

熊野川における河口砂州の動態と 維持管理方策に関する研究

MORPHOLOGICAL CHANGES AND MAINTENANCE POLICY OF SAND BAR AT THE KUMANO RIVER MOUTH

山本隼也¹・中道誠¹・橋本将明¹・中辻崇浩²
・兼頭淳²・真栄平宜之¹・津村智明³

Junya YAMAMOTO, Makoto NAKAMICHI, Masaaki HASHIMOTO, Takahiro NAKATSUJI
Jun KANETO, Takayuki MAEHIRA and Tomoaki TSUMURA

¹正会員 工修 株式会社 建設技術研究所 大阪本社 河川部 (〒541-0045 大阪市中央区道修町1-6-7)

²正会員 工修 株式会社 建設技術研究所 大阪本社 環境部 (〒541-0045 大阪市中央区道修町1-6-7)

³非会員 工修 国土交通省 近畿地方整備局 紀南河川国道事務所
(〒646-0003 和歌山県田辺市中万呂142)

The river mouth sand bar in the Kumano River, which is located in the heavy rainfall and typhoon hit areas, causes the discharge capacity to decrease and the water level to rise. Therefore, it is important to establish an effective and efficient management method. In this study, we analyzed the river mouth morphology changes by numerical analysis and the topographic surveys using UAV and RTK-GPS. In addition, maintenance policy of sand bar in areas that are greatly affected by both floods and waves are discussed. For the river mouth morphology changes, the flash process due to the river flow and the recovery process due to the waves were clarified. It was found that the sheet pile increased the tractive force by the flow control, and was effective in promoting the flushing of the sand bar. The sand bar on the right bank varies greatly due to the sand supply from the adjacent beach and terrace. Therefore, it was suggested that a relatively stable sand bar on the left bank was easier to maintain.

Key Words : river mouth sand bar, UAV, RTK-GPS, morphological changes, numerical analysis, river flow, flush, recovery process, maintenance policy

1. はじめに

紀伊半島南東部に位置する熊野川の河口部では、河口砂州の発達に伴う河口閉塞と洪水時の河川水位の上昇が問題となっている(図-1)。当該地では、2011年9月に台風12号による紀伊半島大水害が発生し、計画規模の洪水に対する流下能力を確保するために河道掘削等の河川整備が行われてきた。一方、紀伊半島大水害では、上流域において深層崩壊による大規模河道閉塞が発生し、その影響は明らかではないものの、長期的に下流域への土砂供給が増加し、掘削後の河道への土砂堆積とこれに伴う流下能力の低下が懸念されている。そこで、河道内や河口砂州において定期的な維持浚渫が必要であり、その維持管理には多大な手間と費用が発生することから、効果的・効率的な管理手法の確立が急務となっている。

本研究で対象とする河口砂州は、波や風、潮位変動及び河川流が相互に影響し合って形成されるものであり、河川流による土砂堆積、波による土砂の押し込み、沿岸漂砂による砂州形成等が重複して発生することで大きく発達し、河口閉塞に至るものと考えられている。河口砂州の動態に関して、従来から現地観測や数値解析等による多くの研究が行われており、例えば、立山ら²⁾は阿賀野川を対象に洪水時の河口砂州の開口機構について検討している。また、宇多ら⁴⁾や黒岩ら⁵⁾は河口砂州消失後の波浪による回復・発達機構について検討している。このように河口砂州の動態を把握するためには、河川流の影響(洪水時のフラッシュ)と波浪の影響(回復・発達)を明らかにすることが重要である。

