

交通部中央氣象局

委託研究計畫(期末)成果報告

海岸裂流監測與預警技術研究(2/3)

計畫類別：☐氣象☒海象☐地震

計畫編號：MOTC-CWB-111-O-02

執行期間：111 年 02 月 15 日至 111 年 12 月 31 日

計畫主持人：蔡政翰教授

共同主持人：董東璟教授

執行機構：財團法人成大研究發展基金會

本成果報告包括以下應繳交之附件(或附錄)：

☐赴國外出差或研習心得報告 0 份

☐赴大陸地區出差或研習心得報告 0 份

☐出席國際學術會議心得報告及發表之論文各 0 份

中華民國 111 年 12 月

政府研究計畫(期末)報告摘要資料表

計畫中文名稱	海岸裂流監測與預警技術研究(2/3)		
計畫編號	MOTC-CWB-111-O-02		
主管機關	交通部中央氣象局		
執行機構	財團法人成大研究發展基金會		
年度	111	本期期間	11102-11112
本期經費 (單位：千元)	911		
執行進度	預定進度%	實際進度%	超前/落後%
	100	100	0
經費支用	預定支用經費 (單位：千元)	實際支用經費 (單位：千元)	支用比率%
	911	911	100
研究人員	職級	中文姓名	英文姓名
	兼任研究員	王敘民	Shu-Min Wang
		傅仲偉	Chong-Wei Fu
		何雅惠	Ya-Huei He
		陳泓杰	Hong-Jie Chen
報告頁數	112	使用語言	中文
中英文關鍵詞	裂流/rip current、數值模擬/numerical simulation、海象監測/monitoring、海象預警/forecasting		
研究目的	本計畫目的為強化中央氣象局對危險海象監測和預報的能力，具體研究目標係在於研發裂流預測模式和監測技術，提供臺灣海岸地區潛在裂流發生區域之預警訊息。		
研究成果	1. 透過裂流影像判釋系統辨識外澳監測站影像，蒐集 175 筆裂流影像案例，並統計裂流發生期間周遭海氣象條件。 2. 提升模式運算速率和模擬結果之正確率，已完成 2019 年一整年流場的模擬，以及模擬不同海氣象條下流發生情形。 3. 初步以類神經網路演算法建立乙套裂流經驗預測模式，正確率達 86.1%。 4. 已完成今(111)年度監測站建置規劃，並於新北沙崙、福隆和宜蘭大里完成三套監測系統之建置。		
具體落實應用情形	1. 預期本計畫所建置之裂流影像監測站和裂流經驗預測模式，未來可提供於民眾災害性海象預警訊息。 2. 今(111)年度所完成之裂流影像判釋模式，後續將可以應用於全臺灣海岸監測站，進行裂流災害的觀測與資料的蒐集。		

(以下接全文報告)

摘 要

裂流(Rip current)不易察覺，常出現在海岸邊，流速強，垂直海岸線向海外流去，時常將遊客牽引流向外海，造成傷亡。本計畫旨在研發裂流分析、模擬與監測技術，本報告為計畫第二年度成果，計畫目標為持續監測與分析裂流特性，改進預測模式，並建立經驗預測方法。

本計畫於宜蘭設置裂流影像監測站，監測對象為外澳海灘，計畫已完成裂流影像自動辨識程式，自建站迄今(約 1 年時間)累積蒐集 175 筆裂流案例，統計發現裂流寬度較多介於 30-40 m 間，裂流平均出現時間為 4.2 小時，根據裂流發生時海象之條件機率分析，結果顯示：在示性波高約 1m、平均週期約 6s、波浪垂直入射海岸、高水位、海灘類型參數 Ω 為 5 左右時，裂流出現的機率較高。觀測結果亦發現約 3 km 長的外澳海灘有 11 處曾出現裂流，但在結構物旁受地形效應引起的裂流與海氣象關係不顯著。

本計畫精進 SCHISM-WWM 波流耦合模式來模擬裂流之發生，模擬時間為一整年，水動力驗證結果準確，模擬出裂流出現的位置與影像觀測結果一致。模擬結果也證實了當波高、週期和風速增加，或波浪入射方向較垂直海岸線時，裂流的流速均會增加。除此，本計畫亦使用類神經網路初步建置了裂流經驗預警模式，正確率達 86.1%，透過敏感性分析發現，波高、平均週期、波向和海灘類型參數是顯著參數，而以外澳影像監測資料練之模式有較佳的預警效果，後續待資料量更充足後，全部改用監視影像資料重新校驗模式，應可再提升經驗預測模式的正確率。

以下列出本計畫合約要求驗收項目與報告內容對照表：

交付項目	對應報告內容或章節
1.裂流影像分析技術提升	2-2 節
2.裂流數值模式模擬	第三章
3.裂流監測站影像分析與海氣象條件分析	2-4 節
4.裂流監測站選點與規劃設計	2-5 節
5.完成裂流影像分析技術之研發	第二章
6.完成經驗預測模式之建置與驗證	第四章
7.裂流數值模式模擬與驗證	3-2-1

Abstract

Rip currents are narrow and concentrated seaward-directed flows that extend from the shoreline, through the surf zone, and varying distances beyond. The current often pulls tourists into the sea and causes injuries or death. The object of this project is to develop systems for monitoring and forecasting rip current.

The monitoring station and automatic recognition model on the Waiou Beach in Yilan. In this project, a set of automatic recognition model about rip current has been developed and collected 175 rip current cases. The statistics show that the width of rip currents is between 30-40 m, and average occurrence time is 4.2 hours. In addition, the results that when the significant wave height is 1.0 m, the average period is 6 s, the wave direction is vertical to the coastline, the water level is high, and the beach type parameter is 5, the probability of rip current occurrence is higher. However, it is less relevant to the metro-oceanographic that rip current caused by topographical effects close to the structure.

In this project, the SCHISM-WWM wave-current coupling model has been refined and used to simulation the occurrence of rip currents whole year. The verification results are accurate, and the location of the simulated rip currents is consistent with the monitoring observation results. The simulation results also confirmed that when the wave energy increase, the velocity of the rip current will increase. At the same time, the rip current empirical forecasting model has been established with an accuracy rate of 86.1%. The parameter sensitivity analysis results show that significant wave height, average period, wave direction and beach type parameter is a significant influence on the rip currents parameter. Subsequent use of monitoring image data to recheck the model should improve the accuracy of the empirical forecasting model.

目 錄

政府研究計畫(期末)報告摘要資料表	i
摘 要	ii
Abstract	iii
目 錄	iv
圖目錄	vii
表目錄	x
第一章 前言	1
1-1 背景	1
1-2 計畫目的	3
1-3 前期計畫成果摘錄	4
1-4 本計畫工作項目	8
第二章 海岸裂流影像蒐集與判釋方法	11
2-1 裂流影像監測站資料	11
2-2 影像分析流程與方法	14
2-2-1 小波轉換邊緣偵測方法	15
2-2-2 裂流影像卷積法	17
2-2-3 監測站影像資料處理	19
2-3 影像分析方法驗證	21
2-4 影像判釋結果與探討	24
2-4-1 裂流特性分析結果	24
2-4-2 裂流發生時海氣象特性分析	39
2-5 監測站建置規劃更新	49
2-5-1 新北市沙崙監測站	49
2-5-2 新北市福隆監測站	51

2-5-3 宜蘭縣大里監測站	53
2-5-4 監測站運作規劃	54
第三章 裂流數值模式模擬	57
3-1 模式理論	57
3-1-1 開源碼 SCHISM 模式(SCHISM-WWM)	57
3-1-2 波浪模式 WAVEWATCH III	60
3-1-3 商業 SMS 模式(CMS-Wave & CMS-Flow)	62
3-2 模式環境建置	64
3-2-1 精進地形網格	64
3-2-2 邊界條件設置	66
3-3 裂流數值模式模擬結果與分析	71
3-3-1 長期實測資料模擬與驗證	71
3-3-2 不同海氣象條件下裂流發生情形	81
第四章 裂流經驗預測模式初步建置	89
4-1 人工智慧概論	89
4-1-1 人工智慧方法	89
4-1-2 文獻回顧	90
4-2 類神經網路演算方法理論	90
4-3 裂流經驗預測模式建置	93
4-3-2 模式訓練	95
4-3-3 評估指標	97
4-3-4 訓練與驗證結果	98
4-4 輸入因子探討	100
4-5 輸入資料數量與來源探討	102
第五章 結論與建議	104

5-1 結論.....	104
5-2 建議.....	106
參考文獻.....	107
附錄一 服務建議書審查會議紀錄.....	附 1
附錄二 第一次工作會議記錄.....	附 4
附錄三 第二次工作會議記錄.....	附 5
附錄四 第三次工作會議記錄.....	附 6
附錄五 第四次工作會議記錄.....	附 7
附錄六 期中審查會議記錄與回覆.....	附 8
附錄七 期末審查會議記錄與回覆.....	附 15
附錄八 裂流監測站觀測影像案例.....	附 22
附錄九 績效報告.....	附 81

圖目錄

圖 1-1 裂流影像紀錄(拍攝者：蔡政翰教授，地點：宜蘭大里海岸).....	3
圖 1-2 本計畫完整架構	4
圖 2-1 裂流光學監測站設置位置	13
圖 2-2 外澳裂流影像監測站裂流案例(2021/11/01)	13
圖 2-3 小波轉換邊緣偵測結果(左.攝影機 1、中.攝影機 2、右.攝影機 3).....	17
圖 2-4 裂流影像遮罩建置流程示意圖	19
圖 2-5 裂流影像遮罩預處理(a.遮罩樣本、b.影像擴增).....	19
圖 2-6 裂流影像遮罩卷積計算範圍	21
圖 2-7 幀數聚合後裂流影像案例判釋位置	21
圖 2-8 衛星影像與監測站影像裂流判釋位置比較結果	23
圖 2-9 裂流影像判釋結果	24
圖 2-10 攝影機一觀測到之裂流案例示意圖	32
圖 2-11 攝影機二觀測到之裂流案例示意圖	33
圖 2-12 攝影機三觀測到之裂流案例示意圖	34
圖 2-13 同一時間點發現多個裂流渠道(2022/02/15 09:10:43).....	35
圖 2-14 外澳海灘各位置裂流發生實際情形示意圖	35
圖 2-15 宜蘭縣外澳海灘裂流發生位置分布示意圖	37
圖 2-16 不同位置裂流發生案例數量與累計時長統計結果	38
圖 2-17 外澳海域各位置裂流發生機率	38
圖 2-18 不同月份裂流發生案例數量與累計時長統計結果	38
圖 2-19 裂流發生期間海氣象參數值	44
圖 2-20 裂流發生時間海氣象參數累計時長	46
圖 2-21 不同海氣象條件裂流發生之條件機率	47
圖 2-22 不同位置裂流發生時海氣象參數條件	48

圖 2-22 新北市沙崙監測站監測系統架設位置與觀測區域	50
圖 2-23 新北市沙崙監測站影像實際拍攝情形(暫定).....	50
圖 2-24 新北市沙崙海灘裂流潛勢分析結果	51
圖 2-25 新北市福隆監測站監測系統位置與觀測範圍	52
圖 2-26 新北市福隆監測站影像觀測結果示意圖	52
圖 2-27 新北市福隆海域裂流潛勢分析結果	52
圖 2-28 宜蘭縣大里監測站監測系統位置與觀測範圍	53
圖 2-29 宜蘭縣大里監測站影像觀測結果示意圖	54
圖 2-30 宜蘭縣大里監測站影像觀測結果示意圖	54
圖 2-31 中央氣象局海氣象站資料與影像回傳與儲存架構圖	55
圖 2-32 GoOcean 系統上可用於分析裂流之影像資料	55
圖 2-33 水利署資訊服務網平臺可用於分析裂流之影像資料	56
圖 3-1 宜蘭縣外澳海岸 SCHISM-WWM 模式計算網格	66
圖 3-2 本計畫建構之 WW III 模式之網格計算範圍與鑲嵌示意圖	69
圖 3-3 氣象局 WRF 風場大氣資料	70
圖 3-4 本計畫模擬臺灣周遭海域 2019 年波高分布圖	70
圖 3-5 SCHISM-WWM 模式模擬結果驗證	74
圖 3-6 宜蘭縣外澳海域裂流案例模擬結果	76
圖 3-7 宜蘭縣外澳海域裂流模擬發生位置與現場觀測結果比對	77
圖 3-8 宜蘭縣外澳海域監視站觀測與數值模擬裂流數量比對圖	80
圖 3-9 宜蘭縣外澳海域數值模式與觀測結果完全相符之案例	80
圖 3-10 宜蘭縣外澳海域小型裂流渠道	81
圖 3-11 不同波高條件下近岸流場分布情形	84
圖 3-12 不同週期條件下近岸流場分布情形	85
圖 3-13 不同近岸波高條件下裂流發生情形	86

圖 3-14 波向偏移 30o 時不同波高條件下裂流發生情形	86
圖 3-15 不同波向條件下近岸流場分布情形	87
圖 3-16 不同風速條件下近岸流場分布情形	88
圖 3-17 裂流發生時波高與流速關係(2019 全年模擬結果).....	88
圖 4-1 單個神經元架構圖	92
圖 4-2 梯度下降法示意圖	92
圖 4-3 類神經網路基本架構示意圖	93
圖 4-4 非線性傳遞函數	93
圖 4-5 裂流預警模式建置流程	95
圖 4-6 海岸裂流機率預警模式架構	97
圖 4-7 k-fold 交叉驗證(假設 k=4)	97
圖 4-8 不同輸入因子個數建置預測模式之正確率。	101
圖 4-9 不同輸入資料數量之訓練與驗證結果	103

表目錄

表 2-1 裂流影像判釋結果	23
表 2-2 本計畫在宜蘭縣外澳蒐集之列劉案例清單	26
表 2-3 裂流影像案例發生不同位置與各月份統計表	31
表 2-4 各海灘類型和 Ω 值對照表	44
表 2-5 裂流影像監測站選址評估結果	49
表 2-6 宜蘭縣外澳海灘海灘類型計算參數	50
表 2-7 新北市福隆海灘海灘類型計算參數	51
表 2-8 宜蘭縣大里海灘海灘類型計算參數	53
表 3-1 模擬不同海氣象條件參數設計	69
表 4-1 經驗預測模式建置之訓練與驗證資料數量	95
表 4-2 類神經網路建置模式之參數擬定範圍	96
表 4-3 模式預測裂流事件發生之錯差矩陣	98
表 4-4 網格搜尋法率定最佳訓練參數結果	99
表 4-5 類神經網路經驗預測模式之錯差矩陣結果	99
表 4-6 類神經網路經驗預測模式之訓練與驗證結果	99
表 4-7 不同潛在因子之敏感度	101
表 4-8 輸入資料來源不同之比較	103

第一章 前言

1-1 背景

臺灣四面環海擁有豐富的海洋資源，隨著近年來海岸地區的高度利用與蓬勃發展，相關的遊憩活動協會相繼成立，顯示民眾從事海域休閒活動日漸興盛。臺灣早期因政治戒嚴導致海洋活動發展受限，直至近二十年來方受到政府和民眾的重視，於民國 108 年 12 月行政院蘇貞昌院長仿照「向山致敬」的理念宣布「向海致敬」的政策，一改過去「擋」和「管」態度，鼓勵民眾「知海」、「近海」、「進海」和「淨海」，在保育海洋環境的同時，強調政府不應以危險等理由來「限制」人民，朝向未來全面開放海洋目標前進。

從事海域遊憩活動均潛藏風險，本計畫彙整近五年(民國 105 年至 109 年)消防署溺水案件，於近岸海域發生的意外事件的傷亡人數達 980 人，佔整體溺水人數的 22.66%，其中多是從事休閒遊憩活動時所發生的。有鑑於國內意外事件頻傳，若希望全面開放海洋供民眾使用，掌握災害潛勢(最好能預警)是不可或缺的工作之一，而在眾多的海洋災害中，「裂流(Rip Cruuent)」是最常造成海岸邊意外事件的原因，據美國國家大氣海洋局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) (後文使用縮寫)統計全國海域意外事件發生原因，顯示每年平均有 100 人因裂流而溺亡，甚至單在佛羅里達州就一年內就高達 30 人。臺灣周圍海域亦是裂流好發的區域，根據文獻記載於 2003 年至 2006 年間在福隆沙灘有 6 起案例(黃，2009)，甚至於 2005 年白沙灣海灘就有 45 起，近十年來宜蘭外澳海域、臺南安平海域和新北沙崙海域均有裂流發生的記錄(林等，2007、2009；郭等，2011；蕭等，2014)。至今臺灣每年仍有數起於海岸邊活動時遭遇裂流襲擊被水流沖向外海的意外事件發生，為了海灘上從事遊憩活動遊客的安全，研究裂流發生的機制以及對裂流進行預報是有其必要性的。

岸邊時常發生民眾被海水捲走因而傷亡的案例，根據波浪和潮汐原理，「浪 (wave)」或「潮(tide)」僅傳遞能量不傳遞物質，理論上不是捲走民眾之主因，海水捲走戲水民眾

之主要動力來源係「流(current)」，一種發生海岸邊，流動方向向外海而去的強烈水流稱之為「裂流(rip current)」，也是一種離岸流(圖 1-1)。而裂流的流速可達 2 m/s (Short et al., 1994)，據實驗指出隨著裂流流速的增加，所受的阻力將成指數增加，且遊憩者需耗費至少兩倍以上的力量方能抵抗該外力(Zhang et al., 2020)，加上裂流不像波浪高低和潮汐變化都目視可辨別，時常發現裂流時，已陷入裂流的範圍甚至被帶至外海，若民眾對裂流的特性並不熟悉，此時依靠本能強行逆游而行，則有可能導致筋疲力盡而溺亡。

裂流具有時間短、流速快、尺度小等特點，可殺人於無形間，係具有高度危險性的海岸災害，為能夠預測裂流的發生，許多的科學家著手研究其發生機制，多數文獻均認為當波浪傳遞至近岸時所引發的淺化和折射效應導致海流流向轉外；或是當波浪於近岸堆積後，水體為平衡其輻射應力所產生的外力，亦會導致裂流的發生(Longuest-Higgins and Stewart, 1964; Benedet et al., 2004)。而造成上述現象的除了與近岸水深地形分布不均和海灘型態有密切相關外，入射的海氣象條件亦有相關，且隨著不同時間和營力產生，裂流發生的位置和強度也亦會有所不同(Short and Hogan, 1994; Lushine, 1991)。

在海岸觀測技術的日新月異的發展下，透過攝影機進行影像觀測已被廣泛運用於海岸邊，裂流的觀測亦是如此，透過攝影機拍攝進行海岸邊的監控，再配合影像分析技術便可以判釋裂流發生的時空間(Short and Hogan, 1994; Akila et al., 2021)，此外仍可使用都卜勒流速儀和 X-band 雷達等儀器進行近岸流場的直接或間接量測，進而評估裂流發生情形(Nieto-Borge, 2013; Lee et al., 2016)。隨著數值上海洋波浪和海流預測模式的發展，無論在時間與空間上的解析度日益精進，許多模式已滿足近岸海域模擬之能力，例如 Xbeach、Delf3D、SMS 和 SCHISM 等均可透過波流耦合的過程描述裂流發生的情形(Roelvink et al., 2009; Horta et al., 2018)。透過上述方法可更加地了解裂流的機制，甚至再結合人工智慧 AI 技術或是海氣象預報模式，即可提前預警裂流，藉此減少憾事的發生。在臺灣迄今尚未有裂流預測模式或預警機制，因此本計畫將著手於裂流的監測和預警技術的研發，藉由前者獲取足夠的裂流案例供本計畫系統化的分析，並將結果作為後續預警的基礎。

為達到強化防災科技的研發、保障民眾從事海域活動的安全，本計畫工作之目標係在於研發裂流預測模式與監測技術，藉由蒐集航空衛星影像(第一年已完成)以及監測系統的資料，經由影像辨識技術開發之執行，建置完善的裂流案例資料庫，同時以海洋數值模式建置裂流模式模擬的環境，透過上述實測數據進行數值模擬驗證，提升數值模式模擬的準確性和可信度，並與中央氣象局目前已在臺灣建置的波浪站和潮流站交叉比對，瞭解裂流發生時之海氣象特性以作為預警系統之基礎，完成後可應用於臺灣海岸地區，提供潛在裂流發生區域之預警訊息。



圖 1-1 裂流影像紀錄(拍攝者：蔡政翰教授，地點：宜蘭大里海岸)

1-2 計畫目的

本計畫目的為強化中央氣象局對危險海象監測和預報的能力，具體研究目標係在於研發裂流預測模式和監測技術，提供臺灣海岸地區潛在裂流發生區域之預警訊息。本計畫分三年執行，本計畫架構如圖 1-2 所示，第一年目標係著重在裂流影像分析技術研發，並初步建置裂流模擬能力；第二年除持續改進裂流模擬模式，並透過影像分析結果與鄰近海氣象資料，建置裂流海氣象經驗預測式；第三年進行裂流模擬之驗證，並建立作業化預警系統。藉由達到前述目標提升中央氣象局現有災害預報系統，希冀減少災害所導致的損失，提供民眾一個從事海域活動安全的場所。

今年為該計畫第二年，具體達到之研究目標有(一)提升裂流影像判釋系統使之成為全自動化，並透過分析監測站影像資料擴充裂流事件資料庫，提供科學研究驗證與預警系統用途；(二)發展以類神經網路方法研發裂流經驗預警模式；(三)精進裂流數值模式(SCHISM-WWM)，模擬不同條件下裂流發生情形協助經驗預警系統之建立，同時至少模擬一年以上之實測資料，並與現場影像觀測進行驗證。期能藉由達到前述目標，完成中央氣象局裂流預警系統模式之建立，期能減少因災害性海象所造成的損失，以滿足民眾和防救災單位之需求。

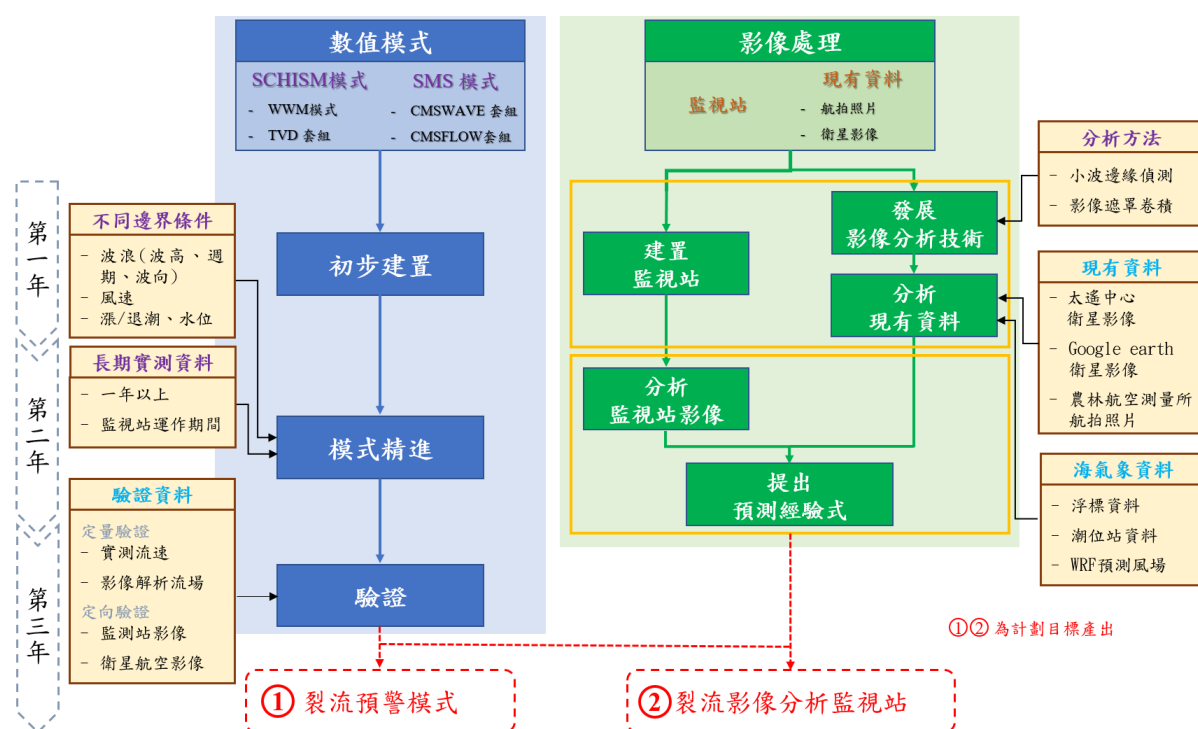


圖 1-2 本計畫完整架構

1-3 前期計畫成果摘錄

(1) 盤點國內外裂流監測與預警技術發展進程

本計畫已透過報章媒體，蒐集臺灣近十年(2010-2021 年)間因裂流引致的意外事件，共計 27 起，並彙整國內相關報告 4 份和 10 篇的學術論文，本計畫也初步提出 30 處裂流潛勢發生區域。有鑑於此，臺灣海岸地區係屬「裂流」好發的區域，時常導致民眾因海流被捲往外海，但截至目前為止，我國對於裂流研究的進程僅限特性上的分析，於實務上仍未有完善的裂流監測和預警系等實際措施，甚至相關研究也是少之又少。

為能對這些難以捉摸的自然現況進行監測和預警，本計畫分別蒐集 30 篇和 40 篇國外裂流相關監測與預警的文獻。影像觀測技術是目前進行裂流監控最常見的方法，透過光學攝影機拍攝岸邊影像，再經由影像處理或是人工智慧 AI 進而判釋裂流是否發生；而直接進行流場測定亦是觀測裂流的方法，如都卜勒流速儀(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)(後文使用縮寫)、GSP 漂流儀器或是基岸雷達等。然該些方式所需成本較高且儀器需佈放於近岸區域也並非易事，因此若考量後續實務的應用，前者的影像觀測是較為可行的方案，當前有 NOAA 採用的岸邊架設網路攝影機 (WebCOOS)，和韓國使用的感光耦合元件(CCD)攝影機進行裂流監測 (Song, 2011)。

在裂流預警技術主要則可透過「數值模式」和「經驗統計模式」進行，前者根據大氣預報模式做為輸入，不僅可以預測裂流是否會發生，也可以直接得到裂流的強度，然而該方法需要大量的運算資源，故當前國際主要是根據裂流發生的機制，透過回歸和相關性等方法統計影響裂流發生的因素，進而對裂流現象進行預警。目前有實際運行的裂流預警系統，本計畫已蒐集美國、紐西蘭、印度和韓國的系統，該些產品均可以做為未來氣象局建置預警系統的參考。

(2) 裂流監測站之規劃並協助建置

根據臺灣裂流案例統計結果，以及本計畫團隊過去進行數值模式模擬的結果，宜蘭縣的外澳海灘係屬裂流好發之海域，且該海灘亦是臺灣熱門的水域遊憩活動區域，在此建立監測站不僅能提供後續研究之能量，於事務上亦有其必要性，此外經本計畫人員勘查，該海灘後方之山坡其視野遼闊，且鄰近有電源網路設備，在建置上可大幅降低難度，因此於第一年本計畫於宜蘭縣的外澳飛行傘基地建置乙座裂流監測站，可完整監測外澳海灘近岸碎波區域的變化情形。

該站於民國 110 年 10 月 8 日落成，建置後一個禮拜內進行系統的調整，最終於 10 月 15 日正式啟用。監測站設備考量影像是否能清晰觀測碎波變化情形，不僅設置三隻攝影機，且影像解析度至少為 full HD (1920x1080)。在監測站運作規劃上透過 OBS Studio 開源串流軟體，利用 4G 網路即時錄製影像回傳至研究單位，並於固定時間進行影像分析，蒐集裂流發生之案例。而監測站影像資料，前規劃當年所拍攝的影像資料，將全部進行保存，若影像中有裂流發生則擷取該案例發生期間之所有影像進行記錄，反之影像若無裂流的發生，考量設備的消耗，翌年將改以每一分鐘存取一張圖片方式儲存歷史影

像。

在第一年本計畫由於監測站裂流影像案例數過少，尚無法透過裂流判釋模式進行分析，故透過人工目視的方式進行分析，於第二年裂流遮罩建置完成後，便可透過模式進行系統分析。於第一年本計畫已分析 10 月 15 日至 11 月 29 日的影像資料，共計約 45 日中監測到 5 筆的裂流案例，其發生位置主要分布於三處且該些案例發生當下波高約介於 0.61-1.17 m。

(3) 影像分析技術發展

為瞭解裂流發生時的原理和機制，完善的裂流資料庫是必不可少，然蒐集的裂流意外事件，該資料量遠遠不足，為此本計畫透過大量的衛星航拍影像進行裂流影像的判釋，來得到更充足的裂流案例，然而影像資料量過於龐大，若以人工的方式進行分析，不僅效率不彰，亦可能參雜個人主觀意識。在第一年本計畫已建置一套「半自動化裂流影像判釋模式」，根據文獻裂流發生時碎波帶會有明顯的不連續帶出現，或是有碎浪等懸浮物向外海延伸之情形，因此該模式根據裂流發生時的特徵，透過小波邊緣偵測和裂流影像卷積兩方法進行裂流影像的判釋，前者根據小波轉換提取影像中的特徵，藉此突顯近岸海域碎波的影像，後者則是根據本計畫團隊經驗建置裂流影像遮罩，將該遮罩掃描小波轉換邊緣偵測之結果，計算出裂流發生的位置。透過人工判釋的 100 張裂流影像和平時影像(無裂流)進行模式驗證，其驗證結果相當良好，正確率可達 83%，且被判釋為裂流發生的位置均是碎波帶明顯斷裂處。

除此之外，為使該些影像案例有更高的可信度，本計畫根據前人文獻和研究團隊的經驗 (Brander, 1999; Dalrymple et al., 2011; Akila et al., 2021)，提出四個裂流影像案例的判釋準則，包含(1)碎波帶有明顯斷裂處，或為斷裂但有向外海延伸之浪花或懸浮物；(2)碎波帶斷裂或是浪花或懸浮物向外海延伸之現象需維持 10 分鐘以上；(3)若同時出現兩處以上的碎波帶斷裂處，彼此間隔須大於 40 m；(4)若無劇烈的海洋或天氣現象(如暴潮、颱風等)，在合適的海氣象條件下，裂流之發生應會重複出現。在滿足上述四個條件本計畫才認定該影像資料係屬裂流案例。

(4) 裂流影像分析結果與討論

如前文所述，本計畫於第一年已完成半自動化裂流影像判識模式且可成功運行，透過該模式本計畫判釋至少五年以上(2016-2020 年)的衛星航拍影像，建立臺灣裂流案例

資料庫，同時本計畫亦分析裂流發生時的特徵與海氣象特性。考量判釋裂流需有清晰的碎波影像，因此影像資料來源為中央大學太空遙測中心和 Google Earth 所提供的高解析度衛星航拍影像(解析度至少為 0.6 m/pixel)，此外，研究範圍參考前期計畫所蒐集的近十年(2010-2019 年)臺灣裂流意外事件統計結果，選址於事件較多的東北角和西南部海域。

本計畫共計分析約 2000 多張影像資料，得到 476 筆裂流影像案例，由於裂流的發生與地形有一定相關性，因此本計畫發現裂流出現位置固定分布於宜蘭縣外澳沙灘、新北市福隆海灘和臺南市漁光島等 36 處海灘，且裂流的寬度約為 40-80 m 間；而從時間分布本計畫發現於 2-5 月期間裂流案例明顯較少，本計畫初步認為該結果可能與春夏兩季波高較小有關，由於近岸波浪能量較少引致輻射應力較少，裂流的現象亦不明顯。此外，本計畫亦將該些裂流案例與鄰近浮標站的實測海氣象資料進行比對(採用案例附近 25 km 內的浮標資料)，探討臺灣海域裂流發生時的海氣象環境，結果顯示裂流發生時示性波高介於 0.38-1.67 m、平均週期介於 4.1-7.6 s、尖峰週期介於 5.0-10.4 s、風速介於 2.5-6.8 m/s 以及波向則為垂直海岸線偏移 40° 以內，該結果本計畫初步認為係屬於適合裂流成長的條件，亦會作為本計畫後續建置經驗統計模式的基石。

(5) 裂流模式初步建置

本計畫透過影像進行裂流案例的現場觀測外，亦會透過數值模式的模擬來探討裂流發生時的近岸水動力現象，不僅可以彌補影像觀測上的限制，且能夠直接計算近岸流場的流速和流向，藉此蒐集裂流案例。在數值模式的建置上，本計畫擬透過半隱式跨尺度綜合水文模式 (Semi-implicit Cross-scale Hydrosceince Integrated System Model, SCHISM) (後文使用縮寫)海流模式耦合風浪模式(Wind Wave Model, WWM) (後文使用縮寫)模擬裂流，在第一年本計畫已完成模式之初步建置，在網格設置上採用巢狀非矩形網格，並考量裂流尺度大小，於近岸目標區域的網格解析度採用 10 m，且利用自強工程顧問公司所提供的 10 m 解析度和海科中心 200 m 解析度的地形資料內插帶入，在邊界條件設置則採用大範圍的海氣象模式輸出結果，含氣象預測系統第二代 (Climate Forecast System Version 2, CFSv2) (後文使用縮寫)所計算的全球大氣資料、法國海洋開發研究院 (French Research Insitutute for Exploitation of the Sea, Ifremer) (後文使用縮寫)透過 WAVEWATCHIII(WWIII) (後文使用縮寫)所計算的大範圍波浪場資料，以及日本 FES (Finite Element Solution, FES) (後文使用縮寫)模式於 2014-2016 年計算的 8 個分潮參數。

考量後續模式將會與現場資料進行驗證，模擬區域選址與監測站相同位置外澳海域進行測試，以東經 121.82° 至東經 122.01°，北緯 24.7° 至北緯 25.0° 範圍建置模式計算區域，初步與龜山島浮標站和烏石漁港潮位站進行驗證，結果顯示波高、水位和週期的模擬趨勢與現場觀測結果一致，NRMSE 約為 0.2，同時該波流耦合模式可以於近岸區域模擬出清楚的裂流現象，並與前述裂流影像案例分析結果進行比對，空間分布相當一致，初步驗證了模式結果之準確性。

1-4 本計畫工作項目

本計畫為三年期計畫，旨在建立一套可預警裂流之監測系統。海洋變化萬千，裂流發生的成因極其複雜，本計畫藉由國內外意外事件和衛星航拍影像蒐集裂流事件，分析鄰近現場測站在事件前後之海氣象資料，並建置監測站獲得更完善之裂流事件資料庫，同時也會以數值模式模擬裂流發生時海況，藉此掌握裂流事件之海象特徵。透過裂流發生時之海象統計分析建立經驗模式，以及對數值模式的模擬結果進行判定，提前預測裂流的發生，本計畫所提出之預警系統也將透過現場實際觀測資料驗證其準確性。

本計畫第一年度已建置於外澳海域置裂流監測原型站，持續提供近岸海域的影像資料，並掌握裂流影像分析方法，針對現有影像以及監測站之時序列影像進行裂流辨識，同時盤點臺灣海域裂流發生位置以及統計當下之海氣象條件。另，以 SCHISM-WWM 波流耦合模式初步完成外澳海域初步裂流數值模擬。第二年本計畫將根據前期研究的基礎進行提升，主要工作項目如下：

1. 裂流影像分析技術提升

對於從影像中如何判釋裂流，本計畫於第一年計畫中根據前人文獻和研究團隊經驗提出四項準則，準則如下：

1. 碎波帶需有明顯的斷裂處、未斷裂但有向外海延伸之浪花或懸浮物
2. 碎波帶斷裂情形需須達 10 分鐘以上(僅在有影像序列時使用)
3. 若在同時出現兩處以上的碎波帶斷裂，間隔須超過 40 m
4. 某處裂流之發生應會重複出現(檢測條件)

並根據準則一建置一套「半自動化裂流影像判釋模式」，且已應用於衛星航拍影像上的

分析，因此在第二年本計畫將調整該模式，提升模式判釋的正確率和便利性，並且使該模式可應用於時序列的影像資料，該部分詳細內容有三點，(1)修正前期研究中模式誤判之情形；(2)將準則二和準則三納入模式，使模式提升為全自動化系統；(3)開始有系統性的分析監測站影像，建立完善的資料庫，並分析裂流特性。

2. 精進裂流數值模式模擬

本計畫已透過 SCHISM 水動力模式與 WWM 風浪模式建置模擬裂流的數值模式，考量運行過程中所面臨的問題，以及期初計畫審查時委員的建議，裂流數值模式仍需加以精進，對於模式的正確率和可信度再做進一步的探討，並且可從數值模式模擬的方法，對裂流發生時的水動力模式做更深入的探討。

在模式設置今年將提升地形網格的精細度，加入近岸海域周遭的結構物，使模式模擬結果更能符合實際情形，並增加模擬時長，至少模擬一年以上的實測資料，確保模式模擬的穩定性；利用模式在設定上的高自由度，可設置不同的邊界條件進行模擬，藉此分析不同營力影響下裂流發生的情形，提供後續經驗預測模式在訓練時有更加完備的資料。

3. 裂流經驗預測模式建立

裂流資料已蒐集數百筆的案例，其中包含意外事件、衛星航拍影像以及數值模式模擬的案例，且仍持續蒐集當中。而本計畫其中一項目標就是建置預警系統，因此本計畫認為以目前裂流案例數已可著手建置經驗預測模式，畢竟類似這種會造成人為傷亡的災害事件是刻不容緩的，若能愈早完成預警系統的建置，便可以預防更多的憾事發生。

由於目前對於裂流發生的機制仍尚未完全瞭解，且近年來電腦演算法的進步，人工智慧 AI 應用於機制尚未明確或是複雜的自然現象，已有不錯的成果，故本計畫在建置預警經驗模式將會採用處理非線性問題有良好表現的類神經網路方法(Artificial neural network, ANN)(後文使用縮寫)，透過前期研究的成果彙整可能影像裂流的發生原因，做為模式的輸入藉此建置預警裂流的模式，後續也會透過現場觀測資料進行驗證，並從中

探討各因子對於裂流發生的敏感性及影響程度。

4. 裂流現場觀測進行驗證

中央氣象局於本計畫每年均會建置數站裂流監測站，可監看整個海灘近岸區域碎波帶分布的情形，透過前期研究所建置的裂流影像判釋模式，以及第二年對於模式的提升，便可全自動化的分析裂流影像監測站的影像，蒐集裂流案例並建置完善的資料庫，而該些資料不僅可作為本計畫探討裂流特性特徵和建立預警模式所使用，另外一個主要的目的就是可以用於數值模式和經驗預測模式建置完成後的驗證，為能達到該工作項目，在前期研究中數值模式的選址已選址於監測站相同之海域(外澳海域)，藉此瞭解兩模式上的不足，作為後續提升模式的依據。

5. 協助氣象局建置裂流影像監測站

本計畫於第一年計畫期間已完成宜蘭縣外澳飛行傘基地裂流影像監測站的建置，在運作上也相當順利，且確實有發現裂流出現，然而資料仍遠遠不足(至第一年計畫結案僅蒐集 5 筆案例)，倘若能加速監測站的建置便可以使後續計畫更加的順利。故在第二年，本計畫團隊將會根據第一年建置監測站的成果，協助中央氣象局廣設站點，透過前期計畫彙整臺灣裂流潛勢發生區域進行選址，並且根據研究團隊的經驗評估影像是否足以進行後續案例分析及蒐集；此外，亦會蒐集目前我國已有架設海岸監控的攝影機(如觀光單位 CCTV 影像)，若有合適進行裂流影像分析，將會納入本計畫進行使用，透過本工作項目提高後續研究之分析能量。

第二章 海岸裂流影像蒐集與判釋方法

在研究裂流這個課題之前，需要蒐集大量的裂流事件做為案例討論的依據，於第一年計畫期間，本計畫參考政府媒體報告與相關報案紀錄，瞭解臺灣海域裂流分佈情形外，也建置一套「半自動化裂流影像判釋模式」，通過分析衛星航拍影像資料，蒐集至少五年以上的裂流案例，由於衛星航拍影像拍攝頻率較小且不固定，在案例蒐集上必會有所受限，甚至無法有系統的探究裂流發生的機制與現象，倘若能進行長期的海岸監測，便可以蒐集更多的裂流影像案例，獲得更多裂流發生時的影像資訊，藉此建置更加完善的裂流案例資料庫。

本計畫已於第一年於宜蘭縣外澳飛行傘基地建置乙裂流影像監測站，進行裂流影像案例的蒐集，然監測站影像與衛星航拍影像資料格式上有所差異，加上監測站僅建置不到半年，裂流案例較少導致無法設置完善的裂流影像遮罩，在分析方法仍先以人為目視的方法進行分析。因此，本計畫會提升裂流影像判釋模式，將運作方式提升為全自動化判釋，並使該模式可成功應用於裂流影像監測站的時序列資料。在後續案例特性的分析上，由於監測站是序列影像可提供時間尺度上的訊息，故會去探討裂流發生的延時，甚至瞭解裂流從生成至消散整個演變的過程。

2-1 裂流影像監測站資料

目前我國並未針對裂流之監測系統。根據過去對裂流之研究，它必發生於碎波帶與海岸間，岸邊地形、地貌複雜，且亦發生變動，導致裂流發生的位置並不固定，若儀器無法直接放置於裂流發生處，將無法完善蒐集裂流之案例，且量測儀器要佈置在碎波帶絕非易事。本計畫認為相較於直接量測技術可獲取準確客觀的數據，遙測系統具有高度自動化與作業化之優勢，故遙測系統是較為可行的方法。

「海洋遙測」已成為海洋相關科學研究領域探索的重要工具，遙測系統包含光學(optics)系統和雷達(radar)系統等，Christian et al. (2008)和 Chen et al. (2019)等人曾使用 X-

Band 雷達影像去分析海洋中的流場，但這類研究的限制在較外海的區域，無法應用在鄰近碎波帶的區域。故光學成為監測裂流較合適的工具，可根據碎波帶的特性推測裂流是否發生，光學監測流場運動每秒鐘記錄 20~30 張影像已足夠，故一般以數位攝影機進行。

目前裂流記錄部分均是根據報載刊登的結果，本計畫認為那些資料可能有部分存疑，且要有人為活動時方有記錄，亦非完整的裂流案例資料，即使使用衛星航拍影像進行裂流案例的蒐集，由於影像拍攝間隔較長且不固定，所蒐集到的資料量仍然不足以應付後續研究使用，甚至由於拍攝的時間時常變動，導致後續無法探討不同情境底下裂流發生的機率。因此若能從事裂流監測，藉以蒐集更加正確、完善的資料提供研究選址和驗證的依據，以及後續建置預警系統使用。本計畫工作項目包含協助中央氣象局規劃設計裂流監測站，測站建置完成後之監測影像可提供本計畫研究分析用。

本計畫工作項目不包含裂流影像監測站之建置，現場觀測站是由中央氣象局設置，本計畫僅透過研究團隊經驗和知識提供協助，並且使用該影像資料進行本計畫研究分析。根據第一年計畫研究成果，宜蘭縣外澳海灘是臺灣海岸中發生裂流事件頻率較高的區域，且本計畫團隊在過去亦有針對該區域進行數值模擬，發現有裂流發生的紀錄(王等，2020、2021)，因此，中央氣象局接受本計畫團隊建議於該處建置一套裂流光學監測站，如圖 2-1 所示，裂流監測站設於外澳海域後方山坡上的外澳飛行傘基地，該處視野遼闊且拍攝角度大，為能清楚觀測近岸碎波帶分布的情形，架設三隻高解析度攝影機(畫素為 200 萬)分別拍攝外澳沙灘北、中和南三個區域，錄影設置上影像格速率為 30 fps，影像清晰可捕捉到碎波帶明顯斷裂處，即裂流發生位置，影像監測站所拍攝到之裂流案例如圖 2-2。本計畫利用影像判釋技術於巨量的監測站影像時序列資料(image time sequence)分析找出這些裂流案例發生之時空間分布，該監測站系統已於 110 年 10 月 15 日開始運作。此外，本(111)年度中央氣象局預計於新北沙崙海灘和福隆海灘、宜蘭大里海灘建置三站裂流影像監測站，預期該些監測站拍攝所得之影像資料，可應用於裂流經

驗預測模式之建置或是數值模式驗證工作上。第一年度本計畫著重於裂流型態的判釋方法，主要針對衛星航拍影像進行分析，並且從過去文獻中蒐集裂流影像的特徵，應用在本光學影像判釋結果的檢核上，亦作為裂流影像案例判釋的定義。本年度將會把該模式應用於監測站的時序列影像，並將所有檢核條件的準則納入模式，使模式可全自動化的從事裂流影像案例的蒐集，提供後續裂流預警經驗模式和現場觀測驗證所使用。



圖 2-1 裂流光學監測站設置位置



圖 2-2 外澳裂流影像監測站裂流案例(2021/11/01)

2-2 影像分析流程與方法

裂流影像監測站可清楚監看近岸海域碎波帶的分布情形，本計畫根據裂流發生時的特徵，初步以碎波帶有明顯斷裂處，或是未斷裂但有向外海延伸的浪花或懸浮物出現的情形，進行裂流事件案例的挑選，為能大量且快速地分析影像資料，本計畫在第一年度期間根據上述條件建置一套「半自動化裂流影像判釋模式」，透過小波邊緣偵測和裂流影像卷積進行衛星航拍影像的分析，蒐集裂流影像案例。同時彙整過去文獻以及本計畫團隊的經驗，除了上述作為模式核心的碎波帶特徵外，還根據裂流的延時、空間分布和發生機制，定義四項在進行裂流影像判釋時的準則，分別為

1. 碎波帶需有明顯的斷裂處、未斷裂但有向外海延伸之浪花或懸浮物
2. 碎波帶斷裂情形需須達 10 分鐘以上
3. 若在同時出現兩處以上的碎波帶斷裂，間隔須超過 40 m
4. 某處裂流之發生應會重複出現(即裂流事件發生位置，應至少有兩起以上之案例)

當滿足上述四個條件時，本計畫方能確定該案例為裂流事件，藉此提升該些裂流影像案例的可信度。

雖然在第一年計畫執行期間監測站已完成建置，然而由於衛星影像與監測站影像格式本質上仍有所不同，前者是單張影像而後者是時序列影像，倘若以相同方式進行分析，將會需要大量的判釋時間，導致效率不彰，同時影像的拍攝角度、解析度甚至可能造成影像無法判釋的問題都有所不同(如衛星航拍影像易受到雲層阻礙，而監測站影像則易受到光線的反射折射等波光粼粼的影響)，故在第一年度適用於監測站影像的裂流遮罩尚未建置完全，僅先以人工目視的方式進行裂流案例的蒐集。

本計畫在第二年度會根據以人工目視蒐集到的裂流影像案例建置遮罩，將該模式成功於監測站時序列影像上運行，而影像資料量相較於衛星航拍影像更龐大，原本由人

工進行檢核的準則二和準則三將會一同納入模式，使該模式提升為全自動化運行，亦會修正第一年衛星影像判釋常出現的錯誤，藉此提升該模式的正確率和分析效率。

2-2-1 小波轉換邊緣偵測方法

目前影像監測技術已被廣泛應用於海洋工程領域，(Boak and Turner, 2005; Guimaraes and Ardhuin, 2020)。為使影像分析能夠順利進行，以及有良好的分析結果，均會對影像進行強化處理，突顯研究目標區域的影像。如前文所述，本計畫是根據波浪向陸淺化過程中，以白色碎浪線之連續性進行判定，若碎浪線斷裂處呈現水域顏色較深之區域，即為疑似裂流流道所產生的位置 (Short, 2006; Turner et al., 2007; Pitman and Gallop, 2016)。第一年度本計畫研究成果利用小波轉化邊緣偵測法進行碎波帶的影像強化，有良好的效果，加上本身就是一種帶通(bandpass)濾波器，影像分析時可減少進行雜訊濾波的步驟，使運行速率有相當不錯提升，因此本(111)年度將會延續前期研究的方法，持續以小波轉換邊緣偵測方法，進行近岸海域碎波帶資訊的提取。

本計畫所採用的小波轉換是參考 Liu et al. (1997)將該小波轉換應用在衛星照相所得的海洋探勘的方式，應用於衛星影像辨識裂流，該方法是根據 Mallat (1998)所提出的小波理論，將灰階影像視為一個二維訊號矩陣 $f(x, y)$ ，利用二維小波轉換的離散傅立葉轉換來找尋影像邊緣。由於二維影像函數 $f(x, y)$ 均有其灰階值，函數 $f(\bar{x}) = f(x, y)$ 的二維傅立葉轉換可定義為下式(2-1)

$$F(\alpha, \beta) = F_x F_y [f(x, y)] \\ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp(-i\alpha x) \exp(-i\beta y) dx dy \quad (2-1)$$

根據上式(2-1)可推得二維小波轉換的定義為下式(2-2)

$$\begin{aligned}
Wf(\vec{\zeta}, s) &= \left\langle f(\vec{x}), \psi_{\vec{\zeta}, s}^*(\vec{x}) \right\rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\vec{x}) \psi_{\vec{\zeta}, s}^*(\vec{x}) dx dy \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\vec{x}) \frac{1}{s} \psi^*\left(\frac{\vec{x} - \vec{\zeta}}{s}\right) dx dy \\
&= Wf(\vec{\zeta}, \eta, s) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\vec{x}) \frac{1}{s} \psi^*\left(\frac{\vec{x} - \vec{\zeta}}{s}\right) dx dy
\end{aligned} \tag{2-2}$$

其中小波函數 $\psi_{\vec{\zeta}, s}^*(\vec{x})$ 可藉由小波母函數 $\psi(\vec{x})$ 平移及尺度擴張取得，但即便如此上述中仍有很多參數式我們無法得知的，因此本計畫將透過快速傅立葉轉換(Fast Fourier transform, FFT)和逆二維傅立葉轉換求解二維小波轉換。小波函數的二維傅立葉可定義為下式(2-3)

$$\begin{aligned}
\Psi_{\vec{\zeta}, x}(\vec{\alpha}) &= F_x F_y [\psi_{\vec{\zeta}, x}(\vec{x})] \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{s} \psi\left(\frac{\vec{x} - \vec{\zeta}}{s}\right) \exp(-i\alpha x) \exp(-i\beta y) dx dy
\end{aligned} \tag{2-3}$$

並且根據尺度擴張及平移的特性 $F_x F_y [\psi(\frac{\vec{x} - \vec{\zeta}}{s})] = s^2 \Psi(s\vec{\alpha}) \exp[-i(\alpha\zeta + \beta\eta)]$ ，可將小波函數 $F_x F_y [\psi(\frac{\vec{x} - \vec{\zeta}}{s})] = s^2 \Psi(s\vec{\alpha}) \exp[-i(\alpha\zeta + \beta\eta)]$ 的二維傅立葉轉換表示為

$$\begin{aligned}
\Psi_{\vec{\zeta}, s}(\alpha, \beta) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{s} \psi\left(\frac{\vec{x} - \vec{\zeta}}{s}\right) \exp(-i\alpha x) \exp(-i\beta y) \\
&= s \Psi(s\vec{\alpha}) \exp[-i(\alpha\zeta + \beta\eta)]
\end{aligned} \tag{2-4}$$

利用二維迴旋定理 $F_x F_y \{f(\vec{x}) * g(\vec{x})\} = F(\vec{\alpha}) G(\vec{\alpha})$ 可將影像 $f(x, y)$ 的二維小波轉換表示為 $f(x, y)$ 與 $\bar{\psi}_s(\vec{\zeta})$ 的二維迴旋積分，並由共軛複數特性可得到 $F_x F_y [Wf(\vec{\zeta}, s)] = F(\vec{\alpha}) s \Psi^*(s\vec{\alpha})$ ，取 $Wf(\vec{\zeta}, s)$ 的二維傅立葉轉換，應用於迴旋定理、尺度擴張、平移及共軛複數的特性可得到式(2-5)

$$F_x F_y [Wf(\vec{\zeta}, s)] = F(\vec{\alpha}) s \Psi^*(s\vec{\alpha}) \tag{2-5}$$

再取出 $F_x F_y [Wf(\vec{\zeta}, s)]$ 的逆二維傅立葉轉換可得到 $Wf(\vec{\zeta}, s)$ 表示為式(2-6)

$$\begin{aligned}\Psi_{\vec{\zeta}, s}(\alpha, \beta) &= F_{\alpha}^{-1} F_{\beta}^{-1} \{F_x F_y [Wf(\vec{\zeta}, s)]\} \\ &= \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(\vec{\alpha}) s \Psi^*(s\vec{\alpha}) \exp(i\alpha\zeta) \exp(i\beta\eta) d\alpha d\beta\end{aligned}\quad (2-6)$$

