

# 台灣海象數值模擬系統預測準確性評估

## Forecast evaluation of Taiwan Ocean Prediction System

廖建明<sup>1</sup> 陳思樺<sup>1</sup>

財團法人國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心<sup>1</sup>

### 摘要

海洋中心台灣海象數值模擬預測實驗由原本3日短期預測提升至7日之短中期預測，其短中期的預測對於海洋產業施工作業規劃、海洋汙染防治等課題更具實用參考價值。本研究利用環台海氣象浮標測站資料與數值模式模擬結果進行比較驗證，得知數值模式推算與實測資料具有合理的一致性，並透過統計指標來量化模式的準確度，相關的統計指標均隨預測時間增長變差，其相關驗證結果可對未來模擬預測改善與資料使用者之參考。

關鍵字：數值模擬、預測

## 一、前言

近年來海洋工程技術的發展迅速，所建造的海洋工程結構物規模越來越大，如能源國家型計畫之離岸風力發電機等結構物，必須倚賴合理的海象預測與分析資料，決定設計標準與施工流程。由於海洋結構物位於毫無掩蔽的海域，在所有海象資料中，波浪作用力之影響相對重要，合理的設計波浪推算，更是決定結構物安全的關鍵因素之一。除此之外，準確合理的海氣象預測，能有效的掌握海事工程計畫執行時程、資金及施工機具的有效運用。

台灣位於西北太平洋颱風行進路徑上，颱風不僅帶來龐大雨量，受颱風低氣壓與風勢的作用所形成暴潮巨浪，除使沿海與低窪地區居民與財產遭受重大損失外，更是嚴重影響海上結構物或港灣的安全，使海上作業或開發計畫遭受嚴重安全威脅。因此如何在颱風侵襲前，預先得知可能發生的海象變化，將能提早防範颱風對海事工程開發計畫的危害。雖然現場施測方式可以準確監測海象變化，但卻無法預測未來數天或數小時之海象變化趨勢。且近年來由於氣候變遷，颱風強度規模與路徑更為詭異多變，合理適當的極端海象預測推算，可以確保結構物設計安全與節省工程經費。提供颱風期間海象預測資訊，作為海上開發計畫之事先規劃與災害因應的決策參考依據，可減輕颱風極端海象情況所產生的損失。

而台灣位於東亞大陸棚架緣上，全年有強勁的黑潮由南而北流經東部海域，冬季則有中國沿岸流由北而南沿流經台灣海峽。而狹長的台灣海峽引致半日型潮波共振效應，在海峽的南北兩端開口，常年

有潮波的無潮點存在，導致海峽內潮流流速強勁。在洋流匯集與強勁潮流的雙重影響下，台灣海域流況極為複雜，對於海上結構物與施工的安全性將產生風險與不確定性。

21世紀以來，隨著超級電腦的運算速度不斷提升，數值天氣預測不斷改良有了爆發性的成長。而另一方面，行動裝置普及化後，資訊量及流通的速度也不斷增加，當然對於氣象預報的需求也不斷增長(黃椿喜, 2017)。因此，多重尺度的天氣預報逐漸發展應用，本研究擬提升海象模擬預測系統之預測時間長度，從原本的3日短期預測提高至7日之短中期預測，對於海洋產業施工作業規劃、海洋汙染防治等課題，短中期的預測更具實用參考價值，並透過統計指標來量化模式的準確度，將其相關結果提供給使用者參考。

## 二、系統架構

本研究利用國研院海洋中心海象預測平台(廖等人, 2015)之數值模式架構為基礎，發展台灣周遭海域海象預測模式。現使用國研院內現有之叢集電腦上進行模式之平行計算，透過MPI平行計算技術加速運算效能減少模擬作業的時間，每日00時和12時(UTC)進行預報模擬，每次提供未來168小時波浪及海流預報資訊。而模式的相關設定與說明如下：

