

台灣海域作業化 WAVEWATCH III

湧浪數值預報建置

范揚銘¹ 陳家銘² 滕春慈³ 朱啟豪⁴ 李汴軍⁵

¹ 成功大學近海水文中心助理研究員

² 成功大學近海水文中心系統工程師

³ 中央氣象局海象測報中心主任

⁴ 中央氣象局海象測報中心課長

⁵ 華梵大學環境與防災設計學系副教授

摘要

本研究目的為開發中央氣象局湧浪與風浪預報作業系統。為因應湧浪預報之需求，中央氣象局已於 99 年度將美國海洋大氣總署所發展之 WAVEWATCH III 波浪模式更新至最新版本 (WAVEWATCH III version 3.14)。為了提昇湧浪與風浪預報模式預報準確度，本研究改進與整合湧浪與風浪預報系統及校驗模式，並開發預報產品資訊提供預報員預報參考。現階段已完成平均周期公式修正：由平均周期驗證結果顯示修正後的周期較接近實測周期，且由修正周期公式前後模擬的波高顯示修正前後波高皆不改變，由此驗證得知已成功修正平均周期計算結果，且其他波浪參數的結果不會受到影響。為了提昇預報準確度，對預報模式進行率定：由敏感度分析的結果顯示 STABSH、LAMBDA、NLPROP 等三個參數對模式計算結果較為敏感，進一步對參數進行率定後確實有效改善波浪模式計算結果。又為了提供預報員預報產品，現已完成預報產品圖形化之程式開發與製作，並已每日作業化執行預報產品輸出。

關鍵詞：NWWIII 湧浪與風浪預報模式、率定、校驗

Development of Operational WAVEWATCH III Swell Modelling for Taiwan Waters

Yang-Ming Fan^{*} Jia-Ming Chen Chuen Teyr Terng Chi-Hao Chu Beng-Chun Lee

^{*} Assisant Research Fellow, Coastal Ocean Monitoring Center, National Cheng Kung University

ABSTRACT

The purpose of this study is to test and verify the output of the WAVEWATCH III wave modeling requiring an efficient approach to characterize individual significant wave height and swell wave components. The swell component is one of the important factors to prevent the disaster over the Taiwan waters, where a lot of marine activities are increasing recently. Identification and separation of the wave energies of wind wave and swell provide a more realistic description of the sea state, which is of great importance to scientific and engineering applications. Verification results using wave height data collected from buoy in the Taiwan waters are presented. The results show that the model results did improve after tuning parameters.

Keywords: NWW III wave modeling; Tuning; Verification

一、前言

海氣象資訊對於海上航行安全影響極大，惡劣的海氣象如海上強風、巨浪與颱風等常是造成船隻觸礁、碰撞甚至傾覆等海難事件之主要原因。準確的海氣象資訊對於確保航行船舶之安全非常重要，有效的提供航行船舶最即時、迅速、適當等各項航行安全資訊，將能有效的預防海上意外事故的發生。另外，近年來國人從事海洋遊憩活動頻繁，完善的海洋遊憩環境，除了完善的硬體設施可提供遊客遊憩便利性外，準確的海氣象資訊是減少意外災害的發生及生命財產的損失之重要一環。

海洋中的波浪主要分為風浪與湧浪兩種。所謂「無風不起浪」，海洋中的波浪一般是由風力所引起的，這種由當地的風所產生的，叫做風浪。而由其它海區傳來、或者當地風力迅減小或風向改變後遺留下來的浪就叫做湧浪。風浪與湧浪除了產生的原因不同之外，在其它方面也有所不同：風浪外形尖削，海面凌亂，波長及周期都比較短；湧浪在傳播過程中，由於受到空氣阻力和海水內摩擦影響，消耗不少能量，導致波高減低而周期拉長，所以湧浪的外形較為圓滑規則，周期較長，波長也較長，可達幾百米。且湧浪的傳播速度往往比海上天氣系統的移速快得多。颱風及西南氣流所引起的湧浪，往往可作為這些天氣系統來臨的先兆。

