

# 由良川河口砂州のフラッシュ及び形成モデルの作成による挙動分析の検討について

関井 茂裕<sup>1</sup>

<sup>1</sup>近畿地方整備局 福知山河川国道事務所 調査第一課 (〒620-0875京都府福知山市字堀小字今岡2459-14)

由良川河口には砂州が発達しており、洪水時の堰上げによる河川の水位上昇が懸念される一方、砂州を著しく開削した場合、渇水時に塩水の遡上による河川環境や水道水への影響が懸念される。また、2004年23号台風以降は砂州が右岸側に偏るとともに、河川の流が左岸側に偏り、河岸侵食が懸念される。このようなことから、砂州の制御可能性を検討するための挙動分析を行ったものである。

キーワード 砂州, 河岸侵食, 挙動分析, 制御施策

## 1. はじめに

由良川は、その源を京都府、滋賀県、福井県の境の三国岳（標高959m）に発し、芦生の原生林を抜けて山間部を西流し、高屋川、上林川などと合わせ綾部市を西流し、福知山市内に出て土師川と合流し、そこから方向を変え北流し、旧大江町を経て舞鶴市と宮津市の市境において日本海に注ぐ、幹川流路延長約146km、流域面積約1,880km<sup>2</sup>の一級河川である（図-1）。

由良川の河口部では、旧来より河川流と波浪・海浜流の影響により砂州が発達している。特に、写真-1に示すように、2004年23号台風以降、滞筋が左岸側に片寄るとともに、砂州が右岸側に集中、拡大しており、洪水時のせき上げによる水位上昇、左岸側への偏流による河岸侵食、周辺海域での海岸侵食等のさまざまな影響が懸念されている。一方で、河口砂州が著しく開口した場合は、塩害の発生や汽水域環境への影響が生じる可能性がある。

このような背景から、今後の適正な河口管理を実施していくため、河口砂州の挙動を解明したうえで、砂州の制御可能性を検討する必要がある。

本稿では、上記検討のうち、数値シミュレーションモデルによる河口砂州の挙動分析を行い、今後の課題について報告するものである。

## 2. 河口砂州変動モデルの構築

河口砂州の変動を予測する解析モデルとして、①洪水時の砂州フラッシュ状況を予測するための砂州フラッシュモデルと、②波浪による砂州の形成・発達過程を予測するための砂州形成モデルの2種のモデルを構築した。

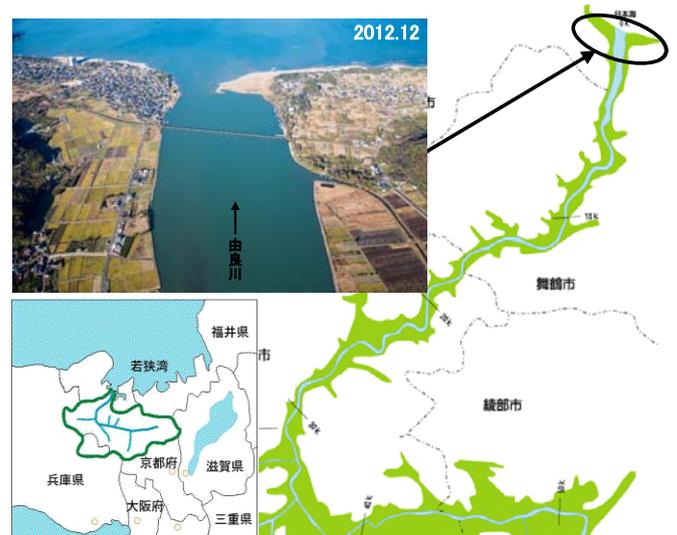


図-1 由良川位置および河口の状況



写真-1 河口砂州の状況

(1) 砂州フラッシュモデルの構築

砂州フラッシュモデルは、一般座標系での平面二次元河床変動モデル用い、河口砂州部の側岸侵食の影響をモデル化し、また、現地にてボーリング調査を行い河口部の層別の粒度分布を確認し、パラメータを再設定することでフラッシュモデルの精度向上を図った。

