水位ハイドログラフを境界条件とした 平面２次元洪水流解析

重枝 未玲[1]・秋山 壽一郎[2]・大久保 剛貴[3]・中島 晴紀[4]

[1]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

[2]フェロー会員 九州工業大学教授（同上）
E-mail:akiyama@civil.kyutech.ac.jp

[3]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

[4]学生会員　九州工業大学　工学部建設社会工学科（同上）
E-mail: o105051h@mail.kyutech.jp

本研究は，水位の経時変化を上・下流端境界条件とした平面 2 次元解析法を提案し，堰を超える非定常流れの実験および平成 24 年九州北部豪雨時の彦山川での出水に適用することで，その再現性について検討したものである．まず，流束差分離法に基づき，洪水波の伝播を考慮した上で水位から単位幅流量を求める上・下流端境界条件式を新たに提案した．次に，実験結果や実出水の観測値に基づき，解析法の検証を行った．その結果， (1)水位を境界条件とした解析は，堰を超える流れの水位や流量の実験結果を予測可能であること，(2)同解析は，実河川の流量・水位ハイドログラフ，痕跡水位を再現できること， (3) その流量の予測精度は，下流の影響を受ける場合に河道内構造物や底面粗度によるエネルギー損失に影響を受けること，などがわかった．

Key Words: *numerical modeling, boundary condition, water level hydrograph, 2D shallow water, experiments, the Hikosan River*

1.　はじめに

近年，豪雨による水災害が頻発している．その被害は激甚化しており，平成 29 年 7 月の九州北部豪雨では死者 37 名，行方不明者 4 名の甚大な被害が生じた[1]．

洪水時に時々刻々と変化する河道内水位は，防災・減災対策を講じる上で有用な情報である．そのため，現状の比較的疎な水位観測から，密な水位観測を行う技術開発が試みられている[2]．さらに，水位の観測値とデータ同化し，疎な情報から密な情報を予測する数値解析手法も構築されている[3),4]．

一般に，数値解析の多くは，上流端境界条件に観測流量，もしくは流出解析によって求められた流量を，下流端には水位を与え解析が実施される[5]．近年では，河道内水位が流量に比べ容易かつ高精度な観測が可能である[5]ことを踏まえ，水位の連続観測結果を上流端境界条件として与え，水面形や流量を予測する解析手法が開発されている[6),7]．福岡らの研究[6]はその先駆けであり，上・下流端に設けた池の水位を，解析対象区間の水面形の経時変化と一致するように制御することで，流量や河道内の粗度を高精度に再現できる平面 2 次元解析法を開発している．著者ら[7]は，実測水位ハイドログラフを上・下流端境界条件とし，特性曲線式に基づく境界条件式を用いて，水面形や流量の経時変化を再現できる 1 次元解析法を開発している．このような洪水流解析は，点観測の水位から水面形の経時変化のような縦断方向に連続的な情報を得られることから，氾濫リスクを評価する危機管理技術として今後ますます重要になると考えられる．

本研究は，以上のような背景を踏まえ，著者らが開発した水位を境界条件とした 1 次元解析法[7]を平面 2 次元洪水流解析法へと発展させ，堰上での流れが完全越流状態，潜り越流状態，両状態に遷移する 3 ケースの非定常実験結果[8]に基づき，その再現性と下流端水位が流量の予測精度に及ぼす影響を検討するとともに，平成 24 年九州北部豪雨での彦山川の出水データに基づき実河川への適用性について検討したものである．

2. 水位を境界条件とした平面 2 次元洪水流解析法の概要

本解析は，従来の水理解析とは異なり，上・下流端に水位を境界条件として与え，解析を実行する点が特徴である．以下では，その概要について述べる．

⑴ 数値モデルの概要

本解析に用いた数値モデルは，著者らが開発した SA-FUF-2DF モデル [8),9)]である．同モデルは，非構造格子，有限体積法，流束差分離法などの数値解法に基づく平面 2 次元自由表面流モデルであり，河道内構造物の簡易的な取り扱いが組み込まれている．また，上流端に流量を，下流端に水位を与える従来の境界条件では，高精度な洪水追跡が可能であることが確認されている [8),9)]．以下に，その概要を述べる．詳細については参考文献 [8),9)]を参照されたい．

