

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

EFFECT OF LAND USE DATA ON RUNOFF RESPONSE FOR AN URBAN RUNOFF MODEL

天口 英雄¹・河村 明²
Hideo Amaguchi¹・Akira Kawamura²

¹正会員 首都大学東京助手 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

²正会員 首都大学東京教授 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

Distributed runoff model have been becoming useful for describing urban runoff processes. Such kind of model reflects hydrological elements such as land use and sewerage system. In particular, hydrological elements in urban area are very complicated and affect results of runoff analysis. The purpose of this study is to investigate the effect of hydrologic elements such as land use form of element on runoff characteristics. Runoff simulations using two type of different form such as grid format and polygon format of land use model in the Kotta River were carried out. Then hydrograph of these runoffs were discussed. The result is as follows; 1) the grid data of 100m or less land use is necessary in urban area, 2) the runoff characteristics is determined by distribution of the land use area in polygon form.

Key Words: GIS, Runoff Analysis, polygon, urbanized watershed, land use, Kotta river

1. はじめに

近年, 都市流域では局所的集中豪雨による浸水被害が多く, 到達時間が数十分という都市河川の流出特性を精度良く再現すると共に, 治水施設や流域内の流出抑制施設等の効果を評価可能な流出モデルの必要性が増している. このような都市河川流域を対象とした流出予測モデルを構築するには多くのモデルとパラメータならびにデータが必要となる. これらについて完全なものが存在しないため, 流出解析結果の不確実性は適用するモデルだけでなく利用可能なデータの情報量にも依存するものと考えられる.

都市域の流出システムは家屋, 建築物, 道路, 駐車場, 芝地, 裸地などの多くの人工構造物からなる流出面と, これらからの雨水を受ける側溝, 小排水路, そしてこれらに続く雨水管路網などの排水路システムにより構成され, 流出面の不均一性などから複雑なものとなっている¹⁾. これまで, 都市流域の洪水流出のピーク流量や総流出量は不浸透域面積率に大きく依存することは多くの研究により示されているが, この流出面について研究された例は決して多くない. 都市域の流出解析において利用される流出面の特性, すなわち土地利用データ(浸透, 不浸透面積データ)は, 計算精度, 計算コストなど利用目的によりさまざまな手法が用いられている. 既往の研究では, 家屋や道路等の不

浸透域面を航空写真や1/2500地形図からデータ化して流出解析に用いるが, その対象面積は都市小試験流域(1km²以下)が多く²⁾³⁾, 中小河川流域へ適用する例は極めて少ない. また, 近年研究開発された都市流域を対象とした分布型流出モデルにおいて利用される土地利用の多くは「細密数値情報」を利用し, サンプル領域から得られる地目毎の不浸透面積率を設定⁴⁾している. この手法はデータ処理コストが低いために大流域への適用について利点はあるが, 都市部中小河川流域の複雑な土地利用形態に対して的確な不浸透面積を反映しているとはいえないと考えられる.

そこで本研究では, 洪水流出プロセスに用いる土地利用データの誤差をできる限り小さくするために, 家屋や道路などの形状から直接取得する手法を用いる. 著者らは, 流域モデリングに必要な土地利用の表現手法として, 地物指向土地利用モデルを提案している⁵⁾. この手法は豊國¹⁾が都市流域モデリングの際に流出面として示した工種そのものを流域モデリングに適用しようとするものである. つまり, 流出面を家屋, 建築物, 道路, 駐車場, 畑地などの地上の地物を個別にポリゴン(多角形)形式として取り扱う手法を提案し, これを「地物指向土地利用データモデル」とした. この地物指向土地利用データモデルを用いた流出モデルでは, 各流出面において発生した表面流は雨水管路を流出経路として流量追跡する手法について示した⁵⁾. 雨

