

都市域の氾濫解析モデルの開発

川池健司¹・井上和也²・林 秀樹³・戸田圭一⁴

¹ 学生会員 修(工) 京都大学大学院 工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

² 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³ 正会員 修(工) 兵庫県 (〒671-1524 兵庫県揖保郡太子町東保 5-7-306)

⁴ 正会員 Ph.D. 京都大学助教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

都市水害の対策を講じるには、都市域の氾濫状況を精度よく予測することが求められる。本研究は、都市域に存在する諸要素 — 例えば道路、建造物、中小河川など — のうちの道路と建造物に着目した氾濫解析モデルの開発を目的としている。従来から用いられてきた氾濫解析手法である 1) デカルト座標系による氾濫解析法、のほかに、都市域の道路と建造物の影響を考慮する手法として、2) 一般曲線座標系による氾濫解析法、3) 非構造格子による氾濫解析法、さらに 4) 領域内の道路網をネットワーク化して 1 次元解析を組み込んだ氾濫解析法を開発し、以上の 4 手法の結果を比較した。各解析手法はそれぞれに特色を有しており、対象とする領域の特色、必要な結果の精度に応じてこれらを使い分けることが都市氾濫解析の高度化につながる。

Key Words : inundation flow model, urban area, unstructured meshes, street network model

1. はじめに

我が国の大都市の多くは海岸に沿ったわずかな低平地や、たび重なる河川の氾濫によって形成された沖積平野上に立地している。これまでにも、都市は多くの高潮災害や洪水災害を経験してきたし、近年にいたってはほぼ毎年のように都市域特有の水害が発生し、問題となっている。

避難などの都市水害対策を講じるには、氾濫水がどのような挙動を示すかを精度よく予測することが重要である。しかし、都市内には道路や建造物といった構造物が存在し、それらが氾濫水の挙動に及ぼす影響は大きくかつ複雑である。

こういった都市の特性を考慮した氾濫解析モデルは、従来の研究において種々考案されてきた。例えば福岡ら¹⁾は、抗力係数または家屋前後の水深を用いて、家屋群に作用する流体力を運動方程式中で考慮したモデルを開発し、それを一般曲線座標系を用いて都市域に適用している。また秋山ら²⁾は、TVD-MacCormack法に基づく平面 2 次元非定常流モデルに、やはり抵抗係数を用いて流体力項を加味したモデルで氾濫解析を行っている。上記の両モデルが家屋周辺の微視的な流況を予測することに主眼をおいているのに対し、末次・栗城³⁾は、道路、農地、その他の土地利用ごとに粗度

係数を定め、それらの面積加重平均値と家屋占有率から合成粗度係数を求める式を提案し、氾濫解析モデルの精度向上を試みている。しかし、ここで用いられている解析格子では道路を流れる氾濫水の挙動を表現することが難しく、解析結果の精度向上のためには格子をさらに細かくとる必要がある。

本研究では、家屋周辺の詳細な氾濫状況を表現することよりも、家屋群と空地からなる格子と道路だけからなる格子を用いて、道路沿いの流れを表現することのできるモデルの構築を目指す。なぜなら、著者らは氾濫解析結果はハザードマップの作成や避難対策などへ応用される基礎情報と考えているが、その際には、氾濫水が対象とした都市域のどこを流れるか、あるいは氾濫水が破堤後どのくらいの時間で対象域のどのあたりまで到達するかという情報が重要であり、家屋周辺の詳細な情報までは必ずしも必要とは限らないと考えているからである。

本研究は以上の考えに基づいて、氾濫解析法を比較・検討する。比較に用いた解析法として、

- 主要な道路に沿って座標軸をとった一般曲線座標系を適用した氾濫解析 (以下、一般曲線座標系モデル)、
- 領域を任意形状の格子に分割できる非構造格子

を適用した氾濫解析 (以下, 非構造格子モデル), を行う. さらに,

- 市街地の道路網をネットワーク化して道路網には 1 次元解析法を適用する氾濫解析法 (以下, 街路ネットワークモデル)

を新たに展開し, 従来から用いられてきた

- デカルト座標系による氾濫解析法 (以下, デカルト座標系モデル)

を合わせた 4 手法を大阪市港区周辺に適用する.

2. 氾濫解析法

(1) デカルト座標系モデル

デカルト座標系による氾濫解析法として, 以下の浅水方程式を基礎式とした武田ら⁴⁾の手法を用いる.

<連続式>

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

<運動量式>

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_w} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_w} \quad (3)$$

ここに, h は水深, u, v は x, y 方向の流速, M, N は x, y 方向の流量フラックス ($M = uh, N = vh$), H は水位, τ_{bx}, τ_{by} は水底面でのせん断応力の x, y 方向成分で, それぞれ以下の式を用いる.

$$\tau_{bx} = \frac{\rho_w g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (4)$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho_w g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (5)$$

ここに, ρ_w は水の密度, g は重力加速度, n はマンニングの粗度係数, t は時間, x, y はデカルト座標系の座標値である. これらの離散化については武田ら⁴⁾の方法にしたがう. すなわち, 時間項には前進差分, 移流項には Doner Cell スキーム, 底面摩擦項には Vasiliev の不安定を避けるため局所的 implicit な形を用いた中央差分, それ以外の項には中央差分をそれぞれ適用する. 未知量は staggered に配置し, 計算は Leap-Frog 的に進める. 氾濫水が不連続になっている場合には, 以下の越流公式, あるいは段落ち式を用いる⁵⁾. つまり, 隣り合う格子の地盤高が低い方の水位 (H_l) が, 他方の地盤高 (z_h) よりも高い場合に, $h_1 = H_l - z_h$ として次に示す越流公式を用いて流量フラックス M_0 を求める.

$$M_0 = \mu h_1 \sqrt{2gh_1} \quad (6)$$

ここに, $\mu = 0.35$ である. また, 地盤高の低い方の水位が一方の地盤高よりも低い場合に, 地盤の高い方の水深 (h_h) を用いて次に示す段落ち式より流量フラックス M_0 を求める.

$$M_0 = \mu h_h \sqrt{gh_h} \quad (7)$$

ここに, $\mu = (2/3)^{3/2}$ を用いている.

