

水理模型実験及び数値解析モデルの併用による 円山川河道整備に伴う瀬・淵環境の保全に関する考察 について

名村 圭司¹

¹近畿地方整備局 豊岡河川国道事務所 調査第一課（〒668-0025兵庫県豊岡市幸町10-3）

円山川上流部の稲葉川合流部付近では河川整備計画に基づく河道整備が進められており、稲葉川の付け替えと本川左岸堤防の整備により堤防法線が大きく変化している。当該地区は魚類や砂河原の植生が良好な生育場となっていることから堤防の完成後においても、瀬・淵環境が維持できるかが課題となった。本論文では、河道整備後の河床の変化傾向を判断するために実施した水理模型実験の結果、及び今後の対策工検討におけるコスト・工期の縮減のために模型実験結果を再現可能な数値解析モデルを今回構築したので、その結果について報告する。

キーワード 瀬・淵の保全、水理模型実験、平面二次元河床変動計算、コスト縮減

1. 円山川の概要

円山川は兵庫県朝木郡生野町（標高640m）を源とし、稲葉川などの支川を合流し、豊岡盆地に入った後、出石川、奈佐川などの支川を合わせて日本海に注ぐ河川である。河川延長は約68km、流域面積は約1,300km²に及び兵庫県全体の約16%を占めている。

この円山川25.2k付近左岸に流入する稲葉川の合流部は魚類等にとっての良好な生育場となる淵が形成されているが、当該地区において現在、整備計画に基づく河道整備が進められており、整備後もその生育場が維持されるかが懸念されているところである。



図-1 円山川流域位置図

2. 検討対象範囲

検討対象範囲は図-2に示すとおり稲葉川の合流点の上下流約1km程度を検討対象範囲とした（円山川24.2k～26.4k、稲葉川0.2k～1.1k）。当該区間には良好な生物の生育場となるNo1～4の淵が形成されているが、稲葉川合

流点の河道整備により、特にNo2の淵の維持が懸念されている。本検討ではこのNo2の淵の変化傾向に特に着目するものとした。

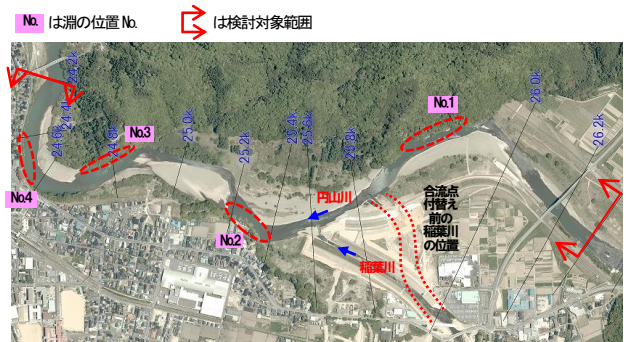


図-2 稲葉川合流部航空写真（淵位置図）

3. 水理模型実験の実施

(1) 実施フロー

下記のフローに従い、模型実験を実施した。

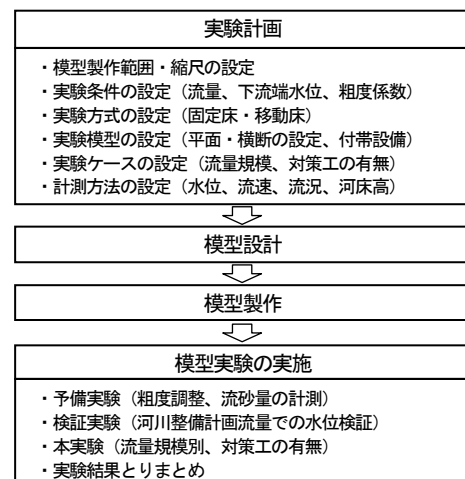


図-3 模型実験実施フロー

(2) 実施条件の設定

模型実験の実施条件を以下に示す。

① 模型範囲

- ・ 円山川の模型の範囲は、稲葉川付け替えに伴う現況の淵（No. 2、No. 3）への影響を適切に評価出来るよう、24.2k～26.4kを再現範囲とした。

② 縮尺

模型の縮尺は以下の理由から1/60とした。

- ・ フルードの相似則より水理量の妥当性を確認した結果、1/50と1/60が適合。
- ・ 模型製作のコスト縮減を考えると1/60の模型が有利。

③ 模型の種類

- ・ 円山川は、淵の保全、再生を検討することから移動床とした。
- ・ 支川の稲葉川は、流砂の影響が小さいことから合流量のみ考慮して固定床とした。

表-1 模型実験実施条件

項目	実施条件
模型範囲	円山川 24.2k～26.4k、稲葉川 -0.2k～1.1k
縮尺	フルードの相似則等より水理量の妥当性を確認し、1/60を採用
下流端水位	準二次元不等流計算による円山川 24.2k 地点（模型下流端）のH-Q式を用いて、流量規模に応じた水位を、下流端ゲート进行操作して設定
粗度係数	河川整備計画河道の粗度係数と整合するように、固定床部にイボ型粗度を設置
給砂量	円山川上流端断面における平衡流砂量
河床材料	現地河床の代表粒径等から、一様珪砂（4号珪砂：0.60～1.18mm）を採用