基礎方程式は，式(1)の 2 次元浅水流方程式である．

$$\partial \boldsymbol{U}/\partial t + \partial \boldsymbol{E}/\partial x + \partial \boldsymbol{F}/\partial y + \boldsymbol{S}_1 + \boldsymbol{S}_2 + \boldsymbol{S}_3 = \boldsymbol{0} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{U} = \left(h,\ uh,\ vh\right)^T ；\boldsymbol{E} = \left(uh,\ u^2h + 1/2gh^2,\ uvh\right)^T ；$$

$$\boldsymbol{F} = \left(vh,\ uvh,\ v^2h + 1/2gh^2\right)^T ；$$

$$\boldsymbol{S}_1 = \left(0, -gh\left(S_{ox} + S_{Lx}\right) + F_x, -gh\left(S_{oy} + S_{Ly}\right) + F_y\right)^T ；$$

$$\boldsymbol{S}_2 = \left(0, ghS_{fx}, ghS_{fy}\right)^T ；\boldsymbol{S}_3 = \left(q_r, 0, 0\right)^T$$

ここに，$\boldsymbol{U}$：保存量ベクトル，$\boldsymbol{E}$，$\boldsymbol{F}$：x，y 方向の流束ベクトル，$\boldsymbol{S}_1$：河床・エネルギー損失勾配・消滅項ベクトル，$\boldsymbol{S}_2$：摩擦勾配ベクトル，$\boldsymbol{S}_3$：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($=-\partial z_b/\partial x$，$-\partial z_b/\partial y$)，$S_{Lx}$，$S_{Ly}$：$x$，$y$ 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，z_b：河床位である．摩擦勾配については Manning の式で，河道内の橋脚や堰などによるエネルギー損失については参考文献 [8),9)]と同様な方法で算定する．

図–1 に示すセル境界線の法線方向を x_n 軸として，式(1)を x_n 軸に回転させると，式(2)の x_n 軸方向に沿った 1 次元浅水流方程式が求まる．

$$\partial \hat{\boldsymbol{U}}/\partial t + \partial \hat{\boldsymbol{E}}/\partial x_n + \hat{\boldsymbol{S}}_1 + \hat{\boldsymbol{S}}_2 + \hat{\boldsymbol{S}}_3 = \boldsymbol{0} \tag{2}$$

$$\hat{\boldsymbol{U}} = \boldsymbol{T} \cdot \boldsymbol{U} = \left(h, u_n h, u_t h\right)^T ；$$

$$\hat{\boldsymbol{E}} = \hat{\boldsymbol{E}}\left(\hat{\boldsymbol{U}}\right) = \left(u_n h, u_n^2 h + 1/2gh^2, u_n u_t h\right)^T = \boldsymbol{T} \cdot \left(\boldsymbol{E} \cdot n_x + \boldsymbol{F} \cdot n_y\right)^T ；$$

$$\hat{\boldsymbol{S}}_1 = \boldsymbol{T} \cdot \boldsymbol{S}_1 = \left(0, \left(-gh\left(S_{ox} + S_{Lx}\right) + F_x\right)n_x + \left(-gh\left(S_{oy} + S_{Ly}\right) + F_y\right)n_y, 0\right)^T ；$$

$$\hat{\boldsymbol{S}}_2 = \boldsymbol{T} \cdot \boldsymbol{S}_2 = \left(0, gh\left(S_{fx}n_x + S_{fy}n_y\right), 0\right)^T ；\hat{\boldsymbol{S}}_3 = \boldsymbol{T} \cdot \boldsymbol{S}_3 = \left(q_r, 0, 0\right)^T$$

ここに，$\boldsymbol{n}=(n_x,\ n_y)$：単位法線ベクトル，$u_n$：$x_n$ 方向の流速($=un_x+vn_y$)，u_t：x_n に垂直な方向の流速($=-un_y+vn_x$)，$\boldsymbol{T}$：x_{n} 軸への回転行列，$\boldsymbol{T}^{-1}$：$\boldsymbol{T}$ の逆行列である．

式(2)を式(3)のように非保存系の方程式に変形すると，式(4)で表される流束ヤコビアン $\hat{\boldsymbol{J}}$ を求めることができる．流束ヤコビアン $\hat{\boldsymbol{J}}$ は，対角化可能であることから，式(5)で表される固有値 $\hat{\boldsymbol{\Lambda}}$，右固有行列 $\hat{\boldsymbol{R}}$，左固有行列 $\hat{\boldsymbol{R}}^{-1}$ を得ることができる．なお，固有値 $\hat{\boldsymbol{\Lambda}}$ は，特性速度すなわち浅水波の伝播速度を表す．

$$\partial \hat{\boldsymbol{U}}/\partial t + \hat{\boldsymbol{J}} \cdot \partial \hat{\boldsymbol{U}}/\partial x_n + \hat{\boldsymbol{S}}_1 + \hat{\boldsymbol{S}}_2 + \hat{\boldsymbol{S}}_3 = \boldsymbol{0} \tag{3}$$

$$\hat{\boldsymbol{J}} = \partial \hat{\boldsymbol{E}}/\partial \hat{\boldsymbol{U}} = \hat{\boldsymbol{R}}\hat{\boldsymbol{\Lambda}}\hat{\boldsymbol{R}}^{-1} \tag{4}$$

$$\hat{\boldsymbol{R}} = \frac{1}{2c}\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ u_n - c & 0 & u_n + c \\ u_t & 1 & u_t \end{pmatrix}; \hat{\boldsymbol{\Lambda}} = \begin{pmatrix} u_n - c & 0 & 0 \\ 0 & u_n & 0 \\ 0 & 0 & u_n + c \end{pmatrix} \tag{5}$$

