

近似リーマン解法を用いた準3次元洪水流モデルの開発と河川合流点流れへの適用

DEVELOPMENT OF QUASI-3D NUMERICAL MODEL FOR FLOOD FLOWS USING APPROXIMATE RIEMANN SOLVER AND ITS APPLICATION TO FLOWS IN A CONFLUENCE

坂本 洋¹・重枝未玲²・秋山壽一郎³・池田 寛⁴

Hiroshi SAKAMOTO, Mirei SHIGE-EDA, Juichiro AKIYAMA and Hiroshi IKEDA

¹正会員 (株) 建設技術研究所 九州支社河川部 (〒810-0041 福岡市中央区大名2-4-12 CTI福岡ビル)
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

²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)

³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)

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)

A quasi-three dimensional numerical model for flood flows was developed. The governing equation with the effect of secondary flow on the momentum equation was used in the model. The velocity profile of secondary flows proposed by Engelund(1974) was used. The model is based on finite volume method using HLL (Harten, Lax and van Leer(1983)) numerical flux, which is one of a Riemann solver. The model is verified against two experimental data of flows in curved channel and in river confluence. It shows that the model can reproduce the complex behavior of the flows with reasonable accuracy.

Key Words : Numerical model, quasi-3D, approximate Riemann solver, secondary flows, river confluence

1. はじめに

近年、治水と環境とが調和した河川管理・整備が求められている。そのため、河道の流れ・河床変動を把握することが不可欠であり、その予測を目的とした様々な解析手法が開発されている。

一般に、準2次元解析¹⁾が実務では用いられており、治水水面では重要な水位等の情報を提供している。さらには、環境や河床変動を含めた河道管理・整備には面的な流れ情報が不可欠であるため平面2次元解析²⁾や水深方向の流速情報等を提供可能な3次元モデル³⁾も開発されている。しかし、平面2次元モデルでは河川湾曲部や合流点で生じる3次元性の強い流れを再現することができない。また、3次元モデルではコンピュータ性能の限界により、解析対象領域の範囲が限られる。

そのため、近年、河川湾曲部や合流点で生じる3次元性の強い流れを簡易的に取り扱う準3次元モデルの開発が活発に行われている^{4),5),6),7)}。準3次元モデルには、(1)

水深方向の流速分布を仮定し水深積分することで、2次流の影響を運動方程式に考慮したモデル⁴⁾、(2) 渦度方程式を解くことで、2次流の発達・減衰までも考慮したモデル^{5),6)}、(3) 重みつき残差法を用いて水深積分を行うことで残差に関する新たな方程式を導き、これを解くことで2次流の影響を考慮したモデル⁷⁾が存在する。(3)のモデルについては実河川へ適用⁷⁾もなされている。さらには、乱流モデルの高度化を図ったモデル⁸⁾、浮遊砂の輸送を考慮したモデル⁹⁾、橋脚周りの馬蹄渦の予測を試みたモデル¹⁰⁾などの開発が行われている。

これらの数値解法に着目すると、いずれも直交座標、一般曲線座標に基づき構築されている^{4),5),6),7),8),9),10)}。直交座標、一般曲線座標ではいわゆる構造格子を用いる必要があり、合流点などの実河川への適用を考えると計算格子の配列に限界がある。一方で、非構造格子などの格子を用いることができれば、合流点などの複雑な河道形状も適切に再現することができる。そのためには、有限体積法に基づくモデルが不可欠である。有限体積法に基づく平面2次元モデルには参考文献^{2),11),12)}に示すようなモ

デルが開発されており、いずれのモデルも高精度高解像度な近似リーマン解法を用い、多くの流れ場に適用され、その予測精度が明らかとなっている。このようなモデルに2次流の影響を組み込むことで、より予測精度の高いモデルを構築できると考えられるが、そのようなモデルは存在しないのが実状である。

本研究は、以上のような背景を踏まえ、流れと河床変動の準3次元モデルの開発を最終的な目的としている。ここでは、その第一歩として、2次流の影響を考慮した基礎方程式を有限体積法に基づく近似リーマン解法を用いた離散化した流れの準3次元モデルを構築し、一樣湾曲流れと河川分流点の流れの予測精度を検証した。

2. モデルの概要

本研究では、Engelund¹³⁾の流速分布を用いて2次流の影響を考慮した浅水流方程式を近似リーマン解法により離散化することで、数値モデルを構築する。モデルの概要は次の通りである。

