

# 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

末次忠司<sup>1</sup>・栗城稔<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 建設省土木研究所都市河川研究室室長（〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地）

<sup>2</sup>正会員 工修 アジア開発銀行（前 建設省土木研究所都市河川研究室室長）

特に市街地において家屋群が氾濫水の挙動に与える影響は大きい。本研究では実験に基づいて、家屋占有率を考慮した合成粗度係数式を提案するとともに、土地利用毎の粗度係数を設定した他、実験・計算に基づいて二次元不定流モデルのモデル構成の検討を行った。そして、新モデルの妥当性の検証・感度分析を筑後川及び鶴見川流域において実施し、その有効性が確かめられた。また、防災GISとしてのハザード・シミュレータを鶴見川流域を対象に開発した。

*Key Words: flooding, simulation, two dimensional unsteady flow model, dyke-break, hazard simulator, hydraulic model test on flooding, Tsurumi River, Chikugo River*

## 1. 序論

近年、堤防・ダム・調節池などの各種治水施設の整備に伴って、破堤や越水による氾濫被害は減少傾向にあるが、水害被害額は経済成長率に呼応して増加している。一方、甲突川（平成5年）、関川（平成7年）において水害が発生して大きな被害となったり、予測を超えた阪神・淡路大震災が発生するなど、今後大水害が発生するポテンシャルはむしろ増大していると言える。

こうした大災害に対応するには、従来から実施されている治水施設の整備に加えて、流域まで含めた「総合治水」、更に積極的に氾濫原における氾濫流制御や各種のソフトな対策まで含めた「氾濫原管理」を実施していく必要があると考えられる。

ソフトな対策には、これまで洪水危険地図が公表されたり、情報伝達体制・避難体制などの強化が図られてきた。これらの対応に不可欠な情報を提供するのが氾濫解析技術である。しかし、行政的に数多く活用される一方で、解析技術自体の改善、特に流域内の家屋が氾濫流の挙動に及ぼす影響に関する研究は中川<sup>2)</sup>、佐藤ら<sup>3)</sup>、福岡ら<sup>4)</sup>などに限られ、研究事例は数少ない。

本研究は氾濫モデルのなかで、もっとも計算精度の高い二次元不定流モデルを対象として、氾濫水理模型実験及び計算結果に基づいて、モデルの構成・粗度係数等に関する検討を行うとともに、最適なメッシュ分割、また

既存の破堤データ等から破堤幅、その時間的変化について検討を行った<sup>5)</sup>が、本報告では紙面の関係でモデルの構成・粗度係数について報告している。そして、新モデルの妥当性を筑後川流域で発生した水害を対象に検討し、また鶴見川流域を対象にして感度分析を行った。

まず、水理模型実験では家屋・道路を想定した模型を用いて、家屋占有率をかえた実験を実施し、家屋占有率と水深をパラメータとした氾濫原の合成粗度係数を算定できる計算式を提案した。同時に既往の計算結果等も用いて、道路・農地・その他の粗度係数も設定した。更に、実験に対応した氾濫計算結果より運動方程式の各項の比較を行い、拡散項を考慮しなくてもよいことを明らかにした。

次に、昭和28年に筑後川流域で発生した水害時に計測された5箇所の最高浸水深及び2箇所の逆破堤時刻（氾濫水により堤内地側から堤防が破堤した時刻）の実績データより、新モデルが妥当であることを検証した。鶴見川流域を対象にした検討では、改良した合成粗度係数式の妥当性の他に検討した破堤幅、メッシュ幅の影響を感度分析し、粗度係数が与える影響が大きいことを示した。

最後に、新モデルを応用して鶴見川流域を対象に開発した「ハザード・シミュレータ」を紹介し、今後の洪水防衛・水防活動・避難活動などの水防災対策に有効であることを示した。

表-1 実験ケース

家屋サイズ	家屋占有率	道路形態	水深	総計 36ケース
40cm× 40cm	9.5%	道路なし 片側1車線 片側2車線	約6cm	
	21.3%		約8cm	
	37.9%		約10cm	
59.2%				
1ケース	4ケース	3ケース	3ケース	

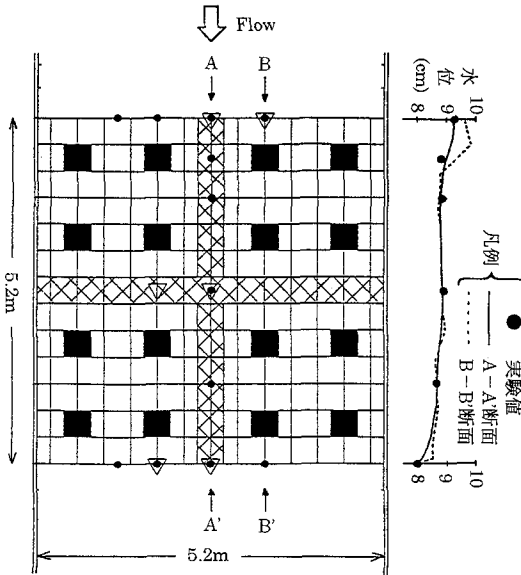


図-1 実験施設及び水位の縦断変化

注) 斜線部分は道路を想定した部分, ●は水位測定箇所, ▽は流速測定箇所である。

(実験条件:  $\theta=9.5\%$ , 道路片側1車線)