式(4)のヤコビアン $\hat{\boldsymbol{J}}$ を，近似ヤコビアン $\tilde{\boldsymbol{J}}$ と置き換え，左から $\tilde{\boldsymbol{R}}^{-1}$ を乗ずることで，式(6)の固有値 $\tilde{\boldsymbol{\Lambda}}$ つまり浅水波の伝播速度に基づく，スカラーの波動方程式群が得られる．なお，近似ヤコビアン $\tilde{\boldsymbol{J}}$ は，Δt，Δx_n 間で一定と仮定している．

$$\partial \tilde{\boldsymbol{R}}^{-1}\hat{\boldsymbol{U}}/\partial t + \tilde{\boldsymbol{\Lambda}} \cdot \partial \tilde{\boldsymbol{R}}^{-1}\hat{\boldsymbol{U}}/\partial x_n = -\tilde{\boldsymbol{R}}^{-1}\left(\hat{\boldsymbol{S}}_1 + \hat{\boldsymbol{S}}_2 + \hat{\boldsymbol{S}}_3\right) \tag{6}$$

式中の～は以下の Roe の平均 [10)]が施された諸量であり，$\tilde{u}_n$，$\tilde{u}_t$ および $\tilde{c}$ はそれぞれ式(7)で表される．

$$\tilde{u}_{n,t} = \left(\sqrt{h_L}u_{n,tL} + \sqrt{h_R}u_{n,tR}\right)\Big/\left(\sqrt{h_L} + \sqrt{h_R}\right);$$
$$\tilde{c} = \sqrt{g\left(h_L + h_R\right)/2};\quad \tilde{h} = \left(h_L + h_R\right)/2 \tag{7}$$

ここに，下添え字は，左側セルの諸量に L，右側セルの諸量に R を付している．

⑵ 境界条件

a) 境界条件式

本解析では，**図–1** に示すように，右側セルを計算領域外とし，各セルの上・下流端境界条件に水位を与え，単位幅流量を算定する．本境界条件は，上流端が射流の場合には，浅水波の伝播速度が計算領域外から領域内に伝播する必要があるため適用できない．従って，ここでは，上流端の流れの状態を常流とする．

上・下流端では河道内に構造物が存在せず，横流入がないとし，式(6)を風上解法で離散化すると，式(8)，式(9)の境界位置での単位幅流量を算定する境界条件式が得られる．式中の記号の定義は**図–1** に示す通りである．

$$\begin{aligned} \frac{\left(u_n h\right)_R^{t+\Delta t}}{2\tilde{c}} = &\frac{\left(u_n h\right)_R^t}{2\tilde{c}} - \left(1 - \frac{\tilde{u}_n}{\tilde{c}}\right)\left(\frac{h_R^{t+\Delta t}}{2} - \frac{h_R^t}{2}\right) - \\ &\left(\tilde{u}_n + \tilde{c}\right)\frac{\Delta t}{\Delta x_n}\left\{\frac{\left(u_n h\right)_R^t}{2\tilde{c}} - \frac{\left(u_n h\right)_L^t}{2\tilde{c}} + \left(1 - \frac{\tilde{u}_n}{\tilde{c}}\right)\left(\frac{h_R^t}{2} - \frac{h_L^t}{2}\right)\right\} + \frac{g\tilde{h}}{2\tilde{c}}\left(S_{on} - S_{fn}\right)\Delta t \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} \left(u_t h\right)_R^{t+\Delta t} = &\left(u_t h\right)_R^t + \tilde{u}_t\left(h_R^{t+\Delta t} - h_R^t\right) \\ &- \tilde{u}_n\frac{\Delta t}{\Delta x_n}\left[\left\{\left(u_t h\right)_R^t - \left(u_t h\right)_L^t\right\} - \tilde{u}_t\left\{h_R^t - h_L^t\right\}\right] \end{aligned} \tag{9}$$

