

Xバンドレーダによる天竜川河口域の地形と流動の観測

Observation of Morphology and Flow Motion at the River Mouth of Tenryu River with X-band Radar

武若 聡¹・高橋 悠²・田島芳満³・佐藤慎司⁴

Satoshi TAKEWAKA, Yu TAKAHASHI, Yoshimitsu TAJIMA and Shinji SATO

An X-band nautical radar system was employed and averaged radar images were analyzed to observe morphology and flow motion around the river mouth of Tenryu-river, Sizuoka, Japan, from June to December of 2007. Sand bar at the river mouth breached due to flooding during the attack of Typhoon MAN-YI in July, 2007. The width of the main channel increased approximately from 50 m to 250 m. The breached part was buried gradually and sand bar showed a recovery with supply of sediments from the seaside. River flow front-like patterns in the vicinity of seaside of the river mouth were observed frequently in the averaged images. The patterns in the averaged images were compared with sea surface colors of a satellite image, confirming river flow front penetration into the coastal water was captured with the radar.

1. 緒言

天竜川河口のある遠州灘の各海岸は全般的に侵食傾向にあり、河川からの土砂供給を促進し、これを沿岸に波及させるための検討がなされている。その一つとしてダム再編事業（浜松河川国道事務所，参照2008-05-07）が着手され、今後、流域から海域への土砂供給が増すと期待される。河川から供給された土砂は河口を経て海域に移動するので、河口域における流動，土砂移動などについて知ることが沿岸域への効率的な土砂供給につながる。この研究では、Xバンドレーダを用い、2007年6月から12月の間の天竜川河口域の地形変化と流動を調べた結果を報告する。台風の来襲に伴う出水により決壊した河口砂州の回復過程を説明し、また、河口から延びる河川水フロントの挙動を検討した。

2. 観測の概要

天竜川河口右岸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月より観測を行った。レーダ画像には波の進行状況，水際位置などが映る。図-1に観測サイト，座標系，レーダ画像を平均化した平均画像（松本・武若，2005）などを示す。座標系は平面直角座標系（Ⅷ系）を参考に、東西方向にx軸，南北方向にy軸を設定した。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。輝度値の大きい部分が陸域に対応しており、河道内の砂州，河口，河口砂州の水際位置，河川水フロントの発生などの状況を判読できる。

平均画像より水際位置を読み取り，高分解能衛星画像

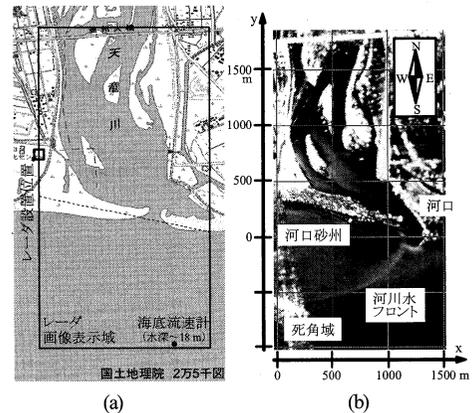


図-1 (a) 観測領域 (b) 座標系と平均画像（観測日：2007年6月8日21時）

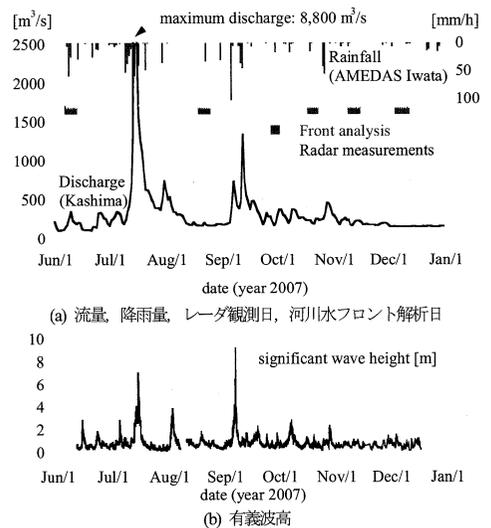


図-2 観測期間中の流量と波高

- | | | |
|-----------|------|----------------------------|
| 1 正 会 員 | 工 博 | 筑波大学准教授 大学院システム情報工
学研究科 |
| 2 学 生 員 | | 筑波大学大学院システム情報工学研究科 |
| 3 正 会 員 | 博(工) | 東京大学准教授 大学院工学系研究科 |
| 3 フ ェ ロ ー | 工 博 | 東京大学教授 大学院工学系研究科 |

