

WAVEWATCH III 多重網格模式應用於颱風波浪推算之研究

戴世杰¹ 黃清哲² 范揚沼³

¹ 國立成功大學水利及海洋工程學系博士生

² 國立成功大學水利及海洋工程學系教授暨近海水文中心主任

³ 國立成功大學近海水文中心研發組組長

摘要

本研究應用 WAVEWATCH III 多重網格風浪模式，對於 2013 年西北太平洋颱風季的二個強烈颱風個案進行波浪推算。利用高度計遙測資料，藉由分析推算誤差來定量地評估模式表現。本文旨在建立一套估計風浪模式預測誤差的驗證程序，這套分析程序可作為後續實作模式資料同化技術，以及研發模式產品等其它應用的依據。根據分析結果，WAVEWATCH III 在推算颱風波浪方面有不錯的表現，惟其數值有低估的傾向。

關鍵詞：WAVEWATCH III、多重網格模式、颱風波浪、Globwave 計畫、效能得分

Applying Multi-grid WAVEWATCH III to Hindcast of Typhoon Waves

Shih-Chieh Tai* Ching-Jer Huang Yang-Ming Fan

* PhD student, Department of Hydraulics and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

ABSTRACT

In this study, a multi-grid WAVEWATCH III modeling system is applied to wave hindcast of two severe typhoons over the western North Pacific Ocean in 2013 typhoon season. Using the remote-sensing data from altimeters, the model performance is assessed quantitatively by analyzing the hindcast errors. The purpose of this study is to develop a validation procedure, which can be a basis for implementing wave data assimilation and other applications of model products. According to the analysis results, WAVEWATCH III had a nice performance of hindcasting typhoon waves, but there was an underestimating tendency in the hindcast results.

Keywords: WAVEWATCH III; Multi-grid model; Typhoon waves; Globwave project; Performance score

一、前言

臺灣位處西北太平洋海域，屬於颱風好發熱點。由颱風所引發的極端波浪可能導致船舶航行、海上活動風險升高、沿岸建物遭受破壞等，對於生命財產安全影響甚鉅。因此，提升波浪推算(hindcast)及預報的準確度，在大浪預警、海岸工程規劃及國土保育等方面有不可忽視的重要性。

波浪數值預報自 1940 年代末起，為因應第二次世界大戰期間登陸作戰對於海況情資的需求開始發展迄今，已趨於成熟。要改善波浪模式的預測能力，首先要知道如何定量地描述模式的表現。Cardone et al. (1996) 建立了一套模式驗證的統計方法，並成為廣泛延用至今的標準；而在極端波浪預測的驗證問題上，該研究以模式預測的平均尖峰示性波高(peak significant wave height, peak SWH) 與現場資

料進行比較。Tolman et al. (2005) 則以時空 (space-time) 序列呈現模式預測與實測資料隨時間變化的情形。Hanson et al. (2009)、Chawla et al. (2009) 及 Chawla et al. (2013) 使用美國陸軍工兵團 (United States Army Corps of Engineers, USACE) 針對波浪模式所發展的「互動型模式評估及診斷系統」(Interactive Model Evaluation and Diagnostics System, IMEDS) 實施模式的驗證，並以效能得分 (performance score) 來描述模式預測波浪的表現。

本研究的目的在利用 WAVEWATCH III 多重網格風浪模式 (multi-grid wind wave model) 進行颱風波浪的推算，同時建立一套模式驗證程序，藉由分析推算誤差來定量地評估模式表現。這套分析程序將有助於估計風浪模式的預測誤差，作為後續實作模式資料同化技術，以及研發模式產品其它應用的依據。

二、波浪模式簡介

本研究使用 WAVEWATCH III 5.16 版(文後簡稱為 WW3) 多重網格風浪模式 (WW3DG, 2016)，以 WRF (Weather Research and Forecasting) 大氣模式風場驅動，進行波浪參數的推算。WW3 屬第三代風浪模式，其控制方程為波浪作用平衡方程 (wave action balance equation)

$$\frac{DN}{Dt} = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

式中 D/Dt 表示全微分； S 為能量源 (sources) 與匯 (sinks) 的淨效應； σ 代表固有頻率 (intrinsic frequency) 或稱相對頻率，也就是相對於海洋中局部海流平均流速的波浪頻率； $N(k, \theta; \mathbf{x}, t)$ 是波浪作用密度譜 (wave action density spectrum)，為波數 k 、方向 θ 、位置向量 \mathbf{x} 以及時間 t 的函數，它是能譜 (energy spectrum) $F(k, \theta; \mathbf{x}, t)$ 經由 σ 正規化後得到的一個量。模式在解算出每一個網格點上 F 的數值之後，再依數學關係轉換為示性波高、平均波向及週期等對應的波浪參數。

