

中彰海域波流數值推算研究

傅怡釗 交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員
陳鈞彥 交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員
張君名 丹麥水利研究所高級工程師

摘要

本研究在 107 年度完成西北太平洋風浪及水動力模式之大域數值模式研究基礎下，再創建屬局部數值模式性質之中彰海域波流耦合模式，經模擬冬季、夏季期間及 2 場颱風事件與觀測資料驗證，證明模式足以反應中彰海域特性，以確實掌握中彰海域海象變化特性，俾利後續探討研究。

一、前言

臺灣臺中、彰化海域(以下簡稱中彰海域)位於臺灣海峽中段位置，而臺灣海峽處於臺灣與大陸之間，傳遞至臺灣中部海域的風、浪及流均受限於兩岸陸地限制或受中央山脈地形影響，使得海象狀況較其他直接面對大洋之海域更為複雜。且自 107 年度經濟部通過審核之離岸風場多位於中彰海域，爰如能進一步掌握此區域海氣象，有助於後續相關工程計畫執行。

交通部運輸研究所港灣技術研究中心(簡稱港研中心)自 106 年底向丹麥水利研究所(Danish Hydraulic Institute, DHI)採購 MIKE 21 數值分析軟體，於 107 年底初步完成西北太平洋風浪及水動力等 2 數值模式(大域數值模式)，本年度(108 年)則再針對中彰海域範圍創建中彰海域波流耦合數值模式(局部數值模式)，利用前述大域數值模式提供局部模式作邊界輸入資料並以波、流耦合計算方式，推算中彰海域波、流模擬資料。

為驗證本研究建置模式推估波浪、潮流具合理性，分別選取本所港研中心設置臺中港北防波堤波流觀測站(TC)、成功大學近海水文中心之彰濱浮標(CH3)作波浪驗證測站;選取本所港研中心臺中港北防波堤波流觀測站(TC)進行潮位、流速、流向驗證，觀測站位置如圖 1 所示。

模式分別以冬季期間、夏季期間及颱風期間作模式驗證時間，藉由與實測資料比對以證明本研究建置之模式可反應此區域海象變化情形。

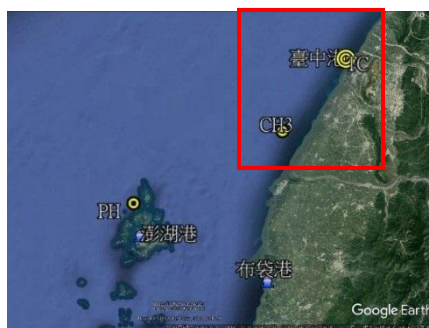


圖 1 驗證測站位置示意圖

二、西北太平洋風浪及水動力模式建立

本研究於 107 年使用 DHI 丹麥水利研究所(Danish Hydraulic Institute)研發之 MIKE 21 數值模擬軟體，蒐集各相關單位地形水深資料如表 1，建置一大範圍之西北太平洋模型，其模型範圍由東經 105°至 150°、北緯 5°至 40°，共計 6,111 個節點及 10,533 個三角形元素，模型邊界網格大小約 1°，如圖 2 所示。

藉由上述西北太平洋模型，使用 MIKE 21 之波浪(SW)及水動力(HD)等模組，分別建置西北太平洋風浪模式及西北太平洋水動力模式等2數值模式(大域模式)，以下分節簡述西北太平洋風浪模式及西北太平洋水動力模式之輸入資料及模式參數。

表 1 模式水深資料彙整

項次	區域範圍	水深資料	資料來源
1	梧棲漁港	92 年刊行之海軍水道圖(臺中港)	海軍大氣海洋局
2	臺中港域	106 年港域測深資料	臺中港務公司
3	臺中沿岸	103 年 10 月海域測深資料	水利署第三河川局
4	彰化王功沿岸 8 km	103 年 10 月海域測深資料	水利署第四河川局
5	臺灣周圍海域	21-26°N, 119-123°E 200m 網格水深	台灣海洋科技研究中心
6	臺灣外海海域	ETOPO1	美國國家海洋暨大氣總署
7	上述地區以外之模式範圍	ETOPO5	

