

河道特性を考慮した高計算効率な 洪水流数値モデルの構築と彦山川への適用

CONSTRUCTION OF QUASI TWO-DIMENSIONAL NUMERICAL MODEL FOR
FLOOD FLOWS AND FLOOD FLOWS ANALYSIS IN THE HIKOSAN RIVER

重枝未玲¹・秋山壽一郎²・Adelaida Castillo DURAN³・中木翔也⁴・大久保剛貴⁴
Mirei SHIGE-EDA, Juichiro AKIYAMA, Adelaida Castillo DURAN,
Syoyou NAKAKI and Kouta OKUBO

¹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)

²フェロー会員 Ph.D. 九州工業大学教授 (同上)

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後期課程 (同上)

⁴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)

Quasi two-dimensional numerical model for flood flows was constructed. The model was based on two-dimensional shallow water equations and the flux by the normal direction of the boundary of control volume was used to deal with flow in river network like a one-dimensional model. The model was also based on flux-difference splitting scheme. The model was verified against observed water level and flood mark on the flood event in the Hikosan River and was compared with numerical results by 2D flood flow model. It shows that the quasi-2d model can reproduce the behavior of flood flows in the Hikosan River with reasonable accuracy.

Key Words : *Quasi two-dimensional numerical model, flood flow, flux-difference splitting, river network, sink term*

1. はじめに

近年、わが国では、毎年のように過去に経験のないような豪雨による水害が生じている。このような豪雨は、世界規模の気候変動により増加することが予測されており、今後、水害が発生する頻度はますます高くなると考えられる。そのため、現在、将来激甚化する水災害の備えとして、ハードによる防災対策に加え、ソフトによる減災対策の検討が急務となっている¹⁾。防災・減災対策を講じるためには、複数の豪雨シナリオに対して、流域から河道へ流出した雨水が、河道特性や治水施設の影響を受けながら、洪水として河道を伝播するかを予測し、河道内水位の経時変化を的確に把握することが重要となる。

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や樹木や粗度による抵抗を適切に取り扱うことが不可欠である。実務の水位予測では、一般に準2次元解析²⁾が用いられる。これ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ず、また、痕跡水位に基づく、

樹木の混合係数や粗度係数の設定が必要になる。近年では、非定常準2次元解析モデル³⁾や平面2次元解析モデル^{4,5)}などの洪水追跡法が開発されており、貯留現象を取り扱うことができるモデルであれば、水面形状の実測値に基づき樹木繁茂状況に応じて樹木群透過係数と河床材料・状態から求まる粗度係数を設定することで、水位ハイドログラフを予測できること⁶⁾も明らかとなっている。さらに、近年では、粒子フィルタなどの統計的な手法を用い、1次元モデル⁶⁾や平面2次元モデル⁷⁾の粗度係数値のパラメータ値を実測水位ハイドログラフに基づき設定する手法も開発されている。このような解析結果を水理量や河床の状態を結びつけることで、粗度係数の設定に関する有用な情報を得ることができると考えられるが、そのためには、参考文献^{8,7)}に示されるように、多数の解析を実施する必要がある。

1次元モデルは計算効率が高いが、河道線形の変化等の平面形状を考慮できないため、そこから得られる粗度係数などの物理的な意味に疑問が残る。一方、平面2次元モデルは河道線形や粗度の空間分布を適切に取り扱うことができるが、計算コストがかかるため、解析対象領域が制限される。上記のような検討を行うためには、平