モデルの精度検証にあたっては、砂州による水位上昇と砂州フラッシュの規模が顕著であった、1982年8月10号台風、1983年9月10号台風を対象に、河口部（由良観測所）の水位観測記録と洪水後の砂州形状について実績と計算結果との整合性を確認することにより検証計算を実施した。解析条件を表-1に示す。

検証計算の結果、由良地点での計算水位は実績を良く表現しており（図-3）、洪水後の砂州フラッシュ形状についても、砂州の平面形状を概ね再現できていることを確認した（図-4）。以上より、本モデルが砂州フラッシュの実態を概ね表現できるものだと判断した。

表-1 砂州フラッシュモデルの検証計算条件

分類	項目	解析条件
地形条件	解析対象区間	河口沖 (-2.0k) ~ 大川橋 (8.2k)
	解析格子	縦断方向 246@25, 50, 250mメッシュ 横断方向 40@20~200mメッシュ
	初期地形	1982年2月測量
境界条件	上流端流量	大川橋地点洪水ハイドロ (1982.8ピーク流量: 3,636m³/s)
	下流端水位	舞鶴検潮所 (気象庁) 観測記録
解析定数	粗度係数	低水敷: 推定粗度係数より設定 高水敷: 検討流量時 (HWL) の水深と植生の高さにより設定
	河床材料	1998, 2000, 2004年河床材料調査およびボーリング調査結果をもとに設定
	樹木	1993, 1998, 2004年河川水辺の国勢調査 (植物調査)、2001, 2004年毎木調査による樹木群を反映
	構造物	1橋梁 (KTR由良川橋) を考慮

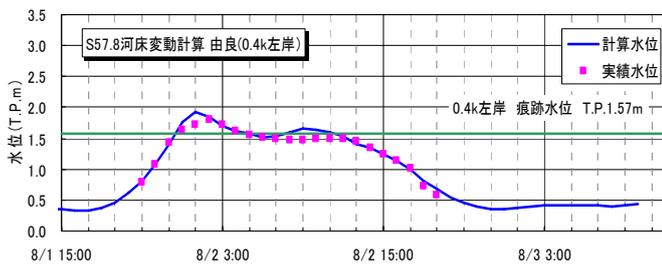


図-3 1982年8月由良地点の水位再現結果の比較

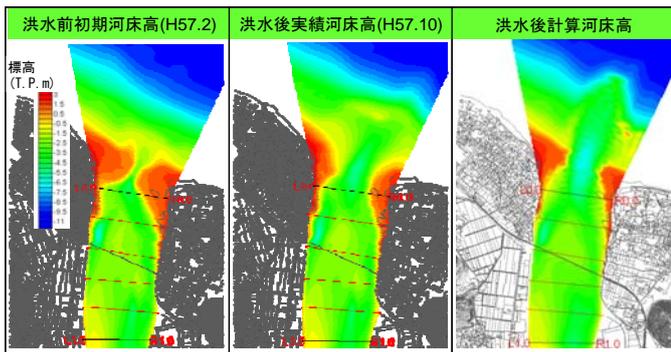


図-4 1982年8月洪水前後の河床高比較

(2) 砂州形成モデルの構築

砂州の形成モデルでは、波浪解析、海浜流解析、地形変化解析の3つの解析により、波浪による河口砂州の変動を解析する。

波浪解析モデルについては、沖波の設定地点から河口までの領域をエネルギー平衡方程式を適用した。海浜流解析については、河口砂州周辺の波浪変形と海浜流を同時に解析可能なブシネスク方程式を適用した。地形変化解析については、海浜流の定常流成分と波動成分によるせん断力から漂砂量を算定する方法を適用し、混合粒径を考慮した。

