

# 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

立川康人<sup>1</sup>・原口明<sup>2</sup>・椎葉充晴<sup>3</sup>・高埴琢馬<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 博士(工学) 京大工学部助教授 防災研究所水災害研究部門 (〒611 宇治市五ヶヶ庄)

<sup>2</sup>正会員 工修 福岡市役所下水道局 (〒810 福岡市中央区天神 1-8-1)

<sup>3</sup>正会員 工博 京大工学部助教授 防災研究所水災害研究部門 (〒611 宇治市五ヶヶ庄)

<sup>4</sup>正会員 工博 京大工学部教授 大学院工学研究科土木システム工学専攻 (〒606 京都市左京区吉田本町)

流域地形の三角形要素網表現をもとに流域地形に即した分布型降雨流出モデルを構築する。まず、三角形要素網による流域地形表現手法をもとに自動分割した斜面要素ごとに斜面勾配・斜面幅を算定し、それらを利用して三次スプライン補間関数を構成して、斜面勾配・斜面幅が連続的に変化する斜面要素モデルを構成する。流域地形は、縦断形状・平面形状ともに三次スプライン補間関数によって表現された斜面要素群とそれらを繋ぐ河道網によって表現することになる。次に、そこでの雨水の流れを、中間流と地表面流とを統合的に表す流量流積関係式を用いた kinematic wave モデルで追跡する。本手法を東京大学愛知演習林白坂流域に適用し、個々の斜面形状の表現形態が流出シミュレーション結果に大きな影響を及ぼすことを示した。

**Key Words :** distributed rainfall-runoff model, basin topography, triangulated irregular network-DEMs, spline function

## 1. はじめに

近年の数値地図情報の整備にともない、分布型降雨流出モデルは、流域地形を電子計算機上で数値的に表し、それをもとに雨水の流れをモデル化する形で構成されるようになってきている。どのような目的で分布型流出モデルを構築するか、流れのモデルをどのように構成するかなど、流出モデルを構成するための主要な要件は流域地形の表現手法に大きく依存するため、流出場の表現手法は分布型流出モデルを構築する上で最も重要な要素と言える。

筆者らは、斜面が流下方向にしたがって収束するような形状をしているか、発散するような形状をしているかなど、個々の斜面要素の形状を考慮することが流域全体からの流出を考える上で重要であると考え、これらを考慮できるような流出場の表現手法として三角形要素網による手法を提案し、流域地形を表現するためのデータ構造とそのデータ構造を有するデータセットを生成するための計算機アルゴリズムについて述べてきた<sup>1),2),3),4)</sup>。本表現手法の最大の利点は、山腹斜面での雨水の流れを一次的に取り扱い得るように実際の地形形状に即して斜面を自動的に分割し、分割した斜面要素の形状特性を自動的に算定できることにある。

本論文では、この流域地形の三角形要素網表現を土台として流域地形に即した分布型降雨流出シミュレーションモデルを構築することを目的とする。以下、本

流出モデルの構成手法を述べた後、本手法を東京大学愛知演習林白坂流域に適用した結果を示す。また、本モデルを用いて、流域スケールが流出に及ぼす影響について考察する。

## 2. 流域地形の三角形要素網表現に基づく分布型流出モデル - その特徴と概要 -

流域地形を数値的に表現するモデルには、グリッドモデル、等高線図モデル、三角形網モデル等がある<sup>4),5)</sup>。流域地形をグリッドモデルで表現する場合は、グリッドモデルから発生させた落水線をもとに、その流れ方向にしたがって雨水を追跡する手法がしばしば用いられる(たとえば陸ら<sup>6)</sup>)など)。この手法は、空間的に分布する水流量を流出モデルに反映させるという点、流出場のモデル化手法がシンプルであるという点で非常に有効であるが、斜面の形状を考慮することは念頭には置かれておらず、筆者らの立場とは異なる。一方、Moore ら<sup>7)</sup>は、電子計算機上に入力された等高線のデータを利用して自動分割した流域ごとに、雨水の流れを kinematic wave モデルで追跡するシステムを提案している。Moore らの手法は、数値地形情報をもとに流れを一次的に取り扱い得るように流域斜面を自動分割し、そこでの雨水の流れを追跡する点で筆者らの手法と同様であるが、流域地形の表現手法が大きく異なる。等高線によって流域地形を表現しようとすると、データ量が非常に膨

大なものとなり、また流域ごとに新たにデータセットを整備せねばならないという欠点がある。しかし、筆者らが提案している三角形要素網による流域の表現手法は、メッシュ形式の地形情報を情報源とするため、現在整備されている国土数値情報などのデータを利用することが可能である。また、分割した斜面要素の形状をパターン化せず、実際の斜面形状を流れのモデルに反映させるために、スプライン関数を導入して斜面要素の形状を表現している点に本手法の特徴がある。

本流出モデルの構成の概略を述べると以下のようにある。まず、流域地形の三角形要素網表現をもとに流域を斜面要素群に分割する。次に、分割した斜面要素ごとに斜面勾配・斜面幅を算定し、それらを利用して三次スプライン補間関数を構成して、斜面勾配・斜面幅が連続的に変化する斜面要素モデルを構成する。流域地形は、縦断形状・平面形状ともに三次スプライン補間関数によって表現された斜面要素群とそれらを繋ぐ河道網によって表現することになる。次に、それらの斜面要素での雨水の流れを、中間流と地表面流とを統合的に表す流量流積関係式を用いた kinematic wave モデル<sup>8),9),10)</sup>で追跡する。流域下端の流出量は、各斜面要素から河道への流出を河道網構造に従って逐一追跡することによって得られる。

### 3. 流出場の数理表現手法

#### (1) 三角形要素網による流域地形の数理表現

前述したように、流域地形を数理的に表現する手法として、グリッドモデル、等高線図モデル、三角形網モデルなどがある。その中で、三角形網モデルは流域を三角形網の集合体として表現するものであり、山頂・峠・河道・尾根上の点などを頂点として選ぶことによって、河川・流域界を三角形要素の辺として表し斜面を面として表現することができるなど流域地形に即した地形形状のモデル化が可能である。

ただし、ただ単に三角形網で流域を覆えばよいのではなく、雨水が斜面を流下・流集していく過程を取り扱うように三角形網を構成しなければならない。また、一般に利用できるデータセットがメッシュ形式で整備され公開されていることを考えると、メッシュ形式のデータをもとに三角形網を構成すべきである。以上の点をふまえ、

