

# 密集市街地の氾濫流に関する研究

福岡捷二\*・川島幹雄\*\*・松永宜夫\*\*\*・  
前内永敏\*\*\*\*

扇状地上に発達した密集市街地における氾濫流の挙動及び粗度係数値を氾濫水理模型実験より明らかにした。次に密集市街地の氾濫流の挙動、家屋・道路配置に着目し、道路形状を精度良く見積もることのできる一般曲線座標系を用いた数値シミュレーションモデルを開発し実験と比較することにより、モデルの有効性を示した。さらに、このモデルにより既成市街地を対象として氾濫シミュレーションを行い、ハード・ソフトの氾濫流対策を検討した。

**Key Words** : inundation water, crowded urban district, numerical simulation, risk management, evacuation system

## 1. 序 論

わが国の社会経済発展の重要な基盤となっている都市の多くは大河川の想定氾濫区域に位置している。こうした都市には社会経済の高度化に伴い、人と資産の集中のみならず、社会経済活動の中核機能が集積してきた。しかし、大河川の整備状況は当面の目標である30~40年に一回発生する程度の規模の降雨に対してすら、要氾濫防区域の62%が整備されているにすぎず<sup>1)</sup>、改修レベルの低い河川にあっては、大きな洪水に対して破堤の危険性が高い。さらに改修の進んだ河川においても、計画の規模を上回る洪水が発生した場合には破堤の懸念がある。

このような治水施設の整備状況にもかかわらず今日の都市計画では、経済性や日常生活上の利便性などに重点をおいた道路・鉄道・公園などの都市施設の整備が進められ、河川の氾濫を念頭においた水防災街づくりはほとんど行われてきていない。

水防災街づくりの一例として、河川と流域が一体となった総合的な治水対策が挙げられる。しかし、この中では具体的な市街地構造、鉄道・道路等土木施設の構造には言及していない。また、浸水実績図・浸水予想区域図の公表などにより浸水の危険性を住民に知らせてはいるが、詳細な水理状況、及び具体的な避難方法が示されていないため、住民が避難行動に役立てる、あるいは自治体が防災計画に利用するには情報が不足しているのが現状である。

氾濫流による都市被害の大きさを考慮すると、沿川市

街地の計画には氾濫によって生じる人的・物的被害を小さくするハードとソフト両面の対策が強く求められている。このことは特に氾濫水の流速が大きくなる扇状地上に発達した密集市街地に対して重要となる。

つまり、街づくりに際しては事前に氾濫水に対して安全な市街地の構造、土木施設の構造及び防災計画（避難方法、避難経路、避難場所、情報伝達システム）を検討し、これらが洪水氾濫時に有効に機能しかつ安全であるか十分確認する必要がある。そのためには、精度の高い市街地氾濫シミュレーションによって、沿川市街地域の氾濫水の挙動と危険度を事前に把握し、対策・計画の効果を評価した上で、最適な対策・計画を立案することが重要である。

氾濫流についての従来の研究は、実際に起こった洪水氾濫流を再現する数値シミュレーションモデルの構築が中心課題となっている<sup>2),3)</sup>。しかし数値シミュレーションモデルの中に含まれる係数値等の決め方があいまいなため、一般的な手法に至っていないのが現状である。係数値を合理的に決め一般性のある予測モデルを構築するには、大型の水理模型による氾濫流実験を行い、この結果より予測モデルを同定することが必要となる。水理模型実験によりシミュレーションモデルを同定しようとする研究は、高橋、中川ら<sup>4)</sup>によりなされているが、排水路網を再現することに主眼がおかれ、密集市街地氾濫流の研究まではなされていない。また避難計画に関する研究としては、西原<sup>5)</sup>が避難シミュレーションにより避難計画を立案する方法を示しているほか、高棹ら<sup>6)</sup>による避難行動のモデル化と避難計画の評価に関する研究がなされている。しかし、密集市街地における一般性のある予測モデルを構築した上で、氾濫流の挙動を明らかにし、その成果を市街地構造など都市防災に生かしていこうという主旨の研究は福岡ら<sup>7),8)</sup>によるものしかないようである。

\*正会員 工博 Ph. D 東京工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

\*\*正会員 (株) 東京建設コンサルタント 技術3部

\*\*\*正会員 工修 東日本旅客鉄道株式会社

\*\*\*\*正会員 建設省建設経済局建設機械課

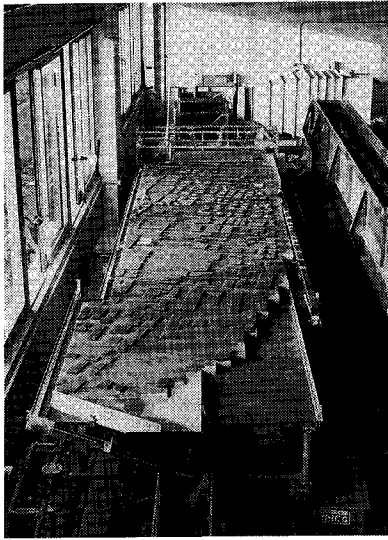


写真1 実験装置

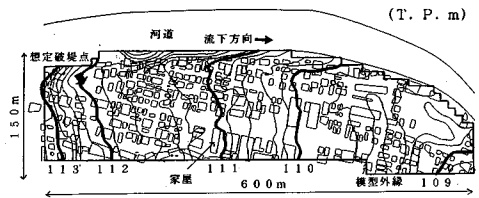


図1 氾濫水理模型と地盤高コンター

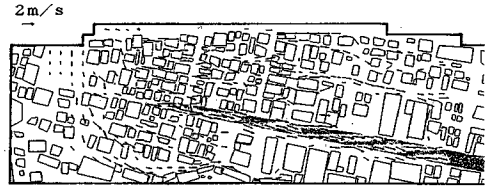


図2 流速ベクトル図 (実験結果)

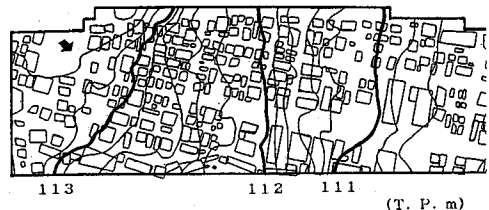


図3 水位コンター図 (実験結果)