熊野川をはじめとする河口砂州が発達する河川では、洪水時に河川水位の上昇や掃流力の低下による土砂堆積が生じる恐れがあるため、河口砂州の維持管理が行われ

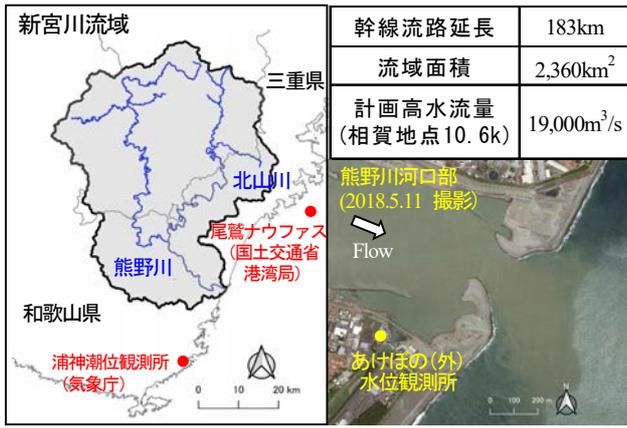


図-1 熊野川の概要及び河口砂州

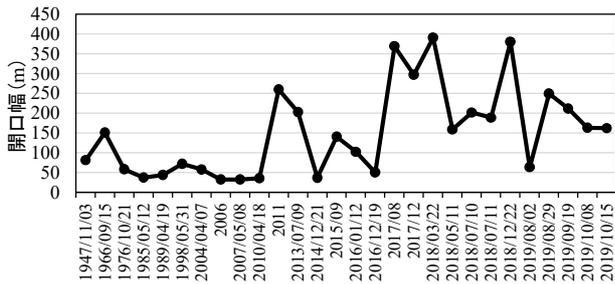


図-2 空中写真による河口砂州開口幅の時系列変化

ている。その方法としては、砂州の形成抑制とフラッシュの促進の両観点から、砂州の切下げによる維持浚渫が一般的となっている。しかし、河口部は洪水と波浪が同時に生起するなど複雑な場であり、河口砂州に関する現地の実態は十分に把握されていないのが現状である。今後の効果的・効率的な管理手法の確立にあたっては、現地特性を十分に把握したうえで、実態を踏まえた対策について検討していく必要がある。

そこで、本研究では、全国有数の多雨量かつ台風常襲地域に位置する熊野川を対象として、現地観測、資料分析及び数値解析を実施し、河口砂州の動態について分析を行い、洪水と波浪の両方の影響を大きく受ける地域における河口砂州の維持管理方策について検討した。

2. 熊野川河口部の特性分析

(1) 空中写真からみた河口砂州の長期的な変遷

1947年以降の国土地理院等の既往の空中写真から整理した熊野川における河口砂州の開口幅と開口部位置の変遷を図-2及び図-3に示す。図-2より、開口幅は撮影時期により大きく変動しており、河口部では砂州形成(河口閉塞)と砂州消失(洪水によるフラッシュ等)が繰り返して発生していることが確認できる。また、図-3では2011年9月の紀伊半島大水害(台風12号)を契機に、開口部の位置等の河口砂州の特性が変化していることが確認できる。まず、開口部の位置は、水害以前は主に左岸側に形成さ