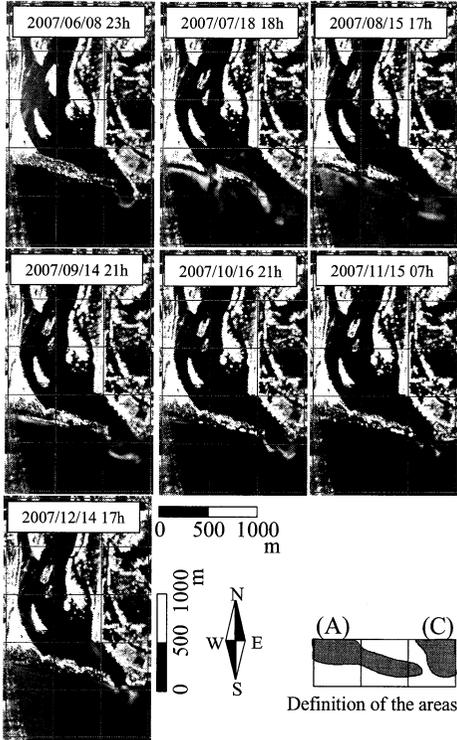


図-3 河口域の地形変化 (2007年6月~12月)

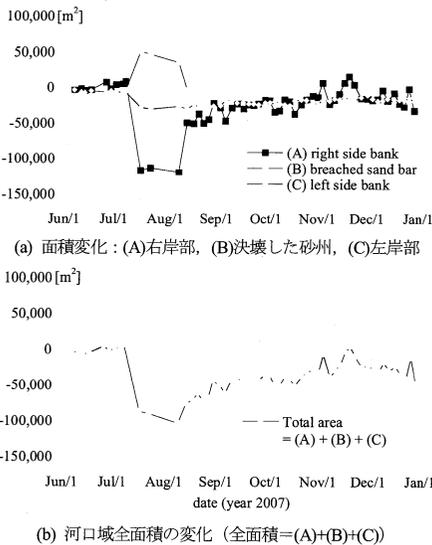


図-4 河口域の面積変化

に映る水際位置と比較した。その結果、レーダの分解能 (7.5 m) の精度でその位置を定められることを確認した。河口砂州の海側にある水際位置の一部はレーダ設置位置から見て死角領域となるために映らず、また、下水処理

施設内にある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。

解析では、河川流量 (鹿島橋、河口より上流約25 km, HQ曲線による推定値)、潮位 (御前崎験潮所、河口東方約40 km, T. P.値)、波高 (波高計: 河口南方1 km, 水深18 m地点; 竜洋観測所: 河口東方約4 km, 水深40 m地点)、海底面流速 (河口南方1 km, 水深18 m地点)、風向風速 (アメダス磐田、河口東方約10 km) を使用する。

レーダ観測を実施した日、出水状況、有義波高、降雨量を図-2に示す。6月、7月のレーダ観測は機器不調のため断続的になされた。台風4号が2007年7月15日に、台風9号が9月7日に天竜川河口域に最接近し、河川流量と波高の増大があった (田島ら, 2008)。

3. 河口砂州の変形

2007年7月に来襲した台風4号が出水をもたらし、河口砂州が決壊した。その後、決壊した砂州は埋め戻された (田島ら, 2008)。レーダ画像で確認できる河口域の平面形状は2007年12月までに決壊前と類似した状況に至った。ここでは、平均画像から河口砂州の変形を読み取り、河口域の面積、河川幅などの変化を調べ、決壊とその後の状況の変遷について説明する。

(1) 河口域の地形変化

御前崎の毎時の観測潮位を調べたところ、最頻値は0.3~0.4 mにあった。ここでは、潮位がこの高さにある時に取得された平均画像に映る水際位置を解析の対象とした。

図-3に2007年6月から12月の間に取得された代表的な平均画像を示す。いずれの画像も潮位が0.3~0.4 mにある時に取得されたものである。

7月には台風4号の来襲に伴う出水により、河口砂州が決壊している ($x = 500$ m付近)。河口左岸の $y = 0$ m の水際位置は東部に向かって約200 m後退している。河道内の砂州も変形しており、 $1000 < y < 1500$ mにあった砂州は分裂している。

