

市街地構造を考慮した 氾濫解析モデルの総合的な検証

COMPREHENSIVE VERIFICATION OF NUMERICAL MODEL FOR URBAN FLOODING

重枝 未玲¹・秋山 壽一郎²

Mirei SHIGE-EDA and Juichiro AKIYAMA

¹正会員 博士(工) 日本学術振興会特別研究員 九州工業大学 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正会員 Ph.D. 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (同上)

A two-dimensional numerical model for urban flooding is developed. The model is based on a numerical model with Finite volume method on Unstructured grid using Flux-difference splitting technique for 2D Flood flows (FUF-2DF model). The treatments of complicated flood plain geometries with submerged/emerged topography, structures, road networks, flood retarding plantation etc. are incorporated into the model. In experiment, flow depths, velocities and hydrodynamic forces acting on structures in flood plain with complicated geometries were observed. The model is verified comprehensively against the experimental data, and it shows that the model can reproduce the complex behavior of the flow and hydrodynamic forces with reasonable accuracy.

Key Words : *urban flooding, numerical simulation, experiment, unstructured grid system, finite-volume method, flux difference splitting*

1. はじめに

ここ数年, 局地的な集中豪雨による大規模な洪水氾濫が世界各地で発生している. わが国でも, 2000 年 9 月の東海豪雨災害が発生し, 破堤氾濫と内水氾濫のために推定で 9,000 億円の被害となった¹⁾. 近年の集中豪雨は予測の範囲を超えており, 時間降雨 75mm 以上の集中豪雨の発生頻度が, 1998 年以降急増している. このため, 大規模な洪水氾濫が発生する可能性は今後益々増大すると予想される.

洪水氾濫の被害を低減するためには, 堤防等の治水施設や遊水池あるいは調節池などのハード面での流域対策が重要であることは言うまでもない. しかし, 洪水を河道内に閉じ込める従来の対策では, 当然のことながら予想を超えた集中豪雨が発生した場合に, すなわち超過洪水時には, (1) 氾濫の発生を防ぎきれないこと, (2) 破堤時の被害の拡大, (3) 河川水位の上昇による雨水排除システムの機能低下とそれに伴う内水氾濫等が生じ, より大きな被害をもたらす可能性があることが, 洪水災害事例から明らかになってきた^{1),2)}. このため, 洪水氾濫対策は洪水を河道内に閉じ込める対

策から, ある程度の氾濫を許容した対策, つまり洪水ハザードマップや洪水時の効果的な避難体制などのソフト面での対策と氾濫流を制御することで家屋等の構造物への被害軽減を図るハード面での対策などに基づく流域対策へとシフトする方向にある.

都市域を含む氾濫原は, 家屋やビルなどの構造物, 盛土などの地形起伏, 道路・水路・下水道網, 田畑・樹林帯のような様々な要素により構成されており, 氾濫流の挙動は, 市街地構造を含む氾濫原特性により大きく影響される. 都市域を含む氾濫原を対象とした氾濫シミュレーションモデルには, 末次・栗城³⁾, 井上ら⁴⁾および福岡ら⁵⁾のモデルなどが存在する. これらの氾濫シミュレーションモデルのいずれも基礎方程式である浅水流方程式を差分法等で離散化した平面 2 次元数値モデル (以下, これを平面 2 次元洪水流数値モデルと呼び, 氾濫シミュレーションモデルとは区別する) に洪水氾濫流の挙動を大きく左右する氾濫原特性を取り扱うための様々な工夫を加えることで構築されている. 末次・栗城³⁾のモデルは, 広域の氾濫を対象に比較的大きな計算格子に基づいて開発されており, 土地利用に応じた等価粗度係数または建物占有率や浸水深の関数と