- グリッドモデルを構成する格子点、河道上の点をもとに三角形要素群を作成する
- 三角形要素間での雨水の授受を扱うことができるように、雨水は三角形要素の最急勾配方向に流れると考え、三角形要素のただ一つの辺だけから雨水が流出するように三角形要素を細分割する

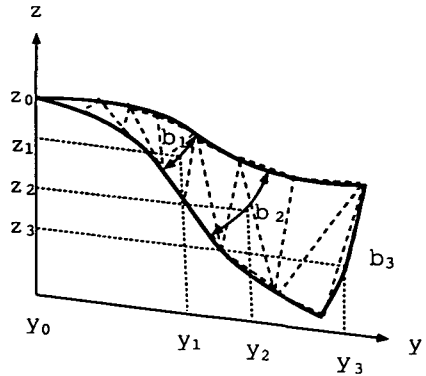


図-1 スプライン補間関数を用いた斜面要素形状の表現

- 河道網構造及び河道網に接続する山腹斜面群を認識できるデータ形式で流出場を表現するという方針にしたがって三角形要素網を構成する<sup>3),4)</sup>。

この表現形式を用いれば、河道の一部に隣接する三角形要素から始めてその三角形要素に雨水が流れ込む三角形要素を次々とたどることによって、雨水の流れを一次的に取り扱うことができるように、その河道区間に寄与する斜面要素を自動的に抽出することができる。また、抽出した斜面要素は隣接する三角形要素の集まりなので、斜面要素上の任意の点での斜面勾配、任意の標高値に対応する斜面幅を求めることは容易である。これらのデータを利用して、分割した斜面要素の形状をパターン化せず実際の斜面形状を流れのモデルに反映させるために、スプライン関数を導入した斜面要素モデルを構成する。

#### (2) 斜面要素モデルの構成

三次スプライン補間関数とは、 $x_1 < x_2 < \dots < x_n$  であるような  $n$  個 ( $n \geq 3$ ) の点  $P_i(x_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  が与えられたときに、これらの  $n$  個の点を通る区分的な  $x$  の三次関数であり、端点を除く  $n - 2$  個の点で二次導関数までが連続で、 $n$  個の点を滑らかに結ぶ性質を持つ。三次スプライン補間関数は、導関数が連続であるため次章での流れの基礎式が取り扱いやすいという理論的な長所を有するとともに、関数形を容易に決定できるという利点を持つ。

三角形網モデルから抽出した斜面要素の形状をスプライン関数を用いて表現した模式図を 図-1 に示す。図中、 $y_i$ ,  $i = 0, \dots, 3$  は斜面上端からの水平距離、 $z_i$ ,  $i = 0, \dots, 3$  は  $y_i$  に対応する斜面の標高、 $b_i$ ,  $i = 1, \dots, 3$  は  $y_i$  に対応する斜面幅を表す。これらのデータがあれば、斜面勾配、斜面幅の連続的な変化を三次スプライン

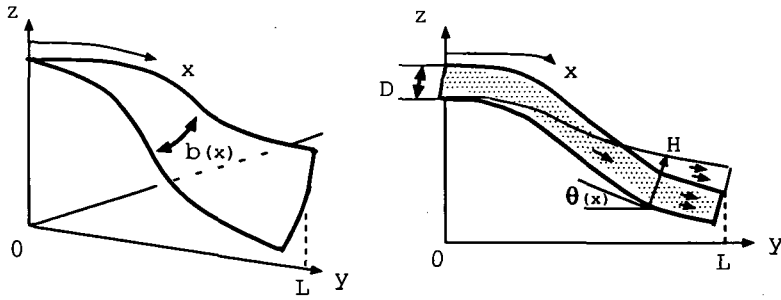


図-2 流れの模式図

ン補間関数によって表現することができる。これらのデータを斜面要素から抽出するためのアルゴリズムを以下に示す。

- 1) 河道に接している三角形要素から順次たどることによって、その河道区分の一部に寄与する斜面要素を構成する三角形要素群を特定する。
- 2) 1) で特定した三角形要素群をもとに斜面要素の標高の最大値と最小値を求め、その差を  $n$  等分して、 $z_i, i = 0, 1, \dots, n$  を決定する。
- 3) 標高が最大の頂点から斜面要素を最急勾配方向に下る過程で順次標高  $z_i$  に対応する水平距離  $y_i, i = 1, 2, \dots, n$  を決定する。
- 4) 三角形平面上で標高  $z_i, i = 1, 2, \dots, n-1$  の線分の長さを足し合わせて斜面幅  $b_i, i = 1, 2, \dots, n-1$  を決定する。 $z_n$  に対する  $b_n$  は河道に接する三角形要素の辺の長さとする。

これらのデータをもとに、流域地形は、縦断形状・平面形状ともに三次スプライン補間関数によって表現された斜面要素群とそれらを繋ぐ河道網によって表現することになる。なお、三角形網モデルから抽出した斜面要素の面積とスプライン近似した斜面要素の面積とは若干のずれが生じるため、流出計算の過程でもとの面積を保持するように流出量を補正する。

#### 4. 実斜面形状を考慮した雨水流追跡モデル

##### (1) 基礎方程式

斜面勾配・斜面幅の変動を考慮し、中間流と地表面流を統合的に表す流量流積関係式を用いた kinematic wave モデルの基礎式を示す。図-2 は斜面要素での表層付近の流れを模式的に表したものである。図中  $x$  は斜面上端から斜面上での流下方向に沿って計る距離であり、 $b(x)$  は距離  $x$  での斜面幅、 $\theta(x)$  は地表面勾配である。 $y$  は水平面上に投影した水平方向の距離、 $H$  は水深、 $L$  は斜面上端から下端までの  $y$  軸に沿った長さ

を表す。斜面要素は A 層と呼ばれる一様な深さ  $D$  の透水性の高い層に被覆されているとし、A 層が不飽和である場所では雨水は直ちに A 層に浸透して飽和側方流を形成し、水深が A 層厚  $D$  を越えた地点において地表面流が発生すると考える。見かけの水深を  $h$  とすると  $\gamma$  を A 層内の空隙率として、 $H < D$  のとき  $h = \gamma H$ 、 $H \geq D$  のとき  $h = H - D + \gamma D$  であり、 $\gamma H$  は見かけの中間流水深を、 $H - D$  は表面流水深を表わす。

