

# 臺灣近岸地區風暴潮溢淹速算系統之開發與研究

蔡育霖<sup>1</sup> 吳祚任<sup>1</sup> 滕春慈<sup>2</sup> 朱啟豪<sup>2</sup> 莊美惠<sup>1</sup> 林君蔚<sup>1</sup> 鄭皓宇<sup>1</sup>

國立中央大學水文與海洋科學研究所<sup>1</sup> 中央氣象局海象測報中心<sup>2</sup>

## 摘要

風暴潮速算系統之成熟與否，取決於計算效能是否符合預報時效且計算域能完整涵蓋颱風運動與生命週期，同時在大尺度之風暴潮傳遞下，兼顧近岸尺度之溢淹溯上即時模擬，除導入理想颱風模式之外，更能即時耦合大氣動力模式之颱風氣象場，反應颱風結構之即時變化等，以上所述皆為速算系統發展之考驗。過去風暴潮速算系統之發展達成上述需求者無幾且有諸多限制，例如計算域過小而無法完整涵蓋颱風生命週期，或者侷限於卡氏座標系統，亦或無法計算近岸溢淹範圍等。因此本研究擬針對臺灣地區發展其適用之風暴潮速算系統，能同時求解球座標系統下不同尺度之風暴潮傳遞並兼顧近岸尺度之溢淹計算。本研究以康乃爾大學所研發之非線性多重網格海嘯模式（Cornel Multi-grid Coupled of Tsunami Model, COMCOT）為基礎進行發展，該模式可同時求解卡氏座標及球座標系統下之非線性淺水波方程式，並以動態巢狀網格解析不同尺度之長波傳遞，並以移動邊界法（Moving Boundary Scheme）計算溢淹範圍。本模式在中央研究院網格與科學計算中心協助下，對模式進行多執行緒且共享記憶體之 OpenMP（Open Multi-Processing）平行化修改，滿足預報時效。本模式除導入理想颱風模式外，同時也耦合中央氣象局目前所使用之大氣動力模式 TWRF（Typhoon Weather Research and Forecasting）之非對稱颱風結構氣象場。本研究除個別以壓力梯度和風剪力解析解進行驗證外，更以不同颱風路徑之歷史案例進行校驗，模擬結果與實測資料均有良好之比對成果，同時包含近岸地區溢淹分析，顯示本研究發展之速算系統具有高度準確性。目前速算系統規劃之產品包含臺灣沿海地區風暴潮潮位和潮汐潮位之預報，以及近岸地區海水倒灌之潛在危機警報，冀望在颱風侵襲期間沿海地區居民能有足夠時間進行災害之防護，降低損失。

關鍵字：風暴潮、COMCOT風暴潮速算系統與溢淹計算。

## 一、前言

在未來全球暖化與極端颱風事件可能增加之情境下，風暴潮於近岸地區所造成之溢淹為現今災害防治之重點。風暴潮由颱風之壓力梯度和風剪力所驅動，因此颱風氣象場之正確性直接影響模擬結果；風暴潮於近岸地區之溯上過程，則受到地形、地表摩擦力和潮汐交互作用影響，對於數值模式為一大挑戰，特別是發展兼顧準確度和效能之速算系統。

國內學者對於風暴潮數值方法之研究，早期可追溯至 1970 年代末期；李賢文（1984、1989）跳脫過去以統計及經驗之分析方法，改以流體動力學方程式建立臺灣海峽沿岸之暴潮數值模式，並於 1984 年完成臺灣周圍海或風暴潮數值模式之建立；劉肖孔（1987）發展出三維風暴潮數值預報模式，並考慮到溫度及鹽度的變化，然而該模式侷限於特定區域之模擬；黃榮鑑等（1995）利用邊界調協座標轉換系統建立半隱式解之三維數值環流模式，用以討論河口及海岸受風暴潮之影響，其水位堆升與海流變化之情況；許泰文等（1997）利用有限元素法求解二維風暴潮模式，並應用於預測臺灣沿海區域之暴潮偏差。近年來仍有許多學者在數值模式上進行研究，邱銘達等（2006）利用 POM（Princeton Ocean Model）模式，針對臺灣海域進行颱風暴潮推算，並分析不同風阻力參數對暴潮計算之影響；

