

# 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

A PROPOSAL OF TOKYO STORM RUNOFF MODEL FOR AN URBAN  
CATCHMENT USING URBAN LANDSCAPE GIS DELINEATION

天口英雄<sup>1</sup>・河村明<sup>2</sup>・高崎忠勝<sup>3</sup>・中川直子<sup>4</sup>

Hideo AMAGUCHI, Akira KAWAMURA, Tadakatsu TAKASAKI and Naoko NAKAGAWA

<sup>1</sup>正会員 博(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)

<sup>2</sup>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)

<sup>3</sup>正会員 博(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)

<sup>4</sup>正会員 博(理) 首都大学東京 特任准教授 都市基盤環境学域 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

Tokyo Storm Runoff (TSR) model using urban landscape GIS delineation is proposed. The polygon feature GIS data are used to parameterize complicated land use patterns in the urban catchment for the modelling. It is shown how various land use, streets, drainage and river systems are used as input to coupled hydraulic and hydrological models. In this model, if the precipitation rate and surface runoff rate from adjacent elements exceed the infiltration rate, runoff will occur. The model is applied to a flood-prone urban catchment in Tokyo with hypothetical rainfall events. It is found that the model can simulate the physical rainfall-runoff process, but validation of the effects of infiltration process expressed in this study should be done in the future.

**Key Words :** *TSR (Tokyo Storm Runoff) Model, distributed storm runoff model, urban catchment, urban landscape GIS delineation, inundation analysis*

## 1. はじめに

都市流域では、雨水が浸透しない建物の屋根、道路、駐車場など人工的に整備された地物の錯雑な分布、道路の側溝や雨水・下水道など河川に至る流出経路、さらには流出抑制施設や治水施設など、複雑な都市流出システムが人工的に形成される<sup>1)</sup>と共に、絶えずその形態が変化している。このような都市流域の集中豪雨による浸水被害は、局所的に生じる雨水管路システムの排水不良から広範囲に生じる河川の溢水など、降雨規模が同じであっても場所により被害規模が異なる。このような流域特性を持つ密集市街地において、治水・流出抑制施設が洪水流出現象に与える影響を評価でき、さらに都市の再開発に伴う土地利用形態の影響を考慮できる都市流域特有の洪水流出シミュレーションモデルの構築が切望されている。

雨水の流出過程において、浸透域での浸透は、対象域への降水および周囲からの流入水により影響を受けるものと考えられるが、既往の都市流域の洪水解析および氾濫解析ではモデル構築上の容易さから降雨のみを浸透させるもの、あるいは地表面流の浸透現象は無視できるものとされる場合が多く、既に直接流出量として分離された雨水が再び浸透するという過程を考慮したモデルは非常に少ない。例えば、雨水・下水道管路の流れを対象としたWASSP法<sup>2)</sup>、SWMM法<sup>3)</sup>、MOUSE法<sup>4)</sup>など、あるい

は、都市流域の水循環解析を対象とした分布型流出モデル<sup>5-8)</sup>が提案されているが、いずれも浸透域上の降水のみが浸透対象となっており、浸透域の周囲から流れ込んだ雨水が浸透する過程は考慮されていない。また、都市流域を対象とした氾濫解析モデルでは、対象とする氾濫現象の規模により浸透域の取り扱いに違いがあるものの、直接流出量を算定時にのみに浸透を考慮するもの<sup>9)</sup>、不浸透面積率などから簡易的に有効降雨を計算しこれを地表面に与えるもの<sup>10)</sup>、あるいは浸透を無視するもの<sup>11)</sup>など、浸透域において氾濫中およびその後の表面水の浸透現象を考慮したモデルは少ない。

そこで本研究では、このような都市流域を対象に、著者らが提案している地物データGISを用いた洪水流出解析モデル<sup>8)</sup>をベースに、直接流出として雨水が地表面を流下している間においても浸透現象を考慮する新たな洪水流出モデルとしてTokyo Storm Runoff (TSR) モデルを提案し、その効果が流出現象に与える影響について評価・検討を行うことを目的とする。本研究で用いる地物データGISとは、洪水流出量を算定する際に最も影響を及ぼす不浸透域の空間情報として、従来のグリッド型には依らない、建物など地物一つ一つの空間情報を用いることにより、浸透・不浸透性の領域を忠実にモデル化したものである。なお、これまでの地物データGISを用いた洪水流出解析モデルを旧TSRモデルと称する。本研究では、東京都内の代表的な中小河川である神田川流域の

