

# 河川横断構造物の簡易的な取り扱いを 組み込んだ平面 2 次元洪水流モデルの構築

重枝 未玲<sup>1</sup>・秋山 壽一郎<sup>2</sup>・大久保 剛貴<sup>3</sup>・中木 翔也<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 九州工業大学大学院准教授 工学研究院建設社会工学研究系

(〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

E-mail:mirei@civil.kyutech.ac.jp

<sup>2</sup>フェロー会員 九州工業大学教授 (同上)

E-mail:akiyama@civil.kyutech.ac.jp

<sup>3</sup>学生会員 九州工業大学大学院 工学府建設社会工学専攻博士前期課程 (同上)

E-mail: q345305k@mail.kyutech.jp, q345315s@mail.kyutech.jp

本研究は、河川横断構造物として堰を取り上げ、その簡易的な取り扱いを組み込んだ新たな平面 2 次元モデルを構築し、実験結果および実河川へ適用することでその再現性について検討したものである。堰の取り扱いについては、計算格子で形状を再現する方法 1、流体力として取り扱う方法 2、エネルギー損失として取り扱う方法 3 を提案した。堰を超える流れの非定常流実験結果に基づく検証から、方法 1、方法 3、方法 2 の順で予測精度が高いことを明らかにした。さらに、同モデルを、九州北部豪雨災害で被災した彦山川へ適用し、その実河川への適用性について検討した結果、同モデルは、堰が連続して設置された河川での洪水流を再現できること、などが確認された。

**Key Words:** numerical modeling, river crossing structures, weir, 2D shallow water, hydraulic experiments

## 1. はじめに

近年、我が国では想定を超えた豪雨による水害が頻発している。計画規模を超える洪水が起こる確率も高くなるのが予測されており、洪水氾濫対策は「氾濫を防止する対策」から「氾濫のある程度許容し、氾濫による被害の最小化を基本とする減災」へ転換する方向にある<sup>1)</sup>。

水害に対する防災・減災対策を講じる上で、河道特性や治水施設の影響を受けながら、河道を伝播する洪水のプロセスを的確に予測し、河道の水位や氾濫の発生する可能性の高い区間などの水害リスクに関する情報を把握することは重要である。

洪水時の河道内水位を高精度に予測するためには、河道の縦横断面形状、平面形状および非定常性に起因する貯留現象、構造物、樹木群や粗度による抵抗を適切に評価することが不可欠である。近年では、水位の観測値と数値解析結果を粒子フィルタなどの手法で同化させ、流量や抵抗特性を補正しながら洪水の予測を行う解析法<sup>2,3)</sup>や、水面形の経時変化に基づき、河道の縦横断面形状、平面形状、樹木繁茂状況や河床材料・状態に応じた

樹木群透過係数や粗度係数を設定し、洪水の再現を行う解析法<sup>4)</sup>が開発されている。一方で、実務では準 2 次元解析による水位予測<sup>5)</sup>が一般に用いられており、同解析は定常流解析であるため貯留現象を取り扱うことはできないものの、痕跡水位に基づき樹木の混合係数や粗度係数を設定し、合流、湾曲部、構造物による水位上昇量を考慮することで洪水の再現が行われている。

このような水位を上昇させる抵抗のなかでも堰などの河川横断構造物は、その形状を的確に再現すればそこで流れを再現することはできる<sup>6)</sup>。しかし、その場合、多大な数の計算格子が必要となり計算負荷が大きくなるため、適用する区間が限定されてしまう。もし、これまでに実務で実績が積まれ準 2 次元解析で用いられているエネルギー損失に基づく水位上昇の評価の仕方が、不定流解析に組み込むことができれば、これまでに培われてきた技術を不定流解析へ導入できると考えられる。

本研究は、以上のような背景を踏まえ、河川横断構造物の簡易的な取り扱いを組み込んだ新たな平面 2 次元モデルを構築し、実験結果および実河川へ適用することでその再現性について検討したものである。

