

風暴潮速算模式之開發 暨 1845 年雲林口湖風暴潮事件之初步研究

蔡育霖¹、吳祚任¹、滕春慈²、朱啟豪²、莊美惠¹、林君蔚¹

¹國立中央大學水文與海洋科學研究所

²中央氣象局海象測報中心

摘要

一套發展成熟之風暴潮預警系統，不僅需要高速計算能力以配合預報時效，計算域需完整涵蓋颱風生命週期，同時耦合不同尺度之風暴潮傳遞計算，並推算沿海區域之溢淹範圍，適時提出海水倒灌之警報。過去數十年許多學者以數值模式進行風暴潮預警系統之發展與研究 (Wu, 1984; Wang, 1991; Jelesnianski, 1992; Flater, 1993; Casull, 2000; Phadke et al., 2003; Weisberg and Zheng, 2006; Ou et al., 2008; Westerink, 2008; You, 2010; Sheng, 2010; Dietrich, 2011)，然而能達成上述需求者無幾。大部分模式仍有諸多限制，如無法進行涵蓋颱風生命週期之暴潮模擬，或者侷限於卡氏座標系統，亦或無法計算溢淹範圍等。本研究以康乃爾大學所開發之非線性多重網格海嘯模式 (Cornell Multi-grid Coupled of Tsunami Model, COMCOT) 為基礎進行風暴潮模式開發。COMCOT 可同時於卡氏座標及球座標系統下求解非線性淺水波方程式，並且具備動態雙向耦合之巢狀網格，可解析不同尺度下之長波傳遞行為，同時配合移動邊界法 (Moving boundary scheme) 可計算溢淹範圍。此外，本研究亦對 COMCOT 模式進行平行化之修改，使其具備高速計算之效能，以滿足風暴潮速算系統之需求。在氣象場部份，本研究耦合理想颱風模式 Holland Model (1980)、CWB Model 和大氣模式 TWRP (Typhoon Weather Research and Forecasting) 作為颱風氣象力輸入，使 COMCOT 具備計算風暴潮傳遞之能力，模式亦與解析解進行驗證，並以 2011 年南瑪都颱風為案例進行模式校驗，模擬結果和實測資料均有良好之比對結果。最後，本研究將所完成之風暴潮模式應用於 1845 年雲林口湖風暴潮事件上。西元 1845 年 (清道光 25 年) 之雲林口湖風暴潮事件為臺灣歷史上傷亡人數最為嚴重之水災，雲林縣口湖鄉與四湖鄉沿海村莊俱為大水吞沒，罹難民眾就地掩埋為萬人塚 (曾, 1978; 金, 2002)。此研究對於擬定風暴潮防災策略上有重大之意義，本研究將重現可能之颱風情境。相關之成果及研究細節將於簡報中呈現。

關鍵字：風暴潮、COMCOT 與速算系統。

一、前言

風暴潮 (storm surge) 是由氣旋與冷鋒之強風作用以及氣壓驟變等強烈的天氣系統所引起之海面異常升降現象，若颱風來襲時適逢天文大潮位，容易使得海水倒灌，大量海水溢堤，沿海地區居民生命財產受到威脅。

一套發展成熟之風暴潮預警系統，不僅需要高速計算能力以配合預報時效，其計算域需涵蓋颱風生命週期，同時耦合不同尺度之風暴潮傳遞計算，並推算沿海區域之溢淹範圍，適時提出海水倒灌之警報。

過去數十年許多學者以數值模式進行風暴潮預警系統之發展與研究 (Wu, 1984; Wang, 1991; Jelesnianski, 1992; Flater, 1993; Casull, 2000; Phadke et al., 2003; Weisberg and Zheng, 2006; Ou et al., 2008; Westerink, 2008; You, 2010; Sheng, 2010; Dietrich, 2011)，然而能達成上述需求者無幾。大部分模式仍有諸多限制，如風暴潮模擬受限小區域之計算域，無法進行完整涵蓋颱風生命週期之暴潮模擬，或者僅限於卡氏座標系統無法適用於大計算域，亦或無法計算溢淹範圍等，台灣位於全球颱風路徑最密集