しての合成粗度係数により、構造物や道路網等の影響を考慮している。また、井上ら⁴⁾のモデルは、非構造格子を用いることで市街地構造の構成要素である道路網を適切に表現できるものの、構造物等の影響については等価粗度係数として考慮している。このため、上記のモデルのいずれも構造物の配置といった市街地構造を適切に取り扱うことはできない。福岡ら⁵⁾は、市街地の構成要素として家屋等の構造物と道路網に焦点を絞り、家屋等の構造物は作用する流体力項を基礎方程式に付加することで、道路網は一般曲線座標系を用いることで、これらの両方を取り扱うことのできるモデルの開発を行っている。しかし、市街地構造を含む氾濫原特性の構成要素は家屋等の構造物や道路網だけでなく、盛土などの地形起伏、水路網、樹林帯等の様々な要素が存在しており、これらを全て取り扱うことのできる氾濫シミュレーションモデルは今のところ存在していない。また、市街地構造を考慮に入れた室内実験データとしては、定常流による福岡ら⁵⁾の水深および流速ベクトルが唯一存在する程度であり、実験結果に基づき適切な検証がなされた市街地氾濫シミュレーションモデルは存在しない。

著者らは、これまで、市街地構造を考慮できる氾濫シミュレーションモデルの開発を目的として、非構造格子と高解像度風上解法⁶⁾に基づく平面2次元洪水流数値モデルの構築⁷⁾と家屋群^{8),9)}、樹林帯¹⁰⁾や流れの状態により水没・非水没状態となる地形起伏¹¹⁾などの氾濫原特性に対する取り扱い方法の提案を行った。そして、実験結果に基づく検証により平面2次元洪水流数値モデルや氾濫原特性の各要素の取り扱いの妥当性を示した。

本研究では、以上のような背景を踏まえ、家屋群^{8),9)}、樹林帯¹⁰⁾や流れの状態により水没・非水没状態となる地形起伏¹¹⁾などの氾濫原特性に対する取り扱い方法を包括した、市街地構造を考慮できる都市域氾濫解析モデル(以下氾濫解析モデルと呼ぶ)を提示する。また、氾濫原要素として、道路網、公園や駐車場などのオープンスペース、構造物、路上設置物、樹林帯、流れの状態により水没/非水没状態になる地形起伏を取り上げ、それらが複雑に配置された市街地での氾濫流の水深、水深方向平均流速ベクトルおよび構造物に働く流体力に関する実験データに基づき、本氾濫解析モデルの再現性の総合的な検証を行う。

2. 氾濫解析モデルの概要

本氾濫解析モデルは、広域の氾濫解析ではなく、河川や市街地を含む都市域を対象とした精度の高い氾濫解析を目的としたものである。以下では、本氾濫解析モデルの平面2次元洪水流数値モデルと氾濫原特性の各要素の取り扱いについて述べる。

(1) 平面2次元洪水流数値モデルの概要

氾濫原構成要素が流れに及ぼす影響は、一般に計算格子を地形形状に沿って形成し、各要素に応じた境界条件や内部境界条件を計算格子に与えることで評価される。そこで、本モデルのベースモデルとして、計算精度および効率の高い格子を容易に生成できる非構造格子に基づくFUF-2DF(Finite-volume method on Unstructured grid using Flux-difference splitting technique for 2D Flood flows)モデル⁷⁾を採用した。以下にFUF-2DFモデルの概要を示す。

a) 基礎方程式

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

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

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

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

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

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、マン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。時間積分にはEulerの陽解法を、空間積分には流束差分法(FDS)¹²⁾を用いる。発生・消滅項については、地盤高勾配のように空間微分を含む場合は、Glaister¹³⁾やBermudez and Vazquez et al.¹⁴⁾が提案するように、流束ベクトルと同様な手法で風上化を行う。一方、摩擦勾配のように空間微分を含まない項については、計算メッシュ重心で定義される保存量 $\mathbf{U}$ に基づき計算を行う。

