

Xバンドレーダによる 感潮域の河道地形変動の観測

OBSERVATION OF RIVER CHANNEL DEFORMATION IN ESTUARINE BASIN WITH X-BAND MARINE RADAR

武若 聡¹・白川直樹²・坂谷好彦³・内田泰雄⁴

Satoshi TAKEWAKA, Naoki SHIRAKAWA, Yoshihiko SAKATANI and Yasuo UCHIDA

¹正会員 工博 筑波大学准教授 システム情報工学研究科 (〒305-8573 つくば市天王台)

²正会員 博(工) 筑波大学准教授 システム情報工学研究科 (〒305-8573 つくば市天王台)

³大林組 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

⁴筑波大学大学院 システム情報工学研究科 (〒305-8573 つくば市天王台)

An X-band marine radar has been installed at the river mouth of Tenryu, Sizuoka, Japan, to observe morphological behaviors of river sand bar and channel configuration in the estuarine. Original images captured by the radar are averaged every hour yielding averaged images, which are analyzed to identify land regions and water lines. Sand bars deformed remarkably during the flooding due to Typhoon 4 in July, 2007. Sand bar in the river channel shrank and its position migrated in the downstream direction. Annual variation of sand bar volume within the tidal range has been estimated. It showed a seasonal variation: it increases in the summer seasons and decreases in winter. Seasonal losses and gains of sand volumes in an area of 1000 square m within the tidal range were in order of 10^4 m^3 .

Key Words : X-Band marine radar, river channel, estuarine, sand bar deformation, Tenryu river

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¹⁾が着手され、今後、流域から海域への土砂供給が増すことが期待されている。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、河口感潮域における流動、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を図る上で必要になる。

この論文では、画像レーダの一つであるXバンドレーダを用い、天竜川河口域の地形変化を調べた結果を報告する。2007年6月から2009年12月の間に観測されたデータを用い、短期的な変動と経年的な変動について説明をする。2007年7月の台風来襲に伴う出水により河道内の砂州が大きく変形する様子、河道内の陸域-水域面積の経時変化などを示す。

なお、上記の期間における河口砂州の変形、河口幅の変化、河口フロントの挙動、河川水位と潮位変動の関係などについては武若ら^{2), 3)}が既に報告している。

河川の地形を継続的に調べる手法には、測量、航空写真撮影、衛星リモートセンシングなどがある。

測量は最も正確な地形情報を与えるが、コスト、機動性の面で制約がある。取得されるデータの精度は保証されているが、その空間密度、取得頻度は限られる。

可視域の波長帯の画像を取得する航空写真、衛星リモートセンシングは広範囲のデータを面的に取得できる点で優れている。撮影機器がある高度により空間分解能が変わるが、衛星による観測でも数メートルの分解能が得られる。これらの画像を用い陸域、水域を見分け、植生域の分布などを判読する。晴天時には有用な画像が取得されるが、降雨時、夜間などには画像の取得が難しい。

次章に説明するように、Xバンドレーダによる観測は対象域の面的な情報を取得するリモートセンシングの一種である。取得されるエコー画像を平均化することにより、陸域-水域をおおよそ空間分解能10 mで見分けることが可能である。また、降雨時、強風時の観測にも対応可能であり、連続的に観測を継続できる堅牢性を有する。一方で、エコー画像の理解と解析には経験的な側面がある。ここではXバンドレーダで観測された結果を解析し、河川地形を継続的に調べる手法としての可能性を調べる。

