

# 臺灣海域風暴潮溢淹速算系統之發展與研究

吳祚任<sup>1</sup>、蔡育霖<sup>2</sup>、劉立方<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 國立中央大學水文與海洋科學研究所副教授兼任所長

<sup>2</sup> 國立中央大學水文與海洋科學研究所博士生

<sup>3</sup> 國立新加坡大學土木與環境工程學系特聘教授兼任副校長

## 摘要

臺灣位於海洋能量充沛之西北太平洋（Western North Pacific, WNP）與南中國海（South China Sea, SCS）間，為颱風高度密度且超級颱風潛在生成之區域。然而，臺灣專屬之風暴潮溢淹預算系統實不多見，大多數模式受限於解析度無法計算溢淹，亦或計算效能不足無法進行預報。綜觀世界上深受風暴潮威脅之國家均有專職溢淹預報或潮高預報之速算系統。因此，本研究之重點為發展專屬於臺灣之精準且高效能之風暴潮溢淹速算系統。本研究以非線性多重網格 COMCOT 海嘯模式為基礎，進行臺灣海域風暴潮溢淹速算系統之發展，以多重巢狀網格解析遠洋尺度之風暴潮傳遞與近岸尺度之溢淹溯上，並以移動邊界法計算溢淹範圍。除了導入理想颱風模式外，也耦合 TWRP 區域大氣模式和 TPXO 全球天文潮模式，提供非對稱颱風氣象場與潮汐水位時序變化。本研究選定 2011 年強烈颱風南瑪都事件進行個案校驗，模擬結果與實測資料有良好之比對成果，同時包含近岸地區溢淹之分析，顯示本研究發展之速算系統具有高度準確性，並可用於實際預報作業之用。

## 溫馨感言

KK 老師生前研究的主力之一，是淡水河出海口的營養鹽的分佈。這當中重要的邊界條件之一，即為出海口水位變化。出海口水位變化由許多因素彼此影響，因此相當複雜難解。其中包括潮汐、波浪、海流、甚至是颱風來襲時，因為氣壓變化以及強風吹襲所產生之風暴潮等。

本篇文章則是試圖解決此一問題。我們發展一數值模式，耦合潮汐與風暴潮，並考慮近岸海床的摩擦阻力。希望這結果能夠更趨近於 KK 老師想要求解的問題，並對近岸海洋研究貢獻棉薄之力。

## 一、 前言

未來全球暖化與潛在極端颱風生成之情境下，風暴潮 (Storm Surge) 於近岸地區造成之溢淹 (Inundation) 為現今水動力學研究與災害防治之重點項目。風暴潮由颱風之壓力梯度 (Pressure Gradient) 和風剪力 (Wind Shear Stress) 驅動，造成海水面異常之抬升，傳遞過程伴隨潮汐、地形和地表摩擦間之非線性交互作用，對於水動力模擬為一大挑戰，特別是發展兼顧準確度和效能之速算系統。

臺灣位於海洋能量充沛之西北太平洋 (Western North Pacific, WNP) 與南中國海 (South China Sea, SCS) 間，為颱風高度密度且超級颱風潛在生成之區域。然而，臺灣專屬之風暴潮溢淹預算系統實不多見，大多數模式受限於解析度無法計算溢淹，亦或計算效能不足無法進行預報。綜觀世界上深受風暴潮威脅之國家均有專職溢淹預報或潮高預報之速算系統，例如美國 NOAA 之 SLOSH 模式 (Jelesnianski et al., 1992) 和英國之 CS3 模式 (Flather & Proctor, 1983) 等。

因此，本研究之重點為發展專屬於臺灣之精準且高效能之風暴潮溢淹速算系統，並且即時耦合全球潮汐模式 (Global Tidal Model) 和區域大氣模式 (Regional Atmospheric Model)，同時推算沿海地區之風暴潮溢淹範圍，以提供預報資訊於災害防治單位決策之用。