また, 氾濫水の移動限界水深は, 岩佐ら⁶⁾にしたがって, 0.001m を用いる.

(2) 一般曲線座標系モデル

デカルト座標系による解析格子の形状は長方形で, 市街地の道路とそれ以外の領域を別の格子で表現しようとすると, 相当細かい格子分割が必要となる. そこで, 一般曲線座標系を用いれば, 主要な道路に沿って座標軸をとることにより, 道路とその他の部分の属性分けがそれほど細かい格子分割によらなくてもある程度可能になる.

本研究で用いた一般曲線座標系モデルにおける基礎式は, デカルト座標系モデルの基礎式 (1) ~ (3) を物理平面 (x, y) 系から計算平面 (ξ, η) 系へ変数変換することによって以下のように得られる⁷⁾.

<連続式>

$$\frac{\partial h}{\partial t} + J \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{M^\xi}{J} \right) + J \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{M^\eta}{J} \right) = 0 \quad (8)$$

<運動量式>

(ξ 方向)

$$\begin{aligned} \frac{\partial M^\xi}{\partial t} = & -J^2 y_\eta \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{u^\xi M^x}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{u^\eta M^x}{J} \right) \right\} \\ & + J^2 x_\eta \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{u^\xi M^y}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{u^\eta M^y}{J} \right) \right\} \\ & - J^2 gh \left\{ (x_\eta^2 + y_\eta^2) \frac{\partial H}{\partial \xi} \right. \\ & \quad \left. - (x_\xi x_\eta + y_\xi y_\eta) \frac{\partial H}{\partial \eta} \right\} \\ & - \frac{gn^2 M^\xi \sqrt{(M^x)^2 + (M^y)^2}}{h^{7/3}} \end{aligned} \quad (9)$$

(η 方向)

$$\begin{aligned} \frac{\partial M^\eta}{\partial t} = & J^2 y_\xi \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{u^\xi M^x}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{u^\eta M^x}{J} \right) \right\} \\ & - J^2 x_\xi \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{u^\xi M^y}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{u^\eta M^y}{J} \right) \right\} \\ & - J^2 gh \left\{ -(x_\xi x_\eta + y_\xi y_\eta) \frac{\partial H}{\partial \xi} \right. \\ & \quad \left. + (x_\xi^2 + y_\xi^2) \frac{\partial H}{\partial \eta} \right\} \\ & - \frac{gn^2 M^\eta \sqrt{(M^x)^2 + (M^y)^2}}{h^{7/3}} \end{aligned} \quad (10)$$

J はヤコビアンであり、以下のように定義される。

$$J = \frac{1}{x_{\xi}y_{\eta} - x_{\eta}y_{\xi}} \quad (11)$$

なお、上付き添字はこの変数の方向の流速および流量フラックスを表し、下付き添字はこの変数による偏微分を表す。

一般曲線座標系モデルの場合も、デカルト座標系モデルと同様に Leap-Frog 法で計算を進め、未知量は staggered に配置する。氾濫水が不連続になっている場合には式(6),(7)を用い、離散化の方法もデカルト座標系モデルと同様である。

(3) 非構造格子モデル

一般曲線座標系による格子は、必ずしも長方形である必要はないため、物理平面 (x, y) 系におけるデカルト座標系の座標軸と平行でない道路に沿って格子を形成することが可能である。しかし、独立な座標軸はもとも 2 本に限られているため、考慮することのできる道路にはおのずと限界がある。そこでつぎに、計算領域を任意形状の格子に分割した非構造格子によって、都市域の氾濫解析を試みる。

本研究では、まず領域を多角形の非構造格子に分割する。つぎに、全領域に対して直交(デカルト)座標軸(x 軸, y 軸)を設定し、この座標系における各方向の流量フラックス(M, N)、および流速(u, v)を非構造格子の境界(多角形の辺の midpoint)で、水深(h)を非構造格子の図心で定義した後、Leap-Frog 的に計算を進める。

非構造格子モデルの氾濫解析に用いた基礎式は以下の浅水方程式である。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2 M \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (13)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{gn^2 N \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (14)$$

ただし、氾濫水が不連続になっている場合には、式(6),(7)を用いて流量フラックスを計算した後、それを x 方向成分, y 方向成分に分解する。

連続式の差分化

連続式は、図-1 に示すコントロールボリュームで計算する。差分式には以下の式を用いる。

$$\frac{h^{n+3} - h^{n+1}}{2\Delta t} + \frac{1}{A} \sum_{i=1}^m \{M_i^{n+2}(\Delta y)_i - N_i^{n+2}(\Delta x)_i\} = 0 \quad (15)$$

h は格子の水深, m は格子を囲む辺の数, A はコントロールボリューム, すなわち格子の面積である。 M_i, N_i はそれぞれ辺 l 上での x, y 方向の流量フラックスを示す。 $(\Delta x)_l, (\Delta y)_l$ は辺 l での両端の点の x 座標, y 座標の差を表す。なお、上付き添字は時間ステップである。

