

都市流域における流出モデル構築への GIS の応用

近森秀高*・岡 太郎・宝 馨・大久保豪**

*岡山大学環境理工学部

**京都大学大学院工学研究科

要 旨

京都南部巨椋流域の一支流域である名木川流域を事例対象として、kinematic 流出モデルの構築に必要な空間分布データを地理情報システム (GIS) を用いて入力・管理する手順、およびこのデータに基づくモデル定数の算定手順を示し、実流域における分布型降雨-流出モデル構築過程への GIS 応用の有用性を示した。また、ここで構築した流出モデルを用いて洪水流出計算を行ない、半日～1 日程度の降雨による出水が精度良く再現できることを示した。

キーワード：GIS, 都市流出, 流出解析, kinematic 流出モデル

1. はじめに

宅地造成等の土地利用改変が行なわれる流域において治水対策を検討する場合、流域の都市化に伴う流出特性の変化を詳細に吟味する必要がある。このような場合、対象流域の地形・土地被覆に関する詳細な空間データを基に構築した分布型流出モデルを用いて洪水流出解析を行ない、都市化前後の降雨-流出関係の変化を調べることが多い。しかし、特に市街地流域のように地形や土地利用分布が複雑な場合はこれらのデータの取扱は容易ではなく、また、急速な宅地開発などによってこれらの地形条件の変化が激しい場合は地理情報データの更新に多大な労力を要する。

近年、都市計画などに広く用いられるようになってきている地理情報システム (GIS, Geographic Information System) は、流出解析に必要な分布型地理情報データの管理に有用な手段として期待される。

そこで本研究では、京都府南部巨椋流域の一支流域である名木川支流流域を事例対象に、現在代表的な GIS の一つである ARC/INFO を用いて土地被覆・地形等の地理情報データベースを作成する。さらに、この地理情報データベースを活用して洪水流出計算を行ない、その洪水再現精度を吟味する。

2. 洪水流出解析における地理情報システムの応用

分布型降雨-流出モデルを用いて流出解析を行なうためには、地形や土地利用などの空間分布型の地理情報データが不可欠である。

一般に、流出解析を行なう際に必要となる空間分布データは、対象地域の地形図や土地利用図・航空写真などから読み取られ、不十分な部分は現地調査によって補完される場合が多い。しかし、土地利用や地形が複雑な市街地や広大な領域を対象とした場合、データ量が大きくなるため取扱が煩雑になりがちであった。

また、都市化が急速に進展している地域では、土地被覆や地形が短期間に急激に変化する。このため、このような流域における流出特性の変化を予測するためには、流出計算に必要な地理情報の迅速な更新が必要となる。

このように、流出解析に必要な分布型の地理情報の管理・更新には多大な労力を要し、これらのデータの効率的な管理が重要な課題である。

地理情報システム (GIS) は、地理的に関連する情報を取得 (入力)、管理 (データベース化)、処理、表示 (出力) するためのハードウェアおよびソフトウェアシステムであり、カナダ、アメリカを中心に 1960

年代に始まった技術である。GISを用いることにより、人口密度、家屋の種類、土地被覆、土地の所有者など対象地域のさまざまな属性に関するデータの入力が可能であり、これらの属性の図示、特定の属性を用いたデータの検索、属性間の演算なども容易に行なうことができる。また、入力済みの地理情報の更新も極めて容易であり、地理情報の経時変化にも柔軟に対応することができる。

近年、例えば細密数値情報などの数値化された標高データや土地利用データなどが利用可能になりつつあるが、これらのデータを併用した地理情報処理もGISを利用することによって容易に行なうことができる。

このようなGISの特長は、分布型流出モデルの構築に必要な地理情報を取扱う上で極めて有利であり、従来煩雑な作業を伴った流出モデルのモデル定数の算出や土地被覆分布による有効雨量の算定が、GISの活用によって効率的に処理できるようになることが期待される。

3. 対象流域および使用データ

3.1 名木川流域

名木川流域は、京都府南部巨椋流域の南東部に位置する一支流域である（Fig.1）。元来、この流域の面積は2.3km²であったが、平成元年の太陽ヶ丘総合運動公園の新設によって流域界が変更されたため上流の山林域の雨水が別の流域に流れ込むようになり、流域面積は1.8km²に減少した。