較新版本的 WW3 模式應用一種稱為鑲嵌 (mosaic) 網格或多重網格的技術以增進模式的計算效率 (Tolman, 2008)。在過去，區域模式的邊界條件是由全球模式所提供。這種典型的單一網格 (single-grid)、單向嵌套 (one-way nesting) 模式意味

著必須等待全球模式結果產出後，才能依序驅動網格解析度較高的區域模式進行計算——也就是需要驅動至少兩次模式 (端視有幾層格網而定)。而多重網格方法的最大優勢在於，它利用雙向嵌套 (two-way nesting) 的設計將粗、細網格接合在一起，構成一張具有兩種以上不同網格解析度的格網，粗、細格點的資訊在計算過程中可直接雙向交換；於是，僅需驅動一次模式就能獲得高解析區域模式 (例如臺灣周邊海域，甚至近岸局部範圍) 的推算或預報結果，這使得電腦所耗費的計算資源更加經濟。

二、研究方法

本文分別針對 2013 年編號第 7 號蘇力 (Soulik) 颱風以及第 19 號天兔 (Usagi) 颱風進行個案分析，當時兩者的最大強度皆達強烈颱風等級。

模式驗證所使用的觀測資料包含歐洲太空總署 (European Space Agency, ESA) 的 Globwave 高度計遙測資料集 (<http://globwave.ifremer.fr/>)。該資料集包含 ERS-1&2, TOPEX-Poseidon, GEOSAT, Follow-ON (GFO), Jason-1, Jason-2, ENVISAT, Cryosat 以及 SARAL 等九項高度計遙測任務所發布的產品，由於不同資料有不同的特性，為便於高度計資料的存取及使用，各項原始產品經過品質審查、訂正，統整為同質的每日資料檔。此外，在點位時序列的比較上，使用來自國立成功大學近海水文中心的臺東外洋 (Taitung Open Ocean) 及東沙島 (Pratas) 浮標資料，測站基本資料如表 1 所示。

表 1 浮標測站基本資料

測站名稱	測站編號	經、緯度座標
臺東外洋	C6S62	124.07417°E; 21.76639°N
東沙島	C6V27	118.86111°E; 21.02111°N

模式網格分為二層 (如圖 1)：外層 (grid 1) 範圍自東經 99.5 度至 155.5 度，北緯 4.5 度至 40.5 度，網格解析度為 0.5 度；內層 (grid 2) 範圍自風東經 109.75 度至 132.25 度，北緯 9.75 度至 35.75 度，網格解析度為 0.25 度。模式外、內層分別以交通部中央氣象局 WRF 模式 45 公里及 15 公里解析度、每六小時 (00, 06, 12 及 18 UTC) 一筆的分析風場空間內插後進行驅動；WW3 模式則是每小時輸出一

筆波浪推算結果，期間若無分析風場（如 01, 02, 03 等時間點）可供驅動 WW3，則使用 WRF 預測風場或時間上線性內插的風場。

根據 Cardone et al. (1996) 與 Chawla et al. (2009) 的方法，定義模式的效能得分為

$$P_S = \frac{1}{3}(\hat{E}_{RMS} + \hat{b} + \overline{SI}),$$

$$\hat{E}_{RMS} = \left(1 - \frac{E_{RMS}}{m_{RMS}}\right),$$

$$\hat{b} = \left(1 - \frac{|b|}{m_{RMS}}\right),$$

$$\overline{SI} = (1 - SI).$$

其中 E_{RMS} 為模式推算值 h 的均方根誤差； b 表示模式的偏誤 (bias)； m_{RMS} 為觀測資料的均方根值； SI 為散布指數 (scatter index)

$$SI = \frac{\sigma_d}{E(m)}, \quad \sigma_d = \left[\frac{1}{n-1} \sum_i (h_i - m_i - b)^2\right]^{1/2}$$

其中， σ_d 為模式推算與觀測之間差值相對於偏誤的標準差 (standard deviation of difference)； $E(\cdot)$ 是期望值算子 (expectation operator)， $E(m)$ 表示觀測數據的平均值； n 為觀測資料的筆數。前述效能得分的數值介於 0 (推算數值與觀測數值不相關) 到 1 (預測數值與觀測數值完全吻合) 之間。

