

3 Sep, 2026

115年天氣分析與預報研討會 2026 Conference on Weather Analysis and Forecasting

王敍民¹

潘琦²

陳琬婷²

蔡政翰³

董東璟¹

¹國立成功大學
水利及海洋工程學系

²交通部中央氣象署
海象氣候組

³國立臺灣海洋大學
海洋環境資訊系

外澳海灘裂流作業化預警之建立與測試

Development and Testing of an Operational Rip Current Forecasting

System for Waiou Beach

Department of Hydraulic and Ocean Engineering,
National Cheng Kung University



Table of Contents

Page

I

背景 & 動機

1

II

前期研究成果

5

III

目的

9

IV

裂流預測方法與理論

10

V

作業化系統架構與測試

16

VI

結論

20

Chapter I

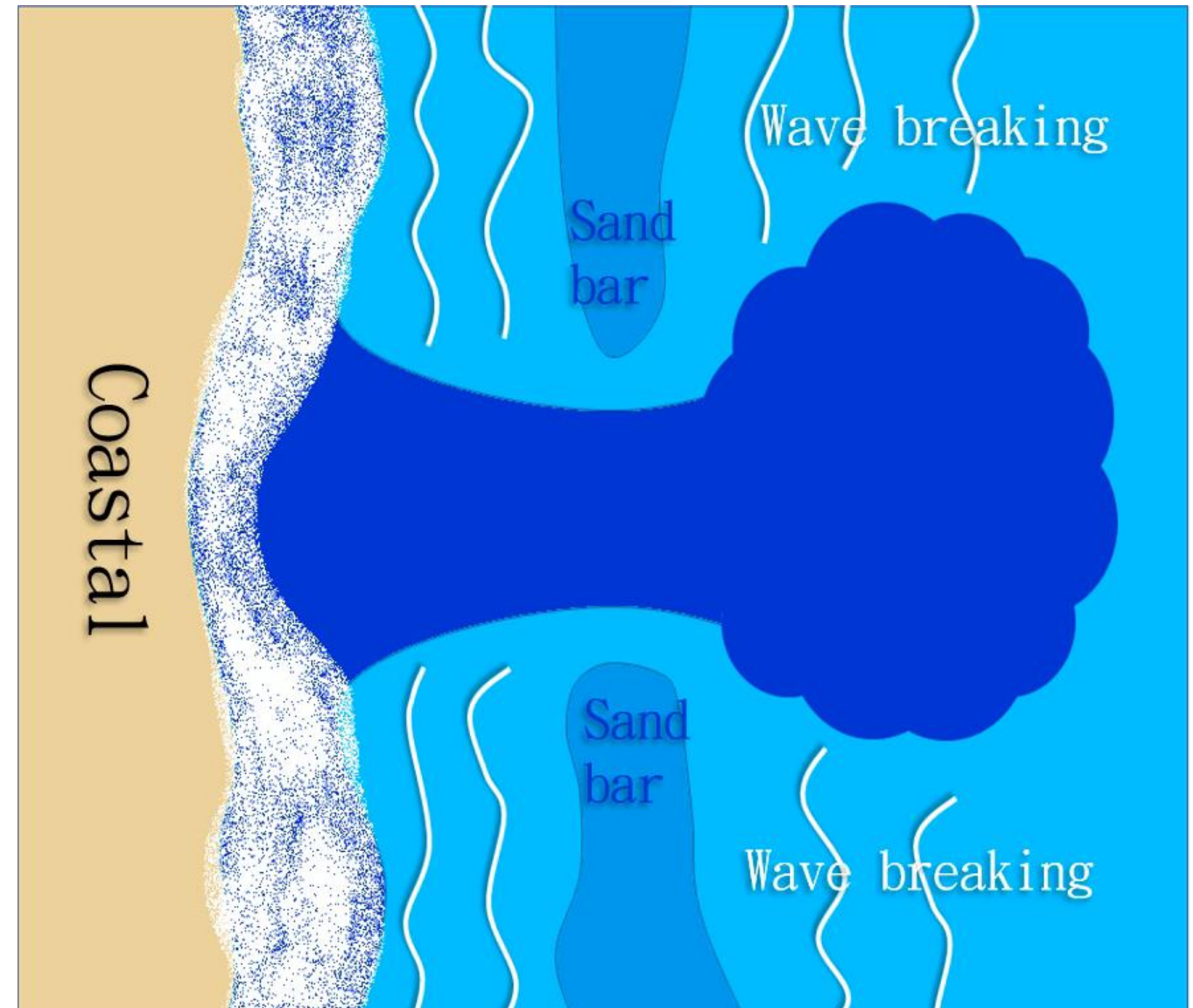
背景 & 動機

- 裂流定義與發生機制
- 文獻回顧

裂流(Rip Current) 裂流是一股近乎垂直岸線向外海移動的強勁水流。它通常由波浪破碎能量與海底地形所引發，有時也會出現在海岸結構物邊。



*Source: Leatherman and Fletemeyer (2011); Segura et al. (2018); Google Earth; Prof. Tsai, Cheng-Han; CWA Monitoring of Rip current

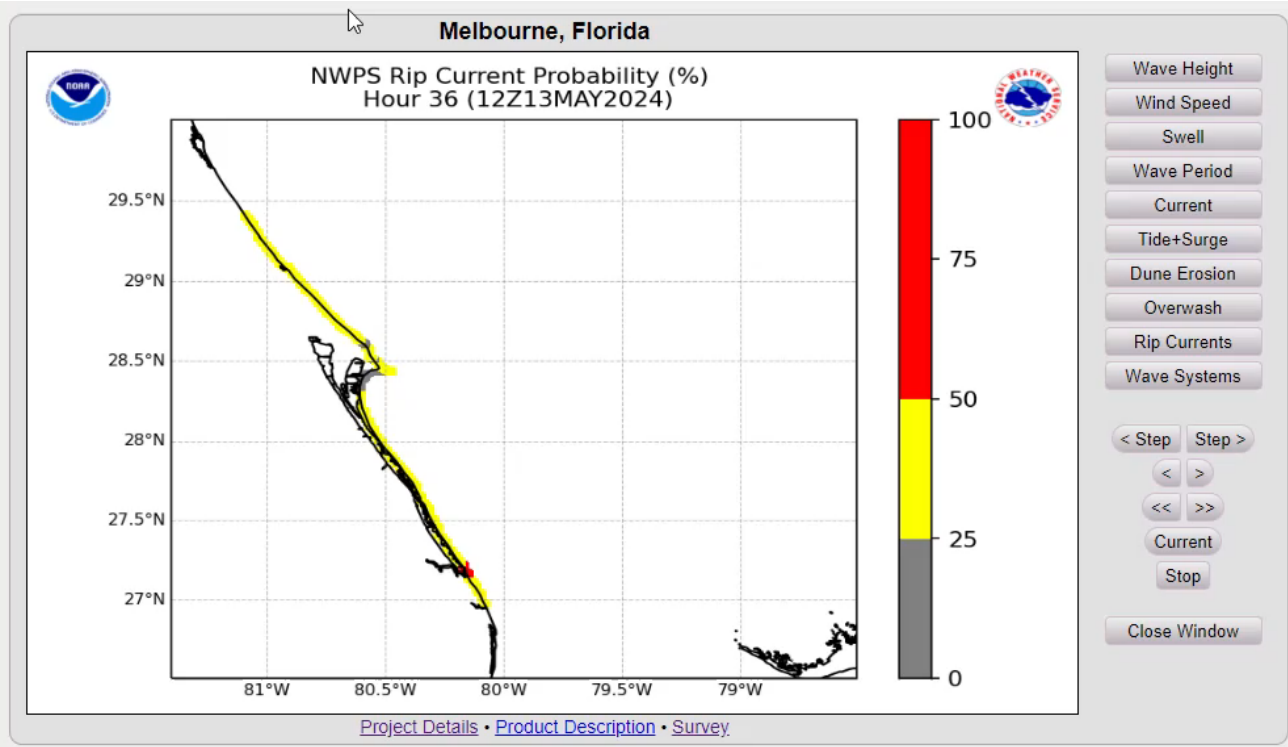
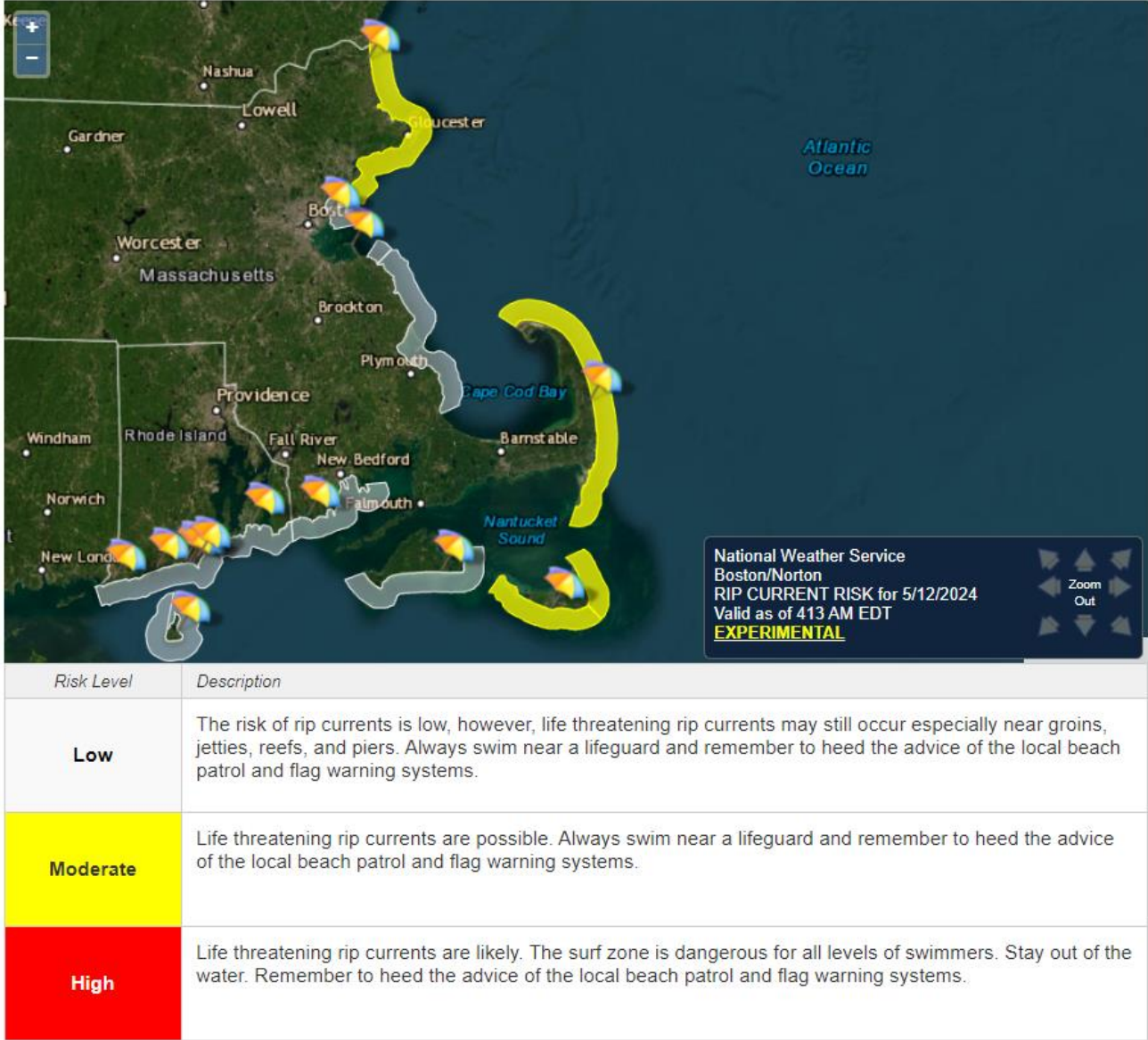