式中的 $F(\vec{\alpha})$ 和 $\Psi^*(s\vec{\alpha})$ 可藉由快速傅立葉轉換取得，並透過最後的逆二維傅立葉轉換公式，便可以計算影像二維小波轉換，最後將小波轉換後的影像係數結果，去除係數為零的結果便可進行邊緣偵測(如圖 2-3)，接著由於小波轉換後的結果使得圖像呈現等值線圖，導致後續在影像卷積閾值訂定不易，因此將會透過均質濾波和二值化的方法將碎波帶邊界至路域的色值調整為 1，而海洋部分則設定為 0。

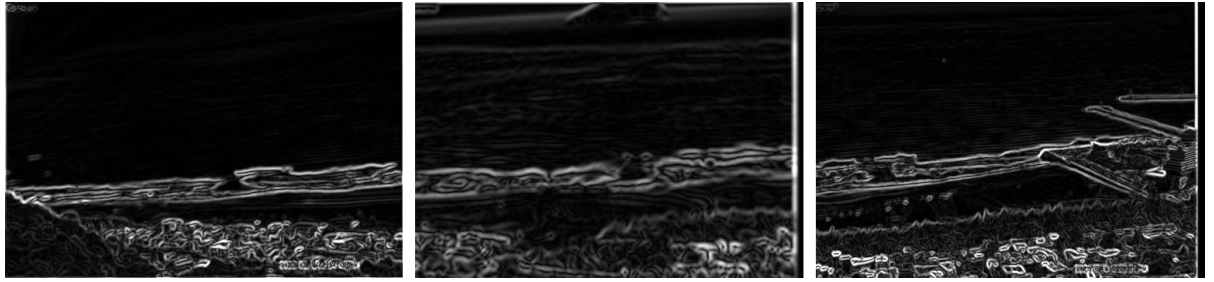


圖 2-3 小波轉換邊緣偵測結果(左.攝影機 1、中.攝影機 2、右.攝影機 3)

2-2-2 裂流影像卷積法

在前述分析過程中，可準確的辨識出碎波帶的範圍，然該結果仍無法判定該影像中何處有裂流，甚至影像中是否有裂流也無法判釋，為此本計畫採用「裂流影像卷積法」框選出裂流發生的位置和範圍，該方法的概念與機器學習中的卷積類似，以影像遮罩對於目標進行“掃描”，以此來獲得特定的影像資訊，對於本計畫而言就是透過裂流影像遮罩去計算影像中各個位置與遮罩的相似度，進而找出裂流發生位置。

在第一年計畫中進行影像判釋的資料，均是衛星航拍這種大範圍的影像資料，透過該些影像觀測裂流，通常在碎波帶不連續處較為平滑，然監測站的影像由於解析度較高，且本身拍攝的角度並非正射，碎波帶斷裂的形狀會有千奇百種，導致使用過往長方形的

裂流影像遮罩在進行判釋時無法找出裂流發生區域，倘若將相似度閾值調低，則會有過多誤判的情形發生。有鑑於此，本計畫先以人工目視的方法判別 110 年 10 月至 12 月間的裂流影像案例，並且通過該些案例建置適用於監測站的裂流影像遮罩，建置方法主要是透過影像平均的方式，將案例期間所有影像進行套疊，再透過前節中所提的小波轉換邊緣偵測法，提取近岸海域碎波帶之影像，接著以人工目視的方式判釋裂流發生位置，並框選出其範圍，接著將邊界進行簡化後，便可以獲得裂流影像遮罩，除了簡易的裂流遮罩(左右兩側白色(示意碎波帶)，中間黑色(示意裂流渠道))，本(111 年)年度已增加 4 種的裂流影像遮罩的建置，裂流遮罩與實際情形對照圖與建置過程，如圖 2-4 所示。在影像處理時，由於影像本身的特徵有所不同，且每次裂流發生時的型態也不盡相同，透過上述方法雖然可大致歸類裂流可能出現的情形，但每次裂流的出現仍會有些微差異(裂流大小、裂流延伸方向等)，倘若要根據這些微小的改變去建置新的遮罩，不僅費時費力，且不能廣泛應用於不同的監測站，因此本計畫將透過影像擴增(Image Data Augmentation)的方式來增加遮罩的適用性，主要採用旋轉、翻轉、縮放和扭曲等，然目前本計畫僅有一站監測站，且拍攝地設置均為固定，因此考量裂流形狀的合理性，再進行影像擴增時不會過度的去改變原有的特徵，因此旋轉角度設定介於 30 至-30、縮放大小為 0.5 倍至 3 倍數，而扭曲延伸的範圍為本身影像的大小的 0.5 倍，即失真度(distortion)為 0.5，如圖 2-5 所示。

透過上述遮罩的建置和影像擴增的方法，可以取得足以分析影像監測站的裂流影像遮罩，下一步便將裂流影像遮罩對小波轉換邊緣偵測結果進行卷積，比較監測站影像上各個位置與裂流影像之相似度，若該比對結果大於 90%時，則將該位置紀錄且視為疑似裂流發生之位置，倘若影像中沒有出現疑似裂流發生位置，則會將相似度降低至 80%，並透過人工目視的方法檢視該結果是否有裂流發生，倘若多數裂流案例以目前遮罩無法判釋出來，且多次遇到該情況下則會考慮再增加該類型之遮罩，藉此持續增加裂流影像遮罩種類來提升影像判釋的正確率。

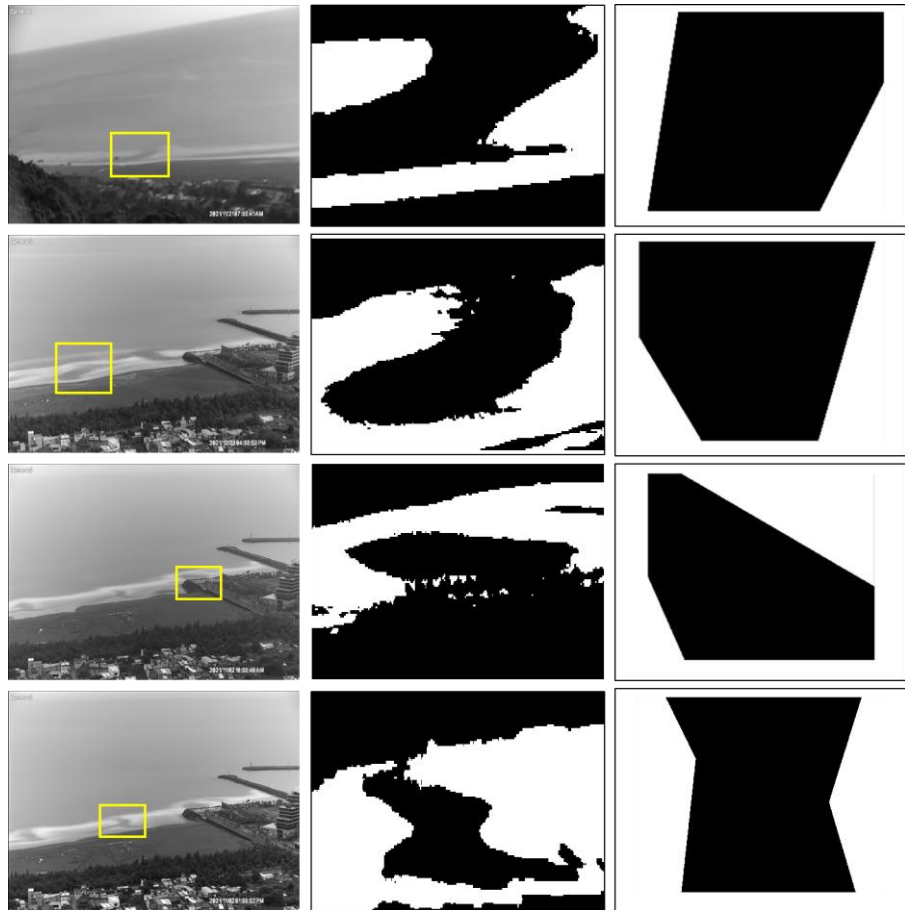


圖 2-4 裂流影像遮罩建置流程示意圖

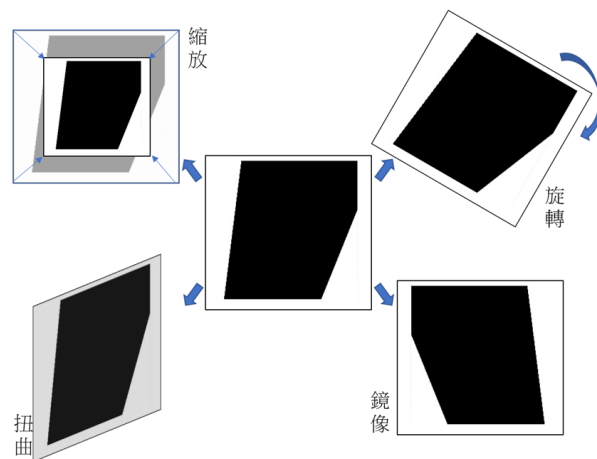


圖 2-5 裂流影像遮罩預處理(a.遮罩樣本、b.影像擴增)

2-2-3 監測站影像資料處理

更新裂流影像遮罩以及進行影像擴增增加影像遮罩的適用性後，裂流影像判釋模式已可應用於監測站所測得的時序列影像資料，而相較於前期研究所採用的衛星航拍

影像，裂流監測站的影像資料有較高的穩定性，且提供時間尺度上的資訊，不僅可探討裂流案例的延時，分析裂流從生成至消散的演變過程外，在影像判釋上亦可提供更多的分析方法和資料的預處理，藉此提升影像判釋結果的正確率和可信度。

根據第一年計畫判釋衛星航拍影像的結果顯示，有不少影像判釋錯誤的案例，原因乃自於陸地上的房屋、結構物或是植被被誤判成裂流所導致的，由於該些背景時常會呈現有間隔性的排列方式，故在進行遮罩卷積時相似度自然而然地會提高，因而導致裂流案例誤判，本計畫將透過裂流影像監測站拍攝範圍固定的特性，在處理影像卷積時僅對近岸碎波帶區域至陸地邊界這個範圍進行計算，藉此解決上述問題，同時也可以減少卷積過程的運算量，提高運算的速度，三架攝影機所拍攝影像中會進行卷積計算的範圍如下圖 2-6 所示。

如前文所述，為能使模式運作方式提升至全自動化，於準則二的判釋上將採用影像平均的作法，將影像進行切割每 10 分鐘進行乙次的影像平均，為減少影像平均所需要的時間，本計畫並非每幀影像都進行平均，而是以間隔為 0.2 秒切割該影像時序列(即每 6 幀擷取一張影像進行計算)，接著透過前兩節判釋裂流位置的方法，快速的檢核該 10 分鐘內是否有裂流的發生。此外，由於裂流發生的位置每時每刻都是會有變動的，而且影像中隨著光線的反射波光粼粼或是突然有人員活動等，都有可能造成裂流位置判釋上的錯誤，因此本計畫在框選裂流發生的位置時，參考 Akila et al. (2021)所提出的「幀數聚合 (Frame aggregation)」的方式，每 60 幀計算一次裂流發生的位置，最後將該十分鐘內框選出來的位置覆蓋率達 80%以上的位置視為裂流主要存在的位置，透過該方法便可以很好的預防影像中突發性的雜訊，結果如圖 2-7 所示。另，準則三的部分由於調整後的影像判釋模式已可以精準的找出裂流發生位置，透過兩裂流間相距的像素大小，再乘上影像的解析度便可以得到兩裂流間隔之間的實際距離；而準則四則是後續再紀錄時，會根據發生位置進行評估，倘若發生裂流的位置在過去案例中均沒有裂流發生，則會將該案例進行保存，視為疑似裂流的案例，往後在相同位置若又有裂流發生，則會將該案例是為裂流案例。



圖 2-6 裂流影像遮罩卷積計算範圍

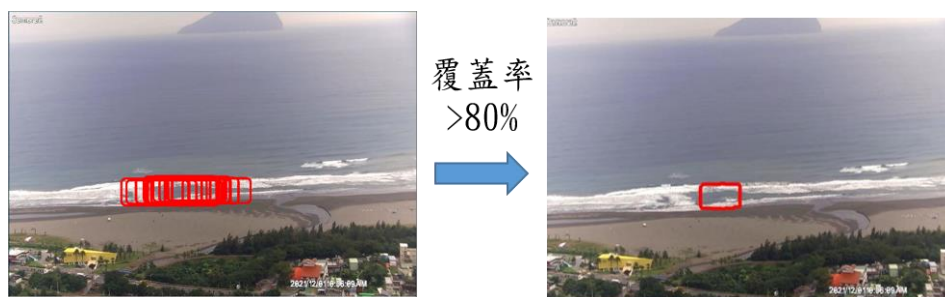


圖 2-7 幀數聚合後裂流影像案例判釋位置

2-3 影像分析方法驗證

今(111)年度本計畫已提升裂流影像判釋模式，可成功應用於裂流監測站的影像資料，同時亦將準則二和三納入模式，使該模式已可全自動化的判釋影像中是否有裂流的發生，模式所採用之理論流程已於上文中所述，為瞭解該辨識模式之正確率，本計畫與衛星航拍影像裂流案例判釋結果進行比對，當中有部分出現裂流的位置是相似的，可初步判定該些資料有一定的可信度，如圖 2-8 所示。

為檢視該模式是否能精準的判別是否有疑似裂流影像，本計畫將從正確率(Accuracy)和回應率(Precision)進行探討，前者可以概括性的瞭解模式在判釋裂流發生與否的正確率，而後者則是評估模式是否在沒有裂流發生時，是否有高估的情形，驗證資料上採用人工的方式挑選 100 張平時影像(無裂流發生)以及 100 裂流發生時的影像作為驗證資料，本計畫將根據以下式(2-7)和式(2-8)分別計算該模式的正確率(accuracy rate)和回應率(reponse rate)

(1)正確率(accuracy rate)

$$\text{Accuracy rate} = \frac{\text{裂流影像判釋有裂流(TP)} + \text{平時影像判釋無裂流(TN)}}{\text{全部影像資料(TP+FP+FN+TN)}} \quad (2-7)$$

正確率即模式在全部實際資料中有預測正確的比率，代表模式對裂流發生或未發生判釋正確的能力，可用來評估裂流影像判釋模式的總體分析能力。

(2)回應率(response rate)

$$\text{Response rate} = \frac{\text{裂流影像判釋有裂流(TP)}}{\text{全部判釋有裂流的影像(TP+FP)}} \quad (2-8)$$

回應率即在模式判釋為裂流的資料中，有多少比率實際有裂流出現的比率，代表在模式判釋裂流會發生的資料中，亦有正確判釋影像中有裂流發生的能力，可用來評估模式是否將裂流未發生的資料判釋成有發生的誤報比率，回應率越高代表模式誤報的程度越低，且當回應率越低但反查率卻相對高時，代表模式在判釋裂流上有高估的傾向。

式中所有影像為 100 筆疑似裂流影像和 100 筆平時影像，判定有裂流影像為模式判釋該 200 筆資料中認定有疑似裂流出現之影像，驗證結果如表 2-1 所示，由人工判釋 100 筆疑似裂流影像中，模式判釋有裂流的影像有 86 筆，無裂流影像有 14 筆；而人工判釋為平時影像，經模式判釋後有 22 是有裂流的影像，而 78 筆是沒有裂流的影像，根據上式(2-7)和(2-8)計算結果，該模式之正確率為 82.0%，回應率則為 79.6%。結果顯示該模式已可大致將疑似裂流影像擷取出來，在有裂流的影像中有 86%的案例是能抓取出來的，然在平時影像中就有較多的誤判情形，有 22%的案例是將沒有裂流案例視為有裂流發生，該部分本計畫亦嘗試通過調整相似度閾值去降低模式高估的情形，然而結果顯示雖若將閾值調為 90%時，在平時影像上僅有 5%的案例出現誤判，然而也會導致再有裂流案例的影像判釋成功率大幅將低，僅剩 62%的案例能成功判釋出裂流位置，考量裂流是一種災害現象，寧可高估的情形發生，也不能有漏網之魚，否則當意外事件發生時將會造成人員傷亡，而本計畫認為隨著後續裂流影像遮罩持續的建置，在相似度的閾

值也可以逐漸調整，藉此來提升該模式的正確率。

除對系統判釋裂流存在與否進行驗證外，本計畫亦針對精準度(即模式判釋裂流發生位置是否與人工判釋位置相近)進行分析，藉由挑選 10 個被判定為裂流影像進行檢視，從結果圖 2-9 顯示，該系統所辨識出的裂流位置，均是碎波帶明顯的斷裂處。總體而言，該模式相較前期計畫已更加的便利，且能應用的範圍更加廣泛，因此根據上述兩指標和裂流位置判釋回應率檢視結果，本計畫認為均已達到可實務上應用之程度。

表 2-1 裂流影像判釋結果

	疑似裂流影像 (人工判釋)	平時影像 (人工判釋)
裂流影像 (系統判釋)	86 筆(TP)	22 筆(FP)
平時影像 (系統判釋)	14 筆(FN)	78 筆(TN)

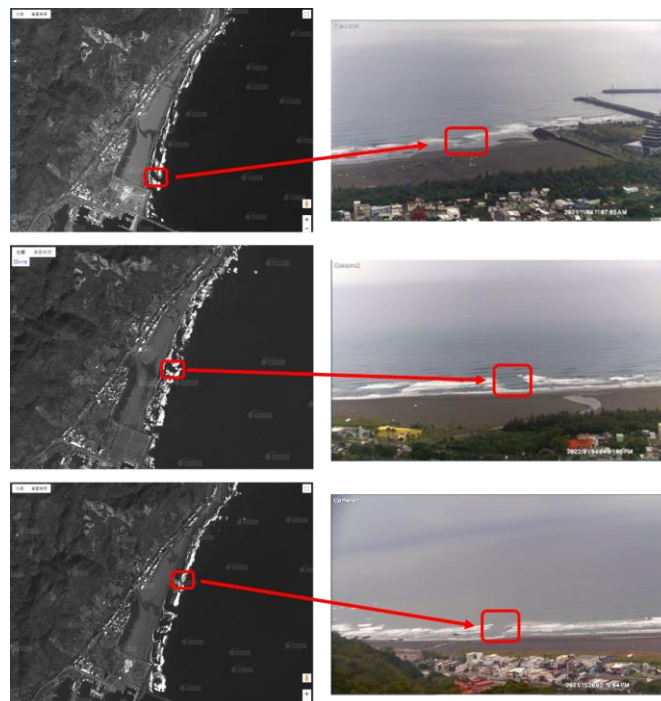


圖 2-8 衛星影像與監測站影像裂流判釋位置比較結果



圖 2-9 裂流影像判釋結果

2-4 影像判釋結果與探討

2-4-1 裂流特性分析結果

本計畫已於前節中提升第一年計畫中所提出的「裂流影像判釋模式」，將其應用於裂流監測站的時序列影像資料，並且加入裂流影像判釋準則二和三，使該模式的運作方式升級為全自動，也透過正確率(Accuracy)和回應率(Precision)評估該模式判釋裂流的成功率，同時以人工目視的方式檢核裂流位置判釋的合理性，結果均證明該模式已可於實務上進行使用。在第一年計畫期間，主要是透過分析衛星航拍影像資料來蒐集裂流案例，而在今(111)年度本計畫將會針對監測站所拍攝的時序列影像進行分析，持續蒐集裂流影像案例，並利用該影像資料可提供時間尺度資訊的特性。

宜蘭縣外澳裂流影像監測站已於去(110)年 10 月 15 日開始啟用，運行至今(期末報告繳交)均非常順利，由於監測站影像資料品質會受到光線的影響，故該寫影像資料在進行分析時，每日僅會使用上午六點至下午六點約 12 小時的影像資料，且若拍攝當下風雨過大，導致攝影機晃動頻繁或是雨水遮擋視線，亦會造成影像無法進行判釋。本計畫已分析 110 年 10 月 15 日至 111 年 10 月 31 日的影像資料，可進行分析之清晰影像約 4138 個小時，共蒐集 175 筆的裂流案例，裂流影像案例如圖 2-10 至圖 2-12 所示，

完整裂流案例發生時之監測站影像資料詳如**附錄八**，裂流案例的紀錄考量同一時間會出現多個裂流渠道，如 111 年 2 月 15 日早上 9 點三處攝影機均有裂流渠道的紀錄，如**圖 2-13** 所示，為便利後續可對不同渠道的裂流特性進行分析，在案例紀錄上以各個裂流渠道作為紀錄單位，內容可分為基本資料有案例編號、開始時間、結束時間、裂流發生位置和延時，以及裂流發生當下的海氣象環境，包含有示性波高、平均週期、尖峰週期、與海岸線夾角(正值為向岸、負值為離岸)、風速和水位，由於裂流深受地形及近岸碎波能量變化的影響，因此本計畫亦統計裂流發生時之海灘類型參數。由於裂流發生時長多超過一小時，其過程中周遭海氣象條件已有些微變化，故本季將會以最小值和最大值進行記錄，描述在該裂流案例發生期間，海氣象條件的變化情形，詳見**表 2-2** 所示，以下將針對裂流發生時的特徵進行探討。

本計畫彙整該些裂流案例發生的位置，在空間分布上可以發現於外澳海域發生的裂流主要分布於 11 個位置(如**圖 2-14** 和**圖 2-15**)，分別為攝影機一所拍攝的 R1、R2 和 R3、攝影機二所拍攝的 R4、R5 和 R6，而攝影機三所拍攝到的範圍基本上均有裂流發生的紀錄，因此本計畫將攝影機三區分為五個區域，分別為 R7、R8、R9、R10 和 R11，來劃分裂流發生時係屬哪一個區域。統計各渠道發生的裂流次數和累計時長，如**表 2-3** 和**圖 2-16** 所示，當中位於烏石漁港北側防波堤旁的 R11 出現的次數最多有 25 筆，累計時長也是最多的達 130 個小時，其次為 R8 的位置有 24 筆，累計時長為 112 小時，最少的則是 R7 僅有 5 筆案例，累計時長則僅有 26 小時，若將裂流發生的累積時長除以可觀測的所有時間，便可以得到各個位置上的發生機率，結果如**圖 2-17** 所示，顯示外澳海域所發生的裂流機率均小於 3.5%。本計畫亦根據 Castelle et al. (2016)所彙整的裂流可能發生的機制，從裂流所發生的位置進行分析，其中 R1 位於外澳海灣的最北側、R2 則是在退潮時可明顯發現該位置處有明顯的礁石，而 R9 和 R10 則是位於烏石漁港北側防坡堤旁，故本計畫初步推測以上四個位置的裂流係屬於邊界控制形式的裂流(boundary controlled rip currents)，較可能是因為波浪入射海岸後淺化和折射後所引致的。其餘位置所發生的裂流則可能是因為地形水深不均、在波流交互作用下所產生的典型裂流現象。

在裂流特徵的分析，本計畫透過計算碎波帶斷裂處的平均寬度(分別碎波帶斷裂處的最外圍、中間和灘線位置的平均)，同時每小時計算乙次，最後將全部資料進行平均，視為該次案例發生時裂流的寬度，統計結果如表 2-2 所示，裂流寬度介於 12m 至 83 m，整體平均值大約介於 30 m 至 40 m 間，從表 2-3 可發現於 R2、R4 和 R11 位置所發現的裂流，寬度通常較大，平均約有 40 m 以上，而 R3 和 R7 的裂流案例其寬度則相較於其他渠道的裂流較小，平均不到 30 m。本計畫也進行時間尺度上的分析，如表 2-2 所示，裂流發生的延時(即裂流發生的持續時間)平均約為 4.2 個小時，裂流發生平均延時最長的 R7 和 R11 位置的裂流，均為 5.2 個小時，而裂流發生平均延時最短的為 R2，僅有 3 個小時，但是在不同案例間有的發生時間不到 1 小時，而有的案例卻可以維持 10 小時，例如編號 17 號 110 年 11 月 25 日於 R1 位置所發生的裂流僅持續半個小時左右，反之編號 20 號 110 年 12 月 15 日於 R6 位置發生的裂流維持超過 10 小時。

此外，通過不同月份統計有裂流出現的累積時間，從結果圖 2-18 可以發現於九月至十二月期間裂流數量有明顯較多，且裂流持續時間也較長，平均延時均達到 3.0 小時以上，而一月份雖然裂流案例數量較少僅有 6 筆，然每起裂流平均發生時間也來到 3.7 個小時，根據前人文獻當波高較小時(小於 1 m)，裂流現象較不顯著(Bruneau et al., 2009)。位於臺灣東北角海域的宜蘭縣外澳沙灘，於每年九月開始將會受到東北季風的影響，該期間波高分布通常均大於 1m，因此才會導致在這段期間內裂流發生的案例數量和累計時長較長。反觀裂流的寬度在不同月份下的情況都沒有顯著的差異，與不同位置的統計結果相似，均介於 30 m 至 40 m 間，本計畫初步認為裂流的寬度與水深地形分布情形較有關係，故較不易受到周遭海氣象特性之影響。

表 2-2 本計畫在宜蘭縣外澳蒐集之列劉案例清單(觀測時間：2021/10/15 至 2022/10/31；資料來源：攝影機、浮標和潮位站資料)

編號	起始時間	結束時間	位置	延時 (hr)	裂流 寬度(m)	示性波高(m)		平均週期(s)		尖峰週期(s)		與海岸線夾角 (°)		平均風速(m/s)		水位(cm)		Ω(海灘類型參數)	
						最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值
Waiou_001	2021110106	2021110111	R1	6	34	0.92	0.75	6.8	5.6	7.7	5.9	71.4	37.4	-	-	92	-489	4.85	3.94
Waiou_002	2021110106	2021110114	R11	9	52	0.96	0.75	6.8	4.6	7.7	5.9	71.4	37.4	-	-	148	-489	5.30	3.94
Waiou_003	2021110207	2021110214	R1	8	33	1.17	0.65	7.1	5.3	8.3	5.8	82.4	14.4	6.4	2.4	129	-492	5.75	3.40
Waiou_004	2021110208	2021110214	R7	7	24	1.17	0.65	7	5.3	8.3	5.8	71.4	14.4	6.4	2.4	80	-492	5.75	3.40
Waiou_005	2021110208	2021110213	R11	6	54	1.17	0.65	7	5.4	8.3	6	71.4	14.4	6.4	2.4	-120	-492	5.75	3.40
Waiou_006	2021110109	2021110112	R7	4	24	0.96	0.81	6.4	5.3	6.7	5.9	71.4	37.4	-	-	-291	-489	5.18	4.05
Waiou_007	2021110109	2021110112	R9	4	39	0.96	0.81	6.4	5.3	6.7	5.9	71.4	37.4	-	-	-291	-489	5.18	4.05
Waiou_008	2021110209	2021110213	R9	5	32	1.17	0.65	6.5	5.4	7.7	6	71.4	14.4	6.4	2.4	-191	-492	5.75	3.40
Waiou_009	2021110315	2021110316	R1	2	35	1.3	1.11	5.8	5.8	7.7	6.7	48.4	37.4	6	5.3	529	246	6.15	5.46
Waiou_010	2021110409	2021110415	R11	7	53	1.09	0.59	6.3	4.9	8.2	6	71.4	26.4	-	-	204	-435	5.60	3.36
Waiou_011	2021110410	2021110414	R7	5	28	1.09	0.72	6.3	5.2	8.2	6.1	71.4	26.4	-	-	-137	-435	5.45	3.74
Waiou_012	2021110410	2021110414	R9	5	33	1.09	0.72	6.3	5.2	8.2	6.1	71.4	26.4	-	-	-137	-435	5.45	3.74
Waiou_013	2021110510	2021110515	R11	6	49	1.13	0.67	6.1	5	7.3	5.8	52.6	30.6	-	-	155	-316	6.06	3.74
Waiou_014	2021111609	2021111613	R4	5	54	1.02	0.68	6.1	5.7	8.6	6.4	59.4	41.6	-	-	-40	-313	5.13	3.74
Waiou_015	2021111706	2021111708	R2	3	39	1.11	0.99	6.1	6	7.5	6.8	48.4	7.6	2.9	1.5	346	96	5.29	4.91
Waiou_016	2021111713	2021111716	R2	4	37	1.26	1.13	6.1	5.6	8.5	6.8	63.6	7.6	-	-	463	-108	6.01	5.36
Waiou_017	2021111713	2021111714	R4	2	39	1.25	1.13	6.1	5.9	8.5	7.4	63.6	14.4	-	-	98	-108	5.91	5.36
Waiou_018	2021111806	2021111809	R2	4	46	0.97	0.69	6.1	4.6	9.8	8	52.6	18.6	7.7	5.2	484	118	5.63	3.70
Waiou_019	2021111910	2021111914	R2	5	47	1.29	0.72	7.2	6.1	8.9	7.6	71.4	14.4	7.2	3.1	128	-117	5.92	3.53
Waiou_020	2021112007	2021112011	R2	5	45	1.48	1.02	6.1	5.5	8.8	8.1	71.4	48.4	8	6.2	535	61	6.78	5.18
Waiou_021	2021112013	2021112014	R8	2	28	1.54	1.41	5.9	5.8	7.8	7.7	59.4	59.4	7.1	6.4	33	-52	6.98	6.47
Waiou_022	2021112015	2021112017	R2	3	47	1.37	1.19	5.6	5.4	7.6	6.4	37.4	3.4	6.4	4.3	553	192	6.61	5.88
Waiou_023	2021112508	2021112509	R2	2	58	0.69	0.66	5.5	5.3	7.1	6.2	14.4	3.4	-	-	61	-69	4.04	3.82
Waiou_024	2021112515	2021112515	R2	1	58	0.76	0.76	5.5	5.5	5.5	5.5	71.4	71.4	2	2	8	8	4.25	4.25
Waiou_025	2021120106	2021120112	R4	7	83	1.87	1.39	6.4	5.8	11.1	9.1	82.4	-3.4	9.8	6.9	237	-284	8.08	6.20
Waiou_026	2021120114	2021120117	R3	4	42	1.74	-	6.8	-	11.3	-	71.4	-16.4	8.3	6.9	612	411	6.90	0.47
Waiou_027	2021121406	2021121410	R8	5	35	1.55	1.31	6.4	6	9.6	8.2	82.4	37.4	3.5	1.1	-30	-289	6.73	5.87
Waiou_028	2021121412	2021121416	R8	5	41	1.68	1.12	6.4	5.8	9.4	7.5	63.6	30.6	2	1.3	326	-61	7.30	5.38
Waiou_029	2021121506	2021121515	R5	10	49	1.26	1.03	6.6	5.5	9.6	6.2	86.6	30.6	6.4	1.4	385	-142	5.91	4.75

Waiou_030	2021121506	2021121515	R8	10	37	1.26	1.03	6.6	5.5	9.6	6.2	86.6	30.6	6.4	1.4	385	-142	5.91	4.75
Waiou_031	2021121512	2021121513	R2	2	38	1.24	1.2	6.1	5.9	8.1	6.2	86.6	52.6	3.8	2.8	149	-4	5.75	5.73
Waiou_032	2021121608	2021121609	R4	2	64	0.91	0.87	6.3	5.9	9.4	9.1	63.6	63.6	-	-	114	-12	4.66	4.32
Waiou_033	2021121610	2021121612	R8	3	34	1.31	0.94	6.3	5.6	8.9	8.6	86.6	63.6	7.4	1.2	-9	-84	6.32	4.57
Waiou_034	2021121909	2021121912	R1	4	27	1.19	0.84	6.4	6	10.2	8.5	82.4	37.4	5.8	5	48	-192	5.40	4.34
Waiou_035	2021122106	2021122111	R1	6	31	0.97	0.77	5.6	5.2	8.9	5.3	52.6	18.6	-	-	200	-72	5.05	4.34
Waiou_036	2021122114	2021122116	R1	3	32	0.99	0.9	5.7	5.3	8.1	5.1	75.6	30.6	-	-	193	-20	5.18	4.94
Waiou_037	2021122807	2021122812	R8	6	36	1.24	1.03	6.8	6	9.4	7.7	82.4	-7.6	4.1	2	162	-477	5.35	5.06
Waiou_038	2021122808	2021122812	R10	5	31	1.24	1.03	6.8	6	9.4	7.7	82.4	59.4	4.1	2.1	162	-439	5.35	5.06
Waiou_039	2021122910	2021122912	R8	3	37	0.88	0.82	6.5	5.6	8.1	5.5	75.6	52.6	-	-	163	-152	4.69	4.12
Waiou_040	2021122910	2021122912	R10	3	35	0.88	0.82	6.5	5.6	8.1	5.5	75.6	52.6	-	-	163	-152	4.69	4.12
Waiou_041	2021122910	2021122912	R5	3	33	0.88	0.82	6.5	5.6	8.1	5.5	75.6	52.6	-	-	163	-152	4.69	4.12
Waiou_042	2021122910	2021122912	R8	3	37	0.88	0.82	6.5	5.6	8.1	5.5	75.6	52.6	-	-	163	-152	4.69	4.12
Waiou_043	2021122910	2021122912	R10	3	35	0.88	0.82	6.5	5.6	8.1	5.5	75.6	52.6	-	-	163	-152	4.69	4.12
Waiou_044	2021122910	2021122912	R5	3	33	0.88	0.82	6.5	5.6	8.1	5.5	75.6	52.6	-	-	163	-152	4.69	4.12
Waiou_045	2021123006	2021123011	R8	6	30	1.53	-	5.5	-	7.8	-	82.4	-16.4	9.7	8.4	24	-193	7.19	0.47
Waiou_046	2021123006	2021123011	R8	6	30	1.53	-	5.5	-	7.8	-	82.4	-16.4	9.7	8.4	24	-193	7.19	0.47
Waiou_047	2021123007	2021123010	R10	4	32	1.51	1.23	5.5	5.3	7.8	7.4	82.4	71.4	9.7	8.7	-114	-193	7.19	6.24
Waiou_048	2021123007	2021123010	R10	4	32	1.51	1.23	5.5	5.3	7.8	7.4	82.4	71.4	9.7	8.7	-114	-193	7.19	6.24
Waiou_049	2022010111	2022010112	R8	2	35	1.04	1.02	6.1	6	8.2	7.8	86.6	59.4	5.6	5.2	-95	-167	5.09	4.97
Waiou_050	2022010111	2022010112	R10	2	28	1.04	1.02	6.1	6	8.2	7.8	86.6	59.4	5.6	5.2	-95	-167	5.09	4.97
Waiou_051	2022010211	2022010214	R5	4	38	1.36	1.11	5.7	5.4	8.3	7.4	71.4	59.4	8.8	7	107	-111	6.50	5.52
Waiou_052	2022010406	2022010410	R5	5	23	1.09	0.86	5.1	4.8	7.3	6.4	59.4	37.4	8.4	6.8	347	-63	5.83	4.94
Waiou_053	2022010414	2022010417	R5	4	47	1.37	1.16	5.8	5.3	7.6	6.8	59.4	48.4	9.3	7.8	439	-82	6.61	5.65
Waiou_054	2022011106	2022011112	R2	7	40	2.17	1.76	5.7	5	9.1	6.6	82.4	71.4	13.4	9.8	243	-120	9.49	7.97
Waiou_055	2022020107	2022020107	R5	1	40	0.76	0.76	5.4	5.4	8	8	37.4	37.4	2.8	2.8	453	453	4.30	4.30
Waiou_056	2022021406	2022021407	R2	2	58	1.09	0.86	5.8	5.1	8.6	8.3	71.4	59.4	7.2	7	389	339	5.39	4.88
Waiou_057	2022021407	2022021407	R8	1	43	0.86	0.86	5.1	5.1	8.3	8.3	59.4	59.4	7	7	389	389	4.88	4.88
Waiou_058	2022021407	2022021407	R10	1	33	0.86	0.86	5.1	5.1	8.3	8.3	59.4	59.4	7	7	389	389	4.88	4.88
Waiou_059	2022021412	2022021414	R6	3	39	1.66	1.03	6.1	5.4	8.8	7.5	71.4	48.4	8.9	6.8	256	18	7.23	5.40
Waiou_060	2022021413	2022021416	R8	4	35	1.66	1.3	6.1	5.4	9.3	8.1	71.4	71.4	8.9	7.6	523	135	7.23	5.96
Waiou_061	2022021413	2022021416	R10	4	32	1.66	1.3	6.1	5.4	9.3	8.1	71.4	71.4	8.9	7.6	523	135	7.23	5.96
Waiou_062	2022021416	2022021418	R6	3	42	1.39	1.11	6.2	6	9.4	8.8	71.4	59.4	8	5.4	601	523	6.33	5.24

Waiou_063	2022021416	2022021418	R2	3	43	1.39	1.11	6.2	6	9.4	8.8	71.4	59.4	8	5.4	601	523	6.33	5.24
Waiou_064	2022021507	2022021511	R8	5	33	1.07	0.99	6.2	5.6	9.1	8.1	71.4	37.4	7.5	2	434	-10	5.43	4.91
Waiou_065	2022021507	2022021511	R10	5	24	1.07	0.99	6.2	5.6	9.1	8.1	71.4	37.4	7.5	2	434	-10	5.43	4.91
Waiou_066	2022021509	2022021517	R6	9	38	1.45	0.92	6.3	5.7	9.1	7.1	59.4	26.4	6.4	1.3	626	-51	6.46	4.75
Waiou_067	2022021509	2022021515	R1	7	59	1.45	0.92	6.2	5.8	8.9	7.1	48.4	26.4	6.4	1.3	301	-51	6.46	4.75
Waiou_068	2022021606	2022021611	R8	6	34	1.86	1.59	6.4	5.9	9.1	8.3	71.4	48.4	10.5	8.2	537	15	7.55	6.78
Waiou_069	2022021606	2022021608	R6	3	45	1.86	1.59	6.4	5.9	8.8	8.3	59.4	59.4	8.2	8.2	537	401	7.55	6.78
Waiou_070	2022021607	2022021611	R10	5	39	1.86	1.59	6.4	6.3	9.1	8.8	71.4	48.4	10.5	8.2	537	15	7.55	6.78
Waiou_071	2022030106	2022030106	R10	1	34	0.57	0.57	6.1	6.1	8.3	8.3	41.6	41.6	-	-	399	399	3.21	3.21
Waiou_072	2022031611	2022031613	R4	3	68	0.77	0.68	5.7	5.2	8.5	6.6	59.4	26.4	6.6	1.6	0	-88	4.44	3.82
Waiou_073	2022032013	2022032015	R2	3	49	1.18	1.01	6.3	5.5	8.1	5.7	71.4	26.4	5.4	4.2	-401	-504	5.85	5.04
Waiou_074	2022032015	2022032017	R11	3	42	1.18	1.07	5.7	5	6.4	4.7	59.4	26.4	5.4	2.7	112	-401	5.85	5.37
Waiou_075	2022032308	2022032309	R11	2	44	2.32	1.97	7.4	6.7	10.4	10.2	82.4	59.4	8.1	7.9	720	718	8.09	7.65
Waiou_076	2022032411	2022032412	R11	2	34	1.18	0.99	6.9	6.7	8.6	8.5	82.4	59.4	4.7	3.9	569	374	5.21	4.48
Waiou_077	2022032614	2022032614	R8	1	29	1.12	1.12	6.2	6.2	7.4	7.4	52.6	52.6	-	-	353	353	5.27	5.27
Waiou_078	2022032614	2022032617	R5	4	43	1.22	1.12	6.6	6.2	8.3	7.3	52.6	26.4	-	-	353	-113	5.47	5.22
Waiou_079	2022040811	2022040813	R9	3	28	1.08	1.03	6.5	6.3	7.2	6.7	82.4	7.6	3.9	2.3	276	33	5.08	4.80
Waiou_080	2022040910	2022040913	R9	4	33	1.23	0.75	6.2	5.7	9.3	7.1	52.6	3.4	-	-	290	168	5.97	3.98
Waiou_081	2022040910	2022040913	R11	4	37	1.23	0.75	6.2	5.7	9.3	7.1	52.6	3.4	-	-	290	168	5.97	3.98
Waiou_082	2022040910	2022040911	R1	2	23	1.23	0.99	6.2	5.7	9.3	8.5	41.6	3.4	1.5	1.2	290	274	5.97	4.80
Waiou_083	2022041207	2022041213	R9	7	30	1.07	0.87	6.5	6.1	9.4	7.8	86.6	41.6	-	-	271	89	5.04	4.41
Waiou_084	2022041208	2022041211	R4	4	64	1.04	0.87	6.5	6.1	9.3	7.8	86.6	63.6	-	-	209	89	4.83	4.41
Waiou_085	2022041406	2022041409	R9	4	32	1.3	0.99	8.9	7.9	13.1	11.6	86.6	-7.6	-	-	584	160	4.65	4.08
Waiou_086	2022041406	2022041407	R2	2	45	1.3	0.99	8.8	7.9	13.1	12.1	86.6	63.6	-	-	584	493	4.65	4.08
Waiou_087	2022041506	2022041507	R9	2	28	1.71	1.47	7.1	6.5	10.8	10.6	48.4	37.4	7.6	6	638	587	6.62	6.27
Waiou_088	2022050313	2022050316	R8	4	36	1.96	1.41	6.3	5.9	7.8	7.5	82.4	48.4	8.9	5.2	-528	-721	8.28	6.40
Waiou_089	2022050315	2022050316	R9	2	37	1.96	1.41	5.9	5.9	7.8	7.8	71.4	48.4	8.9	6.8	-528	-701	8.28	6.47
Waiou_090	2022050611	2022050614	R5	4	67	1.12	0.63	6.6	5.3	10.6	6.7	82.4	59.4	8.3	5.2	249	-366	5.22	3.46
Waiou_091	2022050611	2022050614	R5	4	37	1.12	0.63	6.6	5.3	10.6	6.7	82.4	59.4	8.3	5.2	249	-366	5.22	3.46
Waiou_092	2022050611	2022050614	R8	4	32	1.12	0.63	6.6	5.3	10.6	6.7	82.4	59.4	8.3	5.2	249	-366	5.22	3.46
Waiou_093	2022051706	2022051708	R11	3	55	1.19	1	5.8	5	9.1	8.1	59.4	37.4	7.1	5.4	741	577	6.30	5.11
Waiou_094	2022052215	2022052218	R11	4	52	1.1	0.85	6.9	6.7	10	8.1	82.4	48.4	4.8	2.6	-94	-481	4.85	4.07
Waiou_095	2022052216	2022052216	R2	1	48	0.87	0.87	6.8	6.8	8.1	8.1	59.4	59.4	4.8	4.8	-317	-317	4.10	4.10

Waiou_096	2022060112	2022060113	R1	2	43	0.32	0.28	5	5	7.3	5.5	41.6	41.6	-	-	-409	-580	2.35	2.13
Waiou_097	2022060606	2022060611	R6	6	15	0.5	0.37	5.3	4.7	7.7	4.5	75.6	18.6	-	-	648	329	3.37	2.72
Waiou_098	2022061109	2022061112	R5	4	33	0.92	0.64	5.6	5.1	6.8	6.2	63.6	41.6	-	-	-165	-338	5.02	3.70
Waiou_099	2022061209	2022061213	R1	5	44	0.87	0.61	6.1	5.4	8.5	5.7	82.4	18.6	-	-	-210	-518	4.55	3.41
Waiou_100	2022061309	2022061315	R1	7	45	0.96	0.59	6.1	5	8.8	5.5	71.4	18.6	-	-	34	-671	5.37	3.29
Waiou_101	2022061410	2022061413	R10	4	32	0.91	0.59	6.2	5.7	7.5	6.6	63.6	41.6	-	-	126	-803	4.76	3.36
Waiou_102	2022061912	2022061917	R6	6	36	0.61	0.48	5.2	4.6	6	5	63.6	30.6	-	-	435	-536	3.82	3.19
Waiou_103	2022062509	2022062513	R2	5	36	0.76	-	4.6	-	5.6	-	52.6	-16.4	-	-	61	-376	4.97	0.47
Waiou_104	2022062708	2022062714	R11	7	41	0.87	-	5.2	-	7.8	-	52.6	-16.4	4.7	1.9	161	-562	5.04	0.47
Waiou_105	2022062709	2022062714	R10	6	32	0.87	-	5.2	-	7.8	-	52.6	-16.4	4.7	1.9	-90	-562	5.04	0.47
Waiou_106	2022062806	2022062809	R5	4	37	0.87	0.8	5.5	4.9	8.6	7.8	63.6	41.6	2.6	1.7	676	63	5.04	4.42
Waiou_107	2022062806	2022062806	R6	1	36	0.8	0.8	5	5	8.2	8.2	63.6	63.6	1.7	1.7	676	676	4.68	4.68
Waiou_108	2022062909	2022062914	R11	6	46	1.54	1.08	5.9	5.3	9.3	4.9	63.6	41.6	7.6	6.2	251	-601	7.39	5.33
Waiou_109	2022063010	2022063015	R4	6	78	1.37	0.94	5.5	5	8.3	6.7	63.6	30.6	7.2	5.9	148	-548	6.61	5.10
Waiou_110	2022070110	2022070115	R11	6	46	1.32	1.03	5.9	5.8	8.8	7.1	41.6	7.6	6.3	3	305	-540	6.22	5.17
Waiou_111	2022070111	2022070115	R8	5	47	1.32	1.05	5.9	5.8	8.5	7.1	41.6	7.6	6.3	3	28	-540	6.22	5.24
Waiou_112	2022070208	2022070209	R3	2	28	0.86	0.67	6.3	5.3	8.1	7.3	63.6	63.6	-	-	816	731	4.28	3.96
Waiou_113	2022070208	2022070211	R2	4	36	0.93	0.67	6.9	5.3	10.8	7.3	63.6	-7.6	-	-	816	218	4.63	3.96
Waiou_114	2022070212	2022070216	R9	5	47	1.02	0.7	7.1	6.2	9.1	8.2	75.6	7.6	-	-	-52	-492	4.49	3.64
Waiou_115	2022070214	2022070217	R11	4	44	0.84	0.61	6.8	6	8.6	7.3	52.6	7.6	-	-	-189	-492	4.00	3.41
Waiou_116	2022070506	2022070511	R3	6	12	0.6	0.47	5.5	5.2	6.7	6.1	63.6	52.6	3.4	1.1	714	241	3.60	3.03
Waiou_117	2022070506	2022070509	R7	4	29	0.6	0.49	5.4	5.2	6.7	6.4	63.6	52.6	2.7	1.1	680	241	3.60	3.09
Waiou_118	2022071110	2022071111	R11	2	41	0.45	-	4.8	-	4.4	-	30.6	-16.4	4.3	3.4	-466	-510	3.11	0.47
Waiou_119	2022071311	2022071314	R8	4	37	0.45	0.37	5.6	5.2	9.3	6.7	63.6	30.6	2.6	1.8	-563	-809	2.94	2.45
Waiou_120	2022071312	2022071314	R11	3	43	0.45	0.38	5.5	5.2	9.1	6.7	63.6	30.6	2.4	1.8	-593	-809	2.94	2.53
Waiou_121	2022071411	2022071417	R11	7	42	1.27	0.38	6.1	4.2	8.3	7.2	63.6	30.6	6.1	3.1	116	-814	6.04	2.74
Waiou_122	2022071411	2022071412	R8	2	34	0.62	0.38	6.1	4.8	8.3	7.8	63.6	30.6	3.5	3.2	-359	-635	3.42	2.74
Waiou_123	2022081809	2022081810	R3	2	26	0.72	0.54	5	5	6.5	6	52.6	41.6	4.3	1.1	493	354	4.32	3.49
Waiou_124	2022081906	2022081912	R8	7	37	1.05	0.87	5.1	4.7	7.8	5.3	63.6	41.6	6.5	1.4	336	-170	5.79	5.10
Waiou_125	2022081907	2022081912	R11	6	38	1.05	0.87	5.1	4.7	7.6	5.3	63.6	41.6	6.5	1.4	336	-157	5.79	5.10
Waiou_126	2022081909	2022081913	R5	5	24	1.03	0.87	5.1	4.7	7.8	7.2	63.6	41.6	6.5	3.4	336	63	5.79	5.10
Waiou_127	2022081909	2022081909	R6	1	28	1.02	1.02	5.1	5.1	7.2	7.2	52.6	52.6	4.6	4.6	63	63	5.55	5.55
Waiou_128	2022082208	2022082212	R1	5	23	0.49	0.35	5.7	3.9	9.1	6.4	86.6	30.6	5.1	2.9	68	-251	3.25	2.38

Waiou_129	2022082209	2022082213	R1	5	24	0.49	0.37	5.7	3.9	9.1	4.1	75.6	-75.6	5.1	2.8	236	-251	3.34	2.75
Waiou_130	2022082212	2022082214	R5	3	26	0.44	0.4	4.1	3.9	7.3	4.1	63.6	-75.6	3.6	2.8	236	-73	3.34	3.19
Waiou_131	2022082310	2022082315	R7	6	36	0.75	0.64	5.4	4.3	8.1	7	75.6	41.6	6.4	-	314	-365	4.81	3.78
Waiou_132	2022082310	2022082313	R11	4	39	0.73	0.64	5.4	4.4	8.1	7.1	75.6	52.6	6.2	-	-94	-365	4.70	3.78
Waiou_133	2022083013	2022083016	R5	4	22	0.32	0.22	5.2	4.8	6.9	5.4	59.4	37.4	3.8	1.1	-139	-354	2.41	1.74
Waiou_134	2022090407	2022090413	R3	7	24	2.05	1.27	6.8	5.9	11.9	8.8	82.4	-37.4	9.7	5.7	627	-118	7.96	5.79
Waiou_135	2022090512	2022090515	R11	4	37	1.44	1.26	7.2	6.8	10.4	8.8	86.6	-3.4	2.1	-	566	268	5.76	5.37
Waiou_136	2022090714	2022090717	R4	4	18	0.87	0.65	5.3	5	10.2	6.4	59.4	26.4	5.4	1.5	523	-46	4.87	3.87
Waiou_137	2022090807	2022090814	R4	8	19	0.89	0.52	6.2	4.5	6.8	6.1	71.4	26.4	6	2.9	282	-698	4.96	3.43
Waiou_138	2022091014	2022091016	R4	3	17	0.61	0.58	3.9	3.8	7.1	7	48.4	37.4	8	7.8	157	-489	4.38	4.28
Waiou_139	2022091509	2022091512	R3	4	27	0.52	0.35	5.1	4.4	9.8	5.2	86.6	41.6	6	1.1	594	346	3.43	2.71
Waiou_140	2022091608	2022091617	R3	10	26	0.83	0.43	7.4	4	10.6	3.5	82.4	48.4	9.4	1.1	596	250	5.25	2.54
Waiou_141	2022091713	2022091715	R8	3	26	0.64	0.53	5.5	4.6	12.4	8	71.4	37.4	7.3	6.6	504	460	4.15	3.44
Waiou_142	2022092208	2022092216	R4	9	26	1.09	0.53	6.5	4.6	10.2	6.8	82.4	37.4	8.3	5.5	553	-314	5.45	3.36
Waiou_143	2022092610	2022092614	R1	5	34	0.85	0.62	5.8	5.4	9.1	7.5	71.4	37.4	4.9	3.1	141	-436	4.47	3.57
Waiou_144	2022092708	2022092712	R8	5	28	0.72	0.55	6.5	5.7	9.6	6.1	63.6	37.4	3	-	827	-220	3.74	3.12
Waiou_145	2022092709	2022092712	R10	4	28	0.68	0.55	6.1	5.7	8.6	6.1	63.6	37.4	3	1.1	634	-220	3.74	3.12
Waiou_146	2022092809	2022092811	R5	3	25	0.41	0.33	5.5	5.1	7.1	6.3	52.6	7.6	1.2	-	739	238	2.68	2.27
Waiou_147	2022092810	2022092812	R10	3	25	0.41	0.29	5.5	5.4	7.1	6.4	52.6	7.6	2.3	-	527	-17	2.68	2.09
Waiou_148	2022092912	2022092913	R1	2	32	0.35	0.28	5.8	5.3	7.7	7.2	71.4	37.4	3.3	1.4	155	-41	2.30	2.06
Waiou_149	2022100311	2022100317	R4	7	18	0.36	0.27	4.7	4	8.6	3.9	75.6	-86.6	5.4	2.4	385	121	2.87	2.32
Waiou_150	2022100312	2022100314	R8	3	21	0.35	0.27	4.6	4.1	8.3	4.6	75.6	-59.4	5.4	3.6	374	261	2.64	2.32
Waiou_151	2022100412	2022100415	R4	4	16	0.49	0.25	5.5	4.9	7.1	6.9	86.6	52.6	1.8	-	570	95	3.06	1.96
Waiou_152	2022100915	2022100916	R2	2	26	1.07	0.86	5	4.7	8.3	6.2	59.4	14.4	5.5	5.3	245	-100	5.82	5.12
Waiou_153	2022101008	2022101008	R2	1	28	1.06	1.06	5.1	5.1	8.9	8.9	-3.4	-3.4	10.9	10.9	692	692	5.71	5.71
Waiou_154	2022101011	2022101013	R1	3	31	1.64	1.1	5.9	5.1	9.3	4.8	82.4	48.4	10	8.3	-205	-464	7.24	5.67
Waiou_155	2022101206	2022101208	R5	3	31	1.22	0.97	5.9	5.3	9.1	8.1	59.4	37.4	7.4	6.6	626	306	5.93	5.22
Waiou_156	2022101206	2022101209	R6	4	32	1.22	0.97	5.9	5.3	9.1	8.1	59.4	37.4	7.4	6.6	626	306	5.93	5.22
Waiou_157	2022101310	2022101313	R8	4	36	1.42	1.18	6.4	5.7	9.3	8.5	82.4	37.4	7.1	6.2	468	-119	6.17	5.48
Waiou_158	2022101607	2022101614	R11	8	41	1.76	1.13	6.8	5.5	9.8	8.6	71.4	3.4	9.3	3.5	304	-187	7.98	5.54
Waiou_159	2022101608	2022101610	R4	3	37	1.62	1.18	6.4	5.8	9.8	8.6	71.4	59.4	9.1	7.3	275	-27	6.81	5.72
Waiou_160	2022101609	2022101612	R9	4	38	1.54	1.13	6.3	5.8	9.8	8.6	71.4	37.4	8	6.7	304	168	6.62	5.54
Waiou_161	2022101709	2022101709	R2	1	25	1.68	1.68	5.7	5.7	9.1	9.1	82.4	82.4	11	11	-114	-114	7.54	7.54