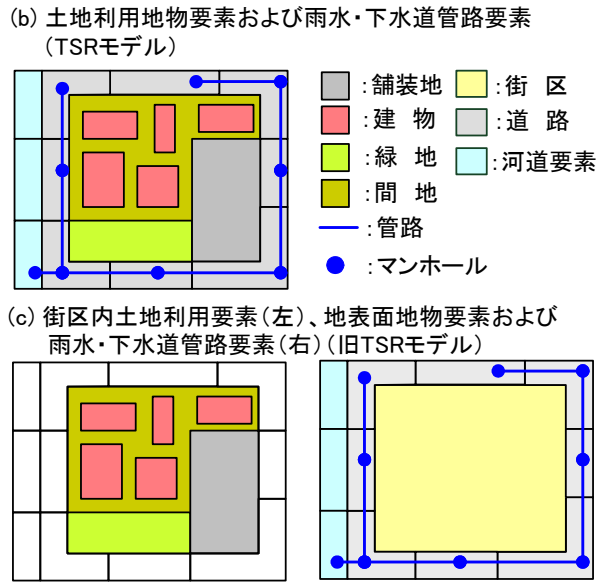
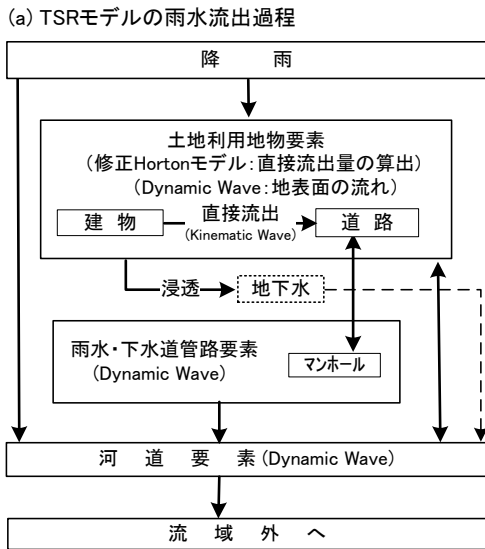


図-1 TSRモデルの洪水流出過程と高度な地物データGISの構成要素

小流域を取り上げ、高度な地物データGISを作成して仮想豪雨を用いた洪水流出解析を行い、提案するTSRモデルに対して表面流出過程における浸透現象の有無および旧TSRモデルとの比較を行うことにより、本モデルの性能評価を行う。

## 2. Tokyo Storm Runoff (TSR) Model

### (1) TSRモデルの概要

図-1(a)は本研究で提案しているTSRモデルの洪水流出過程を、(b)、(c)はTSRモデルおよび旧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、土地利用地物要素、河道要素および雨水・下水道管路要素である。旧TSRモデルでは、街区を直接流出算定用の街区内土地利用要素および浸水現象算定用の地表面地物要素（街区）から構成していたのに対し、TSRモデルでは、街区内土地利用要素を直接流出および浸水現象の算定に用いている。すなわちTSRモデルでは、流域の地表面は土地利用地物要素（建物、道路など）および河道要素により構成される。また、流域の地表面下は管路とマンホールにより構成される雨水・下水道管路要素がある。なお、本モデルは洪水流出を対象とするので降雨の直接流出成分のみを取り扱い、図-1(a)の破線で示した地下水から河道要素への長期流出成分については考慮しないこととする。

本研究で構築するTSRモデルの計算フローを図-2に示す。本モデルの主なパラメータは、直接流出量を算出する初期損失量と初期・終期浸透能、建物から道路への流出計算では等価粗度係数と勾配、雨水・下水道管路要素と河道要素および土地利用地物要素では粗度係数となっている（設定値<sup>9)</sup>は表-1を参照）。