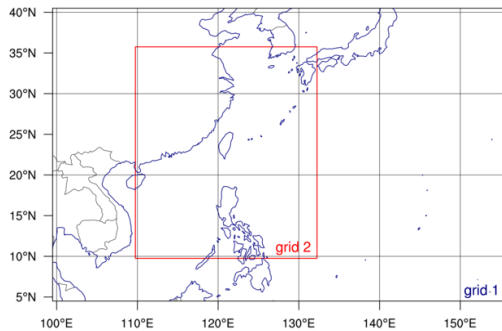


圖 1 WW3 模式模擬的格網範圍

三、結果與討論

3.1 個案一：蘇力颱風 (編號 201307)

2013 年編號第 7 號颱風蘇力路徑如圖 2 所示。熱帶風暴於 7 月 7 日形成熱帶低壓後，即以偏西方向行進，並在 8 日經歷一段快速增強期成為輕度颶

風，11 日達強烈颶風等級；12 日起強度略微減弱為中度颶風，暴風圈逐漸影響臺灣周邊海域。

以 WW3 模式模擬 2013 年 7 月 4 日 00 UTC 時起至 7 月 14 日 00 UTC 時止，總計 241 小時；之後將模式推算的數值經過時間與空間的線性內插，至高度計資料所在的時間及位置上作誤差分析。圖 3、圖 4 分別為 WW3 與高度計示性波高的二元相對次數分布圖 (bivariate histogram) 及推算誤差的空間分布，圖 5 為推算誤差直方圖。需注意其中並未剔除離群值 (outlier)，因此本文使用不受離群值影響的中位數作為誤差代表值；另圖 3 至 5 所展示的，是模式模擬期間所有 grid 2 範圍內的推算資料與觀測資料匹配後的統計結果。由 WW3 的偏誤為 -0.16 m，中位數 -0.21 m 顯示模式推算數值有低估的趨勢。依據分析結果，模式效能得分 P_S 為 0.76。此外，在 WW3 與浮標示性波高時序比較 (如圖 6) 中可以看出，7 月 12 日以後模式推算之示性波高與觀測數值間有顯著的差異。研判可能的因素為，因蘇力颱風結構逐漸受到周邊地形影響，模式無法反應颱風強度變化所導致。