Waiou_162	2022101709	2022101713	R3	5	29	1.79	1.5	5.7	5.2	10	7.6	82.4	59.4	13.7	11	275	-114	8.36	7.24
Waiou_163	2022101709	2022101713	R4	5	31	1.79	1.5	5.7	5.2	10	7.6	82.4	59.4	13.7	11	275	-114	8.36	7.24
Waiou_164	2022101710	2022101714	R5	5	36	1.94	1.5	5.8	5.2	10	7.6	82.4	59.4	13.7	11	275	-114	8.36	7.24
Waiou_165	2022101709	2022101716	R11	8	43	2.18	1.5	5.9	5.2	10	7.6	82.4	-14.4	13.7	11	275	-114	9.04	7.24
Waiou_166	2022102006	2022102009	R9	4	31	1.76	1.6	6.5	6	9.6	8.2	59.4	48.4	8.4	7.1	-169	-457	7.17	6.90
Waiou_167	2022102308	2022102310	R5	3	34	1.42	1.07	6.4	6.2	8.1	7.6	82.4	48.4	7	5.4	51	-394	6.30	4.99
Waiou_168	2022102610	2022102612	R8	3	23	0.81	0.69	6.8	6.3	8.3	7.6	71.4	26.4	2.9	-	111	-286	3.89	3.52
Waiou_169	2022102613	2022102617	R9	5	27	1.15	0.89	6.1	5.1	8	6.4	59.4	18.6	3.4	-	456	-327	5.80	4.48
Waiou_170	2022102810	2022102816	R5	7	34	1.41	0.83	6.7	5.6	8.9	7.3	71.4	7.6	7	3.3	437	-137	6.26	4.23
Waiou_171	2022102812	2022102814	R11	3	35	1.58	0.88	6.7	5.7	8.9	7.3	71.4	7.6	7.7	4.1	330	-137	7.12	4.26
Waiou_172	2022102816	2022102817	R3	2	30	1.58	1.3	5.8	5.7	8.9	7.4	71.4	71.4	7.7	6.7	330	87	7.12	6.22
Waiou_173	2022103006	2022103012	R11	7	37	2.1	1.59	7.4	6.3	12.1	8.6	71.4	52.6	10	8.1	425	-506	8.03	6.72
Waiou_174	2022103010	2022103012	R1	3	31	2.1	1.7	7.4	6.4	9.3	8.6	71.4	59.4	10	8.1	425	385	7.65	7.06
Waiou_175	2022103109	2022103117	R11	9	37	3.3	2.13	7.7	6.4	10.4	9.8	71.4	48.4	12.7	10	405	10	10.73	8.13

*該表統計資料中最大值、最小值係表案例期間出現的最大值和最小值

表 2-3 裂流影像案例發生不同位置與各月份統計表

裂流位置	案例數量	累計時長(hr)	延時(hr)	裂流寬度(m)	月份	案例數量	累計時長(hr)	延時(hr)	裂流寬度(m)
R1	17	75	4.4	34.1	一月	6	22	3.7	35.2
R2	20	60	3.0	42.4	二月	16	27	1.7	39.8
R3	9	42	4.6	27.1	三月	8	17	2.1	42.8
R4	15	72	4.8	42.1	四月	9	20	2.2	35.5
R5	20	83	4.1	35.6	五月	8	15	1.9	45.5
R6	9	36	4.0	34.6	六月	14	62	4.4	39.5
R7	5	26	5.2	28.1	七月	13	35	2.7	37.3
R8	24	112	4.3	34.6	八月	11	27	2.5	31.3
R9	16	54	4.0	32.2	九月	15	68	4.5	29.3
R10	15	54	3.6	31.5	十月	27	80	3	33.3
R11	25	130	5.2	43.2	十一月	24	66	2.8	41.1
					十二月	27	80	3.0	33.3



圖 2-10 攝影機一觀測到之裂流案例示意圖

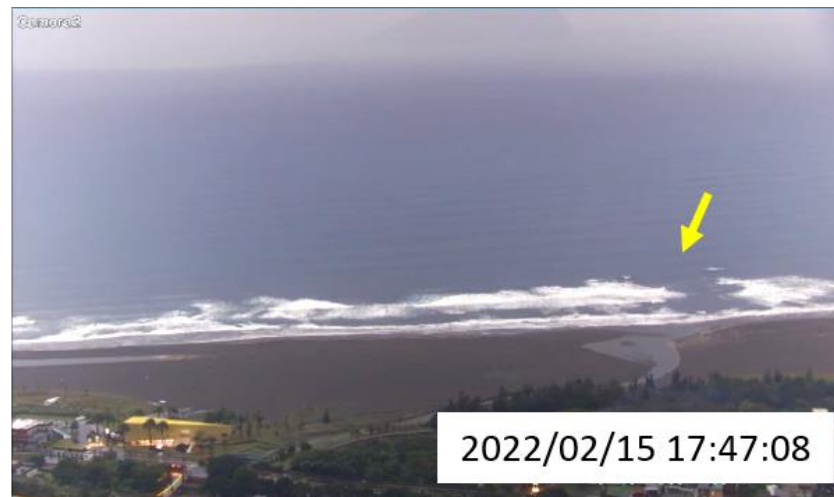


圖 2-11 攝影機二觀測到之裂流案例示意圖

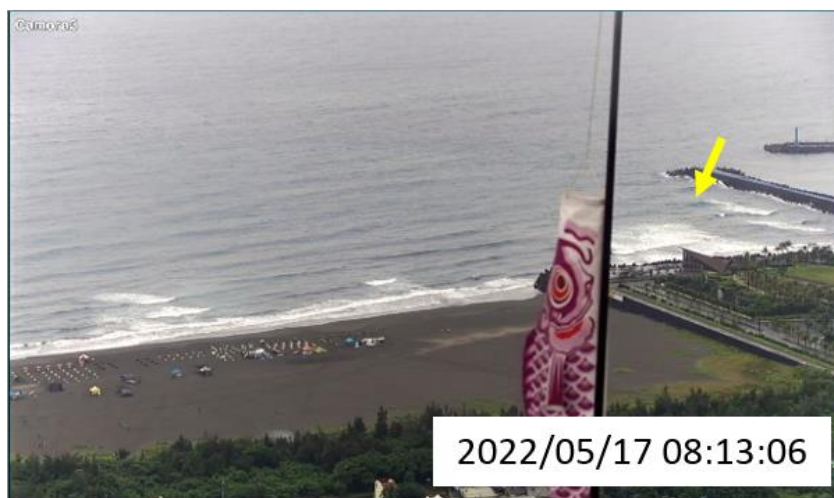


圖 2-12 攝影機三觀測到之裂流案例示意圖

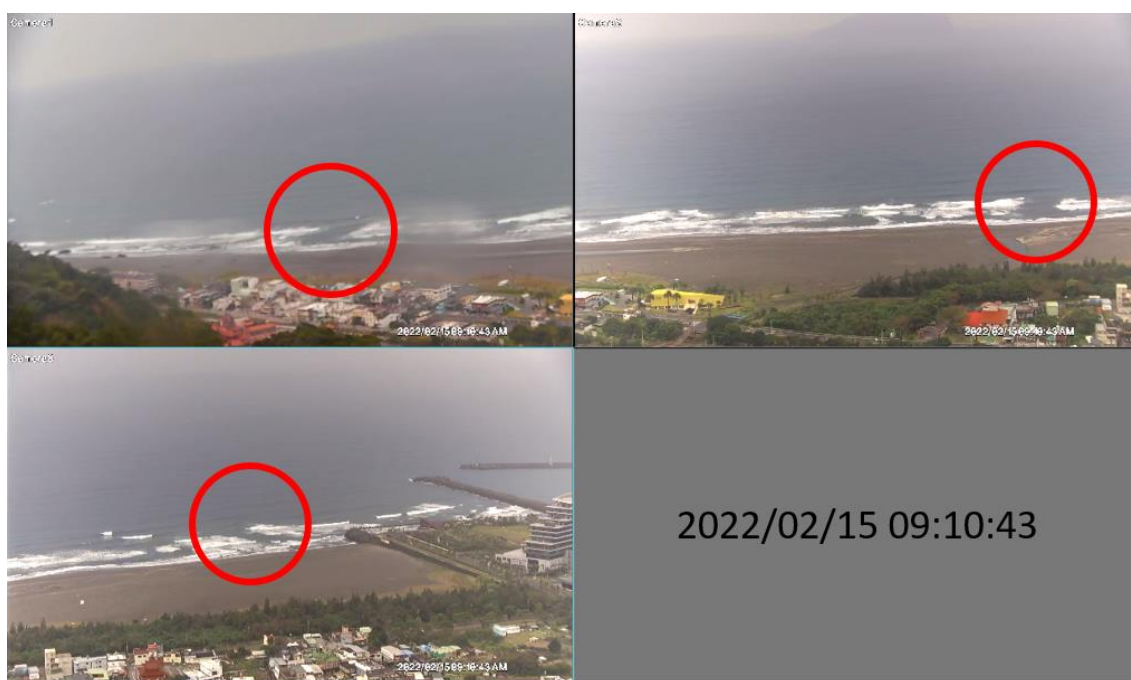


圖 2-13 同一時間點發現多個裂流渠道(2022/02/15 09:10:43)



圖 2-14 外澳海灘各位置裂流發生實際情形示意圖

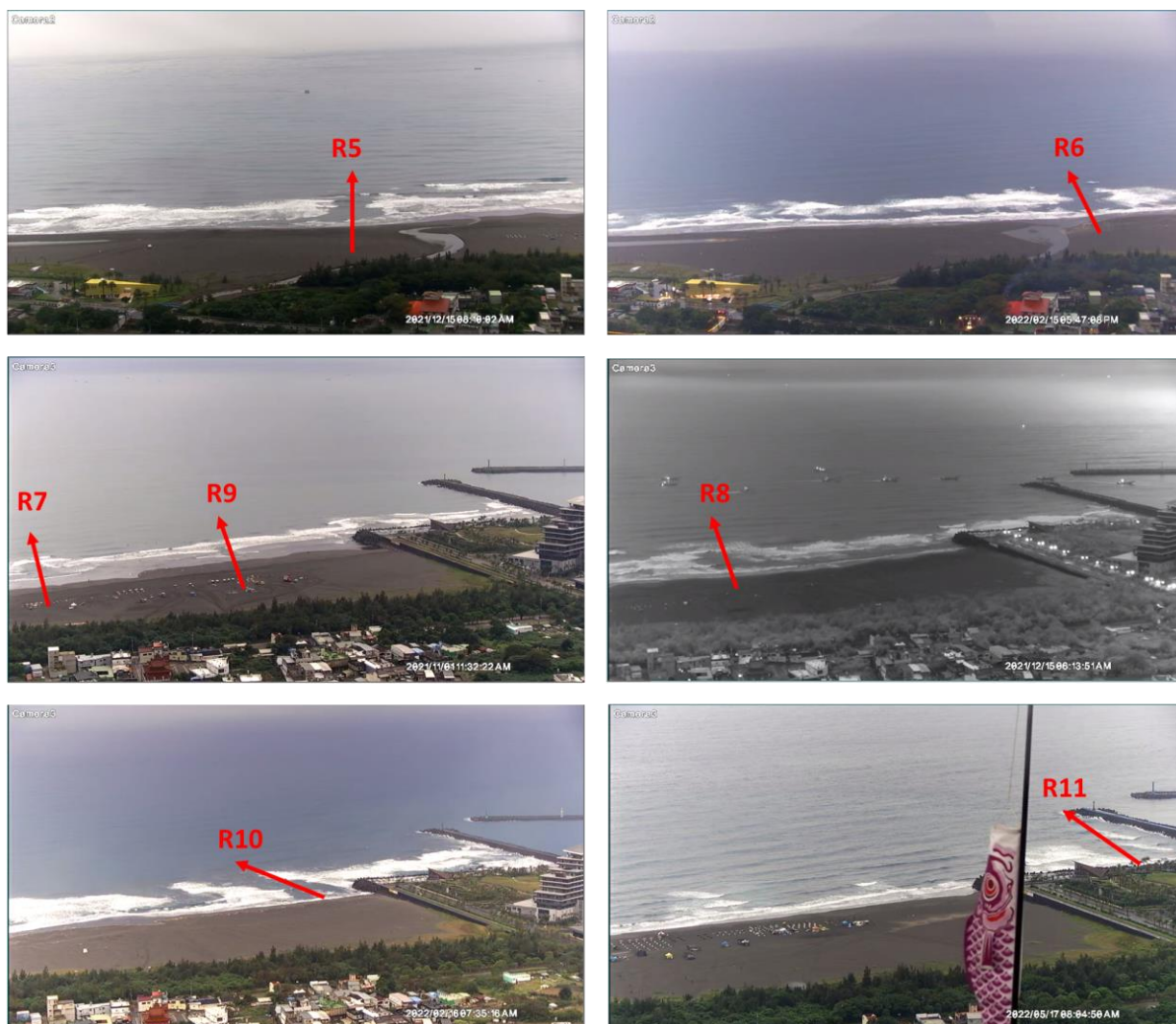


圖 2-14 外澳海灘各位置裂流發生實際情形示意圖(續)

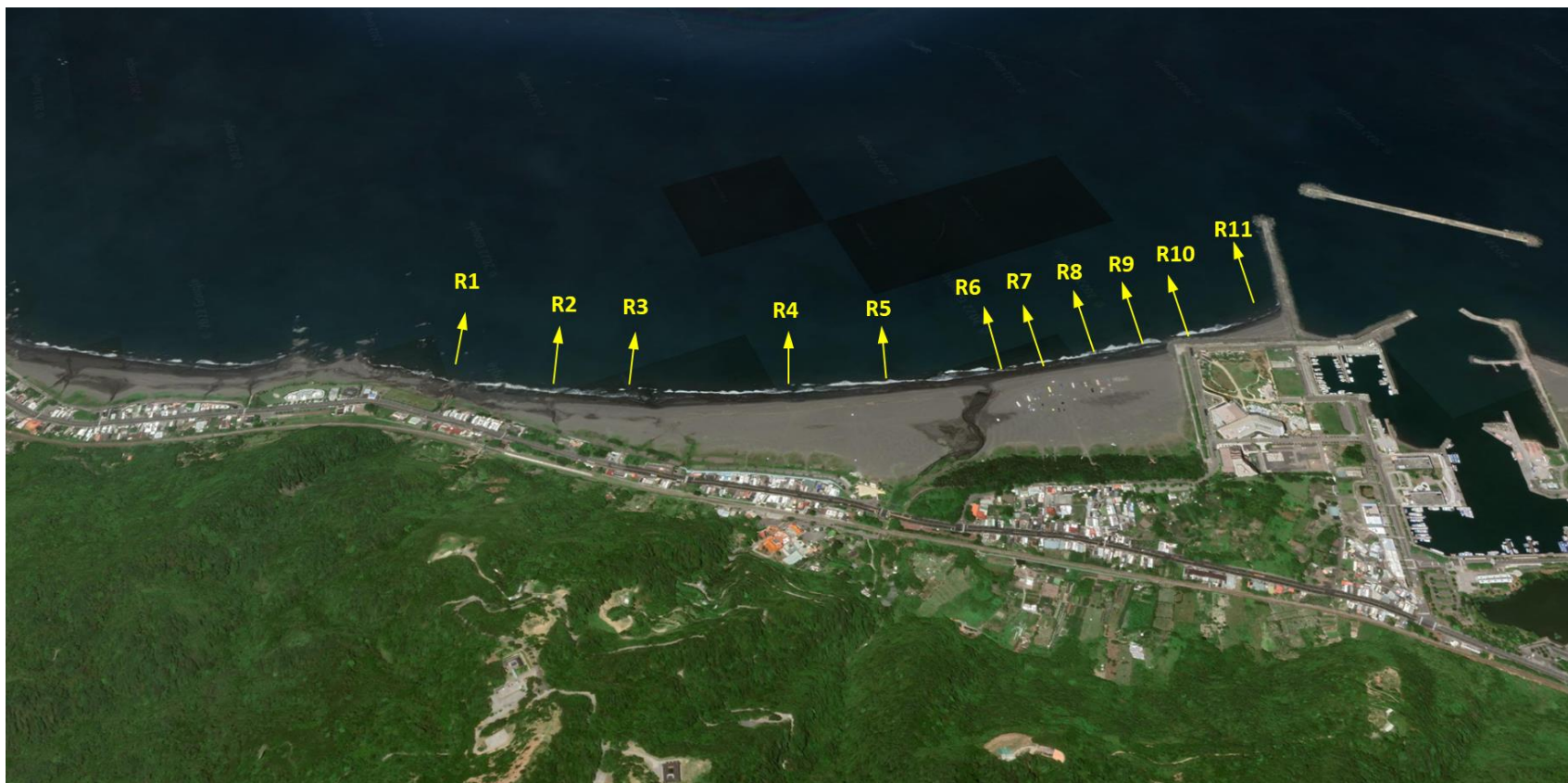


圖 2-15 宜蘭縣外澳海灘裂流發生位置分布示意圖

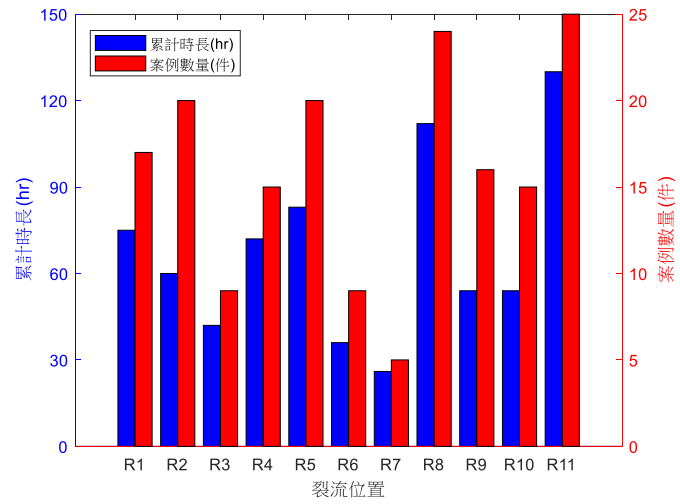


圖 2-16 不同位置裂流發生案例數量與累計時長統計結果

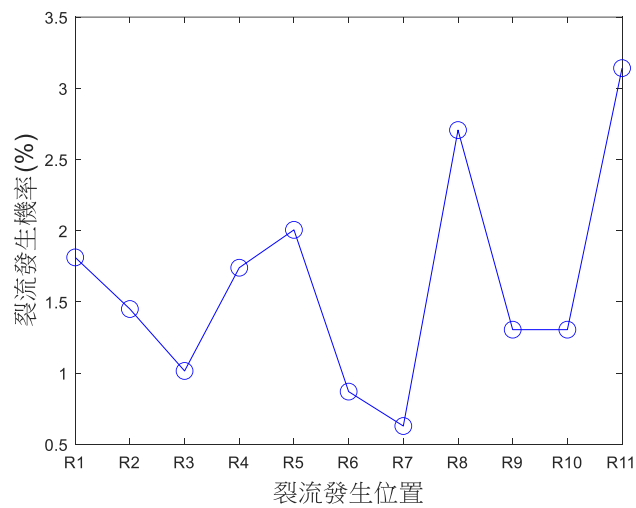


圖 2-17 外澳海域各位置裂流發生機率

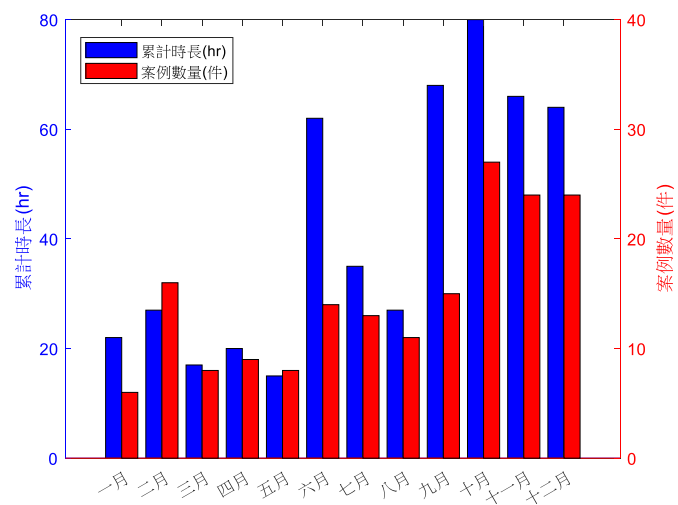


圖 2-18 不同月份裂流發生案例數量與累計時長統計結果

2-4-2 裂流發生時海氣象特性分析

在上一節中，本計畫已針對裂流發生時的特徵進行分析，對裂流發生的時空間分布有一定的瞭解，知道外澳海灘那些時候或是哪些區域，可能有引發裂流出現的潛勢地形，然而這仍不足本計畫探討裂流發生的機制，以及對該災害現象進行預警。根據文獻所述，裂流的發生機制，與波浪破碎後水體的運動或是海域周圍的海氣象環境是有密切的關係(Lushine, 1991; Engle et al., 2002)，因此今(111)年計畫將與前期計畫相同，進行實測資料的統計與分析，且由於擁有整個裂流事件演變的過程，故相較於前期計畫能更加全面的探究裂流發生時的海氣象條件。

實測資料的部分將採用距離外澳海灘鄰近 25 km 內的“龜山島浮標”和“烏石漁港潮位站”，根據 Cavaleri et al. (2012)的研究成果，該浮標所測得的海氣象資料是足以代表外澳海灘周周的海氣象特性，而統計的海氣象參數的項目，則是根據前期計畫中分析衛星航拍影像案例發生時海氣象參數的統計結果，在裂流發生時示性波高、平均週期、尖峰週期、波向和平均風速均在一定的量值之間，故今年度將探討裂流監測站觀測到的裂流案例發生期間，該些海氣象參數分布的情形，根據過去的文獻水位、地形和碎波均是影響裂流發生的重要因素，因此本計畫亦會統計裂流發生時水位和海灘類型參數的分布情形。當海岸邊某一位置出現裂流時，本計畫將會記錄該案例發生起迄時間點，以及案例發生過程中示性波高、平均週期、尖峰週期、平均風速和與海岸線夾角層出現的最大值和最小值，倘若同一時間內不同位置也有裂流案例的發生，則會視為不同案例進行記錄。經過資料品管後 175 筆裂流案例期間均有實測的波浪資料，而風速部分則有 124 筆。

結果如表 2-2 和圖 2-19 所示，以下將分別針對七項海氣象參數進行分析，在裂流發生時示性波高的介於 0.22-3.3 m，其中從每筆案例發生過程中曾出現過的波高最大值來看，有 68%的案例是大於 1.0 m 的。

在裂流發生時平均週期介於 3.8-8.9 s，尖峰周期則介於 3.5-13.1 s，而當尖峰週期大於 10 秒以上，裂流發生的案例數有明顯減少的趨勢。

在裂流發生期間平均風速介於 1.1-13.7 m/s，水位則是介於-814 至 827 mm，整體而言在任何風速和水位的情況下均有裂流的發生。但本計畫統計烏石漁港潮位站 2021 年 11 月至 2022 年 10 月全部的水位資料，發現其水位平均值為 17.2 mm，而裂流發生

時的水位大於全年平均值的案例數量佔全部案例 80%以上，共計有 140 筆。

本計畫在波向的統計上，是以海岸線平均走向為基準，進而計算波向與海岸線間的夾角。統計結果顯示在裂流發生期間波向與海岸線的夾角，大部分的案例均屬於垂直入射海岸線，且裂流發生過程中波向與海岸線夾角曾出 60° 至 90° 的案例有 156 筆，佔全部案例 89%。

而除海氣象參數，本計畫亦統計裂流發生期間的海灘類型參數變化，在前期計畫中，根據 Wright and Short (1984) 所提出的海灘類型參數 Ω ，評估外澳海域裂流發生潛勢，今年度亦以同樣的方法對預計建置的三站監測站進行評估。以下將說明海灘類型參數計算過程，根據 Wright and Short (1984) 所提出的海灘類型參數 Ω ，如下式(2-9)

$$\Omega = \frac{H_b}{W_s \times T} \quad (2-9)$$

式中為 H_b 碎波高度、 W_s 為顆粒沉降速度、 T 為週期。為求得近岸碎波高度 H_b ，本計畫參考 Le Mehaute (1961) 所提出之經驗式，如下式(2-10)

$$\frac{H_b}{H_o} = 0.76 \cdot S^{1/7} \cdot \left(\frac{H_o}{L_o}\right)^{-1/4} \quad (2-10)$$

式(2-10)中 H_o 為示性波高、 S 為近岸平均波度、 L_o 為波長。透過實測浮標所測得的示性波高 H_o 和平均週期 T ，並利用科技部海洋資料庫 200 m 解析度的地形資料計算得到近岸坡度 S 。而顆粒沉降速度則是參考 Stokes Law 進行計算，如下式(2-11)

$$\omega = \frac{1}{18} \times \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \times \frac{gD^2}{\nu} \quad (2-11)$$

式中 D 為沙質粒徑、 ν 為黏滯係數、 ρ_s 為沙的比重。最後將式(2-10)和式(2-11)計算所得到的顆粒沉降速度 ω 和碎波波高 H_b 以及平均週期帶入式(2-9)便可以得到海灘類型參數。宜蘭縣外澳海灘沙質粒徑係參考「宜蘭縣海岸防護基本資料調查」為 0.399 mm，而黏滯係數和砂粒密度分別參考 Zorgani et al. (2018) 和 Morgan (1977) 的實驗結果，黏滯係數為 $1.56 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ，砂粒密度為 $1.6 \times 10^{-3} - 2.0 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ 。各案例計算結果顯示，在裂流發生期間海灘類型參數介於 0.47 - 10.73 之間，參考 Wright and Shor (1984) 和 Brander(1999) 的海灘類型與 Ω 對照表(如表 2-4)，發現裂流發生期間海灘類型參數大多

介於 1-6 之間，共計有 123 筆佔整體案例 70%。根據海灘類型與參數 Ω 對照表比對結果發現，該條件均是有利於裂流發生的過渡型海灘。

從上述分析結果，可對每筆裂流案例發生過程中的海氣象的變化有一定的瞭解，在大部分裂流發生期間波高都曾有大於 1.0 m 的時候，波向則是多為入射海岸線偏移 30° 以內，水位亦多大於全年水位之統計值，海灘型態均為易發生裂流的過渡型海灘，而平均週期、尖峰週期和風速則沒有顯著的特性存在。

本計畫進行不分案例的討論，對有裂流發生時的海氣象進行統計(即該小時內有發生裂流則紀錄為累計一小時)，探討前 12.5%至 87.5%區間內，裂流發生期間的海氣象及海灘類型參數分布情形。經統計 175 筆的裂流案例共計發生於 503 個小時內，分析結果如圖 2-20 所示，在發生裂流時波高主要介於 0.75-1.76 m 間、平均週期介於 5.0-6.5 s 間，以及尖峰週期介於 6.4-9.6 s；波向與海岸線夾角介於 40°-81.4° 間，而有大於 60° 的則有 306 小時，佔全部案例的 60%以上；水位的部分則介於-308 cm 至 566 cm，然而大於烏石漁港全年平均值的案例共計有 333 小時，佔全部案例 66%，代表在水位較高的時候裂流發生的累計時長仍較長；海灘類型參數介於 3.35-6.59 間，該結果顯示仍有部分案例發生時海灘類行為全反射型海灘；此外，根據過去文獻有學者提出在退潮時裂流的流速較大，本計畫亦分析裂流發生時是屬於漲潮或是退潮，結果顯示兩者差異不大，但退潮期間有裂流發生的累計時長較漲潮時多。然而裂流出現期間內，風速並沒有介於一定的範圍量值，基本上從 1-2 m/s 或是較大的時候 7-8 m/s 都有裂流的出現，但仍可從統計結果中發現，當風速大於 10 m/s 以後，就較少有裂流現象的發生。

然而上述裂流發生期間的海氣象條件，與平時的海況並沒有太多的差異，因此本計畫將透過探討裂流在不同海氣象參數量值區間所發生的條件機率(即計算不同量值下有裂流案例累積發生時間與整體觀測累積時間的比值)，評估上述這些裂流發生案例較多的海氣象條件是否確實為有利於裂流生長的條件，亦或者僅是該些海況本身係屬常見的海況所導致的。根據圖 2-21 結果顯示，當波高介於 0.75-1.75 m 時裂流發生的條件機率有較高，約在 1.7%-2.6%，與上述統計各海氣象條件案例數量或時長相比可發現，在該條件下不僅裂流發生之累計時長較長，相對於其他的波浪條件，確實有較高的發生機率。

平均週期的部分亦是相同的情形，在 4.5-6.5 s 這個區間有較高的條件機率，均大於

6%；而尖峰週期介於 5-11 s 時，裂流發生之條件機率明顯提高，均大於 5%。

當波向近乎垂直海岸線時(與海岸線夾角為 75-90 度間)，裂流發生的條件機率最高，達至 20.0%，該條件下的觀測總時間內的累積時長達 505 小時，裂流發生期間的累積時長也有達 103 小時，且並非於同一案例出現，故可以確認在波向近乎垂直海岸線時，會更加容易導致裂流案例的發生，而當波向與海岸線夾角介於 30°-60° 時，裂流發生的條件機率也相當的高，均達到 8%以上。

而風速的部分並未有任何條件下，裂流發生機率較高的情形存在，當風速為 3-12 m/s，裂流發生之條件機率均介於 5-7%之間，然而在風速較小或無風的情況下，可明顯發現裂流發生的條件機率明顯下降，僅有 2%，代表當有風存在時方有裂流的發生。

水位的部分介於-300 cm 至 700 cm 間時，裂流發生之條件機率差異不大，均位於 6%左右，然而可以發現在極低的水位下(<-500 cm)時，裂流發生的機率相當的低，僅有 1.5%，反之在高水位的情況下(>900 cm)時，裂流發生的條件機率明顯上升，達到 12.4%，且在該條件下外澳海域一整年共計有 194 個小時，其中有 24 小時有裂流發生，因此該結果顯示當水位達到一定程度時(>-300 cm)就會產生裂流，且高水位(>900 cm)時裂流則更容易地發生。

海灘類型參數分析結果顯示，當海灘類型參數介於過渡型海灘時(Ω 介於 1-6 之間)，裂流發生之條件機率相對於，大於 6 之後的反射型海灘有明顯的上升，均達到 6%以上，甚至當海灘類型參數為 4.5-5.5 之間，其裂流發生之條件機率更是高達 11%，該結果亦可以說明裂流的發生，不僅與水深地形有著密切的相關，由於該參數在計算時須考慮碎波波高，故能推斷碎波的能量或是型態亦是影響裂流發生的重要因素之一。

無論是從裂流案例進行分析或是對有裂流發生當下的海氣象周遭環境進行統計，結果均顯示海灘類型參數介於一定的區間內，且根據過往文獻裂流的發生與水深地形分部有這密切的相關性(Wright and Short, 1984)，故本計畫將對不同位置下裂流出現時的海氣象條件進行探討，分析在外澳海域出現的裂流在不同的區域上是否有明顯的差異。

分析結果如圖 2-22 所示，在不同位置示性波高、平均波向和風速有些微的差異，各位置上裂流發生時示性波高大部分均有大於 0.5 m，且除 R11 外當波高大於 2.5 m 以

後，均無在觀測到裂流發生的情形；裂流發生時波向與海岸線夾角的平均值大約為 60° 左右，代表波向為入射海岸線偏移 30° 以內，然在 R1、R2、R9 和 R11 四個位置，發現在波向與海岸線夾角較小時，仍有裂流現象的發生；而風速部分在 R1、R6、R7、R8、R9 和 R10 位置，當風速大於 10 m/s 後，就無裂流現象的發生。此外，結果也顯示位於 R7 位置所出現的裂流，在各項參數的分布情況均相當集中，尤其是示性波高、尖峰週期和海灘類型參數這三項，這代表若要於該處形成裂流其條件相對於其他位置較嚴苛，初步推測可能該處位置所存在的裂流渠道較不顯著所導致的。

從上述不同位置下裂流發生時的海氣象環境統計顯示，從示性波高和波向分布情形來看，初步推測位於結構無旁或鄰近結構物旁所發生的裂流，由於其發生之原因會受到波浪淺化折射所影響，因此要發生裂流的條件相較於其他位置限制較小。但從整體上看 R1 至 R11 各個位置上裂流出現時的海氣象條件並沒有非常顯著的差異，與上述統計結果相似，代表該些海氣象條件係屬於適合絕大部分裂流發展的情況。

綜整上述，本計畫透過將裂流案例與實測的龜山島浮標資料和烏石漁港潮位站進行比對，發現各海氣象參數與海灘類型參數在多數的案例中都介於一定的範圍，且該些條件並非是因為係屬於平時海況較容易出線的環境，因而才導致裂流發生次數較多，此外透過不同位置對裂流發生時的海氣象進行分析，發現在結構物旁所發生的裂流，其發生條件較為容易。倘若僅根據該些單一參數的統計結果，透過海氣象參數的分布範圍和閾值來去預測裂流是否發生，仍然是遠遠不足的，從條件機率統計結果來看，很明顯的即便在這些發生機率較高的區間中，也僅僅只有不到 20% 的比例。本計畫認為該部分的結果是由於裂流發生的原因相當複雜，除了受到單一海氣象條件的影響外，彼此之間的交互作用也是重要的原因，因此在第四章本計畫將會根據本節所觀測的案例和分析結果，透過類神經網路演算法初步建置裂流預警系統，透過該方式方能將因子間交互作用，甚至非線性關係進行描述，進而做到預警的目的。

表 2-4 各海灘類型和 Ω 值對照表

海灘類型	Wright and Short (1984) 計算之 Ω 值	Brander (1999) 計算之 Ω 值
DIS	>6	
DIS-LBT		
LBT		4-6
LBT-RBB		3-6
RBB		3-5
RBB-TBR	1-6	2-5
TBR		2-4
TBR-LTT		1-4
LTT		1-3
LTT-REF		
REF	<1	

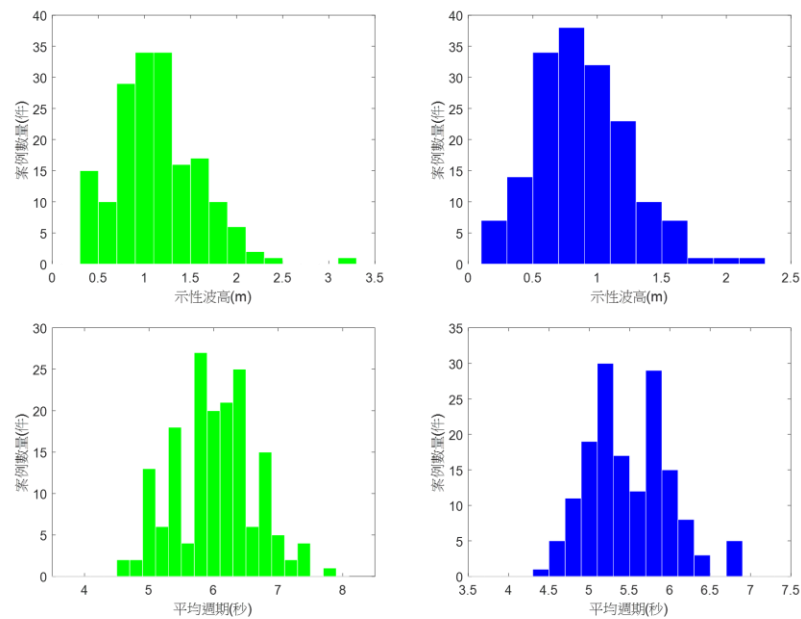


圖 2-19 裂流發生期間海氣象參數值(綠色.裂流發生期間海氣象參數出現最大值、藍色.裂流發生期間海氣象參數出現最小值)

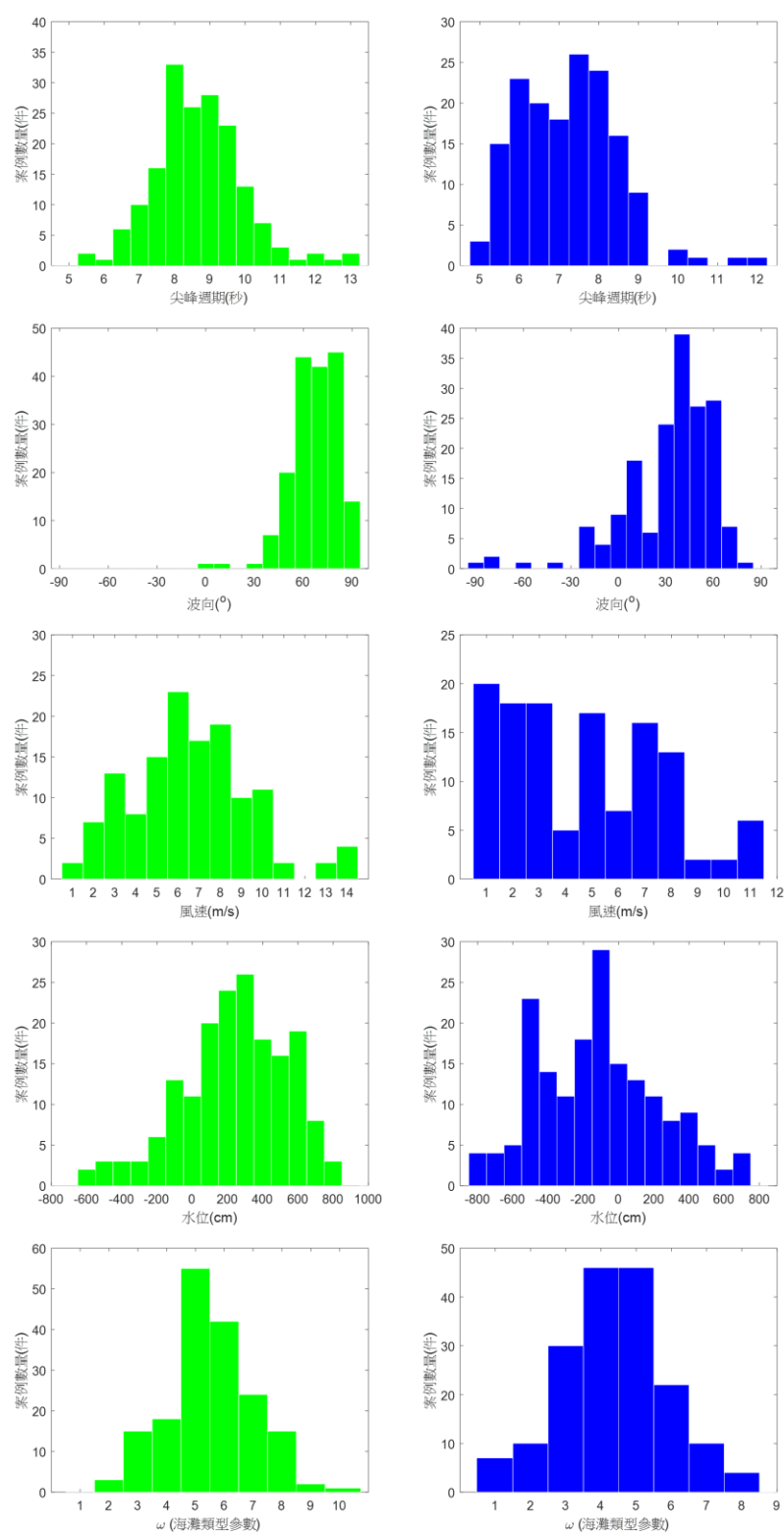


圖 2-19(續) 裂流發生期間海氣象參數值(綠色.裂流發生期間海氣象參數出現最大值、藍色. 裂流發生期間海氣象參數出現最小值)

(資料時間:民國 110 年 10 月 15 日至 111 年 10 月 31 日)

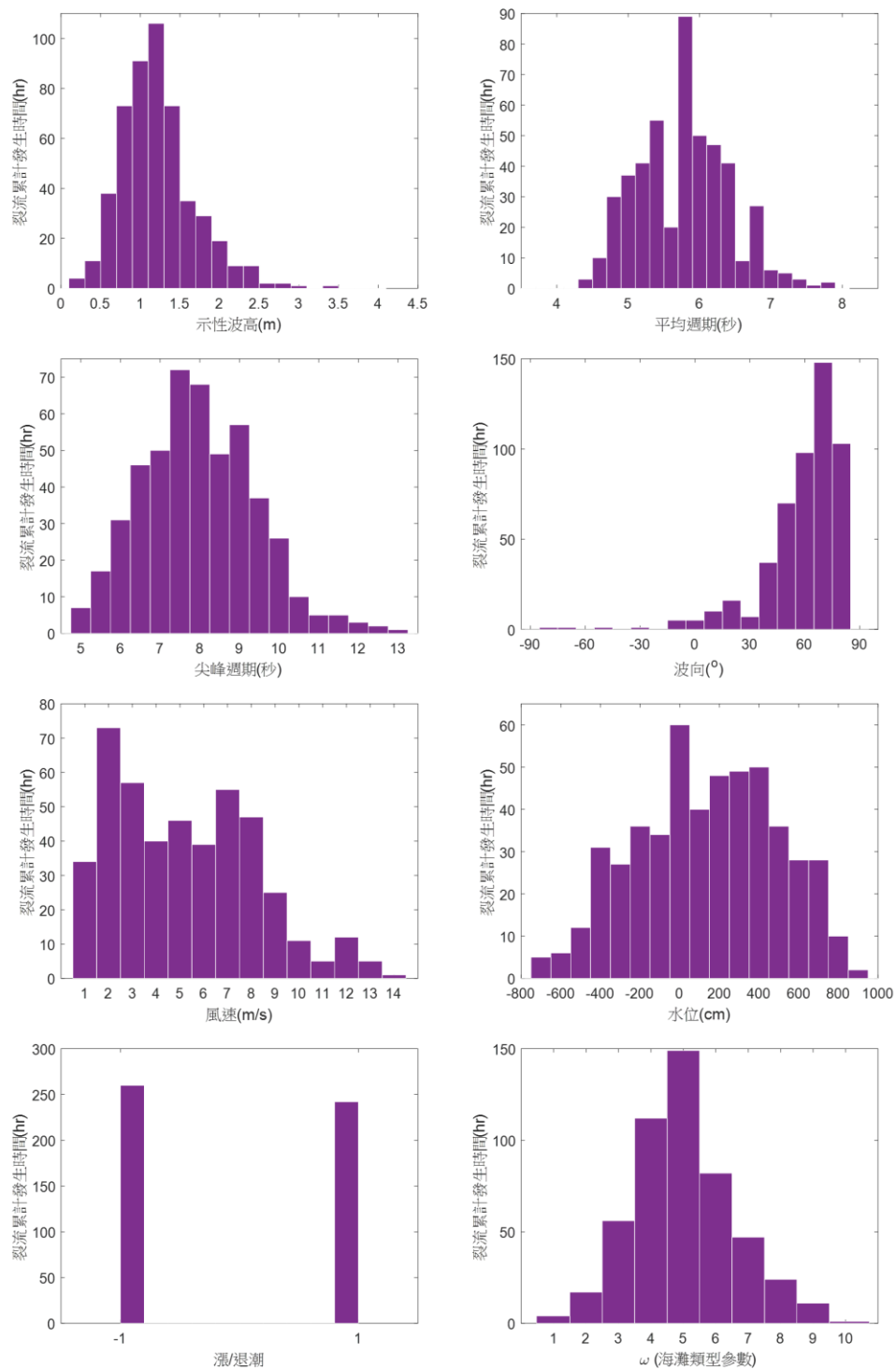


圖 2-20 裂流發生時間海氣象參數累計時長

(資料時間:民國 110 年 10 月 15 日至 111 年 10 月 31 日)

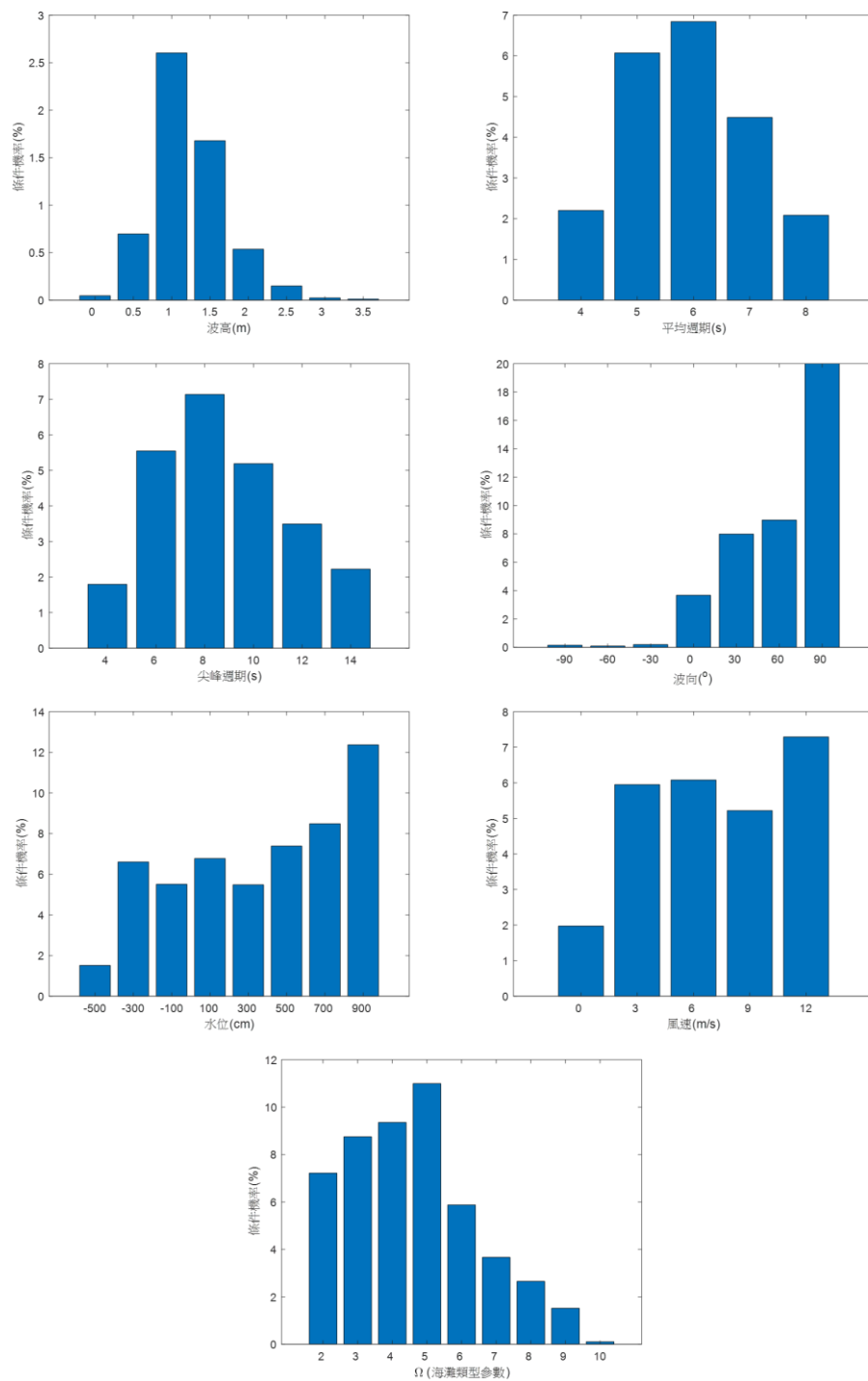


圖 2-21 不同海氣象條件裂流發生之條件機率
(資料時間:民國 110 年 10 月 15 日至 111 年 10 月 31 日)

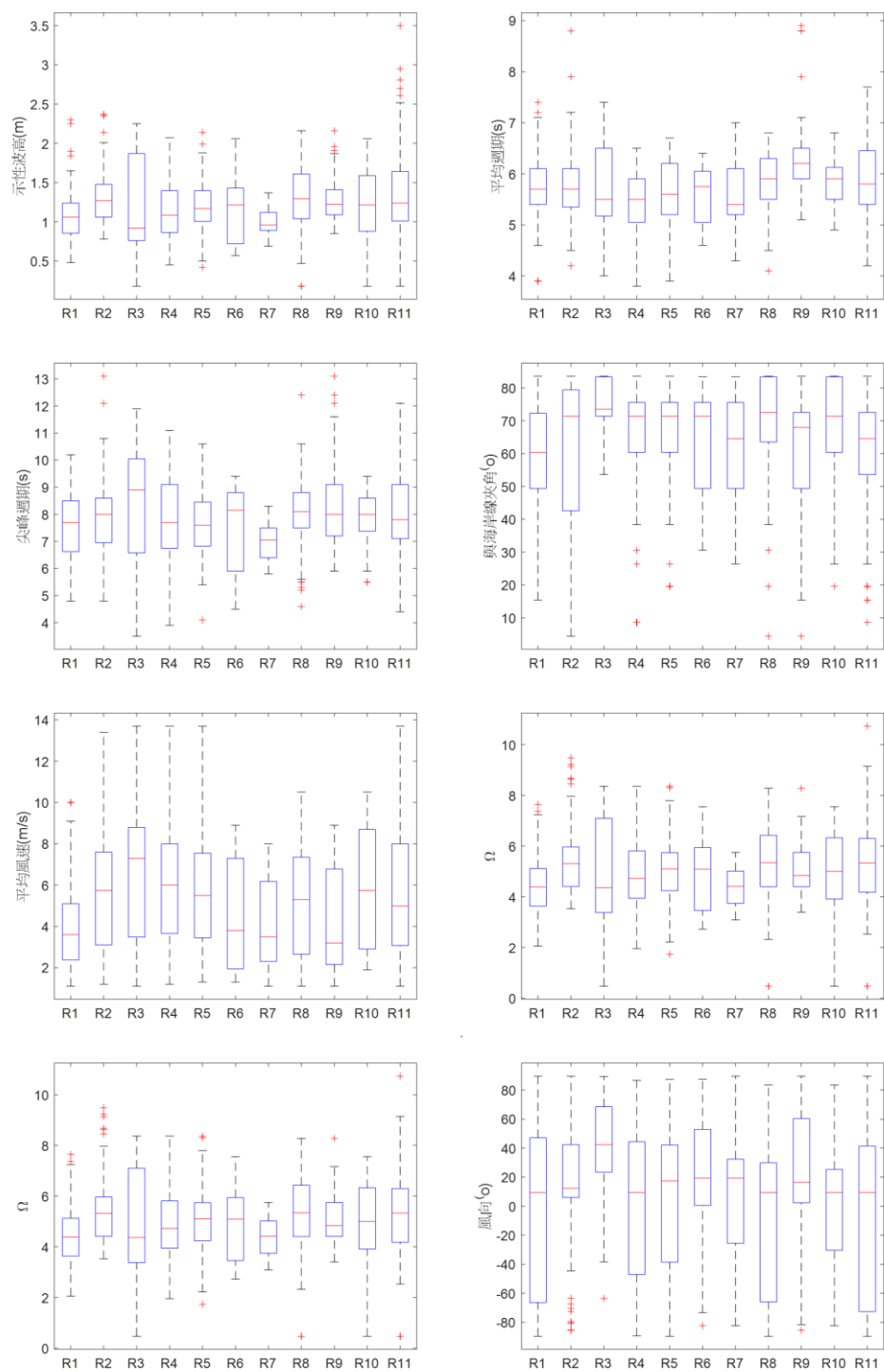


圖 2-22 不同位置裂流發生時海氣象參數條件
(資料時間:民國 110 年 10 月 15 日至 111 年 10 月 31 日)