(2) 氾濫原構成要素の取り扱い

氾濫原特性を構成する要素には、上述したように、家屋やビルなどの構造物、盛土などの地形起伏、道路・水路網、田畑・樹林帯などがある。以下では、これらの取り扱いについて述べる。

a) 道路・水路網・田畑

これらについては、計算セルを境界に沿って配置し、土地利用に応じた等価粗度係数を計算セルに与える。

b) ポンプ排水または降雨

排水量、降雨量をセルに流入する単位面積当りの流量とし、これを計算セルの内部境界条件として与える。

c) 物体・物体群の取り扱い^(8),9),10)

非構造格子は、物体の形状や配置に関係なく、その境界に計算セルを効率良く配置することができる。しかし、全ての物体の境界に計算セルを配置することは、計算容量の関係もあり、現実的ではない。そこで、物体が計算セルより大きい場合には、物体の境界に計算セルを配置し、物体が計算セルより小さい場合には、個々の物体に働く流体力を空間的に平均して得られる流体力項を基礎方程式に付加するにより^{15),16)}、物体が流れに及ぼす影響を考慮する。以下では、前者を「境界適合処理」、後者を「空間平均処理」と呼ぶ。

物体に境界適合処理を適用した場合、物体に働く流体力を求めることができる。物体の境界 Ω' を検査体積 Ω とすると、構造物に働く x および y 方向の流体力 D_x および D_y は、それぞれ式(2)のようになる。

$$D_x = -\rho \oint_{\partial\Omega'} \frac{1}{2} gh^2 n_x dL'; D_y = -\rho \oint_{\partial\Omega'} \frac{1}{2} gh^2 n_y dL' \quad (2)$$

ここに、 ρ は水の密度、 $\partial\Omega'$ は構造物の境界線、 L' は $\partial\Omega'$ の長さ、 n_x 、 n_y はそれぞれ物体境界線における x 、 y 方向の外向き単位法線ベクトルである。

物体に空間平均処理を適用した場合、計算セル i に物体あるいは物体群が含まれることになる。計算セル内の物体群に働く個々の流体力は、空間平均化された流体力項 F_x および F_y として、式(1)の発生・消滅項ベクトル S_i に付加される。

流体力項 F_x および F_y は、それぞれ式(3)のように、抵抗係数と物体密集度パラメータを用いてモデル化される^{15),16),17)}。

$$F_x = \frac{C_d \cdot a}{2} u h \sqrt{u^2 + v^2} \\ F_y = \frac{C_d \cdot a}{2} v h \sqrt{u^2 + v^2} \quad (3)$$

ここで、 C_d は個々の物体の抵抗係数、 a は物体密集度パラメータ($=D' \cdot n'$)(1/m)、 n' は単位面積当たりの物体数(1/m²)、 D' は主流方向に垂直な個々の物体の投影幅である。

d) 流れの状態により水没・非水没状態となる地形起伏の取り扱い¹¹⁾

流束差分法では水深が0となる場合は、セル境界線における数値流束を定められない。そのため、計算の実行が不能となる^{18),19)}。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

