

# 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

天口 英雄<sup>1</sup>・河村 明<sup>2</sup>・高崎 忠勝<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 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)  
E-mail: amaguchi@tmu.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 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)

<sup>3</sup>正会員 東京都土木技術センター 技術調査課 (〒136-0075 東京都江東区新砂一丁目9-15)

本論文では、近年頻発する都市型洪水被害低減を目的に、人工的に形成された非常に複雑な都市型洪水流出過程のモデル化として、既往の土地利用情報のモデル化とは異なり、個々の建物、駐車場、道路等の実際の不浸透域を抽出できる地物データGISを活用し、さらに街区、道路、雨水・下水道管路、河道の情報を付加することにより、雨水の物理的な流出経路を忠実に表現する都市型洪水流出モデルの提案を行っている。東京都内中小河川を対象流域とし、地物データGISを用いて具体的に流域のモデル化を行い、実降雨と仮想豪雨を用いて流出解析を行った。その結果、本モデルにより河川水位を精度良く再現し、また排水不良や河川水位上昇に伴う浸水現象などを含めた洪水流出過程を詳細に表現出来ることを確認した。

**Key Words:** *geographical feature data, GIS, distributed flood runoff model, urban catchment, inundation analysis*

## 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氾濫による浸水被害が頻発している。1999年6月には福岡において梅雨前線の活発な活動による豪雨により死者1名、水没・浸水家屋3300戸以上という被害をもたらした<sup>1)</sup>。同年7月には東京都練馬区を中心とした時間雨量131mmの豪雨により、死者1名、床上・床下浸水800戸以上の被害が発生した<sup>2)</sup>。さらに、2000年9月東海地方は台風14号の影響で活発化した停滞前線により総雨量500mmを越える豪雨に見舞われ、名古屋市西区の庄内川水系新川などで長さ100mにわたる破堤があったほか、東海各地で河川の越流があり、愛知県を中心に5万棟を超える浸水被害が発生した<sup>3)</sup>。このような状況に対して、2001年には水防法の一部が改正され浸水想定区域の指定・公表が義務付けられ、さらに2004年には「特定都市河川浸水被害対策法」が施行されることにより都市型水害の取り組みが強化された。この法律により、都市域では河川や下水道などを連携させ、流域全体で水害に対応することや、ソフト対策として浸水想定区域図の作成が求められている。

都市流域では、雨水が浸透しない家屋やビルの屋根、道路、駐車場など人工的に整備された地物の錯雑な分布、道路の側溝や下水道等の雨水排水施設な

ど河川に至る流出経路、さらには貯留・浸透施設等の流出抑制施設や治水施設の整備など、非常に複雑な都市流出システムが人工的に形成されると共に、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。このような背景の下、現有する河川や調節池などの治水施設や流出抑制施設が洪水流出現象に与える影響や浸水被害を軽減させるために設置する新たなハード対策のきめ細かな影響を評価でき、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。

洪水流出モデルは、対象とする規模や目的、そして水文量の分布の有無により集中型モデルと分布型モデルの2つに大別される<sup>4)</sup>。集中型モデルは流域内の特性を概念的に表したパラメータや変数を用いて表現されるもので、合理式、タンクモデル、貯留関数数法などがある。一方、分布型モデルは地形情報、土地利用情報そして下水道の管路特性情報等から得られる空間情報を基に、流出プロセスに含まれる物理過程を考慮してモデル化するものである。山地流域など人工物の少ない自然流域に適用される分布型モデルとしては、DEM(Digital Elevation Model)を利

用して雨水の流出経路を決定するグリッド型モデルが数多く提案されている<sup>5),6),7)</sup>。また、都市流域に対しても、主に水循環機構の解明を目的としてグリッド型モデルが用いられている<sup>8),9),10)</sup>。本来、都市流域は山地流域とは異なり自然要素だけでなく多くの人工的要素を含んでおり、このような複雑な空間情報の記述にグリッド型を用いることは適当ではないが、入力可能なデータ制約上の理由やモデル構築の簡便さから、グリッド型モデルが多用されているのが現状である。

都市流域の洪水流出シミュレーションを行うためには、都市特有の特徴を反映可能な分布型モデルが必要であり、これまで海外でHYDROWORKS<sup>11)</sup>、SWMM<sup>12)</sup>、MOUSE<sup>13)</sup>などが提案されている。これらの手法は下水道のサーチャージ流れを考慮したDynamic Wave法を適用することで都市流域の流出解析を行っている。しかしながら、グリッド型はもろの事、上記3つの手法においても入力データとして用いられる土地利用情報は単に流域特性としての不浸透面積率や流出係数のみである。このため流出モデル内において個別の建物、道路、駐車場等の地物を考慮することができないので、個別建物の雨水流出抑制施設や特定の透水性舗装道路を整備した効果を検証するなど現実的な政策評価を行うことは困難である。さらに、道路などの地物と地下に埋設されている管路との相互関係など具体的な空間情報が考慮されていないので、例えば、雨水・下水道管路の排水不良に伴うマンホールから道路への溢水による氾濫状況を正確に表現することはできない。

近年、GIS(地理情報システム)の技術的進歩やGISデータ整備が進み、都市流域では道路ネットワーク、街区データなどのデジタル情報が容易に入手できるようになった。さらに、東京都などにおいては、グリッド形状のラスタ型土地利用情報だけでなく、建物や道路などの地物を的確に表現出来る多角形(ポリゴン形状)のベクター型を用いた地物データの作成が行われており、今後各都市において、このような基礎的地物データGISの普及が進展するものと考えられる。これまで、都市流域は自然要素だけでなく多くの人工的要素を含むため詳細な空間情報の記述が容易ではなかったが、これらの地物データを忠実に表現可能なベクター型土地利用情報を用いることで、特定の建物、道路といった詳細な空間情報を抽出することが可能となった。しかし、現在利用可能な基礎的地物データGISには、直接流出量の算定に必要な浸透特性に基づいた林地、緑地、グラウンドおよび畑地などの土地利用種別の情報が含まれていない。また、この基礎的地物データGISから取得

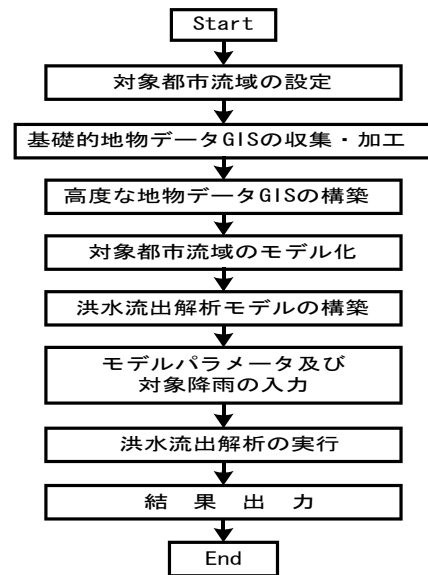


図-1 地物データGISを用いた洪水流出解析の全体ワークフロー

することが可能な道路は、建物とは異なり個々に識別可能ではなく、連続した形状となっているため、分布型水文モデルへの適用には解析用の微小要素へ分割する作業を行わなければならない。このように、基礎的地物データGISに様々な手を加えることで、洪水流出解析モデルに適用可能な高度な地物データGISを構築する必要がある。この高度な地物データGISを用いて都市流域をモデル化することにより、洪水流出に多大な影響を及ぼす不浸透域面積を精度良く算定することが可能となり、また、街区と道路間や道路要素と雨水・下水道管路との接続関係を忠実に表現することができるようになる。

これまで著者らは、多摩川支川匂田川の簡単な流出モデルを例に取り、東京都が独自に作成した建物や街区などの基礎的地物データGISをベースに、著者らが独自に調査した浸透域に関する情報を新たに組み込む事により、地物データGISで表された建物等の地物の位置やサイズが流出に及ぼす影響評価やその特性について検討を行ってきた<sup>14),15)</sup>。

本論文では、対象都市流域の基礎的地物データGISから高度な地物データGISを構築し、対象都市流域をモデル化する事により、豪雨の流出経路を物理的に忠実に再現する精緻な地物指向分布型都市洪水流出解析モデルの提案を行っている。図-1は提案する地物指向分布型洪水流出モデルを都市流域に適用する際の全体ワークフローである。すなわち、まず対象都市流域の基礎的地物データGISの収集・加工を行い、このデータに土地利用種別に関する情報を加え、さらに対象都市流域全体を土地利用種別毎に微小要素に分割する作業を行う事で、高度な地物

データGISを構築する。次いで、この高度な地物データGISから街区要素および街区内土地利用地物要素、道路要素および河道要素を抽出し、雨水・下水道管路要素を加えて都市流域のモデル化を行い、さらに、各地物要素の雨水流出過程を表現する水理・水文モデルを組み込み洪水流出解析モデルの構築を行う。次に、モデルパラメータと初期値を設定し、対象降雨を入力して洪水流出解析を実行したのち、上記5要素の流出量分布の結果を出力する。以上のように、本モデルは都市流域の総合的な洪水流出・浸水過程の状況をシミュレートすることが可能なモデル構造となっている。

本研究では、頻繁に都市型洪水氾濫が発生している東京都内の代表的都市中小河川である神田川流域内の小流域を取り上げ、具体的に高度な地物データGISを作成する手順を示し、これに基づき対象都市流域のモデル化を行っている。そして、本洪水流出解析モデルを用いて実際の集中豪雨データを対象に洪水流出解析を行い、河川水位の解析結果と観測値を比較することにより構築したモデルの妥当性について評価を行うと共に、流域内の要素別貯留量変化、河川水位変化、雨水・下水道管路からの流出量変化について考察を行っている。さらに、仮想豪雨に対し本モデルを適用し、同様の検討を行うとともに、雨水・下水道管路の排水不良や河川水位上昇に伴う浸水現象の妥当性について検討を行っている。

## 2. 洪水流出解析モデルの雨水流出過程

本モデルが対象とする雨水流出過程を図-2に示す。流域内への降雨は高度な地物データGISから作成される街区内土地利用地物要素、道路要素および河道要素の微小要素に対して与えられる。街区内では、土地利用地物要素が持つ浸透・不浸透特性に関する情報を基に、不浸透域の降雨および浸透域の浸透能を超えた雨水を直接流出として計算し、近傍の微小道路要素への流出量を計算する。微小道路要素の水は、その要素内にマンホールが存在する場合には雨水・下水道管路に流下し、マンホールが存在しない場合には道路を流下する。

