

2013 年度（第 49 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 13-A-2

都市域における浸水解析

中部大学 教授

武田 誠

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2013 年 8 月

都市域における浸水解析

An Inundation Analysis in an Urban Area

武田 誠
Takeda Makoto

1. はじめに

近年、ダムや流域内の貯留施設により雨水を保持し、河川に隣接する遊水地で貯留し、堤防で洪水を制御する総合治水対策が実施されている。さらに、ハザードマップを積極的に作成・公開し、計画規模以上の洪水に対しては、避難による減災対策が採られている。ハザードマップ作成には浸水解析の知見が活用されており、治水対策の効果やその費用便益の評価にも浸水解析が活用されている。このように、都市域における浸水解析は、治水対策の検討のための不可欠なツールとなっている。

洪水氾濫解析の先駆けとして、河川流は運動量方程式と連続式を基礎として流れ方向に1次元的に解析し、氾濫流は浅水方程式（運動量方程式、連続式）を基礎として平面2次元的に解析する、岩佐・井上・水鳥の研究¹⁾がある。現在は、破堤流量、粗度係数なども含めた整理が行われており、土木学会水理公式集²⁾や治水対策の各種マニュアル³⁾にも反映され、広く普及している。また、2000年の東海豪雨を契機として内水氾濫対策の重要性が指摘された。内水氾濫は、下水道システムなどの排水能力以上の豪雨による浸水であるので、浸水解析に下水道システムの水理解析を含める必要がある。下水道流は河川流と同じく1次元解析モデルで表現可能であるが、状況に応じて満管流れと開水路流れが生じるため、解析が困難となる。この困難の解消法として、仮想的な壁を立てて満管流れを疑似的に開水路流れとして取り扱うスロットモデルを活用することが一般的であり、下水道解析も含めた浸水解析が実施された。

本報では、氾濫解析法の特徴、都市域の内水を対象とした浸水解析法を概説すると共に、結果の活用、解析法の高度化、更なる浸水解析の課題について論じる。なお、地下空間も含めた都市浸水の課題の検討を、戸田ら⁴⁾、川池ら^{5),6)}、関根ら^{7),8)}、秋山ら⁹⁾、石垣ら¹⁰⁾、渡辺ら¹¹⁾が精力的に進めており、研究対象も多方面に広がっている。ここでは、浸水解析技術に焦点を絞って論じる。

2. 氾濫解析法の特徴

2.1 計算モデル

まずは、地表面の浸水解析（以下、氾濫解析とする）に着目する。氾濫解析法は、前述したように、わが国の実務において広く普及しており、実績を得ている方法である。氾濫解析の基礎方程式は、以下に示す平面二次元の浅水方程式である。

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

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial vM}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial M}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{bx}}{\rho} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial N}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial N}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{by}}{\rho} \quad (3)$$

ここで、 u, v はそれぞれ x, y 方向の流速、 h は水深、 M, N はそれぞれ x, y 方向のフラックス ($M = uh, N = vh$)、 H は水位、 τ_{bx}, τ_{by} はそれぞれ x, y 方向の底面のせん断応力、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ はそれぞれ x, y 方向の渦動粘性係数、 x, y は平面の座標、 t は時間である。

また、せん断応力はマニングの粗度係数 n を用いて以下の式で表現される。

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

$$\tau_{by} = \rho g n^2 N \sqrt{u^2 + v^2} / h^{4/3} \quad (5)$$

岩佐・井上・水鳥の方法¹⁾では、浅水方程式の未知量である流量フラックス、水深を、計算格子にスタガードに配置し、陽的差分法を用いて求めており、移動限界水深（運動量方程式を解く水深の判定値、通常 0.001m が用いられている）を定めて、

- 1) 運動量定義位置を挟む 2 つの格子の水深が移動限界水深以下の場合には氾濫水の運動方程式を解かない。
- 2) 水深が移動限界水深以下である格子から流出している流れがある場合にはその流れが無いものとしてゼロに置き換える。
- 3) 連続式の計算において、水深が負となる場合にはその水深をゼロに置き換える。

という三条件を付加することで氾濫解析が実施されている。ただし、急斜面の解析では、C.F.L.条件などの数値解析の安定条件を満足している場合であっても、計算が不安定となることがあり、そのために計算時間間隔を小さくする方法や、マニング則または段落ちの式などを用いて運動方程式を解かない方法を取るなどの処理が必要となる。また、氾濫解析マニュアル³⁾には、低平地における適切なメッシュ分割として隣り合う格子の地盤高の差を 50cm 以下とするよう記されている。

本章では、氾濫解析法に着目して、急勾配箇所で生じる課題や質量保存に関する氾濫解析法の問題点および修正法について考える。

2.2 モデル領域における浸水過程の計算

図-1 のモデル領域を対象とし、周りに壁を配置し、北方が高くなるように地盤高を変化させ、その勾配として 1/1000, 1/100, 1/20, 1/10, 1/2, 1/1 の 6 ケースを取り扱った。用いた格子幅 ΔS は 10m、計算時間間隔 Δt は 0.5s、底面の粗度係数 n は 0.067 である。計算開始から 2 時間まで全域に 50mm/h の降雨を与え、その後 2 時間までの計 4

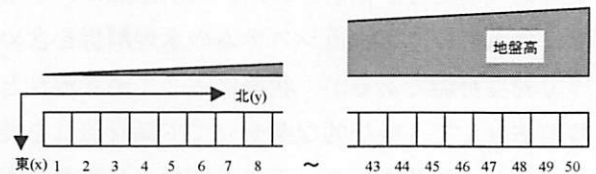


図-1 モデル領域

時間の浸水過程を計算した。なお、平面二次元解析モデルを適用しているが、流れ場が一次元的であるため x 方向の運動方程式は解いていない。

図-2 に勾配 1/1000 と勾配 1/20 の場合の水位分布と浸水深分布を、図-3 に計算終了時の氾濫水量を示す。図-2 から、勾配 1/1000 の場合、水位と浸水深が滑らかな分布を示し、降水量の下流への輸送が計算されており、定性的な観点から妥当と判断される。一方、勾配 1/20 の場合、水位変動は十分に解析できてい

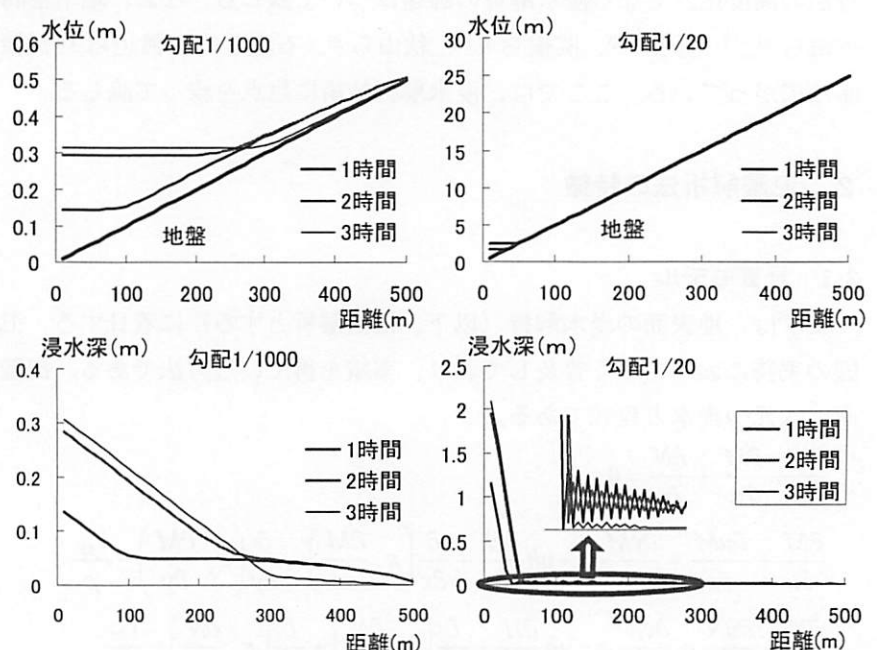


図-2 水位および浸水深

ることが分かるが、浸水深の分布では小さな浸水深の領域において数値振動が生じている。また、図-3 から、1/1000 と 1/100 の緩やかな勾配の場合には、質量誤差を生じることなく解析が行えるのに対して、勾配が増加すると計算終了時の氾濫水量が理論値（500m³）を超えて質量誤差が生じていることが分かり、勾配 1/1 では解が発散し計算が安定に終了できなかった。したがって、氾濫解析における問題点として、勾配が急な場合には安定に計算できなくなること、勾配が大きくなれば質量誤差が生じること、水深が浅い箇所では数値振動が生じることが挙げられる。

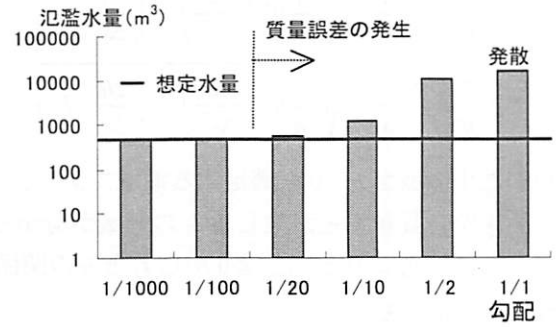


図-3 氾濫水量

また、図-3 から、勾配 1/2 の場合、質量誤差の値が想定水量の約 20 倍となっており、しかも、そのような状況でも安定に計算が終了していることが示されている。浸水解析を行う場合、得られた結果の定量的な妥当性評価は非常に難しく、浸水実績との比較においても大まかな判定にとどまっているのが実情であり、質量誤差が生じたままでも各種治水対策の検証やハザードマップ作成に使用されている可能性がある。

質量誤差の発生のメカニズムは 2.1 に示した氾濫解析法の付加条件 3) に起因するものである。水深が移動限界水深よりも大きい場合、運動量方程式を用いて流量フラックスが計算されるが、地盤勾配が大きい場合は計算される値が大きくなり、連続式において負の水深が発生する可能性がある。この場合、その水深をゼロに修正することは、新たに水量を加えることを意味し、これが質量誤差になる。

2.3 質量誤差の発生条件

図-4 のように水深 h 、 h_{up} 、 h_{down} 、流速 v 、格子幅 ΔS 、水面勾配 I_1 、底面勾配 I_2 を定義する。

まず、数値解析上の安定条件である C.F.L. 条件を取り上げてみれば、

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} > \sqrt{gh} + v \quad (6)$$

であり、氾濫水の場合、水深は数 m のオーダーと小さいので流速 v は無視できない。いま、流速の表現にエネルギー勾配＝水面勾配と仮定して、マニング則を適用すると、 I_1 と h の関係式が得られる。

$$I_1 < \frac{n^2}{h^{4/3}} \left(\frac{\Delta S}{\Delta t} - \sqrt{gh} \right)^2 \quad (7)$$

つぎに、質量保存の条件について、計算時間間隔 (Δt) に格子から流出する水量は、格子に存在する水量よりも多量に流出しないとすると、 $h_{up}\Delta S \geq hv\Delta t$ であり、 $h_{up} = h - I_2\Delta S/2 + I_1\Delta S/2$ であることから、

$$I_1 \geq I_2 + \left(\frac{v}{\Delta S/\Delta t} - 1 \right) \frac{2h}{\Delta S} \quad (8)$$

となる。流速の表現に水面勾配を用いたマニング則を適用すると、 I_1 と h の関係式が得られる。

$$F = I_1 - \frac{2}{n} h^{5/3} \frac{\Delta t}{\Delta S^2} I_1^{1/2} + \frac{2h}{\Delta S} - I_2 \geq 0 \quad (9)$$

なお、 $F < 0$ を満たす条件が質量誤差を生じる条件となる。流下方向の流れを対象としているため、 $I_1 \geq 0$ とし $X = I_1^{1/2}$ とおけば、 $F < 0$ の式は、

$$X^2 - \frac{2}{n} h^{5/3} \frac{\Delta t}{\Delta S^2} X + \frac{2h}{\Delta S} - I_2 < 0 \quad (10)$$

