

総合的な氾濫解析システムの構築に関する研究

STUDY ON THE SYNTHETICA SYSTEM OF OVERLAND FLOOD FLOW ANALYSIS

武田 誠¹, 松尾直規², 山中威士³, 森田 豊⁴

Makoto TAKEDA, Naoki MATSUO, Takeshi YAMANAKA and Yutaka MORITA

¹正会員 博士(工) 中部大学講師 工学部都市建設工学科 (〒487-8501 愛知県春日井市松本町1200)

²フェロー 博士(工) 中部大学教授 工学部都市建設工学科 (〒487-8501 愛知県春日井市松本町1200)

³三井共同建設コンサルタント (〒464-0850 愛知県名古屋市千種区今池5丁目24-32)

⁴学生会員 中部大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (〒487-8501 愛知県春日井市松本町1200)

As the prevention of all water disasters by using of structural measures is very difficult, the present task is to construct non-structural disaster measures as well as the usual structural ones. The importance of overland flood flow analysis increases for examination of these various counter measures. The aim of this study is to develop the synthetic system for analysing water phenomenon in river, sea and urban region in flooding. The heavy rain in Tokai district is treated in this study. The suitable distribution of inundation water depth is obtained in the inundation states of the urban area. From the simulation results, the validity of the numerical analysis models systematized here and the effect of the sewer system in flood is discussed.

Key Words : *Overland flood flow analysis, Tokai heavy rainfall, Urban area, Sewer system, Numerical analysis model*

1. はじめに

近年、豪雨に伴う水害が多発しており、水災に対する対策の見直しが進められている。これまでの治水対策では、破堤や越水に伴う外水氾濫が主たる対象とされてきたが、近年では、降雨排除不良に伴う内水氾濫も含めて検討する必要性が唱えられており、特定都市河川浸水被害対策法が整備されるなど、治水事業も新たな段階に入ってきている。すなわち、浸水に関与する全ての事象(河川、流域、下水道、遊水地など)を詳細に検討し、それらに対する対策の効果を適切に評価する必要がある。

今日の治水対策に対する意識の高まりは、平成12年の東海豪雨災害によるものが大きいといえよう。平成12年9月11日から12日にかけて、東海地方では台風14号および秋雨前線の影響により集中豪雨に見舞われた。名古屋地方気象台では、時間雨量93mm、総雨量567mmを記録した。これは、年間総雨量の3分の1に当たる量である。この記録的な集中豪雨で、愛知県内では水防警報が発令さ

れ、新川・天白川では危険水位(計画高水位)を超える過去最高の水位を記録した。特に被害が大きかった新川では、河口から16km地点、左岸側の名古屋市西区あし原町で破堤があった。この破堤による氾濫面積は5km²である。また、当時はいたるところで内水による氾濫災害が生じており、交通などの都市機能が麻痺するなど、都市の水災に対する脆弱性が浮き彫りにされた¹⁾。

このような浸水災害に対してハード的あるいはソフト的対策を講じる場合には、氾濫解析による知見が非常に重要となることから、精度の高い解析モデルが望まれる。さらに、前述したように、浸水に関与する現象を適切にモデル化する必要がある。このような情勢に鑑み、多くの研究者が解析モデルの構築に取り組み、解析モデルの精度向上が行われてきた。氾濫解析の精度向上を目指した研究事例として、道路など都市構造に沿った氾濫水の挙動を表現するために、川池²⁾、重枝ら³⁾は非構造格子を用いた解析法について研究を行っている。また、水災時における地下施設の影響を検討した戸田ら⁴⁾、関根ら⁵⁾の研究がある。

本研究では、氾濫現象を巨視的に捉え、しかもその流れを決定付ける道路や下水道などの詳細な現象も取り扱うなど氾濫解析モデルの総合化を目指して、海域、河川域、都市域（地表氾濫と下水道流れ）を一体として解析する数値モデルの開発を行った。また、本研究では、東海豪雨時の浸水現象の再現計算を試み、解析モデルの精度および下水道システムの効果について検討した。

2. 数値解析モデル

本研究で対象とする解析モデルは、河川、海域、都市域および下水道内の水理現象を表現するものである。洪水のみを対象とする場合は、河川のみを考慮すればよいが、河口に水位観測所がない場合もあり、また、高潮、津波など外洋性の氾濫災害に対しても検討を加えたいため、海域を含めて総合的なモデル化を施している。

