

2019 年度（第 55 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 19-A-4

都市浸水に関する解析法とその活用

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

2019 年 9 月

都市浸水に関する解析法とその活用

Analysis Model on the Urban Inundation and Its Application

武田 誠

Makoto TAKEDA

1. はじめに

平成27年の鬼怒川破堤氾濫に伴う大規模浸水や、平成30年西日本豪雨における高梁川・小田川の破堤氾濫に伴う大規模浸水のように、近年、広域かつ甚大な浸水災害が生じている。また、短期間および局所的なゲリラ豪雨による内水氾濫も増加している。外水・内水による浸水災害に対しては、ダムや流域内の貯留施設により雨水を保持し、河道で適切に洪水を流下させて、河川に隣接する遊水地で貯留するなどの総合治水対策が実施されており、都市域の内水排除のための下水道整備、貯留槽の建設も進められている。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に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⁴⁾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。

地下空間も含めた都市浸水の課題の検討を、戸田ら⁵⁾、川池ら^{6),7)}、関根ら^{8),9)}、秋山ら¹⁰⁾、尾崎ら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。例えば、関根ら^{12),13)}、石垣ら¹⁴⁾は、地下街の詳細な浸水状況とその時の避難についても検討している。ここでは、浸水解析技術に焦点を絞って論じる。

本報では、大規模な都市浸水に対する氾濫解析法、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、解析モデルの活用に焦点を当てた適用事例を紹介する。

2. 都市における大規模浸水に対する検討^{15),16),17)}

2.1 研究目的

平成27年の鬼怒川破堤氾濫に伴う大規模浸水の様子は、国土地理院による動画（UAVによる撮影）で保管されており、その被害の大きさを知ることができる。仮に、同様の大規模浸水が都市域で生じれば、その被害は甚大なものとなる。平成23年の台風15号による豪雨を受けて庄内川の水位が高くなり、志段味観測所では2000年の東海豪雨時より高い水位となった。名古屋市守山区下志段味地区では越水による浸水被害を受け、

さらに名古屋市民100万人に対して避難勧告が出された。このときは破堤には至らず、庄内川流域の名古屋市内の安全は保たれた。仮に、破堤に伴う大規模浸水が生じれば、地下街および地下鉄を有する名古屋市では深刻な被害が発生すると考えられる。武田ら¹⁸⁾により名古屋駅前の地下空間の入口情報が整理され、その結果は表-1のようにまとめられている。歩道が車道より20cm高いとすれば、入口は車道から0.5mの高さにあり、側壁天端の高さは車道から1mである。洪水ハザードマップをみると、名古屋駅周辺では、豪雨による内水氾濫で0.2m～1m、庄内川が破堤した場合の外水氾濫で1m～3mの浸水が予測されている。この場合、内水氾濫では入口に止水板を設置することで対応できると考えられるが、外水氾濫では止水板や側壁を乗り越えて浸水することが容易に想像できる。すなわち、大規模浸水が生じた場合、都市の地下空間に水が流入する可能性がある。著者らの研究グループでは、その危険性の評価を検討するために、地下空間を考慮した氾濫解析を実施した。

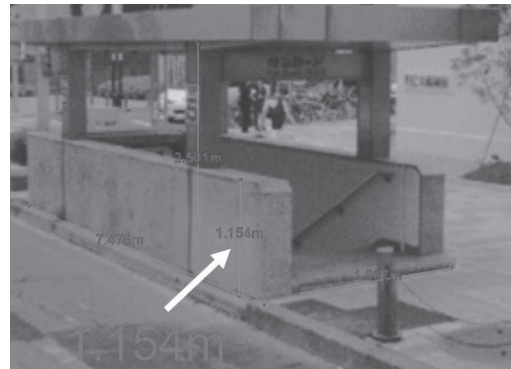


写真-1 入り口の様子

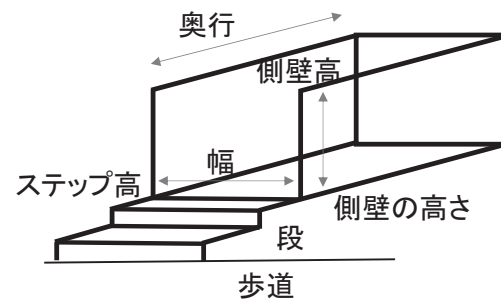


図-1 入口情報の定義

2.2 大規模浸水を対象とした都市浸水の解析法

表-1 入口情報の整理

	幅(m)	側壁の高さ(m)	奥行(m)	段(個)
平均値	1.8	0.91	7.3	1.9
最頻値	1.8	0.75	6.8	2
最大値	3.0	2.45	15.5	3
最少値	1.0	0.55	5.0	1

(1) 河川

河川の解析では、以下の基礎式を用いる。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

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

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、以下の浅水方程式を用いる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = -q_o - q_{in} \quad (3)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial vM}{\partial y} = -gh \frac{\partial(h+z_G)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial M}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{bx}}{\rho} \quad (4)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} = -gh \frac{\partial(h+z_G)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial N}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial N}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{by}}{\rho} \quad (5)$$

ここに、 u, v はそれぞれ x, y 方向の流速(m/s)、 h は水深(m)、 M, N はそれぞれ x, y 方向のフラックス($M = uh$, $N = vh$)(m^2/s)、 q_o は単位面積当たりの流出流量(m^3/s)であり、 $q_o = \sum q_n l_n / \Delta x \Delta y$ (q_n : 単位幅あたりの横流入流量(m^2/s), l_n : 格子にある河川区分の長さ(m), $\Delta x \Delta y$: 格子の面積(m^2))、 q_{in} は単位面積当たりの地下空間への流入流量(m^3/s)であり、 $q_{in} = \sum Q_{in} / \Delta x \Delta y$ (Q_{in} : 後述する地下空間の入口での流入流量(m^3/s))、

z_G は地盤高(m), τ_{bx}, τ_{by} はそれぞれ x, y 方向の底面のせん断応力(Pa), ρ は水の密度 (kg/m^3), g は重力加速度(m/s^2), $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ はそれぞれ x, y 方向の渦動粘性係数(m^2/s)であり, 本研究では 0 とした. x, y は平面の座標, t は時間である.

底面のせん断応力は, マニングの粗度係数を用いて, 以下の式で表される.

$$\tau_{bx} = \rho g n^2 M \sqrt{u^2 + v^2} / h^{4/3} \quad (6)$$

$$\tau_{by} = \rho g n^2 N \sqrt{u^2 + v^2} / h^{4/3} \quad (7)$$

また, 堤防箇所の単位幅横流入流量は以下の式で求めた.

$$h_2 / h_1 \leq 2/3 \quad q = \mu L h_1 \sqrt{2gh_1} \quad (8)$$

$$h_2 / h_1 > 2/3 \quad q = \mu' L h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (9)$$

ここに, 外水位を H_r (m), 堤防天端高を H_0 (m), 堤内水位を

H_f (m), 越流幅を L (m), $h_1 = H_r - H_0$ (m), $h_2 = H_f - H_0$ (m)とし, 河川に流入する量を正, μ を 0.35, μ' を 0.91 とした.

本研究では, 図-2に示すように, 河川の断面データが存在する左岸右岸の点と断面位置を中心とする河川格子の境界点および氾濫格子で区分される河川格子の点を用い, 対応する河川格子および氾濫格子の水位を用いて計算された堤防区分の単位幅横流入流量に, 堤防区分の長さを掛けて, 連続式で考慮される受け渡し流量を算出している. これらは氾濫格子および河川格子を用いて自動的に計算され, 河川水位が堤防天端高を越えれば自動的に越流し, 氾濫域に水が拡がる計算となる.

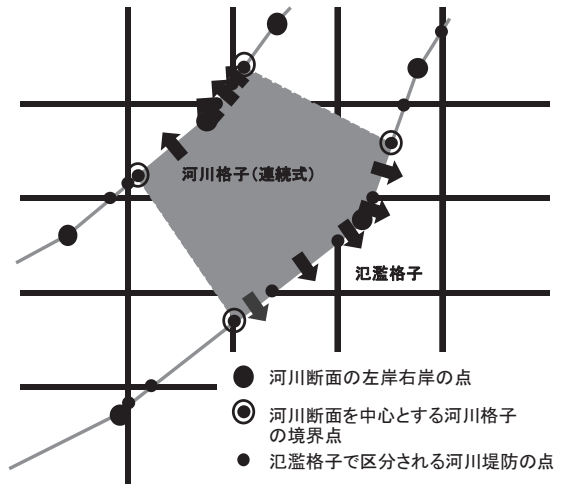


図-2 河川と氾濫域の水の受け渡し

(3) 地下空間のモデル化の概要

本研究では, 地下街・地下鉄駅を一つのボックスとしてとらえ, 線路を約 50m の長さで分割して地下鉄線路の計算格子を設定した. 氾濫水は複数ある地上の入口から地下街・地下鉄駅へ流入・流出し, 地下街・地下鉄駅では地上からの流入・流出流量と鉄道線路への流入・流出流量を考慮して連続式により水の収支が計算される. また, 地下街・地下鉄駅に繋がっている線路格子では流入・流出流量が考慮され, その他の線路格子では考慮されずに, スロットモデルを用いた一次元不定流解析で水の流れを表現した. さらに, 乗換駅のように一つの駅に複数ある線路間の水輸送も考慮している. 解析の地下鉄・地下鉄駅と地下鉄線路のイメージを図-3 に示す.

地下街・地下鉄駅の連続式には以下の式を用いた.

$$A_u \frac{\partial h_u}{\partial t} = \sum Q_{in} - \sum Q_o \quad (10)$$

ここで, A_u は地下街・地下鉄駅の平面面積, h_u は地下街・地下鉄駅の水深, Q_{in} は地下空間への流入流量, Q_o は線路への流入流量である. 地下鉄駅の現地調査を行い, 地下空間の入口の情報(道路から歩道の段差($d2$), 歩道から地下空間の入口の段差($d3$), 止水板(溝)の高さ($d4$), 横幅 (B)を求めた. 地下空間の入口では, 入口ステップにおける氾濫域の水深を $h_{in} = H - (z1 + d2 + d3)$ (ここに, H は計算された氾濫域の水位) から求め, 入口のステップにおける地下街・地下鉄駅の水深を $h_{in_u} = h_u + z_{bu} - (z1 + d2 + d3)$ (ここに, h_u : 地下街・地下鉄駅の水深, z_{bu} : 地下街・地下鉄駅の底面高) から求めた. h_{in} と h_{in_u} の大きい方を h_1 , 小さい方を h_2 として式(8)または式(9)より流入流量 Q_{in} を求めている.