雨水・下水道管路要素に対しては、まず微小道路要素との流入出力および接続管路からの流入出力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計算する。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要素上に溢水する。溢水した水

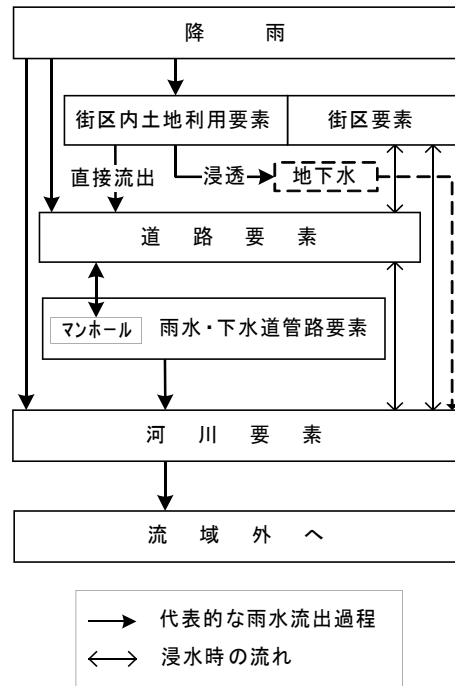


図-2 地物指向分布型都市洪水流出解析の雨水流出過程

は、道路を流下し流下能力に余裕のある雨水・下水道管路の存在する道路要素において再び雨水・下水道管路に流れ込む。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要素に流出し、流域外へと流去する。浸水計算においては、土地利用地物要素からの流出量と雨水・下水道管路からマンホールを介した溢水量により、道路水位が周囲の街区内の地盤高以上となると水は街区内に流出し、道路上の水位が低下すると街区内の水は道路に流出するとしている。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-2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。

## 3. 高度な地物データGISの構築手法について

### (1) 基礎的地物データGISの収集・加工

本論文では、建物の境界線、道路と街区の境界線および河道の境界線など、一次元で表される線(ポリライン)データとしての基礎的地物データGISを収集した上で、これらのデータをGISソフト(ArcGIS)を用いて図-3(a)に示すポリゴン型基礎的地物データGISへ加工する。例えば、街区領域では街区と道路の境界線から二次元閉領域で表現されるポリゴン型データに変換する。建物および河道の境界線を表す線データも同様に、ポリゴン型データに変換する。ただし、河道要素については橋の部分

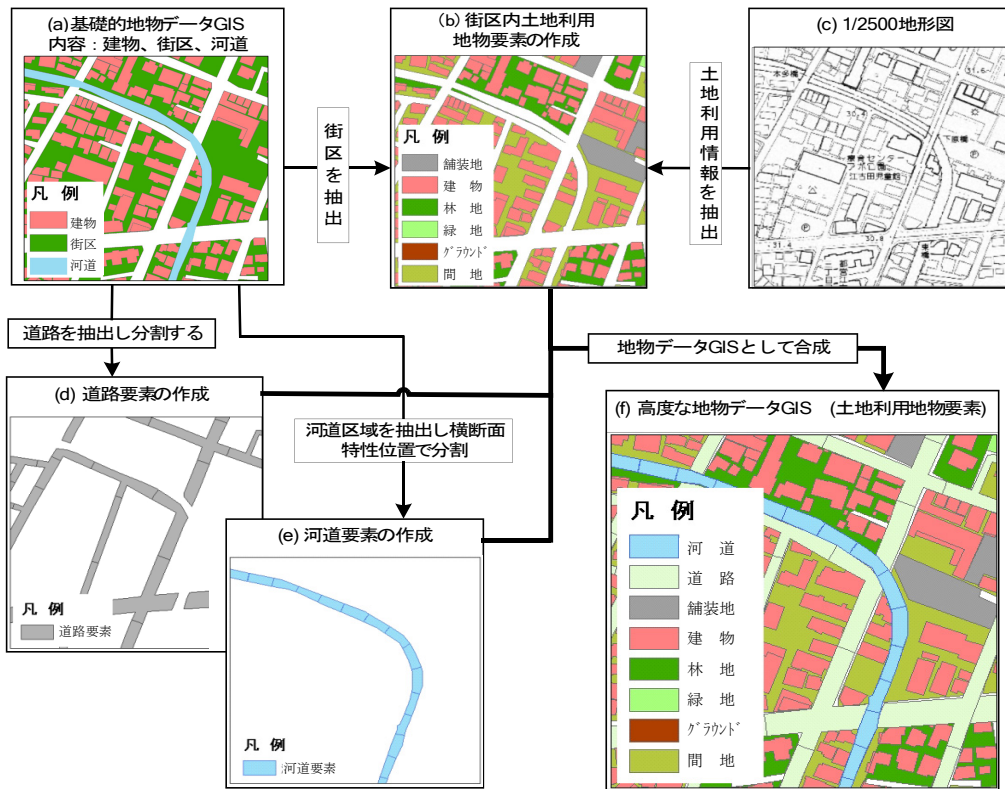


図-3 高度な地物データ GIS の構築

領域とするなどの修正を手作業で行い、河道要素を連続領域として表現する。このように、境界線として表されるデータから建物、街区、そして河道の領域を表すポリゴン形式データへの加工を行うことで、図-3(a)に示す基礎的地物データGISの作成を行う。

以下においては、このポリゴン型基礎的地物データGISに対し、新たに様々な情報を付加する事で各要素を作成し、これらを合成することで高度な地物データGISを構築している。なお、以下の地物データGISの作成に関する作業は全てGISソフトウェアを用いて行う。

### (2) 街区内土地利用地物要素の作成

図-3(a)に示す基礎的地物データGISで表現される各街区要素を対象に、図-3(c)に示す1/2500地形図を参考に舗装地、林地、緑地といった土地利用種別に関する情報を一つ一つ手作業で新たに付加することで、図-3(b)に示す街区内土地利用地物要素を作成する。ここで追加する建物要素以外の土地利用種別については、対象都市流域の土地利用特性に応じて適宜設定するものとする。流出計算においては、この街区内土地利用地物要素を基に浸透・不浸透特性を設定している。

### (3) 道路要素の作成

図-3(a)に示す基礎的地物データGISには道路に関

するデータは含まれていないが、流域界を表すポリゴンデータから街区要素領域と河道要素領域を除外する事で道路領域を表すポリゴンデータを作成することができる(図-4(a))。しかし、作成される道路要素データは連続した一要素のデータとして表現されているため、洪水流出モデルに適用するには微小要素への分割が必要となる。道路要素を単なる不浸透域として取り扱う場合には任意の微小要素形状としても良いが、本論文では道路を水路と見なして流出計算を行うため、微小道路要素は水の流れに直交するように分割する必要がある。そこで本論文では次に示す手順を考案し、微小道路要素を自動処理により作成している。

はじめに、国土地理院より刊行されている数値地図2500(空間データ基盤)から道路中心線データを抽出し、これを用いて道路交差点間を始点・終点とする線分要素を作成する(図-4(b))。次に、図-4(c)に示すように、抽出した線分要素の中心点から道路境界線に向かって垂線を引き、ポリゴン型道路データを微小要素に分割する(図-4(d))。実際の分割では図-4(b)に示す道路中心線長が50m未満では道路中心線を二分割に、それが50m以上75m以下では三分割にするなど、その分割後の線分長が25m以下になるように設定している。

本自動処理手順においては、道路の交差点付近で分割が生じると不適切な微小道路要素が作成される

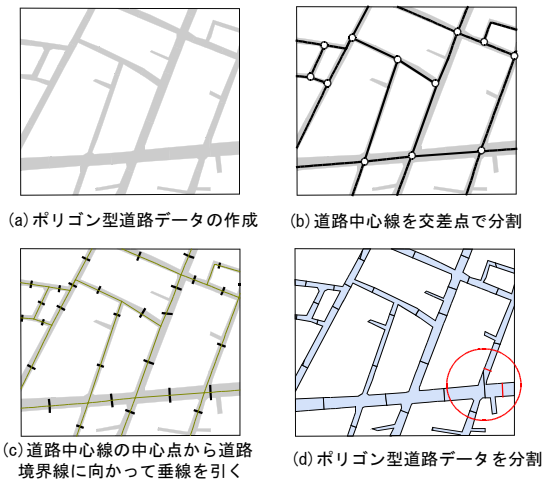


図-4 微小道路要素の作成手順

場合がある。例えば図-4 (d) の赤丸内に示す幅の広い道路の本処理による黒色分割線は、これに接続する幅の狭い道路に入り込んでおり、道路に直交する適切な分割線とはなっていない。このような場合には手作業で赤色分割線のように修正する必要がある。

#### (4) 河道要素の作成

基礎的地物データGISの河道要素も道路要素と同様に連続した領域となっているので、手作業で要素分割を行う。河道要素は河道計算に利用される横断特性との整合性を保つように設定する必要があるため、河川縦横断平面測量図において河道の横断形状が測量されている位置で分割している(図-3(e))。なお、河道の横断特性と河道要素の取り扱いについては4.(1)に示す。

#### (5) 高度な地物データGISの構築

上記の街区内土地利用地物要素、微小分割した道路要素および河道要素を合成することで図-3(f)に示すような高度な地物データGISの構築を行う。このように、地物データGISを用いて表現された土地利用地物要素はこの図のようにポリゴン形式で表現された地図上の地物となる。本論文で用いる高度な地物データGISは、図-2に示す本洪水流出モデルの流出過程において、街区内土地利用地物要素、街区要素、道路要素、河道要素として示されるものである。

### 4. 高度な地物データGISを用いた都市流域のモデル化

都市流域の雨水流出過程をモデル化するためには、前項で構築した高度な地物データGISを基に、さらに地表面地物要素(街区要素、道路要素、河道要素)

間の隣接関係の設定、街区内土地利用地物要素からの流出先である道路要素への接続関係の設定、そして雨水・下水道管路要素のモデル化およびその河道要素への接続関係の設定などを行う必要がある。そのためには、事前に地表面の地盤高情報、雨水・下水道管路に関するGISデータを収集しておく必要がある。

#### (1) 都市流域のモデル化に必要な地物データGIS

本論文では、図-2において示した地物指向分布型都市洪水流出解析モデルの雨水流出過程を実現するために、高度な地物データGISに雨水・下水管路要素を加え、さらに要素の隣接関係を構築することにより都市流域のモデル化を行っている。本解析モデルに必要な街区内土地利用地物要素、地表面地物要素そして地表面地物要素間の隣接関係を規定する地表面境界要素に関する属性情報を図-5に示す。