モデルの精度検証にあたっては、河口部の三次元ナローマルチ深淺測量成果が得られる2010年9月から2010年10月の約1ヶ月間、および洪水期を挟む2010年10月から2011年11月の約1カ年間を検証対象期間として測量成果と計算による地形変化状況を比較することにより検証した。検証計算の解析条件を表-2に示す。

また、本モデルは、3つの解析を繰り返し実行するため、多大な計算時間を要する。この対応として、波浪および潮汐を波浪規模や河川流量規模別等により図-5のようにパターン化し、繰り返し回数を極力少なくすることにより計算の効率化を図った。

表-2 砂州形成モデルの検証計算条件

項目	解析条件	
解析対象範囲	岸沖方向 1.55km, 沿岸方向 1.55km	
解析メッシュサイズ	海浜流解析 : $\Delta x = \Delta y = 5m$ 310×310 メッシュ 水深変化解析 : $\Delta x = \Delta y = 5m$ 310×310 メッシュ	
初期地形	2010年9月ナローマルチ深淺測量および航空レーザー測量成果をもとに作成	
計算期間	2010年9月~10月の36日間 2010年10月~2011年11月の約1カ年	
波浪解析	モデル	沖合: エネルギー平衡方程式 河口部: ブシネスク方程式モデル
	入射波	波高; 2.59m 周期; 9.49sec 波向; NNE 他検証対象期間の波浪観測記録より設定
	摩擦係数	0.005
	反射率	砂州、砂浜海岸線; 0.20、河道内; 1.0
	波高設定	35波入射し26~35波目の平均波高を採用
	河川流量	大川橋地点流量の再現期間平均流量
地形変化解析	水位	由良水位観測所の再現期間平均水位を入力
	計算 Step	$\Delta T = 0.1sec$
	モデル	流砂量式モデル
	漂砂量式	田中の摩擦係数式を用いた Einstein and Brown 式
	河川からの流出土砂量	2010年流砂量調査結果より流砂量を設定
	計算 Step	$\Delta T$ : 入射波周期毎

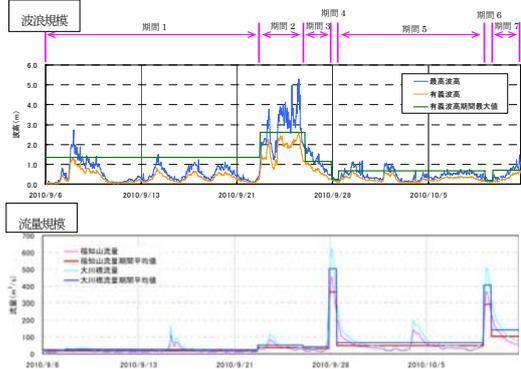


図-5 砂州形成解析における波浪外力のパターン設定例

2010年9月から2010年10月の約1ヶ月間を対象とした検証計算における波浪解析、海浜流解析結果、および河口砂州の地形変化再現結果を図-6、図-7に示す。

これによれば、波浪については開口部沖合において波高が急激に低下し、海浜流においては回折により砂州背後に波浪が進入している等の傾向が見られた。河口砂州の形成傾向（沖側土砂の砂州への戻り）については概ね実績を再現しているが、土砂量および土砂堆積位置が実績に比べ一部再現性が低く、一部改良の余地がある。

