天竜川河口域の出水と波浪による地形変動の観測

Observation of morphological changes due to floods and waves at the river mouth of Tenryu

高橋幹人¹・武若 聡²

Mikito TAKAHASHI and Satoshi TAKEWAKA

Morphological changes at the river mouth of Tenryu by floods and waves are observed continuously with a X-band radar for years 2010 and 2011. X-band radar grasps the shapes of the river channel and sand bar, and the submarine extent of river terrace formed at the seawards of the river mouth. When the river water level increases, flood flow erodes the sand bar, and sediment is fed to expand the river terrace. After the flood, recover of the sand bar starts and its tip migrates to close the river by the action of oblique incident waves. At the same time, river terrace starts to shrink also by the action of waves. The amounts of these changes are estimated from the result of X-band radar observation and are reasonably well correlated with the flood intensities and wave energy fluxes.

1. はじめに

流域から海域に土砂が供給される過程には、次のようなサイクルがあると理解されている（例えば、宇多・石川, 2008）：i) 出水により、河川から海域に供給された土砂は、一旦、河口域に貯留され河口テラスが形成される。ii) その後、波浪の作用によりここから沿岸域に土砂が運ばれ河口テラスが縮小する。このように、河口域は沿岸に土砂が波及する起点となっており、その動態をモニタリングすることができれば、沿岸域の侵食の理解と対策立案の質を高めることが期待できる。

本研究では、ダム再編事業により海域への土砂供給の増加が期待される天竜川の河口において実施しているXバンドレーダ観測の結果を用い、出水と波浪の作用に伴う河口域の土砂移動の規模、河口テラスの拡大・縮小、河口砂州先端位置の移動等を示す。具体的には、図-1に概念的に示す河口域の過程を2010年と2011年の観測結果から示し、各過程を外力（出水の規模、波浪）と関連付けることを試みる。天竜川では、出水、波浪の作用が小さい時期が続くと河口砂州が発達し、河口幅が狭まる。年に数回の規模の出水があると、河口砂州が侵食されて河口幅が広がり、河口の沖合にある河口テラスが拡大する。その後、拡大した河口テラスは、波の作用を受けて縮小する。宇多ら（2012）、三波ら（2013）は深浅測量データを用い、天竜川河口周辺の地形変動特性を論じ、上記の過程を説明している。本研究の特徴は、深浅測量に比較すると精度は劣るが、連続的に取得された高頻度の地形データを用い一連のプロセスを説明する点にある。

図-1 河口で見られる地形変化のサイクル。出水時：a.河口砂州の侵食, b. 河口テラスの拡大. 波浪の作用：c.河口砂州の回復, d. 河口テラスの縮小。

図-2 観測域とレーダ平均画像、座標系

2. 観測の概要

(1) 対象域と観測方法

天竜川河口右岸（静岡県浜松市）にある下水処理施設の屋上にXバンドレーダを設置し2007年6月より観測を

1 筑波大学大学院システム情報工学研究科
2 正会員 工博 筑波大学教授システム情報系

図-3 観測期間中の河川流量，河川海域間の水位差，波高，波向変化。破線は解析対象とした出水。

図-4 出水中に取得された平均画像。2010年7月13日0時(潮位：0.12 m，中ノ町水位：7.0 m)，2010年7月15日0時(潮位：0.13 m，中ノ町水位：8.8 m)。画像中の格子の間隔：500 m。

継続している（2014年5月時点）。レーダ画像には波の進行状況，水際位置などが映る。図-2に観測サイト，座標系，レーダ画像を平均化した平均画像などを示す。座標系は，東西方向にx軸，南北方向にy軸を設定する。平均画像は解析に用いる部分を取り出して表示してある。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，碎波の状況などを判読できる。下水処理施設の塔が妨げとなってレーダエコーを取得できない領域が扇状に広がっている。平均画像の処理と解析に関する基本的な説明は前報（高橋ら，2010）にある。

(2) 観測期間中の河川水位と波浪の変化

図-3に2010年，2011年の河川流と波浪の経過を示す。天竜川鹿島橋（河口より約25 km）の流量，天竜川中ノ町（河口より約9 km，感潮域外）の水位と潮位（御前崎）の差，気象庁の沿岸波浪数値予報モデル（気象業務センター）の河口最寄り位置の計算点の波高・波向の変化を表示した。流量が1000 m³/s超の出水は両年に複数回あった。河川と海域の水位差は土砂移動の規模を評価する際に用いる。波浪は西方からの入射が多く，高波浪の来襲は2011年に多かった。なお，計算値である波高，波向と河口付近の波浪観測結果（静岡県竜洋観測所）を比較し，

