114年天氣分析與預報研討會
2025 Conference on Weather Analysis and Forecasting

4 Sep, 2025

Author

王敍民[1]
林芳如[2]
潘琦[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

以SCHISM-WWM建置裂流預測模式之評析

An Evaluation of Operational Rip Current Forecasting Model Developed with SCHISM-WWM

Department of Hydraulic and Ocean Engineering,
National Cheng Kung University

Table of Contents

		Page
I	Background & Motivation	1
II	Previous Research	10
III	Objective	13
IV	Rip Current Numerical Model Development	31
V	Simulation Verification and Results	46
VI	Conclusion	62

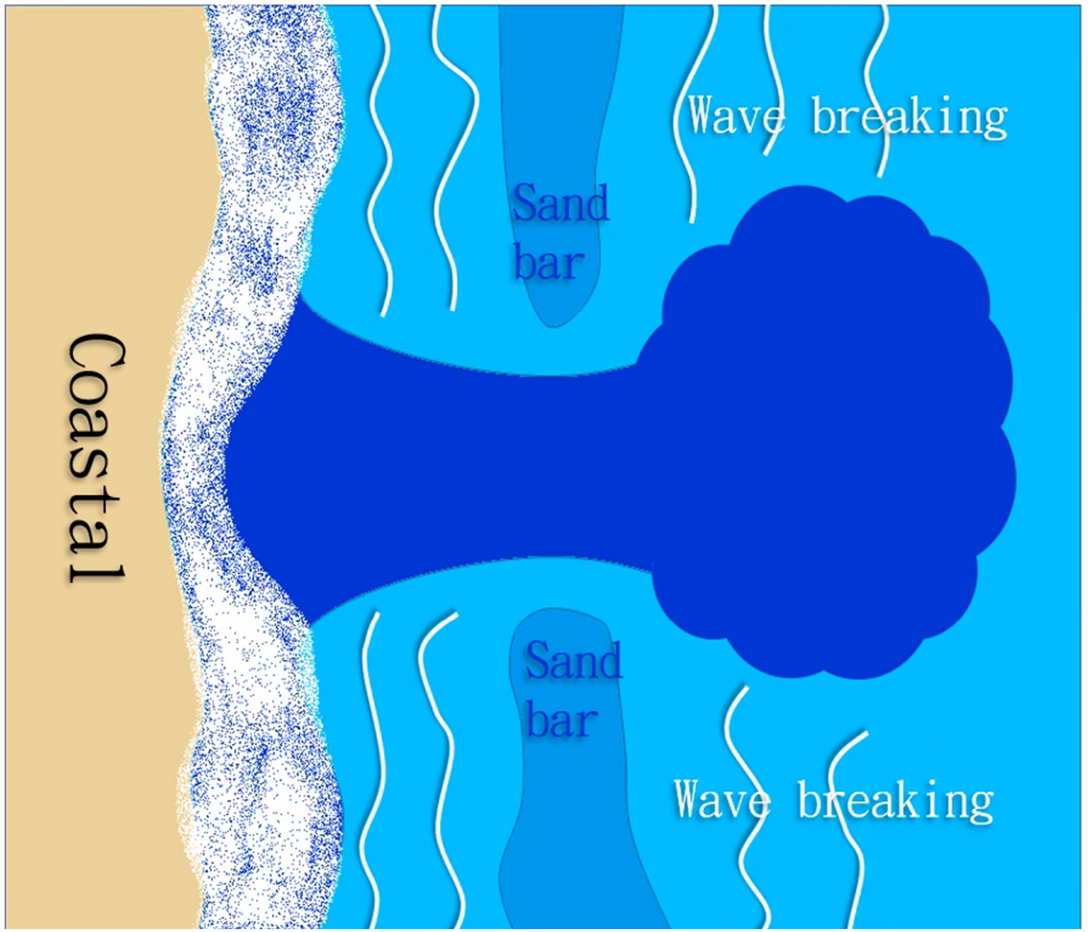
Chapter I

Background & Motivation

- Definition of Rip Currents
- Literature Review

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

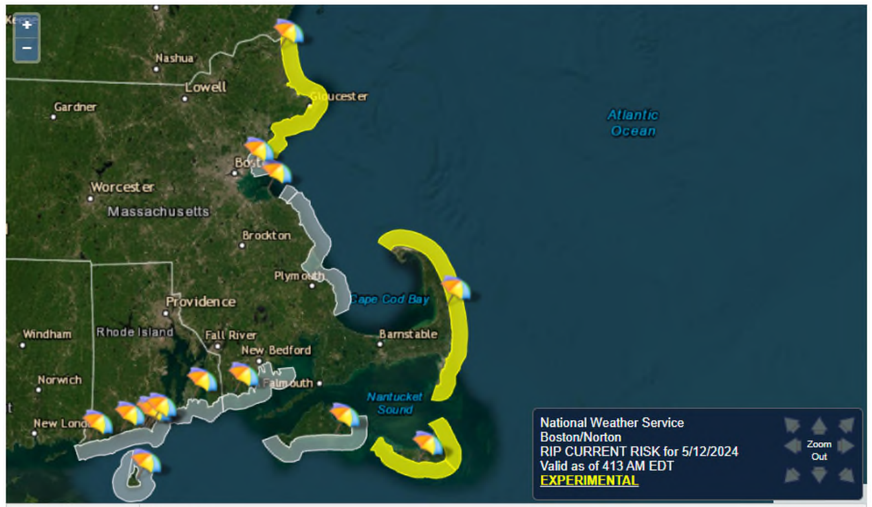


裂流的危害性

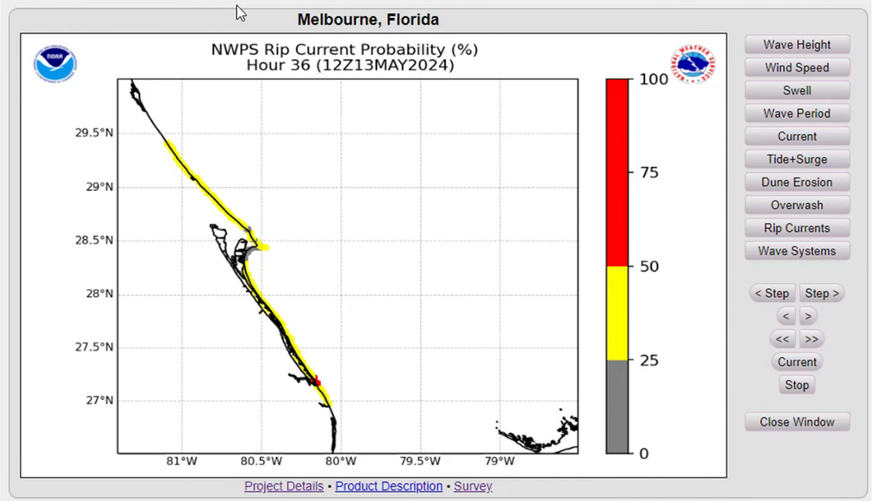
- 海域遊憩活動均潛藏風險，據文獻統計，「裂流」是發生海域意外事件的原因之一.(NWS, 2017; Brighton et al.,2013; Arun Kumar and Prasad, 2014; Arozarena et al., 2015; Kim et al., 2011)
- Lin (2017) 研究成果指出臺灣亦是容易受到裂流肆虐的國家，許多熱門的遊憩景點均曾有傳出過裂流意外事件發生紀錄，如漁光島海灘、貢寮海灘以及外澳海灘。
- 裂流的流速約為0.3-0.7 m/s，甚至可以達到2.0 m/s，已經遠超過於成人的平均泳速(0.2 m/s)；且由於裂流不易透過肉眼辨識，使得當人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; Short and Hogan, 1994).
- 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，提供海岸邊從是活動的相關人員裂流災害警訊。

