

都市流域を対象とした 建物浸水モデルの提案

A PROPOSAL OF STORM RUNOFF MODEL CONSIDERING PROCESS OF BUILDING INUNDATION FOR AN URBAN CATCHMENT

天口英雄¹・長坂丈巨²・河村明³・高崎忠勝⁴・中川直子⁵
Hideo AMAGUCHI¹, Takemi NAGASAKA², Akira KAWAMURA³, Tadakatsu TAKASAKI⁴,
and Naoko NAKAGAWA⁵

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

²正会員 三井共同建設コンサルタント(株) (〒169-0075 東京都新宿区高田馬場1-4-15)

³正会員 工博 首都大学東京 教授 都市基盤環境工学専攻 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

⁴正会員 博士(工) 東京都土木技術支援・人材育成センター (〒136-0075 東京都江東区新砂一丁目9-15)

⁵正会員 博士(理) 首都大学東京 特任准教授 都市基盤環境工学専攻 (〒192-0397 八王子市南大沢1-1)

A numerical simulation model for rainfall-runoff and flood inundation model considering process of individual building inundation was proposed. The set-up of this model is based on so-called “urban landscape GIS delineation” that faithfully describes the complicated urban land use features in detail. The flow between single spatial elements is based on established hydraulic and hydrological models with equations that describe all aspects of storm runoff generation in an urban environment.

The model was set up and applied for the upper Kanda catchment in Tokyo Metropolis, Japan. The runoff response to a storm event was simulated. It was demonstrated how the model can be used to evaluate the process of building inundation in the urban hydrological system.

Key Words: *TSR (Tokyo Storm Runoff) Model, urban catchment, urban landscape GIS delineation, inundation analysis, process of building inundation*

1. はじめに

都市中小河川流域における豪雨時の浸水は、下水道などの排水施設が排水不良を起こして内水として発生するほか、河川沿いでは内水に河川の溢水が重なることで複合的に発生する。浸水被害軽減には治水・雨水排水施設の整備向上を図るだけでなく、豪雨を入力とする浸水解析シミュレーションにより浸水リスクを評価・検討することが重要であり、現在では外水を対象とした浸水想定氾濫区域¹⁾や内水ハザードマップ²⁾の作成・公表が多くの河川流域で行われている。ここで浸水解析により得られる情報として最も重要な情報の一つである浸水深は、治水経済調査マニュアル(案)³⁾により行われる治水事業評価の基礎となる被害額算定の基礎ともなっている。

都市流域を対象とした豪雨時の浸水深を算定する浸水解析モデルとしては、雨水・下水道管路と地表面(氾濫)の流れを同時に解析する手法が一般的であり、前者には主にプライスマンのスロットモデルが、後者には多様な解析格子形状を用いたモデルが提案されている。例えば、

地盤高情報(DEM)に着目しメッシュ状の計算格子を用いた2次元不定流モデル⁴⁾、都市の街区・排水区構造から生成した非構造格子を用いた2次元不定流モデル⁵⁾やダイナミック氾濫解析モデル⁶⁾、都市の道路構造に着目した街路ネットワークモデル(1次元不定流モデル)^{7),8)}など様々な解析格子を用いたモデルが提案されている。これらの解析格子では、建物は非浸水性であるものと仮定し、建物占有率(格子内に建物が占める割合)を用いて水深を上昇させる方法^{5)~7)}により解析格子の水深が計算されている。建物の浸水深は個別に計算されず、多くの場合解析格子の水深と同様⁹⁾あるいは建物周囲の平均水深¹⁰⁾が用いられている。

しかしながら、家屋や事業所などの建物に資産が集中している都市流域においては、ステークホルダーが計画する豪雨浸水被害に対するきめ細かな減災対策には個々の建物の浸水特性を考慮した様々なシナリオ分析が重要であると考えられる。また、都市流域における家屋浸水被害対策の現状は様々であり、浸水発生時には、建物の耐水化や浸水防護壁により雨水の浸入を防止しなければ、雨水は床下、ドア、窓などから建物内に徐々に浸水する

