

# 河口砂州フラッシュの再現計算と要因分析

## STUDY ON NUMERICAL SIMULATION AND FACTOR ANALYSIS OF FLUSHING RIVER MOUTH BAR

佐川 拓也<sup>1</sup>・大谷 靖郎<sup>2</sup>・市川 真吾<sup>1</sup>・武内 慶了<sup>3</sup>・山下 武宣<sup>3</sup>

Takuya SAKAWA, Yasuro OHTANI, Shingo ICHIKAWA, Yoshinori TAKEUCHI and Takenori YAMASHITA

<sup>1</sup>工修 株式会社アルファ水工コンサルタンツ 技術部 (〒063-0829 北海道札幌市西区発寒9条14丁目516-336)

<sup>2</sup>正会員 株式会社アルファ水工コンサルタンツ 東京支店 (〒108-0073 東京都港区三田4-15-35 三田ヒルクレスト)

<sup>3</sup>正会員 工修 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

A 2D River morphology model with a curvilinear grid is developed to simulate the flushing river mouth bar occurred at the Ara River in July 2004. In the hydrodynamic model, the 2D free surface flow is calculated by the Saint Venant equations which are solved by an implicit finite difference technique and the ADI method. In the morphological model, the Van Rijn's model is used to evaluate sediment transport including bed load and suspended load. The helical flow and the transverse bed slope modify the bed load sediment transport. The bed level change is computed by a sediment continuity equation of the bank erosion model. The model is validated by comparison with the observations of water level variations and the riverbed topography at the mouth. A factor analysis is conducted to evaluate the effects of discharge, tide level, and grain size. The result shows that differences of sea elevation and peak discharge have significant effects on a process of morphological change at the river mouth.

**Key Words :** river morphology, river mouth bar, 2D free surface flow, sediment transport, helical flow, bank erosion

### 1. はじめに

河口砂州は、波浪の進入や塩水の遡上を防ぐなどの治水、利水、環境の面において重要な役割を果たしているが、砂州が発達して河口が閉塞された状態になると、出水時には砂州上流の水位が上昇して河川の氾濫を招く危険性もある。一般に大規模な出水時には、河口砂州はフラッシュされることが多いが、河口砂州のフラッシュと河口幅の拡大による流下能力の増大は治水安全上の面から重要である。このように消長を繰り返す河口砂州を適正に管理するためには、河口砂州のフラッシュ現象を定量的に評価することが必要である。

河口砂州フラッシュの平面的な計算に関する最近の研究としては、細山田・佐藤・野田・酒井・酒匂<sup>1)</sup>による阿賀野川河口砂州フラッシュの再現計算があるが、側岸侵食が考慮されていないことなどの課題が残されている。また、川口・福岡・安部<sup>2)</sup>は、常願寺川河口を対象として斜面崩壊を考慮した河床変動計算を用いた河口部の計画手法を提案している。河口砂州のフラッシュ過程については、渡辺・Nguyen・田中<sup>3)</sup>などの研究があるが、フラッシュ現象の要因を検討した研究は少ない状況にある。

本研究は、新潟県の荒川において生じた大規模な河口砂州のフラッシュを対象として、河口砂州のフラッシュ状況を再現する計算モデルを構築するとともに、この計算モデルを用いて砂州フラッシュ現象における河川流量、潮位および粒径の影響について検討を行ったものである。

### 2. 計算モデルの概要

#### (1) 流況計算モデル

流況計算モデルでは、非粘性・非圧縮性ナビエ-ストークス方程式をもとに、連続の式および運動量保存の式を鉛直方向に積分することによって得られるサン-ベナン<sup>4)</sup>の式を解いている。

本モデルで用いている支配方程式を以下に示す。

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{g}{C^2} \frac{p \sqrt{p^2 + q^2}}{h^2} \\ = h \frac{\partial}{\partial x} \left( E \frac{\partial(p/h)}{\partial x} \right) + h \frac{\partial}{\partial y} \left( E \frac{\partial(p/h)}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{pq}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q^2}{h} \right) + gh \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{g}{C^2} \frac{q \sqrt{p^2 + q^2}}{h^2} \\ = h \frac{\partial}{\partial x} \left( E \frac{\partial(q/h)}{\partial x} \right) + h \frac{\partial}{\partial y} \left( E \frac{\partial(q/h)}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