Literature Review

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



Risk Level	Description
Low	The risk of rip currents is low, however, life threatening rip currents may still occur especially near groins, jetties, reefs, and piers. Always swim near a lifeguard and remember to heed the advice of the local beach patrol and flag warning systems.
Moderate	Life threatening rip currents are possible. Always swim near a lifeguard and remember to heed the advice of the local beach patrol and flag warning systems.
High	Life threatening rip currents are likely. The surf zone is dangerous for all levels of swimmers. Stay out of the water. Remember to heed the advice of the local beach patrol and flag warning systems.

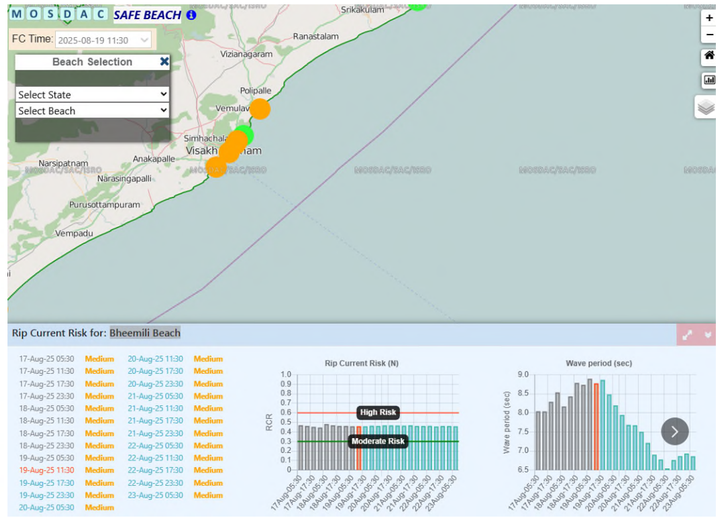


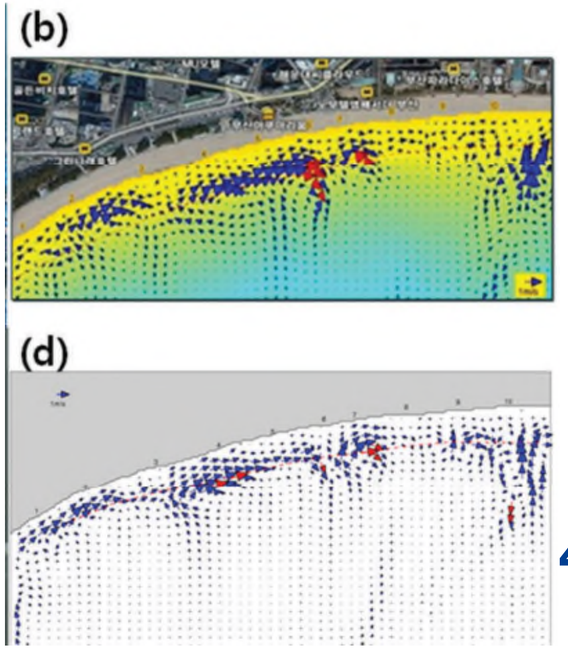
印度裂流預報模式(MOSDAC Safe Beach System)

(A) Wave factor **Rip current Risk Forecast Scale**

Wave height (m)	Rank	Wave period (s)	Rank
Ho ≥ 2.0	1	T ≥ 12	1
1.5 ≤ Ho <2.0	2	9 ≤ T < 12	2
1.0 ≤ Ho < 1.5	3	6 ≤ T < 9	3
0.5 ≤ Ho < 1.0	4	4 ≤ T < 6	4
Ho ≤ 0.5	5	T ≤ 4	5

Wave direction(deg)	Rank	Directional spreading (deg)	Rank
-15 ≤ θ ≤ 5	1	θ <10	1
-25 ≤ θ < -15 or 10 ≥ θ > 5	2	10 ≤ θ < 20	2
-30 ≤ θ < -25 or 15 ≥ θ > 10	3	20 ≤ θ < 30	3
-35 ≤ θ < -30 or 20 ≥ θ > 15	4	30 ≤ θ < 40	4
θ < -35 or θ > 20	5	θ > 40	5





韓國氣象署裂流預報模式 (NERiPS-H & HAECUM)

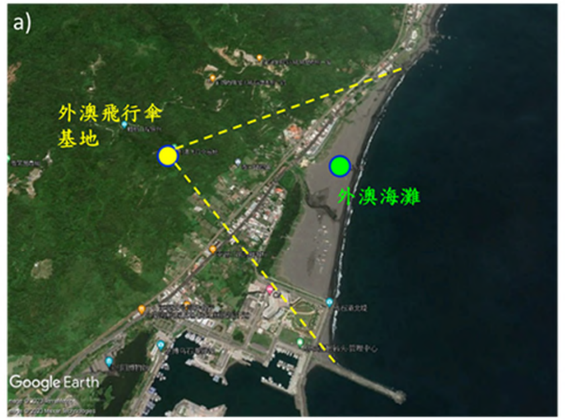
Chapter II

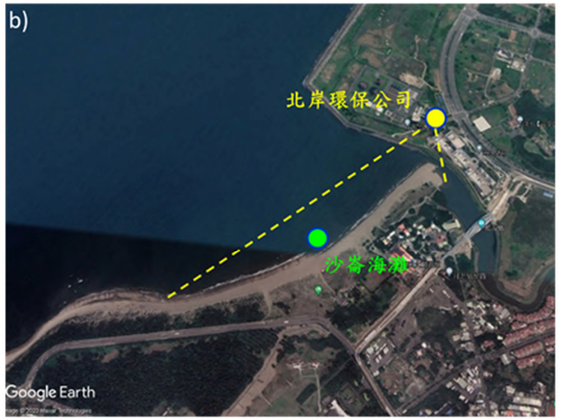
Previous Research

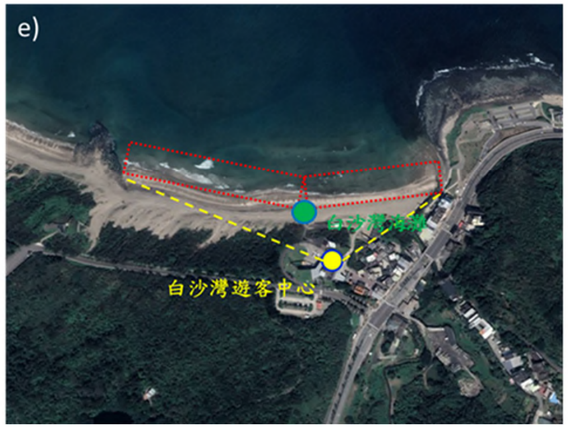
- Monitoring Station
- Overview of Rip Currents in Taiwan