ものと考えられる。個別建物の実情に合った家屋浸水モデル構築には個別建物を解析格子として設定することが必要であるが、このようなモデル化は見当たらない。

一方著者らは、都市構造を忠実に再現するためのGISシステムを用いたデータベースとして、詳細な雨水・下水道システムおよび道路、河道、そして街区内に存在する個々の建物、駐車場、緑地などからなる地物データGISを構築するとともに、これを用いた都市流域の洪水流出・浸水解析モデルとしてTSR(Tokyo Storm Runoff)モデル^{11)~13)}を開発している。TSRモデルの地表面の解析格子表現法の特徴として、上述の解析格子は洪水(氾濫)の流れに着目していることに対し、都市流域の個々の土地利用構造に着目している点にある。また、これまでの氾濫解析モデルにおける雨水の直接流出量の取り扱いは、都市流域で発生する氾濫特性を考慮したモデル開発に重点が置かれているので、豪雨時の直接流出量は一律の流出係数を設定するなど簡便な手法により算定^{5), 6)}されている。一方、TSRモデルでは、雨水の直接流出量の算定に影響を与える個々の地物情報に立脚したモデル構築を目指すことで、局地的な豪雨流出・浸水解析の精度を向上させることができるものと考えている。これまでのTSRモデルにおいては、地表面の洪水流出・浸水解析における建物の取り扱いとして、既往の氾濫解析と同様に地表面を街区と道路に分類して街区に建物占有率を設定した場合¹¹⁾、そして、街区に個々の建物、緑地などから構成される土地利用種別を用い、表面流出および浸水過程においては建物を除いたデータを設定した場合¹³⁾について検討している。

以上の背景のもと本研究では、表面流出および浸水過程において建物の浸水過程を考慮した洪水流出・浸水解析モデルを提案するとともに、提案モデルを神田川上流域に適用し、建物浸水モデルの妥当性について検討を行うものである。

2. 建物浸水過程のモデル化

(1) TSRモデルの概要^{11)~13)}

本研究では、洪水流出・浸水解析の枠組みとして著者が構築したTSRモデルを用いて、個別建物の浸水過程のモデル化を試みる。TSRモデルにおける洪水流出・浸水過程の流れを図-1に示す。図-2はTSRモデルに用いている主要な水文・水理モデルの基礎式を示したものである。有効降雨モデルには修正Hortonモデル、家屋から近傍道路への流出にはKinematic Waveモデル、そして地表面(氾濫)流、雨水・下水道管路流には河道流には一次元不定流モデルを用いている。図-3はTSRモデルで用いている高度な地物データGISの構成要素をそれぞれ示したものである。TSRモデルに用いる高度な地物データGISの構成要素は、街区内土地利用(図-3(a))、道路、河道および雨水・下水道管路(図-3(b))であり、街区内土地利用および道路を合わせて地表面とする。また、TSRモデルで対象とする雨水・下水道管路は、地表面と同様

に枝線管路を含めた雨水排水網の分布状況をできる限り忠実にモデル化されることを想定している。

図-1に示すTSRモデルの流出過程では、まず流域への降雨は地表面および河道に対して与えられる。土地利用地物の浸透・不浸透特性に関する情報を基に、その地物の1ステップ前の水深に降雨、周囲からの流入流出が浸透能を超えた雨水量を計算し、地物毎に水深を設定する。建物の雨水は近傍の道路へ流出するものとし、Kinematic Wave法により算定される(図-2)。この理由は、流出先の道路からの流出は局所的な道路の下水道管路の有無による状況をモデルに反映させるため、これにより個別建物からの雨水排水は近傍道路の下水道管路の状況など局所的な流出経路を反映したものとなる。

道路上の雨水は、道路の側溝を通じて雨水・下水道管路に排水されているのが現状で、TSRモデルではこれらをモデル化することも可能であるが、雨水流出のモデル化においてはこれらの情報収集が困難であるため、マンホールを通じて雨水・下水道管路に雨水が排水されるものとして解析を行なっている。

(2) 建物浸水モデル

これまでのTSRモデルでは、建物には雨水が浸入しないものと仮定し、図-3(c)に示す建物以外の街区内土地利用に対して地盤高を設定し、図-2(b)を用いて地表面の水位を算出している。提案する建物浸水モデルでは、街区内土地利用の建物を地表面の解析格子として活用するとともに、建物周囲の水位を用いて建物への浸水過程の解析を行うものである。

