

# 應用偶合模式於探討波流交互作用之研究

鄭皓元<sup>1</sup> 林敬傑<sup>2</sup> 張志強<sup>3</sup> 高家俊<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 成功大學水利及海洋工程所博士班研究生

<sup>2</sup> 成功大學水利及海洋工程所碩士班研究生

<sup>3</sup> 成功大學水利及海洋工程所碩士班研究生

<sup>4</sup> 成功大學水利及海洋工程學系教授兼近海水文中心主任

## 摘要

潮波流交互作用對風浪與海流特性的影響，可以結合兩個廣泛應用的模式與彼此之間的交互作用來模擬，本研究中即採用第三代風浪模式 (SWAN) 與 Princeton Ocean Model (POM)，而風浪與海流彼此間的交互作用過程，截至目前之研究，針對海流對波浪的影響主要為波浪折射、發展過程與平衡領域的影響，而波浪對海流的影響則為海表面應力的改變對風驅流的影響、碎波後之擾動對 Ocean Mixed Layer 的影響與 Stokes 漂移造成 Langmuir 環流對表面流場的影響。目前能考慮波流交互作用的模式屈指可數，而大部分也都只是針對波對流或流對波單方面的影響為主。本研究之目的為建立一波流交互作用之模式，來探討在潮汐流場與水位變化影響下波浪特性的演變，用以了解潮汐或黑潮作用下，對波浪推算與預報的影響。

關鍵字：SWAN 波浪模式、POM 模式、波流交互作用

## Study on Wave-current Interaction by Using Coupled Wave-current Model

Hao Yuan Cheng\* Ching Chien Lin Chih Chiang Chang Chia Chuen Kao

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

## ABSTRACT

The impact of a coupled ocean wave-tide-circulation system on coastal modeling for wind waves is investigated by coupling of two well-tested models, the third-generation wave model (SWAN) and Princeton ocean model (POM). In this coupled system, wind waves are influenced by both currents and sea level elevation induced by tides, storm surges, and oceanic circulation. Tides were one of the most influential factors in modulating mean wave characteristics in south and north Taiwan. The other factor is kuroshio. Kuroshio is a wide, fast and deep ocean current from the equator. Effects of currents on waves we adopted here are current induced refraction, current enhanced or reduced generation and breaking due to ongoing or opposite current, respectively. And effects of waves on currents are breaking induced vertical energy transport, Stoke drift and changed wind-drive-current due to wave induced surface roughness changing. In this study we attempt to use a coupled modeling to identify what are the effects of tidal and ocean currents on waves. Such as tide and Kuroshio influence waves around Taiwan.

Key words: SWAN wave model; POM model; wave-current interactions

## 一、前言

潮流、暴潮、風浪與海流是主要影響近岸地區環境變化的因素，亦是海洋預報上重要的因子。在很多情形下這些自然現象是共存的，並且彼此都是互相影響的（Longuet-Higgins and Stewart,），雖然在前人的研究中針對各自獨立的現象已做過諸多討論，但對這些現象彼此之間是如何影響的仍是海洋模式的一大議題，在本研究初期，將先於模式中針對流對波的影響做探討，在根據實測波浪與流的資料來做比較，流的波浪的影響在於流速大時更為顯著，而台灣周圍因地理位址的關係造成週遭的劉況變化相當複雜，以下就針對台灣週遭之潮流與海流做一概述。

### (i) 潮流

潮差和潮流流速在台灣大陸棚受地形的影響變化極大，在台灣東部沿岸開闊海域，潮差在大潮時約 1.2 公尺而在小潮時則為 0.6 公尺。在台灣海峽，大潮時之潮差在海峽最北和最南端還不到 1 公尺，海峽中部的台中港則達 3、4 公尺。大潮時的潮流速度在台灣西南海岸外的海峽南部約為 20~140cm/sec，在海峽中不流速約為 10~80cm/sec，在台灣西北海岸外流速約為 30~100cm/sec。

### (ii) 海流

台灣附近的海流主要有四個：

黑潮主流：黑潮北流至台灣南端附近，分成兩股：主流沿台灣東北上，流速達 1 公尺/秒，有時高達 2 公尺/秒。一般而言，夏季流速較快。黑潮為來自赤道附近的暖流（高溫高鹽度），表面水溫平均達 27°C，對台灣東部的氣候與漁產都有重大影響。

