

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

A PROPOSAL OF GIS BASED FEATURE ORIENTATED LAND USE DATA MODEL FOR URBAN RUNOFF ANALYSIS

天口 英雄
Hideo Amaguchi

正会員 学士 東京都立大学 助手 工学研究科土木工学専攻 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

Recently, Geographic information data such as Digital Elevation Model is available in runoff analysis because of improvement of GIS(Geographic information system). In particular, various hydrological models have made a proposal based on DEM. However, there has been least study on land use model that is the origin of flow generation. Subcatchments in slope element runoff model or grids in distributed hydrological model are subdivided into impervious area and pervious area from land-use data. Effective Precipitation is calculated based on them as the specific value in the region. Using the land-use data, there is a problem that the position of runoff control equipment doesn't reflect the runoff model in detail. It is unable to set Equipment characteristic value (discharge point, equipment scale) , because land-use model and equipment dose not have one to one correspondence. In this study, hydrological model using polygon format data to express land-use is proposed, and applied to Kotta River basin. The simulated hydrograph show relatively good agreement with the observation.

Key Words : GIS, RunOff Analysis, polygon, urbanized watershed, land use, Kotta River

1. はじめに

水は地球上に偏在し地域の特性に応じて循環しているため、水問題を議論するためには地形、地質、気候、植生、土壌、土地被覆等の地域特性の理解が何よりも重要であり、地域性を上手に取り入れることによって水資源の開発や適切な管理が可能となる。そのためには空間と時間の枠組みを構築した上で、その中に地域の問題を位置付ける必要がある。リモートセンシング、及び地理情報システム (GIS: Geographical Information System) による情報集積は、水問題が顕在化すると考えられる 21 世紀に求められている重要な手段の中の 1 つである。

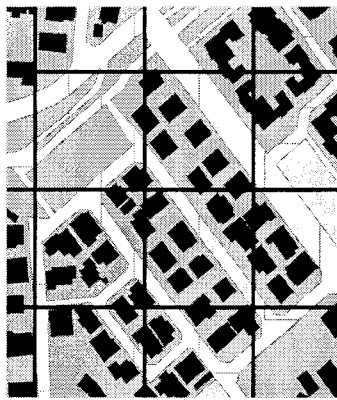
GIS は 1980 年代後半から急速に発展してきた技術で、水文流出解析において膨大で複雑な地理情報の入力、管理を簡素化することが可能となる。今後、空間構成データの解析や計算ツールとしてその果たす役割は益々大きくなる。

また、空間情報データ整備に関しても国土数値情報¹⁾、数値地図、細密数値情報などが利用可能となり、雨水の流出過程を表現するために必要となる流域地形の解析や数値地形モデル (Digital Elevation Model, DEM) の取り扱いが容易に行われるようになった。

このような DEM を用いた流域地形の表現としてグリッドモデル、等高線モデル、三角形網モデルが定着し、これらの地形モデルと流出系のモデル化についての優劣について研究が行われた²⁾。この中で流出解析に最も良く利用される手法として、グリッド型 DEM をベースとした流れのモデル構築があげられる。この理由は、国土数値情報として入手可能なデータが存在し、なおかつデータ処理が容易で流れのモデルも流下方向のみの 1 次元として考えることができるために、モデル構造が単純になるからである。雨水流出に適用する手法としては、流域地形をグリッド型 DEM としてモデル化し、雨水は周囲グリッド 8 方向もしくは 4 方向のうち最急勾配方向に流下することと仮定し、流域全体の雨水流下経路を河道網として決定し、流出追跡計算を行うものである。

このような DEM モデル利用した流出系のモデルは自然的要因としての地形が卓越する山地流域において適用される³⁾。都市河川流域を対象とした水循環モデル⁴⁾の場合には自然的要因だけでなく、下水道や側溝、道路などの人工的要因が組込まれている。

都市流域の下水道に注目した流出モデルとして、都市下水道流域に 10 m のメッシュをかけ、土地利用として細密数値情報等を利用して、各メッシュに降った雨は最寄のマンホールへ集まるとする取り扱い



