

流出土砂が 急傾斜都市氾濫解析に及ぼす影響

EFFECT OF SEDIMENT YIELD ON INUNDATION FLOW ANALYSIS IN HILLSIDE CITIES

川池健司¹・井上和也²・戸田圭一³・中井勉⁴

Kenji KAWAIKE, Kazuya INOUE, Keiichi TODA and Tsutomu NAKAI

¹学生員 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 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)
⁴学生員 京都大学工学部 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

An inundation flow model in hillside cities considering the effects of sediment is developed. In this model, the hydrographs of discharge and sediment concentration calculated in the mountainous area are imposed as the boundary conditions of urban area. In urban area, the two-dimensional inundation flow analysis based on the unstructured meshes is conducted. The above model is applied to Ikuta River basin in Kobe. The obtained results are much severer than those of the case without consideration of sediment. Therefore considering sediment is found out to be very important for inundation flow analysis in the river basin with much sediment yield.

Key Words : hillside cities, sediment yield, inundation flow analysis, unstructured meshes, Kobe city

1. はじめに

1999年, 広島 の山間に開けた住宅地で激甚な土砂・流木による災害が発生した。2000年の東海豪雨災害では, 小牧市の住宅が土砂に巻き込まれて死者が出るなど, 近年の水害における人的被害の多くは土砂が関係している。土砂災害といえば山間部に限られた災害のように思われがちであるが, 1938年(昭和13年), 1967年(同42年)の神戸, さらに1982年(同57年)の長崎では, 土砂による氾濫災害が大都市に凄惨な爪痕を残していった事実がある。背後に山地が迫っている比較的傾斜の急な都市では, 土砂災害によって人命が失われるだけでなく, 都市機能も壊滅的な打撃を受けてしまう。

このような土砂・氾濫災害に対してはハード的対策のみに頼るのではなく, 住民がその地域の危険性を十分認知しておくことが被害の軽減につながる。一つの有力な手段として, 土砂災害のハザードマップを作成・公表することが考えられるが, それには十分に信頼できる土砂・氾濫予測手法が必要である。例えば中川ら¹⁾は, デカルト座標系モデルを用いた土砂・氾濫解析手法を提唱している。しかし, 中川らが対象とした領

域は山間部の集落であり, 都市域での氾濫水はこれとは異なる挙動特性を示すと予想される。そこで本研究では, 非構造格子モデルを用いた二次元氾濫解析を展開し, 土砂動態を含んだ急傾斜都市での氾濫解析法を提示するとともに, 土砂の流出が氾濫解析結果に与える影響を考察した。

2. 氾濫解析法

本研究で用いる解析モデルは, 対象とする河川流域を上流側の山地部と下流側の都市部とに分割する。すなわち, 山地部では, 河川から流出してくる流量と土砂濃度のハイドログラフを求め, その結果を都市部の上流端での境界条件とする。都市部では, 上流端で上記の流量と土砂濃度のハイドログラフを与えて, 2次元の土砂氾濫解析を行う。ただし, 都市部では適用対象の特徴から, 河川を掘り込み河道と考えた非構造格子による解析法を採用する。このようなモデル全体の概念を図-1に示す。