ここに，$S_{on}=S_{ox}n_x+S_{oy}n_y$，$S_{fn}=S_{fx}n_x+S_{fy}n_y$ である．

境界条件の設定手順は次の通りである．まず，境界条件として与えた新しい時間ステップの水位 $H^{t+\Delta t}$ から水深 $h^{t+\Delta t}(=H^{t+\Delta t}-z_b)$を求める．次に，式(8)，(9)を用いて，新しい時間ステップの単位幅流量$(u_n h)^{t+\Delta t}$，$(u_t h)^{t+\Delta t}$ を算出する．ただし，上流端で u_n が負（流入条件）の場合には，

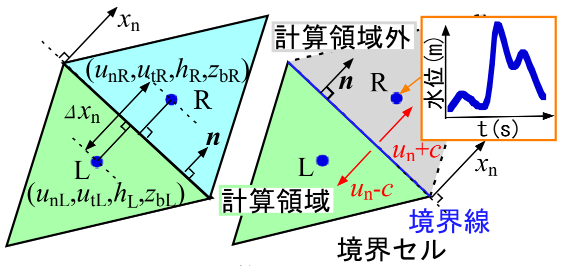

図-1　計算セルと境界セル

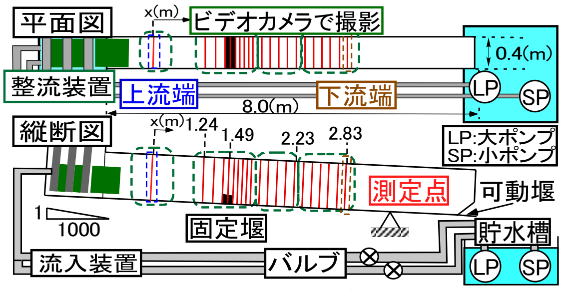

図-2　実験装置の概要

式(9)の $u_t=0$ とする．

b)　境界条件とする実測水位ハイドログラフの補正

境界条件に用いる実測水位ハイドログラフは，区分的3次エルミート内挿多項式補間(PCHIP補間)[11]を用いてデータ補間を行う．さらに，長波を対象とする浅水流方程式では再現できない高周波成分の波を除去する目的で，補間された水位ハイドログラフに対してローパスフィルタ[12]を適用する．ローパスフィルタにはベッセル関数[11]を用いる．

3.　実験結果に基づく解析法の検証

上・下流端境界条件に水位を用いる場合，下流端水位が上流端水位に影響を及ぼすか否かによって，予測精度に差異が生じることが想定される．そこで，本解析法を，堰上での流れが完全越流状態，潜り越流状態，両状態に遷移する3ケースの非定常実験[8]へ適用し，その再現精度の検証を行った．

(1)　実験の概要

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=1.49m地点に高さ0.02mの固定堰が設置されている．上流端からの流入流量については2つのポンプを操作することで，下流端の水位については可動堰で調整している．同水路の粗度係数nは等流実験より，0.011m$^{-1/3}$sであることが確認されている．実験条件は，**表-1**に示す通りである．測定項目は，水位H(m)と表面流速であり，水位H(m)については，ビデオカメラで撮影した水面の経時変化を画像解析することで，表面流速については水面に浮かべた発砲スチロール球の挙動をPTV解析[13]することで求めた．流量Q(m^3/s)については，水位に基づく流積と表面流速から等流時の滑面対数則[14]を用いて求まる断面平均流速に基づき算定した[8]．

表-1　実験条件

	Case1	Case2	Case3
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) ③小ポンプ(80s)	①小ポンプ(10s) ②小+大ポンプ(80s) ③小ポンプ(80s)	①小ポンプ(10s) ②小+大ポンプ(90s) ③小ポンプ(80s)

表-2　解析条件

	上・下流端境界条件	堰の取り扱い	実験Case番号
RunA-a-1～3	水位・水位	方法a	1～3
RunB-a-1～3	流量・水位	方法a	1～3
RunA-b-1～3	水位・水位	方法b	1～3
RunB-b-1～3	流量・水位	方法b	1～3

※RunO-□-△は次の通りである．O：境界条件，□：堰の取り扱い，△：実験Case番号

(2)　解析の概要

解析は，**表-2**に示す12の条件で実施した．水路中の堰は，方法aでは堰形状を河床位で再現することで，方法bでは堰によるエネルギー損失を考慮することで取り扱った．取り扱いの詳細については参考文献[8]を参照されたい．解析領域については，方法aでは堰区間を0.001~0.04m間隔，その他を0.04~0.1m間隔の計440個のメッシュで，方法bでは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nは0.011m$^{-1/3}$sとした．方法bに必要な補正係数α[8]は，完全越流時および潜り越流時における初期流量とピーク流量が再現できるようにそれぞれ，α_1=0.69，α_2=0.055とし，遷移領域での補正係数αは，上・下流の水位比$H_2/H_1 \geqq 2/3$[14]で，式(10)のようにH_2/H_1に応じて線形で変化させ，簡易的に取り扱った．

$$\begin{cases} \alpha=\alpha_1 & (H_2/H_1 \le 2/3) \\ \alpha=\alpha_1-\dfrac{\alpha_2-\alpha_1}{2/3}\left(\dfrac{H_2}{H_1}-\dfrac{2}{3}\right) & (2/3 \le H_2/H_1) \end{cases} \qquad (10)$$

