

都市域の雨水排水過程に着目した 内水氾濫解析モデル

NUMERICAL SIMULATION MODEL OF INUNDATION FLOW
CONSIDERING PROCESS OF STORMWATER DRAINAGE IN URBAN AREA

川池健司¹・中川 一²・今井洋兵³

Kenji KAWAIKE, Hajime NAKAGAWA and Yohei IMAI

¹正会員 博(工) 京都大学准教授 防災研究所(〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

²正会員 工博 京都大学教授 防災研究所(〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

³正会員 修(工) 大阪府安威川ダム建設事務所(〒567-0012 茨木市東太田3-8-4)

Recently, inundation disaster due to heavy rainfall is a serious problem especially in urban area. In this study, to predict its hazardousness appropriately, the conventional numerical simulation model is revised in the model of sewerage system. Storm water given to buildings roofs is drained through sub-sewer, and inundation water on the ground is drained through grating of street gutter into main sewer pipes. This simulation model is applied to the Matsue City area, Japan. As the simulation results, the inundation area and water depth at the disaster of 2006 are reproduced well, but validation of the effects of drainage process expressed in this study should be done in the future.

Key Words : numerical simulation of inundation flow, sewerage system, urban area, Matsue City

1. はじめに

わが国では、相次ぐ豪雨災害を受けて、主に外水氾濫から人命を守るための対策が進められてきた。構造物による対策のみでは追いつかず、近年では洪水氾濫による浸水想定区域の指定・公表の義務づけ、ならびに洪水ハザードマップの事実上の義務化が強力に進められている。

それにもかかわらず、豪雨による浸水被害は後を絶たない。2008年も全国各地で浸水被害が発生しているが、とくに特徴的なのが、局所的豪雨による被害が目立っていることである。累計としての降雨量そのものは決して多くはないものの、短時間に局所的に強い雨が降り、それが都市の排水機能を上回ったために発生する内水氾濫が目立っている。このような局所的な集中豪雨から浸水被害を防ぐには、基本的にはその都市の排水機能を強化させなければならない。すなわち、下水道およびその排水先となる排水路の流下能力が問題となる。豪雨時には、洪水氾濫だけを警戒していたのでは不十分であり、同様に内水氾濫による浸水にも警戒する必要がある。

しかし、内水氾濫による被害を予測する数値モデルの開発は、基本的には地上の氾濫水のみを扱えばよい洪水

氾濫解析モデル等と比較して、意外なほど進んでいない。

例を挙げれば、渡辺ら¹⁾は、管路頂部に仮定の微小幅スロットが付いていると仮定することで管路流と開水路流を同系の基礎式で表すことのできるスロットモデル²⁾を基に、取付管による効果を考慮したラテラルモデルを提唱している。秋山ら³⁾は、ノードとブランチによって下水道網をネットワーク化し、ブランチには1次元スロットモデル、ノードには2次元スロットモデルを適用した下水道モデルを提唱している。これらの研究は下水道管渠内の流れを詳細に取り扱っているものの、地上の氾濫水との相互作用については扱っていないか、あるいは簡便な取り扱いをしている。

これに対し、地上の氾濫水の挙動を解析しながら下水道による排水を考慮している事例として、戸田ら⁴⁾は、鴨川からの洪水氾濫および豪雨を外力とした京都市街地の解析モデルを構築し、連続式のみを考慮した簡易な下水道モデルを適用している。また著者ら⁵⁾は、大阪府の寝屋川流域を対象として、下水道内部の流れをスロットモデルを用いて解析するとともに、排水先の河川水位をも考慮した流域全体を対象とする解析モデルを構築している。つづいて相良ら⁶⁾は、そのモデルを用いて管径30cm以上の非常に細かい下水道までに対象を拡張し、

