

# WAM 模式之評介

陳 炫 杉

美國海洋和大氣總署，氣象中心，海洋預測組

## 摘 要

我們利用WAM模式和美國氣象中心的預測風場來進行全球海面波浪預測。WAM模式是屬於第三代波浪模式。它具有比較完備的非線性波與波之間的能量傳遞作用和新近的Janssen波能輸入。我們已將WAM模式預測的波浪和浮標觀測數據以及其他波浪模式預測的波浪進行比較驗證。結論是，WAM模式預測的指示波高都優於其他的模式，並且與浮標的觀測數據相當吻合，只是在極高波高有低估的現象。WAM的頻率波譜和方向波譜也都相當的合理。WAM模式的程式若在Cray-YMP計算機上使用，24小時的波浪預測只須用CPU 4分鐘不到的時間。

## 一、緒 言

準確瞭解和預測海上波浪的消長演變對海洋預報、海事規劃、海洋和大氣相互作用的研究、海洋工程和海岸工程都極為重要，在過去五十多年中，人們預測波浪的方法，已從經驗公式法 (Empirical Formula)，例如SMB指示波法 (Sverdrup and Munk 1947, Bretschneider 1958, Shore Protection Manual 1984)，PM波譜法 (Pierson and Moskowitz 1964)，JONSWAP波譜法 (Hasselmann et al. 1973)，發展到現在利用波能傳遞方程式 (Radiative Transfer Equation) 為基本方程式的波浪數值模式 (SWAMP Group 1985)。目前最先進的波浪模式已進入所謂的第三代波浪模式，WAM模式即是其中之一，雖然這些計算繁複的先進波浪模式，已使波浪預測達到相當準確的水平，但是波浪模式中的物理過程還是不夠完美健全，使人對於模式的一般性存有疑慮。我們都知道“無風不起浪”，但對於波浪的傳遞和消長過程，依然所知不全。在目前的波浪模式中，僅包括下列的物理過程：即波浪的傳播 (propagation)、淺化 (shoaling)、折射 (refraction) 和波能來源項 (source terms)。其中波能來源包括風能輸入 (wind generation)，

非線性作用的波與波之間波能傳遞 (nonlinear wave-wave energy transfer) 和波能消耗 wave dissipation)。在這些作用中，我們對風能輸入和波能消耗所知有限，只能採用經驗公式，其實這兩項的物理過程是相當的深奧微妙，目前還是被廣泛研究的項目之一，所以目前的波浪模式還是有待繼續研究改進。除此之外，還有一些已知的物理過程，例如波浪的繞射 (diffraction)，波浪和水流的相互作用 (wave-current interaction) 等，還未被納入模式中，原因不外是對其物理過程不清楚，或是不知如何才能有效的納入，或是屬於次級效應 (second order effect) 即在實際情況下對模式的波浪預測影響不大，由此看來模式的缺陷在所難免。總而言之，波浪模式發展到現在的第三代模式，雖未達到完美無缺的階段，但其波浪預測的準確性已達到相當高的水平。近年來第三代的波浪模式不僅常用在波浪傳遞消長演變的研究，也用在合理的工程設計，由於超級計算機 (super-computer) 普遍推廣，第三代的波浪模式已逐漸取代陳舊的模式，成為新近作業化的波浪預報模式。

下文我們將簡述WAM模式的物理基礎與其預測波浪的比較驗證。

## 二、模式的物理基礎

WAM是取自WAVE Model的簡稱，WAM模式原先由德國的Hasselmann發展出來的，後來經由以Hasselmann為首的WAMDI Group (The WAM Development and Implementation Group) 繼續不斷地在模式的物理過程和計算程式上加以修正改進 (The WAMDI Group 1988)。目前WAM模式已是第四修正版，Wamodel Cycle 4 (Gunther et al, 1992)。WAM模式是用來預測波浪傳遞消長的演變，它是以波能傳遞方程式 (radiative transfer equation) 為基本方程式，

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial c_{\phi} E}{\partial \phi} + \frac{\partial c_{\lambda} E}{\partial \lambda} + \frac{\partial c_{\theta} E}{\partial \theta} = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} \quad (1)$$

式中  $E(\phi, \lambda, t, f, \theta)$  為波能密度譜、 $(\phi, \lambda)$  為緯度和經度座標、 $t$  為時間、 $f$  為波頻率、 $\theta$  為波向、 $(c_{\phi}, c_{\lambda}, c_{\theta})$  為波浪在  $(\phi, \lambda, \theta)$  座標方向的波能傳播速度， $S_{in}$  為風傳遞到波浪的波能輸入通量 (flux)， $S_{ds}$  為波能消耗通量， $S_{nl}$  為非線性作用而產生的成份波之間的波浪能傳遞通量。

在不考慮水流的情況下，波能傳播速度為

$$C_{\phi} = \frac{d\phi}{dt} = \frac{C_g \cos \theta}{R} \quad (2)$$

$$C_{\lambda} = \frac{d\lambda}{dt} = \frac{C_g \sin \theta}{R \cos \phi} \quad (3)$$

$$C_{\theta} = \frac{d\theta}{dt} = \frac{C_g \sin \theta \tan \theta}{R} \quad (4)$$

