

非構造格子の 都市氾濫解析への適用

APPLICATION OF UNSTRUCTURED MESHES TO INUNDATION FLOW ANALYSIS IN URBAN AREA

川池健司¹・井上和也²・戸田圭一³

Kenji KAWAIKE, Kazuya INOUE and Kei-ichi TODA

¹学生員 工修 京都大学大学院 (〒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 宇治市五ヶ庄)

³正会員 Ph. D. 京都大学助教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

In this study, an inundation flow model is developed using the unstructured meshes, which can divide the computational area into arbitrary shapes of meshes. This model is applied to the basin which was inundated in 1947 due to the levee breakage in Tone River and the numerical results is compared with those of the Cartesian coordinate. Furthermore, this model is used to analyze the effects of small rivers and continuous dikes in the basin. An advanced inundation flow model which has an advantage of considering the influences of linear structures is developed.

Key Words : *inundation flow model, urban area, unstructured meshes*

1. はじめに

近年, わが国においても毎年のように都市水害が発生している。様々な要因が複雑にからみ合った都市氾濫を精度よく予測する解析モデルの開発が, 現在必要とされている。

従来の氾濫解析モデルは, 有限体積法の考え方に基づくものが主流で, その最も簡便なものは直交(デカルト)座標系を用いたモデル(例えば岩佐ら¹⁾)である。しかしデカルト座標系による矩形格子では, 都市氾濫に影響を及ぼすと思われるさまざまな要素(例えば, 建造物, 道路, 中小河川など)の影響を取り入れることは困難である。そこで著者らは, 建造物, 道路, 中小河川などをそれぞれ別々の格子に分割する手法が必要であると考え, 非構造格子²⁾を都市氾濫解析に適用することを試みた。

非構造格子とは, 形状や配列の仕方が不規則な格子のことをいう(デカルト座標系による格子は非構造格子の特別な場合と考えることもできる)。非構造格子を用いる利点は, 領域を任意形状の格子に分割できること, さらに解析上の重要性に応じて格子の大きさを変えることができることなどである。氾濫水に影響を及ぼす要素が多数存在し, しかもその形状が複雑な

都市域において非構造格子を氾濫解析に適用すれば, より現実に即した結果が期待できるであろう。

2. 氾濫解析法

非構造格子に基づく氾濫解析に用いた基礎式は, 以下の浅水方程式である。

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

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

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

ここで, h は水深, H は水位, u, v はそれぞれ x, y 方向の流速, M, N はそれぞれ x, y 方向の流量フラックス, n は粗度係数, g は重力加速度を表す。

これらの未知量は, 図-1に示すような位置で定義する。すなわち, 全領域に対してまずデカルト座標軸(x 軸, y 軸)を設定し, この座標系における各方向の流速(u, v), 流量フラックス(M, N)は格子境界(多角形

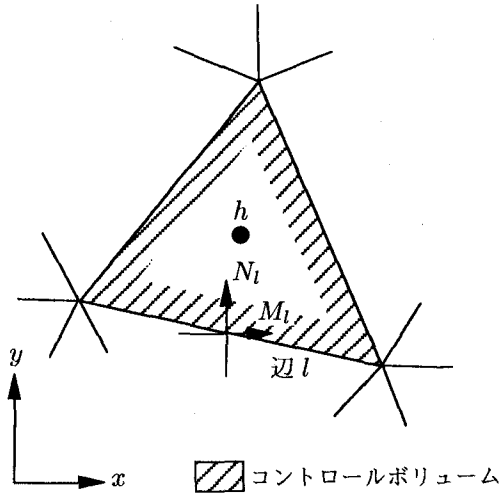


図-1 未知量の定義位置と連続式のコントロールボリューム

の辺の midpoint) で定義し、水深(h)は格子の図心(本研究では多角形の重心を用いる)で定義する。計算は Leap-Frog法を用いて陽的に進める。

まず連続式について、その差分式は以下のものを用いる。なお、このときのコントロールボリュームは図-1に示す領域を用いる。

$$\frac{h^{n+3} - h^{n+1}}{2\Delta t} + \frac{1}{A} \sum_{l=1}^m \{M_l^{n+2}(\Delta y)_l - N_l^{n+2}(\Delta x)_l\} = 0 \quad (4)$$

