



結合近海漂沙觀測與ROMS模式探討 河口泥沙傳輸過程 — 以卑南溪為例

鮑俊宏 / 國立成功大學水利及海洋工程學系 博士候選人

陳佳琳 / 國立成功大學水利及海洋工程學系 助理教授

施孟憲 / 國立成功大學近海水文中心 研究助理

廖敬元 / 國立成功大學水利及海洋工程學系 碩士

河川由上游帶至下游的土砂為海岸漂砂之砂源提供來源之一，而河口與海岸漂砂機制影響海岸地形侵淤變化，同時攸關砂灘後側的海岸防護設施安全，本文透過一套可以自動且長期觀測漂砂之實測資料以及三維數值模式 ROMS (Regional Ocean Modeling System)，據以探討河道漂砂與海岸漂砂之間的關係，瞭解河道漂砂入海後之運移情形。實測數據指出不論卑南溪口北側或南側海域底床附近之漂砂懸浮載濃度約介於 100 ~ 300 mg/L 之間，南站略高於北站。再以數值模式設定 3 個案例進行模擬，分別模擬冬季平時基流量 (案例 1)、一般颱風期間 (案例 2)、以及極端颱風期間 (案例 3)。模擬結果顯示：在冬季基流期因流量較小，河口之沈積物懸浮濃度偏低，地形變化受河口輸砂影響幾乎可以忽略不計，此時期地形變化尺度遠小於颱風時期之變化尺度。一般颱風期間河口的懸浮值濃度可達 4,380 mg/L，其他時期懸浮值濃度皆小於 100 mg/L。極端颱風模擬結果顯示，河口表層濃度之高懸浮載濃度 (> 10g/L)，伴隨高流速作用下可傳送至外海；河口底層較高濃度沈積物造成之地形變化，受潮流方向和科氏力之影響，模擬結果顯示其輸砂方向偏南。

關鍵詞：河口漂砂、漂砂觀測、ROMS、卑南溪口

前言

小型河流向全球海洋輸送大量陸源沉積物，並影響著長短期海岸及海床特徵。特別是高濃度的沉積物堆積時可能引發海底土石流並伴隨發生高濃度濁流，這在某些沿海地區經常觀察到^[1]。一個很好的例子是台灣山區的小河流，每年輸送 1.8 至 3.8 億噸來自陸源的沉積物^[2-4]。特別於颱風季節時，大量河水和沈積物從陸地排出，此時河流洪水和沈積物量體大於旱季好幾個數量級，造成海岸地形劇烈變遷^[5,6]。海岸地形變遷為一複雜的海岸動力過程，受當地地形、氣象、海象

及人為結構物等影響，特別是河口地區更有地形、漂砂與水動力機制間彼此交互作用，地形變動更會進一步改變水動力機制，進而影響河川輸砂入海之型態^[7]。

泥砂依其運動方式主要分成懸浮載 (suspended load) 與底床載 (bed load) 兩部分。底床載為靠近底床以滾動、滑動、或躍動方式運移之沈滓；懸浮載則為距離底床較遠，懸浮於水流中，隨水流被攜往下游運動之沈滓。懸浮載通常為粒徑較小之沈滓，其運動速度大致與水流速度相同，但在水深方向之濃度分佈並不均勻，通常靠近水面附近之懸浮載濃度較靠近底床附近者為

小。因底床載觀測不易，其觀測資料在時間及空間上之代表性低；相較之下，懸浮載觀測採樣技術較成熟、觀測可行性較高，並可藉由懸移質泥砂濃度（Suspended Sediment Concentration, SSC）推估底床載泥砂輸移量，進而推估河道泥砂總載輸移量。但在天然水體之現地觀測環境，懸浮載觀測技術之即時與自動化仍有許多瓶頸，現階段之懸浮載觀測仍偏重於人工操作^[8]，因此現階段發展漂砂自動作業化觀測有其重要性。

現場漂砂觀測實務上常受限於經費，僅能在少數點位進行觀測，難以全面佈點。因此要瞭解河川輸送至海域的漂砂運移過程，數值模式是最好的方式之一。透過數值模式之模式可精細地模擬整個時空過程，對於河川漂砂的運移能有詳細地分析。如運用 Princeton Ocean Model (POM) 模式配合現場觀測資料，探討曾文溪河口淡水和懸浮沈積物濃度於兩組颱風事件高流量時之濃度擴散行為，可看出河口舌流（river plum）的擴散趨勢是受潮汐與風的交互作用所主導，並指出高潮與低潮期間，河口舌流會有不同的傳輸方向^[9,10]。

台灣東部由於河川陡峭，於颱風暴雨期間常常挾帶豐沛土石流入海洋，成為補充沿岸漂砂最大之來源，又因東部海岸坡度水深，河川輸砂瞬間即為海流輸送至深溝處，造成沿岸補充不易而引發侵蝕問題。陳文俊等人^[11]之研究指出台東縣境內主、次要及普通河川共約有 30 條，其中最主要的河系分別是卑南溪、太麻里溪等，因其輸砂量大，河口外側形成廣大三角洲，卻因東部海岸坡度水深，河川輸砂瞬間即為海流輸送至深溝處，造成沿岸補充不易而引發侵蝕問題。另指出台東海岸漂砂數量及運移方向之觀測記錄較為缺乏，更應加強此一方面的觀測規劃。因此本研究以卑南溪為標的，建置漂砂自動作業化觀測系統。囿於觀測點位較無法全面性解析整體輸砂動態，因此本研究採用廣泛應用於近岸河口等海域之海洋學^[12-14]區域海洋模式 ROMS (Regional Ocean Modeling System)，結合 2019 年於卑南溪口之現場作業漂砂觀測數據，共