流域下流部から中流部にかけては都市化がかなり進行しており、宅地造成が現在も進行しつつある。これらの宅地からの流出を抑制するために、数ヶ所に調整池が設けられている。上流域は森林が主体であるが、近年、植物公園が建設され、また、太陽ヶ丘運動公園へ通じる道路が新設されるなど、次第に開発が進みつつある。これらの開発に対応して上流部にも調整池が設けられている。

3.2 水文データ

京都大学防災研究所水資源研究センター都市・地域水文循環研究領域（旧内水災害研究部門）では昭和41年から巨椋流域において水位および雨量の観測を続けており、現在流域内に水位計を19ヶ所、雨量計を10ヶ所設置している。

名木川流域では、流域下流部に位置する廣野皇太神宮内にフロート式の水位計が昭和41年に設置され、水位観測が続けられている。現在、この水位計にはポテンショメーターが取り付けられており、これを用いて5分間隔で観測された水位をデータロガー

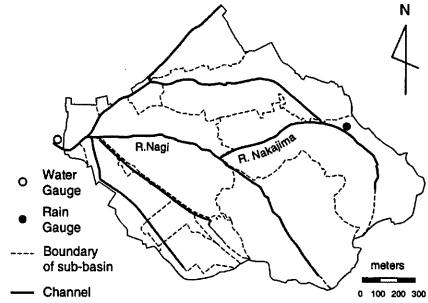


Fig. 1 Physiographical outline of Nagi Basin

に記録する仕組みになっている。

雨量は、昭和55年以来、名木川支流の中島川中流に設置した転倒升式雨量計によって観測が続けられている。また、平成5年以降のデータは、0.5mm単位、時間間隔1分でデータロガーに記録されている。

本研究では、平成6年9月16, 17日（総雨量104mm, 出水1）、平成7年5月11, 12, 13日（総雨量184.5mm, 出水2）、平成8年8月28日（総雨量24mm, 出水3）の降雨を解析対象とした。

4. 地理情報システムを用いたモデル定数の算定

流出解析にはkinematic流出モデルを用いた。モデル定数を、斜面勾配・斜面長・河道勾配・河道長等の地理情報に基づいて求めていく過程を図示すると、Fig.2のようになる。本研究では、図中の点線で囲まれた部分をGIS上で処理した。

本報における地理データの作成では、現在代表的なGISの一つであるARC/INFO（Environmental System Research Institute, Inc., 1995;パスコ, 1995ab）を用いた。

ARC/INFO上では、土地利用・標高等のある特定の主題（あるいは属性）についてその幾何学的形状や位置関係を記述したカバレッジと呼ばれる地図の組合せによって地理情報データを表現する。kinematic流出モデルの定数を算定する際に必要となる各地理情報間の演算は、地理情報データを主題別にまとめたカバレッジを用いて行なわれる。