當波浪由外海傳入近岸產生淺化與折射，在波浪破碎後產生的**輻射應力**會將海水推向岸邊，由於受到海底地形的影響，波浪碎波能量強度分布不均，造成近岸各位置水位抬升程度有所差異。為了維持水量平衡，堆積在岸邊的海水會沿水位較低的路徑集中流回外海，這就是「裂流」發生的過程。

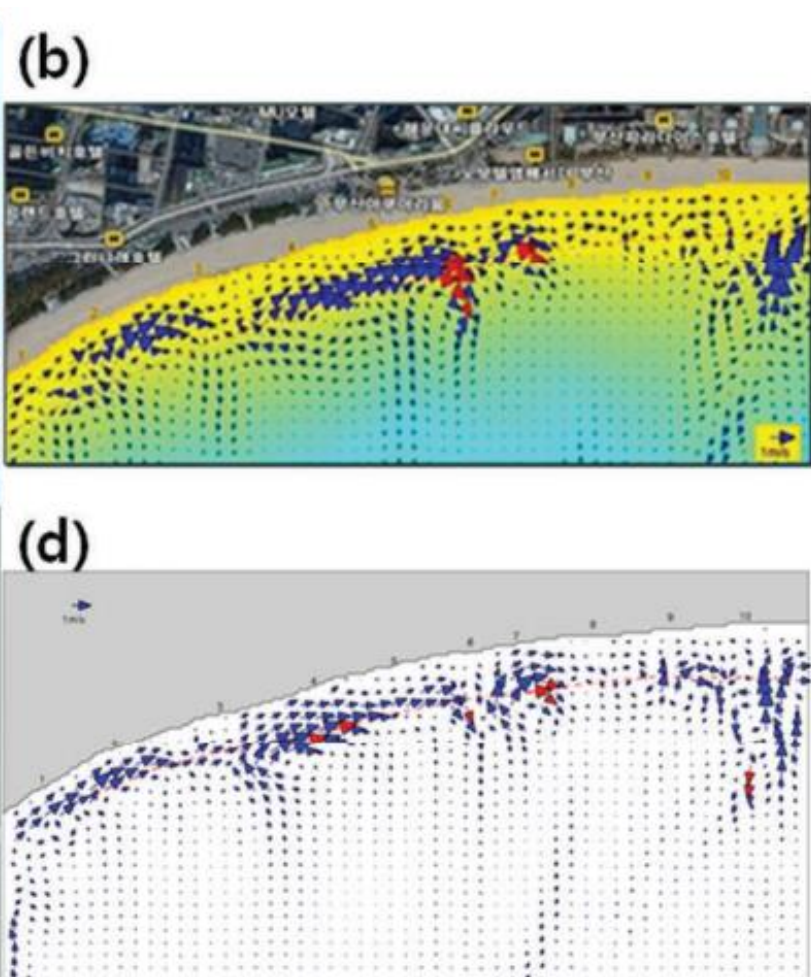
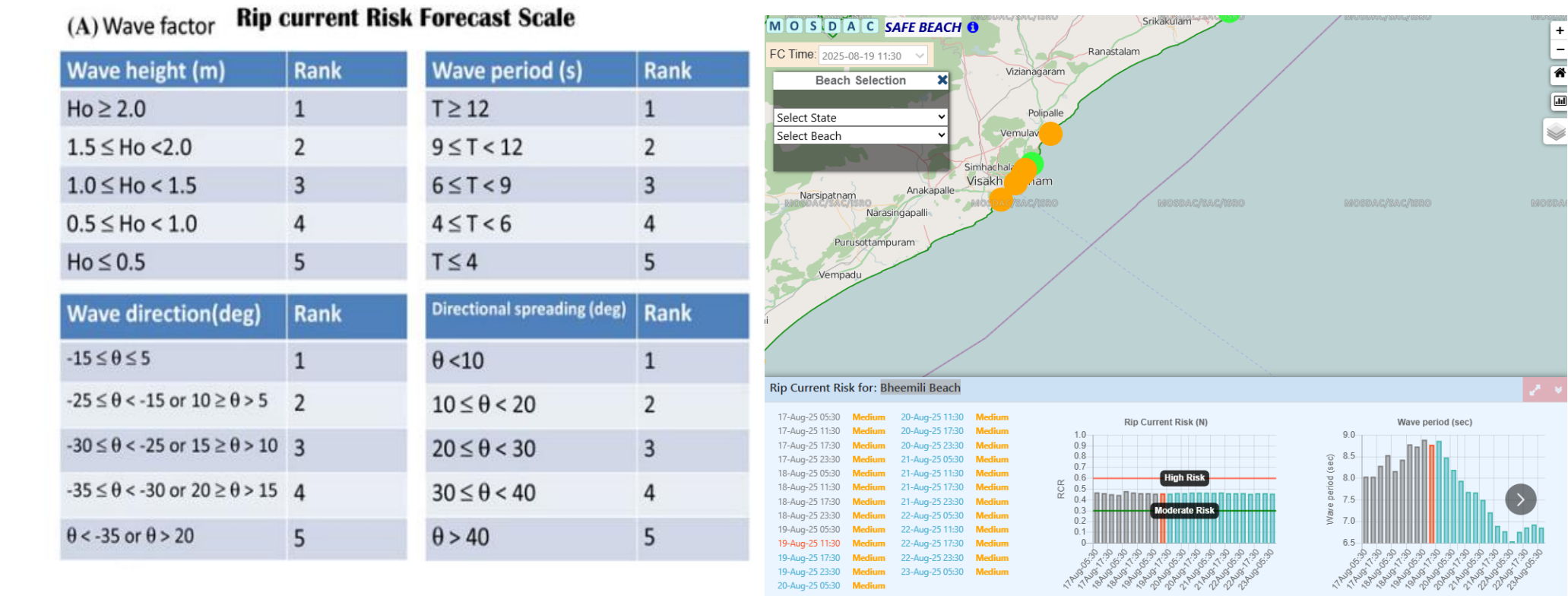
裂流的危害性

- 海域遊憩活動均潛藏風險，據文獻統計，「裂流」是發生海域意外事件的原因之一 (NWS, 2017; Brighton et al., 2013; Arun Kumar and Prasad, 2014; Arozarena et al., 2015; Kim et al., 2011)。
- 臺灣亦是容易受到裂流肆虐的國家，許多熱門的遊憩景點均曾有傳出過裂流意外事件發生紀錄，如漁光島海灘、貢寮海灘以及外澳海灘 (郭等人，2011；林等人，2007、2009；蕭等人，2014)。
- 裂流的流速約為0.3-0.7 m/s，甚至可以達到2.0 m/s (Short and Hogan, 1994)，已經遠超過於成人的平均泳速(0.2 m/s)；由於裂流不易透過肉眼辨識，使得當人們意識到裂流的發生，往往以身陷於其中，導致意外事件的發生 (Huntley et al., 1988)。
- 當今許多國家亦開始注意海岸裂流所造成的危險性，著手開發預警系統，甚至已經作業化的進行預報和警示，提供海岸邊從事活動的相關人員裂流災害警訊 (Eom et al., 2014； Dusek and Seim, 2013； Sharma et al., 2023)。

美國NOAA裂流預報模式
(NOAA National Rip Current Forecast Model)



印度裂流預報模式(MOSDAC Safe Beach System)



Chapter II

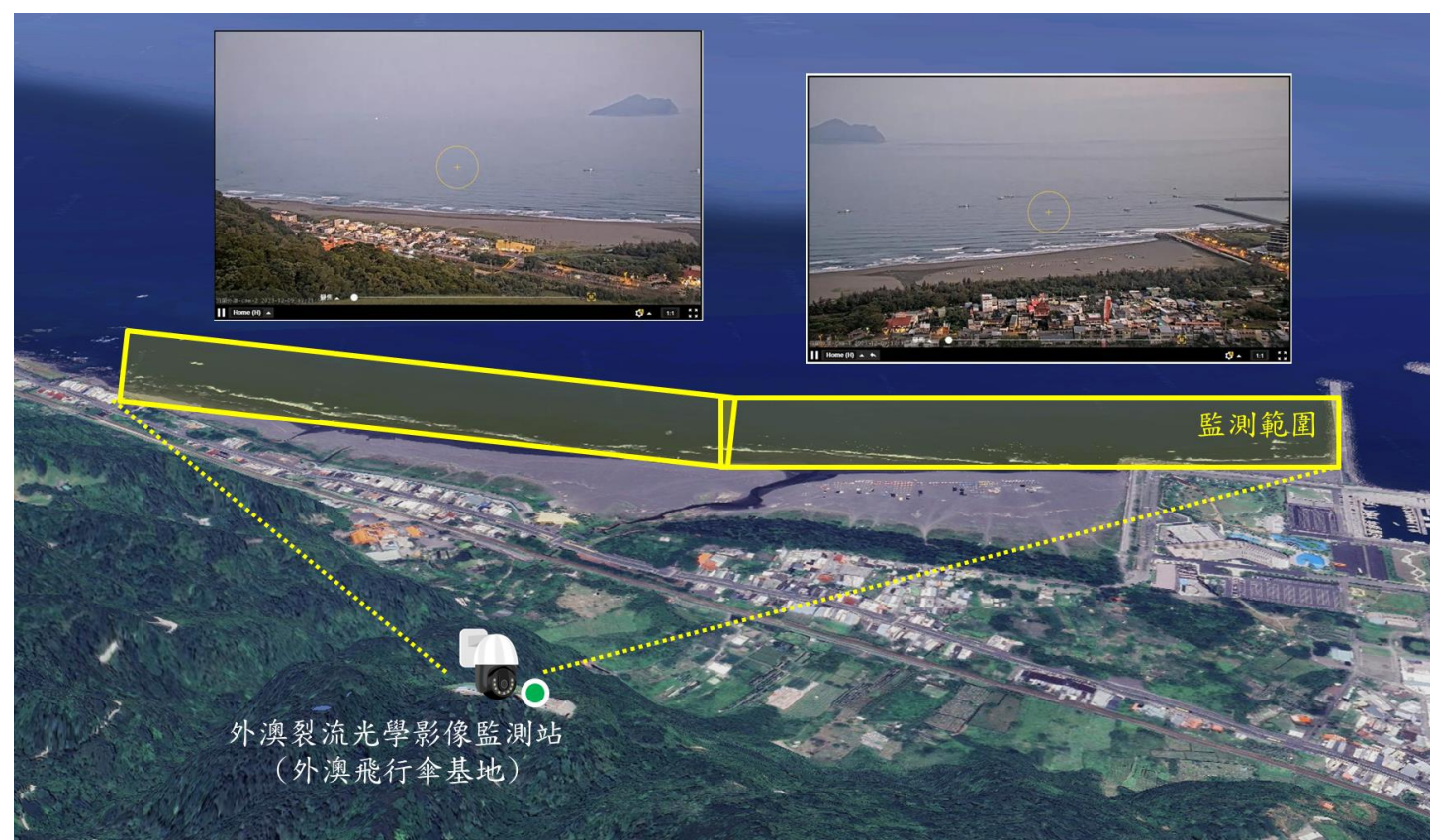
前期研究成果

- 裂流遙測技術發展
- 臺灣近岸海域裂流潛勢評估
- 裂流數值模式模擬



裂流光學遙測技術

- 觀測設備：AXIS Q6135-LE PTZ network camera
- 地點：宜蘭縣外澳海灘



裂流影像定義：

- 碎波帶有明顯斷裂處
- 有向外海延伸之浪花或懸浮物
- 碎波帶斷裂處間隔須超過40 m
- 裂流發生的位置會重複發生
- 上述情形至少持續10分鐘以上



Longuet-Higgins and Stewart (1964); Dalrymple et al., (2011); Cook (1970); Brander and Short (2000)