湧浪一般具有巨大的能量，當它傳到淺海時，波浪底部受海底地形影響，發生變形效應。波浪底部因受海底摩擦停滯不前，而波峰卻以原來的速度前進，這樣就使波長越來越短，波高越來越大，最後發生波峰卷倒和波浪破碎的現象。所以雖然風和日麗、海面平靜，湧浪對身處岸邊或在近岸海面活動的人士構成威脅。如每每颱風尚未抵達台灣前，即使岸邊的風浪還不是很大，但因湧浪已逐漸傳遞至近岸，對岸邊活動的民眾威脅很大。又如民國 98 年 9 月 14 日高雄左營軍港外 1.3 哩處發生潛艦艦長落海事件，艦艇受到突然的大浪拍擊，此大浪即有可能是西南氣流引起的湧浪，因此為了減少意外災害的發生及生命財產的損失，湧浪預報工作刻不容緩。

本研究目的為開發中央氣象局湧浪與風浪預報作業系統。為因應湧浪預報之需求，中央氣象局已

於 99 年度將美國海洋大氣總署所發展之 WAVEWATCH III 波浪模式更新至最新版本 (WAVEWATCH III version 3.14)。為了提昇湧浪與風浪預報模式預報準確度，本研究改進與整合湧浪與風浪預報系統及校驗模式，並開發預報產品資訊提供預報員預報參考。整體工作項目架構圖如圖 1。

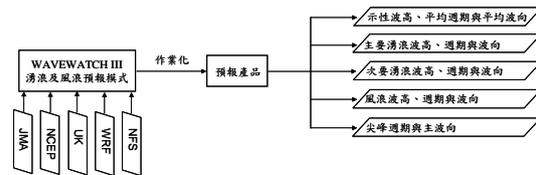


圖 1 主要工作項目架構圖

二、「NWWIII 湧浪及風浪預報模式」介紹

WAVEWATCH III 湧浪及風浪預報模式 (Tolman 1997, 1999, 2009) 乃是 Tolman 基於 WAM 模式 (WAMDIG 1988, Komen 等人, 1994) 架構下在美國 NOAA/NCEP 所發展全波譜第三代波浪模式。在此之前，Tolman 已發展一系列 WAVEWATCH 波浪模式，WAVEWATCH I (Tolman 1991) 及 WAVEWATCH II (Tolman 1992) 分別為 Tolman 於 Delft 科技大學與 NASA Goddard Space Flight Center 所完成；WAVEWATCH III 湧浪及風浪預報模式是以 WAVEWATCH I 與 WAVEWATCH II 模式為基礎而發展，WAVEWATCH III 湧浪及風浪預報模式在所有主要方面如控制方程式、模式結構、數值及物理方法皆異於 WAVEWATCH I 及 WAVEWATCH II 模式。

Tolman 利用周波數與波向在水深地形變化所造成的波浪成長及消散物理現象中保持既有定義的特性及波浪作用力在流場存在時依然保持守恆的性質發展 WAVEWATCH III 湧浪及風浪預報模式，以求解作用力密度波譜平衡方程式來解析周波數-方向波譜；平衡方程式應用時於模式計算過程時，假設波浪場、流場及地形水深於空間和時間尺度上變化遠大於單一波浪的尺度變化。

本研究使用 WAVEWATCH III 最新湧浪及風浪預報模式版本 3.14 版，此版本已包含數種可應用於深海及近岸波浪場之參數化物理源函數，如風能輸入、非線性交互作用、波能消散、底床摩擦、碎

波效應及波浪與底床交互作用產生的散射效應。

WAVEWATCH III 湧浪及風浪預報模式模擬範圍是東經 99 度到 155 度，北緯 1 度到 41 度，又本模式屬於大尺度模擬，故模式空間解析度依照不同的大氣風場分為 0.5 及 0.25 度，時間解析度為一天四次(00UTC、06UTC、12UTC、18UTC)預報未來 72 小時波浪資訊，每小時輸出模式產品。