之區域，因此亟需一套高速且準確之風暴潮預警系統。

本研究擬發展一套計算精準及具有高速運算效能之風暴潮速算模式，耦合氣象局現有大氣模式及參數化颱風模式，並能推算沿海地區之風暴潮溢淹範圍，以提供中央氣象局預報與災害防治單位決策之用。

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 (Cornell Multi-grid Coupled of Tsunami Model) 為基礎發展風暴潮模式，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海之高解析度系統，同時計算遠洋及近岸之風暴潮傳遞以及沿海地區之風暴潮溢淹範圍。本研究開發之數值模式與解析解有良好驗證成果，同時以 2011 年南瑪都颱風 (Typhoon Nanmadol) 作為模式驗證之案例，模擬結果和實測資料皆有良好比對之成果。

西元 1845 年 (清道光 25 年) 之雲林口湖風暴潮事件為臺灣歷史上傷亡人數最為嚴重之

水災，雲林縣口湖鄉與四湖鄉沿海村莊俱為大水吞沒，罹難民眾就地掩埋為萬人(曾, 1978; 金, 2002)。本研究以開發之水動力學風暴潮數值模式，對 1845 年雲林口湖風暴潮事件進行還原，找出其可能之颱風路徑，以期未來類似極端颱風事件再次發生之時，對於臺灣各縣市沿海地區可能遭受之風暴潮影響作出適當警戒，並提供災害防治單位進行風暴潮防災參考。

二、研究方法

本研究以國際知名之海嘯模式 COMCOT (Cornell Mutli-grid Coupled of Tsunami Model) 為基礎加入颱風氣象力(壓力梯度力及風剪力)，使模式具備以非線性之淺水波方程式計算風暴潮生成、傳播以及近岸湖上之完整歷程。

本研究開發之 COMCOT 風暴潮模式所求解之非線性淺水波方程式：

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

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \psi} \left(\frac{P^2}{H} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{PQ}{H} \right) + \frac{gH}{R \cos \varphi} \frac{\partial \eta}{\partial \psi} - fQ + F_{\psi}^b = - \frac{H}{\rho_w R \cos \varphi} \frac{\partial P_a}{\partial \psi} + \frac{F_{\psi}^s}{\rho_w}$$

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

其中， t 為時間， φ 為緯度， ψ 經度， P, Q 為體積通量， η 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 為柯氏力係數， $F_{\psi}^s, F_{\varphi}^s$ 為風剪力， F_x, F_y 分別為底床摩擦剪應力， ρ_w 為海水密度及 P_a 為大氣壓力。

Holland (1980) 所提出之理想颱風風場為：

$$V_w = \sqrt{\frac{B(P_n - P_c) \left(\frac{R_{\max}}{r} \right)^B \exp \left[- \left(\frac{R_{\max}}{r} \right)^B \right] + \frac{r^2 f^2}{4} - \frac{rf}{2}}$$

式中 P_c 為颱風中心之大氣壓力、 V_w 為風速、 R_{\max} 為最大暴風半徑、 B 為峰值參數 (peakness parameter)、 P_n 為環境大氣壓力 (Ambient Pressure)、 f 為柯氏力、 ρ_a 為空氣密度和 r 為距暴風中心半徑

Harper and Holland (1999) 建議峰值參數 B 值的經驗關係如下：

$$B = 2 - \frac{P_c - 900}{160}$$

由氣象局所提供之颱風大氣模式：

$$V_w = 2 \cdot V_{\max} \cdot \frac{R_{\max} \cdot r}{R_{\max}^2 + r^2}$$

其中， V_{\max} 為最近中心最大風速、 R_{\max} 為最大暴風半徑和 r 為距暴風中心半徑。

建議峰值參數 B 值的經驗關係如下：

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

最大暴風半徑 R_{\max} 則依據颱風中心壓力而有相對應之值，如下：

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

其中，最大暴風半徑 R_{\max} ，單位為公里， P_c 單位為毫巴。

理想颱風模式往往無法反應真實之颱風風場，因此，本研究耦合氣象局之 TWRP 模式。TWRP (Typhoon Weather Research and Forecasting Model) 模式為氣象局所使用之大氣模式之一，其投影系統為藍伯特投影，TWRP 模式之預報作業每日執行四次，第一層巢狀網格式之模式初始場來自美國 NCEP GFS 的全球預報系統，而第二層和第三層巢狀網格式之模式初始場由第一層巢狀網格式內插。