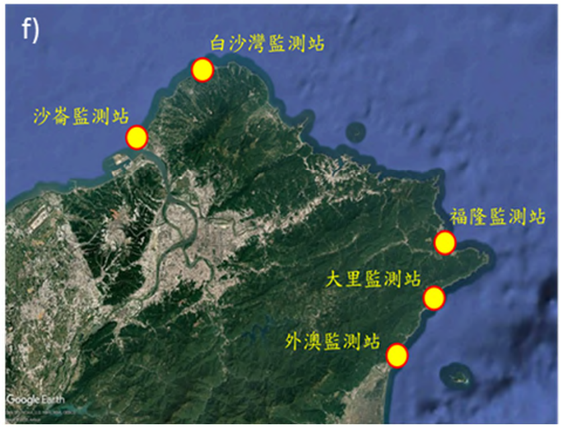
光學裂流影像監測站

- 影像格速率：30 幀/每秒
- 影像解析度：200萬畫素以上(Full HD, 1920x1080)
- 監測時間：每日早上6:00-下午6:00
- 測站位置：外澳、大里、福隆、沙崙和白沙灣

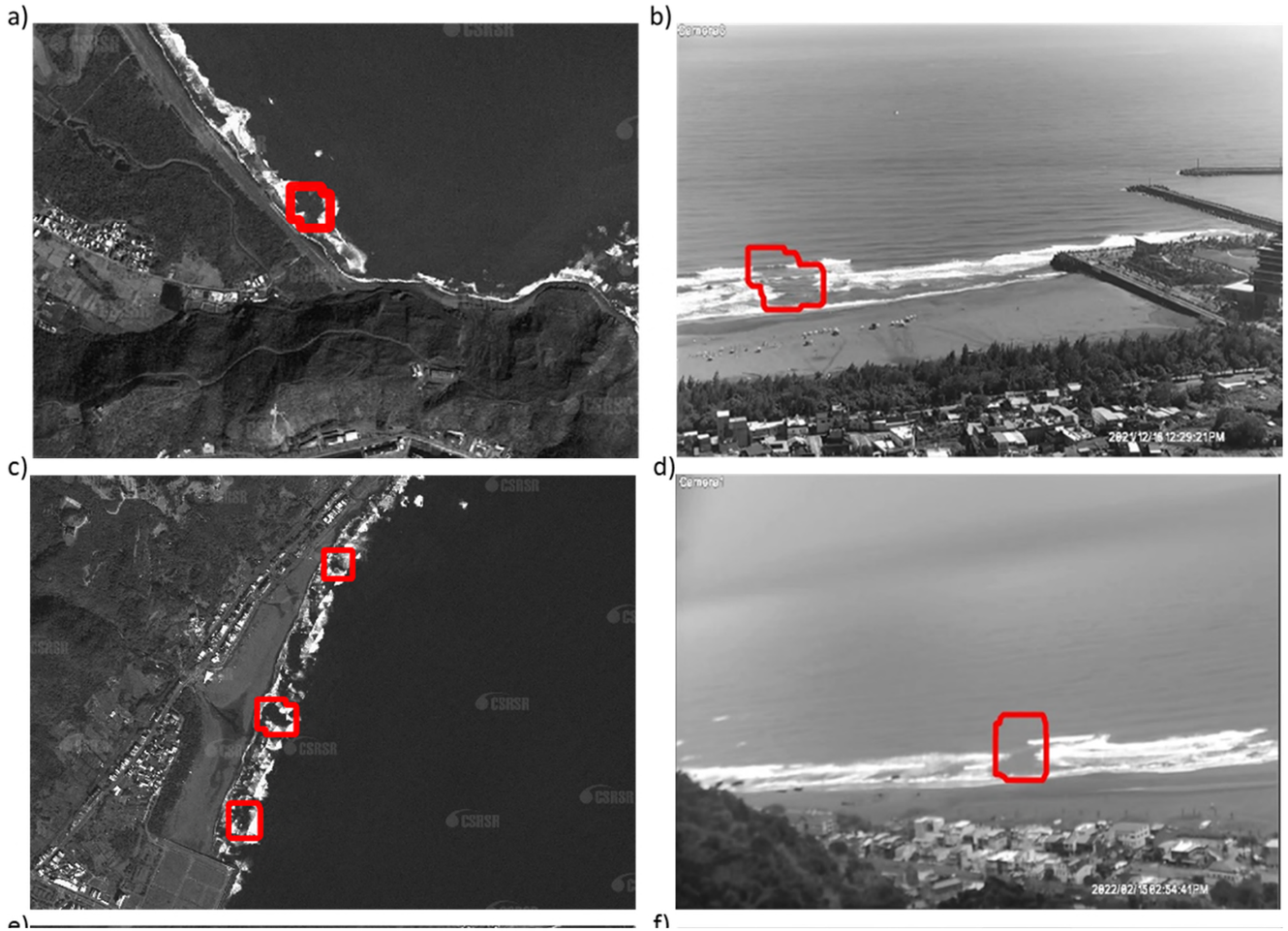


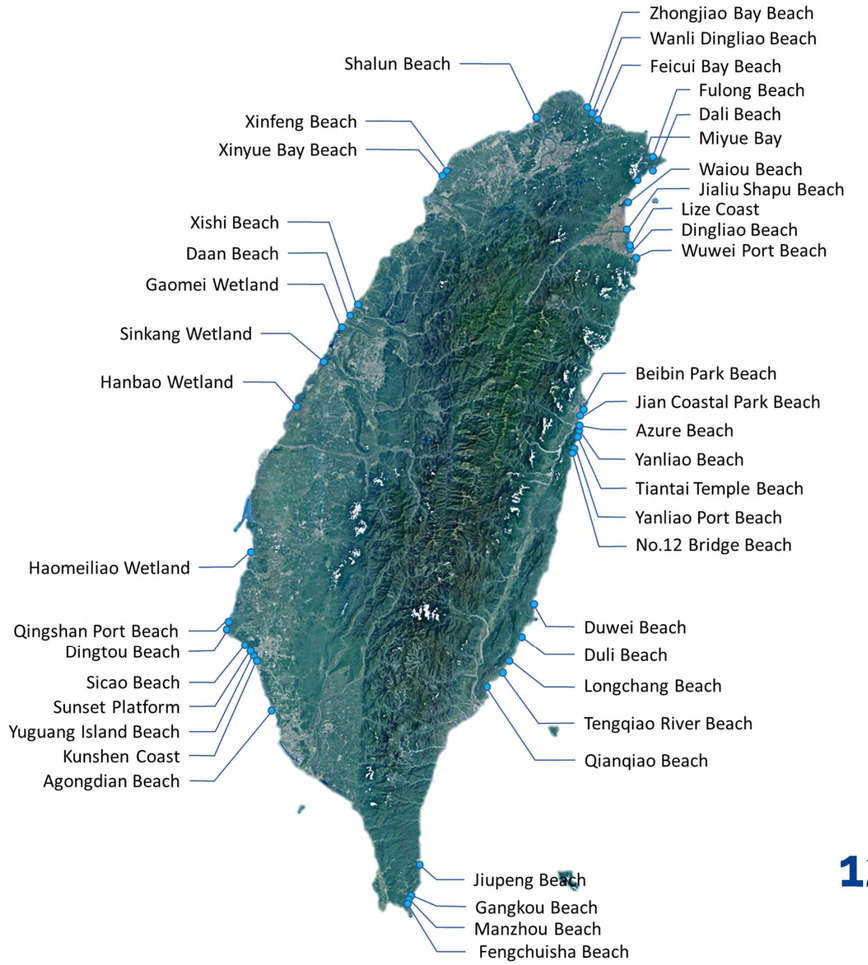






本研究已透過”小波邊緣偵測“和”影像卷積”的方法從影片中辨識裂流發生的特徵，同時該方法亦可應用於衛星航拍影像。於外澳裂流監測站2022年共計拍攝4,029小時，蒐集207筆的裂流案例，並分析103年至107年衛星影像，得到全臺裂流潛勢發生區域。





Chapter III

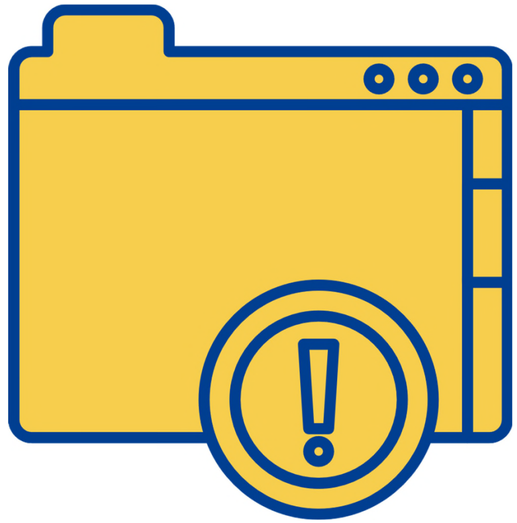
Objective

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**建立裂流預測模型，並與光學裂流影像監測站所觀測到的案例進行比對。

Chapter IV

Rip Current Numerical Model Development

- Numerical Model Theory
- Establishment of the Model

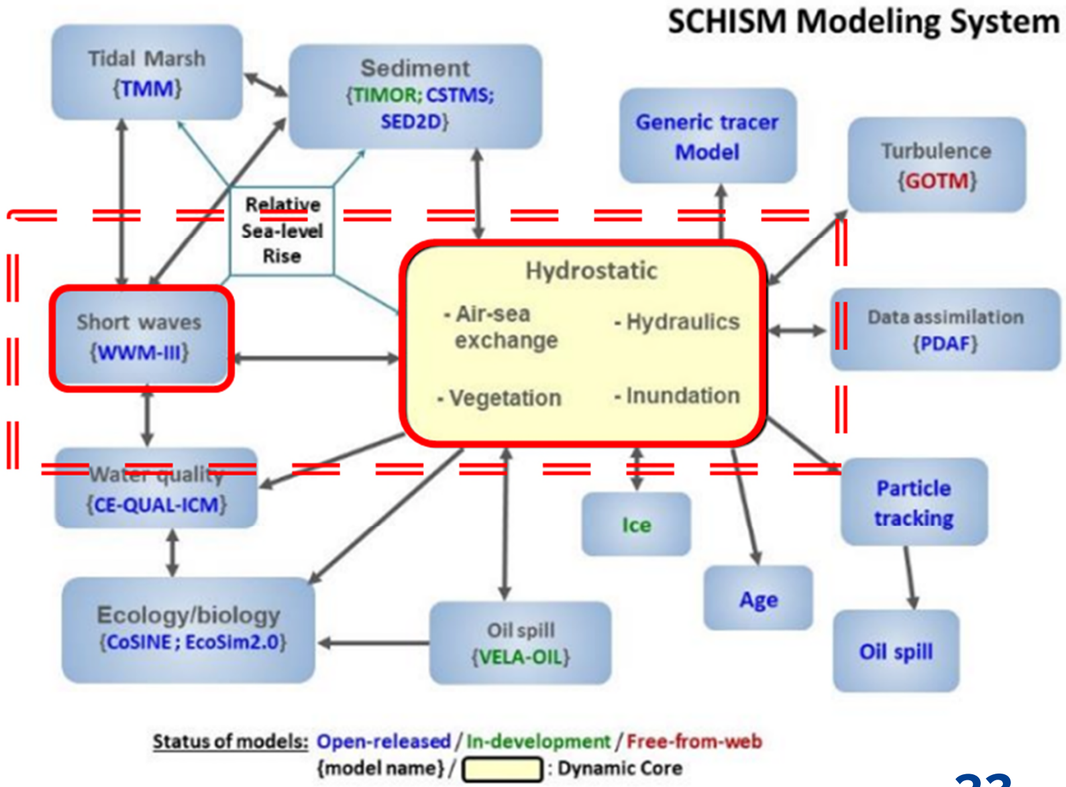


波流耦合數值模式

裂流的發生是當波浪入射進岸時，隨著淺化折射倒至波浪破碎，由於地形的不均導致輻射應力引至的水位抬升程度不同，水體為抵抗該外力，因此形成近乎垂直向外還流動的強勁水流。

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。



SCHISM-WWM 水動力理論

- 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 equaitons)。

- Momentum equations

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

$$\frac{Du}{dt} = f - g\nabla\eta + m_z - \alpha|u|uL(x,y,z)$$

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)

$$\frac{\partial}{\partial t}N + \nabla_X\left(\dot{X}N\right) + \underbrace{\frac{\partial}{\partial\sigma}\left(\dot{\theta}N\right)}_{\text{frequency}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\dot{\sigma}N\right)}_{\text{direction}} = S_{tot}$$

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

- Source term (S_{total})

$$\frac{DN}{Dt} = S_{tot} = \underbrace{S_{in}}_{\text{Wind efect}} + S_{nl4} + \underbrace{S_{ds}}_{\text{Whitecapping and wave breaking}} + S_{nl3} + \underbrace{S_{br}}_{\text{Bottom friction}} + S_{bf}$$

