

## 臺中港鄰近海域之波流場模擬

許弘芑 國立成功大學水工試驗所研究員  
蔡立宏 交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員  
楊炳達 國立成功大學水工試驗所助理研究員  
郭平巧 國立成功大學水工試驗所研究助理  
李孟學 國立成功大學水工試驗所助理研究員

### 摘要

本研究主要應用 NearCoM 模式設置適用於臺中港海域的近岸波流場模式，再以臺中港北防波堤堤頭外側 600m 處量測之海流資料及烏溪外海之海流測站實測海流資料進行模式檢核，流場模擬結果與實測資料比對一致，最後應用 NearCoM 模式進行浮標軌跡模擬，並且修正 NearCoM 模式之浮標軌跡模組，於浮標軌跡模組中增加水平擴散項，並且以臺中港北防波堤北側處之實測浮標軌跡資料來進行驗證，比對結果符合，在考慮水平擴散項模擬結果較未考慮水平擴散項模擬結果有改善。因此，本模式可適切模擬臺中港區域波流場變化。

### 一、前言

臺灣海岸線全長一千五百多公里，擁有豐富的海洋資源，故臺灣港口甚多。港灣結構物興建後，由於流

場的改變，造成海岸地形的變化，港口淤砂問題。因此，港灣鄰近海域之波流場模擬一直是重要的研究議題。

目前臺灣對於近岸平面波流場模擬常用模式為丹麥水利試驗所發展的 MIKE21 水動力數值模式，如楊文衡與許泰文 (2004) 以 MIKE21 模擬核四廠進水口附近海域波流場及漂砂趨勢。楊文衡等人 (2012) 針對淡水第二漁港以 MIKE21 進行波流場及漂砂數值模擬，宋芷萱 (2014) 則利用 MIKE21 模擬東沙島海域颱風侵襲下之波流場，探討東沙島海岸地形變遷。然而 MIKE21 屬於商業軟體，收費不貲。而一般公開免費模式在波場模擬常用如 SWAN 模式為荷蘭 Delft 大學主導發展之波浪模式 SWAN，徐月娟等人 (2005) 應用 SWAN 模式預報台灣近岸海域之風浪預報。李汙軍等人 (2006) 利用 SWAN 討論風浪成長過程出現高估高頻能量及低估低頻能量之現象。陳永隆等人 (2013) 應用 SWAN 模式來評估基隆海

域波浪能量。至於流場模擬則以 POM 模式及 ROMS 模式為主，如廖建明等人 (2004) 應用 POM 模式模擬鹽水溪河口水動力模擬、林濤 (2006) 模擬淡水海岸颱風暴潮水位應用 POM 模式，卓庚榆 (2012) 以 POM 模式討論基隆近岸地區颱風期間之流場，李汙軍等人 (2010) 應用 ROMS 模式模擬墾丁南灣海域潮流流場。江朕榮等人 (2010) 應該 ROMS 模式建立台灣海域海流預報模式。Lim et al.(2013) 應用 ROMS 模擬韓國海岸地區之流場。Moriarty et al.(2014) 以 ROMS 模式模擬紐西蘭 Waipaoa Shelf 區域的漂砂情況。

POM 模式及 ROMS 模式皆為三維水動力模式，因此在計算上需要耗費大量時間，而且 POM 模式與 MIKE21 模式於波流場計算時，並無考慮波流交互作用之影響。因此本研究應用 NearCoM 模式模擬臺中港的近岸波流場，NearCoM 模式是擬三維波流耦合模式 (Shi et al., 2012)，因此可以節省大量計算時間，而且保有三維模式之優點。另外 NearCoM 模式為波流耦合計算在波流場模擬時可呈現波流交互作用之影響。

## 二、研究方法

本研究應用 NearCoM 模式設置臺中港的近岸波流場模式，首先透過資料收集所得的海氣象資料，作為

NearCoM 模式的輸入條件，進行臺中港海域波流場模擬。NearCoM 模式是結合波場模擬的 SWAN 模式與流場模擬的 SHORECIRC 模擬，因此模式中已考慮波流交互作用之影響，模式工作流程圖如圖 1 所示，NearCoM 模式介紹如下。

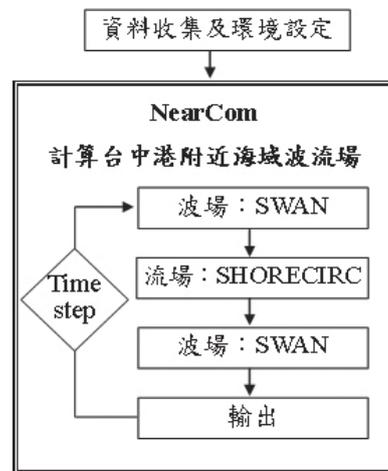


圖 1 模式工作流程圖

NearCoM 近岸系統是結合數種子模式的整合系統模式 (Shi et al., 2012)，主程式用於連結其他子模式 (通常為波浪、潮流、近岸流及漂沙) 並且處理資料的輸入、輸出及模式間資料轉換。NearCoM 常用配置是結合 REF/DIF-1 波浪模式 (Kirby and Dalrymple, 1992)、SHORECIRC 近岸流模式 (Svendsen, et al., 2003) 和 HH 漂沙模式 (Haas et al., 2003)。近期 Newberger and Allen (2007) 則結合波浪模式以及三維環流模式 (POM)。由於 NearCoM 是著重預測近岸波浪與潮流及其所引發的

現象，故 NearCoM 系統主要是針對海岸線至水深大約 10 米處的近岸地區所開發的模式。最近，Shi et al. (2012) 整合 SWAN 波浪模式並且修改系統中的 SHORECIRC 模式版本，將其擴展應用至大尺度海灘系統。

數值計算方面，原始版本的 SHORECIRC 是架構在直角坐標系統的方程式，在時間上採用有限差分預測校正法，而空間差分則是使用二階中央差分。曲線座標版本的 SHORECIRC 則將卡式坐標變換到廣義曲線網格系統 (Shi et al., 2003)，並更進一步使用 CFL-free 的數值方法，以提高計算效率 (Shi et al., 2007)。

最近 NearCoM 應用於各種沿岸系統的案例日益增加，例如河口的波流相互作用之系統、暴潮引起的沿岸溢淹、沙灘和沙丘侵蝕及潮灘過程等。在大尺度區域的應用上，潮汐、風和波浪扮演了重要的角色，而這些應用必需考慮到模式在長時間間隔 (time step) 模擬的效率及穩定性。雖然最近版本使用的 CFL-free 數值方法在長時間間隔應用很有效率的，但在極大的 Courant 數仍會引起所謂的“ADI 效應” (Casulli and Cheng, 1992)。

本研究預計使用的 SHORECIRC 模式為 Dr. F.Y. Shi 所提供的新版模式，該模式使用結合有限體積及有限差分的 TVD 法 (Toro, 2009)。完全非線性

Boussinesq 模式以 TVD 法求解，在計算碎波與海岸線變遷問題上，已證明 TVD 是一個穩定及有效率的數值方法 (Shi et al., 2011a; 2011b; Tehranirad et al., 2011; Kirby et al., 2013)。使用 TVD 法求解 Boussinesq 方程及淺水方程式亦皆有很好的表現 (Tonelli and Petti, 2009; Roeber et al., 2010; Shiach and Mingham, 2009; Erduran et al., 2005)。

## 2.1 SHORECIRC 方程式

SHORECIRC 是擬三維近岸環流模式，它是一個二維水平模式，但包含水流的垂直結構影響，Putrevu and Svendsen (1999) 將瞬時水平速度設為為紊流項  $u'^\alpha$ 、波浪項  $u_w^\alpha$ 、水深及短波平均速度項  $u^\alpha$ 、以及短波平均速度的垂直變化  $u_1^\alpha$  所組成，如式 (1)：

$$u_{ins}^\alpha = u'^\alpha + u_w^\alpha + u^\alpha + u_1^\alpha \quad (1)$$

在廣義曲線座標， $( )^\alpha$  代表向量的逆變分量 (contravariant component)，我們使用上標代表逆變分量，用下標代表笛卡爾分量 (下同)，而水深及短波平均速度  $u^\alpha$  依 Lagrangian 平均定義如下：

$$u^\alpha = \frac{1}{h} \int_h^\zeta \overline{u_{ins}^\alpha} dz \quad (2)$$

此處  $\zeta$  代表瞬時自由表面高程，這種分解方式不同於 Haas et al. (2003) 依 Eulerian 觀點來分解。Lagrangian 平均法假設：

$$\int_{-h}^{\eta} u_1^{\alpha} dz = -Q_w^{\alpha} \quad (3)$$

上式中  $Q_w^{\alpha}$  或  $Q_{\omega\alpha}$  (Cartesian expression) 是短波通量， $\eta$  是波浪平均自由表面水位。

