ダイナミック氾濫解析モデルによる河川からの溢水・越水流量の予測

PREDICTIONS OF OVERFLOW DISCHARGE FROM THE RIVER BY A DYNAMIC INUNDATION ANALYSIS MODEL

重枝 未玲[1]・秋山 壽一郎[2]
Mirei SHIGE-EDA and Juichiro AKIYAMA

[1]正会員 博士 (工)　九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科（〒 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 工学部建設社会工学科（同上）

The overflowing processes from a river into a flood plain were simulated by a dynamic inundation analysis model. The model is based on a numerical model with Finite volume method on Unstrucuted grid using Flux-difference splitting technique for 2D Free-surface flows (FUF-2DF model). In experiment, flow depths, velocities in river and floodplain were observed and the overflow discharges from the river were obtained from these observations. The model is verified comprehensively against the experimental data, and it shows that the model can reproduce the flow in the river and floodplain as well as overflow discharge from the river.

Key Words : *inundation flow, dynamic flood simulation, urban areas*

1. はじめに

近年，局地的な集中豪雨による水害が頻発している．2000 年 9 月には東海豪雨災害，2001 年 9 月には高知県西南豪雨災害，2003 年 7 月には九州豪雨災害，2004 年７月には福井豪雨災害，新潟・福島豪雨災害などで内水氾濫あるいは破堤氾濫が発生し甚大な被害が生じた．

これまで数多くの外水・内水氾濫解析モデルが提案されている[1),2),3),4),5)]．氾濫解析モデルは，氾濫原・河川・下水道網等の各流れを個別にモデル化し，それらを越流公式等で接続した流域全体を対象とした統合型氾濫解析モデル[1),2)]と，氾濫原・河川を平面的かつ一体的に取扱う市街地を対象としたダイナミック氾濫解析モデル[3),4),5)]に大きく分けられる．著者らは，市街地よりも大きな都市域程度のスケールを対象として，氾濫原・河川・下水道網等の各流れを平面的かつ一体的に取り扱えるダイナミック氾濫解析モデル[5)]を開発中である．本ダイナミックモデルは，SA-FUF-2DF(Spatial-Averaged Finite-volume method on Unstructured grid using Flux-difference splitting technique for 2D Free-surface flows) モデル[6),7)]をベースとし，これに氾濫原構成要素の取り扱いを組み込むことで[8)]構成されている．

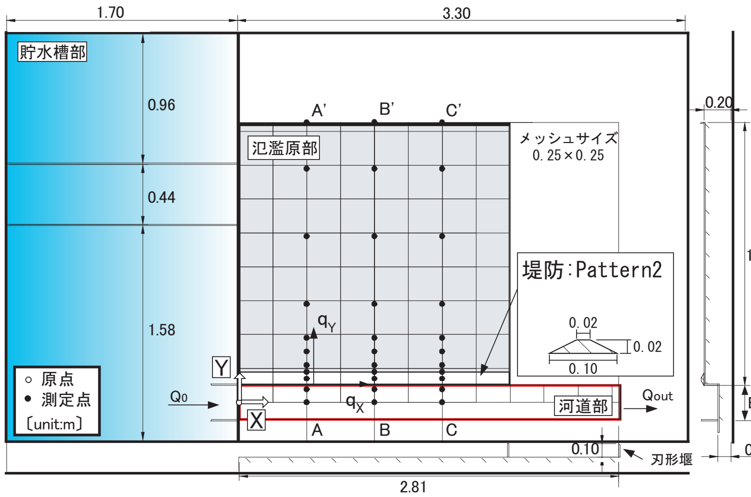
都市域を対象とするダイナミック氾濫解析モデルには，今後都市域での出水被害を最小化するようなハード・ソフト両面での流域対策を検討できるツールが益々重要になると考えられることから，そこでの流域対策に深く関与する本川と支川の整合性，本川と下水道による雨水排除，堤外地と堤内地との雨水のやりとりなどを適正に評価できることが求められる．