(1) 山地部の解析

山地部の河川は, 雨水の流出のみを考え土砂の流

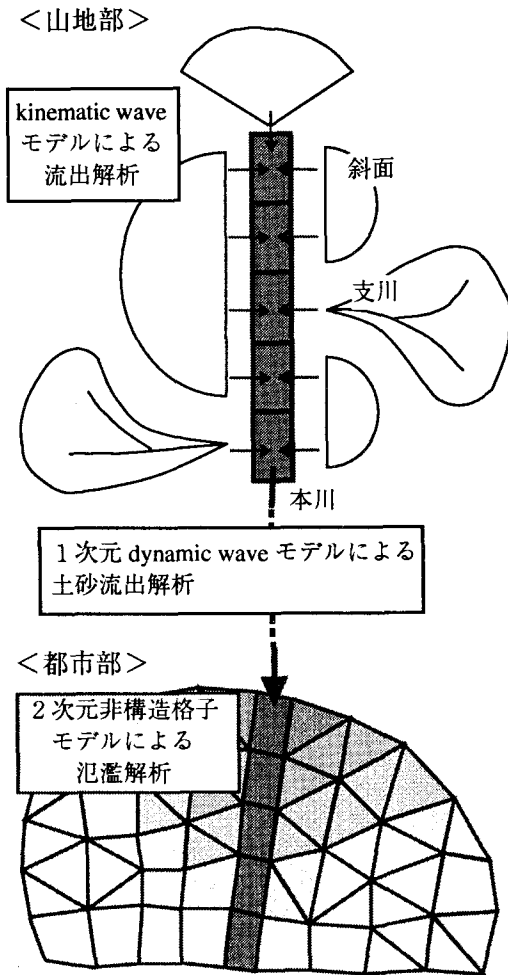


図-1 モデルの概念図

出は考慮しない「支川」と、それが流入して土砂とともに流出する「本川」とに区分する。はじめに、直接本川に流出する斜面および支川からの雨水の流出を kinematic waveモデルを用いて解析する。次に、本川の解析ではそれを横流入流量とし、土砂の流出も含めた1次元dynamic waveモデルを用いて最下流端での流量および土砂濃度の時間変化を解析する。ここでは、山地部の詳細な解析法は参考文献2),3)に譲る。

(2) 都市部の土砂氾濫解析

都市部では、領域を任意形状の非構造格子に分割し、有限体積法の考えに基づいてLeap-Frog法による氾濫解析を進める⁴⁾。本研究で用いた未知量は、図-2に示すような位置で定義される。すなわち、全領域に対してまずデカルト座標系 (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 (多角形の辺の中点) で、流動深 h 、土砂濃度 C 、土砂堆積厚 z_b を非構造格子の図心 (本研究では多角形の重心) で定義する。

都市部で用いる基礎式は、基本的には中川ら¹⁾の手法に従い、それを非構造格子に適用する。まず、流れの連続式と運動量式は以下のとおりである。

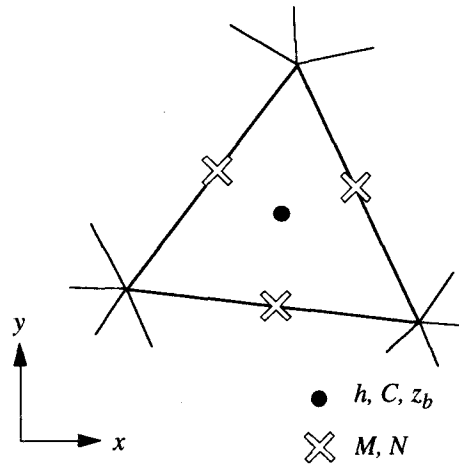


図-2 未知量の定義位置

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

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

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

ただし、 i : 土砂の堆積 (侵食) 速度, q_{rain} : 降雨強度, β : 運動量補正係数, H : 水位, g : 重力加速度である。 ρ_T は流れにおける水と土砂粒子の混合物の密度であって、 σ : 土砂粒子の密度, ρ_m : 流体の密度とすると、 $\rho_T = \sigma C + (1 - C)\rho_m$ である。底面せん断応力 τ_{bx} , τ_{by} には、 C_* を河床土砂の体積濃度として、流体中の土砂濃度の値によって以下の式を用いる。

土石流の場合 ($C \geq 0.4C_*$)

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho_T} = \frac{1}{8} \left(\frac{d_m}{h} \right)^2 \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}}{\{C + (1 - C)\rho_m/\sigma\} \left\{ (C_*/C)^{1/3} - 1 \right\}^2} \quad (4)$$

$$\frac{\tau_{by}}{\rho_T} = \frac{1}{8} \left(\frac{d_m}{h} \right)^2 \frac{v\sqrt{u^2 + v^2}}{\{C + (1 - C)\rho_m/\sigma\} \left\{ (C_*/C)^{1/3} - 1 \right\}^2} \quad (5)$$

