

# 都市分布型洪水流出モデルの流域要素形状が流出応答に与える影響評価

首都大学東京 学生員 鈴木 陽介  
 首都大学東京 正会員 天口 英雄  
 首都大学東京 正会員 河村 明  
 首都大学東京 正会員 中川 直子

## 1. はじめに

近年、都市流域では集中豪雨による内水氾濫や中小河川からの外水氾濫による浸水被害が頻発している。都市流域では、家屋や道路などの人工地物、雨水・下水道等の雨水排水施設など人工的で非常に複雑な都市流出システムが形成されており、このような雨水流出過程をモデル化する手法として、実際の不浸透域を忠実に抽出できる地物データ GIS を用い、既往のグリッド型モデルとは異なる TSR モデル（地物指向分布型都市洪水流出モデル）<sup>1)</sup>が提案されている。従来の分布型流出解析において、山地流域を対象としたグリッド型洪水流出モデルでは、最小単位の地表面形状の大小により生じるスケール問題が報告されているが、都市流域での研究事例は数少なく未解明な点が少なくない<sup>2)</sup>。

そこで本研究では、TSR モデルと、従来から多用されているグリッド型洪水流出解析モデル（グリッド型モデル）を実流域に適用し、洪水流出シミュレーションによって流出特性の比較検討を行い、洪水流出モデルの流域要素形状が流出応答に与える影響について評価・検討する。評価に当たっては、流域要素形状のみの影響を把握するために、TSR モデルによる解析結果を基準として、大きさの異なる2つのグリッド型モデル(10m, 20m)に対して2つの流向（グリッド周囲4方向, 8方向）を評価する。

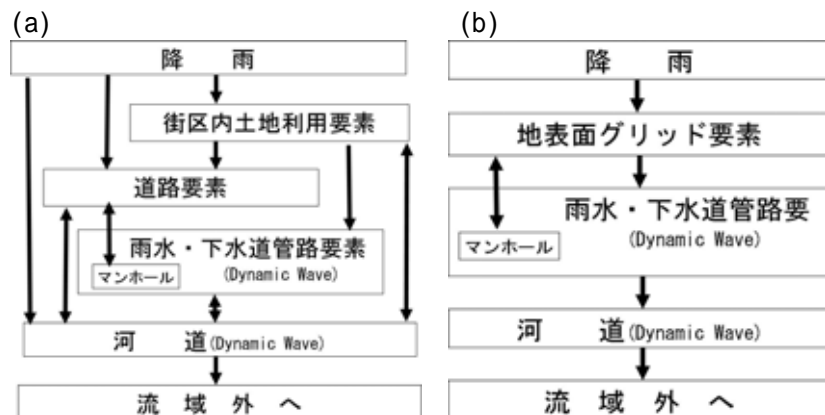
## 2. 洪水流出解析モデルの概要

### (1) TSR モデル

図-1(a)は TSR モデルの雨水流出過程を示したものである。地表面は、街区内土地利用要素、道路要素および河道要素で構成され、地下に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り、マンホールは道路要素、管路は河道にそれぞれ接続している。図-1(c)には TSR モデルに用いる基礎式を示す。降雨は街区内土地利用要素、道路要素および河道要素に与えられ、各地物要素の浸透特性により直接流出量を算出する。街区内土地利用要素から近傍の道路要素への流出量は Kinematic Wave 法により算出され、道路要素上の水は、その要素内にマンホールが存在する場合はそこから雨水・下水道管路へ流下し、最終的には河道要素に流出する。