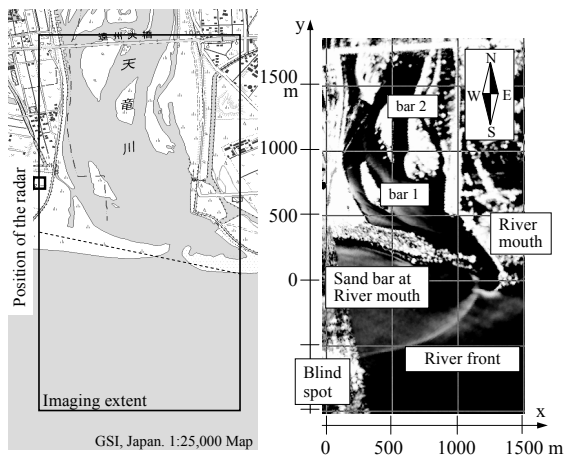


図-1 レーダの設置位置と観測域（天竜川河口域）

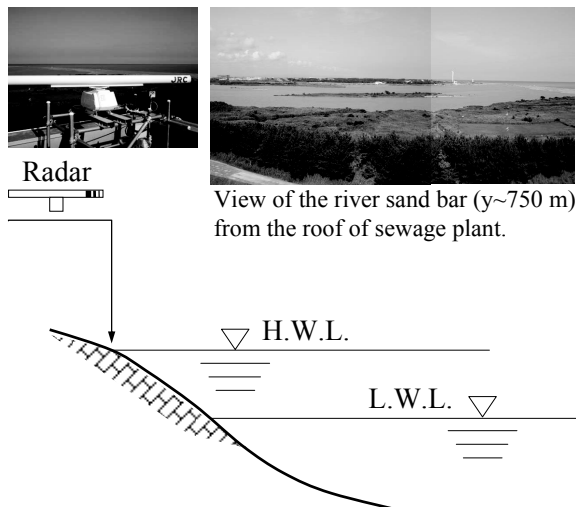


図-2 レーダの外観，設置位置から眺めた観測域と水際位置の推定方法

2. Xバンドレーダによる感潮域河道地形の観測

(1) 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月より観測を行っている。レーダ画像には海岸にある波の波峰の移動，河道内の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⁹⁾などを示す。座標系として，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。

本観測で使用しているXバンドレーダ（図-2，日本無線（株），JMA-3925-9）は画像レーダであり，漁船，プレジャーボートなどに登載して，障害物を検知することが本来の使用目的である。レーダのアンテナが約2.5秒で回転しながらマイクロ波を照射し，その反射（エコー）を画像として表示することにより，観測域の陸域，水域，水際位置，海岸波浪の状況などを知ることができる。レーダが発するマイクロ波のパルス長から定まる径

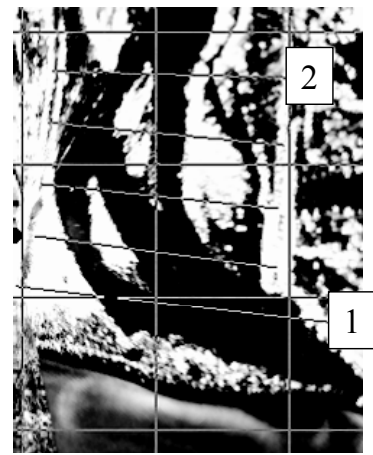
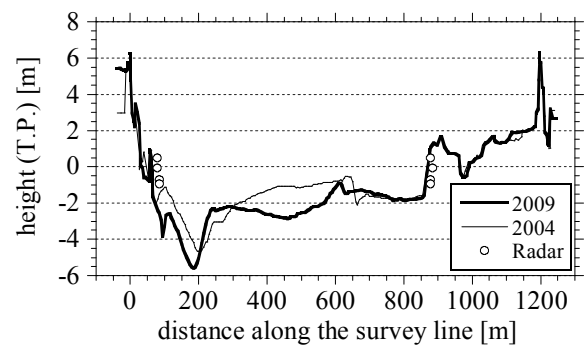
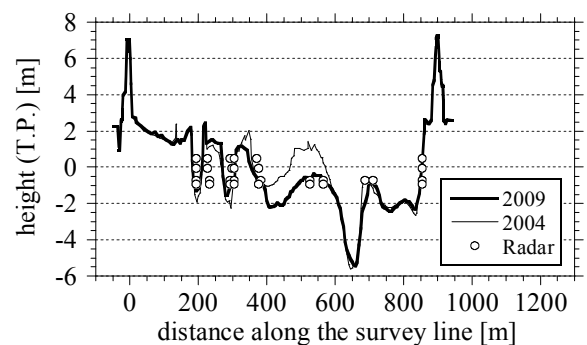


図-3 横断測量測線。測線間隔：400 m.