なおかつ下水道から氾濫水の噴き出しをも考慮した解析を行っている。さらに著者ら⁷⁾は、下水道管渠の上に位置する地上の格子から下水道への排水をモデル化し、下水道からの氾濫水の噴き出しを考慮した解析を行っている。関根ら⁸⁾は、地上の道路網と同様に、下水道網も独自の手法でネットワーク化し、その流れを解析するとともに、地上と下水道の間での氾濫水の受け渡しでは雨水ますでの貯留を考慮したモデルを提唱している。松尾ら⁹⁾は、マンホールを介した氾濫水の受け渡しをモデル化しており、下水道への流入量を評価する段落ち式の流量係数について検討を加えている。このように数組の研究グループによって内水氾濫解析モデルの開発がなされているが、汎用的な解析モデルが確立されるまでには現地への適用も議論も十分になされているとはいえない。

本研究は、これまでの著者らの研究^{5), 7)}からさらにモデルの改良を進めることによって内水氾濫解析モデルの高度化を提案するものである。地上に降る雨のうち、家屋等の建物の屋根に降った雨水が、雨水ます、枝線下水道を経由して下水道に流入する過程をモデルに加えることによって、下水道モデルの高度化を試みる。

2. 雨水排水過程のモデル化

(1) 解析モデルの概要

本研究では、下水道モデルの高度化を試みる。したがって、氾濫解析モデル全体の枠組みは、これまで著者らが提唱してきた統合型氾濫解析モデルを基本とする。統合型氾濫解析モデルにおける雨水の流れを図-1に示す。

ここで、統合型氾濫解析モデルの主要部分となる、地上の氾濫原で用いる基礎式を以下に示す。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = r_e - q_{sew} + q_{up} \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2 M \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{gn^2 N \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (3)$$

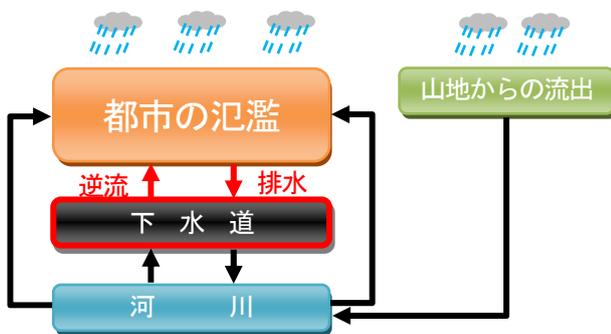


図-1 統合型氾濫解析モデルの雨水の流れのイメージ

ここに、 h : 水深、 H : 水位、 u, v : x, y 方向の流速、 $M (=uh)$ 、 $N (=vh)$: x, y 方向の流量フラックス、 r_e : 降雨量、 q_{sew} : 地上から下水道への単位面積あたりの雨水排水流量、 q_{up} : 下水道から地上への単位面積あたりの雨水噴出流量、 g : 重力加速度、 n : Manningの粗度係数である。

(2) 下水道モデルの改良

まず、これまで用いてきた著者らによる旧下水道モデルについて説明する。下水道網を考慮した氾濫解析モデルとして、著者らはこれまでに、スロットモデルを用いた次元解析を行うことによって、下水道管渠内の流れを解析してきた。基礎式を以下に示す。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{q}{\Delta x} \quad (4)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(uQ)}{\partial x} = -gA \frac{\partial H_p}{\partial x} - \frac{gn^2 |Q| Q}{R^{4/3} A} \quad (5)$$

ここに、 A : 流水断面積、 Q : 流量、 q : 横流入流量、 Δx : 下水管の離散化された1区間長、 u : 流速、 R : 径深である。また、 H_p : ピエゾ水頭であり、 z : 管底高、 h : 水深とすると、 $H_p = z + h$ であるが、 h は、

$$h = \begin{cases} A/B & : A \leq A_p \text{ のとき} \\ B' + (A - A_p)/B_s & : A > A_p \end{cases} \quad (6)$$

で求められる。ここに、 B : 下水道断面を長方形と仮定したときの管路幅、 B' : 管路の天井高、 A_p : 管路の断面積、 B_s : スロット幅である。地上と下水道管渠との間で雨水を授受する手法として、下水道延長の一定割合ごとに排水口を設けて、地上の氾濫水深に基づいた段落ち式によって排水量を決定することとし、松江市の内水氾濫に適用した⁷⁾。このモデルでは、下水道管渠の上に位置する格子からしか排水はなされない。そのため、下水道幹線から離れた場所の雨水が、実際には細かい側溝などを通して下水道に集められる仕組みになっているのであるが、解析では排水されない結果になってしまうという欠点がある。