式中  $C_g$  為波群速度，如在深水中的波群速度為  $C_g = g/(2w)$ ， $g$  為重力加速度， $R$  為地球半徑。

### (一) 波能輸入通量

波能輸入通量  $S_{in}$  基本上採用 Snyder 公式 (Snyder et al. 1981) 再以水面上的摩擦速度 (friction velocity)  $u_*$  代替原先5米高的風速  $U_5$  (Komen et al 1984)，去年更進一步，採用 Janssen 的風浪準線性理論 (quasi-linear theory, Janssen 1989, 1991) 加以修正。以往  $S_{in}$  僅假設為風速的函數而與波浪場無關，這是不準確的。Janssen 的理論說明  $S_{in}$  與風速和波生應力 (wave-induced stress) 都有密切的關係。因而波能的成長率與摩擦速度和粗糙高度 (roughness height) 有關。波能輸入通量為

$$S_{in} = \gamma_{in} w E(f, \theta) \quad (5)$$

式中  $w = 2\pi f$  為角頻率 (angular frequency)， $\gamma_{in}$  為波浪成長率

$$\gamma_{in} = \beta \frac{\rho_a}{\rho_w} \left[ \frac{U_*}{c} \cos(\theta - \phi) \right]^2 \quad (6)$$

式中  $\rho_a$  為空氣密度， $\rho_w$  為海水密度， $c$  為波速， $\phi$  為風向。

$$\beta = \frac{\beta_m}{K^2} \mu \ln^2(\mu), \quad \mu \leq 1 \quad (7)$$

式中  $k$  為 Von Karman 常數， $\beta_m = 1.2$ ， $\mu = Kz_c$  為無維臨界高度 (dimensionless critical height)，其中  $K$  為波數 (wave number)， $z_c$  為臨界高度 (critical height) 即在此高度風速等於波速，求臨界高度需要知道風廓線 (wind profile) 與粗糙高度 (roughness height)  $z_0$ 。

一般風作用在水波上的壓力可書為

$$\tau = Cd U^2(L) \quad (8)$$

式中曳力係數

$$C_d = \left[ \frac{k}{\ln\left(\frac{L}{z_0}\right)} \right] \quad (9)$$

粗糙高度

$$z_0 = \frac{\alpha \tau}{g} \sqrt{1 - \frac{\tau_w}{\tau}} \quad (10)$$

式中  $L$  為距離波面的平均高度， $\tau_w$  為波生產力

$$\tau_w = \rho_w \int \gamma_{in} w W E \cos(\theta - \phi) df d\theta \quad (11)$$

在實際應用上，波生應力的方向和風向是一致的。常數  $\alpha$  的選擇為當在老風浪 (old wind sea) 的情況下，應力  $\tau$  可導出 Charnock 關係式。

### (二) 波能消耗通量

Komen 諸人 (Komen et al 1984) 根據 Hasselmann (1974) 的碎波理論 (white capping theory) 而導出的波能消耗通量為

$$S_{ds} = \gamma_{ds} E \quad (12)$$

$$\gamma_{ds} = \frac{1}{2} C_{ds} \langle w \rangle \langle k \rangle^2 \epsilon^2 \left[ \frac{k}{\langle k \rangle} + \left( \frac{k}{\langle k \rangle} \right)^2 \right] \quad (13)$$

式中常數  $C_{ds} = 4.5$ ，平均角頻率  $\langle w \rangle$ ，平均波數  $\langle k \rangle$  和全波方差 (total wave variance)  $\epsilon$  為

$$\langle w \rangle = \epsilon^{-1} \iint E(f, \theta) w df d\theta \quad (14)$$

$$\langle k \rangle = \epsilon^{-1} \iint E(f, \theta) k df d\theta \quad (15)$$

$$\epsilon = \iint E(f, \theta) df d\theta \quad (16)$$

由方程式(12)， $S_{0i}$ 和 $E$ 是成準線性關係。由方程式(13)，波能消耗係數與波浪頻率的平方成正比。這些都附和Hasselmann的碎波理論。方程式(13)多加了 $-K^2$ 的項用來平衡高頻率的波能。

在淺水中，模式還要加一項因水底摩擦而消耗的波能通量

$$S_{br} = -\frac{r}{g^2} \frac{w^2}{\sinh^2 kh} E \quad (17)$$

式中 $r=0.038\text{m/s}$ ， $h$ 為水深。

### (二)非線性作用的波能傳遞通量

由非線性作用而產生的成份波之間的波能傳遞通量 $S_{ni}$ 是根據Hasselmann(1962)四個成份波的共振原理而導出的Boltzmann積分式(integral)，來計算這四個成份波之間的波能傳遞通量。Boltzmann積分式冗長而繁複，所以不抄錄於本文，Boltzmann積分式是六重積分計算費時甚久，一般不適合用於作業化的預報模式，在第三代模式中採用離散相互作用近似法(discrete interaction approximation)來計算Boltzmann積分式(Hasselmann et al 1985a, Hasselmann et al 1985b)。此法僅採用約20%的子集(subset)波浪共振組，因此計算速度快，其準確度也可達到90%。

在淺水中 $S_{ni}$ 應修正為

$$S_{ni}(\text{淺水}) = R(Kh)S_{ni}(\text{深水}) \quad (18)$$

式中

$$R(kh) = 1 + \frac{5.5}{kh} \left(1 - \frac{5kh}{6}\right) \exp\left(-\frac{5kh}{4}\right) \quad (19)$$