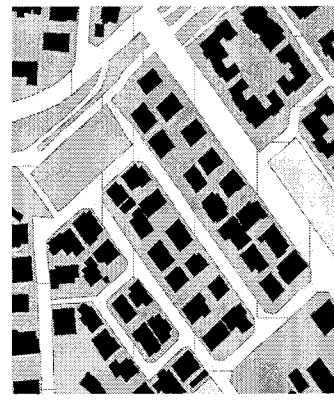
グリッド内の情報は主に面積率（浸透域・不浸透域等）としてデータ化される

図-1 グリッドモデルの土地利用表現

いを提示したメッシュ法⁹⁾や、流域をいくつかのサブキャッチメントとして分割し、この表面流をマンホールへの流入量として、さらに管渠に流入した雨水が下水管渠網を流下して放水口までの流れを追跡する SWMM¹⁰⁾ 等がある。

DEM を用いて構築した都市流域を対象にした分布型水循環モデルや都市下水道流域に着目した流出解析モデルのいずれの場合においても、有効雨量を算出する際には、土地利用データが基礎となる。土地利用データは主に流出場において浸透域・不浸透域を区別するために利用され、そのソースデータとして、ラスタ型データの細密数値情報を用いる場合や、設置した流域分割内の土地利用を地形図や航空写真を判読して利用する場合⁹⁾がある。両者共に、流出が発生する場としての表面流出モデルに対応する領域内の特性値を表すものとして、浸透域・不浸透域面積データが作成される。都市流域では、このような領域内の代表値としてデータを表しているの、流域内に設置された流出抑制施設等を1つ1つ流出モデルに反映できない。つまり、配置された施設と土地利用が1対1に対応しないために、施設固有の特性値等（施設規模や放流先等）を設定することはできないという問題がある。流域管理という視点から見ると、流出抑制施設の整理する手法についても施設と対象とするデータとの関連性がとれた方が望ましいが、ラスタ型データでは適切に表現できない。従って、このようなデータ構造を利用可能にするためには2次元空間の領域を表現し、GIS 機能を利用して属性を割り当てできるポリゴン形式のデータが必要となる。本研究で提案する手法を用いれば、家屋ポリゴンに対して設置されている施設の諸元との対応関係を作成し、流出計算に反映することが可能だと考えられる。

これまで、都市流域の流出解析においてこのような問題点は明確にされることはなかった。その理由として、都市流域において入手できるデータソースとしてのポリゴンデータ整備が行われている流域が



土地利用要素をポリゴン型データとしてそのままモデル化する。GIS 機能により様々な属性を追加可能

図-2 ポリゴン形式の土地利用表現

少ないことや、データ処理が困難であったことがあげられる。さらに流出解析においては土地利用のデータ構造よりはむしろ対象領域における有効雨量算定に重点が置かれていたために、データ処理が困難な個別の家屋等をポリゴン形式データとして直接モデルに組み込む必要は無いことが多かったからである。

次に、都市流域を対象に河川までの排水過程について説明を行う。降水時において流出場が発生する表面流は側溝や雨水桝を通して排水路システムに流入する。そのため、DEM 等を用いて流れの方向を決定するよりも実際に整備されている雨水管路（下水道）によって河川に排水されることは明らかである。雨水管による流出を詳細に見ると、これらの排水路の流出は対象が管路であれば流量の大小により開水路流や満管流れとなり時には流入孔からの溢水などが発生する。本研究では雨水を対象とした下水道が設置された流域を対象とするために、DEM による流出系のモデル化を用いずに雨水管による排水路システムを利用するが、土地利用のデータ構造に焦点を当てるためにモデル構築が容易な開水路流のみを取り扱ったモデルとした。

本研究では図-1に示すような、これまで利用されてきた土地利用の表現形式であるラスタ型、あるいは領域内の特性値としての取り扱いを図-2に示すようなポリゴン型データとして取り扱う新しい手法について検討を行うものであるが、流出抑制施設等の詳細な諸元についての属性情報については本研究では取り扱わず、モデル構築の手法と構築したモデルを利用した洪水流出の再現計算について示した。