### (2) 直接流出量と地表面流の算定

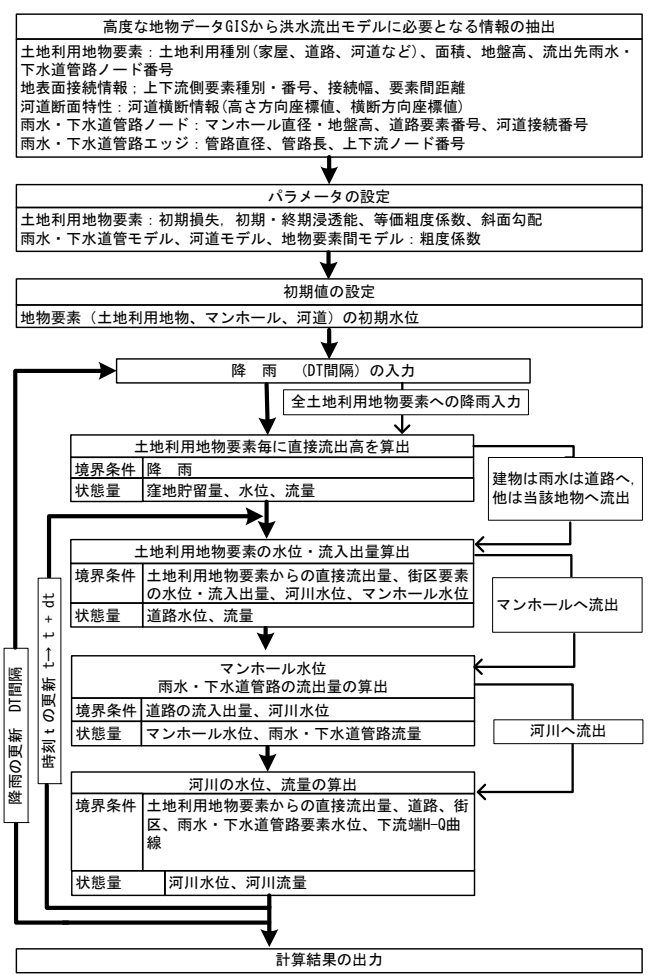


図-2 TSRモデルの計算フロー

流出解析では初期値として、土地利用地物要素、河道要素および雨水・下水道管路要素に対して初期水位を与える。流域内への降雨はDT間隔で土地利用地物要素および河道要素に対して与えられる。土地利用地物要素の浸透・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，周囲からの流入出量が修正 Hortonモデル<sup>12)</sup>により算定される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．なお，建物の雨水は建物の雨水は近傍の道路へ流出するものとしている（図-3①）．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，モデル構築も可能あるが，雨水流出のモデル化においてはこれらの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する．マンホールが存在しない場合には道路を流下する（図-3②③）．

### (3) 雨水・下水道管路および河道の流れ

雨水・下水道管路要素に対しては，まず道路との流入出量および接続管路からの流入出量によりマンホール部においてその水位を算出し，次いでマンホール部の水位と管路断面特性から流量をスロットモデル<sup>13)</sup>により計算する（図-3④⑤）．この計算過程において，マンホール内の水位が上昇して道路の地盤高にまで達すると，マンホール内の水は道路上に溢水する．このように，雨水・下水道管路内の水は数々の管路網を合流して最終的には河道に流出する（図-3⑥）．

## 3. 対象流域

### (1) 江古田川下流域

図-4に，本論文で対象とする江古田川流域の概要図を示す．江古田川流域の流域面積は約6.5km<sup>2</sup>で，上流部は都市下水路となっており，本研究では，江古田川下流域(流域面積は約1.2km<sup>2</sup>，対象区間の河道延長は約1km)を対象としている．

### (2) 地物データGISを用いた対象流域のモデル化

図-5は対象流域を地物データGISにより対象流域をモデル化したものである．まず，図-5(a)および(b)は，本研究で提案するTSRモデルに適用する土地利用地物要素(全数12,917のうち建物数4,750，道路数4,175など)および河道要素(要素数53)と雨水・下水道管路要素(管路数4,485，マンホール数4,472)を土地利用地物要素の地盤高と共に示したものである．TSRモデルではマンホールを通じて雨水が管路に流入することとしているため，雨水・下水道管路データのうち管路については，管路延長の最大が15mとなるように分割を行い，分割点には仮想的にマンホールを追加している．

ついで，図-5(c)には旧TSRモデルで用いている地表面地物要素(全数9,140，街区数4,912，道路数4,175，河道数53)，および雨水・下水道管路要素(TSRモデルと同じデータを利用)を示す．地表面地物要素のうち道路と河道は，図-5(a)と同じ地物を用いているが，街区は隣接する道路および河道の形状に調和するように分割を行った．また，街区面積は，建物により水深が深くなる影響を考慮するために，地物内に存在する建物面積を除いた値を設定している．