建物浸水モデルでは、図-4に示す木造住宅を想定した場合、雨水は屋外水位 H_s が基礎部分に設置された床下換気口の基準標高 B_0 を超えると床下換気口より浸入し、屋外水位 H_s が床面標高 B を超えるとドアやサッシの隙間から屋内に浸入する過程をモデル化する。床下換気口から建物への浸入量は、屋外水位を H_s 、屋内水位を H_b として換気口の基準標高 B_0 との水位差をそれぞれ h_{s0} 、 h_{b0} とした場合、以下に示す越流公式¹⁴⁾に従って算定されるものとした。

$h_{b0}/h_{s0} \leq 2/3$ (完全越流)のとき

$$Q_{b0} = \mu_1 L \alpha_0 h_{s0} \sqrt{2gh_{s0}} \quad (1)$$

$h_{b0}/h_{s0} > 2/3$ (潜り越流)のとき

$$Q_{b0} = \mu_2 L \alpha_0 h_{b0} \sqrt{2g(h_{s0} - h_{b0})} \quad (2)$$

ここに、 Q_{b0} : 換気口からの浸入量(m^3/s)、 μ_1 、 μ_2 : 流量係数、 α_0 : 床下浸入率、 L : 建物の外周延長(m)である。

屋外水位 H_s が床面標高 B を超えた場合も同様の方法により、床面標高 B を基準とした屋外水深 h_s および屋内水深 h_b と床上浸入率 α を用いることにより、屋内への浸入量 Q_b が求まる。また、建物から雨水が排水する場合も

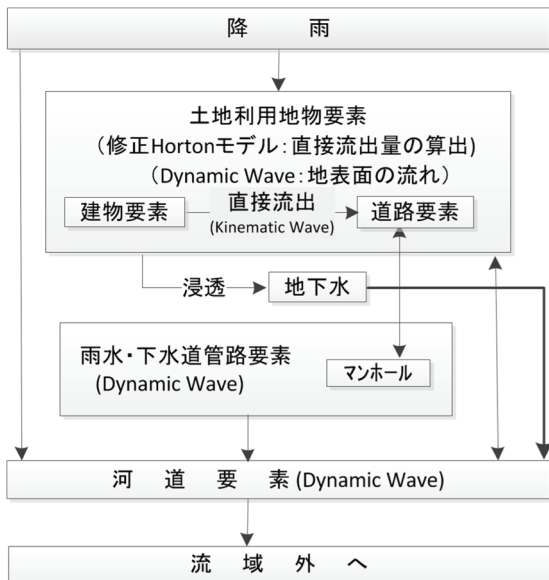


図-1 TSRモデルの洪水流出過程

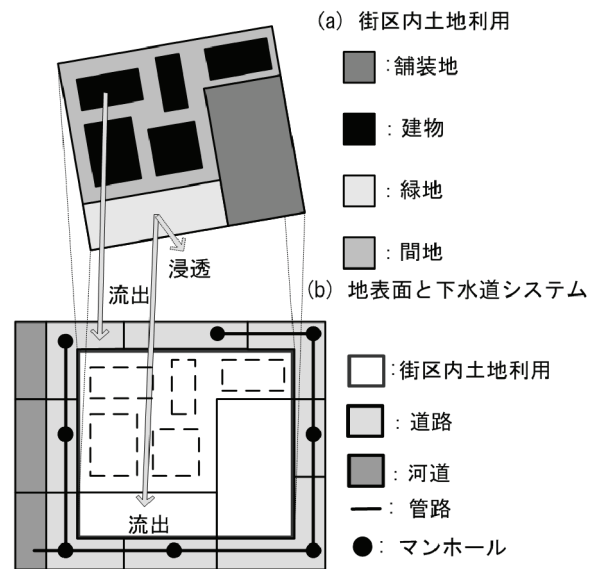


図-3 高度な地物データGISの構成要素

(a) 建物から道路への流れ

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r_e \quad q = \alpha h^\beta$$

h : 建物の水深, q : 単位幅流量, x : 距離 (要素間距離), r_e : 有効雨量, α : 等価粗度係数と勾配の関数, β : 定数

(b) 土地利用地物要素間の流れ

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{gn^2 Q |v|}{R^{4/3}} = 0$$

$$\frac{\partial h_s}{\partial t} = (\Sigma Q_s + \Sigma Bq + \Sigma Q_{in} + rA_s - IA_s) / A_s$$