2-5 監測站建置規劃更新

協助氣象局建置裂流光學監測站為本計畫工作項目之一，根據前期計畫研究成果，本年度會於新北市沙崙海灘、新北市福隆和宜蘭縣大里沙灘等三處建置光學裂流監測站，新北市沙崙監測站已於 2022 年 11 月 16 日完成建置，其餘兩站(宜蘭縣大里和新北市福隆)亦於 2022 年 12 月 9 日完成建置。建置地點的選擇，主要係考量是否能夠蒐集到充足的裂流影像案例，藉此建置完善的資料庫，故需確保該海域是可觀測到裂流，本計畫參考過往實際發生裂流紀錄或數值模式模擬計算結果來分析裂流發生之可能性，並且透過計算海灘類型參數評估該海域是否為裂流發生潛勢較高的區域。當然觀測儀器建置是否容易或是該地區是否有符合行政需求也都有納入選址的依據，評估結果如表 2-5 所示，以下將對今(111)年度預計建置之裂流監測站進行說明。

表 2-5 裂流影像監測站選址評估結果

監測站	行政需求	電力供給	網路傳輸	學理依據	高危害度	歷史經驗
外澳	◎	◎	◎	◎	◎	○
沙崙	◎	◎	◎	◎	◎	◎
大里	◎	◎	◎	○	○	○
福隆	◎	◎	◎	◎	◎	◎

(備註：◎經海灘類型參數和 SMS 數值模式評估有裂流發生、遊客眾多曾發生意外事件；

○僅透過海灘類型參數評估有裂流發生、非著名海域活動遊憩景點但曾觀測到裂流)

2-5-1 新北市沙崙監測站

新北市沙崙海灘監測站系統架設於北岸環保公司屋頂，拍攝範圍如圖 2-23，從該處可以拍攝整個沙灘與近岸區域，而考量到拍攝距離較近，而該處地形較平緩，潮間帶範圍較大，故規劃架設攝影機 2 支，所設定之拍攝實際情形如圖 2-24 所示，且近期內會根據實際拍攝情形再做微調。

沙崙海灘過去有許多戲水溺斃的案例，甚至過去新北市政府公告該處禁止從事水域活動。從衛星影像中分析發現也曾發生裂流案例。本計畫以 SMS 數值模式模擬與評估結果發現，在波高 1.5 m，波向垂直入射海岸線時，有裂流發生的可能性，其裂流發生的位置位於沙灘的中間處。

同樣本計畫根據上節所提出計算海灘類型參數之方式，對新北市沙崙海灘進行裂流發生潛勢的評估。新北市沙崙海灘沙質粒徑係參考「96 年淡水河河口及附近海岸輸沙之研究」為 0.406 mm，而黏滯係數和砂粒密度分別參考 Zorgani et al. (2018)和 Morgan

(1977)的實驗結果，黏滯係數為 $1.56 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ，砂粒密度為 $1.6 \times 10^{-3} - 2.0 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ ，浮標資料採用富貴角浮標站。新北市沙崙海域的海灘類型參數計算結果如表 2-6 所示。參考 Wright and Shor (1984)和 Brander(1999)的海灘類型與 Ω 對照表(如表 2-4)，新北市沙崙海域的海灘類型在春夏季為 LTT(低潮位階地)-LBT(沿岸沙槽/溝)型，而秋季為 RBB(規律沙洲與海灘)-LBT(沿岸沙槽/溝)，僅有冬季非裂流發生之海灘類型。因此本計畫評估認為沙崙海灘為裂流發生潛勢高的海灘，有架設裂流監測站的必要，且周遭設備完善，有利於建站以及後續維護之作業，如圖 2-25。

表 2-6 宜蘭縣外澳海灘海灘類型計算參數

	春(3-5 月)	夏(6-8 月)	秋(9-11 月)	冬(12-翌年 2 月)
示性波高 $H_o(\text{m})$	0.93	0.76	1.55	1.90
平均週期 $T_{m0}(\text{s})$	5.45	5.31	5.95	6.20
	平均坡度	18.53/1000	砂質粒徑(mm)	0.399
海灘類型參數 Ω	3.77	3.24	5.53	6.44



圖 2-23 新北市沙崙監測站監測系統架設位置與觀測區域



圖 2-24 新北市沙崙監測站影像實際拍攝情形(暫定)

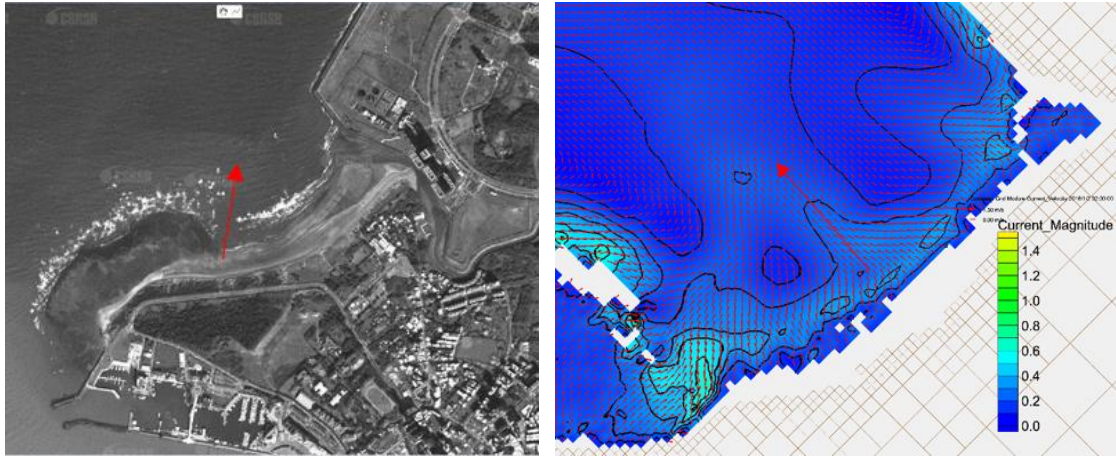


圖 2-25 新北市沙崙海灘裂流潛勢分析結果(左.衛星影像分析、右.SMS 數值模式模擬)

2-5-2 新北市福隆監測站

新北福隆監測站經勘查後，監視站地點規劃於福蓉貝悅飯店屋頂，如圖 2-26，並架設攝影機 3 支，該處視野良好，可以俯視整個福隆沙灘，拍攝範圍如圖 2-27。本計畫從過往蒐集的衛星航拍影像中，分析得到裂流案例。本計畫以 SMS 數值模式進行模擬，發現當波高為 1.5 m，波向垂直入射海岸線時，有裂流發生的可能性，且可能同時有四個位置有裂流的發生，如圖 2-28。

在海灘類型的評估上，新北市福隆海灘沙質粒徑係參考中興顧問公司「鹽寮福隆沙灘變遷因應措施評估報告」為 0.47 mm，浮標資料採用龍洞浮標站，計算結果如表 2-7 所示，該區海灘類型在春夏季為 LTT(低潮位階地)-RBB(規律沙洲與海灘)型，而秋冬季為 TBR(橫向沙洲與裂流)-LBT(沿岸沙槽/溝)，全年均係屬會發生裂流的海灘類型。透過上述分析，福隆海域係屬易發生裂流之海域，根據林等人(2009)對福隆海灘長期分析結果顯示，甚至位於東南端受到河口切穿和人工堤防建造的影響，長期有離岸流的現象，加上福隆沙灘為水域活動與觀光勝地，其監測裂流發生是極其必要。

表 2-7 新北市福隆海灘海灘類型計算參數

	春(3-5 月)	夏(6-8 月)	秋(9-11 月)	冬(12-翌年 2 月)
示性波高 H_o (m)	0.78	0.0.77	1.35	1.48
平均週期 T_{m0} (s)	5.87	5.89	6.22	6.12
	平均坡度	7.19/1000	砂質粒徑(mm)	0.38
海灘類型參數 Ω	2.74	2.73	4.15	4.45



圖 2-26 新北市福隆監測站監測系統位置與觀測範圍

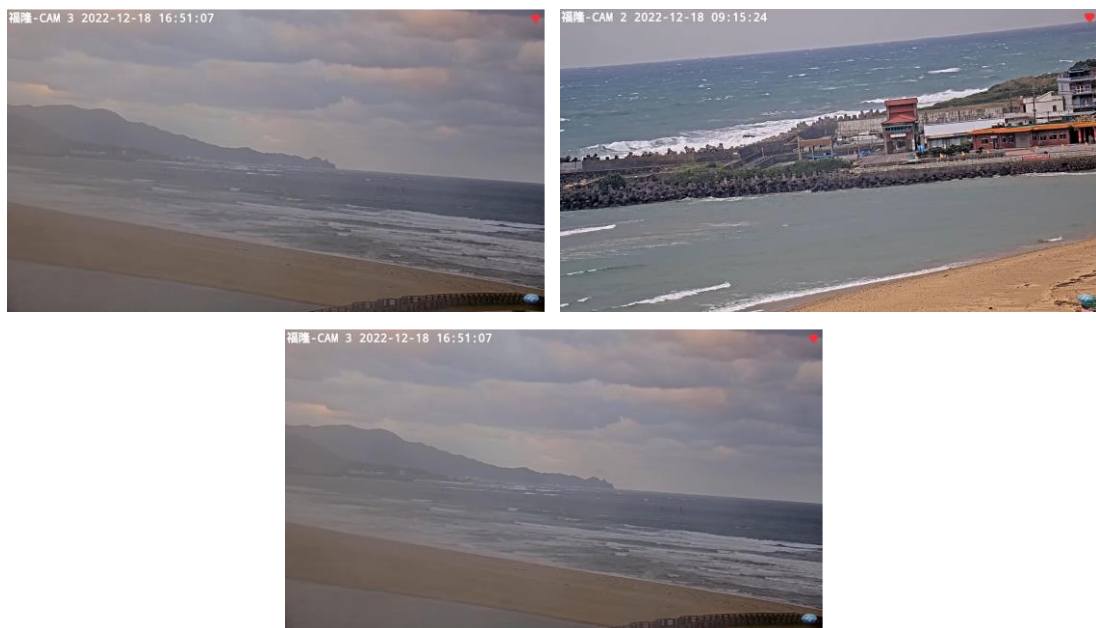


圖 2-27 新北市福隆監測站影像觀測結果示意圖

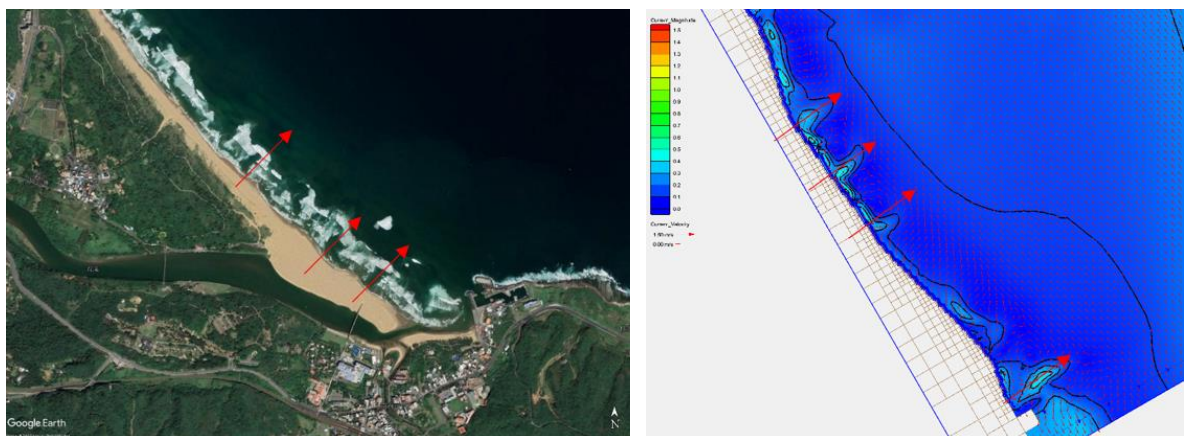


圖 2-28 新北市福隆海域裂流潛勢分析結果(左.衛星影像分析、右.SMS 數值模式模擬)

2-5-3 宜蘭縣大里監測站

宜蘭縣大里海灘監測站經勘查後，會架設於東北角大里遊客中心屋頂，如圖 2-29，該處的視角如圖 2-30，並規劃架設攝影機 2 支，且由於遊客中心與海灘間有樹林遮蔽，為能順利拍攝，規劃該處監測站將增加攝影機拍攝高度，在工程施作與管理單位許可的範圍內，盡量增加攝影機拍攝的高度。本計畫蒐集該處海灘過往衛星影像，從近岸碎波特徵中，亦有發現裂流案例，如圖 2-31

在海灘類型的評估上，宜蘭縣外澳海灘沙質粒徑參考「宜蘭縣海岸防護基本資料調查」報告為 0.399 mm，浮標資料採用龜山島浮標站。宜蘭縣大里海域的海灘類型參數計算結果如表 2-8 所示，該可發現宜蘭縣外澳海灘在春夏兩季位於 LBT(沿岸沙洲槽溝)-LTT(低潮位階地)類型，而冬季為 LBT(沿岸沙洲槽溝)-RBB(規律沙洲與海灘)類型，而該兩類型均是有較高機率發生裂流的情形，而過往研究團隊於該處場勘時，也有觀測到裂流發生的紀錄如圖 1-1，因此本計畫認為與該處建置裂流監測站有助於蒐集不少的裂流案例。

表 2-8 宜蘭縣大里海灘海灘類型計算參數

	春(3-5 月)	夏(6-8 月)	秋(9-11 月)	冬(12-翌年 2 月)
示性波高 H_o (m)	0.78	0.71	1.06	1.14
平均週期 T_{m0} (s)	5.38	5.47	5.87	5.86
	平均坡度	26.9/1000	砂質粒徑(mm)	0.399
海灘類型參數 Ω	3.85	3.70	5.01	5.13



圖 2-29 宜蘭縣大里監測站監測系統位置與觀測範圍

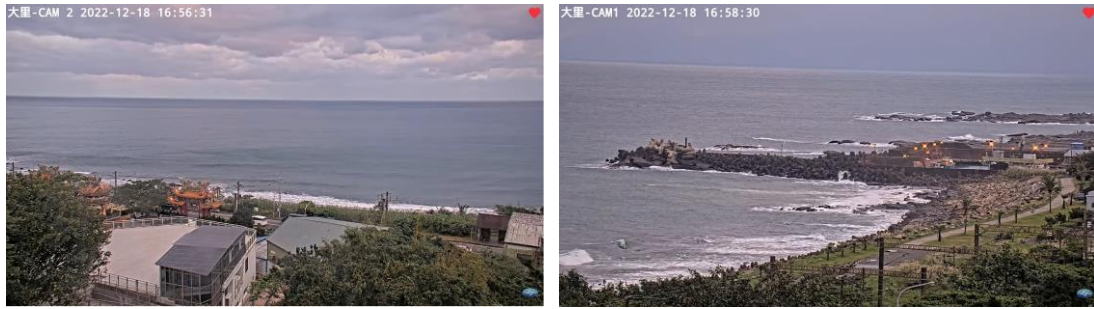


圖 2-30 宜蘭縣大里監測站影像觀測結果示意圖



圖 2-31 宜蘭縣大里監測站影像觀測結果示意圖

2-5-4 監測站運作規劃

本年度規劃三站監測站的視野皆相當良好，且預定位置均能提供固定電源。整套影像監測站設備包含有儀器支架、攝影機、主機、硬碟、通訊傳輸等部分。攝影機依各站位置與目標區的距離不同，建議採用 2-10 倍變焦鏡頭之攝影機，影像解析度至少為 full HD (1920x1080)，影像格速率至少為 30 fps (frame per second)，此速率對於裂流分析已充分足夠。各監測站影像規劃回傳至中央氣象局，參考中央氣象局海氣象測站的資料回傳架構(如圖 2-32)，各監測站接收到影像後，透過中華電信光世代或 4G 網路(或未來 5G)傳送至安管外與安管內之 NVR 主機儲存，安管外主機儲存之影像可提供研究團隊下載分析，傳至安管內之影像則提供中央氣象局做進一步之應用，譬如對民眾展示海岸即時裂流影像之服務。

除了自行架設監測系統外，水利署已於臺灣各海岸線上架設海岸即時監測系統，部分攝影機拍攝海岸與視角非常適合應用於裂流分析使用，因此本計畫後續也會嘗試蒐集海岸即時監測影像，並進一步進行裂流分析，以增加裂流案例資料庫，初步檢視

GoOcean 系統中合適使用的監測站有黃金海岸、多良車站、南濱守望哨和忘憂亭(如圖 2-33)，以及水利署防災資訊服務網平台的林園海堤第一支攝影機、蚵寮國小第一支攝影機和黃金海岸第三支攝影機(如圖 2-34 圖 2-33)，若能取得原始影像資料，便會嘗試套用本計畫提出之裂流影像分析方法進行案例蒐集。

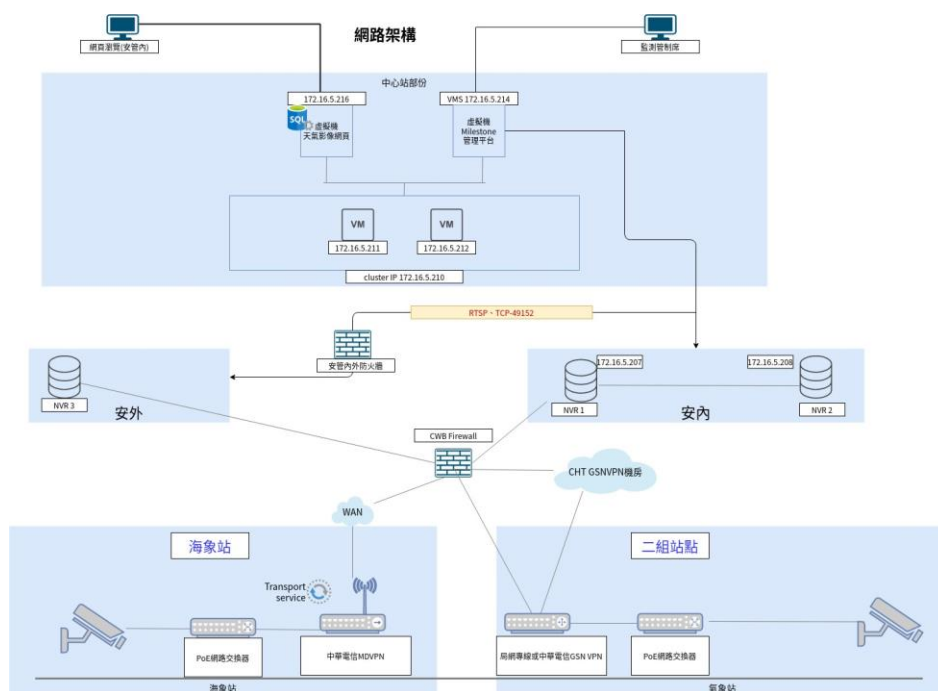


圖 2-32 中央氣象局海氣象站資料與影像回傳與儲存架構圖



圖 2-33 GoOcean 系統上可用於分析裂流之影像資料



圖 2-34 水利署資訊服務網平臺可用於分析裂流之影像資料

第三章 裂流數值模式模擬

裂流具有很大的變動性、短暫性和不確定性，且於岸邊架設觀測儀器實屬不易，裂流案例的蒐集因而有所受限，進而影響到後續研究的進程，若能善用數值模式，便可以透過模擬長期實測資料來蒐集裂流案例，亦可改變邊界條件的輸入，來進行裂流發生機制的探討，作為後續建置裂流預警經驗模式的基石。

於第一年本計畫已透過 SCHISM-WWM 波流耦合完成乙個可以描述裂流現象的數值模式，考量前期研究在運行過程中所面臨的問題，以及計畫書審查時委員的建議，在今(111)年度本計畫將會持續精進該數值模式，主要包含兩項工作，(一)提高該模式的正確率，並模擬至少一年以上的實測海氣象資料，評估其模式的穩定性，並於下半年度與監測站影像觀測結果進行比對；(二)利用模式設置的高自由性，設計不同的海氣象邊界條件來模擬近岸流場，藉此分析各環境下裂流發生情形。透過上述兩工作項目，精進裂流數值模式，藉此協助後裂流案例資料的蒐集和更全面的探討裂流發生的機制。

3-1 模式理論

本計畫將延續第一年的研究成果，使用三維跨尺度海洋數值模式(Semi-implicit Cross-scale Hydroscience Integrated System Model, SCHISM)耦合第三代風浪模式(Wind Wave Model, WWM)描述裂流發生的現象，透過模擬水深地形分布不均導致波浪能量在傳遞過程中受輻射應力影響下的水動力變化，而在第一年本計畫雖然在波浪驗證上有良好的趨勢，然在極端波高的模擬有低估的情形發生，為此本計畫將自行透過波浪模式(WAVEWATCH III, WWIII)進行研究範圍的波浪模擬，再將此結果作為邊界條件帶入波流耦合模式。另，本計畫團隊在過去曾使用由 Aquaveo 開發的地表水建置模型(Surface-water Modeling System, SMS)進行裂流案例的模擬，因此也會將其與本計畫結果進行比較和驗證。

3-1-1 開源碼 SCHISM 模式(SCHISM-WWM)

本計畫採用由 Hsu et al. (2005)所發展能與 SCHISM 三維跨尺度海洋數值模式耦合的 WWM (Wind Wave Model)第三代風浪模式進行近岸波場的模擬。根據 Berthert and Garrett (1968) 利用荷米頓法則 (Hamilton principle)推導出適用於任意地形的波浪作用力平衡方程式 (Wave action balance equation, WAE) (後文使用縮寫)，描述二維近岸與遠

洋之波浪演化過程。WWM 風浪模式之控制方程式如下式(3-1)

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(C_x N) + \frac{\partial}{\partial y}(C_y N) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(C_\sigma N) + \frac{\partial}{\partial \theta}(C_\theta N) = \frac{S_{total}}{\theta} \quad (3-1)$$

在考慮波流交互作用情況下， x 方向的波速 $C_x = \frac{dx}{dt} = C_g \cos \theta + U_x$ 可表示為，而 y 方向的波速可表示為 $C_y = \frac{dy}{dt} = C_g \sin \theta + U_y$ 。並藉由頻散方程式、波數保存方程式和波數向量基於無旋性下可推倒獲得角度空間上的波速式(3-2)和式(3-3)

$$C_\theta = \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{k} \frac{\partial \sigma}{\partial h} (\sin \theta \frac{\partial h}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial h}{\partial y}) + (\sin \theta \frac{\partial U_x}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial U_y}{\partial y}) \quad (3-2)$$

$$C_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial h} (\frac{\partial h}{\partial t} - U_x \frac{\partial h}{\partial x} + U_y \frac{\partial h}{\partial y}) - C_g k (\cos \theta \frac{\partial U_x}{\partial x} + \sin \theta \frac{\partial U_y}{\partial y}) \quad (3-3)$$

上述 $N(k, \theta; x, t)$ 為波浪作用力密度譜， θ 與 k 則為頻譜上波浪傳遞方向和周波數， $\sigma = (2\pi f)$ 為波浪頻率。上式(3-3)中 S 為源函數隨著海洋科學家現場觀測、實驗的校正以及大數據處理，模擬結果已經越來越接近觀測值。主要包含有線性風浪交互作用 S_{ln} 代表的是大氣傳輸至波浪的能量通量亦是啟動模式的主要項、風浪交互作用項 S_{in} 、非線性波波交互作用項 S_{nl} 代表波浪不同頻率分量因非線性交互作用導致的波能於頻率及 S_{nl} 方向上的重新分佈、白帽(whitecapping)能量消散項 S_{ds} 指深海中波浪破碎所導致的波能消散、底床摩擦力項 S_{bot} 、碎波消散項 S_{db} 、三波交互作用 S_{tr} 等，表示如下式(3-4)

$$S = S_{ln} + S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{db} + S_{tr} \quad (3-4)$$

在水動力模擬上本計畫採用 SCHISM 三維跨尺度海洋開放數值模式，該模式係屬開源代碼，其模擬範圍包含海洋、河口和海灣等，並可針對海洋和沿海地區常見的海岸線象進行模擬，如環流、海嘯和暴潮，另外亦可藉由偶和其他模組進行油污擴散、沉積物傳輸、沿海生態和波流交互作用等計算，目前已經廣泛運用在不同尺度的循環系統。SCHISM 模式控制方程式是利用包式近似(Boussinesq approximation)和靜水壓近似(Hydrostatic approximation)求解三維淺水波方程(3D-Navier-Stokes equations)，由連續方程式(3-5)與動量方程式(3-6)所組成

$$\frac{Du}{dt} = f - g\nabla\eta + m_z - \alpha |u| u L(x, y, z) \quad (3-5)$$

$$f = f(v, -u) - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \nabla \rho d\zeta - \frac{\nabla p_A}{\rho_0} + \alpha g \nabla \Psi + F_m + other$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot \int_{-h}^\eta u dz = 0 \quad (3-6)$$

其中 $\eta(x, y, t)$ 代表水面高程[m]、 $u(x, y, z, t)$ 為水平速度[m/s]、 $w(x, y, z, t)$ 為垂直速度[m/s]、 P 為靜水壓[Pa]以及 ρ 和 ρ_0 代表水的密度[kg/m³]，式(3-7)中的 f 表示動量中斜壓梯度、水平黏滯性、科氏力、大氣壓力和輻射應力等。另，SCHISM 模式藉由傳輸方程式(transport equations)計算鹽度和溫度對流速和水位的影響，方程式如下式(3-7)

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (uC) = \frac{\partial}{\partial z} \left[\kappa \frac{\partial C}{\partial z} \right] + F_h \quad (3-7)$$

其中為 C 懸浮物濃度、 ν 為垂直渦流黏滯力、 κ 代表垂直渦流擴散性以及為水平擴散傳輸方程式。

SCHISM 模式在進行波浪耦合數值模式計算時，會先將 WWM 波浪模式會先計算輻射應力，再透過輻射應力作為水動力模式的驅動力獲得流場和水位，而波浪模式再以新的流場和水位作為邊界條件進行下一輪的計算，該步驟為波浪及流場耦合數值模式的計算流程，以確保在計算波場和流場時均有考慮到波流交互作用下之情形。本計畫採用了 Longuet-Higgins(1964)提出最輻射應力參數化公式，方程式如式(3-8):

$$\left\{ \begin{array}{l} R_s = (R_{sx}, R_{sy}) \\ R_{sx} = -\frac{1}{\rho_0 H} \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0 H} \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \\ R_{sy} = -\frac{1}{\rho_0 H} \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0 H} \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} \end{array} \right. \quad (3-8)$$

其中 S_{xx} 、 S_{xy} 和 S_{yy} 是輻射應力張量的組成部分，根據 Battjes(1972)的在應力垂直方向上為均勻的情況下，定義為不規則波譜的形式為、其中 $H = h + \eta$ 為總水深、 c_p 是群波相位速度，輻射應力張量(tensor)表示方程式，如下式(3-9)

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{xy} = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty N_{(\sigma,\theta)} \sigma \frac{C_g(\sigma)}{C_p(\sigma)} \sin(\theta) \cos(\theta) \\ S_{xx} = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty N_{(\sigma,\theta)} \sigma \left[\frac{C_g(\sigma)}{C_p(\sigma)} (\cos^2(\theta) + 1) - \frac{1}{2} \right] d\theta d\sigma \\ S_{yy} = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty N_{(\sigma,\theta)} \sigma \left[\frac{C_g(\sigma)}{C_p(\sigma)} (\sin^2(\theta) + 1) - \frac{1}{2} \right] d\theta d\sigma \end{array} \right. \quad (3-9)$$

在波浪數值計算上在求解波浪作用力方程式需耗費大量記憶體和運算時間，故 WWM 風浪模式採用分步法(Fractional step method, Yanenko, 1986)，將複雜的波浪作用力平衡方程式分解成三個物理亦亦相同的空間包含頻率空間、角度空間和幾何空間，並可根據不同物理特性進行分析，再利用有限元素法(Finite element method, FEM)離散控制方程式，對於不規則或目標處之邊界直接加密，三個控制方程式如式(3-10)，其中 N^n 、 $N^{n+1/3}$ 、 $N^{n+2/3}$ 和 N^{n+1} 分別代表 n 、 $n+1/3$ 、 $n+2/3$ 及 $n+1$ 時刻的波浪密度譜。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{N^{n+1/3} - N^n}{\Delta t} + \frac{\partial}{\partial \sigma} (C_\sigma N) = 0 \\ \frac{N^{n+2/3} - N^{n+1/3}}{\Delta t} + \frac{\partial}{\partial \theta} (C_\theta N) = 0 \\ \frac{N^{n+1} - N^{n+2/3}}{\Delta t} + \frac{\partial}{\partial x} (C_x N) + \frac{\partial}{\partial y} (C_y N) = S_{tot} \end{array} \right. \quad (3-10)$$

而在數值上本計畫在 SCHISM 水動力模式以半隱式尤拉-拉格朗日法(Eulerian-Lagrangian Method, ELM)進行有限元素法解析(Finite element method, FEM)三維淺水波方程式(Navier-Stokes equations)，由於使用單一時間步長有限元素法來解析方程式，故可降低內外模組之間的誤差，加上半隱式和尤拉-拉格朗日法(Eulerian-Lagrangian Method, ELM)的處理，在同時計算連續方程式和動量方程式，亦達到模式穩定所要求的步長，且因為本身就含有擴散的特性，可在計算時忽略方程式中的擴散係數。

3-1-2 波浪模式 WAVEWATCH III

本文採 WWIII 波浪模式來模擬研究範圍的波浪場資料，並經由內插帶入 SCHISM-WWM 波流耦合進行近岸流場的計算，WW III 模式為美國海洋大氣總署 NOAA 下所屬的國家環境預測中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP)(後文使用縮寫)所發展的全波譜第三代波浪模式，該模式係依據 WAM 模式改良而來的，本計畫所使用的版本為 WWIII Version 5.16 版。

WW III 波浪模式的控制方程式為二維波浪作用力平衡方程式 WAE，此方程式是由 Hasselmann et al. (1973)所提出，其卡式座標線型式如下所示：

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_x \dot{x}N + \frac{\partial}{\partial k} \dot{k}N + \frac{\partial}{\partial \theta} \dot{\theta}N = \frac{S}{\sigma} \quad (3-11)$$

$$\dot{x} = C_g + U \quad (3-12)$$

$$\dot{k} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial s} - k \cdot \frac{\partial U}{\partial s} \quad (3-13)$$

$$\dot{\theta} = -\frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + k \cdot \frac{\partial U}{\partial m} \right] \quad (3-14)$$

上式中的 $N(k, \theta, x, t)$ 為波浪作用力密度譜(wave action density spectrum)， $\dot{x}$ 為空間中 x 和 y 方向上波浪能量的傳遞速度(其考慮了群波速度 C_g 以及流速 U)， θ 和 k 則分別為波譜上的傳遞方向與波數， s 為 θ 方向的座標， m 方向為垂直於 s 方向的座標。

當模式應用於大尺度範圍時，可以將(3-11)式轉換為球面座標型式的平衡方程式，如(3-15)式所示：

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{\cos \Phi} \frac{\partial}{\partial \Phi} \dot{\Phi} N \cos \theta + \frac{\partial}{\partial \lambda} \dot{\lambda} N + \frac{\partial}{\partial k} \dot{k} N + \frac{\partial}{\partial \theta} \dot{\theta}_g N = \frac{S}{\sigma} \quad (3-15)$$

式中，

$$\dot{\Phi} = \frac{c_g \cos \theta + U_\phi}{R} \quad (3-16)$$

$$\dot{\lambda} = \frac{c_g \sin \theta + U_\lambda}{R} \quad (3-17)$$

$$\dot{\theta}_g = \dot{\theta} - \frac{c_g \tan \Phi + \cos \theta}{R} \quad (3-18)$$

上式中的 Φ 與 λ 分別代表緯度與經度， $\dot{\Phi}$ 與 $\dot{\lambda}$ 為波浪能量於緯度和經度方向上的傳遞速度， R 為地球半徑，(3-18)式中包含了在大曲率下傳遞時的修正項。

而與 WWM 風浪模式相似，透過(3-11)等號右側出現的源函數 S (source term)，對波浪在傳遞過程中所產生之能量成長與消散進行描述，在 WW III 計算深海地區波浪能

量時，源函數 S 主要包含三個部分，分別為風浪成長項 S_{in} 、能量消散項 S_{ds} 以及非線性波-波交互作用項 S_{nl} ；另外，在淺海海域必須額外考慮到底床摩擦效應 S_{bot} 的影響 (Shemdin et al., 1978)，在 WW III 中源函數的定義如下式所示：

$$S = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} + S_{bot} \quad (3-19)$$

WW III 模式是以能量譜(energy spectrum)來定義各源函數項，但是模式源函數之計算過程在求解作用力密度譜，然後再將作用力譜所得到的物理結果轉換為能量譜，在得到每一個網格點上的能譜值後，在依數學關係轉換為示性波高、平均波向及週期等波浪參數。

3-1-3 商業 SMS 模式(CMS-Wave & CMS-Flow)

上述已對本計畫進行裂流模擬所使用的數值模式 SCHISM-WWM 波流耦合模式和研究範圍波浪場模擬的 WW III 波浪模式進行理論介紹，將 WW III 波浪場輸出結果內插帶入 SCHISM-WWM 波流耦合的邊界，WWM 風浪模式計算出之波浪輻射應力，與 SCHISM 潮流模式計算之水位資料進行耦合，進而模擬地形沙槽導致波浪堆積所產生之裂流現象。根據文獻，裂流發生的機制相當複雜，波浪的水動力機制均有可能影響裂流的發生，倘若在模式進行模擬時加入過多的影響條件，不僅會造成模式運算效率的不彰，甚至可能導致模擬結果發散，故本計畫會使由 Aquaveo 開發的地表水建置模型 (Surface-water Modeling System, SMS)，利用該模式有軟體介面之系統藉此提升本計畫執行之效率。

本計畫採用的波浪模式為 SMS 11.0 版本下 CMS-Wave (STeady-state spectral WAVE)，該套組是一種二維波譜變換模型，採用有限差分 (Finite-difference method, FDM)和相位平均(phase-average)求解波浪作用守恆方程式(Wave action balance equation, WAE)(Mase, 2001)，方程式如下所示(3-20)

$$\begin{aligned} \frac{\partial(C_x N)}{\partial x} + \frac{\partial(C_y N)}{\partial y} + \frac{\partial(C_\theta N)}{\partial \theta} = \\ \frac{\kappa}{2\sigma} \left[\left(CC_g \cos^2 \theta N_y \right)_y - \frac{CC_g}{2} \cos^2 \theta N_{yy} \right] - \varepsilon_b N - S \end{aligned} \quad (3-20)$$

其中 $N = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma}$ ， N 為波浪作用力密度函數，為一頻率 σ 及方向 θ 的函數， $E(\sigma, \theta)$ 為

波譜密度函數，表示每單位水表面積頻率間隔的波浪能量；且在考慮波流交互作用的情形下，波浪的特徵速度可表示為 $C_x = C_g \cos \theta + U$ 和 $C_y = C_g \sin \theta + V$ ；而 S 為與上述兩模式相同，為描述波浪能量成長和消散之關係，故在此不加以贅述。

而潮流模式即水動力模式係由淺水波方程(Shallow water equations)為控制方程式，計算海域潮汐、海流作用之對流、擴散等分布情形。本計畫進行近岸流場模擬的模式採用同為 SMS 11.0 版中的 CMS-Flow 套組，該套組以利用有限差分法 (FVM)進行深度積分 (depth-integrated) 求解連續方程式和動量方程式，方程式如式(3-21)、式(3-22)和式(3-23)所示

$$\frac{\partial(h+\eta)}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (3-21)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial u q_x}{\partial x} + \frac{\partial v q_x}{\partial y} + \frac{1}{2} g \frac{\partial(h+\eta)^2}{\partial x} = \\ \frac{\partial}{\partial x} D_x \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} D_y \frac{\partial q_x}{\partial y} + f q_y - \tau_{bx} + \tau_{wx} + \tau_{Sx} \end{aligned} \quad (3-22)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial u q_y}{\partial x} + \frac{\partial v q_y}{\partial y} + \frac{1}{2} g \frac{\partial(h+\eta)^2}{\partial y} = \\ \frac{\partial}{\partial x} D_x \frac{\partial q_y}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} D_y \frac{\partial q_y}{\partial y} - f q_x - \tau_{by} + \tau_{wy} + \tau_{Sy} \end{aligned} \quad (3-23)$$

其中 h 為靜水深， η 是水面高度與靜水面的差， t 為時間， q_x 和 q_y 為單位寬度流量， u 和 v 為水深平均流速， g 是重力加速度， D_x 和 D_y 為擴散係數， f 是科氏力， τ_{bx} 和 τ_{by} 為底床剪應力， τ_{wx} 和 τ_{wy} 為表面風應力，而 τ_{Sx} 和 τ_{Sy} 為波浪應力，且 CMS-Flow 在考慮波浪的情況，是透過引入波浪輻射應力與 CMS-Wave 求解出波浪場進行波流耦合，採用 Smith et al. (1999)提出的線性理論演算法求解，其中 S_{xx} 為正向海岸動量， S_{xy} 為平行海岸動量， S_{yy} 為沿岸流動量， E 為波浪能量密度。

$$S_{xx} = \iint E(\omega, \alpha) \left[0.5 \left(1 + \frac{2k(h+\eta)}{\sinh 2k(h+\eta)} \right) (\cos^2 \alpha + 1) - 0.5 \right] d\omega d\alpha \quad (3-24)$$

$$S_{xy} = \iint \frac{E(\omega, \alpha)}{2} \left[0.5 \left(1 + \frac{2k(h+\eta)}{\sinh 2k(h+\eta)} \right) \sin 2\alpha \right] d\omega d\alpha \quad (3-25)$$

$$S_{yy} = \iint E(\omega, \alpha) \left[0.5 \left(1 + \frac{2k(h+\eta)}{\sinh 2k(h+\eta)} \right) (\sin^2 \alpha + 1) - 0.5 \right] d\omega d\alpha \quad (3-26)$$

商業 SMS 模式有著簡易的介面，以及為使用者提供多種的模式設置，考量裂流案例主要來自於影像分析的結果，加速裂流監測站的建置是有其必要性。本計畫已使用 SMS 模式快速的對海域進行裂流潛勢的評估，結果已於 2-5 節中所述，提供裂流監測站建置規劃的依據。

3-2 模式環境建置

在第一年的計畫中主要目的是為評估 SCHISM-WWM 波流耦合模式是否有描述裂流現象的能力，因此無論在網格的設置或運算效率上均沒有過多的要求，一切以成功運行作為目標。在今(111)年度本計畫將會透過更改模式設置，包含地形網格的精細以及輸入參數的調整，使模式運行結果更加合理且準確，且在增加模擬時長(至少一年)的同時能降低模式計算所需的時間，希冀後續可透過模擬大氣或波浪預報模式結果，實現裂流災害預警。另，為能蒐集更多的裂流案例供後續裂流經驗預警模式進行建置，在模式應用上也會透過直接輸入不同的邊界條件，藉此來分析各種海況下裂流發生與否。

3-2-1 精進地形網格

數值計算上無論是 WWM 風浪模式或 SCHISM 三維水動力模式均是以有限元素法(Finite-Element methods, FEM)(Lydard et al., 2017; Carrere et al., 2016)進行數值解析，且該兩種模式可以在使用相同的網格設定下進行耦合的運算。根據前人文獻和前節對於裂流特徵的分析結果(MacMahan et al., 2006)，裂流流幅(寬度)應介於數 m 至數十 m 間，為能清楚地描述裂流現象，網格解析度需要非常精細，然模擬範圍均使用高解析度的網格，則會造成運算資源過度消耗，故在網格的使用上仍採用第一年計畫所使用的非矩形(三角網格)的巢狀網格。

然而該設定對於裂流模擬仍有不足，主要有兩項分別為(1)沒有考慮地形結構物對外澳海域水動力的影響；(2)網格解析度仍過於粗糙，無法清楚描述流幅較小或是現象較微弱的裂流案例，以下將進行說明。前者在計畫書審查時，委員認為位於外澳海灘南側的烏石漁港和漁港外側的離岸堤會影響外澳海灘近岸的水動力變化，因此本計畫將參考委員建議將上述兩結構物加入地形網格，使模擬結果更加合理；在解析度的部分第一

年在近岸區域設計為 10 m，雖已能清楚看到流場向外海延伸的現象，但若裂流流幅僅有 20 m 或是較微弱的裂流現象，該解析度大小的地形網格恐難以完整呈現裂流的現象，為此本計畫將近岸地區的網格解析度提升至 5 m(如圖 3-1a)。在外海區域的網格本計畫原先有想要將網格解析度降低，藉此降低全部網格的數量，然而該調整會導致網格向岸提升解析度時，網格大小縮小過快，不僅會出現 10° 左右的銳角三角形網格，在模擬時也會導致流場在該處非常混亂，因此外海的網格解析度也提高至 0.1°。

裂流主要發生於近岸淺水區域，不同水深的流速分布差異並不大，因此在進行模式模擬時，本計畫僅採用二維的模擬，然而 SCHISM 是透過深度積分來進行數值計算，因此在二維模式模擬的條件下，仍需給定垂直網格。從第一年模擬結果來看，垂直網格對於近岸水動力的模擬結果影響甚小，故今(111)年度本計畫將採用去年的設置，使用 S-Z 混和網格，以 S 網格劃分上層的水體，直接設定垂直網格的層數，並且可依照地形梯度變化來決定網格厚度，在地形變化較大區域可設置解析度較粗糙之 S 網格，並且根據地形梯度變化來決定每層網格的厚度，而在深水區則採用 Z 網格進行切割，透過給定網格曲率設定曲線網格，在垂直網格參數設定上同樣參考 Alvaro et al. (2019)模擬大湖裂流的設置，在 S 網格上設置 20-30 層，而 Z 網格的曲率給定為 1×10^{-6} (如圖 3-1b)。針對垂直網格水動力傳輸上，在去年採用斜壓的設定(Baroclinic)，然而如上述所述，在近岸區域水深較淺，垂直差異並不大，因此改採用正壓的設定(barotropic)，而更改該設定後，運算效率也有明顯的上升，從原本一個月模擬需要兩周提升至一個禮拜左右。

在模式模擬範圍的選定上，由於邊界條件大多是下載現有的大範圍波浪或是大氣模式，解析度通常較為粗糙，倘若模擬範圍縮小，恐導致邊界條件的參數梯度過小，使模式無法產生初始動力，最終運行至發散。因此在模擬範圍仍與去年度相同涵蓋整個宜蘭縣，以東經 121.82° 至東經 122.01°，北緯 24.7° 至北緯 25.0° 範圍建置模式計算區域，該範圍垂直外澳沙灘往外海延伸約 25 km，沿岸方向由北至南約 30 km 的範圍。而本計畫所採用的地形資料來自於兩個來源，分別為科技部海洋資料庫所提供的 200 m 解析度水深資料，此外本研究團隊再過去與自強公司有進行計畫上的合作，當時因計畫需求自強公司有提供北海岸部分近岸水深地形資料，其中就包含外澳海灘的水深地形資料，故在近岸地形水深資料係採用 108 年 8 月測得的近岸 10 m 解析度網格，地形網格亦設置為 10 m 解析度，而其餘的網格則採用 200 m 的資料，透過內插各別帶入上述所建置的網格中，並非將兩地形資料直接合併以後在將其內插進網格。

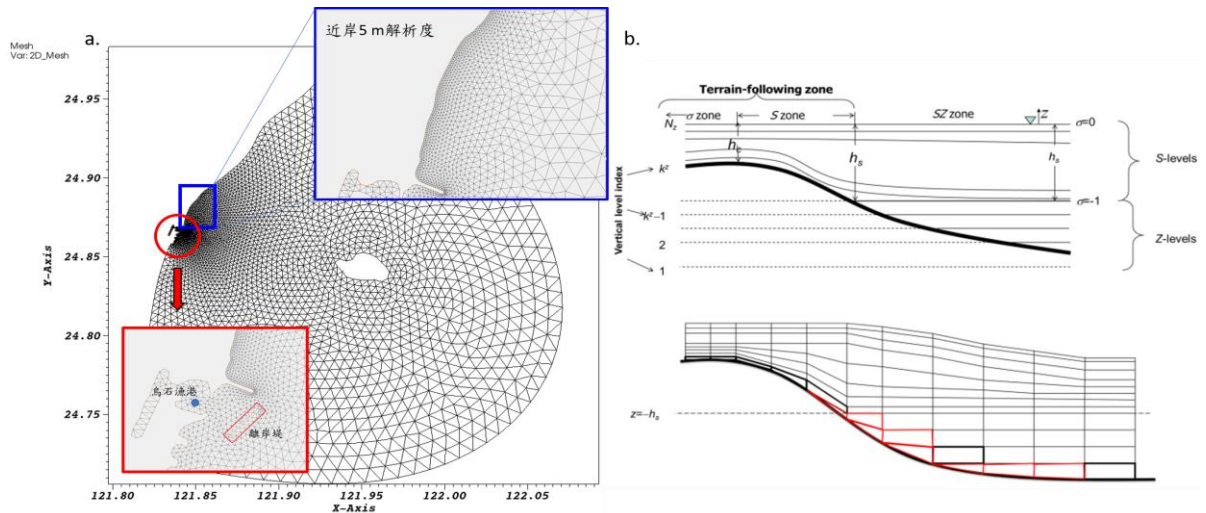


圖 3-1 宜蘭縣外澳海岸 SCHISM-WWM 模式計算網格(a.水平網格、b.垂直網格)

3-2-2 邊界條件設置

本計畫採用的 SCHISM-WWM 波流耦合模式，是透過給定邊界條件作為驅動力進而計算模擬範圍的水動力變化情形，因此邊界條件的設定也是決定模擬結果是否準確的一個重要工作。根據第一年的計畫成果，目前本計畫所設定的邊界條件有波浪場、大氣和潮流三種邊界條件，在模式運行的速率非常低，雖然透過上述垂直網格數值計算方法，速率有些許提升，然未來要進行即時的裂流預警，仍有其困難性；而模擬結果也不甚理想，雖然波浪場模擬與實測龜山島浮標資料站比對，趨勢相當一致，然從定量數值上進行分析，可明顯發現在颱風期間的極端波高，模擬結果有明顯低估的情形。有鑑於此，今(111)年度本計畫將針對邊界條件資料的選定和資料來源進行改動，藉此提高模式的運算效率和正確率。

在波浪場邊界條件的輸入，前期研究是採用 Ifremer 所提供的 WWIII 以 ST4 套組進行大範圍模擬輸出結果，然而根據張等人(2019)透過不同深水套組模擬臺灣周遭海域結果顯示，ST6 套組在波高模擬上與浮標實測資料比對誤差最小，且該模式輸出的波浪場資料解析度為 0.25° ，時間解析度為 3 小時一筆，初步推測該些原因係造成模擬極端波高時模式低估的因素。

本計畫於今(111)年度將會自行透過 WWIII 模式進行波浪場資料的模擬，模式計算域之空間離散採用單向式巢狀網格，以低解析度網格的數值作為高解析度網格的邊界，有利於節省模式之計算資源。本計畫建構之模式計算網格第一層網格選取範圍為東經

99°~155°及北緯 1°~41°間，網格解析度為 0.45°；而第二層網格嵌套在第一層區域之中，為東經 110°~130°及北緯 10°~30°間，網格解析度為 0.15°，涵蓋臺灣周圍的海域，如圖 3-2 所示。模式第一層與第二層網格分別採用中央氣象局 WRF 模式之 45 km 及 15 km 解析度、每六小時一筆(00, 06, 12 及 18 UTC)的風場資料空間內差後進行驅動，如圖 3-3；WW3 模式則是每小時輸出一筆波浪推算結果，期間若無分析風場資料(如 01, 02, 03 等時間點)可驅動 WW3，則使用 WRF 之預測風場或時間上線性內插的風場。所使用之地形水深資料為解析度 200 m 的海科中心提供的全球地形數據庫。

WW3 模式在頻率域的解析度為 0.04~0.4 Hz，共分成 40 個頻帶，方向上的解析度則以 10°為一單位，共分 36 個方向傳遞。模式外層網格之全域時間步長為 1800 s，x-y 空間域時間步長為 960 s，波浪能量角度與頻率時間步長為 1200 s，入源項的時間步長為 30s；而模式內層網格之全域時間步長為 1200 s，x-y 空間域時間步長為 660 s，波浪能量角度與頻率時間步長為 600 s，入源項的時間步長為 30 s。最後，將第二層網格輸出之波浪場內插進 SCHISM-WWM 波流耦合模式的邊界網格，每一小時輸入一筆資料，包含示性波高、平均週期、尖峰頻率、方向譜寬和波向，示性波高模擬結果如圖 3-4 所示。

而潮汐邊界採用 FES(Finite Element Solution)模式於 2014-2016 年計算的 8 個分潮，包含全日潮(K1、P1、O1 和 Q1)和半日潮(S2、M2、N2 和 K2)，進行調和分析，將分析結果與臨近烏石漁港潮位站相比針對平均水位和潮汐相位進行微調；氣象條件則採用 NECP 透過氣象預測系統第二代 (Climate Forecast System Version 2, CFSv2) (後文使用縮寫)所計算的全球大氣預報資料，時間解析度為 3 小時一筆，空間解析度為 0.205°，再經由線性內插帶入模式上的每一個網格點進行計算，包括短波輻射(Short radiation)、長波輻射(Long radiation)、氣壓(pressure)、濕度(Humidity)和降雨量(precipitaion)。此外，為讓模式模擬結果能更加良好，在邊界上亦會國家海洋同盟計畫(National Ocean Partnership Program, NOPP) (後文使用縮寫)所提供的混和座標海洋模型(The Hybrid Coordinate Ocean Model, HyCOM) (後文使用縮寫)輸出的大範圍水位和流速，時間解析度為 3 小時一筆，空間解析度為 0.04°，且流速的資料在垂直方向上有六個分層，在第一年度計畫中該些資料均有內插帶入邊界網格進行計算，然該部分僅是對上述邊界條件進行微調，然卻需要大量的時間去讀取資料和進行運算，且由於溫鹽對於近岸水動力模擬的影響並不大，因此在今年度 HyCOM 模擬的溫鹽資料就沒有帶入 SCHISM-WWM 波

流耦合模式的邊界，經該調整模式運行 1 個月期間，僅需要 2-3 天時間的運算。

在今年度本計畫於數值模式模擬還有一項工作，就是模擬不同環境下裂流發生的情形。無論是現場觀測或是長期實測資料模擬，在進行裂流案例探討的時候，在資料中沒有特定海氣象條件時，便無法去評估該條件裂流是否會發生，且極端的海氣象通常發生的次數較少，這也會導致分析結果的代表性不高，因此透過該項工作便可以探討特定海氣象特性下的裂流特性，過去文獻中也有許多學者透過模擬不同條件來去探討裂流發生的機制(Rutten et al., 2019; Hong et al., 2021; Kevin et al., 2003)，因此本計畫將會參考上述學者所選擇的海氣象條件，並且從裂流影像案例中，海氣象統計分析結果中可明顯找到區間或是閾值之參數，最終選定 6 種波高條件、8 種波向條件、3 種風速條件和五種平均週期條件，如表 3-1 所示，本計畫在進行模擬時均以波高 1.5 m、波向垂直入設海岸、3 級風(4.4 m/s)和平均週期 6 s 為基礎，以單一海氣象條件作為變因進行探討，模擬的時間為 7 天，並使用一天的為冷啟動，而該些條件將會透過 JONSWAP 譜作為邊界驅動力帶入模式進行計算，公式如下式(3-27)

$$S(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4} \frac{1}{f^5} \exp[-1.25(\frac{f_m}{f})^4] \gamma^{\exp[-(f-f_m)^2/2\sigma^2 f_m^2]} \quad (3-27)$$

式中 α 代表能量尺度參數、 γ 代表譜峰升高因素、 f_m 代表譜峰頻率，以及 σ 代表峰形參數。模式模擬仍需要水位資料，該部分則透過代入 2018 年 1 月 1 日至 2018 年 1 月 7 日的實際水位資料進行計算，藉此模擬水位的變化，而風場則是固定整個模擬區域同一數值進行模擬。模擬完成後去除掉第一天的冷啟動，結果分析從第二天(第 25 個輸出結果)開始。

表 3-1 模擬不同海氣象條件參數設計

Case	Variable conditions	H_s (m)	T_{m0} (s)	θ (°)	V_{10} (m/s)
Wave conditions					
W1	Wave height	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0	6.0	90	4.0
W2	Wave period	1.5	6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0	90	4.0
W3	Wave direction	1.5	6.0	0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315	4.0
meteorological condition					
V1	Wind velocity	1.5	6.0	90	4.0, 9.0, 15.0