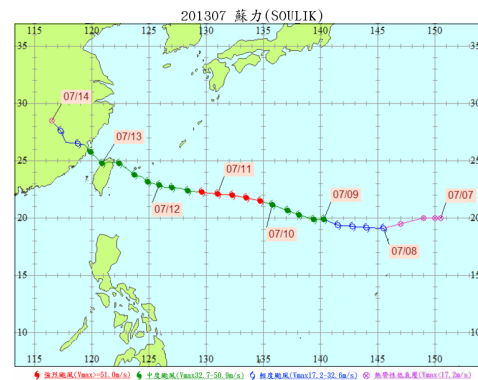


圖 2 蘇力颱風路徑圖

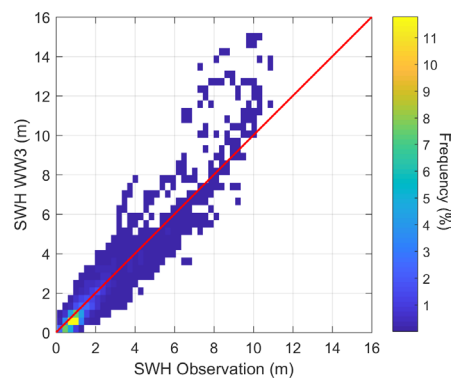


圖 3 蘇力颱風示性波高的二元相對次數分布圖

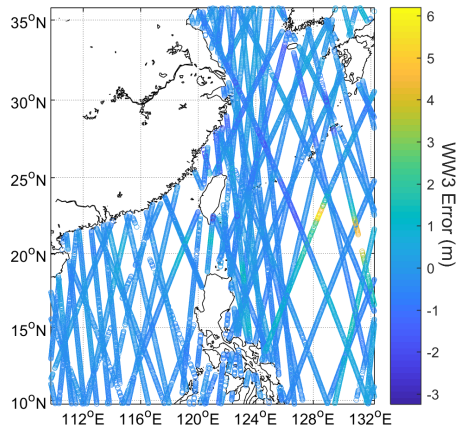


圖 4 2013 年 7 月 4 日至 14 日期間 WW3 推算誤差的空間分布

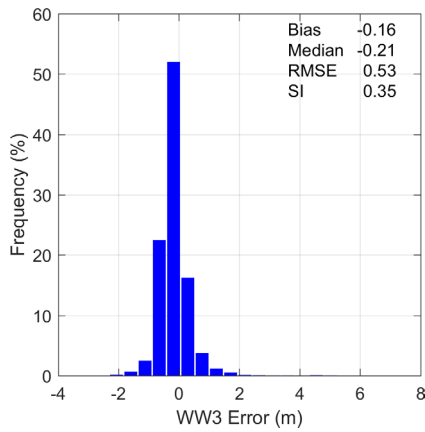


圖 5 2013 年 7 月 4 日至 14 日期間 WW3 推算誤差的相對次數直方圖

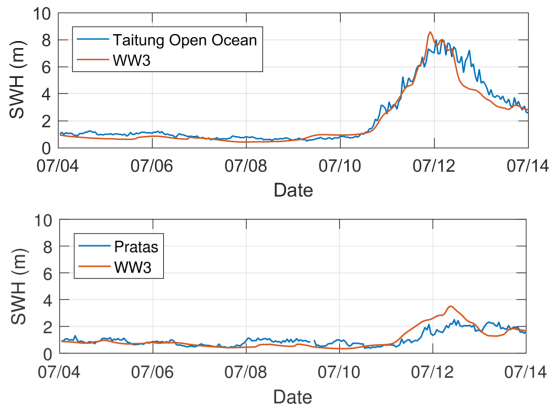


圖 6 蘇力颱風 WW3 模式推算與臺東外洋、東沙島浮標示性波高時序序列比較

3.2 個案二：天兔颱風（編號 201319）

2013 年編號第 19 號颱風天兔（路徑如圖 7 所

示)於 9 月 16 日在菲律賓呂宋島東方海面形成；19 日轉向西北西移動，增強為強烈颱風，並於 20 日夜間起至 22 日間通過巴士海峽。

WW3 模式模擬時間自 2013 年 9 月 16 日 00 UTC 時起至 9 月 23 日 00 UTC 時止，總計 169 小時。根據誤差分析(如圖 8 至 10)，模式推算偏誤為 -0.32 m，中位數 -0.29 m，均方根誤差 0.59 m， $SI = 0.18$ ，模式效能得分 P_S 為 0.84 。如同前例，模式推算數值也有低估的傾向。而 WW3 模擬計算的示性波高與東沙島浮標資料比對，推算數值與觀測資料隨時間變化的趨勢一致，但當天兔颱風於 21 日夜間至 22 日通過巴士海峽及東沙近海時，模式也有明顯低估的表現。

根據誤差分析及效能得分顯示，模式推算有不錯的表現，但仍有部分數值與觀測資料有明顯差異。值得一提的是，由圖 4 及圖 9 的推算誤差空間分布顯示，顯著誤差主要分布在颱風行經的路徑上。

造成模式推算誤差的可能解釋有幾點：其一為來自大氣模式所提供的風場內即存在誤差，因而使得波浪推算偏離實況；其二為模式無法解析次網格 (sub-grid) 的波浪場特徵，特別是在熱帶風暴剛形成、結構尚不明確時；此外，由前述個案可以知道，可能的因素還包含颱風與地形之間複雜的交互作用，現今仍無法完整解釋，而使得模式推算結果的不確定性大幅增加。這些誤差可以透過改良模式網格的設計，以及引進資料同化技術等方式來改善。