Q : 流量, A : 流積, H : 水位, x : 要素間距離, n : 粗度係数, v : 流速, R : 径深, h_s : 地表面の水深, ΣQ_s : 隣接地表面要素からの流入量, r : 雨量, I : 浸透量, A_s : 地表面要素面積, B : 微小土地利用要素の斜面幅, q : 街区内土地利用要素の単位幅流量

(c) 雨水・下水道管路の流れ

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{gn^2 Q |v|}{R^{4/3}} = 0$$

$$\frac{\partial S_m}{\partial t} = \Sigma Q_{in} - \Sigma Q_{out}$$

Q : 流量, A : 流積, v : 流速, H : 水位, x : 管路長, n : 粗度係数, R : 径深, S_m : マンホールの貯留量 (マンホール部の貯留量・水位換算式により水位を算出), Q_{in} : マンホール部流入量, Q_{out} : マンホール部流出量

(d) 河道の流れ

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{gn^2 Q |v|}{R^{4/3}} = 0$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - \Sigma q = 0$$

Q : 流量, v : 流速, x : 要素間距離, H : 水位, n : 粗度係数, A : 流積, Σq : 降水量, 雨水・下水道管路および地表面からの横流入量

図-2 TSRモデルの水文・水理モデルの基礎式

同様に越流公式を用いて流量を算定する。

建物の浸水深は、式(1)あるいは式(2)により評価された浸入量 Q_{b0} (あるいは Q_b) を用いて、式(3)により算定される。

$$dh_b/dt = (\Sigma Q_{b0} + \Sigma Q_b) / (0.9A_b) \quad (3)$$

ここで、地物データGISより得られる建物面積 A_b (m^2)は実際の床面積ではなく屋根面積となっているので、本研究では、建物の浸水深をより正確に評価できるように床面積は屋根面積の9割に相当するものと仮定した。

建物浸水モデルのパラメータは、建物の敷地標高、換気口の基準標高 B_0 、床面標高 B 、床下浸入率 α_0 および床上浸入率 α であり、以下に設定方法を示す。

まず、建物の敷地標高は基盤数値情報 (数値標高モデル) 5mメッシュ (標高)により建物要素内の平均値として求めたものに0.1mを加算する。この理由は、現地調査

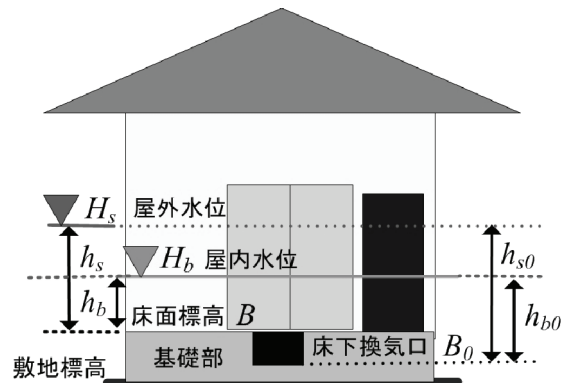


図-4 建物浸水モデルに用いるパラメータ

により得られた建物の敷地高が平均値よりも若干高い傾向が見られたためである。床面までの高さおよび建物への浸入率は、個々の建物の用途に大きく影響するものと考えられるので、建物を住宅と商業施設や工場など人の出入りを考慮した非住宅とに区分した。住宅の場合にはさらに、その構造により木造と非木造に分けてパラメータを設定した。表-1は設定した建物用途別の床下・床上基準標高および床下・床上浸入率を示したものである。なお、換気口の基準標高および床面標高は、敷地標高に表の値を加えたものとする。