本研究は、福岡らの研究<sup>7),8)</sup>の延長上にあるもので、扇状地上に発達した密集市街地の氾濫流の挙動を模型実験より明らかにした上で、これを説明する数値シミュレーションモデルを開発し、密集市街地における氾濫流対策を検討することを目的としている。

まず模型実験では、多様な道路網、家屋密度・配列をもつ実際の市街地を対象とした模型を用いて氾濫流の挙動を明らかにし、道路及び家屋群間の粗度係数値を求める。さらに氾濫水深と粗度係数の関係を明らかにする。次に、市街地氾濫流が道路に集中することに着目し、氾濫流の流速・水深・移動速度などを精度よく計算することのできる、一般曲線座標系を用いた氾濫シミュレーションモデルを開発し、水理模型実験結果との比較によりモデルの有効性を示す。また、従来用いていた直交座標系モデルと比較した利点も併せて示す。最後に、そのモデルを用いて、既成の市街地を対象として氾濫シミュレーションを実施し、市街地氾濫流の被害を小さくすることを旨とした、ハード・ソフトの氾濫流対策を示す。

## 2. 密集市街地の氾濫流水理模型実験

### (1) 実験装置と実験方法

写真1に示すように扇状地上に発達したH市市街地の一部分について、家屋配置と道路網を再現した1/100無ひずみ模型を製作した。実験範囲はあらかじめ数値計算を実行し、水深が模型上で0.5cm以下になる範囲を実験領域外縁に選んでいる。氾濫域の大きさは実スケールに換算すると幅150m、流下方向に600mであり、外縁境界は段落形式になっている。図1は氾濫模型を地盤高コンターとともに示す。この区間の平均縦断勾配は1/140で、ほぼ河川の勾配と同じである。地盤はモルタ

ルで製作し表面を研磨しており、地盤高の精度は模型上で約1mmである。また、家屋は全て四辺形に単純化し目の粗いスポンジで製作した。

想定破堤点は幅約100mとし、ここから約106m<sup>3</sup>/s(1/70確率年相当)の一定流量を流入させ、氾濫流の水位、流速、流向等を測定した。流速測定には小型プロペラ流速計を用いた。

### (2) 実験結果

実験結果はフルードの相似則を用いて実スケールに換算した値で示す。

図2は流速ベクトルを、図3は水位コンターを示す。幹線道路(ハッチした道路)上では0.5~0.8mの水深と約3.0m/sの流速が発生している。また、ほとんどの小さな街路で、流下方向に1~1.5m/sもの流速がみられる。破堤点付近では家屋間でも水深約1.2mで、2.0m/s程度の流速が生じている。氾濫水は流下するに従って、家屋密集地では流速が小さくなるが、道路では流速は大きいままである。最大水深は1.9m、全体では概ね0.7~0.9mの水深である。また、破堤点付近では、慣性力を持った流入水のため水面形は複雑な様相を呈しているが、ある距離流下すると水面高は横断方向にほぼ一樣になる。

図4は横断面内の通過流量を示す。破堤点付近では道路と家屋群間双方で氾濫流を分担しているが、流下するに従って、氾濫水は道路に集中するようになる。破堤

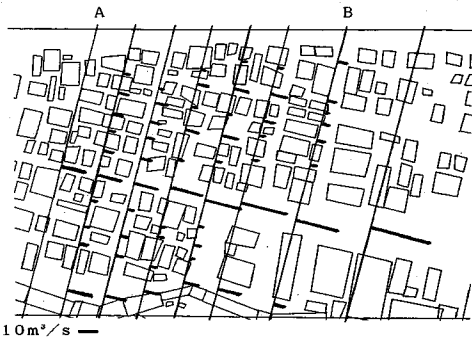


図-4 横断通過流量 (実験結果)

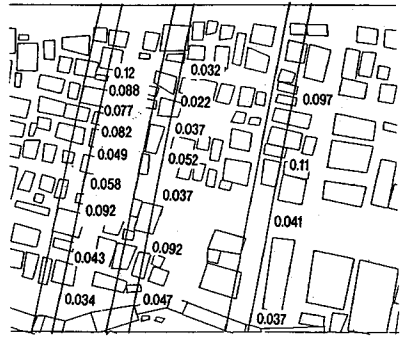


図-6 粗度係数の分布

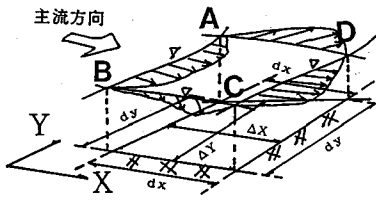


図-5 粗度係数算定領域

点から 100 m 流下した横断面 (A 断面) の中央の道路は 22% の流量を分担しているに過ぎないが、破堤点からわずかに 250 m 流下 (B 断面) すると、45% もの流量を分担している。さらに下流に進むと、ほとんどの氾濫水は道路を走るようになる。また、幹線道路では流速は 3 m/s と大きくなるので道路に面する建物などには耐水構造を施すことが必要であり、特に建物が道路に張り出すと損壊する危険性が高くなる。

(3) 道路及び家屋群内の抵抗の評価

氾濫実験結果から、密集市街地においては氾濫水が家屋群によって流下阻害されることにより道路上を集中して流れ、氾濫水は道路上の流れに大きく支配されていることが明らかとなった。つまり、氾濫原の粗度を評価する際には、道路の粗度と家屋群による流下阻害を的確に与えることが重要となる。まず、家屋群については流れに対する抵抗の形で運動方程式の中に直接取り込み、その影響を評価する方法も考えられるが、種々の家屋規模、家屋形状、家屋配置による抵抗の違いを逐一計算の中に取り込むことは、実際上不可能である。そこで、中川と同様に家屋群は占有面積率<sup>3)</sup>に応じて粗度係数を実験的に決めることとした。

すなわち、粗度係数は水位と横断面内の流速分布から算定した。流れが定常で水平粘性が無視できるほど小さく、流速分布は鉛直方向に一様であると仮定すると、 $x$  方向の平面二次元流れの基礎方程式は次式で示される。

$$\frac{\partial u(uh)}{\partial x} + \frac{\partial v(uh)}{\partial y} = -gh \frac{\partial(h+z)}{\partial x} - \frac{gn^2 u_0 (u^2 + v^2)^{1/2}}{h^{1/3}} \dots \dots \dots (1)$$