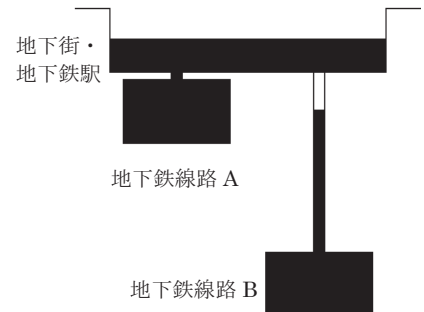


図-3 地下街・地下鉄のモデル

また、地下街・地下鉄駅と線路においても地下空間の入口と同様に、地下街・地下鉄駅の底面からの水深を求め、式(8)または式(9)より Q_o を求める。ここで、地下街・地下鉄駅の水深 h_u 、地下街・地下鉄駅の底面高からみた線路の水深 $h_{s-u} = h_s + z_{bs} - z_u$ (h_s は線路の水深、 z_{bs} は地下鉄線路の底面高) の大きい方を h_1 、小さい方を h_2 とし、入口の周長を L とした。

さらに、地下鉄トンネルではスロットモデルを導入し、次式を考慮している。

$$\frac{\partial A_s}{\partial t} + \frac{\partial Q_s}{\partial x} = q_o \quad (11)$$

$$\frac{\partial Q_s}{\partial t} + \frac{\partial U_s Q_s}{\partial x} = -g A_s \frac{\partial (h_s + z_{bs})}{\partial x} - \frac{g n_s^2 Q_s |U_s|}{R_s^{4/3}} \quad (12)$$

ここで、 A_s は流水断面積、 Q_s は流量、 q_o は単位幅横流入流量であり $q_o = Q_o / \Delta x_s$ 、 h_s は線路の水深、 U_s は流速、 n_s はマンニングの粗度計数、 R_s は径深である。スロット幅は以下の式より求める。

$$B = \frac{g A_s}{C^2} \quad (13)$$

ここに、 g : 重力加速度、 A_s : 断面積、 C : 流速(20m/s を仮定)である。

地下鉄の断面は、図-4 の幅 7.75m、高さ 4.35m の矩形断面を想定する。本研究では乗換駅の水輸送も考慮している。乗換駅では、関連するすべての線路への流量 Q_o が計算される。また、地下鉄路線に侵入した氾濫水が、乗換駅で吹き出し地下街・地下鉄に浸入して別の路線へ浸水が生じることもモデル化している。

(4) 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aggerドに配置し、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。

2.3 計算領域および計算条件（名古屋の場合）

地下街・地下鉄駅の面積および鉄道線路の平面線形は Web にある数値地図より入手した。また、駅における地下鉄路線高を基に、駅間の線路高は線形に変化するとした。地下鉄の断面は縦 4.35m × 横 7.75m とした。線路断面の天井の上 0.5m に地下街・地下鉄の底面高があると仮定し、現地調査を行ってその値を修正した。なお、乗換駅では複数の底面高が現れるので、一番高い値を地下街・地下鉄駅の底面高とし、地下鉄線路とは周長 20m の入口で接続されているとみなしている。このように、地下街・地下鉄駅を一つのボックスでモデル化していることから、今後、この点の詳細化が必要と考える。

庄内川の上流端には、平成 23 年 9 月 15 日の庄内川洪水流量として志段味（庄内川本川）と当地（支川の矢田川）の流量を合算して与え、庄内川の下流端には、同時刻の名古屋港の潮位を与えた。また、枇杷島の水位がピークとなる 19h に庄内川左岸の 3km～17km の 2km 毎の堤防箇所がそれぞれ幅 100m で破堤するとした。

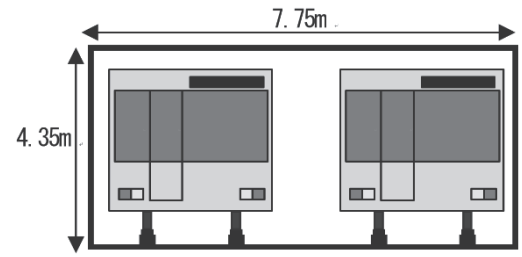


図-4 地下鉄断面

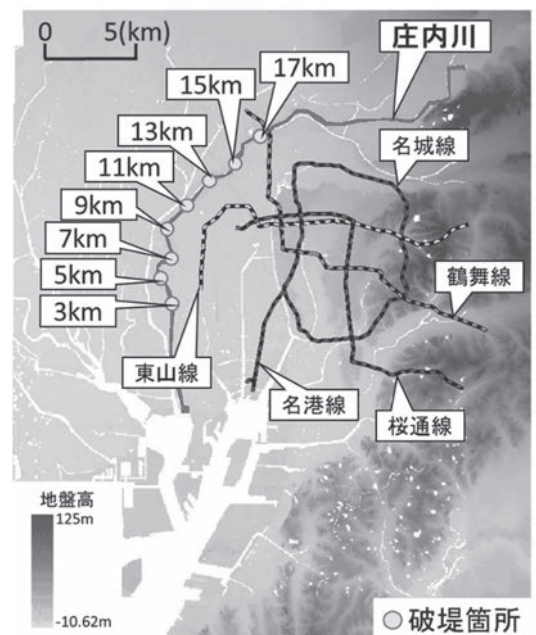


図-5 名古屋の計算領域

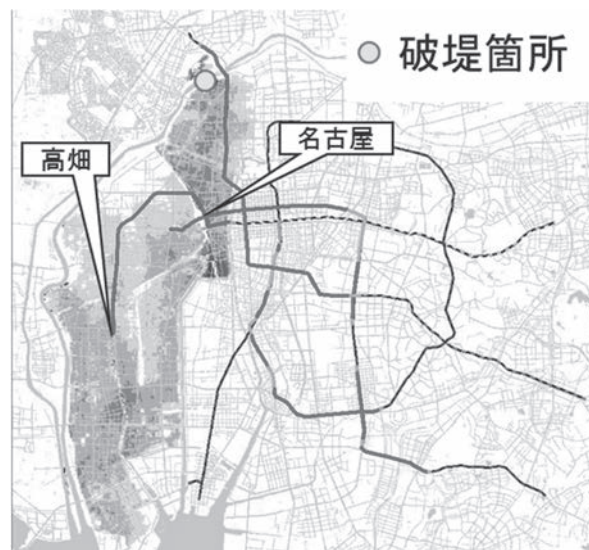
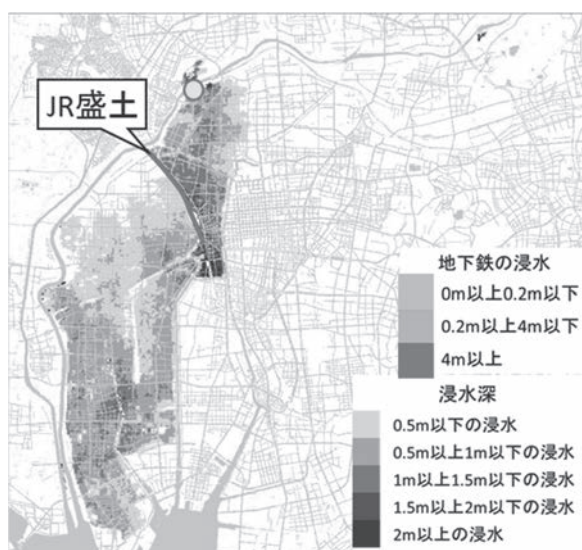
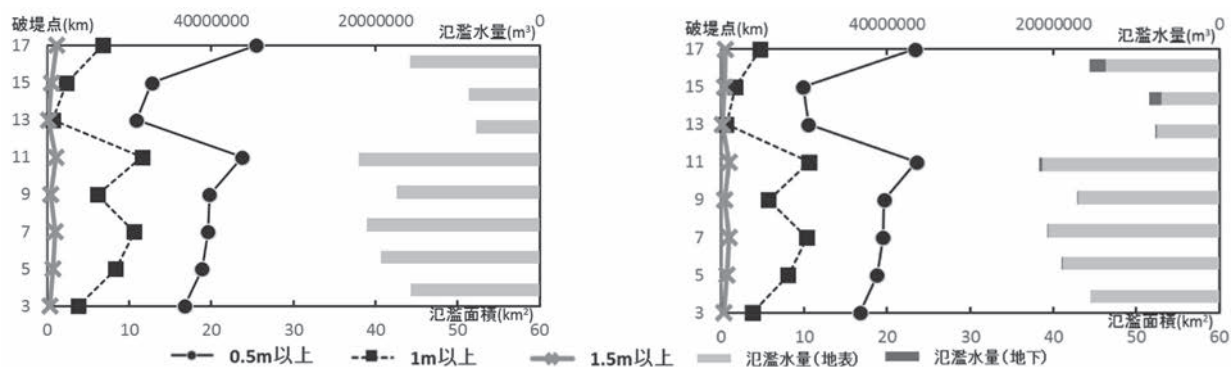
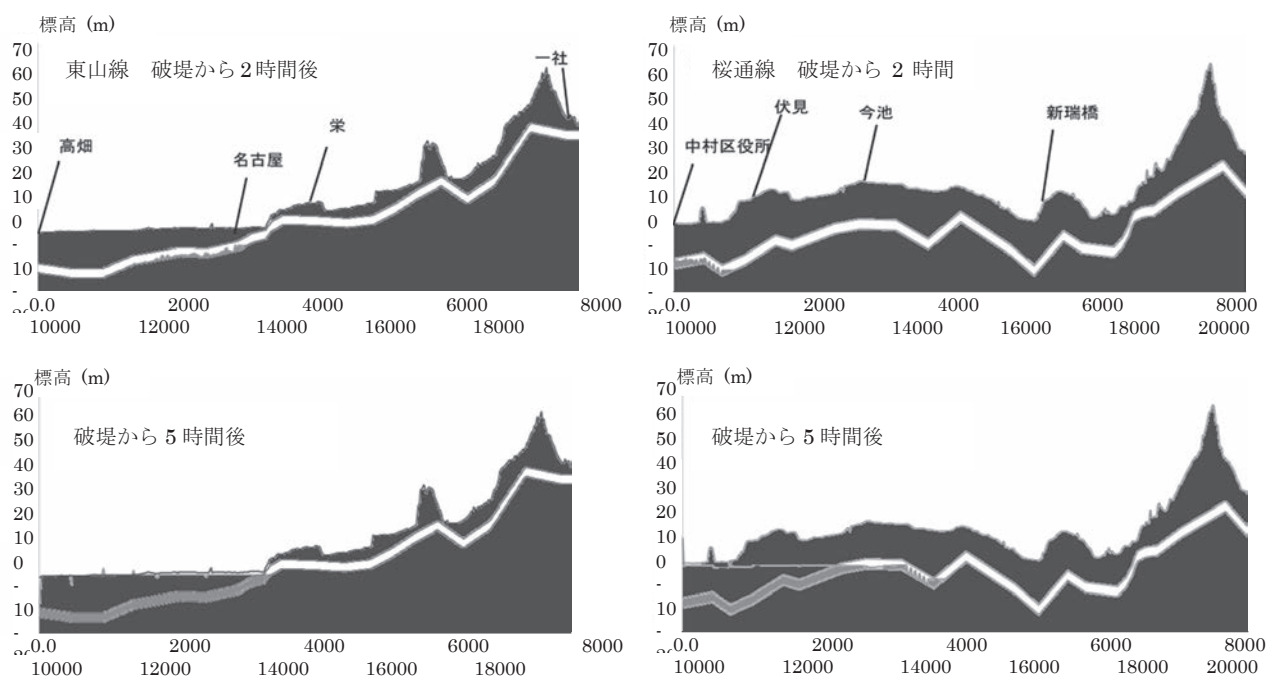