運動量式の差分化

運動量式は、格子の辺において計算する。例えば格子 i, j にはさまれた格子辺 L での計算には、図-2 に示す値を用いて以下の差分式を用いる。

(x 方向)

$$\frac{M_L^{n+2} - M_L^n}{2\Delta t} + M1 + M2 = -g\bar{h}^{n+1}(\nabla H)_x - \frac{gn^2 \frac{M_L^{n+2} + M_L^n}{2} \sqrt{(u_L^n)^2 + (v_L^n)^2}}{(\bar{h}^{n+1})^{4/3}} \quad (16)$$

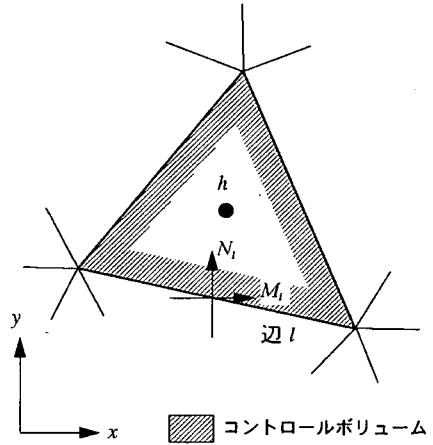


図-1 連続式のコントロールボリューム

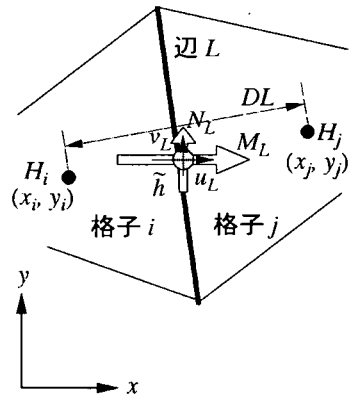


図-2 運動量式の計算に用いる諸量

(y 方向)

$$\frac{N_L^{n+2} - N_L^n}{2\Delta t} + N1 + N2 = -g\bar{h}^{n+1}(\nabla H)_y - \frac{gn^2 \frac{N_L^{n+2} + N_L^n}{2} \sqrt{(u_L^n)^2 + (v_L^n)^2}}{(\bar{h}^{n+1})^{4/3}} \quad (17)$$

ここに、 M_L, N_L は格子辺 L 上での x および y 方向の流量フラックス、 u_L, v_L は格子辺 L 上での x および y 方向の流速である。 $M1, M2$ はそれぞれ式 (13) の移流項の左辺第 2 項および第 3 項を、 $N1, N2$ はそれぞれ式 (14) の移流項の左辺第 2 項および第 3 項の差分表示で、下のように記述できる。

$$M1 + M2 = \frac{1}{A_{cv}} \sum_{l=1}^{m'} \left\{ (u_l \tilde{M}_l)(\Delta y)_l - (v_l \tilde{M}_l)(\Delta x)_l \right\} \quad (18)$$

$$N1 + N2 = \frac{1}{A_{cv}} \sum_{l=1}^{m'} \left\{ (u_l \tilde{N}_l)(\Delta y)_l - (v_l \tilde{N}_l)(\Delta x)_l \right\} \quad (19)$$

ここに、 A_{cv} はコントロールボリュームの面積、 m' はコントロールボリュームを囲む辺の数、 u_l, v_l は辺 l 上での流速、 $(\Delta x)_l, (\Delta y)_l$ は辺 l の両端の点の x 座標、 y 座標の差である。 \tilde{M}, \tilde{N} は格子の図心上の流量フラックスであり、格子辺上の流量フラックスから補間して求める。格子辺上の流速 (u_l, v_l) の方向にしたがって、 \tilde{M}, \tilde{N} には上流側の補間流量フラックスを用いることにする。

$(\nabla H)_x, (\nabla H)_y$ はそれぞれ格子 i, j 間の水面勾配 ∇H の x, y 方向成分であり、以下のように計算する。

$$(\nabla H)_x = \frac{H_j - H_i}{DL} \cdot \frac{x_j - x_i}{DL} \quad (20)$$

$$(\nabla H)_y = \frac{H_j - H_i}{DL} \cdot \frac{y_j - y_i}{DL} \quad (21)$$

ここに、 H_i, H_j は格子 i, j での水位、 $(x_i, y_i), (x_j, y_j)$ はそれぞれ格子 i, j の図心の座標である。 DL は格子 i, j の図心間距離であり、

$$DL = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \quad (22)$$

である。 \bar{h} は格子辺上の水深であり、図心における水深から補間して求める必要がある。本研究では、格子 i, j での水深をそれぞれ h_i, h_j 、格子 i, j の図心と辺 L の中点との距離をそれぞれ d_i, d_j とすると、補間水深 \bar{h} は d_i, d_j の逆数に比例する形で補間した。すなわち、

$$\begin{aligned} \bar{h} &= \frac{\frac{1}{d_i} h_i + \frac{1}{d_j} h_j}{\frac{1}{d_i} + \frac{1}{d_j}} \\ &= \frac{d_j h_i + d_i h_j}{d_i + d_j} \end{aligned} \quad (23)$$