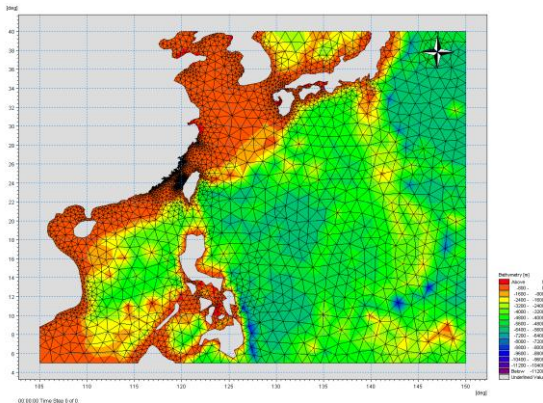


圖 2 西北太平洋模型範圍示意圖

3.1 西北太平洋風浪及水動力模式風、氣壓場資料

本研究模式驗證以 104 年度冬、夏季及颱風為主，西北太平洋風浪及水動力模式所使用之 104 年風場資料，為中央氣象局第四代數值天氣預報系統之區域模式 WRF(Weather Research and Forecasting)風場 M00 成員之第一層數值預報資料，其網格解析度約 45km;另模式模擬 108 年利奇馬颱風所使用的風場資料則為 WRF 風場 M05 之第一層數值預報資料，網格解析度約 15km，每 6 小時發布一次的 84 小時預報資料。

上述 2 類預報資料均擷取其每次發布之第 5 至 11 時、共計 6 小時之風、氣壓場，拼接組合成本研究模式所需之 2 維平面風、氣壓場資料作為西北太平洋風浪及水動力模式驅動力。

3.2 西北太平洋風浪模式參數及邊界設定

西北太平洋風浪模式選用全譜方程式求解，在波浪頻率方面，最小頻率採 0.055Hz，並以 1.1 倍參數的指數型式分割成 25 個頻率帶；在角度領域方面，以 22.5 度為 1 個角度單位，共計分割成 16 個方向角。風浪能量消散機制則考量 4 個波波非線性交互作用、碎波效應、底床摩擦、白帽耗散等物理機制，其中碎波指標 0.8、底床摩擦係數 0.04m、白帽耗散係數 4.5。

模式初始條件由 JONSWAP 經驗譜公式給定，邊界條件分成二種邊界形式，一為陸域邊界，其不考慮入射波浪的能量通量；另一為海域邊界，海域邊界均設定為封閉邊界，即外部無波浪能量進入模式內，內部波浪能量向外擴至邊界時則完全被邊界吸。

至於西北太平洋風浪模式模擬冬季、夏季及颱風期間波浪資料與實測資料驗證比對結果，併入第 4.3 節說明。

3.3 西北太平洋水動力模式參數及邊界設定

西北太平洋水動力模式之控制方程式由 Boussinesq 假設之不可壓縮流之 Reynolds averaged Navier-Stoke 方程式，可同時考慮底床摩擦、科氏力、風、大氣壓力、潮汐水位變化、輻射應力等因素，其中紊流渦度係數設 0.028、底床摩擦係數 $43.5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ，水位初始值設 0 m，模式邊界水位使用 MIKE 21 提供的全球潮汐模式資料庫對應之潮汐水位。

至於西北太平洋水動力模式模擬冬季、夏季及颱風期間潮流資料與實測資料驗證比對結果，併入第 4.3 節說明。

四、中彰海域波流耦合模式建立

本年度(108 年)為進一步掌握中彰海域海象變化特性，使用表 1 之第 1~5 項水深資料，創建中彰海域波流耦合模式(局部數值模式，以下簡稱：耦合模式)，模型涵括臺中、彰化沿岸向外海 80 公里範圍，模型網格共計 201,2550 個節點及 401,030 個三角形元素，如圖 3 所示，其中臺中、彰化沿岸及彰化外海所有離岸風電潛力場址及示範場址區域之網格大小邊長約 40~50 公尺，如圖 4 所示，其餘中彰海域網格大小則長約 3 公里。

