

## 河川基金助成事業

# 天竜川河口域の河道・河口砂州・河口テラス動態の 確率的評価

助成番号：2022-5211-016

筑波大学システム情報系  
教授 武若 聡

2022 年度・2023 年度

## 天竜川河口域の河道・河口砂州・河口テラス動態の確率的評価

武若聡・筑波大学

## 目次

1. 研究のねらい
  2. 観測の概要
  3. 河道内砂州の掘削
  4. 河道内砂州の掘削前後の河口位置と河口幅の変化
  5. 出水時の表面流速分布の推定
  6. XBeach による河川から海域への土砂供給過程の再現
  7. 結び
- 参考文献

## 1. 研究のねらい

天竜川では総合土砂管理が行われており、今後、流域より海域に供給される土砂量の増加が見込まれている。これに関連して、河口域でXバンドレーダ観測を行い、河口砂州、河道形状等の連続観測を行った。これらとこれまでに蓄積した観測結果と合わせて、「河道内の砂州の掘削後の埋め戻し、消長の追跡」、「河道内砂州掘削前後の出水フラッシュによる河口位置と開口幅の変化の解析」、「出水時の表面流速分布の推定」、「XBeachによる河川から海域への土砂供給過程の再現」を行い、常に変動を見せる河口域の地形と流れの経過を説明する。結果をとりまとめ、河道管理、河口域の地形管理などを支援する情報「河道掘削効果の持続時間」、「河川から海域への土砂供給など」を示す。

## 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月より観測を継続している。レーダ画像には河道内の水際位置、河道砂州、河口砂州などが映る。図-1に観測サイト、レーダ画像、座標系などを示す。本観測で使用しているXバンドレーダ（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。Xバンドレーダは送信した電波の反射を収集する能動リモートセンシングであり、夜間、少雨時にも観測が可能である。有効な観測範囲はおおよそ1,000 m四方であり、レーダ波の反射強度分布（＝レーダ画像）の判読、解析より対象物の分類（陸域、人工物、水域等）とその動きなどを推定する。陸域と水域を見分け、これらの平面的な分布を知ることができるが、高さの情報は直接取得できない。

レーダが発するマイクロ波の反射を専用のサンプリングボードで収録した。この際のサンプリング周波数より定まる径方向の観測空間分解能は7.5mである。観測結果はレーダを中心とする約5,556 m四方の領域を1,024×1,024ピクセルの画像として2秒毎に収録したが、本研究の解析に使用できるのは十分な反射が得られるおおよそ1,000 m四方

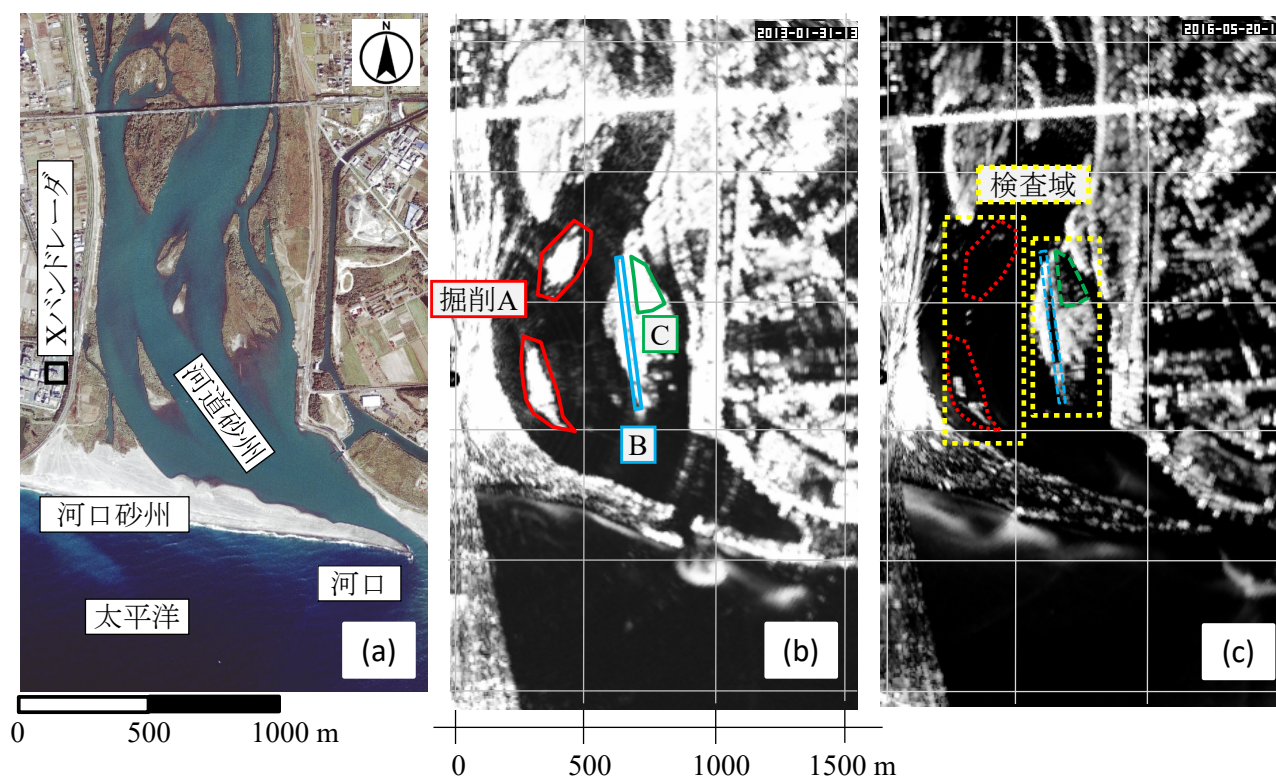


図-1 天竜川河口域とレーダ画像，掘削 A，B，C と検査域の範囲  
 (a) 天竜川河口・衛星画像（2008 年 10 月 4 日，潮位（御前崎）：0.38 m）  
 (b) 時間平均画像：掘削前（2013 年 1 月 31 日 13 時，潮位（御前崎）：-0.51 m）  
 (c) 時間平均画像：掘削後（2016 年 5 月 20 日 11 時，潮位（御前崎）：-0.52 m）

の領域である．画像の1ピクセルの大きさは5.43 m×5.43m，画像間の時間は2秒である．偶数時間の0分から10分の間に流速分布推定を行うためにデータを取得した．

図-1(b)，(c)はレーダ原画像を時間平均化した時間平均画像であり，陸域，人工物などのレーダ波の反射が大きい部分が高輝度に表示されている．この時間平均画像は毎時に作成され，これの判読，解析により河道内の地形変化，掘削の効果の持続性などを調べた．対象域は感潮域内にあり，潮位変動による地形の水没・露出がある．潮位が等しい時間帯の観測画像を比較することにより，潮位とほぼ等しい標高の地形変化を追跡できる．この後の解析では反射が大きかったピクセル（画像中の高輝度部）を陸域（水没しておらず露出している部分）からの反射としてカウントし，砂州面積の減少と増加を調べた．

本研究では河口より東方約40 kmに位置する御前崎験潮所で観測された潮位を使用する．この海域の平均海面位置はおおよそ標高0 mにある．時間平均化する前の原画像を解析することにより，河川表面を流れる漂流物の移動速度を推定できる．これにより，河道掘削前後の表面流速分布を推定し，掘削が流水に及ぼした効果も調べた．

### 3. 河道内砂州の掘削

天竜川河口域では2013年以降に，図-1(b)，(c)に示す河道砂州の掘削A，B，Cが行われた．これらの概要を表-1に示す．いずれの箇所にも掘削前に植生があった．

表-1 掘削の概要

| 掘削 | 内容                                                      | 工事時期                      |
|----|---------------------------------------------------------|---------------------------|
| A  | TP-0.5 m までの掘り下げ<br>工事面積：約 36,000 m <sup>2</sup>        | 2013 年 7 月<br>－2014 年 1 月 |
| B  | 長さ 450 m，幅 20 m の直線切り欠き<br>工事面積：約 16,000 m <sup>2</sup> | 2013 年 1 月<br>－3 月        |
| C  | TP-0.5 m までの掘り下げ<br>工事面積：約 26,000 m <sup>2</sup>        | 2016 年 1 月<br>－3 月        |

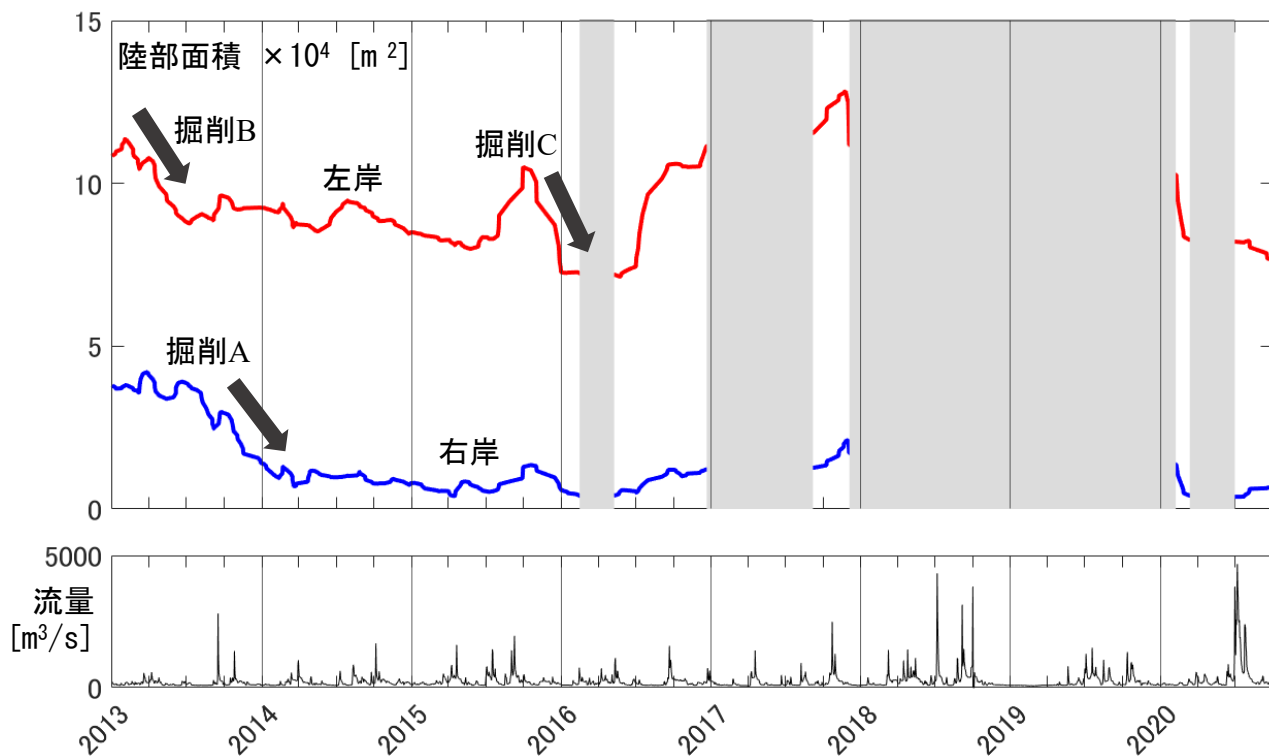


図-2 天竜川河口域・左右岸の陸部面積（御前崎潮位が  $-0.5 \text{ m}$  前後の時）と河川流量（鹿島観測所，河口から約  $25 \text{ km}$ ）の経時変化。赤：左岸・陸部面積，青：右岸・陸部面積，グレーハッチング：レーダ観測欠測期間

