

# HLLC法による彦山川の 平面2次元洪水流解析とFDS法との比較

## FLOOD FLOWS ANALYSIS IN THE HIKOSAN RIVER BASIN BY TWO-DIMENSIONAL NUMERICAL MODEL BASED ON HLLC SOLVER AND COMPARISON WITH FDS SOLVER

重枝未玲<sup>1</sup>・秋山壽一郎<sup>2</sup>・坂本洋<sup>3</sup>・大久保剛貴<sup>4</sup>・中木翔也<sup>4</sup>  
Mirei SHIGE-EDA, Juichiro AKIYAMA, Hiroshi SAKAMOTO,  
Kouta OKUBO and Syouya NAKAKI

<sup>1</sup>正会員 博士(工) 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)

<sup>2</sup>フェロー会員 Ph.D. 九州工業大学大学院教授 工学研究院建設社会工学研究系 (同上)

<sup>3</sup>会員 (株) 建設技術研究所 東京本社河川部 (〒330-0071さいたま市浦和区上木崎1-14-6)  
九州工業大学大学院 工学研究科建設社会工学専攻博士後期課程

<sup>4</sup>学生会員 九州工業大学 工学部建設社会工学科 (同上)

Flood flows analysis in the Hikosan river basin in July 2012 were performed by numerical models for the 2D unsteady free-surface flow based on HLLC(Harten-Lax-van Leer and Contact). A new procedure for a dry/wet boundary over a topography is incorporated into the model based on HLLC solver. The HLLC model was verified against the observed water level. The computation accuracy and speed were compared between HLLC model and FDS(Flux-Difference Splitting) model. It shows that (1) the HLLC model reproduce the behavior of flood flows with reasonable accuracy, and that (2) the calculation efficiency is high compared with FDS model, and that (3) the treatment of a dry/wet boundary needs to be improved for the HLLC model to conserve the mass.

**Key Words :** two-dimensional numerical model, flood flow, Harten-Lax-van Leer and Contact solver, flux-difference splitting solver, the Hikosan river

### 1. はじめに

近年、観測史上最大を超える豪雨が頻発し、甚大な被害が生じている。地球温暖化に伴う気象変動により、年最大日雨量が増大することが予測<sup>1)</sup>されており、今後、観測史上最大の豪雨が発生する可能性はますます高くなると考えられる。このような自然環境の変化とともに、社会的背景から、これまでの河道整備と維持管理による防災に加え、計画を上回る外力に対する減災対策がますます重要になってきている。

このような減災対策を講じるうえで、任意の豪雨外力に対して、河道内水位がどのように変化するかを把握することが不可欠である。そのためには、流域からの雨水の流出プロセスや、その結果によって生じる洪水プロセスを予測できる数値モデルが不可欠である。そのため、降雨を外力として河道内の洪水流の水位や流量の予測を目的とした様々な数値モデルが構築されている<sup>2),3),4),5),6)</sup>。

このような数値モデルに用いられる数値解析手法の中で、非構造格子、有限体積法、流束差分法(FDS法)<sup>7)</sup>は、

河道の洪水<sup>8)</sup>だけでなく、分派河川<sup>9)</sup>への分派流量、遊水地への分派流量<sup>9)</sup>、破堤部からの氾濫流量<sup>10)</sup>をも十分な精度で予測できる有用な手法の一つであることが明らかになっている。このようにFDS法は十分な精度を有した手法であるが、数値流束を求める際に流束ヤコビアン<sup>11)</sup>の固有ベクトルを求める必要<sup>7)</sup>があるため、多くの計算時間が必要となる。一方で、FDS法<sup>7)</sup>のような固有ベクトルを必要とせず、より簡易的に数値流束を求めることが可能なHLLC(Harten-Lax-van Leer and Contact)法<sup>11)</sup>を用いた数値モデルの開発も行われているが、ドライからウェットあるいはその逆の状態となる河床の取扱いが組み込まれていないため、実河川への適用性については十分には検討されているわけではない。

本研究は、以上のような背景を踏まえ、流域と河道特性を踏まえた上で、降雨外力から本川および支川の水位ハイドログラフなどの洪水流の予測を行なうことが可能な「分布型流出解析・平面2次元洪水追跡モデル」の開発を最終的な目的としたものである。ここでは、著者らの開発したHLLC法に基づく平面2次元モデル<sup>11)</sup>にドライ・ウェット状態となる河床の取扱いを組み込んだ新た

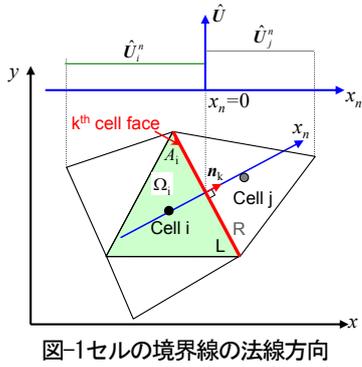


図-1セルの境界線の法線方向

なモデルを構築するとともに、2012年九州北部豪雨時の彦山川流域を対象に、分布型流出解析と同モデルとFDSを用いた平面2次元洪水追跡を行い、同モデルの洪水流への適用性について検討した。