同研討河口輸砂時空分佈現象，提供未來海岸工程設計之相關參考依循。

研究方法

本研究以卑南溪為例，發展自動化海域漂砂觀測系統，並以三維數值模式結合其河川水文特性與海岸漂砂等各項監測數據，釐清河口輸砂與海岸漂砂之相關性，進而解析台灣東部河口之輸砂時空分佈特性。

研究區域

卑南河流域面積約 1,603 平方公里，主流全長約 84.35 公里，河床平均坡降約 1/165，其河面遼闊、河水流量豐富，其支流的沖積扇於花東縱谷中規模僅次花蓮流域。

現場觀測

河道漂砂觀測

本研究蒐集經濟部水利署水利規劃試驗所「卑南溪河口海岸地形變遷趨勢評估基本資料補充調查」^[15]調查卑南溪河口漂砂資料，該調查分別於夏季、颱風季和冬季進行懸浮質漂砂濃度調查（每次僅量測 24 小時），有關河川流速、懸浮質調查、中值粒徑、輸砂量成果如表 1，據以作為數值模式相關參數使用。

河川水位、流速與海域漂砂觀測

經濟部水利署水利規劃試驗所「卑南溪河口輸砂及海岸漂砂連續監測及相關性研究」^[16]發展自動化海域漂砂觀測系統，此系統與河川量測系統不同，因其錨碇於海底必須有良好水密性，且海底觀測資料無法即時傳輸，因此設置即時傳輸浮球，將觀測結果每小時即時回傳。觀測系統包含：(1) 儀器支架載台；(2) 具水密性之控制與電力系統；(3) 感測器元件以及 (4) 即時傳輸浮球（架構如圖 1）。其中感測器之漂砂濃度量測採用雷射粒徑濃度儀 LISST-Acoustic Backscatter Sensor（簡稱 LISST-ABS）、流速量測使用聲波式都卜勒流速儀 AUQADOPP，

表 1 卑南溪河道流速及懸浮質調查表

期間	流量 (cms)	懸浮質濃度 (mg/L)	中值粒徑 (μm)	輸砂量 (公噸)
夏季	39 ~ 50	768 ~ 3,671	12 ~ 13	7,955
颱風豐水期	1,123 ~ 1,699	河道 10,494 ~ 16,876	15 ~ 24	1,447,000
		河口北側 310 ~ 6,710		
		河口南側 130 ~ 4,380		
冬季	96 ~ 108	1,663 ~ 4,694	28 ~ 29	27,394

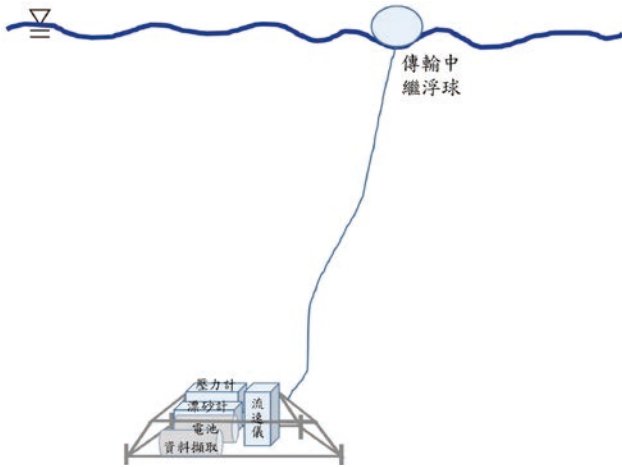


圖 1 卑南溪口海域漂沙觀測系統架構圖



圖 2 卑南溪口海域漂沙觀測點位示意圖

潮位和波浪變化則使用壓力計 JTK-620 型號，再透過零切法 (zero-crossing method) 分析得波高和週期。

為探討河口泥沙傳輸現象，於卑南溪口南北各設置一處海域漂沙觀測點位如圖 2，分別完成了 36 與 42 日之累積觀測日數。觀測期間底床懸浮載濃度皆介於 100 ~ 300 mg/L 之間 (圖 3)，而白鹿颱風期間 (2019 年 8 月 23 日同日發布並解除海上路上颱風警報) 曾測得 3,772 mg/L (圖 4(c))。

為分析整體河川輸砂動態，同時於鄰近出海口之台東大橋佈設河川輸沙觀測點，與海域同步觀測。從

其水位時序列觀測圖 (如圖 4(a))，可見颱風前最低水位為 26.05 m，受白鹿颱風主要的降雨自 8 月 24 日上午開始發生，因此水位自 24 日起明顯驟升，25 日達峰值最高水位為 30.07 m，整體降雨為卑南溪河川水位抬升了 4.02 m。再從流速時序列觀測圖 (如圖 4(b)) 可知平時河川表面流速不及 1 m/s，當小幅度降雨發生時 (如 8 月 10 日前後)，流速略升高至 3 m/s 上下，而颱風期間暴雨導致之洪峰表面流速最快達 6.59 m/s。巨量且湍急之洪水衝擊下終造成海域漂沙觀測儀器於 8 月 25 日上午後遺失 (如圖 4(c))。