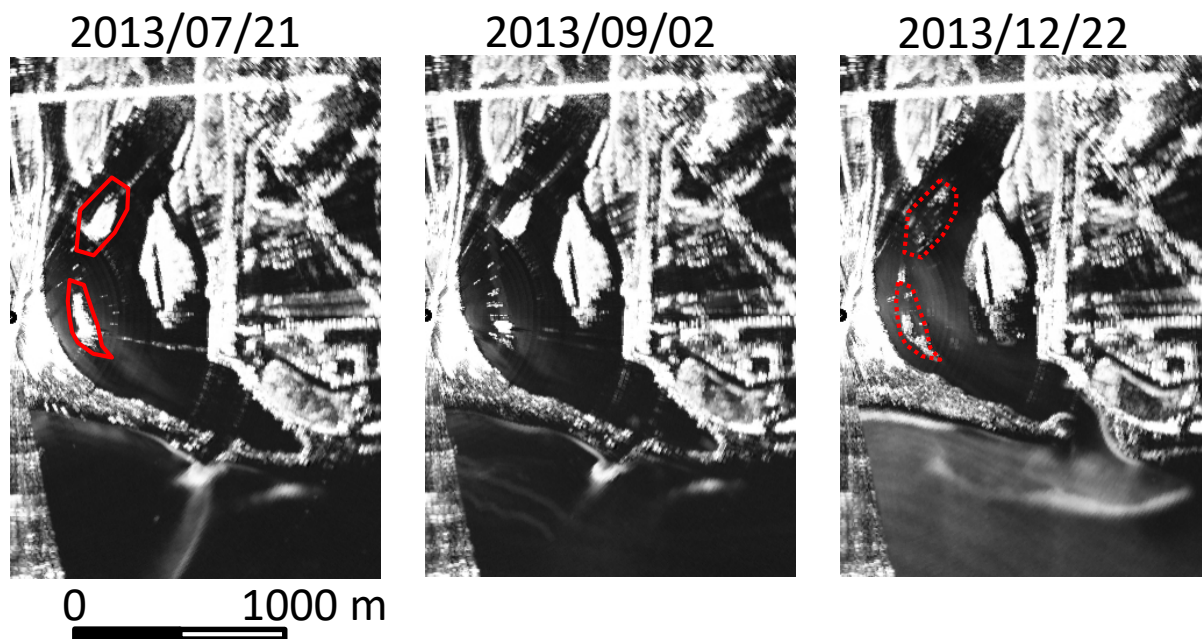


図-3 掘削 A（右岸砂州の掘削）の経過

〔掘削A〕 右岸にある二つの砂州が標高 $-0.5 \text{ m}$ まで切り下げられた。図-1(b), (c)に潮位が $-0.5 \text{ m}$ の時に取得された掘削前後の観測結果を示す。掘削前の2013年の観測結果では、二つの砂州は完全に露出している。掘削後の2016年の観測結果では、上流の砂州は水没しており、下流の砂州は若干露出している。

〔掘削B〕 左岸にある砂州内に幅約 $20 \text{ m}$ ，長さ約 $450 \text{ m}$ の直線切り欠きが設けられた。掘り下げは標高 $-0.5 \text{ m}$ よりも深くまで行われている。

〔掘削C〕 左岸にある砂州の一部が標高 $-0.5 \text{ m}$ 程まで掘り下げられた。

潮位が  $-0.49 \text{ m}$  から  $-0.51 \text{ m}$  の間にあった時に作成された時間平均画像を解析し，掘削前後の変化を調べた。



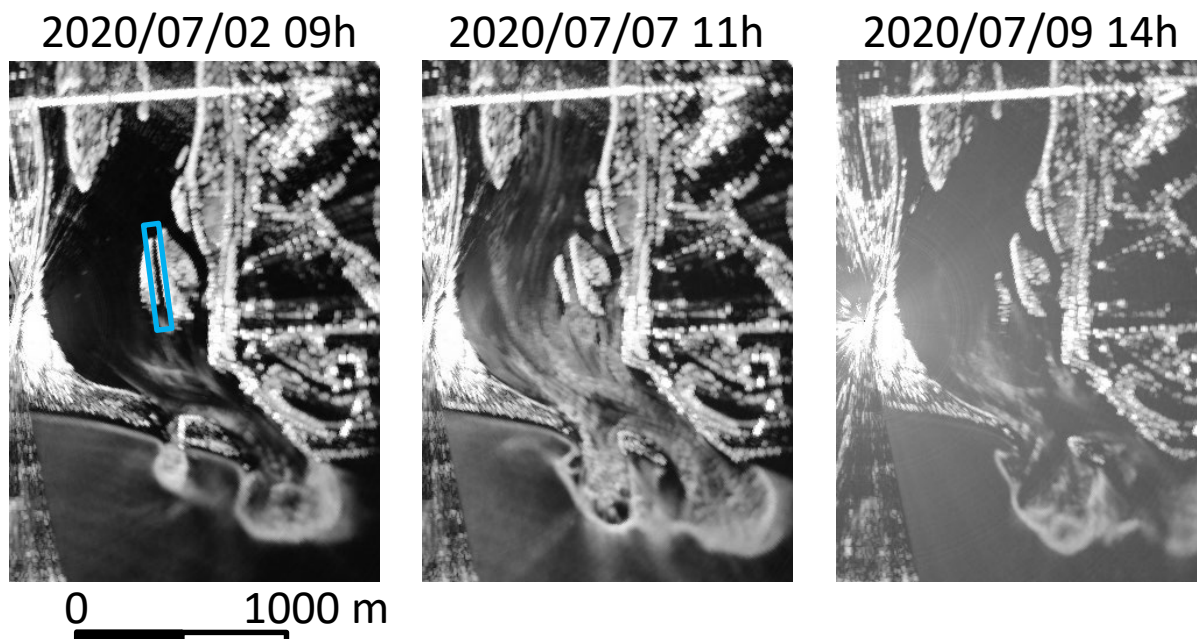


図-4 掘削B（直線切り欠き）周辺の2020年7月出水前後の地形変化

時間平均画像が取得された時の潮位（御前崎）は約 -0.5 m

2日9時（流量 2,320 m<sup>3</sup>/s），7日11時（流量 4,450 m<sup>3</sup>/s），9日14時（流量 3,600 m<sup>3</sup>/s）

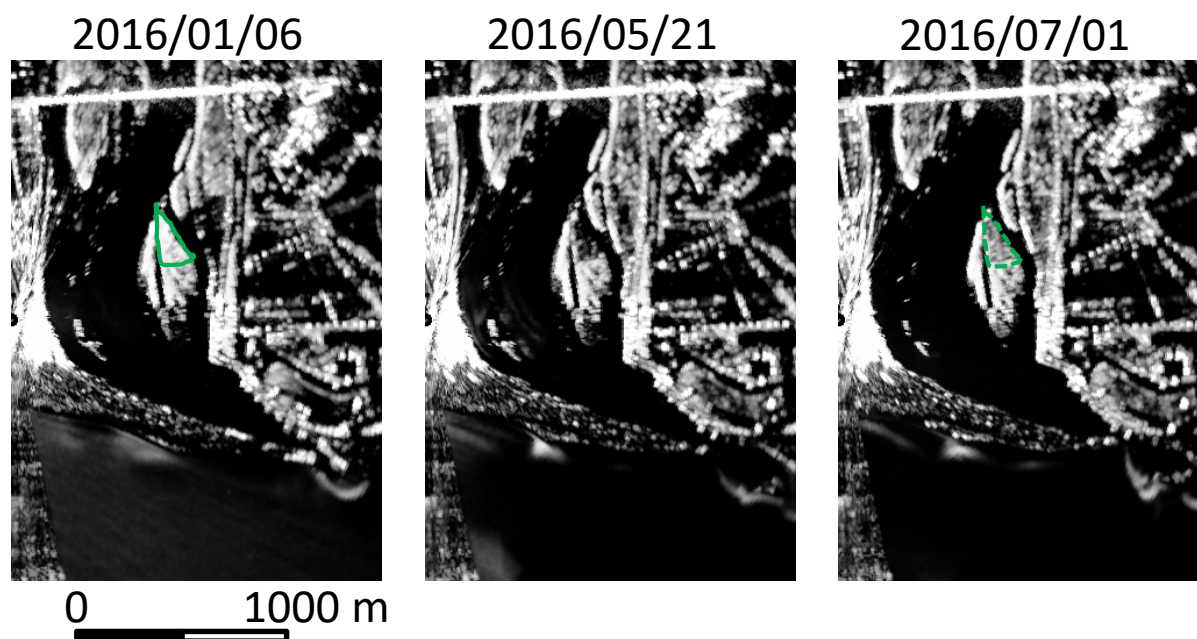


図-5 掘削Cの経過（緑の枠：左岸における掘削工事の範囲）

時間平均画像が取得された時の潮位（御前崎）は約 -0.5 m

水没していない（露出している）部分は，時間平均画像内に設けた検査域に含まれる輝度値が閾値を超えたピクセルとして求めた．この総数より，潮位が-0.5 m 程の時に水没しない（露出している）領域の面積を定めた．図-1(c)に右岸検査域（面積：約 265,000 m<sup>2</sup>）と左岸検査域（面積：約 230,000 m<sup>2</sup>）の範囲を示す．

図-2に潮位が約-0.5 m の時の左右岸検査域内の露出面積を示す．灰色のハッチ部はレーダ機器の不調，交換等によりデータが取得できなかった期間である．

右岸では2013年から2014年にかけて掘削Aが行われた．その効果は2020年の時点でも持続し，再堆積は生じていない．この掘削による出水時の流速場の変化を次章で説明する．