## 2. HLLC法を用いた平面2次元自由表面流モデルの概要

本研究で実施した分布型流出解析・平面2次元洪水追跡は、①「セル分布型流出解析モデル」で、流域の雨水の挙動を予測し、②「平面2次元自由表面流モデル」で河道の洪水追跡を行う。①では降雨を入力条件として河道への流入流量が、②では①で得られた流量を境界条件あるいは内部境界条件として与えることで、任意の地点での水位および流量ハイドログラフを得ることができる。

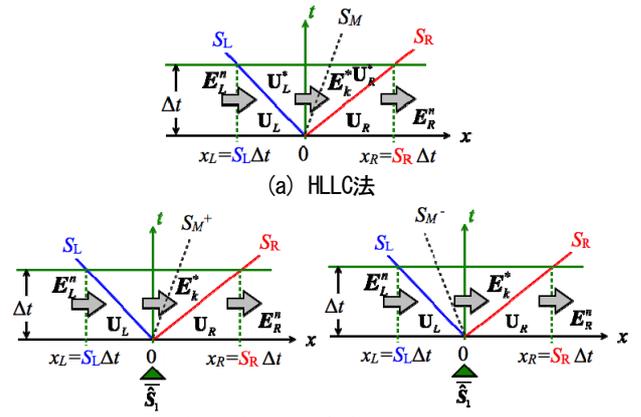
本研究では、平面2次元自由表面流モデルとして、(1) FUHLLCS-2DF モデル (Finite volume method on Unstructured grid using HLLC numerical flux with Source term for 2D Free-surface flows)<sup>11)</sup> をベースに、数値流束の取扱いの改良とドライ・ウェット条件を組み込んだ新たなモデルと(2) PSA-FUF-2DFモデル(A Parallelized Spatial Averaged Finite volume method on Unstructured grid using FDS technique for 2D Free-surface flows)<sup>9)</sup>を用いた。PSA-FUF-2DFモデルではこれまでのモデルと同様であるので、以下では、ドライ・ウェット条件を組み込んだFUHLLCS-2DFモデルの概要について述べる。

### (1) 基礎方程式

FUHLLCS-2DFモデルの基礎方程式は、式(1)の2次元浅水流方程式である。

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

$\mathbf{U} = (h, uh, vh)^T$ ;  $\mathbf{E} = (uh, u^2h + 1/2gh^2, uvh)^T$ ;  
 $\mathbf{F} = (vh, uvh, v^2h + 1/2gh^2)^T$ ;  $\mathbf{S}_1 = (0, gh \partial z_b / \partial x, gh \partial z_b / \partial y)^T$ ;  
 $\mathbf{S}_2 = (0, gh S_{fx}, gh S_{fy})^T$ ;  $\mathbf{S}_3 = (q_r, 0, 0)^T$   
 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、 $\mathbf{S}_1$ =河床勾配ベクトル、 $\mathbf{S}_2$ =摩擦勾配ベクトル、 $\mathbf{S}_3$ =発生項・消滅項ベクトル、 $h$ =水深、 $u$ 、 $v$ =x、y方向の流速、 $g$ =重力加速度、 $z_b$ =河床高、 $S_{fx}$ 、 $S_{fy}$ =x、y方向



(a) HLLC法  
(b) 河床勾配を考慮したHLLC法  
図-2 HLLCと河床勾配を考慮したHLLCの数値流束

の摩擦勾配、 $q_r$ =単位面積当りの流入流量(-:流入、+:流出)である。摩擦勾配はManningの公式を用いて計算される。

図-1に示すセルの境界線の法線方向 $x_n$ に、式(1)の2次元浅水流方程式を回転させると、式(2)の $x_n$ に対する1次元浅水流方程式が得られる。

$$\frac{\partial \hat{\mathbf{U}}}{\partial t} + \frac{\partial \hat{\mathbf{E}}}{\partial x_n} + \hat{\mathbf{S}}_1 + \hat{\mathbf{S}}_2 + \hat{\mathbf{S}}_3 = 0 \quad (2)$$

$$\hat{\mathbf{U}} = \mathbf{T} \cdot \mathbf{U} = (h, u_n, h, u, h);$$

$$\hat{\mathbf{E}} = \hat{\mathbf{E}}(\hat{\mathbf{U}}) = (u_n h, u_n^2 h + 1/2gh^2, u_n u, h) = \mathbf{T} \cdot (\mathbf{E} \cdot \mathbf{n}_x + \mathbf{F} \cdot \mathbf{n}_y);$$

$$\hat{\mathbf{S}}_1 = \mathbf{T} \cdot \mathbf{S}_1 = (0, gh \partial z_b / \partial x_n, 0);$$

