頗為一致的單一颱風預報，如圖4中左下角的副圖，黑色點線為觀測路徑，藍色點線為預報路徑，兩者相當一致；最後，本研究設定的第三組數值實驗的參照組為15公里解析度的合成颱風模擬，其所需的颱風路徑與強度相關參數即為觀測結果(圖4與圖5中的黑色實線)。第二、三組數值實驗設計的目的在於，當颱風路徑與颱風強度一致時，用來瞭解大氣模式與合成颱風模型建構出的颱風運動狀態對颱風暴潮水位的影響。由於，在進行海岸工程應用或防災淹淹研究時，是使用合成颱風來驅動颱風暴潮水位的運動，因此，可藉由這兩組實驗的比較，瞭解使用合成颱風模型與實際颱風模式所提供的颱風運動狀態的差異，以及兩這之間的誤差對颱風暴潮水位模擬的影響。

模式誤差的部分，則是因為數值差分方法誤差與物理參數化方法誤差所造成。數值方法的誤差，主要與差分方式和空間解析度有關；物理參數化方法誤差，則與如何表示產生颱風暴潮水位的物理機制有關。在本研究中，我們建構的作業化颱風暴潮預警系統尚未考慮波場作用對暴潮水位的影響，同時，倒氣壓計與風揚作用的物理參數化機制中所使用的參數已調校至最適狀態，因此，我們暫不討論物理參數化誤差對暴潮水位模擬的影響，僅探討網格解析度不同而產生的模式誤差對暴潮水位模擬的影響。例如，第二數值實驗的暴潮模式使用1-15公里的變態網格系統，第三組數值實驗的暴潮模式使用15公里的均勻網格系統。

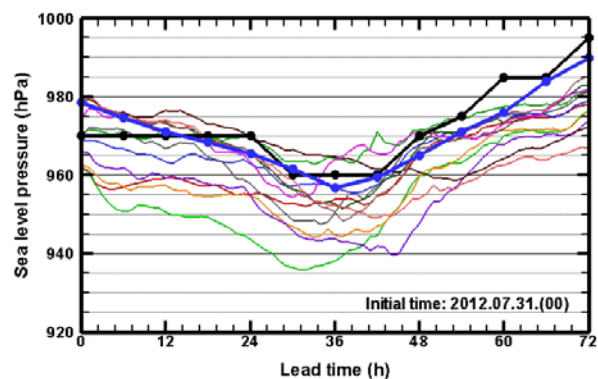


圖5. 颱風中心氣壓預報與觀測之比較，黑色點線為觀測，藍色點線為高解析度的颱風預報，各式彩色實線為颱風系集預報

本研究進行的三組數值實驗的模擬結果，如圖6所示，蘇澳和淡水潮位站的結果顯示第一組數值實驗(系集預報；黃色實線)顯示強烈颱風蘇力(2013)的結果在暴潮水位的強度與發生時間表現最佳；中度颱風凡那比(2010)和蘇拉立(2012)的暴潮水位強度較觀測(藍色黑線)弱；中度颱風莫拉克(2009)和蘇拉(2012)的發生時刻較不準確，預報的颱風登陸時間比實際的觀測時間晚，且各個成員間的結果變異度較大。

第一組數值實驗結果說明，系集預報結果基本上能掌握颱風暴潮水位的強度與發生時刻，但是會因為颱風預報誤差變大，而有暴潮水位預報誤差變大的情形。三場中度颱風事件(莫拉克、凡那比、蘇拉)因移動路徑受台灣高山地形影響較多，預報的不確定性增加，各個系集成員的颱風路徑或強度預報誤差較大，因此預報颱風暴潮發生時刻的準確性較低，僅強烈颱風蘇力的水位預報結果最佳。

第二組(紅色實線)和第三組(綠色實線)數值實驗的結果，因提供的風動態與觀測最接近，因此暴潮水位的模擬也最佳。四場颱風事件中，颱風登陸前(蘇澳潮位站)的暴潮水位模擬與觀測結果相當一致；颱風登陸後，淡水潮位站比較實驗的結果顯示颱風莫拉克(2009)、蘇拉立(2012)和蘇力(2013)也有不錯的結果，僅颱風凡那比(2010)較差。原因在於前三場颱風事件的颱風是由台灣西南沿海離開台灣，凡那比颱風(2010)是由台灣西南外海離開台灣。淡水潮位站在凡那比颱風事件中，位在颱風暴風半徑的外圍，模擬的颱風風場和壓力場誤差較大，因此暴潮水位預報的結果也較不準確。

第二、三兩組數值實驗顯示當颱風預報準確時，即可得到準確的暴潮水位預報，說明暴潮模式網格的解析度較不會影響暴潮水位模擬的結果，颱風預報的準確度才是影響暴潮水位預報的重要因子。

