

都市域における 氾濫解析モデルに関する研究

INUNDATION FLOW MODELING IN URBAN AREA

井上和也¹・川池健司²・林 秀樹³

Kazuya INOUE, Kenji KAWAIKE and Hideki HAYASHI

¹正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒 611-0011 宇治市五ヶ庄)²学生員 京都大学大学院 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)³正会員 工修 (株)五洋建設 (〒 740-0025 山口県岩国市三角町2丁目米軍基地内)

In overland flood flow analysis, the cartesian coordinate system has been commonly used for its easiness of mesh formation. However, in the application of it to urban area, blocking of inundated flow by buildings or spread of it along streets cannot be well expressed. In order to improve this, "Generalized Curvilinear Coordinate" and "Street Network Model" in which a network is constituted by links of streets and nodes of cross points are developed here. The results obtained by the three models including the cartesian coordinate are studied and the merit of "Street Network Model" is designated.

Key Words : storm surge flooding, inundation flow model, urban area, street network model

1. はじめに

従来, 2次元非定常流の氾濫解析を行う際には, 格子形成の簡便さからデカルト座標系 (Cartesian Coordinate) が最もよく用いられてきた. しかし, それを市街地の氾濫に適用するとなると, 氾濫水に大きな影響を及ぼすと思われる道路や建造物の影響を考慮することが難しくなる. 従来の研究では, それらの影響を考慮するための工夫として, 建造物の密集度に応じた粗度係数の算定¹⁾や, 建造物に働く流体力を考慮する²⁾などの手法がとられてきた. しかしこれらの手法でも, 上記のような要素を格子ごとに与えることに変わりはなく, 氾濫解析の精度を向上させるという点では限界があると考えられる. そこで本研究では, 道路と建造物をそれぞれ異なる計算格子として評価することが重要であるとの考え方に立脚し, 氾濫解析モデルとして, 一般曲線座標系を用いた解析を行い, さらに新たに街路ネットワークモデルという解析手法の開発を試みる. これらの氾濫解析を大阪市港区の高潮氾濫に適用し, 3手法の解析結果を相互に比較検討する.

2. 各モデルの概要

(1) デカルト座標系

高潮氾濫解析は, 高潮解析と氾濫解析の2つの部分から構成されている. 本研究では, 海域の高潮解析には従来のデカルト座標系をそのまま使い, つぎの浅水方程式を支配方程式とする.

<連続式>

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

<運動量式>

$$\begin{aligned} & \frac{\partial M^x}{\partial t} + \frac{\partial (u^x M^x)}{\partial x} + \frac{\partial (u^y M^x)}{\partial y} \\ &= -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial P_0}{\partial x} \\ &+ \varepsilon_h \left(\frac{\partial^2 M^x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M^x}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_{sx}}{\rho_w} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_w} + f M^y \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial M^y}{\partial t} + \frac{\partial(u^x M^y)}{\partial x} + \frac{\partial(u^y M^y)}{\partial y} \\
& = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial P_0}{\partial y} \\
& + \varepsilon_h \left(\frac{\partial^2 M^y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M^y}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_{sy}}{\rho_w} - \frac{\tau_{by}}{\rho_w} - f M^x
\end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 h は水深、 u^x, u^y は x, y 方向の流速、 M^x, M^y は x, y 方向の流量フラックス（ $M^x = u^x h$, $M^y = u^y h$ ）、 H は水位、 τ_{sx}, τ_{sy} は自由水面上でのせん断応力の x, y 方向成分、 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。

$$\begin{aligned}
\tau_{sx} &= \rho_a \gamma^2 W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2}, \\
\tau_{sy} &= \rho_a \gamma^2 W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2}, \\
\tau_{bx} &= \frac{\rho_w g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} - k \tau_{sx}, \\
\tau_{by} &= \frac{\rho_w g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} - k \tau_{sy}
\end{aligned}$$