(a) Line 1



(b) Line 2

図-4 レーダから読み取った水際位置と河川断面（2004年2月27日，2009年1月24日。図-3の測線に対応）。水平位置は左岸堤防からの距離。水際位置の読み取りは，2009年1月23日と24日の潮位がおおよそ T.P. -0.9 m, -0.7 m, -0.1 m, 0.5 m の時間帯に取得されたレーダ平均画像から行った。

方向の観測空間分解能は7.5 mである。

エコーデータは2秒毎にレーダデータサンプリングボード（日本無線（株）製）を通じて，1024×1024ピクセルの画像としてPCに収録している。1ピクセルの大きさは約5.43 m 四方に相当し，また，エコー強度は256階調で収めている。時間，空間共に，レーダの性能を上回る分解能でデータを収録している。

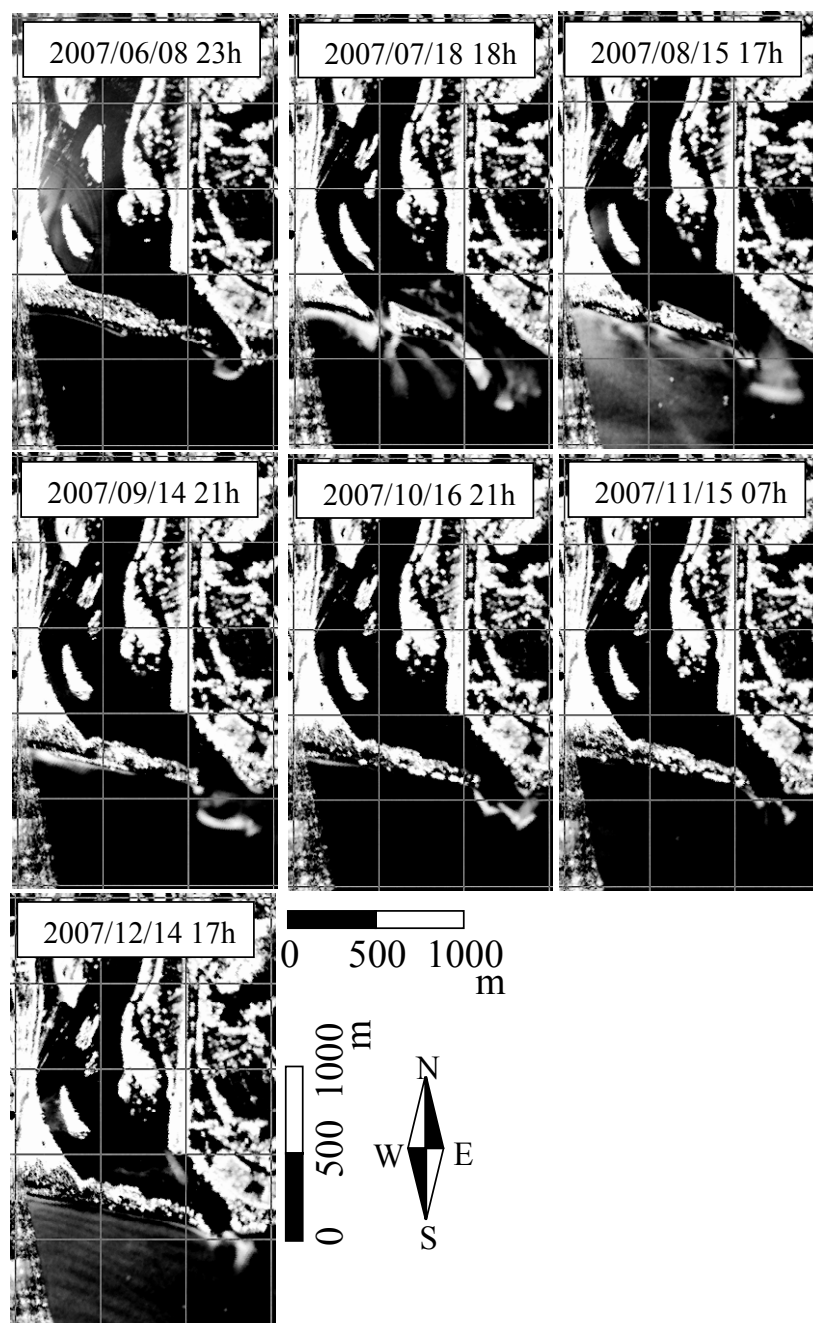


図-5 河口域の地形変化（2007年6月～12月）．
潮位がT. P. +0.3 ～0.4 mにある時間帯に取得した平均画像を表示．

本研究では、毎正時0分から17分間にかけて取得した画像を平均化した平均画像を解析に用いる．図-1に示すように、平均画像中の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（砂州1、砂州2）、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．図-2にはレーダの外観、レーダ設置位置から眺めた河道の様子を示す．なお、機器の不調により連続的、間欠的に欠測となった観測期間が複数回ある．

(2) レーダによる水際位置の読み取り

平均画像から読み取った水際位置の精度を河道横断測