雖然這種修正很不合波浪淺水中的共振理論，但在還沒有得到正確有效的淺水理論之前，我們姑且用之。

顯然，不僅上文所述的物理過程有待改進，而且還有一些已知的物理過程尚納入模式中，例如波能的繞射、波浪與水流的相互作用等等。雖然如此，WAM模式包括的物理過程都比其他模式優越，無怪乎目前WAM模式在研究上和工程上已被廣為使用。許多與海洋有關的單位也都逐漸採用WAM模式為作業化的波浪預測模式。

## 三、數值計算

我們利用美國氣象中心，每三小時的分析風

場(analysis winds)和每三小時的預報風場(forecast winds)分別輸入WAM模式，計算24小時的全球海面波譜追報(hindcast)和72小時的全球海面波譜預報(forecast)。自從1991年11月起每天進行這種預測(prediction)計算。數值計算的海域緯度從南緯67.5度到北緯77.5度，經度從0度到360度，包括三大洋的海面。計算的空間精度(spatial resolution)為2.5度，時間精度(temporal resolution)為20分鐘，波譜區分為25個頻率，最低頻率為0.042Hz，相鄰頻率的比值為1.1，波向區分為12個方向，每個方向區為30度。

WAM模式應用有限差分法(finite difference method)求解。在方程式(1)中，平流傳播(advection propagation)的部份採用迎風差分(upwind difference)，波能來源項則採用隱含二階中心差分(implicit second order centered difference)。迎風差分法雖然計算較快，但它產生顯著的數值耗散(numerical dissipation)因而影響波能來源項的準確性，這是模式急須改進的項目之一(Chen 1992, Tolman 1992)。

WAM模式不僅具有比較完整的非線性作用的成份波之間的波能傳遞，而且在計算過程中，對每一個時間算出的波譜不加任何限制，這是第三代的模式的特徵和優點。

WAM模式使用Cray YMP超級計算機來執行運算，快速又有效率，24小時的波浪預測只須CPU 4分鐘不到的時間。但若使用Cyber 205超級計算機來執行同樣的運算就要花費CPU 20多分鐘的時間(Chen 1991, 1992)。這是因為WAM模式的計算程式的工作控制語言(Job Control Language, JCL)主要是根據Cray YMP計算機硬體和其操作系統軟體的特性而設計的。

## 四、比較驗證

我們從WAM模式預測的波浪可看出，WAM波浪的全球分佈概圖，如圖1所示，和風的概圖，如圖2所示，是很接近一致的，這是相當合理的結果，在圖1， $H_s$ 為指示波高，在圖2， $U_{10}$ 為10米高的風速，我們將WAM波浪和美國浮標數據中心(NBDC, National Buoy Data Center)的24個深水浮

24-Hour Forecast Wave Hs (ft)