ここでは，掘り込み河川あるいは築堤河川を対象として，河道に沿って斜めに溢水・越流する溢水・越水量について検討を加え，本ダイナミック氾濫解析モデルがそれらを十分な精度で予測できることを示した．

2. 実験の概要

実験装置は，貯水槽部，河道部および氾濫原部で構成された洪水氾濫水槽である．**図–1** に洪水氾濫水槽を示す．実験装置は水平に保たれており，河道部と氾濫原部の底面はアクリル製である．河道部は氾濫原部から 0.10m 掘り込まれており，河道部の下流には，水位上昇を再現するために高さ 0.10m の刃形堰が設けられている．

実験条件は**表–1** に示す通りであり，掘込み河川を溢水する流れ (Pattern1) と堤防を完全越流する流れ (Pattern2) について検討した．Pattern2 では**表–1** に示すよ



図–1 実験装置の概要

表–1 実験条件

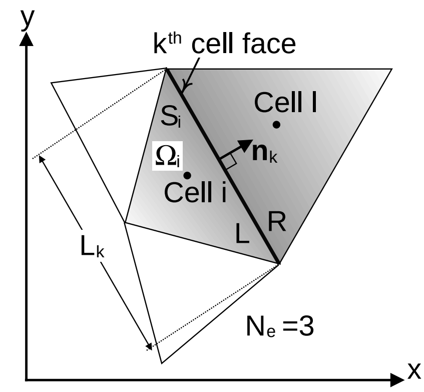
	堤防	堰	溢水・越流状態
Pattern 1	無	有	掘込み河川からの溢水
Pattern 2	有	有	完全越流

うに，天端幅と高さが 0.02m で，法面勾配が 1:2 の堤防を設置した．

貯水槽部から一定流量 Q_0（Q_0=0.00721m^3/s）を流入させ，定常状態となった時点で，**図–1** に示す測定点の水深 h，x，y 方向の水深平均流速 u，v および河道部下流端での流出流量 Q_{out} を測定した．水深測定は，**図–1** に示す測定点で容量式波高計により行った．測定時間と間隔はそれぞれ 60 秒と 0.05 秒である．水深平均流速については，直径約 5mm の発泡スチロール球を多数投入し，**図–1** に示す測定点を画面の中心に，発泡スチロール球の動きをデジタルビデオで撮影・収録し，その画像を PTV(Particle Tracking Velocimetry) 解析することで x および y 方向の表面流速 u_s および v_s を求めた．次に，定常自由表面流の等流の実験より得られた表面流速 $\boldsymbol{U}_{sa}$ と水深平均流速 $\boldsymbol{U}$ との比と Reynolds 数 Re との関係[9]から得られる関係式 ($\boldsymbol{U}$=0.90$\boldsymbol{U}_{sa}$) を用い，画像解析より得られた水表面流速ベクトル $\boldsymbol{U}_{sa} = (u_s, v_s)$ を水深平均流速ベクトル $\boldsymbol{U} = (u, v)$ に変換し，**図–1** に示す測定点での水深平均流速ベクトルを算定した．

3. ダイナミック氾濫解析モデルの概要

以下では，本ダイナミック氾濫解析モデルのベースとなる SA-FUF-2DF モデル[6),7)]の概略ならびに河道と氾濫原との境界の取り扱いについて述べる．



図–2 計算セル

(1) SA-FUF-2DF モデルの概要

SA-FUF-2DF モデルに用いた基礎方程式および数値解析手法は以下に示す通りである．

a) 基礎方程式

基礎方程式は 2 次元浅水流方程式であり，$\boldsymbol{U}$ を保存量ベクトル，$\boldsymbol{E}$ と $\boldsymbol{F}$ をそれぞれ x と y 方向の流束ベクトル，および $\boldsymbol{S}$ を発生項・消滅項ベクトルとすると，式 (1) で表される．

$$\frac{\partial \boldsymbol{U}}{\partial t} + \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial x} + \frac{\partial \boldsymbol{F}}{\partial y} + \boldsymbol{S} = \boldsymbol{0} \tag{1}$$

