

# 波譜資料同化於 SWAN 波浪模式之研究

范揚洺<sup>1</sup> 李汴軍<sup>2</sup> 高家俊<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 國立成功大學水利及海洋工程學系博士班研究生

<sup>2</sup> 華梵環境與防災設計學系副教授

<sup>3</sup> 國立成功大學水利及海洋工程學系教授

## 摘要

本研究之目的在利用資料同化技術提昇波浪數值現報與預報模式之準確度。資料同化技術應用於數值預報與傳統預報方法最大的不同點在於：傳統的作法利用波浪數值模式進行推算(hindcast)，並與現場觀測結果作比對，藉以調整波浪數值模式參數的設定，從中調校出最佳的參數組合，其後，波浪數值模式便被用來進行海況預報；相對於上述作法，資料同化則是將作業化預報模式與作業化即時觀測網進行整合，利用即時資料對海況進行即時校正，以提昇波浪數值模式現報與預報的準確度。

早期前人利用衛星波高或資料浮標波高進行資料同化，發現在距離實測資料較遠的格點會產生極端的修正參數，Hasselmann 等人經過多次驗證發現以波譜做資料同化能改善推算的影響範圍大約為 1000km。又本研究對於波浪數值模式的研究以作業化波浪預報為目標，故本研究擬採用連續資料同化進行資料同化，其中的方法為最佳內插法，結合衛星波高資料與資料浮標波譜資料進行研究。由資料同化應用於颱風波浪數值模式的結果，已驗證資料同化模式的正確性及資料同化模式可應用於台灣海域。

關鍵字：波譜、資料同化、最佳內差法、數值波浪模式

## Spectral Wave Data Assimilation in SWAN Wave Model

Yang-Ming Fan\* Beng-Chun Lee Chia-Chun Kao

\* Ph.D student, Department of Hydraulics and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

### ABSTRACT

The purposes of this proposal is to enhance the accuracy of numerical wave forecast with data assimilation. Traditional forecast is consisting in: uses numerical wave model to do hindcast, and then adjusting the parameters by measured data. Use numerical wave model to forecast wave after finding the best parameters. A technique - data assimilation combine model results with measured data. Using measured data to correct model results immediately and to do wave forecast. Review past research, we find that the extreme parameters were produced at grid point in the distance of measured station by using data of wave height to do data assimilation. Hasselmann, etc. proved that using wave spectrum to do data assimilation can improve the coverage calculated about 1000km. In order to make this research look forward to do operating numerical wave model, we adopt sequential data assimilation to do data assimilation. In the process of data assimilation, the optimal interpolation is adopted. And the analytic data is from satellites and data buoy. The result which using data assimilation to typhoon numerical wave model in order to verify the accuracy of data assimilation model and analyze the wave character Taiwan water. The results show that simulation with data assimilation have better results than without data assimilation.

Key words: spectral; data assimilation; optimal interpolation; numerical wave model

## 一、前言

資料同化的方法是源自於氣象上的應用，最早出現於 1960 年代數值化的氣象預報研究中 (Gandin, 1963)，氣象學家利用即時氣壓觀測值繪製等壓線或應用於氣象上的數值模式，至今已成為氣象預報工作重要的一環，包含初步處理、客觀分析、初始化及預報四部份。初步處理即觀測資料的品質控制，將觀測資料中的重大誤差加以訂正或者捨棄；客觀分析則是調整初始場以滿足風場與波浪場間的平衡，再將模式初始化以維持模式計算初始條件的正確性，提高模式推算的準確性。

