

# 下水道の簡易的なモデル化による 内水氾濫解析手法の開発

Development of Numerical Simulation Method on Inland Water Flooding

by Simple Modeling of Sewage System

紺野矩彦<sup>1)</sup>, 小笠原敏記<sup>2)</sup>

Norihiro Konno and Toshinori Ogasawara

1) 岩手大学大学院 総合科学研究科 (〒020-8551 岩手県盛岡市上田4-3-5, E-mail: g0122030@iwate-u.ac.jp)

2) 工博 岩手大学 理工学部 教授 (〒020-8551 岩手県盛岡市上田4-3-5, E-mail: togasa@iwate-u.ac.jp)

In recent years, flood damage due to climate change has occurred frequently, and simulation of disaster damage has become necessary. Sewage analysis is essential to calculate the impact, but some local governments say it is difficult to analyze the sewage system as pipeline flow. We hypothesized that the runoff into the sewage system could be easily calculated using Torricelli's theorem. This hypothesis was applied to Morioka City, Iwate Prefecture, focusing on land use, and the characteristics of the flood were clarified.

**Key Words :** Inland water flooding, Numerical simulation, Modeling sewage system

## 1. はじめに

近年の気候変動による短時間雨量が、内水氾濫の増加を引き起こしている。例えば、令和4年8月3日からの大雨では、14水系40河川流域で内水氾濫が発生した[1]。外水氾濫のハザードマップは整備が進められているが、内水氾濫のハザードマップの整備は不十分である[2]。内水氾濫の浸水想定手法に用いる数値解析には、地表面の流れと下水管路の流れを解析する手法(以下、「下水道ネットワーク+平面2次元モデル」と呼称)や、あらかじめ降雨強度から下水道の排水能力分を差し引き、地表面の流れのみを解析する手法(以下、「平面2次元モデル」と呼称)などがある[3]。「下水道ネットワーク+平面2次元モデル」は氾濫の再現性が高いが、下水道網の情報を必要とする。下水道網は、標高データのように全国で一括したデータが一般公開されていないため、解析対象ごとにデータを作成する必要がある。下水道網のデータ作成やその計算は煩わしく時間を要するため[4]、「下水道ネットワーク+平面2次元モデル」は汎用性に欠ける。一方で、「平面2次元モデル」は管路網の入力が不要なため、計算に手間を要さないが、湛水面積を過大評価する傾向であることから、ハザードマップに用いるためには結果の再現性や妥当性について留意する必要がある[3]。したがって、簡便で精度が保証される内水氾濫のハザードマップ作成には、「平面2次元モデル」のように管路網の入力が不要で、かつ「下水道ネットワーク+平面2次元モデル」に準ずる再現性を有する解析手法の開発が必要であると考える。

内水氾濫の解析手法に関する既往研究として、関根[5]や川池ら[6]、三好ら[7]などが挙げられる。関根[5]や川池

ら[6]は、下水道ネットワークを考慮した解析手法である。関根は、特に雨水が地表面や屋根から下水道に流れる過程などを考慮した街路ネットワーク浸水・氾濫解析モデルを構築し、内水氾濫解析の高精度化を図っている[5]。川池らは、「下水道ネットワーク+平面2次元モデル」の解析結果と実験結果との比較を行い、計算モデルの検証を行なっている[6]。また、三好らは「平面2次元モデル」について、下水道による内水排除に準線形貯留関数モデルを適用させて、下水道網のデータを必要としない解析手法を開発し、オープンデータのみで広域の内水氾濫解析を行なっている[7]。しかしながら、三好らのモデルは、過去の浸水記録に基づくパラメータ同定を必要とするため、浸水記録がない地域への適用は難しいと考える。