ここに，H_1，H_2はそれぞれ堰頂を基準とする上流側，下流側水位を示している．

(3)　結果と考察

図-3は，図中の水位ハイドログラフを境界条件としたRunA-a-1~3とRunA-b-1~3について，上流端の流量ハイドログラフと水面形の経時変化の解析結果と実験値との比較を行ったものである．水面形の経時変化から，RunA-aでは，全てのRunにおいて，(1)堰上での窪みや跳水位置を正確には再現できないものの，(2)堰上流および下流での水位変化を概ね再現できること，RunA-bでは，(1)堰形状を再現していないため，堰上での窪みや跳水が発生する区間の流況は再現できないものの，(2)跳水区間を除く水面形や潜り状態の水面形を概ね再現しており，上記を除いた区間では，RunA-aと同程度の再現精度であること，(3)RunA-b-1の90秒では，解析水位が実測と異なること，などが確認できる．RunA-b-1

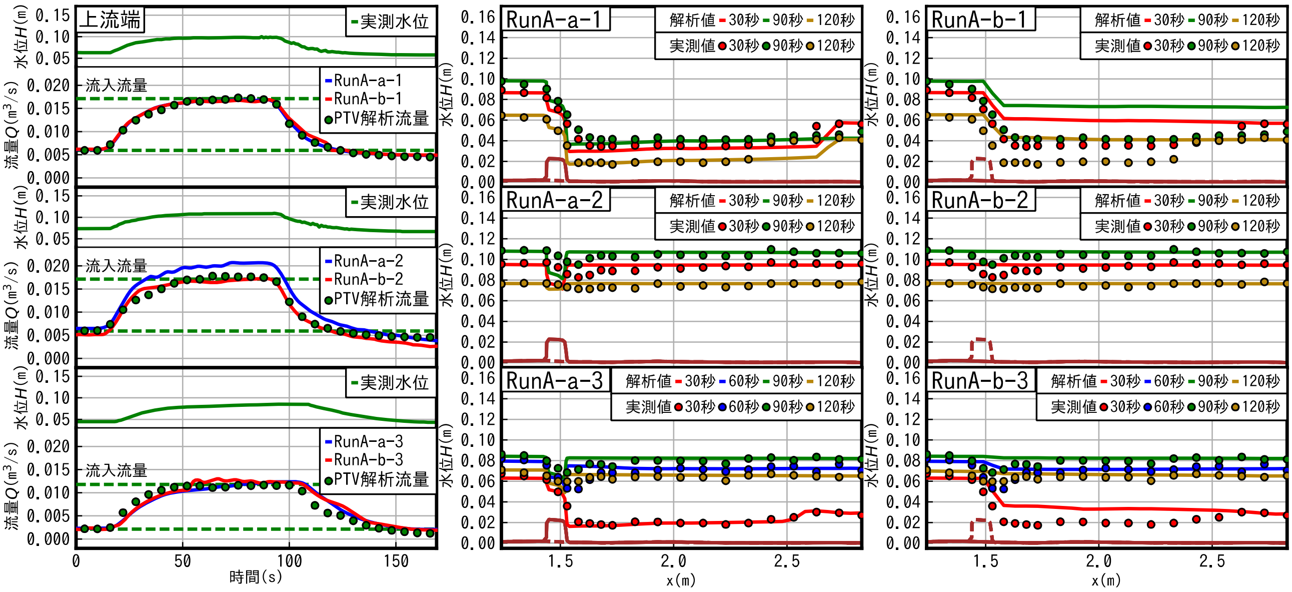

図-3 上流端流量と水面形の経時変化の比較(左：水位・流量ハイドログラフ，中：RunA-a の水面形，右：RunA-b の水面形)