## 2. 数値モデルの概要

本研究で開発したモデルは、著者ら<sup>7)</sup>が開発したSA-FUF-2DFモデル(A Spatial Averaged Finite volume method on Unstructured grid using FDS technique for 2D Flood flows)をベースとしている。同モデルでは、計算メッシュ内の物体群の取り扱い<sup>8)</sup>、合理的なドライ・ウェットの取り扱い<sup>7)</sup>などが組み込まれている。堰や橋脚などの河川横断構造物の取り扱いには、①その形状をメッシュで考慮することで、流れに及ぼす影響を考慮する方法<sup>9)</sup>、②計算メッシュ内に含む抵抗として取り扱う方法<sup>8)</sup>、③エネルギー損失として取り扱う方法<sup>9)</sup>がある。SA-FUF-2DFモデルは、上記の①と②の扱いは既に組み込まれている。ここでは、同モデルに③の取り扱いを新たに組み込む。取り扱い③は、漸変流では運動量補正係数やエネルギー補正係数を1.0としても実用上問題はなく、この係数を用いた場合、運動方程式とエネルギー方程式が同一の式となる<sup>9)</sup>ことから、組み込むことが可能な取り扱いである。なお、本研究では河川横断構造物として堰を対象とした。

### (1) 基礎方程式

基礎方程式は、式(1)の2次元浅水流方程式である。

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} + \mathbf{S}_1 + \mathbf{S}_2 + \mathbf{S}_3 = \mathbf{0} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{U} &= (h, uh, vh)^T; \mathbf{E} = (uh, u^2h + 1/2gh^2, uvh)^T; \\ \mathbf{F} &= (vh, uvh, v^2h + 1/2gh^2)^T; \\ \mathbf{S}_1 &= (0, -gh(S_{ox} + S_{Lx}) + F_x, -gh(S_{oy} + S_{Ly}) + F_y)^T; \\ \mathbf{S}_2 &= (0, ghS_{fx}, ghS_{fy})^T; \mathbf{S}_3 = (q_r, 0, 0)^T \end{aligned}$$

ここに、 $\mathbf{U}$ =保存量ベクトル、 $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{F}$ = $x$ 、 $y$ 方向の流束ベクトル、 $\mathbf{S}_1$ =河床・エネルギー損失勾配・消滅項ベクトル、 $\mathbf{S}_2$ =摩擦勾配ベクトル、 $\mathbf{S}_3$ =発生項ベクトル、 $h$ =水深、 $u$ 、 $v$ = $x$ 、 $y$ 方向の流速、 $g$ =重力加速度、 $q_r$ =単位面積当りの流入流量(−:流入、+:流出)、 $S_{ox}$ 、 $S_{oy}$ = $x$ 、 $y$ 方向の河床勾配、 $S_{Lx}$ 、 $S_{Ly}$ = $x$ 、 $y$ 方向のエネルギー損失勾配、 $S_{fx}$ 、 $S_{fy}$ = $x$ 、 $y$ 方向の摩擦勾配、 $F_x$ 、 $F_y$ =計算メッシュ内に樹木などの物体群が含まれる場合に付加される $x$ 、 $y$ 方向の流体力項である。摩擦勾配は、Manningの公式を用いて計算される。なお、エネルギー損失勾配、流体力項の取り扱いについては後述する。

### (2) 数値解析手法

計算領域を分割した微小領域をセル $i$ とし、このセルを検査体積 $\Omega_i$ とした積分形の浅水流方程式を有限体積法に基づき離散化すると式(2)が得られる。

$$\mathbf{U}_i^{t+\Delta t} = \mathbf{U}_i^t - \Delta t \left[ \frac{1}{A_i} \sum_{k=1}^{N_k} (L_k (f_k^* \cdot \mathbf{n}_k)) + (\mathbf{S}_1 + \mathbf{S}_2 + \mathbf{S}_3)_i \right] \quad (2)$$

なお、時間積分には Euler の陽解法を用いた。ここに、

$U_i$ =セル $i$ での $\mathbf{U}$ の平均値、 $A_i$ =セル $i$ の面積、 $t$ =時間に対する添字、 $k$ =セル $i$ を構成するセル境界線に対する添字、 $N_k$ =セルを構成するセル境界線の総数、 $\Delta t$ =時間の刻み幅、 $L_k$ = $k$ 番目のセル境界線の長さ、 $f_k^* \cdot \mathbf{n}_k$ = $k$ 番目のセル境界線を流入出する数値流束である。数値流束 $f_k^* \cdot \mathbf{n}_k$ は、流束差分法(FDS)<sup>10)</sup>を用いて計算を行う。なお、計算セルには三角形( $N_k=3$ )の非構造格子を、時間の刻み幅の算定にはクーラン型の安定条件を用いた。