三、「NWWIII 湧浪及風浪預報模式」平均周期公式修正

由 WAVEWATCH III 產出湧浪及風浪預報模式產品中，發現模式的計算平均周期公式與中央氣象局資料浮標的計算平均周期公式不同。然而為了後續率定、校驗及預報統計誤差等工作，有必要以中央氣象局資料浮標的計算平均周期公式為基準，對模式的原始程式碼著手修正，修正前後結果將與實測值比較討論，以證明本項工作的正確性。

3.1 平均周期公式差異

「NWWIII 湧浪及風浪預報模式」平均周期公式為：

$$T_m = 2\pi \overline{\sigma^{-1}} \quad (1)$$

其中 $\overline{\sigma^{-1}} = E^{-1} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \sigma^{-1} F(f_r, \theta) df_r d\theta$ ；

$E = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} F(f_r, \theta) df_r d\theta$ ，故(1)式可改寫為：

$$T_m = 2\pi \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \sigma^{-1} F(f_r, \theta) df_r d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} F(f_r, \theta) df_r d\theta} \quad (2)$$

$$= 2\pi \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \sigma^{-1} F(f_r, \theta) df_r d\theta}{m_0}$$

然而，中央氣象局資料浮標周期公式為：

$$T_{zero} = \left(\frac{m_0}{m_2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

其中 $m_0 = \sum_{f_1}^{f_0} (S(f) \times d(f))$ ；

$m_2 = \sum_{f_1}^{f_0} (S(f) \times d(f) \times f^2)$ ，此為波譜零次矩與波譜二次矩之比值，明顯與(2)式不同，故必須由原始程式碼著手修正。檢視 NWWIII 湧浪及風浪預報模式的程式碼，修正後的檔案已更新於中央氣象局的湧浪與風浪預報作業系統。

3.2 平均周期修正後的驗證

為了驗證平均周期修正後的正確性，將修正前後結果與實測值比較討論。利用不同風場驅動數值波浪模式計算得到的修正前後周期與資料浮標觀測周期比較時序列圖，如圖 2~圖 4 所示，以 NCEP 風場模擬的波浪為例，由圖 2 顯示修正後的周期小於修正前的周期，又由圖 3 與圖 4 顯示修正後的周期較接近實測周期。

數值波浪模式的波浪參數值是由計算波浪能量得到，因此為了確認修正程式碼後不會造成波浪能量的增減，可由任一波浪參數來判斷。本研究以波高參數為例，因為波高與波浪能量之間是平方關係。圖 5 顯示修正周期公式前後模擬的波高，圖中顯示修正前後波高皆不改變，由此驗證得知平均周期計算公式已完成修正，且其他波浪參數的結果不會受到影響。