資料同化方法主要分為兩種，一為連續資料同化(sequential data assimilation)，另一為變分資料同化(variational data assimilation)。連續資料同化乃在波浪模式模擬波浪的過程中，結合數值預報值與現有的觀測值，最後在某一時時刻得到平衡的分析場，以做為隨後繼續預報的初始場之用。此類型的資料同化系統較為簡單，常見的方法有直接內插法(或直接更新法)、Kalman 濾波器及最佳內插法(optimal interpolation)等。直接內插法是以一定的時間間距直接用當時當地的觀測值取代數值預報值，這種方法相當簡易，但是觀測值與數值預報值差異過大，會嚴重影響後續模式推算的準確度；Kalman 濾波器近似於最佳內插法，此法可以決定出一個既和波浪數值模式相協調，又按某個準確度接近觀測值的模式變數，以做為隨後預報的初始值之用，模式反覆計算過程需耗費較長時間，因此不利作業化需求；最佳內插法是以線性疊加方式表示分析值、實測波高與起始猜測值的關係，以最佳權重決定計算格點受實測波高的影響程度，以改善模式推算的準確度。目前國內學者歐等人(2004)即利用此法於近岸波浪模式的推算。

回顧國外文獻，Komen(1985)首先嘗試實測波高應用於波浪數值模式資料同化的研究，利用挪威外海及鹿特丹港港口的實測資料，以第二代波浪數值模式進行資料同化計算，由於受到湧浪的影響，使港口附近的推算有高估的現象。Tomas(1988)同樣以第二代風浪模式結合浮標觀測的波高值與風速進行資料同化，藉由實測風速重新分配 JONSWAP 波譜的能量與尖峰頻率。Hasselmann 等人(1988)及

Bauer 等人(1992)以實測波高與模式推算值之比，作為修正二維波譜的參數，由於在距離實測資料較遠的格點，會產生極端的修正參數，經過多次驗證發現波譜修正能改善推算的影響範圍大約為 1000km。Janssen 等人(1989)利用衛星觀測波高資料探討波高與風場的修正，將波譜分為風浪波譜與湧浪波譜，湧浪波譜的修正是保持原本波譜形狀與尖峰頻率，只改變能量大小，而風浪波譜的修正則是根據 Thomas(1988)以 JONSWAP 波譜重新分配波譜能量與尖峰頻率。Lionello 等人(1992)、Lionello 等人(1995)及 Hasselmann 等人(1997)在資料同化研究中，以最佳內插法修正起始猜測值，改良波譜修正的尺度因子。由於最佳內插法的計算過程簡單且佔記憶體容量少，是現今大多作業化的同化系統採用的方法。

變分資料同化則是考慮整個波浪場中複雜的動力機制，將影響波浪場的控制變數以價值函數(cost function)表示，分析能符合實測資料的最佳化價值函數。由於運動方式分析後的網格點資料直接作為原始模式的初始場，此種方式將會產生不連續或局部地區的不平衡狀態，雖然此種不平衡狀態會由模式本身所產生的消散或頻散作用來平衡而消失，但仍需經過一段時間，此錯誤的雜訊累積可能影響模式的預測準確性，利用模式動力平衡調整出雜訊較小的初始場，加速調整過程以減低雜訊。De Valk 等人(1989)、De Las Heras 等人(1992)嘗試以伴隨模式(adjoint model)研究波浪數值模式的資料同化之研究，這些方法雖然可以獲得較良好的分析結果，但是相對的需要花費較長的計算時間，在作業化的應用上略顯困難。

## 二、研究動機與目的

本研究目的在利用資料同化技術提昇近岸波浪數值模式現報與預報之準確度。資料同化技術應用於數值預報與傳統預報方法最大的不同點在於：傳統的作法利用數值模式進行推算(hindcast)，並與現場觀測結果作比對，藉以調整數值模式中的參數設定，從中調校出最佳的參數組合，其後，數值模式便被用來進行海況預報(forecast)；相對於上述作法，資料同化演算程序則是將作業化預報模式與作業化即時觀測網進行整合，利用即時資料對海況進

行即時校正與現報(nowcast)，以提昇數值模式現報的準確度。

資料同化應用於波浪預報方面，曾因為缺乏高品質的實測波浪資料而使得在發展上受到阻礙，近來在衛星觀測技術的快速發展及日益增加的現場波浪監測站條件下，資料同化於波浪模式的應用逐漸展開。就台灣而言，自 1997 年起中央氣象局與水利署開始在台灣環島設立波浪監測站網，迄今 9 個長期作業化的波浪站在持續運轉，這些測站每兩小時進行一次波浪觀測，隨即由無線通訊方式將資料立即回傳，這些成果為本研究的展開提供了絕佳的基礎與條件。