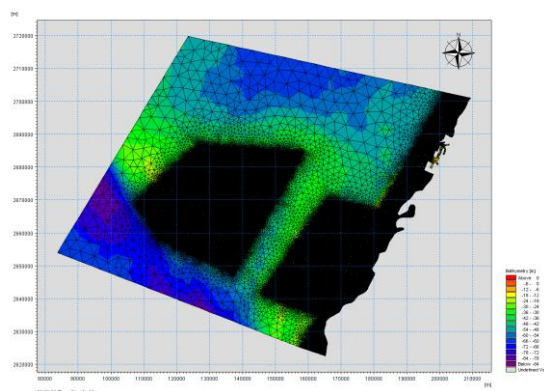


圖 3 中彰海域模型示意圖

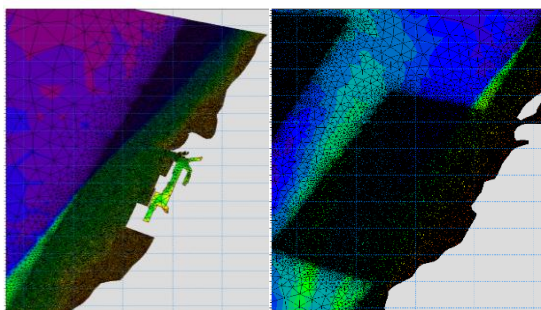


圖 4 中彰海域模型-臺中及彰化段示意圖

4.1 中彰海域波流耦合模式風、氣壓場資料

本研究模式驗證以 104 年度冬、夏季及颱風為主，中彰海域波流耦合模式使用之 104 年風場資料，為中央氣象局 WRF 風場 M00 成員第三層數值預報資料，其網格解析度約 5km 且為每 6 小時發布一次的 84 小時預報資料；另模式模擬 108 年利奇馬颱風所使用的風場資料則為 WRF 風場 M05 之第二層數值預報資料，網格解析度約 3km 且為每 6 小時發布一次的 84 小時預報資料。

上述 2 類預報資料均擷取其每次發布之第 5 至 11 時、共計 6 小時之風、氣壓場，拼接組成本研究模式所需之 2 維平面風、氣壓場資料作為中彰海域耦合模式驅動力。

4.2 中彰海域波流耦合模式參數及邊界設定

耦合模式係結合 MIKE 21 之波浪(SW)及水動力(HD)等 2 模組，模組間採耦合計算方式，即水動力模組內各時刻輸入波浪條件資料來自於波浪模組計算，而波浪模組內輸入之水位、流場資料來自水動力模組計算，如此相互提供計算結果，直至模擬時間結束為止。

耦合模式內之波浪模組，選用全譜方程式求解，各參數設定與西北太平洋風浪模式相同(詳 3.2 節)，初始條件由 JONSWAP 經驗譜公式給定，另將西北太平洋風浪模式(大域模式)模擬結果，取對應中彰海域模型邊界範圍之波浪條件，作為耦合模式內波浪模組的邊界波浪資料。

耦合模式內之水動力模組，底床摩擦係數 $36 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ，其餘各參數設定與西北太平洋水動力模式相同(詳 3.3 節)，水位初始值 0m，另將西北太平洋水動力模式(大域模式)模擬潮位結果，取對應中彰海域模型邊界範圍之潮位，作為耦合模式內水動力模組的邊界水位資料。

4.3 中彰海域波流耦合模式驗證

為驗證本研究建置耦合模式模擬推估波浪、潮流之合理性，耦合模式分別模擬冬季、夏季及颱風期間，並將模擬結果與臺中(TC)、彰濱浮標(CH3)觀測資料作比對驗證，觀測站位置如圖 1。冬季、夏季及颱風期間模擬結果分小節敘述如下，其中各驗證圖之黑色線(或符號)代表觀測值、藍色線(或符號)代表第三章西北太平洋風浪模式或水動力模式模擬結果、紅色線(或符號)則代表本章中彰海域波流耦合模式模擬結果。

4.3.1 冬季期間波浪及水動力驗證結果

選取臺中測站 104 年冬季期間(1/28~2/17)蒐集之波浪、潮位觀測資料作為模式冬季期間驗證資料，臺中測站(TC)波浪驗證結果如圖 5、示性波高誤差分析如表 2;臺中測站(TC)潮流驗證結果如圖 6、潮位誤差分析列如表 3。

由圖 5 可知，冬季期間臺中測站示性波高模擬結果均小於波高觀測資料，雖波高模擬較觀測值略小，但耦合模式波高模擬結果較西北太平洋風浪模式波高模擬結果佳，其模擬值與觀測值相關性(R^2)為 0.93，2 種模式示性波高模擬值變化趨勢與實測示性波高變化趨勢相近，至於譜峰週期及波向模擬結果大致與實測譜峰週期及波向趨勢相符。

由圖 6 可知，耦合模式在臺中測站潮位模擬值與潮位觀測資料相比，模擬潮差較大，雖潮差模擬較潮位觀測值略大、且與西北太平洋水動力模式潮位模擬比較結果較差，但整體潮位模擬值與觀測潮位相關性(R^2)為 0.83、具良好相關性，2 種模式整體模擬潮位之變化趨勢亦符合觀測潮位變化情形。

比對耦合模式在臺中測站流速模擬結果，在實際流速低時，模擬流速雖較實測流速略高，但與西北太平洋水動力模式流速模擬結果相比，耦合模式較能反應實際流速較高之實況，至於流向模擬大致與觀測流向相符。