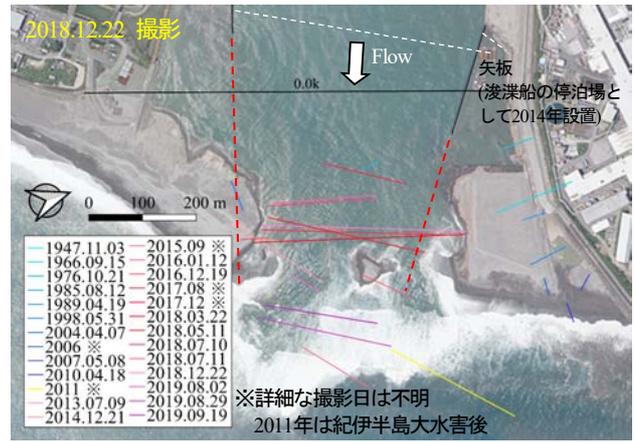


図-3 空中写真による河口砂州(形成状況・開口部位置)の変遷

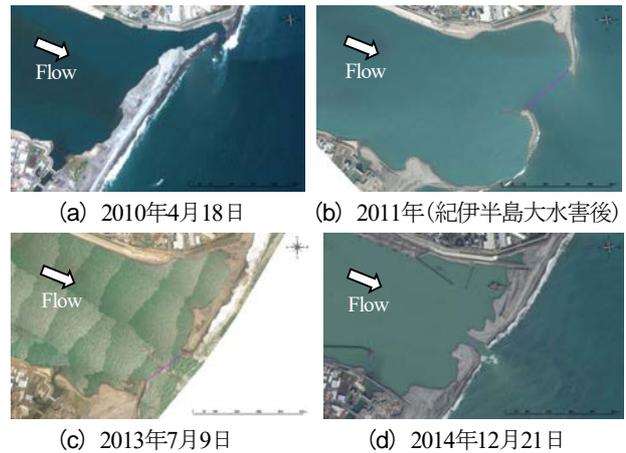


図-4 紀伊半島大水害及び矢板設置による砂州変化

れているのに対し、水害以降は河道中央部に形成されており、2014年に河口部左右岸で設置された工事用矢板の延長線間に集中していることがわかった。さらに、開口部の位置は水害以降徐々に沖側に移動していることがわかった。以上を踏まえ、紀伊半島大水害及び矢板設置前後における河口砂州の変遷を図-4に示す。紀伊半島大水害の前後(図-4 (a), (b))では河口砂州がフラッシュされるなど河道特性が大きく変化し、その後、2014年の矢板設置前後(図-4 (c), (d))において、河道中央部が開口しやすい状況に変化したことが確認できた。

(2) 河口部における洪水時の水理特性

1989年以降の河川流量、河川水位及び潮位の観測データをもとに、河口部における洪水時の水理特性を分析した。分析は、期間中に発生した主要な25洪水を対象として、相賀地点(河口から10.6km)の河川流量、成川地点(河口から2.35km)及びあけぼの(外)地点(河口から0.1km)の河川水位、気象庁の浦神観測所の潮位データをもとに、中野ら⁶⁾及び竹林ら⁷⁾を参考に実施した。中野ら⁶⁾によると、河口砂州のフラッシュが発生した場合、河道内水位と近傍の潮位には高い応答性があることが示されている。また、竹林ら⁷⁾は、熊野川では洪水ピーク流量に到達する前に河口砂州のフラッシュが開始し河川水

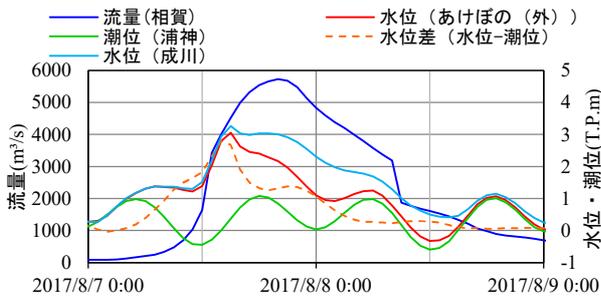


図-5 河川水位の時系列変化(2017.8.6~2017.8.10)

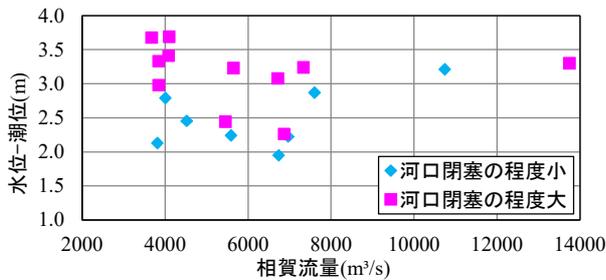
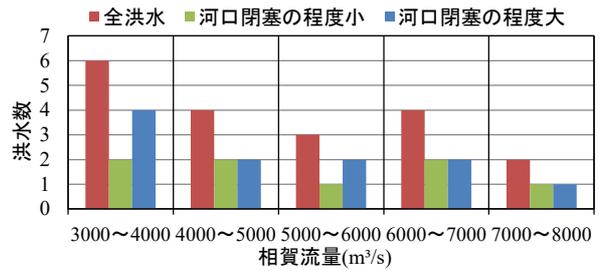


