

都市流域を対象とした 雨水管路網の理論データ構築手法の開発

DEVELOPMENT OF THEORETICAL STORM SEWER SYSTEM DATA CONSTRUCTION METHOD IN URBAN WATERSHED

天口 英雄¹・河村 明²

Hideo AMAGUCHI¹ and Akira KAWAMURA²

¹正会員 博士(工) 首都大学東京 助教 都市基盤環境学域 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

²正会員 工博 首都大学東京 教授 都市基盤環境学域 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

In this study, the theoretical storm water system data construction method using the urban landscape GIS data such as roads and buildings was developed. The procedure is to prepare urban landscape GIS data, create road network data from road polygon, and set the pipe bottom height and pipe diameter for each drainage area. The proposed method was applied to the upper Kanda River. The constructed storm sewer system data was set lower toward the river channel, and the pipe diameter has similar value to the actual data. The theoretical sewer system data was also evaluated by rainfall runoff simulation using actual storm sewer system data.

Key Words : urban landscape GIS, sewer system, road network, urban watershed, distributed runoff model, inundation model, Tokyo Storm Runoff (TSR) Model

1. はじめに

都市流域を対象とした分布型洪水流出解析および氾濫モデル^{1)・5)}には種々の流出素過程の計算が組み込まれており、個々の計算と入力データとは、直接流出には土地利用データ、地表面流出および氾濫計算には地盤高データ、雨水・下水道管路流には雨水管路網データが対応している。地表面流出・浸水状況を解析するための格子形状は都市構造の表現方法により様々な形式が提案⁶⁾されており、地表面に関する情報（地盤高情報、道路・街区・建物等の情報）は、基盤地図情報⁷⁾として入手は比較的容易である。雨水管路網データは実データを入手してモデル構築することが前提となっており、雨水管路網データを地表面情報等から構築する手法について検討した事例はほとんどない。既存の地盤高、道路および建物などのGISデータを活用して膨大な作業時間を必要とせずに対象流域の雨水管路網データを構築することが出来れば、任意の都市流域における分布型洪水流出モデルデータを迅速に作成することが可能となる。このため、一般に入手可能な地盤高、道路および建物などのGISデータを活用し、現実に近い雨水管路網の理論データを構築する手法の開発が望まれている。

そこで本研究では、著者らが提案するポリゴン型の土

地利用地物要素³⁾を用いて雨水管路網の理論データを構築する手法を開発し、実際の雨水管路網データとのデータ特性および洪水流出解析による流出特性を検討することにより、その有用性を評価する。

2. 対象流域の概要

(1) 流域の概要

神田川は、三鷹市の井の頭池にその源を発し、途中善福寺川と妙正寺川を合流して隅田川に流入する東京都内の代表的な都市河川である。本研究では、井の頭池から善福寺川合流点までの神田川上流域(流域面積約11.8km²、流路延長約9km)を設定した。

対象流域の下水道は合流式で整備されており、汚水は下水道幹線により下水道処理場に送水されている。図-1a)は、東京都1/2500地形図より構築した神田川上流域の高度な地物データGISを示したものである。地表面の全要素数は104,342、建物、道路、緑地、舗装地の流域面積に対する面積率はそれぞれ29%、16%、9%および3%である。図-1b)は、実際の雨水管路網の現況図である。雨水管路網のGISデータは、マンホールをポイント型、管路をポリライン型で表しており、神田川上流域ではマンホール数9,632、管路数9,904となっている。