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

ここに、 $u_n = x_n$ 方向の流速(= $u_n x + v_n y$ )、 $u_r = x_n$ に垂直な方向の流速(= $-u_n y + v_n x$ )、 $\mathbf{T}$ =式(3)の回転行列、 $\mathbf{T}^{-1} = \mathbf{T}$ の逆行列である。

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & n_x & n_y \\ 0 & -n_y & n_x \end{pmatrix}, \mathbf{T}^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & n_x & -n_y \\ 0 & n_y & n_x \end{pmatrix} \quad (3)$$

### (2) 数値解法

#### a) 有限体積法

計算領域を分割した微小領域セル $i$ の検査体積 $\Omega_i$ とし、時間積分にEulerの陽解法を、空間積分に有限体積法を用いて式(2)を離散化すると式(4)が得られる。

$$\mathbf{U}_i^{t+\Delta t} = \frac{\left( \mathbf{U}_i^t - \frac{\Delta t}{A_i} \sum_{k=1}^{N_e} (\mathbf{T}^{-1} \cdot \hat{\mathbf{E}}^*)_{k} dL_k - \frac{\Delta t}{A_i} \int_V (\mathbf{T}^{-1} \cdot \hat{\mathbf{S}}_1) dV - \Delta t \theta \mathbf{S}_{2i} - \Delta t \mathbf{S}_{3i} \right)}{1 + (1-\theta) \Delta t \mathbf{S}_{2i} / \mathbf{U}_i^t} \quad (4)$$

ここに、 $\mathbf{U}_i$ =セル $i$ での $\mathbf{U}$ の平均値、 $V_i$ =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、 $N_e$ =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、 $(\mathbf{T}^{-1} \cdot \hat{\mathbf{E}}^*)_{k}$ = $k$ 番目のセル境界線を流入出する数値流束、 $\mathbf{S}_{2i}$ =セル $i$ での $\mathbf{S}_2$ の平均値である。 $(\mathbf{T}^{-1} \cdot \hat{\mathbf{E}}^*)_{k}$ は数値流束であり、 $x_n$ 方向の一次元の数値流束 $\hat{\mathbf{E}}^*$ を $\mathbf{T}$ の逆行列 $\mathbf{T}^{-1}$ で変換することで算定する。



図-3 彦山川流域の概要

### b) HLLC法に基づく数値流束

FUHLCS-2DF モデルの数値流束は、式(5)の HLLC 法に基づく数値流束である。この数値流束は、図-2 に示すように、セル境界線の L 側と R 側の特性速度  $S_L (=u_n - c)$ ,  $S_R (=u_n + c)$  と中間の特性速度  $S_M = u_n$  に囲まれた領域、0 と  $S_L$  あるいは  $S_R$  に囲まれた領域とにわけ、それぞれの領域で、保存量ベクトル  $\hat{U}$ , 流速ベクトル  $\hat{E}$  を一定と仮定し、 $\hat{E}_R - \hat{E}_L = S_a (U_R - U_L)$  の関係を適用することで得ることができる。ここに、 $c = \text{波速} (=gh)^{0.5}$  である。なお、射流の場合には風上側の諸量を用いる。

$$\textcircled{1} S_L \geq 0 : \hat{E}_k^* = \hat{E}_L, \quad \textcircled{2} S_R \leq 0 \text{ の場合} : \hat{E}_k^* = \hat{E}_R \quad (5)$$

③  $S_L < 0 < S_R$  の場合 :

$$S_M > 0 \text{ の場合} : \hat{E}_k^* = \hat{E}_L + S_L (\hat{U}_L^* - \hat{U}_L)$$

$$S_M \leq 0 \text{ の場合} : \hat{E}_k^* = \hat{E}_R + S_R (\hat{U}_R^* - \hat{U}_R)$$

ここに、 $S_M =$  中間波の特性速度、 $\hat{U}^*$  は中間状態での保存量ベクトルある。河床勾配等の発生項がある場合、式(5)の  $S_M$  と  $\hat{U}^*$  がその影響を受け、式(5)は式(6)のようになる。

$$\textcircled{1} S_L \geq 0 : \hat{E}_k^* = \hat{E}_L, \quad \textcircled{2} S_R \leq 0 \text{ の場合} : \hat{E}_k^* = \hat{E}_R \quad (6)$$

③  $S_L < 0 < S_R$  の場合 :

$$S_M^+ > 0 \text{ の場合} : \hat{E}_k^* = \hat{E}_L + S_L (\hat{U}_L^{*+} - \hat{U}_L)$$

$$S_M^- \leq 0 \text{ の場合} : \hat{E}_k^* = \hat{E}_R + S_R (\hat{U}_R^{*-} - \hat{U}_R)$$

