

# 市川の歴史的河川施設機能を考慮した河川整備

## RIVER IMPROVEMENT PROJECTS CONSIDERING PERFORMANCE OF HISTORICAL RIVER FACILITIES

保坂幸一<sup>1</sup>・眞間修一<sup>2</sup>・寺谷毅<sup>3</sup>・熊田登宇<sup>3</sup>

高橋伸明<sup>3</sup>・竹村仁志<sup>4</sup>・松浦祐樹<sup>4</sup>・小林優一<sup>5</sup>・田中俊介<sup>4</sup>

Koichi HOSAKA, Shuichi MAMA, Tsuyoshi TERATANI, Takanori KUMADA,  
Nobuaki TAKAHASHI, Hitoshi TAKEMURA, Yuki, MATSUURA, Yuichi KOBAYASHI

<sup>1</sup>正会員 博士(工) 八千代エンジニアリング(株)事業統括本部  
(〒111-8648 東京都台東区浅草橋5-20-8CSタワー)

<sup>2</sup>八千代エンジニアリング(株)名古屋支店 (〒460-0004 愛知県名古屋市中区新栄町2-9)

<sup>3</sup>兵庫県中播磨県民センター姫路土木事務所 (H.29在籍含む: 〒670-0947 姫路市北条1-98)

<sup>4</sup>八千代エンジニアリング(株)大阪支店 (〒540-0001 大阪府大阪市中央区城見1-4-70)

<sup>5</sup>八千代エンジニアリング(株) 事業統括本部 (〒111-8648 東京都台東区浅草橋5-20-8CSタワー)

The Tohori construction area in Ichikawa have two oblique weirs, groynes and sluices, which are historical river facilities. Those facilities have maintained flood control and water utilization of Himeji City until today. However, their hydraulic performance has not been evaluated quantitatively. In this study, the hydraulic performance of those facilities was evaluated using three-dimensional survey and three-dimensional analysis. As a result, one of the oblique weirs had the effect of lowering the water level on the upstream at flood and the groynes had the effect of controlling the flow toward the downstream sluice. Therefore, their hydraulic performance were reflected in the river improvement.

**Key Words :** river improvement, historical river facility, oblique weir, groin, three-dimensional survey three-dimensional analysis

### 1. まえがき

河川における伝統技術は、洪水に対して一つの施設のみで防護するのではなく、システムとして被害を抑えるという特徴を持ち、長年に渡る試行錯誤を経て確立された個々の川の性格を巧みに生かした総合技術と言える。このような考え方は、近年の大規模水害への対応としてハード・ソフトが一体となった治水対策を推進する上でも参考とすべきであり、既存の効果的な技術及び施設を保全・管理し、将来へ引き継いでいく必要がある。このため、河川伝統技術の今日における活用・応用に際して、有効性、安全性について最新の知見や技術(測量技術・数値計算技術等)に基づき評価を行うことが重要である。

本論文では、兵庫県姫路市市川砥堀工区に残る歴史的河川施設のうち、斜め堰及び水制工群について最新技術により機能再評価を行い、河川改修計画に反映した事例について報告する。

### 2. 市川砥堀工区の概要

市川は、兵庫県姫路市街の東側を南へ流れ播磨灘に注ぐ506km<sup>2</sup>の流域を有する2級河川である。砥堀工区は下流部の高木橋周辺から生野橋周辺の延長約3kmの区間である。姫路城史<sup>1)</sup>によると、寛延二年(1749)の洪水では砥堀工区にある飾磨樋門が決壊し、姫路城や姫路城下一帯に大きな被害を及ぼした記録が残っている。このことから現在の姫路市中心部を市川の洪水被害から守るために重要な箇所である。

平成22年3月に河川整備計画<sup>2)</sup>(整備計画目標流量2,400m<sup>3</sup>/s)が策定され、下流区間から順次改修が進められている。その後、平成23年台風12号出水(ピーク流量2,790m<sup>3</sup>/s)が既往最大規模を記録するなど、平成28年度から砥堀工区の改修に着手するにあたり、具体的な改修計画の検討が必要であった。