ここでは、このカバレッジの作成法とこれに基づくモデル定数の算定法について述べる。

なお、これらのデータは、1/2,500の国土基本図を基にデジタイザーを用いて入力した。また、国土基本図のみでは不明な点については現地調査を行なった。

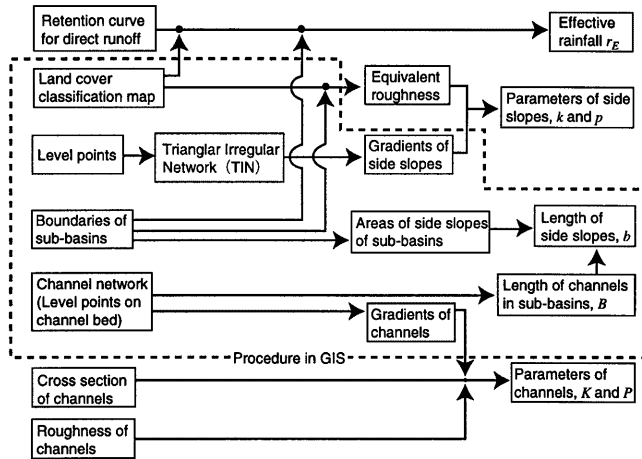


Fig. 2 Procedure of estimation of parameters of kinematic wave runoff model

4.1 地理情報データ

kinematic 流出モデル構築のために作成した地理情報データは以下のである。

- 1) 土地利用分類図：国土基本図に基づいて土地利用を水田・畑・道路・裸地・市街地・森林・水域の7カテゴリーに分類し、その境界線を入力した。この境界線に囲まれたポリゴン（領域）に土地被覆のデータを与えた。このようにして得られた分類図を Fig.3に示す。なお、対象流域内に水田はなかった。
- 2) 河道網図（河床標高）：国土基本図に示された河道および地下排水溝のうち断面積の大きいものを選び、これらの中心線に沿って約25m間隔でノード（節点）を入力した。また、各ノードにおける標高を属性として与えた。
- 3) 支流境界図：国土基本図や現地調査に基づいて定めた流域界・支流境界をデジタイザーを用いてアーク（曲線）として入力した。また、この境界線上にはほぼ等間隔でノードを置き、各ノードにおける標高を属性として与えた。
- 4) 標高点分布図：国土基本図に示された流域内および周辺の標高点を入力し、各点の標高を属性として与えた。
- 5) 市街地の不透透域分布図：各支流の左右の斜面ごとに国土基本図上に描かれた市街地から数区画を選定した。その市街地およびその中の建造物の外形をデジタイザーで入力し、建造物の部分を不透透域、それ以外の部分を浸透域とし

て取扱った。

4.2 モデル定数の算定

(1) 等価粗度

kinematic 流出モデルを用いて流出計算を行なう際に等価粗度が非常に重要な役割を果たすことはよく知られている。ここでは、等価粗度は水理公式集（土木学会、1985）上で各土地被覆に対応して示されている値を用いることにし、森林域の等価粗度を0.7、裸地と畑を0.3、市街地を0.03として計算を行った。また、計算ハイドログラフが実測ハイドログラフに適合しない場合は、洪水流出に最も影響の大きい市街地の等価粗度に巨椋流域の過去の観測から算出された0.007を用いた（角屋ら、1980）。

(2) 斜面定数・河道定数

kinematic 流出モデルにおいて、斜面流の基礎式は以下のである。

$$h = kq^p, \quad k = \frac{N}{\sqrt{s}}, \quad p = \frac{3}{5} \quad (1)$$

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

ただし、 t ：時間 (s)、 x ：距離 (m)、 h ：雨水流の水深 (m)、 q ：単位幅流量 (m^2/s)、 r ：有効降雨強度 (m/s)、 N ：等価粗度係数、 s ：斜面勾配、 k 、 p ：斜面定数。ここで、各支流の土地利用別の斜面の斜面定数は、それぞれの斜面の等価粗度 N と斜面勾配 s から計算される。斜面勾配 s は次のような手順で求める。

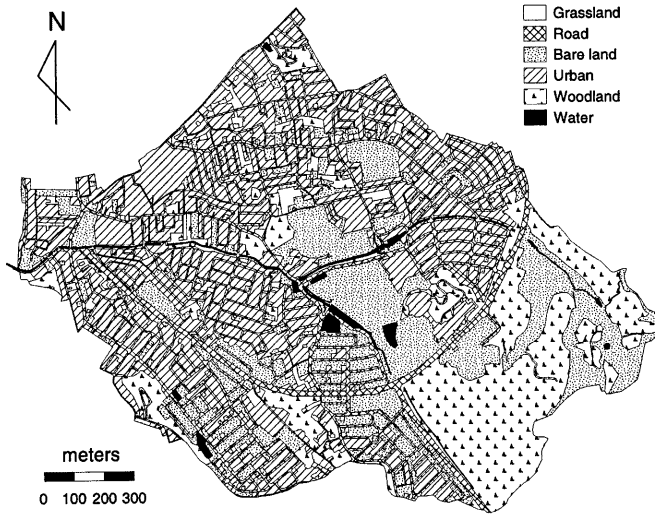


Fig. 3 Land use classification map of Nagi Basin

- 1) 河道網図に入力された河床標高点と標高点分布図から、これらの標高点を頂点とする三角形網 (Triangular Irregular Network; TIN) を作成する (パスコ, 1996)。得られた TIN を Fig. 4 に示す。
- 2) GIS 上では、TIN を構成する各三角形の斜面勾配が算出される。各支流の片側斜面に含まれる三角形の斜面勾配の平均値を各三角形の面積を重みとして計算し、これをその支流斜面の勾配とする。