そこで本研究では、著者らによる旧下水道モデルのうちの地上と下水道管渠の間で行われる氾濫水の受け渡しのモデル化に着目し、上記の欠点を補うようなモデルを構築する。すなわち、地上に降った雨水が下水道に集められる経路として、図-2に示すような2つを考える。1つは、家屋などの建造物の屋根に降った雨水が雨どい等を介して雨水ますに集められて下水道に排水される経路(図中、青色矢印)であり、これが本研究で新たに追加された部分である。もう1つは、旧モデルでも考慮されていたように、市街地に降った雨水が地上を氾濫・流下し、下水道延長の一定割合ごとに設けられた排水口のグレーチングから下水道管渠に排水される経路(図中、赤色矢印)である。以下に、両者の詳細について述べる。

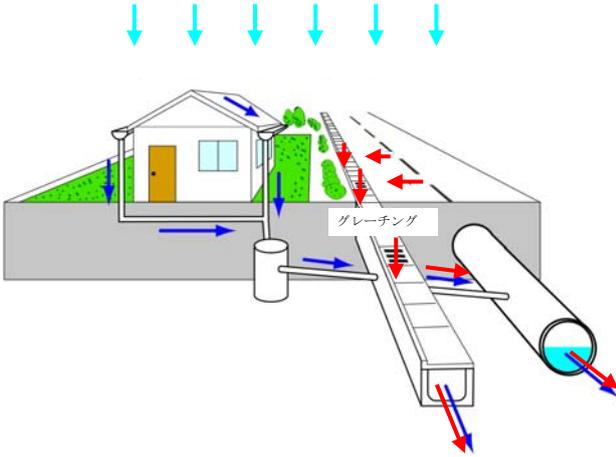


図-2 雨水の排水過程

a) 建造物の屋根からの排水

建造物の屋根に降った雨水は、図-2のように雨どい等を介して雨水ますに集められて排水される仕組みになっている。そこで、各解析格子面積のうち建造物面積が占める割合（＝占有率 λ ）に相当する雨水を、強制的に枝線下水道に流入させる。枝線下水道は、各解析格子の図心から、最短距離にある幹線下水道にいたる経路上に仮定した下水道で、管径、勾配ともに流出先の幹線下水道と同じ値とする。枝線下水道内の流れも、式(4)-(6)を用いて解析される。式(1)の q_{sew} および式(4)の q はそれぞれ、

$$q_{sew} = \lambda r_e \quad (7)$$

$$q = B \cdot \Delta x \cdot q_{sew} \quad (8)$$

となる。なお、枝線下水道内のピエゾ水頭がいくら上昇しても、建造物の屋根に降った雨水は枝線下水道上流端に供給され、また枝線下水道からの雨水の逆流は発生しないものとする。

b) 排水口（グレーチング）からの排水

地上の解析格子のうち、その下に幹線下水道が通っている格子からは、氾濫水が幹線下水道に流入する。その際に、関根ら⁸⁾のような雨水ますは考慮せず、氾濫水は瞬時に下水道幹線に流入するものとする。その流入流量は、下記の段落式に従う。

$$Q = \mu L h \sqrt{gh} \quad (9)$$

ここに、 Q は地上から幹線下水道への流入流量、 h は地上の氾濫水深、 g は重力加速度である。 μ は流量係数で0.544とする。 L は排水口の周囲の長さである。式(1)の q_{sew} および式(4)の q はそれぞれ、

$$q_{sew} = Q/S_g \quad (10)$$

$$q = Q \quad (11)$$

となる。ただし、 S_g は地上の解析格子の面積である。逆

に幹線下水道内のピエゾ水頭が上昇し、地上の氾濫水の水位より高くなった場合、この排水口を通して雨水が逆流するとする。そのときの流量は、以下の越流公式にしたがって評価される⁷⁾。