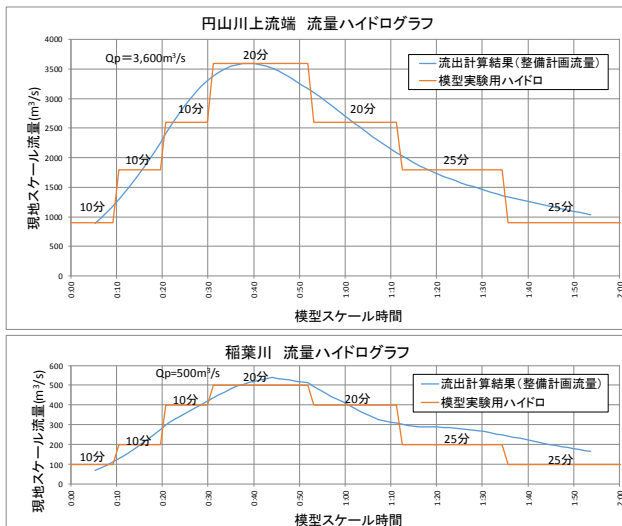


図-4 上流端流量ハイドログラフ（整備計画流量規模）

(3) 模型設計・製作

実施条件を満たす河道模型を設計した。

河道模型の諸元は円山川の横断測量成果、深淺測量結果、LPデータ、計画縦横断面図等から設定した。

河道模型を製作し、給水ポンプや量水槽、下流端ゲート等の付帯設備を配置した。

ト等の付帯設備を配置した。

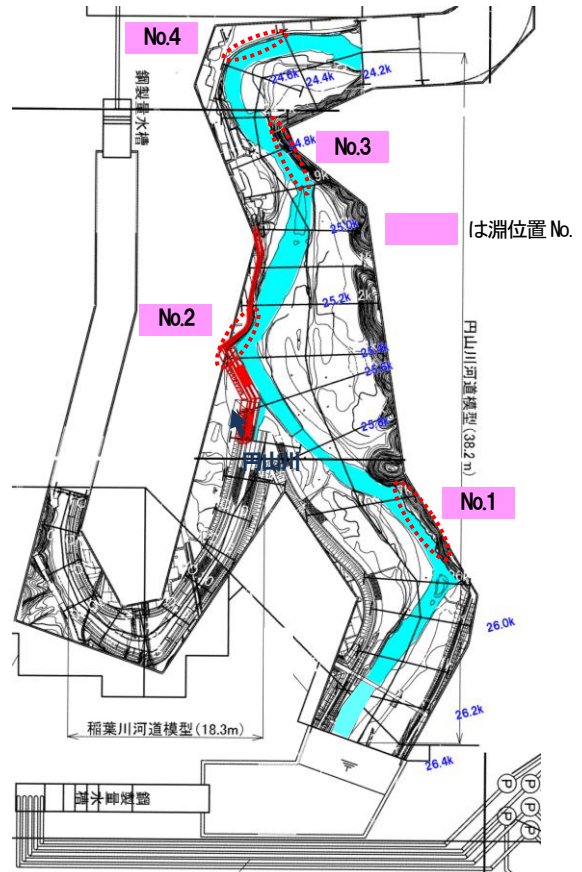


図-5 円山川河道水理模型

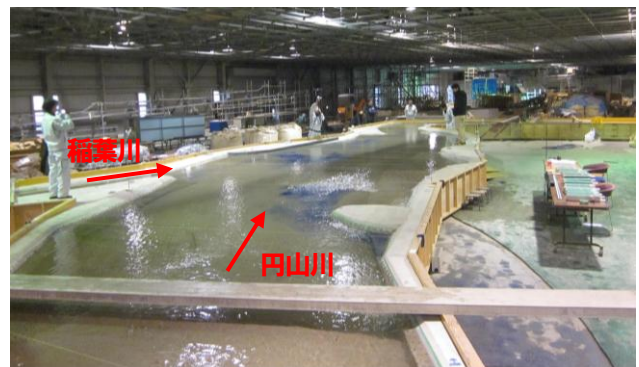


図-6 模型河道の現地写真

(4) 実験ケース

実験のケースは下表に示すとおりとし、整備計画河道を対象に、流量規模を限界掃流力程度から河川整備計画流量規模まで複数ケース通水した。

表-2 模型実験ケース

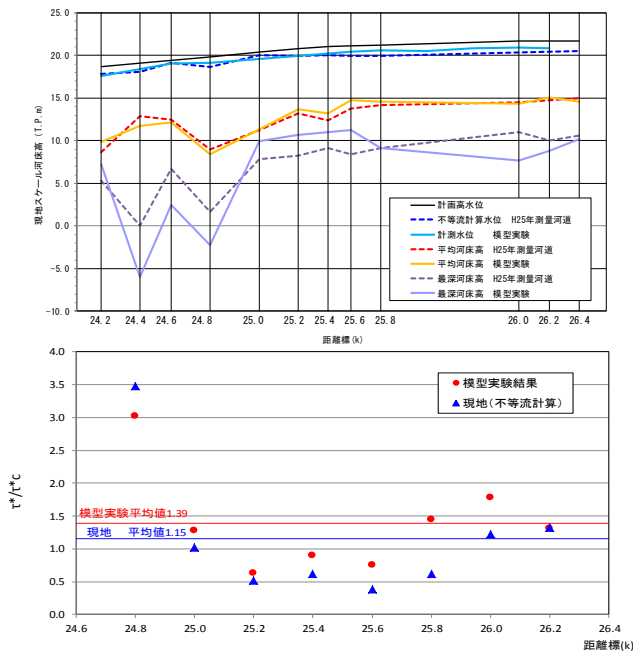
実験回数 (ケース)	対策工	流量規模	通水時間		備考
			模型	現地換算	
0	無し	4,100m ³ /s ハイドロ×2	120分 ×2	15時間 ×2	検証実験 平坦から通水し、本実験の初期河道を整形
1	無し	1,000m ³ /s 一定量	80分	10時間	ケース0の実験後の河床形状から通水
2	無し	2,000m ³ /s 一定量	90分	12時間	ケース1の実験後の河床形状から通水
3	無し	3,000m ³ /s ハイドロ	110分	14時間	ケース2の実験後の河床形状から通水
4	無し	4,100m ³ /s ハイドロ×2	120分 ×2	15時間 ×2	ケース3の実験後の河床形状から通水
5	無し	4,100m ³ /s ハイドロ×2	120分 ×2	15時間 ×2	No.2の淵の現地形状を再現した実験 樹木模型を設置