ここで、 ρ_a は空気の密度、 γ^2 は自由水面上での抵抗係数、 W_x, W_y はそれぞれ自由水面上10mでの x, y 方向の風速、 n はマンニングの粗度係数、 k は定数であり、0.25を用いる。 g は重力加速度、 ρ_w は海水の密度、 P_0 は気圧、 ε_h は渦動粘性係数、 f はコリオリのパラメータ、 t は時間、 x, y はデカルト座標の座標値である。これらの離散化、および開境界条件と気圧場・風速場の設定については武田・井上³⁾の方法を用いる。

汎濫解析にデカルト座標系を適用する方法では、上記の浅水方程式をコリオリ項、表面せん断応力項および底面せん断応力項の表面せん断応力を含む項を省略して用いる。図-1に、汎濫解析に用いた対象領域の格子とその地盤高を示す。

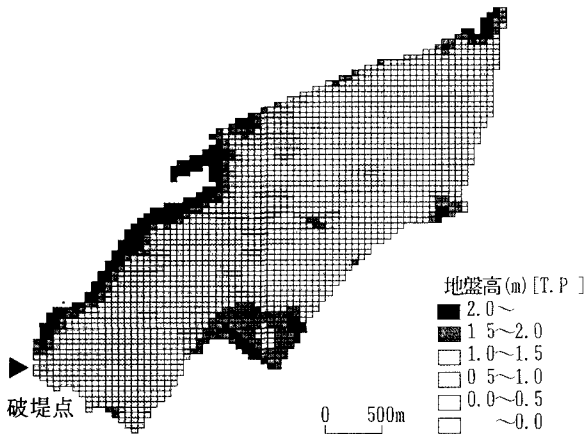


図-1 デカルト座標系における計算格子

(2) 一般曲線座標系

デカルト座標系のような直交する直線群で区切られた格子では表せない形状の道路を格子として評価することを目的に、一般曲線座標系（Generalized Curvilinear Coordinate）を用いる。一般曲線座標系の基礎式は、デカルト座標系の基礎方程式を、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（たとえば、細田⁴⁾参照）。<連続式>

$$\frac{\partial h}{\partial t} + J \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{M^\xi}{J} \right) + J \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{M^\eta}{J} \right) = 0 \quad (4)$$

<運動量式>

(ξ 方向)

$$\begin{aligned}
\frac{\partial M^\xi}{\partial t} &= -J^2 y_\eta \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{u^\xi M^x}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{u^\eta M^x}{J} \right) \right\} \\
&+ J^2 x_\eta \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{u^\xi M^y}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{u^\eta M^y}{J} \right) \right\} \\
&- J^2 g h \left\{ (x_\eta^2 + y_\eta^2) \frac{\partial H}{\partial \xi} \right. \\
&\quad \left. - (x_\xi x_\eta + y_\xi y_\eta) \frac{\partial H}{\partial \eta} \right\} \\
&- \frac{g n^2 M^\xi \sqrt{(M^x)^2 + (M^y)^2}}{h^{7/3}}
\end{aligned} \quad (5)$$

(η 方向)

$$\begin{aligned}
\frac{\partial M^\eta}{\partial t} &= J^2 y_\xi \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{u^\xi M^x}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{u^\eta M^x}{J} \right) \right\} \\
&- J^2 x_\xi \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{u^\xi M^y}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{u^\eta M^y}{J} \right) \right\} \\
&- J^2 g h \left\{ -(x_\xi x_\eta + y_\xi y_\eta) \frac{\partial H}{\partial \xi} \right. \\
&\quad \left. + (x_\xi^2 + y_\xi^2) \frac{\partial H}{\partial \eta} \right\} \\
&- \frac{g n^2 M^\eta \sqrt{(M^x)^2 + (M^y)^2}}{h^{7/3}}
\end{aligned} \quad (6)$$

ここに、 J はヤコビアンであり、以下のように定義される。

$$J = \frac{1}{x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi} \quad (7)$$

なお、下付き添字はこの変数による偏微分を意味する。

一般曲線座標系では、対象領域を建造物の存在しない道路格子と、それ以外の格子である住区（細かい道路と建造物からなる）に分類することによって、それぞれの格子属性を考慮した解析が可能となる。図-2は、本研究で用いた道路と住区の格子分類である。このように分類すると、この対象領域の場合、その面積の約25%を建造物の存在しない道路格子として取り扱うことができる（実際の地図から読み取った道路の面積は、全面積の約35%である）。