于嘉順等（2005）以多尺度暴潮模式進行臺灣海域之暴潮水位模擬。

除臺灣外，許多受風暴潮災害影響之國家，也逐漸發展適合該國使用之風暴潮模式；Jelesnianski et al. (1992) 為美國國家海洋暨大氣總署（National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA）建立 SLOSH 模式（Sea, Lake, and Overland Surges from Hurricanes），該模式可於卡氏座標（Cartesian Coordinate）及極座標（Polar Coordinate）下進行風暴潮模擬及預警，同時以移動邊界法（Moving Boundary Scheme）推算暴潮溢淹範圍。同一時間，Luettich et al. (1992) 發展了 ADCIRC（Advanced CIRCulation）數值模式，該模式可於非均勻網格下求解深度積分之淺水波方程式，Westerink et al. (2008) 則應用 ADCIRC 模式於美國路易斯安那州南部（Southern Louisiana）墨西哥灣附近，並以颶風貝絲（Hurricane Besty）和安得烈（Hurricane Andrew）作模式校驗。Flater (1993) 以深度積分之方程式發展風暴潮模式，並應用於北孟加拉灣地區（Northern Bay of Bengal）1991 年之歷史風暴潮事件中。

上述文獻回顧中之風暴潮數值方法皆求解深度積分之淺水波方程式（Pugh, 1987）。換言之，風暴潮模式在 1980 年代後至今，為兼顧效能和準確性，多以淺水波方程式加上颱風氣象力之驅動，同時導入潮汐邊界條件，求解或預

報沿海地區風暴潮水位和溢淹範圍。

本研究之目的為發展計算精準及具有高速運算效能之風暴潮模式，耦合全球朝夕模式和區域大氣模式，並能推算沿海地區之風暴潮溢淹範圍（Inundation Range），以提供預報與災害防治單位決策之用。因此，本研究以康乃爾大學土木與環境工程學系劉立方教授團隊所發展成熟之非線性 COMCOT 海嘯模式（COmell Multi-grid Coupled of Tsunami Model）為基礎發展風暴潮模式（Liu et al., 1995），並且利用多重巢狀網格系統（Multi-grid System）與數值移動邊界法（Moving Boundary Scheme），建構深海之大網格系統與近岸之高解析度網格系統，同時計算遠洋及近海之風暴潮傳遞以及近岸地區之風暴潮溢淹範圍。

## 二、研究方法

### 2.1 風暴潮模式介紹

本研究以 COMCOT 模式為基礎，加入颱風氣象力發展 COMCOT 風暴潮模式，以淺水波方程式解析風暴潮生成、傳播以及近岸潮上之完整歷程。當風暴潮傳遞至近岸，水深變淺且波長變短時，非線性效應顯著，因此非線性對流項和底床摩擦不可忽略，非線性淺水波方程式較為適用。

茲列出控制方程式如下：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \left\{ \frac{\partial P}{\partial \psi} + \frac{\partial}{\partial \varphi} (\cos \varphi \cdot Q) \right\} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \psi} \left( \frac{P^2}{H} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \frac{PQ}{H} \right) \\ + \frac{gH}{R \cos \varphi} \frac{\partial \eta}{\partial \psi} - fQ + F_\psi^b \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} = - \frac{H}{\rho_w R \cos \varphi} \frac{\partial P_a}{\partial \psi} + \frac{F_\psi^s}{\rho_w} \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \psi} \left( \frac{PQ}{H} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \frac{Q^2}{H} \right) \\ + \frac{gH}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} + fP + F_\varphi^b \end{aligned} \quad (3)$$

其中， $t$  為時間， $\varphi$  為緯度， $\psi$  經度， $P, Q$  為體積通量， $\eta$  為自由液面高程， $h$  為靜水深， $H$  為總水深 ( $H = h + \eta$ )， $R$  為地球半徑， $f$  為科氏力係數， $F_\psi^s$ ， $F_\varphi^s$  為風剪力， $F_\psi^b$ ， $F_\varphi^b$  分別為底床摩擦剪應力， $\rho_w$  為海水密度及  $P_a$  為大氣壓力。

