

暴潮分析與預警系統技術發展

Development of the Storm Surge Analysis and Forecast System

主管單位：台灣颱風洪水研究中心

廖建明¹
Liau, Jian-Ming

陳思樺¹
Chen, Szu-Hua

楊文昌¹
Yang, Wen-Chang

賴堅戊¹
Lai, Jian-Wu

¹台灣海洋科技研究中心

摘要

為了提供颱風來襲時台灣環島海岸水位預測資訊，建置洪氾即時預警平台應用發展之目標，本研究收集台灣環島近岸水位監測資料，利用調和分析等方式，分析台灣環島天文潮位與暴潮偏差，作為環島暴潮預測模式驗證的依據，並建置暴潮資料展示網頁進行加值應用。並利用國研院海洋中心海象預測平台之數值模式架構發展環島暴潮預測模式，測試不同時空解析度大氣預測模式所提供之海面氣象邊界條件對於暴潮模擬預測影響。採用 2013 年蘇力颱風為案例，利用颱風中心所提供之高解析度大氣模式，透過暴潮模式模擬結果與潮位測站觀測值之比較中，在新竹、蘇澳、花蓮及馬祖站的暴潮與天文潮模擬合成水位誤差小於 0.3 公尺以下，表示暴潮預測模式能合理模擬颱風侵襲下環台海岸水位的變化，但位於蘇力颱風中心登陸處附近的龍洞潮測站水位，在颱風登陸前後卻有明顯低估現象，考慮高解析度近岸波浪模式估計由於颱風巨浪所引起波揚水位，則可以合理改善龍洞潮測站的水位變化模擬。故在颱風巨浪的情況下，考慮近岸波揚水位抬升現象可改善海岸水位模擬結果。並研擬作業化暴潮預測流程，建立適合於台灣海岸地區的高解析度的海岸水位推算模式，以提供詳細的海岸水位資料於溢淹計算模擬，並為日後颱風災害防治與規劃提供一適當工具。

關鍵詞：暴潮、波揚

Abstract

In order to predict the water level around the Taiwan coast for the early warning flooding prediction when the typhoon struck, the observation data of the tidal stations were analyzed to separate the tidal and storm surge level components by using harmonic method. These data could be used to validate the rationality of the storm surge prediction model and also inquire by the database website. The Taiwan ocean prediction system of Taiwan Ocean Research Institute (TORI) was applied to simulate the synthetic water level composed of tide and storm surge. Several atmospheric forecast models with different spatial and temporal resolutions were used as the sea surface boundary

conditions to evaluate the impact of the prediction of storm surge. According to the validation of the Typhoon Soulik case in 2013, the difference between predicted and observed water levels was less than 0.3 meters at Hsinchu, Suao, Hualien and Matsu tidal stations by using the data of the high-resolution atmospheric model provided by the Taiwan Typhoon and Flood Research Institute (TTFRI). It shows that the prediction of storm surge could have good agreements around the Taiwan coast. However, the water level is significantly underestimated at Longdong tidal station, which the typhoon center passed nearby. In this study, a high-resolution SWAN wave model was applied to simulate the rapid water level raising due to the wave set-up. The results show that the estimation of the synthetic water level with the wave set-up induced by the huge wave height should be considered. The operational process of the storm surge prediction was also investigated to develop the high-resolution water level prediction model at the coastal area of Taiwan during the typhoon struck period. The reasonable water level prediction could help the flood simulation to improve the precision and provide typhoon disaster prevention and planning an appropriate tool.

Keywords : storm surge, wave set-up.

一、前言

根據中央氣象局的颱風統計資料顯示，台灣每年平均受到3至4個颱風所侵襲，颱風過境時所夾帶的強大風勢往往在海面上形成碩大的風浪，而這些海浪不僅直接對濱海地區的港灣建設與海岸工程造成極大的損害，也影響到附近居民的生命財產安全。近年來海岸、港灣結構物遭受颱風侵襲嚴重破壞之事件屢屢發生，沿岸常有海水倒灌而造成海岸災害，暴風浪造成海岸嚴重侵蝕。這些災害發生之原因乃在於對颱風波浪之行進演化不能確切地預報，過去依賴傳統之颱風波浪統計模式迴歸深海波浪條件，再以線性理論計算海岸地區之波場分布狀況作為設計條件，忽略波浪行進之能量消散與轉換之重要物理機制的影響，因此計算結果較難符合實際海域之波浪分布。此外，颱風之低氣壓及強風導致的水位上升，即暴潮現象，其會增加颱風對海岸結構物的破壞力，因此如何適切的模擬近岸暴潮，進而防患颱風暴潮之侵害，乃為防護海岸地區重要課題之一。

另一方面，隨著電腦計算能力的突飛猛進，許多學者相繼投入以數值模式方法來模擬各種海象演化之物理模型。不論波浪或暴潮從生成到傳遞至近岸，其演化過程相當複雜，主導外力也因演化地點不同也有所改變。而海岸淺水地區異常水位發生因素包括颱風暴潮、天文潮及海岸淺水地區碎波引致的波揚等三項，天文潮具有可預測之週期性，透過水動力方程式與精細格網化近岸水深資料，配合深海已知潮汐波動邊界條件所架構之數值模式即可合理的模擬海岸之潮位變化。而颱風暴潮發生在颱風侵襲之時，對於暴潮的推算一般可歸納為風剪應力與颱風低壓所產生綜合水位抬升，故給定合理颱風氣壓與風場，亦可利用水動力數值模式進行颱風暴潮模擬。在近岸海域，波浪傳遞至近岸水深較淺處受水深影響而產生碎波現象，波浪能量受碎波快速消滅而形成波浪能量梯度的變化，產生所謂輻射應力(radiation stress)變化，會導致平均水位發生下降與上升現象。在碎波帶外，從外海至碎波點的平均水位低於靜水位，並逐漸下降，此現象稱為平均水位下降或波降(wave set-down)；在碎波帶內，從碎波點起平均水位隨著水深的遞減而逐漸升高，此現象稱為平均水位上升或波揚(wave set-up)。由於颱風所引致暴風浪較平時風浪為大，則波浪所引致之近岸平均水位將隨著外海波高大幅增高，故精算近岸水位變化是否造成海岸災害時應不可忽略。