6	無し	1,000m ³ /s →2,000m ³ /s 一定量	120分	15時間	淵形成の要因分析のための実験 No.2 淵付近の河床を平坦に均して通水
7	有り	2,000m ³ /s 一定量	120分	15時間	対策工の検討(樹木模型・透過型対策工) ケース6の実験後の河床形状から通水
8	有り	2,000m ³ /s 一定量	120分	15時間	対策工の検討(不透過型対策工) No.2 淵付近の河床を平坦に均して通水

(5) 実験結果

a) 検証実験

河床を平坦にした河道に4,100m³/sの流量ハイドログラフを2回通水し、水面形の検証を行うとともに、本実験のための初期河床の整形を行った。

現況河道の平均河床勾配を良好に再現出来ていること、及び τ_*/τ_{*c} が現地と模型で大差ないことから、初期河道として問題ないことを確認した。

図-8 模型実験と現地の無次元掃流力 τ_* と無次元限界掃流力 τ_{*c} の比較

b) 本実験

① 樹木群による影響分析

No. 2以外の淵の箇所は本実験の第1回(1,000m³/s)から深掘れが発生したが、No. 2の淵の箇所は第4回(4,100m³/s)の実験でも深掘れが発生しなかった。現地では、淵の対岸の樹木群が流れを阻害し、流向を変化させている可能性があるため、樹木群模型を設置した通水実験を実施した(ケース5)。その結果、円山川上流からの流れが、左岸側に寄るようになり、No. 2の淵が深くなり拡大することが確認された。また、通水後、淵の対岸に大きな砂州が形成され、この砂州も流向を変化させた要因と考えられた。

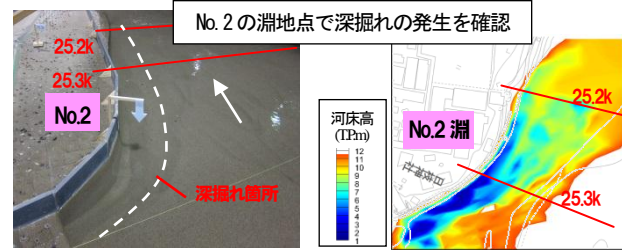


図-9 通水後の淵付近の河床形状

図-10 河床高カウンター図 (No. 2 淵付近)