### (一) 格網設定

在格網設定方面，為了提高解析度降低計算資源的需求，採用巢狀格網方式進行台灣海域高解析度海象模擬，採用西北太平洋(N2)和台灣海域(T3)格網進行逐層計算。如圖1分別為西北太平洋和台灣海域之計算領域地形水深圖，其計算格網間距小於水

深資料庫格網間距區域則採線性內插方式，而模式格網設定亦如表1中所示。

表 1 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	0.08 度	ETOPO1
T3	117E~124.5E 18N~26.5N	0.02 度	海洋資料庫 200m

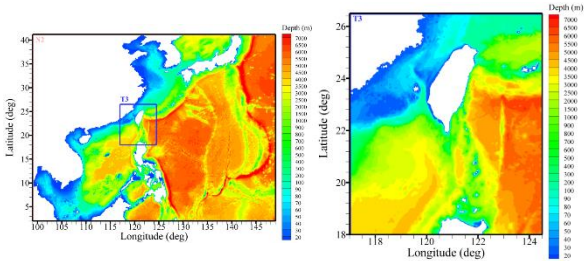


圖 1 西北太平洋(N2)和台灣海域(T3)之計算範圍與地形水深圖

## (二) 波浪數值模式

本研究使用WAVEWATCH III (WW III, v5.16) 多重網格風浪模式(WW3DG, 2016)，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：

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

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

在3.14版本後，納入了雙向多重巢狀網格(multi-grid)之計算。模式中可考慮任意數量及解析度的網格，每一層網格被賦予一個等級，較高等級對應較高的網格解析度。在不同網格的計算中，為了滿足數值穩定，所採用的時間步長都會有所差異，高解析度網格都必須採取較小的計算間距。在進行數值的交換，雙向嵌套利用較高解析度網格中的能量 $E_{h,i}$ 估計較低解析度網格中的波能 $E_{l,i}$ 可以表示如下：

$$E_{l,i} = \sum \omega_{i,j} E_{h,j} \quad (2)$$

其中 $i$ 和 $j$ 代表兩個不同網格中的網格計數器，其中 $\omega_{i,j}$ 是平均權重。

本研究改善西北太平洋模式與台灣海域模式之邊界條件，利用WW III波浪模式之雙向巢狀格網，在高、低解析度網格之間於相應的計算時間進行數值

的交換，包含將數值從較低解析度傳至高解析度網格及將數值從較高解析度傳至低解析度網格，亦可合理模擬波浪傳遞變化之情形。

## (二) 海流數值模式

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 $\sigma$ 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)。

## (三) 大氣模式與邊界資料

由於波浪模式對於大氣風場的時空解析度要求較高，更為精細的風場資料可以反應出更為精確地風浪模擬結果，本研究海象預測模擬所使用的為中央氣象局WRF-OP模式與美國NOAA之GFS風場資料，GFS風場資料目的在提供大範圍海域的邊界條件，而WRF-OP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。為了提供3至7日的短中長期預測資料，故收集了美國NCEP之全球預報系統(Global Forecast System)的氣象預測格網資料。該模式水平格網解析度約28公里，可提供每天4次、每次未來16天之全球大氣預測資料，該模式為一耦合模式，其中包括大氣模式，海洋模式，土地/土壤模型和海冰模式，相關資料可由NOMADS網站下載。

為了滿足歷史推算與預測的需求，在預測方面使用中央氣象局的WRF-OP、NOAA之GFS作業化資料，而歷史海象特性的推算方面的則使用NCEP/NCAR的海氣象資料庫來做為風浪與海流模式的海面邊界條件。而NCEP/NCAR再分析場資料(NCEP/NCAR Reanalysis 1)，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 Gaussian Grid，資料範圍涵蓋全球，資料網址為<http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.ncep.reanalysis.html>。其包含海面氣象資料有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WOD13 (Boyer等人, 2013)海洋資料庫的月平均氣候值。

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。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)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後，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。