ここで、 $x, y$ : 平面座標、 $p, q$ :  $x, y$  方向の質量フラックス、 $H$ : 水位、 $h$ : 水深、 $g$ : 重力加速度、 $C$ : Chezy数、 $E$ : 渦動粘性係数である。また、方程式は、スタッガード格子上で定義される  $p, q, h$  について A D I 法によって解いている。

河川流曲部を通過する流れにおいては、遠心力の不均衡により、水面近くでは外側へ、底面近くでは内側へと向かうらせん流（二次流）が発生する。このらせん流は、河川の流曲部の河床変動において重要であることから、底面摩擦力の偏向角として考慮した。また、底面摩擦力および浮遊土砂移動を求めるために必要な鉛直方向の流速分布については、対数分布を仮定した分布関数により流線方向（ $x$  軸）の流速  $u$  の鉛直分布を与えた。

## (2) 河床変動計算モデル

河床変動計算では、計算ステップ毎に各格子点における限界掃流力、底質諸元等によって浮遊砂量と掃流砂量を算出し、流砂の連続式より地形変化量を算出している。計算に用いているファン・レインのモデル<sup>5),6)</sup>においては、掃流砂量  $S_{bl}$  ( $m^2/s$ ) は次式で与えられる。

$$S_{bl} = 0.053 \frac{T^{2.1}}{D_*^{0.3}} \sqrt{(s-1)g \cdot d_{50}^3} \quad (4)$$

ここで、 $s$ : 相対的な砂の比重 ( $\rho/\rho_s$ )、 $g$ : 重力加速度、 $d_{50}$ : 土砂の中央粒径、 $T$ : 無次元移動段階パラメータ、 $D_*$ : 無次元粒子パラメータである。 $T$ は、限界摩擦速度と有効摩擦速度で定義され、 $D_*$ の関数として限界シールドズを求めている。

また、浮遊砂量  $S_{sl}$  ( $m^2/s$ ) は次式で与えられる。

$$S_{sl} = f \cdot c_a \cdot u \cdot h \quad (5)$$

ここで、 $c_a$ : 底層濃度、 $h$ : 水深、 $f$ : 浮遊砂量に対する修正係数である。移流拡散については、浮遊砂では考慮しているが、掃流砂では移動形態から考慮していない。ただし、らせん流の影響と河床勾配による影響を考慮した移動として、 $x$  軸および  $y$  軸に対する掃流砂移動寄与率を求めて各々の掃流砂量を与えている。

## (3) 側岸侵食モデル

側岸侵食速度  $E$  ( $m/s$ ) は、近接格子点における地形変化量および流砂量の関数として次式で表される。

$$E = -\alpha \frac{\partial z}{\partial t} + \beta \frac{q_s}{h} \quad (6)$$

ここで、 $\alpha, \beta$ : 計算パラメータ、 $z$ : 岸近接格子点の地盤高、 $t$ : 時間、 $q_s$ : 岸近接格子点における流砂量、 $h$ : 岸近接格子点における水深である。また、側岸侵食量は、横断方向の侵食量を水際陸上セルにおける鉛直方向の地形変化量に置き換えることにより考慮している。

表-1 計算ケースの一覧

ケース	ピーク流量 ( $m^3/s$ )	下流端水位 (潮位: T.P.)	粒径 (mm)	備考
Case-0	3,886	岩船港潮位 (+0.6~0.9m)	2.0	再現計算
Case-1	1,600	+0.34m (平均満潮位)	2.0	流量の 影響検討
Case-2	3,000			
Case-3	4,000			
Case-4	1,600	ピークに満潮	2.0	潮位の 影響検討
Case-5				
Case-6	4,000	ピークに満潮	2.0	潮位の 影響検討
Case-7		ピークに干潮		
Case-8	3,886	岩船港潮位 (+0.6~0.9m)	0.5	粒径の 影響検討
Case-9			1.0	
Case-10			5.0	
Case-11			22.0	

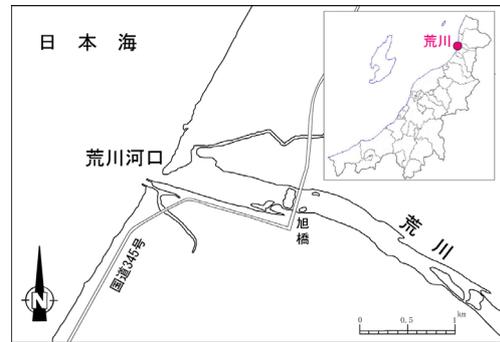


図-1 荒川河口の位置

## (4) 計算ケース

本研究において実施した計算ケースを表-1に示す。

## 3. 再現計算

### (1) 荒川の概要と河口砂州のフラッシュ状況

荒川は、その源を山形県の大朝日岳に発し、越後平野の北側を流れて、図-1に示すように新潟県荒川町で日本海に注ぐ、幹川流路延長が約73km、流域面積が約1,150  $km^2$ の一級河川である。荒川では、1967年8月に計画高水流量 (3,200  $m^3/s$ ) を遥に上回る大規模な洪水に見舞われて死者が90名に達する「羽越水害」が発生した。これを契機として、一級河川に指定され、計画高水流量も6,500  $m^3/s$ に改定された。

