

近岸風浪模式預報

許泰文¹ 歐善惠¹ 廖建明¹ 陳亞嵐¹

國立成功大學水利及海洋工程學系¹

摘要

本文利用求解波浪作用力平衡方程式發展風浪數值模式 WWM (Wind Wave Model) (Hsu 等人, 2005), 其採用分步法的解析技巧, 並以有限元素法離散控制方程式, 對於不規則之海岸邊界及複雜地形水深之解析具有便利性, 可改善使用巢狀格網逐步計算的繁複過程, 能節省計算流程並提高計算之精確性。透過驗證結果的分析發現, WWM 模式的數值解析精度有優異的表現, 波浪示性波高、週期均具有相當良好的準確度。

關鍵字：波浪作用力平衡方程式、風浪模式、WWM、分步法、有限元素法

一、前言

波浪推算始於第二次世界大戰後期, 由於目前對於風浪成長發達的機制尚未完全瞭解, 在工程應用上仍需從風場資料來推算海面的風浪特性。波浪推算的方法分為示性波法及波譜法。示性波法以 SMB 法較具代表性, 適用於季風波浪的推算。波譜法則有 PNJ 波譜法, 此法適用在風域、風速以及風向變化不大風浪預報, 此法必須依標準步驟查圖, 在應用上相當不便。由於現代電腦科技進步神速, 使用數值模式來預測波浪成長與發達成為主要趨勢。目前波浪模式已邁入第三代波浪模式, 如 WAMDI (1988) 所提出的第三代風浪模式 WAM (Wave Model), 同時它也是目前各國最常使用的深海風浪之預報模式, 但其對於近岸淺水之風浪運動行為模擬則略顯不足。近來在近岸海域之風浪模擬可由荷蘭 Delft 大學所發展之 SWAN (Simulating WAVes Nearshore) (Booij 等人, 1996) 補足大尺度範圍模式對近岸風浪行為模擬的不足, SWAN 模式除了包含第三代風浪模式的特徵外, 同時考慮波浪在近岸海域的傳遞特性和變形效應, 更能符合波浪在實際海域的波動現象。歐等人(1999)及 Ou 等人(2002)也曾利用 SWAN 模式對侵襲台灣之颱風風浪做過一系列之研究與模擬, 並且已有初步成果。由於

SWAN 模式所利用之波浪作用力平衡方程式為簡化之方程式, 在地形平緩與海流流速較小狀況下, 能適當模擬近岸海域之波浪, 但台灣東部海域坡度較陡, 由於陡變地形所產生波浪淺化效應在簡化的 SWAN 模式方程式中會有低估情況(廖, 2001)。Wang 和 Yu (2000)嘗試推導波浪作用力平衡方程式的完整型式並討論方程式中修正因子對預報結果之影響。他們的實例計算缺乏完整性, 無法探究每項因子對模式之影響權重。例如, 修正因子隨水深和週期變化, 在不同的相對水深, 各項修正因子具有不同之重要性。

本文利用求解波浪作用力平衡方程式發展風浪數值模式 WWM (Wind Wave Model) (Hsu 等人, 2005), 其數值方法採用分步法之解析技巧, 將控制方程式分解成三個物理意義相同的空間加以求解, 降低控制方程式之維度以節省記憶空間和計算時間, 進而提高計算效率; 再以有限元素法離散控制方程式, 對於不規則之海岸邊界及複雜地形水深可直接加密而具有便利性, 可以改善使用巢狀格網逐步計算的繁複過程, 能節省計算流程並提高計算之精確性。期望風浪模式能適用於台灣海岸多變地形與特殊海象, 提升風浪模式作業化預報之推算能力與效率, 作為預測颱風波浪之適當工具。

二、數值模式

2.1 控制方程式

Bretherton 和 Garrett (1968) 利用荷米頓法則 (Hamilton principle) 推導出單一份波波浪作用力平衡方程式 (wave action balance equation)，利用 Willebrand (1975) 之方法，可獲得連續形式之波浪作用力平衡方程式如下，

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(C_x N)}{\partial x} + \frac{\partial(C_y N)}{\partial y} + \frac{\partial(C_\sigma N)}{\partial \sigma} + \frac{\partial(C_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (1)$$