(2) 既存雨水管路網データの分析

本研究では、地表面の情報から雨水管路の情報を予測

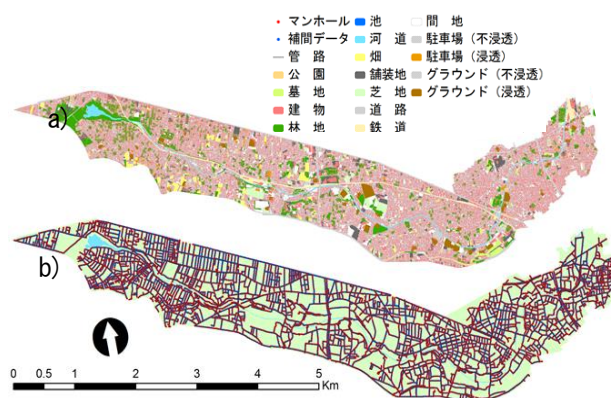


図-1 地図データ、a) 神田川上流域の土地利用地物要素、b) 雨水管路網の現況、
c) 本研究で作成した道路ネットワークデータ、d) 排水区の設定

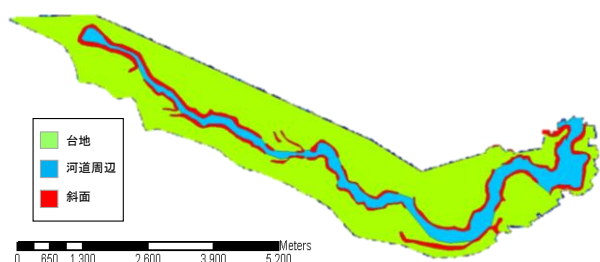
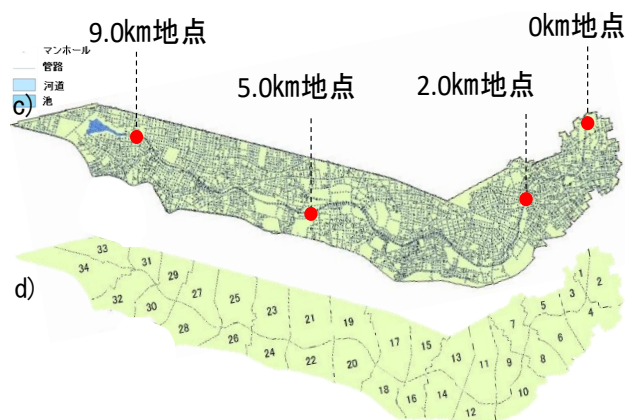


図-2 神田川上流域の地形区分⁸⁾

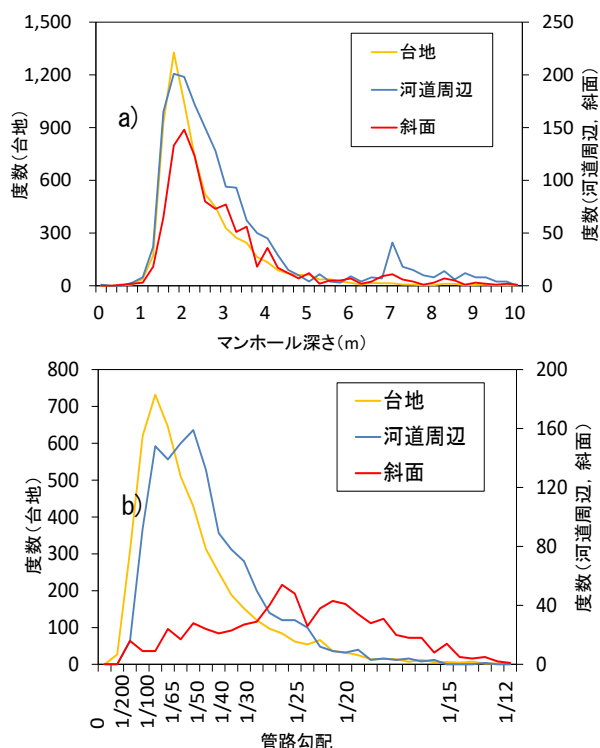


図-3 a) マンホール深さ、b) 管路勾配

する必要があるため、管路勾配・マンホール深さと地形特性との関連について検討を行う。

a) 管路網の埋設状況

流域内の雨水管路網の埋設状況を把握するために、マンホールの深さおよび管路の勾配特性を分析した。マンホール深さは、これに接続する管路の最低標高値を求め、地盤高との差を設定した。流域を図-2のように台地、河道周辺および斜面に地形を3分類し、地形毎にマンホー