2. 地物指向土地利用データモデルの提案

本節では土地利用をポリゴン形式で表現した新しい形式の流出モデルについて説明を行う。

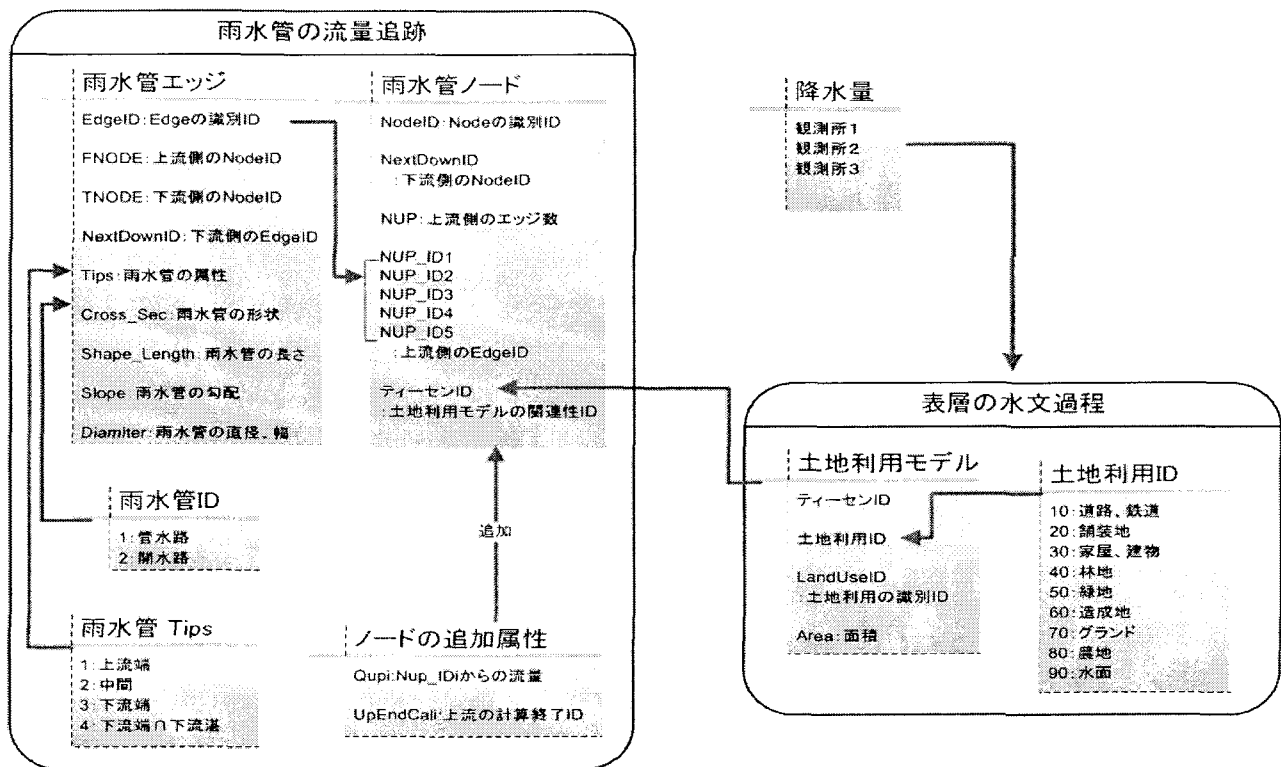


図-3 流出モデルに利用されるデータの関係

(1) 流域（土地利用）とポリゴン・クラスの関係

降水が地表に到達した時に、水が表層でどのような反応をするかを決定する土地利用形態は、ポリゴン・クラスとして表現される。GISを用いることにより、ポリゴン形式のクラスとしてデータを入力すると、属性として面積、周囲長、そしてデータ形式を表す情報が自動的に与えられる。したがって、ある土地利用の形状を入力すると、ポリゴン・クラスとしての機能に加え、その土地利用特有の情報（土壌の型、降水量、地形勾配など）を追加することができる。ここで、ポリゴン・クラスとは、境界線で区切られた領域として定義されるもので、例として敷地境界や建物の形状が挙げられる。道路のような連続物は、距離に応じて区分することにより対処した。本研究では、図-3の土地利用IDに示すように9種類の土地利用区分を用いた。また、流域抑制施設等の諸元については土地利用モデルに必要な項目を追加することで表現可能となる。

(2) 排水路システムとライン・クラスの関係

ポリゴン・クラスと同様に、ライン・クラスとしてデータを入力すると、そのラインには長さ、ラインクラスを表す属性が自動的に与えられる。さらに、ラインの接合点となるノードとラインとして与えられていたデータをネットワークに変換することによって、流下方向と合流という特性を与え、排水路（河川）システムとして機能させることが可