まず、図-5(a)はポリゴン形で表される街区内土地利用地物要素を模式的に示している。この要素に対しては、図-5内(d)に示すように要素番号、要素面積、土地利用種別番号、後述する流出先地表面種別番号および流出先要素番号を設定する。街区内土地利用種別は図-5内(e)に示すように舗装地、建物、林地、緑地、グラウンド、間地の6つの種別を、また流出先要素種別は図-5内(f)に示すように3種類設定している。

次に、図-5(b)は高度な地物データGISから得られるポリゴン型の地表面要素である街区要素、道路要素および河道要素を示している。これらの要素に設定する属性は図-5内(g)に示すように、要素番号、要素種別番号、要素面積、街区内建物面積(街区要素のみ)、地盤高、要素重心点座標値(X,Y)そして排水先雨水・下水道管路要素ノード番号(道路要素のみ)である。図-5内(h),(i)に示す雨水・下水道管路要素の作成については後述するが、本要素のノード(マンホール)には要素番号、マンホール直径、マンホール地盤高、溢水先の道路要素番号と排水先の河道要素番号を設定し、本要素のエッジ(管路)には要素番号、管路直径、管路長、上下流側管路底高および上下流側ノード番号を設定する。

最後に、図-5(c)はポリライン型の地表面境界要素を示している。図-5内(j)に示すように、地表面境界要素については要素番号、上下流側要素種別番号、上下流側要素番号、共有線分長、隣接要素間距離(隣接要素の重心点間距離)を設定する。ここで、上下流という名称は、属性情報に便宜上つけたもので、必ずしも流れの方向と一致している訳ではない。また河道内境界要素(河道要素同士の境界)にはさらに河道断面番号を設定し、この断面番号に対し図-5

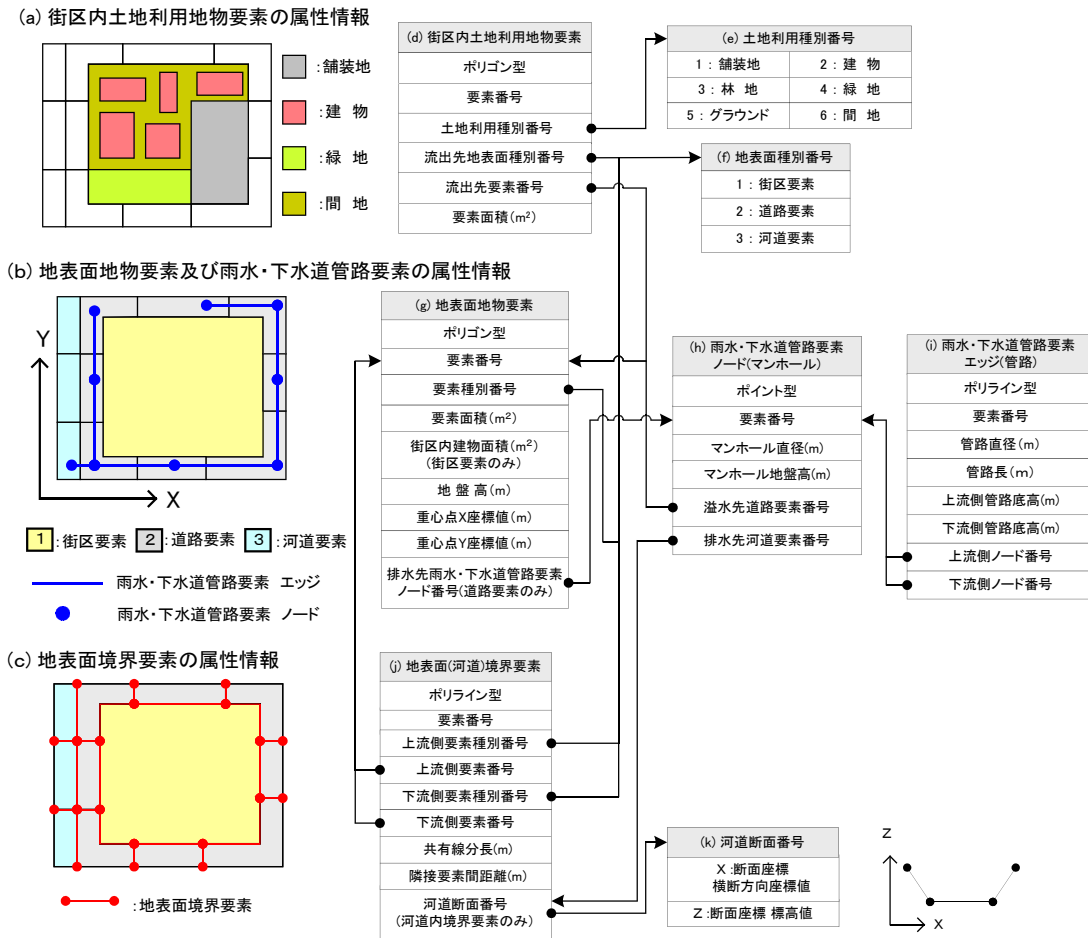


図-5 都市流域のモデル化に必要な地物データ GIS 要素とその属性情報

内(k)に示す断面座標(横断方向座標値)とこれに対応する標高値を設定している。なお、地表面境界要素の具体的な作成方法については4. (2)に述べる。

図-5 (b), (c)の属性情報を用いることにより、図-2に示す代表的な雨水流出過程から浸水時に至る流れの経路を表現することが可能となる。なお、5. で述べる水理モデルでは、図-5 (b)に示す地表面地物要素に関する属性情報を連続的に、図-5 (c)に示す地表面境界要素に関する属性情報を運動方程式に与えることにより計算を行っている。

(2) 地表面境界要素の作成

図-5 (c)で示した地表面境界要素は、地表面地物要素内の水がどの要素種別のどの要素番号に流れるかを指定するのに利用される。ここでは図-6 (a)に示す街区要素と道路要素間を例に取り、地表面境界要素の作成とその属性情報の設定について述べる。まず地表面境界要素の作成については、GISソフトウェアを用いてポリゴン型の地表面地物要素(街区要素、道路要素、河道要素)をポリライン型の地物に変換し、隣接する地表面地物要素が互いに共有す

る線分(図-6 (a)の太黒線)に分割することで、ポリライン型の地表面境界要素を作成する。そして作成した地表面境界要素に対し、図-5内(j)で示した属性情報を設定する。

なお、道路要素および街区要素の地盤高は、地盤高情報に関するGIS(国土地理院5mメッシュ標高)を用いて対象要素内の平均地盤高として求める。

(3) 街区内地利用地物要素の直接流出先の設定

都市流域においては傾斜地であっても街区内部は家屋やビルを建てる目的で造成が行われ、一般的に道路よりも高く平坦な土地となっている。このような街区内地利用地物要素の直接流出経路はそこに設置されている排水施設の状態に強く依存しており、通常は近くの道路に向かって水は排水される。また、実際の道路への排水経路を一つ一つモデル化するためには、人為的に設置された事細かな排水施設情報を入手しなければならないが、現実的にはこのようなデータの情報収集には現地調査も必要となりかなり困難を窮める。そこで、本論文においては街区内地利用地物要素の直接流出量の流出先は近傍の道

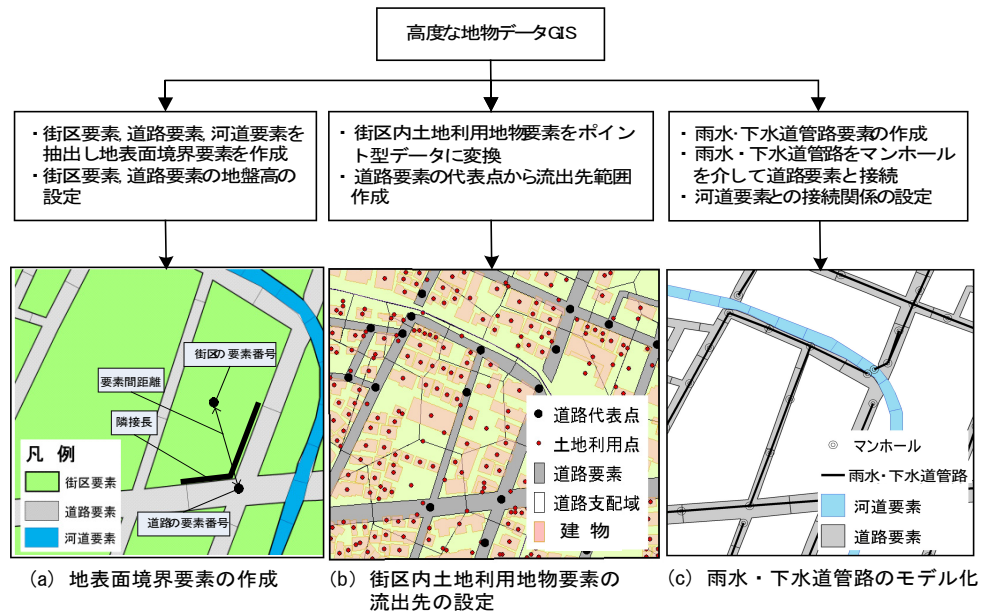


図-6 高度な地物データ GIS を用いた都市流域のモデル化

路要素に流れるものと仮定する。ただし、街区内地利用地物要素から道路要素までの距離が非常に長い場合(100m以上)、地盤高を考慮し街区要素を流下するとしている。

ここでは、各地物要素データの取り扱いを簡便にするために、土地利用地物要素の位置情報から重心点を計算し、この重心点に新たにポイント型データを作成する。次に、作成したポイント型の街区内地利用地物要素から道路要素への流出先を決定するには道路データを活用する。すなわち図-6(b)に示すように、各道路要素の支配領域は、道路中心線の始点(あるいは終点)から作成されるティーセンポリゴンを用い、街区内地利用地物要素がどの道路要素の支配領域内に存在するかを設定する。

#### (4) 雨水・下水道管路のモデル化

対象都市流域の流域界を設定する場合、雨水・下水道管路による河川への雨水排水区域を考慮し、他流域からの雨水が入り込まない排水区域を流域界と設定することを基本とする。

雨水・下水道管路要素は管路特性を表現するエッジ(線)データ、マンホールの特性を保持するノード(点)データとして構成する。図-6(c)に示すように、微小道路要素内には複数のマンホールが存在し、このマンホールを介して相互方向に流れが生じる。このため、道路要素にはその内部に存在する複数のマンホールの情報が設定され、マンホールにはそれがどの微小道路要素内にあるかという情報を設定する。さらに、雨水・下水道管路と河道要素の接続関係を設定する。雨水・下水道管路要素のエッジに設定すべき属性情報である図-5内(h)の属

