



海岸裂流觀測之研究

王敘民／國立成功大學水利及海洋工程學系 博士候選人

董東璟／國立成功大學水利及海洋工程學系 教授

蔡政翰／國立台灣海洋大學海洋環境資訊學系 教授

林芳如／交通部中央氣象局海象測報中心 課長

裂流 (rip current) 是在近岸碎波帶一股向外海而去的海流，對從事海洋活動民眾具威脅性。過去裂流記錄非常稀少，因此發生的機制或海氣象條件至今仍未完全被掌握。為能夠蒐集更加完善的裂流案例，本研究彙整國內外有關於裂流觀測的技術，根據觀測方法和儀器可分類為五種：(1) 質點追蹤法、(2) 直接測量法、(3) 拉格朗日測量法、(4) 影像流場反算法和 (5) 裂流影像特徵法。本研究採用裂流影像特徵法，從碎波帶的斷裂處判釋有無裂流存在，該方法識別的正確率達 82%，顯示此分析方法可正確地從影像中分析得到裂流案例。同時亦應用於衛星影像與外澳監視站影像之分析，歸納後發現多數案例發生在 46 處海灘，裂流出現的持續時間從最短 1 小時至最長 10 小時。本文彙整現今可用於裂流觀測的方式，以及所建立的裂流影像判釋模式，可供後人進行裂流觀測上使用，蒐集大量的裂流案例，為裂流後續相關研究甚至是建置預警系統奠定基礎。

關鍵詞：裂流、光學影像、衛星影像

前言

裂流 (rip current) 也稱為離岸流，是一種發生於海岸邊，向外海移動的強勁水流，加上海流無法直接以肉眼觀測，因此遊客往往會無意間的快速被帶離海岸，造成意外事件的發生。近年來台灣海域遊憩活動逐漸發展，民眾開始親近海洋，但也伴隨意外事件的發生，根據美國國家海洋大氣局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 統計，裂流是造成全球海岸邊意外事件最多的原因，在美國平均每年約有 100 人因裂流而溺亡。台灣亦是受裂流危害嚴重的國家，近年來裂流引起溺斃的事件頻傳，根據過往文獻紀錄台灣迄今至少發生數十起的意外事件，累計造成傷亡人數甚至達數百人之多。然而裂流發生機制複雜，至今尚未被完全掌握，因此為能正確地預測發生時間或發生地點，避免意外事件的發生，相關研究仍持續進行。

若要掌握裂流發生的機制，需要基於大量案例的分析，過去有許多研究會採用報章媒體所記錄的裂流案例進行分析^[1,2]，但這些紀錄本身具有一定程度的不確

定性，當下亦沒有現場測量結果可供研究上進行檢核，且當裂流發生時沒有意外事件發生，則不會有所紀錄。Shepard *et al.*^[3] 以海面的懸浮物和浪花漂移的軌跡觀測裂流 (如圖 1)；Huntley *et al.*^[4] 則是佈放染料用以標記海水流動的情形。直接測量海流流速的儀器也能進行裂流的觀測，如聲學都卜勒流速剖面儀 (Acoustic Doppler Current Profile, ADCP)、聲學都卜勒流速儀 (Acoustic Doppler Velocimetry, ADV) 或是 GPS 漂流儀^[3,5,6] 等。但由於無法確認裂流何時、何地會出現，加上裂流的位置發生在海岸與陸地交界的碎波帶範圍，使得該些方法或儀器無法進行長期測量，研究上往往僅能對特定案例進行探討。而在海洋相關研究常會使用光學影像並透過影像處理技術來進行觀測與分析海域中的各種問題，裂流觀測亦可透過影像進行觀測，不僅可以長時間對同一區域進行觀測，若使用衛星影像則可同時蒐集到多個海岸裂流發生的情形^[7-9]。

本研究旨在於彙整過去文獻中提及可用於觀測裂流的方法，並建立一套自動化裂流影像判釋模式，同時應用



(a) 台南漁光島裂流案例



(b) 宜蘭外澳裂流案例

圖 1 裂流示意圖

於衛星和監視站影像之分析，探討裂流發生時的特徵和時空間分布。未來若能有效的應用上述裂流觀測的技術與方法，便能大量蒐集裂流案例，不僅能提供後續裂流相關研究，亦能作為建置預警系統和數值模式驗證之資料。