掃流状集合流動の場合 ($0.02 \leq C < 0.4C_*$)

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho_T} = \frac{1}{0.49} \left(\frac{d_m}{h} \right)^2 u\sqrt{u^2 + v^2} \quad (6)$$

$$\frac{\tau_{by}}{\rho_T} = \frac{1}{0.49} \left(\frac{d_m}{h} \right)^2 v\sqrt{u^2 + v^2} \quad (7)$$

掃流砂の場合 ($C < 0.02$)

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho_T} = \frac{gn^2 u\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (8)$$

$$\frac{\tau_{by}}{\rho_T} = \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (9)$$

ここで, d_m : 平均土砂粒径, n : Manningの粗度係数である。

また, 土砂の堆積速度については, 河川という属性を与えた格子では侵食・堆積を, その他の格子では堆積のみを考えることにして

侵食の場合

$$i = \delta \frac{C_\infty - C}{C_* - C_\infty} \sqrt{u^2 + v^2} \quad (10)$$

堆積の場合

$$i = \delta' \frac{C_\infty - C}{C_*} \sqrt{u^2 + v^2} \quad (11)$$

を用いる。 δ には0.0007, δ' には0.001を用いる³⁾。

平衡土砂濃度 C_∞ については, エネルギー勾配 $\tan \theta$ によって以下のようにして求める。

$\tan \theta \geq 0.138$ のとき

$$C_\infty = \frac{\rho_m \tan \theta}{(\sigma - \rho_m)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad (12)$$

$0.03 \leq \tan \theta < 0.138$ のとき

$$C_\infty = 6.7 \left\{ \frac{\rho_m \tan \theta}{(\sigma - \rho_m)(\tan \phi - \tan \theta)} \right\}^2 \quad (13)$$

$\tan \theta < 0.03$ のとき

$$C_\infty = \frac{(1 + 5 \tan \theta) \rho \tan \theta}{\left(1 - \bar{\alpha}^2 \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \left(1 - \bar{\alpha} \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}}\right)} \quad (14)$$

ここで ϕ :土砂粒子の内部摩擦角, ρ :水の密度, τ_* および τ_{*c} はそれぞれ無次元掃流力, 無次元限界掃流力であり, 以下のようにして計算する。

$$\tau_* = \frac{u_*^2}{(\sigma/\rho - 1)gd_m} \quad (15)$$

$$\tau_{*c} = 0.04 \times 10^{1.72 \tan \theta} \quad (16)$$

u_* :摩擦速度で, $u_*^2 = gh \tan \theta$ である。さらに, $\bar{\alpha}$ については,

$$\bar{\alpha}^2 = \frac{2 \left(0.425 - \frac{\sigma \tan \theta}{\sigma - \rho}\right)}{1 - \frac{\sigma \tan \theta}{\sigma - \rho}} \quad (17)$$

とする。ただし, エネルギー勾配 $\tan \theta$ は, 式(4)～(9)を用いて

$$\tan \theta = \frac{\sqrt{\tau_{bx}^2 + \tau_{by}^2}}{\rho_T gh} \quad (18)$$

で求める。

土砂粒子の連続式は以下の式を用いる。

$$\frac{\partial(Ch)}{\partial t} + \frac{\partial(CM)}{\partial x} + \frac{\partial(CN)}{\partial y} = iC_* \quad (19)$$

さらに河床の連続式には以下の式を用いる。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + i = 0 \quad (20)$$

3. 神戸市への適用

(1) 対象領域

本研究の対象領域を含む神戸市街を図-3に示す。図のほぼ中央に位置する三宮地区には官庁街や繁華街があり, 神戸市の中核を成す地域である。本研究で生田川を対象としたのは, 生田川がこの三宮付近を流れているために, 氾濫が生じた場合, もっとも水害の影響度が高い河川であると考えたからである。