荒川では、2004年7月17日~18日に大規模な出水が生じて河口砂州がほとんどフラッシュされた。図-2および図-3は、砂州フラッシュ前後の河口周辺地形であり、図-2は砂州フラッシュ前の2004年2月の地形、図-3は砂州フラッシュ後の2004年7月の地形である。出水前は、河口部には右岸側から約150m幅の砂州が伸びており、河口部はほぼ閉塞した状況にある。出水後には、河口砂州はほとんどフラッシュされ、河道の中央付近に若干浅い箇所が残された状況となっている。

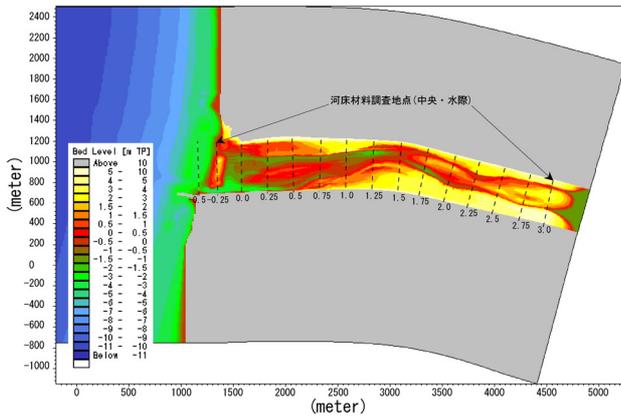


図-2 フラッシュ前の地形 (2004年2月)

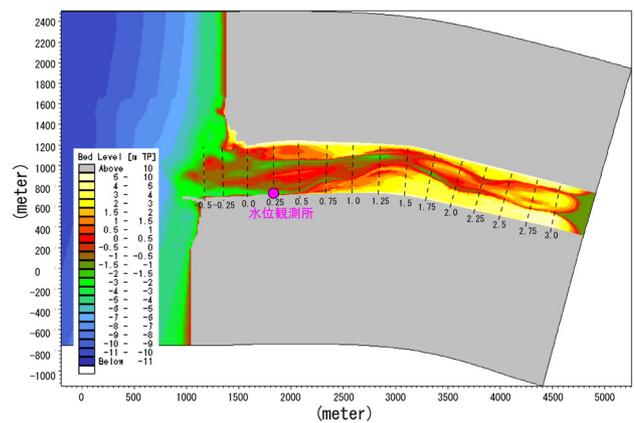


図-3 フラッシュ後の地形 (2004年7月)

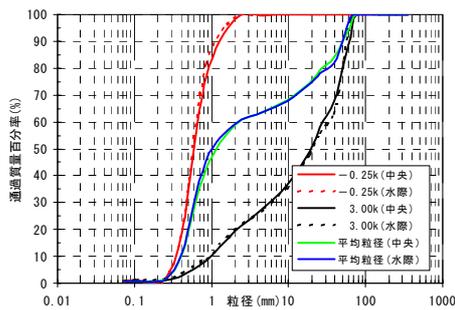


図-4 河口部の底質の粒径加積曲線 (1999年河床材料調査結果)

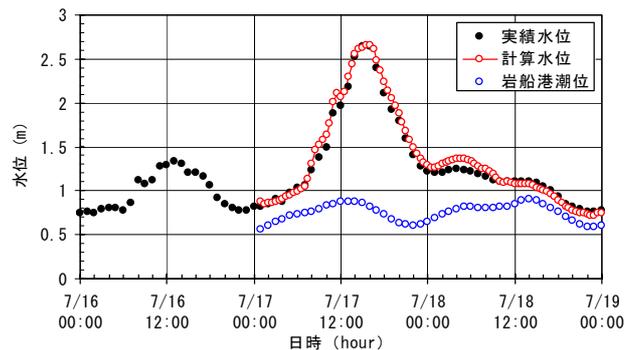


図-5 河口部(-0.25KP)の水位の比較

## (2) 計算条件

計算期間は、河口砂州のフラッシュが生じた期間と推定される2004年7月17日1時～18日24時の約2日間とした。計算時間間隔は、計算の安定性を考慮して、流況計算が $\Delta t=2\text{ s}$  (84,600ステップ)、河床変動計算が $\Delta t=6\text{ s}$ とした。計算範囲は、海域が沿岸方向3.2km、岸沖方向3.0kmであり、河道が3.0kmである。計算格子点は、596点×178点であり、河道内には、縦断方向に300点、横断方向に60点の格子点を配置した。