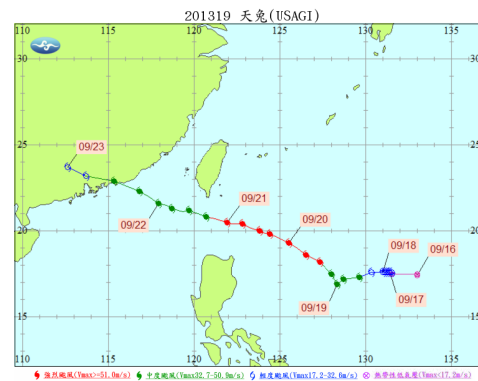


圖 7 天兔颱風路徑圖

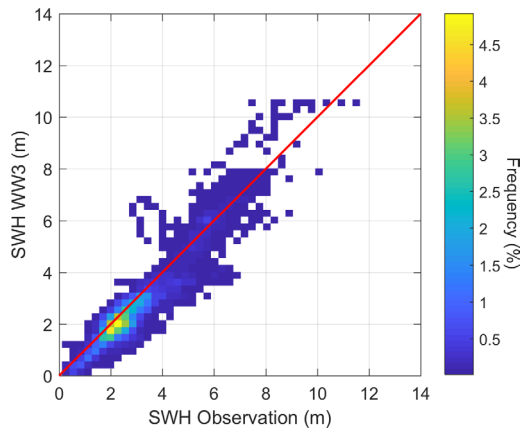


圖 8 天兔颱風 WW3 模式推算與高度計示性波高的二元相對次數分布圖

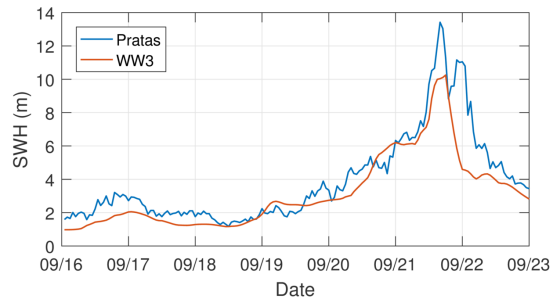


圖 11 天兔颱風 WW3 模式推算與東沙島浮標示性波高時序列比較

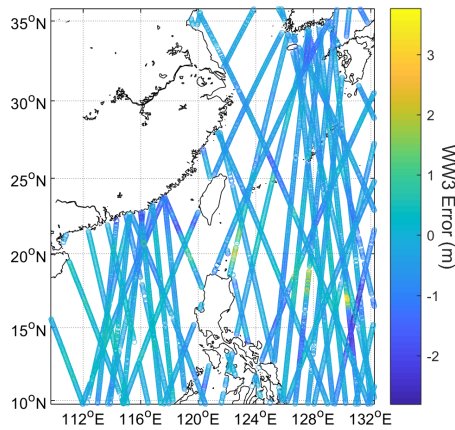


圖 9 2013 年 9 月 16 日至 23 日期間 WW3 推算誤差的空間分布

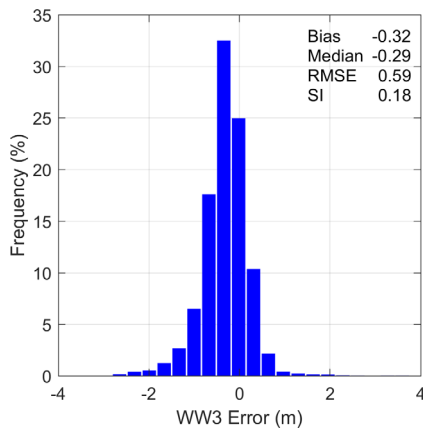


圖 10 2013 年 9 月 16 日至 23 日期間 WW3 推算誤差的相對次數直方圖

四、結論

本文展示了 WAVEWATCH III 多重網格風浪模式對於 2013 年颱風季中二個強烈颱風個案的波浪參數推算及驗證結果。透過散布指數 SI 及效能得分 P_5 等統計指標 (indicator) 的建立，能定量、有效地顯示模式推算或預測的綜合表現。這種標準驗證程序的訂定，可作為後續作業化波浪模式評估、內建物理參數調校、波浪資料同化以及模式研發的參考依據。

參考文獻

1. Cardone, V., Jensen, R., Resio, D., Swail, V. and Cox, A. (1996) Evaluation of Contemporary Ocean Wave Models in Rare Extreme Events: The "Halloween Storm" of October 1991 and the "Storm of the Century" of March 1993, *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 13, 198-230.
2. Chawla, A., Tolman, H., Hanson, J., Devaliere, E. and Gerald, V. (2009) Validation of a Multi-Grid Wavewatch Iii Modeling System, *NOAA/MMAB Contribution*, 281, 15.
3. Chawla, A., Tolman, H.L., Gerald, V., Spindler, D., Spindler, T., Alves, J.-H.G.M., Cao, D., Hanson, J.L. and Devaliere, E.-M. (2013) A Multigrid Wave Forecasting Model: A New Paradigm in Operational Wave Forecasting, *Weather Forecast.*, 28, 1057-1078.
4. Hanson, J.L., Tracy, B.A., Tolman, H.L. and Scott, R.D. (2009) Pacific Hindcast Performance of Three Numerical Wave Models, *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 26, 1614-1633.

5. Tolman, H.L. (2008) A Mosaic Approach to Wind Wave Modeling, *Ocean Model.*, 25, 35-47.
6. Tolman, H.L., Alves, J.-H.G.M. and Chao, Y.Y. (2005) Operational Forecasting of Wind-Generated Waves by Hurricane Isabel at NCEP, *Weather Forecast.*, 20, 544-557.
7. 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.