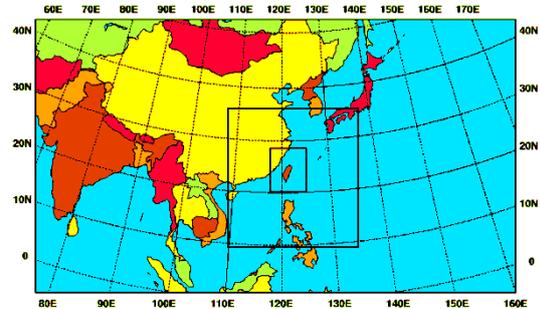


圖 1 TWRP 模式範圍 (CWB)

三、解析解驗證

本研究於球座標系統之理想環境下，分別代入大氣壓力場和風剪力進行解析解驗證；當非線性強度夠小時，非線性淺水波方程式可簡化為線性淺水波方程式描述水體之傳輸。

解析解驗證於均勻水深 100 公尺之地形進行，計算域範圍為東經 117 度至 123 度，北緯 20 度至 26 度，邊界條件為開放邊界 (Open Boundary)，數值模擬中僅考慮經度方向之動量傳輸，不考慮底床摩擦以及科氏力之影響。

壓力梯度造成水體動量傳輸之效應，忽

略科氏力造成之影響，動量方程式可簡化為：

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{gH}{R \cos \varphi} \frac{\partial \eta}{\partial \psi} = - \frac{H}{\rho_w R \cos \psi} \frac{\partial P_a}{\partial \psi}$$

考慮穩態 (Steady-state) 情況可以得到自由液面高程於大氣壓力場下之解析解：

$$\partial \eta = - \frac{\partial P_a}{g \rho_w}$$

解析解與地形深度無關，僅與當時大氣壓力變化、重力加速度和海水密度成正比，當重力加速度與海水密度為一定值時，自由液面高程變化僅與大氣壓力變化成正比。

計算域中代入正弦函數之壓力場，其壓力分布設定為：

$$P_a = -9800 \cdot \sin \left[\frac{2 \cdot \pi (\psi - \psi_1)}{\psi_2 - \psi_1} \right] + 1013.25 \cdot 10^2$$

本數值模式在導入上述參數後，利用控制方程式中之線性連續方程式和動量方程式，求解水面受大氣壓力影響開始擾動之情況。

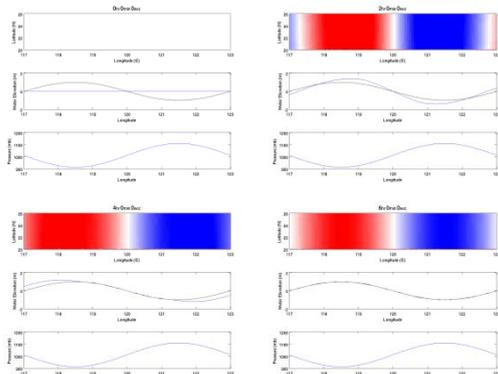


圖 2 大氣壓力場之解析解驗證

風剪力造成水體動量傳輸之效應，並且忽略科氏力造成之影響，其動量方程式簡化為：

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{gH}{R \cos \varphi} \frac{\partial \eta}{\partial \psi} = \frac{F_\psi^s}{\rho_w}$$

考慮穩態 (Steady-state) 情況，可得到計算域受風剪力影響下之自由液面解析解：

$$\partial \eta = F_\psi^s \frac{R \cdot \cos \varphi \cdot \partial \psi}{\rho_w \cdot gH}$$

計算域受 26 公尺/秒之西風吹拂，數值預測之水位面持續上下擾動，最終收斂於解析解附近，代表水面受風剪力作用後，達到穩態 (steady state) 之情況，表示模擬結果準確。