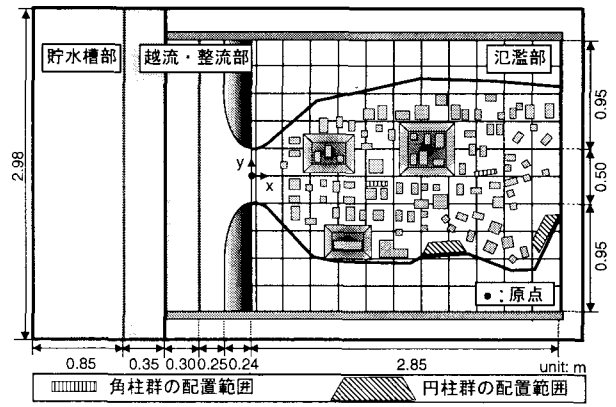


図-1 モデル市街地の実験装置

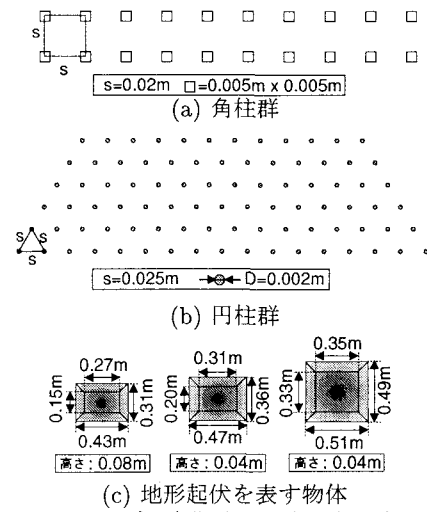


図-2 モデル市街地の構成要素の諸元

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0.00001m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、この場合も計算不能となる²⁰⁾。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 の値は、上述した h_v 値を用い $n=0 \sim 0.07$ 程度まで計算可能な最小の値である0.001mを与えた。

3. モデルの検証

(1) 実験の概要

氾濫流は水の無いドライベッド上あるいはそれに近い状態の氾濫原を広がる非定常性の強い自由表面流で

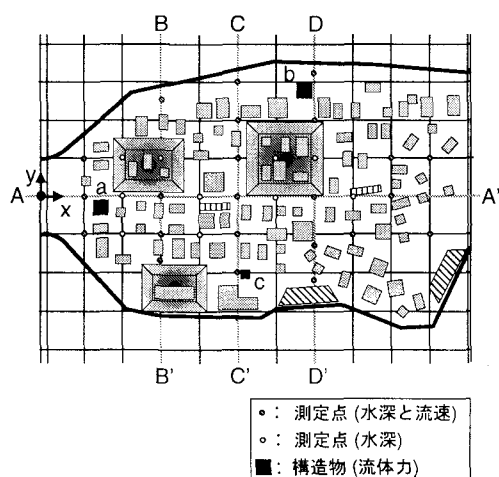


図-3 モデル市街地での測定点および流体力測定を行った物体

ある。しかし、複雑な構造を有する市街地では氾濫流が物体群中を流れるために、その可視化が難しく、著者ら⁷⁾がドライベッド上の2次元部分ダム破壊流れに適用した画像解析による計測手法を用いても氾濫流の水深や流速ベクトルを正確に計測することは極めて難しい。そこで、ここでは定常流での実験を行った。

実験装置は、図-1に示すような貯水槽部(幅2.98m、長さ0.85m)、越流・整流部(幅2.4m、長さ1.14m)および氾濫部(幅2.4m、長さ2.85m)より構成される洪水氾濫水槽である。整流部から流出部へは、流れの剥離が生じないように幅2.4mから0.5mへ緩やかに絞り込まれている。

市街地を構成する要素として、道路網、公園や駐車場等のオープンスペース、構造物、路上設置物、樹林帯、水没/非水没状態となる地形起伏を考慮し、構造物としての角柱または路上設置物としての角柱群、樹林帯としての円柱群および地形起伏としての物体を氾濫部に配置した。角柱の配置については、1983年7月の山陰豪雨で大きな被害を受けた三隅地区²¹⁾の道路網や構造物の配置状況を参考に決定した。角柱群、円柱群および地形起伏を表す物体の配置と諸元はそれぞれ図-2に示す通りである。なお、本研究の目的は都市域構成要素の取り扱いを組み込んだ氾濫シミュレーションモデルの検証であるので、市街地構成要素が流れに及ぼす影響が明確になるように、その縮尺や配置および流入流量などの実験条件を設定した。

水路上流端から一定流量 $Q=0.0155\text{m}^3/\text{s}$ の水を流入させ、図-3中に示した測定位置で水深と流速を、図-3中の黒で塗りつぶした物体に働く流体力を測定した。水深 h の測定はポイントゲージで行った。 x および y 方向の流速 u_x および u_y の測定は、電磁流速計で測定し、その結果から水深方向の流速分布を求め、これを積分することで単位幅流量を求めた。これを水深で除して、 x および y 方向の水深平均流速 u 、 v を算定した。物体に働く流体力の測定は、物体に2分力計を取り付ける