性は自然流下の場合を想定したものであり、ポンプ施設がある場合にはさらにポンプに関する属性情報も設定する必要がある。

### 5. 地物指向分布型都市洪水流出解析モデル

本研究で構築する都市洪水流出解析モデルの計算フローを図-7に示す。本論文ではGISソフトを利用して作成した図-5の地物データGIS要素の属性情報をテキスト形式データとして出力・保存し、これを入力データとする様々な水理・水文モデルをFortran言語で作成し、これらを統合することで洪水流出解析モデルを構築している。後述する本モデルの主なパラメータは、土地利用地物要素に対しては、直接流出量算出に必要な初期損失量、初期・終期浸透能、浸透減衰係数、街区内地利用地物要素から道路要素への流れの計算に必要な等価粗度係数、斜面勾配である。また、雨水・下水道管路要素、河道要素そして地表面地物要素間の流れに対しては粗度係数となっている。初期値として道路要素、街区要素、雨水・下水道管路要素、河道要素に対して初期水位を与える。

代表的な雨水流出経路に沿った計算フローは次のようになる。降雨は図-7に示す時間間隔DTで、高度な地物データGISとして構築した各微小土地利用地物要素に対して与え、その土地利用種別に基づき直接流出量を算出する。そして、流出先の微小道路要素では算出された直接流出量とKinematic Waveモデルを用いて、図-7の時間間隔dtで計算した隣接す

る街区内土地利用地物要素からの流量を累計する。さらに当該要素内のマンホールを介して雨水・下水道管路要素へと流出させ、河道要素に至るまで管路内の流量を計算する。河道要素では、上流からの流入量および雨水・下水道管路からの流入量を合計して河道要素毎の水位や流量を算出する。また、図-2に示す浸水時の流れに対しては、4. (1)において設定した地表面境界要素を用いて一次元の不定流計算を行っている。

なお、本研究では地物データGISを用いた地物指向分布型都市洪水流出解析モデルに対する総合的概念を提示し、まずその全体モデルを具体的に提案・構築・評価することを主な目的としている。そのため本研究で用いる個々の水文・水理モデルについては、とりあえず既存の簡便で標準的と考えられるモデルを採用している。もちろん、より高度な水文・水理モデルを本洪水流出解析モデルに組み込んで改良していくことは容易である。

(1) 土地利用地物要素における直接流出量の算定

直接流出量の算定には図-3(f)の土地利用地物要素を用い、河道、道路、舗装地、建物を不浸透域に、林地、緑地、グラウンド、間地を浸透域に分類し、浸透域に関してはさらに浸透能特性を考慮して計算するモデルを用いる<sup>16)</sup>。

不浸透域では、降雨初期に生じるコンクリートやアスファルト面における吸収や窪地貯留などの損失を考慮し、次式によって直接流出量に寄与する有効雨量 $r_e$ (m/s)を算定する。

$$r_e(t) = \begin{cases} 0 & (\sum r(t) \leq L) \\ r(t) & (\sum r(t) > L) \end{cases} \quad (1)$$

ここに、 $t$ :時刻(sec),  $r(t)$ :時刻 $t$ における降雨量(m/s),  $\sum r(t)$ :降雨開始から時刻 $t$ までの総雨量(m),  $L$ :初期損失雨量(m)

浸透域の有効雨量の算定は、初期損失降雨量と浸透量を差し引いて算出する。浸透量の計算には降雨強度が浸透能以上の場合には浸透能に相当する降雨を、逆の場合には全ての降雨を浸透させる。この浸透量の算定には降雨強度の変化を浸透能に反映させるため修正Hortonモデル<sup>17)</sup>を用いている。

(2) 街区内土地利用地物要素から道路要素への流れ

街区内土地利用地物要素において発生した直接流出量は4. (2)において述べたように近傍の道路要素に流出するものとしている。この雨水流出過程では街区内土地利用地物要素を流出面と捉え、雨水流出計算手法には、土地利用や降雨などの空間分布を適切に表現可能な分布定数系物理モデルとしての

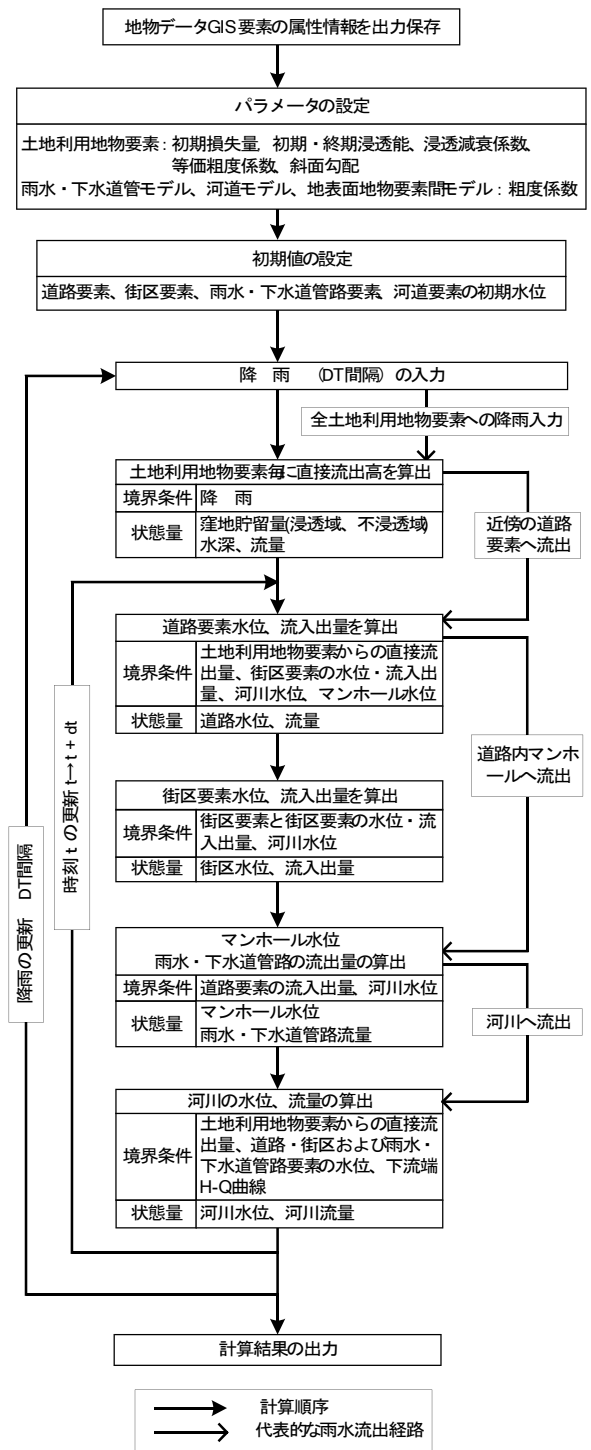


図-7 都市洪水流出解析モデルの計算フロー

Kinematic Waveモデルを用いる<sup>18)</sup>。街区内土地利用地物要素の形状は複雑であるため、Kinematic Waveモデルの適用に当たり、ここでは同じ面積を持つ正方形として単純化し、斜面長および斜面幅を地物の要素面積から算出している。一様斜面での基礎方程式は以下のように表される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r_e \quad (2)$$



$$q = \alpha h^\beta \quad (3)$$

ここに、 $t$ :時間(sec),  $q$ :斜面単位幅流量( $m^2/s$ ),  $h$ :斜面流の水深(m),  $x$ :距離(m),  $r_e$ :有効雨量( $m/s$ )

式(3)の $\alpha$ と $\beta$ は流れの抵抗にかかわる定数で、地表斜面流が乱流でManning則を適用すると、 $\alpha = \sqrt{\sin \theta / N}$ ,  $\beta = 5/3$ と表される。ここに、 $\theta$ :斜面勾配(m/m),  $N$ :等価粗度係数( $s/m^{1/3}$ )

式(2)および式(3)の数値解析は差分法を用いて行い、時間に関する項は前方差分、距離に関する項は後方差分を用いている。

### (3) 地表面地物要素間の流れ

本論文では、図-2で示した浸水時の地表面地物要素間の流れも流出現象の一部として捉え、雨水流出過程のモデル化を行っている。都市流域を対象とした浸水時の水理モデルとして川池ら<sup>19)</sup>は(a)デカルト座標系による汎濫解析法、(b)一般座標系による汎濫解析法、(c)非構造格子による汎濫解析法、さらに(d)領域内の道路網をネットワーク化して一次元解析を組み込んだ汎濫解析法(街路ネットワークモデル)について詳しく比較検討を行っている。特に(d)の街路ネットワークモデルは一般座標系や非構造格子と比較し、緻密な道路を表現することが可能で、道路を流れる汎濫水の挙動を詳細に表現できる特長を持つ。本論文では水理モデルとして、街区要素、道路要素が適切に分割される高度な地物データGISの特徴が生かせる街路ネットワークモデルの概念を用いる。

本モデルに用いる解析格子は図-5(b)に示す街区要素および道路要素である。これらの解析格子に対し図-5(c)で定義される地表面境界要素の属性情報(図-5内(j))を基に、隣接する要素の重心点間を上流から下流向きに $x$ 軸を取り、矩形断面水路とみなして隣接する地表面地物要素に対し一次元解析法を適用する。解析格子となる街区要素と道路要素では連続式から水深を求める。ここでは川池らと同様に、道路や建造物が汎濫水に及ぼす影響を反映させるために建物の占有率と通過率を考慮した。さらに街区要素には建物などの障害物があり道路要素には障害物がないという汎濫水の流れに対する特性を反映させるため、街区要素と道路要素に対し異なる粗度係数を用いている<sup>19)</sup>。ここで、建物の占有率は図-5(b)で定義される地表面地物要素の属性情報(図-5内(g))の街区面積と街区建物面積から計算し、街区要素と道路要素間の通過率は建物の占有率から計算している<sup>19)</sup>。道路要素ではマンホールを介して雨水・下水道管路との水の流れを考慮している。本論文では地表面の解析格子を地物データGISから作成

している。地表面地物要素間のみならず建物の占有率や雨水・下水道管路要素と道路要素の隣接関係についても忠実にモデル化できる点に特長がある。

なお本論文では、単に街区内の建物占有率をそのまま用いて街区内の浸水計算を行ったが、実際の浸水状況は建物の盛土状況や地下室の有無さらには遮水板や土嚢などによる浸水防御活動に大きく影響を受ける。しかしこの場合でも、街区土地利用要素である建物に対し必要な情報を付加することができれば、より現実的な浸水状況の評価が可能と考える。

