

都市域における浸水氾濫解析に関する基礎的研究 MODELING OF FLOODING PHENOMENON IN URBANIZED AREA

平井真砂郎*・道上正規**・檜谷治***

By Masaro HIRAI, Masanori MICHIE and Osamu HINOKIDANI

The urbanized areas in Japan have been subjected to the danger of inundation due to these location of the alluvial lowlands formed by flooding. Further, in recent years, the inundated areas have been increased by the rapid urbanization, in spite of the fact that the drainage system has been completely equipped for the established design level. In this paper, flooding model for urbanized area is proposed when the flood will exceed a design level. To put it concretely, Two-dimensional and One-dimensional approach are presented to analyze for the complicated flow condition mixing the sub-critical flow and the super-critical flow. The applicability of these models is explained by numerical study

Keywords Flooding in urbanized area, Flooding analysis, Numerical simulation

1. はじめに

わが国の多くの都市は、大河川の下流部の低平地に位置しており、流域の形成に係わる歴史的過程から、極めて災害を受けやすいという自然的特性を有している。現在、都市域の雨水排除を担う中小河川や下水道の整備は概ね1時間当たり50ミリの降雨に対処できるように整備が進められている。一方、近年の著しい都市化の影響により不浸透域は拡大し、雨水流出量の増大や流量波形の先鋭化を招いており、さらには、ヒートアイランド現象に関連したゲリラ的集中豪雨の発生も顕著となっている。こうした状況にあつて、都市域での浸水被害、特に内水氾濫被害が増大している¹⁾。稠密な土地利用、社会経済機能・資産の集積している都市域においては、一旦こうした浸水氾濫が発生した場合の被害は非常に大きいと言える。そのため、都市域の雨水処理に関連する施設を限られた都市空間の中で効率的に配置し、それらの段階的な整備方針を明確にして雨水排水システムの再構築を図っていく必要がある。そうした段階的な施設整備の中にあつては、超過洪水による氾濫が生じた場合でも極力被害の発生を抑制できるような都市構造にしていけることも重要である²⁾。本稿は、既存排水施設的能力を超えた超過降雨が発生した場合の都市域における地表氾濫流解析について、平面2次元アプローチと都市内道路網を対象とした1次元ネットワーク氾濫モデルについて提案する。

* 正会員 工修 株式会社 日水コン環境事業部

(〒163-11 東京都新宿区西新宿 6-22-1 新宿スクエアタワー)

** 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科 (〒680 鳥取市湖山町南 4-101)

*** 正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部土木工学科 (〒680 鳥取市湖山町南 4-101)

2. 都市域における氾濫現象とモデル化の視点

近年、都市域においては内水被害が増大している。内水氾濫は、外水位の上昇に伴って内水地域内の排水不良となりマンホールから雨水が吹き上げたり、ポンプの運転調整等により排水できない雨水が地域内に湛水したりして生ずる。こうした氾濫の場合は、下水道等の排水施設の能力不足の箇所や河川水位の影響を受けやすいところなどから溢水してくるため、水流の勢いは外水氾濫に比較して弱く破壊力は小さいが、ほとんど同時に複数の地点から溢水が生じはじめるという特徴を有する。また、溢水箇所は地域内の各所に発生し、氾濫した水は主として道路上を流下して次第に低地部に湛水していくことになり、流下途中の氾濫水の水深や流速によっては非常に多くの交通量を有する都市部にあっては交通障害等の原因となる可能性がある。また、都市域の地形をみると、概ね平坦であるが、局所的に地形勾配が急であったり、周辺に比較して窪地になっているところがある。浸水被害の多くは、そうした地形勾配の変化点（急勾配から緩勾配）や局所的な窪地で生じることが多い。また、谷底低地によくみられる急傾斜地では水深は小さいものの流速が大きいことから足を取られて負傷するといったような人的被害の発生も想定される。したがって、都市域における氾濫実態に整合した解析を行うにあたっては、ある程度都市域内の微地形に配慮する必要があり、常流・射流状態の混在した複雑な流況が解析できることが必要となる。