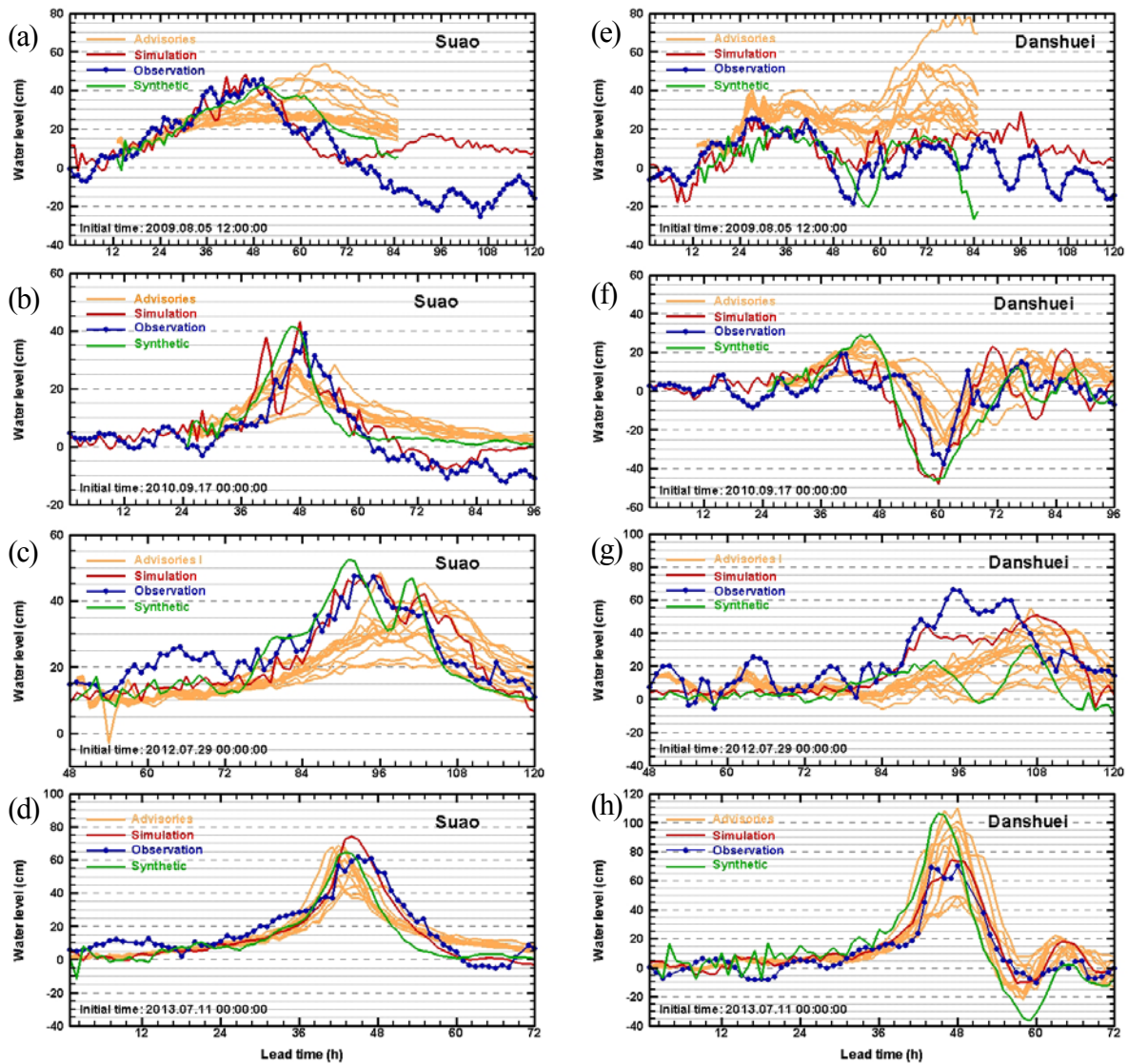


圖6. 模擬與觀測颱風暴潮水位在蘇澳(Suao；a-d)與淡水(Danshuei；e-h)的時序列比較圖，由上而下的四張小圖分別顯示颱風事件莫拉克(2009)、凡那比(2010)、蘇拉(2012)和蘇力(2013)的結果。黃色實線為系集預報成員實驗，藍色點線為觀測，綠色實線為合成颱風實驗，紅色實線為高解析度颱風預報實驗