## 二、 研究方法

本研究以康乃爾大學所發展成熟之非線性 COMCOT (COrnell Multi-grid Coupled of Tsunami Model) 海嘯模式為基礎進行發展 (Wang and Liu, 2006 and Wang and Liu, 2011)，求解球座標系統下之非線性淺水波方程式。在中研院物理所網格中心協助下，以 OpenMP (Open Multi-Processing) 記憶體共享方式進程式平行化改寫，使運算速度提升至少 10 倍以上，滿足預報之時效 (Lin et al., 2015)。

本研究建構之巢狀網格系統 (Nested-grid System) 可兼顧遠洋尺度之風暴潮傳遞與近岸尺度之溢淹溯上，同時利用移動邊界法 (Moving Boundary Scheme) 計算沿海地區之溢淹範圍。圖 1 為風暴潮模式巢狀網格之計算域。

本模式更與中央氣象局目前所使用之大氣模式 TWRP (Typhoon Weather Research and Forecasting Model) 即時耦合，考慮地形交互作用和大氣條件變動下之非對稱氣象場 (Non-symmetric Metrological Field)。此外，為追求預報時效，

也耦合理想颱風模式 (Jelesnianski, 1966) 並且以最大暴風半徑、七級風半徑、中心氣壓等參數建構颱風氣象場。除大氣模式之即時耦合外，本模式也與奧瑞岡州立大學 (Oregon State University, OSU) 所開發之 TPXO 全球潮汐模式即時耦合，該模式包含八個主要分潮位 (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)，以 0.25 弧分之解析度進行運算 (Dushaw et al., 1997)。

### 三、 模式驗證與案例分析

本研究選定 2011 年強烈颱風南瑪都 (Typhoon Nanmadol) 作為模式校驗案例。2011 年 8 月 23 日南瑪都颱風於菲律賓東方海面生成，8 月 27 日颱風中心通過菲律賓呂宋島東北角後，緊接著朝臺灣前進並且於 8 月 29 日登陸臺東縣，爾後由臺南出海進入臺灣海峽，緩慢向西北移動並減弱為熱帶性低氣壓。其颱風生命歷程中，最大七級風半徑為 180 公里，近中心最大風速可達 53 公尺/秒，颱風中心氣壓最低為 920 毫巴，為中央氣象局定義之第 4 類侵臺颱風路徑，圖 2 為中央氣象局颱風資料庫提供之南瑪都颱風路徑圖。

本研究案例分別由中央氣象局 TWRF 模式與理想颱風模式建立颱風氣象場，且於 30 分鐘內完成所有遠洋地區和近岸地區之風暴潮計算，突顯模式計算效能。圖 3 為颱風期間之 TWRF 模式壓力場，顏色表示地形和水深高程，單位為公尺，等高線表示壓力場，單位為毫巴；圖 4 為颱風期間之 TWRF 模式風場，顏色表示絕對風速值，單位為公尺/秒，箭頭表示風場向量。由圖 3 和圖 4 觀察可知，南瑪都颱風行經臺灣時，颱風結構受高山地形影響所導致之非對稱結構，同時風速集中於颱風前進方向之右側。圖 5 為不考慮潮汐條件下之海水位起伏情況，顏色代表颱風影響下之水位起伏，單位為公尺。當南瑪都颱風於菲律賓東方時，水深較深，壓力梯度影響顯著，因此水位朝颱風中心集中；颱風以西北方向朝臺灣接近時，因臺灣海峽水深較淺，風剪力效應漸趨顯著，造成海峽中水位起伏，理論與模擬結果相符。

圖 6 為模擬結果與實測資料之比較，依序分別為蘭嶼、小琉球與南灣測站；第一欄為考慮潮汐條件之總水位模擬結果與實測資料比較，第二欄為模式潮汐模擬結果與調和分析之比較，第三欄為暴潮偏差 (Surge Deviation) 之比較，橫軸

為時間，縱軸為水位，單位為公尺。結果顯示模式成功捕捉最大暴潮偏差與風暴潮和潮汐交互作用下所產生類潮汐週期之訊號，驗證本研究所發展之模式具有高度準確性（實測資料與調和分析資料由中央氣象局海象測報中心提供）。