2.1 解析モデルの骨組み

1) 海域の取り扱い

海域での解析には平面二次元解析法を適用する。基礎方程式は以下の連続式と運動量方程式である。

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial vM}{\partial y} = & -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_w} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial M}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{bx}}{\rho_w} + fN \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} = & -gh \frac{\partial H}{\partial y} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial N}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial N}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{by}}{\rho_w} - fM \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 u, v : それぞれ x, y 方向の断面平均流速、 h : 水深、 M, N : それぞれ x, y 方向の流量フラックス ($M = uh, N = vh$)、 H : 水位、 q : 流入流量（ここではゼロ）、 τ_{bx}, τ_{by} : 水底面でのせん断応力の x, y 成分、 g : 重力加速度、 $\varepsilon_x, \varepsilon_y$: x, y 方向の渦動粘性係数、 f : コリオリのパラメータである。

なお、底面のせん断応力 τ_{bx}, τ_{by} は以下の式で表される。

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

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

ここに、 ρ : 水の密度、 n : マニングの粗度係数である。

2) 河川の取り扱い

河川流の解析には、以下の連続式とエネルギー方程式を用いた。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\beta}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\alpha u}{g} \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \cos \theta \frac{\partial h}{\partial x} - \sin \theta + \frac{n^2 u |u|}{R^{4/3}} = 0 \quad (7)$$

ここに、 A : 流水断面積、 Q : 流量、 x : 流下方向の座標、 t : 時間、 u : 断面平均流速 ($= Q/A$)、 h : 水深、 g : 重力加速度、 θ : 河床勾配、 ρ : 水の密度、 R : 径深、 n : マニングの粗度係数、 α : エネルギー補正係数、 β : 運動量補正係数、 λ : 圧力分布補正係数である。ここで、 α, β, λ は 1 とした。

3) 都市域の取り扱い

都市域での解析には平面二次元解析法を適用する。基礎方程式は(1)式の連続式と(2)式と(3)式から粘性項とコリオリ項を省略した以下の運動量方程式である。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial vM}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_w} \quad (8)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_w} \quad (9)$$

ただし、流入流量 q には降雨量およびマンホール部における落ち込み流量を考慮している。

本研究では、非構造格子を用いた氾濫解析法を適用し、図1のように流速 (u, v)、流量フラックス (M, N) を格子境界（多角形の辺の midpoint）で、水深 (h) を格子の図心で定義し、有限体積法的に差分式を展開する。

連続式について、その差分式は以下の式を用いる。

$$\frac{h^{n+3} - h^{n+1}}{2\Delta t} + \frac{1}{A} \sum_{l=1}^m \{ M_l^{n+2} (\Delta y)_l - N_l^{n+2} (\Delta x)_l \} = q \quad (10)$$

ここで、 h は格子の水深、 m は格子を囲む辺の数、 A は格子の面積である。 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 上での両端の点の 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り、辺 l は格子を囲む辺を意味する。

辺 l で定義された運動量式について、以下のような差分式を用いる。

$$\begin{aligned} \frac{M_l^{n+2} - M_l^n}{2\Delta t} + M1 + M2 = \\ -g\tilde{h}^{n+1} (\nabla H)_x - \frac{gn^2 \frac{M_l^{n+2} + M_l^n}{2} \sqrt{(u_l^n)^2 + (v_l^n)^2}}{(\tilde{h}^{n+1})^{4/3}} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{N_l^{n+2} - N_l^n}{2\Delta t} + N1 + N2 = \\ -g\tilde{h}^{n+1} (\nabla H)_y - \frac{gn^2 \frac{N_l^{n+2} + N_l^n}{2} \sqrt{(u_l^n)^2 + (v_l^n)^2}}{(\tilde{h}^{n+1})^{4/3}} \end{aligned} \quad (12)$$

ここで、 u_l, v_l は辺 l 上での x および y 方向の流速、 $(\nabla H)_x, (\nabla H)_y$ はそれぞれ格子 i, j 間の水面勾配 ∇H の x, y 方向成分、 \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。 $M1, M2$ または $N1, N2$ は、それぞれ(11)式、(12)式の移流項であり、図2に示すような辺 l を中心とするコントロールボリュームを考え