表-1 モデル市街地の計算に用いた係数値

粗度係数	物体密集度	抵抗係数
n	a	C_d
0.01	12.5(角柱群)	2.12(角柱群)
	0.09(円柱群)	1.2(円柱群)

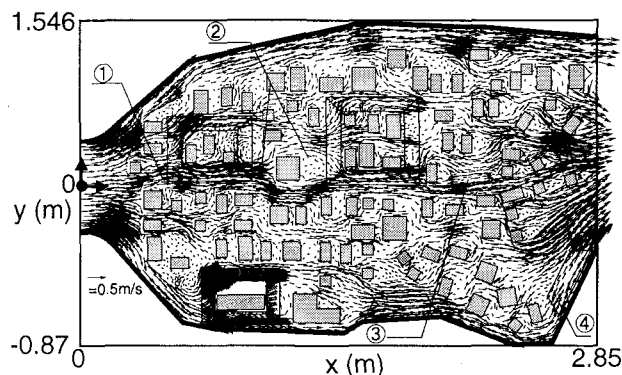


図-4 モデル市街地での氾濫流の流速ベクトル

ことで測定した。以下の実験結果をフーリエ解析すると、いずれの角柱においても、その固有振動数は角柱設置時の固有振動数の1/5以内におさまっており、測定時の固有振動数の影響は無視できることが確認された。なお、流速および物体に働く流体力測定のサンプリング時間とサンプリング間隔は、それぞれ30秒と0.05秒および60秒と0.05秒である。

(2) 数値シミュレーションの概要

計算領域および物体の境界におけるメッシュ分割数を変化させた数値実験結果¹⁰⁾を参考に、境界での分割数を与え、デローニ法を用いたメッシュジェネレータによりメッシュサイズと配置を自動的に決定した。その結果、7441個のメッシュで計算領域を分割した。図-3中の影をつけた物体には境界適合処理を、角柱群および樹林帯には空間平均処理をそれぞれ適用した。計算に用いたManningの粗度係数 n 、角柱群および樹林帯の物体密集度 a および抵抗係数 C_d は表-1に示す通りである。物体密集度 a については、角柱群および樹林帯の配置から決定した。角柱群の抵抗係数 C_d については、まず、角柱群の代替として迎角を考慮しなくて良い円柱群を用い試算を行い、配置範囲での主流方向は街路に沿った方向であることを確認した後、この主流方向をもって角柱の迎角 $\alpha = 0^\circ$ を定め、参考文献22)の表-3から C_d 値を決定した。円柱群の抵抗係数 C_d については、参考文献23)の図-14から C_d 値を決定した。境界条件としては、上流端には一定単位幅流量 ($q=6.5 \times 10^{-3}(\text{m}^2/\text{s})$)、下流端には実験より求めた水深 ($h=0.0163 \sim 0.0364\text{m}$)、壁面には閉境界条件をそれぞれ与えた。初期条件としては、流速 $u=v=0$ と全ての地形起伏が水没状態となるような水位を与えた。各時間の計算結果の比較から定常状態と判断した時点で