在考慮有流的影響下， C_x 與 C_y 可表示為，

$$C_x = \frac{dx}{dt} = C_g \cos \theta + U_x \quad (2)$$

$$C_y = \frac{dy}{dt} = C_g \sin \theta + U_y \quad (3)$$

而 C_θ 與 C_σ 可由分散方程式、波數保存方程式與波數向量的無旋性推導而得，

$$C_\theta = \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{k} \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left(\sin \theta \frac{\partial d}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial d}{\partial y} \right) + \left(\sin \theta \frac{\partial U_s}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial U_s}{\partial y} \right) \quad (4)$$

$$C_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left(\frac{\partial d}{\partial t} + U_x \frac{\partial d}{\partial x} + U_y \frac{\partial d}{\partial y} \right) - C_g k \left(\cos \theta \frac{\partial U_s}{\partial x} + \sin \theta \frac{\partial U_s}{\partial y} \right) \quad (5)$$

式(1)左側第一項為波譜密度函數之時變項，第二與第三項為對流項，第四與第五項分別表示地形與洋流所造成的波浪頻率位移與折射效應；方程式右側為源函數，包含波浪成長與消散效應。其中波浪成長與消散效應包含深水海域之風浪成長、白沫消散、波波交互作用與淺水海域之底床摩擦、碎波消散與非線性淺化效應等。

2.2 數值方法

由於求解波浪作用力平衡方程式在各領域變化時，耗費大量記憶體與計算時間，故本模式採用分步法 (Fractional Step Method) (Yanenko, 1971) 將波浪作用力平衡方程式依空間、頻率及角度領域特性區分，

並以時間變數進行離散，以縮短模式計算時間，離散方式如下：

$$\frac{N^{n+1/3} - N^n}{\Delta t} + \frac{\partial}{\partial \sigma} (C_\sigma N) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{N^{n+2/3} - N^{n+1/3}}{\Delta t} + \frac{\partial}{\partial \theta} (C_\theta N) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{N^{n+1} - N^{n+2/3}}{\Delta t} + \frac{\partial}{\partial x} (C_x N) + \frac{\partial}{\partial y} (C_y N) = \tilde{S}_{tot} \quad (8)$$

其中 Δt 為時間間距， N^n 、 $N^{n+1/3}$ 、 $N^{n+2/3}$ 及 N^{n+1} 分別為 n 、 $n+1/3$ 、 $n+2/3$ 及 $n+1$ 時刻之波浪作用力密度譜， $\tilde{S}_{tot} = S_{tot} / \sigma$ 。如此可使方程式轉換成具有較低維度，並可針對不同物理特性空間，利用適合之數值方法來求解。

為節省計算時間並增加精確度，使用有限元素法求解空間領域之分步式。利用泰勒-葛拉金 (Taylor-Galerkin) (Donea, 1984; Selmin 等人, 1985) 法，在時間領域採用泰勒級數展開法，在空間領域中則使用標準葛拉金法來加以離散。考慮計算之效率與精度，刪除尺度較小之項，即可得到泰勒-葛拉金法之離散方程式為，

$$\left\{ \mathbf{M} + \Theta \left[\begin{array}{c} \Delta t (\mathbf{VM}_a - \mathbf{SM}_a) \\ -\frac{\Delta t^2}{2} (\mathbf{VM}_b - \mathbf{SM}_b) \end{array} \right] \right\} \mathbf{N}^{n+1} = \left\{ \mathbf{M} - (1 - \Theta) \left[\begin{array}{c} \Delta t (\mathbf{VM}_a - \mathbf{SM}_a) \\ -\frac{\Delta t^2}{2} (\mathbf{VM}_b - \mathbf{SM}_b) \end{array} \right] \right\} \mathbf{N}^{n+2/3} \quad (9)$$

上式中粗體表示為矩陣形式。

三、結果與討論

由於風浪模式的主要外力為風，風浪模式的計算必須與提供預報風場資訊的端點配合，才能進行風浪模式作業化的推算流程，架構完整風浪預報系統。本文採用的風場資料是由中央氣象局提供，目前中央氣象局的大氣模式可預報未來 72 小時的氣壓場與預報風場資料，預報的網格尺度共有三種類型，如表 1 所示。為了滿足風浪模式的推算範圍及推算精度，風場採用大氣模式中尺度 MC 模式之預報資料，其解析網格度為 $15\text{km} \times 15\text{km}$ ，網格數為 181×193 ，格點位置分別為左下點 (9.28194°N , 109.7727°N)、右上點