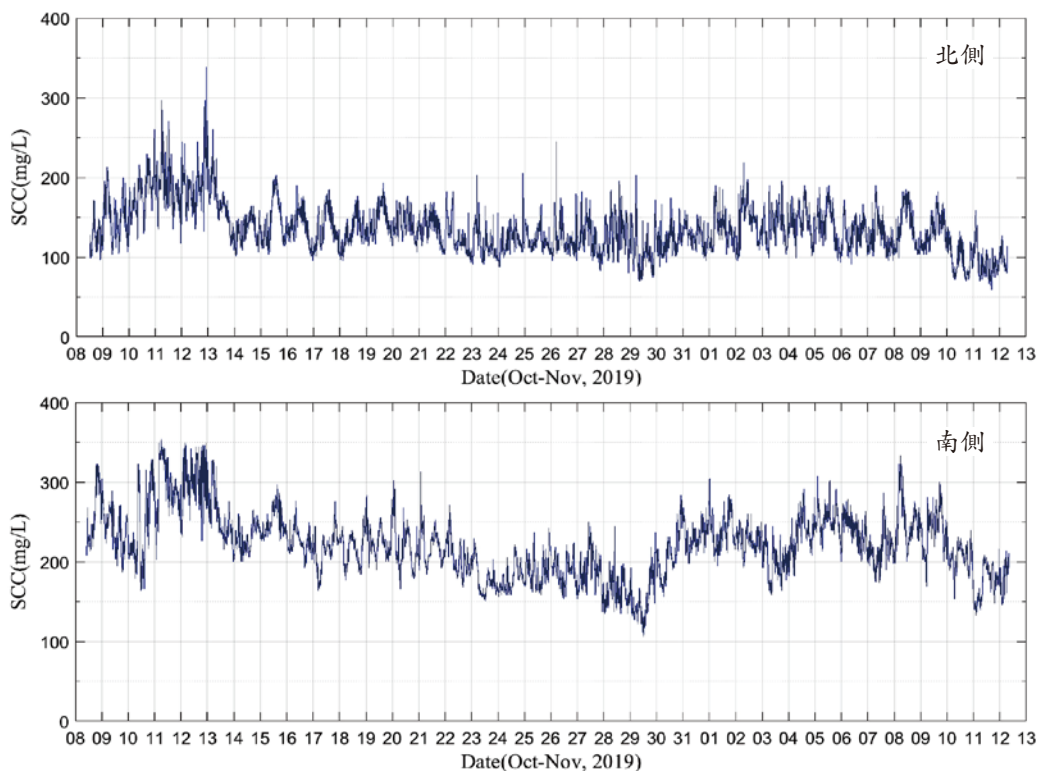


圖 3 卑南溪河口南北側海域 (2019/10/8-2019/11/12) 觀測時序列圖

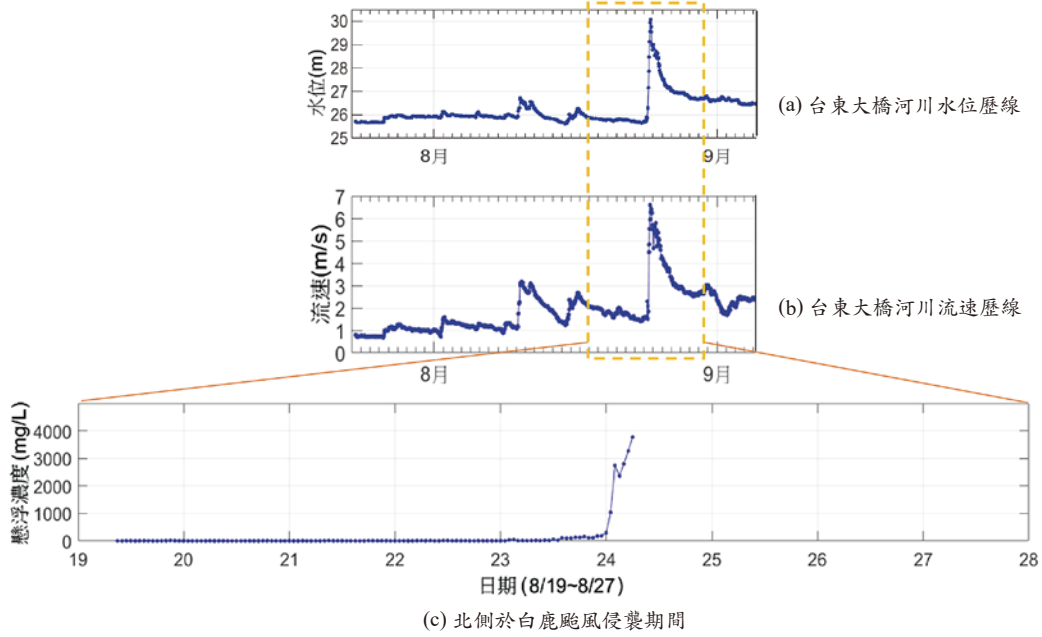


圖 4 卑南溪河口水位、流速歷線與海域懸浮濃度於白鹿颱風期間時序列觀測圖

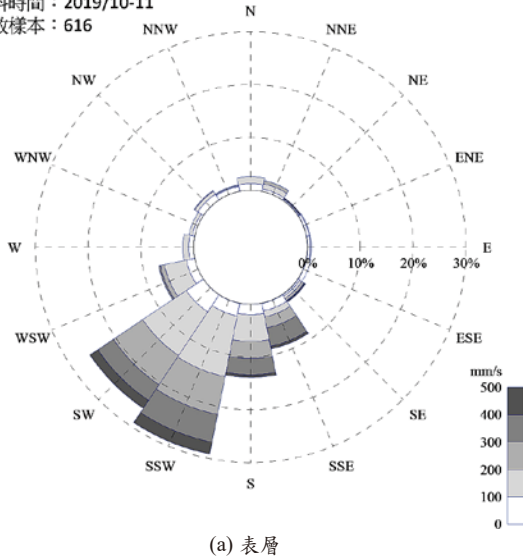
海域流速觀測

前揭海域觀測站點同時紀錄水位、波高、流速、流向等資料，為討論流速與流向對於輸沙之影響，以玫瑰圖分別展示北側站點和南側站點於表層與底層流速之分布如圖 5 和圖 6。二者之表層流速較底層劇烈，而北側海域流向多為西南向與南南西向，整體水流顯著向南；南側海域流向多為東北與西南向，較強流速經潮位比對可知發生於新月前幾天，且往東北向之流速分量明顯高於向南分量。