$q$  を単位幅当りの地表面に沿う流量とすれば、斜面勾配・斜面幅の変化を考慮した斜面上の連続式、運動式は、

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{b(x)} \frac{\partial}{\partial x} \{qb(x)\} = r(x, t) \cos \theta(x) \quad (1)$$

$$\left. \begin{array}{l} 0 < h < \gamma D \text{ のとき } (0 < H < D \text{ のとき}) \\ q = \frac{k \sin \theta(x)}{\gamma} h \\ h \geq \gamma D \text{ のとき } (H \geq D \text{ のとき}) \\ q = \frac{\sqrt{\sin \theta(x)}}{n} (h - \gamma D)^m + \frac{k \sin \theta(x)}{\gamma} h \end{array} \right\} (2)$$

で表される。式中、 $r(x, t)$  は位置  $x$ 、時刻  $t$  での鉛直方向の降雨強度、 $k$  は A 層の透水係数、 $n$  は Manning の粗度係数、 $m = 5/3$  である。

ここで斜面上端から斜面に沿って計る距離  $x$  を、水平距離  $y$  に変換することを考える。 $x$  と  $y$  との間には

$$x = f(y) = \int_0^y \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2} dy \quad (3)$$

という関係があるので、これを基礎式に代入して次の変数変換

$$\left. \begin{array}{l} A(y, t) = \frac{h(f(y), t)B(y)}{\cos \theta(f(y))} \\ Q(y, t) = q(f(y), t)B(y) \\ B(y) = b(f(y)) \\ R(y, t) = r(f(y), t) \end{array} \right\} (4)$$

を施し、さらに  $\theta(f(y))$  を  $\theta(y)$  と書くことにすると、

連続式, 運動式は

$$\frac{\partial A(y, t)}{\partial t} + \frac{\partial Q(y, t)}{\partial y} = B(y)R(y, t) \quad (5)$$

$$Q(y, t) = B(y)F(\sin \theta(y), \frac{A(y, t) \cos \theta(y)}{B(y)}) \quad (6)$$

となる. ここで運動式(6)において,

$$\left. \begin{aligned} 0 < A(y, t) \cos \theta(y) < B(y)\gamma D \text{ のとき} \\ F(i, w) &= \frac{kiw}{\gamma} \\ B(y)\gamma D \leq A(y, t) \cos \theta(y) \text{ のとき} \\ F(i, w) &= \frac{\sqrt{i}}{n}(w - \gamma D)^m + \frac{kiw}{\gamma} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

である. 以上の諸式で,

$$\left. \begin{aligned} \sin \theta(y) &= -\frac{dz/dy}{\sqrt{1 + (dz/dy)^2}} \\ \cos \theta(y) &= \frac{1}{\sqrt{1 + (dz/dy)^2}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

であり, これらの値は, 斜面の縦断形状を表す三次スプライン補間式より簡単に求めることができる. なお, 初期条件・境界条件はそれぞれ

$$A(y, 0) = A_I(y) = 0, 0 \leq y \leq L \quad (9)$$

$$A(0, t) = A_B(t) = 0, t > 0 \quad (10)$$

で与えられるものとする.

## (2) 差分解法

上記の kinematic wave 流れを数値的に解くために, 椎葉による差分スキーム<sup>8)</sup>を参考にして以下のスキームを構成する. 今,  $(n+1)$  個の節点

$$y_j = j\Delta y, j = 0, 1, \dots, n, \Delta y = \frac{L}{n} \quad (11)$$

において, ある時刻  $t_i$  での  $A(y_j, t_i)$ ,  $Q(y_j, t_i)$  を既知とする. 初期条件式(9), 流量流積関係式(6)により  $t_i = 0$  のとき, これらの値は既知である.

ここで, 微小時間  $\Delta t$  後の  $t_{i+1} = t_i + \Delta t$  での流積  $A(y_j, t_{i+1})$  を求めることを考える.  $j = 0$  に対しては境界条件式(10)から

$$A(0, t_{i+1}) = A_B(t_{i+1}) \quad (12)$$

である.  $1 \leq j \leq n-1$  に対しては  $A(y_j, t_{i+1})$  を  $t = t_i$  の回りにテイラー展開して  $\Delta t$  の 2 次の項までとると

$$\begin{aligned} A(y_j, t_{i+1}) &= A(y_j, t_i) + \Delta t \frac{\partial A(y_j, t_i)}{\partial t} \\ &\quad + \frac{(\Delta t)^2}{2} \frac{\partial^2 A(y_j, t_i)}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (13)$$

となり, 連続式(5)を用いると

$$\begin{aligned} A(y_j, t_{i+1}) &= A(y_j, t_i) \\ &\quad + \Delta t \left( B(y)R(y, t) - \frac{\partial Q(y, t)}{\partial y} \right) \Big|_{y=y_j, t=t_i} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+ \frac{(\Delta t)^2}{2} \left[ B(y) \frac{\partial R(y, t)}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{\partial Q(y, t)}{\partial A} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left( B(y)R(y, t) - \frac{\partial Q(y, t)}{\partial y} \right) \right\} \right] \Big|_{y=y_j, t=t_i} \end{aligned}$$

となつて  $Q$  に関して時間微分項を含まない形となる. 上式中の空間微分をそれぞれ

$$\frac{\partial Q}{\partial y} \Big|_{y=y_j, t=t_i} \Rightarrow \frac{Q(y_{j+1/2}, t_i) - Q(y_{j-1/2}, t_i)}{2\Delta y} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{\partial Q(y, t)}{\partial A} \left( B(y)R(y, t) - \frac{\partial Q(y, t)}{\partial y} \right) \right\} \Big|_{y=y_j, t=t_i} \\ \Rightarrow \frac{G(y_{j+1/2}, t_i) - G(y_{j-1/2}, t_i)}{\Delta y} \end{aligned} \quad (15)$$

として空間差分で置き換えると  $A(y_j, t_{i+1})$  の計算式が得られる. ただし,  $0 < A(y, t) \cos \theta(y) < B(y)\gamma D$  のとき

$$\begin{aligned} &G(y_{j\pm 1/2}, t_i) \\ &= \left( \frac{k}{\gamma} \sin \theta(y_{j\pm 1/2}) \cos \theta(y_{j\pm 1/2}) \right) \\ &\quad \times \left\{ B(y_{j\pm 1/2})R(y_{j\pm 1/2}, t_i) \right. \\ &\quad \left. - \frac{Q(y_{j+1/2\pm 1/2}, t_i) - Q(y_{j-1/2\pm 1/2}, t_i)}{\Delta y} \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