砥堀工区には江戸・明治時代にかけて築造された2つ

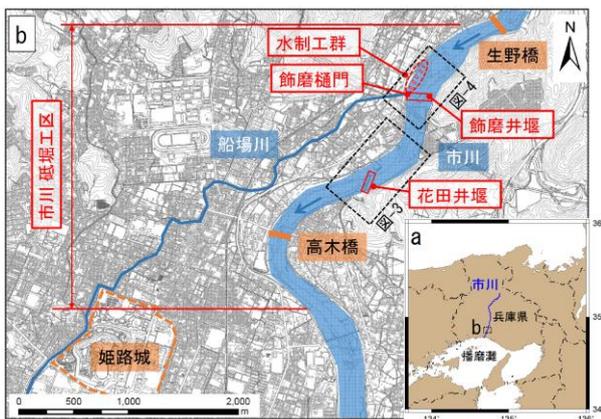


図-1 市川砥堀工区(国土地理院 基盤地図情報より作成)

の農業用水取水を目的とした斜め堰(花田井堰・飾磨井堰)、水制工群、飾磨樋門があり(図-1)、それらが全体で機能することで、現在まで姫路市の治水・利水を支えてきたと考えられるが、これまで水利機能の定量評価は成されていなかった。一方、花田井堰～飾磨井堰間の流下能力ネック箇所の解消を図るため、現整備計画では河川管理施設等構造令に適合させた河道に直交する可動堰改築が予定されていた。しかし可動堰改築は管理手間が増えるため、高齢化が進む地元水利組合との調整も課題とされていた。さらに、水制工群、樋門の老朽化も懸念されている状況であり、水制工群は水生生物の生息場所となる淵等を創出する効果があると考えられ、その機能低下による河川環境影響も懸念された。本検討は市川の治水安全度向上及び利水機能維持のため、①各施設の機能を最新測量・解析技術により明らかにし、②将来に引き継ぐべき伝統的治水・利水技術を抽出し、③それらの機能を考慮した水理面、環境面、経済面、管理面において合理的で持続可能な河川改修計画策定を目的とした。

### 3. 最新河道形状の把握

市川砥堀工区の最新の河道形状把握のために、高木橋下流の河口より9.7km地点～生野橋13.5km地点(約3.8km)を対象に、UAV空中写真及びレーザー測量、地上レーザー測量、車載レーザー測量、ラジコンボート深淺測量等を組合せた3次元測量を実施し(図-2)、3次元モデルデータ、点群データ、オルソ画像、河床高データを取得した。

花田井堰、飾磨井堰及び水制工群周辺での3次元測量結果から得られた標高図を図-3、図-4に示す。花田井堰の上流左岸側には、湾曲する河道に沿って流れによって形成される「鯉の淵」と呼ばれる深い淵があり、その淵の効果により渇水時の水位が維持されている<sup>3)</sup>。ラジコンボートによる深淺測量によりその淵の分布、形状を詳細に把握することができた。水制工群周辺の河床は水制工間で河道中央部の河床高よりも局所的に低く、水制工群が淵・深みの形成に寄与していることが示唆された。