前章で述べた山地部, 都市部には, 図-3に示す領域をそれぞれ用いた。すなわち, 山地部の領域は新神戸駅より上流の生田川流域, 都市部は青谷川, 宇治川をそれぞれ東西の境界とし, 北を居住地域の境界, 南を海岸線とする領域である。なお, 生田川の流域には含まれていないが雨水が直接都市部に流出する山地領域を「里山」と呼ぶこととし, その範囲を図-3に示す。簡単のため, 本研究では里山からは雨水の流出のみを考慮し, 土砂の流出は考えないことにする。なお, 対象とした山地部, 里山, 都市部の面積はそれぞれ10.8km², 1.5km², 9.6km²であり, 総面積は21.8km²である。

(2) 山地部の解析

2.(1)の手法を用いて, 山地部からの雨水および土砂の流出量を計算した。降雨条件には昭和13年水害時に神戸測候所で観測された毎時雨量を用い, 計算時間は降雨開始から108時間(4.5日)までとし, $\Delta t=0.1s$ とした。

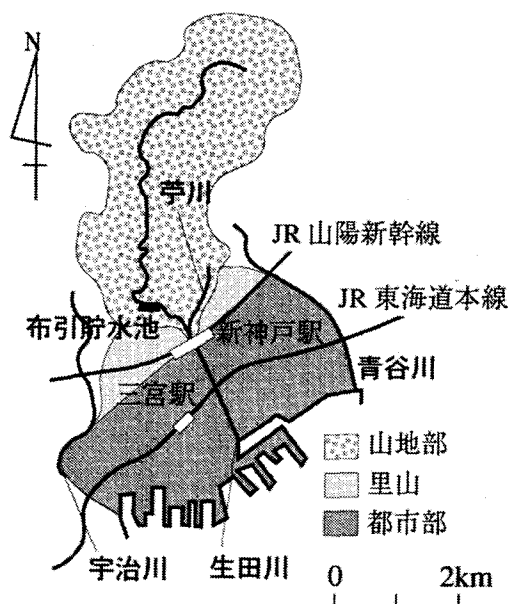


図-3 対象領域図

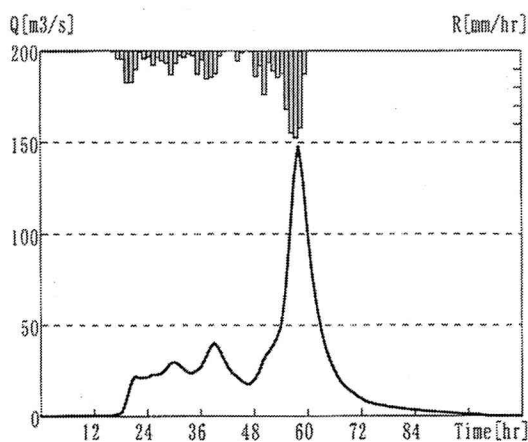


図-4 流量ハイドログラフ（雨水のみ考慮）

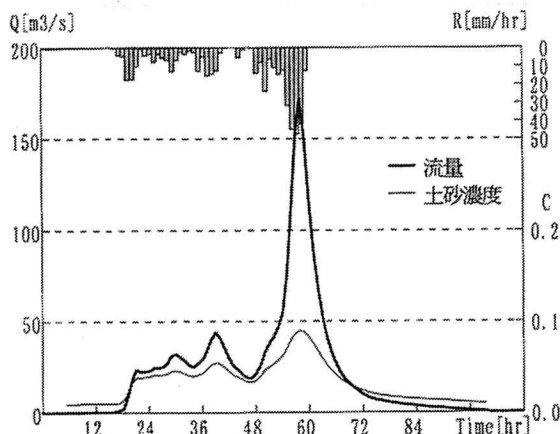


図-5 流量・土砂濃度ハイドログラフ（雨水・土砂考慮）

図-4に雨水の流出のみを考慮した場合の流量ハイドログラフを、図-5に雨水にあわせて土砂流出を考慮した場合の流量と土砂濃度ハイドログラフをそれぞれ示す。雨水だけの場合では最大流量は $148\text{m}^3/\text{s}$ であるのに対して、土砂流出を考慮した場合では最大流量は $170\text{m}^3/\text{s}$ と大きくなっている。これは、土砂の流出分が含まれているためである。昭和13年水害時の災害科学研究所⁵⁾の調査によると、生田川の最大流量は $135\text{m}^3/\text{s}$ に達しており、これと大きくは異ならない結果が得られた。