ここで、 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_l 、 N_l はそれぞれ辺 l 上での x 、 y 方向の流量フラックスを表し、 $(\Delta x)_l$ 、 $(\Delta y)_l$ 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。

運動量式について、図-2に示すように、格子 i 、 j にはさまれた格子辺 L での計算には以下のような差分式を用いる。

(x 方向)

$$\begin{aligned} & \frac{M_L^{n+2} - M_L^n}{2\Delta t} + M1 + M2 \\ &= -g\tilde{h}^{n+1}(\nabla H)_x - \frac{gn^2 \frac{M_L^{n+2} + M_L^n}{2} \sqrt{(u_L^n)^2 + (v_L^n)^2}}{(\tilde{h}^{n+1})^{4/3}} \end{aligned} \quad (5)$$

(y 方向)

$$\begin{aligned} & \frac{N_L^{n+2} - N_L^n}{2\Delta t} + N1 + N2 \\ &= -g\tilde{h}^{n+1}(\nabla H)_y - \frac{gn^2 \frac{N_L^{n+2} + N_L^n}{2} \sqrt{(u_L^n)^2 + (v_L^n)^2}}{(\tilde{h}^{n+1})^{4/3}} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 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。 $(\nabla H)_x$ 、 $(\nabla H)_y$ はそれぞれ格子 i 、 j 間の水面勾配 ∇H の x 、 y 方向成分である。 $\tilde{h}$ 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。

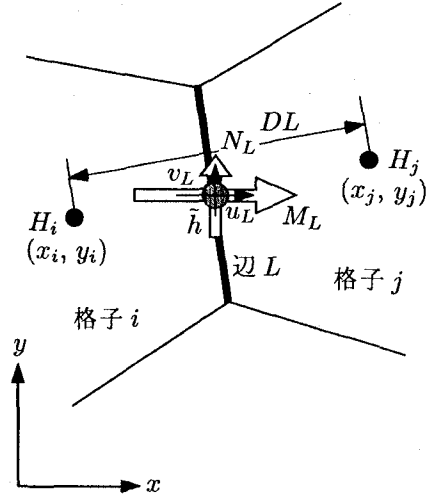


図-2 運動量式の計算に用いる諸量

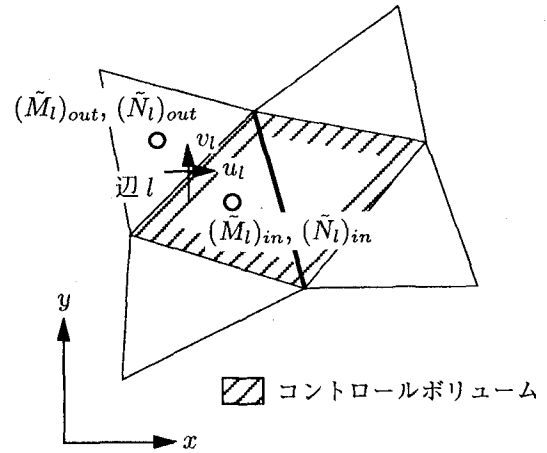


図-3 移流項の計算に用いるコントロールボリューム

$M1$ 、 $M2$ または $N1$ 、 $N2$ は、それぞれ(2)、(3)式の移流項(左辺第2項、第3項)を表しており、図-3に示すようなコントロールボリュームを考えて、それぞれ

$$M1 + M2 = \frac{1}{A_{cv}} \sum_{l=1}^{m'} \{ (u_l \tilde{M}_l)(\Delta y)_l - (v_l \tilde{M}_l)(\Delta x)_l \} \quad (7)$$

$$N1 + N2 = \frac{1}{A_{cv}} \sum_{l=1}^{m'} \{ (u_l \tilde{N}_l)(\Delta y)_l - (v_l \tilde{N}_l)(\Delta x)_l \} \quad (8)$$