量結果と比較して検討した．観測域は感潮域内にあるので、潮位の変化に伴い、河道内の水位が上昇下降し、水際位置も変化する（図-2）．ここでは、水際位置の水平位置をレーダ画像から読み取り、鉛直位置を御前崎で観測された潮位（気象庁観測、河口から東方約40 km）とした．水際位置は、しきい値よりも大きな輝度に変化する部分を読み取って定めた．潮位はおおよそT. P. +0.8 m から -0.7 m の範囲で変動し、最も頻繁に観測される水位はおおよそT. P. +0.3 mである．

上記の手順で定めた水際位置を横断測量結果と比較する．図-3に横断測量線を、図-4に平均画像から推定した

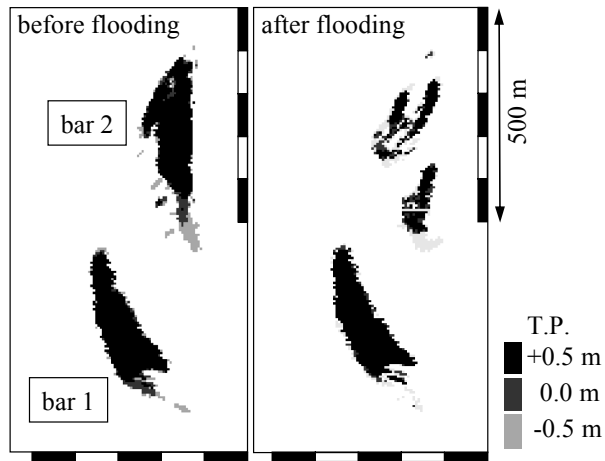


図-6 2007年7月出水前（左）と後（右）の砂州形状

水際位置と河道横断形状の比較を示す。Line 2は砂州2（図-4(b)の横断距離 550 m 付近）にかかっているが、水位が高くなるとこの砂州は水没するため、レーダによる読み取り結果が無い。

水際地形の読み取り精度は、その平均的な位置と勾配から判断した。図-4の縦方向に分布する記号（○）の塊の距離位置の平均が水際位置で、○の分布の勾配が水際位置の勾配である。横断測量結果とレーダ画像から推定された水際位置を比較すると、観測場所によっては10 から 20 m の系統的なずれがあり、これがレーダ観測の誤差である。この大きさはレーダ画像上で数ピクセルに相当し、これが生じる原因は特定できていない。一方、水位が変動する範囲内で、河道水際地形の勾配は捉えられている。以上より、水際位置の推定に系統的なずれが生じることは、次章で水位別に相対的な面積変化を論じる際には大きな問題とならないと判断した。