ル深さと水平面を基準とした管路勾配のヒストグラムを作成した(図-3)。階級幅は、マンホール深さを0.1 m、管路勾配を1/400と設定した。

マンホールの深さは、地形の違いによらず概ね同様の傾向がみられ、流域全体の平均値は2.61 m、標準偏差は2.06で、マンホール深さは0.6 m から4.6 m の間に多く分布していることが分かる。次いで管路勾配は、斜面とそれ以外の地形で異なる傾向がみられたため、斜面の平均値は1/26、標準偏差は1/56で、台地部と河道沿いを累計した平均値1/57、標準偏差1/74よりも急勾配となっている。すなわち管路勾配は斜面勾配に依存しているものと考えられ、斜面では1/18～1/50、斜面以外では1/34～1/274に分布している。

3. 雨水管路網の理論データ構築手法

(1) 必要データ

雨水管路網の理論データ構築に必要となるデータは、地表面の土地利用をポリゴン形式で表現したGISデータで、属性には土地利用(種別は河道、道路など)、地盤高および面積が必要である。また、排水区が複数ある場合には個々に排水区および放流管路の指定が必要である。本研究での排水区の設定は、河川への放流管が橋付近に集中している特徴を考慮し、橋に接続する道路を境界とする方針とした。

(2) 理論データの構築手順

図-4は提案する雨水管路網の理論データ構築手順である。管渠ルートの設定には、管渠が道路に埋設されている状況、河川への雨水排水は橋梁付近で行われている状況などを勘案し、道路NWを用いることとした。すなわち、雨水管路網データの構築ステップは、以下のようになる。

- ① 道路ネットワークの作成および排水区の設定
- ② 自然流下を考慮した管路高の設定
- ③ 計画雨水量の算定と管路直径の設定

a) 道路NWと初期雨水管路網データの作成

先ず、高度な地物データGISから道路要素を抽出して

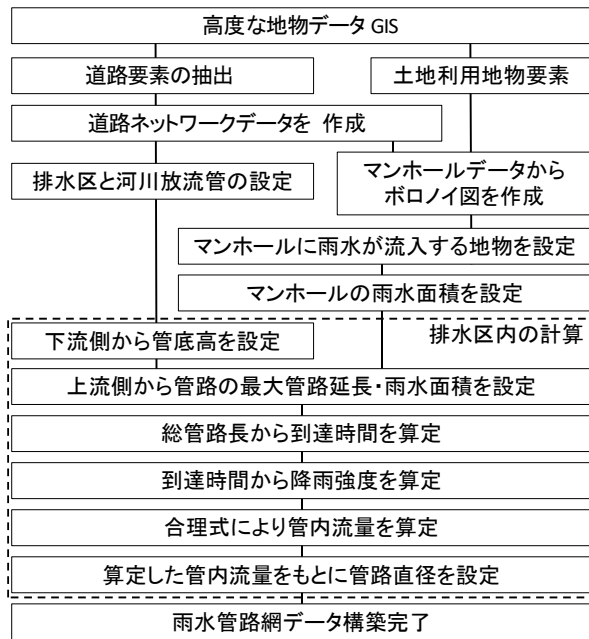


図-4 理論雨水管路網データ構築の流れ

道路NWを作成する。道路NWの作成には、直進性が高く、道路幅の狭い道路の作成が可能で、道路幅の情報も付加することができる手法⁹⁾を用いる。高度な地物データGISから道路ポリゴンを抽出し、これをポリライン型に変換して入力データとすれば、この手法により道路の交点にはポイント型、そして、これらを連結するポリライン型として構成する道路NWが出力される。道路NWを雨水管路網として利用するには、ポイント型をマンホール、ポリライン型を管路として設定する。雨水流出解析モデルでは、雨水がマンホールを介して地上と地下と出入りするため、本研究ではマンホールの間隔が最大で50 m となるように設定した。すなわち初期道路NWにおいて、マンホール間距離が50 m 以上の場合には距離に応じて管路を等分し、新たにマンホールを追加する。最後に、管路網の排水区毎への分離、河川への放流管データの追加、マンホールの地盤高設定を行い、これを初期雨水管路網データとする。