### 三、結果討論

本研究模擬驗證分為兩部分，一為推算模式驗證，以了解模式特性；二為模式預測比對，為了解預測誤差分布。利用環台海氣象監測站之觀測結果來進行比對，測站位置如圖2所示，藍色代表波高和海流資料測站，而紅色代表只有波高資料測站。

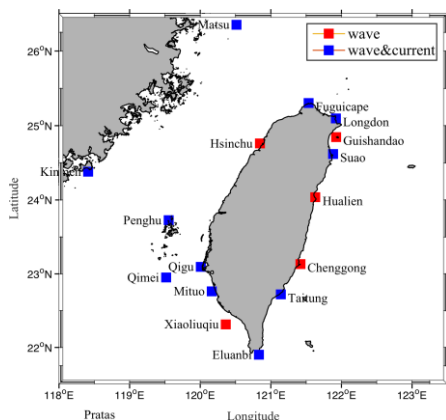


圖 2 浮標測站位置圖

#### (一) 推算模式驗證

推算模式是為了產生預測模擬的起始值，使每次預測模擬啟動之起始值可以接續相同時刻的模擬推算值，節省冷啟動所需的模擬時間，且海流模擬所需的穩定計算時間較長，亦不適合採用冷啟動方式。以下則利用2018年6月至12月模擬結果與中央氣象局/水利署環台海氣象監測站之觀測結果來進行推算模式驗證。

在波浪部分，在模擬期間有瑪莉亞(7月9日至7月11日，如圖3所示)和山竹(9月14日至9月15日，如圖4所示)颱風侵襲台灣海域，其瑪莉亞颱風於6月26日在關島東南方海面生成熱帶擾動，7月4日日本氣象廳

給予國際編號1808，而後向西北西移動，10日通過台灣北方海面，11日由福建進入大陸。如圖5中，7月初處為瑪莉亞颱風經過台灣北部海域於龍洞測站所產生的波高劇增現象，但最大波高之模擬值略小於觀測值。而山竹颱風在威克島南方海面生成後向西移動，如圖6中，於小琉球浮標測站之9月中旬波高劇增現象為山竹颱風經過台灣南部海域時所產生，但最大波高之模擬結果亦小於觀測值。整體而言，模式大致可模擬波浪變化情形，但在最大波高值之模擬仍有偏低的現象發生。由於波浪推算所使用的大氣分析場為6小時一筆資料，對於颱風劇烈天氣的快速變化，現有輸入波浪模式的風場空間解析度雖然足夠，但時間解析偏低，造成最大波高之模擬值略有偏低的現象產生。未來如能取得時間解析度較高的大氣分析場，應可對於波浪推算或歷史推算的模擬有所改善。

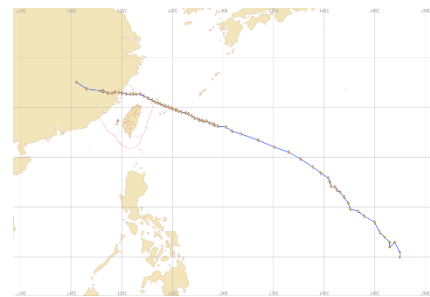


圖 3 瑪莉亞颱風路徑圖(中央氣象局颱風資料庫)

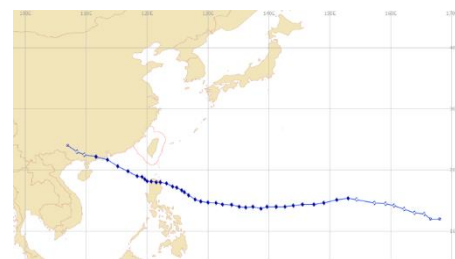


圖 4 山竹颱風路徑圖(中央氣象局颱風資料庫)