SHORECIRC 方程式在逆變形式下可寫成：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial x_{\alpha}} [Ju^{\alpha} H] = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u^{\alpha} H}{\partial t} + (u^{\alpha} u^{\beta} H)_{,\beta} + f^{\alpha} + \frac{1}{\rho} (S^{\alpha\beta})_{,\beta} \\ + gHg^{\alpha\beta} \frac{\partial \eta}{\partial x_{\beta}} + \frac{\tau_b^{\alpha}}{\rho} - \frac{\tau_s^{\alpha}}{\rho} - (H\tau^{\alpha\beta})_{,\beta} + \mathbf{ROT} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $H = h + \eta$ ， $h$  是靜止水深、 $\rho$  是水的密度、 $f^{\alpha}$  是科氏力， $(\cdot)_{,\beta}$  代表共變導數，而  $g^{\alpha\beta}$  是逆變度量張量， $S^{\alpha\beta}$  是輻射應力 (Longuet-Higgins and Stewart, 1962; 1964)，其逆變形式在 Shi et al. (2003) 中曾提及說明。 $\tau_s^{\alpha}$  和  $\tau_b^{\alpha}$  分別為風應力和底床應力， $\tau^{\alpha\beta}$  代表等水深情況下的紊流剪力：

$$\tau^{\alpha\beta} = \nu_t T^{\alpha\beta} \quad (6)$$

其中  $T^{\alpha\beta}$  是應變張量， $\nu_t$  是渦粘度係數，渦黏滯度會影響碎波及底床所產生的紊流，可表示如下：

$$\nu_t = C_1 k \sqrt{\frac{f_{cw}}{2} u_0 h + Mh \left(\frac{D}{\rho}\right)^{1/3}} + \nu_{t0} + \nu_s \quad (7)$$

其中  $k$  是馮卡曼常數 ( $k \sim 0.4$ )， $u_0$  是波浪模式中短波的粒子速度振幅， $D$  是波浪模式中單位面積之能量消散。

和  $C_1 \sim 0.2$  和  $M = 0.08$  (Svendsen et al., 2003)。常數  $\nu_{t0}$  是由實驗所得的背景渦黏滯度。如果關閉三維頻散時可以使用較大的值 (紊流黏滯度的 10~20 倍)。

在 SHORECIRC 中的風應力使用 Van Dorn's (1953) 公式：

$$\tau_s^{\alpha} = f_a \rho_a |\mathbf{W}| W_{\alpha} \quad (8)$$

其中  $\mathbf{W}$  是水面上 10 米高的風速， $f_a$  是風阻係數 (Dean and Dalrymple, 1991)， $\rho_a$  代表空氣密度。

在 SHORECIRC 中之底床應力採用 Svendsen and Putrevu (1990) 結合波和流的波浪平均底床應力的公式：

$$\tau_b^{\alpha} = f_{cw} \rho u_{\omega} (\beta_1 u_b^{\alpha} + \beta_2 u_w^{\alpha}). \quad (9)$$

其中  $u_{\omega}$  為在底床處的短波粒子速度振幅， $f_{cw}$  為摩擦係數， $u_b^{\alpha}$  為底床流速，可從方程式中垂直項的理論解獲得， $\beta_1$  和  $\beta_2$  是流和波動的權重係數 (Svendsen and Putrevu, 1990)，並且使用線性波理論來評估。ROT 在式 (5) 代表與大氣壓相關的剩餘項和三維頻散 (詳細請參閱 Shi et al., 2003)。

結合的有限體積法和有限差分法，並不適合在以上的逆變形式方程式。使用笛卡爾和逆變式相結合，可以得到方程式的保守形式 (Shi and Sun, 1995; Shi et al., 1998)，即笛卡爾坐標  $x_{\alpha}$  和廣義曲線坐標系  $\xi_{\alpha}$  之間進行坐標變換。

速度向量的逆變項可表示如下：

$$u^{\alpha} = u_{\beta} L_{\beta}^{\alpha} \quad (10)$$

其中 $u_\beta$ 是速度向量的笛卡爾項並且

$$L_\beta^\alpha = \frac{\partial \xi^\alpha}{\partial x_\beta} \quad (11)$$

在直角坐標中的導數可(12)式轉換至曲線坐標

$$\frac{\partial}{\partial x_\alpha} = L_\alpha^\beta \frac{\partial}{\partial \xi^\beta} \quad (12)$$

SHORECIRC 方程式的守恆形式如下，

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{J} \frac{\partial JP^\alpha}{\partial \xi^\alpha} = 0 \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial Hu_\alpha}{\partial t} + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi^\beta} \left[ JP^\beta u_\alpha + \frac{1}{2} g(\eta^2 + 2\eta h) JL_\alpha^\beta \right] \\ & + f_\alpha - g\eta \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi^\beta} (h JL_\alpha^\beta) + \frac{1}{\rho} \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi^\gamma} (S_{\alpha\beta} JL_\beta^\gamma) \\ & + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi^\gamma} (\tau_{\alpha\beta} JHL_\beta^\gamma) + \frac{\tau_\alpha^b}{\rho} - \frac{\tau_\alpha^s}{\rho} + \mathbf{ROT} = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

其中 $P^\alpha = Hu^\alpha$ ，表示體積通量的逆變項； $f_\alpha$ 代表科氏力的笛卡爾項，如 $(-fHv, fHu)$ ，其中 $(u, v)$ 代表直角坐標中的速度； $S_{\alpha\gamma}$ 代表輻射應力的笛卡爾項； $\tau_\alpha^b$ 和 $\tau_\alpha^s$ 是底床應力和風應力的笛卡爾項，注意(14)式的推導使用度量公制法 (metric identity law, Thompson et al., 1985)，如：

$$\frac{\partial}{\partial \xi^\alpha} (JL_\beta^\alpha) \equiv 0 \quad (15)$$

$$\begin{aligned} & -gHJ \frac{\partial \eta}{\partial x_\alpha} = -\frac{\partial}{\partial \xi^\alpha} \left[ \frac{1}{2} g(\eta^2 + 2\eta h) JL_\beta^\alpha \right] \\ & + g\eta \frac{\partial}{\partial \xi^\alpha} (h JL_\beta^\alpha) \end{aligned} \quad (16)$$

使用(13)式和(14)式較使用(3)式和(4)式具有以下優點：1. 他們是守恆形式可用於混合數值方法中。2. 不同於(5)式中的逆變項，所有外力項在直角座標中將恢復為向量形式。3. 輻射應力項 $S_{\alpha\beta}$ 使用直角坐標中的原始形式，因此二階張量不需要轉換。缺點是(14)式包含笛卡爾項 $u_\alpha$ 和逆變項 $P^\alpha$ ，然而在SHORECIRC使用的混合數值方法，為方便求解這二個變數，採用顯式法，而非隱式法 (Shi et al., 2007)。

紊流剪應力項的處理如同輻射應力項的方式， $\tau_{\alpha\beta}$ 被定義在直角坐標中如下：

$$\tau_{\alpha\beta} = \nu_t \left( \frac{\partial u_\alpha}{\partial x_\beta} + \frac{\partial u_\beta}{\partial x_\alpha} \right) \quad (17)$$

使用(12)式可求得在直角坐標中的導數。

水平速度的垂直結構的控制方程式，可求解最低階之流的垂直變化方程式之解析解得之：

$$\frac{\partial u_{1\alpha}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_t \frac{\partial u_{1\alpha}}{\partial z} \right) = F_\alpha \quad (18)$$

其中 $\nu_t$ 是渦黏滯係數， $F_\alpha$ 為局部外力項 (local forcing)，其一般形式如下：

$$F_\alpha = \frac{1}{\rho h} f_{w\alpha} - f_\alpha^{rad} + \frac{\tau_\alpha^b}{\rho h} - \frac{\tau_\alpha^s}{\rho h} \quad (19)$$

其中 $f_\alpha^{rad}$ 代表局部輻射應力如Putrevu and Svendsen (1999)所定義。在離岸區域無波力時，(19)式減化為

$$F^\alpha = \frac{\tau_\alpha^b}{\rho h} - \frac{\tau_\alpha^s}{\rho h} \quad (20)$$

(18) 式的解可依 Putrevu and Svendsen (1999) 的方式被解出。底床流速  $u_\alpha^b$  可由在底床的  $u^\alpha$  和  $u_{1\alpha}$  來表示，如：

$$u_\alpha^b = u_\alpha + u_{1\alpha}(z = -h) \quad (21)$$

## 2.2 SWAN 方程式

SWAN (Simulating Waves Near-shore)，是由荷蘭的 Delft 大學統合以往學者的研究並加以改良而成風浪模式 (Booij et al., 1999)，為求解波浪作用力之平衡方程式，在廣義曲線坐標下，其控制方程式如下：

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{J} \frac{\partial (JC_g^\alpha)}{\partial \xi_\alpha} + \frac{\partial (C_{g\sigma} N)}{\partial \sigma} + \frac{\partial (C_{g\theta} N)}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (22)$$

其中  $\xi_\alpha$  為曲線坐標，其定義與曲線型 SHORECIRC 模式相同； $\sigma$  是相對角頻率； $\theta$  是每個波的前進方向； $C_g^\alpha$  代表能量傳遞速度的逆變項，可利用坐標轉換求得：

$$C_g^\alpha = C_{g\beta} L_\beta^\alpha \quad (23)$$

其中，在矩形直角坐標  $C_{g\beta} = (C_{gx}, C_{gy})$ ，為了使其符合環流方程式，(22) 式是張量不變形式，如 Booij et al. (1997) 中擴展的數值形式。 $C_{g\sigma}$  和  $C_{g\theta}$  分別代表在  $\sigma$  和  $\theta$  能量傳遞速度， $S$  表示波浪傳遞時可能發生之波浪能量成長、消散及非線性交互作用等物理現象之源函數， $N$  是波浪作用力，其定義如下：

$$N = E(\xi^\alpha, \sigma, \theta, t) / \sigma \quad (24)$$

式中  $E$  是波浪能量密度。

至於流對波變形的影響詳述如下：

1. 群波速度 (包含流的項)

$$C_{g\alpha} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) \frac{\sigma k_\alpha}{|\mathbf{k}|^2} + u_{E\alpha} \quad (25)$$