図-7 名古屋の最大浸水深の分布



2.4 計算結果および考察（名古屋の場合）

地下鉄を考慮しない場合と考慮する場合の、名古屋における破堤箇所毎の計算終了時の氾濫水量と最大浸水深を用いた氾濫面積を図-6に示す。まず、図-6の結果から、破堤箇所において氾濫面積と氾濫水量の違いがあることが分かる。また、地下鉄を考慮しない場合の氾濫水量は、地下鉄を考慮する場合の地上と地下の総水量と一致している。このことは、質量保存の観点からの計算モデルの妥当性を示している。さらに、図-6から、庄内川の河口から15kmと17kmが破堤した場合の解析において、地下空間に多くの氾濫水が流入することが示された。それに伴い、地上の氾濫面積が減少していることが分かる。15kmと17kmの破堤箇所はJR盛土よりも上流側であり、これらの場所で破堤が生じれば、氾濫水は地下空間の入口が多く存在する名古屋駅前に集まって流下するので、地下空間への流入が多くなると考えられる。17km破堤における、地下鉄を考慮しない場合と考慮する場合の最大浸水深の分布を図-7に示す。本図から、地下鉄を考慮することで、最大浸水深がわずかに低下している様子がわかる。また、名古屋の地盤高は東側が高くなっており、図-7の結果から庄内川から溢れた氾濫水が東方に拡がらないことが示された。さらに、地下鉄も同様に東方の線路高が高くなっており、地下の浸水も東方に拡がらない。庄内川の河口から17km地点で破堤した場合、氾濫水は鶴舞線から流入し、地上からの氾濫水の流入や乗換駅を通じて、他の線路へ広がっている。桜通線は名古屋の地下鉄線路内の中で最も線路高が低いいため、広範囲に浸水が広がっていく様子が示された。

2.5 他地域への適用（大阪の場合）

大阪の計算領域を図-9に示す。淀川の河口から3km～15kmまでを2km毎に、100m幅で破堤(破堤箇所の堤防天端が堤内地地盤高に置き換わる)させた想定破堤氾濫解析を実施した。淀川の計画高水流量を基にピーク値が12000 m³/sとなる流量ハイドログラフを淀川の上流端に与え、洪水ピーク時に満潮となる大潮の名古屋の水位を下流端に与えた。破堤の時間は計算開始19時間後、計算時間は61時間とした。

地下鉄を考慮しない場合と考慮する場合の、大阪における破堤箇所毎の計算終了時の氾濫水量と最大浸水深を用いた氾濫面積を図-10に示す。図-9に示すように、大阪の地盤高は全体的に低く、計算領域中央の地盤が高くなっている。図-10の結果から大阪の浸水は河口から3km以外の破堤箇所で大量の氾濫水が地下空間へ流入しており、地下への流入水量は破堤箇所が違ってほぼ同様であった。これは、大阪が低平地に位置しており、地盤の低い地域に地下鉄が建設されており、本計算条件では地下鉄などが満水になっているためと考えられる。ここで、9km破堤と15km破堤の最大浸水深の分布を図-11、図-12に示す。図-11の結果から、9km破堤では、小河川域で囲われた梅田駅周辺に浸水がとどまっている。ここでは、大川（旧淀川）を非計算領域としているため、地上の浸水はその川を跨いで広域に拡がらない。しかし、図-13と図-14に示すように、地下鉄線路を水路として水が流れ、他地域で溢れることから、地下鉄の有無による浸水の様子に違いがみられた。

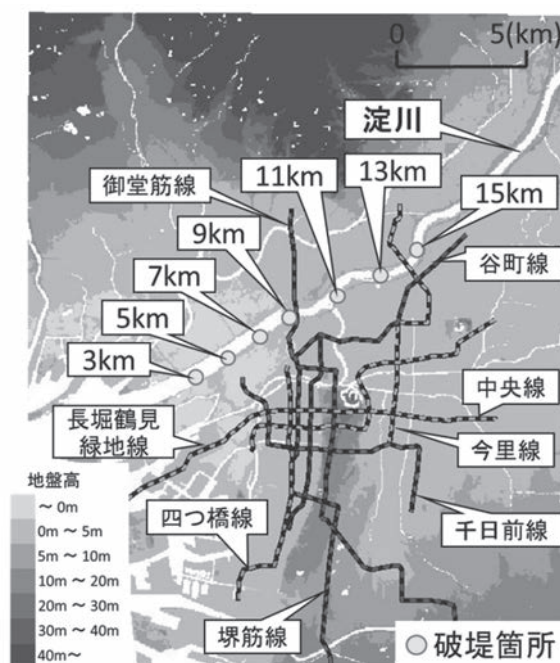


図-9 大阪の計算領域

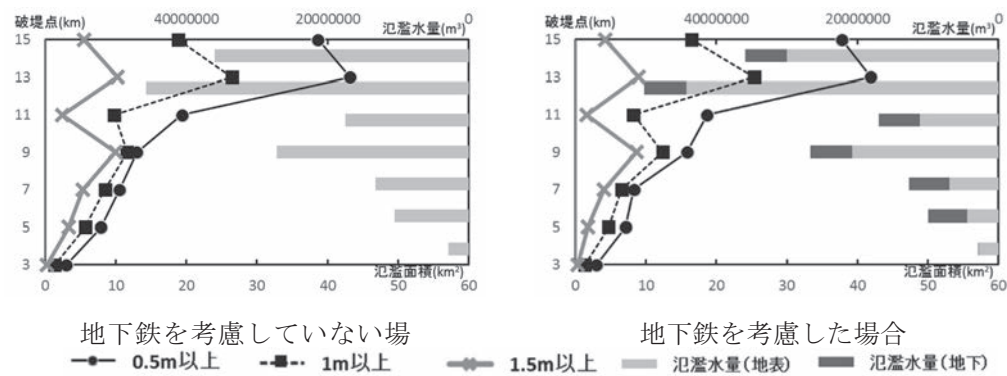


図-10 大阪の氾濫水量と氾濫面積

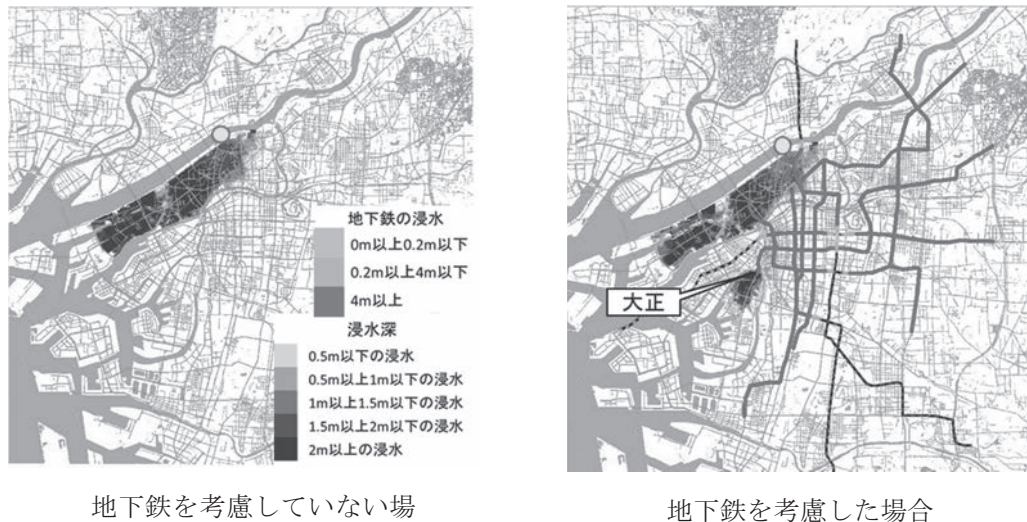


図-11 大阪の最大浸水深の分布(9km地点の破堤の場合)

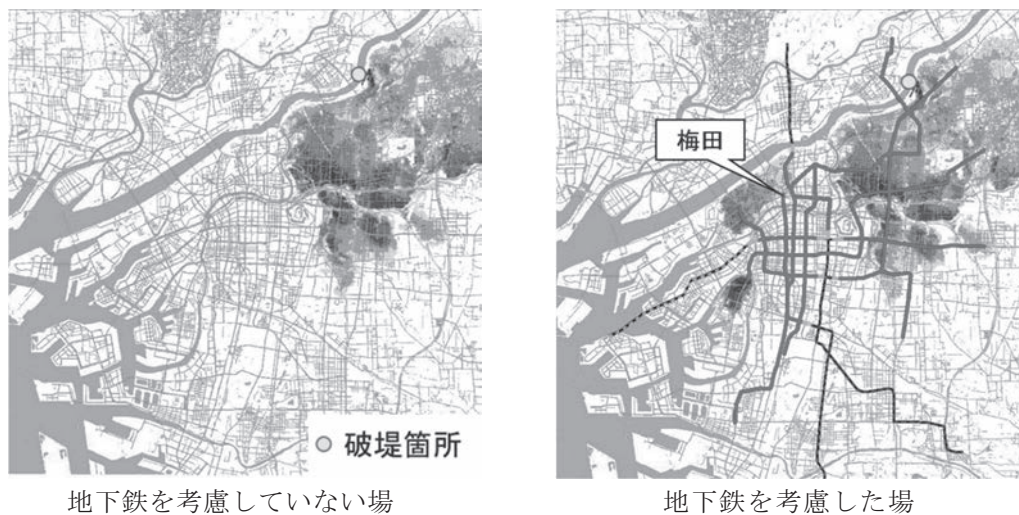


図-12 大阪の最大浸水深の分布(15km地点の破堤の場合)

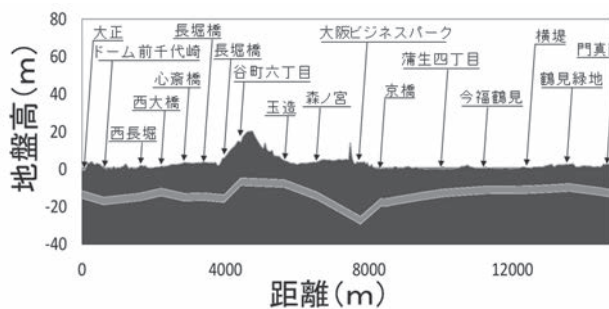


図-13 長堀鶴見緑地線の水深(破堤箇所 9km 地点)

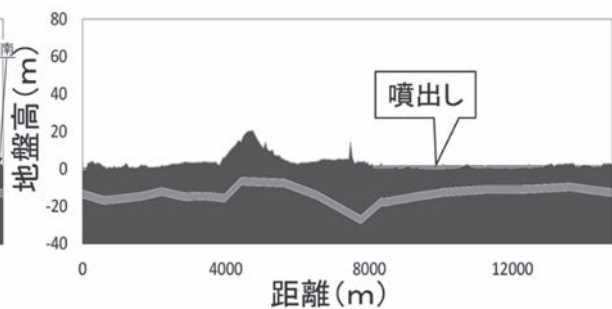


図-14 長堀鶴見緑地線の水深(破堤箇所 15km 地点)