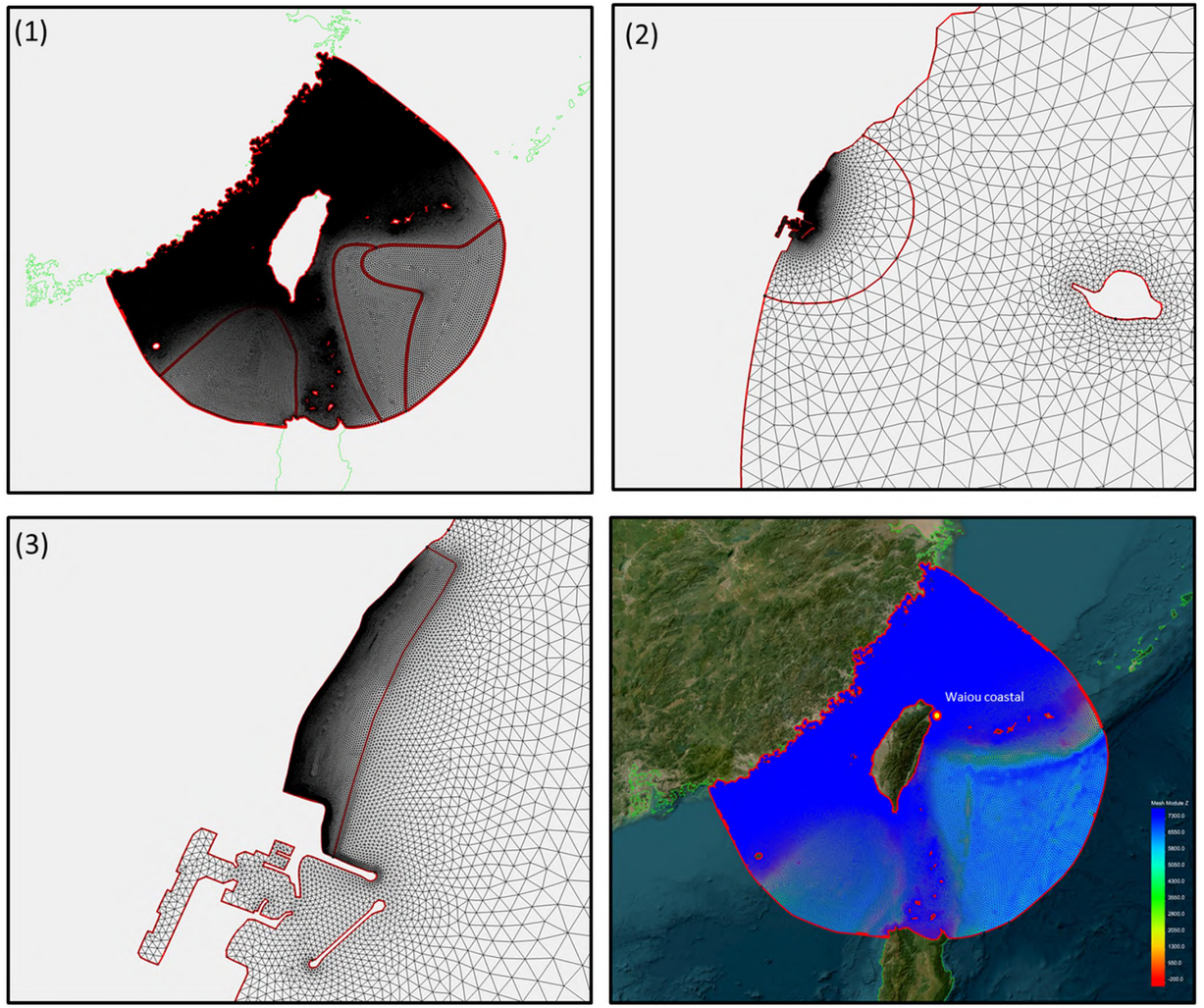
Nonlinear interaction in deep and shallow water

- Numerical Formulation method (Fractional step method)

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

水平網格建置

- SCHISM-WWM數值模式係屬於完全耦合，故其網格可完全相同，本研究採用的是巢狀非矩形網格，在考慮運算效率的同時，能對研究區域增加其分辨率.
  - 模擬區域: 台灣周遭海域
    - 經度：114^{o} – 128^{o}
    - 緯度：18^{o} – 32^{o}
  - 裂流主要模擬區域: 宜蘭縣外澳海灘
  - 網格解析度:
    - 開放邊界: 10 km
    - 陸地邊界 : 2 km
    - 裂流模擬區域(外澳海灘) : 1 m
  - 地形資料：
    - 外澳近岸區域:中興顧問公司船測 5 m 地形解析度
    - 外海區域:ETOP1 200 m 解析度地形資料



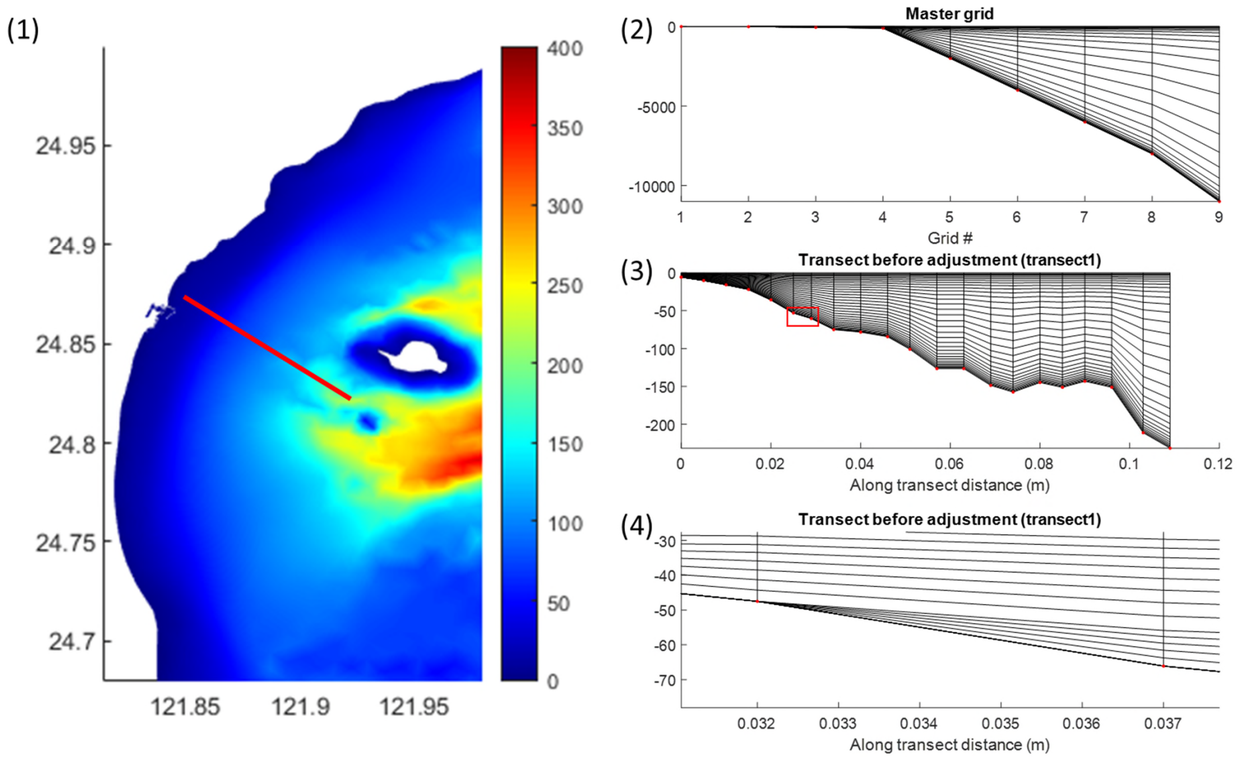
Results of the computational grid setup for rip current numerical simulations.