表-1 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 : 100
	緑地 : 30
	グラウンド : 10
終期浸透能(mm/hr)	林地 : 50
	緑地 : 20
	グラウンド : 5
浸透能の減衰係数 (hr <sup>-1</sup> )	4.14
建物の等価粗度係数	0.035
地物要素間の粗度係数	道路 : 0.043
	街区 : 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

#### ① 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,  $\alpha$ : 等価粗度係数と勾配の関数,  $\beta$ : 定数

#### ② 土地利用地物要素間の流れ

$$\frac{1}{g} \left( \frac{\partial v}{\partial t} \right) - i_0 + \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{n^2 |v| v}{R^{4/3}} = 0$$

$v$ : 流速,  $i_0$ : 勾配,  $h$ : 水深,  $x$ : 要素間距離,  $n$ : 粗度係数,  $R$ : 径深

#### ③ 土地利用地物要素の連続式

$$\frac{\partial h_m}{\partial t} = (\sum Q_s + \sum Bq + \sum Q_{div} + rA_s - IA_s) / A_s$$

$h_m$ : 地表面の水深,  $\sum Q_s$ : 隣接地表面要素からの流入出量,  $r$ : 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,  $q$ : 街区区内土地利用要素の単位幅流量

#### ④ 雨水・下水道管路の流れ

$$\frac{1}{g} \left( \frac{\partial v}{\partial t} \right) - i_0 + \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{n^2 |v| v}{R^{4/3}} = 0$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + v \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{c^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} = 0$$

$v$ : 流速,  $i_0$ : 管路勾配,  $h$ : 水深,  $x$ : 管路長,  $n$ : 粗度係数,  $R$ : 径深,  $c$ : 微小錯乱(重力波)の伝搬速度(スロット幅と管路径の関数)

#### ⑤ マンホール部の連続式

$$\frac{\partial S_m}{\partial t} = \sum Q_m - \sum Q_{out}$$

$S_m$ : 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),  $Q_m$ : マンホール部流入量,  $Q_{out}$ : マンホール部流出量

#### ⑥ 河道の流れ

$$\frac{1}{g} \left( \frac{\partial v}{\partial t} \right) + \frac{1}{g} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{v^2}{2} \right) - i_0 + \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{n^2 |v| v}{R^{4/3}} = 0$$

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

$v$ : 流速,  $x$ : 要素間距離,  $h$ : 水深,  $i_0$ : 水路勾配,  $n$ : 粗度係数,  $A$ : 通水断面面積,  $Q$ : 河川流量,  $\sum q$ : 降水量, 雨水・下水道管路および地表面からの横流入量

図-3 TSRモデルの水理・水文モデルの基礎式

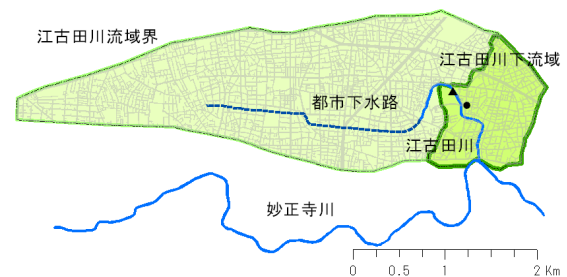


図-4 江古田川下流域の概要図

旧TSRモデルに用いる地表面上の地物データGISとしては，図-5(a)に示す土地利用地物要素および図-5(c)に示す地表面地物要素を準備する必要がある．一方，提案するTSRモデルでは，図-5(a)に示す土地利用地物要素のみを準備すればよく，データ作成作業の減少とともに，データ管理の向上が得られている．

図-5(a)より対象流域の不浸透面積率は，土地利用地物要素のうち建物，道路および舗装地を不浸透域とすれば，約60%となる．なお，地表面地物要素の地盤高は，国土地理院発行の5mメッシュ地盤高を用いて地物内の平均地盤高の値を設定している．