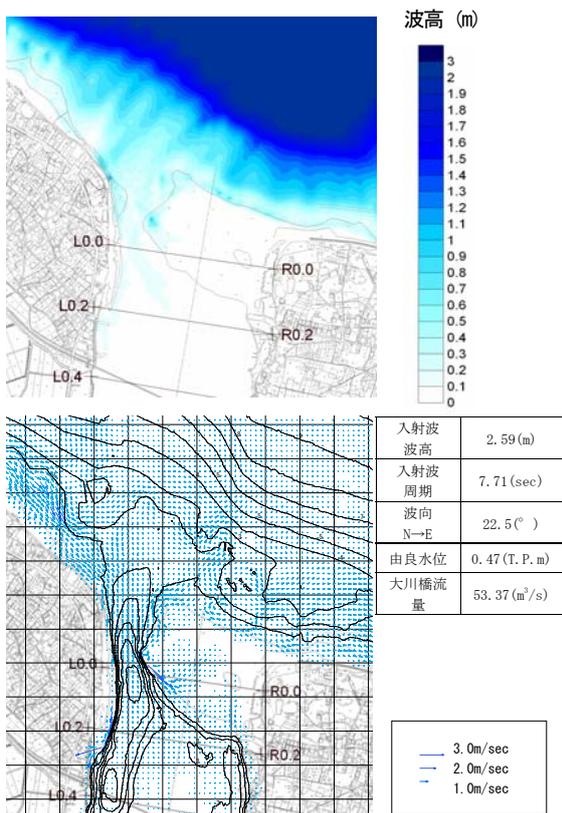


図-6 波浪、海浜流解析結果

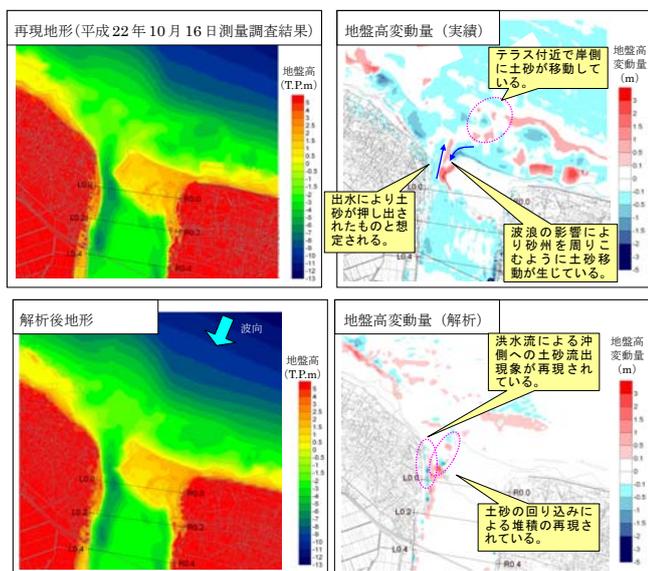


図-7 砂州形成解析の地形変化再現結果

### 3. 開口位置固定化の要因分析

2006年頃より生じている左岸開口やみお筋の固定化現象の要因を、これまでの測量成果について整理し、河口部の滞筋位置が河口部の流れに影響を及ぼす要因を把握した。また、平面二次元流況解析により主流線の違いについて分析し、測量成果との整合性について確認を行った。

#### (1) 現況地形分析

河口砂州の形成に影響を及ぼす下流区間について、これまで実施されている測量を基に、測量断面の最深河床位置を整理し、滞筋位置の経年変化図を作成した(図-9左)。

#### (2) 二次元流況解析

##### 1) 砂州のフラッシュ流量

開口幅が拡大し、かつその間に洪水が生起している場合を、「砂州フラッシュ」と考え、図-8の砂州フラッシュ時期に生じた河川流量を整理し、砂州がフラッシュされる河川流量規模を推定する。

結果、砂州フラッシュと想定された期間中で基準地点の福知山地点における河川流量は、最小流量1,539m³/s、平均流量2,486m³/sとなることから、砂州がフラッシュされる河川流量は概ね1,500m³/s以上と推定した(表-3)。