と表すことができる。したがって、 $X > 0$ の範囲で、

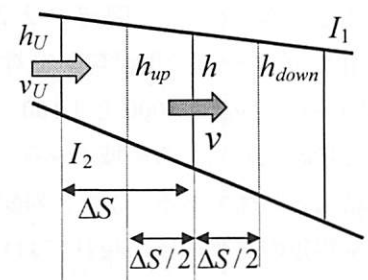


図-4 未知量の定義

$$X > \frac{1}{n} h^{5/3} \frac{\Delta t}{\Delta s^2} - \sqrt{\left(\frac{1}{n} h^{5/3} \frac{\Delta t}{\Delta s^2} \right)^2 - \left(\frac{2h}{\Delta s} - I_2 \right)} \quad \text{かつ}$$

$$X < \frac{1}{n} h^{5/3} \frac{\Delta t}{\Delta s^2} + \sqrt{\left(\frac{1}{n} h^{5/3} \frac{\Delta t}{\Delta s^2} \right)^2 - \left(\frac{2h}{\Delta s} - I_2 \right)} \quad (11)$$

を満たす領域が $F < 0$ を満足する領域であり、 $I_1 = X^2$ の関係から質量誤差が生じる I_1 の領域が分かる。

さらに、 $h_{up} \geq 0$ と $h_{down} \geq 0$ から I_1 と h の関係式が次式のように得られる。

$$I_1 \geq I_2 - 2h/\Delta x \quad (12)$$

$$I_1 \leq I_2 + 2h/\Delta x \quad (13)$$

Δs 、 Δt 、 I_2 、 n が定まった場での h と I_1 の関係の一例を図化したものが図-5 であり、理解を助けるため (11) 式の範囲を誇張して記している。本図の (12) 式、(13) 式で囲まれる範囲に実際の解析点が記され、解析点が (7) 式、(12) 式、(13) 式で囲まれた範囲（図中灰色部、安定領域とする）に存在する場合に安定に計算される。さらに、(11) 式の範囲（図中斜線部）では、質量誤差が生じることから、安定に計算できる領域内に質量誤差の発生する領域が存在することが分かる。なお、このような質量誤差の生じる範囲は地盤勾配により変化する。そこで、図-6 に 2.2 で用いた解析条件を使用し、6 ケースの地盤勾配を対象に同様の図を示す。本図から、勾配 1/1000 と 1/100 では、安定領域において質量誤差の生じる領域が存在せず、これは図-3 の解析結果と同様である。また、勾配 1/20 から安定領域に質量誤差の発生領域が現れており、勾配が大きくなれば質量誤差の発生領域が大きくなることが分かる。

2.2 の計算において、質量誤差の発生した点を縦線で示したのが図-7 である。本図から、勾配が緩やかな場合は水深が小さく、隣り合う格子の水深が大きく異なる水際において質量誤差が発生し、勾配が大きくなれば、それ以外の箇所でも発生していることが分かる。

図-6 に、2.2 で行ったモデル解析の結果のうち、1 分毎の解析結果を出力し、流下方向の流速とマンニング則による流速の比を用いて定常状態と見なした解析点を示した。2.2 の解析は非定常計算であり定常状態を見積もることが困難であるが、解析で質量誤差の生じていない勾配 1/1000 と 1/100 では理論的に質量誤差の発生領域が生じないこと、解析において質量誤差が生じた点が発生領域内にプロットされることから、(11) 式で示した質量誤差の発生条件は概ね妥当であるとみなせた。

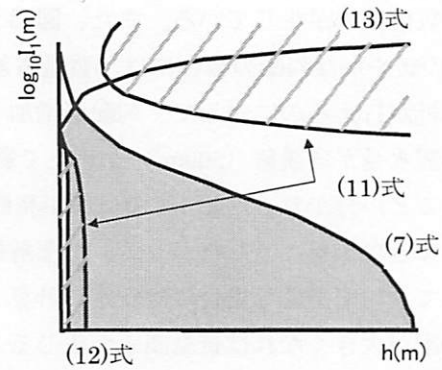


図-5 解析点の存在領域と質量誤差の発生領域

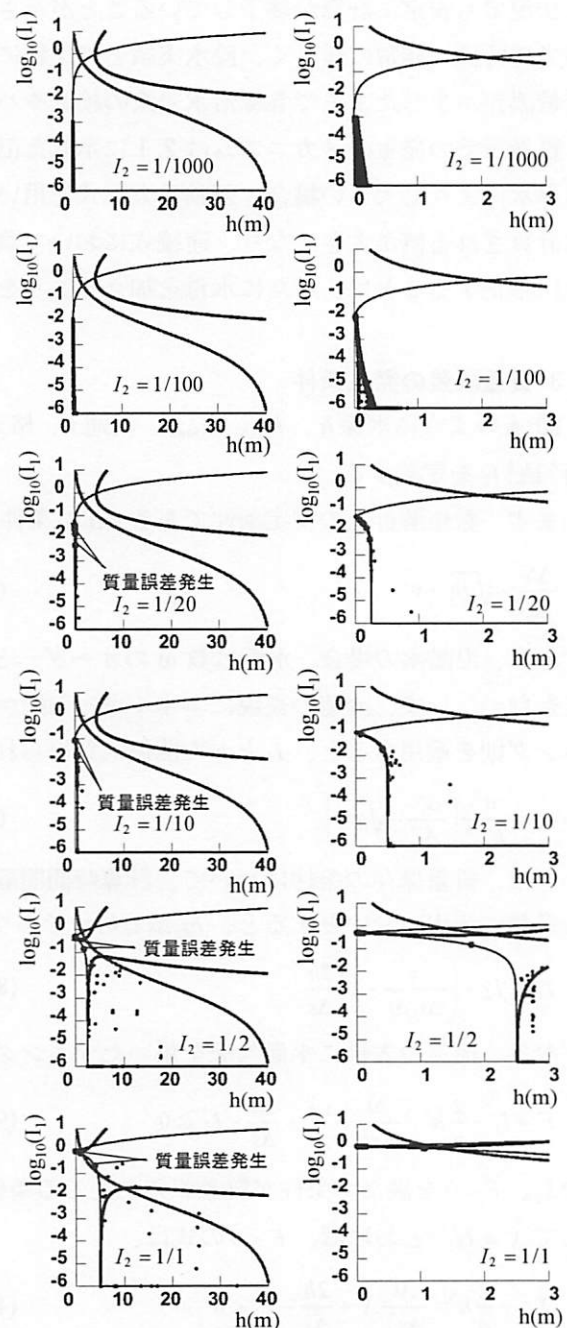


図-6 質量誤差の発生領域

2.4 質量保存を考慮した修正法

ここで紹介している問題の要因は、計算中に格子内水量が無くなる状況が生じることであり、それは主として水際部で生じることが示された。一般に流速定義位置での水深は隣あう格子の水深の平均値として求められるが、水際の場合、流速を求めるコントロールボリュームと水深を求めるコントロールボリュームの水量が大きく異なり、計算時間ステップ Δt 中に上流部の格子の水が無くなるが生じる。これまでの氾濫解析ではこの問題を2.13)の付加条件で対処してきた。 Δt 中に水が無くなることを想定していない以上、水際部の運動方程式によって得られる解は実際よりも大きく見積られる可能性がある。従って、質量誤差が生じた箇所では、運動量方程式で得られた値を真値とせずに、質量保存を満足するような修正法を試みた。

いま、格子から流出する流量フラックスを M_1, M_2, N_1, N_2 （流入する場合はゼロ）とすれば、連続式の差分式は図-8を参考に以下のように表される。なお、この場合の連続式はその格子から流出するもののみを対象としている。

$$\frac{h^{t+\Delta t} - h^t}{\Delta t} = -\frac{M_1 - M_2}{\Delta x} - \frac{N_1 - N_2}{\Delta y} \quad (14)$$

Δt 秒後の水深が負となる場合は質量保存の観点からその流量フラックス分の水は流れず、 Δt 秒後の水深がゼロとなる流れまでは許容されるため、以下の式から低減係数を求める。

$$\alpha = \frac{-h^t}{\Delta t} \left/ \left(-\frac{M_1 - M_2}{\Delta x} - \frac{N_1 - N_2}{\Delta y} \right) \right. \quad (15)$$

得られた低減係数 α を格子から流出する流量フラックスに乗ずることで質量保存を満たすように修正した。なお、 α が1以上の場合は修正を行っていない。

$$M = \alpha M, N = \alpha N \quad (16)$$

つぎに、この手法の妥当性を検証するために、2.2で示した条件の下で解析を行った。図-9に計算終了時の氾濫水量を $\Delta t=0.1s$ とした場合の結果と併せて示している。本図から、 $\Delta t=0.1s$ とした場合は従来の方法よりも質量誤差が発生していないが、勾配が1/10よりも大きい場合には質量誤差が発生している。また、ここで示した修正法を用いた場合は質量誤差を生じずに解析が終了しており、勾配1/1においても安定に計算が終了していた。したがって、勾配1/1における不安定の原因として、

前述したように質量誤差の発生に伴い水量が増大し、C.F.L.条件を満足できなかったことが考えられる。

3. 都市域の浸水解析

近年、都市の浸水に関する研究は広がりを見せており、1.の研究事例のように、外水氾濫、内水氾濫、地下空間の浸水・避難などが検討されている。都市浸水を考える上では、下水道システムや小河川、道路によ

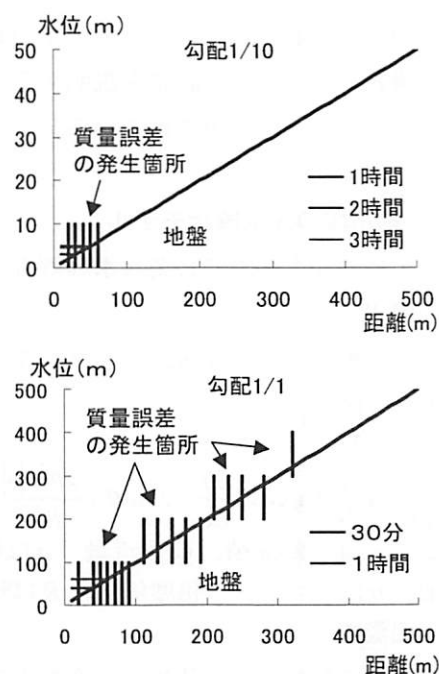


図-7 質量誤差の発生箇所

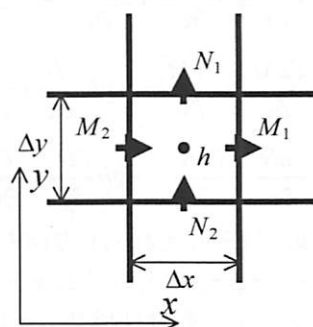


図-8 連続式における未知量の定義

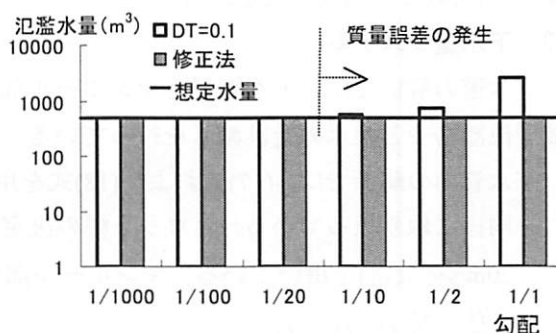


図-9 氾濫水量の比較

る水の挙動を適切に表現するモデルが必要となる。著者も都市内水を対象とした浸水解析を展開しており、この講義においてその詳細を説明する。ここで示すモデルは鹿島建設と共同で開発した「都市型水害予測解析システム」にも使用されている。

3.1 都市域の浸水解析モデル

都市域の浸水解析に必要な水理解析モデルの基礎式を以下に示す。

(1) 河川

河川の解析では、連続式とエネルギー方程式を用いる。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (17)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \cos \theta \frac{\partial h}{\partial x} - g \sin \theta + \frac{gn^2 u |u|}{R^{4/3}} = 0 \quad (18)$$

ここで、 A は断面積、 Q は流量、 q は横流入量、 u は流速($=Q/A$)、 h は水深、 g は重力加速度、 θ は河床勾配、 n はマンニングの粗度係数、 R は径深、 x は距離、 t は時間である。

(2) 氾濫域

氾濫域の解析では、建物占有率および透過率を考慮した以下の浅水方程式を用いる。

$$(1-\sigma) \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial \beta M}{\partial x} + \frac{\partial \beta N}{\partial y} = -\sum Q_{in} \quad (19)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial vM}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial M}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{bx}}{\rho} \quad (20)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial N}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial N}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{by}}{\rho} \quad (21)$$