泥沙傳輸數值模式

本文的數值模式是採用 ROMS 三維模式，李汴軍等人^[7]指出 ROMS 也是採用靜水壓的原始方程組 (RANS equations)，為了簡化方程式 ROMS 運用了兩個假設：第 1 個假設為水體內部的密度差異可以忽略，除非這個差異是由重力所引起，此為布氏近似 (Boussinesq approximation)；第 2 個假設為流體的重量與其壓力梯度平衡，即為靜力假設 (hydrostatic assumption)。此模式可以模擬不同尺度的運動，例如全球尺度的環流模擬、中尺

測站名稱：卑南溪北岸(表層)
資料時間：2019/10-11
有效樣本：616



測站名稱：卑南溪北岸(底層)
資料時間：2019/10-11
有效樣本：835

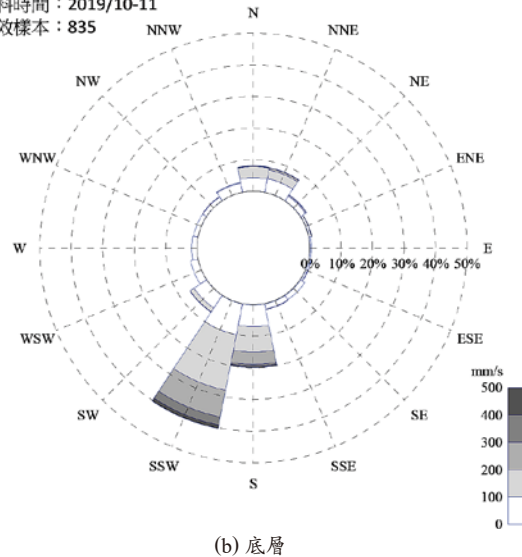


圖 5 卑南溪河口北側海域之流速分布 (觀測時間：2019/10/8-11/12、流向定義為流去方向)

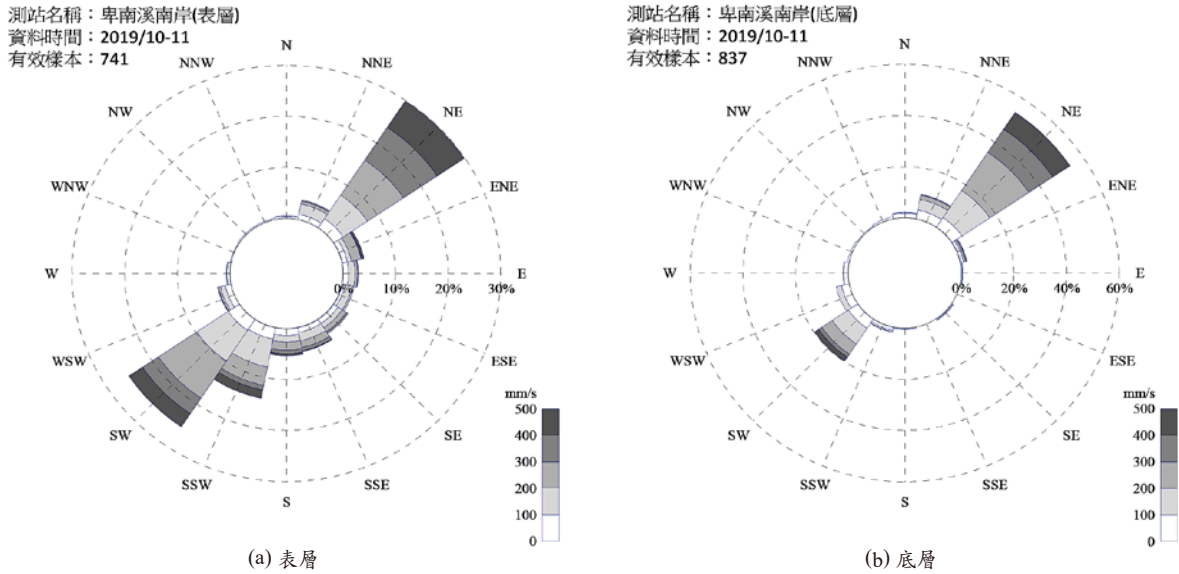


圖 6 卑南溪河口南側海域之流速分布 (觀測時間：2019/10/8-11/12、流向定義為流去方向)

度由氣象因素或是天文潮所引起的水位與流場變化，也可以計算小尺度河川渠道等的水理運動，可適用於推算河口表層與底層等不同垂直向之泥沙濃度分布。前人研究如 Warner *et al.* [18] 曾使用該模式，成功模擬美國喬治亞州溼地（河海交界）之案例。Liu *et al.* [19] 亦曾應用 ROMS 模擬美國路易斯安那州南端海域，並與現地實測之鹽度進行驗證，據以探討 Atchafalaya 河口至近海船型淺水域之泥沙傳輸現象。研究發現於 1 年的模擬期間下，源自河川渠道的泥沙幾乎不會直接沉積於外海淺水區，反而多半是於河口—堰洲島（Barrier Island）—淺灘之間的動態循環，堰洲島群最西側的浣熊島（Raccoon Island）附近水域在接近水體底部的懸浮濃度值普遍較高。