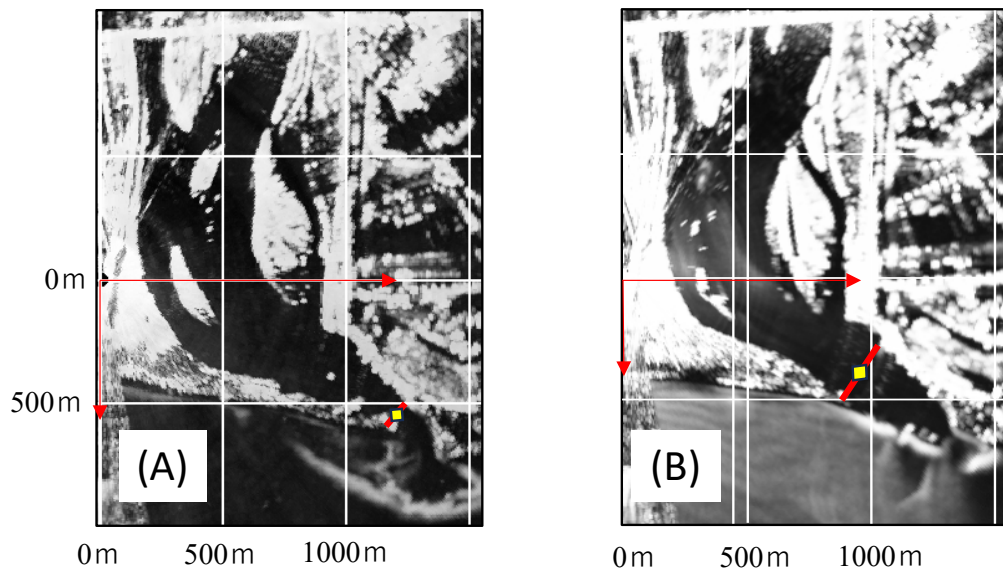


図-6 河口開口位置，開口幅の定義

(A) 2011 年 5 月 5 日：開口幅：70 m，開口位置（東西）：1,207 m，開口位置（南北）：537 m  
 (B) 2017 年 11 月 30 日：開口幅：240 m，開口位置（東西）：967 m，開口位置（南北）：410 m

図-3 には掘削 A の工事期間中の時間平均画像を示す。上流側，下流側の砂州が掘削され，徐々に露出している部分の面積が減少する様子が捉えられている。

左岸で行われた掘削 B, C による面積変化は図-2 に示す矢印で示す時期（2013 年，2016 年）に反映されている。2020 年 7 月の出水では，掘削 B により設けられた砂州内の切り欠きがきっかけとなり，周辺の砂州が大きく変形したと考えられる。図-4 に出水前後の時間平均画像を示す。出水後，切り欠きは不明瞭となり，その周辺にあった砂州が浸食され，下流方向に移動したように見える。

2016 年当初に行われた掘削 C の効果は持続せず，2016 年 7 月頃までに再堆積が進んだ。図-5 に掘削前後の時間平均画像を示す。掘削を行った領域では標高 -0.5 m は維持されず，早い時期に再堆積があった。この間に顕著な出水はなかった。ここには，掘削前，植生が密であったことより（図-1(a)），堆積が進みやすい箇所であった可能性がある。また，この領域の流速が掘削 A の行われた河道右岸寄りに比して小さいことも再堆積の要因として考えられる（次章に示す図-6 の出水中の表面流速分布の推定結果から判断）。一方，直近の掘削 B では再堆積は生じておらず，掘削 C の再堆積が早い内に進行した原因を確定するにはさらなる検討が必要である。

以上をとりまとめる。各掘削の効果，持続性などは以下の通りである：

- 〔掘削A〕 再堆積は生じなかった。出水時の水際流速を低下させた。また，後の5章で示すように，流速が大きくなる領域を河道中央に変移させる効果があった。
- 〔掘削B〕 再堆積は生じなかった。掘削による切り欠きが，出水中の周辺砂州の浸食のきっかけとなった可能性がある。
- 〔掘削C〕 掘削効果は持続せず，再堆積が徐々に生じた。これの原因として，掘削部の流れが遅いこと，掘削前には植生が密に繁茂し堆積が生じやすい場所であることなどが考えられる。

#### 4. 河道内砂州の掘削前後の河口位置と河口幅の変化

天竜川の河口開口位置は東寄りにあることが多い。大規模な河道内砂州の掘削により流れ場が変化した可能性があり，その影響を受けたかを調べた。具体的には，河口開口位置，開口幅をXバンドレーダ観測の結果より読み取り，2014年を境に変化があるかを調べた。また，年の最大流量を観測した前後の河口幅の変化を求め，流量と開口幅変

## 鹿島 日流量

## 開口位置 (●) と開口幅 (—) の変化

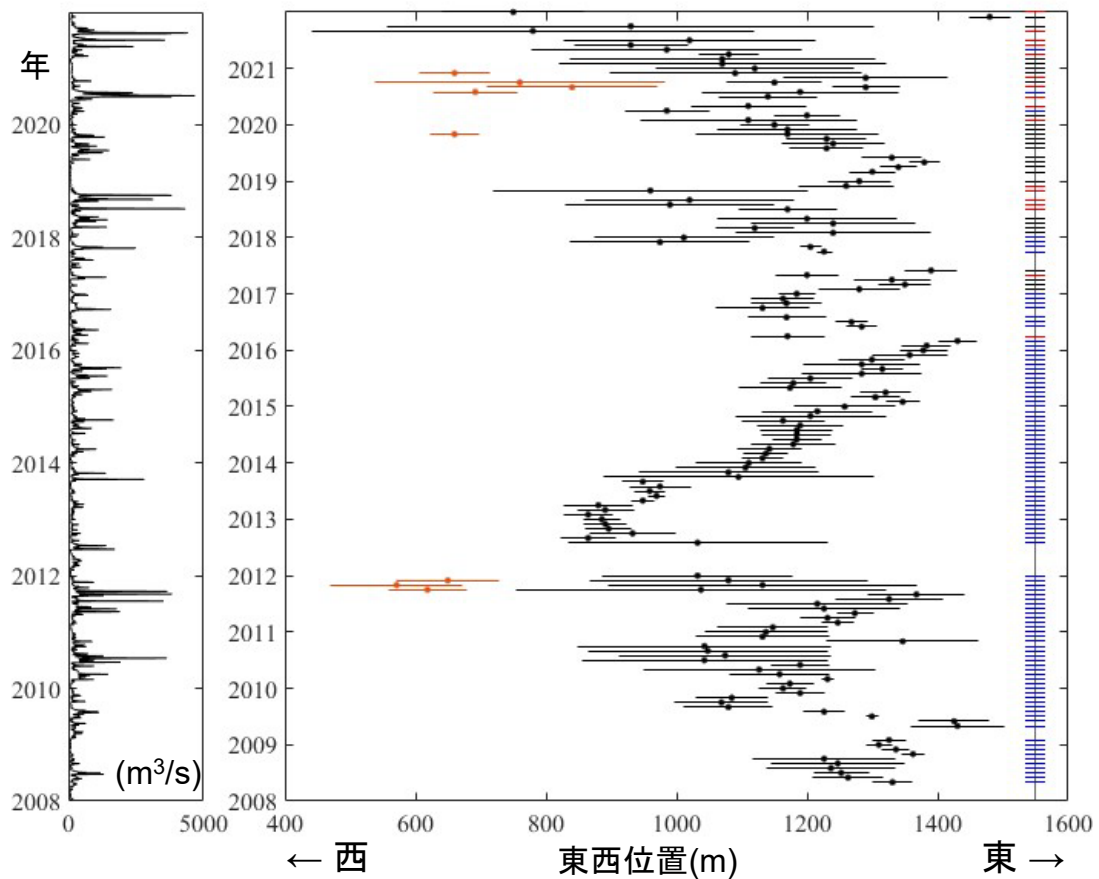


図-7 河口開口位置（東西），開口幅の経年変化  
左パネル：鹿島日流量，メインパネル右列：青＝レーダ画像，赤＝衛星画像

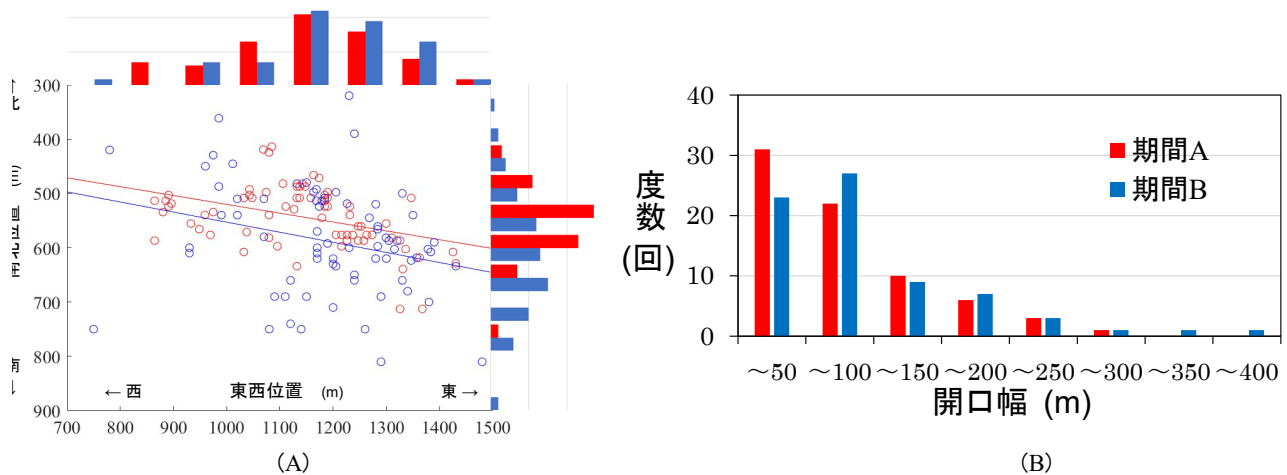


図-8 河口の (A) 開口位置，(B) 開口幅の頻度分布。期間 A=2008-2013，期間 B=2014-2021

化の関係を調べた。

### (1) 河口開口位置と開口幅の定義

図-6に示すように，開口部は河口砂州の先端と対岸を結ぶ最も短い線分で定義した。開口位置は線分の中心点（東西位置，南北位置），開口幅は線分の長さとした。開口部が2箇所にあった場合は，右岸から延びる砂州と河口中央の砂州の間，河口中央の砂州と左岸を結ぶ二つの線分を設け，開口位置と開口幅を定めた。