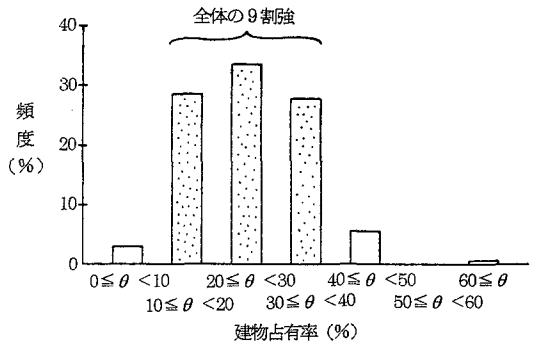


図-2 建物占有率の頻度分布

測した結果得られた図-2の頻度分布図をカバーするように設定したものである。

表-1以外の実験ケースも含めて, 建物の占有率(密度), 配置に伴う氾濫水の流況の概要は以下の通りである。

a) 建物密度が面的に一樣な場合

- ・横断方向の水深分布は一樣であるが, 水深は縦断的に減少する。後述する抗力係数の検討結果同様, 建物占有率が25%に近い21.3%と37.9%のケースで水深が低く, 37.9%のケースで水面勾配が最大となっている。
- ・縦断方向の流速は下流に行くに従って増大しているが, 建物占有率が大きな37.9%と59.2%のケースではほぼ一樣である
- ・建物密度が同じであっても, 流量(水深)が大きくなると, 渦が発生し, 建物間の流れが蛇行するようになる。

b) 低速域(建物占有率約44%と64%)と高速域(建物なし)が横断的に配置された場合

- ・横断方向に見て特に建物占有率が大きくなると, 水深分布の変化は少なくなる
- ・横断方向に見て建物間の流速は高速域の最大流速の(6~8)割である
- ・高速域の流速は低速域からの距離にほぼ比例して増大する

## 2. 氾濫水理模型実験による粗度係数の検討

### (1) 氾濫水理模型実験の概要

従来より氾濫解析に用いられてきた二次元不定流モデルの粗度係数について検討し, 改善するために家屋を仮想したブロックを水路床に配置した水理模型実験を実施した。実験には幅5.2m, 長さ16m(うち5.2m区間に家屋模型を配置)で水路床がフラットである氾濫流実験施設を用いた。表-1, 図-1に示したように, 水路床には縮尺1/25の家屋を想定して40cm四方, 高さ12cmのコンクリートブロック(図において■)を家屋占有率をかえて格子状に配置するとともに, 道路形態, 浸水深による違いも確認した。そして水位はポイントゲージ, 流速はプロペラ流速計で測定した。ここで, 家屋占有率とは敷地面積に占める家屋面積の割合で9.5%, 21.3%, 37.9%, 59.2%の4ケースを設定した。この値は全国29の中核都市における160箇所(1箇所あたり500m×500m区画)の建物占有率を1/2,500の都市計画図で計

### (2) 合成粗度係数式の提案

実験では家屋設置区間の上・下流各々4地点(家屋の上・下流2点, 敷地側又は道路の上・下流2点)の水深を測定した。家屋群による合成粗度係数 $n$ は上流側平均水深 $h_u$ , 下流側平均水深 $h_d$ , 単位幅流量 $q$ を用いて, 連続式と不等流式より求めた次式により計算した。

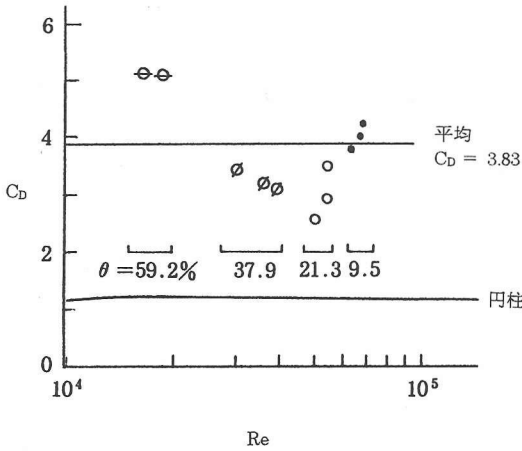


図-3  $Re$  と  $C_D$  との関係

$$n = \sqrt{\frac{2g(h_u - h_d) + q^2 \left( \frac{1}{h_u^2} - \frac{1}{h_d^2} \right)}{gq^2 \left( \frac{1}{h_u^{10/3}} + \frac{1}{h_d^{10/3}} \right) \Delta x}} \quad (1)$$

ここに  $g$ : 重力加速度,  $\Delta x$ : 実験区間長(5.2m)である。一方, 氾濫水の重力の流下方向成分  $G$  は底面せん断力  $R_1$  と家屋の抵抗力  $R_2$  の和と等しくなるから, 以下の関係式が成立する。

$$G = R_1 + R_2 \quad (2)$$

$$G = \rho g V I = \rho g B h u \Delta t \left( 1 - \frac{\theta}{100} \right) \frac{n^2 u^2}{h^{4/3}} \quad (3)$$

$$R_1 = \tau A_1 = \rho g h \frac{n_o^2 u^2}{h^{4/3}} B u \Delta t \left( 1 - \frac{\theta}{100} \right) \quad (4)$$

$$R_2 = \frac{1}{2} C_D \rho u^2 A_2 = \frac{1}{2} C_D \rho u^2 \frac{\theta}{100} B u \Delta t \frac{h}{d} \quad (5)$$

ここに,  $\rho$ : 水の密度,  $V$ : 氾濫水の容積,  $I$ : 水面勾配,  $h$ : 水深,  $B$ : 水路幅,  $u$ : 流速,  $\theta$ : 家屋占有率,  $\tau$ : 底面せん断力,  $A_1$ : 氾濫水の底面積,  $A_2$ : 家屋の総投影面積,  $n_o$ : 底面粗度係数,  $C_D$ : 抗力係数,  $d$ : 家屋幅である。

これらの式より,

$$n^2 = n_o^2 + \frac{C_D}{2gd} \times \frac{\theta}{100 - \theta} h^{4/3} \quad (6)$$