⇨ comprises 237,653 元素網格 and 123,655 節點

垂直網格建置

透過引入垂直網格層，模型可以解析三維的水動力過程。

- 垂直網格類型: LSC^2 (feat. Water depth)
  - 分層: 5 – 39 layers
    - 深度區間: **1.0 m**、**5.0 m**、10.0 m、50 m、100 m、2,000 m、4,000 m and 8,000 m.
    - 各區間層數: **5**、**7**、13、22、28、33、33、36、39.
  - Sigmod網格攝製參數
    - Vertical stretching intensity (θ_f): 1
      (The nonlinearity of the vertical grid distribution)
    - Bottom stretching weight (θ_b): 1
      (The resolution near the bottom increases)



Using a Schematic diagram of the LSC^2 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.

輸入資料

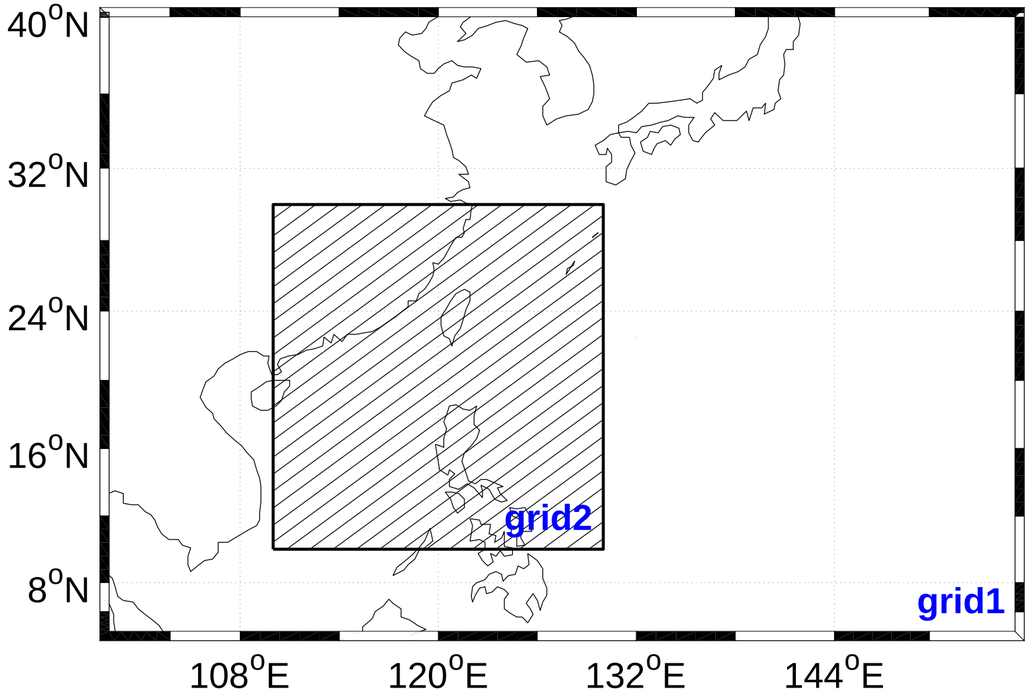
根據模式的驅動力可以區分為”大氣資料“、”波浪資料“、”潮、流資料“和”溫鹽資料“；並且根據其用途，以邊界條件、初始條件輸入進模式。

- 大氣應力:
  - 資料來源: 氣象署WRF預報大氣場
  - 時間 / 空間 解析度: 1 hr / 3 km
  - 參數: **U / V 風速、氣壓** and **比濕度**
- 初始條件:
  - 資料來源: HYCOM+GODA 資料庫
  - 時間 / 空間 解析度: 1 hr / 1/12^{o} (~9 km)
  - 參數: **鹽度、溫度**
  - 垂直解析度: 41 層
- 水動力邊界條件:
  - HYCOM+GODA 資料庫
    - 時間 / 空間 解析度: 1 hr / 1/12^{o} (~9 km)
    - 參數: **鹽度、溫度、U / V 流速、水位.**
    - 垂直解析度 41 層
  - 天文潮調和參數
    - 資料來源: (FES 2014-2016) Finite Element Solution
    - 空間解析度: 1/16^{o} (~6 km)
    - 調和參數: **K1、P1、O1、Q1、S2、M2、N2、K2**
    - 參數: **Amplitude、Phase、Tidal Current**

波浪邊界條件

張(2019)研究成果表示***ST6物理套組***能更加有效的描述近岸極端波浪的情況，考量到台灣時常有颱風侵襲，故本研究自行透過WAVEWATCH III以ST6套組模擬台灣周遭之波浪場，做為波流耦合模式的輸入。.

- 波浪模式: WAVEWATCH III
- 輸入資料: 氣象署WRF預報風場
- 網格建置:
  - 網格類型: 雙向鑲嵌矩形網格
  - 外網格:
    - 解析度: 0.45°
    - 範圍: 99°E to 155°E and 1°N to 41°N
  - 內網格:
    - 解析度: 0.15°
    - 範圍: 110°E to 130°E and 10°N to 30°N
  - 輸出資料(SCHISM-WWM輸入資料): **SigWaveHeight、Main Direction、Zero-cross Mean Period、Sqreading、Peak Period**.



The wave field in this study was simulated using WAVEWATCH III with the ST6 source term package and a nested grid system

$$S(f)=\frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4}\frac{1}{f^5}\exp[-1.25(\frac{f_m}{f})^4]\gamma^{\exp[-(f-f_m{}^2/2\sigma^2 f_m^2)]}$$