地表面地物要素(道路要素、街区要素、河道要素)間の流量計算は、図-5(c)に示す地表面境界要素を用いて一次元不定流の速度項を省略した次式を適用する<sup>20)</sup>。

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

ここに、 $t$ :時間(sec),  $g$ :重力加速度( $m/s^2$ ),  $v$ :流速( $m/s$ ),  $i_0$ :水路勾配(m/m),  $h$ :水深(m),  $x$ :要素間距離(m),  $n$ :粗度係数( $s/m^{1/3}$ ),  $R$ :径深(m)

地表面地物要素間の流量は、式(4)で算出した流速 $v$ と水深 $h$ および要素の隣接長を用いて計算する。

次に地表面地物要素の水深変化を計算する。道路の水深は、微小土地利用地物要素からの流出量、道路要素・街区要素・河道要素からの流入出量に加え、雨水・下水道管路要素の流入出量を考慮して式(5)により道路の貯留量を算出したのち、式(6)を用いて算定する。

$$\frac{\partial S_r}{\partial t} = \sum Q_s + \sum Bq + \sum Q_{div} + r_e A_r \quad (5)$$

$$\frac{\partial h_r}{\partial t} = \frac{1}{A_r} \frac{\partial S_r}{\partial t} \quad (6)$$

ここに、 $t$ :時間(sec),  $S_r$ :道路の貯留量( $m^3$ ),  $Q_s$ :道路に隣接する要素からの流入出量( $m^3/s$ ),  $B$ :微小土地利用地物要素の斜面幅(m),  $q$ :微小土地利用地物要素からの斜面単位幅流量( $m^2/s$ ),  $Q_{div}$ :マンホールからの溢水量( $m^3/s$ ),  $r_e$ :道路の有効雨量( $m/s$ ),  $h_r$ :道路の水深(m),  $A_r$ :道路面積( $m^2$ )

街区要素の水深は、隣接する地表面地物要素からの流入出量と建物面積を除いた街区面積から次式を用いて計算する。

$$\frac{\partial h_s}{\partial t} = \frac{1}{A_s} \sum Q_s \quad (7)$$

ここに、 $t$ :時間(sec),  $h_s$ :街区の水深(m),  $A_s$ :建物面積を除いた街区面積( $m^2$ ),  $Q_s$ :街区に隣接する要素からの流入出量( $m^3/s$ )

なお、上記の計算において、隣接する要素上の水位が不連続になっている場合には越流公式あるいは段落ち式を用いる<sup>21)</sup>。また、地表面間と後述する雨

水・下水道管路と河道の不定流計算に関する数値解析は蛙飛び計算法<sup>20)</sup>を用いている。

#### (4) 雨水・下水道管路の流れ

雨水・下水道管路では、マンホール部と管渠部に分けてモデル化を行い、マンホール部で微小道路要素との水の受け渡しを行う。雨水・下水道管路の流量追跡モデルは開水路流れとサーチャージ流れを同一の方程式で表現することが可能なPreissmanのスロットモデルを利用する<sup>22)</sup>。さらに本モデルの適用に当たってはスロット壁面の摩擦を無視することから生じる計算水位の低下を補正する手法<sup>22)</sup>を用いている。この手法では、(a)スロット断面における流速は管路内を流れる管内流速と等しい、(b)スロット壁面は流れの抵抗を無視するという2つの仮定を用いている。これらの仮定により、スロットモデルの運動方程式および連続式は次のように表される。

$$\frac{1}{g} \left( \frac{\partial v}{\partial t} \right) - i_0 + \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{n^2 |v| v}{R^{4/3}} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + v \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{c^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

ここで、

$$c = \sqrt{gA/B_s} = c_a \sqrt{1 + (B_s/A_p)(h-D)} \quad (10)$$

$$c_a = \sqrt{gA_p/B_s} \quad (11)$$

$$A = A_p + B_s(h-D) \quad (12)$$

ここに、 $t$ :時間(sec),  $g$ :重力加速度( $m/s^2$ ),  $v$ :流速( $m/s$ ),  $i_0$ :管路勾配( $m/m$ ),  $h$ :水深( $m$ ),  $x$ :管路長( $m$ ),  $n$ :粗度係数( $s/m^{1/3}$ ),  $R$ :径深( $m$ ),  $c$ :微小擾乱(重力波)の伝播速度( $m/s$ ),  $B_s$ :スロット幅( $m$ ),  $A$ :通水断面積( $m^2$ ),  $A_p$ :雨水・下水道管断面積( $m^2$ ),  $D$ :雨水・下水管直径( $m$ )

マンホール部では、以下に示す連続式(13)によりマンホール内の貯留量を求め、貯留量・水位換算関数式(14)によりマンホール部の水位を算定する。

$$\frac{\partial S_m}{\partial t} = \sum Q_{in} - \sum Q_{out} \quad (13)$$

$$H_m = f_m(S_m) \quad (14)$$

ここに、 $t$ :時間(sec),  $S_m$ :マンホール部貯留量( $m^3$ ),  $Q_m$ :マンホール部流入量( $m^3/s$ ),  $Q_{out}$ :マンホール部流出量( $m^3/s$ ),  $H_m$ :マンホール部水位( $m$ ),  $f_m$ :貯留量・水位変換関数

なお、式(14)のマンホール水位と貯留量の関係は、水位が道路要素の地盤高以下の場合はマンホール内水深とマンホール断面積の関係から求められ、水位が地盤高以上で溢水している場合はマンホール断面上の浸水深分を加えたものを貯留量としている。この場合、道路要素に流出する当該マンホールからの

溢水量 $Q_{div}(m^3/s)$ は次式で計算する。

$$Q_{div} = \frac{S_m - S_{max}}{dt} \quad (15)$$

ここに、 $S_{max}$ :マンホール最大貯留量( $m^3$ )

#### (5) 河道の流れ

河道の流れは、図-5(c)に示す地表面境界要素としての河道内境界要素に関する情報から、図-5内(j)の上下流側の河道要素番号、隣接要素間距離および河道断面番号とその属性(図-5内(k))を抽出し、これらを運動方程式(16)、連続式(17)に与えて一次元解析として計算する<sup>20)</sup>。なお、河道要素では降水量、雨水・下水道管路および道路・街区からの横流入出量を考慮する。

$$\frac{1}{g} \left( \frac{\partial v}{\partial t} \right) + \frac{1}{g} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{v}{2} \right)^2 - i_0 + \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{n^2 |v| v}{R^{4/3}} = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - \sum q = 0 \quad (17)$$

ここに、 $t$ :時間(sec),  $g$ :重力加速度( $m/s^2$ ),  $v$ :流速( $m/s$ ),  $x$ :要素間距離( $m$ ),  $h$ :水深( $m$ ),  $i_0$ :水路勾配( $m/m$ ),  $n$ :粗度係数( $s/m^{1/3}$ ),  $A$ :通水断面積( $m^2$ ),  $Q$ :河川流量( $m^3/s$ ),  $\sum q$ :降水量, 雨水・下水道管路からの横流入量および道路・街区からの横流入量の合計量( $m^2/s$ )

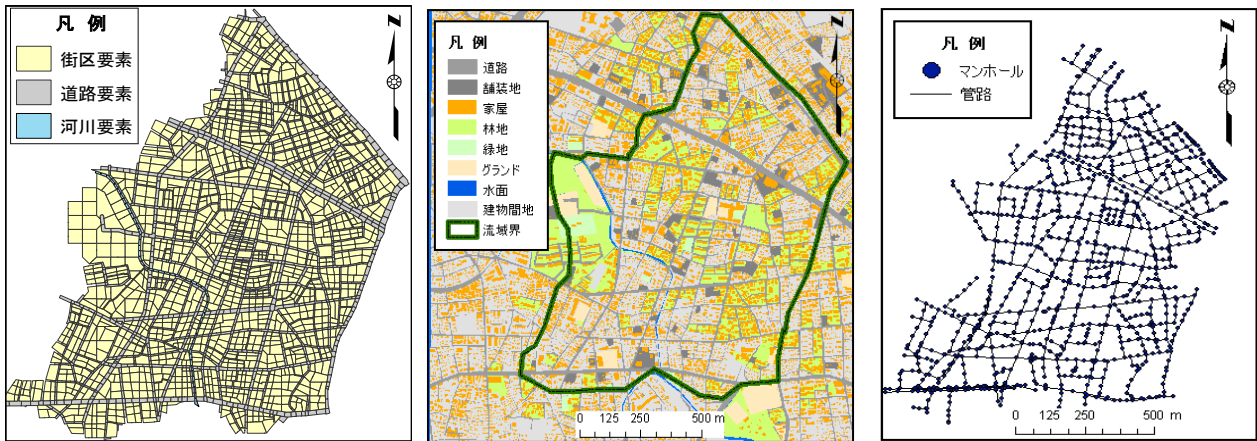
### 6. 実流域への適用

本論文では、提案した都市洪水流出解析モデルによる雨水流出過程・浸水過程の妥当性を評価するために、東京都内の代表的都市河川である神田川の支川江古田川流域の下流域を対象に本モデルの適用を試みる。まず、3.で述べた手順に従い対象流域の高度な地物データGISを具体的に構築し、これを用いて対象都市流域をモデル化する。次に、実績降雨および仮想豪雨に対して本洪水流出解析モデルを適用し、本モデルによる河川水位の再現性や洪水流出シミュレーション結果の妥当性などについて詳しく検討を行う。

#### (1) 対象流域の概要

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という支川を合流して隅田川に流入する流域面積 $105km^2$ 、流路延長 $25km$ の東京都内の代表的な中小河川である<sup>23)</sup>。図-8(a)に、本論文で対象とする妙正寺川支川の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 $6.5km^2$ で、上流部は都市下水路となっており、本研究では、図-8(b)に示す江古田川下流域(流域面積は約 $1.1km^2$ 、





(a) 地表面地物要素 (b) 高度な地物データ GIS による土地利用地物要素 (c) 雨水・下水道管路要素

図-9 地物データ GIS を用いた対象流域のモデル化

物要素に関しては流域界内部を対象としている。また、表-4の管路要素数がマンホール要素数よりも若干多いのは、複数の管路でマンホール間を接続している箇所があるためである。