以上のような点を考慮して、本研究では都市域における氾濫現象、特に内水氾濫を解析するための手法として下記の2つの手法を提示する。

①平面2次元氾濫解析モデル

②道路網を対象とした1次元ネットワーク氾濫解析モデル

①の平面2次元モデルは、基本的には従来から数多く研究・開発されている氾濫解析モデルと相違ないが、都市域内の微地形を考慮した場合に生ずる可能性のある常流・射流混在した流況においても安定的に解析が可能となるような数値解析手法を提示する。②の1次元ネットワークモデルは、都市内の氾濫水は道路に集中して流れることを考慮して、道路網を水路と想定した1次元解析手法であり、この場合も①のモデルと同様に常流・射流が混在した状況を解析できるような数値解析手法を提示する。

3. 地表氾濫解析モデル

3. 1 平面2次元地表氾濫モデル

氾濫場を平面2次元として解析している例としては、岩佐・井上・水島³⁾、中川⁴⁾、福岡・松永⁵⁾などが挙げられる。本研究では、都市市街地内の道路の影響ならびに微地形に起因する常流・射流が混在した複雑な流れを解析することから、精度ならびに安定性の面で優れる MacCormack 法⁶⁾による差分モデルを適用する。

(a) 流れの基礎式

支配方程式として、次に示す二次元浅水流モデルに対する連続式および運動方程式を用いた。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} = C \quad (1)$$

ここに、

$$U = \begin{pmatrix} h \\ uh \\ vh \end{pmatrix}, E = \begin{pmatrix} uh \\ u^2h + \frac{1}{2}gh^2 \\ uvh \end{pmatrix}, F = \begin{pmatrix} vh \\ uvh \\ v^2h + \frac{1}{2}gh^2 \end{pmatrix}, C = \begin{pmatrix} q \\ gh(S_{0x} - S_{fx}) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \varepsilon \frac{\partial(uh)}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \varepsilon \frac{\partial(uh)}{\partial y} \right\} \\ gh(S_{0y} - S_{fy}) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \varepsilon \frac{\partial(vh)}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \varepsilon \frac{\partial(vh)}{\partial y} \right\} \end{pmatrix}$$

$$S_{\hat{x}} = \frac{n^2 u \sqrt{(u^2 + v^2)}}{h^{4/3}}, S_{\hat{y}} = \frac{n^2 v \sqrt{(u^2 + v^2)}}{h^{4/3}}, S_{0x} = -\frac{\partial z}{\partial x}, S_{0y} = -\frac{\partial z}{\partial y}$$

h : 水深、 u, v : x, y 方向の水深平均流速、 g : 重力加速度、 $S_{\alpha x}, S_{\alpha y}$: x, y 方向水路勾配、 $S_{\hat{x}}, S_{\hat{y}}$: x, y 方向の底面摩擦勾配、 ε : 水平方向の渦動粘性係数、 n : マニングの粗度係数、 q : 横流入量

(b) MacCormack 法による基礎式の差分化

MacCormack 法 (以下、MC 法と略す) は、時間 step 毎に粗い近似 (予測子段階) とその修正 (修正子段階) を繰り返す時間依存差分法の一つである。この手法は時間・空間方向に二次の精度を持ち、跳水を含む計算や段波などの計算においても安定に解析できる。MC 法による差分式は下記のとおりとなる。

[予測子段階]

$$U_{i,j}^p = U_{i,j}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left\{ (E_{i,j}^n - E_{i-1,j}^n) - (Q_{x,i,j}^n - Q_{x,i-1,j}^n) \right\} - \frac{\Delta t}{\Delta y} \left\{ (F_{i,j}^n - F_{i,j-1}^n) - (Q_{y,i,j}^n - Q_{y,i,j-1}^n) \right\} + \Delta t C_{i,j}^n \quad (2)$$