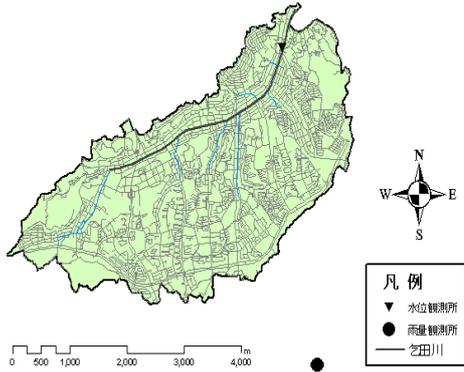


図-1 乞田川流域の概要

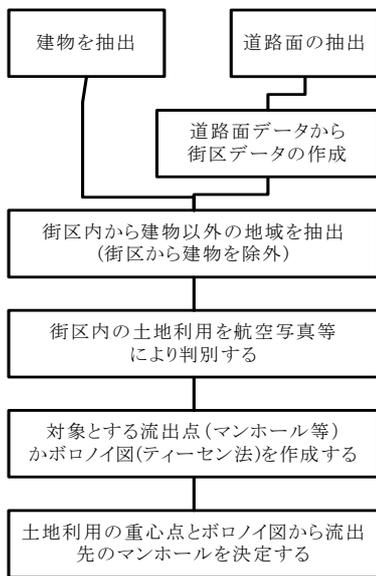


図-2 地物指向土地利用データの作成手順

水管路内と河道内の流れは、それらの物理特性から流出量を推定することが可能である。しかし、地物指向土地利用データとグリッド形式の土地利用データを同じ流出モデルに適用することにより、その形状による違いが流出特性に与える影響を明らかにする必要がある。

本研究の目的は流出面の形状が流出に与える影響を比較・分析することである。流出面の形状は①地物指向土地利用データモデルと②地物指向土地利用データモデルを一定間隔でサンプリングして作成した数種類のグリッド型土地利用を対象とし、算出された流出の特徴を比較・分析する。流出解析には同一の雨水流出モデルを利用し、雨水管路から河川までの流出経路は同一条件として与えた。また、対象流域として図-1に示す多摩川支川の乞田川 (13.1km²) に適用を行なう。

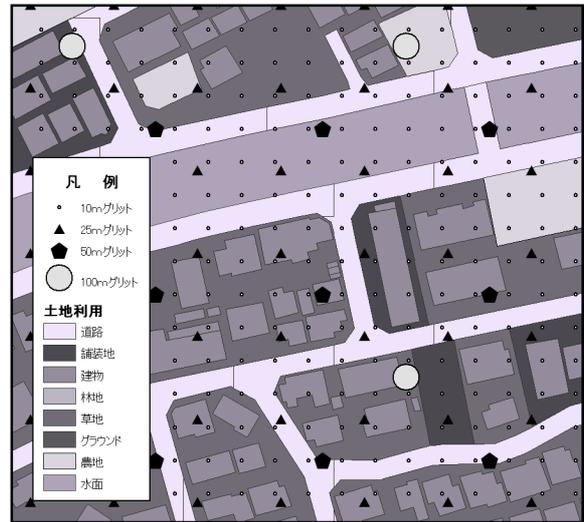


図-3 地物指向土地利用データとグリッドデータのサンプリング方法

2. 地物指向土地利用データから作成したグリッド型土地利用の精度について

本章では乞田川流域を対象に、地物土地利用データの作成方法とその特徴についてはじめに述べる。また、地物土地利用データからグリッドデータを作成した場合、サンプリング間隔の大きさにより土地利用の特性がどの程度維持されるかの検討を行なった。

(1) 地物指向土地利用データモデルの概要

地物指向土地利用データの基盤となる情報は縮尺1/2500等の国土基盤図から得られる家屋、道路の形状データから作成したものであり、GISを用いる事により多角形データとしてその位置情報と属性を持った個別のデータとして利用可能である。地物指向データモデルの作成手順について図-2に示す。家屋の形状データを1/2500地形図より取得は非常に手間のかかる作業であるが、自治体によってはこれらのデータをデジタルデータとして所有している場合もある。本研究では、東京都土地計画局が所有するデジタルデータを用い、街区内の土地利用は航空写真により判別した。作成した土地利用図の一例を図-3に示す。本データモデルの特徴として、人工的に建造された建物や道路などの形状を精度良くデータ化が可能であることや、その人工物に取り付けられた流出抑制施設等もGISを用いることでその施設の諸元についてもデータベース化が可能である。また、地物指向土地利用データモデルを雨水流出モデルに適用する場合には、後述するように、都市流域の流出特性に強く影響する下水道 (雨水管渠) の水路網をできる限り取込むことが可能なモデルを想定している。