河口から-0.25km地点および3.0km地点において、1999年に実施された河床材料調査の結果を図-4に示す。再現計算では、この図をもとに数種類の粒径を用いて試行計算を行い、砂州のフラッシュ状況が最も適合する2.0mmを代表粒径として設定した。なお、2.0mmの粒径は、図-4に示したように河口砂州およびその上流側における中間的な粒径に相当するものと考えられる。

その他の主な計算条件としては、粗度係数は低水路が0.031、高水敷が0.045、渦動粘性係数は $1.0\text{ m}^2/\text{ s}$ 、流砂量の補正係数は1.0、浸水・冠水の判定水深は0.1～0.2mとした。境界条件としては、海側境界の潮位は岩船港の観測結果とし、河川流量は葛籠山地点 (4.6kp) の観測結果を上流端に入力した。また、河床変動計算の境界条件としては、すべての境界において河床高を固定とした。

## (3) 計算結果

図-3中に示した河口部の水位観測所における観測結果

と計算結果の比較を図-5に示す。計算値と観測値の水位の上昇と下降の時期およびピーク水位の値は一致しており、水位に関しては、出水による砂州フラッシュ時の状況を計算によって再現できているものと判断される。なお、一部に計算値と観測値に差異が見られることから、実際の砂州のフラッシュ過程と再現計算では若干の相違が生じていることも考えられる。

次に、計算による出水後(7月18日24時)の地形を図-6に示す。図-3に示した測量結果と比較すると、河口砂州がほとんど消失していること、砂州上流側の河床の変化が小さいことは一致しており、砂州右岸側の侵食量はやや小さいが、砂州のフラッシュを含めた河口部の全体的な地形変化の状況は概ね合致している。なお、計算では、河口部沖合のテラス地形の発達が小さくなっている。

図-7は、図-6中に示した河口砂州の横断面の地形変化である。これを見ても、出水後の実測と計算の地形変化は、侵食位置等の傾向が一致しており、出水による砂州フラッシュ時の地形変化の状況は概ね再現できているものと考えられる。ただし、計算では、実測と比較して砂州左岸側で侵食量が大きく、右岸側で小さくなっており、砂州の変形と流れの複雑な相互関係の再現精度に課題があると考えられる。なお、砂州フラッシュ後から測量までの期間に地形変化が生じたことも一因として想定される。

図-6中に示した代表測線における縦断地形、横断地形および水位の経時変化を図-8に示す。流量が $2,000\text{ m}^3/\text{ s}$

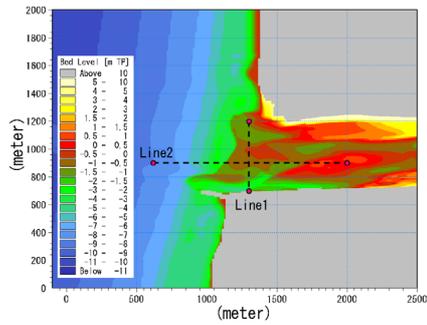


図-6 計算によるフラッシュ後の地形  
(2004年7月18日24時)