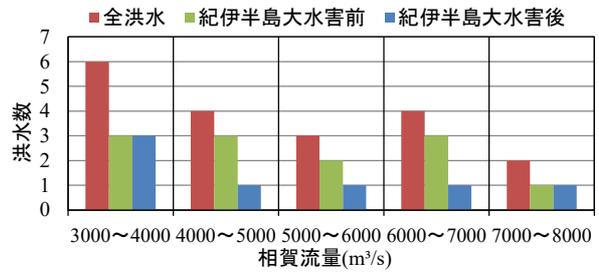
図-6 フラッシュ開始流量と河口水位上昇量の関係

位が低下することを明らかにしている。そこで、本研究では、洪水時の流量増加時に河川水位が低下する時点フラッシュ開始と定義し、その時点の河川流量をフラッシュ開始流量と呼称した。なお、河川水位低下の判断については、河口砂州の直上流で観測されているあけぼの(外)地点を用いる。この水位は潮位変動の影響を受けていることから、水位低下がフラッシュによるものなのか潮位変動によるものなのかを区別するため、あけぼの(外)地点の河川水位と浦神観測所の潮位の水位差を算出し推定を行った。この結果、対象とした25洪水のうち19洪水において、河口砂州のフラッシュによるものと推定される河川水位の低下が発生していることがわかった。確認した結果の一例を図-5に示す。これより、洪水ピーク流量は6,000m³/s程度であるのに対し、流量が4,000m³/s程度の時点で河川水位は最大となりその後は低下することが確認できる。さらに、水位差が大きくなる期間(河口砂州による背水影響期間)は約1.5日と長期に渡るとともに、その影響範囲は上流の成川地点まで及んでいることがわかった。

以上で推定した19洪水のフラッシュ開始流量とその時点の水位差(潮位を基準とした河川水位の上昇量)の関係について整理したものを図-6に示す。図中に示す河口閉塞の程度の大・小については、空中写真や洪水前の水位差(河口閉塞の場合は河川水位と潮位の応答性が低く位相差が発生)から定性的に区分したものである。これより、フラッシュ開始流量の最小値は4,000m³/s程度であり、計画高水流量19,000m³/sに対し小規模であることがわかる。また、低流量であっても河口閉塞の程度が大きい場合には河川水位は顕著に上昇し、最大4m程度も上昇することが確認できる。次に、図-7は(a) 河口閉塞の程度、(b) 2011年9月の紀伊半島大水害前後で分類したフラッ



(a) 河口閉塞の程度による分類



(b) 2011年9月紀伊半島大水害前後による分類

図-7 フラッシュ開始流量の発生頻度

シュ開始流量の頻度分布を示す。今回検討した19洪水においては、河口閉塞の程度によらずフラッシュ開始流量の最小値は4,000m³/s程度であり、閉塞の大小による顕著な違いは見られなかった。一方、紀伊半島大水害の前後では、紀伊半島大水害以降の方が低流量でフラッシュする頻度が高い傾向が示唆された。これは、上述のとおり、水害後の2014年に矢板が設置されたことで、河口部の掃流力が増大し、水害前よりも低流量時にフラッシュしやすい状況に変化したためだと考えられる。

3. 数値解析による河口部水理特性の検討

(1) 解析手法・条件

上記で確認した河口部における洪水時の水理特性について、洪水流及び河床変動の数値解析を実施し河口部に設置された矢板の効果を検討した。

解析では、河口砂州が洪水流下を阻害することで流線が大きく曲げられ流れの三次元性が強くなることを踏まえ、河口砂州周辺の洪水時の流れと土砂動態を精度よく表現する必要がある。そこで、河口砂州のフラッシュ現象の検討に多く用いられている内田・福岡のGBVC法⁸⁾による準三次元洪水流解析と芦田・道上式⁹⁾による混合粒径の掃流砂を対象とした河床変動解析を実施した。解析区間は熊野川の河口-2.4km(洪水流の影響がない範囲まで延伸)から流量観測所がある相賀地点(河口から10.6km)までを対象とし、境界条件やメッシュ等の解析条件は表-1に示すとおりとした。ここでは、矢板による効果を検討するため、最新の河道横断測量成果(2017年)をもとに、河口閉塞状態を想定した矢板あり・なしの2

表-1 解析条件

項目	設定値
メッシュサイズ	縦断方向25m×横断方向25m程度
分割数	縦断方向520×横断方向42
河道条件	2017年測量データ 河口砂州：空中写真等から設定 ・砂州高：T.P.+3m ・開口幅：50m
	1)：現状（矢板あり+砂州あり） 2)：矢板あり+砂州なし 3)：矢板なし+砂州あり 4)：矢板なし+砂州なし
下流端水位	T.P.+0.93m (浦神地点の朔望平均満潮位)
上流端流量	6,000m ³ /s (小規模洪水程度) 12,000m ³ /s (平均年最大流量程度)
粗度係数	6,000m ³ /s：0.032, 12,000m ³ /s：0.038 (洪水痕跡等の再現検証から各々設定)
河床材料	河床材料調査結果から1km間隔で設定 (混合粒径)