模式中之底床摩擦剪應力以曼寧公式（Manning's Formula）假設，可表示為：

$$F_x = gn^2 H^{-\frac{2}{3}} P \sqrt{(P^2 + Q^2)} \quad (4)$$

$$F_y = gn^2 H^{-\frac{2}{3}} Q \sqrt{(P^2 + Q^2)} \quad (5)$$

其中， $n$  為曼寧粗糙係數（Manning's Roughness Coefficient），為一經驗常數，由流體所通過之不同介質底床之材料所決定。

### 2.2 理想颱風模式之耦合

颱風壓力場和風場可以透過理想颱風模式生成，針對臺灣複雜之高山地形對於颱風結構之影響，中央氣象局建構一理想颱風模式，其建議之理想風場模式為：

$$P_a = P_c + (P_n - P_c) \exp \left[ - \left( \frac{R_{\max}}{r} \right)^B \right] \quad (6)$$

$$V_w = 2 \cdot V_{\max} \cdot \frac{R_{\max} \cdot r}{R_{\max}^2 + r^2} \quad (7)$$

建議峰值參數  $B$  值的經驗關係如下：

$$B = \frac{1}{P_n - P_c} \left( \frac{V_{\max}}{5.375} \right)^2 \quad (8)$$

最大暴風半徑  $R_{\max}$  則依據颱風中心壓力而有相對應值，如下：

$$R_{\max} = \begin{cases} 42.6 - 0.86 \cdot (P_c - 990) & P_c \geq 990 \\ 51.0 - 0.84 \cdot (P_c - 980) & 980 \leq P_c < 990 \\ 58.4 - 0.74 \cdot (P_c - 970) & 970 \leq P_c < 980 \\ 63.0 - 0.46 \cdot (P_c - 960) & 960 \leq P_c < 970 \\ 70.0 - 0.234 \cdot (P_c - 930) & 930 \leq P_c < 960 \\ 80.0 - 0.167 \cdot (P_c - 870) & 870 \leq P_c < 930 \\ 80.0 & P_c < 870 \end{cases} \quad (9)$$

其中， $R_{\max}$  為最大暴風半徑，單位：公里， $P_c$  為中心氣壓值，單位：毫巴。

對於海水和大氣之交互邊界效應，透過風剪力係數  $C_d$  來描述海水面之粗糙程度，隨不同風速而有相對應之區間（Large and Pond, 1981, Powell, 2003），如下：

$$10^3 C_d = \begin{cases} 2.16 & |\bar{V}_w| \geq 26ms^{-1} \\ 0.49 + 0.065 |\bar{V}_w| & 10ms^{-1} \leq |\bar{V}_w| < 26ms^{-1} \\ 1.14 & 3ms^{-1} \leq |\bar{V}_w| < 10ms^{-1} \\ 0.62 + \frac{1.56}{|\bar{V}_w|} & 1ms^{-1} \leq |\bar{V}_w| < 3ms^{-1} \\ 2.18 & |\bar{V}_w| < 1ms^{-1} \end{cases} \quad (10)$$

### 2.3 區域大氣模式之耦合

理想颱風模式為對稱風場（Symmetric Wind Field），無法描述颱風結構受地形影響之非線性變化以及熱能傳輸之改變，對於風暴潮模擬有一定程度之影響。

本研究與大氣模式 TWRF (Weather Research and

Forecasting Model) 耦合，TWRF 模式為目前氣象局所使用之大氣模式之一，為藍伯特投影系統（Lambert Projection System），模式之預報作業每日執行四次，分別為每日之 00 UTC、06 UTC、12 UTC 和 18 UTC，第一層巢狀網格之初始場來自美國全球預報系統 NCEP GFS，而第二層和第三層巢狀網格之模式初始場由第一層巢狀網格內插，圖 1 表示 TWRF 模式計算範圍。

本研究耦合 TWRF 模式第二層巢狀網格系統所產出 6 小時分析場資料，包含大氣壓力場和風場，於統制方程式中之壓力梯度項和風剪力項驅動風暴潮之傳遞。

## 2.4 全球天文潮模式之耦合

風暴潮傳遞逢朝夕大潮或漲時對於近岸溢淹之影響加深，不可忽略，因此風暴潮與天文潮之非線性交互作用也必須被考慮。

本研究耦合俄勒岡州立大學（Oregon State University, OSU）所研發建置之全球天文潮模式 TPXO，由邊界導入潮汐作用力，並考慮八個主要分潮位（M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1）、兩個長週期分潮位（Mf, Mm）和 3 個非線性分潮位（M4, MS4, MN4），該模式以 0.25 弧分之解析度進行朝夕運算（Dushaw et al., 1997）。