ここで、 u, v はそれぞれ x, y 方向の流速、 h は水深、 M, N はそれぞれ x, y 方向のフラックス($M = uh, N = vh$)、 H は水位、 τ_{bx}, τ_{by} はそれぞれ x, y 方向の底面のせん断応力、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ はそれぞれ x, y 方向の渦動粘性係数、 σ は氾濫格子に対応する建物占有率、 β は透過率であり建物占有率を用いて $\sqrt{1-\sigma}$ であり、 x, y は平面の座標、 t は時間である。底面のせん断応力は、マンニングの粗度係数 n を用いて前述した(4)式と(5)式で表される。

(3) 下水道システム

下水道の解析では、下水管渠とマンホール部における水の挙動をそれぞれモデル化しており、マンホール部で氾濫格子との水の受け渡しを行っている。

下水管内の解析では、(17)式および(18)式を用いており、スロットモデルにより、満管流れおよび開水路流れを同様に扱っている。スロット幅の決定には、 gA_s/C^2 (g は重力加速度、 A_s は断面積、 C は波速であり、20m/sを仮定)を用いている。マンホール部の水位は、次の連続式で求めている。

$$A_m \frac{\partial H}{\partial t} = \sum Q + Q_{in} - Q_{out} \quad (22)$$

ここに、 A_m はマンホールの面積(水位が地盤高よりも高い場合は氾濫格子の面積)、 H は水位、 $\sum Q$ はマンホールにつながっている下水道管からの正味の流入流量、 Q_{in} は氾濫格子からの流入流量($KLh\sqrt{gh}$: K は流量係数0.544、 L はマンホールの円周、 h は浸水深)、 Q_{out} はポンプが存在する場合の流出流量である。

マンホール内の水位が地盤高よりも低い場合は、落ち込み流量(Q_{in})をマンホール部の連続式へ受け渡している。仮に、計算時間ステップ Δt 中にマンホールへ流入する水量がマンホール内の許容容積を超えた場合には、超えた水量を氾濫域の連続式で考慮し、マンホール部の水位は氾濫格子で得られた水位と同じと改めている。一方、マンホール部の水位が地盤高よりも高い場合は、まず、落ち込み流量(Q_{in})と、マンホールに隣接する下水道管の流量から得られる正味の排出流量($Q_2 = -\sum Q$)を計算し、 $Q_{in} < Q_2$ の場合には、マンホール内と氾濫域の水が分断されると仮定して、1ステップ前のマンホールの水位を地盤高に置

き換えて、 Q_m を考慮した連続式を計算する。その場合、氾濫格子の連続式で Q_m を考慮する。一方、 $Q_m > Q_2$ の場合、 Q_m を考慮せずにマンホールの連続式を計算し、水量の変化量を氾濫域の連続式で考慮し、得られた氾濫格子の水位をマンホールの水位と改めている。

(4) 各モデル間での水輸送

河川と氾濫域の間の堤防では、以下の本間の越流公式を用いて堤防上の越流現象をモデル化している。

$$\begin{aligned} Q &= \mu L h_1 \sqrt{2gh_1} & h_2/h_1 \leq 2/3 \\ Q &= \mu' L h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} & h_2/h_1 > 2/3 \end{aligned} \quad (23)$$

ここで、 $h_1 = H_r - H_0$ 、 $h_2 = H_f - H_0$ 、 H_r は河川水位、 H_f は堤内地の水位、 H_0 は堤防の天端高、 L : 格子に存在する堤防長、 μ, μ' は流量係数であり、それぞれ 0.35、0.91、 g は重力加速度である。なお、上記の式は河川水が堤内地水位よりも高い場合のものであるが、逆の場合は H_r と H_f を入れ替えて用いている。

下水道と河川との水輸送として、ポンプおよび雨水吐による排水を考慮している。ポンプ排水流量の影響は、放出先の河川格子の連続式で計算している。さらに、雨水吐箇所では、下水道管渠における運動方程式中の重力項を、対応する河川水位を用いて計算することで、流速および流量を求めており、その値を下水道および河川の連続式に使用している。

(5) 数値解析法

本解析モデルでは、数値解析法として差分法の陽的解法を適用している。未知量は格子に対してスタaggerd に配置し、運動量方程式にある移流項には風上性を考慮したドナースキームを、粘性項には中央差分、圧力項にも中央差分を適用している。

3.2 データ整備

下水道などの都市構造物を考慮した浸水解析において、データ整理には莫大な時間と費用がかかるのが一般的である。仮に、その作業が簡単化できるならば、浸水解析を実施する問題点の多くが解決できる。したがって、詳細な浸水解析の実務への適用を行う場合には、そういったデータ整備に関する問題を解決する必要がある。著者らは上記の課題を解決するために、鹿島建設と共同で下水道システムや河川、小河川、道路などの都市内の複雑な水の挙動を適切に表現する氾濫解析モデルを構築するとともに、データ整備および解析結果処理も含めた解析システム「都市型水害予測解析システム」を構築している。ここでは、データ整備の概要を紹介する。

- 解析データの自動作成：河川や海域の境界などの地形情報や地盤高、建物形状のデータが入手できれば、それらを用いて氾濫格子に対応する Information データ（計算格子、非計算格子、河川格子を示すデータ）、地盤高、格子に対する建物占有率（粗度係数や透過率に関与する）を自動的に算出する。
- 下水道データの修正：下水道データは、数値化されたものが少なく、仮に数値化されていたとしても使用頻度が低いものはデータに間違いが多い。そこで、マンホールと下水道との関連、マンホール底面高と地盤高、下水道水路床高との関連、土被り厚との関連からデータを評価し、不都合な部分を図化し、修正する。
- 氾濫格子と河川格子の関連データの作成：デカルト座標の氾濫解析法を適用しており、河川の解析は一次元解析法を適用している。したがって、堤防からの越流を考慮する場合、どの河川断面からどの氾濫格子に越流量を受け渡すかを定義する必要がある。このような河川と氾濫格子との接続情報と氾濫格子中に在る堤防長を自動的に作成する。

3.3 計算実施上の課題および計算条件

著者らは、都市型水害予測解析システムを用い名古屋市を対象に浸水解析を進めてきた。その中で、次の2点が大きな課題となった。

- 都市域から下水道システムへの水の受け渡しは、マンホール部で行っている。管径 600mm 以上の多

くの下水道管とそれに対応するマンホールを用いて解析を行っているが、解析上マンホールが存在しない場所にも、実際には側溝があり小さな下水道管が配置され幹線下水道へとつながっている。解析では、そのような細かな下水道システムの影響が表現できていない。

B) マンホール内は一つの空洞としてモデル化してきた。しかし、実際にはマンホールの中にも複雑な水の輸送形態があり、水量が増え水位が堰高を超えた場合にマンホール部の下部へと流れ、別の下水道管へつながるものもある。このような詳細なマンホール内の水の輸送が表現できていない。

ここでは、上の2点に絞ってモデル化の改善を紹介する。計算対象は東海豪雨による名古屋市の浸水とする。計算領域および計算条件を図-10および表-1に示す。計算期間は2000年12月11日2時～12月12日7時までであり、それに対応する降雨を与えている。なお、本研究の場合、建物占有率はゼロとした。

3.4 下水道システムへの流入に関するモデル化

(1) モデル化の概要

都市型水害予測解析システム（以後、旧モデルとする）では、マンホール部で氾濫域と下水道システムへの水の輸送を取り扱っている。すべての下水道管およびマンホールとそれにつながる側溝を取り上げることは、計算時間および計算容量の観点から現実的ではない。細かい排水過程が表現されていないモデル（旧モデル）では、マンホールが無い格子の水は地盤高の低い格子へと流れ、マンホールが存在する箇所において下水道へと流入することとなるが、その場合、浸水深が過大に現れることも考えられる。そこで、下水道への流入に関する取扱いを下記のように改めた。なお、噴き出しなどの氾濫域とマンホール部の水のやり取りに関しては従来どおりの取り扱いであり、落ち込み流量が発生する格子とその値の設定が異なる。ここでは、一つのマンホールに流れ込む領域を予め求めておき、その領域から落ち込み流量の上限値(Q_{max})に対応する水量（“ $Q_{max} \times \text{格子の面積} \times \text{計算時間間隔}$ ” (V_0)）の領域における総和（ V_T ）をマンホールへ輸送させた。ただし、格子に V_0 分の水量が無い場合には存在する水量を対象とし、マンホールに V_T 分の容積が無い場合には、許容できるマンホールの容積分に相当する水量を（その場合には、格子からの水量を減少させて）受け

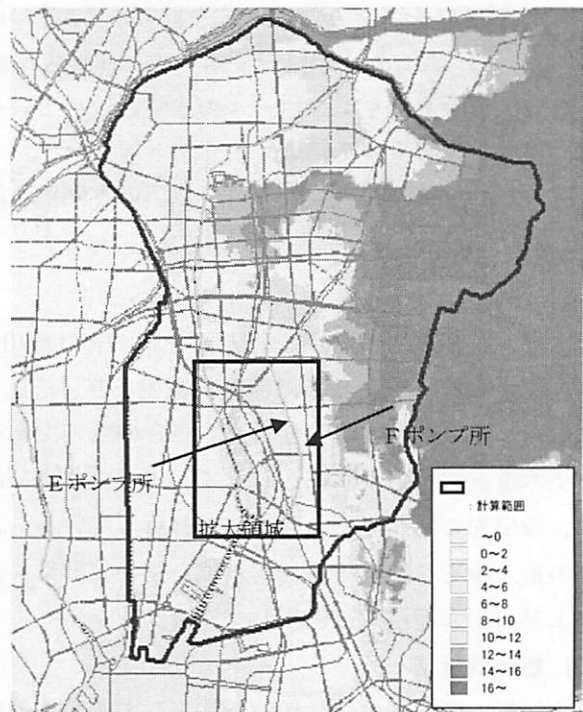


図-10 計算領域

表-1 計算条件

計算格子	30m×30m(格子数93,633)
地盤高	数値地図50mメッシュ(標高)国土地理院 下水道人孔(マンホール)標本データ
河川	A川、B川、C運河、D河川
下水道	マンホール: 14,894、管渠: 15,625
ポンプ	内水排除ポンプ17箇所、その他ポンプ3箇所
貯留施設	12箇所
地下鉄浸水	2箇所(80,000m ³ 、11,000m ³)
堤防・盛土	鉄道等の盛土を考慮
粗度係数	地表面: 0.067、下水道管渠: 0.013、河川0.030
降雨量	21箇所の観測所よりティーセン分割した10分間実測降雨を各格子に与える。
水位境界条件	A川河口にE港実績潮位を与える。
流量境界条件	C運河、D川はポンプによる排水
計算時間	2000年9月11日2時～9月12日7時
計算時間間隔	氾濫計算: 0.1秒、下水道計算: 0.05秒