が導かれる。ここで実験水路にブロックを配置しない状

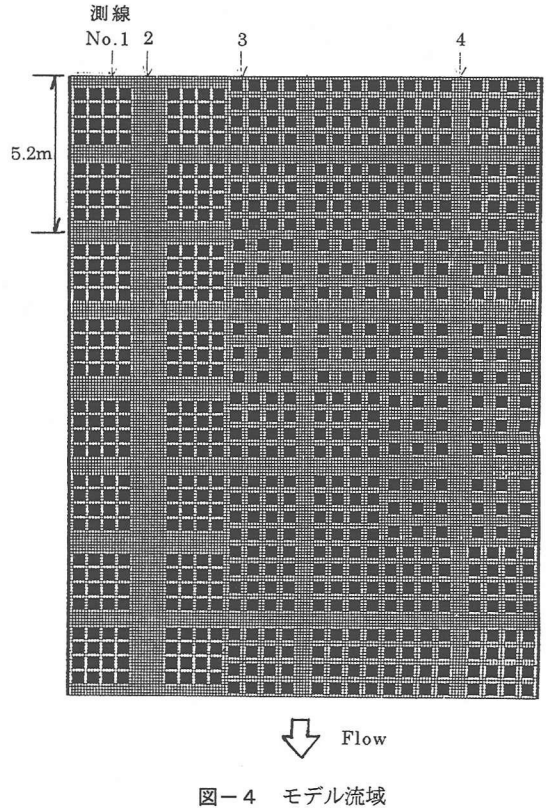


図-4 モデル流域

態での粗度係数  $n_o = 0.0126$  を与えれば, 式(1)と式(6)より, 各実験ケースにおける  $C_D$  が計算できる。ここで式(6)は家屋に直交する氾濫流による抵抗のみを考慮しており, 家屋と氾濫流との相互方向を考慮して, 今後式(6)を改良していく必要があると考えられ, 今後の課題としている。以下ではまず家屋だけの抵抗を考えるため, "道路なし" のケースの  $C_D$  のみを考慮した。単独の正四角柱の場合の  $C_D$  は 10cm 四方の角材を用いて流量  $Q=19.4$  l/s ( $h=10$ cm), 62.3 l/s ( $h=20$ cm) の条件で計測した結果, 平均値として  $C_D=2.02$  が得られた。家屋群の  $C_D$  はこの値より大きく, 家屋間距離が家屋幅に等しくなる"家屋占有率 25%"に近くなるほど小さな値となっている。これは流れの(横断方向に見た)剥離域の幅が家屋の約半分であるため, 家屋間距離がこの値に近づくにつれて, 流れの乱れが少なくなり, あたかも流れを加速するような流れとなり, 背後家屋への流水抵抗が減少したためであると考えられる。計測された  $C_D$  は  $Re$  数によりばらついているものの,  $\theta$  をかなり広い範囲でとっており, 有意な差であるとは考えず, 平均化して図-3のように平均値 3.83 を得た。ここで  $Re = uB/v$  である。この  $C_D$  は円柱の  $C_D$  の約 4 倍に相当するものである。こ

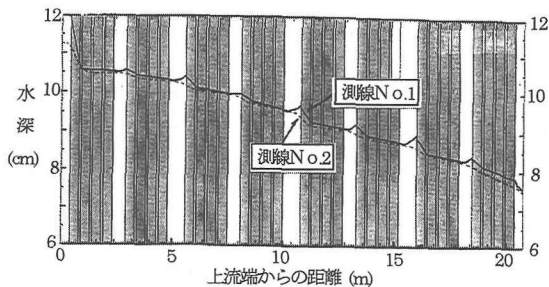


図-5 測線毎に見た水深分布(1)  
注) 図中の網掛け部分は家屋区間である

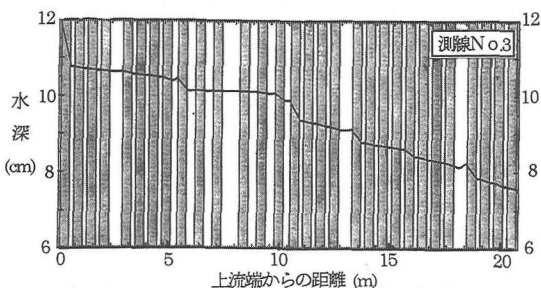


図-6 測線毎に見た水深分布(2)

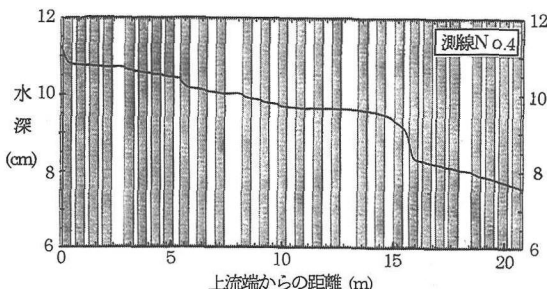


図-7 測線毎に見た水深分布(3)

の値を式(6)に代入し、スケール 1/25 で  $\frac{C_D}{2gd}$  を現地換算すると以下の式が導ける。

$$n^2 = n_0^2 + 0.020 \times \frac{\theta}{100 - \theta} \times h^{4/3} \quad (7)$$

また実験のうち、道路の上下流の水深より道路の粗度係数  $n_f = 0.0273$  (現地換算で 0.047) が得られた。片側1車線の場合と片側2車線の場合の粗度係数の違いは高々1割以内であったので、車線数での区別は行わなかった。一方、農地の粗度係数は大半の土地利用が農地である小貝川破堤(昭和61年8月)データに基づいて検証された  $n_s = 0.060$  を用いた<sup>9)</sup>。またこれらの粗度係数を参考にして、その他の土地利用の場合の粗度係数は  $n_s = 0.050$  を採用した。これらの土地利用別粗度係数が分かれば、以下の面積加重平均式によって底面粗度係数  $n_0$  が算定

