研究開発助成 研究概要 流域と海域を繋ぐ総合的土砂管理の実現 に向けた実践的フィールド研究

筑波大学 教授 武若 聡

概要:

わが国は流域から海域にかけての「総合的な土砂管理」の推進を閣議決定し、高度に土砂移動を管理す ることを目指している.本研究は、これを実現するのに必要な土砂移動量の観測と診断をする総合的なシ ステムを構築することを目的とする.フィールド観測、数値解析、モデル実験を行い、流域から海域にか けての土砂移動をモニタリングし、その特性を理解することを目指す.天竜川で展開した研究により次の 成果を得た.(1)河川域の土砂移動を数値モデルで再現し河道の形状の影響を調べた、(2)Xバンドレー ダによる出水、暴浪等による河道、砂州等の地形変化を連続的に観測した、(3)固定カメラ、高頻度測量 の組み合わせによる河口砂州の変形過程の分析した、(4)多数のシラス漁船に装着した測深器による流域 -海域の広範囲・高頻度水深測定を行い、沿岸域の地形変動特性を明らかにした、(5)砂浜形成に寄与し ない深海部への土砂損失の評価を実験的に行った.

キーワード:総合土砂管理 , 流域, 河口域, 沿岸域, 地形の観測, 天竜川

1. 研究の目的

わが国は、流域から海域にかけての「総合的な土砂管 理」の推進を閣議決定し、高度に土砂移動を管理するこ とを目指している.本研究は、これを実現するのに必要 な土砂移動量の観測と診断をする総合的なシステムを構 築することを目的とする.具体的には、フィールド観測、 数値解析、モデル実験を行い、流域から海域にかけての 土砂移動をモニタリングし、その特性の理解を目指す.

研究は天竜川にて行っている.図-1に研究項目と各研 究者の役割を示す.研究項目の概要は以下である: (1)河川域の土砂移動を数値モデルで再現し、樹林化,

ダム堆砂等の影響の評価(島根大学・佐藤) (2) X バンドレーダによる出水,暴浪等による河道,砂

州等の地形変化の連続観測(筑波大学・武若)

(3) 固定カメラ,高頻度測量の組み合わせによる河口砂 州の変形過程の分析 (東京大学・佐藤・田島)

(4) 多数のシラス漁船に装着した測深器による流域-海域の広範囲・高頻度水深測定(豊橋技術科学大学・岡辺・ 加藤)

(5) 砂浜形成に寄与しない深海部への土砂損失の評価 (大阪大学・青木)

以下では、各研究項目の成果を説明し、最後に次年度 の研究展望を述べる.



図-1 研究項目と各研究者の役割

2. 流域から海域への土砂供給の分析

天竜川は河口から約25 km 地点の鹿島基準地点より扇 状地が展開し.高水路幅が約200 m から1,200 m に拡幅 していく.この間に天竜川本川の流況や遠州灘海岸の汀 線維持に寄与するほどの土砂供給のある支川はなく,鹿 島地点上流本川からの流下土砂が重要となる.また.河

発表14



図-2 河道の設定

ロから約3.3kmの掛塚地点までは干潮区間なる.一定流 量下において、高水路幅の拡大や潮位は掃流力を弱める 作用を果たすため、数値計算モデルの構築にあたっては これらの定性関係を把握しておく必要がある.本章では、 鹿島下流の河道平面形状を模し、また、潮位の影響を加 味した水路実験を行い、数値計算モデルのパラメータを 定めるための予備検討を行った.

実験用水路は、鹿島下流の幾何縮尺を1/5,000 とした 矩形開水路を用いた.鹿島と河口での高水路幅がそれぞ れ200 mと1,200 mであること、この間の距離が25 km であることを考慮して、実験水路の有効水路幅は線形に 漸拡する設定とし、その他の寸法を定めた.天竜川が鹿 島から高水路幅を拡大しない場合を想定した土砂流況を 比較するため0.04 mの一定幅の実験も行った(図-2).

土砂は水路の上流に水路を接続させて流下・供給した). ここから下流は初期条件では固定床としているが.これ は実際の天竜川の鹿島下流で海岸構成砂となる粒径の土 砂供給が恒常的には存在していないことに相当する.

計算は流れ場を1次元のDynamic Wave Modelを TVD-MacCormack法により解き,土砂輸送量は掃流砂を仮 定して芦田・道上による修正 Egiazaroff 式を用いて推定 する.限界掃流力は岩垣式を用いた.

先端位置や輸送量の計算と実験結果を見ると、漸拡で は土砂輸送が水路途中でとどまりやすい傾向にあること が分かる.すなわち、天竜川下流では相当規模の洪水で ないと河口まで土砂が到達しづらい河道の平面形状であ る可能性を示唆している.