圖 7 為南瑪都颱風期間模式所模擬之最大風暴潮高，顏色表示風暴潮高，單位為公尺，等高線表示最大風暴潮高之空間分佈。結果顯示臺灣西部沿岸最大風暴潮高分佈為 1.2 公尺至 1.8 公尺，在臺灣南部和東部沿岸之最大風暴潮高分佈為 0.8 公尺至 1.2 公尺，臺灣西岸和西南岸之風暴潮受地形和底床摩擦影響，至近岸產生波高衰減情況，同時於局部區域有輕微淹水之可能。

#### 四、 總結

本研究以非線性多重網格 COMCOT 海嘯模式為基礎，進行臺灣海域風暴潮溢淹速算系統之發展，以多重巢狀網格解析遠洋尺度之風暴潮傳遞與近岸尺度之溢淹溯上，並以移動邊界法計算溢淹範圍。除了導入理想颱風模式外，也耦合 TWRF 區域大氣模式和 TPXO 全球天文潮模式，提供非對稱颱風氣象場與潮汐水位時序變化。本研究選定 2011 年強烈颱風南瑪都事件進行個案校驗，模擬結果與實測資料有良好之比對成果，同時包含近岸地區溢淹之分析，顯示本研究發展之速算系統具有高度準確性，並可用於實際預報作業之用。

#### 五、 參考文獻

- [1] Dushaw, B.D., G.D. Egbert, P.F. Worcester, B.D. Cornubbe, B.M. Howe, and K. Metzger, "TOPEX/POSEIDON global tidal model (TPXO.2) and barotropic tidal currents determined from long-range acoustic transmissions," *Prog. Oceanog.*, vol. 40, pp. 337-367.
- [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] Jelesnianski, C.P., J. Chen and W.A. Shaffer, "SLOSH: Sea, Lake, and Overland Surges from Hurricanes," 1992.
- [4] Wang, X. and Phillip L.-F. Liu, "An explicit finite difference model for simulating weakly nonlinear and weakly dispersive waves over slowly varying water depth," *Coastal Eng.*, 58, pp. 173-183, 2011.
- [5] Wang, X., Liu, P.L.-F., "An analysis of 2004 Sumatra earthquake fault plane mechanisms and Indian Ocean tsunami," *J. Hydraul. Res.* 44 (2), 147-154., 2006.
- [6] Lin, S. C, T.R. Wu, E. Yen, H.Y. Chen, J. Hsu, Y.L. Tsai, C.J. Lee, and P. L.-F. Liu, "Development of a tsunami early warning system for the South China Sea," *Ocean Engineering*, 100, 1-18, May 2015.