御前崎の観測潮位と観測域の河道内水位は一致しないが、波浪が小さく、また、出水時でなければその差は小さいことを、左岸の河口付近にある水門で観測された水位記録より確認している。本来であればこの水位記録を用い解析を行うのが理想的であるが、記録が間欠的であるために潮位を使用した。

3. 河道内地形の変化

(1) 河道内砂州の変形

図-1に示す $y = 750$ m 付近（砂州1）と $y = 1200$ m 付近（砂州2）にある河道内の砂州の形状変化を調べた。

2007年7月中旬には台風4号の通過に伴う大出水（ピーク流量約8,800 m^3/s 、鹿島水位観測所、河口から約25 km）があり、河道内の砂州が変形し、河口砂州が破断した。図-5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 T.P. +0.3 ~ 0.4 mにある時間帯に取得されたものである。

後に示す水位記録（図-7）から判断すると、2007年7

月の出水により、いずれの砂州も水没したと推測される。砂州1の形状は出水に伴い若干下流方向に伸びたが、基本的な形状は保たれ安定していた。これに対して、砂州2は、出水により分断され、その部分の埋め戻しは見られない。河口砂州の破断後の回復状況については武若ら²⁾が報告している。

平均画像内の砂州周辺に検査領域を設け、しきい値を超える輝度のピクセルを陸域として取り出した。砂州1、2の平均画像から読み取った2007年7月の出水前後の形状を図-6に示す。潮位が T.P. -0.5 ± 0.05 m, 0.0 ± 0.05 m, $+0.5 \pm 0.05$ mの範囲にある時に陸部のあった位置を評価し、重ねて表示した。砂州1は出水前後の形状変化が少ないのに対して、砂州2は流れにより大きな浸食を受け、砂州が分断された状況が捉えられている。

図-7に砂州1、2の面積変化、中ノ町（河口から約9 km、感潮区間外）で観測された日平均河川水位をあわせて示す。ここで、砂州の面積は潮位が T.P. -0.5 ± 0.05 m, $+0.5 \pm 0.05$ mの範囲にある時に評価した。また、図-8には砂州1、2のx方向、y方向重心位置Gx、Gyの経時変化を示す。砂州の重心位置は潮位が T.P. 0.0 ± 0.05 mにある時に映っている形状に対して評価をしており、ここで求めた量は厳密にはこの水位高さの水平断面の図心に相当する。

砂州の水平断面形状は、標高が高い領域から低い領域へとその断面が広がる末広がりの形状であるので、平均画像から読み取った砂州の面積も潮位が低いときに小さくなっている。潮位が低い時間帯（T.P. -0.5 m）に測った面積の散らばりは潮位が高い時間帯（T.P. $+0.5$ m）に測ったものと比較して大きく、河川流に常にさらされている部分の地形変動が相対的に大きいことを示している。

先にも説明したように、2007年7月の出水により砂州2の面積は大きく減じたが、これは標高の高い部分で顕著であった。砂州が水没したことにより浸食されたと考えられる。

図-7に示したように砂州の面積には、夏季から冬季に減じ、冬季から夏季にかけて増加するサイクルの存在が伺われる。また、面積の増減に合わせて、河道横断方向、流下方向に砂州の重心位置が変動する。砂州にある植生、水位上昇の規模と時期などがこれらと関連することが考えられるが、現時点では定量的な評価はできていない。なお、2008年の砂州1と砂州2の面積増加が始まる時期には2ヶ月程の差があるのに対して、2009年はほぼ同じ時期に増加が始まっている。

(2) 河道陸域面積の変化

先に示した砂州周辺よりも広い領域（ $0 \text{ m} < x < 1,000 \text{ m}$, $500 \text{ m} < y < 1,500 \text{ m}$, 面積 1,000,000 m^2 ）の陸域面積の経時変化を調べた（図-9）。前と同じように、平均画像の対象域内のしきい値を超える輝度のピクセルの数を調べた。河川敷、河川堤防、河川敷上の構造物な