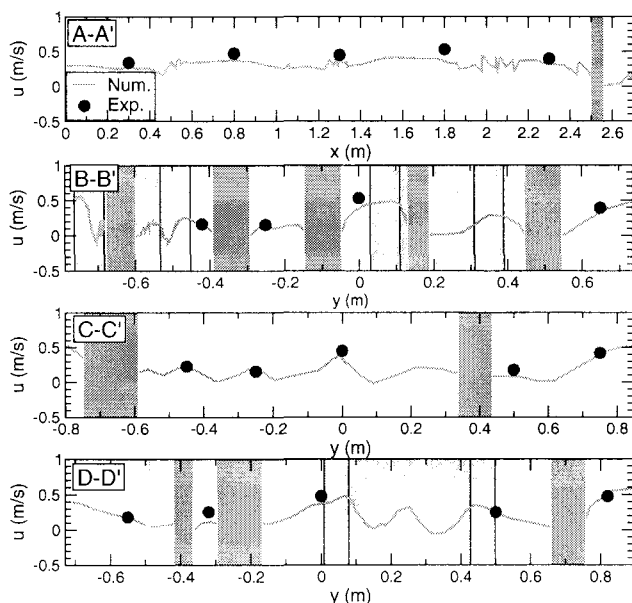


図-5 モデル市街地での各断面における x 方向流速の比較
計算を終了した。

(3) 結果および考察

図-4 は流速ベクトルの計算結果、図-5 と図-6 は、それぞれ図-3 に示す A-A' から D-D' 断面における流速ベクトルの実験値と計算結果の比較を行ったものである。図-5 および図-6 中の薄く影をつけた部分は水没物体、濃く影をつけた部分は非水没物体を表している。

図-4 から、流出部付近の氾濫流が、街路幅の広い両側壁付近の街路および $x=0$ 軸を通る街路に集中して流れる様子が確認できる (図-4 ①)。さらに、氾濫流の主流方向が物体により大きく変化し、物体背後にオープンスペースがある場合には渦が発生するなど、非常に複雑な流況が生じることもわかる (図-4 ②)。また、 $x=0$ 軸を通る街路沿いに路上設置物として配置した角柱群や壁面付近に設置した樹林帯により、流れが減勢される様子も確認できる (図-4 ③, ④)。このように、市街地での氾濫流の流速と流向は、市街地構造により大きく変化し非常に複雑であるため、図-5 と図-6 に示すように、いずれの断面においても x および y 方向の水深方向平均流速の変動は急激で大きい。例えば、物体が最も多く設置されている B-B' 断面では、 x 方向流速 u が物体間で加速される様子 (図-5 B-B' $y=0$ 付近) や、非水没となる地形起伏と物体の影響により、 y 方向流速 v が正負の方向に 2 分される様子 (図-5 B-B' $y=-0.6$ 付近) が確認できる。C-C' 断面の街路沿い ($y=0\text{m}$) では、その上流側の角柱および角柱群の影響により、流れが街路に集中するため加速され、 $y=0\text{m}$ 付近での x 方向流速 u が大きい。また、D-D' 断面の地形起伏上 ($y=0 \sim 0.5\text{m}$) では、その上流側にある物体間で流れが加速され、 $y=0.25\text{m}$ 付近の x 方向の流速が大きくなる様子等が確認できる。これら構造物が多く存在する断面に比べ、A-A' 断面は街路に沿っているため、流速変動は

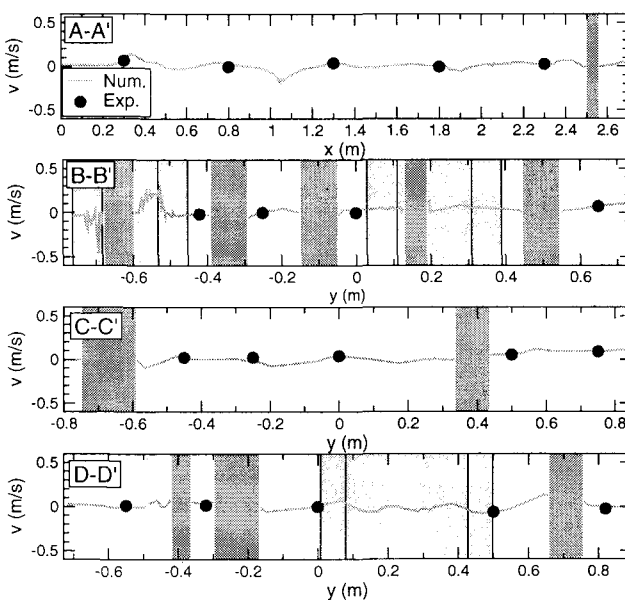


図-6 モデル市街地での各断面における y 方向流速の比較

小さい。計算結果はいずれの断面においても実験値をおおむね再現している。

図-7 と図-8 はそれぞれ、底面を基準面とした水位コンター図の計算結果と図-3 に示す A-A' から D-D' 断面における水位の実験値と計算結果の比較を行ったものである。図-7 から、流れが流入口付近の物体によりせき止められ、そこでの水位が大きくなる様子がわかる。また、図-8 から、水位は上流から下流へと小さくなり、横断方向については水面形状がほぼ一定であること、などがわかる。計算結果は実験値をほぼ再現していることも確認できる。