(2) 空間解像度の違いによる土地利用データの特徴

地物指向土地利用データをグリッドデータとして利用する場合を想定し、図-3に示すように一定間隔(10m, 25m, 50m, 100m, 250m)でサンプリングした点を対象グリッド上での土地利用として作成した。表-1は作成されたグリッドデータと地物指向土地利用データの誤差を示し、表-2は各土地利用の全流域面積に対する割合を示した。

表-1から、道路等の連続物や家屋といった土地利用はサンプリング間隔が大きくなるにつれて変換後の面積が減少傾向するが、林地や草地など比較的大きな面積を有する土地利用は増加傾向となる。この間隔を100m以下とすれば、各土地利用の変化の割合は±1%以下であり、250mの間隔でも全流域面積に対する割合の変化は±3%以下であることが分かった。

3. 土地利用の影響評価に用いる雨水流出モデル

本研究で使用する流出モデルは地物指向土地利用データモデルを利用して有効雨量を算定し、雨水管路や河川などの物理量を用いてKimematic Wave法により流量追跡を行なうものであり、土地利用や排水路の条件を変更することで同様の再現が期待できる。ここで、流出面の流出地点の決定手法は図-4に示すように行なう。

(1) 有効降雨モデル

有効降雨の算定には、都市域を不浸透域と浸透域に分け、さらに浸透域を土地利用別に分けて浸透能特性を考慮するモデル⁶⁾を用いる。

a) 不浸透域

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の吸収や窪地貯留などの損失を考慮し、次式によって有効雨量を算定する。

$$Re_{imp}(t) = \begin{cases} 0 & (\sum R(t) \leq L_{imp}) \\ R(t) & (\sum R(t) > L_{imp}) \end{cases} \quad (1)$$

ここに、 $R(t)$:降雨(mm)、 $Re_{imp}(t)$:不浸透域の有効降雨(mm)、 L_{imp} :不浸透域の初期損失(mm)である。

不浸透域の初期損失量 L_{imp} の値について山口⁷⁾らは、谷端田川、桃園川、豊橋、名古屋の4都市流域の調査で2mmという結果を得ており、藤村ら⁸⁾は多摩ニュータウン地域で2mmの値を用いて洪水流出解析を行なっており、本研究でも2mmの値を用いる。

b) 浸透域

浸透域では、土地利用毎に初期損失と浸透能を雨水損失とみなして有効雨量を算定する。浸透能は次式⁹⁾

表-1 グリッドデータの土地利用面積誤差

	10m	25m	50m	100m	250m
道路	0.2%	0.5%	7.8%	-4.1%	-11.1%
舗装地	0.1%	1.7%	-5.4%	-9.6%	19.2%
建物	1.0%	1.6%	-2.2%	9.6%	-16.5%
林地	1.5%	1.1%	-0.5%	0.7%	16.5%
草地	1.6%	0.5%	1.8%	5.5%	5.2%
造成地	6.9%	8.8%	1.7%	13.5%	18.2%
グラウンド	-0.1%	2.1%	-1.8%	-5.4%	-28.3%
畑地	0.9%	-4.6%	1.3%	-6.0%	-9.6%
河川	10.6%	12.4%	7.8%	10.9%	54.0%
全体	1.1%	1.1%	1.1%	1.4%	1.0%

表-2 各土地利用の全流域面積に対する割合

地物指向型	10m	25m	50m	100m	250m	
道路	18.6%	18.4%	18.5%	19.8%	17.6%	16.4%
舗装地	10.7%	10.6%	10.8%	10.0%	9.5%	12.6%
建物	14.1%	14.1%	14.2%	13.7%	15.3%	11.7%
林地	16.2%	16.3%	16.2%	16.0%	16.1%	18.7%
草地	31.9%	32.0%	31.7%	32.1%	33.2%	33.2%
造成地	1.6%	1.7%	1.7%	1.6%	1.8%	1.9%
グラウンド	5.3%	5.2%	5.3%	5.1%	4.9%	3.7%
畑地	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	0.9%
河川	0.6%	0.7%	0.7%	0.7%	0.7%	0.9%

表-3 浸透域の初期浸透能と終期浸透能

	(mm/hr)				
	林	緑地	造成地	グラウンド	農地
初期浸透能	150	30	10	10	150
終期浸透能	100	20	5	7	100

に示す修正Hortonモデルにより計算される。

$$F_l(t) = \int_0^t f_l(t) dt = f_{c_l} t + \frac{(f_{o_l} - f_{c_l})}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t}) \quad (2)$$