の 90 秒で差異が生じる要因は，実験では下流端が射流状態であったにもかかわらず，解析では常流であったため，与えた境界条件が適切でないことが考えられる．流量ハイドログラフの比較から，RunA-a では，(1)いずれも上流端の流量ハイドログラフの波形を再現していること，(2)RunA-a-1 の完全越流状態では実測流量を十分な精度で再現していること，一方で，(3) RunA-a-2 および RunA-a-3 の潜り越流状態となる時刻において，流量を 5~20%程度過大に評価していること，RunA-b では(1)いずれも上流端の流量ハイドログラフの波形を概ね再現していること，(2) 完全越流状態の RunA-b-1 では，RunA-a-1 同様に実測流量を十分な精度で再現していること， (3) 潜り越流状態の RunA-b-2 および RunA-b-3 の潜り越流状態となる時刻では，流量は 5.6%程度の誤差であり，RunA-a-2 や 3 よりも予測精度が高くなること，(4)RunA-b-3 の完全越流状態から潜り越流状態となる時刻では流量が急増し予測精度が低下していることから，遷移状態での式(10)の取り扱いが十分ではないこと，などが確認できる．このように，堰上での流れが潜り越流状態となった場合，方法 a に比べ方法 b の流量の予測精度は高くなる．これは，方法 b では，方法 a では考慮されない堰下流の鉛直方向の渦によるエネルギー損失が考慮されたためと考えられる．

以上から，水位を境界条件とした解析は，(1)流量を境界条件とした解析と同様に，跳水や堰上の窪みなど，局所的な流れは再現できないため，完全越流から潜り越流に遷移する際に誤差が発生するものの，それ以外の区間では十分な精度で流れを再現できること，(2)流入出流量を十分な精度で再現できること，その予測精度は，(3)下流側の影響を受けない場合に高く，(4)下流の影響を受ける場合には河道内構造物や底面粗度によるエネルギー損失に影響を受けることが確認された．

4. 彦山川への適用

最後に，本平面 2 次元モデルを平成 24 年 7 月九州北部豪雨災害で被災した彦山川へ適用し，実河川への適用性を検討した．

(1) 解析対象河川の概要

彦山川は，一級河川遠賀川の一次支川であり，幹線流路延長は 43.8km，流域面積は 327.6km^{2}である．彦山川流域の概要および水位観測所を**図-4** に示す．

(2) 解析条件の概要

解析対象は，彦山川，金辺川，中元寺川であり，対象出水は，2012 年 7 月 14 日 0 時から 15 日 0 時とした．解析区間の堰についてはエネルギー損失で考慮した．式(10)中の定数 α_1，α_2 は実験と同様にした．なお，可動堰の稼動時刻が不明であったため，固定部の堰高のみを考慮した．解析については，RunA と B の 2 通りを実施し，RunA では上流端に添田観測所，春日橋観測所，夏吉観測所の実測水位を，RunB では流出解析によって算出した流量 [8]を与えた．いずれの Run も下流端には中島観測所の実測水位を与えた．なお，**図-4** に示す伊田・赤池観測所を上・下流端として，また，赤池・中島観測所を上・下流端として，水位を境界条件とした解析を実施し，赤池観測所の流量を比較したところ，**図-5** のように，上流端流量は再現できるものの，下流端での流量は再現できない場合があった．これは，水位を境界条件とする解析では，**図-4** の赤枠で示す流域の小河川を考慮しておらず，同流域からの流量を考慮することができないためである．ここでは，赤枠で示す流域からの流入についてのみ流出解析 [8]より得られた流量を与えた．なお，水位観測値や河道の横断面データ等が存在しない河川からの流入の取り扱いについては今後の課題である．