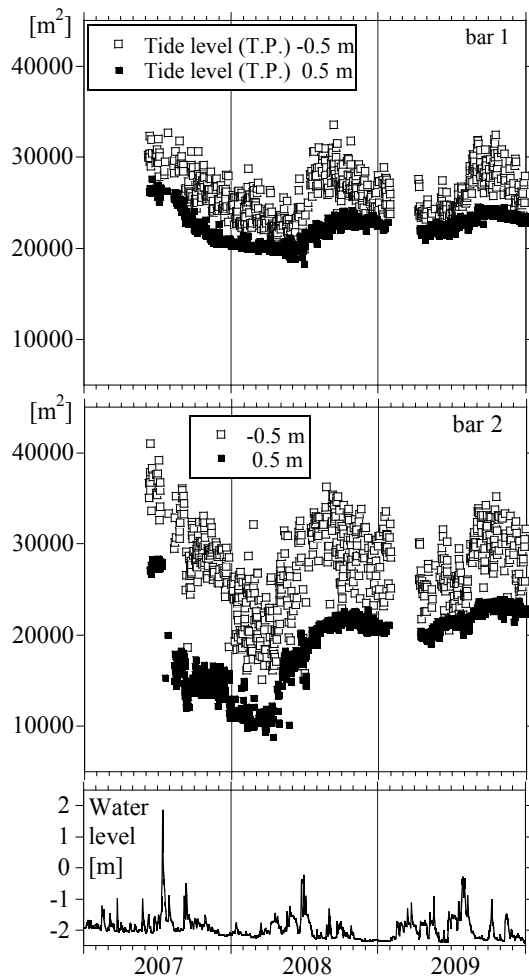


図-7 砂州1, 砂州2の水位別 (T.P. -0.5 m, +0.5 m) の面積変化と中ノ町観測日平均水位

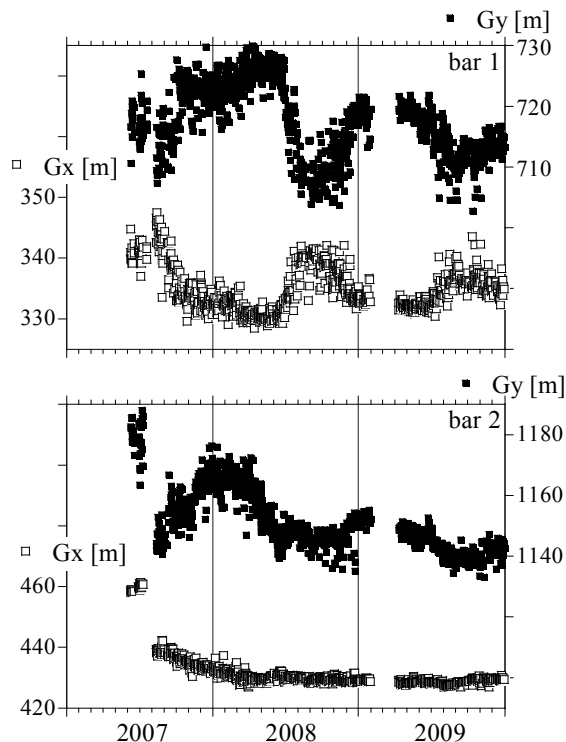


図-8 砂州1, 砂州2の重心位置 (水位 T.P. 0.0 m 観測時) の変化

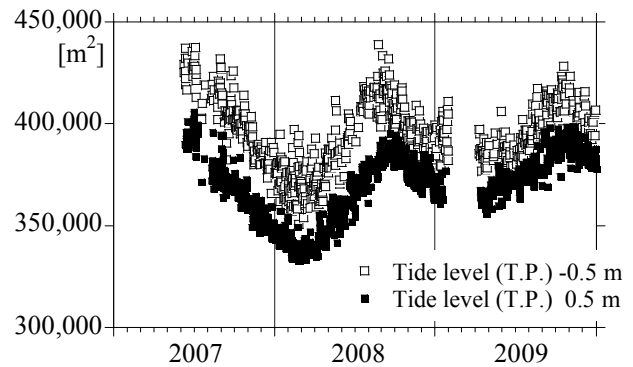


図-9 領域 ($0 < x < 1,000$ m, $500 < y < 1,500$ m) 内の陸部面積の変化

表-1 対象域の水位 T.P. -0.5 m ～0.5 mの間の土量変化

期間	土量変化 [m³]	
2007年6月 - 2007年8月	-15,000	出水
2007年8月 - 2008年2月	-39,500	
2008年2月 - 2008年9月	+48,000	
2008年9月 - 2009年5月	-28,000	
2009年5月 - 2009年10月	+29,500	

どは常に高輝度部として存在するので、差分が河道内に生じる陸域面積変化と考えられる。なお、面積の評価は、先と同様、潮位が T.P. -0.5 ± 0.05 m, $+0.5 \pm 0.05$ m の範囲にある時にそれぞれ行った。

表-1にいくつかの期間における対象域のおおよその土量変化を求めた。土量変化は高さ T.P. -0.5 m から $+0.5$ m の範囲の面積変化に水位差 1 m を乗じて求めた。

2007年7月の出水により、対象域からは少なくとも 15,000 m³ の土砂が失われた可能性がある。田島ら⁵⁾はこの出水により 20万m³ のオーダの土砂供給が河川域から海岸域にあったとしており、ここに説明した土量の減少はこれの一部であった可能性がある。

季節的な土砂量増減を通算すると僅かな値となり、対象領域への土砂ストック、対象領域からの土砂供給は小さい。季節的に現れる土砂量増減の過程、例えば、土砂供給が上流側からあるのか、浸食された土砂の行方などの土砂移動過程の詳細は不明であり、その解明には測量データ、河道内の流況解析を交えた議論が必要である。

4. 結言

Xバンドレーダにより天竜川河口域の地形を調べた。レーダ画像を平均化した平均画像から、感潮域の河道の形状を調べた。観測域は感潮域にあるので、水際線位置は潮位変動に伴い移動する。これを利用し、潮位が変化する範囲内の河道の地形を調べた。横断測量結果を用い平均画像からの地形の読み取り精度を検討した。水際の地形勾配を評価することはできたものの、水際位置には 10 m 程度の系統的なずれがあった。