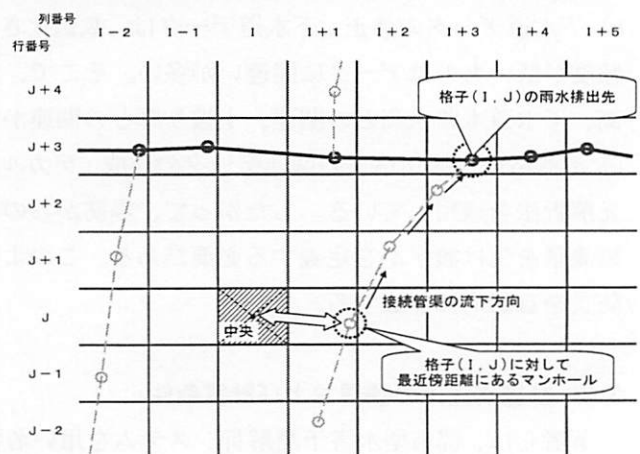


図-11 マンホールに対応する氾濫格子の設定

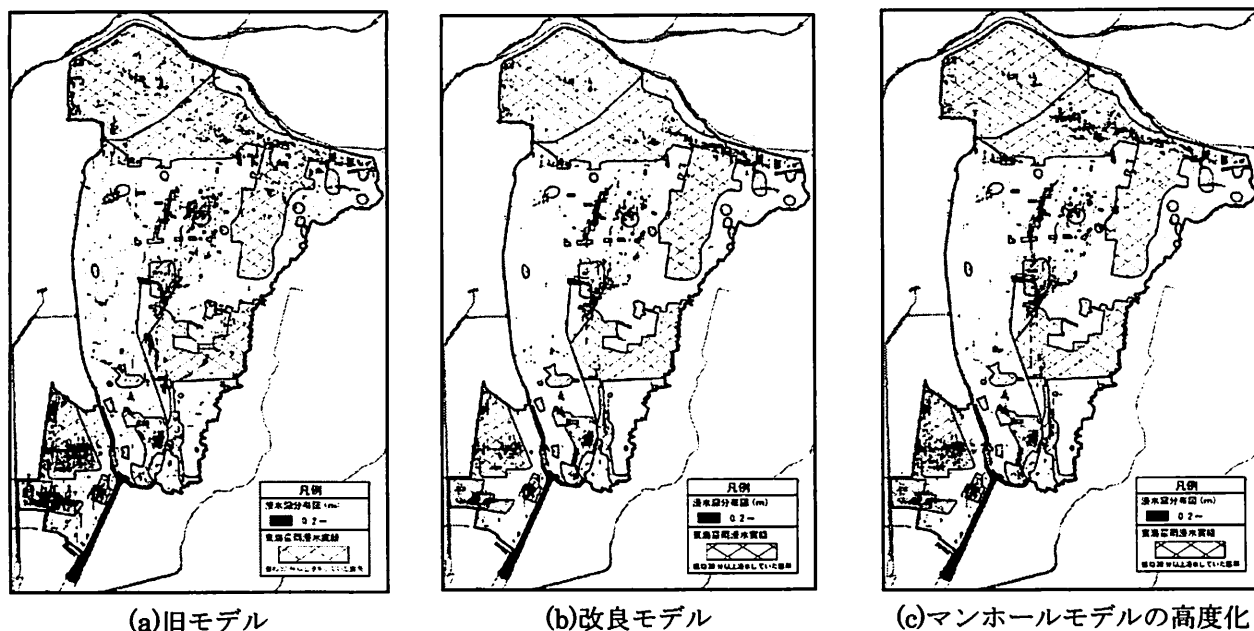


図-12 最大浸水深の分布

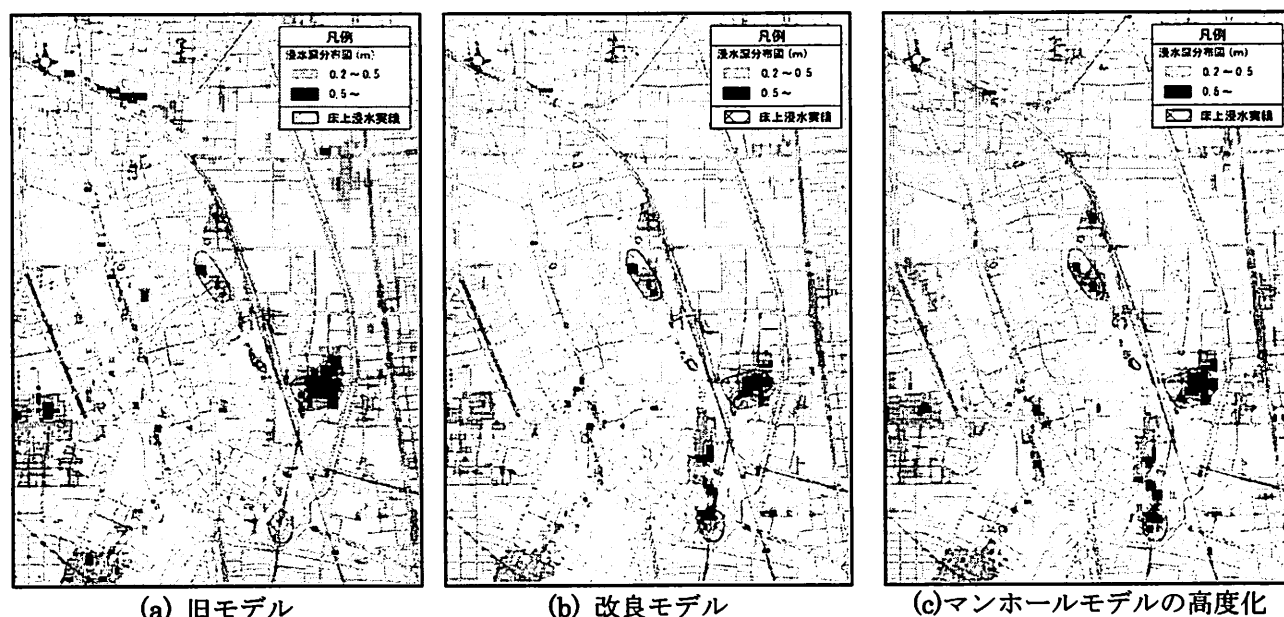


図-13 最大浸水深の分布（拡大領域）

渡した。すなわち、マンホールが無い格子からも送り先のマンホールが満杯にならなければ、最大で $Q_{\max}$ に相当する水量を受け渡し、マンホールが満杯になれば雨水は排出できずに、下水道へは輸送されないこととなる。なお、マンホールに流れ込む領域の設定は、解析に使用していない小さな管径の下水道データを用い、各格子の中央座標に対して最も近い距離のマンホールを求め、そのマンホールを基点として流下方向に接続する下水管およびマンホールを追跡し、解析で使用しているマンホール番号までつなげることで、計算格子とマンホールの対応を設定した。

(2) 計算結果および考察

図-12に旧モデルと改良モデルにおける0.2m以上の最大浸水深の分布を示す。本図から、両者には大きな差が見られないが、改良モデルの方が浸水域が小さく固まって現れている。実績の浸水域と異なるようであるが、実績の浸水域には不確実性が伴うこと、旧モデルの実績に浸水が見られない箇所で浸水が現れている状況が幾分解消されていることから、良い結果と考えている。また、図-13は図-12で示した部分を拡大して最大浸水深の分布を示しており、ここでは床上浸水があった地域も同時に記載している。床上浸水があった

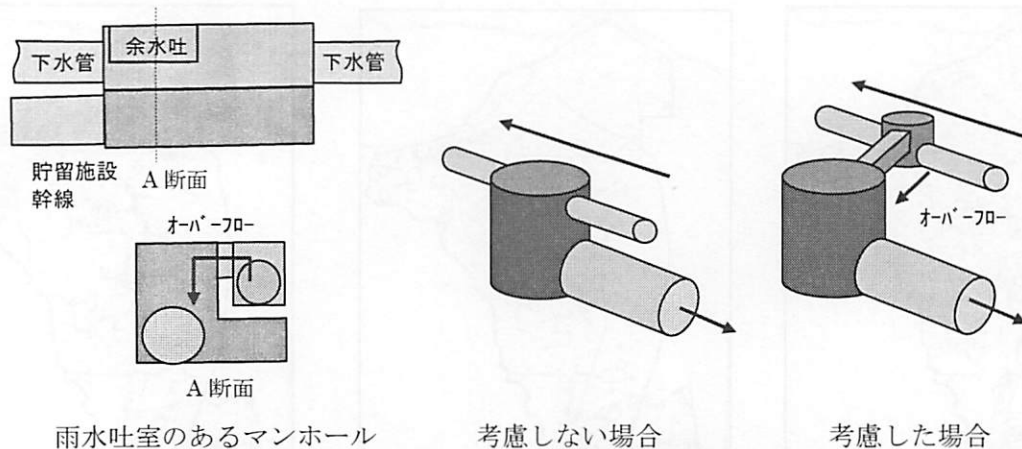


図-14 マンホール内の水輸送モデルの高度化

場所は確実に浸水深が大きい箇所であり、旧モデルよりも改良モデルの方が床上浸水の場所と浸水深の大きい場所が一致していることから、改良モデルの妥当性が示された。

3.5 マンホール内の水輸送モデルの高度化

(1) モデル化の概要

下水道管は複雑に構成されており、図-14 に示すように、マンホール内に余水吐が存在する事例も多い。このような場合、余水吐室を考慮しないと、下水道管を通じて流入した水は、マンホール部の最も低い箇所に位置する下水道管（多くの場合、幹線下水道管か貯留施設へ向かう下水道管）を伝わって流れることとなる。しかし、実際は堰高を越える水位が現れてから初めて最下部に位置する下水道管へと流れるため、実際とは異なる状況となる。本研究で対象とした名古屋市にもこのような複雑なマンホールが多数あり、これらを考慮しない場合には、解析結果に実際との差が現れると考えられる。そこで、図-14 のように余水吐室のあるマンホールを 2 つに分け、その間を仮の管路（断面は越流部の断面を設定、長さは 1m を仮定）でつなげ、約 300 個の余水吐、マンホールの高さや形状などを個々にモデル化し、下水道データを改良することで、複雑なマンホール内の水理現象をモデル化し、マンホールモデルの高度化を行った。

(2) 計算結果および考察

前述した図-12 および図-13 にマンホールモデルの高度化による最大浸水深の分布を(c)として示す。まず、全城の最大浸水深の分布を見れば、(b)に比べ

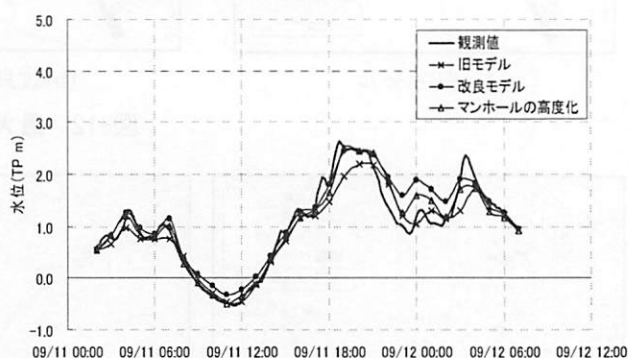
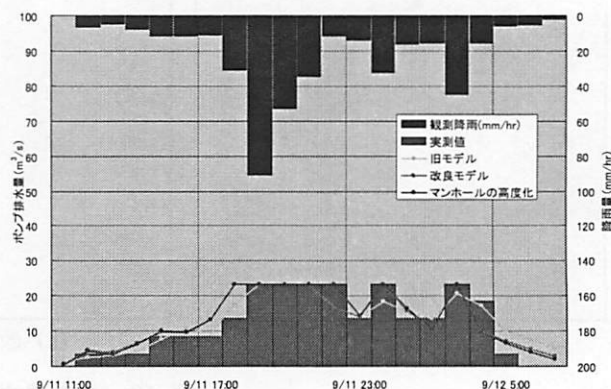
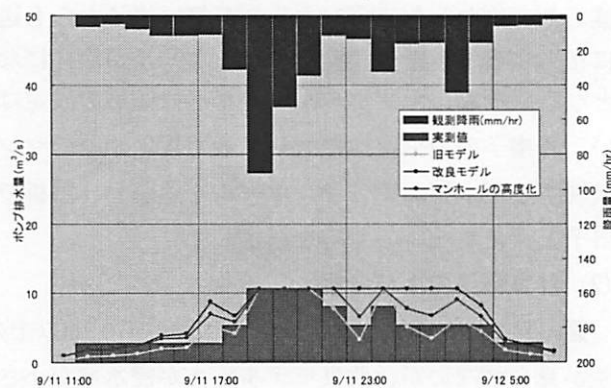


図-15 河川水位（堀川）



E ポンプ場



F ポンプ場

図-16 ポンプの排出流量

て対象領域の北側で大きな違いが現れている。この領域には多数マンホールモデルの高度化が行われており、その結果が現れているものと考えられる。黒丸で示した部分には、地下に大径の下水道（大幸幹線）が存在する。(b)では早くから大幸幹線に水が浸入するため、その上流域で下水道へ流下せず浸水が生じているのに対し、マンホールの高度化を行ったことで、下水道への流下能力が低下し下流側にも浸水が現れている。また、図-13 の床上浸水が生じた箇所を見れば、マンホールモデルを高度化した方が浸水深が大きくなっており、実際に近い結果となっている。