模式數值地形

為模擬卑南溪出海後的泥沙傳輸動向與周遭地形之交互作用，依據卑南溪出海口實測地形水深資料，建構數值地形（如圖 7）供模式使用。黑色線為等深線，深度每 50 公尺增加一條，並且一直延伸到深海水深八百米區域。河口區域網格經過加密處理，垂直網格分為 20 層（sigma-coordinate），水平網格 dx 最小為 56.9 公尺，dy 最小為 55.6 公尺，時間步距為 10 秒。

起始與邊界條件

模式的三個開放邊界以 OSU（Oregon State University）的 Tidal Model Driver（TMD）（Martin *et al.* [20]）所提供之調和常數與全球潮位預報相對應時間之潮位水位，以作為邊界條件。潮汐變化是依據模式所設定之計算區域邊界坐標之 K1, O1, P1, Q1, K2, M2, N2,

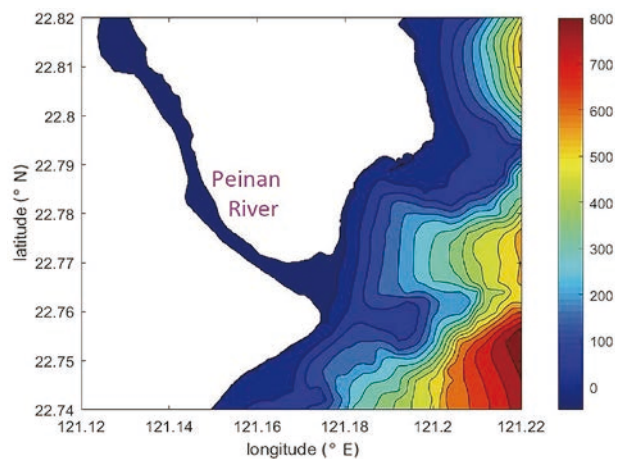


圖 7 數值模式 ROMS 中卑南溪數值地形圖

S2 等十三項分潮組合推估的天文潮位，做為潮汐邊界條件。與富岡漁港之實測水位所求得之調和常數相比，TMD 提供之北邊界振幅較富岡漁港之振幅小，但差距皆在 10 cm 以內。陳佑廷 [21] 曾使用 TMD 模式與台灣沿海 28 個潮位站之調和常數進行比較，經計算預報水位與實測水位其相關係數在西海岸可達 0.98。

結果與討論

為探討不同期間之河口輸沙分佈，本研究分 3 種情境模擬（如表 2），分別為案例 1 冬季基流期、案例 2 一般颱風事件、案例 3 特殊颱風事件，起始流量位置為卑南溪立吉橋，而起始流量、懸砂濃度以及沉積物粒徑分佈皆參考表 1 之實測資料所設定，D50 皆設為 15 μm ，模擬情境時間皆為 24 小時。

表 2 模擬情境對應流量與懸砂濃度

CASE	模擬情境	起始流量 (CMS)	懸砂濃度 (g/L)	圖面展示
案例 1	冬季基流期	108	5	表層分佈
案例 2	一般颱風事件	1,700	17	表層 / 底層 (高 / 低潮)
案例 3	特殊颱風事件	3,000 (參考 2005 年海棠颱風期間觀測結果)	35 (參考歷年流量與輸砂量之迴歸公式)	表層 / 底層 (高 / 低潮)

冬季情境模擬結果

模擬結果皆顯示河口含沙量低於 1 g/L，與實測結果相符。圖 8 顯示案例 1 模擬結果，該圖包含四個子圖，分別顯示 (a) 水體表層懸砂濃度、(b) 地形變化、(c) 表層鹽度及 (d) 深度平均流速之空間分佈結果。結果可發現冬季基流期間由於河川流速較小，河口流速受潮流作用明顯，退潮時期河口流速增大，方向向外，有助於傳輸河口沈積物至沿海區域，由於此處分潮振幅較小，造成之潮流速度亦不大，此時期之地形變化尺度遠小於颱風時期之變化尺度。

一般颱風情境模擬結果

探討案例 2 颱風期間卑南溪之輸砂過程，案例 2 模擬之第 4 個小時結果如圖 9，從該結果可知，海水與淡水混和之交界鹽度約為 20 ppm 左右，在出海口處，隨著時間的推演，河川淡水會從河口處向海洋大面積擴散，使得周圍表層海水鹽度逐漸降低，離河口越遠鹽度越高，而從水體表層懸砂濃度分佈圖（圖 9(a)）可

知，河道中斷面較狹窄處至出海口這一段的懸砂濃度（接近 20 g/L）比源頭（17 g/L）更高，從底床地形變化推斷，高濃度懸浮載源自於被刷深之河道，除了上游源頭提供之沈積物之外，河道亦提供了懸浮沈積物至下游河口。

模擬第 7 個小時結果如圖 10，出海口之懸砂濃度達到 5 g/L 左右，模擬結果顯示颱風期間，河口附近懸浮值濃度最高達 4.38 g/L，此濃度對比表 1（河口南北側）調查資料尚為合理。

圖 11 顯示第 24 小時的模擬結果，可知河川內水體表層的鹽度接近 0 ppm，代表此時河川內幾乎為淡水無海水，而在出海口附近，100 公尺等深線上方之表層海水鹽度降到 5 ppm 左右，由於懸浮沉積物多分佈於底層而非表層，河川夾帶著懸浮沉積物流出海後，從河口處向海洋擴散，不過在接近出海口處，因流速減緩，河流之承載能力下降，造成底層懸浮濃度下降，表層懸浮濃度提高形成羽狀流，沉積物在出海口附近積聚，造成河口之地形改變。

