

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

福岡捷二¹・川島幹雄²・横山洋³・水口雅教⁴

¹フェロー 工博 Ph.D. 広島大学教授 工学部第4類建設系(〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

²正会員 工博 (株)東京建設コンサルタント 総合河川部(〒171-0014 豊島区池袋2-43-1)

³正会員 工修 北海道開発局開発土木研究所 環境水工部(〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

⁴学生会員 広島大学大学院 工学研究科博士課程前期 環境工学専攻

破堤氾濫が発生しても壊滅的被害を回避し、人命を守るための危機管理対策が近年強く求められている。この対策を立案するには密集市街地における高精度の氾濫シミュレーションモデルが必要となる。この際、密集市街地では道路網と家屋の抵抗を精度良くモデル化する必要があることが明らかにされている。本モデルでは座標系に一般曲線座標系を採用し道路線形を適切に表し、基礎的に流体力項を付加することにより家屋抵抗を考慮している。家屋抵抗は異なる配列の家屋群について流体力計測実験を行いこれを説明できる流体力の式、すなわち家屋前後の水深を用いて表現している。この新しいシミュレーションモデルは実際の市街地を再現した氾濫模型実験の結果を良好に説明できるものである。最後にこのモデルを適用して被害軽減対策の事例研究を行っている。

Key Words : flood-induced flows, urban residential areas, hydrodynamic force, numerical simulation, damage reduction, flooding water control

1. 序論

我が国の大都市の多くは河川の氾濫区域に位置する。これら大都市には人口、資産、中枢管理機能が集積し、ひとたび河川が破堤氾濫すれば生命、財産、社会経済に甚大な被害を及ぼす恐れがある。これに対して河川改修は進められているが改修の完成には長年月を要する。また、自然災害の特性として計画を上回る洪水の可能性は否定できない。つまり、破堤氾濫の危険性は常に存在している。しかし、もし破堤氾濫が生じた場合でも壊滅的被害はもはや許されず、被害を最小限に抑える危機管理対策が強く求められている¹⁾。

危機管理対策・計画の多くは、氾濫流の挙動を事前に高い精度で予測し、洪水時に有効に機能しかつ安全が確保されるか十分に比較検討を行った上で立案する必要がある。また、近年では洪水ハザードマップなど一般住民へ公表するケースが増加し、高い予測精度が要求されている。これらの要求に答えるには高精度の氾濫シミュレーションモデルが必要である。特に避難計画を検討する上で最も重要な情報である氾濫水の到達時間は、氾濫域内の道路、水路、盛土等の微地形や

家屋の抵抗を適切にモデル化しなくては高い予測精度が得られない。これは密集市街地では特に重要である。

シミュレーションに適用する氾濫数値解析手法はダム破壊問題を契機にして飛躍的に進歩し、コンピュータの進歩に伴い次元不定流モデル²⁾から、1970年代後半よりドライベット上での二次元平面流れに関する数値解析³⁾⁻⁵⁾が行われ、現在では二次元モデルが主流となっている。従来の二次元型の氾濫シミュレーションにおける堤内地の抵抗の評価方法と道路網の扱いを概観する。まず岩佐ら⁶⁾は地目別に適当な等価粗度係数の値を与え計算を行っている。中川⁷⁾は、家屋密集度に応じた粗度係数を計算格子毎に与えることで家屋群の影響を考慮した計算が行えることを示している。佐藤ら⁸⁾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、正方形の抗力係数 C_D 値を用いて計算を行っている。しかし、これらは何れも実際に起こった氾濫を再現するように係数値を求めているため、 C_D の決め方に汎用性を欠いており、一般性のある抵抗の評価となっていない。また氾濫流が集中する道路網についても考慮していない。模型実験を氾濫シミュレーションモデルの同定に利用しよう

とする試みは中川ら⁹⁾が行っているが、密集家屋群の抵抗については実験より算出した抗力係数を用いているため、一般性のある評価方法とはなっていない。福岡ら⁸⁾は密集市街地では道路網を正確にモデル化する必要があることを示し、一般曲線座標系で表した基礎方程式を用いて道路網をモデル化すると共に、模型実験により求めた家屋面積占有率に応じた等価粗度係数を適用することにより密集市街地の氾濫流の挙動を計算できる方法を提示している。建設省土木研究所⁹⁾は大型模型実験を行い建物占有率、水深を考慮した等価粗度係数の計算式を提案している。この様に等価粗度係数については一般化が図られつつある。しかし等価粗度係数は広い領域の平均的な氾濫流の挙動を表すには適しているが、家屋、道路配置を考慮できないため家屋群内、道路などの流況を精度良く求めることができない。このため、氾濫流の到達時間等の算定についても十分とは言えない。

本研究の目的は密集市街地における氾濫流の挙動を予測することの出来る一般性の高い氾濫シミュレーションモデルを構築し、これを用いた被害軽減策を研究することである。このため、まず種々の配列の家屋群に作用する流体力を計測し、測定された流体力を统一的に説明できる算定式を導く。次に市街地氾濫流について一般曲線座標系を採用し道路網や家屋群の正確なモデル化を図り、さらに家屋群に作用する流体力の算定式を流体力項として基礎式に付加し、氾濫シミュレーションモデルを構築する。次にこれを規模や配列の異なる2種類の市街地氾濫模型実験に適用し、シミュレーションモデルが氾濫流の推定に妥当であることを示す。最後にA市をケーススタディとして、このモデルを用いて被害軽減策の効果分析を行い、対策を提言している。

2. 密集市街地の氾濫シミュレーションモデルとその適用性の検討

(1) 流体力の算定と表現式

家屋群内にある家屋に作用する氾濫流の流体力は家屋配置や道路網によって定まる流れの場に規定される。そこで道路網に対する種々の家屋配置について流体力の計測を行い¹⁰⁾家屋に作用する流体力の算定法を確立する。ここでは2つの方法が用いられる。第一の方法は抗力係数を用い算定する方法である。この方法は主として無限に広い流れの中の物体に作用する流体力を抗力係数を用い算定するもので、慣用的な方法である。しかし氾濫流はその特徴として自由水面を持つことより、流体力の作用を受ける家屋近傍の水面形を利用し流体力を算定する方法が考えられる。すなわち第二の

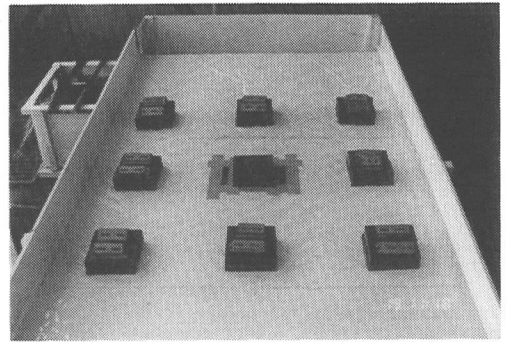


写真-1 流体力測定実験水路

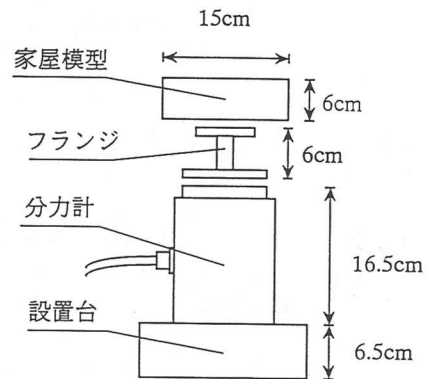


図-1 分力計と家屋模型設置状況

方法は家屋前後の水面高の変化から算定する方法である。

a) 流体力計測実験

まず密集市街地模型による流体力計測実験を行った。流体力測定実験水路を写真-1に示す。実験は全長270cm、幅135cm、高さ20cmの開水路を用い、勾配1/700、粗度係数0.012の条件で行った。模型縮尺は1/50程度を想定している。水路のほぼ中央部に当たる上流端より150cm、両岸から67.5cmの場所を中心にして幅30cm、長さ20cm、深さ29cmのピットを設置し、ピット内に流体力を計測するための3分力計を水平に取り付けた。図-1に示すように分力計上部の測定部に1辺15cm正方形の木製四角柱の家屋模型をアルミニウム製フランジにより接続している。3分力計の測定範囲は $\pm 19.6\text{N}$ ($\pm 2\text{kgf}$)であり、測定誤差は錘を載せて検定した結果、約 $\pm 1\%$ であった。また設置時の計器の傾きによっても誤差が生じるため、細心の注意を払い水平に設置した。流速は電磁流速計により、水位はポイントゲージにより測定を行った。また一般に氾濫流では家屋が完全水没することは稀であるので、実験は家屋が水没しない状態を対象とする。実験流量は氾濫水深2~4cmとなる10.2l/s、15.3l/sの2ケースで行った。