b) 管底高の設定

排水区では、初期雨水管路網データに対し、設定した放流管路から河川に自然排水できるように、上流側の管路勾配を設定する。まず、河川への放流管の管底高を河床高+ dh_s m として設定し、管路長と初期勾配 sl_s を用いて、上流の管底高を設定するとともに、この管底高をマンホールの底高とする。次いで、マンホールに接続している管路数を確認し、2つの場合には、上流側の管路の管底高をマンホール底高とし、前述のような方法で上流の管底高を設定する。ここで、マンホールに管路が3つ以上、すなわちマンホールの上流側に2つ以上の管路が接続している場合には、管路に接続する上流側マンホールの地盤高をチェックし、地盤高の最も低い管路を選択し管底高を設定する。そして、同様の手順で管路選択およ

び管底高を設定しながら、最上流地点まで優先的に完了させる。その後は最下流地点から、管底高が未設定の管路を出発地点とし、基本的には上記手順を繰り返す。また、管路上流側マンホールの底高設定してある場合には、この管路は利用しないので初期雨水管路網データから削除する。なお、地盤高と管底高との差（深度）が一定の範囲に収まらない場合には、前項のマンホール特性を参考に、1mから5mの深さに管底高を設定する。

c) 管路直径の設定

① 計算方法

管路直径の設定根拠となる管路流量は、一般的に下水道計画で用いられている合理式を用いる。

$$Q_p = \frac{1}{360} CIA \quad (1)$$

ここに、 Q_p ：計画流量(m^3/s)、 C ：流出係数、 I ：降雨強度(mm/h)、 A ：排水面積(ha)である。

流出係数は浸透特性に応じた土地利用毎の流出係数と面積から加重平均により算定する。

$$C = \frac{\sum_{i=1}^m C_i A_i}{\sum_{i=1}^m A_i} \quad (2)$$

ここに、 C_i ：土地利用毎の流出係数、 A_i ：土地利用毎の合計面積(ha)、 m ：土地利用種別数である。本研究では、東京都における工種ごとの流出係数¹⁰⁾として、道路を0.9、建物を0.95、その他を0.35と設定した。

降雨強度 I の算定は各自治体により定められた算定式を用いて行っている。本研究では、東京都で用いられている次式の降雨強度式¹⁰⁾を用いる。

$$I = \frac{5000}{t + 40} \quad (3)$$

ここに、 t ：流達時間[min]であり、流達時間は流集時間と流下時間の和で求められる。

設定した流出係数 C 、降雨強度 I 、排水面積 A を用いて計画流量 Q_p を求め、この流量を流すことができる円形断面を次式により設定する。

$$Q_p = \frac{\pi D^2}{4} v \quad (4)$$

ここで、 D ：管路直径(m)、 v ：管内流速(m/s)である。この際の管内流速の算定はマンニングの式を用いて行う。

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} I_s^{1/2} \quad (5)$$

ここで、 v ：管内流速(m/s)、 n ：粗度係数、 R ：径深(m)、 I_s ：管路勾配である。本研究では、粗度係数は、下水道管路として一般に用いられている値0.013¹¹⁾を設定する。

② 設定方法

排水面積および流出係数は、マンホール地点上流での合計値を設定する。まず図-5に示すように、マンホールを母点としたティーセン分割図を作成し、地表面地物重心点によりマンホール排水区を定め、この排水区の土