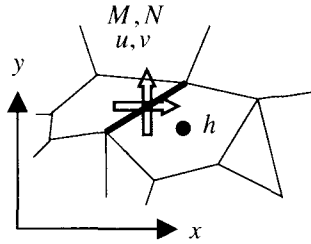


図1 未知量の配置

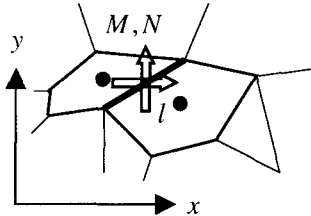


図2 運動量方程式のコントロールボリューム

て、それぞれ次のように計算する。

$$M1+M2=\frac{1}{A_{cv}}\sum_{r=1}^m\{(u_r\tilde{M}_r)(\Delta y)_r-(v_r\tilde{M}_r)(\Delta x)_r\} \quad (13)$$

$$N1+N2=\frac{1}{A_{cv}}\sum_{r=1}^m\{(u_r\tilde{N}_r)(\Delta y)_r-(v_r\tilde{N}_r)(\Delta x)_r\} \quad (14)$$

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、 \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完して求める。(13)式、(14)式の計算では、格子辺上の流速(u_r, v_r)の方向にしたがって、 \tilde{M} 、 \tilde{N} には上流側格子図心の補間流量フラックスを用いる。なお、本研究では移流項計算に用いられる上流側格子の図心の流量フラックス算出において、格子形状を考慮した重みを用いている⁶⁾。

4) 下水道システムの取り扱い

下水道システムは、マンホール部と管渠に分けてモデル化を行い、マンホール部で氾濫域との水の受け渡しを表現している

管渠における水理現象のモデル化は、式(6)、式(7)の連続式とエネルギー方程式を用い、スロットモデルにより満管流れを考慮している。本計算では満管流れの波速 c を 20m/s と仮定し、以下の式からスロット幅 B を求めている。

$$B=\frac{gA_s}{C^2} \quad (15)$$

ここに、 A_s : 下水道管渠の断面積である。なお、マンホールの水位がマンホールに接続している管底高よりも低い場合には越流公式を用いて流速を求めている。

また、マンホール部では、以下の連続式により水位変化を求めている。

$$A_m\frac{\partial H}{\partial t}=\sum Q+Q_{in}-Q_{out} \quad (16)$$

ここに、 g : 重力加速度、 A_m : マンホールの断面積、 H : マンホールの水位、 $\sum Q$: 下水道管渠からマンホールに流れ込む流量、 Q_{in} : 氾濫域からの落ち込み流量、 Q_{out} : ポンプの流出流量であり、マンホールの水位が対応する地盤高よりも高い場合は、 A_m : 対応する氾濫格子の面積、 $Q_{in}=0$ となる。なお、ポンプ場のみ排水が行われ、通常のマンホールではポンプ排水を考慮していない。さらに、氾濫域からの落ち込み流量 Q_{in} は、

$$Q_{in}=\mu Lh\sqrt{gh} \quad (17)$$

として取り扱っている。ここで、 μ : 流量係数、 L : マンホールの円周であり r_m をマンホールの半径とすれば $L=2\pi r_m$ 、 h : マンホールが位置する氾濫格子の浸水深、 g : 重力加速度である。

2.2 解析におけるその他の取り扱い

河川の分岐および合流、河川域と海域の接合、洗堰、小田井遊水地、庄内川・新川河口域の背割堤部における越流の取り扱いの詳細は、武田ら⁷⁾を参照されたい。

2.3 数値解析法

数値解析には差分法を用い、河川の一次元解析、海域および都市域の二次元解析ともに、時間項には前進差分、移流項にはDONORスキーム、その他の項には中央差分を用いた。

氾濫計算のアルゴリズムとして、連続式、運動量方程式を計算した後で、下水道システムの計算を行っており、マンホール部で得られた水位が対応する氾濫格子の地盤高よりも大きい場合には、その水位変化量を氾濫格子の水位に加え、修正された氾濫格子の水位を用いてマンホール部の水位も修正している。氾濫域の連続式の q は $-Q_{in}$ を考慮しており、この取り扱いとマンホール部計算後の修正により氾濫格子における落ち込み・噴出しを表現している。