(1) 流速分布

図-1に示すように、主流および主流に垂直な方向を s 、 n 軸とし、それらの流速を u_s 、 u_n とする。 x 、 y 軸方向の流速 u 、 v を分解することで、次式のような u_s 、 u_n の式が得られる。

$$u = u_s \cos \theta - u_n \sin \theta, \quad v = u_s \sin \theta + u_n \cos \theta \quad (1)$$

$$u_s = U_s(s, n)\psi(\zeta), \quad u_n = A_n(s, n)f(\zeta) \quad (2)$$

ここに、 $\cos \theta = u/(u^2+v^2)^{0.5}$ 、 $\sin \theta = v/(u^2+v^2)^{0.5}$ 、 $U_s =$ 水深平均流速、 $\psi(\zeta) =$ 主流方向流速分布、 $f(\zeta) =$ 2次流の流速分布、 $\zeta = (z-z_b)/h$ 、 $z =$ 基準面からの高さ(鉛直上向きを正)、 $z_b =$ 水路床高である。また、式(2)中の A_n は2次流強度であり、次式で表される。

$$A_n = \frac{U_s h}{R_s}, \quad \frac{1}{R_s} = -\frac{1}{U_s} \left\{ U \frac{\partial \theta'}{\partial x} + V \frac{\partial \theta'}{\partial y} \right\} \quad (3)$$

ここに、 $h =$ 水深、 $R_s =$ 流線の曲率半径、 U 、 $V = x$ 、 y 軸方向の水深平均流速、 $\theta' = \tan^{-1}(V/U)$ である。

主流方向流速分布 $\psi(\zeta)$ 、2次流の流速分布 $f(\zeta)$ には、 ζ の基準面を底面に変換したEngelund¹³⁾の流速分布を用いた。

$$\psi(\zeta) = \frac{u_s}{U_s} = 1 - \frac{1}{2\alpha\phi} \left(\zeta^2 - 2\zeta + \frac{2}{3} \right) \quad (4)$$

$$f(\zeta) = \frac{u_n}{U_s} \frac{R_s}{h} = \frac{1}{\alpha} \left(\phi + \frac{1}{6\alpha} \right) \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2}(1-\zeta)^2(\beta-1) + \frac{1}{6}\gamma(1-\zeta)^4 \\ -\frac{1}{30}\gamma^2(1-\zeta)^6 + K \end{array} \right\}$$

ここに、 $\alpha =$ 定数 $= \kappa/6$ or 0.077 、 $\phi =$ 流速係数、 $K =$ 積分定数 $(= 1/6(1-\beta) - 1/30\gamma + 1/210\gamma^2)$ 、 $\beta = (1-\gamma + 3/5\gamma^2 - 1/7\gamma^3)/(1-1/3\gamma)$ 、 $\gamma = 6.5/(\phi + 6.5)$ である。

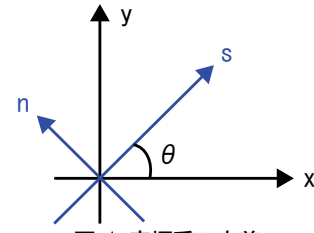


図-1 座標系の定義

(2) 基礎方程式

基礎方程式は、上記の流速分布を用いて、連続の式と運動方程式を、運動学的境界条件とライプニッツルールを適用して水深積分した浅水流方程式であり、式(5)で表される。

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} + \mathbf{M} + \mathbf{S}_1 + \mathbf{S}_2 = \mathbf{0} \quad (5)$$

$$\mathbf{U} = (h \quad Uh \quad Vh)^T, \quad \mathbf{E} = \left(Uh \quad U^2h + \frac{1}{2}gh^2 \quad UVh \right)^T,$$

$$\mathbf{F} = \left(Vh \quad UVh \quad V^2h + \frac{1}{2}gh^2 \right)^T,$$

$$\mathbf{M} = \left(0 \quad \frac{\partial M_1}{\partial x} + \frac{\partial M_2}{\partial y} \quad \frac{\partial M_2}{\partial x} + \frac{\partial M_3}{\partial y} \right)^T,$$

$$\mathbf{S}_1 = \left(0 \quad gh \frac{\partial z_b}{\partial x} \quad gh \frac{\partial z_b}{\partial y} \right)^T, \quad \mathbf{S}_2 = \left(0 \quad ghS_{fx} \quad ghS_{fy} \right)^T$$

ここに、 S_{fx} 、 S_{fy} は摩擦勾配であり、次式のManningの式を用いる。

$$S_{fx} = n^2 U \sqrt{U^2 + V^2} / h^{4/3}, \quad S_{fy} = n^2 V \sqrt{U^2 + V^2} / h^{4/3} \quad (6)$$

ここに、 $n =$ Manningの粗度係数である。なお、式(4)の流束係数 ϕ とManningの粗度係数 n との間には $\phi^2 = h^{1/3}/(gn^2)$ の関係がある。