8月の時点では河口砂州の決壊部は埋まりつつある。ただし、この時期の潮位が高い時 (潮位約0.8 m) には、後に説明する河川水フロントの発達が決壊部からもあり、決壊部は完全に埋まっていない。なお、河川水フロントについては次章で説明する。

9月から12月にかけて、河口砂州の先端が x 正方向 (東方) に向かって延びている。この間の時期には河口砂州決壊部から発達する河川水フロントは見られない。12月と6月の状況を比較すると、河口砂州の y (南北) 方向の幅が小さくなったものの、河口砂州の平面形状は類似しており、河口左岸水際の位置、河道の延伸方向もほぼ同一である。

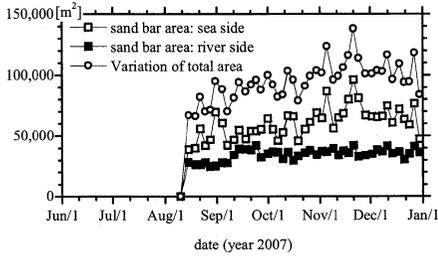


図-5 8月を基準とした河口砂州部面積の経時変化

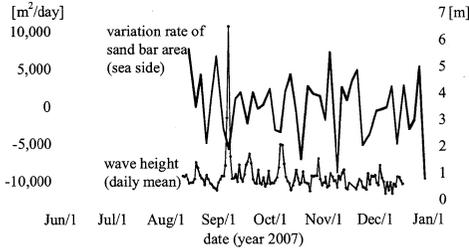


図-6 河口砂州部（海側）の面積変化率と日平均波高の変化

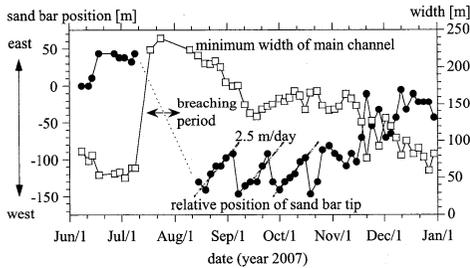


図-7 河口砂州先端位置(●)と河口最小幅(□)の変化

(2) 河口部面積の変化

2007年6月から12月の間に、潮位が0.3~0.4 mにあった時に取得された平均画像から55枚を選び、水際位置を読み取った。欠測期間を除くと、選択した画像が取得された日時の間隔はおおよそ3日である。

河口砂州を含む河口部の面積変化を次の手順で求めた。各平均画像から、 $0 < x < 1500$ m, $0 < y < 500$ mの範囲(総面積750,000 m²)にある水際位置を読み取り、右岸陸域、河口砂州、左岸陸域の面積を算定した。図-4(a)に2007年6月8日の面積を基準とした、(A) 右岸部陸域と河口砂州を合わせた面積、(B) 砂州決壊により孤立した河口砂州面積、(C) 左岸部陸域面積の経時変化を示す((A)と(C)の定義は図-3の右下に説明)。負の値は面積の減少を表す。7月中旬に決壊により島状に孤立した河口砂州は新たに生じた面積としてカウントし、右岸部陸域からはこれが失われたものとして表示した。図-4(b)には、(A)~(C)の総和、すなわち河口域の陸部の総面積の経時変

化を示す。7月の台風4号の来襲と出水による砂州決壊、左岸浸食などにより河口域の総面積は約100,000 m²減少した。田島ら(2008)の測量結果によると、河口砂州の平均的な地盤高さは1 m以上ある。7月のイベントにより、高さ1 m程までに侵食が及んでいたと仮定すると、100,000 m³のオーダの土砂が対象域から海域に移動したと見積もられる。