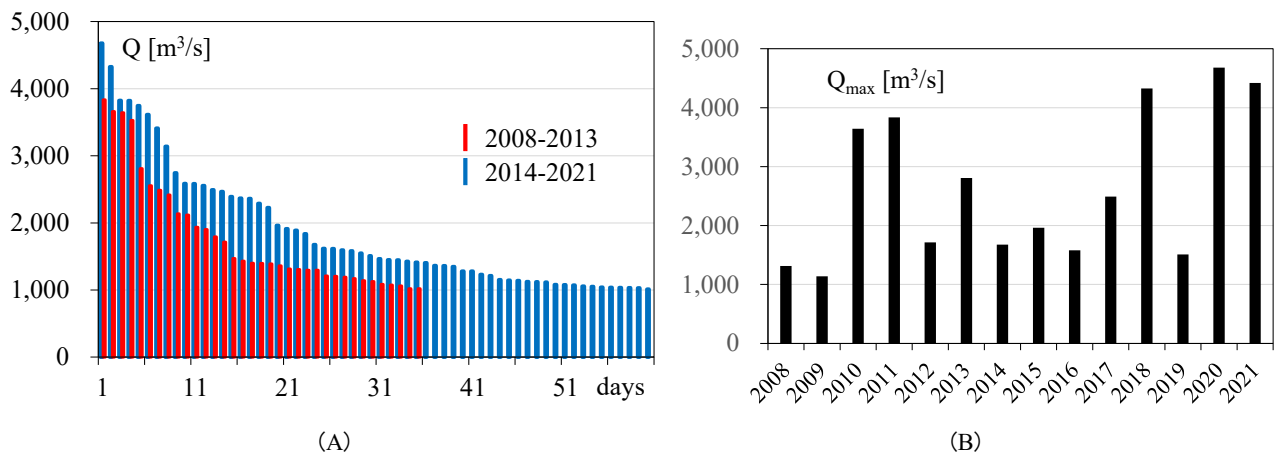


図-9 (A) 鹿島日流量 1,000 m³/s 以上を記録した期間別の日数, (B) 年最大日流量の経年変化

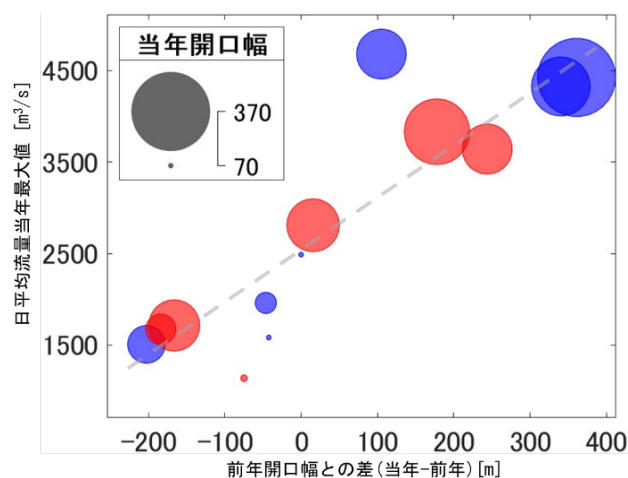


図-10 出水規模と河口開口幅の変化. 縦軸：毎年の最大の出水量, 横軸：年の最大出水による開口幅の変化.

図中の円の径：出水前の開口幅, 図中の円の色：赤色 = 期間 A, 青色 = 期間 B のデータ

## (2) 河口開口位置と開口幅の変化

図-7に河口開口位置（東西位置）と開口幅，日流量の変化を示す．Xバンドレーダが欠測していた時の情報は衛星画像（Sentinel-2）より読み取った．出水がある都度に開口位置が間欠的に西方に変位し，開口幅が増す．また，流量が相対的に小さい期間が続くと，河口位置は東方に変位し河口幅が狭まることが多い．以上が繰り返して生じるのが河口地形プロセスになる．

2014年に前章で説明した河道内砂州の掘削が行われている．その前後の時期（期間A：2008-2013，期間B：2014-2021）の河口開口幅，開口位置（東西，南北）の頻度を図-8に，鹿島の各年の最大日流量と日平均流量が1,000 m³/s を上回った日数の頻度を図-9示す．掘削が行われた後，河口開口幅は平均的に約20 m 広がっている．また，開口位置は平均的に約50 m 東方に変位している．これらは，河道内の砂州掘削の効果に加え，二つの期間の流況の変化によるものと考えられるが，その詳細を確認するには至っていない．

先に説明したように，出水があると河口幅が拡大する．この関係を図-10に示す．縦軸は毎年の最大の出水量，横軸は年の最大出水による開口幅の変化を表す．また，図中の円の径は出水前の開口幅を表し，赤色が期間A，青色が期間Bのデータであることを示す．この図からいくつかのことが読み取れる：

- 流量が2,500 m³/s 以上の出水があった時に河口幅の拡大が見られる
- 前年からの河口幅の拡大，縮小には該当年の開口幅は影響しない
- 河口幅拡大，縮小への河道内砂州の掘削による影響は見られない



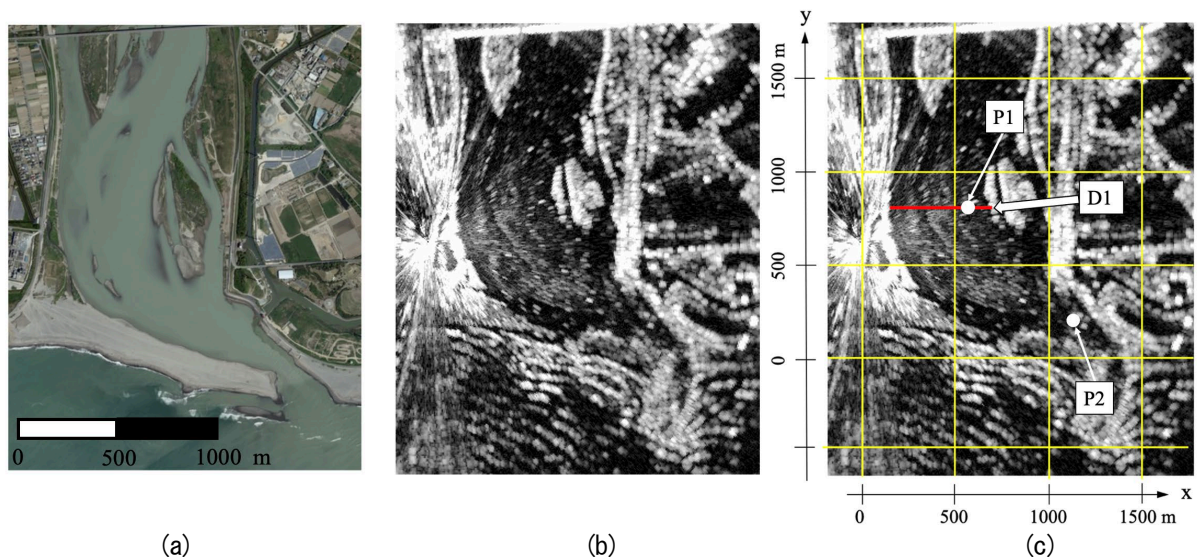


図-11 (a) 観測サイト（天竜川河口，国土地理院撮影 2015年5月1日），(b) レーダ画像（2020年7月1日4時），(c) 座標系，P1，P2：流速の時間変化を調べた地点．測線：D1（長さ：470 m）

## 5. 出水時の表面流速分布の推定

図-11 に観測対象領域のエコー画像（原画像）とその説明を示す．画像中央に天竜川の河道が映っており，河道内の砂州，河口砂州，遠州大橋等の位置を確認できる．

2 秒毎に収録されたレーダ画像を連続的に表示すると，輝度の大きい点群の流下方向への移動を視認できる．輝度の大きい部分は河川表面にある浮遊物（流木，ごみ等）であると考えられるが，出水中に直接の確認はできていない．本研究では高輝度の点群の流下方向への動きを PIV 法（Particle Image Velocimetry，粒子画像流速測定法）により解析し，2010 年（出水 1）と 2020 年（出水 2）の出水を対象として表面流速の分布と時間変化を推定する．

本研究では 2 秒毎に取得された一連のレーダ画像に PIV 法を適用し，河口付近の出水中の表面流速の分布を推定する．ビデオカメラで河川流を撮影し，これを PIV により解析して表面流速分布を推定することについては既に研究が重ねられている．ここでは，同様の考え方で，レーダが捉えたエコー画像を解析する．

PIV の解析には MATLAB 上で動作する mpiv を使用した．PIV 解析を行う際には，テンプレートの大きさ，テンプレート間のマッチングを行う探索範囲，画像間隔等，様々なパラメータを試行錯誤的に定める必要がある．ここでは，様々なパラメータの組み合わせによる解析を行い，尤もらしい結果を与えるパラメータの組み合わせを定めた．これにより得られた流速分布の推定結果の妥当性は次に議論する．

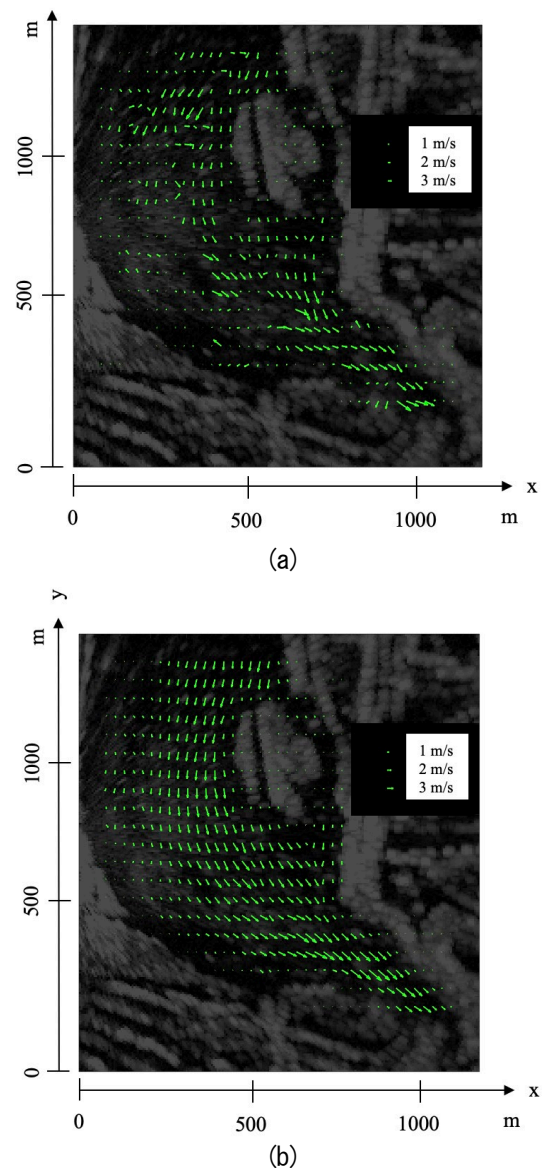


図-12 PIV解析結果  
(出水2：2020年7月1日4時，鹿島流量：4,700 m<sup>3</sup>/s)  
(a) 瞬時流速分布 (b) 平均流速分布