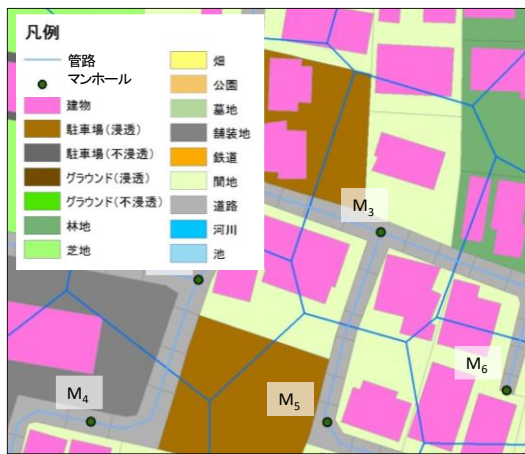


図 - 5 マンホール排水区の設定

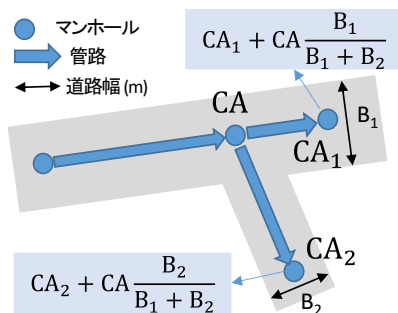


図-6 分流時のCAの計算

表-1 構築データの概要

	構築データ	実データ
マンホール数	8,857 個	9,632 個
管路数	10,671 本	9,904 本
総管路延長	344,674m	268,641m
総管路容量	103,289m ³	69,636m ³

土地利用種別毎の合計面積(A_i)およびそれに対応する流出係数(C_i)を設定する。

流下時間の設定に必要なマンホール地点の最大管路延長および累計CAは、前述の②のデータにおいて、管路が1つ接続している上流端マンホールから計算を開始し、下流側の管路長およびCAを加える。マンホールの下流側に2つ以上の管路がある場合には、CAを複数の分流先の管路へ分配する(図-6)。分配方法は分流先の管路が位置する道路の幅を用いてCA値を按分する。

到達時間は、上流側の最大管路延長を管内平均速度(1.2 m/s)で除した値(流下時間)に最上流部マンホールへの流集時間(5分)を合計したものを、全てのマンホールに設定する。

マンホール毎の降雨強度、流出係数および排水面積を用いて、式(1)により計画流量を計算し、これをマンホール地点下流側管路の流量とする。管路直径は、計画流量を用いて式(4)および式(5)を満たす値を求め、これより大きな規格品の値を設定する。

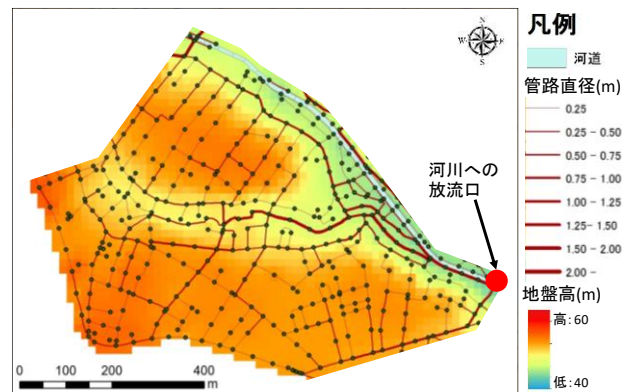


図-7 構築データの地盤高と管路直径の空間分布

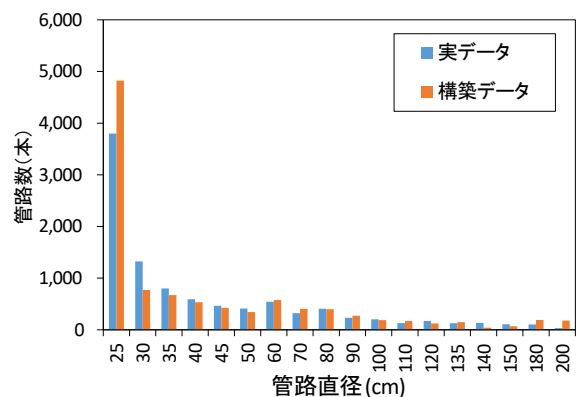


図-8 管路直径度数分布の比較

4. 神田川上流域への適用

(1) 設定条件

図-1c) は神田川上流域の道路ポリゴンデータから道路NWを作成したものである。前項の手順により、図-1c)の排水区毎に理論雨水管路網データを作成した。管路縦断特性を設定するパラメータは、河川への放流管の管底高は現状を参考に河床高+0.5 mを設定した。管路の基準勾配の初期値 sl_0 は台地部での最頻値に近い1/100として設定した。管路勾配は、個々の管底高が設定される時に、土被りを考慮して補正されるため、これよりも急勾配の値が設定されるものと考えた。