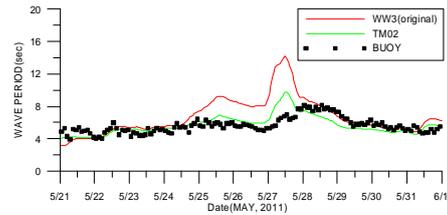


圖 2 修正前後的周期與實測周期比較時序列圖-以 NCEP 風場模擬波浪

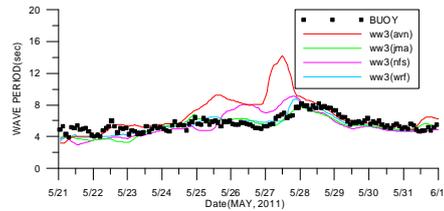


圖 3 修正前的周期與實測周期比較時序列圖

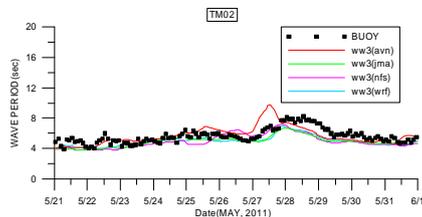


圖 4 修正後的周期與實測周期比較時序列圖

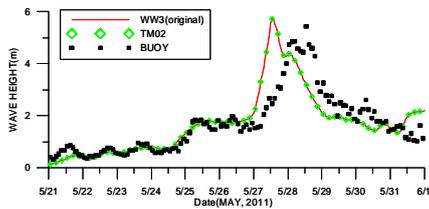


圖 5 修正前後的波高與實測波高比較時序圖-以 NCEP 風場模擬波浪

四、「NWWIII 湧浪及風浪預報模式」參數率定

波浪模式所採用的經驗公式包含許多經驗參數，參數設定對預報結果具有很大的影響。有鑒於經驗參數為模式發展者依據當地海域現場觀測資料所率定出來，而當地海氣象與台灣海域面對海氣象有相當大的差異，因此波浪模式應用海域的不同，模式的參數也會有不同的設定；此外，隨著波浪模式的逐步發展，模式預設參數不見得適用於新增加的物理機制和數值方法，所以必須重新迴歸新的參數設定值以符合新的模式架構。

4.1 參數敏感度分析

本研究以參數敏感度分析找到影響模式輸出結果最為顯著之經驗參數，選取分析的參數為 FLAGTR(預設值= 0)、GAMMA(預設值= -0.0670)、WDTHCG(預設值= 1.5)、WDTHTH(預設值=1.5)、SWELLF(預設值= 0.1)、STABSH(預設值=1.380)、LAMBDA(預設值= 0.250)、NLPROP(預設值=1000000)，其中 GAMMA、WDTHCG、WDTHTH 是參考 NOAA 執行的 5 種 WAVEWATCH3 模式設定；SWELLF、STABSH 分別為依據使用手冊建議風浪成長項中的可調整參數；LAMBDA、NLPROP 分別為依據使用手冊中建議非線性波波交互作用項中的可調整參數。

圖 6 與圖 7 為敏感度分析的結果，圖中顯示 STABSH、LAMBDA、NLPROP 等三個參數對模式計算結果較為敏感。

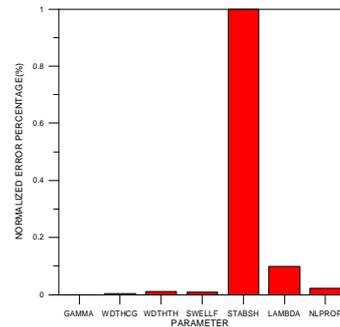


圖 6 各參數敏感度分析誤差

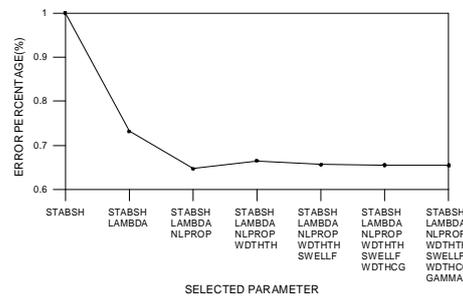


圖 7 累積參數個數之敏感度分析誤差

4.2 經驗參數率定

依據 Lee et al.(2009) 提出的率定方法，配合實測資料進行參數率定。圖 8~圖 11 以黑色實線表示測站示性波高資料，藍色點線表示模式初始設定參數計算結果，紅色點線表示經率定參數模式計算結果。圖中顯示四種分別利用不同風場模擬的波浪經參數率定後，接較初始設定參數計算結果更趨近測站資料。表 1 與表 2 為參數率定前後統計誤差結果，在數據上皆顯示參數率定後可有效改善波浪模式計算結果。

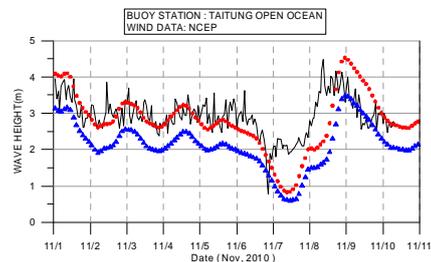


圖 8 NCEP 風場模式結果在台東外洋浮標之示性波高時序比對圖

五、「NWWIII 湧浪及風浪預報模式」預報內容與產品

為了開發預報產品資訊提供預報員預報參考，本章節應用 NCL 繪圖軟體將 WAVEWATCH III 湧浪與風浪預報模式所輸出產品圖形化，繪製出波浪等值圖、方向波譜圖、波浪時序列圖及波浪與實測統計誤差分析圖。