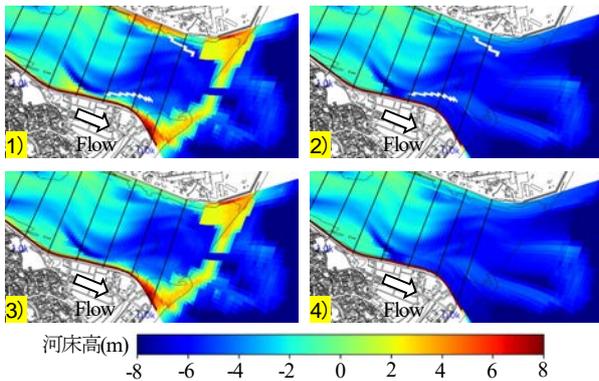
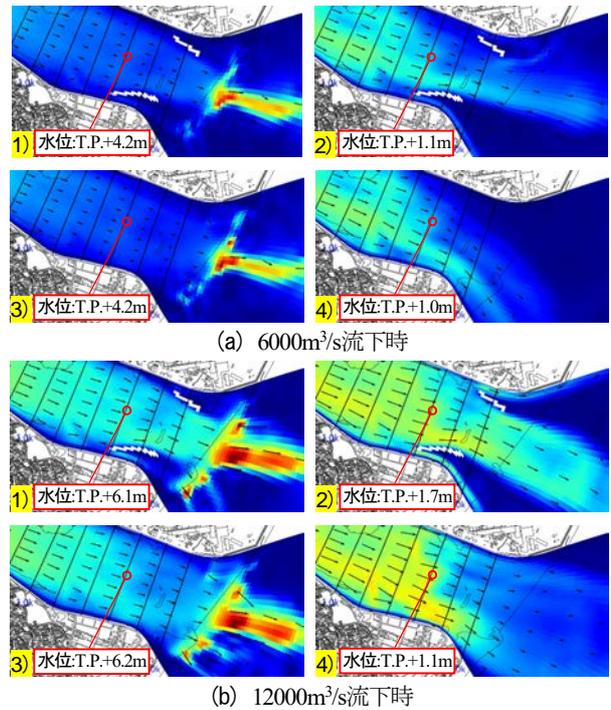


図-8 解析で設定した初期河道条件(白抜き：矢板)

種類の河道条件を設定した。河口閉塞状態については、上述の空中写真等から確認できた河口砂州の条件(砂州高：T.P.+3m，開口幅：50m)を設定した。なお、河口閉塞による背水の影響が大きいことから、背水の影響がない状況での矢板あり・なしの比較を行うため、河口砂州が形成されていない河道条件についても検討を行った。

(2) 解析結果

図-8で設定した初期河道条件下において準三次元洪水解析を実施した場合の流速分布を図-9に示す。これより、矢板なし+砂州なしの河道条件(4)では、河口部の滞筋が右岸側に存在することから、いずれの流量条件においても洪水流は主に右岸側を流下しやすい傾向となることがわかる。また、砂州あり・なし(1)と2)または3)と4)を比較すると、流量条件及び矢板あり・なしの河道条件によらず、砂州がある場合(1, 3)には背水の影響を受けて砂州上流側の河川水位が上昇し洪水時の流速が減少する傾向となることがわかる。一方、矢板あり・



流速(m/s) 0 1 2 3 4 5 6 7 8

図-9 解析による流速分布(水深方向の平均流速)

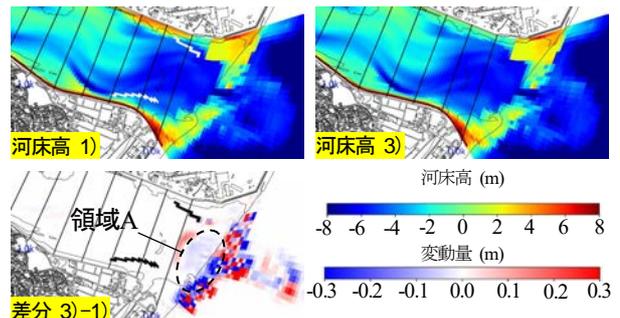
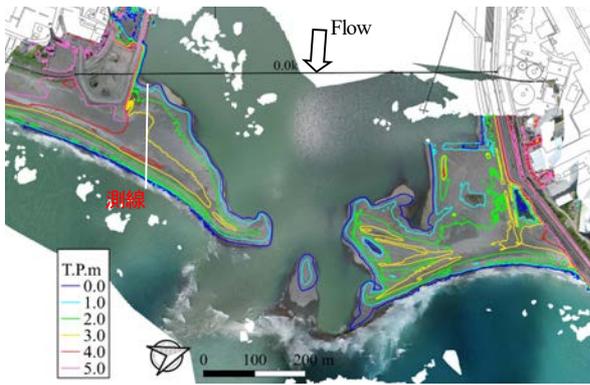