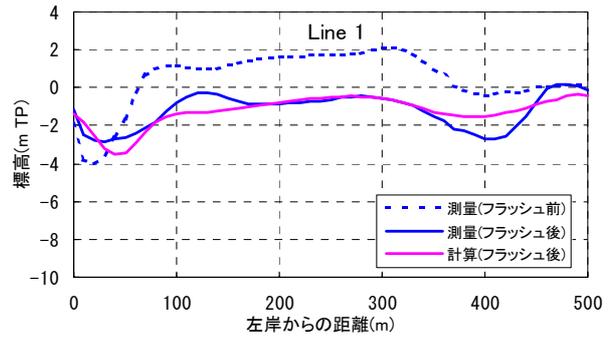


図-7 フラッシュ後の横断地形の比較

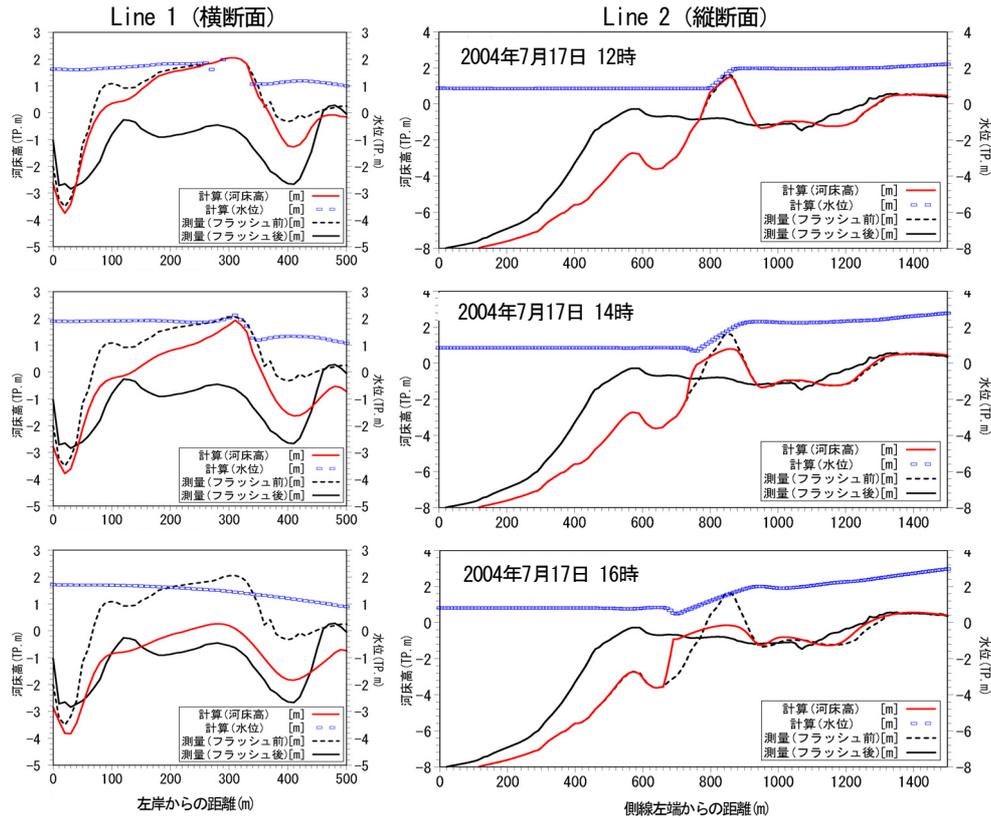


図-8 横断地形、縦断地形および水位の経時変化

に達した17日12時では、既に砂州両側の流路では侵食が生じており、さらに、河口部の水位が砂州頂部(T.P.+2 m)まで上昇して砂州全体が浸水する状況となっており、砂州頂部においても侵食が始まっている。その2時間後の14時には流量が約3,000 $\text{m}^3/\text{s}$ まで増加し、砂州のフラッシュが顕著となっている。さらに2時間後の16時にはほぼピーク流量に相当する約3,700 $\text{m}^3/\text{s}$ となり、河口砂州の大部分がフラッシュされている。なお、砂州上流側の水位は、流量がピークとなるまで上昇している。

図-9に砂州フラッシュ開始時の12時およびピーク流量付近の16時における流速分布を示す。フラッシュ開始時では、砂州両側の流路に流速が3 $\text{m}/\text{s}$ を超える流れが部分的に見られるが、砂州がフラッシュされたピーク流量付近では、3 $\text{m}/\text{s}$ を超える流れがほぼ一様に生じており、沖合では砂州によって2つに分岐した流れとなっている。