家屋配置、道路網は実際の密集市街地構造を参考に

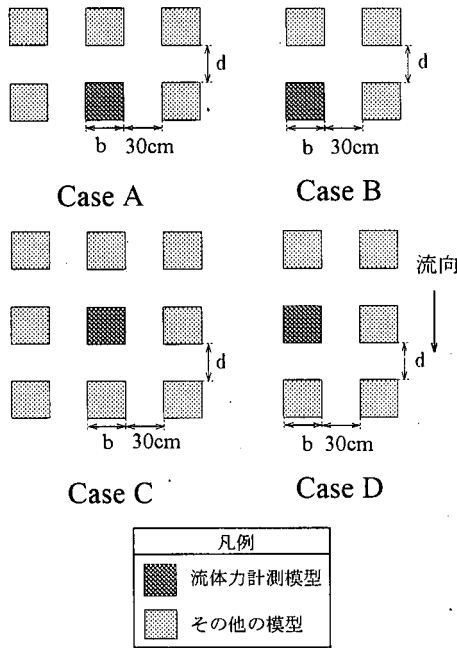


図-2 家屋配置ケース

理想化して設定した。図-2に家屋配置を示す。Case Aは下流側が幹線道路・空き地等の開けた場所に面している家屋を、Case Bは幹線道路の交差点等に面している家屋を、Case Cは群内にある家屋を、Case Dは家屋の側面が幹線道路等開けた場所に面していることを想定している。次いで密集市街地における家屋間隔の範囲を設定する。建設省土木研究所⁹⁾によれば、全国の中核都市の家屋密集地における家屋総面積が対象領域面積に占める割合は10%から40%までがほとんどである。これは家屋が等間隔で整列していると仮定した場合、家屋間隔の家屋幅に対する比にすると0.75から2.3に相当する。実際の住宅地には空き地、駐車場、公園等のスペースが存在し、これよりも間隔が広い場所も少なくない。そこで家屋間隔 d は $d=15, 30, 45, 60\text{cm}$ (家屋幅 b に対する比 db にするとそれぞれ $db=1, 2, 3, 4$) に設定した。家屋間隔は縦断方向にのみ変化させ、横断方向には30cmで固定した。以下本章で家屋間隔と言えば縦断方向の家屋間隔を指す。

b) 抗力係数と家屋配置、間隔の関係

最初に本実験のフルード数、レイノルズ数を検討した。本実験では家屋前面の平均水深は2cm、家屋前面の平均流速は10cm/s、家屋幅は15cmであり、家屋前面の流速・水深を用いたフルード数は0.23、家屋前面の流速と家屋幅を用いたレイノルズ数は $1.0 \times 10^4 \sim 3.0 \times 10^4$ である。

図-3に家屋に作用する抗力と db の関係を示す。い

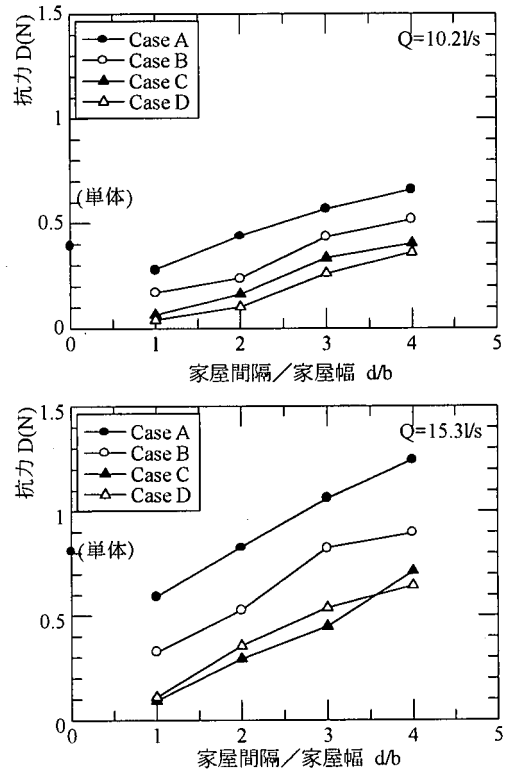
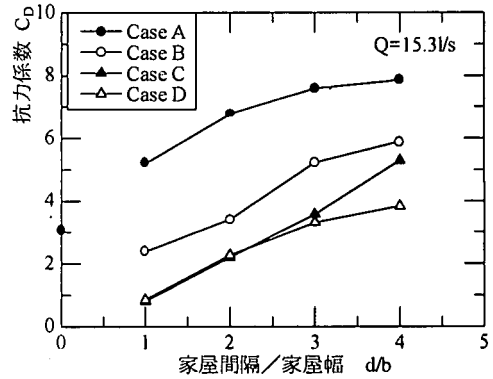
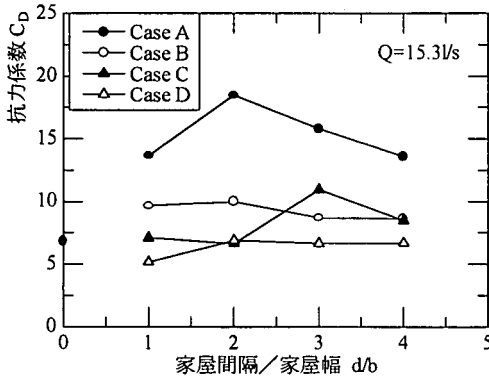
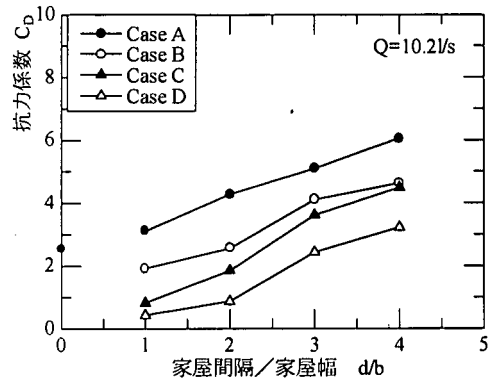
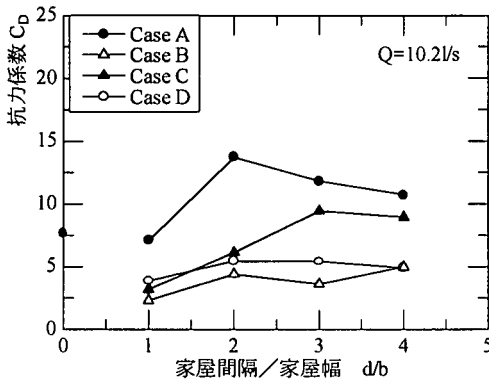


図-3 密集家屋群内家屋の抗力

ずれの流量、家屋配置でも db が大きくなるに従い抗力が増加している。これは家屋間隔が広がると家屋後流域では平面渦が発達し家屋後面の圧力低下が生じる一方、家屋前面では接近流速の増加による圧力上昇が生じ、その結果家屋前面と後面での圧力差が大きくなるためである。家屋配置別に抗力をみると、Case A, BはCase C, Dに比べ抗力が大きい。これはCase A, Bは流体力計測家屋の下流に家屋がないため後流域で渦が発達し家屋後面で大きな圧力低下を生じるのに対し、Case C, Dは下流側の家屋により渦が十分発達できず、家屋後面の圧力低下が小さいためである。すなわち家屋に作用する抗力は、下流が開けている場合が開けていない場合に比べ抗力が大きい。またCase Aの抗力はCase Bに比べ大きい。この理由を以下に述べる。流体力計測家屋の左右両側に家屋があるCase Aは、片側しか家屋がないCase Bに比べ流れの阻害が著しい。よって家屋前面での水位せき上げとそれによる圧力上昇、後流域での渦の発達による圧力低下はCase Aの方が大きくなり、家屋前面と後面の圧力差も大きくなる。