$h_m/h_d \leq 2/3$ （完全越流）のとき

$$Q_{up} = \mu_1 L h_d \sqrt{2gh_d} \quad (12)$$

$h_m/h_d > 2/3$ （潜り越流）のとき

$$Q_{up} = \mu_2 L h_m \sqrt{2g(h_d - h_m)} \quad (13)$$

ここに、 Q_{up} ：下水道からの逆流流量、 μ_1 、 μ_2 ：流量係数、 h_d ：下水管水位と地上地盤高の差、 h_m ：地上水深である。

3. 松江市への適用

前節で構築した解析モデルを、ここでは松江市街地に適用する。松江市は、2006年7月の豪雨災害によって宍道湖および大橋川の水位が上昇し、その結果雨水が排水しにくくなったり、下水道を通して洪水が逆流したりして、34年ぶりに浸水被害を受けた。このときの被災状況の詳細については、文献10)を参照されたい。

(1) 高度化した下水道モデルによる解析結果

その他の解析モデルの詳細については文献7)に譲るとして、ここでは文献7)と同じく2006年7月に発生した豪雨災害による松江市内の氾濫状況を再現する解析を行った。解析に用いた条件は、地上の市街地には松江観測所の10分ごとの観測雨量（図-3）を一様に与え、大橋川の上下流端にはそれぞれ宍道湖、中海の観測水位（図-3）を、朝酌川の上流端には松江の雨量を与えたときの朝酌川上流域での流出解析結果（流量）を与えた。なお、解析に用いた松江市の下水道網は図-4に示すとおりである。松江市では、幹線下水道と位置づけられているものの多くは道路側溝であり、図-2のうちの円管が存在しないような仕組みになっている。現地での踏査より、排水口の周囲長 L は、長辺が下水道管渠延長に対して10%、短辺が0.4mの長方形として決定する。また、図-4の水路網は、地上の氾濫原モデルの中で周囲よりも地盤の低い格子として平面2次元解析の中で扱われる。

2006年7月豪雨時の再現計算結果のうち、最大浸水深を図-5に示す。著者らによる旧下水道モデル⁷⁾を用いた解析結果のうち、浸水域を図-6に示す。この図には水害時の浸水実績も同時に示している。図-5と図-6を比較すると、下水道モデルを高度化しても解析結果にそれほど違いが出ていないことがわかる。これは、このときの氾濫現象が外水位の上昇によって下水道から洪水が逆流して氾濫域が広がったこと、すなわち外水位と堤内地盤