其中  $k_\alpha$  或  $\mathbf{k}$  代表波速， $d$  是短波平均下之水深，而  $d = h + \eta$ 。

$u_{E\alpha} = u_\alpha - Q_{w\alpha} / H$  為回流項，或 Eulerian 平均速度。

2. 相對頻率的改變

$$C_\sigma = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left( \frac{\partial d}{\partial t} + \mathbf{u}_E \cdot \nabla d \right) - C_g \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}_E}{\partial s} \quad (26)$$

3. 流導致之波浪折射

$$C_\theta = -\frac{1}{k} \left( \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}_E}{\partial m} \right) \quad (27)$$

其中  $s$  是在方向  $\theta$  的空間坐標， $m$  是  $s$  的法線坐標

## 三、模式之率定驗證

數值模式之品質管制主要包括：1. 控制方程式之品管；2. 數值技巧之品管；3. 模式計算結果之品管。本研究應用之 NearCoM 模式為美國 Delaware 大學所發展，由於此模式已被廣泛的應用於許多地區，其在模式控制方程式與數值技巧方面之品管均已有相當程度之公信力。因此本研究之模式品管重點在於模式參數之率定與模擬結果之驗證。

### 3.1 模式設定

本研究模擬區域(如圖2方框所示)北涵蓋臺中港海域至彰濱工業區崙尾區海域,其沿岸長度約為41公里,向離岸範圍則延伸至水深-50公尺處,長度約為15公里。圖3則為經座

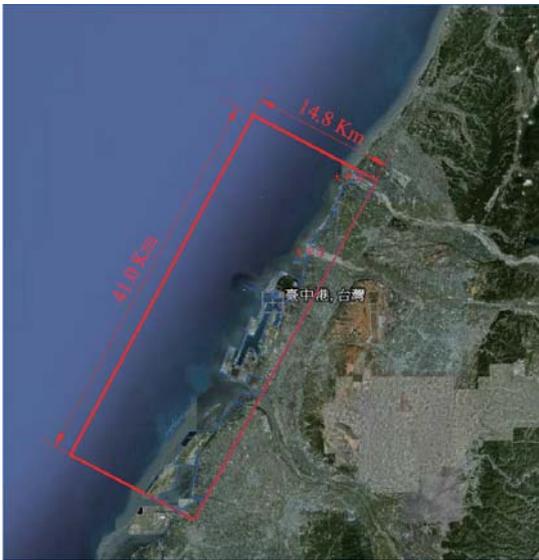


圖2 計畫範圍

標轉換後之海潮流模擬範圍及地形水深分佈圖,模式領域在水平方向劃分為 $408 \times 148$ 個正方網格,每一網格之邊長為100公尺。表1則詳列模式所運用之計算時間間距及地理座標之轉換參數。模式開放邊界資料,採用臺灣近岸海象預報系統(TaiCOM Model)所提供的逐時預測水位,以預測水位做為調合分析取得邊界上M2、S2、N2、K1、O1、Q1、P1、K2分潮係數之用。開放邊界資料以8個分潮計算。

表1 大區域海潮流模式之格網及計算條件

模式面積	40.8 公里 $\times$ 14.8 公里
格網大小	100 公尺 $\times$ 100 公尺
格網數目	$408 \times 148$
原點座標 (Twd 67)	E = 191,800 N = 2,663,500
轉角 (由正北向順時針)	$62^\circ$

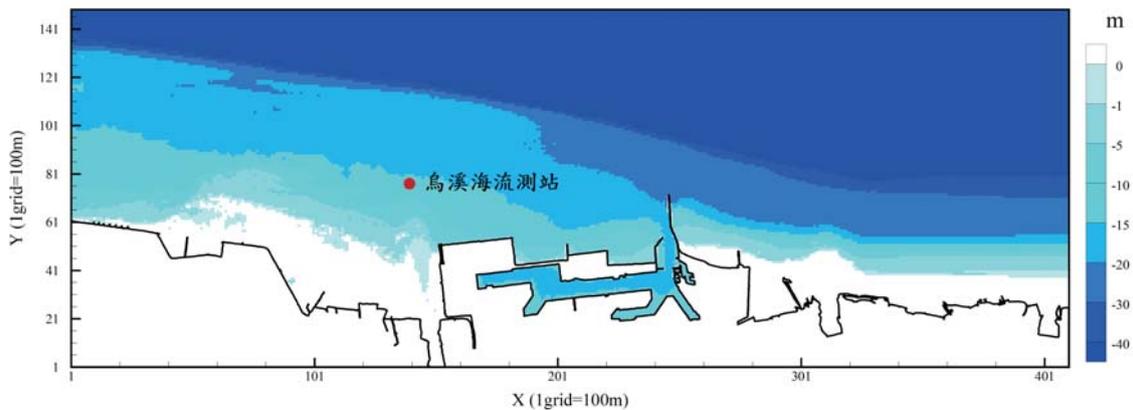


圖3 海潮流模式模擬範圍及地形水深分佈圖

### 3.2 模式率定

水動力模式之主要參數包括渦動粘性係數及底床磨擦係數，這些參數值的選取將影響模式的穩定性及計算結果的準確性。一般來說，模式使用之參數值必須經由模式之率定來決定。



圖 4 臺中港海象測站示意圖

本研究在流場模式之率定方面，利用設置於北防波堤堤頭外側 600m 水深 25m 處以 AWCP 儀器量測海流資料 ( $24^{\circ}18'04''N$   $120^{\circ}28'59''E$ )，以及本所港灣技術研究中心在 2011 年於臺中港南側，烏溪 (又稱大肚溪) 外海 ( $24^{\circ}13'6.8''N$   $120^{\circ}25'30.3''E$ ) 之海流測站實測海流資料來進行模式檢核與驗證。並與臺中港內 ( $24^{\circ}17'16''N$ ,  $120^{\circ}31'57''E$ ) 及北防波堤外 AWCP 測站的水位資料進行比對，測站位置如圖 4。

SHORECIRC 模式之主要參數為底床磨擦係數與渦動黏性係數，其值將影響模式的穩定性及計算結果的準確性。本研究利用測站資料進行參數值率定，測站實測資料與模擬結果的均方根誤差 (RMSE) 如圖 5 所示，率定所得到底床摩擦係數之最佳參數為 0.0035，渦動黏性係數為 0.001。

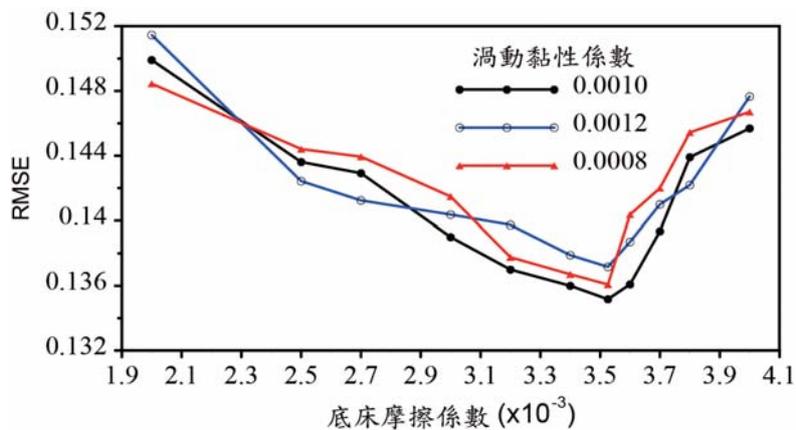


圖 5 NearCoM 模式參數率定圖

流場模式計算結果，其沿岸方向之流速分量以往北為正，岸方向流速分量則以岸方向(往西方向)為正。模式計算結果與實測值之比較分析如下：

圖 6 與圖 7 分別為臺中港內以及北防波堤外 AWCP 的潮位及水位記錄與海潮流模式模擬結果，時間為

2011/05/14 零時起，逐時模擬比較 8 天資料。由圖中可發現此二處水位變化差異不大，模式計算結果略小於實測記錄，但大致相符。本模式開放邊界潮位資料係採用大區域模式計算所得資料，可預期會有誤差存在，但結果尚可接受。

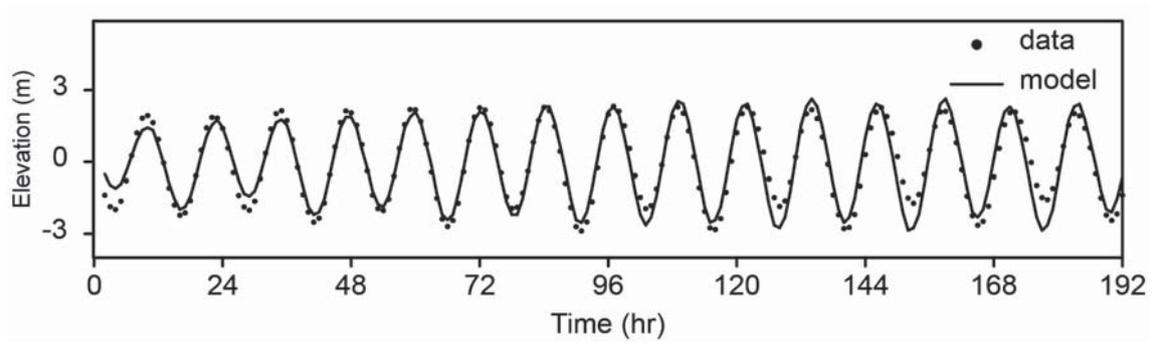


圖 6 臺中港內實測潮位與模式計算比較圖 (起始時間：2011/05/14 00:00:00)