[修正子段階]

$$U_{i,j}^{n+1} = \frac{1}{2} (U_{i,j}^n + U_{i,j}^p) - \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{\Delta x} \left\{ (E_{i+1,j}^p - E_{i,j}^p) + (Q_{x,i+1,j}^p - Q_{x,i,j}^p) \right\} - \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{\Delta y} \left\{ (F_{i,j+1}^p - F_{i,j}^p) + (Q_{y,i,j+1}^p - Q_{y,i,j}^p) \right\} + \frac{\Delta t}{2} C_{i,j}^p \quad (3)$$

$$Q_{x,i,j} = \frac{k}{8} (U_{i+1,j} - 2U_{i,j} + U_{i-1,j}), Q_{y,i,j} = \frac{k}{8} (U_{i,j+1} - 2U_{i,j} + U_{i,j-1}) \quad (4)$$

ここに、 Δt : 時間間隔、 $\Delta x, \Delta y$: 空間差分間隔、 Q_x, Q_y : 人工粘性、 k : 人工粘性係数(m/s)、下付き添字 i, j : 空間位置を現す添字、上付き添字 n, p, c : それぞれ現時刻および予測子段階での解あるいはその解より求められる値を示す。なお、水平拡散項の差分には、中央差分を用いた。

(c) 氾濫実験との比較検証

ここでは中川⁴⁾が行った市街地氾濫実験と上記のモデルによるシミュレーション結果を比較し、計算法の妥当性を確認する。

図-1 および図-2 に実験と計算による氾濫形状と破堤口中心線上の水面形についての比較結果を示す。右に、計算条件を示す。まず、図-1 は、氾濫

[計算条件]

$\Delta x = \Delta y = 5.0\text{cm}$

$\Delta t = 0.005\text{sec}$

氾濫水先端条件

$h < 0.01\text{cm} \rightarrow u=v=0.0$

原に家屋ブロックを配置していない一様場を対象としたものである。このケースの場合、水深については計算値の方が若干大きく、到達範囲も大きくなっているが、氾濫形状は実験値同様ほぼ円形状に拡がるのが再現されており、一様場における計算方法の妥当性が認められる。図-2 は、家屋ブロックを 10.5cm 間隔で配置したケースであり、計算上、家屋ブロックのあるメッシュにおいては粗度係数を $n=0.04$ とし、その他メッシュについては $n=0.01$ として計算している。この結果によると、実験結果で生じている舌状の氾濫形態は表現できていないが、家屋ブロックのないケースに比較して氾濫形状は三角形状となり計算値はその傾向を包絡的には良く表現している。また、水面形についても実験値と比較的に良く一致している。ただし、この結果は、家屋ブロックのあるメッシュの粗度係数 (0.04) を試行錯誤的に求めたものであり、実用上は、家屋密度から適切な粗度係数に変換する必要がある。これは、氾濫実績との検証計算を積み重ねて検討していく課題である。

(d) 人工粘性係数に関する数値実験

MC 法では、人工粘性項を導入している。ここでは、人工粘性係数を変化させた場合の氾濫水の水面形状

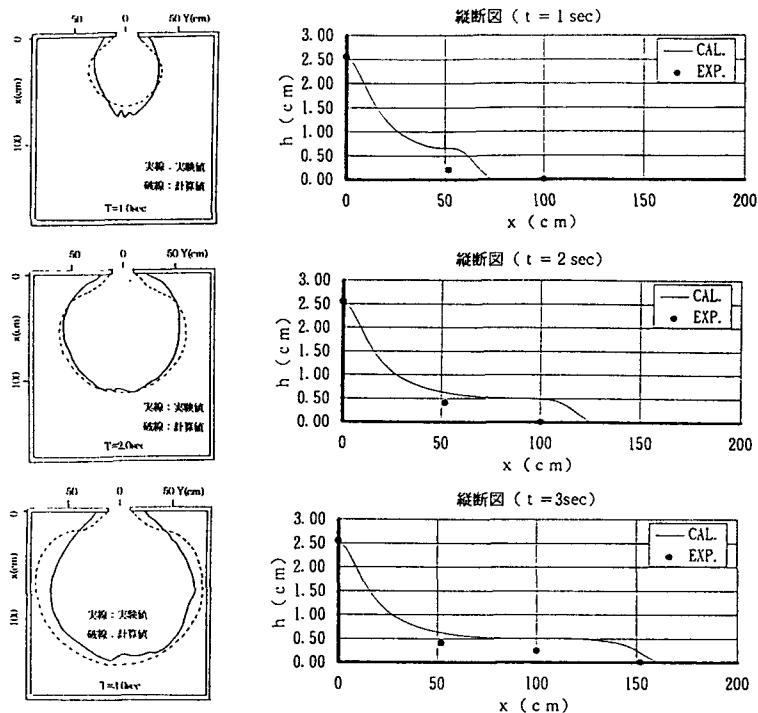


図-1 実験と計算による氾濫形状と水面形 (家屋ブロックなし)