で求める。

(4) 街路ネットワークモデル

非構造物格子を用いた氾濫解析もまた、デカルト座標系モデル、一般曲線座標系モデルと同様、領域全体を平面 2 次元の場として解析するモデルである。しかし、道路に沿った氾濫水の伝播をより重視した場合、市街地の道路網をネットワークとして、1 次元解析法を適用することも可能である。本研究ではこのような考え方に立脚し、まず道路をネットワーク（交差点をノード、交差点間の道路をリンクとする）とみなすとともに、ネットワーク以外の市街地（建造物、空き地およびネットワークとみなされなかった細かい道路）を住区とするモデル化を行う。道路のリンクでは、始点ノードから終点ノードの向きに x 軸をとり、長方形断面水路とみなした 1 次元解析法を適用する（リンクは縦断方向に格子分割する）。交差点および住区はそれぞれが面積を有する 1 つの格子であるとみなし、連続式から水深を求める。用いた基礎式は以下のとおりである。なお、計算は上記 3 手法と同様に Leap-Frog 的に進め、氾濫水が不連続になっている場合には式 (6), (7) を用いる。

<リンク>

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = \frac{q_{in}}{B} \quad (24)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial (uM)}{\partial x} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2 |M|M}{h^{5/3}} \quad (25)$$

ここに、 u, M は x 方向の流速、流量フラックスであり、 q_{in} は横流入流量（住区からリンクに浸入する x の単位長さ当たりの流量）、 B はリンク幅である。

<ノードおよび住区>

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^m Q_k \quad (26)$$

ここに、 h はノードまたは住区の水深、 A はその面積、 Q_k はノードまたは住区の周を構成する格子辺からの流入流量、 m は格子を構成する辺の数である。

<リンク、ノード、住区間の流量フラックス>

リンクと住区、ノードと住区、およびノードとリンクとの間の流量は、運動量式として簡単のため式 (25) の左辺第 2 項を省略した次の式を適用する。

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2 |M|M}{h^{5/3}} \quad (27)$$

上式の右辺第 1 項で用いる格子間距離 (Δx) は、リンク、ノード、住区間のそれぞれの場合において次のように定義する。

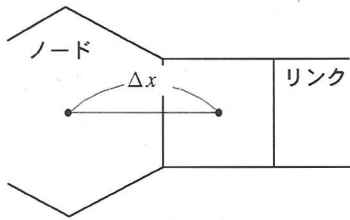


図-3 リンクとノードの格子間距離

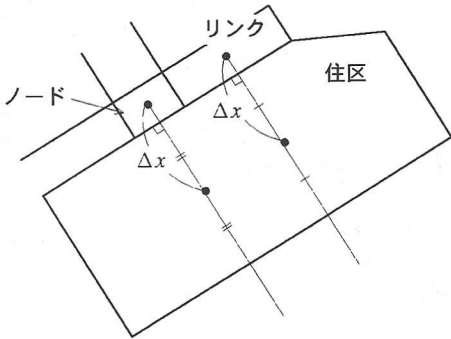


図-4 リンクと住区、ノードと住区の格子間距離

まずリンクとノードの場合には、図-3に示すように、ノードの図心とノードに接するリンク格子の図心の間の距離を Δx とする。リンクと住区の場合には、図-4に示すように、リンク格子の図心から住区との境界線におろした垂線が住区によって切り取られる線分の中点と、リンク格子の図心との距離を Δx とする。ノードと住区の場合には図-4に示すように、上記のリンクと住区の場合の説明において、リンクの図心の代わりにノードの図心を用いるだけである。

3. 大阪市港区周辺への適用

(1) 計算条件

前章で提示した氾濫解析の4手法を都市域に適用するときの解析格子を概念的に示したのが図-5である。

これらを、本研究では大阪市港区周辺の高潮氾濫に適用する。この領域は図-6に示すように、安治川、木津川、尻無川、および大阪湾に囲まれ、河川堤防や海岸堤防により輪中をなしている。本研究で用いた各手法の格子分割を図-7に示す。なお、デカルト座標系の格子にはこの領域の地盤高も示している。その他の3手法の格子には道路格子と住区格子に分割した結果を示している。その際に、一般曲線座標系モデルではまず幅員約30m以上の主要な道路を選択して座標軸を決定し、形成された解析格子の図心が地形図上で道路ならばその格子は道路とした。非構造格子モデルでは幅員

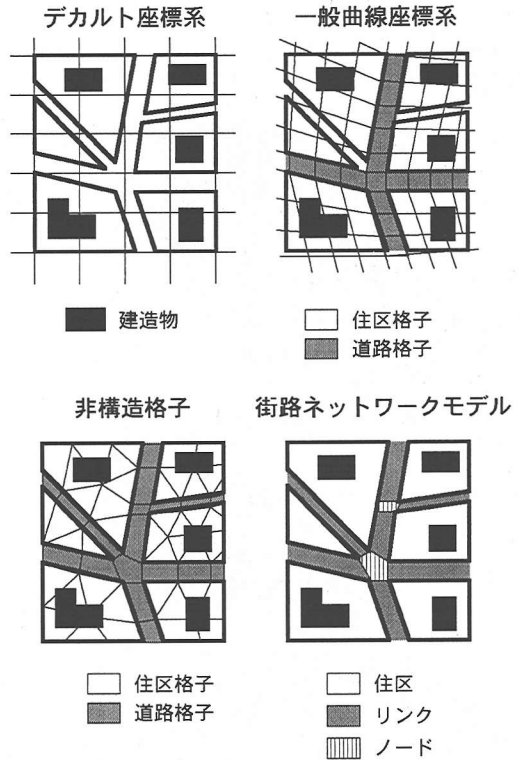


図-5 各手法の解析格子の概念図

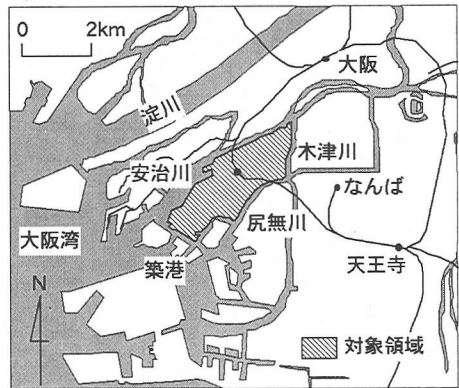


図-6 対象領域

が約30m以上、街路ネットワークモデルでは同10m以上の道路を道路格子として採用してから解析格子を形成した。格子サイズは、デカルト座標系モデルは $57.25 \times 46.125\text{m}$ 、一般曲線座標系モデルは概ね一辺50mの四角形、非構造格子モデルは一辺が30~100mの多角形、街路ネットワークモデルはリンクの縦断方向の分割幅が10m、ノードが一辺10~100m、住区が同50~300mの多角形である。格子数はデカルト座標系モデルで2434個、一般曲線座標系モデルで2701個、非構造