また、ベクトル \mathbf{M} は、2次流の影響を表す補正項であり、ベクトルの中の $M_1 \sim M_3$ はそれぞれ次式で表される。

$$M_1 = U^2 h C_1 - 2 \frac{UVh^2}{R_s} C_2 + \frac{V^2 h^3}{R_s^2} C_3$$

$$M_2 = UVh C_1 + \frac{(U^2 - V^2)h^2}{R_s} C_2 - \frac{UVh^3}{R_s^2} C_3 \quad (7)$$

$$M_3 = V^2 h C_1 + 2 \frac{UVh^2}{R_s} C_2 + \frac{U^2 h^3}{R_s^2} C_3$$

ここに、 $C_1 \sim C_3$ は流速分布によって決まる係数であり、それぞれ次式で表される。

$$C_1 = \int_0^1 \psi^2(\zeta) d\zeta - 1 = \frac{1}{45} \left(\frac{1}{\alpha\phi} \right)^2$$

$$C_2 = \int_0^1 \psi(\zeta) f(\zeta) d\zeta = \frac{\left(\phi + \frac{1}{6\alpha} \right) (\gamma^2 - 6\gamma - 21\beta + 21)}{945\alpha^2\phi} \quad (8)$$

$$C_3 = \int_0^1 f^2(\zeta) d\zeta = \left(\left(\phi + \frac{1}{6\alpha} \right)^2 (\chi_1 + \chi_2) \right) / \alpha^2$$

ここに χ_1 、 χ_2 は係数で、それぞれ次式で表される。
 $\chi_1 = (207\gamma^4 + 1638\gamma^3 + (8190\beta + 7735)\gamma^2) / 5159700$

$$\chi_2 = \frac{\left(\begin{array}{l} 33\gamma^4 - 1470\gamma^3 + (3773 - 5390\beta)\gamma^2 + \\ (18480\beta - 18480)\gamma + \\ 32340\beta^2 - 64680\beta + 32340 \end{array} \right)}{1455300}$$

式(5)を任意の検査体積 Ω (本研究の場合は、検査面積となる)で積分し、ガウスの発散定理を用いると、式(9)に示す積分形の浅水流方程式が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} U dV + \oint_{\partial\Omega} (\mathbf{F}_n \cdot \mathbf{n}) dL + \int_{\Omega} (\mathbf{M} + \mathbf{S}_1 + \mathbf{S}_2) dV = \mathbf{0} \quad (9)$$

ここに、 $\partial\Omega$ =検査体積の境界線、 $L = \partial\Omega$ の長さである。 $\mathbf{F}_n \cdot \mathbf{n}$ = 境界線 $\partial\Omega$ の法線方向を通過する流束ベクトルであり、式(10)で表される。

$$\mathbf{F}_n \cdot \mathbf{n} = E n_x + F n_y \quad (10)$$

ここに、 $\mathbf{n} = (n_x, n_y)$ =検査体積の境界線 $\partial\Omega$ の外向き単位法線ベクトルである。

(3) 数値解析手法

計算領域を分割した微小領域セル i の検査体積 Ω_i とし、式(9)を有限体積法に基づき離散化すると式(11)が得られる。なお、時間積分にはEulerの陽解法を用いた。

$$\mathbf{U}_i^{t+1} = \mathbf{U}_i^t - \frac{\Delta t}{A_i} \sum_{k=1}^N (\mathbf{F}_n^* \cdot \mathbf{n})_k dL_k - \frac{\Delta t}{A_i} \int_V (\mathbf{M} + \mathbf{S}_1) dV - \Delta t \mathbf{S}_{2i} \quad (11)$$

ここに、 \mathbf{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_e = セルを構成するセル境界線の総数、 Δt = 時間の刻み幅、 $L_k = k$ 番目のセル境界線の長さ、 $(\mathbf{F}_n \cdot \mathbf{n})_k^*$ = k 番目のセル境界線を流入出する数値流束、 \mathbf{S}_{2i} = セル i での \mathbf{S}_2 の平均値である。

数値流束 $(\mathbf{F}_n \cdot \mathbf{n})_k^*$ には、近似リーマン解法の一つで、流束差分法¹⁴⁾に比べ、離散式がシンプルなHLL(Harten, Lax and van Leer)の数値流束¹⁵⁾を用いた。HLLの数値流束は次式で表される。