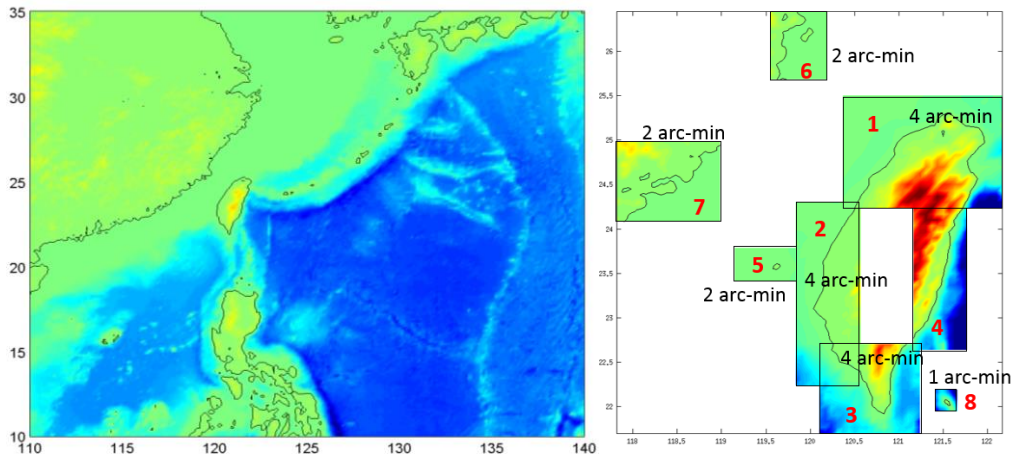


圖 1：COMCOT 風暴潮模式巢狀網格第一層（遠洋尺度）與第二層（近岸尺度）計算域。

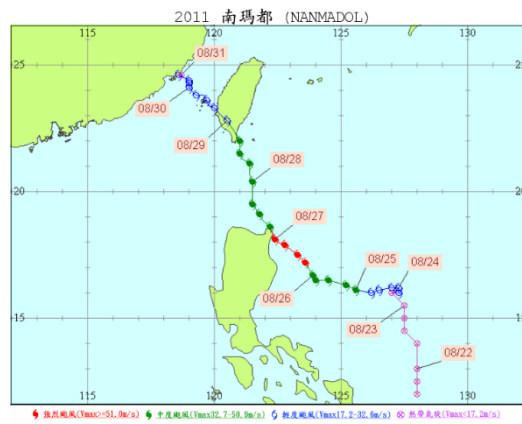


圖 2：2011 年南瑪都颱風之路徑圖（中央氣象局颱風資料庫提供）。

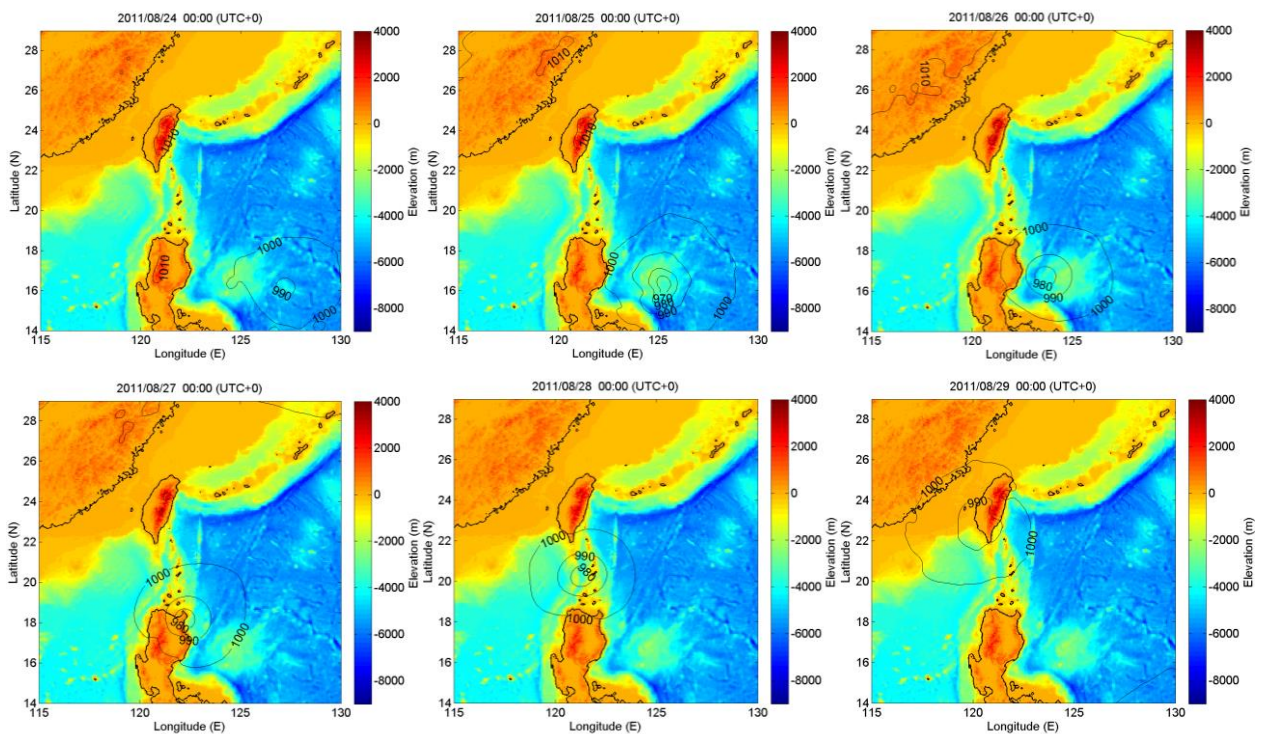


