

地形情報処理による流出解析の手法に関する研究

A STUDY ON A PROCEDURE OF RUNOFF ANALYSIS BY TOPOGRAPHICAL INFORMATION PROCESSING

丸 安 隆 和*・村 井 俊 治**

By Takakazu Maruyasu and Shinji Murai

1. 研究の目的

毎年大雨が降るとどこかで必ず地すべりや崖崩れがおきて自然が破壊され、生命や財産までが失われる。このような災害は道路や造成地など人工的に手を加えられたところに多く発生し、蒙む被害も大きい。

このような災害を防ぐことはできないのであろうか。もしできたとしてもそれには莫大な費用が必要であるに違いない。実際には、科学的にいろいろな条件を考慮して被害の程度と災害のおこる危険度を算出し災害防止のための最も効果的な方法と優先順位を一定の予算内で考えることが必要となろう。

著者らはこれらの点に着目して土讃線沿いの地域を対象に地すべり崩壊の統計的研究を行なった¹⁾。この研究は確かに自然災害の危険度を科学的に割出す手法としては新しい試みであったが、この研究の中で、自然災害に関連する要因として取扱ったのは主として素因と考えられるものだけであった。その後災害のパターンを数多く分析して見ると、地すべり、崩壊に最も関連の深い要素は地表水の流出に関連していることがわかった。この点で先の研究は不完全なものであったといわざるを得ない。

地表に降った雨がどのような経路にしたがって流れ、それらがどのくらいの時間のうちに、どこの個所にどのように集まってくるかを考えることが自然災害の危険度を解析するうえで決定的に重要な課題となることに気付いたのである。

雨水の流出機構については、水文学の中で数多くの研究がなされている。しかしこれらの研究の中で流出に最も関連の深い地形形状との結びつき、植生その他の地表面の状態との結びつきについて刻明に解析されたものは見当たらないようである。

この研究は、これらの点に着目し、航空写真を用いて地形情報を抽出し、それを処理して雨水の流出機構を解

析するシステムを開発し防災対策への資料を提供しようとしたのである。

山腹斜面に降った雨がどのように流下するかについての一般的な法則はまだ確立されていないようであったから、これらについては大胆な仮定に基づいて処理したが、水理的に研究が進んでその一般法則が確立されれば、このシステムの中に新しく開発される法則を取り入れることはそれほど困難ではないものと思われる。

この研究では解析の対象に利根川水系宝川流域を選んだが、この流域は農林省の試験林で割合多くの雨量、流出の観測データがあり、それを利用することができたからである。またこの地域は地形が急峻であり、がけ崩れが二、三見うけられるところでもあったからである。

この研究で開発した数多くの手法たとえば航空写真を用いての情報収集、コンピュータによる数値地形モデルの作成、ビジュアルな形での図形処理、雨水の流出シミュレーションなどと、これらの手法を結合させた流出解析システムは、水文学への新しいアプローチとしてより、むしろ造成地、道路、鉄道における広域防災の計画に新しい貢献がなされるであろうことを希ったのである。

2. 地形を考慮した流出解析手法の基本的な考え方

山間部に降った雨は、山腹斜面の最急勾配方向に沿って沢あるいは河に流れこむ。沢あるいは河の流れは山腹斜面からの横流入と、上流からの流れとが合成された流れである。したがって雨水の流出機構は、雨が地形曲面の流線に沿って沢あるいは河に到達するまでの運動と、それらが集合される運動とで構成される。

雨が沢あるいは河に到達するまでの運動を解明するために、まず地形を連続した曲面と考え、この曲面の流線を求める。このために、本研究では、流域内の地域を多数の格子に分割し、航空写真測量によってその格子点の地盤高をデジタルな形で抽出した。次に、これらの地

* 正会員 工博 東京大学教授 生産技術研究所

** 正会員 工博 東京大学助教授 生産技術研究所

形点を用いて隣りあう格子曲面が互いになめらかに連続するように、地形曲面を計算機のなかに三次曲面群として記憶させた。このとき、流域内に降った雨が流れる経路すなわち流線は、三次曲面の最急勾配方向の軌跡として求められる。本研究では、流域内のそれぞれの格子点に雨が降ったと考え、格子点から出る流線群を計算機のなかに作り出しておいた。

次に、流線に沿って流れる雨水の運動を、地形曲面と重力に拘束され、曲面の粗度抵抗をうける物体の運動として取り扱おうとした。したがって雨水の流下速度は、流量と地形の最急勾配と粗度抵抗の関数として表わした。

沢あるいは河での雨水の運動は、どこの山腹に降った雨がどこの沢に到達し、それがどのように合流しながら流れてゆくかを求める問題と考えられる。この問題を解くために本研究では、流域を多数の小流域に分割し、それらの小流域と河、河と河の対応関係あるいは順序関係を水系ネットワークを作成することによって、自動的に計算機内で雨水の合成を処理できるようにした。本研究では、ひとたび、ある流域の流線群と水系ネットワークが計算機内に記憶されると、あとは降雨データさえ与えられれば各小流域の終端におけるハイドログラフがただちにラインプリンタによって出力される。ただし、このとき得られるハイドログラフのパターンは、地形曲面の粗度抵抗をどのような値として与えるかによって異なる。粗度抵抗は場所により、降雨量により異なる値と考えられる。本研究では粗度抵抗の逆数を取り流過係数なる係数を導入したが、この係数として前もって適正な値を与えるほどの資料をもちあわせていなかったため、どのような流過係数を与えるとどのようなパターンのハイドログラフが得られるか、実際の流出記録と比較しながらその挙動を探ろうとした。

