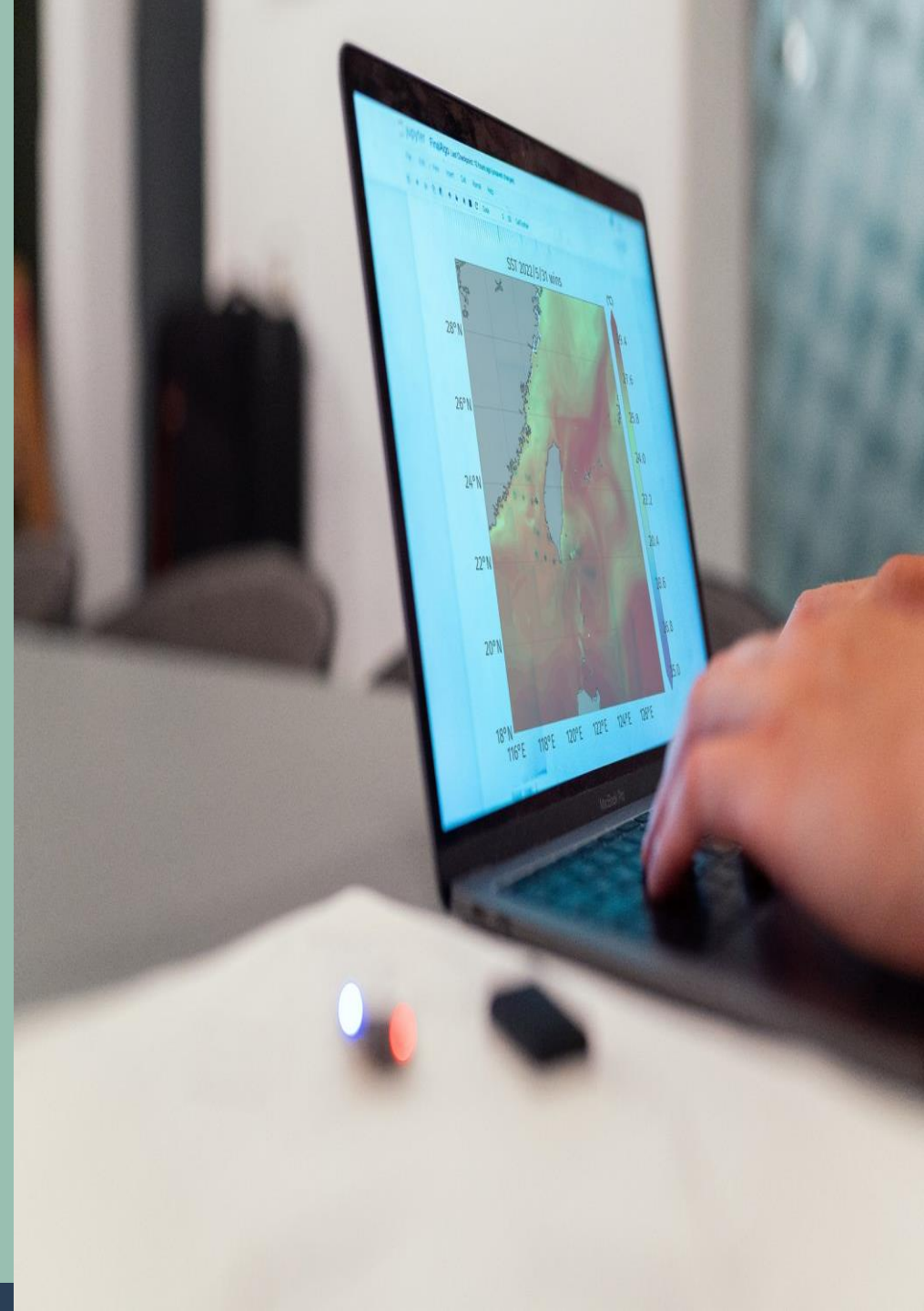


發展三維波潮流整合模式 探討波浪效應對臺灣海域海流之影響

第40屆天氣分析與預報研討會

王啓竑¹ 于嘉順¹ 陳琬婷² 朱啟豪²

¹西灣海環科技股份有限公司 ²中央氣象署海象氣候組 | 2026 年 9 月



簡報大綱

從波潮耦合作業化系統，到三維波潮流整合——波浪效應的分離、量化與驗證



- 01 1 研究背景與問題定義
- 02 2 模式架構與耦合機制
- 03 3 颱風個案分析 – 暴潮
- 04 4 颱風個案分析 – 流速

1

研究背景與問題定義

- 海流時空變化的三個驅動來源
- 獨立模式架構的物理侷限
- 下一世代海流預報系統的課題

研究背景：波浪效應是劇烈天氣期間海流模擬的缺口

- 海流之時空變化，受潮汐、風驅環流與波浪交互作用共同影響。
- 傳統數值模式中，波浪與海流各有其控制方程式及作用力描述，多採獨立運作方式計算，忽略波流間的相互作用。
- 現行海流作業化預報系統即以獨立模式架構運行，於一般天氣條件下已具穩定預報能力。
- 惟於颱風等劇烈天氣期間，波浪引致之輻射應力對流場的貢獻顯著，獨立模式架構難以完整解析海流之時空變化。
- 此為下一世代海流預報系統亟需突破之課題。

波流交互作用在劇烈天氣下不可忽略——這是下一世代海流預報最關鍵的物理缺口

現行架構與發展方向

現行架構：三套系統獨立運作

- CWA-OCM：三維斜壓海流（潮汐 + RTOFS / HYCOM 邊界與初始場、溫鹽）
- CWA-OCM-WT：三維波潮耦合（SCHISM + WWMIII）
- CWA-OCM-FH：福島海域顆粒傳輸擴散（擴大範圍）
- 各自網格、各自初始場，重疊海域重複計算
- 波浪對流場之回饋未進入海流預報產品

發展方向：三維波潮流整合（CWA-OCM-WTC）

- 同一非結構網格、相同時間步長之動態雙向耦合
- 波浪模式先算波場，將輻射應力傳遞至水動力模式
- 水動力模式納入流場與水位計算，再將表層流場及水位回傳波浪模式
- 單一系統同時輸出水位、暴潮、波浪、流場與溫鹽
- 消除重疊計算、共用初始場，提升作業預報韌性