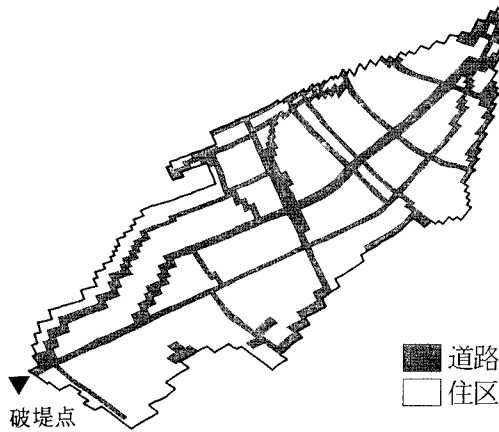


図-2 一般曲線座標系における道路格子図

(3) 街路ネットワークモデル

市街地では、道路の両側に建造物が林立し、氾濫水が伝播する際には道路に沿って拡がると考えられる。

そこで、本モデルでは、対象領域を道路とそれ以外（住区とよぶ）に分類し、そのうち道路については交差点をノード、交差点間の道路をリンクとするネットワークを形成する。その際、ノードおよび住区はそれぞれで1つの格子と考える。このようなネットワーク化の概念を図-3に示すとともに、本研究で用いた街路ネットワークモデルにおける道路格子図を図-4に示す。ここでは、対象領域の面積の約33%を道路格子として取り扱うことができる。

計算においては、リンク（交差点間の道路）においては、以下に示す方程式を支配方程式とする1次元解析を行い、リンクを縦断方向に格子分割して leap-frog 的に計算を進める。つまり、リンクを、 x 軸を始点ノードから終点ノードの向きにとり、1次元の長方形断面水路とみなすのである。

<連続式>

$$\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial M}{\partial x} = \frac{q_{in}}{B} \quad (8)$$

<運動量式>

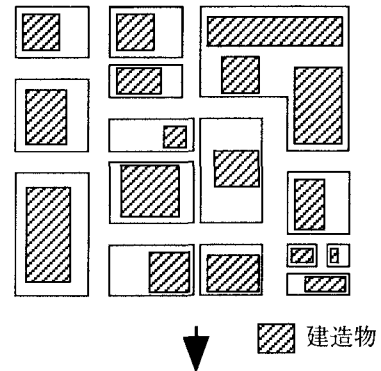
$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2 |M| M}{h^{\frac{7}{3}}} \quad (9)$$

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（住区からリンクに侵入する x の単位長さあたりの流量）、 B はリンク幅である。なお、粘性項に関しては、粗度係数 n の値によって評価できると考え、省略した。

ノードあるいは住区の水深はつぎの連続式から計算する。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^m Q_k \quad (10)$$

実際の市街地の地形



街路網をネットワーク化した市街地

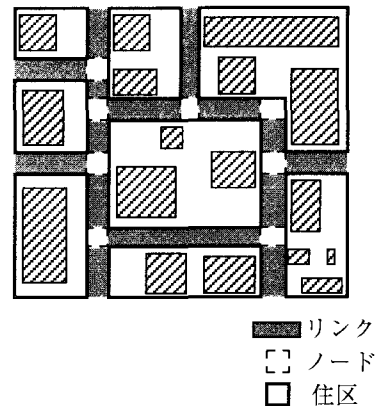


図-3 ネットワーク化の概念図

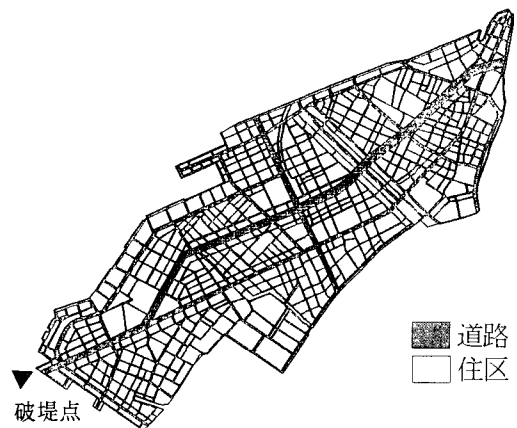


図-4 街路ネットワークモデルにおける道路格子図

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。

リンクと住区、およびノードと住区、ノードとリンクとの間の流量は、運動量式として(9)式の左辺第2項を省略したつぎの式から求める。

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2 |M| M}{h^{\frac{7}{3}}} \quad (11)$$