裂流現場觀測方法

本研究蒐集近二十年國內外曾用於裂流觀測的技術，根據所使用的儀器和方法，將裂流觀測的方法歸納為五類，分別為透過佈放染劑或觀測懸浮物的 (1) 粒子追蹤法、使用儀器測量海流流速的 (2) 直接測量法和 (3) 拉格朗日測量法，以及從光學影像中擷取海面特徵的 (4) 影像流場反算法和 (5) 裂流影像特徵法^[3,5,10,11]，該些方式都是目前裂流觀測常見的方式，以下將進行詳述。

粒子追蹤法

對於裂流的觀測，最早可追溯至西元 1941 年，Shepard *et al.*^[3] 發現裂流可將底床的沙粒或是海面的浪花從岸邊快速的帶往外海。爾後，許多學者以此概念作為

基礎，透過海面上質點移動的軌跡，蒐集裂流案例，統計裂流發生時的寬度、長度和延時等，甚至利用顆粒追蹤速度法 (Particle Tracking Velocity, PTV)，直接計算裂流範圍內的流速。Shepard and Inman^[12] 以釣魚線綁住漂浮物，觀測其移動的路徑，發現裂流會出現於波浪的匯聚點。考量並非海面上均會出現漂浮物或沙粒，Huntley *et al.*^[4] 和 MacMahan *et al.*^[13] 則是佈放染劑來標記海水移動的情形，進而觀測裂流現象，如圖 2 (右：黃色部分為染劑)，並透過波浪模式計算的近岸波浪場，發現裂流的發生與案例發生前後入射波高的變化有相關。

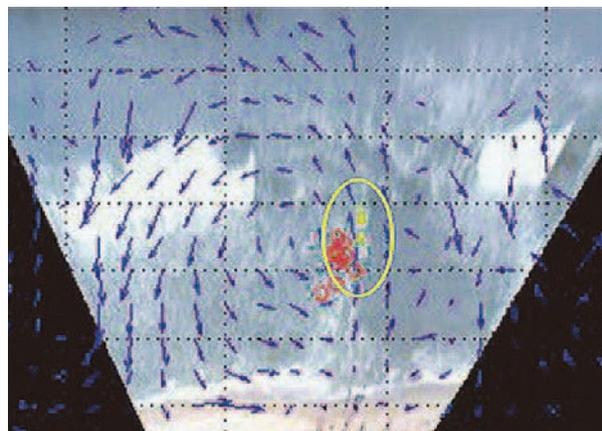
儀器直接量測

直接測量法

隨著科技的進步，可直接測量海流流速的儀器逐漸問世，如透過電位差計算流速的電磁流量計 (electromagnetic flow meter, EM) 或是根據都卜勒效應獲得垂直剖面流速的 ADCP 和 ADV 均是可以直接計算流速。然而裂流具有空間變異性，需要多點量測得以量



(a) 從浪花中發現裂流 (Shepard *et al.*^[3])



(b) 透過染劑觀測裂流 (MacMahan *et al.*^[13])

圖 2 透過海面特徵進行裂流觀測

測，方能從近岸流場的分布情形觀測裂流。Bowman *et al.* [14] 以陣列是擺放 14 個電磁流量計測量以色列 Herzliya 海灘的海流流速，發現影響裂流發生的因素不僅與入射波有顯著關係，次諧波 (subharmonic edge waves) 和亞重力波 (infragravity) 所造成的震盪亦有相關。此外，透過該些儀器不僅可以觀測裂流，亦可同時計算出當下的流速和流向，Bruneau *et al.* [15] 利用多個 ADCP 和 ADV 對法國的阿基坦海岸進行觀測，發現在波高小於 1.0 m 時，裂流流速不超過 0.8 m/s，而波高為 2.5 ~ 3.0 m 時，在整個潮汐週期均可觀測到裂流現象。