群内の家屋に作用する抗力の大きさは、本実験の範囲内では多くが単体の場合の抗力以下である。しかしCase Aは他の配置に比べ際立って抗力が大きく、 $db=3$



(a)家屋前面の流速を代表流速にした場合

(b)上流一様流部分の流速を代表流速にした場合

図-4 密集家屋群内の抗力係数

以上では単体の場合より抗力が増加している。

また抗力と家屋前後の水位に注目すると、抗力が大きいときは家屋前面の水位のせき上げが大きく、家屋後面で渦が発達し圧力低下することで水位が下がっている。すなわち抗力と家屋前後の水深は密接な関係がある。

なお家屋間隔をさらに大きくしていくと抗力は一値（この場合は横断方向に単列配置したときの値）に漸近していくと予想される。しかし本研究は一般的な密集家屋群内家屋で作用する抗力について検討することを目的としている。前述したように密集市街地では $db \leq 4$ が一般的であり、 db が 4 より大きい家屋配置は稀であるため本実験では対象外としている。

次に抗力の評価を行うため、抗力係数を算出、検討する。抗力係数 C_D は実測した抗力 D より次式で求めた。

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho u^2 b h} \quad (1)$$

ここで、 ρ : 水の密度、 u : 代表流速、 b : 家屋幅(=15cm)、 h : 家屋前面での水深である。

代表流速 u の決定に当たっては次の 2 種類の方法を検討した。第一は代表流速に家屋前面の流速を用いる方法である。ここでは様々な試行の結果、家屋前面から $(1/2)b$ 上流側の断面で計測した流速は変動が相対的に小さく最も安定しており、この断面での測定値を横断平均したものを代表流速としている。第二は代表流速に家屋の影響が及んでいない流れが一様な場での流速を用いる方法である。ここでは流速の横断分布がほぼ一様である上流端家屋の前面から 60cm 上流での測定値を横断平均して用いた。家屋前面および後面の水深はできる限り家屋壁面に近い位置で測定しこれも横断平均した値を用いた。

図-4 は 2 種類の代表流速のとり方による家屋配置ごとの抗力係数 C_D と db の関係を示している。代表流速に家屋前面の流速を用いた場合、単体では $C_D=8$ 程度になっている。代表流速に一様流速を用いると $C_D=2.6$ および 3.1 となり、従来いわれてきた単体の C_D と同程度

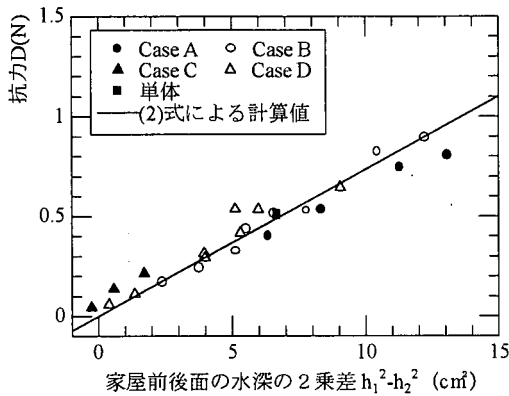


図-5 抗力と家屋前後の水深との関係

の大きさである。群内家屋の C_D は家屋前面の流速を用いた場合は 2~18 であり、一様流速を用いた場合は 0.5~8 である。図-4 から明らかなように、代表流速にどちらの方法を用いても、密集家屋群の C_D は家屋配置、家屋間隔、さらに実験流量すなわちレイノルズ数により変化しており、個々の家屋別に異なる C_D をもつことになる。

c) 家屋抗力と家屋前後の水深の関係

家屋に作用する抗力は前述したように家屋の前面水深 h_1 と後面水深 h_2 に密接な関係があることから抗力を家屋前後の圧力差で表現する¹¹⁾。圧力分布を静水圧分布と仮定する。このとき抗力は式(2)で表現される。

$$D = \frac{1}{2} \rho g (h_1^2 - h_2^2) b \quad (2)$$

ここで、 D : 抗力、 h_1 : 家屋前面の平均水深、 h_2 : 家屋後面の平均水深、 b : 家屋幅 (=15cm) である。

$h_1^2 - h_2^2$ と抗力の関係を図-5 に示す。図中の直線は式(2)による計算値である。家屋配置、間隔、流量規模に拘わらず実測値と計算値は全体的に良い一致を示しており、家屋に作用する抗力は式(2)で表わせることが分かる。すなわち非水没家屋周辺の氾濫流はほぼ静水圧分布と見なし得ることを示している。

(2) 一般曲線座標系を用いた氾濫流の基礎方程式

被害軽減対策の検討では正確かつ詳細な氾濫水理情報が必要なため二次元浅水流モデルを用いる。基礎方程式は図-6 に示すように直交直線座標系表示ではなく一般曲線座標系に座標変換した式を用いた。基礎式に一般曲線座標系を採用した理由は以下の通りである。密集市街地には多様な形状の構造物及び街路が存在する。数値計算にあたってこれらの複雑な形状を精度よく表現するためには、直交座標系では計算メッシュの

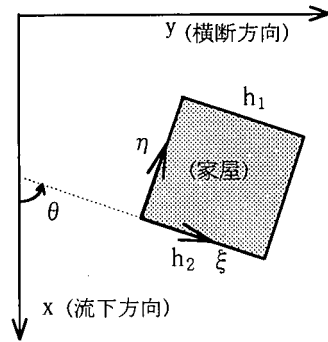


図-6 直交直線座標系の一般曲線座標系への変換

分割を非常に小さくする必要があるが、これは困難である。しかし一般曲線座標系では任意の形状に沿って座標系をとることができ、直交座標系に比べると少ない計算メッシュでより精度よく密集市街地を表現することができ利点が多い。また基礎式には流体力項を付加している¹²⁾。流体力は本来物体周囲の圧力分布により物体に働く力であり、物体周囲の圧力分布を三次元計算によって厳密に求めることができれば、基礎式に付加する必要のない項である。しかし、本研究で用いている浅水流モデルは鉛直積分した二次元方程式であるため、物体周囲の流れを厳密に求めることができず物体周囲の圧力分布を解くことは不可能である。このため流れが家屋から受ける流体力をモデル化し、これを基礎式に付加している。氾濫流解析に用いる基礎方程式を以下に示す。

連続方程式)

$$\frac{\partial h}{\partial t} J + \frac{\partial u^\xi h}{\partial \xi} J + \frac{\partial u^\eta h}{\partial \eta} J = 0 \quad (3)$$

ξ 方向運動方程式)

$$\frac{\partial u^\xi h}{\partial t} J^2 + \frac{\partial (u^\xi)^2 h}{\partial \xi} J^2 + \frac{\partial u^\xi u^\eta h}{\partial \eta} J^2$$

$$- \frac{h}{J} u^\xi \left(u^\xi \frac{\partial \xi_x}{\partial \xi} J + u^\eta \frac{\partial \xi_x}{\partial \eta} J \right)$$

$$- \frac{h}{J} v \left(u^\xi \frac{\partial \xi_y}{\partial \xi} J + u^\eta \frac{\partial \xi_y}{\partial \eta} J \right)$$

$$+ \frac{gh}{J} \left(\alpha \frac{\partial H}{\partial \xi} + \beta \frac{\partial H}{\partial \eta} \right) + \frac{gn^2 u^\xi}{J^2 h^{1/3}} (u^2 + v^2)^{1/2}$$

$$- \frac{\varepsilon}{J} \left\{ \xi_x \left(\alpha \frac{\partial^2 u h}{\partial \xi^2} + 2\beta \frac{\partial^2 u h}{\partial \xi \partial \eta} + \gamma \frac{\partial^2 u h}{\partial \eta^2} \right) \right\}$$

$$\begin{aligned}
& + \xi_y \left(\alpha \frac{\partial^2 v h}{\partial \xi^2} + 2\beta \frac{\partial^2 v h}{\partial \xi \partial \eta} + \gamma \frac{\partial^2 v h}{\partial \eta^2} \right) \\
& - \frac{1}{J^2} (\xi_x F^x + \xi_y F^y) = 0 \quad (4)
\end{aligned}$$