これらの問題を解決するため、本研究は雨水排除の簡易的なモデル化による汎用的な内水氾濫解析手法の開発を目的とする。雨水は、森や畑といった浸透域では地面への浸透により、都市部の不浸透域では道路に設置されている雨水ますを介して下水道により排除される。そこで土地利用に応じて、浸透量をHorton式で、雨水ますから下水道への流量をトリチエリの定理を用いて簡易的に解析するモデルを作成し、盛岡市市街地に対象として解析を行った。この解析結果を盛岡市が「下水道ネットワーク+平面2次元モデル」を用いて作成したハザードマップと比較して、本モデルの内水氾濫の再現性について、浸水分布と浸水深の点から検討する。

## 2. 手法

### (1) 平面二次元場の基礎方程式

平面二次元場の流れの基礎方程式として、局所慣性方程式と連続式を用いる。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + gh \frac{\partial(h+z)}{\partial x} + gn^2 \frac{|M|M}{h^{7/3}} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + gh \frac{\partial(h+z)}{\partial y} + gn^2 \frac{|N|N}{h^{7/3}} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = r - f \quad (3)$$

ここで、 $M, N$ はそれぞれ $x, y$ 方向の流量フラックス、 $h$ は水深(m)、 $g$ は重力加速度( $m/s^2$ )、 $z$ は地盤高(m)、 $n$ はマニングの粗度係数( $=0.03$ )、 $r$ は降雨強度( $m/s$ )、 $f$ は後述する雨水排除速度( $m/s$ )である。差分は、Gustavo et. al. [8]を参考に行った。

## (2) 雨水排除速度の定式化

地表の雨水は、浸透と下水道によって排除される。式(3)の雨水排除速度 $f$ について、森や畑などの浸透域では式(4)より、道路では式(6)より求める。式(4)は、森や畑などにおける浸透速度を表し、Horton式を用いて計算される[9]。

$$f_{inf} = \frac{1}{3600} \times \{f_c + (f_0 - f_c)e^{-\alpha t}\} \quad (4)$$

ここで、 $f_{inf}$ は浸透速度( $m/s$ )、 $f_0$ は初期浸透能( $m/h$ )、 $f_c$ は終期浸透能( $m/h$ )、 $\alpha$ は減衰係数( $=4.14$ )、 $t$ は降雨経過時間( $h$ )である。パラメータは天口ら[10, 11]を参考にして定めた(表-1)。

下水道による雨水排除は、雨水ますを介して行われる。道路における雨水ますを介した下水道への流量は、トリチエリの定理を用いて簡易的にモデル化される(図-1、式(5))。トリチエリの定理における水深を用いた流量計算とは厳密には異なるが、下水道への流量は地表面の水深の $1/2$ 乗に比例すると仮定した。なお、本モデルでは下水道から地表への逆流は考慮していない。雨水ますは最低20m間隔で道路に設置されることから[12]、計算格子1つあたりの下水道による水位減少速度 $f_{sewer}$ は、雨水ますに近接する格子間で前述の流量を按分し、式(6)で求める。

$$Q_{sewer} = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2gh} \quad (5)$$

$$f_{sewer} = \frac{Q_{sewer}}{A} \times \frac{dx}{20} \quad (6)$$

ここで、 $Q_{sewer}$ は雨水ますを介した下水道への流量( $m^3/s$ )、 $d$ は取付管の内径( $m$ )、 $h$ は水深( $m$ )、 $f_{sewer}$ は下水道による水位減少速度( $m/s$ )、 $A$ は計算格子の面積( $m^2$ )、 $dx$ は格子刻み( $m$ )である。取付管の内径は設計指針の下限である0.125mを用いた[12]。前述の通り、道路では式(6)により雨水排除速度を求めるが、雨水ますは道路の両端に設置されることから、道路格子で格子内の建物面積が5~95%の格子にのみ式(6)を適応させた。