(2) 理論データの構築および実データとの比較

構築した神田川上流域における雨水管路網の理論データは、マンホール数8,857個、管路数10,671本、総管路延長344,674 m、総管路容量103,289 m³であった。

表-1は本研究において構築した雨水管路網データ(以下、構築データ)の概要を実雨水管路網データ(以下、実データ)と比較した表である。構築データは実データに比べ、マンホール数は少ないものの、管路数、総管延長、総管路容量において値が大きい結果となった。実データの雨水管路網は概ね樹枝状のネットワークとなっており、マンホール数と管路数に大きな違いは見られない。これに対し、構築データの雨水管路網は網目状のネットワークになっているため、マンホール数に比べて管路数が多くなっている。また、実データでは樹枝状の

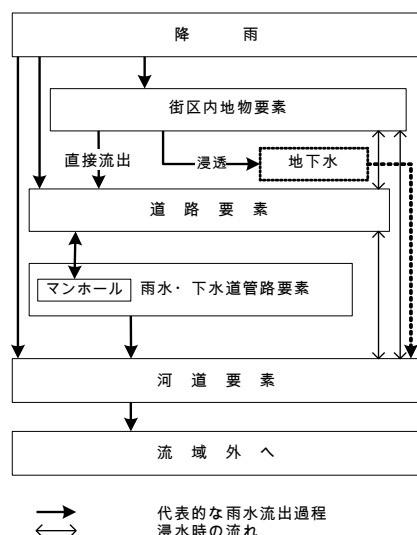


図-9 TSRモデルの概要

ネットワークのため全ての道路の下に管路は埋設されていないことに対して、構築データでは全ての道路の下に管路が埋設されていると仮定して雨水管路網を作成している。このことから実データに比べて、構築データの総管路延長と総管路容量は大きくなっている。

図-6は、図-1d)の排水区番号28について、管底高と管路直径について図示したものである。管底高は地形に沿うように設定されており、管路直径は河川への放流管に近づくほど大きくなっている。また、マンホールの深さは、河道から離れ、標高が高い場所に位置する管路ほど管路の管底が深い傾向がみられた。本手法では地形の影響を受けつつ、設定した排水区ごとに雨水が河川へ放流する雨水管路網データが構築できたことがわかった。

図-7は、構築データと実データの比較を行うため、管路直径ごとの管路数分布を示したものである。管路数分布は概ね同様の傾向がみられるが、構築データは管路直径の大きい2.0 mの管路数が多い。下流側の計画降雨時のピーク流量が実データよりも過大に算定されている可能性があり、実データ設計時からの都市化の進行により、不透透面積率の増大による影響が反映されているものと考えられる。

(3) 雨水流出解析による比較

a) TSRモデルの概要

TSRモデルが対象とする雨水流出過程を図-9に示す。代表的な雨水流出過程を述べると、流域内への降雨は高度な地物データGISから作成される土地利用地物要素それぞれに与えられる。街区内では、土地利用地物要素が持つ浸透・不浸透特性に応じて不浸透域の降雨および浸透域の浸透能を超えた降雨を直接流出として計算し、建物の雨水は近傍の道路要素への流出量として算定する。道路要素の雨水は、その要素内にマンホールが存在する場合には雨水・下水道管路に流入し、存在しない場合には道路要素上を流下する。こうして、雨水・下水道管路へ流下した水は数々の管路網を経て、最終的には河川要