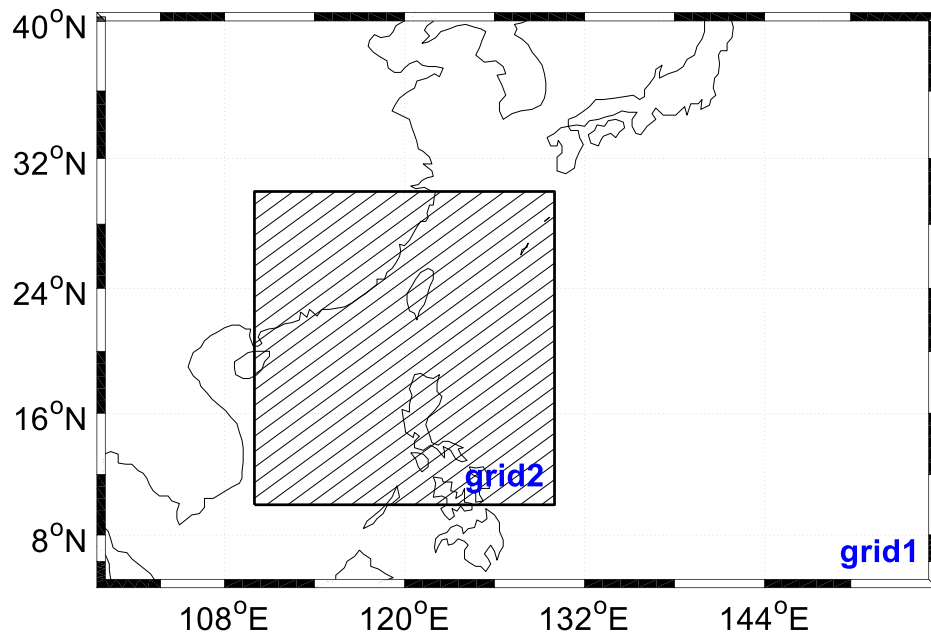


圖 3-2 本計畫建構之 WW III 模式之網格計算範圍與鑲嵌示意圖

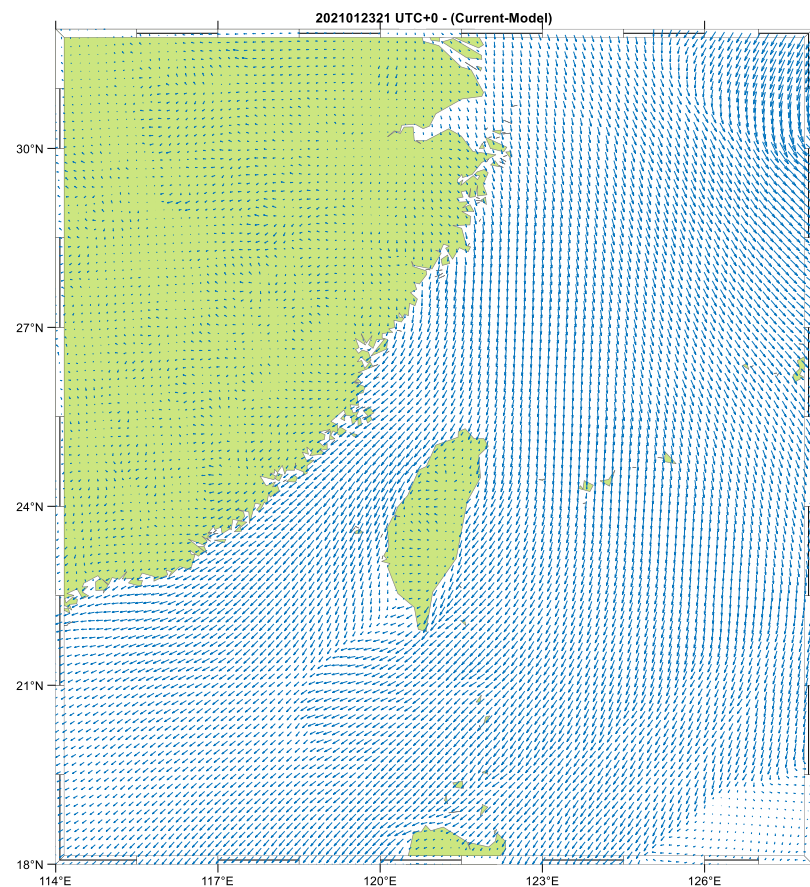


圖 3-3 氣象局 WRF 風場大氣資料

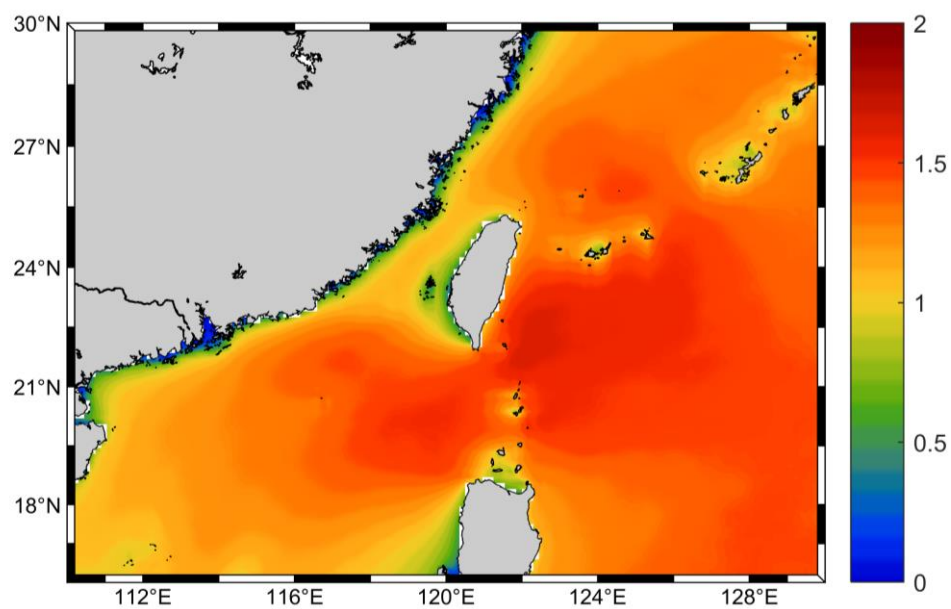


圖 3-4 本計畫模擬臺灣周遭海域 2019 年波高分布圖

3-3 裂流數值模式模擬結果與分析

裂流的發生主要與近岸水深地形分布不均有關，當波浪入射海灣或槽溝時，波浪向中央匯聚引致水位的抬升，而水往低處流，因此就產生向外海移動的流場，然而到底多大的波浪？波向為何？亦或者與風速有關？至今仍沒有定論，然而透過實際觀測案例進行分析，耗時又費力，且在沒有觀測儀器的海域則無法對當地裂流發生潛勢進行探究，因此亦有學者透過數值模式進行裂流案例的探討以及評析不同條件下裂流發生的情形 (MacMahan et al., 2008; Austin et al., 2012; Leatherman, 2017)，因此裂流數值模式的模擬亦是本計畫相當重要的工作項目。

本計畫係屬三年期計畫，在第一年度中已完成裂流數值模式環境的建置，並且透過 SCHIMS-WWM 波流耦合模式初步模擬一個月的現場實測資料，在波浪場的驗證與實測資料比對趨勢相當一致，同時根據模擬結果也能清楚的看出近岸流場的分布，進而評估裂流是否發生。而今(111)年度為本計畫第二年，主要目標是以第一年計畫成果作為基礎，精進該數值模式，提升模式模擬的準確性和可信度。而該部分的工作主要有兩部分，其一，是透過長期(至少一年)實測資料的模擬，並與實測資料進行驗證，評估該模式設置可信度和準確性；其二是在確保該模式模擬結果良好後，透過設計不同的邊界條件，瞭解裂流在不同海氣象條件下的發生情形，以下將針對兩工作項目進行詳述。

3-3-1 長期實測資料模擬與驗證

裂流數值模式已在第一年的基礎上進行調整，藉此精進數值模式，提升模式運算效率和模擬結果的可信度和正確率，詳細過程已於上節中說明。在模式的運算效率，由於在垂直網格上數值傳輸方法進行簡化，以及減少溫度和鹽度邊界條件的輸入，因此，從原先模擬一個月時測資料需要兩個多禮拜，經改動後可提升至 3-4 天便可完成模擬，不僅便利後續長期實測資料的模擬外，也提升後續想要透過數值模式進行裂流預警作業的可行性。

然模式的好壞最重要的還是模擬結果的準確性和穩定性，為此已透過該模式進行 2019 年一整年，以及 2021 年 11 月至 2022 年 10 月的長期實測資料的模擬，為驗證模式的正確率是否有所提升，本計畫蒐集烏石漁港水位資料和龜山島浮標資料進行波浪場和潮位的驗證，而為與前期計畫模擬結果比對，驗證資料的時間採用 2019 年 8 月一整個月份，驗證結果如圖 3-5 所示，在前期計畫模擬結果中示性波高在極端氣候條件下

模擬結果有明顯的低估，在颱風期間實測波高可達 4-5 m，而模式模擬的結果卻連 3 m 都不到，而在今年度波浪邊界條件的資料來源，修改為本計畫團隊自行透過 WWIII 以深水套組 ST6 模擬的結果帶入後，可明顯看出波高在極端值上的模擬相當不錯，且正規化均方跟誤差(normalized root mean square error, NRMSE)(後文使用縮寫)提升至 0.2707(如圖 3-5a)；而水位和平均週期的模擬結果也相當不錯，NRMSE 分別為 0.2290 和 0.1743(如圖 3-5b 和圖 3-5d)；另，由於前期研究結果顯示，裂流的發生時波向有明顯的規律性，因此在期初計畫審查時，委員建議應對波向進行驗證，藉此增加模式的可信度，從結果圖 3-5c 顯示，在波向模擬結果與實測資料趨勢呈現一致，且除了某些時刻外模擬結果均十分接近，整體 NRMSE 為 0.3197。同時本研究亦比較 2021 年 11 月至 2022 年 10 月數值模式和監測站在裂流發生時的海氣象，統計裂流發生時各海氣象在特定條件下的發生機率，結果如圖 3-6 所示，兩者在裂流發生時的各海氣象的條件機率均相似，代表透過該數值模式所描述的裂流現象，與實際情況發生裂流的水動力機制是一致的。

除對模式模擬的水動力結果進行驗證外，本計畫亦對裂流發生的時空間分布進行分析。在模擬的時間內外澳海灘有多個區域均曾發生裂流，與外澳裂流影像監測站觀測結果相似，裂流出現的位置涵蓋整個外澳海域，而該些地點與前節中監測站影像分析的結果有部分相似，例如 2019 年 10 月 17 日晚間十點於北緯 24.885° 附近所出現的裂流，就與外澳監測站觀測到的 R1 裂流渠道位置相近(如圖 3-8a)，2019 年 1 月 18 日下午三點於北緯 24.880° 和 24.875° 的位置所模擬出的裂流現象，則與監測站觀測的 R4 和 R6 位置相近(如圖 3-8d 和圖 3-8f)，此外監測案所觀測到的 R6 和結構物旁的 R11 所出現的裂流現象均可以良好的分辨出來，與實際情形差異不大。然而並非所有監測站所觀測到的裂流渠道，在數值模式上均可以有良好的分辨率，如 2019 年 4 月 25 日上午 10 點位於 24.882° 附近出現的裂流範圍，就同時涵蓋監測站所觀測到 R2 和 R3 的裂流渠道(如圖 3-8b 和圖 3-8c)，同理位於港澳溪出海口南側所觀測到的 R7、R8、R9 和 R10 的裂流渠道，在模式模擬結果通常均整個範圍都有裂流的出現(如圖 3-8g)，本計畫認為該現象是由於這幾個裂流渠道彼此之間相距太近，而本計畫所能取得的水深地形資料解析度僅 10 m，因而在這樣的情況下對於位置過於相近的裂流渠道並無法很好的進行辨別。

本計畫亦對裂流出現的時間分布進行比對。統計 2021 年 11 月至 2022 年 12 月的現場實際資料模擬結果，在不同季節裂流發生的累計小時，數值模式和現場觀測結果的比例是相近的(如圖 3-9)，均是秋季發生的案例數量最多，春季最少，而整體累積時長在

觀測上共計 503 個小時，而數值模擬結果則有 1073 個小時，這是因為數值模式的模擬可分析夜間的情況，因此總類計時長大約為現場觀測的兩倍。此外，從模擬結果顯示在部分時間上，監視站所觀測到的裂流現象無論在位置或是時間上均相符合，如 2022 年 9 月 15 日早上 9 點至 12 點，在外澳監視站 R3 的位置有觀測到裂流現象，而數值模式亦有模擬出相似的情形，如圖 3-10 所示。然而有部分案例模擬結果與現場觀測結果並不相符合，有時模擬結果出現裂流的現象提早，有時則會延遲，或是裂流出現的時間點是相同的，但是其位置卻與觀測不一，且該現象並沒有明顯規律性。本計畫亦發現由於受到地形水深資料解析度的限制，在觀測結果終可看見較小的裂流現象，而數值模式則無法模擬出來，例如 2022 年 10 月 4 日上午 12 時，於影像中最右側有個極小的裂流渠道，之所以能確定該現象係屬於裂流，其主要原因是在後續的退潮時，可看到此處地形有明顯的槽溝狀(如圖 3-11)。

本計畫透過數值模式模擬長期實測資料的目的，除驗證模式準確性和可信度外，也希望後續能透過數值模式的模擬蒐集更多裂流發生的案例，為此本計畫初步分析 2019 前全年的模擬結果，評估模擬結果在時空間分布的合理性。從結果顯示該模式可以描述裂流的現象，甚至從生成至消散的整個演變過程都能清楚得知，且整個裂流演變的過程相當的連續，並沒有流向和流場突然大幅度的變化，初步證實模式模擬的合理性，如圖 3-6 所示，該案例為 2019 年 1 月 4 日上午三點至上午六點，共計出現了 4 個小時，並且可以發現該案例一開始流場是平行外澳海灘向北流去，然而隨著上方流場的增強，隨著這兩股海流匯聚後因而向外海延伸，進而形成裂流現象，並於上午七點時流場的方向又逐漸轉為平行海岸線向北。此外，在烏石漁港北側防坡堤旁一直有股微弱的海流，沿著結構物旁向外海而去的裂流。

綜上所述，長期實測資料模擬結果與實測資料進行比對，在波高、週期、波向和水位的驗證均有不錯的結果，正確率和運算效率也相較前期計畫有明顯提升，而在描述裂流發生的情形也相當不錯，且引致裂流發生的水動力條件與觀測結果一致。絕大部分裂流出現的位置和區域，在數值模擬的結果中均有出現，也可以清楚地觀測裂流整個生命週期的演變。在時間分布上，在各季節出現的裂流比例也相近，裂流於春季出現的次數最少，於秋季出現的次數最多，然而從結果顯示，僅有部分數值模擬出的裂流和現場觀測結果的裂流無論在時間上或空間上完全相同，仍有部分情形裂流出現的時間點或是位置會有差異，而造成上述無論是空間分辨率不足或是模擬與現場比對不符的原因，初

步推測有兩個，其一是所能取得的水深地形資料解析度仍些微不足，其二則是該地形水深是於 2019 年所測量的，距今已有兩年的時間，因此現場的地形水深分布情況恐有所改變。

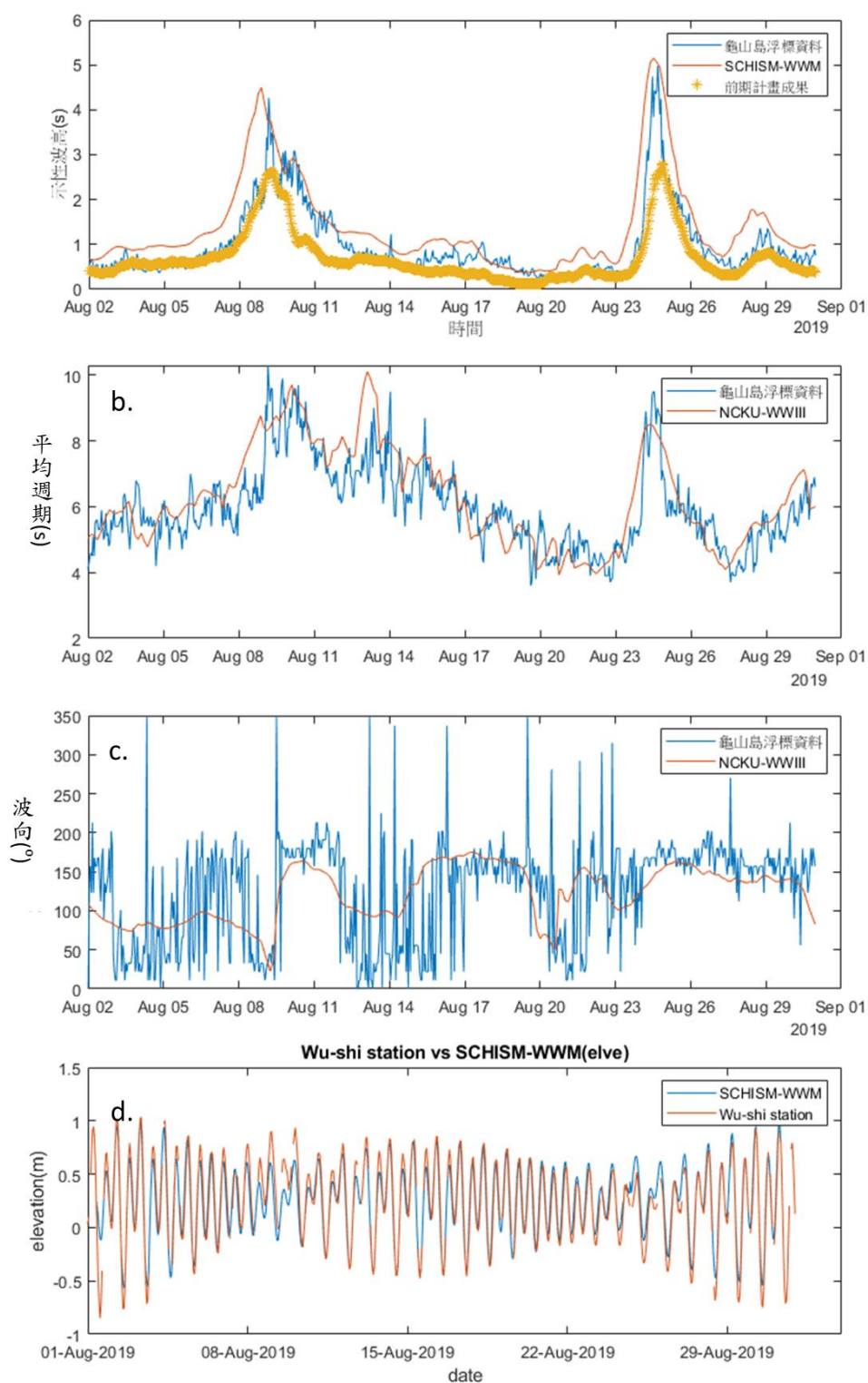


圖 3-5 SCHISM-WWM 模式模擬結果驗證(a.示性波高、b.平均週期、c.波向、d.水位)

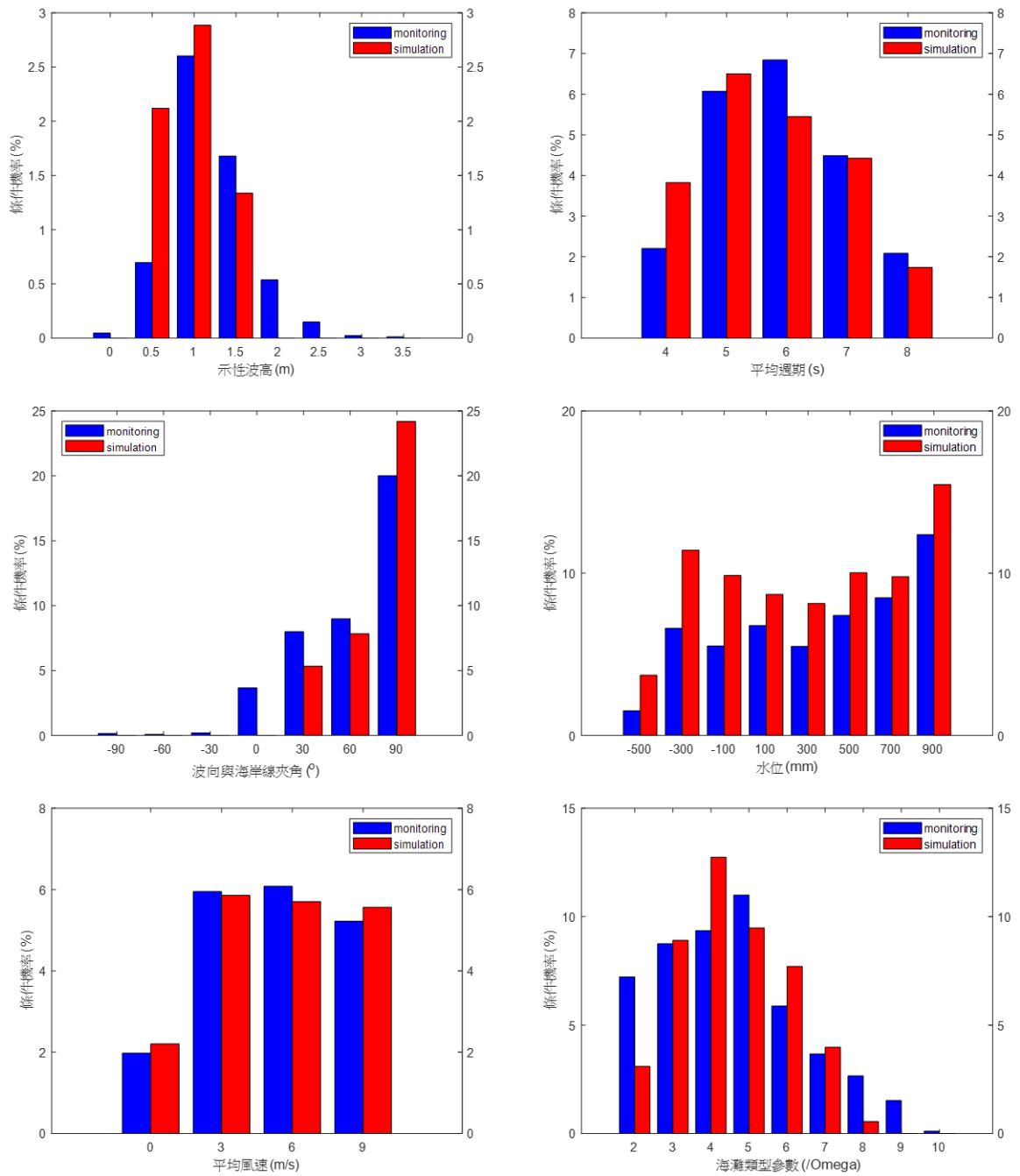


圖 3-6 宜蘭縣外澳海域模式模擬和現場觀測裂流發生之條件機率比較

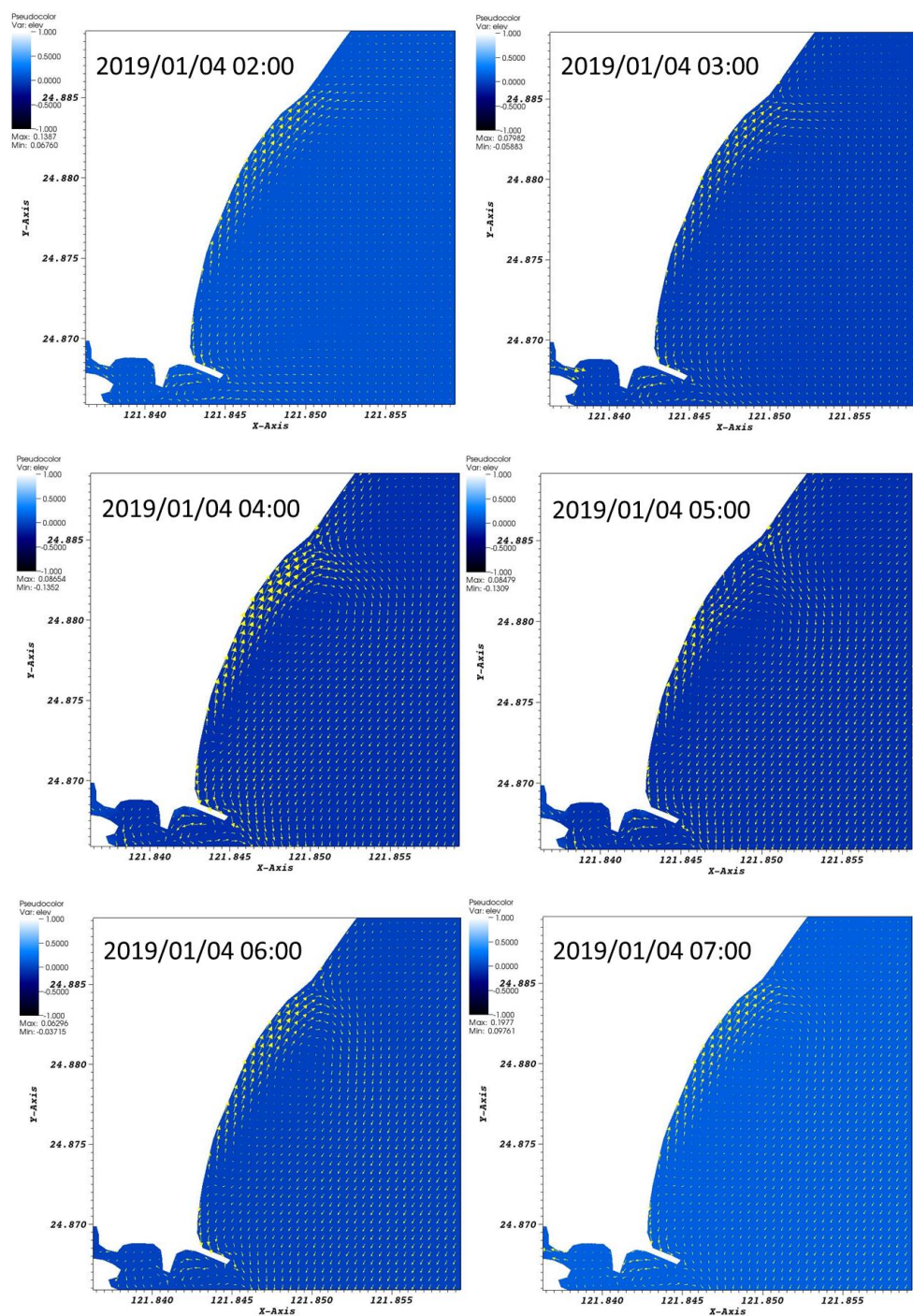


圖 3-7 宜蘭縣外澳海域裂流案例模擬結果(有裂流時間為 2019/01/04 03:00-2019/01/04 06:00)

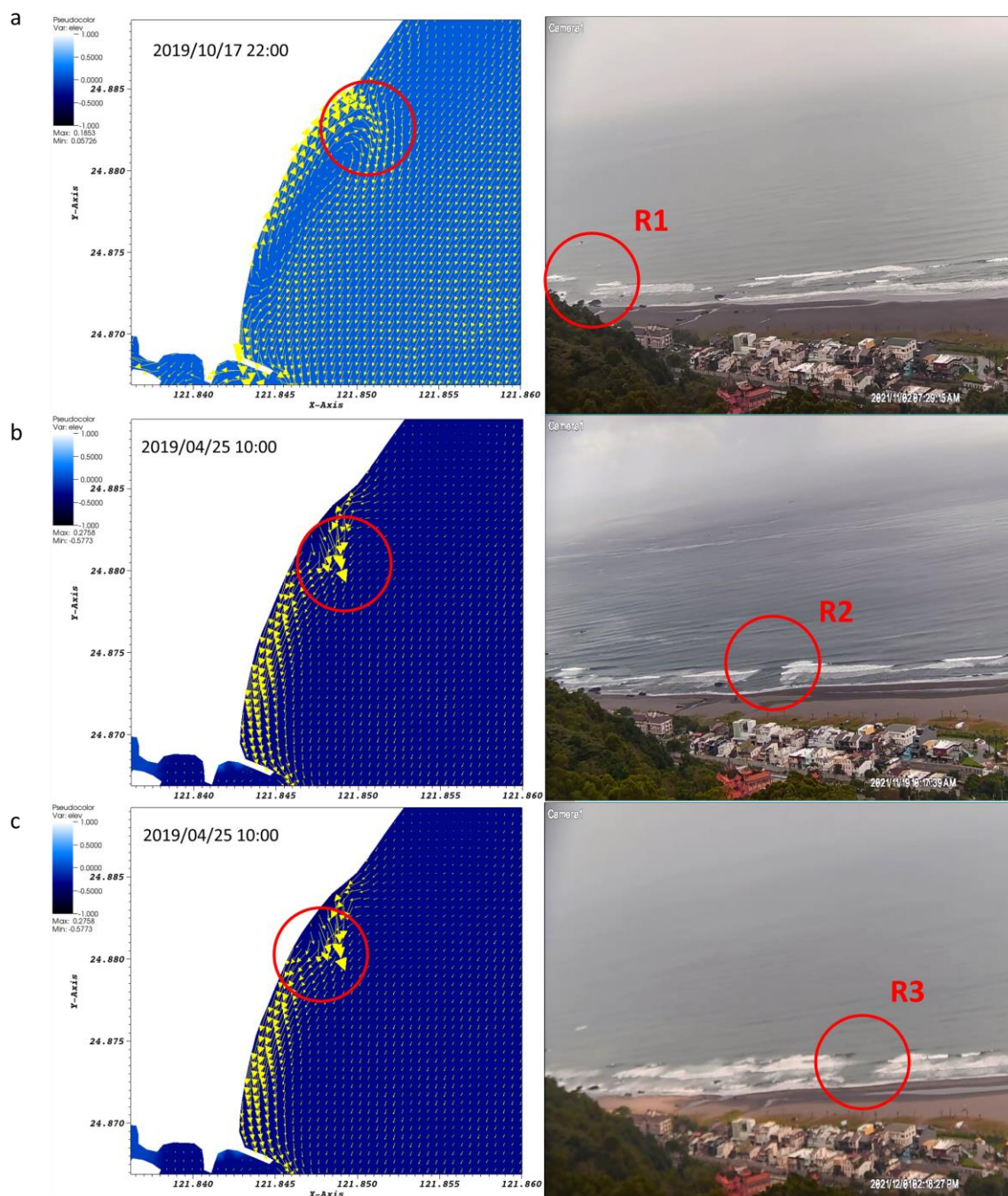


圖 3-8 宜蘭縣外澳海域裂流模擬發生位置與現場觀測結果比對

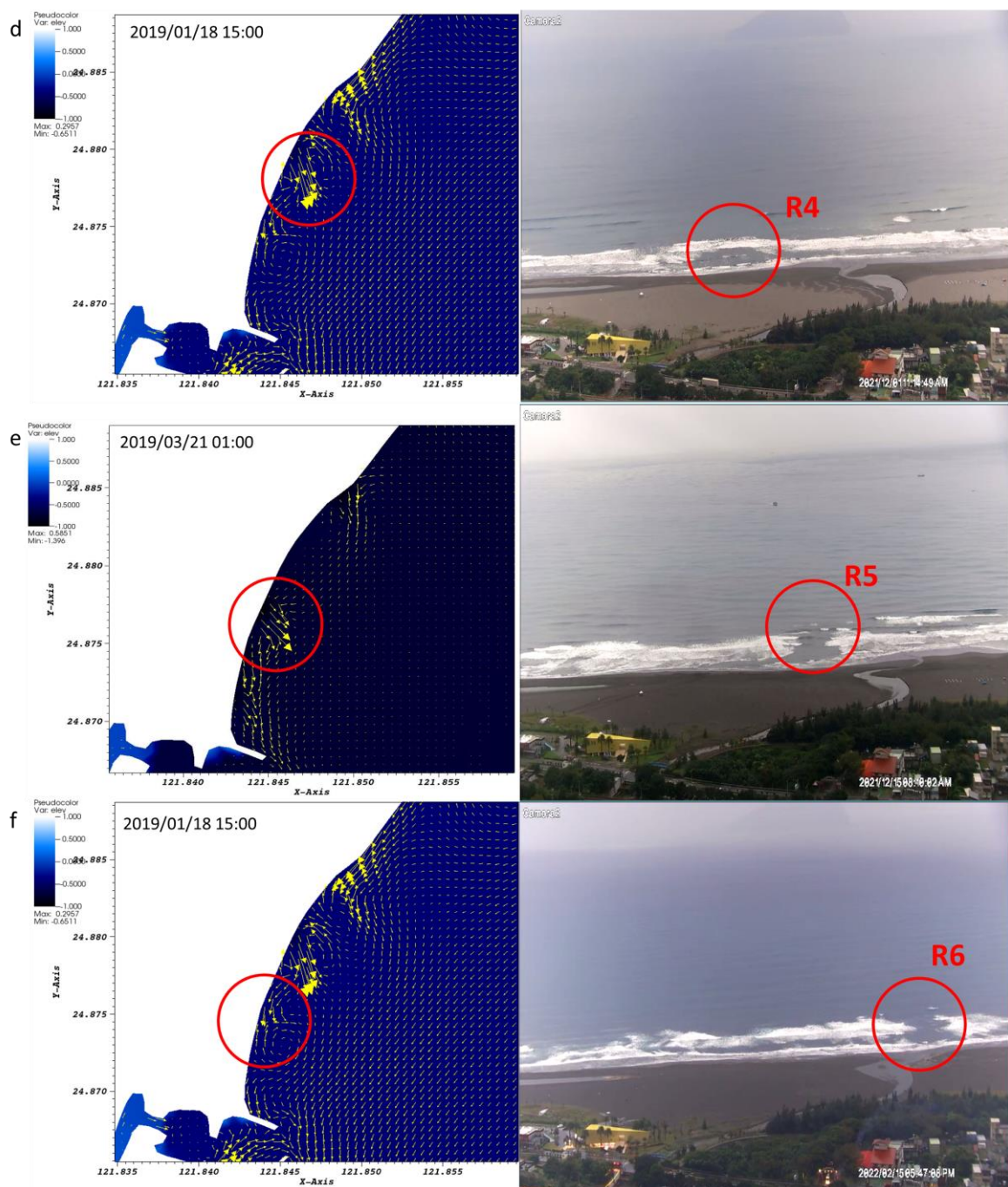


圖 3-7(續) 宜蘭縣外澳海域裂流模擬發生位置與現場觀測結果比對

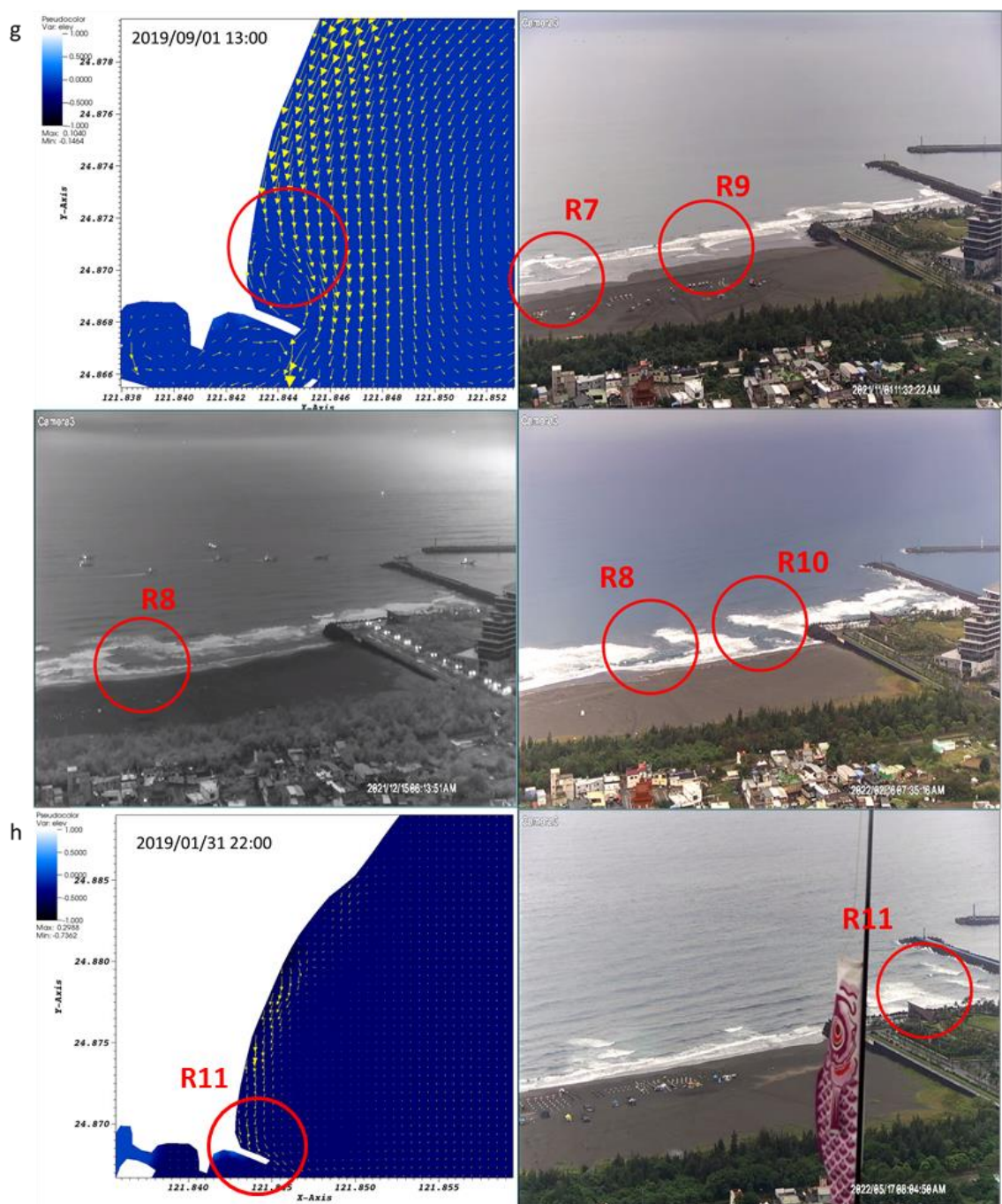


圖 3-7(續) 宜蘭縣外澳海域裂流模擬發生位置與現場觀測結果比對

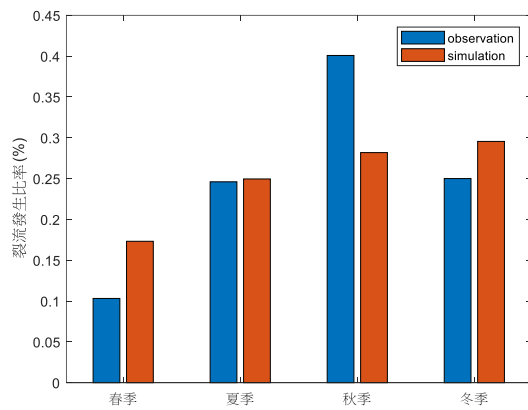


圖 3-9 宜蘭縣外澳海域監視站觀測與數值模擬裂流數量比對圖

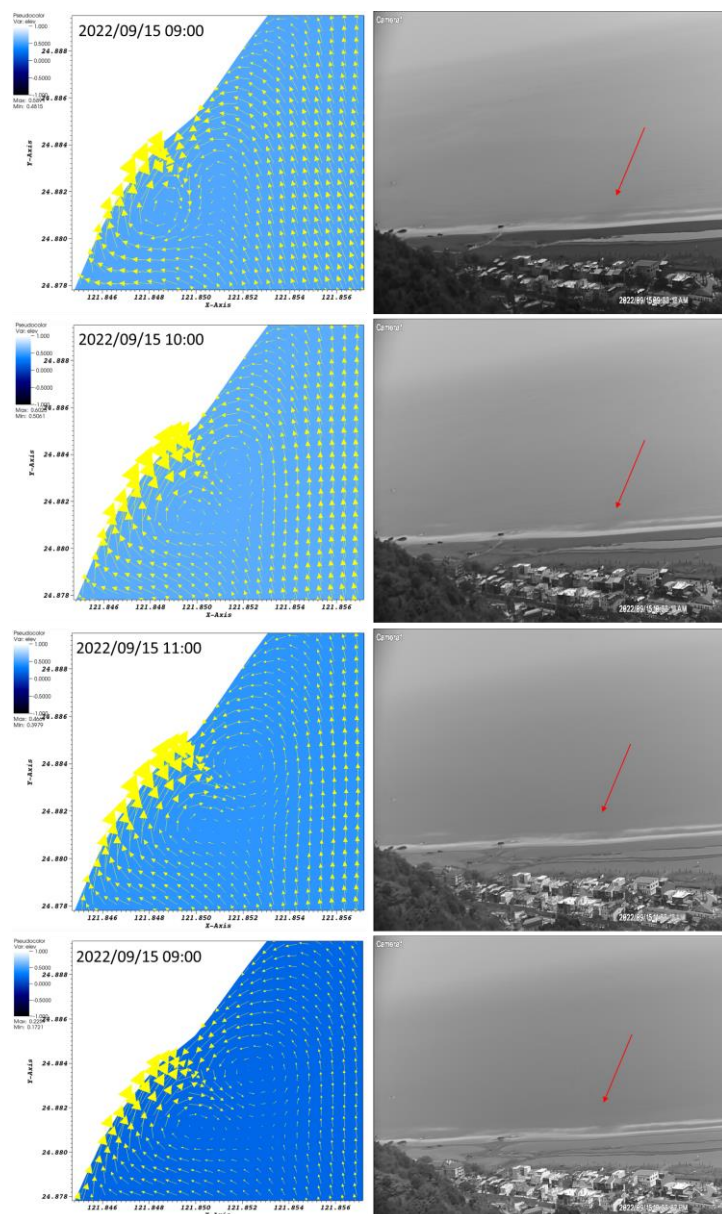


圖 3-10 宜蘭縣外澳海域數值模式與觀測結果完全相符之案例

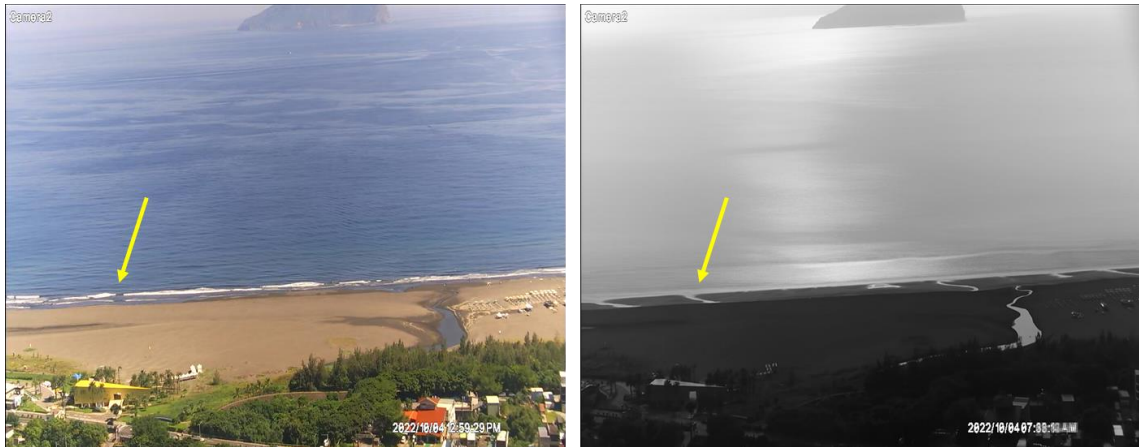


圖 3-11 宜蘭縣外澳海域小型裂流渠道(左.裂流發生實際情形、右.退潮時地形有明顯槽溝)

3-3-2 不同海氣象條件下裂流發生情形

前節已初步對模式模擬裂流的能力進行評估，結果顯示模式現在所採用的設置是足以提供本計畫於裂流研究上所使用，反映不同機制下水動力對於裂流發生的影響。在今年度數值模式的工作項目中，除前節中為下半年度現場觀測資料驗證工作做準備，所進行的長期實測資料模擬外，為能更加全面的探究影響裂流發生的因素，以及蒐集後續建置裂流預警經驗模式的資料，需再進行不同海氣象條件下裂流數值的模擬。

根據前期計畫與裂流監測站分析結果顯示，在裂流發生時示性波高、波向、平均週期和平均風速，在特定的條件下有較多的案例，且條件機率也有明顯的提升。因此，本計畫將對上述該些參數，設計不同的條件進行模擬，藉此分析近岸流場分布是否有明顯變化(如流向和流速)。波浪參數是透過將波浪邊界條件改為由使用者自行設計不同的波浪場作為輸入，而風場資料則是直接提供整個面上單一的風速於模式進行運算，而詳細的模擬條件已於 3-2-2 節中有詳述。在進行模式模擬時考量到運算所需的時長，本計畫並非是對各個海氣象參數所設計的條件以排列組合的形式進行模擬，而是根據影像裂流案例統計結果中，較容易出現裂流案例的條件作為基準(示性波高為 1.5 m、波向近乎垂直海岸線、平均週期 6 s、風速 4 級風)，再以單一海氣象條件作為變因進行探討。

如圖 3-12 至圖 3-18 所示，模擬結果顯示在不同波高的邊界條件下，近岸流場的分布情形並沒有太大的差異，以模式模擬至第 54 小時的結果來看，當邊界條件的波高值為 0.5 m 時，並沒有明顯向外海方向的流場，然當波浪條件介於 1.0 m 至 2.5 m 時，位於烏石漁港北堤旁可發現一股微弱的流場，離岸而去，雖然隨著波高變大流速有些許的提升，達到 0.2 m/s，然近岸的流場分布情形基本上沒有任何的變動，直至波高設置條

件為 3.0 m 時，該處的流場才有明顯的變化，上述那股微弱的流場不僅流速有明顯變大，達到 0.5 m/s，流向也更加垂直於海岸線向外海移動，如圖 3-12；在不同平均週期的模擬，與上述波高分析結果相似，隨著週期的變化，近岸流速有些許增強，然近岸流場的分布情形均並沒有明顯變化，如圖 3-13。

造成該結果因素主要有二，其一是因為 SCHIMS-WWM 在模擬特定條件海況時，僅能透過邊界給定，而本計畫所設計之網格距離岸邊達 30 km，因此即便將邊界上的波高條件調整成 3.0 m，在傳遞至近岸時仍僅有 0.2-0.3 m，因此本計畫將邊界的網格向近岸移動 10 km 希冀邊界條件更容易影響到近岸的波高，模擬結果如圖 3-14 所示，在模擬至第 67 個小時時，當邊界波高設定為 0.5 m 時，近岸的波高為 0.2 m，且從圖來看並未有裂流的現象發生，然而當邊界波高設定為 3.0 m 時，由於將邊界網格向近岸移動，此時的近岸波高有明顯提升至 0.8 m，且此時在 R4 位置上有明顯的裂流現象。

而第二個原因則是因為在進行模擬時，本計畫設計的波向條件為垂直入射海岸，因此本計畫模擬當波向為垂直入射海岸向北偏移 30° 和向南偏移 30° 下在不同波高的情形，結果如圖 3-15 所示，當波向為入射垂直海岸線向北偏移 30° 時，在模擬至第 124 個小時時，隨著波高的增強不僅流速有明顯的上升，從流向上來看可明顯的發現裂流延伸的方向有逐漸向南傾斜，在邊界波高為 0.5 m 時，裂流渠道相當垂直於海岸線，但此時流速較小僅有 0.47 m/s，而當邊界波高維 1.5 m 時，裂流的渠道逐漸向南偏移，但由於波高變大此時的流速也有所提升，達到 0.71 m/s，而當波高達到 2.5 m 時，此時流向已相當平行於海岸線，但流速也已達到 1.1 m/s；反之，若波向條件為垂直海岸線向南偏移 30° 時，在模擬至第 135 個小時時，以隨著邊界波高設定增加，裂流渠道有逐漸向北偏移的情形，當邊界波高為 0.5 m 時，並沒有裂流的現象，然隨著邊界波高的增加，逐漸於 R3 的位置出現裂流現象。

在不同波向和不同的風速條件下，近岸流場的模擬結果就有明顯的不同，如圖 3-16 顯示，以模擬至 133 小時為例，在波向的部分，當參數設計為近乎垂直海岸線時會有明顯的裂流現象，大致位於裂流監測站觀測結果中 R4 和 R5 的位置，且此時的流速最大可達 0.8 m/s，而當波向為垂直海岸線逐漸向南偏移時，裂流的位置則會逐漸移動至外澳海域北方(約為監測站觀測結果 R1 位置)，且裂流渠道也會逐漸向北傾斜，然隨著波向愈平行海岸線，此時的流速則愈小，當波向為平行海岸線向南時，則流速僅剩 0.43

m/s；倘若改為向北偏移 90° 以內，裂流發生的位置相較於前者更接近烏石漁港北堤，約為監測站觀測結果 R2 和 R3 位置，且與向北偏移時相同，隨著波向偏移量增加近岸流速有明顯下降，且而當波向已非入射海岸，則無裂流的發生，近岸流場大致為平行海岸線的沿岸流。而不同的風速條件也會導致近岸流場分布情形有明顯差異，以模式模擬至第 54 小時的結果來看，在風速為 3 級風(4 m/s)時，並未有裂流的現象，而近岸的流速亦僅有 0.22 m/s，而當風速來到五級風(9 m/s)時，此時的模擬結果與長期實測資料模擬結果相似，裂流出現的位置位於外澳沙灘的北方，裂流流速提升至 0.42m/s，而當風速來到七級風(約 15 m/s)時，裂流現象更加的明顯，流幅更寬，此時流速也達到 0.68 m/s，但其方向並非垂直海岸線，有向北偏移的情形出現(如圖 3-17)。

除探討在不同邊界條件下裂流發生之情形，本計畫亦統計上述 2019 年全年長期模擬的結果，比對該 407 個裂流案例發生時，當下波高與流速之關係，結果如圖 3-18 所示，可發現在所模擬出的裂流案例從流速上可明顯分為兩類，大致以 0.9 m/s 為分界，然無論是哪一類，從結果上均可以發現當波高變大時，裂流流速有明顯上升，流速較小的裂流情況，在波高為 0.4 m 時，流速介於 0.5-0.6 m/s 間，而當波高達到 1.5 m 以上時，流速則可以達到 0.9 m/s，而流速較大的裂流也有類似情況，當波高為 0.6 m 時，裂流流速介於 1.0-1.1 m/s 間，而當波高達到 1.4 m 以上，流速就來到 1.5 m/s 以上。此外，從結果也可以發現，在流速較小的裂流情形，隨著波高的增加，流速上升的幅度較大。

綜上所述，不同的海氣象條件不僅會影響裂流發生與否，亦會影響裂流的流速和裂流的型態，當波向為垂直入射海岸線時，在不同波高情況下裂流流向並不會有太大的差異，但流速會隨著波高變大而增加，而根據長期現場模擬結果顯示，在流速較小的裂流案例，隨著波高的增加裂流流速上升的幅度會較為顯著，反之亦然。而當波向並非垂直入射海岸時，則會隨著波浪能量的增加(波高或週期變大)，對近岸裂流趨勢造成相對應的偏移，即波向向北偏移時，隨著波高變大裂流的趨勢會向南偏移；倘若波高不變的情況下，隨著波向偏移量愈大，則裂流的流速則會愈小。而風速的部分不僅會隨著風速愈大，流速愈大，且裂流發生的位置也會有所不同。