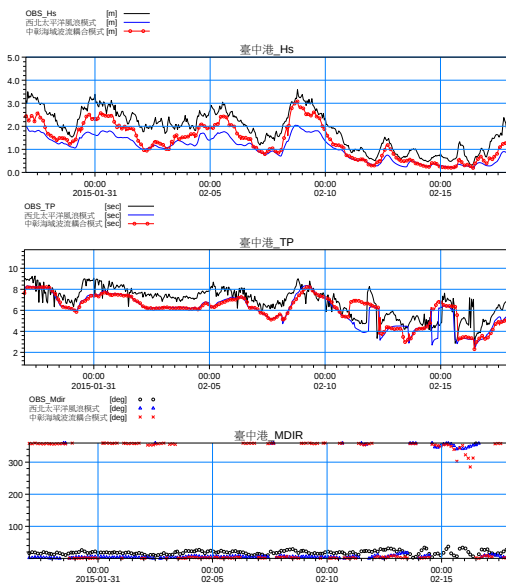


圖 5 冬季期間-臺中(TC)波浪驗證

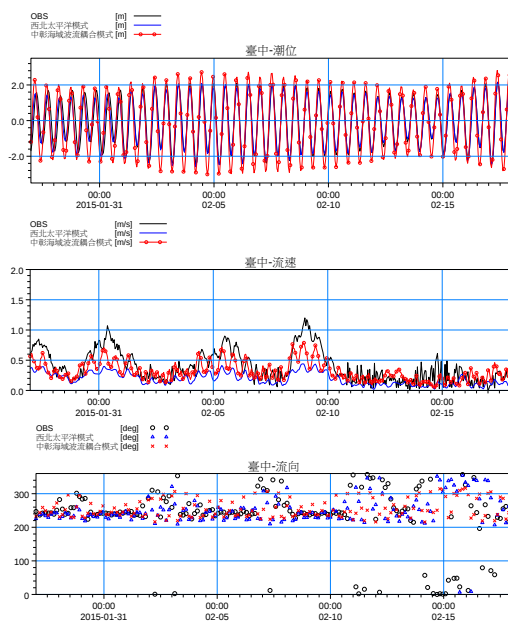


圖 6 冬季期間-臺中(TC)潮流驗證

表 2 冬季期間-示性波高誤差分析

模式	測站	絕對誤差 最大值(m)	絕對誤差 平均值(m)	RMSE (m)	R ²
西北太平洋 風浪模式	TC	1.77	0.82	0.89	0.94
中彰海域波 流耦合模式	TC	1.40	0.50	0.56	0.93

表 3 冬季期間-潮位誤差分析

模式	測站	絕對誤差 最大值(m)	絕對誤差 平均值(m)	RMSE (m)	R ²
西北太平洋 水動力模式	TC	0.73	0.20	0.25	0.92
中彰海域波 流耦合模式	TC	2.14	0.61	0.75	0.83

4.3.2 夏季期間波浪及水動力驗證結果

選取臺中及彰濱浮標於 104 年夏季期間(7/15~8/5)蒐集之波浪及潮位觀測資料作為模式驗證資料，臺中(TC)及彰濱浮標(CH3)波浪驗證結果如圖 7 及圖 8，示性波高誤差分析如表 4，臺中測站(TC)潮流驗證結果如圖 9，潮位誤差分析列如表 5。

由圖 7 可知，耦合模式模擬臺中之示性波高模擬結果有時略小於示性波高觀測值，耦合模式示性波高模擬結果雖較西北太平洋風浪模式模擬結果略差，但其模擬值與觀測值相關性(R²)為 0.79; 由圖 8 可知，耦合模式模擬彰化浮標之示性波高模擬值略高於觀測值及西北太平洋風浪模式模擬值，較西北太平洋風浪模式波高模擬結果略差，但其模擬值與觀測值相關性(R²)為 0.82 具良好相關性。2 種模式模擬臺中及彰化浮標示性波高變化趨勢與實測波高變化趨勢大致相符。

由圖 9 可知，耦合模式在臺中測站潮位模擬值與潮位觀測資料相比，模擬潮差較大，雖潮差模擬較潮位觀測值略大，但與西北太平洋水動力模式模擬近似，其潮位模擬值與觀測潮位相關性(R²)為 0.96 具良好相關性，2 種模式整體模擬潮位之變化趨勢亦符合觀測潮位變化情形。