黑潮支流：黑潮支流沿台灣西岸而上，夏季時因有西風吹送，可一直流經整個台灣海峽；冬季時海峽北部海面因有盛行的東北季風吹送，黑潮支流流至澎湖群島附近，與北方的中國沿岸流會合後，折向西流入南海。

中國沿岸流：起源於渤海與黃海北部，沿大陸海岸南下，為低溫低鹽度的冷流。冬季因有東北季風之助，流到台灣海峽後與黑潮支流相會於澎湖群島附近，會合後在一起流入南海；夏季時，黑潮支流強勁，就無法流到台灣海峽。

南海海流：冬季時，此一海流無法流入台灣海峽，在夏季由於有西南風之助北上，與黑潮支流相遇後一起流經台灣海峽。

不論是黑潮或是南海海流，水溫都很高，因此夏季時，台灣沿海地區濕度大、氣溫高。冬季時，高雄、屏東沿海仍受黑潮支流影響，濕度大、氣溫高。台灣南端的恆春，就是因少有寒冬景象，四季如春而得名；而北部的基隆、台北沿海因受來自北方中國沿岸流的冷水影響，使得氣溫低一些，所以冬季時台北的氣溫通常比高雄低 5°C 以上。

在台灣東部海域，黑潮主流的寬度大約為 110~150 公里，主流中軸線距岸大約 50~150 公里，最大流速範圍為 60~100cm/sec，但隨區域和季節而有所不同，最強之流速出現在接近台灣海岸處，流速向東緩慢降低。在主流的右側，一般都有一反向流（向南）或渦流存在。

黑潮的主流由海面向下可延伸 600 公尺深處，在此深度流速尚達 10~20cm/sec，在台灣東部近岸區流速超過 30cm/sec 的黑潮水亦可延展到 200 公尺深。

## 二、理論分析

本研究計畫所著重之波潮流系統乃是基於兩個廣泛應用的模式，即第三代風浪模式 SWAN（Simulating WAve Nearshore）模式與海洋模式 POM 模式（Princeton ocean model）。

SWAN 模式是由荷蘭 Delft 大學所發展，在模式中可以考虑隨空間時間上變化的流場來模擬流對波浪的影響，所以很適合用來結合海洋模式。SWAN 模式中考虑風浪的成長與消散過程，並且以顯式形態來表示風能輸入、波波交互作用、白沫與底床造成的消散，在風能輸入是採用 Cavaleri、Rizzoli（1981）與 Janssen（1991）之經驗式，非線性波波交互作用項則是採用 Hasselmann（1985）之 DIA（Discrete Interaction Approximation）方法，而白沫消散與底床摩擦項則分別採用 Banner（2004）與 JOANSWAP（Hasselmann et al., 1973）之經驗式。

POM（Blumberg and Mellor, 1987）模式考慮自由液面、sigma 座標系統，並且包含了簡單的擾動模式（Mellor 與 Yamada, 1982）來模擬垂直方向動

量的傳遞。在潮流的影響上，將考慮八種潮型即 M2、S2、K1、O1、K2、N2、P1 與 Q1。

## 2.1 波浪模式中波流結合之方法

SWAN 模式採作用力密度譜來解析波浪，考慮流場之作用力平衡方程式可以 Eq. (1) 表示：

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla_x \cdot \left[ \overbrace{(\dot{c}_s + \bar{U})A}^a \right] + \overbrace{\frac{\partial}{\partial \omega} [\dot{c}_\omega A]}^b + \overbrace{\frac{\partial}{\partial \theta} [\dot{c}_\theta A]}^c = \frac{S}{\sigma}, \quad (1)$$

$$\dot{c}_s = \frac{\sigma}{k} \left[ \frac{1}{2} + \frac{kd}{\sinh 2kd} \right],$$

$$\dot{c}_\omega = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial t} + \bar{k} \cdot \frac{\partial \bar{U}}{\partial t},$$

$$\dot{c}_\theta = -\frac{1}{k} \left[ \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \bar{k} \cdot \frac{\partial \bar{U}}{\partial m} \right],$$