拉格朗日測量法

現今全球定位系統 (Global Positioning System, GPS) 在越來越小的同時還更加精確，也有許多的儀器開始搭載 GPS 定位系統，透過本身可以記錄絕對位置 (經緯度座標) 的優點，提供不同時間點下空間分布的訊息。近岸環流的觀測亦可使用類似的技術，利用儀器記錄空間資訊，藉由拉格朗日測流法 (Lagrange method) 分析漂流物的時空分布，根據物體移動之距離與時間的倒數，計算海流的流速和流向。使用拉格朗日測量法的海洋觀測儀器常見的有 GPS 漂流儀或 GPS 浮標，相較單點式流速儀，由於本身會隨著海流移動，故可以在僅有一台儀器的情況下，判釋是否有裂流發生 [16-18]。Song and Bae [19] 在裂流發生時透過 GPS 漂流浮標進行量測 (如圖 3)，並結合 GPS 浮標本身所測量多種波浪參數，調查裂流發生時周圍的海氣象環境，作為協助後續改善經驗預警系統的參考；Austin *et al.* [20] 使用多個 GPS 漂流儀進行裂流的觀測，發現裂流在低潮時流速會達到最高，而在高潮和中潮時，近岸海流的流向則是由沿岸流所主導。

影像遙測法

上述直接量測流速的儀器，在觀測裂流的同時也能測量多種海氣象參數，對於後續裂流研究係屬相當便利。相對於直接測量，遙測技術也常被用來進行海



圖 3 海雲台海灘測量裂流之 GPS 浮標 [19]

洋觀測，有學者提出可以透過雷達 (radar) 或光學 (optical) 影像從事長時間和大範圍的裂流觀測，在方法上可從影像中擷取海面裂流的特徵，或透過反算海面的流速和流向，以下將針對該兩方法進行說明。

影像流場反算法

近岸環流的變化也可以從雷達或光學影像中計算出來，前者是以雷達波取得海表面的粗糙度，再透過傅立葉轉換 (Fourier transform) 或是小波轉換 (Wavelet transform) 擷取影像中海表面的訊息，並利用調制轉換函數 (Modulation Transfer Function, MTF) 以及分散方程式 (dispersion relation function) 求解波場和流場。Frasier *et al.* [21] 透過雷達微波測量碎波帶間的流速變化，結果與 ADV 觀測結果相當一致。Punzo [22] 透過 X-band 雷達進行近岸環流的觀測 (如圖 4)，發現在礁石海岸或防波堤附近會有裂流的發生，且流速快慢與屏障前後水面高低落差呈正相關。此外，亦有學者提出透過監視站光學影像反算流場的方法，Chickadel *et al.* [23] 提出光學流速測量法 (optical current meter, OCM)，透過時頻分析方法擷取影像中周波數的頻譜後，與觀測得到的實際譜型進行擬合估計海面流場。Cohen [24] 透過 OCM 法進行裂流的觀測 (如圖 5)，發現雖然 OCM 法與單點流速儀量測流速量質並不相同，但趨勢是一致的，因此認為 OCM 法可以透過流速梯度變化來進行裂流觀測，當流速梯度值超過一定閾值，則觀測範圍內高機率是有裂流發生。

裂流影像特徵法

海流不像波浪變化或潮汐漲退可由目視辨別，但當海岸邊有裂流的出現，海面上就會出現與平時不一樣的特徵，因此裂流的觀測可以透過影像中海面特徵的變化來進行觀測。最早在 Shepard *et al.* [3] 就有提到當裂流發生時，海面上的碎浪帶會有明顯的斷裂處，但該現象也有可能是沿岸的強風或是突如其來的大浪所造成的，因

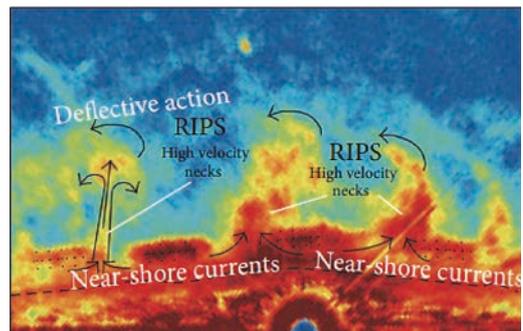


圖 4 雷達觀測裂流結果圖 [22]



圖 5 影像反算流場範圍 [24]

此為解決上述的不確定性，有學者提出，將數十分鐘甚至數小時的影像進行平均，若平均影像內碎波帶仍有明顯的不連續現象，便可確認該位置有裂流的發生 [15,25]。Holman *et al.* [26] 透過將長期岸邊攝影機的影像資料進行平均，結果顯示在 Embayed 海灘發現 5271 個裂流渠道（如圖 6），甚至在四年的觀測期間有 782 天有裂流發生。韓國氣象局為能減少裂流意外事件的發生，於海雲台海灘架設光學攝影機，並透過擷取影像中裂流的特徵，進行即時監測，一但有裂流出現，便立即警告民眾 [19]。