- $S_L \geq 0$ の場合： $\mathbf{F}_n^* \cdot \mathbf{n} = (\mathbf{F}_n \cdot \mathbf{n})_L$ (12)
- $S_L < 0 < S_R$ の場合：

$$\mathbf{F}_n^* \cdot \mathbf{n} = \frac{S_R (\mathbf{F}_n \cdot \mathbf{n})_L - S_L (\mathbf{F}_n \cdot \mathbf{n})_R + S_R S_L (\mathbf{U}'_R - \mathbf{U}'_L)}{S_R - S_L}$$
- $S_R \leq 0$ の場合： $\mathbf{F}_n^* \cdot \mathbf{n} = (\mathbf{F}_n \cdot \mathbf{n})_R$

式(12)中の S_L と S_R は、セル境界線のL側とR側の特性速度であり、次式で定義される。

$$S_L = \begin{cases} (U n_x + V n_y)_R - 2c_R & \text{if } h_L \leq h_v \\ \min((U n_x + V n_y)_L - c_L, U_* - c_*) & \text{if } h_L > 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$S_R = \begin{cases} (U n_x + V n_y)_L + 2c_L & \text{if } h_R \leq h_v \\ \max((U n_x + V n_y)_R + c_R, U_* + c_*) & \text{if } h_R > 0 \end{cases}$$

また、 $c_* = (gh_*)^{0.5}$ であり、 U_* および h_* は、次式で求める。

$$U_* = \frac{1}{2} \left((U n_x + V n_y)_L + (U n_x + V n_y)_R \right) + c_L - c_R$$

$$h_* = \frac{1}{16g} \left\{ 2(c_L + c_R) + \left((U n_x + V n_y)_L - (U n_x + V n_y)_R \right)^2 \right\}$$

なお、式(12)中では水路床高が複雑に変化する場合についても、水面が静水状態で一定に保たれるように、 $\mathbf{U} = (h, U h, V h)^T$ を $\mathbf{U}' = (H, U h, V h)^T$ に置き換えた¹¹⁾。ここに H =水位である。

空間微分を含む発生項ベクトル \mathbf{S}_1 と2次流補正項ベクトル \mathbf{M} については、数値流束と同様に特性速度に基づき風上化¹²⁾を行い、次のように離散化を行った。

$$-\frac{\Delta t}{A_i} \int_V (\mathbf{M} + \mathbf{S}_1) dV = -\frac{\Delta t}{A_i} \sum_{k=1}^N (\mathbf{M}_n^* \cdot \mathbf{n} + \mathbf{S}_{1n}^* \cdot \mathbf{n})_k dL_k \quad (14)$$

ここに、 $\mathbf{M}_n^* \cdot \mathbf{n}$ 、 $\mathbf{S}_{1n}^* \cdot \mathbf{n}$ は、それぞれ2次流補正項ベクトルおよび発生項ベクトル対応する数値流束であり、次式で表される。

• $S_L \geq 0$ の場合：

$$(\mathbf{M}_n^* \cdot \mathbf{n} + \mathbf{S}_{1n}^* \cdot \mathbf{n})_L = 0$$

$$(\mathbf{M}_n^* \cdot \mathbf{n} + \mathbf{S}_{1n}^* \cdot \mathbf{n})_R = -(\mathbf{M}_n \cdot \mathbf{n})_R + (\mathbf{M}_n \cdot \mathbf{n})_L + g \left\{ \frac{(h_L + h_R)}{2} ((\mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{n})_R - (\mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{n})_L) \right\}$$

• $S_L < 0 < S_R$ の場合：

$$(\mathbf{M}_n^* \cdot \mathbf{n} + \mathbf{S}_{1n}^* \cdot \mathbf{n})_L = -\frac{S_L}{S_R - S_L} \left[(\mathbf{M}_n \cdot \mathbf{n})_R - (\mathbf{M}_n \cdot \mathbf{n})_L + g \left\{ \frac{(h_L + h_R)}{2} ((\mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{n})_R - (\mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{n})_L) \right\} \right]$$

$$(\mathbf{M}_n^* \cdot \mathbf{n} + \mathbf{S}_{1n}^* \cdot \mathbf{n})_R = \frac{S_R}{S_R - S_L} \left[(\mathbf{M}_n \cdot \mathbf{n})_R - (\mathbf{M}_n \cdot \mathbf{n})_L + g \left\{ \frac{(h_L + h_R)}{2} ((\mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{n})_R - (\mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{n})_L) \right\} \right]$$

• $S_R \leq 0$ の場合：

$$(\mathbf{M}_n^* \cdot \mathbf{n} + \mathbf{S}_{1n}^* \cdot \mathbf{n})_L = (\mathbf{M}_n \cdot \mathbf{n})_R - (\mathbf{M}_n \cdot \mathbf{n})_L + g \left\{ \frac{(h_L + h_R)}{2} ((\mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{n})_R - (\mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{n})_L) \right\}$$

$$(\mathbf{M}_n^* \cdot \mathbf{n} + \mathbf{S}_{1n}^* \cdot \mathbf{n})_R = 0$$

ここに、 $\mathbf{M}_n^* \cdot \mathbf{n} = (0, M_1 n_x + M_2 n_y, M_2 n_x + M_3 n_y)^T$ 、 $\mathbf{S}_{1n}^* \cdot \mathbf{n} = (0, z_{\beta n_x}, z_{\beta n_y})^T$ である。