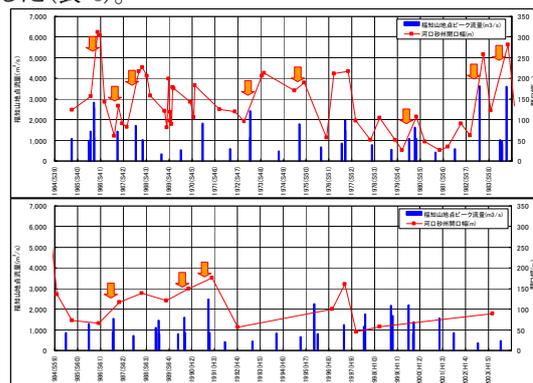


図-8 砂州開口幅と主要洪水の生起状況

表-3 砂州フラッシュ時の流量整理

砂州フラッシュが生じた期間	当該期間に生じた洪水	福知山洪水流量(m³/s)	期間最大流量(m³/s)	備考
S40.7.28~S40.11.16	S40.9.14	2,833	2,833	秋雨前線
S42.2.26~S42.9.2	S42.7.10	1,712	1,712	低気圧・梅雨前線
S47.4.10~S48.1.24	S47.9.17	4,064	4,064	台風7220号
S49.7.1~S49.11.26	S49.9.9	1,785	1,785	台風7418号・前線
S54.3.9~S54.10.27	S54.10.1	1,633	1,633	台風7916号
S57.2.28~S57.10.2	S57.8.2	3,636	3,636	台風8210号
S58.1.26~S58.10.28	S58.9.28	3,608	3,608	台風8310号
S60.12.6~S61.10.28	S61.7.22	1,539	1,539	梅雨前線
S63.11.15~H1.11.13	H1.9.3	1,583	1,583	秋雨前線
H1.11.13~H2.11.22	H2.9.20	2,469	2,469	台風9019号
砂州フラッシュが生じた期間の期間最大流量の最小値		1,539		
砂州フラッシュが生じた期間の期間最大流量の平均値		2,486		

#### 2) 解析条件

河川流量は、砂州フラッシュが開始される1,500m³/sとし、表-4に示す地形条件を適用した。2003年及び2008年の地形を用いて、両年における主流線の違いを評価した(図-9)。

表-4 対象とする地形条件

地形	地形条件	河口砂州の状況
No.1	河道: 2003年度測量	両岸に形成し、河道中央が開口した地形
	河口: 2003年8月航空写真から推定	
No.2	河道: 2008年度測量	右岸側に大きく形成し、左岸が開口した地形
	河口: 2011年11月深淺測量	

### (3) 開口位置の固定化要因分析

これまでの測量成果の測量断面の重ね合わせによる滞筋位置の経年変化図により、2004年23号台風を境として、下流部河道形状が変化しており、これにより洪水時の河口部の流れも左岸寄りとなっている。よって、河道の滞筋位置が変化(0.4k~0.8k等)し、河口部の流況が左岸寄りに変化したものと考えられる。また、2ケースの地形条件による平面二次元流況解析を行い、横断方向で最大流速が発生する位置を抽出し、主流線を整理した結果(図-9右)、河口部での最大流速発生位置について測量成果と同様に左岸寄りとなる傾向となり、平面二次元流況解析での整合性が確認できた。

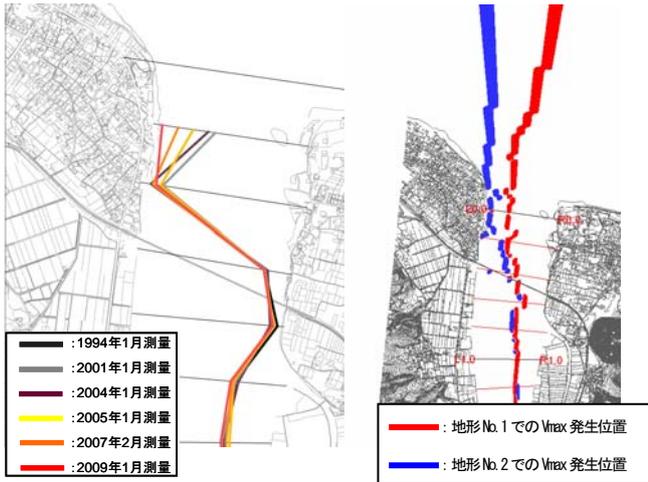


図-9 現況地形分析結果(左)及び平面二次元流況解析結果(右)