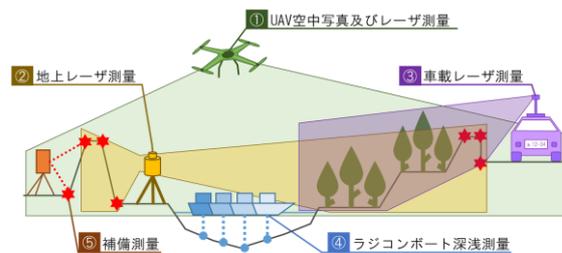


図-2 各測量の作業イメージ

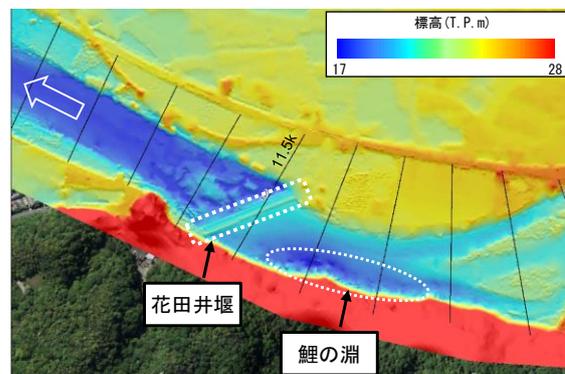


図-3 花田井堰周辺の標高図

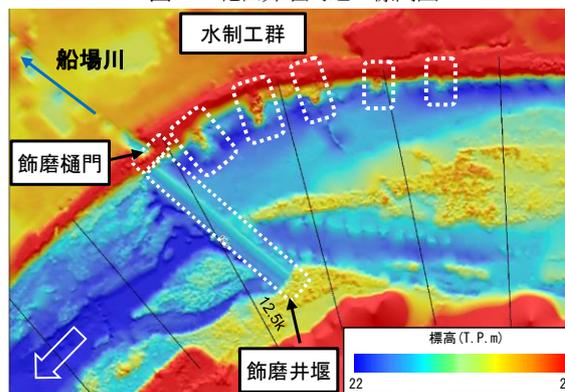


図-4 飾磨井堰及び水制工群周辺の標高図

### 4. 水理解析モデルの構築

市川の既往流下能力検討における斜め堰のせき上げ量は、堰を流向に対して直角投影した断面での不等流解析により評価されてきた。しかし、斜め堰と直交堰の水理特性は異なり、斜め堰周辺の流れは3次元的な特性を持つと考えられる。福岡ら<sup>4)</sup>は、直交堰または斜め堰を設置した場合の単断面直線水路による水理実験を実施している。中須賀ら<sup>5)</sup>は、その実験に対して平面2次元モデルによる再現計算を行い、水路中心線上水位は実験と計算で結果がよく一致するが、堰天端上の流速・流向と越流後の流速が説明できないと報告している。

また水制工周辺は3次元性の強い複雑な流れ場となるとされている。長田ら<sup>6)</sup>は、非越流・不透過型水制周辺では鉛直流速が卓越する3次元性の強い流れが生じるため、3次元流体解析及び河床変動解析により、水制背後の流れの構造を明らかにし、その3次元的な流れが水制

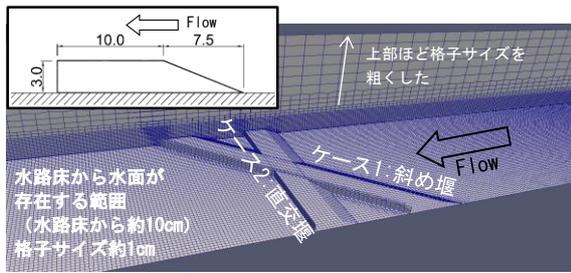


図-5 格子サイズの設定(ケース1とケース2を重ねて表示)

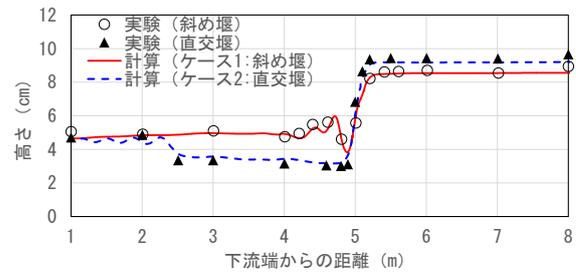


図-6 水路中心線上の水位縦断面図

周辺の局所洗掘に寄与すると報告している。

以上を踏まえ、本検討では平面2次元解析手法等と比べ、より実現象を再現可能な3次元流体解析手法を用いて斜め堰及び水制工群周辺の水理特性を評価することとした。

### (1) 3次元流体解析モデルOpenFOAM

本研究では、3次元流体解析ソフトとしてオープンソースであるOpenFOAM<sup>7)</sup>を用いた。OpenFOAMは多相流や燃焼、磁場などの用途に応じた各種ソルバを有しており、本解析ではそのうち、等温・非圧縮・不混和流体の2相流(水・空気)を扱うinterFoamを用いた。このinterFoamの基礎方程式は、連続式とNavier-Stokes方程式であり、離散化手法には有限体積法、自由表面の解析にはVOF法を用いている。

### (2) 斜め堰周辺流れ再現性の検証

OpenFOAMの斜め堰を越流する流れの再現性については、福岡らによる単断面水路(水路長15m, 水路幅0.8m, 水路勾配1/600)による実験結果を再現することで確認した。