3. 内水氾濫に関する検討 ^{19) 20) 21) 22)}

3.1 研究目的

平成 23 年の台風 15 号に伴う豪雨により、庄内川の水位が高くなり、愛知県春日井市では内水被害が生じた。流域では、大規模な洪水災害が生じる前に内水氾濫が生じることが多く、河川管理の立場からも、豪雨による都市浸水の対策は重要かつ喫緊の検討課題である。都市浸水の対策には、流域における下水道施設や貯留施設の整備がある。しかし、豪雨時の都市浸水や下水道の水位が計測されておらず、対策の検討のための重要なツールである浸水解析の妥当性評価が困難な状況にある。また、内水氾濫対策はその効果が分かりにくく、さらに、地域の水防活動を担う市役所などの行政職員からは、豪雨時の浸水現象の把握が難しいという指摘がある。これらの課題解決のため、春日井市を対象とした浸水解析モデルを構築し、各種対策の適用を検討した。ここでは、まず、内水氾濫解析について概説する。

3.2 内水氾濫を対象とした都市浸水の解析法

内水氾濫を対象とした浸水解析は、2.2 の河川解析および氾濫解析と同様であり、加えて、下水道システムの解析モデルを導入して、下水道から河川への排水をモデル化している。なお、春日井市には地下街、地下鉄が存在しないので、該当する地下空間（地下街および地下鉄）に関する解析モデルは考慮していない。

下水道の解析は、下水道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、マンホール部で氾濫格子との水の受け渡しを行う。

下水管内の解析は、スロットモデルを考慮した一次元の連続式と運動量方程式を用いる。

$$\frac{\partial A_s}{\partial t} + \frac{\partial Q_s}{\partial x} = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial Q_s}{\partial t} + \frac{\partial U_s Q_s}{\partial x} + g A_s \frac{\partial (h_s + z_{bs})}{\partial x} + \frac{g n_s^2 Q_s |U_s|}{R_s^{4/3}} = 0 \quad (15)$$

ここに、変数は 2.2 (3) に従い、添字 s は下水道を意味する。スロット幅は(13)式の取り扱いと同様である。マンホール部の水位は、以下の式を用いて行う。

$$A_m \frac{\partial h_m}{\partial t} = \sum Q_s + Q_{m_in} - Q_{m_out} \quad (16)$$

ここに、 A_m ：マンホールの面積（マンホールの水位が地盤高を越えた場合には、対応する格子の面積として置き換える）、 h_m ：水深、 Q_{m_out} ：ポンプの排水流量である。また、氾濫域から下水道への落ち込み流量 Q_{m_in} は、式(8)または式(9)より求める。対象となるマンホールの地盤高を基準とした地表面浸水の水深とマンホール水位から算出される水深を用い、大きい方を h_1 、小さい方を h_2 として、マンホールの周長 L_m を掛けてマンホールへの落ち込み流量を求めている。なお、ここでは、マンホールから吹き出し地表面へ流出する様子も計算されている。

3.3 計算条件と解析結果

図-15 の計算領域(10m 格子)を設定し、図-16 の下水道情報と河川情報を整備した。計算領域に春日井市（図-17）で観測された図-18 の降雨の時間変化を一様に与え、河川下流に観測された水位を与えて平成 23 年 9 月 20 日 12:00～22:00 の再現計算を行った。図-19 に最大浸水深の分布と過去の浸水実績図を、図-20 に地蔵川と八田川の計算水位と観測水位の比較を示す、図-19 の最大浸水深の分布には西側境界部分に大きな浸水深がみられるが、本研究では、計算領域の西側境界の処理を行っていないため、この部分の浸水は重要視しておらず、特に地蔵川流域を対象に考察している。平成 23 年の浸水実績が入手できなかったため、図-19 の浸水の様子と過去に生じた浸水履歴とを比較した。それによると、概ね両者の浸水箇所が類似しているといえ

る。また、図-20 の水位の比較をみると、地藏川では計算水位と観測水位が非常に良く一致していることが分かる。一方、八田川では、下流における水位の一致はみられるが、上流では差が生じている。これは、八田川流域では下水道や小河川の情報が入手できていない地域があり、その影響で計算上の河川への水の流入が不足し計算水位が高まらずに計算値と観測値の水位に差が生じていると考えられる。また、床上浸水家屋および床上浸水家屋と最大浸水深を比較してみると、被害家屋が最大浸水深の大きい箇所で見られていた。浸水深の大きいエリアに床上浸水家屋と被害を受けていない家屋が点在していたが、これは個々の家屋の盛土などの対策の効果と考えられる。浸水深の分布、河川水位、浸水実績との比較から、地藏川流域を対象とした解析モデルは妥当なものと判断できるが、定量的な観点からの詳細な検討が実施できていない。そこで、つぎに、数値解析モデルの妥当性評価を検討する。

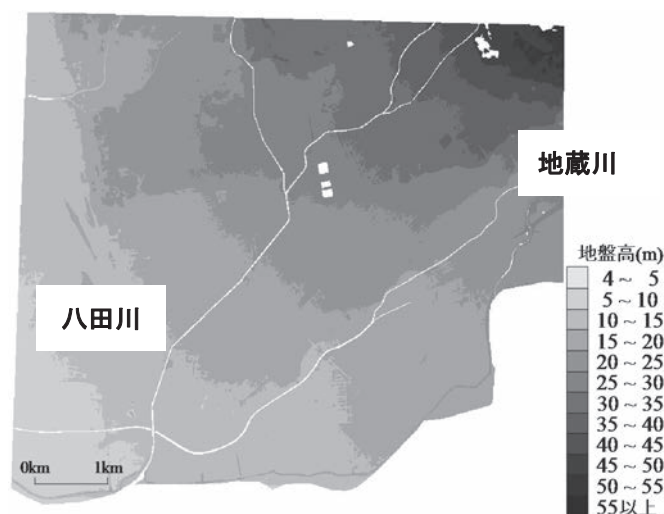


図-15 地盤高の分布



図-16 下水道管路と余水吐



図-17 観測場所

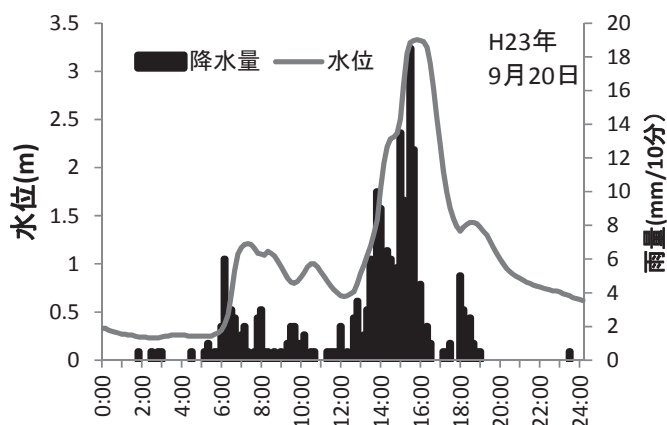


図-18 春日井市役所の降雨と
地藏川の勝川水位観測所の水位

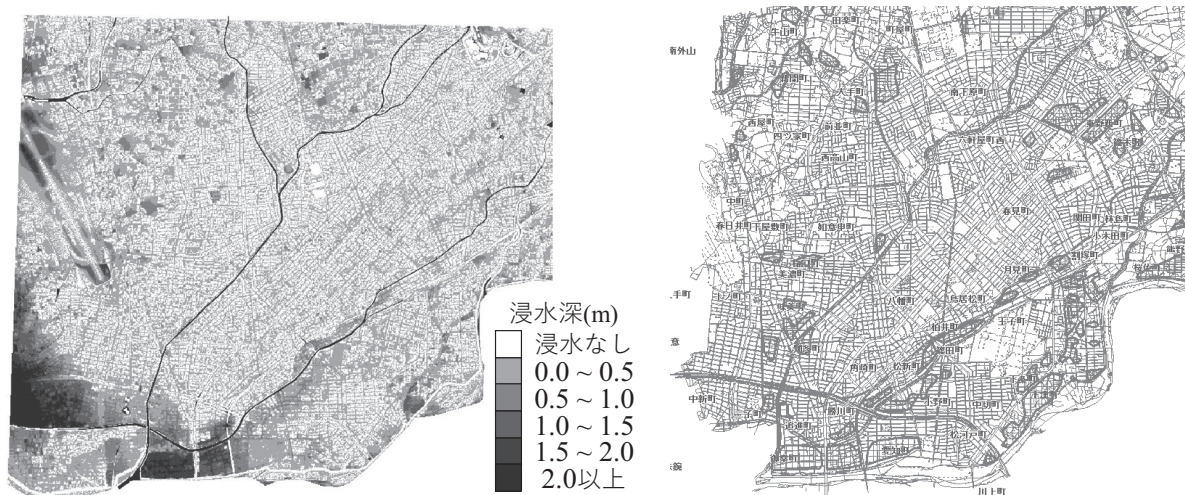


図-19 計算結果と比較（左：最大浸水深の分布，右：春日井市の浸水実績図²³⁾）

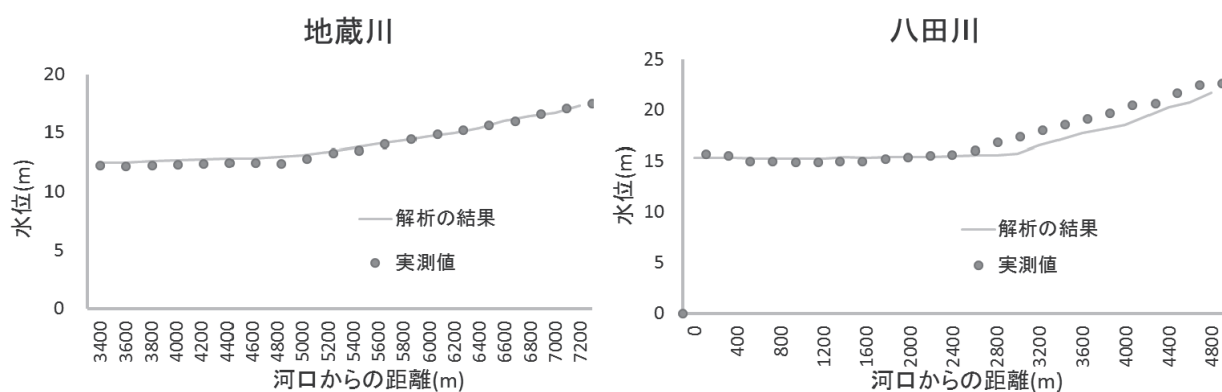


図-20 河川水位の比較

3.4 下水道内水位計測を用いた数値解析の妥当性評価

(1) 下水道内水位計測

3.3で示した情報だけでは、解析モデルの妥当性評価が難しく、地蔵川流域の浸水プロセスが十分に把握できない。そこで、平成29年および平成30年に都市浸水のモニタリングを行った。具体的には、春日井市水防関連情報表示システム（建設技術研究所所有）で降雨、河川水位の情報収集を行い、同時に、図-21に示すマンホールの最下層ステップに、水位計（圧力計）を設置した。観測期間は、平成29年6月22日～同年10月12日と平成30年6月18日～平成30年10月15日である。観測場所は、春日井市と協議し、過去の浸水実績と観測のしやすさを考慮して選定した。観測場所を図-21にアルファベットで示す。計測にはJEFアドバンテックの高精度小型メモリー圧力計（2分毎の計測を設定）を使用し、マンホールの最も低いステップに固定した。よって、固定したステップよりも高い水位の場合にその値が計測される。