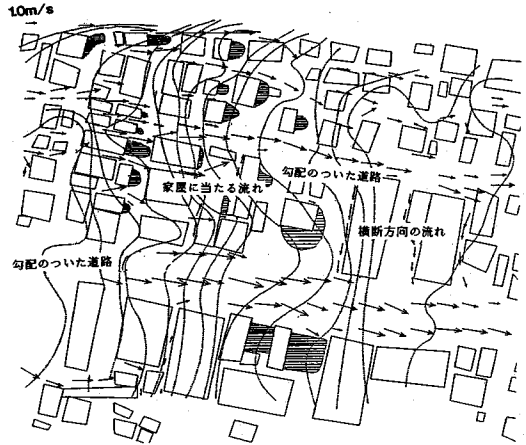


図-7 死水域の分布 (ハッチした範囲が死水域)

図-5 のような検査領域 ABCD における流速分布、水位において、式 (1) の各項を次の手順で求める。

左辺第 1 項は、断面 AB, CD の全面から  $x$  方向の流量フラックスが速度  $u_{AB}$ ,  $u_{CD}$  をもって出入りし、第 2 項は、断面 BC, DA から  $x$  方向の流量フラックスが速度  $v_{BC}$ ,  $v_{DA}$  で出入りすると考え、

$$\frac{\partial u(uh)}{\partial x} = \frac{u_{CD}u_{CD}h_{CD}dy - u_{AB}u_{AB}h_{AB}dy}{\Delta x \Delta y} \dots \dots \dots (2)$$

$$\frac{\partial v(uh)}{\partial y} = \frac{v_{DA}u_{DA}h_{DA}dx - v_{BC}u_{BC}h_{BC}dx}{\Delta x \Delta y} \dots \dots \dots (3)$$

右辺において水深  $h$  は断面 AB 間の平均水深  $h_0$  で表し、検査断面中央の流速  $u_0$ ,  $v_0$  は断面 AB, BC の平均流速で表すと、

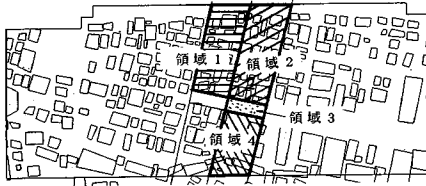
$$-gh \frac{\partial(h+z)}{\partial x} = -gh_0 \frac{h_{CD} + z_{CD} - (h_{AB} + z_{AB})}{\Delta x} \dots \dots \dots (4)$$

$$-\frac{gn^2 u_0 (u^2 + v^2)^{1/2}}{h^{1/3}} = -\frac{gn^2 u_0 (u_0^2 + v_0^2)^{1/2}}{h^{1/3}} \dots \dots \dots (5)$$

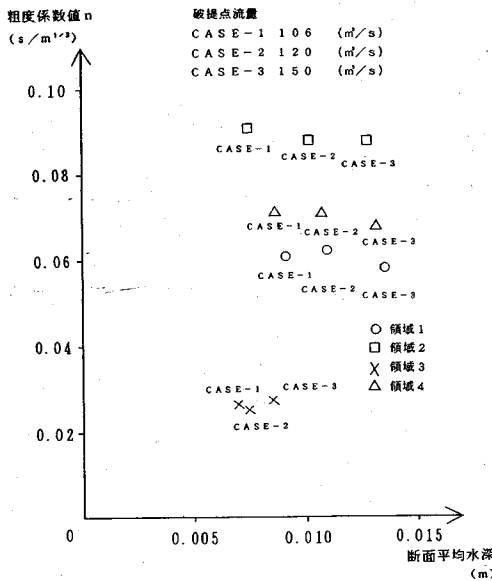
図-6 にこれらの関係式から算定した粗度係数値  $n$  の分布を示す。中央道路の粗度は 0.058~0.037 で平均は 0.045 である。家屋群の粗度係数は同程度の家屋占有面積率でもかなりバラツキが生じる。このバラツキの原因としては、検査断面内に家屋が存在しても、流れが全断

表一 家屋占有面積率と粗度係数

家屋面積 (%)	横型粗度係数	現地粗度係数
道 路	0.020	0.043
0 ~ 20	0.026	0.056
20 ~ 50	0.040	0.084
50 ~ 80	0.047	0.096
80 以上	1.000	1.000



図一八 粗度係数の検査領域



図一九 粗度係数値と水深の関係

面を流れると仮定し、家屋群の抵抗は粗度係数の中に取り込むものとしているが、実際には図一七に示す様に家屋の背後には家屋の形状、流れの状況によって様々な死水域の範囲が生じており、これがパラツキの原因になると推定される。このため家屋の存在する範囲の粗度係数値は、家屋占有面積率がほぼ等しいと思われる範囲毎に得られた粗度係数値を平均して用いることにする。平均粗度係数値を表一に示す。ここで、家屋面積80%以上の場合は、ほとんど家屋で占められることになり流れがほとんど生じないことから極端に大きな粗度係数値1.0を与えている。

粗度係数値が流量、水深など水理量にどの程度依存するかを調べるため、破堤点における流入量を106 m<sup>3</sup>/s (CASE-1)、120 m<sup>3</sup>/s (CASE-2)、150 m<sup>3</sup>/s (CASE-3) に変化させ、同一領域における粗度係数値の変化を調べ

た。検査領域を図一八に、検査領域における平均水深と粗度係数値の関係を図一九に示す。家屋群内の粗度係数値は概ね右下がりの傾向を示すが、その変化は小さい。また、道路の粗度係数値は一定であると考えてよい。これらのことは水深によって粗度係数値はあまり大きくは変化しないと考えてよい。

### 3. 密集市街地における氾濫流の数値解析

氾濫流の挙動を数値シミュレーションで予測する研究は従来から多く為されているが、大別して三つの検討すべき点が残されている。

第一に氾濫流の支配方程式である。現在、多く使用されているモデルはタンクモデル、二次元浅水流モデルの二つである。タンクモデル<sup>9)</sup>は、その基礎式の簡便さに加え、比較的家屋密度の小さい氾濫域において、浸水面積や湛水深をよく説明するという利点から、多くの流域において使用されている。しかし、氾濫水先端の到達時間、氾濫流速などの詳細な氾濫水の挙動解析には不向きである。それに対して、二次元浅水流モデルは、基礎式はX、Y方向の運動方程式と連続式からなり、計算は煩雑になるが、その物理的な明確さや、近年の計算機の発達により、現在、氾濫流解析手法の主流になっている。特に比較的地盤勾配の大きい地形上での氾濫流の挙動には、二次元モデルが必要となる。