決壊部が埋まった後の(A)右岸部陸域と河口砂州の面積の変化を、2007年8月10日を基準として、また、図-1に示した斜線を用い海側面積と川側面積に分けて変化を調べた(図-5)。河口砂州の総面積は、先に説明したように緩やかに増加しているが、海側の面積増加が川側に比較して大きい。また、川側の面積は変動が小さいのに対して、海側の面積変化の変動が大きい。図-6は、海側面積の変化率と日平均波高の関係を示したもので、波高が増大したときに面積が減ることが多い。以上より、河口砂州決壊後の堆積と侵食は主に海側における波の作用によりもたらされ、波高の小さいときに堆積が進んだことがうかがえる。

渡辺ら(2005)は名取川(宮城県)の河口砂州決壊後の回復過程(3事例)について解析している。河口域の砂州面積を指標とし、砂州決壊後の回復期間が1ヶ月から1.5ヶ月であることを報告している。天竜川であった2007年7月の河口砂州決壊の回復は、面積の観点からは2007年12月の時点で継続している。

(3) 河口幅の変化

河口砂州の水際位置、河口左岸部の水際位置から、河口砂州と左岸の間の最短距離(以降、河口幅とする)、河口砂州水際位置x座標の最大値(最東位置。以降、河口砂州先端部位置とする)を求めた。図-7に河口幅、2007年6月8日を基準とする河口砂州先端位置の経時変化を示す。なお、ここで求めた河口幅は一定の位置で測ったものではなく、地形の形状により測定位置が異なること、河口砂州先端位置は、河口砂州の最も尖った位置に一致しない時もあることにそれぞれ注意が必要である。河口幅は、7月の台風4号に伴う出水により50 mからおおよそ250 mまで拡大し、その後8月からは断続的に縮小した。9月の台風9号の接近後11月中旬までは小規模の出水が断続的にあり河口幅の縮小がなかったと考えられる。11月中旬以降は出水、波浪の作用が小さくなり、12月の時点では6月とほぼ同じ河口幅となった。なお、潮位が異なる時に取得された平均画像を比べ、河口付近の水際の地形を詳細に調べたところ、波の作用を受け土砂が堆積する領域は緩勾配の地形が形成されており、一方、河川流が常にあたる領域(例えば、河口左岸)は急勾配の地形となっていた。

河口砂州決壊後の河口砂州先端位置は、ある期間継続

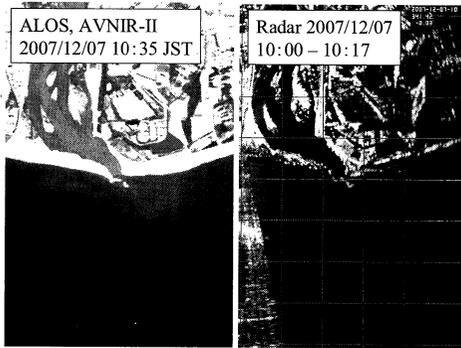


図-8 河川水フロントを捉えた衛星画像（可視データを白黒強調表示）とレーダ平均画像．観測日：2007年12月7日10時．

的に x 正方向（東方向）に移動した後，急激な負方向（西方向）移動を繰り返し，全体的には東に移動してゆく．8月から10月にあった東向きの移動速度はおおよそ2.5 m/dayであった．宇多ら（1994）は1982年から1993年の間に撮影された10組の空中写真を判読し，河口砂州は常に右岸から左岸に向かって伸び，その延伸速度は3～20 m/monthであること，砂州の決壊があった時にこの速度が大きくなることを報告している．本解析で示した河口砂州先端位置の移動速度は，2007年8月から12月までの通算で評価するとおおよそ20 m/monthとなる．

4. 河川水フロント

河川水フロントには河川から供給される土砂が含まれており，これの挙動を知ることにより，土砂の行方，河口テラス形成などについて理解が深まることが期待される．平均画像中には，図-1に例示したように，河川水フロントを捉えたと思われるパターンが映っている．この位置は時間的に変動しており，また，平均画像に断続的，あるいは，連続的に出現する．

(1) 平均画像に捉えられたパターンの検討

衛星可視データ（ALOS，宇宙航空研究開発機構，参照2008-05-07）とほぼ同時刻に観測されたレーダ平均画像を比較した．その結果，可視画像に捉えられた海面色が急変する位置とレーダ平均画像に捉えられた線状のパターンの発達する位置がほぼ一致していたことから，平均画像中の白い曲線パターンは河川水フロントを捉えたものと判断した（図-8）．このシーンが撮影された時には，河川から海域に供給された濁質は，河川水フロントの東側にあると考えられる．