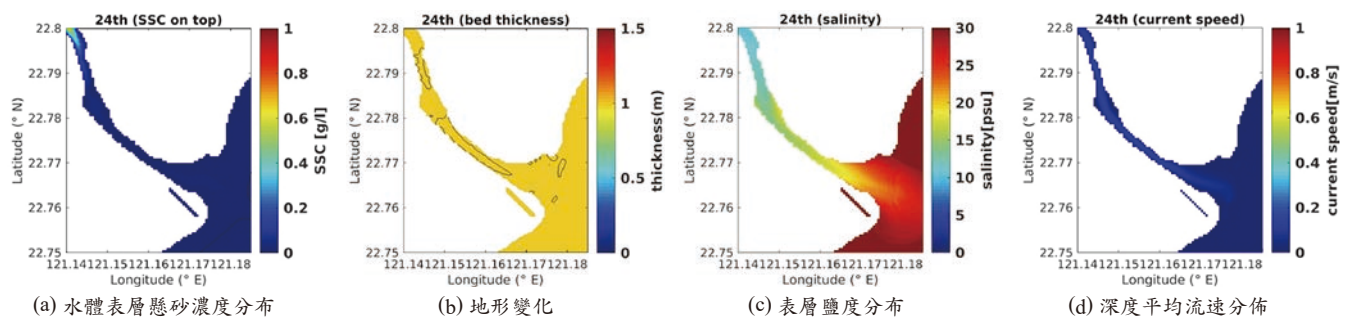


圖 8 案例 1 冬季基流期間第 24 小時模擬結果

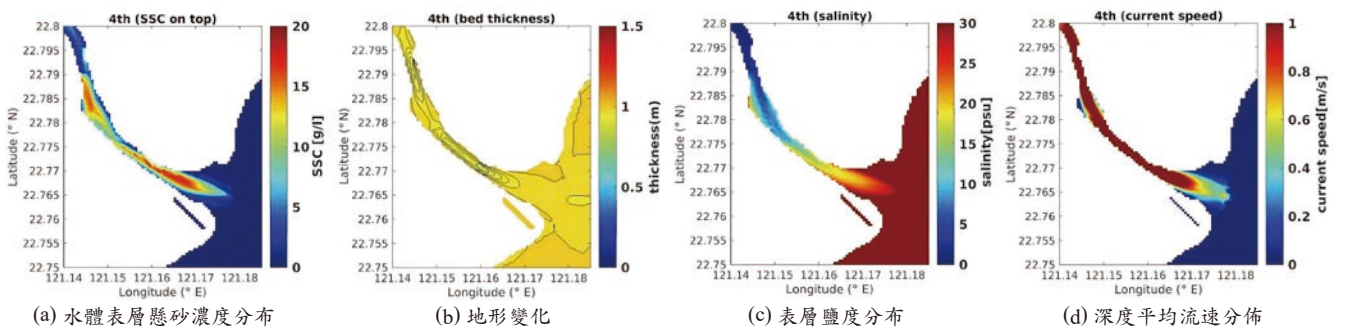


圖 9 案例 2 颱風期間第 4 小時模擬結果

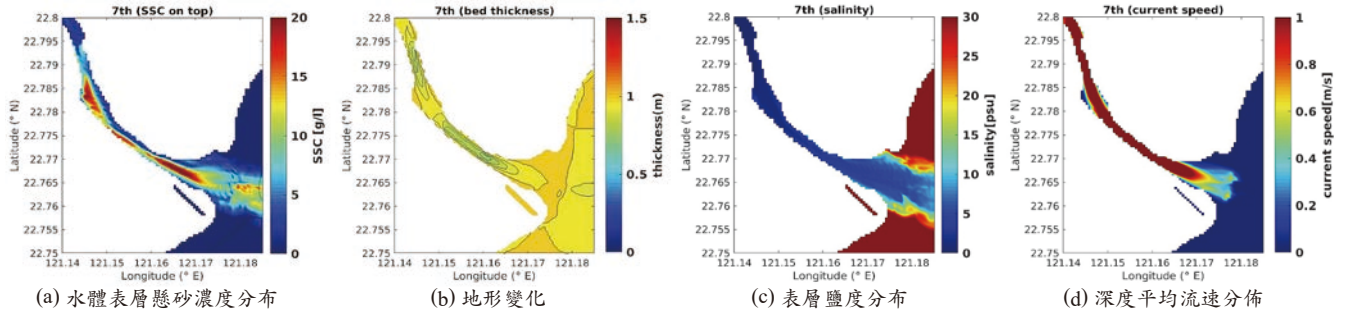


圖 10 案例 2 颱風期間第 7 小時模擬結果

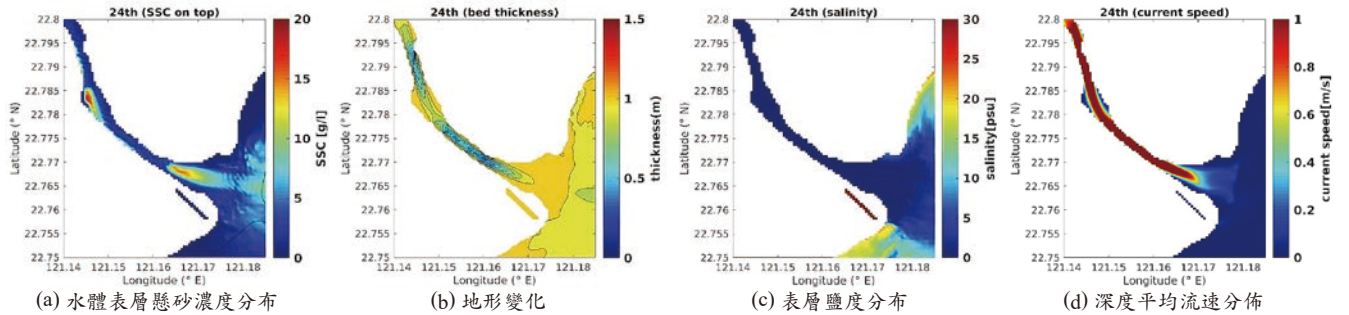


圖 11 案例 2 颱風期間第 24 小時模擬結果

另就高低潮時期探討不同垂直向之懸砂濃度分佈情形。首先為表層懸砂濃度圖（高潮：圖 12(b)，低潮：圖 12(d)），表層濃度之懸浮載濃度可藉高流速 (> 2 m/s) 傳遞至外海。再從底層懸砂濃度圖（高潮：圖 12(a)、低潮：圖 12(c)）中發現，在河口處由於地形擴張流速減緩，底層懸砂濃度由 20 g/L 下降至 5 g/L 以下，表層懸砂濃度由速度較快之表層沖淡水帶往外海且濃度不高（約為 < 5 g/L），河川輸砂主要影響中下游河道部分之地形變遷較明顯，但對河口海岸部分之影響較為有限。

極端颱風情境模擬結果

案例 3 以 2005 年海棠颱風期間尖峰流量約為 3,000 cms，作為數值模式中卑南溪的代表例子。從表層懸砂濃度圖（圖 13(b)、13(d)）中可知，表層濃度之高懸浮載濃度 (> 10 g/L) 可藉高流速 (> 2 m/s) 影響可傳遞至外海。因地形的作用，河口部分較淺或較狹窄處模擬之表面流速可達 4 m/s。從底層懸砂濃度圖（圖 13(a)、13(c)）中發現，河道中斷面較狹窄處至出海口前的懸砂濃度比源頭更高 (> 40 g/L，超過異重流發生之臨界