3. 東海豪雨を対象とした総合的氾濫解析

3.1 計算条件

図3～図5のような名古屋市を囲む領域を計算領域として設定した。東海豪雨の再現計算を行うために対象河川を庄内川 $0.0\text{km}\sim 32.7\text{km}$ 、矢田川 $0.0\text{km}\sim 3.6\text{km}$ 、八田川 $0.0\text{km}\sim 3.6\text{km}$ 、新川 $0.0\text{km}\sim 21.6\text{km}$ 、中川運河 $0.0\text{km}\sim 7.9\text{km}$ 、堀川 $0.0\text{km}\sim 15.3\text{km}$ 、新堀川 $0.0\text{km}\sim 5.9\text{km}$ とする。

計算期間は海域の計算を安定させるため東海豪雨の1日前の2000年9月10日0:00から9月13日1:00までの73時間とする。境界条件として庄内川には志段味水位観測所における流量、矢田川には瀬古水位観測所における流量を与えた。八田川には春日井水位観測所で得られた水位を、新川には久地野水位観測所で得られた水位を与えた。また、中川運河、堀川、新堀川の上流端流量を $0.0\text{m}^3/\text{s}$

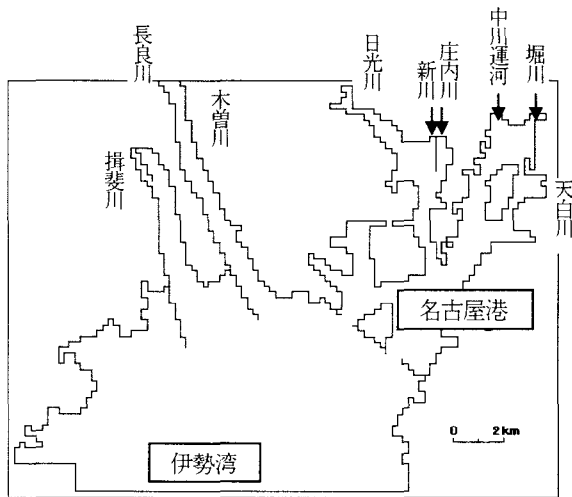


図3 海域の計算領域図

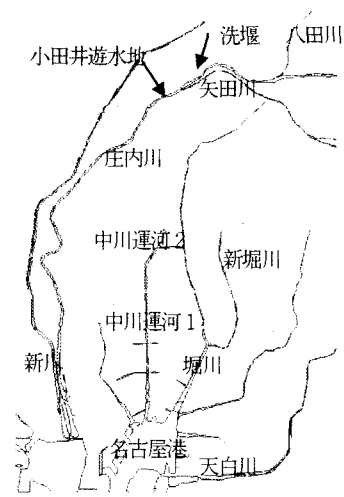


図4 河川域の計算領域図

表1 貯水施設

	貯留量
福德	7500
権現通	3600
柳島	3300
尾頭橋	2500
玉船	5000
小碓	14000
南郊	25000
惟信	12000

(単位: m³)

表2 排水ポンプの概要

ポンプ名	排水流量	ポンプ名	排水流量
岩塚	22.3	名駅前	0.8
平田	12.3	千年	15.2
福德	18.8	白鳥橋	20.3
中村	35.0	八剣	12.0
城北	12.0	宝神	42.0
打出	58.4	当知	12.7
篠原	13.8	港北	16.7
露橋	5.4	大手	10.0

(単位: m³/s)

と設定した。海域には四日市と常滑の推算天文潮を平均して平面二次元解析の海側開境界条件として与えている。河川の下流端では該当する海域の水位を、海域では河川流量を考慮して同時に計算が行われている。

粗度係数には、試行的に河川全てに0.02を与え、庄内川においては河口から15.8kmには0.015を与えた。また、都市部の粗度係数について道路に0.043、住宅等に0.067を適用している。

東海豪雨時には、新川16km地点において堤防が破堤したため、枇杷島町では甚大な被害が生じた。今回の計算では2000年9月12日03:00に新川の河口より16kmの堤防を破堤させ実際の浸水状況を再現する。観測水位より破堤が生じて約1m水位が下がっていることから、越流水深を考慮して後に示す解析値のピーク水位の1.5m下(T.P.+4m)まで破堤により堤防天端が瞬時に低下するものと設定した。