η 方向運動方程式)

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial u^n h}{\partial t} \frac{1}{J^2} + \frac{\partial u^\xi u^n h}{\partial \xi} \frac{1}{J^2} + \frac{\partial (u^n)^2 h}{\partial \eta} \frac{1}{J^2} \\
& - \frac{h}{J} u (u^\xi \frac{\partial \eta_x}{\partial \xi} \frac{1}{J} + u^n \frac{\partial \eta_x}{\partial \eta} \frac{1}{J}) \\
& - \frac{h}{J} v (u^\xi \frac{\partial \eta_y}{\partial \xi} \frac{1}{J} + u^n \frac{\partial \eta_y}{\partial \eta} \frac{1}{J}) \\
& + \frac{gh}{J} (\beta \frac{\partial H}{\partial \xi} + \gamma \frac{\partial H}{\partial \eta}) + \frac{gn^2 u^n}{J^2 h^{1/3}} (u^2 + v^2)^{1/2} \\
& - \frac{\varepsilon}{J} \left\{ \eta_x \left(\alpha \frac{\partial^2 u h}{\partial \xi^2} + 2\beta \frac{\partial^2 u h}{\partial \xi \partial \eta} + \gamma \frac{\partial^2 u h}{\partial \eta^2} \right) \right. \\
& \left. + \eta_y \left(\alpha \frac{\partial^2 v h}{\partial \xi^2} + 2\beta \frac{\partial^2 v h}{\partial \xi \partial \eta} + \gamma \frac{\partial^2 v h}{\partial \eta^2} \right) \right\} \\
& - \frac{1}{J^2} (\eta_x F^x + \eta_y F^y) = 0 \quad (5)
\end{aligned}$$

ここに、

h : 水深, H : 水位 (= $h+z$, z : 地盤高), u : x 方向流速, v : y 方向流速, u^ξ : ξ 方向流速, u^η : η 方向流速, n : 粗度係数, J : 変換のヤコビアン

$$(= \xi_x \eta_y - \xi_y \eta_x),$$

F^x, F^y : 流体力の x, y 成分, ε : 水平渦動粘性係数,

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

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

$$\xi_x = \partial \xi / \partial x, \xi_y = \partial \xi / \partial y, \eta_x = \partial \eta / \partial x, \eta_y = \partial \eta / \partial y$$

$$u = \frac{1}{J} (\eta_y u^\xi - \xi_y u^\eta), v = \frac{1}{J} (-\eta_x u^\xi + \xi_x u^\eta)$$

流体力項 F^x, F^y については前述した抗力係数を用いる方法と家屋前後の水深を用いる方法の2つについて検討する。抗力係数を用いる解析では2(1)b)で示したように家屋配置、間隔、流向を考慮して抗力係数を適切に設定することは困難であることから、平均的、代表的な家屋間隔の範囲における抗力係数 C_D を定め計算する。代表流速には、実際の氾濫流において2(3)以下の値が求められる家屋群の影響がない領域

での一様流速を用いる。流体力項は主流方向に作用する抗力を直交座標成分に分解し式(6)で表している。

$$F^x = -\frac{1}{2} C_D u \sqrt{u^2 + v^2} \frac{A}{A'} \quad (6)$$

$$F^y = -\frac{1}{2} C_D v \sqrt{u^2 + v^2} \frac{A}{A'}$$

ここに、 A : 家屋の主流方向に対する投影面積, A' : 抗力の作用する計算格子の面積, u, v : 一様流速の x, y 方向成分である。

一方、家屋前後の水深を用いて流体力項を表現する場合には式(7)を用いている。

$$\begin{aligned}
F^x &= -\frac{1}{2} g (h_1^2 - h_2^2) \frac{B}{A'} \sin \theta \\
F^y &= \frac{1}{2} g (h_1^2 - h_2^2) \frac{B}{A'} \cos \theta \quad (7)
\end{aligned}$$

ここに、 B : 家屋の主流方向に対する投影幅, h_1 : 家屋前面の平均水深, h_2 : 家屋後面の平均水深, θ : 抗力の作用する家屋壁面の接線ベクトルが流下方向である x 軸に対してなす角(反時計回りを正とし, $0 \leq \theta \leq \pi$) である(図-6を参照)。

式(6)あるいは式(7)をみると抗力の作用する計算メッシュの面積 A' が流体力項に影響しており、解析の精度にも影響する。前述したように抗力の大きさは家屋前後の水面形が最も大きく影響するので、計算メッシュの大きさは水面形状を精査し、家屋が流れに及ぼす流体力による影響が著しいと考えられる領域の大きさを基準にしている。

なお式(7)による流体力表現において主流方向を決める必要がある。密集家屋群内の流向は複雑となるが、市街地氾濫流は幹線道路等で卓越するため、これらに沿う軸を主流方向と考える。

家屋群の計算への導入方法を示す。計算ではメッシュ自体の地盤高をかき上げし、また全ての非水没家屋壁面において slip 条件を設定して家屋に対する流れの不透過条件を表現し、各家屋について式(6)あるいは式(7)により流体力を算出する。これを家屋壁面の1つ手前の流速計算点における運動方程式に導入する。移流項は1次精度の上流差分で計算している。また家屋と道路の境界に作用する流速差によるせん断力によって道路の流速は減速される一方、家屋群の間の流れは加速されるが、これは式(4)及び式(5)の水平拡散項によって表現される。渦動粘性係数 ε は局所的な摩擦速度 u と局所的な水深 h に比例すると仮定して以下の式を用いる。

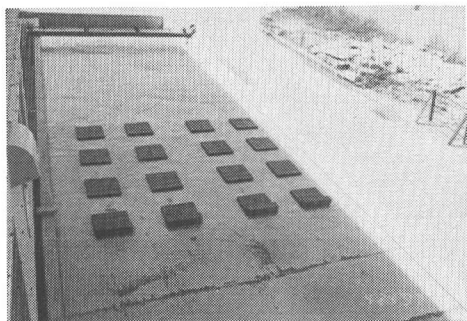


写真-2 大型氾濫模型実験

$$\varepsilon = \frac{\kappa}{6} u_* h \quad (8)$$

ここに κ : カルマン定数(=0.4)である。

(3) シミュレーションモデルの氾濫模型実験への適用

氾濫シミュレーションモデルの適合性を検討するため氾濫模型実験と比較する。氾濫模型実験の目的は2つある。第一は2(1)において示した流体力測定実験が小規模模型であったため、流体力の測定値にスケールが影響を与えないかを確認することである。第二は密集市街地における氾濫流を、シミュレーションモデルがどの程度再現可能であるかを調べることである。

a) 大型氾濫模型実験

まず実際の市街地を極めて単純化した大型氾濫模型を用いて実験を行った。写真-2に氾濫模型を示す。実験水路は全長15m、幅4.0mであり、水路床は塩化ビニール板である。一辺40cm正方形の家屋模型(レンガを使用)を流下方向、横断方向共に等間隔で整列配置した。家屋間隔 d の家屋幅 b に対する比 d/b は case1 では $d/b=1.0$ ($d=40\text{cm}$)、case2 では $d/b=0.5$ ($d=20\text{cm}$) である。なお両ケースとも水路中央部に幅80cmの幹線道路を設けている。水路床平均勾配は両ケース共に約 $1/500$ である。本実験では家屋が水没しない状態を考え、流量は家屋配置領域で水深2~4cmになるように case1 で 34.8l/s 、case2 で 33.4l/s に設定した。水位はポイントゲージにより、流速は電磁流速計により測定を行った。