此外，近年來隨著人工智慧（Artificial intelligence, AI）的發展，只要所觀測的目標可從影像中擷取特徵，便可以透過 AI 技術進行判釋。而上述提及裂流在發生時，海面上有明顯的特徵變化，因此是可以透過人工智慧的方法進行判釋，Akila *et al.* [9] 以卷積神經網路（Convolutional Neural Networks, CNN），並結合影像平均和影像聚合的方法，建立自動化判釋裂流判釋模式。

研究資料與分析技術

分析方法

裂流影像判釋原則

本研究參考前人所提出的海面裂流影像特徵法作為基礎，並從裂流發生的機制以及發生時的海面特徵，提出從衛星影像和監視站影像中判釋裂流的準則，藉此增加裂流案例分析結果的可信度。

根據 Longuet-Higgins and Stewart [27] 的研究成果，裂流的發生與近岸波流交互作用有顯著相關，在沒有裂流的情況，波浪入射至近岸後，波浪應會破碎導致能量的消散，然而當裂流發生時，波浪匯聚後會導致水位的抬升，此時水體為抵抗輻射應力所引致的外力，進而產生向外海移動的水流，此時能量已被抵消便不會有波浪破碎的現象，故透過近岸區域碎波帶斷裂情形便可以進



圖 6 透過裂流影像特徵觀測之裂流案例 [26]

行裂流的觀測，且該現象已於過去許多文獻均有被提及且應用 [3,28]；此外，過去文獻亦會透過海面上有明顯懸浮物（如漂砂、漂流木等）移動的軌跡進而判定當下海流的流向 [7,29]，倘若影像中該些物質有向外海延伸的趨勢，便可視為影像中有裂流的發生（如圖 7）。

然而並非出現以上的情形就必定有裂流，由於波浪傳遞是具有週期性的變化，因此透過影像在進行判釋的時候，不同位置上波浪破碎會有先後的差異，使碎波帶呈現斷裂的情形；或近岸風速較大時，會使得海面上碎浪浪花被吹散，亦會呈現碎波帶不連續的現象。考量波浪的週期和陣風發生的時間較短，與裂流持續時間長達數十分鐘至數小時有明顯的區別 [8]，故本研究將參考前人的方法，對時序列影像進行平均，若平均後的影像中仍出現碎波帶不連續的情形，便可確認有裂流的發生 [25,26]。

而衛星影像為某時刻的單張影像，雖無法對影像進行平均，但可以從裂流發生時的空間分布進行確認，透過裂流與裂流彼此間間隔大小確認碎波帶斷裂是否為裂流所導致的，本研究彙整前人文獻的研究



圖 7 判釋裂流發生之主要條件（向外海延伸的浪花）

成果發現裂流彼此間隔不小於 40 m^[30-32]，並將此條件作為裂流影像判釋的準則之一。

裂流發生的機制除有合適的海氣象環境，水深地形亦是一個重要的因素，Wright and Short^[33] 透過現場觀測與實驗對海灘類型進行分類，並且認為中間過渡型的海灘（即非完全消散型或反射型海灘）是較容易產生裂流的。由於海灘的地形與地貌倘若沒有遭遇颱風或暴潮等劇烈的天氣現象是不易改變的，加上產生裂流的海氣象條件並不是非常的嚴苛的極端海況^[1,34]，故在同一個位置上裂流應有復發之現象。綜上所述，為提高裂流影像判釋結果的可信度，本研究參考前人的研究成果，並根據裂流發生的機制和發生時的特徵，提出以下四點作為從光學影像中判釋裂流的準則：

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 公尺
4. 某處裂流之發生應會重複出現

裂流影像分析技術

前文已詳述從影像中判釋裂流的四個準則，然現有衛星與攝影機所拍攝的影像資料量過於龐大，為此本研究建立一套裂流影像判釋方法，將影像資料進行數位化處理，量化為可用的資訊。該模式是透過「小波邊緣偵測 (Wavelet Edge Detector)」和「影像卷積 (Image convolution)」作為核心概念，搭配影像灰階、影像平均和影像擴增等多種影像處理技術，根據裂流判釋的主要條件，概略挑選影像中有裂流的位置，再以準則二至準則四檢核該處是否真為裂流所發生的位置，其詳細的分析過程如下。