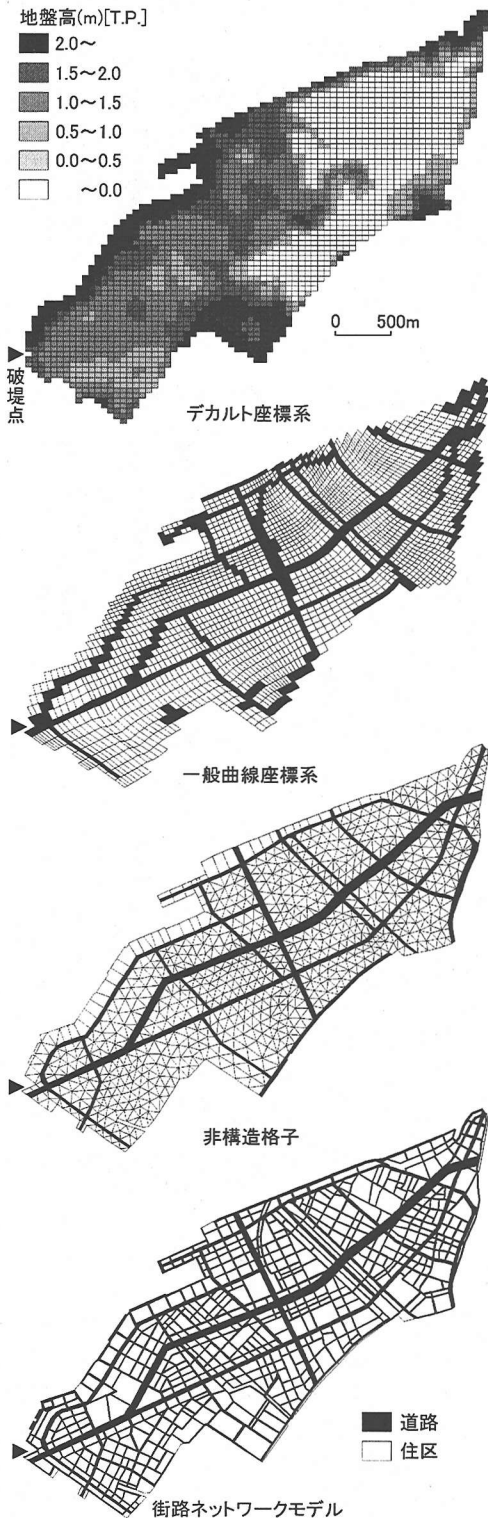


図-7 解析格子

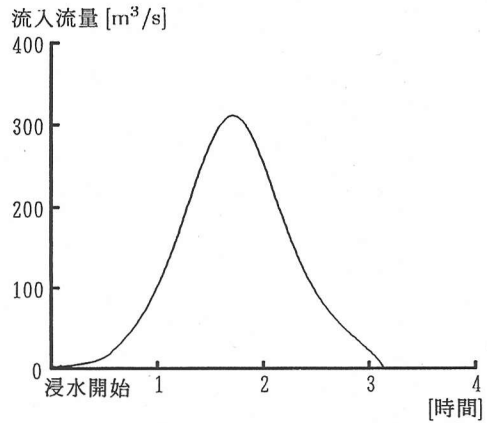


図-8 流入流量ハイドログラフ

格子モデルで1750個、街路ネットワークモデルで7396個(ただし、道路を縦断方向に分割した格子も含む)である。この領域の周囲は十分高い直立壁で囲まれておりとし、想定破堤点から、図-8に示すような流入流量ハイドログラフの氾濫水が流入するとする。このハイドログラフは、大阪市の計画台風(伊勢湾台風規模の台風が室戸台風と同一のコースを通過したと仮定した台風)を用いて高潮解析を行った結果得られた、大阪築港での潮位を基に作成したハイドログラフ⁷⁾である。

(2) 道路、建造物の影響

領域内に存在する道路や建造物は、例えば、非浸水性の建造物による氾濫面積の拡大、建造物による氾濫水の遮断、道路に沿った氾濫水の伝播などのように、氾濫水の挙動に大きな影響を与える。これらを考慮するため、本研究ではデカルト座標系モデルを除く他の3手法において計算領域の格子を、図-7に示すように道路格子と住区格子に二分する。そして、それぞれの格子に建造物の占有率⁸⁾ λ (格子面積のうち建造物の敷地面積の占める割合、ただし道路格子の占有率は0)を考慮するとともに、各格子境界では建造物が存在することによる住区内への流入量(あるいは住区からの流出量)の減少を表現するため通過率 β ($0 \leq \beta \leq 1$)を定義し、さらに道路格子の粗度係数 n を住区格子の値よりも小さくすることによって、道路と建造物の影響を考慮することを試みる。

a) デカルト座標系モデル・一般曲線座標系モデル・非構造格子モデル

通過率 β を用いて、運動量式から得られた各格子境界での流量フラックスを以下のように補正する。

$$M^* = \beta M \quad (28)$$

$$N^* = \beta N \quad (29)$$

この補正流量フラックス M^* , N^* を, 占有率 λ を考慮した以下の連続式に代入して各格子の水深を求める.