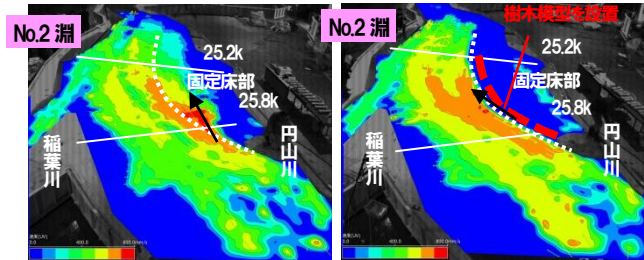
【第4回 4,100m³/s】【第5回 4,100m³/s 樹木模型設置】

図-11 流速カウンター図 (No. 2 淵付近)

② 淵対岸の砂州による影響分析

No. 2の淵が拡大した主要因を明らかにするため、樹木群模型なしで通水実験(1,000m³/s→2,000m³/s)を行い、淵が再現できるかを確認した(ケース6)。その結果、樹木群模型なしでもNo. 2の淵が深くなり、規模が拡大することが確認できた。このため、淵対岸の砂州が淵の形成に重要であることが分かった。

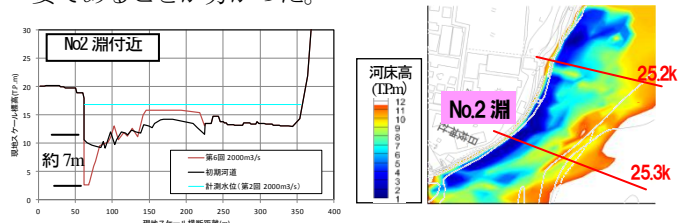


図-12 河床横断面図 (25.3k)

図-13 河床高カウンター図 (No. 2 淵付近)

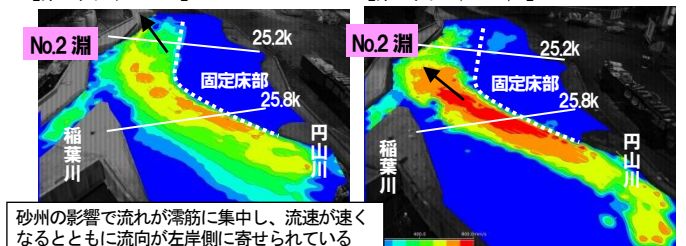
【第2回 2,000m³/s】【第6回 2,000m³/s】

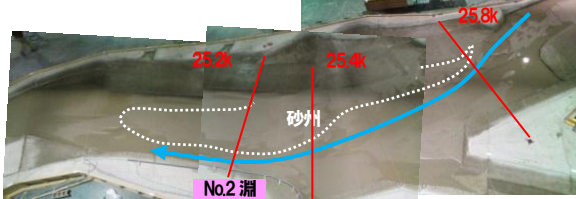
図-14 流速カウンター図 (No. 2 淵付近)

③ 砂州の発生と移動現象の整理

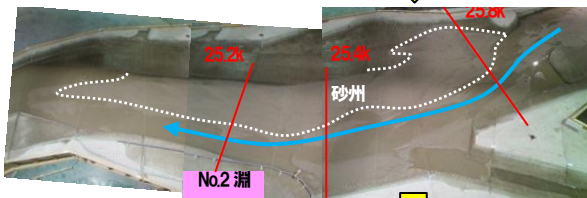
平坦河道から開始した検証実験及び2～6回目の実験結果をもとに砂州の移動現象を整理すると図-15のとおりであり、通水を繰り返すことによって砂州が発達したことが確認できる。

今回の実験結果を中規模河床形態の領域区分図にプロットすると図-16のとおり砂州の形成領域に入っている。現地の砂州の状況とほぼ一致しており、本実験が妥当なことが伺える。

