

神田川上流域の地物データを用いた 洪水流出モデルの構築とその適用

DEVELOPMENT OF STORM RUNOFF MODEL USING ADVANCED GIS DELINEATION FOR UPPER KANDA BASIN AND ITS APPLICATION

天口英雄¹・河村明²・荒木千博³・高崎忠勝⁴

Hideo AMAGUCHI, Akira KAWAMURA,
Kazuhiro ARAKI and Tadakatsu TAKASAKI

¹正会員 博士(工学) 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)

²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)

³正会員 工修 建設技術研究所 (〒160 東京都新宿区三矢六丁目13-5)

⁴正会員 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)

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 modeling. It is shown how various land use, streets, drainage and river systems are used as input to coupled hydraulic and hydrological models. No calibration or tuning was performed, but the general model formulation was used with standard parameter values obtained from the literature. The runoff response to storm event which did not inundate was simulated. The simulated discharge substantially reproduced the observed ones. It was also demonstrated how the model can be used to evaluate the flow conditions in specific components of the urban hydrological system, which facilitates e.g. evaluation of flood-preventive measures. Owing to its high level of detail as well as potential for result visualization, the model is well in line with the recent trend of increased stakeholder involvement in hydrological modeling.

Key Words : *Precise GIS delineation, urban catchment, storm runoff distributed model, Kanda River*

1. はじめに

都市流域の雨水流出プロセスは建物、道路など多くの人工的な構造物からなる流出面とこれらからの雨水を河川まで運ぶ道路の側溝や雨水・下水道管路などから構成され、雨水の流出経路は非常に複雑なものとなっており¹⁾、これらは水循環を構成する全ての素過程に影響を与えている。特に不浸透域からの雨水流出は雨水・下水道管路を通じて河川に排出され、洪水時のピーク流量の形成プロセスを強く支配している²⁾。都市流域を対象とした複合的な流出・浸水状況を解析する流出・氾濫モデルでは、データ構築の容易さから地表面被覆構造をグリッド型としたモデルが数多く開発されているが、解析結果はグリ

ッド解像度に左右されるとの指摘もある³⁾。そこで著者らは実務上用いられる洪水流出シミュレーションモデルはモデルパラメータに依存しない構造が望ましいとの観点から、地表面を忠実に表現可能な地物データGISを独自に作成する手法と洪水予測モデルの提案を行っている⁴⁾。本研究では、本手法を神田川上流域に適用し、河道の溢水氾濫が生じていなかった中小洪水を対象に、中小河川流域への適用可能性とその洪水流出過程のメカニズムを把握することを目的とする。

2. 高度な地物データGISを用いた洪水流出モデル

(1) モデルの概要

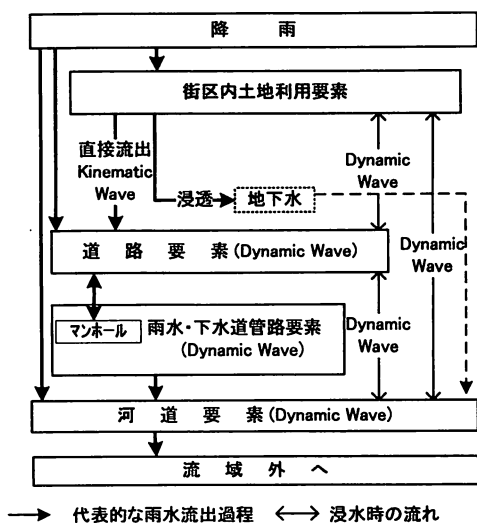


図-1 洪水流出モデルの流出過程

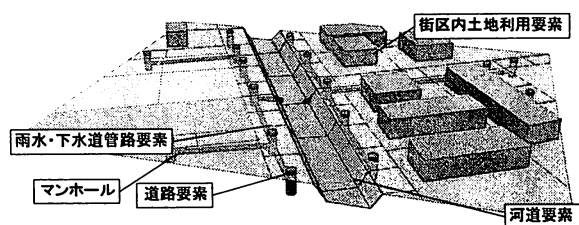


図-2 地物データGISを用いた都市流域のモデル化

図-1は著者らが構築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、図-2は地物データGISを用いた都市流域のモデル化の模式図を示す。図-2に示すように、流域は地表面の街区内土地利用地物要素、道路要素および河道要素により構成されている。また、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と管路は河道要素にそれぞれ接続させている。