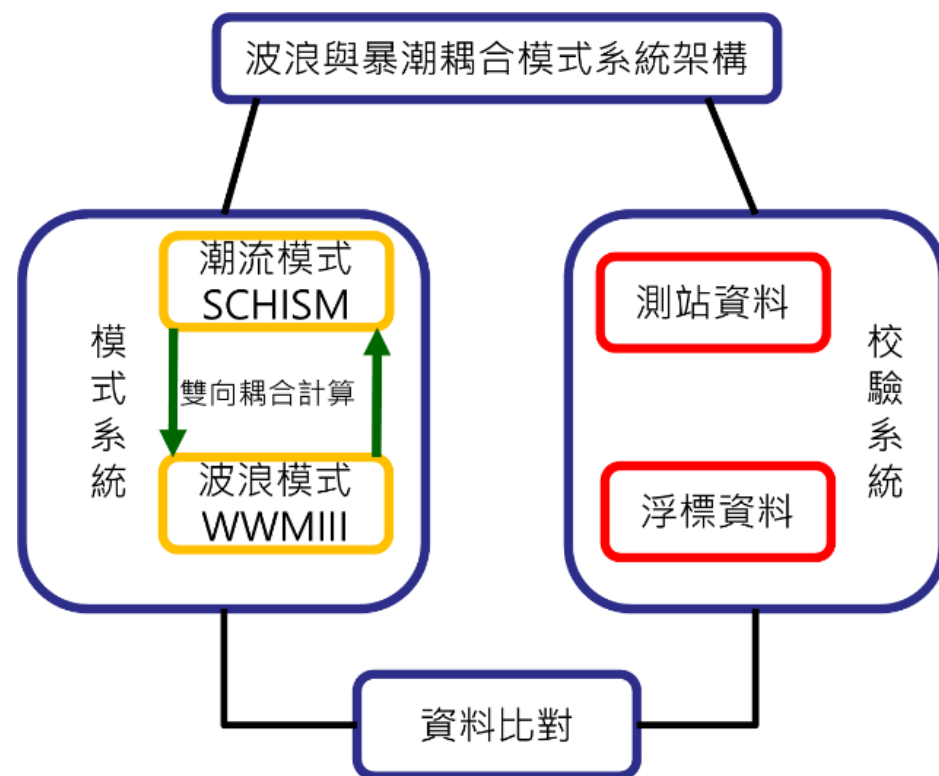
從三套獨立系統走向單一整合系統，是物理完整性與作業韌性的同步提升

2

模式架構與耦合機制

- SCHISM 與 WWMIII 雙向動態耦合
- 非結構網格與 LSC2 垂直分層
- 輻射應力與表層流場的雙向交換

三維波潮流整合作業化預報系統架構



三維波潮流整合作業化預報系統架構圖

模式系統

- 水動力模式 SCHISM：三維非結構網格、半隱式數值架構，可解析潮汐、風驅環流與溫鹽斜壓
- 波浪模式 WWMIII：第三代波浪模式，求解波作用力平衡方程
- 雙向耦合：兩模式共用同一網格與相同時間步長，逐時間步交換輻射應力與表層流場、水位

校驗系統

- 資料來源：氣象署臺灣海象災防環境平台與資料開放平臺
- 波浪浮標 20 站、潮位測站 16 站

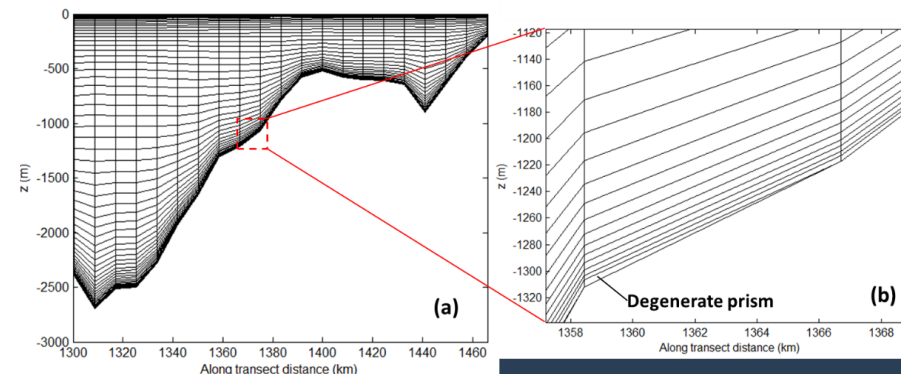
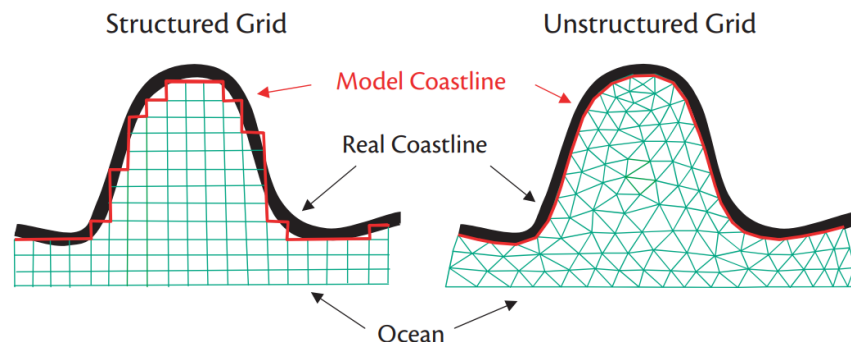
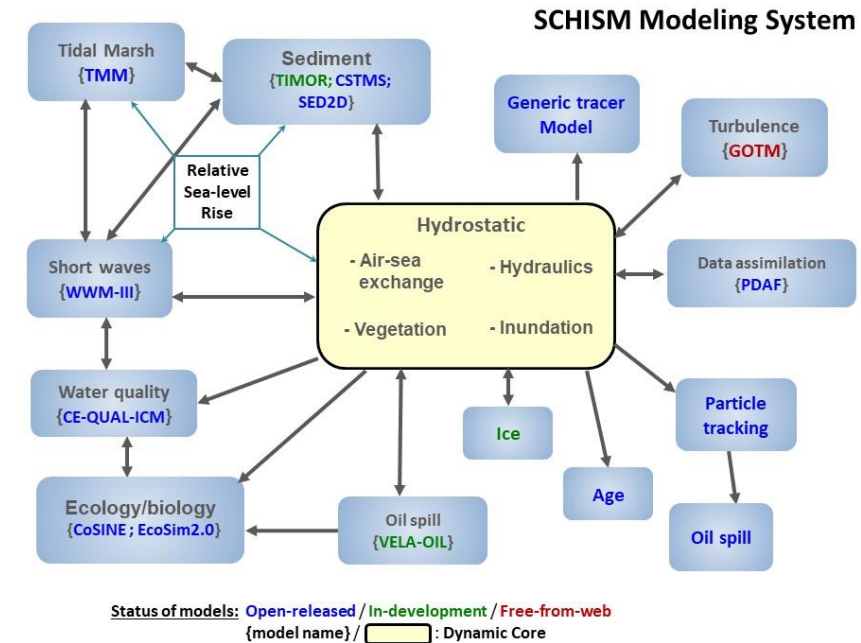
作業排程