ここで格子間距離 Δx については、それぞれの場合においてつぎのように定義する。

まず、リンクとノードの場合は、図-5に示すようにノードの図心とリンク端の格子の図心間距離を適用する。リンクと住区の場合には、図-6に示すようにリンクの図心からリンクと住区の境界線に垂直にのぼした直線をひき、その直線が住区に切り取られる線分の中点を住区格子の図心とみなすことでそれらの図心間距離を格子間距離として適用する。最後に住区とノードの場合には、図-6に示すようにノードの図心からノードと住区の境界線に垂直にのぼした直線をひき、その直線が住区に切り取られる線分の中点を住区の図心とみなすことでそれらの図心間距離を格子間距離として適用する。

街路ネットワークモデルでは、街路網をネットワーク化する際に、長い直線の道路を複数のリンクに分割せざるを得ないことが多い。そこで、ノードを介して連続する2本のリンクのなす角が 10° 以内であれば、それらのリンクは直線とみなし、この場合にもリンクとノードの間のフラックスを求める際には(9)式を用いることにする。

3. 市街地への適用

(1) 道路・建造物の影響

道路や建造物が氾濫水に及ぼす影響を考慮するため、中川¹⁾による占有率 λ (格子または住区の面積のうち建造物の占める割合)と通過率の概念をつぎのように導入する。

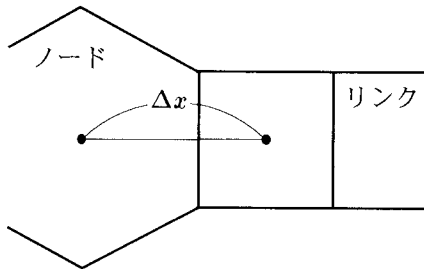


図-5 ノードとリンク間の格子間距離

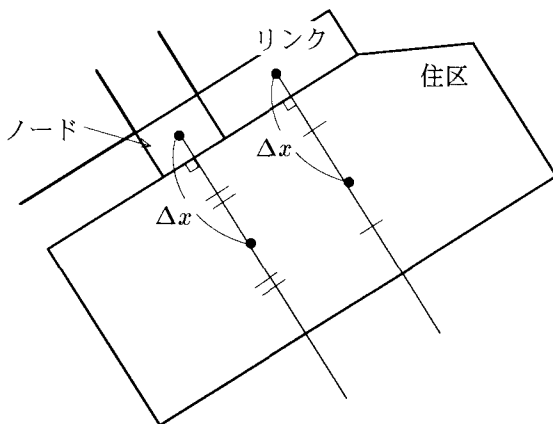


図-6 リンクと住区間、ノードと住区間の格子間距離

a) デカルト座標系・一般曲線座標系の場合
格子 (i, j) の占有率 $\lambda_{i,j}$ より通過率 $\beta_{i,j}$ を

$$\beta_{i,j} = \sqrt{1 - \lambda_{i,j}} \quad (12)$$

によって定義し、格子 (i, j) と $(i+1, j)$ の間の $x(\xi)$ 方向の流量フラックス $M_{i+1/2,j}^x$ をつぎのように補正する。

$$\tilde{M}_{i+1/2,j}^x = \beta_{a,j} M_{i+1/2,j}^x \quad (13)$$

ただし、 a の値は $M_{i+1/2,j}^x$ の正負に対応し、それぞれ $a = i+1$ 、 $a = i$ とする。格子 (i, j) と $(i, j+1)$ の間の $y(\eta)$ 方向の流量フラックス $M_{i,j+1/2}^y$ の補正も同様である。