$B(y)\gamma D \leq A(y, t) \cos \theta(y)$  のとき

$$\begin{aligned} &G(y_{j\pm 1/2}, t_i) \\ &= \left\{ \frac{\sqrt{\sin \theta(y_{j\pm 1/2})}}{n} \cos \theta(y_{j\pm 1/2}) m \right. \\ &\quad \times \left( \frac{\cos \theta(y_{j\pm 1/2})}{B(y_{j\pm 1/2})} \right) \\ &\quad \times \left. \frac{A(y_{j+1/2\pm 1/2}, t_i) - A(y_{j-1/2\pm 1/2}, t_i)}{2} - \gamma D \right\}^{m-1} \\ &\quad + \frac{k}{\gamma} \sin \theta(y_{j\pm 1/2}) \cos \theta(y_{j\pm 1/2}) \left\{ \right. \\ &\quad \times \left. \left\{ B(y_{j\pm 1/2})R(y_{j\pm 1/2}, t_i) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{Q(y_{j+1/2\pm 1/2}, t_i) - Q(y_{j-1/2\pm 1/2}, t_i)}{\Delta y} \right\} \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

(複号同順) である.  $j = n$  に対しては, 後退差分近似を用いて

$$\begin{aligned} A(y_n, t_{i+1}) &= A(y_n, t_i) + \Delta t \left( B(y_n)R(y_n, t_i) \right. \\ &\quad \left. - \frac{Q(y_n, t_i) - Q(y_{n-1}, t_i)}{\Delta y} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

とする. 以上の計算中の時間間隔  $\Delta t$  は, 次の Courant の条件

$$\frac{\Delta y}{\Delta t} \geq \frac{\partial Q}{\partial A} \Big|_{y=y_j, t=t_i}, j = 0, 1, \dots, n \quad (19)$$

を満たすようにとる.  $A(y_j, t_{i+1})$  が得られれば, 運動式(6)を用いて  $Q(y_j, t_{i+1})$  が得られる.

### 流域地形のモデル化

- (a) 三角形要素網モデルによって流域地形を表現するためのデータセットを生成する。
- (b) 斜面要素を抽出する。
- (c) 三次スプライン関数によって斜面要素を表現するためのデータを算出する。



### 流れのモデル化と流出シミュレーション

- (d) 河道区分の計算順序を決定する。
- (e) 流出シミュレーションの計算期間を設定する。
- (f) 1つの河道区分に含まれる全ての斜面要素からの流出量時系列を(e)で設定した計算期間分算定し記憶する。
- (g) 記憶した斜面要素群からの流出量を河道区分への側方流入量とし、河道区分上端からの流入量(上流河道区分からの流出量)を上流域条件として河道区分下端の流量時系列を求め記憶する。
- (h) (f), (g)の手順を(d)で決定した河道区分の計算順に従って実行し、流域下流端での流量系列を求める。

図-3 流出シミュレーションの実行手順

## 5. 河道網における流れの追跡手法

前章までの準備をもとに、斜面要素一つ一つにおける斜面流れを追跡し、さらにそれを河道網への入力として河道流れを追跡することによって流域下端での流出量を算定する。河道における流れも斜面と同様に kinematic wave モデルを用いて追跡する。図-3は、流出シミュレーション実行するための手順を示したものである。

流出計算の過程において、図-3(f)で算定する斜面要素群から河道区分への流出量は、一つの記憶場所を設定し、そこに一つの河道区分に含まれる全ての斜面要素からの流出量時系列を記憶させる。ここで河道区分とは、水源または合流点から、一つ下流の合流点または流域下端までの河道網の一部分を意味する。記憶した斜面要素群からの流出量はそれらが接続する河道区分からの流出量が算定できた時点で消去しても良い。しかし、図-3(g)で算定する各河道区分からの流出量時系列は、その河道区分に接続する下流の河道区分の計算が終了するまで保存しなくてはならず、各河道区分からの流量系列の記憶場所の量は図-3(d)の河道区分の計算順序に依存する。

この河道区分の計算順序に関して、高棹・椎葉<sup>11)</sup>、陸ら<sup>12)</sup>は詳細に議論を展開しており、一つの河道区分からの流量系列を記憶するために必要な記憶容量を1記憶単位とすると、河道流の追跡計算に利用する入出力のための記憶場所は、最大位数分の記憶単位を用意しておけばよいことを証明し、河道追跡の流出計算順序の系統的な算定手法を提案している。ここでは、これらと同様のアルゴリズムによって河道区分の計算順序を決定した。

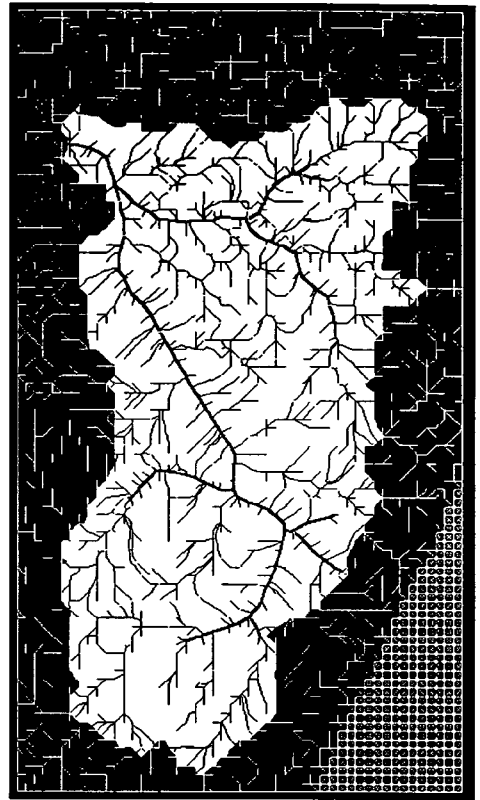


図-4 白坂試験地の流域界の自動抽出

## 6. 実流域への適用

東京大学愛知演習林白坂流域(0.88 km<sup>2</sup>)を対象として本モデルを適用する。その際、斜面要素の形状の近似方法として、スプライン関数による方法と、従来よく行なわれている矩形近似による方法を取り上げ、斜面形状の表現手法の違いが流出シミュレーション結果に及ぼす影響について述べる。また、流域スケールが流出に及ぼす影響について調査する。