ここで、 $F_l(t)$:時刻 t における累加浸透量(mm)、 $f_l(t)$:時刻 t の浸透能(mm/hr)、 f_{c_l} :終期浸透能(mm/hr)、 f_{o_l} :初期浸透能(mm/hr)、 α :減衰係数(hr^{-1})、 t :浸透開始からの時間(hr)、添え字 l は土地利用の種別である。

降雨強度の変化を浸透能に反映させるため、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浸透させ、逆の場合には全ての降雨が浸透する。

本研究で用いた初期浸透能、終期浸透能は既往の研究⁸⁾を参考に設定した(表-3)。また、減衰係数 α は標準値⁹⁾として $4hr^{-1}$ を用いた。

(2) 雨水流出計算

雨水流出計算は地物指向土地利用モデルを対象に斜面流計算を行ない、下水道・河道計算へと流量追跡を行なう。

a) 土地利用要素の表面流出計算

地表面の雨水流出計算手法には、時間・面積法と非線形貯留法がある。本モデルでは地表面流を求める際に勾配が必要となるが、物理過程による流出現象を再

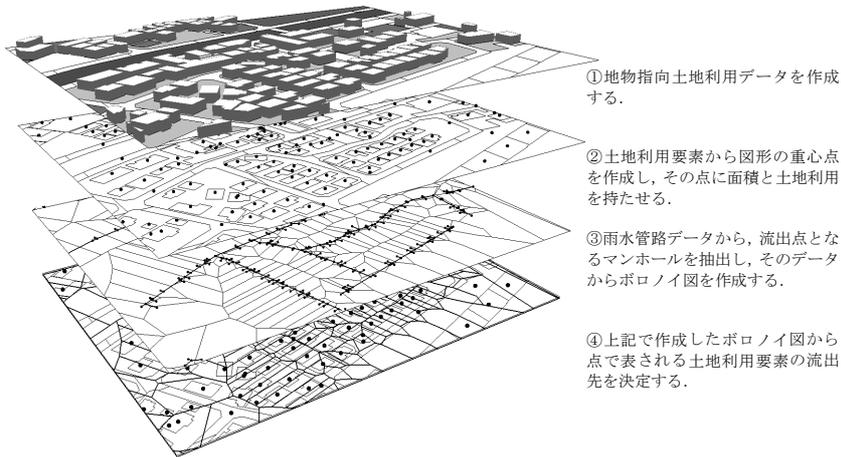


図-4 地物指向土地利用データから流出地点の決定方法

現できる点を考慮し非線形貯留法を適用する。

非線形貯留法はKinematic Wave式を適用し、以下にその運動方程式と連続式を示す。

$$q = \frac{1}{N} h^{\frac{5}{3}} s^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r \quad (4)$$

ここで、 q : 斜面単位流量(m^2/s)、 N : 等価粗度係数、 h : 斜面流の水深(m)、 s : 斜面勾配(m/m)、 r : 有効雨量強度(mm/s)、 t : 時間(s)、 x : 距離(m)である。式(3)及び式(4)の数値解析は差分法を用いて行ない、時間に関する項は前方差分、距離に関する項は後方差分とした。

Kinematic Wave法を地表面流に適用するためには、その斜面形状(斜面長と斜面幅)を設定する必要がある。既往の研究¹⁰⁾では、同一の集水域を土地利用形態毎の小集水域に分割し、各小集水域からの流出量の総和を対象とする集水域全体からの流出量としてモデル化が行なわれる。雨水幹線など比較的大きな流域ではその地形特性を考慮して斜面形状を決定するが、下水道のマンホールを対象とする亀割図を対象とした斜面流では分割流域数も多く、その形状も多様なために地表面の形状を設定する決定的な手法はない。