図-4　彦山川と流域の概要

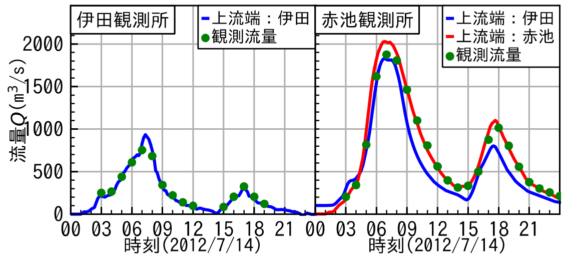

図-5　伊田・赤池観測所を上流端水位とした解析結果

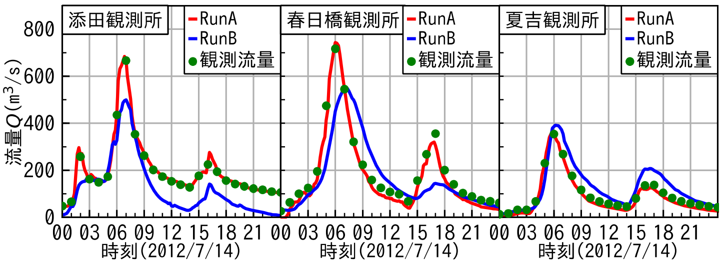

図-6　添田，春日橋，夏吉観測所の流量ハイドログラフと観測結果との比較

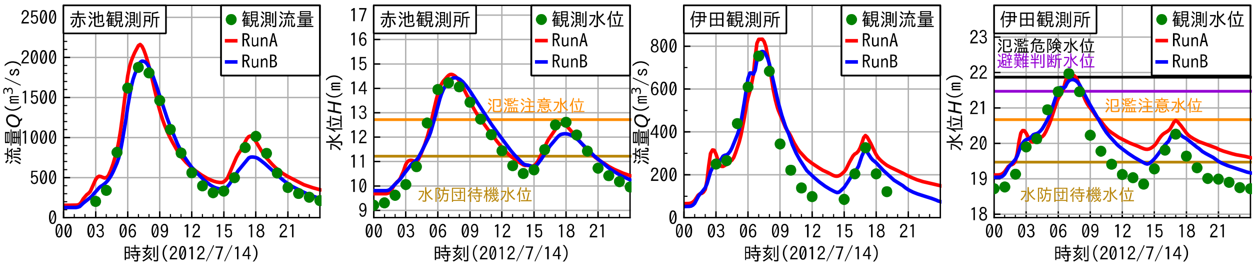

図-7　赤池観測所，伊田観測所での流量および水位の比較

(3) 結果と考察

図-6 は，上流端である添田，春日橋，夏吉観測所の流量ハイドログラフと観測結果との比較，RunA と B との比較を行ったものである．これらより，RunA は(1)RunB に比べ，流量ハイドログラフの波形を高い精度で再現していること，(2)ピーク時の流量誤差は 3%程度であること，などが確認できる．このように，本解析法は上流端の流入流量を十分な精度で再現できる．

図-7 は，**図-4** に示す彦山川の赤池観測所，伊田観測所での水位と流量の解析結果と観測値との比較を行ったものである．赤池観測所では，RunA，B ともに，(1)流量・水位ハイドログラフの波形を概ね再現していること，(2)ピーク時の流量・水位は過大に評価していること，RunA は RunB に比べ，(3)2 山目の流量・水位を高い精度で再現していること，伊田観測所では，RunA，B ともに，(1)流量・水位ハイドログラフの 2 山波形を再現しているものの，(2)7 月 14 日 9~15 時では流量・水位を過大に評価していること，などが確認できる．赤池観測所で RunA がピーク流量・水位を過大に評価した理由は，上流端流量の再現精度が高いことを踏まえると，**図-4** の赤枠に示す残流域からの流入流量が適切に評価できていないためと考えられる．伊田観測所の 7 月 14 日 9~15 時において，RunA が水位を過大に評価した理由は，この時間帯では伊田観測所に比べ，添田観測所での観測流量が上回っていることから，伊田，添田間の可動堰によって洪水が貯留されたためと考えられる．

図-8 は，彦山川について解析最大水位と痕跡水位の比較を行ったものである．これらから，RunA，B ともに，(1)痕跡水位を概ね再現していること，(2)距離標 10.6km-12.4km，17.2km において，解析最大水位を過小に評価していること，などが確認できる．本解析では堰の可動部を考慮していないため，ピーク時の高柳堰や新地堰，丹波堰の状況が適切に再現されておらず，上記区間の解析最大水位を過小に評価したと考えられる．

5.　おわりに

本研究は，水位を境界条件とした平面 2 次元解析法を新たに提案し，堰を超える流れの実験結果および彦山川での出水に適用し，その予測精度について検討した．その結果，水位を境界条件とした本解析は，(1)堰を超える流れの水面形と流量および，(2)実河川での流量・水位ハイドログラフ，痕跡水位を十分な精度で再現できることが確認された．流量の予測精度は河道内構造物や底面粗度によるエネルギー損失の影響を受けることから，本解析法は河道内の抵抗把握にも有用と考えられる．この点について，今後検討したいと考えている．