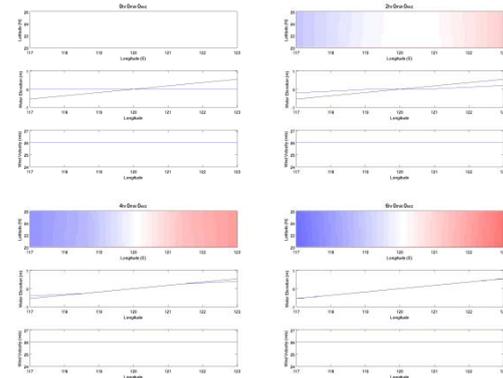


圖 3 風剪力之解析解驗證

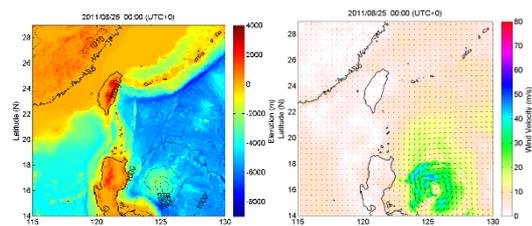
四、模式驗證

本研究以 2011 年南瑪都颱風作為模式驗證之案例；南瑪都颱風 (Typhoon Nanmadol)，國際颱風編號：1111，生命週期由 2011 年 8 月 21 日至 2011 年 8 月 31 日，為氣象局所定義之第 4 類侵臺路徑之強烈颱風，；南瑪都颱風影響臺灣期間，造成彰化縣西塭仔漁港海水倒灌，海水溢堤進入附近商店街，水深及膝，沿海居民財產受到損害；屏東縣因長延時之強降雨，造成沿海低窪地區大範圍淹水災情以及海水倒灌等現象。

本研究開發之風暴潮模式代入不同颱風氣象場求解 2011 年南瑪都颱風之風暴潮傳遞，包含 Holland Model (1980)、CWB Model，以及耦合 TWRF 大氣模式等。

圖 4 為 CWB Model 之颱風氣象場，左欄為大氣壓力場，顏色代表地形高程，單位：公尺，等高線代表大氣壓力，單位：毫巴，右欄為大氣風場，顏色代表絕對風速，單位：公尺/秒；圖 5 為代入 CWB Model 所計算之暴潮偏差，單位公尺；圖 6 為觀測資料與模式計算結果之比較，上欄為實測資料與調和分析之天文潮，下欄為代入不同颱風氣象力所計算之暴潮偏差，同時疊合天文潮之結果，與實測資料均有良好比對成果。

南瑪都颱風期間，龍洞、高雄和南灣地區之風暴潮高皆小於 1 公尺，海水倒灌之警戒較低；梧棲地區之風暴潮高最多可達 2.9 公尺，適逢天文潮之潮高峰值，於中部區域有較大之海水倒灌危害。