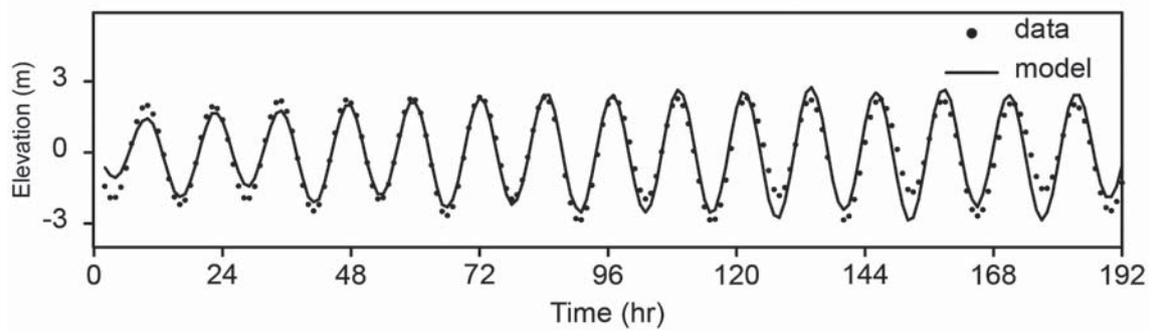


圖 7 臺中港北防波堤外 (AWCP) 實測水位與模式計算比較圖 (起始時間：2011/05/14 00:00:00)

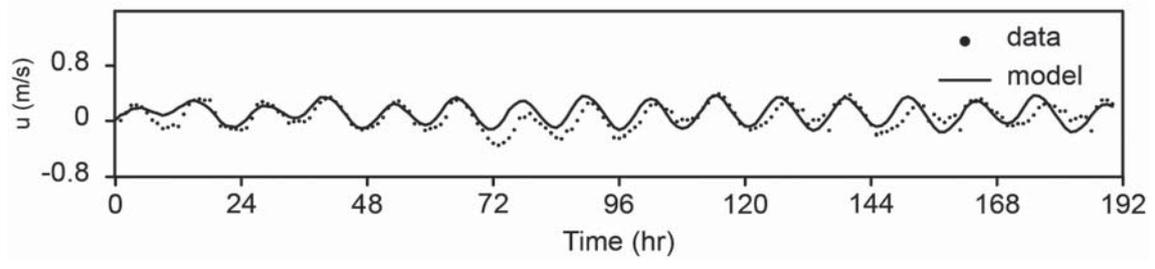


圖 8 烏溪外海實測沿岸海流與模式計算比較圖 (起始時間：2011/05/14 00:00:00)

圖 8 與圖 9 對烏溪海流測站記錄與海潮流模擬結果，針對沿岸流速及離岸流速成份分別進行比較，時間為 2011/05/14 零時起，逐時模擬比較 8 天資料。由圖中顯示，此海域沿岸流速大於離岸流速，約為兩倍之量，計算期間，沿岸方向最大流速為 0.3m/sec，離岸方向最大流速 0.12m/sec。沿岸流

速與離岸流速二者位相差約二分之一週期，約為 6 小時。圖中顯示模擬結果與實測值尚為吻合。

圖 10 與圖 11 對臺中港北防波堤外 AWCP 站測記錄與海潮流模擬結果，針對沿岸流速及離岸流速成份分別進行比較，時間為 2011/05/14 零時起，逐時模擬比較 8 天資料。由圖中

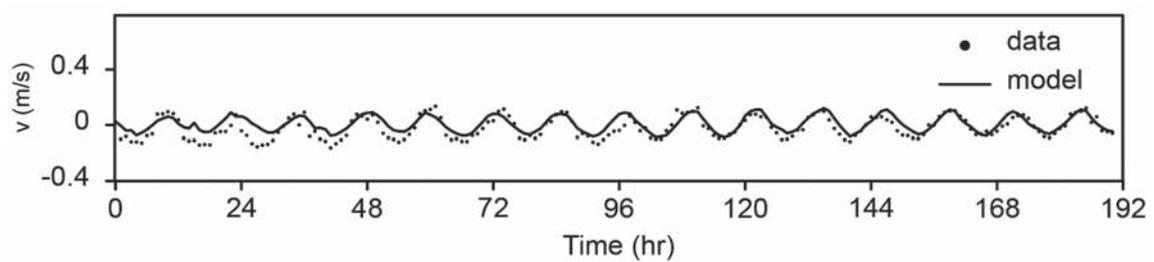


圖 9 烏溪外海實測離岸海流與模式計算比較圖 (起始時間：2011/05/14 00:00:00)

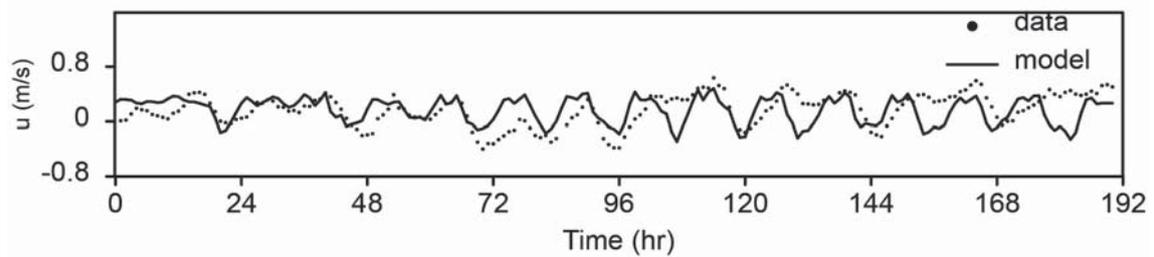


圖 10 臺中港北防波堤 (AWCP) 實測沿岸海流與模式計算比較圖  
(起始時間：2011/05/14 00:00:00)

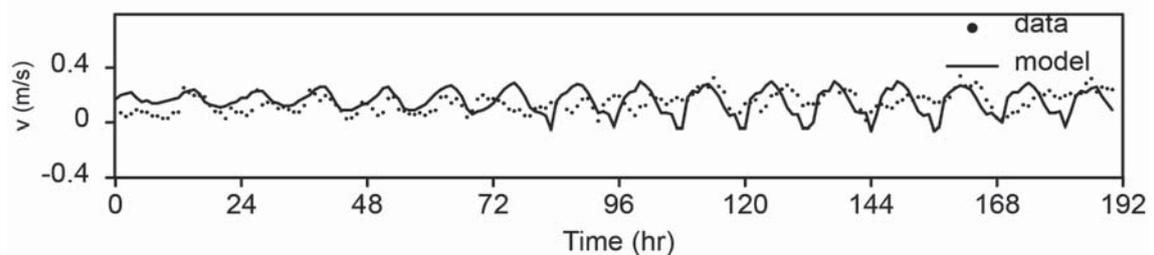


圖 11 臺中港北防波堤 (AWCP) 實測離岸海流與模式計算比較圖  
(起始時間：2011/05/14 00:00:00)

顯示，此海域沿岸流速大於離岸流速，約為兩倍之量，計算期間，沿岸方向最大流速為 0.64m/sec，離岸方向最大流速 0.34m/sec。此處海域存在恆流，沿岸流速平均為 0.20 m/sec，離岸流速平均為 0.15 m/sec，整體流向約為 N 方。此處受到波流及突堤影響，流場較為複雜，圖中顯示模擬結果不如烏溪外海測站理想，但趨勢仍與實測值相符。由以上分析可驗證本模式可適切模擬臺中港區域海潮流變化。

### 3.3 臺中港附近海域流場模擬

港灣技術研究中心於 2014 年 6 月 20 日在臺中港北防波堤附近海域進行

船碇 ADCP 量測表層流速流，並分析其不同潮位之流場。圖 12 至圖 15 為本模式在相同時間所模擬臺中港鄰近海域於滿潮、退平潮、乾潮及漲平潮時之潮流場向量圖。

圖 16 至圖 19 為北防波堤堤頭附近的實測流場與模式模擬結果之比較圖，左圖為實測圖，右圖為模擬結果。實測資料為一段時間(約 2 至 3 小時)量測的結果，數值模擬呈現的則為某一瞬間的流場，二者條件有所差異，但應有相似的趨勢。