(35.2665°N, 137.7342°N)。

表 1 中央氣象局所提供之有限區域大氣模式網格資訊

模式	DMS FLAP	網格數	解析度
NFS	RC	221x127	45 km
	MC	181x193	15 km
	HC	91x121	5 km

中央氣象局將預報風場資料加碼並以 UTC 時間釋出，對所取得之風場資料進行解碼、座標轉換及資料內差等作業，風場轉換採用 Lambert 座標轉換法進行風場坐標轉換，獲得符合 WWM 模式所需格式的風場資料。取得風場資料後，進行 WWM 模式波浪計算，最後獲得數值模式的波浪資料，完成 WWM 模式波浪預報流程。

為了說明驗證數值波浪模式，以 2004 年 7 月至 2004 年 9 月期間所發生的颱風波浪為例。WWM 模式計算範圍為東經 110°~134°、北緯 10°~35°，不規則的三角網格分布如圖 1 所示，其中共有 3788 個節點、7096 個元素。風場資料經解碼內插後的輸出範圍與計算範圍相同，時間間隔為 1 小時。為了驗證 WWM 模式預報波浪的能力，與 WAM/SWAN 巢狀網格計算的預報結果作比較，遠域以 WAM 模式計算，WAM 模式的特性為適用於深水海域且計算效率快速，取較粗的網格間距為 0.2°，計算範圍為東經 110°~134°、北緯 10°~35°；近岸海域以 SWAN 模式計算，SWAN 模式的特性是能描述波浪在淺水地形的物理機制演變，故取較細的網格間距為 0.04°，計算範圍為東經 119°~123°、北緯 21°~25°。為了配合 WAM/SWAN 巢狀網格的解析度，遠域海域的水深資料來源參考美國 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 之 NGDC (National Geophysical Data Center) 建立全球陸地與海底地形資料庫(ETOPO2)，地形資料解析精度為 2 弧分，模式計算範圍的水深分布如圖 2 所示。近岸海域的水深資料來源為國家海洋科學研究中心之台灣附近海域海底地形第六版(TaiDBMV6)，水深資料解析度為 500 公尺，如圖 2 中之方框所示。最小與最大截頻分別為 0.05 Hz 和 1.0 Hz，以指數遞增分佈為 25 個頻率帶，波譜在角度空

間的解析度為 $\Delta\theta = 15^\circ$ ，計算時間間隔為 $\Delta t = 10$ 分鐘。WWM 模式流程架設於個人電腦，作業系統採用 Mandrake 10.0 版本之 Linux 平台，中央處理器為 Pentium4 2.8 GHz，記憶體容量為 1 GB，模式以 Absoft Fortran Compiler for Linux (32-bit)編譯。

根據中央氣象局在 2004 年 6 月 25 日至 9 月 23 日期間所發佈的颱風警報，共計有 6 月 28 日至 7 月 3 日敏督利(Mindulle)颱風、7 月 14 日至 7 月 15 日康柏斯(Kompasu)颱風、8 月 10 日至 8 月 13 日蘭寧(Rananim)颱風、8 月 23 日至 8 月 26 日艾利(Aere)颱風及 9 月 11 日至 9 月 13 日海馬(Haima)颱風等 5 個颱風，此期間發生之颱風路徑如圖 3 所示。WWM 模式波浪預報時間為 6 月 26 日至 9 月 29 日，驗證模式計算結果採用的實測波浪資料由中央氣象局提供，目前台灣附近的波浪浮標觀測站分佈如圖 4 所示，配合 WWM 模式波浪預報的時間，選擇該期間內有效的觀測資料進行驗證，如七股、大鵬灣、金門、鵝鑾鼻、龜山島、花蓮、龍洞及蘇澳等八個測站。

圖 5 至圖 7 為大鵬灣、龜山島及花蓮海域示性波高之時序列圖，圖 8 至圖 10 為示性週期之時序列圖。在示性波高方面，WAM、SWAN 及 WWM 模式的計算結果與實測值相似，大致上可獲得相當良好的預報趨勢。以發生颱風時間來看，6 月 28 日至 7 月 3 日發生的敏督利颱風路徑屬於第四類路徑(七種路徑分類)，7 月 1 日敏督利颱風的路徑較為複雜多變，可能導致颱風風場資料產生誤差，使得各個模式在東部海域的計算結果與實測值略有差異(如龜山島、花蓮海域)；西部海域受到中央山脈的屏障，各個模式均有較佳的計算結果(如大鵬灣海域)。在 7 月 11 日至 8 月 10 日期間，輕度康柏斯颱風對於台灣附近海域的影響較小，此期間多為波浪變化緩和的季風波浪，各個模式均有良好的預報趨勢。在示性週期方面，大致上 WAM、SWAN 及 WWM 模式的計算結果屬於合理的預報趨勢。各個模式在東部海域的計算結果略有差異，其中以 8 月 2 日左右最為明顯，由圖 9 及圖 10 中可發現，WWM 模式的計算結果較符合實測值，WAM、SWAN 模式的計算結果則有低估的現象；在大鵬灣海域的計算結果較具一致性。由以上分析可知，本文建立之 WWM 模式進行波浪預報，其計算結