(3) 実績降雨を用いた洪水流出解析

a) 水理・水文パラメータの設定

本洪水流出解析モデルで用いる主要パラメータについては5.で述べたが、その具体的な設定値を表-5に示す。本設定値は、既往の研究から得られる値を基に以下のように設定を行った。表-5の浸透域・不浸透域の初期損失量の値については山口ら<sup>24)</sup>が示している4mm, 2mmをそれぞれ用いる。浸透域の初期浸透能、終期浸透能そして減衰係数は既往の研究を参考に設定した<sup>15),17),25)</sup>。土地利用地物要素の等価粗度係数は地物データGISを利用した流出モデルの検討において、浸透域を0.07, 不浸透域を0.035とする事で良好な洪水流出量の再現結果が得られており<sup>15)</sup>、本研究でもこれらの値を利用する。Kinematic Waveモデルで必要となる土地利用地物要素の斜面勾配は平均流域勾配を求めて全ての土地利用地物要素に対して一様に1/350を与えた。地表面地物要素間モデルの粗度係数は、川池らによる街路ネットワークモデルを用いた氾濫解析<sup>19)</sup>を参考に表-5のように与えた。雨水・下水道管路および河道の粗度係数については、それぞれコンクリート管路およびコンクリート河道としての値を設定した<sup>26)</sup>。

b) 初期値および境界条件の設定

本モデルを適用する場合、通常無降雨がある程度続いた降雨前より計算を開始する事を基本としているので、河道要素の初期値としては平常時の流量に相当する水位および流量を与え、雨水・下水道管路

表-2 地表面地物要素の要素数および総要素面積

要素名	要素数	総要素面積(m <sup>2</sup> )
街区要素	1467	837, 907
道路要素	1688	274, 061
河道要素	53	8, 063
合計	3208	1, 120, 031

表-3 街区内土地利用地物要素の要素数および総要素面積

要素名	要素数	総要素面積(m <sup>2</sup> )
舗装地	58	44, 542
建物要素	4, 558	348, 056
林地要素	174	205, 088
グラウンド要素	8	32, 679
間地要素	383	207, 500
合計	5, 181	837, 865

表-4 雨水・下水道管路の要素数

要素名	要素数
マンホール要素	1, 039
管路要素	1, 053

要素および地表面の初期水深としてはゼロとするのが妥当であろう。

河道要素では上流端および下流端の2つの境界条件の設定を行う。流域内の最上流には図-8(b)に示す西原橋水位観測所が設置されており、河道断面特性と河道勾配および粗度係数から水位流量曲線を算出し、観測水位を流量に換算してこの流量を上流の境界条件として設定する。また、河道の下流端も同様に水位流量曲線を作成し、計算流量を水位に換算

表-5 パラメータの設定

パラメータ名	設定値	
初期損失量 (mm)	浸透域: 4 不浸透域: 2	
初期浸透能 (mm/hr)	林地: 150 緑地: 30 グラウンド: 10 間地: 10	
終期浸透能 (mm/hr)	林地: 100 緑地: 20 グラウンド: 5 間地: 5	
減衰係数 (hr <sup>-1</sup> )	4.14	
土地利用地物要素の斜面勾配	1/350 (流域平均勾配)	
土地利用地物要素 の等価粗度係数	浸透域: 0.070 不浸透域: 0.035	
地表面地物要素間 モデルの 粗度係数	道路要素間, 道路 要素-河道要素間	0.043
	街区要素間, 道路 要素-街区要素間	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	

した値を境界条件として設定する。一本の污水幹線の境界条件に関しては、ここでは降雨時には上流域からの流入で満管となり、それがそのまま本流域から下水処理場に流出するとして取り扱った。すなわち、ここでは対象流域内の雨水・下水道管路による雨水は全て河川に排水されるとした。なお、入力降雨間隔は1分で与え計算時間間隔は0.1秒として洪水流出解析を行った。

c) 対象洪水

対象洪水は、2004年10月20日に関東地方に上陸した台風23号による降雨とした。本洪水においては、16:00から24:00までの8時間に総雨量110mmが流域内の江古田観測所において記録され、図-10(a) (1分間降雨量)および図-10(b) (10分間降雨量に換算)に示すように18:20と22:00付近にピークのある降雨波形となっている。洪水流出解析に用いた降雨は、対象流域が1.1km<sup>2</sup>と小さいために、江古田降雨観測所で観測された値を全流域に与える。

対象とする江古田川下流域には水位計が設置されていないため、モデル評価に用いる観測流量データを得ることができない。そこで、著者らは観測流量データを取得するため本洪水時に現地観測を敢行した。図-8(b)に示す現地水位観測地点において、午後10時15分から11時まで5分間隔で目視により水位の記録を行った。なお、著者らの研究室より現地観測地までの距離が50km以上とかなり離れているため第一ピークの値は得られなかったものの、第二

ピークからその減衰に至るまでの水位を取得することができた。そして得られた観測水位から、河道横断特性および河床勾配そして粗度係数を用いて観測流量の値を算出した。

d) 洪水流出解析結果と考察

図-10(a)に本洪水流出解析により得られた河川水位および流量を実線で表している。これらを著者らが実測した第二ピークから減衰期にかけての観測値と比較すると、解析された河川水位および流量は、観測値のピークや波形を概ね捉えていることが分かる。

次に、江古田川下流域の流出特性について調べた。図-10(b)は累加降雨量(実線)および流域内全ての街区要素、道路要素、雨水・下水道管路要素から河道要素への累加流出量(破線)を示している。図-10(c)は全ての雨水・下水道管路および街区・道路要素から河道要素への1分間隔の流出量を示している。マイナスの値は河道要素から雨水・下水道管路要素への逆流、あるいは河道要素から街区・道路要素への溢水量を示すが、今回の降雨の場合マイナスの値は生じていない。図-10(d)は雨水・下水道管路要素、街区要素、道路要素におけるそれぞれの要素合計貯留量を示したものである。

図-10(b)より降雨終了時における累加降雨量は110mmとなっているのに対し、河道要素への累加流出量は72mmとなっている。すなわち、図-10(d)の各要素における降雨終了時の合計貯留高約2mmを直接流出量にカウントし、さらに河道要素への直接降雨(対象流域に対する河道要素の割合で約0.7%)を考慮すると、本降雨の直接流出率は約0.68 (=74/110+0.007)と推定される。対象流域内の不浸透域面積率は約60%であるので、直接流出率との差8%が浸透域より直接流出として流出したものと考えられる。

次に、河道に接続する雨水・下水道管路のマンホール内水位と河川水位の関係、そして河道への流出状況を確認するために、江古田川下流域(図-8(b))の現地水位観測地点より上流350m付近を一例として取り上げる。この区域の詳細な河道および雨水・下水道管路の接続状況を図-11に示す。この図よりマンホール(番号M44)が接続する雨水・下水道管路(番号P72)が河道要素(番号R22)への排水管路となっている。ここで、これらのマンホール内水位、河川水位および管路流量の時系列変化を図-10(e), (f)に示す。

図-10(b), (e)より、降雨開始とともにマンホール内水位は徐々に増加しこれにやや遅れて河川水位も増加している。図-10(f)に示す管路番号P72の流量

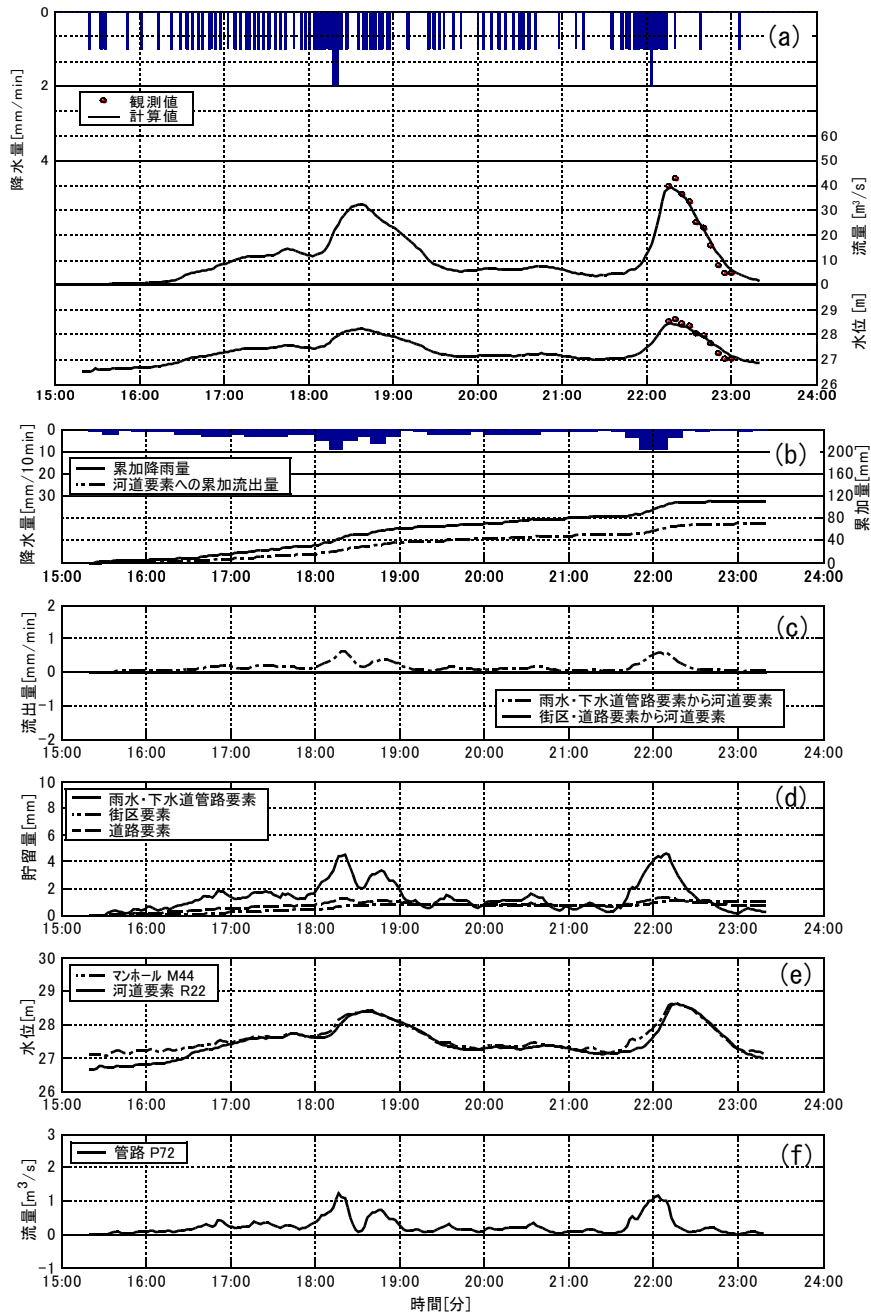


図-10 解析結果(2004年10月20日)