消滅項ベクトル \mathbf{S}_2 については、計算セルの重心で定義される保存量 \mathbf{U} に基づき計算を行う。

計算セルには三角形($N_e=3$)の非構造格子を用いている。また、時間の刻み幅は、クーラン型の安定条件と消滅項を考慮した安定条件を用いている¹⁶⁾。

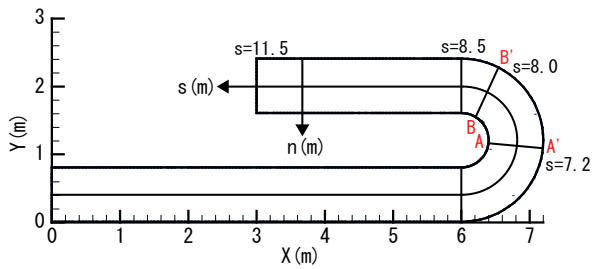


図-2 Rozovskiiの実験水路

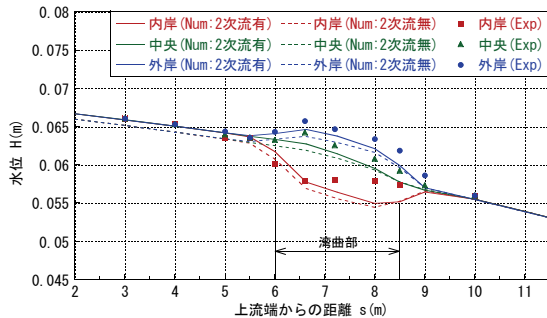
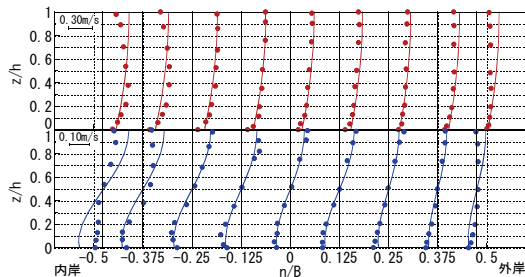
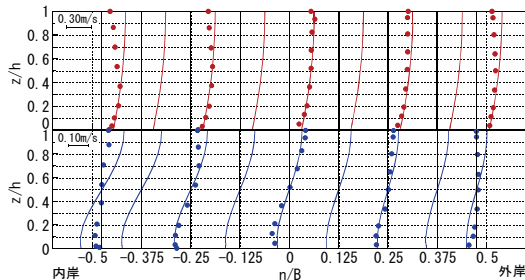


図-3 水面形の比較



(a) A-A' 断面 (上:主流, 下:2次流)



(b) B-B' 断面 (上:主流, 下:2次流)

図-4 主流および2次流の流速分布の比較
(プロット:実験値, ライン:解析結果)

3. モデルの基本性能の検証

まず、Rozovskii¹⁷⁾の実験結果に基づき、本モデルの基本性能の検証を行った。実験水路は図-2に示す通りである。上流端からは流量 $Q=0.0123\text{m}^3/\text{s}$ が流入されている。測定項目は水深および流速である。解析領域を横断方向に20分割、流下方向に220分割し、計8850個の三角セルで分割した。水路床勾配と粗度係数はそれぞれ0と0.019とした。上下流端の境界条件には流量と水位を与えた。

図-3は、水路内岸、中央、外岸の水面形の水路中心軸s上の変化を示したものである。図中には2次流を考慮していない場合の解析結果も合わせて示している。これより、(1) 本モデルの解析結果は、水路外岸・中央の水面

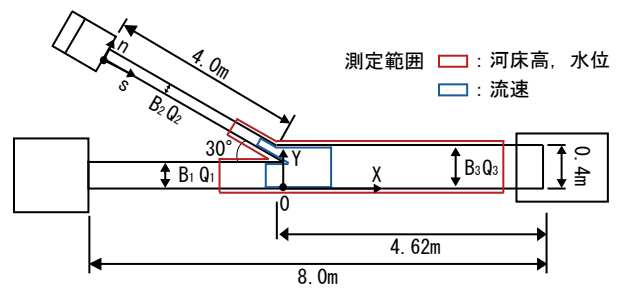


図-5 河川合流点流れの実験装置の概要

を概ね再現していること、(2) 内岸側の7.5~8.5m付近で実験値との差が大きいこと、(3) 本モデルの解析結果は、2次流を考慮していない結果に比べ、精度が改善していること、などが確認できる。