果的趨勢與實測值相當吻合，進一步與 WAM/SWAN 模式巢狀網格計算的結果比較，驗證了 WWM 模式應用於台灣海域波浪計算的合理性。

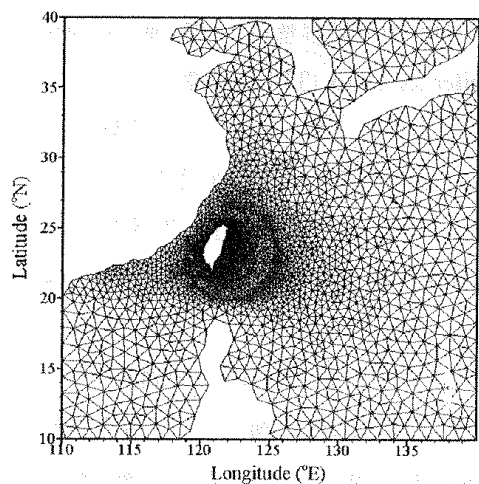


圖 1 WWM 模式有限元素法三角網格分布圖

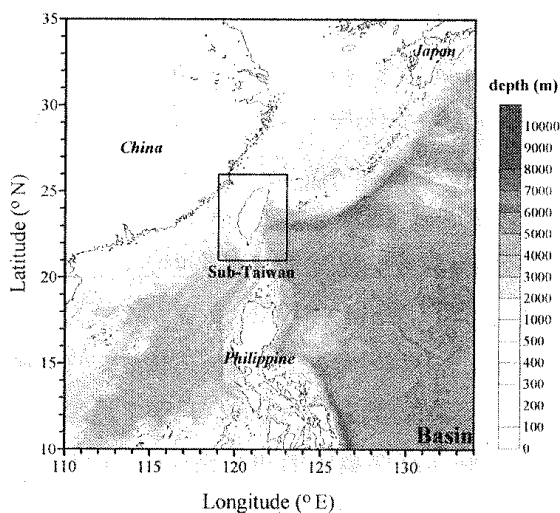


圖 2 模式計算範圍之水深分布圖

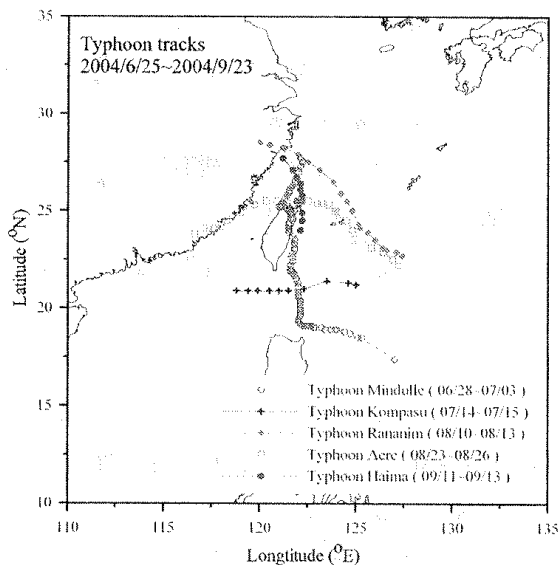


圖 3 6 月 25 日至 9 月 23 日發生颱風之路徑圖

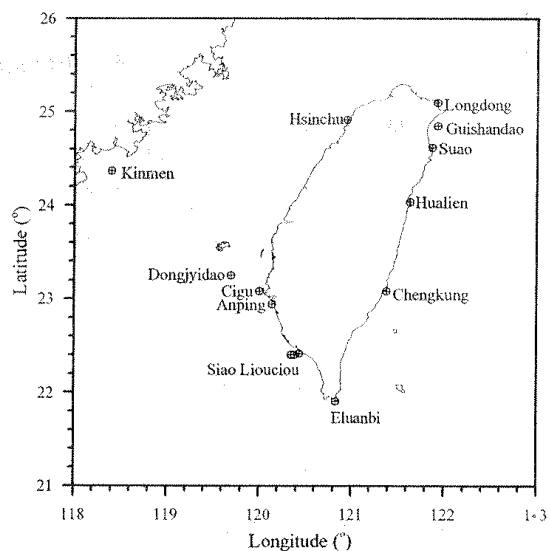


圖 4 台灣附近海域波浪觀測站之分布圖

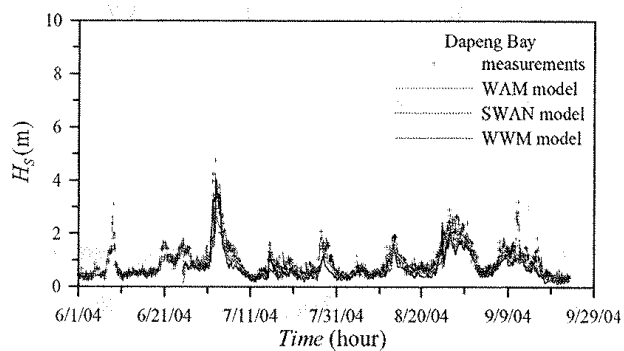


圖 5 大鵬灣海域附近示性波高之時序列圖

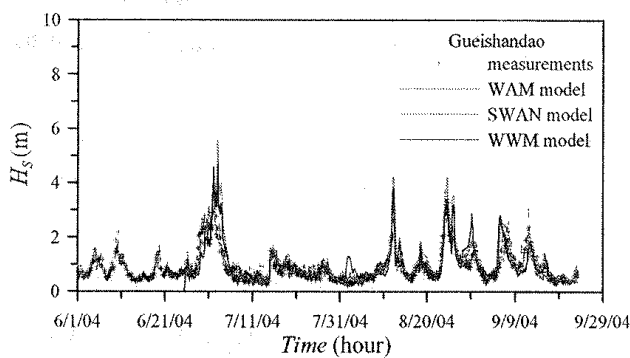


圖 6 龜山島海域附近示性波高之時序列圖

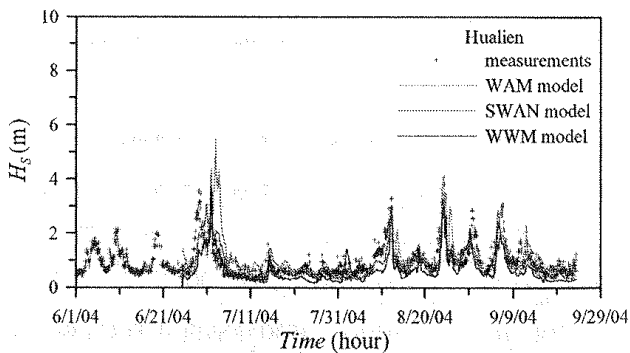


圖 7 花蓮海域附近示性波高之時序列圖

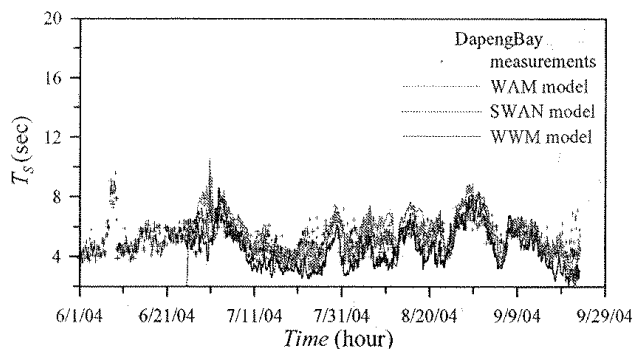


圖 8 大鵬灣海域附近示性週期之時序列圖

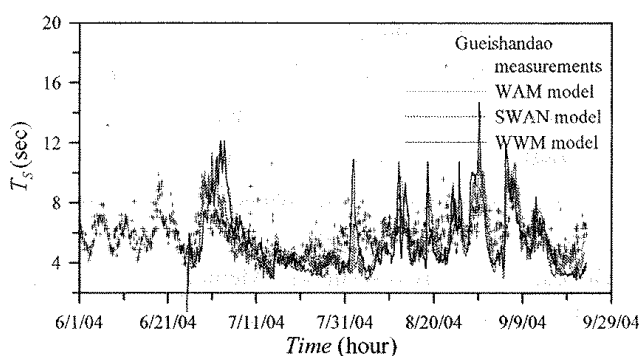


圖 9 龜山島海域附近示性週期之時序列圖