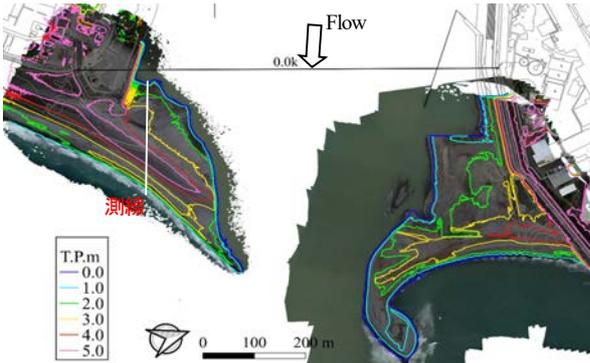
図-10 12000m³/s流下時の計算後河床及び差分コンター図

なし(1)と3)または2)と4))を比較すると、流量条件及び砂州あり・なしの河道条件によらず、矢板がある場合(1, 2)には矢板間に洪水流が集中することで矢板設置箇所から下流側の河道中央部付近における流速が増加する傾向となることがわかる。図-10には平均年最大流量程度の12,000m³/sの流量が流下した場合の河床変動解析結果(一定量を1時間作用させた計算結果)として、矢板あり+砂州あり(1)と矢板なし+砂州あり(3)の河道条件における計算後の河床高と両河床高の差分図を示す。小規模洪水程度の6,000m³/sの流量では河床高の顕著な違いは見られなかったが、12,000m³/sの流量では、矢板がある場合(1)の方が河口部の流速が増加することから、矢板設置箇所から下流側の河道中央部付近及び特に右岸側河口砂州の一部(領域A)においてよりフラッシュされやすい状況になることが確認できる。

以上のことから、河口部に設置された矢板は、河口部の流速(掃流力)を増加させ、河口砂州のフラッシュを促進させる効果が高いことがわかった。



(a) 2019年8月2日測量



(b) 2019年8月28日測量

図-11 UAVによる空中写真及び等高線図(DEMデータ)

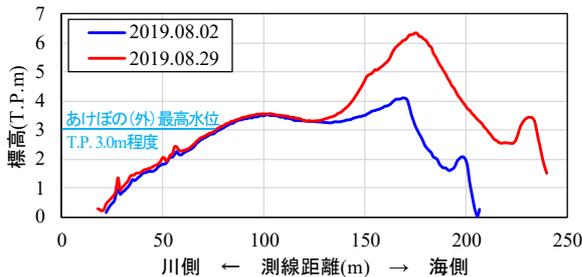


図-12 測線の河口砂州高計測結果(DEMデータ)

4. ネットワーク型RTKを搭載したUAVを用いた河口砂州の動態把握及び維持管理方策の考察

(1) ネットワーク型RTKを搭載したUAVによる観測概要

台風及び洪水前後における河口砂州の地形変化とその後の回復過程を把握するため、2019年8月～2020年3月までの期間において、概ね月1回の頻度でネットワーク型RTKを搭載したUAVによる砂州地形測量を9回実施した。調査範囲は熊野川河口部の左右岸に広がる河口砂州の全域とし、右岸側は和歌山県が管理する砂浜海岸(王子ヶ浜)の一部も対象とした。なお、UAVの飛行に際しては、河口砂州上に標定点を5点以上設置し、別途トータルステーションを用いて標定点の測量を実施した。砂州地形測量では、Phantom4RTKを用いて垂直写真を撮影し、撮影した垂直写真から3次元画像解析ソフト(Metashape Ver1.50)によってオルソ画像とDEMデータを作成した。