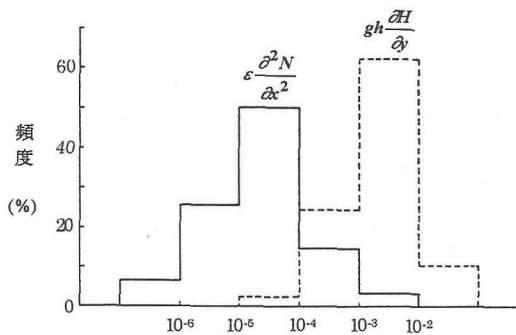


図-8  $\epsilon \frac{\partial^2 N}{\partial x^2}$  と  $gh \frac{\partial H}{\partial y}$  のオーダー比較

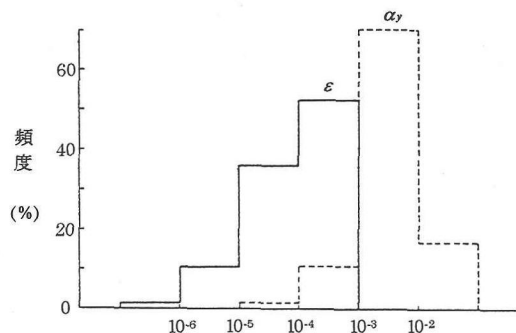


図-9 水平粘性係数 ( $\epsilon$ ) と数値粘性係数 ( $\alpha_y$ ) のオーダー比較

できる。

$$n_0^2 = \frac{n_1^2 A_1 + n_2^2 A_2 + n_3^2 A_3}{A_1 + A_2 + A_3} \quad (8)$$

ここに  $A_1$ : 道路面積,  $A_2$ : 農地面積,  $A_3$ : その他の土地利用の面積である。

以下では、これらの(合成)粗度係数を用いて、モデル流域における氾濫計算を実施した。

### 3. 実験スケールでの氾濫解析に関する検討

#### (1) 実験に対応した氾濫解析

粗度係数は家屋の密集度がパラメータとなることから、図-4に示す鶴見川流域の末吉地区を参考にして、現地の  $100\text{m} \times 100\text{m}$  区画を実験水路の  $5.2\text{m} \times 5.2\text{m}$  区画に見立てて、都市域をモデル化し  $10\text{cm} \times 10\text{cm}$  の細メッシュで二次元不定流モデル(式(9)及び拡散項を除いた式(10)(14))により計算を行った。ここで、下流端水深は

7.56cm (水路中央部の下流端水深の平均値), 上流端流量は 74l/s ( $\theta=9.5\%$ , 片側1車線の実験ケースの平均流量)を与えた. 左右岸は直立壁である.

図-5に示すように, 家屋がない領域(測線 No. 2)では上流端において大きなエネルギーロスがある以外は, 氾濫水の水面勾配はなめらかになっている. また, 家屋が均一に配置している場合(測線 No. 1)は家屋群の上流側で水位が堰上げられているが, それ以外の水理現象は前述した測線と同様である. これに対して, 測線 No. 3(図-6)では中央付近において水面勾配がかなり急になっている. これは, 氾濫水が家屋占有率の高くなる区間を流下する際に流れが縮流し, 上流側の水位を堰上げたためである. また, 図-7のように, 流下方向に家屋占有率が変化する領域を通過する道路の測線 No. 4では, 家屋占有率が高い下流域において急激な水位低下が生じている.

## (2)モデルの各項目の影響

次に詳細に, 二次元不定流モデルの運動方程式の各項の影響を検討するため,  $\theta=9.5\%$  (片側1車線), 水深約 10cm ( $Q=100.4\text{l/s}$ ) の実験に対応した計算を  $\Delta x=5\text{cm}$  ( $\Delta t=0.002\text{sec}$ ) の極細メッシュで実施した. 連続式, 拡散項を考慮した運動方程式は以下のとおりである.

[連続式]

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

[x 方向: 横断方向運動方程式]

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \underbrace{\frac{\partial(uM)}{\partial x}}_{\text{移流項}} + \underbrace{\frac{\partial(vM)}{\partial y}}_{\text{水面勾配項}} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \underbrace{\frac{\tau_x}{\rho}}_{\text{摩擦項}}$$

$$+ \underbrace{(\varepsilon + \alpha_x) \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + (\varepsilon + \alpha_y) \frac{\partial^2 M}{\partial y^2}}_{\text{拡散項}} \quad (10)$$

$$\tau_x = \frac{\rho g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (11)$$

$$\alpha_x = \frac{1}{2} u \Delta x \left( 1 - u \frac{\Delta t}{\Delta x} \right) \quad (12)$$

$$\alpha_y = \frac{1}{2} v \Delta y \left( 1 - v \frac{\Delta t}{\Delta y} \right) \quad (13)$$

[y 方向: 流下方向運動方程式]

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho}$$

$$+ (\varepsilon + \alpha_x) \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + (\varepsilon + \alpha_y) \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \quad (14)$$

$$\tau_y = \frac{\rho g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (15)$$

ここに,  $M, N, X$  方向及び  $Y$  方向の流量フラックス ( $M=uh, N=vh$ ),  $u, v, X$  方向及び  $Y$  方向の流速,  $H$  水位,  $h$  水深,  $\tau_x, \tau_y$ :  $X$  方向及び  $Y$  方向の底面せん断力,  $\varepsilon$ : 水平粘性係数,  $\alpha_x, \alpha_y$ :  $X$  方向及び  $Y$  方向の数値粘性係数,  $\rho$ : 水の密度,  $g$ : 重力加速度,  $n$ : 粗度係数である. 全項の合計を 1 とした時の各項のオーダーを比較してみると, 水面勾配が緩いため小さく評価された摩擦項を

除いて考えると, 例えば水平粘性項  $\varepsilon \frac{\partial^2 N}{\partial x^2}$  は  $10^{-6} \sim 10^{-4}$

であり, 水面勾配項  $gh \frac{\partial H}{\partial y}$  より 2 オーダー小さい(図

-8 参照).