図-1の洪水時の雨水流出過程においては、流域内への降雨は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与えられる。直接流出成分に寄与する有効雨量は、不浸透域（河道、道路、舗装地、建物）では降雨量を、浸透域（林地、緑地、グラウンド、間地）では修正Hortonモデル⁹⁾により表面流出に寄与する水量を算定する。街区内土地利用要素の家屋要素では、雨水を近傍の道路要素への流出するものとして計算する。道路要素の雨水は、その要素内にマンホールが存在する場合には管路に流下し、マンホールが存在しない場合には道路要素間を雨水が流れる。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⁶⁾により計算する。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。

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河道を流下する。

(2) 直接流出量の算定

直接流出量の算定には、対象流域の土地利用地物要素を不浸透地物と浸透性地物に分類し、不浸透性地物では初期損失のみを考慮し、浸透性地物では初期損失に加えて浸透能特性を考慮したモデルを用いる⁷⁾。不浸透性地物では、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 $D(t)(m/s)$ を算定する。

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

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_i :土地利用種別 i の初期損失量(m)。

浸透性地物の直接流出量は、初期損失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。この浸透能の算定には降雨強度の変化を浸透能に反映させるために修正Horton浸透方程式⁸⁾を用いる。

$$F(t) = \int_0^t f_i(t) dt = f_{ci}t + \frac{(f_{oi} - f_{ci})}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t}) \quad (2)$$

ここに、 $F(t)$:時刻 t における累加浸透量(m), $f_i(t)$:時間 t における浸透能(m/s), f_{ci} :終期浸透能(m/s), f_{oi} :初期浸透能(m/s), α :減衰係数(s^{-1}), t :降雨開始からの時間(s)。

浸透域からの直接流出量 $D(t)$ は降雨量から土地利用種別を考慮した(3)式によって計算される。

$$D(t) = \begin{cases} 0 & \sum P(t) \leq L_i \\ P(t) - \bar{f}(t) & \sum P(t) > L_i \end{cases} \quad (3)$$

ここに、 $\sum P(t)$:累加雨量(m/s)。

(3) 建物要素から道路要素への流れ

都市流域では、建物には雨樋、駐車場および公園などには雨水排水施設が設置されているが、特に建物の排水施設の情報をデータ化することは困難である。そこで、地物データGISを用いた雨水流出過程において、建物要素への降雨は、道路要素へ流出することと仮定し、以下の一樣斜面でのKinematic Wave法の基礎方程式を適用している。

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

$$S_f = S_0 \quad (5)$$

ここに、 q :単位幅流量(m^2/s), h :斜面流の水深(m), x :距離(m), S_f :摩擦勾配, S_0 :地表面勾配。なお、他の土地

利用地物要素への降雨は、当該要素に有効雨量を直接与えている。

(4) 雨水・下水道管路の流れ

雨水・下水道管路地物要素の流れは、マンホール部と管渠部に分けてモデル化を行い、マンホール部で道路地物要素との水の受け渡しを行う。雨水・下水道管路地物要素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スロットモデルを利用する⁹⁾。マンホール要素では、マンホールの流入出量から貯留量を求め、マンホール地点の貯留量と水位との関係により、貯留量から水位を算定する。

$$\frac{\partial Q_s}{\partial t} + gA \frac{\partial H_m}{\partial x} + \Gamma \cdot g \frac{n^2}{R^{4/3}} Q_s |v| = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial S_m}{\partial t} = \Sigma(Q_s + Q_{div} + Q_{rs}) \quad (7)$$

$$H_m = f_{ms}(S_m) \quad (8)$$

ここに、 Q_s :管路要素の流量(m^3/s)、 Γ :サーチャージ流れの場合の摩擦項の補正係数、 A_p :管路要素の断面積(m^2)、 S_m :マンホール部貯留量(m^3)、 H_m :マンホール部水位(m)、 f_{ms} :貯留量・水位変換関数。

(5) 河道要素の流れ

河道地物要素の運動方程式は流量 Q_r 、水位 H を変量とすれば、式(9)のようになる⁷⁾。河道地物要素の水位変化は、河道地物要素、雨水・下水道管路地物要素、要素からの合計流量と直接流出量を考慮すれば、式(10)で表わせる。

$$\frac{\partial Q_r}{\partial t} + \frac{\partial(Q_r^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + g \frac{n^2}{R^{4/3}} Q_r |v| = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\Sigma(Q_r + Q_s + Q_{r0})}{A_{rv}} + r_e + Z_{rv} \quad (10)$$