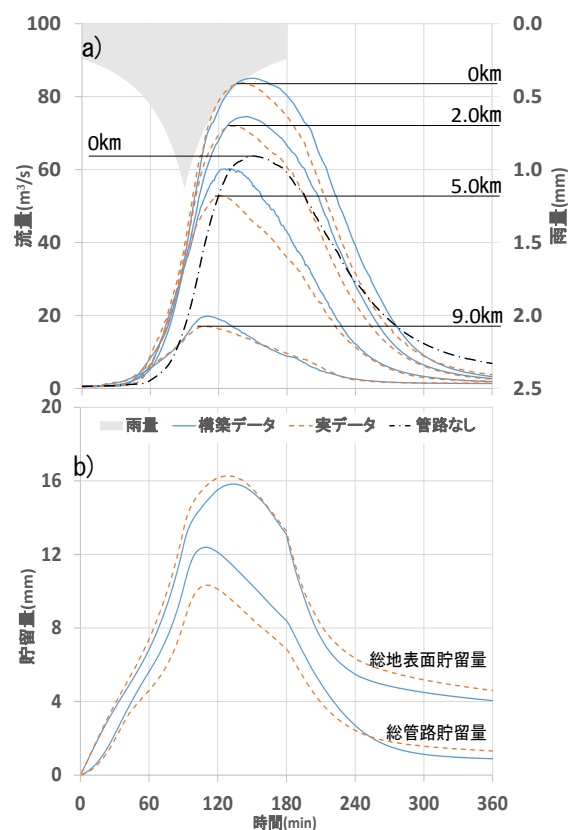


図-10 解析結果。 a) 河道流量、
b) 地表面・管路総貯留量

表-2 河道流量20m³/sまでの経過時間

距離 (Km)	実データ (min)	構築データ (min)
0	75	79
1	76	79
2	78	80
3	76	78
4	73	78
5	77	77
6	74	78
7	81	81
8	81	89

素に流出して流域外へと流去していく。

b) 河道流出量の比較

構築した雨水管路網データと実雨水管路網データを用いてTSRモデルによる雨水流出解析を実施した。入力降雨として東京管区気象台の降雨から算定される5年確率降雨の中央集中型波形を用いた実雨水管路網データの雨水流出解析結果を指標とし、本手法により構築した雨水管路網データの流出特性について、河道流量および地表面・管路の総貯留量に関して考察を行った。

図-10 a)は、図-1c)に示した神田川上流域の河道最下流端から0km, 2.0km, 5.0km, 9.0kmの4地点における河道流量を示したものである。総降水量91mmに対する河道最下流端における流出率は、構築データの流出高は68mmなので流出率は75%となっており、実データの流

出率73%よりも僅かながら大きくなった。河道ピーク流量は、構築データが実データを下流端、下流、中流、上流でそれぞれ2%、4%、13%、14%程度上回り、流量ピーク時以降も引き続き同様の傾向が見られた。

図-10 b)は総地表面貯留量の時系列変化を示したものである。総地表面貯留量は、構築データが実データを平均7%程度下回り、その傾向は貯留高上昇初期から計算終了時まで続いている。総地表面貯留量の大小は、雨水がマンホールを介して雨水管路に流入しやすいかどうかに影響を受けると考えられるので、両者のマンホールの数に着目して考察する。雨水管路網のマンホールの数は、構築データが8,857個、実データが9,632個であり、構築データの方が少なくなっている。構築データのマンホールは道路ネットワークデータ上の交差部および単路部に最大間隔50mとして全ての道路上に均等に配置してある。一方、実データの場合、マンホールのない道路が多数存在すること、交差部に複数のマンホールが密集していること、単路部でマンホール同士の間隔が近接していることが挙げられる。以上のことから、マンホールの数自体が主要因ではなく、その配置が雨水の管路への流入のしやすさに大きく関わっていることが推察される。この要因により、道路NWにより構築した雨水管路網データは、地上の雨水がマンホールを通じて管路に流入しやすくなっていることが考えられる。