### (1) 白坂流域の三角形要素網表現

白坂流域を三角形要素網で表現するために、空間分解能 20 m のメッシュ標高データ、および 1/5,000 都市計画図をもとに読みとった流路位置の点列のデータを入力データセットとして用いた。本流域を三角形網モデルで表現した結果、最大河道位数が 6、総河道区分数は 1151 個、総斜面要素数は 2851 個となった。図-4は、流域の三角形要素網表現をもとに流域内部を自動的に抽出した図である。流域内部の黒い線は河道網を表しており、流域の左上(北西端)に流域下端が存在する。

(2) 斜面形状の表現手法の違いが流出シミュレーション結果に及ぼす影響

図-5 は、抽出した三角形要素群を矩形で近似することを表わした模式図である。図中の黒丸は、河道網を構成する頂点であり、三角形要素群は、河道網を構成する頂点と頂点にはさまれた河道網の一部に寄与する斜面要素を表わす。この斜面要素を矩形で近似するために、斜面幅・斜面長・斜面勾配を

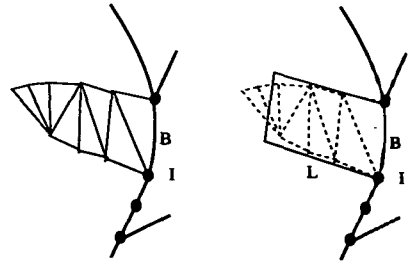


図-5 斜面要素の抽出とその矩形近似

- 斜面幅：河道に接している三角形要素の辺を水平面に射影した長さ
- 斜面長：斜面要素の面積を、各三角形要素を水平面に投影した面積の和として求め、その値を斜面幅で割った値
- 斜面勾配：各三角形要素の勾配を各三角形要素の面積で重みをつけて平均した値

として決定する。流域は、斜面長・斜面幅・斜面勾配の異なる多数の矩形斜面とそれらをつなぐ河道網で構成されることになる。斜面要素をスプライン関数で表現する手法は 3. で述べた通りである。

斜面要素を上記の異なる形式で表現したときの基本的な流出特性の差異を把握するために、以下の条件で流出シミュレーションを行なった。降雨は、継続時間が 1 時間、降雨強度 5 mm/hr の空間的に一様な矩形降雨を与え、与えた降雨はすべて流出するものとした。流れのモデルパラメータは李が同流域で行なった研究<sup>13)</sup>や砂田が荒川試験地を対象として行なった研究<sup>14)</sup>などを参考にして流域全体で、透水系数は 1.4 cm/sec, A 層空隙率は 0.15, 粗度係数は斜面では 0.2 sec/m<sup>1/3</sup>, 河道では、0.05 sec/m<sup>1/3</sup>, 河道幅 1.0 m を与えた。

白坂流域下流端における流出高のハイドログラフを図-6 に示す。Case 1, Case 2, Case 3, Case 4 は

- Case 1: A 層厚をいずれも 0mm とし各斜面要素をスプライン近似および矩形近似した場合の流出高
- Case 2: 各斜面要素を矩形近似し, A 層厚を 0 mm, 5 mm, 20 mm, 70 mm と変化させた場合の流出高
- Case 3: 各斜面要素をスプライン近似し, A 層厚を 0 mm, 5 mm, 20 mm, 140 mm と変化させた場合の流出高
- Case 4: 各斜面要素を矩形近似し A 層厚を 140 mm とした場合の流出高と, スプライン近似し A 層厚を 0 mm, 140 mm とした場合の流出高

を示したものであり、図中のたとえば spline D5 は斜面要素をスプライン関数で表現し A 層厚を 5 mm に設定した場合の流出シミュレーション結果を表す。地表面流のみを考えた Case 1 では、ハイドログラフの立ち上がりおよび低減とも、斜面要素を矩形近似した場合の方がスプライン近似した場合よりも早くおとずれている。実際の斜面要素の形状は斜面頂部よりも斜面下部

のほうが斜面幅が大きいのが一般的であるため、矩形で近似すると斜面長を実際の長さより短く見積もってしまう。このため、矩形で近似した場合は、流出の発生を早めに算定する結果となる。

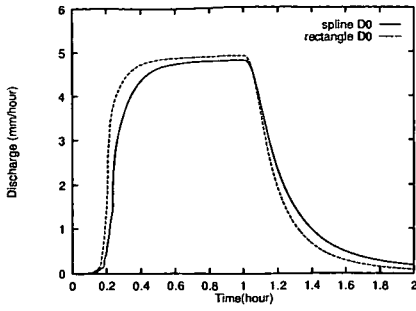
Case 2 で A 層厚を 0 mm, 5 mm, 20 mm, 70 mm と変化させたときの応答は、A 層厚が 20 mm 以上になると全く一致した。これは、A 層厚が 20 mm 以上では地表面流が発生していないことを示している。一方、Case 3 では、A 層厚 20 mm と A 層厚 140 mm とではハイドログラフが異なるため、A 層厚 20 mm の場合は、中間流・地表面流とも発生していたことがわかる。つまり、同じ A 層厚を設定していても、矩形近似した場合は地表面流が発生せず、スプライン近似した場合は地表面流が発生している。これは、

- スプライン関数による斜面要素表現は、斜面勾配の変化を表現することができるため、下に凹な形状をしている斜面下部において地表面流が発生しやすいという構造を表現できていること
- スプライン関数による斜面要素表現は、斜面の収束・発散を表現することができるため、収束型の斜面下部で地表面流が発生しやすい構造を表現できていること

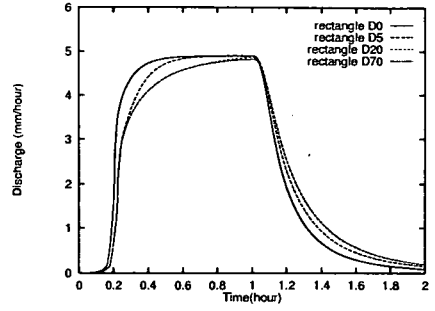
の結果が現れていると考えることができる。

Case 4 は、以上の 3 つのケースから 3 種類のハイドログラフを抜き出したものである。矩形近似、スプライン近似ともに A 層厚が 140 mm の流出高を比較すると、矩形近似した場合のハイドログラフは立ち上がり早く流量も定常状態に達しているが、スプライン近似した場合は流量は定常状態に達せず低減の裾の長いハイドログラフとなっている。この場合のように地表面流が発生しにくい状況を設定して両者を比較すると、Case 1 の地表面流しか発生しない場合よりも一層、斜面形状の表現手法の違いが流出シミュレーション結果の違いに与える影響は大きくなるのがわかる。