- 依作業化 WRF 氣象場每 12 小時執行一次；分析場 48 小時約 1 小時、預報場 120 小時約 1.5 小時

SCHISM 與 WWMIII 共用同一非結構網格與時間步長，逐時間步雙向交換

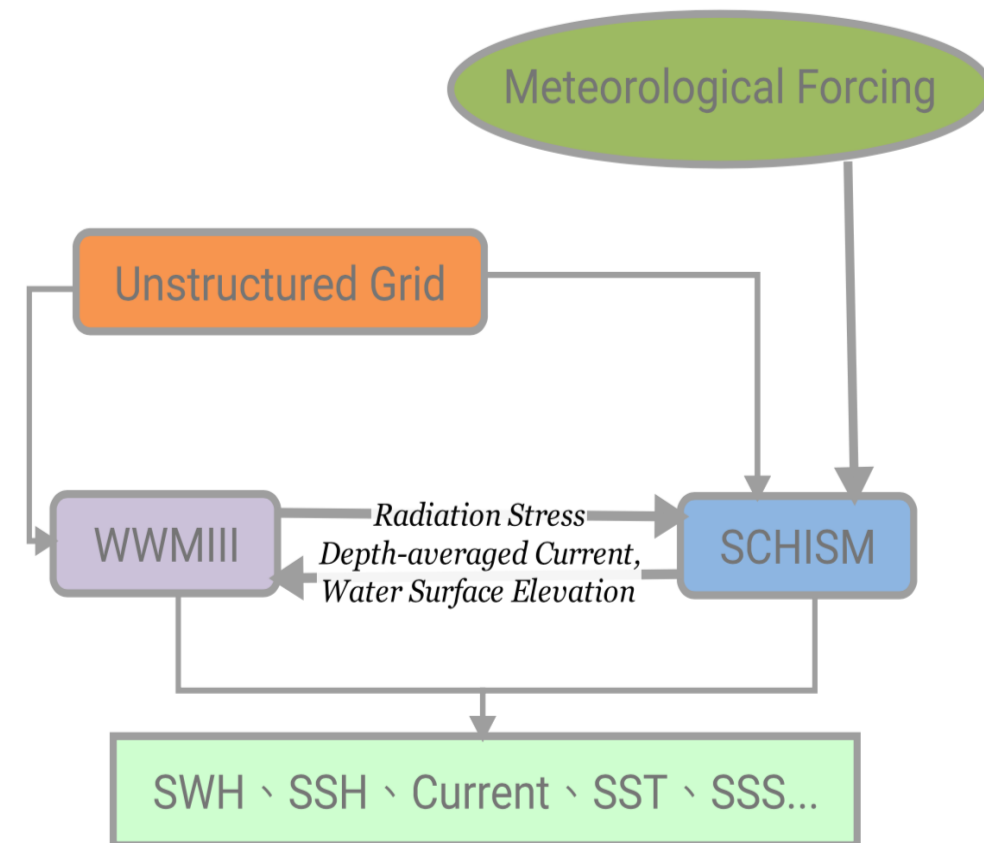
波潮流耦合模式架構

- 海流動力模式為SCHISM
(Semi-implicit Cross-scale Hydroscience Integrated System Model) (Zhang et al., 2016)
- 波浪模式為第三代WWM(Wind Wave Model, Roland et al., 2009)波浪模式
- 水動力及波浪模式**共用同一網格**
- 水平網格採用非結構三角網格，更能精確貼合近岸複雜岸線
- 以半隱式法解決時間步長限制(CFL條件較寬鬆)



波浪與流場的雙向耦合機制

- 波浪模式先行計算波場，將波浪破碎與波場梯度所產生之輻射應力 (radiation stress) 傳遞至水動力模式。
- 水動力模式納入輻射應力後求解流場與水位；波浪引致之動量通量因而改變近岸流速、流向與平均水位。
- 水動力模式再將表層流場與水位回傳波浪模式，作為下一時間步之背景流與水深條件，形成雙向回饋。
- 兩模式使用同一非結構網格及相同時間步長，達成波、潮、流之動態同步耦合。
- 沿岸總水位 $TWL = \text{天文潮} + \text{暴潮} + \text{波浪溯升}$ ；波浪溯升即輻射應力梯度所造成之平均水位抬升，水位抬升也影響流場的變化。