ここに、中間波の特性速度  $S_M$  の上付の +, - はそれぞれ正負の速度であることを表しており、その評価について後述する。また、 $\hat{U}^*$  はそれぞれ、河床勾配の影響を受け次式のように表される。

$$\hat{U}_L^{*-} = \hat{U}_R^{*+} - \bar{G}_1^+; \quad \hat{U}_R^{*+} = \hat{U}_L^{*+} + \bar{G}_1^- \quad (7)$$

式中の記号の定義は以下の通りである。

$$\begin{aligned} \bar{G}_1^+ &= \frac{\tilde{S}_2}{\tilde{\lambda}_L \tilde{\lambda}_R} (1, 0, u_{nL})^T; \quad \bar{G}_1^- = \frac{\tilde{S}_2}{\tilde{\lambda}_L \tilde{\lambda}_R} (1, 0, u_{nR})^T; \quad \tilde{S}_2 = g\tilde{h}(z_{bR} - z_{bL}) \\ \hat{U}_R^{*+} &= h_R^+ (1 \quad S_M^+ \quad u_{nL})^T; \quad \hat{U}_L^{*-} = h_L^- (1 \quad S_M^- \quad u_{nR})^T \quad (8) \\ h_R^+ &= \frac{h_L (u_{nL} - S_L) - S_L \bar{G}_1^+}{S_M^+ - S_L}; \quad h_L^- = \frac{h_R (u_{nR} - S_R) + S_R \bar{G}_1^-}{S_M^- - S_R} \end{aligned}$$

である。ここに、 $\tilde{\lambda}_L = \tilde{u}_n - \sqrt{g\tilde{h}}$ ,  $\tilde{\lambda}_R = \tilde{u}_n + \sqrt{g\tilde{h}}$  であり、式中の  $\sim$  は、式(9)の Roe の平均を用いた諸量であることを表している。

$$\tilde{h} = \frac{h_R + h_L}{2}; \quad \tilde{u}_n = \frac{u_{nR} \sqrt{h_R} + u_{nL} \sqrt{h_L}}{\sqrt{h_R} + \sqrt{h_L}}; \quad \tilde{u}_i = \frac{u_{iR} \sqrt{h_R} + u_{iL} \sqrt{h_L}}{\sqrt{h_R} + \sqrt{h_L}} \quad (9)$$

また、発生項の離散化は式(10)のように行う。

$$-\frac{\Delta t}{A_i} \int_V (\mathbf{T}^{-1} \cdot \hat{S}_i) dV = -\frac{\Delta t}{A_i} \sum_{k=1}^N (\mathbf{T}_k^{-1} \cdot \hat{S}_{iL}^*) dL_k \quad (10)$$

発生項に関する数値流束については、式(11)で表される。

$$\begin{aligned} -\frac{\Delta t}{A_i} \int_V (\mathbf{T}^{-1} \cdot \hat{S}_i) dV &= -\frac{\Delta t}{A_i} \sum_{k=1}^N (\mathbf{T}_k^{-1} \cdot \hat{S}_{iL}^*) dL_k \\ \textcircled{1} S_L \geq 0, \textcircled{2} S_R \leq 0 \text{ の場合} : & \quad (11) \\ \hat{S}_{iL}^{*HLLC} &= \hat{S}_{iL}^*, \quad \hat{S}_{iR}^{*HLLC} = \hat{S}_{iR}^* \\ \textcircled{3} S_L < 0 < S_R \text{ の場合} : & \\ \hat{S}_{iL1,2}^{*HLLC} &= \hat{S}_{iL1,2}^*, \quad \hat{S}_{iR1,2}^{*HLLC} = \hat{S}_{iR1,2}^* \\ \hat{S}_{iL3}^{*HLLC} &= 0, \quad \hat{S}_{iR3}^{*HLLC} = 0 \end{aligned}$$

### c) 特性速度

特性速度  $S_L$  と  $S_R$  および  $S_M^{\pm}$  は次のように評価した。  $S_L$  と  $S_R$  については、次式でエントロピー補正を考慮した式(12)より求めた。

$$\begin{aligned} S_L &= \begin{cases} \tilde{\lambda}_L & \text{if } |\tilde{\lambda}_L| \geq \delta_L/2 \\ \min(\tilde{\lambda}_L, \tilde{\lambda}_L^-, \tilde{\lambda}_R^-) & \text{if } |\tilde{\lambda}_L| < \delta_L/2 \end{cases} \\ S_R &= \begin{cases} \tilde{\lambda}_R & \text{if } |\tilde{\lambda}_R| \geq \delta_R/2 \\ \max(\tilde{\lambda}_R, \tilde{\lambda}_L^+, \tilde{\lambda}_R^+) & \text{if } |\tilde{\lambda}_R| < \delta_R/2 \end{cases} \quad (12) \\ \delta_L &= \max(0, 4(\lambda_{R-}^- - \lambda_{L-}^-)), \quad \delta_R = \max(0, 4(\lambda_{R+}^+ - \lambda_{L+}^+)) \end{aligned}$$