## 4. 河口砂州制御可能性の検討

前項「3. 開口位置固定化の要因分析」による結果を基に、砂州制御施策の方向性及びその手法等について整理するとともに、挙動予測モデルを用いた数値計算を行い、制御施策可能性の検証を行った。

### (1) 制御施策案の方向性及びその手法

砂州の制御施策案の方向性として、開口位置を可能な限り河道流心で維持管理することで洪水時のフラッシュ促進を図るとともに、河岸寄りの開口に伴う河岸・海岸侵食を防止することから、制御施策として以下の手法が考えられる。

- ・ 砂州部の掘削等による開口位置の付け替え
- ・ 水制工等による砂州周辺の主流の制御

### (2) 制御施策案の設定

上記で示した河口砂州の制御施策手法の具体的な施策案について、以下に示す。

- 開口位置付け替え案：流心部の開削と現状のみお筋の埋め戻しにより開口位置を付け替える。
- 砂州安定工設置案：現状の開口部に捨石などを投入し、左岸側の堆積を促進する。
- 流況制御案：河道上流区間に水制工を設置し、河口砂州周辺の主流を制御する。

制御施策案は上記a)~c)の単独ケースと、組み合わせ案の計5案を設定する。

### (3) 挙動予測モデルによる制御施策の数値解析

5つの河口砂州制御施策案について前章で構築した挙動予測モデルを基に数値計算を行い、制御可能性の検討を行った(表-5)。

この数値計算の結果を基に、基本方針流量流下時の最高水位を評価する「洪水流下」、基本方針流量流下時の流速を評価する「河岸侵食」、低水管理上の塩水遡上を評価する「低水管理」、「越波」、「事業費」の5つの観点から各施策案について比較を行ったところ(表-5.6)、「開口位置付け替え+流況制御案」による対策が、制御可能性が高い結果となった。

## 5. まとめ

今回の検討により、河口部の砂州について、挙動分析のために構築した予測モデルのうち、砂州フラッシュモデルについては概ね実現象を再現できるものを構築することが出来た。また、砂州形成モデルについては、一定の再現性のあるものが構築できたが、開口部における波浪の土砂の戻りや出水による沖側への移動の再現性に改善の余地がある。

また、複数の制御施策案について、数値計算により砂州の挙動解析を行った結果、「開口位置付け替え+流況制御案」による対策が制御可能性が高い結果となった。

今後は、波浪の影響をより適切に考慮することで砂州形成モデルのさらなる精度向上を図ると共に、水理模型実験等による制御施策の実現象・効果検証を実施していく予定である。