本研究配合「洪氾即時預警平台建置與應用」計畫之目標進行，收集台灣環島近岸水位監測資料，利用調和分析等方式，分析台灣環島天文潮位與暴潮偏差，作為環島暴潮預測模式驗證的依據，並建置暴潮資料展示網頁進行加值應用。而暴潮預測模式發展方面，利用海洋中心海象預測平台架構配合颱風中心高解析度大氣預測模式，建構暴潮預測數值模式，透過完善的物理機制與適當的邊界條件，合理的建構預測颱風暴潮的作業化數值模式，據此建立適合於台灣海岸地區的高解析度的海岸水位推算模式，以提供詳細的海岸水位資料於溢淹計算模擬，並為日後颱風災害防治與規劃提供一適當工具。

二、暴潮資料分析

2.1 環島天文潮位分析

在潮位站實測資料的分析方面，延續去年度建立的暴潮偏差分析技術，利用1946至

2013年中央氣象局所保存的環台潮位資料，利用調和分析法來分離天文潮位與暴潮偏差水位，同時建立各潮位測站之分潮調和常數，作為預測天文潮位的依據。由於天文潮呈現週期性變化，可藉由調和分析來解析各分潮成份，進而達到預測潮位。而調和分析係以牛頓所提出的平衡潮(equilibrium tide)理論為基礎，假設某地任一時間的潮汐水位 $Y(t)$ 為各分潮潮高 $y_i(t)$ 之總合，其數學式可表示如下：

$$Y(t) = H_0 + \sum_{i=1}^M y_i(t) = H_0 + \sum_{i=1}^M f_i H_i \cos(\omega_i t + (V_0 + u)_i - k_i) \quad (1)$$

其中 Y 為潮汐高度， H_0 為觀測資料期間之平均海水面， y_i 為各分潮潮高， t 為時間， M 為分潮個數， ω_i 為各分潮角速度， $(V_0 + u)_i$ 為各分潮平衡引數(equilibrium argument)， k_i 為各分潮相位角(phase angle)。在計算過程中，假設平均海水面為大地水準面，故 H_0 設為0，利用三角函數關係可將式(1)轉換如下：

$$Y(t) = a_0 + \sum_{i=1}^M (a_i \cos \omega_i t - b_i \sin \omega_i t) \quad (2)$$

式中 a_i 、 b_i 為各分潮之調和分量。利用前述之數學式，將觀測水位資料代入運算，利用最小二乘法即可解算各分潮之調和常數，再利用各分潮之調和常數，藉由式(1)得到潮汐高度 $Y(t)$ ，在此調和分析共使用69個分潮來進行計算。但由於觀測失敗或資料品質不佳之潮位資料可能會造成調和分析的誤差，故經資料整理與品質檢查後去除各測站不合理與缺漏較多的年份資料，整理出1991至2013年台灣本島與離島共31測站之潮位資料。以品質校驗過後之潮位資料進行調和分析，配合颱風侵襲事件的時間，利用實測潮位扣除調和分析之天文潮位則可得到各颱風事件之暴潮偏差水位值，並依此結果進行暴潮資料庫建置與預測模式之校驗。而以龍洞測站2013年的分析為例，表1僅列出分潮振幅前10大的分潮調和常數表，則利用各分潮調和常數與潮汐關係式即可推算天文潮汐的時間序列。如圖1所示為台灣東北海岸龍洞潮位測站2001~2013年與西北海岸竹圍潮位測站1993~2007年之觀測潮位、調和分析天文潮位及暴潮偏差水位值的分析結果，配合颱風事件的發生時間即可獲得各颱風於測站所引發的暴潮偏差水位值。

2.2 暴潮資料庫與網頁展示

彙整已品質檢查之潮位資料、調和分析天文潮位、暴潮偏差水位值資料，以及模式模擬所得之暴潮資訊，來建置環台暴潮資訊之展示平台，本項工作透過MySQL、JavaScript、Microsoft .NET Framework及google地圖圖資等開發暴潮資料庫與網頁展示系統，使用者可以透過潮位測站名稱或地圖位置的索引查詢各測站實測潮位、調和分析潮位及暴潮偏差值，並可指定時間日期繪製時序列圖，或進行資料統計分析與資料匯出(須密碼)等功能。如圖2中分別為測站、地圖查詢介面與觀測潮位、調和分析天文潮位及暴潮偏差水位於指定時間內之繪製展示結果。