圖 3：2011 年南瑪都颱風之 TWRF 大氣壓力場，顯示受地形影響下之颱風非對稱結構變化，顏色表示高程，單位為公尺，等高線表示壓力分佈，單位為毫巴。

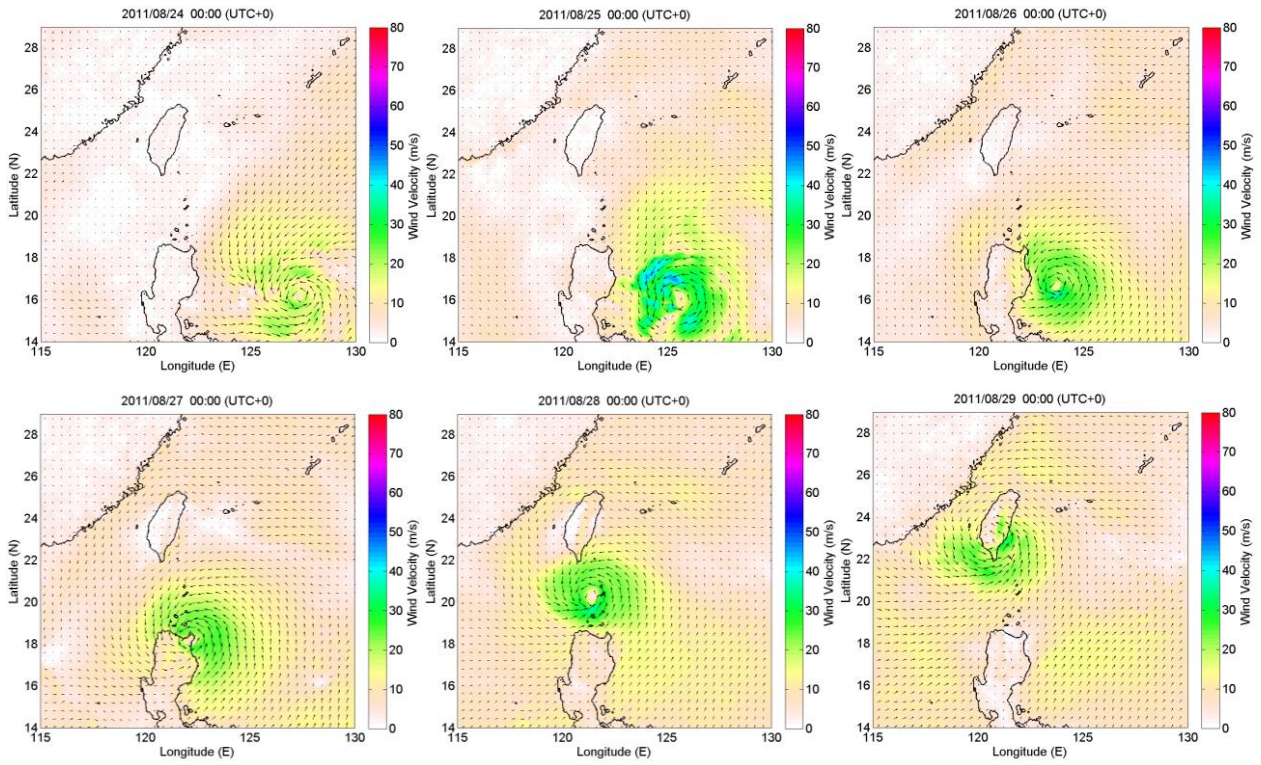


圖 4：2011 年南瑪都颱風之 TWRP 大氣風場，顯示受地形影響下之颱風非對稱結構變化，顏色代表絕對風速，單位為公尺/秒，箭頭代表風場方向。