輻射應力向前、表層流與水位向後——雙向交換在每一個時間步都在發生

作業化系統規格與執行時窗

網格

- 50萬節點
- 100萬元素

時間

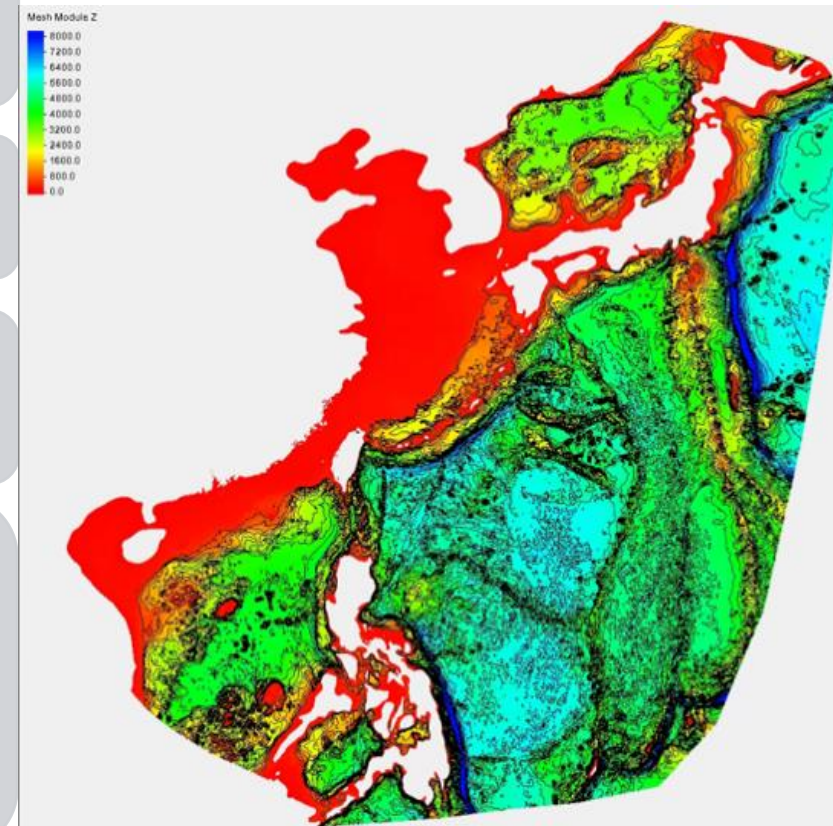
- 96小時預報場計算

模式

- SCHISM三維水動力模式
- WWMIII波浪模式 波流雙向完全耦合

驅動力

- 中央氣象局氣象場
- TOPEX潮汐邊界K1,O1,P1,Q1,M2,S2,N2,K2
- 氣象局NWW3波浪模式作為邊界



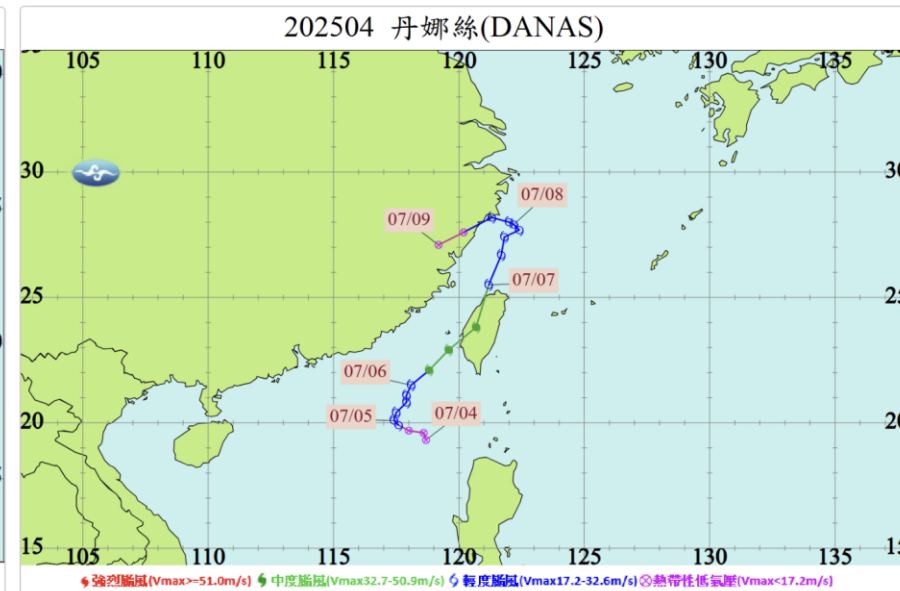
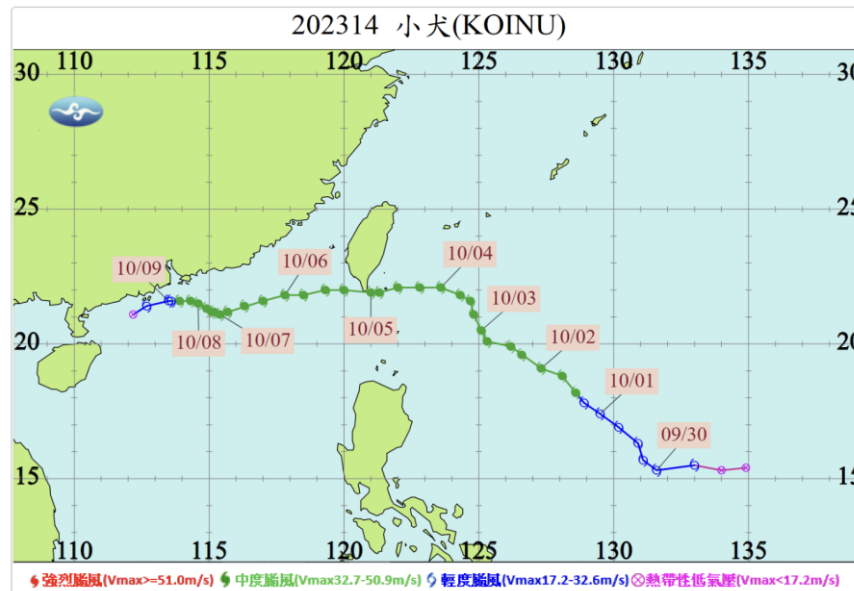
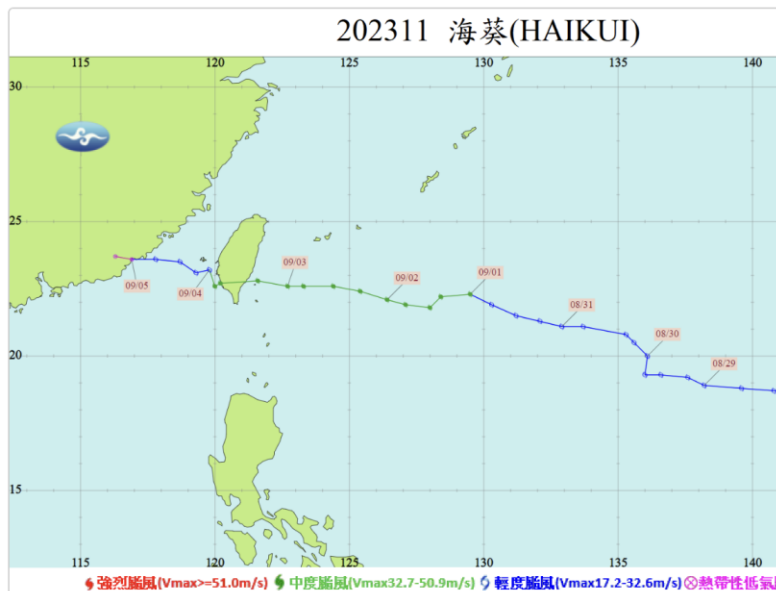
透過耦合波浪效應的波潮流整合模式與未引入波浪效應的暴潮模式進行後續模式結果比對