計測期間中 B 地点で3回（平成29年7月4日、8月18日、平成30年8月12日）、F 地点で2回（平成30年6月29日、8月12日）、H 地点で1回（平成29年7月4日）の地表面浸水（F 地点は50cm程度、その他は20cm程度）があった。なお、春日井市によると、平成29年7月4日はB 地点に赴き浸水を確認しているが、平成29年8月18日は真夜中でもあり、把握できなかったようである。平成29年のB 地点の下水道内水位を図-22に示す。なお、計測期間中において水位変化があまり生じていなかった観測地点(G,I など)

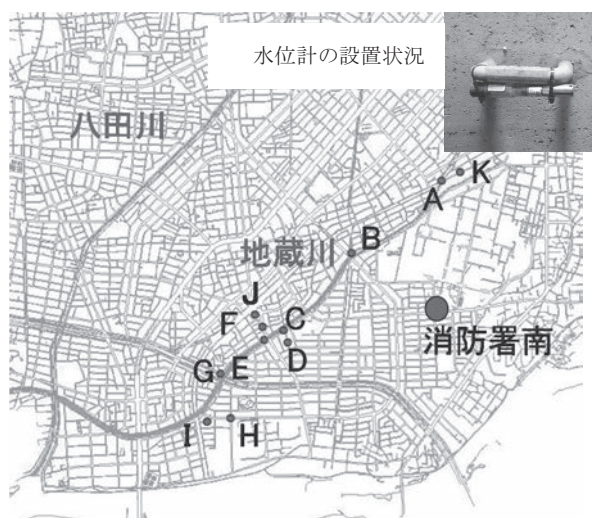


図-21 下水道内水位の計測地点

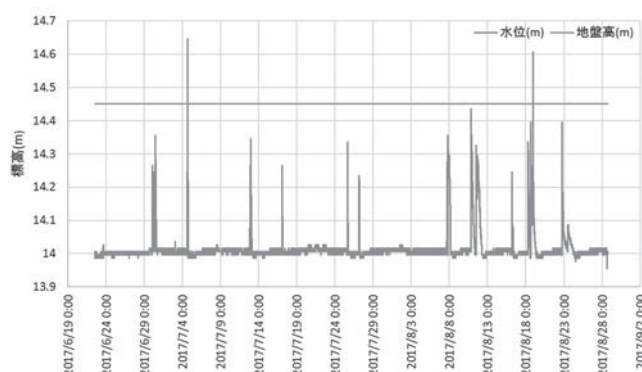


図-22 B地点の下水道内水位（平成29年）

もあった。これらは、設置個所における雨水の集中の程度と、計測装置高と水位との関係によるものと考えられる。

今回、下水道内水位を計測することで図-22のような情報を得た。計測を実施しない場合、現地のヒアリングにより地上の浸水が把握できたとしても、B地点では期間内に3回のみの浸水を把握することになり、図-22のような詳細な水位変化を知ることはできない。このような情報の蓄積が都市浸水の様子を知るためには、きわめて重要と考える。

(2) 観測結果を用いた数値解析結果の妥当性評価

ここでは、平成29年7月4日の観測結果を用いて解析モデルの妥当性評価を行う。図-23のようにティーセン法で分割した地域に、各観測所で観測された平成29年7月4日の降雨の時間変化を与え、地蔵川下流にて観測された水位を与えて、都市浸水の再現計算を行った。

解析結果として、下水道内水位の時間変化を図-24に示す。ここでは、本図の計算値と観測値の比較を行う。本図から、Bでは地上でも浸水が生じた箇所であり、計算結果にも浸水が表現されている。また、F、Gでは観測結果で得られた水位変動と同様の水位変動を示しており、下水道内の水輸送のプロセスが表現できていると考える。なお、これらは、地蔵川の右岸に位置する。ただし、地蔵川左岸流域に位置するD、H、Iでは排水が十分に現れていない。したがって、下水道管の接続状況を再度確認し、まだ考慮できていない貯水槽およびポンプ排水を考慮することが次の課題となった。

(3) 修正モデルによる妥当性評価

ここでは、下水道管の接続を見直し、修正を行い、ポンプ排水と貯水槽を考慮した。新たに考慮した排水施設は、勝西浄化センター（ $2.4 \text{ m}^3/\text{s}$ ）と南部浄化センター（ $14.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ）の2ヶ所である。貯水槽は、はなのき公園（ 3039 m^3 ）、細木公園（ 7397 m^3 ）、勝川公園（ 5032 m^3 ）の3箇所を考慮した。排水施設と貯水槽の位置を図-25に示す。各貯水槽には、導水路が存在し、一部が既存の下水管と接続している。解析において、新たにマンホールおよび下水道管を設置し、堰高の設定を行った。

図-24には、修正モデルの結果（計算値（排水貯留考慮））が示されている。本結果と観測値を比較してみると、D、Gなど精度の高い結果を示しており、H、Iなど左岸流域でみられた排水不良が改善され、水位低下の様子が適切に表現できていると考える。H地点の近くには貯水槽があり、Iにも影響を与える。H、Iの計算値と観測値には差がみられることから、管路のつながりと貯水槽の堰高について見直す予定である。このように、まだ課題はあるものの全体的な解析モデルの精度向上が行われた。本解析モデルでは、地上に雨が降り、

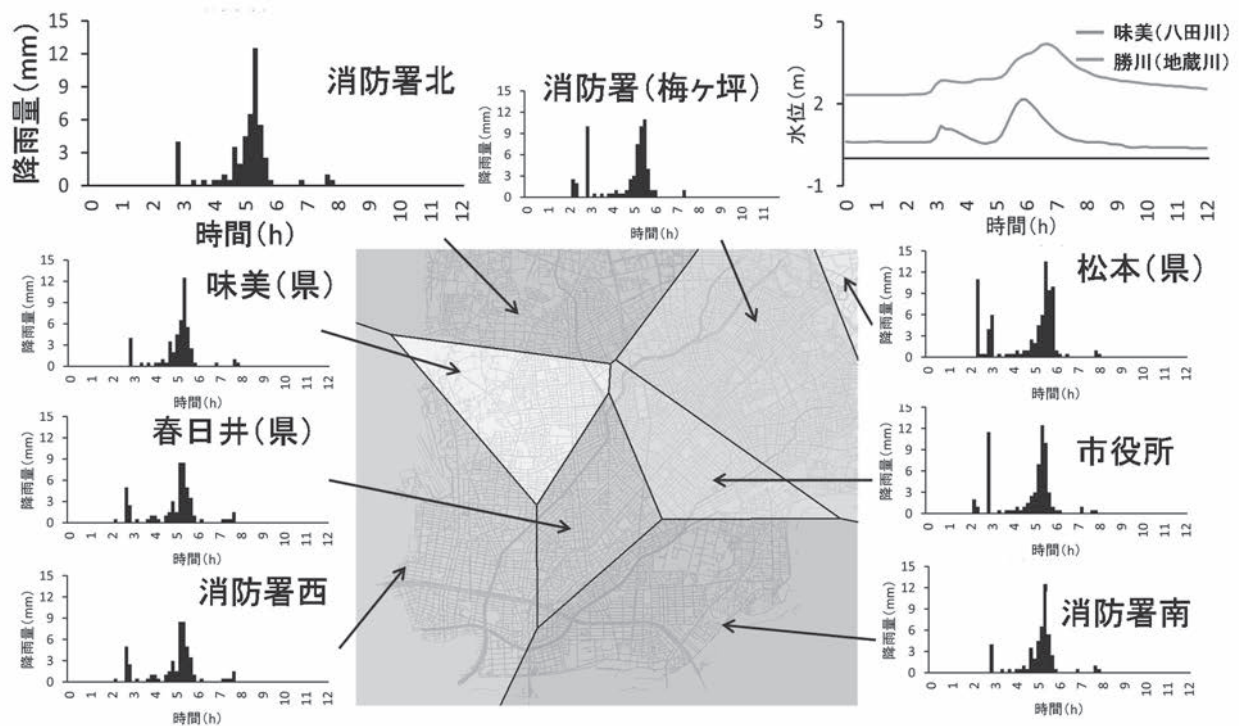


図-23 計算条件（平成 29 年 7 月 4 日）

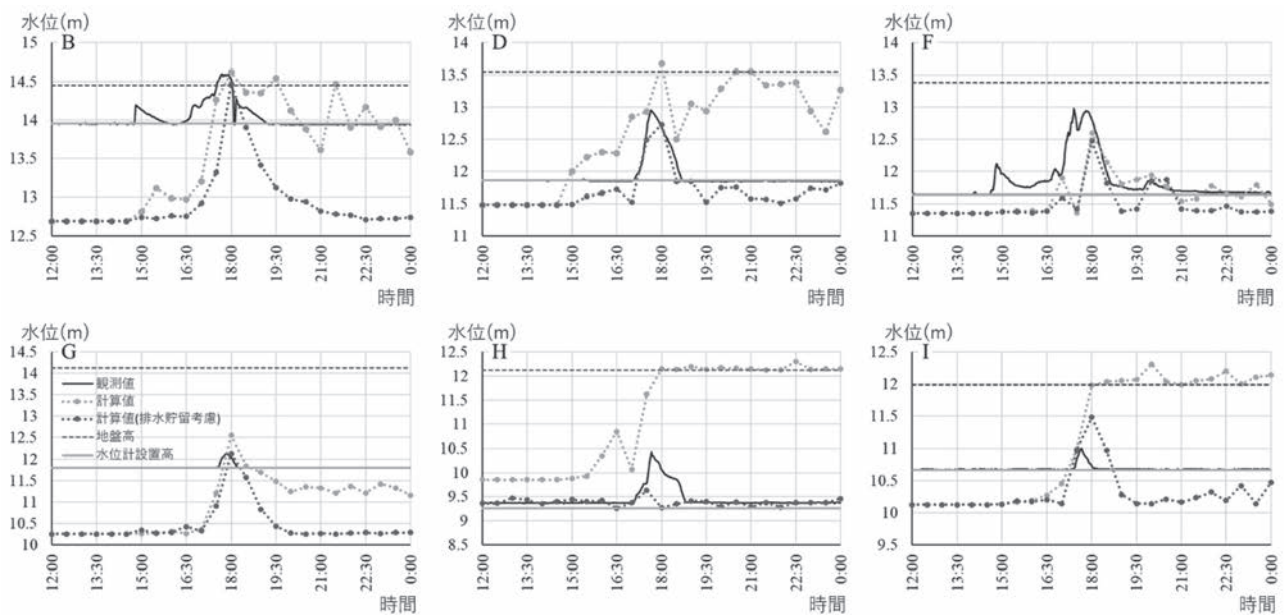


図-24 下水道内水位の解析値と観測値の比較（平成 29 年 7 月 4 日）

それがマンホール部分を介して下水道内へ流れるとしている。実際には雨水樹で集積した雨水が下水管へ流入し、さらには、建物の屋根に振った雨は、直接下水道へ流入することから、そのような機構を考慮したモデルの開発により、精度はさらに高まることが予想される。