1) 計算モデル、条件

家屋に作用する流体力の影響が著しい領域は壁面から10cm程度であると考えられる。そこで計算メッシュは家屋及び道路に沿って一辺10cmの正方形に分割している。家屋はメッシュ自体の地盤高を高くすることで不透過の流下障害物として表現している。境界条件は流入条件として上流端より実験流量をフラックスで

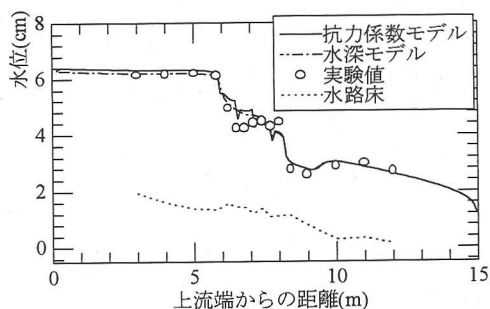


図-7 平均水位縦断形の比較

流入させ、下流端では段落ちによる限界水深を与えている。計算は case1, 2ともに流体力項について式(6)(以下抵抗力係数モデルと呼ぶ)と式(7)(以下水深モデルと呼ぶ)の2種類の計算方法を用いた。抵抗力の算定は前述のように家屋の影響のない領域(ここでは水路上流部)での一様流速を用いる。具体的には流体力計測実験において Case A 以外の $d/b=1.0$ での平均値 $C_D=1.2$ を用いて計算を行った。なお Case A は下流が広く開けて抵抗力が特に大きくなる特殊な場合であり、平均値を求めるに当たり除外している。

2) 計算結果と実験結果の比較

ここでは case2 について結果を示す。図-7は平均水位縦断形について実験結果と計算結果を比較したものである。家屋が配置してある上流端より6mから8mの区間をみると、水深モデルは水位の変化は滑らかであるが、抵抗力係数モデルは水位が細かく振動しながら変化している。これは抵抗力係数モデルが個々の家屋に作用する抵抗力を大きめに評価しているためと考えられる。しかし計算結果は抵抗力係数モデル、水深モデルいずれも実験結果をほぼ再現しており、家屋群が流れに及ぼす抵抗をほぼ正確に表現できている。図-8は家屋配置領域での水位横断形を示したものである。計算結果は抵抗力係数モデル、水深モデルともに実験結果をほぼ再現できている。図-9は家屋配置領域での流速横断分布を示したもので、計算結果は両モデル共に実験値の傾向および水路中央部の幹線道路に集中する流れをよく再現できている。なお case1 についても同様な精度をもつ結果を得ている。

b) A市市街地氾濫模型実験

次に実際の市街地の一部を再現した氾濫模型を作成し実験を行った。実験は2(3)a)で前述した大型氾濫模型実験と同じ水路を用いており、全長15m、幅4m、底面塩化ビニール板で勾配約 $1/600$ である。水路上流端より3mから12mまでの9mの区間にA市市街地の一部分を再現した密集市街地氾濫模型を縮尺 $1/50$ で作成した。

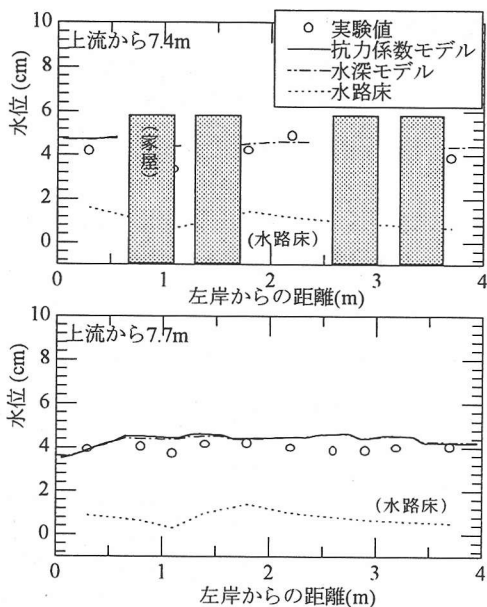


図-8 水位横断形の比較

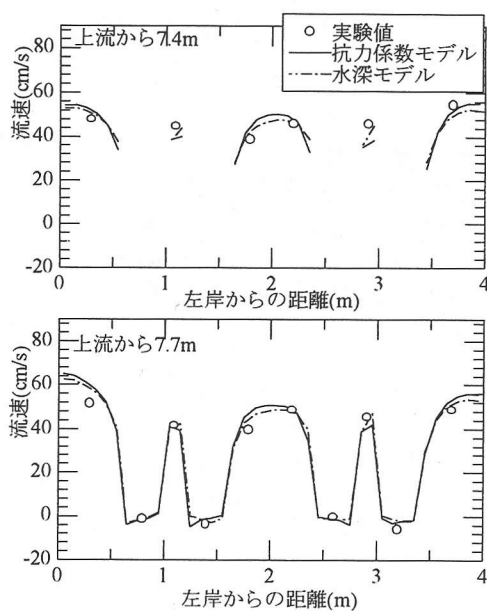


図-9 流速横断分布の比較



写真-3 A市市街地氾濫模型実験

写真-3に氾濫模型を示す。流体力計測実験、大型氾濫模型実験で示した模型と異なり幹線道路は斜めに通り、家屋配置・密度の不規則性が目立つ。流量は家屋が水没しない状態を考慮し、水深が2~3cm(1~1.5m)になる様に13.6 l/s (240m³/s)で行った。上流から3mの断面から12.2mの断面まで0.4m間隔に測定断面をとり、横断方向に水位は0.2m間隔で、流速は0.4m間隔で測定を行った。水位測定はポイントゲージにより行い、流速測定は電磁流速計を用いた。

1) 計算モデル、条件

図-10は家屋配置、道路等を再現した計算メッシュを示す。計算メッシュは幹線道路に沿ってη軸をとり家屋、道路に沿って分割している。家屋の流体力の影響が著しいのは壁面から5cm程度と考えられるので、これを計算メッシュの大きさの基準としている。家屋は