のように計算する。ここで、 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。 $\tilde{M}$ 、 $\tilde{N}$ は格子の重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。

3. 利根川流域への適用

前章で提示した非構造格子による氾濫解析を、図-4に示す埼玉県東部・東京都足立区、葛飾区、江戸川区にまたがる利根川流域に適用する。この領域は1947年（昭和22年）カスリーン台風による洪水で甚大な被害を受けた地域である。図-5³⁾に当時の浸水実績を示す。この領域を対象とした理由は、非構造格子が線状の構造物を考慮するのに適しており、この領域内の中川、綾瀬川といった中小河川からの氾濫水の排水や、中小河川堤防、JR武蔵野線などの連続盛土による氾濫水の遮断の影響をうまく表現できると考えたからである。

本研究では、カスリーン台風時の破堤点を想定破堤点とし、そこから図-6に示すハイドログラフにしたがって氾濫水が流入するとする。このハイドログラフは、平面タンクモデル（ポンドモデル）を用いて利根川破堤による流域の氾濫特性を検討した建設省資料⁴⁾によるものである。

まず従来から用いられている氾濫解析手法であるデカルト座標系による解析結果と比較するため、中小河川も連続盛土も考慮しないという簡単な条件で氾濫解析を行う。図-7にデカルト座標系と非構造格子の解析に用いた格子を示す。非構造格子生成の際には、なるべく格子形状が正三角形または正方形に近くなるように、またデカルト座標系格子（500m×500m）と極端に大きさが異ならないように配慮した。デカルト座標系の図には、この領域の地盤高も合わせて示している。なお、このときの粗度係数は、全領域において $n=0.067$ を用いる。図-8にデカルト座標系による解析結果を、図-9に非構造格子による解析結果を示す。両者を比較すると、中小河川も連続盛土も考慮しない簡単な条件下では、ここで提唱した非構造格子による氾濫解析は従来の手法とほぼ同様の結果をもたらすことがわかる。しかし、これらを図-5のカスリーン台風来襲時の氾濫実績と比較すると、下流端で極端に浸水深が大きくなっており、しかも氾濫域も実績より西方に大きく広がっている。これは、解析では下流端を十分

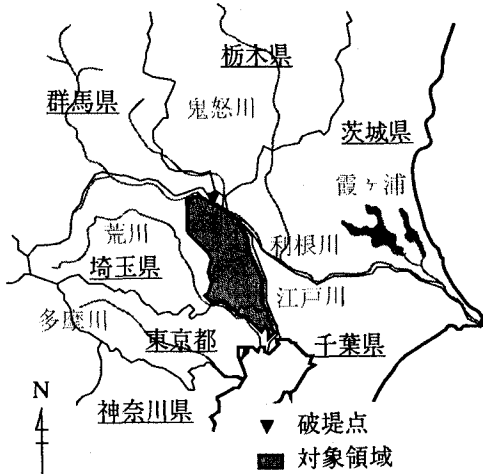


図-4 対象領域

高い直立壁と考え、氾濫水の排水を全く考慮していないためであって、実際には中小河川からかなりの氾濫水が排水されると思われる。

つぎに、非構造格子を用いて中小河川の影響を考慮した解析を行う。領域内の格子を、中小河川格子とそれ以外の堤内地格子に二分する。図-10には、中小河川として認識した河川を示している。これらの河川格子は、周囲の堤内地格子よりも地盤の低い長方形断面の掘り込み河道として取り扱う。掘り込み深さは、この格子の地盤高に建設省利根川上流工事事務所の資料を基にした河床の地盤高を与えて決定する。さらに河川格子と堤内地格子の境界には堤防を考慮して、それらには同事務所資料に基づいて堤防天端高を与える。また、河川格子と堤内地格子の間では次の本間の越流公式⁵⁾を適用する。すなわち、隣接する格子のうち低い方の水位を H_l 、高い方の水位を H_h 、堤防天端高を H_0 とし、 $h_1 = H_h - H_0$ 、 $h_2 = H_l - H_0$ とすれば、 $h_1 > 0$ のときの流量フラックス M_0 を、 $h_2/h_1 \leq 2/3$ （完全越流）のとき