(3) 都市部の解析

a) 計算条件

本研究で用いた解析格子，ならびに対象領域の地盤高は図-6のとおりである。格子形成には，生田川のみならず，国道，幹線道路，鉄道などを考慮して領域を分割した。図-7に河川および道路（鉄道を含む）として認識した格子を示す。領域全体の格子数は1844個で，そのうち河川格子は27個，道路格子は319個であり，面積比にすると河川格子が全領域の0.3%，道路格子が同9.3%である。河川格子を除く格子の地盤高は，神戸市の1:2500都市計画図から読み取った値を補間して作成した。河川格子の地盤（河床）高は，生田川の横断面より得た100m間隔の断面積を各河川格子に対

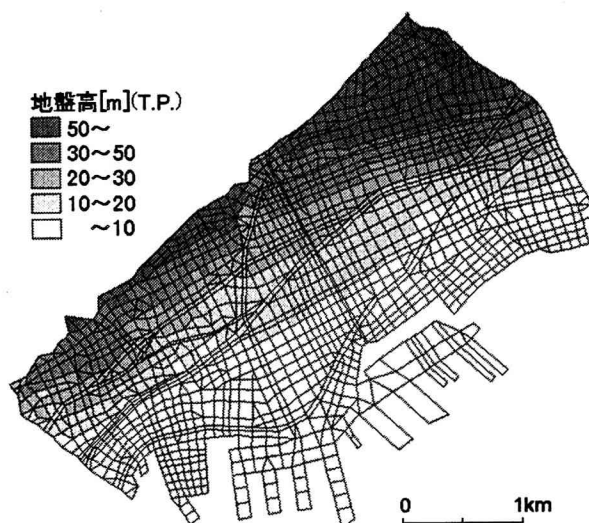


図-6 解析格子と地盤高

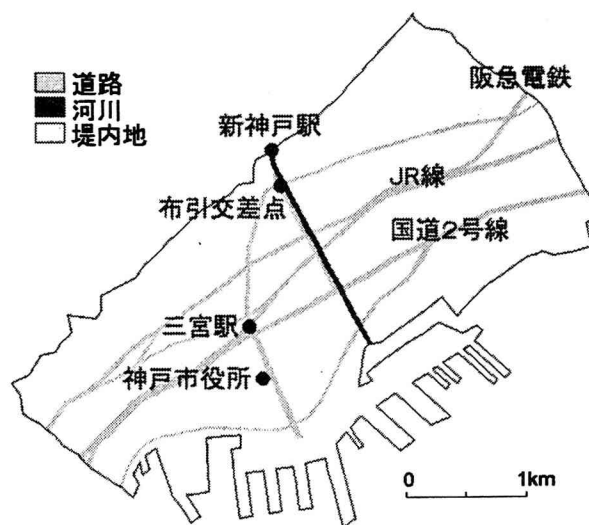


図-7 格子属性（道路・河川・堤内地）

応させ，さらにその格子の平面形状から求められる川幅より掘り込み深さを決定し，兩岸の格子の平均地盤高からそれを減じて決定した。

生田川上流端では，図-4，図-5に示されるハイドログラフに従って，流量フラックスと土砂濃度を境界条件として与えることにした。里山と接続している格子境界では，kinematic waveモデルを用いて得られた里山からの流出流量を，流量フラックスに改めて与えた。その他の領域境界（下流端の海岸線，および青谷川・宇治川）では，格子境界の流量フラックスを M_0 ，境界に隣接する格子の流動深を h_1 として，段落ち式を用いて土砂を含む氾濫水を流下させた。