河床・エネルギー損失勾配・消滅項ベクトル $\mathbf{S}_1$ 、摩擦勾配ベクトル $\mathbf{S}_2$ 、発生項ベクトル $\mathbf{S}_3$ は、次のように離散化した。摩擦勾配ベクトル $\mathbf{S}_2$ 、発生項ベクトル $\mathbf{S}_3$ については計算セルの重心で定義される保存量 $\mathbf{U}$ に基づき離散化を行った。河床・エネルギー損失勾配・消滅項ベクトル $\mathbf{S}_1$ については、Burmudez and Vazquez<sup>11)</sup>と同様に、流束ベクトルと同じ方法で風上化を行うことで、式(3)のように離散化を行った。

$$\mathbf{S}_{1i} = \frac{1}{A_i} \sum_{k=1}^{N_k} L_k \mathbf{S}_{1k}^* ; \mathbf{S}_k^* = \pm \sum_{j=1}^3 (\tilde{\beta}^j \tilde{\mathbf{e}}^j)_k \quad (3)$$

$$(\tilde{\beta}^1, \tilde{\beta}^2, \tilde{\beta}^3) = \frac{1}{2\tilde{c}} (S_2 n_x + S_3 n_y, 0, -(S_2 n_x + S_3 n_y))^T$$

$$S_2 = g\tilde{h}(\Delta z_b + \Delta H)n_x + F_x d_n ; S_3 = g\tilde{h}(\Delta z_b + \Delta H)n_y + F_y d_n$$

$$\tilde{\mathbf{e}}^1 = (1, \tilde{u} + \tilde{c}n_x, \tilde{v} + \tilde{c}n_y)^T ; \tilde{\mathbf{e}}^2 = (0, -\tilde{c}n_y, \tilde{c}n_x)^T ;$$

$$\tilde{\mathbf{e}}^3 = (1, \tilde{u} - \tilde{c}n_x, \tilde{v} - \tilde{c}n_y)^T$$

ここに、 $\mathbf{n}=(n_x, n_y)$ =検査体積の境界線の外向き単位法線ベクトル、 $z_b$ =地盤高、 $\Delta = \Delta(\bullet) = (\bullet)_R - (\bullet)_L$ で定義されるオペレーター、 $\Delta H$ =損失水頭、 $d_r$ =セル中心間の距離、 $u$ 、 $v$ 、 $c$ および $h$ はそれぞれ次式で表される。

$$\tilde{u} = (\sqrt{h_L} u_L + \sqrt{h_R} u_R) / (\sqrt{h_L} + \sqrt{h_R});$$

$$\tilde{v} = (\sqrt{h_L} v_L + \sqrt{h_R} v_R) / (\sqrt{h_L} + \sqrt{h_R});$$

$$\tilde{c} = \sqrt{g(h_L + h_R)/2}; \tilde{h} = (h_L + h_R)/2$$

ここに、 $L$ 、 $R$ =セル境界線の左もしくは右側を表す添字で、セル $i$ 側を $L$ としている。

### (3) 堰の取り扱い

河川横断構造物の堰の扱いは、①計算格子で取り扱う方法、②流体力で取り扱う方法、③エネルギー損失で取り扱う方法の3通りを用いた。方法2と3では、水位が堰高よりも低い場合には閉境界条件を与えた。式中の記号の定義は図-1に示す通りである。下添え字は、堰上流の諸量に1、下流側の諸量に2を付している。

#### a) 計算格子で取り扱う方法 (方法1)

同方法は、堰形状に沿ってメッシュを配置し、堰の河床高を与える方法である。

#### b) 流体力で取り扱う方法 (方法2)

同方法は、堰形状に沿ってメッシュを配置せず、セル境界線の情報として堰高 $D$ を与え、式(3)中の $F_x$ 、 $F_y$ を、式(5)に示す抵抗係数を用いて求める方法である。

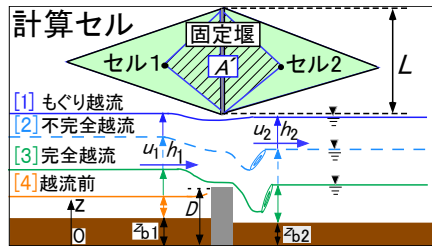


図-1 堰の取り扱いの定義図

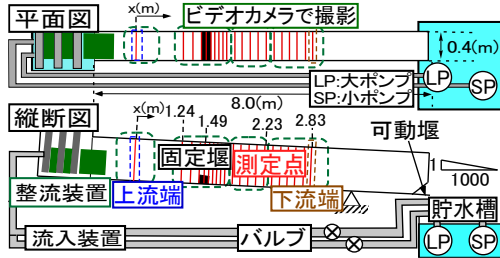


図-2 実験装置の概要

$$F_n = [1/2 C_D u_{n1} |u_{n1}| (D - z_{b1}) L] \cdot 1/A' \quad (5)$$

$$u_n = u \cdot n_x + v \cdot n_y; F_x = F_n n_x; F_y = F_n n_y$$

ここに、 $F_n$ =セル法線方向の流体力、 $D$ =基準面から堰頂までの高さ、 $A'$ =堰の境界線とセル重心で構成されるセルの面積である。

### c) エネルギー損失で取り扱う方法(方法3)

同方法は、堰形状に沿ってメッシュを配置せず、セル境界線の情報として堰高  $D$  を与え、式(3)中の  $\Delta H$  を式(6)に示すように、段上りと段落ちのエネルギー損失に補正係数をかけて求める方法である。