影像辨識方法：小波邊緣偵測 & Yolo AI 影像辨識模型

YOLO AI外澳裂流辨識模型驗證結果

$$g(x, y) = \sum_{i=-\frac{m}{2}}^{\frac{m}{2}} \sum_{j=-\frac{m}{2}}^{\frac{m}{2}} f(x+i, y+j) * h(i, j)$$

f : Monitoring Image
 h : Rip Current Mask

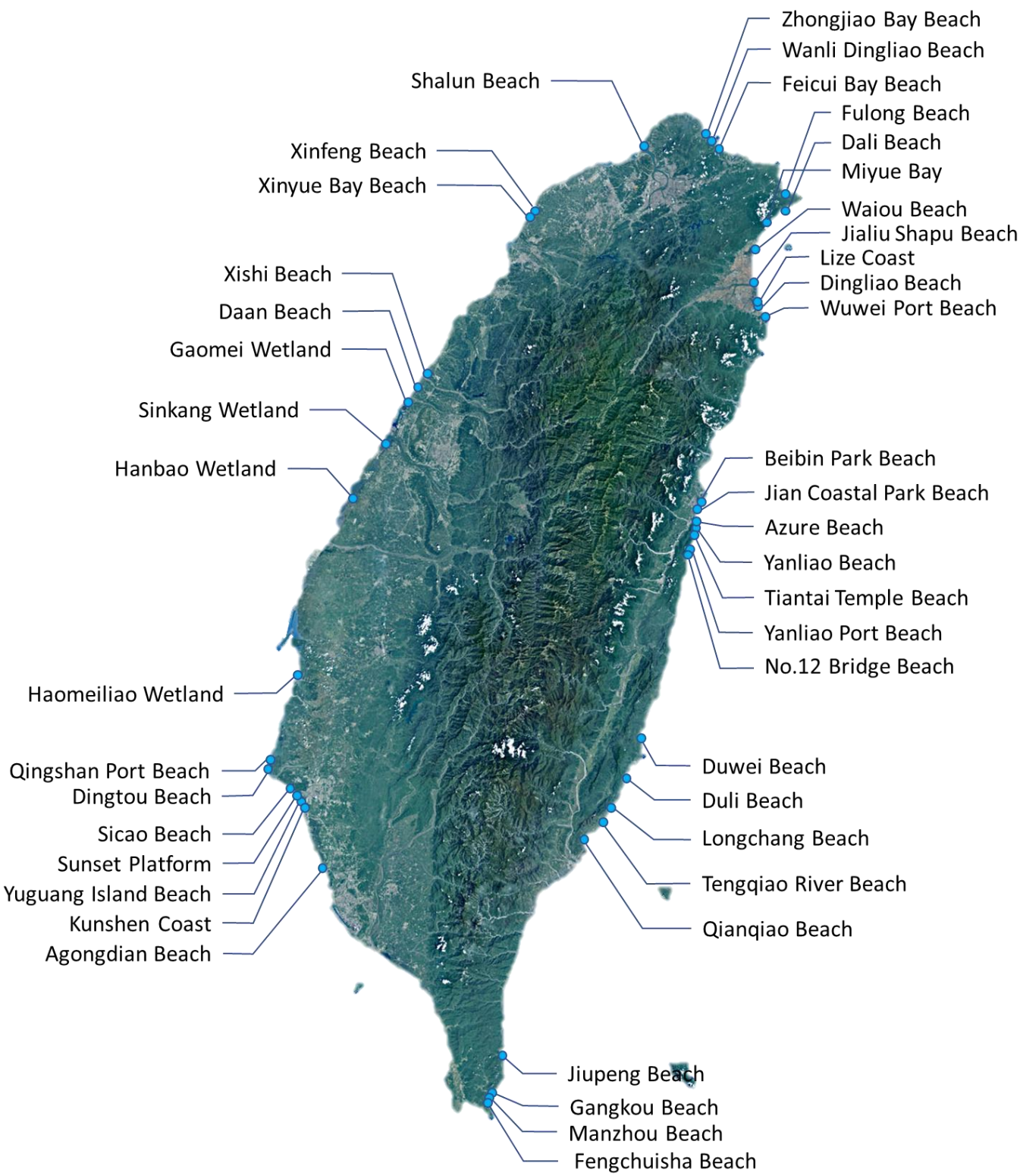
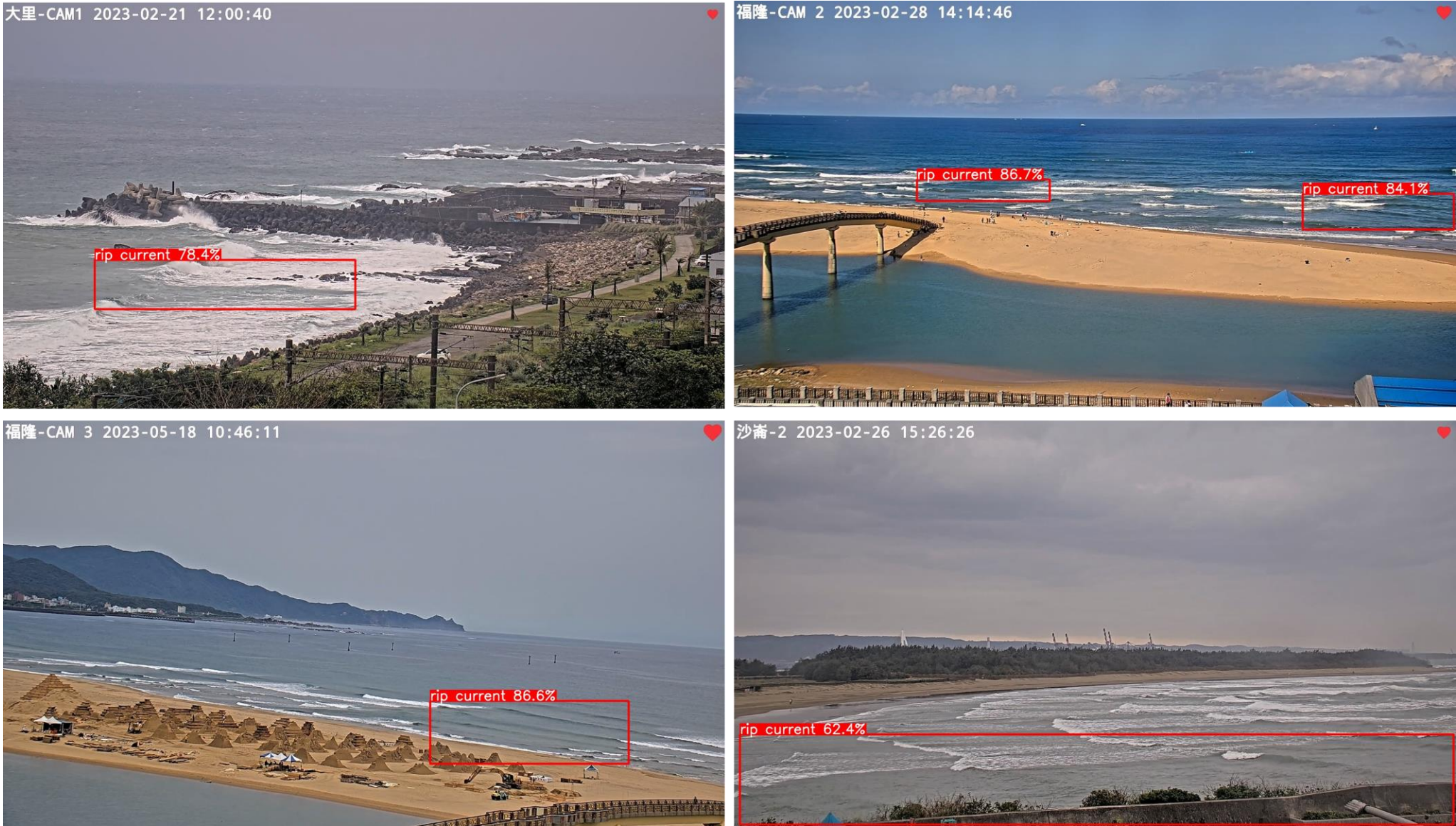
前期影像案例不多時，採用傳統影像處理；在將結果提供給AI模型進行訓練，提升影像辨識效率。

訓練結果	正確率	81.9%	
	命中率	74.7%	
	誤報率	12.7%	
混淆矩陣		實際案例(人工辨識)	
		Positive	Negative
驗證結果 (非模型資料集內的資料)	Positive	75	103
	Negative	47	331
	正確率	80.2%	
	命中率	72.8%	
	誤報率	14.6%	