為了更明確量化觀測與模擬結果之關係，將17座海氣象浮標觀測值比對分析結果，利用相關係數(COR)和均方根誤差(RMSE)參數，藉以量化模式結果與觀測值之差異程度。圖7表示波高、週期及大氣風速之模擬誤差統計。波高比對統計結果顯示模擬結果與測站觀測大致呈現一致性，相關係數呈現良好相關，可達整體平均值0.87，均方根誤差約為0.5公尺，週期均方根誤差約為1秒左右。其中有些測站未達平均值，推測可能原因為台灣海域沿岸波浪特性有地域性之影響因而影響波候之大小。由於風浪模式的主要外力為風力，但目前尚未有台灣周遭海域更高解析度的風場資料，故無法反映高解析度地形與風力所產生的波浪變化特性，其有待後續其他大氣模擬計畫配合後再進行測試與驗證。



而海流部分，圖8為蘇澳浮標測站觀測值與台灣海域(T3)推算模擬結果之時序列比較圖，圖中藍色為觀測資料、紅色為模擬結果，圖中各別依序表示為水位、東西速度分量、南北速度分量、流速、流向、水溫、風速及風向之比較結果。由時序列模擬結果來看，模式在南北速度分量較東西速度分量模擬佳。

圖9為12處海流驗證統計參數圖，圖中顯示東西速度分量差異較大，南北速度分量較為一致。由於台灣西部近海浮標位於台灣海峽內，太平洋潮波自台灣海峽南北兩端湧入海峽內，交匯於中台灣外海一帶，導致海峽內主要海流為南北向流動；而台灣東部沿岸經由邱等人(2000)實際量測所得，花蓮台11線近岸海域地區潮波之流向大約是以豐濱地區為分界點，漲潮時豐濱以北之流向為由南向北，豐濱以南則是由北向南；反之，退潮時豐濱以北之流向為由北向南，豐濱以南則是由南向北，表示東部沿岸主要也以南北流向為主。模式在主要海流南北速度分量亦呈現較佳的模擬準確性，均方根誤差較為一致，而東西速度分量均方根誤差各測站差異較大，推測可能受到潮汐影響在南北海流轉換方向時刻準確性稍差。其中，龍洞、澎湖、鵝鑾鼻、富貴角、台東等浮標在統計參數上表現較差，推測模式之地形水深解析度無法合理呈現近岸海域之變化，或模式參數在近岸地區仍需要調整。此外，觀察均方根誤差與相關係數兩者關係，也發現如富貴角測站在海流優勢方向東西向之相關係數可達0.72，但均方根誤差也達0.64公尺每秒，顯示流速模擬趨勢應是合理的，但流速大小尺度仍須要調整。