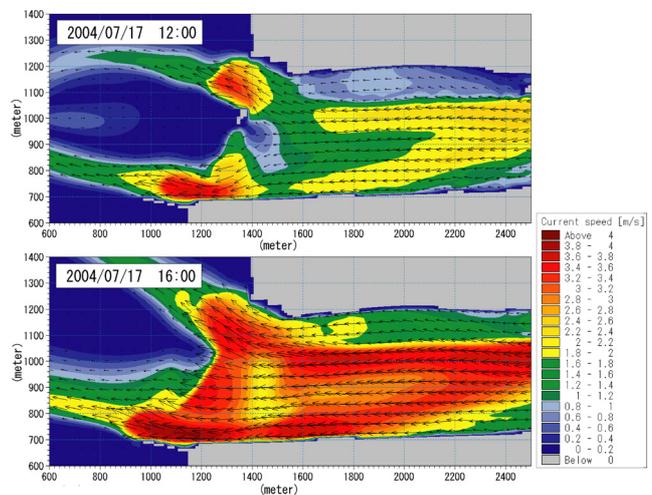


図-9 フラッシュ直前とピーク流量時の流速分布

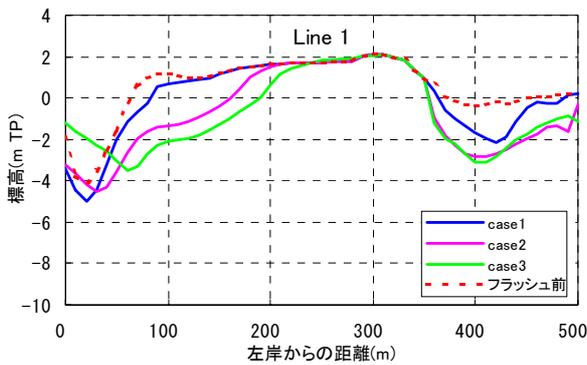


図-10 ピーク流量の違いによるフラッシュ後の地形の比較

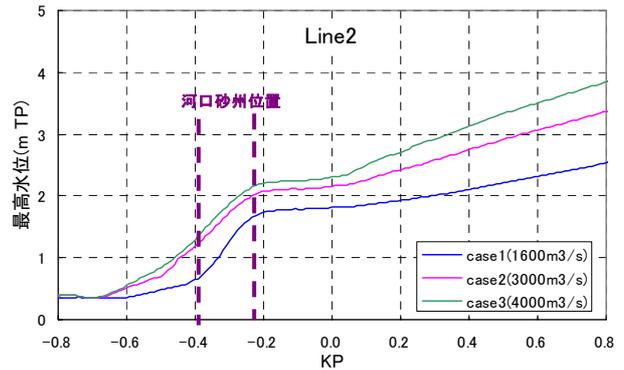


図-11 ピーク流量の違いによる最高水位の縦断分布

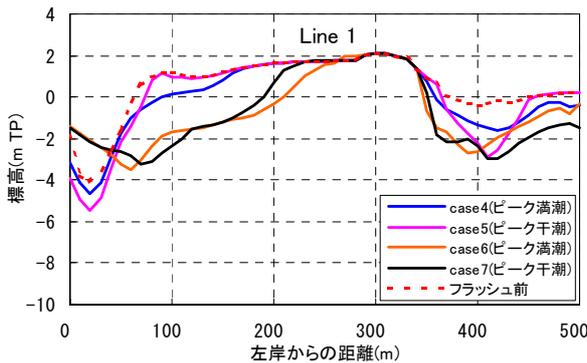


図-12 潮位の違いによるフラッシュ後の地形の比較

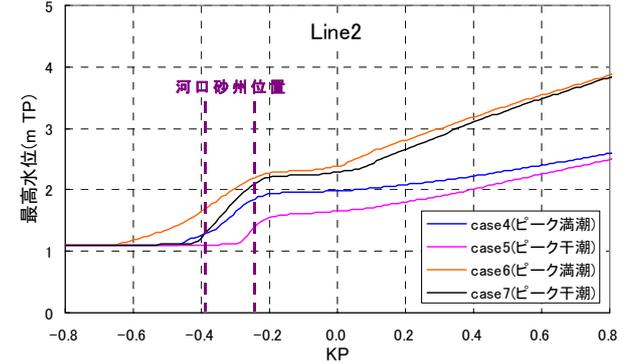


図-13 潮位の違いによる最高水位の縦断分布

#### 4. 要因による応答特性

##### (1) 河川流量の影響

ピーク流量の違いが河口砂州フラッシュに与える影響について検討するために、3ケース(1,600, 3,000, 4,000  $\text{m}^3/\text{s}$ )のピーク流量について計算を行った。ピーク流量が1,600  $\text{m}^3/\text{s}$ は1999年9月の出水相当であり、4,000  $\text{m}^3/\text{s}$ は2004年7月の出水相当、3,000  $\text{m}^3/\text{s}$ は2004年7月の出水の75%相当である。なお、外海潮位は、朔望平均満潮位(T.P.+0.34m)を一定に与え、その他の計算条件は再現計算と同様である。