ここに、 $\lambda_{L\pm}^{\pm} = u_{nL} \pm \sqrt{gh_L}$ ,  $\lambda_{R\pm}^{\pm} = u_{nR} \pm \sqrt{gh_R}$  である。中間波の特性速度は、それぞれ式(13)で算定した。

$$\begin{aligned} S_M^+ &= \frac{S_L h_R (U_{nR} - S_R) - S_R h_L (U_{nL} - S_L) + S_R S_L \bar{G}_1^+}{h_R (U_{nR} - S_R) - h_L (U_{nL} - S_L) + S_L \bar{G}_1^+} \\ S_M^- &= \frac{S_L h_R (U_{nR} - S_R) - S_R h_L (U_{nL} - S_L) + S_R S_L \bar{G}_1^-}{h_R (U_{nR} - S_R) - h_L (U_{nL} - S_L) + S_R \bar{G}_1^-} \quad (13) \end{aligned}$$

### d) ドライ・ウェット状態の取扱い

水深  $h$  がドライベッド状態を表す水深の閾値  $h_v$  以下であるセルをドライセルと定義する。隣接セルの全てがドライセルである場合に完全ドライセル、隣接するセルのいずれかが水深  $h > h_v$  となる場合に部分ドライセルとする。完全ドライセルについては、 $h = h_v$ ,  $u = v = 0$  に設定する。部分ドライセルについては、式(8)の  $h_R^+$  と  $h_L^-$  が  $h_v$  よりも小さくならないように、式(8)の  $\bar{G}_1^+$ ,  $\bar{G}_1^-$  中の  $S_2$  を以下のように修正するとともに、水深が  $h_v$  以下となる部分ドラ

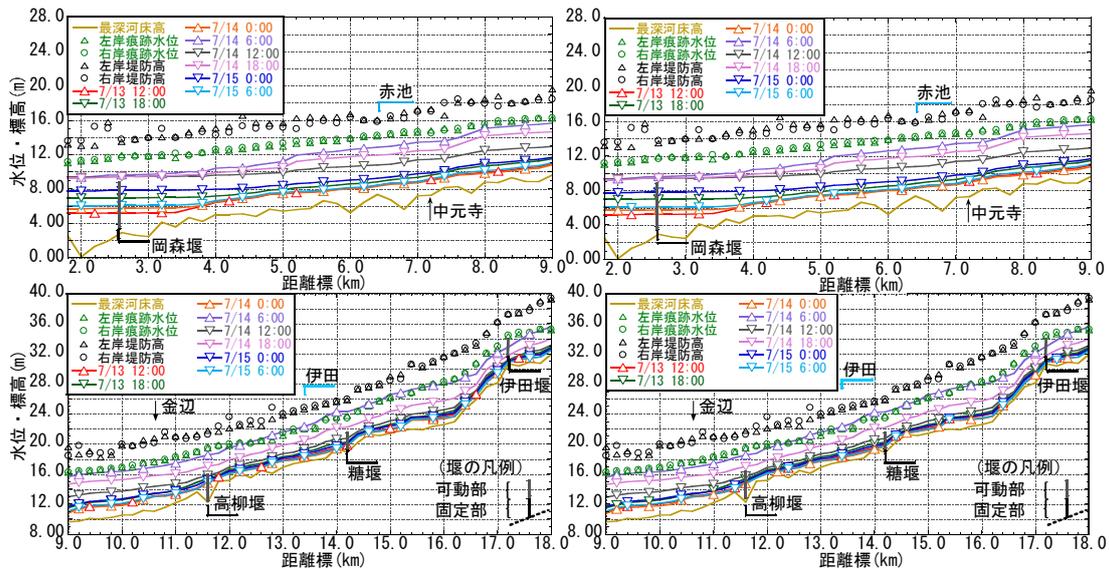


図-4 彦山川の1.8~9km及び9~18kmの水面形の経時変化(左: FUHLLCS-2DFモデル, 右: PSA-FUF-2DFモデル)