本研究透過非颱風期間之天文潮比對進行校驗，並計算模擬之天文潮與中央氣象局所提供之調和分析資料和觀測資料之差異；經信十分析之結果，偏差量（Bias）小於 0.1 公尺，方均根誤差（RMS）小於 0.3 公尺，顯示模擬之天文潮相當準確；圖 3 以龍洞潮位站於 2011 年 3 月 1 日至 3 月 7 日之比較為例，上欄為模擬結果與調和分析資料之比較，下欄為模擬結果與觀測資料之比較，橫軸為日期，單位：天，縱軸為水位，單位：公尺。

## 三、模式校驗

### 3.1 南瑪都颱風介紹

南瑪都颱風（Nanmadol）於 2011 年 8 月 23 日菲律賓東方海面生成，初期往西移動，隨後轉為偏西方向北行進，27 日其中心通過菲律賓呂宋島東北角，轉為西北西移動。颱風中心於 29 日 4 時由臺東縣附近登陸，13 時由臺南附近出海轉而進入臺灣海峽，緩慢向西北移動，31 日時於臺灣海峽減弱為熱帶性低氣壓。最大七級風半徑為 180 公里，近中心最大風速高達 53（公尺/秒），颱風中心最低氣壓為 920 毫巴，為一強烈颱風。圖 4 中央氣象局颱風資料庫提供之 2011 年南瑪都颱風之路徑圖，為中央氣象局定義之第 4 類侵臺颱風路徑。

### 3.2 計算域範圍

本研究所發展之 COMCOT 風暴潮模式之計算域為完整涵蓋颱風之生命週期和風暴潮傳遞歷程，因此建構球座標系統下之大尺度計算域、區域尺度計算域和近岸尺度之計算域。

圖 5 表示 COMCOT 風暴潮模式球座標系統下之第一層計算域，網格解析度為 8 弧分，此計算域可涵蓋大部分颱風之生命週期，並且提供下層計算域邊界條件。

圖 6 表示 COMCOT 風暴潮模式之第二層計算域，可視模擬區域之地形特性調整解析度，同時導入潮汐之效應。解析度分別為：臺灣本島沿海地區為 4 弧分，金門、馬祖和澎湖地區為 2 弧分，蘭嶼島嶼為 1 弧分。

### 3.3 颱風風場與壓力場

本研究除導入理想颱風模式之對稱風場外，更導入大氣動力模式 TWRF 之非對稱且與地形交互作用下之氣象場，以壓力梯度和風剪力之方式驅動風暴潮傳遞。

圖 7 表示 2011 年南瑪都颱風之 TWRF 大氣壓力場，顏色表示地形和水深高程，單位：公尺，等高線表示壓力場，單位：毫巴。

圖 8 表示 2011 年南瑪都颱風之 TWRF 大氣風場場，顏色表示絕對風速值，單位：公尺/秒，箭頭表示風場向量。

由圖 7 和圖 8 可知，2011 年南瑪都颱風經臺灣時颱風結構受到破壞之影響所產生之非對稱情形，風速主要集中於颱風前進方向之右側。

### 3.4 模擬結果與分析

2011 年南瑪都颱風案例開啟多重巢狀網格功能，向下耦合 200 公尺解析度地形進行風暴潮溢淹範圍之計算。

圖 9 分別以新竹地區之最大風暴潮高程，顏色表示風暴潮和潮汐非線性交互作用下之最大暴潮高程，單位：公尺。

由圖 9 所示，可知新竹地區受南瑪都颱風最大暴潮高程約為 1.3 公尺，由模擬結果顯示有溢淹情況產生，風暴潮溢淹至陸地後，於內陸地區之暴潮高程約為 1 公尺。

圖 10 為模擬結果與中央氣象局所提供之暴潮偏差（Surge Deviation）比較。上欄為模式導入天文潮和氣象力之模擬結果與實測資料比，中欄為單純天文潮之模擬結果與調和分析比，下欄為實測資料與調和分析之差（亦即暴潮偏差）與模式模擬暴潮偏差之比較，橫軸為日期，單位：天，縱軸為水位，單位：公尺。