式中， $S$  為描述成長、消散與非線性現象之源函數項， $\bar{U}$  為平均流速， $d$  是水深（為水深與水位之合）， $\sigma$  為相對頻率、 $\theta$  為波浪前進方向， $C_g$  為波能前進之速度， $C_\omega$  與  $C_\theta$  分別為頻率與方向上之前進速度， $m$  為正交於  $\theta$  之座標。在模式結合上，SWAN 模式使用每個時刻由 POM 所獲得的流速與水位資料帶入 Eq. (1) 計算，方程式中， $a$  項代表流場與水位在空間上變化對波場的影響， $b$  項代表水深與流速的不穩定導致絕對頻率的改變，而  $c$  項則反映出因為水深與流場的變化所造成波浪的折射。

## 2.2 波浪造成海表面糙度改變對潮流模式之影響

本研究利用 POM 模式在計算海表面風剪應力時，加入考慮波浪造成的海表面粗糙度變化之影響，根據 Janssen (1991) 之研究，海表面的總剪應力大致可以風與擾動所造成的剪應力合來代表，擾動所造成的剪應力可以混合長度假說來表示，而風剪應力可以 Eq. (2) 表示之：

$$\tau_w = \rho_w \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \sigma S_w(f, \theta) df d\theta \quad (2)$$

式中  $S_w$  為 SWAN 模式中之風浪成長項 (Janssen, 1991)， $f_r$  等於  $\sigma/2\pi$ ， $\rho_w$  為水的密度，風速剖面可以 Eq. (3) 表示之：

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left( \frac{z + z_e - z_0}{z_e} \right), \quad (3)$$

其中  $u_*$  代表摩擦速度， $Z_0$  為相對於波況之粗糙長度， $Z_e$  為有效糙度， $Z_0$ 、 $Z_e$  可以 Eq. (4)、Eq. (5) 表示之：

$$z_e = \frac{z_0}{\sqrt{1 - \tau_w/\tau}}, \quad (4)$$

$$z_0 = 0.01 \frac{u_*}{g} \quad (5)$$

其中 Eq. (5) 即為 Charnock 形式之關係式，用來調整成熟風浪所產生的應力。當有海面上 10 米的風速值時 Eq. (2) ~Eq. (5) 可以直接帶入風速解之。

大氣的能量透過波浪傳至海表面後可以分成兩個成分，一為直接傳輸至流場裡，另一為造成波浪的成長，而部份波浪的能量因為波浪破碎後會在傳至表面的流場裡。在本研究中假設波浪消散的能量與部分表面應力（總應力減去波浪造成的應力）會傳遞到表面流場，波浪消散的能量以 SWAN 模式中的消散項決定。

## 2.3 碎波造成的擾動對於 Ocean Mixed Layer 之影響

以往認為海面能量的消散是隨著水深向下而遞減的，尤其在表面的能量消散會最明顯，然而最近的研究指出海面下幾公尺處也出現相當高的能量消散比列，原因是因為表面波浪破碎所造成的擾動引至海面下流體能量的耗散 (Terray et al., 1996; Drennan et al., 1996)。在 Ocean Mixed Layer 裡，能量消散隨著水深向下呈現 2~4.6 次方的遞減 (Gargett, 1989; Craig 與 Banner, 1994; Terray et al., 1996; Drennan et al., 1996)。

在 POM 模式裡所採用的 M-Y 擾動模式並沒有考慮表面碎波造成的擾動消散，但這個現象對於結合波浪與海洋模式是相當重要的，所以在本研究中也將採用有考慮波浪破碎之修正型 C-B 模式 (Craig 與 Banner, 1994)。根據 C-B、Mellor 與 Blumberg (M-B, 2004)，新的擾動動量方程式可以 Eq. (6) ~Eq. (8) 表示之：

$$q^2 = (15.8 \alpha_{cb})^{2/3} u_*^2 \quad \text{at } z=0, \quad (6)$$

$$l = \max(\kappa z_w, l_z) \quad \text{at } z=0, \quad (7)$$

$$z_w = 0.85 H_s, \quad (8)$$

其中  $q_2$  為擾動動能,  $Z$  為垂直方向座標,  $u\tau$  為海表面的摩擦速度,  $\alpha_{CB}$  為一定值,  $l$  為主要長度尺度,  $l_z$  為相較於 M-Y 模式之經驗長度尺度 (M-Y, 1982; M-B, 2004),  $\kappa$  為 von Karman 常數,  $H_s$  為示性波高。