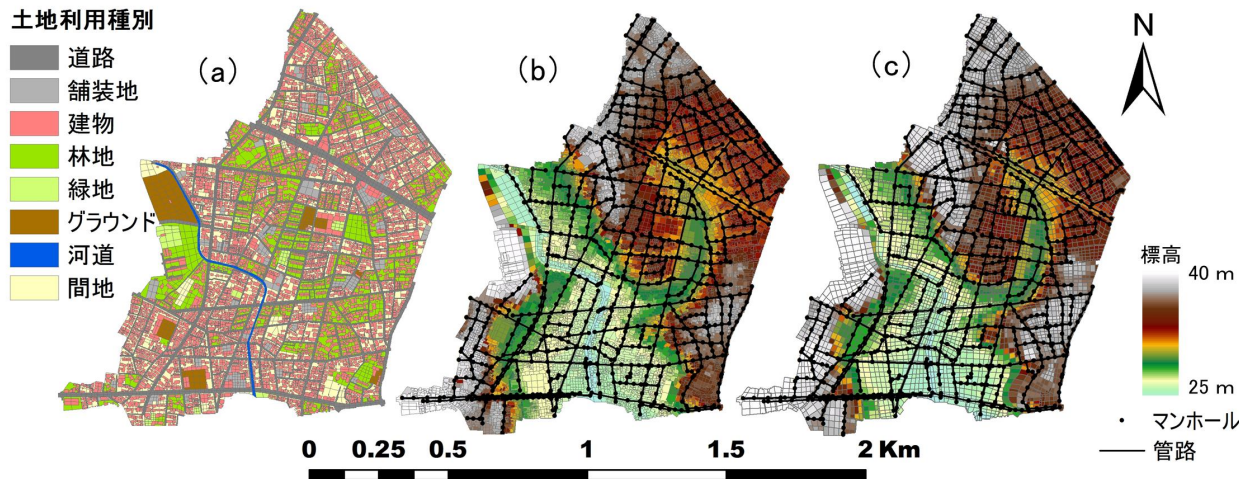


図-5 対象流域の地物データGISによるモデル化。(a)土地利用地物要素, (b)土地利用地物要素の地盤高と雨水下水道管路要素, (c)旧TSRモデルによる地表面地物要素と雨水・下水道管路要素

#### 4. 計算緒元

提案したTSRモデルの性能評価に用いる対象降雨は、東京管区気象台の確率降雨とした。対象流域で浸水が発生した2005年9月4日豪雨では、近傍の江古田観測所において総降水量118mm、60分最大雨量57mmを記録した。本研究ではこの規模に近い降雨として確率年は20年、降雨継続時間は3時間とし、中央分布型で1分単位の降雨波形を作成した。その結果、総降雨量は127mm、60分最大雨量は66mm、最大雨量強度は1.57mm/minであり、作成したハイエトグラフおよび累加雨量を図-6(a)に示す。

両モデルの河道の初期条件としては平水時の流量を与え、河川上流端の境界条件は上流からの流量をゼロと設定する。

#### 5. 結果と考察

提案するTSRモデルの影響を見るために、直接流出が地表面を流下する際に浸透域の浸透過程を考慮した場合をCase A、考慮しない場合をCase Bとする。また、TSRモデルでは土地利用地物要素のうち建物からの流出過程は建物周囲の間地などを流下せずに、近傍の道路に流下すると仮定し、解析にはKinematic Wave法を用いている。実際の建物からの雨水の流出状況は雨樋を通じてその敷地内に流れ込んでいる場合、雨水浸透マスを通じて地下に浸透している場合、あるいは雨水・下水道管路に接続している場合などがある。Case Cは、建物に周囲よりも高い標高を設定し、地表面の流れ(Dynamic wave)を適

用して、雨水はその周囲の土地利用地物要素に流下するものと仮定した。最後にCase Dとして、直接流出量の算定には土地利用地物要素を用い、地表面の流れの解析には街区、道路から構成されるデータセットを用いた旧TSRモデルを解析対象とする。

図-6(b)～(f)は解析により得られた河道下流端流量、累加浸透量、土地利用地物要素上の貯留量、雨水・下水道管路内貯留量、全雨水・下水道管路要素から河道要素への排水量をそれぞれ示す。また、表-2には流出率、累加浸透量、および貯留量や排水量の最大値を、図-7には土地利用地物要素(Case A～Case C)および地表面要素(Case D)の最大水深分布図を示す。