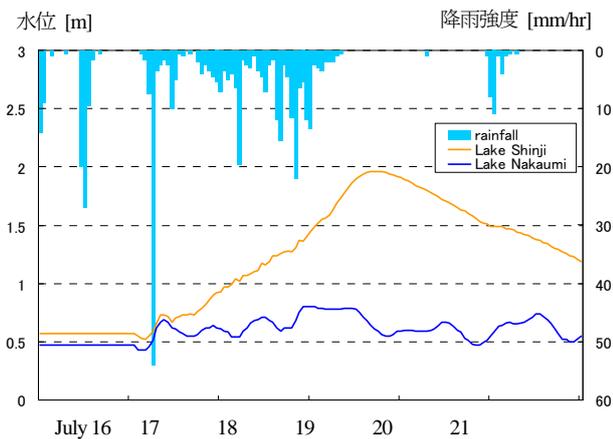


図-3 解析に用いた境界条件

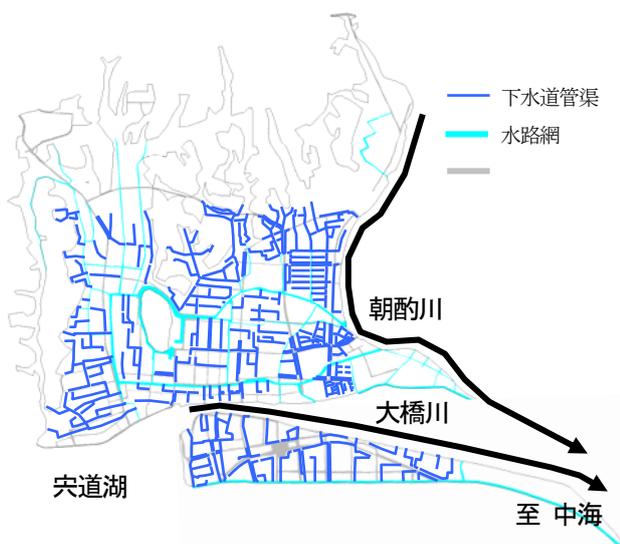


図-4 下水道網

高との関係によってほぼ氾濫域が決定していることに起因するためと考えられる。

(2) 下水道モデルの高度化による解析結果への影響

高度化した下水道モデルによる影響をみるために、外水位を十分低いところで保ったまま強い降雨を与える解析を行う。外水位は初期の水位のまま一定とし、降雨には図-7のような2000年東海豪雨災害時の名古屋での観測値を用いる。

解析結果として、図-8 (a), (b)に両モデルによる最大浸水深を示す。この図から、高度化した下水道モデルを用いた方が、氾濫水の拡がりが大きいことがわかる。この浸水過程を比較するために、いくつかの地点を通る下水道内の水深の時間変化に着目する。図-8 (a)に示す下水管N1, N2, S1内の水深の時間変化を図-9に示す。格子1, 格子2, …とあるのは、それぞれの下水管渠を縦断方向に分割した解析区間のことであり、1区間あたり約20mとなっている。これらの水深の変化を見てみると、高度化された下水道モデルを用いたほうが、降雨の一部