図-4は、図-2中の断面A-A', B-B'断面の主流および2次流の流速分布について、解析結果と実験値との比較を行ったものである。これらより、本モデルは、(1) 湾曲部での2次流の発達、(2) 流速分布を概ね再現していること、(3) 一方で、内岸や外岸の側壁部分で2次流を過大に評価しており、特に内岸側は差が大きいこと、などが確認できる。側壁付近の水位、流速分布に差が生じた理由としては、本モデルは、2次流の発達・減衰を考慮しておらず、側壁付近での2次流の減衰を考慮していないためと考えられる。

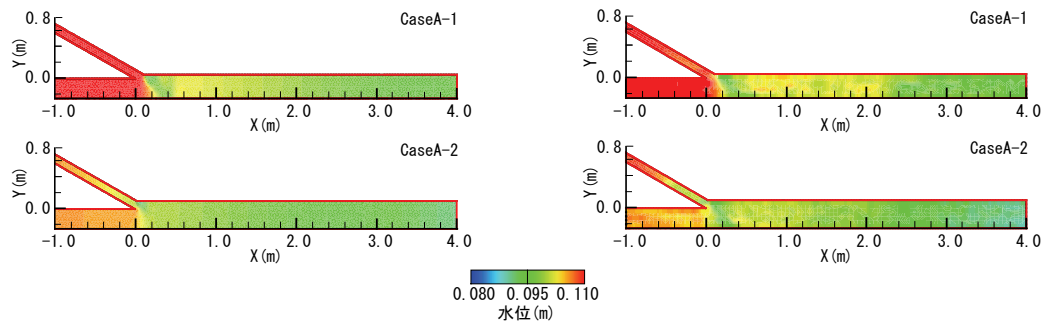
以上から、本モデルは、内岸付近での流れの再現性には若干の問題が残るが、湾曲部の流れを概ね再現できることが明らかとなった。

4. 河川合流点への適用

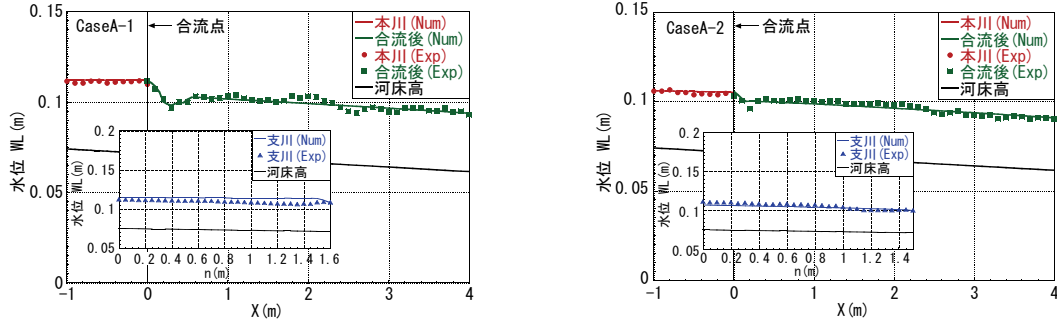
最後に、本モデルを河川合流点流れの実験結果¹⁸⁾に適用し、本モデルの予測精度を検証した。

実験装置は、図-5に示す本川(長さ8m×幅0.4m×高さ0.4m)と支川(長さ4m×幅0.1m×高さ0.3m)とで構成される可変勾配水路である。合流前の本川と支川の河道幅比 $B_2/B_1=0.4$ 、合流角度 θ を 30° 、流量比 $Q_2/Q_1=0.4$ 、河床勾配は本支川共に1/400に設定した。本川と支川の流量を一定とし、合流後の河道幅をCaseA-1では0.30m、CaseA-2では0.35m、CaseA-3では0.40mに設定した。

測定項目は、水位と水表面・水深平均流速および底面での流線であり、定常状態であることを確認した後に測定を開始した。水位と河床高については砂面測定器で、水表面の測定については、直径約5mmの発砲スチロール球を、砂の移動方向の測定については、直径約3mmのプラスチック球を流し、その動きをビデオカメラで撮影しPTV解析を行い求めた。なお、プラスチック球は流れに追従するわけではないので流速値は正確な値ではない。そこで、以下では底面流速については流向についてのみ議論する。測定点は、縦断横断方向のいずれも5cmずつ測定した。

