

臺灣東南海域海象模擬系統建置

劉正琪 國立成功大學水工試驗所研究員
李兆芳 國立成功大學水利及海洋工程學系教授
傅怡釗 交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員
李俊穎 交通部運輸研究所港灣技術研究中心科長
謝佳紘 國立成功大學水工試驗所研究助理

摘要

本文主要介紹港研中心 TaiCOMS 有關臺東富岡漁港、綠島南寮漁港及蘭嶼開元漁港等海域小尺度海象模擬之研究成果，其中風浪模擬採用大、中、小三層巢狀網格，並將東南海域網格解析度提高至 0.008；水動力模擬系統係由中尺度臺灣周圍海域及小

尺度東南海域雙層有限元素網格構成。目的提供臺東與綠島、蘭嶼等離島藍色公路細緻化更精確的風浪模擬資訊，以保障海上航行安全。針對部份模擬結果與觀測值間校驗不盡理想之處，後續仍應研究尋求改善之道。

一、前言

由於我國為海島型國家，臺灣本島與離島間各類物資及人員多需仰賴海洋運輸，因此發展藍色公路乃政府長期推動之政策。基於臺灣周圍海域海象變化莫測，為確保海上交通航行安全，交通部運輸研究所港灣技術研究中心(以下簡稱港研中心)長期推動發展近岸/近海防救災相關海象預報系統，配合海氣象觀測，提供各大商港海象觀測與預報的資料(李，2007)。近年來，積極發展提供藍色公路相關航線上海象數值預報資訊，確保航運安全，協助相關單位

維護臺灣海域的安全。為提供藍色公路細緻化海象(風浪、水位及潮流等)模擬資訊確保航行之安全，本文目的介紹港研中心針對臺東富岡漁港、綠島南寮漁港及蘭嶼開元港間藍色公路航行海域建置小尺度海象模擬系統之研究成果(邱，2018)。

臺灣近岸海象預報系統(Taiwan Coastal Operational Modeling System, TaiCOMS)之整體組成架構如圖 1 所示，包括即時海象觀測網、海象模擬作業化系統及港灣環境資訊網；其中海象

模擬作業化系統區分為風(壓)場處理系統、波浪模擬系統、水動力模擬系統及海嘯模擬預警系統等四個子系統。在海象模擬作業化系統架構下，有關風浪模擬之組成架構如圖 2 所示，其組成是由大尺度遠域風浪模擬、中尺度近域風浪

模擬及小尺度近岸風浪模擬建構出三層巢狀網格之風浪模擬系統；水位及潮流模擬之組成架構如圖 3 所示，其組成是由中尺度臺灣周圍海域水動力模擬及小尺度近岸水動力模擬建構成兩層巢狀邊界之水動力模擬系統。

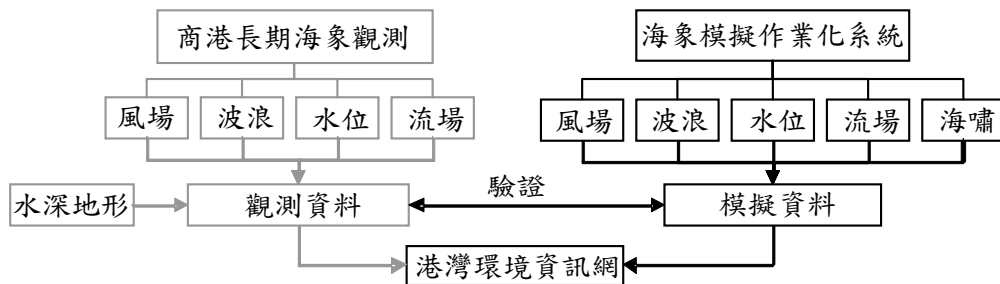


圖 1 臺灣近岸海象預報系統整體架構圖

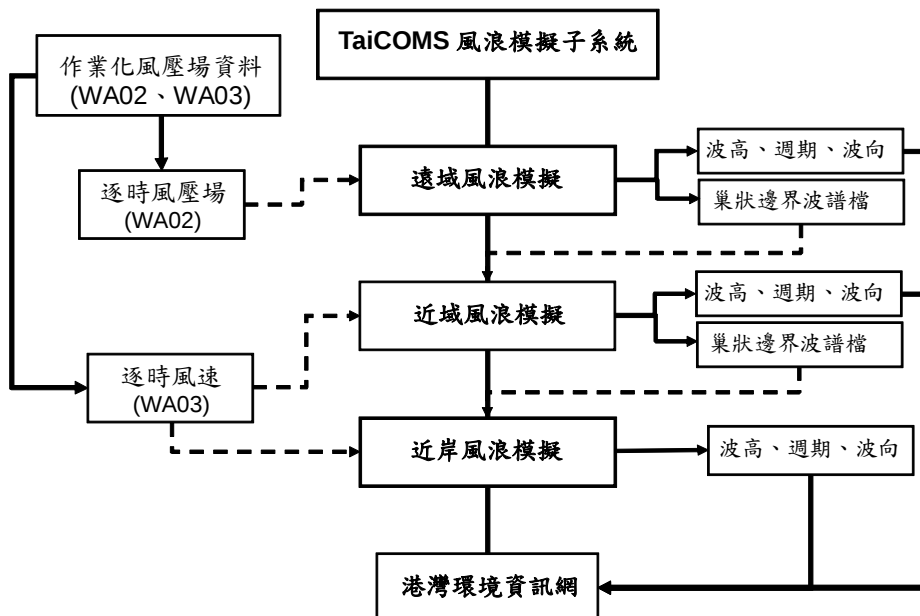
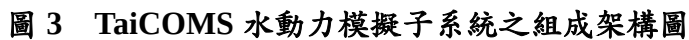


圖 2 TaiCOMS 風浪模擬子系統之組成架構圖



係由離作業化時間最近的六組連續預報風壓場資料(中央氣象局天氣預報資料)，合併構成一組 73 小時組合式風壓場資料，如圖 4 所示。

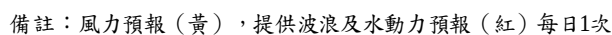


圖 4 每日(D 日)海象模擬預報風場組合示意圖

參照 TiaCOMS 海象模擬作業化系統現有架構，本研究東南海域小尺度海象模擬系統包括東南海域風浪模擬子

系統(如圖 2 所示)及水動力模擬子系統(如圖 3 所示)，相關研究成果分述如后。

二、東南海域風浪模擬子系統建置

本研究結合 TaiCOMS 現有大尺度西太平洋遠域風浪模組、中尺度臺灣周圍海域近域風浪模組及本研究建置的小尺度東南海域近岸風浪模組建構東南海域風浪模擬子系統。

2.1 數值模式介紹

TaiCOMS 風浪模擬系統使用的數值模式包括 WAM (WAMDI group, 1988)及 SWAN (Booij, 2004)，前者應用於遠域風浪模擬，後者應用於近域及近岸風浪模擬。有關 WAM 及 SWAN 之基本控制方程式介紹如下：

1. WAM

WAM 之基本方程式為二維波浪能量平衡方程式，其表示式如下：

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{\cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} (C_{\phi} F) + \frac{\partial}{\partial \lambda} (C_{\lambda} F) + \frac{\partial}{\partial \theta} (C_{\theta} F) = S \quad (1)$$

式中 $F=F(f, \theta, \lambda, \phi, t)$ 為波浪能量密度譜 (energy density spectrum)， f 為波浪之頻率， θ 定義為波浪傳播方向， t 為時間， C 為波浪群速度 (group velocity)， S 為源函數 (source function)， ϕ 為緯度， λ 為經度， C_{ϕ} 、 C_{λ} 與 C_{θ} 分別為波浪群速度 (group velocity) 在球面座標 ϕ 、 λ 軸及波浪傳播方向 θ 之空間傳遞速率。源函數 S 可表示成