下水道システムの管渠およびポンプ場、貯留施設の位置は図6のとおりであり、下水道管渠は幹線(管径は0.25m~5m)を取り扱った。また、排水量および貯留量は表1、表2のとおりである。なお、図6および表2に示されたポンプ場には下水処理場も含まれている。本来ならば対象領域は合流式の下水道整備が進められているため、下水管から直接河川(堀川や中川運河)に排水されるが、本モデルではそこまでのモデル化が行われていない。さらに、現在まで庄内川左岸の下水道データが整備できて

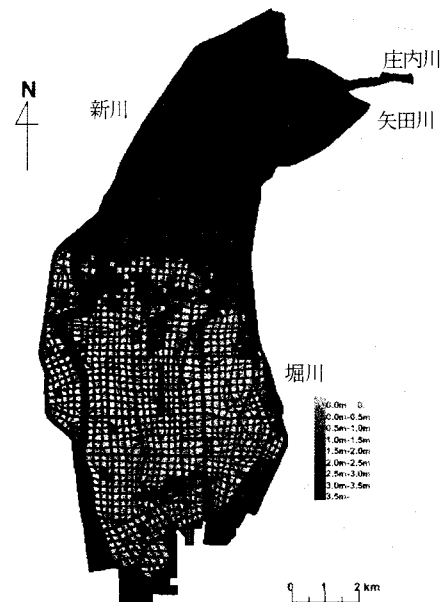


図5 都市域の計算領域図



図6 マンホールと下水道の配置

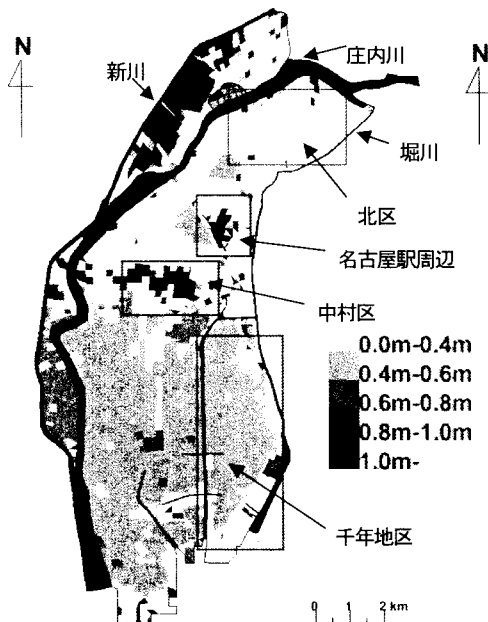


図7 解析値の最大浸水深の分布

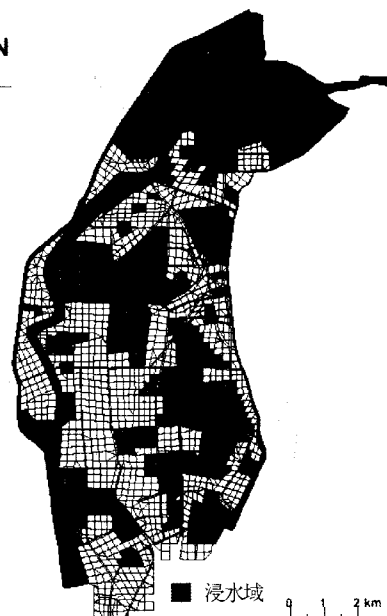


図8 実績値による浸水深の分布

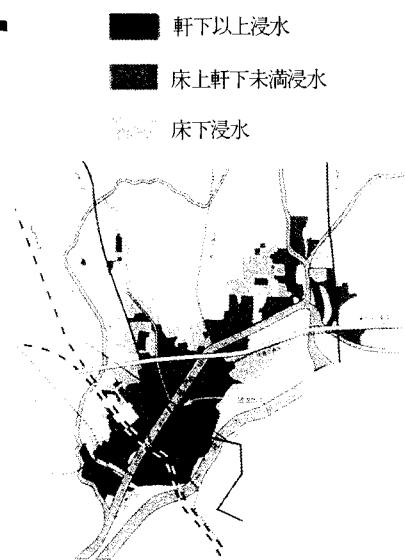


図9 破堤部近傍における浸水実績図⁸⁾

ならず、その地域にあるポンプ場や貯留施設はその近傍のマンホールにて表現している。したがって、本研究はモデル構築に重点を置き、内水氾濫解析においては定性的な検討として捉え考察している。さらに、各格子に与えた降雨量は、東海豪雨時の14箇所の観測雨量を用い算出した。