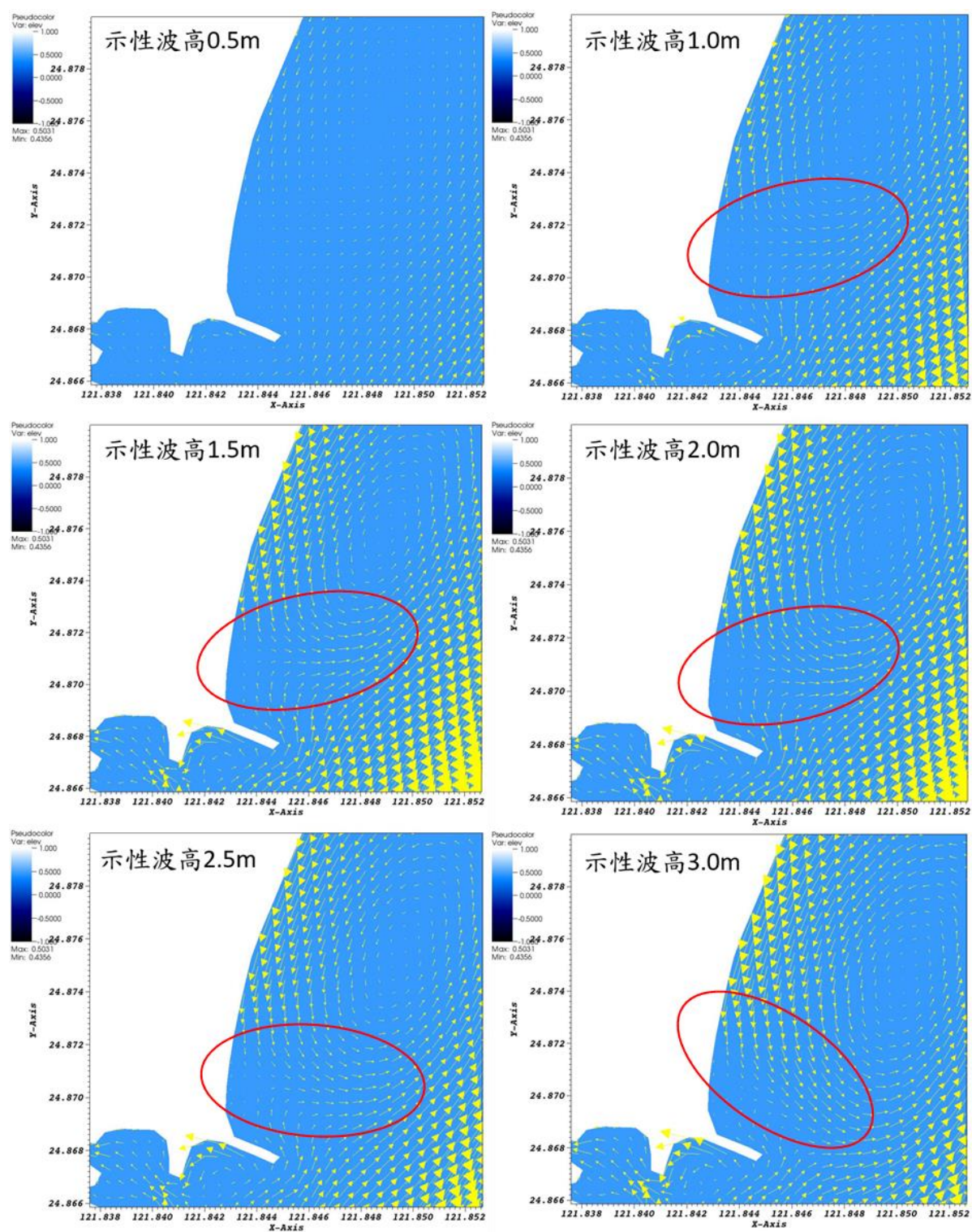


圖 3-12 不同波高條件下近岸流場分布情形

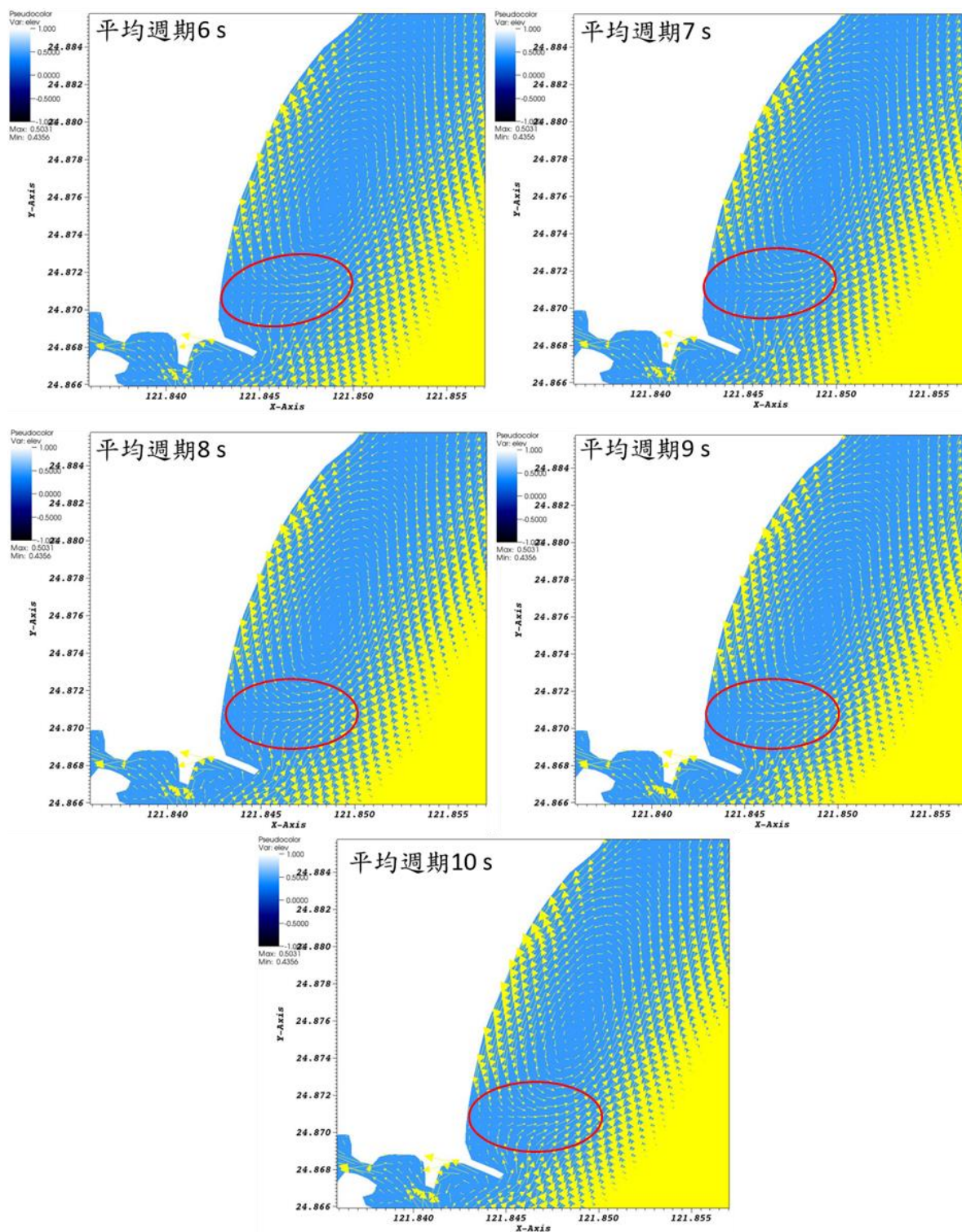


圖 3-13 不同週期條件下近岸流場分布情形

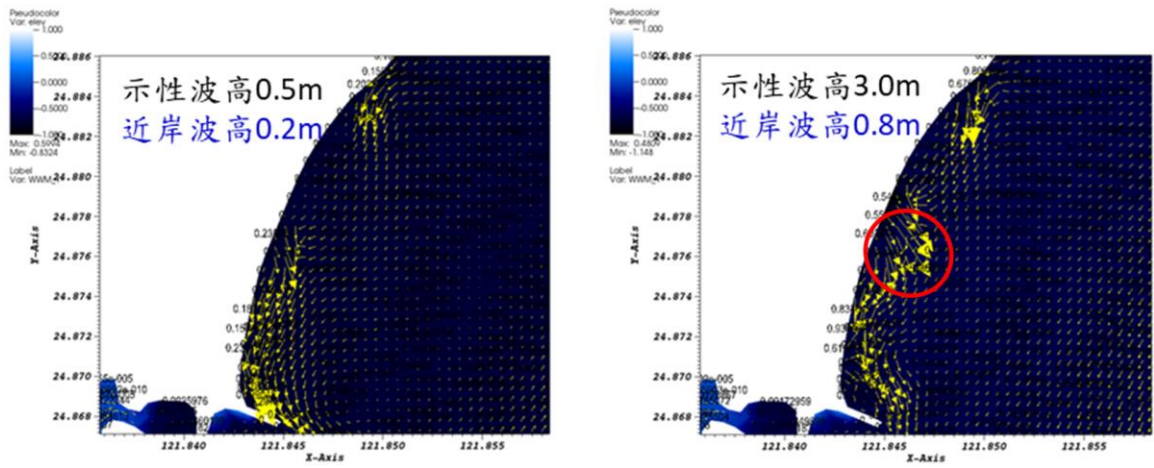


圖 3-14 不同近岸波高條件下裂流發生情形

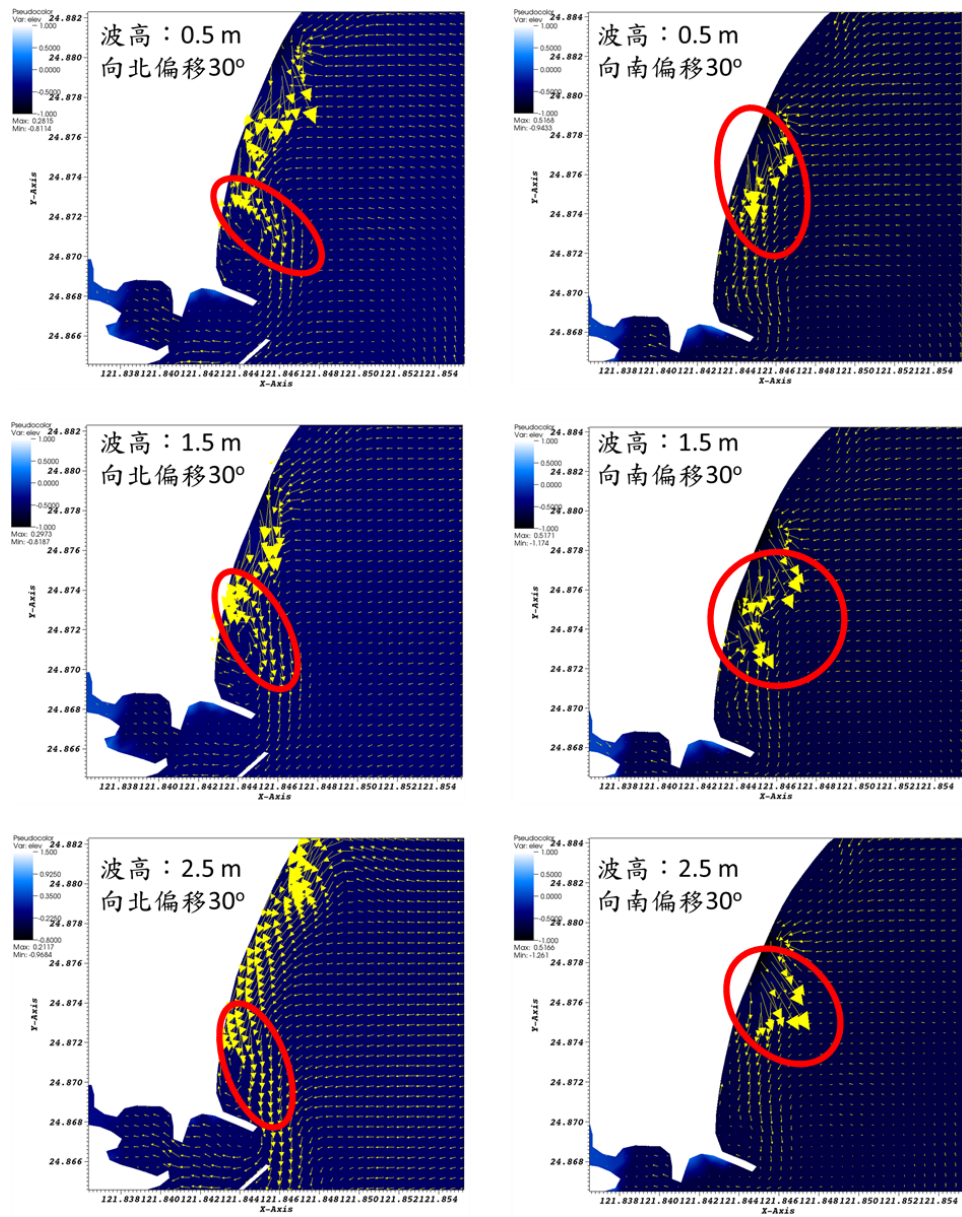


圖 3-15 波向偏移 30° 時不同波高條件下裂流發生情形

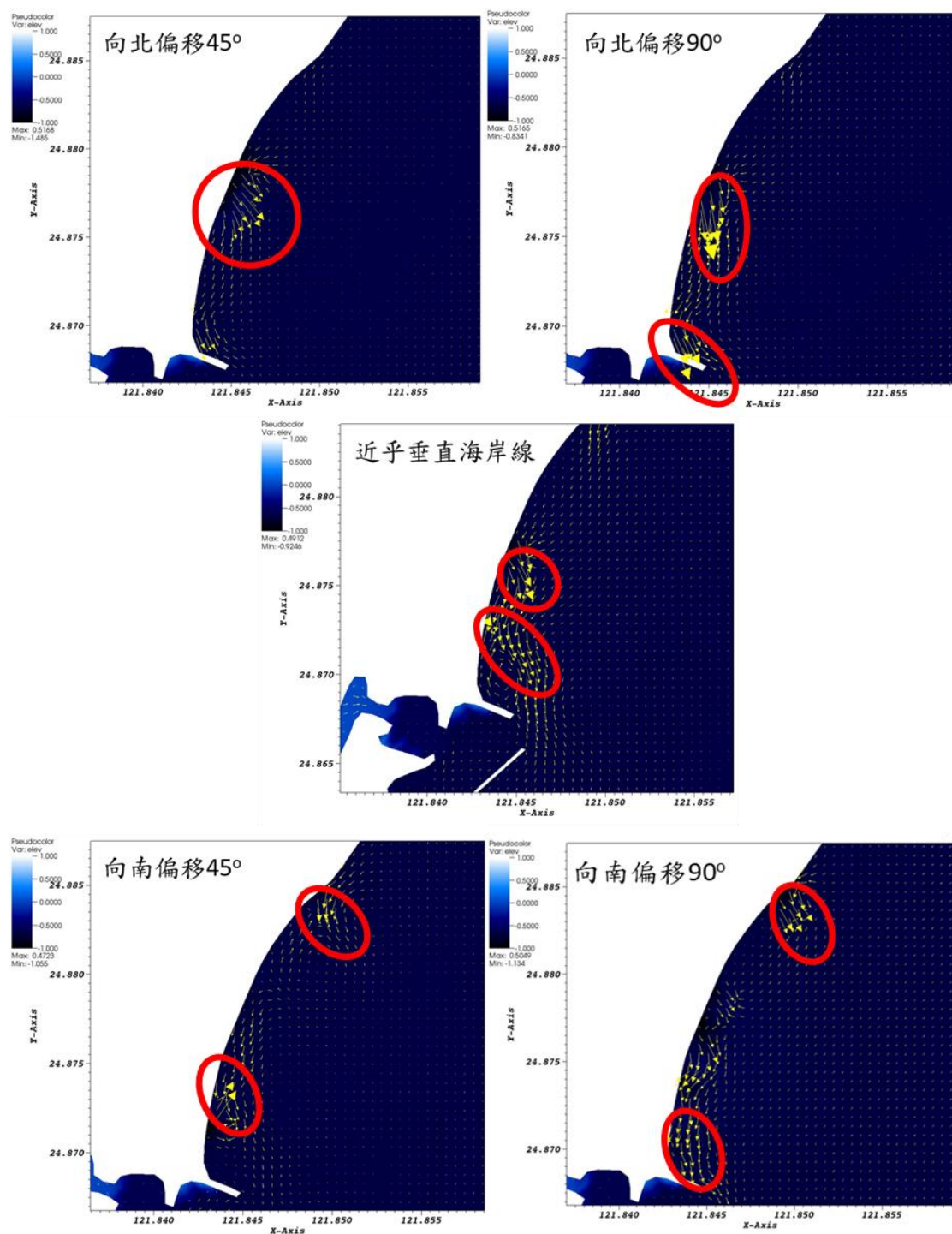


圖 3-16 不同波向條件下近岸流場分布情形

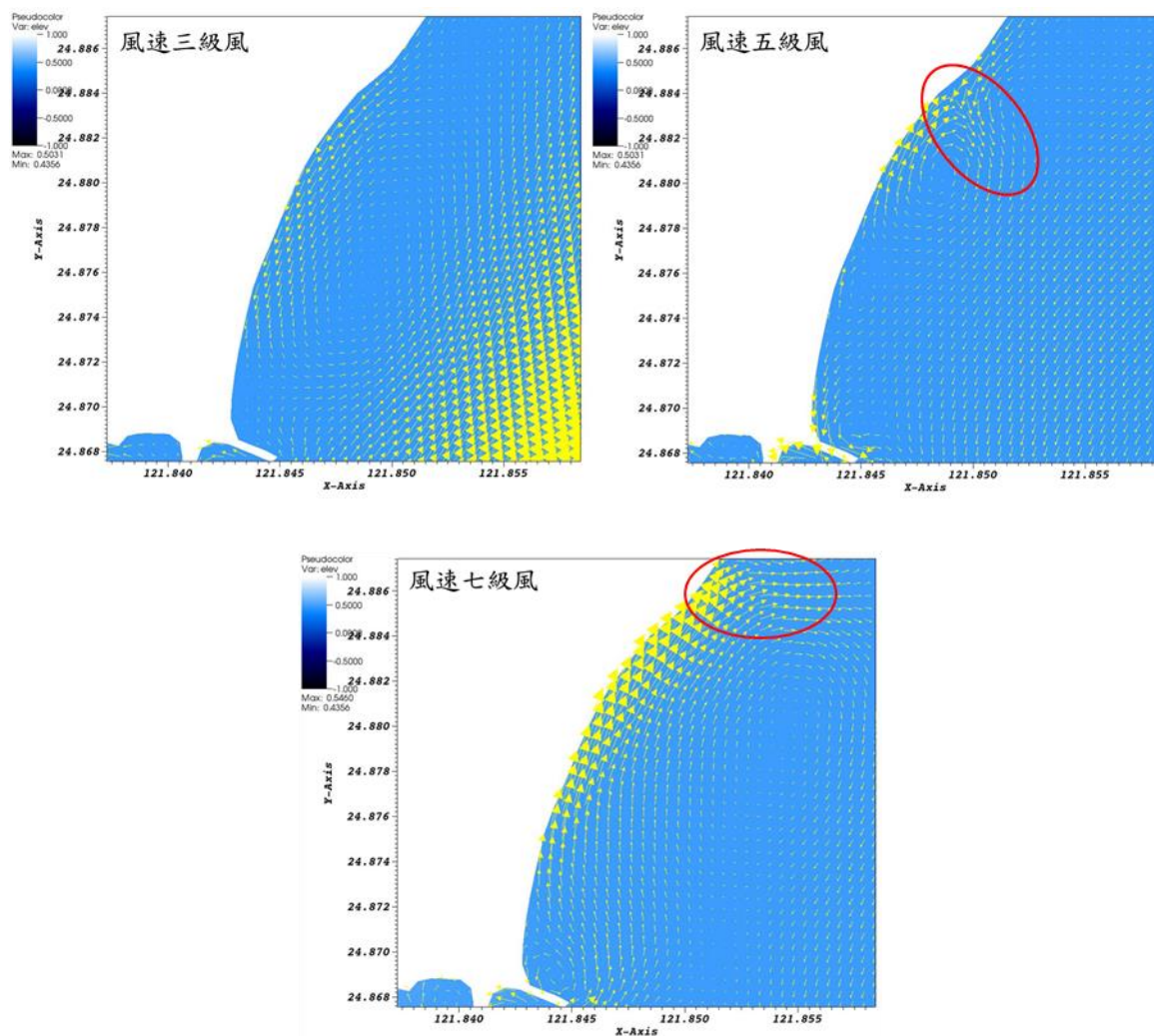


圖 3-17 不同風速條件下近岸流場分布情形

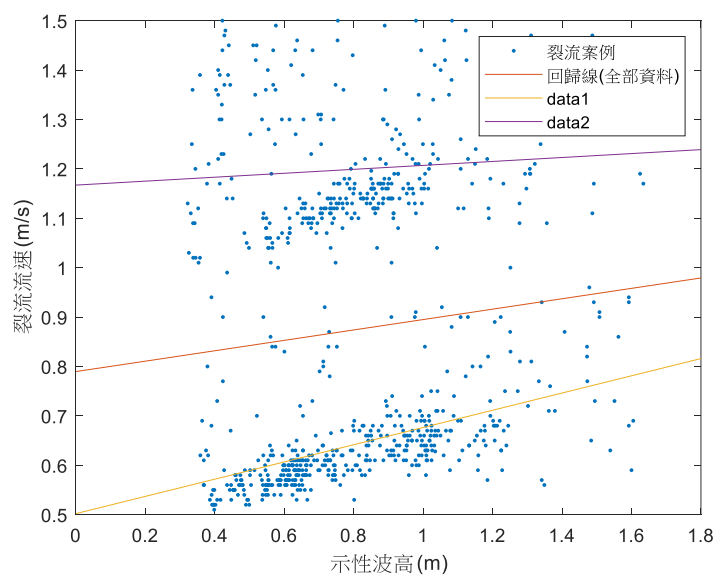


圖 3-18 裂流發生時波高與流速關係(2019 全年模擬結果)

第四章 裂流經驗預測模式初步建置

4-1 人工智慧概論

裂流的發生機制複雜且未明，至今未有完整的理論可以清楚地描述裂流發生的位置或是時機，而近年來隨著電腦技術增強以及人工智慧技術的蓬勃發展，許多應用人工智慧技術於機制複雜自然現象的研究逐漸出現。人工智慧(artificial intelligence, AI)目的為讓機器或電腦等非人類的人造物能透過各種不同的方法來擁有部分與人類相似的智慧，人類智慧的行為諸如模仿、學習、思考、判斷以及啟發等，因此人工智慧是一種理念、目的或是框架，可以囊括諸多概念與方法。在人工智慧的基礎下誕生了許多諸如資料探勘(data mining)、機器學習(machine learning)以及深度學習(deep learning)等概念及方法，這些人工智慧方法彼此相關聯，目標皆為讓機器或電腦擁有部分於人類智慧相似的能力。因此，本計畫透過人工智慧技術分析裂流發生的歷史案例，學習容易有裂流發生的海氣象條件，建置出裂流經驗預測模式來預測裂流的發生，預警海岸遊憩人員進而幫助降低人員傷亡。

4-1-1 人工智慧方法

人工智慧方法衍生許多方法來應對不同領域的問題，如資料探勘方法透過各種不同方法來挖掘原本大量且複雜的資料，目的在給定的資料中挖掘知識、特徵或關係。資料探勘方法包含了許多種機器學習方法與深度學習方法，只要是基於大量資料中分析的方法都能稱作為資料探勘方法。機器學習是在已處理過的資料中透過學習已知的特徵來對新事物進行預測，機器學習在進行學習前必須給定一組包含經由人類知識萃取出特徵的資料。而深度學習基於神經網路(neural network)理論，不同於機器學習方法，深度學習捨去了需先由人類知識來做的知識萃取，而是從大量資料中讓多層結構的神經網路學習特徵為何，對資料進行學習前不需透過人類知識的介入。無論機器學習或深度學習欲分析的問題本身必須存在某些潛在規則可以去學習，並且要有明確的目標，存在一定規則但目前並無理論公式可描述，因此才須利用機器學習或深度學習方法來解決問題。而機器學習以及深度學習中提到的學習，指的是觀察一組資料並發掘資料中潛在知識的過程，學習的類型又可分成三類，監督式學習(supervised learning)給定一組資料包含要判斷或預測的答案給機器進行學習、非監督式學習(unsupervised learning)給定一組資料但不包含要判斷或預測的答案來讓機器學習對資料進行分群或是組織以及強

化式學習(reinforcement learning)則是機器會不斷地嘗試錯誤(trial-and-error)並針對潛在的正確答案得到回饋。而機器學習衍生許多種演算法，其中包含 ANN、支撐向量機(Support vector machine, SVM)(後文使用縮寫)以及隨機森林(Random forest, RF) (後文使用縮寫)等，主要透過對輸入資料進行分析，從資料中找出規律或特徵進而對新的資料進行準確的預測。

4-1-2 文獻回顧

隨著電腦技術日新月異，許多透過人工智慧方法應用在不同領域的研究逐漸興盛，例如在遊戲競技領域上如 Silver et al. (2017)利用深度類神經網路對人類專家學習以及自身強化學習，成功創造能擊敗圍棋世界冠軍的 AlphaGo；在地質領域上如 Karimpouli and Tahmasebi (2019)利用卷積類神經網路對岩層進行分類；在災害領域上如 Bui et al. (2019)利用多變量自適應回歸模型對森林火災的空間分布進行分析以及預測；在醫學領域上如 Ozturk et al. (2020)利用卷積類神經網路透過檢視 X 光圖輔助檢測患者是否罹患 COVID-19。這些人工智慧方法衍生的機器學習與深度學習方法繁多，在各個領域上都能有不錯的成效。

因此，近年來對於分析複雜或尚未了解機制的自然現象研究，以不同統計和機器學習方法來建置預警模式應用在不同領域的研究也開始層出不窮，如 Böse et al. (2008)提出以 ANN 建置即時且高可信度的地震預警系統，當地震發生於海底，因震波的動力會引起海水劇烈起伏形成海嘯，Romano et al. (2009)、Mase et al. (2011)利用倒傳遞類神經網路(Back Propagation Neural Network)建置即時海嘯預警系統，因應氣象引致區域型的災害，Chang et al. (2007)、Kung et al. (2012)利用 ANN 建立土石流預警系統，判斷土石流是否會發生；Thirumalaiah et al. (1998)、Sunkpho et al. (2011)、López et al. (2012)利用 ANN 預測水位高度進而建置城市淹水預警系統；Chen (2013)利用 SVM 來針對颱風的降雨量、延時以及雨型等進行預測，Perol et al. (2018)利用卷積神經網路(convolutional neural network, CNN)預測地震的發生位置。許多研究透過機器學習方法來處理複雜且尚未了解機制的自然現象問題，尤其常應用在如土石流、颱風以及海嘯等常造成人員傷亡的災害上，都能有不錯的成效並降低災害的影響。

4-2 類神經網路演算方法理論

本計畫使用在處理如裂流現象的非線性問題有良好表現的 ANN 方法來建置裂流經

驗預警模式。該模式係屬於監督式學習的演算法，且在模式訓練過程中可提供明確的正確答案，對後續模式驗證準確度相當便利。類神經網路為模仿人類大腦組織以及運作方式的資料處理技術，人類大腦由密集相互連接的神經細胞所組成，每個神經細胞的構造簡單，但大量的神經細胞結合起來能擁有可觀的計算與處理能力。透過讓電腦學習與人類結構相同的神經傳遞資訊過程，從而讓電腦模擬神經傳遞訊息與反應動作，而由 Rumelhart et al. (1986) 研究出倒傳遞神經網路(back propagation neural network)以及近代電腦能力日新月異，使類神經網路開始突出於機器學習領域，常被應用於機制尚未明確或是複雜的自然現象上，預期能找出自然現象的發生徵兆及機制等。因此，對於預測裂流的發生機率，預期使用 ANN 建置預警模式也能有不錯的效果。

神經元(neuron)為 ANN 最基本的組成單位，如圖 4-1 所示，輸入值經過權重值輸入至神經元後，神經元內部開始進行運算如式(4-1)所示，而權重值會逐步調整直到訓練完成，而計算結果即為神經元的輸出值。

$$Y_j = f(\sum_i W_i X_i - \theta_j) \quad (4-1)$$

其中 Y_j 為神經元的輸出值， W_i 為 ANN 各神經元間連結的權重值， X_i 為神經元的輸入值， θ_j 為神經元內的門檻值， f 為傳遞函數(activation function)，神經元內部計算後使其能有非線性的輸出。

倒傳遞演算法是利用將網路中所有的權重，計算損失函數的梯度，根據梯度下降法 (gradient descent) 來決定如何修正網路中的權重，如圖 4-2 所示，即透過計算誤差函數中的梯度方向來得到如何修正權重能使誤差降低的方法。在模式訓練的疊代過程中，根據目前輸出與目標輸出的誤差調整各神經元間連結的權重來完成訓練，假設輸入給神經元第 p 個資料，即在疊代 p 中，輸出為 $Y(p)$ ，目標輸出為 $Y_d(p)$ ，因此誤差為：

$$e(p) = Y_d(p) - Y(p) \quad (4-2)$$

假如誤差 $e(p)$ 為正，代表需增加權重來增加輸出，假如誤差 $e(p)$ 為負，代表需減少權重來減少輸出，以此方式來降低輸出值與目標輸出的誤差，因此可寫成下式：

$$w_i(p+1) = w_i(p) + \alpha \times x_i(p) \times e(p) \quad (4-3)$$

其中 α 為學習率，為介於 0~1 之間的常數，影響誤差回傳神經網路時調整權重的幅度。類神經網路基本的架構如圖 4-3 所示，由許多個神經元所組成，其中包含輸入層(input layer)、隱藏層(hidden layer)以及輸出層(output layer)，ANN 的輸入資料由輸入層輸入，傳遞至隱藏層的神經元進行運算，最後經由傳遞函數得出輸出，訓練的過程中，根據輸出值與目標值的誤差，倒傳遞至神經元並調整权重，不斷重複輸入資料進行疊代，此疊代過程會不斷進行直到权重調整至能使輸出值與目標值的誤差最小化。根據不同問題之複雜度可以決定不同的隱藏層數目、神經元數量、學習率以及傳遞函數。對於發生機制尚未明確或複雜的自然現象預測問題，常會使用如 S 型函數(sigmoid function)、雙曲線正切函數(hyperbolic tangent function)或線性整流函數(rectified linear function)作為神經元的傳遞函數(如圖 4-4)，使類神經網路具有非線性計算能力，建立複雜的函數關係，以描述整個物理現象。

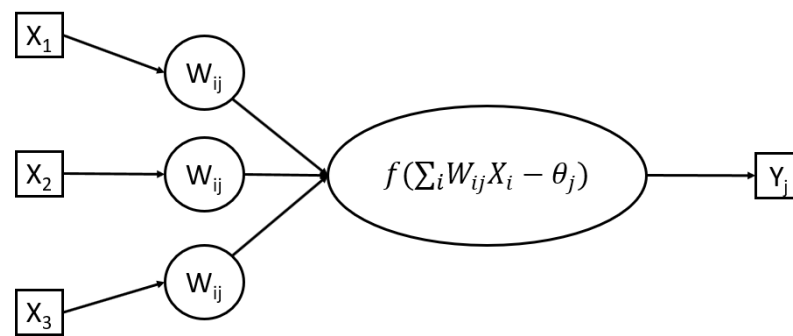


圖 4-1 單個神經元架構圖

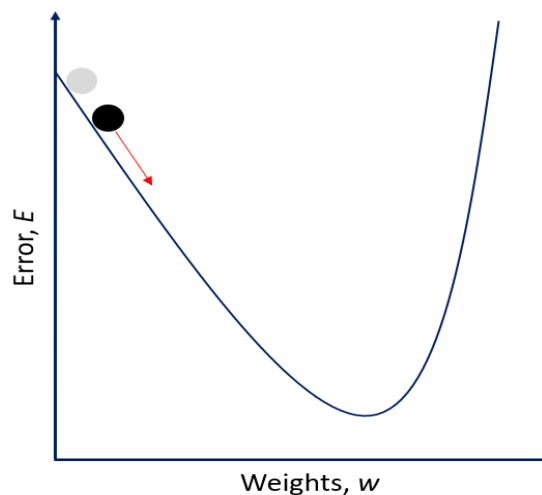


圖 4-2 梯度下降法示意圖

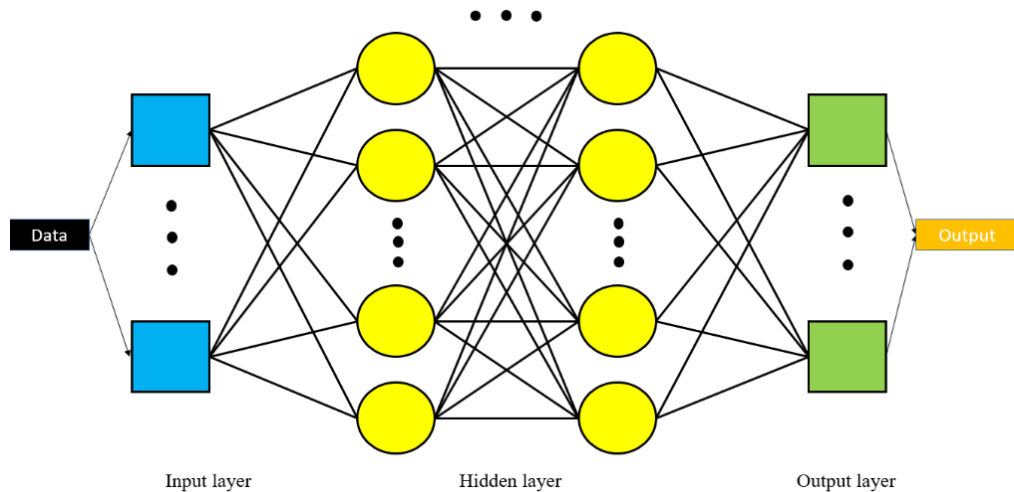


圖 4-3 類神經網路基本架構示意圖。類神經網路基本架構包含輸入層、隱藏層與輸出層

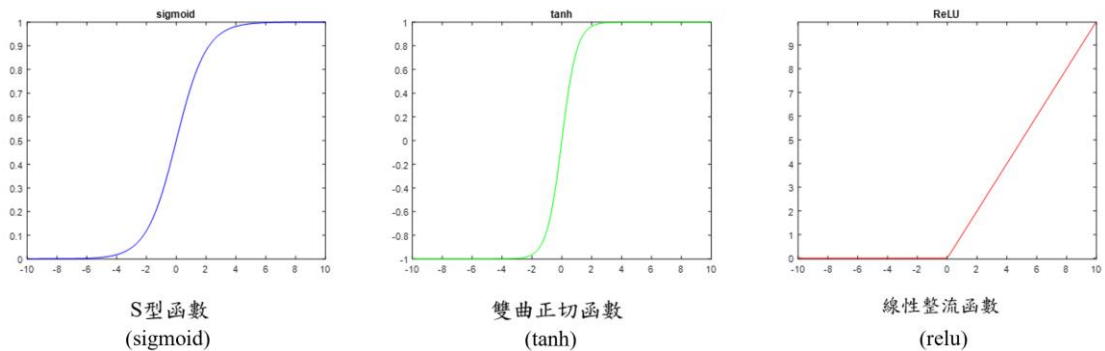


圖 4-4 非線性傳遞函數。從左至右分別為 S 型函數、雙曲正切函數以及線性整流函數

4-3 裂流經驗預測模式建置

本計畫自衛星航拍與裂流監視站影像獲得裂流發生的時間與案例，並且整理成訓練與驗證資料來建置裂流經驗預測模式，其中利用多個數值模式輸出欲建置模式海岸的波浪、風與潮汐資料，做為訓練模式時輸入的因子與資料，經過率定訓練參數的過程來建置最佳裂流經驗預測模式，並且以多個評估指標來驗證經驗預測模式的預測效果。

4-3-1 輸入資料與建置流程

在經驗預測模式建置上，本計畫所採用的裂流案例，使用透過衛星航拍影像分析後獲得在 2016~2020 年間有裂流發生時的案例時間，以及 2021 年裂流監測站所測得以每一小時觀測到一個或以上裂流為基準進行資料離散處理，並且為避免訓練不平衡 (imbalanced training)，同時選取與裂流案例同樣筆數的無裂流發生時的資料，以 1:1 隨

機挑選的方式進行訓練與驗證，一共蒐集到 792 筆裂流資料以供預測模式建置，而本計畫使用全部資料中 70%作為訓練資料，剩下的 30%作為評估模式預測能力的驗證資料。

表 4-1 列出本計畫經驗預測模式建置的訓練與驗證資料分配情形。

建置經驗預測模式時，因子之間的單位不同，其數字大小的代表性也各不相同，因此造成各因子變化程度不一，影響利用機器學習方法建置預測模式的結果。為了更有效地建置經驗預測模式，可先對資料進行正規化(normalization)，再進行預測模式的建置。本計畫設定資料正規化上下限範圍為 0~1 之間，將原始資料縮放成介於 0~1 之間的值，而資料正規化的公式如下式所示：

$$y' = lower + (upper - lower) \times \frac{y - \min}{\max - \min} \quad (4-4)$$

式中 y 為縮放前的數據、 y' 為縮放後的數據； $lower$ 為指定的縮放下限、 $upper$ 為指定的縮放上限； $\min$ 為原始數據的最小值、 $\max$ 為原始數據的最大值。

根據第一年度本計畫研究成果，選擇裂流發生時海氣象資料較有規則性的參數，作為影響裂流發生的潛在因子，包含波高(H_s)、平均週期(T_{m0})、尖峰週期(T_p)、波向(θ_{wave})、平均風速(V_{wind})、水位(η)。此外，根據前人文獻裂流的發生容易受到地形地貌的影響，故本計畫將海灘類型參數(Ω)納入，但由於該參數的計算需要有近岸海域砂質粒徑的基本調查資料，因此該參數將會作為選擇性因子，即在預測時可根據使用者選擇性加入或不加入，而其他海氣象影響因素將透過數值模式輸出的海氣象資料來得到裂流發生時的條件，波浪資料上採用 WWIII 大範圍模擬的資料，風場的資料則採用大氣預報模式第二代(CFSv2)或是氣象局 WRF 預測風場所計算的結果，而水位的部分則是透過 FES 模式模擬 2014-2016 年所計算的八個分潮參數，並透過鄰近的水位觀測站進行修正。最終根據上述影響裂流發生的因子統計結果，利用類神經網路方法輸出裂流的發生機率，並透過實測資料進行驗證，作為本計畫所提出的裂流經驗預警模式。

因此，本計畫以衛星航拍影像與裂流監測站影像產生歷史裂流發生案例，本計畫將自 WWIII 波浪模式，產出欲建置海岸之波浪參數輸出，自 WRF 模式產出海岸風之參數輸出，自 FES 模式輸出海岸潮汐之參數以及透過計算得到海灘類型參數；而裂流案例可由光學影像分析可得到。裂流經驗預測模式建置流程如圖 4-5 所示。

表 4-1 經驗預測模式建置之訓練與驗證資料數量

資料類型		訓練/驗證 資料分配	有裂流/無裂流 資料分配
訓練資料	裂流資料	554(70%)	277(35%)
	無裂流資料		277(35%)
驗證資料	裂流資料	238(30%)	119(15%)
	無裂流資料		119(15%)

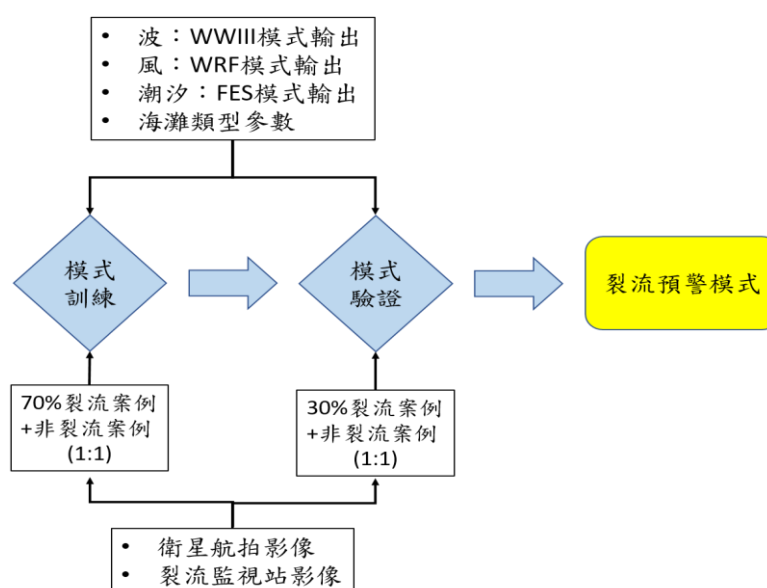


圖 4-5 裂流預警模式建置流程

4-3-2 模式訓練

本計畫選用的類神經網路方法為 Rumelhart et al. (1986)提出的倒傳遞神經網路，為監督式機器學習方法，學習過程中給予有輸入資料和學習目標，模式透過訓練找出輸入資料與學習目標之間的關係，利用權重(weight)與偏差值(bias)來表示其關係的強弱，預警系統模式架構圖如圖 4-6 所示。訓練過程中透過不斷調整訓練參數，以達到最佳訓練結果，訓練過程中的參數包含了隱藏層數目、神經元數目、學習速率以及隱藏層與輸出層傳遞函數等。

經驗預測模式訓練過程中，隱藏層層數和神經元數目決定神經網路的結構，學習速率影響神經網路調整權重時的幅度，傳遞函數則影響每個神經元內部如何非線性計算

並傳遞到下一個神經元的方式。因此，本計畫率定訓練參數時，隱藏神經元數、學習率、隱藏層層數與輸出層傳遞函數皆以網格搜尋法(grid search)與 k-fold 交叉驗證(k-fold cross-validation)來率定。網格搜尋法利用在指定的範圍內測試所有不同的參數組合並比較，選出訓練結果最佳的訓練參數組合，而比較的依據是藉由 k-fold 交叉驗證輸出訓練結果，如圖 4-7 所示。k-fold 交叉驗證將訓練資料分成 k 等份，k-1 等份的資料建置預測模式，其餘的資料用來測試該模式的正確率，此過程將會重複進行直至每一等份的資料都曾作為測試資料後，最後將每一次的測試結果平均加總起來，即為 k-fold 交叉驗證的輸出結果，亦為預測模式的訓練結果。

因此，本計畫設定學習率測試範圍取 0.001 到 0.1 之間進行測試，找出訓練結果最佳的學習率。隱藏層與輸出層傳遞函數測試則經由交叉測試 S 型函數(sigmoid function)、雙曲線正切函數(hyperbolic tangent function, tanh)(後續使用英文縮寫)以及線性整流函數(rectified linear unit, relu)等三種不同非線性函數後，找出最佳的隱藏層與輸出層傳遞函數。為了增加預測模式的非線性演算能力，隱藏層層數可設定為多層，以 1 至 3 層進行率定。隱藏層神經元數根據葉(2001)指出可由平均法求得，可從輸入層神經元數與輸出層神經元數兩者平均作為參考，因此本計畫神經元數範圍以 1 至 8 測試，找出最佳的隱藏層神經元數目。類神經網路建置預測模式時所設置的參數擬定範圍如表 4-2 所示。

而因為各神經元間經過非線性傳遞函數，使神經元能根據輸入的資料輸出介於 0~1 之間的值，因此將模式訓練時的訓練目標設為輸出為 0.5 以上時為有發生裂流，即模式輸出裂流發生機率大於 50%時，代表模式認為有發生裂流，低於 50%時代表模式認為未發生裂流，在訓練過程中透過輸出值與目標值之間的誤差調整神經元之間的權重，經過多次疊代後建置能輸出裂流發生機率的裂流預測模式。

表 4-2 類神經網路建置模式之參數擬定範圍

學習速率	[0.001, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1]
隱藏層與輸出層轉移函數	[sigmoid, tanh, relu]
隱藏層層數	[1,2,3]
隱藏層神經元數	[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]

裂流機率預警模式
(倒傳遞類神經學習演算法)

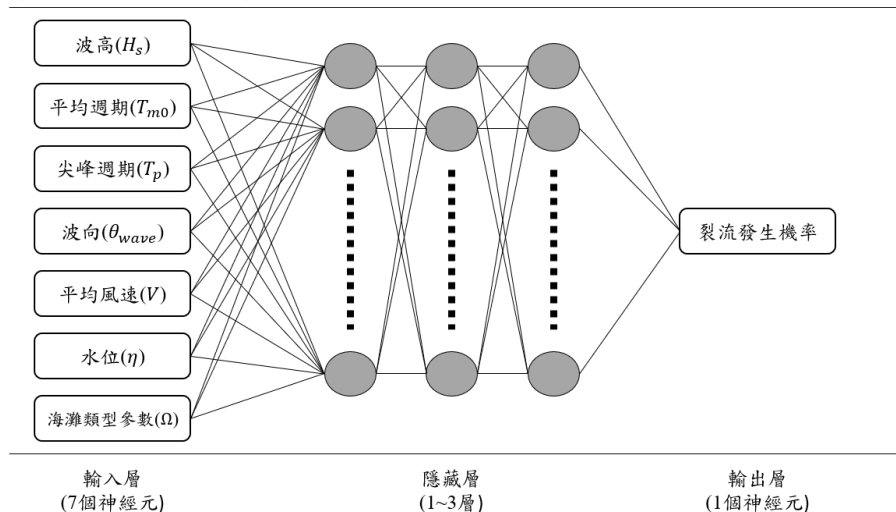


圖 4-6 海岸裂流機率預警模式架構

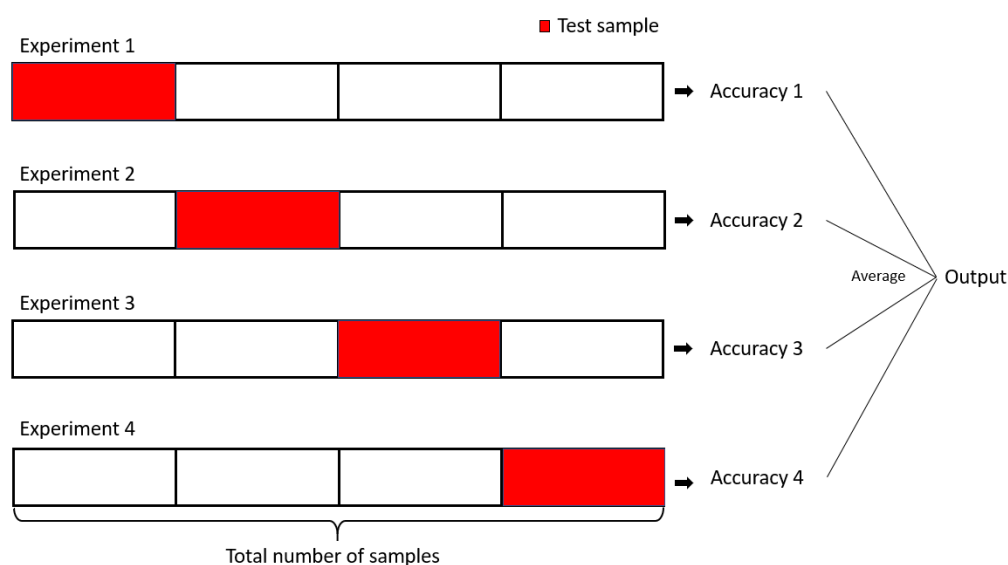


圖 4-7 k-fold 交叉驗證(假設 k=4)

4-3-3 評估指標

對於二元分類預測的問題，機器學習領域常使用錯差矩陣(confusion matrix)衍生而出的評估指標來驗證模式的好壞，根據輸入預測模式的訓練與驗證資料可計算出預測的錯差矩陣。以裂流經驗預測模式預測裂流發生或未發生，即為二元分類預測問題，如表 4-3 所示的裂流經驗預測模式錯差矩陣中：A 代表模式預測不會發生裂流事件，實際也無裂流事件發生的事件個數；B 代表模式預測不會發生裂流事件，實際卻有裂流事件發生的事件個數；C 代表模式預測會發生裂流事件，實際卻無裂流事件發生的事件個數；D 代表模式預測會發生裂流事件，實際也有裂流事件發生的事件個數。

根據錯差矩陣的結果可計算出四個評估指標來評估預測模式的優劣，除前文中所提及的正確率(accuracy rate)和回應率(response rate)，還會增加反查率(recall rate)和預兆得分(thread score)兩指標，以下論述此 2 個評估指標：

(1)反查率(recall rate)

$$\text{Recall rate} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (4-5)$$

反查率即實際為陽性的資料中，模式正確預測為陽性的比率，代表預測模式在實際裂流有發生的資料中，能正確預測裂流有發生的能力，可用來評估實際有裂流發生時，模式預測裂流發生時的預測能力。

(2)預兆得分(threat score)

$$\text{Threat score} = \frac{TP}{FN + FP + TP} \quad (4-6)$$

預兆得分是在天氣預報時常會引用之評估指標，主要在評估預警系統是否能正確預測裂流發生的能力，其值也是越高越好，由上述所示的四種評估指標可用於評估裂流預警模式之預警能力，若能通過模式驗證過程，則完成模式之建置。

表 4-3 模式預測裂流事件發生之錯差矩陣

	實際發生 裂流	實際未發生 裂流
預測發生 裂流	TP	FP
預測未發生 裂流	FN	TN

4-3-4 訓練與驗證結果

本計畫透過光學監測站與衛星航拍影像分析得到裂流案例，並透過多個數值模式輸出波浪、風以及潮汐數據，建立裂流案例發生資料庫，將裂流資料分成訓練與驗證資料，採用全部裂流資料中的 70% 案例進行模式訓練，將其他 30% 的案例進行驗證。利用機器學習中的類神經網路方法建置裂流經驗預測模式，輸入可能影響裂流發生的七種因子建置經驗模式。建置經驗預測模式時，透過網格搜尋法與 k-fold 交叉驗證來率定最

佳訓練參數組合，來建置最佳訓練效果的預測模式。

表 4-4 顯示經過網格搜尋法率定最佳訓練參數後的結果，結果顯示以學習速率為 0.001、隱藏層與輸出層轉移函數為 tanh、隱藏層層數為 3 層以及隱藏層神經元數各層為(8,7,5)，可建置出訓練效果最佳的預測模式，其訓練結果顯示正確率可達 87.6%。因此，根據率定好的最佳訓練參數組合來建置最佳經驗預測模式，並且輸入驗證資料至經驗預測模式，以多個評估指標來評估預測模式的預測效果。

表 4-5 顯示類神經網路經驗預測模式驗證結果之錯差矩陣，透過此錯差矩陣計算不同評估指標，**表 4-6** 顯示預測模式的訓練結果與驗證結果，結果顯示類神經網路經驗預測模式的預測能力良好，正確率可達近 86%，反查率代表實際有裂流發生時的預測能力，類神經網路經驗預測模式也表現良好，回應率則代表模式預測裂流發生時的誤報比率，當模式的誤報比率越低，回應率則會反之越高，而類神經網路經驗預測模式也表現不錯，並沒有顯著誤報的情形發生。以上結果均顯示此類人工智慧技術能有效地預警裂流的發生。

表 4-4 網格搜尋法率定最佳訓練參數結果

學習速率	0.001
隱藏層與輸出層轉移函數	雙曲線正切函數(tanh)
隱藏層層數	3
隱藏層神經元數	(8,7,5)
訓練結果(正確率)	87.6%

表 4-5 類神經網路經驗預測模式之錯差矩陣結果

	實際發生裂流	實際未發生裂流
預測發生裂流	82	14
預測未發生裂流	19	123

表 4-6 類神經網路經驗預測模式之訓練與驗證結果

訓練結果	正確率	87.6%
驗證結果	正確率	86.1%
	反查率	81.2%
	回應率	85.4%
	預兆得分	71.3%

4-4 輸入因子探討

本計畫利用機器學習方法中的 ANN 演算法建置裂流經驗預警模式，透過衛星航拍影像與裂流監測站影像找出歷史裂流發生時間，由光學影像分析可得到裂流案例，並且自 WWIII 波浪模式、WRF 模式與 FES 模式等海氣象相關參數，一共得到 7 個因子輸入類神經網路模式進行訓練。分別為波高(H_s)、平均週期(T_{m0})、尖峰週期(T_p)、波向(θ_{wave})、平均風速(V_{wind})、水位(η)以及海灘類型參數(Ω)。

機器學習方法建置預警模型時，輸入的因子會影響模式訓練時學習的知識與特徵，本計畫根據前人文獻選擇可能影響裂流發生的潛在因子作為輸入模式學習的因子，理論上用來讓模式訓練的因子越多，代表模式可以學習到更多的裂流事件發生時的特徵，模式的預測能力即會越好。因此，本計畫分別以 1 至 7 個不同因子數量選取所有可能的因子排列組合，並輸入類神經網路模式進行訓練，建置所有因子組合下的預測模式，並且不同因子個數下模式的正確率作為比較的依據，探討在相同的訓練與驗證資料的條件下，輸入因子個數多寡對模式訓練效果的影響。

圖 4-8 顯示不同因子個數下建置的預測模式之正確率，橫坐標代表輸入的可能影響裂流發生潛在因子個數，縱坐標為該因子個數下建置模式的正確率，以盒狀圖顯示輸入不同因子個數建置模式的正確率分布，並且以藍線代表輸入因子個數的平均正確率，紅線代表輸入該因子個數下的最高正確率，由圖中的趨勢可發現當輸入的因子個數逐漸增加，預測模式的正確率也會隨之升高，而觀察不同輸入因子個數建置模式時，該因子個數下最高的正確率，發現當輸入因子個數增加至 5 個時，正確率的變化已不再顯著，無論再增加多少因子對模式的正確率已不再敏感。以上結果顯示，輸入的因子個數越多，越有利於預測模式的訓練效果，但並不會一直保持顯著上升的趨勢，推測本計畫已經選取足夠可能影響裂流發生的潛在因子。