比對耦合模式在臺中測站流速模擬結果，在實際流速低時，模擬流速雖較實測流速略高，但與西北太平洋水動力模式流速模擬結果相比，耦合模式較能

反應實際流速較高之實況，至於流向模擬大致與觀測流向相符。

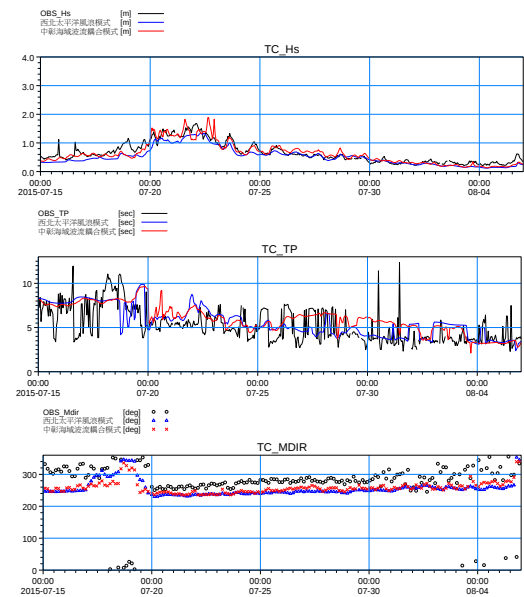


圖 7 夏季期間-臺中(TC)波浪驗證

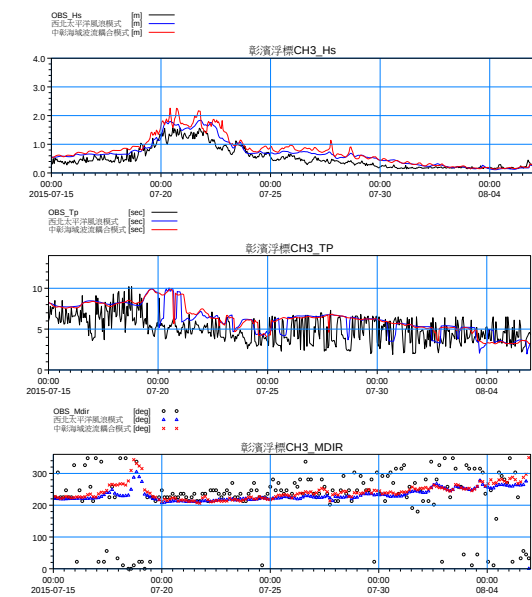


圖 8 夏季期間-彰濱浮標(CH3)波浪驗證

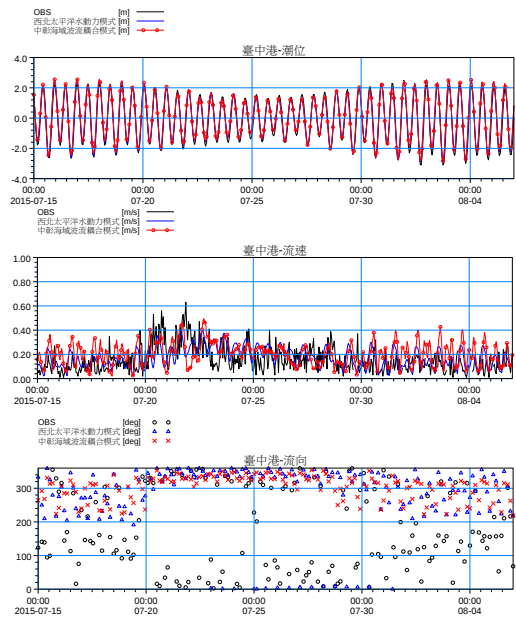


圖 9 夏季期間-臺中(TC)潮流驗證

表 4 夏季期間-示性波高誤差分析

模式	測站	絕對誤差 最大值 (m)	絕對誤差 平均值(m)	RMSE (m)	R ²
西北太平洋 風浪模式	TC	0.79	0.14	0.19	0.81
	CH3	0.62	0.10	0.14	0.88
中彰海域波 流耦合模式	TC	0.90	0.31	0.19	0.79
	CH3	0.72	0.25	0.32	0.82

表 5 夏季期間-潮位誤差分析

模式	測站	絕對誤差 最大值 (m)	絕對誤差 平均值 (m)	RMSE (m)	R ²
西北太平洋水 動力模式	TC	0.77	0.21	0.26	0.96
中彰海域波流 耦合模式	TC	2.18	0.23	0.30	0.96

4.3.3 颱風期間波浪及水動力驗證結果

選取 104 年侵襲臺灣中部的蘇迪勒颱風(中度颱風，104 年 8 月 6 日-8 月 10 日)及 108 年未侵襲臺灣的利奇馬颱風(強度颱風，108 年 8 月 7 日-8 月 10 日)等 2 場颱風事件作模式驗證，結果如下：

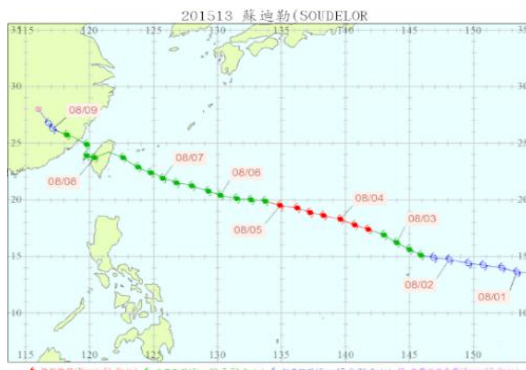
1. 104 年蘇迪勒颱風:

蘇迪勒颱風路徑如圖 10，模擬結果與臺中(TC)、彰濱浮標(CH3)示性波高觀測資料比對如圖 11 及圖 12 所示，示性波高誤差分析如表 6，與臺中(TC)潮位、流速及流向觀測資料比對如圖 13 所示，潮位誤差分析如表 7。

由圖 11 可知，耦合模式模擬臺中港示性波高模擬尖峰值雖小於實測波高尖峰值，但模擬結果較西北太平洋風浪模式模擬結果更接近觀測示性波高值，模擬值與實測值相關性(R^2)為 0.73，整體模擬臺中示性波高、譜峰週期及波向變化趨勢大致與實測示性波高、譜峰週期及波向相符;由圖 12 可知，彰濱浮標示性波高模擬尖峰值雖小於實測波高尖峰值，但模擬結果較西北太平洋風浪模式模擬結果高，模擬值與實測值相關性(R^2)為 0.57，整體模擬彰濱浮標示性波高、譜峰週期及波向變化趨勢大致與實測示性波高、譜峰週期及波向相符。

由圖 13 可知，耦合模式在臺中測站潮位模擬值與潮位觀測資料相比，模擬潮差較大，雖潮差模擬較潮位觀測值略大，但與西北太平洋水動力模式模擬近似，其潮位模擬值與觀測潮位相關性(R^2)為 0.89，2 種模式整體模擬潮位之變化趨勢亦符合觀測潮位變化情形。

比對耦合模式在臺中測站流速模擬結果，耦合模式模擬流速雖較實測流速略低(尤其是實際流速突然升高處)，但與西北太平洋水動力模式流速模擬結果相比，耦合模式較能反應實際流速較高之實況，至於流向模擬大致與觀測流向相符。