図-10 b)の総管路内貯留量(管路内総貯留容量/流域面積)の時系列変化に着目すると、貯留量の上昇初期から250分頃までは構築データが実データの貯留量よりも大きく、特にピーク時には構築データ12.4mmに対し、実データは10.3mmで20%程大きい。250分以降は、構築データが実データの貯留量を平均0.5mm程度下回っている。この原因としては、上述したマンホールの配置の違いに加え、道路ネットワークを利用した雨水管路網データは、全ての道路の地下に雨水管路を設定して構築しているため、総管路容量が実データの69,636m³に対し約1.5倍の103,289 m³に設定されたことにより、総管路貯留量も大きくなったと考えられる。また、構築データにおいて設定された管路直径は実データよりも大きく、特に河道付近に設置された直径の大きい管路の影響により、構築データの総管路容量が上昇したものと考えられる。

河道流量の上昇初期における流出特性を把握するため、河道流量20m³/sを越えるまでの時間を表-2に示す。河道流量20m³/sに至る時間は、構築データが実データよりも数分程度遅れる傾向が見られるが、5km地点や7km地点のように遅れが見られない地点もあるが、河道ピーク流量に至る到達時間は、いずれの地点においても構築データが実データよりも数分から最大で8分程度遅れている。

5. むすび

本研究は、高度な地物データGISを用いて理論的な雨水管路網データを構築する手法を開発し、本手法を神田

川上流域に適用したものである。構築した雨水管路網データに対して、実雨水管路網データとの物理特性値を比較検討し、また、洪水流出解析による流出特性を検討することにより、提案した手法の有効性について評価を行った。

実雨水管路網データは樹枝状で、構築データは網目状の特性を持つネットワーク形状の違いから、実データはマンホール数と管路数に違いがあまりみられなかったことにに対し構築データではマンホール数に比べて管路数が多い結果となった。また、本手法は道路ネットワークを雨水管路網としているので、実際に管路が埋設していない道路にも管路が存在するので、構築データは総管路延長と総管路容量が共に多い結果となった。

5年確率降雨の中央集中型波形を用いた洪水流出解析による流出特性の比較では、流出率および河道の流量波形は概ね一致した傾向を得ることができたものの、構築データの結果は、管路網特性を反映し、管路内貯留量が多いために河道ピーク流量が数%小さくなることが確認できた。今後は他の河川流域への適用、洪水浸水解析への適応などを行い、適用性評価をさらに進めていく予定である。

参考文献

- 1) 川池健司, 井上和也, 戸田圭一, 野口正人: 低地河川流域での豪雨による都市氾濫解析, 水工学論文集, 第48巻, pp.589-594, 2004.
- 2) 武田 誠, 森田 豊, 松尾直規: 下水道システムを考慮した氾濫解析の治水対策への適用, 水工学論文集, 第51巻, pp.529-534, 2007.
- 3) 天口英雄, 河村明, 高崎忠勝: 地物データGISを用いた新たな地物指向分布型都市洪水流出解析モデルの提案, 土木学会論文集, Vol.63, No.3, pp.206-223, 2007.
- 4) 秋山壽一郎, 重枝未玲, 田邊武司: 下水道網を考慮した飯塚市街地の氾濫解析, 水工学論文集, 第53巻, pp.829-834, 2009.
- 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解析, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.67, No.2(2011), 70-85.
- 6) 天口英雄, 椿涼太: 浸水被害予測技術の現状と課題, 河川技術論文集, pp.425-430, 2015.
- 7) 国土地理院: 基盤地図情報ダウンロードサービス, <https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php> (アクセス日 2019/3/25)
- 8) 国土地理院: 土地条件図, 東京西部および吉祥寺, 2011.
- 9) 田内裕人, 天口英雄, 河村明, 古賀達也, 萩原陽一: 都市域の道路形状特性に着目した新たな道路ネットワークデータの自動構築手法, 土木学会論文集F3(土木情報学), Vol.70, No.2, pp. I_115-I_122, 2014.
- 10) 東京都下水道サービス株式会社: 管渠再構築の手引き, pp.126-127, 2005.
- 11) 田中修司: 下水道管渠学, 環境新聞社, pp.29-36, 2001.

(2019. 4. 2受付)