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{dis} + S_{bot} \quad (2)$$

其中 S_{in} 、 S_{dis} 、 S_{bot} 及 S_{nl} 分別代表風浪之成長項、能量消散項、底床摩擦項及波浪間非線性交互作用項。

2. SWAN

SWAN 之控制方式為波浪作用力平衡方程式 (wave action balance equation)，表示如下：

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_{\sigma} N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_{\theta} N}{\partial \theta} = \bar{S} \quad (3)$$

式中 $N(\sigma, \theta)$ 為波浪作用力密度波譜 (action density spectrum)，其中 σ 為相對的波浪頻率， θ 為波浪方向角； x 、 y 為直角座標系統之座標軸， c_x 及 c_y 分別為波浪作用力在 x 及 y 空間之傳遞速度， c_{θ} 代表波浪作用力在波向 θ 空間之傳遞速度， c_{σ} 代表波浪作用力在波浪頻率 σ 空間之傳遞速度， S 代表波浪成長與消散之源函數項。

SWAN 在能量成長與消散項的參數選擇上比其它模式更具彈性，相關功能包括可以計算波浪在時間及空間領域之傳遞、波與波之間非線性的交互作用、波浪受風之成長、碎波之能量消

散、底床摩擦引起的能量損失、以及波浪受到海流及地形變化影響而產生的頻率位移、淺化與折射等物理過程。

2.2 巢狀網格

東南海域風浪模擬系統建構的三層巢狀網格之模擬範圍如圖 5 所示，各層數值計算網格資料如表 1 所列，表中大尺度遠域、中尺度近域及小尺度近岸網格之解析度分別為 0.2° 、 0.04° 及 0.008° 。圖中各層數值計算網格水深資料建置說明下：

(1)遠域計算網格之地形水深資料採用美國國家地球物理資料中心

(NGDC)公布的全球 1 弧分格網數值地形資料(ETOPO1)建置；(2)近域風浪模擬以臺灣周圍海域為對象，網格地形水深資料係採用國家海洋科學研究中心發布的台灣附近海域海底地形 500m 及 200m 網格數值水深資料建置；(3)東南海域近岸計算網格之地形水深資料同樣採用 200m 網格數值水深資料及海軍水道圖，如 5 萬分之一比例尺海圖 04501 出風鼻至車城泊地、04521 東河至知本海域、04522 知本至大武海域及 04523 大武至大板埕海域等水深資料建置。

表 1 東南海域風浪模擬系統之巢狀網格資訊表

網格層次	範圍		解析度 ($^\circ$)	格點數
	經度($^\circ$) 最小值/最大值	緯度($^\circ$) 最小值/最大值		
遠域網格	110.0/134.0	10.0/35.0	0.2	121×126
近域網格	117.6/123.6	20.60/28.0	0.04	151×186
近岸網格	120.76/122.00	21.52/23.00	0.008	156×186

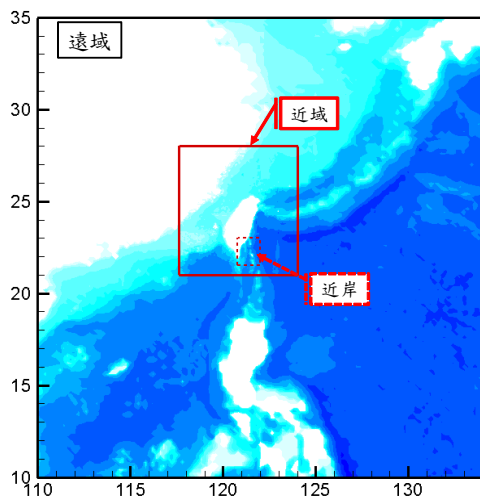


圖 5 東南海域風浪模擬系統三層巢狀網格範圍圖

2.3 離散化數值波譜

風浪模擬波譜之離散化方法採用階梯函數(step function)，為獲得相對均等的解析度，離散化頻寬計算採用對數尺度，即 $\Delta f/f = 1.1$ ，則波浪頻率模擬範圍為

$$f_{\max}/f_{\min} = (1.1)^{ML-1} \quad (4)$$

式中 ML 為頻率離散化數量。

本系統離散化波譜之頻率數(ML)及波向數(KL)設定值分別為 31 及 36，

其中最小頻率值 $f_{\min}=0.04$ ，波向解析度為 10° 。

2.4 開放海域邊界條件

大尺度遠域風浪模擬假設海域開放邊界為自然邊界條件 (natural boundary condition)，即假設開放海域之網格點無任何波浪能量通率 (energy flux) 進入計算領域且波量以 free advection 方式傳到網格外。第二、三層巢狀網格海域開放邊界分別採上層 (即第一、二層) 風浪數值模擬輸出之三維方向波譜離散資料。

2.5 初始條件設定

在遠域風浪模擬中，除冷啟動採用假設之均勻波譜場為初始條件外，每日作業化模擬熱啟動採用的初始條件均為前次(日)作業化模擬過程產生的第 24 小時模擬結果之方向波譜場資料。

在近域及近岸風浪模擬中，除冷啟動風浪模擬之初始條件為模組穩態模

擬產生的方向波譜熱啟動檔外，每日作業化模擬熱啟動採用的初始條件均為前次(日)作業化模擬過程利用 24 小時非穩態模擬流程產生的第 24 小時方向波譜熱啟動檔。

2.6 風場輸入資料

TaiCOMS 每日提供海象模擬之作業化風壓場資料為海面 10m 高度風場及海面氣壓場之預報資料，資料來源為中央氣象局每日 4 次數值天氣預報資料。TaiCOMS 作業化風場資料依據水平網格解析度 ($1/6^\circ$ 、 $1/12^\circ$ 及 $1/24^\circ$) 區分為大尺度西太平洋風場(WA01)、中尺度中國海域風場(WA02)及小尺度臺灣海域風場(WA03)等三種格式，如表 2 所列。由風浪模擬架構知，本研究遠域風浪模擬採用 WA02 風場，如圖 6 所示，近域及近岸風浪模擬均採用 WA03，如圖 7 所示。

表 2 TaiCOMS 之作業化風(壓)場網格資訊表

網格層次	範圍		解析度 ($^\circ$)	格點數
	經度($^\circ$) 最小值/最大值	緯度($^\circ$) 最小值/最大值		
WA01	99.0/150.0	0.0/35.0	1/6	607×201
WA02	110.0/135.0	10.0/35.0	1/12	301×301
WA03	117.5/124.5	20.5/28.0	1/24	169×181