つぎに、堀川の河川水位を図-15 に示す。本図から、河川水位に関しては、マンホールの高度化の影響が明らかに現れており、観測値に近い水位変化を示している。また、本図には、旧モデルの結果も併せて示しているが、旧モデルの結果よりも、改良モデルの結果が実績に近いことが示されており、さらに、マンホールモデルの高度化を施した方が実際に近い値を示している。

図-16 にポンプの排出流量の時間変化を示す。ポンプ場では、流入してきた水を河川に排出し、上限値の流量（水量としては、最大流量×計算時間間隔）のみが決められている。すなわち、上限値以下の水が流入した場合には、そのまま河川へ排出され、上限値以上の水が流入した場合には、上限値の流量が排出される。図-16 には、本研究で取り扱った3つの解析結果が示されているが、すべて同様の傾向を示しており、実績とも類似していることから、すべての解析において管路内を適切に水が流れ、ポンプ場に集積していることが分かる。その中でも、マンホールモデルを高度化したものは特に降雨に対する感度が比較的良好で実際の値と一致している。

図-17 に、改良モデルとマンホールの高度化のモデルにおける、余水吐室を有するマンホールと隣接する幹線下水道の9月11日10時と同日17時の水位を示す。9月11日10時には、改良モデルでは既に幹線下水道内に水位が現れているが、マンホールの高度化を施したモデルでは、堰の効果を受けて水位が現れていない。9月11日17時には共に幹線下水道内水位が現れているが、両者に差が現れている。定量的な妥当性評価は困難であるが、マンホール部の余水吐室の効果としては定性的に妥当であること、河川水位の値と変化が概ね一致したことから、マンホール部の高度化を施したモデルが妥当であるといえる。

3.6 落ち込み流量に関わる上限値の再評価

3.4において落ち込み流量の評価を実施したが、その上限値に関する評価が不十分であった。そこで、計算領域を広げるとともに、河川の粗度係数を0.025として東海豪雨による浸水を再度計算した。落ち込み流量の上限値を50,60,120,250,500,750,1000 (mm/h)と変化させた計算結果の比較を行う。なお、本計算には、流出係数0.9を用いている。図-18に名古屋市の浸水域実績と計算による落ち込み流量500mm/hの場合の最大浸水深の分布を、図-19に堀川景雲橋の河川水位を示す。まず、図-18より名古屋市北部において浸水の相違が見られるものの、計算された浸水深の大きい場所は実績の浸水域に含まれている。また、名古屋市（特に、北部）の浸水実績に不確かなデータが含まれていることも否定できず、このことを含めて考えれば、解

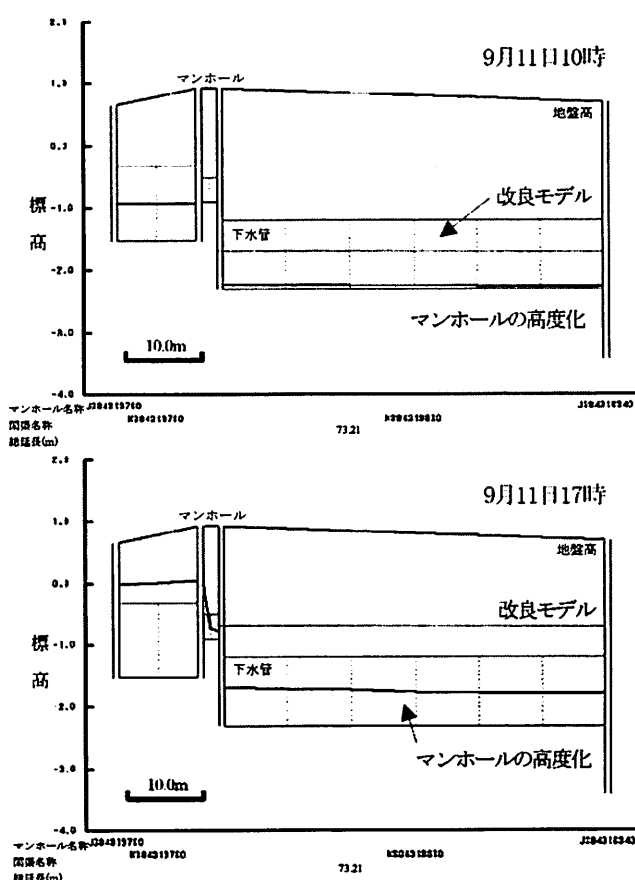


図-17 下水道内の水位

析結果は概ね妥当と判断できる。さらに、落ち込み流量の上限値 50mm/h と 1000mm/h の結果を比較すると、計算領域全体における最大浸水深の差は小さく、浸水状況も類似したものであった。図-19 は各落ち込み流量の上限値における堀川景雲橋の河川水位の時間変化である。本図より、落ち込み流量の上限値 500 mm/h の計算水位が実測水位に最も近い値となった。上限値 50mm/h の計算水位のピークは実測値よりもかなり小さく現れており、500 mm/h 以上の場合、500mm/h の場合と比べて大きな水位変化はないが、ピーク後の水位変化が実測値よりも若干高い値となっている。これらのことから、本計算の場合、落ち込み流量の上限値は 500mm/h が適切である。また、名古屋市では下水道を時間雨量 50mm に対応するように設計しており、図-18 で示されているように、ピーク雨量が 50mm/h（落ち込み流量の上限値の 1/10 の値）以上である東海豪雨によって浸水被害を受けている。このことから、都市域の下水道能力は、氾濫域から下水道システムへの落ち込み能力よりも下水道の流下能力に強く支配されていると推察される。

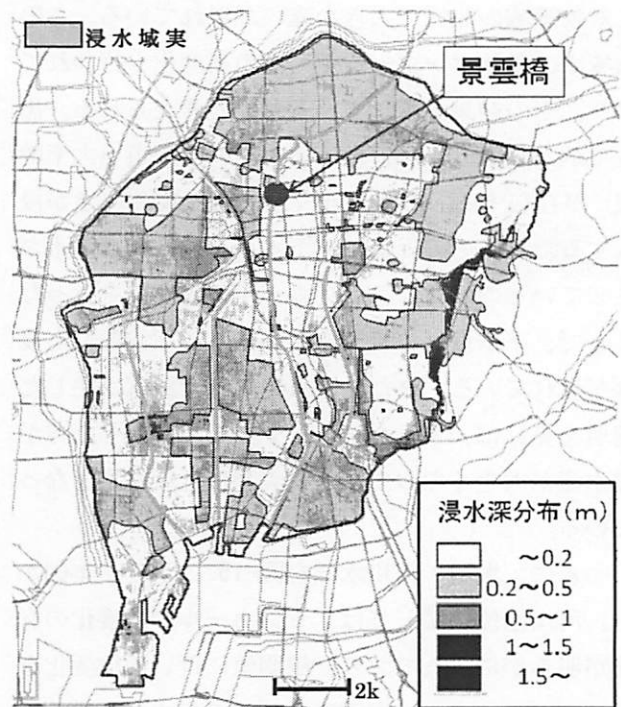


図-18 最大浸水深の分布と氾濫域の実績

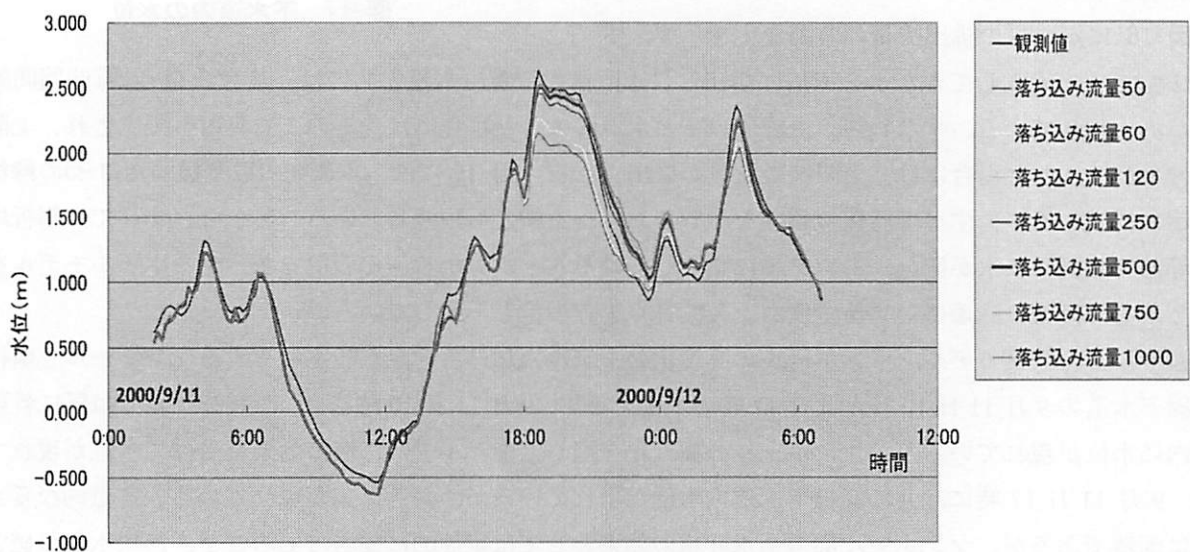
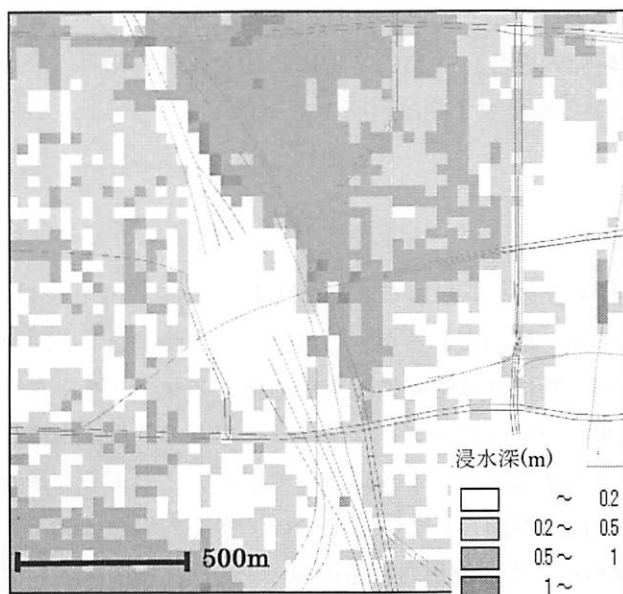


図-19 東海豪雨による堀川景雲橋の水位

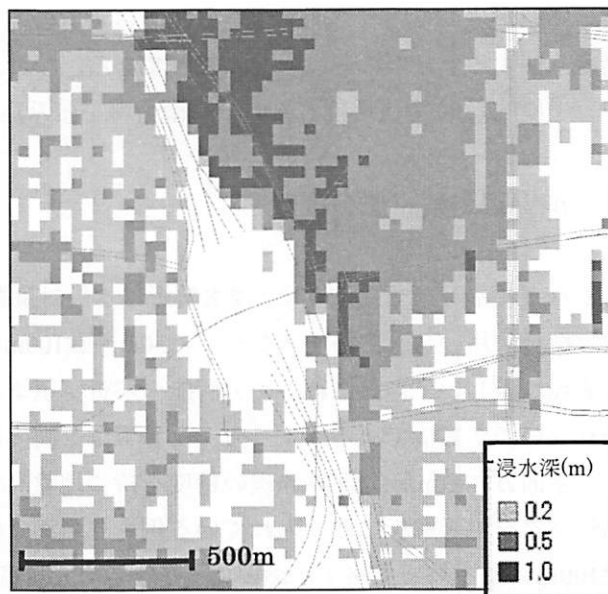
3.7 リアルタイムの浸水予測に関する検討

(1) モデルの概要

3.1で示した都市型水害予測解析システムは、詳細な物理モデルであり解析に多大な時間を要する。しかし、災害発生時にはリアルタイムに、あるいは予測情報として浸水を表現することも求められる。そこで、本研究では、高橋らが開発した簡易浸水予測システム¹⁵⁾を応用し、リアルタイムの浸水予測について検討する。まず、都市型水害予測解析システムの計算結果から、0.2m以上、0.5m以上、1.0m以上の浸水コンター図を作成し、それらを用いて任意の格子の浸水の有無を判断させた。解析に用いた10分間雨量から時間雨量を求め、