本研究の対象領域は高度に都市化が進んでいるため，氾濫の過程において市街地の諸要素の影響を考慮しなければならない。本研究では井上⁶⁾にならない，占有率 λ と通過率 β を導入した。すなわち，河川格子，道路格子を除く堤内地格子には非浸水性の建造物が存

在するとし、その面積が格子全体の面積に占める割合として占有率 λ を定義した。本研究では1:2500都市計画図から読み取った占有率の平均値 $\lambda = 0.64$ を全堤内地格子に適用した。また、建造物による氾濫水の遮断を考慮するため、通過率を導入するが、井上⁶⁾が各格子中心において通過率を定義していたのに対し、本研究では、通過率は流量フラックスと同じ格子境界で定義するべきであると考え、堤内地-堤内地、堤内地-河川、堤内地-道路の各格子境界では通過率 $\hat{\beta}$ を0.35(1:2500地形図から読みとった値)、それ以外の格子境界は $\hat{\beta} = 1.0$ とした。これらの値を用いて、流量フラックスを次のように補正した。

$$M^* = \hat{\beta}M, \quad N^* = \hat{\beta}N \quad (21)$$

上式で補正した流量フラックスを用いて、連続式は式(1)に代わって、

$$(1 - \lambda) \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M^*}{\partial x} + \frac{\partial N^*}{\partial y} = i + q_{rain} \quad (22)$$

を用いた。ここで降雨強度 q_{rain} には昭和13年水害時の毎時雨量を用いた。また、土砂粒子の連続式は式(19)に代わって、

$$(1 - \lambda) \frac{\partial (Ch)}{\partial t} + \frac{\partial (CM^*)}{\partial x} + \frac{\partial (CN^*)}{\partial y} = iC_* \quad (23)$$

から求めた。さらに、河床の連続式については、式(20)の代わりに、

$$(1 - \lambda) \frac{\partial z_b}{\partial t} + i = 0 \quad (24)$$

を用いた。また、粗度係数 n の値を格子の属性によって変化させた。すなわち、道路格子は福岡⁷⁾により0.043、河川格子と堤内地格子は通常用いられている値としてそれぞれ0.020、0.067を用いた。

その他のパラメータについては、 $\sigma = 2650 \text{ kg/m}^3$ 、 $\rho_m = 1150 \text{ kg/m}^3$ 、 $C_* = 0.65$ 、 $\tan \phi = 0.7$ とし、平均土砂粒径は現地にて採取した土砂より $d_m = 1.14 \text{ mm}$ を用いた。運動量補正係数 β については中川¹⁾に従い、流れが土石流の場合(式(4)、(5)を用いるとき)は1.25、それ以外のときは1.0を用いた。なお、 $\Delta t = 0.5 \text{ s}$ を用いた。

b) 解析結果と考察

図-8に雨水のみを考慮した場合の最大浸水深図を示す。最大浸水深が0.5mを越えるのはごく限られた地点のみであることから、土砂生産が盛んなこの領域において土砂を考慮せずに解析を行えば、生田川の氾濫による被害は総じて小さい結果となった。

次に図-9に雨水と土砂を考慮した場合の最大浸水深図を、図-10に計算終了時刻における土砂堆積厚をそれぞれ示す。計算終了時刻における対象領域内の堆積土砂量の総計は約40万 m^3 となり、昭和13年当時の流出土砂量(48万 m^3 ⁵⁾)と比較してほぼ同程度となっ