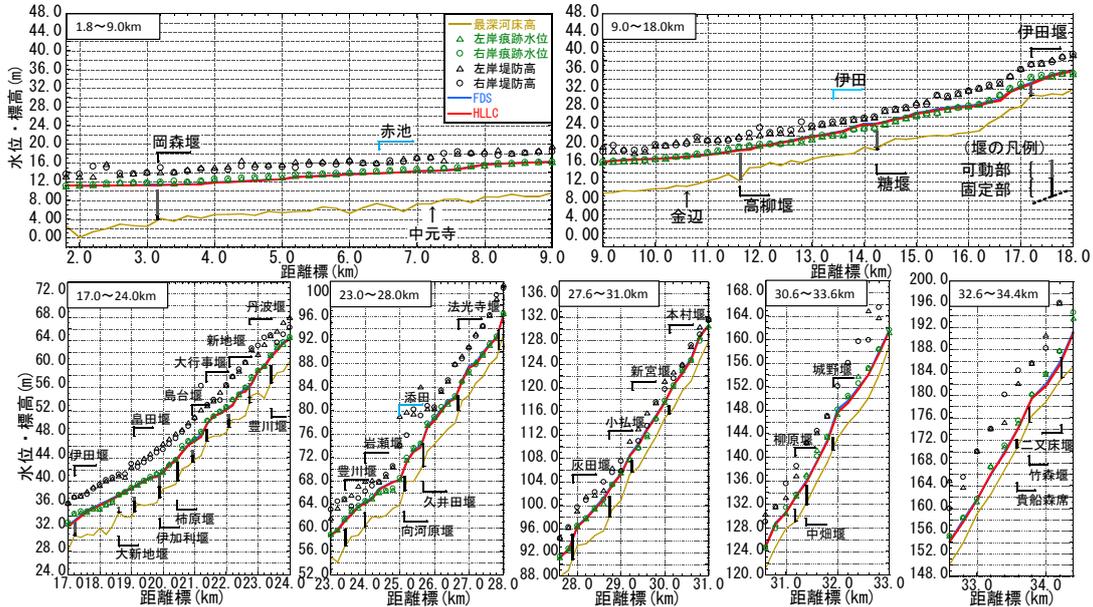


図-5 彦山川での痕迹水位と最大解析水位との比較

イセルのセル境界線の法線方向の流速を0とした。

①  $h_R > h_v$  の場合 :

$$\tilde{S}_2 = -\tilde{\lambda}_L \tilde{\lambda}_R \frac{h_R (S_R - u_{nR}) + h_L (S_L - u_{nL}) + h_v (S_R - S_L)}{S_L}$$

②  $h_L < h_v$  の場合 :

$$\tilde{S}_2 = -\tilde{\lambda}_L \tilde{\lambda}_R \frac{h_R (S_R - u_{nR}) + h_L (S_L - u_{nL}) + h_v (S_R - S_L)}{S_R}$$

なお、ウェットなセルがドライセルに遷移し完全ドライセルとなる場合、水深  $h < h_v$  となるセルが生じる。安定した計算を実施するため、このセルの水深を  $h = h_v$  とする。このようなセルが生じた場合に質量誤差が生じる。

### 3. 彦山川への適用

九州北部豪雨災害で被災した彦山川の出水に、FUHLLCS-2DFモデルとPSA-FUF-2DFモデルを適用し、

その予測精度の検証と、計算効率の比較を行った。なお、水位および流量の観測データは、国土交通省水文水質データベース<sup>13)</sup>から入手した。

#### (1) 解析条件の概要

彦山川は、一級河川遠賀川の支川であり、金辺川、中元寺川の支川が合流する。彦山川流域の概要および水位観測所を図-3に示す。解析対象河川は、図-3に示す彦山川、金辺川、中元寺川とした。

解析には、FUHLLCS-2DFモデルとPSA-FUF-2DFモデルを用いた。対象とした出水は、九州北部豪雨災害時の2012年7月13日から15日であり、解析開始時刻は、2012年7月13日午前10時とした。

河道を12区間に分割し、並列計算を行った。河道横断面図は、2010年のものを用いた。総メッシュ数は13,939個であった。粗度係数には計画粗度係数を用いた。上流端の境界条件には分布型流出解析モデルより算出した流

量を、下流端には中島観測所の実測水位を境界条件として与えた。クーラン数はいずれも0.40とした。平面2次元洪水追跡の解析データの作成方法の詳細については、参考文献<sup>12)</sup>に示す通りである。また、解析全体での質量誤差は、次式より求めた。ここにV=水の体積である。

$$MassError = \left| \frac{V_{初期値} + \sum (Q_{in} - Q_{out}) \Delta t - V_{初期値}}{V_{初期値}} \right| \times 100$$

彦山川には図-4に示すように堰が複数設置されているが、堰の多くは転倒堰であり出水時には転倒している。堰を考慮した解析には非常に細かなメッシュが必要となるため、堰の転倒時には洪水流に及ぼす影響が小さいと考え、計算効率の観点から本解析では堰を考慮せずに解析を実施した。なお、細かな計算メッシュを必要としない堰の簡易的な取扱いについては今後検討したいと考えている。