都市型水害予測解析システム



簡易浸水予測システム

図-20 最大浸水深の分布（東海豪雨の1.5倍の降雨）

時間最大雨量と格子の0.2m以上、0.5m以上、1.0m以上の浸水の有無との関係を格子毎に学習用データとしてデータベース化し、機械学習の一手法であるSVMで学習した。なお、紙面の都合上、簡易浸水予測システムの詳細は、高橋ら¹⁵⁾を参考にさせていただきたい。

(2) 浸水深および時間雨量のデータベース作成

ここでは、東海豪雨や平成16年度豪雨、平成20年度8月末豪雨の実測雨量を、それぞれ0.5倍、1.0倍、1.5倍、2.0倍、2.5倍とした3×5=15ケースに、東海豪雨の時間雨量が最も大きかった港区と最も小さかった当知の降雨が全域に降った2ケースの合計17ケースを対象とした。また、降雨ピークと潮位ピークが重なるように大潮を想定し、振幅1mの潮位変化を堀川河口に与えた。

使用した入力降雨は10分間雨量であったので、その情報から時間最大雨量を算出した。また、得られた最大浸水深を用いて0.2m以上、0.5m以上、1.0m以上の浸水のコンター図を描いた。これら時間最大雨量と各浸水域を簡易浸水予測システムの基礎資料としている。なお、SVMの学習には東海豪雨の1.5倍の条件を除いた16ケースを使用し、東海豪雨の1.5倍の計算結果は簡易モデルの検証に使用した。

(3) 簡易浸水予測システムの精度評価

ここでは、都市型水害予測解析システムの結果を、簡易浸水予測システムが適切に表現できるかを検討する。東海豪雨の1.5倍の降雨条件に対して、簡易浸水予測システムで予測した。図-20は都市型水害予測解析システムの計算結果との比較を示している。浸水域は概ね適切に表現されており、簡易浸水予測システムが都市型水害予測解析システムと同程度の精度を有していることが分かる。しかし、浸水深に関しては場所に

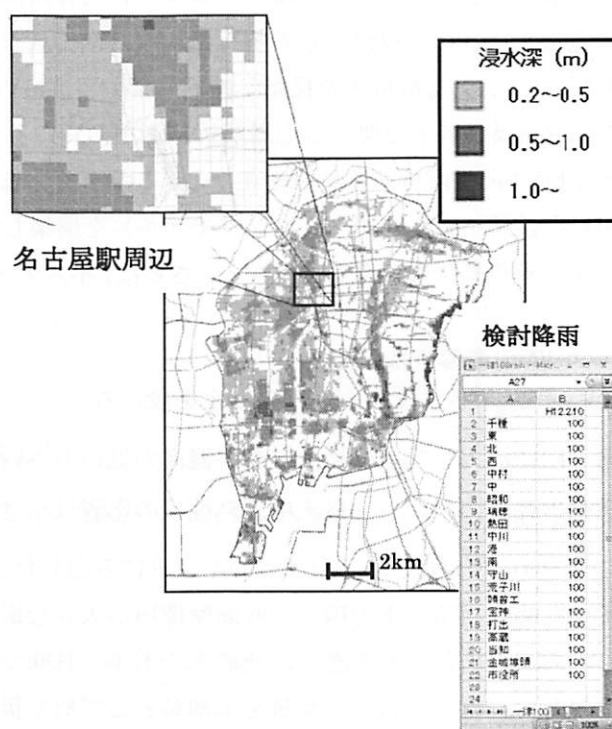


図-21 予測解析（全域に100mm/hの降雨）

よって差が生じており、簡易浸水予測システムの方が高めの値を示している。この簡易浸水予測システムの精度に関する詳細な検討は今後の課題である。なお、本研究の場合、SVMの学習に約10分程度の時間はかかる（一般的なPCを使用）ものの、降雨情報を読み込んでからの浸水予測は瞬時であった。

4. h-VA氾濫解析法の提案

これまで示してきたように、浸水解析は水災対策を検討するツールとして重要な役割を有する。現状では、浸水解析に用いられる格子スケールは50m～数100mのものが一般的であるが、これでは、道路網などの詳細な表現は難しい。さらに細かい分解能の解析が望まれるが、特に計算時間の観点から格子スケールを小さく取れないのが実情であろう。一方、今日では、高度に進歩したレーザープロファイラーなどの測量技術により、平面方向数m毎に数10cm程の精度を持つ地盤高データが整備されるようになってきた。このような地盤高データを氾濫解析に取り入れている例も見られ、精度の向上が図られているものの、多くの場合は50m～数100mの幅を持った格子において、その平均地盤高を求めるために使用されるのみであり、詳細な地盤高データが十分に生かされていない状況にある。詳細な地盤高を直接解析に用いることも考えられるが、そうすると格子幅が数mとなり、計算時間が甚大となる。

格子幅を小さくするという視点ではなく、計算時間を多大とせず、効果的に詳細な地盤高情報を氾濫解析に適用するという視点からの解析法の検討はこれまで実施されてきていないと考える。著者は新たな試みとして、h-VA氾濫解析法を提案し検討している。h-VA氾濫解析法はポンドモデルと同様の概念を用い、それを数10m幅の格子を要する氾濫解析に適用していることに特徴がある。また、格子内の地盤高特性を考慮できるh-VA氾濫解析法の特徴を生かし、これまであまり例がなかった氾濫解析における異なる格子スケールを用いた接続モデル（ネスティングモデル）を構築した。ここでは、h-VA氾濫解析法の概要を示し、計算手順および解析結果の特徴を紹介する。さらに、ネスティングモデルについても、その概要と利点を報告する。

4.1 h-VA 氾濫解析法の概要

h-VA 氾濫解析法では、以下の仮定を設ける。

- A) 格子内に流入した水は格子内の地盤高の低い方へ瞬時に流れ、連続式の未知量は水深ではなく水量とする。
- B) 運動方程式において、移流項、粘性項の影響は小さく省略できると仮定し、流量を未知量とする。

ここで、A)の仮定は、格子を一つのポンドにみなしたことに対応している。また、氾濫水の流れの解析には、簡単のため圧力項（重力項）と底面摩擦項が大きな影響を与えるとみなし、移流項、粘性項を省略した。

これら二つの仮定を考慮し、連続式の本来の意味である「入ってきた正味の流量は氾濫水の体積の時間変化に等しい」という式と、流量を未知量として取り扱った移流項、粘性項を無視した運動方程式を本解析モデルの基礎式とする。図-22の定義位置を意識して展開した

それぞれの式を以下に示す。

$$\frac{\partial V}{\partial t} = (Q_{x1} - Q_{x2}) - (Q_{y1} - Q_{y2}) \quad (24)$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} = -gA_x \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2 Q_x \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (25)$$

$$\frac{\partial Q_y}{\partial t} = -gA_y \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{gn^2 Q_y \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (26)$$

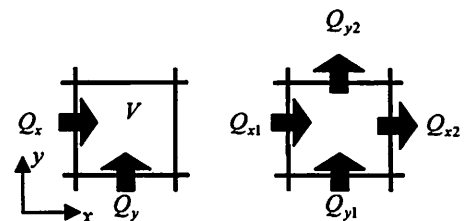


図-22 未知量の設定位置と(24)式の説明

ここで、 V は格子内の水量、 Q_x, Q_y はそれぞれ x, y 方向の流量（ $Q_x = uA_x, Q_y = vA_y$ ）、 A_x, A_y はそれぞれ格子内、 Q_x, Q_y が定義されている箇所の x, y 方向の流水断面積、 H は水位である。

本解析の手順を説明する。解析を行う前に、それぞれの格子内に存在する詳細な地盤高データを用いて、格子内の最低地盤高を基準とした $h-V$ 関係、断面内の最低地盤高を基準とした $h-A_x$ 関係を作成する。計算では、(24)式により格子内の水量が求まり、 $h-V$ 関係を用いてその格子内水量に対応する水深（最低地盤高の水深）を求める。格子内水位を求めて、 Q_x, Q_y 定義位置の水位を求め、最低地盤高を差し引くことで断面内の最大水深を求める。

$h-A_x$ 関係、 $h-A_y$ 関係を用いてその水深に対応する流水断面積を求める。(25)式と(26)式により流量を求める。得られた値を既知の値に置き換えて、(24)式の計算へと繰り返される。本計算手法は、解析結果の格子内最大水深から水位を求め、格子内で水位が一定であると仮定して、地盤高を引くことにより、詳細な浸水深を求めることが出来る。

ここで、図-23にh-VA氾濫解析法の特徴の概念図を示す。黒色で示されたラインは従来の氾濫解析モデルの概念であり、赤色で示されたラインはh-VA氾濫解析モデルの概念である。格子スケールが非常に小さい場合（図中①）には、移流の効果を無視していることから、h-VA氾濫解析モデルは従来の氾濫解析モデルよりも精度が悪いものと考えられるが、格子スケールが大きく流れも比較的緩やかでh-VA氾濫解析法の仮定が成り立つようであれば（図中②）、従来の氾濫解析モデルは平均水深×格子面積で氾濫水を表現していることから、格子内の地盤高形状を考慮しているh-VA氾濫解析モデルの精度は上がるものと考えられる。なお、格子がさらに大きくなり、格子内に複数の窪みが存在する場合には、解析精度が低下する可能性がある（図中③-1）。移流の効果が影響を与える格子スケールや流れの条件、採用できる最大の格子スケールなどの検討が必要ではあるが、数10m規模の格子スケールでは、概ね図中②の範囲にあると考えている。つぎに、計算時間をみてみれば、各格子における $h-V$ 関数、各辺における $h-A$ 関数を用いていることから、従来の氾濫解析モデルに比べると計算時間が多くなるが、例えば、図中Aの精度を有する格子スケールのh-VA氾濫解析モデルの計算時間（図中a）と同精度の従来の氾濫解析モデル（図中B）の計算時間（図中b）を比べれば、明らかにh-VA氾濫解析モデルは計算時間が短くなる。すなわち、ここで用いた仮定が成り立つ状況（図中②）では、工学的見地からh-VA氾濫解析モデルが有効である。

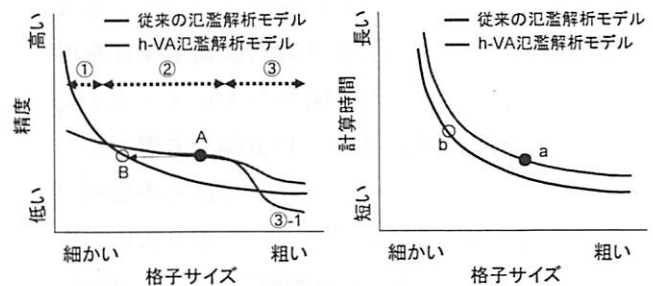


図-23 h-VA 氾濫解析法の特徴

4.2 氾濫解析におけるネスティングモデル

(1) 氾濫解析におけるネスティングモデルの問題点

津波や高潮の解析では、外洋から沿岸域までを格子スケールの異なる領域で表現し、その領域間の物理量を受け渡して、解析を実施する接続モデル（ネスティングモデル）が用いられている。一方、氾濫解析では有限要素法や非構造格子を用いた格子幅を任意に変化できるモデルは別として、矩形格子を接続させるネスティングモデルが開発されていない。

ここで、従来の氾濫解析法における格子接続の課題を検討するため、接続を行う場合の断面の様子を図-24に示す。まず、大格子では、水量を格子面積×格子内の平均水深で表現していることから、図-24(a)に示すように氾濫水の挙動に大きな影響を与える水位を適切

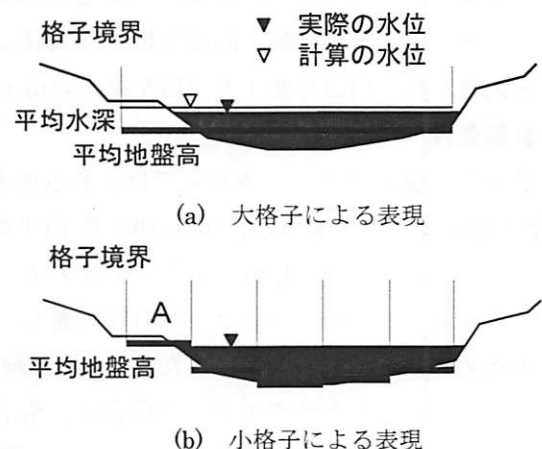


図-24 氾濫解析におけるネスティングモデルの問題点

に表現できない。さらに、接続箇所において、水量を大格子から小格子へ受け渡す場合、何も条件を用いなければ、浸水が生じない図中の A 格子へ水を受け渡すこととなる。仮に水位と地盤高を考慮して、水を受け渡さないとしても、大格子ではその場所で流出していると思なしていることから取り扱いの不一致が生じる。一方、h-VA 氾濫解析法では、格子内の地盤高を考慮した解析を行っていることから、水位が適切に求められる。さらに、接続箇所の A 格子に水量を与えなくても、大格子における計算でもその場所では水が流れていないと考えているため矛盾が生じない。