$$\Delta H = \alpha (\xi \cdot u_{n1}^2 / 2g + \xi_{sd} \cdot u_{n2}^2 / 2g) \cdot |u_n| / u_n$$

$$\xi = -1 + (h_1/h)^2 + 2/Fr_1^2 \cdot (-1 + \Delta z_{b1}/h_1 + h'/h_1); \quad (6)$$

$$\xi_{sd} = -1 + (h_2/h)^2 + 2/Fr_2^2 \cdot (-1 + \Delta z_{b2}/h_2 + h'/h_2)$$

ここに、 $\alpha$ =補正係数、 $h'$ は堰上での水深であり、堰下流の水深が堰高を超える場合には、 $h'=(h_1+z_{b1}+h_2+z_{b2})/2-D$  を超えない場合には、 $h'=(h_1+z_{b1})-D$  を与えた。

## 3. 実験結果に基づくモデルの検証

本モデルを堰がある場での非定常流実験に適用し、方法1~3の予測精度について検証した。

### (1) 実験装置の概要

実験装置は、図-2に示す長さ8m、幅0.4mの水路である。水路床勾配は1/1,000に設定されており、 $x=1.49$  m地点に高さ0.02mの固定堰が設けられている。下流端には可動堰が設置されており、堰高によって水位を調節できるようになっている。また、上流端では、二つのポンプにより流入流量が調整される。同水路の粗度係数は、等流実験より  $n=0.011\text{m}^{1/3}$  であることが確認されている。実験は非定常流で行い、固定堰上の流れが完全越流状態となる CaseA、潜り越流状態となる CaseB、完全越流状

表-1 実験条件

	CaseA	CaseB	CaseC
越流状態	完全越流	潜り越流	①完全越流 ②潜り越流 ③完全越流
使用ポンプ	①小ポンプ(10s) ②小+大ポンプ(80s)	①小ポンプ(10s) ②小+大ポンプ(80s)	①小ポンプ(10s) ②小+大ポンプ(90s) ③小ポンプ(80s)
可動堰高(m)	0.045	0.075	0

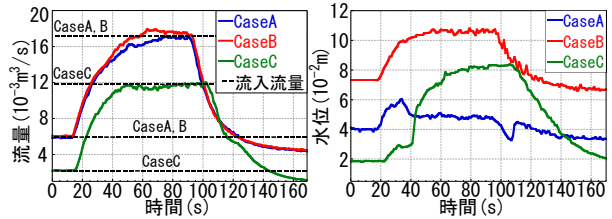


図-3 境界条件(左:上流端流量, 右:下流端水位)

態から潜り越流状態に移行する CaseC の3通りを実施した。非定常流は、上流から一定流量  $Q_1$  を供給した後、2台目のポンプを計測開始時刻から10秒後に  $Q_2$  で稼働させ、CaseA, Bでは90秒後、CaseCでは100秒後に停止させることで発生させた。表-1に実験条件を示す。

測定項目は、水位  $H$ (m)、流量  $Q$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )である。水位については、ビデオカメラで撮影した画像を画像解析することで、図-2中の測定点で測定した。流量については、直径約5mmの発砲スチロール球を流し、その動きをビデオカメラで撮影し、2次元流体解析ソフトウェア Flownizer2D<sup>12</sup>を用いて1フレーム(1/60秒)の画像データをPTV解析とデータ処理を自動的に行うことで、図-2中の測定点での1秒平均の水表面流速を測定した。これに等流時の滑面対数則により得られる水表面流速  $\eta$  と水深積分から得られる水深平均流速  $\eta'$  との比(本実験では0.88~0.89程度)をかけることで、水深平均流速を求め、この水深平均流速と水位観測より得られる水深により流量を求めた。図-3に算出した流量ハイドログラフを示す。なお、図中には各Caseでの初期・ピーク時のポンプの流入流量をあわせて示している。なお、算出結果と流入流量の相対誤差は、最大で2.5%であった。