$$M_0 = \mu h_1 \sqrt{2gh_1} \tag{9}$$

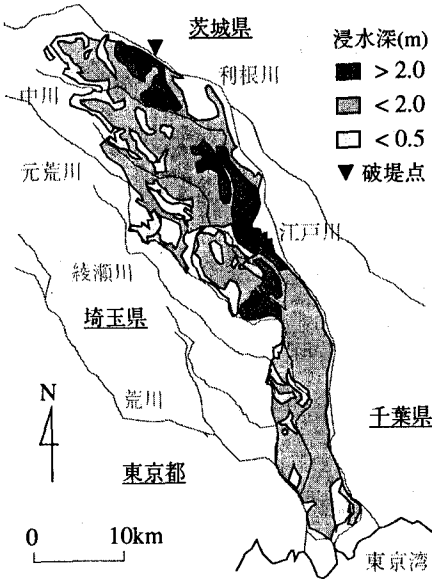


図-5 カスリーン台風実績図³⁾

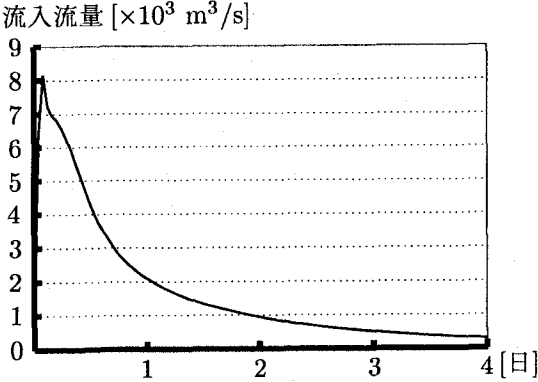


図-6 流入流量ハイドログラフ