3

颱風個案分析－暴潮

- 波浪溯升之同系統雙生實驗
- 三個颱風個案的量化貢獻

颱風個案及其路徑

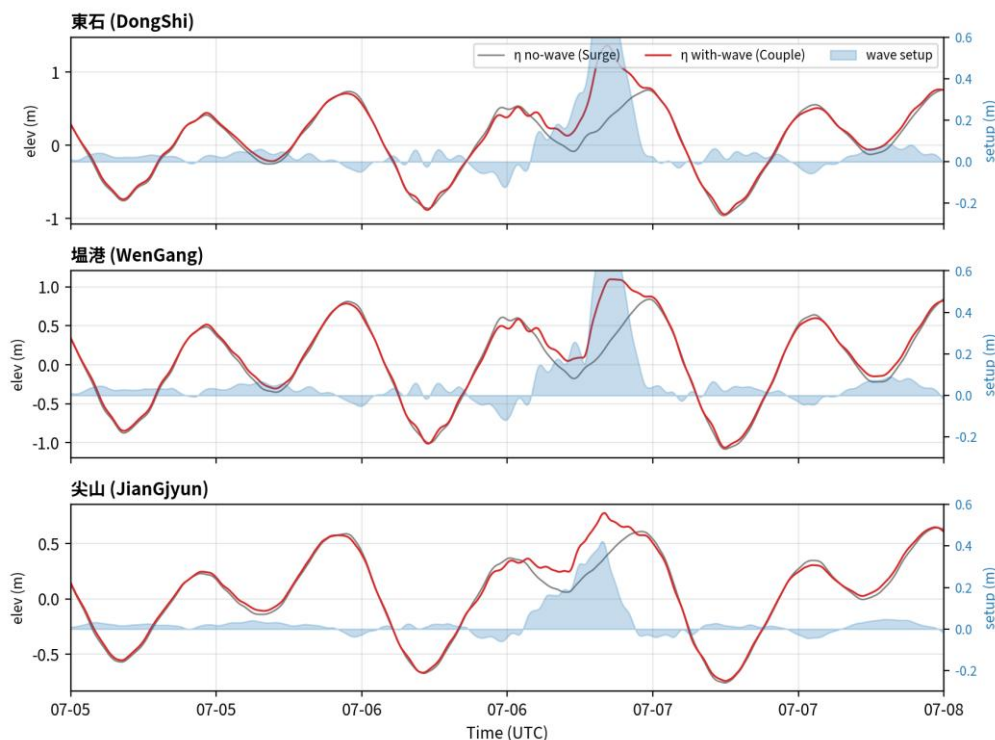


波浪溯升雙生實驗颱風個案設定表

颱風個案	期間 (UTC)	路徑與主要影響	資料來源
海葵 Haikui	2023-09-03 ~ 09-04	南部登陸，影響東北岸	三維暴潮模式 vs 三維波潮流耦合模式
小犬 Koinu	2023-10-04 ~ 10-05	通過臺灣南方，影響東岸與南岸	三維暴潮模式 vs 三維波潮流耦合模式
丹娜絲 DANAS	2025-07-05 ~ 07-08	穿越臺灣海峽，主要影響西岸	三維暴潮模式 vs 三維波潮流耦合模式

颱風個案與溯升貢獻統計

DANAS total water level with / without wave setup



丹娜絲颱風 (2025/07/05–08 UTC) 西岸代表站 (東石、塭港、尖山)
含 / 不含波浪溯升之總水位時序

- 紅線：含波情境 (Couple)，灰線：無波情境 (Surge)，藍色陰影：兩者差值，即純粹之波浪溯升
- 平時兩線幾乎完全重合，溯升近乎為零
- 7月6日至7日風暴峰值期間，含波水位顯著高於無波
- 溯升與風暴同步出現、事後回落，時間相位一致，· 東石站抬升最大，達 +0.60 公尺

各代表測站波浪溯升對總水位貢獻量統計表

個案	代表測站	dPeak (m)	占暴潮峰值	水位最大 (m)
Haikui	蘇澳 SuAo	+0.10	10%	0.25
Koinu	蘇澳 SuAo	+0.16	16%	0.23
Koinu	成功 ChengKong	+0.14	13%	0.27
Koinu	後壁湖 HouBiHu	+0.07	7%	0.08
DANAS	東石 DongShi	+0.60	44%	1.04
DANAS	塭港 WenGang	+0.25	23%	0.82
DANAS	尖山 JianGjyun	+0.13	17%	0.42