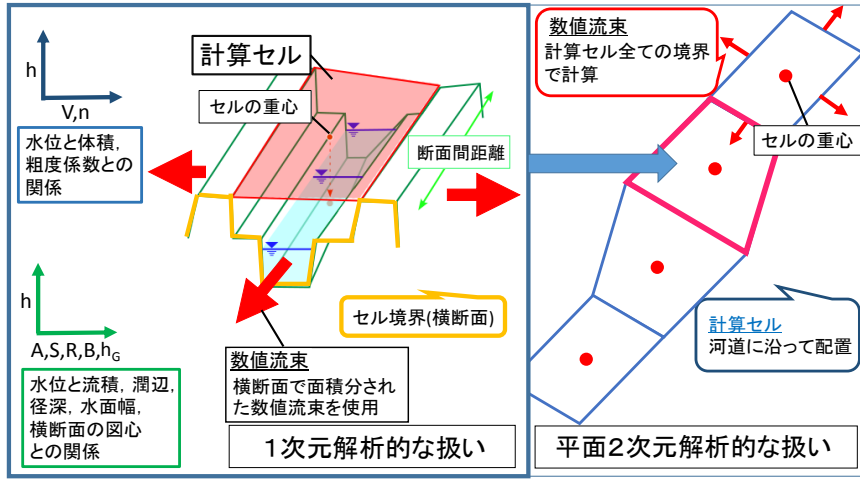


図-1 準平面2次元モデルの概念図

面2次元モデルのように、河道線形や粗度の空間分布を適切に取り扱え、かつ計算効率の高い数値モデルが必要と考えられる。

本研究は、以上の背景を踏まえ、河道特性を考慮でき、かつ高い計算効率が期待できる数値モデルの開発を行ったものである。ここでは、著者らが、圧力・自由表面流れを対象に開発した準平面2次元モデル⁸⁾をベースとして、河道へ適用可能なように改良することで、河道特性を考慮した高効率な洪水数値モデルを構築し、彦山川を対象に同モデルの再現性の検討、1次元洪水モデルおよび著者らが開発した平面2次元洪水モデル⁹⁾の解析結果との比較を行ったものである。

2. 準平面2次元洪水モデルの概要

本研究では、河道特性を考慮した高効率な洪水数値モデルとして、準平面2次元洪水モデルを構築した。同モデルは①計算セルを河道線形に沿って配列することで、平面2次元モデルのように河道特性を考慮し、②セル境界の数値流束には、横断面で面積分された数値流束を用いることで、1次元モデルのように高い計算効率で解析を行うことが可能なモデルである。同モデルでは、(1)河道線形に沿って計算セルを配置し、(2)計算セルをコントロールボリュームとして、計算セル境界の法線方向に対して、セル境界の横断面で面積分された数値流束を算定し、(3)全てのセル境界線に対して数値流束を線積分することで、計算セル内の体積、流速と体積との積を算定し、水深と流速の予測を行う。本モデルの概要を図-1に示す。以下では本モデルの概要について述べる。

(1) 基礎方程式

準平面2次元モデルの基礎方程式は、式(1)の2次元浅水方程式の積分形である。

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

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

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

$$\mathbf{S} = (0, -ghS_{0x} + ghS_{fx}, -ghS_{0y} + ghS_{fy})^T$$

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} =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、 S_{0x} 、 S_{0y} = x 、 y 方向の河床勾配、 z_b =河床高、 S_{fx} 、 S_{fy} = x 、 y 方向の摩擦勾配である。河床勾配は次式で計算される。

$$S_{0x} = -\partial z_b / \partial x, \quad S_{0y} = -\partial z_b / \partial y \quad (2)$$

摩擦勾配は、次式のManningの公式で計算される。

$$S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{R^{4/3}}, \quad S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{R^{4/3}} \quad (3)$$

ここに、 n =Manningの粗度係数、 R =径深である。

式(1)の浅水方程式を任意の検査領域 Ω で積分し、ガウスの発散定理を用いると、式(4)の積分形の浅水方程式が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \mathbf{U} d\Omega + \oint_{\partial\Omega} (\mathbf{f} \cdot \mathbf{n}) dL + \int_{\Omega} (\mathbf{S}) d\Omega = \mathbf{0} \quad (4)$$

ここに、 $\partial\Omega$ = 検査領域の境界線、 L = $\partial\Omega$ の長さ、 $\mathbf{f} \cdot \mathbf{n}$ =境界線 $\partial\Omega$ の法線方向を通過する流束ベクトル($=\mathbf{E} \cdot \mathbf{n}_x + \mathbf{F} \cdot \mathbf{n}_y$)、 $\mathbf{n}=(n_x, n_y)$ =境界線 $\partial\Omega$ の外向き単位法線ベクトルである。