由圖 10 可知，南瑪都颱風所引起之暴潮偏差於南臺灣地區之影響較大，約有 30 公分之風暴潮和模式推算結果大致符合，顯示模式計算之高準確度。

## 四、結論

本研究以非線性多重網格海嘯模式（Cornel Multi-grid Coupled of Tsunami Model, COMCOT）為基礎進行發展風暴潮模式，同時求解卡氏座標及球座標系統下之非線性淺水波方程式，並以動態巢狀網格解析不同尺度之長波傳遞，並以移動邊界法（Moving Boundary Scheme）計算溢淹範圍。除導入理想颱風模式外，也耦合中央氣象局目前所使用之大氣動力模式 TWRF（Typhoon Weather Research and Forecasting）之非對稱颱風結構氣象場和全球天文潮模式 TPXO。更以不同颱風路徑之歷史案例進行校驗，茲列出 2011 年南瑪都颱風結果，模擬結果與實測資料均有良好之比對成果，同時包含近岸地區溢淹分析，顯示本研究發展

之速算系統具有高度準確性。

## 參考文獻

- [1] Dushaw, D. Brian, Gary D. Egbert, Peter F. Worcester, Bruce d. Cornuelle, Bruce M. Howe and Kurt Metzger, A TOPEX/POSEIDON global tidal model (TPXO.2) and barotropic tidal currents determined from long-range acoustic transmissions. *Prog. Oceanogr.* Vol. 40, pp. 337 – 367, 1997
- [2] Flather, R.A. and Proctor, R., Prediction of North Sea storm surges using numerical models: recent developments in the U.K. In: Sundermann, J. & Lens, W. (eds), *North Sea dynamics*. Springer, Berlin, pp. 95-107, 1983
- [3] Pugh, D.T. Tides, surges and mean sea level. John Wiley & Sons., 1987
- [4] Jelesnianski, C. P., J. Chen and Wilson A. Shaffer, SLOSH: Sea, Lake, and Overland Surges from Hurricanes, 1992
- [5] Large, W. G. and S. Pond, Open ocean momentum fluxes in moderate to strong winds, *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 11, pp. 324-336, 1981
- [6] Liu, Philip L.-F., Young-Sik Cho, Michael J. Briggs, Utku Kanoglu, and Costas Emmanuel Synolakis. Runup of solitary waves on a circular island. *J. Fluid Mech.* Vol. 302, pp. 259 – 285, 1995
- [7] Luettich R. A. Jr., J. J. WesterinkADRIIC: An Advanced Three-dimensional Circulation Model for Shelves, Coasts, and Estuaries , 1992
- [8] Powell, M. D., P. J. Vivker, and T. A. Reinhold , Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones, *Nature*, vol. 422,pp. 278-283, 2003
- [9] Westerink, Joannes J., Richard A. Luettich, Jesse C. Feyen, John H. Atkinson, Clint Dawson, Hugh J. Roberts, Mark D. Powell, Jason P. Dunion, Ethan J. Kubatko and Hasan Pourtaheri, A basin- to Channel-Scale Unstructured Grid Hurricane Storm Surge Model Applied to Southern Louisiana. *American Meteo. Soc.*, vol. 136, pp. 833 – 864, 2008
- [10] 李賢文，”沿海產地與海水推升之研究（1）-台灣周圍海域颱風暴潮數值模式”，防災科技研究報告，1984。
- [11] 劉尚孔，”臺灣每域颱風暴潮及氣象潮數值預報模式研究計畫”，第三階段成果報告，中央氣象局研究報告第 279 號，1987。
- [12] 于嘉順，”中央氣象局多尺度暴潮模式預報作業改進及長期暴潮水位模擬分析研究（1/3）”，交通部中央氣象局委託研究計畫成果報告，2005。
- [13] 許泰文、蔡長泰、王永和、張有德，”海岸溢淹模式之建立與應用”，第21屆海洋工程研討會論文集，1999
- [14] 李賢文，”台灣鄰近海域朝夕預報數值模式”，第二屆海洋數值模式研習會論文集，港灣技術研究所，P.179-P.195，1989
- [15] 黃榮鑑、姚家琪，”颱風暴潮三維數值模式研究”，第17屆海洋工程研討會暨 1995 兩岸港口及海岸開發研討會論文集 p.315-p.332，1995
- [16] 邱銘達、高家俊、逢智源、江俊儒，”颱風暴潮數值推算確度提升之研究”，第 28 屆海洋工程研討會論文集 p.253-p.258，2006