また速度差の大きな領域, 例えば家屋が密集した領域と道路との境界などでは水平粘性作用が大きくなるが, 空間的に中央差分近似した水平粘性項は数値粘性項よりも小さくなることが予想される. 実際, 図-9に示すように計算の結果得られた  $y$  方向の水平粘性係数

$$\varepsilon \left( = \frac{\kappa \sqrt{g} N n}{\sigma h^{1/6}} \right) \text{ は } 10^{-5} \sim 10^{-3} \text{ であり, 数値粘性係数 } \alpha \text{ よ}$$

りも 1~2 オーダー小さくなっている. これらの拡散項は空間的には 2 次精度の中央差分近似を用いて差分近似の精度を上げる方法が考えられるが, 水深や流速の変化が大きな場所での数値的不安定(解の発散)を生じないよう, 1 次精度の風上差分近似を用いている. 以上より, 解の安定性を考えて, この差分法を採用するかぎり, 数値粘性が生じても仕方なく, また水平粘性項のオーダーが小さいことから, 基本的には拡散項を無視して計算しても問題ないと言える.

## 4. 新モデルの検証

### (1) 筑後川流域の浸水実績<sup>7)</sup>から見た検証

昭和 28 年 6 月の梅雨前線豪雨では, 全国で千名以上の死者・行方不明, 47 万棟以上の被災家屋が発生した. 特に九州地方の被害は甚大で, 筑後川においては本川直轄区間だけで 26 箇所破堤氾濫が生じた.

福岡県久留米市では 6 月 26 日の 17 時 30 分頃に東櫛

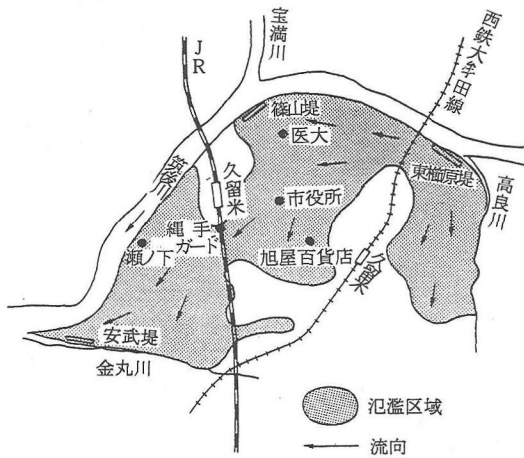


図-10 最高浸水深が観測された地点

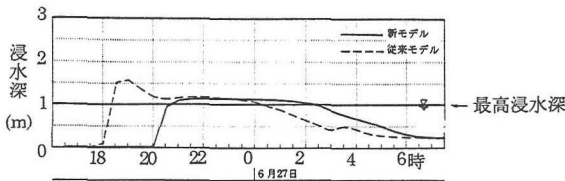


図-11 新旧モデルによる浸水深の比較 (旭屋百貨店)

原堤が破堤し、市街地一帯が浸水した。この氾濫に伴う最高浸水深は図-10に示す市内5箇所において、痕跡により明らかにされた。更に氾濫水のうち、筑後川左岸沿いの流れは、篠山堤から河道に溢水し、6月26日の18時20分頃に堤防を破堤(逆破堤)させた。また市街地へ向かった氾濫流は国鉄縄手ガードを経て、下流の水田地帯を浸水させ、その後支川金丸川の堤防(安武堤)を溢水し、6月26日の23時30分頃、堤防を逆破堤させた。

本検証ではこれらの最高浸水深、逆破堤時刻を検証材料として、モデルの妥当性を確かめた。新モデルでは流域を $\Delta x = 100\text{m}$ で分割し、計算時間間隔 $\Delta t = 2$ 秒で計算を行った。流域施設としては盛土の他、樋門、カルバートを考慮している。また実績値より最終破堤幅は90mを用い、最終破堤幅になる30分間に破堤幅、破堤数高は時間とともに変化すると仮定した。この計算で特徴的なのは従来モデルでは文献(8)に基づいて粗度係数を土地利用毎に

- ・宅地 0.040
- ・水田・畑 0.025
- ・山林 0.060

と設定していたのに対して、粗度係数の設定に新たな知

表-2 最高浸水深の比較

地点	実績	従来モデル	新モデル
久留米医大	TP3.0m ~4.0m	TP4.0m	TP3.9m
久留米市役所	TP1.2m ~1.5m	TP1.6m	TP1.2m
旭屋百貨店	TP1.0m	TP1.6m	TP1.1m
国鉄縄手ガード	TP3.9m	TP3.7m	TP3.0m
瀬ノ下	TP2.0 ~2.3m	TP2.4m	TP1.8m

表-3 逆破堤時刻の比較

	実績	従来モデル	新モデル
篠山堤	6/26 18:20	6/26 17:50 実績より30分早い	6/26 18:15 実績より5分早い
安武堤	6/26 23:30	6/26 20:05 実績より3時間25分早い	6/27 0:30 実績より1時間遅い