$$(1 - \lambda) \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M^*}{\partial x} + \frac{\partial N^*}{\partial y} = 0 \quad (30)$$

b) 街路ネットワークモデル

街路ネットワークモデルの場合も住区 k との境界で通過率 β_k を定義してリンクと住区, ノードと住区間の流量を補正する.

$$Q_{k,l}^* = \beta_k Q_{k,l} \quad (31)$$

そして, この $Q_{k,l}^*$ を住区 k の占有率 λ_k を考慮した次の連続式に代入して, 各住区格子の水深を求める.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{(1 - \lambda_k) A_k} \sum_{i=1}^m Q_{k,i}^* \quad (32)$$

(3) 市街化していない場合

対象領域は現在では高度に都市化が進んでいるが, まず市街化していない場合として道路と建造物の影響を全く考慮しない ($\lambda=0.0, \beta=1.0$) という簡単な条件の下で4つの氾濫解析手法を比較する. すなわち, ここでは道路格子と住区格子を区別せず, 全領域において粗度係数 $n = 0.067$ とし, 占有率 λ と, 通過率 β は上記のとおりとする.

図-9は, 解析結果から氾濫面積の時間変化を, 図-10は浸水域の広がり方の比較を表したものである. これらの図によると, 街路ネットワークモデルにおいて氾濫水の伝播がやや速くなっているものの, 他の手法と比較してその差はわずかである. つまり, ここで提示した4つの氾濫解析手法は, 市街化していない(住区に建造物が存在しない)という簡単な条件の下では, ほ

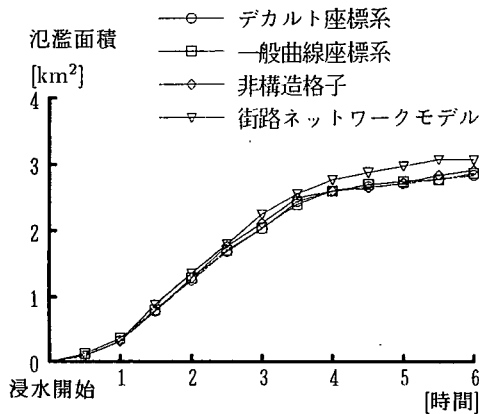


図-9 浸水面積の時間変化
(市街化していない場合)

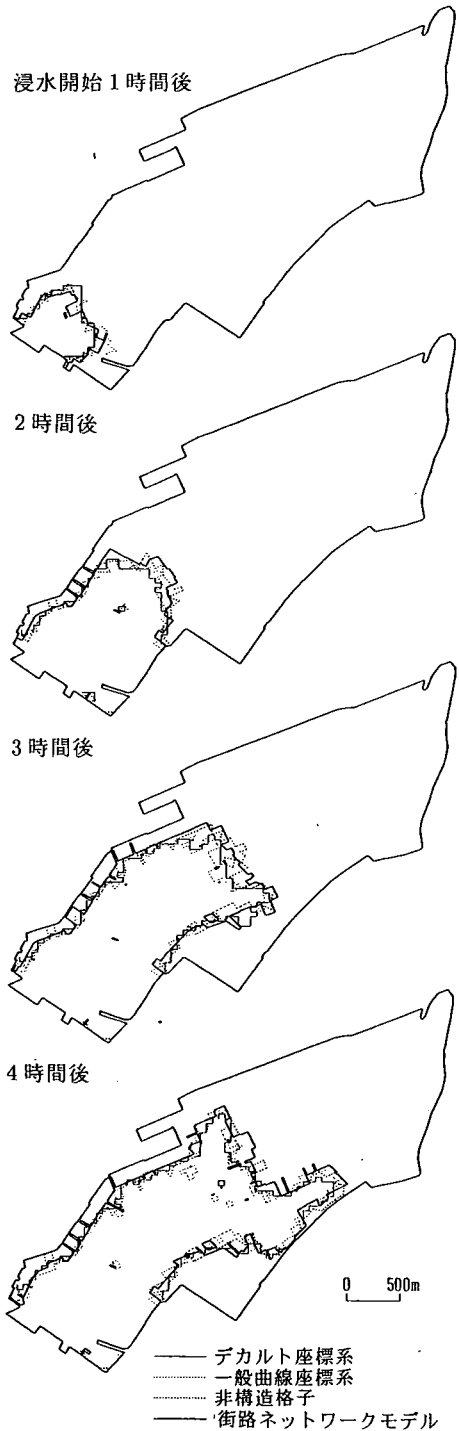


図-10 浸水域の変化
(市街化していない場合)

ば大差ない結果をもたらすことがわかる。

(4) 市街化が進んだ場合

つぎに、市街化が進んだ場合として、道路と建造物の影響を考慮した解析を行う。ここで、デカルト座標系を除く3つの解析手法では、図-7に示すように全解析格子を道路格子と住区格子に二分する。道路格子として属性分けされた格子の面積は、対象領域の面積（約6.4km²）のうち、一般曲線座標系モデルでは25%、非構造格子モデルでは16%、街路ネットワークモデルでは33%である。以下では、道路格子と住区格子のそれぞれに異なる粗度係数、異なる占有率の値を与えることにより、道路と建造物の影響を考慮する。すなわち、粗度係数については、道路では $n=0.043$ 、住区では $n=0.067$ とする。占有率については、道路では当然 $\lambda=0.00$ とするが、住区では0でない値（デカルト座標系モデル 0.48：一般曲線座標系モデル 0.64：非構造格子モデル 0.58：街路ネットワークモデル 0.72）を与える。値がモデルによって異なるのは、全領域の面積に対して住区格子が占める面積の割合が異なるからであり、全領域でみた建造物の面積は統一されている。通過率については $\beta=0.6$ を与える。