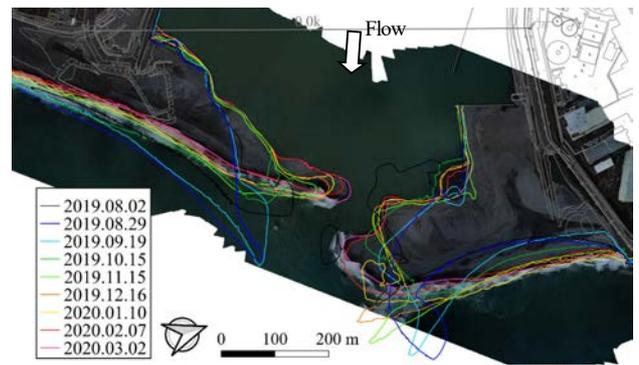


図-13 水際線の変化

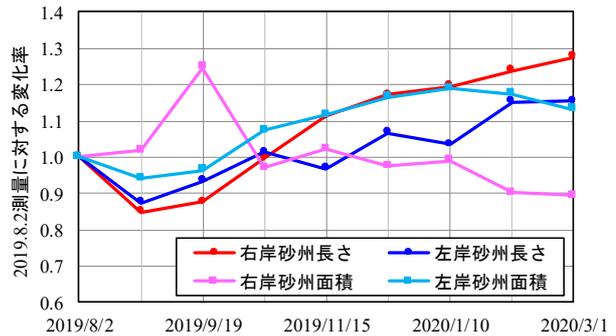


図-14 調査回ごとの砂州長さ及び砂州面積の変化率

(2) 台風時における土砂動態

2019年8月15日に熊野川河口部に最接近した台風10号の前後で撮影・測量した熊野川河口部の状況を図-11に示す。この台風では、相賀地点における最大流量が $8,900\text{m}^3/\text{s}$ 程度となる比較的小規模の洪水が発生している。また、尾鷲地点のナウファスでは、最大8m程度の有義波高(波向はSSW～SSE方向が卓越)が観測されている。図より、この台風前後では矢板の延長線に沿って河道中央部の河口砂州が左右岸ともフラッシュされたことが確認できる。一方、図-12は右岸側の河口砂州上に設けた測線上の断面地形を比較したものであるが、河道側では台風前後の砂州地形に変化は見られないものの、海側では台風前に比べ最大4m程度も砂州高が上昇したことが確認できる。これは、台風時の高波浪によって海域から土砂が堆積したことを表しており、熊野川では台風時には洪水と高波浪が同時に生起することで、河口砂州のフラッシュと形成・発達が同時に発生することがわかった。

(3) 洪水期後の砂州回復過程

合計9回実施した砂州地形測量の結果をもとに、各回の水際線(T.P.0m)の位置を包絡した重ね合わせ図を図-13に示す。また、左右岸それぞれにおいて、砂州長さ(砂州先端部を0.0kの測線に投影し堤防上の測線の基準杭からの距離を定義)と砂州面積(水際線と堤防法線で囲まれた範囲を定義)の経時変化を第1回目(2019年8月2日)の結果を基準にその変化量として整理したものを図-14に示す。これより、左右岸のいずれにおいても、河口砂

州は8月～9月頃の洪水期にフラッシュされた後、秋季～春季にかけて回復傾向にあることが確認できる。右岸側の河口砂州については、洪水時のフラッシュによって砂州の先端部が海側へ一旦押し出されるものの、その後作用した波浪によって河道方向へ押し戻され、さらに左岸側に向けて延伸することがわかった。また、10月以降の砂州長さや砂州面積は反比例の関係にあり、砂州は面積を縮小しながら左岸側へ延伸している状況が確認できた。砂州が延伸する速度は左岸に比べ大きいことも確認できた。一方、左岸側の河口砂州については、右岸と同様、洪水時のフラッシュによって砂州の先端部が海側へ一旦押し出された後、河道方向へ押し戻されながら洪水前の状況に回復していく傾向が確認できる。ただし、右岸に比べ砂州が延伸する速度は緩やかであり、砂州長さや砂州面積は概ね比例する関係にあつて、1月以降は概ね横ばいの傾向(砂州の発達に止まった状態)にあることがわかった。