本検討で利用する地物指向土地利用データにおいても、土地利用要素の流出に関する粗度や勾配などの水理特性についての詳細なデータは得られていない。つまり、建物の土地利用分類の中には屋根の形状が平坦なビルや、傾斜のある住宅の屋根があるが、本研究で利用したデータはそのような分類はされていない。従って、本流出モデルでは各土地利用要素面において生じた有効雨量を、その要素面において適当な等価粗度係数と斜面勾配を与えることとする。この場合、地表面の斜面形状は、対象とする土地利用要素面積の平方根を斜面長及び斜面幅として設定する。

b) 水路(雨水管渠・河道)の流量追跡

本研究で対象とする河川は概ね1/1000より大ききな

河床勾配をもつ流域を対象とするため、雨水管渠・河道流出解析にはKinematic Wave法を用いる。雨水管渠への適用は管直径30cmの枝管までを対象とし、簡便的に矩形開水路と仮定するため、管路から雨水が溢れるような現象は想定していない。以下に運動方程式と連続の式を示す。

$$Q = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial X} = \sum q \quad (6)$$

ここで、 Q : 流量(m^3/s)、 n : 粗度係数、 A : 流水断面積(m^2)、 S : 水路勾配(m/m)、 $\sum q$: 土地利用要素からの合計流量(m^3/s)、 X : 距離(m)である。

本研究では、既往の研究⁶⁾において設定した粗度係数として河道には0.025、下水道には0.015を用いた。水路のモデル化を行なう雨水管渠は、直径30cmなどの枝管を含めて行なう。

4. 土地利用データが流出計算結果に与える影響

(1) 土地利用要素の形状による影響

上述した雨水流出モデルに用いたパラメータは既往の研究⁵⁾により設定された値を用いる。土地利用データが流出計算結果に与える影響を把握するため、河道・下水道データとそのパラメータを同一条件とし、一定間隔でサンプリングした土地利用データを対象に流出計算を行なった。対象降雨は実績降雨(2002年7月10日、降雨時間間隔1min、総雨量118mm)と雨量強度1mm/min(降雨時間180分)とした。表面流出要素の形状は対象土地利用面積を正方形として設定することで斜面長および斜面幅を設定し、斜面勾配は全土地利用要素で1/300を用い、等価粗度係数は浸透域において0.07、不浸透域において0.035を用いた。

図-5は実績降雨を対象に得られたハイドログラフであり、観測値を○で表し、計算値を各種の線で表した。

表-2に示すように、土地利用面積の割合の変化は25m

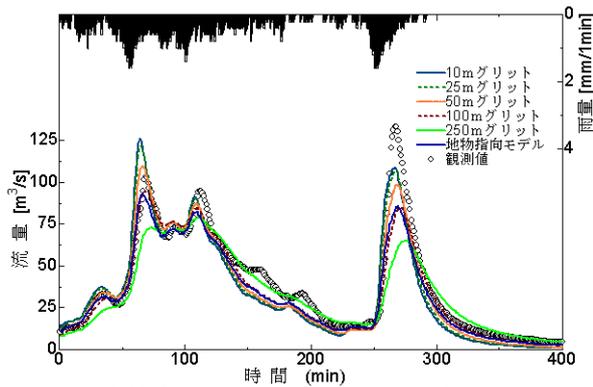


図-5 実績降雨による計算ハイドログラフ

グリッド以下であれば1%未満である。全体的に計算流量のピークは観測流量に比較して速い傾向があるが、グリッド長100m以下と地物指向データによる計算値は概ね観測値を再現している。グリッド間隔が50mよりも大きくなるとピーク流量が低減する。この要因はグリッドの大きさだけでなく不浸透域面積率の低下による影響も入っているものと思われる。詳細に見ると、グリッド型土地利用を用いたピーク流出量は斜面要素が小さいほど大きい。一方、地物指向土地利用データモデルのハイドログラフはグリッド長100mの計算結果に近い値になっているが、ピーク付近と低減部ではその大きさは逆転している。次に、図-6は一定降雨強度1mm/1minを180分与えた計算結果である。この図から分かるように、地物指向土地利用データのハイドログラフの立ち上がりは100mグリッドに相当するが、ピーク流量の約7割から250mグリッドの計算値に接近し、低減部では再度100mグリッドの計算値に接近する。これらの原因を検討するため、地物指向土地利用の土地利用毎の排水点までの距離の分布について示したものが図-7である。また、図-8には土地利用要素の面積分布を示した。これらの図から、土地利用要素の多くは100m以内に排水点が存在すること、要素面積から斜面長の分布が100m以内であることがわかる。