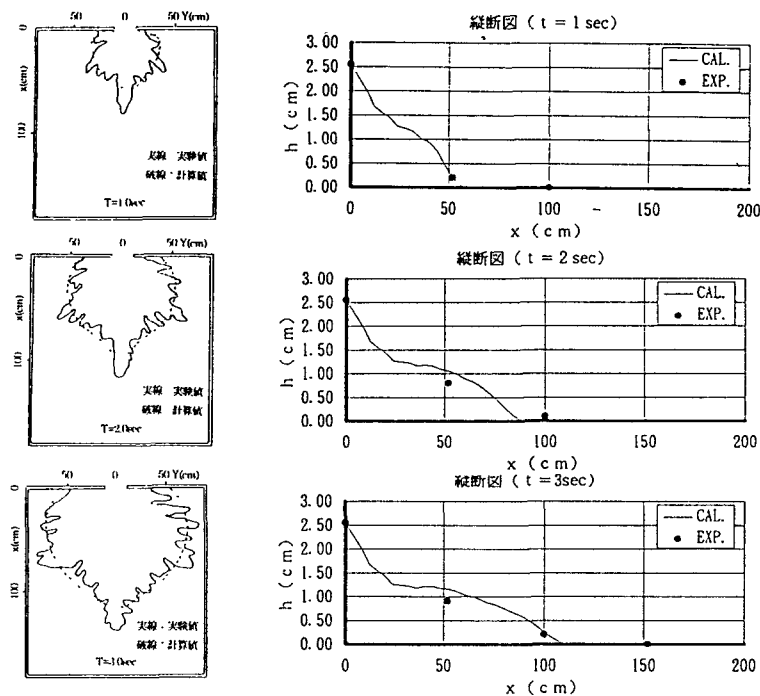


図-2 実験と計算による氾濫形状と水面形 (家屋ブロックあり)

について数値実験する。なお、検討に用いた氾濫場の条件は、先に示した氾濫実験と同様であり、家屋ブロックのない状況を対象とする。図-3に、 $t=3(\text{sec})$ の時の各ケースの氾濫水先端付近の水面形（氾濫場中心線上）を比較して示す。これによると、 $k=0.0(\text{m/s})$ すなわち、人工粘性項を考慮しない場合は、水面形は波を打っている状況にあり、また、氾濫水の先端位置から見ても実験結果とは大きく異なる結果となっている。それに対して、人工粘性項を考慮した場合はほぼどのケースも同じような水面形をしているが、人工粘性係数を大きくしたほど、水面形は平滑化されている状況にあり、若干ではあるが氾濫水の到達位置も異なっている。このことから、MC法では、人工粘性係数を導入することにより安定な計算が可能となるが、余り大きな人工粘性係数を与えることは解析結果を平滑化しすぎる傾向となることが判断される。

(e) 氾濫水先端条件に関する数値実験

氾濫計算を行う場合、氾濫場内に全く水がない状態から氾濫水が伝播していく状況を解析する必要がある、何らかの境界条件を設定する必要がある。本モデルでは、対象メッシュ内の水深がある値に達するまでは、当該メッシュの流速はゼロとし、氾濫水の伝播を表す方法としている。ここでは、先端条件をいくつか変化させ、その水面形状の比較を行って先端条件の影響について検討する。図-4は、先端条件として図中の3ケースを設定して計算した水面形（氾濫場中心線上）を比較して示したものである。なお、解析条件は氾濫実験の家屋ブロックのないケースと同様であり、人工粘性係数は $k=2.5(\text{m/s})$ とした。これによると、先端条件として大きな値を用いるほど、氾濫水先端の水面勾配は大きくなり、また、当然のごとく、氾濫水の到達位置も遅くなる傾向にある。しかしながら、今回検討した程度の先端条件の違いでは余り大きな水面形の変化は生じず、また、何れの計算ケースも安定に計算することができたが、この先端条件は、適用する場のスケール（地形状況、氾濫水流の規模）に応じて適した条件があると思われ、実績氾濫への適用を図りながら、先端条件の望ましい設定法について検討していきたい。