計算格子サイズは、水が存在する範囲は細かくし、上部は粗く設定している(図-5)。福岡らと同様に「ケース1: 斜め堰(水路に対して45°)」と「ケース2: 直交堰」の2ケースを対象とした。境界条件は、水底及び堰はNoslip、領域側部はslip、上部は開放、上流端は実験同様に流量20l/sの水を一定流入、下流端は同流量を流出させ、かつ実験結果を参考に水深を5cmで固定とした。壁面摩擦条件は対数則と粘性底層の組合せモデルであるspalding則を設定した。計算時間は流況がほぼ定常状態となる70秒間、計算時間間隔は自動制御(最大クラン数0.5)とした。乱流モデルは、複数モデルで検証し、再現性が良好であったLESの標準Smagorinskyモデルを採用した。

図-6に水路中心線上の水位縦断面図を示す。図中プロットは福岡らの実験結果の読み取り値であり、実験と計算の水位は良好に一致した。堰上流の水位は「ケース1: 斜め堰」の方が「ケース2: 直交堰」に比べ低くなっている。図-7にOpenFOAMによる斜め堰周辺の流速分布を示す。堰を越流する流れは堰軸に直交する方向に傾いている。そのことから、堰上流側で斜め堰の方が、水位が下がる理由は、福岡らでも報告されているとおり、斜め

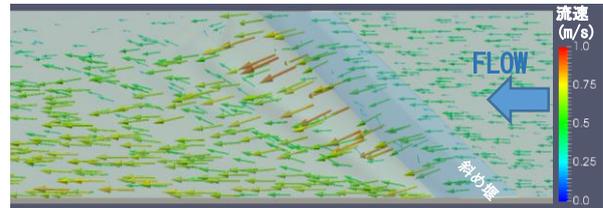


図-7 ケース1: 斜め堰の堰周辺の流速ベクトル

堰の場合は堰の越流方向が堰軸直交側に傾くため越流幅が広がり、単位幅流量が小さくなることで堰上の限界水深が小さくなるためであると推定された。

図-7から、堰直下流において、水面付近の高流速と水底付近のやや遅い流れの流向が異なっている箇所が認められる。そのため、斜め堰周辺の詳細流速分布を把握するためには、流れの3次元性を考慮した数値解析が必要であることが推定された。

### (3) 実地形・実洪水に対する再現性の検証

実河川をモデル化した洪水流況計算を実施するにあたり、既往洪水の再現性を確認することで、解析モデルの実洪水への適用性を検証した。対象洪水は既往最大規模洪水である平成23年台風12号出水(ピーク流量2,790m<sup>3</sup>/s)とし、その痕跡水位と計算水位を比較した。

地形データは、3次元測量により得られた点群データから作成した。計算格子サイズは堰周辺以外の範囲の洪水時水深が6~8m程度、堰越流部の水深が3m程度であり、水深方向を5分割程度確保するため、一般河道部は水平方向2.5m、鉛直方向1.25m、堰周辺は水平方向1.25m、鉛直方向0.625mでモデル化し、水が存在しない上部は実験再現計算と同様に格子サイズを粗くした。河床摩擦は、不等流解析で推定されている粗度係数に整合する相当粗度を考慮した粗面の壁関数を設定する方法も考えられたが、3次元測量により河床および砂州の凹凸を3次元モデルで密にモデル化しているため、不等流解析で推定されている粗度相当とすると、粗度が過大となることが懸念された。そのため、本検討では実験の再現同様にspalding則により河床の摩擦を考慮した。

上流端はピーク流量を一定流入、下流端は同流量の水を流出させ、かつ痕跡水位T.P.+21.8mで固定した。計算時間は流況がほぼ定常となる600秒間とした(他の条件は実験再現と同じ)。