木造住宅の場合、建築基準法¹⁵⁾では、基礎の高さを地面から45cm以上、床下換気口は基礎の長さ5m以下ごと面積30cm²を設けるようになっている。そこで、基礎高を50cm、換気口は基礎上端から高さ10cm、幅30cmと仮定し、5m毎に1つの換気口が設置されているものとして、建物全周囲長 L に対する浸入率 α_0 は $6/100(=0.3/5.0)$ となる。また、床上浸入率 α は、ドアや玄関などの開口部からの浸入を想定しており、ここでは床下浸入率の1/3程度の2/100を設定する。非木造住宅の場合は床下換気口が無いものと仮定した。

最後に、工場、倉庫および商業施設などでは人の出入りなどが考慮されているため、建物の敷地標高から床面標高までの高さは25cmを用いる。なお、地下室のある建物については、その階数によらず建物敷高を一律に3m低下させてこれを地下室とみなし、周辺の水位が床面標高を超えた場合には家屋1階へ浸水するものとする。

3. 神田川上流域への適用

(1) 対象流域

本研究で対象とする神田川は、三鷹市の井の頭池にその源を發し、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11.5km²、流路延長約9km)を設定した(図-5(a))。

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-5(b)は、東京都1/2500地形図の電子データおよび航空写真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¹⁴⁾。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-5(c)は、神田川上流域の雨水・下水道管路を示したのものである。下水道システムのモデル化には下水道台帳より行政が監理する全管路を対象とした。またTSRモデルでは、地表面の雨水はマンホール地点で雨水・下水道管路に流れ込むものとしているので、道路の側溝からの排水を模擬的に表現するために、全ての管路長が15m以内となるように雨水流入のためのマンホールを新たに追加した。その結果、マンホールと管路の数はそれぞれ38,831、39,102となっている。建物浸水モデルでの住宅および工場、倉庫および商業施設などの建物の用途設定は、東京都整備局の東京都都市計画地理情報システムにより行った。

(2) 対象降雨と水文・水理パラメータの設定等

本研究では、提案する建物浸水モデルのパフォーマンスを確認する。対象降雨は2005年9月4日豪雨であり、本豪雨は神田川の西部から東部に移動すると共に、南北に伸びる降雨域の影響により、神田川流域では21:00から24:00にかけて1時間雨量110mm以上の豪雨を記録し、妙正寺川流域および善福寺川流域の中野区、杉並区では約3700戸の浸水被害が発生した¹⁶⁾。

本研究で対象としている神田川上流域では、神田川地下水調節池の運用により目立った浸水被害は発生していない。そこで本研究では、本豪雨で神田川地下水調節池が機能しない場合を想定して洪水流出・浸水解析を行い、家屋の浸水特性を評価することにより建物浸水モデルの妥当性について検討を行うものとする。

表-1 建物浸水モデルのパラメータ

	木造	非木造	商業等
B_0	+40cm	-	-
B	+50cm	+50cm	+25cm
α_0	6/100	-	-
α	2/100	2/100	2/100
要素数	2,449	28,708	2,893
総面積(m ²)	188,919	2,601,434	273,530

表-2 TSRモデルのパラメータ

パラメータ名	設定値
初期浸透能 (mm/hr)	林地 : 30
	緑地 : 30
	グラウンド : 10
	間地 : 10
終期浸透能 (mm/hr)	林地 : 20
	緑地 : 20
	グラウンド : 5
	間地 : 5
浸透能の減衰係数 (hr ⁻¹)	4.14
地表面	道路 0.043
	その他 0.067
雨水・下水道管路の粗度係数	0.013
河道の粗度係数	0.0225

降雨は、東京都水防災システムにより観測された神田川上流域に隣接する7ヶ所の1分データを用いて、ティーセン法により個々の土地利用地物に与えた。また、水文・水理パラメータは既往の文献等から設定したもので、表-2に示す神田川上流域へ適用¹⁷⁾した値を用いた。

4. 解析結果と考察

まず、河道水位を用いて解析モデルの妥当性について検討を行う。図-6は、洪水流出解析により得られた河道水位で、図-6(a)に中流部に位置する高井戸橋の水位を、図-6(b)に下流部に位置する方南橋の水位を、流域平均雨量および観測河道水位とともに示したものである。流域平均雨量は図-5(a)に示す7つの雨量観測所により得られた雨量をティーセン法により求めたもので、開始時刻は2005年9月4日19:00である。