透過光學影像觀測之裂流案例，提供後續預測模式校驗使用。

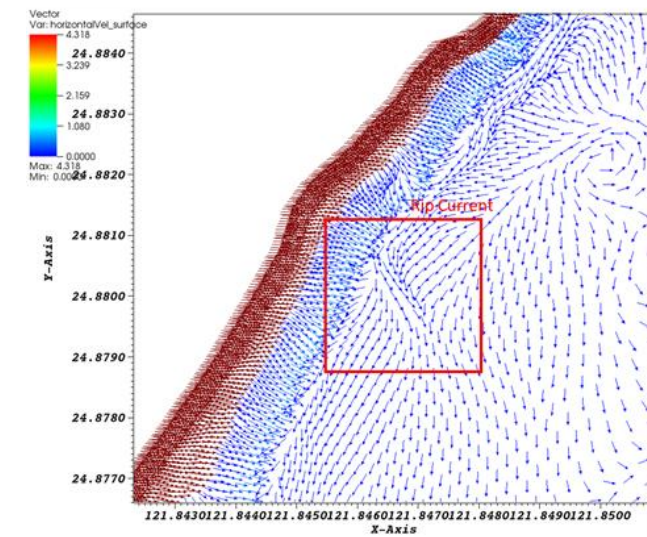
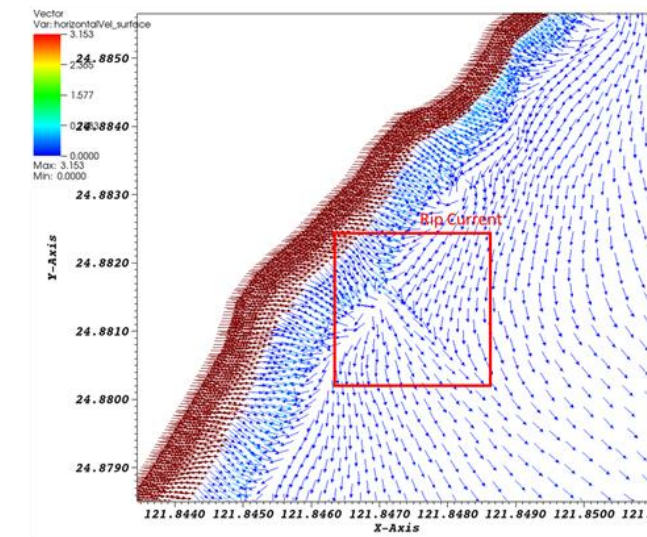
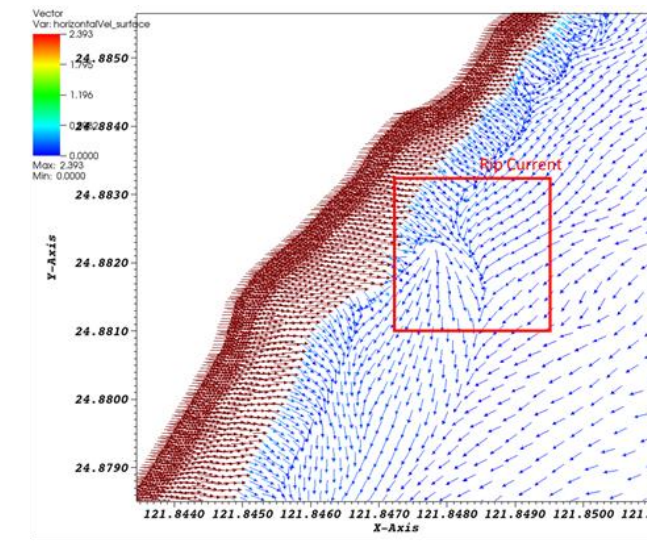
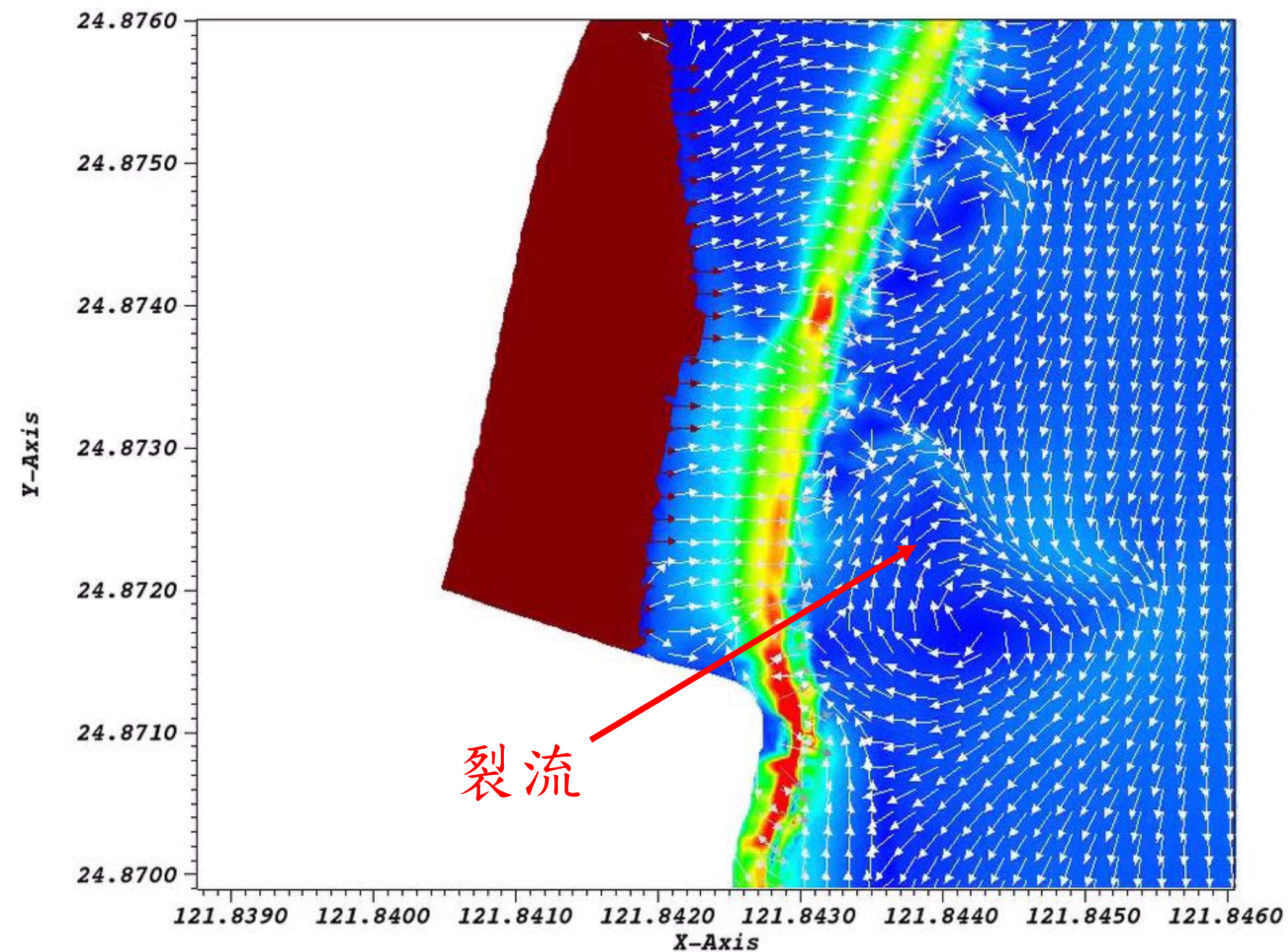
本研究過去透過分析103年至107年全臺海岸衛星影像，彙整出**47處**裂流高潛勢發生區域。同時，也分析外澳、大里、福隆、沙崙四處海灘，共計在2021年至2024年間蒐集**872起**裂流案例，累計發生3,850小時。