図-25 考慮した調整地とポンプ施設

3.5 下水道内水位計測の活用

ここでは、下水道内水位計測の観測結果から春日井市の浸水特性を明らかにする。

まず、消防署南の降雨データとB地点の水位データを用いて、降雨(10分間雨量, 時間降雨, 日降雨)のピーク値と水位のピーク値の、降雨ピークと水位ピークの時間差を検討した。図-26に示すように、10分間雨量の最大値と水位ピークには相関関係がみられ、この関係は時間雨量を用いた場合も同様であった。しかし、日雨量との関係は見られなかった。また、降雨

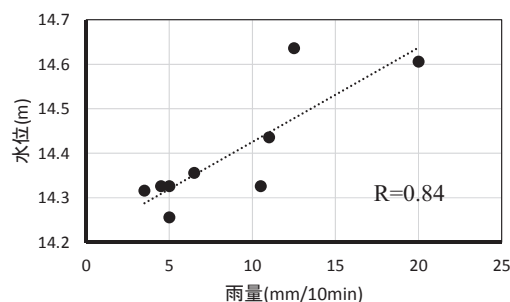


図-26 降雨と水位の関係(B 地点)

ピークと水位ピークの時間差の多くは20分～30分程度であった。降雨と水位の関係をみると、10分間降雨と共にそれまでの累積雨量が水位の増加に大きく影響していると考えられた。そこで、図-27のように、降雨とそれによる水位を基礎とし、ピーク水位までを対象に、10分間雨量, その一つ前からの1時間先行雨量を求め、その時の水位をある区間で色分けして、一つの降雨パターンで得られる関係を図-28のように図化した。この図には、平成29年と平成30年の情報が記されている。本図から、先行雨量が大きい場合に浸水が発生していることが分かる。このように観測データを蓄積することで、浸水の特徴をより明瞭に示すことができる。しかし、図-28の表現では、浸水する降雨の様子は見積もることができるが、定量的な降雨の情報から定量的な下水道内水位を見積もることは難しいと考える。また、1時間先行雨量としても、10分前と60分前では水位に与える重みが異なると考えた。そこで、半減期を用いた実効雨量を、(17)式を用いて図-29のように求め、実効雨量のピーク値と水位のピーク値の関係を検討し、最大となる相関係数を示す場合を整理した。

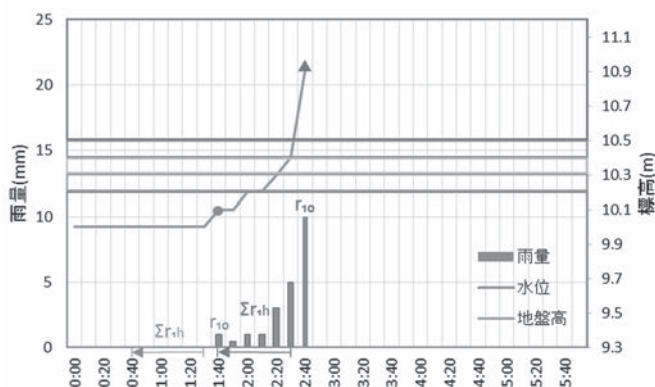


図-27 観測データの整理

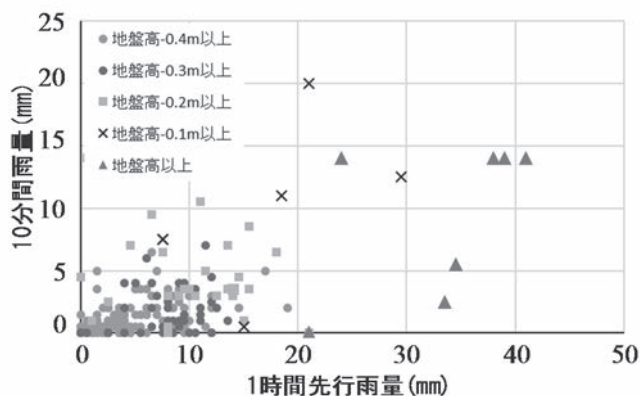


図-28 1時間先行雨量と10分間雨量と水位の関係

$$R_{Gi} = \sum_{n=0}^{nT} a_n R_{i-n} \quad a_n = (0.5)^{\frac{n \times 10}{T}} \quad (17)$$

ここに、 R_{Gi} : 実効雨量(mm), R_i : i 番目の降雨値(mm/10分), a_n : 減少係数, nT : $i-1$ 個であり, T : 半減期(分)である。

B地点の場合は、半減期30分の条件で相関係数も高い状況となる。この関係を図-30に示し、ここでは、地盤高の情報も記している。本図から、相関関係を示す近似式を用いることで、地盤高を超え浸水する実効雨量も求めることができる。

各地点の観測データを同様に整理し、それぞれの実効雨量のピークと水位ピークの相関係数が高い半減期は表2のようになった。表2の値の差は、それぞれの地域における地盤勾配や下水道の配管の様子により雨水が集積する状況が異なることによるものと考えられる。

また、それぞれの場所の線形の相関関係式を用いて浸水する実効雨量を求めた。その値を表-3に示す。本表から、それぞれの場所の浸水する実効雨量の違いがみてとれ、浸水する実効雨量が小さいことは、浸水にとって脆弱である場所といえる。

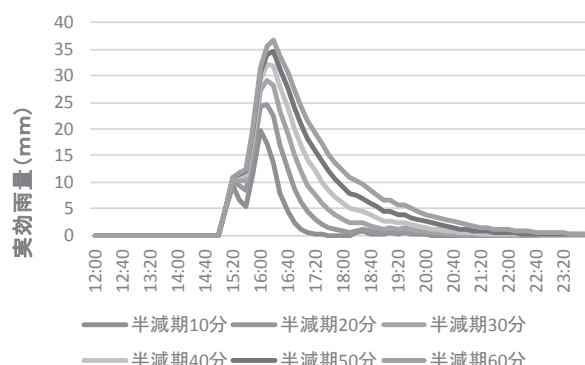


図-29 10 分間雨量と 1 時間先行雨量と水位の関係 (B 地点, 平成 29 年, 平成 30 年)

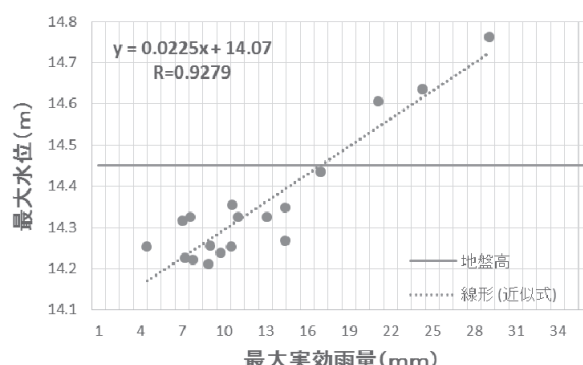


図-30 最大実効雨量と最大水位の関係

表-2 観測場所の半減期

観測点	A	B	D	F	G
半減期(分)	20	30	50	20	10
観測点	H	I	M	N	O
半減期(分)	40	50	10	10	30

表-3 観測場所の浸水する実効雨量

観測点	A	B	D	F
実効雨量(mm)	50.1	15.6	43.1	25.6
観測点	G	H	I	M
実効雨量(mm)	59.8	52.9	79.6	71.1
観測点	N	O		
実効雨量(mm)	24.6	48.8		

4. 解析モデルの活用 ^{24) 25) 26) 27) 28)}

4.1 起源を考慮した浸水解析

(1) 研究の目的

3. では、改良を加えながら解析モデルを整備し、貯水槽の有無による、または、ポンプ排水の有無による都市浸水の様子（それぞれの効果）が検討された。これらは重要な一つの成果であるが、ここでは、別の視点から数値解析モデルの活用を考える。

3. で示した内水氾濫は、雨水が下水道の排水機能以上に集積して、浸水が生じる現象である。そこで、一つの計算の中で、雨水の移動を可視化できれば、雨の集合する経路が分かるので、適切な対策が構築できる。佐山ら²⁹⁾は浸水の起源を分析する方法として、T-SAS (time-space accounting scheme) を開発している。本研究は、T-SASのアイデアを活用し、内水氾濫における雨水の移動を可視化する解析モデルを構築した。解析モデルは3.2と同様であり、運動量方程式は変更せずに、連続式の取り扱いを変更した。雨水を時間または空間の成分に分け、上流側の成分を考慮しながら連続式を用いて成分毎に水量を求め、計算格子における異なる成分の水量を総合して格子内の総水量を算出し、水深を求めている。

また、後述するように、大規模浸水に対しても起源を考慮した解析を試みている。この場合も、2.2で示した解析モデルを用い、連続式の取り扱いを変更した。

(2) 基礎方程式および離散化

ここでは紙面の都合上、地表面と下水道管におけるモデル化について説明する。

地表面では、以下の連続式により成分 k の水量が求められる。

$$\frac{\partial V_{k_{i,j}}}{\partial t} = Q_{x_{i-1/2,j}} \frac{V_{k_{i+a,j}}}{V_{i+a,j}} - Q_{x_{i+1/2,j}} \frac{V_{k_{i+b,j}}}{V_{i+b,j}} + Q_{y_{i,j-1/2}} \frac{V_{k_{i,j+c}}}{V_{i,j+c}} - Q_{y_{i,j+1/2}} \frac{V_{k_{i,j+d}}}{V_{i,j+d}} + r_k A_0 - v_{ok} - v_{ink} \quad (18)$$

$Q_{x_{i-1/2,j}} \geq 0$ の場合 $a = -1$ 、 $Q_{x_{i-1/2,j}} < 0$ の場合 $a = 0$
 $Q_{x_{i+1/2,j}} \geq 0$ の場合 $b = 0$ 、 $Q_{x_{i+1/2,j}} < 0$ の場合 $b = 1$
 $Q_{y_{i,j-1/2}} \geq 0$ の場合 $c = -1$ 、 $Q_{y_{i,j-1/2}} < 0$ の場合 $c = 0$
 $Q_{y_{i,j+1/2}} \geq 0$ の場合 $d = 0$ 、 $Q_{y_{i,j+1/2}} < 0$ の場合 $d = 1$

ここに、 V_k ：汜濫格子における成分 k の水量、 V ：格子内総水量、 $Q_x (= M\Delta y)$ 、 $Q_y (= N\Delta x)$ ：それぞれ x, y 方向の流量、 r_k ：成分 k の降雨、 A_0 ：地表面の計算格子の面積である。 v_{ok} ：河川への流出流量であり、 v_0 が正の場合は地表面格子における水量の比 v_k/V を、負の場合は対応する河川格子における水量の比 V_{rk}/V_r を用いて計算される。また、 v_{ink} はマンホール部における汜濫域から下水道への流入流量であり、正の値の場合には地表面格子における水量の比 v_k/V を用い、負の場合にはマンホール部の水量 V_{mk_m}/V_{m_m} の比を用いて計算される。 (i, j) 格子に対応する $V_{k_{i,j}}$ を求めた後、格子内で成分に関する総和をとることで $V_{i,j}$ が求まり、格子面積で除することで水深が求まる。