図-6(b)に示す高井戸橋での計算河道水位は、概ね観測河道水位を再現していることが読み取れる。一方、図-6(a)に示す方南橋における観測河道水位は神田川地下水調節池への流入量を反映して断続的に低下が見られている。計算河道水位における初期の上昇時間が観測河道水位より40分程度早く再現性が悪いものの、ピーク水位など全体的な波形は概ね再現したものとなっている。河道水位の急激な上昇を再現できなかった理由としては、初期損失や浸透のパラメータが影響していると考えられるほか、降雨域が線状に南北に伸びた局地性の降雨¹⁶⁾で

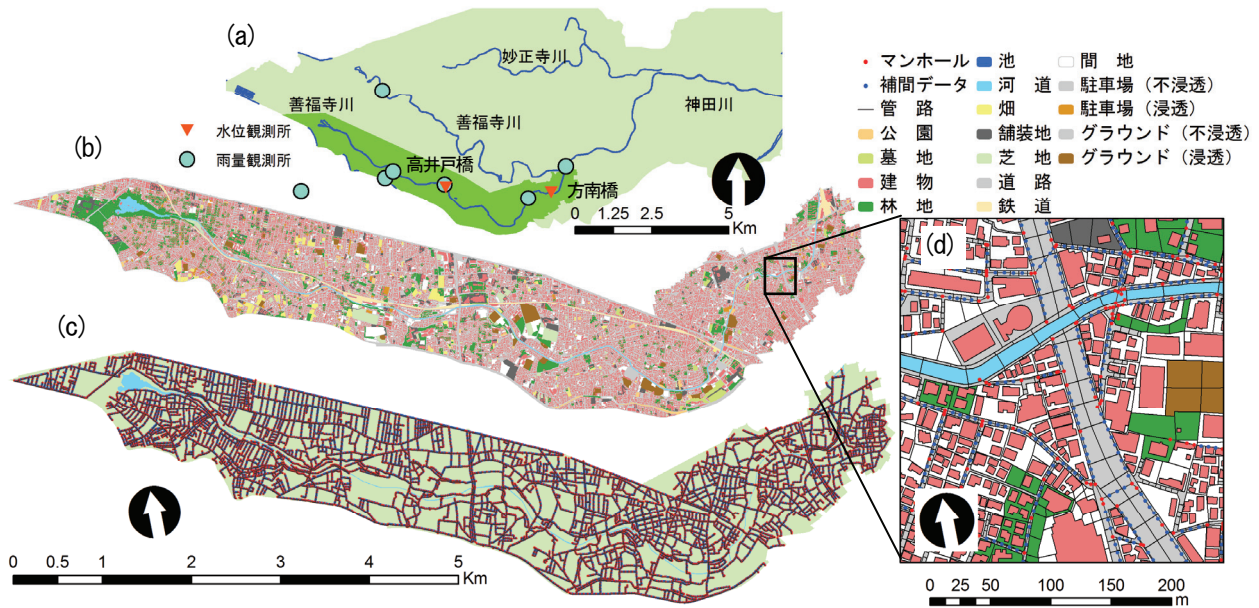


図-5 対象流域のモデル化, (a) 神田川上流域の位置図, (b) 土地利用地物要素, (c) 雨水・下水道管路要素, (d) 拡大図

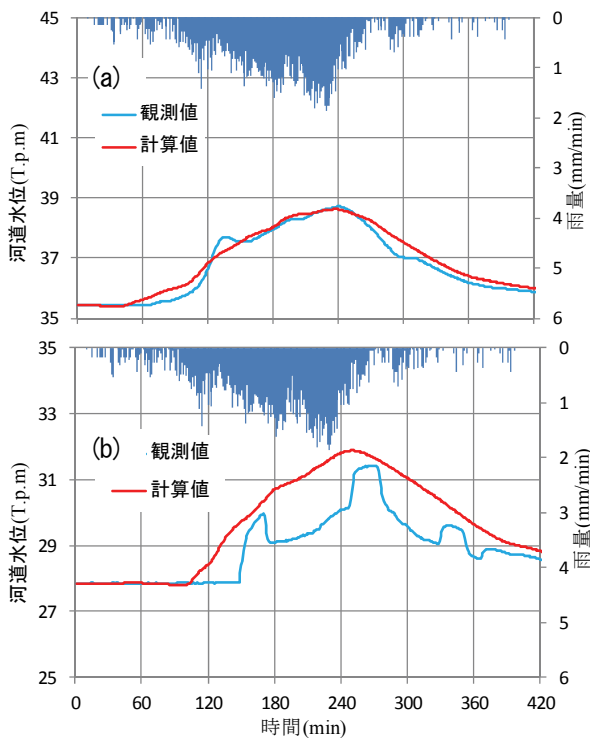


図-6 河道水位の比較, (a) 高井戸橋, (b) 方南橋

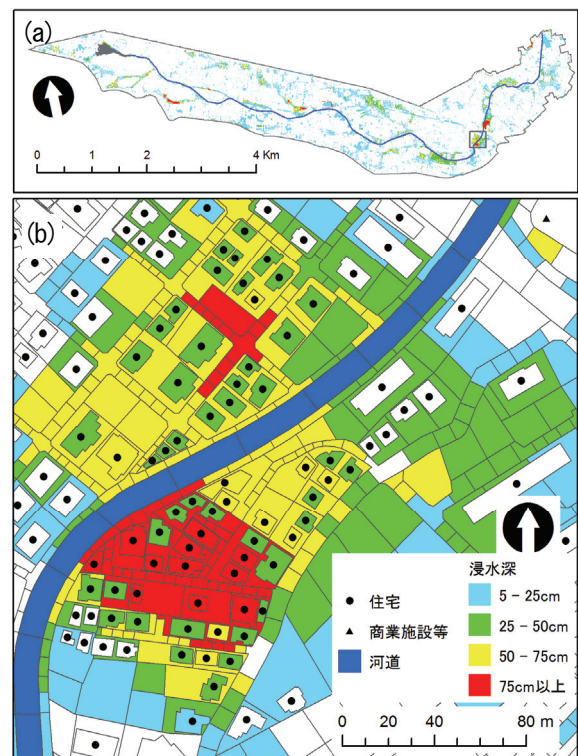


図-7 最大浸水深分布, (a) 全体図, (b) 拡大図

あったため、ティーセン法により入力した降雨が実際の降雨現象を正確に捉えられていなかった可能性も推察される。