裂流的發生主要位於近岸碎波帶的區域，為強化沙灘與碎波帶間的差異，本研究透過小波邊緣偵測對影像進行強化，由於該方法係屬一種帶通 (bandpass) 濾波器，不僅可偵測碎浪邊緣的位置，亦可進行濾波去除影像上的雜訊。而為能正確判釋裂流發生的位置，本研究建置一種左右為白色 (碎浪)，中央為黑色 (海水) 的遮罩，模擬裂流發生時碎波帶周圍環境，並將其對小波邊緣偵測後的影像進行影像卷積，計算影像與遮罩間的相似度，當相似度達 80% 以上時，本研究就會認定該區域是疑似裂流發生的區域，並且透過影像擴增 (Image Data Augmentation) 的方法，將該遮罩進行縮放、延伸、扭曲和旋轉來因應這些差異，使該模式的應用性能更加廣泛。

研究資料

本研究所使用的影像有衛星和監視站所拍攝的兩種資料，衛星影像的蒐集是由「中央大學太空及遙測中心」所提供，考慮裂流空間尺度較小，約數十公尺至百來公尺^[18]，故本計畫僅使用 SPOT6/7 和 Pléiades 的高解析度衛星資料，解析度均達到 1.5 m/pixel (如圖 1(a))，探勘的範圍為全日本島 227 處海灘 (海灘分類根據國家海洋研究院 (2021) 所調查之結果)，影像資料的時間則是從 2013 年至 2017 年，以每個海灘作為一張圖片，本研究所使用的衛星影像資料共計可達 8,000 多張。

此外，裂流的觀測可利用攝影機拍攝的序列影像進行分析，雖然不能如衛星影像進行大範圍的觀測，但可持續不間斷的進行拍攝，瞭解裂流發生的延時，甚至可詳細觀測到裂流從發生至消散的整個過程。我國中央氣象局為能進行裂流的監測，已於去 (2021) 年開始於台灣裂流潛勢發生區域建置監視站，目前已於宜蘭縣外澳海灘完成裂流監測站的建置，由於該監測站建置於外澳海域正後方約一公里處的山頭上，拍攝角度可達 30° 至 40°，且裝設三台的 FULL HD 光學攝影機 (即影像大小為 1920 × 1080)，故影像資料可良好的描述裂流特徵 (如圖 1(b))。目前本研究已蒐集該監視站從去 (2021) 年 11 月啟用至今年 5 月的影像資料，由於是光學攝影機的拍攝受限於日照，共計約 2,376 小時可作為後續裂流觀測分析使用。

裂流影像分析結果

影像判釋驗證

由前文說明的分析流程可以自動的從影像中擷取裂流發生的範圍，為瞭解該模式對於裂流影像判釋的正確率，本研究透過人工方式判釋 100 筆影像中有出現裂流，以及 100 筆影像中未有裂流出現的資料，其中衛星影像資料和監視站影像資料各占一半。驗證結果顯示在 100 筆有裂流發生的影像中，有 86 筆被成功判釋出來；反之，在 100 筆沒有裂流的影像中有 22 筆被誤判為裂流，故整體正確率達 82%。在 14 筆裂流影像判釋失敗的原因，主要受到天氣的影響，使得海灘反光，與碎浪的顏色幾乎相同，因此在碎波帶的判釋上，無法將兩者區分開來。而 22 筆平時影像被誤判有裂流發生的情形，大多是因為陸地的房屋或魚塢間隔相排，與碎波帶斷裂情形相似，因此被誤判為裂流。此外，本研究亦針對裂流判釋出的位置進行檢視，從圖 8 結果顯示，該模式所判釋出的裂流位置，均位於碎波帶明顯斷裂處。整體而