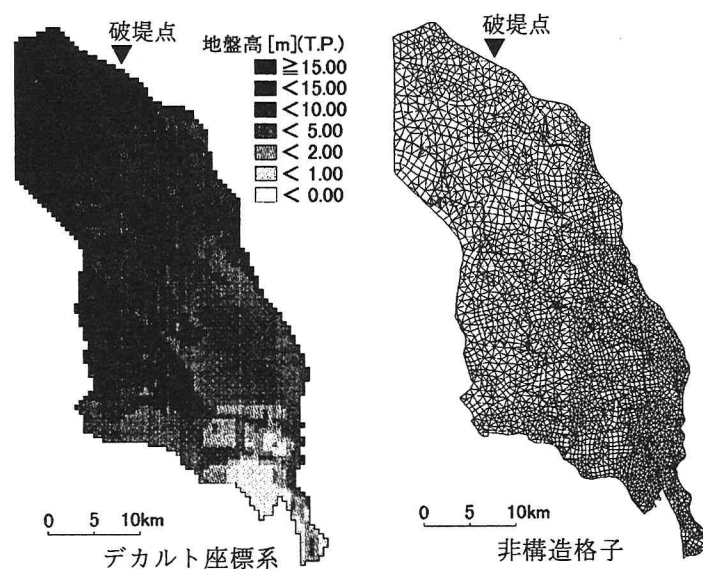


図-7 解析格子と地盤高

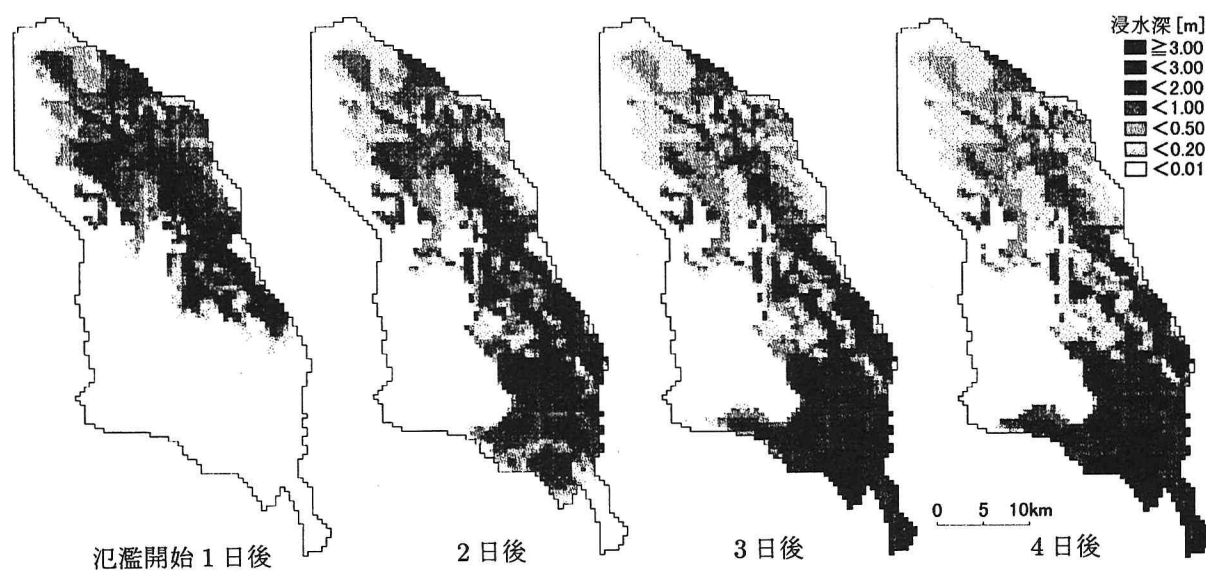


図-8 浸水深の時間変化 (デカルト座標系)

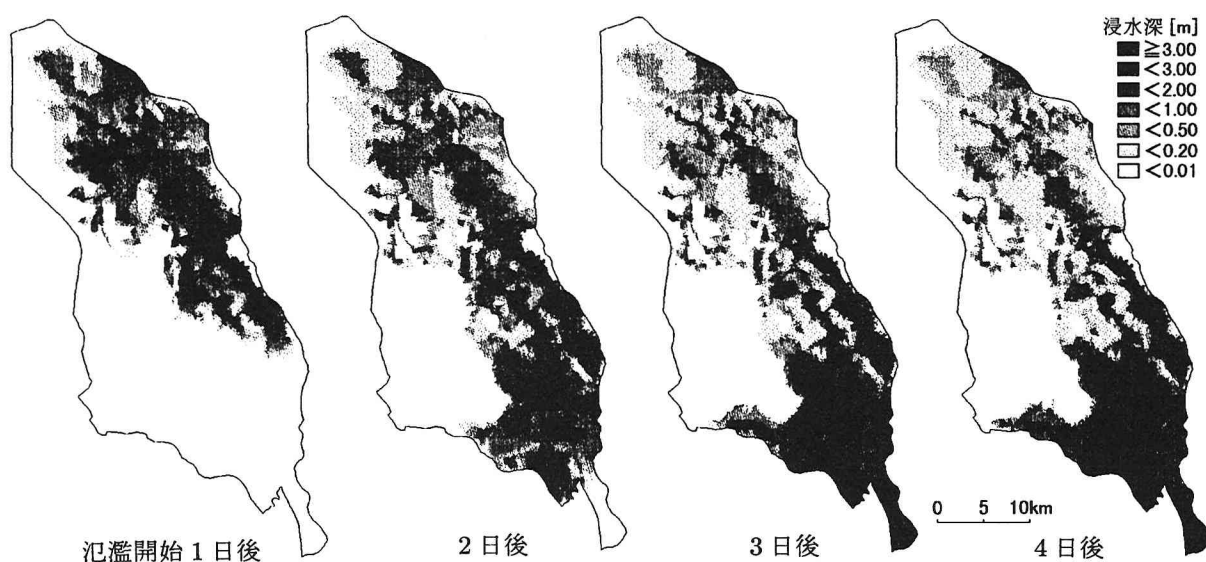


図-9 浸水深の時間変化 (非構造格子)