平均化に使用した原画像を確認し，フロントのイメージングメカニズムについて検討した．この日は波高が小さく，波の進行状況を確認し読み取ることはできなかつ

たものの，フロントが映っている位置では海面からのエコー強度が大きくなっていった．これは，フロント付近の海表面に流れの収束域が形成され，そこに到達した波が局所的に増幅された結果と考えている．

波の進行状況を確認できる他の観測日の画像を確認したところ，波は線状に延びる河川水フロントに交わる方向に進行していた．河川水フロントのある位置では，河川からの流れと海域の流れの対向する成分が収束域を発生させ，これに伴う下降流が生じるとされている（例えば，柳，1985）．レーダは，沖から伝播してきた波が河口付近で収束域の発生に伴う流れ場に遭遇し，波が逆流に乗った状況を捉えたものと考えられるが，フィールド観測による裏付けが必要である．

レーダ平均画像への河川水フロントパターン出現の有無と風速の関係を調べた．風速が大きいとパターンが現れる頻度が増すこと，1 m/s以下の風速ではパターンの出現がほとんど見られないこと等，パターンの出現に局地的な風の影響があることが示唆された．

(2) 河川水フロント角度の変動

河川水フロントが数潮汐サイクルにわたり連続的に捉えられた期間が複数回あった（図-2の■で示した期間）．図-9に河川水フロントの発生位置が変動する一例を示す．河口付近（ $x \sim 750$ m）の楕円状に広がる高輝度部分は碎波領域であり，ここから河川水フロントが南東方向に延びている．波の進行状況を確認したところ，南南西方向から入射があり，波はフロントと交わるように進む状況にあった．

この期間のフロントの位置をマニュアル操作で読み取り，放物線をあてはめてフロントの延びる方向 θ を定めた． θ の定義は図-9に示す． θ の変化と潮位，河川流量，波高，風向・風速，河口沖合で観測した底面平均流（20分平均値）の向き・速さと比較した結果を図-10に示す．

この観測期間中の流量は約150 m³/s，河口幅はおおよそ200 mであり，河口の平均水深を2 mと仮定すると，河口最狭部における流れの速さは0.4 m/s程度と見積もられる．観測期間中の入射波高は1 m程であった．風向はほぼ一定の西風であり，風速は日に大きくなった．底面平均流速の南北方向成分はほぼ一定値（南向き）であったのに対して，東西方向成分は平均値が東向きであり，これに潮位変化に連動する変動成分が加わり，底面平均流の流向が変化した．

θ が底面平均流速の向きに追従する時間帯と追従しない時間帯がおおよそ12時間の間隔で現れた．潮位が下降する時間帯では， θ と底面流速の向きが一致していた．この間，底面平均流速の東西方向成分は小さくなっていった．Syamsidikら（2007）の観測結果によると，河口沖合の流れの構造は3次元性が強い．現時点では，河川水フ

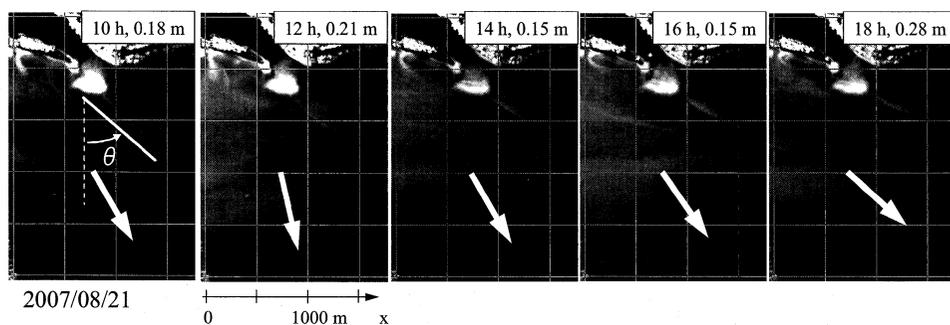


図-9 河川水フロントの変動。観測日：2007年8月21日。矢印は底面の平均流の向き。始端が流速計設置位置。図中の数字は時刻と潮位 (T. P., [m])。各画像はフロントの視認性を増すために輝度値を個別に調整して表示。