(2) 数値解析法

河道横断面と堤防に挟まれる領域をセル i とし、このセルを検査領域 Ω_i として、式(4)を有限体積法に基づき離散化すると式(5)が得られる。

$$\mathbf{V}_i^{t+\Delta t} = \mathbf{V}_i^t - \Delta t \sum_{k=1}^{N_e} (\mathbf{f}_k^* \cdot \mathbf{n}_k) - \Delta t \int_{\Omega_i} (\mathbf{S}) d\Omega \quad (5)$$

$$\mathbf{V}_i = \int_{\Omega_i} \mathbf{U} d\Omega = (V_i \quad u_i V_i \quad v_i V_i)^T \quad (6)$$

ここに、 V_i =水の体積、 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, $(\mathbf{f}_n^* \cdot \mathbf{n})_k =$ k 番目のセル境界線を流入出する数値流束である. 数値流束には, 式(7)で表される流束差分法(FDS法)¹⁰を用いた.

$$(\mathbf{f}_n^* \cdot \mathbf{n})_k = \frac{1}{2} \left[(\mathbf{f}' \cdot \mathbf{n})_{kR} + (\mathbf{f}' \cdot \mathbf{n})_{kL} - \tilde{\mathbf{C}}_{nk} |\Delta \mathbf{V}'_k| \right] \quad (7)$$

$$(\mathbf{f}' \cdot \mathbf{n})_k = \mathbf{E}'_k \cdot n_x + \mathbf{F}'_k \cdot n_y$$

$$\mathbf{E}'_k = \begin{pmatrix} uA_k \\ uvA_k \end{pmatrix}; \mathbf{F}'_k = \begin{pmatrix} vA_k \\ v^2A_k + gF_{hk} \end{pmatrix}; \mathbf{V}'_k = \begin{pmatrix} A_k \\ vA_k \end{pmatrix}$$

ここに, $A = k$ 番目のセル境界線での流積, $F_h =$ 静水圧項, $\Delta(\circ) = (\circ)_R - (\circ)_L$ で定義されるオペレータ, $L, R =$ セル境界線の左側, 右側を示す添字, $\tilde{\mathbf{C}}_{nk} = k$ 番目のセル境界線における近似ヤコビアンである. 静水圧項については, 式(8)により求めた.

$$F_{hk} = \int_{z_b}^{h+z_b} (h+z_b-z)B(z)dz = Ah_G \quad (8)$$

ここに, $h_G =$ 水面から流積の図心位置までの深さである. 近似ヤコビアン $\tilde{\mathbf{C}}_{nk}$ の絶対値と $|\Delta \mathbf{V}'_k|$ との積は, 以下に示す流速と波速のRoeの平均値に基づき計算される. \sim はRoeの平均に基づき計算された諸量であることを表す.

$$|\tilde{\mathbf{C}}_{nk} \Delta \mathbf{V}'_k| = \sum_{j=1}^3 \left(|\tilde{\lambda}^j| |\alpha'^j \mathbf{e}^j| \right)_k$$

$$\tilde{\mathbf{u}} = \frac{\sqrt{A_{kL}} u_L + \sqrt{A_{kR}} u_R}{\sqrt{A_{kL}} + \sqrt{A_{kR}}}, \tilde{\mathbf{v}} = \frac{\sqrt{A_{kL}} v_L + \sqrt{A_{kR}} v_R}{\sqrt{A_{kL}} + \sqrt{A_{kR}}}, \tilde{\mathbf{c}} = \sqrt{2} \left(\frac{A_{kL}}{B_{kL}} + \frac{A_{kR}}{B_{kR}} \right)$$

$$\tilde{\lambda}^1 = \tilde{u} n_x + \tilde{v} n_y + \tilde{c}; \tilde{\lambda}^2 = \tilde{u} n_x + \tilde{v} n_y; \tilde{\lambda}^3 = \tilde{u} n_x + \tilde{v} n_y - \tilde{c}$$