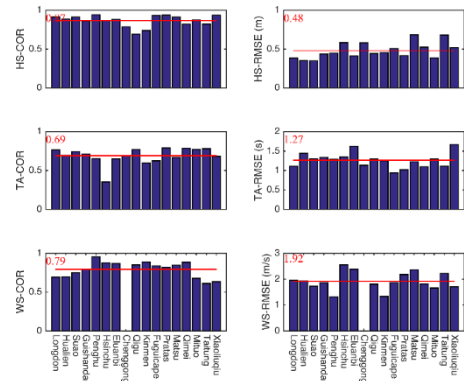


圖 7 台灣海域 17 處測站波浪推算統計圖

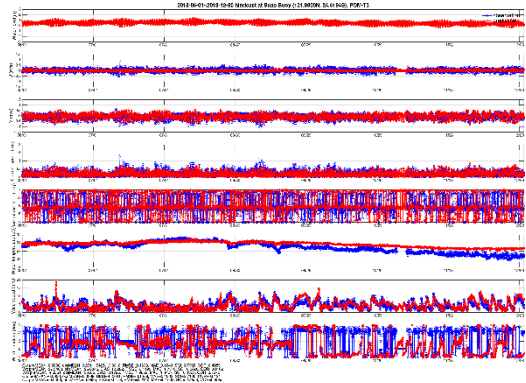


圖 8 蘇澳浮標海流推算與觀測時序列比較圖

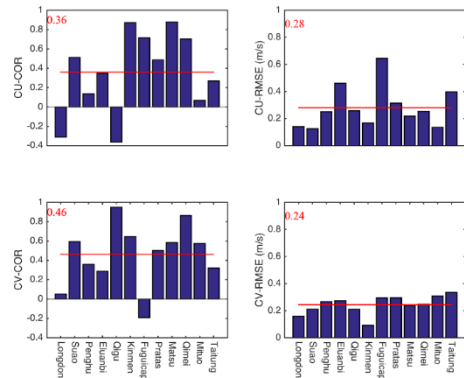


圖 9 台灣海域 12 處測站海流推算統計圖

(二) 預測模式驗證

海象模擬預測平台每日00Z與12Z執行台灣海域預測模式，預測未來7天(168小時)之海象變化。以2019年1月至2月共兩個月時間，將模式預報結果與台灣近岸海域周遭之海氣象觀測浮標之觀測資料進行比對，並分為七天進行比對，擷取每次預報各別時段如第一天(0~24小時)、第二天(25~48小時)、第三天(49~72小時)、第四天(73~96小時)、第五天(97~120小時)、第六天(121~144小時)、第七天(145~168小時)，以瞭解不同預測時間長度之誤差結果，其中1月初與2月初無資料產出。

圖10為蘇澳浮標測站觀測值與台灣海域(T3)波浪預測結果之時序列比較圖，圖中黑色為觀測資料，其他為預測資料分別是綠色為第1天、粉紅色為第2

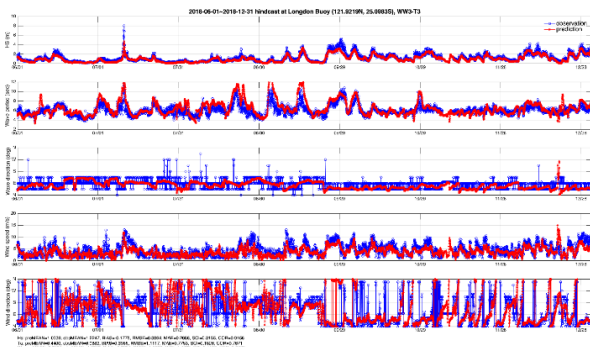


圖 5 龍洞浮標波浪推算與觀測時序列比較圖

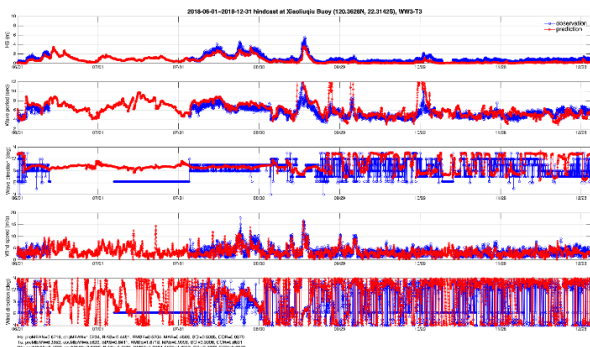


圖 6 小琉球浮標波浪推算與觀測時序列比較圖

天、藍色為第3天、青色為第4天、黃色為第5天、紅色為第6天、白色為第7天之模擬結果。圖中各別依序表示為波高、週期、波向、風速及風向之比較結果，結果顯示預測結果與黑色實線之觀測結果並無明顯的偏差現象，表示預測結果並無明顯偏離實測值，而在波峰預測會有略為高估之現象。