圖 8 裂流影像判釋模式辨識結果

言，當岸邊碎浪帶出現不連續的現象時，本研究所提出的裂流影像判釋方法，絕大部分皆可以成功辨別。

裂流案例分析

從 2013 年至 2017 年的衛星影像分析結果顯示，在 1,494 張的衛星影像中有 468 張影像分析得到裂流案例，進一步統計更發現多數案例集中在 46 處海灘（如圖 9），顯示這些海灘為裂流相對較易發生的區域，其中發生比例達 20% 以上的海灘包含新北市福隆海灘、中角灣海灘和沙崙海灘、宜蘭縣外澳海灘和蜜月灣海灘、台南市漁光島海灘、黃金海岸海灘和四草海灘，以及台中市大安海水浴場等著名的水域遊憩活動熱門景點。

外澳裂流監視站裂流案例分析結果顯示，在 2,376 個小時的影像中共計蒐集 76 筆裂流案例，累計時長為 186 小時，裂流發生的位置大致可分布于 9 個位置，如圖 10 中標示 R1 至 R9 的位置，且同一個海灘同時可出現多起裂流案例。根據前人研究成果，於結構物旁會因為波浪的繞射和折射，容易有裂流的發生^[18]，位於烏石漁港北側防坡堤旁 R9 的位置，本研究確實有發現裂流案例，故可提高本研究提出裂流判釋方法的可信度。由於監視站影像資料可提供時間尺度的訊息，故本研究

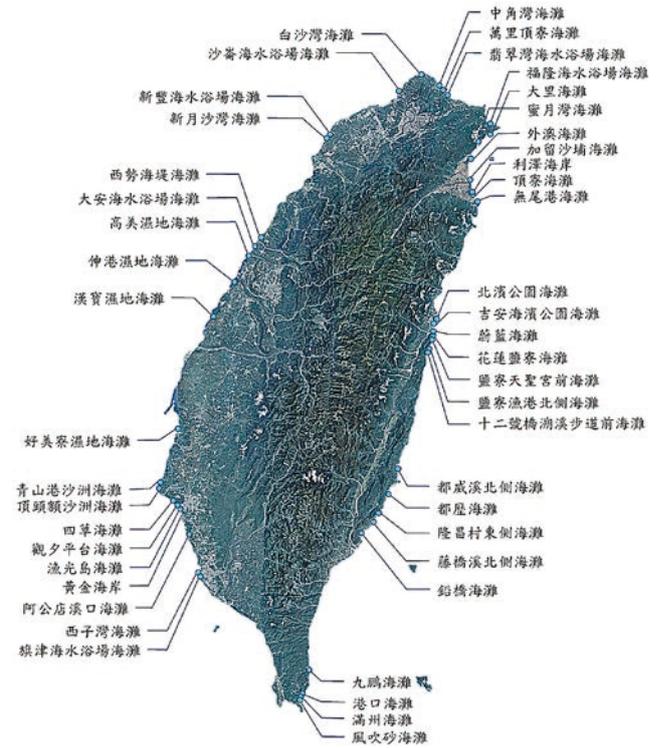


圖 9 全台灣裂流發生潛勢區域
(資料來源：1494 張衛星影像；資料時間：2013 ~ 2017 年)

統計裂流發生的延時（即裂流發生的持續時間），裂流發生的延時最短不到 1 小時，最長則可達 10 小時，例如 2021 年 12 月 15 日於 R6 位置所發生的裂流，從早上 6 時至下午 15 時均有明顯的碎波帶斷裂情形。此外，本研究透過計算碎波帶斷裂處的平均寬度，對裂流的流幅（即裂流的寬度）進行統計，結果顯示裂流的寬度介於 20 m 至 80 m 間。