計算結果で得られる河道センターライン沿いの水位の

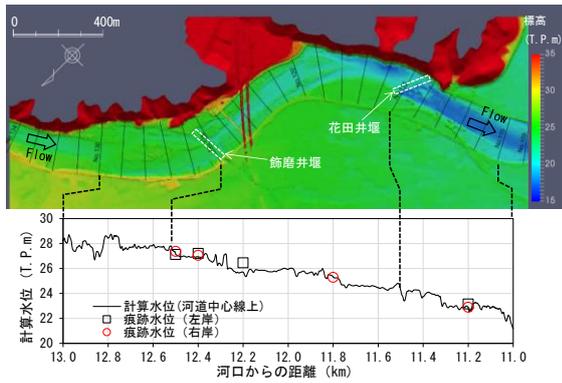


図-8 痕跡水位と計算水位の河道縦断面図

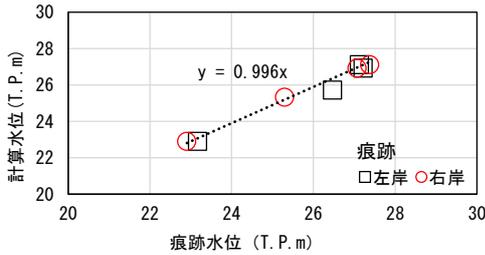


図-9 痕跡水位と計算水位の関係

縦断及び河道内の水位の分布を図-8に示す。痕跡水位と計算水位の関係には、ほぼ1:1の関係があり、再現性が良好であると判断した(図-9)。図にプロットされた痕跡水位と計算水位は整合的であった。

#### 4. 斜め堰の現況機能の把握

##### (1) 治水機能

2つの堰について、河川整備計画目標流量 $2,400\text{m}^3/\text{s}$ を流下させた場合の「現況ケース:斜め堰」と「比較ケース:直交堰」の流況を解析した。「比較ケース:直交堰」では、現況取水点を基点に堰を回転させた(図-10)。

図-11に計算開始600秒後の水位差分図(斜め堰-直交堰)を示す。花田井堰では、斜め堰の方が直交堰に比べ、堰上流約200m区間に渡り水位低下(河道中心線上で概ね10~20cm, A-A'断面で平均11cm)が確認できた。飾磨井堰では、斜め堰の場合と直交堰の場合で水位差はほとんど認められなかった。計画規模洪水条件においても、前述の単断面水路の場合と同様に、花田井堰を越流する流れに堰軸直交側への流向変化が認められた(図-12)ため、堰上流側の水位上昇量が低減されたと推察される。

飾磨井堰は流向に対し約 $70^\circ$ で花田井堰( $60^\circ$ )より直角に近いことや河道形状の影響により、直交堰とした場合の堰幅と大きな差がなく、水位低減効果が現れにくくなったと推察される。

一方、花田井堰で確認された斜め堰の水理特性(上流側での局所的な水位上昇、堰地点での流向変化)は越水や下流側局所洗掘等の悪影響を及ぼす場合もある<sup>8)</sup>が、上流左岸が山付であること、下流右岸には砂州が形成され

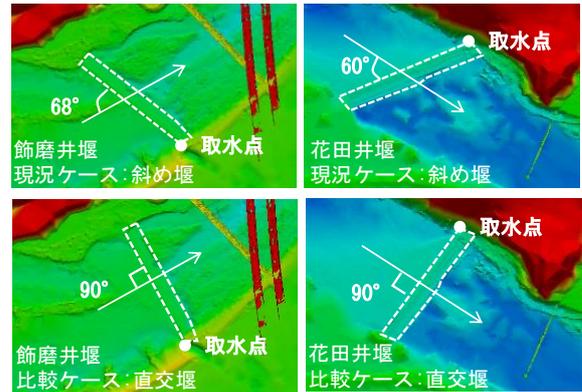


図-10 斜め堰と直交堰の地形モデル

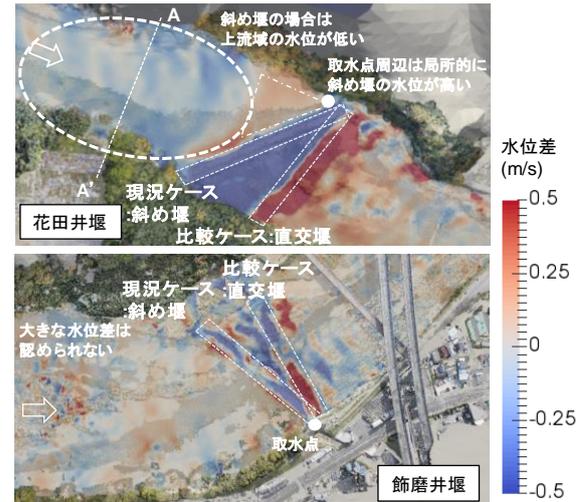


図-11 洪水時の堰周辺の水位差(斜め堰-直交堰)