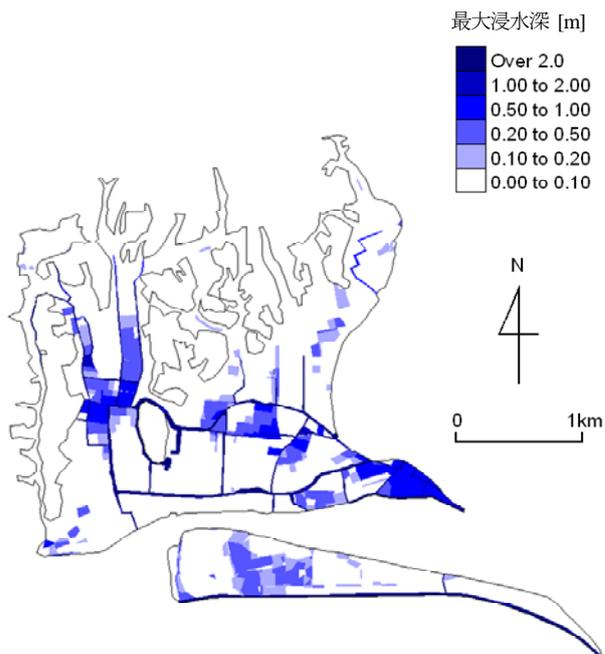


図-5 最大浸水深

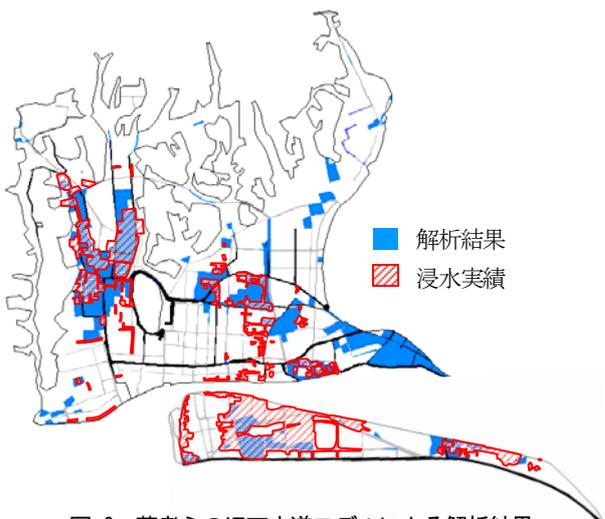


図-6 著者らの旧下水道モデルによる解析結果 (浸水域) と浸水実績の比較

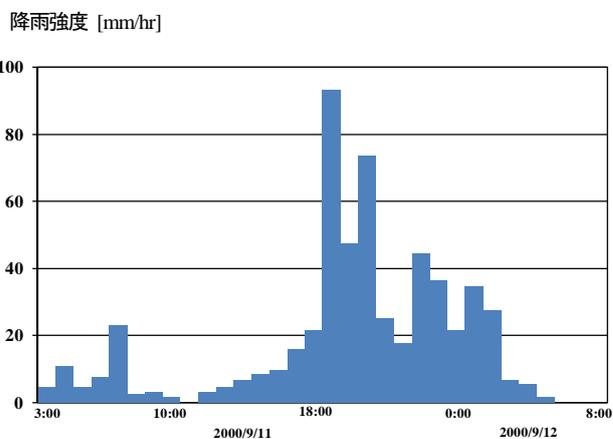


図-7 東海豪雨災害時の名古屋での観測雨量

が枝線下水道から強制的に集められることにより、下水道管渠内の水深が大きくなっていることがわかる。なお、これだけの豪雨を与えても両モデルともほとんどの地域で浸水が起こっていないのは、外水位の影響を受けて下水道管渠内の水位が十分下がっているところに雨水が速やかに排水されたためと考えられる。局所的に地上の浸水深、管渠内水位とも大きくなっている箇所があるが、これは枝線下水道を介した強制排水によって管渠内水位が上昇しやすくなっていること、それによる地上の排水不良との相互作用によるものと考えられる。管渠N1を見ると、高度化した下水道モデルを用いるとピエゾ水頭が下水道管径を超えており地上でも氾濫が生じているが、従来の下水道モデルでは管渠内の水深が小さく地上で氾濫も生じていない。管渠N2では、高度化した下水道モデルにおいてピエゾ水頭が管径を超えていないのに地上で氾濫が生じているが、これは地上の排水能力を超える降雨強度によるものと思われる。著者らの旧下水道モデルを用いた場合のS1の位置においても、同様の現象が見られる。

以上のように、建造物の屋根からの雨水排水過程を考慮することによって、解析の結果に差が出る場合があることがわかった。しかし、どちらの解析モデルがより精度が高いかの検証が、今後の課題といえる。

4. おわりに

本研究では、家屋からの雨水排水過程を考慮した氾濫解析モデルを構築し、松江市に適用した。その結果、平成18年7月豪雨時の浸水状況が旧モデルと同様に再現可能であること、さらに旧モデルで表現されていなかった

家屋からの排水が氾濫水に影響を及ぼすことがわかった。

しかしながら、両モデルの間で結果に差が出ることはわかったものの、検証材料が存在しないことから、本モデルによって精度が向上したと結論付けることはできなかった。したがって、模型実験や現地での観測を行うことによってモデルの検証を進めていくことが、今後の課題である。

謝辞：本研究を進めるにあたり、国土交通省出雲河川事務所より平成18年7月豪雨での浸水状況に関するデータを、また松江市下水道課より下水道に関するデータを快く提供いただきました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 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管網内の遷移流計算法, 土木学会論文集, No.411/II-12, pp. 81-90, 1989.
- 2) Chaudhry, M. H.: Applied Hydraulic Transients, Van Nostrand Reinhold, 1979.
- 3) 秋山壽一郎, 重枝未玲, 田邊武司: 自由表面・圧力流れのダイナミックネットワークモデルの構築と都市域下水道網への適用, 河川技術論文集, 第14巻, pp.241-246, 2008.
- 4) 戸田圭一, 井上和也, 村瀬 賢, 市川 温, 横尾英男: 豪雨による都市域の洪水氾濫解析, 土木学会論文集, No.663/II-53, pp.1-10, 2000.
- 5) 川池健司, 井上和也, 戸田圭一, 野口正人: 低平地河川流域での豪雨による都市氾濫解析, 土木学会論文集, No.761/II-67, pp.57-68, 2004.
- 6) 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.