結論

裂流是海岸常見的自然災害，但由於觀察的不易，裂流案例的缺乏，至今對於裂流發生的機制和條件仍尚未明瞭。為能得到更加完善的裂流案例進行裂流相關研

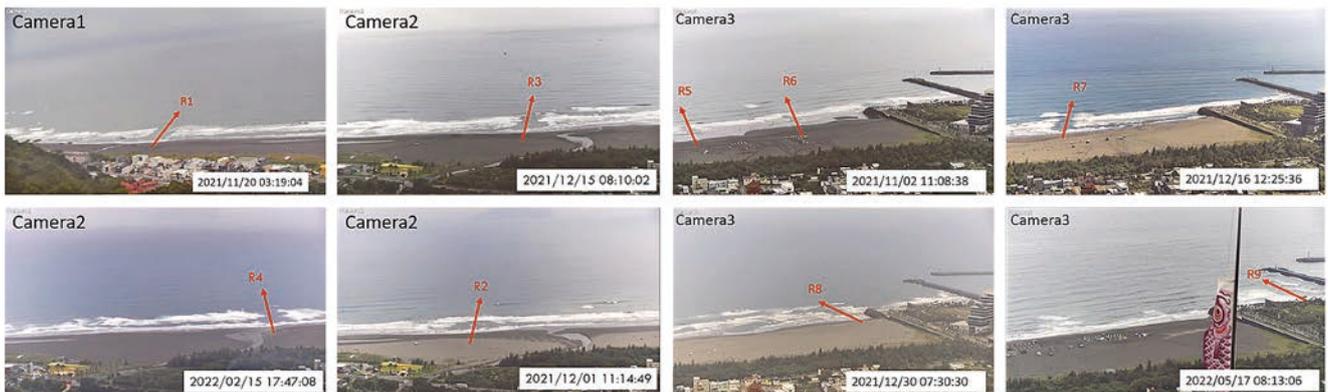


圖 10 外澳海灘裂流發生位置示意圖

究，本研究彙整過去文獻中提及可用於裂流觀測的方法，並提出一套可從光學影像中判釋裂流的方法，同時亦進一步對裂流的特徵進行分析和探討。本研究蒐集近二十年來國內外有關於裂流觀測技術的文獻，並基於觀測所使用的儀器和方法將其歸納為 5 種，分別為 (1) 質點追蹤法、(2) 直接測量法、(3) 拉格朗日測量法、(4) 影像流場反算法和 (5) 裂流影像特徵法。而本研究採用裂流影像特徵法建立了一套裂流影像判釋方法，並參考 Longust-Higgins and Stewart^[27] 所提出之裂流發生機制，以及彙整文獻中觀測到裂流發生的特徵，提出四個裂流影像判釋準則。經驗證該方法判釋的正確率達 82%，顯示此分析方法可正確地從影像中得到裂流案例，同時亦應用於台灣海岸周遭的衛星影像與岸上監視站影像，分析 2013 年至 2017 年共計約 8000 多張的衛星影像結果中取得 712 筆案例，歸納後多數案例發生在 46 處海灘，包含新北市福隆海灘、宜蘭縣外澳海灘和台南市漁光島海灘等多處熱門遊憩景點，且在大多案例中可以發現同一海域同一時間會出現多個裂流渠道。在岸上監視站影像分析上，從 2021 年 11 月至 2022 年 5 月 2376 個小時中，有 186 個小時有裂流發生，共計有 73 筆案例，並發現裂流出現的延時從最短不到 1 個小時，最常則可達到 10 小時，而裂流的寬度則介於 20 ~ 80 m 間。本研究蒐集裂流觀測相關文獻，並提出一套自動化裂流影像判釋方法，經測試可從影像中得到裂流案例。後續若能於海岸廣泛架設光學影像監測站或取得更多衛星影像資料，便可自動化蒐集大量的裂流案例，提供裂流相關研究甚至是建置預警系統的基石。

誌謝

本論文係中央氣象局研究計畫「海岸裂流監測與預警技術研究 (2/3)」之研究成果，承蒙中央氣象局經費之補助使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