表-5 対策案ごとの砂州フラッシュ・形成モデル効果

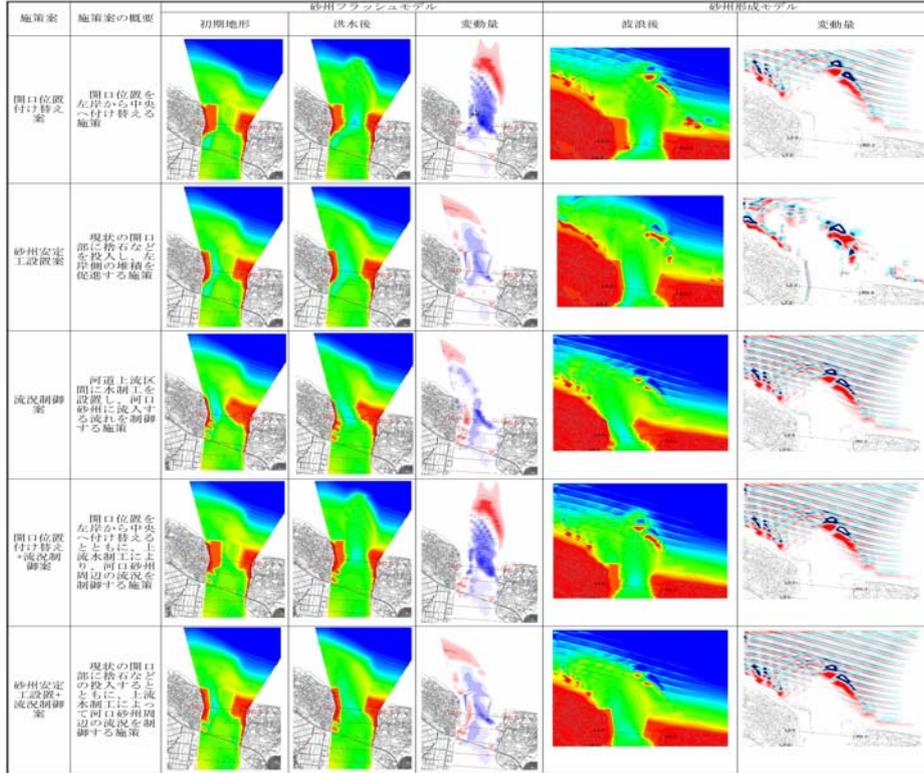


表-6 検討結果一覧表

施策案	砂州フラッシュモデルによる検討			砂州形成モデルによる検討			事業費	総合評価
	洪水流下	河岸侵食	地形変化	低水管理	越波	地形変化		
開口位置付け替え案	○ (左右岸ともに水位をHWL以下に抑えることが可能)	◎ (左岸の流速を低減させることが可能)	○ (砂州は中央からフラッシュされ、兩岸の砂州も残る)	△ (砂州が回復しにくい、効果を期待しにくい)	△ (砂州が回復しにくい、効果を期待しにくい)	△ (沖合に土砂がフラッシュされ、回復しにくい)	○ (3.9億円)	
砂州安定工設置案	○ (左右岸ともに水位をHWL以下に抑えることが可能)	△ (左岸の流速低減効果はほとんどない)	△ (0.0k下流左岸寄り河床低下が進行)	○ (塩水の遡上を抑制でき、かつ左岸の越波も軽減できる)	○ (塩水の遡上を抑制でき、かつ左岸の越波も軽減できる)	○ (フラッシュされた土砂が戻り、若干回復する)	△ (22.8億円)	
流況制御案	× (水位がHWLを上回る地点が発生)	△ (0.1k~0.2kでは低減効果があるが、0.1kから下流ではほとんどない)	△ (0.0k下流左岸寄り河床低下が進行)	◎ (砂州の回復により、塩水の遡上を抑制でき、かつ左岸の越波も軽減できる)	◎ (砂州の回復により、塩水の遡上を抑制でき、かつ左岸の越波も軽減できる)	◎ (水制工で流向を変えたことにより回復しやすい)	◎ (2.3億円)	
開口位置付け替え+流況制御案	○ (左右岸ともに水位をHWL以下に抑えることが可能)	◎ (左岸の流速を低減させることが可能)	○ (砂州は中央からフラッシュされ、兩岸の砂州も残る)	○ (塩水の遡上を抑制でき、かつ左岸の越波も軽減できる)	○ (塩水の遡上を抑制でき、かつ左岸の越波も軽減できる)	○ (フラッシュされた土砂が戻り、若干回復する)	○ (5.4億円)	○
砂州安定工設置+流況制御案	○ (左右岸ともに水位をHWL以下に抑えることが可能)	△ (左岸の流速低減効果はほとんどない)	○ (砂州は中央からフラッシュされ、兩岸の砂州も残る)	◎ (砂州の回復により、塩水の遡上を抑制でき、かつ左岸の越波も軽減できる)	◎ (砂州の回復により、塩水の遡上を抑制でき、かつ左岸の越波も軽減できる)	◎ (水制工で流向を変えたことにより回復しやすい)	△ (24.3億円)	