$h_2/h_1 > 2/3$ (潜り越流) のとき

$$M_0 = \mu' h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (10)$$

で求める。ここで μ および μ' は、完全越流および潜り越流時の流量係数で、それぞれ0.35および0.91とする。これらの概念図を図-11に示す。粗度係数は、河川格子では0.020、堤内地格子では0.067とする。下流端の境界条件は、中川、綾瀬川、新芝川、三郷放水路の各下流端の格子において、Manningの公式を用いた等流条件、すなわち、

$$Q_{out} = vA = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \cdot A = \frac{1}{n} \frac{(Bh)^{5/3}}{(B+2h)^{2/3}} I^{1/2} \quad (11)$$

により、流出流量が求められる。ここで、 Q_{out} は下流端から流出する流量、 A は断面積、 I は河床勾配、 R は径深、 B は川幅、 h は水深である。氾濫水の排出はこの河川の下流端でのみ考慮し、それ以外の領域境界は十分高い直立壁で囲まれているとする。また、これらの河川における初期条件には、各河川の洪水時流量の不等流状態を与える。すなわち、この流量を各河川の上流端の格子に時間的に変化しないとして与え、下流端の境界条件を適用して十分長い時間計算した後、河川格子の水深が時間的に変化しなくなった状態を定常状態とみなして、その水深を各河川格子の初期条件として用いる。なお、この流量は、氾濫解析中も絶えず与え続けることとする。上記のような条件のもとで解析した結果を、図-12に示す。この結果を図-9と比較すると、下流端付近の浸水深が大きく低減し、さらに浸水域も綾瀬川の左岸側堤防によって堰き止められているのがわかる。この解析ケースがカスリーン台風時の地形に最も近いと考えられるので、図-12を図-5と比較すると、氾濫域は元荒川の左岸側、綾瀬川の左岸側までとなっており、三郷放水路より下流の中川左岸を除くと、おおむね一致している。これは、中小河川から氾濫水が排出される影響とその堤防によって氾濫水が堰き止められている影響がこのモデルによって表現されたためであろう。

さらに、中小河川に加えて、領域内に存在する鉄道や道路などの連続盛土を考慮した解析を行う。本研究では、図-10に示した、東北自動車道、国道16号線、JR武蔵野線の連続盛土を格子境界で認識し、河川堤防の取り扱いと同様にこれを越流(横断)する流量フラックスを(9)、(10)式によって計算する。解析結果を図-13に示す。領域の北西部の東北自動車道の盛土によって、氾濫域の拡大が遮断されているのが確認される。また、氾濫開始2日後以降の浸水深を見ると、JR武蔵野線の盛土の上流側で浸水深が大きくなっており、ここで氾濫水が一部貯留されているのがわかる。なお、国道16号線の盛土は、盛土部分が短いことと、周囲の地盤が比較的高いため浸水深が浅いことから、氾濫状況にはほとんど影響を与えていないことがわかる。