Chapter V

Simulation Verification and Results

- Hydrodynamic Validation
- Field Measurement Comparison of Rip Currents

Hydrodynamic Validation

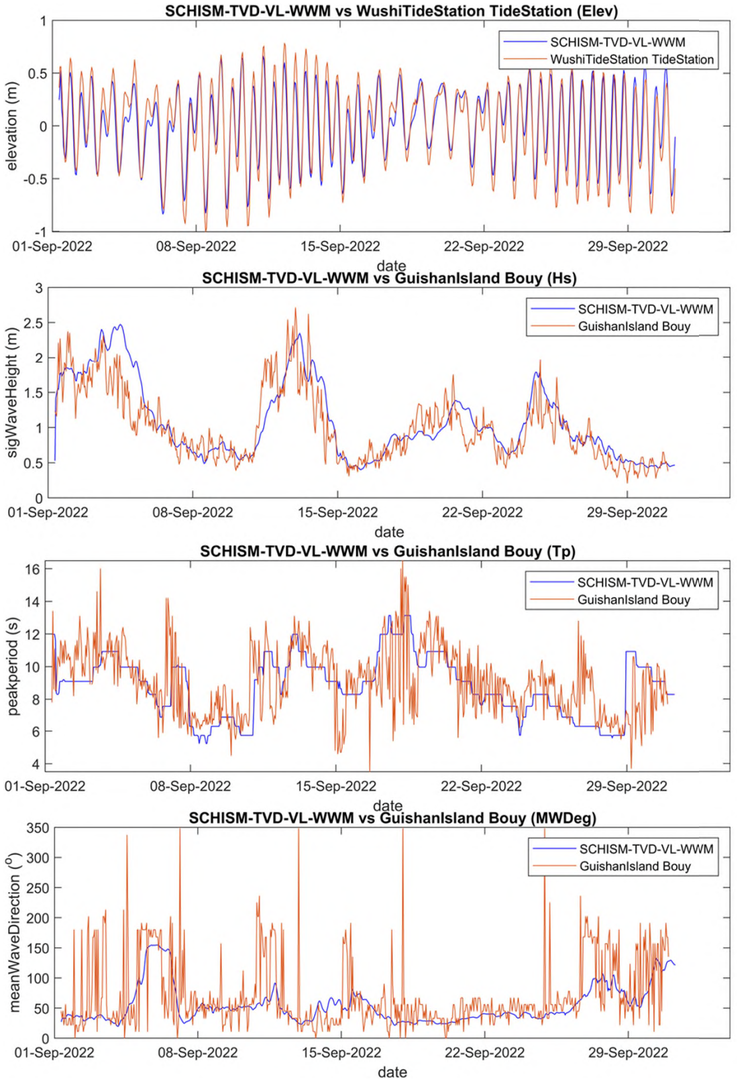
水動力驗證

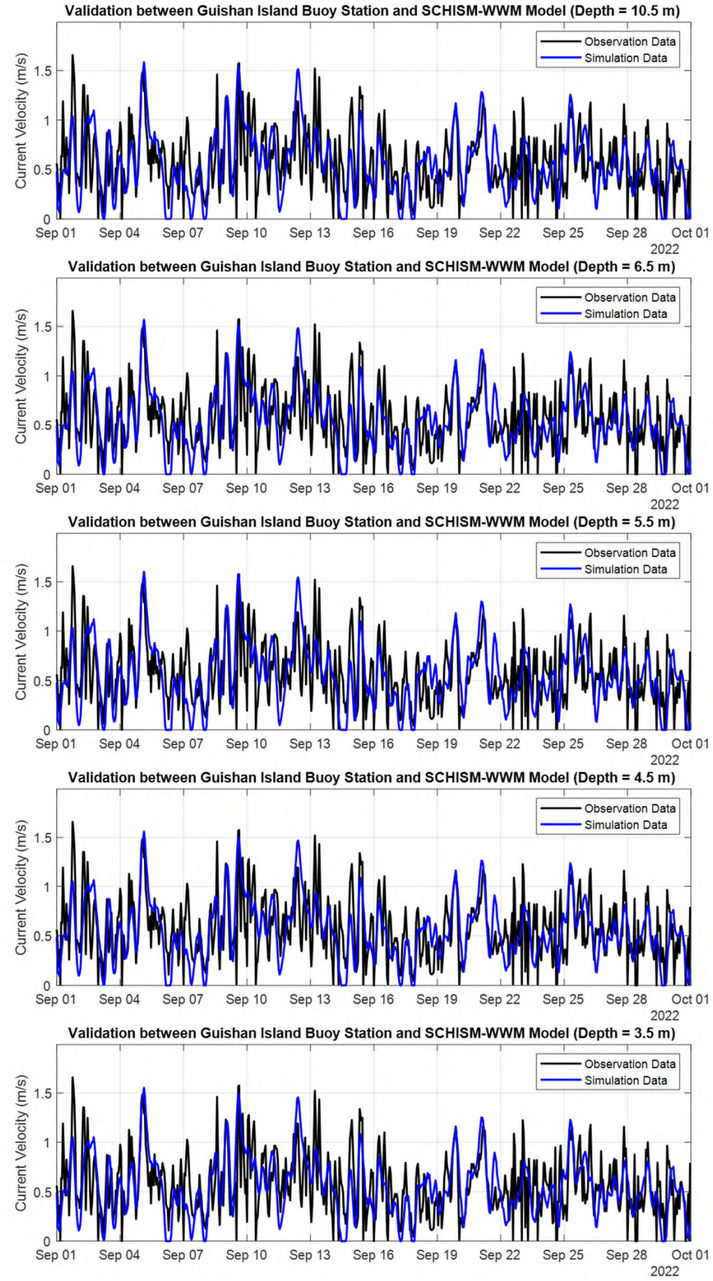
本研究利用外澳海域周遭的”烏石漁港潮位站”和”龜山島浮標站“對SCHISM-WWM波流耦合模式進行驗證.

- 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%。

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

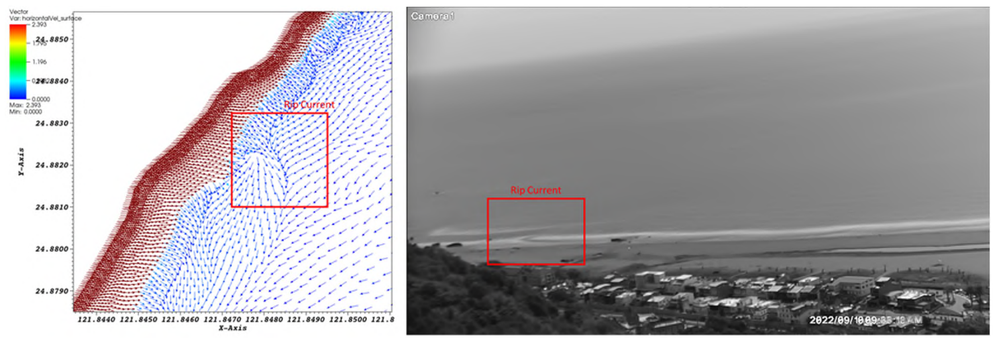
- 由於本研究所使用的模式是三維的模式，在流訴的驗證上，從3.5 m-10.0m水深的流速驗證亦相當不錯，準確率可達80%。