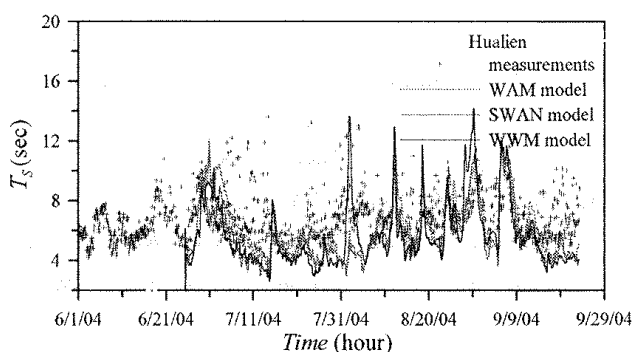


圖 10 花蓮海域附近示性週期之時序列圖

表 2 為 WWM、WAM 及 SWAN 模式波浪預報結

果的相關係數比較表，表中列舉的驗證測站分別為七股、大鵬灣、金門、鵝鑾鼻、龜山島、花蓮、龍洞及蘇澳等測站。在示性波高方面，WAM 模式在各測站的驗證結果優劣差異較大，其中花蓮測站的相關係數僅有 0.53，金門測站的相關係數 0.84 為較佳。SWAN 模式在各測站的驗證結果優劣差異較為一致，相關係數約在 0.68~0.79 之間。WWM 模式在各測站的驗證結果優劣差異較小，其中大鵬灣測站的相關係數 0.88 為整體之最。在示性週期方面，各模式的驗證結果大部分為偏低的相關係數，相關係數優劣差異約在 0.10~0.70 之間，其中 WAM、SWAN 模式在鵝鑾鼻測站的相關係數僅有 0.10、0.06；在花蓮測站的相關係數僅有 0.14、0.20，相較之下，WWM 模式的驗證結果明顯優越於其他模式。在風速方面，各模式的驗證結果優劣差異也較大，約在 0.20~0.70 之間，其中 WAM、SWAN 模式在花蓮測站的相關係數 0.18、0.24 為低；而 WWM 模式驗證結果的相關係數較佳，多數測站具有 0.60 以上的相關性（如七股、金門、鵝鑾鼻、龜山島及龍洞等測站）。從測站的平均值可以發現，數值模式預報波浪的精準度以 WWM 模式為最，不論在示性波高、週期及風速方面，驗證結果與實測值的相關係數表現均優於 WAM、SWAN 模式。