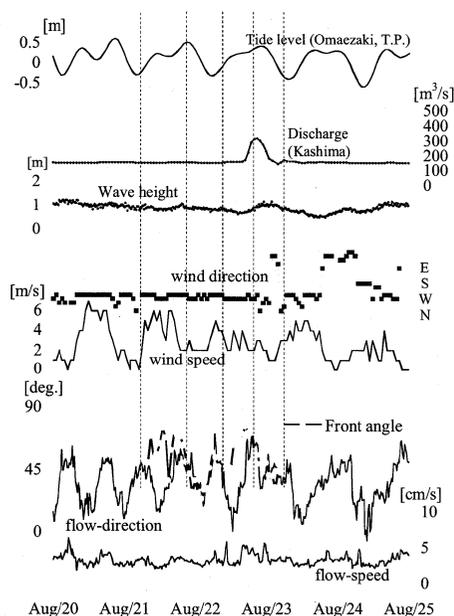


図-10 河川水フロントの延伸方向の変動と潮位，流量，波高，風向風速，海底平均流の流向と速さ。2007年8月20日～24日。

ロントの延伸方向と底面平均流速の関係を，3次元的な流れ場構造を踏まえた上で運動学的に説明することは出来ず，見かけ上の議論に留まっている。

5. 結語

Xバンドレーダデータを河口域の地形と流動の観測に適用し，2007年6月から12月の間の天竜川河口域の地形変化と流動を調べた。7月の台風来襲に伴う出水により決壊した河口砂州の回復過程を説明した。決壊した部分は2ヶ月程度で埋まり，河口砂州の平面形状は12月の時点ではほぼ決壊前の状況に戻った。河口幅は洪水に伴い

50 mから250 mまで拡大したが，その後12月の時点で50 mまで狭まった。河口から延びる河川水フロントの挙動を検討した。平均画像捉えられた河川水フロントパターンと衛星可視画像を比較し，その存在を確認した。フロントの延びる方向の変化を調べた。フロントの延びる方向は，底面平均流速の向きに追従する時間帯と追従しない時間帯が潮位変動と連動しておおよそ12時間の間隔で現れた。

謝辞：観測に際し静岡県下水道公社西遠浄化センターならびに日本ヘルス工業(株)職員の皆様へ便宜を図って頂いた。豊橋技術科学大学岡田拓巳産学官連携研究員・青木伸一教授に天竜川河口域の観測データの提供を受けた。東京大学劉海江助教に天竜川河口域ビデオデータの提供を受けた。本研究は科学技術振興調整費(先端技術を用いた動的土砂管理と沿岸防災，代表者：青木伸一)の支援を受けた。以上，ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 宇宙航空研究開発機構，地球観測センター・地球観測衛星「だいち」(ALOS)，http://www.corc.jaxa.jp/hatoyama/satellite/satdata/alos_j.html，参照2008-05-07。
- 宇多高明・鈴木忠彦・大石守伸・山本雅彦・大谷靖郎(1994)：天竜川河口砂州の伸長に伴う河岸侵食と海浜変形，海岸工学論文集，Vol. 41，pp. 481-485。
- 田島芳満・高川智博・浅野泰史・佐藤慎司・武若聡(2008)：特性の異なる二つの台風による天竜川河口砂州の大規模変形，海岸工学論文集，Vol. 55。
- 浜松河川国道事務所，天竜川ダム再編事業http://www.cbr.mlit.go.jp/hamamatsu/gaiyo_dam/tenryu.html，参照2008-05-07。
- 松本亮介・武若聡(2005)：前浜地形の沿岸分布の連続観測とその変動特性，海岸工学論文集，Vol. 52，pp. 506-510。
- 渡辺一也・Nguyen Trong Tu・田中仁(2005)：洪水時の河口砂州崩壊とその回復過程，海岸工学論文集，Vol. 52，pp. 586-590。
- 柳哲雄(1989)：沿岸海洋学，恒社厚生閣，154p。
- Syamsidik・青木伸一・加藤茂(2007)：河口沖合での潮流と浮遊砂フラックスの特性に関する研究，海岸工学論文集，Vol. 54，pp. 601-605。