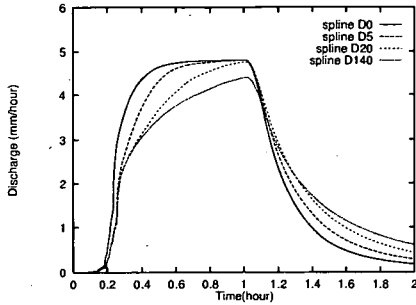
また、今回の降雨条件では、矩形近似で地表面流が全く発生していない A 層厚 140 mm の流出高ハイドログラフとスプライン近似で地表面流しか発生していな



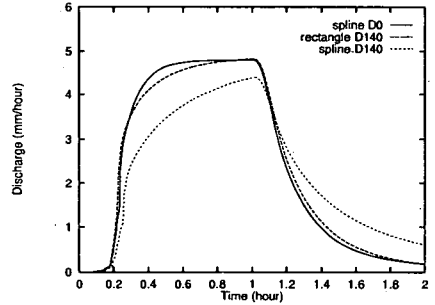
(a) Case 1



(b) Case 2

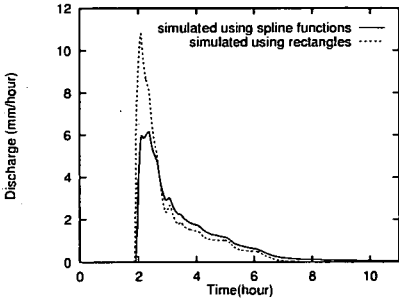


(c) Case 3

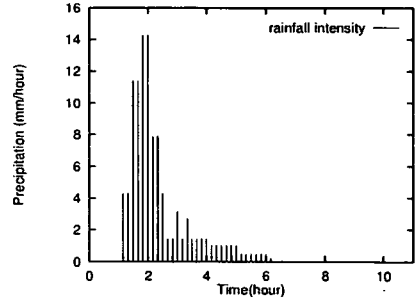


(d) Case 4

図-6 最下流端における流出高のハイドログラフ



(a) 流出高のシミュレーション結果の比較



(b) 設定した降雨強度

図-7 現実の降雨を想定した流出シミュレーション結果

いA層厚0mmの流出高ハイドログラフとがかなり似た形状を示すという結果を得た。これは、流域地形の表現方法によっては、流出の形態が全く異なるモデルを用いても似通った流出シミュレーション結果が得られる例であり、流出形態を正しく再現する上でも流域地形を実地形に即して表現することの重要性を示している。

### (3) 現実の降雨を想定した流出シミュレーション

前節で示した二つの流出場の表現手法に対して実際の降雨を想定した流出シミュレーションを行なった。モデルパラメータは前節とほぼ同様の値を設定し、スプライン近似する場合も矩形近似する場合も、A層厚50cm、

透水係数1.4cm/sec、A層空隙率は0.15、粗度係数は斜面では $0.25 \text{ sec/m}^{1/3}$ 、河道では $0.05 \text{ sec/m}^{1/3}$ 、河道幅は位数ごとに0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0mを与えた。また、有効降雨としては、初期損失雨量を考えそれを超える降雨は全て流出するとした。具体的には、A層における見かけの水深の初期値を $-5 \text{ mm}$ とし、見かけの水深が正となった場合に流量が発生するとした。流域下流端における流出シミュレーション結果(流出高)を図-7(a)に示す。また、設定した降雨強度を図-7(b)に示す。

斜面形状の表現形式の違いによって流出計算結果にかなりの違いが生じている。したがって、これらのモデルを現実の同一の出水に適合させる場合、両者のモデル

表-1 河道位数による斜面のグループ分け

| 位数   | 平均流域面積 (km <sup>2</sup> ) | 平均流域面積が全流域に占める割合 (%) | 河道区分の個数 |
|------|---------------------------|----------------------|---------|
| 位数 1 | 0.0006                    | 0.07                 | 576     |
| 位数 2 | 0.004                     | 0.44                 | 195     |
| 位数 3 | 0.017                     | 1.94                 | 140     |
| 位数 4 | 0.079                     | 9.03                 | 78      |
| 位数 5 | 0.38                      | 43.2                 | 71      |
| 位数 6 | 0.87                      | 98.5                 | 7       |

ルパラメータはかなり異なったものになることが予想される。等価粗度法のようにモデルパラメータを地形表現手法とセットとして考えるチューニングパラメータと考えれば、両者のモデルパラメータに違いが生ずることも不自然ではないが、観測事実に基づく流出モデルを構成していくことを考えると、モデルパラメータは流域の特性を反映する唯一のものと考えたい。実際の流域での地形特性や土壌特性等をそれぞれ分離してそれらの効果を導入できるような流出モデルの構築を目指そうとすると、土壌特性等を適切にモデルに反映させる上でも、実地形に即して流出場を表現することが非常に重要となることがわかる。

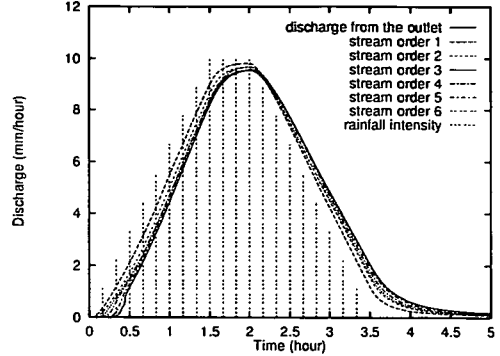


図-8 河道位数ごとの平均流出高ハイドログラフ

#### (4) 流出現象の流域スケールに関する考察

Wood ら<sup>15)</sup>は、分布型流出シミュレーションモデルの一つである TOPMODEL<sup>16)</sup>を用いて流域スケールと流出特性との関連を論じている。彼らは、流域面積が約 1 km<sup>2</sup> 以上になると個々の斜面特性が流出特性に影響を及ぼさなくなっていくことを流出シミュレーションによって示し、この流域サイズを REA (Representative Elementary Area) と呼んで基本的な流域単位と位置付けている。本節では、筆者らが提案した流出モデルを用いて、白坂流域を対象として河道位数および流域面積の変化に伴って流出高がどのように変動するかを調査する。