由以上分析可知，本文建立之 WWM 模式適用於台灣附近海域的風浪預報，且模式結果具有相當良好的準確性，透過 WWM 模式的預報風浪，能即時提供完整、精準的波浪特性資料，以利附近海上作業、工程設計研究之用。

表 2 WWM、WAM 及 SWAN 模式作業化波浪預報相關係數之比較

測站	模式	WAM			SWAN nested			WWM		
		Hs	Ts	風速	Hs	Ts	風速	Hs	Ts	風速
七股		0.76	0.63	0.55	0.77	0.59	0.56	0.69	0.71	0.64
大鵬灣		0.82	0.66	0.37	0.78	0.63	0.42	0.88	0.67	0.56
金門		0.84	0.52	0.58	0.78	0.48	0.63	0.74	0.47	0.67
鵝鑾鼻		0.69	0.10	0.55	0.71	0.06	0.51	0.85	0.23	0.66
龜山島		0.80	0.56	0.62	0.78	0.58	0.85	0.79	0.52	0.69
花蓮		0.53	0.14	0.18	0.68	0.20	0.24	0.75	0.39	0.39
龍洞		0.62	0.42	0.55	0.79	0.51	0.57	0.84	0.62	0.63
蘇澳		0.65	0.47	0.51	0.78	0.56	0.56	0.80	0.69	0.59
平均值		0.71	0.44	0.49	0.76	0.45	0.54	0.79	0.54	0.60