以上のべた雨水流出解析の手法を流れ図に表わすと図-1 のようになる。

3. 地形を考慮した流出解析手法の設定条件

本研究では、次に示すような設定条件のもとに洪水流出解析手法の開発を行なった。

(1) 豪雨時での流出解析を行なうことを本手法の目的とする。したがって流域内の含水率が十分高い状態のときに強雨が来たときをモデルに選んで流出解析を行なう。

(2) 流出解析を行なう流域が小さく、かつ地形的に急峻な山間部を対象とする。このような流域では直接流出率が十分高いと考える。

(3) 流域を適当な間隔の格子に分割し、各格子点か

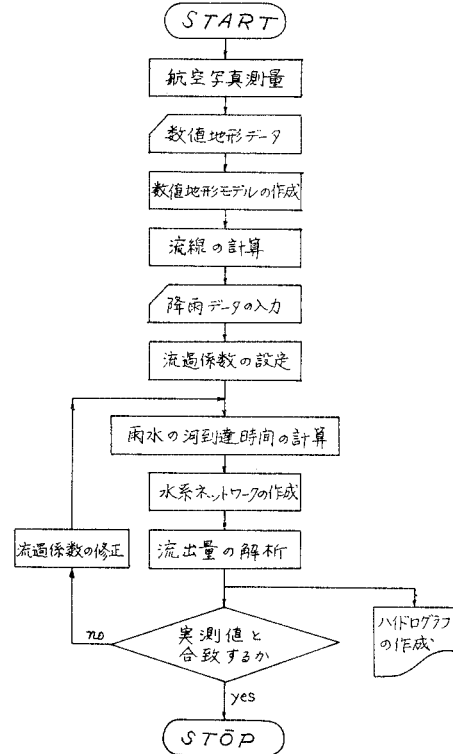


図-1 地形情報処理による雨水流出解析の流れ

ら沢または河までに至る流線上を雨水が流れるものとする。このとき流線は多数の連続する微小空間直線群とする。この場合格子間隔は用いる航空写真の縮尺を考慮した上で決めなければならない。

(4) 沢あるいは河は、2本以上の流線が合流するときをもって定義する。したがって、おのおのの流線は沢あるいは河に至るまでは互いに交わらないものとする。

(5) 沢あるいは河は流線と同様に、微小な連続する空間直線群として表わされる。

(6) 雨水は、同一空間直線上では等速運動と仮定する。流路が空間的に屈曲している場合には、勾配または平面的な変化によるエネルギー損失を考える。

(7) 河に流入した多数本の雨水がつくる流れは、微小直線群のそれぞれの始端における流量、到達時刻、および流速をもとにして合成される。

(8) 流域内では一様に同じパターンおよび量の降雨があったと仮定する。

4. 雨水流出解析に必要な地形情報の抽出とその自動処理²⁾

(1) 航空写真測量による地形情報の抽出

雨水の流出機構に大きな影響力をもつ地形情報には、

地盤高、地形勾配などの幾何学的な情報と、地質、植生、土地利用など定性的な情報とがある。

ところで、航空写真には位置の情報と色調差による情報とが含まれている。位置の情報は写真測量により地形の形状に変換され、等高線図や断面図などの図解的な形で表現されると同時に (X, Y, Z) の座標をもつ数値的な点群として抽出され得る。

色調差による情報は写真判読の技術により、地質、植生、土地利用などの定性的な情報に変換される。写真判読は技術者の経験をたよりとして行なわれるので、これらの定性的情報は、航空写真を刻明に観察することによって得られる。

雨水の流出機構にもっとも大きく影響する幾何学的な地形情報は、雨水の流出経路となる流線の最急勾配であろう。航空写真から抽出できる地形データは地形上の点の座標 (X, Y, Z) だけであり、最急勾配を直接抽出できない。

したがって、航空写真測量によって抽出された (X, Y, Z) の点の座標をもとにして、地形をなめらかに連続した曲面として表現し、その曲面の最急勾配およびその軌跡である流線を求めなければならない。

これらの手続きは、すべて数値的に処理することが可能であるから、計算機を利用することにより、きわめて迅速に処理し、かつその結果を計算機内に記憶しておくことが可能である。

次に地形情報処理の手法と、それを本研究で用いたモデル地域に応用した例を以下に示そう。

(2) モデル地域における地形情報処理

以下にのべる雨水流出解析の手法は、群馬県利根川水系室川の支流初沢の農林省林業試験所が管理している森林理水試験地域に応用された。

a) モデル地域の原地形¹⁾

図-2 は初沢流域の等高線図である。図-3 は同じ地域の航空写真に計算機で自動作画した等高線を重ね焼きしたステレオ写真である。この流域は、約

117.9 ha の流域面積をもち、全体にきわめて急峻な地形を有している。航空写真からもわかるように、一部伐採されている箇所をのぞき全体が樹木におおわれ、一部に山くずれが生じている。ところどころに小さな沢があるが、常時流れているわけではなく、河道もきわめて小