Time: 93 10 11 00

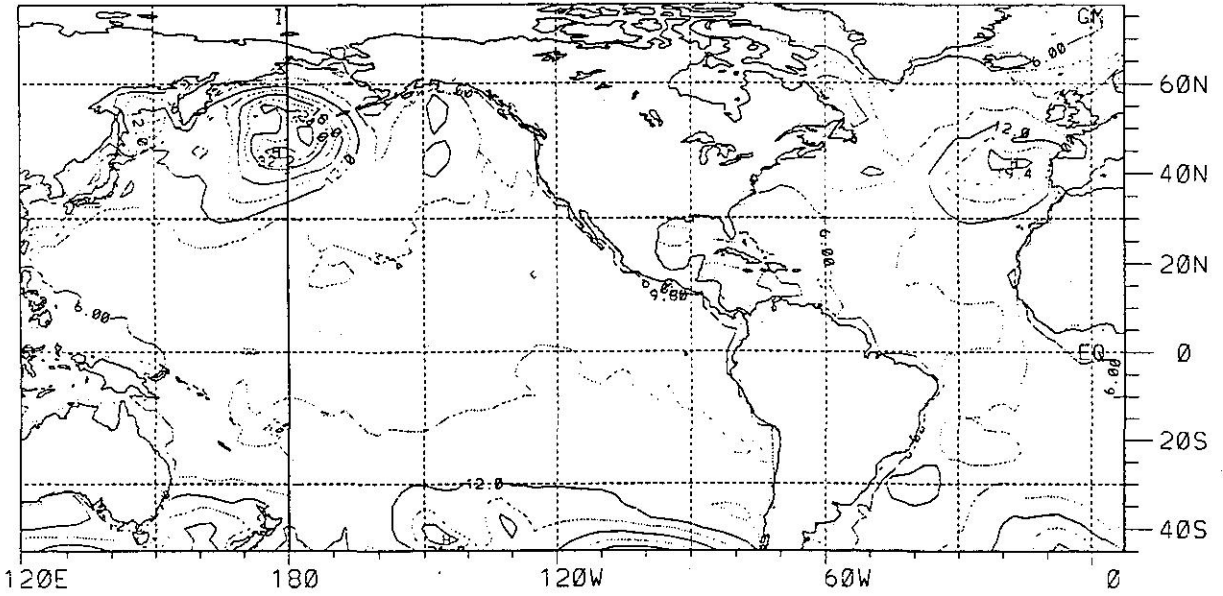


圖1 24小時預報的指示波等高線概圖

24-Hour Forecast Wind U10  $10 \text{ m/s}$

Time: 93 10 11 00

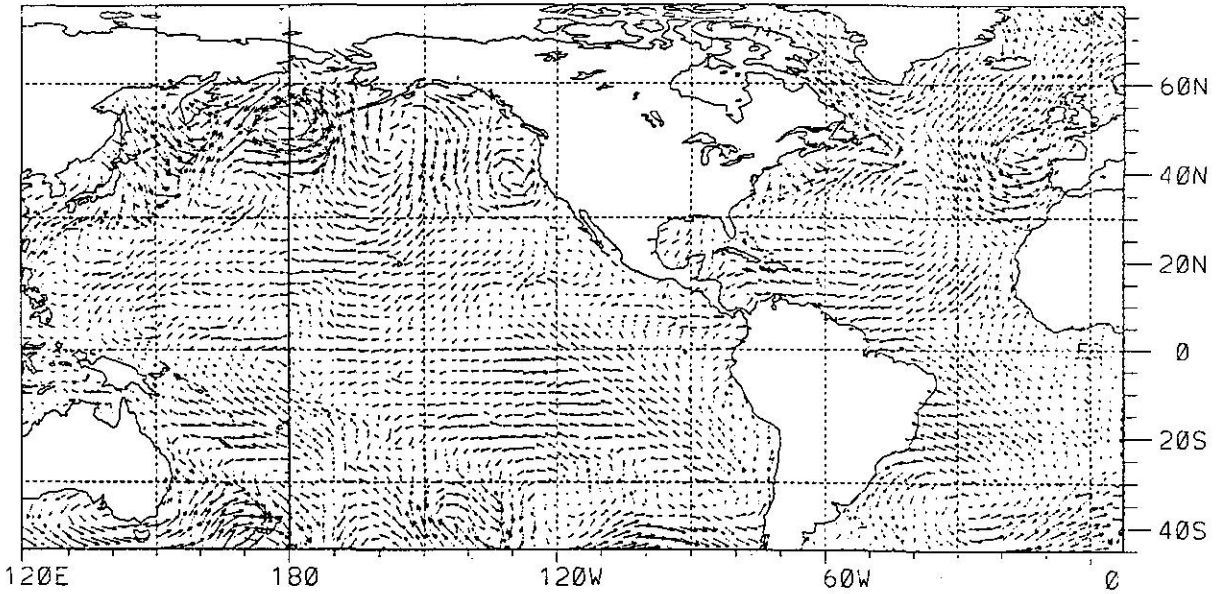


圖2 24小時預報的海面風向量概圖

Buoy 46006, SE Papa (40.8N, 137.6W)