參考文獻

- Lushine, B.J. (1991), A study of rip current drownings and related weather factors. Nation Weather Service Forecast Office, 13-19.
- 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.
- Shepard, F.P., Emery, K.O., and LaFond, R. 1941. Rip currents, a process of geological importance. *J. Geol.*, 49 (1941), pp. 337-369.
- Huntley, D.A., Hendry, M.D., Haines, J., and Greenidge, B. (1988), Waves and rip currents on a Caribbean pocket beach, Jamaica. *Journal of Coastal Research*, 4 (1) 69-79. Char-lottesville (Virginia) ISSN 0749-0208.
- 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.
- 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.
- Brander, R.W.(1999), Field observations on the morphodynamic evolution of low wave energy rip current system. *Mar. Geol.* 157, 199-217.
- Dalrymple, R.A., MacMahan J.H., Reniers A.J.H.M., Nelko V. (2011), Rip currents. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 43:551-81.
- Akila, D.S., Mori, I., Dusek, G., Davis, J., and Pang, A. (2021), Automated Rip Current Detection with Region based Convolutional Neural Networks. *Coastal Engineering* 166, 103859.
- Guza RT, and Thornton EB. (1989), Measuring surf zone dynamics: A. General measurements. In *Nearshore Sediment Transport*, ed. RJ Seymour, pp. 51-60. New York: Plenum.
- Stockdon HF, and Holman RA. (2000), Estimation of wave phase speed and nearshore bathymetry from video imagery. *J. Geophys. Res.* 105:22015-33.
- Shepard FP, and Inman DL. (1950), Nearshore circulation related to bottom topography and wave refraction. *Trans. Am. Geophys. Union* 31:196-212.
- MacMahan J, Brown J, Thornton E. (2009), Low-cost handheld global positioning system for measuring surfzone currents. *J. Coast. Res.* 25:744-54.
- Bowman D, Rosen D.S, Kit E, Arad D, and Slavicz A. (1988), Flow characteristics at the rip current neck under low energy conditions. *Marine Geology*. Vol. 79, Issues 1-2, pp. 41-54.
- Bruneau N., Castelle B., Bonneton P., Pedreros R., and Almar R. (2009), Field observations of an evolving rip current on a meso-macrotidal well-developed inner bar and rip morphology. *Cont. Shelf Res.* 29:1650-62.
- Johnson D, Stocker R, Head R, Imberger J, and Pattiaratchi C. (2003), A compact, low-cost GPS drifter for use in the oceanic nearshore zone, lakes, and estuaries. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 18:1880-84.
- Schmidt W, Woodward B, Millikan K, Guza R, Raubenheimer B, and Elgar S. (2003), A GPS-tracked surf zone drifter. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 20:1069-75.
- Gallop, S.L.; Bryan, K.R.; Pitman, S.J.; Ranasinghe, R., and Sandwell, D., 2016. Pulsations in surf zone currents on a high energy mesotidal beach in New Zealand. *Journal of Coastal Research, Special Issue No. 75*, 379.
- 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.
- Austin, M.J., Scott, T., Brown, J., Brown, J., MacMahan, J., Masselink, G. and Russell, P. (2010), Temporal observations of rip current circulation on a macrotidal beach. *Continental Shelf Research* 30 (2010) 1149-1165.
- Farquharson G., Frasier B., Raubenheimer B., and Elgar S. (2005), Microwave radar cross sections and Doppler velocities measured from the surf zone. *J. Geophys. Res.* 110:C12024.
- Punzo, M., Lanciano, C., Tarallo, D., and Bianco, F. (2016), Application of X-Band Wave Radar for Coastal Dynamic Analysis: Case Test of Bagnara Calabra. *Journal of Sensors*, Volume 2016, Article ID 6236925, 9.
- Chickadel C., Holman R., and Freilich M. (2003), An optical technique for the measurement of longshore currents. *J. Geophys. Res.* 108:3364.
- Cohen A. (2005), Video-derived Observations of Longshore Current. *Coastal Engineering* 2004, pp. 1468-1479.
- Holman RA, and Stanley J. (2007), The history and technical capabilities of Argus. *Coast. Eng.* 54:477-91.
- Holman RA, Symonds G, Thornton EB, and Ranasinghe R. (2006), Rip spacing and persistence on an embayed beach. *J. Geophys. Res. C Oceans* 111:C01006.
- 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.
- Lippmann TC. and Holman RA. (1990), The spatial and temporal variability of sand bar morphology. *J. Geophys. Res.* 95:11575-90.
- Short, A.D. (1985), Rip current type, spacing and persistence, Narrabeen Beach, Australia. *Mar. Geol.*, 65, pp. 47-71.
- Aagaard, T., Greenwood, B., and Nielsen, J. (1997), Mean currents and sediment transport in a rip channel. *Mar. Geol.* 140, 24-45.
- Brander, R.W. and Short, A.D. (2000), Morphodynamics of a large-scale rip current system at Muriwai Beach, New Zealand. *Mar. Geol.* 165, 27-39.
- Maryan, C.C. (2018), Detecting Rip Currents from Image. University of New Orleans.
- Wright, L.D. and A.D. Short. (1984), Morphodynamic variability of surfzone and beaches: a synthesis. *Marine Geology*, 56, 93-118.
- Lascody, R.L. (1998), East central Florida rip current program. *National Weather Digest*, Volume 22, 25-30.