ここに、 Q_r :河道地物要素の流量(m^3/s)、 Q_{r0} :道路地物要素および街区要素の流量(m^3/s)、 A_{rv} :河道地物要素面積(m^2)。

(6) 地表面地物要素間の流れ

本モデルに用いる解析要素は建物要素および河道要素どうしを除く全ての土地利用地物要素である。これらの解析要素に対し、地表面地物要素間の境界条件を定義する地表面境界要素の属性情報を基に、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。解析格子の地物要素では連続式を用いて水深を求める。ここでは川池らと同様に、道路や建造物が氾濫水に及ぼす影響を反映させるために建物の占有率および通過率を考慮した⁹⁾。さらに建物要素を取り囲む要素には障害物があり道路要素には障害物がないという氾濫水の流れに対する抵抗特性を反映させるため、道路要素とそれ以外の要素に対して異なる粗度係数を用いている⁹⁾。

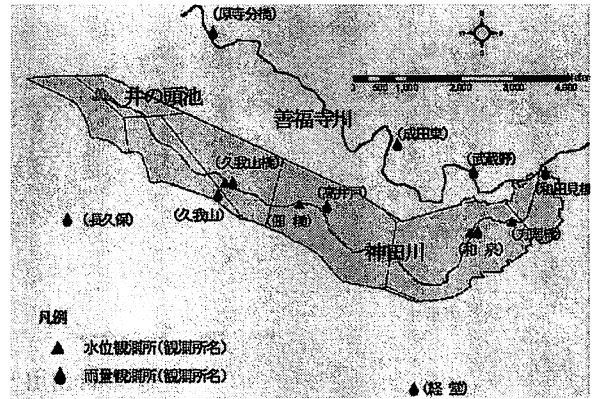


図-3 神田川上流域の概要

ここで、建物の占有率は地表面地物要素の属性情報の街区面積と街区内の建物要素面積から計算し、街区要素と道路要素との間の通過率は建物の占有率から計算している。道路地物要素ではマンホール要素を介して雨水・下水道管路地物要素との水の流れを考慮している。

地表面地物要素(道路地物要素、街区要素)間の流れに対しては、流量 Q_{rb} と水位 H を変量とする一次元不定流の速度項を省略した運動方程式(12)を適用する。

$$\frac{\partial Q_{rb}}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + g \frac{n^2}{R^{4/3}} Q_{rb} |v| = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial h_{rb}}{\partial t} = \frac{\Sigma Bq + \Sigma Q_{rb} + \Sigma Q_{r0} + \Sigma Q_{div} + \Sigma Q_{rs} + r_e A_{rd}}{A_{rd}} \quad (12)$$

ここに、 Q_{rb} :流量(m^3/s)、 g :重力加速度(m/s^2)、 x :道路地物要素または街区要素の重心点間距離(m)、 v :流速(m/s)、 h_{rd} :道路地物要素の水深(m)、 B :微小土地利用地物要素の斜面幅(m)、 Q_{rs} :道路地物要素からマンホール要素への流量(m^3/s)、 Q_{div} :雨水・下水道管路地物要素から道路地物要素への溢水量(m^3/s)、 A_{rb} :道路地物要素の面積(m^2)。なお、地表面地物要素間の流れ計算に用いる移動限界水深は、岩佐らによって報告されている0.001mを用いる⁹⁾。

3. 神田川上流域への適用

(1) 神田川上流域の概要

神田川は三鷹市の井の頭池にその源を発し、途中善福寺川と妙正寺川を合流して隅田川に流入する流域面積105km²、流路延長25kmの東京都内の代表的な中小河川である。本研究では、図-3に示す神田川の井の頭池から善福寺川合流地点までの上流域(流域面積約11.8km²、流路延長約9km)を設定した。本流域では、東京都により設置された降雨・水位観測所により、1分間隔で観測データが取得されている⁹⁾。