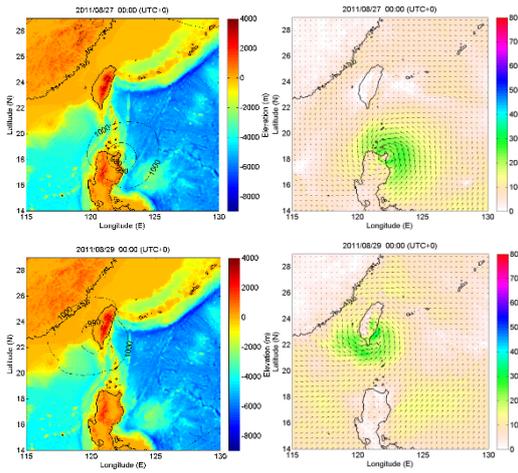


圖 4 2011 年南瑪都颱風代入 CWB Model 之颱風氣象場

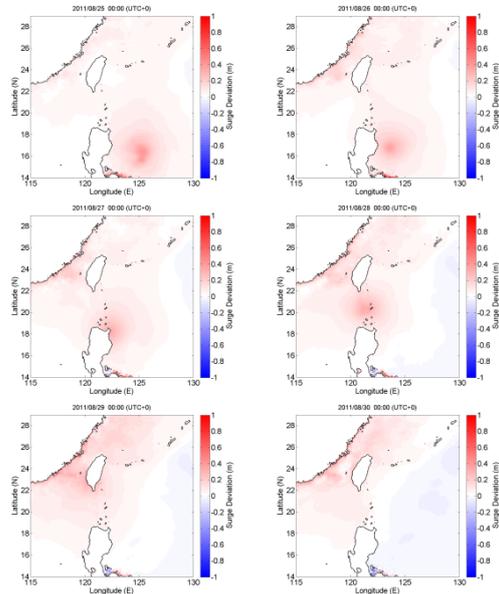


圖 5 2011 年南瑪都颱風代入 CWB Model 所計算之暴潮偏差

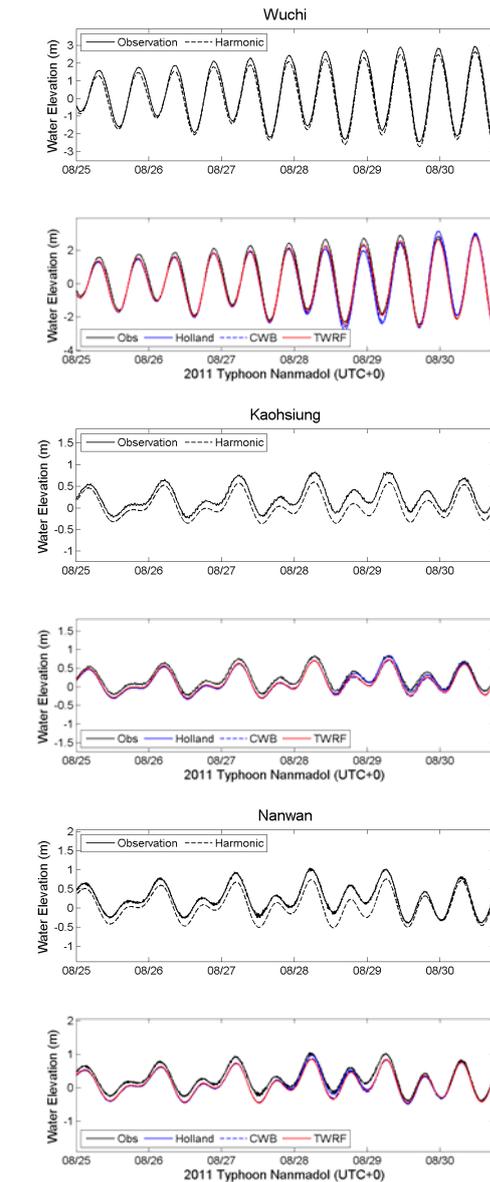
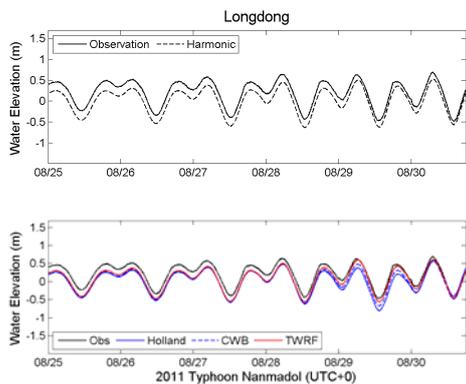


圖 6 2011 年南瑪都颱風實測資料與模式計算結果之比較 (龍洞、梧棲、高雄和南灣)

五、雲林口湖事件還原

西元 1845 年 (清道光 25 年) 農曆 6 月 7 日, 連宵大雨, 颶風由西南捲向東北, 引起海水倒灌, 沿海村莊俱沒入海中, 無一倖存, 影響區域遍及雲林沿海一帶, 罹難屍首不計其數, 最後由朝廷派出官兵掩埋, 估計約有七千人罹難, 可謂開臺有史以來最為嚴重之水災。道光皇帝憐恤百姓, 敕封為「萬善同歸」, 倖存民眾為告祭先祖, 因而有雲林口湖牽水狀告慰冤魂之科教儀式 (李豐楙, 1996; 曾人口, 1978)。

歷史史料匯整如《清宣宗實錄》、《臺案彙錄甲集》、《清實錄》以及《臺灣通誌》等, 俱記載颶風過境之記錄。因此, 此 1845 年雲林口湖地區之嚴重水災並非由地震或山崩所造成之海嘯所引起, 而是由颶風所引發之風暴潮於雲林沿海地區造成嚴重海水倒灌所致。