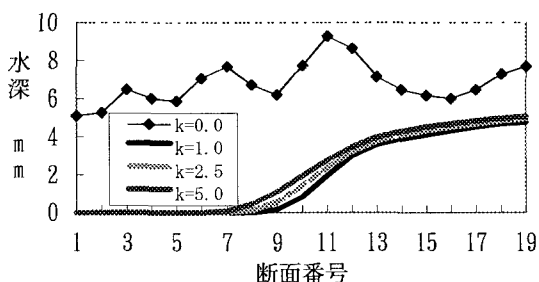


図-3 人工粘性係数に関する数値実験結果

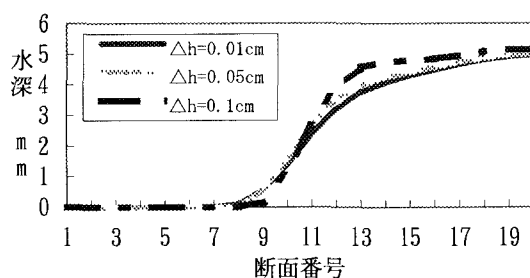


図-4 氾濫水先端条件に関する数値実験結果

3. 2 一次元ネットワーク氾濫モデル

道路網を対象とした氾濫解析の場合は、場合によっては段波状の流れや常流・射流が混在した複雑な流れとなる。そこで、本研究では、こうした不連続な現象を含む流れにも適する計算法として前出のMC法による差分近似を適用し、一次元ネットワーク不定流モデルを定式化する。

(a) 流れの基礎式

一次元不定流の基礎式を保存則型で表せば下記のとおりである。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial X} = b \quad (5)$$

$$\text{ここに、} U = \begin{pmatrix} A \\ Q \end{pmatrix}, f = \begin{pmatrix} Q \\ (P/\rho)_b + Q^2/A \end{pmatrix}, b = \begin{pmatrix} q \\ gA(S_z - S_f) \end{pmatrix}$$

A : 流水断面積、 Q : 流量、 P : 圧力、 ρ : 密度、 q : 横流入量、 g : 重力加速度、 S_z : 地表勾配、 S_f : 摩擦勾配 ($= n^2 Q |Q| / A^2 / R^{4/3}$)、 n : マニングの粗度係数、 R : 径深

(b) MC法による差分化

二次元の場合と同様に予測子段階、修正子段階の差分式は下記のように表される。

$$[\text{予測子段階}] : U_j^p = U_j^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_{j+1}^n - F_j^n) + \Delta t b_j^n + V_j^n \quad (6)$$

$$[\text{修正子段階}] : U_j^{n+1} = \frac{1}{2} (U_j^n + U_j^p) - \frac{\Delta t}{2\Delta x} (F_j^p - F_{j-1}^p) + \frac{1}{2} (\Delta t b_j^p + V_j^p) \quad (7)$$

ここに、 Δt : 計算時間間隔、 Δx : 距離に関する差分間隔、 n, p : それぞれ現時刻、修正子段階を表すサフィックス、 j : 距離ステップを表すサフィックス、 V : 人工粘性項

人工粘性項については、種々の形式が提案されているが、本研究では岡部ら⁷⁾の用いた式を用いる。

$$\text{予測子段階} : V_j = -(D_{j+1} - D_j) \quad (8)$$

$$\text{修正子段階} : V_j = +(D_j - D_{j+1}) \quad (9)$$

$$\text{ただし、} D_j = Ku_j h_j (U_{j+1} - 2U_j + U_{j-1}) \Delta t / \Delta x^2 \quad (10)$$