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．本研究を実施するに当たり，遠賀川河川事務所

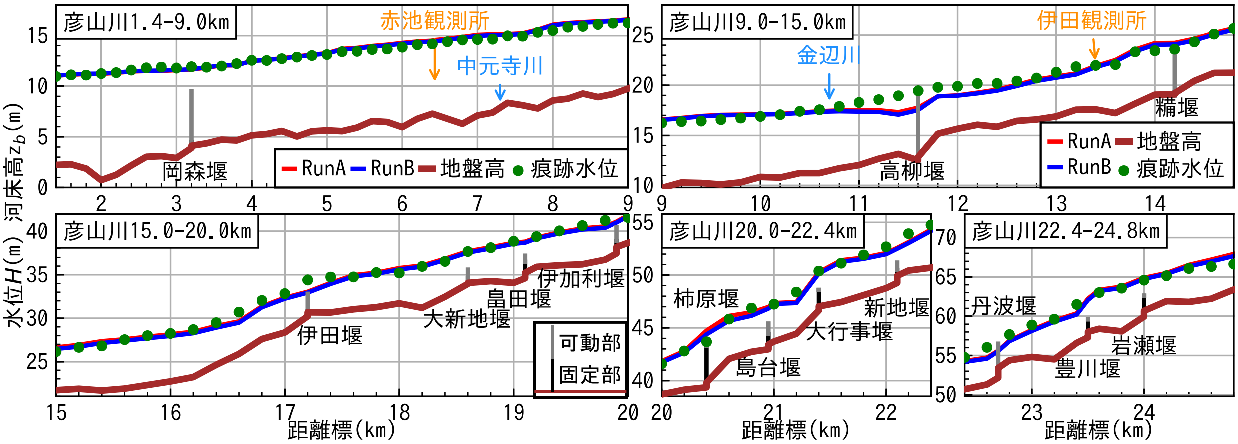

図-8　彦山川の痕跡水位と最大解析水位との比較

の関係者各位にはデータの提供など多大な協力を得た．ここに記して感謝の意を表します．

参考文献

1) 消防庁災害対策本部：平成 29 年 6 月 30 日からの梅雨前線に伴う大雨及び台風 3 号の被害状況及び消防機関等の対応状況について(第 68 報)，http://www.fdma.go.jp/bn/【第 68 報】6 月 30 日からの大雨及び台風 3 号の被害状況等.pdf，2017.
2) 国土交通省NETIS；通信ルートを自動的に組み換える無線通信を用いた水位センシングシステム，http://www.netis.mlit.go.jp/NetisRev/Search/NtDetail1.asp?REG_NO=QS-090024，2017.
3) 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.511-516，2011.
4) 渡邊明英，見上哲章，小島崇，松延和彦，鈴田裕三，富澤慎二郎：平面2次元流解析とアジョイント法に基づいた点観測の水位情報に対する縦断水面形時間変化の同化手法の検討，河川技術論文集，第23巻，pp.197-202，2017.
5) 国土交通省：河川砂防技術基準調査編，http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/gijutsu/gijutsukijunn/chousa/pdf/00.pdf，2012.
6) 福岡捷二，渡辺明英，原俊彦，秋山正人：水面形の時間変化と非定常二次元解析を用いた洪水流量ハイドログラフと貯流量の高精度推算，土木学会論文集，No.761，II-67，pp.45-56，2004.
7) 重枝未玲，秋山壽一郎，阿部琢哉，田口英司：水位を境界条件とした1次元不定流解析法と水面形を与条件とした流量・粗度係数の推定法~矩形一様断面水路を対象として~，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.73，No4，pp.655- 660，2017.
8) 重枝未玲，秋山壽一郎，大久保剛貴，中木翔也：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，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.73, No.4，pp.1423- 1428，2017.
9) 重枝未玲，秋山壽一郎，大久保剛貴，中木翔也：橋梁を簡易的に考慮した山国川流域の洪水氾濫解析，河川技術論文集，第23巻，pp.13-18，2017.
10) Roe, P. L.: Approximate Riemann solvers, parameter vectors and difference schemes, *Journal of Computational Physics*, Vol. 43, pp. 357-372, 1981.
11) Fritsch, F. N. and Carlson, R. E.: Monotone Piecewise Cubic Interpolation, *SIAM Journal on Numerical Analysis*, Vol.17(2), pp.238-246, 1980.
12) Parks, T. W. and Burrus, C. S.: Digital Filter Design, *John Wiley & Sons*, p.368, 1987.
13) ディテクト：Flownizer2D User's Manual，p.136，2012.
14) 椿東一郎：基礎土木工学全書6　水理学I，森北出版，p.208，1973.

(2017. 9. 29 受付)

TWO-DIMENSIONAL FLOOD FLOW ANALYSES USING WATER LEVEL HYDROGRAPHS AS BOUNDARY CONDITIONS

Mirei SHIGE-EDA, Juichiro AKIYAMA, Kouta OKUBO and Haruki NAKASHIMA

A numerical method for two-dimensional flood flow analysis using water level hydrographs as boundary conditions was proposed. The method was verified against experiments of unsteady flow over the weir. It showed that the method can reproduce observed water surface profile and discharge hydrograph and prediction accuracy of discharge is affected by prediction accuracy of energy loss by river crossing structures or bottom friction. The model was also verified against observed water level and flood mark on the flood event in the Hikosan River. It showed that the proposed model can reproduce the behavior of flood flows in the Hikosan River with reasonable accuracy.