M-B 取  $\alpha_{CB}$  與  $Z_w$  為定值對 M-Y 模式進行敏感度分析, 而這兩參數可經由波浪模式的能譜與示性波高獲得, 根據 Terray et al. (1996) 與 M-B (2004)  $\alpha_{CB}$  可由 Eq. (9) 獲得,

$$\alpha_{CB} = \frac{F}{u_c^3}, \quad (9)$$

其中  $F$  為能量從風傳遞至波浪的比例,  $F$  可定義為風浪的成長率。在 SWAN 模式中 為 Janssen (1991) 提出之表示式, 如 Eq. (10) 所示:

$$F = \iint \beta \frac{\rho_a}{\rho_w} \left( \frac{u_c}{c} \right)^2 \max[0, \cos(\theta - \theta_w)]^2 \delta\psi(f, \theta) df, d\theta. \quad (10)$$

方程式中,  $\psi(f, \theta)$  為方向波譜;  $\rho_a$  是空氣密度;  $\theta_w$  為平均風向;  $C$  為位相速度; 而  $\beta$  則為 Miles 常數, 可由臨界高度  $\lambda$  與有效糙度  $Z_e$  獲得, 如 Eq. (11) 所示。

$$\begin{cases} \beta = \frac{1.2}{\kappa^2} \lambda \ln^4 \lambda, & \lambda < 1 \\ \lambda = \frac{gZ_e}{c^2} e^r, & r = \kappa z / [U_c \cos(\theta - \theta_w)] \end{cases} \quad (11)$$

## 2.4 波浪模式與潮流模式結合之程序

在模式的結合上, 利用以上所考慮的波流交互作用、不同波況所造成海表面應力的改變、波浪破碎造成之擾流與 Langmuir 環流, SWAN 模式與 POM 模式可以以下程序來結合。首先在第一個 time-step, SWAN 經由風能的輸入算出方向波譜與波高, 但是並不包含流場及水位的影響, 經由輸出的波浪資料來計算海表面應力(利用 Eqs.(2)-(5))與碎波所造成之擾動(利用 Eqs.(6)-(11)), 在將這些在帶進 POM 模式裡計算流場與水位值, 於下一個 time-step 時將所算出之流場與水位帶入 SWAN 模式中計算新的波場, 往後的 time-step 重覆此一過程。

## 三、結果與驗證

本文驗證時間為 2004 年 8 月期間, 驗證點位為台灣東北角龍洞海域與南邊鵝鑾鼻海域, 驗證期間包含颱風期間資料。

圖 1 與圖 4 為龍洞海域與鵝鑾鼻海域示性波高模式計算值與實際觀測值比較圖, 由圖顯示在有無潮波流交互作用下對於波高的計算結果只對於極大值有影響, 如龍洞海域, 無潮波流交互作用下, 驗證期間模式計算波高最大值為 5.6 米, 若考慮潮流波流交互作用下波高最大值為 5.4 米, 整體來說兩者間的差異約只有 1% 左右。

圖 2 與圖 5 為龍洞海域與鵝鑾鼻海域平均週期模式計算值與實際觀測值比較圖, 由圖顯示在有無潮波流交互作用下對於平均週期的計算結果並無太大影響, 整體來說兩者間的差異約小於 1%。

圖 3 與圖 6 為龍洞海域與鵝鑾鼻海域平均波向模式計算值與實際觀測值比較圖, 由圖顯示在有無潮波流交互作用下對於平均波向的計算結果並無太大影響, 整體來說兩者間的差異約小於 1%。

表 1 與表 2 為有無潮流交互作用下, 示性波高與平均週期相較於實際觀測值之統計誤差表, 由表顯示模式計算結果與實際觀測值波高誤差為 50 公分左右, 週期誤差約為 1 秒左右, 有無潮流交互作用對於結果之影響小於 1% 以下。

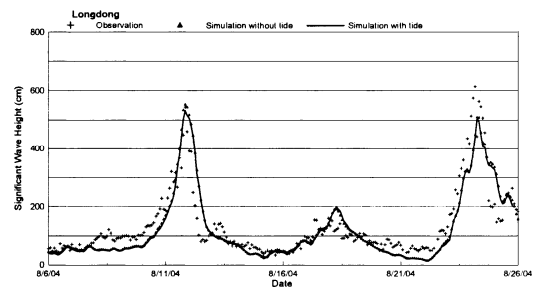


圖 1 有無潮流交互作用下模式計算之示性波高值與實際觀測示性波高值之比較 (龍洞海域)