因此，為了探討本計畫選取可能影響裂流發生的潛在因子中，何種因子影響預測模式的訓練效果最為顯著，代表該因子為顯著影響裂流發生的潛在因子。本計畫透過未輸入某一個潛在因子來建置裂流經驗預測模式，並且與使用全部潛在因子建置預測模式的正確率比較，探討不同潛在因子對模式建置時的敏感度。**表 4-7** 顯示未輸入某一個潛在因子的正確率變化，從表中可以發現所有影響裂流發生的潛在因子之中，以模式缺少波高因子的正確率降幅程度為最為顯著，其次為海灘類型參數因子，並且波高與海灘類

型參數因子較其他潛在因子的正確率降幅程度顯著，明顯影響裂流經驗預測模式的訓練效果，代表波高、平均周期、波向和海灘類型參數因子為最為顯著影響裂流發生的潛在因子。

根據以上輸入因子個數與敏感度探討結果，本計畫建議使用 ANN 演算法建置裂流經驗預測模式時，可考慮使用本計畫所提出的可能影響裂流發生的潛在因子，並且輸入模式訓練的因子越多越能提升模式的訓練效果，其中建議選取輸入的潛在因子須包含波高與海灘類型參數，可建置出預測能力較好的裂流經驗預警模式。

表 4-7 不同潛在因子之敏感度

未輸入之因子	正確率	正確率降幅
波高(H_s)	77.3%	-10.2%
平均週期(T_{m0})、	83.8%	-2.7%
尖峰週期(T_p)	85.0%	-1.3%
波向(θ_{wave})	83.5%	-3.0%
平均風速(V_{wind})	85.3%	-0.9%
水位(η)	85.5%	-0.7%
海灘類型參數(Ω)	79.2%	-8.0%

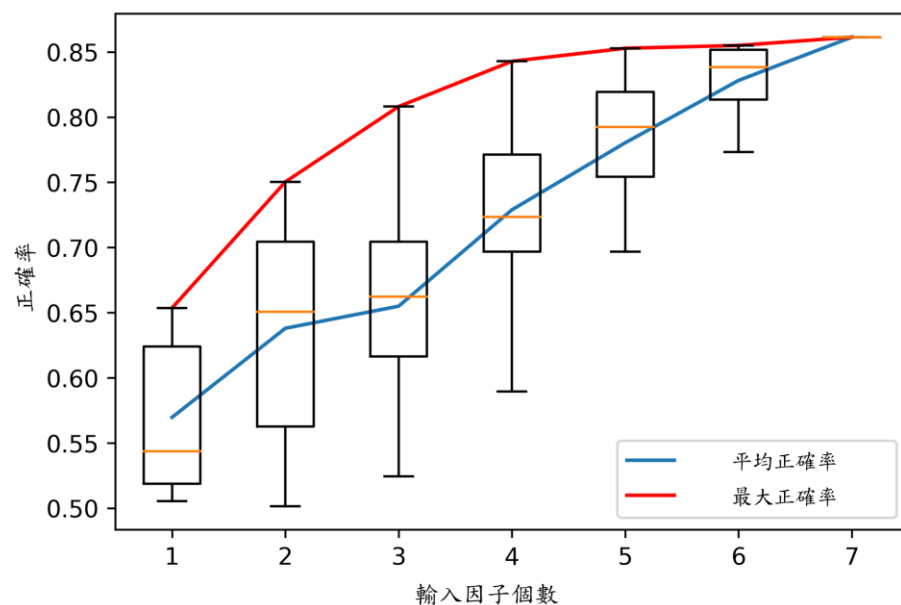


圖 4-8 不同輸入因子個數建置預測模式之正確率。

(圖中以盒狀圖顯示不同因子個數下的正確率分布，藍線為該因子個數下的平均正確率，紅線則為該因子個數下的最大正確率)

4-5 輸入資料數量與來源探討

本計畫使用衛星航拍影像與裂流監測站影像找出歷史裂流事件發生的時間，並且透過光學影像分析方法得到裂流案例，為了避免訓練不平衡，也加入了沒有裂流發生時的數據，因此一共得到 792 筆裂流資料建置裂流經驗預警模式。理論上輸入的資料越多，預測模式能學習的知識與特徵即越廣泛，其預測能力也會隨著資料越多而提高，因此，本計畫透過輸入不同數量的資料來進行裂流經驗預測模式的建置，並且驗證其預測效果，探討不同輸入資料數量對模式的影響。

圖 4-9 顯示隨著不同輸入資料數量下建置經驗預測模式，其訓練與驗證結果(以正確率表示)，從圖中可發現當輸入資料數量較少時，其訓練與驗證結果皆不高，並且有驗證結果正確率遠低於訓練結果正確率的情形，即有過度學習的問題發生，而隨著輸入資料數量的增加越有利於預測模式的建置，在大約輸入資料數量約 475 筆時，其訓練與驗證結果正確率的變化趨於平緩，均可保持在八成以上，並且沒有過度學習的情形，代表在該輸入資料數量下預測模式已能有不錯的訓練效果。

本計畫使用兩種不同來源的影像來建立裂流發生案例，分別為衛星航拍影像與岸邊監視站影像，而不同影像來源的裂流案例可能會得到相異的預測結果，因此本計畫透過將兩種不同來源的輸入資料分別建置裂流經驗預測模式，探討不同輸入資料來源建置模式之預測效果。**表 4-8** 顯示不同輸入資料來源之驗證結果比較，從表中可發現衛星影像整體的預測能力較沒有岸邊影像來得好，其正確率為七成，而岸邊影像可達八成，並且衛星影像的反查率雖然較高，但其回應率表現得較低，代表使用衛星影像建置預測模式會有高估預測的傾向，較容易把沒有發生裂流時預測成有裂流發生，即有預測模式誤報程度較高的問題。使用岸邊影像建置預測模式，其驗證結果顯示雖反查率並沒有比衛星影像來得高，但其各項指標均表現較為平均，模式整體的預測能力較佳。

根據以上結果顯示，使用越多裂流資料建置裂流經驗預警模式能得到越好的預測效果，並且建議可輸入至少 475 筆裂流資料來建置模式，其預測結果正確率至少能達八成以上。而比較不同輸入資料來源發現，使用岸邊影像建置裂流預測模式能得到較好的預測效果，因此建議未來能透過裂流監測站影像來蒐集更多的裂流案例建置裂流經驗預警模式，預期能有效提高預測模式的訓練效果。

表 4-8 輸入資料來源不同之比較

輸入資料來源	正確率	反查率	回應率
衛星影像	70.3%	93.3%	63.6%
岸邊影像	81.4%	80.0%	81.5%

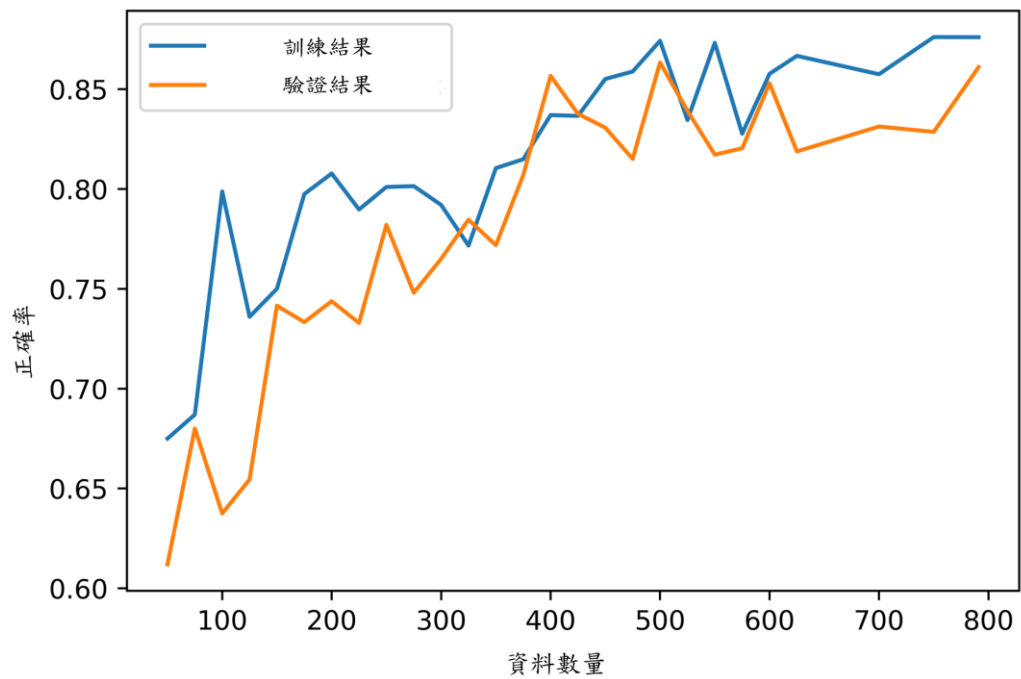


圖 4-9 不同輸入資料數量之訓練與驗證結果

第五章 結論與建議

5-1 結論

本計畫目的旨在進行兩項研究，包含研發「裂流監測技術」和「裂流預警系統」，今(111)年度本計畫將在過去研究的基礎下，提升影像監測技術和精進數值模式，改善不足之處，並開始著手於裂流經驗統計模式的建置，希冀未來能提供災害性海象預警訊息。

本年度已完成裂流影像判釋模式的提升，可於監視站影像進行全自動化方式運行，且模式的驗證結果正確率已達 82%。分析外澳裂流監測站所拍攝的一整年的影像資料(110 年 10 月 15 日至 111 年 10 月 31 日)，共蒐集到 175 筆的裂流案例，裂流發生累計小時數達到 503 個小時，統計發現該些裂流渠道可區分為外澳海灘 11 個位置，裂流的流幅(寬度)大多介於 30-40 m 間，裂流發生所持續的時間平均每起事件約為 4.2 個小時，甚至同一時間可能有多個裂流案例的發生。而個位置裂流發生的機率大約介於 0.5-3.0 %間，其中位於烏石漁港北側防坡堤的 R11 裂流發機率最高，達 3.0%以上；而秋冬之際受到東北季風影響下，在 9 月至 12 月期間裂流發生的機率也有明顯的上升。

本計畫將該些案例與實測浮標資料進行比對發現，當在裂流發生時波高介於 0.75-1.76 m、平均週期介於 5.0-6.5 s、尖峰週期介於 6.4-9.6 s、波向則多為垂直海岸線偏移 30° 以內，海灘類型參數則介於 3.35-6.59 的過渡型海灘，而水位在高於全年平均值時裂流發生的比例較多。同時透過分析各參數在不同量值組體下發生的條件機率，結果顯示在示性波高約 1m、平均週期約 6s、波浪垂直入射海岸、高水位、海灘類型參數 Ω 為 5 左右時，裂流出現的機率較高。從不同位置裂流發生時的海氣象環境發現在結構物旁或是海灣邊界(即 R1、R2 和 R9)受地形邊界下波浪淺化和折射所形成的裂流，與海氣象關係較不顯著。

前期計畫已透過 SCHISM 水動力模式耦合 WWM 風浪模式，建置乙套可以模擬裂流的環境。今(111)年度本計畫已精細地形網格的設置，並調整邊界條件輸入的資料，提高模式正確率的同時也大幅降低運算所需的資源，同時也模擬一整年(2019 年)的波流資料，與鄰近觀測站(龜山島浮標站和烏石漁港潮位站)比對，模擬結果均較前期研究成果優異，同時各海氣象的裂流發生條件機率與監測站觀測統計結果一致。在裂流現象的描述也有不錯的表現，不僅可以清楚觀察裂流整個生命週期的演變(即從生成至消散流速

和流向的變化)，將模式模擬的案例與現場觀測的案例進行比對，兩者結果一致；而季節分布的情況兩者結果亦相似，受東北季風之影響，在秋冬之際(9月至12月)所發現的裂流案例較多。統計數值模式裂流發生時的海氣象條件統計結果，亦與觀測案例一致，證實該模式之可信度。然而數值模式和觀測所蒐集的裂流案例，在紀錄的時間和位置兩者間仍有誤差，本計畫認為這是因為所使用的水深地形資料解析度雖然已經非常精細達10m，但對於較小的裂流仍然無法良好描述，且該地形資料已是2019年所測量的，經過兩年間的變動，外澳海域的水深地形恐有些微不同。

另，透過模擬不同邊界條件下裂流發生的情形，本計畫設計6種示性波高、5種平均週期、8種波向和3種風速，模擬結果顯示不同的風速和波向對於近岸流場有明顯的影響，不僅導致流速和流向的不同，裂流發生的位置和特徵也不盡相同，而波高和平均週期在波向為垂直海岸線入射時，不同條件下流向並沒有明顯的差異，反之若波向非垂直入射海岸時，裂流的現象則會隨著波高變大，而有趨向於波向偏移的另外一個方向(如當波向為垂直海岸線向北偏移30°時，隨著波高變大，裂流向外海延伸的方向便會逐現向南遷移)。在不同條件下裂流流速亦會有所差異，當波高變大、週期變大、風速變大，或波向入射方向較垂直海岸線時，裂流的流速會有明顯的上升。此外，本計畫亦分析2019年全年模擬結果顯示，當裂流流速較小時(流速小於1.0 m/s)，隨著波高愈大流速上升的幅度相較於流速較大時(流速大於1.0 m/s)多。

對於裂流經驗預測模式建置上，今(111)年度已蒐集的裂流影像案例，初步建置乙套以類神經網路為理論核心的「裂流經驗預測模式」，在模式設置上透過網格搜尋法率定最佳的訓練參數，當學習率為0.001、轉移函數為正切函數(hyperbolic tangent function, tanh)、隱藏層層數為三層以及隱藏層神經元各層分別為8、7和5有最好的驗證正確率達86.1%。而透過敏感性分析可發現示性波高、平均週期、波向和海灘類型參數是對模式訓練顯著的參數，也代表該些因子可能是引致裂流的主要原因。此外，本計畫亦輸入不同的裂流資料(衛星航拍和岸邊影像)進行模式的訓練，結果顯示若訓練資料全部使用衛星影像蒐集的裂流案例，其模式訓練結果相較於全部使用岸邊攝影機資料訓練結果差，其中反查率達93.3%，代表使用衛星航拍影像訓練之模式，在裂流的預警有高估的情形。因此，本計畫認為裂流的發生與水深地形有著密切的關連性，建議後續再建置裂流預警系統時，不僅每一個地區需獨自建置一個系統，所使用的訓練資料應採用當地監測站所得到的裂流案例。

本計畫今(111)年度已協助氣象局完成沙崙、大里和福隆三站監視站的建置規劃，且新北市沙崙站已於 11 月完成建置，而其餘兩站亦於 12 月完成建置。未來(第三年)，本計畫將會持續協助氣象局規劃裂流影像監視站的建置，藉此蒐集更多的裂流影像案例，並優先統計裂流影像案例發生時的海氣象環境，以及模擬長期現場資料或是不同地形和海氣象條件，來得到裂流好發的條件，以提供後續經驗預警模式訓練和驗證使用，建置裂流經驗統計模式。此外，若能定期測量地形資料，並且提高水深地形資料的解析度，亦可考慮直接模擬預報資料來得到未來近岸流場的分布，藉此預警裂流的發生情形。

5-2 建議

1. 未來可考慮將外澳裂流影像傳輸方式改為氣象局所使用的行動數據群組企業網路(MDVPN)，與中央氣象局現有系統相同，方便後續即時影像上傳至氣象局的影音平台。
2. 考量影像為裂流分析的主要資料，建議加速大量建置裂流監視站，或者可連結其他單位海岸影像進行裂流監測與分析，如 GoOcean 系統或水利署災防平臺所展示之影像資料。
3. 有鑑於目前的水深地形資料與實際情形有所差異，考量實務有即時性之需求，建議可優先使用經驗統計模式，以大數據或是人工智慧(AI)的方法，建立初代的預警模式。
4. 裂流影像判釋程式已有不錯的成功率，建議可著手規劃現場之實際應用，如何提供資訊予現場人員，以及現場設備之需求(是否需使用微型電腦)。
5. 建議可以利用邊緣運算的技術，使資料在傳送時大幅降低延遲或頻寬使用，減少影像和分析結果傳輸所需的時間，提高裂流現場即時監流和警示的可行性。
6. 建議可根據本計畫之成果，選址易發生裂流之熱點和可能發生之時間點，進行現場觀測的試驗，可透過放置 ADCP、GPS 漂流器或染料等方式取得裂流案例，以進行更加詳盡的驗證。

參考文獻

- [1] 中興顧問公司，鹽寮福隆沙灘變遷因應措施評估報告，臺灣電力公司，2003。
- [2] 王敘民、邱啟敏、董東璟、蔡政翰，2021，裂流模擬與影響因子之評析，第 43 屆海洋工程研討會，共 6 頁。
- [3] 王敘民、邱啟敏、梁立翰、董東璟，2020，應用 SCHISM 模式模擬裂流時空分布，第 42 屆海洋工程研討會論文集，共 6 頁。
- [4] 交通部運輸研究所，96 年淡水河河口及附近海岸輸沙之研究，國立中央大學，2007。
- [5] 林雪美，2007，臺灣北海岸海灘安全性之地形動力學研究，2007 年地理學者學術研討會，高雄師範大學，共 7 頁。
- [6] 林雪美，2009，宜蘭外澳海灘裂流判釋與遊憩安全告示牌設計，國立臺灣師範大學地理學系，交通部觀光局計畫。
- [7] 林雪美、黃翊翔、沈淑敏，2009，臺灣東北部福隆海灘類型和裂流分布之長期變動研究，第十期地理研究，第 47-65 頁。
- [8] 張紘聞，「應用 WWIII 波浪模式於極端波高模擬之研究」，國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文，2019
- [9] 郭平巧、許弘莒、張裕弦、劉景毅，2011，臺南市海灘類型與離岸流分布之變動探討，第 33 屆海洋工程研討會論文集，第 453-457 頁。
- [10] 黃翊翔，2009，臺灣北部福隆海域海灘類型和裂流分布的時空間變動研究，國立臺灣師範大學地理學系碩士論文。
- [11] 經濟部水利署第一河川局，宜蘭海岸地形與漂沙及波潮流監測調查計畫(2/2)，2007。
- [12] 葉怡成，應用類神經網路，儒林圖書公司，2001。
- [13] 蕭仁豪、溫志中、李宗霖、蕭坤欣，2014，海水域場海灘安全性評估研究，第 36 屆海洋工程研討會論文集，第 141-146 頁。
- [14] Akila, D.S., Mori, I., and Dusek, G. 2021. Automated Rip Current Detection with Region based Convolutional Neural Networks. Preprint submitted to Elsevier.
- [15] Álvaro, I., Chin, H.W., Adma, J.B., Eric, J.A., and David, A.R. 2019. Unexpected rip currents induced by a meteotsunami. Scientific Reports. 9:2015. 1-9.
- [16] Austin, M.J., Scott, T., Russell, P., and Masselink, G. 2012. Rip Current Prediction: Development, Validation, and Evaluation of an Operational Tool. Journal of Coastal Research, Vol. 00, No. 0, 0000.
- [17] Benedet, L., Finkl, C. W., and Klein, A.H.F. 2004. Morphodynamic classification of beaches on the Atlantic coast of Florida: Geographical variability of beach types, beach safety and coastal hazards. Journal of Coastal Research, SI(39).
- [18] Boak, E.H. and Turner, I.L. 2005. Shoreline Definition and Detection: A Review. Journal

of Coastal Research.

- [19] Böse, M., Wenzel, F., Erdik, M. (2008). PreSEIS: A Neural Network-Based Approach to Earthquake Early Warning for Finite Faults. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98 (1), 366 – 382.
- [20] Brander, R.W. 1999. Field observations on the morphodynamic evolution of low wave energy rip current system. *Mar. Geol.* 157, 199 – 217.
- [21] Bretherton, F. P. & Garrett, C. J. R. 1968 Wavetrains in inhomogeneous moving media. *Proc. Roy. Soc. A* 302, 529–554.
- [22] Bruneau, N., and Castelle, B., Bonneton, P., Pedreros, R., Almar, R., Bonneton, N., Bretel, P., Parisot, J-P., and Senechal, N. 2009. Field observations of an evolving rip current on a meso-macrotidal well-developed inner bar and rip morphology. *Continental Shelf Research* 29, 1650–1662.
- [23] Bui, D. T., Hoang, N. D., & Samui, P. (2019). Spatial pattern analysis and prediction of forest fire using new machine learning approach of Multivariate Adaptive Regression Splines and Differential Flower 59 Pollination optimization: A case study at Lao Cai province (Viet Nam). *Journal of Environmental Management*, 237, 476-487.
- [24] Carrere L., F. Lyard, M. Cancet, A. 2016. Guillot, N. Picot: FES 2014, a new tidal model – Validation results and perspectives for improvements, presentation to ESA Living Planet Conference.
- [25] Cavaleri, L., Bertotti, L., and Torrisi, L., Bitner-Gregersen, E., Serio, M., and Onorato, M. 2012. Rogue waves in crossing seas: The Louis Majesty accident. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C11).
- [26] Chang, F.J., Tseng, K.Y., Chaves, P. (2007). Shared near neighbours neural network model: a debris flow warning system. *Hydrological Processes*, 21, 1968 – 1976.
- [27] Chen, X., Huang, W., and Zhao, C. 2019. Rain detection from X-band marine radar images: A support vector machine-based approach. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote. Volume: 58, Issue: 3.*
- [28] Christian, S., Joerg, S., and Stylianou, F. 2008. Determination of Bathymetric and Current Maps by the Method DiSC Based on the Analysis of Nautical X-Band Radar Image Sequences of the Sea Surface. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 46(8):2267 – 2279.
- [29] Cybenko, G. 1989. Approximation by superposition of a sigmoidal function. *Mathematics of Control, Signals and Systems* volume 2, pages303–314.
- [30] Dalrymple, R.A., MacMahan J.H., Reniers A.J.H.M., and Nelko V. 2011. Rip currents. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 43:551–81.
- [31] Engle, J., MacMahan, J., Thieke, R.J., and Hanes, D.M. 2002. Formulation of a Rip Current Predictive Index Using Rescue Data. *National Conf. on Beach Preservation Technology*, FSBPA, January 23-25, Biloxi, MS
- [32] Guimaraes, P.V. and Ardhuin, F. 2020. A data set of sea surface stereo images to resolve space-time wave fields. 7:145 | <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0492-9>.

- [33] Hong, X., Zhang, Y., Wang, B., Zhou, S., and Yu, S. 2021. Numerical study of rip currents interlaced with multichannel sandbars. *Natural Hazards* 108:593–605.
- [34] Horta, J., Oliveira, S., Moura, D., and Ferreira, Ó. 2018. Nearshore hydrodynamics at pocket beaches with contrasting wave exposure in southern Portugal, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, doi: 10.1016/j.ecss.2018.02.018.
- [35] Hsu, T.W., Ou, S.H., and Liao, J.M. 2005. Hindcasting nearshore wind waves using a FEM code for SWAN. *Coastal Engineering*, Vol. 52, 177-195.
- [36] Karimpouli, S., & Tahmasebi, P. (2019). Segmentation of digital rock images using deep convolutional autoencoder networks. *Computers & Geosciences*, 126, 142-150.
- [37] Kevin, A.H., Svendsen, I.A., Merrick, C.H., and Qun, Z. 2003. Quasi-three-dimensional modeling of rip current systems, *Journal of Geophysical Research*. Vol. 108. No. C7, 3217.
- [38] Kung, H.Y., Chen, C.H., Ku, H.H. (2012). Designing intelligent disaster prediction models and systems for debris-flow disasters in Taiwan. *Experts Systems with Application*, 39, 5838 –5856.
- [39] Leatherman, S.B. 2017. Rip Current Measurements at Three South Florida Beaches. *Rip Current Measurements at Three South Florida Beaches*.
- [40] Lee, L., Kim, D.H., Lee, S., and Lee, J.J. 2016. Lagrangian Observation of Rip Currents at Haeundae Beach Using an Optimal Buoy Type GPS Drifter. *Journal of Coastal Research*, SI(75), 1177-1181.
- [41] Liu, A.K., Peng, C.Y., and Chang, S.Y.S. 1997. Wavelet analysis of satellite images for coastal watch. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 22(1), 7-17.
- [42] Longuet-Higgins, M.S., and Stewart, R.W. 1964. Radiation Stresses in Water Waves; A Physical Discussion, with Applications[J]. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 11(4): 529-562.
- [43] López, V.F., Medina, S.L., Paz, J.F.d. (2012). Taranis: Neural networks and intelligent agents in the early warning against floods. *Experts Systems with Application*, 39, 10031 – 10037.
- [44] Lushine, B.J. 1991. A study of rip current drownings and related weather factors. *Nation Weather Service Forecast Office*, 13-19.
- [45] Lyard F., L. Carrere, M. Cancet, A. Guillot, N. 2017. Picot: FES2014, a new finite elements tidal model for global ocean, in preparation, to be submitted to *Ocean Dynamics* in.
- [46] MacMahan, J., Thornton, E., Reniers, A., Stanton, T., and Symonds, G. 2008. Low-energy rip currents associated with small bathymetric variations. *Mar. Geol.* 255:156–64.
- [47] MacMahan, J.H., Thornton, E.B., and Reniers, A.J.H.M. 2006. Rip current review. *Coastal Engineering* 53 191 – 208.
- [48] Mallat, S. G. 1998. A wavelet tour of signal processing, *Academic Press* , pp. 1-126.
- [49] Mase, H. 2001. Multi-directional random wave transformation model based on

- energy balance equation. *Coastal Engineering Journal* 43(4), 317-337.
- [50] Mase, H., Yasuda, T., Mori, N. (2011). Real-Time Prediction of Tsunami Magnitudes in Osaka Bay, Japan, Using an Artificial Neural Network, *Journal of Water, Port, 137* (5), 263 – 268
 - [51] Morgan, P. 1976. *Geophysical methods in geology*: P.V. Sharma. Elsevier, Amsterdam. DOI:10.1016/0016-7142(77)90040-0
 - [52] Nieto-Borge, J.C. 2013. Use of X-band marine radars as a remote sensing system to survey wind-generated waves. *COASTAL PROCESSES 2013* Volume: 169.
 - [53] Ozturk, T., Talo, M., Yildirim, E. A., Baloglu, U. B., Yildirim, O., & Acharya, U. R. (2020). Automated detection of COVID-19 cases using deep neural networks with X-ray images. *Computers in Biology and Medicine*, 121.
 - [54] Pitman, S., and Gallop, S.L. 2016. Synthetic Imagery for the Automated Detection of Rip Currents. *Journal of Coastal Research*, SI(75), 912-916.
 - [55] Roelvink, D.J.A., Reniers, A., Dongeren, A., de Vries, J.V.T., McCall, R., and Lescinski, J. 2009. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering* 56(11-12):1133-1152.
 - [56] Romano, M., Liong, S.Y., Vu, M.T., Zemskyy, P., Doan, C.D., Dao, M. H., Tkalich, P. (2009). Artificial neural network for tsunami forecasting. *Journal of Asian Earth Sciences*, 36, 29 – 37.
 - [57] Rumelhart, D.E., Hinton, G.E., and Williams R.J. 1986. Learning Representations by Back-Propagating Errors. *Nature* 323(6088): 533-536.
 - [58] Rutten J., Dubarbier, B., Price, T. D., Ruessink, B. G., & Castelle, B. 2019. Alongshore variability in crescentic sandbar patterns at a strongly curved coast. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 124.
 - [59] Short, A.D. 2006. Introduction: Australian coastal geomorphology, *Journal of Coastal Research*, 22(1), 11-27.
 - [60] Short, A.D., and Hogan, C.L. 1994. Rip currents and Beach Hazards: Their Impact on Public Safety and Implications for Coastal Management. *Coastal Res*, 12: 197-209.
 - [61] Silver, D., Schrittwieser, J., Simonyan, K., Antonoglou, I., Huang, A., Guez, A., Hubert, T., Baker, L., Lai, M., Bolton, A., Chen, Y. T., Lillicrap, T., Hui, F., Sifre, L., van den Driessche, G., Graepel, T., & Hassabis, D. (2017). Mastering the game of Go without human knowledge. *Nature*, 550(7676), 354-+.
 - [62] Smith, J. M., D. T. Resio, and A. Zundel. 1999. STWAVE: Steady-state spectral wave model, Report 1: User's manual for STWAVE version 2.0. Instruction Report CHL-99-1, Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station.
 - [63] Song, D. and Bae, H.K. 2011. Observation and Forecasting of Rip Current Generation in Haeundae Beach, Korea Plan and Experiment. *Journal of Coastal Research*, SI 64, 946-950.
 - [64] Sunkpho, J., Otamakorn, C. (2011). Real-time flood monitoring and warning system. *Journal of Science and Technology*, 33(2), 227 – 235.

- [65] Thirumalaiah, K., Deo, M.C. (1998). Real-Time Flood Forecasting Using Neural Networks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 13, 101 – 111.
- [66] Turner, I.L, Whyte, D., Ruessink, B.G., and Ranasinghe, R. 2007. Observations of rip spacing, persistence and mobility at a long, straight coastline. *Marine Geology* : 236, 209–221.
- [67] Yanenko, N.N., and Vasilkovsky, S.N. 1986. Application of the Method of One-Dimensional Functionals to the Solution of Elasto-Plastic Problems. First published: <https://doi.org/10.1002/zamm.19860660208>.
- [68] Zhang, K.; Zhang, M.C.; Leatherman, S.B., and Leatherman, S.P., 2020. Rip current hazard analysis. In: Malvárez, G. and Navas, F. (eds.), *Global Coastal Issues of 2020*. *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 95, pp. 969–973. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208.
- [69] Zorgani, E., Al-Awadi, H. Yan, W., Al-lababid, S., Yeung, H., and Fairhurst, C.P. 2018. Viscosity effects on sand flow regimes and transport velocity in horizontal pipelines. *Experimental Thermal and Fluid Science* 92, 89–96.

附錄一 服務建議書審查會議紀錄

交通部中央氣象局

111 年度服務建議書審查會議紀錄

一、專案名稱：111 年度「海岸裂流監測與預警技術研究(2/3)」

二、場商名稱：財團法人成大研究發展基金會

三、審查日期：111 年 1 月 19 日（星期三）下午 01 時 30 分

四、地點：線上(Google Meet)

五、主 持 人：滕春慈 主任

紀錄：施景峯

六、出席人員：略

七、簡報：略

八、審查意見與回覆：

委員姓名與意見	團隊回覆
一、交通部中央氣象局海象測報中心 滕春慈 主任	
1. 16 頁、32 頁的表 1 及人力分配，請修正	感謝委員的指正，遵照辦理。
2. 有關 SCHISM 模擬裂流建議可以嘗試人工智慧方式由粗網格降尺度方式測試效能、準度。	感謝委員建議，目前仍希冀透過一些網格設置的改動來提升模式的運算速率，若後續有機會將會嘗試以人工智慧的方法進行降尺度的運算。
二、交通部中央氣象局海象測 報中心 朱啟豪 技正	
1. 未來建議 ANN or model 作為預測方法	目前初步規劃主要是使用數值模式作為主要的預測方法，但仍會透過 ANN 的訓練模式進行協助，例如當模式運行時發散，則會改以 ANN 進行預測。另，若要模擬裂流的發生，精細的地形資料也是一個必要的條件，因此若要預測的海域無精細的地形資料，也會使用 ANN 的預測模式進行預警。
2. 是否有監測站發現裂流，立即通	目前裂流監測站建置目的為蒐集更

知的功能	多裂流案例，並進一步探討裂流好發時刻，為預警系統發展之基礎。裂流監測站即時分析並通報為下一階段之目標，團隊會持續構思裂流監測即時通報系統之架構。
三、國立師範大學地理學系 林雪美教授	
1. 裂流也稱為離岸流，是否改為裂流也是一種離岸流」，請考量。	感謝委員的建議，遵照辦理。
2. p.3 第 6 行「地形不均」建議改為「近岸地形變動」，請考量。	裂流的發生是由於地形擁有槽溝或是海灘呈現彎形，導致波浪入設海岸時會向中樣匯聚，然後向外海移動。因此並不適地形變動所造成的，在內文中會改成地形水深分布不均。
3. p.4 倒數第 5 行「小波轉換邊緣偵測和裂流影像遮罩律定法」，不清楚第一年度是否提及，如果沒有則需補充說明。	該兩方法是本計畫分析裂流案立的影像處理技術，已於第一年期末修正報告中 4-3 節中有詳細的說明。
4. p.7 圖 2 第二年「地形對流項」，亦請於文中補述內容。	在第一年計畫中，模式模擬的結果無論是對於裂流的描述或是波場和水位的驗證都已有不錯的成果，因此在第二年度我們將會以增加模擬時間還有模擬不同海氣象條件進行模式的精進，對於模式設置的參數暫不會進行修改，因此對於此部分的研究架構會稍作修正。
5. p.7-8 年度工作項目及排序，應與 p.29 甘梯圖一致，以方便檢視達成否。	感謝委員的建議，遵照辦理。
6. 全文「臺」灣或「臺」灣宜統一。	感謝委員的建議，遵照辦理。
四、弘光科技大學環境與安全 衛生工程學系 溫志中教授	
1. 計畫書所提施作內容可行	感謝委員認可。
2. 第二年度重點於精進裂流數值模式、方面、建議宜加強結構物之效應呈現，以釐清是否為外在影響(如連通水域)	感謝委員的建議，遵照辦理。本年度計畫將會提升近岸網格的解析度，並增加烏石漁港的外離岸堤的地形，藉此了解波浪與結構物交互作用後的對裂流的影響。

3. 海域地形相關參數及年份請再補充於報告書中	感謝委員的建議，遵照辦理。
-------------------------	---------------

九、審查結果：通過

十、散會：上午 11 時 30 分

附錄二 第一次工作會議記錄

「海岸裂流監測與預警技術研究(2/3)」計畫案

【111 年 3 月工作會議紀錄】

時 間：111 年 3 月 24 日(星期四) 上午 10:00

地 點：中央氣象局 616B 會議室(臺北市公園路 64 號)

主 席：滕春慈主任

出席人員：海象中心：林芳如課長、朱啟豪技正、施景峯研究員、陳琬婷研究助理

財團發人成大研究發展基金會：蔡政翰教授、董東璟教授、王敘民研究助理

記 錄：王敘民研究助理

壹、工作進度簡報：

計畫執行進度報告。(如附件 1)

貳、討論及決議事項：

1. 今年(111 年)度所規劃的新北市沙崙裂流影像監測站，建議可與海上皇宮大廈管委會進行協商，設法於該大廈增設乙座攝影機監測沙崙海灘裂流發生的情形，配合原先規劃建置的北岸環保公司頂樓的攝影機，可使取得的近岸碎波帶影像更加的清晰。
2. 建議中央氣象局可根據該影像分析或數值模式的研究成果，選址易發生裂流之熱點和可能發生的時間進行現場觀測試驗，透過置放 ADCP、GPS 漂流器或染料等方式來取得裂流案例進行更加詳盡的驗證。

參、散會：11 時 30 分

附件 1：計畫工作進度簡報

附錄三 第二次工作會議記錄

「海岸裂流監測與預警技術研究(2/3)」計畫案

【111 年 5 月工作會議紀錄】

時間：111 年 5 月 19 日(星期四) 上午 10:00

地點：視訊會議

主席：滕春慈主任

出席人員：海象中心：林芳如課長、朱啟豪技正、施景峯研究員、陳琬婷研究助理

財團發人成大研究發展基金會：蔡政翰教授、董東璟教授、王敘民研究助理

記錄：王敘民研究助理

壹、工作進度簡報：

計畫執行進度報告。(如附件 1)

貳、討論及決議事項：

3. 本計畫已預計連結其他單位海岸影像進行裂流監測與分析，目前初步規劃取得水利署所拍攝的影像資料，包含黃金海岸、南濱守望哨、多良車站和忘憂亭，建議研究單位可著手規畫影像傳輸方法以及分析上的作業流程。
4. 本年度將會完成三站裂流影像監視站的建置，在資料傳輸上將採用行動數據群組企業網路(MDVPN)，為方便後續監視站管理及作業上的一致性，建議前期計畫所建置的外澳裂流影像監視站亦可更改為相同的方式。

參、散會：11 時 30 分

附件 1：計畫工作進度簡報

附錄四 第三次工作會議記錄

「海岸裂流監測與預警技術研究(2/3)」計畫案

【111 年 8 月工作會議紀錄】

時間：111 年 8 月 24 日(星期三) 上午 09:30

地點：視訊會議

主席：滕春慈主任

出席人員：海象中心：林芳如課長、朱啟豪技正、陳琬婷研究助理

財團發人成大研究發展基金會：蔡政翰教授、董東璟教授、王敘民研究助理

記錄：王敘民研究助理

壹、工作進度簡報：

計畫執行進度報告。(如附件 1)

貳、討論及決議事項：

5. 目前裂流影像判釋程式已有不錯的成功率，建議研究團隊可著手規劃推廣事宜，考量裂流的資訊如何提供予現場活動者，以及實務應用是否需使用邊緣系統等。待未來系統足夠成熟，可與國家災害防救科技中心(NCDR)合作，立即上架系統。
6. 隨著對於裂流的研究愈發深入，建議研究團隊可提供更多有關於裂流的訊息，如裂流發生持續時間。並且希冀於期末報告中可以說明海灘類型參數的細節，以及對於裂流發生的影響。
7. 本計畫已預計連結其他單位海岸影像進行裂流監測與分析，目前初步規劃取得水利署所拍攝七處的海岸影像資料，請研究單位測試是否能於開放平臺上介接全部的影像資料，並規劃影像傳輸方法以及分析上的作業流程

參、散會：11 時 30 分

附件 1：計畫工作進度簡報

附錄五 第四次工作會議記錄

「海岸裂流監測與預警技術研究(2/3)」計畫案

【111 年 10 月工作會議紀錄】

時 間：111 年 10 月 18 日(星期二) 下午 02:00

地 點：視訊會議

主 席：滕春慈主任

出席人員：海象中心：林芳如課長

財團發人成大研究發展基金會：蔡政翰教授、董東璟教授、王敘民研究助理

記 錄：王敘民研究助理

壹、工作進度簡報：

計畫執行進度報告。(如附件 1)

貳、討論及決議事項：

1. 本計畫預計會持續建置裂流影像監測站，建議研究單位可根據過往裂流意外事件，盤點可建置裂流影像監視站之位置，作為建站選址之參考依據，並提前進行現場勘查及協助規劃事宜，加速後續裂流影像分析作業。
2. 目前裂流影像判釋程式已有不錯的成功率，建議研究單位應對程式運算效率進行提升，以現場即時分析作業為目標，為後續推廣事宜進行提前準備。

參、散會：15 時 30 分

附件 1：計畫工作進度簡報

附錄六 期中審查會議記錄與回覆

交通部中央氣象局

111 年度委託研究計畫期中審查會議記錄與回覆

一、計畫名稱：海岸裂流監測與預警技術研究(2/3)

二、廠商名稱：財團法人成大研究發展基金會

三、審查日期：111 年 7 月 21 日(星期四)上午 10 時

四、地點：google meet 線上會議

五、主持人：滕春慈 主任

紀錄：施景峯

六、出席人員：如簽到表

七、執行單位簡報：略

八、審查意見與回覆

委員姓名與意見	執行單位回覆
一、交通部中央氣象局海象測報中心 滕春慈主任	
1. 是否可以增加裂流的垂直剖面圖。	謝謝委員的建議。本計畫目前模擬模式係採水深平均之二維模擬，採用三維模擬才有可能見到垂直剖面，為三維模擬難度較高，本年內不易實現，未來可朝此方向進行。另，也可透過現場觀測獲得如使用 ADCP，但本計畫工作亦未有此類實測規劃。
2. 2019 年的裂流模擬是否可以	謝謝委員提醒。本計畫模擬係採用

加強說明使用的大氣模式、提供邊界的海流、波浪模式等。	WWIII 為波浪邊界條件、無輸入海流邊界條件，對於使用之大氣模式與波浪等條件會在期末報告做更詳盡之說明。
3. 測試裂流模擬的海、氣象條件，可以加強模擬實驗的說明，比如模擬多久才進行資料分析等。	謝謝委員的建議。各式海氣象條件之模擬時間為 7 天，扣除模式冷啟動(1 天)，第 2 至 7 天之模擬資料提供分析用途。期末報告時會加強說明。
4. 裂流模擬實驗多見僅一個裂流區，和實際同時數個裂流發生不一致，未來可以有相關實驗。	謝謝委員的建議。長期模擬(一年)結果尚有很多未分析完，有發現同時出現多個裂流案例。下半年將會與影像觀測結果進行比較分析，探討其異同與可能原因。
5. 公式2-7是否就是錯差矩陣的正確率，公式2-8為回應率，請團隊參考。	謝謝委員的建議，會進行修正。本計畫在驗證上所採用的指標，將會統一採用錯差矩陣的定義。
二、交通部中央氣象局海象測報中心 朱啟豪技正	
1. P55. 倒數第2行，錯字解「析」度、「網」格、該調整會「導致」。	謝謝委員的指正，會依委員指正修改或補充。
2. P71、P72、3-3-2是否又有波高、平均週期在邊界輸入，波向、風是整面輸入，才会有P72結論。	謝謝委員的指正，模式在進行各式條件模擬時，波浪條件(波高、週期和波向)是在邊界給定；風速條件是給定整個面。
3. 式4-4縮放上下限是多少。	為使倒傳遞類神經模式運算上更有

	效率，本計畫將原始資料進行正規化至 0-1 之間。
4. P86無表4-5	謝謝委員指正，原報告缺漏或在期末報告補正。
三、國立師範大學地理學系 林雪美教授(退休)	
1. 影像模式採用準則 1 做衛星影像半自動判釋的正確率 83%，監測影像加入準則 2~3 做監測影像密集平均影像判釋後，正確率80%。經驗模式的類神經網路模式判釋，正確率78%。如此越多精準的判釋卻越不準確，邏輯上是否恰當，宜考量。	謝謝委員指正。事實上，不論第一年或本年(第二年)的影像判識均採用了全部 4 個準則，只是第一年在準則 2~4 是人工作業，今年已改可程式自動化進行。驗證資料兩年均相同，理論上驗證結果亦應為相同，但實際上有些微差異，去年正確率為 83%，今年為 82%(在報告 21 頁)，此差異是人工判釋真值時有 1 個案例在去年判釋非為裂流但經討論今年判釋為裂流所導致。事實上，兩年的結果是相同的，差異只是把去年半自動程式改為全自動而已。另，經驗模式是預測，其驗證結果(正確率 78.6%)無法拿來與影像辨識結果比較。
2. 影像擴增及遮罩(p.18、圖2-4)不易理解，請框出照片位置配合說明。	謝謝委員的建議，會於期末報告中加強補充說明並增加遮罩與影像之套疊示意。
3. 「回應率」與「正確率」二者	謝謝委員的建議，p21 的正確率

公式(p.21)有異，但未清楚解釋其意之差異，請白話解釋。既然所得結果差異不大，建議本計畫只採其一，以免混淆。類神經網路建置模式另使用「正確率」(p.82)，宜統一使用正確率。	(Accuracy)即是 p84 頁的正確率 (accuracy rate)；而正確率 (precision)即是 p84 頁的反查率 (recall rate)，會統一使用。正確率代表模式對裂流發生或未發生預測正確的能力，可說是一個總體預測能力指標；而反查率是用來評估有裂流發生時能真正預測到的能力指標。
4. 沙崙、福隆都是遊客較多的海水浴場，選擇為實驗海域相當恰當；但宜蘭大里非屬之，建議改為石門的白沙灣。白沙灣過去有相當的裂流案例與傷亡紀錄，且北觀處遊客中心具有行政上的支援。	謝謝委員的建議，本年度建置已經行政上確認，委員建議在白沙灣建監視站將列為明年第一優先地點。
5. 類神經網路的預警系統模式是人工智慧的監督式學習、非監督式學習、強化式學習的哪一種？為什麼要選擇該種學習模式？	本計畫採用之類神經網路演算法是屬於監督式學習，其特色是在建模過程中，須提供明確的正確答案(即裂流)供模式訓練，而其優點是模式建置完成後，準確度的評估較容易(因為根據明確答案來驗證)。
6. 類神經網路的預警系統模式是否給予訓練參數的權重？如何給予？	類神經網路的訓練參數權重是隨機給定，訓練過程會逐步調整權重直到訓練完成 (收斂)。
7. 部份段落內容重複，請檢視修	謝謝委員的指正，會依委員指正修

正，簡要為宜。如P.15首段與p.19末段重複、p.81上下二段部份文稿重複等。	改或補充。
8. 部份錯字應改正，如成縣→「呈現」、結果→「結果」等。	謝謝委員的指正，會依委員指正修改或補充。
9. 本文、本計畫、本計畫三者宜統一用詞。	謝謝委員的指正，會依委員指正修改或補充。
10. 報告中常見整大段都沒標註「。」，不易閱讀。	謝謝委員的指正，會依委員指正修改。
11. 摘要宜加註「本年度(111年)」。	謝謝委員的指正，會依委員指正修改或補充。
12. 建議增列年度工作甘梯圖，以便檢視。	謝謝委員的指正，會依委員指正進行補充。
四、弘光科技大學環境與安全衛生工程學系 溫志中教授	
1. 期中報告內容可符合單位所提的工作項目	謝謝委員的肯定。
2. 在期中報告加強海域地形特性之分析，已有助於後續裂流發生地點之預判。	謝謝委員的肯定。
3. 建議可統整數值模擬與觀測點裂流發生點之標示，以提升模式未來之可用性。	謝謝委員的建議。期中報告剛完成長期一年的模擬，模擬結果有很多尚未分析，將加強模擬結果與影像觀測結果在裂流出現點異同的探討，除瞭解其原因外，也希望能提升模式未來之可用性。

4. 依據初步結論所提之結論，應繼續深化分析適合裂流存在環境分析，使計畫更能掌握其特性。	謝謝委員的建議。裂流發生的原因相當複雜，截至目前為止單一海氣象對裂流的影響已有一定的瞭解，然各因素間彼此會有交互作用，本計畫將會繼續深化分析適合裂流存在的條件使有更多之掌握。
五、交通部中央氣象局預報中心 林秉煜課長	
1. 風速在此案占了蠻重要的因子，那麼風向的因素呢?和浪向間是否有關係?	謝謝委員指正。風並非直接影響裂流的發生，而是當風吹拂海面時，會造成波浪場的變化，因而導致裂流的發生。在第一年的研究中，亦曾對裂流之發生與風向以及風向-波向夾角進行分析，結果並沒有顯著的相關性。整體來說，浪是最直接的影響因素，而浪確實會受風的影響，風可說不是直接但可能有部分間接影響。
2. 類神經網路演算加入水位，可否對水位的因子有哪些進行說明。	本計畫在建置經驗統計模式中選用的水位因子，考慮了裂流發生時的水(潮)位高程，即以潮位高低為因子。
3. 目前分析的時間，以2021/10-2022/5為主，期待夏天的數據近來，能更完整。	謝謝委員的建議。本計畫將持續分析監視站的影像資料，研究團隊亦深度期待可以獲得更多的數據。
4. P15.領"域"、碎浪"線"。P17.遮罩去去計算。P19.圖2-55。P21."	謝謝委員的指正，會依委員指正修改或補充。

結”果顯示、模式”已”可大致。 P60.”示”意圖。	
5. 圖4-4，此架構中的因子亦可加入波高趨勢、週期趨勢、風速趨勢等試試看	謝謝委員的建議。我們會思考是否以及如何納入所建議的因子。

九、審查結果：

原則上通過，請參考委員意見修正或為下半年研究參考。

十、散會：上午 11 時 30 分

附錄七 期末審查會議記錄與回覆

交通部中央氣象局

111 年度委託研究計畫海岸裂流監測與預警技術研究(2/3)

期末審查會議記錄與回覆

壹、計畫名稱：海岸裂流監測與預警技術研究(2/3)

貳、廠商名稱：財團法人成大研究發展基金會

參、審查日期：111 年 12 月 13 日(星期二) 下午 2 時

肆、地點：視訊會議

伍、主持人：滕主任春慈

陸、出席人員：如視訊會議截圖與簽到表

柒、會議意見與回覆

紀錄：施景峯

委員姓名與意見	財團法人成大研究發展基金會回覆
一、交通部中央氣象局海象測報中心 滕春慈主任	
1. 報告書有詳細說明各服務建議書中各工項，審查通過。	謝謝委員的肯定。
2. 87頁，模式模擬的裂流發生比例和觀測是否相似。	分析結果顯示，模式模擬和觀測的裂流案例發生時，其海氣象特性分布相似，該結果會與修正報告中再強化說明。
3. AI方法可以分辨出R1-R11個別	裂流預測AI經驗統計模式是對整個

裂流的發生，還是一起發生、不發生？	海灘是否會發生裂流進行建模，建模資料還不足以細化到各小區域，未來若有足夠資料可建模，有可能預測R1~R11這些小區域裂流之發生。
4. 裂流模式的執行時間？	今(111)年度透過調整模式輸入項，已提升模式運算效率，模擬一個月的裂流，約需電腦執行3-4天。
5. 小範圍海底地形測量的費用。	經訪查，測量3 km X 3 km範圍的水深地形資料約需新台幣50萬元上下，然該費用受要求地形解析度與測量地點高度影響。
二、交通部中央氣象局海象測報中心 朱啟豪技正	
1. 錯字，計「劃」、P65模「式」、P69「示意圖」。	謝謝委員的指正，會於正式報告中修正。
2. P67，本中心有2.5 km的WW3，可否當成邊界條件。	謝謝委員的建議，2.5km網格之波浪模式為相當高之輸出解析度，理應可充分提供本計畫使用。惟在研究階段，建議會先以案例方式比較貴中心波浪模式輸出與目前計畫運作方式(近岸網格0.15度)之差異，確認差異很大則即刻改為使用貴中心模式進行運算，若否，則建議暫以現行方式進行，以節省模式結果輸出與傳遞為貴中心帶來之額外工作

	量。
3. 圖3-5(a)黃色線是否是去年結果。	該圖中黃色模擬結果是去(110)年採用法國海洋科學院ifremer所提供的WW3波浪場作為邊界條件輸入的模擬結果，今年已不再使用。
4. 若以ST4就無法模擬出極端波高嗎?	根據研究團隊過去的探討結果顯示，使用ST6物理套組會比使用ST4能準確模擬出極端波浪，因此，本計畫執行WWIII模式時採用ST6套組。
5. P75，注意堤防突出處也有裂流。	謝謝委員的提醒，此為結構物引起之裂流，很多地方都會出現，本案模擬在烏石漁港北堤處亦發現有沿著結構物向外海流動的裂流出現。
6. P81，可在圖上標出R3、R4，也請標示裂流處。	謝謝委員的建議，會於修正報告中進行補充說明。
7. P99，訓練結果為何有正確率。	在機器學習模式建置過程中，在模式訓練階段，為掌握模式訓練結果，亦會先進行診斷，"正確率"是診斷的其中一個指標，模式根據這些指標持續進行修正，最後獲得一個最佳模型。
三、國立師範大學地理學系 林雪美教授	
1. 裂流預測(1)全數使用衛星航照的訓練模式「反查率」	目前監視站的裂流案例仍過少，對於模式訓練同時採用衛星和監視站

93.3%、(2)監視影像經驗預測模式「正確率」86.1%，二者如何比較？	所有案例，驗證結果顯示正確率達86.1%。此外，為探討誤報的原因，本研究額外訓練兩個模式，一個全部使用“監視站”案例訓練，另一個全部使用“衛星”案例，兩者比較後發現全部使用監視站案例訓練的模式正確率較高，使用衛星影像建置的模式其驗證結果卻顯示反查率高達93.3%，這表示透過衛星影像案例訓練的模式會有高估的情況，即可能有誤判的情形發生。
2. 監測站建置選擇的考量條件，除了已擁有充足的資料庫之外，其他條件建議明示，例如海灘的位置、沙洲槽型態或Ω值、粒徑淘選度，以便未來依據需要及經費條件作為排序的參考。	謝謝委員的建議，目前本研究僅有分析外澳監視站一整年完整的裂流案例，因此若要對地貌、海灘位置、粒徑淘選度進行泛用性的分析，資料量仍顯不足。後續可待更多的監視站影像進行分析後，再歸納出上述因素中適合裂流發生的條件。而目前本研究也透過數值模式評估各海域裂流發生的情形，作為監視站建置選址的依據。
3. 缺少甘梯圖，如增補應與工作項目符合。P.8第16行「...甘梯圖，如錯誤!找不到參照來源。」請修正。	謝謝委員的指正，經和委託單位討論，工作項目於期末審查時確認均已達成，因此報告書中不會加入甘梯圖，因此P8第16行會刪除。
4. 摘要第10行3公里，建議改為3	謝謝委員的建議，會於修正報告中