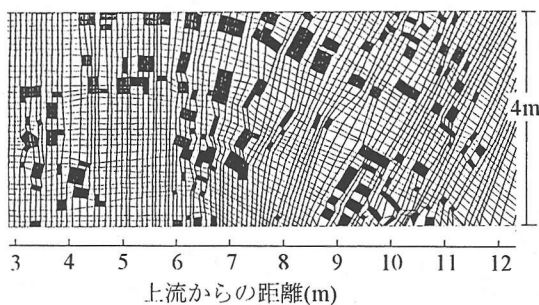


図-10 A市市街地模型実験の計算メッシュ

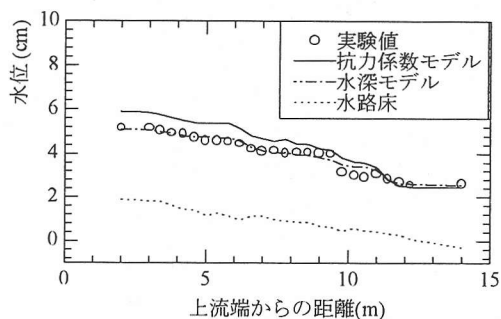


図-11 平均水位縦断形の比較

前述したとおり不透過の流下障害物として表している。境界条件は流入条件として上流端より一定流量(実験流量)を流量フラックスで設定し、下流端は流下方向

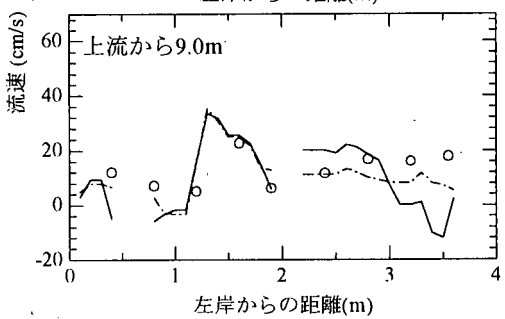
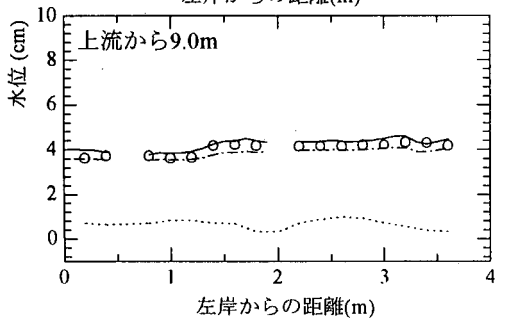
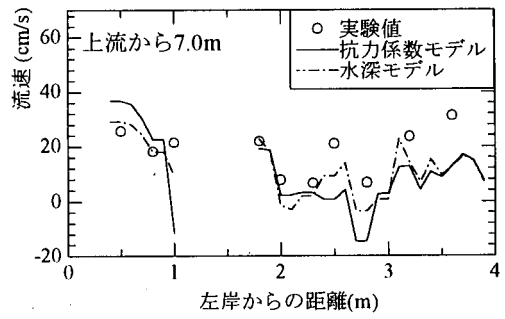
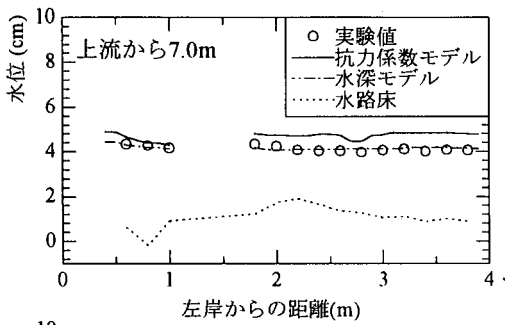
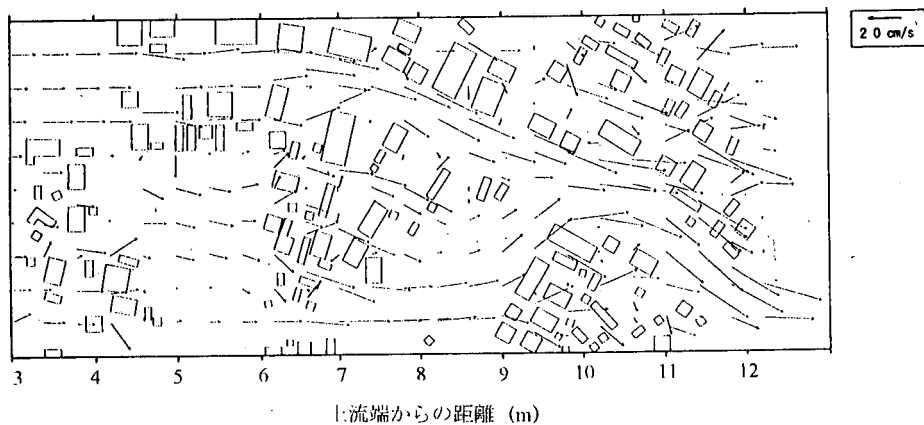
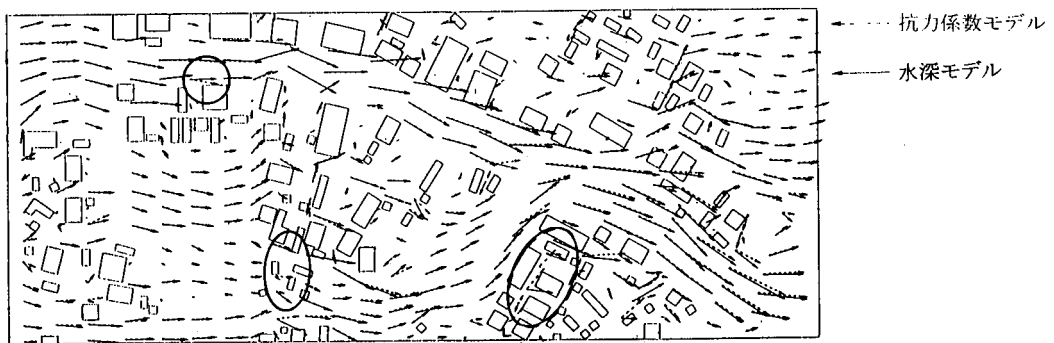


図-12 水位横断形の比較

図-13 流速横断分布の比較



(1) 実験結果



(2) 計算結果

図-14 流速ベクトルの比較

に流速が変化しない条件($\partial v / \partial \eta = 0$)を設定している。市街地の家屋形状および家屋間隔は様々であるが、抗力係数は前述した大型氾濫模型実験と同じく $C_D=1.2$ を用いた。

2) 計算結果と実験結果の比較

図-11 に平均水位縦断面の実験結果と計算結果の比較を示す。抗力係数モデルによる水位は実験値よりも大きく、家屋群の抵抗を過大評価している。これは抗力係数モデルによる計算では全家屋に一律な C_D を与えているが、流体力測定実験より明らかなように家屋ごとに抗力係数は異なるためである。一方水深モデルによる計算結果は実験結果を良好に再現している。これは密集家屋群内の水面形を考慮して抗力を計算している水深モデルは、個々の家屋の抵抗を精度よく表現できることを示している。図-12 に水位横断面を示す。抗力係数モデルは実験値よりも計算値が大きく、家屋の抵抗を過大評価している。一方水深モデルは水面形の特徴を良好に再現している。図-13 に横断流速分布を示す。両モデルともに幹線道路では流れをほぼ再現できている。しかし家屋密集域では抗力係数モデルは実験結果と大きく異なり、水深モデルが抗力係数モデルに比べ実験結果を高い精度で再現している。これは密集家屋群で家屋に作用する抗力は抗力係数モデルでは適切に評価されておらず、水深モデルの方がより精度の高い抗力評価が可能であることを示している。次にモデルの違いによる流速ベクトルの比較を図-14 に示す。幹線道路あるいは空き地などのオープンスペースでは抗力係数モデルと水深モデルともに流れをほぼ再現している。一方密集家屋群内をみると、抗力係数モデルは局所的に流向、大きさともに実験値と明らかに異なるベクトルが見られる。それに対し、水深モデルは密集域内でも実験値をよく再現している。つまり密集市街地では抗力係数モデルでは抗力を過大に算定するが、家屋前後の水深を用いたモデルでは抗力が正しく算定される。

以上の結果をまとめると、抗力係数モデルでは実際の複雑な家屋配置の氾濫流に対して個々の家屋の抗力係数を設定することは困難である。このため複雑な密集市街地の氾濫流解析に抗力係数モデルを用いると、その計算精度は一般的に低くなる。これに対して水深モデルでは、複雑な家屋配置、流れの状況に対しても式(7)の抗力計算法により水位、流速分布、抗力が同時に求まり、かつこれらの値の精度が高いことが明らかになった。このように水深モデルは現実に複雑な市街地構造を有する氾濫流の解析に有効かつ一般性が高い方法を与えるといえる。

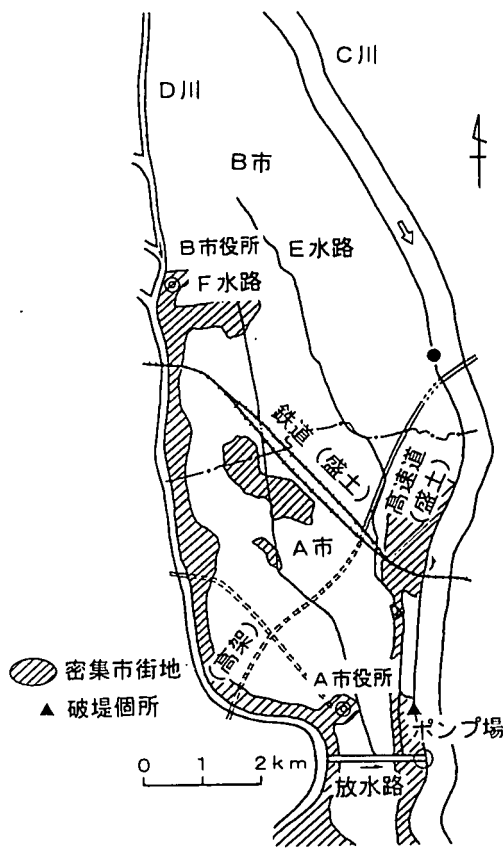


図-15 被害軽減対策検討対象氾濫域

3. 洪水被害軽減対策の検討

被害軽減策は大きく構造物などで対応するハード面の対策とそれ以外のソフト面の対策に分けられる。前者はスーパー堤防、氾濫流制御対策等であり、後者は避難活動、洪水ハザードマップ、水防活動等である。これら対策は氾濫域の氾濫特性、被災形態を考慮して有効な対策を組み合わせ、総合的に計画することが重要である。被害軽減策に関する研究は近年の危機管理意識の高まりとともに実用化されつつある段階にある。しかし破堤氾濫を想定した総合的な被害軽減策を立案した事例は吉田川流域の鹿島台町など¹³⁾数少ない。そこで本研究では総合的な被害軽減策のケーススタディとしてA市を対象に被害軽減策を研究する。