圖 16 至圖 19 顯示臺中港北防波堤堤頭西側海域，海流流向大致呈現為往北以及東北向，漲潮時段的流

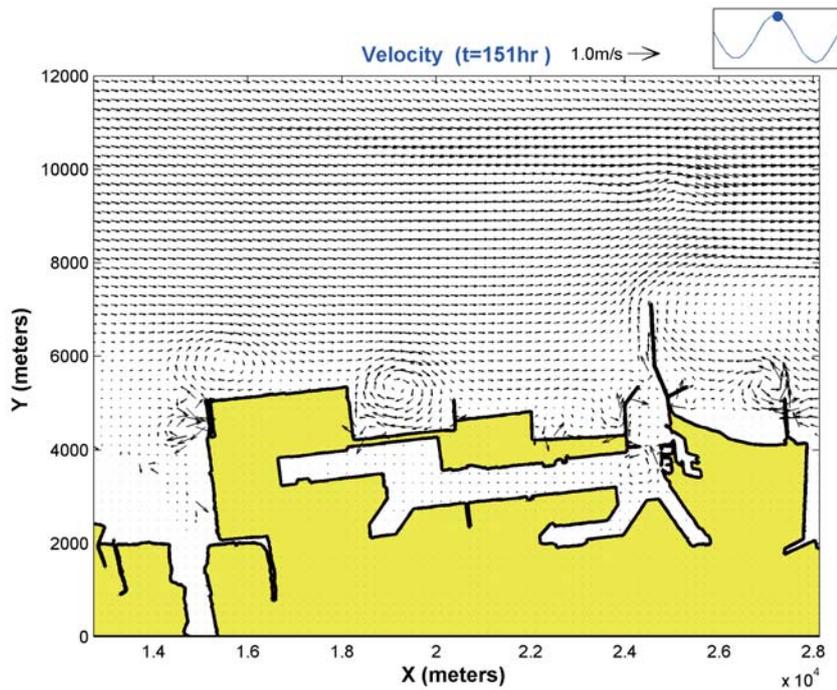


圖 12 臺中港附近海域潮流場模擬 (滿潮，2014/6/20 17:00:00)

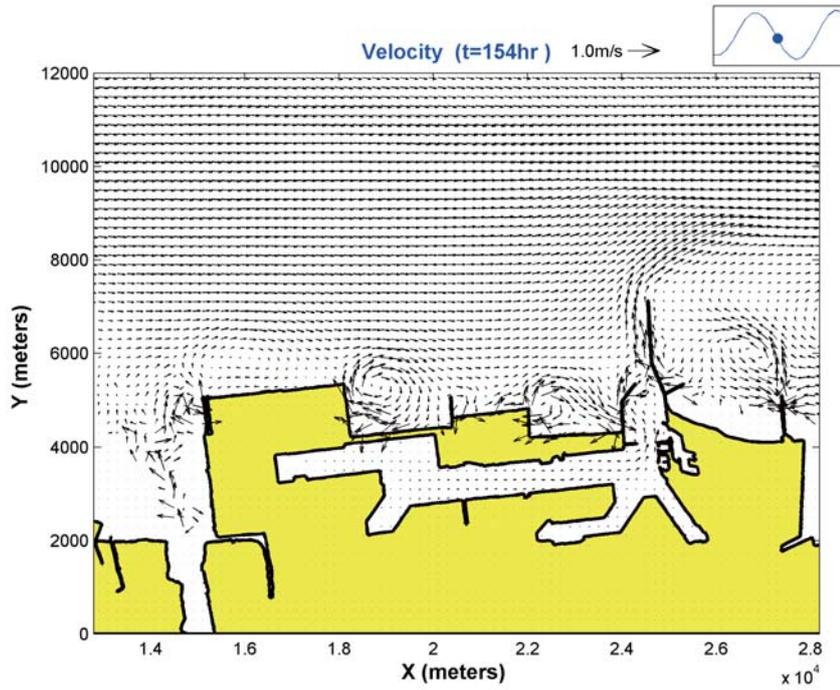


圖 13 臺中港附近海域潮流場模擬 (退平潮，2014/6/20 20:00:00)

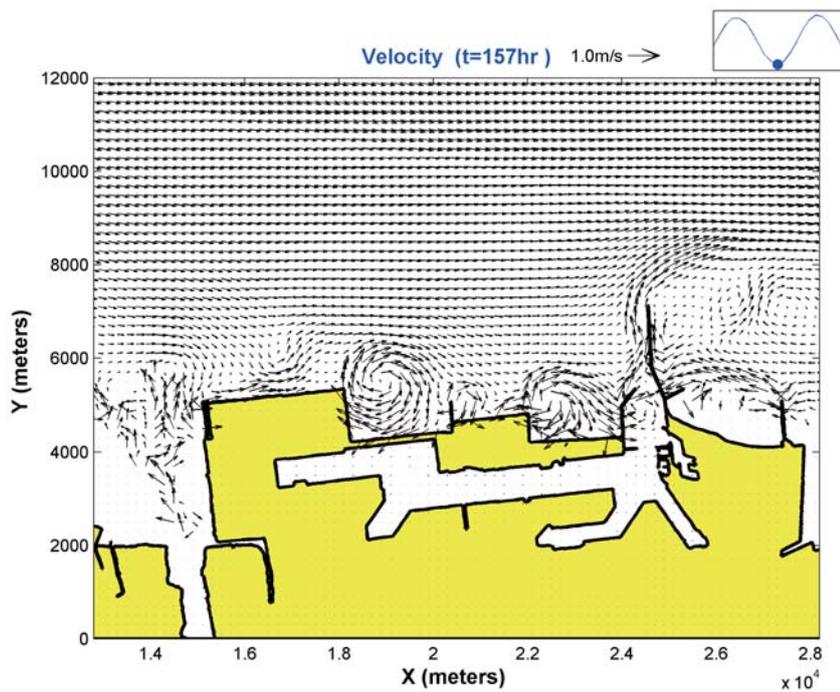


圖 14 臺中港附近海域潮流場模擬 (乾潮，2014/6/20 23:00:00)

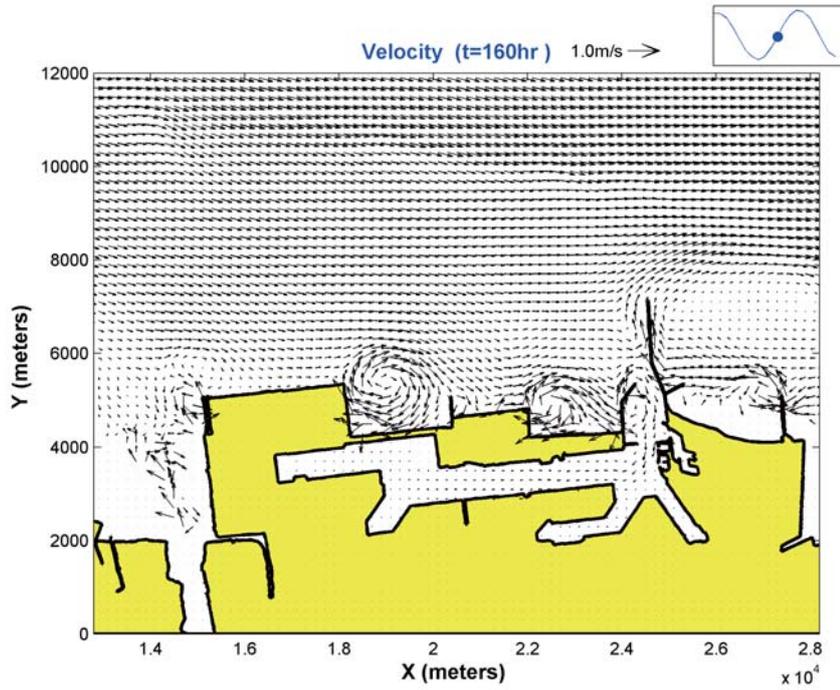


圖 15 臺中港附近海域潮流場模擬 (漲平潮，2014/6/21 02:00:00)

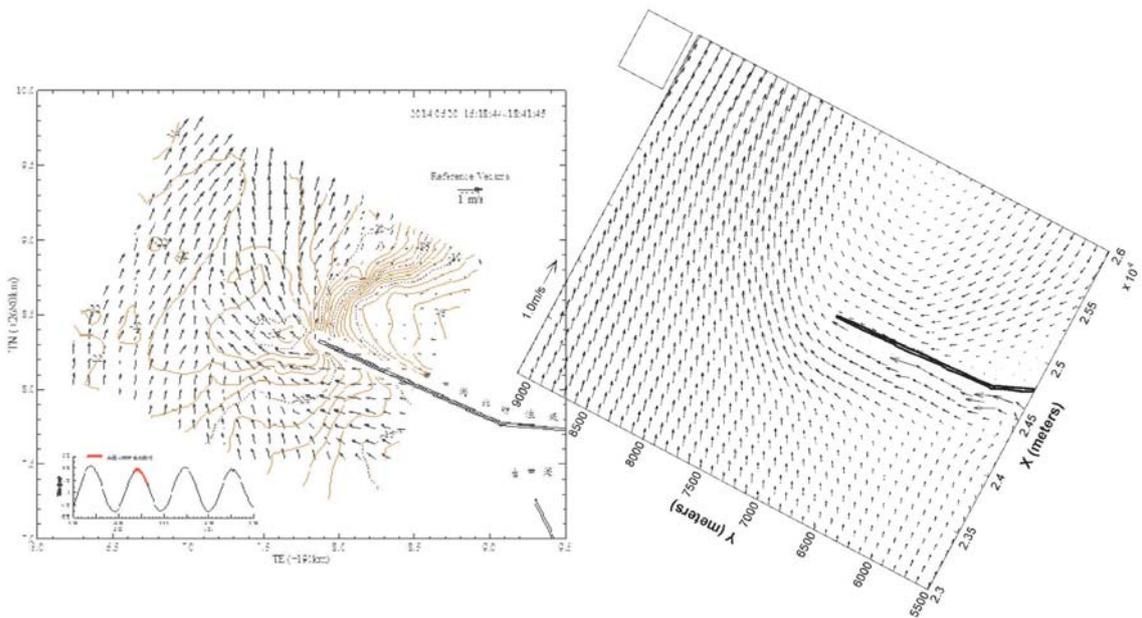


圖 16 臺中港堤防波堤堤頭附近海域之實測 (左) 與模擬 (右) 流場  
(滿潮，2014/6/20 17:00:00)