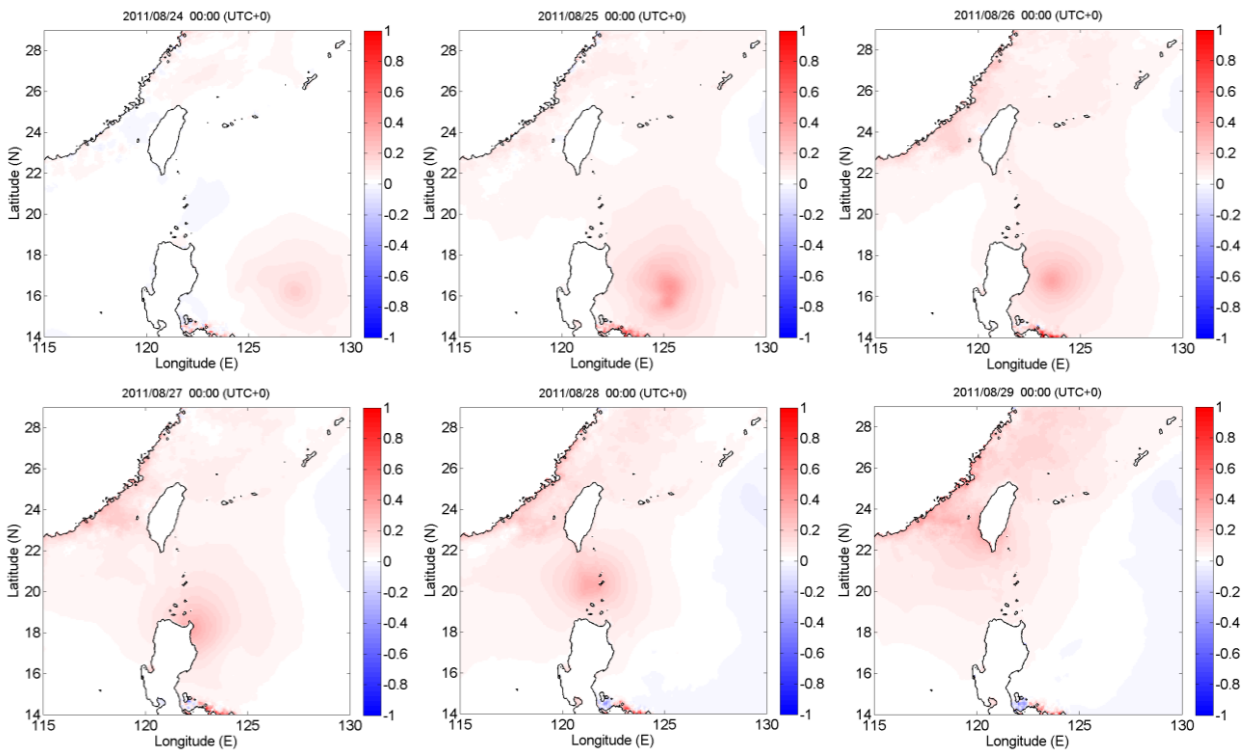


圖 5：不考慮潮汐條件下受南瑪都颱風影響之水位起伏，當南瑪都颱風於菲律賓東方時，水深較深，壓力梯度影響顯著，因此水位朝颱風中心集中；颱風以西北方向朝臺灣接近時，因臺灣海峽水深較淺，風剪力效應漸趨顯著，造成海峽中水位起伏，顏色表示水位變化，單位為公尺。