3. 河口域の地形変動特性

河川から海域には洪水時に土砂が間欠的に供給される. この過程を調べるために,天竜川河口右岸の下水処理場



(b) 天竜川河口の観測域とレーダ平均画像,座標系図-3 天竜川

の屋上にX バンドレーダを設置し、河口周辺の地形を継 続的に観測している。毎時のレーダの観測結果には、出 水と波浪の作用に伴う河口砂州の侵食パターンと規模、 出水中に生じる特徴的な河床の変動が捉えられている。

図-3(a) に天竜川下流域の衛星写真を示す.前章の解 析は河口からおおよそ25 km までの河道を対象にしてお り,ここでは図-3(b)に示す河口域の観測結果を説明する. X バンドレーで取得される画像(同図右)の高輝度の部 分が陸域に対応しており,河道内の砂州,河口砂州の形 状,河口フロントの発生,砕波の状況などを判読できる.

出水の規模が大きくなると、天竜川を塞ぐように発達 している河口砂州が侵食される.これは出水の規模に応 じて間欠的に生じ、この際に土砂が海域に供給される. 従って、河口砂州の侵食程度を空撮、レーダ等により計 測し、海域に供給される土砂量を推定することができれ ば、総合的な土砂管理を実施するための基本的な情報と できる可能性がある.

過去の観測記録と合わせて河口砂州の侵食規模(~河



図-4 河口幅変化量(dB),河口砂州侵食パターンと 出水規模Q。とその超過確率年の関係



図-5 洪水規模 Q_A と河口域侵食中に見られる河床底 面の移動速度 V_Mの関係

ロ幅の拡幅),侵食パターンと河川流量の関係を図-4 に 示す.おおよそ,出水の規模に応じて浸食量が大きくな り河口拡幅も増す関係性が見られる.さらに詳細に各出 水に伴う河口拡幅の状況を調べたところ,河口の拡幅量 には出水前の河口幅に依存していた.これは,同じ規模 の出水でも,出水前の河口が狭ければ浸食量が増すこと に対応している.この出水前の河口幅の依存性を各出水 について検討した結果 60 m が出水前の河口幅の広狭を 区分する境と判断した.

洪水の出水中のレーダ画像を詳しく見ると,レーダ画 像の輝度分布には河道内を下流に伝わる特徴的な時間変 化が現れる.これは、河床にあった地形の起伏の移動を 捉えたものと考えられる.これの下流への伝播の規模を 指標として、出水による海域への土砂供給量を検討する. ここでは、先ず、これの移動速度と出水規模の関係を調 べた.この移動速さの出水中の総計72時間内の平均を求 め、出水中の河道内の輝度パターン移動速さ V_Mとする. この V_Mと出水規模を示す Q_Mの関係を図-5 に示す.おお よその比例関係があることが期待できる.各出水の際に あった河ロテラス域の土砂増加量を特定することができ れば、間欠的に生じる出水により期待される土砂供給量 の評価が可能となる.



4. 河口砂州の変形過程の分析

流砂系の土砂管理を進めるうえでは、河川と海岸の結 節点である河口の諸現象の理解が重要となる。河口砂州 の存在,形状等は簡単に観察をすることが可能で、河口 砂州の変形,消滅,再生等を追跡することで土砂供給に 関する状況を知ることができれば、土砂管理の基本的な 情報とすることが可能になる。

ここでは、台風来襲時の大規模外力による河口砂州の 地形変動メカニズムを詳細かつ継続的な現地調査により 明らかにし、河口砂州の地形変形を支配する越流現象と それに伴う河口地形の変形機構を解明することを目的と した.大規模な砂州が形成されている天竜川河口におい て、水際線測量と断面測量を継続的に行った.台風期に は顕著な地形変化が観測された.現地調査に加えて、台 風期の河口を両岸から俯瞰する連続画像を撮影し、それ をオルソ画像に変換したうえで、一時間平均画像や各断 面のTime-stack 画像を分析した.収集した波浪・水位デ ータと合わせて分析を行った.

高波浪を含む期間の入射波に含まれる周期 30 秒以上 の長周期成分の波高と入射波の有義波諸元の関係を分析 した.長周期波の波高は有義波高に概ね線形であったが, 有義波波高と有義波周期の積に対してさらに明瞭な線形 関係があることを確認した.また,河川流量が十分小さ







図-9 推定された汀線位置の経時変化

い満潮時を対象に、砂州河道側で計測した水位と御前崎 における潮位の差を wave setup 量と考え、有義波高との 関係を分析したところ、線形な関係を確認した.