3.2 東海豪雨の再現計算結果及び考察

本研究では、東海豪雨時の氾濫水の状況に焦点を絞って考察する。なお、河川における計算結果は武田ら⁶⁾とほぼ同様であり、比較的精度良く解析が行えていることが確かめられている。

氾濫解析の結果として、図7に解析で得られた最大浸水深の分布を図8に名古屋市がまとめた浸水域を計算格子で示したものを、図9に破堤部近傍における浸水実績図を示す。名古屋駅周辺や中村区、千年地区周辺の浸水の様子が再現されており、実際と同様の結果を示している。さらに、庄内川右岸にみられる越水による浸水や新川破堤に伴う浸水の様子も解析結果と観測値とが比較的一致していた。下水道データの不備に伴い、庄内川左岸側や北区の浸水状況が一致しておらず、定量的な評価ができないが、解析モデルとしては妥当な結果を示しているものと考えている。

図10に9/12 06:00の氾濫水の流速分布を示す。なお、本図は0.002m/s以下の流速は表示していない。本図から、氾濫水が北方から南方に輸送されている様子が分かり、特に名古屋駅周辺では、北方の氾濫水が集まっている様子が示された。さらに、本図の矢印に示すように、道路に沿った流れが再現されていることが分かる。

ただし、本研究の場合、下水道管渠は幹線のみを考慮しており、氾濫水との水の受け渡しはマンホール部で取

り扱っている。実際には、幹線よりも規模の小さい下水道網によって氾濫水は集められ、しかも、マンホール部は開いた状態ではない。したがって、氾濫域と下水道システムとの水の受け渡しに関して、その適切なモデル化を検討する必要がある。

4. 外水氾濫時の下水道システムの効果

構築したモデルを用いて、庄内川左岸の破堤を想定した外水氾濫を対象に下水道システムの効果を検討した。3.1の計算条件の下で外水の影響を検討するために降雨を省き、庄内川左岸の河口より11.2km地点(豊公橋付近)を12日03:00に破堤させた。図11および図12に9/12 06:00における浸水深の分布および下水道の状況を示す。下水道の図では満管流れの状態を薄く、開水路流れの状態(非満管状態)を濃く(水が流れていない場合は描いていない)示している。本図では、新川の破堤および河口から4km一色大橋付近の越水による浸水に加えて新たに庄内川破堤による浸水が表れており、氾濫水は破堤点から地盤の低い南方へ拡がること示されている。また、下水道管を進行している水が地表面浸水より早く広範囲に広がっていることがわかる。このことから、外水氾濫が発生した場合、道路上に下水道からの水が先に噴出する可能性もあり、このような場合には避難時において危険な状況になる可能性も考えられる。また、得られた外水氾濫の様子も表面流および下水道流共に水理学的にみて矛盾なく表現されていること、得られた河川水位の分布も破堤箇所・破堤時間において水位低下が見られることなどから、本解析モデルが急激な浸水過程を伴う外水氾濫時においても適用可能であることが改めて示