また、河道流の基礎式は以下ようになる。

$$A = KQ^P \quad (3)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (4)$$

ここに、 A : 河道の流水断面積 (m^2)、 Q : 河道の流量 (m^3/s)、 K, P : 河道定数。

ところで、河道流の流速が Manning 則で表されると仮定すると、

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

となる。ここに、 n : 河道の粗度係数、 R : 径深 (m)、 I : 河道勾配。ここで径深 R を、定数 K_1 および Z を用いて

$$R = K_1 A^Z \quad (6)$$

とおき、式 (5) に代入して整理すると、式 (3) における河道定数 K, P は以下のように表現できる。

$$K = \left(\frac{n}{K_1^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}} \right)^P, \quad P = \frac{3}{3+2Z} \quad (7)$$

すなわち、河道断面から式 (6) の定数 K_1 と Z を推定し、河道勾配 I が分かれば、 K, P を算定することができる。

河道断面は現地調査によって調べる必要があるが、河道勾配は、河道網図に入力された河床標高点のデータから算出すればよい。

河道粗度は、水位計設置点において過去の流量観測の結果を整理して得られた $n=0.013$ を用い、全河道において一定とする。また、河道断面は各支流域内で一様とする。

5. 名木川流域への適用

5.1 名木川流域のモデル化

流域は 12 個の支流域に分割して取扱った。

流域内、とくに都市域では、さまざまな土地被覆が混在していることが多く、各支流域の斜面の等価粗度・有効雨量の取扱が問題となる。ここでは、各支流域の左右各斜面ごとに同一の土地被覆の領域をまとめて 1 斜面として取扱った。すなわち、各支流域における土地被覆の面積比に従って支流域の河道を分割し、これを各土地被覆斜面が接する河道長とした。ここで左右斜面それぞれの土地被覆面積を各土地被覆の河道長で除し、この値を土地被覆斜面の斜面長とした。

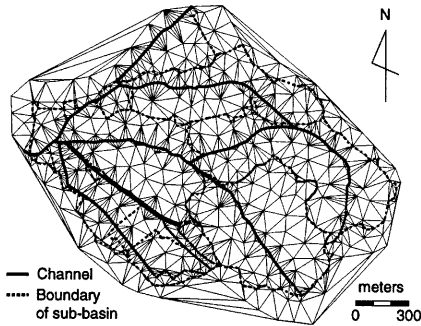


Fig. 4 Triangular Irregular Network (TIN) on Nagi Basin

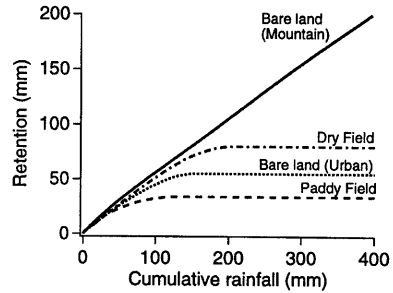


Fig. 6 Retention curve for direct runoff

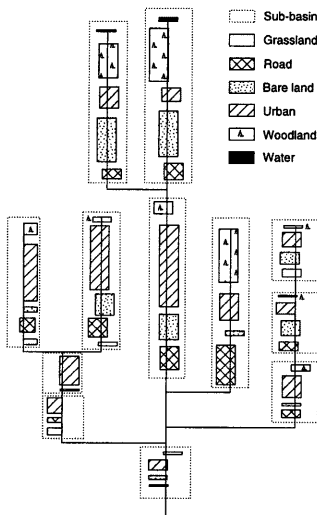


Fig. 5 Watershed model for the kinematic wave runoff model

このようにして得られた流域モデルを Fig.5に示す。この図から、各支流流域は、単一の土地被覆を持つ複数の副支流流域を直列した形で表現されていることが分かる。

5.2 有効雨量の算定

有効雨量は土地利用によって異なる。ここでは山地には ϕ -index 法 ($\phi=30\text{mm}$) を用いて定め、その他の地目では、角屋ら (1980) の検討結果に基づき土