(4) 維持管理方策

上述のとおり、洪水と波浪の両方の影響を大きく受ける熊野川河口部では、洪水によって砂州がフラッシュされるものの、その後の波浪によって回復すること、右岸側の砂州は左岸に比べ発達しやすく、台風時には砂州高が急激に上昇することが確認できた。海域からの土砂移動の詳細は現状では明らかではないが、右岸側には砂浜海岸が存在しており、河口前面に形成されている河口テラスからのうちあげも含めて海からの土砂供給が左岸に比べ多いことが、右岸側の砂州が発達しやすい主な要因であると推察される。これら現地観測の結果から、効果的・効率的な河口砂州の維持管理にあたっては、比較的安定しており土砂供給が少ない左岸側の砂州を対象とするのが望ましいということが示唆される。また、現地観測より明らかとなった高波浪時の土砂堆積が顕著であることから、一般的に実施されている維持浚渫とは異なる対策を実施する必要がある。その1つとして、数値解析で確認した、矢板等の設置により河口部の掃流力を向上させ、砂州フラッシュを促進する対策が有効であることが示唆された。

5. おわりに

本研究では、全国有数の多雨量かつ台風常襲地域に位置する熊野川を対象として、現地観測、資料分析及び数値解析を実施し、河口砂州の動態について分析を行い、洪水と波浪の両方の影響を大きく受ける地域における河口砂州の維持管理方策について検討したものである。本研究から得られた主要な結果を以下に示す。

(1) 熊野川における河口砂州の動態について、河川流の

影響(洪水時のフラッシュ)と波浪の影響(回復・発達)を明らかにした。

- (2) 通常は洪水期後の秋季～春季にかけて河口砂州は発達していくが、その一方、一時化(2019年台風10号・最大有義波高8m)で、右岸砂州高が時化前より最大4m程度上昇することが分かった。
- (3) フラッシュ開始流量は計画高水流量 $19,000\text{m}^3/\text{s}$ に対し $4,000\text{m}^3/\text{s}$ 程度と小規模であり、河口部に設置されている工事用矢板の延長線に沿った河道中央部が開口しやすい状況であることが分かった。
- (4) 準三次元洪水解析等による数値解析の結果、矢板は河口部の流速(掃流力)を増大させ、河口砂州のフラッシュを促進させる効果が高いことが分かった。
- (5) 右岸砂州は隣接する砂浜や河口テラスからの土砂供給により変動が大きいことから、比較的安定している左岸砂州の方が維持管理しやすいことが示唆された。

参考文献

- 1) 榎木 亨：河口閉塞にともなう河道内水位の変化について—河口閉塞機構に関する基礎的研究；第3報—，第15回海岸工学講演会論文集，pp.195-202，1968。
- 2) 立山政樹，内田龍彦，福岡捷二，田部成幸：大規模洪水時の河口砂州と周辺河床の変動解析—平成23年阿賀野川洪水を対象として—，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.69，NO.4，I_1009-I_1014，2017。
- 3) 立山政樹，福岡捷二，石俊之：大規模洪水による河口砂州の開口機構に関する研究，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.74，No.4，I_715-I_720，2018。
- 4) 宇多高明，芦沢真澄，宮原志帆，伊達文美：四方十川河口部における砂嘴の発達とBGモデルによるその再現，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.72，No.2，I_739-I_744，2016。
- 5) 黒岩正光，梶川勇樹，戸田 俊，倉繁 仁，片山 崇：UAVとRTK-GPSを用いた河口砂州の地形変化観測とフラッシュ後の回復過程，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.74，No.2，pp.I_793-798，2018。
- 6) 中野 晋，石丸訓之，岡本誠一郎：物部川における河口閉塞の現状と河口部潮位変動，海岸工学論文集，第53巻，pp.601-605，2006。
- 7) 竹林洋史，江頭進治，金海生，佐々木忠志：洪水時における河口砂州上流域の水位変動特性，応用力学論文集，Vol.9，pp.997-1006，2006。
- 8) 内田龍彦，福岡捷二：非平衡粗面抵抗則を用いた一般底面解析法の導出と局所三次元流れへの適用，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.71，No.2，pp.43-62，2015。
- 9) 芦田和男，道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第206号，pp.59-69，1972。

(2020. 4. 2受付)