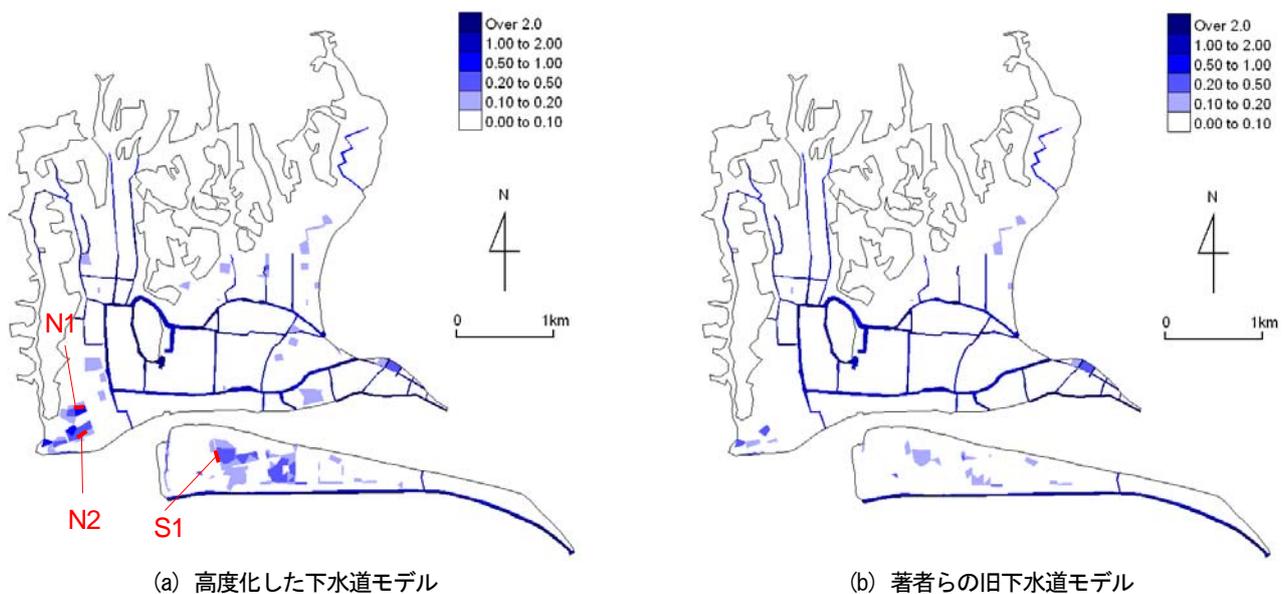
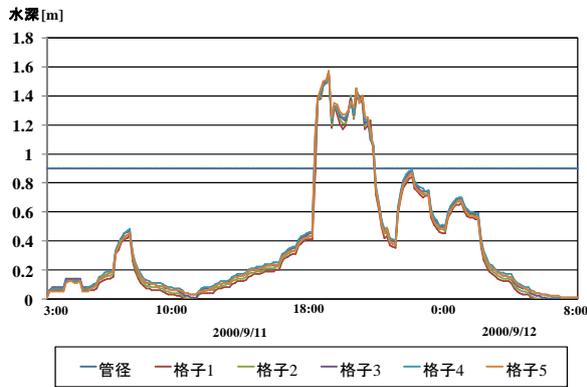


図-8 外水位が十分低い場合の最大浸水深の比較

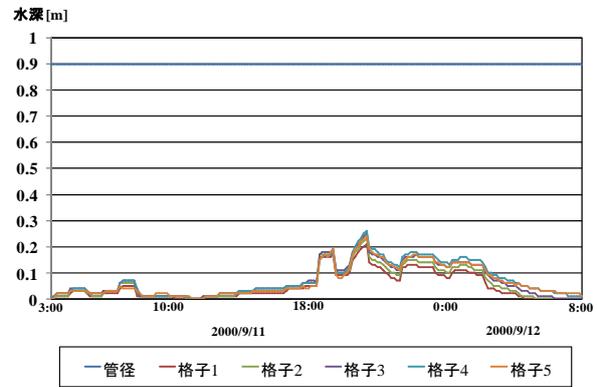
- 7) Kenji Kawaike and Hajime Nakagawa: Flood Disaster in July 2006 in the Matsue City Area and its Numerical Modeling, XXXII IAHR Congress Proceedings, 2007.
- 8) 関根正人, 河上展久: 地下街を抱える高度に都市化された地域の内水氾濫に関する数値解析, 土木学会論文集, No.789/II-71, 2005.
- 9) 松尾直規, 武田 誠: 都市域における氾濫解析システムの適