$$\tilde{\mathbf{e}}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ \tilde{u} + \tilde{c} n_x \\ \tilde{v} + \tilde{c} n_y \end{pmatrix}; \tilde{\mathbf{e}}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ -\tilde{c} n_y \\ \tilde{c} n_x \end{pmatrix}; \tilde{\mathbf{e}}_3 = \begin{pmatrix} 1 \\ \tilde{u} - \tilde{c} n_x \\ \tilde{v} - \tilde{c} n_y \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \alpha^1 \\ \alpha^2 \\ \alpha^3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\Delta A_k}{2} + \frac{1}{2\tilde{c}} \{ \Delta(uA_k) n_x + \Delta(vA_k) n_y - (\tilde{u} n_x + \tilde{v} n_y) \Delta A_k \} \\ \frac{1}{\tilde{c}} \{ \Delta(vA_k) - \tilde{v} \Delta A_k \} n_x - \{ \Delta(uA_k) - \tilde{u} \Delta A_k \} n_y \\ \frac{\Delta A_k}{2} - \frac{1}{2\tilde{c}} \{ \Delta(uA_k) n_x + \Delta(vA_k) n_y - (\tilde{u} n_x + \tilde{v} n_y) \Delta A_k \} \end{pmatrix}$$

これらを用いると式(7)は式(9)のように変形できる.

$$(\mathbf{f}_n^* \cdot \mathbf{n})_k = \frac{1}{2} \left[(\mathbf{f}' \cdot \mathbf{n})_{kR} + (\mathbf{f}' \cdot \mathbf{n})_{kL} - \sum_{j=1}^3 \left(|\tilde{\lambda}^j| |\alpha^j \tilde{\mathbf{e}}^j| \right)_k \right] \quad (9)$$

ここで, エントロピー補正のために, 式(9)中の $|\tilde{\lambda}^j|$ を $\Psi(\tilde{\lambda}^j)$ に置き換える

$$(\mathbf{f}_n^* \cdot \mathbf{n})_k = \frac{1}{2} \left[(\mathbf{f}' \cdot \mathbf{n})_{kR} + (\mathbf{f}' \cdot \mathbf{n})_{kL} - \sum_{j=1}^3 \left(\Psi(\tilde{\lambda}^j) |\alpha^j \tilde{\mathbf{e}}^j| \right)_k \right] \quad (10)$$

ここに, $\Psi(\tilde{\lambda}^j)$ は式(11)で表される.

$$\Psi(\tilde{\lambda}^j) = \begin{cases} |\tilde{\lambda}^j| & \text{if } |\tilde{\lambda}^j| \geq \delta^j/2 \\ \tilde{\lambda}^{j2}/\delta^j + \delta^j/4 & \text{if } |\tilde{\lambda}^j| < \delta^j/2 \end{cases} \quad (11)$$

$$\delta^j = \max(0, 4\Delta \tilde{\lambda}^j)$$

河床勾配および摩擦勾配の離散化については,

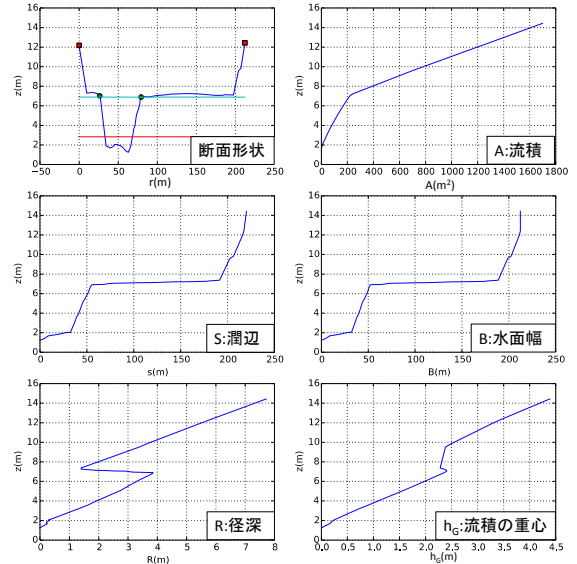


図-2 計算に用いた断面各諸量一例

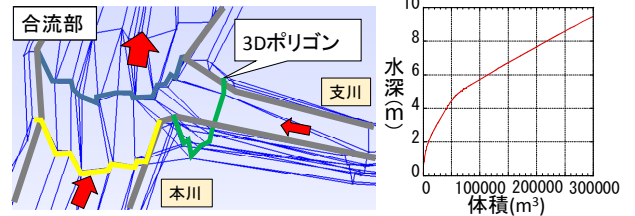


図-3 合流部の取り扱いとセルの体積と水深との関係

Burmudez and Vazquez¹¹⁾やBurguete and Garcia-Navarro¹²⁾と同様な方法に基づき, 流束ベクトルと同じ方法で風上化を行う. 発生消滅項に対応する数値流束 \mathbf{S}_k^* は, 風上化を行うことで $\mathbf{S}_k^* = \mathbf{S}_k^* + \mathbf{S}_k^{*+}$ に分けられる. 式(4)はセル i を対象とした式なので, \mathbf{S}_k^* の項のみがセル i に寄与する. 従って, 式(4)の $\int_{\Omega} \mathbf{S} d\Omega$ は次式で表される.