### 三、研究方法

早期前人利用衛星波高或資料浮標波高進行資料同化，發現在距離實測資料較遠的格點會產生極端的修正參數，經過多次驗證發現波譜修正能改善推算的影響範圍大約為 1000km(Hasselmann 等人，1988)。又本研究對於波浪數值模式的研究以作業化波浪預報為目標，故本研究擬採用連續資料同化的方法進行資料同化，以實測波譜資料作最佳內差法，此方法的特色在於分別處理各個成分波的波譜能量，換句話說，此方法將平均波向加入分析，相較於過去只採用示性波高與平均週期而言，此方法更完整的描述波浪的傳遞過程。方程式推導如下：

$$E_A^i = E_p^i + \sigma_p^i \sum_{j=1}^{N_{obs}} W_{ij} \frac{E_O^j - E_p^j}{\sigma_p^j}$$

$$E_A^{total} = \sum_{f=1}^M \left( E_p^{if} + \sigma_p^{if} \sum_{j=1}^{N_{obs}} W_{ij} \frac{E_O^{jf} - E_p^{jf}}{\sigma_p^j} \right)$$

假設  $\sigma_p^i = 1, \sigma_p^j = 1$ ，且將實測資料內插至網格點上，所以：

$$E_A^{total} = \sum_{f=1}^M \left( E_p^{if} + \sum_{j=1}^{N_{obs}} W_{ik} \left( E_O^{kf} - E_p^{kf} \right) \right)$$

其中  $A$  表示分析值； $P$  表示預報值； $O$  表示觀測值； $i$  是欲求的分析值位置； $k$  是測站位置； $N_{obs}$  是測站數目。

$$\text{又 } W_{ik} = \sum_{m=1}^{N_{obs}} P_{im} M_{mk}^{-1} ; M_{mk} = P_{mk} + O_{mk} .$$

其中  $m$  是網格點位置；

## 四、邊界值對近岸波浪模擬的影響

### 4.1 衛星波高資料與實測資料的比對

目前國內波浪監測站網已提供足夠資料進行區域化颱風波浪現報模式，但深海的實測波浪資料卻不足，為了對 NWWIII 波浪數值模式進行資料同化，因此本研究與德國亥姆霍茲國家研究中心聯合會(Helmholtz Association of National Research Centers)之 GKSS 研究中心海岸工程研究所(GKSS Research Center, Institute for Coastal Research)共同合作，由該研究單位提供衛星波浪資料進行分析。

衛星波浪資料是利用衛星影像根據理論分析得到波浪資料，而資料浮標是利用量測的加速度分析波浪資料，兩者的分析方法並不相同，因此在利用兩者波浪資料進行資料同化前，必須對兩者波浪資料進行相關性分析，以確保在同一時刻衛星觀測資料與資料浮標觀測資料具有一致性。若兩者之間存在誤差，則視資料浮標波浪資料為真值，對衛星波浪資料進行修正。

### 4.2 利用衛星波高資料進行大範圍的資料同化

過去已對 SWAN 波浪數值模式進行修正，但由於颱風引起的波浪變化複雜，若利用過去的研究成果，輔以資料同化，預期可大幅提升深海波浪數值模式現報的能力，進而提供更適當的邊界條件設定。本研究擬以上述研究方法，利用衛星波高資料進行資料同化，接著推算過去歷史颱風波浪，探討衛星波高資料應用於 SWAN 波浪數值模式推算颱風波浪的準確度。分析結果如圖 1 所示，圖中黑點為為實測值，實線為模擬波高，SWAN 波浪數值模式在波浪成長階段與實測值相似，但在波浪快要成長到尖峰點的期間，卻無法有較佳的模擬結果。圖 2 是艾莉颱風期間衛星運動的其中一個軌跡，沿著此運動軌跡的模擬結果與實測值比較，結果如圖 3 所示，圖中黑點為為實測值，實線為模擬波高，因此數值模式無法推算至最大波浪的主要原因為衛星資料在該段期間沒有資料，無法進行資料同化。衛星資料的具有空間的優勢，但在時間卻無法連續，故本研究將利用資料浮標的觀測資料進行下一步資料同化，以補足衛星資料的缺點。