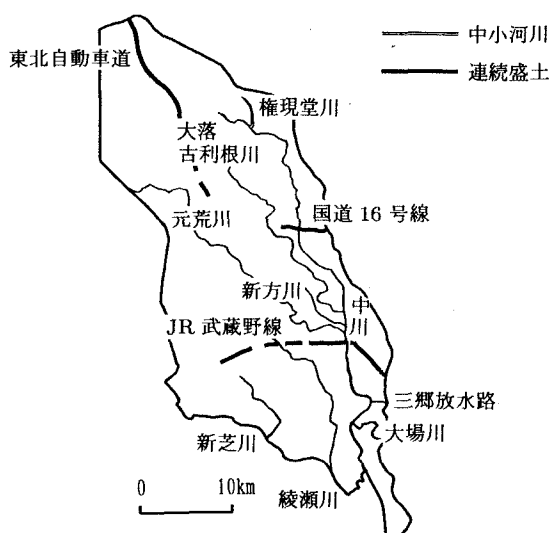


図-10 中小河川と連続盛土

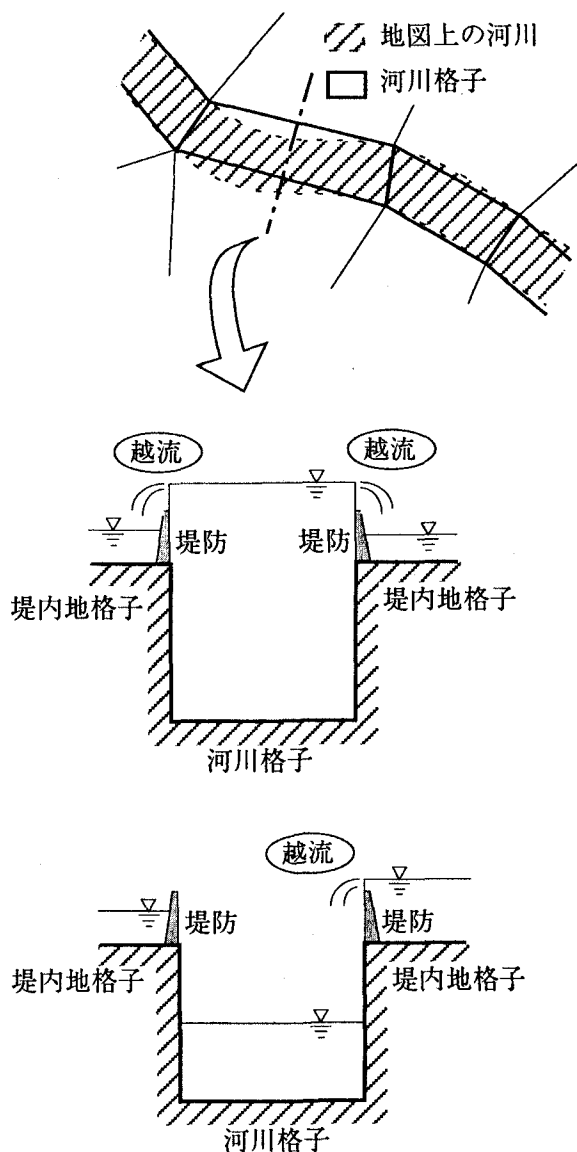


図-11 河川格子の取り扱い

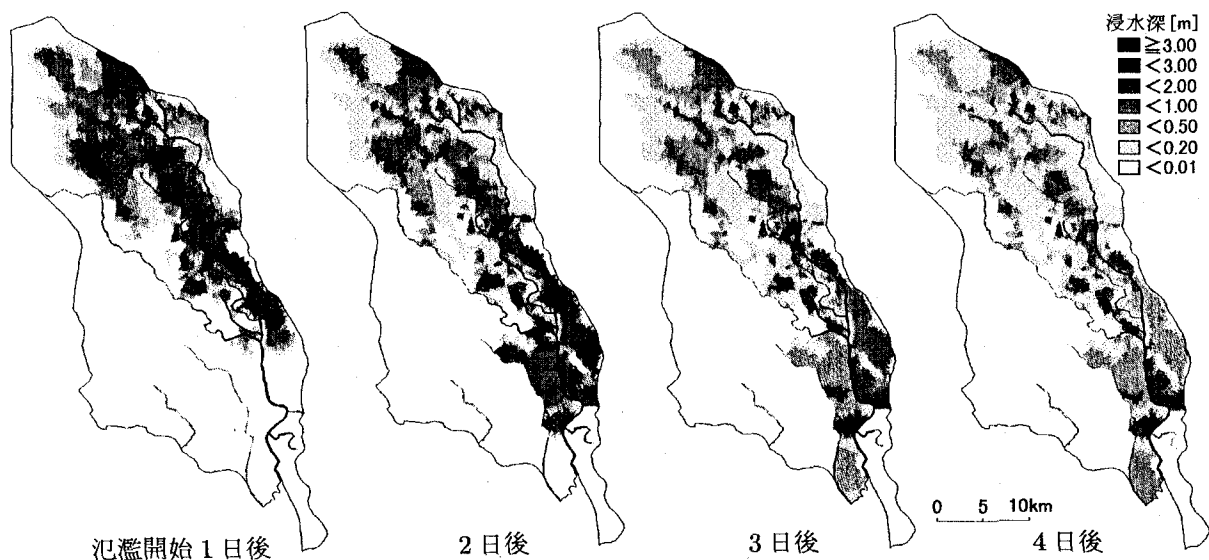


図-12 浸水深の時間変化 (中小河川考慮)