能となる。図-3に本研究で与えたポリゴン・クラスとライン・クラスに含まれる属性を示す。

(3) 地図データベースと流出モデルとの関係

ポリゴン・クラスで構成される流域（土地利用）モデルとライン・クラスから構成される排水路（河川・下水管）ネットワークモデルを構築し、このデータモデルを流出モデルとして利用するためには、それらデータ間の関係付けを行う必要がある。

流域を表現する土地利用モデルは、降水を流出量に変換する役割も持つ。表層からの流出は、この土地利用モデルから雨水管ノードに引き渡すために共通のIDを用いて関連付けが行われている。流出量が引き渡される雨水管ノードは、本研究で対象とした乞田川流域では、下水管に接続されている末端のマンホール（道路の流入口、家屋、団地の接続地点）に設定した。

雨水管ノードに受け渡された水文量は、雨水管エッジを上流から下流に向かって追跡する。ここで、ある地点の雨水管ノードを解析するには、既にその上流側からの流入量が追跡されている必要がある。そこで、この情報を識別するために、雨水管ノードには上流からの流入雨水管エッジ数とそれらを識別するためのID追加した。追跡された合流量を雨水管エッジに保存し、この情報を利用して下流側への流出量を計算する。これらの情報を用いることにより、対象雨水管の流量追跡の終了が識別可能となるので、雨水管から河道へと流量が引き渡される。流

出モデルでは、以上の流れを繰り返し行うことにより、水文量の追跡を行う。

3. データの作成方法について

ここでは、乞田川流域を対象に前項において説明した土地利用モデル、排水路システム及び両者の関連性の構築手順について、実流域に適用した例を説明する。

(1) 対象流域の概要

対象とする流域は標高 60 ～ 170m の丘陵地で、流域面積は約 14.51km² である（図-4）。乞田川流域では分流式の雨水管が流域全体的に配置されているために、本研究で想定する下水道（雨水管）が強く流出特性に影響を与える都市流域としての特徴を持っていると考えられる。

(2) 土地利用モデル

今回作成した土地利用モデルは土地利用区分を 1 つ 1 つ流出過程に組み込む事により、流域内の土地利用状況による表面流出特性を統合的に考慮することができる。ここではその土地利用モデルの機構とその構築手順について述べる。

土地利用モデルのデータ作成には、東京都地形図（縮尺 1/2500）の電子ファイルを用いた。土地利用モデルの構築において使用したレイヤーは、道路と建造物である。これを形状編集してデータベース内に入力し、土地利用別ポリゴンを作成した。また形状編集する際には航空写真と東京都地形図（縮尺 1/2500）を用いた。作成した一部を図-5 に示す。

(3) 排水路システム

対象とする排水路システムは、乞田川流域に設置された雨水管及び河川である。排水路を表現するネットワークモデルはエッジというライン・クラスとノードというポイント・クラスで構成され、これらのデータは GIS を用いてネットワーク化（例えばノードでは、そのノードに接続するエッジの情報を付加し、エッジにはそれに接続するノードの情報が付加される。）を行った。

a) 基盤データの作成

下水道配管図のデータが GIS として整備されている場合には、そのデータを直接利用することが可能である。しかし、乞田川流域では GIS として整備された下水管配管図の電子ファイルがないために、下水管配管図（1/500）をスキャナーで PC に取り込んでこれを基盤データとして用いた。流出モデルに最低限必要な物理量として、雨水管の直径、勾配等は下水管配管図に記載されている