(1) A市の地形特性と被害軽減策案

対象とする氾濫域は図-15に示すA市、B市を含む地域であり、南北17km、東西5kmの南北に長い形状をし、東側にC川、西側にD川という二つの大河川に囲まれた閉鎖型地域である。地形的にはこの地域はC川、D川の氾濫域に位置し、平均地盤勾配が約1/4000の低平地となっている。氾濫域内には氾濫流の挙動に大きく影響す

る鉄道、高速道などの盛土構造物及び水路網、放水路が存在する。また放水路の流末にはポンプが設置されている。これらの特性を踏まえて、A市における次の2つの被害軽減策を検討する。ただし、ここではC川が破堤した場合を想定する。

・ 氾濫流誘導・排除対策

氾濫水をE水路とF水路を利用して放水路まで誘導しポンプによりC川に排水し浸水深の軽減を図る。

・ 避難対策

浸水を考慮した避難場所の設定、氾濫水の到達時間に基づく避難困難な区域の把握と対応策を検討する。

(2) 計算モデル、条件

破堤氾濫のシミュレーションモデルはC川の河道水位・流量を計算する洪水流追跡モデル（一次元不定流モデル）、氾濫域水深・流速を計算する氾濫流追跡モデル（一般曲線座標系浅水流モデル）、C川から氾濫域への氾濫流入量を計算する破堤モデル（本間の横越流式）から構成される。また、氾濫流追跡モデルには盛土の越流計算、カルバートの通過流量計算、樋門・樋管排水量計算、ポンプ排水計算など氾濫流に影響を及ぼす施設等の計算も組み込まれている。

対象洪水規模はC川の計画洪水とし、C川の上流端境界条件として洪水ハイドログラフを設定する。

(3) 氾濫流誘導・排除対策の効果分析

A市の浸水深がもっとも大きくなる▲地点が破堤した場合を検討する。

図-16に被害軽減対策なしの場合の破堤3時間後の流速ベクトル図を、図-17に最大浸水深分布図を示す。最初は氾濫流は放射状に拡散し、しだいにE水路とF水路を伝わり上流に伝播する。鉄道上流にはE水路とF水路のボックスカルバートを通り若干上流に広がる。最終的には主に鉄道下流域が浸水し、最大2.5m(2階)以上の浸水深がF水路沿いの低地に生じる。

次にポンプ排水を行った場合の最大浸水深を図-18に対策なしの浸水深からの水深低下量を図-19に示す。ポンプの排水量は現況の150m³/sを増強し300m³/sにしている。鉄道下流のほぼ全域で水深の低下効果が見られる。また2階以上の浸水区域が無くなり2階へ逃げれば生命の安全が確保できる。ポンプは現状ではD川の洪水排除を目的としているが危機管理対策として増強することにより大きな排水効果が得られる。

(4) 避難対策の検討

地方自治体は地域防災計画において避難計画を定めているが、多くは震災を想定した計画であり、これを水害時に適用するには多くの問題を含んでいる。また

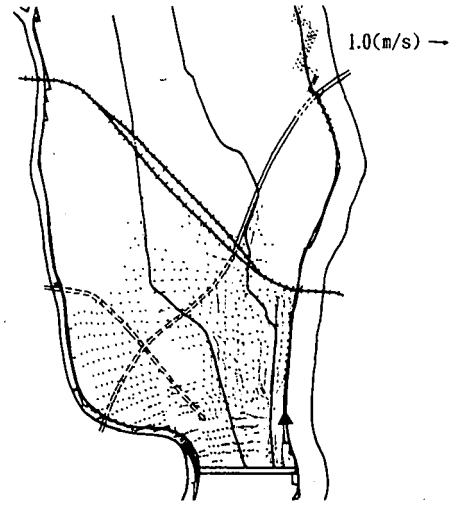
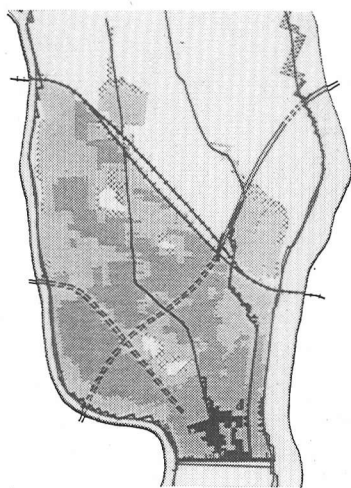


図-16 流速ベクトル図(破堤3時間後)

水害を想定している場合でも、氾濫状況を予想し計画を立案しているケースはほとんどないのが実状である。ケーススタディでは現況の流域条件においてC川沿いのどの地点が破堤しても対応できる避難方法、場所の検討を行う。このため想定する破堤箇所はC川沿いに約1~1.5kmピッチで多数設定している。

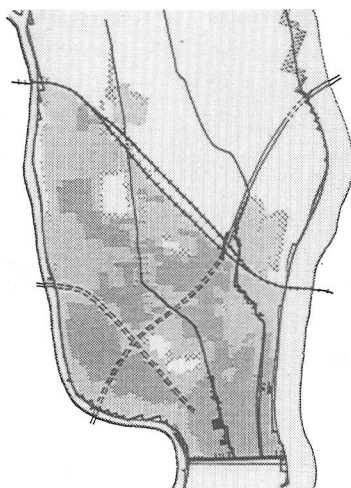
避難場所は浸水に耐える構造で最大浸水深以上の高さのフロアーを有する必要があること及び周知度、公共性を考え高層コンクリート構造の学校を避難場所に選定した。最大浸水深分布から見て何れの避難場所も浸水することが予想され、最大浸水深と階層を比較して利用可能フロアーがどの程度あるかあらかじめ調べて避難場所に設定している。

避難場所を指定しても破堤点近傍の氾濫水到達時間の早い区域などでは避難場所に到達できないことがありうる。このような避難困難な区域を抽出する方法として人間の避難行動をモデル化した避難行動シミュレーションを用いる方法が西原¹⁴⁾、高棹¹⁵⁾により研究されているが、ここでは簡易に評価するため破堤開始時に避難開始するものと仮定し、避難場所が浸水するまでに到着できる範囲内の住民は避難可能と判断した。例えば避難場所への氾濫水到達時間が30分であれば、30分以内に避難場所まで徒歩で到達できる範囲が避難可能区域である。避難(歩行)速度は既往水害時¹⁶⁾を参考に老人・子供等の災害弱者を対象として1km/hとした。図-20は全ての破堤箇所の氾濫水の到達時間分布をオーバーラップした図から氾濫水の等到達時間コンターを作製したものである。等到達時間分布の頂点を連ねるようにしてコンターを引いている。次に図-21は避難場所に到達できる区域を円で示している。濃い黒色に着色した区域が何れの避難場所へも避難困難な