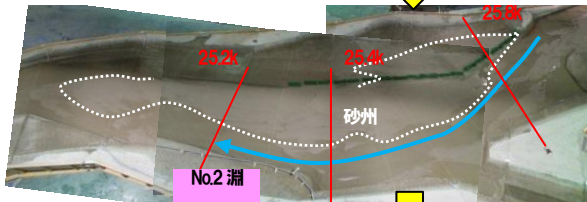
【第2回 2,000m³/s 一定量通水後】



【第4回 4,100m³/s ハイドロ通水後】



【第5回 4,100m³/s ハイドロ通水後】



【第6回 2,000m³/s 一定量通水後】

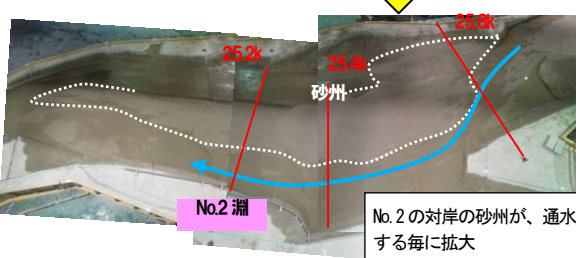


図-15 通水にともなう砂州の拡大

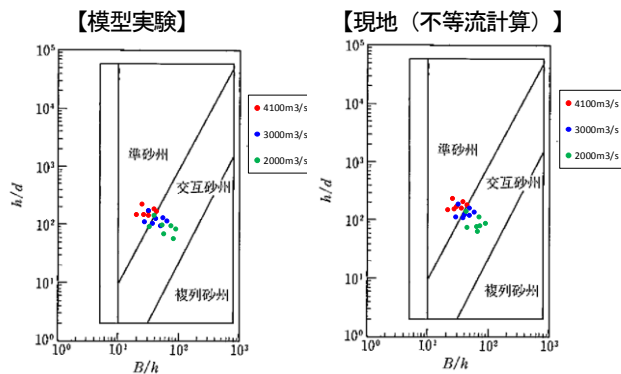


図-16 中規模河床形態の領域区分図

(6) 模型実験のまとめ

- No. 2 以外の渦の箇所は、本実験の第1回目 (1,000m³/s) から深掘れが発生したが、No. 2の渦の箇所は第4回目 (4,100m³/s) の実験でも深掘れは発生しなかった。
- 第5回目 (4,100m³/s) の実験では、No. 2の渦が深くなり拡大することが確認された。これは、樹木の障害を考慮したことと、通水実験を繰り返したことで渦の対岸に砂州が形成され、主流の流向が渦側に変化したことが主要因である。
- ただし、堤防整備後の25.2k～25.8kにおける河道は、堤防整備前よりも蛇行の程度が緩やかになっているため、今後、砂州が移動する可能性がある。
- このため、No. 2の渦を保全するためには、模型実験で流向の変化が確認された25.8k付近の樹木群の設置など、何らかの対策が必要と考えられる。

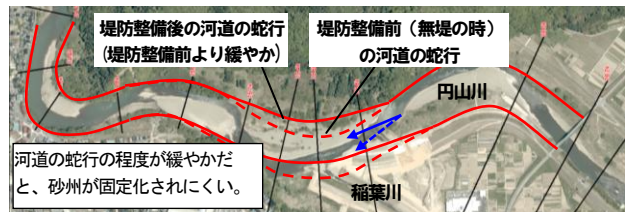


図-17 堤防整備による河道の蛇行の変化

4. 数値解析の実施

(1) 目的

渦の維持のための今後の対策工検討に数値解析モデルを活用することで、コストや工期の削減を図ることを目的とし、模型実験の結果を踏まえて数値解析モデルを構築した。本検討では、模型スケール (縮尺1/60) により、代表的な模型実験結果の再現を行った後、現地スケールにおいても数値解析を実施し、河床変動の傾向を把握するものとした。

(2) 平面二次元河床変動モデルの構築

① 解析手法

本検討では、平面二次元不定流解析モデルに河床変動モデル (掃流砂+浮遊砂を考慮) を組み合わせたシミュレーションモデルを構築するものとした。

② モデルの対象範囲

模型の作成範囲と同じとした。

③ モデルの概要

a) 計算モデル

- 流 れ・・・一般曲線座標系による平面二次元不定流解析モデル
- 河床変動・・・掃流砂 (芦田・江頭・劉の式)・浮遊砂 (板倉・岸の式) を考慮した混合粒径モデル

b) メッシュ分割および河床高の設定

対象区間のメッシュ分割は、現地スケールで縦断方向は10m程度、横断方向は5m～10mを基本として分割した。なお、境界条件の影響を避けるため、対象区間の上下流端を延伸させ、約1km程度の助走区間を設定した。また、分割したメッシュに模型及び現地の地盤高を設定した。