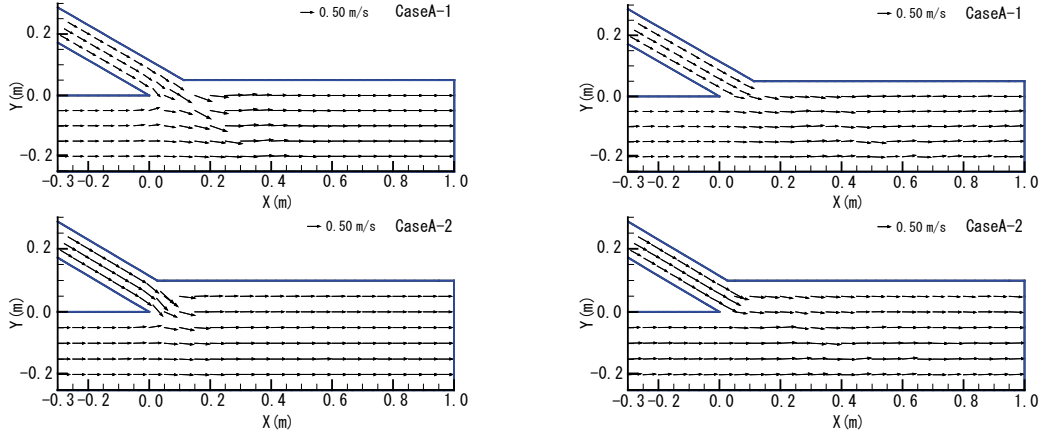


(a) 水位コンター (左: 解析結果, 右: 実験値)

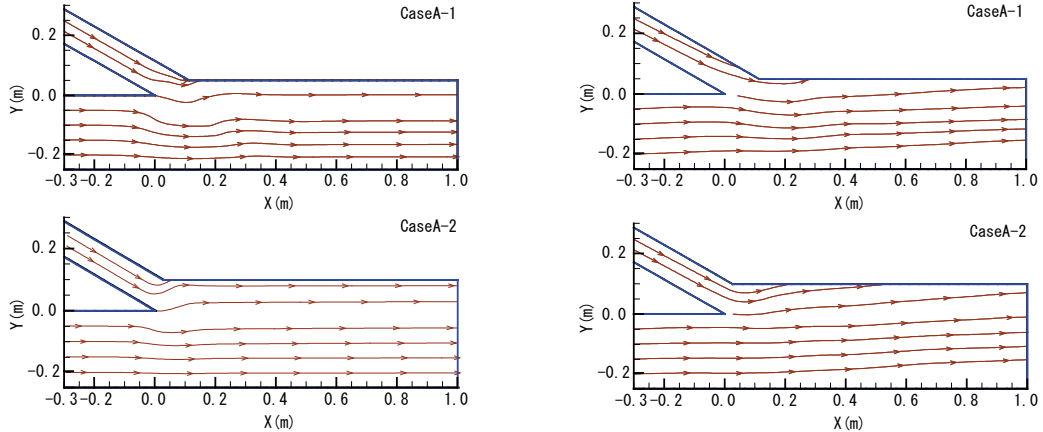


(b) 水面形

図-6 水位コンターと水路中心軸の水面形の比較



(a) 水表面流速ベクトル (左: 解析結果, 右: 実験値)



(b) 底面流線 (左: 解析結果, 右: 実験値)

図-7 水表面流速ベクトルと底面流線の比較

解析領域は計5651~5840個の三角セルで分割した。水路の粗度係数は本川を0.01, 支川を0.012とした。上下流端の境界条件には, それぞれ流量と水位を与えた。CaseA-3について同様な精度が得られたので, ここではCaseA-1と2の結果について示す。

図-6はCaseA-1と2の水位コンター図と本川と支川の中心軸上の水面形について, 実験値と解析結果との比較を行ったものである。これより, 本モデルは, (1) 合流点上流で水位が上昇すること, (2) その上昇の度合いは合流後の水路幅の狭いCaseA-1が大きくなること, (3) 支川

で若干の差があるものの水面形状を概ね再現していることがわかる。

図-7は、CaseA-1と2の水表面流速ベクトルと底面流線について、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、本モデルは、表面流速については(1) CaseA-1では合流前後で流れが加速される様子や支川の流れが右岸側壁へ衝突する様子、(2) CaseA-2では合流点付近で支川の流れが本川方向へ曲げられる様子、CaseA-1とは異なり、その流れは右岸側壁へ到達しない様子、底面流速については、(3) CaseA-1では支川の流線が左岸側へ曲げられる様子、合流点付近の本川の流線は右岸側へ曲げられる様子、(4) CaseA-2では本川の流線はさほど影響を受けず本川に沿っていること、支川の流線は左岸へ曲げられその後、本川に沿っていること、などを再現していることがわかる。しかし、定量的には表面流速を過大に評価している箇所があり再現性には若干の問題が残る。これは、湾曲部と同様に、2次流の発達・減衰を考慮しておらず、側壁付近での2次流の減衰を考慮していないためと考えられる。