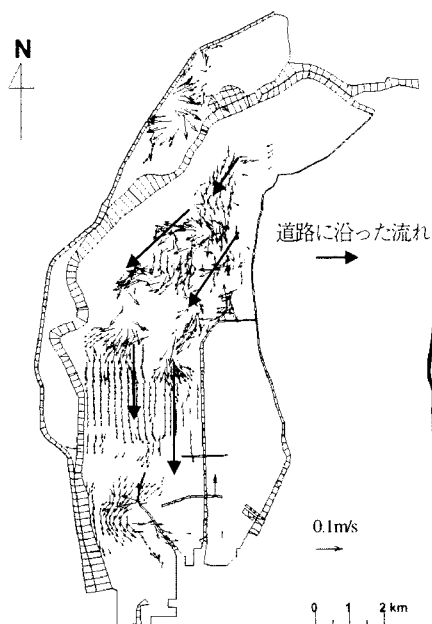


図10 流速分布

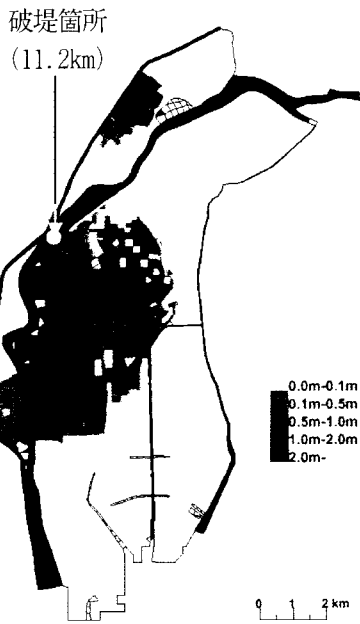


図11 浸水深の分布

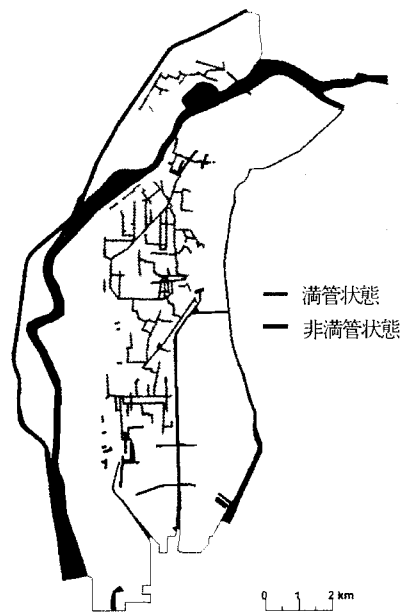


図12 下水道内の流れの様子

された。

5. おわりに

氾濫水は、河川・海域からの流入や降雨によって都市域にもたらされ、道路に沿いながら、下水道システムを通じて外部へ流出する。したがって、そういった一連の現象をモデル化できれば、様々な数値実験により水災対策が検討できるため非常に有益である。本研究では、高潮および外水・内水氾濫に起因する複合的氾濫水の現象を取り扱う総合的な解析システムを示し、海域、河川域、都市域（地表と下水道システム）の水理を同時に取り扱い、相互の関係を考慮した解析モデルを構築し、その概要を示した。

また、本解析モデルを用いて東海豪雨による氾濫水の再現計算を行った。データ整備に不十分な点があり、特に内水氾濫の再現計算において定量的な検討が十分にできなかったが、新川破堤に伴う浸水状況、名古屋駅周辺の内水氾濫の危険性や、紙面の都合上ここで示せなかったが潮位変動に伴う河口水位および洪水時の河川水位の解析結果、庄内川一色大橋付近の危険性など特徴的な水理現象は概ね再現できており、複合現象を扱う解析モデルの構築が行えたものと考えている。また、外水氾濫時の下水道システムの効果を検討するために、庄内川左岸の破堤を想定した氾濫解析を行った。この結果から、氾濫水よりも早く下水道水が拡がることにより、水が路面に噴出する可能性が指摘された。本研究により総合的氾濫解析モデルの骨組みは構築できたものと考えている。今後は残された解析モデルの課題（下水道システムへのデータ整備および氾濫水の下水道システムへの流入の。

モデル化) について検討するとともに、解析モデルを用いて様々な水災対策を検討していきたいと考えている

参考文献

- 1) 愛知県建設部：平成12年9月11日～12日 豪雨災害（台風14号，秋雨前線）
- 2) 川池健司：都市における氾濫解析法とその耐水性評価への応用に関する研究，京都大学学位論文，2001。
- 3) 重枝未玲・秋山壽一郎：市街地構造を考慮した氾濫解析モデルの総合的な検証，水工学論文集，第48巻，pp.577-582，2004。
- 4) 戸田圭一・井上和也・大八木亮・中井勉・竹村典久：複雑な地下空間の浸水実験，水工学論文集，第48巻，pp.583-588，2004。
- 5) 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，pp.889-894，2003。
- 6) 武田 誠，松尾直規，中嶋大次郎：非構造格子を用いた氾濫解析に関する一考察，水工学論文集 第47巻，pp.895-900，2003。
- 7) 武田 誠，松尾直規，山中威士，山口義一，中村昌充：東海豪雨における庄内川の洪水解析，水工学論文集，第47巻，pp.901-906，2003。
- 8) 建設省中部地方建設局（現国土交通省中部地方整備局）・愛知県：平成12年9月東海豪雨 庄内川・新川河川激甚災害対策特別緊急事業，2000。

(2004.9.30 受付)