王志文 (2002) 以現代科學知識檢閱歷史文件資料，推斷此事件之風暴潮災情特別嚴重之因素，在於雲林口湖之瀉湖地形，輔以颱風路徑直接與海岸方向垂直，並且配合潮汐大潮之時間，因此有沿岸波高疊加之效果，使得風暴潮災情更為嚴重；同時指出颱風極有可能從雲林地區登陸臺灣，緊接著朝東北方向前進，同時研判 1986 年韋恩颱風 (Typhoon Wayne) 路徑可能類似於此 1845 年之歷史颱風情況。

過去對於歷史風暴潮事件之研究，多著重於史料探討與分析，缺乏以物理角度討論之研究。因此，本研究以發展之水動力學風暴潮數值模式進行情境還原，首先以 1986 年之韋恩颱風為案例，進行颱風路徑之敏感性分析。

1986 年韋恩颱風 (Typhoon Wayne)，國際編號 8614，其生命週期長達 20 天，影響時間為 1986 年 8 月 17 日至 1986 年 9 月 6 日，為目前西太平洋最長壽之熱帶氣旋，也是臺灣颱風史上，第一個直接登陸臺灣西部彰化 and 雲林地區一帶之颱風。韋恩颱風創造了許多臺灣氣象史上之特別記錄，例如，第一個從臺灣西部登陸和颱風生命週期最長等現象，甚至一度轉為熱帶性低氣壓，最後卻再度發展為颱風之奇特情況。

圖 7 為 1986 年韋恩颱風代入 CWB Model 之颱風氣象場，左欄為大氣壓力場，顏色代表地形高程，單位：公尺，等高線代表大氣壓力，單位：毫巴，右欄為大氣風場，顏色代表絕對風速，單位：公尺/秒；圖 8 為 1986 年韋恩颱風代入參數化大氣模式所計算之暴潮偏差，單位公尺；圖 9 為模式所計算之暴潮偏差，包含龍洞、花蓮、梧棲、安平與口湖等地區。

梧棲地區由大氣壓力梯度和風剪力影響所計算出來之暴潮偏差最大值为 1.6 公尺，顯示中部地區因颱風直接登陸，而有較大之暴潮偏差影響；在龍洞、花蓮和安平等地區，其最大值皆小於 70 公分，顯示韋恩颱風對於北部、東部、和南部之影響較小。