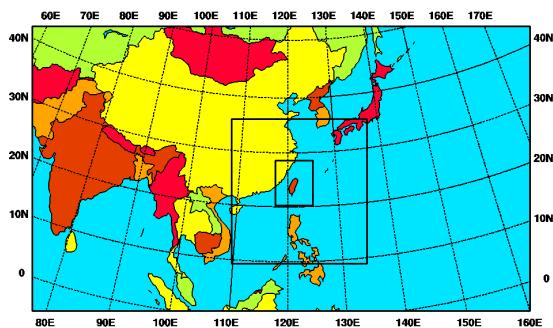


圖 1：TWRF 模式計算範圍（中央氣象局提供）

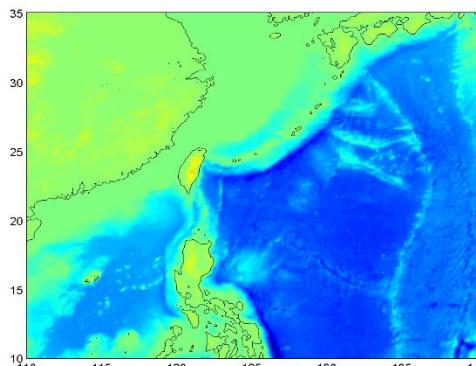


圖 5：COMCOT 風暴潮模式之第一層計算域

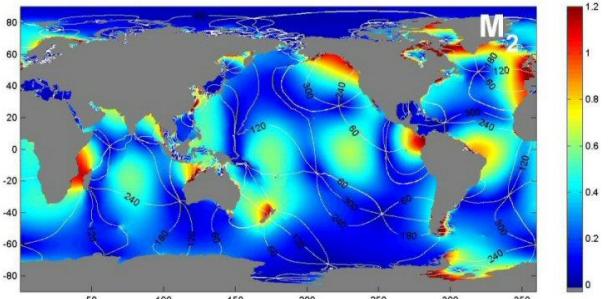


圖 2：TPXO 模式計算域範圍，以 M2 分潮為例

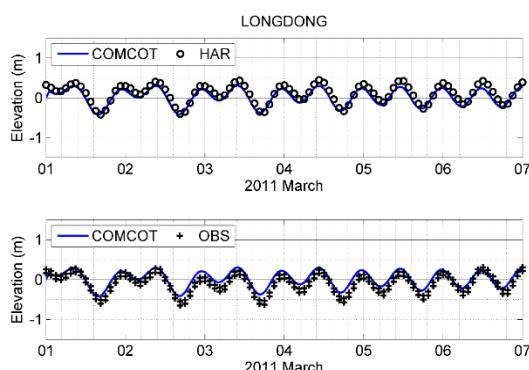


圖 3：模擬結果與調和分析資料和觀測資料之比較（以龍洞潮位站為例）

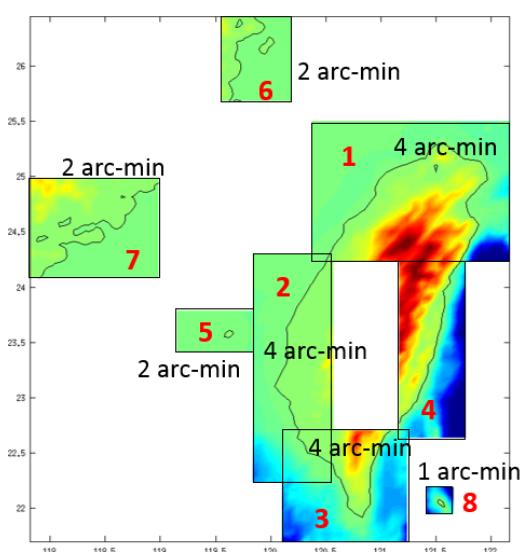


圖 6：COMCOT 風暴潮模式之第二層計算域