ている。図-10を見ると、土砂の堆積範囲は領域上流端から扇状に広範囲にわたっている。新神戸駅から生田川に沿って約1km下流までの地域でおおむね1m以上の土砂の堆積が見られ、とくに布引交差点付近においては堆積厚は3m以上となっている。これは、新神戸駅から布引交差点にかけて河床勾配が急に緩くなっており、この近辺で土砂が堆積しやすくなっていることが原因と考えられる。

また、生田川に沿って数カ所から堆積厚の大きい領域が東西方向に伸びているのがみられるが、図-7と照らし合わせるとこの領域は道路格子に沿っていることがわかる。したがって、土砂は生田川から道路格子に沿って伝播・堆積していく過程が予測される。

ここで氾濫現象に与える土砂の影響を考えるために、図-8と図-9を比較する。土砂を考慮した場合は、土砂堆積により生田川の河床が上昇するため、溢水が生じやすくなり氾濫域が拡大している。生田川に沿った領域のうち、とくに領域の上流部では最大浸水深が1~2mも上昇している。したがって、雨水のみを考慮した解析で安全と判断された領域の中には、雨水と土砂を考慮した解析を行えば危険と判断される領域がかなりあり、神戸市のように背後に山地を持つ都市を対象とした氾濫解析においては、土砂を考慮することが重要な意味をもつことが確認された。またこれらの図より、豪雨時の山地部からの土砂流出を抑えることができれば、被害が大きく軽減されることもわかった。

b) 阪神大水害時との比較

昭和13年の阪神大水害の状況(図-11⁸⁾)と本研究の解析結果を比較してみると、昭和13年水害時には生田川左岸ではほとんど浸水しておらず、右岸の旧河道に沿って氾濫水・土砂が流下して大きな被害を出しているのに対し、図-9においては兩岸で氾濫がみられ、当時の状況が十分に再現されているとはいえない。その原因として、昭和13年当時の生田川が暗渠であったこと、本研究の解析では流木の影響を無視していることなどが考えられる。現在の生田川流域の地形では、旧河道に沿って氾濫水が流れるということは考えにくいことから、昭和13年当時には何らかの原因で右岸側に偏った流れが発生したと思われる。しかし、本研究の解析では、生田川の最大流量および流出土砂量が昭和13年当時の観測値(推定値)と大きくは異ならないため、得られた結果は決して非現実的な規模のものではないと考えて良いであろう。