以上から、本モデルは、改善の余地はあるが、合流点での流れを概ね再現できることがわかった。

5. おわりに

本研究は、有限体積法に基づく近似リーマン解法を用いた準3次元モデルを構築し、一様湾曲流れと河川合流点の流れの予測精度を検証した。その結果、同モデルが一様湾曲流れと河川合流点の流れを概ね良好な精度で再現できることがわかった。しかしながら、定量的な再現には若干の課題が残る。今後は、2次流の発達・減衰過程を組み込む、同モデルを発展させたいと考えている。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金若手研究B(課題番号：21760388、研究代表者：重枝未玲)の助成を受け実施したものである。本研究を遂行するに当たり、本学学部4年生橋立広隆君、当時、本学大学院生森山拓士君(現：中電技術コンサルタント株式会社)にはデータ整理等で多大な協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 財団法人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。
- 例えば、重枝未玲・秋山壽一郎・小園裕司・上川謙：遠賀川流域の分布型流出解析と複数の支川を考慮した平面2次元洪水追跡、河川技術論文集、第16巻、pp.443-448、2010。
- 例えば、二瓶泰雄・加藤祐一・佐藤慶太：広域河川流計算のための新たな三次元流動モデルの開発と洪水流計算への応用、土木学会論文集、No.803/II-73、pp.115-131、2005。
- 細田尚、長田信寿、岩田通明、木村一郎：一般座標系での主流と2次流の遅れを考慮した平面2次元モデル、水工学論文集、第44巻、pp.587-592、2000。
- 音田慎一郎、細田尚、木村一郎：一般座標系での湾曲流の水深積分モデルの改良とその検証について、水工学論文集、第50巻、pp.769-774、2006。
- 内田龍彦、福岡捷二：浅水流方程式と渦度方程式を連立した準三次元モデルの提案と開水路合流部への適用、水工学論文集、第53巻、pp.1081-1086、2009。
- 吉田圭介、石川忠晴、箕浦靖久：準3次元CIP-Sorobanモデルによる利根川洪水流の大規模数値計算、水工学論文集、第53巻、pp.877-882、2009。
- Thanh, M.D, Kimura, I., Shimizu, Y. and Hosoda, T.: Numerical simulation of flow at an open-channel confluence using depth-averaged 2D models with effects of secondary currents, *Journal of Applied Mechanics*, JSCE, Vol.13, pp.769-780, 2010.
- Kimura, I., Onda, S., Hosoda, T. and Shimizu, Y.: Computations of suspended sediment transport in a shallow side-cavity using depth-averaged 2D models with effects of secondary currents, *Journal of Hydro-environment Research*, Vol.4, pp.153-161, 2010.
- 木村一郎、細田尚、岩田通明：水深積分浅水流方程式における馬蹄渦のモデル化、土木学会水工学論文集、第54巻、pp.1147-1152、2010。
- Zhou, J.G, Causon, D.M., Mingham, C.G., Ingram, D.M.: The surface gradient method for the treatment of source term in the shallow water equations, *Journal of Computational Physics*, Vol.168, pp.1-25, 2001.
- Fraccarollo, L., Capart, H. and Zech, Y.: A Godunov method for the computation of erosional shallow water transients, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.41, pp.951-976, 2003.
- Engelund, F.: Flow and bed topography in channel bends, *Journal of Hydraulic Division*, ASCE, Vol.100, No.HY11, pp.1631-1648, 1974.
- Roe, P. L.: Approximate Riemann solvers, parameter vectors and difference schemes, *Journal of Computational Physics*, Vol.43, pp.357-372, 1981.
- Hattem, A., Lax, P.D. and van Leer, B.: On upstream differencing and Godunov-type schemes for hyperbolic conservation laws, *SIAM Review*, Vol.25, No.1, pp.35-61, 1983.
- 秋山壽一郎・重枝未玲・小園裕司：流域特性を考慮した都市域氾濫解析モデルと都市域での浸水プロセスの予知、水工学論文集、第54巻、pp.919-924、2010。
- Rozovskii, I.L.: Flow of water in bends of open channels, Israel Program for Scientific Translation, Jerusalem, Israel, 1961.
- 重枝未玲、秋山壽一郎、森山拓士、池田寛：合流後の流況が河川合流部周辺の流れと河床変動に及ぼす影響、水工学論文集、第54巻、pp.799-804、2010。

(2010. 9. 30受付)