圖 4：2011 年南瑪都颱風之路徑圖（中央氣象局颱風資料庫提供）

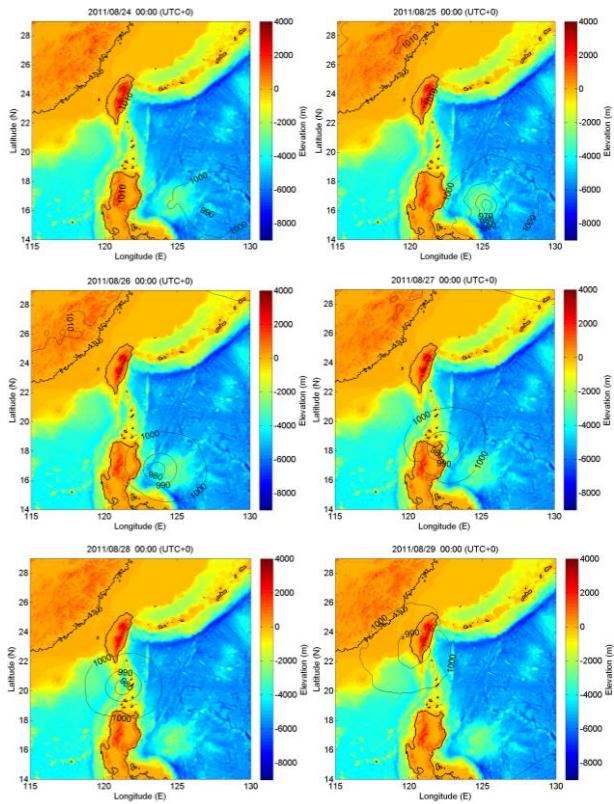


圖 7：2011 年南瑪都颱風之 TWRF 大氣壓力場

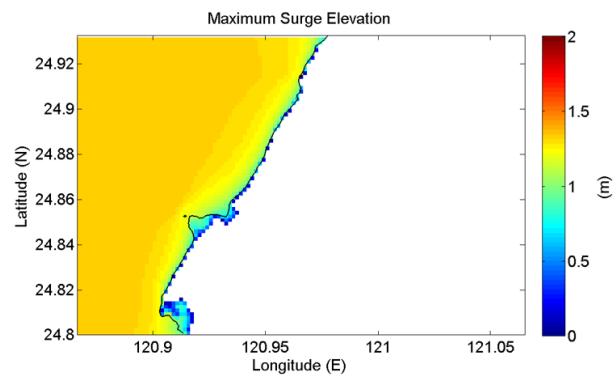


圖 9：導入颱風氣象力和潮汐條件下所做計算之近岸風暴潮溢淹（新竹地區）

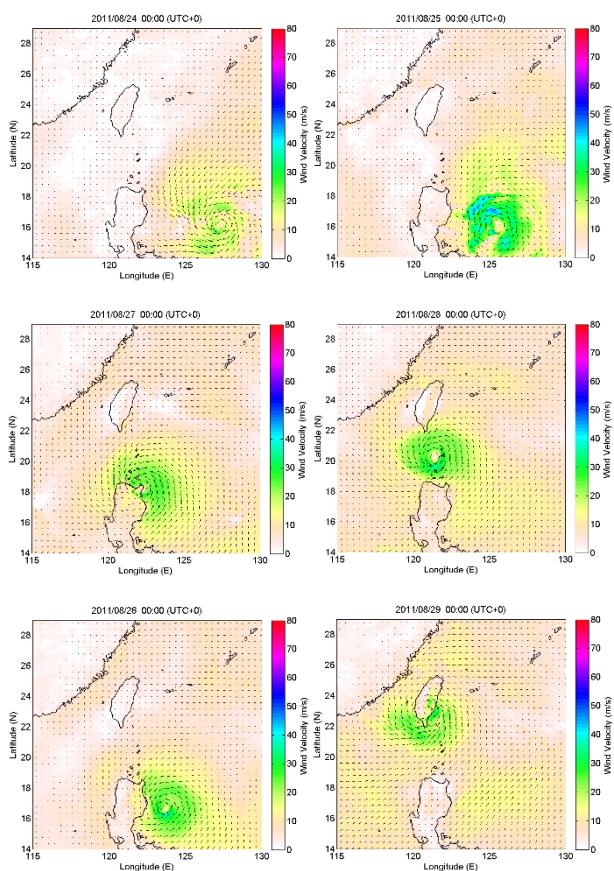


圖 8：2011 年南瑪都颱風之 TWRF 大氣風場

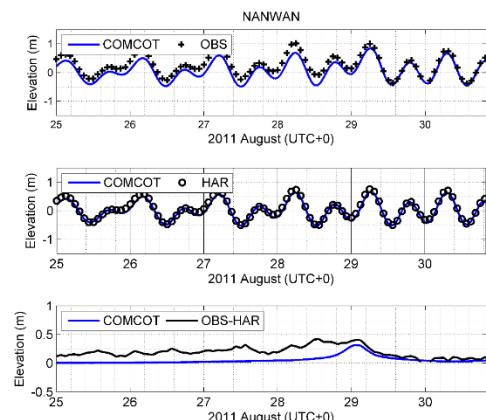


圖 10：2011 年南瑪都颱風期間潮位這廿比對（南灣潮位站）