(c) ネットワークへの適用

都市内の道路形態は、ネットワークを形成している。道路ネットワークは、交差点をノードと考えれば模式的に図-5のような道路地盤高に応じて方向が決められた道路をリンクとした有向グラフとして記述される。各リンクにおける水理解析は上記のMC法により解析できる。したがって、道路交点（ノード）における境界条件（水位）を設定すれば良い。分合流点における計算法としては、水位および流量の連続条件と特性曲線理論を用いることが水理学的に見て適切な計算法を与える⁸⁾。しかし、本研究では、取り扱いの簡便さを考慮してBOX型のスキームを適用する。具体的には、図-6のような合流点に対して以下の各式を連立して、それぞれ境界点での水深（断面積）、流量を求める。

$$H_2 = H_4 = H_5 \quad (11)$$

$$Q_2 + Q_4 = Q_5 \quad (12)$$

$$\frac{A_1^{n+1} - A_1^n}{\Delta t} + \frac{A_2^{n+1} - A_2^n}{\Delta t} + \frac{Q_2^{n+1} - Q_1^{n+1}}{\Delta x} + \frac{Q_2^n - Q_1^n}{\Delta x} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{A_3^{n+1} - A_3^n}{\Delta t} + \frac{A_4^{n+1} - A_4^n}{\Delta t} + \frac{Q_4^{n+1} - Q_3^{n+1}}{\Delta x} + \frac{Q_4^n - Q_3^n}{\Delta x} = 0 \quad (14)$$

$$\frac{A_5^{n+1} - A_5^n}{\Delta t} + \frac{A_6^{n+1} - A_6^n}{\Delta t} + \frac{Q_6^{n+1} - Q_5^{n+1}}{\Delta x} + \frac{Q_6^n - Q_5^n}{\Delta x} = 0 \quad (15)$$

(d) 氾濫原のモデル化

一次元モデルでは、流下断面を仮定する必要がある。一次元モデルの主要な出力は道路面上の水深と流速であるからこれをある程度精度良く求められるように氾濫原のモデル化を行うことが要件となる。道路を流下する水流は、概念的

には、図-7のような密集市街地の家屋等が流水の抵抗となり、道路内と家屋群内の相互干渉を受けながら、水流は道路面上に集中すると考えられる。道路ネットワークならびに各リンクの道路幅と道路標高については、政令指定市等において導入されている「道路台帳システム」から容易にデータ化が可能である。しかし、道路網に囲まれた家屋密集地区内の標高データに関しては、得ることができず、氾濫原に関して何らかのモデル化が必要である。これについては、都市内微地形の分析及び家屋・建物の配置形状を考慮した詳細メッ

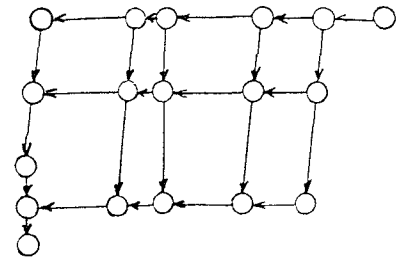


図-5 道路ネットワークのイメージ

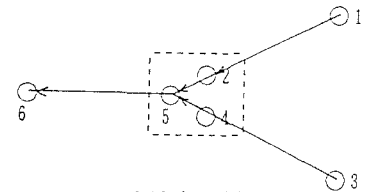


図-6 合流点の断面番号

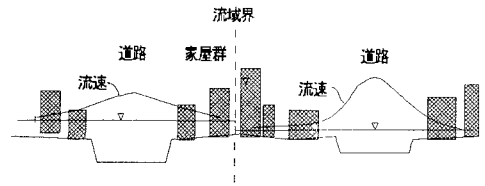


図-7 密集市街地内の氾濫流イメージ

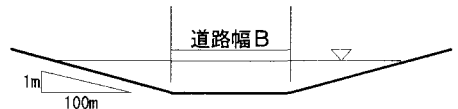
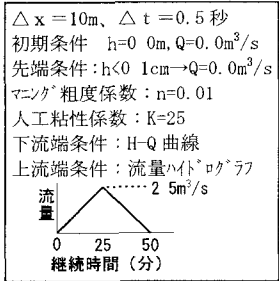