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

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

$$\boldsymbol{S} = \left(0, -gh\left(S_{ox} - S_{fx}\right), -gh\left(S_{oy} - S_{fy}\right)\right)^T$$

ここに，h は水深，u と v はそれぞれ x と y 方向の流速，g は重力加速度，S_{ox} と S_{oy} はそれぞれ x と y 方向の地盤高勾配，および S_{fx} と S_{fy} はそれぞれ x と y 方向の摩擦勾配である．摩擦勾配 S_{fx} と S_{fy} は，マニングの公式で計算される．

b)　数値解析法

式 (1) の離散化は有限体積法 (FVM) に基づき行う．**図–2** に示すよう計算セル i を検査体積 Ω_i とすると，式 (1) は次式のようになる．

$$\frac{\partial}{\partial t}(\boldsymbol{U}_i V_i) + \oint_{\partial\Omega_i} (\boldsymbol{\mathcal{F}} \cdot \boldsymbol{n}) dL + \int_{\Omega_i} \boldsymbol{S} dS = \boldsymbol{0} \qquad (2)$$

ここに i は計算セルに対する添字，V_i は計算セルの面積，$\boldsymbol{\mathcal{F}} \cdot \boldsymbol{n}$ はセル境界を流出入する流速ベクトルである．

時間積分には Euler の陽解法を，空間積分には流束差分離法 (FDS) [10]を用いる．発生・消滅項については，摩擦勾配のように空間微分を含まない場合は，計算メッシュ重心で定義される保存量 $\boldsymbol{U}$ に基づき計算を行う．一方，地盤高勾配のように空間微分を含む場合は，Glaister[11]や Bermudez and Vazquez et al.[12]が提案するように，流束ベクトルと同様な方法で風上化を行う．

まず，式 (3) のように発生・消滅項ベクトル $\boldsymbol{S}$ を空間微分を含む項と含まない項に分離する．

$$\boldsymbol{S}_i = \boldsymbol{S}_{si} + \frac{1}{V_i} \sum_{k=1}^{N_e} \boldsymbol{S}_k^* \qquad (3)$$

ここに，$\boldsymbol{S}_{si}$ = 空間微分を含まない発生・消滅項ベクトル，$\boldsymbol{S}_k^*$ = 空間微分を含む発生・消滅項ベクトル，N_e は計算セルを構成する境界線数 (計算セルが三角形の場合 N_e=3) である．ここに添字 k は，計算セルを構成する境界線に対する添字である．$\boldsymbol{S}_{si}$ と $\boldsymbol{S}_k^*$ は，それぞれ次式のように表される．

$$\boldsymbol{S}_{si} = \begin{pmatrix} 0 \\ ghS_{fx} \\ ghS_{fy} \end{pmatrix}_i$$

$$\boldsymbol{S}_k^* = \frac{1}{2}\left(\tilde{\boldsymbol{S}}_k - \sum_{j=1}^{3} \left(\frac{|\tilde{\lambda}^j|}{\tilde{\lambda}^j}\, \tilde{\beta}^j\, \tilde{\boldsymbol{e}}^j\right)_k \right) \qquad (4)$$

ここに，式中の $\tilde{\lambda}^j$ は流束ベクトルの固有値であり，この符号により地盤高の離散化方向が決定される．$\tilde{\boldsymbol{S}}_k$，$\tilde{\lambda}^j$，$\tilde{\boldsymbol{e}}^j$ および $\tilde{\beta}^j$ はそれぞれ次式のように表すことができる．ここに添字 j は固有値に対応するものである．

$$\tilde{\boldsymbol{S}}_k = \left(0, g\tilde{h}\,(L_k \Delta z_b n_x), g\tilde{h}\,(L_k \Delta z_b n_y)\right)^T \qquad (5)$$