NCL(The NCAR Command Language)是由美國國家大氣研究中心研發的軟體，可支援 netCDF、GRIB、HDF、binary 及 ascii 等多種格式檔案的資料存取、數值分析及圖形化之編程語言；擁有眾多內建數值分析函式與強大的圖形化能力，在氣象與模式方面的數據處理及繪圖皆有廣泛應用。

5.1 產出的波浪參數

WAVEWATCH III 湧浪及風浪預報模式可輸出多種平均波浪參數的網格場域資料，WAVEWATCH III 湧浪及風浪預報模式自動輸出波浪參數資料包含：(1)示性波高、平均週期與平均波向；(2)主要湧浪波高、週期與波向；次要湧浪波高、週期與波向；(3)風浪波高、週期與波向；(4)尖峰週期與主波向。

5.2 圖形化預報產品

應用 NCL 繪圖軟體將 WAVEWATCH III 湧浪與風浪預報模式所輸出波浪參數資料圖形化，繪製出波浪等值圖與方向波譜圖。

5.2.1 波浪等值圖

波浪參數等值圖如圖 12，除了呈現波高分佈情形外，更提供風浪波高、風浪週期、湧浪波高、湧浪週期及湧浪波向等資訊。

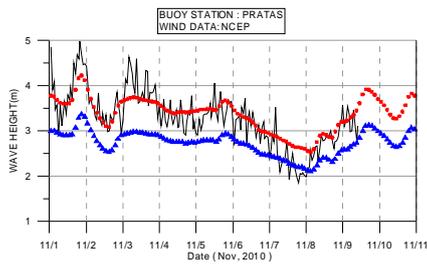


圖 9 NCEP 風場模式結果在東沙島浮標之示性波高時序列比對圖

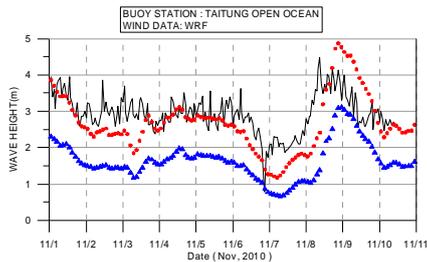


圖 10 WRF 風場模式結果在台東外洋浮標之示性波高時序列比對圖

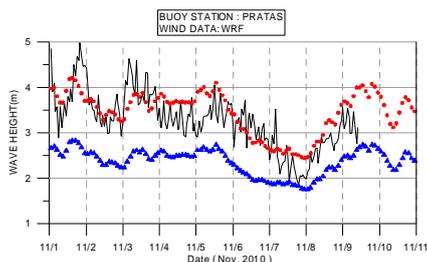


圖 11 WRF 風場模式結果在東沙島浮標之示性波高時序列比對圖

表 1 NCEP 風場率定前後誤差統計分析表

浮標站	東沙島		台東外洋	
	調整前	調整後	調整前	調整後
BIAS	0.56	-0.066	0.77	0.10
RMSE	0.70	0.36	0.84	0.48
SI	0.21	0.10	0.29	0.16
CR	0.88	0.86	0.83	0.82

表 2 WRF 風場率定前後誤差統計分析表

浮標站	東沙島		台東外洋	
	調整前	調整後	調整前	調整後
BIAS	0.92	-0.15	1.27	0.25
RMSE	1.03	0.46	1.31	0.57
SI	0.31	0.14	0.45	0.19
CR	0.72	0.71	0.77	0.75