下水管では、以下の連続式により成分 k の水量が求められる。

$$\frac{\partial V_{S_{k_{k,n}}}}{\partial t} = Q_{S_{k,n-1/2}} \frac{V_{S_{k,n+c}}}{V_{S_{k,n+c}}} - Q_{S_{k,n+1/2}} \frac{V_{S_{k,n+d}}}{V_{S_{k,n+d}}} \quad (19)$$

ここに、 V_{S_k} ：下水道格子における成分 k の水量、 V_S ：下水道格子内の総水量である。また、最下流端の格子では、 $Q_{S_{k,n-1/2}}$ がマンホールと接続する断面の流量となり、その場合、 $Q_{S_{k,n-1/2}} < 0$ の条件では接続するマンホール格子 m の水量を考慮して、(18)式の項が以下のように変換される。

$$Q_{S_{k,n-1/2}} \frac{V_{S_{k,n+c}}}{V_{S_{k,n+c}}} \rightarrow Q_{S_{k,n-1/2}} \frac{V_{mk_m}}{V_{m_m}} \quad (20)$$

最上流端の格子も同様に、マンホールと接続する断面の流量が正の場合にはマンホール部の上流側の水量が考慮される。 (k, n) 格子 (k ：管番号、 n ：断面番号) に対応する $V_{S_{k,n}}$ を求めて、格子内で成分に関する総和をとることで $V_{S_{k,n}}$ が求まり、格子長さで除することで断面積が求まり、断面特性量と水深の関係を用いて、断面積から水深を求め、径深、水面幅などを求める。

マンホール部や河川部でも同様であり、流入水量の上流側格子の成分 k の水量と総水量の比を流量に掛けて、成分 k に関する連続式を計算する。その後、格子内で成分の水量の総和をとって全水量を求め、断面積や水深を求める。

(3) 雨水の移動の可視化

計算領域を左岸流域、右岸流域、その他の流域、河川（下流から）に区分し、そこを起源とする水（成分とする）の移動の分析を行った。計算領域および計算条件は 3.3 と同様である。

計算結果を図-31 に示す。本図は地表面の浸水深の分布であり、下水道内水位も同様に解析できている。これらの検討から、地盤の関係上、右岸側は比較的早く排水され、流下した雨水は地蔵川に入り、下流で溢れて左岸流域にも広がるのに対し、左岸側は地盤勾配が緩く、浸水も長い期間生じる様子が示された。同じ地蔵川流域においても、左岸流域と右岸流域の浸水特性は異なっている。このような情報を春日井市の職員と共有することは非常に大事と考える。

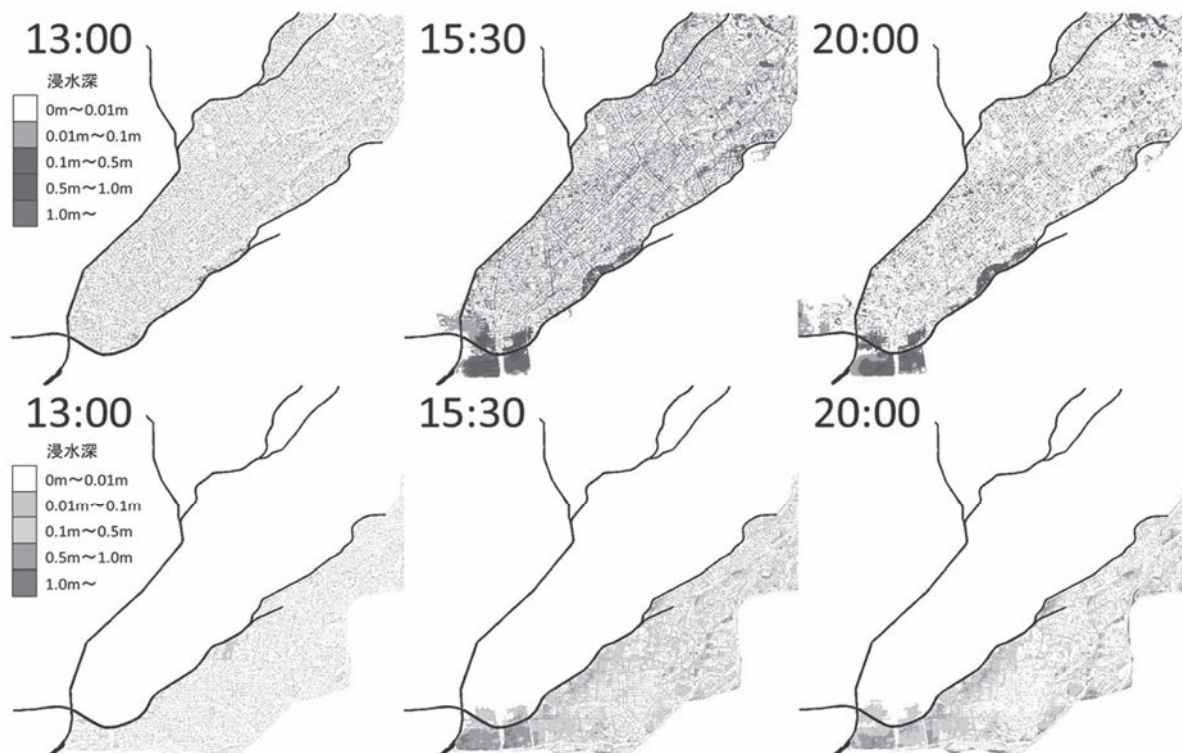


図-31 地上の浸水深の分布（上：右岸流域／下：左岸流域に降った雨水の移動）

(4) 雨水の移動の逆解析（降雨エリアの算出）

4.1(3)では雨水の移動の可視化として、ある地域に降った雨の移動の様子を考察した。ここでは、雨水の移動の可視化技術を応用して、浸水の起源となる降雨範囲の逆解析を提案している。ある指定箇所（対象浸水エリア）にある水の元の降雨地域（降雨エリアと定義）を求めたのが、図-32である。本図から、下水道内の水は地表面の氾濫水よりも広い地域から集合して流れていることが分かり、その結果、排水が弱まり浸水が生じていることも改めて確認できた。紙面の都合上、それらの詳細は村瀬ら²⁴⁾を参考にしていきたい。

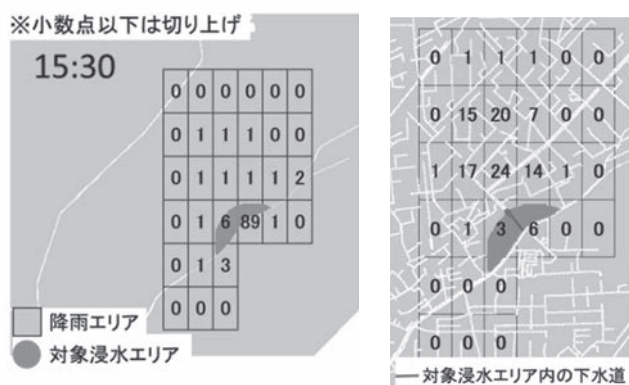


図-32 計算結果の一例：集積した雨水の降雨エリアと雨水の割合（左：陸域，右：下水道）

(5) 大規模浸水における高潮と洪水（豪雨と洪水）の重畳現象への適用

T-SAS を活用することで、高潮と洪水の重畳現象の中で、高潮または洪水の浸水を表現することも可能である²⁵⁾。ここでは、高潮（伊勢湾台風による潮位偏差の計算値（ピーク潮位 19h）と満潮 1.3m が重なった場合）と洪水（計画洪水流量 4400m³/s をピーク値(19h)に持つ流量ハイドログラフ）が重なった場合を想定し、高潮計算ではピーク時に海岸堤防が破堤し、洪水計算では指定箇所が 19h に破堤する条件で計算を行った。ここでは、高潮と洪水の重畳現象の解析の中で、高潮のみ、洪水のみの現象を区別して計算している。図-33 に最大浸水深の分布を示す。本図から、高潮と洪水が同時生起する中で、高潮のみおよび洪水のみの最大浸水深の分布が計算されている。高潮は海水であり、洪水は淡水であるので、このような解析結果は、

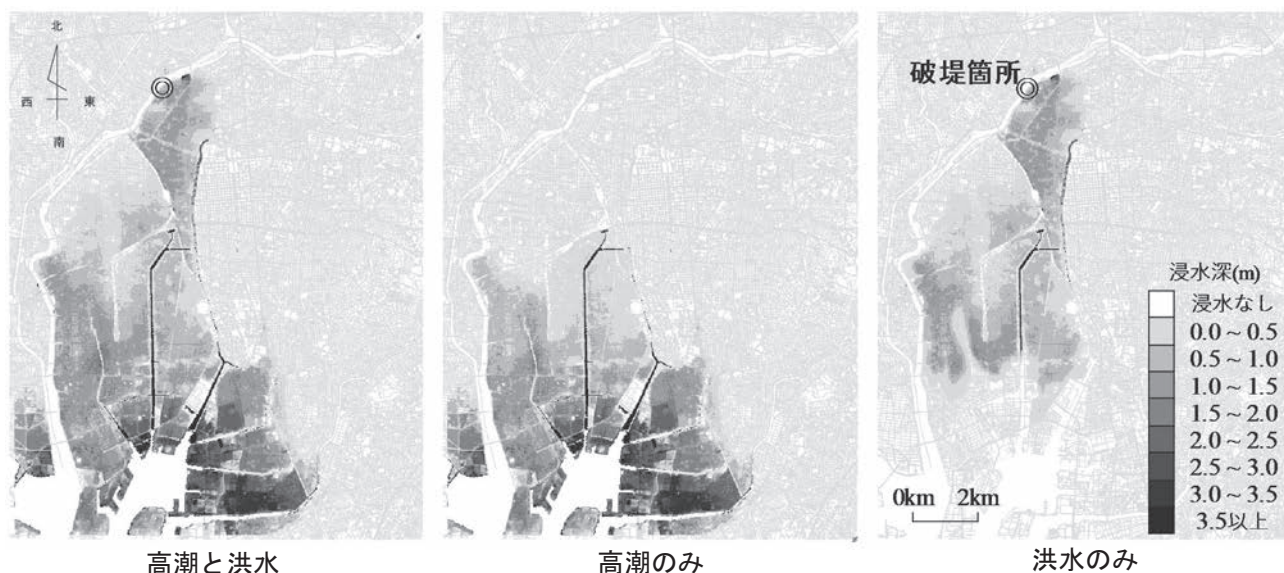


図-33 最大浸水深の分布（高潮と洪水の重畳）

同時生起する中での塩害対策などの一つの目安になると考える。

同様に、豪雨と洪水の重畳現象を対象とした中で、豪雨および洪水の浸水を明らかにする解析も試みている²⁶⁾。名古屋を対象とし、下水道ネットワークおよび堀川、中川運河などの小河川の水利を考慮して、名古屋市で観測された東海豪雨時の豪雨を全域に与え、計画洪水流量をピーク流量にもつ流量ハイドログラフを破堤箇所に与えた。始めに豪雨があり内水氾濫が広がった後に、洪水破堤による浸水が生じる条件の解析を行った。その結果、洪水氾濫の拡がりと共に、先に生じていた豪雨による氾濫水が南下する様子が示された。さらに、格子における浸水の中での内水（豪雨）と外水（洪水）の割合が計算されることから、浸水解析における内水氾濫と外水氾濫の寄与度を表現することが可能となった。このような工夫によって、内水氾濫と外水氾濫の影響する地域も明確になることから、解析結果の理解が深まるものとする。