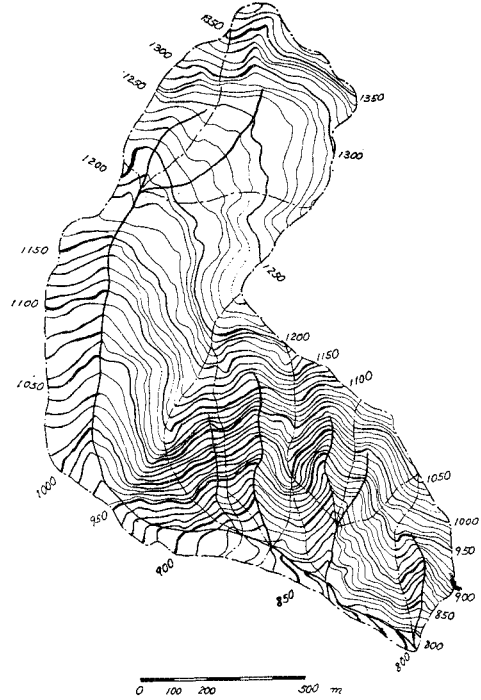


図-2 初沢流域の地形図

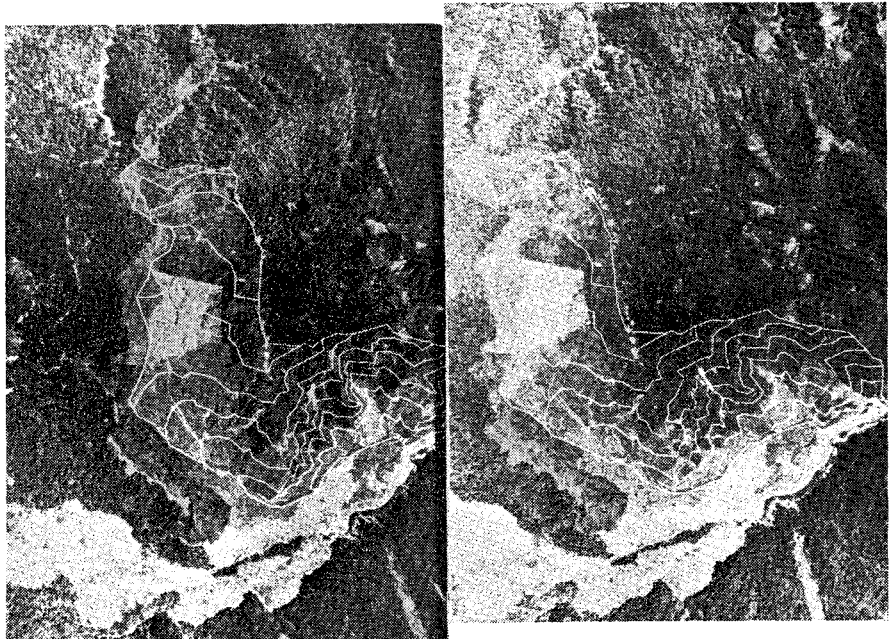


図-3 初沢流域の航空写真ステレオペア

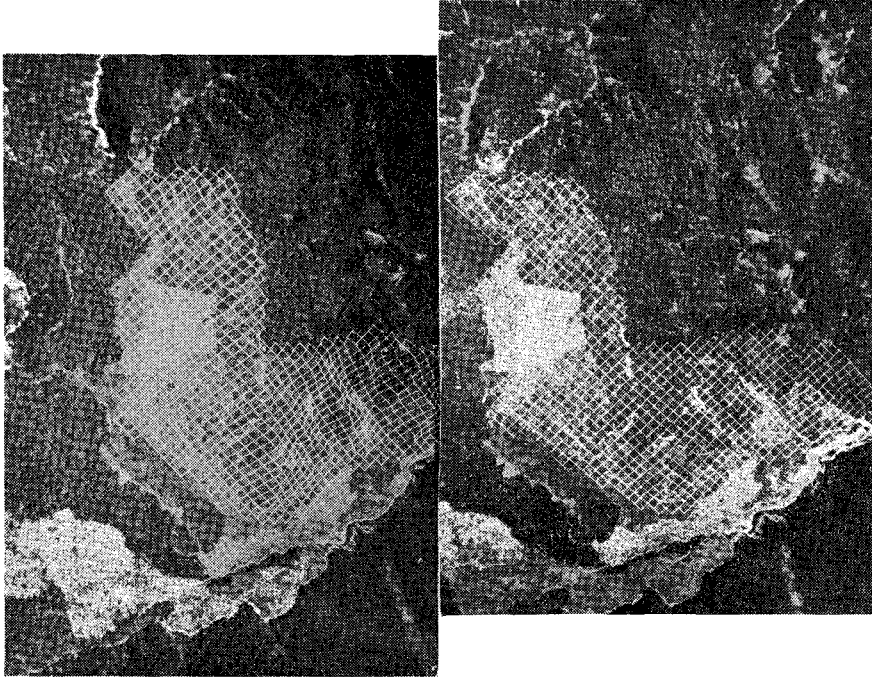


図-4 メッシュを重ね焼きした航空写真

い。この沢の終端部に堰が設けられており流量測定が行なわれている。

b) デジタル Terrain モデルの作成

初沢流域に 40 m 間隔のメッシュをかけ、それぞれの格子点の地盤高を航空写真測量により抽出した。これらの地形データから、それぞれ隣りあうメッシュがなめらかに連続する曲面で構成されるように、次に示すような三次多項式からなる曲面をおおののメッシュにあてはめた。

$$z=f(x, y)=\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 a_{ij} x^{i-1} y^{j-1}$$

$$0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1$$

この三次曲面は、メッシュの間隔を単位とする座標系をもち、16 の係数 a_{ij} は、格子の 4 隅の点における地盤高 z 、 x 方向勾配 $\partial z/\partial x$ 、 y 方向勾配 $\partial z/\partial y$ およびねじれ $\partial^2 z/\partial x \partial y$ の計 16 の境界条件式により求められる。

図-4 は 40 m 間隔のメッシュに対応する点を中心投影変換し、自動製図させたメッシュをもとの航空写真に重ね焼きしたものである。

上記の三次曲面は一つ一つのメッシュにそれぞれあてはめられ、全体の地形曲面は、なめらかに連続する三次曲面群で構成されている。

c) 地形最急勾配

地形曲面 $z=f(x, y)$ の任意の点 (x, y) における最急勾配 s およびその方向 θ は次に示す式により求めら

れる。

$$s=\sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2}$$

$$\tan \theta=\left(\frac{\partial z}{\partial y}\right) / \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)$$