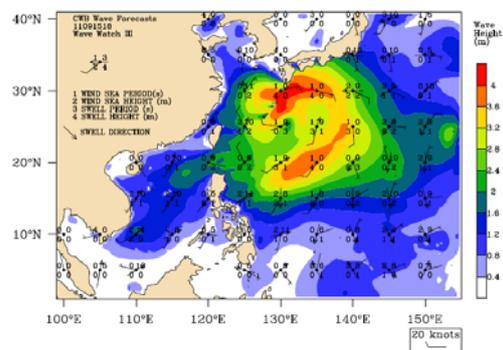


圖 12 波浪參數等值圖

5.2.2 方向波譜圖

為了進一步檢視風浪與湧浪的正確性，本研究繪製方向波譜圖如圖 13，除了呈現波譜在方向與頻率分佈趨勢外，同時在圓心處以箭頭表示風的來向。由於風浪一般是由風力所引起的，若風向與波向相近時，此波浪為風浪；相反的，若風向與波向相差甚遠時，則此波浪為湧浪，因此預報員可由風湧浪特性與方向波譜圖判讀海況。

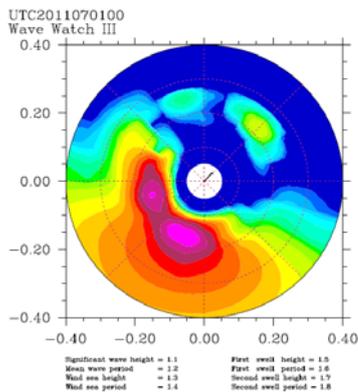


圖 13 方向波譜示意圖

六、結論

本研究為了提昇湧浪與風浪預報模式預報準確度，改進與整合湧浪與風浪預報系統及校驗模式，並開發預報產品資訊提供預報員預報參考。結論說明如下：

由平均周期驗證結果顯示修正後的周期較接近實測周期，且由修正周期公式前後模擬的波高顯示修正前後波高皆不改變，由此驗證得知平均周期計算公式已完成修正，且其他波浪參數的結果不會受到影響。

由敏感度分析的結果顯示 STABSH、LAMBDA、NLPROP 等三個參數對模式計算結果較為敏感。進一步對參數進行率定後確實有效改善波浪模式計算結果。

為了提供預報員預報產品，現已完成預報產品圖形化之程式開發與製作，並已每日作業化執行預報產品輸出。預報員可由風湧浪特性、波浪等值圖與方向波譜圖判讀海況，做出正確的湧浪預報。

謝誌

本論文係中央氣象局委外開發設計案「災害性

天氣監測與預報作業建置計畫-改善海象預報作業」之研究成果，承蒙中央氣象局經費之補助使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

參考文獻

1. Komen, G.J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S. and Janssen, P.E.A.M. (1994) "Dynamics and Modelling of Ocean Waves," *Cambridge University Press*, 532 pp.
2. Lee, B.C., Fan, Y.M., Chuang, Laurence Z.H. and Kao, C.C. (2009) "Parametric Sensitivity Analysis of the WAVEWATCH III Model," *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences*, Vol.20, pp. 425-432.
3. Tolman, H.L. (1991) "A Third-generation Model for Wind Waves on Slowly Varying, Unsteady and Inhomogeneous Depths and Currents," *J. Phys. Oceanogr.*, 21, pp. 782-797.
4. Tolman, H.L. (1992) "Effects of Numerics on the Physics in a Third-generation Wind-wave Model," *J. Phys. Oceanogr.*, 22, pp. 1095-1111.
5. Tolman, H.L. (1997) "User Manual and System Documentation of WAVEWATCH-III Version 1.15," *NOAA / NWS / NCEP / OMB Technical Note 151*, 97 pp.
6. Tolman, H.L. (1999) "User Manual and System Documentation of WAVEWATCH-III Version 1.18," *NOAA / NWS / NCEP / OMB Technical Note 166*, 110 pp.
7. Tolman, H.L. (2009) "User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III Version 3.14," *NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note 276*, 194 pp.+ Appendices .
8. WAMDIG, (1988) "The WAM model – a Third Generation Ocean Wave Prediction Model," *J. Phys. Oceanogr.*, 18, pp. 1775-1809.