第二は、堤内地の抵抗力の評価方法である。特に市街地では、家屋の評価方法が問題となる。岩佐<sup>2)</sup>らは、堤内を大きく田畑、森林、宅地といった領域に分け、各々適当な等価粗度係数の形で与え、計算を行った。中川<sup>9)</sup>は、家屋の密集度の違いによって、その密集度に応じた適当な粗度係数を計算格子毎に与えることで家屋群の影響をある程度考慮した計算が行えることを示した。佐藤<sup>10)</sup>は、計算格子内に占める家屋数と家屋面積を単純化し、一個の正方形の家屋と見なすことで、正方形の抵抗係数Cd値を用いて、家屋による流水抵抗を計算格子毎に与え計算を行った。

第三に計算格子をどの程度の大きさにとるかは、対象とする氾濫域の面積、地盤勾配、土地利用状況や計算時間、計算に求める精度によって、決定されるものである。著者らの研究<sup>7)</sup>から、密集市街地における氾濫解析では、道路上の流速、水深等が精度よく解析できれば、氾濫水の到達時間や流況がかなりの程度説明できることが分かっている。そのため、計算格子サイズを道路幅程度の10m×10mと小さくし、道路の流下方向に沿って格子分割することにより、市街地における氾濫流の挙動を細かく解析する事ができたが、この方法では、データ作成などに非常に手間がかかり、解析に要する時間、コスト上の問題も大きく、大きな氾濫域における解析には必ずしも最適な方法とは言えない。また、道路網は一般には

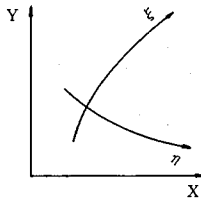


図-10 直交直線座標系と一般曲線座標系

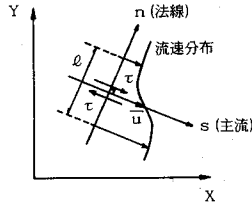


図-11 水平混合項の考え方

直交していることは少ないので、直交座標系では道路網を精度良くモデル化することは難しい。

そこで本研究では、直交座標系に変わり、計算格子を道路網に沿った任意の座標系にとることができ、それにより格子数を削減し、計算時間、データ作成の手間を少なくすることのできる一般曲線座標系を採用する。基礎式には、一般曲線座標系により記述した浅水方程式を用いた。さらに市街地の粗度係数は2. (3) で述べた家屋の占有面積率に応じて評価することとした。

(1) 一般曲線座標系を用いた二次元浅水方程式

図-10 に示すように物理平面 (x, y) を直交直線座標系に、写像平面 (ξ, η) を一般曲線座標系として、二次元浅水方程式を座標変換し、以下の基礎式を得る<sup>11)</sup>。ここでは、計算を簡略化するために、流れの水平混合については図-11 に示すように流れの主流 (s 方向) に対する法線方向 (n 方向) のみの拡散を考慮している。

差分式は staggerd-scheme を用いる。

a) 連続式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial u^\xi h}{\partial \xi} + \frac{\partial u^\eta h}{\partial \eta} = 0 \dots\dots\dots (6)$$

b) ξ 方向運動式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u^\xi h}{\partial t} + \frac{\partial (u^\xi)^2 h}{\partial \xi} + \frac{\partial u^\xi u^\eta h}{\partial \eta} \\ & - \frac{h}{J} u^x \left[ u^\xi \frac{\partial \xi_x}{\partial \xi} + u^\eta \frac{\partial \xi_x}{\partial \eta} \right] \\ & - \frac{h}{J} u^y \left[ u^\xi \frac{\partial \xi_y}{\partial \xi} + u^\eta \frac{\partial \xi_y}{\partial \eta} \right] \\ & + \frac{gh}{J} \left[ \alpha \frac{\partial H}{\partial \xi} + \beta \frac{\partial H}{\partial \eta} \right] + \frac{gn^2 u^\xi}{J^2 h^{1/3}} \{ (u^x)^2 + (u^y)^2 \}^{1/2} \\ & + \frac{h}{J^2} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial n} \frac{u^\xi}{u} = 0 \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

c) η 方向運動式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u^\eta h}{\partial t} + \frac{\partial u^\xi u^\eta h}{\partial \xi} + \frac{\partial (u^\eta)^2 h}{\partial \eta} \\ & - \frac{h}{J} u^x \left[ u^\xi \frac{\partial \eta_x}{\partial \xi} + u^\eta \frac{\partial \eta_x}{\partial \eta} \right] \\ & - \frac{h}{J} u^y \left[ u^\xi \frac{\partial \eta_y}{\partial \xi} + u^\eta \frac{\partial \eta_y}{\partial \eta} \right] \\ & + \frac{gh}{J} \left[ \beta \frac{\partial H}{\partial \xi} + \alpha \frac{\partial H}{\partial \eta} \right] + \frac{gn^2 u^\eta}{J^2 h^{1/3}} \{ (u^x)^2 + (u^y)^2 \}^{1/2} \\ & + \frac{h}{J^2} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial n} \frac{u^\eta}{u} = 0 \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

ただし、τ は主流方向のせん断力を表している。主流に対する法線方向 (n 方向) の混合を表す ∂τ/∂n は次式により求めることができる。

$$\frac{\partial \tau}{\partial n} = -\frac{u^\eta}{u} \left[ \alpha \frac{\partial \tau}{\partial \xi} + \beta \frac{\partial \tau}{\partial \eta} \right] + \frac{u^\xi}{u} \left[ \beta \frac{\partial \tau}{\partial \xi} + \alpha \frac{\partial \tau}{\partial \eta} \right] \dots\dots\dots (9)$$

氾濫流の水平混合は主に道路上の速い流れと家屋群内の遅い流れとの間で生じていることから、混合距離の考え方を適用し、せん断力 τ 及び水平混合係数 ε を次のように表す。

$$\begin{aligned} \varepsilon &= b |\Delta \bar{u}| a \ell \\ &= b \times |\text{流速差}| \times \text{混合距離 (剪断層の厚さ)} \dots\dots (10) \end{aligned}$$

$$\frac{\tau}{\rho} = \varepsilon \frac{\partial \bar{u}}{\partial n} = \varepsilon \frac{\Delta \bar{u}}{\ell} \dots\dots\dots (11)$$