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

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

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

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

$$\left(\tilde{\beta}^1, \tilde{\beta}^2, \tilde{\beta}^3\right)^T = \frac{g\tilde{h}\,(L_k \Delta z_b)}{2\tilde{c}}\,(1, 0, -1)^T$$

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

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

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

ここに，z_b は地盤高，L_k はセル境界線の長さ，Δ は $\Delta(\bullet) = (\bullet)_R - (\bullet)_L$ で定義されるオペレータで式中の $\bullet$ は物理量を表し，$\Delta z_b = z_{bR} - z_{bL}$ となる．ここに，添え字 R，L はそれぞれセル境界線の右側，左側を表す．

(2)　掘り込み河川または築堤河川と氾濫原との境界の取り扱い

河道と氾濫原との境界は，流れの状態により水没・非水没状態となる地形起伏[13]として取扱う．その概要は以下に示す通りである．

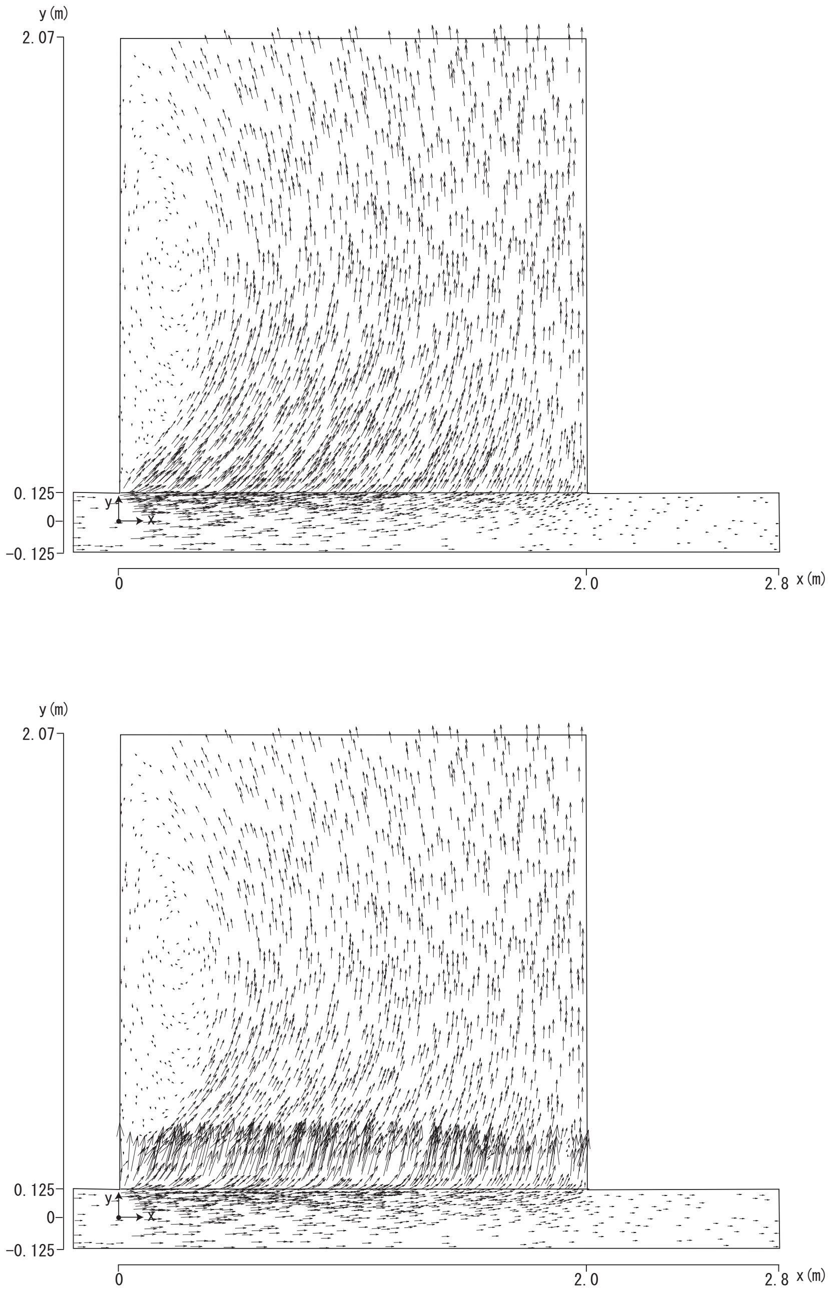
流束差分離法では水深が 0 となる場合では，セル境界線における数値流束を定められないので，計算の実行が不能となる[14),15]．そこで，そのような場合には極めて小さな水深 h_v を与えることで，これを処理する．ここでは，水深 h が h_v 以下であるセルをドライセルと定義する．