### (2) グリッド型モデル

図-1(b)はグリッド型モデルの雨水流出過程を示したものである。



### (c)

- ① 街区内土地利用要素から道路要素への流れ (地物型)  $\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r_e \quad q = \alpha h^\beta$
- ② 地表面要素間の流れ (地物型, グリッド型)  $\frac{1}{g} \left( \frac{\partial v}{\partial t} \right) - i_0 + \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{n^2 |v| v}{R^{4/3}} = 0$
- ③ 地表面要素の連続式 (地物型, グリッド型)  $\frac{\partial i_s}{\partial t} = (Q_s + Bq + Q_{div} + r_e A) / A$
- ④ 雨水・下水道管路の流れ (地物型, グリッド型)  $\frac{1}{g} \left( \frac{\partial v}{\partial t} \right) - i_0 + \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{n^2 |v| v}{R^{4/3}} = 0$   
 $\frac{\partial h}{\partial t} + v \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{c^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} = 0$
- ⑤ マンホール部の連続式 (地物型, グリッド型)  $\frac{\partial S_m}{\partial t} = Q_{in} - Q_{out}$
- ⑥ 河道の流れ (地物型, グリッド型)  $\frac{1}{g} \left( \frac{\partial v}{\partial t} \right) + \frac{1}{g} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{v^2}{2} \right) - i_0 + \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{n^2 |v| v}{R^{4/3}} = 0$   
 $\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - \sum q = 0$

$h$ :土地利用要素の水深,  $q$ :単位幅流量,  $x$ :距離,  $r_e$ :有効雨量,  $\alpha$ :等価粗度係数と勾配の関数,  $\beta$ :定数  
 $v$ :流速,  $i_0$ :勾配,  $h$ :水深,  $x$ :要素間距離,  $n$ :粗度係数,  $R$ :径深  
 共通の変数:  $h_s$ :地表面の水深,  $\Sigma Q_s$ :隣接地表面要素からの流入出量,  $r_e$ :地表面要素の有効雨量,  $A$ :地表面要素面積  
 地物指向型モデルの変数:  $B$ :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  
 $v$ :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)  
 $S_m$ :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  
 $v$ :流速,  $x$ :要素間距離,  $h$ :水深,  $i_0$ :水路勾配,  $n$ :粗度係数,  $A$ :通水断面積,  $Q$ :河川流量,  $\Sigma q$ :降水量, 雨水・下水道管路および道路・街区からの横流入量

図-1 分布型洪水流出モデルの概要. (a) TSR モデルの流出過程, (b) グリッド型洪水流出モデルの流出過程, (c) 分布型洪水流出モデルの水理・水文モデルの基礎式

グリッド型モデルにおいては、流出過程および基礎式は土地利用情報を含む TSR モデルと基本的に同様であるが、直接流出量を算定するには、土地利用に関する情報が必要である。

### 3. 対象流域の概要とモデル化

本研究で対象とした神田川上流域は、図-2 に示すように、井の頭池から善福寺川が合流するまでの流域面積 11.8km<sup>2</sup>、流路延長 9km を有し、その市街化率は 97% に達し、地表面の大半が不浸透域となっている。

図-3(a) は、地物データ GIS により対象流域をモデル化した地表面地物要素に対し、5m メッシュ標高を用いて要素毎に地盤高を設定したものである。同図の河道付近を拡大した図には、地表面地物要素として建物要素、道路要素およびその他の地物、河道要素、および雨水・下水道管路要素を示した。なお、対象流域内の地表面地物の要素数は 104 670 となっている。

図-3(b) は 20m グリッドを用いて対象流域をモデル化したものであり、地盤高は 5m メッシュ標高を用いて設定し、要素数は 29 394 である。また、別途作成した 10m グリッドを用いた対象流域の要素数は、117568 である。なお、本研究で用いた洪水流出解析モデルは、表面水が氾濫する過程を考慮にしているため、一般的にグリッド型流出モデルで行われる地盤高の窪地の補正処理は行っていない。また、拡大図に示すように、河道はグリッド境界上に配置させると共に、河道付近の雨水・下水道管路網の配置を、設定した河道位置に応じて移動させる。これにより、左右岸の雨水・下水道管路網に雨水が混合せずに流出計算を行うことが可能である。