見を含めた新モデルでは式(7)で提案した合成粗度係数式及び式(8)の底面粗度係数を用いたことである。

概して、新モデルは合成粗度係数が大きくなった分、氾濫水が遅く伝播している。そして図-11、表-2に示したように、旭屋百貨店などでは新モデルの方が実績値に近い最高浸水深となっている。特に逆破堤時刻(越水開始時刻)は、表-3のように両地点においてかなり実績時刻に近くっており、よく改善されていると言える。以上の結果より、新モデルは従来モデル以上に氾濫現象を正確に再現していると考えられる。

## (2) 鶴見川流域を対象にした感度分析

序論で示したように、今回は氾濫解析に関係する項目のうち、メッシュ幅、破堤幅及びその時間的变化、合成粗度係数の設定の4項目について検討した(表-4参照)。本節では鶴見川流域を対象にして、これらの影響を感度分析した結果を示す。

対象としたのは鶴見川左岸15k地点における破堤である(対象流域の建物占有率は約20%である)。計算は流域を約100m(厳密には緯度・経度に対応させて113m×92m)又は約250mに分割し、計算時間間隔は $\Delta t = 5$ 秒とした。破堤幅は従来の式より求めた152m(従来型)と既存の全国101破堤データより新たに提案した式より求めた104m(改良型)の2通りとした。ここで、

- ・従来の式とは

表-4 計算ケース

ケース	メッシュ幅	破堤幅	破堤幅の時間変化	粗度係数
1	250m	従来型	従来型	従来型
2	100m	従来型	従来型	従来型
3	250m	改良型	従来型	従来型
4	250m	従来型	改良型	従来型
5	250m	従来型	従来型	改良型
6	100m	改良型	従来型	従来型
7	100m	従来型	改良型	従来型
8	100m	従来型	従来型	改良型
9	250m	改良型	改良型	従来型
10	250m	改良型	従来型	改良型
11	250m	従来型	改良型	改良型
12	100m	改良型	改良型	従来型
13	100m	改良型	従来型	改良型
14	100m	従来型	改良型	改良型
15	250m	改良型	改良型	改良型
16	100m	改良型	改良型	改良型

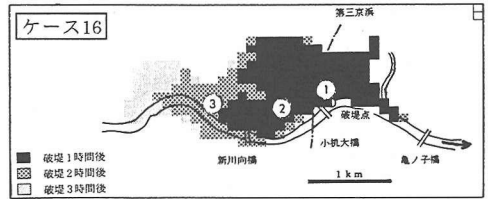
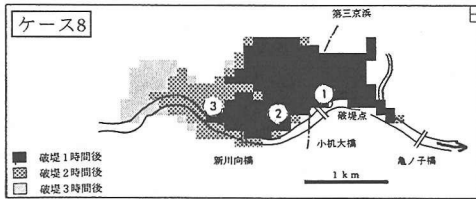
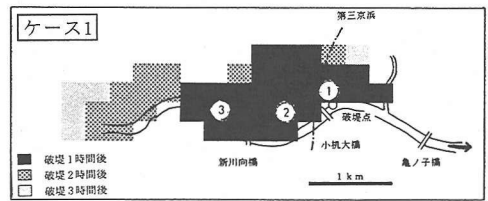
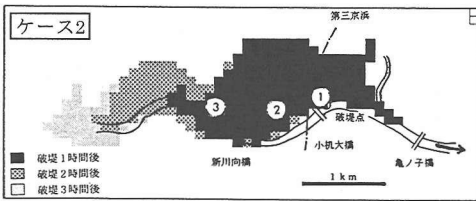


図-1 2 粗度係数に対する感度分析  
(氾濫水の拡散)

図-1 4 4項目に対する感度分析  
(氾濫水の拡散)

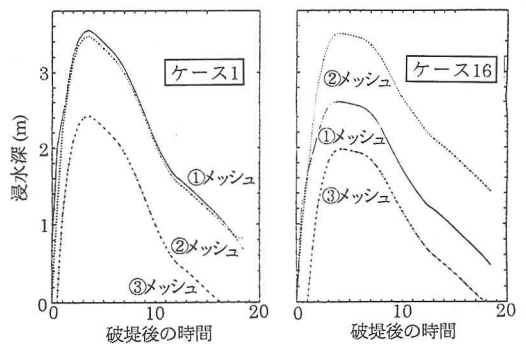
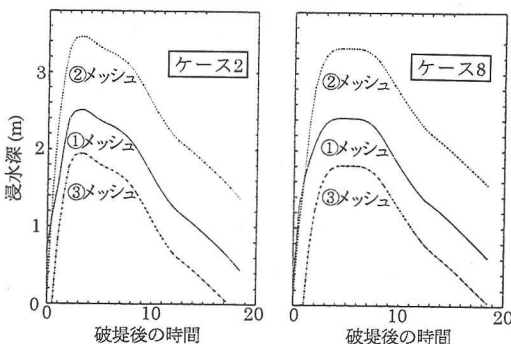


図-1 3 粗度係数に対する感度分析  
(浸水深の時間的変化)

図-1 5 4項目に対する感度分析  
(浸水深の時間的変化)



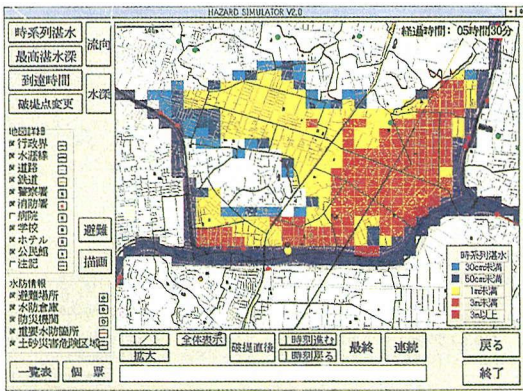


図-16 最高浸水時の浸水深分布  
(破堤後5時間30分)