浸水面積の時間変化を図-11に、浸水域の拡がり方の比較を図-12にそれぞれ示す。これらの図より、市街化していない場合（図-9、図-10）と違って、各手法の間で氾濫水の伝播速度に差が現れていることがわかる。伝播速度が最も速いのは街路ネットワークモデルで、ついで一般曲線座標系モデルと非構造格子モデルがほぼ同一の速度で伝播し、デカルト座標系モデルでは一番遅くなっている。これは、道路格子として考慮するこ

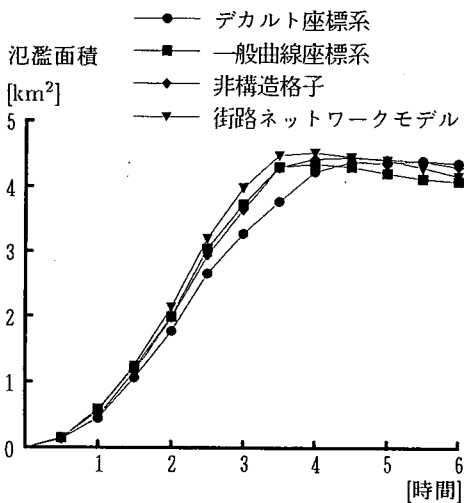


図-11 浸水面積の時間変化
(市街化が進んだ場合)

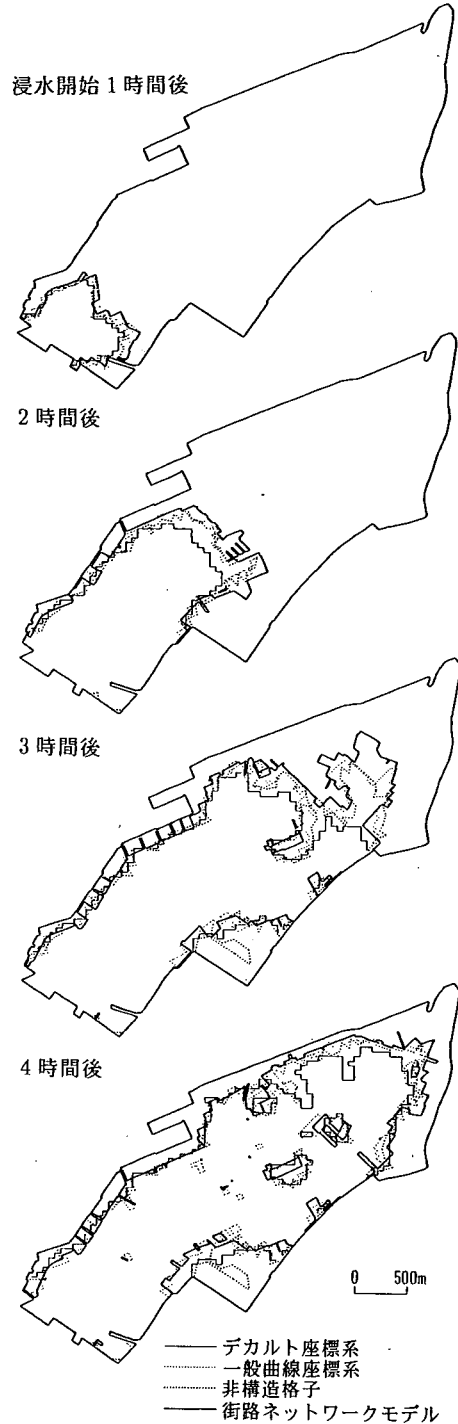


図-12 浸水域の変化
(市街化が進んだ場合)

表-1 各氾濫解析モデルの長所と短所

氾濫解析法	長所	短所
デカルト座標系モデル	格子形成が簡便, 大まかな氾濫の状況を把握するのに好都合	建造物や道路の影響の考慮が困難
一般曲線座標系モデル	主要な道路に沿った格子形成が可能	格子形成が街路網の形状に依存
非構造格子モデル	複雑な地形や境界を取りこむのが容易	格子形成に時間と労力が必要
街路ネットワークモデル	密集市街地において, 建造物や道路の影響を考慮するのに最適	格子形成にかなりの時間と労力が必要

とのできた面積の割合の大きさの順とほぼ等しくなっている。すなわち、道路を道路として考慮できたモデルほど氾濫水が速く伝播しているといえる。とくに浸水開始3時間後には、デカルト座標系モデルと街路ネットワークモデルの間には、氾濫水の先端に約800mの差が生じている。以上の結果から、一般曲線座標系モデル、非構造格子モデル、街路ネットワークモデルを用いれば、比較的簡便な手法で都市域に存在する建造物や道路の存在を考慮した氾濫解析が可能となることがわかった。

(5) 4手法の比較

本研究でとりあげた4つの氾濫解析手法は、格子形成にそれぞれの特徴を持っており、以下に挙げる長所と短所とを有する。以上をまとめたのが、表-1である。

デカルト座標系モデルは、氾濫解析に広く一般的に用いられているが、これは格子形成の簡便さに起因すると考えられる。すなわち、格子形成に要する時間や労力は4手法の中では最も少なくすむモデルである。しかし、市街地に適用する場合、建造物も道路も同一の格子内に混在することになり、これらの影響を考慮した氾濫解析は不可能となる。道路や建造物を別々の格子に属性分けできるほど細かく格子分割することも考えられるが、それでは格子形成におけるデカルト座標系の利点を損なうことになりかねない。