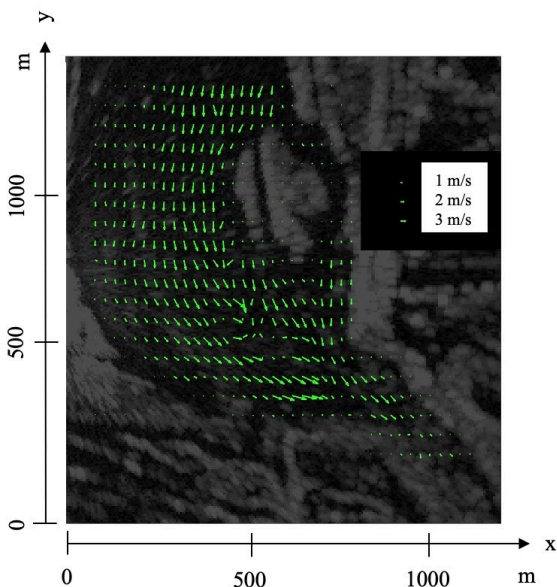


図-13 PIV解析結果：平均流速分布  
(出水2：2020年7月1日10時，鹿島流量：5,200 m<sup>3</sup>/s)

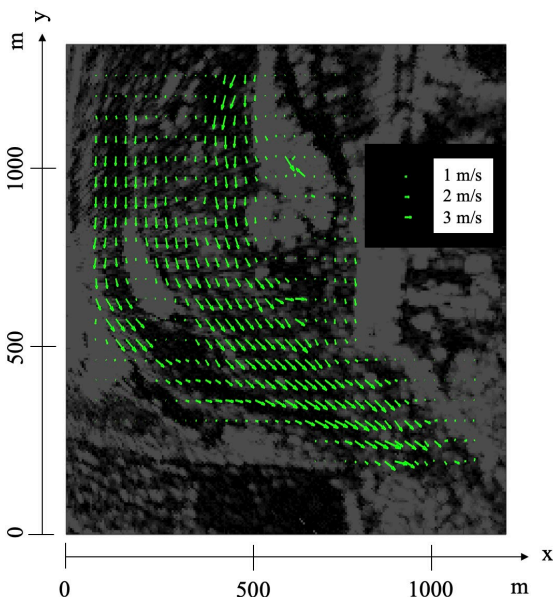


図-14 PIV解析結果：平均流速分布  
(出水1：2010年7月15日0時，鹿島流量：4,860 m<sup>3</sup>/s)

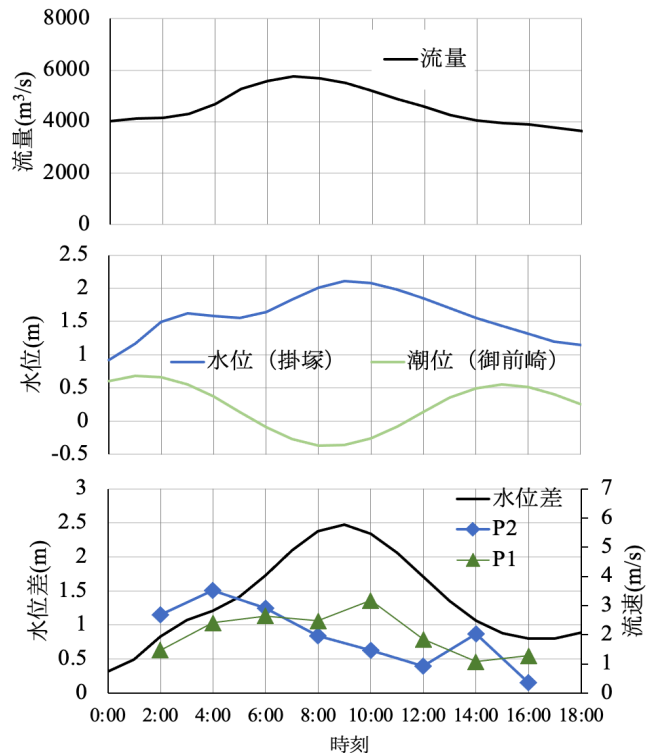


図-15 流速の時間変化 (出水2：2020年7月1日)  
(上) 鹿島流量，(中) 河道内外の水位 (T.P.値)，(下) 流速と河道内外の水位差

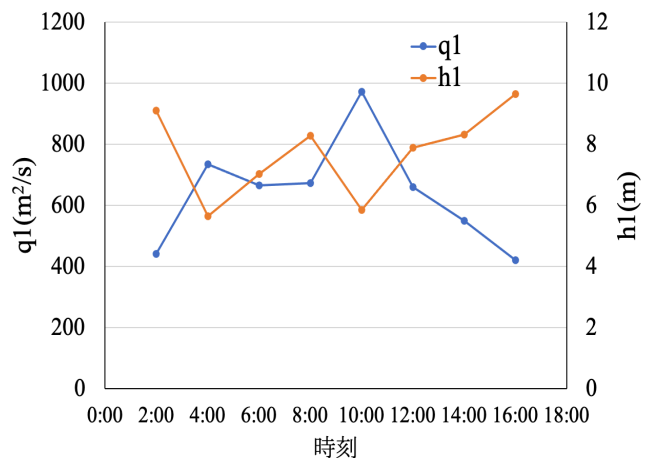


図-16 測線D1を通過する表面流速量 (出水2：2020年7月1日)

### (1) 表面流速分布の推定

一組の画像ペア (2 秒間隔，出水 2) を PIV 解析して得られた流速ベクトルの分布を図-12(a)に示す (以降では表面流速を単に流速とする)。流れが河口に向かっていて、河口砂州の存在により大きく向きを変えていること等が読み取れる。流速ベクトルの中には、河川流路内で誤推定されたと思われる結果、流れが無い陸上部の誤推定も含まれる。後者については、解析範囲を限定するマスキングを行えば対処できる。

約 9 分間の観測で得られた 256 組の推定結果を平均した平均流速ベクトル分布を図-12(b)に示す。先に示した結果と比較して、流速ベクトルは滑らかに分布し、流向が徐々に変化する状況、流れが加減速する様子などが捉えられている。図-13 には後続の時間の推定結果を示す。y~500 m や河口付近の流速が小さく推定されている。この理由については後に説明する。

図-14 に出水 1 の観測結果より推定された平均流速分布を示す。2010 年には(x, y)=(200 m, 700 m)付近に長さ約



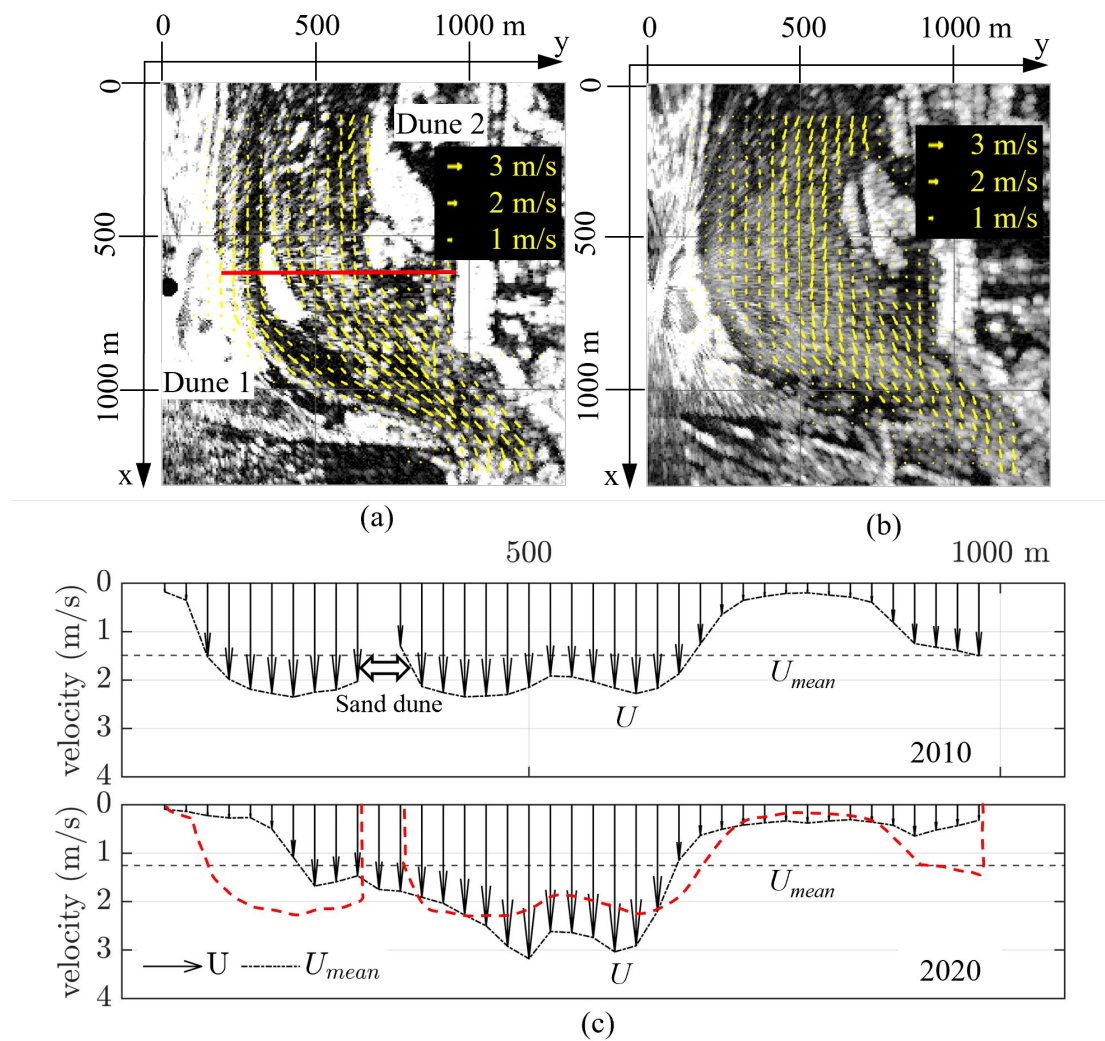


図-17 河道内砂州掘削前後の流速分布

(a) 2010 年出水時流速分布（赤線：南北方向流速成分を比較する測線），(b) 2020 年出水時流速分布，  
(c) 2010 年南北方向流速成分，(d) 2020 年南北方向流速成分

250 m，幅約 200 m の河道内砂州があり，これを避けるように流れが分布することが捉えられている。

2010年の時点で存在していた河道内砂州は2013年度後半に掘削・浚渫された。出水2で得られた流速分布では河道砂州のあった領域上に流れがあるが，その流速は小さい。2020年の時点で，砂州頂部が水上に現れることはないものの，徐々に埋戻しが進んだと考えられる。

## (2) 出水中の流速変化

毎時の平均流速ベクトル分布を推定した結果より，2地点P1, P2（図-11(c)）の流速ベクトル絶対値の経時変化を調べた（図-15）。これらは，河川幅（流れがある横断方向の範囲）が相対的に大きい地点と河口砂州付近の河川幅が小さい地点である。同図には，鹿島水位観測所（河口から約25 km）の推定流量，掛塚水位観測所（河口から約3 km），御前崎潮位（河口の東方約40 km）とこれらの間の水位差を示した。鹿島で流量がピークを迎えた約2時間後の9時頃に河口付近の河道内・海域の水位差が最大となる。これは，下流端水位を0 mとして，クライツ・セドン式から求めた洪水到達時間に一致する。