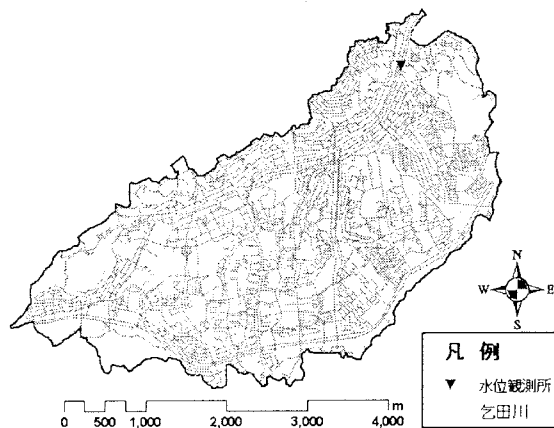


図-4 乞田川流域の概要

ので、それらを参照してラインに属性を与えた。

b) 排水路システムの構築

排水路システムでは、雨水管流の結合部についての情報が重要である。具体的には、ある雨水管ノード上流側に接続している雨水管エッジの本数とその識別 ID や、その下流に接続している雨水管エッジについての情報を必要とする。これらの情報を構築するために、GIS のネットワーク機能を用いて作成した基盤データ（ライン）から雨水管エッジ及び雨水管ノードをネットワーク化した。このネットワーク化により、雨水管エッジと雨水管ノードは互いに接続性が維持されるので、接続状況の情報を流出計算に利用できるような形式に変換した。雨水管の流量追跡の項目に相当する雨水管エッジ・雨水管ノードに対して、図-3 に示す属性を入力した。

乞田川を対象に構築した排水路システムは、表-2 に示すようにエッジ数 36858 個、ノード数 36715 個（その内、末端ノード数 16770）となった。

(4) 土地利用モデルと排水システムの関連性

降雨は浸透域では土中に浸透し、浸透能を超える降雨が生じると浸透しなくなり地表流として流出する。不浸透域では窪地貯留や樹冠遮断等を差し引いた量が流出しており、その道筋は多様で且つ複雑である。しかし、直接流出に限ってみれば、雨水管が整備された都市流域では、雨水の流出経路は雨水管等に強く支配される特徴がある。

a) 関連性の構築方法

図-6 に示すように、土地利用モデルと排水路システムの関連性を構築する場合に重要となるのは、ポリゴン形式で表現される土地利用モデルで生じる地表面流がどの雨水管に流入するかという点である。忠実に流出過程を追跡するならば地表の標高データをもとに 1 つの雨水管流入口に流入する区域を設定し、その区域内の地物を判別したり、実際の家屋等の雨水管との接続状況を調査する必要がある。しかし、家屋等との接続状況を把握できるような資

料がない為、本研究で対象とした乞田川流域では、雨水管流入孔が平均して 30m 四方に 1 箇所は存在するので、地形特性から雨水管流入孔を決定するのではなく、土地利用モデルの要素重心と雨水管流入孔の位置関係から決定した。

b) 関連性の構築

本研究では地表面流の雨水管への流入は雨水管に接続されている末端のマンホールとして考え、これを表層流出の流入点とした。この末端マンホールの位置をもとにティーセン分割図（ボロノイ図）を作成し、その対象領域に含まれる土地利用要素を流出想定区域として扱った（図-7）。作成したボロノイ図の各区域にティーセン ID を与え、この ID を領域内のマンホールに割り当てたと同時に、土地利用モデルの重心点として表されたポイントに対しても同じ ID を与えた。このように、両者共通の ID を与えることで土地利用モデルから排水路システムへの水文量の受け渡しを可能とした。

5. 洪水解析への適用

構築したデータモデルを用いて、表層モデル及び下水道・河道流出において図-8 に示す基礎式を用いて洪水流出解析を行った。表層モデルのパラメータ値は既存の文献⁸⁾⁹⁾を参考に、土地利用の相違を考慮して決定した。下水道と河道の粗度係数はそれぞれ 0.015, 0.025 を用い、流域の浸透域・不浸透域の等価粗度係数はそれぞれ 0.2, 0.1 を用いた。不浸透域は完全に道路・屋根・駐車場等を対象にしている為に浸透域よりも小さく設定した。また、表面流出に用いた形状は対象土地利用面積から正方形として与え、斜面勾配は流域の平均勾配を利用した。洪水解析に用いた水文量は 1 分間隔データを対象とし、降水量は流域周辺の 5 箇所を用いてティーセン分割により各土地利用モデルに設定し、流量は乞田川の車橋地点にある水位観測所の水位データから変換した。対象とした降雨は 2002 年 7 月 10 日とし、総雨量 118mm・ピーク雨量 72mm/hr、ピーク流量 91m³/s である。

以上の条件を用いて再現計算を行った解析結果の一例を図-9 に示す。計算値は実測の洪水波形やピーク流量を良く再現していることが読み取れる。しかし、ハイドログラフの立ち上がり部分やピーク時の時間を詳しく見ると、観測値に比べ計算値が 5 分程度速く流出する結果となった。これは、設定した粗度（等価）係数はピーク流量を再現するように与えた為で、より再現性を高める為には、入力する水文特性や水理特性を表現するパラメータを土地利用や水路等で同一の値を利用せず、より実測に即した値を利用することや、水路の水文量追跡