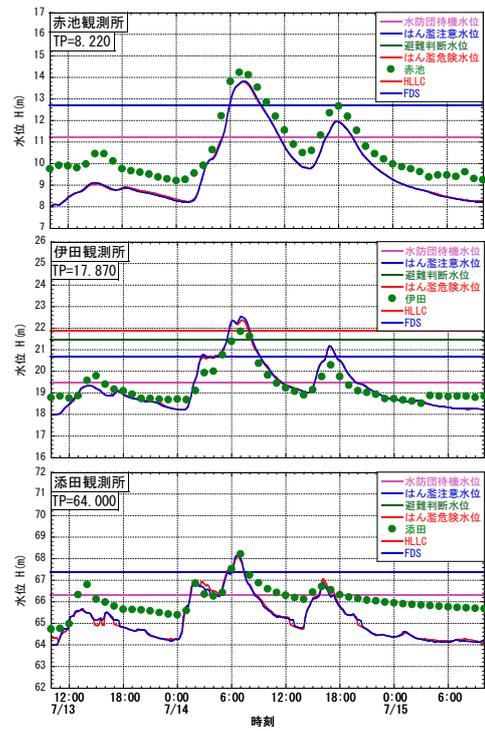
## (2) 結果と考察

図-4は、彦山川の1.8~9km及び9~18kmについて、両モデルの水面形の経時変化を示したものである。なお、ライン上の上向きの三角プロットは増水期の水面を、下向きのプロットは減水時の水面であることを表している。これらより、いずれのモデルについても、(1) 堰を考慮していないため、水位は堰高を下回ること、(2) 距離標5.0kmより上流側では水面はほぼ相似形を保って増水、減水すること、(3) 5.0kmより下流では下流端の水位の影響を受け、水面形は相似形ではないこと、などが確認できる。本解析は下流端に実測水位を与えているが、この区間は遠賀川本川との合流点であることから、河道の貯留効果により、このような水面形になったと考えられる。両モデルは、このような水面形変化を捉えている。

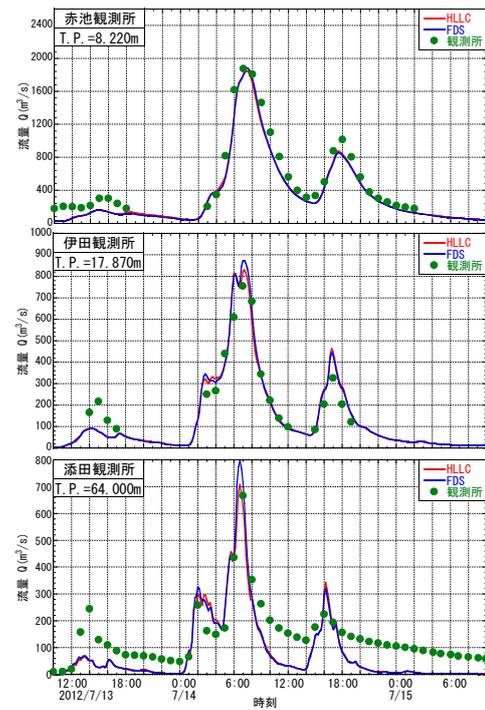
図-5は、彦山川での痕跡水位と最大解析水位との比較を行ったものである。これより、(1) いずれのモデルも痕跡水位を概ね再現できること、(2) 全体的な予測精度は同程度であること、(3) 堰周辺では再現精度が低いこと、(4) 両モデルを比較すると、同程度の精度であること、などが確認できる。

図-6は、彦山川の赤池、伊田、添田観測所での水位と流量ハイドログラフの比較を行ったものである。これらから、(1) いずれのモデルについても、水位および流量ハイドログラフが増減する時間やピークが発生する時間など、水位および流量ハイドログラフの波形を定性的には再現していること、(2) 伊田観測所では、いずれのモデルも水位および流量ハイドログラフを十分な精度で再現していること、(3) 赤池観測所の流量ハイドログラフは十分な精度で再現しているが、(4) 一方で、赤池観測所の水位および添田観測所の流量・水位ハイドログラフでは、伊田観測所に比べ再現精度が低いこと、(5) 両モデルを比較すると、同程度の精度であること、などが確認できる。

図-7は、赤池・伊田観測所について、解析結果および実測値より求めた水位と流量との関係を示したものである。これより、いずれのモデルも、(1) 伊田観測所では、



(a) 水位ハイドログラフ



(b) 流量ハイドログラフ

図-6 各観測所での水位・流量ハイドログラフの比較

水位と流量との関係はループを描かず貯留効果が少ないこと、一方で、(2) 赤池観測所では本川との合流の影響により、伊田観測所より、水位流量曲線はループを大きく描いていること、などの現象を捉えている。実測との比較に着目すると、(3) いずれのモデルも同程度の予測精度であること、などが確認できる。

実測値と差が生じた理由としては、赤池観測所では流量についてある程度予測していることから、堰の影響を考慮していないため、また、添田観測所では水位・流量

について予測できていないことから、堰の影響に加え流出解析による流量の予測精度が十分でないこと、などが考えられる。

計算効率については、同一コンピュータで実施した解析のCPUタイムを比較したところ、FUHLLCS-2DFモデルは、PSA-FUF-2DFモデルの1.45倍程度の計算速度を有することが確認された。