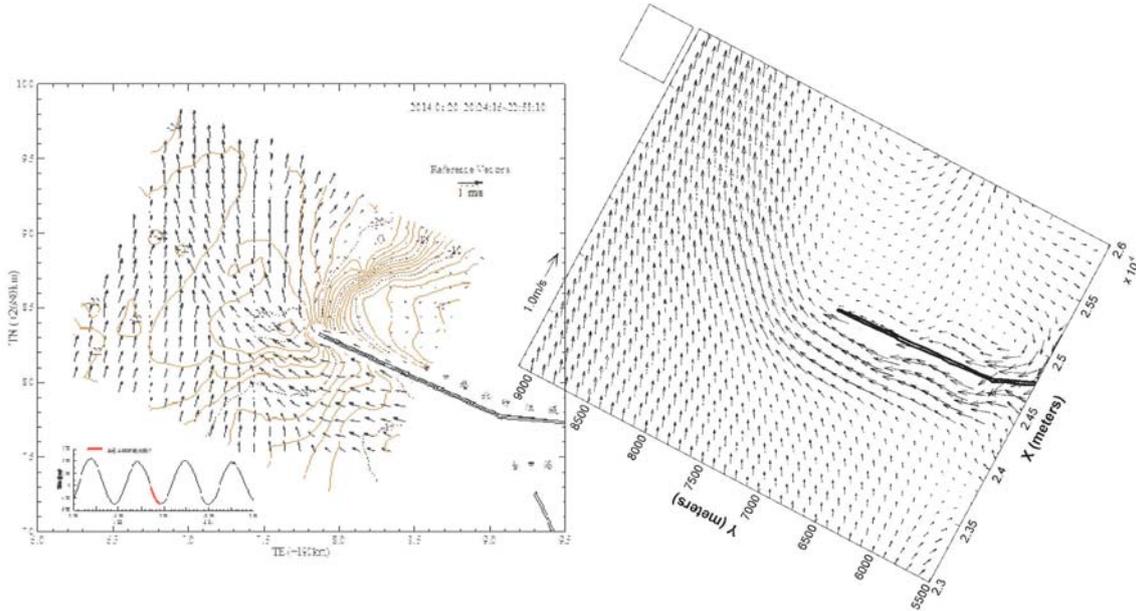


圖 17 臺中港堤防波堤堤頭附近海域之實測 (左) 與模擬 (右) 流場  
(退平潮，2014/6/20 20:00:00)

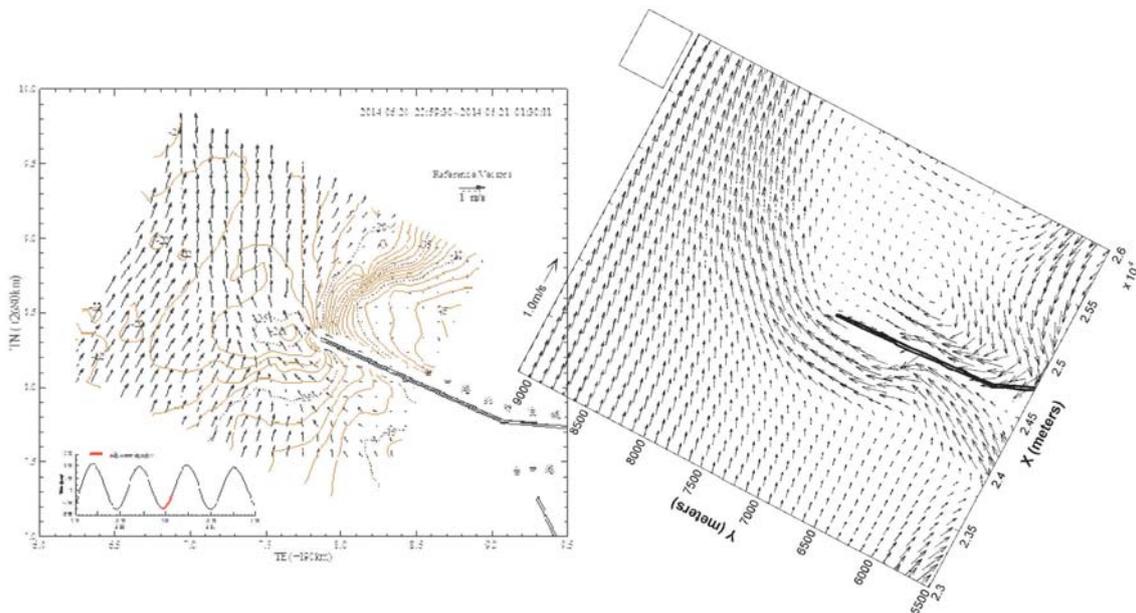


圖 18 臺中港堤防波堤堤頭附近海域之實測 (左) 與模擬 (右) 流場  
(乾潮，2014/6/20 23:00:00)

向較偏東北，退潮時段則較偏北；在臺中港北防波堤西側凹陷地形區之流向大則呈現往西北及東北方向，漲潮時段的流向較偏東北，而退潮時段則較偏西北，且該區域之流速略大於其西側海域，可能肇因於退潮時港嘴區海流與之匯流而產生較大流速；臺中港北防波堤北側區域則受到防波堤遮蔽影響，無論漲潮或退潮，其流速都明顯小於其他地區，且流向呈現順時針旋轉。模式計算結果與實測流場分布，趨勢尚屬一致，惟漲、退潮的流況差異，模式計算結果較為不明顯。

此次觀測期間之表層平均流速，在臺中港北防波堤以西之海域，其平

均海流流速約在 0.42~0.58m/sec 間，流向大致為往東北~北之方向前進，而臺中港北防波堤南側(港嘴附近海域)之平均流速約在 0.2~0.35m/sec，其流向為沿北防波堤往西北方向前進，而北防波堤北側區域受防波堤遮蔽影響，流速明顯較小(約 0.05m/sec 以下)。

### 3.4 臺中港附近海域浮標軌跡模擬

港灣技術研究中心於 2013 年 7 月 23 日，在臺中港北防波堤附近海域海面漂流浮標軌跡與風速之量測，以瞭解當地海域之表面流場變化情況。圖 20 為北防波堤處的實測風速資料，量測所得之風速介於 0 ~ 10.3m/s 間。本

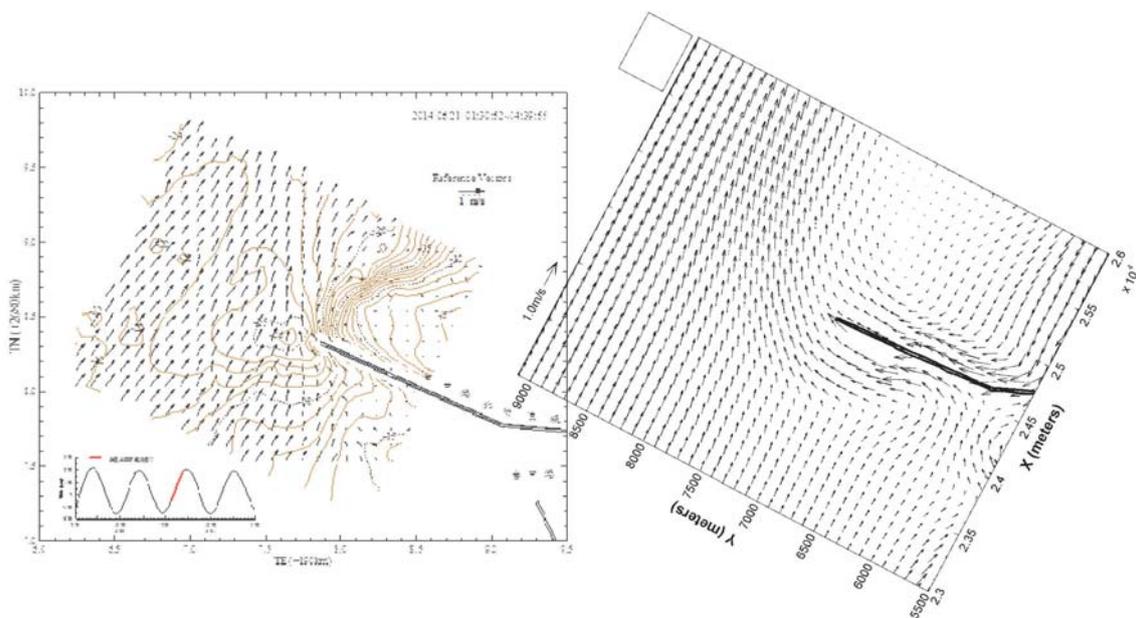


圖 19 臺中港堤防波堤堤頭附近海域之實測(左)與模擬(右)流場  
(漲平潮，2014/6/21 02:00:00)