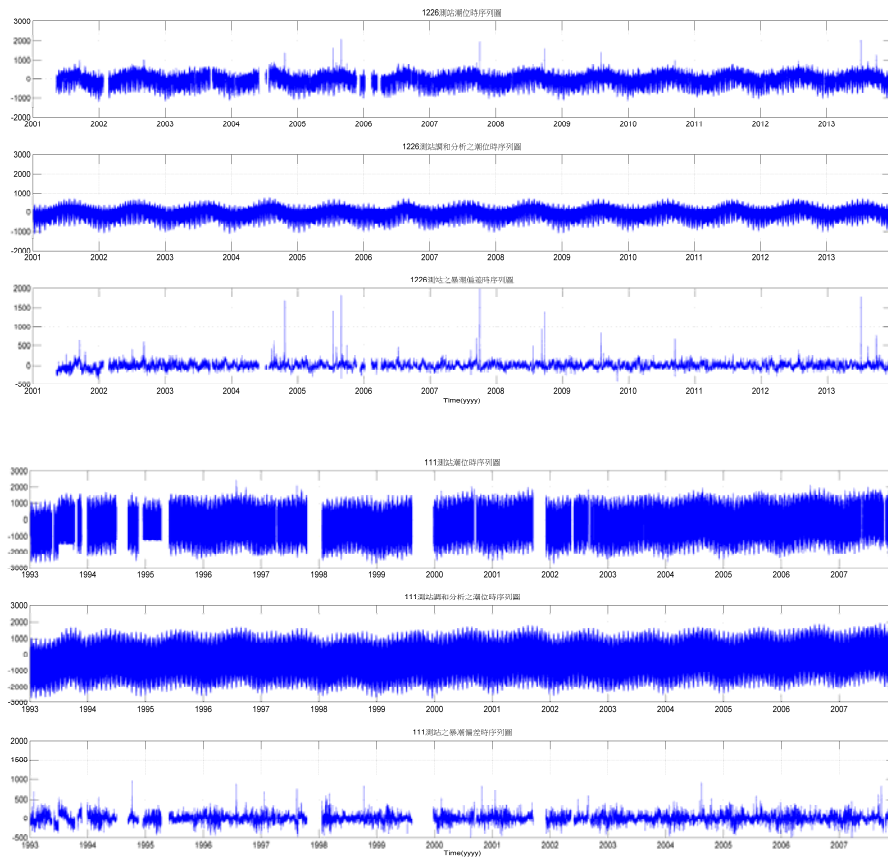


圖 1、龍洞 (2001~2013 年)與竹圍(1993~2007 年)潮位站潮位觀測、調和分析天文潮及暴潮偏差分析結果

表 1、龍洞測站 2013 年調和常數(分潮振幅前 10 大)

分潮	頻率(Hz)	振幅(mm)	相位角 (degree)
M2	0.080511	230.1299	340.86
K1	0.041781	197.2851	102.13
O1	0.038731	163.5168	76.94
SA	0.000114	153.7651	196.88
S2	0.083333	106.6639	348.29
P1	0.041553	62.4968	100.05
N2	0.078999	56.9961	333.12
SSA	0.000228	35.3374	7.66
Q1	0.037219	34.0664	58.3
K2	0.083562	29.3955	335.77

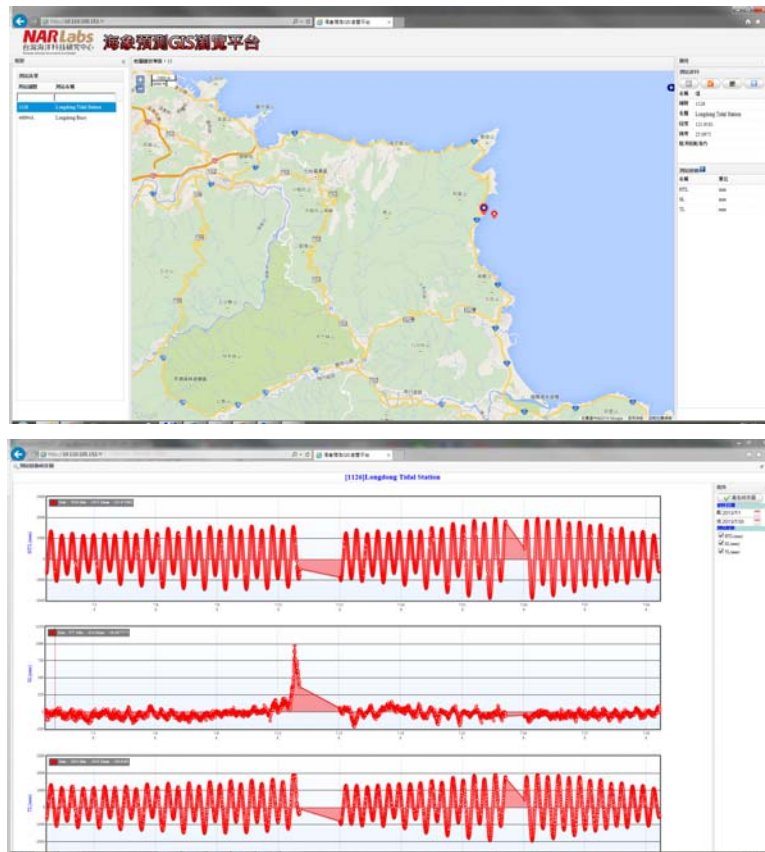


圖 2、天文潮位與暴潮偏差資料展示網頁

三、暴潮模擬與預測

3.1 環島暴潮預測模式發展

為了提供颱風來襲時台灣環島海岸水位，完成洪氾即時預警平台建置與應用發展之目標，利用國研院海洋中心海象預測平台(<http://tops.tori.org.tw>)(廖等人，2013)之數值模式架構為基礎，發展台灣環島暴潮與波浪預測模式。而模式的相關設定與說明如下：

3.1.1 網格設定

由於颱風除了暴潮之外，亦會引起巨浪，故海岸暴潮水位預測中包含波浪與海流模式，在格網設定方面，為了取得計算速度與格網解析度間的平衡，皆採用巢狀格網進行台灣附近海域高解析度海象模擬，在波浪與海流模式皆使用西北太平洋(N2)與台灣海域(T3)格網，如圖3中分別為西北太平洋與台灣海域之計算領域地形水深圖。為了計算近岸波揚故需要一個更高解析度的計算範圍，在本研究中分別使用格網解析度50公尺與100公尺之台灣東北海域(TNE)高解析度格網來進行測試，如圖4中所示。而其計算格網間距若小於水深資料庫格網間距則採用線性內插方式補足，而各模式格網設定如表2中所示。