### (2) 解析の概要

解析対象領域は、実験水路の  $x=0.0\sim 2.83\text{m}$  の区間とし、方法1では堰形状を再現することを目的に、堰周辺では0.001m~0.04m間隔の細かなメッシュを配置し、その他の区間は0.04~0.1mの間隔の計440個のメッシュで、方法2と3では堰の中心位置をセル境界で再現できるように、全ての区間で0.04m~0.1m間隔の368個のメッシュで分割した。Manningの粗度係数は  $n=0.011\text{m}^{1/3}$  とした。境界条件には、図-3に示すような上流端の実測流量ハイドログラフと、下流端の実測水位ハイドログラフを与えた。壁面には閉境界条件を与えた。

式(5)中の抵抗係数  $C_D$  および式(6)中の補正係数  $\alpha$  は、CaseAの初期流量で定常状態の水面形を最も再現できる値  $C_D=6.9$ 、 $\alpha=0.78$  とした。全てのCaseでこの値を用い

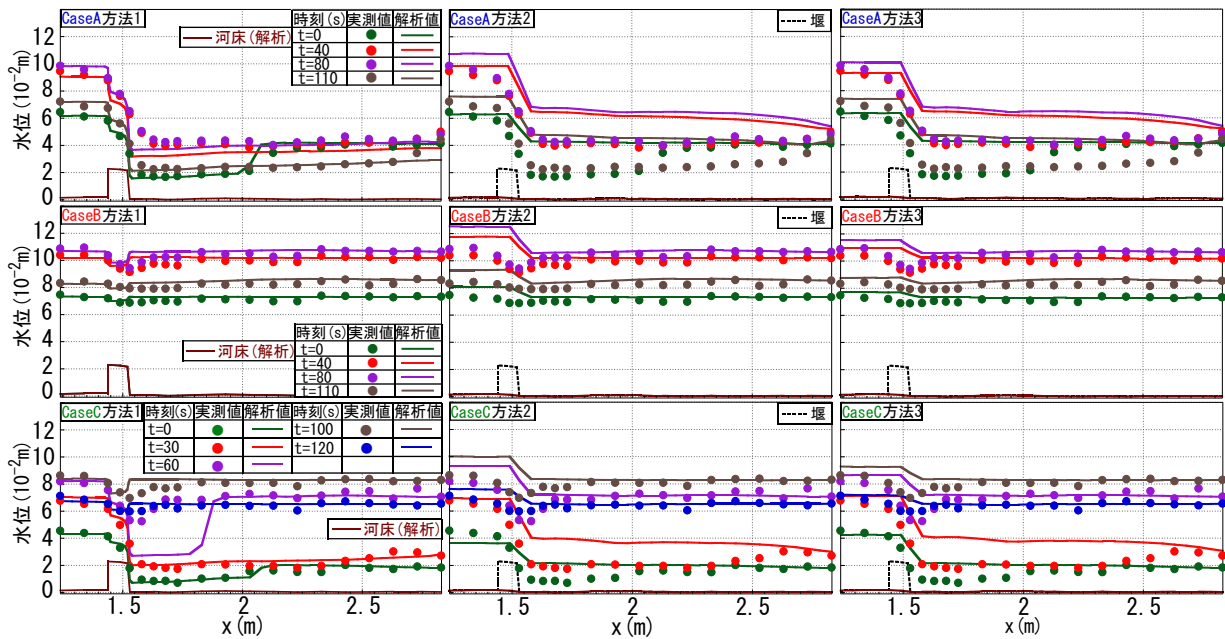


図-4 解析結果と実験値との比較(左:方法1, 中:方法2, 右:方法3)



図-5 彦山川流域の概要および水位観測所

た。堰の抵抗係数  $C_b$  は、堰形状を考慮しないために、堰形状と流体力を考慮した解析<sup>13)</sup>で用いられた  $C_b=5.0$  よりも大きい値となっている。これらの値の一般性については、今後検討する必要がある。

### (3) 結果と考察

図-4 は、CaseA~C の完全越流状態、潜り越流状態、両者への遷移状態について、各モデルの水面形の経時変化について、解析結果と実験値との比較を行ったものである。これより、(1)いずれの Case についても堰形状を考慮した方法 1 は、3.0% の程度の誤差で水面形の実験結果を再現していること、(2)方法 1, 方法 3, 方法 2 の順で再現精度が高いこと、(3)方法 2, 3 は、堰形状を考慮していないため、CaseB や C の堰上での水面の窪みや CaseA や C の堰下流の跳水が発生する区間の流況が再現できず、41% 程度の大きな誤差が生じること、(4)一方で、