中央氣象署(2025)「海岸裂流監測與作業化預警試用研究」海岸邊裂流光學影像分析結果

裂流數值模擬模式

本研究透過SCHISM水動力模式耦合WWM第三代風浪模式，建立一個可以描述近岸裂流現象的數值模式環境。



數值模擬與現場裂流發生位置比對結果

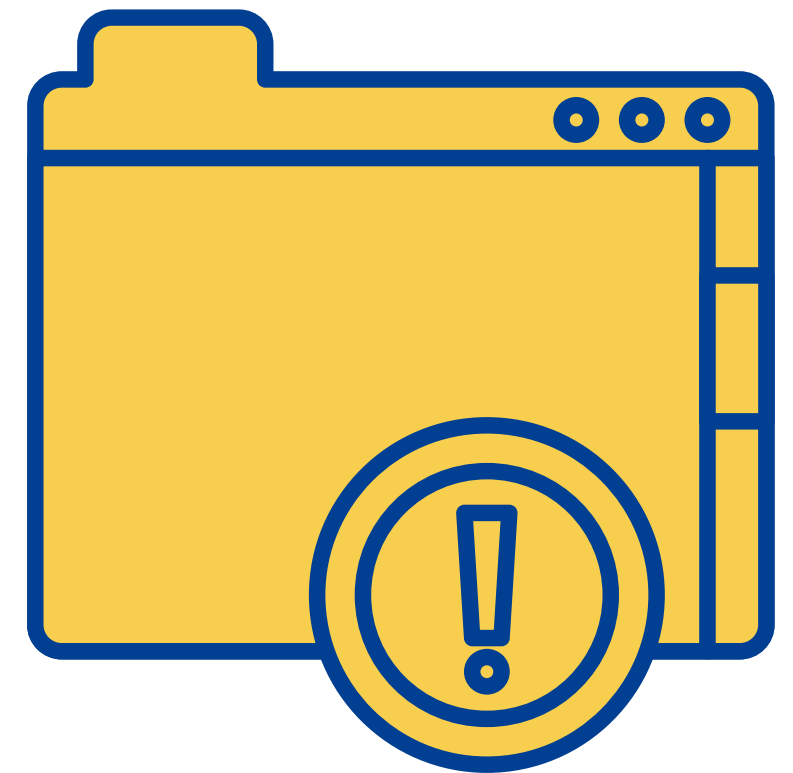
目的

為能有效的降低裂流災害對海岸邊所造成的風險。本研究將接續前期計畫研究成果，利用數值模式建立裂流預測方法，並將其應用於作業化預警系統。

Chapter IV

裂流預測方法與理論

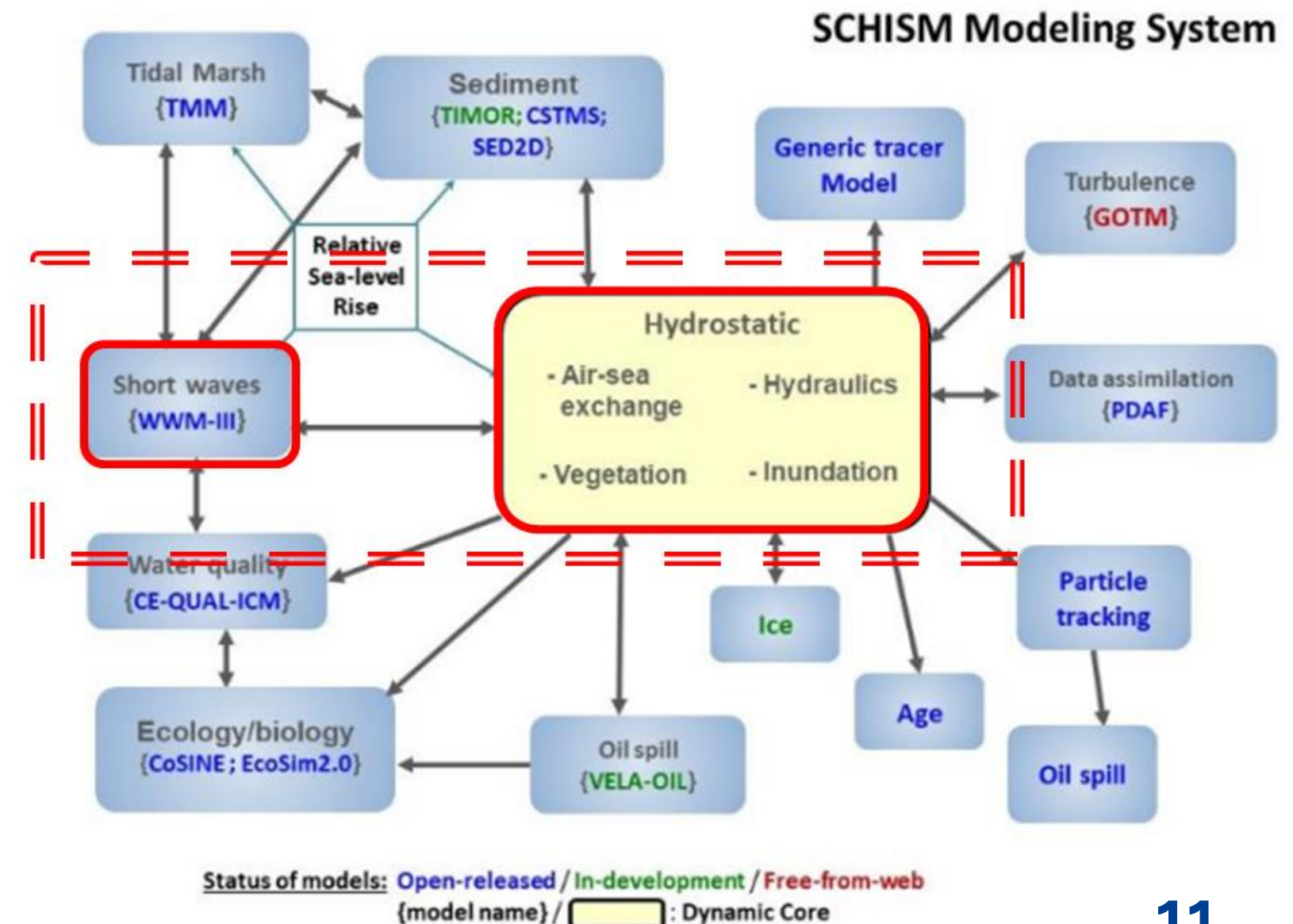
- SCHISM-WWM 理論
- 模式建置



SCHISM-WWM 水動力理論

若要以數值模式描述現場裂流的現象，該模式須能夠進行良好的波流耦合。故本研究採用由VIMS所開發的SCHISM三維跨尺度數值模式建置預測模型。

- SCHISM 是一套三維跨尺度的海洋數值模式，可更好的求解地形變化對於海洋流力與物理現象之變化。
- 可與WWM風浪模式進行完全耦合，進而描述波流交互作用對於近岸水動力的影響。
- 半隱式的數值求解方法，可以忽略CFL的條件，提高模式運行的效率。
- 可考慮許多可能對於近岸沿岸流影響的因素，包含風、波、潮、流、溫、鹽度。



- 控制方程式是在靜水壓 (Hydrostatic approximation)、包式近似 (Boussinesq approximation) 的假設下，求解三維淺水波方程 (3D-Navier-Stokes equations)。

- Momentum equations

$$\alpha g \nabla \Psi = -\nabla \cdot \mathbf{S} = -\left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y}, \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right)$$

$$\frac{Du}{dt} = \boxed{f - g \nabla \eta + m_z} - \underbrace{\alpha |u| u L(x, y, z)}_{\text{Vegetation effects}}$$

Where $\mathbf{f} = \underbrace{f(v, -u)}_{\text{① Coriolis force}} - \underbrace{\frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \nabla \rho d\zeta}_{\text{② Baroclinic term}} - \underbrace{\frac{\nabla p_A}{\rho_0}}_{\text{③ atmospheric pressure gradient}} + \underbrace{\alpha g \nabla \Psi}_{\text{④ Radiation stress gradient}} + \underbrace{\mathbf{F}_m}_{\text{⑤ Friction \& other force}}$

- Continuity equation

$$\nabla \cdot \mathbf{u} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (\mathbf{u} = (u, v))$$

(Solve the water level by depth integration)

$$\Rightarrow \frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot \int_{-h}^\eta \mathbf{u} dz = 0$$

Mass conservation of the water column for free surface simulations (e.g., tides and water level variations)

- WWM風浪模式是透過求解波譜波浪作用力方程式，進而描述波浪成長和消散的影響。

- Wave Action Balance Equation (WAE)

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \nabla_x \left(\dot{X} N \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\dot{\sigma} N \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\dot{\theta} N \right) = S_{tot}$$

frequency direction

$$\text{Where } N_{(t, X, \sigma, \theta)} = \frac{E_{(t, X, \sigma, \theta)}}{\sigma} \quad \text{when wave coupled current}$$

- Source term (S_{total})

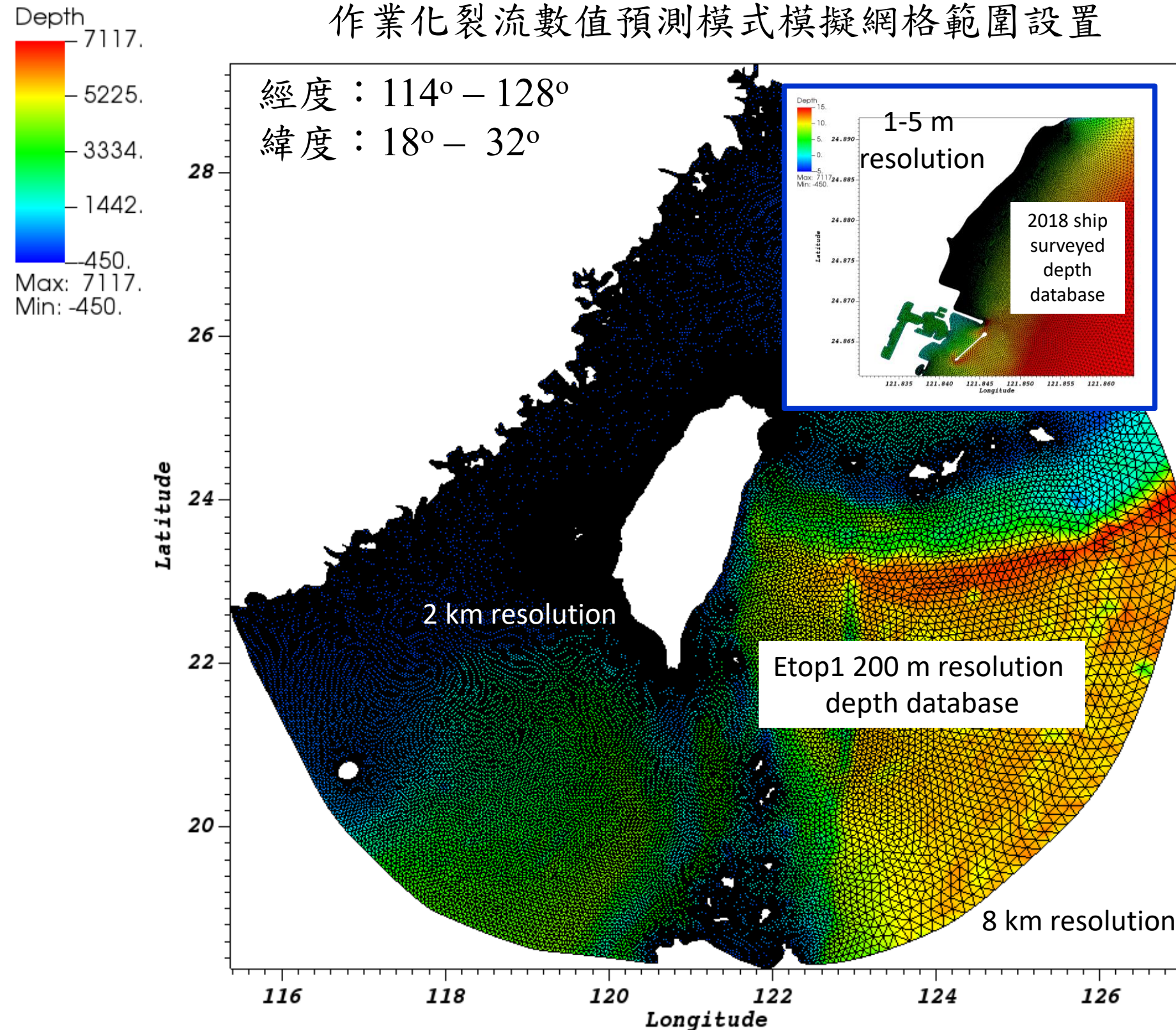
$$\frac{DN}{Dt} = S_{tot} = \underbrace{S_{in}}_{\text{Wind effect}} + \underbrace{S_{nl4}}_{\text{Nonlinear interaction in deep and shallow water}} + \underbrace{S_{ds}}_{\text{Whitecapping and wave breaking}} + \underbrace{S_{nl3}}_{\text{Nonlinear interaction in deep and shallow water}} + \underbrace{S_{br}}_{\text{Bottom friction}} + \underbrace{S_{bf}}_{\text{Bottom friction}}$$

- Numerical Formulation method (Fractional step method)

$$\begin{cases} \frac{N^{n+1/3} - N^n}{\Delta t} + \frac{\partial}{\partial \sigma} (C_\sigma N) = 0 \\ \frac{N^{n+2/3} - N^{n+1/3}}{\Delta t} + \frac{\partial}{\partial \theta} (C_\theta N) = 0 \\ \frac{N^{n+1} - N^{n+2/3}}{\Delta t} + \frac{\partial}{\partial x} (C_x N) + \frac{\partial}{\partial y} (C_y N) = S_{tot} \end{cases}$$