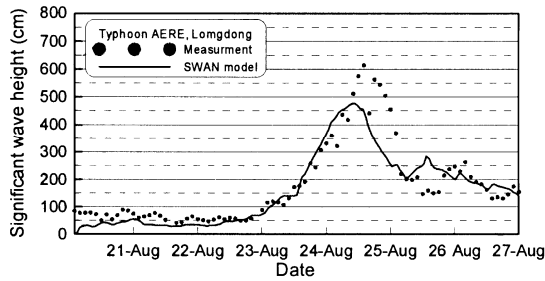


圖 1 艾利颱風期間 SWAN 數值模式模擬波高與實測值比較

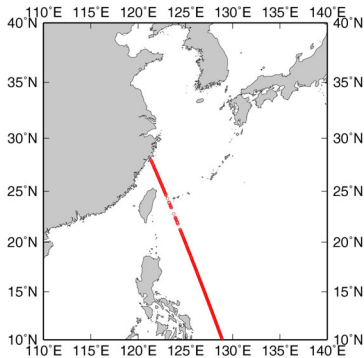


圖 2 衛星運動軌跡

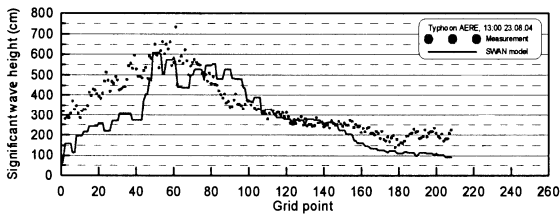


圖 3 沿著衛星軌跡的模擬波高與實測資料的比較

## 五、資料浮標波譜資料進行區域化的資料同化

經由上述的研究，獲得適當的邊界條件給於 SWAN 近岸波浪數值模式，本研究進一步利用深海資料浮標的颱風觀測波譜資料對 SWAN 近岸波浪數值模式進行資料同化。雖然台灣近岸有數個資料浮標站，但就資料同化的精神而言，應採用外海的實測資料進行分析才具有意義，若採用近岸測站資料進行資料同化，則波浪由近岸傳遞至岸邊的時間太短暫，失去資料同化的意義。又雖然目前深海只有一個資料浮標測站，但本研究結合衛星資料一同進行資料同化。將衛星資料於資料同化過程中的  $t_0$

時刻波譜資料輸出，比較資料浮標測站於  $t_0$  時刻的波譜資料，假設資料浮標的波譜資料為真值，修正其餘網格點的波譜能量，再利用本研究之研究方法做波譜的最佳化，最後再代回數值波浪模式計算波浪。

圖 4 為資料同化前後的輸出波高與實測值比較，圖中黑色十字為實測值，實線為有做資料同化的模擬波高，虛線為沒有做資料同化的模擬波高，圖中顯示有做資料同化不但波浪變化趨勢與實測值相似，且波浪成長到尖峰時，模擬波浪幾乎可以完整描述。

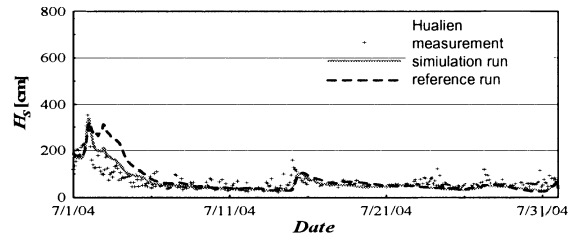


圖 4 資料同化前後的輸出波高與實測值比較

## 六、結論與建議

過去模式模擬波浪的初期，邊界值的設定是利用暖機(warm start)的方式來提供邊界值，然而邊界值的適當與否，對於模擬結果具有相當程度的影響，故本研究利用衛星資料進行資料同化，將模擬的結果做為近岸模擬時的邊界條件，由分析結果顯示此過程得到的邊界值較佳。