Δū : n 方向の流速差, ℓ : 距離

よって、

$$\frac{\tau}{\rho} = b |\Delta \bar{u}| a \ell \frac{\Delta \bar{u}}{\ell} = ab |\Delta \bar{u}| \Delta \bar{u} \dots\dots\dots (12)$$

ab=f とおく。このとき f は境界に於ける混合係数で実験によると<sup>12)</sup> f=0.035 である。

以上の各式において、用いられている記号は次のとおりである。

h : 水深, H : 水位 (=h+z, z:地盤高),

u<sup>ξ</sup> : ξ 方向流速, u<sup>η</sup> : η 方向流速,

J : 変換のヤコビアン (=ξ<sub>x</sub>η<sub>y</sub>-ξ<sub>y</sub>η<sub>x</sub>),

ξ<sub>x</sub>=∂ξ/∂x, ξ<sub>y</sub>=∂ξ/∂y,

η<sub>x</sub>=∂η/∂x, η<sub>y</sub>=∂η/∂y,

$$u^x = \frac{1}{J} (\eta_y u^\xi - \xi_y u^\eta),$$

$$u^y = \frac{1}{J} (\xi_x u^\eta - \eta_x u^\xi),$$

$$\bar{u} = \{ (u^x)^2 + (u^y)^2 \}^{1/2},$$

$$\alpha = \frac{1}{J} (\xi_x^2 + \xi_y^2), \quad \beta = \frac{1}{J} (\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y),$$

$$r = \frac{1}{J} (\eta_x^2 + \eta_y^2)$$

(2) 計算条件

図-12 に計算格子を示す。道路方向に η 軸をとり、基本的に一格で道路を表している。著者らが行った<sup>8)</sup>

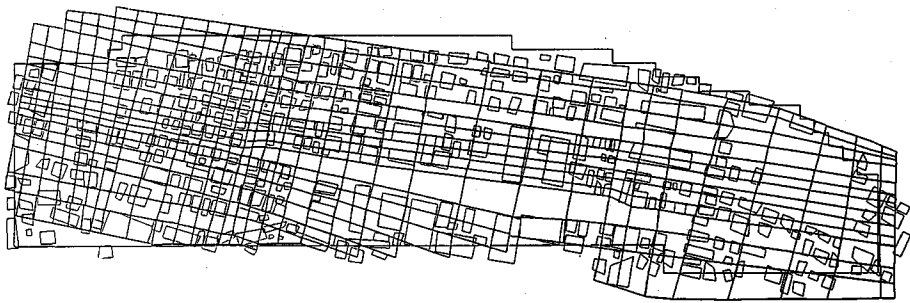


図-12 一般曲線座標系の計算格子配置 (実験領域)

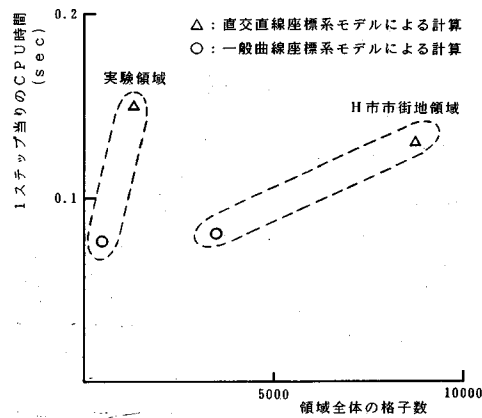


図-13 座標系の違いによる計算時間の比較

直交座標系を用いた  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$  格子モデルでは格子数は 1,334 個であったのに対して、一般曲線座標系を用いたモデルでは 515 個と約 40% にすることができ、大幅に計算時間の短縮が計れた (図-13)。

家屋群の抵抗は模型実験の結果得られた家屋の占有面積率に応じた粗度係数値 (表-1) を与える。

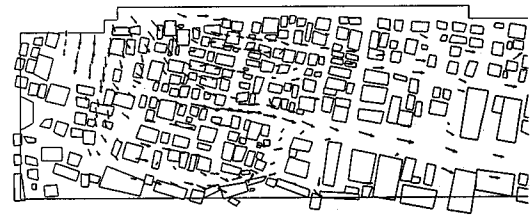
境界条件は、流入条件として想定破堤点より  $106\text{ m}^3/\text{s}$  一定流量を、河道と鉛直向き (模型実験の流入条件と等しい) に、流量フラックスで設定している。下流端には実測の水深を、また実験領域外は実測段落ち水深で与えた。計算時間間隔は、計算の安定する  $0.1\text{ s}$  とした。

(3) 模型実験結果と数値シミュレーション結果の比較

図-14 に流速ベクトルの比較図を示す。破堤後 20 分で定常状態に近づいたと判断し、計算を終了した。計算では道路を方向・幅に関係なくモデル化できているため、密集市街地における氾濫流の特徴である道路に集中する流れを表しており、実験値 (a) をよく説明する流速ベクトルを得ている。図-15 に水深コンターの比較を示す。計算結果 (b) は実験結果 (a) の水深コンター形状及び水深を良好に再現できている。図-16 は氾濫水先端の到達時間コンターを示す。計算結果 (b) は道