図-5 は地形最急勾配を矢印の長さとその方向によってベクトル表示した例である。

d) 流線

流線はまえにも述べたように、地形曲面上を雨が流下してゆく最急勾配方向の軌跡である。本研究では、流線を次のようにして作成した。

(1) 格子点における最急勾配とその方向を求める。

(2) 最急勾配の大き

きに対応した微小長さの矢線を最急勾配方向につくり、その矢線の先端から地形曲面へ投影した足を求め

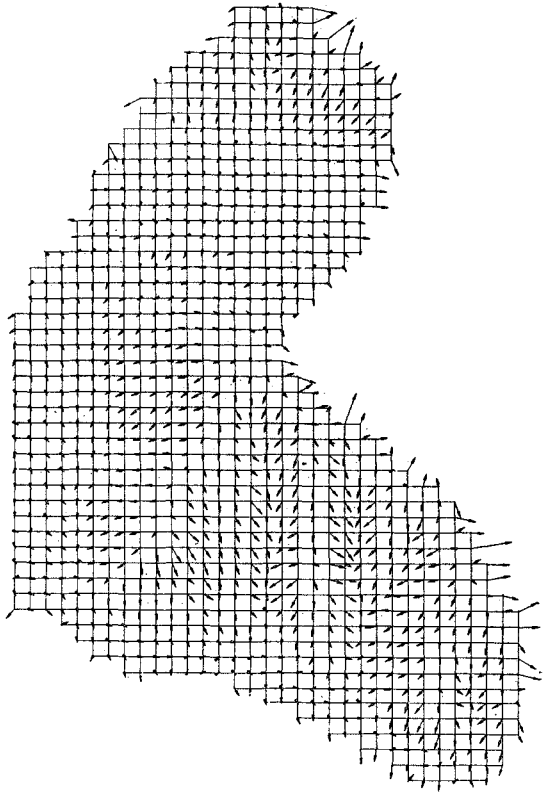


図-5 自動製図されたベクトル地形図

る。微小矢線の長さ d は、著者の実験によれば、格子間隔を D とするとき最急勾配 s に応じて次のようにとればよいことがわかった。

- $s \geq 1.0$ のとき $d = 1/4 \cdot D$
- $0.75 \leq s < 1.0$ のとき $d = 3/16 \cdot D$
- $0.5 \leq s < 0.75$ のとき $d = 1/8 \cdot D$
- $s < 0.5$ のとき $d = 1/16 \cdot D$