地利用別の累加雨量-累加保留量曲線を用いて定めた。裸地 (山地)、裸地 (市街地)、畑地、水田の累加雨量-累加保留量曲線を Fig.6に示す。ここに裸地 (山地) は巨椋流域の過去の水文資料、畑地は久御山町の試験圃場の水文資料、裸地 (市街地) は京都市の天神川流域における観測資料を整理して得られた結果である。なお市街地における有効雨量は、不浸透域からは観測降雨全てが流出、浸透域からの流出は裸地 (市街地) の保留量曲線に従うものとし、対象地域全体の有効降雨は、不浸透域の割合によって変化するものとして取扱った。各支流流域の斜面の不浸透面積率は、GIS上で作成された市街地における不浸透域分布図を用いて、建造物の領域を不浸透域、それ以外の部分を浸透域として算定した。

5.3 名木川流域における流出解析

(1) 出水期間中の水収支

洪水流出計算を行なう前に、各出水の水収支について検討した結果を Table 1に示す。

まず、出水1および2について、全流域からの流出を対象にした Case 1 について見てみると、出水期間中の有効降雨の総量が総流出量を上回っていることが分かる。この原因として上流部の調整池の影響が挙げられる。この調整池の容量などの諸元は不明であるので、とりあえず雨水が調整池に流入する地域を除外して検討した結果を Case 2 に示す。この結果を見ると、出水1では有効雨量の総量が総流出量よりも若干少なくなっている程度であり、ほぼ等しいと見なしてよさそうであるが、出水2では有効雨量の総量の方がやや多く 17% 程度上回っている。出水当時、水位観測塔内に堆積していた土砂の影響

Table 1 Water balance during three flood events in the Nagi Basin

Flood duration	Total amount of effective rainfall (m ³)		Total amount of discharge(m ³)
	Case1*	Case2**	
Sep. 14 - 15, 1994	126448.5	98024.6	108878.3
May 11 - 13, 1995	236647.4	184734.0	157948.7
Aug. 28, 1996	28661.3	21898.9	57370.8

* Case 1: Whole of Nagi Basin is treated as the analytical area

** Case 2: Upper area than regulation pond in the Nagi Basin is excepted from the analytical area

で一定水位（出水1：9.8cm，出水2：9.7cm，出水3：12.4cm）未満は計測できない状態であったため，出水期間中水位がこれらの値を下回ったときは便宜的に観測流量を0として取扱っている。すなわち，実際には流出がある時でも計算上では流量を0としている場合が想定され，総流出量が過少評価されていることが考えられる。出水2のCase2において総有効雨量が総流出量を上回っているのはこの総流出量の過小評価が原因であると考え，流出解析を行なう上では問題ないものと見なした。

出水3について見てみると，Case1, 2いずれの場合も有効降雨の総量を総流出量が大きく上回っており，水収支上問題があることが分かる。この原因の一つとして，名木川流域内の1点の雨量計では流域内の降雨の分布状況を十分には把握できなかったことが考えられる。このことは，出水3のような短時間集中型豪雨の場合，名木川のような小流域でも雨量の空間分布を詳細に考慮する必要があることを示唆している。

(2) 流出解析の結果

出水1（平成6年9月16, 17日）および出水2（平成7年5月11, 12, 13日）について，計算時間刻み $\Delta t = 5$ （min）として計算した結果を，観測値とともにFig.7に示す。これらの出水については，ハイドログラフの立ち上がりの部分とピーク生起時刻はほぼ適合していると言えるが，ピーク流量はやや過小評価されていることが分かる。

短時間の豪雨によって発生した出水3（平成8年8月28日）を $\Delta t = 5$ （min）として再現計算したハイドログラフをFig.8に示すが，ここでは，ハイドログラフの立ち上がり，ピーク流量，生起時刻いずれも再現できておらず，観測データでは2個あるピークも1個しか再現できていない。