堰による水位上昇は、方法 2 で 9.6%、方法 3 で 4.7% 程度となり、跳水区間の誤差に比べ小さくなること、(5)方法 2, 3 は、(3), (4)に示すような誤差はあるものの、CaseA と C の跳水区間を除く水面形や潜り堰状態の CaseB の水面形の実験結果を 5.0% 程度の誤差で全体的には再現していること、などがわかる。なお、方法 2, 3 は、方法 1 に比べ、計算メッシュ数が少ないために、49 倍程度の計算効率であった。

このように、堰形状を考慮しない方法 2, 3 は、方法 1 に比べ予測精度は若干低下するが、計算効率が高く、方法 3 は 2 に比べ、予測精度が高いことが確認された。

## 4. 彦山川への適用

最後に、方法 3 のモデルを九州北部豪雨災害で被災した彦山川へ適用し、その実河川への適用性を検討した。

彦山川は、一級河川遠賀川の一次支川であり、その幹線流路延長 43.8km、流域面積 327.6km<sup>2</sup> である。彦山川流域の概要および水位観測所を図-5 に示す。

解析対象河川は、彦山川、金辺川、中元寺川であり、解析は 2012 年 7 月 14 日 0 時から 15 日 0 時の出水を対象とした。解析では図-6 に示す彦山川の堰の全てを考慮した。なお、可動堰がいつ稼動したのか不明であったため、可動部と固定部の堰高を与えた解析と固定部の堰高を与えた解析の二通りを実施した。補正係数  $\alpha=0.78$  を用いた。粗度係数には計画粗度係数を用いた。また、堰高を 0 とした堰を考慮しない解析もあわせて実施した。降雨外力からの水位予測を目的として、上流端あるいは残留域や解析で考慮されていない支川からの流入流量については、分布型流出解析モデルより算出した流量を上