ドライセルは完全ドライセルと部分ドライセルに分けられる．完全ドライセルは隣接するセルの水深 h が全て h_v 以下のセルであり，そこでの水深および流速をそれぞれ $h = h_v$ および u=v=0 のように設定する．一方，部分ドライセルは，隣接するセルのいずれかが水深 $h > h_v$ となるセルであり，隣接するセルの水位とドライセルの地盤高との高低差に基づき次のように処理する．ドライセルの地盤高より隣接セルの水位が高い場合には，通常通り計算を行う．一方，ドライセルの地盤高より隣接セルの水位が低い場合には，両セルの境界に閉境界条件を与え，ドライセルの水深および流速をそれぞれ $h = h_v$ および u=v=0 に設定する．h_v の値は，後述する実験結果に対しては計算精度および効率を勘案した上で 0.0001m とした．

水深が 0 に極めて近く流速が大きい洪水氾濫流のフロント部分では摩擦勾配 S_{fx} と S_{fy} が極めて大きくなるために，この場合も計算不能となる[16]．これに対しては，限界の水深 h_c を与え，水深が h_c 以下となるセルでの摩擦勾配を S_{fx}=S_{fy}=0 として処理した．h_c の値としては，上述した h_v 値を用い，n=0〜0.07 程度まで計算可能な最小の値である 0.001m を与えた．

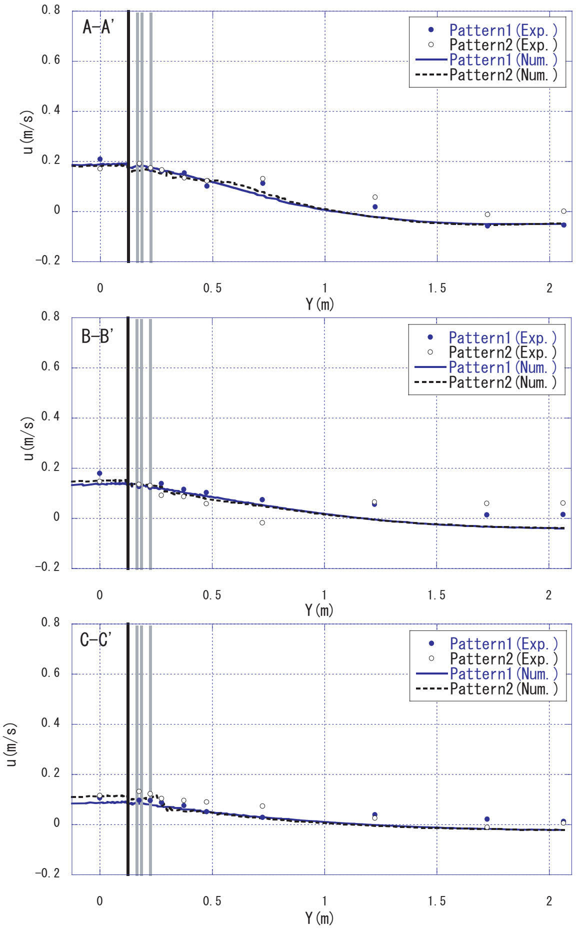
4.　結果と考察

図–3 は，掘り込み河川からの溢水を想定した Pattern1 と堤防からの越流を想定した Pattern2 の流速ベクトルの解析結果を示したものである．なお，流速ベクトルは 1/3 程度間引いて表示している．これより，Pattern1 と Pattern2 の間には，堤防付近の流速ベクトルに違いが認められるものの，全体的な流況については大きな違いは認められないことがわかる．また，いずれの Pattern についても，河道内流れの影響により，河道や堤防に対して斜めに溢水あるいは越水し，氾濫原を流下する様子がわかる．