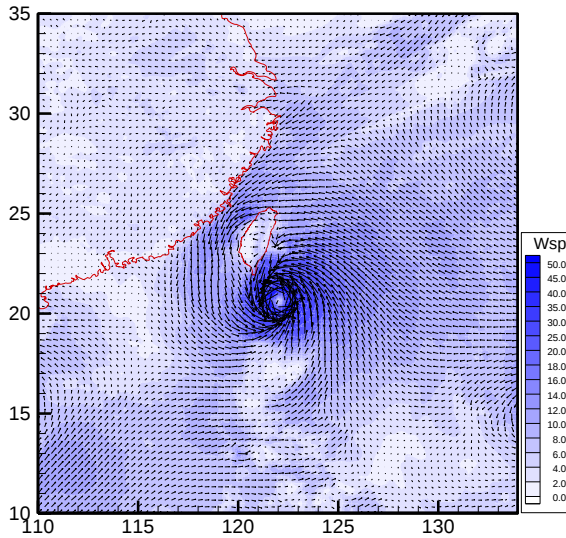


圖 6 TaiCOMS 作業化風場 WA02 之風場範圍圖

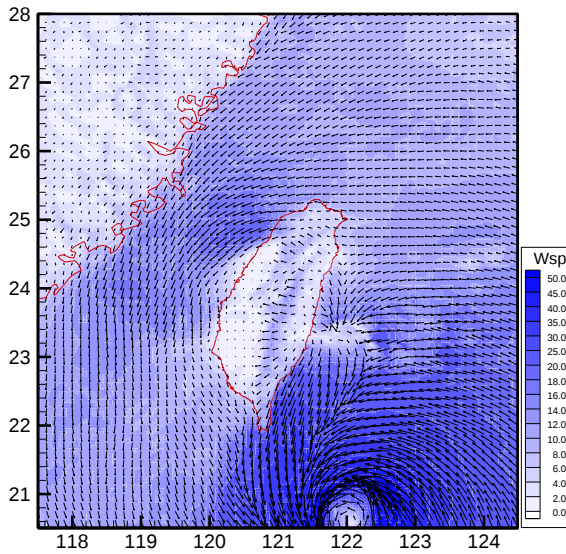


圖 7 TaiCOMS 作業化風場 WA03 之風場範圍圖

2.7 風浪輸出點位及輸出參數

針對小尺度東南海域風浪模組模擬預報資訊輸出點位之規劃，如圖 8 所示，其中波浪測站計有港研中心綠島南寮漁港 AWAC 測站(LD)、水利署台東

浮標測站(TD)、氣象局蘭嶼浮標測站(LY)等，漁港外海風浪預報站計有富岡漁港(FG)、蘭嶼開元漁港(KY)及大武漁港(DW)等，台 9 線海岸公路南興(NX)及多良(DL)段風浪預報站，藍色公路風浪預報計有臺東富岡-綠島-蘭嶼線、蘭嶼-富岡線及屏東後壁湖-蘭嶼線等航線。

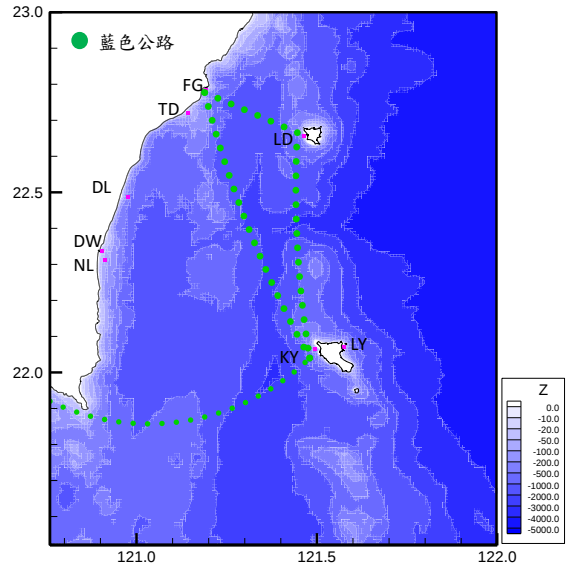


圖 8 小尺度東南海域風浪模組測站、漁港、海岸公路預警及藍色公路風浪模擬輸出點位圖

本研究小尺度風浪模擬結果主要輸出波浪參數包括示性波高(H_s)、平均波向(θ_m)、平均週期(T_{m02})、譜峰週期(T_p)等，各項參數與波浪能譜 $E(f, \theta)$ 之關係如下

(1) 波浪能譜 n 階動差(M_n)定義如下：

$$M_n = \int f^n E(f, \theta) df \cdot d\theta \quad (5)$$

(2) 示性波高(H_s)：

$$H_s = 4\sqrt{E_0} = 4\sqrt{M_0} \quad (6)$$

- (3) 平均週期(T_{m02})：採用零階動差與 2 階動差比值平方根定義風浪平均週期，即

$$T_{m02} = \sqrt{M_0/M_2} \quad (7)$$

- (4) 平均波向：定義為

$$\langle \theta \rangle = \tan^{-1}(SF/CF) \quad (8)$$

其中

$$SF = \int \sin \theta \cdot E(f, \theta) df \cdot d\theta \quad (8-1)$$

$$CF = \int \cos \theta \cdot E(f, \theta) df \cdot d\theta \quad (8-2)$$

- (5) 譜峰週期(T_p)：以不連續波浪能譜 $E(f_i)$ 之最大能量頻寬(bin)之不連續頻率 f_p 定義波浪之譜峰週期，即

$$T_p = 1/f_p \quad (9)$$

2.8 風浪模擬流程

基於本研究建置的東南海域風浪模擬系統採用兩種風浪數值模式 WAM 及 SWAN，因此本研究分別針對數值模式本身特性規劃出兩種作業化模擬流程，如圖 9 及圖 10 所示。圖 9 顯示模式 WAM 係由 PREPROC、PRESET、CHIEF 及 PGRID 等四個模組組成，一般風浪模擬流程僅需依序執行各模組即可。由於 PREPROC 模組產生的輸出檔案可供主程式 CHIEF 模組重複使用，因此本研究作業化模擬流程設計

PREPROC 及 PRESET 模組僅需於初始模擬狀態下(或冷啟動模擬)執行。在熱啟動作業化模擬狀態下，系統設計由 CHIEF 模組開始，而熱啟動需輸入之檔案(blspanal 及 lawianal)則由 CHIEF 模組設定間隔 24 小時產出，次日風浪模擬使用。此外，每次風浪模擬過程 CHIEF 均會產生巢狀網格(中尺度)之邊界波譜離散化資料供 SWAN 使用。

模式 SWAN 僅有一個執行檔模組，其數值模擬方式分為穩態及非穩態數值模擬兩種方式。圖 10 顯示本研究風浪模擬以非穩態數值模擬方式為主，針對初始模擬狀態(或冷啟動)，本研究規劃先以穩態模擬方式產生初始狀態之穩態解，再將過程中產生的 hotfile 作系統後續執行 24 小時及 72 小時風浪模擬時 SWAN 之初始條件，此方式可以加速冷啟動過程風浪模擬達到成熟階段。另在熱啟動作業化模擬狀態下，風浪模擬僅需先後 24 小時及 72 小時風浪模擬即可。SWAN 模擬過程產生的輸出檔可分為三類，即單點(point)一維風浪模擬資料、網格(grid)二維風浪模擬資料及巢狀網格(小尺度)邊界波譜離散化資料(nest)。