網格建置

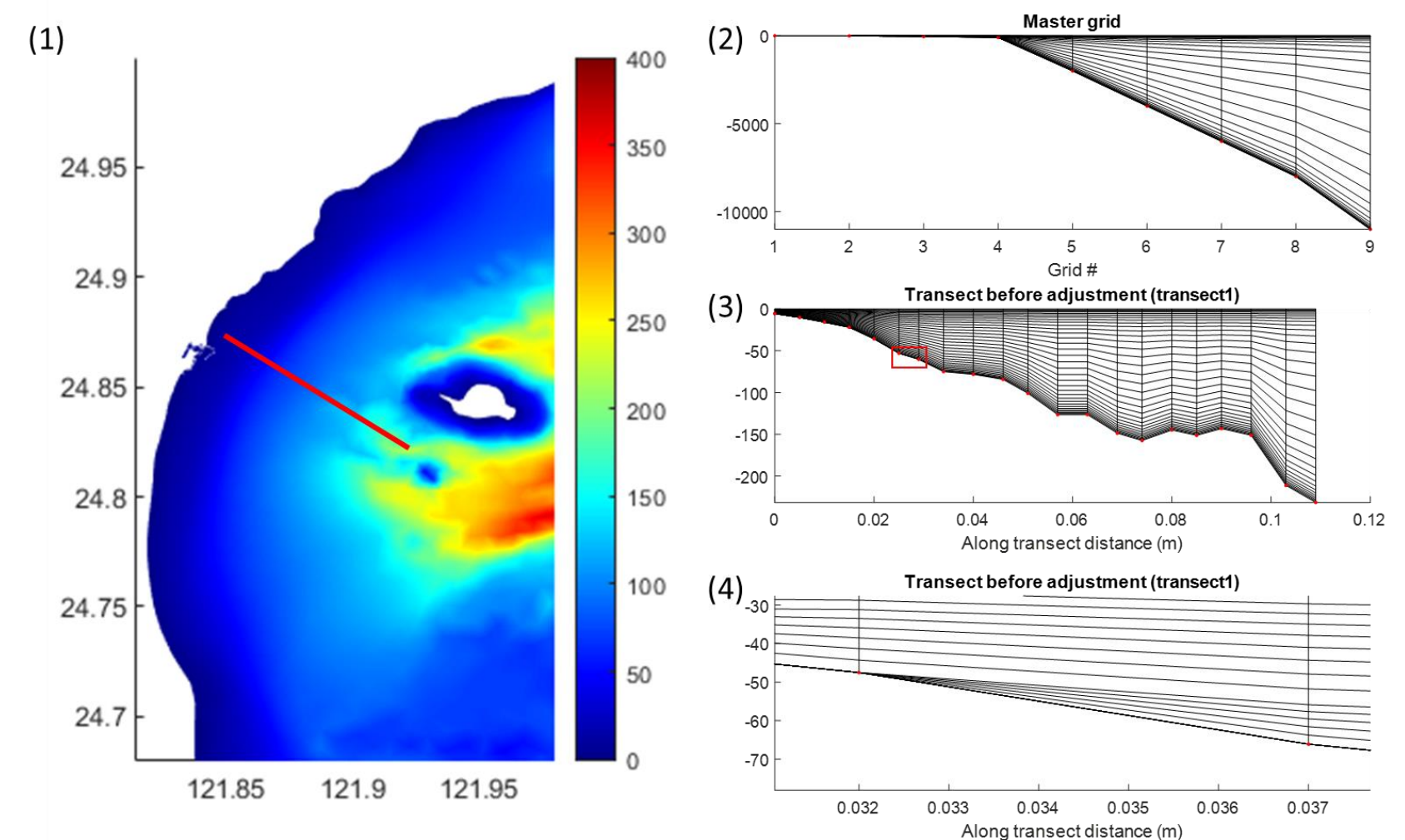
作業化裂流數值預測模式模擬網格範圍設置



comprises 237,653 元素網格 and 123,655 節點

SCHISM-WWM為完全耦合模式，可共用相同的計算網格。

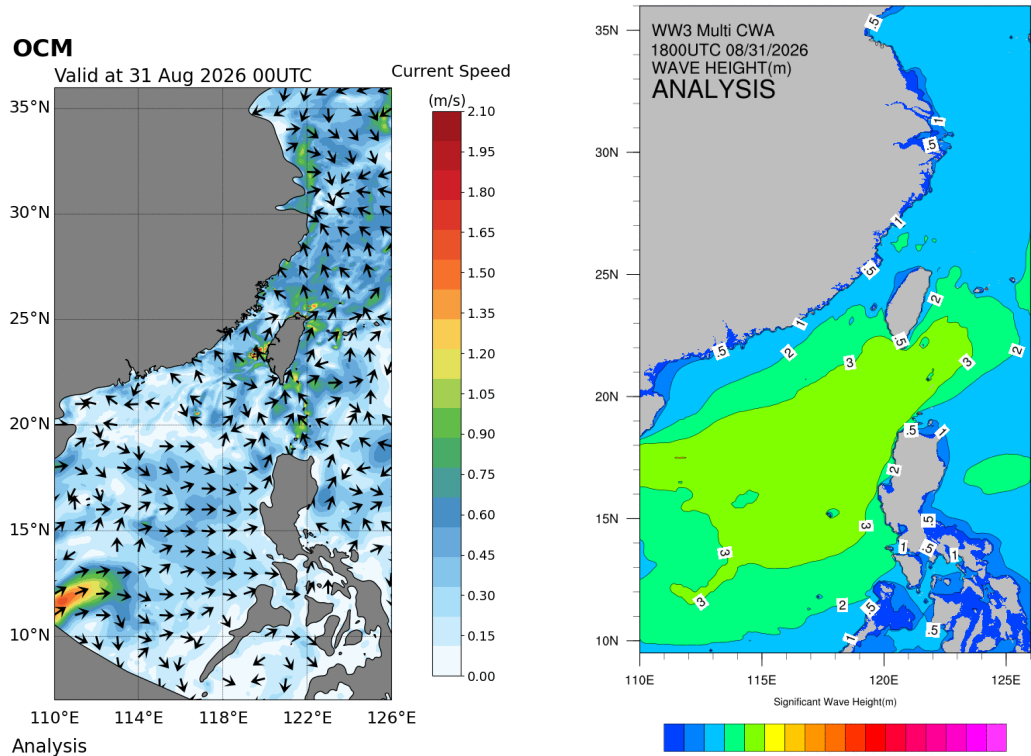
本研究採用**巢狀非結構網格**，在兼顧運算效率的同時，提高研究區域的空間解析度；此外，透過**垂直分層設定(LCS²)**，可進一步解析三維水動力過程。



Using a Schematic diagram of the LCS² vertical grid configuration. (1) Bathymetry near Waiou Beach; (2) Vertical grid distribution across different depth layers; (3) Vertical grid structure along the cross-section line shown in Fig. (1); (4) In areas with steep bottom slopes, adjacent elements are connected via nodal alignment.

作業化資料來源 & 參數設置

- 邊界 & 初始條件：
 - 水動力條件：水位、流速、流向、溫度和鹽度。
 - 波浪條件：示性波高、尖峰週期、平均週期、波向、方向分不參數。
 - 大氣條件：風速、風向、氣壓、氣溫、降雨量、比濕度、長/短波輻射。
- 本研究測試5種不同的設定(含time step、波流耦合頻率、輸入資料頻率、back track、tvd傳輸time step)，以找到最佳**效能和準確率**(以水位驗證進行評估)。



本研究作業化採用的輸入資料，來自氣象署作業化預報模式的輸出(OCM海流模式、WWIII波浪模式、WRF大氣模式)

模式設置對於模式運算效能與正確率評估

電腦配置	模式設置參數	數值	運算效率 (運算一天的模擬結果需要多少小時的模擬時間)	水位驗證 (NRMSE)
24 核心	水動力時間步長	100 s	4.72	9.4 %
	波流耦合頻率	3 次時間步長		
	邊界條件輸入頻率	3 小時一筆		
	回溯步長最大/小值	3 時間步長 / 9 時間步長		
	傳輸方程運算步長	1/600 倍		
測試一	水動力時間步長	120	4.70	9.4 %
		180	4.42	9.4 %
		300	3.98	9.6 %
測試二	波流耦合頻率	5 次時間步長	3.76	9.7 %
		6 次時間步長	3.02	9.8 %
		8 次時間步長	2.39	13.2 %
		10 次時間步長	2.08	17.3 %
測試三	邊界條件輸入頻率	1 天一筆(參考 SCHISM 手冊)	4.48	9.5 %
測試四	回溯步長最大/小值	2 時間步長 / 5 時間步長	3.39	9.4%
		1 時間步長 / 3 時間步長	模式潰散	
測試五	傳輸方程運算步長	1/500	4.47	9.5 %
		1/400	3.89	9.8 %
		1/300	模式潰散	
效率改善後 模式	水動力時間步長	300	1.27	10.3 %
	波流耦合頻率	6 次時間步長		
	邊界條件輸入頻率	1 天一筆(參考 SCHISM 手冊)		
	回溯步長最大/小值	2 時間步長 / 5 時間步長		
	傳輸方程運算步長	1/400		