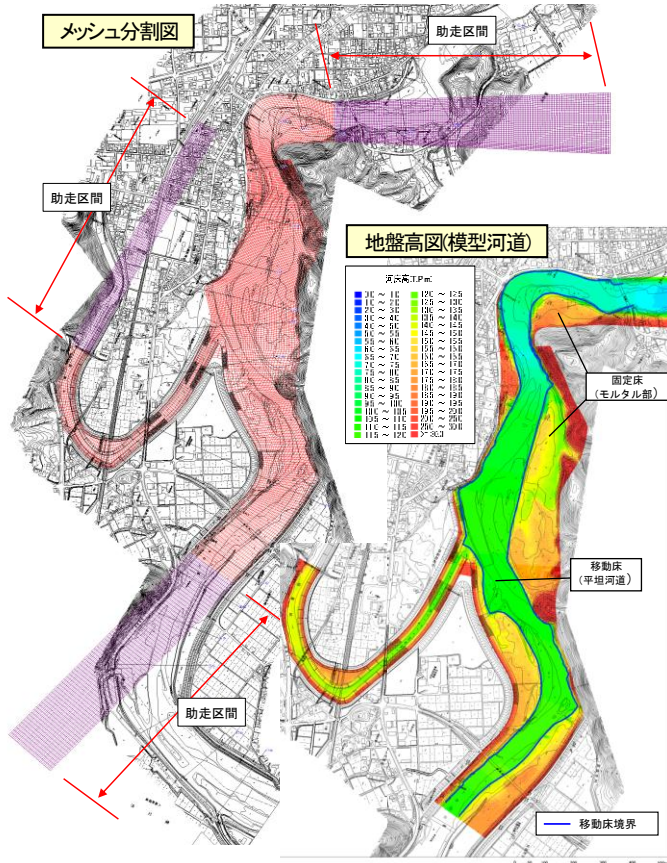


図-19 メッシュ分割と地盤高の設定

(3) 実施条件の設定

模型スケール及び現地スケールにおける河床変動解析の実施条件は表-3に示すとおりである。

表-3 数値解析実施条件一覧表

項目	模型スケール	現地スケール	備考
検討対象範囲	円山川: 24.2k～26.4k, 稲葉川: -0.2k～1.1k		
計算	流れ	平面二次元不定流モデル(一般曲線座標系)	
モデル	河床変動	掃流砂・浮遊砂を考慮した混合粒徑モデル	
対象流量	ケース1	147.0ℓ/s	4,100m³/s (整備計画流量)
	ケース2	107.6 ℓ/s	3,100m³/s
	ケース3	71.7 ℓ/s	2,000m³/s
	ケース4	35.9 ℓ/s	1,100m³/s
河道条件	初期河道	平坦河道	整備計画河道
	河床高	模型実験と同様(平均河床高を目安に設置した移動床の高さ)	・河道横断測量(200mピッチH25年度測量) ・H25年度測量LPデータ ・音響測深による調査結果(河床部)により作成
	メッシュ分割	・縦断方向: 0.17m程度 ・横断方向: 0.08m～0.17m程度	・縦断方向: 10m程度 ・横断方向: 5m～10m程度
	粗度係数	・円山川: 24.2k～25.0k: n=0.020 25.0k～26.4k: n=0.018 ・稲葉川: -0.2k～1.1k: n=0.015	・円山川: 24.2k～25.0k: n=0.040 25.0k～26.4k: n=0.035 ・稲葉川: -0.2k～1.1k: n=0.030
	樹木群	考慮しない	航空写真(H25)より樹木群の粗密を設定(透過係数: 密 K=40、粗 K=55)
	粒度分布	模型河道で設置した4号珪砂(0.60～1.18mm)を設定	現地のH26年河床材料調査結果(0.14～122mm)を設定
境界条件	下流端水位	不等流計算によるH-Q式(円山川24.2k)	同左
	上流端	上流端断面における平衡流砂量と流入土砂量を与える	同左

(4) 模型スケールの河床変動解析

① 検証実験(ケース0)の再現

初期河床を平坦河床とした模型の検証実験のケースを数値解析により再現した結果は次のとおりである。

【再現結果】

- 河床変動解析の水面形及び平均河床勾配は模型実験結果を概ね再現できている。(図-20)
- No.1、No.3、No.4の淵では河床が掘れ、No.2の淵では、河床の変動はほとんど生じない結果となった(図-21)。これは模型実験と同様の傾向を再現できている。

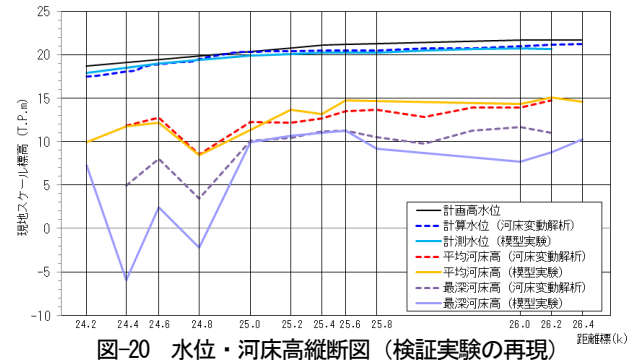


図-20 水位・河床高縦断面図(検証実験の再現)