砂州の変形状況を説明した。河口に最も近い砂州とその上流にある砂州の面積変化を水位別(低潮位～高潮位)に求めた。面積変化には季節的な変動に加え、短期的な変動が見られた。砂州の面積変化には、夏季から冬に向かって減少し、その後、春から夏にかけて増加する季節変動がある。これは砂州上にある植生の効果によりもたらされたと考えている。河川流量が増すと砂州の面積が急減するが、その回復は早い。砂州の上流側の地形は変動が少ないのに対して、下流側の浸食と堆積による変動は活発であった。出水による砂州の分裂、その面積減少、重心位置の変位などを示した。

謝辞：観測に際し、静岡県下水道公社西遠浄化センター、日本ヘルス工業(株)、東京大学佐藤慎司教授、田島芳満准教授に便宜を図って頂いた。浜松河川国道事務所には横断測量データを提供頂いた。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)、河川環境管理財団河川整備基金の支援を受けた。以上、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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 2010-03-25.
- 2) 武若 聡，高橋 悠，田島芳満，佐藤慎司：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，海岸工学論文集，55，pp. 646-650，2008.
- 3) 武若 聡，高橋 悠，高橋 亮，田島芳満，佐藤慎司：天竜川の河口フロントと河口地形の観測，海岸工学論文集，56，pp. 411-415，2009.
- 4) Takewaka S.: Measurements of shoreline positions and intertidal foreshore slopes with X-band marine radar system, Coastal Engineering Journal, Vol. 47, pp. 91-107, 2005.
- 5) 田島芳満，高川智博，浅野泰史，佐藤慎司，武若聡：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，55，pp. 646-650，2008.

(2010. 4. 8受付)