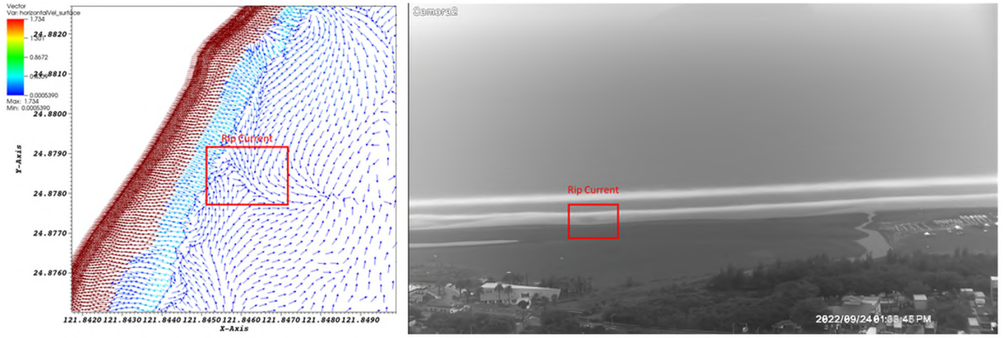


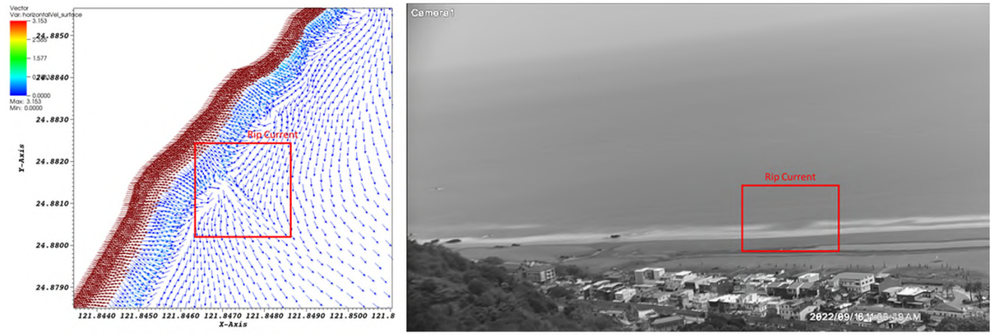


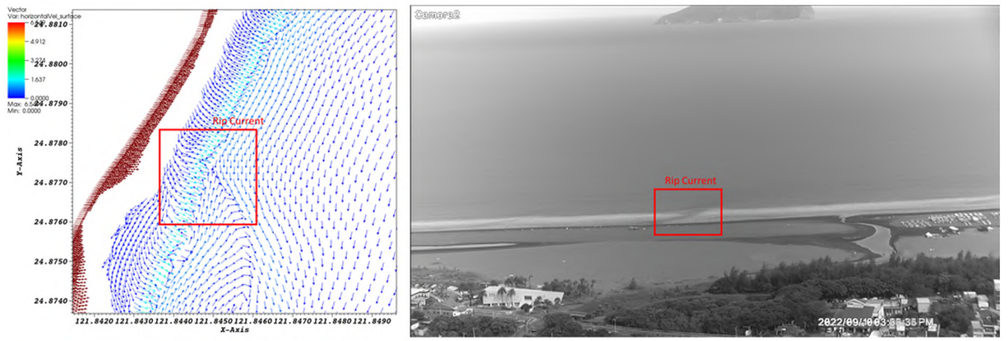
現場觀測裂流與數值模式比對

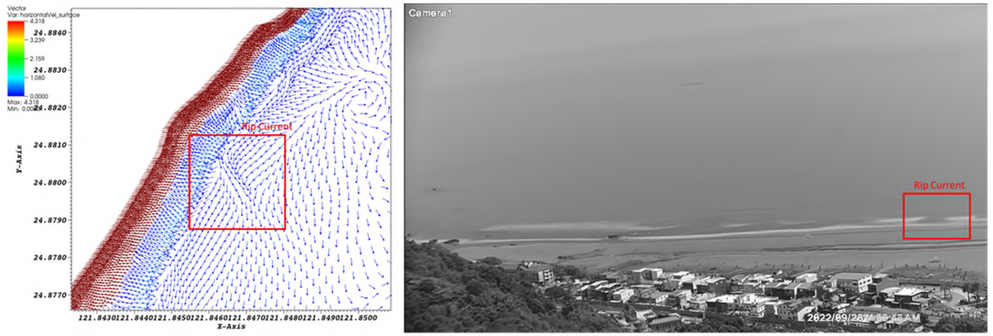
本研究挑選2022/09年一個月所觀測到的裂流案例進行比對，在該月份外澳海灘層出現裂流的位置，本研究透過SCHISM-WWM數值模擬模式均有模擬出來。

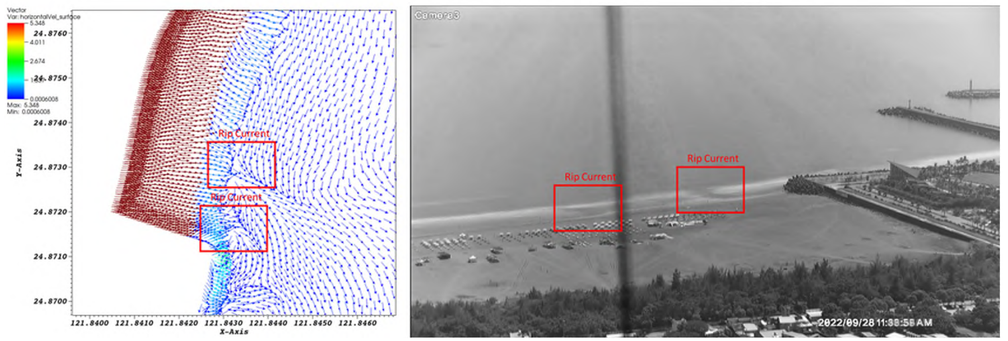












裂流案例驗證

- 本研究透過”混淆矩陣“的方式對模式描述裂流的準確率進行量化，準確率公式如下:

$$\text{Accuracy rate} = \frac{\text{實際有發生/模式模擬出裂流(TP)} + \text{平時情況/模式未模擬出裂流(TN)}}{\text{全部觀測資料(TP+FP+FN+TN)}}$$

- 與現場觀測站結果比對，在未考慮裂流發生位置的情況下進行離散化，在有發生裂流的時刻中(91小時)有67小時有成功模擬出裂流；反之，在未發生裂流的時刻(269小時)中，未模擬出裂流的情形也達207小時，其準確率可達76.1%。

Confusion Matrix for Classifying Modeled and Observed Rip Currents at Waiou each Based on Optical Remote Sensing Results

	Observation With Rip Current	Observation No Rip Current
Simulation With Rip Current	67 hr (TP)	62 hr (FP)
Simulation No Rip Current	24 hr (FN)	207 hr (TN)

Confusion Matrix Based on Rip Current Occurrence by Location: Classification of Modeled Results versus Optical Remote Sensing Observations

	Observation With Rip Current	Observation No Rip Current
Simulation With Rip Current	91 hr (TP)	487 hr (FP)
Simulation No Rip Current	46 hr (FN)	1896 hr (TN)

Chapter VI

Conclusion

- 本研究透過SCHISM-WWM波流耦合模式成功建置出可以描述近岸裂流現象的數值模擬模式。
- 該模式在水動力的驗證上相當的良好，無因次均方根誤差(NRMSE)均可小於0.2。
- SCHISM-WWM裂流數值模式不僅可以描述裂流發生的現象，與現場觀測結果比對，在於裂流發生的位置和時間點，均相當一致，其準確率可達7成以上。
- 根據本研究成果，透過SCHISM-WWM波流耦合模式所建置的數值模式，初步評析可應用於未來建置預警系統之核心技術之一。

10 June, 2025

Thank you for listening

ADVISOR

董東璟
Dong-Jiing, Doong

STUDENT

王敍民
Hsu-Min, Wang

Department of Hydraulic and Ocean Engineering,
National Cheng Kung University