以實測波譜資料作最佳內差法的特色在於分別處理各個成分波的波譜能量，換句話說，此分析方法將平均波向加入分析，相較於過去只採用示性波高與平均週期而言，此方法更完整的描述波浪的傳遞過程。

利用連續資料同化進行資料同化，以最佳內插法結合衛星波高資料與資料浮標波譜資料進行分析。由資料同化應用於颱風波浪數值模式的結果，證明資料同化模式的具合理性與正確性，且資料同化模式可應用於台灣海域。

未來將因應作業化區域化颱風波浪數值模式預報之需求，在完成現報模式之研究後，將繼續探討區域化颱風波浪數值現報模式應用在預報上的準確度，意即模擬數個颱風波浪，分析一天、三天、五

天及七天數值模式推算值與實測波浪的差異性。

## 謝誌

本論文係國科會研究計畫「適用台灣海域的區域化颱風波浪現報模式之研究」(NSC95-2221-E-211-025)之研究成果，承蒙國科會經費之贊助使本研究得以順利完成，謹致感謝之意，並且中央氣象局、水利署、德國 GKSS 研究中心慷慨提供相關波浪、衛星資料，特此一並致謝。

## 參考文獻

1. 歐善惠、許泰文、廖建明、陳亞嵐、徐立昌，(2004)「近岸波浪推算資料同化之研究」，第二十六屆海洋工程研討會論文集，第 206-213 頁。
2. Bauer, E., Hasselmann, S. and Hasselmann, K. (1992) "Validation and Assimilation of Seaset Altimeter Wave Heights Using the WAM Wave Model," *J. Geophys. Res.*, 97, pp. 12671-12682.
3. De Las Heras, M.M. and Janssen, P.A.E.M. (1992) "Data Assimilation with a Coupled Wind-Wave Model," *J. Geophys. Res.*, Vol. 97, pp. 20261-20270.
4. De Valk, C.F. and Calkoen, C.J. (1989) "Wave Data Assimilation in a Third Generation Wave Prediction Model for the North Sea-An Optional Control Approach," *Delft Hydraul. Lab.*, Delft, Netherlands, Rep. X38, pp. 123.
5. Gandin, L.S. (1963) "Objective Analysis of Meteorological Fields" *Gidrometeoizdat Leningrd*, pp. 242.
6. Hasselmann, K., Hasselmann, S., Bauer, E., Brüning, C., Lehner, S., Graber, H.C. and Lionello, P. (1988) "Development of a Satellite SAR Image Spectra and Altimeter Wave Height Data Assimilation System for ERS-1," *Final Report ESA Study Contract No. 6875/87/HGE-I(SC)*, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Report No. 19, pp. 155.
7. Hasselmann, S., Lionello, P. and Hasselmann, K. (1997) "An Optimal Interpolation Scheme for the Assimilation of Spectral Wave Data," *J. Geophys. Res.*, 102, pp. 15823-15836.
8. Janssen, P.A.E.M., Lionello, P., Reistad, M. and Hollingsworth, A. (1989) "Hindcasts and Data Assimilation Studies with the WAM Model During the SEASET Period," *Geophys. Res.*, 94, pp. 973-993.
9. Komen, G.J. (1985) "Introduction to Wave Models and Assimilation of Satellite Data in Wave Models, In: The Use of Satellite Data in Climate Models," *Proc. Alpbach Conference*, ESA Pub., ESA SP, 244, pp. 21-26.
10. Lionello, P., Günther, H. and Hansen, B. (1995) "A Sequential Assimilation Scheme Applied to Global Wave Analysis and Prediction," *J. Mar. Syst.*, 6, pp. 87-107.
11. Lionello, P., Günther, H. and Janssen, P.A.E.M. (1992) "Assimilation of Altimeter Data in a Global Third Generation Wave Model," *Journal of Geophysical Research*, 97, pp. 14253-14474.
12. Thomas, J.P. (1988) "Retrieval of Energy Spectra from Measured Data for Assimilation into a Wave Model," *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 114, pp. 781-800.