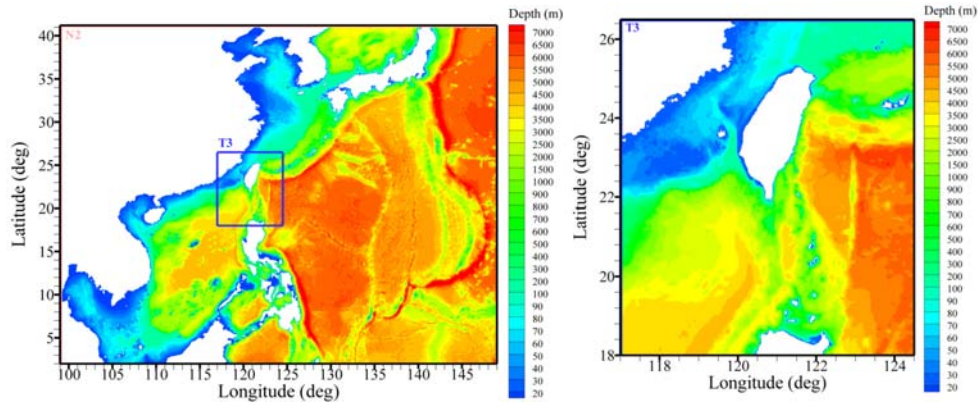


圖 3、西北太平洋(N2)、台灣海域(T3)之計算範圍與地形水深圖

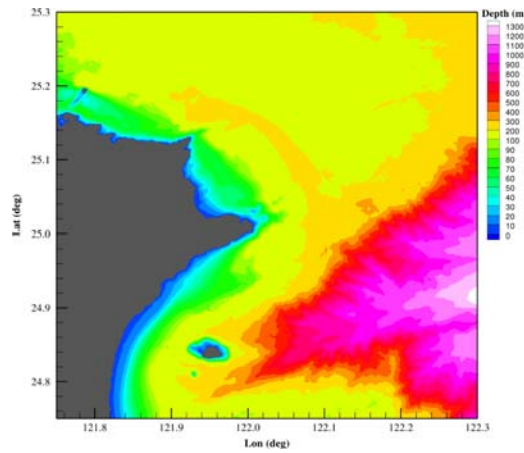


圖 4、台灣東北海域高解析度波浪(TNE)之計算範圍與地形水深圖

表 2、巢狀格網之範圍與計算條件

模式	模式範圍	解析度	地形水深
N2	99E~149E 2N~41.2N	10000 公尺	ETOPO1
T3	117E~124.5E 18N~26.5N	2500 公尺	海洋學門海洋資料庫 200m
TNE	121.7E~122.3E 24.7N~25.3N	100 公尺 50 公尺	海洋學門海洋資料庫 200m

3.1.2 波浪數值模式

在風浪模擬方面，首先利用適用於大範圍海域計算的NWW III (NOAA WaveWatch III)風浪模式進行，NWW系列的風浪模式是由Tolman所發展的，首先於荷蘭Delft大學時發展WaveWatch I (Tolman, 1989)，隨後於1992年發展WaveWatch II，目前已發展至WaveWatch III (最新版本為3.14版)，因其為美國NOAA/NWS/NCEP的主要作業化風浪預報模式，故又稱NWW III，中央氣象局亦使用NWW III作為每日波浪預測模式。而NWW III模式使用波浪作用力平衡方程式為控制方程式，適用於有海流狀況下進行波流交會現象的模擬，對於未來考慮波流交會影響的計算上有所助益，在大範圍波浪模擬時通常使

用波浪作用力平衡方程式之球面座標型式表示：

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{\cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \dot{\phi} N \cos \theta + \frac{\partial}{\partial \lambda} \dot{\lambda} N + \frac{\partial}{\partial k} \dot{k} N + \frac{\partial}{\partial \theta} \dot{\theta} N = \frac{S}{\sigma} \quad (3)$$

式中 N 為波浪作用力譜， k 與 θ 為波浪波數與角度空間， ϕ 與 λ 為緯度與經度， $\dot{\phi}$ 與 $\dot{\lambda}$ 為波浪於緯度與經度方向之傳遞速度， R 為地球半徑。而 S 為源函數能量譜項，主要包含三個部份，分別是風浪成長項 S_m 與白沫效應波能量消散項 S_{ds} ，及非線性波波交互作用項 S_{nl} ；另外，在淺海地區則必須額外考慮底床摩擦效應 S_{bot} 。

而台灣海域與近岸風浪模式則選擇SWAN (Simulating WAVes Nearshore) (Booij等人, 1996)近岸風浪模式，SWAN模式所用之控制方程式為求解二維的波浪作用力平衡方程式(action balance equation)，如下式

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} C_x N + \frac{\partial}{\partial y} C_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S_{total}}{\sigma} \quad (4)$$

上式左側之第一項為運動波譜密度函數之時變項，第二與第三項為傳導項，第四與第五項分別表示由於地形與洋流所造成的波浪頻率位移與折射效應， σ 與 θ 分別表示成份波之頻率與角度， S_{total} 表示波浪傳遞時可能發生之波浪能量成長、消散及非線性交互作用等物理現象之源函數。在波浪成長與消散之源函數項中，SWAN模式提供了許多選擇，包括風浪線性成長項、風浪指數成長項、白沫消散項、四個波波非線性交互作用項、底床摩擦項、三個波波交互作用項、碎波消耗項等。