##### a) 河道位数と流出高との関連に関する考察

表-1 は白坂流域における河道位数ごとの平均流域面積、平均流域面積の全流域面積に対する割合、および河道区分の個数を示したものである。白坂流域のすべての河道区分からの流出シミュレーション結果を記憶しておき、河道位数ごとに流出高の平均ハイドログラフと平均ハイドログラフからのばらつきを調査する。各斜面形状はスプライン関数で表現し、流れのモデルパラメータは前節と同様の値を用いる。A 層厚と初期損失量はそれぞれ 20 mm, 0 mm とし、降雨は、降り始めから 1 時間半で 10 mm/hr に達し、30 分間 10 mm/hr で降り続いた後、その後 1 時間半後に降り止むような台形型として与えた。

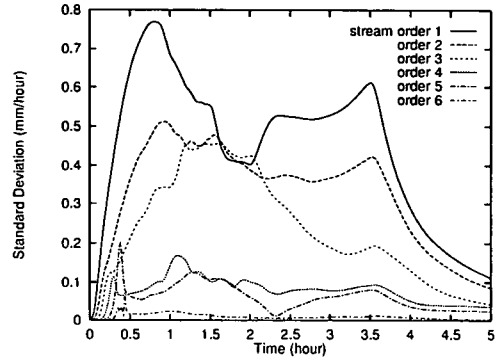


図-9 河道位数ごとの平均ハイドログラフに対する標準偏差

図-8 は流域下端における流出高、河道位数ごとの平均流出高ハイドログラフ、および与えた降雨強度を示したものであり、図-9 は河道位数ごとの平均流出高ハイドログラフに対する標準偏差を示したものである。特に河道位数 1 の一次谷からの流出のばらつきが顕著であることがわかる。流量ピーク時付近で他の時刻に比べてばらつきが小さくなるのは、河道位数 1 の河道では河道による遅れ効果がほとんど無いためにほぼ同じ時刻に同様の流出高でピークに達するためと考えられる。このばらつきの様子は、河道位数が増えるにしたがって減少し、特に河道位数 3 と河道位数 4 の間では



表-2 流域面積による斜面のグループ分け

| グループ    | 流域面積 (km <sup>2</sup> ) | 全流域面積に占める割合 (%) | 河道区分の個数 |
|---------|-------------------------|-----------------|---------|
| group1  | 0 ~ 0.00044             | 0 ~ 0.05        | 311     |
| group2  | 0.00044 ~ 0.00088       | 0.05 ~ 0.1      | 136     |
| group3  | 0.00088 ~ 0.0088        | 0.1 ~ 1.0       | 321     |
| group4  | 0.0088 ~ 0.018          | 1.0 ~ 2.0       | 71      |
| group5  | 0.018 ~ 0.044           | 2.0 ~ 5.0       | 71      |
| group6  | 0.044 ~ 0.088           | 5.0 ~ 10.0      | 38      |
| group7  | 0.088 ~ 0.18            | 10.0 ~ 20.0     | 24      |
| group8  | 0.18 ~ 0.35             | 20.0 ~ 40.0     | 30      |
| group9  | 0.35 ~ 0.53             | 40.0 ~ 60.0     | 38      |
| group10 | 0.53 ~ 0.70             | 60.0 ~ 80.0     | 4       |
| group11 | 0.70 ~ 0.88             | 80.0 ~ 100.0    | 7       |

らつきが大きく減少する。これは、下流に行くに従って様々な斜面要素からの流出を含んで行くため、どの河道区分からの流出も同じような平均的な状態を示すようになっていくことを示している。ただし、このことは、下流に行くにつれて流域地形が流量特性に影響を及ぼさなくなるということではない。河道位数が大きくなるにつれて、個々の斜面形状がハイドログラフに及ぼす影響は小さくなるが、斜面形状全体としての特性、たとえば対象流域の斜面長の分布といった特性はハイドログラフの形成に影響することに注意しておく必要がある。

b) 流域面積と流出高との関連に関する考察

河道位数による分類では、同じ位数をもつ河道区分でもその流域面積は様々な値をとり、また河道位数も地図等のスケールによって異なるので、本節では流域面積をもとに同様の検討を行なう。

前節での流出計算結果を流域面積ごとに整理し、表-2に示すように流域面積ごとに11のグループに分類して各グループごとに流出高平均ハイドログラフを求め、それに対する標準偏差を求める。各グループは河道区分を単位として上流から流域面積を累加し、累積面積が全流域面積に占める割合で分類する。

各グループごとの平均ハイドログラフに対する標準偏差を 図-10 に示す。全流域面積に対する割合が10%程度以上、すなわち、流域面積が約0.1km<sup>2</sup>以上になると流出高のばらつきが非常に小さくなるのがわかる。この結果は、河道位数に対する検討を行ったときに位数4以上の河道ではばらつきが極端に減少し、位数4の流域の全流域面積に占める平均的な割合が約9%であったことに符合する。このことは流域面積が0.1km<sup>2</sup>以下では、流出は部分流域ごとにかなり異なった様相を示すが、0.1km<sup>2</sup>以上になると、どの部分流域からの流出も同じような形態を示すようになり、各部分流域からの流出特性に個々の斜面形状が影響しないようになることを示している。つまり、この値よりも小さ

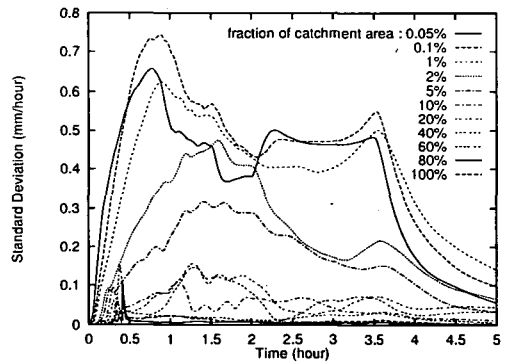


図-10 流域面積ごとの平均ハイドログラフに対する標準偏差

な流域を対象とする場合は、個々の斜面形態を直接考慮しなければならないのに対して、この値よりも大きな流域を対象とする場合は、個々の斜面形状ではなく斜面形状全体としての特性を考慮すべきことを意味している。