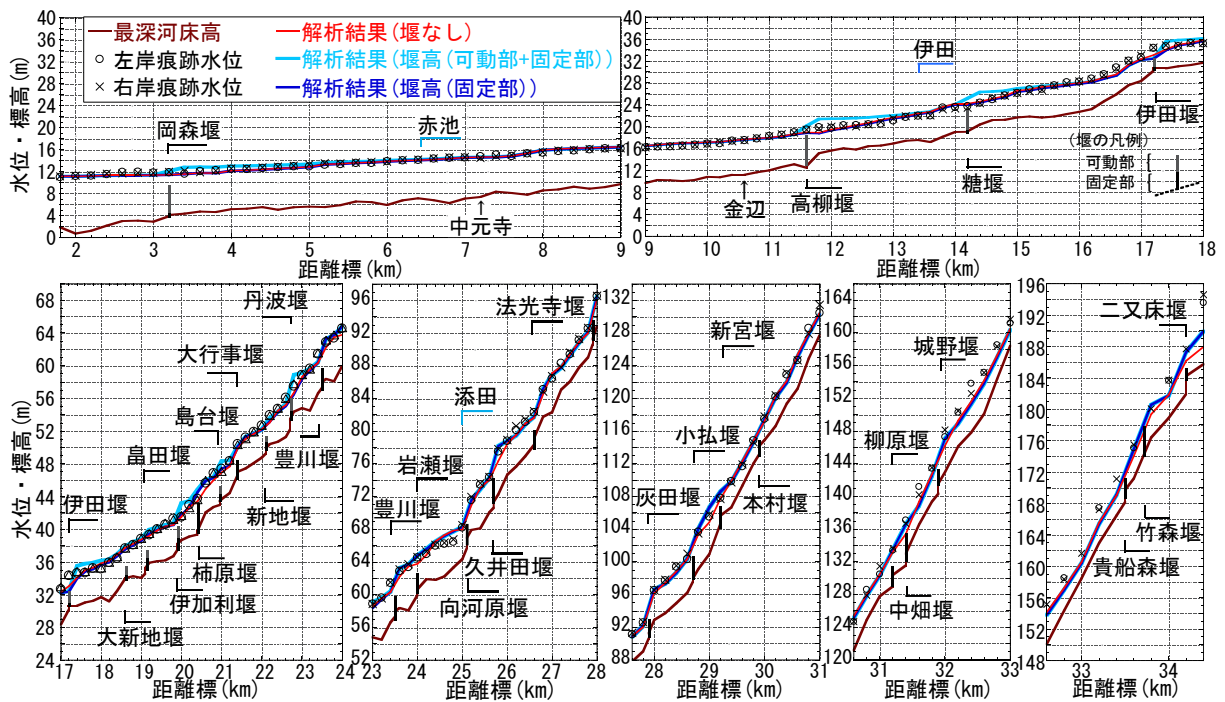


図-6 彦山川の痕跡水位と最大解析水位との比較

流端境界条件あるいは内部境界条件として与えた。下流端の境界条件には中島水位観測所の実測水位を与えた。

図-6 は、彦山川について、解析ピーク水位の縦断変化と痕跡水位との比較を行ったものである。なお、図中には、堰を考慮していない解析結果もあわせて示している。これより、本モデルの解析結果は、(1)堰を考慮しない解析結果に比べ、堰周辺での予測精度が向上していること、(2)それ以外の区間でも痕跡水位を平均誤差10%程度の精度で再現していること、などがわかる。また、堰の稼働の有無で結果を比較すると、下流の岡森堰、高柳堰、糖堰、伊田堰で両結果に違いが大きく、痕跡水位がその間に含まれることから、いずれも出水時に堰が稼働したことも確認できる。

図-7 と 8 は、それぞれ、彦山川沿いの赤池、伊田、添田水位観測所での流量と水位ハイドログラフの解析結果と実測値との比較を行ったものである。これらより、流量ハイドログラフについては、いずれの解析結果も、(1)赤池・伊田観測所の二山波形や添田観測所の三山波形を持つ複雑な流量ハイドログラフを再現していること、(2)堰を考慮しない解析と考慮した解析を比較すると大きな差異はないが、堰を考慮した解析はピーク流量が小さくなること、などが確認できる。水位ハイドログラフについては、いずれの解析結果も、(1)二山の波形を持つ複雑な水位ハイドログラフの波形を再現していること、(2)赤池水位観測所では水位を概ね再現すること、(3)伊田観測所では、水位を過大に評価すること、(4)添田水位観測所では、水位を概ね再現していること、(5)堰を稼働させた解析結果は、他の解析結果に比べ予測精度は高いこと、などが確認できる。

以上から、本モデルは、連続して複数の堰が設置された複数の支川が合流する河川での流量・水位ハイドログラフを十分な精度で予測できることが確認された。

## 5. おわりに

本研究は、河道横断構造物の簡易的な取り扱いを組み込んだ新たな平面2次元モデルを構築し、実験結果および実河川へ適用することでその再現性について検討した。その結果、本モデルは、(1)堰形状を考慮しないために、堰下流の跳水が発生する区間での予測精度は低下するものの、堰を超える非定常流を概ね再現できること、(2)複数の堰が設置された河川での痕跡水位、流量・水位ハイドログラフを再現できること、などが確認された。

なお、本論文の簡易的な扱いは、平面2次元解析だけでなく、1次元解析にも適用可能と考えている。

**謝辞：**本研究は、科学研究費基盤研究(C)(課題番号：16K06515、研究代表者：重枝未玲)の助成を受けたものである。また、本研究を遂行するにあたり、本学学部生の板井勇生君、荒木佑仁君には多大な協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 社会資本整備審議会 河川分科会 気候変動に対応した治水対策検討小委員会：水災害分野における気候変動適応策のあり方について～災害リスク情報と危機感を共有し、減災に取り組む社会へ～中間とりまとめ、