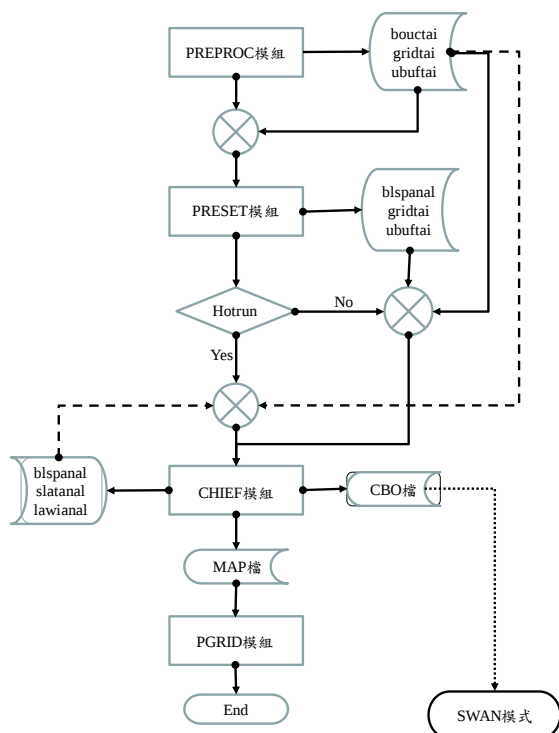


圖 9 近域及近岸風浪模組 SWAN 之程式架構及執行流程圖

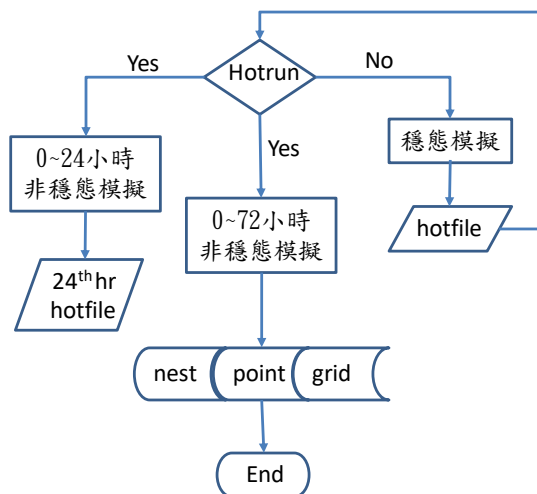


圖 10 近域及近岸風浪模組 SWAN 之程式架構及執行流程圖

2.9 小尺度東南海域風浪模擬與校驗

針對中央氣象局每日 4 次數值天氣預報風場資料(2016 年 9 月 10 日~9 月 30 日)，本研究分別選取其中 06~11 時風場資料組合連續性風場，作為東南海域風浪模擬系統之輸入資料，執行風浪數值模擬。模擬期間分別有強烈颱風莫蘭蒂(9 月 12 至 9 月 14 日，如圖 11 所示)、中度颱風馬勒卡(9 月 15 至 9 月 18 日，如圖 12 所示)及中度颱風梅姬(9 月 25 至 9 月 28 日，如圖 13 所示)等三場颱風侵襲。針對東南海域小尺度模擬結果，本研究選取臺東浮標站及綠島南寮漁港 AWAC 測站波浪觀測資料與風浪模擬之示性波高、平均週期及平均波向比較，如圖 14 及圖 15 所示。

圖 14 所示為臺東資料浮標站觀測資料與中尺度臺灣風浪模組(Taiwan mode)、小尺度東南海域風浪模組(SEsea mode)模擬輸出結果之比較，顯示在示性波高、平均週期及平均波向變化上中、小尺度風浪模擬結果之差異均不顯著，推論該海域地形水深變化對風浪模擬結果之影響甚微。模擬波高之變化趨勢與觀測資料相當一致，顯示模擬期間影響波高大小主要因素為颱風，其中強烈颱風莫蘭蒂侵臺影響最顯著。另外，平均週期模擬之變化趨勢與觀測資料變化趨勢大致相似，同樣受到颱風侵襲影響，颱風侵臺期間波浪之波高及週期均會變大，惟週期大小模擬值明顯較觀測值低，推測原因可能與浮標觀測方式有關。

圖 15 所示為港研中心綠島南寮漁港外海 AWAC 測站觀測資料與中、小尺度風浪模組模擬輸出結果之比較，顯

示中、小尺度模組模擬結果僅在颱風影響期間有較顯著的差異；波高變化趨勢上，模擬值明顯較觀測值提前反應颱風之影響，颱風影響期間最大波高模擬值亦明顯大於觀測值，此可能與 AWAC 測站較近港口(或近岸)有關。綠島平均週期模擬值變化趨勢與觀測結果之趨勢相近似，週期大小則模擬值與觀測值間相近。在平均波向變化比較上，於颱風影響期間出現明顯的差異，此仍需再進一步分析造成差異原因。

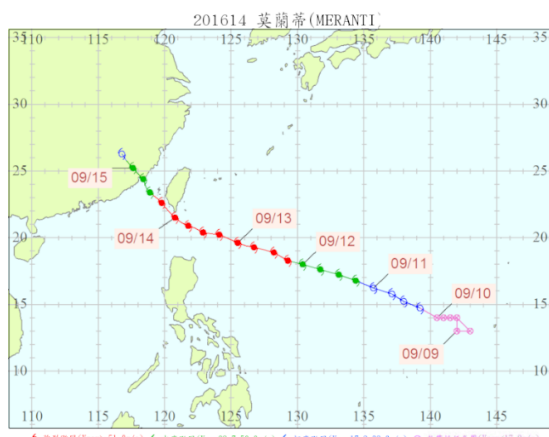


圖 11 2016 年強烈颱風莫蘭蒂行進路徑圖

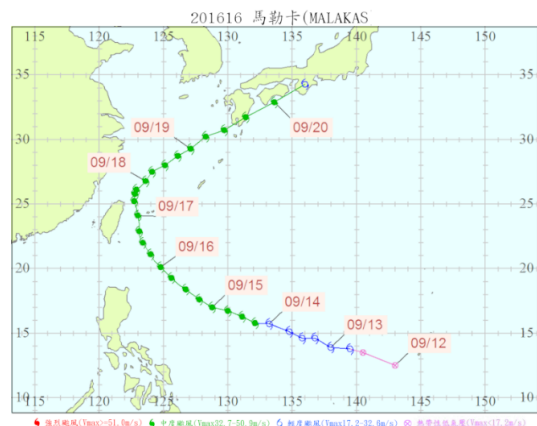


圖 12 2016 年中度颱風馬勒卡行進路徑圖

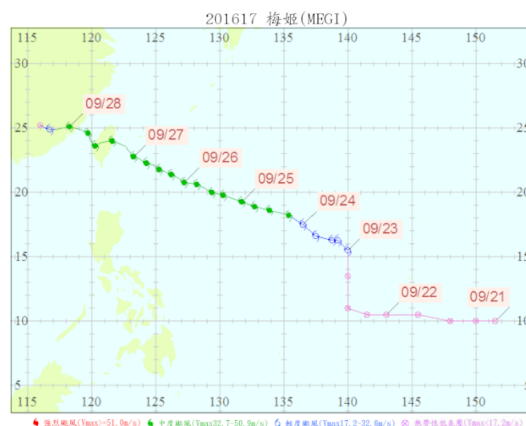


圖 13 2016 年中度颱風梅姬行進路徑圖

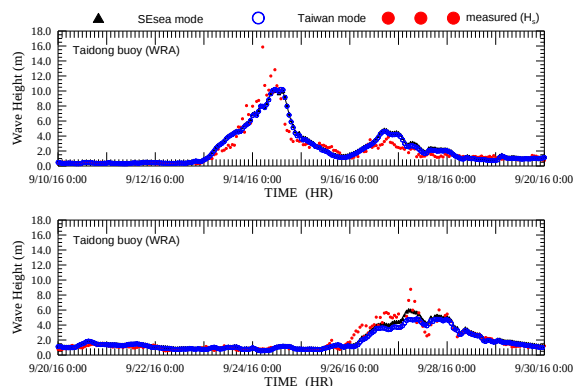


圖 14a 臺東資料浮標示性波高模擬值與觀測值比較圖

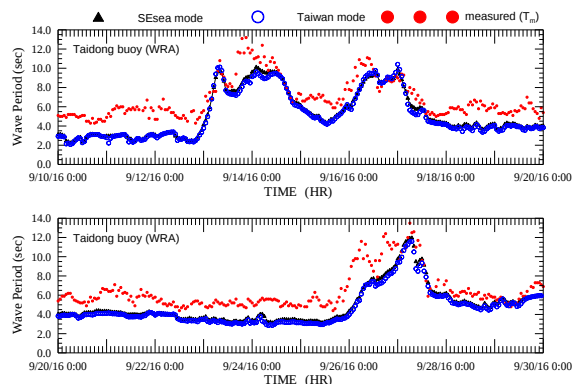


圖 14b 臺東資料浮標平均週期模擬值與觀測值比較圖

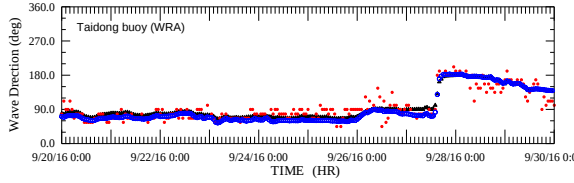
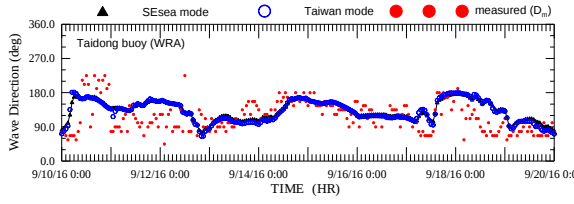