表-1 浸透域の浸透能

	初期浸透能	終期浸透能
森	0.100	0.050
畑	0.050	0.020
荒れ地	0.010	0.005

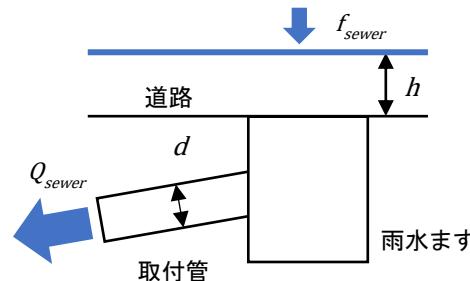


図-1 下水道による雨水排除の概念図

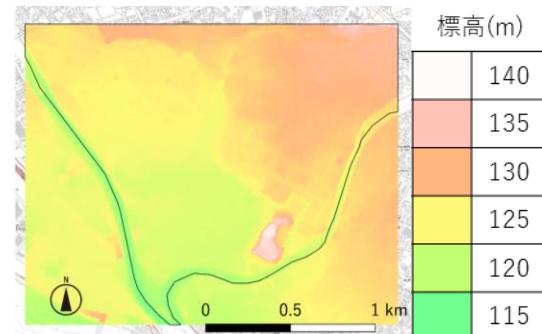


図-2 盛岡市市街地の標高



図-3 盛岡市市街地の土地利用

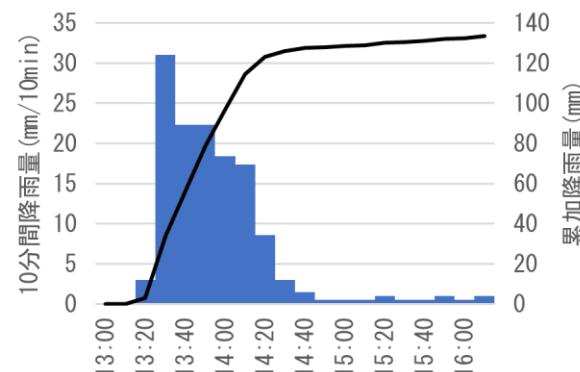


図-4 想定降雨

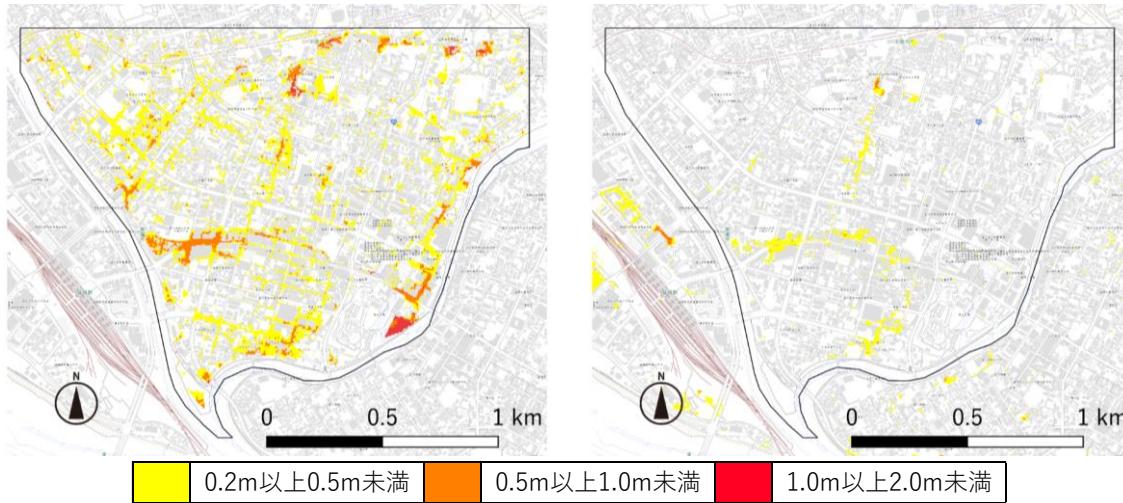


図-5 (左)本モデルによる最大水深、(右)盛岡市内水ハザードマップ  
図の背景として国土地理院の淡色地図を引用した。内水ハザードマップは盛岡市のデータに一部加筆した。