##### (1) 河道流出高および浸透量

対象降雨によるCase A～Case Dの流出率(河道最下流端総流出高/総降水量)は、それぞれ68%、75%、62%、75%となっており、直接流出量が地表面を流下する場合に浸透現象を考慮したTSRモデルによるCase AおよびCase Cの流出率が他より10%程度低い。これに関連して浸透量は、地表面の雨水流下における浸透過程を考慮しないCase BおよびCase Dでは24mmであるが、考慮した場合にはCase Aで34mm、Case Cで41mmと大きくなっている。図-6(c)に示す浸透量の時系列変化を見ると、Case BとCase Dの曲線は一致し、降雨終了後に浸透していない。一方、Case AおよびCase Cでは、降雨終了後においても、浸透が発生しており、実現象に近い解析結果が得られていると考えられる。

表-2 解析結果のまとめ

	流出率	浸透量 (mm)	最大値			
			河道下流端 (mm/min)	下水道から河川へ の排水量(mm/min)	地表面貯留量 (mm)	下水道管路貯留量 (mm)
Case A	68%	34.03	0.69	0.63	21.36	6.95
Case B	75%	24.40	0.70	0.64	23.36	7.00
Case C	62%	41.31	0.66	0.60	24.27	6.72
Case D	75%	24.39	0.72	0.67	23.24	7.63

図-6(b)に示す河道下流端での流量ハイドログラフの形状は、その立ち上がりからピーク流量発生時まで、Case Cを除いた3つのケースではほぼ一致しており、これらのピーク流出高は0.69mm/min (Case A), 0.70mm/min (Case B), 0.72mm/min (Case D)で、Case Cの0.66mm/minよりも5~11%程度大きい。ピーク流量発生時刻以降のハイドログラフの形状は、Case AとCase C, Case BとCase Dがほぼ一致しており、雨水の地表面流下時における浸透現象の有無により異なっていることが分かる。

### (2) 地表面の貯留量変化

図-6(d)に示す地表面貯留量変化は、降雨開始からピーク降雨時までの間は、建物の直接流出量の流出先として道路を設定しているCase A, Case BおよびCase Dの立ち上がり部分が一致しているが、ピーク雨量以降、地表面流出時に浸透過程を考慮したCase Aと、考慮していないCase BおよびCase Dにより貯留量変化は異なっている。特に、建物からの直接流出量をその周囲の地物に流下させた場合 (Case C) には、雨水はマンホールが存在する道路まで流下するので、その間の流れが貯留量に反映され、他の場合より貯留量が大きくなっている。地表面水深の最大値分布を示した図-7において、Case Cの水深分布は他の場合よりも面的な広がり大きいことが原因で貯留量が多くなっている。なお、地表面の最大水深は流下過程の浸透考慮の有無により、深い方からCase B, Case D, Case A, Case Cとなっている。

### (3) 雨水・下水道管路要素の貯留量変化

図-6(e)に示す雨水・下水道管路要素の貯留量の増減は、マンホールが存在する道路に到達した雨水に影響を受ける。管路内貯留量は全時間で旧TSRモデルのCase DとTSRモデルのケースと大きな違いが見られる。旧TSRモデルでは地表面流は街区を流下するため、雨水は基本的に建物などの障害は受けにくいので道路に到達しやすい。一方、TSRモデルは土地利用種別に分割された地物上を雨水が流下するので、建物がある場合にはそれを迂回する必要があるために、旧TSRモデルよりも道路に到達するには時間がかかることが影響しているものと考えられる。TSRモデルを適用したケースでは、降雨ピーク前後で特徴が異なり、Case Aの貯留量は降雨ピーク前ではCase Bの貯留量にほぼ一致しているものの、降雨ピーク後では徐々にCase Dに接近している。図-6(f)に示す全雨水・下水道管路要素から河道要素への全排水量は、基本的には管路内貯留量の大小に応じて変動していることが分かる。

以上のように、直接流出量の地表面流下中において浸透を考慮することにより、解析結果に大きな差が生じることが明らかになると共に、浸透域においては降雨終了後も浸透が継続するなど、実現象に近い解析が可能になった。また、TSRモデルによる解析において、建物からの雨水を道路に流下させずにその周囲の地物に流下さ