資料來源:中央氣象局颱風資料庫

圖 10 104 年蘇迪勒颱風路徑

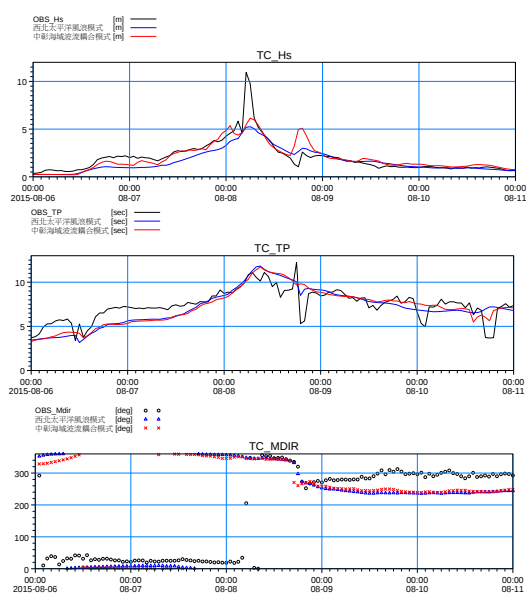


圖 11 蘇迪勒颱風-臺中波浪驗證

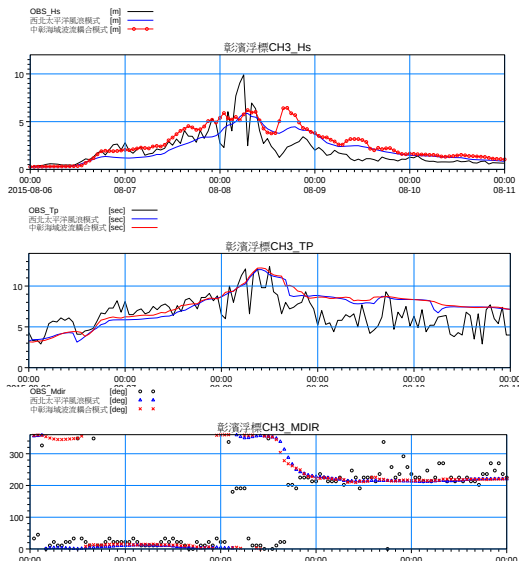


圖 12 蘇迪勒颱風-彰濱浮標波浪驗證

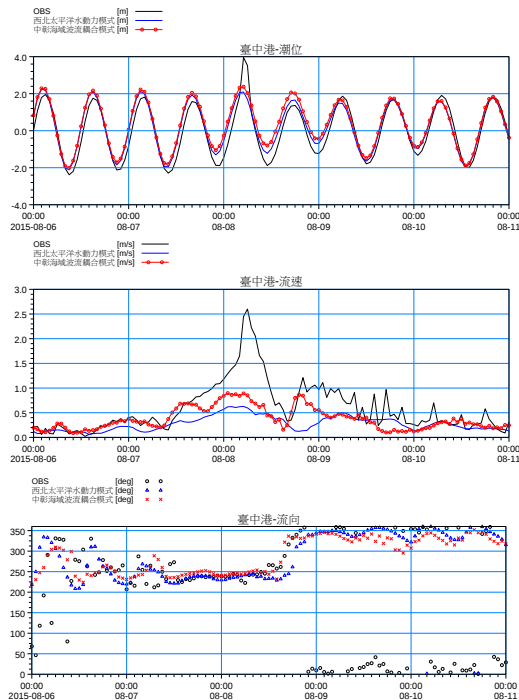


圖 13 蘇迪勒颱風-臺中潮流驗證

表 6 蘇迪勒颱風-示性波高誤差分析

模式	測站	絕對誤差最大值(m)	絕對誤差平均值(m)	RMSE (m)	R ²
西北太平洋風浪模式	TC	5.76	0.34	1.00	0.72
	CH3	4.08	0.34	1.23	0.54
中彰海域波浪耦合模式	TC	5.49	0.44	0.84	0.73
	CH3	4.15	1.08	1.42	0.57

表 7 蘇迪勒颱風-潮位誤差分析

模式	測站	絕對誤差最大值(m)	絕對誤差平均值(m)	RMSE (m)	R ²
西北太平洋水動力模式	TC	1.87	0.37	0.48	0.89
中彰海域波浪耦合模式	TC	1.58	0.47	0.59	0.89

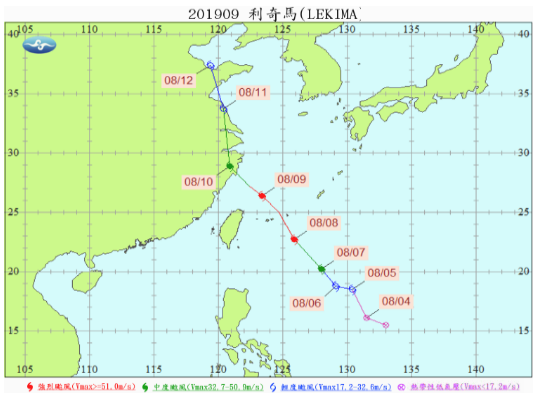
2. 108 年利奇馬颱風:

颱風路徑如圖 14，耦合模式模擬臺中(TC)波浪與觀測波浪資料比對如圖 15、示性波高誤差分析如表 8，耦合模式模擬臺中(TC)潮流與觀測潮位、流速及流向資料比對如圖 16，潮位誤差分析如表 9。

由圖 15 可知，耦合模式模擬臺中波高較西北太平洋風浪模式略高，但較接近實測波高，其波高模擬值與觀測波高相關性(R²)為 0.58，亦優於西北太平洋風浪模式模擬結果。整體模擬臺中港示性波高變化趨勢與實測波高變化趨勢相近；至於模擬臺中站週期及波向變化趨勢亦與實測波浪週期及波向變化趨勢大致相符。

由圖 16 可知，耦合模式模擬臺中站潮位模擬值與潮位觀測資料相比，模擬潮差較大，雖潮差模擬較潮位觀測值略大，但與西北太平洋水動力模式模擬近似，其潮位模擬值與觀測潮位相關性(R²)為 0.97 具良好相關性，2 種模式整體模擬潮位之變化趨勢亦符合觀測潮位變化情形。

耦合模式模擬流速較實測流速值偏低，其流速模擬值偏低除了可能與颱風期間之預報風場之風速值較觀測值低有關外，還與颱風路徑僅從臺灣東北部掠過而未直接影響臺灣中部有關，但整體而言，2 種模式模擬臺中流速、流向模擬值之變化趨勢仍符合觀測流速、流向變化趨勢