図-8 本稿における氾濫原横断形状

シュによる2次元解析結果等を踏まえてモデル化していきたいと考えている。本稿では、図-8に示したように氾濫原の横断勾配として1/100の勾配を設定して解析している。

(e) 数値事例

ここでは、K市の実際の道路(延長790m、幅6m)を対象として上記モデルを適用した事例を示す。解析条件は、右に示すとおりである。図-9に地盤高、最大水深、最大流速、最大流速時のFroude数の縦断変化を示している。図によると、急勾配地点では、最大流速が2 m/s程度(水深約10cm)、フルード数3程度の射流状態となって歩行者等にとっては危険な状態が想定される。ここには示していないが、射流から常流への遷移点においても安定に計算ができており、この解析モデルにより谷底低地等で発生する可能性のある斜面からの落水による危険度評価等に対して本モデルは有効であると考えられる。



もう1つの事例として、平面2次元モデルと比較した数値事例を示す。対象とした氾濫場は、図-10に示されるように幅員が10mの道路が延長50mの間隔(勾配=0)で格子状に配置されており、道路で囲まれた氾濫場は1/100の勾配の四角錐状(横断面図参照)であると仮定したものである。A-A断面の上部から三角波形の氾濫水(ピーク流量0.5m³/s)を5分間にわたって流入させた。図-11は、氾濫水流入開始後5分経過した時点でのA-A断面とB-B断面での水面形を比較したものである。これによると、一次元モデルの方が若干スムーズな水面となっているが、両モデルの水面形は良く一致している。このことから氾濫場の形状、粗度係数等を適切に設定することにより、道路面を走る氾濫水の挙動は一次元モデルでも再現可能であると考えられる。なお、粗度係数としては道路・氾濫原とも簡単のため $n=0.01$ として解析した。