神田川上流域を対象に構築した、雨水・下水道管路要素は管路数 9 909、マンホール数 9 638 である。本研究で用いた洪水流出解析モデルでは、地表面の雨水はマンホールを介して管路要素に流入するものとしているが、実際には地表面の雨水は道路の側溝などから管路に流入している。そこで、地表面から管路へ直接雨水が流入するように対処するため、管路要素を分割し、その部分から雨水が管路に流入するように雨水・下水道管路要素データの再構築を行った。地物データ GIS による対象流域のモデル化の場合には、道路要素との整合性から、管路長の最大値を 15m として分割した結果、管路数は 39 101 個となった。また、グリッド型モデルの場合は管路沿いのグリッドに管路分割点が存在するように設定したので、管路長の最大値は、20m グリッドの 25m、10m グリッドの 15m とした結果、管路数はそれぞれ 19 231、39 101 となった。

### 4. 地表面形状が流域応答に与える影響評価

本研究では、分布型洪水流出モデルの地表面形状に加え、グリッド型モデルに対しては 2 種類の流行方向(グリッド周囲の 4 方向および 8 方向)による影響を評価する。なお本研究では、地表面形状が流出応答に与える影

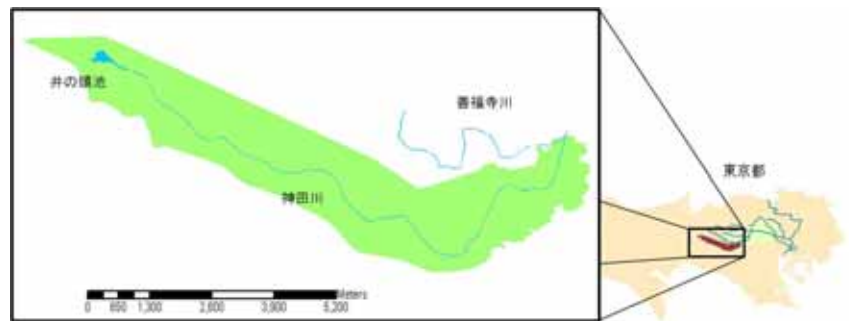


図-2 神田川上流域の流域図

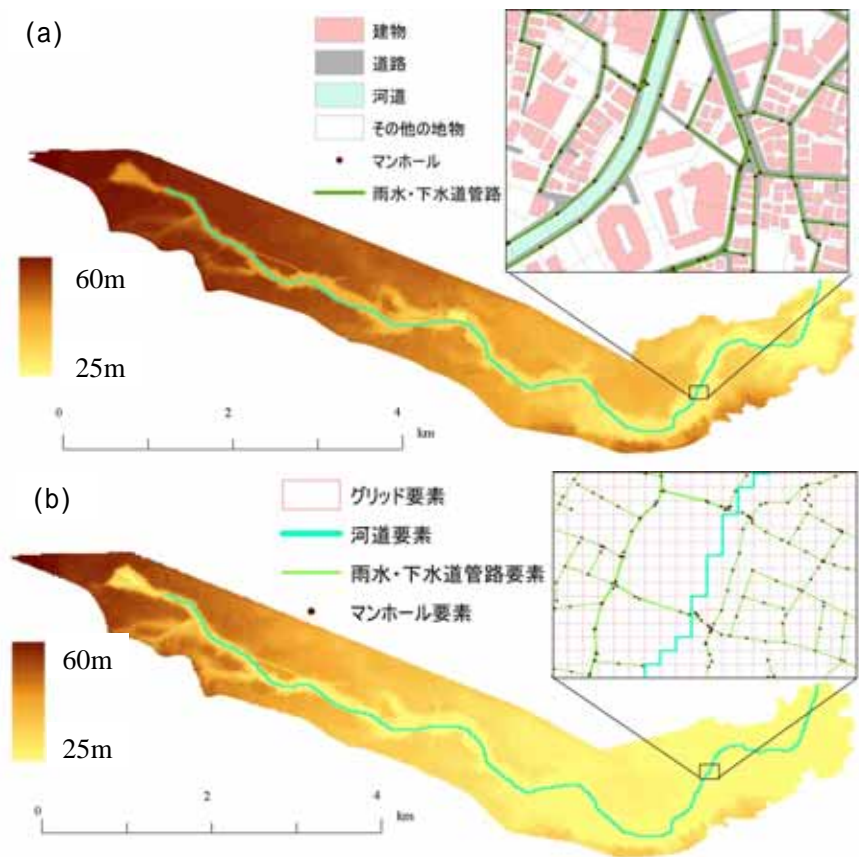


図-3 対象流域のモデル化 (a) 地物データ GIS によるモデル化, (b) 20mグリッド要素によるモデル化

響を、できる限り単純化した条件で評価するために、地表面からの浸透は無視し、全て不浸透域であると仮定した。対象降雨は東京管区気象台の確率降雨(確率年20)を基に、降雨継続時間は3時間、中央分布型で1分単位の降雨波形を作成した。総降雨量は127mm、最大雨量強度は1.57mm/minである。本モデルのパラメータは、地表面流、雨水・下水道管路および河道の粗度係数であり、それぞれ0.043, 0.013, 0.0225を用いている。表-1は、本研究で対象とする解析の一覧を示したものである。すなわち、Case 1はTSRモデル、Case 2は10mグリッド型洪水流出モデル、Case 3は20mグリッド型洪水流出モデルで、およびは、それぞれ流行方向が4方向、8方向の場合を表したものである。