(2) ネスティングモデルの概要

大領域に h-VA 氾濫解析法を適用し、小領域に従来の氾濫解析法（従来モデルとする）を適用し、その間を接続させるネスティングモデルを開発した。比較のために両領域に従来モデルを適用した場合も開発した。

ネスティングモデルの概要を図-25 に示し、以下に接続 1 と接続 2 について説明する。

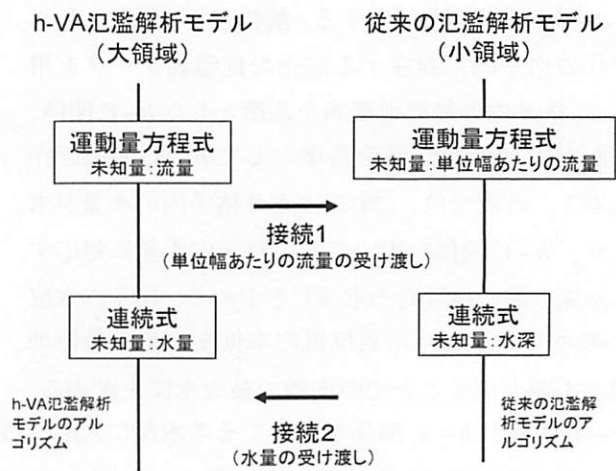


図-25 ネスティングモデルの概要

表-2 計算条件

	解析モデル		備考
CASE 1	従来モデル		格子幅 10m
CASE 2	h-VA 氾濫解析法		格子幅 50m
	広領域(格子幅50m)	狭領域(格子幅10m)	
CASE 3	h-VA 氾濫解析法	従来モデル	ネスティングモデル
CASE 4	従来モデル	従来モデル	ネスティングモデル

接続 1：運動方程式を計算した後で、大領域から小領域へ単位幅流量を受け渡す。まず、大領域の流量受け渡し断面の水位と小領域の地盤高から水深を求める。大領域の流量を小領域の流量に配分する場合には、マニング則を用い、水深の 5/3 乗をその配分に用いた。得られた小領域の格子の流量を格子幅で割って単位幅流量を求めた。

接続 2：連続式を計算した後で、小領域から大領域へ水量を受け渡す。大領域の格子内に存在する小領域の格子の水量を総和し、大領域の格子の水量とした。

両方の領域に従来モデルを適用した場合も、同様の接続法を用いている。大領域の単位幅流量に格子幅を掛けて流量を求め接続 1 を行い、大領域の格子内に存在する小領域の格子の水量を総和したものを大領域の格子面積で除することによって大領域の格子の水深を求めた。

本検討では、次の 2 つの取り扱いを行った。

ケース A：破堤箇所近くの領域は、氾濫水の流動が非常に激しく、詳細な水深、流速分布の解析が要求されることから、その地域を詳細な格子で表現し、破堤箇所から離れた場所では粗い格子で表現する。

ケース B：特に検討を要する領域を細かい格子で表現し、その周りは粗い格子で表現する。

(3) 計算条件

計算条件を表-2 に示す。本研究では、名古屋市内の下水道処理区を対象に破堤の条件を用いて検討した。5m 毎の地盤高データを用い、10m×10m 格子(平均地盤高、格子数：357 個×550 個)を用いた従来モデルと、ネスティングモデルとの比較を行う。ネスティングモデルは、広領域（50m×50m 格子）と狭領域（10m×10m 格子）を配置し、ケース A とケース B を考慮し、図-26 に示す 2 タイプの領域設定を行っている。さらに、比較のために、広領域を対象とした h-VA 氾濫解析モデルによる解析も実施している。なお、すべての領域を粗い格子で設定した従来モデルの場合は、格子スケールによる誤差が全領域において現れることが明白なため、この検討においては対象としていない。図-26 に示した破堤箇所では図-27 の流入流量を想定し、6 時間後までを計算対象とした。なお、粗度係数の値として 0.067 を用いた。本研究では、格子スケールが全てにおいて小さい CASE 1 の結果を真値とみなしている。

(4) 計算結果および考察

ここでは紙面の都合上、ケース A のみを紹介する。最大浸水深の分布を図-28 に示す。CASE 1 の結果から、道路に沿った浸水の様子がみてとれる。CASE 2 の結果からは、格子幅が 50m であるが h-VA 汎濫解析法を用いていることから、詳細な浸水情報が得られていることが分かる。ただし、図中赤枠の北西部では CASE 1 よりも浸水深が小さく計算されている。CASE 3 では、ほぼ CASE 1 と同様の最大浸水深が得られている。そして、CASE 4 では狭領域では詳細な浸水の様子が計算できているが、広領域では格子スケールが粗いため、当然ではあるが CASE 1 よりも粗く計算が行われている。図-26 の CASE 1 図の赤丸で示した 8 地点における浸水深の時間変化を図-29 に示す。破堤箇所近傍 (①、②) では、CASE 2 の結果はその他の結果と比べて浸水が遅く現れており、浸水深のピークも小さくなっている。破堤箇所から離れた場所では、それぞれの結果に大きな差がなくなっているが、広領域において従来モデルを用いている CASE 4 は、浸水深の差が現れている。一方、大きな格子幅を持つ CASE 2 では、h-VA 汎濫解析法を用いていることから CASE 1 と同様の結果が得られている。CASE 3 の結果が CASE 1 の結果とほぼ同一であったことから、破堤箇所を詳細に取り扱ったネスティングモデルの妥当性が示された。なお、図-29 を詳しく見てみれば、特に⑤と⑧では CASE 1 と CASE 3 においても浸水の時間的な始まりに両者の違いが現れている。大きな格子スケールの場合、抵抗を十分に表現できていないことが考えられ、これは今後検討すべき課題であろう。

破堤箇所近傍の流れを詳細に検討するため、CASE 1 と CASE 2 における浸水深の時間的な広がりの様子を図-30 に示す。本図から、CASE 1 では北西部に向かう浸水がみられるのに対し、CASE 2 ではそういった浸水の様子はみられず、30 分以降に北西部に浸水が広がっていることが分かる。本計算では、同じ距離の破堤箇所において図-27 の流量を与えている。CASE 1 の場合には、破堤箇所の格子の地盤高が高くてもそこに流量を与えているが、CASE 2 の場合には、h-VA 汎濫解析法を適用していることから、格子内の低い箇所まで水が流れる。すなわち、解析法の特性によって、境界条件として与える流量の位置が異なることとなり、高い地盤高を持つ格子に流量が与えられた CASE 1 は早く北西部への浸水が始まり、一方、CASE 2 は破堤箇所北部の線形構造物の影響で計算の初期に