このように補正した流量フラックスを用いて、例えばデカルト座標系においてはつぎの連続式に代入して水深を求める。

$$(1 - \lambda_{i,j}) \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{M}^x}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{M}^y}{\partial y} = 0 \quad (14)$$

b) 街路ネットワークモデルの場合

a) と同様の概念に基づき、住区 k における占有率 λ_k を用いて通過率 β_k を $\beta_k = \sqrt{1 - \lambda_k}$ とする。住区 k と住区 k に格子辺 l で接しているリンクあるいはノードとの間の流量 $Q_{k,l}$ を、つぎのように補正する。

$$\tilde{Q}_{k,l} = \alpha Q_{k,l} \quad (15)$$

ただし、住区へ流入するときは $\alpha = \beta_k$ 、住区から流出する場合は $\alpha = 1$ とする。このように補正した流量フラックスを用いて、つぎの連続式に代入して水深を求める。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{(1 - \lambda_k) A_k} \sum_{i=1}^m \tilde{Q}_{k,i} \quad (16)$$

一方、住区内の建造物により氾濫水の流れが阻害される影響と、道路づたいに氾濫水が伝播する影響を考慮するために、住区格子と道路格子に異なる粗度係数 n の値を与える。

(2) 計算条件

解析ケースとして、市街化が進んでいない場合($\lambda=0.0$, $n(\text{住区})=n(\text{道路})=0.067$)と市街化が進んだ場合($\lambda(\text{住区}) \neq 0.0$, $\lambda(\text{道路})=0.0$, $n(\text{住区})=0.067$, $n(\text{道路})=0.043$)を考える。これらをまとめたものを表-1に示す。なお、市街化が進んだ場合のうち住区格子の占有率の値がモデルによって若干異なるのは、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。

また、氾濫外力は大阪市の計画台風(伊勢湾台風規模、室戸台風コース)を用い、2.(1)の高潮解析から

得られる高潮の越流量ハイドログラフ（図-7）を用いて、想定地点における破堤（破堤幅は約50m）として取り扱う。なお、破堤点以外の計算領域の境界は、全て十分に高い直立壁とする。

4. 解析結果

(1) 各ケースにおける解析結果の比較

解析結果のうち、図-8に全ケースの氾濫面積（浸水域内にある建造物の面積を含む）の時間変化を示す。市街化が進んでいない場合と市街化が進んだ場合の間で氾濫面積に大きな差が現れているのは、市街化が進んだ場合には式(14)を用いて非浸水性の建造物による氾濫水の拡がりを考慮しているので氾濫面積が拡大した（非浸水性の建造物の面積も含まれている）ためであり、両者の比較にそれほど意味はない。

図-9(a)は市街化が進んでいない場合における氾濫水の先端部分の比較を、浸水開始2時間後について示したものである。まず、市街化が進んでいない場合に着目してみると、図-8(CASE(C₀), CASE(G₀),

CASE(N₀))、図-9(a)より、3手法の間で結果にそれほど大きな差はみられない。つまり、一般曲線座標系および街路ネットワークモデルでは、これまでのデカルト座標系とそう大差ない結果が得られるといえる。

図-9(b)は、市街化が進んだ場合における氾濫水

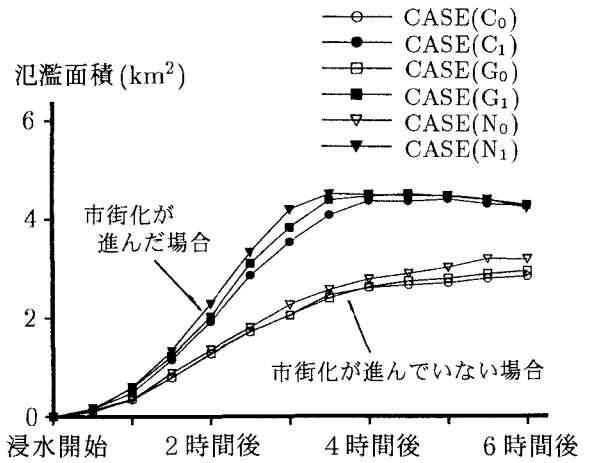


図-8 氾濫面積の時間変化

表-1 計算ケース

	市街化が進んでいない場合	市街化が進んだ場合
デカルト座標系	C ₀	C ₁ 道路格子: 0%
一般曲線座標系	G ₀	G ₁ 道路格子: 25%
街路ネットワークモデル	N ₀	N ₁ 道路格子: 33%