4.2 SVM（機械学習）を用いた簡易浸水予測システム^{27) 28)}

内水氾濫対策に関連する必要な情報のひとつに、将来（例えば、1時間後）の浸水予測が挙げられる。3で示した内水氾濫の物理モデルを活用してリアルタイムシミュレーションを実施することも重要な検討課題であるが、ここでは、構築した解析ツールから得られる計算結果をデータベースとして、SVM（機械学習）を活用する簡易浸水予測システムを紹介する。これは、高橋ら²⁷⁾により検討されたものであり、現在、3.のモデルを基礎として、愛知県春日井市において簡易浸水予測システムの精度検証が行われている。

まず、2014年～2017年までの降雨（春日井（県）、松本（県）、味美（県）、市役所、消防署（梅ヶ坪）、消防署西、消防署南、消防署北）、河川水位（八田川（県）、地蔵川（県））をさまざまに引き延ばして、浸水が生じる多数の条件を作成する。本研究では計97個の降雨パターン、河川水位パターンを作成し、それを活用した氾濫解析を実施する。

得られた計算条件および計算結果を整理し、1時間最大雨量と最大水位と、各計算格子の閾値（0.2m, 0.5m, 1.0m, 2.0m）以上の有無の関係を機械学習（SVM）を用いて求めた。これにより、与えられる降雨に対する浸水が求められる。

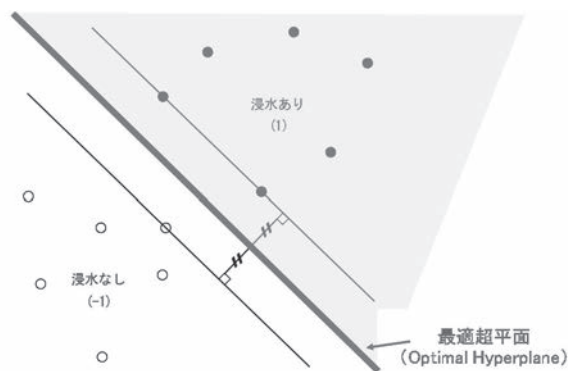


図-34 機械学習 (SVM) の概念

5. おわりに

ここでは、都市浸水の解析法の概説および活用の紹介を目的として、以下の項目および事例を示した。

第2章では、都市における大規模浸水の危険性を示して、地下空間を考慮した解析モデルを紹介し、名古屋および大阪への適用事例を示した。例えば、名古屋では、庄内川の氾濫に関して、破堤箇所の違いによる地下空間への流入の様子が異なり、JR盛土よりも上流側で破堤が起これば、大きな浸水深を持って流れる氾濫水は地下空間の入り口が多い名古屋駅周辺に至り、そこで大量の氾濫水が地下空間へ流入することが示された。また、その水は乗り換え駅を介して他の地下鉄線路へ流入するが、熱田台地などの影響もあり地下鉄線路の標高の高い東側には浸水しないことが示された。また、大阪では、低平地を地下鉄が通っているため、対象とした淀川の破堤点の多くの場合で、地下鉄が満水になっていることが示された。このように、都市の大規模浸水を対象とする場合には、地下空間を想定した氾濫解析が重要であり、その危険性を示すことができたが、地下空間の情報の整理が不十分であり、精度向上について検討する必要がある。

第3章では、都市の内水氾濫解析の概要を示し、愛知県春日井市を対象とした解析事例を示した。ここでは、河川流解析、氾濫流解析、下水道解析とそれらの接続法を説明し、現地観測結果との比較から、解析モデルの精度を検証した。また、下水道内観測の結果を活用して、春日井市の降雨と浸水の関係を考察し、半減期を考慮した実効雨量のピーク値と水位のピーク値に高い相関があることを示した。解析精度の検証において、下水道内水位の情報は非常に有効であり、さらに様々な浸水特性の考察にも活用できることから、下水道内水位計測の重要性が示された。

第4章では、解析モデルの活用として、構築した解析モデルをT-SASを用いて展開し、解析の中で空間、時間、要因により分けられた起源毎の浸水の様子を表す解析モデルを構築した。その適用として、豪雨による都市浸水における雨水の移動の可視化、雨水の移動の逆解析を用いた降雨エリアの算出、高潮と洪水の重畳現象における高潮と洪水それぞれの浸水の様子、豪雨と洪水の重畳現象における豪雨（内水）と洪水（外水）それぞれの浸水の様子などを紹介した。また、SVM（機械学習）を用いて、内水の解析結果をデータベースとした降雨値から各地点の閾値を超える浸水の有無を判断する簡易浸水予測システムを紹介した。

過去に浸水災害が頻繁に発生していた低平地にも、現在では大規模な浸水災害の発生が減少したため、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、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されるようになった。そのような災害に対して、氾濫解析は主にハザードマップの作成や費用便益評価のために活用されているが、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、今後はきわめて重要になると考える。ここで紹介した数値解析法は基礎的なものであり、道路ネットワークモデル、非構造格子モデルなどによる都市構造物の詳細な表現や、建物の屋根に降った雨水の排水、浸水現象に関わる建物の取り扱い（建物への雨水の流入・流出の考慮）など、今後は高度な解析モデルの社会への普及、適用が進むと考えられる。その場合、検証データの確保は非常に重要となるため、本研究で示した下水道内水位計測の重要性はますます高まると考える。さらに、ここでは、数値解析モデルの活用を意識した研究事例を紹介した。解析モデルを高度化することで実現象を明らかにすることを目指したが、それに加えて、浸水のメカニズムの理解を深めるための数値解析の活用（工夫）も意識して検討を進めた。ここで示したように、数値計算における現象理解のためのモデルの活用（工夫）は非常に重要な視点と考える。

謝辞

本報を作成するにあたり、中部大学大学院博士後期課程の村瀬将隆氏に多大な支援を受けました。ここに記して謝意を表します。また、本報の内容は、中部大学工学部都市建設工学科の武田研究室の卒業生に大きな支援を受けて実施してきたものです。ここに謝意を表します。さらに、春日井市の内水氾濫に関わる研究

は、カジマICTの高橋俊彦氏，建設技術研究所の矢神卓也氏と共同で実施した成果であることを記します。

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) 水利公式集[2018年版]，土木学会水利委員会，丸善，pp.237-250，2019.
- 3) 例えば，国土交通省水管理・国土保全局 河川環境課 水防企画室 国土技術政策総合研究所 河川研究部 水害研究室：洪水浸水想定区域図作成マニュアル（第4版），2015.
- 4) 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□-12，1989.
- 5) 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，pp.589-594，2004.
- 6) 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.
- 7) 川池健司・中川一：都市域におけるオンサイト貯留施設による内水氾濫軽減効果の検討，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.74, No.4, I_1537-1542, 2018.
- 8) 関根正人：住宅密集地域を抱える東京都心部を対象とした集中豪雨による内水氾濫に関する数値解析，土木学会B1（水工学），Vol.67，No.2，PP.70-85，2011.
- 9) 関根正人，小林香野：荒川決壊を想定した東京東部低平地を対象とした浸水・氾濫の数値予測，土木学会B1（水工学），Vol.73，No.4，i_1453-I_1458，2017.
- 10) 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.
- 11) 尾崎平，浅野統弘至，石垣泰輔，戸田圭一：短時間集中豪雨に伴う内水氾濫による地下街浸水特性の考察，土木学会論文集B1（水工学），Vol.70，No.4，pp.I_1417-I_1422，2014.
- 12) 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.
- 13) 関根正人，大野龍馬：複雑な構造をもつ地下鉄駅構内の浸水時避難行動解析と避難誘導，水工学論文集，Vol.55，pp.961-966，2011.
- 14) 井上知美，川中龍兄，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.
- 15) 武田 誠，西田貢士郎，村瀬将隆，川池健司：地下鉄を考慮した都市の浸水解析，地下空間シンポジウム論文・報告集，第21巻，pp.153-160，2016.
- 16) 村瀬将隆・中島勇介・武田 誠・川池健司・松尾直規：地下鉄を考慮した名古屋と大阪の大規模浸水解析，土木学会論文集B1(水工学) Vol.73, No.4, I_1441-I_1446, 2017.
- 17) 村瀬将隆，中島勇介，武田 誠，川池健司：洪水破堤による三大都市圏の浸水解析，地下空間シンポジウム論文・報告集，pp.97-102，第23巻，2018.
- 18) 武田 誠，久野智弘，中村正司，松尾直規：名古屋駅前地下街の入口調査と地下空間の浸水解析，地下空間シンポジウム論文・報告集，第21巻，pp.161-166，2016.
- 19) 武田 誠・野々部竜也・橋本善喜・松尾直規：春日井市の内水氾濫解析と雨水の移動の可視化に関する検討，土木学会論文集B1(水工学) Vol.72, No.4, I_1375-1380, 2016.
- 20) 村瀬将隆・武田 誠・矢神卓也・高橋俊彦・村松航希：春日井市における都市浸水のモニタリングと内水氾濫解析の検証，土木学会論文集B1(水工学), Vol.74, No.5, I_1471-I_1476, 2018.

- 21) 村瀬将隆, 大矢航平, 武田 誠, 矢神卓也, 高橋俊彦: 春日井市における下水道内水位計測とその浸水予測への適用, 土木学会第 74 回年次学術講演会, 2019. (発表予定)
- 22) 山内琳太郎, 村瀬将隆, 武田 誠, 松尾直規, 矢神卓也, 高橋俊彦: 排水施設と貯水槽を考慮した春日井市の都市浸水解析, 土木学会第 74 回年次学術講演会, 2019. (発表予定)
- 23) 春日井市ホームページ, 春日井まっぷ, 防災情報: <http://www2.wagamachi-guide.com/kasugai/> (2019年6月28日確認)
- 24) 村瀬将隆, 武田 誠, 松尾直規: 雨水の移動の可視化技術を用いた都市内水氾濫の浸水特性に関する検討, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.74, No.4, I_1513-I_1518, 2018.
- 25) 武田 誠, 村瀬将隆, 中島勇介, 小松健大, 松尾直規: 浸水の起源を考慮した高潮と洪水の重畳氾濫に関する数値解析, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.74, No.4, I_1429-I_1434, 2018.
- 26) 武田 誠・村瀬将隆・毛利僚央・松尾直規: 起源を考慮した洪水と豪雨による都市浸水解析, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.74, No.5, I_1465-I_1470, 2018.
- 27) 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.
- 28) 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.
- 29) 佐山敬洋・建部祐哉・藤岡 奨・牛山朋來・田中茂信: 大規模洪水氾濫の時空間起源分析に関する研究, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.69, No.4, I_463-I_468, 2013.