$$\int_{\Omega} \mathbf{S} d\Omega = \sum_{k=1}^{N_e} \mathbf{S}_k^{*+}, \quad \mathbf{S}_k^{*+} = \frac{1}{2} \left(\tilde{\mathbf{S}}' \pm \sum_{j=1}^3 \left(\frac{|\tilde{\lambda}^j|}{|\tilde{\lambda}^j|} \beta^j \tilde{\mathbf{e}}^j \right) \right) \quad (12)$$

$$\begin{pmatrix} \beta^1 \\ \beta^2 \\ \beta^3 \end{pmatrix} = \frac{1}{2\tilde{c}} \begin{pmatrix} S_1 \\ 0 \\ -S_1 \end{pmatrix}; \tilde{\mathbf{S}}' = \begin{pmatrix} 0 \\ S_1 n_x \\ S_1 n_y \end{pmatrix}; S_1 = g\tilde{A}_k \Delta z_b + g\tilde{A}_k S_{fn} d_n \quad (13)$$

ここに, $S_{fn} = S_{fn} n_x + S_{fn} n_y$, $d_n =$ セル中心間の距離である. 式(13)中の S_{fn} は, 次式を用いて評価した.

$$S_{fn} = \frac{n^2 \tilde{u}_n |u_{n \min}|}{R_{\max}^{4/3}} \quad (14)$$

$$\tilde{u}_n = \tilde{u} n_x + \tilde{v} n_y; u_{n \min} = \min(u_{nL}, u_{nR}); R_{\max} = \max(R_L, R_R)$$

また, 摩擦勾配により, 流速の符号が変化することを防ぐために, 摩擦勾配によるエネルギー損失 $S_{fn} d_n$ が速度水頭を超えることがないように, 式(15)のような処理を行った.

$$S_{fn} d_n = \begin{cases} S_{fn} d_n & \text{if } |S_{fn} d_n| < \frac{|\tilde{u}_n u_{n \min}|}{2g} \\ \frac{\tilde{u}_n |u_{n \min}|}{2g} & \text{if } |S_{fn} d_n| \geq \frac{|\tilde{u}_n u_{n \min}|}{2g} \end{cases} \quad (15)$$

3. 解析データの作成

準平面2次元解析には、図-1に示すように、①各断面間の流積 A 、潤辺 s 、径深 R 、水面幅 B 、水面からの流積の図心位置 h_G と水深 h との関係、②断面間を境界とするコントロールボリュームの平均河床高 z_{ba} 、最深河床高 z_{bd} に加え、コントロールボリューム内の水の体積 V 、粗度係数 n と水深 h との関係が必要となる。後述する彦山川では200m間隔の定期測量横断面図から、線形補間により50m間隔の横断面図を求め、これに基づき合流部を除く①と②のデータを作成した。

①の各断面での A 、 s 、 R 、 B 、 h_G と h との関係は、河道横断面図のデータから合緯距法や三平方の定理などを用いることで求めた。横断面形状、流積、潤辺、径深、水面幅、水面から流積の図心位置の計算結果の一例を図-2に示す。②各コントロールボリュームでの z_{ba} 、 z_{bd} 、 V 、 n については、合流部とそれ以外で次のように求めた。合流部以外では、 z_{ba} 、 z_{bd} は①で各断面の平均河床と最深河床を平均することで、 V は①で求めたコントロールボリューム上下流の断面での流積と距離から体積を算出することで、 n は計画粗度係数を与えることで求めた。合流部では、図-3に示すように、合流部を構成する各断面から3次元ポリゴンを作成し、このポリゴンから z_{ba} 、 z_{bd} 、 V を算出することで、 n は計画粗度係数を与えることで求めた。コントロールボリュームの体積と水深との関係の一例を図-3に示す。