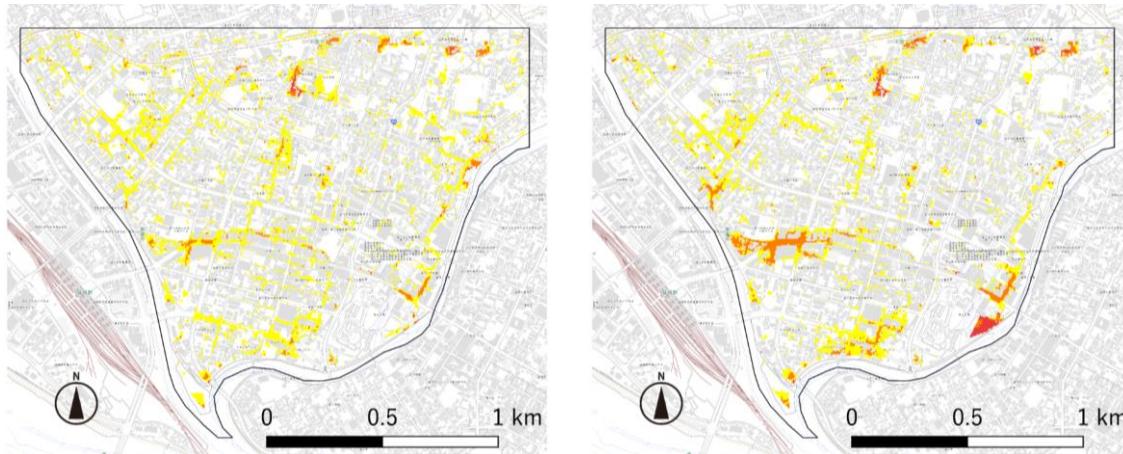


図-6 (左)想定降雨終了直後(14:20)の浸水深、(右)想定降雨終了 2 時間後(16:20)の浸水深  
図の背景として国土地理院の淡色地図を引用した。

### 3. 解析条件

解析対象は岩手県盛岡市とする。盛岡市の市街地は、北上川の旧河道や盛岡城の堀などにより局所的に標高が低く、水が集まりやすい地形となっている(図-2)。標高値は、国土地理院基盤地図情報のDEM5A[13]を用いた。浸透を解析する際の土地利用は、JAXAの高解像度土地利用土地被覆図[14]を用いて、最近傍近似によりDEM5Aのメッシュに合わせた(図-3)。雨水ますを介した下水道を再現する道路境界は、基盤地図情報の建物と道路から判断した[13]。解析領域の境界と建物には不透過条件を課している。

降雨条件は、盛岡市が行った解析結果と比較するため、2016年8月2日に観測された時間雨量62.3mmの降雨[15]を、時間雨量120mmになるように引き延ばして課した(図-4)。時間刻みを0.1秒とし、3時間想定して解析を行った。格子刻みはDEMのメッシュサイズである5.236mとし、東西2200m、南北1770mの領域で解析した。また、計算の発散を防ぐため、勾配が急な盛岡城跡とその周辺に不透過条件を課している。

件を課した。

### 4. モデルの検証

#### (1) 「下水道ネットワーク+平面二次元モデル」との比較

解析によって得られた最大水深(図-5左図)を、盛岡市が「下水道ネットワーク+平面二次元モデル」を用いて行った解析結果(図-5右図)と比較する。浸水域の分布傾向は概ね一致しているが、本モデルで浸水深が大きくなることが確認できる。この要因として、下水道への流量の過小評価が考えられる。本モデルではトリシェリの定理における水深を浸水深で計算しているが、厳密にはトリシェリの定理における深さとは異なる。したがって、深さを適切にモデル化することができれば、浸水深もより高精度で再現できると推察される。また、解析領域の東端の中津川右岸や西部中央の材木町周辺で、解析結果に顕著な違いが見られる。境界に不透過条件を課したため、河川への排水を再現できず、浸水深が深くなったと考えられる。