三個路徑互異之個案：丹娜絲穿越海峽影響西岸、小犬通過南方影響東岸與南岸、海葵南部登陸影響東北岸，波浪溯升不是常態偏差，而是與風暴同步出現、事後回落的事件型訊號

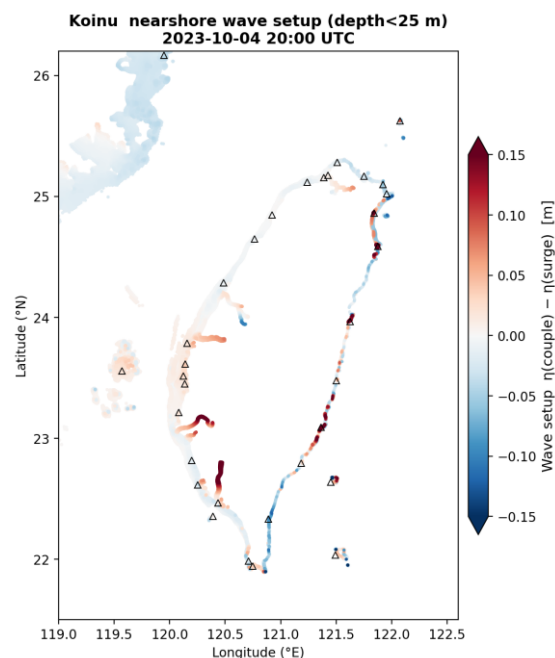
近岸空間分布與輻射應力物理檢核

空間分布特性

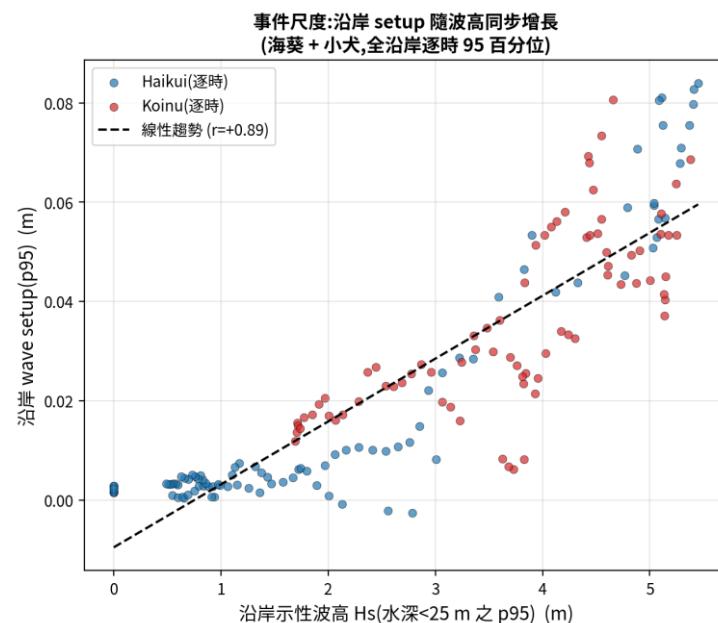
- 波浪溯升屬近岸現象 (水深 < 25 m)
，集中於淺水、迎浪之海岸段
- 小犬期間東岸正溯升明顯，對應其通過臺灣南方時之東向浪
- 海葵量級較小，集中於東北角淺水灣澳

物理學理檢核

- 全沿岸逐時溯升與示性波高 p95 隨風暴同步增長，相關係數 $r = +0.89$
- 與 Longuet-Higgins & Stewart 輻射應力理論及 Stockdon et al. (2006) 經驗參數化一致



小犬颱風近岸溯升空間分布



事件尺度溯升對示性波高之關係

空間型態與理論一致，證實所分離者確為輻射應力驅動的物理訊號

波浪溯升對沿岸總水位之貢獻（三個颱風個案）

+0.60 m

東石站最大水位抬升

丹娜絲颱風（2025/07），西岸淺水迎浪岸段

44 %

占暴潮峰值水位比例

東石 44%、塭港 23%、尖山 17%

$r = +0.89$

溯升與示性波高之相關

小犬與海葵行經臺灣東側，蘇澳、成功約 +0.10 ~ +0.16 公尺（占峰值 10–16%），量級較小但同樣可辨識

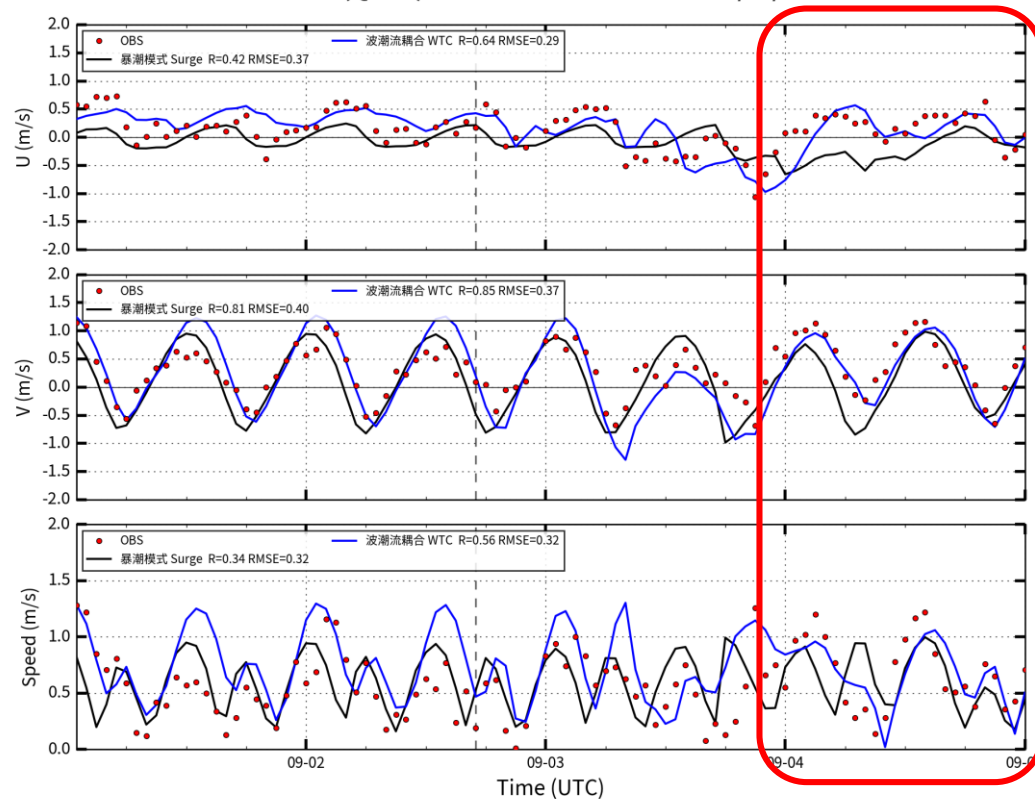
4

颱風個案分析－流速

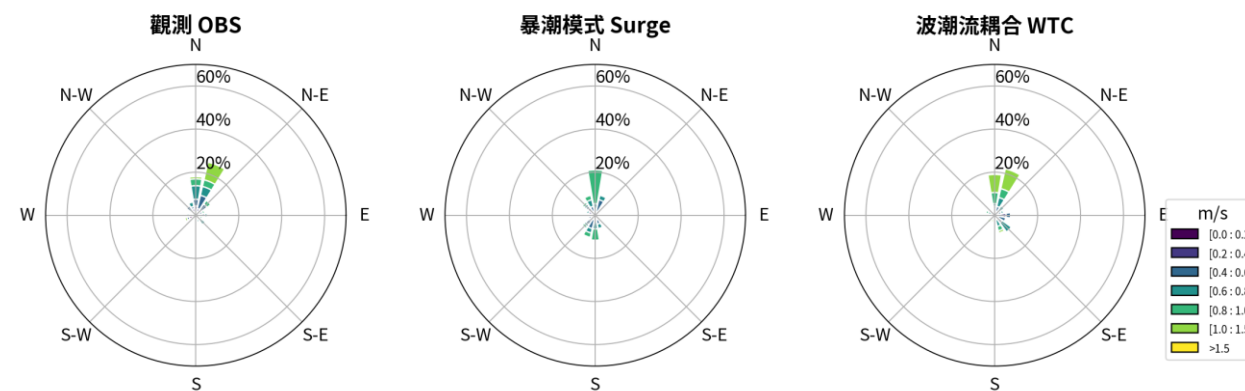
- 三颱風個案之表層流速驗證：暴潮模式 vs 波潮流整合

海葵颱風：七美測站之流速驗證

C6W10 七美 (Qimei) — 表層流速 海葵 HAIKUI 2023/09/01-05



流速玫瑰圖 — C6W10 七美 (Qimei) 海葵 HAIKUI 2023/09/01-05 N=95



流速玫瑰圖 (觀測 / 暴潮 / 波潮流耦合，共同時刻)