潮位にwave setup 量を加えた平均水位が大きな複数の ケースについて、砂州頂標高の低い砂州先端部から標高 の高い付け根に亘る複数の断面の Time-stack 画像を比 較した.その結果、標高の低い先端部では、平均水位の 上昇と共に、越波数が増加することが確認された.一方 で、標高が高い砂州付け根部では、平均水位よりもむし ろ、長周期波の波高が大きいケースで越波が激しいこと が見出された(図-6).

高波浪来襲時の満潮時に越波が観測された断面の砂州 頂標高のうちで最大のものをその日の最大越波標高とし、 その潮位に相対的な高さを長周期波の波高に対してプロ ットすると、図-7のような関係が得られた.上記の結果 を合わせて考慮すると、この最大越波標高は、潮位に加 え、平常波浪の遡上高、高波浪時の wave setup 量、長周 期波の遡上高、各々の寄与の和として表現できることが 確認できた.同図に、各地点の砂州標高をプロットする と、波浪による打ち上げと長周期波による水位上昇のそ れぞれが、砂州の先端部と付け根部における越流の発生 に本質的な影響を及ぼしていることが分かる.

5. 沿岸域の地形変動のモニタリング

河ロテラスにストックされた土砂が、波浪によって周 辺の沿岸へ供給されるプロセスを把握するためには、頻 度の高いテラス域の地形モニタリングが必要である. 波・流れが複雑に干渉するとともに、ナロマルチビーム 方式の長所が活かせない浅い水域での深浅測量は、作業 コストが大きく、十分な時間解像度で地形データを取得 することが困難である.これに対し、漁船に搭載してい る魚群探知機やGPS プロッタの情報を記録して海底地形 を生成する手法を構築してきた.高頻度に浅海域の地形 を計測することができるまでになったものの,水深約4 m 以浅の地形は,漁船の操業水深から外れるため取得で きない.モニタリングした地形情報を数値モデルに反映 させるためには,汀線など,この領域の地形を何らかの 手法で推定し,モニタリングデータを外挿する必要があ る.そこで,漁船で計測できる,およそ4m以深の沖合 地形より,汀線の位置を推定する方法を検討する.

天竜川河口も含めた遠州灘を操業する 26 隻の漁船か ら取得するデータ(以下,漁船データ)は、航行中の水 深、位置、時刻であり、潮位などの水深補正を行い、対 象とする時空間スケールでの平均的な地形を算出する. ここでは断面地形を生成して分析する.岸沖方向に設定 した測線に沿って、1カ月間の漁船データをとりまとめ て 2008 年から 2016 年までの毎月の時間平均的な断面地 形を生成した.次に、静岡県が年に1~2回実施している 深浅測量(海浜も含めた浅海域の縦断測量)と比較した. この測量結果から得られる汀線の変化量に対する、漁船 データで得られる沖合の断面地形の諸量の関係を検討す る.この関係を用いて、漁船データ(沖合地形)を用い て汀線位置の推定を試みた.

図-8 に漁船データで生成した縦断地形および深浅測 量結果の断面地形を示す. 漁船データで得られ縦断地形 は、深浅測量と比較して高精度ではないものの、バーや トラフといった地形の特徴を捉えられることがわかる. この漁船データで生成した断面地形の中で、バーとトラ フの水深差hの変化量が、測量基準点からの汀線距離1 の変化量との関連が強かった. これらの相関関係の正負 は、汀線の経年的な前進あるいは維持しているエリアと 後退するエリアに対応していた. 図-9は、この回帰直線 と漁船データから求めた沖合の断面地形を用いて推定し た汀線位置の経時変化を示したものである. 図中の×は 深浅測量結果の汀線位置を示す. この手法は汀線の変化 量を推定するため、その初期値は2008年3月の深浅測量 結果の汀線位置を用いた. これより, 推定位置は最大で 30m程度の誤差がある.これは、推定した誤差が経時的 に積算されるためであり、例えば、毎年の深浅測量結果 で推定の初期値を更新すれば、大きくは外れない、

6. 河口から供給された土砂の深海部への輸送

河川から出水時に間欠的に供給される土砂が河口域で どのように輸送・拡散・堆積し、その後の波浪によって どのように海岸に供給されるか、という一連のプロセス については不明な点が多い.我が国有数の土砂河川であ る天竜川においては、土砂管理の方法として、佐久間ダ ム等に堆積した土砂をダム下流に置土して出水時に自然 流下させる方法が検討されている.したがって、出水時 の土砂の河口域での挙動を解明することは、今後の土砂 管理における重要な鍵となる.さらに、出水時に一気に 海域に流出する土砂がどの程度海域の深部に到達し、海