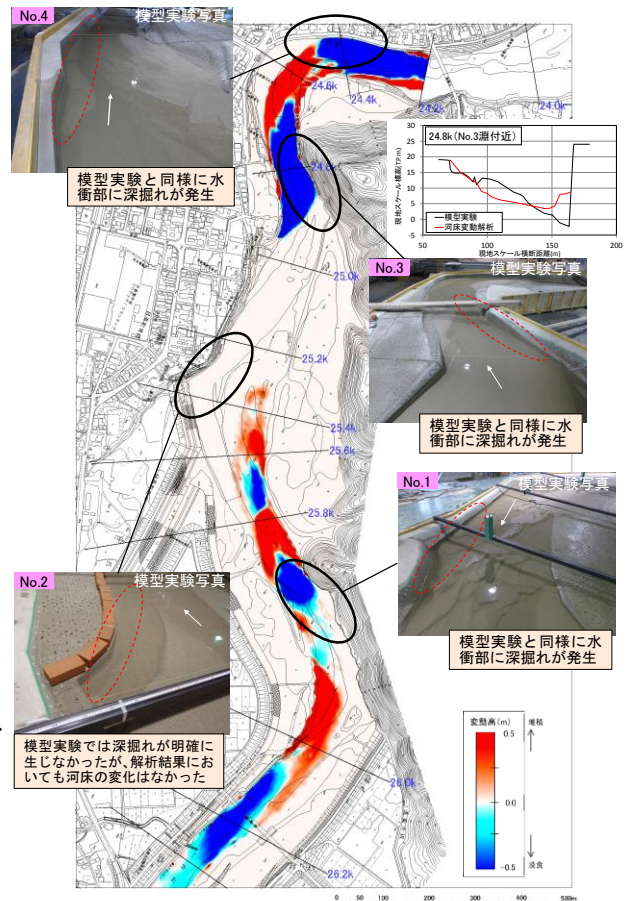


図-21 河床変動高図(検証実験の再現)

② 本実験(ケース1～4)の再現結果

模型実験の本実験について数値解析により再現した結果は次のとおりである。

【再現結果】

- 河床変動解析の水面形は、 $1000\text{m}^3/\text{s}$ のケースにおいて25.4k下流で模型実験との差が大きくなったが、全体的には模型実験の水面勾配と近似している。(図-22)
- 河床の縦断変化は概ね模型実験と同様の河床勾配となっており、再現できている。(図-23)
- $2000\text{m}^3/\text{s}$ 流下時の流速・流向については概ね模型実験と近似している。(図-24)
- 河床高の変化は模型実験同様にNo. 1、No. 3、No. 4の淵ではケース毎に拡大し、No. 2の淵では、河床の変動はほとんど生じない結果となった。

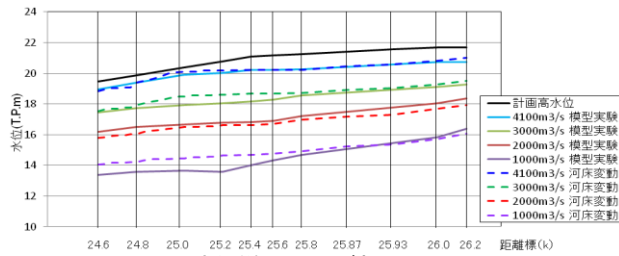


図-22 水位縦断形の比較 (ケース1~4)

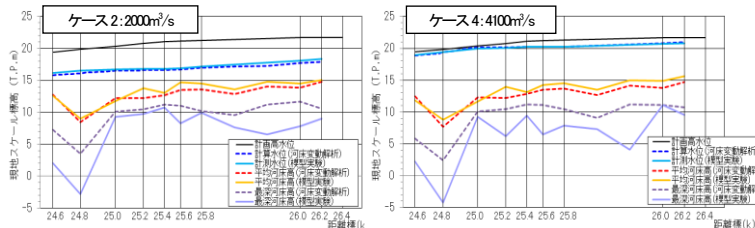
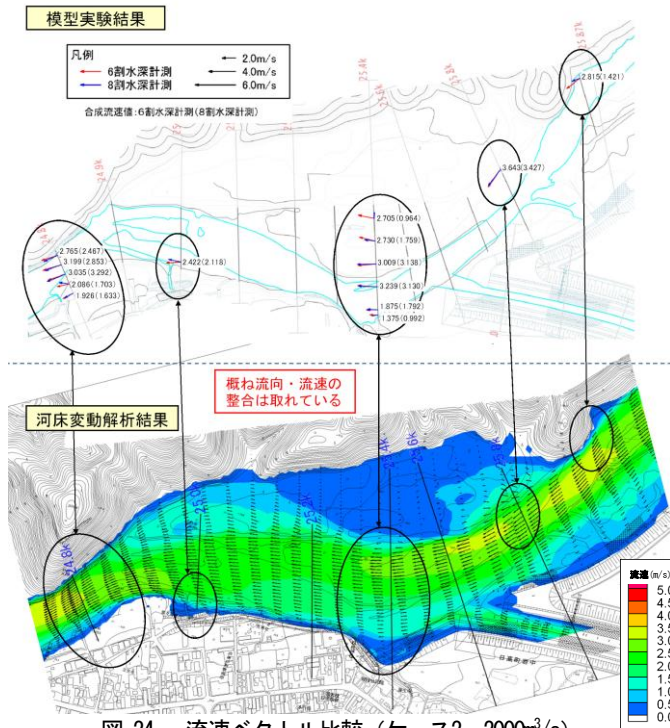