4. 彦山川への適用

準平面2次元洪水流モデル、1次元洪水流モデル(dynamic waveモデル)、平面2次元洪水流モデル⁹⁾を、九州北部豪雨災害で被災した彦山川へ適用し、その予測精度の検証と比較を行った。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¹³⁾から入手した。また、準平面2次元洪水流モデルが矩形断面の非定常流の挙動を十分な精度で再現できることは、既存の研究⁹⁾から確認されているので参照されたい。

(1) 解析対象領域の概要

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327.6km²である。また、中元寺川や金辺川が支川として合流する。彦山川流域の概要および水位観測所を図-4に示す。

(2) 解析の概要

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13日15時から15日10時の出水を対象とした。粗度係数には計画粗度係数を用いた。上流端の境



図-4 彦山川流域の概要と水位観測所(背景はGoogle Map)

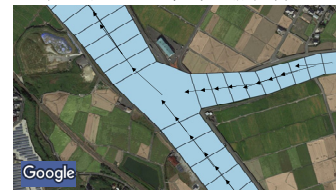


図-5 彦山川と金辺川周辺の流速ベクトル(背景はGoogle Map)

界条件には、分布型流出解析モデルより算出した流量を、下流端の境界条件には中島観測所の実測水位を与えた。また、彦山川には堰が複数設置されているが、本解析では堰を考慮せずに解析を実施した。非定常流解析における堰の取り扱いについては今後検討したいと考えている。

準平面2次元解析では、河床勾配の計算に平均河床高あるいは最深河床高を用いた解析を行った。これは、最深河床高で解析可能であれば、平均河床に比べデータに対する曖昧さを除くことができると考えられることから、用いる河床高の違いが解析結果に及ぼす影響について検討する目的で実施した。また、1次元解析および平面形状を考慮できる平面2次元解析結果との比較を行った。

(3) 結果と考察

図-5は、ピーク水位時の彦山川と中元寺川の合流点周辺の空間平均流速ベクトルの準平面2次元解析結果を示したものである。これより、(1)流速ベクトルは河道線形に沿って流れている様子、(2)合流部周辺ではその形状に沿って流れている様子、などが確認でき、準平面2次元解析の妥当性が窺える。

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、1次元、平面2次元洪水流解析の結果もあわせて示している。これより、(1)1次元、準平面2次元、平面2次元モデルのいずれも堰周辺で誤差が生じているものの、(2)それ以外の区間では痕跡水位や水位観測所のピーク水位を十分な精度で再現していること、などがわかる。河床高に平均河床と最深河床を用いた準平面2次元解析に着目すると、(1)最深河床および平均河床のいずれも河床勾