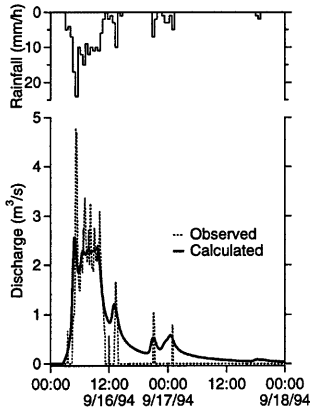
そこで， $\Delta t = 1$ （min）として再現計算を行なったが再現精度の向上があまり見られなかったので，洪水流出計算に最も影響する市街地の等価粗度を巨椋流域での過去の観測によって求められた0.007（角屋ら，1980）を用いて計算を行なった結果，Fig.9のようなハイドログラフが得られた。このハイドログラフでは，2個のピークが表現できており，ピーク流量も以前に比べると観測値に近づいている。しかし，2番目のピークは観測データよりもやや早く現れており，観測ハイドログラフを十分に再現できたとは言にくい。

出水3については元々水収支に問題があるため，あまりよい再現性が得られなかったのはむしろ当然の結果であると言ってよい。再現精度向上のためには，雨量の空間分布の再検討が不可欠であろう。

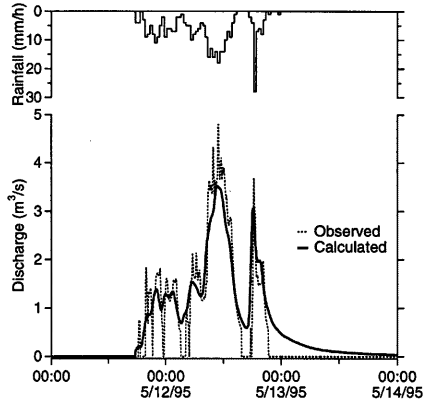
他の2出水についても計算時間刻み，市街地の等価粗度に同様の値を用いて計算を行なったが，ピーク流量がやや過少評価されたもののFig.7と同様の再現性が得られた。ハイドログラフは，形状に顕著な差異が見られなかったので，ここでは省略する。

(3) 流出解析におけるGIS利用の有効性

ここでは，GISを用いて流出モデルのモデル定数を決める際，基礎となる地理情報の入力にデジタイザを用いたが，これには相当の時間と労力を要した。これらの作業に要する労力を軽減するためには，国土数値情報等に代表される数値地図を利用していく方法が考えられる。ただし，本報で事例対象とした名木川のような小流域における流出解析には，さらに詳細な数値地図が必要であり，例えば，各地方自治体による詳細な現地調査に基づく地理情報データの整備が望まれる。昨今では都市計画・土地利用計画等にGISが活用される事例も多くなってきており，流出解析に有用な地形・土地利用に関するデー



(a) Discharge on September 16, 1994.



(b) Discharge on May 11, 1995.

Fig. 7 Calculated hydrograph of flood discharge at Nagi water gauge station

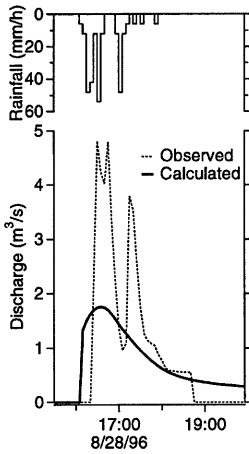


Fig. 8 Discharge hydrograph on August 28, 1996 ($\Delta t=5\text{min}$, $n=0.030$)

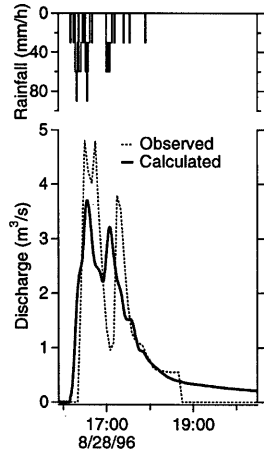


Fig. 9 Discharge hydrograph on August 28, 1996 ($\Delta t=1\text{min}$, $n=0.007$)