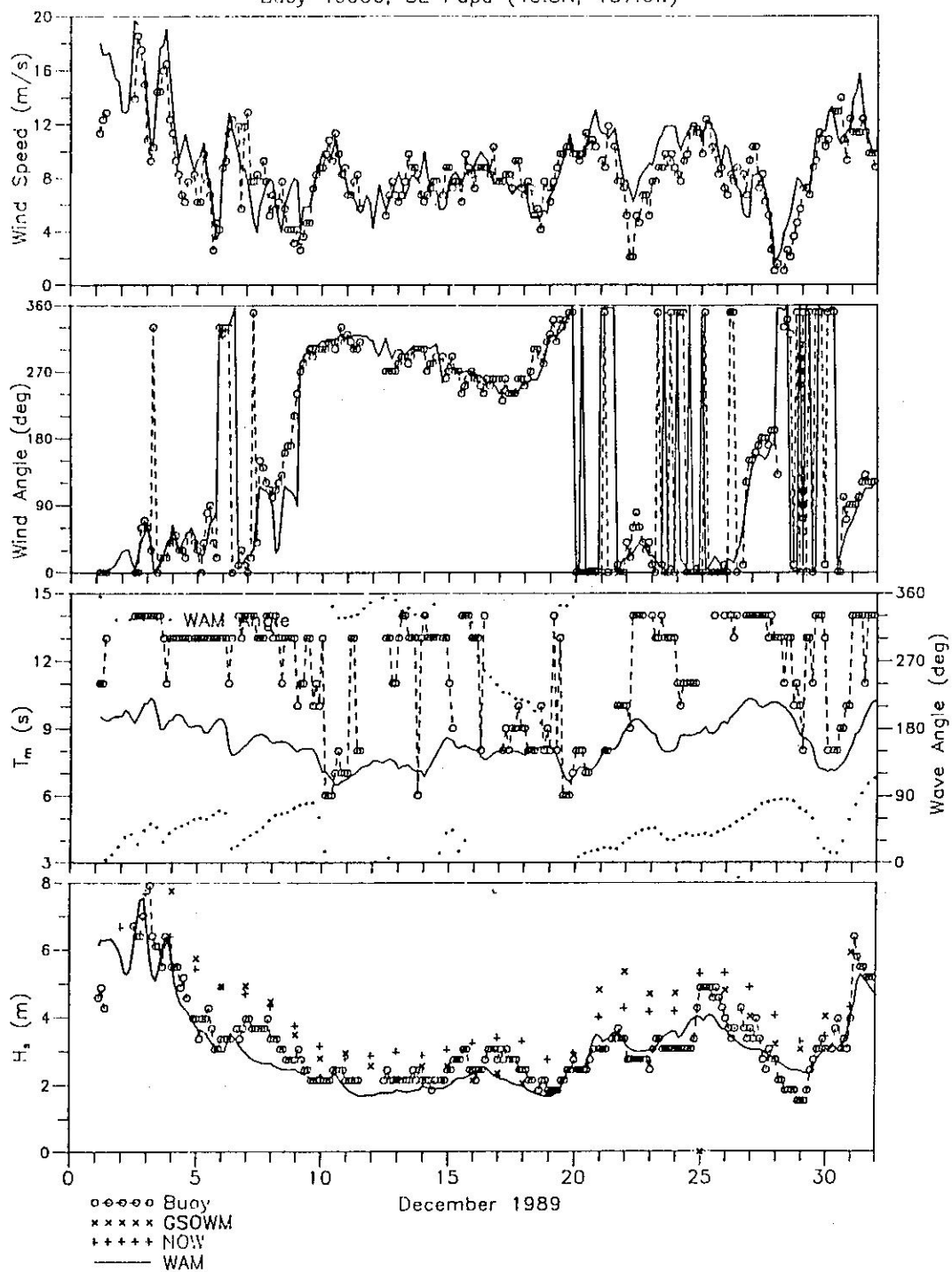


圖3 在浮標站的指示波高時間序列比較

24/48/72 HOUR FORECAST

■ = WAM  
 ▨ = NOW

GLOBAL BASIN

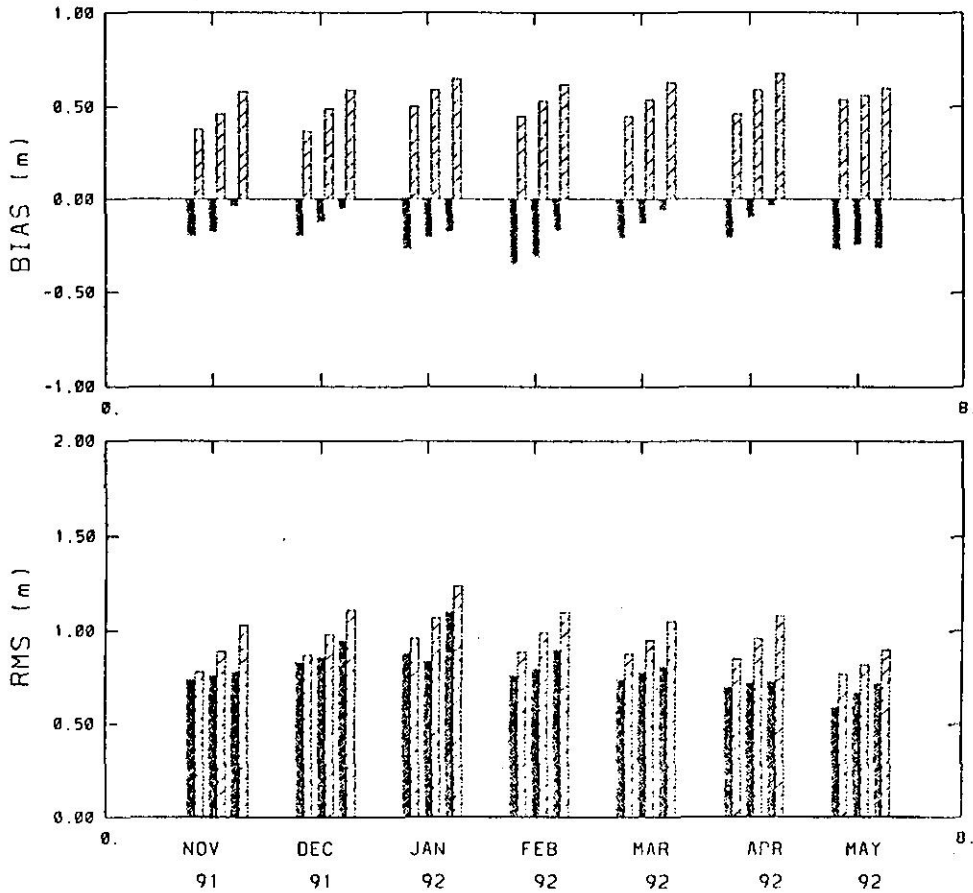


圖4 24、48和72小時預報的指示波高統計量比較

標的波浪數據進行比，這些深水浮標站的編號為在日本南方的21004和22001，在智利西方的32302，在阿拉斯加灣的46001，46002，46003，46005和46006，在白令海峽的46035，在加利福尼亞州西方的46025和46042，在夏威夷海域的51001和51004，近南極圈的17001，在美國本土東方的41001，41002，41006，41008，44004，44008，44011和44014，在墨西哥灣的42001和在愛爾蘭西方的62108。

比較指示波高的時期序列(time series)的結

果，一般顯示WAM波浪和浮標數據很吻合，只是在極高波高(extreme waves)有低估的現象。WAM波浪一般都比其他模式為優。典型的例子如圖3所示。圖中GSOWM和NOW分別為目前美國海軍和氣象中心所使用的作業化模式。WAM24、48和72小時預測的波浪一般都優於目前的NOW模式。由圖4可見WAM的統計量(statistic measures)如偏差，均方根差 (root-mean-square error, RMSE) 都比NOW模式小。WAM的偏差 (bias) 一般都為負值。頻率波譜的比較，如圖5所示。一般顯示，