3.1.3 海流數值模式

而海流數值模式則使用美國普林斯頓海洋模式(Princeton Ocean Model, POM)，該模式早期是由於Blumberg and Mellor (1983)在大西洋南方海灣作的一連串預測的數值模擬，直到1987年Blumberg和Mellor再整理模式之後命名為Princeton Ocean Model，簡稱POM模式。POM模式能描述三維的海洋變化物理現象，控制方程式包含採用垂直 σ 座標之連續方程式、動量方程式、鹽度與溫度守恆方程式，模式中並包含Mellor and Yamada (1982)紊流閉合模式(turbulence closure model)。在數值技巧方面，水平網格可利用正交曲線網格，提高解析度並增加計算效率。而時間積分採用分割技巧，利用水深積分將三維方程式轉換成二維模式，將模式分成二維模式來模擬快速變動的慣性重力波，而三維模式來模擬緩慢變化的內部波動或熱動力變化等，可以有效率的解決三維模式模擬速度較慢的缺陷，關於模式詳細內容可參考Mellor (2003)。

3.1.4 大氣模式與邊界資料

在海表面邊界氣象資料方面，為了計算台灣海域暴潮現象，海象預測模式利用了中央氣象局(CWB-WRF)模式風場資料，其具有45、15及5公里解析度之三層巢狀資料，該資料為中央氣象局WRF (Weather Research and Forecasting)作業模式運算後之結果，每日資料釋出00Z、06Z、12Z及18Z四次，每次含有未來72小時預測，時間解析度為每1小時一筆，每日由自動化命令腳本透過網路傳送資料。由於其格式為GRIB，故資料獲取後需要解碼後再進行海象模式的邊界條件設定。為了測試大氣預測模式對於海象模式在計算暴潮與海岸水位的影響，亦使用國研院颱洪中心所提供的高解析度大氣模式

(TTFRI-WRF)資料來進行評估與比較。

由於海流模式中包含了一個提供大洋邊界條件的洋流模式，為提供此模式所需的氣象邊界條件，故蒐集了NCEP/NCAR再分析場資料(NCEP/NCAR Reanalysis 1) (Kalnay等人, 1996)，其資料為模式運算後資料同化之分析場結果，資料時間範圍自1948年至今，時間解析度為每6小時一筆，空間格網為T62 Guassian Grid，資料範圍涵蓋全球。而海流數值模式之表面邊界條件包含10米高海面風場(uwnd、vwnd)、海平面大氣壓力(slp)、2米高氣溫(air)、2米高比濕(shum)、表面長波輻射通量(nlwrs)、表面短波輻射通量(nswrs)、表面潛熱通量(lhtfl)、表面顯熱通量(shtfl)、降雨率(prate)等變數，利用海面通量計算方式，進行海面風剪應力、溫度與鹽度通量等表面邊界條件之計算，而模式鹽度與溫度起始資料以WOA09海洋資料庫的月平均氣候值來計算。

考慮天文潮汐為近岸海域之重要影響因素，故利用邊界條件處理方式來模擬台灣海域洋流與潮流同時存在之流況。其利用台灣海域洋流模式(T3模式)為基礎，採用OTPS (OSU Tidal Prediction Software, <http://volkov.oce.orst.edu/tides/global.html>)來建立天文潮位邊界，配合西北太平洋海域模式(N2模式)所輸出之海流流速與水位，將潮汐與洋流模式之水位兩者相加，並考慮遠域之潮汐流速影響分量很小，以洋流模式結果做為流速主要成分，提供台灣海域模式(T3)所需的水位與流速邊界條件進行模擬計算。

3.1.5 暴潮模式驗證

為了解颱風侵襲台灣時於海岸所產生的暴潮水位，故利用2013年強烈颱風蘇力侵襲台灣北部之案例來驗證討論模式設定之合理性，圖5為蘇力颱風路徑圖，13日3時於新北市與宜蘭縣交界處登陸，8時左右於新竹附近出海，16時前後由福建進入大陸。在波浪與海流模式起始值方面，利用海洋中心海象預測平台於12日0600UTC時，颱風靠近台灣本島前之輸出值作為本案例波浪與暴潮水位模擬的起始值，再分別利用NCEP、CWB(中央氣象局)及TTFRI(國研院颱風中心)所提供的大氣模式資料作為海面邊界條件進行模擬，各大氣資料在時間解析度方面分別6、6及1小時，在空間解析度方面NCEP再分析資料為200公里，CWB與TTFRI資料在台灣附近為5公里。

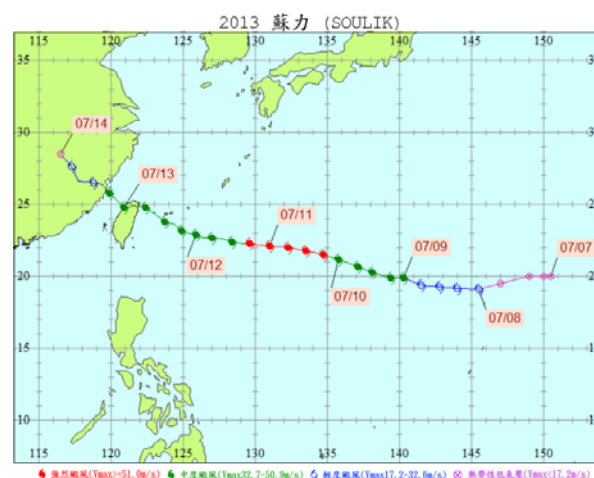


圖 5、2013 年蘇力(SOULIK)颱風路徑圖(中央氣象局)