資料來源:中央氣象局颱風資料庫
圖 14 108 年利奇馬颱風路徑

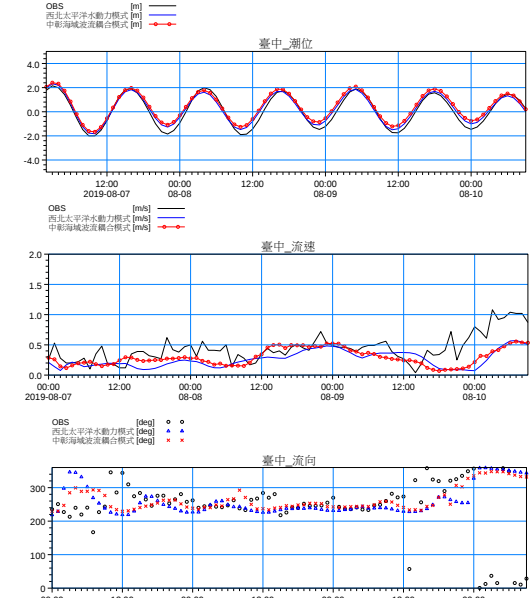


圖 16 利奇馬颱風-臺中潮流驗證結果

表 8 利奇馬颱風-示性波高誤差分析

模式	測站	絕對誤差最大值(m)	絕對誤差平均值(m)	RMSE (m)	R ²
西北太平洋風浪模式	TC	0.90	0.32	0.37	0.53
中彰海域波流耦合模式	TC	0.83	0.31	0.36	0.58

表 9 利奇馬颱風-潮位誤差分析

模式	測站	絕對誤差最大值(m)	絕對誤差平均值(m)	RMSE (m)	R ²
西北太平洋水動力模式	TC	0.64	0.25	0.30	0.97
中彰海域波流耦合模式	TC	0.83	0.36	0.43	0.97

五、結論

為能確實反應中彰海域局部海象變化情形，在 107 年度完成大域數值模式基礎下，本(108)年度再創建中彰海域波流耦合模式，屬局部數值模式性質，並

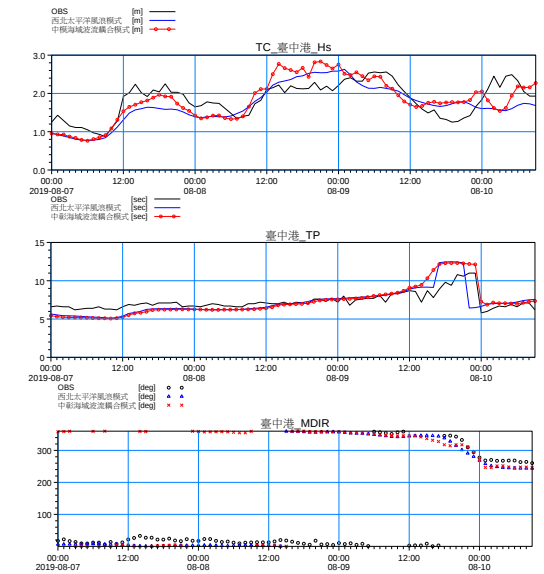


圖 15 利奇馬颱風-臺中波浪驗證結果

藉由大域模式提供局部模式數值邊界條件之執行方式作為 2 種不同尺度模式結合。

中彰海域波流耦合模式整體波高模擬值與波高實測值相比結果，耦合模式於冬季、夏季期間之示性波高模擬值略高，颱風期間示性波高模擬值除了發生尖峰波高時，模擬波高值較實測波高小外，其餘時刻模擬波高值略高於實測波高值；與西北太平洋風浪模式波高模擬值相比結果，耦合模式於冬季期間模擬結果較佳、夏季及颱風期間略差。

中彰海域波流耦合模式整體潮流模擬值與潮流實測值相比結果，潮位模擬值與潮位實測值均有良好相關性，耦合模式流速模擬結果較西北太平洋水動力模式流速模擬結果更能反應實際流速。

中彰海域波流耦合模式經模擬冬、夏季期間及 2 場颱風事件與觀測資料驗證，證明模式足以反應中彰海域特性，模式架構設計除了節省數值運算時間，亦提供較細緻局部海象資料，供後續進一步海域海象特性探討。

六、參考文獻

1. 許朝敏、林銘崇、楊文榮、曾瓊蓉，「波浪通過離岸風田之變形研究」，第 32 屆海洋工程研討會論文集，社團法人臺灣海洋工程學會，2010 年 11 月，第 375-456 頁。
2. 許弘莒、蔡立宏、楊炳達、郭平巧、李孟學，「臺中港鄰近海域之波流場模擬」，港灣技術季刊，第 1 卷第 10 3 期，2016 年，第 42-63 頁。
3. 張君名、錢樺，「西北太平洋颱風波浪波高推算」，第 39 屆海洋工程研討會論文集，社團法人臺灣海洋工程學會，2017 年 11 月，第 25-30 頁。
4. 經濟部水利署第四河川局，彰化海岸防護基本資料調查(2/2)，2014 年。
5. 經濟部水利署第三河川局，臺中海岸基本資料調查(2/2)，2015 年。
6. 經濟部能源局，離岸風電推動現況與展望，2019 年。
7. 交通部中央氣象局，颱風資料庫。
8. Danish Hydraulic Institute, Spectral Wave Module Scientific Documentation ,2012.
9. Danish Hydraulic Institute, Spectral Wave Module Scientific Documentation ,2012.