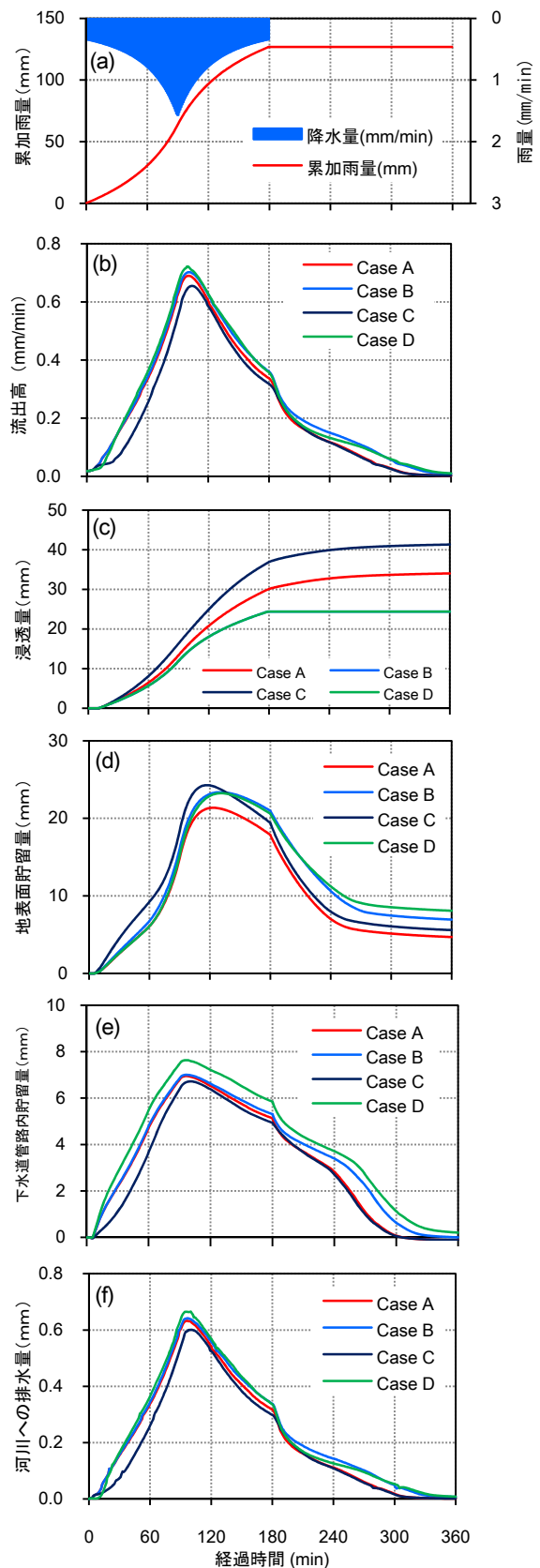


図-6 解析結果. (a) 雨量および累加雨量, (b) 河道下流端流出高, (c) 土地利用地物要素からの累加浸透量, (d) 土地利用地物要素/地表面貯留量, (e) 雨水・下水道管路要素内貯留量, (f) 全雨水・下水道管路要素から河川要素への全排水量