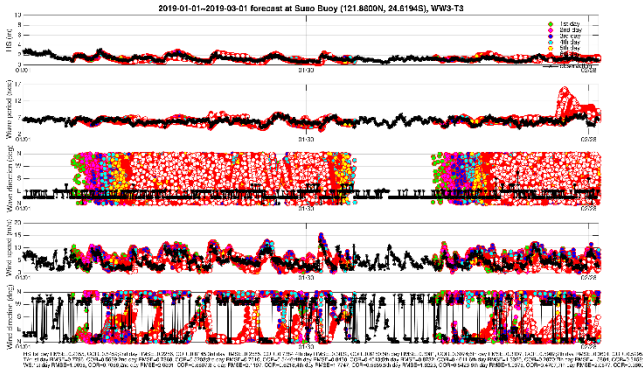


圖 10 蘇澳浮標波浪預測與觀測時序列比較圖

表 2 台灣海域 17 處測站波浪預測平均統計表

COR							
	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
HS	0.75	0.75	0.72	0.67	0.63	0.60	0.55
TA	0.54	0.55	0.52	0.47	0.44	0.38	0.40
WS	0.74	0.71	0.68	0.64	0.62	0.56	0.48
RMSE							
	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
HS(m)	0.35	0.32	0.34	0.38	0.40	0.42	0.44
TA(s)	0.64	0.65	0.67	0.72	0.72	0.88	1.04
WS(m/s)	1.82	2.07	2.18	1.95	1.95	2.05	2.23

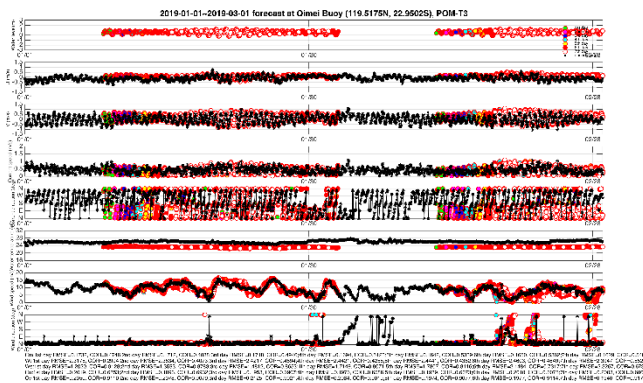


圖 11 七美浮標海流預測與觀測時序列比較圖

表 3 台灣海域 12 處測站海流預測平均統計表

COR							
	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
CU	0.35	0.34	0.34	0.34	0.34	0.33	0.31
CV	0.44	0.42	0.41	0.42	0.41	0.41	0.41
RMSE							
	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
CU(m/s)	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
CV(m/s)	0.20	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.20

表2為平均各浮標第1天至第7天之波高、週期及風速之模擬誤差統計，結果顯示波高相關係數於第4天開始明顯下降趨勢，由於1~3日的短期預報採用中央氣象局大氣預測場(WRF)，具有台灣周遭5公里解析度風場資料，可提供較高解析度之地方資訊；而3~7日的短中長期預報採用美國國家氣象局國家環境預測中心(NCEP)開發的全球預測系統(GFS)，對應的是全球預報系統。表中顯示第1天的相關係數最高，波高平均為0.75、週期平均為0.54、風速平均為0.74，接續依模擬時間長度增加遞減，第7天波高平均為0.55、週期平均為0.40、風速平均為0.48；而均方根誤差第1天最低，波高平均為0.35、週期平均為0.64、風速平均為1.82，接續依模擬時間長度增加遞增，第7天波高平均為0.44、週期平均為1.04、風速平均為2.23。整體而言，7日後的預測波高、週期及風速相關係數下降分別為0.20、0.14、0.26，均方根誤差分別提升為0.09公尺、0.40秒及0.41公尺每秒，由比例來看，波高準確性隨著大氣預測風速的誤差而下降，顯示波浪預測的關鍵仍是大氣預測的準確度。

圖11為七美浮標測站觀測值與台灣海域(T3)海流預測模擬結果與實測值之時序列比較圖，圖中黑色為觀測資料。圖中各別依序表示為水位、東西速度分量、南北速度分量、流速、流向、水溫、風速及風向之比較結果。由於觀測浮標並無水位變化資料，故水位變化僅有預測結果，由預測結果來看，不同預測時間長度的資料偏差並不明顯，顯示預測時間長度並不會造成海流預測的大幅變化。