の大小は、基本的にはマンホール番号M44の内水位と河道要素番号R22の河川水位との水位差に因るが、降雨開始直後はこの水位差が大きいにもかかわらず流量が小さくなっている。これは降雨開始時にはまだ管路内に流量が十分に貯留されておらず、また河川水位が管路吐水口より低いためである。

22:00頃の降雨ピーク付近の状況を見ると、降雨強度が大きくなるにつれマンホール内水位が上昇しこれにやや遅れて河川水位も上昇しており、これらの水位差により図-10(f)に示すように管路内流量が増加している。しかしその後、降雨強度が小さくなるにつれ上記の水位差がゼロに近づき、22:10頃より管路流量が激減している様子が見てとれる。

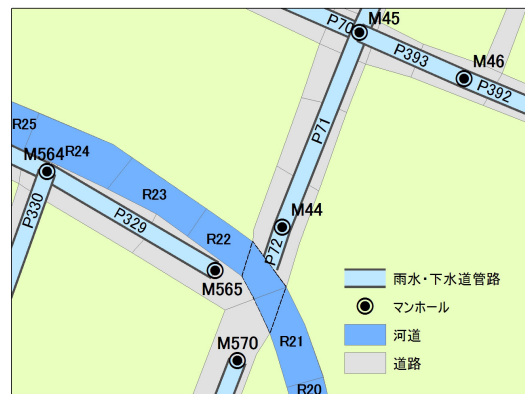


図-11 河道および雨水・下水道管路の接続状況

なお、本実績降雨における解析結果からは街区内や道路の浸水状況は発生せず、実際の浸水被害も報告されていない。

#### (4) 仮想豪雨を対象とした洪水流出解析

##### a) 計算条件

前述したように、実績降雨の解析結果からは浸水状況はほとんど発生しなかった。そこで本モデルによる浸水状況の評価・検討するため、仮想的な豪雨を作成し洪水流出解析を行い、その特性について考察を行った。

本流出解析では、対象流域への河道上流からの流入量を境界条件として与える必要があるため、仮想豪雨としては前述の実績降雨データを有効に用いて、この降雨強度を増加させることを考える。そこで実績データの降雨強度を2倍にし、さらに降雨開始から終了までの時間(降雨継続時間)を半分に集中させてこれを仮想豪雨とした。その結果仮想豪雨の総降水量は221mm、時間最大雨量は92mm、降雨継続時間は約4時間となった。近年の東京都市部における集中豪雨の傾向としては、時間最大雨量100mm程度の降雨が4、5時間に集中し、総雨量としては200mm程度のものが発生している。なお、本洪水流出解析モデルのパラメータや初期値は実績降雨の場合と同じ値を用いて流出解析を行った。

##### b) 洪水流出解析結果と考察

仮想豪雨による洪水流出解析結果を図-12に示す。実績降雨での結果と同様に、図-12(a)には仮想のハイトグラフおよび流量・水位ハイドログラフを、図-12(b)には10分間換算降雨強度、累加降水量、流域内全ての街区・道路要素および雨水・下水道管路要素から河道への累加流出量を、図-12(c)には全ての雨水・下水道管路および街区・道路要素から河道要素への1分間隔の流出量を、そして図-12(d)には流域内の各要素別の合計貯留量を示している。

図-12(a)より、計算ピーク水位は約29.3m、ピーク流量は約68m<sup>3</sup>/sとなり、図-10(a)に比べてそれぞれ0.8m、28m<sup>3</sup>/s程度高くなっている。図-12(b)より、流域内への総降雨量は221mm、その内河道への累加流出量が188mmとなっており、その差は33mmとなっている。実績降雨の場合と同様に河川への降雨としての直接流出率は0.7%で、図-12(d)の計算終了時点での各要素の合計貯留量は約5mmでこれも直接流出量に含めて考えると、本仮想豪雨に対する流出率は0.88(=193/221+0.007)となり実績降雨の場合と比べ20%も高くなっている。すなわち実績降雨の場合、浸透域からの直接流出率は約8%で

あったが、仮想豪雨ではそれが約28%に跳ね上がっている。

図-12(d)の雨水・下水道管路要素内の貯留量に注目すると、図-12(b)の降雨開始時の10分間換算降雨強度が5mmの時には雨水・下水道管路貯留量は2mm程度であり、10分間換算降雨強度が10mm程度になると貯留量は5mm程度に増加し、その後降雨強度が強くなっても貯留量はほとんど増加せず、10分換算最大降雨強度約30mmの時でも最大貯留量は7mm程度となっている。この理由は対象流域内の雨水・下水道排水の設計が50mm/hrなので、10分間降雨強度が約10mmを超えると、雨水・下水道管路の排水能力を超え管路内の水が道路に溢れるためである。その結果、図-12(d)に示すように街区要素および道路要素の貯留量が急激に上昇する。また、図-12(c)に示すように、降雨の第一ピーク時(T=100分頃)と第二ピーク時(T=210分頃)にマイナスの値が生じ、河道から街区・道路要素への溢水が生じているのがわかる。

次に、図-12(e)、(f)には前述の実績降雨と同様に、図-11のマンホール番号M44と河道番号R22の水位および管路番号P72の流量の時系列を示している。なお参考のため、図-12(e)にはマンホールM44が敷設されている道路要素の水位も示している。図-12(e)よりマンホールM44の水位は河川水位と同期して上昇し、降雨の第一ピーク付近(T=100分頃)では、河川水位上昇および上流の雨水・下水道管路からの流出量が集中するためマンホール内水位は急激に上昇している。そして、マンホール内水位が道路地盤高に達し道路上への溢水が始まると、マンホール内水位は道路上溢水位と等しくなり、この水位は河川水位よりも高く保持されているため、図-12(f)に示すように河道から管路P72への逆流現象は生じていない。その後、降雨の減少とともに道路上溢水位はゼロとなり、マンホール内水位も低下して河川水位と同期して変動している。また、降雨の第二ピーク付近(T=210分頃)でも同様の現象が生じているが、最終的にマンホール内水位は低下して河川水位に漸近し、管路P72の河道への流出量もゼロに近づいている。

次に、図-13に降雨の第二ピークの開始T=180分から終了T=210分までの浸水状況を10分間隔で示す。また同図には計算終了時点(T=360分)での浸水状況の図も付加している。図-13より、降雨第二ピーク前のT=180分時点での対象流域内の浸水状況は、降雨の第一ピークの影響が残り、主に排水不良の雨水・下水道管路に沿って浸水区域が広がっている。

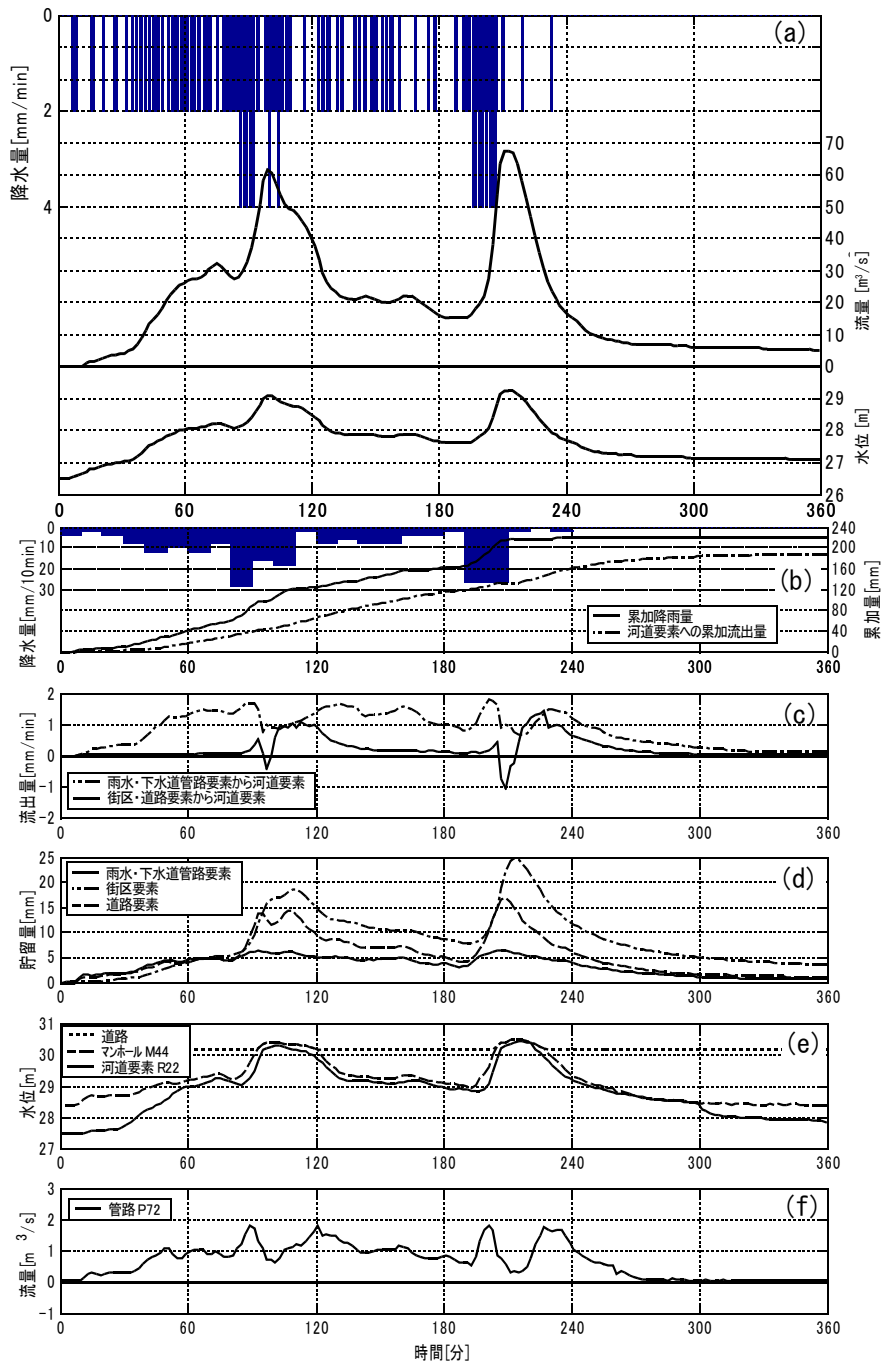


図-12 仮想豪雨による解析結果

降雨が激しくなり始めたT=190分頃よりピークであるT=200分頃にかけて、排水不良による浸水区域が広がっている。そしてT=210分では、雨水・下水道管路を通して流出した水が河道周辺に集中し、さらに河道から街区・道路への溢水も発生し、その結果浸水区域も排水不良の雨水・下水道管路沿いのみならず河道周辺にまで広がる結果となっている。計算終了時点T=360分での浸水状況では、一部の区域で浸水箇所が残っているが、これはこの区域が周囲の地盤高よりも低い街区・道路となっているためである。以上のように本モデルにより短時間で浸水箇所