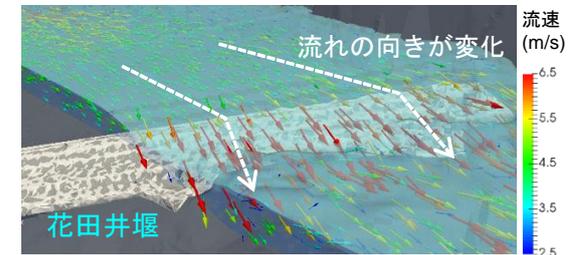


図-12 花田井堰流況詳細図

侵食を緩和する河道特性を有していることから、特に問題とはならない状況であった。

##### (2) 利水機能

現況の斜め堰による取水効果を明らかにするため、堰軸方向と水路形状を組み合わせた3ケース(表-1)について

表-1 水路と堰の平面形状による取水量の比較	
ケース1: 蛇行水路×斜め堰 取水量: $2.33\text{m}^3/\text{s}$	ケース2: 蛇行水路×直交堰 取水量: $2.02\text{m}^3/\text{s}$
ケース3: 直線水路×斜め堰 取水量: $2.01\text{m}^3/\text{s}$	

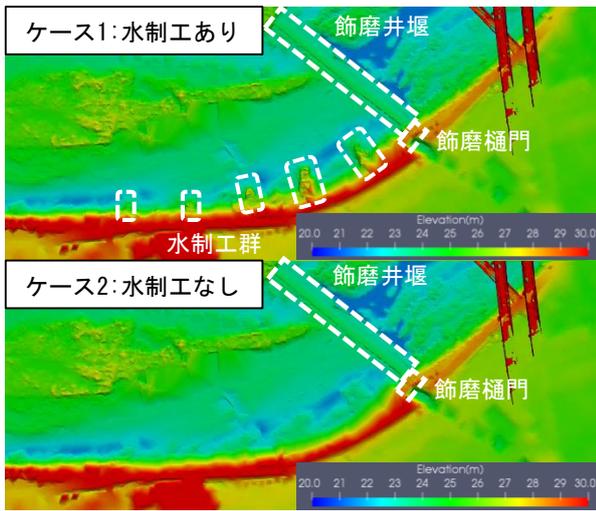


図-13 水制工群効果検証における河道地形

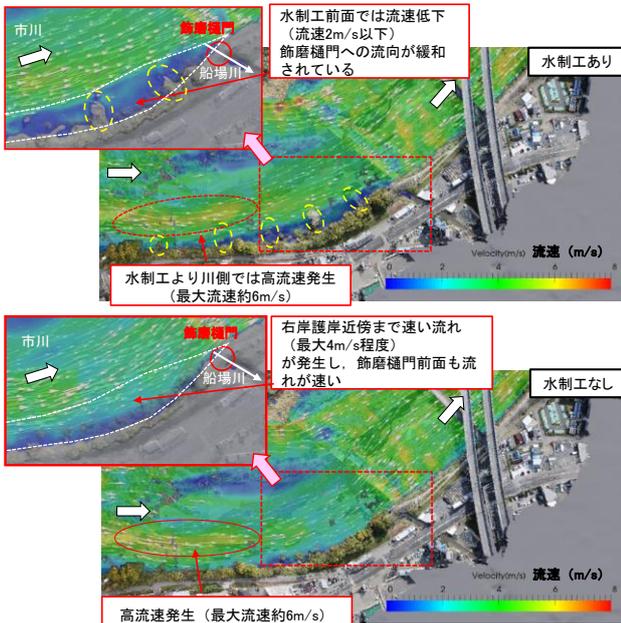


図-14 水制工群周辺の流速・流向分布

取水量を解析により比較した。砥堀工区の河道特性を参考に川幅100m、河床勾配1/400のモデル水路とし、対象流量は市川(砥堀水位観測所)の平水流量である $10\text{m}^3/\text{s}$ とした。なお、ここでの解析は流速が遅く、緩やかな常流状態であることから、平面2次元解析モデルにより実施した。各ケースでの取水量を比較すると、現状の花田井堰や飾磨井堰の状況に最も近い蛇行水路で斜め堰を設置した①の場合が他ケースと比較して約15%取水量が大きくなり、当時の利水者が河道形状と斜め堰を上手に組み合わせ、取水効率を高めようとした結果であると考えられる。