図-10に各ケースにおけるフラッシュ後の河口砂州部の横断地形を示す。これらの計算では、外海潮位が砂州高(約T.P.+2m)に対して低く、オーバーフローが発生しなかったため、ピーク流量が4,000  $\text{m}^3/\text{s}$ のケースでも砂州の一部がフラッシュされずに残る結果となった。

河川流量の影響については、ピーク流量の増大に伴って砂州側岸の侵食量も増大することが認められ、地形変化の傾向は各流量ともに類似したものとなった。また、流量の増加速度が側岸侵食による通水面積の拡大速度を上回る場合には、水位上昇およびオーバーフローが発生して砂州の侵食が進行することが示唆された。

図-11に各ケースにおける最高水位の縦断分布を示す。砂州の欠壊が生じたピーク流量が3,000  $\text{m}^3/\text{s}$ と4,000  $\text{m}^3/\text{s}$ のケースでは、砂州部の水位がともに砂州高のT.P.+2m前後まで上昇しており、上流側の水位は4,000  $\text{m}^3/\text{s}$ の方が0.5m程度高くなっている。砂州の欠壊がほとんど生じな

い1,600  $\text{m}^3/\text{s}$ の場合には、4,000  $\text{m}^3/\text{s}$ に比べて砂州部で0.5m程度、上流側で1.5m程度水位が低くなっている。

##### (2) 潮位の影響

外海潮位が砂州フラッシュに与える影響について検討するために、ピーク流量時に満潮あるいは干潮が重なった場合の各々のケースについて計算を行った。ピーク時の流量は1,600  $\text{m}^3/\text{s}$ と4,000  $\text{m}^3/\text{s}$ の2ケースとし、干満の潮位差は1.5m(T.P.-0.41m~+1.09m)である。

図-12に各ケースにおけるフラッシュ後の河口砂州部の横断地形を示す。流量のピーク時が満潮の場合には、干潮の場合と比べて砂州側岸の侵食量が大きくなっている。一方、ピーク時が干潮の場合には、砂州両側の流路の侵食量が大きく、砂州自体の侵食量は小さくなっている。これは、ピーク時に潮位が高い場合には、砂州のオーバーフローが発生しやすくなるため、砂州本体の侵食量が増加することによるものと考えられる。潮位が低い場合には、水位の縦断勾配が急になり流速が増大するため、砂州両側の流路の侵食が進行し、通水面積の拡大によってオーバーフローが抑えられていることが考えられる。

図-13に各ケースにおける最高水位の縦断分布を示す。ピーク流量が4,000  $\text{m}^3/\text{s}$ のケースでは、砂州高まで水位が上昇してオーバーフローによる侵食が進行するため、満潮および干潮ともに砂州上流側の水位差が全体的に小さくなっている。流量が1,600  $\text{m}^3/\text{s}$ のケースでは、満潮と干潮の水位差は、砂州部では0.5m程度生じているが、上流側では4,000  $\text{m}^3/\text{s}$ の場合と同様に小さくなっている。

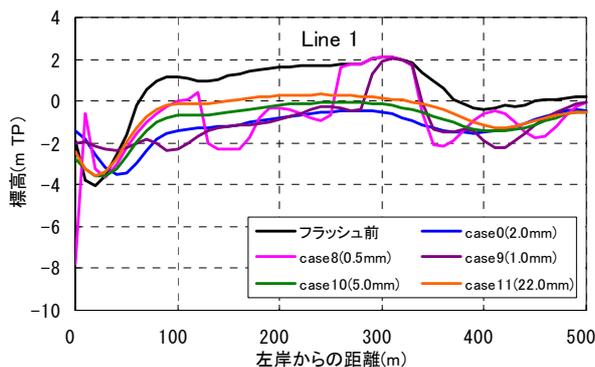


図-14 粒径の違いによるフラッシュ後の地形の比較

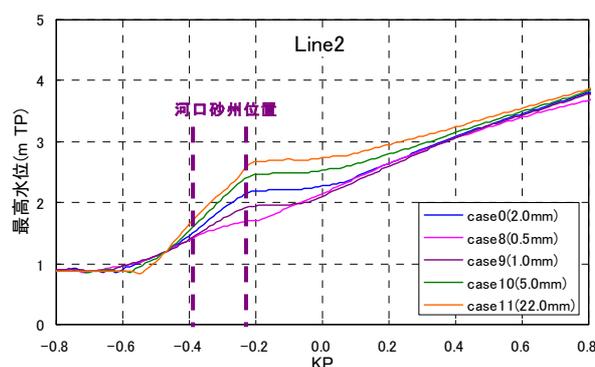


図-15 粒径の違いによる最高水位の縦断分布

### (3) 粒径の影響

再現計算では、砂州および河床の底質の粒径は一様に2.0mmと与えているが、図-4に示した河床材料調査結果をもとに、底質粒径を0.5mm、1.0mm、5.0mm、22.0mmと各々一様としたケースについても計算を行っている。