圖 14c 臺東資料浮標平均波向模擬值與觀測值比較圖

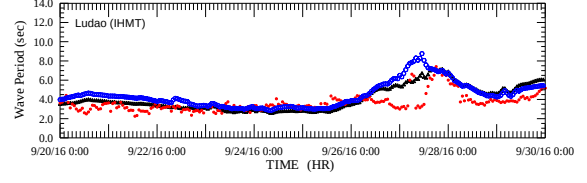
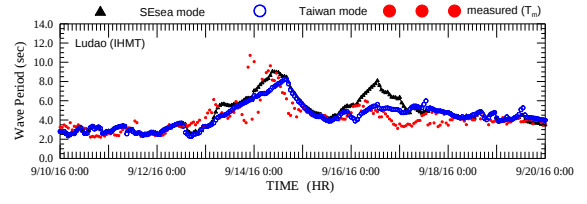


圖 15b 綠島南寮漁港平均週期模擬值與觀測值比較圖

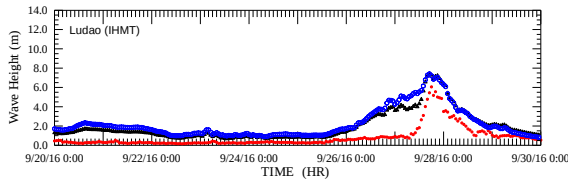
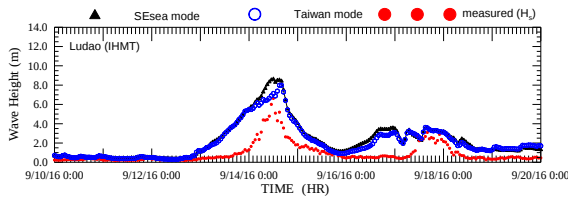


圖 15a 綠島南寮漁港示性波高模擬值與觀測值比較圖

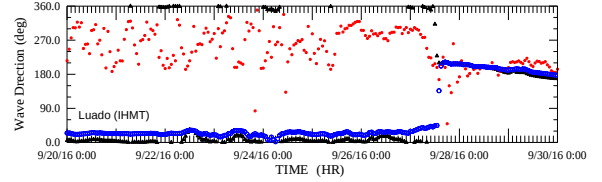
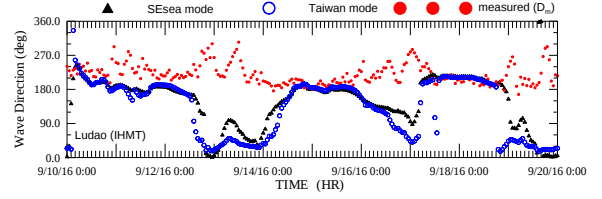


圖 15c 綠島南寮漁港平均波向模擬值與觀測值比較圖

三、東南海域水動力模擬子系統建置

本研究結合 TaiCOMS 現有中尺度臺灣周圍海域近域水動力模組及本研究建置的小尺度東南海域近岸水動力模組，構成東南海域水動力模擬子系統。

3.1 數值模式介紹

水動力模擬系統使用的數值模式為水深積分平均二維有限元素水動力模式，模式之基本控制方程式介紹如

下：

假設水體為具有黏滯性之不可壓縮流體，將描述流體運動之三維連續方程式及運動方程式，沿水深方向垂直積分，同時加入底部和表面的邊界條件，則可得到下列的平面二維流場連續方程式及運動方程式：

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = Q_0 \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}q_x)}{\partial x} - f q_y \\ &= -\frac{H}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} (p^s + \rho g \eta) + \frac{1}{\rho_0} (\tau_y^s - \tau_x^b) \\ &+ \left(\frac{\partial F_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial F_{yx}}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}q_y)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}q_y)}{\partial x} - f q_x \\ &= -\frac{H}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial y} (p^s + \rho g \eta) + \frac{1}{\rho_0} (\tau_x^s - \tau_y^b) \\ &+ \left(\frac{\partial F_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial F_{yy}}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

其中

$$H = \int_{-h}^{\eta} dz = h + \eta \quad (13)$$

$$q_x = \int_{-h}^{\eta} u dz = \bar{u} H \quad (14)$$

$$q_y = \int_{-h}^{\eta} v dz = \bar{v} H \quad (15)$$

$$\bar{u} = \frac{1}{(h + \eta)} \int_{-h}^{\eta} u dz \quad (16)$$

$$\bar{v} = \frac{1}{(h + \eta)} \int_{-h}^{\eta} v dz \quad (17)$$

$$F_{ij} = E_{ij} (q_{j,i} + q_{i,j}) \quad i, j = x, y \quad (18)$$

$$\tau_i^b = C_f (q_x^2 + q_y^2)^{1/2} \frac{q_i}{H^2} \quad i = x, y \quad (19)$$

$$\tau_i^s = \rho_a C_d |U_{10}| U_i \quad i = x, y \quad (20)$$

式中 H 為總水深， h 為靜水深， η 為水位變化， q_x 、 q_y 分別為水體在 x 及 y 方向之流量， $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 分別為 x 及 y 方向之平均流速， Q_0 為單位面積水體質量增加

率， g 為重力常數， p^s 為水面大氣壓力， ρ_0 為流體平均密度， τ_x^b 、 τ_y^b 分別為 x 及 y 方向之底床剪應力， τ_x^s 、 τ_y^s 分別為 x 及 y 方向之表面風剪應力， C_f 為底床擦係數，引用 Manning 公式可得 $C_f = ng/H^{1/3}$ ， n 為曼寧係數， C_d 為風曳力係數，其值為 $(1.1 + 0.0536 U_{10}) 10^{-3}$ ， U_{10} 為海面上 10 公尺處之風速， E_{ij} 為渦動黏滯係數 (Eddy coefficient)， f 為柯氏力參數 (Coriolis parameter)，等於 $2\omega \sin \phi$ ， ω 為地球自轉之位相速度， ϕ 為計算領域所在位置之緯度。

針對上述控制方程式採用有限元素法求解，即配合邊界條件利用加權殘差方法將上述方程式轉化成積分方程式，再將所要計算之領域任意分割成許多副領域 (稱之為元素)，利用線性三角形元素之形狀函數來描述計算領域中之函數變化，進而將積分方程式離散化，並簡化為聯立的數值方程組，藉以求解計算領域中所取元素節點上之函數值。在時間項的處理上，則以二階段顯式法對連續方程式及動量方程式作積分計算。