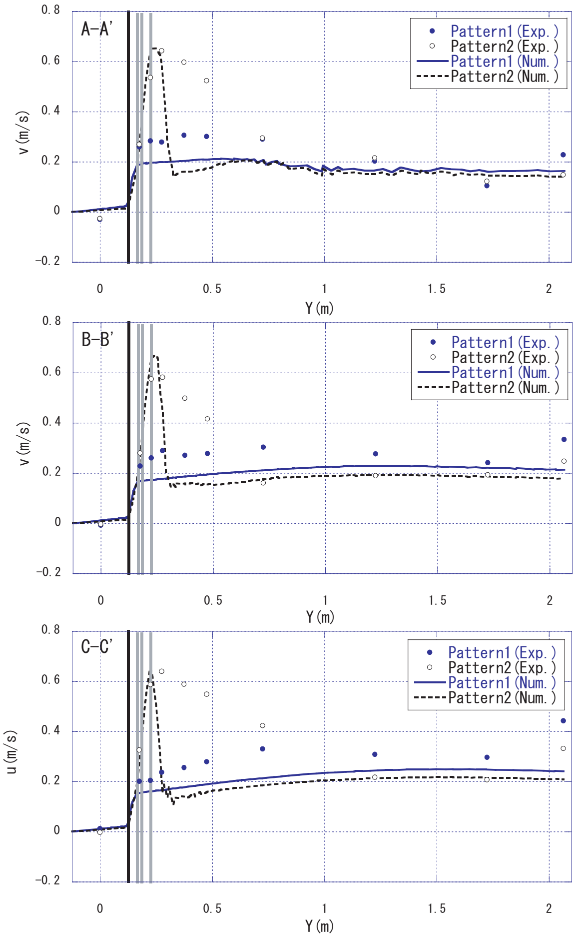


図–3　流速ベクトルの解析結果 (上：Pattern1，下：Pattern2)

図–4 と**図–5** は，それぞれ**図–1** に示す A-A’〜C-C’ 断面での X 方向の流速 u と Y 方向の流速 v の解析結果と実験値との比較を，**図–6** は水位の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，X 方向の流速 u については，いずれの Pattern についても河道と氾濫原との境界で流速が最大となる様子や，Y 方向の流速ベクトル v については Pattern1 では河道と氾濫原の境界付近で，Pattern2 では堤防と氾濫原の境界付近で最大となる様子，水位については Pattern2 では河道内水位を若干小さく評価しているが，いずれの Pattern についても全体的には水面形状を再現しており，解析結果は実験値を概ね再現している．Pattern2 で河道内水位が過小評価された理由として，実験では下流端に刃型堰が設置されているのに対し，本解析では境界条件として水位を与えたことが考えられるが，その詳細は不明であり，今後検討する予定である．また，Pattern2 の Y 方向の流速ベクトル v や水位については，堤防上や堤防と氾濫原の境界付近では解析結果は実験値を概ね再現しているものの，それよりも Y 方向へ流下すると，両者の間には大きな差異が生じている．これは，平面 2 次元モデルである SA-FUF-2DF モデルでは，非静水圧分布が生じる跳水現象を正しく再現できないため