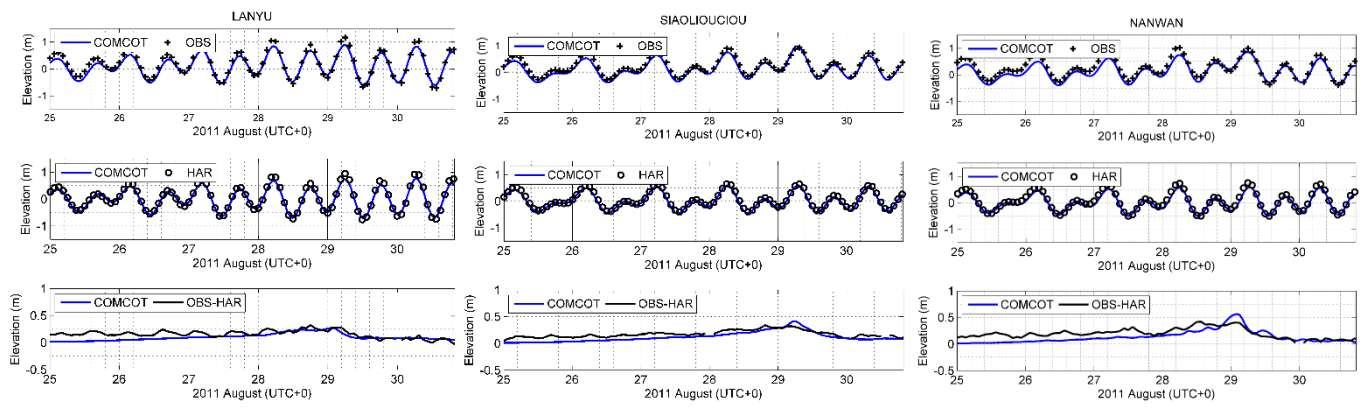


圖 6：模擬結果與實測資料之比較，依序分別為蘭嶼、小琉球與南灣測站；第一欄為考慮潮汐條件之總水位模擬結果與實測資料比較，第二欄為模式潮汐模擬結果與調和分析之比較，第三欄為暴潮偏差之比較，橫軸為時間，縱軸為水位，單位為公尺。模式成功捕捉最大暴潮偏差與風暴潮和潮汐交互作用下所產生類潮汐週期之訊號，顯示本研究發展模式具有高度準確性。

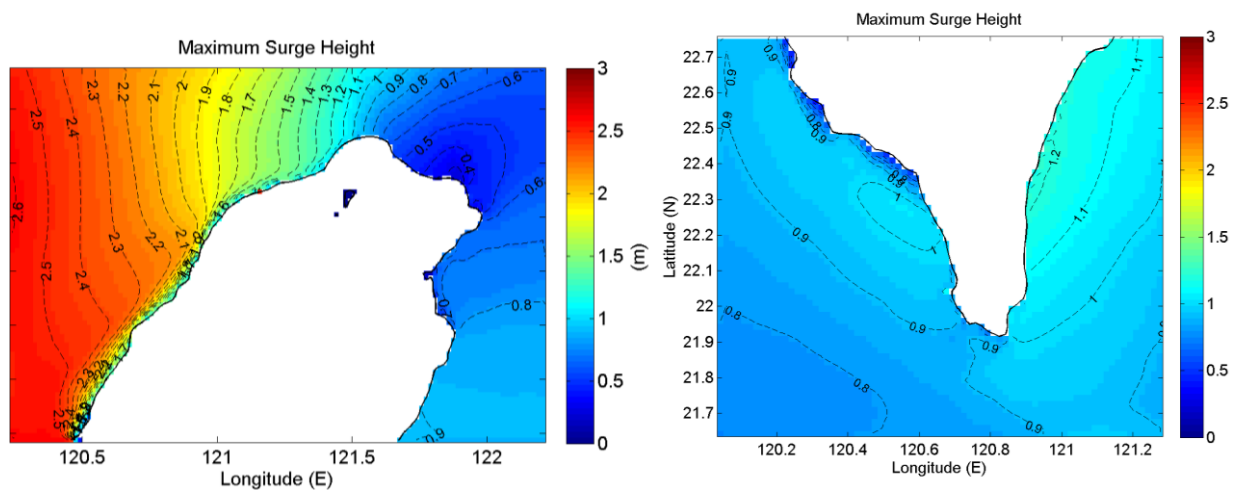


圖 7：南瑪都颱風期間模式所模擬之最大風暴潮高，顏色表示風暴潮高，單位為公尺，等高線表示最大風暴潮高之空間分佈。結果顯示臺灣西部沿岸最大風暴潮高分佈為 1.2 公尺至 1.8 公尺，在臺灣南部和東部沿岸之最大風暴潮高分佈為 0.8 公尺至 1.2 公尺，臺灣西岸和西南岸之風暴潮受地形和底床摩擦影響，至近岸產生波高衰減情況，同時於局部區域有輕微淹水之可能。