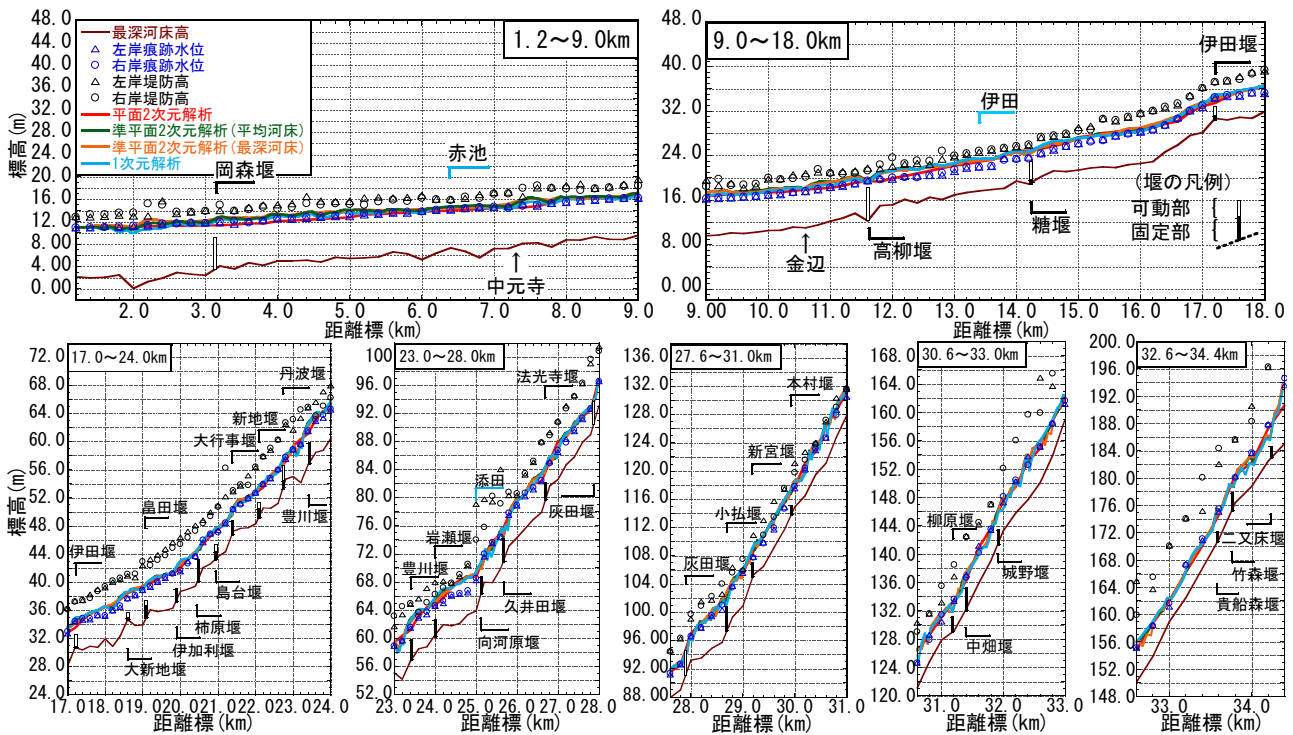


図-6 彦山川の痕跡水位と最大解析水位との比較

そのような区間を除いては、最深、平均河床を用いたいずれの解析も痕跡水位やピーク水位を概ね再現していること、などが確認できる。

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、いずれの解析結果についても、(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)平面2次元、準平面2次元、1次元解析結果を比較すると大きな差異はないが、伊田観測所では平面2次元モデルは他の解析結果に比べ実測値を再現しており、その予測精度が高いこと、などが確認できる。水位ハイドログラフについては、(1)いずれの解析もピークの時間にずれはあるものの、2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平面2次元解析は水位の概ね再現しているが、準平面2次元と1次元解析では減水期に水位を過大評価する傾向があること、(3)伊田、添田水位観測所では、平面2次元解析、準平面2次元解析は概ね一致しており、1次元解析モデルは減水期に水位を過大に評価する傾向にあること、また、同水位観測所周辺は、堰があるため、特に低水時にいずれのモデルも観測値との誤差が大きくなること、(4)準平面2次元解析は、1次元解析に比べ予測精度は高く、平面2次元解析より若干精度が劣ること、などが確認できる。

このように、準平面2次元解析は、平面2次元解析に比べ、解析精度は若干劣る。しかし、その計算効率は、1次元解析に比べ0.43倍程度、平面2次元解析に比べ1,200倍程度であった。これらを踏まえると、水位観測に基づ

く流出解析のパラメータ設定に本モデルを利用することが可能になると考えられる。

また、河床高に平均河床と最深河床を用いた準平面2次元解析に着目すると、いずれの水位観測所においても、若干の差異はあるものの最深河床および平均河床の解析結果に大きな差が生じていないことが確認できる。このように、準平面2次元解析では河床勾配の評価に、平均河床も最深河床のいずれを用いても予測精度に及ぼす影響は小さいことも確認できる。

以上から、本準平面2次元モデルは、堰周辺の流れの再現性については改善の余地が残るものの、複数の支川が合流する河川での水位ハイドログラフをある程度の精度で予測することが確認された。

5. おわりに

本研究では、平面2次元モデルのように河道の線形、その合流を一つのモデルとして取り扱え、河道を1次元モデルのように取り扱うことが可能な準平面2次元洪水流モデルを構築し、同モデルを彦山川へ適用するとともに、1次元・平面2次元洪水流モデルの解析結果との比較を行った。その結果、本準平面2次元洪水流モデルは、(1)1次元解析より予測精度は高く、平面2次元解析より予測精度は劣るものの、複数の支川が合流する河川での水位ハイドログラフを予測可能であること、(2)平面2次元解析に比べ、その計算効率は1,200倍程度であること、(3)河床高に平均河床高、最深河床高を用いても、同程度の精度で予測が可能なること、などが確認された。今後は、堰の取り扱いに加え、同モデルを用いた粗度係数等のパ