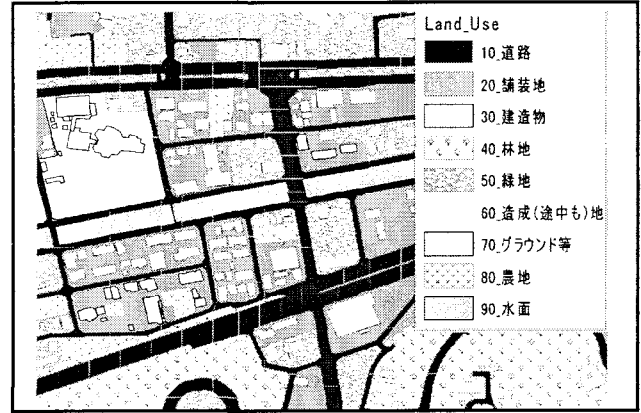


図-5 土地利用モデルの拡大図

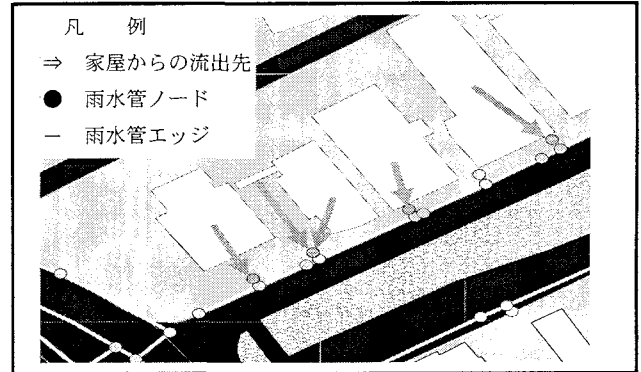


図-6 家屋の流出先

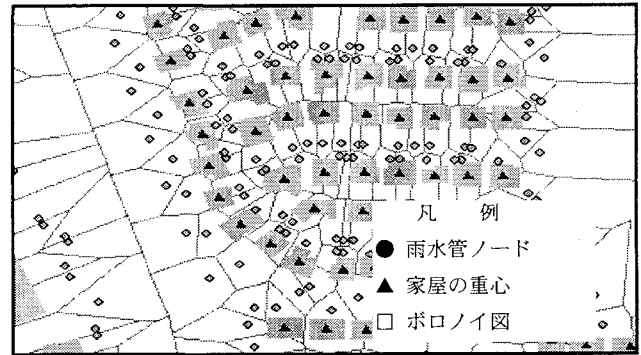


図-7 雨水管ノード(最上流点)を用いて作成したボロノイ図と土地利用ポイント(家屋の例)

表-1 作成した土地利用モデル要素数

土地利用	ID	要素数
道路等	10	4828
舗装地	20	782
建築物	30	13349
林地	40	87
緑地	50	1664
造成地	60	45
グラウンド	70	114
農地	80	216
水面	90	23
合計		21108

表-2 排水路システムの要素数

雨水管の種類	要素数
エッジ数	36858
全ノード数	36715
上流ノード数	16770

表層モデル

浸透域: Horton 式 ($f_i(t) = f_{ci} + (f_{oi} - f_{ci})e^{-\alpha t}$) を用いて表面流出量を評価

表面流 = $L/N \cdot (h - Loss)^{5/3} \cdot i^{1/2}$

中間流 = $A_w \cdot \beta \cdot (h_s - S_{mx})$

河道モデル

下水道及び河道に適用

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

$$A = kQ^p$$

$f_i(t)$: 時間における浸透能	L : 斜面長
f_{ci} : 終期浸透能	N : 等価粗度係数
f_{oi} : 初期浸透能	h : 水深
α : 減衰係数	$Loss$: 初期損失
t : 降雨開始からの時間	i : 斜面勾配
A_w : 小流域面積	Q : 河道流量
β : 定数	A : 流水断面積
h_s : 土壌水分量	k, p : 定数
S_{mx} : 飽和貯留高	