表3為平均各浮標第1天至第7天之東西速度分量、南北速度分量之模擬誤差統計，結果顯示第1天的相關係數最高，東西速度分量平均為0.35、南北速度分量平均為0.44，接續依模擬時間長度增加遞減，第7天東西速度分量平均為0.31、南北速度分量平均為0.41；而均方根誤差平均變化不大，東西速度分量平均為0.23公尺每秒、南北速度分量平均為0.21公尺每秒。整體而言，7日後的預測相關係數平均下降0.04，其準確度下降幅度並不大，其與波浪預測準確性與大氣預測模式準確度息息相關的情況略有不同，海流模擬的重點應是地形水深資料與格網解析度是否可合理的描述實際地形變化。

## 四、結論

本研究由每日大氣預測模式資料，作為海象數值模式之海面邊界條件，進行海象預測作業，提供波浪、海流等預測資訊，目前完成短中期7日的波浪與海流預測作業，並與環台海氣象浮標進行比對驗證，透過統計指標來量化模式的準確度，相關的統計指標均隨預測時間增長變差。波浪部分，由比例來看，波高準確性隨著大氣預測風速的誤差而下降，顯示波浪預測的關鍵仍是大氣預測的準確度。海流部分，

其準確度下降幅度並不大，其與波浪預測準確性與大氣預測模式準確度息息相關的情況略有不同，海流模擬的重點應是地形水深資料與格網解析度是否可合理的描述實際地形變化。

雖然模式可提供合理的推算結果，但從推算與預測結果中之比較可知，第1天的預測結果準確性皆略高推算結果，其原因應該是推算與預測模擬所使用的大氣資料時間解析度不同所導致，故如何取得最佳的大氣模式資料也是海象模擬的關鍵。且在海象模擬驗證結果中仍出現實測與模擬推算值間的差異，所以現場實測資料亦應持續進行作為海象模式參數修正的依據。

## 誌謝

本文係「台灣離岸風能大數據產業之發展與創新應用—台灣離岸風能大數據產業之發展與創新應用(2/3)」之部分研究成果，承蒙科技部經費之補助使本研究得以順利完成。

## 參考文獻

- Blumberg, A.F., and G.L. Mellor, 1983: "Diagnostic and prognostic numerical circulation studies of the South Atlantic Bight," *J. Geophys. Res.*, 88, 4579-4592.
- Boyer, T.P., J. I. Antonov, O. K. Baranova, C. Coleman, H. E. Garcia, A. Grodsky, D. R. Johnson, R. A. Locarnini, A. V. Mishonov, T.D. O'Brien, C.R. Paver, J.R. Reagan, D. Seidov, I. V. Smolyar, and M. M. Zweng, 2013: *World Ocean Database 2013*, NOAA Atlas NESDIS 72, S. Levitus, Ed., A. Mishonov, Technical Ed.; Silver Spring, MD, 209 pp., <http://doi.org/10.7289/V5NZ85MT>
- Mellor, G. L. (2003) "Users guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model," Program in Atmospheric and Oceanic Sciences, Princeton University, Princeton.
- 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.
- WAVEWATCH III Development Group (WW3DG) (2016) *User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III Version 5.16*, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, College Park, MD, USA.
- 邱永芳、蕭松山、吳帥賢、鄭育民 (2000)：台灣東部近岸海流特性之調查研究，第22屆海洋工程研討會論文集，高雄。
- 黃椿喜 (2017)：風雨將臨—從多重時空尺度的天氣預報到即時天氣預報，科學月刊。

廖建明、楊益、賴堅戎、陳思樺 (2015)：海洋數值模式資料同化模擬驗證，104年天氣分析與預報研討會論文集，台北。