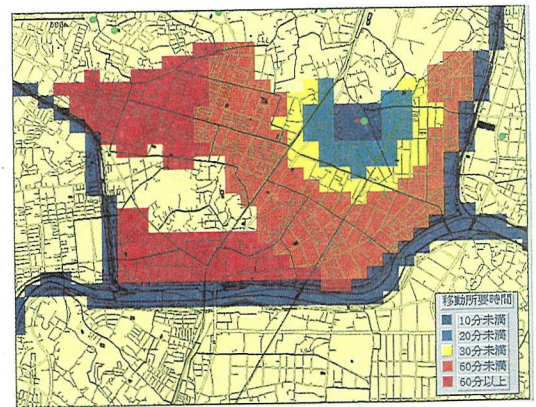


図-18 避難所要時間の分布

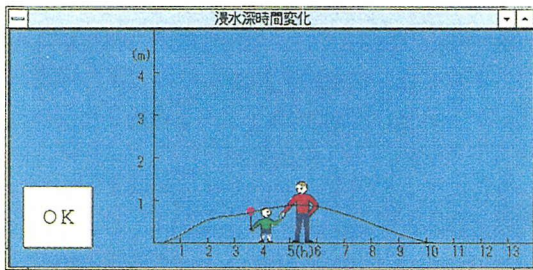


図-17 浸水深の時系列変化

$$B_b = B(2.46 - 0.352 \times \ln B) : \text{直線部} \quad (16)$$

$$B_b = B(4.18 - 0.565 \times \ln B) : \text{湾曲・合流部} \quad (17)$$

・提案式とは

$$B_b = 2.0 \times (\log_{10} B)^{3.84 + 77} : \text{合流部} \quad (18)$$

$$B_b = 1.6 \times (\log_{10} B)^{3.84 + 62} : \text{合流部以外} \quad (19)$$

であり、今回のケースでは式(17)及び式(18)を採用している<sup>9)</sup>。ここに、 $B_b$ : 破堤幅、 $B$ : 川幅である。

破堤幅は破堤後瞬時に最終破堤幅に拡大するケース(従来型)と破堤してから最終破堤幅になるまで1時間を要する場合(改良型)の2ケースを想定した。(合成)粗度係数は筑後川における検証と同様の条件で比較を行った。

感度分析の結果は氾濫水の拡散状況、浸水深の時間的変化、最高浸水深の3通りで比較したが、破堤幅及びその時間的変化については何れの項目について見ても、あまり差異は見られなかった。またメッシュ幅による違いは、メッシュ幅が細かいほど地形特性がよく反映されて、

氾濫水の伝播が早く、かつ広い範囲に伝播している。

もっとも影響が大きかったのは、合成粗度係数による違いで、流域全体の平均粗度係数は従来モデルで0.038、新モデルで0.133である。図-12、13に示すように新モデルの計算では家屋粗度が大きく評価された結果、氾濫水の伝播が遅く、かつ浸水深のピーク発生時刻も遅くなっている。ただし、最高浸水深の時の状況については浸水範囲が若干狭くなったり、浸水深が若干低くなっている程度で大きな差異は見られなかった。また4項目全てを変えて感度分析計算を行った結果を図-14、15に示したが、粗度係数のみを変えた場合の計算結果とあまり変わらない結果となっている。

従って、今回提案した合成粗度係数式を用いることにより、氾濫解析精度が向上し、氾濫現象をより忠実に再現できると言える。また、最高浸水深などにより浸水リスクを評価する場合は合成粗度係数の影響は小さいが、避難活動や氾濫流制御など氾濫水の伝播プロセスが問題となる場合は家屋占有率を考慮した合成粗度係数式を用いることが必要であると言える。

## 5. ハザード・シミュレータの開発<sup>10)</sup>

### (1)シミュレータの概要

氾濫解析技術を実際の防災活動に適用していくためには、様々な条件に対応し、かつ迅速に氾濫現象を予測することが必要となる。本シミュレータは予め計算しておいた結果を瞬時にパソコンの画面上に表示するとともに、各種防災情報を提供できるシステムである。

計算モデルには新たに開発した合成粗度係数式を用いるとともに、対象とした鶴見川流域が都市域であることを考慮して下水道による排水も計算条件に加えている。



そして、流下能力が低い箇所、または堤内地から見た河床高の比高が高い箇所を中心に仮定の破堤箇所を 51 箇所(うち支川 13 箇所)選定した。幹線流路延長が 42.5km であるから、およそ 1km ピッチで破堤氾濫を再現できる。破堤は河道水位が計画高水位を超えた時点で発生するか、又は計画水位を超えない場合は最高水位で発生するものとした。また様々な条件に対応できるよう、対象外力は昭和 33 年 9 月(狩野川台風)の実績洪水波形の他、昭和 41 年 6 月波形(工事実施基本計画対応)の確率洪水(超過確率 1/30, 1/40, 1/50, 1/100, 1/150)の 6 タイプが選択可能である。

このシミュレータは防災GISで、緯度及び経度で統一表示可能な 3 層構造のシステムである。3 層成分は、国土数値情報(3 次メッシュデータを 10 等分したもの)、数値地図 10,000(総合)、氾濫解析結果である。すなわち、流域は国土数値情報に対応できるよう、約 100m 四方のメッシュに分割されて計算されており、また数値地図に登録されている行政界、道路、鉄道などの表示が可能となる。

## (2)シミュレータによる表示

上記の 3 層成分の情報は Visual Basic for Windows によって表示される。表示項目は大別して以下の 4 種類がある。

### ・浸水情報

図-16のように、氾濫水の挙動は浸水深のランク毎に、時間的・場所的に表示される。浸水深は避難のことを考慮して、30cm, 50cm, 1m, ……というようにランク分類されている。時間表示は破堤後 1, 2, 3 分からはじまって、時間経過とともに 30 分きざみの表示となる。図-17のように個別の浸水危険性を知るために、任意メッシュにおける浸水深の時間的な変化も表示できる。また各メッシュにおける流速・流向も表示可能である。