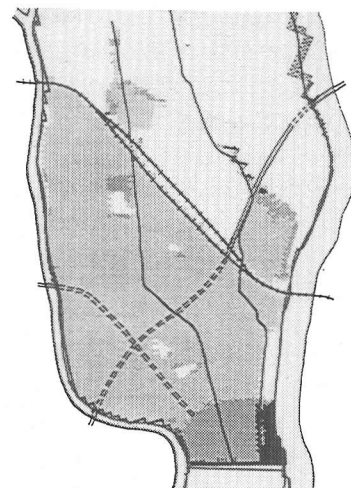
最大浸水深(m)	
0.01以上 ~ 0.5 未満	0.5 以上 ~ 1.5 未満
1.5 以上 ~ 2.5 未満	2.5 以上 ~

図-17 最大浸水深分布
(対策なし)



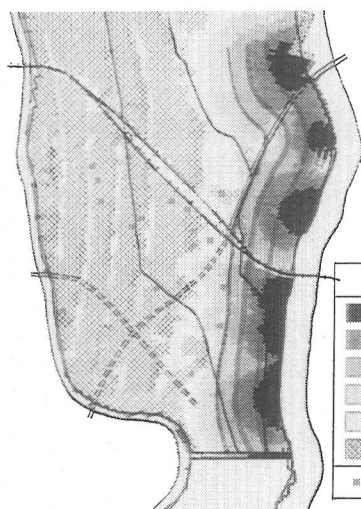
最大浸水深(m)	
0.01以上 ~ 0.5 未満	0.5 以上 ~ 1.5 未満
1.5 以上 ~ 2.5 未満	2.5 以上 ~

図-18 最大浸水深分布
(氾濫流誘導・排除対策あり)



浸水深低下量(m)	
0.01以上 ~ 0.2 未満	0.2 以上 ~ 0.4 未満
0.4 以上 ~	

図-19 浸水深軽減効果



氾濫水の到達時間(分)	
~ 10分未満	10分以上 ~ 20分未満
20分以上 ~ 30分未満	30分以上 ~ 45分未満
45分以上 ~ 60分未満	60分以上 ~

※ 避難場所

図-20 氾濫水等到達時間コンター

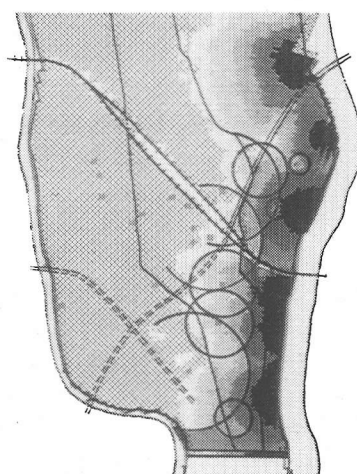


図-21 避難困難な区域の抽出

区域であり、川沿いの約600mが避難困難になる。このような区域には公共施設及び民間の建物等のコンクリート構造の中高層建築物を緊急避難場所として位置づけることが必要であると伴に避難困難な区域は破堤以前に避難する必要のある危険区域として避難情報、勧告を早く、迅速に伝達できる体制を予め整えておく必要がある。またA市には盛土あるいは高架にした一般道路はないため、氾濫後では安全に歩行できる道路がなく、逃げ遅れた場合にはほぼ避難不可能である。そこで鉄道、高速道を緊急避難道路、一時避難場所、救援活動用道路としても利用すること等も考えておくことが必要である。

4. 結論

本研究で得られた主な結論を以下に示す。

- 1) 密集市街地における氾濫流の非水没家屋に作用する流体力を計測した結果、家屋周辺の流れはほぼ静水圧分布と見なすことができ、家屋に作用する抗力は家屋前面と後面の水深、つまり水理量のみから求めることができる。一方、通常抗力係数を用いて抗力を算定する場合、家屋配置、間隔により抗力係数は変化し、様々な家屋に対して抗力係数を正しく定めることは困難である。
- 2) 密集市街地の氾濫シミュレーションモデルでは道路網を精度良くモデル化すること及び家屋群の抵抗を適切に考慮する必要がある。本研究では一般曲線座標系を採用することにより道路網、家屋等の高精度のモデル化を可能にした。抵抗を底面摩擦、家屋背後の平面渦による抵抗、家屋の流体力に分け、家屋の流体力は水理実験から定めた抗力の表現式(7)を導入した。これらを基礎式に取り込むことにより水位、流速分布、抗力が同時に求まり、かつ一般性が高く精度の良い氾濫流計算が可能なモデルを構築した。この新しいモデルは道路、家屋群内の水位、流速分布について精度の高い計算を可能にしている。
- 3) 氾濫域内のポンプ、水路を利用した氾濫水誘導・排水対策は浸水面積の減少、浸水深の低下効果がある。ポンプを危機管理のために増強することにより大きな効果が得られる。
- 4) 破堤点を川沿いに多数設定することにより氾濫水到達時間コンターを推定し、避難困難な区域を抽出できる。子供、老人など災害弱者の避難を想定した場合、河川近傍の約600mの区域で避難できないことが予想された。この区域では緊急避難場所の設置、避難情報・勧告等を迅速に伝達できる体制を予め構築しておくなどの対策が必要である。

参考文献

- 1) 河川審議会：「今後の河川整備はいかにあるべきか」についての答申，1991。
- 2) 例えば、角屋睦，早瀬吉雄，岡太郎：昭和49年7月豪雨による伊勢市水害の発生過程，京都大学防災研究所年報，第18号B，pp.453-468，1975。
- 3) Xanthopoulos, T. and Koutitas, C.: Numerical Simulation of a Two Dimensional Flood Wave Propagation Due to Dam Failure, Jour. of Hydraulic Research, vol.14, No.2, pp.321-331, 1976。
- 4) Katopodes, N. and Strelkoff, T.: Computing Two-Dimensional Dam-Break Flood Waves, Proc. of ASCE, vol.104, HY9, pp.1269-1288, 1978。
- 5) 岩佐義郎，井上和也，水鳥雅文：氾濫水の水利の数値解析法，京都大学防災研究所年報，第23号B-2，pp.305-317，1980。
- 6) 中川一：洪水および土砂氾濫災害の危機度評価に関する研究，京都大学博士論文，1989。
- 7) 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—8610号台風による吉田川の場合—，第33回水理講演会論文集，pp.331-336，1989。
- 8) 福岡捷二，川島幹雄，松永宜夫，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，pp.51-60，1994。
- 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) 福岡捷二，川島幹雄：市街地氾濫流の挙動と危機回避策，氾濫原危機管理国際ワークショップ論文集，pp.187-199，1996。
- 11) 福岡捷二，川島幹雄，横山洋，水口雅教：家屋群に作用する氾濫流の流体力に関する実験的研究，水工学論文集，第41巻，pp.693-698，1997。
- 12) 福岡捷二，渡辺明英：ベーン工の設置された湾曲部の流れと河床形状の解析，土木学会論文集，No.447/II-19，pp.45-54，1992。
- 13) 鹿島台町，大郷町，松島町，建設省，宮城県：「水害に強いまちづくり」パンフレット，1992。
- 14) 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，1993。
- 15) 高棹琢馬，椎葉充晴，堀智晴：水害避難行動のマイクロモデルシミュレーションと制御に関する研究，土木学会論文集，No.509/II-30，pp.15-25，1995。
- 16) 末次忠司：“建設技術Q&A「水害時の危機管理の留意点について」”，土木技術資料[37/3]，pp.10-11，1995。

(1997. 8. 28 受付)

THE NUMERICAL SIMULATION MODEL OF
FLOOD- INDUCED FLOWS IN URBAN RESIDENTIAL AREA
AND THE STUDY OF DAMAGE REDUCTION

Shoji FUKUOKA, Mikio KAWASHIMA,
Hiroshi YOKOYAMA and Masanori MIZUGUCHI

In order to construct the countermeasures against flooding, a floodwater simulation model with a high degree of accuracy is required. We constructed a new numerical simulation model in an urban residential area to apply a two dimensional shallow water model. This model employs the general curvilinear coordinate system to reproduce the road network and houses and considers the hydrodynamic force acting on the houses. We estimated the force by the experiments. The applicability of the model was verified by reproducing the results obtained from large scale hydraulic model experiments. Finally, the model was used to carry out case studies of actual urban districts and the countermeasures were investigated.