図-4は解析結果を示したものであり、同図の(a)は河道最下流点における流量ハイドログラフである。最大流量(発生時刻)は、大きい方から順に、Case 1の140 m<sup>3</sup>/s (127分)、Case 2-①の133m<sup>3</sup>/s (144分)、Case 2-②の130m<sup>3</sup>/s (145分)、Case 3-①の129 m<sup>3</sup>/s (145分)、Case 3-②の125m<sup>3</sup>/s (142分)となっている。TSRモデル(Case 1)によるハイドログラフは、その立ち上がりがグリッド型モデル(Case 2, Case 3)よりも15分ほど早く、かつピーク流量は10 m<sup>3</sup>/sほど大きくなっている。TSRモデルでは、街区内土地利用要素への降雨は、基本的に近傍の道路要素に流出するものと設定している。この設定により、河道最下流点地点でのピーク流出高は、TSRモデルがグリッド型モデルよりも大きくなっている。グリッド型のCase 2, Case 3に着目すると、流向が8つのは流向が4つよりもピーク流量が多いものの、ハイドログラフの上昇部および下降部の差はあまり見られない。

本研究では、各洪水流出モデルによる解析結果を大局的に考察するために、雨水・下水道管路要素および地表面要素の貯留量、そして、それらの要素から河道要素への流出高に着目する。また、図-4(a)において、本研究で対象とした降雨によるグリッド型モデルの流出高は、流向方向よりもグリッド幅の影響が強いと判断し、以下では流向が4つの場合について述べることにする。図-4において、(b)は雨水・下水道管路要素内の貯留量、(c)は地表面要素内の貯留量、(d)は地表面要素内の貯留量、そして(e)は地表面要素から河道への合成流量を示したものである。

まず、雨水・下水道管路要素の貯留量(図-4(b))は、大きい順にCase 1, Case 3, Case 2である。雨水・下水道管路要素から河道要素への合計流出量(図-4(c))は、貯留量が最大であったCase 1の流出高が最も大きいものの、グリッド型モデルでは貯留量の小さかったCase 2の流出量がCase 3よりも大きくなっている。また、ピーク流量発生以降のハイドログラフは、Case 2, 3のグリッド型モデルでは振動を伴いながら低減しているが、Case 1のTSRモデルにおいてはこのような振動はみられない。

次いで、地表面要素の貯留量(図-4(d))は、グリッド型モデルの方がTSRモデルよりも2倍程度大きくなっている。グリッド型モデルについてはピーク貯留量

表 1 解析種別

名称	モデル	グリッド幅	流行方向
Case 1	TSRモデル	—	—
Case 2	① グリッド型モデル	10	4方向
	② グリッド型モデル	10	8方向
Case 3	① グリッド型モデル	20	4方向
	② グリッド型モデル	20	8方向