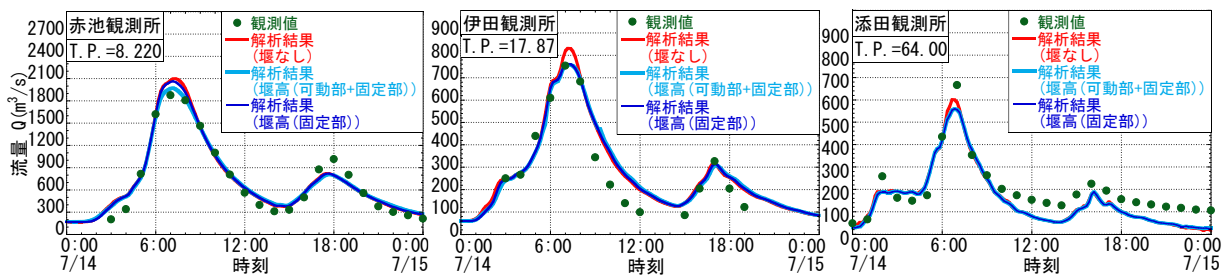


図-7 彦山川沿いの各観測所の流量ハイドログラフの比較

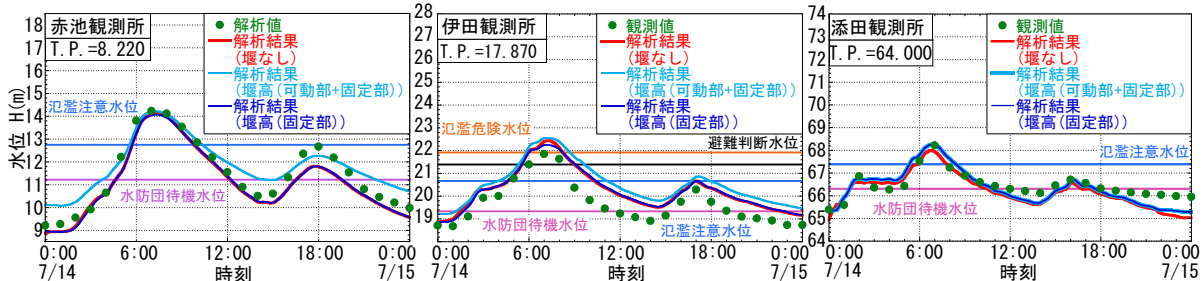


図-8 彦山川沿いの各観測所の水位ハイドログラフの比較

[http://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo03\\_hh\\_000870.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo03_hh_000870.html), 2015.

- 2) 立川康人, 須藤純一, 椎葉充晴, 萬和明, キムスンミン: 粒子フィルタを用いた河川水位の実時間予測手法の開発, 水工学論文集, 第55巻, pp.S511-S516, 2011.
- 3) キムヨンス, 立川康人, 萬和明, キムスンミン: 粒子フィルタと洪水追跡モデルを用いた水位流量曲線の作成および補正手法の開発, 河川技術論文集, 第20巻, pp.361-366, 2014.
- 4) 福岡捷二, 佐藤宏明, 藤澤寛, 大沼史佳: 洪水流と河道の樹木繁茂形態に基づく樹木群透過係数と粗度係数の算定法, 水工学論文集, 第51巻, pp.607-612, 2007.
- 5) 国土技術研究センター(編): 河道計画検討の手引き, 山海堂, p.189, 2002.
- 6) 例えば, 重枝未玲, 秋山壽一郎: 流束差分法に基づく有限体積数値モデルの堰を越える流れへの適用性について, 土木学会第56回年次学術講演会講演概要集, pp.302-303, 2001.
- 7) 重枝未玲・秋山壽一郎・重岡広美: ドライ・ウェット状態となる地形起伏がある場での氾濫流の数値シミュレ

ション, 水工学論文集, 第51巻, pp.781-786, 2007.

- 8) 重枝未玲, 秋山壽一郎: 数値シミュレーションに基づく堤防に沿った樹林帯の治水機能の検討, 土木学会論文集, No.740II-64, pp.19-30, 2003.
- 9) 椿東一郎: 基礎土木工学全書6 水理学I, 森北出版, p.208, 1973.
- 10) Roe, P. L.: Approximate Riemann solvers, parameter vectors and difference schemes, *Journal of Computational Physics*, Vol.43, pp.357-372, 1981.
- 11) Bermudez, A. and Vazquez, M.: Upwind methods for hyperbolic conservation laws with source terms, *Computers Fluids*, Vol.8, No.8, pp.1049-1071, 1994.
- 12) ディテクト: Flownizer2D Version1.12 User's Manual, p.136, 2012.
- 13) 森本輝, 越智繁雄, 林良範, 中川達郎, 清水敦司: 河川横断構造物を有する区間における準3次元解析について, 第57回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp.209-210, 2002.

(2016.9.30 受付)

## NUMERICAL MODELING OF A RIVER CROSSING STRUCTURE IN 2D SHALLOW WATER FLOW SIMULATIONS

Mirei SHIGE-EDA, Juichiro AKIYAMA, Kouta OKUBO and Syouya NAKAKI

A numerical model for 2D flood flows with river crossing structures was developed. The model was based on Spatial Averaged Finite volume method on Unstructured grid using FDS technique for 2D Free-surface flows (SA-FUF-2DF model). A treatment for a weir is incorporated into the model. The model was verified against experimental data of unsteady flow over a weir as a river crossing structure. It shows that the model can reproduce the complex behavior of the flows with reasonable accuracy. The model was also verified against observed water level and flood mark on the flood event in the Hikosan River. It shows that the proposed model can reproduce the behavior of flood flows in the Hikosan River with reasonable accuracy.