圖6為不同大氣模式資料帶入海流模式後於台灣東北部龍洞潮位測站所引致之暴潮水位與實測值比較圖，由於NCEP在資料水平解析度較粗，並無法顯現蘇力颱風經過台

灣東北部海域時所引致的暴潮水位，而CWB與TTFRI的大氣模式資料輸入海流模式後於7/12 18:00至7/13 12:00之間可明顯反應颱風經過時所引致的暴潮水位，表示大氣模式資料空間解析度須能解析颱風環流與氣壓結構才能有效於海流模式中反應颱風暴潮現象。但圖中約7/13 00:00至06:00期間，實測值明顯大於模擬值，此時應是颱風中心經過台灣東北部海域，除去海流、大氣模式及測量的不準確性，應有其他因素造成水位突然升高現象。

圖7分別為使用CWB與TTFRI大氣模式資料作為邊界條件，利用環台暴潮模式於蘇澳、花蓮、新竹及馬祖海域模擬結果與觀測水位之比較圖。觀察蘇澳測站水位變化比較結果，利用時間解析度較高的TTFRI大氣模式作為邊界條件，於13日8時所模擬出的最大天文潮與暴潮合成水位值較為吻合實測值，表示所使用的海面邊界資料之時間解析度會影響暴潮計算結果，時間解析度越高對於最大水位值的模擬越準確。除了蘇澳測站之外，蘇力颱風中心距離其餘測站較遠，故暴潮水位抬升現象並不明顯，仍是以天文潮位主導水位變化趨勢。以圖中結果看來，新竹、蘇澳、花蓮及馬祖測站的暴潮與天文潮合成水位模擬值相較於觀測值的誤差皆小於0.3公尺以下，顯示模式可合理的推算海岸地區天文潮與暴潮合成水位，其水位變化資料對於後續洪水溢淹推算應有所助益。

圖8為2100UTC 12/JUL/2013由蘇力颱風在台灣海域造成海面風速、波高、表面流速及水位分布圖，圖中時刻為蘇力颱風中心即將登陸宜蘭與新北市交界處，在台灣東北角海岸可見海面10公尺高風速接近每秒50公尺，波高可達10公尺，而海面流速受颱風擾動下也呈現劇烈變化，在局部近岸區域甚至流速超過每秒1.5公尺，颱風中心附近之台灣東北海域水位高度也明顯高於周圍海域，其天文潮與暴潮合成水位可達1公尺以上。由以上結果顯示，利用海洋中心海象預測平台可以合理的模擬颱風侵襲時台灣海域的海象變化，包括波高、波浪週期、天文潮、洋流與暴潮綜合效應下的三維海洋流速、水位及溫度變化等，而海面氣象參數亦可由大氣模式資料中獲得，其海象預測平台所提供資訊應可在颱風災害防救治上有所助益。

以上說明了環台海岸水位與波浪模擬的結果合理性，由於圖6中明顯可看出在7月13日0時至8時之間潮位測站出現了水位急速上升的明顯現象，對照同一時間龍洞遊艇港外海，離岸約10公里處水深約30公尺之龍洞觀測浮標上所量測到的波高亦出現急速增高的趨勢，根據水位與波高上升的趨勢，假設為外海波浪受地形影響碎波後所產生的近岸波揚水位。由於近岸波揚現象需要更高格網解析度才可解析，故使用圖4之台灣東北海域格網做為台灣海域格網之巢狀子格網進行模擬。

圖9為使用CWB-WRF大氣模式資料作為海面邊界條件進行水位與波浪模擬於龍洞海域之結果，其水位截取處為龍洞潮位測站，波浪為龍洞浮標處，若使用台灣東北海域近岸波浪SWAN模式(格網解析度為100公尺)計算波揚值，圖中綠色實線則為波揚、暴潮及天文潮位之合成疊加水位，其明顯於7/12 18:00至7/13 06:00期間產生了由於近岸波揚現象所增加的水位高，由於蘇力颱風於龍洞海域產生了超過10公尺的波高，由於近岸碎波現象所產生的波揚現象亦相當明顯，顯示巨浪所產生的波揚水位在外海波高較大時應加以考慮其對於近岸水位抬升的影響。圖中藍色空心圓點為解析度50公尺之台灣東北海域近岸波浪SWAN模式所計算之含有波揚水位之合成水位變化時序列，其合成水位於外

海波高發生極大值時明顯高於100公尺解析度，表示波揚現象的模擬亦需要極高解析度的格網，或許在作業化預測資源需求上必須考量與克服。

圖10為使用TTFRI-WRF大氣模式資料進行水位與波浪模擬於龍洞測站之模擬值，由圖中模擬結果可見，其波高最大值出現時間為7/13 12:00，相較於使用CWB-WRF作為邊界條件模擬下，水位極大值出現時間延遲3個小時，而由於龍洞浮標於7/13 00:00左右開始缺少觀測值，故無法更進一步比較波高變化趨勢。但由圖中波高與合成水位出現極大值時間吻合情況下，在50公尺解析度模擬之波揚水位與暴潮、天文潮合成水位之極大值可達平均水位1.5公尺以上，其與龍洞潮位測站於蘇力颱風侵襲下出現最高水位約為1.5公尺以上具有一致性，雖然圖中合成水位極大值出現的時間有所延遲，卻顯示若要模擬近岸波揚水位需要有高時空解析度的大氣資料外，波浪模式的格網解析度亦需要接近50公尺才可適切模擬此一現象。由模擬結果顯示不同大氣模式資料造成水位與波浪特性明顯有差距，在劇烈天氣下之海象推算模擬上，大氣模式資料準確度仍具有關鍵決定性。