以上のことから、HLLC法に基づくFUHLLCS-2DFモデルは、FDS法に基づくPSA-FUF-2DFモデルと同程度の予測精度を有しており、計算効率が上回っていることが確認された。しかし、FUHLLCS-2DFモデルの質量誤差は解析全体を通じて0.25%程度、PSA-FUF-2DFモデルの0.06%に比べ、大きく上回っていた。これは、上述のように、河床のドライ・ウェット状態の変化により生じることから、この点については今後改善する必要があると考えられる。

#### 4. おわりに

本研究では、ドライ・ウェット状態となる河床の取扱いを組み込んだ新たなHLLC法に基づく平面2次元自由表面流モデルを構築するとともに、2012年九州北部豪雨時の彦山川流域を対象に、分布型流出解析と同モデルとFDSを用いた平面2次元洪水追跡を行い、同モデルの洪水流への適用性と予測精度の比較を行った。その結果、同モデルは、(1) 水位・流量および水位と流量との関係を十分な精度で再現できること、(2) FDS法に基づくモデルに比べ、計算効率が高いこと、(3) 一方で、質量誤差が大きく、ドライ・ウェット条件の取扱いについては改善が必要なこと、などが確認された。

**謝辞：**本研究を実施するに当たり、遠賀川河川事務所の関係各位にはデータの提供など多大な協力を得た。また、本研究では、科学研究費補助金若手研究B(課題番号：25820225、研究代表者：重枝未玲)の助成を受けた。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省：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 ～ ，  
[http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai\\_blog/shaseishin/kasenbunkakai/shouinikai/kikouhendou/pdf/1508\\_02\\_toushinonbun.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/kasenbunkakai/shouinikai/kikouhendou/pdf/1508_02_toushinonbun.pdf), 2015.
- 2) 小林健一郎，寶 馨，中北英一：全球気候モデル出力を用いた日本域の100年確率日降水量の将来予測，水工学論文集，第54巻，pp.223-228，2010.
- 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.S511-S516，2011.

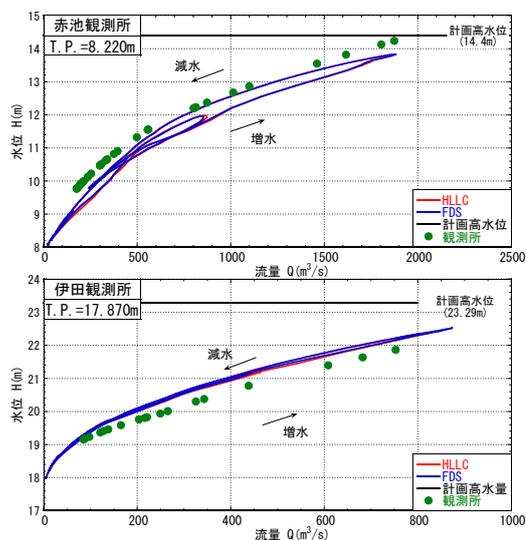


図-7 赤池・伊田での水位と流量との関係

- 4) 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.
- 5) 川池健司，中川一，馬場康之：平成18年7月豪雨災害時の川内川洪水解析と推込分水路の影響の検討，水工学論文集，第52巻，pp.811-816，2008.
- 6) 重枝未玲，秋山壽一郎，草野浩之，野村心平：高解像度風上解法を用いた遠賀川流域の分布型流出・平面2次元洪水追跡と改修効果の評価，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.68，No.4，pp.I\_1429-I\_1434，2012.
- 7) Roe, P. L.: Approximate Riemann solvers, parameter vectors and difference schemes, *Journal of Computational Physics*, Vol.43, pp.357-372, 1981.
- 8) 重枝未玲，朝位孝二，坂本 洋，長太茂樹，秋山壽一郎，樋口直樹，重岡広美，徳永智宏：大野川とその派川の乙津川を包括した平面2次元洪水解析と河道内樹木が乙津川への分流量に及ぼす影響，河川技術論文集，第12巻，pp.85-90，2006.
- 9) 秋山壽一郎，重枝未玲，田島瑞規：数値解析を用いた遊水地の洪水調節効果の評価 - 牟田辺遊水地を対象として - ，土木学会論文集B1(水工学)Vol.70，No.4，I\_847-I\_852，2014.
- 10) 秋山壽一郎，重枝未玲，松本創次郎，中上竜吾：複数箇所での氾濫・復流する洪水氾濫流の数値解析とその検証，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.71，No.4，I\_1477-I\_1482，2015.
- 11) 重枝未玲，秋山壽一郎，坂本 洋，野村心平：HLLとHLLC法を用いた平面2次元自由表面流モデルの構築と複雑な地形起伏を有する場での流れへの適用，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.69，No.4，I\_637-I\_642，2013.
- 12) 重枝未玲，秋山壽一郎，野村心平：実測水位に基づく分布型流出・平面2次元洪水追跡モデルのパラメータ最適化法，河川技術論文集，第18巻，pp.459-464，2012.
- 13) 国土交通省：水文水質データベース，<http://www.l.river.go.jp/>，2015.

(2015. 9. 30受付)