## 5. 水制工群の現況機能の把握

飾磨樋門上流側の5基の水制工群について、3次元流体解析モデルにより河川整備計画目標流量 $2,400\text{m}^3/\text{s}$ 流下時

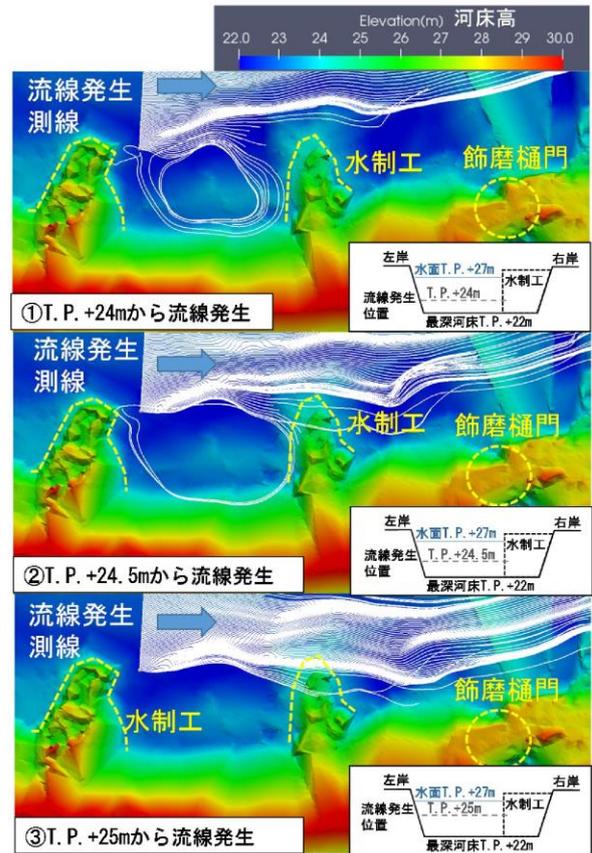


図-15 水制工群周辺の流线

の流速低減効果および流向制御効果を確認した。水制工群の効果については3次元測量データから河道形状を再現した「ケース1: 水制工あり」と、水制工群の形状を除去した「ケース2: 水制工なし」を設定し(図-13)、これらの2ケースの流況を比較することにより検討した。水制工群の有無による2ケースの3次元流体解析による流況解析結果を図-14に示す。水制工近傍測線から計算開始600秒後の流速場に基づく流线を発生させた結果を図-15に示す。流线発生測線の標高は、3次元的な影響を確認するためT.P.+24.0m、24.5m、25.0mと変化させた。

### (1) 流速・流向

図-14から確認されるとおり、水制工なしの場合は、右岸堤防付近まで流速 $6\text{m/s}$ 程度の速い流れが生じているが、水制工ありの場合は、水制工より河道中央部の範囲では $6\text{m/s}$ 程度の速い流れが確認されるものの、水制工が存在する堤防付近の流れは遅くなっている。飾磨樋門前面では、水制工ありの場合の方が、流れが遅い範囲が存在することで河道中央部での流れが速くなっているが、その流れの向きは下流側に向かっており、水制工の流向制御効果により飾磨樋門を避けた流れが生じている。水制工なしの場合は、堤防及び飾磨樋門際まで流れが速く、飾磨樋門に向う流れになっている。

以上より、水制工群は主流を堤防から遠ざけるとともに飾磨樋門への洪水の直撃を防ぐ機能を持っており、堤

防、樋門の安全度を高めていることが確認された。

## (2) 3次元的な流れの特徴

長田らは、直線水路に非越流・不透過型の水制を配置した水理模型実験再現計算結果から、水制背後で水制先端部、特にその底面近傍への流れが集中し、底面近傍で岸に向かう流れが生じる結果、洗掘初期段階における水制先端付近の洗掘を惹起させると報告している。

図-15から確認されるとおり、水深が深い位置(T.P.+24m, 24.5m)から流線を発生させた場合は、水制工内部を循環する流れが認められるが、水深が比較的浅い位置(T.P.+25m)から流線を発生させた場合ではその流れが認められない。そのため水制工前面から岸向きの内部へ流入する流れは、底面付近からの流れであり、既往研究で報告された流れ場と整合した3次元的な流れ構造になっていることが確認された。

水制工群周辺に形成される淵は、ニホンウナギ、オオサンショウウオなどの様々な水生生物が生息するための貴重な場所となっており<sup>9)</sup>、水制工群は淵の形成にも有効であることが推定された。