## (2) 時間経過に伴う考察

想定降雨終了時の浸水深(図-6左図)と降雨終了から2時間後の浸水深(図-6右図)を比較する。降雨終了直後では、浸水域が解析領域全体に広がることがわかる。2時間後では、浸水域が減少する一方で、旧河道や堀の跡のような低地では、さらに浸水深が大きくなることがわかる。したがって、降雨終了後の浸水状況は、地形の影響を大きく受けながら変化するものと考えられる。

## (3) 解析時間

対象領域の計算時間は、「Intel Xeon W-2265 3.5Ghz」のPCで、実現象の3時間分の計算に49分を要した。この結果より、本計算モデルは、計算処理速度が十分に速く、リアルタイム氾濫解析への適応が期待できると言える。

## 5. まとめ

本研究では、雨水の排除過程の簡易的なモデル化による内水氾濫解析を行い、以下の成果を得た。

- 1) トリシェリの定理を用いた下水道の簡易的な再現により、内水氾濫の浸水分布を概ね解析できることを示した。
- 2) 盛岡市市街地では、従来危険と考えられてきた旧河道に加えて掘の跡でも浸水深が大きくなることを示した。
- 3) 本モデルは、計算の処理速度が速いことから、洪水の予報業務や動的なハザードマップへの応用が期待できる。

今後の課題として、実験による本モデルの検証や、下水道の逆流の考慮、他地域での検証が挙げられる。

**謝辞:**「下水道ネットワーク+平面2次元モデル」による内水氾濫解析データは、盛岡市上下水道局より提供を受けました。ここに記して、感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] 日本河川協会：  
[https://www.japanriver.or.jp/information/info\\_pdf/2022\\_web\\_resume.pdf](https://www.japanriver.or.jp/information/info_pdf/2022_web_resume.pdf)  
(2023年3月20日 閲覧)
- [2] 内水氾濫 想定済み1割、岩手日報、2022年10月7日、p.4
- [3] 国土交通省水管理・国土保全局下水道部、内水浸水想

定区域図マニュアル(案)、令和3年7月

- [4] 労力に二の足 遅れる備え、岩手日報、2022年10月7日、p.4
- [5] 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計算、学会論文集B1(水工学), Vol.67, No.2, 70-85, 2011.
- [6] 川池健司、清水篤、馬場康之、中川一、武田誠：下水道を含めた氾濫模型実験による内水氾濫解析モデルの検証、土木学会論文集B1(水工学), Vol.67, No.4, L\_985-I\_990, 2011.
- [7] 三好学、田村隆雄、武藤裕則、安藝浩資：全国規模で整備されているオープンデータを用いて広域かつ詳細な浸水深分布を作成する内水解析モデル、土木学会論文集B1(水工学), Vol.74, No.4, L\_1321-I\_1326, 2018.
- [8] Almeida, G.A.M., Paul Bates, Jim E.F., and Maxime. S. : Improving the stability of simple formulation of the shallow water equations for 2-Dflood modeling, Water Resources Research, Vol.48, W05528
- [9] 土木学会 水理委員会：水理公式集[平成11年版], pp.23-24
- [10] 天口英雄、河村明、高崎忠勝、中川直子：個別の地物情報を考慮した密集市街地におけるTokyo Storm Runoff Modelの提案、土木学会論文集B1(水工学), Vol.67, No.4, L\_517-I\_522, 2011
- [11] 天口英雄、青木宥都、河村明：地物GISを用いた農村流域における洪水流出解析モデルの開発、河川技術論文集、第27巻、2021年6月
- [12] 日本下水道協会：下水道施設整備計画・設計指針と解説 2009年版
- [13] 国土地理院：基盤地図情報  
<https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>  
(2023年3月14日 閲覧)
- [14] JAXA：高解像度土地利用土地被覆図(バージョン21.11),  
[https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/jp/dataset/lulc\\_j.htm](https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/jp/dataset/lulc_j.htm)  
(2022年12月5日 閲覧)
- [15] 気象庁：過去の気象データ検索、  
<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>  
(2023年2月21日 閲覧)