節應用 NearCoM 模式模擬臺中港北防波堤附近海域之浮標漂流，並與實測資料進行驗證。

描述流體運動之方式通常可分為 Eulerian 方式與 Lagrangian 方式兩種。

1. Eulerian 方式是針對流場中通過固定位置點處之流體質點的運動特性；2. Lagrangian 方式則為描述流場中特定流體質點之運動軌跡與特性。因此，若將浮標視為流體質點以數值模式所模擬計算出之 Eulerian 方式之流速，將可轉換成特定流體質點之 Lagrangian 流速。浮標追蹤模組中模擬浮標軌跡的路徑  $\bar{X}_m$  之方程式如下

$$\begin{aligned} \bar{X}_m(t) &= \bar{X}_m(t=0) \\ &+ \int_0^t [\bar{u}_{L,m}(\bar{X}_m(t'), t')] dt', \end{aligned} \quad (28)$$

其中  $\bar{u}_{L,m}$  為 Lagrangian 方式下之質點速度，在 NearCoM 模式中可計算各

個位置之  $\bar{u}_{L,m}$  隨時間變化所有情形。因此，各時間點的浮標位置  $\bar{X}_m$  即可被求得，應用 (28) 式模擬浮標漂移結果如圖 21 ~ 22。圖中分別為不同時間點實測資料與數值模擬結果比較，其中實線為 NearCoM 模擬結果，而點為蔡與黃 (2014) 實測資料。結果顯示應用 (28) 式模擬北防波堤堤頭附近的浮標軌跡模擬結果則尚屬合理，但圖 21 中點位 1、2 與圖 22 中點位 1 比對結果尚不理想。因此，根據 Thorpe et al.(2004) 方式加入水平擴散修正項，如 (29) 式所示

$$\begin{aligned} \bar{X}_m(t) &= \bar{X}_m(t=0) \\ &+ \int_0^t \{\bar{u}_{L,m}(\bar{X}_m(t'), t') + w(t')\} dt', \end{aligned} \quad (29)$$

其中  $w(t') = (\sqrt{12\kappa Vt} R_1 \cos(2\pi R_2), \sqrt{12\kappa Vt} R_1 \sin(2\pi R_2))$  為二維水平擴散項， $R_1$ 、 $R_2$  為隨機變數， $\kappa$  為水平擴散係數，參考 Spydell et al. (2015) 之建議

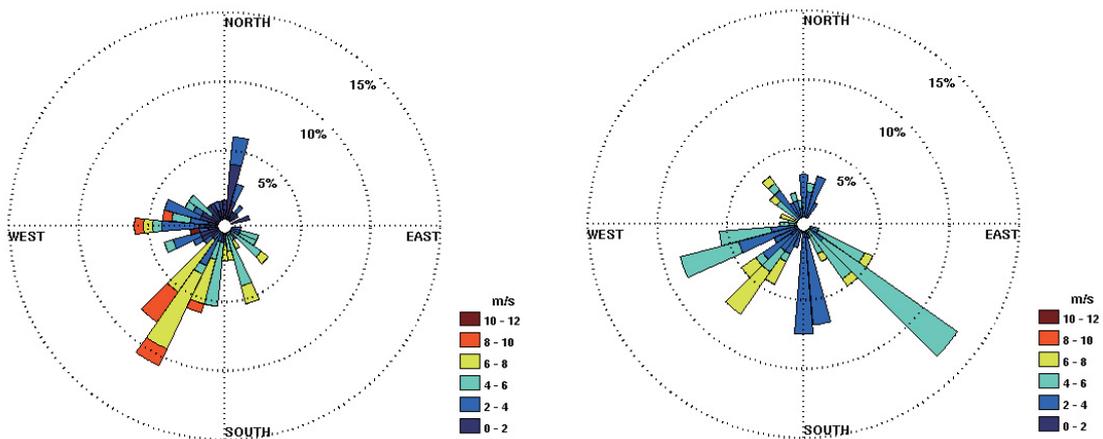


圖 20 臺中港北堤漲潮 (左) 及退潮 (右) 時段風玫瑰圖。(引自蔡、黃 2014)

及實測資料率定可得 $\kappa = 0.1m^2s^{-1}$ 。圖 23 與圖 24 為應用 (29) 式之浮標漂流模擬結果。圖中顯示於圖 21 點位 1、2

與圖 22 點位 1 模擬結果不理想的部份於圖 23 與圖 24 皆有改善。

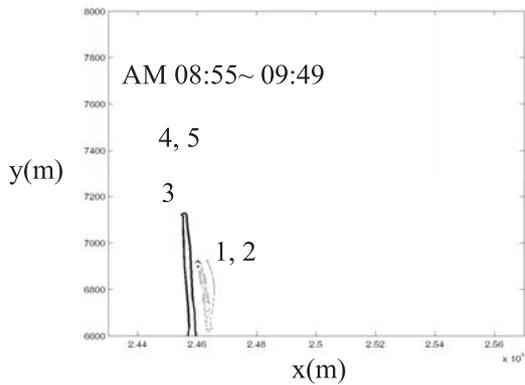


圖 21 浮標軌跡模擬圖

(平均風速：1.26m/s，實線：NearCoM 模擬結果，點：蔡與黃(2014)實測資料)

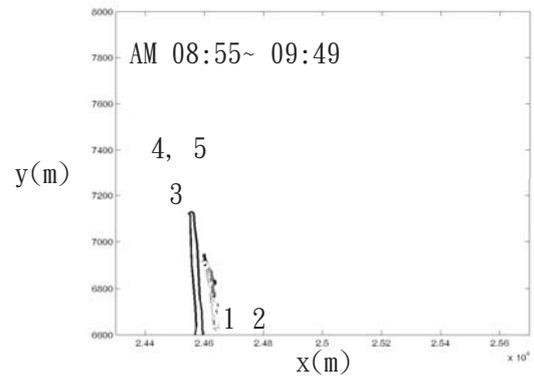


圖 23 含水平擴散浮標軌跡模擬

(平均風速：1.26m/s，實線：NearCoM 模擬結果，點：蔡與黃(2014)實測資料)

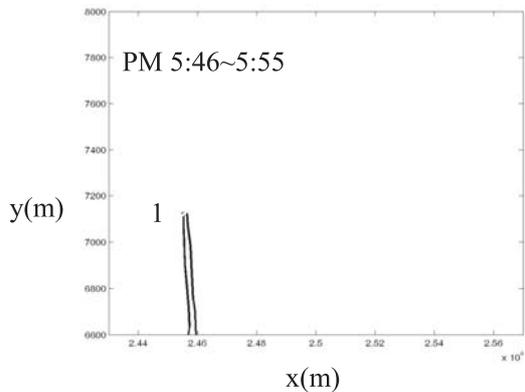


圖 22 浮標軌跡模擬圖

(平均風速：5.43m/s，實線：NearCoM 模擬結果，點：蔡與黃(2014)實測資料)

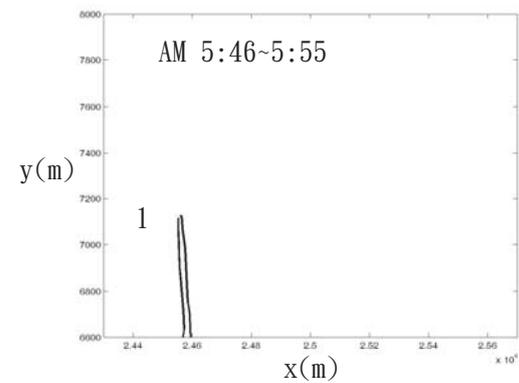


圖 24 含水平擴散項之浮標軌跡模擬圖

(平均風速：5.43m/s，實線：NearCoM 模擬結果，點：蔡與黃(2014)實測資料)

## 四、結論

本研究應用 NearCom 擬三維波流耦合模式進行臺中港的近岸波流場模擬。總結如下：

1. 臺中港附近海域波流場模式，利用臺中港北防波堤外 AWCP 測站資料，以及本所在民國 100 年於臺中港南側(烏溪外海)之海流測站實測海流資料來進行模式參數值率定與驗證。最終率定所得到底床摩擦係數之最佳參數為 0.0035，渦動黏性係數為 0.001。NearCom 模式模擬結果與臺中港南側(烏溪外海)實測資料有不錯的吻合度；與北防波堤外 AWCP 測站資料則有較大的差異，但趨勢仍相符合。
2. 臺中港北防波堤堤頭西側海域，海流流向大致呈現為往北以及東北向，漲潮時段的流向較偏東北，退潮時段則較偏北；在北防波堤西側凹陷地形區之流向大則呈現往西北及東北方向，漲潮時段的流向較偏東北，而退潮時段則較偏西北，且該區域之流速略大於其西側海域；臺中港北防波堤北側區域則受到防波堤遮蔽影響，無論漲潮或退潮，其流速都明顯小於其他地區，且流向呈現順時針旋轉。模式計算結果與實測流場分布，趨勢尚屬一致，惟漲、退潮的流況差異，模式計算結果較為不明顯。