WAM波譜形狀 (spectrum shape) 很接近浮標數據，特別是在高頻部份，反觀NOW的波譜形狀在峰頻 (peak frequency) 右邊有一小峰消之不去，原因是NOW模式不具備有效的非線性波與波之間的波能傳遞作用。WAM的頻率波譜在峰頻及其左邊低頻率部份也有低估的現象。在方向波譜方

面，我們沒有數據比較；我們知道當海上風場迅速轉向時，很少有波浪模式能做到滿意的預測，但在WAM模式的方向譜 (directional spectrum) 上，如圖6所示，我們可以看出波譜隨風轉向的情形是相當合理的。圖中Sp Den為波譜密度比值， $W_a$ 為平均波向， $U_a$ 為風向。

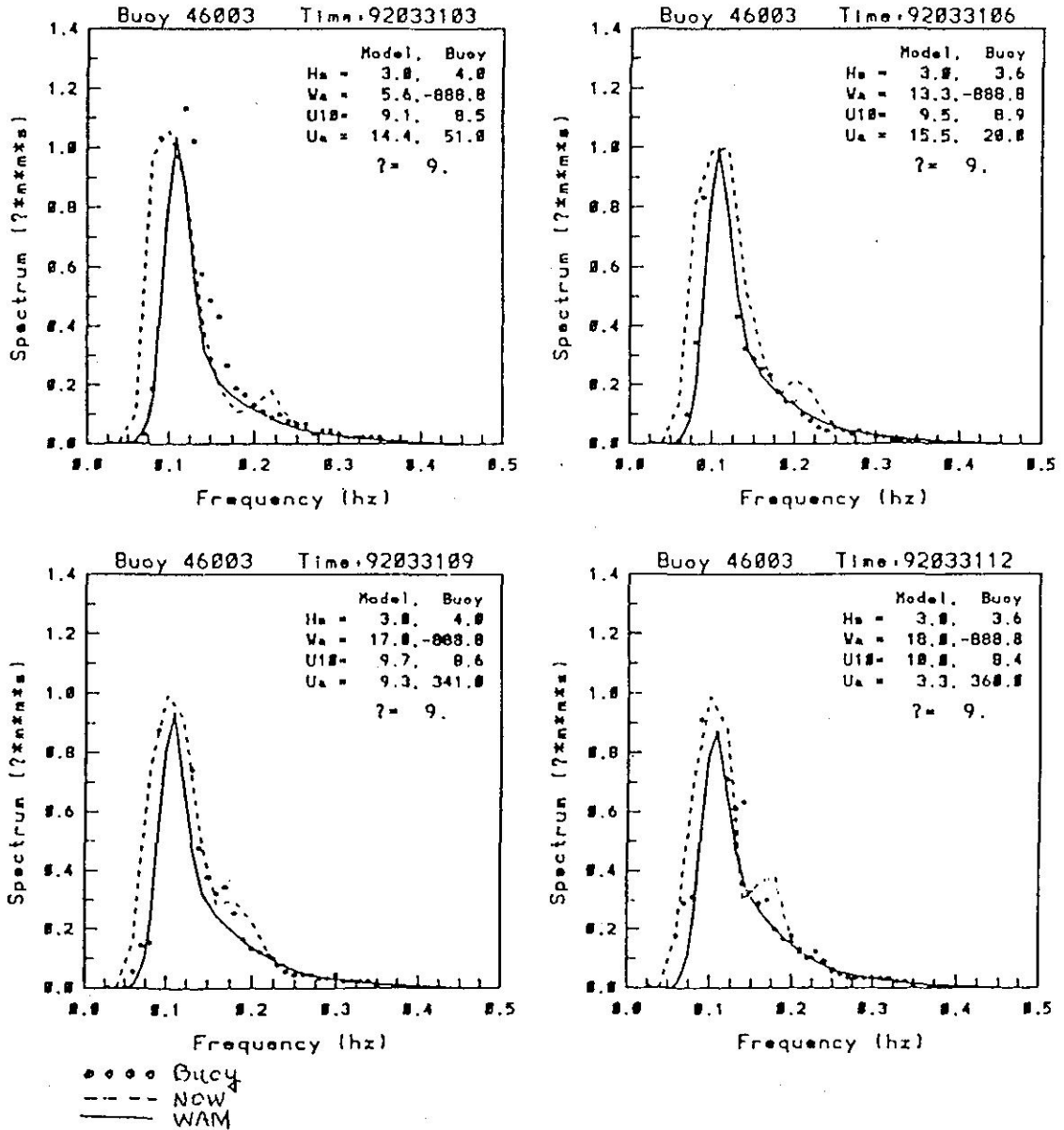


圖5 頻率波譜的比較

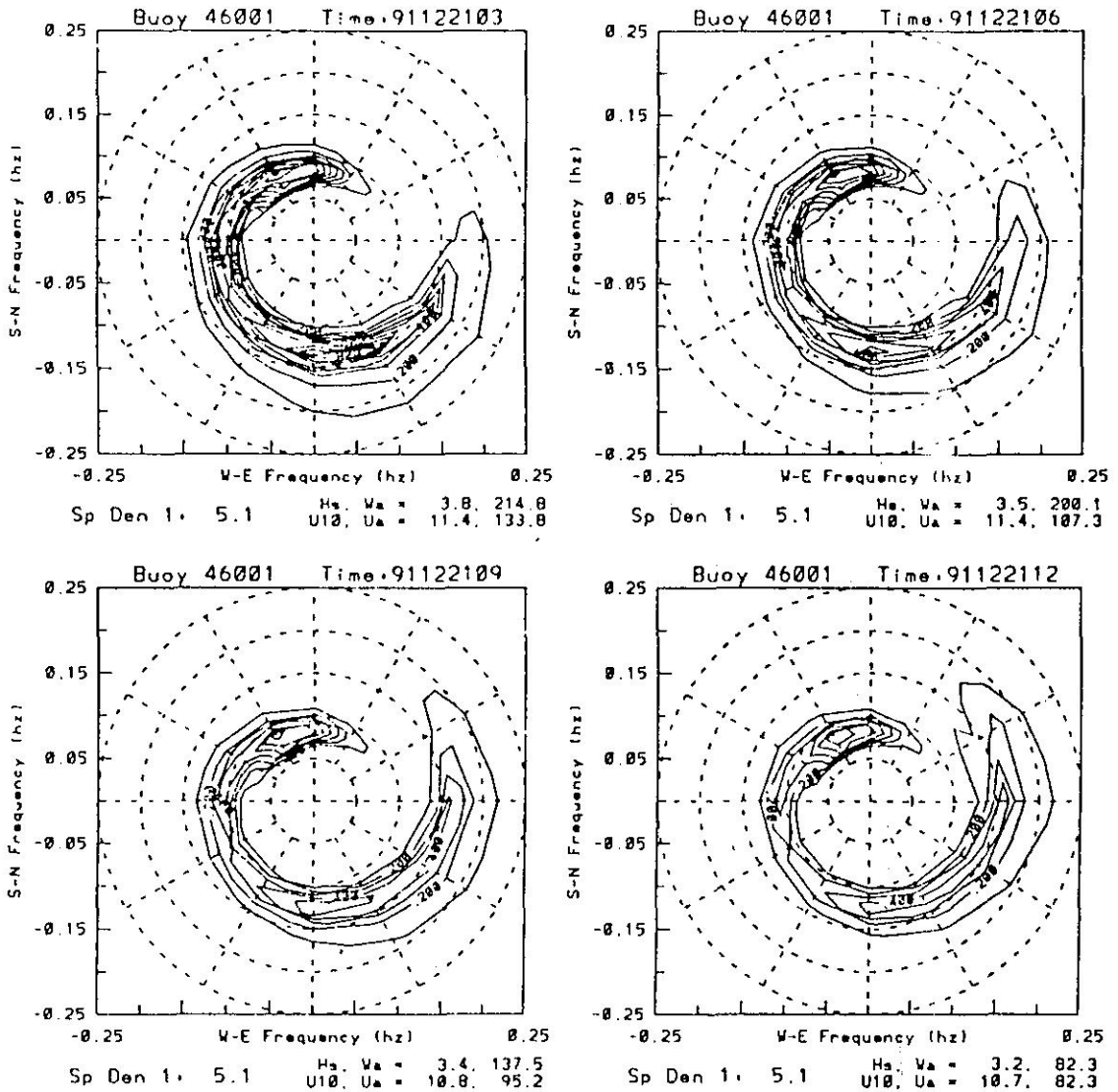


圖6 風向迅速轉變的WAM方向波譜

## 五、結 語

我們利用WAM模式和美國氣象中心的預測風場 (wind fields) 來進行全球海面波浪預測 (prediction)。WAM模式是屬於第三代波浪模式，也是目前最先進又最廣泛使用的模式，用來預測波浪的風場有二，一是分析風場 (analysis winds) 用來計算 24 小時的波浪追報 (hindcast)，另一是預報風場 (forecast winds)