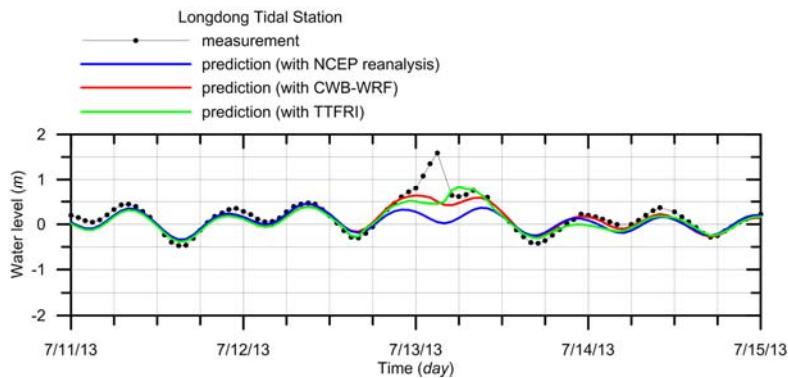


圖 6、不同大氣模式資料引致暴潮水位於龍洞測站之比較

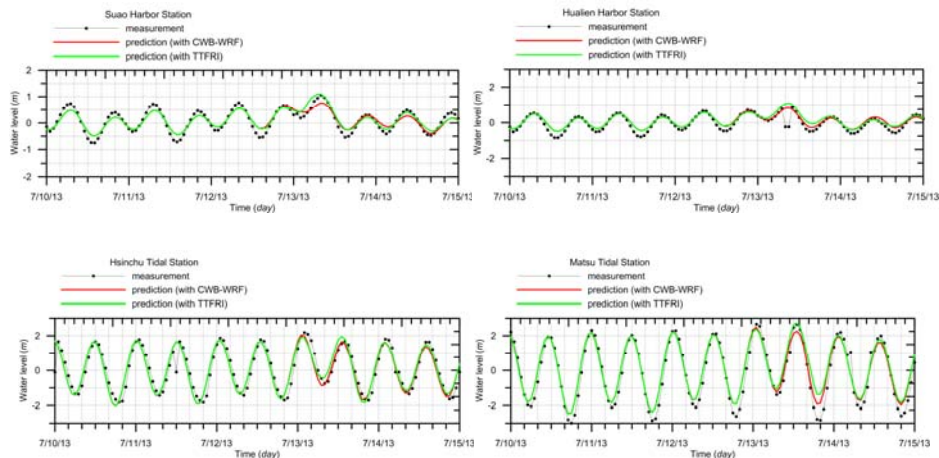


圖 7、蘇澳、花蓮、新竹及馬祖海域水位變化時序列

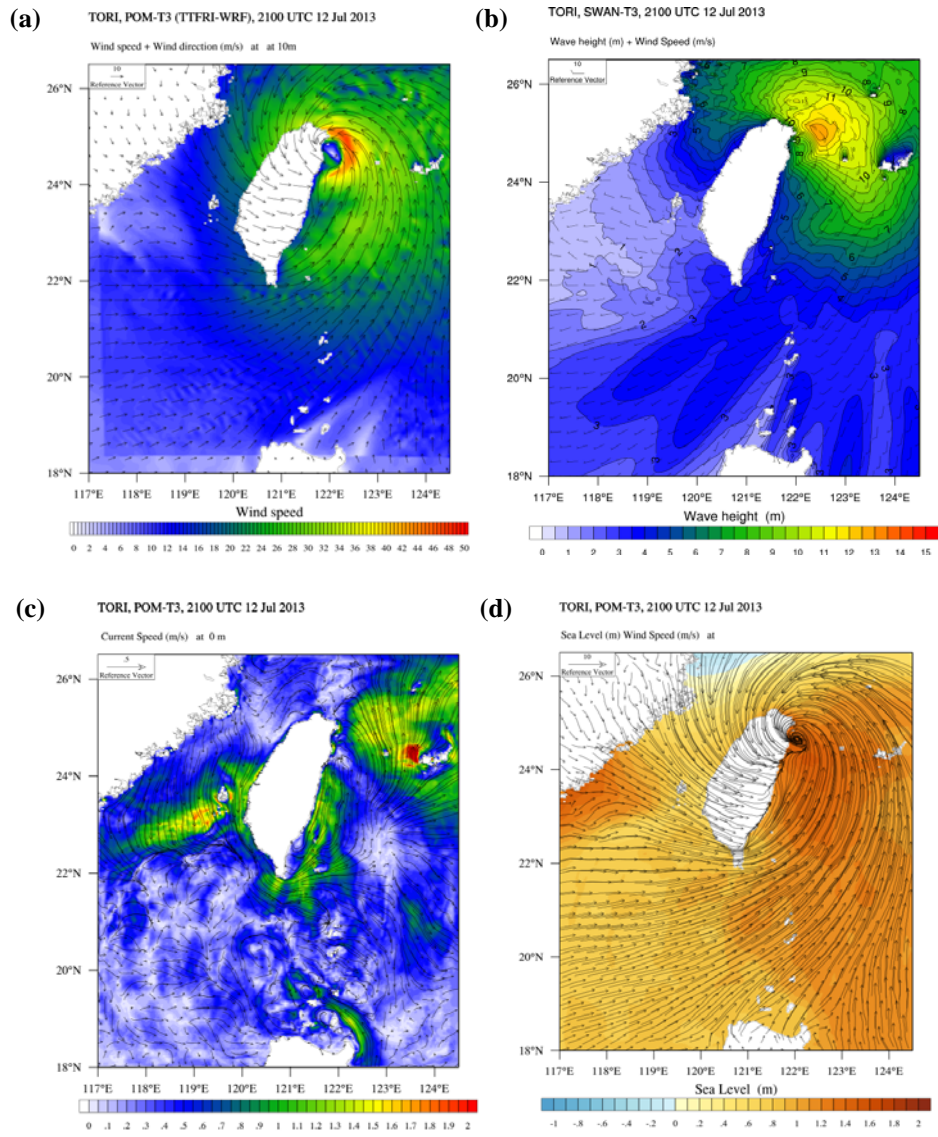


圖 8、2100UTC 12/JUL/2013 由蘇力颱風在台灣海域所引致之海象變化 (a)10 公尺高風速、(b)波高、(c)表面流速及(d)水位分布

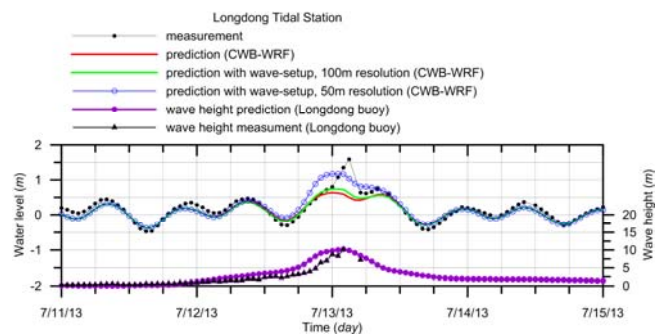


圖 9、龍洞海域水位與波高時序列圖(CWB-WRF)

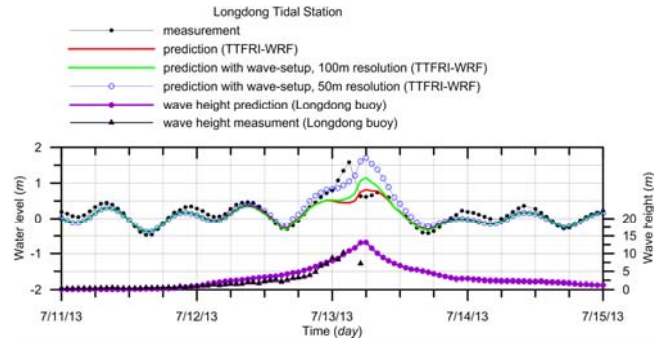


圖 10、龍洞海域水位與波高時序列圖(TTFRI-WRF)

暴潮預測模式利用國研院海洋中心海象預測平台之數值模式架構為基礎，進行颱風侵襲台灣海域時所引致的波浪、天文潮、暴潮及波揚水位模擬，利用實測潮位資料驗證後，可以合理的模擬環台暴潮與天文潮合成水位，且發現由颱風巨浪所引致的近岸波揚水位在近岸水位模擬估計中是不可忽略的因素。為了模擬近岸波揚水位分布變化，高解析度的大氣、波浪及海流模式都是需要考慮的，本計畫結果對於後續洪水溢淹推算的準確度提升應有所助益。

3.2 環島暴潮預測作業化建置

為了洪氾即時預警平台建置與應用發展，故進行暴潮預測作業化流程建置，以本研究所發展的暴潮預測模式為基礎，配合前置與後置處理程序的發展，將暴潮預測模擬程序進行作業化。透過網路傳遞颱風中心每日進行的WRF大氣模式系集預測，挑選其中一組成員，利用cdo軟體(<https://code.zmaw.de/projects/cdo>)對於wrfout之NetCDF格式進行解碼程序，再利用前置處理程式進行資料處理，內插大氣模式資料至暴潮模式中，作為模式之邊界條件。之後再透過海洋中心海象預測平台之架構，進行暴潮模式作業化預測，模擬天文潮與暴潮合成水位，輸出環島海岸水位高度，於颱風來襲時提供颱風中心洪氾預測模式合理的下游邊界水位，提高洪氾預測的精度與合理性，完成洪氾即時預警平台建置。

四、結論與建議

本研究利用調和分析方法建置環台暴潮偏差資料與展示網頁，其有助於後續暴潮統計分析與模式驗證。在預測模式發展方面，利用國研院海洋中心海象預測平台之數值模式架構為基礎，利用不同時空解析度之大氣模式資料作為海面邊界條件，進行2013年蘇力颱風侵襲台灣海域時所引致的波浪、天文潮、暴潮及波揚水位模擬，其結果顯示除了颱風中心經過外之區域，可以合理的模擬環台暴潮與天文潮合成水位。但在颱風中心經過之區域無法如同颱風中心經過外之區域合理模擬，如龍洞潮位測站於蘇力颱風侵襲下所產生的水位急速變化現象，由模擬結果顯示，颱風巨浪所引致的近岸波揚水位在近岸水位模擬估計中是不可忽略的因素。為了模擬近岸波揚水位分布變化，高解析度的大氣、波浪及海流模式都是需要考慮的，但現實作業上需耗費大量計算資源且不利作業化時效需求，對於颱風災害防救治上，若能事先評估海岸各地可能發生的波揚水位高度，其對於後續洪水溢淹推算的準確度提升應有所助益。

參考文獻

1. 廖建明、陳思樺、賴堅戊、詹森、龔國慶(2013)，「海象預測模擬之校驗」，第 35 屆海洋工程研討會論文集，高雄，第 155-160 頁。
2. Tolman, H. L. (1989) "The Numerical Model WAVEWATCH: A Third Generation Model for the Hindcasting of Wind Waves on Tides in Shelf Seas," Communication on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Delft University of Technology, Report No. 89-2.
3. Booij, N., Holthuijsen, L. H. and Ris, R.C. (1996) "The SWAN Wave Model for Shallow Water," Proceedings of 24th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Orlando, Vol. 1, 668-676.
4. Blumberg, A. F. and Mellor, G. L. (1983) "Diagnostic and prognostic numerical circulation studies of the South Atlantic Bight," J. Geophys. Res., 88, 4579-4592.
5. Mellor, G. L. and Yamada, T. (1982) "Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems," Rev. Geophys. Space Phys., Vol. 20, 851-875.
6. Mellor, G. L. (2003) "Users guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model," Program in Atmospheric and Oceanic Sciences, Princeton University, Princeton.
7. Kalnay et al. (1996) "The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project," Bull. Amer. Meteor. Soc., 77, 437-470.