口湖地區於韋恩颱風直接由西部登陸臺灣時，暴潮偏差最大值为 2 公尺，顯示該路徑對於雲林口湖地區之暴潮反應敏感。

綜合以上結果，颱風直接由西部登陸時，其暴潮偏差由中部反應最大，特別是雲林地區，北部、東部和南部等地區受此路徑之影響較小，例如桃園、花蓮和安平等地區。

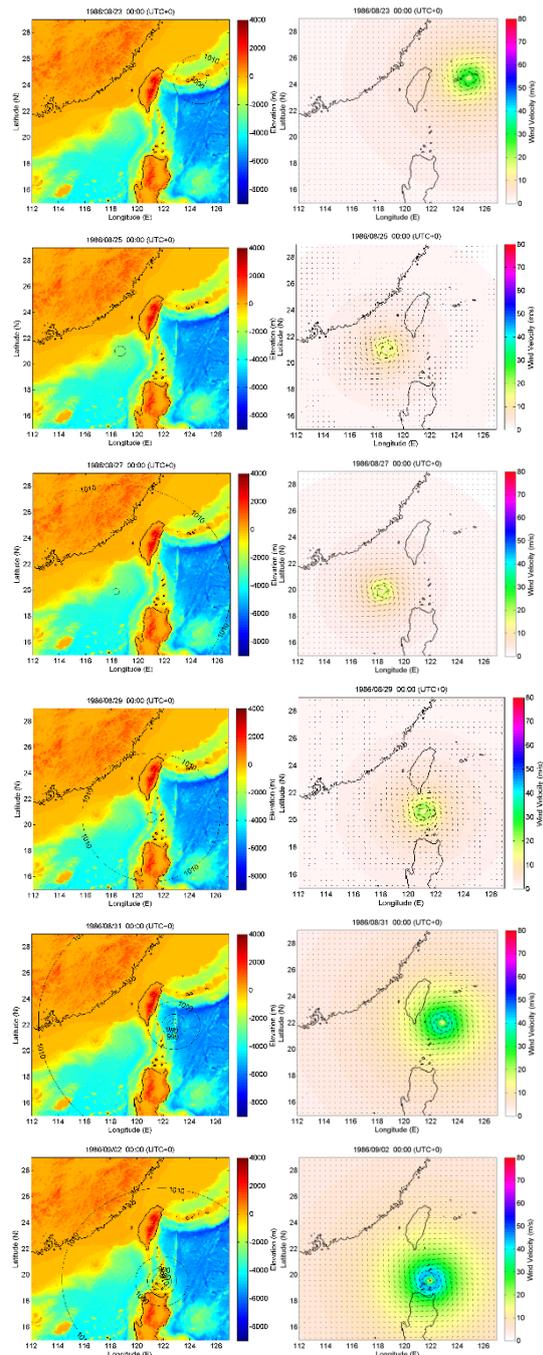
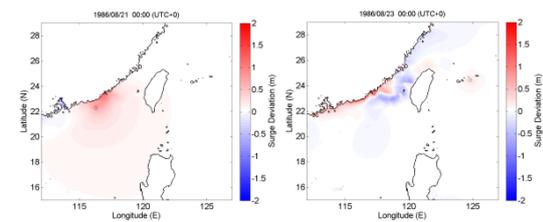
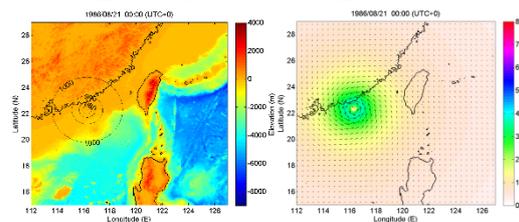


圖 7 1986 年韋恩颱風代入 CWB Model 之颱風氣象場



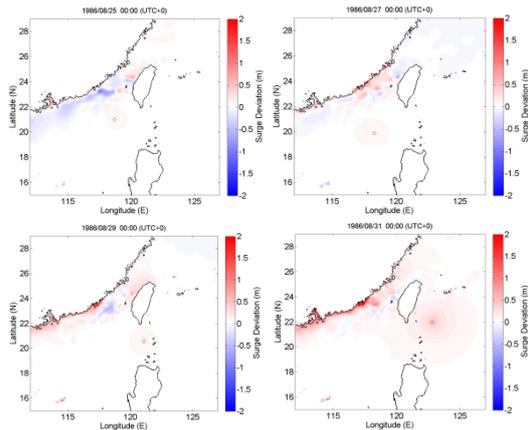


圖 8 1986 年韋恩颱風代入 CWB Model 所計算之暴潮偏差

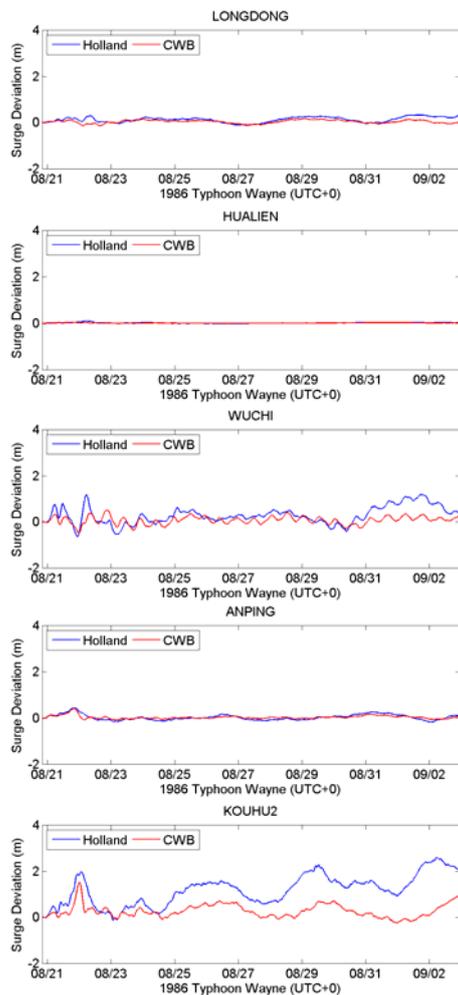


圖 9 風暴潮模式所計算之暴潮偏差 (龍洞、花蓮、梧棲、安平和口湖)