図-5 出水中の河道内の輝度パターン移動速さを計るためのライン画像。(左)輝度を平均画像より取出したライン。(右)ライン画像。横軸：時間，縦軸：流下方向。

図-6 出水中の平均河川海域間の水位差 Δh と河道内の輝度パターンの移動速度 V_M

両者に高い相関性があることを確認している。

3. 河口域の地形変動と外力との関連付け

河口域では様々な地形の変動過程が見られる。出水時，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（武若・高橋，2011）。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。レーダ画像には，碎波により河口テラスの縁辺を捉えたときとみなせる高輝度部が現れる。この分布を読み取り，潮位・深浅測量の結果と比較することにより，河口テラス域の拡大縮小過程を追跡した。河口砂州は出水，高波浪時に侵食され，その後，静穏期に再び形成される。この再生期の河口砂州先端位置の移動を追跡した。以下ではそれぞれの過程の詳細と評価について説明する。

(1) 出水時の河道内の土砂移動

出水の最盛期前後の平均画像を詳細にながめると，河道内に，流れ方向に連続的に伝播する輝度パターンの存在が認められる（図-4）。河道内から海域に土砂が押し出されている様子が伺え，これは砂堆など，河道にあった底面地形の凹凸が移動したものの反映であると考えている。この輝度パターンの移動速さは，出水のピーク時に

(a) 2010年6月16日, 潮位: -0.87 m, 等水深線(赤): -3.5 m.

(b) 2010年8月31日, 潮位: -0.53 m, 等水深線(赤): -3.3 m.

図-7 深浅測量結果と平均画像のオーバーレイ. 高輝度部の縁辺が等水深線(図中の赤線)に沿って分布している. 画像中の格子の間隔: 500 m.

増加し, また, 潮位が上昇し水位勾配が小さくなると低下するという特徴がある(武若・高橋, 2011).

ここでは, 図-3に示した9回の出水時に河道内で見られた輝度パターンの移動速さと出水の規模を比較し, 輝度パターンの移動速さが土砂移動を代表する量となり得るかどうかについて検討する.

河道内の流下方向に設けたライン上の輝度分布を画像の縦方向に展開し, これを観測時間毎に行って画像の横軸方向に並べた流下方向ライン画像を作成した(図-5). ライン画像中には, 右下方にのびる筋状のパターンが確認でき, これらは輝度パターンが河道内の流下方向に移動したことを表している. これらのライン画像中の筋状パターンの傾き, すなわち, 輝度パターンの移動速さ V_M をPIV的な解析から求めた(武若・高橋, 2011). 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とする.

河道内水位(中ノ町)と海域(御前崎)の水位差を h とし, 同量の年間の平均値を $\bar{h}_{year}$, 同量の出水期間中の72時間の平均値を $\bar{h}$ とし, $\Delta h = \bar{h} - \bar{h}_{year}$ という量を求めた. 河川と海域間の水位差が大きいと土砂輸送の増大を期待できることから, この量を出水の規模を表す指標として導入する. 図-6に V_M と Δh の関係を示す. 両者に

図-8 潮位別の高輝度部縁辺の水深頻度分布. 各潮位における高輝度部縁辺の平均地盤高さ: 潮位 -0.1 m $\rightarrow$ -3.0 m, 潮位 -0.5 m $\rightarrow$ -3.2 m, 潮位 -0.8 m $\rightarrow$ -3.5 m

図-9 高輝度部縁辺位置の平均水深と潮位の関係. 縦棒の長さは潮位別に高輝度部縁辺部の水深を定めた際にあったバラツキの大きさ(RMS値).

は相関が見られ, レーダ画像に捉えられた河道内の輝度パターンの移動は出水に伴う土砂移動を代表できる可能性が示された.

(2) 河口テラス縁辺部の水深の推定

河口テラスの縁辺部で碎波が生じるとこれが高輝度領域として平均画像に映る. 潮位が異なる時間帯の画像を調べると, 潮位が高い時には高輝度領域が縮小し, 逆に低い時には拡大し, 碎波位置が水深により変移する. 図-7は平均画像と深浅測量結果をオーバーレイして表示したもので, 高輝度領域の縁辺部はほぼ特定の等水深線水深に沿って分布することが理解される.