次いで、建物浸水モデルの有用性は、本洪水流出・浸水シミュレーションにおいて家屋浸水が多く発生している領域を取り上げることに伴い、その評価を行なっていく。図-7は、(a)に神田川上流域における最大浸水深分布を、(b)には(a)の□印に示す範囲を一例として、河道近傍における最大浸水深を4段階で示したものである。建物要素には建物用途として●印を住宅、▲印を商業施設

等として示しており、図-7(b)に示す建物の用途の多くは住宅となっている。建物浸水モデルでは住宅の場合、雨水は宅地の敷高より40cm高く設定した基礎部分の換気口から浸入する。建物と建物周囲の浸水深分布は、設定されたパラメータを反映した結果が得られているものと考えられる。建物の浸水状況は、建物周囲の最大浸水深が5~25cmおよび25~50cmの区分の場合には建物にはほとんど浸水が発生していないが、浸水深の区分が50~75cmから75cm以上と上昇するにつれて、建物の浸水深も徐々に増加していることがわかる。すなわち、建物浸

水モデルにより算定される建物浸水深は、住宅の場合では建物周囲の水深が雨水が建物に浸入する水位である40cmを超過しなければ床下浸水は発生しないので、床上以上の浸水家屋被害は建物周囲の浸水深が50cm以上となる場合に発生していることが確認できる。

なお、本研究では建物浸水モデルを考慮しない場合の河道水位についての結果を図-6に示してはいないが、対象降雨により発生する図-7(a)の最大浸水深はピーク時の数10分間程度であるため、建物浸水モデルの考慮の有無による河道地点における水位変化量は最大でも数cm程度とわずかであることを確認している。