市街化が進んでいない場合
 $\begin{cases} \lambda(\text{住区}) = \lambda(\text{道路}) = 0.0 \\ n(\text{住区}) = n(\text{道路}) = 0.067 \end{cases}$
市街化が進んだ場合
 $\begin{cases} \lambda(\text{住区}) = \begin{cases} 0.48 \cdots \text{デカルト座標系} \\ 0.64 \cdots \text{一般曲線座標系} \\ 0.72 \cdots \text{街路ネットワークモデル} \end{cases} \\ \lambda(\text{道路}) = 0.0 \\ n(\text{住区}) = 0.067 \\ n(\text{道路}) = 0.043 \end{cases}$

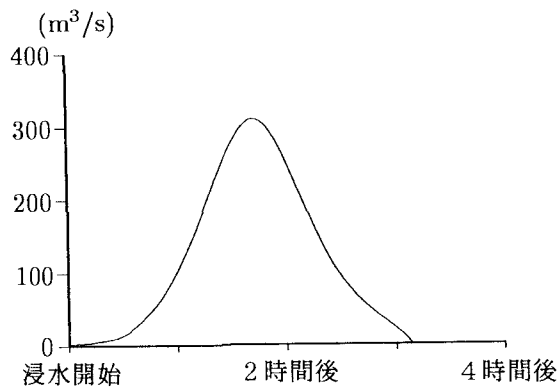
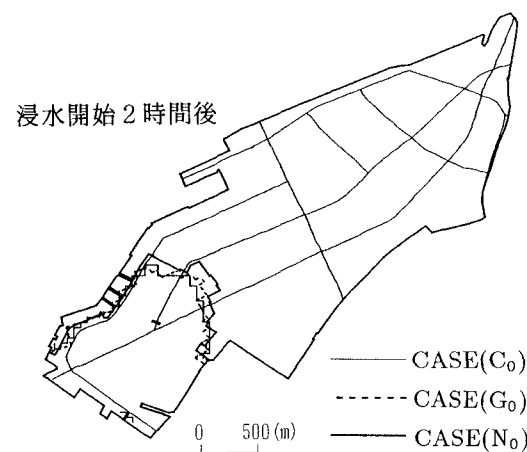
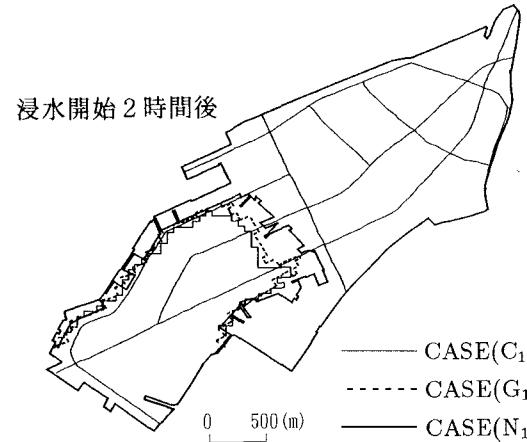


図-7 流入流量



(a) 市街化が進んでいない場合



(b) 市街化が進んだ場合

図-9 氾濫水の先端部分の比較

の先端部分の比較を、浸水開始2時間後について示したものである。市街化が進んだ場合についてみると、図-8 (CASE(C₁), CASE(G₁), CASE(N₁)), 図-9 (b) より、氾濫水の伝わり方は、街路ネットワークモデルが最も速くなっており、一般曲線座標系、デカルト座標系と続いている。すなわち、道路として取り扱える面積が大きいモデルほど氾濫水が速く伝わっていることがわかる。これは、道路沿いの氾濫水の伝播が現れているものと考えられる。さらに街路ネットワークモデルでは、かなり細かい道路にまで氾濫水が浸入している様子もみてとれる。