用來推算72小時的波浪預報 (forecast)。自從1989年底以來，我們已將WAM模式預測的波浪和浮標觀測數據以及其他波浪模式預測的波浪進行比較驗證。一般的結論是，WAM模式預測的指示波高 (significant wave height) 都優於其他的模式，並且與浮標的觀測數據相當吻合，只是在極高波高 (extreme waves) 有低估的現象。統計量 (statistical measures) 比較的結果，顯示WAM指示波高的偏差 (bias) 一般都為負值，但其絕對值都比



其他模式為小，它的均方根差（root mean square error）也比其他模式為小。

因為WAM模式具有比較完備的非線性波與波之間的能量傳遞作用，所以它的頻率波譜形狀（frequency spectrum shape）也比其他模式的預測更接近浮標觀測數據。當海上風場迅速轉變方向時，很少有波浪模式能做到滿意的預測，但在WAM模式的方向波譜（directional spectrum）上，可以看出隨風轉向的波譜分佈是相當合理的，可惜我們沒有適當的方向波譜的觀測數據來加以驗證。WAM模式的計算程式（computer code）有一部份是按照計算機的硬體和操作系統的軟體而設計的。若在Cray-YMP計算機上使用，運算起來效率非凡，24小時的波浪預測只須CPU 4分鐘不到的時間。