図-9 は、図-3 中の黒で塗りつぶした物体 a～c に働く流体力の計算結果と実験値との比較を行ったものである。図中のエラーバーは測定結果の標準偏差を表している。この図から、物体 a, c では、計算結果は実験値を良好に再現していることがわかる。しかし、物体 b では計算結果と実験値との間に標準偏差程度のずれが生じている。これは、物体 b の位置では、上流側の物体により生じた剥離した流れが衝突し、そのような流れは浅水流方程式では再現できないためと考えられる。

4. おわりに

本研究では、物体群および水没／非水没状態の地形起伏などの氾濫原構成要素が混在する極めて複雑なモデル市街地での氾濫流の実験結果に基づき、本氾濫解析モデルの総合的な検証を行った。その結果、本氾濫解析モデルが、複雑な市街地構造を有する場での氾濫流だけでなく、構造物に働く流体力までも十分な精度で再現できることを明らかにした。

謝辞： 本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金（特別研究員奨励費）の援助を受けた。また、本研究を

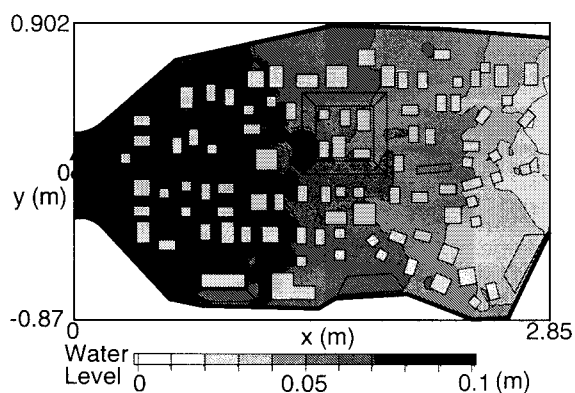


図-7 モデル市街地での氾濫流の水位コンター (計算結果)