P1においては，洪水の最盛期の前後に推定された流速の絶対値がピークを迎え，局所の水位勾配に応じて流速が約1 m/s から3 m/sの範囲で変化する様子が捉えられている。この推定の妥当性については別途観測による検証が必要である。一方，P2においては，4時までの推定結果はP1の値を上回っているものの，6時から12時の推定はP1に比べて小さくなっており，流れの連続性を考えると矛盾する結果に見える。この時間帯は潮位が下がり，河口から波が

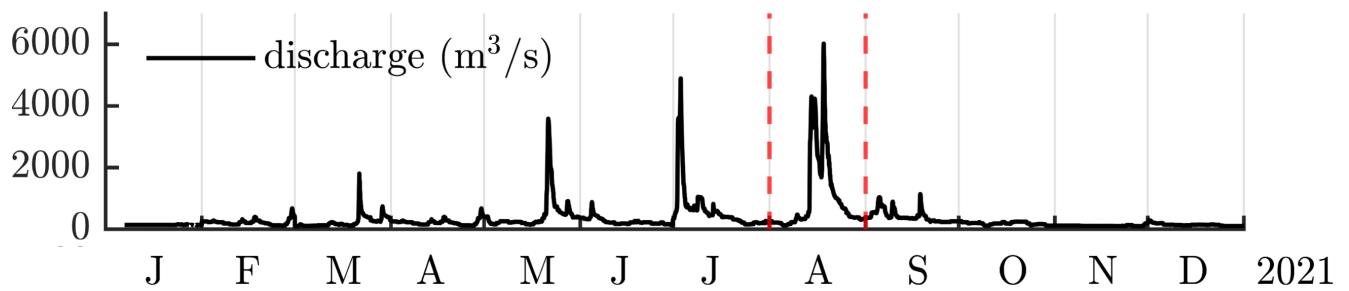


図-18 流量変化（鹿島，2021 年）

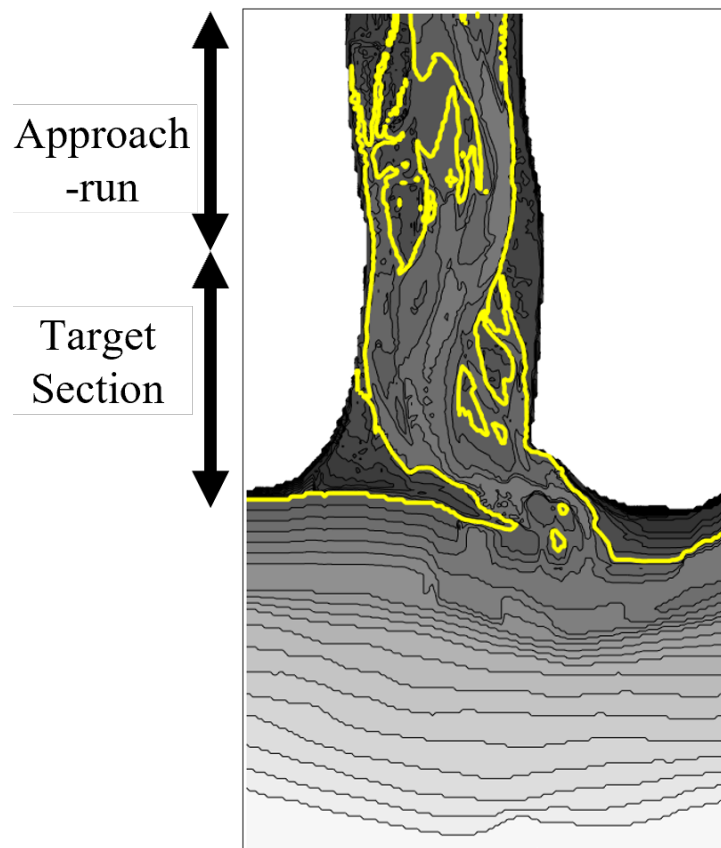


図-19 XBeach の計算領域.

上部：助走区間，下部：ターゲット区間．等値線：測量結果（2021 年 4 月）．黄線：標高 0 m

進入してP2付近で砕波が生じていた可能性がある．砕波があるとマイクロ波の反射が不規則になり，浮遊物がこれに紛れて，PIVによる追跡が困難になったと考えている．

河道横断方向に測線D1（図-11(c)）を設け，これらに直交する流速成分の積算値 $q_1$ を求めた．具体的には，D1に沿って求めた流速の平均値 $V$ にD1の長さを乗じた量 $V \times D1$ を求めた．続いて，2時間前の流量推定値（鹿島）を $q_1$ で除した量 $h_1$ を求めた．ここで，洪水到達時間を考慮し，流量推定値（鹿島）は2時間前の数値を使用した．このようにして求めた $q_1$ と $h_1$ の時間変化を図-16に示す． $h_1$ は測線に沿っての平均的な全水深を代表する量である．なお，出水中，D1は一定であった．

$q_1$ は鹿島流量がピークを迎えたおおよそ2時間後に最大となり，平均表面流速の変動は洪水の発達と減衰に同期していた．一方， $h_1$ は6 mから8 mの間を中心に変動している． $h_1$ のオーダは尤もらしいものと判断するが，測線に沿っての河床高，各時間の水位が不明なため，この妥当性を定量的に評価することは難しい．河床が洪水中により上



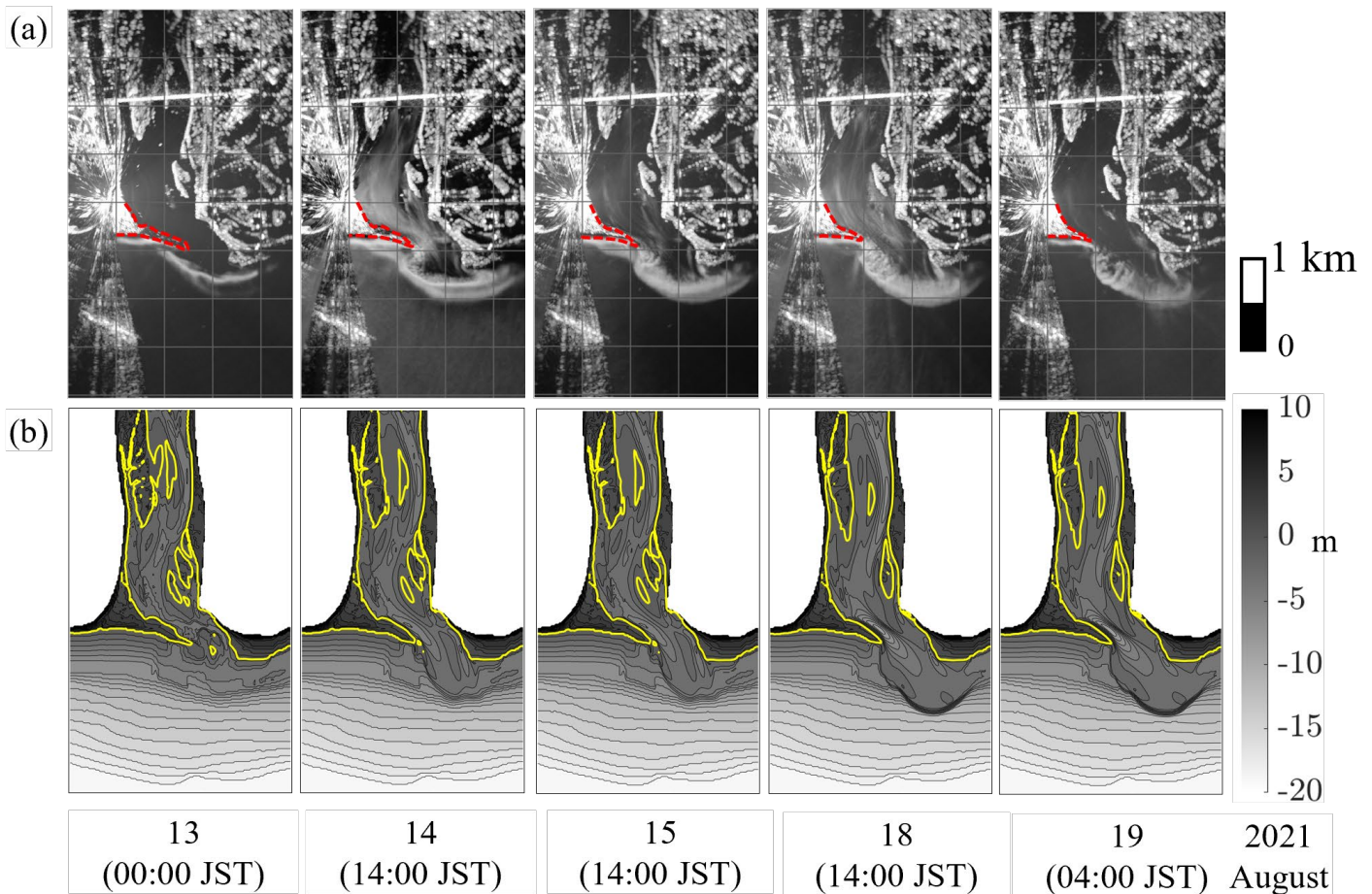


図-20 XBeach 計算結果とレーダ観測結果の比較：地形（2021年8月13日-19日）

(a) Xバンドレーダ観測結果、赤線＝河口砂州外郭、(b) XBeach 計算結果、黄線＝標高0 m

上部：助走区間，下部：ターゲット区間．等値線：測量結果（2021年4月）．黄線：標高0 m

昇下降し得ること、水位が洪水流と潮位の位相関係により定まること等、不確定な要因を定めるための検討が必要である。

### (3) 河道内砂州掘削前後の流速分布の変化

前章に示したように2013年から2014年にかけて、大規模な河道内砂州の掘削が行われた。この掘削が流速場に与えた変化を示すのが図-17である。砂州を掘削する前の2010年の時には、右岸の直近まで大きい流速があった。砂州を掘削した後の2020年では、流速が最大となる位置は河道中央部に変位している。このように、河道内の砂州を除いたことにより、流速が大きくなる領域を河岸から遠ざけることができ、この点からこの掘削が有効であったと判断できる。

## 6. XBeach による河川から海域への土砂供給過程の再現

### (1) 概要

2021年8月に天竜川河口で発生した1週間の洪水をXバンドレーダで観測し、この流況と地形変化をXBeachにより再現した。図-18に2021年の鹿島で推定された日流量の変化を示す。8月に約1週間継続した出水があった。2021年8月の出水の規模は、1956年から2021年に観測された年日最大流量の上位約1/3に相当するものである。