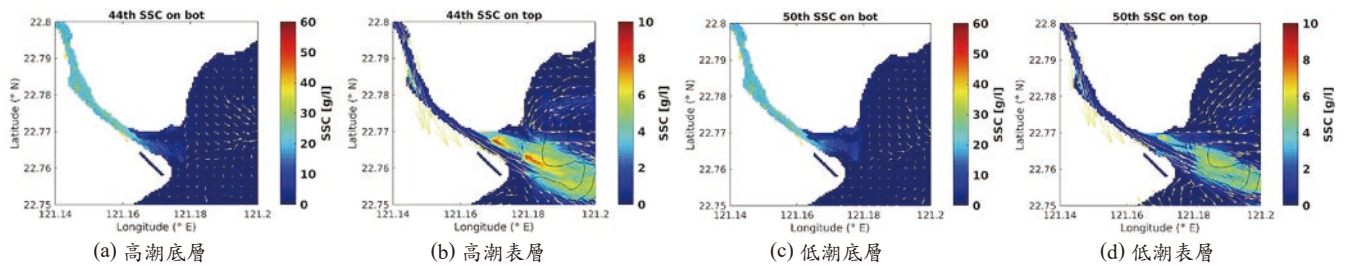


圖 12 案例 2 在高低潮時期懸砂濃度底層與表層分佈圖

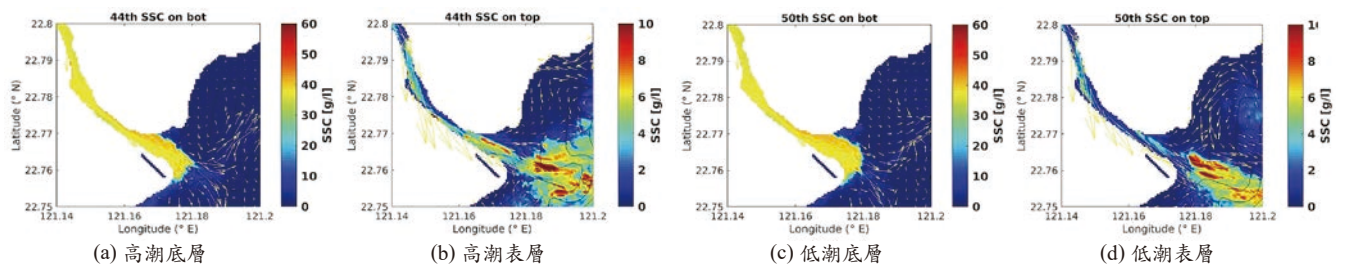


圖 13 案例 3 在高低潮時期懸砂濃度底層與表層分佈圖

值)。從底床地形變化推斷除來自上游之砂源外，河道亦提供大量砂源至河口，且多數高濃度之沈積物沈積於河口處並形成河口砂洲。受沈積物造成之地形變化及潮流方向和科氏力之影響，模擬結果顯示河口底層之較高濃度輸砂方向偏南，推斷卑南溪上游之輸砂可補充河口南側的砂源。

結論

為瞭解卑南溪河道漂砂入海後之運移與分布，本計畫使用 ROMS 數值模式進行模擬，並設定 3 種情境進行模擬，模擬結果顯示：

1. 非颱風時期因流量小，河口懸砂濃度偏低，地形變化受河口輸砂影響幾可忽略不計，此時地形變化主要由潮汐及波浪作用所主導。
2. 颱風期間河口的懸浮值濃度可達 4,380 mg/L，其他時期懸浮值濃度皆小於 100 mg/L。
3. 颱風期間，河道會因較強流速而有刷深現象且供給砂源，但河口流速因河道變寬而減弱，造成沈積物堆積於河口附近。
4. 極端颱風波浪模擬結果顯示，河口表層濃度之高懸浮載濃度 ($> 10 \text{ g/L}$)，伴隨高流速作用下可傳送至外海。河口底層較高濃度沈積物造成之地形變化，受潮流方向和科氏力之影響，模擬結果顯示其輸砂方向偏南。