図-23 水位・河床高縦断図

図-24 流速ベクトル比較 (ケース2: $2000\text{m}^3/\text{s}$)

(5) 現地スケールの河床変動解析

模型スケールの河床変動解析モデルを現地サイズにスケールアップし、表-4のケースについて現地スケールの河床変動解析を実施した。解析結果は次のとおりである。

表-4 現地スケールの河床変動解析実施ケース

ケース	初期河道	流量規模	計算時間	備考
1	整備計画河道	$2000\text{m}^3/\text{s}$ 一定量	12時間	概ね過去5ヶ年の $2000\text{m}^3/\text{s}$ 規模以上の生起時間に相当
2		$4100\text{m}^3/\text{s}$ ハイドロ	16時間	H16.1020洪水 (台風23号:整備計画流量)

【解析結果】

- 河床変動解析の水面形は、 $4100\text{m}^3/\text{s}$ 時に、不等流計算水位の水面勾配と近似している。(図-25)
- 流速ベクトルでは、模型スケールの結果と同様にNo2の淵の上流側で死水域となり渦を巻く結果となった。
- 河床高の変動は、25.0k下流の河床変動は少なく、No2の淵では河床変動はほとんど生じなかった。(図-26)

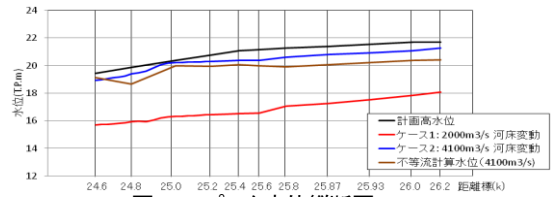


図-25 ピーク水位縦断図

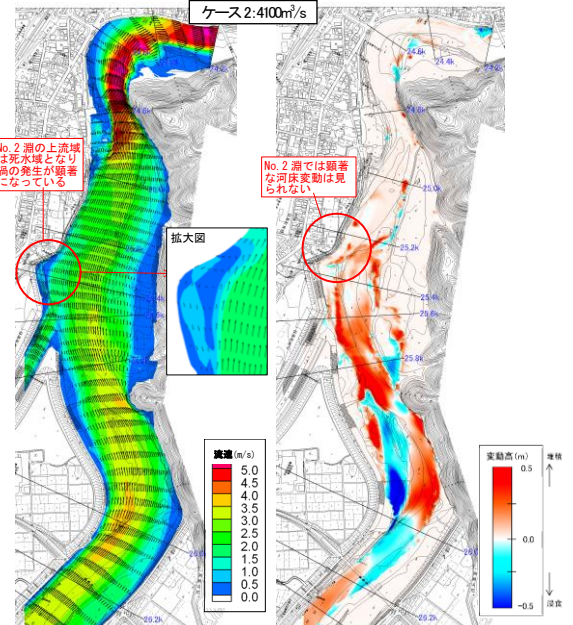


図-26 流速ベクトル・コンター及び河床変動高図 (現地スケール)

5. まとめ

- 水理模型実験結果から、No. 2の淵の対岸の砂州を保全することで淵が維持されるものの、砂州の移動を考慮すると、25.8k付近への樹木群の設置など、何らかの対策が必要であることが分かった。
- また、数値解析では、対策工の効果等を確認するのに十分なモデルを構築できたと言える。
- 今後、模型実験による対策工の検討を実施していく必要があるが、今回作成した数値解析モデルで対策工のシミュレーションを実施することで、模型実験では測定できない水理諸量の補完が可能となる。
- さらに、コストや工期の面から模型実験が難しいケースについても数値解析による効果の把握を容易に行うことが可能となりコストや工期の縮減が期待できる。