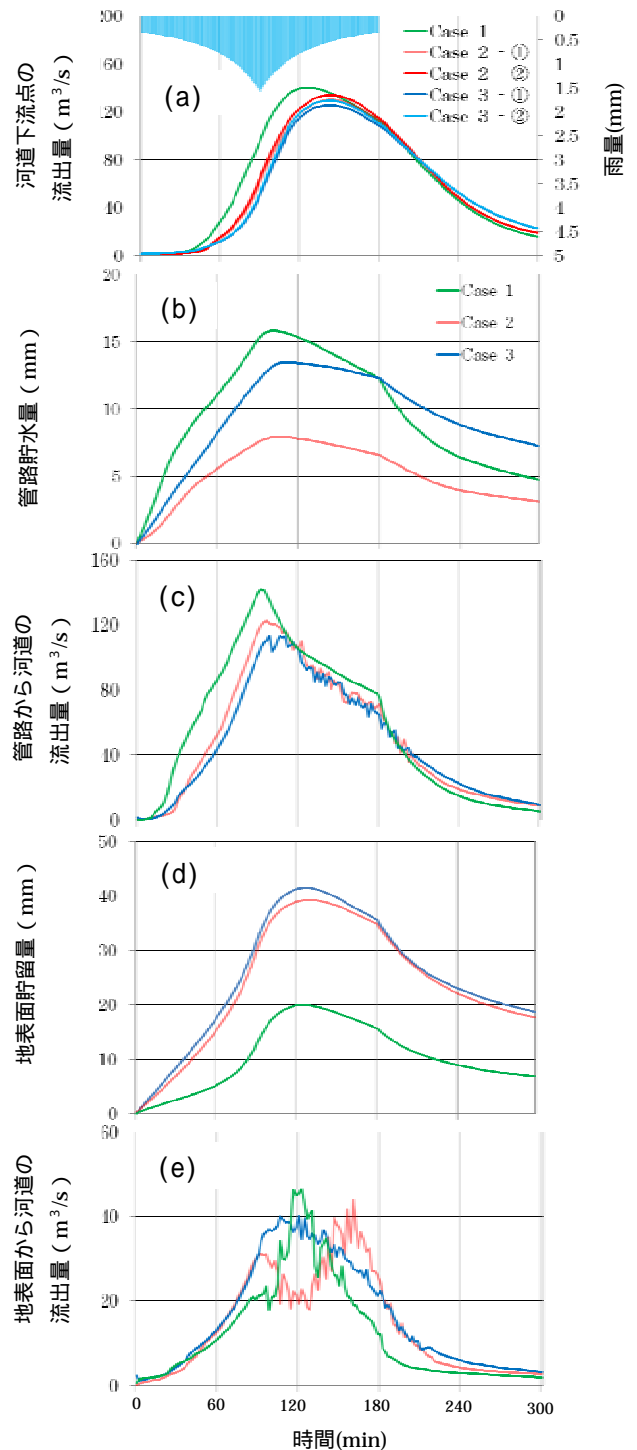


図-4 解析結果。(a)河道最下流点における流出量、(b)雨水・下水道管路の貯留量、(c)雨水・下水道管路から河道への合計流量、(d)地表面の貯留量、(e)地表面から河道への合計流量