4. おわりに

本研究で得られた成果をまとめれば、以下のようになる。

- 土砂の動態も含めた急傾斜都市における氾濫解析手法を提示することができた。

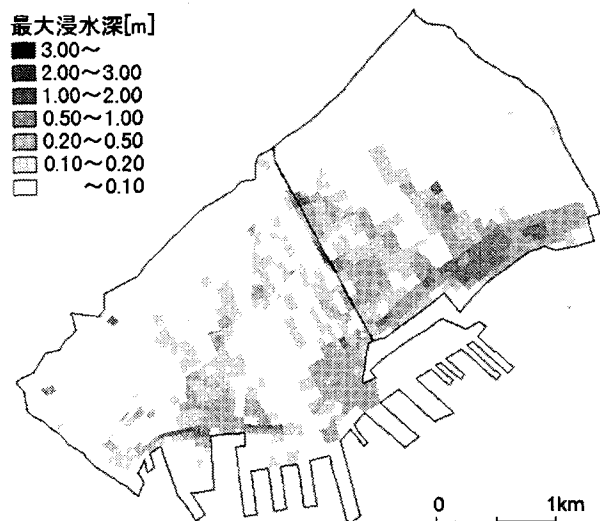


図-8 最大浸水深（雨水のみ）

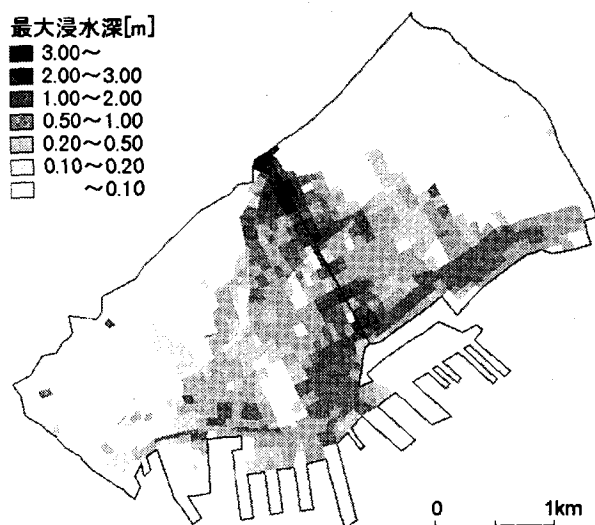


図-9 最大浸水深（雨水・土砂考慮）

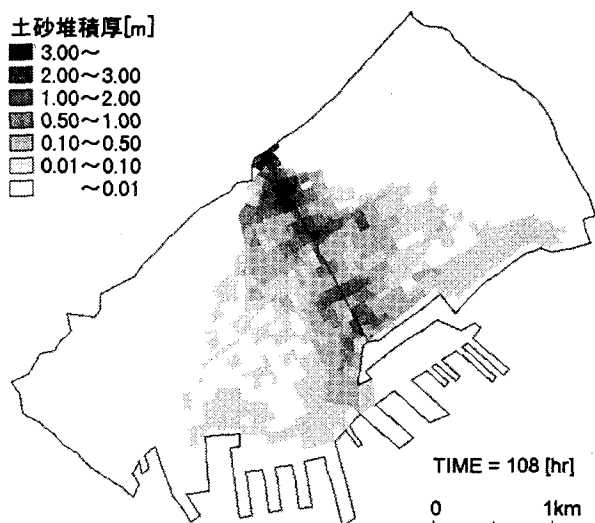


図-10 計算終了時刻の土砂堆積厚

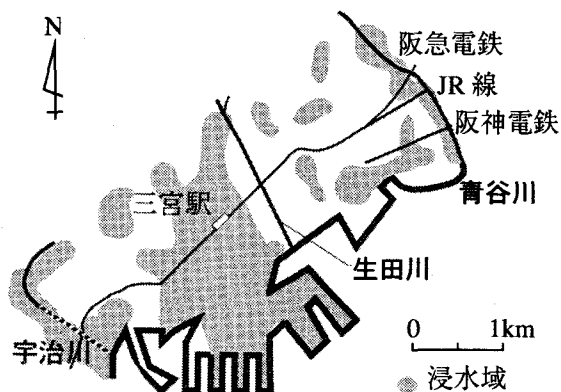


図-11 1938年当時の浸水域⁸⁾

- 土砂を考慮した場合と考慮しなかった場合の解析結果を比較することによって、土砂供給の多い河川流域の都市域においては、氾濫水の挙動が土砂によって大きく影響を受けることが確認できた。

本研究で提示した解析モデルは、改良の余地はあるにせよ、急傾斜都市における土砂・氾濫災害の予測手法として有効な情報を与えることができると考えている。

謝辞：本研究を進めるにあたり、生田川に関する資料をご提供下さいました、兵庫県土木部河川課の方々に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 中川一・高橋保・澤田豊明・石橋晃睦：豪雨性表層崩壊に起因する土石流の規模予測とGISを用いた避難行動の解析，水工学論文集，第42巻，pp.325-330，1998.
- 2) 角屋睦：都市化と流出，水工学に関する夏期研修会，土木学会水理委員会，pp.A-2-1-A-2-21，1974.
- 3) 土木学会編：水理公式集例題集，（印刷中）。
- 4) 川池健司・井上和也・戸田圭一：非構造格子の都市氾濫解析への適用，水工学論文集，第44巻，pp.461-466，2000.
- 5) 災害科学研究所：昭和13年災害資料（その3）災害科学研究所報告 第1号，昭和13年7月5日阪神大水害調査報告，1938.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 神戸市役所：神戸市水害誌，1939.

（2000.10.2受付）