(2) 地物土地利用データのパラメータ感度分析

次に、地物指向土地利用データを用いて表面流出要素に関するパラメータとして等価粗度係数(0.02, 0.035, 0.05)と斜面勾配(1/200, 1/300, 1/400)を設定して感度分析を行なう。解析条件は前節と同様とし、粗度係数の変化に関する結果を図-9に示し、勾配の変化に関する結果を図-10に示す。

地物指向土地利用データを用いた結果はハイドログラフの立ち上がり部分は速く、その後徐々にピークに接近する傾向があり、粗度係数や流域の勾配の変化が流出量に与える影響はグリッドの大きさによる影響と比較して少ないことが分かる。

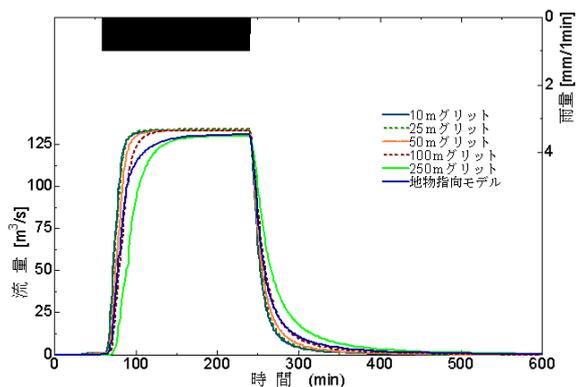


図-6 降雨強度一定の計算ハイドログラフ

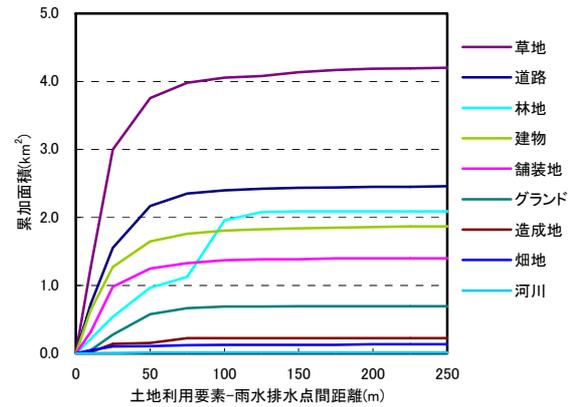


図-7 土地利用要素から排水点までの距離

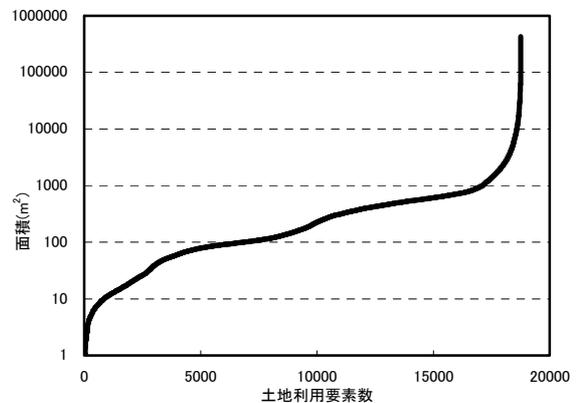


図-8 土地利用要素の面積分布

(3) 考察

本研究で用いた雨水流出モデルは河川・雨水管路の流出過程については同一条件として設定し、雨水管に流入するまでの表面流出過程の違いについて土地利用データの形状による違いがハイドログラフに与える影響について検討を行なった。従って、ハイドログラフに現れる変化は全て雨水管渠までの到達時間の変化によるものである。

実績降雨、一定強度降雨の計算結果より、都市流域においてグリッド型モデルを適用する場合には、グリ

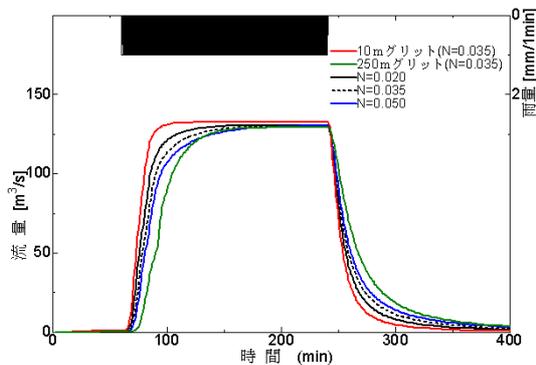


図-9 粗度係数の変化による雨水流出の変化

ッドの大きさが100m以下であればヒドログラフの立ち上がりを精度よく再現することが可能であることが分かる。これは、土地利用要素と排水点間距離の分布から、下水道の流入孔が少なくとも100m四方に1つの割合で設置されているためであると考えられる。