表3為WWM、WAM/SWAN模式波浪預報流程之比較，表中列舉節點、格網間距、時效性等比較項目。WAM、SWAN模式分別在深水、淺水海域具有其計算優勢，為求高解析精度的計算結果，遂發展出WAM/SWAN巢狀網格的計算技巧，結合WAM、SWAN模式各自的優點，但卻不能同時保有準確度及計算效率。WWM模式利用有限元素法的解析技巧，不規則三角格網分布能任意地對複雜多變地形加密，縮小台灣附近海域的解析網格，模式利用分步的數值方法，將控制方程式分為空間、頻率、角度領域等三個物理特性逐步解析，從表中可以發現，WWM模式採用的數值方法確實能改良WAM/SWAN在計算時效及解析精度的取捨難題，並大幅提升風浪模式的計算效率。

表3 WWM模式與WAM/SWAN模式流程之比較

項目	WWM	WAM/SWAN
節點	3788	遠域 (101x126) 近岸 (101x125)
格網間距	最大 100 km 最小 2 km	遠域 (20 km) 近岸 (4 km)
計算實際 1 小時風浪所 需時間	0.83 分	總共 3.75 分 遠域 (2.25 分) 近岸 (1.5 分)

四、結論

本文之風浪模擬WWM模式，採用分步法的解析技巧，降低控制方程式之維度以節省記憶空間和計算時間。以有限元素法離散控制方程式，對於不規則之海岸邊界及複雜地形水深可直接加密而具有便利性，可以改善使用巢狀格網逐步計算的繁複過程，能節省計算流程並提高計算之精確性。透過驗證結果的分析發現，WWM模式的數值解析精度有優異的表現，波浪示性波高、週期均具有相當良好的準確度，在作業化計算流程的分析中，WWM模式也改善了WAM/SWAN計算時效的缺點，大幅提升了數值風浪模式的計算效率。WWM模式之建立，對於台灣海岸多變地形與特殊海象具有適用性，且能夠合理地描述台灣近岸波浪演變，提供完整、準確的預報資料。

致謝

本文係行政院國家科學委員會專題研究計畫「台灣環島海岸溢淹水位預報系統之建立-總計畫暨子計畫化：遠域颱風波浪數值推算(III)」(編號NSC-93-2625-Z006-002)之研究成果，承蒙國科會經費之補助使本研究得以順利完成，謹致感謝之意。

參考文獻

- Booij, N., L.H. Holthuijsen and R.C. Ris, The SWAN Wave Model for Shallow Water, *Proc. 25th Int. Conf. Coastal Eng.*, pp. 668-676 (1996).
- Bretherton, F.P. and C.J.R. Garrett, Wave Trains in Inhomogeneous Moving Media, *Proc. Roy. Soc. Lon.*, A302, pp. 529-554 (1968).
- Donea, J., A Taylor-Galerkin Method for Convective Transport Problem, *Int. J. Num. Meth. Eng.*, 20, pp. 101-119 (1984).
- Hsu, T.W., S.H. Ou and J.M. Liau, Hindcasting nearshore wind waves using a FEM code for SWAN, *Coastal Engineering*, Vol. 52, pp. 177-195 (2005).
- Selmin, V., J. Donea and L. Quartapelle, Finite Element Methods for Nonlinear Advection, *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.*, 52, pp. 817-845. (1985).
- Ou, S.H., J.M. Liau, T.W. Hsu and S.Y. Tzang, Simulating Typhoon Waves by SWAN Wave Model in Coastal Waters of Taiwan, *Ocean Eng.*, 29, pp. 947-971 (2002).
- Wang, Y., and Z. Yu, An Attempt to Improve SWAN Model, *Proc. 4th Workshop on Ocean Models for the APEC Region, Tainan*, pp. 3-1 - 3-3 (2000).
- WAMDI Group, The WAM Model - A Third Generation Ocean Wave Prediction Model, *J. Phys. Oceanogr.*, 18, pp. 1775-1810 (1988).
- Willebrand, J., Energy Transport in a Nonlinear and Inhomogeneous Random Gravity Wave Field, *J. Fluid Mech.*, 70, pp. 113-126 (1975).
- Yanenko, N.N., *The method of fractional steps*, Springer-Verlag. (1971).
- 歐善惠、許泰文、臧效義、方介群、廖建明，「應用SWAN波浪模式推算台灣附近海域颱風波浪之研究」，第二十一屆海洋工程研討會論文集，87頁-95頁 (1999)。
- 廖建明，「近岸風浪推算之研究」，國立成功大學水利及海洋工程研究所博士論文 (2001)。