重點

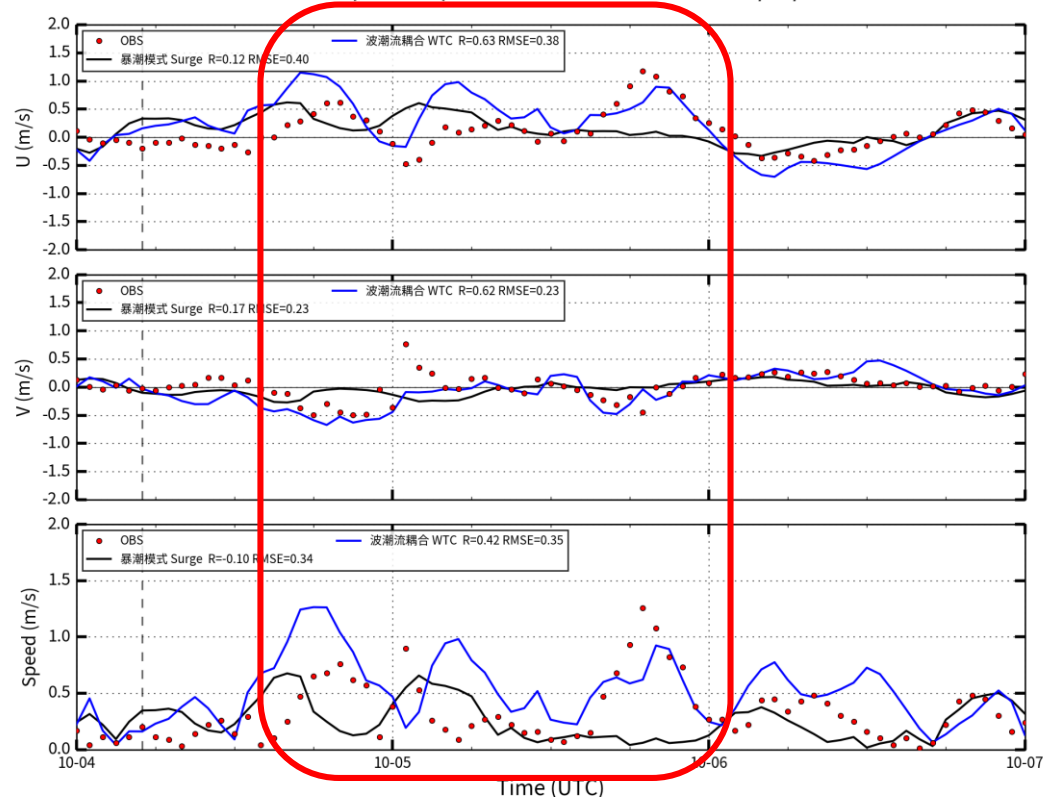
- 近海葵中心路徑表現最佳之測站 (距路徑 38 km) ; R 流速 0.34→0.56、U 0.42→0.64
- 玫瑰圖：耦合重現觀測之北北東主向與 1.0–1.5 m/s 強流出現頻率；暴潮低估強流且方向較散

表層流速時序 (觀測 + 暴潮 + 波潮流耦合)

海葵近路徑測站：波潮流耦合同時改善流速時序與流向—流速分布

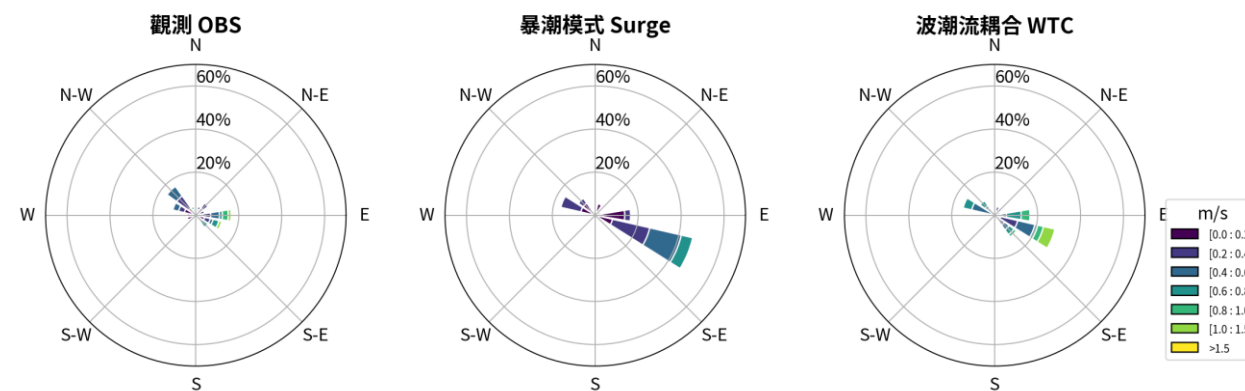
小犬颱風：鵝鑾鼻測站之流速驗證

46759A 鵝鑾鼻 (Eluanbi) — 表層流速 小犬 KOINU 2023/10/04-07



表層流速時序 (觀測 + 暴潮 + 波潮流耦合)

流速玫瑰圖 — 46759A 鵝鑾鼻 (Eluanbi) 小犬 KOINU 2023/10/04-07 N=73



流速玫瑰圖 (觀測 / 暴潮 / 波潮流耦合，共同時刻)