(2) 高度な地物データGISによる対象流域のモデル化

神田川上流域のモデル化に必要な基礎データ一覧を表-1に示す。本研究では、建物の境界線、道路と街区の境

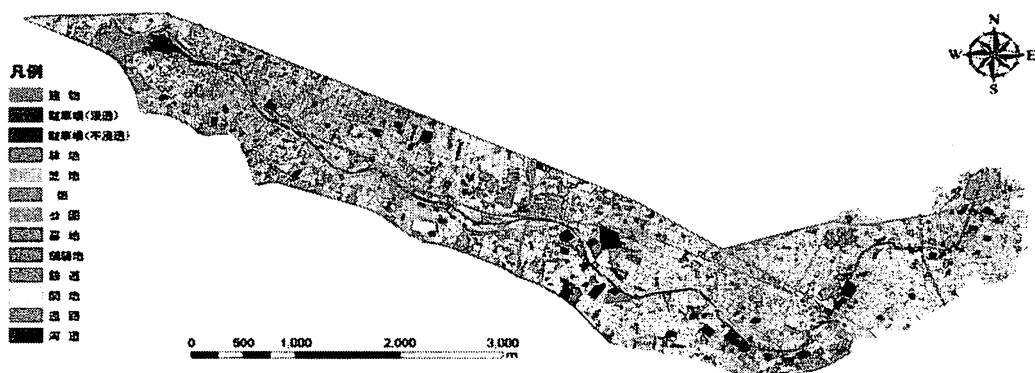


図-4 神田川上流域の土地利用地物要素



図-5 神田川上流域の雨水・下水道管路要素

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)データとしてのポリライン型基礎的地物データGISを収集した上で、これらのデータをGISソフト(ArcGIS)によりポリゴン型基礎的地物データGISへ加工する。そして、これに対して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の構築を行った。図-4および図-5は基礎的地物データGISを基にして高度な地物データGISの構築を完了した流域図を示したものである。

表-1は神田川上流域の地物データGISの要素数と総要素面積を示す。街区内土地利用地物要素数は54,229であり、このうち街区内土地利用地物要素における建物と間地以外の4,000以上は1/2500地形図および航空写真を参考に手作業により作成した。道路要素は独自に作成した微小道路要素を生成するプログラムにより分割し、面積の大きい要素はさらに分割を行った結果、道路要素数は45,874で、1要素の当たりの平均面積は約41m²である。なお、道路要素および建物を除く街区内要素の地盤高は、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ている。

河道要素は河道計算に用いら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、まず河川縦横断面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(約100m間隔)で分割を行い、他の道路要素等の大きさと整合させるため、さらに約30m間隔で分割し、その分割位置には断面特性情報を加えた。作成した河道要素

表-1 高度な地物データGISの作成に必要な基礎データ

基礎データ	抽出するデータ
東京都基礎的地物データGIS	建物・街区・河道データ
東京都地形図1/2500	街区内土地利用地物データ
河道の縦横断面図	河道データ
国土地理院5mメッシュ(標高)	道路要素、街区要素の地盤高データ
下水道台帳	雨水・下水道管路データ

表-2 地物データGISの要素数および総要素面積

		要素名	要素数	面積(m ²)
高度な地物データGIS	道路要素	道路	45,874	1,877,041
		河道	315	102,565
	街区内土地利用地物要素	建物	40,241	3,449,181
		駐車場(浸透)	97	60,428
		駐車場(不浸透)	363	213,180
		グラウンド(浸透)	211	228,939
		グラウンド(不浸透)	16	23,280
		テニスコート(浸透)	42	54,512
		テニスコート(不浸透)	27	30,383
		林地	1,667	1,069,471
		芝地	207	172,545
		畑	229	188,616
		公園	146	95,676
		墓地	73	70,612
		池	52	50,402
		舗装地	564	384,139
		ブル	17	10,570
		裸地	67	52,707
		鉄道	435	149,388
		間地	9,775	3,518,916
		合計	54,229	9,822,944
地表面境界要素	地表面地物要素		100,418	11,802,550
	雨水・下水道管路要素	マンホール	9,638	
		管路	9,909	
		合計	19,547	
	高度な地物データGIS		119,965	
	街区-街区間	街区-街区間	20,074	
		街区-道路間	106,367	
		街区-河道間	108	
		道路-道路間	48,351	
		道路-河道間	1,629	
		河道-河道間	314	
	合計		176,843	

数は315要素である（表-2）．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．作成した管路要素数は9,909，マンホール要素数は9,638である（表-2）．なお本研究では，1997年に供用している神田川地下調節池および神田川上流域に設置している雨水流出抑制施設のデータ化は行っていない．