(3) 図-6 に示すように、地形曲面に投影された点における最急勾配とその方向を求め、(2) と同様のことを流線が沢または河に到達するまでくりかえす。

(4) 投影された点群を結び、微小直線群の流線をつくる。

図-7 は上に示した方法により計算機内につくられた

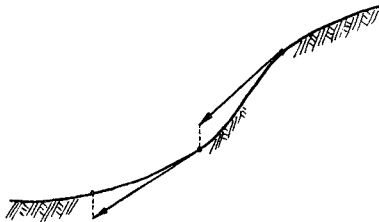


図-6 最急勾配線の追跡による流線の作成

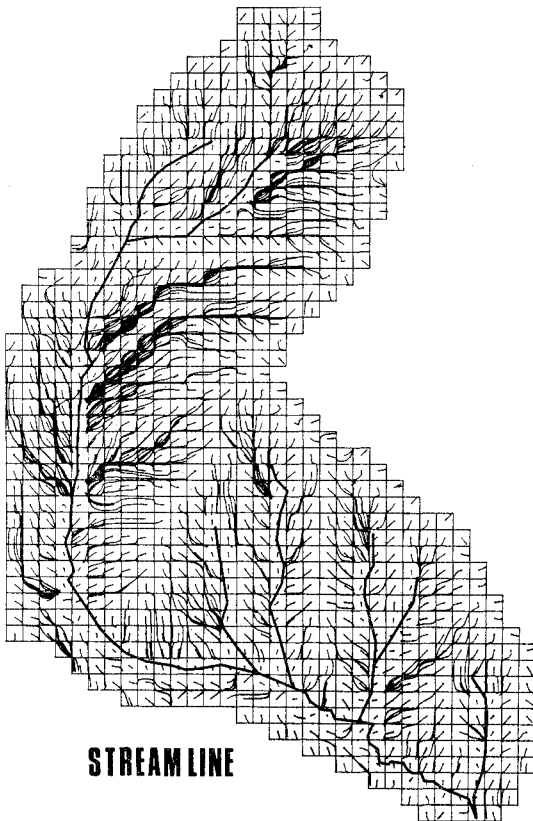


図-7 自動製図された流線図

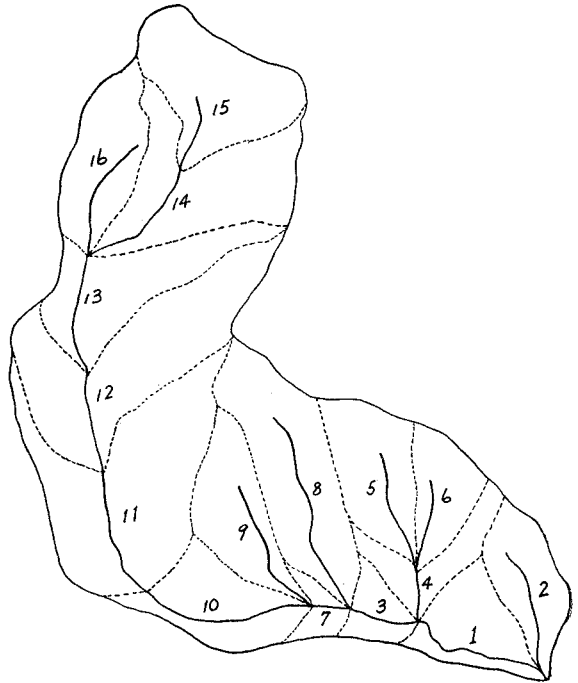


図-8 小流域に分割された初沢流域

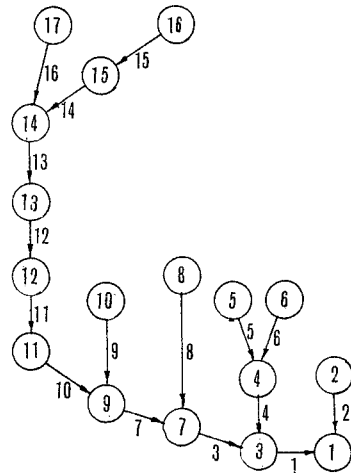


図-9 初沢流域の水系ネットワーク

流線を自動製図機で自動作画したものである。

e) 水系ネットワーク

計算機を利用して流量解析する場合、河、結合点および流域の関係を系統的に取扱いたい。

本研究では、全体の流域を図-8 に示すように、16 の小流域に分割し、河を両端に結合点をもつ有向線分からなる水系ネットワークを作成した。

おのおのの河および結合点に番号をつける。任意の河の番号 K は上流端の結合点 I および下流端の結合点 J ($I > J$) をもつものとし、さらに

$$I=N\bar{O}DE(K, 1)$$

$$J=N\bar{O}DE(K, 2)$$

として、 K, I, J を水系ネットワークをつくるための入力データとする。

図-9 は上記の流域の水系ネットワークである。

この入力データは、どの結合点からどの結合点に向けてどの河が流れているかを示している。計算機内では、入力データをもとにして

(1) どの結合点にはどの河とどの河が流れこみ、どの河が流れ出しているか。

(2) ある河の上流の河はどれとどれであり、どの河が下流となって流れ出しているか。

(3) ある結合点における上流の河の順序関係が求められる。

f) 流域

沢または河に流入する流線の発生する領域をその沢または河に対応する流域ということにする。水系ネットワークで名付けられた沢または河に流入する流線に、その沢または河の名前を対応づけおくと、水系ネットワークと流域の関係が容易に対応づけられる。

図-10 はこのようにして求めた初沢流域の流域と水系の関係をラインプリンタで作成したものである。ただし図中で 10 番以上の河は順次 A, B, C, … のアルファベットでおきかえている。

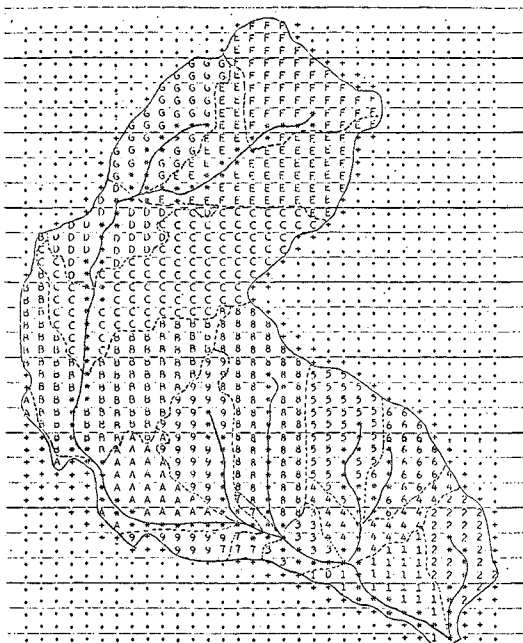


図-10 ラインプリンタで作成された流域図

5. 流出解析のプロセス

(1) 流線上を流れる雨水の運動

図-3 の航空写真からもわかるように、山腹斜面は一般にきわめて急傾斜であり、その斜面の流線には、河のような一定の流路断面があるわけではない。草木や枯葉などの間を流れてくる雨水の運動は現在のところ十分に解明されていない。

これらの理由から、マニングの公式や不等流の公式を用いて雨水の運動を解明するには、断面形状に関する入力情報不足から無理があると考えられる。

そこで、本研究では、同一勾配の流線では雨水は等速運動を行なうと考え、また流速は流量すなわち単位メッシュ内の降雨量および地形勾配に影響をうけるものと考え、流線上の雨水の流速に次に示す式を仮定した。

$$v=K\sqrt{Q_u}g \sin \theta=K_r\sqrt{r/1000}\cdot g \sin \theta \dots (5.1)$$

ここで、 Q_u : 単位メッシュあたりの入力流量、 r : 時間降雨量 (mm)、 g : 重力の加速度、 θ : 地形勾配、 K_r : 粗度抵抗の逆数で、ここでは山腹流過係数と呼ぶことにする。

上記の山腹流過係数は、植生によりあるいは雨量や土の含水率などによって異なる値を取るものと考えられるが、本研究で初めて著者らが仮定した係数であるため、どのような値をとったらよいかの理論値あるいは実験値が定められていない。そのため、本研究では K_r の係数の値を計算機の中でいろいろな値にシミュレートさせて、得られるハイドログラフの挙動と実際に流量観測された地点でのハイドログラフを比較した上で、この係数の取るべき範囲を確かめようとした。

次に、微小直線群でつくられた流線上を上記の流速で流れる雨水が沢または河に到達する時間を求める方法を示そう。

いま長さ L_i の微小長さの微小直線区間の始端における流入速度を v_{si} とし、区間の終端速度を v_{ei} とするとき、この微小区間を雨水が流れる時間 t_i は次の式で求めるものとした。

$$\left. \begin{aligned} t_i &= L_i/v_i \\ v_i &= (v_{si} + v_{ei})/2 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (5.2)$$

ここで、流線の微小直線区間が区間の境界で曲がるときは、前の区間の終端速度 v_{ei-1} の速度成分が、直線と直線の交角による影響をうけて減少するものとした。すなわち、交角を α_i とするとき

$$\left. \begin{aligned} v_{si} &= v_{ei-1} \cos \alpha_i & 0 \leq \alpha_i \leq \frac{\pi}{2} \\ v_{si} &= 0 & \alpha_i > \frac{\pi}{2} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (5.3)$$

のように v_{si} が定められるものとする。

ただし

$$\left. \begin{aligned} v_{ei} &= K_r \sqrt{r/1000} \cdot g \sin \theta_i \\ v_{si} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(5.4)$$

とする。ここで θ_i は i 区間での地形勾配を表わす。

結局、微小直線群で与えられる流線上を沢または河まで雨水が到達する時間の総計 T は

$$T = \sum t_i = \sum L_i / v_i \dots\dots\dots(5.5)$$

と求められる。

雨水の到達時間 T は、降雨量 r によって異なり、式(5.6)から

$$T = \sum L_i / v_i \propto 1 / \sqrt{r}$$

となり、降雨量の平方根に逆比例する。

したがって、任意の雨量 r に対応する到達時間 T は、基準降雨量 r_0 に対応する到達時間 T_0 を求めておけば、

$$T = T_0 \sqrt{r/r_0}$$

の式より計算できる。

実際には、降雨量は時間ごとに変化し、1本の流線を流れる雨水の速度もその都度変化することになる。したがって1本の流線に落ちる雨の降雨パターンと、河に到達したときのパターンは異なる。