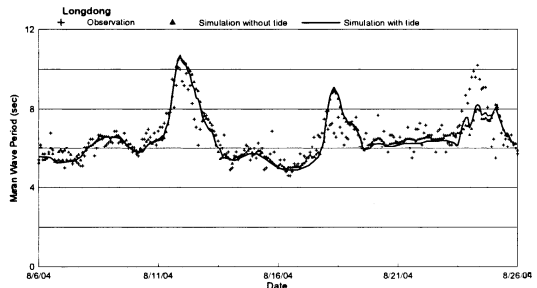


圖 2 有無潮流交互作用下模式計算之平均週期值與實際觀測平均週期值之比較 (龍洞海域)

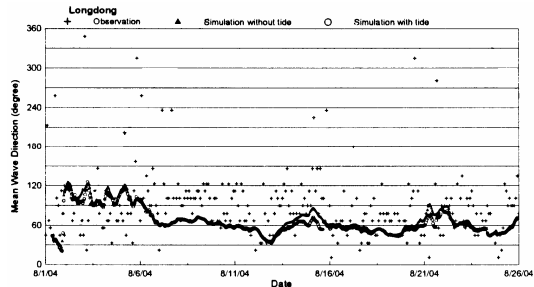


圖 3 有無潮波流交互作用下模式計算之平均波向值與實際觀測平均波向值之比較（龍洞海域）

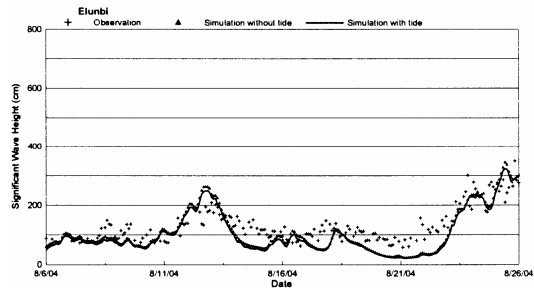


圖 4 有無潮波流交互作用下模式計算之示性波高值與實際觀測示性波高值之比較（鵝鑾鼻海域）

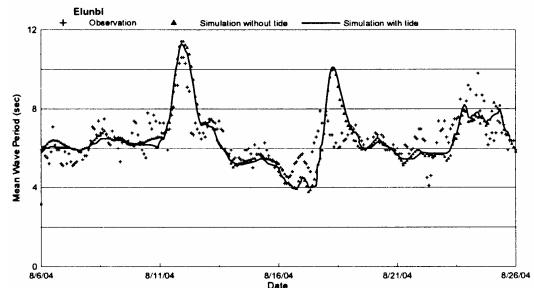


圖 5 有無潮波流交互作用下模式計算之平均週期值與實際觀測平均週期值之比較（鵝鑾鼻海域）

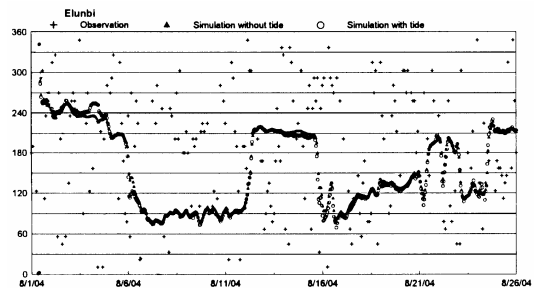


圖 6 有無潮波流交互作用下模式計算之平均波向值與實際觀測平均波向值之比較（鵝鑾鼻海域）

表 1 有無潮波流交互作用下模式計算結果示性波高比較表

Wave Height	BIAS (cm)	RMSE (cm)	SI
With wav-current interaction	-8	55	0.568
Without wav-current interaction	-10	60	0.589

表 2 有無潮波流交互作用下模式計算結果平均週期比較表

Wave Period	BIAS (cm)	RMSE (cm)	SI
With wav-current interaction	-1.0	1.1	0.385
Without wav-current interaction	-1.1	1.2	0.391

#### 四、結論

本文中模式計算結果發現，潮流與水位的變化對於波浪計算的結果有些許的影響，其中比較明顯的影響是在波高與波向上，波高是反映在極大值上，波向則是在某些時刻影響較大，必須再進一步探討，本研究計算的範圍是屬於中尺度的範圍，在這樣的範圍裡考慮波流交互作用對於波浪計算的結果影響並不顯著，未來應將焦點放在波浪對暴潮的影響上或是近岸小尺度沿岸流對近岸波浪的影響上著手。