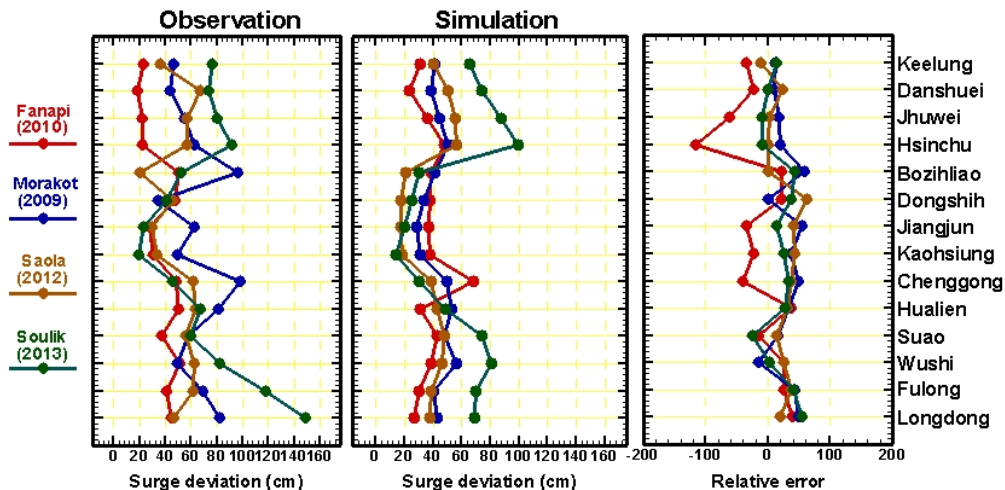


圖7. 颱風暴潮模式模擬範圍與21場歷史颱風路徑分布狀態

四場颱風事件的所有潮位站觀測與模擬的暴潮水位的相對誤差結果(圖7)顯示,第二組數值實驗室三組實驗中較驗結果最好的,其中,所有潮位站的相對誤差皆可控制在50%以內,數個在颱風移動過程中,位處颱風最大暴風半徑內的潮位站,相對誤差約落在20-30%之間。

從觀測到的暴潮水位資料顯示,三場颱風路徑較偏北的事件,例如莫拉克、蘇拉和蘇力颱風,在台灣東北半部潮位站校驗結果較中南部的潮位站校驗結果佳,例如位在東北部的潮位站有基隆(Keelung)、淡水(Danshuei)、竹圍(Jhuwei)、新竹(Hsinchu)、龍洞(Longdong)、福隆(Fulong)和烏石(Wushi),說明位在颱風移動路徑上的潮位站觀測,可以觀測到最大的暴潮水位,與颱風暴潮生成機制一致,最大暴風半徑內有最大的壓力差和最大的暴風速度,因此,可以產生較大的暴潮水位。

觀測與模擬的暴潮水位相對誤差的資料顯示,凡那比颱風事件中,多數潮位站的預報暴潮水位有稍微高估的情形,因此相對誤差多數為負值,其他颱風事件,則為低估的情形較多,但是相對誤差的絕對值差異不大。其中,凡那比颱風事件在新竹(Hsinchu)潮位站的相對誤差雖然高達100%,但是因為凡那比颱風離台路徑在台灣西南邊,新竹朝外站位在颱風外圍環流區域,暴潮水位很小,因此相對誤差顯得較大。

## 六、結論

颱風暴潮水位預報與颱風預報的準確度有高度相關,與暴潮模式本身的網格解析度相關較低。然實際運用上,無

法事先得知哪個颱風資訊才是準確的,因此,將彙集預報的結果綜合而成機率預報,將大幅提高使用性。

在對照組的數值實驗(第二、三組)顯示,當颱風路徑與強度預報與觀測越接近時,暴潮水位預報誤差越小。雖然預報準確度差異不大,但是較高的解析度在實際作圖或結果展示時,所能呈現的圖形較為細緻。所以,高解析度的模擬雖然叫作高計算能量,但是有較為細緻的結果,只是得到的暴潮水位的量值,差異不大。

控制組的數值實驗(第一組)顯示,颱風彙集預報所觸動的颱風暴潮水位,大致能掌握實際暴潮水位的大小,其中,有以強烈颱風或受台灣高山地形干擾較小的颱風,其暴潮水位預報結果最佳。

## 七、參考文獻

- 邱銘達、錢樺、李汴軍、高家俊, 2008: "應用 POM 推算颱風暴潮之研究", 海洋工程學刊, 第 8 卷, 第 1 期, 第 43-65 頁。
- 廖建明, 陳思樺, 2015, 「近岸波揚對於暴潮水位推算之影響」, 台灣水利期刊, 63(1), pp. 83-92。
- Chiou, M. D., 2010: "Characteristic and numerical simulation of astronomic tide and storm surge in Taiwan water", Ph.D. thesis, 135pp.
- Holland, G. J., 1980: An analytic model of the wind and pressure profiles in Hurricanes, Mon. Weather Rev., **108**, 1212-1218.
- Pawlowicz, R., B. Beardsley, and S. Lentz, "Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T\_TIDE", Computers and Geosciences 28 (2002), 929-937.