タも次第に整備されていくものと思われる。

雨量データには、ここでは1観測点における観測データのみを用いたが、流出計算の精度をさらに向上させるためには、前述のように雨量の空間分布を把握することが望ましい。このためには、複数の雨量観測点を流域の内外に設置する従来どおりの方法や、近年よく用いられるようになってきているレーダー雨量計のデータを活用する方法が考えられる。これらの方法で得られた空間分布型の雨量データを

流出解析に活用するためには、各雨量データと流域内の各点の位置関係を正確に把握しなければならないが、この場合もGISは有用な手段となるであろう。

この他にも流出計算の精度を悪化させる要因として、従来から問題にされてきた流域分割や計算時間刻み・等価粗度の取扱の問題が挙げられるが、これらの問題に対処するためには、ある程度試行錯誤的に計算を行なわざるを得ない。このうち、流域分割などの地理情報データの取扱に関連する特に煩雑な

作業は、GIS上に入力された地理情報データを用いることによって従来よりも効率よく行なうことが可能である。

また、本研究では、2斜面1河道を基本とする従来型の kinematic 流出モデルを用いて流出解析を行なったが、GIS上に入力された詳細な地理情報データの活用という点から見れば、このような従来型モデルではやや不十分だったかもしれない。流出解析で必要となるモデルの複雑さは解析の目的にも左右されるが、例えば、流域内の各点における雨水の挙動を把握するために、GIS上で入力・管理される空間密度の高い地理情報データと詳細な物理的流出モデルとを有機的に結びつけていくような手法についても今後は検討していく必要があるだろう。

6. おわりに

本研究では、GISに入力された地理情報データに基づいて従来型の kinematic 流出モデルを用いて流出解析を行なう手順と、この方法を用いて構築された流出モデルによる流出解析の結果を示した。

基本となる地理情報データの入力の簡便化、空間分布型データをさらに有効に活用可能な流出モデルの開発等の問題が残されているが、降雨-流出解析におけるGISの有用性を示すことができたと考えている。

Fundamental Study on Application of Geographic Information System to Construction of Rainfall-Runoff Model of Urbanized Area

Hidetaka CHIKAMORI*, Taro OKA, Kaoru TAKARA and Go OKUBO**

* Faculty of Environmental Science and Technology, Okayama University

** Graduate School of Civil Engineering, Kyoto University

Synopsis

A Geographic Information System (GIS) was applied to the constructing process of the kinematic wave runoff model of Nagi Basin, which constitutes a part of Ogura Basin located in the south of Kyoto. It was clarified that the application of GIS facilitates a handling of many kinds of geographic data required in the process of estimating parameters of the rainfall-runoff model.

Moreover, the rainfall-runoff simulation was performed using the constructed model. The accuracy of calculated discharge caused by a half to one-day rainfall was sufficient for a practical use.

Keywords : GIS, urban runoff, runoff analysis, kinematic wave runoff model

謝 辞

本研究に際し、宇治市、城陽市、久御山町の御協力をいただいたこと、本研究所 角田吉弘 技官の援助を受けたことを付記し、深謝の意を表す。なお、本研究は、平成8年度文部省科学研究費補助金・基盤研究(B)「都市水害の解析・防御のための地理情報システムとリモートセンシングの応用」(課題番号 07458086, 代表・宝 馨 京都大学防災研究所助教授)による研究成果の一部であることを付記する。

参考文献

- 角屋 睦, 早瀬吉雄, 西村昌之 (1980): 巨椋低平地域の都市化と内水(2)—京都大学防災研究所年報, 第23号B-2, pp.263-277.
- 土木学会 (1985): 水理公式集—昭和60年版—, 技報堂, p.163.
- パスコ, システム技術センター (1995a): ARC/INFO 入門 自習用マニュアル, パスコ.
- パスコ, システム技術センター (1995b): 初めてのARC/INFO, パスコ.
- パスコ (1996): ARC/INFO データマネージメント, パスコ, pp.2-24, 25.
- Environmental System Research Institute, Inc. (1995): Understanding GIS—The ARC/INFO, third edition, John Wiley & Sons.