また、本研究で用いた雨水流出モデルのように、斜面流モデルとしてKinematic Wave法を用いると、斜面流の追跡に必要な斜面形状は土地利用要素から求めざるを得ない。そのため、グリッド型の土地利用データを用いた場合には、斜面流計算に利用される斜面形状の大小により流出特性が変化する。これらの結果はグリッド型の斜面要素を持つ分布型流出モデルに共通する特徴でありその補正手法についても検討されている¹¹⁾。一方、地物指向土地利用データを利用することにより、都市域の直接流出を発生させる流出面を家屋や道路といった固有の面積や分布から設定できるため、特に不浸透域において実際に表面流が発生しているスケールと同程度の斜面要素設定が可能であるものと考えられる。

5. まとめ

本論文の結論は以下のとおりである。

- (1) 地物指向土地利用データを用いて等間隔にサンプリングしたグリッド型土地利用データは25m以下では±1%、250mでは±3%の精度で作成することが可能である。
- (2) 地物指向土地利用データの流出特性はその土地利用要素面積の分布により決定される。グリッド型モデルを利用する場合には、その間隔を100m以下とすることで洪水ヒドログラフの立ち上がりを精度良く再現できるものと考えられる。
- (3) 地物指向データモデルの要素面積は10000m²以下であり、河道・下水道データを用いることで、表面流出の等価粗度係数や斜面勾配に影響を受けにくい流出モデルを作成することが可能である。

今後の課題として、斜面流に必要な形状の合理的

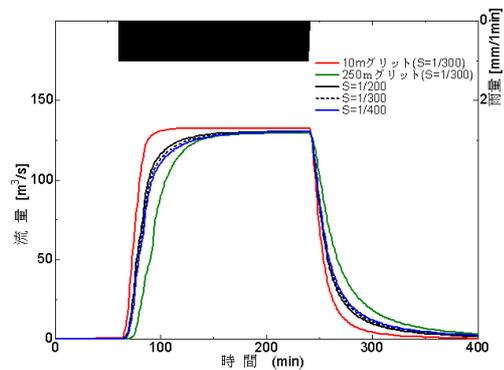


図-10 流域勾配の変化による雨水流出の変化

な設定方法についての検討、長期流出モデルへの適用、洪水流出モデルへの適用、そして流出抑制施設効果の検討があげられる。

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17年度首都大学東京傾斜的研究費の補助を受けました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 豊國永次:都市域の流出プロセスとモデリングについて、雨水技術資料 Vol31, pp7-17,1998
- 2) 岡太郎, 角屋陸, 野口美具:宅地域の雨水浸透と流出特性 京都大学防災研究所年報第23号 B-2 PP227-238,1980
- 3) 杉尾哲, Agus SHARYANTO:雨水貯留施設による洪水流出制御の検討, 雨水技術資料 Vol31, pp31-42,1998
- 4) 羽田野琢磨, 高木康行, 中嶋規行, 中村茂, Srikantha HERATH:グリッド型水循環系解析モデルの多摩川流域への適用, 水工学論文集第47巻, pp199-204,2003.
- 5) 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(1)pp199-204,2005
- 6) 安藤義久, 虫明功臣, 高橋裕:丘陵地の水循環機構とそれに対する都市化の影響, 第25回水理講演会論文集 pp197-208,1981
- 7) 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, 13, 10. pp483-487,1970.
- 8) 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
- 9) William James, W.Rovert C.James: WaterSystem Model(1) HYDROLOGY, User's Guide to SWMM4 Runoff and supporting modules pp105-111,2000.
- 10) Hurber, W.C. and Dickinson, R.E.:Storm Water Management Model, Version4, PartA, User's Manual, U.S.EPA/600/3-88/001a,1998.
- 11) 砂田憲吾, 青木謙治, 藤村拓夫:分布型流出モデルの応答に及ぼす流域要素スケールの影響について, 水工学論文集第45巻, pp145-150,2001.

(2005.9.30 受付)