図-8 流出モデルに用いた基礎式

に Dynamic Wave 法等を利用する方法が考えられる。

6. まとめ

本研究は、土地利用モデルにポリゴン型データを用いることで流域内の土地利用毎に対して詳細な属性を割り当てる事が可能な、地物指向土地利用データモデルを提案した。さらに、流出モデル構築に必要なポリゴン型土地利用モデル、排水路ネットワーク及び、両者の関連性を構築に必要なデータ構造について説明を行った。提案した流出モデルを乞田川流域に適用し、土地利用モデル・排水路ネットワークモデルの構築手順と両者の関連性の作成を行った。構築したデータモデルを利用して洪水流出解析を行ったところ、良好な再現性を得ることができた。今後はさらに、都市域を対象としたグリッド型データモデルとの比較、長期流出モデルへの適用、洪水氾濫モデルへの適用、そして流出抑制施設の効果の検討していく予定である。

謝辞: 本研究で利用した東京都地形図 (1/2500) 電子データは、東京都都市計画局より研究目的配布されたものである。本研究は、平成 15 年度東京都立大学総長特別研究費 (若手奨励研究) の補助を受けました。研究当時東京都立大学工学部土木工学科 4 年生であった高原望人君にはデータベースの作成で尽力してもらいました。ここに記して感謝の意を表します。

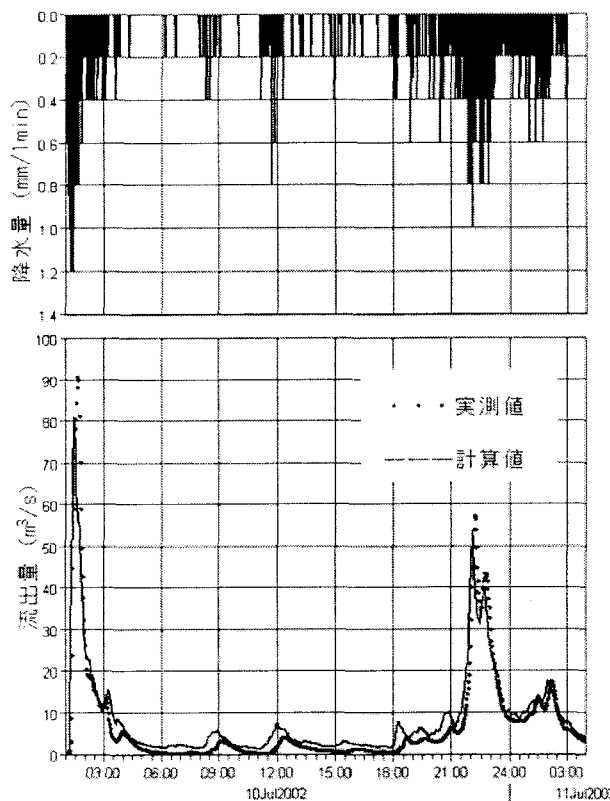


図-9 洪水解析ハイドログラフ

参考文献

- 1) 建設省国土地理院: 数値地図ユーザズガイド, (財) 日本地図センター地図研究所 研究第 1 部, 1992.
- 2) 立川康人, 椎葉充晴, 高棹琢馬: 三角形要素網による流域地形の数値表現に関する研究, 土木学会論文集, 第 558 号, II -38, pp. 45-60, 1997.
- 3) 立川康人, 原口 明, 椎葉充晴, 高棹琢馬: 流域地形の三角形要素網表現に基づく分布型降雨流出モデルの開発, 土木学会論文集, 第 565 号, II -39, pp. 1-10, 1998.
- 4) 中村茂, 中嶋規行, 忌部正博, Shikantha Herath: グリッド型水循環系モデルの開発—海老川流域を対象として—, 水工学論文集, 第 45 巻, pp103-108, 2001.
- 5) 市川 新, 榊原 隆: 都市域における新しい雨水流出シミュレーションモデルの提案—メッシュ法—, 水利科学 28-1, 1984.
- 6) Hurber, W. C. and Dickinson, R. E.: Storm Water Management Model, Version 4, Part A; User's Manual, U. S. EPA/600/3-88/001a, 1998.
- 7) 花木俊幸, Agus SUHARYANTO, 杉尾 哲: 都市河川流域における雨水浸透施設による洪水流出制御の検討, 水工学論文集, 第 43 巻, pp37-42, 1999.
- 8) 藤村和正, 安藤義久: 都市流域における雨水浸透施設による流出抑制効果に関するシミュレーション, 水文・水資源学会誌 Vol11, No4, pp360-370 1998.
- 9) 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, pp271-276, 2002.

(2004. 9. 30 受付)