- 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.
- 10) 川池健司, 中川 一, 市川 温, 丸山寛起: 平成18年7月豪雨による松江市内の都市水害に関する数値解析的検討, 水工学論文集, 第51巻, pp.535-540, 2007.

(2008. 9. 30受付)

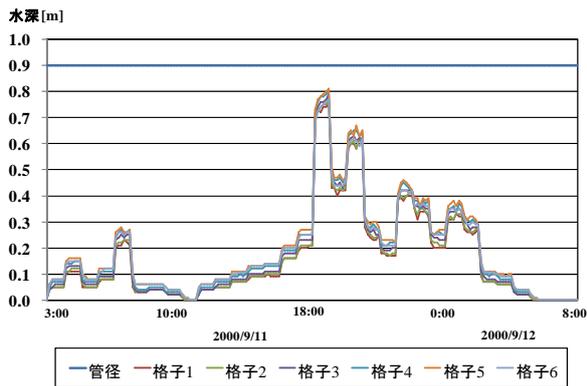


高度化した下水道モデル

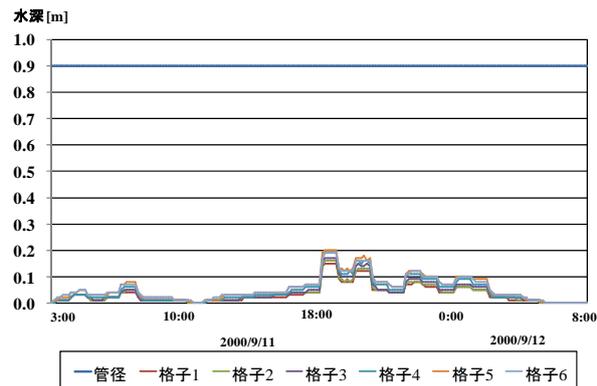


著者らの旧下水道モデル

(a) N1

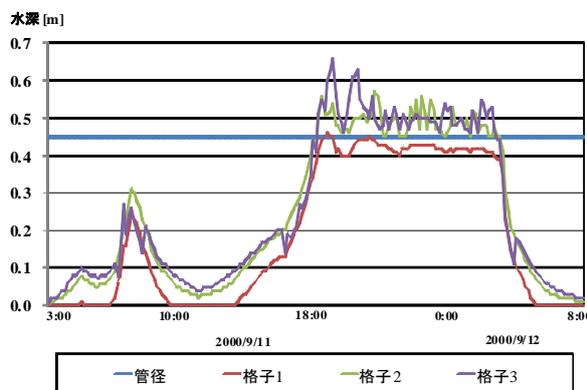


高度化した下水道モデル

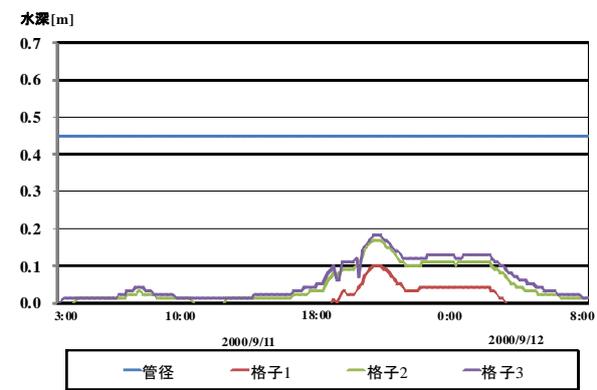


著者らの旧下水道モデル

(b) N2



高度化した下水道モデル



著者らの旧下水道モデル

(c) S1

図-9 下水道管渠内の水深の時間変化