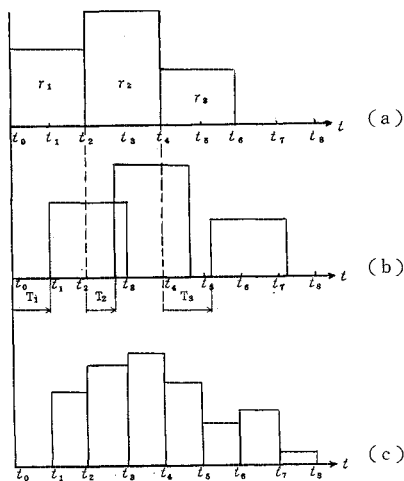


図-11 流線上を流れる雨水の流出パターンの変化

たとえば、図-11 (a) に示すような降雨 r_1, r_2, r_3 があったとしよう。それぞれの降雨が独立して流れたと仮定するとそれぞれ T_1, T_2, T_3 なる到達時間がかかり、図-11 (b) に示されるようなパターンが得られることになる。

このとき本研究では、図-11 (c) に示すように図-11 (b) のパターンで表わされる流出を等時間間隔内で平均化したものが河に到達したときのパターンと考えた。

(2) 沢または河における雨水の集合とその運動

沢または河の流れは図-12 に示されるように、上流からの流入と、山腹の流線からの横流入によって合成されてゆく。

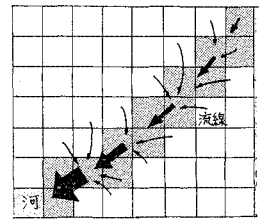


図-12 横流入のある河の流れ

本研究では、沢または河は微小長さをもつ連続した空間直線群で近似されるものとし、同一勾配の区間では次の式によって流速が与えられるものと仮定した。

$$v = K_s \sqrt{Q} \cdot g \sin \theta \dots\dots\dots(5.7)$$

ここで、 K_s は河川流過係数、 Q は流量 (m^3/sec)、 θ は河川勾配を表わす。

いま、山腹の流線からの横流入は、沢または河を構成する微小直線区間のそれぞれの始端に流入するものと考え、微小区間の始端に上流から v_s をもつ流量 Q_s の流入があり、山腹の流線から Q_r の横流入があったとすると、合成後の流速 v は次の式で与えられるものとした。

$$v = v_s \sqrt{Q_s / (Q_s + Q_r)} \dots\dots\dots(5.8)$$

ただし、横流入量 Q_r は、図-11 で示されたような流線終末における流入パターンに、流線を代表する格子面積を乗じたものを合計したものである。

沢または河の微小直線区間 i を流下する時間 t_i は区間長 L_i を次の式によって求められる平均流速 v_{mi} で割って求められる。

$$\left. \begin{aligned} t_i &= L_i / v_{mi} \\ v_{mi} &= (v_{si} + v_{ei}) / 2 \\ v_{ei} &= K_s \sqrt{Q_{si}} \cdot g \sin \theta_i \\ v_{si} &= v_{ei-1} \sqrt{Q_{si-1} / Q_{si}} \cdot \cos \alpha_i \\ Q_{si} &= Q_{si-1} + Q_{ri} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(5.9)$$

ここで、 v_{si}, v_{ei} : 始終端流速、 α_i : 交角

(3) 流出解析の手続き

沢または河の流れが互いに合流されながら下流へ流れてゆく過程における時間と流量の関係、すなわちハイドログラフを求める手続きを以下に段階ごとにまとめてみることにする。

流出解析は大きく次の3段階に分けられる。

a) 地形データ入力および数値地形モデルの作成

ここでは、地形曲面が三次曲面群で近似され、各格子点から沢または河までの流線が求められる。

b) 流線上の雨水の運動の解析

流域内に基準雨量があったとき、おのおのの流線上の雨水が沢に到達するまでの基準到達時間を求める。このときどの流線がどの沢または河のどの微小区間に流

入するかを記憶しておき、最後に沢の各区間に流入する流線の名前と基準到達時間と、それらの本数を記憶しておく。

c) 沢または河の流れの解析

沢または河の流れの解析が行なわれる前に、次に示されるデータが入力されていなければならない。

(i) 水系ネットワークのデータ：沢または河の総数、それらを構成する測点の数と空間座標、上流の沢または河の本数、 i 番目の河の j 番目の区間に流入する流線の数

(ii) i 番目の河の j 番目に流入する k 番目の流線の基準到達時間

(iii) 降雨データ

沢または河の流出解析は、水系ネットワークにより、まず上流のない一次沢より順次下流に向って行なわれる。

一般に i 番目の沢または河の流出解析は次のようにして行なわれる。

(i) 上流の沢または河がないときは、上流からの流入量と初期流速をゼロにする。上流が1つ以上あるときは上流からの流入合計量および合成速度を初期流量および初期流速にする。