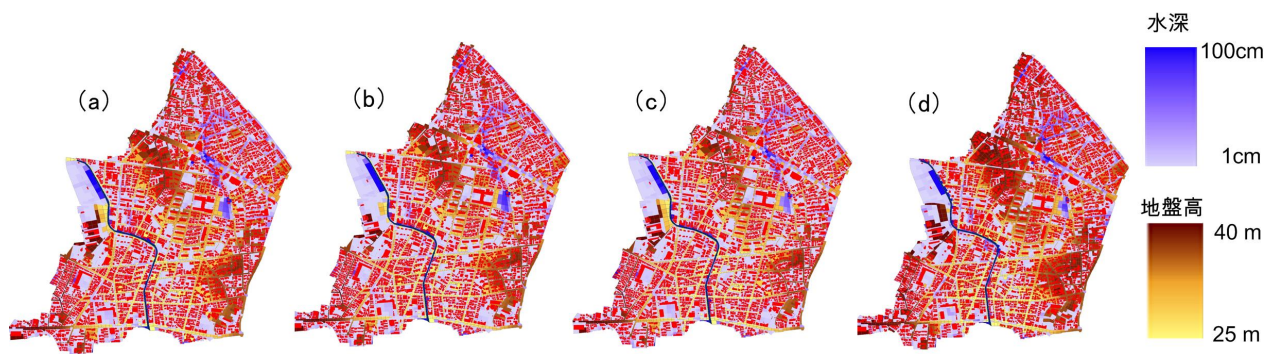


図-7 地表面要素の最大水深。(a) Case A, (b) Case B, (c) Case C, (d) Case D

せたシミュレーション (Case C) では、雨水が一斉に雨水・下水道管路に集中しないため地表面貯留量は増加するものの、河川ピーク流量が 4%程度低下すること、浸透量が20%増加することが確認できた。

## 6. むすび

本研究では、都市流域を対象に、著者らが提案している地物データGISを用いた洪水流出解析モデル<sup>8)</sup>をベースに、直接流出として雨水が地表面を流下過程において、浸透現象を考慮する新たな洪水流出モデルとしてTSRモデルを提案した。本モデルは、旧TSRモデルにおいて地表面の流れに用いられていた街区を街区内地利用地物要素に置き換えることで、より単純な地物データGISの構成が可能となった。また、地表面流の流れに土地利用地物要素を用いる事で旧TSRモデルでは表現されていなかった、地表面流下過程における浸透現象を組み込む事が可能になり、現実的なシミュレーションが可能となった。

TSRおよび旧TSRモデルの流出解析結果の比較により、浸透の影響を詳細に評価することは、河道の流量予測という観点では両モデルの解析結果に違いはあまり見られなかったものの、河道に到達するまでの流出過程の水文量変化(浸透量, 地表面貯留量, 雨水・下水道管路内貯留量)に対する影響は無視できないことが明らかとなった。特に、都市河川流域で行われている透水性舗装道路などの流出抑制効果の算定には、道路への雨水のみならず周囲からの雨水流入を含めた浸透効果を検討することが現実的であり、それを可能とするには本モデルで示した高度な流出計算が必要であろう。

しかしながら本研究では、TSRモデルの性能評価を目的に実施したため、実測値による検証ができていないために、モデル精度の向上に関して結論付けることはできない。したがって、実観測データを用いたTSRモデル性能評価の検討ならびにモデルパラメータの感度分析を行うことによりモデルの検証を進めていくことが今後の課題である。

究(B), 課題番号: 21760389および一般研究C, 代表: 河村明, 課題番号: 21560545)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) 豊國永次, 渡辺政広: 都市流出シミュレーションモデルとその調査流域への適用, 第29回水理講演会論文集, pp.43-48, 1985.
- 2) HydroWorks Wastewater network simulation and analysis software: Wallingford Software Ltd., Oxfordshire, U.K., 2000.
- 3) Huber, W.C.: EPA Storm Water Management Model -SWMM, Computer Models of Watershed Hydrology, Singh, V.P.ed., Water Resources Publication, pp.783-708, 1995.
- 4) Danish Hydraulic Institute: MOUSE-Technical Reference and User's Guide, Version3.1, 1992.
- 5) 賈仰文: 分布型モデルを用いた都市河川流域における流出抑制施設の効果の比較, 水工学論文集, 第45巻, pp.109-114, 2001.
- 6) 天口英雄, 安藤義久: SMPTモデルを用いた分布型水循環モデルの改良について, 水工学論文集, 第46巻, pp.265-270, 2002.
- 7) 中村茂: グリッド型水循環系解析モデルの開発〜海老川流域を対象として〜, 水工学論文集, 第45巻, pp.103-108, 2001.
- 8) 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, Vol63 No.3, pp.206-223, 2007.
- 9) 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.
- 10) 尾崎平, 石垣泰輔, 戸田圭一: 低平地住宅未収地域における内水氾濫の危険度評価に関する研究, 水工学論文集, 第53巻, pp.823-828, 2009.
- 11) 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, 1-10, pp.1-10, 2000.
- 12) Huber, W.C., Dickinson, R.E.: Storm Water Management Model Version4, User's manual, EPA/600/3-88/001a, Environmental Protection Agency, USA, 1988.
- 13) 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道網内の遷移流計算法, 土木学会論文集, No.411/II-12, pp.81-90, 1989.

謝辞: 本研究を遂行するにあたって科学研究費(若手研

(2010. 9. 30受付)