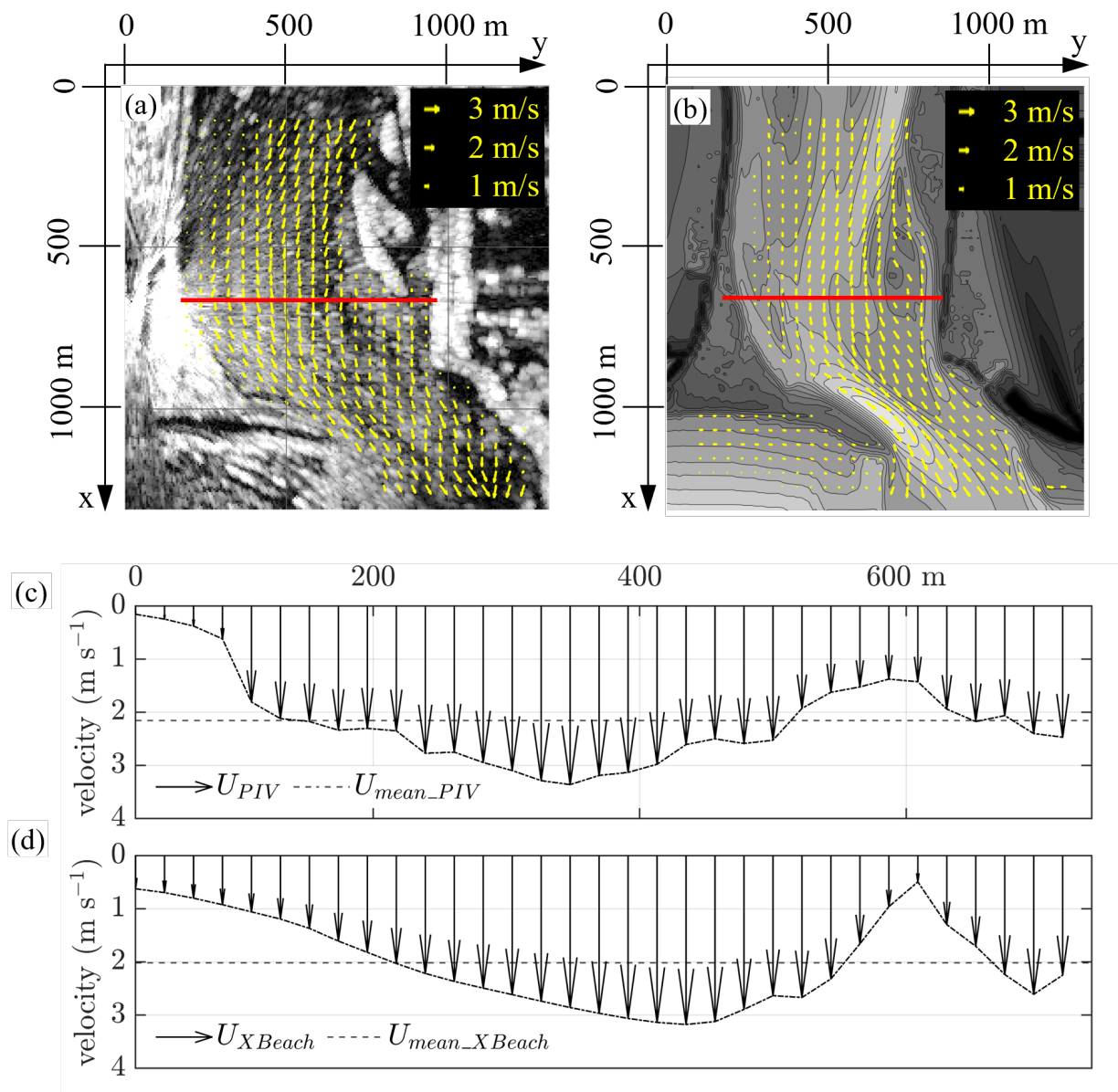


図-21 XBeach 計算結果とレーダ観測結果の比較：表面流速分布（2021 年 8 月 18 日 18 時）

(a) X バンドレーダ観測結果の PIV 解析による表面流速分布の推定結果

(b) XBeach による表面流速分布の再現計算

(c) 流下方向表面流速分布（X バンドレーダ PIV 解析，上図の赤測線）

(d) 流下方向表面流速分布（Xbeach 再現計算，上図の赤測線）

先に示したように，Xバンドレーダ画像をPIVで解析し表層流のパターンを推定したところ，本流路の流向は滑らかに変化し，表面流速は流出量に応じて1～3m/sであった．また，出水により河口砂州が浸食され，また，河口の海側には堆積域が形成された．これらをXBeachにより再現することを目指す．

XBeach (<https://oss.deltares.nl/web/xbeach/>)は，沿岸の波と流れ，土砂移動を計算するためのパブリックドメインの数値モデルであり，海岸工学分野の研究コミュニティで広く利用されている．開発はRoelvink (Roelvink et al, 2007)によって開始され，開発チームとユーザーコミュニティにより随時改良と拡張が行われている．XBeachにより流速分布，出水中の流量変化にともなう流速変化などを計算したところ，良好に再現できることを確認した．2021年8月出水による河川から海域に移動した土砂量は80万m<sup>3</sup>であると推定された．以下，これらについて詳細を説明する．

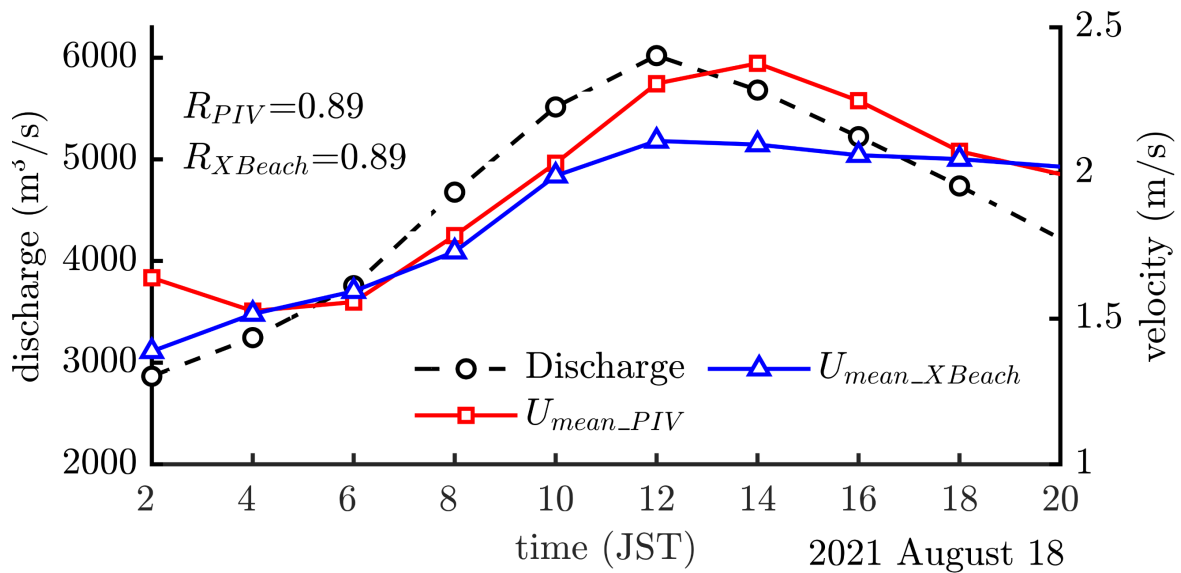


図-22 XBeach 計算結果とレーダ観測結果の比較：平均流速（2021 年 8 月 18 日 18 時）

△：XBeach 計算結果，□：X バンドレーダ推定結果，○：流量（鹿島）

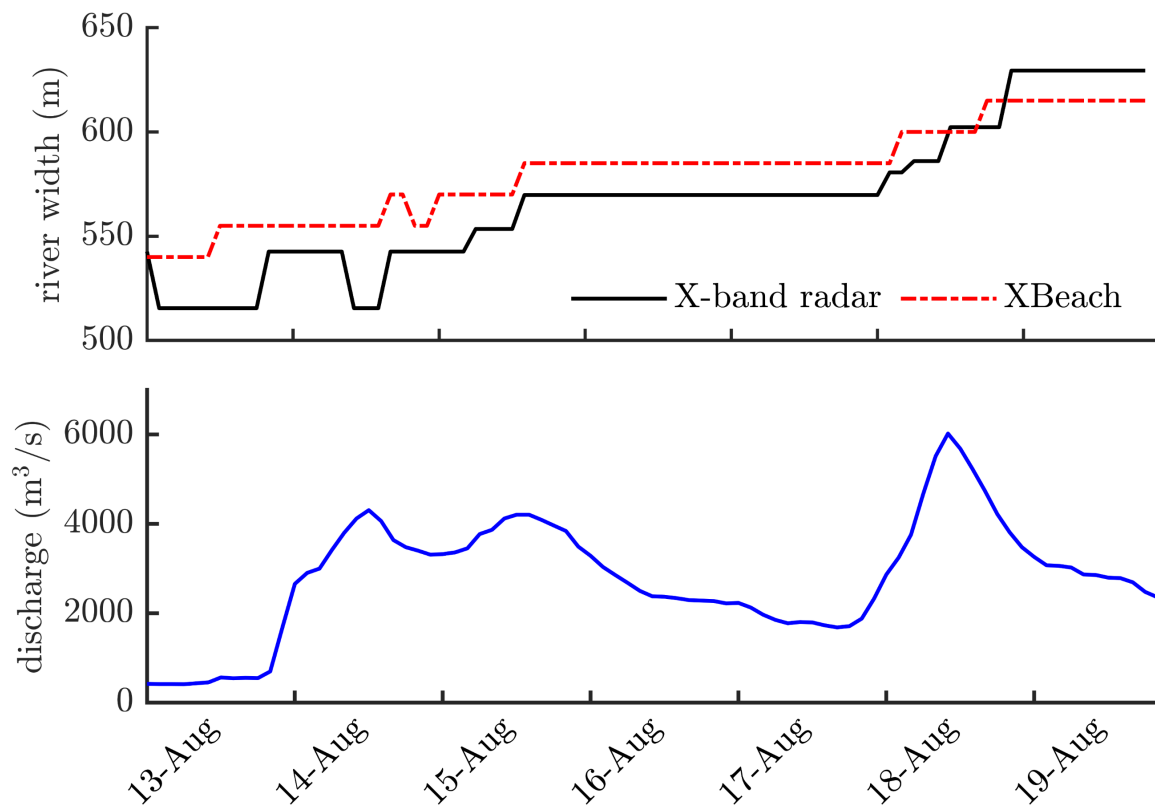


図-23 XBeach 計算結果：（上段）河口幅の変化，（下段）流量（鹿島）

## (2) XBeachによる出水の流況と地形変化の再現

XBeachの計算では、2021年4月に行われた測量結果を初期床面標高として用いた。図 19 に計算領域を示す。計算グリッドはサイズ $15 \times 15 \text{ m}$ の正方格子、計算時間間隔は1秒とした。計算期間は2021年8月13日から19日までとした。上部境界では、鹿島で推定された流量と掛塚観測で観測された水位を与えた。海側境界では御前崎検潮所で測定された潮位を与えた。