(3) 実降雨を用いた洪水流出解析

本研究では，図-3に示す東京都水防災総合情報システムにより1分単位で観測されている水文データを用いて，2002年8月18日降雨（流域平均総雨量112mm，60分最大雨量27mm，10分最大雨量7mm）を対象に洪水流出解析を行った．土地利用地物への降雨分布の影響を考慮するために，降雨は降雨観測所と地物要素の位置関係を基に，近傍観測所の雨量を土地利用地物要素毎に与えた．表-3に示す本洪水流出解析モデルのパラメータは，既往の研究を参考に標準と考えられる値を設定した⁴⁾．雨水・下水道管路要素では，神田川上流域から排出される下水道処理場へ向かう幹線管路のデータ化は行っているが，本洪水流出解析では幹線管路端末からの流出はないものと仮定して計算を行っている．

図-6から図-8は，方南橋，和泉橋，佃橋における計算結果を観測値と共に示したものである．方南橋および和泉橋では，4時頃に発生している観測値のピーク流量以降の5時頃において，計算値では30m³/s程度の高い流量が発生してしまっている．この点を除くと佃橋における解析結果を含め，計算値は観測値よりも高いものの，10時頃に発生しているピーク流量の生起時刻がほぼ一致するなど，本モデルによる解析結果は概ね観測値を再現している．ハイドログラフの立ち上がり部分に注目すると，方南橋および和泉橋において，3:00から4:00にかけて観測値は急激に上昇して最大流量となっているが，計算値ではこの間に比較的緩やかに上昇している．このように流量が観測値より計算値が多く，また計算値の流量増加率が観測値のそれより低くなっている原因について以下に考察を行う．

計算値の流量が観測値のそれよりも大きくなった原因として，本解析では計算条件で述べたように，雨水・下水道管路において幹線貯留効果は考慮しているものの，幹線管路流末から下水処理場への流出は考慮していないこと，不浸透性地物に設置されている雨水流出抑制施設の特性をデータ化していないので，その効果を考慮していないことなどが流量増加の主要因となっているものと思われる．このように考えた場合，計算値のピーク流量は観測値のそれを上回る値が得られると予想されるが，本解析ではほぼ一致した値が得られている．ハイドログ

表-3 洪水流出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	:30
	緑 地	:30
	グラウンド	:10
	間 地	:10
終期浸透能(mm/hr)	林 地	:30
	緑 地	:20
	グラウンド	: 5
	間 地	: 5
浸透能の減衰係数 (hr ⁻¹)		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	0.043
	街区要素	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

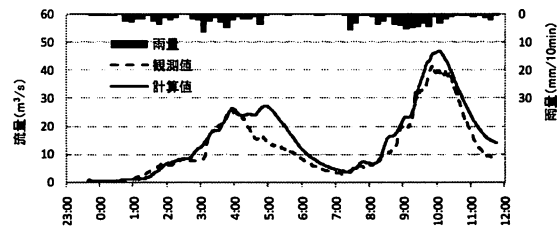


図-6 方南橋におけるハイドログラフ

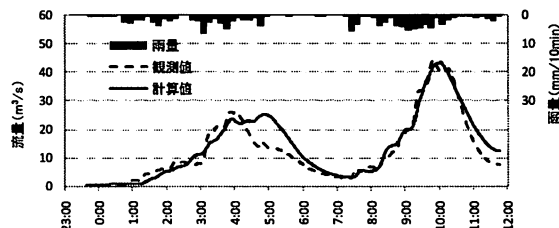


図-7 和泉橋におけるハイドログラフ

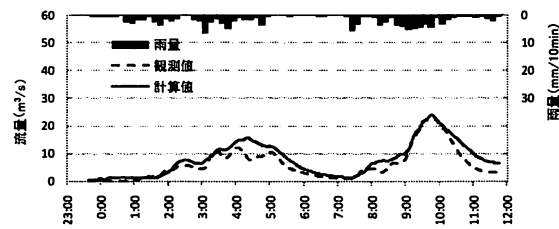


図-8 佃橋におけるハイドログラフ

ラフ上昇期間の観測値の増加速度は計算値のそれよりも大きく，この点を改良するモデル化が必要である．なお，解析結果を観測値と一致させるためには，浸透性地物の浸透関係パラメータのキャリブレーションを必要であるが，地物データGISを用いた洪水流出モデルでのモデル化方針は，雨水の流出経路を忠実に再現することを前提としているので，パラメータによるキャリブレーションは最終段階で行う．