公里「長」。	進行更改。
四、弘光科技大學環境與安全 衛生工程學系 溫志中教授	
1. 計畫成果豐碩，明確符合主題需求。	謝謝委員的肯定。
2. 就今年分析所得之結論，歸納出觀察區域形成裂流之海氣象條件，建議未來可增加波向線圖，已掌握流向相關變化。	謝謝委員的建議。後續將預計進行更多的模擬，屆時亦會對波向和流向間的關係，再做進一步的分析和探討。
3. 就今年觀測結果，海域地形地貌似乎為形成裂流主因之一，建議未來可分析裂流渠道地形之剖面變化，以掌握裂流之變化。	謝謝委員的建議。待後續監視站影像分析和數值模式模擬結果更加的豐碩，會將裂流出現的位置，甚至發生時裂流的寬度、流速和流向與地形剖面進行比較，找出兩者間的關聯性。
4. 未來第三年期計之計畫，可擴大以經驗式來預測可能發生之時機，以增加應用性。	謝謝委員的建議。本計畫將持續分析裂流監測站影像資料，增加監視站的裂流案例，後續可全部改用監測站的案例進行訓練，預計能再提升模式的正確率。 而今(111)年所建置的監測站，完工後將立即進行影像分析，同時將該些案例一起進行訓練，預計可提高模式的泛用性。此外，考量裂流受地域性的影響，本研究亦不排除每個海灘各自訓練一個預警模式。

五、交通部中央氣象局預報中心 林秉煜課長	
1. 錯字： (1) P2 和 P5 都卜勒與督卜勒用法需一致。 (2) P8，line 15 “如錯誤_”應為誤植。 (3) P12，line 9 “從是”。 (4) P43，line 15 “出線”。 (5) 文中有公尺、公里、m、km..應一致(包含台和臺) (6) P69 “是意” (7) P73 “解果”，line 10 “是是相同”，line 23 “不族”。 (8) 雖P37有R1-R11的位置，但圖3-11至圖3-14看不出。	謝謝委員的指正，會進行修正。圖3-11至圖3-14會於修正報告中補充說明裂流發生位置。
2. P21~P22正確率、回應率的使用法應一致，例如P22 recall rate，但下方寫的是response rate。	謝謝委員的指正，會進行修正，將評估指標統一為正確率(accuracy)、反查率(recall rate)、回應率(response)和預兆得分(Threat Score)。
3. 未來水位高低是否能和漲/退潮時間搭配成一張圖說明更細一些。	謝謝委員的建議。未來會對裂流發生時，漲退潮相位和水位的關係做進一步的討論和分析。

捌、會議結論

原則上通過，請參考委員意見修正或為明年研究參考。

玖、會議結束：

下午 3 時 30 分

附錄八 裂流監測站觀測影像案例



Waiau_001



Waiau_002



Waiau_003



Waiau_004



Waiau_005



Waiau_006



Waiau_007



Waiau_008



Waiau_009



Waiau_010



Waiau_011



Waiau_012



Waiau_013



Waiau_014



Waiau_015



Waiau_016



Waiau_017



Waiau_018



Waious_019



Waious_020



Waious_021



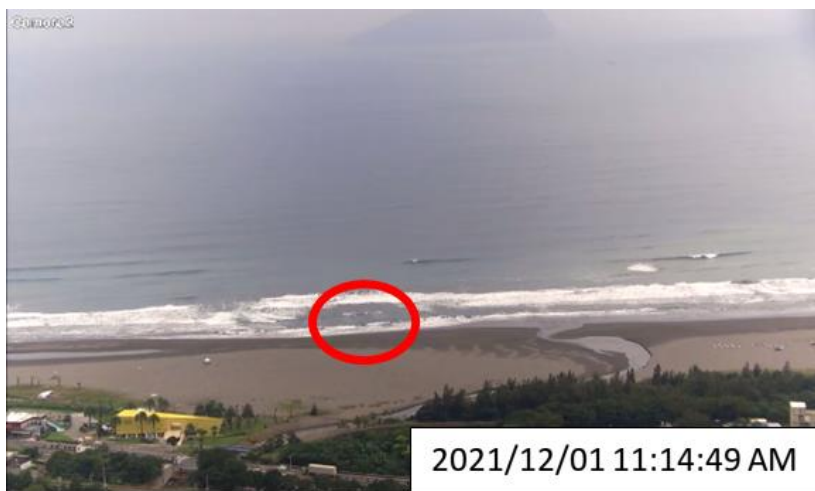
Waiau_022



Waiau_023



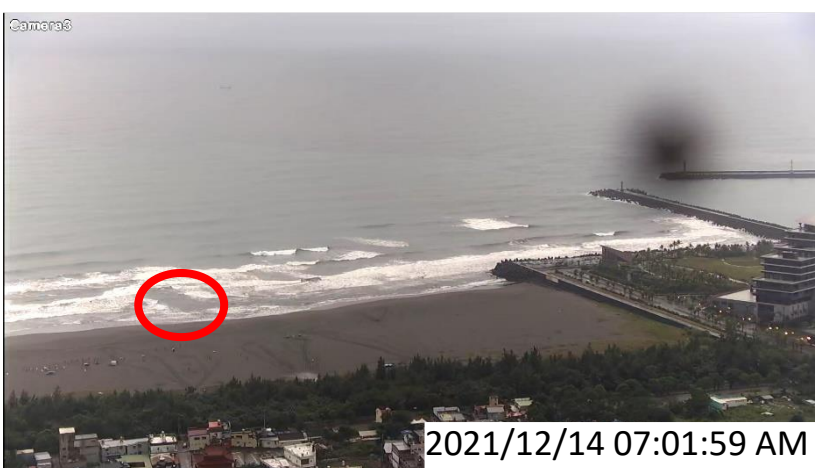
Waiau_024



Waiau_025



Waiau_026



Waiau_027



Waiau_028



Waiau_029



Waiau_030



Waiau_031



Waiau_032



Waiau_033



Waious_034



Waious_035



Waious_036



Waiau_037



Waiau_038



Waiau_039



Waiau_040



Waiau_041



Waiau_042



Waiau_043



Waiau_044



Waiau_045



Waiau_046



Waiau_047



Waiau_048



Waiau_049



Waiau_050



Waiau_051



Waiau_052



Waiau_053



Waiau_054



Waiau_055



Waiau_056



Waiau_057



Waiau_058



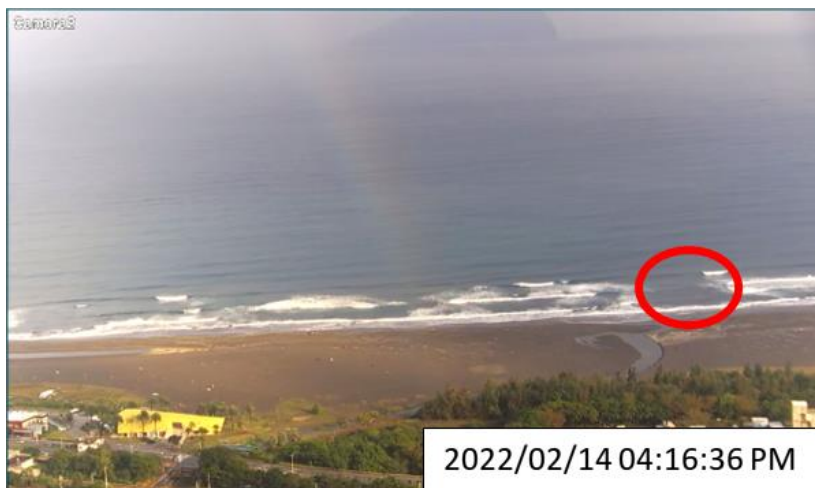
Waiau_059



Waiau_060



Waiau_061



Waiau_062



Waiau_063



Waiau_064



Waiau_066



Waiau_067



Waiau_068



Waiau_069



Waiau_070



Waiau_071



Waiau_072



Waiau_073



Waiau_074



Waiau_075



Waiau_076



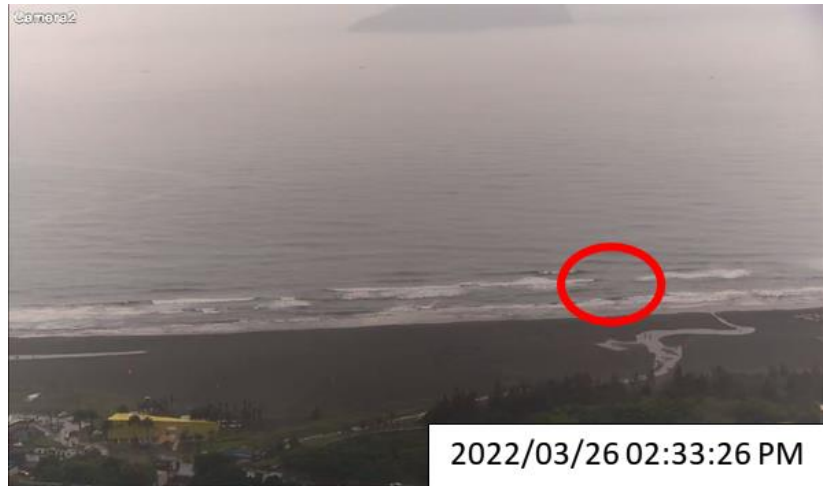
Waiau_077



Waiau_078



Waiau_079



Waiau_080



Waiau_081



Waiau_082



Waiau_083



Waiau_084



Waiau_085



Waiau_086



Waiau_087



Waiau_088



Waiau_089



Waiau_090



Waiau_091



Waiau_092



Waiau_093



Waiau_094



Waiau_095



Waiau_096



Waiau_097



Waiau_098



Waiau_099



Waiau_100



Waiau_093



Waiau_094



Waiau_095



Waiau_096



Waiau_097



Waiau_098



Waiau_099



Waiau_099



Waiau_100



Waiau_101



Waiau_100



Waiau_101



Waiau_102



Waiau_103



Waiau_104



Waiau_105



Waiau_116



Waiau_117



Waiau_118



Waiau_119



Waiau_120



Waiau_121



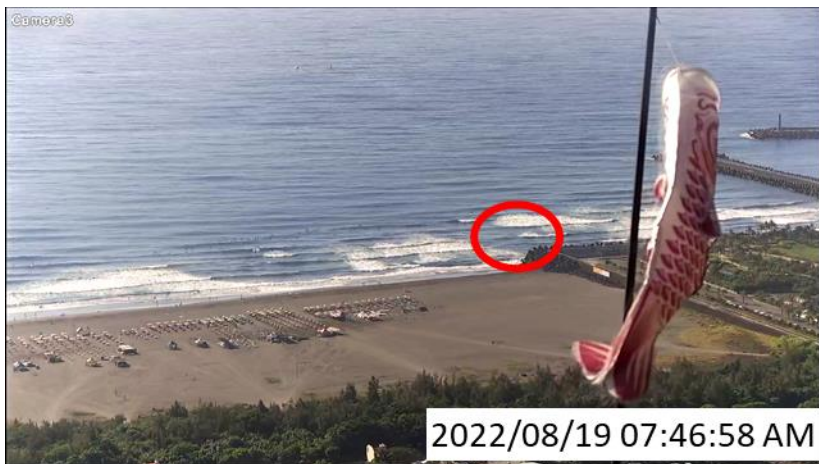
Waiau_122



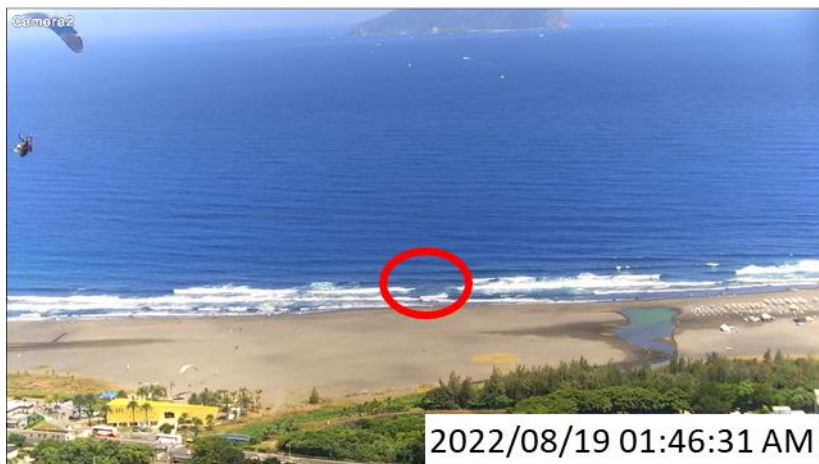
Waiau_123



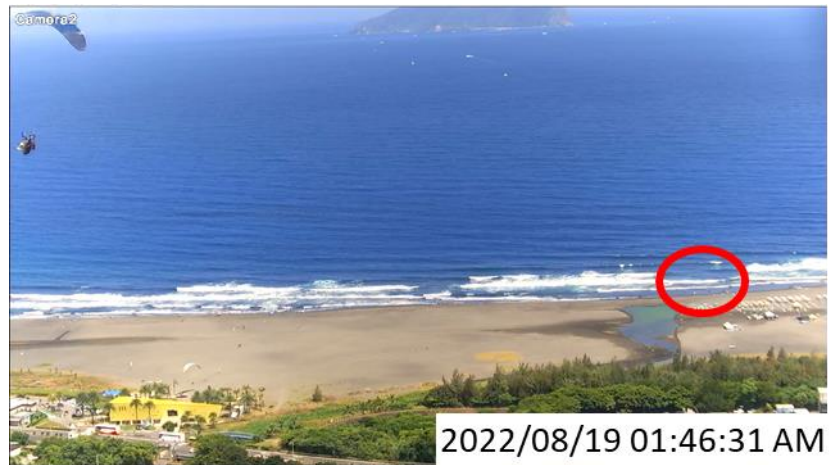
Waiau_124



Waiau_125



Waiau_126



Waiau_127



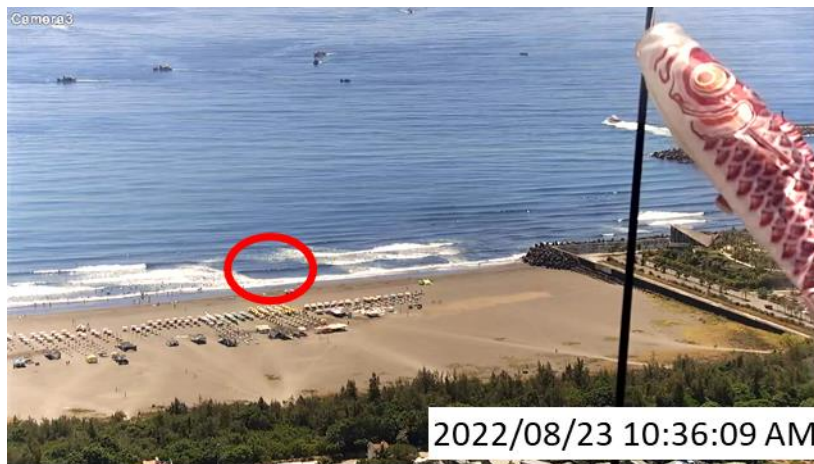
Waiau_128



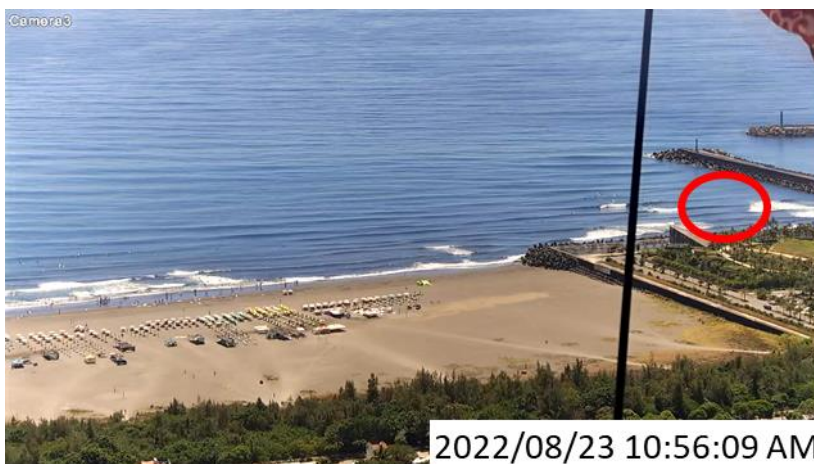
Waiau_129



Waiau_130



Waiau_131



Waiau_132



Waiau_133



Waiau_134



Waiau_135



Waiau_136



Waiau_137



Waiau_138



Waious_139



Waious_140



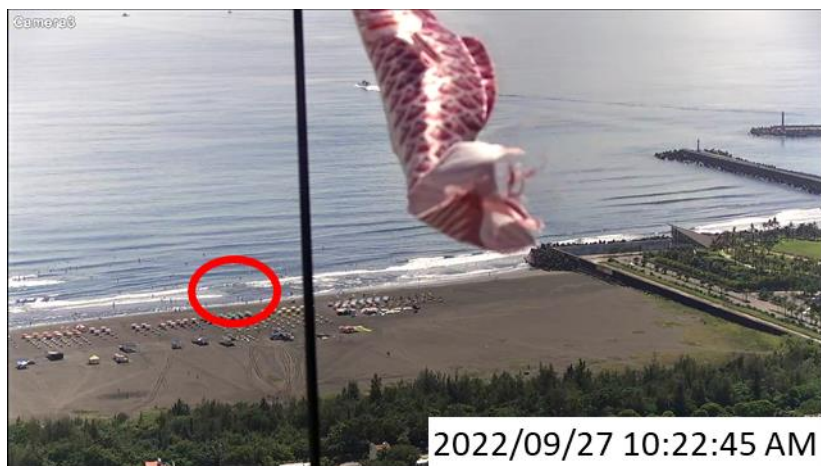
Waious_141



Waious_142



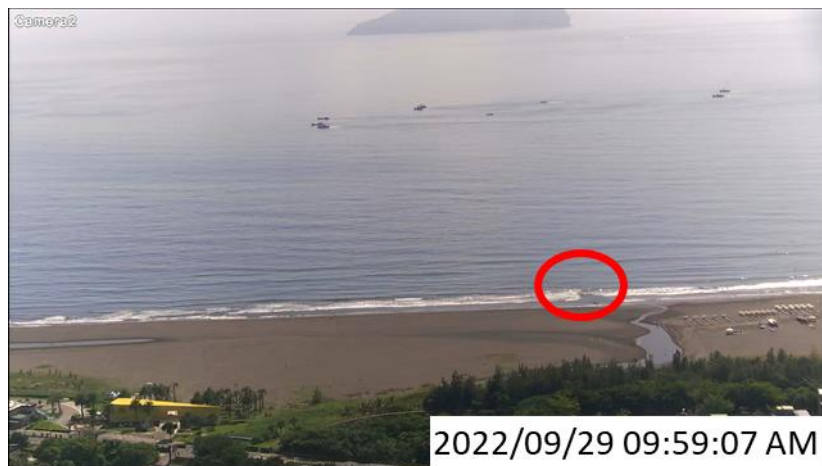
Waious_143



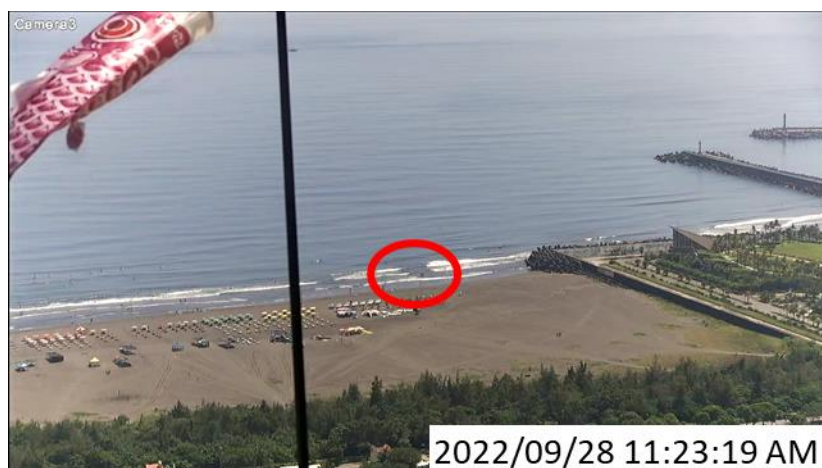
Waious_144



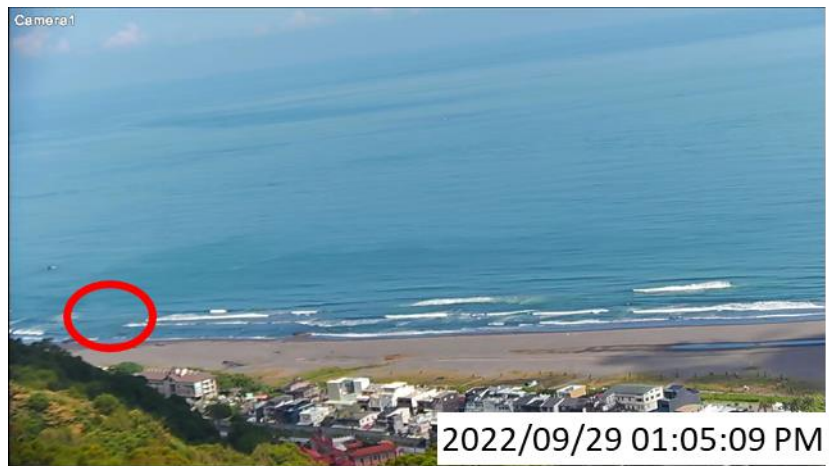
Waiau_145



Waiau_146



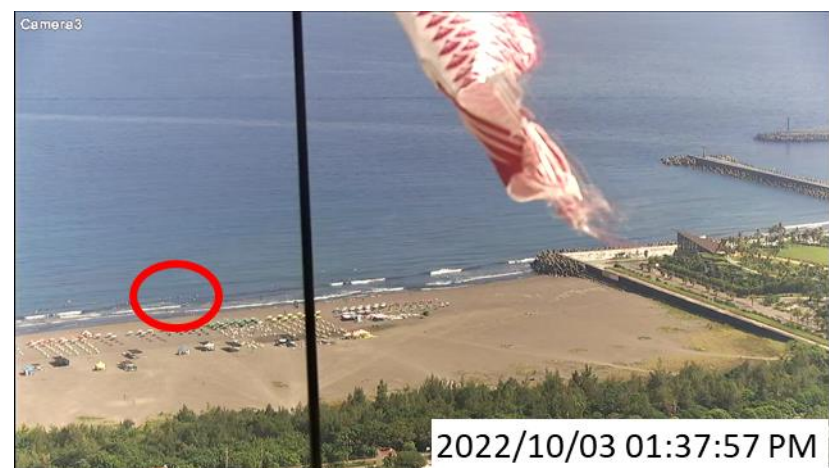
Waiau_147



Waiau_148



Waiau_149



Waiau_150



Waiau_151



Waiau_152



Waiau_153



Waiau_154



Waiau_155



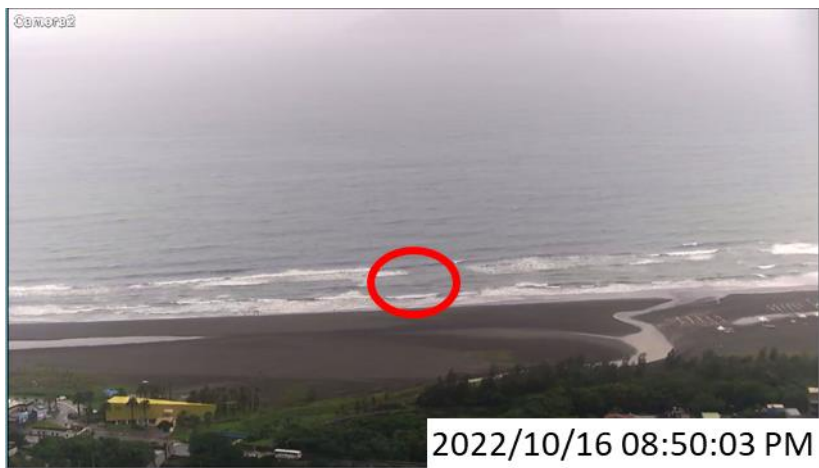
Waiau_156



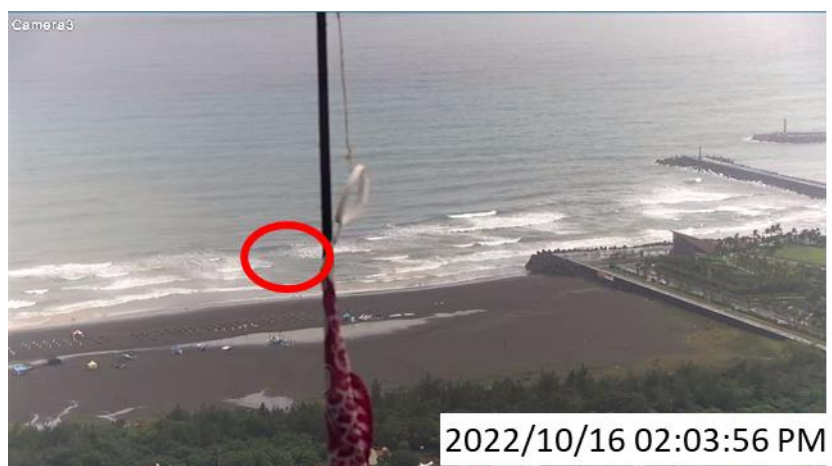
Waiau_157



Waiau_158



Waiau_159



Waiau_160



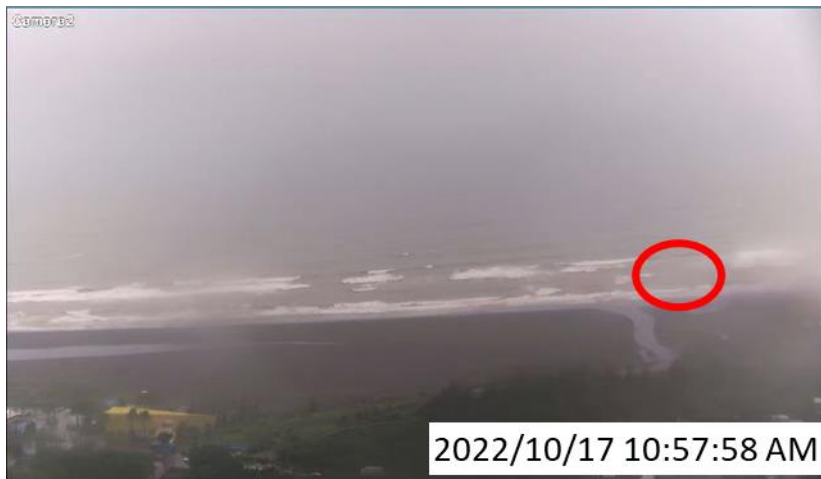
Waiau_161



Waiau_162



Waiau_163



Waiau_164



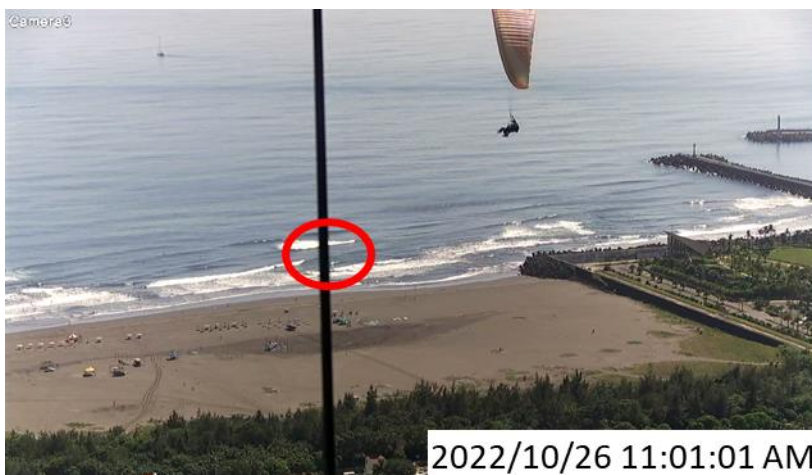
Waiau_165



Waiau_166



Waiau_167



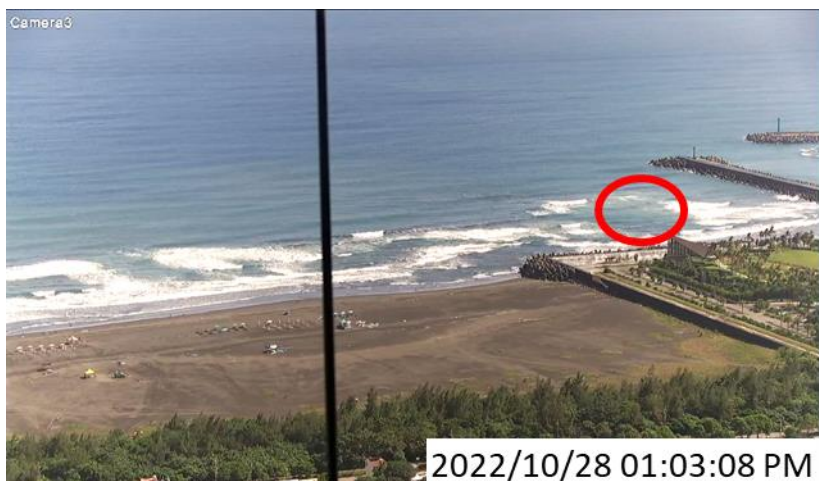
Waiau_168



Waiau_169



Waiau_170



Waiau_171



Waipou_172



Waipou_173



Waipou_174



Waiau_175

附錄九 績效報告

111 年度政府科技發展計畫 績效報告書 (D006)

計畫名稱：海岸裂流監測與預警技術研究

執行期間：自 111 年 02 月 15 日 至 111 年 12 月 31 日止

主管機關：交通部

執行單位：中央氣象局

中華民國 111 年 11 月 29 日

年度	階段性目標達成情形 (每年度以 300 字為限)	重要成果摘要說明 (每年度以 600 字為限，過程性結果請免列)
111	「裂流」亦稱為離岸流，具有流速快，垂直海岸線向外海流去，時常造成遊憩者發生意外事件。本計畫目標為持續監測與分析裂流特性，改進預測模式，並建立經驗預測方法。本計畫分析一整年外澳監測站影像資料，探討裂流發生時的特徵和海氣象條件。本計畫亦持續精進 SCHIMS-WWM 波流耦合模式，同時模擬長期現場波流場，與監測站觀測結果進行比較，兩者結果一致，並且模擬不同海氣象條件下裂流發生情形，作為預警系統建置之基石。此外，本計畫採用倒傳遞類神經網路建置裂流經驗統計模式，驗證結果顯示各項指標均達到 80% 以上，初步顯示該模式具有一定可信度。	[1] 透過增加裂流遮罩，以及將影像判釋準則 2、3 納入模式，提高模式的正確率和運算效率。 [2] 分析 2021/11 至 2022/10 一整年外澳監測站影像資料，蒐集 175 筆裂流案例，而裂流發生的位置主要分布於外澳海灘 11 處。 [3] 統計裂流發生時的特徵，裂流流幅(寬度)介於 20-80 m 間，發生時間從最短 1 小時可至最長 10 小時。 [4] 彙整裂流發生時的海氣象條件，在示性波高約 1m、平均週期約 6s、波浪垂直入射海岸、高水位和海灘類型參數 Ω 為 5 左右時，裂流發生的機率較高。 [5] 透過精細地形網格的設置，並調整邊界條件輸入的資料，提高模式的正確率的同時也降低運算時所需的資源。 [6] 完成模擬一整年(2019 年)的波流資料，水動力驗證結果準確，裂流出現的位置與現場監測站觀測結果一致。 [7] 模擬不同海氣象條件下裂流發生情形，證實當波高、週期和風速增加，或波浪入射方向較垂直海岸線時，裂流流速均會增加。 [8] 採用倒傳遞類神經方法，完成裂流經驗統計模式的初步建置，驗證結果正確率達 86.1%。 [9] 協助中央氣象局持續建置裂流影像監測站。對沙崙、大里和福隆三處海灘裂流潛勢的評估，並完成三站監測站建置的規劃。

第一部分

壹、目標與架構

目標與效益

目標

C 本計畫目的旨在研發裂流預警模式和監測技術，提供臺灣海岸地區潛在裂流發生區域之預警訊息。根據前期計畫研究成果，本計畫協助裂流影像監測站的建置，亦持續進行監測站影像資料的分析，建立完善的裂流案例資料庫，掌握裂流發生時的特徵與海氣象環境，作為後續建置裂流預警系統的基石。

本計畫除了上述目標外，透過波流耦合模式模擬長期(至少一年)現場波流資料，和不同海氣象下裂流發生情形，瞭解裂流發生的特點和探究可能發生的機制，並與現場觀測結果進行比較，提高對於模式的掌握度，另一方面也初步建立裂流經驗統計模式，提供裂流預警的訊息。同時，本計畫持續裂流影像分析技術和數值模式的改良，以上作為均是為提供未來發展更精確預警模式之參考。

效益

台灣四面環海，經濟發展與海洋息息相關，同時，民眾休閒活動日益接近海洋，裂流相關災害問題頻繁發生，有必要針對此類災害建立預警機制。

「裂流」亦稱為離岸流，它是一種足以將人沖向外海而去的強勁水流，根據前人研究，裂流是海岸溺水事件發生最主要的因素。近十年對此部分的研究相當興盛，雖對於裂流生成的機制有

初步的瞭解，但由於裂流發生機制相當複雜，包含地形不均導致波浪入射海岸時，為抵抗輻射應力所引致的外力，所產生向外海移動的水流，許多水動力交互作用均是裂流發生的原因，加上裂流觀測不易，因此研究上也受到限制，至今仍無法完整掌握裂流發生的機制。

台灣也是受裂流危害相當嚴重的國家，過去十年在台灣海岸已發生數十起的裂流事件，每年因此死傷的人數甚鉅，亟需建立監測和預警系統，計畫最終目標為建置全台灣各濱海縣市裂流預警系統，提供裂流發生機率的訊息，並適時提出預警，減少意外事件的發生。在學術上也有創新作為，研究成果在國際上亦可能獲得關注。整體而言，本計畫在學術、實務上均將有重大貢獻。

● 國際比較與分析

比較項目或計畫產出成果	計畫執行前	計畫執行後
建立裂流案例資料庫	僅有衛星和航拍影像所觀測到瞬間的裂流案例。	改進裂流影像判釋模式，提升正確率和運算效率，並提升為全自動化。同時應用於監視站影像資料，蒐集更加完善的裂流案例，記錄裂流從生成至消散的整個過程。
建立海域裂流預警系統	沒有適用於台灣海域的裂流預警系統	採用衛星和監測站影像中所蒐集的裂流案例，以倒傳遞類神經方法，建立宜蘭縣外澳海域裂流經驗統計模式。

主要內容

- 裂流影像分析
- 裂流數值模擬方法之精進
- 裂流經驗預測模式建立
- 裂流現場觀測進行比較
- 裂流影像監視站協助規劃設計

遭遇困難與因應對策

(執行計畫過程中所遭遇困難、執行落後之因應措施及建議，如無遭遇困難或落後情形者，請填寫「無」即可。)

類別	說明	因應措施與建議
執行困難	無	
執行落後	無	

貳、經費與人力執行情形

參、已獲得之主要成果與重大突破(含量化 output) (E003)

1.

屬性	績效指標類別	績效指標項目		111 年度		效益說明 (每項以 500 字為限)	重大突破	
				原訂目標值	實際達成值			
學術成就（科技基礎研究）	A.論文	期刊論文	國內(篇)	2	1	將本計畫各部份研究成果於國內外研討會發表，增加研究成果能見度，提升討論空間，有助於提供後續預警模式之基礎，達到雙贏效益。		
			國外(篇)					
		研討會論文	國內(篇)		2			
			國外(篇)					
		專書論文	國內(篇)					
			國外(篇)					
	B.合作團隊(計畫)養成	機構內跨領域合作團隊(計畫)數		1		組成國內研究裂流現象跨校研究團隊		
		跨機構合作團隊(計畫)數			1			
		跨國合作團隊(計畫)數						
		簽訂合作協議數						
		形成研究中心數						
		形成實驗室數						
學術成	C.培育及延攬人才	博士培育/訓人數		1	1	本計畫培育一位碩士班、一位博士班研究生。培育之研究生未來在科研單位或海象相關研究部門可貢獻其在災害性		
		碩士培育/訓人數			1			
		學士培育/訓人數						

屬性	績效指標類別		績效指標項目	111 年度		效益說明 (每項以 500 字為限)	重大突破
				原訂目標值	實際達成值		
就 (科技基礎研究)			學程或課程培訓人數			海象分析技術，有助於學術科技發展與實務應用開發。	
			延攬科研人才數				
			國際學生/學者交換人數				
			培育/訓後取得證照人數				
	D1.研究報告		研究報告篇數	1	1	產出研究報告乙本，研究報告中之裂流發生機制及影響條件，內容可提供國內學術研究參考；監測和預警系統運作內容可提供相關政府部門參考；至於報告中蒐集之裂流資料庫則可供政府與學界研究參考使用。所有蒐集案例與其原始資料均附於研究報告或光碟中。	
	AC.減少災害損失		開發災害防治技術與產品數				
			建立示範區域或環境觀測平台數				
			建築或橋梁補強數				
			輔導廠商建立安全相關生產或驗證機制之件數				
			預估降低環境危害風險或成本(千元)				
	其他						
社	環	Z. 調查	調查筆數				

屬性	績效指標類別		績效指標項目	111 年度		效益說明 (每項以 500 字為限)	重大突破
				原訂目標值	實際達成值		
會 影 響	境 安 全 永 續	成果	調查圖幅數				
			調查面積				
			影像資料筆數				
			調查物種數				
		其他					
其 他 效 益 （ 科 技 政 策 管 理 及 其 他 ）	Y. 資訊平台與資料庫		新建資訊平台或資料庫數	1	1	分析 2021/11 至 2022/10 一整年宜蘭縣外澳裂流監測站影像資料，完善裂流資料庫，蒐集 175 筆案例，共計累計時長達 503 小時。對於後續該資料之研究提供完整的參考資訊，並已應用於預警系統建置之使用。	
			更新資訊平台功能項目				
			更新或新增資料庫資料筆數				
			資訊平台或資料庫使用人次				
	AA. 決策依據		新建或整合流程數			效益說明可包含政策建議被採納數、節省公帑(千元)等。	
			提供政策建議或重大統計訊息數				
			政策建議被採納數				
			決策支援系統及其反應加速時間(%)				
	其他						

111 年度計畫績效指標實際達成與原訂目標差異說明：

績效指標與原訂目標相符。

第二部分

壹、主要成就及成果之價值與貢獻度(outcome)

(請說明計畫所達成之主要成就與成果，以及其價值與貢獻度；若綱要計畫為多年期計畫，請填寫起始年累積至今之主要成就及成果之價值與貢獻度。)

學術成就(科技基礎研究)

裂流(Rip Current)發生的原因很多要因素包含地形不均、海灘型態的變化以及波浪間的交互作用，本研究分析裂流監視站影像資料，蒐集裂流案例，希望透過實測資料掌握裂流發生時海象狀況，並進一步從裂流發生時海象特徵建立裂流統計經驗模式預警系統，同時結合海氣象預報作業產出，來建置裂流預警系統，目前本計畫已改進裂流影像判釋技術，並完成一整年現場觀測資料分析；同時亦精進裂流數值模式，模擬長期現場波流場和不同海氣象下裂流發生情形。該兩項為重要之學術成就，茲分點說明如下：

(一) 裂流監測站影像分析

在第一年(110 年)本計畫已建立半自動化裂流影像判釋模式，分析衛星和航拍影像資料，搜集 475 筆裂流案例，並分析裂流發生時的海氣象條件。今(111)年度本計畫透過增加裂流遮罩，以及將裂流影像判釋準則 2、3 納入模式，使模式提升為全自動化，而模式驗證結果顯示各項指標也有所提升，均達到 80%，顯示該模式已可以於實務上使用。

分析 2021/11 至 2022/10 一整年宜蘭縣外澳裂流監測站影像資料，共蒐集 175 筆裂流案例，裂流發生累計小時數達 503 個小時，從時空

間分布來看，歸納外澳海灘出現裂流的位置主要分布於 11 處，而裂流流幅(寬度)介於 20-80 m 間，裂流發生所持續的時間從最短 1 小時可到最長 10 小時，此外裂流在同個海灘同時間可有多個位置出現裂流案例。而裂流發生的機率每個位置差異不大，約為 3% 左右，其中以結構物旁出現的裂流機率最大，而秋末冬初(9 月至 12 月)期間裂流發生的比例較高。

本研究參考過去文獻所提出可能影響裂流發生的因子進行討論，包含有波高、平均週期、尖峰週期、風速、波向、水位和海灘類型參數。根據裂流發生時海象之條件機率分析，結果顯示：在示性波高約 1m、平均週期約 6 s、波浪垂直入射海岸、高水位、海灘類型參數 Ω 為 5 左右時，裂流出現的機率較高。此外，歸納不同位置裂流發生時的海氣象條件差異並不大，然發生在結構物旁易受到地形效應引起的裂流發生因素與海氣象關係不顯著。

(二)裂流數值模式模擬

裂流的發生原因一直是海洋災害相關研究持續探討的重要課題，然而該災害性波浪現象仍然難以被全盤掌握。為瞭解裂流發生機制和發生時的特徵，除上述透過影像觀測技術蒐集裂流案例進行分析，若能善用數值模式進行裂流模擬，亦可以透過模擬長期現場波流場資料，分析裂流案例，亦可以直接更改輸入的海氣象，對裂流發生的水動力機制進行探討。

去(110)年本計畫採用 SCHISM 水動力模式耦合 WWM 風浪模式，初步建置一套可以模擬裂流的環境。本計畫根據前期計畫的基礎進行改進，精細地形網格的設置，並調整邊界條件所需要輸入的資料，提高模式正確率的同時，也大幅降低運算所需要的資源。模擬 2019 年一整年的波流資料，與鄰近龜山島浮標站和烏石漁港潮位站進行比對，模擬結果均相較前期研究成果優異，在裂流現象的描述也有不錯的表現，不

僅可以清楚觀察裂流整個生命週期的演變(即從生成至消散流速和流向的變化)，而模式模擬與現場觀測的解果進行比對，兩者裂流出現的位置和裂流發生時的海氣象結果均一致。此外，透過模擬不同海氣象條件下裂流發生情形，也證實當波高、週期、風速增加，或波浪入射方向較垂直海岸線時，裂流的流速均會增加。另一方面，從長期現場波流場模擬結果顯示，裂流可根據流速大小分為兩類，以流速為 1.0 m/s 作為分界，同時亦發現當流速小(流速小於 1.0 m/s)時，隨著波高增加，裂流流速增加的幅度較裂流大(流速大於 1.0 m/s)時多。

技術創新(科技技術創新)

裂流經驗預警模式

海洋現象如裂流的發生機制相當複雜，尚未有明確的理論可以完整說明其發生的時機以及地點，因此，預測裂流的發生相當困難。近年來，由於電腦計算能力與人工智慧技術的增強，利用人工智慧技術來分析自然現象的研究逐漸興起。人工智慧技術中的機器學習方法(machine learning)可以透過學習大量資料中所蘊含的知識與特徵來對新事物進行預測，至今衍生了許多機器學習方法，包含隨機森林(random forest)、支撐向量機(support vector machine)以及類神經網路(artificial neural network)。

本計畫使用在處理如裂流現象的非線性問題有良好表現的類神經網路方法來建置裂流經驗預警模式。該模式是屬於監督式學習的一種機器學習演算法，在模式訓練過程中提供明確的正確答案，對後續模式驗證準確度相當便利。類神經網路為模仿人類大腦組織以及運作方式的資料處理技術，人類大腦由密集相互連接的神經細胞所組成，每個神經細胞的構造簡單，但大量的神經細胞結合起來能擁有可觀的計算與處理能力。透過讓電腦學習與人腦結構相同的神經傳遞資訊過程，從而讓電腦模擬神經傳遞訊息與反應動作，而由 Rumelhart et al. (1986)研究

出倒傳遞神經網路(back propagation neural network)以及近代電腦能力日新月異，使類神經網路開始突出於機器學習領域，常被應用於機制尚未明確或是複雜的自然現象上，能找出自然現象的發生徵兆及機制等。因此，對於預測裂流的發生機率，使用類神經網路建置預警模式也能有不錯的效果。

神經元(neuron)為類神經網路最基本的組成單位，神經元透過權重的連結將信號傳送至其他神經元，輸入值 X 與權重值 W 輸入至神經元後，神經元內部即開始進行運算，運算完後的結果再經過啟動函數(activation function)轉換，計算公式如下所示，而計算結果 Y 即為神經元之輸出值。

$$Y_j = f(\sum_i W_{ij} X_i - \theta_j)$$

其中 Y_j 為類神經網路中神經元的輸出值， $f(\text{network})$ 為啟動函數， W_{ij} 為類神經網路中各神經元間的連結權重值， X_i 輸入變數， θ_j 類神經網路處理單元的門檻值。

類神經網路利用倒傳遞演算法來更新權重，透過不斷地計算與更新權重，最終得到可以適應或是擬合欲解決問題的函數。在模式訓練時的疊代過程中，根據目前輸出與目標輸出的誤差調整各神經元間連結的權重來完成訓練，假設輸入給神經元第 p 個資料，即在疊代 p 中，輸出為 $Y(p)$ ，目標輸出為 $Y_d(p)$ ，因此誤差為：

$$e(p) = Y_d(p) - Y(p)$$

其中假如誤差 $e(p)$ 為正，代表需增加權重來增加輸出，假如誤差 $e(p)$ 為負，代表需減少權重來減少輸出，以此方式來降低輸出值與目標輸出的誤差，因此可寫成下式：

$$w_i(p+1) = w_i(p) + \alpha \times x_i(p) \times e(p)$$

其中 α 為學習率，為介於 0~1 之間的常數，影響誤差回傳神經網路時調整權重的幅度。

倒傳遞演算法可利用將網路中所有的權重，計算損失函數的梯度，根據梯度下降法(gradient descent)來決定如何修正網路中的權重，梯度下降法會透過計算誤差函數的梯度，得到如何修正權重能使誤差降低的方向，訓練過程中不斷地計算梯度並修正權重，使誤差隨著訓練次數而逐漸降低，最終得到訓練效果良好的神經網路模型。

類神經網路架構包含輸入層(input layer)、隱藏層(hidden layer)以及輸出層(output layer)，神經網路的輸入資料由輸入層輸入，傳遞至隱藏層的神經元進行運算，根據要解決的問題之複雜度，神經元的數量可以是一個或是多個，最後經由啟動函數(activation function)計算得到輸出值。而對於機制尚未明確或是較為複雜的問題，通常會使用如 S 型曲線函數(sigmoid function)和雙曲線正切函數(hyperbolic tangent function)，使類神經網路具有非線性計算能力，建立複雜的函數關係。

因此，本計畫提出一套利用人工智慧技術中類神經網路方法建置裂流經驗預警模式的流程，自衛星航拍與裂流監視站影像獲得裂流發生的時間與案例，透過類神經網路來建置裂流經驗預警模式。利用多個數值模式輸出波浪、風與潮汐資料，作為訓練模式時輸入的因子與資料，模式經過率定訓練參數來建置訓練效果最佳的裂流經驗預測模式，並且以多個評估指標來驗證經驗預測模式的預測效果。研究成果顯示使用此種人工智慧技術建置裂流經驗預警模式，能有效地預測裂流的發生。

經濟效益(經濟產業促進)

中央氣象局發布之海象資訊與許多遊憩活動息息相關，許多海上作業船隻與或是海邊遊憩戲水或衝浪的民眾，都需參考海象資訊。因此提升在海象災害方面的預警能力，將可有效的避免遭遇到海岸猜害，並避免國人生命財產的損失。本計畫研究目標就是建置一套裂流預警系統，海流與海浪不同，肉眼難以直接辨識，需要藉由儀器量測才能觀測得到。本計畫為三年期計畫第一年，主要完成了裂流案例的識別與數值模式建立，相關研究成果是後續建置與警系統之基石，因此成果雖難以直接量化估計的經濟產值，但是對間接的減少海洋岸邊災害發生的隱憂，對海域遊憩民眾能提供更多的訊息。

社會影響(社會福祉提升、環境保護安全)

本研究建立裂流影像案例之資料庫，持續分析裂流監測站所拍攝的影像資料，蒐集完善的裂流案例，另一方面，透過數值模式模擬長期現場資料和不同海氣象下裂流發生情形，同時將該些結果作為預警系統訓練、驗證之用。未來可提供相關研究之參考，從統計得到之裂流好發海氣象條件，也可事前瞭解活動期間，該時刻活動之風險性，甚至可透過監測技術提供裂流警示資訊。同時也可以讓社會大眾更了解變化多端的海洋，進一步提升社會大眾對海洋的認知與了解。

檢討與展望

海洋變化萬千，裂流(即離岸流)常導致近岸意外事件的發生，本計畫目的旨在透過「數值模式」和「經驗統計模式」發展裂流預警系統，並藉由建置裂流影像監視站，蒐集完善的裂流資料庫，研究裂流成因與特性，使該系統能夠提供完善的海域遊憩安全資訊。在第二年的工作中，本計畫精進裂流影像判釋技術和裂流數值模式，不僅增加模式的正確率，也提高模式的運算效率。在研究上分析監測站所拍攝的影像資料，

以及進行裂流現象長期和特定條件下的模擬，同時也初步建置裂流經驗統計模式。基於前述，對後續工作構想重點建議和未來展望條列如下：

- [1] 未來可考慮將外澳裂流影像傳輸方式改為氣象局所使用的行動數據群組企業網路(MDVPN)，與中央氣象局現有系統相同，方便後續即時影像上傳至氣象局的影音平台。
- [2] 考量影像為裂流分析的主要資料，建議加速大量建置裂流監視站，或者可連結其他單位海岸影像進行裂流監測與分析，如 GoOcean 系統或水利署災防平臺所展示之影像資料。
- [3] 有鑑於目前的水深地形資料與實際情形有所差異，考量實務有即時性之需求，建議可優先使用經驗統計模式，以大數據或是人工智慧(AI)的方法，建立初代的預警模式。
- [4] 裂流影像判釋程式已有不錯的成功率，建議可著手規劃現場之實際應用，如何提供資訊予現場人員，以及現場設備之需求(是否需使用微型電腦)。
- [5] 建議可以利用邊緣運算的技術，使資料在傳送時大幅降低延遲或頻寬使用，減少影像和分析結果傳輸所需的時間，提高裂流現場即時監流和警示的可行性。
- [6] 建議可根據本計畫之成果，選址易發生裂流之熱點和可能發生之時間點，進行現場觀測的試驗，可透過放置 ADCP、GPS 漂流器或染料等方式取得裂流案例，以進行更加詳盡的驗證。

附表、佐證資料表

【A 論文表】

題 名	第一作者	發表年(西元年)	文獻類別
海岸裂流觀測之研究	王敘民	2022	B 國內重要期刊
以數值模式探討裂流生成海氣象條件-以漁光島海灘為例	王敘民	2022	E 國內研討會
海岸裂流影像監測與分析	王敘民	2022	E 國內研討會

註：文獻類別分成 A 國內一般期刊、B 國內重要期刊、C 國外一般期刊、D 國外重要期刊、E 國內研討會、F 國際研討會、G 國內專書論文、H 國際專書論文

【B 合作團隊(計畫)養成表】

團隊(計畫)名稱	合作對象	合作模式	團隊(計畫)性質	成立時間(西元年)
災害性海象預警團隊	國立成功大學 國立台灣海洋大學	B 跨機構合作	A 形成合作團隊或合作計畫	2002

註：合作模式分成 A 機構內跨領域合作、B 跨機構合作、C 跨國合作；團隊(計畫)性質分成 A 形成合作團隊或合作計畫、B 形成研究中心、C 形成實驗室、D 簽訂協議

【C 培育及延攬人才表】

姓名	機構名稱	學歷	性質
王敘民	國立成功大學水利及海洋工程學系	A 博士 (含博士生)	B 學程通過
傅仲偉	國立成功大學水利及海洋工程學系	B 碩士 (含碩士生)	B 學程通過

註：學歷分成 A 博士(含博士生)、B 碩士(含碩士生)、C 學士(含大學生)；性質分成 B 學程通過、C 培訓課程通過、D 國際學生/學者交換、E 延攬人才

【Y 資訊平台資料庫表】

資訊平台/資料庫名稱	內容描述	類別	資料筆數
裂流影像資料庫	儲存宜蘭縣外澳裂流影像監測站觀測到之裂流影像	Text	175

註：類別分成 Bibliography、Numerical、Factual、Multimedia、Text