模式驗證結果

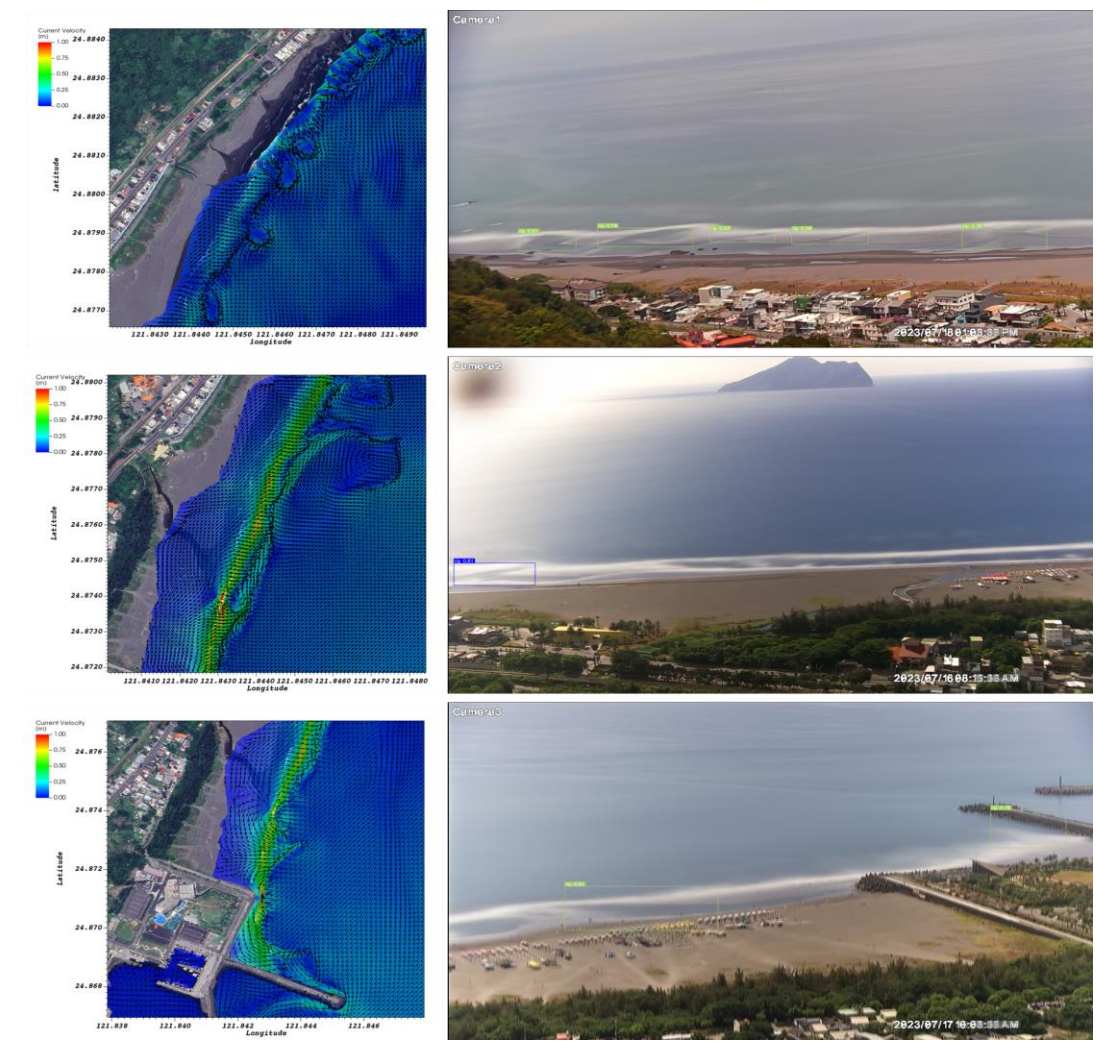
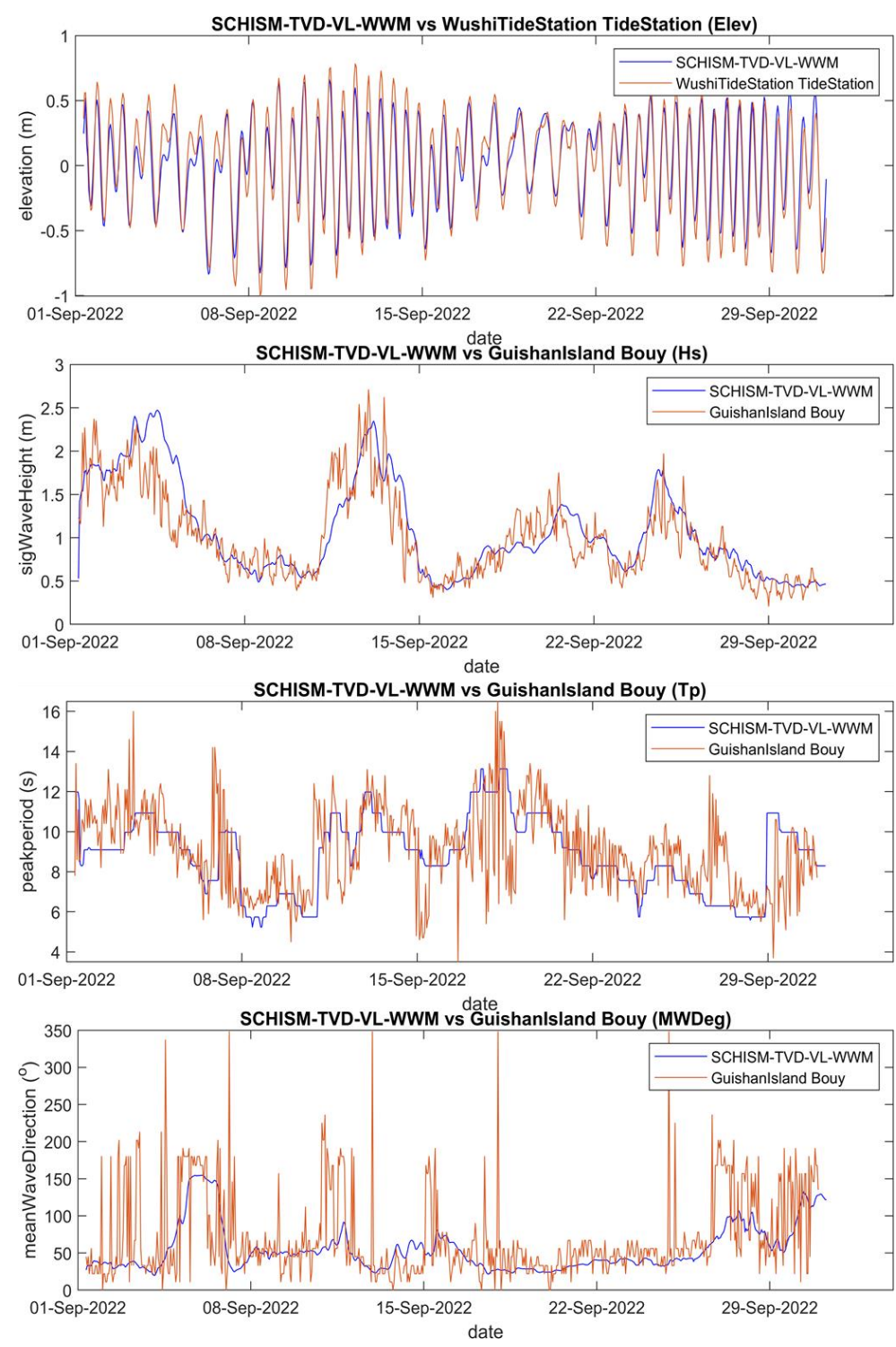
本研究利用外澳海域周遭的”烏石漁港潮位站”和”龜山島浮標站“對SCHISM-WWM波流耦合模式進行驗證。

- 模式在水位、示性波高、尖峰周期和波向的驗證趨勢相當的一致。其無因次均方根誤差(NRMSE)均小於15%。

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}}{y_{max} - y_{min}}$$

- 此外，透過混淆矩陣驗證半年以上的裂流案例，結果顯示正確率可達78.0%、命中率76.6%、誤報率為21.2%。

SCHISM-WWM裂流數值模式模擬與現場觀測站水動力驗證結果
(波浪實測資料：龜山島浮標資料站、水位實測資料：烏石漁港潮位站)



裂流數值模式裂流預測驗證結果
(資料來源：2023/03-2023/08，127筆裂流案例)

混淆矩陣		實際案例(人工辨識)	
		Positive	Negative
模式預測	Positive	82	22
	Negative	25	85
驗證結果	正確率	78.0%	
	命中率	76.6%	
	誤報率	21.2%	
	預兆得分	0.64	

Chapter V

作業化系統架構與測試

- 系統架構與流程
- 作業化運行測試



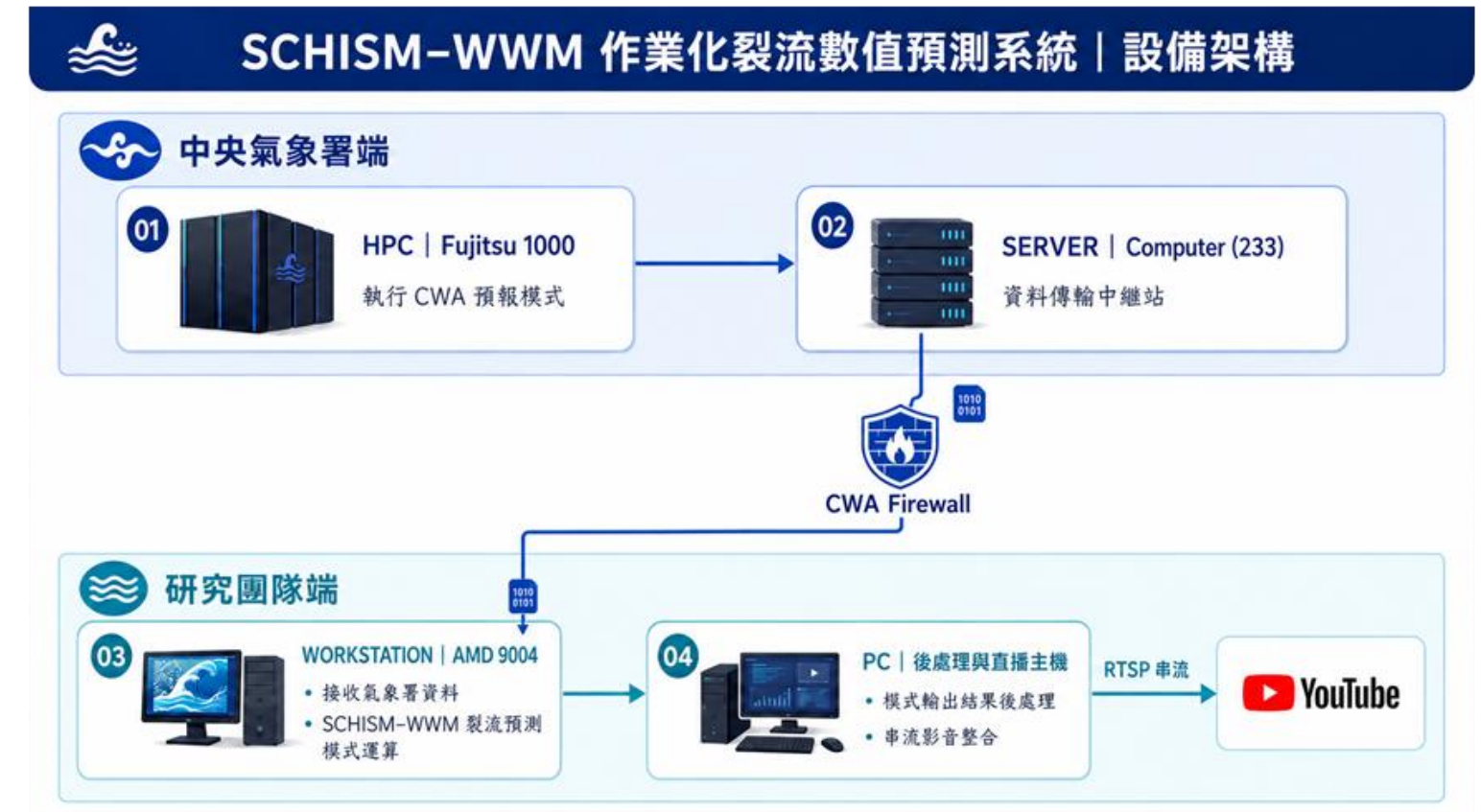
數值預測模式作業化

- 以 SCHISM-WWM 數值模式作為預測系統的主要核心。
- 輸入資料均採用 氣象署作業化模式 最新一報之輸出 (若當報資料缺失，則向前一報取)。
- 作業化運作設備

AMD EPYC 9004 (64 C 2.45GHz)

- 輸出產品：
 - 一天預報一次 (UTC+8 00:00啟動)
 - 運作時長約9小時，UTC+8 2:00前完成更新
 - 預報未來明後兩天逐時裂流發生情形
 - 近岸流場空間分布圖