3. 對於一般浮標追蹤模擬常用的方式為  $x(t+Vt) = x(t) + U(t)Vt$ ，如莊與廖(2011)。而近年研究於浮標追蹤模擬時，需考慮水平擴散的影響如(Spydell et al. 2015)。本研究依 Thorpe et al.(2004) 考慮水平擴散，則改善浮標追蹤模擬結果，並完成臺中港區水平擴散係數率定。

## 參考文獻

1. 楊文衡、許泰文，2004，核能四廠鹽寮海岸漂砂數值模擬，台灣電力公司報告。
2. 廖建明、許泰文、林意淳，2004，POM 模式應用於河口水動力計算之研究，第 26 屆海洋工程研討會論文集，A8。
3. 徐月娟、楊天瑋、林芳如、陳琬婷、張恆文，2005，SWAN 模式在近岸風浪預報之應用研究，第 27 屆海洋工程研討會論文集，pp55-62。
4. 李汴軍、鄭皓元、范揚洺、高家俊，2006，區域化颱風波浪現報模式之研究 (I)-SWAN 波浪模式推算週期之探討，第 28 屆海洋工程研討會論文集，pp229-234。
5. 林濤，2006，應用 POM 模式模擬淡水海岸颱風暴潮水位之研究，國立海洋大學河海工程學系碩士論文。
6. 江朕榮、余杏儒、于嘉順、陳琬婷、朱啟豪、滕泰慈，2010，台灣海域

- 多尺度三維海流預報作業模式建置—太平洋及西北太平洋模式，中央氣象局天氣分析與預報研討會暨美華海洋大氣學會第五屆國際海洋大氣研討會論文集，pp37。
7. 李汭軍、范揚洛、馮智源，2010，ROMS 海洋模式應用於南灣海域潮流流場模擬，海洋工程學刊，第 10 卷，pp201-217。
  8. 卓庚榆，2012，應用 POM 模式模擬基隆近岸波浪測試場颱風期間之流場，國立海洋大學河海工程學系碩士論文。
  9. 楊文衡、陳鈺龍、馬雅馨，2012，淡水第二漁港波流與漂砂數值模擬之研究，第 34 屆海洋工程研討會論文集，pp393-398。
  10. 陳勇隆、臧效義、許泰文、鎮洲、何積忠，2013，應用 SWAN 模式於基隆海域波能計算之評估，第 35 屆海洋工程研討會，pp861-866。
  11. 宋芷萱，2014，颱風侵襲下 - 東沙島海岸地形變遷數值研究，海洋國家公園管理處成果報告。
  12. 蔡立宏、黃茂信，2014，港灣構造物與波流互制研究 (1\_4)，交通部運輸研究所。
  13. Booij, N., Holthuijsen, L. H., Doorn, N. and Kieftenburg, A. T. M. M., 1997, "Diffraction in a spectral wave model", Proceedings of 3th International Symposium Ocean Wave Measurement and Analysis WAVES 97, ASCE, New York, 243-255
  14. Booij, N., Ris, R.C. and Holthuijsen, L.H., 1999, "A third generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation", Journal of Geophysical Research: Oceans, 104(C4), 7649-7666.
  15. Casulli, V. and Cheng, R. T., 1992, "Semi-implicit finite difference methods for three-dimensional shallow water flow", International Journal for Numerical Methods in Fluids, 15 (6), 629-648.
  16. Dean, R. G. and Dalrymple, R. A., 1991, Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists, World-Scientific Pub. Co., Teaneck, NJ.
  17. Erduran, K. S., Ilic, S., and Kutija, V., 2005, "Hybrid finite-volume finite-difference scheme for the solution of Boussinesq equations", International Journal for Numerical Methods in Fluids, 49, 1213-1232.
  18. Haas, K. A., Svendsen, I. A., Haller, M. C. and Zhao, Q., 2003, "Quasi-three-dimensional modeling of rip current systems", Journal of Geophysical Research, 108 (7), 3217.
  19. Kirby, J. T. and Dalrymple, R. A.,

- 1992, Combined Refraction/Diffraction Model REF/DIF 1, Version 2.4. Documentation and User's Manual, Research Report No. CACR-92-04, Center for Applied Coastal Research, Department of Civil Engineering, University of Delaware, Newark.
20. Kirby, J. T., Shi, F., Tehranirad, B., Harris, J. C. and Grilli, S. T., 2013, "Dispersive tsunami waves in the ocean: Model equations and sensitivity to dispersion and Coriolis effects", *Ocean Modeling*, 62, 39-55.
21. Lim, H.S.m, Kim, C.S., Park, K.S., Shim, J.S., Chun, L., 2013, "Down-scaled regional ocean modeling system(ROMS) for high-resolution coastal hydrodynamics in Korea", *Acta Oceanol. Sin.*, 9, 50-61.
22. Longuet-Higgins, M. S. and Stewart, R. W., 1962, "Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to 'surf beats' ", *Journal of Fluid Mechanics*, 13(4), 481-504.
23. Longuet-Higgins, M. S. and Stewart, R. W., 1964, "Radiation stresses in water waves; a physical discussion, with applications", *Deep Sea Research and Oceanographic*, 11(4), 529-562.
24. Moriarty, M.M., Harris, C. K., Hadfield, M.G., 2014, "A Hydrodynamic and sediment transport model for Waipaoa shelf, New Zealand: sensitivity of fluxes to spatially varying erodibility and model nesting", *Journal of Marine Science and Engineering*, 2, 336-369.
25. Newberger, P. A. and Allen, J. S., 2007, "Forcing a three-dimensional, hydrostatic, primitive equation model for application in the surf zone: 1. Formulation", *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112(C8).
26. Putrevu, U. and Svendsen, I. A., 1999, "Three-dimensional dispersion of momentum in wave induced nearshore currents", *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 409-427.
27. Roeber, V., Cheung, K. F. and Kobayashi, M. H., 2010, "Shock-capturing Boussinesq-type model for nearshore wave processes", *Coastal Engineering*, 57, 407-423.
28. Shi, F. and Sun, W., 1995, "A variable boundary model of storm surge flooding in generalized curvilinear grids", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 21 (8), 641-651.
29. Shi, F., Sun, W. and Wei, G., 1998, "AWDM method on generalized curvilinear grid for calculation of storm surge flooding", *Applied Ocean Research*, 19(4), 275-282.

30. Shi, F., Svendsen, I. A., Kirby, J. T. and Smith, J. M., 2003, "A curvilinear version of a Quasi-3D nearshore circulation model", *Coastal Engineering*, 49 (1-2), 99-124.
31. Shi, F., Kirby, J. T. and Hanes, D., 2007, "An efficient mode-splitting method for a curvilinear nearshore circulation model", *Coastal Engineering*, 54, 811-824.
32. Shi, F., Kirby, J. T., Tehranirad, B. and Harris, J. C., 2011a, "FUNWAVE-TVD, users' manual and benchmark tests", Center for Applied Coastal Research Report, CACR 2011-04, University of Delaware, Newark, Delaware.
33. Shi, F., Kirby, J. T., Harris, J. C., Geiman, J. D. and Grilli, S. T., 2011b, "A high-order adaptive time-stepping TVD solver for Boussinesq modeling of breaking waves and coastal inundation", *Ocean Modelling*, 43, 36-51.
34. Shi, F., Kirby, J. T., Hsu, T. J. and Chen J. L., 2012, "NearCoM-TVD, documentation and users' manual", Research Report, CACR, University of Delaware, Newark, Delaware.
35. Shiach, J. B. and Mingham, C. G., 2009, "A temporally second-order accurate Godunov-type scheme for solving the extended Boussinesq equations", *Coastal Engineering*, 56, 32-45.
36. Spydell, M. S., Feddersen, F., Olabarrieta, M., and Chen, J. L., 2015, "Observed and modeled drifters at a tidal inlet", *Journal of Geophysical Research: Oceans*, DOI 10.1002/2014JC010541.
37. Svendsen, I. A. and Putrevu, U., 1990, "Nearshore circulation with 3-D profiles", Proceedings of 22th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, 241-254.
38. Svendsen, I. A., Haas, K. A. and Zhao, Q., 2003, Quasi-3D Nearshore Circulation Model SHORECIRC: Version 2.0, Research Report, Center for Applied Coastal Research, University of Delaware.
39. Tehranirad, B., Shi, F., Kirby, J. T., Harris, J. C. and Grilli, S., 2011, Tsunami benchmark results for fully nonlinear Boussinesq wave model FUNWAVE-TVD, Version 1.0, Research Report No. CACR-11-02, Center for Applied Coastal Research, University of Delaware.
40. Thompson, J. F., Warsi, Z. U. and Mastin, C. W., 1985, "Numerical grid generation: foundations and applications", Amsterdam: North-hollan.

41. Thorpe, S. E., Heywood, K. J., Stevens, D. P., and Brandon, M. A., 2004, "Tracking passive drifter in a high resolution ocean model: implications for interannual variability of larval krill transport to South Georgia", *Deep-Sea Research I*, 51,909-920.
42. Tonelli, M. and Petti, M., 2009, "Hybrid finite volume - finite difference scheme for 2DH improved Boussinesq equations", *Coastal Engineering*, 56, 609-620.
43. Toro, E. F., 2009, *Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics: a practical introduction*, Third edition, Springer, New York.
44. Van Dorn, W.G., 1953, "Wind Stress on an Artificial Pond", *Journal of Marine Research*, 12, 249-276.