(2) 住区壁を考慮した解析

図-10 に示すような建造物が林立する住区内に氾濫水が浸入する際、氾濫水は建造物と建造物の隙間を介して浸入するものと考えられる。(1)の解析では、通過率 β は占有率 λ の関数として定義されていたが、本来 β と λ は独立な量と考えられる。そこで街路ネットワークモデルにおいて建造物と建造物の隙間の長さを、住区の辺長に対する割合で直接パラメータ化して通過率 β を占有率 λ とは独立に決定することを試みる。なお、住区への流入あるいは住区からの流出いずれの場合にも、(15) 式の α を β で読み換える。

(1)の計算で用いた β の値は0.53であったが、これに近い値として $\beta=0.6$ を与えた場合をCASE(N _{α})とする。対象領域の通過率は実際にはもう少し小さい値であると考えられるので、 β に0.4, 0.2を与えた場合をそれぞれCASE(N _{β}), CASE(N _{γ})とする。これら3ケースにCASE(N₁)を加えた氾濫面積の時間変化を図-11 に示す。この図によると、通過率が小さい場合ほど氾濫水の拡がり方が遅くなっていることがわかる。これは、通過率が小さいほど住区から流出してくる氾濫水が抑制され、住区内に氾濫水がより長く滞留するためと考えられる。ただし一方、 β が小さいほど、道路沿いの伝播が速められると予想されるので、この点についてはより詳しく検討したい。

このように街路ネットワークモデルを用いれば、従来占有率から求められていた通過率を独立に定義することができ、より現実的に即した氾濫解析が可能になると考えられる。

5. おわりに

本研究では、従来から用いられているデカルト座標系とあわせて、道路を格子として評価できる氾濫解析手法として一般曲線座標系および街路ネットワークモデルを提案して、3手法による氾濫解析結果を相互に比較検討した。その結果、一般曲線座標系、および街路ネットワークモデルでは領域を道路のみで構成される道路格子とそれ以外の住区格子に分類することができ、それぞれの格子に異なる占有率や粗度係数の値を

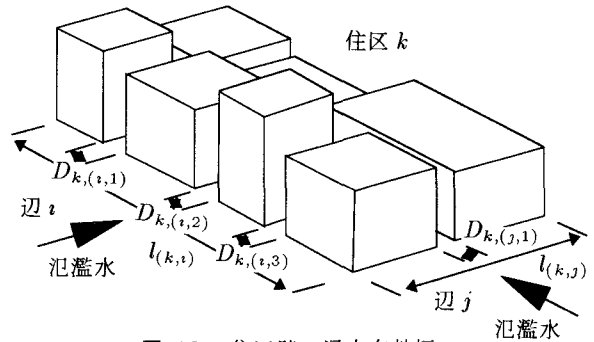


図-10 住区壁の浸水有効幅

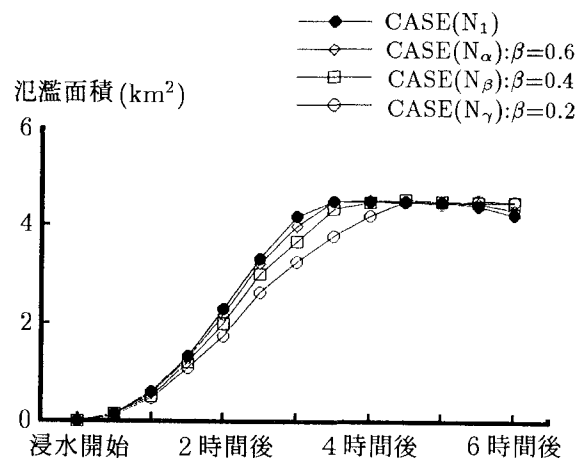


図-11 氾濫面積の時間変化 (2)

与えるという簡単な操作によって、現実の都市域での氾濫をデカルト座標系による方法よりも具体的に表現できることが知られた。とくに本研究で提案した街路ネットワークモデルは、住区壁を考慮することによって氾濫水の通過率を直接パラメータ化することができ、都市域における氾濫水の挙動をより顕著に反映するモデルであることがわかった。

参考文献

- 1) 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，1986。
- 2) 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。
- 3) 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。
- 4) 細田尚・長田信寿・村本嘉雄：移動一般座標による開水路非定常流の数値解析，土木学会論文集 No. 533 II-34，pp. 267-272，1996。

(1998.9.30 受付)