(4) 仮想降雨を用いた洪水到達時間の推定

神田川上流域の雨水の挙動を把握するために、本研究では雨水・下水道管路要素のマンホール内水位に着目し、ピーク降雨からピーク水位に達するまでの時間の推定を試みる。対象とする降雨は実降雨で利用した降雨を活用し、1分降雨強度が最大であった時刻を含む3:00から3:40までを抽出し、この間の降雨強度の4倍となる仮想降雨を作成した。解析条件は実績降雨の場合と同じである。

図-9は解析により得られた方南橋、和泉橋、佃橋のハイドログラフであり、ピーク雨量時刻と河道流量ピーク時刻との差はそれぞれ45分、43分、24分となっている。佃橋では、一山のハイドログラフとなっているが、方南橋および和泉橋では二山に近い形状となっているなど、観測所により流出特性が異なっている。

図-10は、マンホール内水位を対象に、河川流量と同様に、降雨ピーク時刻とマンホール水位ピーク時刻を求め、この差を到達時間としてプロットしたものである。なお、同図には参考の為に神田川上流域の標高を示した。

到達時間分布は、全体的に地盤高が低い河川周辺において長く、それ以外の台地部において短い傾向が見られる。台地部において到達時間の長い区域では、要素面積の大きい浸透性地物が分布しているために、降雨は道路要素へ徐々に排水される傾向が強く、降雨終了後においても継続して流出が発生していると考えられる。

4. むすび

本研究では、地表面を忠実に表現可能な地物データGISを用いる洪水流出解析モデルを神田川上流域に適用し、河道の溢水氾濫が生じていなかった中小洪水を対象に、中小河川流域への適用可能性とその洪水流出過程のメカニズムの把握を行った。洪水流出解析結果では、ハイドログラフの形状は概ね再現できたものの、計算流量の河川流量増加率は若干観測流量のそれを下回る結果となっているので、降雨強度が増加した時に対応する雨水流出過程のモデル化についての改良が課題となった。

今後は、本研究で考慮していない流域内の雨水・流出抑制施設および神田川地下調節池のモデル化、そして汚水幹線の下水道処理場への雨水流出現象を考慮したモデルを構築する予定である。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金（若手(B)：課題番号21760389）の研究助成を受けて行ったものである。

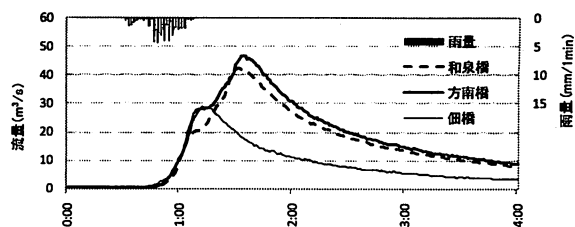


図-9 解析ハイドログラフ

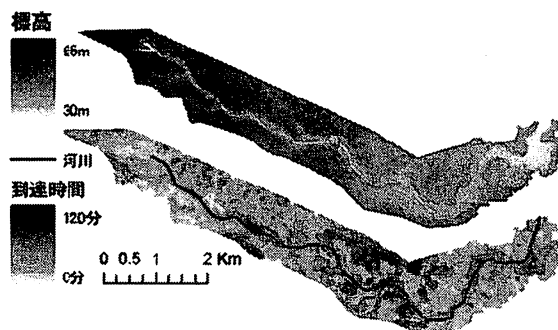


図-10 神田川上流域の地盤高とマンホール水位ピーク時刻までの到達時間

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) 守田優, 和泉清: 都市化と洪水流出変化の定量的分析, 第29回水理講演会論文集, pp.19-23, 1985.
- 3) 砂田憲吾, 青木謙治, 藤村拓生: 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, pp.145-150, 2001.
- 4) 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.
- 5) Huber, W.C., Dickinson, R.E.: Storm Water Management Model Version4, User's manual, EPA/600/3-88/001a, Environmental Protection Agency, USA, 1988.
- 6) 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.
- 7) 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, 第29回水理講演会論文集, pp.49-54, 1985.
- 8) 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.
- 9) 岩佐義朗, 井上和也, 水島雅文: 氾濫水の水利の数値解析法, 京都大学防災研究所年報, 第23号, B-2, pp.305-317, 1980.
- 10) 天口英雄, 河村明, 高崎忠勝, 荒川大樹: 東京都水防災システム降水データの特性, 水文・水資源学会2007, 年研究発表会要旨集, pp.14-15, 2007.

(2009. 4. 9受付)