(ii) 降雨データをもとにして沢または河の j 区間に流入する流線からの雨水の到達時刻と横流入量の関係を求める。

(iii) 区間始末端の流速を求める。

(iv) 微小区間に流入する上流からの流れと、流線からの横流入を合成し、微小区間を流下する所要時間を求める。

(v) j 区間の終端における時刻と流量の関係を求める。

(vi) すべての区間について (iii) から (v) までの計算が終了したらラインプリンタで i 番目の沢または河のハイドログラフを作成する。

以上の手続きを流れ図に表わすと 図-13 のようになる。

6. シミュレーションの手法による流出解析への応用

過去に実測された雨量記録のうち、2. にのべた設定条件に合致するような強雨の例をとりだし、いままでのべてきた手法を用いて流出解析を行なった一例を示そう。

図-14 は、例題に用いた降雨記録と、初沢流域終端で観測された流量記録である。

ここでは、第一に流線流過係数 K_r と河流過係数 K_s

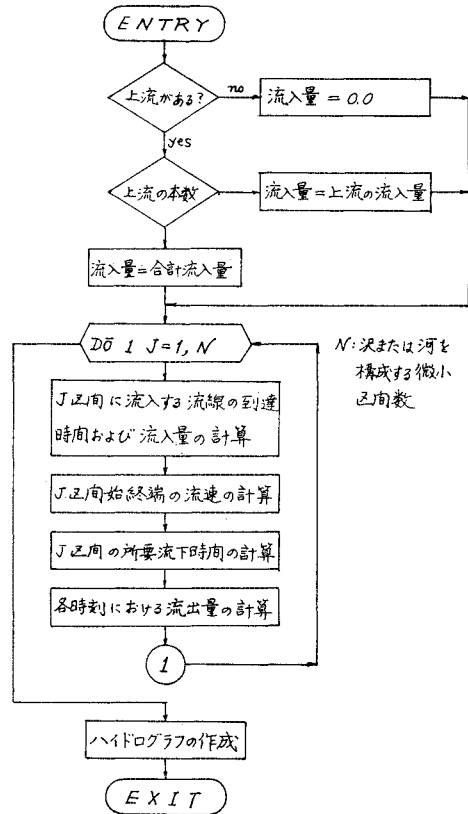


図-13 沢または河の流出解析

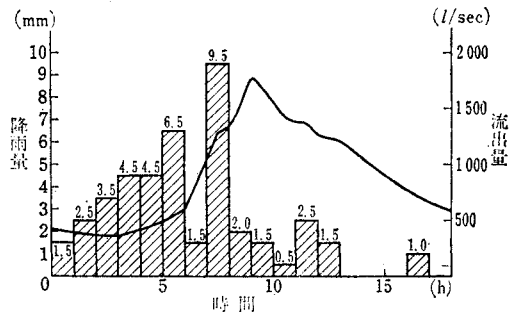
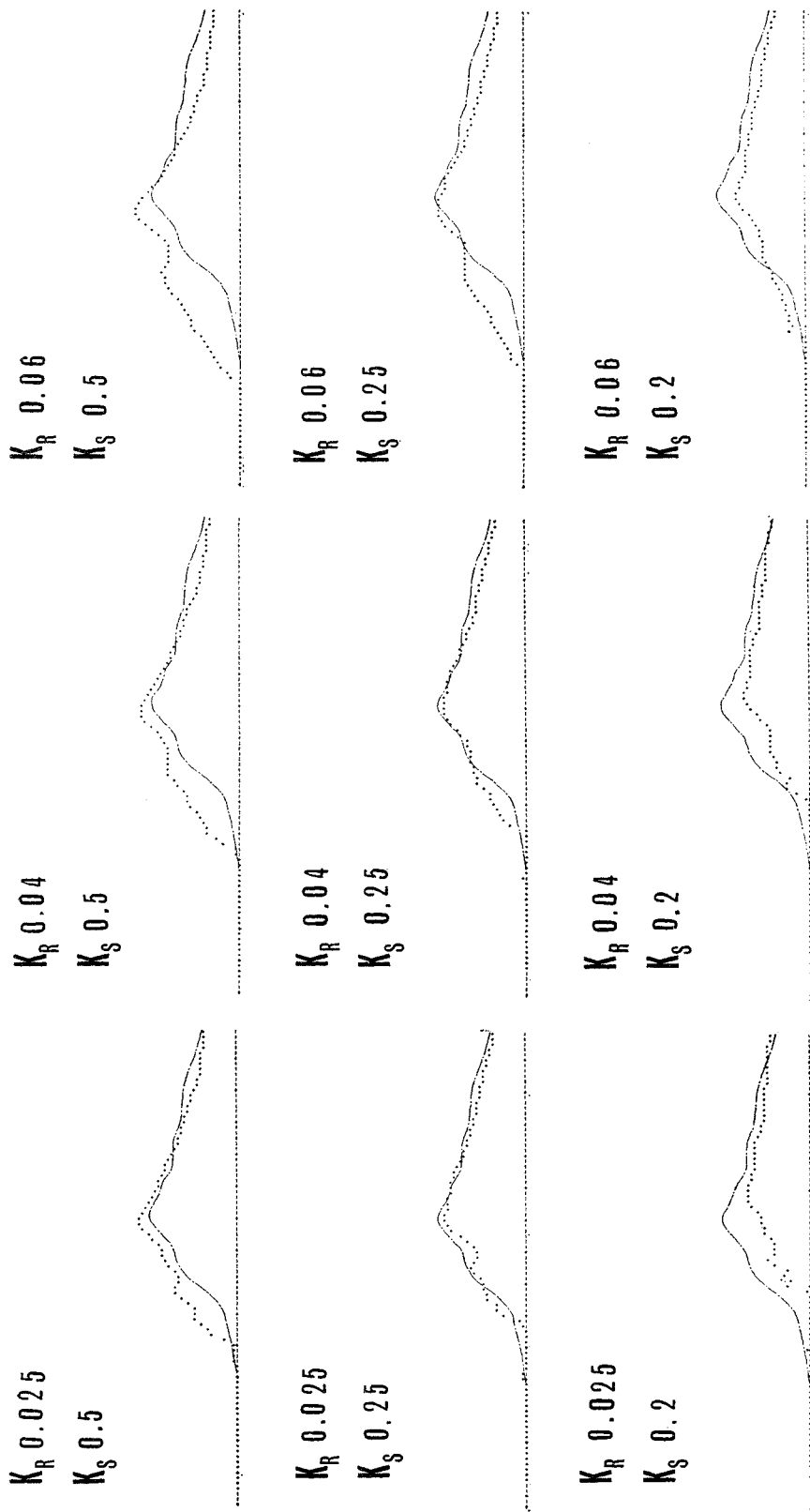