図–4 X 方向の流速 u の実験値と解析結果との比較



図–5 Y 方向の流速 v の実験値と解析結果との比較

である．

図–7 は，河道からの溢水あるいは越水単位幅流量を求めたものである．河道と氾濫原との境界は，実験・解析結果のいずれも Y=0.175m とした．これより，本ダイナミック氾濫解析モデルは，掘り込み河川から溢水あるいは築堤河川からの越水流量を十分に再現できることがわかる．なお，解析より得られた単位幅流量を河道と氾濫原との境界に沿って積分した溢水量・越水量と河道下流端から実測した流量を流入流量から差し引いて求めた溢水量・越水量との違いは，それぞれ相対誤差で 1%と 10%程度であり，当然ながら水位の再現性が劣る Pattern2 の方が再現性は低い．

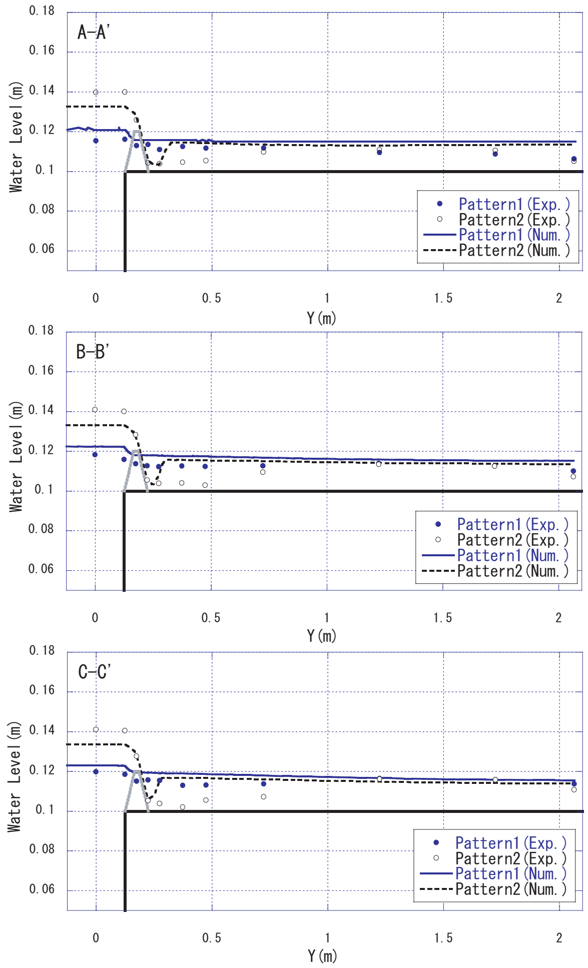
5. おわりに

本研究より，本ダイナミック氾濫解析モデルが河道と氾濫原の境界や堤防上や堤防と氾濫原の境界付近を含め，☒モデルの制約上再現できない箇所を除き，河道と氾濫原の全体的な流況を概ね再現できること，☒河道からの溢水・越水量を十分な精度で再現できることが明らかとなったことから，本ダイナミック氾濫解析モデルは河道と氾濫原との水のやり取りを十分な精度で予測できると考えられる．今後は，潜り堰状態を含めた溢水・越水状況について同様な検討を加えるとともに，斜め溢水・越流する場合の越流公式の予測精度について検討する予定である．

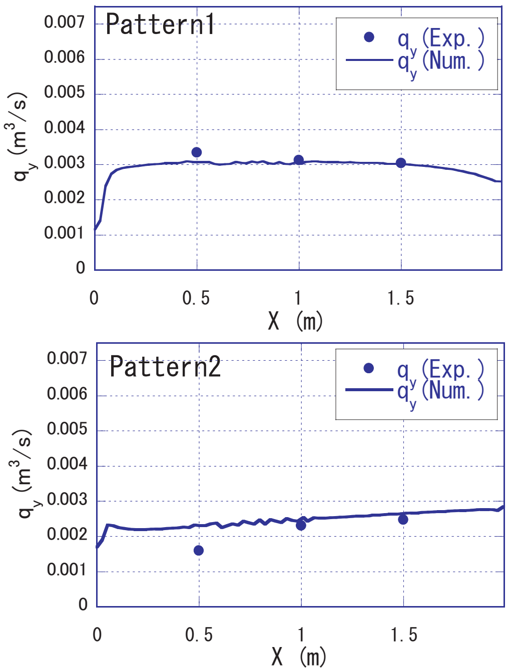
謝辞： 本研究を遂行するにあたり，当時本学大学院生 野中雅之君 (現 北九州市)，本学学部生 下出 昌毅君 (現 和歌山県) の協力を得た．ここに記して感謝の意を表します．