5. むすび

本論文は、詳細な雨水・下水道システムおよび道路、河道、そして街区内に存在する個々の建物、駐車場、緑地などからなる地物データGISを用いた洪水流出・浸水解析モデルであるTSRモデルを用いて、建物浸水過程のシミュレーションを可能とする建物浸水モデルを提案したものである。建物浸水モデルに設定するパラメータとして換気口の基準標高、床面標高および床下・床上浸入率を導入するとともに、これらのパラメータを建物用途等から設定する方法を示した。

提案モデルを神田川上流域に適用し、2005年9月4日の豪雨を用いて神田川地下調節池が機能しなかった場合についての洪水流出・浸水シミュレーションを行った。その結果、建物に設定した個々のパラメータを反映した浸水特性が得られていることを定量的に示すとともに、家屋の浸水現象を定性的に表現できていることを確認した。ただし、本研究で対象とした流域および降雨により生じる建物の浸水現象は、洪水流出過程全体からみて河道水位に与える影響は相対的に小さいので、提案する建物浸水モデルにより河道水位・流量等の洪水流出予測精度の向上は期待できない。

しなしながら、個々の建物に対して建物浸水モデルパラメータを設定出来る提案モデルを用いることにより、治水施設をはじめ雨水流出抑制施設などの浸水被害軽減策など様々なシナリオに対して洪水流出・浸水シミュレーションを行うことにより、個別建物の浸水リスクを評価することは可能であるものと考えられる。

今後の課題としては、実浸水域における建物浸水状況を把握し、洪水流出・浸水シミュレーションによる結果を比較することで提案した建物浸水モデルの精度向上を目指して行く必要がある。また、合流式下水道の整備された都市流域では、豪雨時に雨水が下水道管路を逆流することにより建物が浸水する現象が報告されている。このような家屋の浸水現象にも対応させるため、建物と雨水・下水道管路との接合関係を構築し、豪雨時の合流下水道管路から家屋内への浸水リスク評価モデルを開発する予定である。

謝辞：本研究を遂行するにあたって、東京都アジア高

度研究「アジア都市圏における水問題解決のための適応策に関する研究」（代表：河村明）の補助を受けました。ここに記して深謝申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省 河川局治水課：浸水想定区域図作成マニュアル（案），2005.
- 2) 国土交通省 都市・地域整備局：内水ハザードマップ作成の手引き（案），2009.
- 3) 国土交通省 河川局治水課：治水経済調査マニュアル（案），2005.
- 4) 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, 1_1015-1_1020, 2012.
- 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) 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.
- 7) 関根正人，和田祐樹，佐藤裕隆：住宅密集地を対象とした集中豪雨の浸水氾濫過程に関する数値解析，土木学会論文集B1(水工学)Vol.68, No.4, 1_997-1_1002, 2012.
- 8) 馬場洋光，真野明：電子データベースを統合した都市氾濫モデルの構築，水工学論文集，第52巻，pp.871-876, 2008.
- 9) 小林健一郎，寶 馨，奥勇一郎：統合型降雨流出・洪水氾濫モデルによる佐用町洪水災害分析と経済被害推定，水工学論文集，第55巻，pp.S949-S954, 2011.
- 10) 秋山壽一郎，重枝未玲，草野浩之：都市浸水・減災対策検討シミュレータによる飯塚市の浸水被害評価，土木学会論文集B1(水工学)Vol.68, No.4, 1_1063-1_1068, 2012.
- 11) 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B, Vol.63 No.3, pp.206-223, 2007.
- 12) 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，水工学論文集，第55巻，pp.S517-S522, 2011.
- 13) Amaguchi, H., Kawamura, A., Olsson, J. and Takasaki, T. : Development and testing of a distributed urban storm runoff event model with a vector-based catchment delineation., *Journal of Hydrology*, No.420-421, pp.205-215, 2012.
- 14) 土木学会編：水理公式集, 技法堂, pp.265-266, 1971.
- 15) 総務省行政管理局：建築基準法施行令，<http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S25/S25SE338.html>
- 16) 野村孝雄：集中豪雨による東京都内における水害について（速報），土木学会誌 Vol.90, No.11, pp.51-52, 2005.
- 17) 天口英雄，河村明，荒木千博，高崎忠勝：神田川上流域の地物データを用いた洪水流出モデルの構築とその適用，河川技術論文集，第15巻, pp.371-382, 2009.

(2013. 4. 4受付)