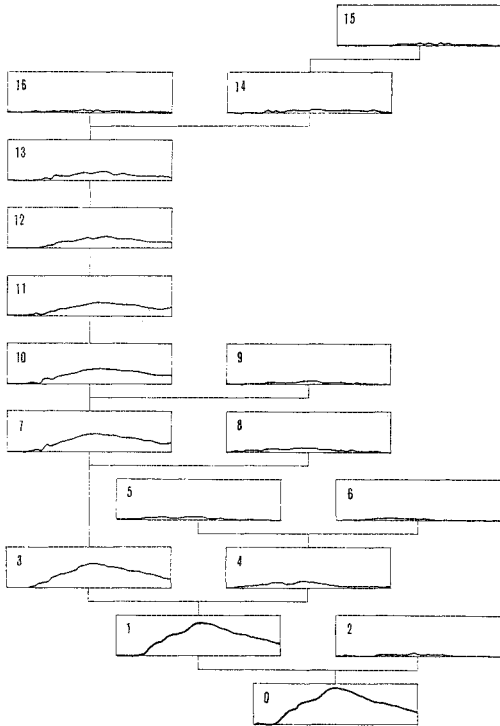
図-14 例題に用いた降雨データと流量記録

をいろいろな値にシミュレートさせ、そのとき得られる初沢流域終端の流出パターンの挙動と実測の流出パターンとの対応を見ようとした。第二に、シミュレーションされた中で比較の実測パターンと合致するものを選び出し、このとき、水系ネットワークの各結合点でどのような流出パターンとなっており、それらがどのように累積されていったかを見るために、各結合点の流出パターンを作成した。

流出パターンの挙動を見るために、きわめて数多くの流過係数の組 (K_r, K_s) についてシミュレーションが行なわれたが、ここでは、紙数の都合上、比較の実測パ



図一15 シミュレーションによる流出解析と実測地との比較 (5分ごとの流量をプロットしたものである)



図一16 流出過程とそのパターン変化

ターンに近いパターンをつくる (K_r , K_s) の組のまわりに変化させた組に対応するパターンを9つ示すことにする。

図一15 は上へのべた9つのパターンと実測値の比較を表わす。これらの図はすべて計算機により自動的に、5分ごとのハイドログラフとして出力された。

図一16 は、 $K_r=0.04$, $K_s=0.25$ の場合に、上流のおおのの結合点でどのような流出パターンになっているかを計算機によって求めたものを示している。

シミュレーション結果から次のことが指摘された。

(1) K_r の値、すなわち山腹に降った雨が沢または河に到達するまでの速さを決める係数は流出パターンの形状にきわめて敏感に反応する。この値のとり方によっては流出のピークの高さが一つになったり、二つになったりする場合すら起こる。

(2) K_s の値、すなわち沢または河の流速を決める係数は流出パターンの形状にはほとんど影響を与えない。むしろピークの高さとピーク到達時刻にわずかに影響をおよぼす。

(3) 実測の流量記録に近いパターンを示す (K_r , K_s) の組を求めることができる。この組の値はその流域の特性値であって、これらの値に近い値を用いれば、その流域の豪雨時の流出解析をほぼ正確に推定できる参考資料が得られるであろう。

(4) 流過係数はプログラム上では小流域ごとに異なる値を入力できるようになっているが、今回のシミュレーションだけでは、植生の違いによってどのような流過係数を用いたらよいかまでは判明しなかった。

7. 結 論

以上へのべてきた地形情報処理による山岳小流域の雨水流出解析の手法の特徴を以下にまとめてみよう。

(1) 地形情報処理により、雨水が地形曲面を流れるべき経路の一本一本を詳細に計算機のなかに作り出すことが可能となった。そのために実際に大地に雨が降り、集合されてゆくときの状態に近いモデルをつくることが可能となった。

(2) 既往の降雨記録と流量観測のデータを用いたシミュレーションから、その流域の流出解析の特性をあらゆる流過係数を求めることが可能である。この流過係数を本手法にあてはめることにより豪雨があったときの洪水流出量を迅速かつ正確に予測することが可能である。

(3) 本手法では雨水の一本一本が集合される状態を計算機の中で仮想的に再現するから、その流域内の任意の地点でのハイドログラフを求めることが可能となった。

(4) 一度その流域の流線モデルを作成して計算機に記憶させれば、あとは降雨データを入力するだけで自動的に流出解析が行なわれる。流線一本一本を考慮しているのでたとえば流域内で異なるパターンの降雨があった場合もプログラム上では入力データを変えることにより、流出解析をすることが可能である。

本研究では、山岳地帯の小流域においてきわめて詳細に地形を考慮して洪水流出解析を行なったが、この手法をさらに一般的に実用化するには次に示すような事項を検討する必要がある。

(1) もう少し大きい流域に対しても応用可能にするには流線モデルの作成方法を簡略化することを考える。

(2) 山腹を流れる雨水や、急峻な沢を流れるような水の運動については十分水理学に解明されていない現状では本研究で導入したようにある仮定のもとに、このような水の運動方程式を仮定せざるを得ない。しかし、たとえば本研究で用いた流過係数などは、どのような植生や地質のときには、どのような値を用いたら妥当かは実験的に検証される必要がある。

(3) 本研究では、十分含水率の高いときに豪雨がいったとか、急峻な山岳で小流域であるなどの理由から間接流出や浸透流を考慮しなかった。これらの影響は、小流域の場合豪雨時にはそれほど大きくないにしても、あ

る程度、これらの流れによる時間的遅れや損失を考慮することが必要であろう。

以上にのべたように、本研究で示した手法のなかには水理学的あるいは水文学的になお説明すべき点が残されているとはいえ、従来の水文学では到底考慮できなかった地形の詳細な要因を雨水の流出過程のなかに導入しようとした点に本研究の最大の特徴があるといえる。

本研究で示した流出解析の手法が、水文学のなかで新しい位置づけがなされることを切望する次第である。

参 考 文 献

- 1) 丸安隆和：航空写真判読による地じり，崩壊の統計的研究，土木学会論文集 116 号，昭和 40 年。
- 2) 丸安隆和・村井俊治：土木設計システムにおける地形情報処理，土木学会誌，Vol 55, No. 10, 1970.
- 3) 丸安隆和・村井俊治：地形情報の抽出とその自動処理，カラム No. 34, 1969.
- 4) 農林省林業試験場：森林理水試験地観測報告（日降水量・日流出量）p.p. 119～p.p. 171, 昭和 36 年 3 月。

(1971.5.20・受付)