ここでは, 2008年から2010年に行われた河口周辺の5回の深浅測量の結果を用い, 高輝度領域の縁辺部の水深を潮位別に調べた. 具体的には, 深浅測量が行われた時期の近くに取得された平均画像から高輝度領域の縁辺部の位置を読み取り, これらの位置における水深を深浅測量結果から求めた. 御前崎で観測された潮位(T.P.値, 平均満潮位約0.9 m, 平均干潮位約-0.8 m)を用い, 潮位が0 m から-0.7 m の時間帯にかけて取得された平均画像を分析した.

図-8に潮位別に求めた高輝度領域縁辺部の水深の頻度分布を示す. 上記の手順で定めた水深にはばらつきがあ

る。これは平均画像が取得された時の入射波高、高輝度領域縁辺部の海底勾配の違いなどが考慮されておらず、碎波の発生状況と位置に差異があったためと考えている。

以上のようなばらつきはあるものの、各頻度分布の単純平均と潮位の関係(図-9)より、潮位 η [m]と高輝度領

図-10 河口テラス面積と砂州先端位置の変化。(a) 出水前、(b) 出水後河口テラスの拡大、河口砂州の浸食)、(c)、(d) 波浪の作用による変化河口テラスの縮小、河口砂州の回復)

図-11 河口テラス面積変化と変化率を調べた期間(I~VI).
◇: 河口テラス面積変化率を求める際に使用したデータ.

図-12 河口テラス面積の減少率と沿岸方向波浪エネルギーフラックス P_L (正值: 東向フラックス)の関係

図-13 出水による河口テラス部の土砂量変化(正值: 増加)と河道内の輝度パターンの移動速度 V_M

域縁辺部の地盤高さ d [m]の関係を次式で定めた。

$$d = 0.80 \eta - 2.9 \quad \dots\dots\dots (1)$$

以降では、この式を用い河口テラス縁辺部の水深を推定する。

(3) 河口テラスの拡大と縮小

冒頭に述べた河口付近で見られる地形変化のサイクルの各過程を調べる。図-10に示すように、出水があると河口砂州が浸食され河口テラスが拡大する。その後、河口砂州が発達し、河口テラスは縮小する。

河口テラスの縁辺部の位置を潮位がおおよそ -0.4 m となる時間帯に取得された平均画像よりトレースし、その面積変化を調べた(図-11)。このトレースは $500 < x < 2,000$ mの範囲で行った。推定された河口テラスの面積は、平均画像を取得した時間帯の碎波状況の差異による影響を受け、変動が大きい。しかしながら、出水時に河口テラスの領域が拡大し、その後、徐々に縮小するというが繰り返される過程は捉えられている。縮小時の面積変化率 dA を同図に示した6期間について求め、沿岸方向波浪エネルギーフラックスを代表する量 P_L

$$P_L \sim H^2 T \sin \theta \cos \theta \quad \dots\dots\dots (2)$$

のそれぞれの期間中の平均値 $\overline{P_L}$ と比較した(図-12)。ここで H は数値予報モデルが与える波高、 T は周期、 θ は波向である。 θ の定義は南からの入射時に $\theta = 180^\circ$ 、西方からの入射時に $180^\circ < \theta < 270^\circ$ とするので、西方からの波浪がある時に $\overline{P_L} > 0$ となる。データ数が限られているものの、 dA と $\overline{P_L}$ には相関関係があると期待できる。出水により形成された河口テラスの土砂がその後の波浪の作用により河口域外へ運ばれ、河口テラスが縮小している状況を捉えたと考えている。

先に示した9回の出水前後の河口前面($1,000 < x < 1,500$ m)の河口テラスの地盤高さが-3.5 mから-3 mの範囲の土砂変化量の推定を試みた。具体的には、潮位が0 m から -0.7 m となる時間帯に取得された複数の平均画像から高輝度部の縁辺を読み取り、式(1)を介して河口テラスの地盤高さが-3.5 mから-3 mの範囲の体積を求めた。これを出水の前に行い、河口テラス部の一部の土砂量変

図-14 河口砂州先端位置の変化とその移動速さを調べた期間(I~N). 先端位置(◆◇)は河道内の東西方向の相対的な位置。東方が正方向。白抜きの記号(◇)は各期間の移動速さ(実線の傾き)を定めるのに使用したデータ。

化を求め、先に求めた出水時の河道内の輝度分布移動速度 V_M を比較した(図-13)。残念ながら、両者の相関性は高くない。土砂量変化を求める範囲を極めて限定したこと、土砂量を計る深さが限られていることなどにより、出水の影響を十分に捉えていないことに原因があると考えている。出水があると河口前面の河口テラスが形成される領域が拡大することは確認できているが、堆積した土量の見積り方法には改善の余地がある。