六、結果與討論

本研究使用廣為學界所認可之開放原始碼之非線性淺水波海嘯模式 COMCOT (Cornell Multi-grid Coupled of Tsunami Model)，加入颱風氣象力，使其具備計算風暴潮傳遞之能力，

並且建立風暴潮速算系統，以供預警之用。

本研究開發之 COMCOT 風暴潮模式分別於壓力梯度以及風剪力之假想環境下，與解析解進行驗證，結果顯示長時間作用下，數值模式之答案會達到穩態 (Steady-state)，符合解析解之答案，並選用 2011 年南瑪都颱風進行模式驗證，同時代入參數化大氣模式 Holland Model、CWB Model 以及 TWRP 大氣模式之颱風氣象場，計算其暴潮傳遞現象，並且和氣象局提供之沿海測站之實測資料進行比對，皆有良好的比對成果。

本研究以 1986 年韋恩颱風作為還原 1845 年雲林口湖風暴潮事件之參考案例，模式計算結果於雲林口湖地區有 2 公尺之暴潮偏差，颱風直接由西部登陸對於雲林口湖地區之暴潮反應敏感；若未來發生類似路徑之強烈颱風情況，中部地區如雲林等地應嚴防海水倒灌之災情。顯示過去發生之嚴重風暴潮事件的掌握及情境還原，對於災防單位之防災設置具有重要參考價值，並更凸顯研究歷史風暴潮事件的重要性。

參考文獻

1. Flather, R.A. and Proctor, R. (1983) 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.
2. Pugh, D.T. (1987) Tides, surges and mean sea level. John Wiley & Sons.
3. Salomon, J.C. and Breton, M. (1990) Modele general du plateau continental Nord Europeen. Rapport au Programme CEE-MAST 89 0093, FLUXMANCHE.
4. Smith, S.D. and Banke, E.G. (1975) Variation of the sea surface drag coefficient with wind speed. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 101, 665-673.
5. Smith, S.D., E.G.. Banke,(1975), Variation of the sea surface drag coefficient with wind speed. *Quart. J. R. Met. Soc.*,101,p.665-p.673
6. Garratt, J.R., (1977) ,Review of drag coefficients over oceans and conditions. *Monthly weather Review*, Vol.105,p.915-p.929
7. Wu, Jim, (1980), Wind-stress coefficients over sea surface near neutral conditions. *Journal of Physical Oceanography*, Vol.10,p.727-p.740
8. C. S. Yu, M. Fettweis, I. Hermans and J. Berlamont (1989) , Tidal flow simulation in the English Channel and Southern North Sea, *Adv. Water Resources*, 1989, Volume 12, December P.194-P.203
9. W. G. Large and S. Pond,(1981),Open ocean momentum fluxes in moderate to strong winds, *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 11, pp. 324-336
10. M. D. Powell, P. J. Vivker, and T. A. Reinhold (2003) , Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones, *Nature*, vol. 422,pp. 278-283
11. A. Harper and G. J. Holland (1999) , An updated parametric model of the tropical cyclone, in In:

- Proceedings of the 23rd Conference of Hurricane and Tropical Meteorology Dallas, Texas, pp. 893-896
12. G. J. Holland (1980), An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes, *Monthly Weather Rev.*, vol. 108, pp. 1212-1218
 13. Phadke, C. Martino, K. F. Cheung, and S. H. Houston (2003), Modeling of tropical cyclone winds and waves for emergency management, *Ocean Eng.*, vol. 30, pp.553-578
 14. K.F. Cheung, A.C. Phadke, Y. Wei, R. Rojas, Y.J.-M. Douyere, C.D. Martino, S.H. Houston, P.L.-F. Liu, P.J. Lynett, N. Dodd, S. Liao, E. Nakazaki (2003), Modeling of storm-induced coastal flooding for emergency management, *Ocean Eng.*, vol. 30, pp.1353-1386
 15. 曾人口，「金湖春秋」，中國詩文之友社，1978。
 16. 王志文，「感性與理性：鄉土神話的科學探討-以金湖牽狀為例」，pp.391-427，2002。
 17. 李豐楙，「金湖文化祭」，pp.10-17，1996。