### ・避難情報

避難活動への活用は本シミュレータの開発の大きな目的の一つである。避難の困難度について、浸水深と氾濫水の流速との関係から避難の可能域、不可能域が表示できる。一方、指定避難所を表示できる他、図-18のように任意の避難先までの所要時間分布を表示できる。この図より、効果的な避難所の指定ができる。なお避難速度は既往の調査結果に基づいて、安全側サイドで 30cm/秒又は 45cm/秒の 2 通りを設定できる<sup>11)</sup>。

### ・防災支援情報

シミュレータには避難所の他に、水防倉庫、防災機関、土砂災害危険区域、重要水防箇所の一覧・個別表示ができる。個別表示では、避難所の避難収容人員、水防倉庫に備蓄されている水防資器材などが示される。土砂災害危険区域を表示しているのは、山沿いの道路を避難して

土砂災害に遭遇しないためであり、今後は地域によっては高潮や地震による危険区域も表示する予定であり、そういう意味で洪水ハザード・シミュレータではなく、一般的な「ハザード・シミュレータ」と命名しているのである。

### ・その他の情報

上記の情報以外に、各時刻に対応して、水害被害状況が表示できる。例えば被災世帯数、建物被害額、事務所(償却・在庫)被害額や浸水深別の被災世帯数なども画面上に表示できる。他に、地図上には学校、病院、警察署、消防署などもマーキングできる。

このシミュレータについては、行政機関における運用が可能かどうか、また操作性・視認性などに問題が無いかどうかについて、建設省京浜工事事務所及び横浜市役所において、職員に実際に操作してもらい、利用可能性が十分であることを確認した。

## 6. 結論

本研究の主要な結論を以下に示す。

- 1) 氾濫水理模型実験の結果に基づいて、家屋の密度(占有率)を考慮した氾濫原粗度係数の算定式を提案した。他、道路・農地・その他の土地利用の場合の粗度係数も設定した。
- 2) 実験及び計算結果より、運動方程式における水平粘性項は小さく、拡散項を考慮しなくても問題ないことが分かった。
- 3) 筑後川流域で発生した水害を対象にして、最高浸水深及び逆破堤時刻から新モデルの計算精度が向上したことが確かめられた。
- 4) 鶴見川流域における感度分析結果より、氾濫水の伝播には粗度係数がかつても大きく影響することが分かり、今回のモデルの改良で精度向上に十分寄与できることが分かった。
- 5) 新モデルを実際の防災活動に応用できる形式として、鶴見川流域を対象に、防災GISタイプのハザード・シミュレータを開発した。シミュレータは氾濫予測の他、水防活動・避難活動への適用も十分可能であることが確かめられた。

**謝辞:** 本研究を進めるにあたり、当研究室の海野仁主任研究員、小林裕明研究員、田中義人研究員には水理模型実験及び氾濫計算に関して多大な協力を頂いた。記して、感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 末次忠司: 氾濫原管理のための氾濫流制御と避難体制の強化。氾濫原危機管理国際ワークショップ, 1996。

- 2) 中川一:洪水および土砂氾濫災害の危険度評価に関する研究,京大学位論文,1989.
- 3) 佐藤智,今村文彦,首藤伸夫:洪水氾濫の数値計算および家屋被害について,第33回水理講演会論文集,1989.
- 4) 福岡捷二,川島幹雄,松永直夫,前内永敏:密集市街地の氾濫流に関する研究,土木学会論文集 No.491/II-27,1994.
- 5) 栗城稔,末次忠司,海野仁,田中義人,小林裕明:氾濫シミュレーション・マニュアル(案)-シミュレーションの手引き及び新モデルの検証-,土木研究所資料第3400号,1996.
- 6) 建設省下館工事事務所:小貝川氾濫解析(その2)業務報告書,1987.
- 7) 建設省筑後川工事事務所:筑後川氾濫解析と避難システム検討報告書,1985.
- 8) Xanthopoulos,Th and Ch.Koutitas: Numerical Simulation of a Two Dimensional Flood Wave Propagation Due to Dam Failure, Jour. Hydraulic Research, Vol.14,No.2,1976.
- 9) 栗城稔,末次忠司,海野仁,田中義人,小林裕明:氾濫シミュレーション・マニュアル(案)-シミュレーションの手引き及び新モデルの検証-,土木研究所資料第3400号,1996.
- 10) 栗城稔,末次忠司,小林裕明:ハザード・シミュレータの水防・避難活動への活用,土木技術資料,Vol.37, No.11,1995.
- 11) 栗城稔,末次忠司,小林裕明:洪水による死亡リスクと危機回避-すぐに役立つ実践的危機管理のポイント(避難編)-,土木研究所資料第3370号,1995.

(1997.1.30 受付)

## RESEARCH ON APPLICATION FOR FLOOD DISASTER PREVENTION AND SIMULATION OF FLOODING FLOW BY MEANS OF NEW FLOOD SIMULATION MODEL

Tadashi SUETSUGI and Minoru KURIKI

The behavior of flooding flow has influence of the density and arrangement of houses in urbanized area, especially. We proposed new equation of synthesized roughness coefficient considering occupation ratio of houses due to hydraulic model test. Besides, we investigated roughness coefficient concerning other land-use and the influence of term of two dimensional unsteady flow model. And validity of new model was verified in case of Chikugo and Tsurumi River Basin. Moreover, Hazard Simulator in Tsurumi River Basin was developed as GIS for flood disaster prevention.