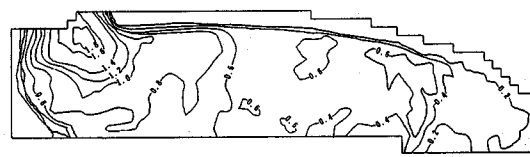


(a) 実験結果

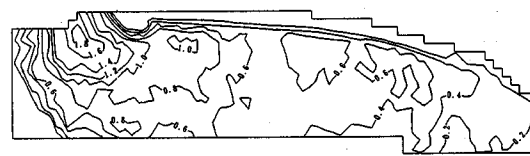


(b) 計算結果

図-14 流速ベクトル図



(a) 実験結果

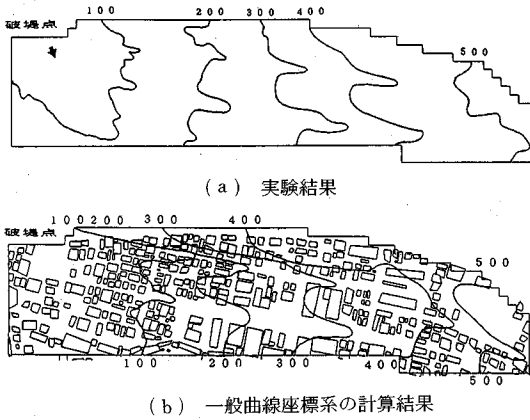


(b) 計算結果

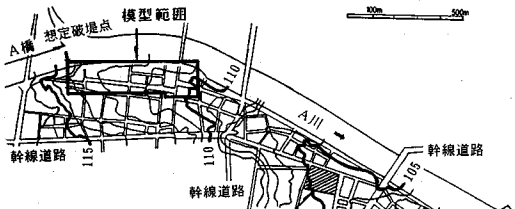
図-15 水深コンター図

路上を氾濫水が走る現象は良くとらえられており、流れの大部分の領域において到達時間もよい一致を示している。

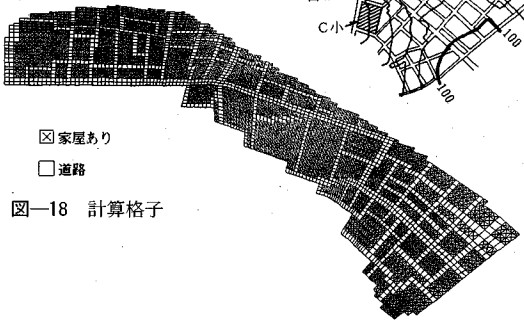
以上よりシミュレーションモデルは対象領域における氾濫水の挙動をよく再現していることがわかる。



図一六 氾濫水先端の到達時間コンター図 (単位: 秒)



図一七 H市市街地概要



図一八 計算格子

#### 4. 既成市街地における氾濫流対策

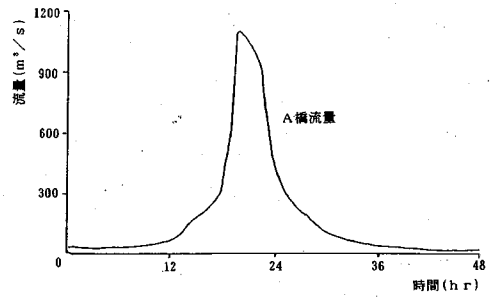
氾濫シミュレーションモデルが市街地部分模型を用いた氾濫流実験をよく説明できることを示した。次に市街地の広い範囲にこの氾濫シミュレーションモデルを適用し氾濫流況を予測し、氾濫流対策について検討する。

##### (1) 氾濫解析結果

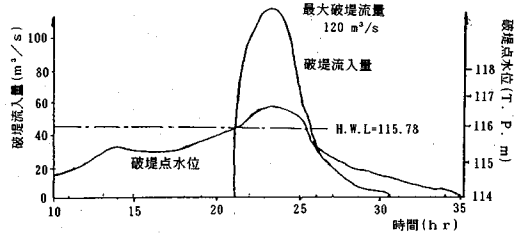
###### a) 対象区域

計算対象とした市街地を図一七に示す。さきの模型実験で検討した範囲もあわせて図示している。想定破堤点付近は30年以上たった個人所有の家屋が多く、街路も小さいものが無秩序に何本も走っている。これに対して、下流側は既に区画整理事業が為されており、比較的大規模の建造物が多い。この近辺の災害時の避難所は市が指定するB中学校、C小学校であり、それらは計算領域の下流側にある。

###### b) 計算方法及び条件



図一九 検討対象洪水ハイドログラフ



図二〇 破堤流入量ハイドログラフ

計算格子は図一八の様に配置される。破堤点は計算領域の最上流側(実験の想定破堤点と同じ)に設定している。計算格子は、河道方向に延びる幹線道路に沿って取った。格子数は対象領域の面積約0.8km<sup>2</sup>について約3,500個である。計算時間間隔は、計算の安定する0.1sとした。

A河川における洪水流は一次元不定流計算で追跡し、堤内の氾濫流計算を同時に行う。河道水位と堤内水位との関係より越流公式により破堤流量を求め、それを氾濫流計算モデルの境界条件とした。図一十九は河道の境界条件として与えた洪水ハイドログラフである。破堤幅は過去の事例で観測されたものはバラツキが大きく、一義的に決定することはできないが、条件として設定する必要があるため、経験的に言われている破堤幅=川幅と考え、破堤幅=100mとした。

###### c) 計算結果

図二〇は破堤点からの流入量ハイドログラフである。破堤後2時間で河道水位のピークと同時に最大破堤流量の120m<sup>3</sup>/sが生じ、氾濫水の流入は約10時間継続する。

図二一は破堤後30分の流速ベクトル図である。氾濫水の先端が道路上を走っていることがわかる。道路と家屋群の間では氾濫水先端の位置に50~100m程度の差がある。また、小さな街路においても最大3m/s程度の流速が生じている。松浦ら<sup>13)</sup>は人間の流水中での活動性に及ぼす、水深・流速の関係を調べた結果を得ている。膝下の水深( $h=0.3$ m)では、歩行者は流速が最大0.8m/sでも普通に歩くことができるが、水深が膝( $h=0.5$ m)まで達すると流速が0.6m/sで歩行時に圧迫を感じるようになる。さらに膝上の水深では流速が0.4