7. おわりに

本論では、斜面勾配・斜面幅の変動をパターン化せず三角形網モデルから算定する斜面勾配・斜面幅のデータを利用して三次スプライン補間関数を構成し、斜面勾配・斜面幅が連続的に変化する斜面要素モデルを構成した。次に、そこでの雨水の流れを、中間流と地表面流とを統合的に表す流量流積関係式を用いた kinematic wave モデルで追跡する手法を提案し、流域地形に即した分布型流出シミュレーションモデルを開発して、流出現象の本質である雨水の流動を流域地形に忠実に再現しようとした。また、このシステムを東京大学愛知演習林白坂流域に適用して斜面形状の表現形式が流出シミュレーション結果に大きく影響を及ぼすことを示すと同時に、流出現象の流域スケールに関して定量的

な評価を行い、流域面積が 0.1 km<sup>2</sup> 以上になると個々の斜面特性よりも流域斜面形状全体としての特性が重要となることを述べた。

Wood らはこの値が約 1 km<sup>2</sup> であることを数値シミュレーションで示したが、本研究の結果では約 0.1 km<sup>2</sup> となった。この違いは、解析に用いた流出モデルの違い、対象とする流域の大きさの違い、流域特性を表現するための空間分解能の違いなどによって現れると考えられるが、根本的にこうした流域スケールに絶対的な値が存在するのかという疑問も起こる。このような値は絶対的な値ではなく全流域面積の何割といった相対的な値ではないのかといったことも含めて、多数の流域で種々の分布型流出モデルを用い、現地観測と合わせてこうした流域サイズの存在を検証せねばならないであろう。なお、このような値は、どのくらいの大さの流域を一まとめとして考えてもよいかという高樟の基準面積<sup>17)</sup>の下限値と考えることもできる。この上限値を抽出することも重要な課題である。

謝辞：本研究は文部省科学研究費試験研究 B (代表：椎葉充晴)、総合研究 A (代表：西尾邦彦) および河川情報センターの補助を受けて行なわれた。また東京大学愛知演習林の DEM は宇宙開発事業団によって作成されたものを用いた。ここに謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 高樟琢馬, 椎葉充晴, 立川康人: TIN-DEM データ形式による流域地形の表現について, 水工学論文集, 第 35 巻, pp. 75-80, 1991.
- 2) 高樟琢馬, 椎葉充晴, 立川康人, 大江郁夫: TIN-DEM データ形式を用いた流域場情報システムの開発, 水工学論文集, 第 36 巻, pp. 677-684, 1992.
- 3) Tachikawa, Y., Shiiba, M., and Takasao, T.: Development of a basin geomorphic information system using a TIN-DEM data structure, *Water Resources Bulletin*, vol. 30, no. 1, pp. 9-17, 1994.
- 4) 立川康人, 椎葉充晴, 高樟琢馬: 三角形要素網による流域地形の数理表現に関する研究, 土木学会論文集, 第 558 号/II-38, pp. 45-60, 1997.
- 5) Moore, I. D., Grayson, R. B., and Ladson, A. R.: Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications, *Terrain Analysis and Distributed Modelling in Hydrology* (ed. K. J. Beven and I. D. Moore), John Wiley & Sons, pp. 7-34, 1992.
- 6) 陸晏皎, 小池俊雄, 早川典生: 分布型水文情報に対応する流出モデルの開発, 土木学会論文集, 第 411 号/II-12, pp. 135-142, 1989.
- 7) Moore, I. D. and Grayson, R. B.: Terrain-based catchment partitioning and runoff prediction using vector elevation data, *Water Resources Research*, vol. 27, no. 6, pp. 1177-1191, 1991.
- 8) 高樟琢馬, 椎葉充晴: Kinematic Wave 法への集水効果の導入, 京大工学防災研究所年報, 第 24 号 B-2, pp. 159-170, 1981.
- 9) 高樟琢馬, 椎葉充晴, 立川康人: 流域微地形に対応した準 3 次元流出モデル, 京大工学防災研究所年報, 第 31 号 B-2, pp. 341-355, 1988.
- 10) 高樟琢馬, 椎葉充晴, 立川康人: 流域微地形に対応した準 3 次元流出モデルと流域規模モデルの自動作製, 第 33 回水理講演会論文集, pp. 139-144, 1989.
- 11) 高樟琢馬, 椎葉充晴: 河川流域の地形構造を考慮した河川流域の出水解析法に関する研究, 土木学会論文集, 第 248 号, pp. 69-82, 1976.
- 12) 陸晏皎, 早川典生, 小池俊雄: 河道網構造に基づく最適追跡順番の決定法, 土木学会論文集, 第 473 号/II-24, pp. 1-6, 1993.
- 13) 李 憲浩: 林相の経年変化が水流特性に及ぼす影響, 京大工学農学部演習林報告, 第 86 号, pp. 77-178, 1991.
- 14) 砂田憲吾: 洪水の数値予報, 第 7 章, 森北出版, pp. 100-119, 1989.
- 15) Wood, E. F., Sivapalan, M., Beven, K., and Band, L.: Effects of spatial variability and scale with implication to hydrologic modeling, *Journal of Hydrology*, vol. 102, pp. 29-47, 1988.
- 16) Beven, K., Kirkby, M. J., Schofield N., and Tagg, A. F.: Testing a physically-based flood forecasting model (TOPMODEL) for three U. K. catchments, *Journal of Hydrology*, vol. 69, pp. 119-143, 1984.
- 17) 高樟琢馬: 流出機構, 水工学に関する夏期研修会講義集 (A 河川コース), 土木学会水理委員会, pp. 3-1 - 3-43, 1967.

(1996. 6. 21 受付)

## DEVELOPMENT OF A DISTRIBUTED RAINFALL-RUNOFF MODEL BASED ON A TIN-BASED TOPOGRAPHIC MODELING

Yasuto TACHIKAWA, Akira HARAGUCHI, Michiharu SHIIBA and Takuma TAKASAO

A distributed rainfall-runoff simulation model based on the BGIS (Basin Geomorphic Information System) is developed. By using the BGIS, a watershed basin is represented as a set of slope elements of a quasi-three-dimensional shape by making use of cubic spline functions. On an approximated slope element, water movement is represented by combined surface-subsurface kinematic wave equations considering a change of slope gradient and slope width, and discharges from distributed slope elements are routed to a basin outlet through a channel network. BGIS is applied to the Shirasaka experimental basin (0.88km<sup>2</sup>) in the Tokyo University Forest in Japan, and runoff simulations are carried out.