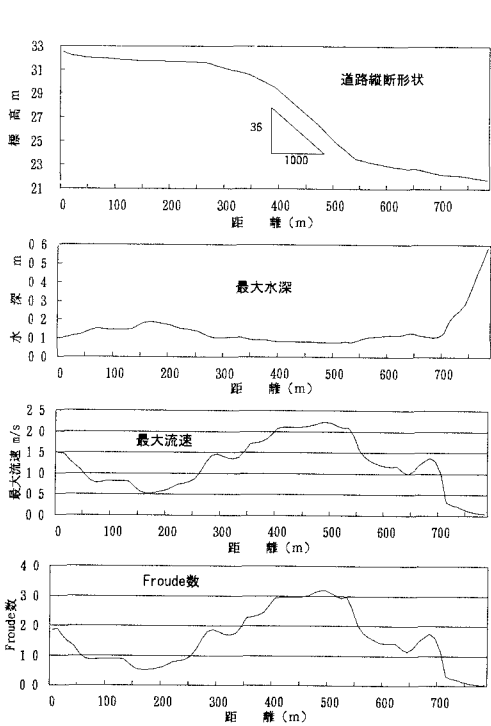


図-9 急勾配道路での計算結果

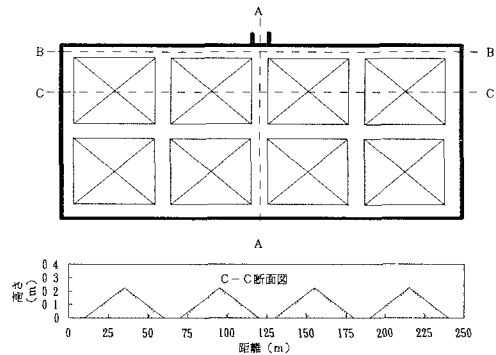


図-10 格子状モデル道路網図

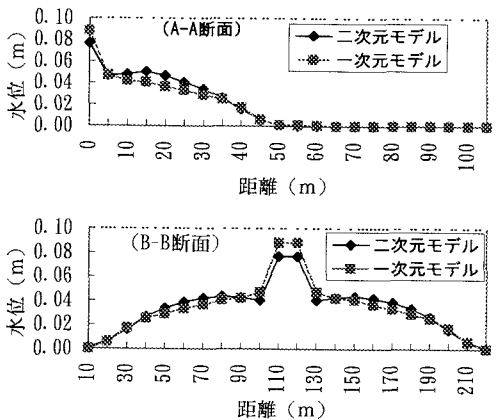


図-11 水位縦断図の比較

3. 3 モデルの適用性と課題

上記の数値事例で示されたように基本的には2次元モデルと1次元モデルでは氾濫水の到達範囲・到達時間等はパラメーターを適切に設定することによりほぼ同等の解析結果を得ることが可能であるとする。したがって、実際の問題への適用にあたっては、対象地区の規模、地形特性や都市構造、雨水排水施設構造、要求される解析精度等を考慮して適する解析手法を選定する必要がある。ここでは、2次元モデルと1次元モデルの実際問題への適用性と課題を整理する。

表ー1 解析モデルの適用性と課題

項目	平面2次元モデル	ネットワーク1次元モデル
①氾濫規模	ほぼ全域が浸水するような大規模氾濫に適する。小規模氾濫の場合は、無駄が多い。	概ね道路冠水や軽微な床下浸水程度の小規模氾濫に適する。
②流域規模	メッシュサイズ'によるが小メッシュの場合は作業量の関係からある程度狭い流域が適する。	平面2次元に比べて広い領域を対象とすることが可能である。
③地形特性	特に関係ない	道路の路線別流域界がある程度明確に設定できることが望ましい。
④計算時間	1次元モデルに比較して多大である。	解析対象とする道路密度による。
⑤解析準備	地盤高、家屋密度等については細密数値情報等の既存メッシュデータがあれば比較的簡単である。大メッシュの場合は地形特性情報が失われる可能性が大きい。	道路標高・道路幅等の情報や流域界の設定が必要であり作業は煩雑である。道路台帳システムのようなマッピングシステムの活用や雨水排水施設区画割平面図等を活用できる。
⑥利点	・解析結果の表示は比較的簡単である(水深コンター図、流速ベクトル等) ・メッシュ別水深・流速により直接被害額算定が容易である。	・ネットワーク理論の活用により溢水箇所と湛水箇所の関係を比較的容易に把握できる。 ・交通流等の対応が簡単であり、交通障害等の被害算定が容易である。 ・下水道ネットワーク等との対応が図り易い。
⑦共通課題	●家屋密度に応じた粗度係数の設定方法の確立 ●解析準備作業の効率的方法の確立	

4. おわりに

本稿では、都市域における内水被害が増大している現状を踏まえ、都市域氾濫現象の特性を考慮した氾濫解析手法について提示した。都市域の氾濫特性としては、内水氾濫の場合氾濫規模は外水氾濫に比較して大きくはないが、密集市街地では氾濫水が道路に集中して流れ、また、実際の被害が発生する場所は地域内の微地形に影響されている。そのため、本研究では、氾濫水の挙動をある程度微視的に表すことのできることを念頭に数値解析モデルを提示した。今後は、実際の氾濫現象への適用を図り、氾濫場のモデル化の方法、モデルの適用性、雨水排水システムとの連携(溢水、排水)、超過洪水時における道路網を活用した排水計画、都市域における氾濫被害評価手法等について研究していきたいと考えている。

【参考文献】

1) 建設省河川局：水害統計平成3年度版、1993。
2) 平井真砂郎・飯野将徳：雨水排水システム再整備計画のための枝線部雨水流出モデル、NSC 研究年報、Vol.18,No.1,pp.133～147、1993。
3) 岩佐義朗・井上和也・水鳥雅文：氾濫水の水利の数値解析法、京大防災研究所年報、第23号B-2、pp.305～317、1980。
4) 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。
5) 福岡捷二・松永宜夫：密集市街地における洪水氾濫流解析と氾濫流制御の試み、水工学論文集、第36巻、1992。
6) 日本機械学会編：流れの数値シミュレーション、コロナ社。
7) 岡部健士・天羽誠二・石垣昌邦：常流・射流の遷移を伴う不等流の数値計算法について、水工学論文集、第36巻、1992。
8) 井上和也：開水路非定常流の数値計算法とその水工学への応用に関する研究、京都大学学位論文、1986。