図-14に各ケースのフラッシュ後の河口砂州部の横断地形を示す。粒径の小さい0.5mmおよび1mmでは、再現計算の2mmの場合と異なり、砂州は完全にフラッシュされずに右岸側が残っているが、左岸側では逆に侵食量が大きくなっている。一方、粒径の大きい5mmと22mmでは、2mmと同様に砂州全体がフラッシュされており、砂州両側の流路の侵食量は小さくなっている。なお、砂州自体の侵食量については、粒径が2mm、5mm、22mmの順に小さくなる。

図-15に各ケースの最高水位の縦断分布を示す。粒径が大きくなるとともに河口付近の最高水位は高くなるが、砂州から1km程度上流側の水位はほぼ等しくなっている。粒径が小さい場合には、早い時期に砂州両側の流路の侵食が生じるため水位が低くなるが、粒径が大きい場合には、初期における砂州および河道の変化が小さく、砂州のオーバーフローとフラッシュが開始されるまでに時間を要するため、河口部の水位が上昇しているものと考えられる。

## 5. まとめ

2004年7月に発生した荒川の大規模な出水による河口砂州フラッシュの再現計算を行った結果、河口部の水位変動の計算値は実測値とほぼ一致しているとともに、河口砂州を含めた河口部周辺の地形変化状況を概ね再現できていることから、計算モデルの再現性および計算条件の妥当性が確認されたものと考えられる。

この計算モデルを用いた河口砂州のフラッシュ要因の感度分析の結果によると、ピーク流量については、流量の増加速度と砂州両岸流路の通水面積の拡大速度との関係から、砂州上流側の水位上昇量とオーバーフローの発生状況が定まり、それによって砂州のフラッシュ状況が変化することが明らかとなった。また、潮位については、ピーク流量時の潮位が低い場合には、流速の増大によっ

て砂州両側流路の侵食が進行して通水面積が拡大されるため、砂州本体の侵食量は小さくなる。一方、潮位が高い場合には、砂州のオーバーフローが発生しやすくなるため、砂州本体の侵食量が增大する。

粒径については、粒径が小さい場合には、砂州両側の流路の侵食速度が大きく砂州は完全にフラッシュされないが、粒径が大きい場合には、流路の侵食の進行が遅く、砂州上流側の水位が上昇するため、オーバーフローが生じて砂州全体がフラッシュされる。砂州フラッシュが生じるような大規模な出水の場合には、粒径によって砂州フラッシュの状況は異なるものとなるが、河口からある程度離れた上流側の水位に大きな違いは生じていない。

今後の課題として、現地において出水時の河口砂州のフラッシュ過程および流況の変化を把握し、これをもとに計算精度の向上を図り、治水上の安全性を考慮した河口砂州の適正管理および河口域の土砂管理に活用していくことが挙げられる。

**謝辞：**本研究を実施するにあたり、国土交通省北陸地方整備局羽越河川国道事務所より、貴重なデータ・資料の提供を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 細山田得三, 佐野啓明, 野田猛, 酒井優, 酒匂秀典: 洪水時における阿賀野川河口砂州のフラッシュ現象の再現に関する研究, 河川技術論文集, 第12巻, pp.73-78, 2006.
- 2) 川口広司, 福岡捷二, 安部友則: 常願寺川河口部における洪水中河床変動量の推算と河口部計画の改善策, 河川技術論文集, 第12巻, pp.79-84, 2006.
- 3) 渡辺和也, Nguyen Trong Tu, 田中仁: 洪水時の河口砂州崩壊とその回復過程, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.586-590, 2005.
- 4) Chow, V.T.: Open-channel hydraulics, McGraw-Hill, 1959.
- 5) Rijn, L. C. van: Part I: Bed load transport, Journal of Hydraulic Engineering, 110, October 1984.
- 6) Rijn, L. C. van: PartII: Suspended load transport, Journal of Hydraulic Engineering, 111, November 1984.