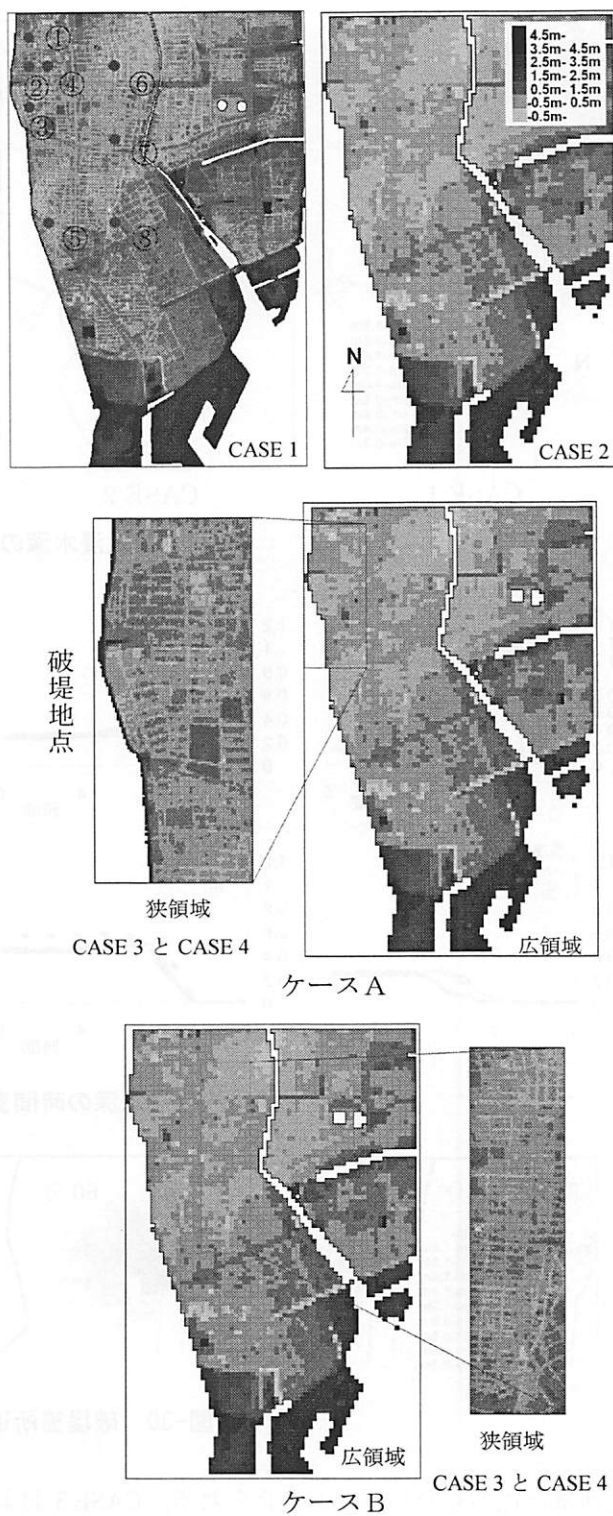


図-26 計算領域

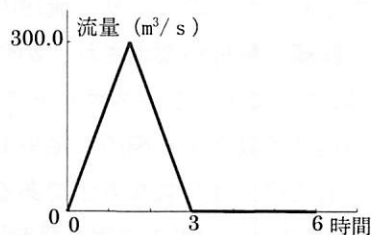


図-27 破堤箇所の流入流量

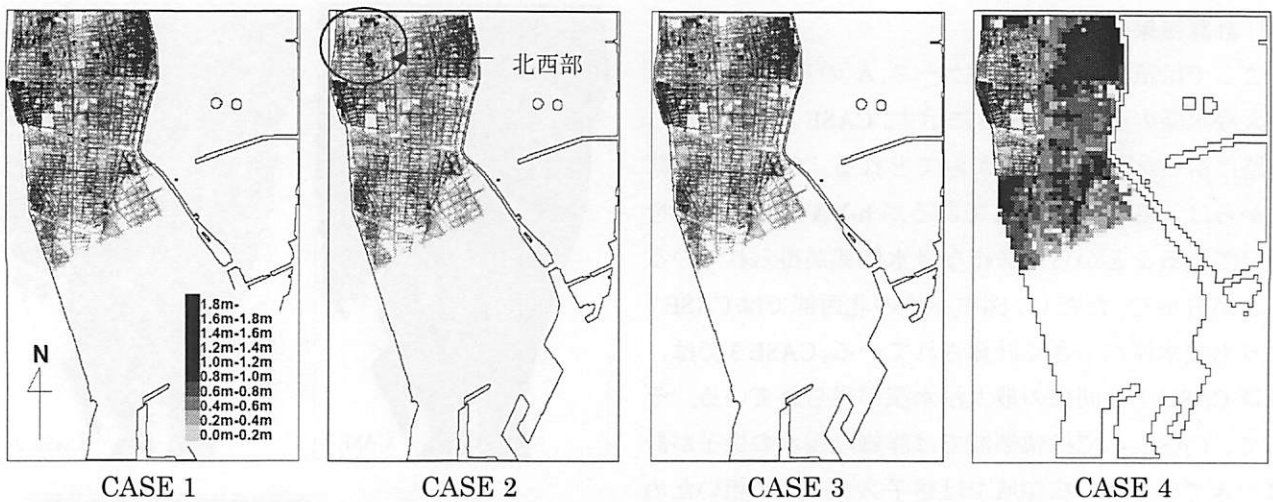


図-28 最大浸水深の分布（ケース A の場合）

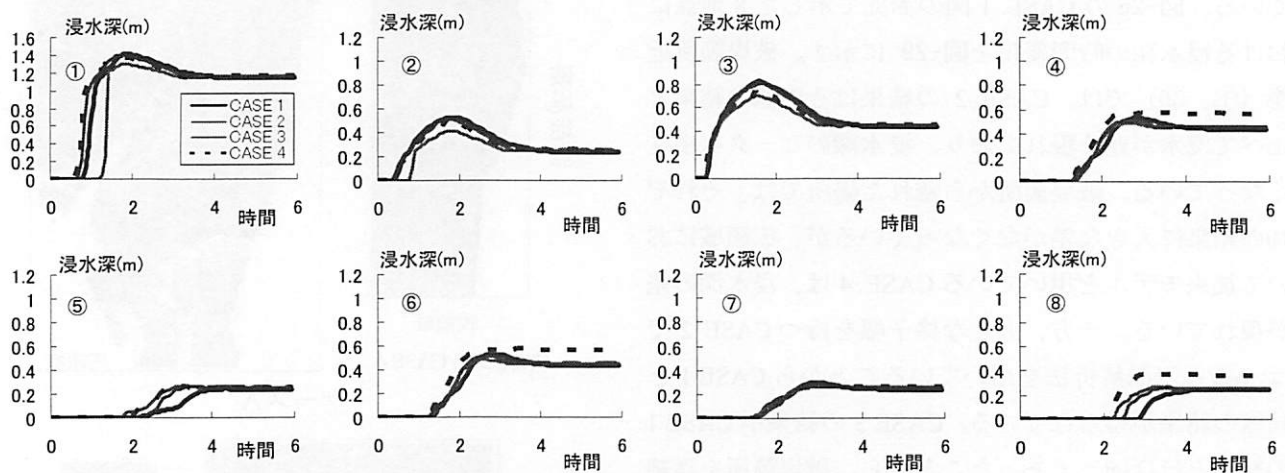


図-29 浸水深の時間変化（ケース A の場合）

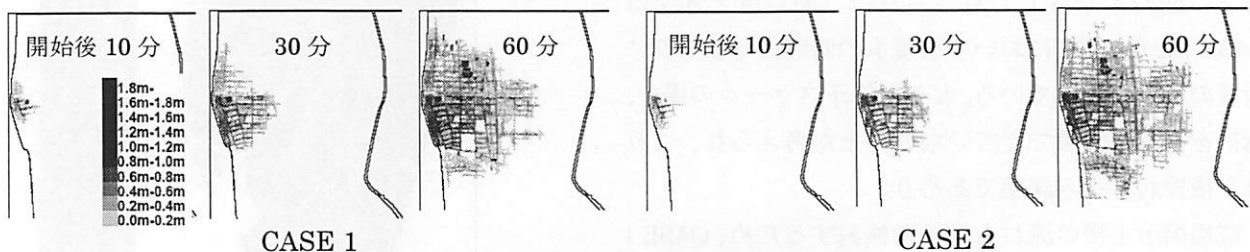


図-30 破堤箇所近傍の浸水深の広がり

北西部へ広がらなかったと考えられる。CASE 3 および CASE 4 は、破堤箇所近傍の狭領域に 10m 格子および従来モデルを用いていることから、CASE 1 と同様の浸水域の時間変化を示した。

狭領域を設定する一つの目的に、流速分布および流体力の評価がある。h-VA 氾濫解析法は浸水深の評価に重点を置いたものであり、流速の表現には曖昧さが残る。したがって、構造物に対する影響など、流速を含めた詳細な解析が要求され、かつ詳細な格子で全計算領域を解析するには膨大な計算時間が必要となる場合には、ここで示したネスティングモデルが有効であり、粗い格子で設定できる箇所は h-VA 氾濫解析法で、細かい格子で設定する箇所は従来モデルあるいは更に高度なモデルを用いるなど、適宜モデルを組み合わせることも実務では有益な方法であると考えられる。最後に、h-VA 氾濫解析法のメリットである計算時間について、CASE 1 と CASE 3 の実計算時間は 3.5 時間と 0.6 時間であった。これにより、大きな時間短縮が図られていることも示された。

5. おわりに

ここでは、浸水解析の概説を目的として、以下の項目および事例を紹介した。

第2章では、質量保存の観点からの氾濫解析の特徴を示した。この知見（理論）はオーソライズされたものではなく、特に、非定常性の強い氾濫水の解析に定常流であるマニング則を適用し、エネルギー勾配＝動水勾配（水面勾配）とするなど、強引な仮定が含まれている。しかし、得られた結果には、氾濫解析には安定に解析が行える条件でも質量誤差が含まれる条件が存在するなどの重要な知見が示されており、これは、氾濫解析に携わった多くの研究者において経験的にも納得できる知見と考える。

第3章では、都市域の浸水解析の一例を示し、そこで使用されている基礎方程式および種々の水理量の受け渡し法を記述した。特に、内水氾濫解析では、浸水域と下水道システムとの水の受け渡しが一つの境界条件となるため、適切に設定する必要がある。本研究の場合、マンホールが受け持つ集水域を設定し、格子の落ち込み流量の上限値以下の水理量は先のマンホールが一杯になるまで輸送するという単純なモデル化とした。著者の旧モデルでは、マンホール部で水の受け渡しを行っていたが、取り扱ったマンホールのみでは実在するすべての流入現象を表現できないと判断した。水理学的に適切なモデル化を行ったとしても、取り扱う下水道データや側溝などの情報量によって、浸水域と下水道の流入・流出現象が十分に表現できない場合も考えられる。さらに、解析結果の活用例として、機械学習の手法であるSVMを用いた簡易浸水予測システムを示した。詳細な物理モデルは治水施設の影響も適切に表現できるが、多大な計算時間のため避難や水防活動などの実時間（予測）的対策への適用が難しい。しかし、避難対策は今後の治水対策の重要なポイントであり、避難対策を支援する情報提供およびツールは今後益々重要となる。災害の直前または時中の対策では、情報の精度と共に情報提供の即時性が重要である。精度に関する検討を進める必要はあるが、浸水予測に時間がかからない簡易浸水予測システムは、リアルタイムの浸水対策の有効なツールになり得る。

第4章では、都市浸水解析の精緻性への検討事例を示した。浸水解析の要望は年々高まっており、解析範囲もより広域となっている。狭い範囲の解析であれば、数m～10m程度の格子サイズを用いた解析が可能であるがその場合には境界条件が問題となる。一方、広域の解析であれば50m程度の格子サイズを用いて浸水解析が実施されているが、都市構造物が十分に表現できない。また、計算格子内には水が充満していることを前提として水理解析が実施されるが、都市の浸水解析では、そのような前提条件が崩れている。そこで、一つの例として、著者らが提案しているh-VA氾濫解析を示した。この方法は一般的な氾濫解析ツールを基にして比較的容易に精度向上ができ、計算時間の観点からも効果的な方法と考える。

都市域の浸水解析により、豪雨による浸水現象の把握などが可能となった。しかし、道路には歩道や縁石があり、ひとつの道路内で浸水の現象は多様である。避難対策に使用する場合には、そういった人の移動に直接的に関与する道路の詳細な浸水現象が重要であり、浸水による交通問題や地下浸水もローカルな浸水評価が非常に重要となる。したがって、今後の都市域の浸水対策において、そのような詳細な水理現象の把握が大事なテーマになる。さらに、1. で紹介したように現在では総合治水対策の下で各種治水対策が実施されている。近年、大規模な浸水災害が減り、過去に浸水災害が頻繁に発生していた低平地にも人が住むようになった。これにより、都市における潜在的な水害ポテンシャルは増大していると言える。一方で、地球温暖化による気候変動が懸念され、既往最大の降雨や河川高水位なども記録されるようになった。そのような災害に対して、構造的対策で守り切れない災害には、避難などのソフト的対策を大いに活用する政策が採られている。ここで、主にハザードマップの作成や費用便益評価のための浸水解析の使用から一歩踏み込んで、浸水の都市内の流水制御（例えば、陸上の構造物による浸水の誘導）を目的とした浸水解析の使用を検討することも、きわめて重要といえる。このような目的のためには、今後、浸水解析が益々重要になってくるものとする。

参考文献

- 1) 岩佐義朗, 井上和也, 水鳥雅文: 氾濫水の水理の数値解析法, 京都大学防災研究所年報, 第23号b-2, pp. 305-317, 1980.
- 2) 水理公式集, 土木学会水理委員会, 丸善, pp. 125-133, 1999.
- 3) 例えば, 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 –, 土研資料第3400 号, 1996.
- 4) 相良亮輔, 錦織俊之, 井上和也, 戸田圭一: 枝線下水道を考慮した市街地氾濫解析, 水工学論文集, 第48巻, pp589-594, 2004.
- 5) 川池健司, 井上和也, 林秀樹, 戸田圭一: 都市域の氾濫解析モデルの開発, 土木学会論文集No. 698/II-58, 1-10, 2002.
- 6) 川池健司, 井上和也, 戸田圭一, 野口正人: 寝屋川流域を対象とした氾濫解析モデルの高度化, 水工学論文集, 第47巻, pp. 919-925, 2003.
- 7) 関根正人, 河上展久: 都市における内水氾濫と地下街浸水の被害予測に関わる数値解析, 水工学論文集, 第47巻, pp889-894, 2003.
- 8) 関根正人, 本山量啓: 地下浸水時の避難誘導に関する数値解析, 水工学論文集, 第52巻, pp. 847-852, 2008.
- 9) 秋山壽一郎, 重枝未玲, 草野浩之: 都市域浸水・減災対策検討シミュレータによる飯塚市街地の浸水被害評価, 土木学会論文集B1 (水工学), Vol. 68, No. 4, I_1063-I_1068, 2012.
- 10) 井上知美, 川中龍児, 石垣泰輔, 尾崎平, 戸田圭一: 内水氾濫による大規模地下街の浸水過程と避難の安全性に関する検討, 水工学論文集, 第55巻, pp. 973-978, 2011.
- 11) 渡辺政広, 江藤剛治, 室田明: 取付管の調圧効果を考慮した下水道管網内の遷移流計算法, 土木学会論文集, 第411号 II-12, 1989.
- 12) 武田 誠, 松尾直規, 井上和也: 質量保存を考慮した氾濫解析の修正に関する検討, 土木学会第58回年次学術講演会, II-68, 2003.
- 13) 松尾直規, 武田誠: 都市域における氾濫解析システムの適用と下水道流入モデルに関する検討, 河川技術論文集第12巻, pp.97-102, 2006.
- 14) 武田誠, 山中威士, 霧生元道, 松尾直規: 都市内水氾濫解析における複雑な下水道管網のモデル化に関する検討, 河川技術論文集第15巻, pp.393-398, 2009.
- 15) 高橋俊彦, 平山康典, 天野玲子, 武田誠, 松尾直規: 浸水実績・降雨記録を用いた機械学習に基づく簡易浸水予測システム, 水工学論文集55巻, pp.937-942, 2011.
- 16) 武田 誠・高橋俊彦・長尾佳幸・平山康典・松尾直規: 都市域の内水氾濫モデルの検討と浸水時対策への応用について, 土木学会論文集B1 (水工学) Vol. 68, NO. 4, I_1015-I_1020, 2012.
- 17) 武田誠, 小寺大輔, 松尾直規: 格子内の地盤高特性を考慮した簡便な氾濫解析法に関する研究, 水工学論文集, 第52巻, pp.853~pp.858, 2008.
- 18) 武田誠, 松尾直規, ポカレルパラメソル: h-VA氾濫解析法を用いたネスティングモデルに関する検討, 水工学論文集 第53巻, pp.835~840, 2009.
- 19) 武田誠, 松尾直規: 下水道解析を考慮したh-VA氾濫解析モデルに関する検討, 水工学論文集 54巻, pp.895-900, 2010.