3.2 數值計算網格

本研究東南海域水動力模擬系統係由中尺度臺灣周圍海域水動力模組及小尺度東南海域水動力模組構成，其中臺灣周圍海域水動力模組及小尺度東南海域水動力模組之模擬範圍，如圖 16 所示。圖中臺灣周圍海域水動力模組模擬範圍為含蓋東經 $116.5^\circ \sim 125^\circ$ 及北緯 $21^\circ \sim 26.5^\circ$ 之海域，模組採用的有限元素計算網格係 2015 年建置的，如圖 17 所示，計有 8,237 個節點及 15,800

個三角形元素 (李兆芳等, 2016)。小尺度東南海域水動力模擬之範圍為圓弧狀，直徑約 180km；本研究建構的有限元素數值計算網格，如圖 18 所示，計有 10,409 個節點及 20,425 個三角形元素，包含綠島及蘭嶼等離島。

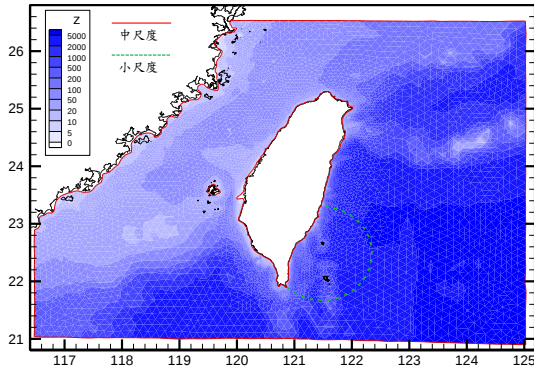


圖 16 中尺度臺灣周圍海域及小尺度東南海域水動力模擬範圍圖

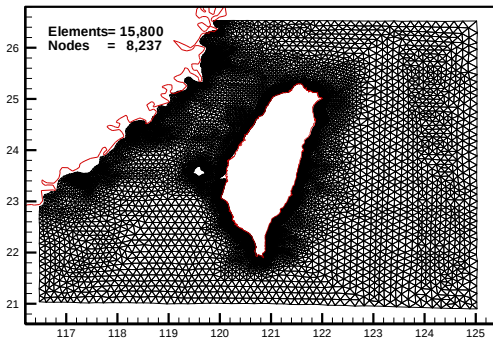


圖 17 臺灣周圍海域水動力模組之三角形元素網格分布圖

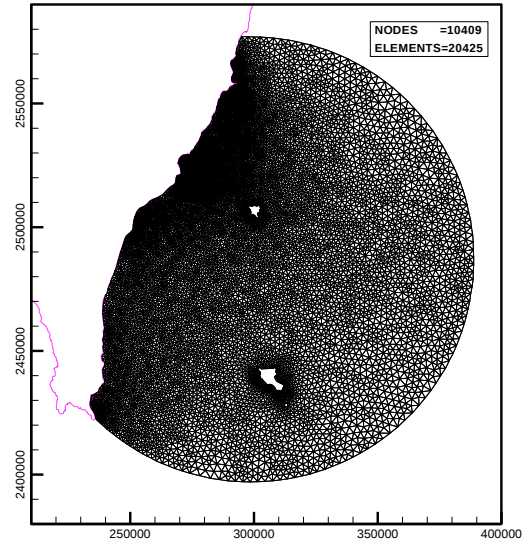


圖 18 東南海域水動力模式之三角形元素網格分布圖

3.3 邊界條件及初始條件

水動力數值模式邊界條件計有側向邊界條件及海面邊界條件，其中側向邊界條件主要區分為陸地流速邊界條件及水域開放邊界條件等兩種類型。陸地流速邊界條件依流速設定型態分為 (1) 不滑動邊界條件，假設陸地邊界節點流速等於零，即 $u=0$ 且 $v=0$ ，如本研究中尺度水動力模組即屬之；(2) 滑動邊界條件，即假設陸地邊界節點垂直方向之流速或流量($q_n=0$)等於零，如本研究小尺度水動力模組之設定。

水域開放邊界則採用水位條件為模式之邊界條件，其中本研究水動力模擬開放邊界水位條件之設定簡述如下：

假設海域(或河口)開放邊界之水位(η)等於

$$\eta = \eta_a(t) + \frac{\Delta P(t)}{\rho g} \quad (21)$$

式中 $\eta_a(t)$ 代表天文潮引起的水位變化，本研究採用 Matsumoto et al.(2000)發展的 NAO.99Jb 模式，推算或預測計算網格開放邊界各節點天文潮水位逐時資料，如圖 19 所示。圖中水位時序列變化分別代表數值計算網格(參考圖 8)開放邊界上四個角落節點之天文潮時序列資料，顯示數值計算網格左上角臨近陸地(中國大陸)之開放邊界節點天文潮位呈現半日潮型，臺灣東部太平洋海上開放邊界節點之天文潮位屬於混合潮型態，西南角落開放邊界節點之天文潮位則呈現全日潮型態。

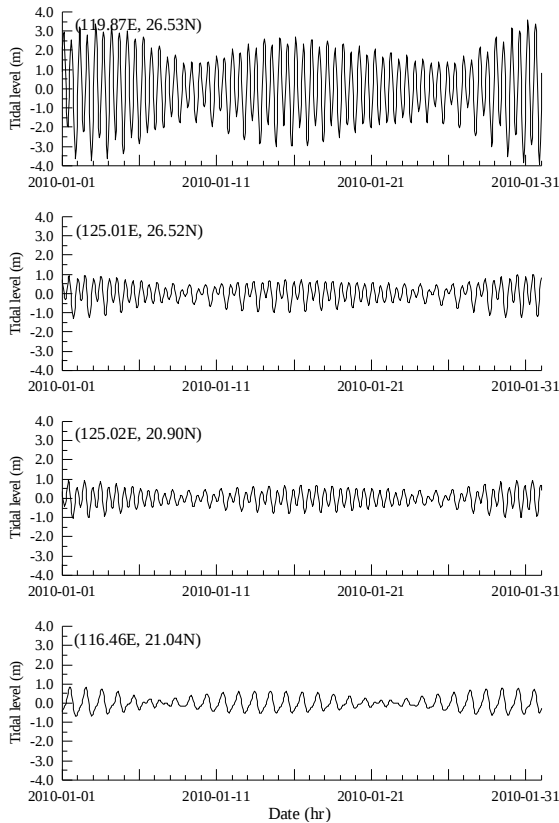


圖 19 近域臺灣周圍海域水動力模組開放邊界節點之天文潮水位資料時序列圖

第二項代表海面氣壓變化引起的水位變量，此項必需配合港研中心 TaiCOMS 之作業化風壓場資料使用；目前採用的作業化風壓場格式為 WA02，其網格解析度為 $1/12^\circ$ 或 $5'$ ；並於水動力模擬作業化開始前，系統會先將 WA02 方格網風壓場資料轉換成有限元素計算網格風壓場資料，如圖 20 所示，再提供中尺度水動力模式使用。

小尺度東南海域水動力模組海域開放邊界水位條件，則直接由中尺度水動力模擬結果提供。至於海面邊界條件包括海面 10m 處風速大小及海面氣壓值，此部份需由數值天氣預報資料提供，如圖 20 所示；於小尺度水動力模組則假設忽略海面氣壓項影響，風應力項亦僅考慮一維時序風場資料。