## 6. 河道改修計画の立案

3次元流体解析モデルによる結果から、斜め堰の場合に堰を越流する際に流向は堰軸直交側に向くことが確認されたため、不等流解析において、堰部断面を河道に対して直交投影せずに、実際の堰軸方向(河道中心線に対して斜め方向)として流下能力を評価することとした。3次元流体解析モデルによる結果と同様に、斜め堰を直交投影した場合に比べ、その方法では堰上流側の水位が低下することを確認するとともに、その方法により平成23年台風12号出水再現計算により、痕跡水位を再現することができた。斜め堰周辺流速分布には3次元性が認められたものの、本検討の対象箇所及び流下能力評価では、その影響は局所的で大きな影響が生じず、簡易的な不等流計算手法の工夫により、斜め堰の特性を考慮した流下能力評価が可能と推定された。

以上の流下能力の改善を図ることで、現整備計画の整備内容であった井堰全改築を行わず、流下能力のネックとなっていた花田井堰～飾磨井堰間の河床掘削、堤防嵩上げ、樹木伐採を行うことで流下能力が確保可能な河道改修計画を立案することができた。

## 7. まとめ及び課題

本検討では、実河川での既往最大洪水の痕跡水位再現等により最新解析技術活用の妥当性を検証し、伝統的施設である斜め堰、水制工群の水理機能を評価した。その

結果を活用し、流下能力を適切に再評価することと併せて、河川における伝統的施設を保存することの治水面・利水面・環境面における重要性を明らかにした。この結果、現堰存置による河床安定性確保、河川整備・維持管理コストの縮減、水利組合の管理手間軽減となる河川改修計画策定を実現するとともに、老朽化した水制工群等の歴史的施設の維持補修計画の必要性を明確にした。

本技術及び検討プロセスは、水理実験の代替として複雑な流れが生じる河川構造物周辺流況の評価に広範に適用できる可能性がある。

河道湾曲部における二次流の発生、水制工背後の洪水時の段階的な洗掘による流れの変化等、本検討で対象とした斜め堰及び水制工群の水理特性評価において、河床変動を含めた検討ではそのような流れの影響が問題となる場合がある。現時点の計算手法は水の流れのみしか扱えないため、3次元的な流れとそれに起因する河床変動を併せた河川構造物機能評価法の開発を今後の課題としている。また、斜め堰存置の可能性は、前述の様に対象河川の山付、堤防や河岸までの位置関係などの河道特性を踏まえて、治水面、利水面、環境面で総合的に検討すべきである。

**謝辞：**本論文は、受託業務成果の一部を抜粋・追記して取りまとめたものであり、業務実施にあたり、兵庫県姫路土木事務所をはじめ、多大なるご指導を頂きました検討委員会(委員長：神戸大学大学院工学研究科藤田一郎教授)をはじめ関係者の方々に深くお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 橋本政次: 新訂姫路城史, 中巻, 臨川書店, 1994.
- 2) 兵庫県: 市川水系河川整備計画, H.22.3.
- 3) 松木洋忠: 寄稿, 姫路・市川の伝統的な河川技術, 河川文化, 64号, pp.24-25, 2013.
- 4) 福岡捷二, 三代俊一, 荒谷昌志, 中須賀敦, 岡田将治, 田中正敏: 堰の位置及び構造の違いによる堰上流, 下流の河道水量の変化, 水工学論文集, 第45巻, pp.397-402, 2001.
- 5) 中須賀敦, 片山敏男, 福岡捷二, 三代俊一, 荒谷昌志: 堰を越える流れの実験と解析, 土木学会中国支部第52回研究発表会, II-8, pp.125-126, 2000.
- 6) 長田信寿, 細田尚, 村本嘉雄, 中藤達昭: 3次元移動座標系・非平衡流砂モデルによる水制周辺の河床変動解析, 土木学会論文集, 2001巻, 684号 p. 21-34, 2001.
- 7) OpenFOAM Foundation: <http://www.openfoam.org/>, 参照2016-10.
- 8) 財団法人国土技術研究センター編: 改訂解説・河川管理施設等構造令, 平成14年9月10日改訂.
- 9) 兵庫県中播磨県民センター 姫路土木事務所 河川砂防課: 市川のほとり, 砥堀工区市川改修情報誌, 平成29年11月号, VOL.3, 2017.

(2019. 4. 2受付)