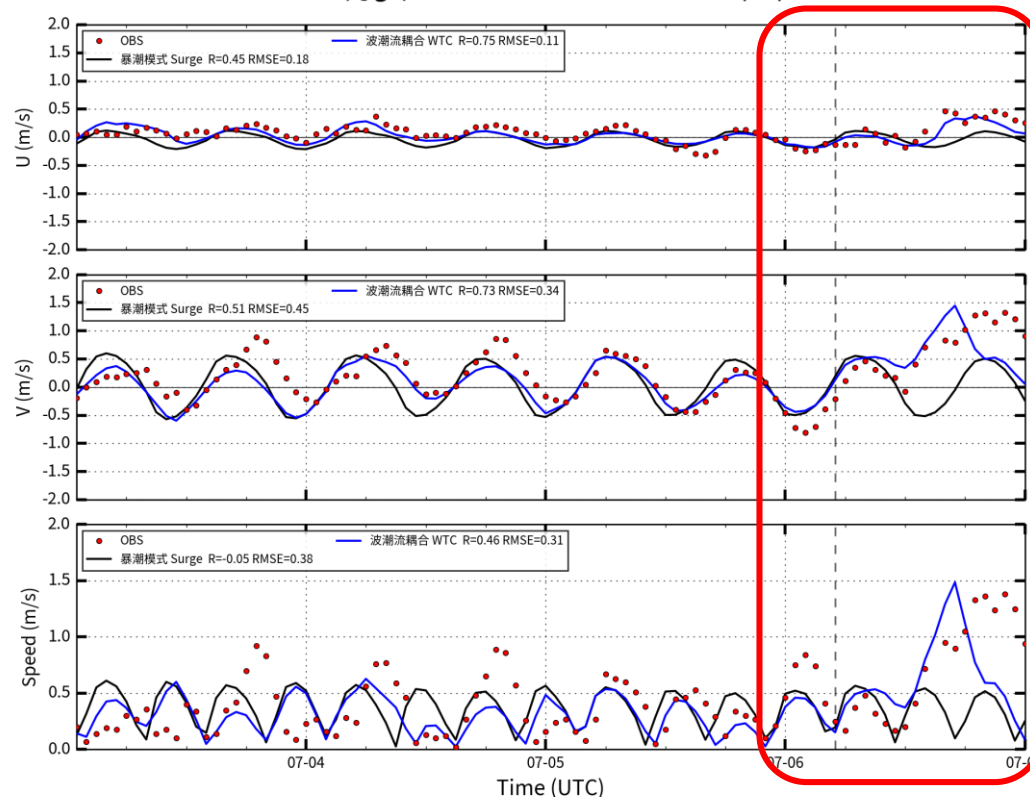
重點

- 小犬路徑上有觀測之最近測站 (距路徑 25 km) ; U 之 R 0.12→0.63、流速 -0.10→0.42
- 玫瑰圖：觀測呈西北西—東南東雙向結構，耦合重現之；暴潮過度集中於單一東南東向

小犬近路徑測站：颱風期之流速增強事件僅波潮流耦合能重現

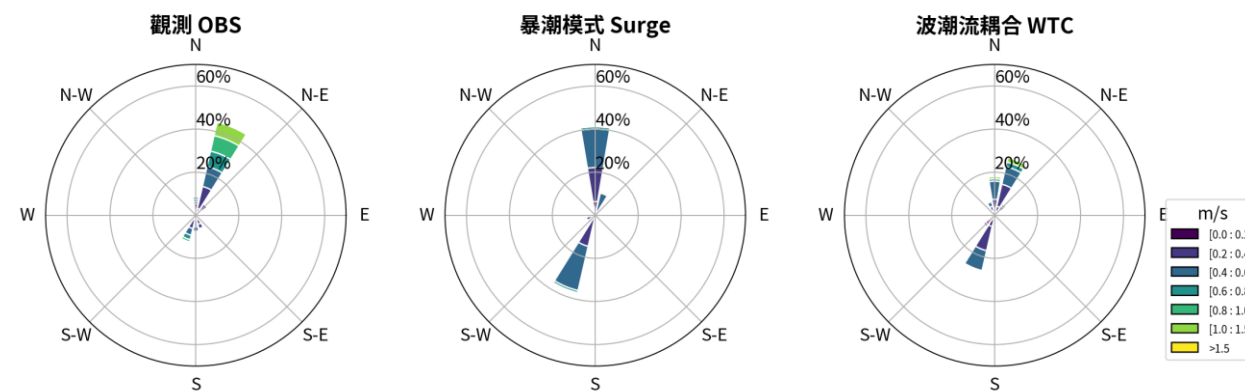
丹娜絲颱風：七股測站之流速驗證

46778A 七股 (Qigu) — 表層流速 DANAS 丹娜絲 2025/07/03-07



表層流速時序 (觀測 + 暴潮 + 波潮流耦合)

流速玫瑰圖 — 46778A 七股 (Qigu) DANAS 丹娜絲 2025/07/03-07 N=95



流速玫瑰圖 (觀測 / 暴潮 / 波潮流耦合，共同時刻)

重點

- 登陸點旁之測站；R 流速 $-0.05 \rightarrow 0.46$ 、U $0.45 \rightarrow 0.75$ ，RMSE 全面下降
- 登陸後實測流速增強至 1.5 m/s ：暴潮停留於潮汐週期未見反應，耦合完整重現
- 玫瑰圖：觀測呈北北東單向強流主導；暴潮為對稱雙向純潮汐、無強流，耦合重現單向主導結構

登陸點暴潮流僅波潮流耦合能重現；暴潮模式停留於潮汐週期、流速能量嚴重不足

波浪對颱風期間水位影響顯著

- 丹娜絲東石站波浪溯升 +0.60 公尺，占風暴峰值水位 44% (西岸淺水迎浪岸段)
- 溯升與風暴同步出現、事後回落，並與示性波高高度相關 ($r = +0.89$)
- 忽略波浪將系統性低估颱風期間之沿岸總水位

波浪對颱風期間流速影響同樣顯著

- 引入波浪後表層流速相關係數由 0.19–0.39 提升至 0.38–0.49 (海葵、小犬 ADCP 實測驗證)
- 颱風驅動之流速增強僅含波耦合模式能重現 (七股登陸點 1.5 m/s、鵝鑾鼻、七美)
- 登陸點風場對於近岸流場和波浪影響——關鍵在流場與波浪耦合

必要性與後續工作

- 波浪效應為近岸流場模擬不可或缺之一環，應納入作業化海流預報
- 波浪提供的靠岸物理機制，也是漂流模擬重要的一個重要環節

颱風期間波浪效應對水位與流速均有顯著且正向之貢獻——將波浪效應納入近岸流場預報係屬必要

Thank You

敬請指教

西灣海環科技股份有限公司 Baytech Environment and Engineering Inc.

wchihome@wbaytech.com.tw | www.wbaytech.com.tw