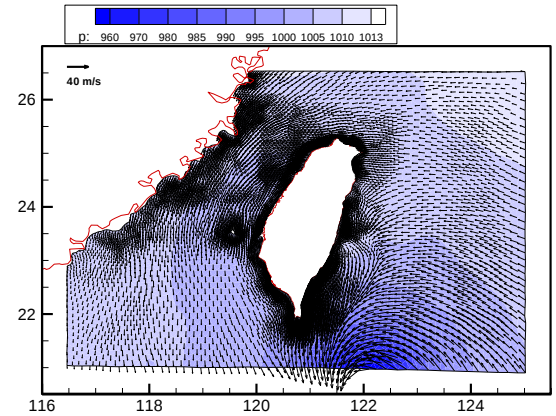


圖 20 中尺度有限元素網格風壓場圖

3.4 模式物理參數設定

水動力模式之模擬時間間距(Δt)與網格三角形元素最小尺度有關，且需滿足下列條件式(22)

$$\Delta t < 1.5 \Delta t_{cr} = 1.5 \Delta s^* / U^* \quad (22)$$

式中 Δs^* 為代表性網格大小， $U^* = \sqrt{2gH}$ ， H 為水深(m)， g 為重力加速度。經測試後，中尺度及小尺度水動力模組採用的時間間距 Δt 分別為 4sec 及 2sec。

模式渦動粘滯性係數建議採用 Connor and Wang (1974)提出之經驗公式(23)推估，

$$E_{xx} \sim ag(\tilde{\eta}/\tilde{u})\tilde{x} \quad (23)$$

式中 E_{xx} 為渦動粘滯性係數，其單位為 m^2/s ， a 為無因次係數，其合理的範圍介於 0.01~0.1 之間； $\tilde{\eta}$ 為潮汐代表性潮差， $\tilde{u}$ 為潮流代表性流速， $\tilde{x}$ 為三角元素代表性邊長。

1. 中尺度水動力模組

本研究選取無因次係數 $a = 0.025$ ，代表性潮差 $\tilde{\eta} = 1.20$ m，潮流代表性流速 $\tilde{u}$ 為 0.5 m/s，先估算中尺度計算網格各元素之渦動粘滯係數值；之後，再經由模式模擬結果驗證程序率定渦動粘滯係數值。

2. 小尺度水動力模組

同樣假設 $a = 0.02$ 、 $\tilde{\eta} = 1.50$ m 及 $\tilde{u} = 0.5$ m/s 先估算小尺度計算網格各元素之代表性渦動粘滯係數值，再經由模式模擬結果驗證程序率定渦動粘滯係數值。

3.5 水動力輸出點位

針對小尺度東南海域水動力模組模擬預報資訊輸出點位之規劃，參考圖 6 所示，主要水位輸出計有富岡(Fugan)漁港、綠島(Ludao)南寮漁港、蘭嶼

(Lanyu)開元漁港及大武(Dawu)漁港等海域，藍色公路水位及潮流預報同樣包括臺東富岡-綠島-蘭嶼線、蘭嶼-富岡線及屏東後壁湖-蘭嶼線等航線。

3.6 小尺度水動力模擬與驗證

本研究利用中尺度臺灣周圍海域水動力模組進行 2016 年 9 月天文潮模擬，並產生臺灣東南海域水動力模組開放邊界水位邊界條件(天文潮)，再執行小尺度東南海域水動力模組之水位及流場模擬。

針對小尺度模式水位模擬結果，本研究選取富岡、綠島及蘭嶼等潮位站天文潮分析結果與模式天文潮水位模擬值進行比較，如圖 21 至圖 23 所示；顯示小尺度模式水位模擬值與天文潮預測值間變化趨勢具有高度一致性(相關係數 R 值均高於 0.99)，僅蘭嶼呈現模式天文潮水位模擬值有明顯偏小的現象存在。誤差分析結果顯示，富岡及綠島海域均方根誤差小於 0.05m，蘭嶼海域均方根誤差約 0.9m(略差)。針對小尺度水動力模式蘭嶼海域天文潮模擬值偏小現象，則需進一步判斷誤差來源是小尺度水動力模式問題，或是上游中尺度模式問題，才能著手進行修正。

圖 24 所示為大潮期間富岡漁港海域漲退潮流速向量分布圖，顯示出當地海域僅富岡漁港北側小野柳外海礁岩區流速略大外，其餘海域潮流模擬值均相當小；此外，整體漲、退潮時流向轉變時間大多發生於高低潮位時，明顯比預期的較晚。圖 25 及圖 26 分別為大潮期間綠島及蘭嶼海域漲、退潮時流速向量分布圖，同樣顯示整個海域潮流模擬值均相當小，整體漲、退潮時流向轉變