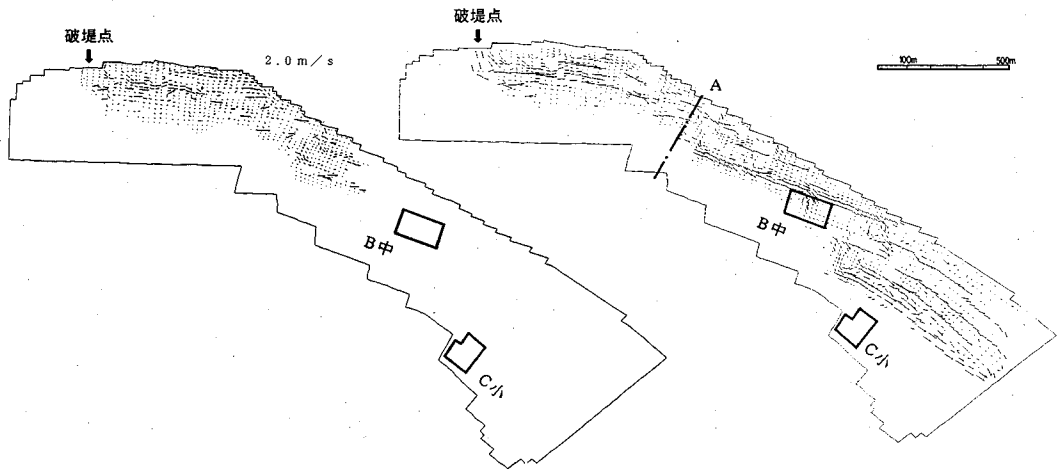


図-21 流速ベクトル図（破堤後30分）

図-22 流速ベクトル図（破堤後75分）

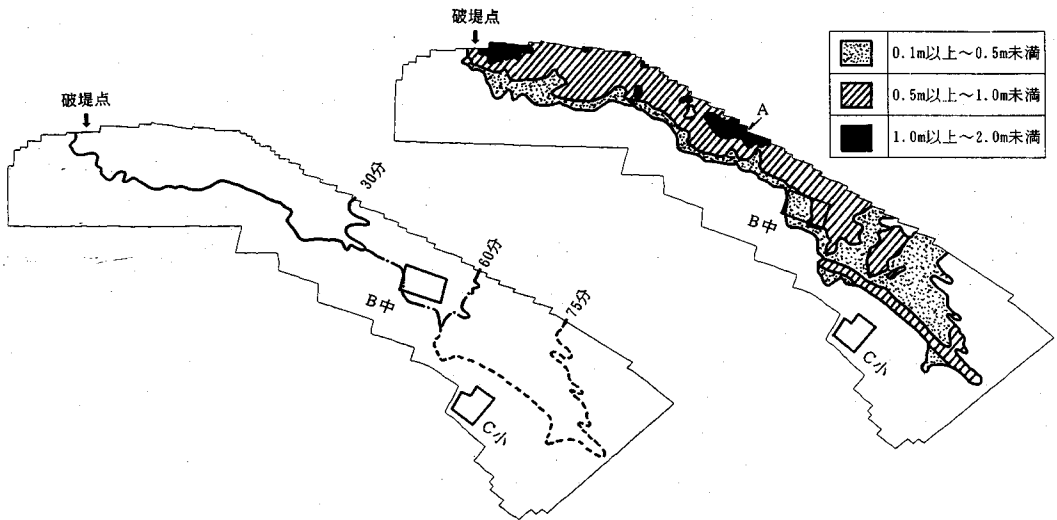


図-23 氾濫水先端の到達時間図（単位は分）

図-24 浸水深図（破堤後75分）

m/sで強い圧迫感を感じ、通常に歩行できなくなる。この結果と計算結果を比較すると、対象区域のような急勾配の氾濫域では浸水後に道路上を歩くことは不可能であるといえる。

図-22はモデルの下流端にほぼ氾濫水の到達した破堤後75分の流速ベクトル図である。A断面より下流では氾濫水の大部分は道路に集中して流れていることがわかる。幹線道路上の流速は約3~3.5m/sあり、道路上を歩くことは不可能である。避難場所となっているB中学校は浸水し、またかなりの流速が出ており、洪水時の避難場所としては不適切であるといえる。

図-23は氾濫水の到達時間図である。破堤後短時間の内に氾濫水は流下する。浸水後では避難することは困難であるので、事前の避難情報を適切に伝達することが重要であることがわかる。

(2) 氾濫流に対する対応策

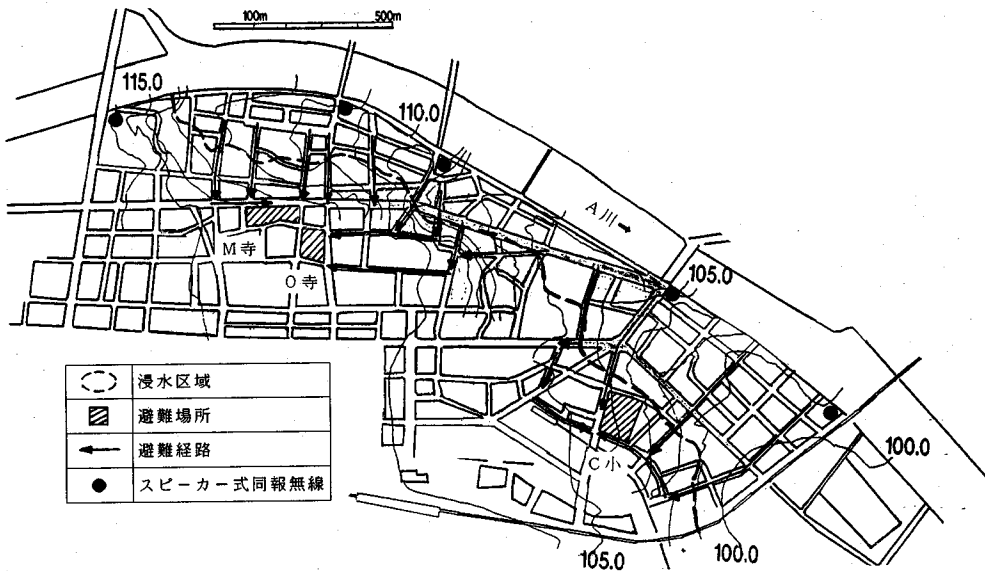
市街地における氾濫流解析から、取り得る対策として次の様なものが考えられる。

①対象地域のような堤内地盤の勾配が大きい氾濫域では、氾濫水の到達時間が非常に早く、流速も速いため、破堤後に避難行動を開始したのでは避難が困難である。従って、河川の水位について早期に警戒を行い、洪水避難情報を早く適切に住民に伝えられる水防災システムを整備することが重要である。災害情報の一般的な伝達手段については調査<sup>14)</sup>がなされている。これを参考にして洪水避難情報の伝達手段の特徴を整理したものが表-2である。対象地域では市街地内の多数の住民に瞬時に情報を伝達する必要があり、また洪水避難情報を必要とするのは特定のエリアに限定されるという情報の地域性から判断して、スピーカ方式の同報無線とサイレンによる情報伝達が望ましいと考えられる。つまり、河川沿いに一定間隔で無線システムを備えたスピーカを配置すれ