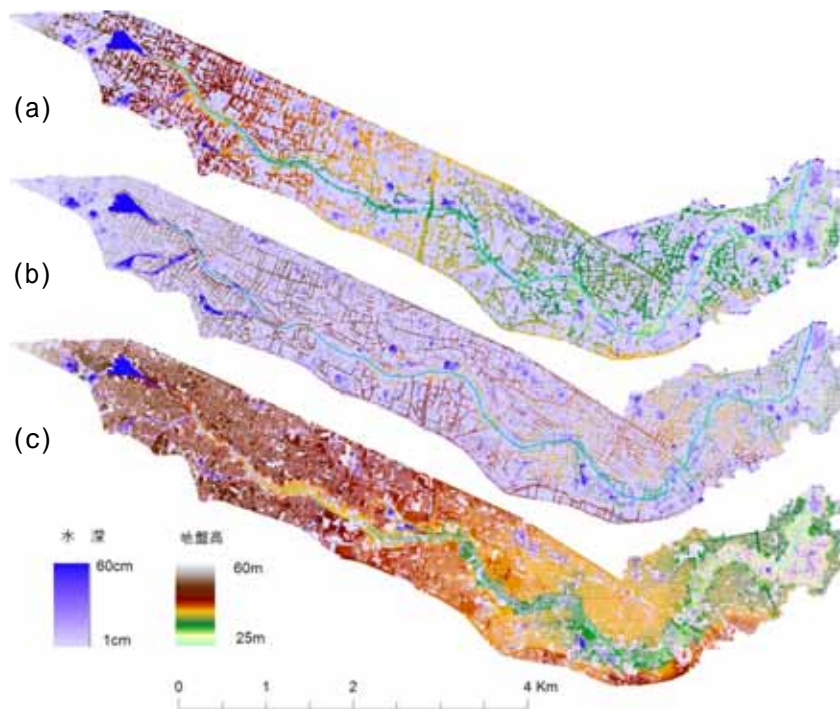


図 - 5 最大水深分布図. (a) Case 3, (b) Case 2, (c) Case 1

の大きい順に, Case 3, Case 2 とわずかながら違いが見られる. 図-5は, 地表面の雨水分布を見るために, Case 1, Case 2, および Case 3 における最大水深分布を示したものである. 水深分布は図-4(c)を反映して, TSR モデルの図-5(c)では水深分布は少なく, 水深の大きい場所は家屋以外の間地, 低地部の道路などのなっているのに対し, グリッド型モデルの図-5(a), (b)では雨水・下水道管路のある道路付近を除き, 全体的に 1cm 以上の水深が分布している. 地表面要素から河道要素への流出高(図-4(e))は, 基本的には地表面の貯留量を反映し, 貯留量の小さかった Case 1 の値は小さく, グリッド型の Case 2, Case 3 の値は大きくなっている. ピーク生起時間は, TSR モデルの Case 1 の場合は, 図-4(a)の河道流出高のピーク時と一致しているが, グリッド型の Case 2 と Case 3 の場合は, 20m グリッドの Case 3 では 120 分頃, 10m グリッドの Case 2 では 160 分頃となっており, 河道のピーク流量前後に発生している.

## 5. まとめ

本研究では, 都市流域を対象とした分布型洪水流出解析モデルの流域要素形状が流出応答に与える影響について評価を行った. 洪水流出解析モデルとして TSR モデルおよびグリッド型モデル(10m, 20m)を取り上げ, 流出量, 地表面貯留量, 雨水・下水道管路貯留量などを比較し, 大局的な検討を行った. その結果, グリッド型モデルにおいては洪水到達時間を短くする事が必要で, 地表面の雨水が雨水・下水道管路要素に流入するまでを地表面を流下させるのではなく, 雨水・下水道管路要素周辺のグリッドから強制的に流入させるなどの工夫が必要である. また, 都市流域に対して 2 種類の大きさのグリッド型洪水流出解析モデルを適用した結果, 流域内から河道への流出量の合計値には大差がないものの, 河道までの雨水流出経路はグリッドの大きさにより異なることが分かった.

今後は, グリッド型モデルにおいて, 雨水・下水道要素から河道要素へのピーク流出高が小さいグリッドの方が大きくなること, 地表面要素から河道要素へのピーク流出高生起時間が小さいグリッドでは早く, 大きいと遅くなることの原因をさらに解明するために, 雨水が雨水・下水道管路要素, 地表面要素および河道要素との間をどのように移動しているかを別途詳細に評価・検討する予定である.

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) 天口英雄, 河村明, 高崎忠勝, 荒木千博, 中川直子: 分布型都市洪水流出モデルの流域要素形状が流出応答に与える影響について, 水工学論文集, 第 54 巻, pp.493-498, 2010 年