SCHISM-WWM 作業化裂流數值預報系統架構

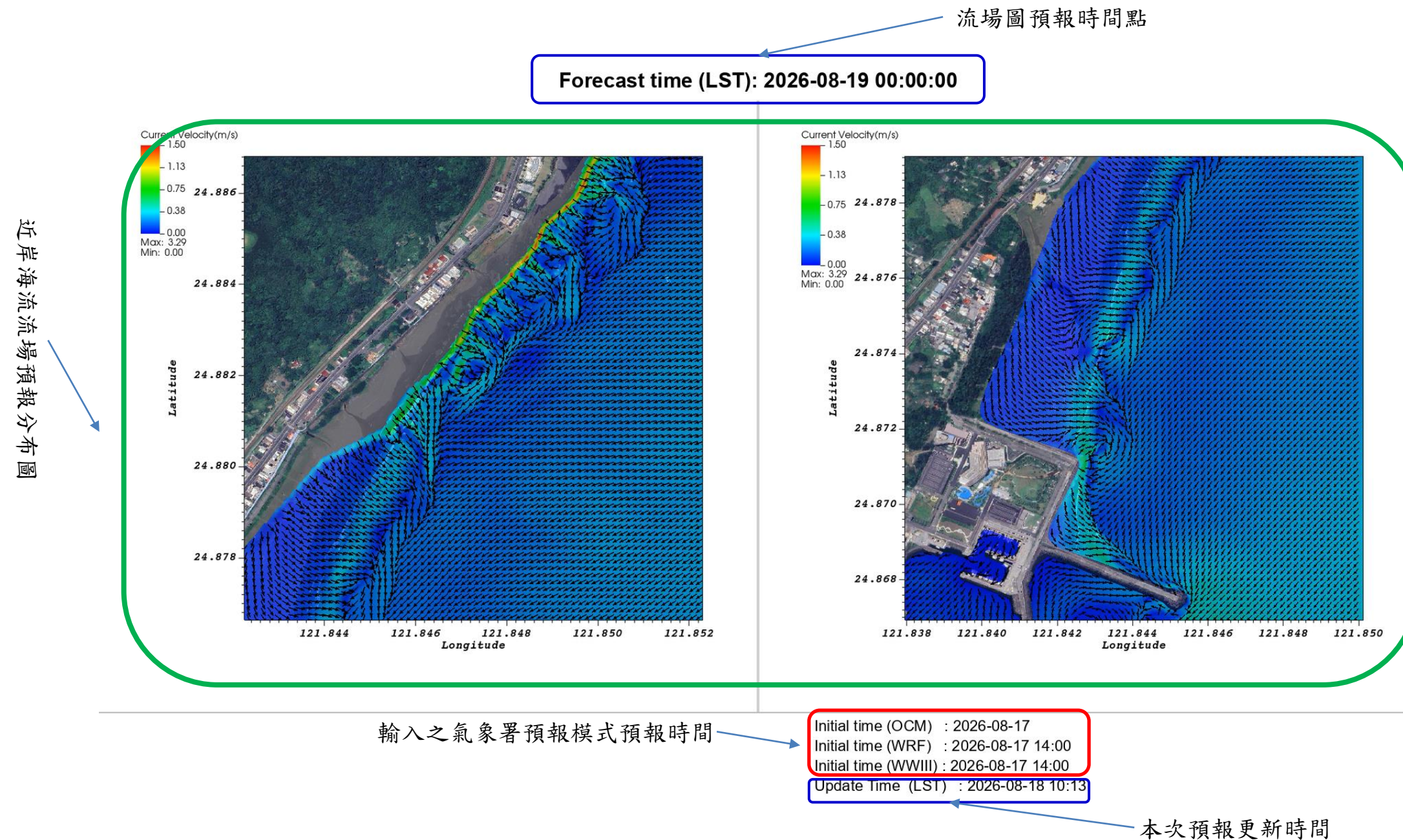


SCHISM-WWM 作業化裂流數值預報系統流程圖



作業化裂流數值預測系統產品

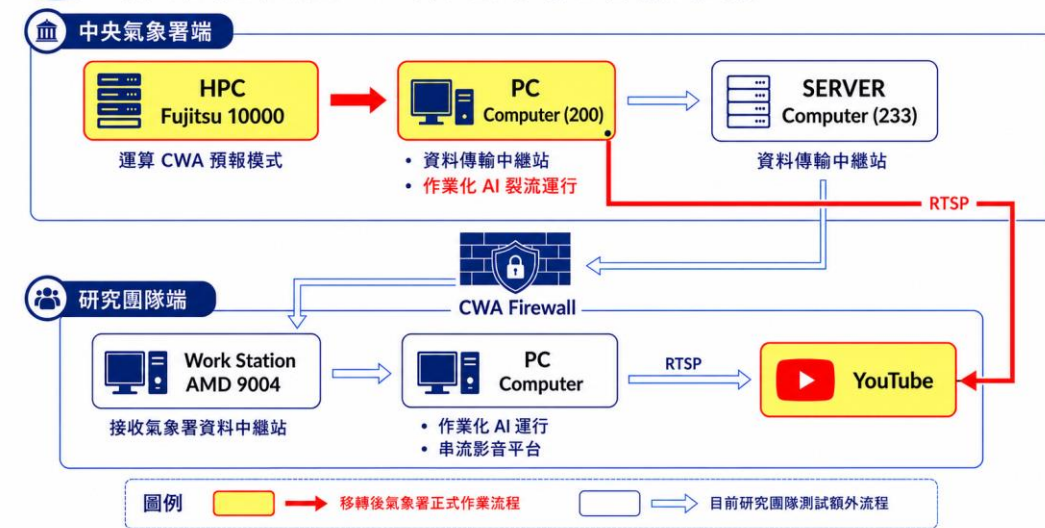
本研究已於2026/07/01開始作業化運行裂流預測系統，截至2026/09/01運行成功率達95.16%；
且與監測站觀測結果比對，準確率較校驗時提高7-8%，可達85.26%的準確率。



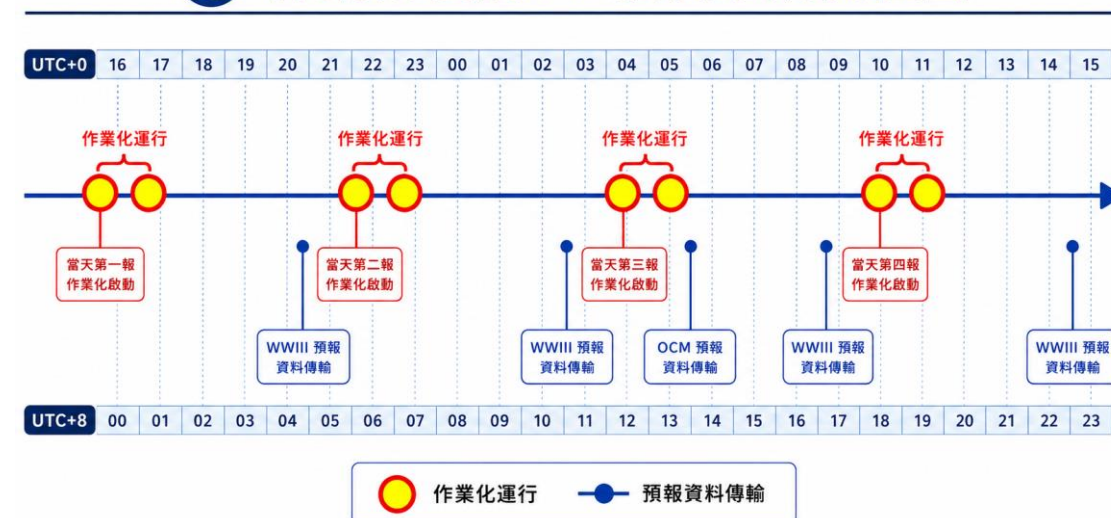
作業化裂流預測備援系統

考量到數值模式在極端海氣象條件，或是不可空因素下可能會有發散的情形，導致預報無法成功執行。本研究建立以 **LSTM AI (長短時記憶網路) 的經驗統計模型**，來做為系統的備源，以確保作業化裂流預測系統均可順利進行。

作業化裂流 AI 預測系統設備架構



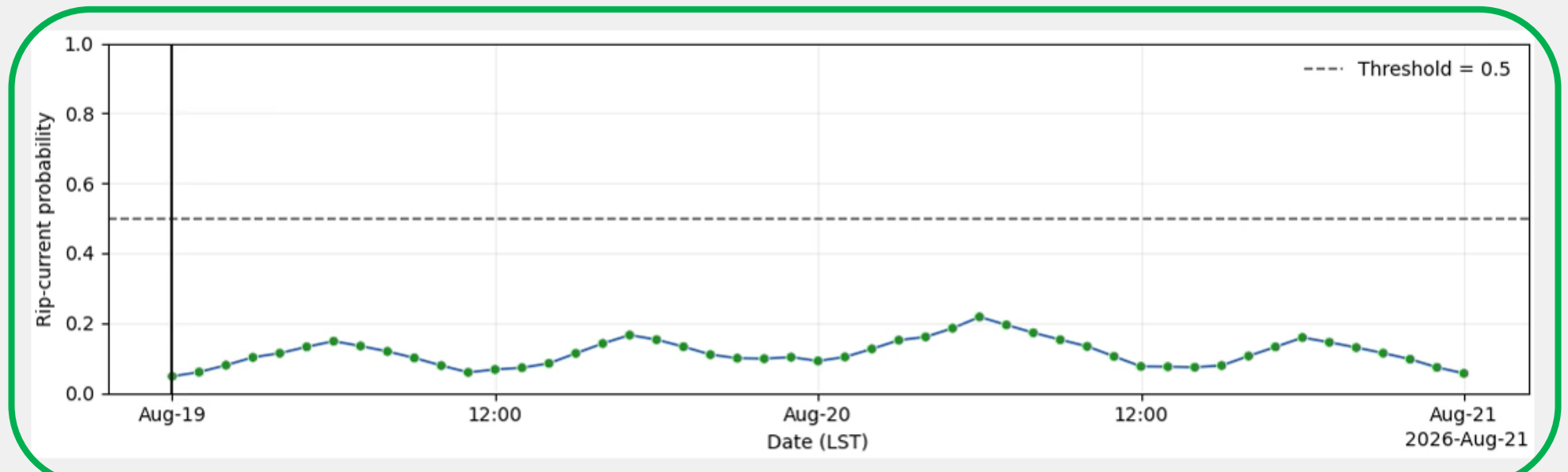
作業化裂流 AI 預測系統流程圖



LSTM Rip Current Probability Prediction System

Initial Time OCM (LST): 2026/08/17 08:00
Initial Time WWIII (LST): 2026/08/17 20:00
Update Time (LST): 2026/08/18 12:01

輸入之氣象署預報模式預報時間
本次預報更新時間



裂流預報時間點

Forecast Time (LST): 2026/08/19 00:00

Rip Current No Rip Current

預報時間點裂流是否發生

Run Restart

預測完成；正在輸出 49 張 GUI 影像...

系統啟動、重啟手動操作部分

<https://www.youtube.com/live/NR4MjVQizbo>

Chapter VI

結論

- 本研究採用 SCHISM-WWM 完全耦合模式，結合高解析度非結構網格與垂直分層，模擬近岸波流交互作用及裂流空間分布。
- 水位與波浪參數之無因次均方根誤差（NRMSE）均小於 15%；經 127 筆裂流案例驗證，預測正確率達 78.0%、命中率為 76.6%，誤報率為 21.2%。
- 整合氣象署海流、波浪及大氣預報資料，建立每日更新之作業流程，提供未來兩天逐時裂流預報與近岸流場分布，作為海灘安全管理之參考。
- 系統自 2026 年 7 月 1 日運行至 9 月 1 日，運行成功率達 95.16%；與監測站觀測結果比對，裂流預測準確率達 85.26%，顯示系統具實務應用潛力。
- 建立 LSTM 裂流預測模型作為數值模式之備援，提供未來 48 小時裂流發生機率，以降低數值模式異常造成預報中斷的風險。

3 Sep, 2026

Thank you for listening

王敍民¹

潘琦²

陳琬婷²

蔡政翰³

董東璟¹

¹國立成功大學

水利及海洋工程學系

²交通部中央氣象署

海象氣候組

³國立臺灣海洋大學

海洋環境資訊系

Department of Hydraulic and Ocean Engineering,
National Cheng Kung University