XBeachの計算では図19に示す計算領域の上端から流入する土砂量を適切に推定することが難しかったため、計算領域を助走区間とターゲット区間に分けた。助走区間で計算上の土砂移動が始まり、ターゲット区間では土砂の移動状況が平衡となることを期待した。次に、計算における土砂の平均直径の選択を説明する。現地に出向くと河口域の



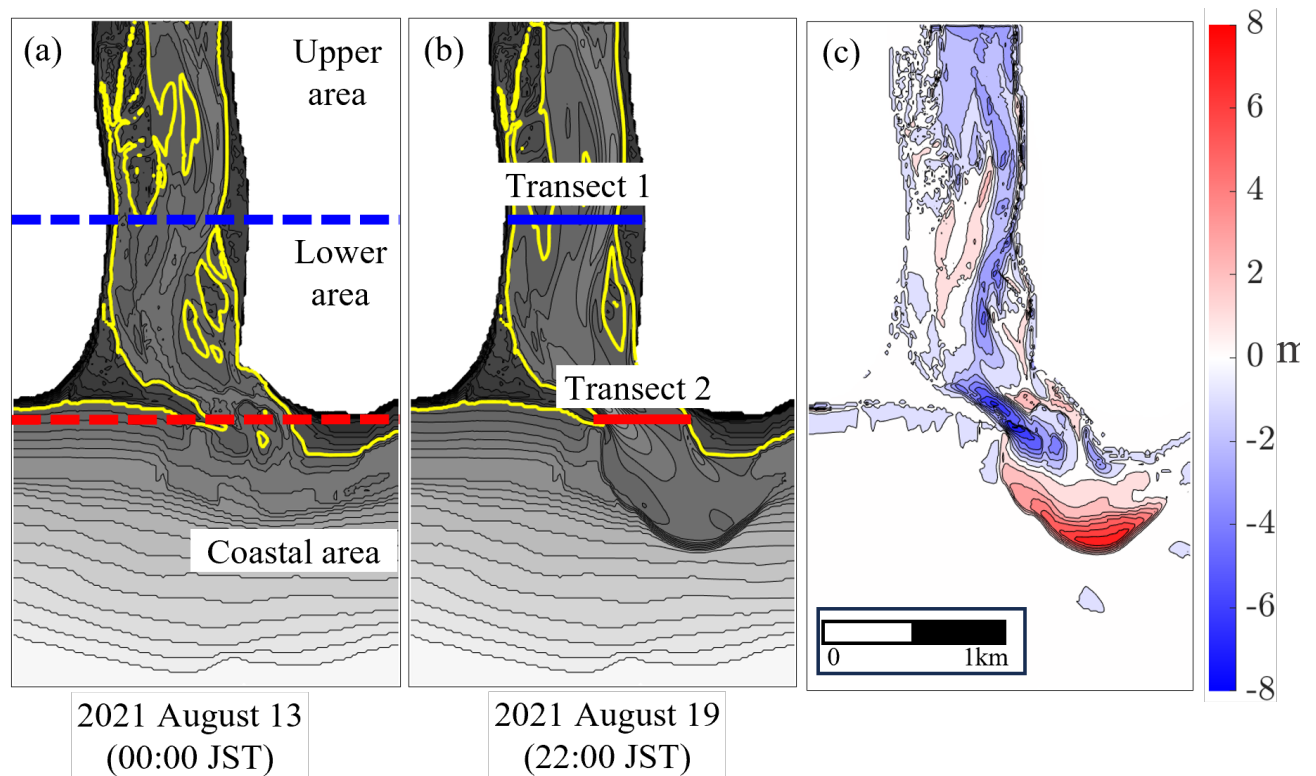


図-24 XBeach 計算結果：河口テラスの拡大

(a) 出水前, (b) 出水後, (c) 地形変化 (赤：堆積, 青：浸食)

底質材料は細かい砂から砂利まで様々な粒径で構成されている。理想的には、混合した粒径で計算を行うべきであるが、代表粒径D50で計算を簡略化した。計算結果と測量結果が整合するように試行錯誤的にD50を変化させ、0.6 mmで両者の差が小さくなることを確認した。

図-20に出水中の地形変化を示す。上段がXバンドレーダの観測結果、下段がXBeachの計算結果である。両者を比較すると、河口部で横断方向に延びる河口砂州が徐々に流水により浸食され、先端部が西方に移動している状況が捉えられている。また、Xバンドレーダ画像の河口の海側では高輝度の半円状の領域が拡大する様子が捉えられている。これは、出水により土砂が海域に運ばれ、水深が浅くなり、海の波の碎波が増したことの反映である。これはXBeachの計算結果にも捉えられている。計算でも浅海部が徐々に半円状に拡大する状況が捉えられている。一方、河道内の縦断方向に延びる砂州の変形は、観測結果よりも大きく進んでいる。これは、植生の効果を計算では無視しているためである。河道内砂州は密な植生に覆われており、出水中も砂の動きは小さい。

図-21(a), (b)はXBeachで計算された流速分布とXバンドレーダ観測結果の解析より推定した表面流速分布を比較したものである。流れが河道に沿って分布し、河口に向かって収束している状況、流速の大きさが最大で約3 m/sに達することなどが共通している。図-21(c), (d)は測線に沿っての流速分布を示したものである。横断方向位置約400mの位置で流速が最大となること、砂州の下流に位置する横断方向位置約600mで流速が低下していること、最大流速の大きさがほぼ等しいことなどが示されている。

図-22は先に示した測線に沿ってXBeachの計算結果とXバンドレーダ観測により推定した表面流速の平均を求め、その時間変化を比較したものである。両者と鹿島（河口から約25km）で推定した流量の変化には約2時間のラグがある。これは洪水が伝播するのに要する時間である。計算結果は12時から16時の間にかけてレーダ観測の推定結果を下回っている。これは、計算の河積が現実よりも大きく計算されていたことによると考えている。

図-23に出水中の河口幅変化を示す。計算結果とレーダ観測結は似た変化を示している。出水後に50 m 程の河口幅の拡大があり、8月14日、8月18日に流量が増大した時に河口幅の拡幅が進んでいた。



以上のように、一部再現できていない変化はあるものの、XBeachによりおおむね出水による河口域の流速と地形の変化を再現できることを確認した。

### (3) XBeachによる河川から海域への土砂供給量の推定

天竜川では総合土砂管理の試行が行われており、様々な施策が試みられている。今後、有効な方法が定まれば河川から海域への土砂供給が増すと期待される。これに関連して、本研究では2021年8月の出水により海域にあった土砂堆積量をXBeachの計算結果より推定した。図-24は計算初期と終了時の底面高さの分布とこれらの差分である。河道内の大半で底面が低下しており（浸食）、河口より海側で底面が上昇（堆積）していた。海側の底面高さの差分より供給された土砂量を求めたところ86万 $\text{m}^3$ という値を得た。これは、他の研究者（Torri et al, 2004; 宇多ら, 2012）が様々な仮定、条件下で求めた天竜川の土砂排出量と一致するオーダーにある。

## 7. 結び

天竜川河口域でXバンドレーダ観測を行い河口砂州、河道形状等を連続観測した。これまでに蓄積した観測結果と合わせて分析し、河道管理、河口域の地形管理などを支援する情報「河道掘削効果の持続時間、河川から海域への土砂供給など」を示した。

（Xバンドレーダによる河口域のモニタリング） Xバンドレーダにより、河口域地形の長期的な推移、出水中の地形と流況変化の追跡、河口テラスの発達などを捉えられることを示した。また、計算モデルXBeachと見合わせた分析を行うことにより、河川から海域に運ばれる土量を推定できることも示した。

（河道内の砂州の掘削後の埋め戻し、消長の追跡） 河口域の直近にある河道内砂州など複数の掘削が行われた。これをXバンドレーダで追跡し、効果が持続した掘削、直ぐに埋め戻しが生じた掘削などの経過を示した。

（河道内砂州掘削前後の出水フラッシュによる河口位置と開口幅の変化） 様々な規模の出水により、河口開口部の位置、幅が変化することを示した。年の最大流量が2,500 $\text{m}^3/\text{s}$ を超えると河口幅が拡大した。

（出水時の表面流速分布の推定） Xバンドレーダで収集した画像に対してPIV解析を行い、出水時の表面流速分布を推定した。推定した流速は流量の変化に応じて変動していた。河道内砂州の掘削前後の流速分布を比較したところ、掘削前、河岸部の直近にあった大きな流速は、掘削後、河道中央部に現れた。

（XBeachによる河川から海域への土砂供給過程の再現） XBeach計算モデルにより、出水による河道内地形変化の再現を試みた。その結果、Xバンドレーダで捉えた流速分布、地形変化などをおおむね再現できることを確認した。出水により、河川から海域に運ばれた土砂量を推定したところ、86万 $\text{m}^3$ という値が得られ、これの大きさは過去に行われたいくつかの推定と整合することを確認した。

## 参考文献

（Xバンドレーダ観測）

- Takewaka, S. and Ono, T.: X-band radar observation of morphological changes due to flood events at the mouth of Tenryu River, Japan, Coastal Engineering Journal, Vol. 60, pp. 387-399, 2018.

(河口域地形の地形観測，掘削効果の説明)

- 武若聡，栞原一峻, Ivan HUMAN : Xバンドレーダによる天竜川河口域の河道砂州掘削後の地形変化の追跡，土木学会河川技術論文集，Vol. 29，2023. [https://doi.org/10.11532/river.29.0\\_335](https://doi.org/10.11532/river.29.0_335)

(PIV解析)

- mpiv: <http://www.oceanwave.jp/software/mpiv/> (2024年4月4日 閲覧)
- Ivan Aliyatul Humam and Satoshi Takewaka: Estimations of surface velocity distributions from X-band radar images during floods observed at the mouth of Tenryu River, Japan, Journal of Hydraulic Research, 2024. <https://doi.org/10.1080/00221686.2024.2305360>

(天竜川から海域への土砂量推定)

- K. Torii, S. Sato, T. Uda, & T. Okayasu: Regional sediment management. Proc. 29<sup>th</sup> ICCE, 3110–3122, 2004..
- T. Uda, Toshiro San-Nami, Toshinori Ishikawa, Norifusa Shiraishi, & Jun-ichiro Sato: Field Observation on Response of Topography around Tenryu River Mouth to Floods and Wave Action. Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering), 68(Issue 2), 626–630, 2012.