が変化していく様子が把握できる。

以上の洪水流出・浸水状況に関する考察は仮想豪雨を対象としたシミュレーション結果に対するものである。実測値は存在せず得られた流出量や浸水区域の妥当性についての定量的な評価は困難である。しかし、本シミュレーション結果は実際の都市流域特有の局所的な浸水現象や河道付近の雨水・下水道管路の排水不良による内水浸水状況を定性的に良く捉えており、本モデルによる定量的な洪水流出解析結果は妥当なものであると考える。



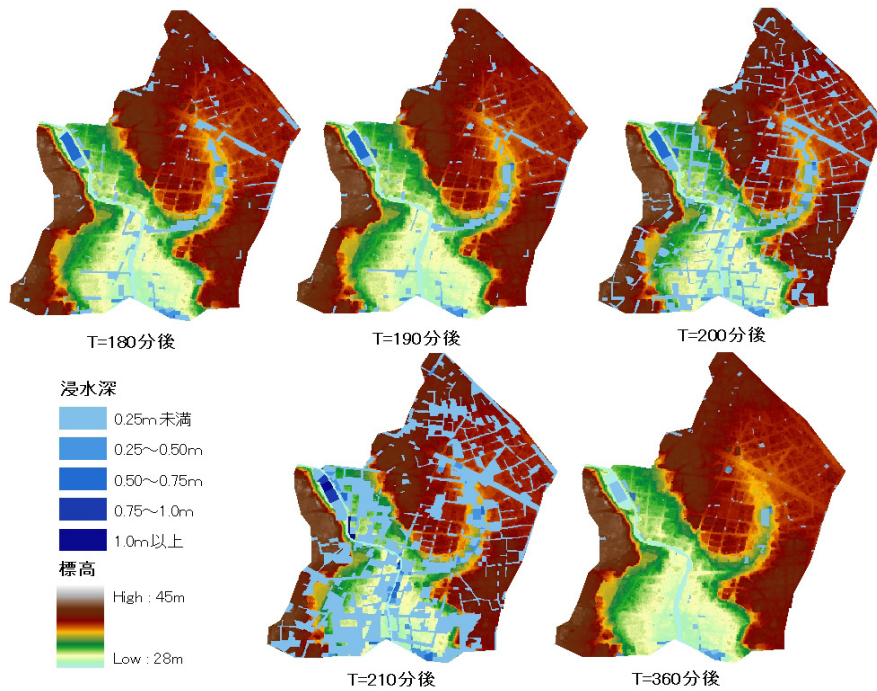


図-13 街区要素・道路要素の浸水深の変化

## 7. む す び

本論文は、都市流域特有の洪水流出現象を再現するために、都市流域の複雑な土地利用地物要素形状を忠実に表現可能な高度な地物データGISを用いて対象都市流域のモデル化を行い、この地物データGISの特性を考慮に入れた地物指向分布型都市洪水流出解析モデルの提案を行ったものである。

まず、比較的容易に入手可能な街区と建物および河道の境界線データを基にポリゴン型データで表される基礎的な地物データGISを準備し、街区内を建物要素のみならず舗装地、林地、グラウンド、間地などの土地利用種別情報を加え、さらに道路や河道を微小要素に分割する高度な地物データGISの構築方法を示した。次いで、高度な地物データGISと雨水・下水道管路データを用いて雨水流出過程に沿ったデータ要素間の接続関係に関する情報を加えることで都市流域のモデル化を行った。

次に、地物データGISを用いて作成した都市流域モデルデータを入力とする直接流出モデル、街区内土地利用地物要素から道路要素への流出モデル、地表面地物要素間の流出モデル、雨水・下水道管路モデルおよび河道モデルを組み合わせることで豪雨の流出経路を忠実に再現し、また、浸水現象も表現可能な地物指向分布型都市洪水流出解析モデルを構築しその計算フローを示した。

最後に、本都市洪水流出解析モデルを、東京都内神田川流域の小流域に適用し、実績降雨および仮想

豪雨を対象に、本モデルの妥当性や特性について評価・検討を行った。その結果、標準的モデルパラメータ値を用いたモデルでも、対象とした実績降雨の第二ピークから減衰期にかけての観測値に対し、水位波形およびピーク水位を概ね再現していることを確認した。また、本対象流域での対象実績降雨に対する流出率は68%であることや河道に接続する雨水・下水道管路から河道への流出推定量などを示した。仮想豪雨を用いたシミュレーションでは、流出率が高くなることを定量的に示すとともに、本モデルにより局所的に生じる雨水・下水道管路の排水不良や河川水位の上昇による内水氾濫現象を定性的に表現できることを確認した。

以上のように、本モデルにより都市流域の複雑な洪水流出過程を適確に捉えることができ、河道流量や浸水状況などを詳細に把握することが可能であると考えられる。また、本洪水流出解析モデルでは、建物、道路、舗装地、林地、緑地、グラウンドおよび間地などの土地利用地物要素を考慮しているため、これらの地物要素に設置予定あるいは設置済の浸透施設や透水性舗装などの雨水流出抑制施設の具体的な流出特性をモデルに組み込むことができる。このため、浸水被害を軽減させるための新たなハード対策の影響評価をきめ細かく行うことが可能であると考えられる。

なお本論文では、対象流域最下流の観測データの制約上モデルの検証は実績降雨の一例となっているが、今後は他流域への適用も含め検証事例を増やし、本モデルが都市域特有の洪水流出現象に対する有効

性を高める必要がある。さらに、本モデルの水理・水文モデルは標準的なものを用いているが、今後より高度な水理・水文モデルを組み込んだ検討も必要であろう。また、水理・水文パラメータの精度良い推定のためには、その推定方法に関する研究の推進および都市流域の流出関連観測網の整備が望まれる。

**謝辞：**本研究を遂行するにあたって科学研究費（一般研究C、代表：河村明、課題番号：18560502）および平成17年度首都大学東京傾斜的研究費の補助を受けました。また、東京都都市計画局には東京都地形図（1/2500）電子データを提供して頂きました。ここに記して深謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 楠田哲也：1999.6.29福岡豪雨，土木学会誌，第84巻，第11号，pp.42-44, 1999.
- 2) 後藤恵之輔：都市水害における地下事故二題，土木学会誌，第85巻，第6号，pp.66-69, 2000.
- 3) 牛山素行：2000年9月東海豪雨とその災害，土木学会誌，第85巻，第11号，pp.60-63, 2000.
- 4) 水文・水資源学会：水文・水資源ハンドブック，朝倉書店，pp.1-8, 1997.
- 5) 市川温，村上将道，立川康人，椎葉充晴：流域地形の新たな数理表現形式に基づく流域流出系シミュレーションシステムの開発，土木学会論文集，No.691/II-57, pp.43-52, 2001.
- 6) Takeuchi, K., Ao, T. and Ishidaira, H.: Introduction of block-wise use of TOPMODEL and Muskingum-Cunge method for the hydro-environmental simulation of a large ungauged basin, *Journal of hydrological Sciences*, Vol.44, No.4, pp.633-646, 1999.
- 7) 朴珍赫，小尻利治，友杉邦雄：環境評価のためのGISベース分布型流出モデルの展開，水文・水資源学会誌，第16巻5号，pp.541-555, 2003.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) HydroWorks Wastewater network simulation and analysis software: Wallingford Software Ltd., Oxfordshire, U.K., 2000.
- 12) Huber, W.C.: EPA Storm Water Management Model - SWMM, *Computer Models of Watershed Hydrology*, Singh, V.P.ed.s., Water Resources Publication, pp.783-708, 1995.
- 13) Danish Hydraulic Institute: MOUSE-Technical Reference and User's Guide, Version3.1, 1992.
- 14) 天口英雄：GISを用いた都市流出解析における地物指向土地利用データモデルの提案，水工学論文集，第49巻，pp.199-204, 2005.
- 15) 天口英雄，河村 明：都市流出モデルに及ぼす土地利用データの影響について，水工学論文集，第50巻，pp.301-306, 2006.
- 16) 安藤義久，高橋 裕，和泉 清，金尾健司：土地利用別の浸透能特性を考慮した都市流域の洪水流出解析，水理講演会論文集，第29巻，pp.49-54, 1985.
- 17) Huber, W.C., Dickinson, R.E.: Storm Water Management Model Version4, User's manual, EPA/600/3-88/001a, Environmental Protection Agency, USA, 1988.
- 18) 水文水資源学会：水文・水資源ハンドブック，朝倉書店，pp.87-90, 1997.
- 19) 川池健司，井上和也，林秀樹，戸田圭一：都市域の氾濫解析モデルの開発，土木学会論文集，No.698/II-58, pp.1-10, 2002.
- 20) 土木学会編：水理公式集，技報堂，pp.180-197, 1971.
- 21) 土木学会編：水理公式集，技報堂，pp.265-266, 1971.
- 22) 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.
- 23) 東京都立大学土木工学教室編：都市の技術，技報堂出版，pp.30-41, 2001.
- 24) 山口高志，松原重昭，山守隆：都市流出調査 - 降雨損失機構の検討-，土木技術資料，Vol.13, No.10, pp.483-487, 1970.
- 25) 藤村和正，安藤義久：表層浸透能の変化を考慮した多摩丘陵都市流域における水循環解析，水工学論文集，第46巻，pp.271-276, 2002.
- 26) 田中修司：下水道管渠学，環境新聞社，pp.29-36, 2001.

(2006. 12. 4 受付)

## PHYSICALLY BASED DISTRIBUTED FLOOD RUNOFF MODEL FOR AN URBAN CATCHMENT USING POLYGON FEATURE GIS DATA

Hideo AMAGUCHI, Akira KAWAMURA and Tadakatsu TAKASAKI

Physically based distributed urban flood runoff model using polygon feature GIS data 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. The distributed runoff model is applied to a flood-prone urban catchment in Tokyo with actual and hypothetical rainfall events. It is found that the model can simulate both the physical rainfall-runoff process as well as inundation in the basin in a satisfactory way.