WAM模式雖然並不是一個完美無瑕的模式，但它具有比其他模式更優越的物理過程，更有效率的計算程式和更佳的預測結果，所以無論在研究上或在工程上，已廣被使用，許多有關海洋的單位也逐漸淘汰陳舊的模式而以WAM模式為作業化的波浪預測模式。

## 六、參考文獻

- Bretschneider, C.L., 1958 : Revisions in wave forecasting : Deep and shallow water, Proc, Int. Conf. Coastal Eng, ASCE, 6th, pp 30-67.
- Chen, H. S. 1991 : Wave Calculation Using WAM model and NMC wind, Mechanics Computing in 1990's and Beyond, Vol I,(ed) H. Hojjat and R. L. Sierakowski, ASCEEM, pp 368-372.
- Chen, H. S., 1992 : Taylor-Galerkin method for wind wave propagation, Engineering Mechanics, Proceedings of the Ninth Conference,(ed) L. D. Lutes and J. M. Niedzwecki, ASCE, pp 87-90.
- Chen, H. S. 1993 : Global wave prediction, using the WAM model and NMC winds, Advances in Hydro-science and-Engineering, Voll, Part B,(ed) S. S. Y. Wang, Center for Computational Hydroscience and Engineering, The Univ. of Mississippi, pp 1453-1460.
- Gunther, H., Hasselmann, S., and Janssen, P. A. E., 1992 : Wamodel Cycle 4, Deutsches KlimaRechenZentrum, Technical Report No. 4, ed. Beteuungsgruppe, M., Hamburg.
- Hasselmann, K., 1962 : On the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum. 1, General theory, JFM, Vol 12, pp 481-500.
- Hasselmann, K., 1974 : On the characterization of ocean waves due to white capping, Boundary-Layer Meteorology, Vol 6, pp 107-127.
- Hasselmann, K., Barnett, T. P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D. E., Enke, K., Ewing, J. A., Gienapp, H., Hasselmann, D. E., Kruseman, P., Meerburg, A., Muller, P., Olbers, D. J., Richter, K., Sell, W, and Walden, H., 1973 : Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea wave project (JONSWAP), Deutsch, Hydrogr. Z., Suppl. A., 8(12).
- Hasselmann, S. and Hasselmann, K., 1985 : Computations and parameterizations of nonlinear energy transfer in a gravity wave spectrum. Part I : A new method for efficient computations of the exact nonlinear transfer integral, JPO, Vo 115, No 11, pp 1369-1377.
- Hasselmann, S., Hasselmann, K., Allender, J. H. and Barnett, T. P., 1985 : Computations and parameterizations of nonlinear energy transfer in a gravity wave spectrum. Part II : Parameterization of the nonlinear energy transfer for application in wave models, JPO, Vol 15, No 11, pp 1378-1391.
- Janssen, P. A. E. M., 1989 : Wave-induced stress and the drag of air flow over sea waves, JPO, Vol 19, pp 745-754.
- Janssen, P. A. E. M. 1991 : Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting, JPO, Vol 21, pp 1631-1642.
- Komen, G. J., Hasselmann, S., and Hasselmann, K., 1984 : On the existence of a fully developed wind sea spectrum, JPO, Vol 14, pp 1271-1285.

- Pierson, W. J. and Moskowitz, L., 1964 : A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii, *JGR*, 69, PP 5181-5190.
- Shore Protection Manual, Vol I, CERC, WES, U. S. Army Corps of Engineers, 1984.
- Snyder, R. L., Dobson, F. W., Elliot, J. A. and Long, R. B. 1981 : Array measurements of atmospheric pressure fluctuations above surface gravity waves, *JFM*, Vol 102, pp 1-59.
- Sverdrup, H. U. and Munk, W. H., 1947 : Wind, sea and swell : Theory of relations for forecasting, U. S. Navy Hydrographic Office Publication 601.
- The SWAMP Group, 1985 : *Ocean Wave Modeling*, Plenum Press, New York.
- The WAMDI Group, Dec. 1988 : The WAM model-A third generation ocean wave prediction model, *JPO*, Vol. 18, pp 1775-1810.
- Tolman, H. L., 1992 : Effects of numerics on the physics in third-generation windwave model, *JPO*, Vol 22, No 10, pp 1095-1111.

## EVALUATION OF THE WAM MODEL

Hsuan S. Chen

NOAA/NWS/NMC, Marine Prediction Branch

### ABSTRACT

We employed the WAM model and used the NMC (National Meteorological Center) winds as forcing to predict global ocean wave spectra. The WAM model is a third generation wave model. It implements a more complete calculation for nonlinear wave-wave interaction and the Janssen formulation for wave generation. The WAM waves have been compared with the NDBC (National Data Buoy Center) buoy data and results from other models. The comparison indicates that the WAM waves generally predict a good estimate of the significant wave height, but often under-predict the extreme waves when compared with the buoy data. Nevertheless, its accuracy and quantitative measures are shown to be better than those from the other models. Its frequency spectra and directional spectra all are very reasonable. The CPU time for a 24-hour prediction run on the NMC Cray-YMP computer is less than 4 minutes.