参考文献

1) 川池健司, 井上和也, 戸田圭一, 野口正人：低平地河川流域での豪雨による都市氾濫解析, 土木学会論文集, No. 761/II-67, pp. 57–68, 2004.
2) 辻本哲郎, 本守眞人, 安部友則, 山田哲夫：氾濫シミュレーション手法の開発と東海豪雨災害の再現, 河川技術論文集, 第 8 巻, pp. 121–126, 2002.
3) 福岡捷二, 川島幹雄, 横山洋, 水口雅教：密集市街地の氾濫シミュレーションモデルの開発と洪水被害軽減対策の研究, 土木学会論文集, No. 600/II-44, pp. 23–36, 1998.
4) 川口広司, 末次忠司, 福留康智：2004 年 7 月新潟刈谷田川洪水・破堤氾濫流に関する研究, 水工学論文集, 第 45 巻, pp. 577–582, 2005.
5) 秋山壽一郎, 重枝未玲：飯塚市を中心とした都市域のダイナミック氾濫解析〜2003 年 7 月遠賀川豪雨災害を対象として〜, 水工学論文集, 第 45 巻, pp. 619–624, 2005.



図–6 水位の実験値と解析結果との比較



図–7 溢水または越流流量の実験値と解析結果との比較

6) 秋山壽一郎, 重枝未玲, 浦 勝：非構造格子を用いた有限体積法に基づく 1 次および 2 次精度平面 2 次元洪水流数値モデル, 土木学会論文集, No. No.705/II-59, pp. 31–43, 2002.

7) 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. 740/II-64, pp. 19–30, 2003.

8) 重枝未玲, 秋山壽一郎：市街地構造を考慮した氾濫解析モデルの総合的な検証, 水工学論文集, 第 48 巻, pp. 577–582, 2004.

9) 秋山壽一郎, 重枝未玲, 小林俊彦, 大田和正：定常自由表面流中の正角柱に働く流体力, 水工学論文集, 第 46 巻, pp. 1205–1210, 2002.

10) Roe, P. L.: Approximate Riemann solvers, parameter vectors and difference schemes, *Journal of Computational Physics*, Vol. 43, pp. 357–372, 1981.

11) Glaister, P.: Approximate Riemann solutions of shallow water equations, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 26, pp. 293–306, 1988.

12) Bermudez, A. and Vazquez, M.: Upwind methods for hyperbolic conservation laws with source terms, *Computers & Fluids*, Vol. 8, No. 8, pp. 1049–1071, 1994.

13) 重枝未玲, 秋山壽一郎：複雑な地形起伏を有する場における氾濫流の数値シミュレーション, 水工学論文集, 第 47 巻, pp. 871–876, 2003.

14) Zhao, D. H., Shen, H. W., Tabios III, G. Q., Lai, J. S. and Tan, W. Y.: Finite volume two-dimensional unstetady-flow model for river basins, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 7, pp. 863–883, 1994.

15) Fraccarollo, L. and Toro, E. F.: Experimental and numerical assessment of the shallow water model for two-dimensional dam-break type problems, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 33, No. 6, pp. 843–864, 1995.

16) アキレス・クマール・ジャ, 秋山壽一郎, 浦 勝, 重枝未玲：FDS を用いた洪水流の数値モデル, 土木学会論文集, No. 656/II-52, pp. 73–82, 2000.

(2005. 4. 7受付)