時間大多發生於高低潮位時，明顯比預期的較晚。

整體而言，東南海域潮流模擬值普遍偏低，僅在鄰近岸邊水域有較大潮流模擬值出現。

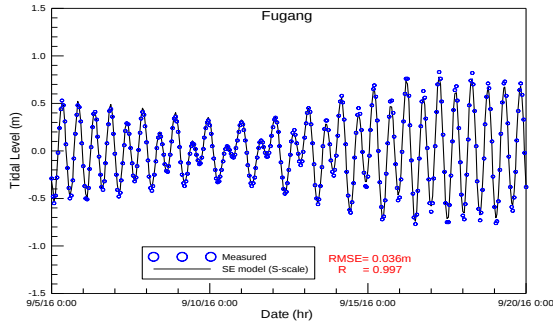


圖 21 東南海域水動力模式水位模擬值與富岡潮位站天文潮預測值之比較圖

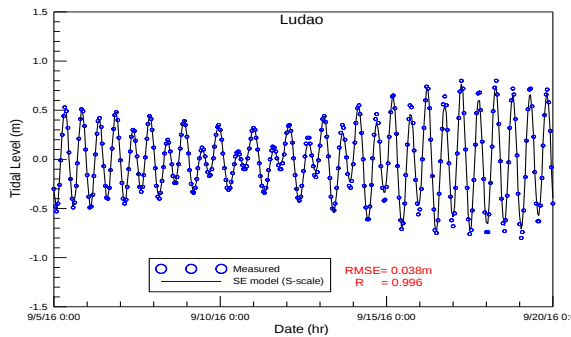


圖 22 東南海域水動力模式水位模擬值與綠島潮位站天文潮預測值之比較圖

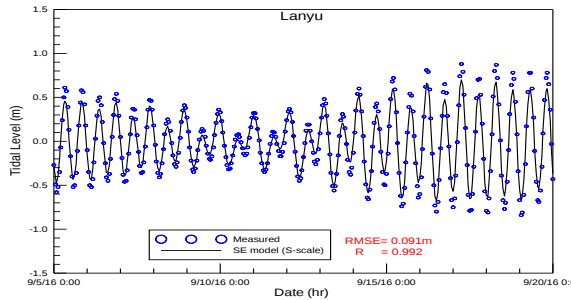


圖 23 東南海域水動力模式水位模擬值與蘭嶼潮位站天文潮預測值之比較圖

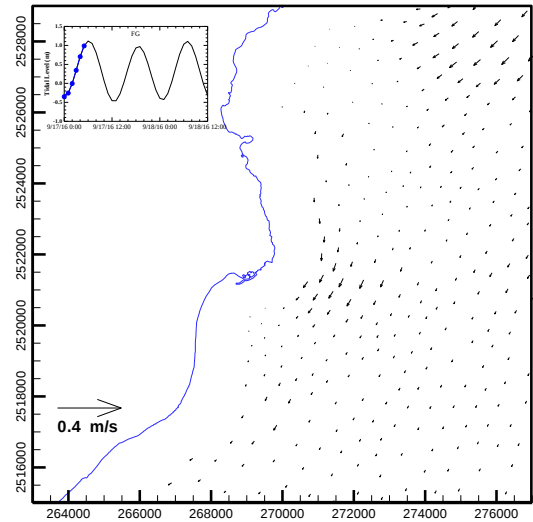


圖 24 東南海域水動力模式模擬富岡漁港海域之流場圖

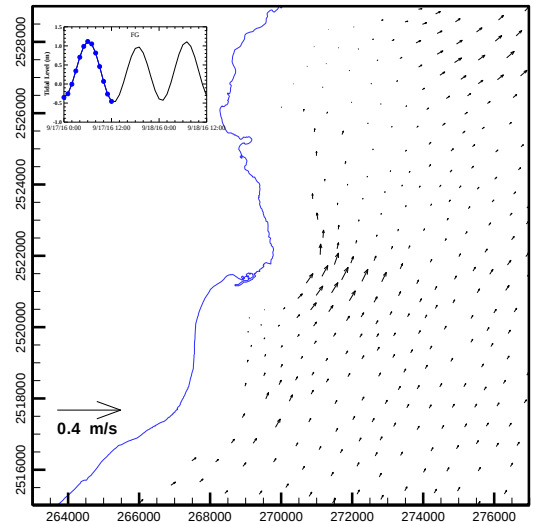


圖 24 (續)東南海域水動力模式模擬富岡漁港海域之流場圖

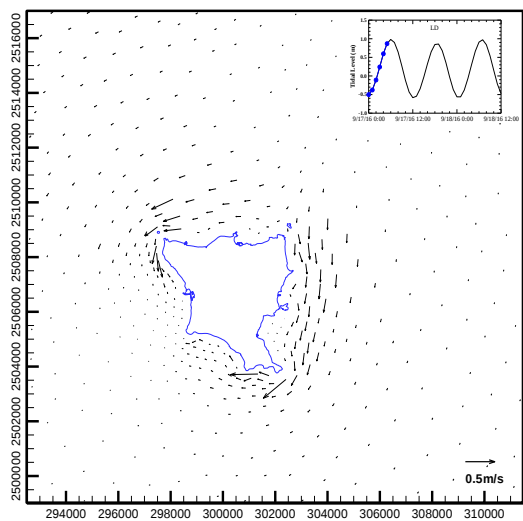


圖 25 東南海域水動力模式模擬綠島周圍海域之流場圖

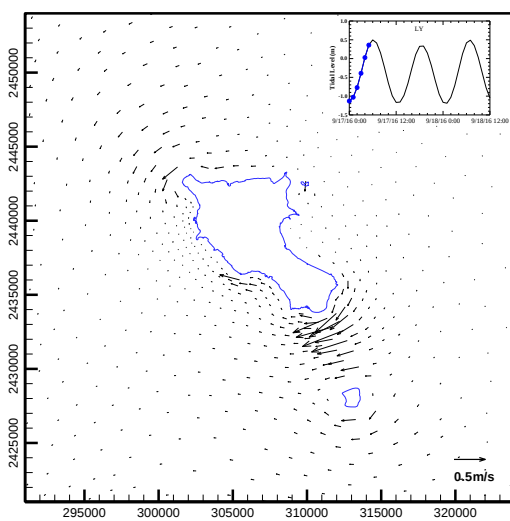


圖 26 東南海域水動力模式模擬蘭嶼周圍海域之流場圖

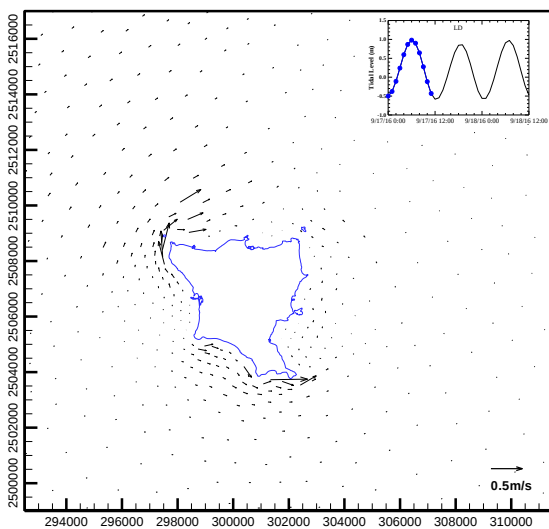


圖 25 (續)東南海域水動力模式模擬綠島周圍海域之流場圖

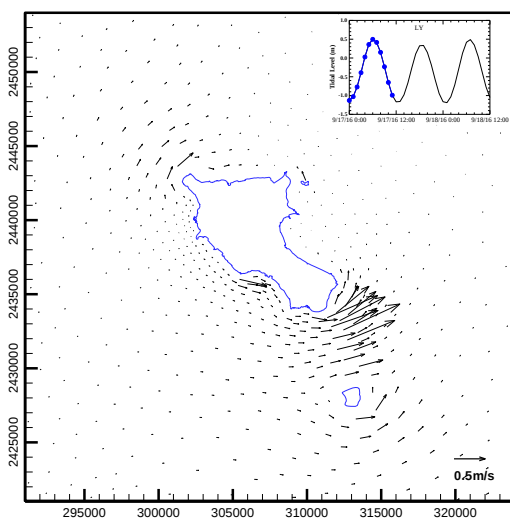


圖 26 (續)東南海域水動力模式模擬蘭嶼周圍海域之流場圖

四、結論

本研究目的針對臺東富岡漁港、綠島南寮漁港及蘭嶼開元漁港等海域建

置小尺度海象模擬系統，以提昇東南海域海象(波浪、水位及流場)模擬之解析

度，提供東南海域藍色公路細緻化海象模擬資訊，以確保航運安全，協助相關單位維護臺灣海域的安全。主要研究成果包括建置東南海域小尺度風浪模擬系統及小尺度水動力模擬系

統，完成初步小尺度風浪模擬、水位及潮流流場模擬結果之比較與校驗。模擬結果與觀測值間部份模擬現象不盡理想，仍待後續研究尋求改善之道。

參考文獻

1. 李忠潘、邱永芳、陳陽益、于嘉順、蘇青和、劉正琪、林昭圭、張憲國、王兆璋，近岸數值模擬系統之建立(3/4)，交通部運輸研究所，2007 年 4 月。
2. 劉正琪、李兆芳、李俊穎、陳明宗，「澎湖海域海象模擬」，港灣季刊，107 期，p1~18，2017 年，6 月。
3. 李兆芳、邱永芳、劉正琪、蘇青和、陳明宗、李俊穎、唐宏結、江朕榮、謝佳紘，「海氣象自動化預報模擬系統作業化校修與維運」，交通部運輸研究所研究報告，2016 年 3 月。
4. 李兆芳、邱永芳、劉正琪、蘇青和、陳明宗、李俊穎、江朕榮、謝佳紘，「105 年海氣象自動化預報模擬系統作業化校修與維運」，交通部運輸研究所研究報告，2017 年 3 月。
5. 邱永芳、李兆芳、劉正琪、蘇青和、陳明宗、李俊穎、謝佳紘、江朕榮，「港灣海象模擬技術及預警系統研發」，交通部運輸研究所研究報告，2018 年 3 月。
6. Booij, N., J.G. Haagsma, L.H. Holthuijsen, A.T.M.M. Kieftenburg, R.C. Ris, A.J. van der Westhuysen, M. Zijlema, "SWAN Cycle III version 40.41 USER MANUAL," Delft University of Technology, 2004.
7. Connor, J. and J. Wang, "Finite Element Modeling of Hydrodynamic Circulation, in Numerical Methods in Fluid Dynamics," ed. By Brebbia and Connor, Pentech Press, 1974.
8. Matsumoto, K., T. Takanezawa, and M. Ooe, "Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: A global model and a regional model around Japan," J. Oceanogr., Vol.56, pp.567-581, 2000.
9. WAMDI Group (1988) "The WAM Model – A Third Generation Ocean Wave Prediction Model," Journal of Physical Oceanography, Vol. 18, pp. 1775-1810.