一般曲線座標系は、湾曲部を含む開水路流れの数値解析などにおいて広く用いられている。この座標系モデルを市街地に適用する場合、座標軸を適切にとることができれば、格子ごとに道路や建造物の属性分けができる。したがって、デカルト座標系と比較して、市街地での詳細な氾濫解析により適したモデルであるとい

える。本研究の格子分割の際には、ある程度の幅員をもつ主要道路のみに着目し、これらをもとに座標軸を決定した後、隣接する格子の大きさがなるべく異ならないよう配慮して格子分割を行った。しかし、デカルト座標系と比較して格子形成にはかなりの労力が要求される。しかも、座標軸は ξ, η の2本に限られるので、考慮に入れられる道路の方向はおのずと制限される。この点は、対象とする街路網の形状に大きく左右される条件である。

非構造格子モデルを氾濫解析へ適用するとき、長所として、境界や形状の複雑な領域に対して格子を形成しやすということや、計算上重要でない領域は格子を粗くとることなどが挙げられる。都市域においては、複雑に流れる中小河川やその堤防、また鉄道や道路などの連続盛土が存在し、それらは氾濫水の挙動に大きな影響を及ぼす。これらの線状構造物の影響を考慮に入れた氾濫解析を行うには非構造格子の適用が有利である。本研究では、対象となる都市域の特性あるいは解析の目的に応じてまず道路あるいは河川網を連続した格子で表現し、その他の領域をなるべく正三角形か正方形に近い形状の多角形格子に分割するよう配慮した。しかし非構造格子においても、一般曲線座標系と同様、格子形成に要する時間と労力は多大である。

街路ネットワークモデルは密集市街地への適用を目的として開発されている。密集市街地では建造物が道路の両側に林立し、氾濫水は主に道路を伝って、市街地を伝播していくと予想される。街路ネットワークモデルでは、この点に着目して、道路だけを取り出して格子を形成する。したがって、一般曲線座標系や非構造格子と比較しても、かなり細かな道路まで考慮に入れることができる。しかしその反面、格子形成に要す

る時間と労力は4手法の中で最も大きい。

以上の議論をまとめると以下のようである。氾濫域内の平均的な流速、水深の分布がおおまかに知りたい場合はデカルト座標系モデルを適用すればよい。対象域の都市化が進み、道路や建造物の影響を考慮したいときには、主要な道路に沿った格子形成が容易な場合は一般曲線座標系モデルを、複雑な道路網や地形を扱う場合は非構造格子モデルの適用が望ましい。さらに道路を伝う氾濫水の挙動を詳細に表現したい場合には街路ネットワークモデルの適用が考えられよう。

4. おわりに

本研究では、都市域の道路と建造物の影響を考慮に入れた氾濫解析手法を開発することを目的とし、デカルト座標系、一般曲線座標系、非構造格子を氾濫解析に適用し、さらには街路ネットワークモデルという解析手法を展開するとともに、それぞれの結果を比較して特徴を検討した。

本研究では、都市域の氾濫予測の結果は、例えば住民避難などの防災対策へ応用される際の重要な基礎情報であると考え、都市の特性である道路や建造物による影響を表現することを念頭において、道路および住区を計算格子に取りこむ氾濫解析法を開発した。ここで挙げた4手法のうちデカルト座標系モデルを除く3手法では、いずれも道路だけからなる格子を形成することができるので、道路とそれ以外でパラメータ（粗度係数や占有率）に異なる値を設定するという比較的簡易な方法による解析を試みた。その結果、デカルト座標系モデルとその他の3手法の間に氾濫水の伝播速度

に差がみられた。これらの結果から、氾濫解析における道路や建造物の影響をある程度考慮し、都市の氾濫予測に有効な手法を提唱することができたと考えている。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 末次忠司, 栗城 稔: 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-43, pp.41-50, 1998.
- 4) 武田 誠, 井上和也, 上塚哲彦, 松村貴義: 高潮解析における数値解析モデルおよびその境界条件に関する検討, 水工学論文集, 第40巻, pp.1089-1094, 1996.
- 5) 武田 誠: 高潮の氾濫解析法とその都市域への応用に関する研究, 京都大学学位論文, 1996.
- 6) 岩佐義朗, 井上和也, 水鳥雅文: 氾濫水の水利の数値解析法, 京都大学防災研究所年報, 第23号B-2, pp.305-317, 1980.
- 7) 井上和也, 川池健司, 林 秀樹: 都市域における氾濫解析モデルに関する研究, 水工学論文集, 第43巻, pp.533-538, 1999.
- 8) 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, 京都大学学位論文, 1989.

(2000.11.29 受付)

DEVELOPMENT OF INUNDATION FLOW MODEL IN URBAN AREA

Kenji KAWAIKE, Kazuya INOUE, Hideki HAYASHI and Keiichi TODA

In considering a countermeasure against urban flooding, it is necessary to predict inundation flooding exactly. In this study, it is aimed to develop inundation flow models which can take account of streets and buildings in urban area. Cartesian coordinate, Generalized curvilinear coordinate, Unstructured meshes are applied to inundation flow analysis, and Street network model is also developed. Their results are compared with one another. These models have their own characteristics, therefore, in accordance with characteristics of the computational area or required accuracy of the results, the proper choice of these models will lead to advanced inundation analysis in urban area.