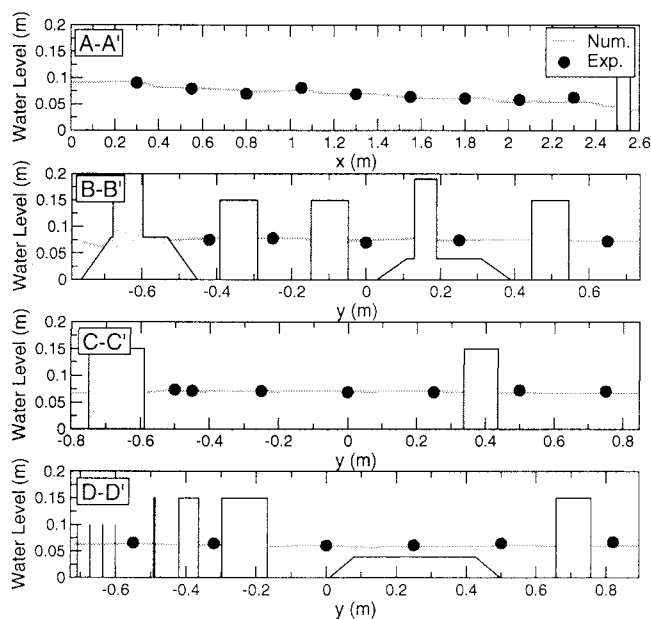


図-8 モデル市街地での各断面における水位の比較

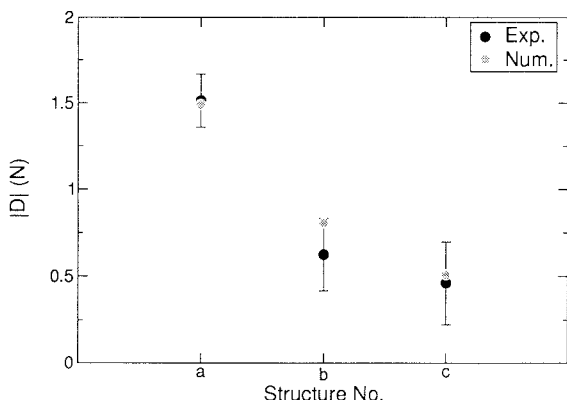


図-9 モデル市街地での物体に働く流体力の比較

遂行するにあたり、本学大学院生 大田和正君 (現 (株) 大本組), 浅野孝典君の協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 辻本哲郎 (編): 2000 年 9 月東海豪雨災害に関する調査研究, 平成 12 年度科学研究費補助金 (特別研究促進費 (1)) 研究報告書, 2001.
- 2) 米国省庁合同氾濫原管理委員会: 21 世紀に向けたアメリ

カの河川環境管理, Technical report, 1994.

- 3) 末次忠司, 栗城健: 改良した氾濫モデルによる氾濫流の再現と防災への応用に関する研究, 土木学会論文集, No. 593/II-44, pp. 41-50, 1998.
- 4) 井上和也, 川池建司, 戸田圭一: 非構造格子による氾濫解析モデル, 京都大学防災研究所年報, Vol. 42 B-2, pp. 339-353, 1999.
- 5) 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.
- 6) 藤井孝蔵: 流体力学の数値計算法, p. 234, 東京大学出版会, 1994.
- 7) 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.
- 8) 重枝未玲, 秋山壽一郎, 浦 勝, 有田由高: 非構造格子を用いた有限体積法に基づく平面 2 次元洪水流数値モデル, 水工学論文集, 第 45 巻, pp. 895-900, 2001.
- 9) 重枝未玲, 秋山壽一郎, 浦 勝, 小林俊彦: 洪水氾濫流と構造物に働く流体力の数値シミュレーション, 水工学論文集, 第 46 巻, pp. 833-838, 2002.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) Roe, P. L.: Approximate Riemann solvers, parameter vectors and difference schemes, *Journal of Computational Physics*, Vol. 43, pp. 357-372, 1981.
- 13) Glaister, P.: Approximate Riemann solutions of shallow water equations, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 26, pp. 293-306, 1988.
- 14) Bermudez, A. and Vazquez, M.: Upwind methods for hyperbolic conservation laws with source terms, *Computers & Fluids*, Vol. 8, No. 8, pp. 1049-1071, 1994.
- 15) Raupach, M. R. and Shaw, R. H.: Averaging procedures for flow within vegetation canopies, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 22, pp. 79-90, 1982.
- 16) 秋山壽一郎, 浦 勝, 重枝未玲, 有田由高: 杭群のある場における非定常自由表面流の数値シミュレーション, 水工学論文集, 第 43 巻, pp. 527-532, 1999.
- 17) 池田駿介, 太田賢一, 長谷川洋: 側壁部植生境界の周期渦の発生機構, 土木学会論文集, No. 443, pp. 47-54, 1992.
- 18) Zhao, D. H., Shen, H. W., Tabios III, G. Q., Lai, J. S. and Tan, W. Y.: Finite volume two-dimensional unsteady-flow model for river basins, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 7, pp. 863-883, 1994.
- 19) 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.
- 20) 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.
- 21) 河田恵昭, 中川一: 三隅川の洪水被害-洪水氾濫と家屋の被害-, 京都大学防災研究所年報, Vol. 27 B-2, pp. 1-18, 1984.
- 22) 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.
- 23) 林建二郎, 藤井優宏, 重村利幸: 開水路中における円柱群に作用する流体力に関する研究, 水工学論文集, 第 45 巻, pp. 475-480, 2001.

(2003. 9.30 受付)