誌謝

本研究係經濟部水利署水利規劃試驗所「卑南溪河口輸砂及海岸漂砂連續監測及相關性研究」(計畫編號：MOEAWRA1081101N) 計畫案之研究成果，感謝水利規劃試驗所經費支持，使研究得以順利完成，謹致謝忱。

參考文獻

1. Osadchiv, A. A., Korotenko, K. A., Zavialov, P. O., Chiang, W.-S., and Liu, C.-C. (2016), "Transport and bottom accumulation of fine river sediments under typhoon conditions and associated submarine landslides: case study of the Peinan River, Taiwan," *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 16, 41-54.
2. Dadson, S., Hovius, N., Pegg, S., Dade, W. B., Horng, M. J., and Chen, H. (2005), "Hyperpycnal river flows from an active mountain belt," *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 110, F04, 016.
3. Kao, S.-J., Chan, S. C., Kuo, C. H., and Liu, K. K. (2005), "Transport-dominated sediment loading in Taiwanese rivers: a case study from the Ma-an Stream," *J. Geol.*, 113, 217-225.
4. Kao, S.-J., Jan, S., Hsu, S.-C., Lee, T.-Y., and Dai, M. (2008), "Sediment budget in the Taiwan Strait with high fluvial sediment inputs from mountainous rivers: New observations and synthesis," *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 19, 525-546.
5. Warrick, J. A. and Milliman, J. D. (2003), "Hyperpycnal sediment discharge from semiarid southern California rivers: implications for coastal sediment budgets," *Geology*, 31, 781-784.
6. Mirabito, C., Haley Jr., P., Lermusiaux, P. F. J., and Leslie, W. G. (2012), "A River Discharge Model for Coastal Taiwan during Typhoon Morakot", Rep. MSEAS-13, MIT, Cambridge, MA.
7. Zhang, M., Townend, I., Zhou, Y. X., and Cai, H. Y. (2016), "Seasonal variation of river and tide energy in the Yangtze estuary, China," *Earth Surface Process and Landforms*, Vol. 41, pp. 98-116.
8. 許盈松、蔡俊鋒、魏綺瑪、黃宏甫 (2007)，「水庫泥沙濁度與濃度率定關係研究—以石門水庫為例」，農業工程學報，第 53 卷，第 1 期。
9. Korotenko, K., A. Osadchiv, P. Zavialov, R. Kao, and C. Ding, (2014), "Effects of bottom topography on dynamics of river discharges intidal regions: Case study of twin plumes in Taiwan Strait." *Ocean Sci.* 10: 863-879.
10. Liu, J., S. Chao, and R. T. Hsu, (2002), "Numerical modeling study of sediment dispersal by a river plume," *Cont. Shelf Res.* 22: 1745-1773.
11. 陳文俊、郭金棟 (2005)，「台東海岸線變遷分析」，第 27 屆海洋工程研討會論文集。
12. Flores, R. P., Rijnsburger, S., Horner-Devine, A. R., Kumar, N., Souza, A. J., and Pietrzak, J. D. (2020), "The formation of turbidity maximum zones by minor axis tidal straining in regions of freshwater influence," *Journal of Physical Oceanography*, 50(5), 1265-1287.
13. Moriarty, J. M., Harris, C. K., and Hadfield, M. G. (2014), "A hydrodynamic and sediment transport model for the Waipaoa Shelf, New Zealand: Sensitivity of fluxes to spatially-varying erodibility and model nesting," *Journal of Marine Science and Engineering*, 2(2), 336-369.
14. Warner, J. C., *et al.* (2005), "Numerical modeling of an estuary: A comprehensive skill assessment," *Journal of Geophysical Research: Oceans* 110(C5).
15. 詮華國土測繪有限公司 (2018)，「卑南溪河口海岸地形變遷趨勢評估基本資料補充調查」，經濟部水利署水利規劃試驗所。
16. 財團法人成大研究發展基金會 (2019)，「卑南溪河口輸砂及海岸漂砂連續監測及相關性研究」，經濟部水利署水利規劃試驗所。
17. 李汴軍、范揚銘、馮智源 (2010)，「ROMS 海洋模式應用於南灣海域潮流流場模擬」，海洋工程學刊，第 10 卷，第 2 期，第 201-217 頁。
18. Warner, J. C., Defne, Z., Haas, K., and Arango, H. G. (2013), "A wetting and drying scheme for ROMS," *Computers & geosciences*, 58, 54-61.
19. Liu, H., Xu, K., Ou, Y., Bales, R., Zang, Z., and Xue, Z.G. (2020), "Sediment Transport near Ship Shoal for Coastal Restoration in the Louisiana Shelf: A Model Estimate of the Year 2017-2018," *Water*, 12, 2212.
20. Martin, P.J., Smith, S., Posey, P.G., and Dawson, G.M. (2009), "Use of the Oregon State University Tidal Inversion Software (OTIS) to generate improved tidal prediction in the East-Asian Seas," *Naval Research Laboratory, Oceanography Division, Stennis Space Center, MS, USA.*
21. 陳佑廷 (2011)，「台灣海域一公里網格調和常數再探討」，碩士論文，國立臺灣海洋大學海洋環境資訊學系，基隆。