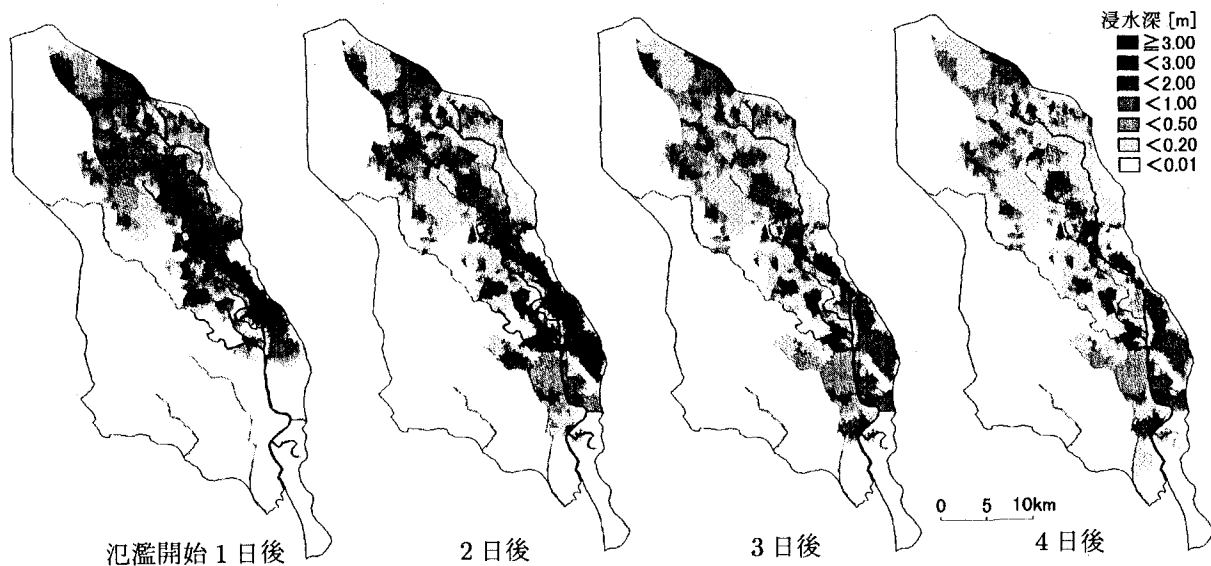


図-13 浸水深の時間変化 (中小河川・連続盛土考慮)

4. おわりに

本研究で提示した非構造格子による氾濫解析法は、簡単な条件のもとではデカルト座標系による解析とほぼ大差ない結果をもたらした。また、非構造格子は格子形成の融通性に優れていることから、線状の構造物などの対象領域内の微細な地形的特徴を容易にモデルに組み入れることができる。本研究で解析したように中小河川や連続盛土の影響はこの方法により適切に表現されており、より高度化した氾濫解析の一手法が提示できたと考えている。

謝辞：ご多忙の中、多くの資料を提供頂きました建設省利根川上流工事事務所調査課の方々に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 程曉陶・劉如雲・顔元亮・楊磊：黄河治理與水資源開發利用 黄河下游灘區水沙運行数学模型及減災措施的研究，中国水利水电科学研究院，pp.11-15，1995。
- 3) 建設省関東地方建設局利根川上流工事事務所：利根川(小冊子)，1995。
- 4) 建設省関東地方建設局利根川上流工事事務所・パシフィックコンサルタンツ株式会社：洪水対策調査報告書，1995。
- 5) 土木学会編：水理公式集，昭和46年改訂版，p.265，1971。

(1999.9.30受付)