表一 洪水避難情報の伝達手段の比較

特徴	市町村防災行政無線固定系 (同報無線)	テレビ、ラジオ (マスメディア)	サイレン	広報車	有線電話 有線テレビ
長所	・スピーカーを備えた無線局より情報を伝達する。 ・即時、広範囲に大量の情報伝達が可能である。	・即時、広範囲に大量の情報伝達可能である。	・サイレンを備えた無線局より情報を伝達する。 ・即時、広範囲に正確に情報伝達が可能である。	・スピーカーを備えた自動車より情報を伝達する。 ・正確に大量の情報伝達が可能である。	・即時、大量に正確な情報伝達が可能である。
短所	・雨天時には戸を閉め切らなければならないため、雨音が伝わり難い。ある程度に配置する必要がある。	・洪水情報、避難情報は地域性が強い。マスメディアの情報としては不向きである。 ・受信していないと情報を受けれない。	・信号の意味を事前に周知させる必要があるため、情報量は限られる。	・到着、周囲に時間を要するため、情報伝達が遅れる。 ・浸水区域には入れない。 ・走行ルート以外の住民には聞こえない。	・情報の伝達は端末の設置された家庭に限られる。



図一 25 H市市街地における氾濫流対策案

ば、随時洪水避難情報を伝達することが可能となる。図一25にH市市街地における氾濫流の対策案を示す。ただし、情報の伝達手段は氾濫流に対する地域の特色に応じて選定すればよく、表一2に示した長所を生かして、短所を補完する方法を考えることが重要である。

②破堤点付近の住民は氾濫水の到達時間、流速が早いので道路を使って避難することは危険である。危険な道路沿いに避難するよりも堅固な2階建て以上の建物に避難するのがよい。

③これまで、避難場所は一般に地震や火事を想定して指定しており、氾濫を意図した避難場所となっていない。B中学校の様に河川沿いの氾濫域内の施設では浸水する危険性が高く不適切である。従って、氾濫に対する避難場所として高台の施設を利用すべきである。図一24に示すように高台にあるM寺、O寺、C小学校を使用することが適当であろう。

④避難経路に関しては浸水中に移動することは不可能なため、図一25に示すように、まず高台に出た後に避難場所に向かう経路を選択することが安全である。

⑤ハード面の対応としては図一24に見られるように、氾濫水が集中していると考えられるA地点に危機管理用樋管を配置し、氾濫水を河道に速やかに排水することが考えられる。さらに、氾濫水を道路等の盛土を利用して排水施設に誘導するとより効果的である。

これらの対応策を、地域の防災計画に反映させ、また流域住民に十分知らせることにより水害に強い市街地を作っていくことが重要である。

### 5. 結 論

本研究の主要な結論を以下に要約する。

①扇状地上に発達した密集市街地での氾濫流の挙動及び粗度係数値を氾濫流水利模型実験より明らかにした。密

集市街地では破堤点近傍を除いて氾濫水は大部分が道路に集中して流れ、氾濫流況は道路上の流れに大きく依存することが明らかとなった。また、家屋群および道路の粗度係数値は現地粗度係数に換算して、道路は0.043、家屋群は家屋占有面積率に応じて0.056～1.0であり、この粗度係数値は水深によってほとんど変化しないことが明らかとなった。

②道路網に沿った一般曲線座標系を用いた数値計算により精度の高い氾濫流況の再現が可能となった。またこのモデルは、直交座標系モデルに比して、大幅に格子数を減らすことができ、計算時間の短縮が計れ、さらに再現精度を向上させることができた。

③既成市街地を対象とした氾濫シミュレーションにより氾濫流対策を検討した。ソフト面では洪水情報、避難情報を住民に適切に伝達する水防災システムの整備、洪水を想定した避難場所、避難経路の設定、またハード面では氾濫水が集中する地点への危機管理用樋管の設置及び道路等の盛土を利用した氾濫水の誘導を提言した。

#### 参 考 文 献

- 1) 建設省河川局河川計画課：治水事業の現状，河川第543号，pp.3～10，1991.
- 2) 岩佐義朗・井上和也・水鳥雅文：氾濫水の水利の数値解析法，京大防災研究所年報，第23号B-2，pp.305～317，1980.
- 3) 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，京都大学博士論文，1989.
- 4) 高橋 保・中川一・寛 崇弘：排水路網を考慮した洪水

- 氾濫解析，京大防災研究所年報，第32号B-2，pp.617～632，1988.
- 5) 西原 巧：氾濫解析に基づく避難システムの河川工学的研究，京都大学博士論文，1983.
- 6) 高棹琢馬・椎葉充晴・堀 智晴・安延直宏：マイクロモデルを用いた水害避難計画評価システムの開発，土木学会第48回年次学術講演会講演概要集2，pp.110～111，1993.
- 7) 福岡捷二・松永宜夫：密集市街地における洪水氾濫流解析と氾濫流制御の試み，水工学論文集，第36巻，pp.311～316，1992.
- 8) 福岡捷二・松永宜夫・前内永敏：氾濫流解析にもとづく水害に強い沿川市街地の構造に関する研究，東京工業大学土木工学科研究報告，第47号，pp.21～30，1993.
- 9) 建設省土木研究所河川部総合治水研究室：氾濫シミュレーション(2)，土木研究所資料第2175号，1985.
- 10) 佐藤 智・今村文彦・首藤伸夫：洪水氾濫の数値計算及び家屋被害について，第33回水利講演会論文集，pp.331～336，1989.
- 11) 清水康行・山下恭正・山下彰司・崇田徳彦：一般曲線座標系を用いた常・射流混在流れの計算，開発土木研究所月報，No.455，pp.93～108，1991.
- 12) 福岡捷二・藤田光一：洪水流に及ぼす河道内樹木群の水利的影響，建設省土木研究所報告第180号の3，pp.129～192，1990.
- 13) 松浦茂樹・小栗幸雄：親水活動にとって魅力的な砂州及びその周辺の物理的条件，土木技術資料，Vol.28，No.11，pp.567～572，1986.
- 14) 自治省消防庁：総合的災害情報システムに関する調査研究，p.79，p.101，1981.

(1993.11.8 受付)

## FLOODING WATER OVER A CROWDED URBAN DISTRICT

Shoji FUKUOKA, Mikio KAWASHIMA, Norio MATSUNAGA and Hisatoshi MAEUCHI

By the hydraulic model test, it was shown that flooding water over a crowded urban district flowed along major roads in the direction of the mean ground surface slope. Also, the Manning roughness coefficients in roads and housing areas were estimated. We developed the numerical model with a general non-orthogonal coordinate system that properly incorporated the roads in the model. The validity of this model was confirmed by comparing with the result of the hydraulic model test. Structural and non-structural measures against inundation were proposed based on the results of the hydraulic and numerical models.