(4) 出水により浸食された河口砂州の回復

出水・高波浪があると、河口砂州が浸食され河口幅が一気に広がる。その後、静穏期には河口砂州周辺への堆砂があり、河口幅は徐々に狭まる。図-14に、レーダの観測結果から読み取った河口砂州の先端位置(東西方向)の変化を示す。例えば、図-10に示すように、2010年7月の出水で河口先端位置は175 m西方に後退し、河口幅は増加した(期間Kの末期→期間Lの初期)。その後、河口砂州の先端位置は東方に移動し、2010年11月頃には出水前とほぼ同じ位置となった(期間M)。

図-14に示す6期間の出水後の河口砂州先端位置の西から東への移動速さ V_s を調べ、沿岸方向波浪エネルギーフラックスのそれぞれの期間中の平均値 $\overline{P_L}$ と比較した(図-15)。河口砂州先端位置の移動速さは一日当に数メートルのオーダーである。 V_s と $\overline{P_L}$ には相関関係があると期待でき、出水後の河口砂州への堆積の一部は沿岸流によるものと解釈できる。河口砂州の発達を主に沿岸方向漂砂により説明できることは、例えば、中山ら(2006)も指摘している。なお、河口砂州を踏査した際には、いわゆる打上げにより顕著な堆積があることをしばしば確認しており、河口砂州の形成過程における岸沖漂砂の寄与を調べることも必要である。

4. 結び

本論文では天竜川河口域に見られた一連の地形変動過程を継続的な観測結果より説明した：a) 出水時の土砂移動を代理的に説明する量を抽出し、出水の規模と関連付

図-15 河口砂州先端位置の移動速さ V_s と沿岸方向波浪エネルギーフラックス $\overline{P_L}$ (正值：東向)の関係

けた、b) 出水により、河口前面の河口テラスが拡大し、土砂が蓄えられる状況を示した、c) 河口テラスが波浪の作用を受け、徐々に縮小し、河口周辺域の土砂供給源となる過程を捉えた、d) 侵食された河口砂州の回復時の先端の伸長速さと沿岸方向波浪エネルギーフラックスに相関があることを示した。

沿岸域の土砂管理に貢献するという観点からは、出水に伴う河口テラス域の土量変化の見積りをする必要があるが、本研究では河口テラス域の拡がりの評価をするに留まっている。入射波浪の条件を考慮した碎波帯の拡がりの検討、浅海域の波浪変形状況の解析による水深分布推定などを通じて河口テラス域の水深分布を求め、土砂量の変化を評価する手法の開発が必要である。

謝辞：河口周辺の深浅測量データを浜松河川国道事務所より提供頂いた。本研究は科学研究費(24656293, 25420516)、河川財団河川整備基金の補助を受けて行われた。

参 考 文 献

- 宇多高明・石川仁憲(2008)：河口部での土砂移動を安倍川河口に見る、土木技術資料、Vol. 50, 10月号, pp. 58-61.
- 宇多高明・三波俊郎・石川仁憲・白石慎重・佐藤純一郎(2012)：天竜川河口部地形の洪水・波浪応答に関する現地観測、土木学会論文誌B2 (海岸工学), Vol. 68, pp. I_626-I_630.
- 気象業務センター：沿岸波浪数値予報モデルGPV (CWM), <http://www.jmbc.or.jp/hp/online/f-online3t.html>, 参照2014-05-09.
- 三波俊郎・宇多高明・石川仁憲・大井戸志朗・遠藤和正・佐藤純一郎(2013)：天竜川河口右岸の浜松五島海岸で進む集中的な侵食の実態、土木学会論文誌B2 (海岸工学), Vol. 69, pp. I_646-I_650.
- 高橋 亮・武若 聡・田島芳満・佐藤慎司(2010)：天竜川河口域の地形の推移に関する研究、土木学会論文誌B2 (海岸工学), Vol. 66, pp. 596-600.
- 武若 聡・高橋 亮(2011)：Xバンドレーダを用いた天竜川河口域の出水による地形変化の観測、土木学会河川技術論文誌, Vol. 17, pp. 1-4.
- 中山大輔・田中 仁・山路弘人(2006)：画像記録装置を用いた河口地形変動の観測とそのモデリング、海岸工学論文誌, Vol. 53, pp. 581-585.