図-11 斜面を流下する泥流の先端速度と層厚の時間変化

浜形成に寄与しないかを定量化することも土砂管理上重 要である.これらのことを背景として、本研究では、河 ロ域の流れを、高密度の濁水が海底上を密度流として流 下する流れ(ハイパーピクナル流)であると仮定し、混 入させる土砂の粒径の割合を変化させた一定密度の泥水 を用いて、洪水時・平常時それぞれにおける泥水の挙動 特性と土砂の堆積特性について明らかにすることを目的 とし、水理模型実験を実施した.具体的には、高密度の 濁水が河口から海底面上を密度流として流下する流れを 対象に、混入させる土砂の粒径の割合を変化させた一定 密度の泥水を用いた水理模型実験を実施し、洪水時・平 常時を想定した条件下における泥水の挙動を明らかにし た.以下に、泥水流の挙動と土砂の堆積特性を説明する.

洪水時と平常時の代表的な河川流量を用い,天竜川河 ロに堆積した土砂の粒径分布を3段階に分類し,それぞ れの割合を変化させた泥水を作成した.また,密度に関 しては,現地で観測された濁度を参考に定めた.模型実 験に用いた2次元水槽を図-10に示す.ゲートから泥水 を淡水で満たした水槽に流入させ,ビデオカメラを用い て泥流の先端速度と先端形状を観測した.図-11に各ケ ースの先端速度と層厚の時間変化を示す.平常時と比較 して洪水時の条件の際に先端速度が大きいこと,また, 大粒径を多く含む方が上流での先端速度が大きく,その 後下流で減少していく様子が見られた.先端形状に関し ては,洪水時に小粒径を多く含む場合は,流入時に拡散 することで層厚が大きくなり,平常時に小粒径を多く含 む場合は,層厚が乱れることなく流下する様子が見られ た.

泥水の流下実験後に堆積した土砂を 15cm~25cm 間隔 で採取し、LISST-100 を用いて粒径区分ごとの体積濃度 を検出することで、堆積した土砂の粒径分布を把握した. 大粒径を多く含む場合、粒径の大きい土砂が中流まで運 搬されることで、それに追随するように小粒径の土砂も 運動量を維持しながら流下し、下流に堆積する割合が高 くなった.一方、小粒径を多く含む場合、粒径の小さい 土砂に粒径の大きい土砂が追随し、中流まで運搬された.

7. 結言

流域から海域を繋ぐ総合的な土砂管理を行う際には 様々な要素技術(土砂移動量の観測と予測技術,土砂の 移動量を制御できる構造物等)が必要となる.これを受 け、本研究は、土砂移動量の観測と診断をする総合的な システムを構築することを目標としており、天竜川流域 から遠州灘海域にかけての土砂移動の実態について様々 な計測と解析手法を組み合わせた分析を行った:

- 河道形状・水面勾配等が河道の土砂動態に与える影響を把握するための土砂輸送モデルの基本コンセプトの確立、これに必要となるパラメータ較正するため水理実験の準備を完了した。
- Xバンドレーダ、その他の機器を組み合わせて、継続的に河口地形、河川流動、波浪場を観測する体制を整えた。
- 河ロテラスの変化とその種変の沿岸に生じる地形 変化を分析するための手法を確立した.これに必要 となる深浅測量データ入手し,漁船測深データと比 較するためのデータベースを整備した.
- 河川出水時に河口沖で発生する濁水流を分析する フレームワークを定めた.周囲流体との密度差,濁 水を構成する粒子の粒径等の影響を調べるモデル

実験の基礎設計を行った.

変動の大きい河川,河口,沿岸域の水理・土砂移動現 象を包括的に理解して記述するためには,現地調査で検 証された信頼度の高いモデルを構築することが重要であ る.これを完成させるために,観測を継続し,確率的に 生じる様々な事象を収集することが肝心となる.幸いに も研究の進捗は順調であり,平成29年度(2017年度) は研究成果の総合化を行う.その際には以下の点に留意 して研究を進める:

- 河川域の土砂移動の数値モデル構築(樹林化,ダム 堆砂等の影響評価に必要となるパラメータを水理 実験による決定)
- 洪水,暴浪等による河口付近の河道,砂州等の形状 変化の継続的観測とそのモデル化
- 海域に到達した土砂の河ロテラスへの蓄積と周辺 海域への波及
- 砂浜形成に寄与しない深海部への土砂損失の評価 (実験によるパラメータの検証)