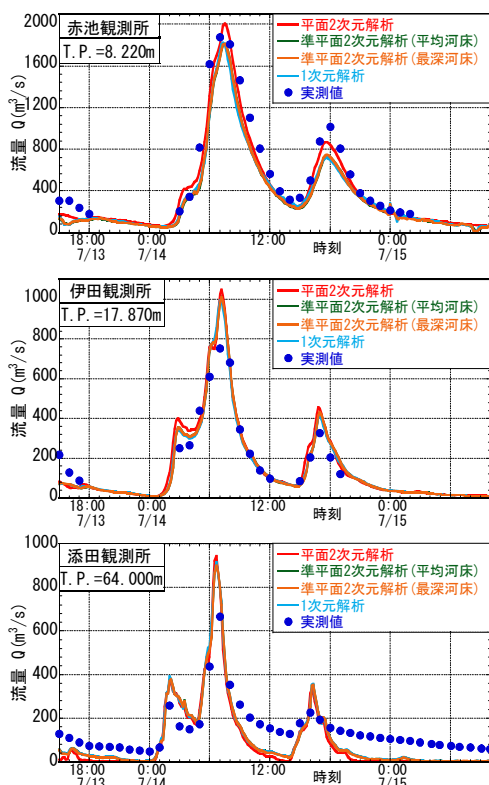


図-7 彦山川沿いの各観測所の流量ハイドログラフの比較

ラメータや流出解析のパラメータの設定法について検討したいと考えている。

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。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，http://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo03_hh_000870.html, 2015.
- 2) 国土技術研究センター(編)：河道計画検討の手引き，山海堂，2002.
- 3) 福岡捷二，佐藤宏明，出口桂輔：洪水流の非定常準二次元解析法の研究，土木学会論文集B, Vol.65, No.2, pp.95-105, 2009.
- 4) 福岡捷二，渡邊明英，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留量の高精度推算，土木学会論文集，No.761/II-67, pp.45-56, 2004.
- 5) 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.

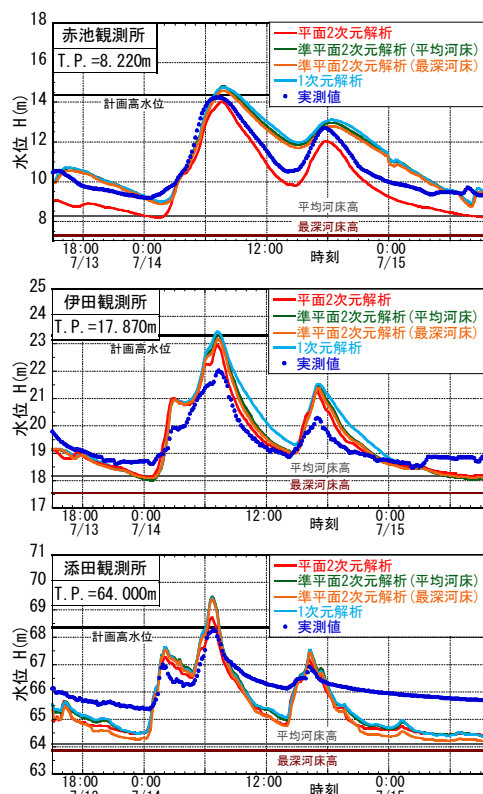


図-8 彦山川沿いの各観測所の水位ハイドログラフの比較

- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 重枝未玲，秋山壽一郎，川上優：圧力流・自由表面流混在流れの準平面2次元数値モデルの構築，土木学会論文集B1(水工学)Vol.71, No.4, I_571-I_576, 2015.
- 9) 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.
- 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) Burguet, J. and Garcia-Navarro, P.: Efficient construction of high-resolution TVD conservative schemes for equations with source terms: application to shallow water flows, *International journal for numerical methods in fluids*, Vol.37, pp.209-248, 2001.
- 13) 国土交通省：水文水質データベース，<http://www1.river.go.jp/>, 2015.