此研究對於中尺度的波流交互作用研究結果雖與單獨計算波浪的結果並無太大的差異，但對於波浪模式本身計算精度之驗證已有相當不錯之結果，相信對於日後之研究更有所助益。

#### 謝誌

本論文係國科會專題研究計畫「應用偶合模式於探討波流交互作用之研究」(編號 NSC 95-2221-E-006-487)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，謹致謝忱。

## 參考文獻

1. Bao, J.-W., Wilczak, J.M., Choi, J.-K., Kantha, L.H. (2000) "Numerical simulations of air-sea interaction under high wind conditions using a coupled model: a study of hurricane development," *Mon. Weather Rev.*, 128, 2190–2210.
2. Blumberg, A.F., Mellor, G.L. (1987) "A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model," *Three-Dimensional Coastal Ocean Models.*, Vol. 4, pp. 1-16.
3. Bretherthon, F.P., Garrett, C.J.R. (1968) "Wave trains in inhomogeneous moving media," *Proc. R. Soc. London.*, A 302, 529–554.
4. Choi, B.H., Eum, H.M., Woo, S.B. (2003) "Modeling of coupled tide-wave-surge process in the Yellow Sea," *Ocean Eng.*, 30, 739–759.
5. Craig, P.D., Banner, M.L. (1994) "Modeling wave-enhanced turbulence in the ocean surface layer," *J. Phys. Oceanogr.*, 24, 2546–2559.
6. Craik, A.D.D., Leibovich, S. (1976) "A rational model for Langmuir circulation," *J. Fluid Mech.*, 73, 401–426.
7. Davies, A.M., Lawrence, J. (1995) "Modeling the effect of wave-current interaction on the three-dimensional winddriven circulation of the eastern Irish Sea," *J. Phys. Oceanogr.*, 25, 29–45.
8. Drennan, W.M., Donelan, M.A., Terray, E.A., Katsaros, K.B. (1996) "Oceanic turbulence dissipation measurements in SWADE," *J. Phys. Oceanogr.*, 28, 1624–1641.
9. Drennan, W.M., Graber, G.C., Hauser, D., Quentin, C. (2003) "On the wave age dependence of wind stress over pure wind seas," *J. Geophys. Res.*, 108 (C3), 8062.
10. Grachev, A.A., Fairall, C.W., Hare, J.E., Edson, J.B. (2003) "Wind stress vector over ocean waves," *J. Phys. Oceanogr.*, 33, 2408–2429.
11. Holthuijsen, L.H., Tolman, H.L. (1991) "Effects of the Gulf Stream in ocean waves," *J. Geophys. Res.*, C 96, 12755–12771.
12. Jacobs, G.A., Hur, H.B., Riedlinger, S.K. (2000) "Yellow and East China Seas response to winds and currents," *J. Geophys. Res.*, 105 (C9), 21947–21968.
13. Janssen, P.A.E.M. (1989) "Wave induced stress and the drag of air flow over sea waves," *J. Phys. Oceanogr.*, 19, 745–754.
14. Janssen, P.A.E.M. (1992) "Experimental evidence of the effect of surface waves on the airflow," *J. Phys. Oceanogr.*, 22, 1600–1604.
15. Kantha, L.H., Clayson, C.A. (2004) "On the effect of surface gravity waves on mixing in the oceanic mixed layer," *Ocean Modell.*, 6 (2), 101–124.
16. Komen, G.J., Janssen, P.A.E.M., Makin, V., Oost, W. (1998) "On the sea state dependence of the Charnock parameter," *Global Atmos. Ocean Sys.*, 5, 367–388.
17. Smith, S.D. (1980) "Wind stress and heat flux over the ocean in gale force winds," *J. Phys. Oceanogr.*, 10, 709–726.
18. Mastenbroek, C., Burgers, G., Janssen, P.A.E.M. (1993) "The Dynamical coupling of a wave model and a storm surge model through the atmospheric boundary layer," *J. Phys. Oceanogr.*, 23, 1856–1866.
19. Moon, I.-J., Oh, I.S. (2003) "A study of the effect of waves and tides on storm surge using a coupled ocean wave-circulation model," *J. Korean Meteorol. Soc.*, 39 (5), 563–574.
20. Moon, I.-J., Ginis, I., Hara, T., Tolman, H., Wright, C.W., Walsh, E.J. (2003a) "Numerical simulation of sea-surface directional wave spectra under hurricane wind forcing," *J. Phys. Oceanogr.*, 33, 1680–1706.